

高品质特种钢转炉冶炼工艺控制研究

王春强

首钢京唐钢铁联合有限责任公司 河北 唐山 063000

摘要：特种钢作为高端装备制造的关键材料，其转炉冶炼工艺控制水平直接影响产品质量与性能。本文针对特种钢冶炼过程中对纯净度、成分均匀性及稳定性的严苛要求，系统分析了转炉冶炼的核心工艺环节与控制难点，重点探讨了顶底复吹技术优化、终点精准控制、脱氧合金化工艺及夹杂物去除等关键技术。研究表明，通过复吹工艺创新实现长炉龄稳定生产、构建“氧—温”协同控制体系、优化脱氧制度及强化全过程控氮措施，可显著提升钢水纯净度与产品质量稳定性。本文为高品质特种钢转炉冶炼提供技术参考。

关键词：特种钢；转炉冶炼；顶底复吹；纯净度控制；工艺优化

引言：随着高端装备制造业快速发展，对特种钢的强度、韧性、疲劳寿命及纯净度提出了更高要求。转炉冶炼作为特种钢生产的关键环节，其工艺控制水平直接决定了钢水质量与后续加工性能。本文立足转炉冶炼工艺全流程，从复吹技术、终点控制、脱氧合金化及杂质去除等维度，系统探讨高品质特种钢转炉冶炼的关键控制技术，旨在为特种钢生产工艺优化提供理论与实践指导。

1 特种钢转炉冶炼的技术特点与控制要求

1.1 特种钢对钢水质量的特殊要求

高品质特种钢对钢水纯净度有着极为苛刻的要求。以轴承钢为例，其全氧含量需控制在 8×10^{-6} 以下，钛含量低于 25×10^{-6} ，钙含量低于 10×10^{-6} 。齿轮钢则要求平均氧含量小于 15×10^{-6} ，且淬透带宽带控制在 4HRC 以内。这些指标远高于普通钢种，对转炉冶炼工艺提出了极高要求。特种钢还需严格控制磷、硫等有害元素，磷含量通常要求低于 0.015%，硫含量低于 0.010%。另外，非金属夹杂物的形态、尺寸及分布也是影响特种钢性能的关键因素，要求冶炼过程中实现夹杂物的充分去除与变性处理。

1.2 转炉冶炼工艺控制的核心要素

转炉冶炼工艺控制围绕“温度、成分、纯净度”三大核心要素展开。温度控制直接影响脱碳、脱磷反应的进行及终点命中率，特种钢冶炼要求终点温度偏差控制在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 以内。成分控制涉及碳、硅、锰、磷、硫及各类合金元素，需在极短时间内实现精准配比。纯净度控制则是特种钢冶炼的重中之重，包括降低钢中氧、氮、氢含量及去除非金属夹杂物。三大要素相互关联、相互

制约，例如终点碳含量过低会导致钢水过氧化，增加夹杂物含量；温度过高则加剧炉衬侵蚀，影响复吹效果^[1]。因此，特种钢转炉冶炼需建立多目标协同控制体系。

2 顶底复吹工艺优化

2.1 复吹技术的冶金功能与优势

顶底复吹技术结合了顶吹的快速脱碳能力和底吹的强搅拌效果，是高品质特种钢冶炼的核心技术。该技术通过向炉内同时吹入氧气和惰性气体，能有效提高反应效率，改善钢水质量，降低生产成本。底吹气体的搅拌作用可促进钢渣反应平衡，加速脱磷、脱硫进程，同时降低钢水过氧化程度，减少夹杂物生成。首钢水钢的实践表明，通过优化复吹工艺，2号转炉复吹寿命成功突破万炉大关，渣中全铁含量下降 1.68%，脱磷效率显著提高，为优特钢、帘线钢等高端产品结构转型提供了坚实的工艺支撑。

2.2 底吹气体切换与流量控制

底吹工艺的核心在于气体种类与流量的精准控制。吹炼前期采用氮气底吹可降低成本，但吹炼至一定阶段后需切换为氩气，防止钢液增氮。专利技术表明，顶底复吹转炉下枪供氧开始前 3 分钟底吹氮气，吹炼至 3 分钟时切换为氩气至吹炼结束，可有效控制钢中氮含量。吹炼过程中，底吹流量需根据冶炼阶段动态调整：前期采用较大流量强化搅拌，促进脱磷；中期适度降低流量，避免喷溅；后期维持稳定流量，保证终点均匀性。首钢水钢引进了全新的底吹自动控制系统，实现了底吹自动调节与智能化控制，杜绝了误操作，为稳定复吹奠定了硬件基础。

2.3 炉龄与复吹效果的协同提升

长炉龄是转炉高效生产的重要标志,但炉龄延长与复吹效果维持之间存在矛盾。随着炉龄增加,炉底侵蚀加剧,复吹砖寿命下降,底吹效果逐渐恶化。为解决这一问题,需从设备、管理、操作、维护等多个维度精准发力。优化炉型设计,改变砌筑方式,增强抗侵蚀能力;落实优化炉渣结构、控制氧化镁比例、标准化溅渣护炉、降低出钢温度等精细化操作措施。同时,强化过程管控,为每座转炉建立专属工作群,炉长检查每炉炉况并实时分析,实现信息透明与快速响应。这些措施使复吹寿命大幅提升,冶金效果与产品质量同步提高^[2]。

