

冶炼中高碳钢影响成品碳控制的因素及对策

戚亚非

安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455000

摘要: 中高碳钢(碳质量分数0.25%~1.50%)广泛应用于机械制造、轨道交通、弹簧及轴承等关键领域,碳含量作为其核心指标,直接决定钢材强度、硬度、韧性及焊接性能,需精准控制在目标值 $\pm 0.02\%$ 范围内。本文基于转炉-LF精炼-连铸全流程工艺,系统分析铁水条件、转炉冶炼、精炼操作、连铸过程及原辅料等环节对成品碳控制的影响机制,结合生产实际提出针对性控制对策。实践表明,通过优化高拉碳工艺、稳定增碳剂质量、控制过程增碳、精准温度与氧含量调控等措施,可将成品碳合格率提升至99.5%以上,满足高端中高碳钢的质量要求。

关键词: 中高碳钢;成品碳控制;转炉冶炼;精炼;连铸;碳含量稳定性

1 引言

中高碳钢因强度高、耐磨性好等特性,在工业领域占据重要地位。随着制造业升级,用户对钢材成分均匀性与稳定性要求愈发严苛,碳含量微小波动会导致钢材性能显著差异,如碳含量偏高易引发脆性断裂,偏低则强度不足。

当前国内中高碳钢生产多采用转炉 \rightarrow LF精炼 \rightarrow 连铸工艺,流程长、环节多,碳含量易受多因素干扰,波动超标问题频发。据统计,约60%的成分不合格品由碳含量失控导致,严重影响产品合格率与企业经济效益。因此,系统梳理成品碳控制的影响因素,制定全流程精准控制对策,对提升中高碳钢质量稳定性、降低生产成本具有重要现实意义。

2 中高碳钢碳控制的核心要求

中高碳钢碳含量区间宽、钢种多,不同钢种碳控制精度要求差异显著:

中碳钢(0.25%~0.60%):如45#钢,碳含量目标偏差 $\leq \pm 0.02\%$,需兼顾强度与韧性;

高碳钢(0.60%~1.50%):如SWRH82B帘线钢、GCr15轴承钢,碳含量偏差 $\leq \pm 0.015\%$,对碳均匀性要求极高,需避免碳偏析与成分波动。

碳控制核心难点在于过程增碳与脱碳的动态平衡:转炉终点碳偏低需增碳,增碳剂质量不稳定易导致碳波动;精炼与连铸过程中,钢包耐材、覆盖剂、中间包残渣等易造成钢水增碳,且温度、氧含量变化会影响碳氧反应平衡,进一步加剧碳含量波动。

3 冶炼中高碳钢成品碳控制的影响因素

3.1 铁水条件的影响

铁水是转炉炼钢的主要原料,其碳含量、温度、硅锰硫磷成分直接决定转炉初始碳含量与脱碳负荷,是成

品碳控制的基础。

铁水碳含量:铁水碳质量分数通常为4.0%~4.4%,碳含量波动 $\pm 0.1\%$ 会导致转炉脱碳量偏差约5%。铁水碳偏低时,转炉需强化脱碳,终点碳易偏低,后续增碳量增加,波动风险上升;碳偏高时,脱碳负荷大,易出现终点碳超标或脱碳过度。

铁水温度:适宜铁水温度为1280~1350 $^{\circ}\text{C}$,温度每升高10 $^{\circ}\text{C}$,碳在钢液中溶解度增加约0.02%。温度过低,转炉脱碳反应速率慢,终点碳难以控制;温度过高,碳氧反应剧烈,易导致终点碳偏低,且钢水氧化性增强,后续增碳吸收率下降。

铁水杂质成分:硅、锰含量偏高会增加造渣难度,导致炉渣泡沫化,影响脱碳反应稳定性;硫、磷含量超标需强化脱除,延长冶炼时间,加剧碳含量波动。

3.2 转炉冶炼过程的影响

转炉冶炼是碳含量控制的关键环节,终点碳、氧含量及温度直接决定钢水初始碳水平,操作波动是碳失控的主要原因。

终点碳控制策略:中高碳钢冶炼需采用高拉碳工艺,终点碳控制在0.15%~0.25%,减少后续增碳量。若终点碳偏低($< 0.10\%$),钢水氧化性强,增碳剂易被氧化,碳吸收率仅60%~70%,且增碳量需大幅增加,易导致碳超标;终点碳偏高($> 0.30\%$),后续精炼脱碳难度大,易造成成品碳超标。

