

介绍我国新材料产业发展动态 助力新材料前沿论文选题

彭超群

《中国有色金属学报》中、英文版编辑部
联系方式：0731-88877197



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

目录

综述

- 新材料产业发展面临的形势
- 我国新材料产业发展现状和趋势
- 我国新材料产业取得的成绩
- 我国新材料产业发展存在的问题
- 发展思路
- 对策建议

新材料举例

- 钛合金材料
- 稀土新材料
- 超高强度钢
- 高温合金
- 锂离子电池材料
- 增材制造金属材料
- 液态金属材料



第一部分 综述





新材料作为科技强国建设的重要物质保障，是具有战略性、基础性和先导性的产业。新一代信息技术与新材料是制造业的两大"底盘技术"。新一代信息技术是第四次工业革命的驱动力，而新材料是支撑战略性新兴产业和重大工程不可或缺的物质基础。信息技术与新材料深度融合，共同推动制造业向高端化发展。加快新材料产业发展，有利于推动传统产业转型升级和战略性新兴产业发展，实现社会生产力和经济发展质量的跃升，对实施创新驱动发展战略、加快供给侧结构性改革、增强产业核心竞争力具有重要战略意义。



1.1 新材料产业发展面临的形势

(1) 新一轮科技革命和产业革命，为关键材料的大发展提供了历史机遇

当前，国际正在经历一场更大范围、更深层次的新工业革命，**信息技术、制造技术、能源技术、材料技术**交叉融合、深度渗透、群体性突破、协同应用，新技术、新业态、新产业层出不穷；一批标志性通用技术（**数字化制造、5G、大数据等**）涌现并向各产业领域渗透。

(2) 发达国家在关键材料领域加速布局，抢占发展先机

由于新材料的重要性，世界各国都不失时机地调整产业政策，加速布局材料前沿技术和颠覆性技术。例如：在第三代半导体领域，**富士通、英飞凌、三菱**等跨国公司都已初步完成产业布局，并陆续开发出新一代产品，在**高速列车、智能电网、5G通信**等领域实现了应用。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.1 全球新材料产业发展现状

(1) 全球各国新材料产业政策持续推出，纷纷抢占制高点

进入21世纪，世界各国特别是发达国家，都高度重视新材料产业的发展，均制订了相应的新材料发展战略和研究计划。主要发达国家针对新材料重点领域，如**高温合金、碳纤维及复合材料、新型显示材料、新型能源材料、第三代半导体材料、稀土新材料、石墨烯等**，还出台了专项政策。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.1 全球新材料产业发展现状

(2) 产业规模不断扩大，地区差异日益明显

世界上**新材料龙头企业主要集中在美国、欧洲和日本**，拥有全球绝大部分大型跨国公司，在经济实力、核心技术、研发能力、市场占有率等方面占据绝对优势，形成全球市场的垄断。中国、韩国、俄罗斯紧随其后，属于第二梯队。其中，**中国在半导体照明、稀土永磁、人工晶体材料领域具有较强竞争力**。除巴西、印度等少数国家之外，大多数发展中国家的新材料产业比较落后。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.1 全球新材料产业发展现状

(3) 市场竞争日趋剧烈，关键材料成为焦点

信息技术是当前世界经济复苏和推动未来产业革命的重要引擎。信息化的发展水平主要取决于光电信息功能材料，其主流仍然是半导体材料。另外，**砷化镓、碳化硅和氮化镓**等宽禁带半导体材料也将对光纤通信、互联网做出重要贡献。**美国等发达国家在电子信息等关键材料领域占据主导地位。**



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.1 全球新材料产业发展现状

(4) 集约化集群化发展，高端材料垄断加剧

随着全球经济一体化进程加快，集约化、集群化和高效化成为新材料产业发展的突出特点。国际新材料企业呈现集团化、寡头化、国际化发展趋势。例如：日本、德国的5家企业占据了80%以上的半导体硅材料国际市场销售额。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.2 全球新材料产业发展趋势

(1) 新技术与新材料交叉融合、加速创新

21世纪以来，全球新材料产业竞争格局发生重大调整，**新材料、信息、能源、生物**等学科间交叉融合不断深化。以材料基因工程为代表的一系列材料设计新方法的出现，不断突破现有思路、方法的局限性，以**高通量计算、高通量制备、高通量表征、数据库与大数据**等技术为支撑，立足把握材料成分—原子排列—相—显微组织—材料性能—环境参数—使用寿命之间的关系，推动新材料的研发、设计、制造和应用模式发生重大变革，大幅度缩减新材料的研发周期和研发成本，加速新材料的创新过程。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.2 全球新材料产业发展趋势

(2) 绿色化、低碳化、智能化成为新材料发展的新趋势

以新能源为代表的新兴产业崛起，将引起电力、IT、建筑业、汽车业、通信行业等多个产业的重大变革和深度裂变，拉动上游产业(如风机制造、光伏组件、多晶硅深加工等一系列加工制造业和资源加工业)的发展，促进智能电网、电动汽车等输送与终端产品的开发和发展，促进节能建筑和光伏发电建筑的发展。短流程、少污染、低能耗、绿色化生产制造，节约资源以及材料回收循环再利用，是新材料产业满足经济社会可持续发展的必然选择。



1.2 全球新材料产业发展现状及趋势

1.2.2 全球新材料产业发展趋势

(3) 新材料技术日益提升人类的生活质量

随着新材料研究技术的不断延展，产生了诸多与人类生活水平提升息息相关的新兴产业。例如：氮化镓等化合物半导体材料的发展，催生了半导体照明技术；质子膜燃料电池已用于交通示范运行，促进了新能源汽车产业的发展。**生物医用材料的应用显著降低了心脑血管、癌症等疾病和重大创伤的病死率。**



1.3 我国新材料产业取得的成绩

改革开放以来，我国出台了多项政策，在材料领域全面部署，对标发达国家奋起直追。经过40多年的不懈努力，我国在体系建设、产业规模、技术进步、集群效应等方面取得了较大进步，取得了举世瞩目的巨大成绩，为国民经济和国防建设做出了重要贡献。



1.3 我国新材料产业取得的成绩

(1) 国家及地方高度重视，产业政策密集出台

近些年，国家高度重视新材料产业发展，相关部委陆续推出了一系列政策，如《增强制造业核心竞争力三年行动计划(2018—2020年)》《“十三五”先进制造技术领域科技创新专项规划》《“十三五”材料领域科技创新专项规划》《国家新材料生产应用示范平台建设方案》《国家新材料测试评价平台建设方案》《新材料标准领航行动计划(2018—2020年)》《重点新材料首批次应用示范指导目录(2018年版)》，这些政策加强了对产业发展的统筹规划和顶层设计，引领新材料产业快速健康发展。2010—2018年国家出台了新材料产业相关政策。



1.3 我国新材料产业取得的成绩

(2) 加强新材料产业发展顶层设计

2016年12月国务院批准成立国家新材料产业发展领导小组。2017年2月，作为领导小组的咨询机构，国家新材料产业发展专家咨询委员会成立。2017—2020年，中国工程院先后依托专家咨询委开展“新材料强国2035年战略研究”“新材料产业发展战略研究”“提升新材料产业基础能力战略研究”重大咨询项目研究，旨在对我国新材料产业发展进行顶层设计，为国家加快提升新材料自主创新能力、和产业核心竞争力提供咨询建议。



1.3 我国新材料产业取得的成绩

(3) 产业规模不断壮大，部分材料进入世界前列

我国新材料产业市场规模快速扩张，从2011年的0.8 万亿元增长到2020年的5 万亿元。部分新材料重点领域产业规模已位居世界前列。例如：我国碳纤维产能和实际用量两项指标均跨入世界前三位，多种电子陶瓷产品的产量占世界首位，我国新型显示材料产值全球第一。

(4) 创新能力不断提升，一系列核心技术取得重大突破

新材料产业发展始终坚持“需求牵引、创新发展”的原则，我国新材料产业研发能力在不断积累中逐步增强，自主创新能力不断提升，新材料品种不断增加。在一些涉及“受制于人”的重点、关键新材料，从制备、工艺流程到新产品开发及节能环保和资源综合利用等方面取得重大突破。

(5) 产业集聚效应明显，区域特色产业集群初步形成

京津冀、长三角、珠三角等沿海发达地区依托人才、市场优势，形成新材料研发与应用为主的新材料产业集群。



1.4 我国新材料产业发展存在的问题

(1) 新材料对外依赖度高，产业基础能力薄弱

我国新材料对外依赖度高，产业基础能力薄弱。我国高端材料大量依赖进口，例如：我国虽然集成电路和显示产业规模居世界前列，但**集成电路材料和显示材料70%以上尚需进口**。部分关键原辅材料依赖国外进口，已成为制约我国新材料高性能化和高端元器件及零部件制造的重大瓶颈。

