

炼钢全流程钢水增氮机理 分析与协同控制实践

Mechanism Analysis and Synergistic Control Practice of Nitrogen Increase in Molten Steel During the Entire Steelmaking Process

供稿|刘晓峰, 郝苏, 包广团, 代蒙, 刘震 / LIU Xiaofeng, HAO Su, BAO Guangtuan, DAI Meng, LIU Zhen

内容导读

针对重庆钢铁 210 t 转炉生产线钢种氮质量分数偏高导致的钢板性能波动问题, 本文系统分析了炼钢全流程钢水中氮的质量分数变化规律, 明确了增氮关键环节, 并提出多工序协同控氮策略。采用对转炉终点、吹氩站、LF、RH 及中间包等工序的系统取样与检测, 发现钢水中氮的质量分数增加主要集中于转炉出钢 (增氮 10×10^{-6})、LF 精炼 (增氮 6×10^{-6}) 及连铸浇注 (增氮 4×10^{-6}) 环节。研究表明, 转炉出钢过程中强脱氧钢水裸露、LF 电弧区氮气电离及连铸保护不良是钢水增氮的主因。基于此, 制定并实施以下综合措施: 采用硅锰弱脱氧工艺, 开发钢包吹氩自动控制模型, LF 采用微正压操作结合电石埋弧技术, RH 真空处理前期强化脱氮, 改进连铸密封圈等。实践表明, 中间包钢水中氮的质量分数均值降低 $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$, 氮含量控制达标率显著提升, 取得了良好的实践效果。

氮作为钢中的常存元素, 其含量直接影响钢的力学性能。在含钛钢中, 过高的氮含量会与钛结合形成大尺寸 TiN 夹杂物, 削弱钛的晶粒细化和沉淀强化作用, 导致钢板性能波动^[1-2]。近年来, 炼钢过程中钢水氮含量的控制成为行业关注焦点, 其核心在于抑制氮的溶解与促进脱氮过程的平衡。钢液吸氮的物理化学过程主要涉及氮气在钢液表面的吸附、解离和溶解 ($N_2(g) \rightarrow 2[N]$), 其速率受钢液成分、温度、氮分压及界面反应动力学影响^[3-4]; 脱氮则依赖于真空处理或气泡浮选等机制, 通过降低氮分压或气液界面传质实现^[5]。研究表明, 转炉出钢、LF 精炼及连

铸浇注是炼钢全流程钢水增氮的主要环节^[6-7]。其中, 转炉点吹操作和钢包裸露会导致大气中氮溶解^[8], LF 精炼电弧区的高温电离加剧氮的渗透^[9], 连铸保护浇注不良则引发二次吸氮^[10]。学者们通过优化钢包底吹氩模式、改进保护浇注技术及引入真空脱氮工艺, 显著降低了钢水氮含量^[11-12]。然而, 不同工艺条件下增氮机制的差异仍需结合生产实际进一步探究。本文基于重庆钢铁股份有限公司 (以下简称重庆钢铁) 210 t 氧气顶吹转炉 (BOF) → 钢包精炼炉 (LF) → RH → 连铸 (CC) 炼钢流程展开系统分析, 提出多工序协同控氮策略, 为同类企业提供参考。

钢水氮含量全流程取样及分析

取样方案

对 210 t BOF→LF→RH→CC 炼钢流程的钢水进行取样,在转炉终点、吹氩站(出钢结束)、LF 出站、RH 出站和连铸中间包节点采集球拍样。制样步骤如下:通过砂轮机打磨试样至无肉眼可见的气孔及杂物,剪取试样中间段 0.5~2.0 g 样品,用无水乙醇在超声波仪中清洗 1 min,经吹风机吹 30 s 以上至干燥,用电子天平称量后,采用 LECO ON736 氧氮分析仪测得各工序钢水氮的质量分数。现场取样制样实物见图 1,LECO ON736 氧氮分析仪见图 2。



图 1 现场取样制样实物



图 2 LECO ON736 氧氮分析仪

分析结果

对 35 炉次炼钢过程各工序钢水氮的质量分数进行分析,结果及变化情况分别如表 1 和表 2 所示。由表 1 可知,试样中转炉终点钢水平均氮质量分数

为 26×10^{-6} ,吹氩站为 36×10^{-6} ,LF 出站为 42×10^{-6} ,RH 出站为 42×10^{-6} ,连铸中间包为 47×10^{-6} 。由表 2 可知,吹氩站—转炉终点钢水平均增氮 10×10^{-6} ,LF 出站—吹氩站平均增氮 6×10^{-6} ,RH 出站—LF 出站平均增氮 1×10^{-6} ,连铸中间包—RH 出站平均增氮 4×10^{-6} 。整体来看,整个炼钢过程均存在增氮现象,增氮幅度较大的环节依次为转炉出钢、LF 精炼和连铸浇注,RH 精炼脱氮效果较弱,该增氮特征与其他钢企存在明显差异。

