



露天开采工艺学

第二章 露天矿岩破碎工艺

主讲：胡建华 教授

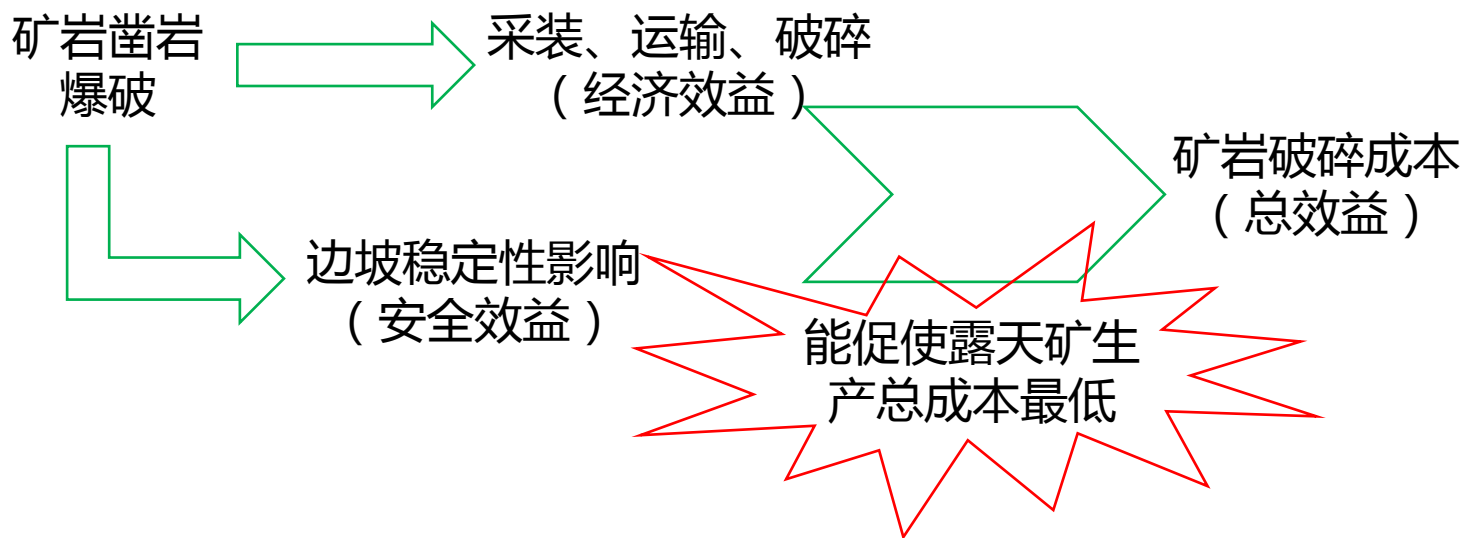
露天矿岩破碎工艺

- 矿岩破碎的基本性质
- 穿孔工作与装备
- 爆破作业工艺
- 机械破碎工艺
- 露天矿岩破碎新工艺



概述

- 在露天采场的回采工作中，个别松软的矿岩可以直接用采掘设备采出，而多数硬岩需要在采装前进行破碎工作，以达到采装设备工作要求。 这一道工序称为露天矿石破碎工艺。
- 矿岩破碎是硬岩开采的必要流程，也是后续工艺顺利进行的保证。
- 矿岩破碎的方法、 参数、 爆堆形状和尺寸对采装、 运输工作等产生很大影响。

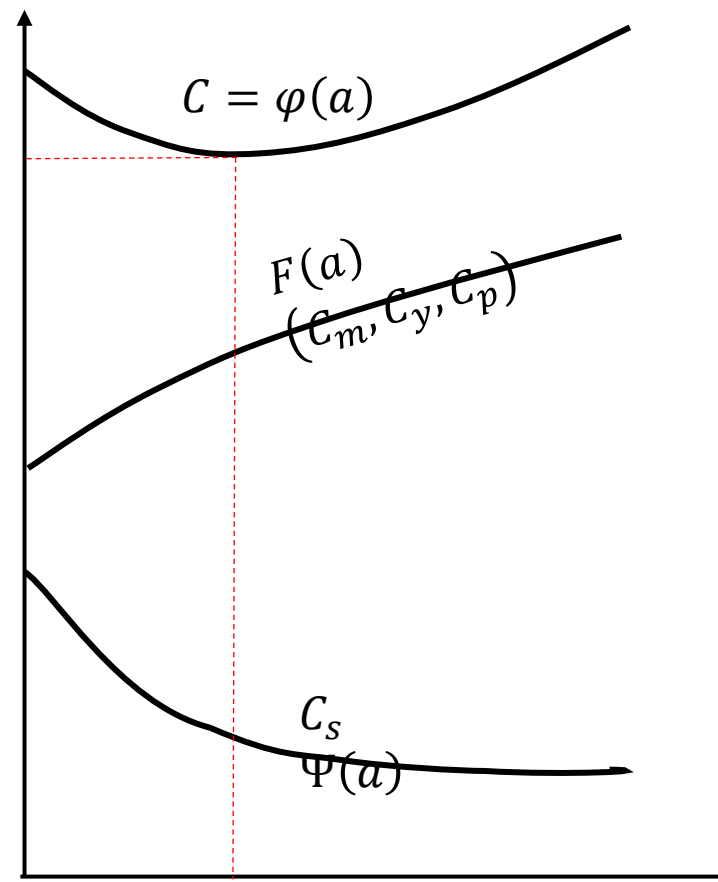


概述

- 矿岩松碎对采装、运输（含排岩）、二次破碎工作的影响。

$$\begin{aligned}C &= \varphi(a) \\&= \varnothing(C_s, C_m, C_y, C_p) \\&= \Psi(a) + F(a) \\&= C_s + C_m + C_y + C_p\end{aligned}$$

C_s 、 C_m 、 C_y 、 C_p 分别代表生产成本、铲装成本、运输成本和破碎成本



概述

- 大块率

- 露天矿的采装、运输和粗碎设备，对爆破后的矿岩块度都有一定的要求，称做允许块度。
- 超过允许块度的矿岩块称为大块。
- 大块总量与爆破总量的比率称为大块率。
- 大块率越高，说明爆破质量越差。



2.1 矿岩破碎的基本性质

- 矿岩破碎的方法

- 机械法

- 软层、冻岩中使用，设备简单、易于管理，工艺过程简单、一次松碎量少。
 - 硬岩开采中也开始使用机械方法剥离围岩和开采矿石。



2.1 矿岩破碎的基本性质

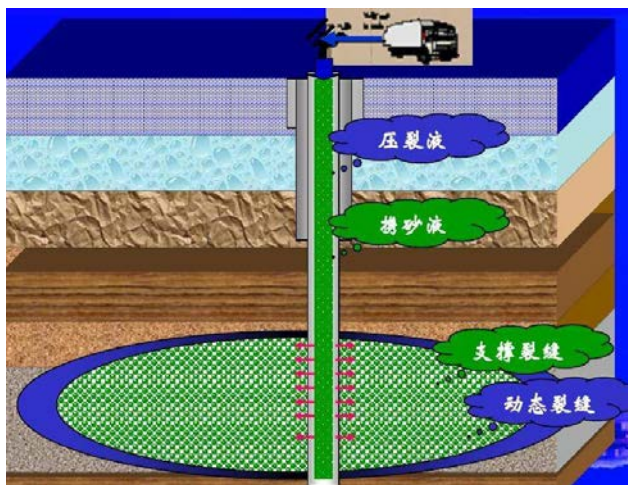
- 矿岩破碎的方法

- 水力法

- 适用于软岩，采用高压水。
(存在局限性)

