

RH 深度脱碳与协同脱氧关键技术

袁保辉, 刘建华*, 何杨, 杨晓东, 张硕

北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083

Key Technologies of RH Deep Decarburization and Synergistic Deoxidation

Yuan Baohui, Liu Jianhua*, He Yang, Yang Xiaodong, Zhang Shuo

Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing
100083, China

1. 前言

IF 钢 (Interstitial-Free Steel), 又称无间隙原子钢, 是超低碳钢中代表性钢种之一, 具备极优异的深冲性能, 是汽车生产的重要原材料[1]。RH 是生产超低碳 IF 钢的重要单元, IF 钢对钢液成分和洁净度有严格要求, 钢中碳含量应尽可能降至 20 ppm 以下, 连铸坯总氧含量要求低于 20 ppm[2][3]。

围绕高效生产高洁净度超低碳 IF 钢的目标, 本文基于 RH 精炼脱碳核心机理, 从循环流量优化、真空压降控制、脱碳方式、控制增碳四个方面总结了 RH 精炼高效脱碳关键技术, 又深入分析了 RH 深度脱碳新技术。综合 RH 精炼高效脱碳与 RH 精炼氧控制关键技术, 凝炼出针对超低碳 IF 钢生产的全流程控氧新理念, 通过 RH 深度脱碳与协同脱氧关键技术的应用, 助力高效生产高品质 IF 钢。

2. RH 精炼脱碳核心机理

2.1. 脱碳反应方式与区域

RH 冶炼超低碳钢过程中, 在钢水初始氧含量难以满足生产需求时, 一般采用 RH 强制吹氧脱碳工艺, 即向钢中吹入一定量的氧气来促进脱碳反应, 提高脱碳效率, 相反则采用自然脱碳工艺进行脱碳。

为更好模拟实际脱碳过程, 普遍认为 RH 脱碳反应发生在 4 个区域, 包括 Ar 气泡表面、钢液内部、熔池表面和液滴表面, 如图 1 所示。

2.2. RH 精炼过程碳变化规律

采用强制吹氧脱碳工艺后, 钢液内部脱碳速率显著提升, 且钢液内部脱碳对总的效率至关重要, 依据碳含量变化可将脱碳过程分为初始脱碳阶段、快速脱碳阶段与缓慢脱碳阶段。

2.3. RH 精炼过程碳变化规律

图 3 为首钢迁钢 RH-TOP 吹氧脱碳过程脱碳速率变化。根据表观脱碳速率 K_c 不同, 吹氧脱碳过程分为 3 个阶段, 第 2 阶段的 K_c 值最大为 0.274 min^{-1} , 是脱碳的主要阶段。表 1 为各企业工业试验测得脱碳速率常数的比较, 通过采用强制吹氧脱碳工艺, 脱碳速率常数得到较大提升。

2.4. 钢液流动特征

RH 真空室内钢液停留时间是评价流体流动行为的重要指标, 真空室内液面高度过高, 真空室内部分液体出现短路流现象, 部分流体产生内循环, 真空处理能力大于真空室脱碳能力上限。

目前有关 RH 顶枪喷吹的研究大多集中在生产工艺方面, 关于 RH-KTB 氧枪在真空条件下射流特性的研究很少。凹坑的形状对于 RH-KTB 精炼脱碳效率有着重要影响, 冲击深度 H、冲击直径 D 是描述凹坑形状的重要指标, 如图 5 所示。

3. RH 精炼高效脱碳关键技术

3.1. 循环流量优化

根据图 7 国内各企业 RH 真空吹氩制度，将实际生产时最大吹氩流量、深真空压力 67 Pa 及浸渍管直径代入公式(2)，计算钢液循环流量，结果如表 2 所示。

表 2 不同钢企 RH 浸渍管直径与钢液循环流量关系

Table2 Relationship between snorkel diameter and steel circulation flow during RH treatment in different enterprises

