

特种冶炼工艺及产线智能化展望

谢宇

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 当代航空航天、能源技术等日新月异的发展, 对钢或合金材料在耐高温、高压、耐腐蚀性等方面提出了更高的要求。为提高产品质量, 需采用特种冶炼的方法, 代替常规的冶炼工艺。本文介绍了特种冶炼生产的核心工艺流程, 并对现有生产中应用的智能化技术进行分析。结合生产企业生产模式, 在保证主体工艺现有熔速智能控制、自动加渣与一键精炼等关键环节的智能制造体系, 在辅助生产工艺通过引入 AI 模拟、机器人化操作与 MES 全流程监控, 实现冶炼过程绿色化、无人化与高效协同。

关键词: 特种冶炼; 冶炼工艺; 自动化技术; 绿色生产

Prospects for Special Metallurgical Processes and Production Line Intelligence

Xie Yu

China Metallurgical Beijing Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: The rapid development of modern aerospace and energy technologies has imposed higher requirements on steel or alloy materials in terms of high temperature resistance, high pressure resistance, and corrosion resistance. To improve product quality, special smelting methods need to be adopted instead of conventional smelting processes. This article introduces the core process flow of special smelting production and analyses the intelligent technologies applied in existing production. Combined with the production models of manufacturing enterprises, the intelligent manufacturing system ensures key steps of the main process such as intelligent control of the current melting rate, automatic slag addition, and one-key refining, while auxiliary production processes achieve green, unmanned, and highly efficient collaborative smelting through the introduction of AI simulation, robotic operation, and MES full-process monitoring.

Keywords: Specialised smelting; Smelting technology; Automation technology; Green production

0 引言

钢的特种冶炼, 通常是指以提高钢的质量为目的, 或针对含有易氧化活泼金属或合金的特殊冶炼工艺, 需在真空或隔绝空气的环境中熔炼的生产方法^[1]。

随着航空航天、能源技术、电子技术及民用高端钢材等领域用钢需求快速增长, 高温合金、耐蚀合金、精密合金等特种冶金材料市场需求进一步提升, 特种冶金材料市场需求向高技术含量、高附加值方向发展, 产品升值空间大, 同时也促使着国内特种冶炼企业快速发展, 企业装备和自动化程度不断提升。

1 特种冶炼及特种冶炼设备

钢的特种冶炼, 主要用来生产某些具有特殊纯净度要求的特殊钢和高温合金、精密合金、难熔金属、钛及钛合金、特种不锈钢等高级合金。针对不同的金属、合金, 通常采用的冶炼方法也不相同。

例如, 真空感应熔炼 (VIM) 等一次熔炼工艺, 广泛用于高级轴承钢、燃气轮机用钢等高级钢种的熔炼; 适用于航空航天、能源国防特种材料等关键领域及燃机、核电等民用高端金属材料的需求, 生产工艺通常采用电炉 / 真空感应炉 + 电渣炉 / 真空自耗炉 + 锻造或轧制成材; 适用于钛合金生产的真空自耗电弧熔炼 VAR 或冷床炉熔炼工艺等。

其中真空感应 + 真空自耗 / 电渣 + 锻造的冶炼模式作为重点的特种冶炼方式之一, 在高温合金、特种不锈钢、高合金钢的材料冶炼中广泛应用。

最近十几年是我国特种冶金行业发展最快的时期。据不完全统计, 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, 总年生产能力约 30 万吨。生产用的电渣重熔炉设备数量则超过 1800 台套, 年生产能力超过 300 万吨^[2]。

传统的特钢企业如抚钢、大冶特钢、攀长特钢等相继引进大规模新建大型真空感应炉、真空自耗炉和电渣重熔炉。宝武特冶、太钢不锈、钢研高纳、湖州久立永兴特材、西部超导、六合锻造、隆达超合金等特冶企业也呈现出蓬勃发展的势头。