(2) 引领发展能力不足，难以抢占战略制高点

目前，国际产业巨头不仅在多数高端领域占据垄断地位，还在不少前沿领域再次实现率先发展，未来我国可能处于更加不利的位置。



1.4 我国新材料产业发展存在的问题

(3) 投资分散，初创期融资能力弱，缺少统筹

我国部分新材料领域的产业结构不够合理，新材料产业的投资和支持只看到一些“点”，尚未形成以点带线、以线带面的联动效应。

(4) 管理支撑体系不健全，未形成良好生态

我国虽然拥有众多的材料测试评价机构，但材料测试评价机构普遍规模较小，部分测试评价方法落后，高性能测试仪器设备未能完全自主掌握，长期依赖进口，部分高端仪器设备长期闲置，高水平测试评价人才不足，市场化服务能力弱。



1.5 发展思路

我国下一阶段新材料发展总体思路为：面向在世界材料强国行列中占有一席之地的战略目标，围绕保障**国家安全、产业安全、科技安全**的重大需求，着力破解核心系统、补强重大工程和应用系统中器件的核心问题。



1.5 发展思路

1.5.1 目标

(1) 先进基础材料

到2035年，基础材料中高端产品占比达到50%，基础材料进入全球产业链的中高端，二氧化碳等温室气体排放减少20%，绿色制造达到国际一流水平，基础材料的设计、生产、服务全过程基本实现智能化。

(2) 关键战略材料

国民经济和国防建设重点领域战略材料制约问题全面解决，关键战略材料实现全面自主保障。

(3) 前沿新材料

到2035年，前沿新材料领域拥有一批具有全球影响力的跨学科研究团队，形成一批具有国际领先水平的原创性研究成果。



1.5 发展思路

1.5.2 重点任务

(1) 实施重点领域短板材料产业化攻关

推动“**重点新材料研发及应用重大项目**”启动。发挥举国体制优势，在新一代信息技术、国防军工等重点领域启动实施“**短板材料产业化攻关行动**”，集中突破一批关键短板材料。

(2) 加强新材料成果转化能力

夯实新材料创新体系薄弱环节，补齐新材料创新链条中科技成果转化成功率低的短板，**构建20个以上规模逐级放大的新材料中试中心，加快整合各地创新资源，在此基础上成立6家以上“国家新材料工程转化中心”**。

(3) 完善创新能力体系建设

建立起以企业为主体、市场为导向、产学研用紧密结合的自主创新体系，加快新材料创新平台布局。在应用端继续推动国家新材料生产应用示范平台，在材料开发端布局部分关键材料领域和前沿材料领域一批创新平台，推动数字研发中心建设。



1.5 发展思路

(4) 推进新材料产业协同发展

加速推动新材料产业集聚区培育，支持建立产业集聚区培育平台，加强新材料产业链相关产业、科研机构、成果转化机构、高等院校、服务贸易机构、金融机构等各类业态与产业集聚区的融合协同，推动形成高效协同融合发展集聚区试点示范。

(5) 开展新材料领军能力建设

针对我国具有优势或潜在优势的新材料品种，实施“**新材料长项技术和产品提升专项行动**”，支持重点企业面向国内外市场需求，巩固和强化竞争优势，形成一批国际知名品牌和新材料行业巨头，以期在国际竞争中形成战略反制能力。

(6) 攻克一批新材料生产用核心装备及核心原辅料

实施“**材料装备一体化行动**”，组织新材料生产单位、装备研制单位、高校、科研院所等开展联合攻关，加快专业核心装备的研发和应用示范，解决新材料研发、生产、测试所需的核心设备、仪器、控制系统等不能自主生产，甚至高端装备面临**国际禁运**的问题。对新材料生产原辅料相关的国际、国内矿产资源和加工生产技术，实施“**新材料专用原辅料保障行动**”，提升保障能力。



1.6 对策建议

- (1) 加快完善宏观管理体系
- (2) 统筹协调财政金融支持
- (3) 加强资源共享能力建设
- (4) 营造产业发展良好环境
- (5) 协力推进国际开放合作

第二部分 新材料举例





新材料包括先进基础材料、关键战略材料、前沿新材料。

- 先进基础材料：先进碳水泥基材料、先进陶瓷材料、**钛合金材料**、高性能纤维材料、**稀土新材料**、**高温合金**、**超高强度钢**
- 关键战略材料：高温合金、高效石油工业催化材料、高性能二维材料膜、**锂离子电池材料**、压电陶瓷和微波介质材料与元器件
- 前沿材料：**增材制造金属材料**、智能仿生材料、**液态金属材料**、**气凝胶材料**等



2.1 钛合金材料

2.1.1 钛合金材料产业发展的背景需求及战略意义

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐高温、耐低温、耐腐蚀、可焊、无磁、生物相容性好等综合优点，是三大轻金属(铝、镁、钛)中强度最高、耐热性最好、耐腐蚀最好的材料，被广泛应用于航空、航天、舰船、兵器、化工等领域。钛是航空、航天等高技术领域的支撑性关键材料，对国民经济建设、社会发展和国家安全有重大影响。钛产业水平是国家综合国力的体现。



2.1 钛合金材料

2.1.2 钛合金材料产业的国际发展现状及趋势

目前世界上具有**完备钛合金体系**的国家仅有**美国、俄罗斯、日本和中国**4个国家。国外经历长期的发展，已经形成门类齐全、体系完整的钛合金产业，在每一个应用领域，都有1~2个可供选择的成熟主干钛合金。根据钛合金设计功能的不同，形成了**高温钛合金、高强韧钛合金、耐腐蚀钛合金、低成本钛合金**等体系。根据应用领域的不同，形成了**航空航天用钛合金、舰船用钛合金、兵器用钛合金**等体系。



2.1 钛合金材料

在**航空航天**领域，钛合金的应用已成为飞机先进性的标志，**美国四代机F-22**用钛量达到41%。对于发动机用高温钛合金，英国发展得最为成熟，有完整的IMI体系，其400~600 °C系列钛合金Ti-6Al-4V、Ti-6242S、IMI834已普遍用于**罗-罗公司**等的系列航空发动机以及惠普公司的PW350发动机压气机盘及机匣，其性能稳定可靠。

在航天用**低温钛合金**领域，俄罗斯的研究居世界领先水平，其研制的系列α低温钛合金OT4、OT4-1、BTS-1_{KT}等已在航天火箭技术装备中获得大量应用。**在船用耐腐蚀钛合金方面**俄罗斯处于世界领先水平。1968年，苏联就建成了世界上第一艘钛合金多功能核动力潜艇(Papa)，是钛合金应用于大型海装结构的革命性一步。

在**钛合金加工**领域，世界先进钛合金加工技术以**美国Timet、ATI、RTI和俄罗斯VSMPO**等四大公司为代表。

日本钛合金民用技术一直走在世界前列，钛产品已遍及化工、石化、建筑、医疗(人体植入件、轮椅)、交通(汽车、摩托车)、体育(高尔夫球杆、网球、渔具、钓鱼船等)、日用电子产品(照相机、手表、复印机、打字机、手机)、炊具(刀、叉、锅、铲)等各个领域。



2.1 钛合金材料

2.1.3 我国钛产业发展概述

(1) 产能

2018年，我国海绵钛产能首次突破10万t；2018年后，海绵钛产能有了明显的增加，2019年比2018年增长了47.7%；2020年比2018年增长了65.4%，比2015年增长了101.1%。这说明我国对海绵钛的需求大幅度增加。钛锭的产能稳步增长，2020年突破20万t。2020年产能比2015年增长了47.4%，说明我国钛加工材料对钛锭的需求明显增加。

(2) 产量

2020年，我国共生产海绵钛122958 t，比2019年增长了4.9%，实现连续6年增长。2020年我国共生产钛锭119937 t，比2019年增长了35.2%，比2015年增长了100.8%，实现了连续6年增长。2020年我国共生产钛加工材97029 t，比2019年增长了28.9%，比2015年增长了99.5%，已连续6年增长。尽管如此，2020年我国仍然进口了钛加工材6139 t，占产量的6.3%。



2.1 钛合金材料

2.1.3 我国钛产业发展概述

(3) 产业结构

2020年，我国钛板材的产量比2019年增加了47.5%，占到当年钛材总产量的79.4%，其中钛带卷的产量占到了一半以上。

(4) 市场

2020年，我国海绵钛的总销售量为122958 t，净进口为4175 t，国内销售量为127133 t，同比大幅度增长了39.7%。2020年，我国钛材的总销售量93596 t，净出口量为9107 t，国内销售量为84489 t，同比增长了50.7%。



2.1 钛合金材料

2.1.4 我国钛合金材料研发和技术的提升

- ①开发的多种钛合金材料成功应用于我国重要工程。例如：我国创新研制的高强高韧损伤容限钛合金TC21和具有我国特色的中强高韧损伤容限钛合金TC4-DT已成功应用于我国新型战机等，成为我国航空领域的主干钛合金牌号
- ②钛合金的熔炼技术得到提升
- ③钛合金的锻造技术水平迈上了新台阶
- ④合金板材制备技术得到提升
- ⑤大口径钛及钛合金无缝管材及弯管制备技术得到提升
- ⑥钛合金型材及深加工制品制备技术得到明显提升。成功制备深潜器的载人球体，实现了国产化
- ⑦钛合金材料低成本化制备技术受到高度重视