终点氧含量:碳氧平衡遵循 $[\text{C}] \times [\text{O}] = K$ (温度常数),终点氧含量每升高 100×10^{-6} ,碳含量约降低0.03%。中高碳钢终点氧含量需控制在 $400 \sim 600 \times 10^{-6}$,氧含量过高,钢水氧化性强,增碳剂氧化损失大,碳吸收率不稳定;氧含量过低,碳未充分脱除,终点碳超标风险上升。

出钢温度与下渣量：出钢温度需控制在1620~1640℃，温度过高，钢水碳溶解度增加，且后续精炼降温过程中易发生碳析出，导致碳偏析；温度过低，钢水流动性差，增碳剂溶解不均匀，碳含量波动大。出钢下渣量需 $\leq 5\text{kg/t}$ 钢，下渣过多会带入氧化性炉渣，氧化增碳剂，降低碳吸收率，同时炉渣中碳化物会造成钢水局部增碳。

吹炼操作稳定性：吹炼过程中供氧强度、枪位、造渣料加入量波动，会导致脱碳速率不稳定。如供氧强度过大，脱碳过快，终点碳易偏低；枪位过高，炉渣氧化性强，碳氧反应不充分，终点碳偏高；造渣料加入不及时，炉渣泡沫化，影响碳含量控制精度^[1]。

3.3 精炼过程(LF)的影响

LF精炼是碳含量微调与均匀化的核心环节，增碳操作、钢水温度、搅拌强度及精炼渣成分直接影响碳含量稳定性。

增碳剂质量与加入方式：增碳剂是精炼调碳的关键材料，其碳含量、硫氮杂质、粒度及石墨化程度决定碳吸收率。优质石墨化增碳剂碳含量 $\geq 98\%$ 、硫 $\leq 0.05\%$ 、氮 $\leq 0.02\%$ ，碳吸收率可达90%以上；普通煅后焦吸收率仅60%~70%，且杂质含量高，易导致碳含量波动与钢水污染。增碳剂加入时机不当（如钢水未脱氧、温度过低），会导致增碳剂漂浮、氧化，吸收率不稳定；一次性加入过多，易造成局部碳超标。

钢水温度与搅拌强度：精炼温度需控制在1580~1600℃，温度每升高50℃，碳吸收率提高约5%。温度过低，增碳剂溶解速率慢，碳分布不均匀；温度过高，碳溶解度增加，后续连铸降温时碳易析出，形成碳偏析。氩气搅拌强度不足，钢水流动性差，增碳剂扩散不均匀，碳含量偏差大；搅拌过强，钢水裸露面积大，碳易被空气中氧气氧化，导致碳含量偏低。

精炼渣与钢包耐材：精炼渣碱度控制在3.2~3.5，碱度过低，炉渣氧化性强，易氧化钢中碳；碱度过高，炉渣黏度大，不利于碳均匀化。钢包耐材（如铝镁碳砖）含碳量约5%~10%，高温下碳会缓慢溶解到钢水中，造成钢水增碳，增碳量约0.01%~0.03%，新钢包增碳更显著。

3.4 连铸过程的影响

连铸过程是碳含量控制的最后环节，中间包增碳、钢水温度、拉速及结晶器保护渣等因素会导致成品碳波动与碳偏析。

中间包增碳：中间包耐火材料（含碳衬砖、水口）、覆盖剂及残渣是主要增碳源。中间包衬砖含碳3%~8%，高温下碳溶解进入钢水，增碳量约0.005%~0.02%；覆盖剂若

含碳量过高（ $>5\%$ ），或残渣清理不彻底，会造成钢水二次增碳，高碳钢增碳敏感度更高，易导致碳超标。

水过热度与拉速：连铸过热度需控制在 $25\pm 5\text{℃}$ ，过热度每升高10℃，铸坯中心碳偏析指数增加约0.03。过热度过高，钢水凝固速率慢，碳原子易向中心富集，形成中心碳偏析；过热度过低，钢水流动性差，易导致水口堵塞，拉速波动，加剧碳含量不均匀。拉速不稳定，会导致钢水在结晶器内停留时间波动，碳元素分布不均，同时拉速过快易引发卷渣，带入含碳杂质，造成局部增碳。