1.1 真空感应熔炼

真空感应熔炼(VIM)是一种在真空或惰性气氛环境下,借助电磁感应涡流效应使金属加热熔化,并浇注成铸锭的冶炼方法。感应熔炼没有来自电极材料的污染,加上金属熔池内的电磁搅拌,有效控制成分并脱碳、去气、除杂质等,获得较高金属纯净度。

与其他冶炼方法对比,真空感应冶炼具有可精确控制化学成分,制备的电极纯净度高,且冶炼过程灵活可控,工艺参数可根据生产要求调整。产品具有较高的纯净度、冶炼工艺可控可调性强等优势 and 特点,冶炼金属的气体元素、非金属夹杂物和其它有害杂质元素的含量远低于其他冶炼方法。

同时,真空感应炉冶炼在冶炼过程中对易挥发元素的成分控制较为复杂,且存在一定的偏析。因此真空感应炉为一次冶炼,多与真空电弧重熔或电渣重熔设备组合生产。

目前真空感应炉是制备镍基高温合金、特种不锈钢、高强度等高性能合金的关键熔炼设备。国内引进的最大真空感应炉为30t级,建设于抚顺特钢。大冶特钢30t级真空感应炉正在建设中。

1.2 真空电弧重熔设备

真空电弧重熔(VAR)是在真空条件下,采用直流电弧加热,将已知成分的金属电极逐层重熔,并经水冷铜结晶器顺序凝固,生成全新固体电极的冶炼工艺。真空电弧重熔生产,旨在提升材料纯净度和组织均匀性。

真空电弧重熔工艺,无耐火材料或渣料的污染,该方法可有效降低金属中氧含量及非金属夹杂,同时大量去除氢,并部分减少氮和硫,具有产品纯净度高、凝固组织和化学成分均匀、成材率提高和容量大等特点,因此在特种冶炼生产中广泛应用。

1.3 电渣重熔设备

电渣重熔(ESR)是利用熔渣电阻热在水冷结晶器中重熔自耗电极,从而制备高质量钢与合金的冶炼工艺。

经过电渣重熔可有效去除自耗电极中的大型非金属夹杂物,残留的小颗粒杂质分布均匀。金属溶液在水冷结晶器中强制冷却凝固,形成组织致密且宏观偏析轻微的铸锭^[3]。经电渣重熔后,钢锭表面覆盖一层薄而均匀的渣壳,

钢锭表面光滑,减少精整工序,提高了金属成材率。

电渣重熔法因其相较于其他特种熔炼方法,设备简单、工艺操作方便且生产费用低,是当今世界上采用最广泛的特种熔炼方法。

2019年国机重装下属二重装备公司,引进建设的国内最大单相125t级电渣重熔炉顺利投产。2024年国内引进的INTECO 150保护气氛电渣炉在一重建设完成。

2 特种冶炼生产工艺流程及操作要点

2.1 真空感应炉工艺流程

2.1.1 装料

真空感应炉的装料方式,实际生产中多采用冷装法装料,即将固体炉料从坩埚顶部上加料装置直接装入真空感应炉的坩埚内。

根据材料的熔点、密度、活性及挥发性差异,将炉料分时段分别装入坩埚不同位置及加料器,装料需遵循下紧上松原则,防止炉料下行时卡料,使其相互间不易焊接,从而加快炉料的熔化速度。为预防架桥问题需控制加入炉料的尺寸^[4]。

侧加料装置用于加入易挥发或合金等物料,可根据用户的要求配备。一般采用震动侧加料的方式,12t真空感应炉单次可加料约3吨。6t炉侧加料一般为1.5~2t。

2.1.2 熔化

熔化期通过合理控制供电使炉料顺利熔化,使固体物料逐步熔化并逐步扩大熔池,炉料的熔化过程直接影响到金属熔化时间、电能消耗等技术经济指标,实现脱氢、去除杂质元素和有限的脱碳与脱氮。

