



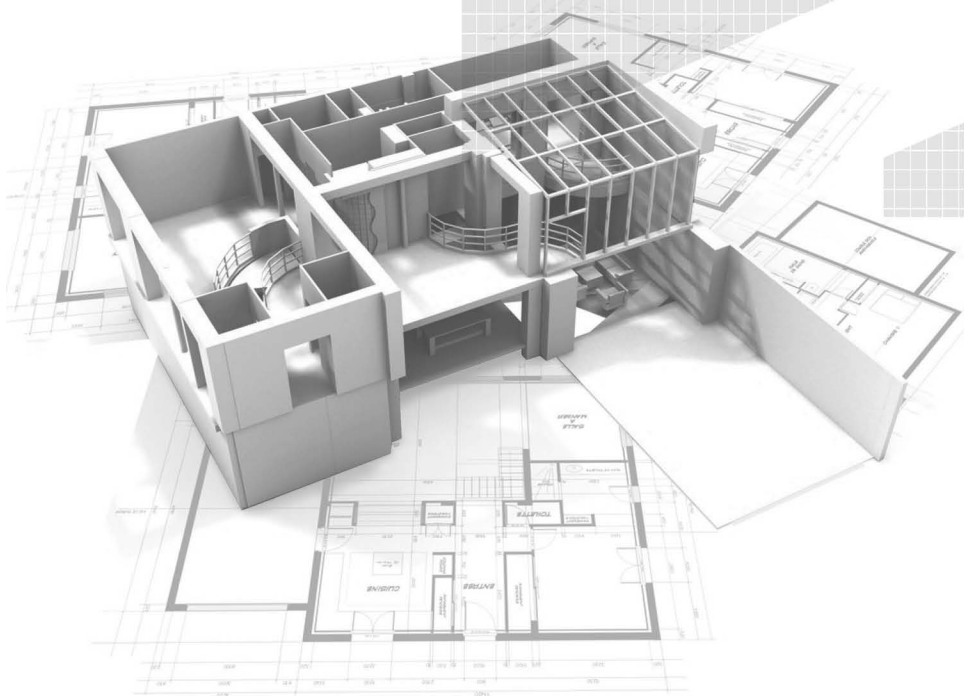
“十三五”职业教育国家规划教材

建设工程 材料 第2版

JIANSHE GONGCHENG
CAILIAO

主 编 王四清

副主编 贺安宁 蒋 荣 魏 婷



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

· 长沙 ·

内容简介

本教材为“十三五”职业教育国家规划教材，依据教育部该课程的教学标准与我国现行的国家、行业标准及规范编写而成，涵盖了建筑、公路、市政及铁道工程建设领域的工程材料。

本教材共分建设工程材料的基本性质等 10 个模块，系统地介绍了混凝土结构工程、砌体结构工程、钢结构工程、防水工程、给排水工程、装饰装修工程、路基填筑工程、公路路面工程、铁路轨道工程常用材料的品种、规格、特性、技术要求、应用、验收与施工管理等知识。本教材以“互联网+”的形式出版，读者通过扫描书中的二维码，即可阅读丰富的拓展知识、材料实物及应用图片、材料检测视频等知识。

本教材具有较强的系统性、实用性和通用性，可作为高等职业教育建筑、道路、市政及铁道等建设工程技术、工程造价、工程管理等专业的教材，也可作为建筑与土木工程类专业成人教育及行业培训用教材，还可供从事相关工程技术的人员参考。

本教材配有多媒体教学电子课件。



高等职业教育土建类“十三五”规划“互联网+” 创新系列教材编审委员会

主 任

王运政 胡六星 郑 伟 玉小冰 刘孟良 陈安生
李建华 谢建波 彭 浪 赵 慧 赵顺林 向 曙

副主任

(以姓氏笔画为序)

王超洋 卢 滔 刘文利 刘可定 刘庆潭 孙发礼
杨晓珍 李 娟 李玲萍 李清奇 李精润 欧阳和平
项 林 胡云珍 黄 涛 黄金波 龚建红 颜 昕

委 员

(以姓氏笔画为序)

万小华 邓 慧 王四清 龙卫国 叶 姝 包 蜃
邝佳奇 朱再英 伍扬波 庄 运 刘小聪 刘天林
刘汉章 刘旭灵 许 博 阮晓玲 孙光远 孙湘晖
李为华 李 龙 李 冰 李 奇 李 侃 李 鲤
李亚贵 李进军 李丽田 李丽君 李海霞 李鸿雁
肖飞剑 肖恒升 何 珊 何立志 余 勇 宋士法
宋国芳 张小军 张丽姝 陈 晖 陈 翔 陈贤清
陈淳慧 陈婷梅 易红霞 金红丽 周 伟 赵亚敏
徐龙辉 徐运明 徐猛勇 卿利军 高建平 唐 文
唐茂华 黄郎宁 黄桂芳 曹世晖 常爱萍 梁鸿颀
彭 飞 彭子茂 彭秀兰 蒋 荣 蒋买勇 曾维湘
曾福林 熊宇璟 樊淳华 魏丽梅 魏秀瑛 瞿 峰

出版说明 INSTRUCTIONS

遵照《国务院关于加快发展现代职业教育的决定》提出的“服务经济社会发展和人的全面发展，推动专业设置与产业需求对接，课程内容与职业标准对接，教学过程与生产过程对接，毕业证书与职业资格证书对接”的基本原则，为全面推进高等职业院校土建类专业教育教学改革，促进高端技术技能型人才的培养，依据国家高职高专教育土建类专业教学指导委员会高等职业教育土建类专业教学基本要求，通过充分的调研，在总结吸收国内优秀高职高专教材建设经验的基础上，我们组织编写和出版了这套高等职业教育土建类“十三五”规划“互联网+”创新教材。

高等职业教育教学改革不断深入，土建行业工程技术日新月异，相应国家标准、规范，行业、企业标准、规范不断更新，作为课程内容载体的教材也必然要顺应教学改革和新形势的变化，适应行业的发展变化。教材建设应该按照最新的职业教育教学改革理念构建教材体系，探索新的编写思路，编写出版一套全新的、高等职业院校普遍认同的、能引导土建专业教学改革的“十三五”规划系列教材。为此，我们成立了规划教材编审委员会。教材编审委员会由全国30多所高职院校的权威教授、专家、院长、教学负责人、专业带头人及企业专家组成。编审委员会通过推荐、遴选，聘请了一批学术水平高、教学经验丰富、工程实践能力强的骨干教师及企业专家组成编写队伍。

本套教材具有以下特色：

1. 教材依据国家高职高专教育土建类专业教学指导委员会《高职高专土建类专业教学基本要求》编写，体现科学性、创新性、应用性；体现土建类教材的综合性、实践性、区域性、时效性等特点。
2. 适应高等职业教育教学改革的要求，以职业能力为主线，采用行动导向、任务驱动、项目载体，教、学、做一体化模式编写，按实际岗位所需的知识能力来选取教材内容，实现教材与工程实际的零距离“无缝对接”。
3. 体现先进性特点。将土建学科的新成果、新技术、新工艺、新材料、新知识纳入教材，结合最新国家标准、行业标准、规范编写。
4. 教材内容与工程实际紧密联系。教材案例选择符合或接近真实工程实际，有利于培养学生的工程实践能力。
5. 以社会需求为基本依据，以就业为导向，融入建筑企业岗位（八大员）职业资格考试、国家职业技能鉴定标准的相关内容，实现学历教育与职业资格认证相衔接。
6. 教材体系立体化。为了方便老师教学和学生自主学习，本套教材建立了多媒体教学电子课件、电子图集、教学指导、教学大纲、案例素材等教学资源支持服务平台；部分教材采用了“互联网+”的形式出版，读者扫描书中“二维码”，即可阅读丰富的工程图片、演示动画、操作视频、工程案例、拓展知识。

高等职业教育土建类专业规划教材
编 审 委 员 会

前言 PREFACE

本教材为“十三五”职业教育国家规划教材《建设工程材料》的修订版。教材紧扣“质量、安全、节能、环保”这一主题，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的教育方针，落实立德树人的根本任务，弘扬大国工匠精神，积极培育和践行社会主义核心价值观。在传授学生专业技能的同时，培养学生养成科学严谨、爱岗敬业、团结协作、吃苦耐劳的良好职业素养与创新意识，并对接建设工程技术相应职业岗位要求的要求，融入了“1+X”证书(八大员)的相关知识，突出了我国职业教育的特色。

本教材按最新颁布的国家和行业规范、标准与规程组织编写，并依照《建设工程分类标准》GB/T 50841—2013和有关施工质量验收标准对建设工程的结构类型及分项工程的划分，系统地介绍了混凝土结构工程、砌体结构工程、钢结构工程、防水工程、给排水工程、装饰装修工程、路基填筑工程、公路路面工程及铁路轨道工程常用材料的基本概念、品种、规格、特性、技术要求、质量标准、应用、验收及施工管理等知识。本教材涵盖了建筑、市政、公路及铁道建设工程领域的工程材料，适应建筑、公路、市政及铁道等建设工程的设计、施工、管理、装饰装修、造价等系列专业的教学使用及从事相关技术工作的技术人员参考。

本教材以“互联网+”形式出版，增加了拓展阅读知识。教材中配有大量的图片和视频，内容涉及对结构形式的认识、基本原理的应用、材料的认识与鉴别、材料的应用与质量检验等知识。读者只要通过手机的“扫一扫”功能，扫描书中的二维码，便可对书中的重点、难点知识进行详细的阅读，帮助读者进一步的理解。

考虑到便于学生使用和教师批改，本教材未将常用材料的详细检测方法、检测记录与检测报告等内容编入教材中，有需要的可以另行订购由湖南高速铁路职业技术学院王四清主编、中南大学出版社出版的《建设工程材料检测实训指导书与实训报告》单行本，该实训指导书中详细介绍了水泥、混凝土用骨料、普通混凝土、钢筋、砌筑砂浆、砌墙砖、沥青、沥青混合料的物理力学性能检测及回弹法检测结构混凝土抗压强度的检测方法及结果计算与结果评定，并附有“互联网+”检测视频。

本教材由王四清主编和统稿，贺安宁、蒋荣、魏婷任副主编。书中绪论、模块一、模块

三、模块四由新疆生产建设兵团兴新职业技术学院魏婷编写，模块二、模块九、模块十由湖南高速铁路职业技术学院王四清编写，模块五由湖南高速铁路职业技术学院蒋荣编写，模块六、模块七、模块八由湖南高速铁路职业技术学院贺安宁编写。

本教材在编写过程中选用了百度网(www.baidu.com)的图片及优酷视频网(www.youku.com)的部分视频资料，吸收了许多同行专家的最新研究成果，谨向这些文献的原创者及平台提供网站表示诚挚的谢意。由于科技的发展，建设工程领域的新技术、新材料也在不断涌现，加之编者的水平所限，教材中的疏漏、不妥甚至错误之处恐难避免，编者在此恳请广大教师及读者提出批评与指正，以便今后不断地修改和完善。

所有意见和建议敬请发往：1094292962@qq.com。

课程网页链接：<http://i.mooc.chaoxing.com/space/index?t=1605691346124> (超星学习通)。

编 者
2021 年 5 月

目 录 CONTENTS

绪 论 (1)

 0.1 课程简介 (1)

 0.2 建设工程材料的定义及分类 (2)

 0.3 建设工程材料在建设工程中的地位 (3)

 0.4 建设工程材料的发展状况及发展方向 (4)

 0.5 建设工程材料的技术标准 (5)

模块一 建设工程材料的基本性质 (7)

 1.1 材料的物理性质 (7)

 1.2 材料的力学性质 (16)

 1.3 材料的耐久性 (19)

 复习思考题 (20)

模块二 混凝土结构工程材料 (21)

 2.1 基本概念 (21)

 2.1.1 混凝土的定义及分类 (21)

 2.1.2 混凝土结构的定义及分类 (22)

 2.2 混凝土的组成材料及技术要求 (23)

 2.2.1 水泥 (23)

 2.2.2 骨料 (36)

 2.2.3 矿物掺合料与外加剂 (47)

 2.2.4 拌合和养护用水 (56)

 2.3 混凝土的技术性质及影响因素与改善措施 (57)

 2.3.1 混凝土拌合物的性质及影响因素与改善措施 (57)

 2.3.2 硬化混凝土的性质及影响因素与改善措施 (61)

 2.4 混凝土的配合比设计 (76)

 2.4.1 配合比设计的基本要求 (76)

 2.4.2 配合比设计资料的准备 (76)

 2.4.3 配合比设计中的三个重要参数 (77)

2.4.4	配合比的设计步骤	(77)
2.5	混凝土结构用钢筋	(87)
2.5.1	钢筋的主要技术性质	(87)
2.5.2	钢筋混凝土结构用普通钢筋	(91)
2.5.3	预应力混凝土结构用预应力筋	(94)
2.5.4	钢筋的连接	(96)
2.5.5	钢筋的验收与施工管理	(99)
2.6	预应力筋用锚具、夹具	(101)
2.7	预应力混凝土用波纹管	(103)
	复习思考题	(104)
模块三	砌体结构工程材料	(107)
3.1	砖	(107)
3.1.1	烧结砖	(107)
3.1.2	非烧结砖	(110)
3.1.3	砖的验收与施工管理	(113)
3.2	砌块	(113)
3.3	砌筑石材	(116)
3.3.1	岩石的形成与分类	(117)
3.3.2	砌体结构工程常用岩石与石材	(118)
3.4	砌筑砂浆	(120)
3.4.1	砌筑砂浆的组成材料和技术要求	(120)
3.4.2	砌筑砂浆的技术性质	(123)
3.4.3	砌筑砂浆的配合比设计	(125)
	复习思考题	(129)
模块四	钢结构工程材料	(130)
4.1	钢结构用钢与钢材	(130)
4.1.1	钢结构用钢	(130)
4.1.2	钢结构用钢材	(133)
4.1.3	钢结构用钢材的验收与贮存	(138)
4.2	紧固件	(139)
4.2.1	普通紧固件	(139)
4.2.2	高强度螺栓紧固件	(142)
4.2.3	紧固件的验收与贮存	(144)

4.3 焊接材料	(145)
4.3.1 焊接形式	(145)
4.3.2 焊接材料	(145)
4.3.3 焊接材料的验收与贮存	(148)
4.4 涂装材料	(149)
4.4.1 防腐涂装材料	(149)
4.4.2 防火涂料	(150)
4.4.3 涂装材料的验收与贮存	(152)
复习思考题	(152)
模块五 防水工程材料	(153)
5.1 防水卷材	(153)
5.1.1 沥青与改性沥青防水卷材	(153)
5.1.2 合成高分子防水卷材	(156)
5.1.3 防水卷材的运输与贮存	(159)
5.2 防水涂料	(159)
5.2.1 沥青与改性沥青防水涂料	(160)
5.2.2 合成高分子防水涂料	(161)
5.2.3 防水涂料的运输与贮存	(163)
5.3 建筑密封材料	(163)
5.3.1 密封膏与密封胶	(163)
5.3.2 止水带与遇水膨胀橡胶	(165)
5.3.3 建筑密封材料的运输与贮存	(168)
5.4 防水材料的验收	(168)
复习思考题	(169)
模块六 给排水工程用管材	(171)
6.1 金属管材	(171)
6.2 塑料管材	(175)
6.3 复合管材	(180)
6.4 混凝土管材	(184)
6.5 管材与管件的验收	(185)
复习思考题	(187)
模块七 装饰装修工程材料	(189)
7.1 木材及其制品	(189)

7.1.1	概述	(189)
7.1.2	木质地板	(190)
7.1.3	木线条	(191)
7.1.4	木质人造板材	(192)
7.1.5	木材及其制品的运输与贮存	(194)
7.2	竹材及其制品	(194)
7.2.1	竹集成材地板	(195)
7.2.2	竹质人造板材	(195)
7.2.3	竹材及其制品的运输与贮存	(196)
7.3	石膏及其制品	(196)
7.3.1	建筑石膏的生产、特性与应用	(196)
7.3.2	石膏板材	(197)
7.3.3	艺术装饰石膏制品	(198)
7.3.4	建筑石膏及其制品的运输与贮存	(198)
7.4	陶瓷制品	(198)
7.4.1	陶瓷砖	(199)
7.4.2	陶瓷马赛克	(200)
7.4.3	琉璃制品	(200)
7.4.4	装饰陶瓷制品的运输与贮存	(201)
7.5	玻璃及其制品	(201)
7.5.1	普通平板玻璃	(201)
7.5.2	装饰平板玻璃	(202)
7.5.3	安全玻璃	(204)
7.5.4	节能玻璃	(206)
7.5.5	玻璃的运输与贮存	(207)
7.6	装饰用石材	(207)
7.6.1	天然石材	(208)
7.6.2	人造石材	(209)
7.6.3	石材的运输与贮存	(209)
7.7	金属制品	(209)
7.7.1	铝及铝合金制品	(209)
7.7.2	钢材制品	(213)
7.7.3	金属制品的运输与贮存	(214)
7.8	塑料制品	(214)
7.8.1	塑料地板	(214)

7.8.2	塑料型材	(215)
7.8.3	塑料扣板	(216)
7.8.4	塑料制品的运输与贮存	(216)
7.9	涂料	(217)
7.9.1	外墙用涂料	(217)
7.9.2	内墙用涂料	(219)
7.9.3	涂料的运输与贮存	(219)
7.10	壁纸与壁布	(220)
7.11	绝热材料	(221)
7.11.1	常用无机绝热材料及其制品	(221)
7.11.2	常用有机绝热材料及其制品	(224)
7.11.3	绝热材料的运输与贮存	(225)
复习思考题		(225)
模块八	路基填筑工程材料	(226)
8.1	基本概念	(226)
8.2	路基填筑用土	(226)
8.2.1	土的形成与特性	(226)
8.2.2	土的工程分类	(228)
8.2.3	路基填筑用土的技术要求	(234)
8.2.4	路基填筑用土检测样品的抽取	(237)
8.3	级配碎石	(237)
8.4	土工合成材料	(238)
8.4.1	土工布	(238)
8.4.2	土工格栅	(240)
8.4.3	土工格室与网垫	(241)
8.4.4	土工膜	(242)
8.4.5	排水材料	(243)
8.4.6	土工合成材料检测样品的抽取	(244)
复习思考题		(245)
模块九	公路路面工程材料	(246)
9.1	基层、底基层用稳定材料	(246)
9.1.1	稳定材料的概念与分类	(246)
9.1.2	稳定材料的技术要求	(247)

9.1.3 稳定材料目标配合比的设计	(249)
9.2 路面混凝土	(254)
9.2.1 原材料技术要求	(254)
9.2.2 路面混凝土配合比的设计	(258)
9.3 沥青与沥青混合料	(265)
9.3.1 石油沥青	(265)
9.3.2 沥青的乳化与改性	(270)
9.3.3 沥青混合料的分类	(271)
9.3.4 沥青混合料组成材料的技术要求	(272)
9.3.5 沥青混合料的技术性质及影响因素	(281)
9.3.6 热拌沥青混合料配合比的设计	(286)
9.3.7 沥青及沥青混合料的储运与质量检验样品的抽取	(299)
复习思考题	(301)
模块十 铁路轨道工程材料	(302)
10.1 基本概念	(302)
10.2 道砟	(303)
10.3 轨枕与轨道板	(304)
10.3.1 有砟轨道用轨枕	(305)
10.3.2 无砟轨道用轨枕与轨道板	(306)
10.4 钢轨	(308)
10.5 道岔	(310)
10.6 钢轨扣件	(313)
10.7 水泥乳化沥青砂浆	(318)
10.8 自密实混凝土	(320)
复习思考题	(322)
参考文献	(323)

绪 论

0.1 课程简介

1. 课程内容

本课程主要介绍混凝土结构工程、砌体结构工程、钢结构工程、防水工程、给排水工程、装饰装修工程、路基填筑工程、公路路面工程及铁路轨道工程用材料的品种、规格、特性、技术要求、质量标准、应用、验收与施工管理等方面知识。

2. 课程的重要性

建设工程材料与工程设计、工程结构、工程施工、工程造价等密切相关，相互依存，相互促进。并且，工程材料在很大程度上决定着建设工程的质量。因此，该课程是建筑与土木工程系列专业的一门综合性、实践性都很强的专业基础课，在专业课程中起着承上启下的作用。

3. 课程目标

通过本课程的学习应能达到如下目标：

(1) 素质目标

养成良好的社会主义核心价值观，具备科学严谨、爱岗敬业、团结协作、诚实守信、吃苦耐劳的良好职业素养与创新意识；具备高度的质量、安全、绿色、环保意识和家国情怀；具备在专业方面可持续发展的能力。

(2) 知识目标

了解建设工程常用材料的组成、生产加工及质量标准；掌握常用材料的品种、规格、技术性质及影响因素等基本常识。

(3) 技能目标

掌握常用材料的工程应用，具备正确识别材料、查阅材料相关技术标准及正确、合理选用材料的能力；掌握常用材料的质量检测方法，具备对检测结果进行正确分析与判断，并能提出改善方案和措施及质量验收的能力；具备现场施工质量控制与安全管理的能力；具备对新材料的信息收集与应用能力。

4. 学习方法

本课程涉及知识面广，具有综合性强、系统性差，实践性强、逻辑性差，叙述性和规范性内容多、理论计算少等特点。因此，学习本课程应注意如下几点：

(1) 材料的组成和结构是决定材料性质的内在因素，只有了解材料的性质与组成结构的关系才能掌握材料的性质。

(2) 同类材料存在共性，同类材料的不同品种还存在着特性。学习时应掌握各种材料的共性，再运用对比的方法掌握不同品种材料的特性。

(3) 材料的性质会受到外界环境条件的影响，学习时要运用已学过的物理、化学等基础

知识加深理解，提高分析和解决问题的能力。

(4) 深入建筑工地参观，感性认识各类材料在建设工程上的应用。

(5) 材料检测是本课程学习的一个重要环节。掌握主要建设工程材料的质量检测方法、检测报告的处理与检测结果的评定是熟悉材料性质、了解技术标准、鉴定材料质量的重要手段。

(6) 借助互联网，了解新型材料的发展趋势，查阅各种材料的相关信息，进一步了解材料的性能与应用。

5. 课程体系

本课程体系由理论教学、检测实训教学和现场参观教学三大体系构成。

理论教学以课堂教学为主，系统地介绍工程材料的品种、规格、性质、质量标准与应用。以材料性能为核心，材料的选择与应用为重点，新材料和新技术为前沿，注重知识的基础性、系统性、先进性、技能性和前沿性。

检测实训教学以学生操作为主，通过对一些常用工程材料的物理力学性能检测实训，让学生掌握常用工程材料物理力学性能检测样品的抽取与处置、检测方法原理、检测仪器设备的使用、检测步骤、检测记录的填写、检测结果的计算与处理、检测报告的要求与检测结果的评定等职业技能。

现场参观教学主要是通过参观一些在建和已建的实体工程，进一步认识工程材料及其应用。

6. 考核方式

为了全面了解学生对本课程所涉及的基本概念、基本理论、应用及质量检测的掌握程度，考核方式将覆盖整个教学过程。通过对学生在学习过程中的平时成绩、实训成绩以及期末考试成绩进行综合考核来系统地评价学生对本课程的掌握情况。

学生总成绩的构成如下：

平时成绩(20%)：从学生上课出勤率、课堂提问、回答问题和作业完成情况综合考核；

检测实训(20%~30%)：从学生实训参与情况、任务完成质量、实训报告完成质量综合考核；

考试成绩(50%~60%)：主要考察学生对本课程的基本概念和基本理论知识的掌握程度及应用能力。

0.2 建设工程材料的定义及分类

1. 定义

用于建筑与土木工程建设的各种材料及其制品，统称为建设工程材料。

国家标准《建设工程分类标准》GB/T 50841—2013 将建设工程分为建筑工程、土木工程及机电工程三大类。

建筑工程：指供人们进行生产、生活或其他活动的房屋或场所。按其使用性质又分为民用建筑工程、工业建筑工程、构筑物工程及其他建筑工程等。

土木工程：指建造在地上或地下、陆上或水中，直接或间接为人类生活、生产、科研等服务的各类工程。包括道路工程、轨道交通工程、桥涵工程、隧道工程、水工工程、管沟工程等。

机电工程：指按照一定的工艺和方法，将不同规格、型号、性能、材质的设备、管路、线路等有机组合起来，满足使用功能要求的工程。包括机电设备工程、电气工程、自动化控制

仪表工程、建筑智能化工程、管道工程、消防工程、通风与空调工程等。

2. 分类

建设工程所用材料品种繁多,用途不一,通常按材料的化学成分及使用功能来分类。

1) 按化学成分分

按化学成分可分为无机材料、有机材料和复合材料。

(1)无机材料:是指由无机矿物单独或混合物制成的材料。通常指由硅酸盐、铝酸盐、硼酸盐、磷酸盐等原料经一定的工艺制备而成的材料。无机材料又分为无机金属材料 and 无机非金属材料。

无机非金属材料:如天然石材、砖、瓦、石灰、水泥及制品、玻璃、陶瓷等。

无机金属材料:如钢、铁、铝、铜及合金制品等。

(2)有机材料:通常由 C、H 化合物组成。一般来说,有机材料具有溶解性、热塑性和热固性、电绝缘性,但容易老化。如木材、沥青、塑料、涂料、油漆等。

(3)复合材料:是指由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。各种材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。复合材料是建设工程材料的主流发展方向。它包括无机材料与有机材料的复合,如沥青混合料、树脂混凝土等;金属与非金属的复合,如钢筋混凝土、金属面绝热夹芯板等;金属与有机材料的复合,如铝塑板、门窗用塑钢型材等。

2) 按使用功能分

按使用功能可分为主体结构材料和其他功能材料。

主体结构材料:是指构成建筑物或构筑物受力构件或结构,用于承受建筑物或构筑物自重和外部荷载的材料。如建筑物的基础、梁、板、柱、框架、承重墙体等材料。

其他功能材料:是指不承受外部荷载,只担负建筑物或构筑物使用过程中所必需的某些功能要求的材料。如起围护作用的墙体、门窗用材料,以及起防水、保温、装饰作用等材料。

0.3 建设工程材料在建设工程中的地位

1. 建设工程材料是建设工程中不可缺少的物质基础

任何一项建设工程都是由不同的材料合理组建起来的。例如,修建住宅、办公楼等建筑,每 1000 m² 面积需 1000 ~ 1500 t 材料,估计用量举例如表 0-1 所示。

表 0-1 每 1000 m² 房屋建筑材料参考用量

建筑类型	红砖/千块	砂/m ³	砾石/m ³	水泥/t	钢材/t	木材/m ³	玻璃/m ²	石灰膏/m ³
五层框架办公楼	23	370	40	231	35.0	37	160	5
六层砖混住宅楼	209	370	16	159	15.5	51	140	20

因此,随着工程建设的进展,要及时地提供数量充足、质量良好、品种齐全的各种材料,才能保证工程建设的顺利进行。

2. 建设工程材料的质量直接影响建设工程的质量

材料的质量如何,直接影响着建设工程的质量。材料的品种、组成、构造、规格及使用

方法都会对建设工程的结构安全性、耐久性、适用性产生影响。将劣质材料使用到建设工程上去,必然危害建设工程的质量,影响建设工程的使用效果和耐久性能,甚至会造成严重事故。因此,应根据设计要求,选用质量符合要求的材料,从材料的生产、选择、使用和检验以及材料的贮存、保管等各个环节确保材料的质量。并严格按国家相关标准、规范和法律法规的要求,对所用材料及其制品的质量分批次进行抽样检测,确保材料及其制品的质量符合国家有关标准的要求。

3. 建设工程材料决定着建设工程的造价和经济效益

材料费用在建设工程总造价中占有较大的比重,一般占 50%~60%。因此,在保证材料质量的前提下,降低材料费用,对降低工程造价、提高经济效益将起很大的作用。正确选择、就地取材、合理利用、减少浪费、科学管理等,都是降低材料费用的合理途径。

4. 新型材料的研制和发展将促进建设工程结构和施工技术的进步

建设工程材料与建设工程的设计、施工之间存在着相互促进、相互依存的密切关系。建设工程中许多技术问题的突破和创新,往往依赖于材料性能的改进与提高。而新材料的出现又促进了建设工程的设计与施工技术的发展,使建筑物和构筑物的跨度可做得越来越大,高度越来越高,建筑物的功能、适用性、艺术性、坚固性和耐久性等也得到进一步的改善。

0.4 建设工程材料的发展状况及发展方向

1. 建设工程材料的发展状况

建设工程材料的发展是随着人类社会生产力和科学技术的提高而逐步发展起来的。人类最早穴居巢处,几乎没有建设工程材料的概念。随着社会生产力的发展,人类进入能制造简单的石器、铁器工具时代后,开始掘土凿石为洞,伐木搭竹为棚,利用最原始的材料建造最简陋的房屋。在人类历史发展过程中,建设工程材料有过三次重大的突破,带来了建筑技术的三次大飞跃。

公元前 3 世纪有了烧制的砖瓦、陶瓷、石灰,使建筑冲破了天然材料的局限,得以营造大量的、较大规模的、坚固耐用的各种建筑,这是建筑技术的第一次飞跃。

19 世纪有了钢材、水泥,随后便有了钢结构、混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构,使结构的形式和规模都有了巨大的发展,结构的跨度也从几米、几十米发展到上百米乃至几百米。这是建筑技术的第二次大飞跃。

第三次飞跃是从 20 世纪 30 年代人工合成材料问世至今,各种高分子材料和有机、无机、金属、非金属的复合材料迅速发展,这些轻质、高强、多功能的材料,大大地减轻了材料的自重,为建筑物向高层、大跨度发展创造了极好的条件。

因此,建设工程材料的发展,是推动建设工程发展的重要因素。

2. 建设工程材料的发展方向

为适应时代发展的需要,必须不断提高建设工程质量和降低工程造价,不断研究新材料,开发新型产品,新型材料的发展具有以下趋势:

(1) 高强: 研制和发展高强度材料,以减小承重结构构件的截面,降低结构自重。

(2) 轻质: 发展轻质材料,减轻建筑物的自重,降低运输费用和工人劳动强度。

(3) 复合高效多功能: 发展高性能的复合材料,使材料具有高耐久性、高防火性、高防水

性、高保温性、高吸声性、高装饰性等优异性能,并且使一种材料具有多种功能,除了满足坚固、安全、耐久性的要求之外,还具有良好的保温隔热、吸声、防潮、装饰等功能。

(4)综合利用:充分利用各种地方材料和工业废渣来生产建设工程材料,降低成本,变废为宝,化害为利,做到资源循环利用,节约能源,改善环境。

(5)工业化生产:发展适用于由工厂大规模生产、机械化安装施工的材料制品,加快施工速度,提高经济效益。

0.5 建设工程材料的技术标准

建设工程材料的技术标准是材料的生产、销售、采购、验收和质量检验的法律依据。包括材料、设计、施工、验收及试验检测等技术标准。

1. 标准的分类

根据标准的属性分为国家标准、行业标准、地方标准、企业标准、国际标准等。其中又分为强制性标准和推荐性标准。这些标准均以标准名称、代号、编号和颁布年号组成。如《通用硅酸盐水泥》GB 175—2007。

1) 国家标准

国家标准是指在全国范围内统一实施的标准,分为强制性标准和推荐性标准。

强制性标准:代号为“GB”,是指在一定范围内通过法律、行政法规等强制性手段加以实施的标准,具有法律属性。强制性标准一经颁布,必须贯彻执行,否则造成恶劣后果和重大损失的单位和个人,要受到经济制裁或承担法律责任。

强制性标准主要是指涉及安全、卫生方面,保障人体健康、人身财产安全的标准和法律,行政法规规定强制执行的标准。

工程建设领域的质量、安全、卫生、环境保护及国家需要控制的其他工程建设标准,如:《通用硅酸盐水泥》GB 175—2007、《钢筋混凝土用钢 第1部分:热轧光圆钢筋》GB 1499.1—2017、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204—2015等,均属于强制性标准。

推荐性标准:代号为“GB/T”。推荐性标准又称非强制性标准或自愿性标准,是指生产、交换、使用等方面,通过经济手段或市场调节而自愿采用的一类标准。这类标准,不具有强制性,任何单位均有权决定是否采用,违反这类标准,不构成经济或法律方面的责任。但推荐性标准一经接受并采用,或各方商定同意纳入经济合同中,就成为各方必须共同遵守的技术依据,具有法律上的约束性。

如:《建设用卵石、碎石》GB/T 14685—2011、《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019等。

2) 行业标准

由我国各主管部、委(局)批准发布,并报国务院标准化行政主管部门备案,在该行业范围内统一使用的标准。包括部级标准和专业标准。

建筑工程行业建筑工程技术标准——代号为“JGJ”。

如:《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52—2006。

建筑材料行业技术标准——代号为“JC”。

如:《喷射混凝土用速凝剂》JC 477—2005。

铁道行业技术标准——代号为“TB”。

如：《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424—2018 J 1155—2018。

交通行业建筑工程技术标准——代号为“JTG”。

如：《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020。

城市建设标准——代号为“CJJ”。

如：《城镇道路工程施工与质量验收规范》CJJ 1—2008。

中国工程建设标准化协会标准——代号为“CECS”。

如：《混凝土结构耐久性评定标准》CECS 220：2007。

3) 地方标准

由省、自治区、直辖市标准化行政主管部门制定，并报国务院标准化行政主管部门和国务院有关行政主管部门备案的有关技术指导性文件。适应本地区使用，其技术标准不得低于国家有关标准的要求。其代号为“DB”。如：《水污染物排放标准》DB44/26—2001（广东省地方标准）。

4) 企业标准

企业标准由企业制定，由企业法人代表或法人代表授权的主管领导批准、发布，并报当地政府标准化行政主管部门和有关行政主管部门备案，适应企业内部生产的有关指导性技术文件。企业标准不得低于国家有关标准的要求。其代号为“QB”。

5) 国际标准

国际标准是指国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)和国际电信联盟(ITU)制定的标准，以及国际标准化组织确认并公布的其他国际组织制定的标准。国际标准在世界范围内统一使用。例如，我国加入WTO以来，我国建筑材料工业与国际建材工业实现了对接，促进了建材工业的科技进步，提高了产品质量和标准化水平，扩大了建筑材料的对外贸易，采用和参考了国际通用标准和先进标准。常用的国际标准有以下几类：

美国材料与试验协会标准(ASTM)，属于国际团体和公司标准。

联邦德国工业标准(DIN)，欧洲标准(EN)，属于区域性国家标准。

国际标准组织标准(ISO)，属于国际性标准化组织的标准。

2. 标准的选用原则

国家标准属于最低要求。一般来讲，行业标准、企业标准等标准的技术要求通常高于国家标准，因此，在选用标准时，除国家强制性标准外，应根据行业的不同选用该行业的有关标准，无行业标准的选用国家推荐性标准或指定的其他标准。

模块一 建设工程材料的基本性质

【内容提要】 本模块主要介绍建设工程材料的密度、孔隙率与空隙率及材料与水、热、声学有关的物理性质，材料与外力有关的力学性质及与各种环境因素有关的耐久性，并从材料的组成、结构出发，阐述了影响材料基本性质的内在因素。

建设工程材料在各种建设工程中起着不同的作用，有的主要承受荷载，有的起围护作用，有的则起保温隔热或表面装饰、防水防潮、防腐、防火等作用。材料在这些外力、阳光、大气、水分及各种介质作用下，会发生受力变形、热胀冷缩、干湿变形、冻融交替、化学侵蚀等现象，这些因素都会使材料产生不同程度的破坏。为了使建筑物和构筑物能够安全、适用、耐久而又经济，必须在工程设计和施工中充分了解和掌握各种材料的性质和特点，以便正确、合理地选择和使用材料，使其性能满足使用要求。

本模块将介绍建设工程材料在物理、力学等方面的各种共同特性，建立起主要概念，论述其内涵和相互关联，以便在后续各模块中理解和应用。

1.1 材料的物理性质

一、密度

密度是指单位体积物质的质量，其单位可用 g/cm^3 或 kg/m^3 表示 ($1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)。由于建设工程材料有密实的、多孔的和颗粒堆积等不同状态，且材料内部的孔隙又有开口和闭口之分，故材料的密度也就有密实密度(密度)、表观密度、毛体积密度、堆积密度和紧密密度等之分。

1. 密实密度(密度)

密实密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的干质量，按式(1-1)计算：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中： ρ ——材料的密度， g/cm^3 ；

m ——材料的干质量， g ；

V ——材料在绝对密实状态下的体积， cm^3 。

绝对密实状态下的体积是指材料的实体矿物质所占的体积，不包括任何孔隙在内的体积。但实际上绝对密实的材料是很少的，绝大多数的材料都是含有孔隙的。对于绝对密实的固体材料的密实体积，可用量尺测量计算(具有规则形状的固体材料)或用排水法(对于具有不规则形状且不溶于水中的固体材料，其浸没于水中后，会排开与其相等体积的水)测定；但

对于有孔材料的密实体积,则需将其磨成粒径小于 0.20 mm 的细粉,经干燥后测其粉末的排水体积,并将此体积作为材料的密实体积。材料磨得愈细,测得的密度值愈接近密实密度。

2. 表观密度

表观密度是指材料在自然状态下不含开口孔隙时单位体积的干质量,按式(1-2)计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1-2)$$

式中: ρ_0 ——材料的表观密度, g/cm^3 ;

m ——材料的干质量, g ;

V_0 ——材料的表观体积, cm^3 。

材料的表观体积中包含了材料的矿物质及其内部闭口孔隙所占的体积,但不包含开口孔隙所占的体积,见图 1-1。



液体比重天平法测定
粗骨料的表观密度



广口瓶法测定
粗骨料的表观密度

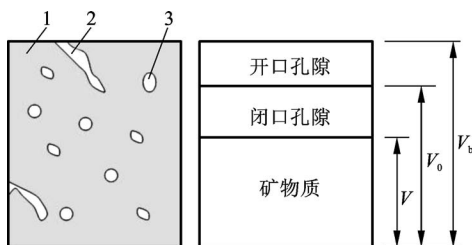


图 1-1 固体材料在自然状态下的体积构成示意图

1—矿物质; 2—开口孔隙; 3—闭口孔隙

对于不规则且不溶于水的颗粒材料或粉状材料的表观体积可用排水法测得,如砂、卵石、碎石等。

3. 毛体积密度(体积密度)

毛体积密度是指块体或颗粒材料在自然状态下单位体积的干质量,按式(1-3)计算:

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (1-3)$$

式中: ρ_b ——材料的毛体积密度, g/cm^3 ;

m ——材料的干质量, g ;

V_b ——材料的毛体积, cm^3 。

材料的毛体积是指块体或颗粒材料表面轮廓线所包围的体积。它包含了材料的矿物质及其内部闭口孔隙和开口孔隙在内的体积,见图 1-1。对于规则材料的毛体积可用量尺测量其几何尺寸来计算,如砖、砌块等;对于不规则且不溶于水的颗粒材料的毛体积可用排水法测得,但与表观体积的区别是,毛体积包含了开口孔隙中水的体积,即开口孔隙体积(其值等于材料饱和面干质量与干质量的差值除以水的密度)。

4. 堆积密度

堆积密度是指颗粒材料或粉状材料在堆积状态下单位体积的干质量。按式(1-4)计算:

$$\rho_L = \frac{m}{V_L} \quad (1-4)$$

式中： ρ_L ——材料的堆积密度， g/cm^3 ；

m ——材料的干质量， g ；

V_L ——材料的堆积体积， cm^3 。

材料的堆积体积中包括矿物质的体积、材料内部闭口和开口孔隙的体积及颗粒间的空隙所占体积，见图 1-2。堆积体积可用已知容积的容器量得。

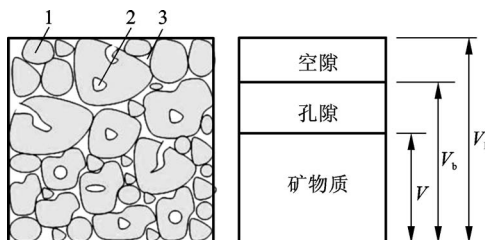


图 1-2 颗粒状材料在堆积状态下的体积构成示意图

1—矿物质；2—闭口孔隙；3—空隙

5. 紧密密度

紧密密度指颗粒材料或粉状材料按规定方法颠实(或振实)后单位体积的干质量，按式(1-5)计算：

$$\rho_c = \frac{m}{V_c} \quad (1-5)$$

式中： ρ_c ——材料的紧密密度， g/cm^3 ；

m ——材料的干质量， g ；

V_c ——材料的紧密堆积体积， cm^3 。

材料的紧密堆积体积中包括矿物质的体积、材料内部闭口和开口孔隙的体积及按规定方法颠实后颗粒间的空隙所占体积。紧密堆积体积可用已知容积的容器量得。

6. 相对密度

材料的相对密度是材料的密度与同温度时水的密度的比值。材料的表观密度与同温度时水的密度的比值则称为相对表观密度；材料的毛体积密度与同温度时水的密度的比值则称为相对毛体积密度。

材料的密度、表观密度、毛体积密度、堆积密度和紧密密度，是材料的主要物理性质，可用于材料的孔隙率或空隙率的计算、材料的质量与体积之间的换算。如材料的用量、运输量和堆积空间的计算，配合比的计算，构件自重的计算等。

同一材料在不同状态下，其不同密度大小关系为： $\rho > \rho_0 > \rho_b > \rho_c > \rho_L$ 。

二、孔隙率与空隙率

孔隙率：是指在材料的自然体积中孔隙体积所占的百分率。由图 1-1 可知，材料的孔隙率可用式(1-6)表示和计算：

$$P = \frac{V_b - V}{V_b} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1-6)$$

式中： P ——材料的孔隙率，%。

空隙率：是指散粒状材料在堆积状态下，颗粒间的空隙体积占堆积体积的百分率。由图 1-2 可知，堆积空隙率可用式(1-7)计算；紧密空隙率可用式(1-8)计算：

$$\text{堆积空隙率: } \nu_L = \frac{V_L - V_0}{V_L} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_L}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-7)$$

$$\text{紧密空隙率: } \nu_c = \frac{V_c - V_0}{V_c} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-8)$$

式中： ν_L 、 ν_c ——材料的堆积空隙率和紧密空隙率，%。

注：建设工程所用颗粒材料通常用于水泥混凝土或水泥砂浆的骨料，由于其开口孔隙能被水泥浆填充，故空隙率的计算公式中的空隙体积包含了颗粒材料的开口孔隙的体积。

对于同一类材料而言，孔隙率愈小，则其体积密度就愈大，结构就愈致密，强度就愈高。空隙率愈小，表明其颗粒级配就愈好，堆积密度就愈大；如果用颗粒材料作为回填材料，压实后的空隙率愈小，表明压实就愈密实；在混凝土配合比设计计算中，也可利用粗骨料的实测空隙率来估算合理砂率。

【例】某混凝土用卵石经洗净烘干后，取 900 g 该卵石浸水饱和，放入事先装有 500 mL 洁净水、容积为 1000 mL 的量筒中，此时量筒中的水位已上升至 840 mL 处；另取该卵石在距离容量筒口 5 cm 高度处，将容积为 20 L 的容量筒灌满后称得其质量为 36.5 kg，容量筒的质量为 5.1 kg，试求该卵石的表观密度、堆积密度及空隙率。如果用堆积密度为 1500 kg/m^3 的砂子来填充 1 m^3 该卵石的空隙并超量 15%，需要多少砂子？

解：① 卵石的表观密度： $\rho_0 = 900 \text{ g} / (840 - 500) \text{ cm}^3 = 2.65 \text{ g/cm}^3 = 2650 \text{ kg/m}^3$ ；

② 卵石的堆积密度： $\rho_L = (36.5 - 5.1) \text{ kg} / 20 \text{ L} = 1570 \text{ kg/m}^3$ ；

③ 卵石的空隙率： $\nu_L = (1 - \rho_L / \rho_0) \times 100\% = (1 - 1570 / 2650) \times 100\% = 41\%$ ；

④ 填充 1 m^3 该卵石的空隙并超量 15% 需要的砂子：

$$m = 1 \times 0.41 \times (1 + 15\%) \times 1500 = 707 (\text{kg})。$$

三、与水有关的性质

1. 亲水性与憎水性

材料与水接触时，根据材料表面对水的吸附程度，有亲水与憎水两种不同情况。

亲水性：材料的表面对水的吸附力较大，水在材料表面呈摊开状[润湿角 $\theta < 90^\circ$ ，如图 1-3(a) 所示]，材料表面能被水润湿，材料中的开口微孔能将水吸入，材料的这种性质称为亲水性，具有这种性质的材料称为亲水性材料，如木材、砖、岩石、混凝土等。

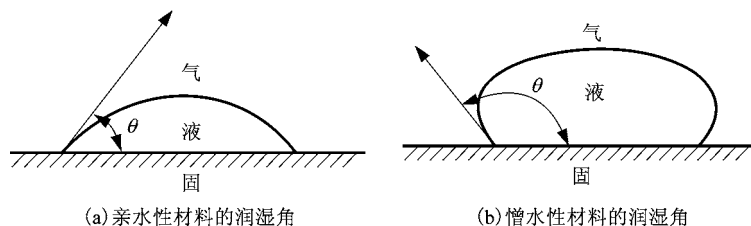


图 1-3 材料的亲水性与憎水性

憎水性：材料的表面对水的吸附力较小，由于水的内聚力作用，水在材料表面收拢成珠

状[润湿角 $\theta > 90^\circ$, 如图 1-3(b) 所示], 材料表面不易被润湿, 材料中的微细孔隙不会将水吸入, 材料的这种性质称为憎水性, 具有这种性质的材料称为憎水性材料。沥青、石蜡等材料属于憎水性材料。憎水性材料常用作防水材料, 或可对亲水性材料表面做防水处理。

2. 吸水性与吸湿性

吸水性: 是指材料在水中吸收水分的性质。材料的吸水性可用质量吸水率或体积吸水率来表示。对某一材料而言, 其吸水率是一固定不变值。

质量吸水率(简称为吸水率)是指材料在吸水饱和状态下, 所吸收水分的质量与材料干质量比值的百分率, 可按式(1-9)计算:

$$W_m = \frac{m_w}{m} \times 100\% = \frac{m_b - m}{m} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中: W_m ——材料的质量吸水率, %;

m_w ——材料在饱和状态下所吸水的质量, g;

m_b ——材料吸水饱和时的质量, g;

m ——材料烘干至恒重时的质量, g。

体积吸水率是指材料在吸水饱和状态下, 所吸收水分的体积占干燥状态下材料毛体积的百分率, 可按式(1-10)计算:

$$W_v = \frac{V_w}{V_b} \times 100\% = \frac{m_b - m}{\rho_w V_b} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中: W_v ——材料的体积吸水率, %;

V_w ——材料在饱和状态下所吸水的体积, cm^3 ;

V_b ——材料在干燥状态时的毛体积, cm^3 ;

ρ_w ——水的密度, 取 1 g/cm^3 。

吸湿性: 是指材料在潮湿的空气中吸收水分的性质, 用含水率表示。

含水率: 是指材料在自然状态下, 其内部所含水分的质量占材料干质量的百分率, 按式(1-11)计算:

$$W_h = \frac{m_h - m}{m} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中: W_h ——材料的含水率, %;

m_h ——材料在吸湿状态下的质量, g;

m ——材料烘干至恒重时的质量, g。

材料的吸水性、吸湿性与材料的亲水性、孔隙率和孔隙特征[指孔隙结构(闭口孔隙、开口孔隙)和孔隙粗细]有关。由于封闭孔隙不能进水, 粗大孔隙虽易进水, 却不易存留, 所以具有大量开口细微孔隙的亲水性材料(如木材、砖、多孔混凝土等), 其吸水性和吸湿性是很强的。材料的吸湿性还随着周围环境空气湿度而变化, 当周围环境空气较为潮湿时, 材料将吸入水分, 使含水率增大; 反之, 当周围环境空气较为干燥时, 材料中的水分蒸发, 使含水率下降, 直至与周围环境空气湿度达到平衡, 达到平衡时材料的含水率称为平衡含水率。故材料的平衡含水率是一动态变化值。

材料吸水后, 其体积膨胀、强度会下降、保温性能降低。如木材, 由于吸水或蒸发水分, 会造成木材翘曲、开裂等缺陷; 石灰、石膏、水泥等由于吸湿性强容易造成其失效; 保温材料吸水后, 其保温性能会大幅度下降等。

3. 耐水性

耐水性是指材料长期在饱和水作用下保持其原有性质的能力。不同材料的耐水性有不同的含义。结构材料的耐水性主要指材料受水后强度的变化；而装饰材料的耐水性主要指材料受水后的颜色变化、霉变、是否会鼓起起层等。

结构材料的耐水性用软化系数(K_R)表示,按式(1-12)计算:

$$K_R = \frac{f_w}{f_d} \quad (1-12)$$

式中: f_w ——材料吸水饱和状态下的抗压强度, MPa;

f_d ——材料在干燥状态下的抗压强度, MPa。

材料在吸水后,由于水分子的浸入,水分被组成材料的微粒表面吸附而形成水膜,削弱了材料微粒间的结合力,同时水分还会溶解其中易溶于水的成分,而使材料的强度有不同程度的下降(软化),严重者会完全丧失其强度(如黏土)。

材料的软化系数,其值在 0 到 1 之间。 K_R 越接近于 1,材料的耐水性越好。凡用于受水浸泡或潮湿环境的重要材料,要求 $K_R \geq 0.85$;用于受潮湿较轻或次要部位的材料,要求 $K_R \geq 0.70$ 。凡 $K_R > 0.85$ 的材料,通常可以认为是耐水材料。

【例】某烧结砖在自然状态下的质量为 2.6 kg,经烘干后其质量为 2.4 kg,将其浸水饱和后称其质量为 2.9 kg;在干燥状态下测得其抗压强度为 15.6 MPa,浸水饱和后测得其抗压强度为 13.7 MPa,试求该砖的含水率、吸水率及软化系数。

解: 含水率: $W_h = [(2.6 - 2.4)/2.4] \times 100\% = 8.3\%$

吸水率: $W_m = [(2.9 - 2.4)/2.4] \times 100\% = 20.8\%$

软化系数: $K_R = 13.7/15.6 = 0.88$

4. 抗渗性与抗冻性

抗渗性:是指材料抵抗压力水(或其他液体)渗透的能力。材料的抗渗性可用抗渗等级或渗透系数来评价。材料的抗渗等级愈高,渗透系数愈小,则抵抗压力水渗透能力就愈强。

材料的抗渗等级可分为 P6、P8、P10、P12、>P12 等。其中的 P 是抗渗等级的代号,其数字代表材料在不发生渗透的前提下所能承受的最大水压力(单位为 0.1 MPa)。如 P6 代表材料按标准方法做抗渗试验时,在 0.6 MPa 的水压作用下,1 组 6 个试件中 4 个试件未出现渗水,此时的水压乘以 10 即为抗渗等级。抗渗等级按式(1-13)计算:

$$P = 10H - 1 \quad (1-13)$$

式中: H ——6 个试件中有 3 个试件出现渗水时的水压力值(MPa)。

渗透系数是指一定厚度的材料,在一定水压力作用下,在单位时间内透过单位面积的水量,试验装置见图 1-4,按式(1-14)计算:

$$K_s = \frac{Q \cdot d}{A \cdot t \cdot H} \quad (1-14)$$

式中: K_s ——材料的渗透系数, cm/h;

Q ——渗透的水量, cm^3 ;

d ——材料的厚度, cm;