- 爆破法

- 适应各类硬岩矿床

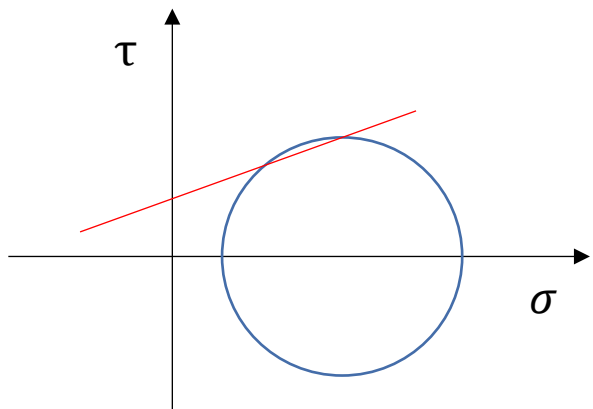


2.1 矿岩破碎的基本性质

- 矿岩破碎机理

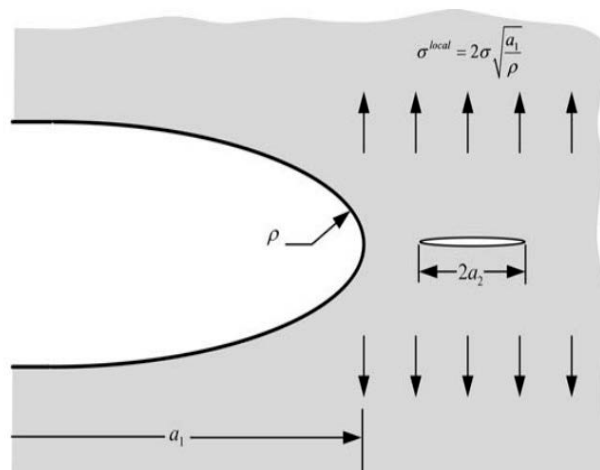
- 摩尔-库伦准则

$$\tau > C + \sigma \tan \varphi$$



- 格里菲斯准则

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}$$



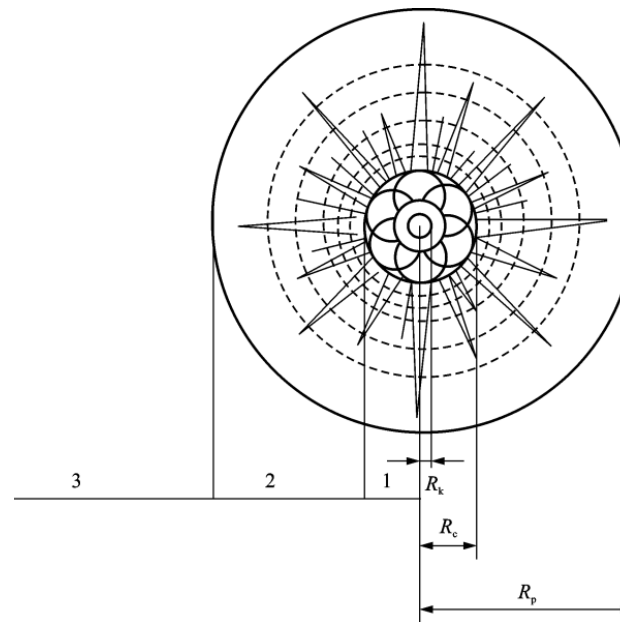
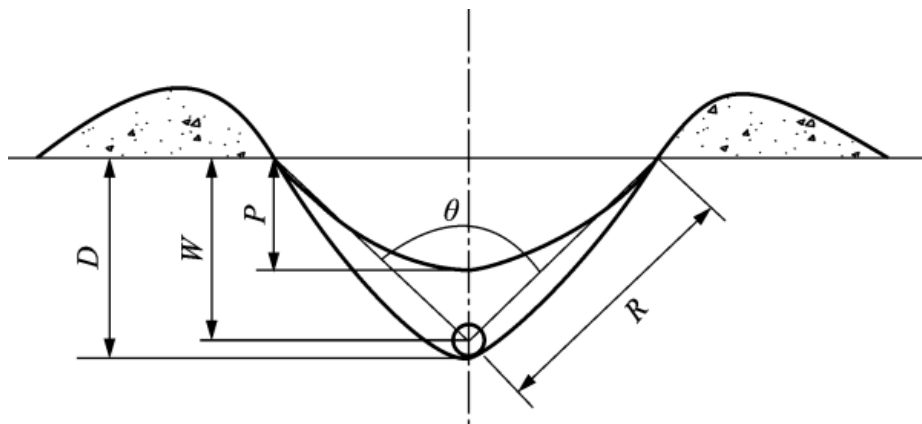
2.1 矿岩破碎的基本性质

- 矿岩破碎机理

- 爆破破岩机理

- 药包从近到远生成压碎圈、破碎圈和震动圈

- 爆破漏斗



2.1 矿岩破碎的基本性质

- 工艺要求与目的

- 足够的松散储备量，5 ~ 10d

- 适宜的块度与粒级

- 满足挖掘机、汽车运输、胶带运输、矿仓破碎机受料口等要求

- 规整的爆堆和台阶形状

- 爆堆：高度、宽度；

- 台阶：根底、伞岩、后冲/裂，底部超深破坏

- 安全与经济



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.1 矿岩的可钻性

➤ 矿岩的可钻性概念

- 是指在钻具的作用下，矿岩破碎的难易程度，主要取决于钻具的类型和矿岩自身的物理力学特性等。

➤ 矿岩可钻性的用途

- 矿岩可钻性是合理选择和使用钻头，确定钻孔参数，预测钻头寿命的科学依据
- 矿岩可钻性是穿孔设备选择、穿孔作业计划制定及穿孔定额目标拟定的参考依据。



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.1 矿岩的可钻性

➤ 影响矿岩可钻性的矿岩物理力学性质包括：

- 硬度
- 强度
- 韧性
- 塑性
- 耐磨蚀性等。

➤ 岩石的硬度和强度越高，耐磨蚀性越强，破碎矿岩的工作就会越困难，矿岩的可钻性就越差。



2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.1 矿岩可钻性分类方法

- 岩石力学性质评价法：矿岩的自身强度对其可钻性有较大的影响, 通过室内岩石力学实验测定能够反映矿岩强度或硬度的一种或几种力学指标, 能直观地表示矿岩可钻性, 所得的指标值稳定、可靠。
- 微钻速度评价法：采用直径为31.75mm的微钻头在岩心上钻孔, 记录钻深2.38~2.40mm的钻孔时间, 换算成以2为底的对数来表示矿岩的可钻性, 称为矿岩的可钻性级值，反映地质因素和技术工艺因素的综合。

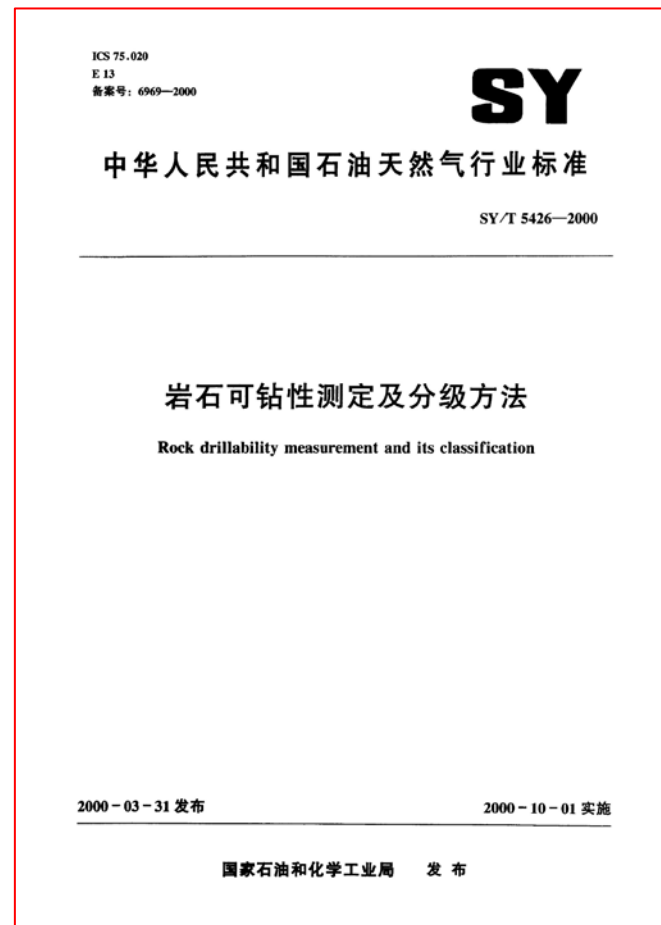
表2-1 SY/T 5426—2016岩石可钻性分级标准

类	级别	级值 K_d	钻进时间 t , s			
			牙轮钻头	PDC钻头		
				1级钻压	2级钻压	3级钻压
I (软)	一	< 2	$< 2^2$	$< 2^2$		
	二	$2 \sim < 3$	$2^2 \sim < 2^3$	$2^2 \sim < 2^3$		
	三	$3 \sim < 4$	$2^3 \sim < 2^4$	$2^3 \sim < 2^4$	$2^2 \sim < 2^3$	
	四	$4 \sim < 5$	$2^4 \sim < 2^5$	$2^4 \sim < 2^5$	$2^3 \sim < 2^4$	
II (中)	五	$5 \sim < 6$	$2^5 \sim < 2^6$	$2^5 \sim < 2^6$	$2^4 \sim < 2^5$	$2^2 \sim < 2^3$
	六	$6 \sim < 7$	$2^6 \sim < 2^7$	$2^6 \sim < 2^7$	$2^5 \sim < 2^6$	$2^3 \sim < 2^4$
	七	$7 \sim < 8$	$2^7 \sim < 2^8$		$2^6 \sim < 2^7$	$2^4 \sim < 2^5$
III (硬)	八	$8 \sim < 9$	$2^8 \sim < 2^9$			$2^5 \sim < 2^6$
	九	$9 \sim < 10$	$2^9 \sim < 2^{10}$			$2^6 \sim < 2^7$
	十	≥ 10	$\geq 2^{10}$			$\geq 2^7$

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.1 矿岩可钻性分类方法

- 碎岩比功评价法：碎岩比功是破碎单位体积矿岩所需的能量，**既是物理量又是碎岩效率指标。**
- 实钻速度评价法：用实际钻进速度（m/h）确定矿岩的可钻性能能够反映地质因素和技术工艺因素的综合影响，对于不同的矿岩，有不同的分级指标，**是一种室内模型试验方法。**
- 国内外主要分类方法
 - 国外常见可钻型分级包括：俄罗斯(前苏联地区)广泛采用的史氏（П.А.史列伊涅尔）岩石硬度测定分级法；美国德雷塞钻具公司采用莫利斯方法。
 - 我国可钻型分级包括：普氏岩石坚固性系数进行岩石分级；国家能源局2016年1月7日鉴定通过的微型测试钻头综合性分级。



2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.1 里热夫斯基的矿岩钻进难度分级法

➤ 前苏联学者里热夫斯基用岩石的钻进难度相对指标 Π_z , 做为岩石可钻性的物理力学基础, 其值可用来确定在外力作用下岩石的相对阻力。

- 穿孔时的压力和剪切力是决定因素, 冲击式-压力破坏; 回转式-剪切力破坏。
- 确定钻速时, 岩体的裂隙度可忽略不计, 只是在确定岩石坚固性时才考虑。
- 在穿孔过程中, 只有及时排出孔内岩碴才能继续破坏岩石; 评价可钻性时, 还必须考虑岩石的容重 γ 。

$$\Pi_z = \frac{0.007(\sigma_y + \sigma_\tau)}{10^5} + 0.7\gamma$$

式中: σ_y 、 σ_τ 分别为压应力和剪应力 (大于相应岩石抗压强度和抗剪强度), Pa;