2.1.3 精炼

精炼期是完成调整熔池温度、脱氧及合金化的重要时期,是提高钢液的纯净度的重要阶段。精炼阶段可实现降碳、脱氧、脱氮,去除有害杂质,调整成分,并为后续合金化创造条件。

2.1.4 合金化

在合金化阶段加入活泼元素,并使其均匀化,用以精确调整化学成分和钢液温度,并调整炉内惰性气体压强等,使其达到出钢要求。

2.1.5 出钢浇铸

小型真空感应炉采用直接上注入钢锭模形式。对于大容量坩埚,也可采用下注式。浇铸前,应将锭模和溜槽预热到所要求的温度后,分别放入浇注室和溜槽室内。分别将浇注室和溜槽室抽真空,使其真空度与冶炼室的真空度相一致。打开有关闸阀,待锭模和溜槽就位后,开始倾动

坩埚浇注。浇注完毕后,根据产品要求,镇静一定时间,使锭模和溜槽回到原来位置,可进行脱模操作。

2.2 真空自耗炉工艺流程

2.2.1 电极准备

自耗锭原材料电极棒一般为真空感应炉产出的感应电极,生产前需进行表面扒皮处理。

电极准备工序主要指自耗电电极与过渡电极焊接。采用炉内焊接时在真空环境中完成,对设备的结构、装置有更高的要求。

从效率、设备占用率及自耗设备简易程度、造价等方面考虑,目前企业多采用自耗电电极炉外焊接形式,即在大气下焊接好电极,要求保证自耗电电极与过渡电极的同轴度,并要求焊缝平直,焊后不变形。

2.2.2 引弧

引弧的作用是在自耗电电极与结晶器底部的引弧剂之间形成电弧,提高弧区温度和在结晶器底部形成一定大小的金属熔池,保持自耗电电极与金属熔池之间形成稳定的电弧,使自耗电电极的重熔转入正常的熔炼。

引弧结束后迅速调整电流至工艺设定值,在控制电压、真空度、熔速等参数的条件下进行稳定熔炼。

2.2.3 正常熔炼期

熔化精炼的主要时期,可有效的脱除金属中的气体和非金属杂质,获得理想的洁净组织。自耗电电极在直流电弧的加热下,温度逐渐达到熔化材料温度以上,电极端部开始熔化。已熔化的液滴在重力的作用下下落,逐步形成金属熔池,熔滴被不断加热,所含的夹杂在低压和高温的作用下会被分解、挥发,使重熔金属得到净化精炼。熔池下部的金属因在水冷结晶器中被冷却而凝固^[3]。

2.2.4 热封顶

熔炼后期,通过调节电流实现控制自耗电电极的熔化速率,这种操作有利于将缩孔最小化并集中于铸锭顶部区域,从而减少后续切头损失,提高材料利用率。

2.2.5 自耗锭冷却及后处理

重熔后的自耗锭根据工艺要求,在真空或惰性气体保护下,在水冷结晶器中冷却后出炉。自耗锭根据工艺要求配置适当的缓冷罩直立放置缓冷。

缓冷后的自耗锭经过切头、表面扒皮研磨处理,作为自耗锭成品储存或进入下一道工序。

2.3 电渣重熔工艺流程

2.3.1 原料准备

(1) 电极棒准备。电渣锭原材料电极棒为真空感应炉

产出的感应电极或精铸车间的模铸电极。电渣锭原料准备与自耗生产工艺相似,都需进行表面处理和炉外焊接。

原料准备还需切割引锭钢板。同时,准备好结晶器、水冷底座,将引锭板放在水冷底座铜板上。

(2) 渣料准备。按照工艺要求配置渣料并进行烘烤。烘烤良好的渣料,送到炉前不得长时间放置,防止渣料吸水。如果有其他特殊附加料、补加料,也需要清洁、干燥,并准确称重。