表 1 炼钢过程各工序钢水氮质量分数分析结果 10^{-6}

项目	转炉终点	吹氩站	LF 出站	RH 出站	连铸中间包
最大值	36	51	59	55	70
最小值	17	22	23	27	29
平均值	26	36	42	42	47

表 2 炼钢过程各工序钢水氮的质量分数增加情况 10^{-6}

项目	吹氩站— 转炉终点	LF 出站— 吹氩站	RH 出站— LF 出站	连铸中间包— RH 出站
最大值	15	8	-4	15
最小值	5	1	4	2
平均值*	10	6	1	4

注:平均值表示为每一炉次各工序间钢水氮质量分数差值的平均值。

钢水增氮原因分析及控制

转炉冶炼出钢增氮及控制

转炉冶炼钢水增氮及控制

转炉冶炼过程中钢水与空气接触面积大、时间长,影响钢水氮的因素较多。不同工艺条件下,各因素对转炉终点钢水氮的影响差异较大,导致该指标存在波动。根据取样结果,分析转炉冶炼过程参数,发现入炉铁水硅、入炉铁水量(铁钢比)、点吹时间和终点碳对转炉终点钢水氮影响显著,且上述因素与终点氮均呈线性关系,见图 3。

铁水中硅对炼钢过程具有重要影响,硅在转炉中氧化,既能调节炉渣流动性和渣量,又能释放热量,是转炉炼钢的重要热源之一。胡亚州等^[13]认为,当入炉铁水硅较低时,转炉吹炼过程中炉渣返干现象明显、化渣效果差,此时在炉口压差影响下,炉内会吸入大量空气导致钢水增氮。张朋等^[14]认为,在转炉高铁耗下,拉碳过程中钢水碳氧反应