γ 岩石容重, kg/dm³

2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.1 里热夫斯基的矿岩钻进难度分级法

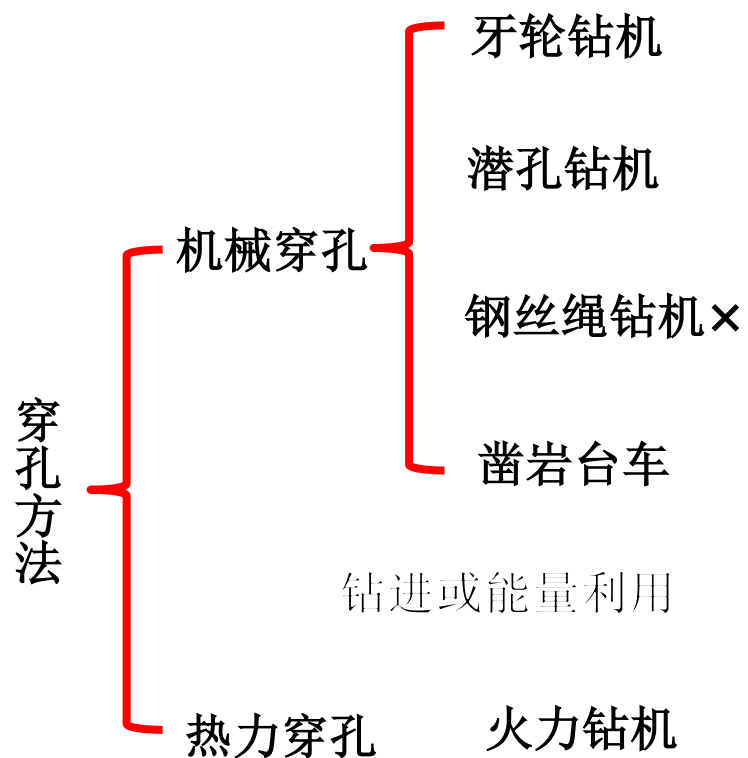
- 五级分类法：

- I 级—易钻的，1-5
- II 级—中等难钻的，6-10
- III 级—难钻的，11-15
- IV 级—很难钻的，16-20
- V 级—极难钻的，21-25
- 大于25的属于级外



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.2 穿孔方法的分类



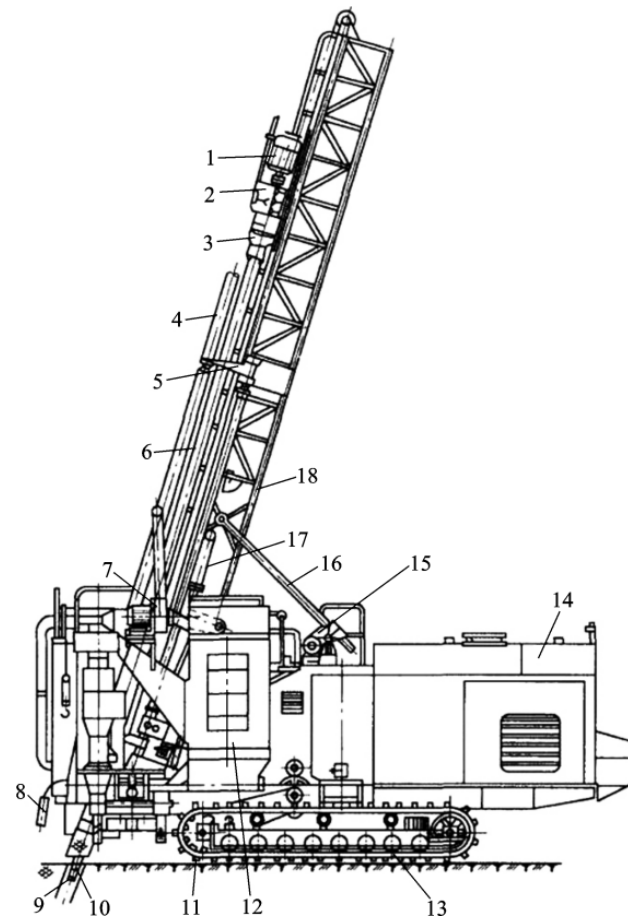
装备是实现采矿工艺和方法变革的基础，只有装备的变革才能带来采矿方法以至矿业领域的变革。

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.3 潜孔钻机

➤ 组成机构

- 潜孔钻机结构组成不同, 一般由钻具(钻头及冲击器)、回转供风机构、提升推进机构、钻架偏摆机构及起落机构、行走机构及供风、除尘等机构组成
- 属于风动冲击式凿岩装备
- 潜孔钻机的结构有整体式和分体式
- 按排气方式分为旁侧排气式和中心排气式



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.3 潜孔钻机

➤ 工作原理

- 潜孔钻机的冲击器潜入孔底，冲击能直接传递给钻头，每一次冲击后钻头就会旋转一个角度，钻刃就会移动到新的位置，如此往复形成炮孔。
- 破碎后的岩屑利用压缩空气或气水混合液的作用沿钻杆与孔壁的间隙排出孔外。
- 同时，单独的旋转机构经钻杆带动钻具旋转，对孔底岩石产生附加的剪切力。



台班生产能力计算：

$$A = 0.6vt\eta$$

V —— 钻进速度；

η —— 时间利用系数；

2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.3 潜孔钻机

➤ 优缺点

- 能量损失小，穿孔速度受孔深影响小
 - 噪音小
 - 用废气排渣，节省动力
 - 钻杆寿命长
 - 轴压小，钻机轻，钻孔不易倾斜。
- 气缸受孔径限制
 - $\Phi > 200\text{mm}$ 时，速度低于牙轮钻机，动力消耗高30-40%，成本高



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.3 潜孔钻机

➤ 钻进速度计算-里氏可钻性分级计算为例

$$v \approx \frac{0.102an'}{K_B \Pi_Z D^2 K_Z}$$

如何理解？对比分析按照岩石凿碎功比耗分级计算。

v ——潜孔钻机的机械钻速，cm/min；

a ——冲击功，J；

n' ——冲击频率，次/min；

K_B ——矿岩可钻性的变换系数(当 $\Pi_Z = 10 \sim 14$ 时， $K_B = 1.0$ ；当 $\Pi_Z = 15 \sim 17$ 时， $K_B = 1.05$ ；当 $\Pi_Z = 18 \sim 20$ 时， $K_B = 1.1$)；

Π_Z ——矿岩可钻性指标；

D ——钻孔直径，cm；

K_Z ——钻头形状系数(三刃钻头 $K_Z = 1.0$ ；十字钻头 $K_Z = 1.1$ ；柱齿形钻头 $K_Z = 1.1 \sim 1.2$)。

2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.3 潜孔钻机—钻进速度影响因素

- 冲击功和冲击频率

- 大冲击功、低频率

- 风压

- 风动工具，风压是达到额定冲击功和冲击频率的重要因素。一般随风压的增大，穿孔速度和钻头寿命都有不同程度的提高。大孔径潜孔钻机都自带空压机以减少管路压降。

- 排渣风量和风速

- 孔底岩碴及时排出对穿孔速度有很大影响。冲击器排出废气不够排碴，还需增加20-40%压缩空气用来排碴。排碴风速取决于岩石容重和岩碴粒度。
 - 为提高排碴风速，可适当增加钻杆直径，但孔径D与钻杆直径d之差值亦不得小于20mm

