

电炉+转炉：开辟钢铁降碳新路径

EAF+BOF: A New Path Low Carbon Emission Steel Production

供稿|彭飞, 段富春, 刘哲, 周军, 陈宇 / PENG Fei, DUAN Fuchun, LIU Zhe, ZHOU Jun, CHEN Yu

内容导读

在“双碳”目标驱动下，钢铁行业作为碳排放大户，正面临前所未有的转型压力。当前主流的应对方案如氢基竖炉、全电炉炼钢等，虽减排效果显著，却普遍存在成本高、钢水氮含量难以控制、或转炉热量不足等瓶颈。为此，本研究提出并验证了一种创新的组合工艺——将电炉冶炼的低碳钢水与高炉铁水按比例混合，再进入转炉进行最终冶炼。该工艺巧妙融合了电炉高废钢比带来的低碳优势（工序碳排放仅每吨钢约 0.6 t CO_2 ）与转炉强烈的碳氧反应所具备的优异脱氮能力，从源头解决了电炉钢水氮含量偏高的行业痛点。实际生产表明，该组合路径可减少碳排放 30% 以上，同时实现钢种全覆盖，且成品钢材的化学成分、力学性能及微观组织均与常规工艺产品无显著差异，质量稳定可靠。本研究为钢铁行业提供了一条兼具经济性、可行性与广泛适应性的绿色转型技术方案。

钢铁行业是全球重要的基础产业之一。目前，钢材生产以高炉-转炉长流程为主（占比 90%），该流程碳排放强度较高，对碳减排贡献较大。随着全球对气候变化的关注日益增强，钢铁行业面临着巨大的碳减排压力。为实现低碳转型，国内外钢铁企业均在研究和探索新的炼钢生产技术^[1]。康斌等^[2]报道了国外典型钢铁企业低碳排放钢的生产工艺，主要为基于可再生能源发电、电解制氢、氢气直接还原炼铁、电炉炼钢的低碳排放全流程生产工艺。国内各钢铁企业也相继开展了增大废钢比及氢基竖炉等技术，如王杨等^[3]报道了河钢氢基竖炉生产绿钢的情况，米飒等^[4]报道了宝钢氢基竖炉+电弧炉生产超低碳排放钢的实践，碳排放降幅较为显著。

在这一背景下，电炉炼钢工艺凭借其直接以废钢为原料、减少焦炭使用、可使用清洁电力等优

势，成为降低碳排放的有效路径。但该工艺也存在以下问题：（1）电炉炼钢工序钢水氮质量分数通常较高（ $\geq 0.0050\%$ ），虽然精炼 RH 工序有一定的脱氮能力，但合金元素等物料添加及连铸存在少量增氮，导致最终钢坯氮质量分数难以满足钢种要求低于 0.0050% 的严格需求，使得对氮含量需求较高的钢种难以生产；（2）电炉炼钢与板坯铸机的生产节奏匹配性不佳，导致生产效率不高；（3）生产成本较高。

相比之下，转炉炼钢因生产周期短，易于与铸机匹配，生产效率高且成本较低。同时，转炉内碳氧反应强烈，可脱去钢中氮元素，冶炼后钢水氮含量相对较低，能够生产氮含量要求较严格的钢种，因此仍是目前炼钢生产的主要工艺路线。但该工艺生产的金属料以铁水为主，导致碳排放量相对较高，各钢厂相继开展了通过多吃废钢技术来降低铁

水消耗、进而降低碳排放的研究。金雄林^[5]报道了首钢实现 50% 大废钢比的技术，田春健等^[6]、刘文凭等^[7]、王达志^[8]、刘孟珂^[9]、李茂权^[10]、高茗^[11]等均对转炉采用高废钢比技术后的造渣脱磷及废钢熔化过程进行了详细的技术研究。但由于转炉冶炼过程富裕的热能有限，继续提高废钢比会导致热量不足，为满足出钢温度要求需加入大量的发热剂，不仅增加成本，还易导致转炉生产质量不稳定，影响终点命中率。本研究通过组合电炉及转炉炼钢工艺，充分利用各自的优点，即利用电炉炼钢提高废钢比，利用转炉炼钢控制钢水氮含量，以满足低碳排放钢对钢水质量的需求，达到炼钢过程降低碳排放的目的。