2.1 钛合金材料

2.1.5 我国主要的新合金研制和应用进展

- ①结合国家海洋战略，创新研制海洋环境应用的钛合金受到高度重视。在国家相关项目的支持下，西北有色金属研究院、中船重工材料研究所等单位已成功研制出强度800、900和1100 MPa级的钛合金
- ②在航空发动机用高温钛合金方面，由中国科学院金属研究所研制的Ti-60合金已在我国新型航空发动机中进行应用考核，合金也进入工程化阶段
- ③在航空航天用高强韧钛合金方面，主要研制了 超高强韧钛合金、超高压中韧和高强损伤容限钛合金
- ④在兵器领域，围绕高性能和低成本问题，在Ti-12LC、Ti-8LC和Ti-0.8Al-1.2Fe等低成本钛合金的基础上，西部超导公司依托“装发预研”项目，开发出M36合金，已经用于多功能战斗部的制备
- ⑤设计开发出可冷轧中高强钛合金，其中大规格管材已用于某种弹壳体
- ⑥创新性研制的钛合金已完成性能优化、工程化和批量化生产
- ⑦深化了钛合金的应用基础研究



2.1 钛合金材料

2.1.6 发展我国钛合金材料产业存在的主要问题及主要任务

(1) 主要问题

2015—2020年，我国钛行业存在同质化、中低端钛产品产能过剩，行业推广应用有待加强，以及钛合金产品的稳定性与国外还有很大的差距等问题，在航空航天、舰船、核电等重要应用领域还存在瓶颈需要突破。

(2) 主要任务

- ①提升原材料冶金的技术水平，稳定钛原料的质量，满足高端市场的需求
- ②强化原创性研究和钛加工材工艺—组织—性能关系研究
- ③强化钛合金材料的工程化研究，提升钛合金材料的成熟度
- ④在国家相关部门的统一规划下，使钛合金产业能够有序发展
- ⑤大力发展钛合金材料的低成本制备技术
- ⑥强化钛合金材料的政产学研用有机结合，推动科技成果快速转化

2.2 稀土新材料

2.2.1 稀土新材料产业发展的背景需求及战略意义

(1) 中国稀土资源概述

稀土(RE)一共包括17种元素，其中镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕被称为“轻稀土”元素，钆、铽、镝、钬、铒、铥、镱、镥以及钪和钇被称为“重稀土”元素。中国稀土矿产资源种类齐全。不仅有大量岩矿型轻稀土矿，也有丰富的离子型重稀土矿。2020年，全球稀土储量和产量分别为1.2亿t和24万t，其中中国占比38%和58%；中国稀土及其制品出口量为7.82万吨，出口金额为21.67亿美元(主要出口日本和美国)，其中稀土金属和合金产品在全球市场份额达80%以上。

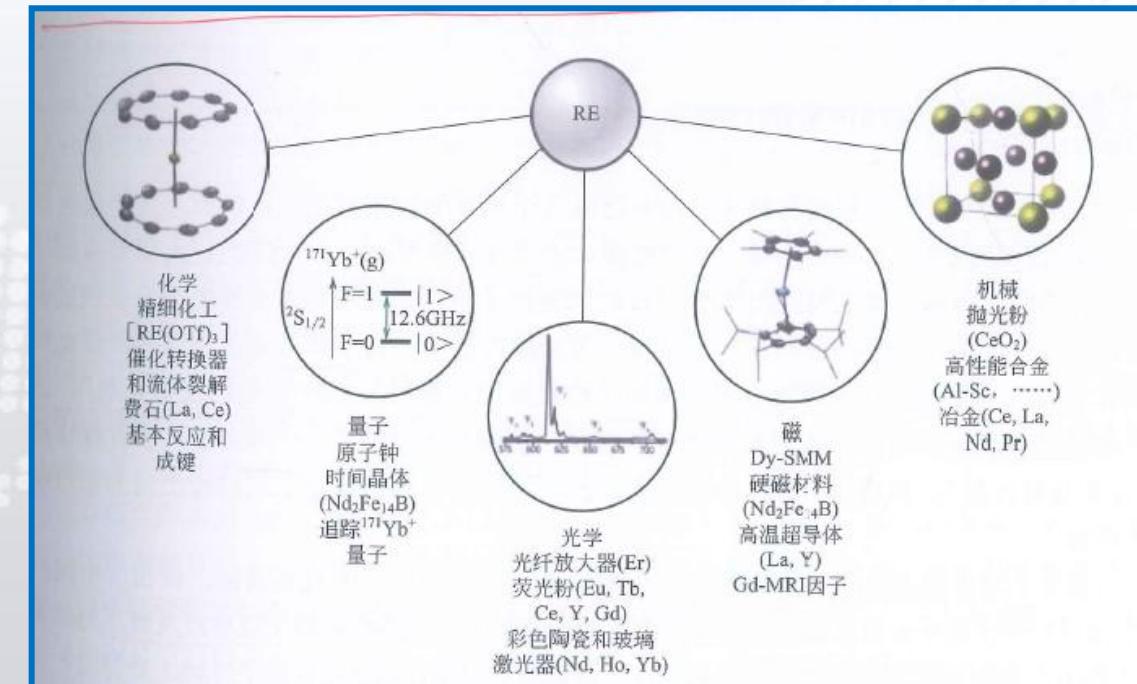


图1 稀土材料的典型特征以及由此导向的不同应用领域举例

2.2 稀土新材料

2.2.1 稀土新材料产业发展的背景需求及战略意义

(2) 稀土新材料及相关产业

作为“工业维生素”，稀土不仅在冶金、石油化工、玻璃陶瓷等传统领域应用广泛，更在**永磁材料、抛光材料、储氢材料、催化材料**等领域占据核心或重要地位。目前，各类稀土新材料已在高档数控机床、机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、节能与新能源汽车等《中国制造2025》涉及的重点高科技领域中起到关键作用。

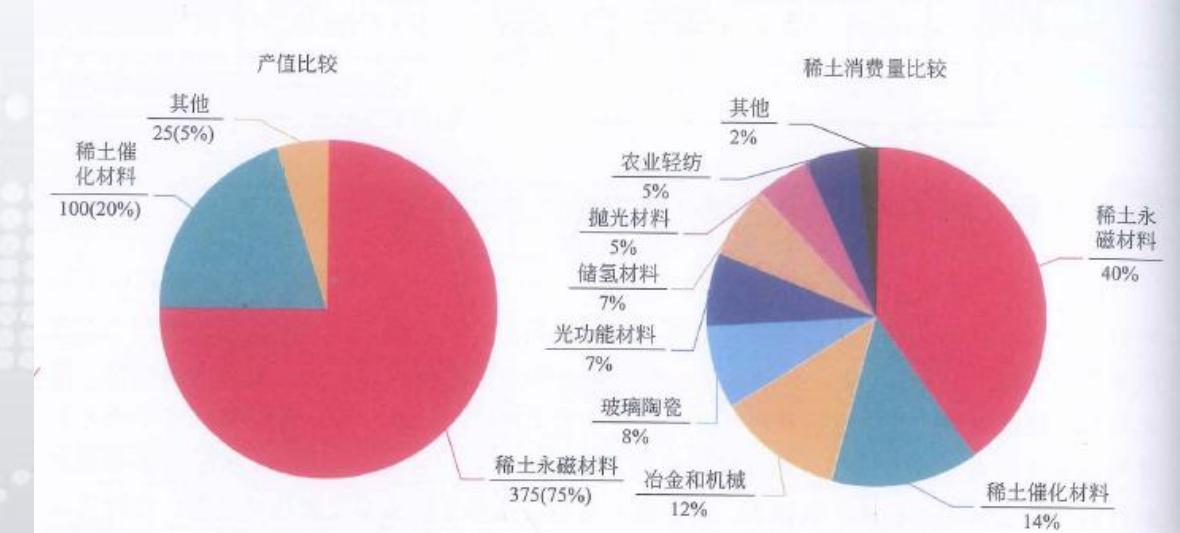


图2 各类稀土功能材料产值及稀土消费量比较



2.2 稀土新材料

2.2.1 稀土新材料产业发展的背景需求及战略意义

(3) 稀土新材料产业的战略意义

以稀土功能材料为代表的稀土新材料已成为全球竞争的焦点之一。近年来全球新能源汽车即将进入智能化主导、多种能源和驱动方式并行的“2.0时代”，大幅度拉动了稀土作为磁性材料、储氢材料的消费；**5G时代智能手机、物联网摄像头等电子设备的更新换代则推动了稀土在光功能材料、抛光材料等领域的消费。**中国已将稀土列为国家重点管控和发展的战略资源，并在**《中国制造2025》**等国家中长期发展规划中将**稀土功能材料列为关键战略材料予以重点发展**。