结晶器保护渣：保护渣含碳量需控制在2%~4%，含碳量过高，会导致钢水表面增碳，铸坯表层碳含量超标；含碳量过低，保护渣润滑效果差，易引发铸坯表面裂纹，同时钢水氧化加剧，碳含量波动。

3.5 原辅料及检测系统的影响

原辅料质量波动：除增碳剂外，铁合金（锰铁、硅铁）、造渣料（石灰、白云石）中含碳杂质，批次波动会导致碳含量偏差；废钢含碳量不稳定（如低碳废钢与高碳废钢混装），会影响转炉初始碳含量，增加控制难度。

检测系统误差：碳含量检测依赖光谱分析与碳硫分析仪，若检测设备未定期校准、试样制备不规范（如表面氧化、偏析），会导致检测结果偏差 $\pm 0.01\%$ 以上，误导工艺调整；检测滞后（如精炼过程取样不及时），会导致碳含量调整不及时，造成成品碳超标。

4 冶炼中高碳钢成品碳控制的优化对策

4.1 稳定铁水条件，夯实碳控制基础

精准管控铁水成分与温度：建立铁水成分预警机制，铁水碳含量控制在4.1%~4.3%、温度1300~1330℃，波动超限时及时调整配料比；定期检测铁水硅、锰、硫、磷含量，硅含量控制在0.3%~0.5%，减少造渣难度与脱碳干扰。

优化铁水预处理工艺：采用脱硫预处理，将铁水硫含量控制在 $\leq 0.02\%$ ，减少精炼阶段脱硫对碳含量的影响；预处理过程避免铁水温度过度损失，确保入炉温度稳定^[2]。

4.2 优化转炉高拉碳工艺，精准控制终点碳

推行高拉碳+低氧出钢工艺：终点碳控制在0.18%~0.22%，终点氧含量 $450\sim 550\times 10^{-6}$ ，减少后续增碳量与钢水氧化性。通过静态控制模型计算供氧强度、枪位及造渣料加入量，脱碳速率控制在0.3%~0.5%/min，避免脱碳过快或过慢。

严控出钢温度与下渣量：出钢温度控制在1625~1635℃，采用挡渣出钢技术，下渣量 $\leq 3\text{kg/t}$ 钢；出钢过程全程吹氩搅拌，钢水成分均匀，避免局部碳含

量偏差。

稳定吹炼操作：供氧强度控制在 $2.8\sim 3.2\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ ，枪位采用“高-低-高”模式，前期化渣、中期脱碳、后期均匀成分；造渣料分批次加入，石灰加入量控制在 $30\sim 35\text{kg/t}$ 钢，确保炉渣碱度稳定在 $3.2\sim 3.5$ 。

4.3 精细化LF精炼操作，稳定碳含量微调

优选增碳剂并规范加入方式：选用碳含量 $\geq 98.5\%$ 、硫 $\leq 0.03\%$ 、氮 $\leq 0.015\%$ 的石墨化增碳剂，粒度控制在 $5\sim 20\text{mm}$ ，避免粉末过多氧化；增碳剂加入时机为钢水脱氧后、温度 $\geq 1580^\circ\text{C}$ 时，分 $2\sim 3$ 次加入，每次加入后氩气搅拌 $3\sim 5\text{min}$ ，确保溶解均匀。

精准控制精炼温度与搅拌强度：精炼温度稳定在 $1585\sim 1595^\circ\text{C}$ ，氩气搅拌强度控制在 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ ，前期强搅拌（ 0.5MPa ）促进增碳剂溶解，后期弱搅拌（ 0.3MPa ）均匀成分、减少钢水裸露；精炼时间控制在 $25\sim 35\text{min}$ ，避免长时间精炼导致钢包耐材增碳过量。