2.3.2 烘渣及生成渣池

除作为电阻发热体提供热源外,电渣炉熔渣通过形成渣壳促进铸锭成型性外,同时起到精炼作用。因此,炉渣的选择会关系到重熔钢锭的质量、电渣生产过程的稳定性等。

电渣重熔所需渣料主要成分为 CaO 、 Al_2O_3 、 CaF_2 ,原料按比例混合破碎后经高温熔炼而成。入炉前的渣料预热,有效除去渣料内的水分和含氢化合物。烘渣的温度、时间与渣料渣池厚度具有密切的关系,烘渣温度一般设定为 $650\sim 900^\circ\text{C}$ 之间。

在引锭板上放置固体导电渣,带电电极下降接触后产生电阻热使其逐步熔化,烘烤后的渣料依次逐步加入结晶器内持续融化,形成渣池。

2.3.3 重熔精炼

正常电渣重熔是整个熔炼中去除杂质,控制成分的关键环节。重熔过程中,要保证电流的稳定,调整合理的电极进给速度。

熔炼过程中需根据工艺要求适时加入脱氧剂及其他添加剂,以有效去除金属中的非金属夹杂物、氧、硫、氮气等有害杂质。

2.3.4 补缩及模冷

金属电极熔炼末期,需对钢锭头部实施填充补缩操作。该工艺通过降低熔化速率,以填充电渣锭头部缩孔,从而提升材料成材率。

电极棒全部完成重熔后,电极夹钳将假电极移开、冷却、卸下后,可以重复利用焊接另外的电极棒,形成新的自耗金属电极。

补缩结束后,电渣锭在结晶器冷却水的作用下进行模冷。模冷期根据电渣锭的尺寸不同,模冷时间不同。一般特种冶炼钢种, $\phi 500\text{mm}$ 钢锭,模冷时间约 $60\sim 70$ 分钟,完成模冷后进行脱模。

2.3.5 钢锭处理

待重熔钢锭完全模冷后,即可与结晶器共同吊运出熔

炼外,完成脱模。依据钢种或合金特性的差异,可分别采用缓冷、退火等差异化冷却工艺。钢锭处理需要取样分析,部分研磨(点磨),成分和表面合格后待流转至下一工序。

3 特种冶炼产线智能化展望

3.1 真空感应熔炼设备

大型真空感应熔炼设备普遍采用半连续式架构,支持 24 h 连续运行。其体型虽大,却将多元工艺集成于一体,兼容性强、覆盖面广,切换灵活。如 12tVIM 也可以用于 6t 锭型生产,设备灵活性高。高度也可随工艺要求调整,满足从 2m 到 4.5m 范围的生产。可根据实际生产需求和工艺需求,进行非标定制化设计。

为保证钢水充分搅拌,真空感应炉都带有电磁搅拌功能。电磁搅拌主要采用三相工频搅拌与单相搅拌(UDS)两种技术。三相工频搅拌技术成熟度高,可应用于小型及大型感应炉,适应性强;UDS 技术源自美国,作为新型搅拌技术,更适用于小型炉型,且制造成本较低。目前国内外 6 吨以上真空感应炉普遍采用三相工频搅拌技术。^[5]

3.2 真空自耗重熔设备

真空自耗生产会采用熔滴短路频率控制方法以满足生产的稳定。此方法对弧长微变和真空电弧扰动具有更高敏感性,且熔滴短路信号响应迅速,有利于维持恒定弧长和稳定的熔化条件。

稳定状态下,使用熔滴短路频率控制熔速的稳定性离散度更小。同时氦气冷却和防止元素挥发的充氦技术也得到了广泛应用。

3.3 电渣重熔炉

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。国产电渣炉在国内的市场占有率达到 95% 以上。

德阳二重集团采用进口的 125t 保护气氛电渣炉结合国内自己的工艺研究成功试制了 620℃ 超超临界火电机组 FB2 汽轮机转子用 100t 级大型电渣锭。

3.4 辅助工序设施智能化及清洁化发展

3.4.1 智能化控制及生产工艺优化

随着计算机仿真技术的应用,利用 AI 建模技术可模拟实现如感应炉的电磁场模拟优化、自耗炉的熔速智能控制、电渣炉的渣层厚度动态调节等生产场景,并且准确控制钢液温度、炉内压力等生产参数,优化生产时电源功率与冶炼生产的电极或钢液的熔化速率,以达到降低能耗,

