

· 综述 ·

## 我国特种冶金产品、技术和装备的最新进展与展望



姜周华<sup>1,2</sup>, 董艳伍<sup>1,2</sup>, 刘福斌<sup>1,2</sup>, 耿鑫<sup>1,2</sup>

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 特殊钢先进冶金工艺与装备教育部工程研究中心, 沈阳 110819)

**摘要:** 航空航天、能源、石油化工、船舶、轨道交通、新能源汽车、节能环保、电子信息等领域的高端装备产业发展强劲, 对特殊钢和特种合金材料的质量和性能提出了更高的要求, 需求量激增。因此, 最近十几年我国特种冶金行业得到了快速的发展。首先, 分析和总结了我国上述高端装备制造用超高强度钢、高温合金、耐蚀合金、耐热钢、特种不锈钢、高性能轴承钢、工模具钢以及精密合金等的新需求。其次, 分析了传统特种冶金流程和几种特冶新流程的发展现状与趋势, 重点强调了与转炉/电弧炉炼钢流程相结合可以为电渣重熔和真空电弧重熔提供高洁净的自耗电电极, 也可以为真空感应炉提供纯净原材料, 用连铸坯作为自耗电电极的抽锭式电渣重熔后接轧制工艺的电渣短流程可以显著提升生产效率和降低生产成本。同时, 也简要介绍了高氮不锈钢冶炼的双联工艺和工模具钢的粉末冶金和喷射成形工艺流程。再次, 分析和总结了我国特种冶金产业发展现状, 以及新技术和新装备的进展情况。最后, 对未来十年我国特种冶金的技术发展提出了建议和展望。

**关键词:** 特种冶金; 特殊钢; 特种合金; 工艺流程; 冶金装备

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00143 **中图分类号:**TF4

## The Latest Progress and Prospect of Special Metallurgical Products, Technology and Equipment in China

Jiang Zhouhua<sup>1,2</sup>, Dong Yanwu<sup>1,2</sup>, Liu Fubin<sup>1,2</sup>, Geng Xin<sup>1,2</sup>

(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Engineering Research Center of Advanced Metallurgical Process and Equipment of Special Steel, Ministry of Education, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The high-end equipment industries in the fields of aerospace, energy, petrochemical, shipbuilding, rail transportation, new energy vehicles, energy conservation and environmental protection, and electronic information have developed strongly, putting forward higher requirements for the quality and performance of special steel and special alloy materials, and the demand has surged. Therefore, in recent ten years, China's special metallurgy industry has been rapidly development. This paper first analyzes and summarizes the new requirements of ultra-high strength steel, super alloy, corrosion resistant alloy, heat resistant steel, special stainless steel, high performance bearing steel, tool and die steel and precision alloy for the above-mentioned high-end equipment manufacturing. Secondly, the development status and trend of traditional special metallurgical processes and several new special metallurgical processes are analyzed. It is emphasized that the combination with basic oxygen furnace/electric arc furnace steelmaking process can provide high clean consumable electrode for electroslag remelting and vacuum arc remelting, and can also provide pure raw material for vacuum induction furnace. The short process of the electroslag remelting with continuous casting billet as the consumable electrode can significantly improve the production efficiency and reduce the production cost. At the same time, the duplex process of high nitrogen stainless steel smelting and the process flow of powder metallurgy and spray forming of tool and die steel are also briefly introduced. Third, China's special metallurgical industry development status, as well as the progress of new technology and new equipment have been summarized. Finally, suggestions and prospects for the technical development of special metallurgy in China in the next ten years are put forward.

**Key Words:** Special Metallurgy; Special Steel; Special Alloy; Process Flow; Metallurgical Equipment

特种冶金也称特种熔炼, 泛指转炉、电弧炉、平炉、感应炉等普通熔炼方法以外的熔炼方法。欧美各国通称“特种熔炼”(Special Melting), 独联体国家通称“特种电冶金”(Специальная электрометаллургия)或是“特种电热冶金”(Специальная электротермическая металлургия), 中国通称“特种

冶金”<sup>[1]</sup>。特种冶金是制备高端特殊钢和特种合金不可或缺的重要手段, 是区别于普通金属材料制备工艺过程的一类特殊的金属材料制备技术。狭义的特殊冶金技术主要包括真空感应熔炼(VIM)、电渣重熔(ESR)、真空电弧重熔(VAR)、等离子重熔(PAM)以及电子束熔炼(EB)等熔炼方法, 广义上讲

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(Nos.U1860204/U1908223)

**作者简介:** 姜周华(1963—), 男, 博士, 教授; **E-mail:**jiangzh@smm.neu.edu.cn; **收稿日期:** 2024-06-04

也可以包括外场冶金(电磁、电场、微波、重力、超声、振动等)、粉末冶金、喷射成形、区域熔炼、激光冶金等。本文关注的主要是前者,也就是我们特殊钢和合金领域中常用的特种冶金方法。特种冶金主要用于制备那些普通熔炼方法不能或难以熔炼的特殊金属材料,是生产高质量特殊钢及超级合金、难熔合金(W、Mo、Nb、Ta、Re)、活泼金属(Ti、V、Zr等)、高纯金属(如零夹杂钢)及近终形铸件的手段。

近年来,随着我国高端装备制造技术和产业的快速发展,高端特殊钢和合金的需要不断增加,对材料性能的要求也越来越高。因此,我国特种冶金技术与装备也需要适应这种新变化和新要求。多年来,我国的特种冶金工作者做了大量的研究工作,出版了一系列专著和教材<sup>[1-12]</sup>,并发表了多篇综述性文章<sup>[13-23]</sup>,笔者也就特种冶金和电渣重熔等方面出版了多部著作和发表过多篇综述性论文<sup>[24-33]</sup>。因此,本文就不再对特种冶金的发展历史和各种方法进行详细的阐述,重点分析总结目前我国特种冶金产品的需求、流程发展的新变化以及近十几年值得同行关注的特冶新技术和新装备,最后,对我国特种冶金技术的研发和产业发展提出一些建议,供同行们参考。

## 1 高端装备制造用特殊钢和合金的新需求

高端装备制造产业指装备制造业的高端领域,“高端”主要表现在三个方面:第一,技术含量高,表现为知识、技术密集,体现多学科和多领域高精尖技术的交叉融合;第二,处于价值链高端,具有高附加值的特征;第三,在产业链占据核心地位,其发展水平决定了产业链的整体竞争力。高端制造产业既包括传统制造业的高端部分,也包括新兴产业的高端部分,所以,涉及的领域比较广泛,主要包括航空航天、能源和电力、船舶海工、轨道交通、新能源汽车、节能环保装备、电子信息产业装备(如半导体芯片)、生物医疗设备、精密仪器、高档数控机床和基础制造装备等。高端装备制造业是以高新技术为引领,处于价值链高端和产业链核心环节的战略新兴产业。大力培育和发展高端装备制造业,对于加快转变经济发展方式、实现由制造业大国向强国转变具有重要战略意义。因此,近年来围绕高端装备用的高性能特殊钢和合金材料的需求十分旺盛,研发活跃。下面对采用特种冶金方法生产的部分典型关键材料的需求做简要分析。

### 1.1 航空航天用特殊钢和合金

高温合金是航空航天发动机的关键材料,超高强度钢则是发动机轴承、齿轮、轴承和起落架用的关键承力构件材料,代表了特殊钢材料的最高水平。另外,航空航天用弹簧、螺栓紧固件等也对质量有着很高要求。我国航天事业的迅速发展也促进了上述材料需求的大幅度提升。据2017年波音公司预测,未来20年全球将交付超过41000架新飞机,总价值约6.1万亿美元<sup>[34]</sup>。这一巨大的市场需求将为我国航空航天材料行业带来广阔的发展空间。以高温合金为例,目前,我国军用航空用高温合金市场规模超过250亿元<sup>[35]</sup>,民用国产航空发动机的成熟将为市场带来更多增量空间。目前,年需求4万吨,其中进口约2万吨。预测未来20年,需求总量约为107万吨<sup>[36]</sup>。

虽然我国航空航天用特殊钢和合金的生产技术有了长足的进步,但总体水平与发达国家尚有较大差距。就高温合金而言,我国已经能够生产750℃变形涡轮盘、第四代粉末盘FGH97和FGH98、燃烧室用变形高温合金薄带等品种,产品质量和稳定性有待进一步提高,但铸造高温合金叶片、800℃及以上变形盘、复杂薄壁机匣等产品仍然不能稳定生产<sup>[37-38]</sup>。对于超高强度钢,我国基本能够实现300M和AerMet100起落架用钢自主生产和供应,也能生产第二代航空轴承齿轮钢M50和M50NiL,但冶金质量和服役寿命不稳定,不能满足民用航空的高安全性高可靠性要求<sup>[39]</sup>。航天用高温合金和超高强度高能基本满足要求。总之,我国航空航天用特殊钢和合金的生产技术要达到国际先进水平还任重道远。