优化精炼渣与钢包管理：精炼渣碱度控制在 $3.3\sim 3.4$ ，FeO含量 $\leq 1.0\%$ ，减少炉渣氧化性；钢包采用“新包预热 \rightarrow 空包吹氩 \rightarrow 残钢残渣清理”制度，新钢包使用前预热至 800°C 以上，减少耐材增碳；钢包周转次数控制在 50 次以内，避免耐材侵蚀严重导致增碳异常。

4.4 强化连铸过程管控，抑制过程增碳与偏析

严控中间包增碳：中间包选用低碳衬砖（含碳 $\leq 3\%$ ），覆盖剂采用无碳或低碳覆盖剂（含碳 $\leq 2\%$ ）；中间包使用前彻底清理残渣，更换水口时避免残渣混入钢水；中间包钢水液面稳定在 $600\sim 800\text{mm}$ ，减少钢水裸露与覆盖剂卷入^[3]。

稳定过热度与拉速：连铸过热度控制在 $22\sim 28^\circ\text{C}$ ，通过LF精炼温度精准调控，避免过热度波动；拉速稳定控制在 $1.8\sim 2.2\text{m/min}$ （高碳钢），采用恒速浇注技术，拉速波动 $\leq \pm 0.1\text{m/min}$ ，减少碳偏析与成分不均匀。

优化结晶器保护渣：选用碳含量 $2.5\%\sim 3.5\%$ 的专用保护渣，确保润滑效果与低增碳性；保护渣加入量控制在 $0.3\sim 0.5\text{kg/t}$ 钢，避免过多卷入钢水造成增碳。

4.5 严格原辅料管控与检测系统校准

稳定原辅料质量：建立原辅料准入制度，增碳剂、铁合金、造渣料等实行批次检测，不合格原料严禁使用；废钢分类堆放，低碳废钢（碳 $\leq 0.2\%$ ）与高碳废钢（碳 $\geq 0.5\%$ ）分开使用，控制入炉废钢碳含量波

动 $\leq \pm 0.1\%$ 。

校准检测系统，规范取样操作：光谱分析仪与碳硫分析仪每周校准1次，采用标准样品比对，确保检测误差 $\leq \pm 0.005\%$ ；精炼、连铸过程取样采用专用取样器，试样表面无氧化、无偏析，取样后及时送检，检测结果实时反馈至操作台，指导工艺调整^[4]。

4.6 建立全流程质量管控体系

制定标准化作业规程（SOP）：明确转炉、精炼、连铸各工序碳控制参数与操作要点，全员培训考核，规范操作行为，减少人为波动。

建立碳含量波动预警机制：实时采集各工序碳含量、温度、氧含量等数据，设定预警阈值（如碳含量偏差 $> \pm 0.01\%$ 预警），异常时自动报警，及时排查原因并调整。

加强过程数据分析与持续改进：定期统计碳含量合格率、波动范围及影响因素，运用六西格玛工具分析关键控制点，持续优化工艺参数，逐步提升碳控制稳定性。

5 结论

中高碳钢成品碳控制是一项全流程系统工程，受铁水条件、转炉冶炼、精炼操作、连铸过程及原辅料等多因素影响，核心矛盾是过程脱碳与增碳的动态平衡及碳元素均匀性控制。

通过稳定铁水成分与温度、优化转炉高拉碳工艺、精细化LF增碳操作、强化连铸低增碳管控、严格原辅料与检测管理及建立全流程质量体系，可有效解决碳含量波动与偏析问题，显著提升成品碳控制精度与稳定性。

未来，需进一步结合智能化技术（如在线碳含量检测、智能控制系统），实现碳含量的实时精准调控，推动中高碳钢生产向高精度、高稳定性、低成本方向发展，更好满足高端制造业对钢材质量的严苛要求。

参考文献

- [1] 马莹,朱建琳,夏鹏飞,等.中高碳钢碳含量稳定性控制生产实践[J].山西冶金,2024,47(6):180-181,184.
- [2] 彭杉,耿丽君,高安创.高碳钢成品C含量稳定性控制分析及改进[J].山西冶金,2025,48(5):220-222.
- [3] 王冠华.转炉冶炼中高碳钢过程及终点控制分析[J].冶金与材料,2023,43(2):105-107.
- [4] 纪瑞东.转炉高拉碳法冶炼中高碳钢技术[J].世界钢铁,2013,13(2):23-26.