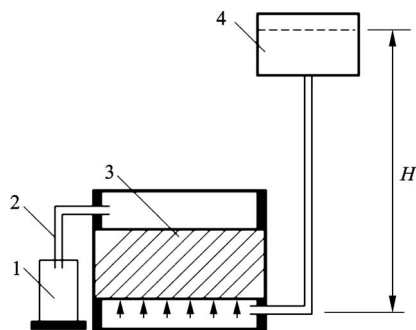


图 1-4 渗透试验装置示意图

1—量筒; 2—出水管; 3—材料试件; 4—水箱

A ——渗水面积, cm^2 ;

t ——渗水时间, h ;

H ——静水压力水头, cm 。

抗冻性:是指材料在吸水饱和状态下,能经受多次冻融循环作用而不被破坏,也不严重降低其强度的性质。

由于水结冰时体积膨胀约 9%,材料孔隙内的饱和水结冰膨胀,将对材料的孔壁产生很大的压应力,当此应力超过材料的抗拉强度时,材料将产生内外裂纹、表面剥落、强度下降。随着冻融次数的增加,冻融破坏就越严重。

材料的抗冻性,用抗冻等级 F_n 表示,其中的“F”是抗冻等级的代号,“n”表示材料能经受的最大冻融循环次数,分为 F_{10} 、 F_{15} 、 F_{25} 、 F_{50} 、 F_{100} 、 F_{200} 等抗冻等级。如 F_{25} 代表材料在 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下冰冻 3 h 后,再在 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下溶化 1 h 的冻融循环试验,其质量损失率不超过 5%、强度损失率不超过 25% 或相对动弹模量不小于 60% 时,所能经受的冻融循环次数最多为 25 次。材料的抗冻等级愈高,则抵抗冻融破坏的能力就愈强。

材料的抗渗性、抗冻性好与差,主要由材料的孔隙率和孔隙特征决定。孔隙率越大,开口连通孔隙越多,连通大孔含量越多,则抗渗性、抗冻性就越差。另外,材料的抗渗性还与材料的憎水性和亲水性有关,憎水性材料的抗渗性优于亲水性材料;材料抗冻性还与材料的强度有关,强度越高抵抗冻融破坏的能力就越强,抗冻性就越好。提高材料的密实性或使材料内部形成一定数量的封闭孔隙,均能提高材料的抗渗性和抗冻性。

四、热工性能

在建筑物中,材料除了要满足必要的强度及其他性能要求外,还应考虑节能和舒适的要求,这就要求材料具有一定的热工性质,以维持室内温度。

1. 导热性

材料能传导热量的性质称为导热性。材料传导热量的能力用导热系数或热阻来评价。

导热系数:在数值上等于厚度为 1 m 的材料,当其相对两侧温差为 1 K 时,在 1 s 时间内通过 1 m^2 面积所传导的热量,见图 1-5,按式(1-15)计算:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot Z \cdot \Delta T} \quad (1-15)$$

式中: λ ——材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

Q ——材料传导的热量, J (焦耳);

d ——材料的厚度, m ;

A ——材料的传热面积, m^2 ;

Z ——传热时间, s (秒);

ΔT ——材料传热时两侧的温差, K 。($1^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$)

热阻:是指材料层的厚度与该材料层的导热系数之比。单一材料层的热阻按式(1-16)计算:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1-16)$$

式中: R ——材料层的热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$;

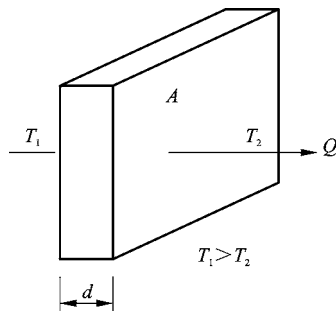


图 1-5 材料传热示意图

d ——材料层的厚度, m。

多层复合材料的热阻等于各单一材料层的热阻之和。

2. 热容量

热容量是指材料受热时吸收热量、冷却时放出热量的性质, 即材料能容纳热量的性质。热容量的大小用比热容表示。比热容为 1 g 材料温度升高 1 K 时所吸收的热量, 或降低 1 K 时所放出的热量, 按式(1-17)计算:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (1-17)$$

式中: c ——材料的比热容, J/(g · K);

Q ——材料吸收或放出的热量, J(焦耳);

m ——材料的质量, g;

ΔT ——材料受热或冷却前后的温差, K。

材料保温性的好与差, 取决于材料的成分、孔隙率和孔隙特征。由于密闭空气的导热系数很小, 所以, 孔隙率较大且为细微封闭孔隙的材料导热系数也就小, 保温性能就好; 具有粗大而贯通孔隙的材料, 由于有对流作用, 其导热系数会增大; 材料受潮或吸水受冻后, 由于水和冰的导热系数比不流动空气的导热系数大几十倍, 会使材料的导热系数增大, 保温隔热性能降低。

用于建筑外围的材料, 宜采用导热系数小的材料, 能在室内外温差较大的情况下缓和室内温度的波动, 对于采暖或供冷的建筑, 可起到节约能源的效果。一般认为, 导热系数 $\lambda < 0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的材料, 可作为保温隔热材料, 这种材料必定是多孔轻质的, 且应在干燥环境中使用, 以利于发挥其保温隔热的效能。常用材料的导热系数和比热容见表 1-1。

表 1-1 常用材料的热工性质指标

材 料	导热系数 λ /[W · (m · K) ⁻¹]	比热容 c /[J · (g · K) ⁻¹]	材 料	导热系数 λ /[W · (m · K) ⁻¹]	比热容 c /[J · (g · K) ⁻¹]
紫铜	407	0.42	石棉、岩棉、玻璃棉板	0.045 ~ 0.050	1.22
建筑钢材	58.2	0.48	水泥膨胀珍珠岩	0.16 ~ 0.26	1.17
花岗岩	3.49	0.92	聚乙烯泡沫塑料	0.047	1.38
钢筋混凝土	1.74	0.92	冰	2.20	2.05
烧结黏土砖	0.55	0.84	水	0.58	4.19
松木(横纹)	0.14	2.51	密闭空气(10℃时)	0.025	1.00

3. 温度变形

材料随使用环境温度的变化, 其体积也随之发生变化, 即“热胀冷缩”现象。温度变形在单向尺寸上的变化称为线膨胀或线收缩, 通常用线膨胀系数来衡量材料的温度变形。线膨胀系数是指温度上升 1 K(或下降 1 K)所引起的材料在某一方向上的长度相对伸长值(或相对缩短值), 用 a_L 表示, 按式(1-18)计算:

$$a_L = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T} \quad (1-18)$$

式中: a_L ——材料在常温下的线膨胀系数, 1/K;

L ——材料的原始长度, mm 或 m;

ΔL ——材料由于温变而引起的伸长值或缩短值, mm 或 m;

ΔT ——材料受热(或冷却)前后的温差, K(开氏温度)。

常用材料的线膨胀系数如下:

钢 材 $\alpha_L = (10 \sim 12) \times 10^{-6}/K$

混凝土 $\alpha_L = (5.8 \sim 12.6) \times 10^{-6}/K$

岩石、骨料 $\alpha_L = (6.3 \sim 12.4) \times 10^{-6}/K$

线膨胀系数是一个重要的物理参数,可以用来计算材料在温度变化时所引起的变形,或当温度变形受阻时所产生的温度应力等。如果温度变形受到阻碍,便会在材料内部产生温度应力,当温度应力达到一定极限时,将导致结构破坏。桥梁或过长的建筑物要留有伸缩缝,架空的长管道要设置“Ω”形管节,钢轨接头处要留有适当的轨缝,都是为了适应由于温度变化所引起的材料变形。

【例】一根长 25 m 的钢轨,在温度升高 60 K 的情况下,其伸长量为:

$$\Delta L = \alpha_L \cdot L \cdot \Delta T = 10 \times 10^{-6} \times 25000 \times 60 = 15 (\text{mm})$$

4. 耐燃性

耐燃性是指材料对火焰和高温的抵抗能力。它是影响建筑物的防火、建筑结构的耐火等级的一项重要因素。建设工程材料按其耐燃性分为不燃、难燃、可燃、易燃四类。

不燃性材料:在空气中遇火或高温高热作用下不起火、不炭化、不燃烧。如砖、石、混凝土、石棉等。

难燃性材料:在空气中遇火或高温高热作用下难起火、难炭化、难燃烧,当火源移走后,已有的燃烧或微燃会立即停止。如经防火处理的木材等。

可燃性材料:在空气中遇火或高温高热作用下立即起火或微燃,且火源移走后仍能继续燃烧。如木材、沥青等。

易燃性材料:在空气中遇火或高温高热作用下立即起火剧烈燃烧,且火源移走后不易扑灭。如泡沫塑料板、化学纤维织物等。

五、声学性能

1. 吸声性能

声音起源于物体的振动,它迫使邻近的空气跟着振动而成为声波,并在空气介质中向四周传播。当声波传到材料表面时,一部分被反射,一部分穿透材料,其余部分则传递给材料,在材料的孔隙中引起空气分子与孔壁的摩擦和黏滞阻力,其间相当一部分声能转化为热能而被吸收掉。这些被吸收的能量(包括部分穿透材料的声能在内)与传递给材料的全部声能之比,是评定材料吸声性能好坏的主要指标,称为吸声系数(α),按式(1-19)计算:

$$\alpha = \frac{E}{E_0} \quad (1-19)$$

式中: E ——被材料吸收的声能(包括部分穿透材料的声能在内);

E_0 ——传递给材料的全部入射声能。

材料的吸声性能除与材料本身的厚度、内部结构及材料的表面特征有关外,还与声波的频率及入射方向有关。同一材料对高、中、低不同频率的吸声系数是不同的。为了能全面反

映材料的吸声性能,通常取 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1000 Hz、2000 Hz、4000 Hz 等六个频率的吸声系数来表示材料的吸声频率特性,凡对上述六个频率的平均吸声系数大于 0.2 的材料,称为吸声材料。材料的吸声系数越大,则吸声效果就越好。

材料的吸声性能主要取决于材料的孔隙率与孔隙特征,具有大量内外连通微细孔的多孔材料具有良好的吸声性能。当声波入射到多孔材料的表面时,便很快顺着微细孔进入材料内部,使孔隙内的空气分子受到摩擦和黏滞阻力,或使细小纤维作机械振动,部分声能将转变为热能和机械能,使穿透材料的声能衰减,从而达到阻止声波传播的目的。如果材料具有大量的封闭孔隙或开口连通孔隙过大,则吸声效果差。

2. 隔声性能

隔声性能是材料阻隔声波的能力。声音按传播的途径不同可分为空气传播声和固体传播声两种。材料的隔声性能可用声波透射系数(τ)来衡量,按式(1-20)计算:

$$\tau = \frac{E_{\tau}}{E_0} \quad (1-20)$$

式中: E_{τ} ——透过材料的声能;

E_0 ——传递给材料的全部入射声能。

材料的声波透射系数越小,隔声性能就越好。常用隔声量 R (分贝: dB)来表示材料对空气声的隔绝能力,其与声波透射系数的关系是: $R = -10 \lg \tau$ 。

要使声波无法传播,最有效的办法就是将其传播介质隔断。

隔绝空气声,隔声效果主要取决于隔声材料的单位面积质量,质量越大,越不易振动,则隔声效果越好。因此须选用密实、沉重的材料,如普通砖、钢板、钢筋混凝土作为隔声材料。

隔绝固体声,最有效的措施是采用不连续的结构处理,即在墙壁和承重梁之间、房屋的框架和隔墙及楼板之间加弹性衬垫,如毛毡、软木、橡皮等材料,或在楼板上加弹性地毯;对于强夯地基施工,为了减少对临近建筑物的振动,可在强夯地基外周挖壕沟,将固体传播声波转换成空气传播声波后,空气传播声波被壕沟的另一侧土方隔断,从而达到隔声的目的。

1.2 材料的力学性质

材料的力学性质又称机械性质,是指材料在外力作用下,抵抗变形和破坏的能力。包括强度、弹性与塑性、韧性与脆性、硬度与耐磨性等。

1. 强度

强度是指材料抵抗外力(荷载)破坏的能力。通常情况下,材料内部的应力多由外力作用而引起,并随着外力的增加而增大,当外力超过材料内部质点所能抵抗的极限时,材料即发生破坏,此极限应力值就是材料的强度。

材料所受的外力有压缩、拉伸、剪切和弯曲等多种形式,根据材料所受外力的形式不同,材料的强度分为抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗折(弯拉)强度四种,见图 1-6。

材料的抗压强度、抗拉强度和抗剪强度,均可按式(1-21)计算:

$$f = \frac{F}{A} \quad (1-21)$$

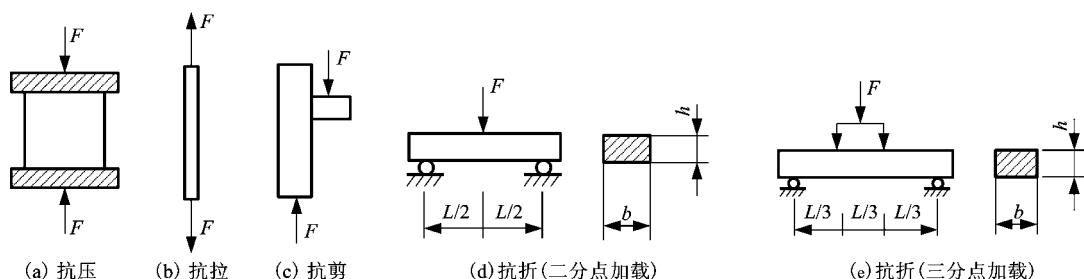


图 1-6 材料的几种受力状态

式中: f ——材料的强度, 包括抗压强度 f_c 、抗拉强度 f_t 和抗剪强度 f_v , MPa (N/mm^2);

F ——材料受压、受拉或受剪破坏时的最大荷载, N;

A ——材料的受力面积, mm^2 。

材料的抗折强度(又称抗弯拉强度)与材料的截面尺寸和受力情况有关, 不同形状大小的试件, 不同的受力情况, 其计算公式是不同的。一集中荷载二点加载方式按式(1-22)计算, 一集中荷载三点加载方式按式(1-23)计算:

$$f_t = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (\text{二点加载}) \quad (1-22)$$

$$f_t = \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (\text{三点加载}) \quad (1-23)$$

式中: f_t ——材料的抗折强度, MPa;

F ——受弯破坏时的最大荷载, N;

L ——跨距, 即两支点间的距离, mm;

b ——材料截面的宽度, mm;

h ——材料截面的高度, mm。

强度是材料的主要技术性质之一。凡是用于承重结构的各种材料, 都规定了有关强度的测定方法和计算方法, 都以其强度标准值的大小划分为若干个强度等级或标号, 以供结构设计和施工时合理选用。

材料的强度与其组成和结构有关, 即使材料的组成相同, 如内部构造不同, 则其强度也不同。材料的孔隙率愈大, 则强度愈低。

材料的强度还与其含水率状态和温度有关, 含有水分的材料, 其强度较干燥状态时要低。某些材料随温度的升高, 其强度将降低, 如沥青混凝土。

2. 弹性与塑性

弹性: 指材料在外力作用下产生变形, 当外力撤销时, 变形会随之消失。这种变形称为弹性变形。弹性变形为可逆变形, 其值与外力成正比。按式(1-24)计算:

$$\varepsilon = \frac{F}{E \cdot A} \quad (\text{虎克定律}) \quad (1-24)$$

式中: ε ——材料的弹性变形, mm;

F ——弹性范围内的作用力, N;

E ——材料的弹性模量, MPa;

A ——材料的受力截面积, mm^2 。

材料的弹性模量 E 是一常数, 其值越大, 材料越不易变形。它是结构设计的重要参数。由式(1-24)可知, 对某一材料来讲, 在规定的弹性变形范围内, 要提高其承载力, 可加大其截面尺寸。

塑性: 指材料在外力作用下产生变形, 当外力撤销后, 仍保持已发生的变形。这种变形称为塑性变形。塑性变形为不可逆变形, 这种变形对结构是有害的。建筑物在正常使用情况下, 是不允许产生塑性变形的。

单纯的弹性材料是没有的。有的材料(如钢材)在受力不太大时表现为弹性, 超过弹性限度之后便出现塑性变形。许多材料(如混凝土等)在受力后, 弹性变形和塑性变形同时发生, 若撤销外力, 其弹性变形将消失, 但塑性变形仍残留着(称为残余变形)。这种既有弹性又有塑性的变形称为弹塑性变形。

3. 韧性与脆性

韧性: 指材料在外力作用下, 发生较大变形尚不断裂的性质。具有这种性质的材料称为韧性材料。如钢材、木材、塑料、橡胶等属于韧性材料。

材料的冲击韧性以冲击吸收功来衡量。用标准试件做冲击试验(见图1-7), 在冲断过程中试件所吸收的功, 即冲断试件所消耗的功, 按式(1-25)计算:

$$A_k = F(H - h) \quad (1-25)$$

式中: A_k ——材料的冲击吸收功, J(焦耳, $\text{N} \cdot \text{m}$);

F ——冲击摆锤的重量, N;

H, h ——冲击前、后摆锤的高度, m。

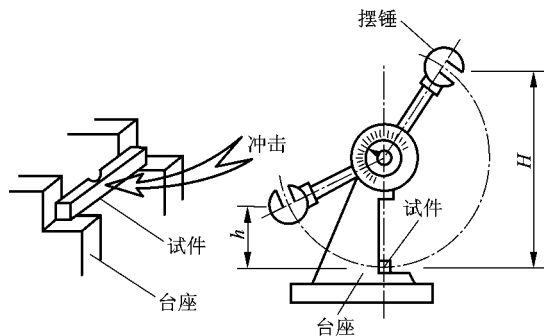


图 1-7 冲击试验装置示意图

脆性: 指材料在外力作用下, 在没有明显塑性变形的情况下突然断裂的性质。具有这种性质的材料称为脆性材料。如铁、混凝土、砂浆、砖、石、玻璃、陶瓷等均属于脆性材料。

一般来说, 脆性材料的抗压强度比其抗拉、抗弯强度高很多倍, 其抵抗冲击和振动荷载的能力较差, 这种材料不宜用于承受振动和冲击的场合。

4. 硬度与耐磨性

硬度: 指材料对外物压陷、刻划等作用的局部抵抗能力。对于木材、金属等韧性材料的

硬度通常采用压入法来测定。压入法硬度指标主要有布氏硬度(HBW)和洛氏硬度(HRA、HRC),是对一定直径的硬质合金球施加试验力压入试样表面,经规定保持时间后,卸除试验力,测定试样表面压痕的直径(布氏硬度)或残余深度(洛氏硬度),以此来计算试样的硬度。对于岩石、玻璃、陶瓷等非金属脆性材料的硬度,则采用刻划法来测定,称为莫氏硬度,它是用系列标准硬度的矿物(按滑石、石膏、方解石、萤石、磷灰石、正长石、石英、黄玉、刚玉、金刚石的硬度由低到高依次排列)对材料表面进行刻划,根据划痕来确定其硬度等级。

工程上常用材料的硬度来推算其强度,如用回弹法测定混凝土强度,就是用回弹仪测得混凝土的表面硬度来推算其强度的。

耐磨性:指材料表面抵抗外物磨损的能力,可用磨耗率来衡量。以材料在规定的负荷作用下研磨规定的圈数后单位面积上的质量损失来表示,按式(1-26)计算:

$$G_c = \frac{m_1 - m_2}{A} \quad (1-26)$$

式中: G_c ——材料的磨耗率, g/cm^2 ;

m_1 ——材料研磨前的质量, g ;

m_2 ——材料研磨后的质量, g ;

A ——材料受磨损的面积, mm^2 。

为了保持材料有较好的表面使用性质和外观质量,要求其必须具有足够的硬度和耐磨性。材料的硬度和耐磨性与材料的组成、结构、强度等因素有关,通常硬度高的材料,其结构就越致密,强度也就越高,耐磨性就愈好。铁路的钢轨和用于路面、地面、桥面、阶梯等部位的材料,都要求具有一定的硬度和耐磨性。

1.3 材料的耐久性

材料的耐久性是指材料在使用条件下,受各种内在和外来自然因素及有害介质的侵蚀而能长久地保持其原有性能的性质。耐久性是衡量材料在长期使用条件下的安全性能的一项综合性指标,包括抗渗性、抗冻性、抗裂性、抗风化性、抗老化性、耐化学腐蚀性等。此外,材料的强度、耐磨性也与材料的耐久性有密切关系。

1. 环境对材料的影响

材料在使用过程中,除受各种外力作用(机械作用)外,还要长期地受到各种自然环境因素的破坏作用,这些破坏作用可以概括为物理、化学和生物作用。

物理作用:材料长期在阳光、大气、雨水、冰雪等作用下,不断发生干湿变化、热胀冷缩、冻融循环,从而发生内外裂缝、表面剥落,使材料逐渐破坏。如岩石的风化、沥青和塑料的老化、材料的冻胀破坏、结构的渗漏等。

化学作用:材料在各种化学介质,如酸、碱、盐等物质的水溶液和有害气体的侵蚀作用下,使材料逐渐发生腐蚀、变质而破坏。如钢材生锈、水泥石腐蚀、钢筋混凝土的碳化破坏、混凝土的碱-骨料反应等。

生物作用:材料受菌类、昆虫的侵蚀造成的破坏。如木材腐朽、虫蛀等。

对于使用中的建设工程材料来说,它们所受到的破坏作用往往不是一种,而是上述几种因素共同作用,如果不采取相应的防护措施,材料就会逐渐发生破坏,从而影响到结构的安

全使用。

2. 提高材料耐久性的措施

- (1) 设法减轻大气或周围介质对材料的破坏作用。如降低温湿度、排除侵蚀性物质等。
- (2) 提高材料本身的密实度，改善材料的孔隙构造。
- (3) 适当改变材料的组成成分，进行憎水性处理及防腐处理。
- (4) 表面保护。如采用饰面、抹灰、刷防腐涂料等保护措施。

复习思考题

1. 材料的密度、表观密度、毛体积密度、堆积密度及紧密密度，它们之间有何区别？
2. 材料的孔隙率与空隙率有何区别？
3. 亲水性材料与憎水性材料是根据什么来划分的？
4. 材料的吸水性与吸湿性有什么区别？分别用什么来表示？
5. 软化系数是用来评价结构材料的什么性质？如何计算？
6. 材料的抗渗性与抗冻性有何区别？与哪些因素有关？分别用什么来评价？
7. 材料的导热性与哪些因素有关？用什么指标来评价？
8. 吸声材料应具有什么特点？要想隔绝或减弱声音的传播，最有效的措施是什么？
9. 混凝土路面、桥梁等超长构件每隔一定距离留置一定宽度的缝隙有何目的？
10. 什么是材料的强度？材料的强度分哪几种？
11. 材料的弹性变形与塑性变形有何区别？
12. 韧性材料与脆性材料有何区别？
13. 什么是材料的耐久性？包括哪些方面？
14. 现有甲、乙两相同组成的材料，密度为 2.70 g/cm^3 。甲材料的绝干毛体积密度为 1.40 g/cm^3 ，质量吸水率为 17%；乙材料吸水饱和后的毛体积密度为 1.862 g/cm^3 ，体积吸水率为 46.2%。试求：(1) 甲材料的孔隙率和体积吸水率；(2) 乙材料的绝干毛体积密度和孔隙率；(3) 评价甲、乙两种材料，指出哪种材料更宜作为外墙材料，为什么？
15. 一块标准红砖，尺寸为 $240 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$ ，在空气中的质量为 2750 g，将其放入水中浸泡 24 h 后称得其饱和面干状态（表面干燥，内部被水饱和）下的质量为 2900 g，再经烘干后称得其质量为 2665 g，然后将其一份磨细后取干粉 55 g，用排水法测得其密实体积为 20.7 cm^3 ，试求此砖的含水率、吸水率、密度、毛体积密度、孔隙率。

模块二 混凝土结构工程材料

【内容提要】 本模块主要介绍混凝土结构工程用通用硅酸盐水泥、砂、卵石、碎石、矿物掺合料、外加剂、普通钢筋、预应力筋及锚具的品种、规格、技术性质、质量要求、应用及验收与施工管理，以及混凝土的技术性质、影响混凝土性质的主要因素与改善措施、配合比的设计等有关知识。

2.1 基本概念

2.1.1 混凝土的定义及分类

1. 混凝土的定义

混凝土(concrete): 用于一般建设工程的混凝土属于普通混凝土, 简称混凝土。它是由水泥(胶凝材料)、粗细骨料(石子、砂子)、水、矿物掺合料和外加剂等组分按适当比例配合, 经搅拌均匀、浇筑、振实成形及养护等工艺, 硬化而成的类似于石材的复合材料, 简称“砼”(tóng)。

2. 混凝土的分类

1) 按干表观密度分

按干表观密度分为重混凝土、普通混凝土和轻混凝土。

重混凝土: 干表观密度 $> 2800 \text{ kg/m}^3$, 是采用密度较大的重骨料和重水泥配置而成, 具有防辐射性能, 故又称为防辐射混凝土, 主要用于有防辐射要求的工程。

普通混凝土: 干表观密度为 $2000 \sim 2800 \text{ kg/m}^3$, 用于一般建筑和土木工程。

轻混凝土: 干表观密度 $< 1950 \text{ kg/m}^3$, 其中按其孔隙结构分为轻骨料混凝土和多孔混凝土。轻骨料混凝土是采用多孔轻质的骨料(如陶粒)与水泥等组分配制而成; 多孔混凝土中无粗、细骨料, 内部充满大量细小封闭的孔, 孔隙率高达 60% 以上, 多孔混凝土又分为加气混凝土和泡沫混凝土两种。轻混凝土具有良好的保温性, 主要用于轻质结构材料和绝热材料, 如建筑自承重(非承重)隔墙材料。

2) 按强度等级分

按强度等级分为普通混凝土($< \text{C}60$)、高强混凝土($\text{C}60 \sim \text{C}100$)、超高强混凝土($> \text{C}100$)。

3) 按流动性(稠度)分

按流动性分为干硬性混凝土(坍落度 $< 10 \text{ mm}$)、塑性混凝土(坍落度为 $10 \sim 90 \text{ mm}$)、流动性混凝土(坍落度为 $100 \sim 150 \text{ mm}$)、大流动性混凝土(坍落度 $> 160 \text{ mm}$)。

4) 按用途分

按用途分为结构混凝土、防水混凝土、道路混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、防辐射混凝土、装饰混凝土、补偿收缩混凝土(膨胀混凝土)等。

5) 按施工工艺分

按施工工艺分为泵送混凝土、喷射混凝土、水下混凝土、碾压混凝土、离心混凝土、真空混凝土等。

泵送混凝土(pumped concrete): 指可通过泵压作用沿输送管道强制流动到目的地并进行浇筑的混凝土。适用于大体积混凝土、高层建筑、桥梁、隧道、地下工程及施工场地狭小的混凝土工程的施工。

喷射混凝土(sprayed concrete): 是指将水泥、骨料和水按一定比例拌制的混合料装入喷射机, 借助压缩空气, 从喷嘴喷出至受喷面所形成的致密均质的一种混凝土。主要用于隧道的支护, 边坡、坝堤等岩体工程的护面等工程。

水下混凝土(hydraulic concrete): 是将混凝土通过竖立的导管, 依靠混凝土的自重在水中静水中进行灌注的施工方法, 也称导管混凝土。适用于处于地下、江河、海洋中的各种混凝土结构的浇筑。

碾压混凝土(roller compacted concrete): 是用通用硅酸盐水泥、火山灰质掺和料、水、外加剂、砂和分级控制的粗骨料拌制成的无坍落度的干硬性混凝土, 采用与土石坝施工相同的运输及铺筑设备, 用振动碾分层压实而成。它具有施工程序简单、快速、经济、可使用大型通用机械的优点。

离心混凝土(centrifugal concrete): 通过离心机的高速转动, 使得混凝土成形、密实的施工方法。通常用于混凝土管道、空心混凝土管桩、混凝土电杆等的制作。

真空混凝土(vacuum concrete): 在混凝土浇筑振捣完毕而尚未凝固之前, 用真空泵、真空罐等抽真空设备在混凝土拌合物内产生负压, 将其中多余的水分抽出来使混凝土密实的施工工艺。该方法不仅能够提高混凝土的早期强度和缩短拆模期限, 而且还可以提高混凝土的抗压、抗渗、抗磨、抗冻等物理力学性能, 减少混凝土的收缩率。

2.1.2 混凝土结构的定义及分类

混凝土结构(concrete structure): 指以混凝土为主制成的结构, 包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构等。

素混凝土结构(plain concrete structure): 指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构。

钢筋混凝土结构(reinforced concrete structure): 指配置受力普通钢筋的混凝土结构。

预应力混凝土结构(prestressed concrete structure): 指配置受力的预应力筋(钢丝、钢绞线等), 通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。其中按预应力建立方式不同又分为先张法预应力混凝土结构和后张法预应力混凝土结构。

先张法预应力混凝土结构(pretensioned prestressed concrete structure): 在张拉台座上先张拉预应力筋, 然后浇筑混凝土, 待混凝土强度达到规定强度后放张预应力筋, 通过预应力筋的收缩, 由黏结传递在混凝土内建立预应力的混凝土结构。

后张法预应力混凝土结构(post-tensioned prestressed concrete structure): 先浇筑混凝土(在浇筑混凝土过程中应预留安装预应力筋的孔道), 待混凝土强度



常用混凝土浇筑工艺简介



先张法与后张法预应力混凝土结构施工流程简介

达到规定强度后,通过张拉预应力筋并在结构上锚固而建立预应力的混凝土结构。

现浇混凝土结构(cast-in-situ concrete structure):在现场原位支模并整体浇筑而成的混凝土结构。

装配式混凝土结构(precast concrete structure):由预制混凝土构件或部件装配、连接而成的混凝土结构。

2.2 混凝土的组成材料及技术要求

混凝土的基本组成材料为水泥、砂、石子、水,另外根据需要还可掺入适量的矿物掺合料和外加剂。在混凝土中,砂子、石子起骨架作用,称为骨料(或称集料),占混凝土总体积的65%~80%,砂子填充石子的空隙,与石子共同构成坚硬的骨架,起到传递应力、提供耐磨性和抑制由于水泥浆硬化干燥所产生的收缩变形的作用。由水泥、矿物掺合料、外加剂和水形成的水泥浆包裹在骨料表面并填充其剩余空隙,在硬化前水泥浆起润滑作用,赋予拌合物(也称新拌混凝土)一定工作性(也称和易性),便于施工;水泥浆凝结硬化后,则将骨料胶结成一个坚实的整体而形成结构构件。

2.2.1 水泥

水泥呈粉末状,是一种良好的水硬性无机胶凝材料。水泥品种繁多,按主要矿物成分可分为硅酸盐类、铝酸盐类、硫铝酸盐类、铁铝酸盐类等水泥。按用途和性能又可分为通用硅酸盐水泥(用于一般建设工程的水泥)、专用水泥(具有专门用途的水泥。如道路水泥、白水泥等)、特性水泥(指某种性能比较突出的水泥。如快硬水泥、低热水泥、膨胀水泥等)等。本节主要介绍通用硅酸盐水泥的有关知识。

一、通用硅酸盐水泥的组成

通用硅酸盐水泥[common portland cement]:指以硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料(掺合料)制成的水硬性胶凝材料。

1. 硅酸盐水泥熟料

硅酸盐水泥熟料是主要由含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的原料,按适当比例磨成细粉烧至部分熔融所得以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。其中硅酸钙矿物含量不小于66%,氧化钙和氧化硅质量比不小于2.0。其主要矿物组成如下:

硅酸三钙: $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,简写为 C_3S ,含量为37%~60%。

硅酸二钙: $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,简写为 C_2S ,含量为15%~37%。

铝酸三钙: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,简写为 C_3A ,含量为7%~15%。

铁铝酸四钙: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,简写为 C_4AF ,含量为10%~18%。

除此之外,还含有少量的游离氧化钙(CaO)、游离氧化镁(MgO)等。

2. 混合材

用于水泥中的混合材料分为活性混合材和非活性混合材。活性混合材主要有磨细粒化高炉矿渣粉、粉煤灰和火山灰质材料,它们均含有一定数量的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 等氧化物,这些氧化物同样具有类似于水泥熟料矿物的活性;非活性混合材是指活性指标分别低于

矿渣粉、粉煤灰和火山灰质活性材料的矿物质材料，主要有石灰石粉和砂岩粉，其中石灰石粉中的 Al_2O_3 含量应 $\leq 2.5\%$ 。混合材的主要作用是用来调节水泥的物理、化学性能及强度等级，节约水泥熟料用量，降低生产成本。

矿渣粉：是炼铁高炉排出的熔渣，经水淬冷成粒后，再经干燥、磨细而成的粉末材料，其中的钙、硅、铝和锰多处于非结晶的玻璃体，矿渣粉磨得越细，其活性越高。用于水泥中的矿渣粉的烧失量应 $\leq 1.0\%$ 、 SO_3 含量应 $\leq 4.0\%$ 、玻璃体含量应 $\geq 85\%$ ，其他技术要求应符合现行国家标准《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046—2017 的有关规定。

粉煤灰：是电厂煤粉炉烟道气体中收集的粉末，为富含玻璃体的实心或空心球状颗粒，粒径一般为 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ ，具有较强的活性。用于水泥中的粉煤灰的烧失量应 $\leq 8.0\%$ 、 SO_3 含量应 $\leq 3.5\%$ 、28d 活性指数(掺有粉煤灰的水泥与未掺粉煤灰水泥的胶砂抗压强度比)应 $\geq 70\%$ ，其他技术要求应符合现行国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596—2017 的有关规定。

火山灰质活性混合材料：是指具有火山灰性或潜在水硬性，或兼有火山灰性和水硬性的矿物质材料。按其成因分为天然火山灰质混合材料和人工火山灰质混合材料。

天然火山灰质混合材料包括火山灰、凝灰岩、沸石岩、浮石、硅藻土或硅藻石。

人工火山灰质混合材料包括煤矸石、烧页岩、烧黏土、煤渣、硅质渣。

火山灰质混合材料的烧失量应 $\leq 10\%$ ； SO_3 含量应 $\leq 3.5\%$ ；28 d 活性指数应 $\geq 65\%$ ；火山灰性应合格。其他技术要求应符合现行国家标准《用于水泥中的火山灰质混合材料》GB/T 2847—2005 的有关规定。

火山灰性是指一种材料磨成细粉后，单独不具有水硬性，但在常温下与石灰和水拌合后生成具有水硬性产物的性能。可通过在规定时间周期后，水化水泥接触的水溶液中存在的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量与饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液相比较来确定，如果该溶液中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的浓度低于饱和浓度，则判定该火山灰水泥的火山灰性合格。

3. 石膏

用于水泥中的石膏分为天然石膏和工业副产石膏(以 CaSO_4 为主要成分的工业副产物)。天然石膏按矿物组分分为石膏、硬石膏和混合石膏；按品质分为特级、一级、二级、三级、四级五个等级。

石膏(代号为 G)在形式上主要以 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 存在。

硬石膏(代号为 A)在形式上主要以 CaSO_4 存在，且 CaSO_4 的质量分数与 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 CaSO_4 的质量分数之和的比 $\geq 80\%$ 的石膏。

混合石膏(代号为 M)在形式上主要以 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 CaSO_4 存在，且 CaSO_4 的质量分数与 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 CaSO_4 的质量分数之和的比 $< 80\%$ 的石膏。

用于水泥中的石膏应符合《天然石膏》GB/T 5483—2008 中规定的 G 类或 M 类二级及二级以上的石膏或混合石膏。

4. 助磨剂

水泥粉磨时允许加入助磨剂，其加入量应不大于水泥质量的 0.5% 。加入助磨剂可以防止水泥粒子团聚，改善水泥物料流动性，从而提高球磨效率，缩短研磨时间。助磨剂按化学结构分为聚合有机盐类、聚合无机盐类和复合化合物类。目前使用的水泥助磨剂产品大都属于有机物表面活性物质。助磨剂应符合《水泥助磨剂》GB/T 26748—2011 的有关规定。

二、通用硅酸盐水泥的分类

国标《通用硅酸盐水泥》GB175—2007(2018 修订版, 下同)将通用硅酸盐水泥按混合材料的品种和掺量分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥, 各品种的组分和代号见表 2-1。

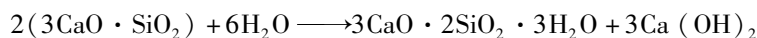
表 2-1 通用硅酸盐水泥的组分

水泥品种	代号	组分	
		(熟料 + 石膏) 含量	混合材料种类及掺量
硅酸盐水泥	P · I	100%	—
	P · II	≥95%	粒化高炉矿渣粉或石灰石粉的掺量 ≤5%
普通硅酸盐水泥(普通水泥)	P · O	≥80% 且 <95%	活性混合材料的总掺量 >5% 且 ≤20%
粉煤灰硅酸盐水泥(粉煤灰水泥)	P · F	≥60% 且 <80%	粉煤灰的掺量 >20% 且 ≤40%
火山灰质硅酸盐水泥(火山灰水泥)	P · P	≥60% 且 <80%	火山灰质混合材的掺量 >20% 且 ≤40%
矿渣硅酸盐水泥(矿渣水泥)	P · S · A	≥50% 且 <80%	粒化高炉矿渣粉的掺量 >20% 且 ≤50%
	P · S · B	≥30% 且 <50%	粒化高炉矿渣粉的掺量 >50% 且 ≤70%
复合硅酸盐水泥(复合水泥)	P · C	≥50% 且 <80%	活性和非活性混合材料的总掺量 >20% 且 ≤50%

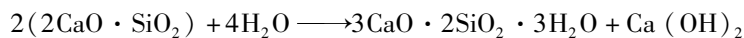
三、水泥的凝结硬化与影响因素

1. 硅酸盐水泥的凝结硬化

水泥与水拌合成为具有可塑性的水泥浆，熟料矿物表面立刻与水发生化学反应(水化)，同时放出一定热量(水化热)，水泥熟料中各矿物成分的水化反应式如下：



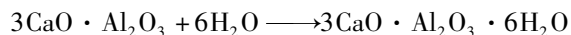
硅酸三钙 水化硅酸钙凝胶 氢氧化钙晶体



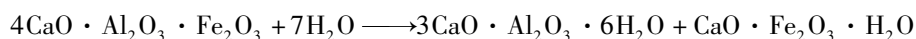
硅酸二钙

水化硅酸钙凝胶

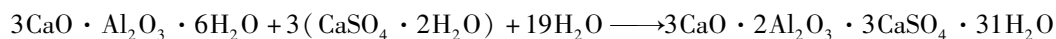
氢氧化钙晶体



铝酸三钙 水化铝酸钙晶体



铁铝酸四钙	水化铝酸钙晶体	水化铁酸钙凝胶
-------	---------	---------



水化铝酸钙晶体	石膏	高硫型水化硫铝酸钙(钙矾石)
---------	----	----------------

从上述反应式中可以看出,硅酸盐水泥熟料与水作用后,生成的主要水化产物有硅酸钙和铁酸钙凝胶,氢氧化钙、铝酸钙和硫铝酸钙晶体。

随着时间的推移，水化反应不断深入，水化产物逐渐增多，水泥浆体逐渐变稠，开始失去可塑性(称为初凝)，随着水化反应的继续进行，水泥浆体最终完全失去可塑性(称为终凝)，并且开始形成一定的强度，往后随着水化反应的持续进行，水化产物不断增加，强度会越来越高，最终变成坚硬的石状固体——水泥石，这一过程称为硬化。水泥的凝结硬化过程是人为划分的，实际上水泥的凝结硬化是一个很复杂的物理化学变化过程。

2. 影响硅酸盐水泥凝结硬化的因素

影响水泥凝结硬化的因素主要有水泥熟料矿物组成、石膏掺量、水泥颗粒的细度、拌合用水量、混合材料的掺量、养护条件、储存条件等。

1) 水泥熟料的矿物组成

硅酸盐水泥是由具有不同特性的多种硅酸盐水泥熟料矿物组成的混合物。每一种矿物成分单独与水作用时具有不同的水化特性，对水泥的强度、水化速度、水化热、耐腐蚀性、干缩性的影响也不尽相同，具体见表 2-2。

表 2-2 硅酸盐水泥熟料矿物特性

矿物名称	水化速度	水化热	强度	耐腐蚀性	干缩性
硅酸三钙	快	大	高	差	中
硅酸二钙	慢	小	早期低，后期高	好	小
铝酸三钙	最快	最大	低	最差	大
铁铝酸四钙	快	中	低	中	小

通过改变水泥熟料中各种矿物成分之间的相对含量，水泥的性质也会发生相应改变，从而可以生产出具有不同性质的水泥。如提高硅酸三钙的含量，可制成高强度水泥；提高硅酸三钙和铝酸三钙的含量，可制得快硬早强水泥；降低硅酸三钙和铝酸三钙的含量，可制得低水化热水泥。

2) 石膏掺量

加入石膏可延缓水泥的凝结。因为石膏会与水化铝酸钙反应生成难溶的水化硫铝酸钙晶体，覆盖于未水化的铝酸三钙周围，阻止其继续水化。但石膏掺量不能过多，一般不宜超过 3.5%，否则会引起硬化后体积安定性不良。

3) 水泥颗粒的粗细

水泥颗粒愈细，总表面积就愈大，与水反应时接触面积就越大，水泥的水化反应速度就愈快，凝结硬化也就愈快。

4) 拌合用水量

拌合水泥浆时，首先应保证水泥充分水化所需的水分，同时尚应满足施工所需的流动性和可塑性。如果拌合用水量过多，水泥浆过稀，加大了水化产物之间的距离，减弱了分子间的作用力，延缓了水泥的凝结硬化，同时多余的水在水泥石中形成较多的毛细孔，降低水泥石的密实度，从而使水泥石的强度和耐久性下降。

5) 养护条件及养护龄期

养护时的温度和湿度是保障水泥水化和凝结硬化的重要外界条件。在保证湿度的前提

下,提高养护温度,可以促进水泥水化,加速凝结硬化,有利于水泥强度增长;温度降低时,水化反应减慢,低于 0°C 时,水化反应基本停止;当水结冰时,由于体积膨胀,还会使水泥石结构遭受破坏。养护龄期越长,其强度越高。硅酸盐水泥的强度一般在 $3\sim 7\text{ d}$ 内增长最快, 28 d 以后增长缓慢,但随着时间的推移,强度仍有增长。

6) 混合材料掺量

在水泥中掺入活性混合材料后,水泥中的熟料矿物成分含量相对减少,从而使其凝结硬化变慢。因此,活性混合材料可用来调节水泥强度等级、降低生产成本,同时还能取得废物利用和节能环保的功效。

7) 储存条件

水泥具有较强的吸湿性,受潮的水泥因部分水化而结块,从而失去胶结能力,硬化后强度严重降低。储存过久的水泥,因过多吸收了空气中的水分和 CO_2 而发生缓慢的水化和碳化现象,影响了水泥的凝结硬化,导致强度下降。

四、通用硅酸盐水泥的技术要求

通用硅酸盐水泥的技术要求包括化学指标和物理力学指标两方面。

1. 化学指标

化学指标包括不溶物含量、烧失量、氧化镁含量、三氧化硫含量、氯离子含量、碱含量(选择性指标)。

不溶物:是指水泥经酸和碱处理后,不能被溶解的残余物。主要由水泥原料、混合材料和石膏中的杂质产生。不溶物含量高会影响水泥的活性及黏结质量。

烧失量:是指水泥在 $(950\pm 25)^{\circ}\text{C}$ 下灼烧后的质量损失率。一方面,水泥煅烧不理想或者受潮后,会导致烧失量增加;另一方面,水泥中所掺活性混合材料中的杂质太多,也会导致烧失量较大。烧失量大会使水泥标准稠度用水量增加、与外加剂相容性变差、强度降低、凝结时间延长。

氧化镁:是指熟料中的游离氧化镁。由于氧化镁水化缓慢,且水化生成的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体体积膨胀可达 1.5 倍,过量会引起水泥石体积安定性不良,导致结构物破坏。

三氧化硫:主要是在水泥的生产过程中因掺入过量石膏带入的。过量的三氧化硫会与水化铝酸钙发生水化反应,生成较多的硫铝酸钙晶体,产生较大的体积膨胀,也会引起水泥石体积安定性不良,导致结构物破坏。

氯离子含量:水泥中的氯离子含量较高时,容易使钢筋混凝土结构中的钢筋产生锈蚀,降低结构的耐久性。

碱含量:是指水泥中 Na_2O 与 K_2O 的总量,碱含量的大小用 $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 的计算值来表示。当水泥中的碱含量较高,骨料又具有一定的活性时,在潮湿环境中容易产生碱-骨料反应,导致结构损坏,降低结构的耐久性。

水泥化学指标的检验按《水泥化学分析方法》GB/T176—2017的有关规定进行。

《通用硅酸盐水泥》GB175—2007对通用硅酸盐水泥中各化学指标的限量见表2-3。

凡水泥中的不溶物、氧化镁、三氧化硫、氯离子含量及烧失量中的任一项不符合国家标准要求时,即为不合格品。氧化镁、三氧化硫含量不合格的水泥应报废处理,不溶物、氯离子含量和烧失量不合格的水泥可用于不重要的素混凝土垫层。

表 2-3 通用硅酸盐水泥的化学指标

水泥品种	代号	技 术 指 标					
		不溶物/%	烧失量/%	氧化镁/%	三氧化硫/%	氯离子/%	碱含量/%
硅酸盐水泥	P · I	≤0.75	≤3.0	≤5.0	≤3.5	≤0.06(0.03)	≤0.60 或由供需双方商定
	P · II	≤1.50	≤3.5				
普通水泥	P · O	—	≤5.0	≤5.0	≤3.5	≤0.06(0.03)	≤0.60 或由供需双方商定
矿渣水泥	P · S · A	—	—	≤6.0	≤4.0		
	P · S · B	—	—	—			
火山灰水泥	P · P	—	—	≤6.0	≤3.5		
粉煤灰水泥	P · F	—	—				
复合水泥	P · C	—	—				

注：表中括号中的数字为《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 对高性能混凝土的要求。

2. 物理指标

物理指标包括细度(选择性指标)、凝结时间、安定性、强度。

1) 细度

细度是指水泥颗粒的粗细程度。水泥颗粒愈细，其表面积就愈大，与水反应时接触面积就愈大，水化速度就愈快，水化反应愈完全、充分，早期强度增长就愈快。但水泥颗粒过细，硬化后收缩量较大，在储运过程中易受潮而降低活性，同时水泥的生产成本也越高。因此，应合理控制水泥细度。

国标 GB 175—2007 中规定：硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的比表面积应 $\geq 300 \text{ m}^2/\text{kg}$ ；矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥 $80 \mu\text{m}$ 方孔筛筛余率应 $\leq 10\%$ 或 $45 \mu\text{m}$ 方孔筛筛余率应 $\leq 30\%$ 。

《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 及《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 中规定硅酸盐水泥和普通水泥的比表面积应在 $300 \sim 350 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

2) 凝结时间

水泥凝结时间分初凝和终凝。初凝时间是指从水泥加水拌合时起，至水泥浆开始失去可塑性所需要的时间；终凝时间是指从水泥加水拌合时起，至水泥浆完全失去可塑性，并开始产生强度所需要的时间。

国标 GB 175—2007 中规定：硅酸盐水泥的初凝时间应 $\geq 45 \text{ min}$ ，终凝时间应 $\leq 390 \text{ min}$ ；普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥的初凝时间应 $\geq 45 \text{ min}$ ，终凝时间应 $\leq 600 \text{ min}$ 。

水泥凝结时间指标的确定，是从便于施工的角度来考虑的。水泥的初凝不宜过早，以便施工时有足够的时间来完成混凝土或砂浆的搅拌、运输、浇筑、捣实或砌筑等操作；但水泥的终凝不宜过迟，以便使初凝后的混凝土等能尽快地硬化，缩短施工工期，不影响下一步施工的正常进行。

水泥的凝结时间与水泥熟料的矿物组成、拌合用水量、水泥颗粒的细度、周围环境的温度与湿度等因素有关。水泥熟料中铝酸三钙含量增加，水泥凝结硬化愈快；水泥颗粒愈细，水化作用愈快，凝结时间愈短；拌合用水量少、养护时



水泥标准稠度用水量检测



水泥凝结时间检测

外界温度和湿度高，可以加快水泥的凝结硬化。

水泥的凝结时间按《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T1346—2011 规定的方法进行测定。

3) 安定性

安定性是指水泥浆在凝结硬化过程中，体积变化是否均匀的性质。通用硅酸盐水泥在凝结硬化过程中体积略有收缩，一般情况下水泥石的体积变化比较均匀，即体积安定性良好。如果水泥浆在凝结硬化过程中体积变化不均匀，会导致水泥石出现翘曲变形、开裂等现象，即体积安定性不良。

引起水泥石体积安定性不良的主要因素是水泥熟料中的游离氧化钙($f\text{-CaO}$)、游离氧化镁($f\text{-MgO}$)含量过多或石膏(SO_3)掺量过多等。水泥熟料中所含的游离氧化钙和氧化镁均属过烧状态，水化速度很慢，在水泥凝结硬化后才慢慢开始与水反应，生成体积膨胀性物质—— $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体，在水泥石中产生膨胀应力，引起水泥石翘曲、开裂或崩溃。如果水泥中石膏掺量过多，在水泥硬化以后，多余的石膏还会继续与水泥石中的水化铝酸钙反应，生成水化硫铝酸钙晶体，体积增大 1.5 倍，从而导致水泥石开裂。

《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》GB/T1346—2011 规定，采用沸煮法检验水泥中过量游离氧化钙所引起的安定性不良。检验时可采用雷氏夹法(标准法)或试饼法(代用法)，有争议时以雷氏夹法为准。国标 GB 175—2007 中规定，采用沸煮法检验水泥安定性必须合格。



水泥安定性检测

4) 强度

水泥的强度是指水泥胶砂试件的抗折、抗压强度。它是划分水泥强度等级的依据。

通用硅酸盐水泥根据其 3 d、28 d 的抗折强度和抗压强度的大小划分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 若干个强度等级，其中带 R 的为早强型水泥。各强度等级水泥在各龄期的强度值不得低于现行国家标准 GB 175—2007 的规定值，见表 2-4。

表 2-4 通用硅酸盐水泥各龄期的强度要求

水泥品种	强度等级	抗压强度/MPa, $\geq$		抗折强度/MPa, $\geq$	
		3 d	28 d	3 d	28 d
硅酸盐水泥 (P·I 或 P·II)	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
	62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
	62.5R	32.0	62.5	5.5	8.0

续上表

水泥品种	强度等级	抗压强度/MPa, ≥		抗折强度/MPa, ≥	
		3 d	28 d	3 d	28 d
普通硅酸盐水泥 (P·O)	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
矿渣硅酸盐水泥 (P·S)	32.5	10.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	15.0	32.5	3.5	5.5
火山灰质硅酸盐 水泥(P·P)	42.5	15.0	42.5	3.5	6.5
粉煤灰硅酸盐 水泥(P·F)	42.5R	19.0	42.5	4.0	6.5
复合硅酸盐水泥 (P·C)	52.5	21.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	23.0	52.5	4.5	7.0

注: GB175—2007(2018 修订版)中已取消了 32.5 和 32.5R 的复合硅酸盐水泥。



《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》GB/T17671—1999 规定水泥胶砂配合比为水泥:ISO 标准砂:水=1:3:0.5(质量比),按规定的方法制成 40 mm×40 mm×160 mm 的标准试件,在标准条件[温度(20±1)℃,相对湿度≥90%]下或在(20±1)℃的静水中进行养护,分别测其 3 d、28 d 的抗折强度和抗压强度,然后根据 3 d 和 28 d 的抗折强度与抗压强度来评定水泥的强度等级。

抗折强度值的计算:抗折强度(R_f)按式(2-1)计算,精确至 0.1 MPa。也可直接从抗折仪上读取。

$$R_f = \frac{3F_f \cdot L}{2b^3} = \frac{3 \times 100F_f}{2 \times 40^3} \quad (2-1)$$