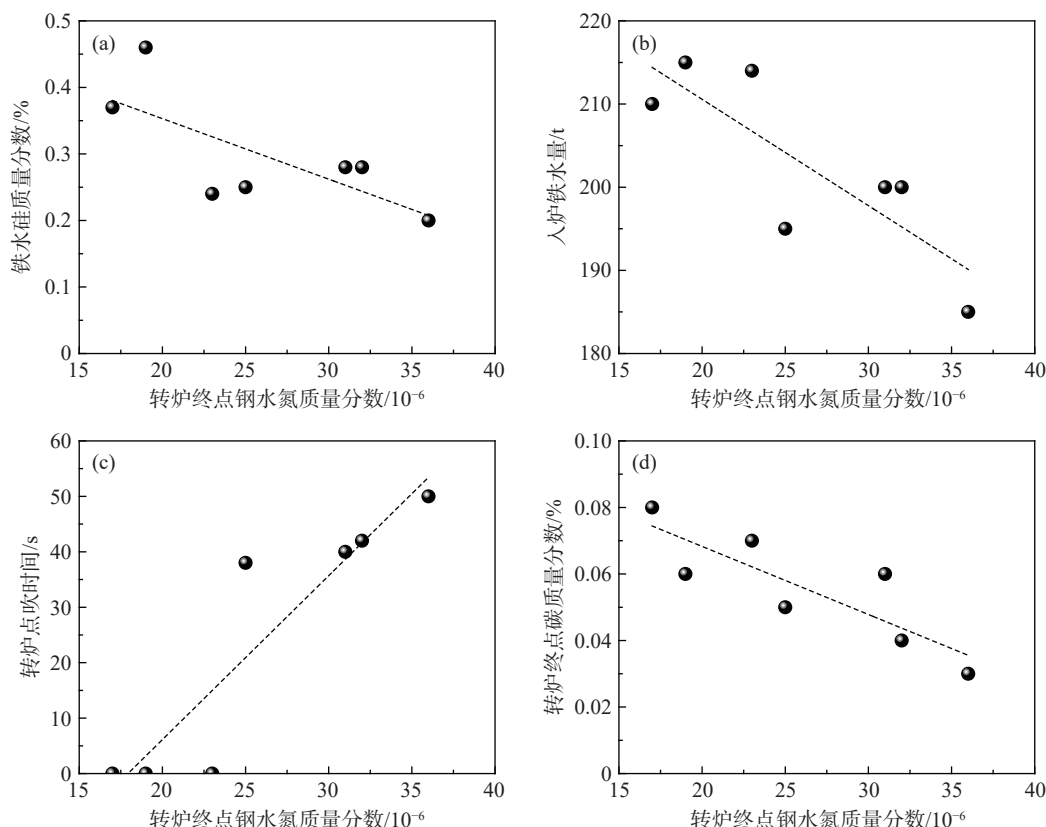


图3 转炉终点钢水氮质量分数与冶炼过程参数的关系: (a) 铁水硅质量分数; (b) 入炉铁水量; (c) 点吹时间; (d) 终点碳质量分数

剧烈, 产生大量 CO 气泡, 钢中氮易进入气泡并随之上浮排出, 使钢中 [N] 快速降低; 低铁耗生产时, 炉内 CO 生成量减少, 脱氮率降低, 导致转炉终点氮上升。转炉点吹操作即转炉终点成分或温度未达标, 需再次下枪吹炼, 此时钢液中碳的质量分数 $\leq 0.05\%$, 碳氧反应微弱, CO 气泡产生量极少, 无法充分带走钢中氮; 同时点吹过程炉内压力低于外界大气压, 压差将空气带入炉内, 空气随着氧气射流卷入钢中, 在点火区高温环境下氮气迅速溶解, 引起增氮。王华^[8]的试验显示, 补吹 1 次会使钢水氮的质量分数增加 $(7\sim 8) \times 10^{-6}$, 补吹次数越多, 增氮量越大。薛正良等^[15]认为, 冶炼后期, 在非碳氧反应区的炼钢温度下, 钢液与大气中的 N_2 发生作用而吸氮, 且钢液氮越低吸氮倾向越明显。因此, 转炉终点钢水中碳越低, 吸氮的可能性越大。

基于上述分析, 对于入炉铁水硅较低的低铁耗生产模式, 可采取以下系统措施控制转炉冶炼终点钢水中的氮: 借助自动炼钢模型静态计算, 开吹前选用硅碳球或焦丁入炉补热; 吹炼过程提高碳氧反

应期氧气流量, 及时降下烟罩保证炉内正压; 采用低枪位吹炼模式, 保证终点压枪时长; 及时补加化渣剂, 防止炉渣返干; 减少点吹次数, 将单次点吹时间控制在 30~35 s, 避免过吹现象; 取消经 LF 精炼部分炉次的转炉终点温度和氧气 (TSO) 测量, 提高直接出钢比例。

转炉出钢过程的钢水增氮及控制

转炉出钢标志着炉外精炼的开始, 该过程吸氮量可达 $(10\sim 30) \times 10^{-6}$ (质量分数)^[8], 增氮主要由 2 部分组成: 一是从大气中吸氮, 二是加入铁合金及增碳剂时带入的氮^[10]。分析发现, 吹氩站钢水氮质量分数与转炉出钢一次预脱氧铝加入量、出钢钢包吹氩流量、增碳剂加入量呈正相关, 与出钢精炼石灰加入量呈负相关, 见图 4。

表面活性元素 (如氧、硫) 对氮的溶解行为具有显著调控作用。研究表明^[3], 当钢液中溶解氧质量分数 $\geq 300 \times 10^{-6}$ 时, 氧原子占据钢液自由表面活性位点, 阻碍 N_2 分子的吸附与解离 ($N_2(g) \rightarrow 2[N]$), 从而抑制增氮。苏小利等^[12]的试验显示, 脱氧方式