### 1.2 能源、电力和石化装备用特殊钢和合金

能源和电力领域包括油气开采和输送、燃气轮机发电、核电(第三代、第四代和可控核聚变)、先进超超临界火电、风电(尤其大型海上风电)、光伏、氢能和石化等多个领域,目前,对高端特殊钢和合金材料有强劲的需求<sup>[40]</sup>。在燃机和核电领域也是高温合金的新增长点<sup>[41-43]</sup>,但燃机用大尺寸变形涡轮盘和大尺寸定向柱晶空心透平叶片材料与精密铸造技术在我国还处于起步阶段。我国虽然也能生产油气开采和石化装备用的镍基耐蚀合金管材和板材,但与国际水平仍然差距较大,目前仍然大量进口。

高性能不锈钢在核电装备中应用广泛,如第三

代核电用主管道不锈钢材料 316LN, 第四代耐冷快堆用不锈钢 316H 以及核聚变用 316L 不锈钢, 由于其性能要求极高, 通常要求用电渣重熔工艺生产<sup>[44-46]</sup>。600 °C 及以上超超临界火电机组用耐热钢和耐热合金大多采用电渣重熔生产<sup>[47]</sup>, 用于 700 °C 先进超超临界高温合金材料则需要双真空冶炼 (VIM+VAR)<sup>[48]</sup>。目前, 我国超超临界耐热钢管和叶片的生产技术已经达到了国际先进水平, 尤其是耐热温度更高的 G115 材料设计和制备技术处于国际领先水平<sup>[48]</sup>。温度达 620 °C 的汽轮机转子 FB2 需要 80 t 以上大型电渣重熔钢锭来制造, 其中, 电渣重熔过程元素 B、N 和凝固质量的精确控制是关键技术<sup>[49-50]</sup>。该产品一直依赖进口, 国内试制刚刚起步。

### 1.3 高性能轴承钢

航空轴承钢代表了轴承钢的最高水平, 通常采用双真空冶炼工艺 (VIM+VAR), 而第三代航空轴承钢——高氮马氏体不锈钢则采用加压电渣重熔 (PESR) 生产<sup>[31,51-52]</sup>。我国和前苏联的铁路轴承钢, 包括高碳轴承钢和渗碳轴承钢, 基本都采用电渣重熔生产<sup>[53-54]</sup>。这是因为电渣钢的产品质量和疲劳寿命更加稳定。高铁轴承钢目前国内尚在开发阶段, 主要原因是高铁轴承本身仍然以进口为主。笔者认为, 采用先进的保护气氛电渣炉精确控制熔化速度, 完全可以保证高铁轴承的洁净度和凝固组织的均匀性, 满足高疲劳寿命和质量稳定性要求。另外, 电渣重熔轴承钢用于大型风电轴承和风电齿轮、盾构机轴承、精密轴承等高端轴承的制造也是一种理想的选择。因此, 电渣重熔技术在高性能轴承钢的应用前景广阔, 今后我国每年的需求量有望达到 10 万吨。

### 1.4 高性能工模具钢

工模具被誉为“现代工业之母”, 是工业生产中非常重要, 且必不可少的特殊基础工艺装备。近年来, 高品质工模具得到了越来越多地关注和应用, 如机械、电子、汽车、信息、航空、航天、轻工等制造领域。其中, 量具钢、刀具钢和模具钢是常用的工模具钢材料。2021 年全球工模具钢市场约 200 万吨, 其中高速钢约占 7%, 即 14 万吨<sup>[55-56]</sup>。我国生产的工模具钢全球市场占有率约为 60%, 即 120 多万吨, 其中模具钢 100 万吨, 高速钢 10 万吨, 冷轧辊用钢约 10 万吨。

近年来, 随着模具行业的迅猛发展, 我国模具钢行业得到了长足发展, 但是, 我国每年仍有 10 多

万吨左右的精品模具钢需要进口, 几乎占据了国内整个模具钢的高端市场<sup>[57]</sup>。国产模具钢的产品质量与进口钢相比还有较大差距: 进口模具钢的特点主要体现在纯净、均匀、组织细小、尺寸精确、使用寿命长; 而国产模具钢中的杂质元素含量较高、大尺寸夹杂物较多、碳化物分布不均匀、使用寿命较短、稳定性差。目前, 高端模具钢大部分依赖进口, 而进口钢的价格是国产钢的 2~5 倍。压铸模具和精密模具是典型的例子<sup>[58-59]</sup>。如汽车压铸模具仍然以进口的 ASSAB8407、ASSAB8418、DIEVAR 等进口模具钢为首选, 电子行业塑料模具以进口 S136、1.2316、M333 模具钢等为首选, 这种局面为国产替代进口模具钢提供了发展的空间。

新能源汽车用一体化大型压铸技术促使模具材料的高端化和大型化。2019 年特斯拉引入一台大型压铸机, 可将车身的大部分框架组装成一个大件, 用铝合金替代钢板, 实现汽车的轻量化。后车架原本由 70 个零件冲压、焊接而成, 变成了一个零部件, 成本下降了 40%<sup>[60]</sup>。未来除汽车外覆盖件外, 其余车身结构件的冲压和焊接环节均可能被压铸工艺替代。新工艺对模具材料提出了新要求: 高导热性和淬透性, 回火性能、韧性、热膨胀系数高, 低偏析、超洁净、高等向性。模具尺寸为厚度 200~600 mm, 宽度 700~1 100 mm, 今后其尺寸将达到厚度 600~800 mm, 宽度 700~1 200 mm, 据估计需要 10~30 t 的大型电渣锭才能满足单重要求<sup>[60]</sup>。同时, 需要进一步提高使用寿命, 达到 3 万~5 万次以上, 需要研制新一代钢种。目前, 大型压铸模具材料我国还不能生产, 因此, 属于新的发展机遇。

### 1.5 电子信息用特殊钢和合金

电子信息产业是当前和今后迅速发展的战略新兴产业的代表。其发展促进了超纯精密不锈钢和精密合金的新需求<sup>[61-64]</sup>。例如, 新型显示用因瓦合金, 尤其是开放式金属掩膜板用因瓦合金 1 040 mm 超宽超薄板材, 精密金属掩膜版用关键材料 25 μm 以下因瓦合金箔材, 目前, 我国尚未见生产报道。集成电路引线框架用高品质精密合金带材 4J42K 虽然可以生产, 但产品质量有待提高。半导体芯片产业链中各种装备用的超纯不锈钢 316L 的板材、管材和棒材完全依赖进口, 成为“卡脖子”材料<sup>[65]</sup>。

### 1.6 其它特种合金

软磁合金<sup>[66-67]</sup>、弹性合金<sup>[68-69]</sup>、膨胀合金<sup>[70-72]</sup>、磁性合金<sup>[73-75]</sup>、电阻电热合金<sup>[76-78]</sup>以及各种靶材<sup>[79-80]</sup>等

特种合金的需求量也不断增加,而且大多采用特种冶金方法生产。

### 2 特种冶金流程的发展与新趋势

特种冶金生产流程的设计取决于产品的用途和性能要求。从冶金方法本身来划分可以有两种主要类型。一是完全的特冶生产流程,另一种是与钢铁生产的大流程(转炉/电弧炉)相结合的复合流程。表 1 给出了几种典型品种的生产流程<sup>[32]</sup>。

#### 2.1 传统的特种冶金工艺流程

如图 1 所示,传统流程通常由初始熔炼、二次熔炼、终端成形等部分组成<sup>[25]</sup>。初始熔炼主要起到精炼、提纯、化学成分控制、制备二次熔炼母材的作用。初炼一般采用真空感应熔炼,也包括非真空感应熔炼和电弧炉加精炼工艺。以真空感应熔炼为例,具体是将回收和加工的碎料及初始料进行真空感应熔炼(VIM)或真空感应脱气浇注炉(VIDP),浇注的钢锭少数情况下会直接进行挤压、锻造、轧制来获得产品,而大部分情况则进行二次熔炼;二次熔炼主要起到材料宏观和微观结构控制的目的,涵盖了雾化制粉、真空电弧熔炼(VAM)壳式精密铸造、感应冷坩埚熔模铸造(ISM)、真空电弧熔炼(VAR)、电渣重熔(ESR)、电子束熔炼(EB)、等离子熔炼(PAM)等多种熔炼工艺;终端成形包括粉末冶金、激光喷涂、定向凝固(DS)及单晶(SC)等工艺。