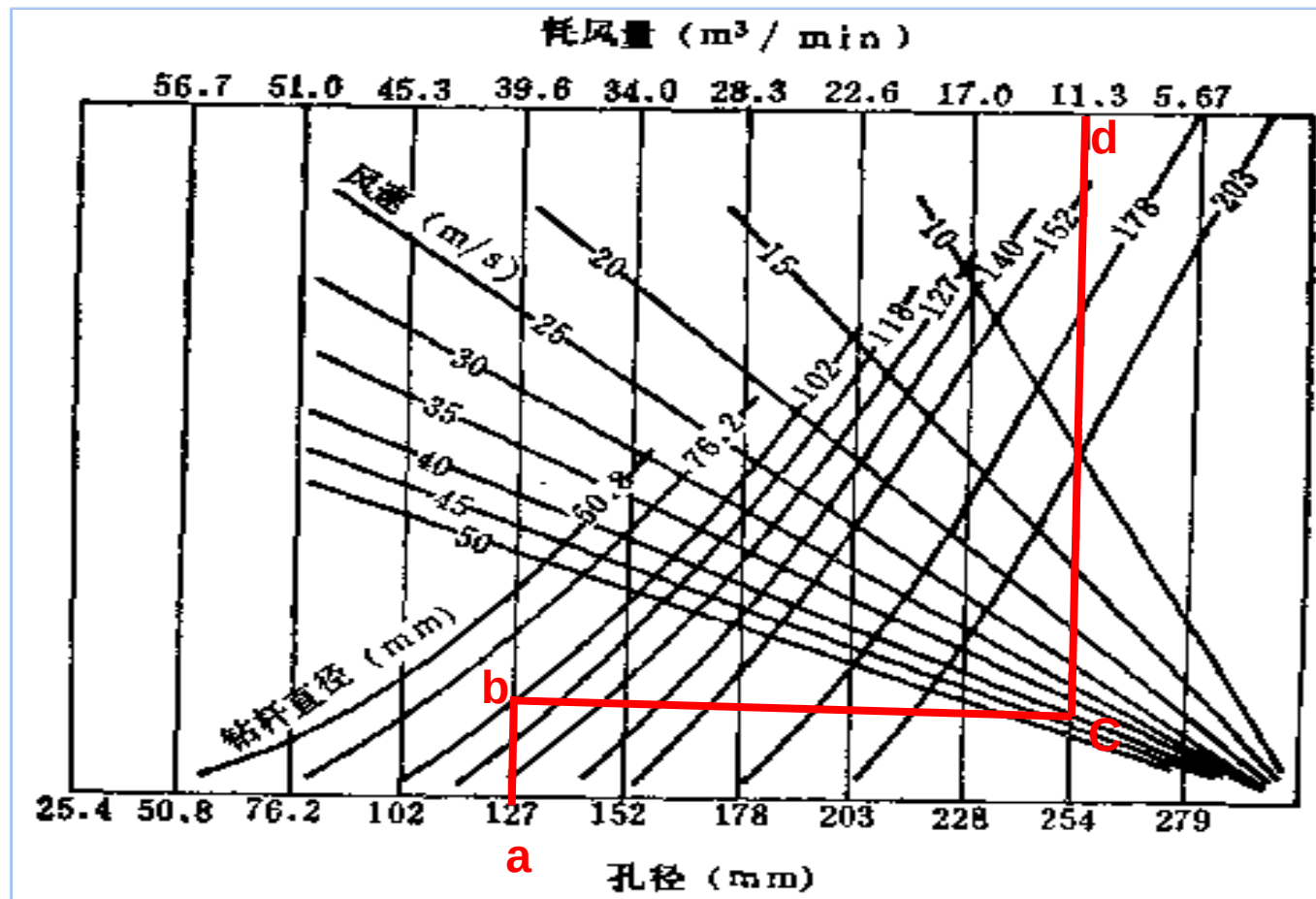
岩石容重(t/m³)	≤3.2	> 3.2	有裂隙的岩石
排碴风速 (m/s)	25-30	40-45	50

2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.3 潜孔钻机—钻进速度影响因素

➤ 风速诺莫图

- 可以根据钻孔孔径和钻杆直径查找排碴所需风速，然后求得耗风量。



2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.3 潜孔钻机—钻进速度影响因素

- 钻孔直径

- 当轴压力P和转速n一定时，钻孔直径D与钻速n成反比。钻孔直径D增大后，钻头的直径和强度也加大，只要相应采用更大的轴压力P和转速n钻进速度并不会降低；当增大钻孔直径D时，可加大爆破孔网参数，相应提高钻孔的延米爆破量和钻机的台年钻孔爆破总量。

南芬铁矿两种孔径的潜孔钻机和钢绳冲击钻机的比较

指标名称	BC-1冲击钻机		KQ-200浅孔钻机		KQ-150A潜孔钻机
	矿石	岩石	矿石	岩石	岩石
钻孔直径 (mm)	250-300	250-300	200	200	150
穿孔速度 (m/台·d)	15.5	28.25	45	100	45
延米爆破量 (t/m)	154.52	129.27	117	95	50
钻孔爆破效率 (t/台·d)	2395	3659	5265	9500	2250
相对指标 (%)	100	100	220	260	81

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.3 潜孔钻机—钻进速度影响因素

➤ 轴压

- 潜孔钻机轴压力，主要用以克服冲击器后座力，使钻头紧紧顶在岩石上，提高冲击能量的传递效率。其本身对岩石破碎效果影响不大，远小于牙轮钻机轴压力，其大小取决于钻头直径和岩石性质。
- 过高的轴压力，既妨碍钻具回转，也容易加快钻头磨损，使硬质合金片齿过早损坏。对于大孔径($D > 200\text{mm}$) 的重型潜孔钻机，一般都采用减压钻进，即钻机的提升推压机构应起减小轴压力的作用。相反，小孔径的中、轻型潜孔钻机，增压钻进。

➤ 转速

- 潜孔钻机的回转，既改变钻头每次凿痕的位置，也使钻头回转切削岩石。转速与钻头直径、冲击频率及岩石性质有关。
- 转速过低，降低穿孔速度；转速过高，过分磨损钻头，穿孔速度反而下降。

在硬岩钻进中，趋向低转速的发展，使转速保持在15-25r/min.

2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.3 潜孔钻机—钻进速度影响因素

- 扭矩

- 潜孔钻机的回转扭矩，主要用以切削钻头凿痕间留下的岩坎，并保证克服卡钻事故，因而潜孔钻机所需扭矩要比回转式钻机小得多。
- 扭矩大小，取决于钻头直径、回转速度及岩石性质等。

分析？

不同的岩体结构对扭矩的要求。如块体结构、碎裂结构、整体结构、层状结构等？

钻头直径（mm）	转速（r/min）	轴压力（kN）	扭矩（N·m）
80-110	30-40	2-5	690-980
150-170	15-30	4-15	1470-2450
200-250	10-15	8-21	3920-5880

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.3 潜孔钻机—影响钻机工作时间利用系数因素

- 接杆、移位、修理（不可避免）
- 等备件、风、水、电（可避免）
- 卡钻处理

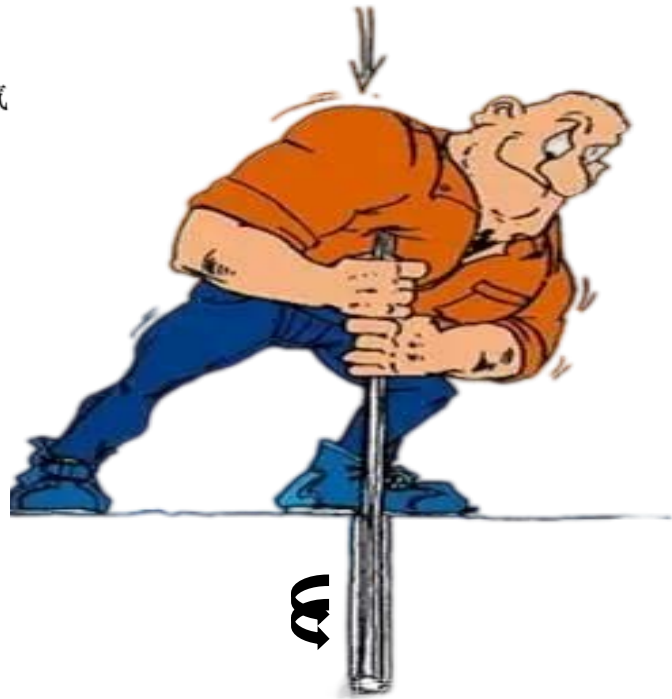
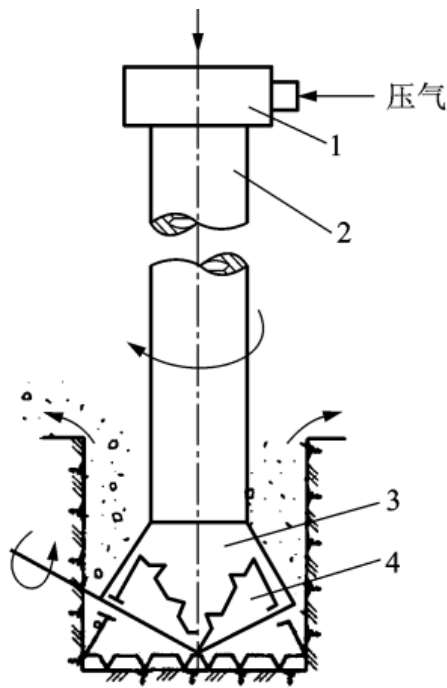
开动时间 (h)	钻矿		钻岩		接杆		投孔		移位		小计	百分数%
	1732.9		2946.8		23.1		549.7		56.5		5309	62.5
停歇时间 (h)	大修	中修	小修	碎修	等修件	换钻杆	卡钻	等风	等电	其他	小计	百分数%
	302.4	94	401.5	584.3	678	59.9	94.1	260.1	495.9	192.8	3163	37.5
合计 (h)											8472	100%

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.4 牙轮钻机

➤ 工作原理

- 牙轮钻机是通过回转机构带动钻头回转，借助加压机构给钻头施加轴向压力（一般约为300 -600kN），由这种动压和静压产生的应力使岩石破碎（剪碎或压碎），同时通过压缩空气冷却钻头并将孔底岩石碎屑吹出孔外以形成钻孔的机械。
- 牙轮钻机的作业特征是钻头轴压力、回转速度以及排除岩破和冷却钻头的压气消耗量之间的有机配合。



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.4 牙轮钻机

➤ 优缺点（与潜孔钻机相比）

- 穿孔效率高2 ~ 3倍
- 钻机作业率高15 ~ 45 %
- 工人劳动生产率高2 ~ 3倍
- 穿孔成本低15 ~ 25 %
- 机身重，价格昂贵。
- 在极坚硬矿岩中或炮孔直径小于150mm时成本较高