低碳排放钢碳排放理论研究

转炉炼钢的碳排放理论计算

碳排放的计算因应用场景和计算方法不同而有所差异，主要包括排放因子法、质量平衡法和实测法 3 类核心方法。其中排放因子法最为常用，其通用公式为：

$$E = P \cdot C \quad (1)$$

式中： E 为二氧化碳排放量； P 为能源消耗量，如电量、热量； C 为排放因子，即单位能源的碳排放量。

通过式（1）可以看出，降低吨钢产品的能源消耗水平能够有效降低碳排放。近年来，国内各钢厂围绕降低能源消耗持续开展技术研究，随着各项节能措施的陆续实施，能源消耗水平普遍有所降低。但若以减少碳排放 30% 以上为目标，目前通过大规模节能措施可挖掘的潜力较为有限；尽管仍存在一定空间，但难以达到 30% 以上的减排需求。此外，降低物料消耗也可间接降低能源消耗和碳排放，但由于物料消耗的降低空间有限，且物料对排放因子的影响较小，因此对降低碳排放的贡献有限。

表 1 为转炉炼钢基本物料消耗数据，包含不同物料在炼钢时吨钢碳理论排放量，本厂炼钢时吨钢对物料的实际消耗量和实际碳排放。（各钢厂因生产环境不同，物料消耗量和种类或有差异，但总体差距不大）。通过表 1 可以看出，铁水的碳排放及

吨钢消耗量在转炉炼钢中占比最大，远高于其他物料。若要实现减少碳排放 30% 以上的目标，需大幅度减少铁水用量，相应需加入大量废钢。

表 1 转炉炼钢常用物料及碳排放水平

物料	碳排放/t	吨钢消耗/t	吨钢碳排放/kg
活性石灰	0.70	0.030	21.00
石灰石	0.44	0.006	2.64
白云石	0.47	0.018	8.46
铁水	1.56	0.950	1482

电炉炼钢与转炉炼钢的碳排放对比

电炉炼钢以废钢为主要原料，省去了焦化、烧结、高炉炼铁等高碳排放生产环节，因此碳排放强度显著降低，并具备使用清洁电力等优势。根据相关报道，在废钢比为 100% 时，电炉炼钢工序的吨钢碳排放强度约为 0.6 t（以 CO_2 计算）。而转炉炼钢则主要采用高炉铁水作为主要原料，废钢比通常为 15% 左右，由于铁水消耗高，碳排放强度较高，炼钢工序一般吨钢碳排放量为 1.8 t（以 CO_2 计算）。如果采用 50% 转炉钢水+50% 电炉钢水的混合流程，折算下来炼钢工序减少碳排放约 33%，见表 2；如果进一步提高电炉钢水比例，可继续降低碳排放水平，全部采用电炉钢水，经计算可降低碳排放 50% 以上。

表 2 不同炼钢方式吨钢碳排放对比 t

转炉炼钢	电炉炼钢	50%转炉钢水+50%电炉钢水
1.8	0.6	1.2

低碳排放钢生产方案设计

生产路径

本项研究的产品生产路径如图 1 所示。鱼雷罐运输至炼铁厂，接受铁厂的部分铁水并采取保温措施，随后运输至电炉钢厂；电炉钢厂同步进行废钢熔化生产，鱼雷罐到达后，由吊车将钢包吊运至鱼雷罐进行折铁操作，按重量要求折入需求钢水；折铁结束后进行鱼雷罐保温，然后运输至转炉钢厂的铁水预处理工序，进行出铁及测温；根据铁水成分及温度情况，由转炉热平衡模型计算是否需添加废钢；半钢水经脱硫扒渣后兑入转炉进行生产，终

