

LF 炉精炼过程中钢液增氮原因及控制措施研究

姜子浩 王苗苗 索文峰 薛献军

河南钢铁集团安阳钢铁股份有限公司, 河南 安阳 455004

[摘要]LF 炉精炼属于钢液增氮的重要环节之一。文章从氮在钢液中溶解的热力学和界面反应动力学入手, 系统分析了电弧区高温电离、埋弧不良造成钢液面裸露、底吹氩搅拌卷入空气、原辅材料带入氮这四个增氮途径, 分析了钢液成分、加热制度、渣层厚度、吹氩流量等因素对增氮行为的影响规律。在此基础上提出了包含造渣制度优化、加热参数控制、吹氩流量分段管理、低氮原辅材料选用的综合控氮方案。研究结果表明, 将 LF 精炼增氮量控制在 5×10^{-6} 以下是可行的。

[关键词]LF 精炼; 钢液增氮; 电弧电离; 埋弧操作; 底吹氩; 控氮工艺

DOI: 10.33142/ec.v9i10.20510

中图分类号: TF734

文献标识码: A

Research on the Causes and Control Measures of Nitrogen Addition in Steel Liquid during LF Furnace Refining Process

JIANG Zihao, WANG Miaomiao, SUO Wenfeng, XUE Xianjun

Anyang Iron & Steel Co., Ltd., He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455004, China

Abstract: LF furnace refining is one of the important processes for increasing nitrogen in molten steel. Starting from the thermodynamics and interfacial reaction kinetics of nitrogen dissolution in molten steel, this article systematically analyzes four nitrogen increasing pathways: high-temperature ionization in the arc zone, exposure of the steel surface caused by poor arc burial, stirring and entrainment of air by bottom blowing argon, and introduction of nitrogen by raw and auxiliary materials. The influence of factors such as steel composition, heating system, slag layer thickness, and argon blowing flow rate on nitrogen increasing behavior is analyzed. On this basis, a comprehensive nitrogen control scheme was proposed, including optimization of slag making system, control of heating parameters, segmented management of argon blowing flow rate, and selection of low nitrogen raw and auxiliary materials. The research results indicate that it is feasible to control the nitrogen increase in LF refining below 5×10^{-6} .

Keywords: LF refining; nitrogen addition in molten steel; arc ionization; submerged arc operation; bottom blowing argon; nitrogen control process

引言

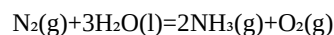
氮是钢中的常存元素, 它的含量会对钢材的性能产生较大影响。含钛钢中氮与钛结合形成大颗粒 TiN 夹杂物, 削弱钛的晶粒细化作用; IF 钢中氮含量过高会造成屈服强度波动、时效性能变坏。由于高品质钢种所占比例越来越高, 成品氮含量 $\leq 0.0040\%$ 的控制要求也越来越普遍。

炼钢全流程取样分析可知, 钢液氮含量增加主要发生在转炉出钢、LF 精炼、连铸浇注这三个环节, LF 精炼阶段增氮量为 6×10^{-6} 。LF 炉具有电弧加热、底吹搅拌和渣洗精炼等多种功能, 电弧区局部温度可达 3000°C 以上, 炉内气氛中不可避免地含有残余氮气, 强搅拌操作使钢液与气相接触面积明显增大, 这些都是钢液吸氮的条件。但是对于各个因素对增氮量的贡献比例以及控制措施的优