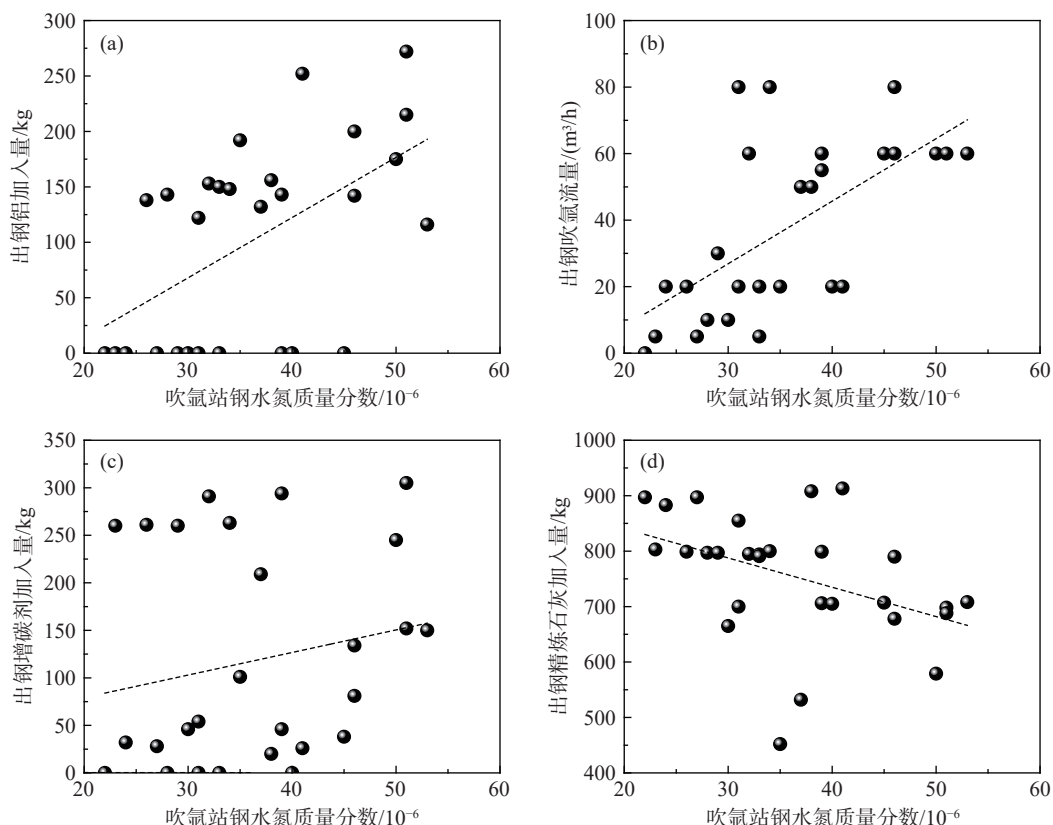


图4 吹氩站钢水氮质量分数与转炉出钢参数的关系: (a) 铝加入量; (b) 钢包吹氩流量; (c) 增碳剂加入量; (d) 精炼石灰加入量

对钢水出钢氮增量影响尤为显著, 转炉以沸腾形式出钢时, 钢水的平均增氮仅为 4.04×10^{-6} , 而以镇静形式出钢时, 平均增氮达到 10.05×10^{-6} 。转炉出钢时的溶解氧质量分数一般为 $(300 \sim 900) \times 10^{-6}$, 硫作为另一表面活性元素, 可与氧协同作用进一步降低氮的溶解速率。当钢中硫质量分数 $> 0.015\%$ 时, 硫优先吸附于钢液表面形成硫化物层, 与氧共同抑制氮的渗透^[3-16]。因此, 转炉出钢钢流与空气接触阶段不会发生明显增氮^[3]。综上所述, 出钢过程的增氮主要发生在钢水进入钢包、强脱氧合金加入后, 受钢流冲击和钢包底吹氩搅拌影响, 钢包顶渣未完全熔化覆盖, 钢水大面积裸露是增氮的主要原因。

为控制出钢过程钢水进入钢包后增氮, 可采取以下系统措施: 采用硅锰弱脱氧工艺替代铝强脱氧, 控制经 LF 精炼钢种到吹氩站钢水氧质量分数约 50×10^{-6} ; 出钢前对钢包进行预吹氩气, 开发分钢种转炉出钢钢包吹氩自动控制模型, 安装高温摄像头实时精准控制钢水亮圈, 或采用低压力小流量吹氩工艺, 有条件的钢厂可开发钢包氩气自动控制系统

统^[1], 减少手动干预, 防止氩气流量过大造成钢水大翻增氮; 提高转炉终点碳, 减少增碳剂加入量或选择低氮增氮剂; 出钢前应检查出钢口状况, 确认出钢口无异常; 适当增加出钢精炼石灰加入量。

LF 精炼增氮及控制

LF 精炼是公认的钢水吸氮过程, 加入的渣料、合金和脱氧剂等辅料含有一定的氮 (表 3 为重庆钢铁相关渣料和合金氮质量分数), 造成钢水增氮。除辅料因素外, 钢水氮含量变化主要受操作条件影响, 其中钢水裸露面积过大且保护效果差, 通电过程电极电离空气中的 N_2 并使其溶解进入钢水, 是 LF 精炼钢水增氮的主要原因。分析发现, LF 精炼时间、通电时间、氩气消耗量和脱硫率均与该环节钢水增氮量呈线性关系, 见图 5。

LF 作为转炉与连铸工序之间的缓冲设备, 具有协调生产配合、确保生产连续性和高效性的功能, 其精炼时间弹性空间较大。LF 精炼过程中^[9], 超过 2300°C 的高温电弧射流将炉内气氛中的氮气吸入弧柱并电离成氮原子, 在熔池表面形成凹坑, 埋弧效

表3 渣料和合金氮质量分数

%

渣料					合金			
电石	铝渣球	电熔渣	精炼石灰	增碳剂*	金属锰	钒钛	碳粉包芯线	钛铁(线)
0.31	0.20	0.05	0.04	0.53	0.20	0.26	0.28	0.75