式中: F_f ——破坏荷载, N;

L ——支持圆柱之间的距离(100 mm);

b ——试件正方形截面的边长(40mm)。

抗折强度值的确定:以 1 组 3 个棱柱体抗折强度值的平均值作为试验结果。但是,当 3 个强度值中有一个超出其平均值±10%时,应剔除该值后,再取余下 2 个的平均值作为抗折强度试验结果;若有 2 个强度值超出其平均值±10%时,则此组结果作废。

抗压强度的计算:抗压强度(R_c)按式(2-2)计算,精确至 0.1 MPa:

$$R_c = \frac{F_c}{A} = \frac{F_c}{40 \times 40} \quad (2-2)$$

式中: F_c ——破坏荷载, N;

A ——试件受压面积, 40×40 mm²。

抗压强度值的确定:以 1 组 3 个棱柱体上得到的 6 个半截棱柱体的抗压强度测定值的算术平均值作为试验结果。但是,当 6 个测定值中有一个超出其平均值的±10%时,就应剔除该值,而以剩下 5 个测定值的平均值为试验结果;若剩下的 5 个测定值中仍有超过其平均值±10%的,则此组结果作废。

水泥的强度除了与水泥的矿物组成、细度有关外，还与用水量、试件制作方法、养护条件和养护时间等条件有关。水泥熟料中硅酸三钙、硅酸二钙含量愈高，水泥强度就愈高；水泥颗粒愈细，水化反应完全充分，水泥强度就愈高；拌合用水量少，硬化后水泥石密实度增大，水泥强度提高；保证一定的温度和湿度，有利于水泥的水化，水泥强度提高。

凡水泥的凝结时间、安定性、强度中的任一项不符合国家标准要求时，即为不合格品。凝结时间、安定性不合格的水泥应报废，强度不合格的水泥可根据其实际强度降级使用。

【例】 某普通硅酸盐水泥，强度等级为42.5级，经抽样检验测得其3 d和28 d的抗折和抗压荷载见表2-5(ISO强度)。试计算该水泥的抗折、抗压强度值，并评定该水泥的强度是否合格。

表 2-5

试件 编号	抗折				抗压			
	3 d		28 d		3 d		28 d	
	荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa
1	1.62	3.8	3.42	8.0	37.1	23.2	73.7	46.1
					38.6	24.1	71.8	44.9
2	1.66	3.9	3.31	7.8	37.9	23.7	75.2	47.0
					37.6	23.5	74.4	46.5
3	1.54	3.6	2.75	6.4	38.9	24.3	63.5	39.7
					38.2	23.9	72.6	45.4
水泥强度评定值		3.8		7.9		23.8		46.0

解：1. 计算试件的抗折、抗压强度：

试件的抗折强度按式(2-1)计算、试件的抗压强度按式(2-2)计算，结果见表2-5。

2. 计算抗折、抗压强度平均值：

$$3\text{ d 抗折强度平均值: } \overline{R_f} = \frac{3.8 + 3.9 + 3.6}{3} = 3.8 (\text{MPa})$$

$$3\text{ d 抗压强度平均值: } \overline{R_c} = \frac{23.2 + 24.1 + 23.7 + 23.5 + 24.3 + 23.9}{6} = 23.8 (\text{MPa})$$

$$28\text{ d 抗折强度平均值: } \overline{R_f} = \frac{8.0 + 7.8 + 6.4}{3} = 7.4 (\text{MPa})$$

$$28\text{ d 抗压强度平均值: } \overline{R_c} = \frac{46.1 + 44.9 + 47.0 + 46.5 + 39.7 + 45.4}{6} = 44.9 (\text{MPa})$$

3. 抗折、抗压强度的确定：

1) 3 d 抗折强度：经检查3个测值均在 $[0.9 \overline{R_f}, 1.1 \overline{R_f}] = [3.4, 4.2]$ MPa 的范围内，没有超出其平均值 $\pm 10\%$ 的，故取3个测值的平均值作为该水泥3d的抗折强度值。

2) 28 d 抗折强度：经检查3个测值中的6.4 MPa 不在 $[0.9 \overline{R_f}, 1.1 \overline{R_f}] = [6.7, 8.1]$ MPa 的范围内，故应舍去6.4 MPa，取余下2个测值的平均值作为该组试件的抗折强度值，即该水泥28 d的抗折强度值为： $(8.0 + 7.8)/2 = 7.9$ (MPa)。

3) 3d 抗压强度：经检查6个测值均在 $[0.9 \overline{R_c}, 1.1 \overline{R_c}] = [21.4, 26.2]$ MPa 的范围内，没有超出其平均值 $\pm 10\%$ 的，故取6个测值的平均值作为该水泥28 d的抗压强度值。

4)28 d 抗压强度:经检查 6 个测值中的 39.7 MPa 不在 $[0.9 \overline{R_c}, 1.1 \overline{R_c}] = [40.4, 49.4]$ MPa 范围内,故应舍去该值,重新计算余下的 5 个测值的平均值,经检查,余下的 5 个测值中没有超出余下的 5 个测值的平均值 $\pm 10\%$ 的,故取余下的 5 个测值的平均值作为该水泥 28 d 的抗压强度值,即: $(46.1 + 44.9 + 47.0 + 46.5 + 45.4)/5 = 46.0$ (MPa)。

结论:因该水泥 3 d、28 d 的抗折和抗压强度均大于《通用硅酸盐水泥》GB175—2007 对 P. O42.5 水泥强度的规定值,故该水泥强度合格。

五、通用硅酸盐水泥的特性与应用

由于通用硅酸盐水泥中熟料含量、混合材的种类与掺量不同,故其特性也有所不同。

1. 硅酸盐水泥的特性与应用

由于硅酸盐水泥中熟料多,故其硅酸三钙和铝酸三钙的含量较高,因此硅酸盐水泥具有快硬、早强;抗冻性、耐磨性好;干缩性小;抗碳化性能好等优点。但是,由于其水化速度快,水化热大,故对大体积混凝土工程不利;又由于水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化铝酸钙的含量较多,不容易被空气中的 CO_2 完全碳化,水泥石能保持一定的碱度,对钢筋提供良好的碱性保护,故其具有良好的抗碳化性和护筋性,但 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化铝酸钙易与酸性物质发生中和反应而被腐蚀,故其耐腐蚀性能较差;硅酸盐水泥受热到 250 ~ 300℃ 时,水化产物开始脱水,体积收缩,强度开始下降,当温度达 400 ~ 600℃ 时,强度明显下降,700 ~ 1000℃ 时,强度降低更多,甚至完全破坏,故其耐热性差。因此,硅酸盐水泥适用于早强混凝土、高强混凝土、预应力混凝土、抗冻混凝土、耐磨混凝土、抗碳化混凝土等工程,不适用于大体积混凝土、受化学及海水侵蚀的混凝土、耐热要求较高的混凝土、有流动水及压力水作用的混凝土等工程。普通硅酸盐水泥的特性与应用与硅酸盐水泥相近。

2. 掺活性混合材硅酸盐水泥的特性与应用

掺有活性混合材的矿渣水泥、粉煤灰水泥、火山灰水泥及复合水泥,是由硅酸盐水泥熟料和活性混合材共同组成的硅酸盐水泥,由于分别掺入了磨细矿渣粉、粉煤灰、火山灰质等活性混合材,故水泥中水泥熟料含量相对减少,因此它们具有以下特点:

1)凝结硬化慢,早期强度低,后期强度发展较快;水化热低;耐腐蚀性能好;抗冻性差;抗碳化能力较差。

由于混合材矿物的活性较熟料矿物活性低,水泥的水化首先是水泥熟料矿物成分的水化,随后是水泥的水化产物氢氧化钙与混合材料中的 SiO_2 、 Fe_2O_3 发生二次水化反应,生成硅酸钙和铁酸钙凝胶,并且二次水化反应速度在常温下较慢,所以,这些水泥的水化速度慢、水化热低、早期强度较低。但在硬化后期,随着水化产物的不断增多,水泥的后期强度发展较快;另一方面,由于水泥熟料含量少,水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较少,而且二次水化反应还要进一步消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,使水泥石结构中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量更低,因此,这些水泥抵抗海水、软水及硫酸盐腐蚀的能力较强,但抗碳化能力较差。因此,掺有磨细矿渣粉、粉煤灰、火山质混合材的水泥适用于大体积混凝土工程、蒸汽养护混凝土构件、抗硫酸盐侵蚀的混凝土工程和一般钢筋混凝土工程,不适用早期强度要求较高的混凝土、有抗碳化要求的混凝土、有抗冻要求的混凝土等工程。

2)矿渣水泥保水性差、容易泌水、干缩性大、耐热性好、抗渗性差。

由于粒化高炉矿渣是一种耐热材料,故矿渣水泥耐热性好,可耐 700℃ 高温,可用于热工

窑炉的基础等工程；又由于磨细的矿渣粉多孔且棱角较多，故拌合用水量较大，且矿渣粉的亲水能力差，泌水性较强，在混凝土施工中由于泌水而形成毛细管通道或粗大孔隙，水分的蒸发又容易引起干缩，致使矿渣水泥的抗渗性、抗冻性较差，收缩量较大，因此，矿渣水泥非常适用于高温车间和有耐热、耐火要求的混凝土工程及砂浆，不适用有抗冻、抗渗要求的混凝土工程。

3) 火山灰水泥保水性好、抗渗性好，耐磨性差。

由于火山灰质混合材含有大量的微细孔，故保水性好，在潮湿的条件下养护，可以形成较多的水化硅酸钙凝胶，使水泥石结构比较致密，因而火山灰质硅酸盐水泥具有较好的抗渗性和耐水性，可以优先选用于抗渗工程；但因其水化产物中含有大量胶体，长期在干燥环境中胶体就会脱水产生严重收缩，导致干缩裂纹，且表面容易产生起粉现象，耐磨性能差。因此，火山灰水泥不适用长期处于干燥环境的混凝土和有耐磨要求的混凝土等工程。

4) 粉煤灰水泥保水性好、干缩性小、抗裂性好。

由于粉煤灰为玻璃体的球形颗粒，结构比较致密，比表面积小，对水的吸附能力较弱，拌合时需水量较少，所以粉煤灰水泥保水性好、干缩性比较小、抗裂性能好，非常适用于有抗裂性能要求的混凝土工程；但不适用于有耐磨要求、长期处于干燥环境、有抗冻要求和有抗碳化要求的混凝土工程。

5) 复合水泥的特性取决于所掺混合材料的种类、掺量及其相对比例。

由于在复合硅酸盐水泥中掺用了两种以上混合材，可以相互补充、取长补短，克服了掺入单一混合材水泥的一些弊病。如在矿渣硅酸盐水泥中掺入石灰石粉不仅能够改善矿渣硅酸盐水泥的泌水性，提高早期强度，而且还能保证水泥石后期强度的增长。在需水量大的火山灰质硅酸盐水泥中掺入矿渣粉等，能有效减少水泥的需水量。复合水泥的使用，应根据掺入的混合材种类，参照掺有混合材的硅酸盐水泥的适用范围和工程经验合理选用。

3. 水泥强度等级的选用

水泥强度等级应与混凝土的设计强度等级相适应。原则上配制高强度等级的混凝土，选用高强度等级的水泥；配制低强度等级的混凝土，选用低强度等级的水泥。如用高强度等级的水泥来配制低强度等级的混凝土，会使水泥用量偏少，影响混凝土的工作性、密实度和耐久性；如用低强度等级水泥来配制高强度等级的混凝土，会使水泥用量过多，不经济，且混凝土的干缩大，容易出现干缩裂纹，从而影响混凝土结构的耐久性。根据经验，水泥与混凝土强度等级之比，对于 C30 及以下的混凝土，宜为 1.1 ~ 2.2；对于 C35 及以上的混凝土宜为 0.9 ~ 1.5。

六、水泥的验收与施工现场管理

1. 水泥的验收

水泥验收的主要内容包括：

1) 检查、核对水泥出厂的质量检验报告

水泥出厂的质量检验报告，不仅是验收水泥的技术保证依据，也是施工单位长期保存的技术资料，还可以作为工程质量验收时的技术凭证。要核对试验报告的编号与实收水泥的编号是否一致，试验项目是否齐全，试验测值是否达到国家标准要求。

2) 核对包装及标志是否符合

水泥的包装及标志必须符合标准规定。水泥的包装可以采用袋装，也可以散装。袋装水

泥每袋净含量 50 kg，且不得少于标志质量的 99%，随机抽取 20 袋总质量不得少于 1000 kg。

水泥包装袋上应清楚标明产品名称、代号、净含量、强度等级、生产许可证编号、生产者名称和地址、出厂编号、执行标准号、包装日期和主要混合材料名称。掺火山灰质混合材料的普通硅酸盐水泥与矿渣硅酸盐水泥还应标上“掺火山灰”的字样。包装袋两侧应印有水泥名称和强度等级。硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的印刷采用红色；矿渣硅酸盐水泥的印刷采用绿色；火山灰质硅酸盐水泥和粉煤灰硅酸盐水泥采用黑色。散装水泥运输时应提交与袋装标志相同内容的卡片。

通过对水泥包装及标志的核对，不仅可以发现包装的完好程度，盘点和检验数量是否给足，还能核对所购水泥与到货的产品是否完全一致，及时发现和纠正可能出现的产品混杂现象。

3) 抽样检验

检验批的划分：以同一生产单位生产的同品种、同强度等级的水泥为一批。散装水泥以 500 t/批；袋装水泥以 200 t/批，当不足上述数量时，也按一批计。

抽样方法：对于袋装水泥，从检验批中随机抽取不少于 20 袋水泥，用专用取样管，沿水泥包装袋对角线插入抽取等量的水泥样品，总量至少 12 kg；对于散装水泥，则从散装水泥卸料处或输送水泥运输机具的出料处，在流动的水泥流中随机抽取水泥样品，总量至少 12 kg。

检验项目：水泥物理指标检测项目主要有水泥的凝结时间、体积安定性、胶砂强度；化学指标根据具体的工程项目需要而定。经检验合格的水泥可以验收。

2. 水泥的施工现场管理

水泥在施工现场储存保管中应注意如下几方面：

1) 应分类储存。不同品种、强度等级、生产厂家、出厂日期的水泥，应分别储存，并加以标识，不得混杂。

2) 应防水防潮，做到“上盖下垫”。水泥在存放过程中很容易吸收空气中的水分产生水化作用，凝结成块，降低水泥强度，影响水泥的正常使用。所以，水泥应在干燥环境条件下存放。袋装水泥在存放时，应用木料垫高约 30 cm，四周离墙不少于 30 cm，堆置高度一般不超过 10 袋。存放散装水泥时，应将水泥储存于专用的水泥罐中。对于受潮水泥可以根据受潮程度，通过试验后的具体情况进行使用。受潮水泥可参照表 2-6 进行处理。

表 2-6 受潮水泥的处理

水泥受潮程度	处理方法	使用场合
有粉块，用手可以捏成粉末，无硬块	压碎粉块	经检验按实际强度等级使用
部分结成硬块	筛除硬块，压碎粉块	经检验按实际强度等级使用。用于不重要、受力小的部位或配制砂浆
大部分结成硬块	将硬块粉碎磨细	不能作为水泥使用，可作为混凝土的掺合料使用

3) 储存期不宜过长。水泥储存时间过长，水泥会吸收空气中的水分缓慢水化而降低强度。袋装水泥储存 3 个月后，强度降低 10% ~ 20%；6 个月后，降低 15% ~ 30%；1 年后降低 25% ~ 40%。因此，水泥储存期不宜超过 3 个月，使用时应做到先存先用，不可储存过久。超过 3 个月的水泥需重新进行质量检验，根据检验结果酌情使用。

七、水泥石的腐蚀与防治措施

1. 水泥石的腐蚀

引起水泥石腐蚀的根本原因：一是水泥石中存在易被腐蚀的氢氧化钙和铝酸钙；其次是水泥石本身不密实，腐蚀性介质易于深入到水泥石内部，加速腐蚀的进程；三是环境中有无侵蚀性介质及介质的浓度等。硅酸盐水泥石的腐蚀主要表现在如下四个方面：

1) 软水侵蚀(溶出性侵蚀)

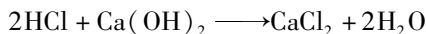
软水是指重碳酸盐(含 HCO_3^- 的盐)含量较小或不含重碳酸盐的水。如雨水、雪水、蒸馏水、工厂冷凝水以及含重碳酸盐很少的河水与湖水等均属于软水。

水泥石长期处于软水环境中，水化产物氢氧化钙会不断溶解，引起水泥石中其他水化产物发生分解，导致水泥石结构孔隙增大，强度降低，甚至破坏，故软水侵蚀又称为溶出性侵蚀。在静水及无压力水的情况下，由于周围的软水容易被溶出的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 所饱和，使溶出作用停止，故对水泥石的影响不大；但在流动水及压力水的作用下，这种溶出作用将会不断地持续下去，水泥石结构的破坏将由表及里不断地进行下去。当水泥石与环境中的硬水接触时，水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与重碳酸盐发生反应生成的几乎不溶于水的碳酸钙积聚在水泥石的孔隙内，形成致密的保护层，可以阻止外界水的继续侵入，从而可阻止水化产物的溶出。

2) 酸类腐蚀

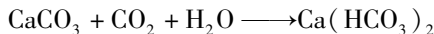
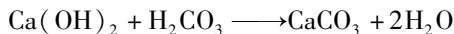
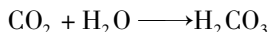
由于水泥石中氢氧化钙和铝酸钙的存在，使得水泥石呈弱碱性，它们能与大多数无机酸和有机酸发生中和反应，生成的化合物或者易溶于水，或者在水泥石孔隙内结晶膨胀，产生较大的膨胀应力，导致水泥石结构破坏。

例如盐酸与水泥石中的氢氧化钙反应，生成的氯化钙易溶于水中。



硫酸与水泥石中的氢氧化钙发生反应，生成体积膨胀性物质二水石膏，二水石膏再与水泥石中的铝酸钙作用，生成高硫型硫铝酸钙(钙矾石)，在水泥石内产生较大的膨胀应力。

在工业污水、地下水中，常溶解有较多的二氧化碳，它对水泥石的腐蚀作用是二氧化碳溶于水后形成碳酸，再与水泥石中的氢氧化钙反应生成碳酸钙，碳酸钙再与含碳酸的水进一步作用，生成更易溶于水的碳酸氢钙，从而导致水泥石中其他水化产物的分解，引起水泥石结构破坏。



3) 盐类腐蚀

在一些海水、沼泽水以及工业污水中，常含有钠、钾、铵等硫酸盐。它们能与水泥石中的氢氧化钙发生化学反应，生成硫酸钙。硫酸钙进一步再与水泥石中的水化产物铝酸钙作用，生成具有针状晶体的高硫型硫铝酸钙。高硫型硫铝酸钙晶体中含有大量的结晶水，体积膨胀可达 1.5 倍，致使水泥石产生开裂甚至毁坏。

在海水及地下水中，还常常含有大量的镁盐，主要是硫酸镁和氯化镁。它们与水泥石中的氢氧化钙作用，生成的氢氧化镁松软而无胶凝能力。氯化钙易溶于水，且对钢筋有腐蚀作用；硫酸钙则会引起硫酸盐的破坏作用。

4) 强碱腐蚀

在一般情况下水泥石能够抵抗碱的腐蚀。但如果水泥石结构长期处于较高浓度的碱溶液(如氢氧化钠溶液)中,也会产生腐蚀破坏。

水泥石的腐蚀是一个极为复杂的物理化学变化过程,水泥石受到腐蚀介质作用时,往往是几种类型的腐蚀同时存在,相互影响。

2. 水泥石腐蚀的防治措施

1) 合理选用水泥品种

根据工程所处的环境特点,合理选用水泥品种。在有腐蚀性介质存在的工程环境中,应选用水化产物氢氧化钙和铝酸钙含量比较低的水泥,选择混合材掺量较大的水泥,以提高水泥石的耐腐蚀性能。

2) 提高水泥石的密实度,改善孔隙结构

通过掺入外加剂减少用水量,改进施工工艺等技术措施,降低水胶比,提高水泥石的密实度、改善孔隙结构,以提高水泥石的抗腐蚀能力。

3) 敷设保护层

在水泥石表面敷设耐腐蚀的材料,如防腐涂料、耐酸陶瓷、塑料、沥青等,阻止侵蚀性介质与水泥石的直接接触,以达到抗侵蚀的目的。

2.2.2 骨料

一、分类

用于混凝土中的骨料分为细骨料(砂子)和粗骨料(卵石、碎石)两种。

公称粒径 ≤ 5.0 mm 的骨料称为细骨料,常称为砂。包括天然砂和机制砂两大类。

天然砂:是指自然条件形成的,经人工开采和筛分的公称粒径 ≤ 5.0 mm 的岩石颗粒。

机制砂:是指经除土开采、机械破碎、筛分而成的公称粒径 ≤ 5.0 mm 的岩石颗粒。

公称粒径 > 5 mm 的岩石颗粒称为粗骨料,常称为石子。包括天然卵石和机制碎石两种。

卵石:也称砾石,是指由自然风化、水流搬运和分选、堆积形成的公称粒径 > 5.0 mm 的岩石颗粒。其表面圆滑,空隙率和总表面积均较小,拌制混凝土时水泥浆需用量较少,和易性较好,但与水泥浆的胶结力不如碎石。

碎石:是指由天然岩石、卵石或矿山废石经机械破碎、筛分制成的公称粒径 > 5.0 mm 的岩石颗粒。颗粒多棱角,表面粗糙,空隙率和总表面积均较大,用碎石拌制的混凝土,所需的水泥浆较多,但水泥浆与碎石的胶结力较强。因此,拌制较高强度混凝土时,宜用碎石或碎卵石。

二、技术要求

混凝土用粗细骨料的技术要求主要包括:颗粒级配、粗细程度、针片状颗粒含量(粗骨料)、有害物质含量、压碎指标、抗压强度、坚固性、吸水率、密度、碱活性等。

1. 颗粒级配

颗粒级配是指不同粒径的颗粒搭配比例。骨料的级配良好,则其空隙率较小,堆积密度较大。这样不仅用来填充骨料空隙的浆料少,多余的浆料可形成较厚的包裹层,有利于水泥浆的润滑与胶结作用,而且可得到较高的密实度,从而使混凝土的强度和耐久性得以提高。

1) 颗粒级配的划分

混凝土用砂根据其在筛孔边长为 0.60 mm 的方孔(对应于公称直径为 0.63 mm)筛上的累计筛余百分率(β_4)划分为三个级配区。Ⅰ区 $\beta_4 = 71\% \sim 85\%$ (偏粗)、Ⅱ区 $\beta_4 = 41\% \sim 70\%$ (粗细适中)、Ⅲ区 $\beta_4 = 16\% \sim 40\%$ (偏细)。《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52—2006、《建设用砂》GB/T 14684—2011、《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 及《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 对砂的级配区的划分见表 2-7。

表 2-7 砂的颗粒级配区

级配区 累计筛余率/% 方孔筛筛孔边长/mm		Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区
4.75		10 ~ 0	10 ~ 0	10 ~ 0
2.36		35 ~ 5	25 ~ 0	15 ~ 0
1.18		65 ~ 35	50 ~ 10	25 ~ 0
0.60		85 ~ 71	70 ~ 41	40 ~ 16
0.30		95 ~ 80	92 ~ 70	85 ~ 55
0.15	天然砂	100 ~ 90	100 ~ 90	100 ~ 90
	机制砂	97 ~ 85	94 ~ 80	94 ~ 75

注：砂的实际颗粒级配与表 2-7 中所列数字相比，除 4.75 mm 和 0.60 mm 筛档外，可以略有超出，但各级累计筛余超出值总和应 $\leq 5\%$ 。

标准 JGJ 52—2006、TB/T 3275—2018 和 GB/T 14684—2011 及 JTG/T 3650—2020 中将混凝土用卵、碎石的颗粒级配分为连续粒级和单粒粒级，具体见表 2-8。

表 2-8 卵石、碎石的颗粒级配

级配情况	公称粒级/mm	方筛孔筛孔边长/mm								
		2.36	4.75	9.50	16.0	19.0	26.5	31.5	37.5	53.0
		累计筛余/%								
连续粒级	5 ~ 10	95 ~ 100	80 ~ 100	0 ~ 15	0					
	5 ~ 16	95 ~ 100	85 ~ 100	30 ~ 60	0 ~ 10	0				
	5 ~ 20	95 ~ 100	90 ~ 100	40 ~ 80	—	0 ~ 10	0			
	5 ~ 25	95 ~ 100	90 ~ 100	—	30 ~ 70	—	0 ~ 5	0		
	5 ~ 31.5	95 ~ 100	90 ~ 100	70 ~ 90	—	15 ~ 45	—	0 ~ 5	0	
	5 ~ 40	—	95 ~ 100	70 ~ 90	—	30 ~ 65	—	—	0 ~ 5	0
单粒粒级	10 ~ 16	—	95 ~ 100	80 ~ 100	0 ~ 15	0				
	10 ~ 20	—	95 ~ 100	85 ~ 100	—	0 ~ 15	0			
	16 ~ 25	—	—	95 ~ 100	55 ~ 70	25 ~ 40	0 ~ 10	0		
	16 ~ 31.5	—	95 ~ 100	—	85 ~ 100	—	—	0 ~ 10	0	
	20 ~ 40	—	—	95 ~ 100	—	80 ~ 100	—	—	0 ~ 10	0

2) 颗粒级配的检验

颗粒级配的检验采用筛析法。通过筛分析，测得各孔径筛面上的筛余颗粒质量，然后分别计算各个筛上的分计筛余百分率和累计筛余百分率。以砂的颗粒级配为例，具体计算方法见表 2-9。

表 2-9 砂子分计筛余和累计筛余百分率计算表

砂的公称 粒径 /mm	圆孔筛的 孔径/mm	方孔筛筛孔 边长/mm	分计筛余 质量 m_i /g	分计筛余 百分率 $\alpha_i/\%$	累计筛余 百分率 $\beta_i/\%$	通过率 /%
5.0	5.0	4.75	m_1	$\alpha_1 = 100m_1/m_s$	$\beta_1 = \alpha_1$	$100 - \beta_1$
2.5	2.5	2.36	m_2	$\alpha_2 = 100m_2/m_s$	$\beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2$	$100 - \beta_2$
1.25	1.25	1.18	m_3	$\alpha_3 = 100m_3/m_s$	$\beta_3 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$	$100 - \beta_3$
0.63	0.63	0.60	m_4	$\alpha_4 = 100m_4/m_s$	$\beta_4 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$	$100 - \beta_4$
0.315	0.315	0.30	m_5	$\alpha_5 = 100m_5/m_s$	$\beta_5 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5$	$100 - \beta_5$
0.16	0.16	0.15	m_6	$\alpha_6 = 100m_6/m_s$	$\beta_6 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6$	$100 - \beta_6$
≤ 0.16	≤ 0.16	≤ 0.16	m_7	—	—	—

注：① m_s ——筛前所称取的试样（砂）总量；②分计筛余率精确至 0.1%，累计筛余率精确至 1%。

3) 级配曲线的绘制

由实测的各粒径累积筛余百分率和标准规定的各粒径累积筛余百分率的上下界限（级配范围），以筛孔尺寸为横坐标，累计筛余百分率为纵坐标绘制而成的粒径与累计筛余百分率的关系曲线称为级配曲线。砂的级配曲线图的绘制见图 2-1。石子的级配曲线图的绘制可参照此图。

4) 级配情况的评定

砂子颗粒级配的评定：通过筛分析得到的各筛上的累计筛余百分率均在标准规定的相应级配区内时，表明该砂的颗粒级配良好。但是，砂的实际颗粒级配不一定完全符合规范要求，规范规定，除 4.75 mm 和 0.60 mm 筛档外，可以略有超出，但各级累计筛余超出值总和应 $\leq 5\%$ ，此时砂的颗粒级配可评定为合格；若超出值总和 $> 5\%$ ，则该砂的颗粒级配可评定为不合格或级配不良。

石子颗粒级配的评定：首先根据石子的最大粒径和各筛的累计筛余百分率与标准规定的连续粒级级配范围进行比较，若在标准规定的范围内，则判为符合该连续粒级；若不满足连续粒级要求，则与标准规定的单粒粒级的级配范围进行比较，若符合要求，则判为符合该单粒粒级；若既不满足连续粒级要求，也不满足单粒粒级要求，则判为级配不合格。

5) 骨料级配对混凝土性能的影响

级配良好的骨料，其空隙率较小，用于填充骨料空隙所需水泥浆量也就少，在水泥浆量相同的条件下，包裹和润滑骨料颗粒的水泥浆层就厚，故拌制的混凝土的和易性好、强度高、耐久性好。

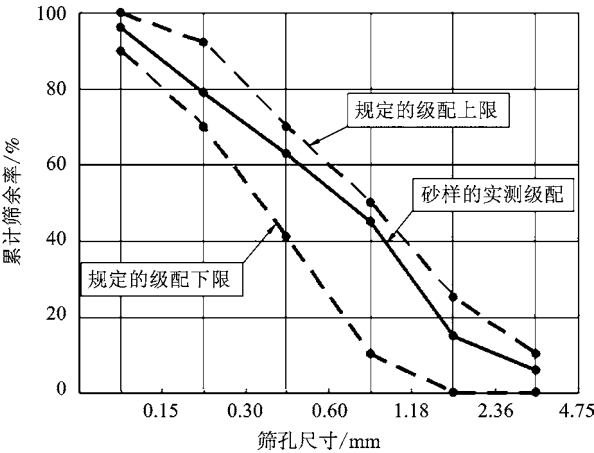


图 2-1 砂的级配曲线

6) 改善级配的措施

当砂子(或石子)的实际颗粒级配不符合要求时,可采用不同粒径大小的单粒级的砂子(或石子)或采用几个不同级配的砂子(或石子)按一定比例进行掺配,使其满足规定的级配要求。合成级配计算方法原理见表 2-10,也可利用 Microsoft Offices Excel 进行自动计算(扫右边二维码见视频)。



视频:粗骨料合成级配
电子表格计算编制方法

表 2-10 石子合成级配计算表

粒径/mm		31.5	26.5	19.0	16.0	9.5	4.75	2.36	筛前试样质量/g	掺配比例/%
碎石 A (19 ~ 31.5)	筛余质量/g	460	4510	30	0	0	0	0	5000	39
	累计筛余 β_i^A /%	9.2	99.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	—	
碎石 B (9.5 ~ 19)	筛余质量/g	0	0	740	2240	1980	540	0	5500	30
	累计筛余 β_i^B /%	0.0	0.0	13.5	54.2	90.2	100.0	100.0	—	
碎石 C (4.75 ~ 9.5)	筛余质量/g	0	0	0	920	1820	2420	210	5410	31
	累计筛余 β_i^C /%	0.0	0.0	0.0	17.0	50.6	95.4	99.3	—	
合成级配(5 ~ 31.5)	累计筛余 β_i /%	3.6	38.8	43.0	60.5	81.8	98.6	99.8	—	—
		β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7		
	标准规定累计筛余/%	0 ~ 5	—	15 ~ 45	—	70 ~ 90	90 ~ 100	95 ~ 100	—	—

以 P_A 、 P_B 、 P_C 分别代表 2-10 中碎石 A、B、C 在合成级配中的含量,且 $P_A + P_B + P_C = 100\%$,表中合成级配各筛的累计筛余率计算方法如下:

$$\beta_1 = (\beta_1^A \cdot P_A + \beta_1^B \cdot P_B + \beta_1^C \cdot P_C) / 100 = (9.2 \times 39 + 0 \times 30 + 0 \times 31) / 100 = 3.6\% ;$$

$$\beta_2 = (\beta_2^A \cdot P_A + \beta_2^B \cdot P_B + \beta_2^C \cdot P_C) / 100 = (99.4 \times 39 + 0 \times 30 + 0 \times 31) / 100 = 38.8\% ;$$

$$\beta_3 = (\beta_3^A \cdot P_A + \beta_3^B \cdot P_B + \beta_3^C \cdot P_C) / 100 = (100.0 \times 39 + 13.5 \times 30 + 0 \times 31) / 100 = 43.0\%$$

依此类推计算出各筛的累计筛余率。

2. 粗细程度

砂的粗细程度是指不同粒径的砂粒混合在一起的总体粗细程度,不是指其平均粒径,用细度模数(μ_f)来衡量,按式(2-3)计算:

$$\mu_f = \frac{\beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 - 5\beta_1}{100 - \beta_1} \quad (2-3)$$

式中: β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 、 β_6 ——4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.60 mm、0.30 mm、0.15 mm 筛上的累计筛余百分率, %。

$\mu_f = 3.1 \sim 3.7$ 为粗砂; $\mu_f = 2.3 \sim 3.0$ 为中砂; $\mu_f = 1.6 \sim 2.2$ 为细砂; $\mu_f = 0.7 \sim 1.5$ 为特

细砂。细度模数愈大，表示砂就愈粗，单位质量总表面积就愈小。

石子的粗细程度：用最大粒径来衡量。最大粒径是指石子公称粒级的上限，如 5 ~ 40 mm 粒级的石子，其最大粒径即为 40 mm。

粗细对混凝土质量的影响：骨料粒径愈粗，总表面积就愈小，在水泥浆量相同的条件下，水泥浆包裹层就愈厚，有利于润滑和胶结。但粒径受构件尺寸、钢筋疏密程度和施工工艺所限，且粒径越大，其内部存在缺陷的可能性也大，影响混凝土的强度及耐久性。

3. 针、片状颗粒

石子颗粒粒形以接近球形为好。但石子中常含有针状颗粒(长度大于所属粒级平均粒径的 2.4 倍)和片状颗粒(厚度小于所属粒级平均粒径的 0.4 倍)，见图 2-2。

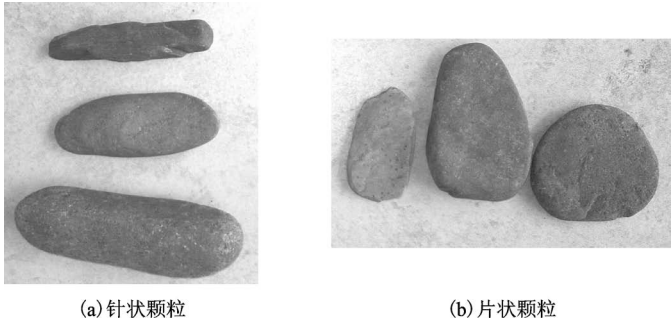


图 2-2 针片状颗粒

针、片状颗粒对混凝土性能的影响：一方面针、片颗粒的表面积比球形和立方体颗粒大，且流动阻力大，导致混凝土拌合物的流动性降低；另一方面在硬化混凝土受力时容易被折断，影响混凝土的强度。JGJ 52—2006 和《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 对混凝土用粗骨料中的针、片状颗粒的含量的规定见表 2-11。

表 2-11 粗骨料中针、片状颗粒含量限量

规 范	JGJ 52—2006			TB/T 3275—2018		
混凝土强度等级	≥ C60	C30 ~ C55	≤ C25	< C30	C30 ~ C45	≥ C50
针、片状颗粒总含量 (按质量计)/%，≤	8	15	25	10	8	5



高性能混凝土的
基本概念与特性

JTG/T3650-2020 规定：混凝土用粗骨料中针、片状颗粒总含量(按质量计)Ⅰ类应≤5%；Ⅱ类应≤10%；Ⅲ类应≤15%。高性能混凝土用粗骨料的针、片状颗粒总含量应≤7%。

4. 有害物质

骨料中的有害物质包括：泥(粒径≤0.075 mm 黏土颗粒)、石粉(机制砂、碎石中粒径≤0.075 mm 颗粒)、泥块(砂子中粒径>1.18 mm，经水洗、手捏后变成<0.6 mm 的颗粒；石子中粒径>4.75 mm，经水洗、手捏后变成<2.36 mm 的颗粒)、云母(钾、铝、镁、铁等层状结构的铝硅酸盐物质)、轻物质(表观密度<2000 kg/m³的物质)、有机物、硫化物、硫酸盐、氯化物、草根、树叶、贝壳、炉渣及活性矿物(骨料中含有蛋白石、方英石、磷英石、

粒径 $<30\ \mu\text{m}$ 的微晶石英、玉髓、火山玻璃、人工硅质玻璃、燧石等硅酸盐类矿物，或含有粒径 $<50\ \mu\text{m}$ 的细小菱形白云石晶体、不溶黏土基质等碳酸盐类矿物)等。

对混凝土质量的影响：泥土成浆，包裹在骨料表面，影响了水泥浆与骨料的胶结；云母和轻物质自身低强易碎；硫化物、硫酸盐会造成水泥石的腐蚀；有机物会影响混凝土的凝结硬化；氯盐对钢筋有锈蚀作用；在潮湿环境中，骨料中的活性矿物易与混凝土中的碱(Na_2O 、 K_2O)产生碱-硅酸盐反应或碱-碳酸盐反应，造成混凝土腐蚀。总之，这些有害物质均会影响混凝土的强度及耐久性，从而影响到结构的安全性。因此，对这些有害物质应加以限量。

标准 JGJ 52—2006、TB/T 3275—2018 及 JTG/T 3650—2020 中对混凝土用粗、细骨料中的有害物质均作出了限量，具体见表 2-12-1、表 2-12-2、表 2-12-3。

表 2-12-1 建筑工程混凝土用骨料中有害物质限量(JGJ 52—2006)

有害物质名称		细骨料			粗骨料		
		≥C60	C30 ~ C55	≤C25	≥C60	C30 ~ C55	≤C25
含 泥 量(按质量计)/%， ≤		2.0	3.0	5.0	0.5	1.0	2.0
泥块含量(按质量计)/%， ≤		0.5	1.0	2.0	0.2	0.5	0.7
云母含量(按质量计)/%， ≤		2.0；有抗渗、抗冻要求的为1.0			0.5		
轻物质含量(按质量计)/%， ≤		1.0			0.5		
有机物含量(比色法)		颜色不深于标准色。如深于标准色，则应配制成水泥砂浆进行强度对比试验，其抗压强度比应≥0.95					
硫化物及硫酸盐含量(按 SO ₃ 质量计)/%， ≤		1.0					
氯化物含量(以 Cl ⁻ 质量计) /%， ≤		钢筋混凝土 0.06；预应力混凝土 0.02					
机制砂石粉含量 (按质量计)/%， ≤	MB 值<1.40(合格)	5.0	7.0	10.0	—		
	MB 值≥1.40 (不合格)	2.0	3.0	5.0	—		

表 2-12-2 铁路工程混凝土用骨料中有害物质限量(TB/T 3275-2018)

有害物质名称	细骨料			粗骨料		
	< C30	C30 ~ C45	≥ C50	< C30	C30 ~ C45	≥ C50
含 泥 量(按质量计)/%， ≤	3.0	2.5	2.0	1.0	1.0	0.5
泥块含量(按质量计)/%， ≤	0.5			0.2		
云母含量(按质量计)/%， ≤	0.5			—		
轻物质含量(按质量计)/%， ≤	0.5			—		
有机物含量(比色法)	颜色不深于标准色。如深于标准色，则应配制成水泥砂浆进行强度对比试验，其抗压强度比应≥0.95					
硫化物及硫酸盐含量(按 SO ₃ 质量计)/%， ≤	0.5					
氯化物含量(以 Cl ⁻ 质量计) /%， ≤	0.02					

续上表

有害物质名称		细骨料			粗骨料		
		< C30	C30 ~ C45	≥ C50	< C30	C30 ~ C45	≥ C50
机制砂石粉含量(按质量计)/%，≤	MB 值 <0.5 g/kg	15			—		
	0.5 g/kg≤MB 值 <1.4g/kg	10.0	7.0	5.0	—		
	MB 值≥1.4 g/kg	5.0	3.0	2.0	—		
碱活性 <i>ε_f</i> /%，<	碱－硅酸盐反应	0.30(快速砂浆棒膨胀率)					
	碱－碳酸盐反应	—			0.10(岩石柱膨胀率)		

表 2-12-3 公路桥涵工程混凝土用骨料中有害物质限量(JTG/T 3650—2020)

有害物质名称		细骨料			粗骨料		
		I 类	Ⅱ类	Ⅲ类	I 类	Ⅱ类	Ⅲ类
含泥量(按质量计)/%，≤	普通混凝土	1.0	3.0	5.0	0.5	1.0	1.5
	高性能混凝土	3.0(<C30)；2.5(C30 ~C45)； 2.0(≥C50)			1.0(≤C45)；0.5(≥C50)		
泥块含量(按质量计)/%，≤	普通混凝土	0	1.0	2.0	0	0.2	0.5
	高性能混凝土	0.5			0.25		
云母含量(按质量计)/%，≤	普通混凝土	1.0	2.0		—		
	高性能混凝土	0.5					
轻物质含量(按质量计)/%，≤	普通混凝土	1.0			—		
	高性能混凝土	0.5					
有机物含量(比色法)		颜色不深于标准色。如深于标准色，则应配制成水泥砂浆进行强度对比试验，其抗压强度比应≥0.95					
硫化物及硫酸盐含量(按 SO ₃ 质量计)/%，≤	普通混凝土	0.5			0.5	1.0	
	高性能混凝土	0.5			0.5		
氯化物含量(以 Cl ⁻ 质量计)/%，≤	普通混凝土	0.01	0.02	0.06	—		
	高性能混凝土	0.02			0.02		
MB 值≤1.4	MB 值，≤	0.5	1.0	1.4 或合格	—		
	石粉含量(按质量计)/%，≤	10.0			—		
	泥块含量(按质量计)/%，≤	0	1.0	2.0	—		

续上表

有害物质名称		细骨料			粗骨料		
		I 类	Ⅱ类	Ⅲ类	I 类	Ⅱ类	Ⅲ类
MB 值 > 1.4 或快速法 试验不合格	石粉 含 量（ 按 质 量 计）/%，≤	1.0	3.0	5.0	—		
	泥块 含 量（ 按 质 量 计）/%，≤	0	1.0	2.0	—		
活性矿物（碱－集料反应）		经碱－集料反应试验后，试件应无裂缝、酥裂、胶体外溢现象，在规 定试验龄期的膨胀率应 <0.10%					

注: 对于可能处于干湿循环、冻融循环下的高性能混凝土, 细集料的含泥量应 < 1.0%。

5. 压碎指标

压碎指标是指砂、石子抵抗外力压碎的能力。它也能间接反映砂、石子的抗压强度。对于同一种类的骨料, 压碎指标值愈小, 表示其抵抗压碎的能力就愈强, 强度就愈高。

砂子压碎指标的检验: 将机制砂先筛分成 4.75 ~ 2.36 mm、2.36 ~ 1.18 mm、1.18 ~ 0.60 mm、0.60 ~ 0.30 mm 四个粒级, 并计算其分计筛余百分率(α_i), 然后分别取各粒级砂约 300 g(m_0)装入专用压碎指标仪中, 振实后装上压头, 放入压力试验机中, 以 0.5 kN/s 的加荷速率加压到 25 kN, 并持压 5 s 后, 以同样速率卸荷, 取出用该粒级的下限筛进行过筛, 称取筛余质量(m_i), 按式(2-4)计算该粒级的压碎指标值(δ_i), 精确至 0.1%, 并按式(2-5)计算该砂总的压碎指标值(δ_{sa}), 精确至 1%:

$$\delta_i = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \tag{2-4}$$

$$\delta_{sa} = \frac{\alpha_1 \delta_1 + \alpha_2 \delta_2 + \alpha_3 \delta_3 + \alpha_4 \delta_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \times 100\% \tag{2-5}$$

JGJ 52—2006 规定机制砂的总压碎指标值应 < 30%。

TB/T 3275—2018 规定机制砂的总压碎指标值应 ≤ 25%。

GB/T 14684—2011 和 JTG/T 3650—2020 规定机制砂单级最大压碎指标值: I 类砂应 ≤ 20%; II 类砂应 ≤ 25%; III 类砂应 ≤ 30%。

石子压碎指标的检验: 取粒径 9.5 ~ 19.0 mm 的气干状态的石子约 3000 g(m_1), 分两层装入压碎指标测定仪的圆模内并颠实, 放上压头后, 放入压力机的压板上, 在 160 ~ 300 s 内 (或以 1 kN/s 的加荷速率)均匀加荷至 200 kN, 并稳荷 5 s, 然后卸荷, 再倒出模中试样, 用筛网孔径为 2.36 mm 的方孔筛筛除压碎了的细粒, 称取筛余质量(m_2), 按式(2-6)计算压碎指标值(δ_a), 精确至 0.1%:

$$\delta_a = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \tag{2-6}$$

混凝土用粗骨料的压碎指标值不得超过表 2-13 的规定。

表 2-13 粗骨料的压碎指标值

项目 \ 规范		JGJ 52—2006		TB/T 3275—2018		JTG/T 3650—2020		
		混凝土强度等级		混凝土强度等级		Ⅰ 类	Ⅱ 类	Ⅲ 类
岩石品种		C60 ~ C40	≤C35	< C30	≥C30			
碎石压碎 指标值 /%, ≤	沉积岩	10	16	16	10	10	20	30
	变质岩或深 成的火成岩	12	20	20	12			
	喷出的火成 岩	13	30	30	13			
卵石压碎指标值/%, ≤		12	16	16	12	12	14	16

注：JTG/T 3650—2020 规定，高性能混凝土用粗骨料的压碎指标应 ≤ 10 %。

6. 抗压强度

骨料的抗压强度是指用来生产机制砂或碎石的岩石的强度。

岩石强度检验方法：取生产碎石的母岩加工成边长为 50 mm 的立方体或 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体试件，1 组 6 个，饱水 48 h 后进行抗压强度试验，以 6 个试件强度的平均值来表示。对有明显层理结构的岩石，应分别取垂直层理和平行层理方向的试件各一组进行强度试验。

TB/T 3275—2018 和 JTG/T 3650—2020 规定粗骨料母岩的抗压强度应 ≥ 1.5 倍混凝土的强度等级，且深成岩和喷出岩的抗压强度应 ≥ 80 MPa，变质岩的抗压强度应 ≥ 60 MPa，沉积岩的抗压强度应 ≥ 30 MPa。

7. 坚固性

坚固性是指砂、石子在自然风化和其他外界物理化学因素作用下抵抗破裂的能力。混凝土用砂、石子应满足一定的坚固性要求，以保证混凝土的耐久性。采用硫酸钠饱和溶液浸泡法检验。即砂或石子在硫酸钠饱和溶液中经 5 次浸渍与烘干的循环之后，其质量损失率应符合表 2-14 的规定。

表 2-14 骨料坚固性

项目	规范	混凝土所处环境条件及性能要求	5 次循环后的质量损失率 /%, ≤	
			细骨料	粗骨料
JGJ 52—2006		在严寒及寒冷地区室外使用并经常处于潮湿或干湿交替状态下的混凝土；对于有抗疲劳、耐磨、抗冲击要求的混凝土；有腐蚀介质作用或经常处于水位变化区的地下结构混凝土	8	8
		其他条件下使用的混凝土	10	12
JTG/T 3650—2020		寒冷地区，经常处于干湿交替状态下的混凝土	8 (I、II 类砂) 10 (III 类砂)	5
		严寒地区，经常处于干湿交替状态下的混凝土		3
		干燥环境，但粗集料风化或软弱颗粒过多时		12
		干燥环境，但有抗疲劳、耐磨、抗冲击要求或强度等级大于 C40 的混凝土		5
TB/T 3275—2018		钢筋混凝土结构	8	8
		预应力混凝土结构		5

注：JTG/T 3650—2020 规定，高性能混凝土用粗骨料的坚固性要求同 TB/T 3275—2018。

8. 吸水率

骨料的吸水率愈大,表明其内部开口微细孔较多,故混凝土的抗压和抗折强度就愈低,其抗渗性、抗冻性、抗盐冻剥蚀、抗碳化性能就愈差。

TB/T 3275—2018 规定干燥环境混凝土用粗、细骨料的吸水率均应 $\leq 2\%$;当用于干湿循环、冻融循环环境时,骨料的吸水率均应 $\leq 1\%$ 。

JTG/T 3650—2020 规定混凝土用粗骨料的吸水率:Ⅰ类应 $\leq 1.0\%$;Ⅱ类、Ⅲ类应 $\leq 2.0\%$;对于干燥环境的高性能混凝土应 $< 2\%$,当用于干湿循环、冻融循环环境时,骨料的吸水率应 $< 1\%$ 。

9. 表观密度、堆积密度、空隙率

一般来讲,骨料的表观密度愈大,表明其内部孔隙就愈少,强度就愈高;堆积密度愈大,表明其空隙率就愈小,颗粒级配就愈好。

GB/T 14684—2011 中规定:砂的表观密度应 $\geq 2500 \text{ kg/m}^3$ 、堆积密度应 $\geq 1400 \text{ kg/m}^3$ 、空隙率应 $\leq 44\%$ 。

GB/T 14685—2011 规定:卵石、碎石的表观密度应 $\geq 2600 \text{ kg/m}^3$ 、堆积密度应 $\geq 1350 \text{ kg/m}^3$ 、空隙率应 $\leq 47\%$ 。

TB/T 3275—2018 规定:粗骨料的表观密度应 $\geq 2600 \text{ kg/m}^3$ 、紧密空隙率应 $\leq 40\%$ 。

10. 碱活性

当骨料中含有活性矿物时,对于长期处于潮湿环境中的混凝土结构,这些活性矿物能与混凝土中的碱(Na_2O 、 K_2O)发生化学反应(也称碱骨料反应),生成膨胀性凝胶物质,从而导致混凝土产生膨胀、开裂甚至破坏。故长期处于潮湿环境中的混凝土结构用骨料,应进行碱活性鉴定。

1) 鉴定方法

先用岩相法鉴定骨料中活性矿物质的品种和含量。当鉴定出含有活性硅酸盐类矿物质时,应采用快速砂浆棒法或砂浆长度法进行进一步鉴定;当鉴定出含有活性碳酸盐矿物质时,应采用岩石柱法进行进一步鉴定。

岩相法:将每类岩石制成若干薄片,在偏光显微镜下观测鉴定矿物质成分的品种、类型和含量,特别是隐晶质、玻璃质成分的含量。

快速砂浆棒法:由该骨料制备的标准砂浆棒试件,在 1 mol/L 的氢氧化钠溶液中浸泡养护至规定龄期后进行长度测定。

砂浆长度法:由该骨料制备的标准砂浆棒试件,在 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中浸泡养护至规定龄期后进行长度测定。

岩石柱法:在骨料上或母岩上钻取直径为 $(9 \pm 1) \text{ mm}$,高度为 $(35 \pm 5) \text{ mm}$ 的圆柱体试件,然后在 1 mol/L 的 NaOH 溶液中浸泡 84 d ,测定试件的膨胀率。

2) 判定方法

(1)由骨料制备的砂浆试件养护至规定龄期后,如果试件出现裂缝、酥裂、胶体外溢等现象,则有危害。

(2)采用快速砂浆棒法鉴定时,砂浆棒 14 d 膨胀率 $\varepsilon_{14} < 0.10\%$ 时,可判定无潜在危害; $\varepsilon_{14} > 0.10\%$ 时,可判定有潜在危害; $\varepsilon_{14} = 0.10\% \sim 0.20\%$ 时,需用砂浆长度法再进行鉴定,当6个月砂浆膨胀率 $\varepsilon_{180} < 0.10\%$ 或3个月膨胀率 $\varepsilon_{90} < 0.05\%$ 时,可判定无潜在危害;否则,