先次序, 在不同的生产条件下存在不同的研究结论。文章利用热力学和动力学分析, 对 LF 炉精炼增氮的成因及影响因素进行系统的整理, 给出可行的控氮措施。

1 钢液增氮的热力学与动力学基础

氮在钢液中溶解反应可以用 Sieverts 定律来描述, 即:



$$\frac{1}{2} \text{N}_2(\text{g}) \rightleftharpoons [\text{N}]$$

平衡常数:

$$K_{\text{N}} = \frac{a_{[\text{N}]}}{(p_{\text{N}_2})^{1/2}}$$

其中, $a_{[\text{N}]}$ ——氮的活度, p_{N_2} ——气相氮分压。在 1600°C 下, 氮在纯铁液中的溶解常数约为 0.045, 即当

$p_{N_2} = 0.1\text{MPa}$ 时, 平衡氮含量约为 0.045%。钢液中合金元素对氮的活度系数有显著影响: 铬、锰、钒、铌等元素降低氮的活度系数, 增大氮的溶解度; 碳、硅、镍等元素则提高氮的活度系数, 降低氮的溶解度。LF 精炼过程中钢液成分的调整会改变氮的活度系数, 进而影响吸氮的热力学驱动力。

从动力学上讲, 钢液吸氮是经过气相氮气传到气液界面上、氮分子在界面上吸附、解离成氮原子、氮原子穿透界面进入钢液、氮原子在钢液中扩散的过程^[1]。研究表明, 钢液中氧含量和硫含量低的时候, 吸氮速率是由液相边界层中的传质控制的; 氧、硫含量高时, 界面化学反应就成了速率控制环节。氧、硫属于表面活性元素, 在钢液表面富集, 使铁原子的表面覆盖率下降, 从而达到抑制吸氮的目的。当溶解氧大于 0.02%时, 在底吹氮气条件下钢液的氮含量基本不变。硫的影响也一样, 低硫含量有利于钢液吸氮, 这也解释了 LF 精炼后期脱硫进行, 钢液增氮速率反而升高的现象。

2 LF 炉精炼过程钢液增氮原因分析

2.1 电弧区高温电离增氮

LF 炉用三相石墨电极插入渣层进行埋弧加热, 电极和钢液之间的电弧温度可以达到 3000℃以上, 弧心温度甚至可以达到 6000℃。在这种高温下, 炉内气氛中氮气分子会发生热电离反应, $N_2 \rightarrow 2N$, 产生出大量的活性氮原子, 这些活性氮原子具有很强的化学活性, 可以直接溶解到电弧下方的钢液凹坑里。石墨电极和钢渣之间形成的电弧区是钢液增氮最剧烈的地方。随着加热时间的增加, 电弧区的钢液不断被更新, 增氮量呈累积增长趋势, 铸坯中的氮含量随加热时间的增加而逐渐增大。

2.2 埋弧不良与钢液面裸露增氮

埋弧效果直接影响到电弧区钢液是否被渣层很好地隔离开来。当渣层厚度不够、流动性不好或者发泡效果不理想的时候, 电弧穿透渣层直接作用在钢液面上, 在高温电弧射流的作用下形成凹坑, 凹坑处的钢液裸露并且温度较高, 气相中的氮原子直接进入钢液造成增氮。在生产实践当中发现, 在 LF 精炼刚开始时, 炉渣还没有完全熔化或者泡沫化的时候, 电弧区钢液裸露的概率最大, 此时增氮速率也最高^[2]。精炼过程中钢液面裸露不只在电弧区, 加料、测温、取样等操作打开炉门时也会造成炉内气氛和空气的交换, 炉气氮分压增大, 增大了钢液吸氮的驱动力。

2.3 底吹氩搅拌卷入空气增氮

LF 精炼依靠钢包底吹氩来达到成分和温度的均匀化, 促进夹杂物上浮, 并加强脱硫反应。但是吹氩流量过大时,

钢液面翻腾剧烈, 渣层被冲开甚至出现钢渣卷混现象, 钢液直接暴露在炉内气氛中。某钢厂 120tLF 炉的工业试验结果表明, 在渣层厚度为 150mm~200mm 的时候, 氩气流量约为 50L/min 时钢液裸露直径可以控制在 100mm 左右, 氩气流量大于 132L/min 时容易引起钢渣卷混, 增氮风险增大。精炼时间越长, 吹氩搅拌时间越长、氩气消耗越多, 增氮量也越大。