注：*在重庆钢铁实际归类中被归为合金类。

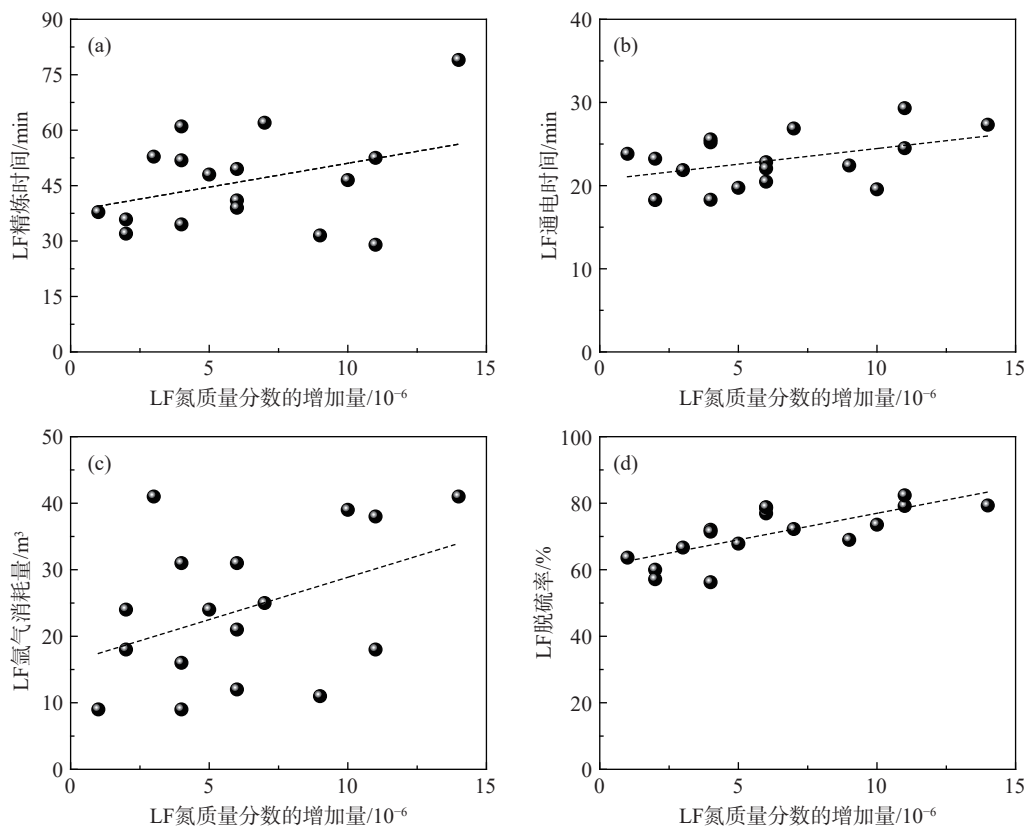


图5 LF精炼钢水氮质量分数增加量与LF精炼参数的关系：(a) LF精炼时间；(b) LF通电时间；(c) LF氩气消耗量；(d) LF脱硫率

果不好的凹坑处有裸露钢水且温度较高，促使N原子进入钢水造成钢水增氮。陆锦祥等^[6]发现，LF现场补加合金多在强氩吹下进行，钢液二次氧化率 $>15 \times 10^{-6}/\text{min}$ 。实际生产过程中，由于转炉出钢一次合金化准确率较低，LF大量增碳和补加合金后搅拌，加剧钢水二次氧化和增氮。LF精炼时间越长，钢包底吹氩搅拌时长与氩气消耗量越大，升温负荷越高，钢水增氮量越大。同时，未脱硫铁水的使用以及各种钢渣含铁资源的投入加重了LF脱硫负荷，钢水搅拌强度提升，进而导致钢水吸氮增加，这是操作因素影响LF精炼钢水氮质量分数增加的主要原因。

为此，采取以下措施控制LF精炼环节增氮：推行钢包铸余渣回收工艺，增加LF进站渣层厚度；引入低熔点钢包用化渣剂，加快前期炉渣熔化；延长

前期低电流、高电压、短电弧的送电时长1~2 min；采用电石替代部分铝渣球，促进炉渣快速发泡埋弧，发挥电石强氧脱硫能力，取消铝丸投入；提高转炉出钢一次合金化的准确率，采用喂碳粉包芯线替代石墨球合金化工艺，避免为促进合金熔化长时间强搅拌；密闭炉门、喂丝孔、加料孔，调低除尘风机转速，保持炉内微正压状态；对经RH真空精炼的钢种，在钢包车驶离处理位后立即关闭底吹氩气，不再要求软吹氩时间，缩短钢包小流量吹氩搅拌时长。

RH精炼增氮及控制

周鉴等^[5]认为，在RH精炼开始后前3 min，真空室内压力急速下降至4 kPa，此过程钢水的脱氮速率最快；随着真空室内压力降至67 Pa（工作真空度）左右，钢水中氮含量进一步下降；在极限真空度下延长保持

时间, 钢水中氮含量持续下降。分析发现, 随着初始钢水中氮的提高, RH 脱氮率呈上升趋势, 当初始氮质量分数 $\leq 60 \times 10^{-6}$ 时, RH 脱氮效果较差 (见图 6(a)), 可见现行工艺下 RH 精炼炉的脱氮能力有限, 应尽量减少 RH 处理前钢水的增氮量。图 6(b) 为 RH 高真空时间与脱氮率的关系, 二者的关系较为复杂。采用 LF→RH 精炼工艺生产时, 为实现夹杂物的高效去除及夹杂物的低熔点改性以避免水口结瘤, 推荐在 RH 精炼后进行钙处理。脱氧效果良好或钢中含有 Al、V、Ti 等易形成氮化物元素的钢水, 吸氮能力极强。资