2.2 稀土新材料

2.2.2 稀土新材料产业的国内外发展现状及趋势

(1) 稀土磁性材料

稀土磁性材料在应用领域具有不可替代性，其中的稀土永磁材料、稀土超磁致伸缩材料和稀土磁制冷材料等稀土磁性材料已发展成为稀土行业的核心产业，带动整个稀土产业的持续发展。稀土超磁致伸缩材料最初应用于美军海军声呐系统，迄今已有1000多种相关器件问世，在军民两方面均有广泛应用。

(2) 稀土催化材料

目前，稀土催化材料最主要的两个应用领域为石油化工(尤其是石油裂化)和大气污染物(尤其是汽车尾气)净化。截至2019年12月，全球共有61808项关于稀土催化材料的专利申请，共涉及85个国家和地区。可见，稀土催化材料的研发与应用涉及地域广泛，属于全球热点技术之一。



2.2 稀土新材料

2.2.2 稀土新材料产业的国内外发展现状及趋势

(3) 稀土光功能材料

中国是稀土光功能材料生产和消费大国，产量占全球总产量80%以上。国内稀土光功能材料的快速发展带动下游产业的迅猛发展，以半导体照明(白光LED光源)为例，2019年行业总产值7548亿元，在通用照明领域市场渗透率超过50%，在显示领域渗透率超过90%。硅酸钇镥(LYSO)、LaBr₃:Ce等稀土光功能晶体制备技术相继取得突破，其中LYSO晶体产能2019年已达15 t。

(4) 稀土储氢材料

储氢材料是可以在一定温度和压力下与氢气发生反应，并且能可逆吸放氢气的一种材料。稀土储氢材料主要以Ni和稀土金属为生产原料，通过真空感应熔炼炉进行规模化生产，使用的生产原料中1/3为轻稀土金属。目前，中国已有多条自主知识产权的稀土系储氢材料生产线，国内总产能在2万t/年左右。



2.2 稀土新材料

2.2.2 稀土新材料产业的国内外发展现状及趋势

(5) 稀土抛光材料

抛光材料主要用于对物体表面的处理，如对玻璃工件表面进行抛光使其更加光滑细润。工业上所使用的稀土抛光材料主要是氧化铈和镧铈复合氧化物，因其优异的抛光效果，在相关领域具有“**抛光粉之王**”之称。2020年中国稀土抛光粉总用量约为3万t，其中手机盖板领域占80%以上。

(6) 高纯稀土金属

2020年，全国稀土金属需求量已经超过10万t。稀土金属的纯度是影响稀土功能材料性能的重要因素，比如蒸发溅射靶材必须使用4N以上的高纯稀土金属。目前高纯稀土金属及其化合物正广泛应用于光电显示材料、超磁致伸缩材料等领域。

2.3 超高强度钢

2.3.1 超高强度钢产业发展的背景需求及战略意义

超高强度钢(含超高强度不锈钢)是为了适应航空航天技术的需要而逐渐发展起来的一种高比强度的结构材料，一般将屈服强度超过1380 MPa的结构钢称为超高强度钢，其在航空航天、能源、船舶海洋、国防军工等领域扮演着越来越重要的角色。当今世界上95%以上的飞机起落架都是采用超高强度钢制造。目前国内外90%以上起落架材料采用300M钢，但是我国300M钢的制造以及新一代高性能起落架材料研究方面仍大幅度落后于国际水平。

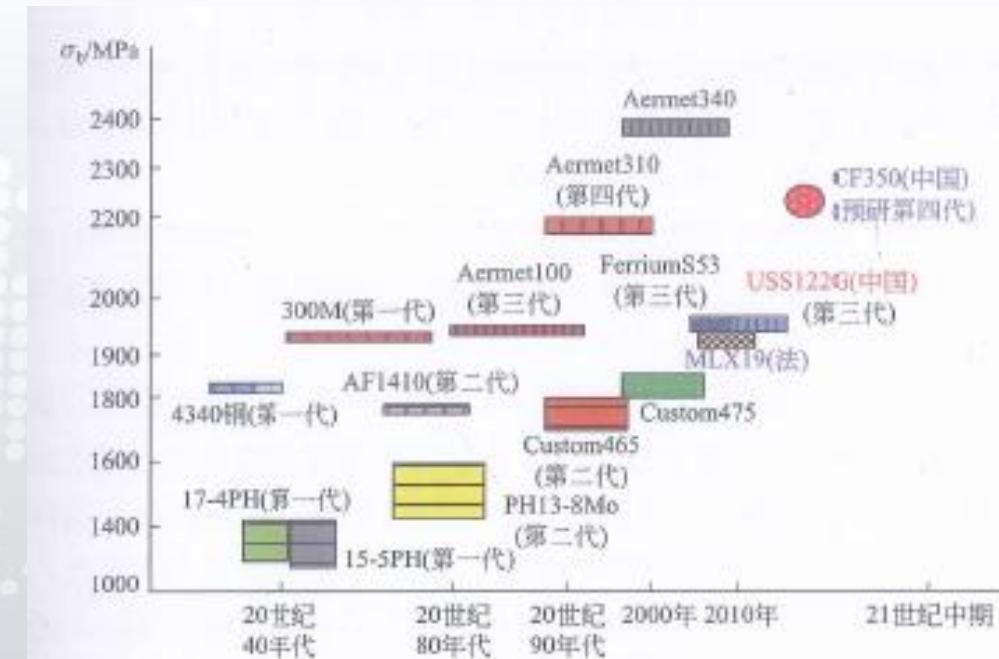


图3 超高强度钢及超强不锈钢的发展图



2.3 超高强度钢

几种典型的超高强度钢

- ✓ **低合金超高强度钢**，其典型钢种有AISI4340、300M、30CrMnSiNi2A、40CrMnSiMoVA等
- ✓ **马氏体时效超高强度钢**，其典型钢种有18Ni系列的18Ni(250)、18Ni(300)以及无钴的T-250和T-300
- ✓ **二次硬化型超高强度钢**，其典型钢种有H11、9Ni-4Co、9Ni-5Co、HY180、AF1410、AerMet100、AerMet310，以及新近开发的高耐腐蚀性二次硬化型超高强度钢S53等
- ✓ **超高强度不锈钢**，其典型的美国钢种有17-4PH、AM355、AFC-77、PH13-8Mo、Custom系列钢等，而欧洲国家在近10年也开发了MLX17、MLX19两种超高强度不锈钢

2.3 超高强度钢

2.3.2 超高强度钢产业的国内发展现状

(1) 机体用超高强度钢

钢铁研究总院在30多年军用起落架双真空300M钢的研制基础上不断突破，成功研制出民机用单真空冶炼工艺超大尺寸300M钢，支撑了C919大飞机“中国制造”。300M钢是我国C919大型客机起落架主体材料，其国产化是C919“中国制造”的重要标志。

(2) 发动机用超高强度钢

国内航空发动机，尤其是大涵道比涡扇发动机的发展相对发达国家而言一直处于落后状态，技术基础薄弱，大量关键材料和制造技术尚未突破和掌握，加之西方科技发达国家通过各种形式进行技术封锁，这需要我国大力开展航空发动机轴材料的研制工作。

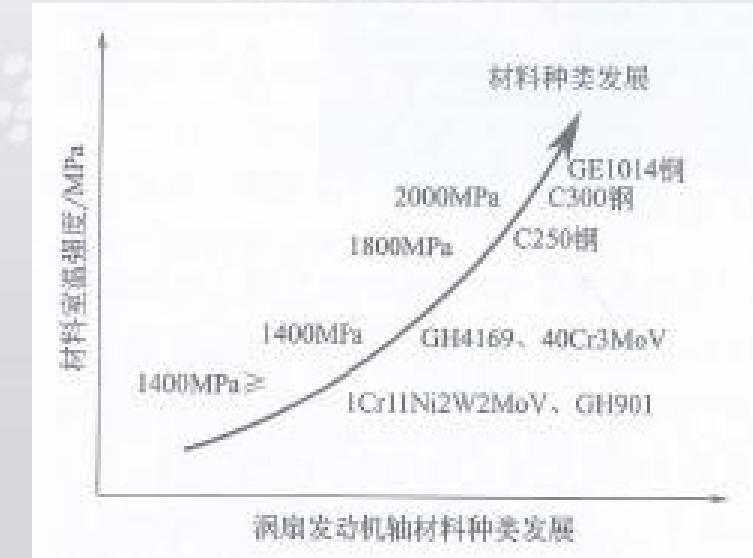


图4 涡轮发动机轴材料的发展



2.3 超高强度钢

2.3.2 超高强度钢产业的国内发展现状

(3) 传动系统用超高强度钢

我国通常用于制造航空发动机齿轮的渗碳高强度钢有:12CrNi3A、12C2Ni4A、14CrMn-SiNi2MoA、18Cr2Ni4WA、20CrNi3A,以上是在改革开放前常用的。此后在引进国外机型后国产化研制的渗碳齿轮钢有:16Ni3CrMoE(仿法国牌号E16NCD13)、16Cr3NiWMoVNbE(仿俄罗斯牌号)、16CrNi4MoA(仿英国牌号S/ZNC)、18CrNi4A(仿意大利牌号18NC16)。渗氮钢牌号有:30Cr3MoA(仿法国牌号30CD12)。