2.4 原辅材料带入氮

LF 精炼过程中加入的石灰、萤石、合成精炼渣、增碳剂和合金等原辅材料中都含有一定的氮。增碳剂属于含氮量较高的一种, 常规增碳剂的氮含量可达到 0.03%~0.5%, 部分低品质增碳剂的氮含量还会更高。这些材料加入钢液之后, 其中的氮化物在高温下分解, 释放出来的氮溶解到钢液里。合金中的氮含量也不能小视, 特别是钒氮合金、氮化锰铁等含氮合金, 本身就是氮的载体。实际生产中因为转炉出钢一次合金化准确率低, LF 精炼需要大量补加增碳剂和合金, 同时为了促进熔化需要强搅拌, 加剧了钢液二次氧化和增氮。

3 LF 炉精炼过程钢液增氮影响因素

3.1 钢液成分对增氮的影响

钢中氧、硫、碳等元素的含量对增氮行为有较大的影响。氧、硫在钢液表面聚集成表面活性层, 使氮原子不能从界面传递出来。LF 精炼初期钢液中氧、硫含量较高时, 增氮速率低, 为 2.88ppm/min; 精炼后期氧、硫含量降到较低水平以后, 增氮速率迅速提高, 达到 9.40ppm/min。碳的影响比较间接, 高碳钢中碳含量的增加使氮的活度系数增大, 降低氮的溶解度, 但是碳氧反应产生的 CO 气泡对钢液有脱氮作用。合金元素的加入也会影响增氮行为, 含铝、钒、钛等强氮化物形成元素的钢液, 由于氮化物析出使溶解态氮的浓度降低, 反而增大了氮的溶解驱动力, 吸氮能力较强。

3.2 加热制度与电弧特性对增氮的影响

加热制度用电弧功率、送电时间、供电档位来调节增氮量。送电时间与增氮量成正比, 加热时间越长, 电弧区的活性氮原子生成量就越大。有文献报道, 正常的 LF 精炼增氮量可以控制在 5×10^{-6} 以下, 但是加热时间过长或者反复送电时, 增氮量可以达到 78.5×10^{-6} 。供电档位选择也很重要, 高功率档位产生的电弧电流大、弧区温度高, 所以增氮速率也大。采用低电流、短电弧的前期送电方式可以减少初始增氮, 某钢厂将 LF 炉 1 档低电流起弧时间延长 1min 以上, 配合前期加调渣剂改善埋弧效果, 有效地降低了精炼前期低温送电增氮量。

3.3 渣层厚度与埋弧程度对增氮的影响

渣层是隔开电弧区钢液和炉内气氛的第一道屏障。渣层厚度不得小于电弧长度,否则电弧会穿透渣层直接作用在钢液上。工业实践中 LF 精炼渣层厚度大于 100mm,保证稳定的埋弧效果。渣层厚度不够时,电弧凹坑处钢液裸露,此处温度高,氮原子的溶解速率远大于渣层覆盖区。渣的泡沫化程度对埋弧效果有直接影响,加入电石使顶渣发泡可以降低送电增氮量。钢包铸余渣回收工艺可以增加 LF 进站渣层厚度,是简单的、有效的源头控氮措施。

3.4 吹氩流量与搅拌强度对增氮的影响

吹氩流量和增氮量之间存在着非线性关系。流量较小的时候,钢液面平稳,渣层完整,增氮量低;流量增大到一定程度时,钢液面翻腾,渣层被局部冲开,增氮量随之增加。当流量大于临界值的时候,钢渣卷混加重,增氮量急剧增大。因此 LF 精炼各个阶段要对应不同的吹氩流量。到站初期为了促进化渣,可以采用大流量;精炼前中期为了保证脱硫效果,保持中等流量;后期和软吹阶段要严格控制流量在低位,使渣面微动但钢液不裸露。某钢厂通过优化各阶段底吹氩流量,将脱硫及合金化阶段流量从 250~350L/min 降至 200~300L/min,软吹阶段从 100L/min 降至 60~80L/min,从降烟罩到软吹结束的增氮量由 0.0026%~0.0027%降至 0.0011%~0.0012%。