应判定有潜在危害。

(3)采用岩石柱法鉴定时,当其 84 d 膨胀率 $\varepsilon_{84} > 0.10\%$ 时,应判定为有潜在危害。

3) 处理方法

当鉴定出骨料中存在潜在碱-碳酸盐反应危害时,该骨料不宜用作混凝土骨料。

当鉴定出骨料中存在潜在碱-硅酸盐反应危害时,应采用含碱量 $\leq 0.6\%$ 的低碱水泥或采取抑制措施,如掺入适量的粉煤灰、矿渣粉或硅灰等掺合料,减少水泥用量,控制混凝土中的总碱含量 $\leq 3 \text{ kg/m}^3$ 。

三、应用

混凝土用粗、细骨料,应尽量选用空隙率和总表面积均较小、级配良好、含杂质少、坚固性好、强度高、不含活性矿物质的优质骨料。

细骨料宜优先选用Ⅱ区砂,因该区砂的粗细程度适中、级配最好。当采用Ⅰ区砂时,因该区砂粗颗粒较多,易泌水,不易密实成形,故应适当提高砂率,增加胶凝材料用量,以满足混凝土的工作性和耐久性的要求;当采用Ⅲ区砂时,因该区砂颗粒偏细,相同质量的砂,其总表面积大,要保证混凝土的工作性和强度,水泥用量要多,且混凝土硬化后,干缩性较大,容易产生干缩裂纹,故宜适当降低砂率。

粗骨料应选用针片状颗粒含量少的连续粒级的碎石、碎卵石或卵石,当不能满足连续粒级要求时,宜采用两级配或多级配掺配使用,尽量使其空隙率达到较小,堆积密度达到较大,且堆积密度应 $> 1500 \text{ kg/m}^3$,紧密空隙率宜 $< 40\%$;吸水率应 $< 2\%$,当用于干湿循环、冻融循环环境时,吸水率应 $< 1\%$;当混凝土强度等级 $> \text{C}30$ 时,宜选用强度高的碎石或碎卵石;最大粒径的选用应符合下列规定:

《混凝土结构工程施工规范》GB 50666—2011 规定:粗骨料最大颗粒粒径不得超过构件截面最小尺寸的 $1/4$,且不得超过钢筋最小净距的 $3/4$;对混凝土实心板,粗骨料的最大粒径不宜超过板厚的 $1/3$,且不得超过 40 mm ;对于泵送混凝土,粗骨料的最大粒径应与输送泵管内径相匹配,当粗骨料的最大粒径不大于 25 mm 时,可采用内径不小于 125 mm 的输送泵管,当粗骨料的最大粒径不大于 40 mm 时,可采用内径不小于 150 mm 的输送泵管。

TB/T 3275—2018 规定:混凝土用粗骨料最大公称粒径不宜超过钢筋的混凝土保护层厚度的 $2/3$,在严重腐蚀环境条件下不宜超过 $1/2$,且不应超过钢筋最小净距的 $3/4$;配制 $\text{C}50$ 及以上混凝土时,最大公称粒径不应大于 25 mm 。

JTG/T 3650—2020 规定:混凝土用粗骨料的最大粒径不得超过结构最小边尺寸的 $1/4$ 和钢筋最小净距的 $3/4$;在两层或多层密布钢筋结构中,最大粒径不得超过钢筋最小净距的 $1/2$,同时不得超过 75.0 mm 。混凝土实心板的粗骨料最大粒径不宜超过板厚的 $1/3$ 且不得超过 37.5 mm 。泵送混凝土时的粗骨料最大粒径,除应符合上述规定外,对碎石不宜超过输送管径的 $1/3$,对卵石不宜超过输送管径的 $1/2.5$ 。高性能混凝土用粗骨料最大粒径不宜超过 26.5 mm (大体积混凝土除外),且不得超过钢筋保护层厚度的 $2/3$ 。

在允许条件下,石子的粒径宜尽量选大一些,以达到节约水泥和提高耐久性的目的。

四、进场验收与施工管理

1. 进场验收

砂、石子作为混凝土的主要组成材料，其质量好坏直接影响到混凝土结构的质量和安
全。因此，每购进一批均应对其质量进行随机抽样检验，经检验符合要求后，方可验收使用。

1) 验收批的划分

混凝土用砂、石子应按同产地、同规格分别分批验收。采用大型工具(如火车、货船或汽车)运输的，应以 400 m^3 或 600 t 为一验收批；采用小型工具(如拖拉机)运输的，应以 200 m^3 或 300 t 为一验收批；不足上述数量的，也应按一验收批进行验收。

2) 抽样方法

(1) 每一验收批至少应进行一次抽样检验。

(2) 在料堆上取样时，取样部位应均匀分布。取样前先将取样部位表层铲除，然后从不同部位(料堆的上、中、下；前、后；左、右)抽取大致等量的砂 8 份，石子 16 份，组成各自一组样品。

(3) 从皮带运输机上取样时，应用接料器在皮带运输机机尾的出料处定时抽取大致等量的砂 4 份，石子 8 份，组成各自一组样品。

(4) 从火车、汽车、货船上取样时，应从不同部位和深度抽取大致等量的砂 8 份，石子 16 份，组成各自一组样品。

(5) 样品数量应能满足各单项检验的最少数量的规定。做几项检验时，如能确保试样经一项检验后不致影响另一项检验的结果，可用同一试样进行几项不同的检验。

3) 检验项目

混凝土用砂的出厂检验项目：包括颗粒级配、含泥量、泥块含量、有机质含量、云母含量、松散堆积密度及机制砂的石粉含量和压碎指标值。

混凝土用卵石、碎石的出厂检验项目：包括颗粒级配、含泥量、泥块含量、针片状颗粒含量、压碎指标值、松散堆积密度及吸水率。

其他项目根据工程项目的特点和有关施工验收标准的要求进行。

2. 施工管理

混凝土用砂、卵石、碎石等骨料应按不同类别和不同规格，分别堆放和运输，防止人为碾压、混合及污染，并应设分类堆放标识牌，标明其规格、类别与适应范围，便于施工人员使用。

2.2.3 矿物掺合料与外加剂

一、矿物掺合料

矿物掺合料又称矿物外加剂。是指在混凝土搅拌过程中加入的具有一定细度和活性、用于改善新拌和硬化混凝土性能(特别是混凝土耐久性)的某些矿物类的产品。目前混凝土用矿物掺合料主要有粉煤灰、磨细矿渣粉、硅灰等，这些矿物类产品中均含有一定数量的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 等活性氧化物，具有较高的活性，它们与水发生水化反应后能形成硅酸钙和铁酸钙凝胶物质。

当今，矿物掺合料已成为混凝土的重要组成部分，具体在使用过程中应经试验确定。

1. 粉煤灰

在混凝土中掺入粉煤灰后，可节约水泥和细骨料，减少用水量；可改善混凝土拌合物的和易性，增强混凝土的可泵性；使混凝土的凝结硬化放缓，水化热降低，温升降低，早期强度在常温下有所降低，但后期强度得到较大增长，养护温度越高，强度增长越显著；可提高硬化混凝土的弹性模量，减少混凝土的收缩和徐变；可提高混凝土抗渗、抗裂能力，改善混凝土的抗蚀性能和抑制碱 - 骨料反应的作用。但是，由于粉煤灰的火山灰反应，消耗了一部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，使混凝土的碱性降低，从而在一定程度上会影响到混凝土的抗碳化性。

用于混凝土中的粉煤灰的技术要求应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596—2017、《高强高性能混凝土用矿物外加剂》GB/T 18736—2017、《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 及《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 的有关规定，见表 2 - 15。

表 2 - 15 用于混凝土中的粉煤灰的技术要求

项目	GB/T 1596—2017、TB/T 3275—2018			JTG/T 3650—2020(高性能砼)	
	I 级	II 级	III 级	< C50	≥ C50
细度(45 μm 方孔筛筛余)/%，≤	12.0	30.0	45.0	25.0	12.0
需水量比/%，≤	95	105	115	105	95
含水率/%，≤	1.0			1.0	
烧失量/%，≤	5.0	8.0	10.0	8.0	5.0
SO ₃ 含量/%，≤	3.0			3.0	
CaO 含量/%，≤	- (10)			10	
游离 CaO 含量/%，≤	1.0(F 类)；4.0(C 类)			1.0 (F 类)；4.0(C 类)	
氯离子含量/%，≤	- (0.02)			0.06	
(SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) 总含量/%，≥	70			70	
密度/(g · cm ⁻³)，≤	2.6			2.6	
活性指数(28 d 抗压强度比)/%，≥	70			75(7 d) 85(28 d)	85(7 d) 90(28 d)
安定性(雷氏法)	雷氏夹煮沸后增加距离 ≤ 5.0 mm(C 类)				

注：①表中括号中的数字为 TB/T 3275—2018 的要求。②F 类是指由无烟煤或烟煤煅烧收集的粉煤灰；C 类是指由褐煤或次烟煤煅烧收集的粉煤灰，其 CaO 含量一般大于 10%。③JTG/T 3650—2020 中对普通混凝土用粉煤灰的要求同 GB/T1596—2017。

粉煤灰适用于配制泵送混凝土及大流动性混凝土；适用于地上、地下和水中大体积混凝土结构；适用于蒸汽养护混凝土构件；适用于抗硫酸盐侵蚀的混凝土工程及有抗裂要求的混凝土工程。

2. 矿渣粉

在混凝土中掺入超细矿渣粉，可节约水泥用量；能够显著降低混凝土的水化热，减少大体积混凝土的温升及内应力，抑制大体积混凝土因内外温差过高而产生裂纹；能有效提高混

凝土抗海水、淡水及硫酸盐的侵蚀；能够抑制碱－骨料反应，显著提高混凝土抗碱－骨料反应的能力；能提高混凝土耐高温性能。矿渣粉磨得越细，其活性越高，与粉煤灰相比，其早期活性明显较高，7 d 强度可赶超对比混凝土，而后期强度继续增加。

用于混凝土中的矿渣粉的技术要求应符合《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046—2017及 TB/T 3275—2018 和 JTG/T 3650—2020 的有关规定，见表 2－16。

表 2－16 用于混凝土中的矿渣粉的技术要求

项目	规范	GB/T 18046—2017、TB/T 3275—2018			JTG/T 3650—2020(高性能砼)
		S105	S95	S75	
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), $\geq$		2.8			2.8
比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), $\geq$		500	400	300	350 ~ 450
流动度比/%, $\geq$		95			100
含水率/%, $\leq$		1.0			1.0
烧失量/%, $\leq$		1.0(3.0)			3.0
SO ₃ 含量/%, $\leq$		4.0			4.0
MgO 含量/%, $\leq$		14			14.0
氯离子含量/%, $\leq$		0.06			0.06
活性指数/%, $\geq$	7 d	95	75	55	—
	28 d	105	95	75	95

注：①表中括号中的数字为 TB/T3275—2018 的要求。②JTG/T 3650—2020 对普通混凝土的要求同 GB/T 18046—2017。

矿渣粉适用于配制泵送混凝土及大流动性混凝土；适用于大体积混凝土工程、抗海水混凝土工程、抗硫酸盐混凝土工程、地下混凝土工程、高强度混凝土和预应力混凝土工程、高温车间和有耐热耐火要求的混凝土工程及蒸汽养护混凝土构件。由于矿粉多棱角，拌合需水量大、保水性差、易泌水，使用时应按照有关设计、施工等标准的有关规定经试验确定。

3. 硅灰

硅灰是冶炼硅铁合金或工业硅时，通过烟道排出的粉尘，经收集得到的以无定形 SiO₂ 为主要成分的粉体材料。外观为灰色或灰白色粉末，颗粒呈非结晶相的无定形圆球状，平均粒径为 0.1 ~ 0.3 μm ，其细度和比表面积约为水泥的 80 ~ 100 倍，粉煤灰的 50 ~ 70 倍，是一种具有很高活性的火山灰质物质，其耐火温度 > 1600℃。

硅灰最主要的品质指标是 SiO₂ 含量和细度，SiO₂ 含量越高、颗粒愈细其活性就愈高，以 10% 的硅灰等量取代水泥，混凝土强度可提高 25% 以上，硅灰掺量越高，需水量越大，自收缩也增大。研究发现，在混凝土中掺入 1 kg 硅灰后，为保持其流动度不变，一般需增加 1 kg 用水量，因此一般将硅灰的掺量控制在 5% ~ 10% 之间，并用高效减水剂来调节需水量。用于混凝土中的硅灰的技术要求应符合《砂浆和混凝土用硅灰》GB/T 27690—2011、TB/T3275—2018及 JTG/T 3650—2020 的有关规定,具体见表 2－17。

表 2-17 用于混凝土和砂浆中的硅灰的技术要求

项目	规范	GB/T 27690—2011	TB/T 3275—2018、JTG/T 3650—2020
比表面积(BET法)/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), $\geq$		15000	15000(18000)
需水量比/% , $\leq$		125	125
含水率/% , $\leq$		3.0	3.0
烧失量/% , $\leq$		4.0	6.0(4.0)
SiO ₂ 含量/% , $\geq$		85.0	85.0
氯离子含量/% , $\leq$		—	0.10(0.02)
碱含量/% , $\leq$		—	—(1.5)
28d 活性指数/% , $\geq$		105(7d 快速法)	115(85)

注：表中括号中的数字为 TB/T 3275—2018 的要求。

硅灰常常与粉煤灰、磨细矿渣粉或其他掺合料共掺，以发挥它们的叠加效应，是目前配制高性能混凝土、高强混凝土常用的方法。

硅灰能够填充水泥颗粒间的孔隙，同时与水化产物生成凝胶体，与碱性材料氧化镁反应生成凝胶体。在混凝土中掺入适量的硅灰可起到如下作用：

- (1) 可显著提高抗压、抗折强度，是高强混凝土的必要成分。
- (2) 可显著提高抗渗、防腐、抗冲击及耐磨性能。
- (3) 具有保水、防止离析、不泌水、大幅降低混凝土泵送阻力的作用。
- (4) 可显著延长混凝土的使用寿命，特别是在氯盐、硫酸盐侵蚀及高湿度等恶劣环境下，可使混凝土的耐久性提高一倍甚至数倍。
- (5) 可大幅度降低喷射混凝土的回弹率，提高单次喷层厚度。
- (6) 具有约 5 倍水泥的功效，在普通混凝土和低水泥浇筑料中应用，可降低成本，提高耐久性。
- (7) 可有效防止发生混凝土碱—骨料反应。

硅灰适用于商品混凝土、高强度混凝土、自密实混凝土(具有高流动性、不离析、均匀性和稳定性好，浇筑时依靠其自重流动，无需振捣而达到密实的混凝土)、干混(预拌)砂浆、耐磨地坪、修补砂浆、聚合物砂浆、保温砂浆、抗渗混凝土等工程。

二、外加剂

在混凝土拌合过程中掺入的能按要求改善新拌混凝土和(或)硬化混凝土性能的物质称为外加剂。当今，外加剂已成为混凝土中的重要组分。混凝土外加剂按其功能可分为下列四大类：

- (1) 改善混凝土拌合物流动性的外加剂，包括各种减水剂和泵送剂等。
- (2) 调节混凝土凝结时间、硬化性能的外加剂，包括缓凝剂、速凝剂和早强剂等。
- (3) 改善混凝土耐久性的外加剂，包括引气剂、防水剂和阻锈剂等。
- (4) 改善混凝土其他性能的外加剂，包括膨胀剂、防冻剂、着色剂等。

目前使用的外加剂绝大多数都是具有多功能的复合型外加剂。

1. 减水剂

1) 定义

减水剂是指掺入混凝土中，在混凝土坍落度(稠度)基本相同的条件下，能减少拌合用水量的外加剂。按其使用效能分为普通型、高效型、高性能型和引气型。其中，普通型和高性能型减水剂又分为早强型、标准型和缓凝型；高效型减水剂又分为标准型和缓凝型。

普通减水剂(WR)：是指在混凝土坍落度基本相同的条件下，能减少拌合用水量的外加剂。

高效减水剂(HWR)：是指在混凝土坍落度基本相同的条件下，能大幅度减少拌合用水量的外加剂。

高性能减水剂(HPWR)：是指比高效减水剂具有更高减水率、更好坍落度保持性能、较小干燥收缩，且具有一定引气性能的减水剂。

引气减水剂(AEWR)：是指既能在混凝土搅拌过程中引入大量均匀分布、稳定而封闭的微小气泡，并能保留在硬化混凝土中，也能减水的外加剂。

标准型减水剂(S)：是指既不改变混凝土的凝结时间和早期硬化速度，也能减水的外加剂。

早强型减水剂(A)：是指既能加速混凝土早期强度的发展，也能减水的外加剂。

缓凝型减水剂(R)：是指既能延长混凝土的凝结时间，也能减水的外加剂。

2) 特性

在混凝土拌合物中掺入适量的减水剂可起到如下作用：

(1) 增大流动性。在水泥用量和用水量不变时，坍落度可增大 100 ~ 200 mm，且不影响混凝土强度。

(2) 提高强度。在保持流动性和水泥用量不变时，可减水 10% ~ 30%，从而降低水胶比，使混凝土强度提高 15% ~ 30%，早期强度提高更为显著。

(3) 改善耐久性。由于水泥颗粒被充分分散，与水的接触面增大，水化较完全，混凝土的密实性增强，从而可提高抗渗、抗冻性能。

(4) 节约水泥。当保持流动性和强度不变时，可在减水的同时节约水泥 10% ~ 15%。

3) 技术要求

减水剂的技术要求应符合《混凝土外加剂》GB 8076—2008、《聚羧酸系高性能减水剂》JG/T 223—2017、《铁路混凝土》TB/T 3275—2018、《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 的有关规定。高性能减水剂的技术要求见表 2 - 18。

表 2 - 18 用于混凝土和砂浆中的高性能减水剂的技术要求

项目	规范	GB8076—2008、JG/T 223—2017		TB/T 3275—2018、JTG/T 3650—2020	
		标准型	缓凝型	标准型	缓凝型
硫酸钠含量(折固后)/%，≤		不超过生产厂控制值		5.0	
氯离子含量(折固后)/%，≤		不超过生产厂控制值		0.6(0.02 未折固)	
碱含量(折固后)/%，≤		不超过生产厂控制值		10.0	
减水率/%，≥		25		25	
含气量/%，≤		6.0		3.0	
1 h 坍落度变化量/mm，≤		80	60(—)	80	60

续上表

项目 \ 规范		GB8076—2008、JG/T 223—2017		TB/T 3275—2018、JTG/T 3620—2020	
		标准型	缓凝型	标准型	缓凝型
常压泌水率比/%，≤		60	70	20	
压力泌水率比/%，≤		—	—	90	
凝结时间差/min	初凝	-90 ~ +120	> +90 (+120)	-90 ~ +120	> +90
	终凝		—		—
抗压强度比/%， ≥	1d	170	—	170	—
	3d	160	—(160)	160	—
	7d	150	140 (150)	150	140
	28d	140	130 (140)	140	130
收缩率比/%，≤		110		110	

注：表中括号中的数字分别为 JG/T 223—2017 和 JTG/T 3650—2020 的要求。

4) 应用

普通减水剂：标准型适用于日最低气温在 5℃ 以上，强度等级为 C40 以下的混凝土工程，不适用蒸汽养护混凝土及有早强要求的混凝土工程；早强型适用于常温或最低气温不低于 -5℃ 环境中施工的有早强要求的混凝土工程，不适用炎热环境下施工的混凝土工程；缓凝型适用于日最低气温在 5℃ 以上的大体积混凝土、碾压混凝土、炎热环境下施工的混凝土、大面积浇筑的混凝土、需长时间停放或长距离运输的混凝土、滑模或拉模施工的混凝土工程，不适用有早强要求的混凝土工程。

高效减水剂：标准型适用于日最低气温在 0℃ 以上施工的素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、高强混凝土及蒸汽养护混凝土；缓凝型适用于日最低气温在 5℃ 以上的大体积混凝土、碾压混凝土、炎热环境下施工的混凝土、大面积浇筑的混凝土、需长时间停放或长距离运输的混凝土、滑模或拉模施工的混凝土及自密实混凝土工程，不适用有早强要求的混凝土工程。

聚羧酸系高性能减水剂：标准型适用于日最低气温在 0℃ 以上施工的素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、高强混凝土、自密实混凝土、泵送混凝土、预制构件混凝土、钢管混凝土、高性能混凝土及蒸汽养护混凝土（非引气型），不适用有早强要求的混凝土工程；早强型适用于有早强要求及低温季节施工的混凝土，不适用 -5℃ 以下施工的混凝土及大体积混凝土工程；缓凝型适用于大体积混凝土工程，不适用日最低气温在 5℃ 以下施工的混凝土及有早强要求的混凝土工程。

引气剂及引气减水剂：适用于有抗冻、抗渗、抗硫酸盐要求的混凝土、泵送混凝土及易产生泌水的混凝土，不适用于蒸汽养护混凝土及预应力混凝土工程。

其他有关规定参照《混凝土外加剂应用技术规范》GB50119—2013 进行。

2. 泵送剂

泵送剂是指能改善混凝土拌合物泵送性能的外加剂。泵送性是指混凝土拌合物能顺利通过输送管道，不阻塞，在压力作用下不泌水、不离析，黏塑性良好。

泵送剂不但能大大提高新拌混凝土的流动性，还能使新拌混凝土在 60 ~ 180 min 内保持其流动性，剩余坍落度不低于初始值的 55%。因此，泵送剂兼具减水剂和缓凝剂的性能，具有高流化、黏聚、润滑、缓凝之功效，适合制作高强或流态型的混凝土。其技术要求应符合

《混凝土外加剂》GB 8076—2008 的有关规定。

泵送剂宜用于日平均气温在 5℃ 以上的施工环境、泵送施工的混凝土、大体积混凝土、高层建筑混凝土、水下灌注混凝土、滑模施工混凝土等工程。不宜用于蒸汽养护混凝土和蒸压养护的预制混凝土。

3. 速凝剂

速凝剂是指能使混凝土迅速凝结硬化的外加剂。速凝剂与水泥加水拌合后,立即与水泥中的石膏发生反应,使水泥中的石膏变成硫酸钠,失去其缓凝作用,从而让铝酸三钙(C_3A)迅速水化并很快析出其水化物,导致水泥浆迅速凝固。

掺用速凝剂的水泥净浆能在 5 min 内初凝,12 min 内终凝,1 d 的抗压强度可达 7 MPa 以上。但后期强度有所下降,28 d 强度为不掺者的 90% 左右,且掺量愈大,强度降低愈严重。其技术要求应符合《喷射混凝土用速凝剂》GB/T 35159—2017 的有关规定。

速凝剂主要用于喷射混凝土或砂浆、紧急抢修工程、军事工程、防洪堵水工程等。如矿井、隧道、引水涵洞、地下工程岩壁衬砌、边坡和基坑支护等工程。

4. 膨胀剂

膨胀剂是指与水泥、水拌合后,经水化反应生成钙矾石、氢氧化钙或钙矾石和氢氧化钙,使混凝土产生体积膨胀的外加剂。按水化产物分为硫铝酸钙类(代号 A)、氧化钙类(代号 C)、硫铝酸钙—氧化钙类(代号 AC);按限制膨胀率分为 I 型和 II 型。其细度、凝聚时间、限制膨胀率、抗压强度等技术要求应符合《混凝土膨胀剂》GB 23439—2017 的有关规定。

在混凝土中掺入适量的膨胀剂能补偿混凝土自身收缩、干缩和温度变形,防止混凝土开裂,并提高混凝土的密实性和防水性能。

膨胀剂宜用于防水混凝土(如地下室底板和侧墙混凝土)、补偿收缩混凝土、工程接缝、填充灌浆、自应力混凝土、钢管混凝土、连续施工的超长结构混凝土等工程。硫铝酸钙类膨胀剂适用于长期服役环境温度为 80℃ 以下的钢筋混凝土结构。氧化钙类膨胀剂适用于混凝土浇筑过程中,胶凝材料水化温升导致结构内部温度不超过 40℃ 的环境。

5. 防冻剂

防冻剂是指能使混凝土在负温下硬化,并在规定养护条件下达到预期性能的外加剂。防冻剂能降低水的冰点,使水泥在负温条件下仍能继续水化,提高混凝土的早期强度,防止混凝土早期受冻破坏。

绝大部分防冻剂由防冻组分、早强组分、减水组分或引气剂复合而成。常用的防冻剂有亚硝酸盐、硝酸盐、碳酸盐等无机盐类和醇类、尿素等有机化合物类。目前工程上使用的都是复合防冻剂,其技术要求应符合《混凝土防冻剂》JC 475—2004 的有关规定。

防冻剂主要适用于冬季负温条件下的施工,在我国北方地区冬期施工非常需要。

6. 防水剂

防水剂是指能提高水泥砂浆、混凝土抗渗性能的外加剂。分为有机化合物类、无机化合物类和复合类。复合类有无机化合物类复合、有机化合物类复合、无机与有机化合物类复合,也可与引气剂、减水剂、调凝剂等外加剂复合。

复合型防水剂具有高效的减水、增强功能;能有效改善混凝土毛细孔结构,同时析出凝胶,堵塞混凝土内部毛细孔通道,与未加防水剂相比,其抗渗性能可提高 5~8 倍,具有高效抗渗功能;能改善新拌砂浆或混凝土的工作性,沁水率小,显著改善其工作性;可延缓水泥

水化放热速率，能有效防止混凝土开裂；在保持与基准混凝土等强度、等坍落度的前提下，可节省水泥。其技术要求应符合《砂浆、混凝土防水剂》JC 474—2008 的有关规定。

防水剂适用于有防水抗渗要求的混凝土工程。如平房房顶用防水混凝土、混凝土大坝、水工混凝土、防水砂浆等领域。对有抗冻要求的混凝土工程宜选用复合引气组分的防水剂。

7. 防腐阻锈剂

混凝土防腐阻锈剂是指掺入混凝土中，用于抵抗硫酸盐对混凝土的侵蚀、抑制氯离子对钢筋或其他金属预埋件锈蚀的外加剂。按其性能与用途分为 A 型、B 型和 AB 型。其技术要求应符合《混凝土防腐阻锈剂》GB/T 31296—2014 的有关规定。

A 型适用于硫酸盐环境作用等级为中等(Ⅴ - C)、严重(Ⅴ - D)、非常严重(Ⅴ - E)或氯化物环境作用等级为中等(Ⅲ - C、Ⅳ - C)的素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土及钢纤维混凝土等工程。

B 型适用于硫酸盐环境作用等级为中等(Ⅴ - C)或氯化物环境作用等级为严重(Ⅲ - D、Ⅳ - D)、非常严重(Ⅲ - E、Ⅳ - E)、极端严重(Ⅲ - F)的素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土及钢纤维混凝土等工程。

AB 型适用于硫酸盐环境作用等级为严重(Ⅴ - D)、非常严重(Ⅴ - E)或氯化物环境作用等级为严重(Ⅲ - D、Ⅳ - D)、非常严重(Ⅲ - E、Ⅳ - E)、极端严重(Ⅲ - F)的素混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土及钢纤维混凝土等工程。

《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476—2019 和《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310—2019 对环境类别与作用等级的划分见表 2 - 19。

表 2 - 19 环境类别与作用等级划分表

环境类别	名称	环境作用等级					
		A(轻微)	B(轻度)	C(中度)	D(严重)	E(非常严重)	F(极端严重)
I	一般环境	I - A	I - B	I - C	—	—	—
II	冻融环境	—	—	II - C	II - D	II - E	—
III	近海或海洋氯化物环境	—	—	III - C	III - D	III - E	III - F
IV	除冰盐等其他氯化物环境	—	—	IV - C	IV - D	IV - E	—
V	化学腐蚀环境(国标)	—	—	V - C	V - D	V - E	—
V	盐结晶环境(交标)	—	—	—	V - D	V - E	V - F
VI	化学腐蚀环境(交标)	—	—	VI - C	VI - D	VI - E	VI - F
VII	磨蚀环境(交标)	—	—	VII - C	VII - D	VII - E	VII - F

注：① 表中一般环境系指无冻融、氯化物和其他化学腐蚀物质作用。② 表中环境名称后未加注明的，表明 GB/T 50476—2019(国标)和 JTG/T 3310—2019(交标)的分类相同。

8. 外加剂的选用注意事项

外加剂的种类应根据设计和施工要求及外加剂的主要作用合理选用。当不同供货方、不同品种的外加剂同时使用时，应经试验验证，并确保混凝土的性能满足设计和施工要求后再使用。外加剂的选用应注意如下几方面：

(1)含有六价铬盐、亚硝酸盐和硫氰酸盐成分的混凝土外加剂，严禁用于饮水工程中建成后与饮用水直接接触的混凝土。六价铬盐为重金属盐类物质，亚硝酸盐为至癌物质，硫氰酸盐为剧毒物质，这些物质渗透到饮水水中会严重影响人身健康。

(2)含有强电解质无机盐的早强型普通减水剂、早强剂、防水剂和防冻剂，严禁用于与镀锌钢材或铝铁相接触部位的混凝土结构、有外露钢筋预埋铁件而无防护措施的混凝土结构、使用直流电源的混凝土结构及距高压直流电源 100 m 以内的混凝土结构。电解质能导电，其与镀锌钢材、铝铁或钢筋相接触时会产生电化学腐蚀，从而加速钢材的腐蚀。

(3)含有氯盐的早强型普通减水剂、早强剂、防水剂和氯盐类防冻剂，严禁用于预应力混凝土、钢筋混凝土和钢纤维混凝土结构。氯盐属于强酸性物质，它会腐蚀钢筋表面的碱性钝化保护膜，从而加速钢筋的腐蚀。

(4)含有硝酸铵、碳酸铵的早强型普通减水剂、早强剂和含有硝酸铵、碳酸铵、尿素的防冻剂，严禁用于办公、居住等有人员活动的建筑工程。硝酸铵、碳酸铵、尿素会释放出具有强刺激性的氨气，对人的呼吸道会造成危害。

(5)含有亚硝酸盐、碳酸盐的早强型普通减水剂、早强剂、防冻剂和含亚硝酸盐的阻锈剂，严禁用于预应力混凝土结构。亚硝酸盐是致癌物质，是施工安全的危险源，有违劳动保护法规；碳酸盐会与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应生成 CaCO_3 ，促进混凝土碳化，使钢筋环境 pH 值减小而容易锈蚀。

三、矿物掺合料、外加剂的验收与施工管理

1. 进场验收

矿物掺合料可以袋装或散装。袋装每袋净质量不得少于标志质量的 99%，随机抽取 20 袋，其总质量不得少于标志质量的 20 倍；散装由供需双方商量确定。所有包装容器均应在明显位置注明执行的国家标准号、产品名称、等级、净质量或体积、生产厂名，生产日期及出厂编号应于产品合格证上予以注明。

外加剂进场时，供方向需方提供型式检验报告、出厂检验报告与合格证、产品说明书等质量证明文件。需方应按有关标准规定的检验批量、检验项目、抽样方法，进行抽样检验与验收，经检验合格并满足设计和施工要求后再使用。

混凝土用矿物掺合料、外加剂验收批的划分与检测样品的抽取见表 2-20。

表 2-20 矿物掺合料与外加剂检测样品的抽取

产品名称		组批规则	抽样方法与抽样数量
掺合料	粉煤灰	同一厂家连续供应的 200 t 相同等级、相同种类为一批；不足 200 t 亦按一批计	取样时，可连续取，也可从 10 个以上不同部位取等量样品，混合均匀后用四分法缩分至不少于 5 kg，装入密封容器内作为检测样品
	矿渣粉		
	硅 灰	同一厂家生产的同种类 30 t 为一批；不足 30 t 亦按一批计	
外加剂		同一厂家生产的相同种类组成一批。掺量 $\geq 1\%$ 同品种的每一批为 100 t，掺量 $< 1\%$ 的每一批为 50 t；不足 100 t 或 50 t 的也应按一批计，同一批号的产品必须混合均匀	从每批产品 3 个以上的部位取等量试样，总量不少于 0.2 t 水泥所需用量，混合均匀后装入密封容器内作为检测样品

2. 施工管理

矿物掺合料在运输过程中，应防止淋湿、包装破损及混入其他杂物。储存时应分类、分等级贮存在专用仓库或储仓中，不得受潮，不得露天堆放，并应有清晰的标识，以易于识别，便于检查和提货，同时应防止污染环境。储存期从产品生产之日起计算不超过 6 个月，超过储存期的应复验，检验合格的才能出库使用。

外加剂在贮存、运输和使用过程中应根据不同种类和品种分别采取安全防护措施。经进场检验合格的外加剂应按不同供方、不同品种和不同牌号分别存放，并应有清晰的标识。

粉状外加剂应防止受潮结块，有结块时应进行检验，检验合格者应经粉碎至全部通过公称直径为 630 μm 方孔筛后再使用；液体外加剂应贮存在密闭容器内，并应防晒和防冻，有沉淀、异味、漂浮等现象时，应经检验合格后再使用。

2.2.4 拌合和养护用水

混凝土拌合和养护用水均应使用清洁水，不应含有对混凝土的工作性、凝结、强度、耐久性和钢筋产生不利影响的物质。《混凝土用水标准》JGJ 63—2006、JTG/T 3650—2020 及 TB/T 3275—2018 对混凝土用水的 pH、不溶物、可溶物、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、碱含量均作出了限量。见表 2-21。

表 2-21 混凝土用水技术要求

标准 项目	JGJ 63—2006、JTG/T 3650—2020			TB/T 3275—2018		
	预应力混凝土	钢筋混凝土	素混凝土	预应力混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
pH 值	≥ 5.0	≥ 4.5	≥ 4.5	> 6.5	> 6.5	> 6.5
不溶物含量 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 2000	≤ 2000	≤ 5000	< 2000	< 2000	< 5000
可溶物含量 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 2000	≤ 5000	≤ 10000	< 2000	< 5000	< 10000
Cl^- 含量 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 500	≤ 1000	≤ 3500	< 500 ; < 350 (用钢丝或 热处理钢筋)	< 1000	< 3500
	< 500 (设计寿命 100 年) < 350 (用钢丝或热处理钢筋)			< 200 (氯盐环境)		
SO_4^{2-} 含量 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 600	≤ 2000	≤ 2700	< 600	< 2000	< 2700
碱含量 $/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	≤ 1500	≤ 1500	≤ 1500	< 1500	< 1500	< 1500
胶砂抗压强度比/%	≥ 90					
净浆凝结时间差/min	≤ 30					

混凝土拌合和养护用水按水源可分为饮用水、地表水、地下水、再生水、混凝土生产企业的设备洗刷水和海水等。符合国家标准的生活饮用水可直接用于各种混凝土；地表水（江河、淡水湖的水）和地下水（含井水）首次使用前，应进行检验；处理后的工业废水经检验合

格后方能使用；海水含有较多的氯盐，会锈蚀钢筋，且会引起混凝土表面潮湿和盐霜，因此海水可用于拌制素混凝土，未经处理的海水不得用于拌制和养护钢筋混凝土、预应力混凝土和有饰面要求的混凝土。

混凝土养护用水除不溶物、可溶物不作要求外，其他应符合拌合用水要求。

2.3 混凝土的技术性质及影响因素与改善措施

2.3.1 混凝土拌合物的性质及影响因素与改善措施

混凝土拌合物是指混凝土各组成材料按一定比例配合，加水拌制而成的尚未凝结硬化的塑性状态的混凝土，也称预拌混凝土或新拌混凝土。和易性是新拌混凝土的主要技术性质，其次，对于需要长时间连续浇筑的大体积混凝土、超长结构的混凝土及长距离运输的混凝土，混凝土的凝结时间也是需要考虑的重要指标。

一、混凝土拌合物的和易性

1. 和易性的概念

混凝土拌合物的和易性又称工作性。是指混凝土拌合物的施工操作难易程度和抵抗离析的程度。混凝土拌合物和易性的好与差，是通过测定其流动性(稠度)，同时观察其黏聚性和保水性来综合评价的。和易性好的混凝土拌合物，应该具有符合施工要求的流动性、良好的黏聚性和保水性。

1) 流动性

流动性是指混凝土拌合物在自重或机械振动作用下能产生流动，并能均匀密实地充满模板的性能。流动性的大小，反映拌合物的稀稠情况，故亦称稠度，可用坍落度、扩展度或维勃稠度来表示。

坍落度是指混凝土拌合物在自重作用下坍落的高度；扩展度是混凝土拌合物坍落后扩展的直径。

《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080—2016 规定：坍落度适用于粗骨料粒径 ≤ 40 mm，坍落度 ≥ 10 mm 的塑性混凝土和流动性混凝土；扩展度适用于粗骨料粒径 ≤ 40 mm，坍落度 > 160 mm 的大流动性混凝土；维勃稠度适用于粗骨料粒径 ≤ 40 mm，维勃稠度在 $5 \sim 30$ s 之间的干硬性混凝土。

2) 黏聚性

黏聚性是指混凝土拌合物在施工过程中，各组成材料之间有一定的黏聚力，不致产生分层离析的性能。

3) 保水性

保水性是指混凝土拌合物在施工过程中，具有一定的保水能力(吸附水分的能力)，不致产生严重的泌水现象。发生泌水的混凝土，由于水分上浮泌出，在混凝土内形成容易渗水的孔隙和通道，在混凝土表面形成疏松的表层；上浮的水分还会聚积在石子或钢筋的下方形成较大的水囊，削弱了水泥浆与石子、钢筋间的胶结力，影响混凝土结构的质量。

由此可见，混凝土拌合物的工作性是关系到是否既便于施工，又能获得均匀密实混凝土的一个重要性质。

2. 和易性的测定与评价

1) 坍落度与扩展度的测定及评价

坍落度的测定：将混凝土拌合物按规定方法，分3层均匀地装入坍落度筒内，每层用捣棒由边缘向中心按螺旋形均匀插捣25次，捣实后的每层厚度约为筒高的1/3；插捣底层时，捣棒应贯穿整个深度，插捣第二和顶层时，捣棒应插透本层至下一层的表面。装满捣实刮平后，清除筒边底板周围的混凝土，在3~7s内，垂直平稳地向上将筒提起，当试样不再坍落或坍落时间>30s时，测量出筒顶与坍落后拌合物试体最高点的高差，即为坍落度，精确至1mm，测定方法见图2-3。从开始装料到提起坍落度筒的整个过程应不间断进行，且应在150s内完成。坍落度愈大，混凝土拌合物的流动性就愈大。

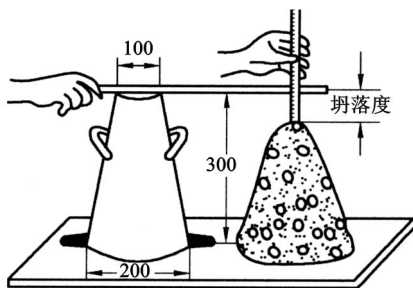


图2-3 坍落度的测定

扩展度的测定：当拌合物的坍落度>160mm时，按测定坍落度的方法装料试验，当混凝土拌合物不再扩散或扩散持续时间>30s时，用钢尺测量混凝土扩展面最终的最大直径和垂直方向的直径，精确至1mm，在二者之差小于50mm的条件下，用其算术平均值作为扩展度值，结果修约至5mm。否则，此次试验无效。扩展度愈大，混凝土拌合物的流动性就愈大。

2) 黏聚性与保水性的评价

黏聚性的评价：将测完坍落度的拌合物锥体，用捣棒轻敲其一侧，若锥体逐渐下沉，则拌合物黏聚性良好；若锥体倒塌、部分崩裂或出现离析现象，则黏聚性差；扩展后，粗骨料在中央集堆，则黏聚性差。

保水性的评价：在坍落度筒提起后无稀浆或仅有少量稀浆自底部析出，则保水性良好；如有较多稀浆自底部析出，锥体部分的混凝土因失浆而骨料外露，则保水性差；扩展后，边缘有水泥浆析出，则保水性差，抗离析性不好。

3) 维勃稠度的测定及

评价

在维勃稠度仪的容量筒中放置坍落度筒，按坍落度的测定方法装入拌合物，然后提起坍落度筒，把透明圆盘转至试样顶面与之接触，启动维勃稠度仪并计时，当透明圆盘底面刚被水泥浆布满时停止计时，从启振到振平所经历的时间(s)即为维勃稠度(又称工作度)，用 $V(s)$ 表示，测定方法见图2-4。维勃稠度愈大，混凝土拌合物就愈干，流动性就愈差。

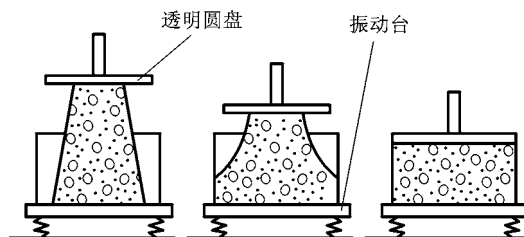


图2-4 维勃稠度的测定

3. 流动性的选用

选用原则：在满足施工操作及混凝土成形均匀密实的条件下，尽量选用较小的坍落度，这样能达到经济合理的目的。

选用依据：应根据不同的结构形式、构件尺寸、配筋疏密、运输方式和距离、浇筑和振捣方式以及工程所处环境条件等因素确定。非泵送混凝土浇筑时的坍落度可参照表 2-22 选用。

表 2-22 非泵送混凝土浇筑时坍落度的选用/mm

基础或地面等的垫层、无配筋的大体积结构(基础、挡土墙等)或配筋稀疏的混凝土结构	10 ~ 30
板、梁和大型或中型截面柱子等	30 ~ 50
配筋密的钢筋混凝土结构(薄壁、筒仓、细柱等)	50 ~ 70
配筋特密的钢筋混凝土结构	70 ~ 90

注：① 本表适用于机械振捣。当人工捣实时，表中数值应酌情增大 20 ~ 30 mm；② 连续浇筑较高的墩台或其他高大结构时，坍落度宜随浇筑高度的上升而适当分段递减。

泵送混凝土的入泵坍落度可参照《混凝土泵送施工技术规程》JGJ/T 10—2011 的规定选用，见表 2-23。

表 2-23 泵送混凝土浇筑时入泵坍落度的选用

最大泵送高度/m	50	100	200	400	> 400
入泵坍落度/mm	100 ~ 140	150 ~ 180	190 ~ 220	230 ~ 260	—
入泵扩展度/mm	—	—	—	450 ~ 590	600 ~ 740

4. 影响和易性的主要因素

1) 水泥浆的稀稠

水泥浆的稀稠是由水胶比决定的。水胶比是混凝土拌合物中的拌合用水量与胶凝材料（水泥 + 矿物掺合料）用量的比值（ W/B ）。在胶凝材料用量不变的情况下，水胶比较大时，水泥浆较稀，拌合物的流动性较大，但水胶比过大时，黏聚性和保水性变差，易离析、分层、泌水。反之，水胶比较小时，水泥浆较稠，拌合物的流动性较小，黏聚性和保水性好，但水胶比过小时，浇筑成形会比较困难。水胶比必须根据混凝土的强度和耐久性的设计要求来合理选择，在满足施工要求的流动性和设计要求的强度与耐久性的前提下，尽量采用较小的水胶比。

《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55—2011 规定，水胶比宜选在 0.4 ~ 0.6 这个合理范围内，以便使混凝土拌合物既方便施工，又能保证浇筑成形的质量。

2) 水泥浆的数量

在水胶比不变的情况下，水泥浆多，骨料表面的水泥浆包裹层较厚，润滑性好，流动性加大，但过多，将容易出现流浆，使混凝土黏聚性变差，且不经济。因此，应以满足施工要求的工作性及设计要求的强度与耐久性的前提下，尽量减少水泥浆量。合适的水泥浆量应根据施工要求的工作性经试验确定。

水泥浆的稀稠和水泥浆的多少，都与拌合用水量有关。一旦水胶比确定后，在试拌过程中为了调整拌合物的流动性，不能只单独调整用水量，而应在保证水胶比不变的前提下，同时调整用水量和胶凝材料用量。因为，在其他材料用量不变的情况下，混凝土的强度主要取决于水胶比，改变用水量就改变了水胶比，故混凝土的强度因此就发生改变。

3) 原材料的影响

水泥品种与特性：不同品种的水泥，其矿物组成、细度、所掺混合材种类的不同都会影响到拌合用水量。在用水量相同的情况下，用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥拌合的混凝土，

其流动性较大、保水较好；用矿渣硅酸盐水泥拌合的混凝土流动性较小、保水性较差；用粉煤灰硅酸盐水泥拌合的混凝土流动性、黏聚性、保水性都较好。水泥的颗粒越细，在相同用水量的情况下，混凝土的流动性就愈小，但黏聚性和保水性较好。

骨料的品种与特性：骨料对拌合物和易性的影响主要有骨料的种类、级配、颗粒形状、表面特征及粒径。卵石表面光滑，流动阻力小，所拌制的混凝土拌合物流动性较大；碎石表面粗糙，流动阻力大，故拌合物的流动性较小。使用级配良好的砂、石时，由于骨料间空隙率小，在水泥浆量不变的情况下，用来填充空隙所需水泥浆量少，包裹在骨料表面的余浆就厚，故拌合物的流动性较大。在水泥浆和骨料用量不变的情况下，骨料颗粒愈粗，骨料总表面积就愈小，故骨料表面的水泥浆包裹层就愈厚，流动性就大。骨料颗粒愈接近球形，针、片状颗粒含量愈小，流动阻力就愈小，故拌合物的流动性就愈好。

外加剂和矿物掺合料的品种与掺量：在混凝土拌合物中加入适量的外加剂，如减水剂、引气剂，可以在不增加水泥浆量的情况下，增大拌合物的流动性，改善黏聚性，降低泌水性，提高混凝土的耐久性；在保证流动性不变的情况下，还可减少用水量和胶凝材料用量。在混凝土拌合物中掺入适量的粉煤灰或磨细矿渣粉时，在用水量、水泥用量不变的情况下，混凝土拌合物的流动性会有明显改善。

4) 砂率的影响

砂率是指混凝土中砂的质量占砂、石总量的百分率。砂率的变动会使骨料的空隙率和骨料的总表面积有显著改变，因而对混凝土拌合物的和易性会产生显著影响。在水泥浆量一定的情况下，若砂率过大，则骨料的总表面积也过大，使水泥浆包裹层过薄，拌合物显得干涩，流动性小；若砂率过小，砂浆量不足，就不能在粗骨料的周围形成足够的砂浆层而起不到润滑作用，也将降低拌合物的流动性，而且会严重影响拌合物的黏聚性和保水性，容易造成离析、流浆等现象。合适的砂率应该是使砂浆的数量能填满石子的空隙并稍有多余，以便将石子拨开，即在水泥浆量一定的情况下，能使混凝土拌合物获得最大的流动性，且能保持良好的黏聚性和保水性，这样的砂率称为合理砂率。也就是说，当采用合理砂率时，能在混凝土拌合物获得所要求的流动性及良好的黏聚性与保水性的条件下，可使胶凝材料用量最少。合理砂率可以通过试验确定，也可通过粗骨料的实测空隙率估算所需砂率，还可根据计算的水胶比、粗骨料的种类和最大粒径参照《普通混凝土配合比设计规程》JGJ 55—2011 确定。

砂率的确定原则是在满足施工要求的和易性的前提下，应尽可能小些。采用粒径较大的粗骨料比粒径较小的砂率要小；级配良好的粗骨料比级配不良的砂率要小；采用卵石比采用碎石的砂率要小；砂较细时，砂率应小些； W/B 较小时，水泥浆稠，砂率应小些；流动性小比流动性大的砂率要小；非泵送比泵送混凝土的砂率要小；有抗渗要求时，砂率应大些；掺用外加剂和矿物掺合料比不掺的砂率要小。

5) 施工方法和环境的影响

用机械搅拌和捣实时，水泥浆在振动中变稀，可使混凝土拌合物容易流动。施工温度较高时，由于水泥水化速度加快和水分蒸发较多，将使混凝土拌合物的流动性很快变小。搅拌好的混凝土在长距离运输或放置较长时间以后，其流动性也会明显变小。

5. 改善和易性的措施

(1) 采用粒形接近球形、针片状颗粒含量少、级配良好的骨料。

(2) 采用合理的砂率。

- (3) 在水胶比不变的情况下调整水泥浆量(可以小幅度调整拌合物的流动性)。
(4) 掺入外加剂(如:减水剂、引气剂等,可以大幅度增大拌合物的流动性)。

二、混凝土拌合物的凝结时间

混凝土拌合物的凝结时间分为初凝和终凝,其概念与水泥凝结时间相同。

混凝土拌合物的凝结时间采用贯入阻力法测定。原理是将新拌混凝土中的砂浆(用孔径为 4.75 mm 的方孔筛过筛)置于砂浆试样筒中,在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 标准温度下,经过一定时间后,将测针以规定的速度 $[(10 \pm 2)\text{s}]$ 贯入砂浆中规定的深度 $[(25 \pm 2)\text{mm}]$ 时,根据测针上所受到的贯入压力 $P(\text{N})$ 来判定混凝土的凝结时间。随着混凝土逐步凝结,测针上所受到的贯入压力也逐步增大,当贯入阻力 $f_{\text{PR}} = 3.5 \text{ MPa}$ 时(测针截面积 $A = 100 \text{ mm}^2$),认为已达到初凝;当贯入阻力 $f_{\text{PR}} = 28 \text{ MPa}$ 时(测针截面积 $A = 20 \text{ mm}^2$),认为混凝土已达到终凝。通过计算不同时间(t)所测得的测针的贯入阻力(f_{PR}),求得两者的对数线性回归方程 $\ln(t) = a + b \ln(f_{\text{PR}})$,然后按式(2-7)计算初凝时间,按式(2-8)计算终凝时间:

$$t_s = e^{(a + b \ln 3.5)} \quad (2-7)$$

$$t_e = e^{(a + b \ln 28)} \quad (2-8)$$

式中: t_s ——初凝时间, min;

t_e ——终凝时间, min;

a 、 b ——线性回归系数;

e ——自然对数的底, $e = 2.718\cdots$ 。

为了满足混凝土结构的施工要求,混凝土在浇筑完成之前不允许出现初凝,而浇筑完成之后要能尽快地凝结。混凝土的凝结时间与水泥品种、水胶比的大小、流动性的大小、所掺外加剂的品种及环境温度等因素有关。水胶比越大、流动性越大的混凝土拌合物,其凝结时间就愈长;掺用缓凝型减水剂时,其凝结时间就长;环境温度愈低,其凝结时间也愈长。

混凝土拌合物的工作性和凝结时间的测定,具体可参照国标《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080—2016 的有关规定进行。

2.3.2 硬化混凝土的性质及影响因素与改善措施

硬化混凝土的性质包括强度、变形及耐久性。

一、强度

混凝土的强度包括立方体抗压强度、轴心抗压强度、圆柱体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折(抗弯拉)强度等。由于立方体抗压强度最容易测定,其他强度与立方体抗压强度之间又有一定的相互关系可以换算,所以选定以立方体抗压强度作为混凝土强度设计和施工质量控制的基准。

1. 抗压强度及强度等级

1) 立方体抗压强度、抗压强度标准值及强度等级

混凝土的立方体抗压强度:按《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019 规定的方法制成的 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体标准试件,1 组 3 块,在标准养护条件[温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $> 95\%$ 或在温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的不流动的饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液



混凝土凝结时间
电子表格计算编制方法

中]下养护 28 d, 按标准的测定方法所测得的抗压强度值称为混凝土立方体抗压强度, 简称混凝土强度。

混凝土立方体抗压强度按式(2-9)计算, 精确至 0.1 MPa:

$$f_{cu} = \frac{F}{A} \quad (2-9)$$

式中: f_{cu} ——混凝土抗压强度, MPa;

F ——试件破坏荷载, N;

A ——试件承压面积, mm^2 。

立方体抗压强度值按下列方法确定:

1 组 3 块试件的强度测定值必有最大值($f_{cu, \max}$)、中间值($f_{cu, m}$)和最小值($f_{cu, \min}$)。

当 3 个测值中的最大值和最小值与中间值的差值均未超过中间值的 $\pm 15\%$ 时, 即 3 个测值均在 $[0.85f_{cu, m}, 1.15f_{cu, m}]$ 范围内时, 则取 3 个测值的算术平均值作为该组试件的强度值。

当 3 个测值中有一个不在 $[0.85f_{cu, m}, 1.15f_{cu, m}]$ 范围时, 则取中间值作为该组试件的抗压强度值。

当 3 个测值中有二个不在 $[0.85f_{cu, m}, 1.15f_{cu, m}]$ 范围时, 则该组试件的试验结果作废。

立方体抗压强度标准值: 是指具有 95% 保证率的立方体抗压强度值, 以 $f_{cu, k}$ 表示。即在混凝土立方体抗压强度测定值的总体分布中, 低于该值的百分率不超过 5%。

研究表明, 同一强度等级的混凝土, 在龄期、生产工艺和配合比基本一致的条件下, 其强度的分布呈正态分布, 见图 2-5。强度平均值($\bar{f}_{cu}$)是曲线的位置参数, 决定曲线最高点的横坐标; 强度标准偏差(σ)是曲线的形状参数, 它的大小反映了曲线的宽窄程度, σ 愈大, 曲线低而宽, 接近强度平均值出现的概率就愈小; σ 愈小, 曲线高而窄, 接近平均值的强度出现的概率就愈大。

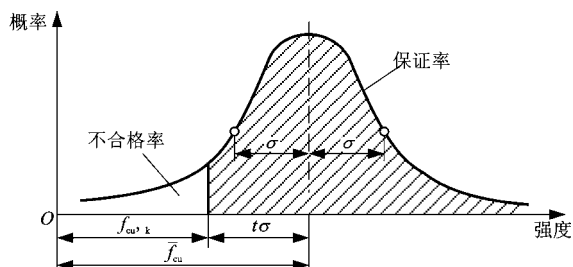


图 2-5 混凝土强度正态分布曲线

由混凝土强度正态分布曲线可知, 要使混凝土的强度具有 95% 的保证率(即强度保证率系数 $t = -1.645$ 时), 则应符合式(2-10)的要求:

$$\bar{f}_{cu} \geq f_{cu, k} + 1.645\sigma \quad (2-10)$$

混凝土强度等级: 混凝土的强度等级采用符号 C 与立方体抗压强度标准值来表示。《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010, 将混凝土强度划分为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80 共十四个等级。如 C20 表示混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu, k} = 20$ MPa, 即强度低于 20 MPa 的概率不超过 5%。

2) 轴心抗压强度

实际建筑结构的形状和受压状态极少有立方体的, 绝大部分是棱柱体和圆柱体形。为了

使测得的混凝土强度接近于混凝土结构的实际情况，在钢筋混凝土结构计算中计算轴心受压构件时，均采用混凝土的轴心抗压强度作为设计依据。

按国标 GB/T 50081—2019 规定的方法制作 150 mm × 150 mm × 300 mm 的棱柱体标准试件，1 组 3 个，在标准养护条件下养护 28 d，按标准的测定方法所测得的抗压强度值称为混凝土的轴心抗压强度（也称棱柱体抗压强度），用代号 f_{cp} 表示。轴心抗压强度的计算与确定方法同立方体抗压强度。研究表明，混凝土的轴心抗压强度为立方体抗压强度的 70% ~ 80%。

2. 劈裂抗拉强度

混凝土在受拉时，变形很小就会开裂，并很快发生脆断。混凝土的抗拉强度很低，一般只有其立方体抗压强度的 1/20 ~ 1/10，因此，在结构中不依靠混凝土的抗拉强度，而只是用来作为确定混凝土抗裂能力的指标。我国采用混凝土的劈裂抗拉强度 (f_{ts}) 来替代其抗拉强度。

按国标 GB/T 50081—2019 规定的方法制作 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体或 $\Phi 150$ mm × 300 mm 圆柱体标准试件，1 组 3 个，在标准条件下养护 28 d，按标准的测定方法进行劈裂试验，试验装置见图 2-6。

混凝土劈裂抗拉强度按式 (2-11) 计算，精确至 0.1 MPa；

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi \cdot A} \quad (2-11)$$

式中： f_{ts} ——混凝土劈裂抗拉强度，MPa；

F ——试件破坏荷载，N；

A ——试件劈裂面面积，mm²。

劈裂抗拉强度的确定方法同立方体抗压强度的确定方法。

研究表明： $f_{ts} = 0.35(f_{cu})^{3/4}$ 。

3. 抗折强度(抗弯拉强度)

按国标 GB/T 50081—2019 规定的方法制作边长为 150 mm × 150 mm × 550 mm 的棱柱体标准试件，1 组 3 个，在标准条件下养护 28 d，按三分点加荷方式测定其抗折强度，抗折试验装置见图 2-7。

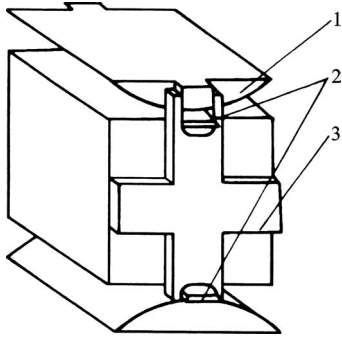


图 2-6 劈裂试验装置

1—垫块；2—垫条；3—支架

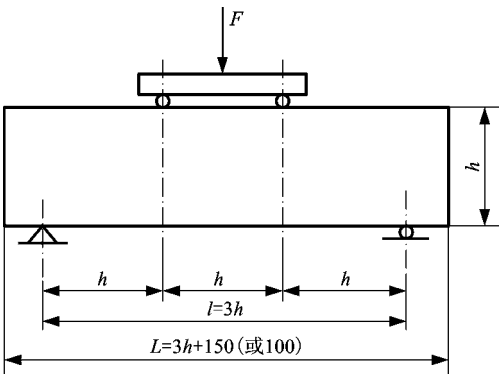


图 2-7 抗折试验装置

若试件下边缘断裂位置处于两个集中荷载作用线之间，则试件的抗折强度按式(2-12)计算，精确至 0.1 MPa：

$$f_t = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \tag{2-12}$$

式中： f_t ——混凝土抗折强度，MPa；

F ——试件破坏荷载，N；

l ——支座间跨度，mm；

b ——试件截面宽度，mm；

h ——试件截面高度，mm。

抗折强度值按下列方法确定：

(1) 3 个试件的折断面均位于两个集中荷载作用线之内时，确定方法同抗压强度。

(2) 当 3 个试件中有一个折断面位于两个集中荷载作用线之外时，则按另 2 个试件的试验结果计算。若这 2 个测值的差值不大于这 2 个测值中较小值的 15% 时，则以这 2 个测值的平均值作为该组试件的抗折强度值，否则该组试件的试验结果无效。

(3) 当 3 个试件中有两个折断面位于两个集中荷载作用线之外时，则该组试件的试验结果无效。

4. 影响混凝土强度的主要因素

影响混凝土强度的主要因素有水泥强度、水胶比、骨料的性质、养护温度与湿度、养护龄期、施工质量、测试条件等方面。

1) 水泥强度

混凝土的强度主要取决于水泥石与骨料界面的胶结强度，而胶结强度主要是由水泥浆凝结硬化而产生的。在其他条件相同时，水泥强度愈高，混凝土的强度也就愈高。

2) 水胶比(W/B)

水胶比的大小决定水泥浆的稀稠，水泥浆的稀稠影响其与砂、石的胶结力及硬化混凝土的密实度，从而影响混凝土的强度。在一定范围内，水胶比愈小，混凝土的强度就愈高。在胶凝材料不变时，水胶比增大，用水量增多，水泥浆变稀，硬化后干缩大，导致水泥石与骨料界面处容易出现干缩裂纹，胶结力变差，且多余的水占有较多的体积，使硬化后的混凝土内留有较多微细孔隙，这都会使混凝土的强度降低。

实践证明，对于强度等级 < C60 的混凝土，混凝土 28 d 的立方体抗压强度(f_{cu})与胶凝材料的强度(f_b)、水胶比(W/B)三者之间的关系可用式(2-13)来表示，即强度回归公式：

$$f_{cu} = \alpha_a \cdot f_b \left(\frac{B}{W} - \alpha_b \right) \tag{2-13}$$

式中： α_a 、 α_b ——回归系数，与粗骨料的品种有关，见表 2-24；

B/W ——胶水比(水胶比的倒数)。

表 2-24 回归系数 α_a 、 α_b 取值 (JGJ 55—2011)

回归系数	粗骨料品种	
	碎石	卵石
α_a	0.53	0.49
α_b	0.20	0.13

由上式可知,当胶凝材料强度和水胶比确定后,可估算出混凝土的强度;当胶凝材料强度和所需混凝土强度确定后,可计算出应采用的水胶比。

由配合比试验确定的水胶比,施工过程中不得随意变动。若因其他原因导致混凝土的流动性损失较大而使施工困难时,不得随意加水,如果多加了水,混凝土的强度就会达不到预定的要求,应在保证水胶比不变的情况下调整水泥浆的用量,或掺入适量的减水剂来改善混凝土的工作性。

3) 骨料性质

使用级配良好、质地坚硬、杂质含量少的砂、石配制的混凝土,其密实度和强度高;碎石表面粗糙,与水泥石的胶结力较强,在相同条件下,碎石混凝土的强度比卵石混凝土稍高一些。

4) 养护温度与湿度

混凝土的硬化关键在于水泥的水化作用,而水泥的水化需要在一定的温度和湿度下进行。在湿度充足的条件下,温度较高时,水泥水化速度加快,因而混凝土强度发展也就加快;反之,温度较低时,混凝土强度发展较为迟缓;当温度在冰点以下时,不但水泥水化基本停止,而且水分结冰,体积膨胀约9%,会使早期强度还不太高的混凝土发生冻胀破坏。因此,夏季高温季节施工时应注意保湿,而当日平均气温低于5℃时,则不得浇水,而应采取保温措施。

如果混凝土表面不便浇水或使用塑料膜时,宜涂刷养护剂;采用塑料膜覆盖养护的混凝土,其敞露的全部表面应覆盖严密,并应保持塑料膜内有凝结水。

对大体积混凝土的养护,应根据气候条件按施工方案采取控温措施,使混凝土内外温差不超过25℃,避免因养护不当造成混凝土结构出现开裂现象。

5) 养护龄期

养护龄期是指混凝土在正常养护条件下所经历的时间。浇筑后的混凝土在正常养护下,其强度随龄期的增长而不断发展,早期(3~14 d)发展较快,以后渐慢,在标准养护条件下,28 d可达到设计强度,以后显著减慢,但只要有水供给,强度仍有所增长,且延续很长时间。

当不掺外加剂、矿物掺合料时,用硅酸盐水泥拌制的混凝土,在标准养护条件下,其强度发展大致与龄期的对数成正比。

当需要较准确地了解结构混凝土在某一龄期的强度时,可在浇筑混凝土的同时制作同条件养护的混凝土强度试件,通过测定同条件养护试件的强度便可知道结构实体混凝土的强度。同条件养护是指养护条件与混凝土结构或构件相同,同条件养护试件的强度可用于结构或构件的拆模、吊装、预应力张拉参考及混凝土强度无损检测结果的修正等。

《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204—2015 规定了同条件养护的等效龄期是按日平均温度逐日累计达到600℃时所对应的龄期(d),0℃及以下的龄期不计,等效养护龄期应 ≥ 14 d,且宜 ≤ 60 d。同一强度等级的同条件养护试件的强度值除以0.88后,再按现行国家标准《混凝土强度检验评定标准》GB 5017—2010的有关规定进行评定,评定结果符合要求时可判结构实体混凝土强度合格。

6) 施工质量

混凝土的搅拌、运输、浇筑、振捣、养护等环节,对混凝土的质量有着重要影响。配料的准确性、振捣密实程度、拌合物的离析、现场养护控制、施工单位的技术和管理水平都会造

成混凝土强度的变化。因此，必须采取严格有效的控制措施和手段，以保证混凝土的施工质量。

7)测试条件

试件尺寸大小的影响：进行混凝土抗压强度测定时，混凝土试件上下端面与试验机上下压板之间的摩阻力对试件的横向鼓胀起着约束作用，越是接近试件的端面，这种约束作用就越大，试件破坏时，其上下部分各成一个较完整的棱锥体，如图 2-8 所示，这种作用称为环箍效应。

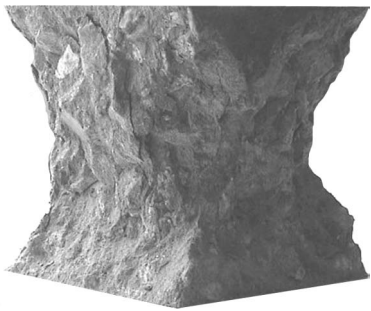


图 2-8 环箍效应

实践证明，环箍效应的作用范围大约是在试件端面边长的 $\sqrt{3}/2$ 倍高度处，故试件的大小不同，其环箍效应也不同，对混凝土强度的测值影响也不同。小立方体试件环箍效应相对作用较大，测得的强度值偏高；大立方体试件环箍效应相对作用较小，测得的强度值偏低；棱柱体试件环箍效应几乎为零。因此，当采用非标准尺寸的立方体试件检验混凝土强度时，对所测强度需要乘以一个换算系数，将其换算为标准试件的强度。混凝土抗压强度试件尺寸的选用与强度换算系数见表 2-25。

表 2-25 混凝土抗压强度试件尺寸与换算系数

骨料最大粒径/mm	立方体抗压强度	轴心抗压强度	换算系数
31.5	100×100×100(非标准试件)	100×100×300(非标准试件)	0.95
40	150×150×150(标准试件)	150×150×300(标准试件)	1.0
60	200×200×200(非标准试件)	200×200×400(非标准试件)	1.05

注：表中试件尺寸单位为 mm。

加荷速率的影响：由于试件的侧向鼓胀变形总是滞后于相应的荷载，如果加荷速率过快，到试件鼓胀破坏时，荷载已超过了其实际所能承受的最大荷载，因而使测值偏高。

国标 GB/T 50081—2019 规定：当混凝土的强度等级 < C30 时，加荷速率为 0.3 ~ 0.5 MPa/s；≥C30 且 < C60 时，为 0.5 ~ 0.8 MPa/s；≥C60 时，为 0.8 ~ 1.0 MPa/s。

其他影响因素：试件各边不相互垂直、表面不平整；试件与压板的接触面有碎片、砂粒；荷载没有施加于轴线上等因素，均会导致混凝土的强度测定值偏低。

5. 提高混凝土强度的措施

- (1)采用高强度的水泥，掺用硅灰或超细矿渣粉等；
- (2)采用坚实、洁净、级配良好的骨料；
- (3)采用较小的水胶比、减少单位用水量；
- (4)采用二次投料搅拌工艺(先将水与砂、水泥进行搅拌，然后加入石子再搅拌)，可改善骨料与水泥砂浆的界面缺陷，有效提高混凝土的强度；
- (5)掺入高性能或高效减水剂，降低水胶比，减少用水量，以提高混凝土的密实度；
- (6)保证成形均匀密实，加强养护。如采用加压成形、压蒸养护等增强措施。

二、变形性能

混凝土的变形对混凝土结构的尺寸、受力状态、应力分布、裂缝开展等有明显影响。

混凝土的变形分为非荷载作用下的变形和荷载作用下的变形。

1. 非荷载作用下的变形

非荷载作用下的变形包括化学收缩、干湿变形和温度变形。

1) 化学收缩

化学收缩是指胶凝材料硬化后的体积收缩,这种收缩是不能恢复的,且随龄期延长而增加,但这种收缩一般不大。水泥品种、水泥用量、单位用水量对混凝土的化学收缩有明显影响。减少水泥用量和单位用水量,采用较小的水胶比可有效减少混凝土的化学收缩。混凝土在收缩过程中会产生微细裂缝,可能会影响混凝土结构的承载状态(裂缝处易产生应力集中)和耐久性。

2) 干湿变形

混凝土随着环境湿度的变化而发生的变形,表现为“湿胀干缩”。在水中硬化的混凝土,体积不变或有微小膨胀;在空气中硬化的混凝土,随着水分的蒸发,凝胶体紧缩而发生收缩,其收缩量可达 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm/m}$ 。

混凝土的干缩量与水泥品种、细度、水泥用量及环境湿度等因素有关。采用矿渣水泥或复合水泥比普通水泥的收缩大;采用高强度水泥时,由于颗粒较细,混凝土的收缩较大;水泥用量较多时,收缩也较大。相反,砂、石在混凝土中形成骨架,对收缩有一定的抑制作用。在水中或潮湿条件下,可以大大减小混凝土的收缩。蒸汽养护的混凝土收缩很小。

混凝土的干燥收缩对工程结构有不利影响。干缩使混凝土结构可能产生干缩裂纹;若干缩受阻将使钢筋混凝土构件产生收缩应力;干缩会使预应力混凝土结构中的预加应力受到损失等。

3) 温度变形

混凝土与其他固体材料一样,具有热胀冷缩现象。当温度变形受到约束时,可能会导致结构的胀裂或拉裂,从而导致结构的破坏。因此,对于超长的混凝土结构和大体积混凝土结构,应根据有关标准的要求设置温度变形缝,避免因温度变形受阻而导致结构开裂或破坏。

2. 荷载作用下的变形

荷载作用下的变形又分为短期荷载作用下的变形和长期荷载作用下的变形。

1) 短期荷载作用下的变形

混凝土结构在短期荷载(临时性的移动外荷载)作用下所产生的变形属弹塑性变形。

混凝土是一种由水泥石、砂、石子组成的不均匀的复合材料,它既不是完全的弹性体,也不是完全的塑性体,而是一个弹塑性体。混凝土在外力作用下,既会产生可以恢复的弹性变形,又会产生不可恢复的塑性变形,这就是随荷载发生的弹塑性变形。

混凝土抵抗变形的能力可用静压弹性模量(割线模量 E)来衡量, E 值愈大,表明其抵抗变形的能力就愈强。在混凝土硬化过程中,由于水泥石的干缩受到骨料的限制,在水泥石与骨料的界面上就存在一些细微的裂缝,当混凝土受压时,其内部应力在裂缝端部形成应力集中,而使裂缝不断扩展,以致延伸汇合成较大的裂缝;当荷载增大到一定程度之后,这些裂缝不断扩大并形成贯通裂缝,导致混凝土结构破坏。

2) 长期荷载作用下的变形

混凝土在长期荷载(如:结构自重荷载、永久性固定的设施设备荷重)作用下,除了会发生随荷载而产生的瞬时变形外,还会发生随时间变化的徐变。

徐变是在长期荷载作用下,混凝土结构在沿作用力方向随时间不断增加的塑性变形,开始时较快,延续2~3年才会逐渐稳定。当荷载卸除后,一部分变形瞬时恢复,还有一部分要过一段时间才能恢复(称为徐变恢复),剩余不可恢复的变形为残余变形。混凝土徐变的数量可达0.3~1.5 mm/m。

徐变发生的原因一般认为是水泥凝胶体发生缓慢的黏性流动并沿毛细孔迁移的结果。环境湿度减少会使徐变增大;混凝土强度愈低,水泥用量愈大,徐变愈大。因骨料的徐变很少,故增加骨料含量可使徐变减少。

混凝土的徐变能缓和钢筋混凝土内由于温度、干缩等引起的应力集中,使应力较为均匀地重新分布,防止裂缝的产生,这是有利的。但在预应力混凝土中,混凝土的徐变,将产生应力松弛,使预加应力受到部分损失,影响预应力混凝土结构的承载能力和使用安全。

三、耐久性

混凝土结构经常会遭受环境温湿度变化、冻融循环、压力水或其他液体的渗透、环境水和土壤中有害介质以及有害气体的侵蚀等各种物理和化学因素的破坏作用。混凝土抵抗环境介质作用,并能长期保持其良好的使用性能和外观完整性,从而维持混凝土结构的安全、正常使用的能力称为混凝土的耐久性。

1. 混凝土耐久性的评价指标

混凝土耐久性可通过其抗渗性、抗冻性、抗硫酸盐侵蚀性、抗氯离子渗透性、抗碳化性、早期抗裂性等指标来综合评价。

1) 抗渗性

抗渗性是指混凝土抵抗压力水渗透的能力。混凝土的抗渗性主要取决于混凝土的密实程度和孔隙构造。若密实性差,且开口连通孔隙多,则混凝土的抗渗性就差;但如果均为封闭孔隙,则混凝土的抗渗性较强。根据混凝土抵抗水压力渗透的能力分为P6、P8、P10、P12、>P12若干等级(抗渗等级),其中P为抗渗等级代号,数字表示不渗漏时能抵抗的最大水压力(单位为0.1 MPa)。抗渗等级愈高的混凝土,其耐久性就愈好。混凝土的抗水渗透性可通过抗渗试验来测定,试验装置见图2-9。



图2-9 混凝土抗渗仪

抗冻性是指混凝土在水饱和状态下,经受多次冻融循环作用,能保持其强度和外观完整性的能力。混凝土抗冻性取决于混凝土的密实程度、孔隙构造和强度。在寒冷地区和严寒地区与水接触又容易受冻的环境下的混凝土,要求具有较强的抗冻性能。

2) 抗冻性

混凝土的抗冻性用28 d龄期的标准试件,按标准方法进行冻融循环试验来确定。冻融试验方法可采用快冻法或慢冻法。

快冻法:按标准方法制作100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,1组3个,在标准

条件下养护至规定龄期(28 d 或 56 d)后,按规定的方法进行冻融循环试验,以试件相对动弹模量(冻融后与冻融前试件横向振动时的基频振动频率的百分数)下降至不低于 60% 或质量损失率不超过 5% 时的最大冻融循环次数来确定其抗冻等级。混凝土抗冻等级分为 F50、F100、F150、F200、F250、F300、F350、F400、>F400 九个等级,其中 F 为抗冻等级代号,数字为最大冻融循环次数。

慢冻法:将按标准方法制作的 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件,1 组 3 个,在标准条件下养护至规定龄期(28 d 或 56 d)后,按规定的方法进行冻融循环试验,以抗压强度损失率不超过 25% 或质量损失率不超过 5% 时的最大冻融循环次数来确定其抗冻标号。混凝土的抗冻标号分为 D50、D100、D150、D200、>D200 五个标号。

3) 抗硫酸盐侵蚀性

抗硫酸盐侵蚀性是指混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力。将按标准方法制作的 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件,1 组 3 块,在标准条件下养护至规定龄期(28 d 或 56 d)后,再在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中进行反复浸泡和烘干循环,并以其抗压强度耐蚀系数 K_f (即抗压强度比)下降到不超过 75% 时的最大循环次数来衡量其抗硫酸盐等级。混凝土抗硫酸盐等级分为 KS30、KS60、KS90、KS120、KS150、>KS150 六个等级。

4) 抗氯离子渗透性

抗氯离子渗透性是指混凝土抵抗氯离子渗透的能力。混凝土抵抗氯离子渗透性愈强,其护筋性就愈强。可用快速氯离子迁移系数法(简称 RCM 法)和电通量法来检验评定。

快速氯离子迁移系数法:将按标准方法制作的直径为 (100 ± 1) mm、高度为 (50 ± 2) mm 的圆柱体试件,1 组 3 个,在标准条件下养护至规定龄期(28 d 或 56 d)后,将试件安装在 RCM 试验装置上,见图 2-10(a),在阴阳两极上施加规定的直流电压至规定的时间。试验结束后,切断电源,取出试件并用清水冲洗干净,在压力试验机上将试件沿轴向劈开后,立即在劈开的试件断面上喷涂 0.1 mol/L 的 AgNO_3 溶液显色剂,15 min 后沿试件直径断面将其分成 10 等份,并用防水笔描出渗透轮廓线,同时测量显色分界线距试件底面的距离,见图 2-10(b)。

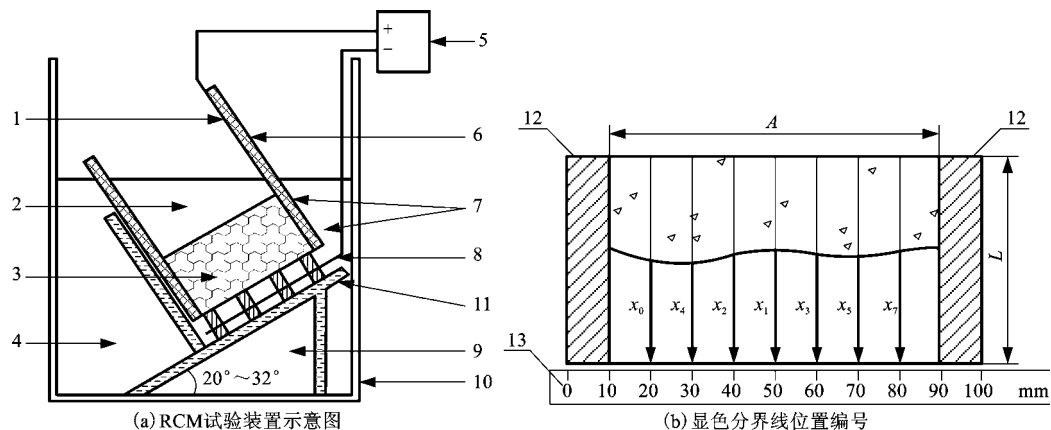


图 2-10 RCM 试验装置示意图及显色分界线位置编号

- 1—阳极板; 2—阳极溶液(0.3 mol/L NaOH 溶液); 3—试件; 4—阴极溶液(10% NaCl 溶液); 5—直流稳压电源;
6—有机硅橡胶套; 7—环箍; 8—阴极板; 9—支架; 10—阴极试验槽;
11—支撑头; 12—试件边缘部分; 13—直尺; A—测量范围; L—试件厚度。

混凝土的非稳态氯离子迁移系数(D_{RCM})按式(2-14)计算,精确至 $0.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$;

$$D_{RCM} = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot X_d}{U - 2}} \right) \quad (2-14)$$

式中: U ——试验时所用电压的绝对值, V;
 T ——阳极溶液的初始温度和结束温度的平均值, $^{\circ}\text{C}$;
 L ——试件的厚度, 精确至 0.1 mm;
 X_d ——氯离子渗透深度的平均值, 精确至 0.1 mm;
 t ——试验持续时间, h。

电通量法: 在直径为 $(100 \pm 1) \text{mm}$ 、高度为 $(50 \pm 2) \text{mm}$ 的混凝土圆柱体试件的两端, 施加 60 V 直流电压, 以 6 h 通过混凝土试件的电量(库仑)来评价混凝土抵抗氯离子渗透性能。该方法原理与 RCM 法类似。试验装置示意图见图 2-11。

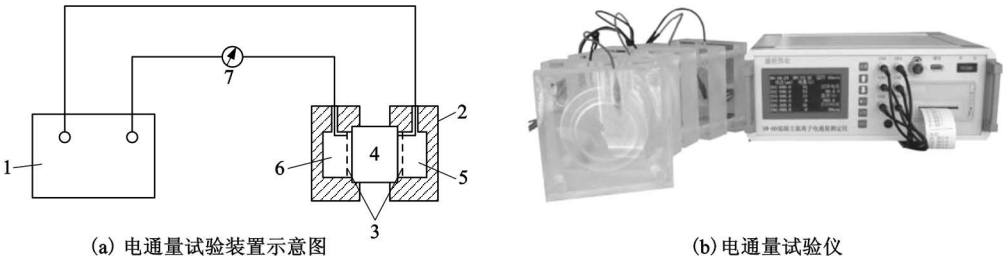


图 2-11 电通量试验示意图

1—直流稳压电源; 2—试验槽; 3—铜电极; 4—圆柱体砼试件; 5、6—电解液室

混凝土抗氯离子渗透性能等级划分见表 2-26。

表 2-26 混凝土抗氯离子渗透性能等级划分(JGJ/T193—2009)

氯离子迁移系数 $D_{RCM}/(\times 10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$					电通量 Q/C				
RCM - I	RCM - II	RCM - III	RCM - IV	RCM - V	Q - I	Q - II	Q - III	Q - IV	Q - V
≥ 4.5	≥ 3.5 < 4.5	≥ 2.5 < 3.5	≥ 1.5 < 2.5	< 1.5	≥ 4000	≥ 2000 < 4000	≥ 1000 < 2000	≥ 500 < 1000	< 500

注:《混凝土耐久性检验评定标准》JGJ/T 193—2009。

混凝土在规定的试验条件下,氯离子迁移系数愈大或电通量愈大,其抵抗氯离子渗透能力就愈差,保护钢筋不被锈蚀的能力也就愈差。

5) 早期抗裂性

早期抗裂性是通过考察受约束的混凝土试件,在规定的养护条件下的开裂趋势来评价混凝土的抗裂性。如果混凝土的抗裂性差,混凝土在干燥收缩时,由于受到约束条件的限制,在混凝土内部将产生拉应力,一旦拉应力超过混凝土的抗拉强度,混凝土表面就会出现开裂现象。

混凝土试件抗裂试验的养护条件,一般宜在温度为 $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $60\% \pm 5\%$ 的条件下进行;有特殊要求的,按要求执行。试验模具见图 2-12 所示。

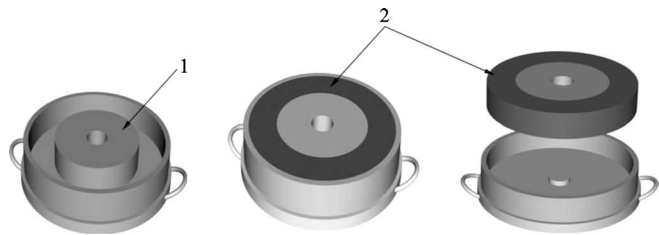


图 2-12 混凝土抗裂试验模具

1—约束环；2—混凝土

混凝土试件开裂性能的评价准则：以试件侧面的开裂程度进行判定。试件侧面开裂面积愈小，开裂出现的时间愈晚，混凝土的抗裂性能就愈强。混凝土早期抗裂性能的等级划分见表 2-27。

表 2-27 混凝土早期抗裂性能的等级划分 (JGJ/T193—2009)

等级	L - I	L - II	L - III	L - IV	L - V
单位面积上的总开裂面积 $c/(\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$c \geq 1000$	$700 \leq c < 1000$	$400 \leq c < 700$	$100 \leq c < 400$	$c < 100$

6) 抗碳化性

硬化后的混凝土中含有水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，能使钢筋表面形成一种阻锈的钝化膜，对钢筋提供碱性保护。但是，长期处于潮湿环境，又受到空气中 CO_2 作用的混凝土，其所含 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 和 H_2O 反应生成 CaCO_3 ，使混凝土碱度降低，这就是碳化。严重的碳化不仅会使混凝土发生收缩裂纹，而且当碳化深度超过混凝土保护层时，钢筋便在 CO_2 和水的作用下发生锈蚀，不但失去了与混凝土的胶结，而且铁锈的膨胀会使已有裂纹的混凝土保护层发生剥落，这种剥落又将引起更严重的锈蚀和崩裂，最后导致结构破坏。因此，对于长期处于潮湿且有较浓 CO_2 环境中的混凝土要重视碳化的危害。

长期处于水中的混凝土不会与 CO_2 接触，干燥环境中的混凝土没有支持碳化的水，均不存在碳化问题。混凝土抗碳化性能的等级划分见表 2-28。

表 2-28 混凝土抗碳化性能的等级划分 (JGJ/T193—2009)

等级	T - I	T - II	T - III	T - IV	T - V
碳化深度 d_m/mm	$d_m \geq 30$	$20 \leq d_m < 30$	$10 \leq d_m < 20$	$0.1 \leq d_m < 10$	$d_m < 0.1$

2. 提高混凝土耐久性的措施

- (1) 根据工程所处环境及要求，合理选用水泥品种，以适应抗蚀、抗渗或抗冻的要求。
- (2) 选用较好的骨料，改善骨料级配，从严控制骨料中的有害杂质含量，注意是否含有活性骨料，保证水泥石和骨料不被腐蚀。
- (3) 确保结构混凝土所需的合理强度。混凝土强度等级应根据不同混凝土结构和所处

环境条件来确定,且确定的混凝土强度等级不得低于相应标准规定的最低强度等级。

《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T50476—2019 对建筑结构混凝土的最低强度等级要求见表 2-29。

表 2-29 建筑工程混凝土的最低强度等级要求 (GB/T50476-2019)

环境类别与作用等级	设计使用年限		
	100 年	50 年	30 年
I - A	C30	C25	C25
I - B	C35	C30	C25
I - C	C40	C35	C30
II - A	Ca35, C45	Ca30, C45	Ca30, C40
II - B	Ca40	Ca35	Ca35
II - C	Ca45	Ca40	Ca40
III - C, IV - C, V - C, III - D, IV - D, V - D	C45	C40	C40
III - E, IV - E, V - E	C50	C45	C45
III - F	C50	C50	C50

注：①表中所示混凝土最低强度等级为配筋混凝土结构；②Ca30 表示强度等级为 C30 的引气混凝土；③素混凝土结构的最低强度等级：I 类环境不低于 C15，II、V 类环境同相应的配筋混凝土结构，III、IV 类环境可按表中的 III - C、IV - C 环境作用等级确定；④预应力混凝土构件最低强度等级为 C40；⑤对于大截面受压墩柱等普通钢筋混凝土构件，在加大钢筋保护层厚度的前提下，可低于表中的规定，但不应低于相应环境作用等级的素混凝土最低强度等级的要求。

《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310—2019 对桥涵结构混凝土的最低强度等级要求见表 2-30。

表 2-30 公路桥涵结构混凝土最低强度等级要求 (JTG/T 3310—2019)

环境名称	环境作用等级	预应力混凝土	钢筋混凝土			素混凝土
			上部结构	下部结构		
			梁、板、塔	桥墩、涵洞	承台、基层	
一般环境	I - A	C40	C35	C30	C25	C25
	I - B、I - C	C45	C40	C35	C30	
冻融环境	II - C、II - D	C45	C40	C35	C30	C30
	II - E	C50	C45	C40	C35	
近海或海洋氯化物环境	III - C、III - D	C45	C40	C35	C30	C30
	III - E、III - F	C50	C45	C40	C35	
除冰盐等其他氯化物环境	IV - C	C45	C40	C35	C30	C30
	IV - D	C50	C40	C35	C30	
	IV - E	C50	C45	C40	C35	

续上表

环境名称	环境作用等级	预应力混凝土	钢筋混凝土			素混凝土
			上部结构	下部结构		
			梁、板、塔	桥墩、涵洞	承台、基层	
盐结晶环境	V - D	C45	C40	C35	C30	C35
	V - E、V - F	C50	C45	C40	C35	
化学腐蚀环境	Ⅵ - C、Ⅵ - D	C45	C40	C35	C30	C35
	Ⅵ - E、Ⅵ - F	C50	C45	C40	C35	
磨蚀环境	Ⅶ - C、Ⅶ - D	C45	C40	C35	C30	C35
	Ⅶ - E、Ⅶ - F	C50	C45	C40	C35	

注：表中所列混凝土最低强度等级是针对设计年限为 100 年的桥涵结构或构件，设计年限为 50 年或 30 年时，其混凝土最低强度等级可在本表的规定上降低一个等级(5 MPa)，但预应力混凝土应 $\geq$ C40、钢筋混凝土应 $\geq$ C25。

《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 对不同结构混凝土的最低强度等级要求见表 2 - 31。

表 2 - 31 铁路工程混凝土的最低强度等级要求 (TB/T 3275—2018)

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别						灌注桩		隧道衬砌	
		100 年		60 年		30 年					
		钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
碳化环境	T1	C30	C30	C25	C25	C25	C25	C30	C30	C30	C30
	T2	C35	C30	C30	C25	C30	C25	C35	C30	C35	C30
	T3	C40	C30	C35	C25	C35	C25	C40	C30	C40	C30
氯盐环境	L1	C40	C35	C35	C30	C35	C30	C40	C35	C40	C35
	L2	C45	C35	C40	C30	C40	C30	C45	C35	C45	C35
	L3	C50	C35	C45	C30	C45	C30	C50	C35	C50	C35
化学侵蚀环境	H1	C35	C35	C30	C30	C30	C30	C35	C35	C35	C35
	H2	C40	*	C35	C35	C35	C35	C40	C40	C40	C40
	H3	C45	*	C40	*	C40	*	C45	C45	C45	C45
	H4	C50	*	C45	*	C45	*	C45	C45	C45	C45
盐类结晶破坏环境	Y1	C35	C35	C30	C30	C30	C30	—	—	C35	C35
	Y2	C40	*	C35	C35	C35	C35	—	—	C40	C40
	Y3	C45	*	C40	*	C40	*	—	—	C45	C45
	Y4	C50	*	C45	*	C45	*	—	—	C45	C45

续上表

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别						灌注桩		隧道衬砌	
		100 年		60 年		30 年					
		钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土 预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	素混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
冻融破坏环境	D1	C35	C35	C30	C30	C30	C30	—	—	C35	C35
	D2	C40	*	C35	C35	C35	C35	—	—	C40	C40
	D3	C45	*	C40	*	C40	*	—	—	C45	C45
	D4	C50	*	C45	*	C45	*	—	—	C45	C45
磨蚀环境	M1	C35	C35	C30	C30	C30	C30	—	—	—	—
	M2	C40	*	C35	C35	C35	C35	—	—	—	—
	M3	C45	*	C40	*	C40	*	—	—	—	—

注：①表中的混凝土强度等级是指在标准条件下制作并养护 56d 龄期的抗压强度值。②“*”表示不宜使用素混凝土，如果不得不使用素混凝土时，混凝土的最低强度等级应与钢筋混凝土一致，且应采取有效的防裂措施。③对于钢筋的配筋率小于最小配筋率的混凝土结构，其混凝土的最低强度等级要求与本表中钢筋混凝土的要求相同。

(4)控制水胶比和胶凝材料用量。水胶比不得过大，并保证合适的胶凝材料用量，以保证混凝土的耐久性。水胶比过大，混凝土干缩大，易出现干缩裂纹，且内部开口连通微细孔多，混凝土抗渗、抗冻性差。胶凝材料过少，混凝土不密实；胶凝材料过多，水化热高，过高的水化热会增加混凝土的开裂可能性，且硬化后的混凝土干缩大，易出现干缩裂纹，均会导致混凝土的耐久性下降。各行业根据工程特点和所处环境条件的不同，对混凝土的最大水胶比和胶凝材料用量均作出了具体规定。

《混凝土结构耐久性设计标准》GB/T50476—2019 对建筑工程混凝土的“最大水胶比”和“胶凝材料用量”的具体规定见表 2-32。

表 2-32 建筑工程混凝土的最大水胶比和胶凝材料用量 (GB/T50476—2019)

强度等级	最大水胶比	最少胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)	最大胶凝材料用量/(kg·m ⁻³)
C25	0.60	260	—
C30	0.55	280	—
C35	0.50	300	—
C40	0.45	320	—
C45	0.40	—	450
C50	0.36	—	500
≥C50	0.33	—	550

注：①表中数据适用于粗骨料最大粒径为 20 mm 的情况，骨料粒径较大时宜适当降低胶凝材料用量，骨料粒径较小时可适当增加胶凝材料用量；②引气混凝土的胶凝材料用量与非引气混凝土的要求相同；③当胶凝材料中的矿物掺合料掺量 > 20% 时，最大水胶比应 ≤ 0.45。

《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》JTG/T 3310—2019 对混凝土的“最大水胶比”和

“单位体积胶凝材料用量”的具体规定见表 2-33。

表 2-33 公路工程混凝土的最大水胶比和单位体积胶凝材料用量 (JTG/T3310—2019)

混凝土强度等级	最大水胶比	最少胶凝材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大胶凝材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
C25	0.55	275	400
C30	0.55	280	
C35	0.50	300	
C40	0.45	320	450
C45	0.40	340	
C50	0.36	360	480
C55	0.32	380	500
C60	0.30	400	530

注：大掺量矿物掺合料混凝土的最大水胶比应 ≤ 0.42 。

《铁路混凝土》TB/T 3275—2018 对混凝土的“最大水胶比”“最少胶凝材料用量”和“最大胶凝材料用量”的具体规定分别见表 2-34、表 2-35。

表 2-34 铁路工程混凝土的最大水胶比和最少胶凝材料用量 (TB/T 3275—2018)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别					
		100 年		60 年		30 年	
		最大水胶比	最少胶凝材料用量	最大水胶比	最少胶凝材料用量	最大水胶比	最少胶凝材料用量
碳化环境	T1	0.55	280	0.60	260	0.60	260
	T2	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	T3	0.45	320	0.50	300	0.50	300
氯盐环境	L1	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	L2	0.40	340	0.45	320	0.45	320
	L3	0.36	360	0.40	340	0.40	340
化学侵蚀环境	H1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	H2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	H3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
	H4	0.36	360	0.40	340	0.40	340
盐类结晶破坏环境	Y1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	Y2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	Y3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
	Y4	0.36	360	0.40	340	0.40	340
冻融破坏环境	D1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	D2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	D3	0.40	340	0.45	320	0.45	320
	D4	0.36	360	0.40	340	0.40	340

续上表

环境类别	环境作用等级	设计使用年限级别					
		100 年		60 年		30 年	
		最大水胶比	最少胶凝材料用量	最大水胶比	最少胶凝材料用量	最大水胶比	最少胶凝材料用量
磨蚀环境	M1	0.50	300	0.55	280	0.55	280
	M2	0.45	320	0.50	300	0.50	300
	M3	0.40	340	0.45	320	0.45	320

注：碳化环境下，素混凝土的最大水胶比应 ≤ 0.60 ，最少胶凝材料用量应 $\geq 260 \text{ kg/m}^3$ ；氯盐环境下，素混凝土的最大水胶比应 ≤ 0.55 ，最少胶凝材料用量应 $\geq 280 \text{ kg/m}^3$ 。

表 2-35 铁路工程混凝土的最大胶凝材料用量 (TB/T 3275—2018)

混凝土强度等级	< C30	C30 ~ C35	C40 ~ C45	C50	C55 ~ C60
最大胶凝材料用量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	360	400 550 (自密实砼)	450 600 (自密实砼)	480	500

(5) 掺用外加剂。掺入减水剂，减少用水量，提高混凝土的密实性；掺入引气剂，改善混凝土的孔隙构造，提高其抗渗、抗冻能力。

(6) 确保施工质量。严格按配合比进行配料，拌合均匀、不离析、不泌水，浇捣均匀密实，并加强养护。

(7) 表面防护。对于处于地上混凝土结构，可用涂料、防水砂浆、瓷砖、沥青等进行表面防护，防止混凝土的腐蚀和碳化。

2.4 混凝土的配合比设计

混凝土配合比设计就是根据所选原材料的技术性能和施工条件，设计出能满足所需混凝土技术要求和经济合理的 1 m^3 混凝土各组成材料的用量(单位用量)或质量比(相对用量)。

配合比设计是保证混凝土质量一个很重要的环节，配合比设计是否合理，直接影响着混凝土结构的质量和建设成本。

2.4.1 配合比设计的基本要求

- (1) 首先应满足施工所要求的混凝土拌合物的和易性。
- (2) 满足结构设计所要求的混凝土的强度及抗渗、抗冻、抗腐蚀等耐久性。
- (3) 在满足上述要求的前提下，尽量节省胶凝材料、降低成本，达到经济合理的目的。

2.4.2 配合比设计资料的准备

(1) 了解设计要求的混凝土强度等级和混凝土生产单位的生产质量控制水平，以便确定强度标准差和配制强度。

(2) 了解工程所处环境条件和混凝土耐久性要求，以便确定所配制混凝土的水胶比和胶

凝材料用量是否满足有关标准对最大水胶比和单位体积胶凝材料用量的规定。

(3) 了解结构构件断面尺寸、钢筋配置情况及施工工艺,以便确定混凝土用骨料的最大粒径及混凝土拌合物的稠度。

(4) 了解混凝土所需各种原材料的供应情况。

2.4.3 配合比设计中的三个重要参数

(1) 水胶比(W/B): 是指水与胶凝材料(水泥+掺合料)的比值。它对混凝土的和易性、强度、耐久性、经济性有明显影响。在满足和易性、强度和耐久性的前提下,应尽量取较小值。

(2) 单位用水量(m_{w0}): 是指在满足混凝土和易性的前提下, 1 m^3 混凝土所需拌合用水的质量。它决定混凝土的和易性及经济性。在满足和易性的前提下,应尽量取较小值。

(3) 砂率(β_s): 是指 1 m^3 混凝土中,砂子的质量与砂子和石子总质量的百分比。它主要影响混凝土的和易性。在满足和易性的前提下,应尽量取较小值。

2.4.4 配合比的设计步骤

混凝土配合比设计应按现行行业标准《普通混凝土配合比设计规程》JGJ55—2011 的有关规定进行。混凝土配合比设计可分为如下几个步骤:

(1) 根据混凝土的技术要求和所选用的原材料技术要求,进行初步配合比的计算。

(2) 按计算所得初步配合比进行试拌、调整,使其拌合物的和易性满足施工要求,并测定拌合物的表观密度,然后修正初步配合比,提出试拌配合比。

(3) 在试拌配合比的基础上进行混凝土强度和耐久性验证,根据验证结果确定略大于配制强度所对应的水胶比,并保持单位用水量不变,砂率在试拌配合比砂率的基础上作适当调整,然后计算出胶凝材料用量和其他材料用量,并进行试拌和验证,符合设计要求后可确定为试验室配合比。

(4) 施工时,再根据施工现场砂、石含水率情况随时进行调整,将试验室配合比换算成施工配合比,并进行开盘鉴定。鉴定内容主要包括现场所用原材料、混凝土的和易性、强度和耐久性是否与配合比试验报告一致。

一、初步配合比的计算

1. 混凝土配制强度的确定

(1) 当混凝土的设计强度等级 $< C60$ 时,配制强度应根据混凝土设计强度标准值和强度标准差(施工单位施工质量控制水平)按式(2-15)计算,精确至 0.1 MPa :

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (2-15)$$

式中: $f_{cu,0}$ ——混凝土配制强度, MPa ;

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值(设计强度标准值), MPa ;

σ ——混凝土强度标准差, MPa ;

1.645——95% 保证率系数。

混凝土强度标准差可按下列规定确定:

① 当具有近 1~3 个月的同一品种、同一强度等级混凝土的强度资料,且试件组数 $n \geq 30$ 组时,其混凝土强度标准差(σ)按式(2-16)计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - n \cdot m_{f_{cu}}^2 \right)} \quad (2-16)$$

式中: $f_{cu,i}$ ——第 i 组试件实测抗压强度值, MPa;

$m_{f_{cu}}$ —— n 组试件抗压强度平均值, MPa。

对于强度等级 $\leq C30$ 的混凝土, 当计算出的 $\sigma < 3.0$ MPa 时, 应取 3.0 MPa; 对于强度等级 $> C30$, 且 $< C60$ 的混凝土, 当计算出的 $\sigma < 4.0$ MPa 时, 应取 4.0 MPa。

②当无近期的同一品种、同一强度等级混凝土的强度资料时, 其强度标准差可按表 2-36 取值。

表 2-36 混凝土强度标准差 σ 值的选用 (JGJ 55—2011)

混凝土强度等级	$\leq C20$	C25 ~ C45	C50 ~ C55
σ /MPa	4.0	5.0	6.0

(2) 当混凝土的设计强度等级 $\geq C60$ 时, 配制强度应按式 (2-17) 计算:

$$f_{cu,0} \geq 1.15 f_{cu,k} \quad (2-17)$$

2. 水胶比 (W/B) 的确定

当混凝土的设计强度等级 $< C60$ 时, 混凝土水胶比可根据混凝土的配制强度、胶凝材料强度和粗骨料种类按式 (2-18) 计算:

$$\frac{W}{B} = \frac{\alpha_a \cdot f_b}{f_{cu,0} + \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot f_b} \quad (2-18)$$

式中: $f_{cu,0}$ ——混凝土配制强度, MPa;

f_b ——实测胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度, MPa, 按水泥胶砂强度检验方法进行测定; 当无实测值时, 可按式 $f_b = \gamma_f \cdot \gamma_s \cdot f_{ce}$ 计算确定;

γ_f 、 γ_s ——粉煤灰和矿渣粉的影响系数, 可按表 2-37 确定, 粉煤灰和矿渣粉的最大掺量参照表 2-38 取用;

f_{ce} ——实测水泥 28 d 胶砂抗压强度, MPa, 无实测结果时, 可按式 $f_{ce} = \gamma_c \cdot f_{ce,g}$ 计算确定;

γ_c ——水泥强度富余系数, 可参照表 2-39 取用;

$f_{ce,g}$ ——水泥强度等级值, MPa;

α_a 、 α_b ——回归系数, 按表 2-24 取用, 也可通过试验确定。

表 2-37 粉煤灰影响系数和粒化高炉矿渣粉影响系数 (JGJ55—2011)

掺量/%	粉煤灰影响系数 (γ_f)	粒化高炉矿渣粉影响系数 (γ_s)
0	1.00	1.00
10	0.85 ~ 0.95	1.00
20	0.75 ~ 0.85	0.95 ~ 1.00
30	0.65 ~ 0.75	0.90 ~ 1.00
40	0.55 ~ 0.65	0.80 ~ 0.90
50	—	0.70 ~ 0.85

注: ① 采用 I、II 级粉煤灰宜取上限值; ② 采用 S75 级矿渣粉宜取下限值, S95 级矿渣粉宜取上限值, S105 级矿渣粉可取上限值加 0.05; ③ 当超出表中的掺量时, 影响系数应经试验确定。

表 2-38 混凝土中矿物掺合料的最大掺量 (JGJ55—2011)

矿物掺合料种类	水胶比 (W/B)	最大掺量/%			
		采用硅酸盐水泥 (P. I、P. II)		采用普通硅酸盐水泥 (P. O)	
		钢筋混凝土	预应力混凝土	钢筋混凝土	预应力混凝土
粉煤灰	≤0.4	45	35	35	30
	>0.4	40	30	30	20
粒化高炉矿渣粉	≤0.4	65	55	55	45
	>0.4	55	45	45	35
钢渣粉	—	30	20	20	10
磷渣粉	—	30	20	20	10
硅 灰	—	10	10	10	10
复合掺合料	≤0.4	65	55	55	45
	>0.4	55	45	45	35

注：① 采用其他通用硅酸盐水泥时，宜将水泥混合材掺量 20% 以上的混合材量计入矿物掺合料；② 复合掺合料各组分掺量不宜超过单掺时的最大掺量；③ 在混合使用两种或两种以上矿物掺合料时，矿物掺合料总掺量应符合表 2-38 中复合掺合料的规定。

表 2-39 水泥强度的富余系数 (JGJ55—2011)

水泥强度等级	32.5	42.5	52.5
富余系数 γ_c	1.12	1.16	1.10

为了满足混凝土有关耐久性要求，计算所得水胶比 (W/B) 不得大于相关标准规定的最大水胶比，否则，应取规定的最大水胶比作为设计水胶比。各行业规定的最大水胶比分别见表 2-32、表 2-33 及表 2-34。

3. 单位用水量、胶凝材料用量及外加剂用量的确定

(1) 每立方米塑性混凝土用水量 (m_{w0}) 应符合下列规定：

① 当 W/B 在 0.40 ~ 0.80 范围时，塑性混凝土可根据粗骨料的种类、最大粒径及施工要求的混凝土拌合物稠度，按表 2-40 确定混凝土的单位用水量。

表 2-40 塑性混凝土的用水量 (JGJ55—2011) / (kg · m⁻³)

拌合物稠度		卵石最大粒径/mm				碎石最大粒径/mm			
项目	指标	10	20	31.5	40	16	20	31.5	40
坍落度 /mm	10 ~ 30	190	170	160	150	200	185	175	165
	35 ~ 50	200	180	170	160	210	195	185	175
	55 ~ 70	210	190	180	170	220	205	195	185
	75 ~ 90	215	195	185	175	230	215	205	195