2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.4 牙轮钻机

➤ 钻进速度：

- 按里氏岩石可钻性分级

$$v = 5.95 \frac{Pn}{\Pi_z D_1^2}$$

- 按普氏岩石坚固性系数分级

$$v = 0.383 \frac{Pn}{fD_1}$$

思考题：如何计算牙轮钻机的台班生产能力？

式中： v ——牙轮钻机的机械钻进速度，cm/min；

P ——轴压力，kN；

n ——钻头转速，r/min；

f ——岩石坚固性系数；

D_1 ——钻孔直径，cm。

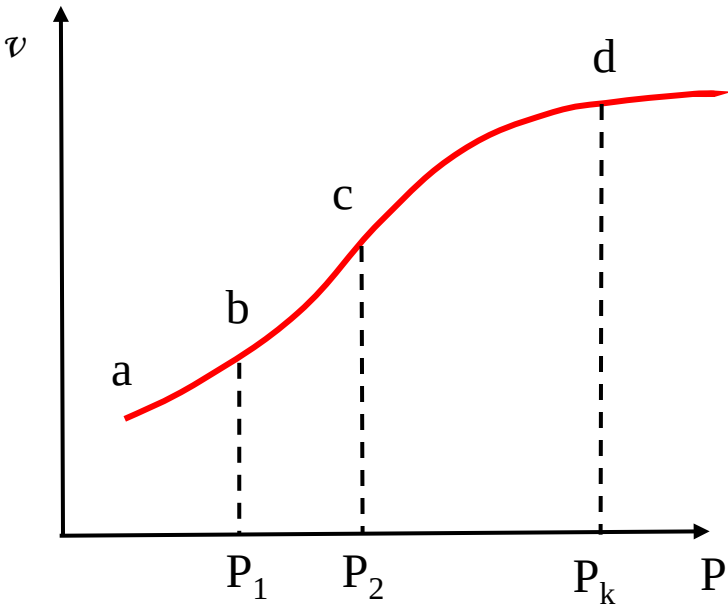
2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.4 牙轮钻机

➤ 主要工作参数

注意：各项参数间的合理匹配

- 钻孔直径
- 钻头轴压力
 - 轴压力 P 与钻速 v 大致成非严格的线性正比关系，具体取决于钻头单位面积上的作用力 P/F （ F -钻头与岩石的接触面积）和岩石的抗压强度 σ_y 之间的关系。
- 回转速度
- 压气消耗量



岩石可钻性 指标Πz	钻头直径， Dt（mm）	单位轴压力（kN/cm）	
		实际的	标准的
8	214	6.9	8.8
10	243	6.8	10.8
12	243-269	10.8	12.7
14	269	12.7	17.6
16	296-320	17.6	21.6

岩石坚固性系数（f）	8	10	12	14	16	18	20
每厘米钻头轴压力（kN/cm）	5.1	6.4	7.8	9.0	10.2	11.5	12.8

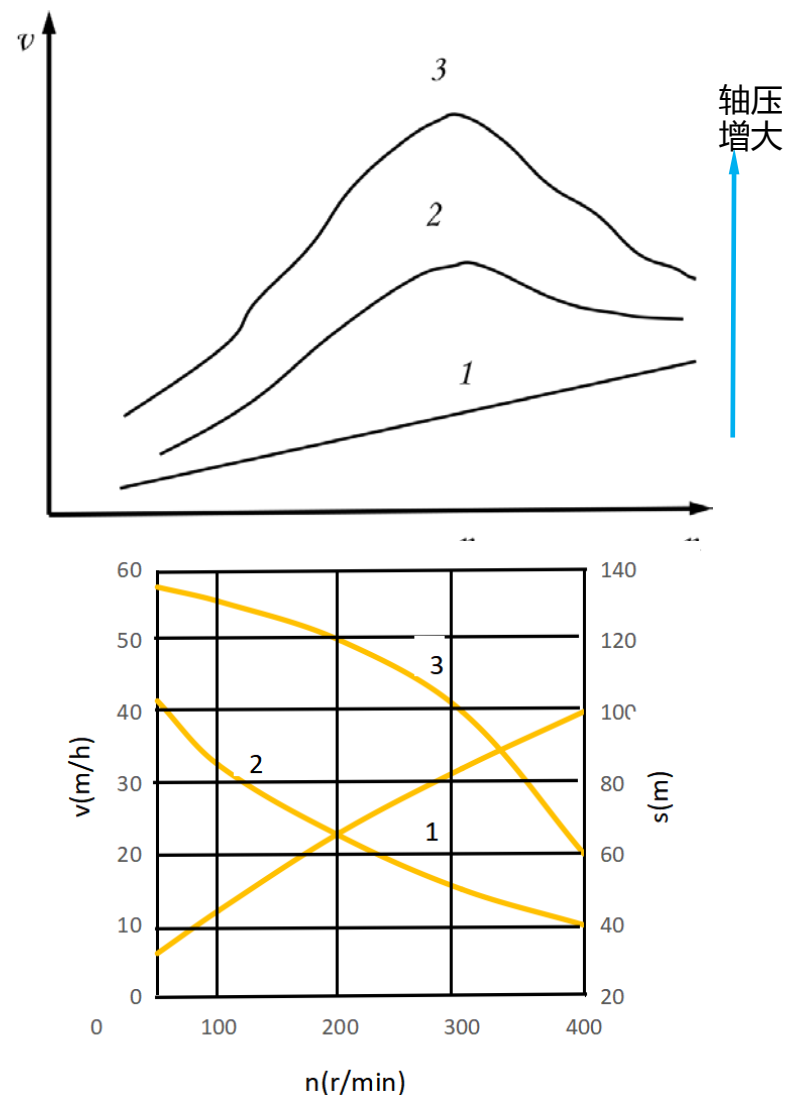
2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.4 牙轮钻机

➤ 主要工作参数

• 回转速度

- 穿孔两种工作制度，即：强制钻进（采用300-600kN高轴压和150r/min以内低转速）；高速钻进（采用100-200kN低轴压和300r/min高转速）。转速 n 和钻速 v 之间成正比关系，但不是一个简单的线性关系。
- 实际：软岩80-120 r/min的转速，中硬岩石60-100 r/min，硬岩50-80r/min；钻机开孔时小于50r/min的转速。
- 我国牙轮钻机正沿着强制钻进途径发展，目前国产YZ型及KY型等中、重型牙轮钻机，其轴压力大都在300-550kN之间，而转速大多控制在100r/min以内。



牙轮钻机钻速 v 、钻头寿命 s 和转速 n 的关系曲线
1-钻进速度 2-钻头寿命（无润滑时） 3-钻头寿命（有润滑时）

2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.4 牙轮钻机

➤ 主要工作参数

• 压气消耗量

- 为了彻底排碴，要求有足够的风量，使孔壁与钻杆之间的环形空间形成适宜的回风速度，从而对岩碴颗粒产生一定的升力以排除出孔。
- 若风速过小，升力不足，岩碴在孔底反复被破碎，既降低穿孔速度，又加剧钻头的磨损，甚至会造成卡钻事故；若风速过大，既浪费空压机功率，也加剧钻杆的磨损。
- 根据国外经验，最小回风速度为15m/s。当回风速度达到25m/s时，可以使容重为3.2t/m³的岩石碎屑排除出孔。