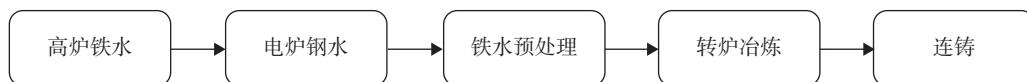


图1 生产路径

点成分合格后，经过精炼、连铸工序生产出合格铸坯。

各节点温度控制

表3为通过式(2)计算的铁水中不同碳含量对应的液相线温度。由于运输过程时间较长，存在温降，需考虑运输过程中鱼雷罐内铁水结壳问题。根据计算结果及实际运输时间，综合制定铁水碳含量的控制要求。结合铁水和钢水的比例，混合后的半钢水碳质量分数控制在2.50%以上比较合适：一方面可降低液相线温度，防止运输过程中铁水结壳；另一方面有助于延长转炉冶炼环节的碳氧反应时间，利于脱除钢水中氮元素。

$$T_L = 1536 - 78w(C) - 7.6w(Si) - 4.9w(Mn) - 34w(P) - 30w(S) \quad (2)$$

式中： T_L 为液相线温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $w(C)$ 、 $w(Si)$ 、 $w(Mn)$ 、 $w(P)$ 、 $w(S)$ 分别为钢中碳、硅、锰、磷、硫的质量分数。

表3 不同碳含量对应理论液相线温度

碳质量分数/%	液相线温度/ $^{\circ}\text{C}$
4.32	1092
3.00	1224
2.50	1274
2.30	1294
2.20	1304
2.10	1314
2.00	1324

表4为根据标定的各节点运输时间及鱼雷罐温降情况制定的各节点温度要求，旨在保障铁水安全运输至炼钢厂，避免铁水结壳影响后续生产；同时，通过温度控制为铁水预处理环节创造良好的生产条件，并满足转炉生产的热平衡要求，避免转炉吹炼终点过吹，确保钢水符合钢种的质量要求。

表4 各节点温度要求 $^{\circ}\text{C}$

电炉钢水	至炼钢厂	倒罐后	入炉
≥ 1600	≥ 1450	≥ 1420	≥ 1380

钢坯氮含量控制

降低铁水氮含量

由于电炉炼钢环节钢水氮含量较高，兑入鱼雷罐与部分铁水混合后，半钢水的氮含量较高，而在后续铁水脱硫过程中，因铁水裸露会造成增氮明显，经检验，该过程可使铁水氮质量分数增加 $15 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$ 。为从源头上降低炼钢终点钢水氮含量，需减少铁水脱硫环节的增氮量。可采取以下措施：（1）严格按钢种质量需求进行脱硫，避免过度脱硫；（2）脱硫过程中合理控制镁粉喷吹速度，避免喷溅导致铁水裸露而增氮；（3）对于部分精炼LF炉路径钢种，可在仅进行扒渣操作后直接兑入转炉，不进行脱硫操作，以尽量减少铁水脱硫环节的增氮量。

提高转炉脱氮能力

由于是半钢铁水，其碳含量较常规铁水低，导致转炉供氧时间偏短，影响造渣操作及终点操作。前期试验2炉，因供氧时间短，炉渣未能有效熔化，导致吹炼终点钢水氮质量分数偏高，分别为 35×10^{-6} 和 29×10^{-6} 。合金类钢种由于出钢过程合金加入等因素会增加部分氮含量，LF炉生产和连铸浇钢过程也会有少量增氮，导致钢坯氮质量分数要求小于0.0050%的钢种生产风险较大，易出现成分不合现象。为满足产品质量要求，需利用转炉冶炼脱氮优势尽量多脱除钢水中的氮元素，降低冶炼终点钢水氮含量。（1）根据铁水的成分及温度，依据转炉热平衡模型计算，合理匹配废钢，避免吹炼终点温度过高或过低，实现吹炼终点碳温命中，避免补吹。（2）由于铁水成分与常规高炉铁水有较大区别，根据热平衡及造渣制度需求，重新优化氧枪操作制度及造渣制度，化好渣，避免钢水裸露增氮。（3）对铁水进行少量增碳，一方面可以降低铁水熔点，减少运输过程结壳问题；另一方面可以增加转炉供氧时间，转炉吹炼过程中碳氧反应产生的局部真空效应应具有脱氮作用，可提高转炉脱氮能力。经生产数据检测，铁水碳质量分数 $> 2.50\%$ 时可满足