高温合金材料制备包含了最典型几种特种冶金生产流程,见表 1 中的四种流程,包括了变形、铸造、粉末和喷射成形四种方法。其中,变形高温合金可以采用双联冶金工艺和三联冶金工艺。后者主要用于生产航空发动机涡轮盘等这样的动部件。铸造高温合金主要用于比变形高温合金服役温度更高的发动机涡轮盘,主要解决变形材偏析和金属间化合物析出严重的问题。铸造高温合金的典型

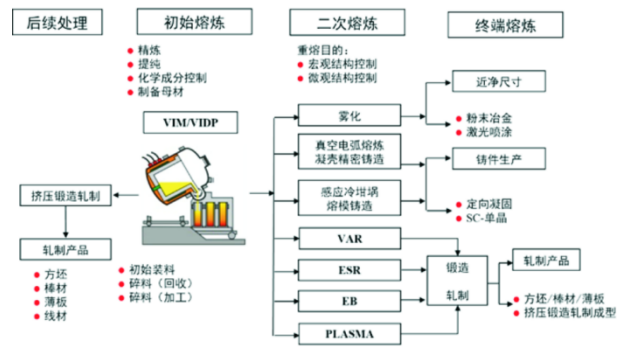


图 1 特种冶金传统流程及其产品

Fig. 1 Special metallurgical traditional process and its products

产品是发动机涡轮上的单晶空心叶片。喷射成形生产高温合金仍然处于研发阶段。

#### 2.2 与转炉/电弧炉流程结合的特冶流程

与转炉/电弧炉流程结合的特冶流程可以实现以下功能<sup>[32]</sup>:

(1)为 ESR 和 VAR 提供高洁净的自耗电极。传统制备自耗电极的方法多为真空感应炉、非真空感应炉和电弧炉,而且是模铸锭。随着炉外精炼和连铸技术的不断进步,可以生产出洁净度达到真空感应炉的水平连铸坯,而铸坯的致密性和均质度明显超过了模铸锭。因此,采用电弧炉/转炉+炉外精炼+连铸流程生产的自耗电极不仅适合于 ESR,而且很多情况下可以用于 VAR,从而大幅度提高了成材率和降低生产成本。对于 VAR 来说减少了由于电极掉块造成的白斑缺陷。例如,采用 BOF+精炼工艺+连铸圆坯生产自耗电极,然后 VAR 单真空低成本生产航空轴用材已经取得了成功。同理,为了降低生产成本,最近国内外相继开发了两条低成本生产高端特殊钢的工艺路线,一种是 EAF+AOD+ESR,该种工艺方式主要生产 40%Ni 以下的铁镍基耐蚀合金;另一种路线是 EAF/BOF+LF+VD/RH+CC

表 1 典型特殊钢品种的特殊冶金生产流程

Table 1 Special metallurgical production process of typical special steels

典型特殊钢品种	典型牌号	生产厂家	工艺流程
超超临界火电用耐热钢	Super304H	日本住友金属	电弧炉冶炼→LF→真空脱气→ESR→均质化处理→开坯→锻造成型→均匀化退火→性能热处理→粗加工→探伤→性能检验→精加工→入库
工模具钢	NAK80	日本大同特殊钢	EAF→LF→VD→IC/CC→(ESR)→锻造或开坯→轧制(返回料)→AIM(非真空感应炉)→ESR→锻造或开坯→轧制
高温合金	Inconel718	美国 Inconel	粉末冶金法/喷射成型法 变形高温合金:VIM→(ESR)→VAR→等温开坯和锻造 铸造高温合金:母合金熔炼→CA 精铸、热控凝固和定向凝固 粉末高温合金:母合金熔炼→雾化粉末→热等静压成型 喷射成形:母合金熔炼→雾化喷射成形→等温开坯和锻造
航空航天用超高强度钢	Aermet100	美国 Carpenter	VIM→VAR→锻造

+VAR/ESR,该工艺主要针对生产高端塑料模具钢和高端轴承钢等。

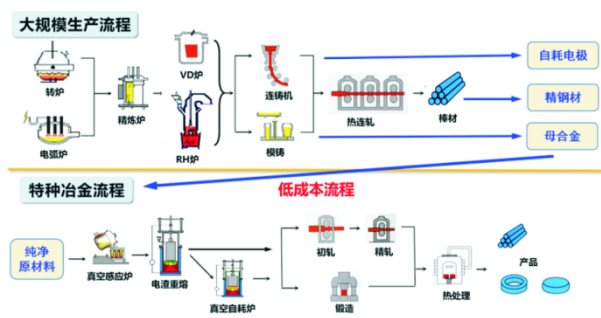


图2 与转炉/电弧炉流程结合的特冶流程

Fig. 2 Special smelting process combined with converter/electric furnace process

(2)VIM、AIM和VID(真空脱气炉)作为初炼炉生产自耗电极,其原材料的质量水平对自耗电极有很大影响。返回废钢、铁合金中很多杂质元素(C、P、有色金属残余元素)和非金属夹杂物很难去除,最终影响特冶产品的质量。以铁水为原料的转炉流程或者兑入铁水和使用DRI的电弧炉流程,由于原料相对纯净,残余元素少,再加上氧化脱碳和脱磷,还原精炼脱氧、脱硫和去除夹杂物,还有真空脱气等环节(AOD、LF、VD、RH等精炼方法),可以为上述初炼炉提供高洁净的精钢材或中间合金(比如含铬、钒等合金),从而为特冶流程提供了优质的原材料。这样可以在大幅度降低原材料成本的同时,保证最终产品的洁净度。例如,20世纪70年代开始仿制的飞机起落架用300M钢是我国第一个采用“VIM+VAR”双真空熔炼研制的航空超高强度钢。但开发之初,由于原材料冶金控制问题,开始研制时采用各种工艺方法,共耗费钢材百吨以上仍不能达到美标水平。采用了电弧炉+炉外精炼工艺的原材料提纯技术后,将 $w[S]$ 降低到0.002%以下,添加合金元素后 $w[S]$ 增至0.003%以下,基本控制了硫化物,各项性能达到美标水平<sup>[81]</sup>。同理,在生产航空超高强度不锈钢时,如果采用EAF+AOD生产的含铬和含钒精钢材(中间合金),作为VIM原材料应该可以解决铬铁和钒铁杂质元素偏高带来的钢水洁净度问题。

### 2.3 半连续电渣重熔实心 and 空心钢锭技术

传统的电渣重熔实心钢锭技术路线为初炼→精炼→模铸→电渣重熔→初轧/锻造→圆坯/方坯→热连轧,传统工艺路线存在生产效率低,成材率低,

电耗高等缺点。目前,创新流程包含了初炼→精炼→连铸→半连续电渣→圆坯/方坯→热连轧工艺,在精炼后直接采用连铸+半连续电渣的方式大大提高了生产效率,具有连续化、高效化、低成本化等优点<sup>[82]</sup>。此外,半连续电渣重熔还有利于碳化物、夹杂物、宏观偏析的控制进而提高热加工塑性<sup>[83-86]</sup>,为后续锻造工艺实施提供基础。

对空心钢锭的制备流程而言,传统流程往往采用电渣重熔实心锭→冲孔→多次加热锻造成形→管材的方法制备,该流程存在浪费材料,难冲孔,组织和晶粒难以控制的诸多问题,而采用电渣重熔空心锭→热锻造成形→管材的创新流程则具有减工序、提质量、降成本的优点<sup>[87]</sup>,这种生产空心锭的创新技术具有很好的发展潜力。

### 2.4 高氮不锈钢生产工艺流程

对高氮不锈钢而言,在一定条件下,钢中氮的溶解度会随着熔炼压力的升高而升高<sup>[31]</sup>。采用加压双联工艺(PIM+PESR)制备高氮不锈钢取得了良好的效果<sup>[52]</sup>。母材电极采用加压感应熔炼,底吹氮气和加压气相渗氮共同作用共同促进氮合金化过程,较高的氮分压能显著提升钢液氮的溶解度。在浇注阶段,采取分阶段控制压力的方法确保钢液凝固过程中氮不会以气体的形式溢出。将熔炼后的电极进行加压电渣重熔,对钢中的夹杂物进行去除,提高洁净度,改善凝固组织<sup>[51]</sup>。加压双联工艺制备高氮不锈钢的核心在于氮合金化、洁净度提升和凝固组织调控任务的再分配,该工艺技术已经取得多项专利<sup>[23, 24]</sup>。