回风速度一定时，排碴风量Q计算公式：

$$Q = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} v_H$$

Q ——排碴风量，m³/min；

D ——钻孔直径，m；

d ——钻杆直径，m，为了便于排碴，应使 $D-d \geq 20$ mm；

v_H ——回风速度，m/min。

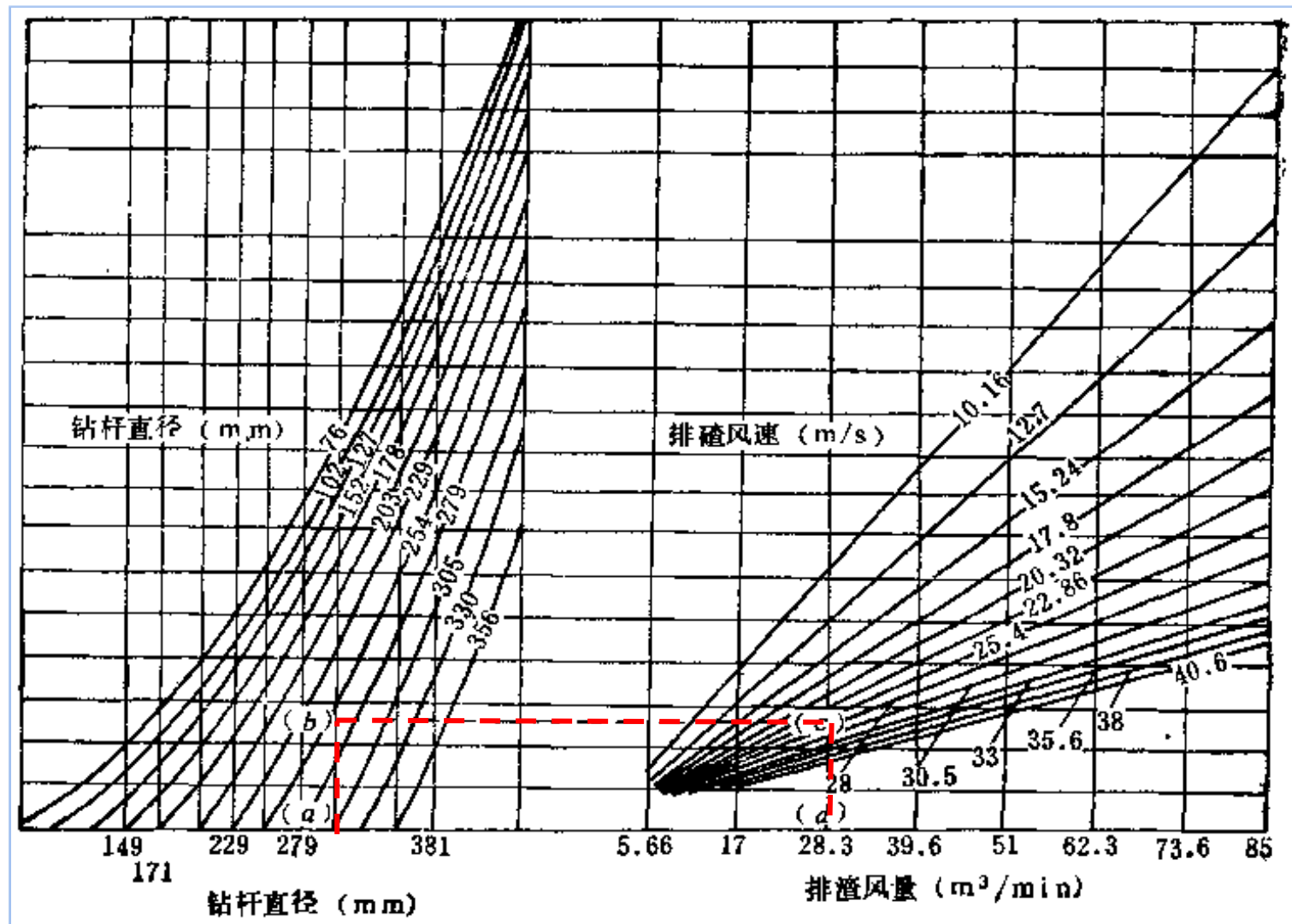
2.2 穿孔工作与装备

• 2.2.4 牙轮钻机

➤ 主要工作参数

- 钻孔直径
- 钻头轴压力
- 回转速度
- 压气消耗量

牙轮钻机排渣风量诺模图



2.2 穿孔工作与装备

● 2.2.4 牙轮钻机

➤ 发展趋势

- 牙轮钻机是目前国内外露天矿穿孔的主要设备，其高效穿孔的发展趋势：钻机、钻头、工作参数和组织管理四个方面改进；如在钻机上装配自动控制系统，根据岩性的变化，自动调控轴压和转速，从而提高穿孔效率，延长钻具和设备的使用寿命。
- 现代设计法与和人机工程学原理的应用改进效率和可靠性
- 应用计算机辅助设计方法提高了钻机的设计质量和设计效率
- 模块式结构组合和多参数监测应用



山河智能
SWDRT250

2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.4 牙轮钻机

- 穿孔设备数量计算及选型

- 生产能力
 - 台班生产能力

$$V_b = 0.6vT_b\eta_b$$

V_b ——牙轮钻机台班生产能力, m/(台·班);
 v ——牙轮钻机钻进速度, cm/min;
 T_b ——每班工作时间, h;
 η_b ——每班工作时间利用系数, 一般的 $\eta_b=0.4\sim0.5$ 。

- 牙轮钻机台年综合效率

台年综合效率和台班工作效率、钻机工作时间利用率有关, 因组织不当造成的停钻时间和钻机故障停钻时间是影响钻机工作时间利用率的主要因素。

部分牙轮钻机平均台年综合效率

钻机型号	孔径/mm	矿岩硬度系数f	台班效率/m	台年效率/m
KY-250	250	6~12	25~50	25000~35000
		12~18	15~35	20000~30000
KY-310	310	6~12	35~70	30000~45000
		12~18	25~50	
45R	250	8~20		30000~35000
60R	310	8~20		35000~45000

- 牙轮钻机需求数量 N 计算

$$N = \frac{A_n}{L \cdot q(1-e)}$$

N ——所需牙轮钻机数量, 台;
 A_n ——矿山设计年采剥总量, t/a;
 L ——每台牙轮钻机的年穿孔效率, |m/a;
 q ——每米炮孔的爆破量, t/m;
 e ——废孔率, %。

Note：当矿岩性质差异较大, 采矿和剥离工作制度不同时, 应分别计算所需台数, 然后再取总和。

2.2 穿孔工作与装备

- 2.2.4 牙轮钻机

- 穿孔设备数量计算及选型

- 钻机选型
 - 特大、大型露天矿：以牙轮钻机为主，孔径 $D\geq 310\text{mm}$ ；
 - 中型露天矿：可选择牙轮钻机或者潜孔钻机，孔径 $D=150\sim 250\text{mm}$ ；
 - 小型露天矿：可选择潜孔钻机、牙轮钻机或者露天凿岩台车，孔径 $D\leq 150\text{mm}$ 。

国内外部分牙轮钻机的工作参数

机型	KY-250	YZ-55	45-R	60-R (IV)
产地	中国		美国	
钻孔直径 (mm)	220~250	250~380	171~279	311~381
钻孔深度 (m)	17	16.5	50.3	15.24/19.81
轴压力 (kN)	411.6	539	306	567
钻具钻速 (r/min)	0~115	0~120	0~165	0~121
回转扭矩 (kN·m)	6546	8500	16376	16551
回转功率 (kW)	50	95	2*50	78
回转动力	直流电机			
钻杆直径 (mm)	194/219	219/273/325	158~228	159~273
钻杆长度 (m)	9.2	16.5	16.8	15.2/19.8
行走方式	履带			
行走速度 (km/h)	0.72	1.3	1.0	1.0
爬坡能力 (°)	12	15%	25	25
机重 (t)	85/90	140	68~71	145

2.2 穿孔工作与装备

• 2.3.1 矿岩可爆性分级

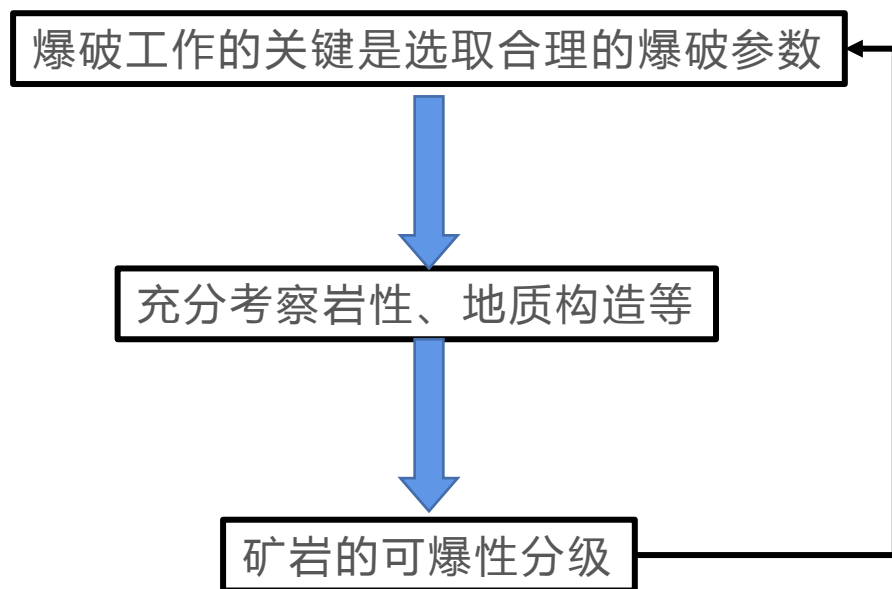
➤ 概念

- 矿岩的可爆性，即矿岩介质对爆破作用的抵抗程度。
- 矿岩的破碎程度主要取决于矿岩对爆破的抵抗程度，这种抵抗程度又与岩石的强度、岩体的完整性有关。根据岩石强度和岩体的完整性，常用炸药单位消耗量 q 来表示这种抵抗程度。

➤ 分级方法

- 里氏强度可爆性分级
- B.H.库图佐夫综合可爆性分级

- 可爆性分级目的不是为了进行岩石分级，而是根据不同岩石对爆破作用的阻抗能力，预计合理的炸药单耗和所能达到的岩石爆破破碎效果，作为爆破工艺设计的依据。



2.3 爆破作业工艺

- 2.3.1 矿岩可爆性分级

- 分级方法

- 里氏强度可爆性分级

$$q_B = \frac{0.02(\sigma_Y + \sigma_L + \sigma_\tau)}{10^5} + 2\gamma$$

σ_Y ——岩石抗压强度, MPa;
 σ_L ——岩石抗拉强度, MPa;
 σ_τ ——岩石剪切强度, MPa;
 γ ——岩石容重, kg/m³。

- 计算单耗值进行修正

$$q_J = q_B K_H K_{PS} K_L K_X K_T K_{WZ}$$

q_J ——设计计算的炸药单耗, g/m³; q_B ——炸药的标准单耗, g/m³;
 K_H ——炸药的换算系数; K_{PS} ——要求的破碎度系数, $K_{PS}=0.5/d_p$;
 d_p ——爆破后矿岩的平均块度尺寸, m; K_L ——岩体的裂隙度影响系数, 一般为1.2;
 K_X ——药包在岩体中的形状影响系数; K_T ——矿岩的爆破体积影响系数;
 K_{WZ} ——药包位置和自由面的影响系数。

里氏强度可爆性分级

分级	描述	炸药标准单位消耗量	类别
I 级	易爆岩体	$q_B \leq 10\text{g/m}^3$	1~5类
II 级	中等难爆岩体	$q_B = 10.1 \sim 20\text{g/m}^3$	6~10类
III级	难爆岩体	$q_B = 20.1 \sim 30\text{g/m}^3$	11~15类
IV级	很难爆岩体	$q_B = 30.1 \sim 40\text{g/m}^3$	16~20类
V 级	极难爆岩体	$q_B = 40.1 \sim 50\text{g/m}^3$	21~25类
级外矿岩		$q_B > 50\text{g/m}^3$	