钢铁企业	RH 炉容量/t	浸渍管直径/mm	设计最大提升气体流量/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	钢液循环流量/ $\text{t} \cdot \text{min}^{-1}$
韩国 POSCO	330	730	260	240
日本 JFE 水岛厂	300	1000	300	240
马钢	300	750	270	225
首钢京唐	300	750	240	233
宝钢	300	750	240	222
涟钢	210	680	230	198
攀钢	200	680	180	187
本钢	180	600	120	141
莱钢	130	480	117	95
涟钢	100	500	180	119

图 7 为各钢企 RH 真空吹氩制度。RH 真空吹氩制度可分为 2~3 个阶段，在真空处理开始后 3~5 min 采用较低吹氩流量，脱碳反应中后期，增大吹氩流量有利于加快钢液循环，促进脱碳反应快速进行。

钢液循环流量与浸渍管直径关系如图 8 所示。随着浸渍管直径增加，钢液循环流量逐渐增加，但增加幅度逐渐减小，说明浸渍管直径过大时钢液循环流量提升并不明显。结合表 2 可知，对于大容量 RH，浸渍管直径 ≥ 750 mm 已经可以满足 IF 钢精炼的需要。

3.2. 预抽真空与真空压降控制

日本新日铁名古屋厂较早提出了预抽真空工艺，预抽真空可有效避免脱碳缓慢阶段，处理开始后脱碳速率可迅速达到较高水平。首钢京唐 300 t RH 先预抽真空至 20 kPa，处理开始后迅速降至 100 Pa 以下，终点碳含量下降了 6 ppm，脱碳时间也从 14.2 min 也缩短至 11 min。可见，预抽真空可缩短脱碳时间，提高脱碳效率。

图 10 为迁钢 RH 脱碳真空压降制度与脱碳情况。由图可知，在真空制度 2 的条件下，碳含量下降更迅速，终点碳含量更低，主要原因是真空制度 2 压降平台持续时间仅 1 min 左右，4 min 内即到达深真空。因此，提高压降速率，缩短达到深真空时间，有利于加快脱碳效率。

3.3. 自然脱碳与强制脱碳

国内各钢企生产超低碳 IF 钢时，转炉终点控制存在碳氧含量波动大，氧含量偏高引起的较严重钢水过氧化问题。同时，国内外 RH 脱碳终点碳含量控制水平相当，但国内 RH 脱碳时间相对较长，强制吹氧脱碳速率明显偏低。

通过转炉高碳低氧出钢，后续在 RH 精炼时采用强制吹氧脱碳工艺，以弥补钢中氧来完成降碳任务，有利于避免钢液过氧化，降低 IF 钢顶渣氧化性，并充分发挥强制吹氧脱碳工艺效果。

3.4. 控制增碳

RH 真空槽、钢包、连铸三大件采用无碳耐材，RH 真空槽、浸渍管及钢包采用镁铝尖晶石耐材，钢包保温剂、中间包覆盖剂，连铸保护渣均用无碳的物料，是控制超低碳钢生产过程增碳的重要措施。此外，为防止精炼初期钢水喷溅，控制精炼初期小吹氩流量，吹氧脱碳期间氧枪吹氧流量与枪位协同控制。

4. RH 精炼深度脱碳新技术

由于工业生产中 RH 深脱碳需求，常规方法难以稳定生产 10 ppm 以下超低碳钢，从而多种 RH 精炼深度脱碳新技术被开发出来，如图 15 所示。RH 精炼深度脱碳新技术包括吹氢强化脱碳、吹氧强化脱碳、吹氩强化脱碳，优化真空罐流动形态技术等。

4.1. 吹氢强化脱碳

吹氢强化脱碳是指在 RH 内吹入氢气或含氢气体增加钢液氢溶解量，吹气位置包括上升管、钢包内、顶吹氧枪等，脱气过程中产生氢气泡有利于加速脱碳和增大气液反应面积。

4.2. 吹氧强化脱碳

吹氧强化脱碳在 RH 上升管吹入氩氧混合气体，一方面氧气溶解进入钢液与钢中碳反应，加快脱碳；另一方面也能起到增大气液反应面积强化脱碳作用。

4.3. 吹氩强化脱碳

吹氩强化脱碳是指在 RH 上升管吹入氩气同时，真空室其他位置也进行吹 Ar，进一步促进了 RH 精炼过程钢液深脱碳。

4.4. 真空罐流动形态优化

RH 脱碳过程通常以真空室内钢液脱碳反应深度来表征脱碳反应界面积的大小，即脱碳反应深度越深，脱碳反应界面积越大。在脱碳 5 min 以后，脱碳由钢液内部逐渐转为钢液表面；脱碳大于 8 min 以后，钢液的主要脱碳区域为真空室表面。因此，可通过调节浸渍管浸入深度降低真空室内液面高度，促进 RH 深度脱碳。

