

编者按：

6月21日，经中国机械工程学会铸造分会（以下简称“全国铸造学会”）第九届理事会第三次理事长工作会议讨论研究，决定编制《铸造行业“十三五”技术发展规划纲要》（以下简称“《纲要》”）。全国铸造学会秘书处确定了《纲要》“编制路线”和编制时间进度，并成立了“教授咨询委员会”和“编制工作委员会”。《纲要》编制工作会议于9月27日在西安召开，确定了《纲要》编制涵盖专业领域分类和工作分工、内容及编写规范、工作进度安排。《纲要》审查会于5月17日在沈阳召开，对《纲要》每个专业领域进行了认真、严格审查，提出了有针对性修改和补充意见。《纲要》审定会于10月25日在长沙召开，审议经过了修改后《纲要》。

《纲要》相关内容作为上报材料关键组成部分已前后提交至中国工程院和工信部。《纲要》作为科学技术发展专题计划，纳入由中国铸造协会组织编制《铸造行业“十三五”发展计划提议》。

《纲要》由18个部分组成：铸钢、铸铁、铸造有色金属、铸造金属基复合材料、铸造耐磨材料、快速铸造、熔模铸造、压铸、反重力铸造、挤压铸造、消失模铸造、数值模拟、网络制造、造型材料、铸造装备和检测技术、环境保护和安全、汽车铸件、铸造标准。

在《中国制造2025》十大关键领域中，有8个领域和铸造亲密相关，甚至有些领域铸造技术作为发展瓶颈，大部分领域全部对铸造技术有强烈需求，或需要铸造技术和铸造产品进行支撑。《纲要》作为铸造行业技术发展指导性文件，在政策层面，向政府提出了建设性提议；在技术发展层面，对各个专业技术领域提出了关键发展项目及关键技术。

《纲要》含有全局性、战略性和前瞻性。为了充足发挥《纲要》指导作用，扩大《纲要》在铸造行业技术发展方面影响，在全国铸造学会第九届理事会第四次理事长工作会议上决定将《纲要》在《铸造》杂志上全文发表。

本刊在本期发表《纲要》全文，以馈广大读者。

铸造行业“十三五”技术发展规划纲要

（中国机械工程学会铸造分会 编制）

引言

“十二五”期间，中国在铸造技术创新、行业进步等方面取得了显著结果。中国铸件总产量达成4620万吨，较4450万吨增加了3.8%，连续位居世界铸件产量第一大国。不过仍未处理中国铸造行业“大而不强”问题，首先在大量出口低端铸件同时，仍需要进口大量高端铸件产品；其次在国防和国家

关键工程建设急需重大技术装备研发过程中，因为国外技术封锁，关键铸件常常成为制约相关领域发展瓶颈。

“十三五”

时期是深入实施创新驱动发展战略，加紧建设创新型国家关键时期。对于在装备制造业中发挥关键作用铸造业，是科技提升、产业转型、提升关键竞争力关键机遇期。为了清楚认识国际铸造科技发展大势，计划铸造技术发展方向，依据《国家中长期科学和技术发展计划纲要（-）》、《国家“十三五”科学和技术发展计划》和《中国制造 2025》提出目标和任务，结合中国铸造行业科技发展实际，编制了《铸造行业“十三五”技术发展计划纲要》（以下简称《纲要》）。

《纲要》由 18 个部分组成：铸钢、铸铁、铸造有色合金、铸造金属基复合材料、铸造耐磨材料、

快速铸造、熔模铸造、压铸、反重力铸造、挤压铸造、消失模铸造、数值模拟、网络制造、造型材料、铸造装备和检测技术、环境保护和安全、汽车铸件、铸造标准。其中《纲要》中 13 个领域计划内容包含到《中国制造 2025》全部五个重大工程，覆盖了高端装备创新工程 10 大领域中 8 个领域。

《纲要》结合中国外铸造技术发展现实状况，结合发展热点问题和中国铸造技术发展需求，指出了发展目标和发展关键，提出了关键发展项目及关键技术。《纲要》突出了战略性和宏观性，含有针对性和可操作性，可作为中国铸造行业—铸造技术发展指南。

（2）很多企业采取精炼手段，并在铸型上采取过滤网，确保钢液纯净度；

（3）发达国家大批量生产中、小型铸件铸型，大多采取高紧实率高压、高速、射压等高效流水线，采取树脂砂制芯，造型设备数控化率较高；

（4）发达国家普遍采取 CAD、CAM 等软件集成技术，基础全部采取工艺模拟，工艺数据库已经很好应用；

（5）铸造原、辅材料质量和品种和社会化、专业化、商品化供给方面已经日臻成熟；

（6）工业 CT 设备等优异检测设备逐步应用到产品检测中；

（7）大型铸钢件冶金技术在向高纯度钢液技术发展，成份均匀性、内部缺点、尺寸正确度等控制技术仍优于中国。

第 1 章 铸钢

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

现在中国小型批量铸件已普遍采取造型线生产，并初步含有以经典产品为关键质量技术体系。但生产线关键设备制造水平偏低，生产线优异程度及技术含量有待提升。中国铸钢市场也是产能过剩，因为受到劳动力、废钢和造型材料价格上升而铸件价格反而回落影响，市场竞争越来越猛烈，很多中小企业步履艰苦，面临重新洗牌局面。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

（1）完全炉前快速检测，成份波动少，检测仪器性能稳定；

1.3 中国外差距

和工业发达国家相比，现在中国大型铸钢件生产在产品品种、工艺水平、质量等级和制造装备等整体水平方面均存在着较大差距。

在大型核电设备中，主泵、核电汽轮机缸体等大型铸钢件多采取不锈钢材料，其质量要求极高，中国还未掌握自主生产技术，基础依靠进口。

1.4 问题分析和处理思绪

针对中国外差距情况，问题关键在中国工程化数据微弱，比如：数值模拟即使在铸造行业应用多年，不过部分关键算法和工程参数还不够精细，造成份析结果不能正确指导生产。

在一些高端铸件熔炼过程中针对有害元素及成份标准内优化问题工程数据缺乏。未建立起以服役条件为指导质量及制造体系。

针对核电、燃机等领域用高端铸件，建立以高端质量的关键研发及生产体系并形成数据积累机制以指导未来部件设计及制造，强化基础工程数据积累及相关技术固化并在行业内推广。

调整产业结构，增加高端铸件在整个铸钢行业比重，转型升级或淘汰落后、污染严重、技术含量低企业。

2 发展目标

提升中国高端铸件生产水平、增加基础数据积累、优化产业结构。

- (1) 小件生产技术集成化，生产规模化；
- (2) 造型技术多样化；
- (3) 铸造用砂高温化；
- (4) 粘结材料化学化、自硬化、无毒化；
- (5) 铸件本体材料合金化；
- (6) 冶炼技术精炼化；
- (7) 工艺设计模拟化；

- (8) 热处理技术智能化；
- (9) 铸钢检测技术可视化；
- (10) 大型铸钢件生产技术高端化。

3 发展关键

3.1 技术路线

分别从铸钢件开发和应用领域、熔炼和铸造领域、热处理领域、装备制造领域、产业共性技术创新体系建设领域开展工作，组成合理技术路线。

3.2 技术研究

- (1) 海洋工程用耐海水腐蚀双向铸造不锈钢材料；
- (2) 开展更多铸造双相不锈钢牌号在舰船上应用研究；
- (3) 特大型合金钢铸锭纯净、致密、均质铸造技术；
- (4) 超临界、超超临界蒸汽轮机高合金耐热钢铸件，百万千瓦水轮机转轮不锈钢铸件，第三代核电技术常规岛汽轮机组高合金钢铸件，海洋石油钻井平台、桥梁等重大工程配套铸钢件研发及产业化；
- (5) ZG1Cr10MoNiWVNbN 等高合金耐热钢材料和 C460 等低温用铸钢材料工艺研究；
- (6) 大型铸钢件砂型（芯）快速、低成本成形技术研究；
- (7) 节能降耗、再生和综合利用技术研究；
- (8) 大型铸钢件智能铸造工厂；
- (9) 大型曲面等异形件电渣熔铸成形技术；

(10) 非均质砂型 3D 打印设备及工艺研究。

3.2.1 共性技术研究

关键包含：金属材料冶炼技术，铸造工艺，热处理技术，计算机模拟技术，微合金化技术。特大型合金钢锭纯净、致密、均质制造技术，曲面异形件电渣熔铸成形技术、大型冶金轧辊复合成形技术、非均质砂型 3D 打印工艺技术。

3.2.2 关键技术研究

高效率、高适应性、高纯净度钢液精炼技术和智能化 AOD 精炼系统；高效、节能、环境保护铸件热处理及后处理技术和自动化系列装备；大型铸钢件 3D 无模造型技术及装备；高温合金燃气轮机叶片精铸芯壳制造技术和凝固梯度控制技术；大型二维电渣板坯制造技术；高品质大型冶金轧辊制造技术。

4 关键项目

4.1 工程目标

水电、核电、冶金轧机、超超临界燃煤、大型船舶（含军用舰船）、大型冶金设备、高速机车等。

4.2 工程内容

第二代半到第三代核电项目配套常规岛汽缸、阀体、隔板等大型铸钢件，AP1000、CAP1400、CAP1700 装备国产化；单机容量在 70~100 万千瓦大型水轮机组乌冬德、白鹤滩等发电设备配套叶片、上冠、下环等不锈钢铸件；超临界、超超临界电厂建设项目配套低合金钢外缸和高合金耐热钢阀门及内缸铸件；大型桥梁、石油钻井平台、矿场建设等工程项目配套机架、壳体、端盖等大型碳钢铸件；

大功率船用发动机设备配套铸钢件；高铁用高速大功率机车铸钢件。

5 政策提议

提议在钢液冶金质量提升、新型造型材料应用、计算机辅助设计、绿色制造等几大领域给支持，对一些高端领域实现以高端铸造方法替换铸造及其它制造方法工程化评价给支持。

第 2 章 铸铁

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

铸铁量大面广，企业近 2 万家，中国铸铁件产量为 3380 万吨（其中，灰铸铁 2080 万吨，球墨铸铁 1240 万吨，可锻铸铁 60 万吨），占当年铸件总产量 4620 万吨 73.2%；球墨铸铁在铸件中所占比重由 25%增至 26.8%，球墨铸铁和灰铸铁百分比由 0.497 上升到 0.596。中国铸铁行业在原辅材料、工艺装备、生产技术、检测控制等方面均已含有生产高端铸铁件能力。