2.3 超高强度钢

2.3.3 发展我国超高强度钢产业存在的主要问题

目前制约发展的主要因素是重大工程对新材料的应用技术偏弱、新材料研发创新的内动力或驱动力不足等。

- ①高端超高强度钢比例低，部分高端产品不能满足国内需求
- ②超高强度钢生产整体技术水平亟待提高
- ③超高强度钢生产的高资源和高能源消耗状况亟待改善



2.4 高温合金

2.4.1 高温合金概述

(1) 成分及性能特点

高温合金是以铁、镍、钴元素为基，能在600 °C以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属结构材料。为了满足苛刻而复杂的性能要求，高温合金中通常加入Cr、Co、W、Mo、Al、Ti、Nb、Ta、RE、Hf、C、B、Y等10余种合金元素，在提供优异的高温力学性能以及抗高温氧化、腐蚀性能的同时，还要确保具有良好的组织稳定性以供长期使用。

(2) 高温合金在航空发动机中的应用

基于高温合金具有优异的高温长时稳定的力学性能和表面化学稳定性，先进的航空发动机中高温合金材料的用量所占比例已高达50%以上，可以说没有高温合金就不可能有高速、高效率、安全可靠的现代航空业。



2.4 高温合金

2.4.1 高温合金概述

(3) 高温合金在航天推进系统中的应用

火箭运载能力的大小，决定着一个国家空间应用水平的高低。在火箭、导弹等航天器的动力装置中，如液氢液氧发动机、液氧煤油发动机以及燃气涡轮发动机等，高温合金是燃气发生器、涡轮转子、涡轮导向器等关键热端部件的主干材料，其性能水平往往直接决定了航天动力推进系统及飞行器本身的性能。

(4) 高温合金在燃气轮机中的应用

燃气轮机涡轮叶片长时间连续工作在高温、易腐蚀和复杂应力下，与航空发动机涡轮叶片相比，对耐久性、抗腐蚀性要求更高，尺寸也更大，要求开发组织和化学稳定性更高的定向/单晶高温合金及大尺寸叶片定向凝固技术。



2.4 高温合金

2.4.1 高温合金概述

(5) 高温合金在其他高端装备中的应用

除了航空、航天发动机及燃气轮机外，高温合金在核能、火电、油气开采、石化等重要工业领域也有广泛用途。其中包括：核电站蒸汽管、转子，超超临界火电机组蒸汽管、涡轮叶片，油气开采井下承力件、阀体，以及汽车、坦克涡轮转子等。



2.4 高温合金

2.4.2 高温合金产业的国际发展趋势

总体来看，国际上燃气涡轮动力(包括航空、航天发动机，舰船和地面燃气轮机)用高温合金向着耐高温、耐腐蚀、高纯净、高可靠性、低成本等方向发展。不断研制新型高温合金材料的同时，注重已有合金的改进，同时开发先进的制备与检测技术，降低成本的同时确保材料的量产稳定性和应用可靠性。

2.4.3 高温合金产业的国内发展现状

改革开放以来，在国家大推力**涡扇发动机、高功重比涡轴发动机、先进火箭及弹用发动机、舰船动力燃气轮机化及兵器动力高增压化**等需求牵引下，国内高温合金得到较为全面的发展。尤其从20世纪90年代中至今，是我国高温合金的新发展阶段，随着航空发动机推重比从3提高到10以上，涡轮前进口温度从1160 K提高到1950~2150 K。同时，国内还开发了一系列具有特殊性能的变形高温合金，如低膨胀系数高温合金**GH2907、GH2909**，具有高强度和低膨胀系数相结合的独特性能，在大推力涡扇发动机上得到批量应用。



2.4 高温合金

2.4.4 发展我国高温合金产业的主要问题

虽然高温金属合金材料与生产技术在我国已发展了60余年，但产业发展仍处于成长期，**科研、生产能力与需求**相比存在三个方面的问题：

(1) **高端新产品**难以满足应用需求，高代次高温合金工程化应用水平与美国、俄罗斯等国仍有差距，我国研制更高性能的航空、航天发动机尚存在材料短板。

(2) 高温合金产品**质量稳定性、性能一致性**以及**性价比**仍有待提高，生产工艺技术细节需全面完善，“一材多用”格局和主干材料体系建设尚需进一步推进。

(3) **生产能力不足**，我国高温合金生产企业技改建设尚未到位，生产能力与需求之间存在一定缺口，特定用户仍倾向于选择国际市场流通的大宗高温合金产品。



2.5 锂离子电池材料

2.5.1 产业发展现状

(1) 正极材料

正极材料是锂离子电池最为关键的原材料，是电池的能量密度和安全性能的主要决定因素，同时也是锂离子电池成本占比最高的材料，对于锂离子电池生产发展具有重要影响。目前已经规模化生产的正极材料主要包括高电压钴酸锂、橄榄石结构磷酸铁锂、层状结构镍钴锰三元材料(含镍钴铝)及尖晶石结构锰酸锂等，其中钴酸锂主要用于移动电子终端产品中的小电池。国外动力电池企业的产品主要以镍钴锰、镍钴铝正极材料为主；中国汽车动力电池企业的产品中，三元材料和磷酸铁锂材料共存。

正极材料向高比容量和低成本两个方向发展，材料体系仍是层状、橄榄石、尖晶石结材料多元化齐头并进。低钴或无钴层状材料技术、三元材料单晶化技术、磷酸铁锂高密度和低成本生产技术、高压尖晶石镍锰酸锂材料技术、富锂锰基材料技术，以及电解液匹配技术支撑高能量密度和低成本动力电池的技术发展，满足从高端到经济性新能源汽车的需求。



2.5 锂离子电池材料

2.5.1 产业发展现状

(2) 负极材料

负极材料在锂离子电池中主要作为储锂主体，在充放电过程中实现锂离子嵌入和脱出，与电池寿命和充电性能密切相关。负极材料通常分为碳材料和非碳材料两大类。碳材料主要包括人造石墨、天然石墨、复合石墨、中间相碳微球、硬炭和软炭等；非碳材料包括钛基材料、锡基材料、硅基材料以及氮化物材料等。负极材料目前以碳材料为主，人造石墨占比最大且增加迅速，加入高比容量硅基材料的人造石墨已开始在少部分电池中应用。从负极产品结构来看，**2020年人造石墨产品占比进一步提升，市场占比达到84%**。

(3) 隔膜材料

隔膜的主要作用是使电池正、负极分隔开来，防止正负极接触而短路，同时能够允许离子通过，从而完成在充放电过程中锂离子在正负极之间的快速传输。隔膜性能的优劣直接影响着电池内阻、放电容量、循环使用寿命以及电池安全性能的好坏。目前，锂离子电池隔膜依旧以聚烯烃基膜为主，材质为聚丙烯和聚乙烯。



2.5 锂离子电池材料

2.5.1 产业发展现状

(4) 电解液

电解液性能直接影响锂离子电池比容量、工作温度范围、循环效率、安全性等性能。目前电解液以碳酸酯类溶剂、六氟磷酸锂电解质盐为主，新型耐高压类溶剂和双氟磺酰亚胺锂盐(LiFSI)类锂盐是重点发展方向。中国电解液企业以碳酸酯类混合溶剂、六氟磷酸锂电解质盐为主，开发了多款功能型添加剂，优化组合出与动力电池相适应的不同电解液体系，匹配不同材料体系的动力电池。



2.5 锂离子电池材料

2.5.2 技术现状和发展趋势

(1) 正极材料

鉴于动力电池需要持续提高安全性和能量密度，**磷酸铁锂和镍钴锰三元材料在今后一段时间内仍是动力电池的主要材料选择**，磷酸铁锂比容量已近极限，但密度会进一步提高，三元材料镍含量提升并以单晶化为趋势，走向低钴/无钴多元材料，尖晶石镍锰酸锂正极材料因其高电压和低成本，以及富锂氧化物固溶体材料因其具有较高的比容量和较宽的电化学窗口，亦成为开发热点。高电压尖晶石镍锰酸锂和高电压高比容量的富锂锰基材料，目前处于研发和产业化前期阶段。



2.5 锂离子电池材料

2.5.2 技术现状和发展趋势

(2) 负极材料

目前商业化应用最广泛的依旧是石墨类材料(天然石墨、人造石墨、中间相碳微球)，其他已规模化生产的负极材料各具特色。无定型碳材料(硬碳和软碳)倍率性能好，硅基材料比容量高，钛酸锂材料高低温性能、循环性能优异。金属锂也将成为研究的重点，应用于包含固态在内的电池体系中。

无定型碳材料具有良好的寿命和循环性能，下一步发展趋势是高比容量材料的实用化，同时需要提升首次库仑效率和降低成本，预计2025年无定型碳材料比容量大于350 mAh/g,2030年大于400 mAh/g , 2035年大于500 mAh/g。