注：① 本表用水量系采用中砂时的平均取值。采用细砂时，每立方米混凝土用水量可增加 5 ~ 10 kg；采用粗砂时，则可减少 5 ~ 10 kg；② 掺用各种外加剂或掺合料时，用水量应相应调整。

② 当 W/B < 0.40 时，其用水量可通过试验确定。

(2) 掺用外加剂时，每立方米流动性和大流动性混凝土的用水量 (m_{w0}) 可按式 (2-19) 计

算,精确至1 kg:

$$m_{w0} = m'_{w0}(1 - \beta) \quad (2-19)$$

式中: m'_{w0} ——未掺外加剂时推算的满足实际坍落度要求的 1 m^3 混凝土的用水量, kg。当坍落度 $>90 \text{ mm}$ 时,可以表 2-40 中 90 mm 坍落度的用水量为基础,按每增大 20 mm 坍落度, 1 m^3 混凝土相应增加 5 kg 用水量来推算;当坍落度增大到 180 mm 以上时,随坍落度相应增加的用水量可减少。

β ——外加剂的减水率, %。应经混凝土试验确定。

(3) 每立方米混凝土中胶凝材料用量(m_{b0})按式(2-20)计算,精确至1 kg:

$$m_{b0} = \frac{m_{w0}}{W/B} \quad (2-20)$$

为了满足混凝土有关耐久性要求,计算所得 1 m^3 混凝土的胶凝材料用量不得少于相关标准规定的最少用量,也不得超过最大用量。当计算所得胶凝材料用量少于有关标准规定的最少用量或超过最大用量时,应取规定的最少用量或最大用量作为设计用量。各行业规定的单位体积胶凝材料的最少和最大用量分别见表 2-32、表 2-33、表 2-34 及表 2-35。

(4) 每立方米混凝土中外加剂用量(m_{a0})按式(2-21)计算,精确至0.01 kg:

$$m_{a0} = m_{b0} \cdot \beta_a \quad (2-21)$$

式中: β_a ——外加剂的掺量(占胶凝材料用量的百分率), %。应经混凝土试验确定。

4. 矿物掺合料和水泥用量的确定

(1) 每立方米混凝土中矿物掺合料的用量(m_{f0})按式(2-22)计算,精确至1 kg:

$$m_{f0} = m_{b0} \cdot \beta_f \quad (2-22)$$

式中: β_f ——矿物掺合料的掺量(占胶凝材料用量的百分率), %。可按表 2-38 确定或经试验确定。

(2) 每立方米混凝土中水泥的用量(m_{c0})按式(2-23)计算:

$$m_{c0} = m_{b0} - m_{f0} \quad (2-23)$$

5. 砂率(β_s)的确定

砂率应根据骨料的技术指标、混凝土拌合物性能和施工要求,参考既有历史资料确定。当无历史资料可参考时,混凝土砂率的确定应符合下列规定:

(1) 坍落度 $<10 \text{ mm}$ 的混凝土,其砂率应经试验确定。

(2) 坍落度为 $10 \sim 60 \text{ mm}$ 的混凝土,其砂率可根据粗骨料品种、最大公称粒径及水胶比按表 2-41 确定。

表 2-41 混凝土的砂率 β_s (JGJ55—2011)/%

水胶比 (W/B)	卵石最大公称粒径/mm			碎石最大公称粒径/mm		
	10	20	40	16	20	40
0.40	26 ~ 32	25 ~ 31	24 ~ 30	30 ~ 35	29 ~ 34	27 ~ 32
0.50	30 ~ 35	29 ~ 34	28 ~ 33	33 ~ 38	32 ~ 37	30 ~ 35
0.60	33 ~ 38	32 ~ 37	31 ~ 36	36 ~ 41	35 ~ 40	33 ~ 38
0.70	36 ~ 41	35 ~ 40	34 ~ 39	39 ~ 44	38 ~ 43	36 ~ 41

注: ① 本表数值系中砂的选用砂率,对细砂或粗砂,可相应地减少或增大砂率; ② 只用一个单粒级粗骨料配制混凝土时,砂率应适当增大; ③ 采用机制砂配制混凝土时,砂率可适当增大。

(3) 坍落度 > 60 mm 的混凝土, 其砂率可经试验确定, 也可在表 2-41 的基础上, 按坍落度每增大 20 mm, 砂率增大 1% 的幅度予以调整。

(4) 泵送混凝土的砂率宜为 35% ~ 45%, 具体应根据骨料的品种、粗细、级配情况来确定。

6. 粗、细骨料用量(m_{g0} 、 m_{s0})的计算

(1) 采用质量法计算时, 粗、细骨料用量按式(2-24)计算, 精确至 1 kg:

$$\begin{aligned} m_{c0} + m_{f0} + m_{s0} + m_{g0} + m_{w0} &= m_{cp} \\ \beta_s &= \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2-24)$$

式中: m_{cp} ——1 m³ 混凝土拌合物的假定质量, kg。可取 2350 ~ 2450 kg。

(2) 采用体积法计算时, 粗、细骨料用量按式(2-25)计算, 精确至 1 kg:

$$\begin{aligned} \frac{m_{c0}}{\rho_c} + \frac{m_{f0}}{\rho_f} + \frac{m_{s0}}{\rho_s} + \frac{m_{g0}}{\rho_g} + \frac{m_{w0}}{\rho_w} + 0.01\alpha &= 1 \\ \beta_s &= \frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} \times 100\% \end{aligned} \quad (2-25)$$

式中: ρ_c 、 ρ_f 、 ρ_s 、 ρ_g 、 ρ_w ——水泥、矿物掺合料、细骨料、粗骨料及水的表观密度实测值, kg/m³。水的表观密度可取 1000 kg/m³。

α ——混凝土拌合物中的含气量, %。在不使用引气剂或引气型外加剂时, 可取 1。

配合比的表示方法:

$$\text{水泥: 掺合料: 砂: 石: 外加剂: 水} = m_{c0} : m_{f0} : m_{s0} : m_{g0} : m_{a0} : m_{w0} = 1 : \frac{m_{f0}}{m_{c0}} : \frac{m_{s0}}{m_{c0}} : \frac{m_{g0}}{m_{c0}} : \frac{m_{a0}}{m_{c0}} : \frac{m_{w0}}{m_{c0}}。$$

二、试拌配合比的确定

初步配合比是借助于一些经验公式和数据计算出来的或是利用经验资料查得的, 因而不一定能符合设计要求, 必须经过试拌和调整, 直到其和易性满足设计要求。试拌时, 按计算所得的初步配合比, 称取不少于 20 L 混凝土各组成材料的用量, 经搅拌均匀后, 进行坍落度或扩展度的测定, 同时观察拌合物的保水性和黏聚性情况, 当坍落度或扩展度满足设计要求, 且拌合物的保水性和黏聚性均良好时, 则该初步配合比可确定为试拌配合比; 当坍落度或扩展度不满足设计要求时, 则按下列方法进行调整:

(1) 若坍落度或扩展度过大, 则保持水胶比不变, 适当减少水泥浆的用量, 同时根据拌合物的保水性和黏聚性的情况, 在砂、石总量不变的情况下, 适当增大砂率; 或减少减水剂的用量。

(2) 若坍落度或扩展度过小, 则保持水胶比不变, 适当增加水泥浆的用量, 同时根据拌合物的保水性和黏聚性的情况, 在砂、石总量不变的情况下, 适当减小砂率; 或增加减水剂的用量。

经试拌和调整, 拌合物的坍落度或扩展度满足设计要求后, 测定拌合物的表观密度, 重新修正初步配合比, 即得试拌配合比。配合比的修正按下列方法进行:

当调整后的拌合物的表观密度实测值与表观密度的计算值之差的绝对值不超过计算值的

2% 时, 试拌配合比可不进行修正; 当二者之差超过 2% 时, 应将确定的试拌配合比中的各材料用量均乘以校正系数(δ), 校正系数按式(2-26)计算, 精确至 0.01:

$$\delta = \frac{\rho_{c, t}}{\rho_{c, c}} \quad (2-26)$$

式中: $\rho_{c, t}$ ——经调整后的混凝土拌合物表观密度的实测值, kg/m^3 ;

$\rho_{c, c}$ ——混凝土拌合物表观密度的计算值, $\rho_{c, c} = m_c + m_f + m_s + m_g + m_w$, kg/m^3 ;

m_c 、 m_f 、 m_s 、 m_g 、 m_w ——调整后的 1 m^3 混凝土拌合物中水泥、矿物掺合料、细骨料、粗骨料及水的用量, kg/m^3 。

三、试验室配合比的确定

经试拌调整确定的试拌配合比的强度和耐久性有可能低于配制强度, 也可能比配制强度高很多, 因此, 尚应对确定的试拌配合比进行强度和耐久性验证。验证时, 应采用三个不同的配合比, 其中一个为经试配、调整和修正后所得的试拌配合比, 另外两个配合比的水胶比以试拌配合比的水胶比为基准, 分别增加和减少 0.05, 用水量与试拌配合比相同, 砂率分别增加和减少 1%, 并分别计算出另外两个配合比的各材料用量, 然后分别按三个配合比进行配料, 经搅拌均匀后, 检验其和易性是否满足设计和施工要求, 符合要求后制作强度和耐久性试验用试件各 1~3 组, 在标准养护条件下养护 28 d 后进行强度试验, 然后根据所测 28 d 的强度和水胶比(W/B)绘制曲线图(见图 2-13), 最后从曲线图上求得 28 d 强度略大于配置强度($f_{cu, 0}$)所对应的水胶比(W'/B'), 即为经济合理的水胶比, 也可采用内插法求得经济合理的水胶比。再用此水胶比, 用水量与试拌配合比相同, 砂率在试拌配合比的基础上作适当调整后, 重新计算其他材料用量, 即确定为试验室配合比。

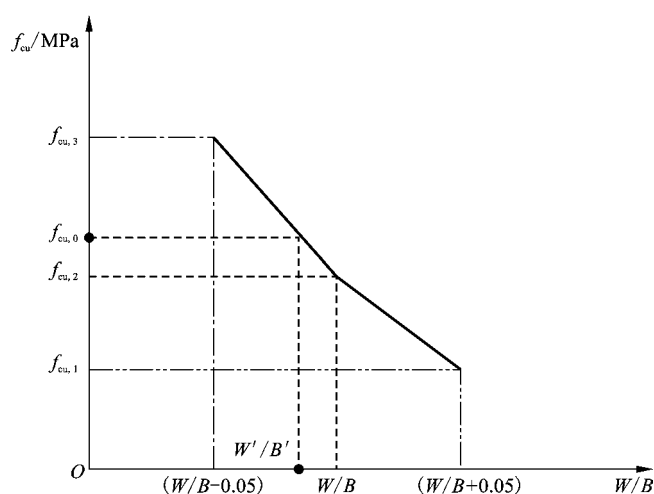


图 2-13 $f_{cu} - W/B$ 关系图

四、施工配合比的换算

试验室得出的配合比,砂、石材料均为风干状态,其含水率均 $<0.5\%$,而施工现场所用砂、石一般都是露天堆放,其含水率随季节的变化较大,故施工配合比应根据现场砂、石的实测含水率值按下述方法进行换算:

设现场使用的砂、石子的含水率分别为 $a\%$ 和 $b\%$,则,施工配合比中的砂、石和水的用量分别按式(2-27)、式(2-28)及式(2-29)计算:

$$\text{湿砂子用量: } m'_s = m_s(1 + a\%) \quad (2-27)$$

$$\text{湿石子用量: } m'_g = m_g(1 + b\%) \quad (2-28)$$

$$\text{拌合用水量: } m'_w = m_w - (m_s \times a\% + m_g \times b\%) \quad (2-29)$$

其他材料用量不变。

五、混凝土配合比设计计算实例

设计资料:某高速铁路桥梁工程的钢筋混凝土桩基础,设计使用寿命为100年,所处环境类别为化学侵蚀环境H1级,混凝土设计强度等级为C35。混凝土浇筑方式采用混凝土输送泵泵送,坍落度为180~220mm。

所用材料:水泥为P.O42.5,表观密度 $\rho_c = 3.1 \text{ g/cm}^3$;粉煤灰为I级,表观密度 $\rho_{\text{II}} = 2.2 \text{ g/cm}^3$,掺量为10%;粒化高炉矿渣粉为S95级,表观密度 $\rho_{\text{I2}} = 2.9 \text{ g/cm}^3$,掺量为10%;天然河砂为中砂,表观密度 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$;碎石最大公称粒径25mm,连续级配,表观密度 $\rho_g = 2.7 \text{ g/cm}^3$;外加剂为聚羧酸系高性能减水剂,掺量为胶凝材料用量的1%,减水率为25%;拌合用水为无腐蚀性的洁净水。试确定该混凝土的试验室配合比?假设现场使用的砂、石子的含水率实测值分别为5%和1%,试确定其施工配合比?

设计步骤如下:

1. 确定混凝土配制强度 $f_{\text{cu},0}$

查表2-36,取标准差 $\sigma = 5.0 \text{ MPa}$ 。

计算混凝土配制强度: $f_{\text{cu},0} = f_{\text{cu},k} + 1.645\sigma = 35 + 1.645 \times 5 = 43.2 \text{ (MPa)}$

2. 确定胶凝材料强度 f_b

因该混凝土分别掺加了粉煤灰、矿渣粉各10%,且无胶凝材料28d实测强度,故查表2-37、表2-39得 $\gamma_f = 0.95$ 、 $\gamma_s = 1.0$ 、 $\gamma_c = 1.16$,并估算出胶凝材料28d强度。

$$f_b = \gamma_f \cdot \gamma_s \cdot f_{\text{ce}} = \gamma_f \cdot \gamma_s \cdot \gamma_c \cdot f_{\text{ce},g} = 0.95 \times 1.0 \times 1.16 \times 42.5 = 46.8 \text{ (MPa)}$$

3. 计算水胶比 W/B

因采用的粗骨料为碎石,故

$$\frac{W}{B} = \frac{\alpha_a \cdot f_b}{f_{\text{cu},0} + \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot f_b} = \frac{0.53 \times 46.8}{43.2 + 0.53 \times 0.20 \times 46.8} = 0.52$$

计算出的 W/B 已大于TB/T 3275—2018规定的最大水胶比0.50(见表2-34),不满足耐久性要求,故应取规定的最大水胶比0.50作为设计水胶比。

4. 确定单位用水量 m_{w0}

由于该混凝土采用最大公称粒径为 25 mm 的碎石作为粗骨料,设计要求的混凝土拌合物坍落度为 180 ~ 220 mm,根据本模块 2.4.4 第一项第 3 条的规定,求得未掺减水剂时的最小用水量为 $210 + (180 - 90) \times 5/20 = 232 (\text{kg}/\text{m}^3)$;最大用水量为 $210 + (220 - 90) \times 5/20 = 242 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。暂取 $m'_{w0} = 240 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。又由于该混凝土中掺用了高性能减水剂,且已知其减水率为 25%,即 $\beta = 25\%$,故实际用水量为: $m_{w0} = m'_{w0}(1 - \beta) = 240(1 - 0.25) = 180 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

5. 计算 1 m^3 混凝土中胶凝材料的用量 m_{b0}

$$m_{b0} = \frac{m_{w0}}{W/B} = \frac{180}{0.5} = 360 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

计算所得胶凝材料用量大于 TB/T 3275—2018 规定的最少胶凝材料用量 300 kg(见表 2-34),小于最大用量 400 kg(见表 2-35),满足耐久性要求。

6. 计算 1 m^3 混凝土中外加剂的用量 m_{a0}

因高性能外加剂掺量为胶凝材料质量的 1.0%,即 $\beta_a = 1.0\%$,故

$$m_{a0} = m_{b0} \cdot \beta_a = 360 \times 1\% = 3.6 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

7. 计算 1 m^3 混凝土中粉煤灰的用量 m_{f1}

因粉煤灰的掺量为胶凝材料总量的 10%,即 $\beta_{f1} = 10\%$,故

$$m_{f1} = m_{b0} \cdot \beta_{f1} = 360 \times 10\% = 36 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

8. 计算 1 m^3 混凝土中矿渣粉的用量 m_{f2}

因矿渣粉的掺量为胶凝材料总量的 10%,即 $\beta_{f2} = 10\%$,故

$$m_{f2} = m_{b0} \cdot \beta_{f2} = 360 \times 10\% = 36 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

9. 计算 1 m^3 混凝土中水泥的用量 m_{c0}

$$m_{c0} = m_{b0} - m_{f1} - m_{f2} = 360 - 36 - 36 = 288 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

10. 确定砂率 β_s

根据本模块 2.4.4 第一项第 5 条的第(4)项的规定,泵送混凝土砂率宜为 35% ~ 45%,暂取 $\beta_s = 40\%$ 。

11. 计算砂、石用量 m_{s0} 、 m_{g0}

(1)按质量法计算:假定 1 m^3 混凝土拌合物的质量为 2400 kg,由下列公式计算:

$$288 + 36 + 36 + m_{s0} + m_{g0} + 180 = 2400$$

$$\frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} = 0.4$$

解联立方程,得 $m_{s0} = 744 \text{ kg}/\text{m}^3$, $m_{g0} = 1116 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

计算配合比(初步配合比)归纳如下:

$$m_{c0} : m_{f1} : m_{f2} : m_{s0} : m_{g0} : m_{a0} : m_{w0} = 288 : 36 : 36 : 744 : 1116 : 3.6 : 180$$

$$=1:0.125:0.125:2.58:3.88:0.0125:0.62$$

(2)按体积法计算：由下列公式计算砂、石用量：

$$\frac{288}{3100} + \frac{36}{2200} + \frac{36}{2900} + \frac{m_{g0}}{2700} + \frac{m_{s0}}{2650} + \frac{180}{1000} + 0.01 \times 1 = 1$$

$$\frac{m_{s0}}{m_{s0} + m_{g0}} = 0.4$$

解方程组得 $m_{s0} = 738 \text{ kg/m}^3$, $m_{g0} = 1107 \text{ kg/m}^3$ 。

计算配合比(初步配合比)归纳如下：

$$m_{c0}:m_{f1}:m_{f2}:m_{s0}:m_{g0}:m_{a0}:m_{w0} = 288:36:36:738:1107:3.6:180$$

$$= 1:0.125:0.125:2.56:3.84:0.0125:0.62$$

12. 试拌配合比的确定

1) 计算试拌 20 L 混凝土各材料用量

以质量法计算的初步配合比为例。将 1 m^3 混凝土各材料用量分别乘以 0.02 便得 20 L 混凝土拌合物各材料用量。见表 2-42。

表 2-42 试拌 20 L 混凝土各材料用量

材料名称	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂子	碎石	减水剂	水
材料用量/kg	5.76	0.72	0.72	14.88	22.32	0.072	3.6

2) 试拌与调整

称取表 2-42 中各材料用量，拌合均匀后测得拌合物的坍落度为 160 mm，小于要求的坍落度 180~220 mm。为此，保持水胶比不变，增加 5% 的水泥浆，同时保持砂、石总量不变，将砂率减少 1%，即调整后的砂率为 39%，重新计算 20L 混凝土拌合物所需各材料用量如下：

$$\text{用水量: } m'_w = 180 \times 0.02(1 + 5\%) = 3.78(\text{kg})$$

$$\text{水泥用量: } m'_c = 288 \times 0.02(1 + 5\%) = 6.05(\text{kg})$$

$$\text{粉煤灰用量: } m'_{f1} = 36 \times 0.02(1 + 5\%) = 0.76(\text{kg})$$

$$\text{矿粉用量: } m'_{f2} = 36 \times 0.02(1 + 5\%) = 0.76(\text{kg})$$

$$\text{砂子用量: } m'_s = (744 + 1116) \times 0.39 \times 0.02 = 14.51(\text{kg})$$

$$\text{碎石用量: } m'_g = (744 + 1116) \times 0.61 \times 0.02 = 22.69(\text{kg})$$

$$\text{减水剂用量: } m'_a = (6.05 + 0.76 + 0.76) \times 0.01 = 0.076(\text{kg})$$

重新称取新计算的各材料拌合均匀后，测得拌合物的坍落度为 210 mm，且保水性和黏聚性均良好，符合要求。同时测得拌合物的表观密度 $\rho_{c,t} = 2420 \text{ kg/m}^3$ 。

3) 试拌配合比的确定

计算调整后的混凝土拌合物表观密度的计算值：

$$\rho_{c,c} = (6.05 + 0.76 + 0.76 + 14.51 + 22.69 + 3.78) / 0.02 = 2428(\text{kg/m}^3)$$

$$\text{修正系数: } \delta = \rho_{c,t} / \rho_{c,c} = 2420 / 2428 = 0.997$$

因为 $0.98 < \delta < 1.02$, 故调整后的配合比无需修正。

故最终确定的试拌配合比为:

$$\begin{aligned} m'_{c0}:m'_{f1}:m'_{f2}:m'_{s0}:m'_{s1}:m'_{s2}:m'_{w0} &= \frac{6.05}{0.02}:\frac{0.76}{0.02}:\frac{0.76}{0.02}:\frac{14.51}{0.02}:\frac{22.69}{0.02}:\frac{0.07}{0.02}:\frac{3.78}{0.02} \\ &= 302:38:38:726:1134:3.8:189 \\ &= 1:0.126:0.126:2.40:3.75:0.0126:0.63 \end{aligned}$$

13. 强度验证和试验室配合比的确定

强度验证采用三个不同的配合比, 其中一个为试拌配合比, 另外两个配合比的水胶比以试拌配合比的水胶比为基准, 分别增加和减少 0.05, 用水量与试拌配合比相同, 砂率分别增加和减少 1%。另外两个配合比的计算结果如下:

1) 另外两个配合比的计算

(1) 配合比 1: $W_1/B_1 = 0.50 - 0.05 = 0.45$, 单位用水量与试拌配合比相同, 即 189 kg, 砂率 $\beta_{s1} = 39\% - 1\% = 38\%$ 。则胶凝材料用量 $m_{b1} = 189/0.45 = 420(\text{kg})$ 。

其中: 粉煤灰和矿渣粉的用量为 $m_{f1} = m_{f2} = 420 \times 10\% = 42(\text{kg})$;

水泥用量为 $m_{c1} = m_{b1} - m_{f1} - m_{f2} = 420 - 42 - 42 = 336(\text{kg})$;

外加剂用量为 $m_{a1} = 420 \times 1\% = 4.2(\text{kg})$ 。

按质量法计算砂和碎石用量。混凝土拌合物的表观密度按实测的试拌配合比的表观密度 2420 kg/m^3 计算。由下列公式计算砂和碎石用量:

$$420 + m_{g1} + m_{s1} + 189 = 2420$$

$$\frac{m_{s1}}{m_{s1} + m_{g1}} = 0.38$$

解方程组得: $m_{s1} = 688 \text{ kg}$; $m_{g1} = 1123 \text{ kg}$ 。

配合比 1: $m_{c1}:m_{f1}:m_{f2}:m_{s1}:m_{g1}:m_{a1}:m_{w1} = 336:42:42:688:1123:4.2:189$

(2) 配合比 2: $W_2/B_2 = 0.5 + 0.05 = 0.55$, 单位用水量与试拌配合比相同, 即 189 kg, 砂率 $\beta_{s2} = 39\% + 1\% = 40\%$ 。则胶凝材料用量 $m_{b2} = 189/0.55 = 344(\text{kg})$ 。

其中: 粉煤灰和矿渣粉的用量为 $m_{f2} = m_{f2} = 344 \times 10\% = 34(\text{kg})$;

水泥用量为 $m_{c2} = m_{b2} - m_{f2} - m_{f2} = 344 - 34 - 34 = 276(\text{kg})$;

外加剂用量为 $m_{a2} = 344 \times 1\% = 3.44(\text{kg})$ 。

按质量法计算砂和碎石用量。混凝土拌合物的表观密度按实测的试拌配合比的表观密度 2420 kg/m^3 计算。由下列公式计算砂和碎石用量:

$$344 + m_{g2} + m_{s2} + 189 = 2420$$

$$\frac{m_{s2}}{m_{s2} + m_{g2}} = 0.40$$

解方程组得: $m_{s2} = 755 \text{ kg/m}^3$; $m_{g2} = 1132 \text{ kg/m}^3$ 。

配合比 2: $m_{c2}:m_{f2}:m_{f2}:m_{s2}:m_{g2}:m_{a2}:m_{w2} = 276:34:34:755:1132:3.44:189$

2) 试拌、调整与强度验证

(1) 试拌与调整: 参照试拌配合比试拌与调整方法进行试拌。经试拌, 配合比 1 和

配合比 2 的坍落度分别为 205 mm 和 215 mm, 拌合物的保水性和粘聚性均良好, 故不需要调整。

(2) 强度验证: 分别以试拌配合比、配合比 1 和配合比 2 的拌合物制作强度验证试件各 3 组, 在标准养护条件下养护 28 d 后测得其平均抗压强度分别为 41.5 MPa、48.3 MPa 和 35.9 MPa。由内插法求得 $f_{cu} = 44$ MPa 时, 其对应的水胶比为 $W'/B' = 0.48 < 0.5$, 满足耐久性要求。

(3) 试验室配合比的确定: 以水胶比为 0.48, 单位用水量为试拌配合比的用水量 189 kg。计算所需胶凝材料用量为 $m'_b = 189/0.48 = 394$ (kg);

其中, 粉煤灰和矿渣粉的用量为 $m'_{f1} = m'_{f2} = 394 \times 10\% = 39$ (kg);

水泥用量为 $m'_c = m'_b - m'_{f1} - m'_{f2} = 394 - 39 - 39 = 316$ (kg);

外加剂用量为 $m'_a = 394 \times 1\% = 3.94$ (kg)。

因确定的 W'/B' 与试拌配合比的水胶比接近, 故取 $\beta'_s = \beta_s = 0.39$ (与试拌配合比的砂率相同), 利用质量法计算砂和碎石用量, 计算时, 假定 1 m^3 混凝土的质量取试拌配合比拌合物的实测表观密度值。计算结果如下:

$$394 + m'_s + m'_g + 189 = 2420$$

$$\frac{m'_s}{m'_s + m'_g} = 0.39$$

解方程组得: $m'_s = 716$ kg; $m'_g = 1121$ kg。

即 $m'_c : m'_{f1} : m'_{f2} : m'_s : m'_g : m'_a : m'_w = 316 : 39 : 39 : 716 : 1121 : 3.94 : 189$

$$= 1 : 0.12 : 0.12 : 2.27 : 3.55 : 0.012 : 0.60$$

14. 施工配合比的确定

湿砂的用量: $m''_s = m'_s(1 + a\%) = 716(1 + 0.05) = 752$ (kg);

湿碎石的用量: $m''_g = m'_g(1 + b\%) = 1121(1 + 0.01) = 1132$ (kg);

用水量: $m''_w = m'_w - (m'_s \times a\% + m'_g \times b\%) = 189 - (716 \times 0.05 + 1121 \times 0.01) = 142$ (kg);

水泥、粉煤灰、矿渣粉和减水剂用量不变。

施工配合比: $m''_c : m''_{f1} : m''_{f2} : m''_s : m''_g : m''_a : m''_w = 316 : 39 : 39 : 752 : 1132 : 3.94 : 142$

$$= 1 : 0.12 : 0.12 : 2.38 : 3.58 : 0.012 : 0.45$$

2.5 混凝土结构用钢筋

混凝土结构用钢筋主要有钢筋混凝土结构用普通钢筋和预应力混凝土结构用预应力筋。

2.5.1 钢筋的主要技术性质

普通钢筋和预应力钢筋作为钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的主要受力结构材料, 不仅需要具有一定的力学性能, 同时还需要具有容易加工的性能。拉伸性能是其力学性能, 冷弯性能和焊接性能是其重要的工艺性能。



钢与铁的区别及钢的分类

1. 拉伸性能

拉伸性能是建设工程用钢材最重要的力学性能。通过拉伸试验所测得的屈服强度、抗拉强度和伸长率等指标是建设工程用钢材的重要技术指标。不同含碳量的钢材在拉伸过程中会表现出不同的特性，而应用最广泛的低碳钢（常称之为软钢），在拉伸过程中所表现的应力与变形的关系最具有代表性，其“应力 - 应变”曲线图如图 2 - 14(a)；中、高碳钢（常称之为硬钢）其“应力 - 应变”曲线图如图 2 - 14(b)。

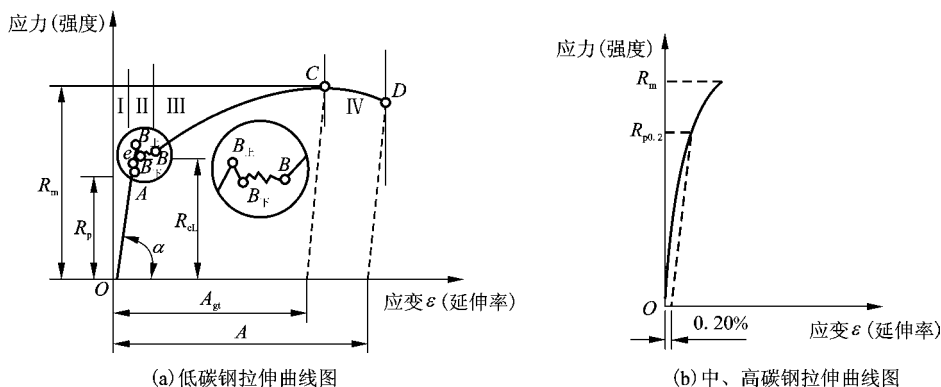


图 2 - 14 钢材拉伸试验应力 - 应变曲线图

低碳钢在拉伸过程中，其应力与变形的变化可分为弹性、屈服、强化和颈缩四个阶段。

弹性阶段(I)：该阶段的应力与应变成正比，见图 2 - 14(a)中直线 OA 段，在此过程中卸去荷载，试件将恢复到原来的形状和尺寸，无塑性变形，此阶段产生的变形称为弹性变形。曲线 A 点对应的应力叫做弹性极限（比例极限），以 R_p 表示。在弹性阶段，应力与变形的比值称为弹性模量(E)，即 $E = R_p / \varepsilon = \tan \alpha$ 。钢材的弹性模量大约为 $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。弹性模量的大小可体现钢材抵抗变形能力的大小。 E 值愈大，使其产生同样弹性变形的应力值也愈大。

屈服阶段(II)：当应力超过弹性极限 A 点后，应力与变形不再成正比关系。由于钢材内部晶粒滑移，使荷载在一个较小的范围内波动，而变形却急剧增加，这一波动阶段叫做屈服阶段。此时卸除外力，试件的变形不能完全恢复，已产生了一定的残余变形，即塑性变形。 AB 段的最高点($B_{\uparrow}$)所对应的应力称为上屈服点(上屈服强度)，用 R_{eH} 表示；最低点($B_{\downarrow}$)所对应的应力称为下屈服点(下屈服强度)，用 R_{eL} 表示，按式(2 - 30)计算，单位为 MPa：

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad (2 - 30)$$

式中： F_{eL} ——屈服阶段的最小荷载，N；

S_0 ——试件的初始横截面面积， mm^2 。

当钢材受力达到屈服点后，变形即迅速发展，虽然尚未破坏，但已不能满足正常使用要求。故钢材在结构中受力不得进入屈服阶段（即必须在弹性阶段内工作），否则将产生较大的塑性变形而使结构不能正常工作，并可能导致结构的破坏。因此，在结构设计中，都是以屈服强度（下屈服强度）标准值作为钢材强度设计取值的依据。

对于中、高碳钢（硬钢），因其含碳量高、变形小，“应力 - 应变”图显得高而窄，如

图 2-14(b) 所示, 它没有明显的屈服现象, 其屈服强度是以试件在拉伸过程中产生 0.2% 塑性变形(残余变形)时的非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替, 称为条件屈服点。

强化阶段(Ⅲ): 钢材从弹性阶段到屈服阶段, 其变形从弹性转化为塑性, 钢材内部组织产生晶格滑移。当应力超过屈服强度后, 由于钢材内部组织产生晶格畸变, 钢材得到强化, 使其抵抗外力的能力又重新提高, 此时的变形发展速度虽然也较快, 但却是随着应力的增加而增加, 故称为强化阶段, 见图 2-14(a) 曲线 BC 段。对应于最高点 C 的应力称为抗拉强度(极限强度), 以 R_m 表示, 按式(2-31)计算, 单位为 MPa:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2-31)$$

式中: F_m ——最大荷载, N。

强屈比: 钢材的抗拉强度与屈服强度之比(R_m/R_{eL})称为强屈比。强屈比是反映钢材利用率和安全可靠度的一个指标。强屈比较大, 钢材的利用率虽较低, 但结构或构件的安全可靠性较高, 如果由于超载、材质不匀、受力偏心等多方面原因, 使钢材进入了屈服阶段, 但因其抗拉强度远高于屈服强度, 而不至于立刻断裂, 其明显的塑性变形会被人们发现并采取补救措施, 从而保证安全; 强屈比过小, 钢材的利用率虽然高, 但结构或构件的安全可靠性较低。一般建设工程用钢材的合理强屈比应在 1.25 ~ 1.67 之间。

颈缩阶段(Ⅳ): 当荷载增加至极限 C 点以后, 试件变形急剧增大, 钢材抵抗变形能力明显下降, 在试件最薄弱处的横断面开始迅速缩小, 出现“颈缩”现象, 如图 2-15 所示, 直至断裂, 最后在曲线的 D 点处断裂[见图 2-14(a)], 这一阶段(曲线 CD 段)称为颈缩阶段。

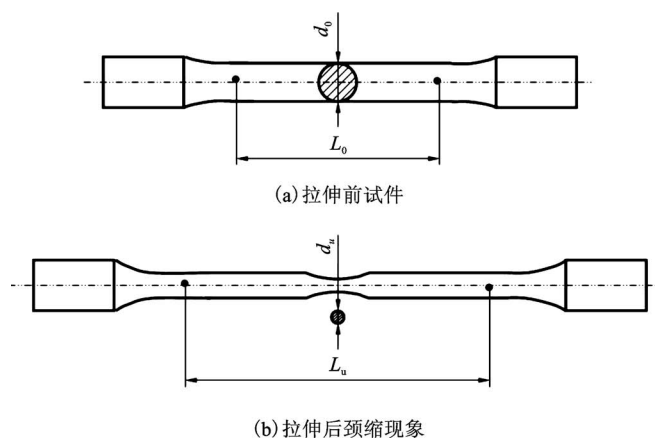


图 2-15 低碳钢拉伸试件颈缩现象

钢材的塑性表示钢材在外力作用下产生塑性变形而不断裂的能力, 用断后伸长率(A)或最大力总延伸率(A_{gt} : 拉伸试验荷载达到试件所能承受的最大荷载时所对应的试件总延伸率)来衡量, 断后伸长率按式(2-32)计算:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2-32)$$



式中： A ——钢材的断后伸长率，%；

L_0 ——试件的原始标距(比例试样： $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ ，且应 ≥ 15 mm；当试样横截面较小时，可采用 $L_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$ 或 100 mm)，mm；

L_u ——试件的断后标距，mm。

断面收缩率是指试件拉断后，其颈缩处最小横截面面积减缩量占原横截面面积的百分率，按式(2-33)计算：

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (2-33)$$

式中： S_0 ——试件拉伸前的横截面积， mm^2 ；

S_u ——试件拉断后断裂处的最小横截面积， mm^2 。

伸长率或断面收缩率的值愈大，说明钢材断裂时产生的塑性变形就愈大，其塑性就愈好。尽管结构在弹性范围内使用，但在应力集中处，其应力可能超过屈服点，有一定的塑性变形，可保证应力重新分布，从而避免了结构的破坏。因此，凡用于结构的钢材，必须满足规范规定的屈服强度、抗拉强度和伸长率指标的要求。

2. 冷弯性能

冷弯性能是指钢材在常温下承受弯曲塑性变形而不断裂的能力。在工程中，常常需要将钢板、钢筋等钢材弯成所要求的形状，冷弯试验就是模拟钢材弯曲加工而确定的。衡量钢材弯曲能力的指标有两个：一是弯芯直径 D ，用试件的厚度或直径 d 的倍数表示($D = nd$ ， $n = 0, 1, 2 \cdots$)；二是弯转角度，如图 2-16 所示。若指定的弯芯直径越小，弯转角度越大，说明对钢材弯曲性能的要求就越高。钢材试件绕着指定弯径、弯曲至指定角度后，无肉眼可见的裂纹为冷弯性能合格。

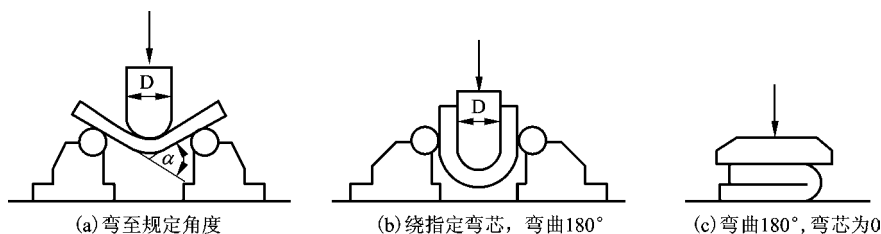


图 2-16 钢材的冷弯试验

通过冷弯试验可以检查钢材内部存在的缺陷，如钢材因冶炼、轧制过程所产生的气孔、杂质、裂纹、严重偏析(各组成元素在结晶时分布不均匀的现象)等。所以，钢材的冷弯指标不仅是工艺性能的要求，也是衡量钢材质量的重要指标。

3. 焊接性能

焊接是连接钢筋和钢构件的主要形式，无论是钢结构，还是钢筋骨架、接头及预埋件的连接等，大多数是采用焊接的，这就要求钢材具有良好的可焊性。

钢材在焊接过程中,由于受局部高温的作用,焊缝及其附近的过热区(热影响区)将发生晶体结构的变化,使焊缝周围产生硬脆倾向,降低焊件的使用质量。钢材的可焊性就是指钢材在焊接后,其焊接接头连结的牢固程度和硬脆倾向大小的一种性能。可焊性良好的钢材,焊接时不易形成裂纹、气孔、夹渣等缺陷,焊接后的焊接头牢固可靠,硬脆倾向小,焊缝处及附近仍能保持与母材基本相同的性能。

钢的化学成分、冶炼质量及冷加工(在常温下对钢筋进行强力拉、拔或轧,使其产生一定的塑性变形的加工方法。经冷加工的钢筋,其强度和硬度有所提高,可节约钢材的用量,但塑性、韧性和可焊性会变差,在使用中应引起重视)等,对钢材的可焊性影响很大。试验表明,含碳量小于0.25%的碳素钢具有良好的可焊性,随着含碳量的增加,可焊性下降;硫(产生热脆)、磷(产生冷脆)以及气体杂质均会显著降低可焊性;加入过多的合金元素,也将不同程度上降低可焊性。对于高碳钢和合金钢,需采用焊前预热和焊后热处理等措施来改善焊后的硬脆性。



2.5.2 钢筋混凝土结构用普通钢筋

钢筋混凝土结构用钢筋主要有热轧钢筋、余热处理钢筋和冷轧带肋钢筋。

1. 热轧光圆钢筋

定义:经热轧成形,横截面通常为圆形,外表光滑的钢筋为热轧光圆钢筋。见图 2-17。

品种规格:钢筋的公称直径为 6~22 mm,分为盘卷(直径在 12 mm 以下)和直条(直径在 12 mm 以上)两种。钢筋的牌号为 HPB300,其中 HPB 为热轧光圆钢筋的英文(Hot rolled Plain Bars)缩写,数字为钢筋屈服强度特征值。

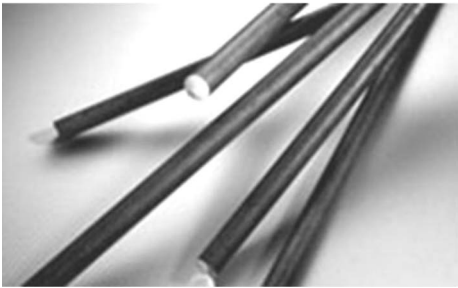


图 2-17 热轧光圆钢筋

技术要求:热轧光圆钢筋的力学与工艺性能应符合表 2-43 的规定。钢筋的化学成分、尺寸、重量及允许偏差、表面质量等技术要求应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢第 1 部分:热轧光圆钢筋》GB1499.1—2017 的有关规定。

表 2-43 热轧光圆钢筋的力学与工艺性能(GB 1499.1—2017)

牌号	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}, \geq$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}, \geq$	断后伸长率 $A/\%, \geq$	最大力总伸长率 $A_{gt}/\%, \geq$	弯曲性能	
					弯芯直径 D	弯曲角度
HPB300	300	420	25	10.0	d(钢筋公称直径)	180°

注:伸长率检验结果可采用 A 或 A_{gt} 作为合格评定依据,但仲裁检验应采用 A_{gt} ,以下同。

特点与应用:热轧光圆钢筋的强度较低,但塑性、焊接性能好,便于冷加工。因其表面光滑,与混凝土之间的握裹摩阻力小,用于钢筋混凝土结构配筋时,常需要在钢筋端部进行弯钩,以提高其锚固性能。适应于中、小型钢筋混凝土结构的主要受力筋及构造筋。

2. 热轧圆盘条钢筋

定义：经热轧成形，钢筋的横截面通常为圆形，外表光滑的盘条钢筋。

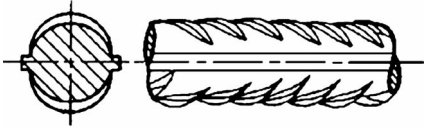
品种规格：钢筋的公称直径为 6 ~ 12 mm。按屈服强度特征值分为 Q195、Q215、Q235 和 Q275，钢筋的牌号由代表屈服强度的汉语拼音字母 Q 和屈服强度特征值组成。

技术要求：热轧圆盘条钢筋的力学与工艺性能应符合表 2 - 44 的规定，其他技术要求应符合现行国家标准《低碳钢热轧圆盘条》GB/T701—2008 的有关规定。

表 2 - 44 热轧圆盘条钢筋的力学与工艺性能 (GB/T 701—2008)

牌号	抗拉强度 R_m /MPa, $\geq$	断后伸长率 $A_{11.3}$ /%, $\geq$	弯曲性能	
			弯芯直径 D	弯曲角度
Q195	410	30	0	180°
Q215	435	28	0	
Q235	500	23	0.5d	
Q275	540	21	1.5d	

特点与应用：热轧圆盘条钢筋的特点与热轧光圆钢筋相似。主要用作箍筋、现浇楼板钢筋及用于制作冷拉钢筋。



3. 热轧带肋钢筋

定义：经热轧成形，横截面通常为圆形，其表面有两条对称的纵肋和沿长度方向均匀分布的横肋的钢筋为热轧带肋钢筋。钢筋表面横肋的纵横面呈月牙形且与纵肋不相交的钢筋称为月牙肋钢筋，见图 2 - 18。横肋的纵横面高度相等且与纵肋相交的钢筋称为等高肋钢筋。



图 2 - 18 月牙肋钢筋

品种规格：热轧带肋钢筋分为普通型 (HRB)、细晶粒型 (HRBF) 和抗震型 (在普通型、细晶粒型牌号后加 E)，公称直径为 6 ~ 50 mm，按钢筋屈服强度特征值分为 400、500 和 600 三个牌号。

技术要求：钢筋的力学与工艺性能应符合表 2 - 45 的规定，其他技术要求应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢第 2 部分：热轧带肋钢筋》GB1499.2—2018 的有关规定。

表 2 - 45 热轧带肋钢筋的力学与工艺性能 (GB 1499.2—2018)

牌号	屈服强度 R_{eL} /MPa $\geq$	抗拉强度 R_m /MPa $\geq$	断后伸长率 A /% $\geq$	最大力总伸长率 A_{gt} /% $\geq$	弯曲性能			
					弯芯直径 D			弯曲角度
					6 ~ 25	28 ~ 40	> 40 ~ 50	
HRB400、HRB400E HRBF400、HRBF400E	400	540	16	7.5 (非抗震型) 9.0 (抗震型)	4d	5d	6d	180°
HRB500、HRB500E HRBF500、HRBF500E	500	630	15		5d	6d	7d	
HRB600	600	730	14		6d	7d	8d	

注：①对于没有明显屈服现象的钢筋， R_{eL} 应采用规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ 。②/公称直径为 28 ~ 40 mm 各牌号钢筋的断后伸长率 A 可降低 1%；公称直径大于 40 mm 各牌号钢筋的断后伸长率 A 可降低 2%。

抗震型钢筋除了应满足普通型或细晶粒型所有要求外，尚应满足下列要求：

- (1) 钢筋实测抗拉强度与实测屈服强度之比(实测强屈比)应 ≥ 1.25 ；
- (2) 钢筋实测屈服强度与屈服强度特征值之比应 ≤ 1.30 ；
- (3) 钢筋的反向弯曲试验应合格(经反向弯曲试验后，钢筋受弯曲部位表面不得产生裂纹)。

产品标识：钢筋产品的表面分别轧有“牌号(普通型分别以 4、5、6 表示；细晶粒型分别以 C4、C5 表示；普通型抗震钢筋分别以 4E、5E 表示，细晶粒型抗震钢筋分别以 C4E、C5E 表示)、厂名(以拼音字头表示)或商标及公称直径(以阿拉伯数字表示)”标识，以示区别。

特点与应用：热轧带肋钢筋具有较高的强度，塑性和焊接性能较好，因其表面具有横肋和纵肋，与混凝土之间的握裹摩阻力大，用于钢筋混凝土结构配筋时，通常情况下，无需对其端部进行弯钩。适应于大、中型钢筋混凝土结构的主要受力筋和预应力混凝土结构配筋。抗震型钢筋适应于抗震要求较高的结构。

4. 余热处理钢筋

定义：经热轧后利用热处理原理进行表面控制冷却，并利用芯部余热自身完成回火处理，在其基圆上形成环状的淬火自回火组织的成品钢筋。外形与热轧带肋钢筋相同。

品种规格：公称直径为 8 ~ 50 mm，按钢筋屈服强度标准值分为 RRB400 和 RRB500 两种牌号，按用途分为可焊(W)和非可焊两种。

技术要求：钢筋的力学与工艺性能应符合表 2 - 46 的规定，其他技术要求应符合现行国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢》GB 13014—2013 的有关规定。

表 2 - 46 余热处理钢筋的力学与工艺性能(GB 13014—2013)

牌号	屈服强度 R_{eL}/MPa $\geq$	抗拉强度 R_m/MPa $\geq$	断后伸长率 $A/\%$ $\geq$	最大力 总伸长率 $A_{gt}/\%$ $\geq$	弯曲性能			
					弯芯直径 D		弯曲 角度	反向弯曲
					8 ~ 25	28 ~ 40		
RRB400	400	540	14	5.0	4d	5d	180°	经正向弯曲 90° 再反向 弯曲 20° 后， 钢筋受弯曲 部位表面不 得产生裂纹
RRB500	500	630	13		6d	—		
RRB400W	430	570	16	7.5	4d	5d		

注：直径 28 ~ 40 mm 的各牌号钢筋的断后伸长率可降低 1%，直径大于 40 mm 的各牌号钢筋的断后伸长率可降低 2%。

特点与应用：余热处理钢筋具有强度高，可节约钢材用量，但塑性和可焊性差。适应于大、中型钢筋混凝土结构的主要受力筋和预应力混凝土结构配筋。

5. 冷轧带肋钢筋

定义：将热轧圆盘条经冷轧后，在其表面带有沿长度方向均匀分布的二面或三面横肋的钢筋。见图 2 - 19。

品种规格：根据钢筋抗拉强度特征值分为 CRB550、CRB650、CRB800、CRB600H、CRB680H、CRB800H 六个牌号，其中带 H 的为高延性钢筋；

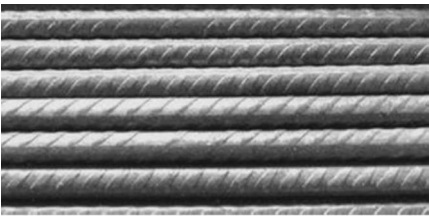


图 2 - 19 冷轧带肋钢筋

CRB550、CRB600H、CRB680H 钢筋的公称直径为4~12 mm，CRB650、CRB800、CRB800H 的公称直径为 4 mm、5 mm 和 6 mm。

技术要求：冷轧带肋钢筋的力学与工艺性能应符合表 2-47 的规定，钢筋的强屈比应 ≥ 1.05 ，其他技术要求应符合现行国家标准《冷轧带肋钢筋》GB/T 13788—2017 的有关规定。

表 2-47 冷轧带肋钢筋的力学与工艺性能 (GB/T 13788—2017)

分类	牌号	非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa, $\geq$	抗拉强度 R_m /MPa, $\geq$	伸长率/% , $\geq$			反复弯曲次数/次, $\geq$	冷弯试验 (180°)	1000 h 松弛率 r /%, (初始应力 $R_{con}=0.7R_m$)
				A	$A_{100\text{ mm}}$	A_{gt}			
普通型	CRB550	500	550	11.0	—	2.5	—	$D=3d$	—
	CRB650	585	650	—	4.0	2.5	3	—	≤ 8
	CRB800	720	800						
高延性型	CRB600H	540	600	14.0	—	5.0	—	$D=3d$	—
	CRB680H	600	680				4	$D=3d$	≤ 5
	CRB800H	720	800	—	7.0	4.0	4	—	≤ 5

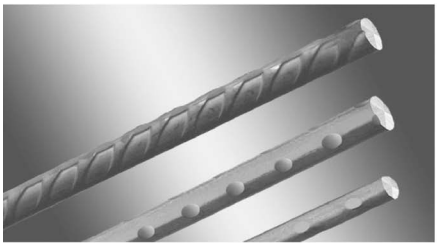
特点与应用：冷轧带肋钢筋具有强度高，节约钢材用量、降低工程造价、与混凝土之间的握裹摩阻力大等优点。CRB550、CRB600H 可用作普通钢筋混凝土结构用钢筋，其他牌号用于预应力混凝土结构用钢筋(如房屋建筑的预应力空心楼板)；CRB680H 也可用作普通钢筋混凝土结构用钢筋。

2.5.3 预应力混凝土结构用预应力筋

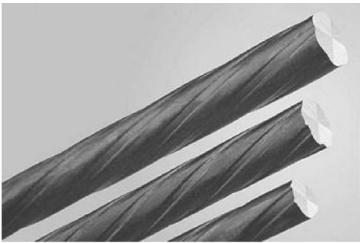
预应力混凝土结构除了配有普通钢筋外，其主要受力钢筋为钢丝、钢绞线或螺纹钢筋。

1. 钢丝

品种规格：按加工状态分为冷拉钢丝(WCD)和消除应力钢丝两类。消除应力钢丝按松弛(指在恒定长度下应力随时间而减少的现象)性能又分为低松弛级钢丝(WLR)和普通松弛级钢丝(WNR)。按外形分为光圆钢丝(P)、刻痕钢丝(I)和螺旋肋钢丝(H)三种，见图 2-20。钢丝的公称直径为 4~12 mm。根据其抗拉强度标准值分为 1470、1570、1670、1770 及 1860 (MPa) 五个强度级别。



(a) 刻痕钢丝外形



(b) 螺旋肋钢丝外形

图 2-20 预应力混凝土用钢丝外形

技术要求：产品的力学性能、表面质量、伸直性、耐疲劳性等技术要求应符合现行国家标准《预应力混凝土用钢丝》GB/T 5223—2014 的有关规定。

特点与应用：预应力混凝土用钢丝具有强度高、节约钢材用量，无接头，与混凝土之间的握裹力强等特点。冷拉钢丝仅用于压力管道，其他钢丝可用于先张法和后张法制造的高效能预应力混凝土结构，如桥梁、屋架、吊车梁、轨枕、预制板、墙板、管桩、电杆等。