3 转炉终点精准控制技术

3.1 “氧—温”协同控制策略

终点控制是转炉冶炼的核心环节,直接决定钢水质量与后续精炼负担。高品质特种钢对终点氧含量和温度有严格限制,需构建“氧—温”协同控制体系。河钢唐钢的实践表明,通过优化溅渣护炉模式保证转炉全炉役具有良好的底吹效果,同时按照不同钢包热状态降低转炉终点温度,进而将终点氧位控制在 500ppm 以下,可确保钢水夹杂物含量达到最低。该方案应用后,IF 钢终点氧位 $\leq 500\text{ppm}$ 的控制比例达到 100%,显著提升了产品质量控制水平。终点控制还需兼顾碳含量,避免过氧化。通过提升终点碳命中率、减少后吹频率、实现高碳出钢,可降低钢液吸氮速率,为高品质钢冶炼创造条件。

3.2 碳—温协调与出钢条件优化

碳含量与温度是终点控制的两大关键参数,二者相互影响。碳含量过高会导致钢水氧化性不足,脱磷不彻底;碳含量过低则钢水过氧化,夹杂物增多。特种钢冶炼要求终点碳含量控制在 0.04%~0.10% 之间,钢水温度控制在 1580℃~1640℃。中高碳特殊钢可实施终点高碳出钢技术,在保证终点钢水温度和磷含量合格的条件下实现高碳出钢,既节约冶炼成本,又降低钢水氧化性。出钢过程需严格挡渣,采用滑板挡渣技术实现“留钢操作”,有效阻断出钢后期因炉渣裹挟空气带来的增氮通道。出钢过程中还需按顺序加入脱氧剂和合金,保证成分均匀性。

3.3 高碳出钢技术的应用

高碳出钢技术是中高碳特殊钢冶炼的重要方向。传统工艺要求终点碳含量较低,导致钢水过氧化严重,脱氧剂消耗增加,夹杂物含量升高。高碳出钢技术通过优化吹炼制度,在保证脱磷效果的前提下将终点碳含量提高至 0.10% 以上,显著降低钢水氧化性,节约冶炼成

本,为冶炼超洁净特殊钢奠定良好基础。该技术的关键在于精准控制供氧强度和造渣制度,在脱碳与脱磷之间找到最佳平衡点。

4 脱氧合金化与纯净度控制

4.1 钢水脱氧工艺优化

脱氧是转炉冶炼后的关键工序,直接影响钢水纯净度与夹杂物形态。特种钢对氧含量有严格限制,轴承钢要求全氧含量低于 8×10^{-6} ,需采用强脱氧剂进行深度脱氧。出钢过程需按顺序加入脱氧剂和合金:钢水罐中钢液达到钢水罐的 1/3 时加入锰系合金进行合金化,出完钢后加入铝系脱氧剂进行深脱氧。铝是强脱氧元素,但脱氧产物 Al_2O_3 易聚集形成大颗粒夹杂物,需通过钙处理将其变性为低熔点钙铝酸盐,促进上浮去除^[3]。LF 精炼过程需优化精炼渣系,制定合理的造渣制度和吹氩搅拌制度,保证钢水脱氧和夹杂物控制效果。

4.2 夹杂物去除与变性处理

非金属夹杂物是影响特种钢性能的关键因素,需在冶炼过程中实现充分去除与有效变性。夹杂物去除的主要手段包括:底吹氩气搅拌促进夹杂物碰撞长大上浮、LF 精炼造白渣吸附夹杂物、RH 真空循环脱气去除微小夹杂物。对于铝脱氧钢,需进行钙处理将 Al_2O_3 夹杂物变性为低熔点钙铝酸盐,避免水口结瘤并改善钢材性能。轴承钢 GCr15 要求全氧含量极低,需通过 LF-VD 或 LF-RH 双联精炼实现深度脱氧和夹杂物控制,实践表明最低全氧含量可达 5×10^{-6} 。

4.3 全流程控氮技术

氮含量控制是高品质特种钢冶炼的难点之一,氮与铁结合形成的氮化物会引起钢材应变时效脆化,导致强度异常升高、塑性和韧性显著下降。转炉工序控氮需从源头入手:革新底吹工艺,吹炼前将底吹气体由氮气切换为氩气,既杜绝底吹增氮,又利用氩气泡的“气泵”效应去除部分已溶氮;精细控制炉口压力,确保炉内维持稳定正压,防止因“大喷”或“吸冷风”造成钢液增氮;升级挡渣技术,采用滑板挡渣技术有效阻断出钢后期增氮通道。精炼工序则需加强物理密封,保持钢包底吹氩搅拌,维持炉内正压氩气环境,通过快速形成还原性白渣、严格执行埋弧加热制度、保障充足软吹氩时间等措施进一步阻断氮元素侵入。