转炉脱氮要求。

工艺实施与性能评估

降低铁水氮含量效果分析

铁水预处理工序对铁水脱硫操作进行优化前后的铁水氮含量对比如图 2 所示。通过图 2 可以看

出, 铁水氮质量分数由措施实施前的最高 92×10^{-6} 、平均 87×10^{-6} 降至最高 78×10^{-6} 、平均 75×10^{-6} , 平均降低 12×10^{-6} 。说明减少铁水裸露可以有效降低铁水氮含量, 目前采取的降氮措施有效, 从生产源头上降低了转炉脱氮的难度, 有利于转炉终点钢水氮含量的降低。

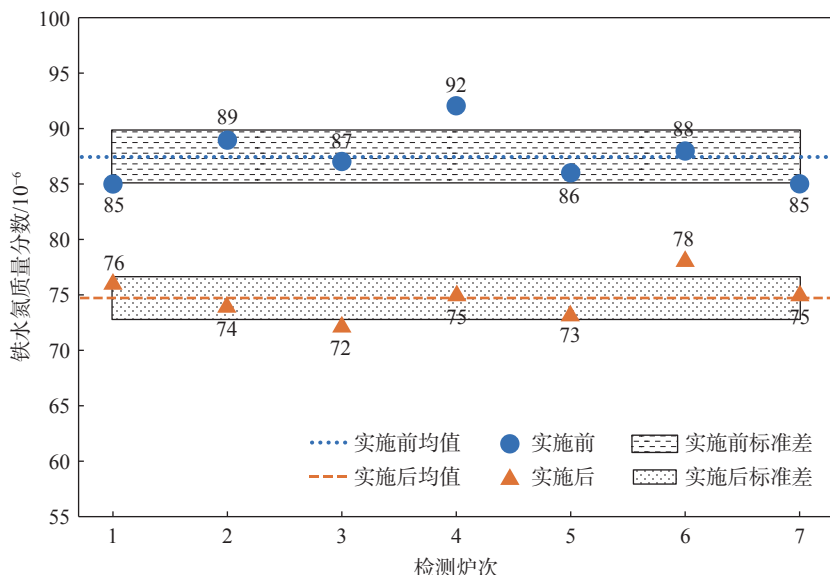


图 2 实施优化措施前后的铁水氮质量分数对比

转炉终点脱氮能力的优化结果

转炉操作方案优化后的转炉终点氮质量分数如图 3 所示。从图中看出, 转炉终点氮质量分数由试验

初期平均 32×10^{-6} 降低至 20×10^{-6} , 最低 15×10^{-6} 。说明适当提高铁水碳含量, 延长转炉供氧时间, 即相应延长转炉吹过程的碳氧反应时间, 增强了钢水搅

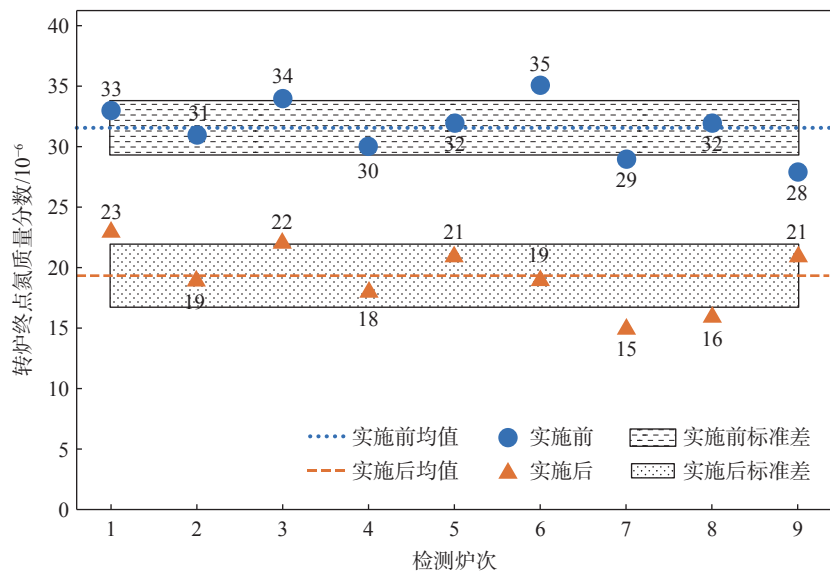


图 3 转炉终点氮质量分数

拌，局部真空条件的存在有效去除了钢水中的氮元素。充分考虑电炉钢厂调碳的难度及成本最优原则，目前控制铁水混钢后的碳质量分数 $>2.5\%$ 即可完全满足转炉吹炼过程去除钢水中氮元素的质量要求及转炉热平衡要求。生产过程稳定，炉渣熔化较好，为后道工序氮含量控制满足钢种要求打下了基础。