当前，应用于动力电池领域的硅基负极材料，主流的选择是硅氧材料。预计2025年硅碳材料比容量大于800 mAh/g,2030年大于1200 mAh/g,2035年大于1500 mAh/g。



2.5 锂离子电池材料

2.5.2 技术现状和发展趋势

(3) 隔膜

隔膜对提高电池的综合性能具有十分重要的作用，隔膜越薄、孔隙率越高，电池的内阻越小，高倍率放电性能就越好，聚烯烃基膜超薄化技术进一步完善，再通过复合表面处理隔膜，安全使用温度逐步提升。隔膜的安全使用温度预计2025年超过 200°C ，2030年超过 250°C ，2035年超过 300°C 。热稳定性高、机械强度高、薄型化的隔膜材料，材质为芳纶、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚偏二氟乙烯(PVDF)和聚酰亚胺(PI)是重点发展方向。



图5 锂离子动力电池材料路线图



2.6 增材制造金属材料

2.6.1 增材制造金属材料产业发展的背景需求及战略意义

(1) 金属增材制造概述

增材制造(Additive Manufacturing , AM)技术，通过计算机辅助技术将零件的三维模型进行切片分层，离散为一层一层的二维截面数据，采用高能热源(如激光、电子束、电弧等)，将离散材料(粉末、丝材等)逐层熔融堆积形成三维物体。增材制造与信息技术、新材料技术、新设计理念的深度融合，将给传统制造业带来变革性影响，被誉为催生第四次工业革命、决定未来经济发展的12项颠覆性技术之一。

经过近40年的发展，增材制造技术面向航空航天、轨道交通、新能源、新材料、医疗等战略新兴产业领域已经展示了重大的价值和广阔应用前景。目前，增材制造已经从最初的原型制造逐渐发展为直接制造、批量制造，成为工业领域的主流制造手段之一。金属增材制造是目前发展最快、应用前景最好的增材制造技术方向。相比传统制造模式，金属增材制造除了具备无模、数字、柔性的特点外，还具有材料总体利用率高、响应速度快等优势，甚至能够完成传统工艺无法实现的高复杂度、高精度金属零部件的直接制造。

2.6 增材制造金属材料

2.6.1 增材制造金属材料产业发展的背景需求及战略意义

(1) 金属增材制造概述

根据所采用能量源和成形材料的不同，典型的金属增材制造技术包括：**选区激光烧结、激光选区熔化、电子束选区熔化、激光立体成形、电子束熔丝沉积成形和电弧增材制造**等技术。相较于传统制造技术，增材制造技术既可以实现材料的一次整体成形，又能够实现不同材料的一体化成形，还能够实现某些特殊复杂结构的自由制造。金属增材制造的核心优势主要表现在对复杂零部件的结构重塑和工艺再造方面。

增材制造技术已在金属领域实现众多实际应用，并证明了其显著优势。例如：美国通用电气公司(GE)使用增材制造技术批量生产LEAP系列航空发动机的**燃油喷嘴**，原本需要20个金属零件组装完成，采用增材制造技术后集成为一个零件，其力学性能接近锻造材料，使燃油喷射系统寿命提高将近5倍，重量减轻25%，成本效益提升30%，库存降低95%。



图6 增材制造的航空发动机燃油喷嘴



2.6 增材制造金属材料

2.6.1 增材制造金属材料产业发展的背景需求及战略意义

(2) 增材制造金属材料概况

增材制造金属原材料主要分**金属粉末**和**金属丝材**两类，其中金属粉末的占比在90%以上。当前全球主流的增材制造金属粉末制备方法包括：气雾化法、等离子旋转电极法、等离子雾化法，以及等离子球化法等，其中气雾化法又细分为有坩埚的真空感应气雾化和无坩埚的电极感应熔融气雾化。电子束熔丝沉积增材制造、电弧增材制造技术通常以**金属丝材**作为原材料。我国高品质球形粉末技术产业基础薄弱，细粒径球形粉末大量依赖进口，价格非常昂贵。

(3) 增材制造金属材料对国家发展战略及经济和国防建设的重要意义

增材制造从原理上突破了复杂异形金属构件的技术瓶颈，实现了金属材料微观组织与宏观结构的协同控制，从根本上改变了传统“**制造引导设计、制造性优先设计、经验设计**”的设计理念，真正意义上实现了“**设计引导制造、功能性优先设计、拓扑优化设计**”转变，为全产业技术创新、军民深度融合、新兴产业、国防事业的兴起与发展开辟了巨大空间。

2.6 增材制造金属材料

2.6.2 增材制造金属材料产业的国际发展现状及趋势

根据全球增材制造文献、专利以及装机量统计数据，全球增材制造产业已基本形成了以美国、欧洲等发达国家和地区主导，亚洲国家和地区后起追赶的发展态势。全球增材制造产业自2011年起连续多年保持快速增长，2020年产值达到127.58亿美元。增材制造金属材料行业产值规模在不断增长，据统计近10年保持30%~40%的增速，2020年全球增材制造金属粉末市场规模达到了3.83亿美元，保守估计2026年将达到18亿美元。

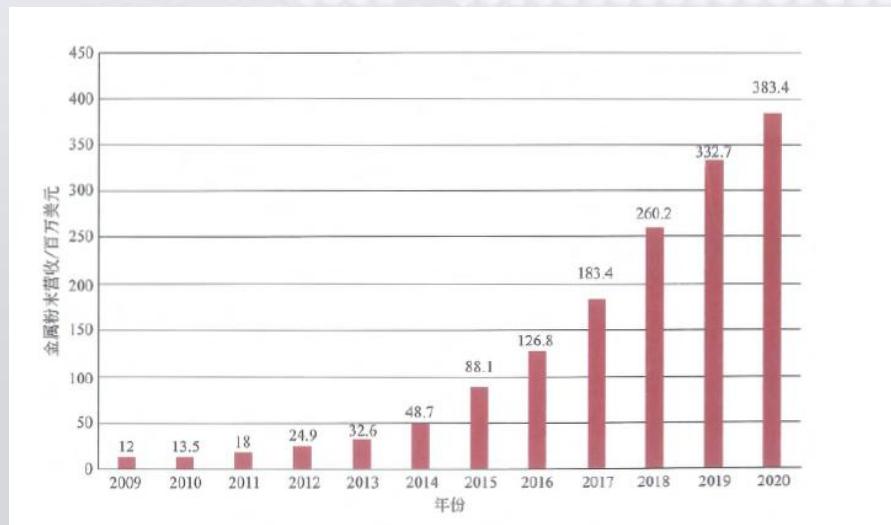


图7 金属增材制造金属粉末营收增长变化图

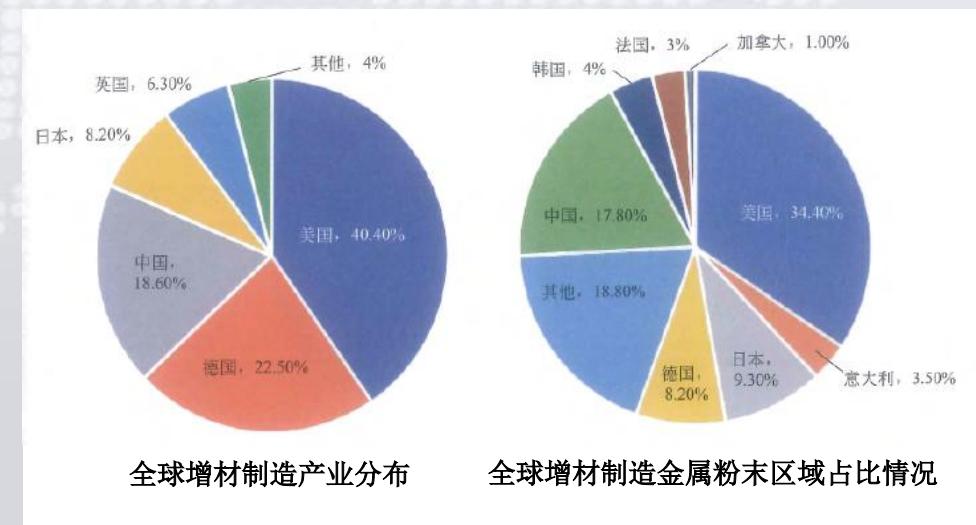


图8 国外各类制粉技术的优势企业及主要产品

2.6 增材制造金属材料

2.6.3 增材制造金属材料产业的国内发展现状

(1) 增材制造金属材料国内产业发展现状

根据中国增材制造产业联盟统计，2013-2019年期间，我国增材制造产业规模保持了40%以上的增长速度。2012年产业规模仅为1.6亿美元，2019年达到140.4亿美元，其中，装备产业规模占比45%，应用服务产业规模占比29%，增材制造材料产业规模占比26%。到2025年我国增材制造市场规模将超过635亿元，2021-2025年复合年均增速20%以上。