（1）质量控制和检测（尤其是在线检测）水平稳步提升；

（2）原辅材料供给品种和质量有了很大改善；

（3）计算机 CAD、CAM、CAE 和炉前热分析等技术手段日益受到重视，应用逐步增加；

（4）部分骨干企业规模、装备和技术水平已达成世界一流水平，并在国际竞争中取得显著优势

（5）部分产品性能达成了国际优异水平；

(6) 高铁机车转向架轴箱、变速箱、电机壳等零件，风电轮毂、底座和数控机床横梁等关键零部件已批量生产和应用；

(7) 年产铸铁件万吨以上、生产设备较优异、质量较稳定厂已达上百家，多采取电炉或冲天炉-电炉双联熔炼，配有炉前氮氢氧测定仪、真空直读光谱仪和扫描电镜等优异设备和检测手段；

(8) 一大批企业使用了国际水平熔化、造型和检测设备。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

工业发达国家铸件产量已从金融危机中恢复过来，铸造厂任务饱满，生产规模 and 专业化程度高，铸件综合质量和技术经济效益好。关键表现在：

(1) 普遍采取 CAD/CAE/CAM，重视经过产品数值模拟和建立生产基础数据库等进行产品和工艺前期优化设计，实现产品研发设计数字化，铸造自动化水平普遍较高；

(2) 在造型、制芯方面，采取机械手，用视觉系统监控组芯过程，铸件尺寸精度高，加工余量小；

(3) 在铁液熔炼方面，除了采取光谱分析之外，重视采取热分析技术，对炉前铁液质量进行正确控制，包含化学成份如碳含量、硫含量等，同时测量铁液 N、H、O 含量，铁液质量稳定，化学成份波动小；

(4) 采取电炉熔炼、喂丝法球化和孕育处理工艺，整个熔化、球化和孕育处理过程连贯，数字化程度高，没有镁光烟尘；

(5) 经过微量合金化和特殊铁液处理技术，能够稳定控制铸件组织和性能，内在质量好、精度保持性好；

(6) 排放低，环境保护达成国际优异标准。

“中国制造 2025”已经公布，它终极目标是把互联网、物联网引入制造业，使产品生产达成高技术、高质量、高效率、智能化。未来铸造行业发展趋势是向大型化、轻量化、正确化、智能化、数字化、网络化及清洁化方向发展，而技术含量高高端铸铁件将成为发展方向。

1.3 中国外差距

中国铸铁厂除了多而分散、产能过剩、两极分化外，和工业发达国家相比，差距关键表现在：

(1) 质量稳定性、一致性差是中国铸铁件生产突出问题：相同碳当量，灰铸铁强度低 1 级；铸件尺寸精度低 1-2 级，表面粗糙度差 1 级；废品率高，铸件缩孔、缩松和变形问题日益突出；铸铁件弹性模量和残余应力等指标，长久未列入验收范围；

(2) 铸铁行业专业化生产程度不高，数字化、智能化水平低；

(3) 大型、厚大断面、高端铸铁件质量控制技术有待提升；。

(4) 蠕墨铸铁应用存在差距；

(5) 10t/h 以上大型热风水冷连续式冲天炉国产化及应用；

(6) 环境保护意识差，污染大、操作人员劳动强度大。

1.4 问题分析和处理思绪

加强新材料、新工艺和新技术研发和推广应用。提升企业数字化、智能化水平，采取优异管理软件和方法。加强产品结构、产业结构调整，实现产品专业化和经济规模化。重视人才培养、加强自主创新。轻量化、清洁化生产，走可连续发展绿色铸铁行业发展之路。

2 发展目标

2.1 铸铁行业规模

铸铁产量持平或略有增加（其中，一般灰铸铁产量降低，球墨铸铁、蠕墨铸铁产量增加），铸铁材质结构连续改善。各材质铸铁件产量目标，见表1。

表 1 各材质铸铁件产量目标

年份	铸铁件产量/万吨	灰铸铁		球墨铸铁		可锻铸铁		蠕墨铸铁	
		产量/万吨	占比/%	产量/万吨	占比/%	产量/万吨	占比/%	产量/万吨	占比/%
2025	3380	2080	61.5	1240	36.7	60	1.8		
	3500	1920	55	1450	41	60	2	70	2
	3600	1700	47	1700	47	60	2	140	4

铸铁企业数量：从现在 1.7 万家到降低到 1 万家左右，到 2025 年达成 6000 家左右。

企业平均产量规模：到，从 1926 吨/家增加到 3500 吨/家；2025 年，平均规模为 6000 吨/家。

2.2 铸铁种类

到，球墨铸铁件年产量占铸铁件总产量百分比达 41%以上，球墨铸铁和灰铸铁之比达成 0.75，ADI 铸件年产量占球墨铸铁件产量 5%以上，蠕墨铸铁产量达成 70 万吨，高端铸铁件占铸铁件产量 20%以上。到 2025 年，球墨铸铁件占铸铁百分比达成 47%以上，球墨铸铁和灰铸铁之比达成 1.0，ADI 件年产量占球墨铸铁件产量 10%以上，蠕墨铸铁产量达成 140 万吨，高端铸铁件占铸铁件产量 25%以上。

2.3 技术进步、自主创新

（1）掌握大型及关键设备零部件铸造技术，实现国产化率 98%以上。

（2）实现核电、轨道交通和汽车等关键、复杂、高精度铸铁件批量生产。

3 发展关键

3.1 技术路线

（1）经过对大型及关键铸件生产中关键技术研究，掌握生产关键技术，并将技术加以推广应用，从而提升中国铸铁行业整体制造水平。

（2）开展新材料研发和机理研究，进而掌握高性能新材料制备技术和相关理论知识，并针对新材料制订对应标准，提升我们行业地位。

（3）针对提升铁液质量开展研究，掌握铁液精炼和净化技术，和高效稳定球化、孕育工艺及检测手段。

3.2 技术研究

3.2.1 关键技术研究

中国高级数控机床、核电、高铁、机器人等战略新兴产业发展对铸件质量、可靠性、精度保持性和可追溯性等提出了新、更高要求，需要加强关键技术研究。

(1) 超大断面球墨铸铁件技术和装备研究，超大断面球墨铸件指重量超出 100 t，壁厚在 300 mm 以上，要求组织：球化等级 2~3 级，铁素体含量 $\geq 90\%$ ，碳化物+磷共晶 $\leq 0.5\%$ ；如 QT400-18 材质铸件性能指标要求在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功 $\geq 12\text{ J}$ 。处理百吨级球墨铸铁核废料罐(要求断裂韧性 $K_{IC} \geq 50\text{ N/mm}^2 \cdot \text{m}^{1/2}$)生产所需技术和装备问题；

(2) 高精度及精度保持性高机床床身铸件批量生产技术研究；

(3) 开发数字化铸铁车间制造实施系统，建设数字化示范车间；

(4) 蠕墨铸铁在线检测和控制技术研究；

(5) 等温淬火球墨铁件（要求等温淬火时盐浴槽温度波动范围在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内）稳定生产技术和装备研究；

(6) 铸铁材料、铸造工艺数据库系统研究和推广应用；

(7) 10t/h 以上大型热风水冷连续式冲天炉研制和生产应用；

(8) 大型、复杂、精密、低成本铸铁件制造技术集成创新。

3.2.2 共性技术研究

(1) 材质方面。研发高性能新材料，除开发新产品外，还应加强对铸铁技术基础理论研究，形成完整理论、技术和生产资料，关键有：硅强化铁

素体球墨铸铁；等温淬火球墨铸铁（ADI）；蠕墨铸铁；高强度高韧性珠光体球墨铸铁；高强度低温高韧性铁素体球铁；高强度高弹性模量低应力灰铸铁特种性能要求铸铁，如耐磨、耐热、耐蚀、 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温铸铁及功效材料等；建立完善铸铁材料数据库，为机械设计师等提供全方面可靠数据，选择最好材料。

(2) 工艺方面。研究近净成形工艺，提升铸件精度和表面质量；确保铸件轻量化造型和制芯工艺；采取不一样工艺方法提升铁液质量，取得高温、纯净铁液；完善“短步骤”熔炼工艺，使高炉铁液直接应用于铸管等铸件大批量生产；提升生产过程数字化和智能化水平来提升铸件产品质量稳定性和一致性；建立行业通用或针对企业生产实际铸造工艺管理数据库。

(3) 质量方面。加强企业对工序技术规范制订和以后智能化生产可用生产数据统计、管理、分析等，建立生产过程数据管理和分析系统；加强铸铁件应力和变形研究，逐步把弹性模量和残余应力等指标纳入验收范围；完善对高端铸件产品质量控制指标；重视铸件表面缺点修复技术研究。

4 关键项目

4.1 关键项目

关键项目见表 2，关键应用在高级数控机床、核电、高铁、机器人等战略新兴产业所需要高性能铸件及其关键制造技术。

表2 关键项目

项目分类	内容
------	----

序 号		
1	高性能铸铁材料 和工艺	高强度高塑性球墨铸铁材料研究
		硅强化铁素体球墨铸铁研究
		高强度低温高韧性铁素体球墨铸铁材料研究
		等温淬火球墨铸铁（ADI/CADI）材料研究
		合金蠕墨铸铁研究
2	高质量纯净铁液 熔炼技术	高强度高弹性模量低应力灰铸铁材料研究
		铸铁材料数据库系统研究和推广
		炉前铁液质量检测和控制技术
3	铸件质量管理和 控制技术	铁液精炼、过滤、净化技术
		残余应力检测装置改善和推广
		弹性模量等关键性能指标正确检测方法研究
		时效处理工艺和设备优化改善
4	缺陷预防和表面 修复技术	等温淬火热处理装备开发
		蠕墨铸铁在线测控装备研发
		铸件产品缺点管理和分析系统推广
		铸件表面修复技术和设备自动化研究