料显示^[16-17], 钙处理时钢水会剧烈翻腾, 导致吸氧增氮, 增加卷渣的风险, 还会影响生产环境, 建议在保证钢液可浇性的前提下, 尽量减少喂钙线量。同时, 喂线速度与底吹氩流量控制不匹配也会加剧钢液表面大翻、卷入空气而增氮^[13], 增氮量最高可达 8×10^{-6} 。为此, 在 RH 预抽真空条件下提高机械泵转速, 将循环气体流量增大至 $120 \text{ m}^3/\text{h}$, 提高真空前期脱氮率; 引入防喷溅钙线, 实施减量化钙处理工艺, 控制喂钙线速度为 $2 \sim 3 \text{ m/s}$, 保证钢包底吹氩处于软吹状态, 减少钙处理过程增氮。

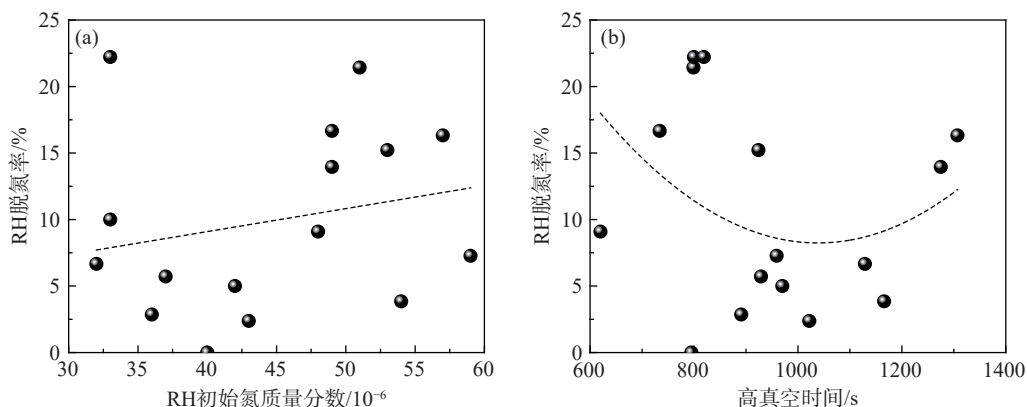


图 6 RH 脱氮率与 RH 初始氮质量分数 (a)、高真空时间 (b) 的关系

连铸过程钢水增氮及控制

在连铸过程中增氮主要是因为钢包、中间包和结晶器之间钢流密封不良^[10]。若钢包不能自动开浇而采用人工引流, 则钢水不仅会发生二次氧化, 还会显著吸氮, 其氮质量分数增加高达 15×10^{-6} 。实际生产中, 偶发性的长水口异常侵蚀断裂 (见图 7)、长水口内的静压为负压、中间包覆盖剂未完全覆盖、长水口注流区翻腾、密封圈破损、中间包加盖

氩封不良、浸入式水口板间压力不足等细节问题, 均会造成钢水增氮。在长水口碗口吹氩保护的基础上, 对标改用质地更软、密封性能更好、耐火度更高、线收缩率更小的耐破损密封圈^[7], 如图 8 所示。为提高隔绝空气和保温的作用, 引入铺展性较好的高碱度中包渣和碳化稻壳并增加用量, 有效减少钢水与空气接触的机会; 中间包增设充氩气管路, 第 1 炉开浇前进行中间包吹氩气排空气操作; 提高换钢

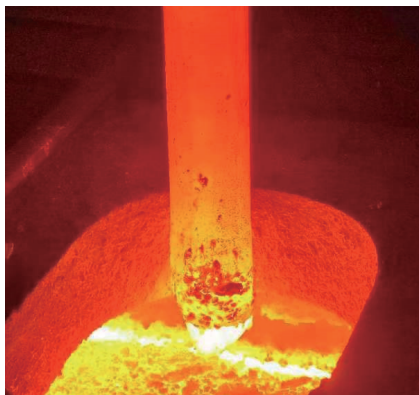


图 7 长水口下部侵蚀断裂实况

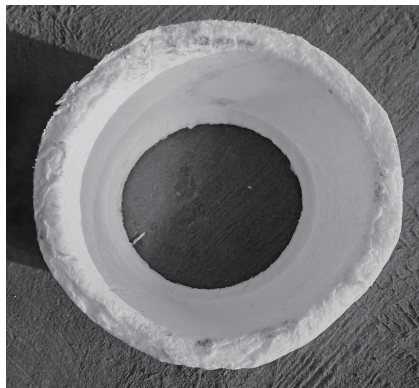


图 8 改进型长水口密封圈形貌

包前中间包液位，避免换钢包间隔中间包液面大幅下降，渣层大面积吹开，导致钢水与空气直接接触；增加高温摄像头，推行中间包保护浇注可视化等精细化管理手段，实现钢水增氮的有效控制。