### 2.5 工模具钢粉末冶金生产工艺流程

传统工模具钢因其高合金含量,在铸造过程中会形成不均匀的偏析组织,如粗大的一次共晶碳化物和网状的二次碳化物<sup>[55]</sup>。这种偏析导致高速钢材料本身力学性能受到了很大的影响,且粗大的碳化物偏析可能导致锻件过热、过烧或开裂。虽然通过电渣重熔及大变形的热加工(锻,轧)等手段在一定程度上改善了大块和网状的碳化物的组织偏析,但这一类高合金工模具钢因其生产过程及工艺造成的本征缺陷限制了其在高端应用领域的发展。鉴于铸造工模具钢在工业生产中存在的各种问题,粉末冶金工模具钢在20世纪60年代后期应运而生<sup>[56]</sup>。1965年美国的Crucible Steels公司最早提出了粉末冶金法生产高速钢。2000年前后,奥地利百禄(Böhler)和美国卡本特(Carpenter)在原有中间包

电渣加热(ESH)技术的基础上引入电磁搅拌(EMS)技术,采用了最大 8 t 的中间钢包,并将气雾化喷嘴改到了喷雾室顶侧面,以此形成了第三代 PMHSS 粉末。引进的奥地利 INTECO 气雾化制粉设备,2019 年第三代粉末高速钢生产线于天工国际落成。气雾化热等静压粉末冶金高速钢生产线,其工艺流程包括:气体雾化→粉末配料装入包套→抽真空→热等静压→锻造、轧制。与此同时,天工国际引进了喷射成形(Spray Forming)技术,目前已经实现了该技术的产业化,可以量产单重 4.5 t 以下的 30 多个不同钢种的坯料。相较于传统粉末冶金工艺,喷射成形的流程更加缩短,省去了等静压成形工序,而是将钢水直接雾化喷射成锭,工艺的成本约可降低 40%,但其致密度,材料综合性能比不上传统的粉末冶金。表 2 给出了 4 种不同工艺生产的高速钢冶金质量、组织和性能的比较<sup>[56]</sup>。目前,国内河冶科技也建成了粉末冶金和喷射成形生产线。可以预计,粉末冶金技术的应用在工模具钢生产、高温合金以及超级不锈钢等领域将不断扩展,但喷射成形技术的推广应用还有待于观察。

### 3 特种冶金产业规模、技术与装备的新发展

我国的特种冶金技术是在 20 世纪 50 年代后期逐渐开展起来的,之后不断发展、成熟和完善。以钢铁研究总院、东北大学、北京科技大学等为代表的科研院所和高校,以抚顺特钢、宝武特冶和长城特钢等为代表的特钢企业长期开展了特种冶金装备、工艺和产品的研发和生产。近十几年来,我国的电渣冶金技术取得了突破性进展,在理论、工艺和装备等方面处于国际先进水平,2019 年东北大学牵头,宝武特冶、舞阳钢铁、冶钢和兴澄特钢等国内多家特钢企业参与的项目“高品质特殊钢绿色高效电渣重熔关键技术的开发与应用”获得国家科技进步一等奖。真空特种冶金技术由于引进、消化和吸收国外的高端特种冶金装备,在设备大型化、真空度及控制等方面已经取得了一定的进步。高端特殊钢和高温合金材料的生产工艺技术和产品质量

也取得长足的进步,为我国航天航空和高端装备制造提供了有力的支撑。但我国在特种冶金的基础理论研究、设备和产品的大型化、产品的纯净度和均匀性、性能的稳定性,尤其是制成零部件后的服役寿命方面与国际先进水平仍有较大的差距。

#### 3.1 我国特种冶金产业规模的新发展

最近十几年是我国特种冶金行业发展最快的时期。传统的特钢企业如抚钢、冶钢等投入巨资大规模新建大型真空感应炉、真空自耗炉和电渣重熔炉。例如,抚顺特钢新建了真空感应炉四台,其中 12 t 两台,20 t 和 30 t 各一台;真空电弧重熔炉八台,其中 12 t 两台,18 t 三台,20 t 两台和 30 t 一台;新建和改造电渣炉三十多台,吨位 3~30 t 不等,其中还有一台 15 t 的加压电渣炉。大冶特钢新建的各种特冶装备也超过三十多台。除了抚钢、冶钢、宝武特冶、攀长钢、太钢不锈、钢研高纳、安泰科技、北冶功能材料、大连精密合金、沈阳合金材料和图南合金等相对历史较长的特冶企业外,近些年又涌现出数十家规模和大小各异的特冶企业,新建了大量的特冶设备,包括西部超导、航材股份、六合锻造、中航上大、广大特材、隆达超合金、西安钢研功能材料、久立永兴特种合金、常州中钢精密、河钢张宣高科、宝武航研、申源特钢、苏州双金、南京达迈科技、一郎合金和沈阳金纳等。对于只有电渣重熔炉的企业至少有上百家,规模较大的有西宁特钢、首钢贵钢、北满特钢、东北特钢、中原特钢、天工国际、河冶科技、中钢邢机、通裕重工、光明特钢、北方重工、上重、沈阳铸造所、台海玛努尔和鞍钢铸钢等。中信重工<sup>[87]</sup>、二重<sup>[88]</sup>和一重<sup>[89]</sup>等大型重机企业则新建了 80~120 t 的大型电渣炉。据初步估计,我国生产用的真空感应炉和真空自耗炉设备总量(不包括科研用设备)超过 1000 台套,容量从 0.1~30 t 不等,年生产能力超过 30 万吨。生产用的电渣重熔炉设备数量则超过 1800 台套,容量从 0.1~200 t 不等,年生产能力超过 300 万吨。

与西方发达国家相比,我国在特种冶金装备、工艺、技术及品种方面发展参差不齐。其中,我国

表 2 不同生产工艺的工模具钢锭组织、成分及生产质量对比

Table 2 Comparison of mold ingot structure, composition and production quality in different production processes

生产工艺	大规格组织偏析	碳化物颗粒度/ $\mu\text{m}$	$w[\text{O}]/10^{-6}$	合金含量>25%	生产周期	材料综合性能	生产成本
电弧炉锭	严重	60	30	不能生产	短	一般	低
电渣锭	一般	50	40	不能生产	一般	较好	较低
喷射成形锭	好	20	40	能生产	短	好	一般
粉末冶金锭	很好	5	80	能生产	较长	很好	高

电渣重熔技术与装备整体处于国际先进水平,大型板坯电渣重熔、抽锭式电渣重熔和空心钢锭电渣重熔等技术装备处于国际领先水平。然而,我国的真空特种冶金技术与西方发达国家相比还存在较大的差距,一些高端材料无法制备,大型真空特种冶金装备的设计和制造技术仍然不够成熟。所以,我国电渣炉设备90%以上是国产的,而6 t以上大型真空感应炉和真空自耗炉几乎全部从国外进口,3 t以下的真空冶金设备则以国产为主。

### 3.2 真空感应熔炼技术与装备

#### (1) 超纯熔炼技术

国内虽然近几年从美国和德国等国家引进了一批先进的大型真空特种熔炼设备,但熔炼技术水平与欧美日等发达国家存在很大差距,主要体现在以下几个方面:1)在产品成分控制、杂质元素等质量控制方面较国外还有较大的差距。例如,国外高水平真空感应熔炼可将 $w[\text{O}]$ 控制在 $3 \times 10^{-6}$ 以下, $w[\text{N}]$ 控制在 $5 \times 10^{-6}$ 以下, $w[\text{H}]$ 控制在 $1 \times 10^{-6}$ 以下<sup>[90-91]</sup>。用于铸造高温合金母合金的熔炼其杂质元素控制水平更高。美国G.E.公司和Rolls-Royce公司对典型铸造高温合金的杂质含量要求见表3<sup>[92]</sup>。美国SMC公司发展了优质级高温合金熔炼技术,迄今为止,该技术代表了熔炼的最高水平。它主要是采用高质量的原材料、高真空精炼及过滤净化等,不但降低了试验钢中氧、氮及硫等杂质元素的含量 $\{w[\text{N}]$ 为 $(1 \sim 3) \times 10^{-6}$ , $w[\text{O}]$ 为 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ , $w[\text{S}]$ 为 $(1 \sim 6) \times 10^{-6}\}$ ,而且成分控制准确,炉与炉之间的化学成分波动小,对100%返回料的处理也可以达到