4.2 关键产品

百吨级球墨铸铁核废料罐；核电、轨道交通、高铁用高级球墨铸铁件；高级数控机床用高精度及高精度保持性机床铸铁件；高气密性液压铸件；-50℃及以下低温球墨铸铁件；ADI 齿轮和曲轴；8MW 风电铸件；长 20 m 左右大型机床铸件；蠕墨铸铁发动机缸体、缸盖、制动盘、制动鼓；大型船用发动机机体；大型燃气轮机铸铁件。

5 政策提议

- （1）继续实施智能装备制造发展专题等科研政策，支持铸造行业数字化车间、数字化工厂建设，推进铸铁行业关键领域和关键企业发展。
- （2）推广标杆企业优异技术和经验，提升铸铁企业整体水平。
- （3）重视铸铁行业作用和地位，对生产中亟需处理共性问题应给支持、立项。

第 3 章 铸造有色合金

铸造有色合金，是用以浇注铸件有色合金，是铸造合金中一类。在航空、航天、船舶、汽车、轨道交通、化工、能源、电子电器和运动休闲等领域有着广泛应用。现在应用最为广泛是铝合金、镁合金、铜合金、钛合金和高温合金。因为这五种合金成份、密度、熔点差异巨大，熔炼和铸造过程完全不一样，所需设备和造型材料也不一样，所以下内容根据合金种类分别叙述。

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

铝合金：精炼处理方面，开发出“氩气旋转喷吹精炼技术”，除气效果愈加好，更环境保护、更安全,有效提升冶金质量; 开发出稀土-惰性气体(氩)联合去气新方法。变质处理方面，研制成功 Na 盐和 Ba 盐复合长久有效变质剂，P 酸盐-Sr 盐复合变质处理，含有变质见效快，效果好，抗衰退能力强优点。新材料方面，研发成功了颗粒增强 SiC_p 铝基复合材料。新技术方面，半固态铸造技术中浆料制备和成形方面有所突破，喷射成形仍处于前期研究阶段，电磁铸造能细化晶粒和提升表面质量，提升铝合金固溶度。

铜合金：中国很多单位研究 Cu-Cr-Zr 系新型高强高导铜合金接触线，突破合金成份设计、非真空下合金熔炼、非真空下大盘重铸坯铸造、铸坯变形和相关热处理等难题。已经取得较大突破，部分产品已经应用于京-沪高铁。CuNi10Fe 铜镍合金，

以其良好耐海水腐蚀性能和抗海生物污损性能应用于海水管路系统。

镁合金：开发了多个高性能稀土镁合金材料，航空航天用高强耐热 Mg-Gd-Y-Zr 系镁合金材料在性能方面已经达成国际优异水平。在镁合金熔体净化方面，开发了新型非熔剂保护熔炼技术和稀土元素添加工艺，开发新型镁合金陶瓷过滤技术及相关装置，开发了镁合金吹气净化技术和相关装置。开展了超轻镁锂合金研究。

钛合金：开发了 TC21 高强韧钛合金，为以后吨级工业规模铸锭棒材研制奠定了坚实基础。中国研制出近 α 型船用耐蚀钛合金 Ti75、Ti31、Ti-B19、Ti91、Ti70 和 Ti80。中国自行开发高 Nb 钛铝合金也开始应用。

高温合金：研制了燃气涡轮发动机用抗腐蚀定向凝固柱晶合金。现在，正在研制第二、三代定向凝固柱晶合金。北京航空材料研究院研制了第三代单晶高温合金 DD9，该合金力学性能和国外第三代单晶高温合金力学性能相当，并开始探索第四代单晶高温合金。

整体来看，中国在上述五种材料方面开展了大量研究，整体向着高强、高韧性、高性能和高附加值方面发展。铝合金和镁合金还向着更轻、质量更高方向发展，铜合金向着更耐磨、更耐腐蚀方向发展，钛合金和高温合金向着使用温度更高、成本更低方向发展。开发了系列合金和对应铸造工艺，一些点上达成国际优异水平，整体面上还是以跟踪为主。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

铝合金：精炼处理，国外出现了一个旋转喷射熔剂法，集精炼处理、钠变质处理、磷晶粒细化处理等于一体，且对环境无不利影响，成本费用适中。美国 Almax 企业采取了惰性气体就地预热、惰性气体对铝液进行摩擦搅拌、预防气泡聚集等方法，达成净化效果，已用于航空航天合金领域。变质方面，国外用 P-RE 复合变质处理活塞用 Al-Si 合金。新材料方面，7085 铝合金是 Alcoa 企业成功研制一个新型超高强铝合金。

铜合金：德国、西班牙等欧洲国家用是铜镁合金接触线，采取水平连铸加轧制工艺制造；法国等普遍使用铜锡合金接触线，采取连铸连轧加工工艺；日本在高速电气化铁路建设，铜合金接触线研究方面处于优异水平。

镁合金：高强耐热镁合金是国外关键研究方向，IBM 企业加工镁锂合金应用在 Saturn V 火箭计算机室和双子座宇宙飞船上，在军事上 DOW 企业开发 Mg-14Li-1.5Al-0.08Mn 用于加工 M113 军用运输车壳体。镁锂合金还被德国、日本等国科学家开发用于医疗器械、电子产品等用途。

钛合金：波音 777 上惠普 4084 发动机和空中客车 A-330 惠普 4168 发动机塞子及喷嘴使用也是 β -21S，高强度铸造钛合金 β -21S 应用使每架波音 777 飞机减重大约 74 kg。另外，超音速民航机设计巡航速度为 2.14 马赫，载客 300 人，还将使用高强度钛合金 Ti6-22-22S。在低温钛合金开发方面美国以后居上，开展了钛合金低温力学性能方面系统研究，现处于世界领先水平。

高温合金：

国外定向凝固柱晶合金已由第一代发展到第三代，其性能水平不停提升，其所适用发动机性能水平(推重比)也在不停提升。又出现了第四代单晶高温合金 MC-NG 和 EPM-102。

整体来看，国外在五种材料研究方面处于领先地位，开发了多个合金体系，对应合金熔炼和铸造方法，而且将五种新材料大规模应用于民用和军事领域。

1.3 中国外差距

铝合金：在精炼技术创新方面和国外仍有差距；新材料方面，最大差距表现在新合金系研究，如高强度铝合金整体研发，另外，铝基复合材料研发结果已经相当多，但在应用方面和发达国家仍有较大差距。在铝合金铸造新技术方面，这部分差距更大，缺乏系统、全方面研发，包含设备、控制、软硬件开发等。

铜合金：在铜产品使用性能上和国外产品还有一定差距。铸造铜合金在海洋工程中应用还和国外存在不少差距，很多关键应用技术亟需提升。中国铜合金生产厂对产品成份正确化控制能力有待提升。

镁合金：在大型复杂铸件制造技术、凝固理论及成形工艺方面，远落后于发达国家。中国在针对镁锂合金研究基础微弱。在合金强化、腐蚀理论，组织和性能关系等方面基础理论研究较少；新合金开发基础上还处于跟踪仿制阶段，独立研究且含有自主知识产权合金品种较少。

钛合金：钛合金品种相对少。高温和高强合金

及其它牌号和用途合金相对较少。熔炼铸造设备大多为真空自耗电极电弧凝壳炉，铸造性能不好。钛应用技术远落后于国外优异国家。现在中国从事钛铸造有一定规模厂家不多，各厂家之间工艺交流不多，管理水平也各有差异。

高温合金：铸造高温合金在中国航空发动机上取得广泛应用，尽管中国研制铸造高温合金和国外同代单晶高温合金性能水平相当，但研制成功时间显著晚于国外航空制造技术优异国家，从而造成中国铸造高温合金整体成熟度低于国外航空制造技术优异国家。

整体来看，我们国家和发达国家相比还有差距，从合金设计、合金熔炼，到铸造工艺及所用设备方面，全部需要开展大量研究。

1.4 问题分析和处理思绪

以《中国制造 2025》为契机，开展有色金属高性能（更轻、更耐磨、更耐腐蚀、更耐高温、更持久等）和低成本材料研究，相关技术研究，及配套熔化和铸造设备，形成含有自主知识产权新材料、新工艺和新装备。

铝合金：国家关键发展领域及发展战略中对铸铝需求是最大机遇，部分新兴产业如高铁、大飞机、新能源汽车等对优质高性能需求量巨大，但高端铸铝件制备仍需铸造界共同努力，特殊性能、特殊结构高端铸铝件制备和国外差距很大，未来需要中国自主研发并替换进口。

铜合金：需要正确控制合金元素之间结合和分布状态。建立多元高强高导铜合金设计准则，研究

高强高导铜合金成份和组织均匀性调控机理。对

超大型舰船用螺旋桨，铸造时加强对合金元素正确控制，处理铸造缺点问题，加强熔炼方法转变，降低能耗，实现绿色生产。

镁合金：提议改变以型号为主导投入模式，加强对共性科学问题和技术研究支持力度，完善高性能铸造镁合金性能数据库。镁合金工程化技术能力微弱，必需发展针对优异镁合金材料应用特征正确控形控性制造工艺技术。缺乏技术标准，提议对已开发成熟合金系或成形技术主动申请制订国家或行业标准。

钛合金：现在耐热合金已经无法满足下一代航天器需求，海洋平台所用钛合金，既要求高抗拉强度，也需要耐腐蚀。钛铝 Ti_3Al 金属间化合物，超出 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 运行环境有用武之地。攻关高温钛合金生产关键设备，逐步摆脱对国外设备依靠。利用这些关键设备开发新型能够有明确应用方向钛合金新品种。

高温合金：长久以来，中国存在重型号研制，轻合金研究思想，造成很多合金应用基础研究缺乏，在缺乏试验数据基础上就开始研制构件使用，从而在这方面出现问题。着力推进自主研制主干铸造高温合金材料，重视铸造高温合金应用基础研究，为优异航空发动机研制提供支持。

2 发展目标

创新驱动发展，学习国外优异材料设计方法和理论，和对应铸造工艺和设备，经过消化吸收和再创新，逐步缩小中国和世界优异水平差距，争取在“十三五”期间在一些领域和方向超出国际水平。