2.3 爆破作业工艺

● 2.3.1 矿岩可爆性分级

➤ 分级方法

• B.H.库图佐夫综合可爆性分级

理论来源

$$\sigma_n = 0.172 q^{\frac{2}{3}}$$

分级参数

$$q_{SX} = q \pm 0.117 q^{\frac{2}{3}}$$

σ_n ——炸药单耗的离差；
 q ——炸药单耗，g/m³。
 q_{SX} ——炸药单耗在B.H.库图佐夫综合可爆性分级中的范围；
 q ——炸药单耗，g/m3。

矿岩可爆性分级	炸药单耗 (kg/m³)		岩体自然裂隙平均间隔 (m)	岩体中各种结构体含量 (%)		抗压强度 σ_y (MPa)	岩石容重 (t/m³)	普氏坚固性系数/值
	范围	平均		+500mm	+1500mm			
I	0.12~0.18	0.130	0.00~0.10	0~2	0	10~29	1.40~1.80	1~2
II	0.18~0.27	0.225	0.10~0.25	2~16	0	40~44	1.75~2.35	2~4
III	0.27~0.38	0.320	0.20~0.50	10~52	0~1	29~64	2.25~2.55	4~6
IV	0.38~0.52	0.450	0.45~0.75	45~80	0~4	49~88	2.50~2.80	5~8
V	0.52~0.68	0.600	0.70~1.00	75~98	2~15	69~118	2.75~2.90	8~10
VI	0.68~0.88	0.780	0.95~1.25	96~100	10~30	108~157	2.85~3.00	10~15
VII	0.88~1.10	0.990	1.20~1.50	100	25~47	142~201	2.95~3.20	15~20
VIII	1.10~1.37	1.235	1.45~1.70	100	43~63	191~245	3.15~3.40	20
IX	1.37~1.68	1.525	1.65~1.90	100	58~78	230~294	3.35~3.60	20
X	1.68~2.03	1.855	≥1.85	100	75~100	≥279	≥3.55	20

2.3 爆破作业工艺

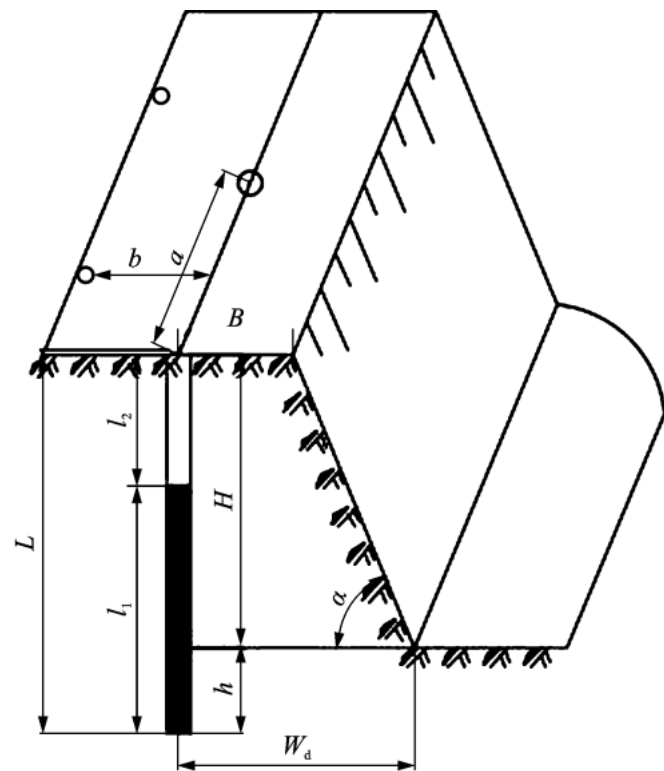
• 2.3.2 露天台阶深孔爆破炮孔参数

➤ 深孔爆破台阶要素

- 台阶高度 H 、钻孔深度 L 、堵塞长度 l_2 、装药长度 l_1 、孔距 a 、排距 b 、安全距离 B 、坡面角 α 、最小抵抗线 W 、底盘抵抗线 W_d 、超深 h 。

➤ 参数计算

请同学们参考凿岩爆破的学习内容，复习各参数的计算方法



2.3 爆破作业工艺

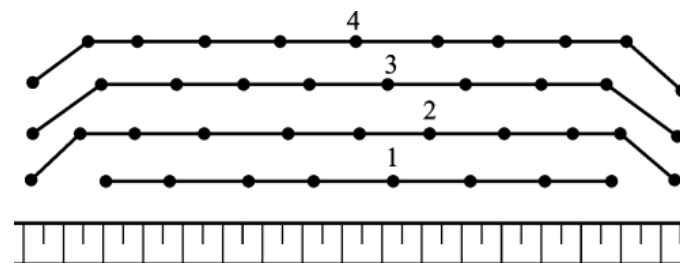
• 2.3.3 起爆工艺

➤ 起爆器材

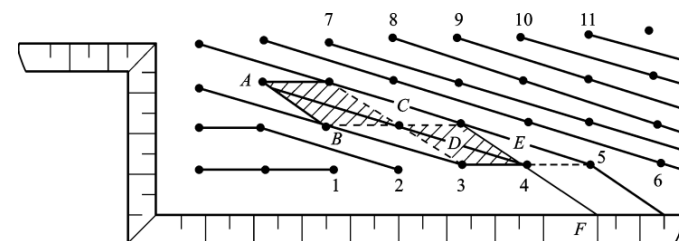
- 起爆器材包括导火索、导爆索、继爆管、导爆管、雷管、起爆药柱、起爆器和起爆所需的其他用品。
- 常用的工业炸药起爆方法可分为电力起爆法、导爆索起爆法和导爆管起爆法。

➤ 起爆顺序

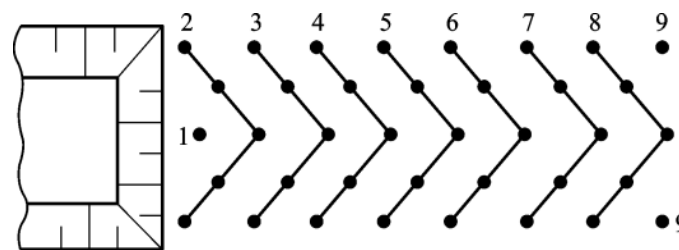
- 多排孔微差爆破优点：爆破效果得到优化;大块率降低、爆堆集中、根底减少、后冲减少;可降低炸药单耗, 提高每米炮孔崩矿量; 限制爆破冲击波的能量, 降低爆破振动对边坡及周围建筑的损伤。



排间顺序起爆



斜线起爆网路



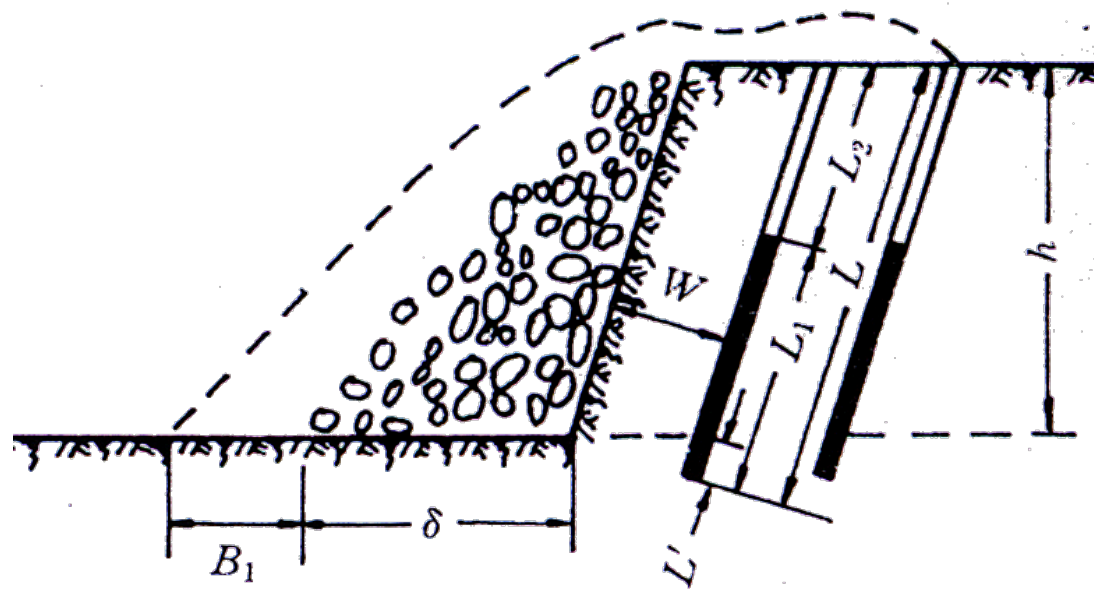
楔形起爆网路

2.3 爆破作业工艺

• 2.3.3 起爆工艺

➤ 微差挤压爆破作用原理

- 先爆孔为先爆孔提供新的自由面
- 后爆孔在先爆孔产生的应力消失之前起爆，将形成应力波相互叠加，增强破碎效果
- 岩块在空中运动相互碰撞（挤压），岩石进一步破碎
- 降低了爆破地震