5. RH 精炼氧控制关键技术

5.1. 有害夹杂物与氧控制

保护渣夹杂物和钢中内生的大尺寸簇群状 Al_2O_3 夹杂物是造成冷轧薄板表面缺陷的主要原因。通过对结晶器流场优化可有效降低保护渣卷入概率，通过控制脱氧前钢液氧活度是减少大尺寸 Al_2O_3 夹杂物、改善钢液洁净度的有效途径。水口结瘤也是铝镇静钢连铸过程中非常普遍现象，为减少钢中残余的 Al_2O_3 夹杂物，减轻水口堵塞，关键在于 RH 脱碳结束氧的控制。

5.2. 脱碳结束氧活度控制

从控氧角度来说，尽量降低 Al 脱氧前钢中氧含量有利于提高钢液洁净度。为保证 RH 脱碳效果，RH 脱碳结束保持在较高氧活度更有利于深脱碳。

本课题组在调研攀钢西昌钢钒 RH 脱碳工艺时发现，应将 RH 脱碳结束氧活度控制在 280~330 ppm，RH 既能保持良好深脱碳效果，也有利于钢液洁净度控制。

5.3. 顶渣改质

随着 RH 出站顶渣 T.Fe 含量增加，中包钢中夹杂物数量呈增加趋势。随着 RH 处理时间延长，顶渣 T.Fe 含量越低，钢液 T.O 含量越低。因此，在 IF 钢精炼过程，为减弱顶渣向钢液传氧，应控制 RH 顶渣 T.Fe 含量在 5% 以下。

5.4. 全流程控氧新理念

针对国内外 RH 深脱碳工艺现状，本梯队提出了全流程控氧新理念，如图 1 所示。转炉高碳低氧出钢，RH 过程集成应用高效脱碳与低氧活度控制技术，助力高效生产高品质 IF 钢。

5.5. 微小氢气泡促进夹杂物上浮新技术

本课题组提出了一种微小氢气泡促进夹杂物上浮新技术。在 RH 真空处理时，氢气代替氩气作为提升气体，使氢溶解在钢液中，在脱除溶解在钢液中的氢时，会在钢液中以夹杂物为核生成弥散微小气泡，微小气泡碰撞捕捉钢中夹杂物，促进夹杂物的聚合长大，促进夹杂物上浮去除。

5.6. RH 下降管吹氩促进夹杂物上浮新技术

本课题组开发了一种 RH 下降管吹氩促进夹杂物上浮新技术。在 RH 精炼装置下降管吹入氩气或含有氩气混合气体，控制从下降管侧壁气孔脱附的气泡直径分布在 0.5 mm~3 mm，并随下降管钢液一起进入钢包，达到最大深度后气泡开始向上运动，在此过程下降管内和钢包内的细小夹杂物被气泡粘附去除，有效提升了夹杂物去除效果。