钢坯氮含量控制结果与稳定性分析

冶炼钢种精炼工序通过 LF 路径生产的钢种钢坯氮质量分数如图 4 所示。从图中可以看出，钢坯平均氮质量分数控制在 40×10^{-6} 左右，波动范围较小，

最大值不超过 45×10^{-6} 。说明通过铁水脱硫环节适当降低脱硫强度，减少了铁水中的氮含量；转炉冶炼操作优化后，钢水氮质量分数控制在 25×10^{-6} 以下；LF 炉造渣采取多批次少量加入造渣材料，合理控制底吹氩流量，避免钢水裸露，钢水增氮量控制较好，满足合金类钢种钢坯氮质量分数 $<50\times 10^{-6}$ 的质量要求。

冶炼钢种精炼工序通过 RH 路径生产的钢种钢坯氮质量分数如图 5 所示。从图中可以看出，钢坯氮质量分数控制在 25×10^{-6} 以下。说明通过铁水适当

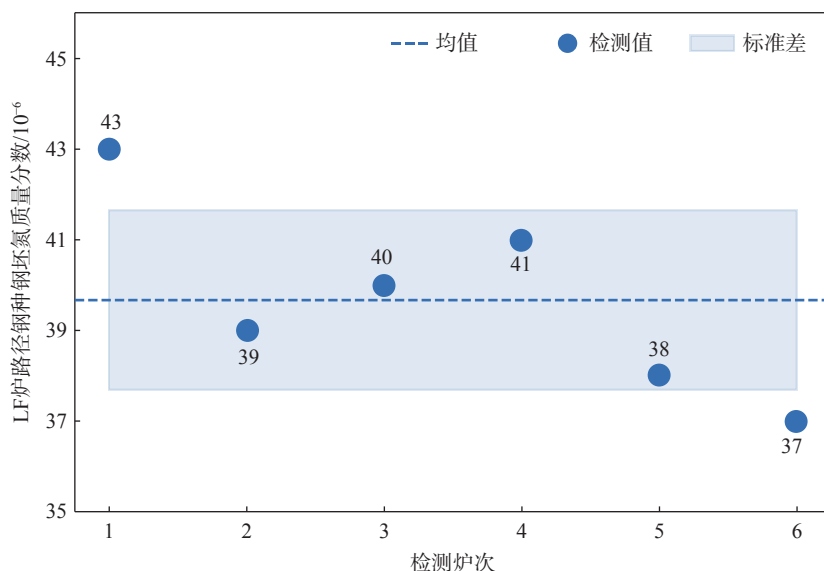


图 4 LF 炉路径钢种钢坯氮质量分数

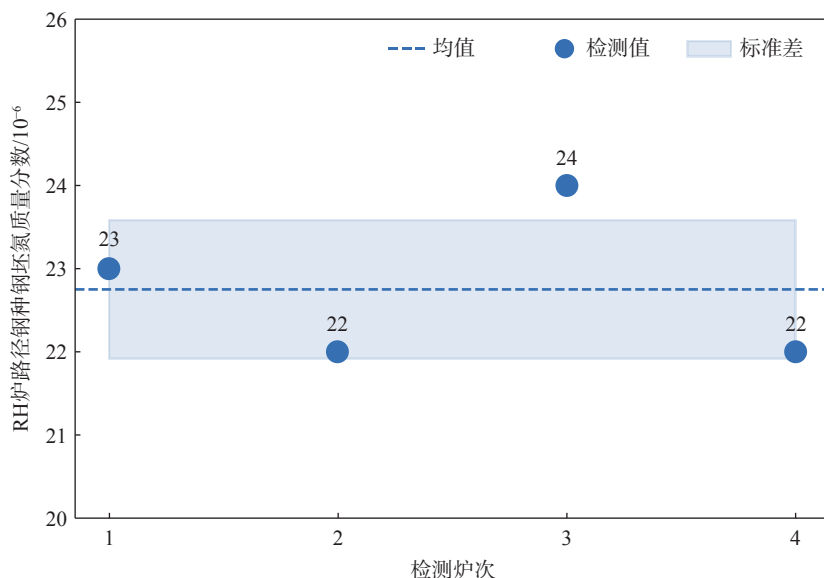


图 5 RH 炉路径钢种钢坯氮质量分数

脱硫，转炉严格按热平衡进行操作，化好过程渣，避免终点过吹，再经 RH 真空处理后，钢水氮含量控制较为稳定，连铸浇钢后钢坯氮含量较低，满足钢种对氮含量的质量要求。

成材性能与微观组织对比评估

铸坯经热轧和冷轧工序轧制成材后，分别选取低碳钢和低合金钢标准样品，对低碳排放钢与常规钢的化学成分、金相组织及力学性能等进行了对比测试。

低碳排放和常规生产的 2 种钢种在化学成分、显微组织和拉伸性能方面均符合标准要求，未见明

显差异。在夹杂物方面，2 种钢材表现相当，低合金钢中夹杂物级别为 DT1.0 和 DS0.5，低碳排钢中仅存在 DT1.0 级别的夹杂，但仍处于标准控制范围内。

金相组织如图 6 和图 7 所示。从图 6 可以看出，低碳排放钢与常规钢均呈现出类似的铁素体-珠光体组织形貌，晶粒尺寸均匀，形貌分布一致，未观察到异常组织，说明二者在热加工过程控制良好。从图 7 低合金钢样品的高倍率组织图像可以看出，二者晶粒结构一致，晶粒细化明显，符合力学性能控制需求。