2.3 爆破作业工艺

- 2.3.4 露天采矿涉及的爆破方法

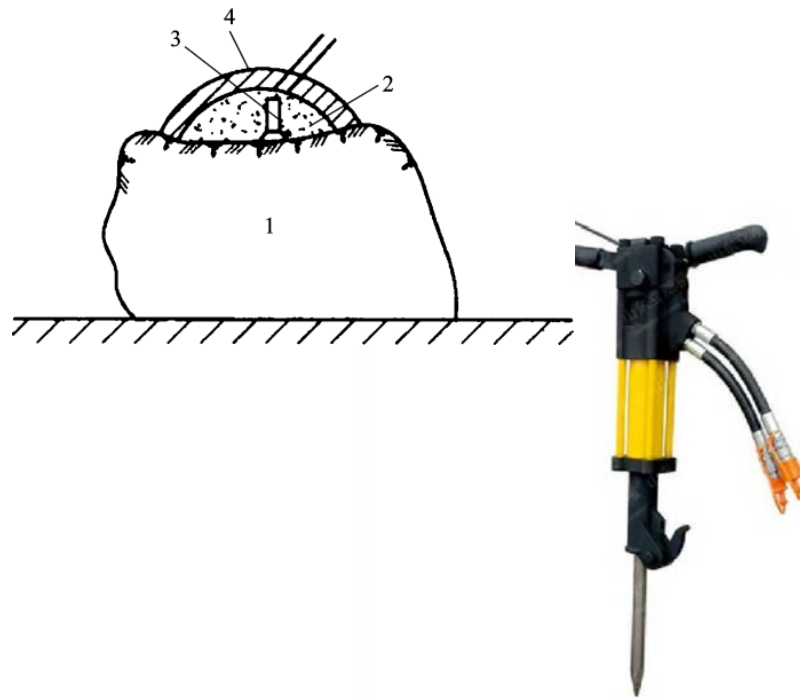
- 深孔爆破（剥离、矿岩）
- 硐室爆破（剥离较多）
- 预裂爆破
- 光面爆破
- 浅孔爆破（二次破碎、修根底等）
- 裸露爆破（二次破碎）



2.3 爆破作业工艺

● 2.3.4 二次破碎

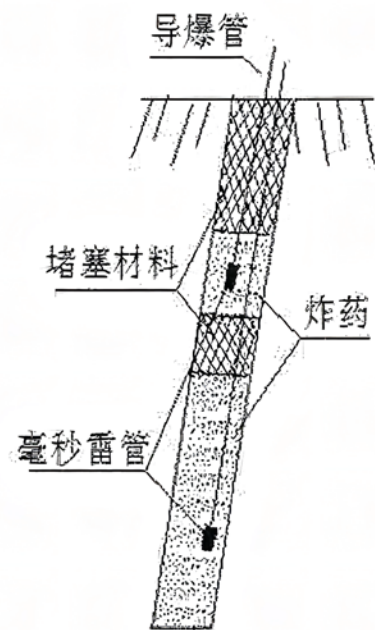
- 裸露爆破（二次破碎）
- 气动破碎锤
- 液压破碎锤



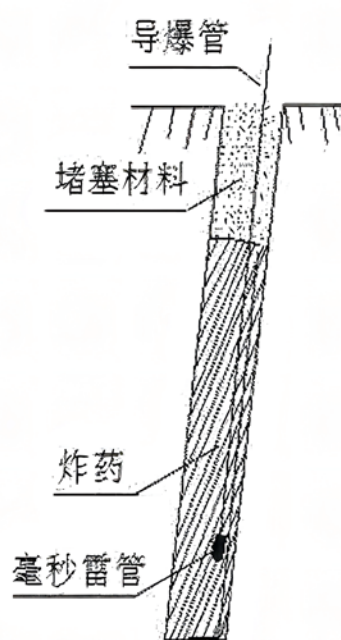
2.3 爆破作业工艺

● 2.3.5 爆破安全与控制措施

- 爆破振动对边坡稳定性
- 动态应力比损伤判据
- 爆破安全控制措施
 - 开挖适当深度的减振沟槽
 - 优化最大单段装药量
 - 优化起爆间隔
 - 优化装药结构
 - 采用边坡控制爆破技术



间隔装药



连续装药

2.4 机械破碎工艺

- 2.4.1 犁松法

- 对于硬土层、软岩和节理裂隙发育的中硬岩石，可以使用犁松法进行破岩，通过犁松机将矿岩破碎，然后用铲运机采装。
- 犁松机最重要的装置就是犁松器，由调节装置和犁钩组成。
 - 犁钩插入矿岩一定的深度后，随着犁松机的前进，矿岩中产生了巨大的剪切力，裂隙从犁钩处向周围扩展，直至岩块破裂。

岩石可松碎性分级

指标	容易松碎	松碎困难	不能松碎
弹性波速度 (m/s)	< 2100	2100~2800	> 2800
岩石分类	泥灰岩、砂岩、页岩等	坚硬砂岩、石灰岩等	花岗岩、玄武岩等
特征	节理、裂隙发育、风化严重、粗粒	有节理和裂隙，有风化现象	均质致密，细粒构造，无弱面

2.4 机械破碎工艺

● 2.4.2 液压破碎锤

➤ 液压破碎锤是将主机输入的液压能转换成机械冲击能的装置，通常搭载在装载机、挖掘机等液压工程机械上使用，完成岩石破碎、拆除等工作，广泛应用于采矿和土木工程。

➤ 优点：

- 破岩能力较强，需要的推力小且机动灵活，适应性好，破岩范围可控，可靠性较高，噪音较低。

➤ 方式

- 活塞冲击式破碎锤
- 高频破碎锤



2.4 机械破碎工艺

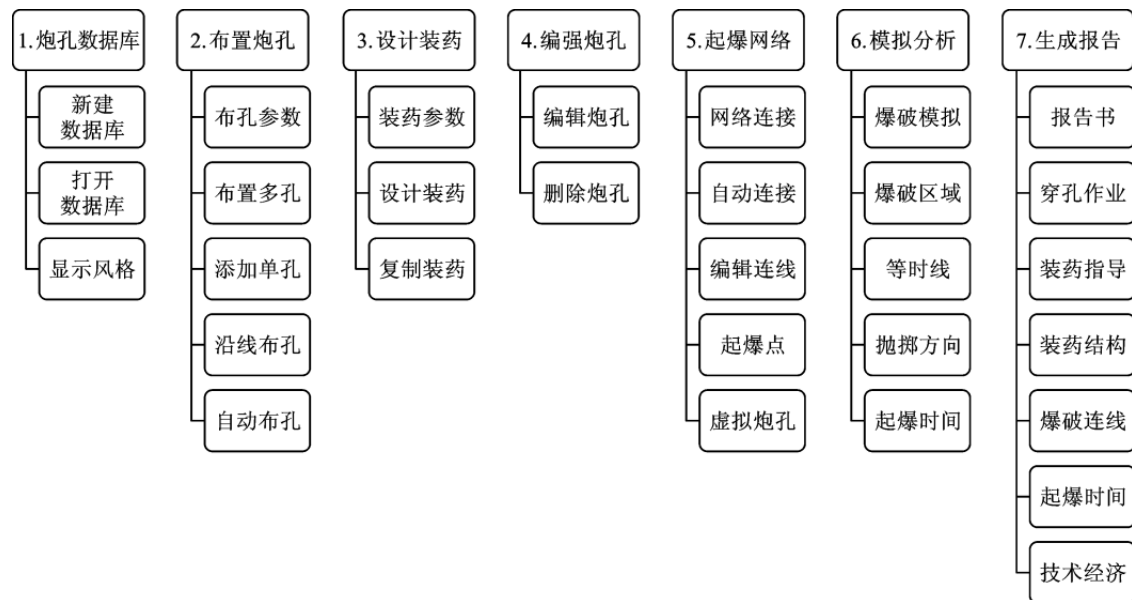
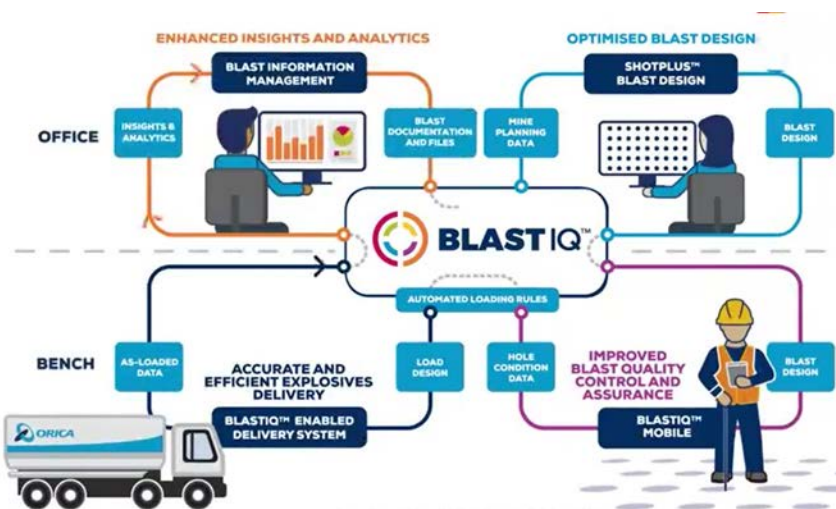
● 2.4.3 露天采矿机

- 露天采矿机主要构成部件为切削转子、发动机、履带装置、卸料皮带、配重、驾驶室等。
- 切削转子是将矿石采出的部件，传动方式为机械式皮带传动，转子刀具为可更换的刀具，安装位置靠近机器的重心，以在开采硬岩时确保切削产量的最大化，并精准控制切削深度；
- 卸料皮带为卸载矿石的部件，与切削转子实现协同采矿的工作目标。



2.5 露天矿岩破碎新工艺

- 钻孔定位技术
 - 卫星定位技术，不仅可以提高钻孔效率，而且还可降低钻孔爆破费用。
- 数字化爆破
 - 工程爆破全生命周期的数字化、可视化及智能化。
- 5G+爆破



谢谢！