2. 钢绞线

预应力混凝土用钢绞线是由多根高强度钢丝捻制而成的绞合钢缆，并经消除应力处理（稳定化处理）制成。其外形见图 2-21。



图 2-21 钢绞线外形

品种规格：按其表面形态可以分为光面钢绞线（标准型）、刻痕钢绞线（I）、镀锌钢绞线、涂环氧树脂钢绞线、外包塑料套钢绞线等；按结构分为 1×2 、 1×3 、 $1 \times 3I$ 、 1×7 、 $1 \times 7I$ 、 $1 \times 7C$ （模拔型）、 $1 \times 19S$ （西鲁式）、 $1 \times 19W$ （瓦林忒式）。建筑与土木工程常用的钢绞线结构为 1×7 ，公称直径为 $\phi 15.2 \text{ mm}$ 或 $\phi 12.7 \text{ mm}$ 。

技术要求：建筑与土木工程常用钢绞线的力学性能见表 2-48。其他技术要求应符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224—2014、《镀锌钢绞线》YB/T 5004—2012、《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152—1999、《无粘结预应力钢绞线》JG161—2016 等有关规定。

表 2-48 预应力混凝土用钢绞线的力学性能（GB/T 5224—2014）

钢绞线结构	公称直径/mm	公称抗拉强度 R_m/MPa $\geq$	整根钢绞线的 最大力 F_m/kN $\geq$	0.2% 屈服力 $F_{R0.2}/\text{kN}$ $\geq$	最大力 总伸长率 A_{gt} ($L_0 \geq 400 \text{ mm}$)	1000 h 松弛率 $r/\%$
1×7	15.20 (15.24)	1720	241	212	$\geq 3.5\%$	初始负荷为钢绞线实际最大力 70% 时： $r \leq 2.5\%$ 初始负荷为钢绞线实际最大力 80% 时： $r \leq 4.5\%$ (允许用 120 h 松弛率推算 1000 h 松弛率)
		1860	260	229		
		1960	274	241		
$1 \times 7C$	15.20 (15.24)	1820	300	264		

特点与应用：钢绞线具有强度高、松弛率小、与混凝土黏结好、断面面积大、使用根数少、柔性好、在结构中排列布置方便、无接头、易于锚固等优点。主要用于大跨度、大荷载的预应力桥梁、屋架、薄腹梁等预应力混凝土结构或构件的曲线配筋。

3. 螺纹钢筋

定义：预应力混凝土用螺纹钢筋是一种热轧成带有不连续的外螺纹的直条钢筋，该钢筋在任意截面处，均可用带有匹配形状的内螺纹的连接器或锚具进行连接或锚固，也称精轧螺纹钢筋。见图 2-22。

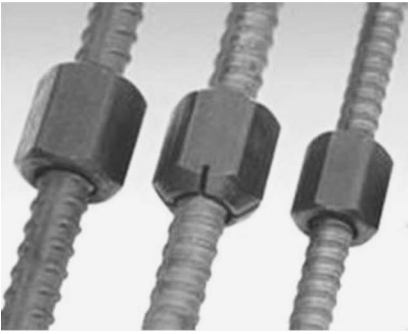


图 2-22 螺纹钢筋及锚固螺母

品种规格：钢筋的公称直径为 15 ~ 75 mm，常用的有 $\phi 25$ mm 和 $\phi 32$ mm；根据其屈服强度最小值分为 PSB785、PSB830、PSB930、PSB1080、PSB1200 五个牌号。

技术要求：螺纹钢各牌号的力学性能要求见表 2 - 49，其他技术要求应符合现行国家标准《预应力混凝土用螺纹钢筋》GB/T 20065—2016 的有关规定。

表 2 - 49 预应力混凝土用螺纹钢筋的力学性能 (GB/T 20065—2016)

牌 号	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa} \geq$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa} \geq$	断后伸长率 $A/\%, \geq$	最大力总伸长 率 $A_{gt}/\%, \geq$	1000 h 应力松弛率 $r/\%, \leq$ (初始应力 $R_{con} = 0.7R_m$)
PSB785	785	980	8	3.5	4.0
PSB830	830	1030	7		
PSB930	930	1080			
PSB1080	1080	1230	6		
PSB1200	1200	1330			

注：①钢筋无明显屈服时，用规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 代替；②无特殊要求时，允许用 120 h 应力松弛率推算 1000 h 松弛率。

2.5.4 钢筋的连接

建设工程中常用的钢筋连接方式有机械连接、焊接和绑扎搭接三种。

1. 机械连接

钢筋机械连接是通过钢筋与连接件或其他介入材料的机械咬合作用或钢筋端面的承压作用，将一根钢筋中的力传递至另一根钢筋的连接方法。

钢筋机械连接分为螺纹套筒连接和套筒挤压连接。其中螺纹套筒连接又分为直螺纹套筒连接和锥螺纹套筒连接；直螺纹套筒连接又分为镦粗直螺纹、剥肋滚轧直螺纹和直接滚轧直螺纹套筒连接。

镦粗直螺纹套筒连接：将钢筋的连接端先行镦粗，再加工出圆柱螺纹，并用相应的螺纹套筒将两根钢筋连接起来。见图 2 - 23(a)。

滚轧直螺纹套筒连接：将钢筋的连接端用滚轧工艺加工成直螺纹，并用相应的螺纹套筒将两根钢筋连接起来。见图 2 - 23(b)。

套筒挤压连接：将专用套筒套在二根钢筋的接头处，在常温下用专用液压机进行挤压，在套筒和钢筋之间形成刻痕，利用刻痕的机械咬合作用来传力的一种连接方式。见图 2 - 23(c)。



图 2 - 23 钢筋机械连接接头

钢筋机械连接接头根据其极限抗拉强度、残余变形、最大力下总伸长率及高应力和大变形条件下反复拉压性能分为 I、II、III 级三个等级。各等级接头的极限抗拉强度及变形性能应符合《钢筋机械连接技术规程》JGJ 107—2016 的有关规定，见表 2 - 50、表 2 - 51。

表 2-50 接头极限抗拉强度 (JGJ107—2016)

接头等级	I 级	II 级	III 级
抗拉强度	$f_{\text{mst}}^0 \geq f_{\text{stk}}$, 断于母材 或 $f_{\text{mst}}^0 \geq 1.10f_{\text{stk}}$, 断于连接件	$f_{\text{mst}}^0 \geq f_{\text{stk}}$	$f_{\text{mst}}^0 \geq 1.25f_{\text{yk}}$

注: f_{mst}^0 ——接头试件实测抗拉强度; f_{stk} ——被连接钢筋抗拉强度标准值; f_{yk} ——被连接钢筋屈服强度标准值。

表 2-51 接头的变形性能 (JGJ107—2016)

接头等级		I 级	II 级	III 级
单向拉伸	残余变形/mm	$u_0 \leq 0.10 (d \leq 32)$ $u_0 \leq 0.14 (d > 32)$	$u_0 \leq 0.14 (d \leq 32)$ $u_0 \leq 0.16 (d > 32)$	
	最大力总伸长率/%	$A_{\text{sgt}} \geq 6.0$	$A_{\text{sgt}} \geq 6.0$	$A_{\text{sgt}} \geq 3.0$
高应力反复拉压	残余变形/mm	$u_{20} \leq 0.3$	$u_{20} \leq 0.3$	
大变形反复拉压	残余变形/mm	$u_4 \leq 0.3$ 且 $u_8 \leq 0.6$	$u_4 \leq 0.3$ 且 $u_8 \leq 0.6$	$u_4 \leq 0.6$

注: u_0 ——接头试件加载至 $0.6f_{\text{yk}}$ 并卸载后, 在规定标距内的残余变形; u_{20} 、 u_4 、 u_8 ——分别表示接头试件按规定加载程序, 经反复拉压 20 次、4 次、8 次后的残余变形; d ——钢筋的公称直径。

机械连接能达到节约钢筋的目的, 且占用钢筋间距较少, 适用于布筋较密集的钢筋混凝土结构或构件。具体使用过程中, 应符合下列要求:

(1) 混凝土结构中要求充分发挥钢筋强度或对延性要求高的部位应选用 II 级接头或 I 级接头。当在同一连接区段内必须实施 100% 钢筋接头的连接时应采用 I 级接头。

(2) 混凝土结构中钢筋应力较高但对延性要求不高的部位可采用 III 级接头。

(3) 钢筋连接件的混凝土保护层厚度应不小于 0.75 倍钢筋最小保护层厚度设计值和 15 mm 的较大值。必要时可对连接件采取防锈措施。

(4) 结构构件中纵向受力钢筋的接头宜相互错开。钢筋机械连接的连接区段长度按 $35d$ 计算, 当直径不同的钢筋连接时, 按直径较小的钢筋计算。位于同一连接区段内的钢筋机械连接接头的面积百分率应符合下列规定:

①接头宜设置在结构构件受拉钢筋应力较小部位, 当需要在高应力部位设置接头时, 在同一连接区段内 III 级接头的接头百分率应 $\leq 25\%$, II 级接头的接头百分率应 $\leq 50\%$ 。I 级接头在无抗震设防要求的结构中不受限制。

②接头宜避开有抗震设防要求的框架的梁端、柱端箍筋加密区; 当无法避开时, 应采用 II 级接头或 I 级接头, 且接头百分率应 $\leq 50\%$ 。

③受拉钢筋应力较小部位或纵向受压钢筋, 接头百分率不受限制。

④对直接承受动力荷载的结构构件, 接头百分率应 $\leq 50\%$ 。

2. 焊接连接

焊接是利用热能或机械压力, 或者两者并用, 使用填充材料, 将两个或两个以上的工件连接在一起成为不可分的牢固接头的方法。

钢筋的焊接分为电阻点焊、电弧焊、闪光对焊、电渣压力焊等形式。

电阻点焊: 是将两钢筋安放成交叉叠接形式, 压紧于两电极之间, 利用电阻热熔化母材金属, 加压形成焊点的一种压焊方法。应用于混凝土结构中钢筋焊接骨架和钢筋焊

接网的焊接。

电弧焊：是以焊条作为一极，钢筋为另一极，利用焊接电流通过上传产生的电弧热进行焊接的一种熔焊方法。分为帮条双面焊、帮条单面焊、搭接双面焊、搭接单面焊等形式。电弧焊所用焊条应符合现行国家标准《非合金钢及细晶粒钢焊条》GB/T 5117—2012 或《热强钢焊条》GB/T 5118—2012 的规定，且所选焊条的型号应与被焊接的钢筋的品种相匹配。钢筋搭接长度和帮条钢筋的长度(l)要求，对于热轧光圆钢筋双面焊 $l \geq 4d$ 、单面焊 $l \geq 8d$ ；对于热轧带肋钢筋和余热处理钢筋双面焊 $l \geq 5d$ 、单面焊 $l \geq 10d$ 。其他技术要求应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18—2012 的规定。钢筋电弧焊接头示意图见图 2-24。

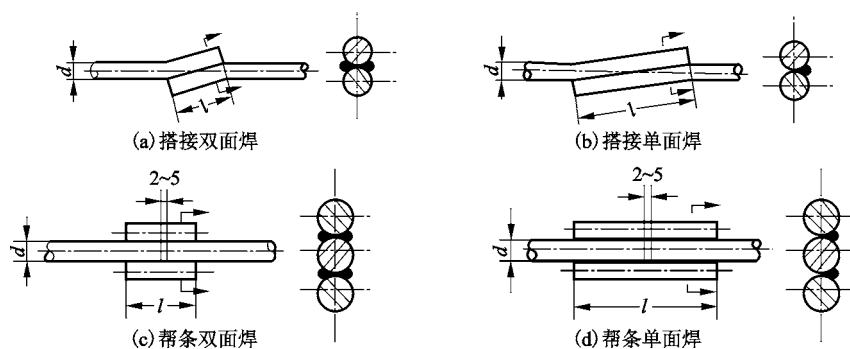
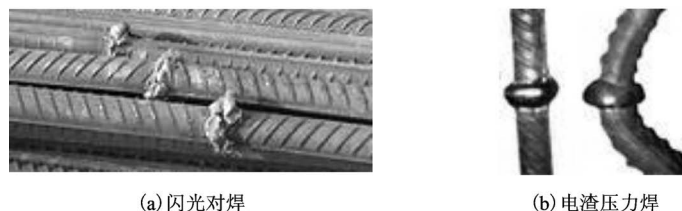


图 2-24 钢筋电弧焊接头

钢筋电弧焊焊接工艺简单，但是耗费钢材，且占用钢筋间距较多，不适用布筋较密的混凝土结构或构件。

闪光对焊：是将两钢筋安放成对接形式，利用电阻热使接触点金属熔化，产生强烈飞溅，形成闪光，迅速施加顶锻力完成的一种压焊方法。钢筋闪光对焊接头处四周有凸起的毛刺，其外形见图 2-25(a)。适用于水平和竖向受力钢筋的连接。

电渣压力焊：是将两钢筋安放成竖向或斜向对接形式，利用焊接电流通过两钢筋间隙，在焊剂层下形成电弧和电渣过程，产生电弧热和电阻热熔化的钢筋，加压完成的一种压焊方法，其外形见图 2-25(b)。电渣压力焊应用于柱、墙等构筑物现浇混凝土结构中竖向受力钢筋的连接；不得用于梁、板等构件中水平钢筋的连接。



(a) 闪光对焊 (b) 电渣压力焊

图 2-25 钢筋闪光对焊与电渣压力焊接头

钢筋焊接接头的验收应依据现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》JGJ18—2012 或其他施工验收标准的有关规定进行。验收内容包括接头的外观质量、抗拉强度，闪光对焊接头尚应进行弯曲性能检验。经检验合格的可以验收，检验不合格的需进行复检，复检合格的可以验收，否则，不予验收。

检验时，同一焊接形式的接头以 300 个接头作为一个验收批，不足也按一批计，每批随机切取 3 个接头进行抗拉强度检验，需要做弯曲检验的尚应再切取 3 个接头进行冷弯性能检验。

3. 绑扎搭接

绑扎搭接是在钢筋搭接部分的中心和两端共三处用铁丝绑扎而成，主要依靠钢筋与混凝土之间的握裹力(锚固力)来传递应力。绑扎搭接操作方便，但不结实。

绑扎搭接接头的应用应符合下列规定：

(1) 轴心受拉及小偏心受拉杆件的纵向受力钢筋不得采用绑扎搭接；其他构件中的钢筋采用绑扎搭接时，受拉钢筋直径宜 ≤ 25 mm，受压钢筋直径宜 ≤ 28 mm。

(2) 接头的横向净间距应大于钢筋的直径，且应大于 25 mm。

(3) 位于同一连接区段内的纵向受拉钢筋搭接接头面积百分率，对梁、板及墙类构件宜 $\leq 25\%$ ；对柱类构件宜 $\leq 50\%$ ；当工程中确有必要增大受拉钢筋搭接接头面积百分率时，对梁类构件宜 $\leq 50\%$ 。

(4) 纵向受拉钢筋的搭接长度应根据位于同一连接区段内的钢筋搭接接头面积百分率按式(2-34)计算，且不应小于 300 mm。

$$l_l = \xi_l \cdot l_a \quad (2-34)$$

式中： l_l ——纵向受拉钢筋的搭接长度，mm；

ξ_l ——纵向受拉钢筋的搭接长度修正系数，按表 2-52 取值，当接头面积百分率为表的中间值时，修正系数可按内插取值；

l_a ——纵向受拉钢筋的锚固长度，按设计要求取值，mm。

表 2-52 纵向受拉钢筋的搭接长度修正系数(GB50010—2010)

纵向搭接钢筋接头面积百分率/%	≤ 25	50	100
ξ_l	1.2	1.4	1.6

纵向受压钢筋的搭接长度应 $\geq$ 纵向受拉钢筋搭接长度的 70%，且应 ≥ 200 mm。

其他有关规定参照《混凝土结构设计规范》GB50010—2010(2015 版)和《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204—2015 的有关规定进行。

2.5.5 钢筋的验收与施工管理

1. 验收

1) 核对钢筋的出厂质量证明书

根据钢筋出厂质量证明书，核对钢筋的生产厂家、品种、规格、标识(金属挂牌标识)、执行标准及数量是否与产品和购置合同一致，包装、标志是否符合国家有关标准的规定。

钢筋的出厂质量证明书的内容包括：供方名称或商标、需方名称、发货日期、标准号、钢材牌号、炉(批)号、交货状态、用途、重量或件数、品种名称、尺寸(型号)和级别、标准和合同中所规定的各项试验结果、供方质量监督部门印章等内容。

2) 检查外观质量与尺寸

检查钢筋的外观是否符合相应标准的要求，并抽查钢筋的尺寸、质量偏差是否在标准规定范围内。

3) 抽样检验

在外观质量符合要求的前提下，按相应标准规定，随机抽取规定数量的样品进行力学与工艺等性能检验。抽样要求和检验项目见表 2-53。

表 2-53 钢筋质量出厂检验项目及检验样品的抽取

钢材品种	组批规则	出厂检验项目及试样数量
热轧光圆钢筋	同一牌号、同一炉罐号、同一规格的钢筋为 60 t/批，不足 60 t 亦为一批。超过 60 t 的部分，每增加 40 t(或不足 40 t 的余数)，增加一个拉伸试验试样	拉伸试验、冷弯试验每批各 2 根；重量偏差每批不少于 5 根
热轧带肋钢筋		
余热处理钢筋		
热轧圆盘条钢筋		拉伸试验每批 1 根；冷弯试验每批 2 根
冷轧带肋钢筋	同一牌号、同一外形、同一规格、同一生产工艺和同一交货状态的钢筋为 60 t/批，不足 60 t 亦为一批。	拉伸试验每盘 1 根；弯曲试验每批 2 根；反复弯曲试验每批 2 根；应力松弛试验定期 1 根
钢丝	同一牌号、同一规格、同一生产工艺生产的钢丝为 60 t/批，不足 60 t 亦为一批	拉伸试验每盘 1 根；规定非比例延伸强度 $R_{p0.2}$ 和最大力总伸长率每批 3 根；应力松弛每合同批不少于 1 根。
钢绞线	同一牌号、同一规格、同一生产工艺捻制的钢绞线为 60 t/批，不足 60 t 亦为一批	拉伸试验每批 3 根；应力松弛每合同批不小于 1 根；伸直性每批 3 根
螺纹钢	同一炉罐号、同一规格、同一交货状态的钢筋为 60 t/批，不足 60 t 亦为一批。超过 60 t 的部分，每增加 40 t(或不足 40 t 的余数)，增加一个拉伸试验试样	拉伸试验每批 2 根；应力松弛试验每 1000 t 取 1 根；重量偏差每批不少于 5 根

注：钢筋的拉伸、弯曲、重量偏差试验用试样长度不少于 500 mm；预应力筋的拉伸、弯曲、重量偏差、应力松弛试验用试样长度不少于 1 m。

经按规定方法抽样检验，检验结果均符合国家现行有关标准要求时，判为合格批，可以验收。若有一项或多项技术指标不符合标准规定时，则应重新从该批未检验过的钢筋中随机抽取双倍数量的试样进行复验，复验全部符合标准规定的则可判为合格批，可以验收；如仍有不符合标准规定项，则该检验批判为不合格批，应不予验收。

2. 施工管理

钢筋在储存过程中应加强管理，避免混淆、锈蚀和污染。若管理不当，造成钢筋锈蚀或污染，将会导致钢筋的性能受损，从而影响到建设工程的质量、安全与造价。国家有关

标准规定：当钢筋表面出现带有颗粒状或片状老锈时，不得使用；当钢筋经除锈后出现严重的表面缺陷时，应重新抽样进行性能检验，检验合格的可以继续使用；当钢筋表面有油污、漆污时，应将污渍清洗干净后再使用。因此，钢筋的施工现场管理工作是一项十分重要的工作，保管不当，将直接造成经济损失，增加建筑造价。钢筋的施工现场管理应注意如下几方面：

- (1) 堆放场地应坚实平整、干燥、不积水、并应有防雨淋措施。
- (2) 堆放时，在钢筋的下面应用方木或其他方料进行垫高，以防钢筋受潮锈蚀。
- (3) 应按品种、规格、批次不同分别堆放，并应有明显的标识，不至混淆。
- (4) 应防止钢筋被油、油漆等污染。

2.6 预应力筋用锚具、夹具

1. 锚具

锚具是指在后张法预应力混凝土结构或构件生产过程中，用于保持预应力筋的拉力并将其传递到结构或构件上所用的永久性锚固装置。按其外形分为圆柱体锚具和长方体扁锚；按锚孔数量分为单孔和多孔；按锚固形式分为夹片式和挤压式（握裹式）；按使用功能分为工作锚（用于预应力筋永久锚固）和工具锚（用于预应力筋张拉和放张）。

圆锚：由锚板、夹片和锚垫板组成，锚板为圆柱体。锚板和夹片用于固定钢绞线，其型号表示为 YM15-N，其中 Y 表示预应力，M 为锚具代号，15 表示用于 $\phi 15.2$ 钢绞线的锚固，N 表示锚孔孔数。锚垫板用于承受锚具传来的预加力，并传递给混凝土的部件，分为普通型和铸造型。此锚具具有良好的锚固性能和放张自锚性能，张拉一般采用穿心式千斤顶。使用装配见图 2-26。



图 2-26 圆锚及使用装配图

扁锚：其组成与圆锚相同，只是锚板为长方体形。其型号表示为 YBM15-N，其中 B 代表扁形锚具，其他符号和数字表示的意思与圆锚相同。主要用于桥面横向预应力、空心板、低高度箱梁，使应力分布更加均匀合理，进一步减薄结构厚度。使用装配见图 2-27。



图 2-27 扁锚及使用装配图

挤压锚：挤压式锚具也称握裹式锚具，由挤压套筒和装插在其中空腔内配套的挤压簧组成。使用时，用专用挤压设备将挤压套压结在钢绞线上，使挤压簧碎片牢固地刻入钢绞线和锚具内将钢绞线锚固。其型号表示为 YM15P，其中 P 表示挤压式锚具。适用于构件端部设计应力大或端部空间受到限制的固定端锚具。挤压锚及使用装配见图 2-28(a)、图 2-28(b)。

锚固螺母：是用于锚固预应力混凝土用螺纹钢筋的锚具。锚固螺母及锚垫板见图 2-28(c)。



图 2-28 挤压锚与锚固螺母

2. 夹具

夹具是在先张法预应力混凝土构件生产过程中，用于保持预应力筋的拉力，并将其固定在生产台座(或设备)上的工具性锚固装置，其外形见图 2-29。

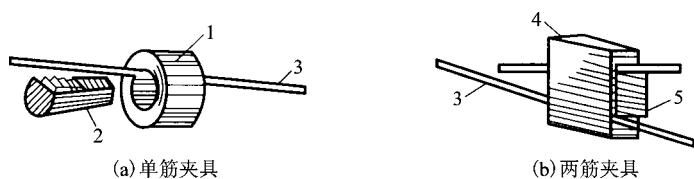


图 2-29 夹具

1、4—套筒；2、5—锥形夹片；3—钢丝

3. 技术要求

预应力筋用锚具和夹具的技术要求应符合《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85—2010、《铁路工程预应力筋用夹片式锚具、夹具和连接器》TB/T 3193—2016 或《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》JT/T 329—2010 的有关规定。

4. 验收

验收时,锚具、夹具以同一规格产品、同一批原材料、同一生产工艺生产的产品为一验收批。锚具每批不超过 2000 套(件),夹具和连接器每批不超过 500 套(件),不足亦为一批。外形外观检验为每批量的 5%~10%;硬度检验为每批量的 3%~5%,且不少于 5 套;锚板强度检验为每批 3 个;静载锚固性能检验为每批 3 套组装件。

2.7 预应力混凝土用波纹管

预应力混凝土用波纹管是用于后张法预应力混凝土结构或构件生产过程中安装预应力筋用的预留孔道。按生产材料分为金属和塑料波纹管;按截面形状分为圆形和扁形。波纹管的外形见图 2-30。

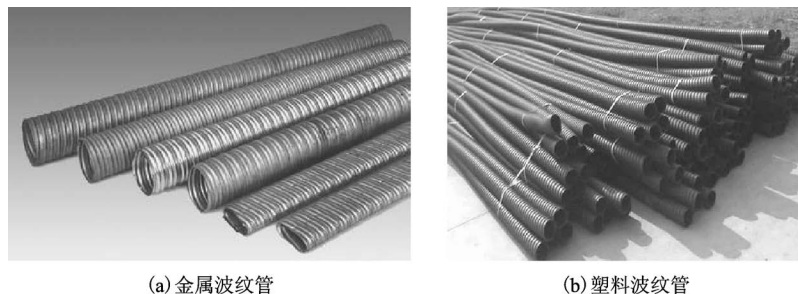


图 2-30 预应力混凝土结构用波纹管

预应力混凝土用波纹管的外观、尺寸、环刚度(管材在均布荷载作用下,管壁单位面积所能承受的压力)、柔韧性(塑料管材按规定方法反复弯曲 5 次后,专用塞规应能顺利地管内通过)、抗冲击性等技术要求应符合《预应力混凝土用金属波纹管》JG/T 225—2020 和《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T 529—2016 的有关规定。

验收时,金属波纹管应以同一钢带生产厂生产的同一批钢带所制造的不超过 50000 m 的波纹管为一验收批,在每批中随机抽取 3 根波纹管进行尺寸偏差、抗局部横向荷载性能、弯曲后抗渗漏性能检验。塑料波纹管应以同一配方、同一生产工艺、同设备稳定连续生产的不超过 10000 m 的波纹管为一验收批,在每批中随机抽取 5 根波纹管进行尺寸偏差、环刚度、柔韧性检验。检验合格的可以验收。

复习思考题

1. 什么是混凝土结构？
2. 混凝土的组成材料有哪些？在混凝土中各自起何作用？
3. 硅酸盐水泥熟料的主要矿物组成有哪些？
4. 通用硅酸盐水泥有些品种？其中有哪些水泥具有较强的抗硫酸盐腐蚀性？
5. 水泥的水化产物主要有哪些？
6. 影响硅酸盐水泥凝结硬化的主要因素有哪些？
7. 通用硅酸盐水泥的化学指标和物理指标分别包括哪些？
8. 为什么要规定水泥的凝结时间？
9. 什么是水泥的安定性？影响水泥安定性的主要因素有哪些？
10. 水泥的强度等级是依据什么来划分的？
11. 什么水泥为不合格水泥？对不合格水泥应如何处理？
12. 选用水泥时应注意哪些因素？
13. 水泥石会被腐蚀的主要原因是什么？
14. 水泥在储运管理过程中应注意哪些方面？
15. 什么是骨料的级配？粗、细骨料的级配是如何划分的？其对混凝土的性能有何影响？
16. 骨料的粗细程度是如何划分的？其对混凝土的性能有何影响？
17. 骨料中的有害物质包括哪些？其对混凝土的性能有何影响？
18. 骨料的强度可用哪些指标来评价？
19. 什么是针、片状颗粒？其对混凝土的性能有何影响？
20. 混凝土用矿物掺合料主要有哪些？其对混凝土的性能有何影响？
21. 混凝土用外加剂按其主要功能分为哪几类？
22. 什么是混凝土拌合物的和易性？和易性的好坏可用什么指标来评价？
23. 混凝土拌合物的流动性应根据什么来合理确定？
24. 影响混凝土拌合物和易性的主要因素有哪些？如何改善？
25. 混凝土的强度分哪几种？混凝土的强度等级如何划分？
26. 影响混凝土强度的主要因素有哪些？提高混凝土强度的主要措施有哪些？
27. 混凝土的变形有哪些？其对混凝土结构有何影响？
28. 混凝土的耐久性的评价指标有哪些？如何提高混凝土的耐久性？
29. 混凝土配合比设计的基本要求是什么？
30. 混凝土的配制强度是依据什么来确定的？
31. 混凝土的水胶比是根据什么来确定的？经试验确定的水胶比为什么不能随意改变？
32. 什么是砂率？合理砂率是如何确定的？

33. 有关规范对混凝土的最大水胶比和单位体积胶凝材料用量进行限制的目的是什么？
34. 钢筋的拉伸试验可检验钢筋的那些性能指标？
35. 什么是强屈比？强屈比的大小对结构的安全性有何影响？
36. 热轧光圆钢筋与热轧带肋钢筋有何区别？各自有何优缺点？
37. 用于抗震结构的钢筋有何特殊要求？
38. 钢筋连接形式有哪些？各自的适用范围是什么？
39. 预应力混凝土结构用预应力筋常用品种有哪些？
40. 预应力筋用锚具的常用品种有哪些？各自的适用范围是什么？
41. 对一强度等级为 42.5 级的普通硅酸盐水泥试样进行了胶砂强度检测，检测结果见下表，试确定其强度等级，并评定其实测强度是否满足国家标准要求。

抗折				抗压			
3d		28d		3d		28d	
荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa	荷载/kN	强度/MPa
1.45		2.90		23.1		75.2	
				28.9		71.6	
1.60		3.05		29.1		70.3	
				28.3		68.4	
1.50		2.75		26.5		69.2	
				27.2		70.3	

42. 某工地用砂的筛分析结果见下表(风干砂样总质量为 500 g)，试确定该砂的粗细，并评定其级配如何？

筛孔尺寸 尺寸/mm	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	筛底
分计筛余 质量/g	14.5	89.3	97.2	98.8	101.4	83.8	14.8

43. 某混凝土试样经试拌调整后，各种材料用量分别为水泥 3.1 kg、水 1.86 kg、砂 6.24 kg、碎石 12.8 kg，并测得混凝土拌合物的表观密度 $\rho_{c,t} = 2400 \text{ kg/m}^3$ ，试计算 1 m^3 混凝土各项材料用量为多少？假定上述配合比，可以作为试验室配合比，若施工现场砂子含水率为 4%，石子含水率为 1%，试求其施工配合比。

44. 测得下列两组混凝土试块的破坏荷载如下表，试计算每个试块的强度和每组试块的强度评定值。

组别	试块尺寸 /cm	破坏荷载/kN		
		1	2	3
第 1 组	15 × 15 × 15	640	540	692
第 2 组	10 × 10 × 10	202	226	193

45. 从新进的一批 $\Phi 18\text{HRB400}$ 钢筋中抽取两根钢筋进行拉伸试验, 测得如下结果: 达到屈服下限的荷载分别为 108.6 kN 和 107.5 kN, 拉断时荷载分别为 144.5 kN 和 147.6 kN, 试件断后标距分别为 107 mm 和 109 mm。试计算此钢筋的屈服强度、抗拉强度(精确到 1 MPa)和伸长率(精确到 0.5%), 并判定该钢筋的拉伸性能是否合格?

模块三 砌体结构工程材料

【内容提要】 本模块主要介绍砌体结构工程中常用的砖、砌块和砌筑石材的品种、规格、技术要求、应用、验收与施工管理,以及砌筑砂浆的组成材料要求、技术性质及配合比设计等有关知识。

砌体结构是指由块体材料和砂浆砌筑而成的墙、柱等建筑物或构筑物的主要受力构件的结构。是砖砌体、砌块砌体和石砌体结构的统称。用于砌体结构工程的材料主要包括砖、砌块、石材和砌筑砂浆。

3.1 砖

砖是以煤矸石、页岩、粉煤灰、黏土或其他工业废料为主要原料,用不同工艺制作而成的,用于砌筑承重墙和非承重墙及其他构筑物的小型块状材料。

按外观形态不同,砖分为普通砖(无孔洞)、多孔砖(孔洞率 $\geq 15\%$)和空心砖(孔洞率 $\geq 35\%$)。孔洞率是指砖中各孔洞体积之和占按外轮廓尺寸计算的砖体积的百分率。

按制造工艺不同,砖又分为烧结砖和非烧结砖两大类。烧结砖是经焙烧而成的砖;非烧结砖是不经过焙烧而制成的砖。非烧结砖由于能够利用工业废料,因而具有节能环保,资源循环利用的经济效益和社会效益,其主要品种有蒸压(蒸养)砖和混凝土砖。

3.1.1 烧结砖

烧结砖是指以煤矸石、页岩、粉煤灰或黏土为主要原料,经焙烧而成的直角六面体块体材料。按主要原料分为黏土砖(N)、页岩砖(Y)、煤矸石砖(M)、粉煤灰砖(F)、建筑渣土砖(Z)、淤泥砖(U)、污泥砖(W)、固体废弃物砖(G)。常用的品种有烧结普通砖(实心砖)和烧结多孔砖。其中,多孔砖具有质量轻、强度高、隔热保温性能好、节能等特点,是目前应用最广泛的品种。

1. 烧结砖的技术要求

烧结砖的主要技术要求包括:尺寸偏差、外观质量、强度、抗风化性能、泛霜、石灰爆裂、吸水率与饱和系数、放射性。此外,对于烧结多孔砖和烧结空心砖,其毛体积密度、孔型结构和孔洞率尚应符合国家有关标准的规定。

1) 尺寸偏差

尺寸偏差是指烧结砖的实际尺寸与标准规定的公称尺寸之间的偏差。尺寸偏差过大,将影响砌体结构的外观和强度,故其偏差应符合国家有关标准的要求。

2) 外观质量

外观质量是指砖的厚度不匀、缺棱掉角、裂纹、弯曲的程度等。其外观质量的优劣直接

影响砌体结构的外观和强度，故外观质量应符合国家有关标准的要求。

3) 抗风化性能

抗风化性能是指砖对于温度、干湿、冻融等气候因素引起风化破坏的抵抗能力。砖的抗风化性能可用抗冻性、吸水率及饱和系数三项指标来衡量。抗冻性是经 15 次冻融循环后，砖样不允许出现分层、掉皮、缺棱、掉角等冻坏现象，裂纹长度不得超过标准规定值。对于处于严重风化区的地区，砌墙砖必须进行冻融试验，经试验符合国家有关标准规定的才允许使用。

4) 泛霜

泛霜是指在新砌筑的砌体表面有时会出现一层白色的粉状物。出现泛霜是由于砖内含有较多可溶性盐类矿物，这些盐类矿物在砌筑时溶解于进入砖内的水中，当水分蒸发时，在砖的表面结晶析出成霜状（盐析）。根据泛霜程度，分为无泛霜（几乎看不到盐析）、轻微泛霜（出现一层细小霜膜）、中等泛霜（部分表面出现明显霜层）和严重泛霜（表面起砖粉、掉屑、脱皮现象）四种情况。严重泛霜的砖对砌体结构起破坏作用，不能使用。

5) 石灰爆裂

烧结砖的原料或燃料中夹杂着石灰石等成分，烧结时被烧成生石灰，吸水后缓慢熟化成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体，体积膨胀，使砖发生爆裂的现象称之为石灰爆裂。石灰爆裂不但影响砖的外观，而且会降低砌体结构的强度。

6) 吸水率与饱和系数

将烘干的砖样先浸泡 24 h，再煮沸 5 h 后，测定其总的吸水率称为 5 h 煮沸吸水率；其浸泡 24 h 的吸水量与煮沸后的总吸水量的比值称为饱和系数。通过测定砖的 5 h 煮沸吸水率和饱和系数来衡量其抗风化性能。吸水率和饱和系数愈小，则砖的抗风化性能愈强。

7) 强度等级

根据砖的平均抗压强度不同分为若干个等级，强度等级由代号“MU”与抗压强度平均值来表示。如 MU15 表示该砖的平均抗压强度值不低于 15 MPa。砖的强度等级直接影响砌体结构的承载能力，故应根据砌体结构的设计要求，选用强度等级与之相适应的砖。

8) 放射性

放射性是指砖中含有镭-226、钍-232、钾-40 等放射性物质。这些放射性物质如果含量超过规定要求，它们所释放的 γ 射线将对人体产生危害，故对其含量必须加以限量。

9) 毛体积密度

毛体积密度是衡量砖自重的一个指标。毛体积密度愈大，表明其孔隙率就愈小，保温性能就愈差，强度就愈高。

10) 孔型结构和孔洞率

孔型结构是指多孔砖和空心砖的孔洞排列情况；孔洞率是指孔洞的体积占砖的总体积的百分率。孔型结构和孔洞率对砖的强度及保温性有直接影响。

2. 常用烧结砖

1) 烧结普通砖

烧结普通砖的外观形状为实心的长方体，毛体积密度为 $1400 \sim 1900 \text{ kg/m}^3$ 。其外形见图 3-1。

规格品种：砖的公称尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = $240 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 53 \text{ mm}$ 。按砖的抗压强度分



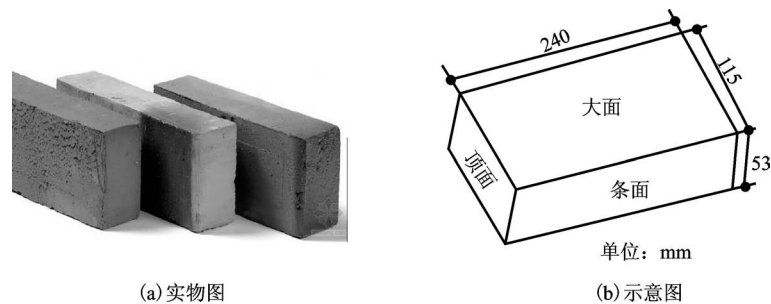


图 3-1 烧结普通砖外形

为 MU30、MU25、MU20、MU15 和 MU10 五个强度等级，各等级的强度要求见表 3-1。

表 3-1 烧结普通砖的强度等级 (GB/T5101—2017)

强度等级	10 块砖的抗压强度平均值 $\bar{f}$ /MPa, $\geq$	抗压强度标准值 f_k /MPa, $\geq$
MU30	30.0	22.0
MU25	25.0	18.0
MU20	20.0	14.0
MU15	15.0	10.0
MU10	10.0	6.5

注: $f_k = \bar{f} - 1.83 s$ (s 为 10 块砖的抗压强度标准差)。

技术要求: 烧结普通砖产品中不允许有欠火砖、酥砖、螺旋纹砖。砖的尺寸偏差、外观质量等技术要求应符合现行国家标准《烧结普通砖》GB/T5101—2017 的有关规定。

欠火砖是指未达到烧结温度或保持烧结温度时间不够的砖。色浅、敲击时音哑、孔隙率大、强度低、吸水率大、耐久性差。

酥砖是指因返潮、雨淋形成的分层等内部缺陷致成品砖被敲击时发出的声音混浊、沉闷、哑音或根本发不出声音或表面片状脱落的砖。易破碎、起壳、掉角,用手拿起碎块用力一捏,立刻呈粉末状,内芯有发黄、蜂窝现象,强度低、耐久性差。

螺旋纹砖是指以螺旋挤出机成型砖坯时,因泥料在出口处愈合不良而形成砖坯内部螺旋状的分层。螺旋纹砖受力后容易破碎,影响砌体结构的整体性和强度。

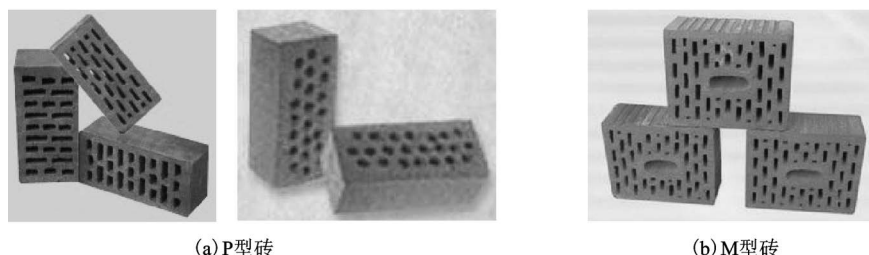
特点与应用: 烧结普通砖具有较高的强度和耐久性、良好的保温隔热和隔声性能,但其自重大、块体小、施工效率低、能耗高、抗震性能差。适用于一般建筑物的承重和非承重墙体的砌筑,也可用于砌筑柱、拱、窑炉、烟囱、台阶、沟道及基础等,亦可砌成薄壳,修建跨度较大的屋盖。在砖砌体中配置适当的钢筋或钢筋网成为配筋砖砌体,可代替钢筋混凝土过梁。在现代建筑中,还可与轻骨料混凝土、加气混凝土、岩棉等复合,砌筑成各种轻体墙,以增强其保温隔热性能。中等泛霜的砖不能用于潮湿部位。



清水墙与混水墙的区别

2) 烧结多孔砖

烧结多孔砖的外形为直角六面体。其外形见图 3-2。



(a) P型砖

(b) M型砖

图 3-2 烧结多孔砖外形

规格品种：砖的长、宽、高尺寸由 290、240、190、180、140、115、90(mm) 中的三个组合而成。常用尺寸为 240 mm × 115 mm × 90 mm (P 型) 和 240 mm × 240 mm × 115 mm (M 型)。按砖的毛体积密度的大小分为 1000、1100、1200、1300 (kg/m³) 四个等级；按整块砖的抗压强度分为 MU30、MU25、MU20、MU15、MU10 五个强度等级，各等级的强度要求同烧结普通砖，见表 3-1。

技术要求：烧结多孔砖产品中不允许有欠火砖、酥砖；砖的尺寸允许偏差、外观质量、孔型结构及孔洞率、泛霜、石灰爆裂、抗风化性、放射性等技术要求应符合现行国家标准《烧结多孔砖和多孔砌块》GB 13544—2011 的有关规定。

特点与应用：烧结多孔砖与烧结普通砖相比，除具有相当的强度外，尚具有毛体积密度较小，自重较轻(墙体自重可减轻 1/5 左右)，保温隔热、隔声、吸潮、耐久性能好的特点。适用于一般建筑物的承重和非承重墙体的砌筑。

3.1.2 非烧结砖

经成型、蒸汽(蒸压)养护或自然养护而制成的砖，均属于非烧结砖。与烧结砖相比，它具有耗能低的优点。按外形分为普通砖(实心砖)和多孔砖两种。

1. 非烧结砖的技术要求

非烧结砖的主要技术要求包括：尺寸偏差、外观质量、强度、抗冻性、干燥收缩率、吸水率、碳化性能、软化性能(软化系数)、放射性。此外，非烧结多孔砖的孔型结构和孔洞率尚应符合国家有关标准的规定。

2. 常用非烧结砖

1) 蒸压灰砂实心砖与多孔砖

蒸压灰砂实心砖与多孔砖是以石灰、砂子为主要原料，允许掺入颜料和外加剂，经坯料制备、压制成形、蒸压养护而成的直角六面体实心或多孔砖。其外形与烧结普通砖和多孔砖相同，无烧缩现象，尺寸偏差较小，外形光洁整齐。

规格品种：蒸压灰砂实心砖的公称尺寸为长 × 宽 × 高 = 240 mm × 115 mm × 53 mm；蒸压灰砂多孔砖的公称尺寸为长 × 宽 × 高 = 240 mm × 115 mm × 90(115) mm。蒸压灰砂实心砖根据其抗压强度分为：MU30、MU25、MU20、MU15 和 MU10 五个强度等级；蒸压灰砂多孔砖按整砖的抗

压强度分为 MU30、MU25、MU20、MU15 四个等级。各等级的强度要求见表 3-2。

质量等级：蒸压灰砂多孔砖按其尺寸偏差和外观质量分为优等品(A)和合格品(C)二个等级。

表 3-2 蒸压灰砂砖与多孔砖的强度等级

强度等级	蒸压灰砂实心砖(GB 11945-2019)		蒸压灰砂多孔砖(JC/T 637-2009)	
	5 块抗压强度 平均值 $\bar{f}$ /MPa, $\geq$	单块最小抗压 强度值 $f_{\min}$ /MPa, $\geq$	10 块抗压强度 平均值 $\bar{f}$ /MPa, $\geq$	单块最小抗压强度值 $f_{\min}$ /MPa, $\geq$
MU30	30.0	25.5	30.0	24.0
MU25	25.0	21.2	25.0	20.0
MU20	20.0	17.0	20.0	16.0
MU15	15.0	12.8	15.0	12.0
MU10	10.0	8.5	—	—

注：优等品的强度级别不得低于 MU15。

技术要求：蒸压灰砂实心砖的线性干燥收缩率应 $\leq 0.050\%$ ；碳化系数和软化系数应 ≥ 0.85 ；尺寸偏差、外观质量、强度等级、抗冻性、放射性等技术要求应符合现行国家标准《蒸压灰砂实心砖和实心砌块》GB 11945—2019 的有关规定。

蒸压灰砂多孔砖的孔洞应垂直于砖的大面，孔洞排列上下左右应对称，分布均匀，圆孔直径应 ≤ 22 mm，非圆孔内切圆直径应 ≤ 15 mm，孔洞外壁厚度应 ≥ 10 mm，肋厚应 ≥ 7 mm，孔洞率应 $\geq 25\%$ ；线性干燥收缩率应 $\leq 0.050\%$ ；碳化系数和软化系数应 ≥ 0.85 ；砖的尺寸允许偏差、外观质量、强度等级、抗冻性、放射性等技术要求应符合现行行业标准《蒸压灰砂多孔砖》JC/T 637—2009 的有关规定。

特点与应用：蒸压灰砂实心砖强度高，无烧缩现象，尺寸偏差较小，外形光洁整齐；蒸压灰砂多孔砖除了具有蒸压灰砂实心砖的优点外，尚具有质轻、保温隔热、隔音等优点。适用于承重和非承重墙体的砌筑，MU15 及以上的砖可用于基础及其他建筑部位，MU10 的砖仅可用于防潮层以上的建筑部位。但是，由于蒸压灰砂砖的耐热性和耐腐蚀性较差，故不得用于长期受热 200℃ 以上、受急冷急热和有酸性介质侵蚀的建筑部位的砌筑。

2) 蒸压粉煤灰多孔砖

蒸压粉煤灰多孔砖是以粉煤灰、生石灰(或电石渣)为主要原料，可掺加适量石膏等外加剂和其他集料，经坯料制备、压制成型、蒸压养护而成的直角六面体多孔砖，代号为 AFPB。

规格品种：砖的长度可为 360、330、290、240、190、140(mm)；宽度可为 240、190、115、90(mm)；高度可为 115 mm 或 90 mm。按整块砖的抗压强度和抗折强度分为 MU25、MU20、MU15 三个等级。

技术要求：砖的孔洞应与砌筑承受压力的方向一致，铺浆面应为盲孔或半盲孔，孔洞率为 25% ~ 35%；线性干燥收缩值应 ≤ 0.5 mm/m；碳化系数应 ≥ 0.85 ；吸水率应 $\leq 20\%$ ；砖的尺寸允许偏差、外观质量、强度等级、抗冻性和放射性等技术要求应符合现行国家标准《蒸压粉煤灰多孔砖》GB 26541—2011 的有关规定。

特点与应用：蒸压粉煤灰多孔砖具有原材料丰富，生产技术简单，质量轻，强度高，保温隔热、隔声性能好，节能环保等优点。适用于工业与民用建筑的承重和非承重结构的砌筑。

3) 承重混凝土多孔砖

承重混凝土多孔砖是以水泥、砂、石等为主要原料，经配料、搅拌、成形、养护制成的直角六面体多排孔混凝土砖。简称混凝土多孔砖，代号为 LPB。其外形见图 3-3。

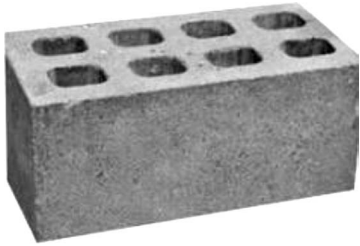


图 3-3 承重混凝土多孔砖外形

规格品种：砖的长度可为 360、290、240、190、140(mm)；宽度可为 240、190、115、90(mm)；高度可为 115 mm、90 mm。按整块砖的抗压强度分为 MU25、MU20、MU15 三个强度等级。

技术要求：砖的孔洞应与砌筑承受压力的方向一致，铺浆面应为盲孔或半盲孔，最小外壁厚应 ≥ 18 mm，最小肋厚应 ≥ 15 mm，孔洞率为 25% ~ 35%；线性干燥收缩率应 $\leq 0.045\%$ ；碳化系数和软化系数应 ≥ 0.85 ；吸水率应 $\leq 12\%$ 。砖的尺寸允许偏差、外观质量、相对含水率、强度等级、抗冻性和放射性等技术要求应符合现行国家标准《承重混凝土多孔砖》GB 25779—2010 的有关规定。

特点与应用：承重混凝土多孔砖具有强度高，耐久性好，保温隔热、隔声性能好等优点。适用于工业与民用建筑的承重结构的砌筑。

4) 炉渣砖

炉渣砖是以炉渣为主要原料，掺入适量水泥、电石渣、石灰、石膏，混合均匀压制成形后，经蒸汽或蒸压养护而成的直角六面体实心砖，代号为 LZ。其外形与烧结普通砖相同。

规格品种：砖的公称尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=240 mm $\times$ 115 mm $\times$ 53 mm。按砖的抗压强度划分为 MU25、MU20、MU15 三个等级，各等级的强度要求见表 3-3。

表 3-3 炉渣砖的强度等级(JC/T 525—2007)

强度等级	10 块砖的抗压强度平均值 $\bar{f}/\text{MPa}$, $\geq$	变异系数 $\delta \leq 0.21$	变异系数 $\delta > 0.21$
		抗压强度标准值 f_k/MPa , $\geq$	单块最小抗压强度值 $f_{\min}/\text{MPa}$, $\geq$
MU25	25.0	19.0	20.0
MU20	20.0	14.0	16.0
MU15	15.0	10.0	12.0

注：变异系数=10 块砖的抗压强度标准差/抗压强度平均值。

技术要求：砖的线性干燥收缩率应 $\leq 0.06\%$ ，耐火极限应 ≥ 2.0 h；砖的尺寸允许偏差、外观质量、强度等级、抗冻性、抗碳化性、抗渗性、放射性等技术要求应符合现行行业标准《炉渣砖》JC/T 525—2007 的有关规定。

特点与应用：由于炉渣具有大量微孔和良好的抗侵蚀性，故炉渣砖具有质量轻，保温隔热和抗侵蚀性能好，且具有利废、节能等优点。主要用于一般建筑物的承重和非承重墙体及基础部位的砌筑。对于经常受干湿交替及冻融作用的建筑部位，最好使用高强度等级的炉渣砖或采用水泥砂浆抹面保护。防潮层以下的建筑部位应采用 MU15 以上的炉渣砖。

3.1.3 砖的验收与施工管理

1. 验收

1) 核对产品出厂合格证

核对出厂合格证的有关产品名称、型号、规格、数量是否与产品和合同要求相符。

砖产品出厂时,生产厂家必须提供产品质量合格证。产品质量合格证主要内容包括:生产单位、产品标记、批量及编号、证书编号、本批产品实测技术性能和生产日期等,并有检验员和承检单位签章。

2) 质量检验

尽管砖产品在出厂时均附有生产厂家提供的产品出厂合格证,但是,为了确保建设工程的质量和施工安全,国家有关法律法规和施工质量验收标准规定,砖在使用前,应按有关产品标准和施工质量验收标准的规定,在监理人员的见证下,分批次、按批量随机抽取规定数量的样品送至具有相应资质的检验机构进行检验,以验证该批产品的技术参数是否符合有关产品标准、设计文件和合同约定的要求。

检验时,首先对产品的外观质量进行检验,外观质量不合格的应不予验收,在外观质量符合要求的前提下,再按有关产品标准和施工质量验收标准的规定,随机抽取规定数量的样品进行强度和其他物理力学性能检验,检验结果符合要求的,该批产品可以验收。烧结砖中有欠火砖、酥砖和螺旋纹砖时,则判该批砖为不合格品,应不予验收。

2. 施工管理

砖在装卸时要轻拿轻放,避免碰撞摔打,禁止翻斗倾卸;储存时,不同技术参数产品应分别码放,不得混杂,并应有明显的标识,以便施工人员正确选用;堆放场地应坚实平整;对于蒸压粉煤灰多孔砖、承重混凝土多孔砖尚应有防雨淋措施。