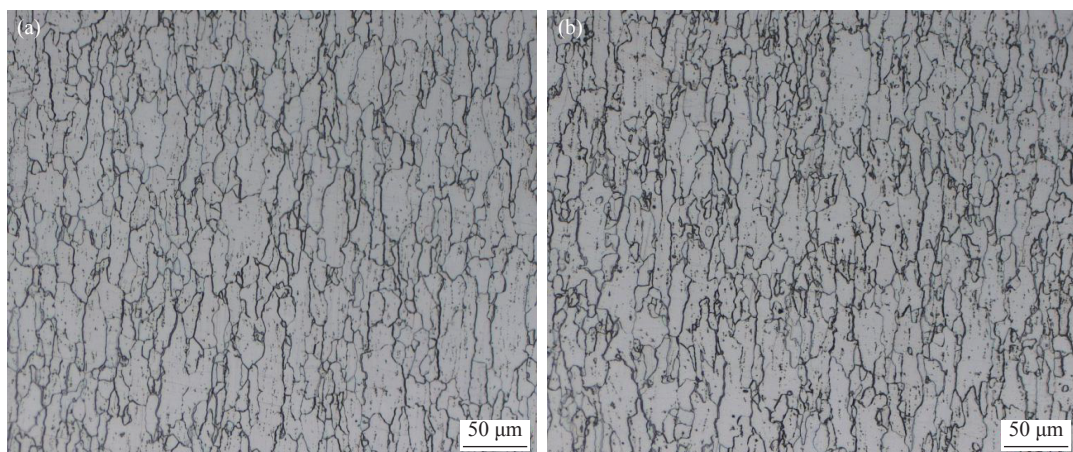


图 6 低碳类钢种的金相照片: (a) 低碳排放钢; (b) 常规钢

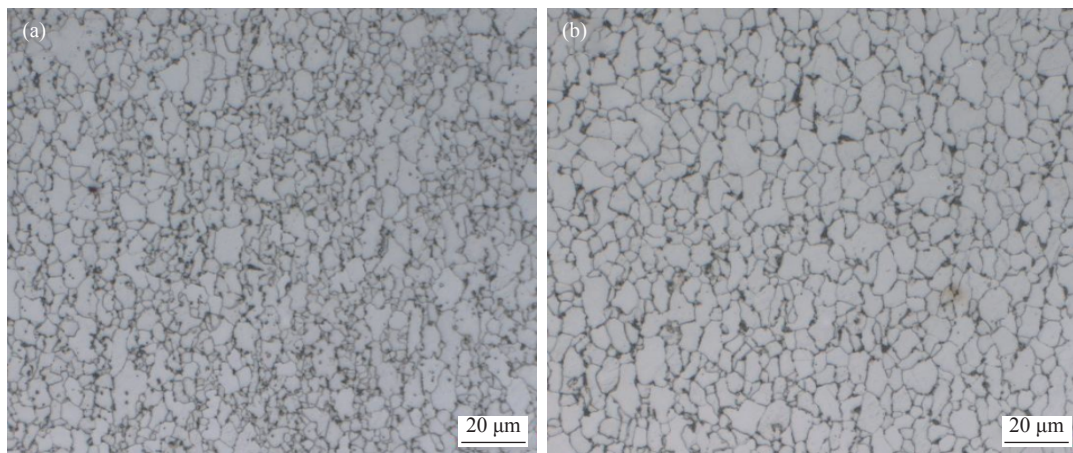


图 7 低合金类钢种的金相照片: (a) 低碳排放钢; (b) 常规钢

综上所述，低碳排放钢在微观组织上与常规钢保持了良好的一致性，其力学性能和组织均匀性均与正常生产的常规钢种相当，质量无显著差异。

结束语

提出并实践了一种将电炉钢水与高炉铁水混合后在转炉中冶炼的低碳排放钢生产工艺，创新性地

融合了电炉炼钢与转炉炼钢两大主流工艺路径。该工艺在充分发挥电炉炼钢高废钢比、低碳排放优势的同时,有效利用转炉碳氧反应强烈、脱氮能力良好的特性,成功解决了电炉钢水氮含量偏高的难题。实际生产表明,该组合工艺适应性强、稳定性好,能够覆盖全系列低碳排放钢种的生产需求,产品质量稳定可靠,完全满足现行钢种标准要求。经对比分析,该路径相较传统转炉炼钢碳排放可降低30%以上,同时在能源利用、生产节奏匹配及成本控制方面具备一定优势。研究成果为钢铁行业实现绿色低碳转型提供了切实可行的技术路径和理论支持,具有良好的推广前景和产业应用价值。

参考文献

- [1] 王嘉,富志生,杨新龙.“双碳”目标下钢铁的“风光”发展之路.金属世界,2025(1): 25