与新料一样的水平。但具体的熔炼是严格保密的;2)大锭型的偏析控制差距较大,影响了我国锭型的扩大;3)夹杂物控制水平也有差距;4)冶炼时间太长,有些大型真空感应炉为了提供高合金的纯净度,特别是去除气体(N和O),熔炼时间超过20 h。

近年来,真空感应熔炼关键技术应重点关注几个方面<sup>[39]</sup>:1)原材料的纯净化处理,这是核心技术;2)高稳定性的坩埚耐火材料(主要为CaO)以降低熔体的氧含量和硫含量;3)真空碳脱氧工艺;4)稀土和镁处理技术;5)合适的控制精炼温度、精炼时间以及真空度,以便有效地去除氮、氧;6)辅助电磁搅拌和底吹气体搅拌加快去除气体和有害杂质;7)陶瓷过滤器浇注去除非金属夹杂物;8)数字化、智能化控制技术。

原材料的纯净化处理作为核心技术,除了前面提到的采用电弧炉和炉外精炼技术为VIM提供精钢材和纯净的中间合金外,另一个重点是高合金返回料的净化处理。中航上大在国内最早新建了SDS-G1型全自动净化清洗线,具有多重清洗及分选功能,自动取样、标识及洁净度检测。可以有效去除机械加工及储运过程中产生的各类杂质,可以直接作为原材料加入到真空感应炉中冶炼高品质的产品<sup>[93]</sup>。由图3可见,通过超声波清洗后,高温合金返回料得到了明显的净化。结果表明,使用100%车屑料冶炼的高温合金铸锭的夹杂物水平与100%新料的水平相当。100%屑料铸成的真空感应电极棒 $w[\text{H}] \leq 1 \times 10^{-6}$ , $w[\text{O}] \leq 10 \times 10^{-6}$ , $w[\text{N}] \leq 40 \times 10^{-6}$ 。

表3 铸造高温合金有害杂质最大允许含量要求(质量分数)

Table 3 Maximum allowable contents requirement of harmful impurities in casting superalloys  $10^{-6}$

公司	As	Bi	Cd	Sb	In	Pb	Se	Ag	Te	Tl	Sn	Zn
G.E.	5	0.5	11	5	0.5	5	11	5	0.5	0.5	5	11
Rolls-Royce	3	0.5	0.2	3	0.2	5	5	5	2	0.2	30	5

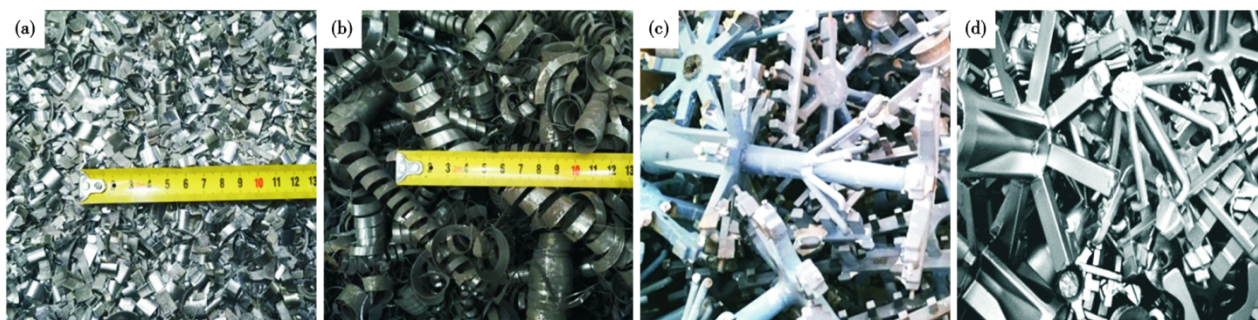


图3 净化前后高温合金返回料的对比:(a)(c)净化前;(b)(d)净化后

Fig. 3 Comparison of superalloy return materials before and after purification:(a)(c) before purification;(b)(d) after purification

日本住友金属公司开发一种真空感应炉旋转铸锭技术<sup>[94]</sup>。如图 4 所示,其原理是:旋转铸型使液态金属和夹杂物一起做旋转运动,密度大的液态金属向外运动,而密度小的夹杂物向里运动,从而使夹杂物向铸锭中心聚集、变大并快速上浮,实现液态金属和夹杂物的分离。上浮的夹杂物往往在冒口被捕捉,最后切割冒口将夹杂物从合金中除去。为防止旋转铸锭产生环状偏析,确定合适的旋转速度和旋转时间,并在铸锭后期如何减速旋转,直至铸锭完全凝固是关键,这样可以得到完全没有环状偏析的铸锭。

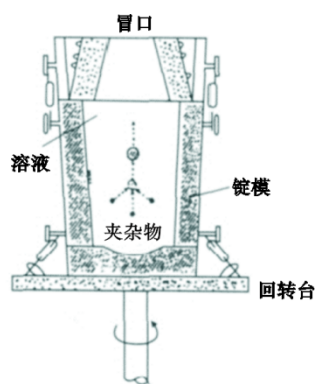


图 4 旋转铸锭技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of rotary ingot technology

## (2) 装备技术

我国在引进消化吸收国外真空感应炉设备先进技术的基础上,也研制了多种类型的真空感应炉,包括立式单室真空感应炉、立式双室真空感应炉、带有流槽室的真空感应炉、锭模室升降式真空感应炉、带有底吹系统的真空感应炉、双门带坩埚旋转式真空感应炉、侧门旋转轴式真空感应炉<sup>[29]</sup>。熔炼室和铸锭室相分离,实现连铸的铸锭功能。我国自行生产的真空感应熔炼炉的容量一般比较小,主要为 5~1 500 kg,近几年也有所突破,最大容量达到 13 t。成功开发了 200 kg 的多功能真空感应精炼炉<sup>[95]</sup>,具有真空下顶吹氧、底吹惰性气体(Ar、N<sub>2</sub>)、喷粉、造渣和合金化等功能,可以实现超纯铁素体不锈钢、超纯 IF 钢、电工钢等特殊钢的冶炼。目前,我国 3 t 以上的大型感应炉主要是从德国、美国、日本进口的。20 世纪 80 年代初,抚钢在国内率先从德国引进 3 t/6 t 大型真空感应炉。从 90 年代以后国内宝钢特钢、东北特钢和攀长钢等企业先后从国外引进了大型真空感应炉,最大容量为 12 t<sup>[96]</sup>。最近

10 年来,目前已经引进的最大容量为 24 t 和 30 t<sup>[97]</sup>。我国国产真空感应熔炼装备在熔炼电源、电磁搅拌、中间包冶金、真空密封、参数检测及智能化控制方面与国外先进水平仍有一定的差距。

## 3.3 真空电弧重熔技术与装备

真空电弧重熔炉方面,我国在 20 世纪 60 年代初开始试制真空电弧重熔炉,宝钛集团于 1971 年制造了 3 t 真空自耗电弧炉,可生产直径为  $\phi 711$  mm、长 1.7 m 的钛锭<sup>[98-100]</sup>;1990 年设计制造了 6 t 真空自耗电弧炉,可生产直径为  $\phi 820$  mm,长 2.5 m 的钛锭。目前,可以设计制造 10 t 真空电弧炉,最大直径  $\phi 1 020$  mm<sup>[101]</sup>。国内设计的真空自耗炉基本可以满足钛熔炼的要求,但不能满足特殊钢和高温合金的熔炼。国产的真空自耗炉开始尝试采用基于电极称量的熔速控制技术和熔滴控制技术<sup>[102]</sup>。

我国 6 t 以上的大型真空自耗炉大多是国外引进,但在工艺技术消化吸收方面取得了明显进步:如真空自耗电弧重熔熔速控制关键技术、真空自耗电弧重熔理论、真空自耗电弧重熔易偏析合金的控制策略等。同时,真空自耗电弧重熔过程控制精准化程度不断提高、数字化技术和在线精确测量技术得到应用。氦气冷却和防止锰元素挥发的充氩技术也得到了应用。

## 3.4 电渣重熔技术与装备

我国电渣冶金技术从 1958 年诞生至今,已有 66 年发展历史。经过几代电渣冶金工作者的不懈努力,我国电渣冶金技术无论在工艺理论、生产技术、装备和电渣产品的开发等方面都取得一系列重要成就,为我国的航天航空和国民经济的许多领域的建设和发展作出了重大贡献<sup>[14,19]</sup>。