由于砖具有较强的吸水性,特别是烧结砖,如果直接用干砖砌筑,则砌筑砂浆中的水分容易被干砖所吸收,使砂浆的流动性降低,导致砌筑灰缝不饱满,灰缝厚度和砌筑平整度难以控制,且还会影响水泥的水化,导致砂浆强度及砂浆与砖的粘接强度降低,砂浆与砖会出现胶结不牢的现象,对砌体质量产生不利影响。因此,在砌筑前,应将干砖用洁净水润湿,但又不能过湿,过湿将使砂浆流动性增大、砂浆与砖的界面层水灰比增大、砂浆强度降低,妨碍了水泥浆向砖体内渗透,出现流浆、离析等现象,也将导致砌体质量下降。

实践证明,适宜的含水率不仅可以提高砖与砂浆直接的粘接力,提高砌体的抗剪强度,还可以使砌筑砂浆在操作面上保持一定的摊铺流动性,便于施工操作,有利于保证砂浆的饱满度,这些对保证砌体施工质量和力学性能都是十分有利的。

适宜的含水率因砖的种类不同而不同。对于烧结砖,宜为10%~15%;对于灰砂砖、粉煤灰砖,宜为8%~12%。现场检验砖含水率的简易方法为断砖法,即将砖砍断,当砖截面四周渗水深度为15~20 mm时,视为符合要求的适宜含水率。

3.2 砌块

砌块是建筑工程中常用的新型墙体材料之一。它可以利用工业废料,化害为利,其块体较大,可提高砌筑效率,提高机械化程度。可以制成实心或空心,分别满足承重或轻质的要

求；若在砂浆层中设置钢筋网片或在墙体内安插钢筋，容易满足牢固抗震的要求。因此，发展砌块建筑，是我国墙体材料改革的重要途径之一，尤其是空心砌块，其空心率可达 35% ~ 50%，墙体自重可减轻 30% 以上，建筑功能也得到改善。

在砌筑块材中，凡长、宽、高有一项或一项以上分别大于 365 mm、240 mm、115 mm，且高度不超过长或宽的 6 倍、长度不超过高度的 3 倍者，均称为砌块。

砌块按其用途分为承重砌块和非承重砌块；按其结构分为实心砌块和空心砌块；按其生产工艺分为非烧结砌块和烧结砌块；按产品规格分为小型砌块（主规格：高为 115 ~ 380 mm）、中型砌块（主规格：高为 380 ~ 980 mm）和大型砌块（主规格：高大于 980 mm）。

由于砌块可以采用各种工业废料和地方资源，因此，若按所用原料来分，便有许多品种，如硅酸盐混凝土砌块（粉煤灰砌块、加气混凝土砌块等）、轻骨料混凝土砌块（陶粒混凝土砌块、浮石混凝土砌块、火山渣混凝土砌块等）、水泥混凝土砌块、煤矸石砌块、石膏砌块、烧结黏土（煤矸石、页岩、粉煤灰）砌块等。常用的砌块有蒸压加气混凝土砌块、普通混凝土小型砌块、粉煤灰混凝土小型空心砌块和轻集料混凝土小型空心砌块。

1. 蒸压加气混凝土砌块

蒸压加气混凝土砌块是以钙质材料（如水泥、石灰等）和硅质材料（如砂子、粉煤灰、矿渣等）为主要原料，掺加发气剂及其他调节材料，通过配料浇筑、发气静停、切割、蒸压养护等工艺制成，用于墙体砌筑的多孔轻质矩形块材，代号为 AAC - B。其外形见图 3 - 4。



图 3 - 4 蒸压加气混凝土砌块

规格品种：砌块主规格的 lengths 为 600 mm；宽度为 100、120、125、150、180、200、240、250 或 300 (mm)；高度为 200、240、250 或 300 (mm)。根据砌块的 100 (mm) 边长立方体抗压强度划分为 A1.5、A2.0、A2.5、A3.5、A5.0 五个强度等级。根据砌块的干密度划分为 B03、B04、B05、B06、B07 五个级别。按尺寸偏差分为 I 型和 II 型。

技术要求：砌块的抗压强度、干密度、导热系数、干燥收缩值应符合表 3 - 4 的规定。

表 3 - 4 砌块的强度等级、干密度、导热系数及干燥收缩值（GB/T 11968—2020）

强度等级	抗压强度/MPa, ≥		干密度级别	平均干密度/ (kg · m ⁻³), ≤	导热系数(干态)/ (W · m ⁻² · K ⁻¹), ≤	干燥收缩值/ (mm · m ⁻¹), ≤
	平均值	最小值				
A1.5	1.5	1.2	B03	350	0.10	0.50
A2.0	2.0	1.7	B04	450	0.12	
A2.5	2.5	2.1	B04	450	0.12	
			B05	550	0.14	
A3.5	3.5	3.0	B04	450	0.12	
			B05	550	0.14	
			B06	650	0.16	
A5.0	5.0	4.2	B05	550	0.14	
			B06	650	0.16	
			B07	750	0.18	

砌块的尺寸允许偏差、外观质量、抗冻性等技术要求应符合现行国家标准《蒸压加气混凝土砌块》GB/T 11968—2020 的有关规定。

特点与应用:蒸压加气混凝土砌块是一种轻质多孔、吸音隔热性能良好的墙体材料。主要用于建筑物的非承重墙的砌筑,也可与其他材料组合成为具有保温隔热功能的复合墙体,但不宜用于最外层。另外,蒸压加气混凝土砌块如无有效措施,不得用于建筑物标高 ± 0.000 以下;不得用于长期浸水、经常受干湿交替或经常受冻融循环的部位;不得用于受酸碱化学物质侵蚀的部位以及制品表面温度高于 80°C 的部位。I型用于薄灰缝砌筑,II型用于厚灰缝砌筑。A1.5、A2.0、B03、B04适用于建筑保温。

2. 普通混凝土小型砌块

普通混凝土小型砌块是以水泥、砂、石、水等为原料,经搅拌、振动成形、养护等工艺制成的直角六面体小型砌块。

规格品种:按使用要求分为主块型砌块(见图3-5)和辅助型砌块;按空心率分为实心砌块(空心率 $< 25\%$,代号为H)和空心砌块(空心率 $\geq 25\%$,代号为S);按砌筑结构和受力情况分为承重砌块(代号为L)和非承重砌块(代号为N);主块型砌块的长度为390 mm,宽度可为90、120、140、190、240或290(mm),高度可为90、140或190(mm);按整块砌块的抗压强度分为MU5.0、MU7.5、MU10、MU15、MU20、MU25、MU30、MU35、MU40九个强度等级。

技术要求:承重砌块的最小外壁厚应 ≥ 30 mm,最小肋厚应 ≥ 25 mm,非承重砌块的最小外壁厚和最小肋厚应 ≥ 20 mm;碳化系数和软化系数应 ≥ 0.85 ;砌块的尺寸允许偏差、外观质量、强度等级、吸水率、抗冻性、抗渗性等技术要求应符合现行国家标准《普通混凝土小型砌块》GB/T 8239—2014 的有关规定。

特点与应用:普通混凝土小型砌块具有块体大,质量轻,保温隔热、隔声性能好,施工效率高等优点。适用于工业与民用建筑的承重和非承重墙体的砌筑。由于它的温度变形和干缩变形值都比普通烧结砖大,为了防止墙体开裂,应根据规定设置伸缩缝,并在必要部位增加圈梁或构造钢筋。

3. 粉煤灰混凝土小型空心砌块

粉煤灰混凝土小型空心砌块是以粉煤灰、水泥、集料为主要组分(也可加入外加剂等),加水搅拌、振动成形、蒸汽养护而制成的直角六面体墙体材料,代号为FHB。其外形同普通混凝土小型砌块。

规格品种:砌块的主规格尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=390 mm $\times$ 190 mm $\times$ 190 mm。按砌块孔的排数分为单排孔(1)、双排孔(2)和多排孔(D)三类。按砌块的密度等级分为:600、700、800、900、1000、1200和1400(kg/m^3)七个等级。按整块砌块的抗压强度分为:MU3.5、MU5.0、MU7.5、MU10、MU15、MU20六个等级。

技术要求:砌块的最小外壁厚,用于承重墙时应 ≥ 30 mm,用于非承重墙时应 ≥ 25 mm;

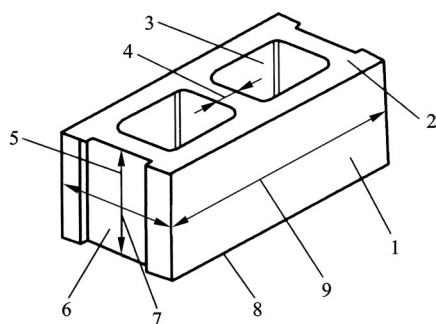


图3-5 主块型砌块外形

1—条面; 2—坐浆面(肋厚较小的面); 3—壁; 4—肋;
5—高度; 6—顶面; 7—宽度; 8—铺浆面; 9—长度

最小肋厚,用于承重墙时应 $\geq 25\text{ mm}$,用于非承重墙时应 $\geq 15\text{ mm}$;线性干燥收缩率应 $\leq 0.060\%$;碳化系数和软化系数应 ≥ 0.80 ;相对含水率,潮湿地区应 $\leq 40\%$ 、中等地区应 $\leq 35\%$ 、干燥地区应 $\leq 30\%$;砌块的尺寸允许偏差、外观质量、强度等级、密度等级、抗冻性、放射性等技术要求应符合现行行业标准《粉煤灰混凝土小型空心砌块》JC/T862—2008 的有关规定。

特点与应用:砌块具有较好的后期强度储备,较好的抗震性、良好的保温性和抗渗性,利废节能,块体大,施工效率高等优点。适用于民用和工业建筑墙体的砌筑。但不宜用于有酸性介质侵蚀、经常处于受高温或潮湿的部位以及有较大震动影响的建筑。

4. 轻集料混凝土小型空心砌块

轻集料混凝土小型空心砌块是指用轻粗骨料(如陶粒、浮石等)、轻砂(或普通砂)、水泥和水等原料配制而成的直角六面体墙体材料,代号为 LB。其外形与普通混凝土小型砌块相同。

规格品种:砌块的主规格尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=390\text{ mm}\times 190\text{ mm}\times 190\text{ mm}$;按砌块孔的排数分为单排孔、双排孔、三排孔和四排孔等;按砌块密度等级分为 700、800、900、1000、1100、1200、1300 和 1400(kg/m^3)八个等级(除自然煤矸石掺量不小于砌块质量 35% 的砌块外,其他砌块的最大干密度等级为 1200 kg/m^3);按整块砌块的抗压强度分为 MU2.5、MU3.5、MU5、MU7.5、MU10 五个等级。

技术要求:砌块的线性干燥收缩率应 $\leq 0.065\%$;碳化系数和软化系数应 ≥ 0.80 ;吸水率应 $\leq 18\%$;砌块各强度等级的强度和干密度要求应符合表 3-5 的规定。其他技术要求应符合现行国家标准《轻集料混凝土小型空心砌块》GB/T 15229—2011 的有关规定。

表 3-5 轻集料混凝土小型空心砌块的强度等级(GB/T 15229—2011)

强度等级	抗压强度/MPa, $\geq$		密度等级 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$, $\leq$	强度等级	抗压强度/MPa, $\geq$		密度等级 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$, $\leq$
	5 块平均值	单块最小值			5 块平均值	单块最小值	
MU2.5	3.5	2.0	800	MU7.5	7.5	6.0	1300(1200)
MU3.5	3.5	2.8	1000	MU10	10.0	8.0	1400(1200)
MU5	5.0	4.0	1200				

注:①当砌块的抗压强度同时满足 2 个或 2 个以上强度等级要求时,应以满足要求的最高强度等级为准。

②括号中的数字为除自然煤矸石掺量不小于砌块质量 35% 以外的其他砌块的要求。

特性与应用:轻集料混凝土小型空心砌块与普通混凝土小型砌块相比,具有质量轻(毛体积密度小)、热工性能较好、节能环保等特点。由于其强度低,故主要用于工业与民用建筑的框架结构的填充墙体和非承重墙体的砌筑。

3.3 砌筑石材

砌筑石材是由天然岩石经人工开采、加工而成。天然岩石具有很高的抗压强度、良好的耐磨性和耐久性,经加工后,表面美观富于装饰性,资源分布广,蕴藏量丰富,便于就地取材,价格低廉,大大降低工程费用等优点,所以至今仍然在砌筑和装饰工程中被广泛使用。

3.3.1 岩石的形成与分类

1. 岩石的形成

天然岩石是由各种不同的地质作用形成的,具有一种或多种矿物组成和一定结构构造的固态矿物的集合体。

岩石的结构是指矿物的结晶程度、结晶大小、形态及相互排列关系。如玻璃状(非结晶体)、细晶状、粗晶状、斑状、纤维状等。

岩石的构造是指矿物在岩石中的排列及相互配置关系。如致密状、层状、片状、多孔状、流纹状等。

2. 岩石的分类

1) 按矿物组成分

岩石按其矿物组成为单矿岩和复矿岩。

单矿岩:是由单一矿物组成的岩石。如石灰岩就是由 95% 以上的方解石(结晶 CaCO_3)组成的单矿岩。

复矿岩:是由两种或两种以上矿物组成的岩石。如花岗岩是由长石(铝硅酸盐)、石英(结晶 SiO_2)、云母(钾、镁、锂、铝等的铝硅酸盐)等矿物组成的多矿岩。

2) 按地质成因分

天然岩石按地质成因分为岩浆岩(火成岩)、沉积岩(水成岩)和变质岩。

岩浆岩:又称火成岩,是由岩浆喷出地表或侵入地壳冷却凝固所形成的岩石,有明显的矿物晶体颗粒或气孔。根据其冷却条件不同又可分为深成岩(在地壳深处冷凝)、浅成岩(在地壳浅处冷凝)、火山岩(在地表冷凝)。深成岩结晶完全、晶粒粗大、结构致密、表观密度大、抗压强度高、孔隙率及吸水率小、抗冻性和耐磨性好;浅成岩具有结晶体与玻璃体混合在一起的半晶质结构,岩石性能比深成岩稍差;火山岩具有细晶粒、隐晶质或玻璃质结构,常含有碎屑、斑晶和很小的气孔,吸水性强、耐高温、抗风化性强。

沉积岩:又称水成岩,是在地表不太深的地方,将其他岩石的风化产物和一些火山喷发物,经过水流或冰川的搬运、沉积、成岩作用而形成的岩石。根据其造岩组分和结构不同又可分为碎屑沉积岩、化学沉积岩和生物沉积岩。沉积岩的主要特征是呈层状构造,孔隙率和吸水率较大,强度较低,耐久性较差。

变质岩:是由于原来的岩石受到强烈的地质活动,在高温和高压条件下矿物再结晶或生成新矿物,使原来岩石的矿物成分及构造发生显著变化而形成的一种新岩石。变质岩具有片理或块状结构,由岩浆岩变质而成的变质岩性能一般比原岩浆岩差,由沉积岩变质而成的变质岩性能一般比原沉积岩好。

岩石在整个地表的分布情况为:沉积岩约占 75%,岩浆岩和变质岩约占 25%。

3) 按抗压强度分

《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 中,根据岩石饱水单轴抗压强度标准值将岩石划分为坚硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩,见表 3-6。

表 3-6 岩石坚硬程度划分 (GB50007—2011)

坚硬程度类别	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
饱水单轴抗压强度标准值(f_{rk})/MPa	$f_{rk} > 60$	$30 < f_{rk} \leq 60$	$15 < f_{rk} \leq 30$	$5 < f_{rk} \leq 15$	$f_{rk} \leq 5$

《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 规定,石材的强度等级采用边长为 70 mm 的立方体试件饱水抗压强度来表示。也可采用边长为 50 mm 的立方体试件,但应对其试验结果乘以 0.86 的换算系数。1 组不少于 3 个试件,当 3 个试件强度值中最大与最小值之差值未超过 3 个试件强度平均值的 20% 时,则取 3 个试件强度的平均值作为该岩石的抗压强度值。否则,应另取第 4 个试件试验,并在 4 个强度中取最接近的 3 个强度值的平均值作为该岩石的抗压强度值,同时在报告中将 4 个强度值全部给出。

根据岩石饱水抗压强度标准值分为 MU20、MU30、MU40、MU50、MU60、MU70、MU80、MU90、MU100、MU120 等强度等级。

3.3.2 砌体结构工程常用岩石与石材



常用岩石的鉴别

1. 砌体结构工程常用岩石

砌体结构工程常用岩石有花岗岩、石灰岩、砂岩、玄武岩等。

1) 花岗岩

花岗岩是一种由火山爆发的熔岩在受到相当的压力作用下,在地表深处慢慢冷却凝固后隆起至地壳表层而形成的一种具有全晶质结构、块状构造、呈花点状的深成酸性火成岩。

花岗岩的主要矿物成分为石英(SiO_2)、长石(CaCO_3)和云母。其中长石含量为 40% ~ 60%,石英含量为 20% ~ 40%。其颜色决定于所含矿物成分的种类和数量,有灰白、微黄、淡红、暗红、黑色、绿色等颜色。岩质坚硬密实、不易风化,表观密度为 2500 ~ 2700 kg/m^3 ,抗压强度为 120 ~ 250 MPa,吸水率小于 1%,磨光性、耐磨性、抗冻性、耐水性、耐酸性、抗风化能力均好。

2) 石灰岩

石灰岩根据其成分、结构构造、形成机理、所含杂质的不同,可分为化学石灰岩(即常称的石灰岩)、生物石灰岩、鲕(ér)状石灰岩、碎屑石灰岩等。

化学石灰岩是湖海中所沉积的碳酸钙,在失去水分以后,紧压胶结起来而形成的岩石。如普通石灰岩、硅质石灰岩等。

生物石灰岩是生物遗体堆积而成的岩石。如珊瑚石灰岩、介壳石灰岩,藻类石灰岩等。

石灰岩的矿物成分主要是碳酸钙(占 50% 以上),还有一些黏土、粉砂等杂质。纯净的石灰岩呈浅灰、灰白色,而含有机质多的石灰岩呈深灰、灰黑、浅黄、淡红等色。除含硅质的石灰岩外,石灰岩的硬度不大,有明显的层理,质脆,遇稀盐酸会激烈起泡,易溶蚀。表观密度为 2600 ~ 2800 kg/m^3 ,吸水率为 2% ~ 10%,抗压强度为 20 ~ 160 MPa。

3) 砂岩

砂岩又称砂粒岩,是由于地球的地壳运动,砂粒(岩石碎屑)与胶结物(硅质物、碳酸钙、黏土、氧化铁、硫酸钙等)经长期巨大压力压缩胶结而形成的一种沉积岩。其中砂粒含量大

于 50%。绝大部分砂岩是由石英或长石组成的。砂岩的颜色和砂子一样，可以是任何颜色，最常见的是棕色、黄色、红色、灰色和白色。

砂岩的性质因其胶结物的种类不同，性能差别很大。致密的硅质砂岩的性质接近于花岗岩；钙质砂岩的性质类似石灰岩；铁质砂岩的性质比钙质砂岩差。砂岩的主要类型有石英砂岩、长石砂岩、岩屑砂岩和杂砂岩等。

4)玄武岩

玄武岩是由火山喷发出的岩浆在地表冷却后凝固而成的一种致密状或泡沫状结构的喷出岩。具有细粒致密结构或斑状结构，呈气孔状或杏仁状构造。

玄武岩的主要矿物为斜长石和辉石。SiO₂ 含量在 45% ~ 52% 之间。呈深灰色、黑色、棕黑色。表观密度为 2800 ~ 3300 kg/m³，吸水率大于 3%，抗压强度为 100 ~ 500 MPa，耐酸、耐热、抗风化能力强。

2. 砌体结构工程用石材及技术要求

砌体工程也称圬(wū)工。砌体工程用石材主要有片石和料石，它们均为天然岩石经开采和加工而成。砌体工程用石材的类别和强度应符合设计要求，石材的质地应均匀、不易风化、无裂纹，外观质量和尺寸大小应符合有关行业的施工或验收标准的规定。

1) 建筑工程对砌体结构工程用石材外观质量与尺寸规格的要求

《砌体结构设计规范》GB 50003—2011 对砌体工程中用石材的外观质量与尺寸规格的具体要求见表 3-7。

表 3-7 砌体工程用石材 (GB 50003—2011)

石材名称	毛石	细料石	粗料石	毛料石
外观要求	形状不规则，中部厚度应≥20 cm	通过加工，外表规则，叠砌面凹入深度应≤1 cm，截面的宽度、高度宜≥20 cm，且不宜小于长度的 1/4	规格尺寸同细料石要求，但叠砌面凹入深度应≤2 cm。	外形大致方正，一般不加工或仅稍加修整，高度应≥20 cm，叠砌面凹入深度应≤2.5 cm
用途	基础、勒脚、墙身、堤坝、挡土墙、片石混凝土的骨料等	柱头、墙身、踏步、栏杆、地坪、纪念碑和其他装饰等	基础、勒脚、墙身、地坪、堤坝、挡土墙及外观要求不高的装饰等	

2) 铁路工程对砌体结构工程用石材外观质量与尺寸规格的要求

《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424—2018 对砌体工程中用石材的外观质量与尺寸规格的具体要求见表 3-8。

表 3-8 铁路砌体工程用石材 (TB 10424—2018)

石材名称	片石	块石	料石
外观要求	形状不规则，石块中部厚度应≥15 cm，且长度和宽度不小于厚度	形状规则、大致方正。稍加修整，厚度应≥20 cm，长度和宽度不小于厚度；丁石的长度应比相邻顺石宽度大 15 cm	形状规则的六面体。经粗加工，表面不允许凸出，凹入深度应≤2 cm，厚度应≥20 cm，宽度不小于厚度，长度不小于厚度的 1.5 倍，外露面四周向内修凿的进深应≥10 cm，且修凿面应与外露面垂直，每 10 cm 应凿切 4 ~ 5 条纹，丁石的长度应比相邻顺石宽度大 15 cm
用途	基础、排水沟、锥坡、护坡、片石混凝土骨料等	基础、排水沟、涵洞、桥梁的墩台及挡土墙等	外观要求较高的涵洞、桥梁的墩台及挡土墙等



岩石的工程应用

3) 公路工程对砌体结构工程用石材外观质量与尺寸规格的要求
《公路桥涵施工技术规范》JTG/T 3650—2020 对砌体工程中用石材的外观质量与尺寸规格的具体要求见表 3-9。

表 3-9 公路砌体工程用石材 (JTG/T 3650—2020)

石材名称	片石	块石	粗料石
外观要求	形状不规则, 片石厚度应 ≥ 15 cm。用作镶面的片石, 应选择表面较平整、尺寸较大者, 并应稍作修整	外形应大致方正, 上下面应大致方正、平整, 厚度应为 20 ~ 30 cm, 宽度应为厚度的 1.0 ~ 1.5 倍, 长度应为厚度的 1.5 ~ 3.0 倍。如有锋棱锐角, 应敲除。用作镶面时, 应从外露面向四周向内稍加修凿, 后部可不修凿, 但应略小于修凿部分	外形应方正, 呈六面体, 厚度应为 20 ~ 30 cm, 宽度应为厚度的 1.0 ~ 1.5 倍, 长度应为厚度的 2.5 ~ 4.0 倍, 表面凹陷应 ≤ 2 cm。用作镶面时, 丁石的长度应比相邻顺石宽度大 15 cm, 修凿面每 10 cm 应有凿 (zǎo) 路 4 ~ 5 条, 侧面修凿面应与外露垂直, 正面凹陷应 ≤ 1.5 cm; 外露带带细凿边缘时, 细凿边缘的宽度应为 3 ~ 5 cm
用途	基础、排水沟、锥坡、护坡、片石混凝土骨料等	基础、排水沟、涵洞、桥梁的墩台及挡土墙等	外观要求较高的涵洞、桥梁的墩台、拱石及挡土墙等

3.4 砌筑砂浆

砌筑砂浆是指由水泥、砂、水以及根据性能要求掺入掺合料和外加剂等组分, 按一定比例配合、拌制而成, 在砌筑过程中将砖、石、砌块等块材砌筑成为砌体的工程材料。砌筑砂浆在砌体中起衬垫、粘结和传力作用。常用的砌筑砂浆有水泥砂浆和水泥石灰混合砂浆。

3.4.1 砌筑砂浆的组成材料及技术要求

1. 水泥

砌筑砂浆宜采用通用硅酸盐水泥或砌筑水泥, 主要起胶结和改善工作性 (和易性) 的作用。M15 以下的砂浆宜选用 32.5 级及以下的水泥; M15 以上的砂浆宜选用 42.5 级的水泥。其技术要求应符合国标《通用硅酸盐水泥》GB 175—2007 或《砌筑水泥》GB/T 3183—2017 的有关规定。

砌筑水泥是由硅酸盐水泥熟料加入规定的混合材料和适量石膏磨细而成的保水性较好的水硬性胶凝材料。砌筑水泥的 SO_3 含量应 $\leq 3.5\%$; 氯离子含量应 $\leq 0.06\%$; 安定性用沸煮法检验应合格; 细度用 80 μm 方孔筛筛余率应 $\leq 10.0\%$; 初凝时间应 ≥ 60 min; 终凝时间应 ≤ 720 min; 保水率应 $\geq 80\%$; 各龄期的强度应符合表 3-10 的规定。

表 3-10 砌筑水泥的强度指标 (GB/T 3183—2017)

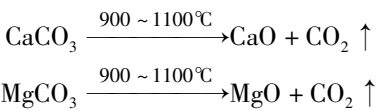
强度等级	抗压强度/MPa, $\geq$			抗折强度/MPa, $\geq$		
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
M12.5	—	7.0	12.5	—	1.5	3.0
M22.5	—	10.0	22.5	—	2.0	4.0
M32.5	10.0	—	32.5	2.5	—	5.5

2. 掺合料

砌筑砂浆常用的掺合料有石灰膏、电石膏、粉煤灰、矿渣粉等。主要起改善工作性的作用。

石灰膏：是将生石灰用过量的水经熟化、沉淀而得到的可塑性膏状物质。沉淀池中贮存的石灰膏表面应保持有一层一定厚度的水，以隔绝空气，防止碳化，还要有防止冻结和污染的措施。严禁使用脱水硬化的石灰膏，消石灰粉(将块状生石灰用适量水熟化而得到的粉状石灰)不得直接用于砌筑砂浆中。

生石灰是由主要成分为碳酸钙和碳酸镁的石灰岩经高温煅烧分解，释放出二氧化碳气体，得到以氧化钙、氧化镁为主要成分的块状气硬性胶凝材料。其反应式如下：



生石灰在生产过程中，由于对煅烧温度、时间和岩块大小的控制不妥等原因，可形成正火石灰、欠火石灰和过火石灰。

正火石灰是煅烧温度和时间控制正常，即在低于烧结温度下煅烧，碳酸钙、碳酸镁完全分解的石灰，其产浆量高、氧化钙和氧化镁含量高、质量好。

欠火石灰是煅烧温度较低、煅烧时间短或岩块尺寸过大，导致碳酸钙、碳酸镁不能完全分解，石灰中含有未烧透的内核的石灰，其产浆量较低，氧化钙和氧化镁含量低，使用时胶结力不足，质量较差。

过火石灰是煅烧温度过高、煅烧时间过长，表面常被黏土杂质熔化时所形成的玻璃釉状物包覆，与水反应速度十分缓慢，若将过火石灰用于工程中，过火石灰颗粒往往会在正常石灰硬化以后才发生水化作用，生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体，体积膨胀，使已硬化的砂浆表面产生开裂、隆起等现象，影响工程质量。

生石灰必须经过熟化(也称消化)才能用于建设工程。熟化过程就是让氧化钙、氧化镁与水发生化学反应而生成氢氧化钙和氢氧化镁。块状生石灰的熟化时间应 ≥ 7 d，并应用孔径不大于 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的网过滤；磨细生石灰粉的熟化时间应 ≥ 2 d，其目的就是让过火石灰得到充分的熟化。

生产石灰膏用石灰的技术要求应符合《建筑生石灰》JC/T 479—2013 和《建筑消石灰》JC/T 481—2013的有关规定。其主要技术要求见表 3 - 11。

表 3 - 11 建筑石灰的技术要求 (JC/T479—2013、JC/T481—2013)

主控项目	钙质石灰			镁质石灰	
	CL90 - Q CL90 - QP HCL90	CL85 - Q CL85 - QP HCL85	CL75 - Q CL75 - QP HCL75	ML85 - Q ML85 - QP HML85	ML80 - Q ML80 - QP HML80
(氧化钙 + 氧化镁) 含量/%， $\geq$	90	85	75	85	80
氧化镁 含量/%	≤ 5			> 5	
二氧化碳 含量/%， $\leq$	4	7	12	7	
三氧化硫 含量/%， $\leq$	2			2	

续上表

主控项目		钙质石灰			镁质石灰	
		CL90 - Q CL90 - QP HCL90	CL85 - Q CL85 - QP HCL85	CL75 - Q CL75 - QP HCL75	ML85 - Q ML85 - QP HML85	ML80 - Q ML80 - QP HML80
产浆量/[dm ³ · (10 kg) ⁻¹], ≥		26			—	
细度	0.2 mm 筛余量/% , ≤	2			2	
	90 μm 筛余量/% , ≤	7			7	
游离水含量/% , ≤		2			2	
安定性		合格				

注：① Q 代表生石灰，QP 代表生石灰粉，CL 代表钙质石灰，ML 代表镁质石灰，HCL 代表钙质消石灰，HML 代表镁质消石灰；② 产浆量只是对生石灰的要求，细度只是对生石灰粉的要求，游离水和安定性只是对消石灰的要求，二氧化碳含量对消石灰粉不作要求。

石灰粉颗粒愈细，石灰粉与水接触面积就愈大，熟化速度就愈快。

石灰中产生胶结性的有效成分是氧化钙和氧化镁，它们的含量决定了石灰胶结能力的大小，是划分石灰质量等级的主要指标。

产浆量是指单位质量的生石灰经熟化后所产生的石灰浆的体积。生石灰产浆量愈高，表明石灰中的氧化钙和氧化镁含量高，故石灰的质量就愈好。

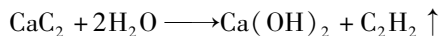
未消化残渣含量是指生石灰在消化过程中未能消化而存留在 5 mm 圆孔筛上的残渣占试样的百分率。未消化残渣含量愈少，表明石灰煅烧愈完全，则石灰质量就愈好。

二氧化碳含量愈高，说明未分解的碳酸盐（即欠火石灰）含量愈高，有效成分（CaO + MgO）含量相对降低，石灰质量就愈差。

消石灰粉中游离水含量是指化学结合水以外的含水量。生石灰消化时多加的水残留于氢氧化钙中，残余水分蒸发后留下孔隙，加剧了消石灰粉的碳化，从而影响其使用质量。

由于生石灰的吸水、吸湿性极强，极易吸收空气中的水分和二氧化碳，还原为碳酸钙，使其性能降低，因此，石灰在存放时应注意防水、防潮，并且不宜久存，做到随到随用；又由于生石灰受潮熟化时放出大量的热，而且体积膨胀，所以，储存和运输生石灰时，应采取防水措施，且不应与易燃易爆物品及液体共存、同运，以免发生火灾，引起爆炸，同时应采取适当的防护措施，避免造成人身安全事故。

电石膏：由电石渣（主要成分为氢氧化钙）制作而成的膏状物质。电石的主要成分是碳化钙（ CaC_2 ），电石与水发生化学反应而生成氢氧化钙和乙炔气体，其反应式如下：



电石膏应用孔径不大于 3 mm × 3 mm 的网过滤，检验时应加热至 70℃ 并保持 20 min，没有乙炔气味后，方可使用。

粉煤灰与矿渣粉：砌筑砂浆用粉煤灰与矿渣粉的技术要求应符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》GB/T 1596—2017 及《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》GB/T 18046—2017 的有关规定。

3. 砂

砌筑砂浆用砂宜选用中砂，其中毛石砌体宜选用粗砂，其技术要求应符合《普通混凝土

用砂、石质量及检验方法标准》JGJ 52—2006 或《建设用砂》GB/T 14684—2011 及其他技术标准的相关规定。砂在砂浆中主要起骨架和减少收缩作用。

4. 外加剂

根据性能要求，砌筑砂浆中可掺入适量的减水剂、砂浆剂、塑化剂、防水剂等，其质量应符合国家现行有关标准的要求，并经砂浆性能试验合格后，方可使用。外加剂主要起改善工作性和提高防水性能作用。

5. 拌合用水

砌筑砂浆拌合用水的技术要求应符合《混凝土用水标准》JGJ 63—2006 的有关规定。

3.4.2 砌筑砂浆的技术性质

由于砌筑砂浆的组分与混凝土的组分只是少了粗骨料，故砌筑砂浆的许多技术性质与混凝土的技术性质相似。砌筑砂浆的性质主要包括新拌砂浆的和易性和硬化砂浆的强度、粘结性、变形性及耐久性等。其性能试验按现行行业标准《建筑砂浆基本性能试验方法》JGJ/T 70—2009 的有关规定进行。

一、新拌砂浆的性质

1. 和易性

新拌砂浆应具有良好的和易性(工作性)，能在砖、石表面比较容易地铺成均匀连续且具有所需厚度的薄层，能与所砌筑的材料紧密粘结，既便于施工操作，又能保证工程质量。砂浆的和易性包括稠度和保水性两方面。

1) 稠度

砂浆的稠度(即流动性)用沉入度来评价。沉入度是以质量为(300±2)g 的标准试锥自砂浆表面自由沉入砂浆中的深度来表示，单位为 mm。砂浆稠度测定仪见图 3-6。

稠度的选用：砌筑砂浆应具有适当的稠度。若砂浆过稠，则不易均匀密实铺平于砖、石表面；若过稀，则容易流淌，不易保证砂浆层的厚度，且强度较低，这都会影响砌体的质量。对于吸水性较强的多孔砌筑块材和炎热天气下施工的砂浆，其稠度应大一些；而对于吸水较少的密实砌筑块材和寒冷气候下施工的砂浆，其稠度应小一些。

具体选用可参照《砌筑砂浆配合比设计规程》JGJ/T 98—2010 的有关规定进行，见表 3-12。

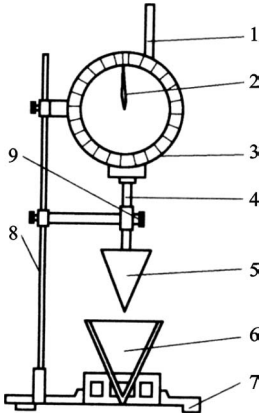


图 3-6 砂浆稠度测定仪

1—齿条齿杆；2—指针；3—刻度盘；
4—滑杆；5—试锥；6—盛装容器；
7—底座；8—支架；9—制动螺栓

表 3-12 砌筑砂浆的施工稠度 (JGJ/T98—2010)

砌体种类	砂浆稠度/mm
烧结普通砖、粉煤灰砖砌体	70~90
混凝土砖、普通混凝土小型空心砌块、灰砂砖砌体	50~70
烧结多孔砖、烧结空心砖、轻集料混凝土小型空心砌块、蒸压加气混凝土砌块砌体	60~80
石砌体	30~50

影响因素：主要有胶凝材料的种类及数量；砂子的粗细与级配；外加剂的种类与掺量；掺合料的种类与掺量；用水量；搅拌时间等。

当砂浆原材料确定后，其稠度的大小主要取决于用水量。

2) 保水性

保水性是指新拌砂浆保存水分的能力，表示砂浆各组成材料是否容易分离的性质。

评价指标：砌筑砂浆的保水性可用保水率和分层度来评价。保水性好的砂浆，在停放、运输和使用过程中，能很好地保持其中的水分不致很快流失或发生分层、离析，在砌筑过程中容易铺成均匀密实的砂浆层，能使胶凝材料正常水化，保证砌体有良好的质量。如果保水性不好，砂浆很容易泌水、分层、离析，甚至由于水分流失，而使流动性变差，不便于施工，同时也会削弱砂浆与砌体材料的粘结，影响砌体的质量。砂浆保水率要求见表 3 - 13。

表 3 - 13 砌筑砂浆的保水率 (JGJ/T 98—2010)

砂浆种类	保水率/%
水泥砂浆	≥80
水泥混合砂浆	≥84
预拌砂浆	≥88

砌筑砂浆的分层度是将测完沉入度后的新拌砂浆，按标准规定的方法一次性装满砂浆分层度筒，静置 30 min 后，去掉上节 200 mm 砂浆，然后将剩余的 100 mm 砂浆重新拌合 2 min，再次测定其沉入度值，前后测定的沉入度之差值即为该砂浆的分层度值，单位为 mm。砂浆分层度筒示意图见图 3 - 7。

砌筑砂浆的分层度以 10 ~ 20 mm 为宜，且不得大于 30 mm。分层度大于 30 mm 的砂浆容易泌水离析，不便于施工。若分层度过小，砂浆干稠，也不便施工，且胶凝材料用量较多，不经济，故砂浆分层度不宜小于 10 mm。

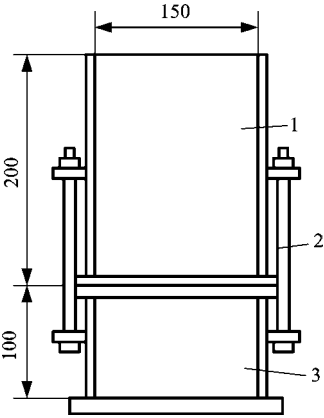


图 3 - 7 砂浆分层度筒 (mm)

1—无底圆筒；2—连接螺栓；3—有底圆筒

二、硬化砂浆的技术性质

1. 强度与强度等级

抗压强度：按标准方法制作的边长为 70.7 mm 的立方体试件，1 组 3 块，在标准养护条件[温度 (20 ± 2)℃、相对湿度 90% 以上]下养护 28 d，按标准方法测得的无侧限抗压强度。

砂浆立方体抗压强度按式 (3 - 1) 计算，精确至 0.1 MPa：

$$f_{m, cu} = K \frac{F_u}{A} \tag{3 - 1}$$

式中: $f_{m, cu}$ ——砂浆立方体抗压强度, MPa;

F_u ——试件破坏荷载, N;

K ——换算系数。对于吸水性强的块材(如烧结砖)取 1.35, 对于不吸水或吸水微弱的块材(如岩石)取 1.0;

A ——试件承压面积, mm^2 。

抗压强度的确定: 抗压强度的确定方法同混凝土抗压强度的确定。

砂浆的强度等级: 根据砂浆抗压强度的标准值 $f_{m, k}$ (具有 95% 保证率的抗压强度值) 将水泥砂浆及预拌砂浆(专业生产厂生产的湿拌砂浆或干混砂浆)划分为 M5、M7.5、M10、M15、M20、M25、M30 七个强度等级; 将水泥混合砂浆划分为 M5、M7.5、M10、M15 四个强度等级。

影响因素: 影响砂浆强度的主要因素是水泥的强度和水泥用量。

2. 粘结性

由于砌筑块材是靠砂浆将其粘结在一起而形成坚固的整体(砌体)来承担和传递荷载, 故要求砌筑砂浆应具有一定的粘结强度。粘结强度越高, 则砌体结构越牢固、强度就愈高、耐久性和抗震性就愈强。砌筑砂浆的粘结性以拉伸粘结强度来衡量。砂浆强度愈高、砌筑块材表面愈粗糙、清洁, 粘结强度就愈高, 同时还与胶凝材料的种类、施工及养护等条件有关。

3. 变形性能

砂浆在荷载作用下或温、湿度变化, 均会产生变形。如果变形过大或变形不均匀, 均将影响砌体结构的整体性, 导致砌体结构沉陷、开裂, 从而影响砌体结构的承载力、耐久性和抗震性。

4. 耐久性

砌筑砂浆应具备经久耐用的性能。处于潮湿部位、地下或水下的砌体结构尚应考虑砂浆的抗渗、抗腐蚀要求; 处于严寒低温环境中的砌体结构, 砂浆尚应满足有关抗冻性的要求。影响砂浆耐久性的主要因素有水泥的品种与用量, 砂浆内部的孔隙率和孔隙特征等。

3.4.3 砌筑砂浆的配合比设计

砌筑砂浆配合比设计应按现行行业标准《砌筑砂浆配合比设计规程》JGJ/T 98—2010 或其他有关技术标准的规定进行, 在满足施工所需和易性和设计要求的强度与耐久性的前提下, 力求经济合理。

一、配合比设计的有关要求

(1) 水泥砂浆拌合物的表观密度宜 $\geq 1900 \text{ kg/m}^3$; 水泥混合砂浆拌合物的表观密度宜 $\geq 1800 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 砂浆的稠度、保水性、试配抗压强度必须同时符合设计要求。

(3) 砌筑砂浆的分层度不得大于 30 mm。

(4) 水泥砂浆中单位水泥用量应 $\geq 200 \text{ kg}$; 水泥混合砂浆中水泥和掺合料单位总量应 $\geq 350 \text{ kg}$ 。

(5) 具有抗冻要求的砌筑砂浆, 经规定冻融循环试验后, 其质量损失率应 $\leq 5\%$, 抗压强

度损失率应 $\leq 25\%$ 。

二、初步配合比的计算

1. 水泥混合砂浆初步配合比的计算

1) 试配强度的确定

砂浆的试配强度应按式(3-2)计算:

$$f_{m,0} = k \cdot f_2 \quad (3-2)$$

式中: $f_{m,0}$ ——砂浆的试配强度, 精确至 0.1 MPa;

f_2 ——砂浆抗压强度平均值(即砂浆的设计强度标准值), MPa;

k ——系数, 按表 3-14 取用。

表 3-14 砂浆强度标准差 σ 及 k 值(JGJ/T98—2010)

砂浆强度等级 施工水平	强度标准差 σ /MPa							k
	M5	M7.5	M10	M15	M20	M25	M30	
优良	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	1.15
一般	1.25	1.88	2.50	3.75	5.00	6.25	7.50	1.20
较差	1.50	2.25	3.00	4.50	6.00	7.50	9.00	1.25

砌筑砂浆强度标准差的确定应符合下列规定:

当有统计资料时, 应按下式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{m,i}^2 - n \cdot \mu_{fm}^2}{n-1}}$$

式中: $f_{m,i}$ ——统计周期内同一品种砂浆第 i 组试件的强度, MPa;

μ_{fm} ——统计周期内同一品种砂浆 n 组试件强度的平均值, MPa;

n ——统计周期内同一品种砂浆试件的总组数, $n \geq 25$ 。

当不具有近期统计资料时, 砂浆强度标准差可按表 3-14 取用。

2) 水泥用量的计算

每立方米砂浆中的水泥用量按式(3-3)计算:

$$Q_c = \frac{1000(f_{m,0} - \beta)}{\alpha \cdot f_{ce}} \quad (3-3)$$

式中: Q_c ——每立方米砂浆的水泥用量, 精确至 1 kg;

f_{ce} ——水泥的实测强度, 精确至 0.1 MPa;

α 、 β ——砂浆的特征系数, 其中 $\alpha = 3.03$, $\beta = -15.09$ 。

注: 各地区也可用本地区试验资料确定 α 、 β 值, 统计用的试验组数不得少于 30 组。

当无法取得水泥的实测强度值时, 可按式(3-4)估算 f_{ce} :

$$f_{ce} = \gamma_c \cdot f_{ce,k} \quad (3-4)$$

式中: $f_{ce,k}$ ——水泥强度等级对应的强度值, MPa;

γ_c ——水泥强度等级值的富余系数, 该值宜按实际统计资料确定。无统计资料时 γ_c 可

取 1.0。

3) 石灰膏用量的计算

石灰膏用量应按式(3-5)计算：

$$Q_D = Q_A - Q_C \tag{3-5}$$

式中： Q_D ——每立方米砂浆的石灰膏用量，精确至 1 kg；石灰膏使用时的稠度宜为 (120 ± 5) mm；当稠度不满足 (120 ± 5) mm 时，可按表 3-15 进行换算。

Q_C ——每立方米砂浆的水泥用量，精确至 1 kg；

Q_A ——每立方米砂浆中水泥和石灰膏的总量，精确至 1 kg；可取 350 kg。

表 3-15 石灰膏不同稠度的换算系数 (JGJ/T 98—2010)

稠度/mm	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30
换算系数 γ_g	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.90	0.88	0.87	0.86

注：表中换算系数为石灰膏的质量换算系数。

4) 砂子用量 Q_s 的计算

每立方米砂浆中的砂子用量，应以干燥状态(含水率 $< 0.5\%$)砂的堆积密度值作为计算值。

5) 用水量 Q_w 的确定

每立方米砂浆中的用水量可根据砂浆稠度等要求选用 210 ~ 310 kg。

注：① 混合砂浆中的用水量，不包括石灰膏中的水；② 当采用细砂或粗砂时，用水量分别取上限或下限；③ 稠度小于 70 mm 时，用水量可小于下限；④ 施工现场气候炎热或干燥季节，可酌量增加用水量。

2. 水泥砂浆配合比的确定

水泥砂浆配合比可参照表 3-16 进行试配确定。

表 3-16 每立方米水泥砂浆材料用量 (JGJ/T 98—2010)

强度等级	水泥用量/kg	砂子用量/kg	用水量/kg
M5	200 ~ 230	砂子的堆积密度值	270 ~ 330
M7.5	230 ~ 260		
M10	260 ~ 290	砂子的堆积密度值	270 ~ 330
M15	290 ~ 330		
M20	340 ~ 400		
M25	360 ~ 410	砂子的堆积密度值	270 ~ 330
M30	430 ~ 480		

注：① M15 及以下强度等级水泥砂浆，水泥强度等级为 32.5 级；M15 以上强度等级水泥砂浆，水泥强度等级为 42.5 级；② 当采用细砂或粗砂时，用水量分别取上限或下限；③ 稠度小于 70 mm 时，用水量可小于下限；④ 施工现场气候炎热或干燥季节，可酌量增加用水量。

三、配合比的试配、调整与确定

(1) 试配时应采用工程中实际使用的材料，搅拌应采用机械搅拌。搅拌时间：对水泥砂

浆和水泥混合砂浆,不得小于 120 s;对掺用粉煤灰和外加剂的砂浆,不得小于 180 s。

(2)按计算或查表所得配合比进行试配时,应测定其拌合物的稠度和保水率,当不能满足要求时,应调整材料用量,直到符合要求为止,然后确定为试配时的基准配合比。

(3)试配时至少应采用三个不同的配合比,其中一个为基准配合比,另外两个配合比的水泥用量应按基准配合比分别增加和减少 10% 确定。在保证稠度和保水率符合设计要求的前提下,可将用水量或掺合料用量作相应调整。

(4)对三个不同的配合比进行调整后,应按现行行业标准《建筑砂浆基本性能试验方法》JGJ/T 70—2009 的规定测定其表观密度和强度,并选定符合试配强度及和易性要求的且水泥用量最低的配合比作为砂浆的试配配合比。

(5)配合比校正同混凝土配合比的校正。校正系数 δ 按式(3-6)计算,精确至 0.01:

$$\delta = \frac{\rho_c}{\rho_t} \quad (3-6)$$

式中: ρ_c ——砂浆的实测表观密度值,精确至 10 kg/m³;

ρ_t ——砂浆的理论表观密度值,精确至 10 kg/m³; $\rho_t = Q_c + Q_D + Q_s + Q_w$ 。

当实测表观密度值与理论表观密度值之差的绝对值超过理论表观密度值的 2% 时,即 $\delta > 1.02$ 或 $\delta < 0.98$ 时,则应将试配配合比中的各材料用量均乘以校正系数 δ 后,确定为砂浆设计配合比。当 $\delta = [0.98, 1.02]$ 时,则直接将试配配合比确定为砂浆设计配合比。

四、配合比计算实例

某房屋工程需要配制 M7.5 的砌砖用水泥混合砂浆,使用水泥为砌筑水泥 M32.5 级;砂子为 II 区级配良好的天然河砂,其干燥堆积密度为 1560 kg/m³;石灰膏稠度为 80 mm,施工单位的施工质量控制水平一般,试计算该配合比。

计算步骤如下:

(1)确定配制强度 $f_{m,0}$

由于施工单位没有该砂浆强度标准差的统计资料,且施工质量控制水平一般,故根据表 3-14 查得 $k = 1.2$ 。

$$f_{m,0} = k \cdot f_2 = 1.2 \times 7.5 = 9.4 \text{ (MPa)}$$

(2)计算水泥用量 Q_c

$$Q_c = \frac{1000(f_{m,0} - \beta)}{\alpha \cdot f_{ce}} = \frac{1000(9.4 + 15.09)}{3.03 \times 32.5} = 249 \text{ (kg)}$$

(3)计算石灰膏用量 Q_D

$$Q_D = Q_A - Q_c = 350 - 249 = 101 \text{ (kg)}$$

由于石灰膏的稠度为 80 mm,故石灰膏的实际用量应为

$$Q'_D = Q_D \cdot \gamma_g = 101 \times 0.93 = 94 \text{ (kg)}。$$

(4)确定单位用水量 Q_w

由于该砂浆是用于砖砌体,故砂浆的施工稠度为 70 ~ 90 mm 即可,故单位用水量暂取 300 kg。

(5)砂子用量的计算 Q_s

1 m³ 砂浆所需砂子取砂子干燥状态下的堆积密度值。 $Q_s = 1560 \text{ kg}$

(6) 砂浆配合比计算结果归纳如下:

水泥:石灰膏:砂:水=249:94:1560:300=1:0.38:6.27:1.2。

复习思考题

1. 什么是砌体结构?
 2. 砖按外观形态分为哪几种? 各自有何特点?
 3. 鉴别过火砖和欠火砖的常用方法是什么?
 4. 烧结砖产生石灰爆裂的原因是什么?
 5. 烧结砖在砌筑墙体前一定要经过浇水润湿, 其目的是什么?
 6. 非烧结砖有何优点? 常用非烧结砖的品种有哪些?
 7. 砌块按产品规格分为哪几种? 常用砌块有哪些?
 8. 加气混凝土砌块有哪些特点?
 9. 岩石按地质成因分为哪几类? 各自有何特点?
 10. 砌体结构用石材分为哪几类?
 11. 石材的强度等级如何确定?
 12. 欠火石灰和过火石灰有何区别?
 13. 由生石灰制成的石灰膏为什么要在储存水池中“陈伏”一定时间才允许使用?
 14. 砂浆的和易性用什么指标来评价?
 15. 砂浆分层度的大小对砂浆的性能有何影响?
 16. 某工地备用烧结砖 10 万块, 尚未砌筑使用, 但储存两个月后, 发现有部分砖自裂成碎块, 断面处可见白色小块状物质, 请分析其原因?
 17. 某小区新建砖混结构房屋, 设计要求砖的强度等级为 MU15, 监理人员在新进的烧结多孔砖产品中, 随机抽取了 10 块砖样进行了强度检测, 单块砖的强度测定值见下表, 请分析这批砖的强度等级是否符合设计要求?
- | 砖编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 抗压强度
/MPa | 16.6 | 18.2 | 9.2 | 17.6 | 15.5 | 20.1 | 19.8 | 21.0 | 18.9 | 19.2 |
18. 某民宅内墙使用石灰砂浆抹面, 数月后, 墙面出现了许多不规则的网状裂纹, 同时个别部位还发现了部分凸出的放射状裂纹, 试分析上述现象产生的原因?
 19. 某烧结多孔砖砌体工程所用水泥石灰混合砂浆的设计强度等级为 M5, 所用水泥为砌筑水泥 M22.5 级, 水泥强度富余系数为 1.10; 石灰膏的稠度为 10 cm; 河砂(中砂)的堆积密度为 1450 kg/m³, 含水率为 2%。施工单位的施工水平一般, 试计算该砂浆的初步配合比。