- [2] 康斌,辜海芳,王媛.国外典型钢铁企业低碳排放钢发展现状及其启示.冶金管理,2024(1): 45
- [3] 王杨,曹莹莹.张宣科技特钢公司:技术加持勇闯“绿钢”生产新赛道.中国冶金报,2024-06-04(2)
- [4] 米飒,杨立文,钟辰,等.“绿钢”诞生记.中国冶金报,2025-03-05(2)
- [5] 金雄林.首钢实现50%大废钢比,废钢铁行业将迎来重大发展机遇.冶金管理,2024(11): 36
- [6] 田春健,臧喜民,张利武,等.转炉高废钢比炼钢技术的发展状况与探讨.钢铁研究学报,2024,36(6): 692
- [7] 刘文凭,李少帅,刘忠建.提高废钢比对转炉冶炼的影响分析.山东冶金,2023,45(5): 65
- [8] 王达志.废钢在转炉炼钢中高效利用的基础研究[学位论文].北京:北京科技大学,2023
- [9] 刘孟珂.废钢在铁碳熔池中的熔化行为及机理研究[学位论文].武汉:武汉科技大学,2022
- [10] 李茂权.转炉大废钢比技术的经济性研究.冶金管理,2021(10): 54
- [11] 高茗.炼钢工艺废钢熔化过程基础研究[学位论文].北京:北京科技大学,2021

作者简介:彭飞(1970—),男,辽宁省本溪人,炼钢专业首席工程师。1992年毕业于东北工学院(现东北大学)钢铁冶金专业,主要研究方向:炼钢。通信地址:辽宁省本溪市平山区南兴路18号;E-mail:1036785864@qq.com。