改善感应电极、自耗锭、电渣锭等产品的缺陷率。

3.4.2 生产流程的机器人化和智能化

危险性的生产区域或产生较大污染的工作流程,采用机械化、智能化最终达到无人化生产,是实现特种冶炼绿色智能化生产的最终目标之一。

电渣炉、自耗炉生产电极的装取料工序,可采用智能天车系统,通过 PLC 及定点控制,实现天车的自动调度,自动定位、自动取料及放料,实现高温钢锭的自动转运。

AGV 车可在无人驾驶的情况下,按规划路线实现小型电极、冷料的转运,对于多工位的电渣、自耗生产,可大大提高转运效率,降低人工成本。

采用机械液压机构,实现真空感应炉浇筑后的感应棒与锭模水平脱开,代替传统的行车吊运撞击方式,可避免行车脱钩及钢锭滑脱情况,避免安全风险及隐患,降低感应棒出钢难度,提高生产效率。

自耗电电极的焊接采用自动焊接机器人,代替传统人工焊接,在保证焊接质量的情况下,焊烟自动收集过滤,更大程度的提升生产环境,满足绿色化、智能化生产。

3.4.3 电渣炉一键式精炼技术

集成工艺模型和自动化设备,通过自动加渣、起弧、熔速调节、保护气氛控制和冷却参数设定,配套智能化天车式运输,实现电渣炉一键式重熔精炼,缩短生产周期,实现从原料电极至成品的全流程控制。

目前自动加渣系统已在国内外电渣炉企业得到广泛应用,湖州久立引进的因泰克、ALD 保护气氛电渣炉,具有加渣系统占地小,集成化程度高的特点,能自动实现渣料的称重,检测渣池深度、渣壳质量,从而自动调节加渣速率。国内企业辽重、鑫蓝海企业的电渣炉也具有加渣设施,可实现自动、手动加渣功能,在各生产企业也得到了广泛应用。

3.4.4 特种冶炼全线集控及 MES 智能化系统追踪管理

MES 系统的应用,可实现采集特冶工序的全过程工艺过程参数,建立数据平台,为工艺质量监控和追溯、质量预警提供依据,为技术和管理人员提供全面准确的工艺质量数据,提高工作效率,减少人工对数据的干预,实现质量追溯。

4 结语

特种冶炼是高端金属材料制备的核心工艺,其自动化、智能化发展是提升产品质量、降低能耗、实现绿色制造的关键。未来,特种冶炼将呈现“工艺透明化、操作无人化、生产绿色化、管理协同化”四大趋势。随着设备结

构逐步完善, 智能的控制系统, 生产的信息化管理, 产线自动化水平的提升, 同时 AI 优化、机器人技术的深度融合, 必然会提高我国特种冶炼装备及产品质量的竞争力, 有望在高端合金、航空航天材料等领域实现更大突破, 使我国特钢生产再创新高。

参考文献:

[1] 薛正良, 朱航宇, 常立忠. 特种熔炼[M]. 冶金工业出版社, 2018.

[2] 姜周华, 董艳伍, 刘福斌, 耿鑫. 我国特种冶金产

品、技术和装备的最新进展与展望 [J]. 特殊钢, 2024,6: 6.

[3] 姜周华, 董艳伍, 耿鑫, 刘福斌. 电渣冶金学[M]. 科学出版社, 2015,12:3-4.

[4] 王振东. 感应炉冶炼工艺[M]. 机械工业出版社, 2012.

[5] 桂大兴, 孙宝德, 董安平. 大型多功用、高性能、智能化真空感应熔炼装备设计[J]. 中国铸造装备与技术, 2022,11:30.