在高性能和低成本有色合金研究、铸造新工艺开发、相关熔炼和铸造设备研制方面能够整体靠近发达国家水平。在大型、复杂和精密铸件方面，实现新突破。

铝合金：开发强韧铝合金新材料，将铝基复合材料研发结果作为工程化应用。开发铝合金铸造新技术方面，包含设备、控制、软硬件开发等。

铜合金：加强高强高导铜合金多元复合微合金化理论及相变机制研究，建立多元高强高导铜合金设计准则，针对超大型舰船用螺旋桨，铸造时加强对合金元素正确控制，处理铸造缺点问题，加强熔炼方法转变，降低能耗，实现绿色生产。

镁合金：进行全新产品创新设计和生产工艺方案设计优化。加强镁加工技术研究，提升镁合金工程化技术能力，发展针对优异镁合金材料应用特征正确控形控性制造工艺技术，满足国防和民用需求。制订镁合金技术标准。

钛合金：以满足对高温高强为关键应用目标高温、高强钛合金开发和应用，以深空探测、海洋和船舶低温、耐腐蚀钛合金为应用目标钛合金品种开发，以医疗为目标生物钛合金开发，钛合金熔炼所需关键设备自主创新，从而促进钛合金全方面应用。开发短步骤钛合金铸造新工艺。

高温合金：着力推进自主研制主干铸造高温合金材料，重视铸造高温合金应用基础研究，为优异航空发动机研制提供支持。继续发展第三代、第四代单晶高温合金，促进应用。

3 发展关键

3.1 技术路线

整体来看，技术路线还是以满足现在中国急需高性能或高附加值产品为目标，开展从合金设计到相关合金熔炼和铸造工艺为技术路线，而且兼顾未来发展趋势。

铝合金：研究不一样用途铝合金新材料开发，对铝合金精炼处理、变质剂及工艺，新型铝基复合材料，铝合金制备新技术等开展研究；针对环境保护和节能减排要求，加大投入力度；针对高速铁路、列车等含有国际竞争力拳头产品，新一代大飞机项目，对铝合金应用开展研究。

铜合金：以经典轨道交通网线和海洋工程用高性能铜合金为关键研究对象，建立一套完整轨道交通及海洋工程用铸造铜合金铸造成形体系，达成各自行业标准性能要求。基于高性能铜合金“设计-制备-加工-性能评价和寿命管理”全步骤技术路线，开展基础研究工作，处理关键科学问题。

镁合金：以航空航天、国防军工和汽车产品研发为牵引，以开展镁-稀土（尤其是重稀土）系和镁锂系新型合金强化、耐热机制研究和成份设计为关键，研制出高强耐热铸造镁合金和超轻铸造镁锂合金。开发高强耐热铸造镁合金和超轻铸造镁锂合金，镁-稀土合金及制品工程化。

钛合金：满足对高温高强为关键应用目标高温、高强钛合金开发和应用，以深空探测、海洋和船舶低温、耐腐蚀钛合金为应用目标钛合金品种开发，以医疗为目标生物钛合金开发。钛合金熔炼所需关键设备，对钛合金熔炼和生产所需设备是根本，然后对钛合金铸造用造型材料研究也应该跟上，从而

促进钛合金合金全方面应用。

高温合金：对定向凝固柱晶高温合金来说，系列化发展合金以适应不一样需求。对于单晶高温合金，在第一代、第二代单晶高温合金服役应用基础上，做好工程应用研究，继续发展第三代、第四代单晶高温合金，促进应用。

3.2 技术研究

3.2.1 关键技术研究

铝合金：针对现在中国铸造铝合金发展中存在关键问题，结合国家关键产业未来发展需求，铸造铝合金应开展研究内容包含以下方面：①半固态铝合金、铝合金复合材料、高强韧铝合金新材料开发和设计研究，关键掌握铸造铝合金新材料体系，得到合金成份对其组织和演变影响特征，掌握合金成份和性能对应关系；②大型、薄壁、特厚、高复杂结构铝合金铸件制备工艺及关键技术研究；③铝合金铸件凝固及固态相变过程组织演变计算机数值模拟技术开发。

铜合金：以高强高导性能需求为导向，结合第一性原理、分子动力学理论，综合考虑成份、组织和性能对应关系，对铜合金进行成份设计和组织结构设计。以高强耐蚀性能需求为导向，对铜合金进行成份设计和组织结构设计，关键研究不一样微量元素对腐蚀性能影响，开发易铸造高强高耐蚀铜合金。改善熔炼及加工装置，以提升生产效率，降低劳动强度，增加经济效益同时降低能耗，降低污染，实现绿色制造。

镁合金：开发高强耐热铸造镁合金和

超轻铸造镁锂合金；突破镁-稀土合金大容量熔炼和净化技术，突破大规格铸锭铸造关键技术，突破直径 500 mm 铸锭冷却技术。高性能镁合金用转移涂料及涂层转移制芯技术。研发镁-稀土合金专用熔化、精炼、输送一体化装备，建立大型铸锭连铸装备。开展大型复杂精密铸件制造技术。

钛合金：研究新铸造钛合金品种，尤其是高强高温合金，研究更高使用温度 TiAl 金属间化合物新材料，和耐腐蚀钛合金等。钛合金精密铸造技术，陶瓷型及精密铸件大型化研发。能够适合铸造 TiAl 金属间化合物新造型材料开发。短步骤低成本钛合金制备和铸造技术。

高温合金：研制新型等轴晶铸造高温合金，开发高温合金大型复杂薄壁铸件热控凝固技术和细化工艺。发展更高性能水平定向凝固柱晶高温合金，发展抗腐蚀定向凝固柱晶高温合金。发展综合性能优异单晶高温合金，研究出超出现有合金强度和承温能力新型单晶高温合金。

3.2.2 共性技术研究

铝合金：以铝合金替换铜合金、钢铁材料合金铸件结构设计及制备工艺技术。铝合金铸件浇注成形过程实时监测及可视化技术研究，实现浇注成形过程中对含气量、温度、体积分数及凝固状态实时监测，并经过可视化技术完全实现凝固成形过程实时再现，进而掌握和控制铸件制备。

铜合金：掌握熔体净化、除气造渣关键工艺参数，关键研发新型高效保护渣配以惰性保护气氛替换真空条件，经过施加电磁场调控铜合金铸造过程以取得均匀成份和组织，降低铸造缺点。

镁合金：高性能铸造镁合金成份优化设计、计算；铸造过程计算机仿真技术。

钛合金：钛合金熔炼关键设备研究，研发新真空熔炼铸造设备，发展其它新熔铸方法，尤其是真空感应水冷铜坩埚凝壳炉普及应用推广，依据铸件形状、尺寸及壁厚等原因探索实践适宜离心转速确保金属钛及钛合金铸造性能。开发出钛及钛合金废料回收重熔新技术，确保在降低成本同时提升产品质量。

高温合金：高冶金质量熔炼工艺和设备，将合金中 O、N、S 等杂质元素含量控制在 5×10^{-6} 以下。高温梯度定向凝固技术，能够使同一材料最大程度发挥材质潜力，也能够提升单晶叶片合格率和生产率，使叶片可靠安全使用。

4 关键项目

拟开展关键项目，关键以处理现在中国急需新产品和新技术，能够产生巨大经济效益和社会效益产品或技术为目标。

铝合金：汽车及新能源汽车轻量化铝合金铸件制备技术；铝基碳纤维复合材料成份设计、加工设备、制备工艺优化；

铜合金：轨道交通尤其是高速列车用接触网高强高导铜合金成份设计及制备技术研发；大型舰船用螺旋桨成份设计及关键制备工艺研发；

镁合金：高强耐热耐蚀镁合金机匣及航空发动机进气涡轮盘研制；铸造镁锂合金及其液态成形技术研究和应用开发；

钛合金：开发新型低成本钛合金熔炼复合设备；

开发钛铝合金新品种，短步骤铸造和成形技术
高温合金：面向需求各类优异铸造高温合金母合金；优异航空发动机和重型燃气轮机单晶涡轮叶片、定向柱晶叶片。

5 政策提议

（1）加强以铝基碳纤维复合材料等的关键新材料研发投入和支持力度，形成中国在铝基新材料制备国际领先优势，掌握关键制备技术，推出一批基于铝合金新材料铸件产品。针对特殊性能、特殊结构铝合金铸件，应予专题关键支持。

（2）提议政府、企业、学术单位开展“产学研”协作，三者进行直接有效合作，有明确目标地针对具体铸造铜合金件开展研究，政府以市场及发展需求为导向，关键企业为支撑，高校进行科学研究。

（3）依据镁材料科技发展基础和现实情况，提议组建由高校、科研院所、企业、国防总体所及国防用户单位等参与协同创新团体，建立统一领导、计划合理、协调高效、优化配置、目标集成镁材料科技发展专题组织管理体系。

（4）加大投入，开发大型优质钛合金坯料制备技术，建立高效、短步骤钛合金加工技术。继续加强钛推广应用，包含生物医用钛、汽车用钛、建筑用钛，船舶用钛等。钛工业逐步趋于国际化，企业竞争和吞并猛烈，要制订适时战略和对策。发展竞争力更强钛合金，发展方向是高性能化、多功效化和低成本化。

（5）重视铸造高温合金研究，提升技术成熟度，为优异航空发动机研制提供支持。重视发展含

有中国自主知识产权铸造高温合金，完善铸造高温合金体系。

第 4 章 铸造金属基复合材料

1 中国外发展现实状况及发展趋势

有色金属基复合材料含有高比强度和刚度，良好耐磨性和阻尼性，在工程和交通运输等领域有着很广泛应用。金属基复合材料还含有很好可设计性，经过改变增强体类型、表面状态、体积分数和基体材料，就能够满足不一样应用领域服役需要。

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

中国在 20 世纪 80 年中期就开展了铸造复合材料方面研究，并取得了一定结果，但所制备材料物理性能和发达国家相比存在较大差距，另外，还难以进行大规模应用和生产。东南大学试制了陶瓷纤维增强铝基复合材料活塞，并将其应用于汽车发动机、大马力柴油机上，使活塞寿命提升了 3~5 倍，发动机功率也显著提升，汽车油耗和尾气排放大大降低。和一般铝合金材料相比，这种陶瓷纤维增强铝基复合材料高温抗拉强度提升了 20%~40%，线膨胀系数降低了 20%。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