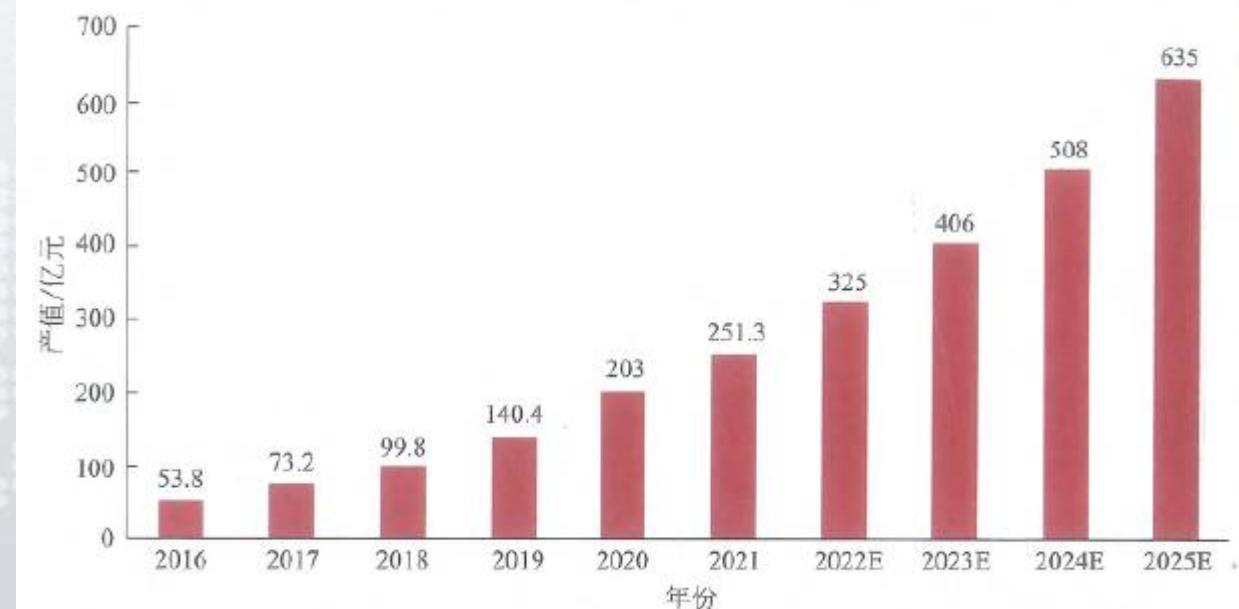


图9 2016—2025年中国增材制造市场规模统计及预测

2.6 增材制造金属材料

2.6.3 增材制造金属材料产业的国内发展现状

(2) 增材制造金属材料国内产业发展现状

当前，增材制造的金属材料材质主要有钛及钛合金、铁基合金、镍基合金、铝合金、钴基合金等，其中钛合金占比27.6%、不锈钢占比26.6%、时效钢占比20.7%、镍基高温合金占比13.8%、铝合金占比3.4%。

(3) 国内工程化产业布局与平台建设

我国增材制造产业已初步形成了环渤海地区、长三角地区、珠三角地区、中西部地区等多个聚集区。环渤海地区是我国增材制造人才培养中心、技术研发中心和成果转化基地。为进一步推动我国增材制造技术产业化进程，国家及各级省市积极推动各类增材制造创新平台建设。

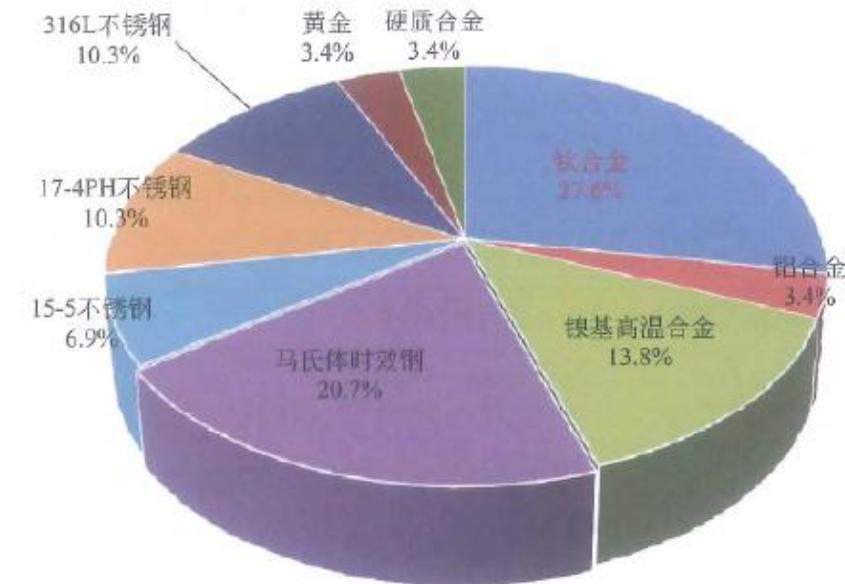


图10 中国金属增材制造中不同金属所占比例



2.6 增材制造金属材料

2.6.3 增材制造金属材料产业的国内发展现状

(4) 市场需求与应用前景

航空航天、汽车工业、医疗/齿科三大领域是增材制造重点应用领域。金属增材制造技术在航空航天领域主要应用于铸造模具设计、功能性零部件制造、重要构件修复，应用价值主要体现在轻量化、一体化结构、拓扑优化、避免大余量切除、空间增材制造等方面。应用于航空航天的增材制造金属材料主要包括钛合金、铝合金、铜合金、镍基高温合金、钛铝金属间化合物等。目前，航空发动机是金属增材制造的重点应用领域，在一些技术较为成熟的国家，增材制造也开始用于导弹、无人机以及卫星的零部件制造。

增材制造技术在汽车领域中的应用主要包括汽车零部件打印、汽车个性化定制和电池电极打印三个方面。在医疗行业，金属增材制造快速响应、个性化定制的特点，迎合了精准医疗的需求，主要医用在牙齿、骨植入物等领域。涉及的金属材料包括不锈钢、TC4、CoCrMo合金、金属Ta、锆镍合金等。



2.6 增材制造金属材料

2.6.4 发展我国增材制造金属材料产业存在的主要问题

与国际先进水平相比，我国金属增材制造材料产业目前所存在的短板，主要表现在以下四个方面：

- (1)材料基础研究薄弱，原始创新不足
- (2)产业化程度较低，自主化保障能力不足
- (3)知识产权保护和标准化体系建设滞后，产业规范化程度较低
- (4)专业人才短缺



2.7 液态金属材料

2.7.1 液态金属产业发展的背景需求及战略意义

液态金属是指常温或工作温度下呈液体状态的金属或合金，具有优异的导电和导热特性，在目前已知液体材料中具有最高的电导率和热导率。与其他金属材料相比，液态金属具有流动性好、液态温区宽、表面张力大、易被改性等显著特征，同时还具备其他固体金属材料所不具备的低熔点特性，熔融状态下的塑形能力使其能够更方便地打造出不同形态的产品。我国在液态金属材料及应用技术方面居国际领先水平。



2.7 液态金属材料

2.7.2 液态金属新材料国际发展现状

以往液态金属的应用主要包括汞及钠钾合金等，其中汞主要应用于冶金、温度计、压力计、汞灯、电开关以及化学药物等，由于其对环境的影响及对人体的毒害作用，目前国际上汞的禁用或限制使用是一个大趋势，而钠钾合金化学性质极其活泼，属于高度危险品，过去主要应用于核堆的冷却与二次传热。

从国际上来看，较早进入液态金属产业的有美国Nanocoolers公司，它成立于2004年，在初期融资阶段曾获得超过2000 万美元的投资，用于开展液态金属芯片散热技术研究，并于2005年联合蓝宝石厂商发布了用于显卡芯片散热的液态金属散热器。



2.7 液态金属材料

2.7.3 液态金属新材料产业的未来发展趋势

作为面向未来的颠覆性材料，液态金属将有望带动新一代信息技术、新能源、高端装备制造等领域快速发展：

- (1)液态金属印刷电子产业
- (2)液态金属混合柔性电子产业
- (3)液态金属3D打印产业
- (4)液态金属医疗技术产业
- (5)液态金属柔性智能机器人产业

2.7 液态金属材料

2.7.4 全球液态金属新材料专利申请趋势

将液态金属新材料相关专利按照申请年份进行统计，液态金属材料2000年以前发展缓慢。2000年之后进入快速发展期，近20年专利申请量年均增长率达到22.2%，而且在2018年专利申请量最多，达到1011项。