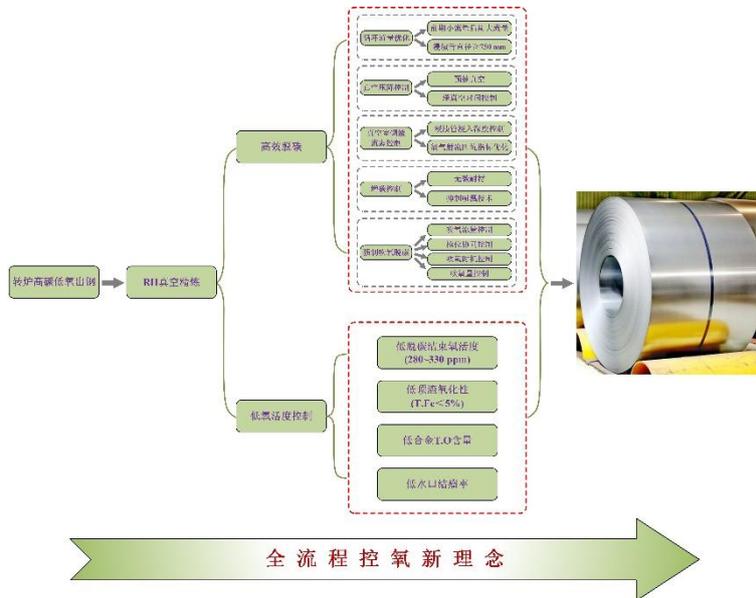


图 1 全流程控氧新理念示意图

Fig.1 New concept of whole-process oxygen control

6. 结论

(1) 国内转炉终点控制存在碳氧含量波动大，氧含量偏高引起的较严重钢水过氧化问题，且国内 RH 脱碳时间相对较长，强制吹氧脱碳速率明显偏低。基于 RH 脱碳核心机理，通过循环流量优化、预抽真空与加快压降速率，在转炉高碳低氧出钢，RH 精炼采用强制吹氧脱碳工艺以弥补钢中氧，并严格控制增碳，有利于避免钢液过氧化，实现 RH 高效脱碳，并可降低 IF 钢顶渣氧化性。

(2) 控制低脱碳结束氧活度、低顶渣氧化性是降低冷轧板表面缺陷率与水口结瘤率的 RH 精炼氧控制关键技术。综合 RH 精炼高效脱碳关键技术，本梯队提出了全流程控氧新理念，在转炉高碳低氧出钢，RH 精炼过程集成应用高效脱碳与低氧活度控制技术，可实现高效、高洁净度目标。

(3) 吹氢强化脱碳、吹氧强化脱碳、吹氩强化脱碳，优化真空罐流动形态技术是实现 RH 深度脱碳的重要新技术，微小氢气促进夹杂物上浮新技术、RH 下降管吹氩促进夹杂物上浮新技术均有望进一步提高 RH 去夹杂能力。

致谢

感谢国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项，2021YFE0113200，炼钢-精炼-连铸过程控制的混合增强智能优化技术的支持。

参考文献

- [1] 贾攀. IF 钢发展及生产工艺研究[J]. 甘肃冶金, 2017, 39(05): 39-42.
- [2] Zhang J, He Y, Liu J, et al. The effects of Soluble Gas Floatation Technology on the flow field of ladle and inclusion removal in RH refine process[J]. Vacuum, 2019, 168: 108803.
- [3] 刘凤刚. 迁钢 IF 钢生产工艺研究[D]. 北京科技大学, 2012.
- [4] Yuan B, He Y, Liu J, et al. Mathematical model for the forced oxygen blowing decarburization process of ultra-low carbon steel during RH treatment[J]. Metallurgical Research & Technology, 2022, 119(4): 415.
- [5] 袁保辉, 刘建华, 周海龙, 等. 高海拔 RH 精炼装置真空脱碳工艺优化研究[J]. 炼钢, 2020, 36(04): 31-38.
- [6] 袁保辉, 刘建华, 周海龙, 等. RH 强制脱碳与自然脱碳工艺生产 IF 钢精炼效果分析[J]. 工程科学学报, 2021, 43(8): 1107-1115.
- [7] Yuan B, Liu J, Zeng J, et al. Evolution of inclusions and cleanliness in Ti-bearing IF steel produced via the BOF-LF-RH-CC process[J]. Metals, 2022, 12(3): 434.
- [8] 刘建华, 张硕, 何杨, 等. 一种在 RH 精炼钢液中生成微小气泡的方法[P]. 北京市: CN110592322B, 2020-12-08.
- [9] Zhang S, Liu J, He Y, et al. Bubble formation by argon injection through the down-leg snorkel with Ruhrstahl-Heraeus (RH) circulating flow[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 306: 117647.