目前,我国大多数特殊钢厂基本均建有电渣车间。生产的品种涵盖合金结构钢、工具钢、模具钢、耐热钢、不锈钢、轴承钢、超高强度钢、高温合金、耐蚀合金、电热合金、精密合金等大部分钢种和合金。生产的钢锭重量从几十公斤到目前最大的几百吨。电渣冶金工艺从电渣重熔发展到电渣熔铸、电渣液态浇注和电渣热封顶等多种形式。电渣产品应用到国民经济的许多领域,包括铁路、航空航天、武器装备、火电、水电、核电、石油、化工、机械等,小到仪器仪表的精密零件、大到上百吨的汽轮机转子均有电渣的产品。

我国电渣产品形成了自己的特色。例如,我国的铁路轴承全部要求采用电渣重熔工艺生产,高品

质的模具钢和高速工具钢也基本采用电渣工艺生产,冷轧辊用钢、汽轮机叶片、大型水轮机导叶和叶片、高压锅炉管和镍基合金等产品采用电渣工艺生产也逐渐成为冶金工作者的共识。此外,电渣生产不仅仅局限于特殊钢企业,我国的机械制造业也广泛采用电渣技术生产大型锻件用钢锭<sup>[28]</sup>。

我国已经掌握了国际先进水平的电渣重熔工艺与装备技术。2005年我国牵头制定的电渣重熔炉2项国际标准获得IEC1906国际标准奖,这是我国标准领域首次获得国际大奖。2020年修订的第三版IEC60519-8和IEC60779两项电渣炉国际标准正式颁布实施。这充分说明了我国在电渣炉领域的技术话语权。近十几年来,国产电渣炉在国内的市场占有率达到95%以上,具有同轴导电、熔速控制和保护气氛的先进电渣炉装备国产市场占有率也超过80%。近年来,我国电渣重熔技术和装备的主要进展包括<sup>[26,33]</sup>:

(1)具有国际先进水平的全密闭保护气氛电渣重熔技术与装备实现了国产化。目前,国内多家冶金设备制造企业能够设计和制造具有全密闭气体保护罩和氧含量在线连续检测、同轴导电布置短网、电压摆动控制电极插入深度、基于电极称重的熔速控制等功能的电渣炉,其应用效果与国外进口水平相当,可以实现“一键式”自动熔炼。目前国产保护气氛电渣炉不仅可以生产圆锭,也可以生产扁锭,其设备容量圆锭最大已达到150 t,扁锭最大已达到60 t。另外,具有中国特色的支臂式保护气保电渣炉,虽然不是同轴导电短网设计,但上述其他

功能全部具备,其优点是投资大幅度降低,只有前一种设备造价的40%~50%,而且特别适合于传统电渣炉的升级改造。这种保护气氛电渣炉除了电耗高于同轴导电的炉型外,钢锭的洁净度和成分均匀控制水平几乎相当。

(2)特长电极不交换抽锭式保护气氛电渣炉装备和工艺技术在济源钢铁公司旗下的国泰东工电渣钢公司开发成功。其特点是自耗电长度超过10 m(连铸方坯或圆坯),全密闭保护下生产6 m以上断面尺寸为430 mm×500 mm方坯和 $\phi 600$  mm圆坯,如图5所示。本项目攻克了单根世界最长自耗电电极抽锭气保冶炼、全密闭渣液面精准检测控制等多项技术难题。

(3)新型电渣炉,如旋转电极电渣炉、磁控电渣重熔炉,以及基于结晶器导电用于复合轧辊和电渣增材制造的电渣装备和工艺技术也取得了重要进展<sup>[103-106]</sup>。

(4)在电渣质量提升方面,开发了基于基因工程进行电渣重熔用渣的成分设计的新方法,以及基于渣中钙离子活度的D类和DS夹杂物控制技术。该技术应用后使得大型热作模具钢的D类和DS夹杂物评级降低到0级。

(5)在品种开发方面,德阳二重集团采用进口的125 t保护气氛电渣炉结合国内自己的工艺研究成功试制了620 °C超超临界火电机FB2汽轮机转子用100 t级大型电渣锭,从而突破了长期以来FB2汽轮机转子只能靠进口的难题,有望很快形成稳定的批量生产能力<sup>[50]</sup>。其关键工艺是含硼渣系的设

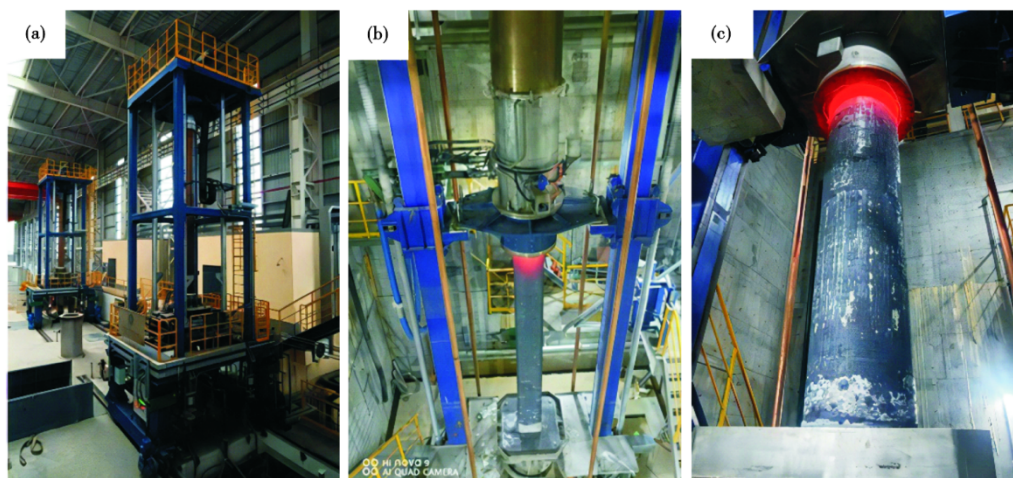


图5 特长电极不交换抽锭式保护气氛电渣炉:(a)电渣炉主体,(b)方形电渣锭,(c)圆形电渣锭

Fig. 5 Extra-long electrode Non-exchange ingot type protective atmosphere electroslag furnace: (a) electroslag furnace body, (b) square electroslag ingot, (c) round electroslag ingot

计、良好的气氛保护和精确的熔速控制,从而保证电渣钢锭中氮含量和硼含量的精确控制。

#### 4 建议与展望

未来十年乃至更长时间内我国特种冶金产业仍然处于黄金发展时期。但时至今日,我国的一些高端特殊钢和合金材料仍然需要进口,国产材料在产品质量、性能稳定性和服役寿命等方面与西方国家的知名企业(如美国 SMC、ATI、Carpenter、VDM 公司等)的产品仍然存在较大的差距,因此,我国在未来仍需开展大量的研发工作。重点应该在以下几个方面加大研发力度:

##### (1) 加强基础理论、超纯净熔炼和凝固技术研究

开展真空特种冶金的基础理论研究,突破高端材料制备的瓶颈,深入开展以超纯熔炼技术为核心的工艺技术研究,包括开发原材料净化处理技术,高稳定性的坩埚耐火材料以降低熔体的氧含量和硫含量等超纯熔炼技术。揭示在真空下元素的挥发和去除、坩埚材料与金属熔体之间的物理化学反应、脱氧和非金属夹杂物的形成和去除机理等超纯熔炼理论。

开展特种熔炼过程电磁场、流场、温度场和凝固组织的数学模拟,掌握钢液凝固过程中溶质迁移行为和凝固组织控制方法,尤其是高合金钢和镍基合金大型铸锭偏析元素和析出相的控制机制,重点突破大尺寸铸锭凝固缺陷的形成机理和凝固组织的控制方法。

##### (2) 大型真空特种冶金装备实现国产化

引进消化和自主创新相结合,开发出具有国际先进水平的真空特种冶金装备并推广应用。技术发展难点是开发大型真空感应炉、真空自耗炉装备以及智能化的检测与控制系统,尤其是基于熔滴短路频率检测的真空自耗炉电极熔速控制方法。研发出工业规模的冷坩埚熔炼炉、真空凝壳炉、真空悬浮熔炼炉、电子束冷床炉和等离子冷床炉等特殊熔炼装备,提升相关技术的自动化水平,是未来 10