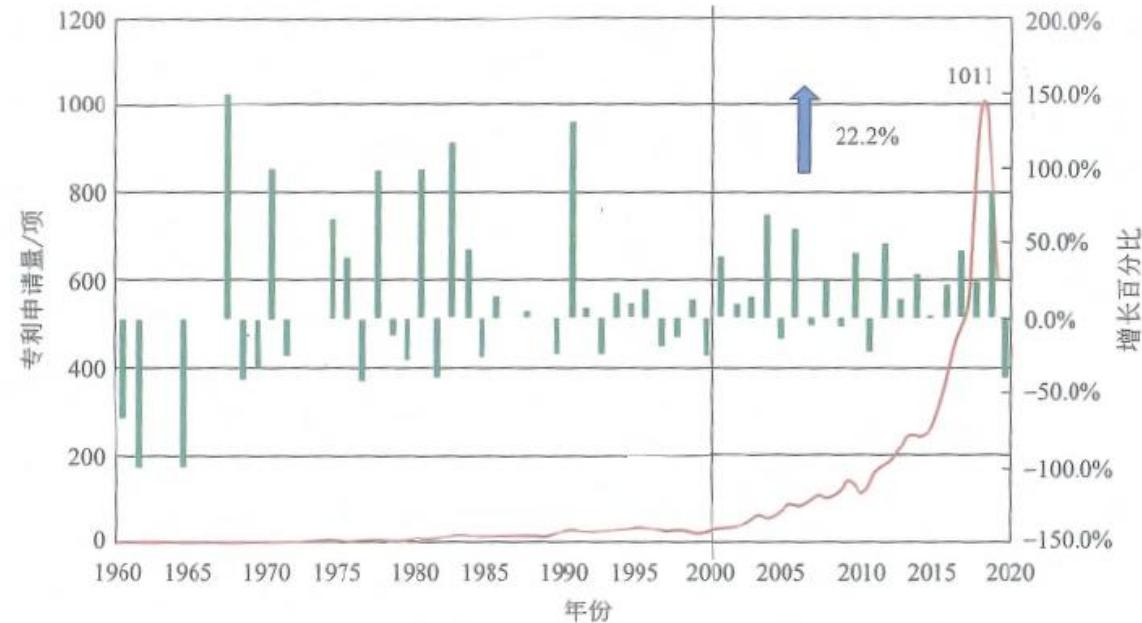


图11 全球液态金属新材料专利申请趋势

2.7 液态金属材料

2.7.4 全球液态金属新材料专利申请趋势

截止到2019年3月底，经检索，共标引了2969项中国专利，由专利申请趋势可以看出，**中国新材料液态金属在2005年之后进入发展黄金期**，近15年专利申请量年均增长率**为29.3%**。

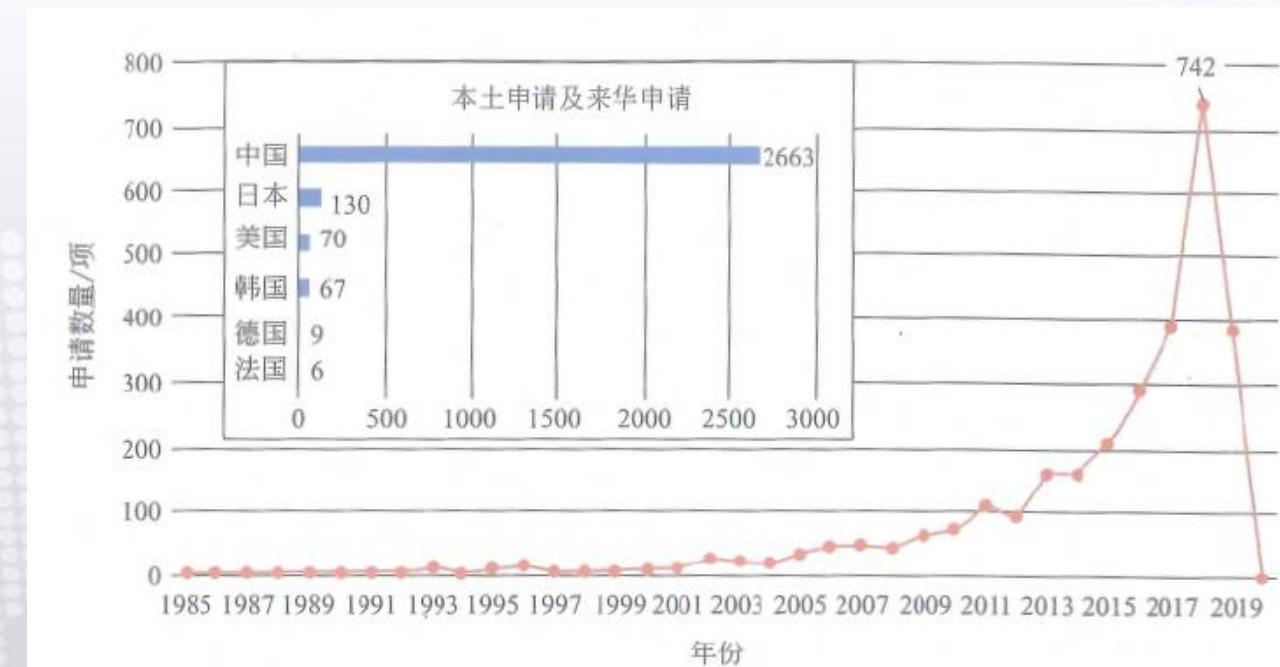


图12 中国液态金属新材料专利申请情况



2.7 液态金属材料

2.7.5 液态金属产业的国内发展现状

作为国际上室温液态金属研究与应用的先行者和拓荒者，中科院理化所刘静研究团队自2000年来，一直在液态金属研究领域不断积累和前行。除在先进芯片冷却、能源领域取得原创性创新突破，还在先进制造、生命健康以及柔性智能机器领域开辟出了一系列有显著科学意义和重大应用前景的全新领域。在液态金属领域渐成国际热门领域的起始阶段，中国团队已出版英文著作3部、中文著作6部，构建了液态金属物质科学与技术体系；已申请600余项发明专利，为我国有关重大前沿产业今后的发展奠定了基础；在取得大量底层核心突破的同时，他们还做出40余项全新的基础科学发现，在国际上产生了广泛的影响。

经多年探索，2011年3月，中科院理化所团队发表的研究工作首次系统论述了所提出的基于液态金属的电子直写技术，逐步创建了液态金属印刷电子技术及基于液态金属的3D打印技术，研发出世界上第一台液态金属桌面电子电路打印机，可在任意基质上打印的液态金属喷墨打印机。



2.7 液态金属材料

2.7.6 发展我国液态金属产业的主要任务及存在主要问题

(1) 发展我国液态金属新材料产业的主要任务

- ① 液态金属天线技术及产业化应用
- ② 液态金属热界面材料产业化应用
- ③ 液态金属电缆连接技术及产业化应用
- ④ 液态金属旋转电连接技术及产业化应用
- ⑤ 液态金属充电桩技术及产业化应用
- ⑥ 液态金属散热技术及产业化应用
- ⑦ 液态金属印刷电子技术及产业化应用
- ⑧ 液态金属可变形机器人技术及产业化应用



2.7 液态金属材料

2.7.6 发展我国液态金属产业的主要任务及存在主要问题

(2) 我国液态金属产业发展存在的主要问题

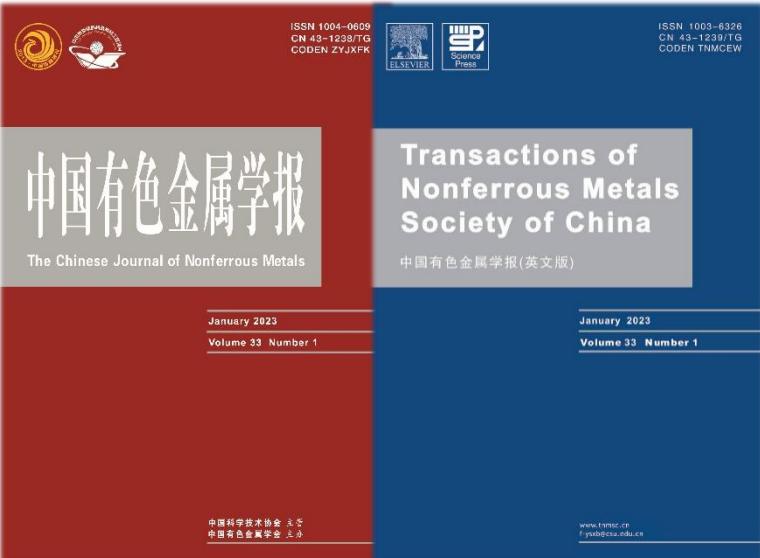
- ① 液态金属产业属于战略性新兴产业的功能定位尚不明确，国家对于这一战略领域的重视程度仍然不够，研发投入严重不足，制约了相关产业的壮大与发展
- ② 缺乏高水平新产品应用示范测试平台，作为新兴材料，液态金属产品在各领域的应用需要漫长的验证测试
- ③ 诸多液态金属科研成果并没有转化与应用，研发的转化效率低、研发周期长；液态金属新技术、新产品、新工艺的研究开发费用高，企业资本金少，难以支撑研发与产业开发持续不断的投入
- ④ 缺乏支撑产业快速发展的高端人才队伍，液态金属产业集群所在地云南省各方面环境条件对比发达地区有差距，薪资待遇也难以达到高端人才的期望值，人才难引进、难留下，人才队伍成为制约产业快速发展的一个重要瓶颈



有色牛
出版人



扫描二维码，关注我的视频号



谢谢！