Alcan 企业于 1995 年生产 SiC_p/Al 复合材料汽车刹车片并在丰田汽车中得到应用，Cercast 企业生产 SiC_p

/A357 复合材料已经应用于飞机摄像机方向架上,美国开发了 SiC_p/Al 复合材料制造汽车齿轮箱。俄罗斯在此方面研究也走在前列,其航空航天总部已成功地将 SiC_p/Al 复合材料应用在飞机起落架和翼前缘加强筋上。日本关键开发了铝基复合材料在汽车零部件中应用。

1.3 中国外差距

国外在铸造复合材料方面研究较早,取得了较多应用。中国铸造复合材料开展工作关键全部侧重于基础研究,对中试到工业生产步骤,缺乏对应支持和生产企业参与,制约了铸造金属基复合材料生产和应用。中国铸造复合材料应用显著落后于工业发达国家。

1.4 问题分析和处理思绪

现在,复合材料产业竞争很猛烈,伴随大量聚合物复合材料发展,传统金属材料不仅需要本身发展和完善,还面临大量高性能非金属材料竞争。铸造界要和工程界加强联络和沟通,充足了解对铸造复合材料需求,强化产学研合作,围绕关键产品开展中试和生产工作,加紧现有成熟铸造复合材料技术产业化转移,紧跟国际优异水平,深入提升工艺稳定性和复合材料性能。同时,开拓创新,研发含有自主知识产权铸造复合材料制备技术和生产工艺。

2 发展目标

2.1 铝基复合材料

“十三五”期间,需要深入提升铸造铝基复合

材料比强度、比刚度等性能,同时降低生产成本,有效控制铸造过程中基体和增强颗粒之间界面反应,同时还需要突破铝基复合材料机加工和回收利用等技术问题。高强韧铸造铝基复合材料(以 A356 合金为基体)应达成以下关键指标:室温拉伸强度 $\geq 330 \text{ MPa}$,屈服强度 $\geq 275 \text{ MPa}$,伸长率 $\geq 12\%$;铸件合格率 $\geq 98\%$ 。耐热耐磨铸造铝基复合材料应达成以下关键指标:室温拉伸强度 $\geq 290 \text{ MPa}$,高温(350°C)拉伸强度 $\geq 110 \text{ MPa}$;产品成品率不低于 90% 。

2.2 镁基复合材料

铸造镁基复合材料在高于镁熔点条件下制备,镁基体和增强体之间通常浸润性差,甚至不浸润,必需设法对纳米颗粒进行合适表面处理以改善和基体浸润性,但须重视外加增强体在高温下发生界面反应,同时避免添加过程中镁氧化。对于铸造镁基复合材料,以后数年间要关键处理界面反应、高温氧化和界面浸润性等关键技术问题,高性能铸造镁基复合材料(以 ZM5 合金为基体)室温拉伸强度 $\geq 300 \text{ MPa}$,伸长率 $\geq 3\%$ 。

2.3 铜基复合材料

现在,即使能用于制备铜基复合材料增强体种类较多,但这些增强体和铜基体润湿性不好,且生产成本偏高,所以,迫切需要寻求新高性能、廉价增强体材料,处理其和铜基体间界面结合问题,开发新型工艺简单、成本低廉铜基复合材料制造技术,提升材料性能和生产率,降低生产成本。“十三五”期间,铸造铜基复合材料应达成关键性能指标有:

拉伸强度 ≥ 600 MPa，导电性 $\geq 80\%$ 纯铜。

2.4 钛基复合材料

钛基复合材料以其高比强度、比刚度和抗高温特征，在未来航空航天技术上有着强大应用潜力，是一项高难度、长远而带有方向性高技术，必需给足够重视。制备高性能复合材料，是钛基复合材料发展目标，但钛及其合金性质活泼，它几乎能够和全部陶瓷增强相发生反应，反应严重时破坏增强相和基体间界面结合状态，影响复合材料力学性能。所以，降低和抑制基体和增强相相互作用是铸造钛基复合材料组成和制备过程中需关注问题。铸造钛基复合材料未来产业化关键性能指标：弹性模量 115~125 GPa，屈服强度 700~1 000 MPa，抗拉强度 900~1 200 MPa，伸长率 3%~5%。。

3 发展关键

3.1 技术路线

采取铸造工艺制备复合材料，关键有搅拌铸造法、挤压铸造法、浸渗法、原位（或内生）复正当，和用于回转体零件离心铸造法。

3.2 技术研究

3.2.1 关键技术研究

3.2.1.1 搅拌法制备工艺完善和优化

颗粒增强金属基复合材料因其含有增强体成本低、材料性能各向同性、制造成本低，可应用传统铸造技术大规模生产，还含有高比强度和比模量，和耐磨、耐热和耐腐蚀等优良性能，多年来其机械加工工艺也得到长足进步，深入确立了其优势地位。

深入完善搅拌法制备工艺，加紧该技术产业化开发。

3.2.1.2 浸渗制备工艺

熔体浸渗法制得材料密度比较均匀，熔融金属冷却快，制备过程周期短，减轻了颗粒界面反应，材料性能较高，能够制备出高体积分数增强体金属基复合材料，同时能够减轻或填补疏松、气孔等铸造缺点。瞄准该技术适用材料和零件，拓展工艺技术应用。

3.2.1.3 原位反应法

原位反应法避免了传统工艺中将增强相直接加入基体时，因为基体和增强相润湿性差，易出现缩孔缩松等缺点等问题，简化了制备工艺，从 20 世纪 80 年代中后期以来，引发材料研究人员广泛爱好，得到大量研究，就继续强化反应过程调控，最终实现对材料性能可控制备。

3.2.1.4 局部复合材料

零件失效常常是因为表面或局部部位损伤引发，所以，只需要提升零件表面或局部区域性能，就能有效延长零件服役时间。结合铸造有色金属特点，研发适用反应体系和制备工艺技术。

3.2.2 共性技术研究

复合材料全部是由两种或两种以上材料复合而成，不一样材料复合方法、材料之间界面、材料相互分散方法等全部影响材料性能，怎样对复合材料性能进行估计和控制，也是复合材料研究热点；其次，还要考虑材料循环利用，以下为未来铸造有色金属基复合材料研究共性技术。

(1) 界面结合。铸造金属基复合材料通常是以颗粒、晶须、纤维为增强体, 深入探索控制增强体和基体界面行为有效手段, 优化界面结构, 提升“界面”对材料性能贡献。在侧重于增强体和基体结合界面及增强体在基体中分布研究之外, 强化对基体和增强体性能同时提升研究。

(2) 界面反应。研究增强体和金属液界面润湿性和反应程度控制路径, 尤其是在高温制备条件下界面反应需控制在一个适宜程度。

(3) 创新工艺。重视不一样工艺技术结合和融合, 开展新型铸造复合材料合成、成形工艺技术研究, 研究低成本、短步骤复合成形技术, 简化制备工艺, 深入降低生产成本。

(4) 性能估计。借助现代计算机模拟技术, 对金属基复合材料热力学和动力学、强韧化机理和基体和增强颗粒在外力作用下变形及失效机制等进行深入研究, 建立相关模型, 指导复合材料设计和制备。

(5) 重视应用。在试验研究基础上, 重视制备工艺放大和工程化研究, 应结合实际工程应用选择合适铸造成形工艺方法。

(6) 循环利用。处理金属基复合材料和环境适应性问题, 实现复合材料废料回收和再生循环利用。

4 关键项目

铸造铝、镁、铜、钛基复合材料应用领域广, 但不一样应用领域对材料性能要求差异也很大。另外, 复合材料制备多年来也朝着不一样方法复合方

向发展, 如原位反应浸渗法, 在浸渗过程中发生一定反应, 生成原位复合材料; 定向增强复合材料, 采取含有定向孔结构陶瓷增强体制备复合材料等。以后铸造有色金属基复合材料发展, 应关注部分关键技术和产品。

铸造有色金属复合材料是一个有巨大发展潜力材料, 也是目前材料研究热点内容, 部分产品已经实现了工业化规模生产。但现在铸造有色金属复合材料过窄应用领域已极难适应该代工程结构要求。依据不一样工作条件和性能要求, 选择合适基体和增强体进行优化设计, 以拓宽铸造有色金属复合材料应用领域, 是需要处理关键问题。结合国家发展战略和人民群众日常生活需要, 围绕航空航天、高铁、城铁等交通运输行业, 新能源汽车和汽车轻量化, 海洋工程等关键领域开展研究, 关注铸造有色金属复合材料性能和功效多元化、材料制备和成形技术一体化、结构和功效一体化, 主动研发可应用于电子封装、汽车零部件、航空航天、国防领域、精密和光学仪器、海洋工程等方面铸造有色金属复合材料, 主动推进钛基复合材料研发, 加紧铸造有色金属复合材料产业化。

5 政策提议

中国除树脂基复合材料外, 包含铸造有色金属复合材料在内其它复合材料, 研究和产业化基础微弱, 和国外差距相当大。中国有很多高校和科研单位从事铸造复合材料研究, 但研究历史较短, 试验室研究多, 中试和生产开发较少, 从试验室向工业化发展还有较长路。在此方面进展和突破, 需要企

业参与，和政府在资金、财税、信贷等方面引导、扶持和相关政策支持。

(1) 切实推进铸造有色金属复合材料结果孵化和产业化,提升相关产业技术水平和产品性能,拓展材料应用范围。

(2) 深入加强信息化基础条件建设,以丰富可靠材料基础数据和方便快捷交流网络确保新型铸造有色金属复合材料开发和应用。

(3) 落实相关科技创新激励方法,保障科技人员、投资者和中介机构正当利益,调动各方面投入主动性。

第 5 章 铸造耐磨材料

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

磨损是材料三大失效方法之一。材料磨损以磨料磨损最为严重,本计划所述铸造耐磨材料及耐磨钢铁铸件关键指用于磨料磨损工况材料和零部件。

现已组成技术系列并已工程化和产业化铸造耐磨材料及其技术分为以下 5 大类:

(1) 奥氏体锰钢(含 Mn13 钢系列、Mn17 钢系列、Mn25 钢和 Mn7 钢系列);

(2) 耐磨损白口铸铁(含高铬、中铬、低铬白口铸铁系列);

(3) 非锰系耐磨损合金钢(奥氏体锰钢之外耐磨合金钢);

(4) 耐磨损球墨铸铁;

(5) 耐磨损钢铁复合材料。

1.1.1 铸造钢铁耐磨材料

(1) 奥氏体锰钢。现在奥氏体锰钢还是中国外用量最大一类耐磨钢,以 Mn13 系列和 Mn17 系列为主。控制 P、Si、O、H 含量是锰钢件生产关键技术;另外为降低铸造高锰钢晶粒易粗大和柱状晶现象,V、Ti、Nb、B 和 RE 等微量元素常被加入高锰钢。

(2) 耐磨损白口铸铁。耐磨白口铸铁关键特点是高硬度和低韧性。Cr15、Cr20 和 Cr26 系列高铬耐磨铸铁在中国外均已大批量生产和应用。中国又研发了中铬硅耐磨铸铁和适于铸态应用低铬耐磨铸铁,并已批量生产和工业应用。澳大利亚研发出高硬度高碳高铬过共晶耐磨铸铁材料。

(3) 非锰系耐磨损合金钢。非锰系耐磨合金钢以硬度较高、韧性较高和强度较高,尤其是硬韧性匹配良好为特点。

(4) 耐磨损球墨铸铁。中国等温淬火含碳化物球墨铸铁(CADI),含有少许碳化物形成元素 Cr,含有较高硬度、一定韧性和良好加工硬化特征,研发工作已取得阶段结果。

(5) 耐磨损钢铁复合材料。比利时 MAGOTTEAUX 企业前后研制出“Bimetal”、“Duocast”、“Xwin”耐磨复合材料技术,用于磨辊和磨盘生产和应用,效果良好。中国双液双金属材料、镶铸复合材料实现了工业化生产和应用。陶瓷颗粒增强钢铁基耐磨复合材料是多年中国外研发烧点之一。

1.1.2 铸造钢铁耐磨材料工艺技术

多年中国研制出磨球和磨段机械化和自动化生产线。研发和应用金属型或覆砂金属型，是提升耐磨件质量很好方法之一。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

1.2.1 奥氏体锰钢

现在奥氏体锰钢还是国外用量最大一类耐磨钢。国外生产和应用奥氏体锰钢也是以 Mn13 系列和 Mn17 系列为主，其中屈服强度和耐磨性较高 Mn13Cr2 和 Mn17Cr2 耐磨钢市场用量较大。国外迄今在大冲击载荷磨料磨损工况，如圆锥式破碎机轧臼壁和破碎壁、旋回式破碎机衬板、电铲铲齿、大中型颚式破碎机颚板、大型锤式破碎机锤头和大中型湿式矿山球磨机衬板等仍关键选择奥氏体锰钢。奥氏体锰钢标准化工作起步较早，在关键工业发达国家全部有了国家标准（或相当于国家标准标准），1999 年国际标准化组织公布《奥氏体锰钢铸件》（ISO13521：1999）国际标准。其中标准含碳量 ZG120Mn17、ZG120Mn17Cr2 还被列入了奥氏体锰钢铸件国际标准。工业发达国家生产高锰钢件时比较重视冶炼过程，其冶金质量很好。

1.2.2 耐磨损白口铸铁

现在国外渣浆泵过流件、反击破板锤等仍关键选择耐磨白口铸铁。Cr15、Cr20 和 Cr26 系列高铬耐磨铸铁在国外均已大批量生产和应用。耐磨损白口铸铁标准化工作起步较早，现有 ISO 国际标准，在关键工业发达国家全部有了国家标准（或相当于国家标准标准）。

低碳含量（1.1%~2.0%C）Cr12 高铬铸铁，淬

火回火后硬度 $\geq$ HRC50，含有很好韧性，近些年在国外生产和应用逐步增多。多年高硬度过共晶高铬铸铁研发和应用取得进展，澳大利亚沃曼企业制造 A217 高碳高铬白口铸铁（5.0%C，35%Cr）硬度超出 HRC63，应用于渣浆泵过流件，使用寿命大幅度提升。

1.2.3 非锰系耐磨合金钢

现在国际上挖掘机斗齿、破碎汽车大型锤破机锤头等选择非锰系耐磨合金钢。采取 AOD 炉等精炼工艺技术以提升合金钢综合性能，是国外生产这类铸钢优异技术。

1.2.4 耐磨损钢铁复合材料

钢铁基耐磨复合材料是近些年国外耐磨材料研究开发烧点之一。前些年比利时 MAGOTTEAUX 企业研制出“Bimetal”钢铁双金属复合技术（耐磨层是硬度 $>$ HRC61 高铬铸铁，其它部位是 $\alpha_{kn} > 245 \text{ J/cm}^2$ 低碳合金钢）；开发出“Duocast”复合技术，将高硬度高铬铁镶嵌在球铁中，生产出大型立磨磨辊；研发“Xwin”技术在立磨高铬合金磨盘（磨辊）表层镶嵌高硬异质颗粒。以后又将 Duocast 和 Xwin 复合技术再组适用于立磨磨辊。此复合铸造材料磨辊和磨盘生产和应用效果良好，反应出该复合铸造材料技术是一个优异技术，值得借鉴。但在简化工艺、确保工艺稳定性和生产成本控制方面值得关注。

1.3 中国外差距

在耐磨材料技术方面，中国材料研发水平较高，工艺技术水平 and 装备水平还有部分差距。和耐磨材料工业发达国家相比，中国铸造耐磨材料产业关键差距和不足是：整体技术研发和技术改造能力较弱；企业自主创新投入严重不足；自动化和机械化生产程度有待提升；缺乏专业人才；知识产权认识和保护不足；采取优异标准组织生产不够，实施标准不严格；企业工艺技术水平参差不齐；缺乏关键技术；用新技术、新工艺生产高附加值高端产品认识不足；科技成果转化和推广应用较差；生产装备水平较低；产品质量不够稳定；熔炼和精炼水平较低，碱性电弧炉应用较少，精炼炉应用甚少；大型耐磨件制造困难；铸件粗糙度等表面质量较差；尺寸和重量偏差较大；优异检测仪器和手段应用较少；产品国际竞争力欠佳。

1.4 问题分析和处理思绪

中国铸造耐磨材料产业技术和世界优异水平还有 5~差距，产业技术研发能力不够和技术投入不足是这种差距关键原因，为此中国部分耐磨材料企业只能处于产业低端从事来料加工业。

经过加大投入、资源整合和协同创新，实现产业技术创新、改造和突破，是中国铸造耐磨材料产业升级迫切任务。

2 发展目标

“十三五”期间，中国铸造耐磨材料产业技术部分落后领域缩小和工业发达国家差距，争取整体

技术水平达成国际优异水平，部分领域技术水平达成国际领先水平。

3 发展关键

3.1 技术路线

分别从耐磨材料开发和应用领域、熔炼和铸造领域、热处理领域、机械加工领域、装备制造领域、产业共性技术创新体系建设领域开展工作，组成合理技术路线。

3.2 共性和关键技术研发

奥氏体锰钢合金设计、优化选材，在不降低韧性情况下提升耐磨性。

处理高硬度过共晶高铬铸铁件脆性问题，提升铬合金耐磨铸铁性价比。

经过合金化、精炼、铸造工艺和热处理工艺提升非锰系耐磨合金钢硬韧性能和拓展应用工况。

陶瓷颗粒和预制体增强钢铁基耐磨复合材料及制备技术。

含碳化物球墨铸铁合金设计和组织控制，提升材料硬韧性能和拓展应用工况。

金属型、覆砂金属型、离心铸造、外场辅助铸造等耐磨件生产线研制和应用。

耐磨钢铁液精炼和过滤技术研发和应用。

4 关键项目

关键项目如表 1 所表示。

表1 优先开展各领域顶级研发项目

领域	项目名称
----	------

领域	项目名称
耐磨材料开发和应用领域	高硬高韧耐磨材料
	高性价比耐磨材料
	耐磨材料成份设计理论和方法
	耐磨材料应用数据库建设

	耐磨材料成份、组织、结构、力学性能和使用性能研究
	高耐磨蚀性合金材料
	陶瓷/钢铁基耐磨复合材料
熔炼和铸造领域	耐磨材料熔体净化技术
	耐磨材料晶粒细化技术
	耐磨材料变质处理技术
	耐磨材料铸造用孕育剂
	耐磨材料铸造用变质剂
	耐磨材料铸造用复合孕育变质剂
	大型厚壁耐磨件铸造技术
	正确控制耐磨件铸造浇注技术
	适于耐磨材料铸件保温发烧冒口技术
	耐磨件金属型、铁型覆砂、离心铸造等铸造成形技术
	耐磨钢连铸连轧技术
	高硬韧耐磨材料热处理技术
热处理领域	少合金低成本耐磨材料热处理技术
	热处理工艺和耐磨材料成份、组织和性能关系系统研究
	高硬度耐磨铸铁件淬火热处理技术
	大型厚壁耐磨件淬火回火热处理技术
	双金属复合铸件热处理工艺技术
	高硬度耐磨件机加工技术
机械加工领域	高加工硬化锰钢耐磨件机加工技术
	高硬度耐磨件机加工用刀具
	高加工硬化锰钢耐磨件机加工用刀具
	高硬度耐磨件机加工用刀具
装备制造领域	耐磨材料熔体精炼系统
	机械化自动化铸球生产线
	机械化自动化铸段生产线
	耐磨件金属型、铁型覆砂、离心铸造、外场辅助等专用铸造设备
	适于耐磨件自动化连续热处理炉和生产线
	高系统刚性机床设计和制造
产业共性技术创新体系建设	构建和完善产学研合作产业技术创新联盟
	建立和完善行业协会对技术创新工作支持和协调机制
	建设支撑产业发展共性技术研发机构
	引导和支持建设企业工程技术研究中心
	建设支撑产业发展质量检测平台
	建设和完善耐磨材料标准体系
	依靠企业建设一批产学研合作产业化示范基地和科技成果转化基地
	建设产业发展需要行业技术信息交流平台