生产实践效果

氮气是空气的主要成分，从炼钢到连铸生产过

程中钢水极易吸氮且脱氮难度较大。从炼钢过程钢水增氮原因分析和控制措施实施情况可见，影响钢水氮含量的因素繁多且主次不一，必须采取系统措施方可降低增氮量。因此，钢水中氮的控制水平是衡量炼钢厂技术实力和质量管理水平的重要指标之一。基于重庆钢铁 210 t BOF→LF→RH→CC 炼钢全流程钢水增氮原因分析，通过实施表 4 所列的多工序协同改进措施，实现了钢水中氮的有效控制。

表 4 主要改进方案及作用效果

工序	改进方案	作用机制	实施效果
转炉冶炼	建立铁水硅含量、终点碳含量驱动自动炼钢模型；限制点吹次数（≤1次/炉），点吹时间≤35 s；补加化渣剂，防止炉渣返干；碳质发热剂补热结合供氧强度优化；取消经LF精炼部分炉次的转炉终点TSO测量	减少钢水裸露时间，抑制点吹吸氮；提高碳氧反应脱氮效率；降低终点氮波动	终点钢水氮质量分数由26×10 ⁻⁶ 降至22×10 ⁻⁶ ，波动范围缩小30%
转炉出钢	LF精炼钢种硅锰弱脱氧替代铝强脱氧；出钢前对钢包进行预吹氩气，开发转炉出钢钢包吹氩自动控制模型；提高转炉终点碳含量，减少增碳剂加入量；出钢前应检查出钢口状况，确认出钢口无异常；精炼石灰加入量增至700 kg/炉	维持钢水中氧质量分数（约50×10 ⁻⁶ ），抑制吸氮；优化氩气覆盖，减少裸露；加速渣层形成	转炉出钢氮质量分数增加量由9×10 ⁻⁶ 降至5×10 ⁻⁶
LF精炼	推行钢包铸余渣回收工艺；引进低熔点钢包用化渣剂，以电石替代铝渣球、铝丸埋弧，喂碳包芯线替代碳锰合金球；采用微正压操作（炉门、喂丝孔密闭）；经RH真空精炼钢种，取消软吹氩操作	增加渣层厚度，促进炉渣发泡埋弧，减少电弧区氮电离；抑制空气侵入；降低合金增氮风险	LF精炼氮质量分数增加量由6×10 ⁻⁶ 降至5×10 ⁻⁶
RH精炼	真空前期机械泵转速提升，增大循环气体流量；防喷溅钙线减量至130 m/炉+软吹氩可视化	强化前期脱氮动力学；减少钙处理过程卷气增氮	RH精炼脱氮率由10%提高至15%。
连铸浇注	采用高密封性长水口（改进型密封圈），结合中间包充氩+高碱度中包渣+碳化稻壳技术；提高换钢包前中间包液位，推行保护浇注可视化管理	阻断钢流与空气接触；中包渣抑制二次氧化	连铸浇注氮质量分数增加量由4×10 ⁻⁶ 降至3×10 ⁻⁶

实施上述措施后，对 2023—2024 年 4 类主要含钛微合金化钢种中间包钢水的氮质量分数进行统计，发现采取新工艺控制钢水增氮措施后，中间包钢水的氮质量分数均值降低（2~3）×10⁻⁶，钢种氮质量分数达标率均明显提高，实践效果良好，满足控氮目标，如图 9 和表 5 所示。

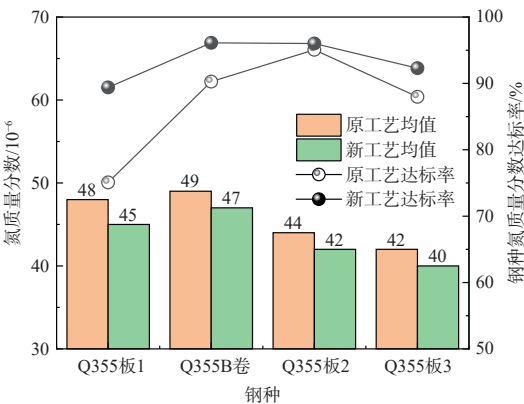


图 9 措施实施前后中间包钢水的氮质量分数及钢种氮质量分数达标率情况

表 5 不同钢种的控氮目标

10 ⁻⁶			
Q355板1	Q355B卷	Q355板2	Q355板3
≤55	≤60	≤55	≤50

结束语

（1）炼钢过程中各工序钢水增氮主要集中于转炉出钢、LF 精炼及连铸浇注环节，RH 精炼因脱氮与吸氮动态平衡呈现差异化特征，与其他钢企存在明显差异。

（2）基于铁水中硅的质量分数与自动炼钢模型优化，结合碳质补热与点吹限制，转炉终点钢水中氮质量分数均值由 26×10⁻⁶ 降至 22×10⁻⁶；采用硅锰弱脱氧工艺、钢包吹氩自动控制模型及精炼石灰增量，控制钢水溶解氧质量分数并减少裸露，使转炉出钢钢水氮质量分数增加量由 9×10⁻⁶ 降至 5×10⁻⁶；LF 精炼采用电石替代铝渣球、铝丸埋弧、微正压操作及喂碳包芯线技术，抑制空气侵入引发吸氮，该