4 LF 炉精炼过程钢液增氮控制措施

4.1 优化造渣制度与埋弧操作

造渣制度的优化目标就是尽快形成足够的泡沫渣层,使电弧全程埋弧。具体措施有以下几点:用低熔点化渣剂加快前期炉渣熔化速度,用电石代替部分铝渣球,利用电石在高温下分解产生的 CO 气泡促进炉渣发泡,同时发挥电石的脱氧脱硫作用,推行钢包铸余渣回收工艺,在转炉出钢过程中向钢包加入精炼渣和石灰进行预造渣,保证 LF 进站时已有一定厚度的液态渣层。渣料加入要分批进行,防止集中投入造成渣面局部降温结壳。精炼前 3min 将渣层厚度提升至 80mm 以上,10min 内达到 100~150mm。渣面有局部亮斑时要及时补加发泡剂,并降低送电档位,等埋弧恢复后继续升温。精炼过程中要密切注意渣面状况,遇有炉渣结壳或者钢液温度偏高时,可采用加热化渣或者加入冷却剂加以调节,防止由于渣况变坏而不得不增大吹氩流量。

4.2 合理控制加热档位与送电时间

加热制度应该以减少不必要的电弧暴露时间、降低弧区活性氮生成量为原则。精炼初期炉渣未完全熔化时,用

低电压档位起弧,短电弧减少对渣层的穿透,待渣层覆盖良好后换到较高档位升温。供电曲线安排上起弧阶段电流控制在额定值的 40%~60%,弧长不能超过渣层厚度的一半^[3]。精炼时减少加热次数,根据钢水温度和节奏要求提前计算升温幅度,防止反复送电。加热一次时间不能大于 15min,以防钢包表面过热、渣线侵蚀。钢水温度接近目标值时使用低档位保温,防止高档位长弧送电。密闭炉门、喂丝孔和加料孔,适当降低除尘风机转速,使炉内保持 200~400Pa 微正压,阻止空气进入,减小炉气氮分压。测温取样应在加热间歇期间进行,减少炉门开闭次数。实践证明微正压操作可以减少钢液增氮 10×10^{-6} 以上。

4.3 精确控制底吹氩流量

吹氩流量控制要分阶段制定量化标准。到站初期采用大流量促进化渣,精炼前期在保证脱硫效果的基础上使用中等流量,后期和软吹阶段严格控制在低位。核心原则就是软吹阶段渣面微动而不出现钢液裸露现象,这时氩气流量一般在 50~150L/min 之间。流量调节应以渣面状态为直接判据,每次调整幅度不大于 50L/min,调整后观察 10~15s 再决定是否继续。渣面有直径大于 200mm 的裸露处时,应立即减小流量并补加渣料。对经过 RH 真空处理的钢种,在钢包车驶离处理位之后立即停止底吹氩气,缩短小流量软吹搅拌的时间。喂钙线时,喂线速度要和底吹氩流量相适应,一般控制在 2~3m/s,防止钢液表面大翻卷入空气。软吹时间不宜超过 12min,避免过度延长搅拌。