年我国的发展重点。进一步研发以导电结晶器、旋转电极和磁控等特征的新一代电渣重熔装备。

##### (3) 加强真空特种冶金工艺技术的研发和工艺规范制定

重点开发高温合金、精密合金、耐蚀合金、超高强度钢、特种不锈钢、高端工模具钢等典型特种冶金产品的工艺技术和规范,并将其转化为工艺模型,实现工艺控制的数字化和智能化,使这些产品的质量和稳定性与国际水平接轨,实现品牌战略。

深入开展高合金返回料,尤其是高温合金返回料循环利用工艺技术和装备的研究,初步建立我国返回料的循环利用的技术和管理体系,建立相关制度和标准。

掌握大型真空自耗锭的凝固特点和产生白斑、黑斑等缺陷机理,电弧燃烧、熔滴滴落、元素挥发、气体和夹杂物行为,开发出压力控制、氦气冷却、浅熔池控制技术等创新工艺,全面提升我国大型自耗铸锭工艺和产品的技术水平。

突破冷坩埚熔炼装备和工艺技术,拓宽冷坩埚感应熔炼技术的应用领域,进行氧化物材料、高熔点材料、单晶硅、放射性铀燃料棒、形状记忆合金、各种磁性材料、高纯溅射靶材和各种金属间化合物及其复合材料等熔炼技术的开发。

##### (4) 关键材料特种冶金和加工技术的突破或质量提升

这些关键材料包括航空航天、燃机用高温合金(变形、铸造、粉末)、航空轴承钢和齿轮钢、大飞机用起落架用钢、高铁、盾构机、精密机床等高端轴承钢、电动汽车制造用一体化压铸模材料、第四代核聚变用特殊钢、电子信息用精密合金和超纯不锈钢、舰船用超高强度钢、海洋工程和石油化工用不锈钢、耐蚀合金、生物医学金属材料等。

(5) 建立“大学-科研单位-装备设计单位-装备制造企业-特种冶金生产企业-用户”全产业链的特种冶金技术创新联盟,建立特种冶金中试基地,实现技术研发的机制创新。

#### 参考文献

- [1] 姜兴渭. 电渣炼钢: 有衬电渣炉及其熔炼[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [2] 常鹏北. 有衬炉电渣冶金[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1979.
- [3] 李正邦, 洪彦若, 张祖贤, 等. 电渣熔铸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [4] 傅杰, 陈恩普. 特种熔炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [5] 戴永年, 赵忠. 真空冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [6] 张继玉. 真空电炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [7] 丁永昌, 徐曾启. 特种熔炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.

- [8] 李正邦. 电渣冶金原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [9] 昌鹤鸣, 杨晓平, 张德惠. 感应炉熔炼与特征铸造技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [10] 王振东, 曹孔建, 何纪龙. 感应炉熔炼[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [11] 李正邦. 电渣冶金的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [12] 崔雅茹, 王超. 特种冶炼与金属功能材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [13] 李正邦. 特种冶金新技术[J]. 特殊钢, 2002, 23(6): 1-5.
- [14] 李正邦, 傅杰. 电渣重熔技术在中国的应用和发展[J]. 特殊钢, 1999, 20(2): 7-12.
- [15] 彭杰楼. 真空感应炉的进步与发展[J]. 上海金属, 2000, 22(3): 13-18.
- [16] 陈希春, 冯涤, 傅杰, 等. 电渣冶金的最新进展[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(2): 62-67.
- [17] 李正邦. 电渣冶金与电渣熔铸在中国的发展[J]. 铸造, 2004, 53(11): 855-861.
- [18] 李正邦. 21世纪电渣冶金的展望[J]. 炼钢, 2003, 19(2): 6-12.
- [19] 李正邦. 21世纪电渣冶金的新进展[J]. 特殊钢, 2004, 25(5): 1-5.
- [20] 马立蒲, 刘为超. 电子束熔炼技术及其应用[J]. 有色金属加工, 2008, 37(6): 28-31+36.
- [21] 马荣宝, 陈峰, 国斌. 电子束冷床炉发展简况及熔炼工艺探讨[J]. 钛工业进展, 2008, 25(5): 37-40.
- [22] 李正邦. 电渣冶金的发展历程、现状及趋势[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(S1): 1-7.
- [23] 王春光, 葛锋, 张玉碧, 等. 工艺参数对电渣重熔凝固过程的影响综述[J]. 铸造技术, 2013, 34(10): 1321-1323.
- [24] 姜周华. 电渣冶金的物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000.
- [25] 姜周华. 电渣冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [26] 姜周华. 高品质特殊钢电渣重熔技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- [27] 姜周华, 姜兴渭. 国外电渣冶金技术的发展动向[J]. 国外钢铁, 1991, 16(4): 27-31.
- [28] 姜周华, 李正邦. 电渣冶金技术的最新发展趋势[J]. 特殊钢, 2009, 30(6): 10-13.
- [29] 姜周华, 董艳伍, 李花兵, 等. 特殊钢特种冶金技术的新发展[J]. 中国冶金, 2011, 21(12): 1-10.
- [30] 姜周华, Lev Medovar, Ganna Stovpchenko, 等. 第二代液态电渣冶金技术的发展[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(3): 1-7.
- [31] 朱红春, 姜周华, 李花兵, 等. 加压技术在高品质特殊钢冶炼和凝固中的作用[J]. 钢铁, 2015, 50(11): 37-44.
- [32] 姜周华, 康从鹏, 刘福斌, 等. 特种冶金生产流程的发展趋势[J]. 材料与冶金学报, 2021, 20(1): 1-8+22.
- [33] 姜周华, 董艳伍, 耿鑫, 等. 高品质特殊钢电渣重熔技术的开发和应用[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 15-25.
- [34] <https://finance.sina.com.cn/roll/2017-06-20/docifyhfpat5527649.shtml>
- [35] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1752060356982282391&wfr=spider&for=pc>
- [36] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1668031928829994580&wfr=spider&for=pc>
- [37] 毕中南. 航空发动机用高温合金及其制备技术[J]. 大飞机, 2021(3): 12-15.
- [38] 刘家兴, 骆仁智, 潘君益, 等. 高温合金的研究进展及产业现状[J]. 浙江冶金, 2022, 35(5): 1-6.
- [39] 姜周华, 龚伟, 王承, 等. 超高强度钢高纯净熔炼技术[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 7-15.
- [40] 田仲良, 包汉生, 何西扣, 等. 700℃汽轮机转子用耐热合金的研究进展[J]. 钢铁, 2015, 50(2): 54-60+69.
- [41] 汪超, 沈红卫, 梅林波. 高温材料在发电燃气轮机中的应用和发展[J]. 热力透平, 2014, 43(2): 94-100.
- [42] 任忠鸣, 韩东宇, 玄伟东, 等. 燃气轮机叶片制备技术研究进展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(5): 722-747.
- [43] 高亚龙, 赵义瀚, 王晓明, 等. 镍基高温合金用于燃气轮机燃烧室概述与进展[J]. 铸造工程, 2023, 47(4): 27-33.
- [44] 王放, 盖仁涛, 漆向前, 等. 第三代核电锻造主管道用奥氏体不锈钢的性能对比和分析[J]. 大型铸锻件, 2021(1): 28-30.
- [45] 王金飞, 李殿杰, 胡日荣, 等. 第三代核电主管道的制造技术[J]. 钢管, 2016, 45(4): 7-11.
- [46] 崔利民, 李青, 胡英超, 等. 核电用超纯奥氏体不锈钢316H电渣重熔氢含量控制[J]. 南方金属, 2023(3): 1-3.
- [47] 刘正东, 程世长, 干勇, 等. 中国600℃蒸汽参数发电机组用锅炉钢管国产化研制进展[J]. 钢铁, 2010, 45(10): 1-8.
- [48] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700℃超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539-548.
- [49] 彭雷朕, 姜周华, 耿鑫, 等. 超超临界火电站用COST-FB2转子钢控氮工艺研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 505-509+527.
- [50] 罗玉立, 曾杰, 路正平, 等. 大型FB2钢锭制造冶炼控制技术的实践与研究[J]. 大型铸锻件, 2023(3): 6-11.
- [51] 姜周华, 李花兵, 董艳伍, 等. 电渣重熔高氮钢技术的进展[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(10): 1-6.
- [52] 李花兵, 姜周华, 申明辉, 等. 氮气加压熔炼高氮钢技术的研究进展[J]. 中国冶金, 2006, 16(10): 9-13.
- [53] 姜周华, 冯浩, 李花兵, 等. 一种加压感应和加压电渣重熔双联冶炼高氮钢的方法: CN106011371A[P]. 2016-10-12.
- [54] 赵艳英. 论国产铁路机车轴承的技术现状与水平[J]. 内燃机车, 2001(1): 28-30+32.
- [55] 周立新, 丁磊, 苏春阳, 等. 惰性气体保护5t电渣炉重熔铁路用G20CrNi2MoA渗碳轴承钢特殊钢[J], 2012, 33(5): 25-28.
- [56] 于洋. 粉末冶金工模具钢的生产技术及应用研究进展(上)[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(1): 1-10.
- [57] 于洋. 粉末冶金工模具钢的生产技术及应用研究进展(下)[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(2): 1-10.
- [58] 朱俊. 我国模具钢的市场需求及发展趋势[J]. 冶金管理, 2014(3): 27-30.
- [59] 雷应华, 周许, 肖攸毅, 等. 我国压铸模具钢研究新进展