环节氮质量分数增加量由 6×10^{-6} 降至 5×10^{-6} ; RH 精炼通过提升真空前期机械泵转速、减量化使用防喷溅钙线及控制软吹氩, 提高真空脱氮率; 连铸环节改进长水口密封圈材质, 采用高碱度中包渣配合碳化稻壳, 增设中间包充氩工艺, 钢水氮质量分数增加量由 4×10^{-6} 降至 3×10^{-6} 。

(3) 通过全流程协同优化, 中间包钢水氮的质量分数均值降低 $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$, 显著提升了含钛钢种的性能稳定性, 验证了多工序控氮工艺的工程适用性。

参考文献

- [1] 毛新平, 孙新军, 康永林, 等. 薄板坯连铸连轧 Ti 微合金化钢的物理冶金学特征. 金属学报, 2006, 42(10): 1091
- [2] 张艳龙, 石凤丽, 彭飞, 等. 转炉冶炼低氮钢控氮研究及实践. 金属世界, 2023(3): 75
- [3] 傅杰. 钢冶金过程动力学. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [4] 战东平, 邱国兴, 牛奔, 等. 氮在钢液中溶解的热力学及动力学研究. 炼钢, 2015, 31(5): 7
- [5] 周鉴, 彭明耀, 彭其春, 等. 连铸 RH—MFB 精炼过程氮的行为研究. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2009, 32(1): 28
- [6] 陆锦祥, 王忠英, 陈永盛, 等. 100 t BOF—LF—RH—CC 工艺冶炼结构钢时钢中氮的行为及控制. 特殊钢, 2009, 30(6): 26
- [7] 陈均, 曾建华, 陈永, 等. 120 t LD—LF—RH—CC 全流程钢水氮含量控制技术研究和工艺实践. 特殊钢, 2016, 37(2): 49
- [8] 王华. 钢中氮含量控制技术研究. 江苏冶金, 2008(1): 12
- [9] 黄德胜, 杨森祥, 李桂军. LF 精炼过程氮含量控制技术与实践. 炼钢, 2012, 28(2): 14
- [10] 李勇. 炼钢过程中钢水氮含量控制. 钢铁, 2010, 45(10): 52
- [11] 张焱, 张朝发, 李硕, 等. 高质量 ER70S-6 焊接用钢: 关键技术及实践效果. 金属世界, 2025(6): 66
- [12] 苏小利, 刘文飞. 260 t 复吹转炉底吹模式及钢水增氮的研究. 炼钢, 2011, 27(6): 31
- [13] 胡亚州, 齐进刚, 樊利智, 等. 汽车大梁钢控氮工艺的优化. 四川冶金, 2024, 46(1): 31
- [14] 张朋, 仇军, 曹保良, 等. 承钢 150 t 转炉炼钢控氮研究. 河北冶金, 2018(3): 48
- [15] 薛正良, 吴映江, 吴丽嘉, 等. BOF—LF—RH—CC 流程钢液增氮控制研究. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 86
- [16] 朱苗勇, 邓志银, 姜文涛. 钢精炼和浇注过程夹杂物行为及其控制. 北京: 冶金工业出版社, 2022
- [17] 张雅辰, 邓志银, 刘晓峰, 等. 钙线喂入量对 Q355 含钛铝镇静钢洁净度的影响. 钢铁研究学报, 2025, 37(2): 164

作者简介: 刘晓峰(1983—), 男, 陕西省渭南人, 正高级工程师, 2005年毕业于重庆科技学院炼钢及铁合金专业, 2009年毕业于重庆科技学院冶金工程专业, 2017年毕业于中共重庆市委党校工商管理在职研究生班。主要研究方向: 炼钢新工艺、新技术应用及研究。获全国发明创业奖三等奖2项, 重庆市科协岗位创新争先成果三等奖1项, 中国宝武岗位创新成果二等奖1项、三等奖5项, 重庆钢铁科学技术奖一、二、三等奖9项。申请57件发明专利(授权13件), 获得17件实用新型专利授权。发表论文40余篇。通信地址: 重庆市长寿区江南街道2号重庆钢铁炼钢厂; E-mail: liuxiaofeng831205@163.com。