5 政策提议

增加财政经费投入和支持，激励和实践政产学研用合作机制，加强产业技术联盟和协同创新中心建设，加强共性技术创新平台建设，建设和完善铸造耐磨材料标准化体系。

第 6 章 快速铸造

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

中国铸件产量从起已连续多年位居世界第一，不过在技术水平及铸件质量等方面和发达国家相比还存在较大差距。在能源危机和环境污染日趋严重重大背景下，怎样经过铸造生产步骤创新设计，实现铸件高效、灵敏制造，已成为大家共同面临研究课题。

西安交通大学自 1993 年起就在中国率先开展光固化快速成形系统研究,并将其应用于快速铸造,利用光固化技术成形树脂模样后翻制陶瓷型壳,实现了含有复杂空心结构发动机叶片快速陶瓷型铸造。北京航空航天大学和大连理工大学研究了覆膜砂 SLS 成形技术。华中科技大学快速制造中心将激光烧结工艺和铸造工艺相结合,形成了以选择性激光烧结(SLS)为基础快速铸造工艺。北京隆源自动成型系统以快速铸造为应用对象,开展了选择性激光烧结工艺研究,成功应用于复杂航空航天铸件生产和发动机、液压件、泵阀、医疗器械等铸造零件试制及小批量制造。现在,铸型打印占增材制造技术总应用量 6.5%,含有巨大发展空间。

机械科学研究总院将数控加工技术应用于铸型成形,开发出可用于多个砂型制造快速砂型铣削技术及装备,可加工铸型最大尺寸达 5 000 mm×3 000 mm×1 000 mm,在中国一汽、广西玉柴等企业得到推广应用。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

伴随信息技术突飞猛进,各国纷纷制订了意在提升国家竞争力、培养竞争优势制造行业计划。美国政府于 1994 年底在《二十一世纪制造企业战略》汇报中指出,应经过灵敏制造强化国家制造行业实力,实现最低资源消耗下高效产品制造。基于数字化加工快速铸造是铸造行业实现灵敏制造关键路径。早在 20 世纪 90 年代,美国、日本和西欧等国家就开始研究并利用快速原型技术进行快速精密铸造。美国、欧洲等高度重视增材制造和铸造

工艺结合,已在航空航天、船舶、机床、汽车等相关领域取得应用。全欧 400 多家精铸厂家中,有 93 %以上使用增材制造技术实现快速铸造。

在发展快速成形技术方面,美国一直处于领先地位,著名高校如 MIT、Texas 大学,和一批研究机构在政府和工业界资助下开展快速成形技术研究。美国 Sandia 国家关键试验室于 1996 年前后成功将 SLS 技术应用于熔模铸造;德国 EOS 企业和美国 DTM 企业分别于 1998 和 1999 年就将聚苯乙烯(Polystyrene, PS)SLS 成形技术和熔模铸造工艺加以结合。

德国 EOS 企业早在 1996 年就在宝马企业安装了 EOSINT S 700 砂质激光烧结系统,将快速成形技术和铸造技术结合;Voxijet 企业大型砂型打印机,ProMaker 企业大尺寸面曝光光敏树脂设备,效率可达成传统快速成形方法百倍;总部在美国 ExOne 企业使用其开发喷胶法砂型打印技术来建立砂型,其耗材成本较低且成形效率高,二十四小时即可完成一套 4 缸发动机所需全套砂芯和砂型快速成形,取得砂型可直接组箱浇注。

伴随快速铸造技术不停开发,和快速铸造工艺相适应铸型材料不停出现,铸型表面质量和精度也得到快速提升。早前快速铸造技术是快速原型制造去适应铸造工艺,而伴随二者不停融合,适合快速铸造步骤铸件结构设计也被提上了日程。

1.3 中国外差距

中国快速铸造技术研究水平总体处于国际第一阵营,但在以下多个方面还存在差距:

(1) 在装备技术和成形工艺方面，铸型成形效率、强度、精度和表面质量，成形

设备可靠性、稳定性和易用性等方面还存在差距；

（2）模样及铸型材料对铸件性能指标相关键影响，然而现在中国在适用于快速铸造铸型材料方面缺乏关注和研究；

（3）在应用层面，快速铸造普及程度远不及美欧日，和快速铸造匹配铸造工艺和装备研究相对缺乏；

（4）对快速铸造成形效用评定和相适应铸件结构优化缺乏重视。

1.4 问题分析和处理思绪

现在中国铸造企业产品生产周期长、新品开发成本高，普遍缺乏优异生产手段，难以实现有效技术创新。而高等院校、科研单位即使掌握了优异技术原理，但缺乏铸件生产现场经验。应该抓住目前快速成形技术良好势头，推进快速铸造技术研发，经过高等院校、科研单位和企业通力合作，实现快速铸造在铸造行业中更广泛应用，提升中国铸造行业水平和实力。

2 发展目标

“十三五”期间，快速铸造技术发展目标是系统研发适用于不一样类型快速铸造工艺铸型材料，提升快速铸型强度和精度，发展适用于多材料和高效率铸型快速制造装备，降低快速铸造成本，提升快速铸造技术效率及工艺可靠性，形成涵盖材料、工艺和装备成套技术，将其应用于多个领域经典铸件高质量快速生产，提升中国铸造行业水平和技术实力。

3 发展关键

3.1 技术路线

（1）以复杂小型铸件快速试制为应用对象，发展和完善模样快速原型 3D 打印技术和铸型翻制技术，建立配套原型及铸型材料体系，推进快速原型 3D 打印工程化生产装备研制；

（2）以复杂小型铸件快速试制为应用对象，发展和完善砂型及陶瓷型铸型 3D 打印技术，建立适用于铸型 3D 打印铸型材料及粘结剂体系，推进快速铸型 3D 打印工程化生产装备研制；

（3）以复杂中型铸件试制或小批量生产为应用对象，发展快速砂型高效率数控铣削成形技术，完善适用于快速铸型铣削成形铸型材料体系，推进快速铸型铣削成形工程化生产装备研制；

（4）以复杂大、中型铸件小批量生产为应用对象，发展快速砂型高效率低成本 3D 打印成形技术，完善适用于快速砂型 3D 打印铸型材料及粘结剂体系，推进快速铸型高效率低成本 3D 打印工程化生产装备研制；

（5）发展和研制适用于复杂铸型快速铸造合金浇注及铸造装备，组织经典复杂铸件快速铸造技术攻关，促进快速铸造技术应用推广；

（6）针对经典复杂铸件，基于快速铸造技术对其结构进行优化，深入挖掘快速铸造技术在制造效率、产品性能上潜力。

3.2 技术研究

3.2.1 关键技术研究

(1) 适用于快速铸造技术制模及造型材料体系开发;

(2) 快速原型高精度模样高效 3D 打印技术;

(3) 快速砂型高效数控铣削成形技术;

(4) 快速砂型高质量 3D 打印快速制造技术;

(5) 高可靠性快速铸造工程化生产装备开发和研制。

3.2.2 共性技术研究

(1) 面向快速铸造铸件结构优化设计技术及 3D 打印路径设计;

(2) 面向快速铸造铸型结构优化设计及组合技术;

(3) 适用于复杂铸型快速铸造合金浇注及铸造装备研制。

4 关键项目

4.1 关键技术

(1) 面向快速铸造铸件结构优化设计技术;

(2) 快速原型高精度模样高效 3D 打印技术;

(3) 面向快速陶瓷型制造陶瓷浆料挤出成形技术和激光直接烧结成形技术;

(3) 面向快速砂型制造微滴树脂喷射灵活控制技术。

4.2 关键项目

(1) 快速铸造专用模料及造型材料研制;

(2) 快速铸造专用设备及其成形工艺研究;

(3) 经典复杂航空器舱体结构件结构优化设计及快速铸造成形;

(4) 高推重比发动机叶片结构优化设计及快速铸造成形;

(5) 经典大型船用发动机铸件结构优化设计及快速铸造成形。

4.3 关键产品

(1) 快速铸造专用模料及造型材料体系;

(2) 面向快速铸造铸件结构优化设计及 3D 打印路径设计软件系统;

(3) 快速原型高精度模样高效 3D 打印工程化生产装备;

(4) 快速砂型高质量 3D 打印快速制造工程化生产装备。

5 政策提议

加强已经有科技平台（如国家实验室、国家关键实验室、国家工程技术中心、国家工程实验室等）之间资源及信息共享，促进学科交叉融合，激励协同创新，提升科技资源合理配置和高效利用。加强基础理论研究、关键技术研发和转化应用之间衔接，提倡和激励自主创新，统筹全国快速制造技术研究和面向行业、地方产业应用协调发展，促进系统性、原创性、重大产出和高效转化。

第 7 章 熔模铸造

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

中国于 20 世纪 50—

60 年代以前苏联引进了熔模铸造工艺技术及装备,形成了中国熔模铸造工业雏形,并建立起了航空工业熔模铸造体系。研究单位和骨干企业针对航空发动机涡轮叶片熔模铸造成形工艺开展研究,在模料、陶瓷型壳、陶瓷型芯等方面取得了大量结果。1975 年,中国从英国引进斯贝航空发动机制造技术,在消化吸收过程中,实现了熔模铸造工艺材料国产化。针对高温合金定向凝固及单晶制造技术,中国也开展了长久研究,不仅开发出系列合金,还在成形工艺、凝固控制及模拟仿真方面取得实用性结果。经过技术引进和后续研发,中国在钛合金、铝合金等轻金属熔模铸造技术及大型复杂铸件整体成形方面均含有了实际生产能力。

和国际上熔模铸造技术发展类似,航空工业发展是中国熔模铸造高附加值产品生产技术发展关键源动力,相关研究单位在航空叶片及其它关键铸件生产工艺方面开展了大量工作,也主动跟踪国际上最新发展。但受制于中国工业基础及航空工业发展相对迟缓客观条件,熔模铸造技术在高端铸件生产工艺方面和发达国家还有不少差距。