- [J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 1-6.
- [60] 苏铭杰. 精密模具制造技术和应用现状[J]. 金属加工(冷加工), 2023(11): 12-16.
- [61] 陶永亮, 娄梦妮. 新能源汽车销量促进压铸产业及一体化压铸发展[J]. 铸造设备与工艺, 2022(2): 52-55.
- [62] 杨佳直. 我国不锈钢精密钢带市场分析[J]. 冶金经济与管理, 2017(5): 14-16.
- [63] 陈国均, 王旭军. 金属功能材料市场需求及发展趋势[J]. 新材料产业, 2022, 79(7): 58-65.
- [64] 陈 昀, 李明光, 张艳红, 等. 因瓦合金发展现状及应用前景[J]. 机械研究与应用, 2009, 22(4): 9-11+14.
- [65] 彭会芬, 孙中华. 高强度因瓦合金的发展现状及展望[J]. 河北冶金, 2017(12): 1-8.
- [66] 姜红华. 如何提高超纯气体输送系统的可靠性[J]. 微电子技术, 2003(2): 58-60.
- [67] 计植耀, 马 跃, 王 清, 等. 高性能软磁合金的研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(3): 69-80.
- [68] 颜丞铭. 我国软磁合金标准体系的发展与现状[J]. 冶金标准化与质量, 2017, 55(6): 15-17.
- [69] 汪必琛, 崔 焯, 连宏凯, 等. FeMnAlNi系超弹性合金的研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(3): 238-248.
- [70] 李瀚宇, 周震涛, 唐江龙, 等. 形状记忆合金宽温区超弹性的研究进展热加工工艺, 2021, 50(17): 1-5.
- [71] 张菽浪. 膨胀合金简介[J]. 特钢技术, 2017, 23(4): 49.
- [72] 袁学敏, 赵中雷. 电渣重熔对 4 J43 膨胀合金的影响[J]. 世界有色金属, 2016(18): 109-111.
- [73] 刘 江. 低膨胀合金的应用和发展[J]. 金属功能材料, 2007, 14(5): 33-37.
- [74] 都有为, 张世远. 磁性材料[M]. 南京: 南京大学出版社, 2022.
- [75] 包头师范学院凝聚态物理创新团队. 磁性功能材料研究进展[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2013.
- [76] 田 霖, 李春燕, 翟建树, 等. 非晶合金的功能性研究进展[J]. 稀有金属, 2021, 45(8): 998-1009.
- [77] 武 英, 谢建刚, 曾克里, 等. Fe-Cr-Al电热合金的研究进展[J]. 有色金属, 1999(4): 83-86.
- [78] 于朝清, 易 立, 徐永红, 等. Ni<sub>80</sub>Cr<sub>20</sub>高电阻电热合金的工艺技术研究现状[J]. 电工材料, 2014(4): 19-23+27.
- [79] 万吉高, 武海军, 杨丽娟, 等. 高温电阻应变合金的研究及应用进展[J]. 贵金属, 2023, 44(4): 74-84.
- [80] 许彦亭, 郭俊梅, 王传军, 等. 贵金属溅射靶材的研究进展[J]. 机械工程材料, 2021, 45(8): 8-14+102.
- [81] 贾国斌, 冯寅楠, 贾 英. 磁控溅射用难熔金属靶材制作、应用与发展[J]. 金属功能材料, 2016, 23(6): 48-52.
- [82] 李华文, 张宝玲, 陈 磊. 赵振业院士访谈[J]. 航空发动机, 2009, 35(3): 65+1-4.
- [83] 臧喜民, 邓 鑫, 李万明, 等. 抽锭电渣重熔 718 塑料模具钢板坯锭的新工艺[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(1): 39-42+48.
- [84] 李福林, 付 锐, 冯 涛, 等. 电渣重熔连续定向凝固 Rene88DT 合金组织与偏析行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(6): 1437-1442.
- [85] Chen X, Jiang Z H, Liu F B, et al. Effect of melt rate on surface quality and solidification structure of Mn<sub>18</sub>Cr18N hollow ingot during electroslag remelting process [J]. Steel Research International, 2017, 88(2): 188-196.
- [86] Liu F B, Yu J, Li H B, et al. Numerical Simulation of the Magneto-Hydrodynamic Two-Phase Flow and Heat Transfer during Electroslag Remelting Hollow Ingot Process[J]. steel research international, 2020, 91(4): 123-132.
- [87] 姜周华, 刘福斌, 余 强, 等. 电渣重熔空心钢锭技术的开发[J]. 钢铁, 2015, 50(10): 30-36.
- [88] 李运前. 国内首台 80 吨低频单电极气保电渣炉在中信重工投产, 中国工业报, 2015.03.02 第 B2 版: 综合新闻.
- [89] 二重集团. 国内最大单相大型电渣重熔炉在二重成功投产[J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54(3): 6.
- [90] 路久宽, 孙 昊. 中国一重新建 150 吨电渣炉, 黑龙江日报, 2023.05.10, 第 07 版: 齐齐哈尔新闻.
- [91] Coutsouradis D. Materials for advanced power engineering 1994: Proceedings of a conference held in Liège, Belgium, 3-6 October 1994: 85.
- [92] Thomas M. C., Helmink R. C., Frasier D. J., et al. Allison Manufacturing, Property and Turbine Engine Performance of CMSX-4® Single Crystal Airfoils, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [93] 姜周华, 张新法, 刘福斌, 等. 镍基高温合金生产用原材料有害杂质的控制[J]. 钢铁, 2017, 52(9): 1-10.
- [94] 郑险峰. 高温合金返回料应用技术, 2018 年全国特种冶金技术学术会议论文集[C], 沈阳. 2018.
- [95] 尹志冬, 戴斌煜, 刘智彬, 等. 高温合金净化技术研究现状[J]. 铸造, 2011, 60(5): 462-465.
- [96] 余 强, 姜晓箐, 姜周华. 多功能真空感应炉的开发[J]. 材料与冶金学报, 2016, 15(3): 187-194.
- [97] 抚顺特钢第三炼钢厂新建 12 吨真空感应炉达产达效[J]. 不锈钢(市场与信息). 2015, (22): 9.
- [98] 杨玉军. 特冶装备与工艺进步推动抚顺特钢高端材料发展, 2018 年全国特种冶金技术学术会议论文集[C], 沈阳. 2018.
- [99] 王 镐, 张 震, 李奔放. 钛真空自耗电弧炉熔炼技术发展概况及未来展望[J]. 钛工业进展, 1998, 15(5): 4-6.
- [100] 于润康. 全自动称重真空自耗电弧炉研制[J]. 真空, 2004, 41(4): 117-120.
- [101] 计玉珍, 郑 贇, 鲍崇高. 真空电弧炉设备与熔炼技术的发展[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 827-829.
- [102] 李 宏, 杨军辉. 10 t 真空电弧炉用 40 kA 直流电源的研制与应用[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11): 72-75.
- [103] 宋青竹, 鄂东梅, 王玲玲, 等. 真空电弧炉及凝壳炉的控制技术进展多功能真空感应炉的开发[J]. 真空, 2022, 59(6): 1-9.
- [104] 郭逸丰, 李 强, 郑天祥, 等. 磁控电渣重熔技术研究进展[J]. 自然杂志, 2023, 45(3): 188-206.
- [105] 刘福斌, 臧喜民, 姜周华, 等. 导电结晶器电渣重熔中非金属夹杂物的去除[J]. 中国冶金, 2010, 20(5): 5-8.
- [106] 曹玉龙, 姜周华, 董艳伍, 等. 电渣复合法制备双金属复合轧辊的研究进展[J]. 特殊钢, 2020, 41(5): 6-13.