5 特种钢转炉冶炼工艺集成与应用

5.1 典型钢种的工艺控制要点

不同特种钢对转炉冶炼工艺有差异化要求。齿轮钢

注重淬透性带宽控制,需开发淬透性预报模型和成分动态控制平台,实现精准合金化-7。轴承钢对氧含量要求最为严苛,需实施全流程低氧冶炼,从转炉出钢到精炼、连铸各环节严格控制氧的进入。IF 钢即超低碳无间隙原子钢,具有超优质的深冲性能,广泛用于汽车冲压件、外板,由于钢水夹杂物是影响表面质量和冲压性能的重要因素,提高钢水纯净度是确保 IF 钢性能的关键-5。冷镦钢 SWRCH22A 则需重点控制钢水纯净度和铸坯质量,应用炉外精炼技术改善夹杂物-4。

5.2 工艺参数的协同匹配

转炉冶炼各工艺参数之间存在复杂的耦合关系,需实现协同匹配才能达到最佳冶炼效果。氧气流量、枪位、底吹流量、造渣材料加入量等参数需根据钢种要求和炉况动态调整,任何单一参数的偏离都可能引发连锁反应。吹炼前期以脱硅、脱磷为主,此时熔池温度较低,需采用高枪位、大流量氧气,配合适量石灰造渣,使石灰快速熔化形成高碱度炉渣,实现高效脱磷。中期进入碳的剧烈氧化期,需降低枪位强化搅拌,使氧气射流直接冲击熔池,加速脱碳反应,同时保持底吹气体搅拌,促进钢渣充分接触。后期需控制终点成分和温度,适度提枪减少喷溅,防止钢水过氧化。底吹流量需与顶吹强度匹配,底吹过小则搅拌不足,钢渣反应不充分;底吹过大则加剧喷溅,甚至造成炉底侵蚀加速。终点碳含量与温度需协调控制,碳含量过低导致钢水过氧化,夹杂物增多;碳含量过高则脱磷不彻底。温度偏高会加剧炉衬侵蚀,温度偏低则影响后续精炼^[4]。实际操作中还需考虑钢包热状态、炉龄阶段等因素,动态调整终点温度目标。这些参数的优化需依托大数据分析和智能模型,通过采集历史炉次数据,建立参数与冶炼效果之间的关联模型,实现动态精准控制,减少人为经验操作的波动性。

5.3 智能化控制发展方向

随着人工智能和大数据技术的快速发展,转炉冶炼正加速向智能化方向迈进,传统依赖操作人员经验的冶炼模式正在被数据驱动的智能控制所取代。智能底吹控制系统实现了底吹气体的自动调节与智能化控制,根据吹炼阶段自动切换底吹气体种类并调节流量,杜绝了人

为误操作,使底吹效果更加稳定可靠。终点预测模型基于海量历史炉次数据训练,利用机器学习和神经网络算法,可实时预测终点碳含量和钢水温度,辅助操作人员精准控制吹炼终点,显著提高终点命中率,减少后吹次数。转炉炼钢专家系统将资深工艺专家的知识和多年操作经验进行系统集成,构建知识库和推理机,可根据当前炉况自动生成操作指导方案,实现冶炼过程标准化、规范化。静态模型依托物料平衡和热平衡计算,在吹炼前制定供氧和造渣方案;动态模型则基于副枪检测或烟气分析数据,在吹炼过程中实时修正操作参数。未来,数字孪生技术将成为转炉冶炼智能化的重要方向,通过构建与物理转炉完全对应的虚拟模型,实现冶炼过程的虚拟仿真和实时优化。操作人员可在虚拟环境中预演不同操作方案的效果,选择最优策略后再付诸实施,大幅提升工艺控制水平、产品质量稳定性及生产效率,同时降低原材料消耗和能源消耗。

结束语

高品质特种钢转炉冶炼工艺控制是涉及多因素、多目标的系统工程。本文从复吹技术优化、终点精准控制、脱氧合金化及纯净度控制等维度,系统探讨了特种钢转炉冶炼的关键技术。研究表明,通过复吹工艺创新实现长炉龄稳定生产,构建“氧—温”协同控制体系实现终点精准命中,优化脱氧合金化制度降低夹杂物含量,实施全流程控氮技术提升钢水纯净度,是高品质特种钢转炉冶炼的有效技术路径。随着智能控制技术与新工艺的不断发展,转炉冶炼将向更高效、更精准、更洁净的方向迈进,为高端装备制造业发展提供优质原材料保障。

参考文献

- [1] 崔世刚. 转炉炼钢的自动化控制技术研究 [J]. 中国金属通报,2022(16):82-84.
- [2] 于国庆. 转炉底吹 CO₂ 对冶炼成本及钢水质量的耦合影响分析 [J]. 冶金标准化与质量,2026,64(1):33-36.
- [3] 杨依龙. 转炉炼钢过程中氧气吹炼对钢水质量的影响分析 [J]. 中国金属通报,2025(4):31-33.
- [4] 崔政. 转炉生产技术现状和 AI 技术应用展望 [J]. 特钢技术,2025,31(1):1-4.