熔模铸造是航空发动机和工业燃气轮机高温涡轮叶片及机匣类复杂整体铸件关键制造技术。最近十多年,中国在航空熔模铸造领域投入了大量资金,进行技术改造,装备条件焕然一新。航天、兵器系统也相继加大投入,部分民营资本也参与其中。但伴随中国型号研制任务开展,中国熔模铸造产品目标已靠近世界优异水平,缩小产品需求和工艺能力之间差距任务迫在眉睫。

20 世纪 90 年代初,台湾通常商业铸件硅溶胶

熔模铸造生产技术引入大陆,带动了出口熔模铸件生产繁荣。经过 20 多年发展,中国现在熔模铸件(不包含水玻璃型壳工艺铸件)产值已占国际总产值 20%~25%。在对外交流过程中,经过引进技术和合资方法,中国汽车涡轮增压器涡轮铸造形成了一定规模。

水玻璃型壳工艺产品质量较硅溶胶型壳工艺低,但在低成本铸件生产中含有一定竞争优势。

1.2 国外发展现实状况及发展趋势

二战时期,熔模铸造作为一个航空发动机叶片成形工艺,受到重视,并逐步发展起来。半个多世纪以来,国际上熔模铸造工艺一直伴伴随航空工业发展而不停进步,并将该工艺向其它高附加值铸件领域扩展,比如工业燃气轮机叶片制造等,形成了面向高附加值铸件生产优异材料成形技术体系。国际上熔模铸造技术优异国家,均是航空制造发达国家,欧美熔模铸造产值中超出 70%为航空铸件为代表高附加值铸件。

国际上,伴随航空发动机性能提升,对其中关键熔模铸件在高精度要求、高形状复杂性、高可靠性、超极限尺寸、特殊合金等方面不停提出新要求,促进了工艺连续进步。发达国家熔模铸造工艺含有以下特点和优势:

- (1) 工业及产学研体系完善,专业化分工明确;
- (2) 连续工艺机理研究,促进了工艺实践精细化控制;
- (3) 关键合金及关键原材料保持高水平研发。

- (4) 关键装备连续改善；
- (5) 特种方法交叉融合；
- (6) 数字化技术广泛应用。

1.3 中国外差距

中国熔模铸造技术和发达国家相比，关键差距表现在以下方面：

(1) 工艺机理研究不够深入，尤其是伴随产品要求不停提升，工艺精细化控制成为制造成败关键；工艺过程基础物理、化学改变不了解，就常常出现控制不到位，产品质量波动大问题；

(2) 关键合金和关键原辅材料和优异国家相比，还存在性能指标和稳定性方面差距；

(3) 复杂型芯制造技术落后于发达国家；

(4) 关键装备制造水平，尤其是关键控制参数不到位，影响制造工艺稳定性，国产装备自动化和可靠性程度低；

(5) 数字化技术应用不够深入，关键热物性参数积累不足；

(6) 产学研体系存在一定问题。

1.4 问题分析和处理思绪

经过多年努力，中国在部分代表熔模铸造前沿水平铸件生产上含有一定能力。比如，航空发动机定向、单晶涡轮叶片、大型钛合金机匣等。但客观地讲，中国现在熔模铸造工艺是在产品需求步步紧逼下被动前进，基础不扎实问题时有暴露，突出表现是：对关键材料和关键工艺机理性认识不足，部分工艺，如陶瓷型芯尚存在短板，特种装备，如高温温度梯度单晶炉还受制于人等。

中国熔模铸造技术大多数情况下在走引进消化吸收和仿制道路，但伴随熔模铸件应用领域越来越敏感，技术引进受到制约。另外，熔模铸造工艺步骤多，局部短板也会引发全局能力不足，必需下决心花更大力气掌握技术关键，突破材料、工艺、装备瓶颈，系统性提升工艺实力。因为体制原因，中国针对高附加值铸件研究工艺向通常商用铸件生产辐射不足，而更大数量通常商用铸件生产企业研发力量不足。应考虑建立国家关键试验室或工程中心统一组织和实施熔模铸造工艺基础研究，以快速提升中国熔模铸造整体水平。

2 发展目标

在熔模铸造工艺中，两类产品含有经典意义：一是工作温度不停提升航空发动机和重型燃气轮机高温涡轮叶片；二是尺寸不停加大航空发动机机匣。中国熔模铸造工艺发展目标应为满足中国航空发动机和重型燃气轮机研制需求，克服工艺技术瓶颈，提供合格铸件。并以此为基础，掌握高端熔模铸件生产关键技术，带动中国熔模铸造产业升级。

3 发展关键

3.1 技术路线

以航空发动机和重型燃气轮机研制为牵引

，关键突破定向、单晶叶片和大型发动机机匣熔模铸造工艺，并形成稳定质量保障和产品供给能力。在此过程中，系统开展工艺机理研究，针对模料、型壳、型芯、浇注系统、凝固控制、后处理、铸件检验等技术进行提升，实现精细化控制。结合3D打印等新技术和新材料发展，促进熔模铸造工艺创新。不停提升满足铸件要求连续提升工艺革新能力。

3.2 技术研究

3.2.1 关键技术研究

（1）下一代定向、单晶空心叶片凝固组织控制和数值模拟技术；

（2）大型、薄壁、复杂熔模铸件近净成形技术。

3.2.2 共性技术研究

（1）熔模铸造模料优化及产品技术标准；

（2）耐受高温及高活性金属作用型壳、型芯体系及相关制备技术；

（3）基于熔模铸造工艺条件传热介质热物性参数测量技术；

（4）复杂熔模铸件及特殊浇注条件下浇冒口系统设计准则；

（5）熔模铸件全工艺过程热力分析和检测技术；

（6）复杂熔模铸件缺点检测及矫形、修复技术；

（7）高可靠性要求铸件缺点敏感性分析和损伤容限设计技术；

（8）高柔性、自动化工艺装备和技术；

（9）复杂型芯系统高效、高精度清理技术；

（10）熔模铸造工艺节能、环境保护技术应用；

（11）3D打印技术在熔模铸造中应用。

4 关键项目

4.1 关键技术

（1）熔模铸造全过程、多尺度数值建模和仿真；

（2）复杂形状定向、单晶叶片凝固组织控制；

（3）钛合金新型熔炼方法及面层材料和型壳技术；

（4）面向新一代涡轮叶片复杂内腔成形用陶瓷型芯制备技术；

（5）熔模铸造工艺和其它成形制造工艺（如3D打印）交叉创新；

（6）超大型、超薄铸件整体成形及内部质量和尺寸精度控制技术。

4.2 关键项目

（1）大尺寸、复杂形状条件下定向、单晶组织制备、控制及铸件近净成形相关技术研发；

（2）超极限尺寸钛合金、高温合金、铝合金熔模铸件成形及内部质量控制；

（3）和3D打印技术相结合熔模铸造工艺提升和创新。

4.3 关键产品

（1）面向型号研制任务航空发动机和重型燃气轮机高温涡轮单晶叶片；

（2）面向型号研制任务大型航空发动机整体机匣和航天发动机钛合金进气道；

（3）满足大批量、高可靠、轻量化、更高温度下工作要求汽车涡轮增压器涡轮。

5 政策提议

改变以型号为主导投入模式，加强对共性技术研究支持力度，形成以高端熔模铸件需求为导向，关键企业为支撑，产学研合理分工熔模铸造工艺研发体系。成立熔模铸造国家关键试验室或工程技术中心，负担和组织中国熔模铸造工艺提升所需要应用基础研究。

支持关键制造企业技术研发实力提升，强化现场工艺检测和控制能力。形成关键企业技术引领和辐射功效。

专题政策支持关键原辅材料及装备专业化研发和供给。

第 8 章 压铸

1 中国外发展现实状况及发展趋势

1.1 中国发展现实状况及发展趋势

压铸是铸造工艺中应用最广、发展速度最快金属热加工成形工艺方法之一。压铸作为一个优异有色合金精密零部件成形技术，适应了现代制造业中产品复杂化、精密化、轻量化、节能化、绿色化要求，其产品已遍布汽车、机械、家电、通讯、五金等很多领域。

中国压铸从 20 世纪 50 年代开始起步，前 30 年内年增加率超出 10%。1990 年至今，年均增加 15% 以上，产量达 318 万吨。经过多年努力，中国已构建起一个完整压铸产业及其配套产业链和若干较为发达压铸工业基地，产量世界最大，成为世界压铸大国。

1.1.1 压铸件合金材料

压铸件合金材料关键以有色金属及其合金为主，压铸铝合金用量最为突出。中国除传统压铸铝合金范围扩大外，还有试验采取压铸新技术以某种变形铝合金来生产较高力学性能受力件，和汽车结构件所需特殊铝合金也在中国压铸生产中开始采取。压铸镁合金材质和性能研究深入深入，对汽车镁合金压铸件应用开发深入加大。国际上优异国家对高硅、特种铝合金、结构件用铝合金应用和研究比中国领先较多，镁合金研究和中国相当。另外，国际上对材料基础性研究要较中国更广泛和深入，结果显著，中国对此方面投入较小。锌合金压铸件产量逐步降低，多属中小零件。铜合金压铸件产量极少，中小零件较多。黑色金属及其合金压铸件在中国起步和国外相近，但中国外发展已较长期全部处于几近停顿状态。

1.1.2 压铸设备

汽车工业高速发展，大型和高端压铸件需求增加，推进了国产压铸机技术提升，高压射速度、较短建压时间、实时控制压射系统、4000 t 大型压铸机、自动化周围配套设备和压铸单元等陆续推出市场，拉近了和国外优异设备差距。但国产设备在稳定性、密封元件耐用性、精度反复性等方面和国外优异设备还有较大差距。大型两板机占领中国市场，给传统压铸机市场带来极大冲击，中国有些厂家已开始两板机研制。镁合金热室压铸机和国外差距较大，现在大多依靠进口。在压铸机自动化集成方面中国厂家开始涉足，但配套资源和处理方法上和优异厂家还有不小差距。多年来，中国自主研发了压铸和挤铸两用设备，成为国际上创新新机种。

以上内容仅为本文档的试下载部分，
为可阅读页数的一半内容。如要下
载或阅读全文，请访问：

[https://d.book118.com/69523222
4042011143](https://d.book118.com/695232224042011143)