4.4 选用低氮原辅材料

增碳剂选用上应选择氮含量不大于 0.03%的低氮增碳剂,固定碳含量不小于 98%,硫含量不大于 0.10%。用量大的增碳剂可以采用喂碳粉包芯线代替石墨球合金化工艺,减少为了促进合金熔化而进行长时间的强搅拌。石灰、萤石等渣料的氮含量也应列入采购标准,石灰中的氮含量一般要求小于 0.01%。原辅材料入厂后应按批次检测氮含量并建立台账,不同批次增碳剂分开堆放,防止高氮物料混入低氮物料。石灰、萤石使用前要充分烘烤,减小水分进入钢液时引起的钢液翻腾和气氛扰动。含氮合金的加入量要准确计算,防止过量加入造成钢液氮含量超过控制范围。氮含量变化大的增碳剂,可以在加入之前根据目标氮含量反算出加入量。提高转炉出钢一次合金化的准确性可以减少 LF 精炼阶段的补加量^[4],从源头上减少原辅材料带入氮的贡献。各个因素以及控制措施的对应关系见表 1。

表 1 LF 炉精炼增氮影响因素与控制措施对照

影响因素	增氮机理	控制措施	预期效果
电弧高温电离	N ₂ 在弧区热电离为活性 N 原子溶解入钢液	低挡位短电弧起弧, 渣层熔化后切换高挡位, 减少加热次数	电弧区增氮量降低 30%~50%
渣层厚度不足	电弧穿透渣层, 裸露钢液直接接触含氮炉气	铸余渣回收加电石发泡, 保证渣层≥100mm	送电过程增氮减少 10×10^{-6} 以上
钢液面裸露	加料、测温、取样时空气侵入, 氮分压升高	密闭炉门和加料孔, 维持 200~400Pa 微正压	精炼全过程增氮量降低约 30%
吹氩流量过大	钢液翻腾裸露, 渣钢卷混使氮接触面积增大	分阶段控制流量, 前期 800L/min 化渣, 中期 350~600L/min 脱硫, 后期 50~150L/min 软吹	吹氩环节增氮量从 0.0026%降至 0.0011%
增碳剂含氮高	增碳剂中氮化物高温分解释放氮进入钢液	选用 N≤0.03%低氮增碳剂, 以喂碳粉包芯线替代石墨球	原辅材料带入氮减少约 40%

5 结束语

LF 炉精炼过程中钢液增氮是由电弧高温、钢液裸露、搅拌卷入以及原辅材料带入等因素共同作用所造成的。氮在钢液中溶解符合 Sieverts 定律, 吸氮速率由液相边界层传质和界面化学反应共同控制, 氧、硫等表面活性元素的存在会抑制吸氮, 精炼后期由于脱硫脱氧, 钢液增氮速率反而增大, 因此 LF 精炼控氮要在脱硫效率和增氮抑制之间找到平衡。从控制策略上来说, 埋弧操作是减少电弧区增氮的主要途径, 足够的渣层厚度以及良好的泡沫化状态可以将电弧和钢液隔离开来; 吹氩流量分阶段精确控制也是减少搅拌增氮的重要手段, 软吹阶段保持渣面微动而不裸露是操作底线; 低氮原辅材料的选择从源头上减少了氮的输入, 配合微正压操作阻断空气吸入, 可以形成界面隔离和气氛控制的双重屏障。经过上述措施的协同使用,

LF 精炼增氮量可以控制在 5×10^{-6} 以下, 工艺上可行, 可以满足大多数低氮钢种成品氮含量的要求。

[参考文献]

- [1]司军亮,智新龙,杜亚杰.LF 炉精炼过程气体氮含量的控制[J].河北冶金,2024,20(9):51-54.
- [2]赵志强.真空炉高氮钢双相增氮控氧工艺实践[J].河北冶金,2026,15(7):66-70.
- [3]刘燕霞,晁霞,张方方,等.顶渣精炼对帘线钢夹杂物的影响研究及工艺改进[J].山东冶金,2025,47(4):1-5.
- [4]王念欣,曾晖,栾吉益,等.LF 增氮控制技术研究与应用[J].山东冶金,2025,47(1):7-9.

作者简介: 姜子浩 (1996—), 男, 山东潍坊人, 助理工程师, 兰州文理学院电子信息工程专业毕业, 现就职于河南钢铁集团安阳钢铁股份有限公司, 从事转炉冶金工作。