

转炉底吹非均匀供气技术研究现状与展望

冯伟伟¹, 隋昕宇², 汪嘉芮¹, 韦梦晨¹, 刘泽水¹, 高新宇^{1*}

¹辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁 鞍山

²辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

转炉底吹非均匀供气技术通过差异化调控底吹元件的流量分配或采用非对称布置方式, 在熔池内构建非对称循环流场, 显著强化熔池水平搅拌效能, 缩短混匀时间, 降低死区占比, 改善冶金反应动力学条件。本文系统梳理了该技术的研究现状, 从作用机理、物理与数值模拟、供气元件与布置优化、工业应用效果及与新兴工艺融合等方面进行综述。研究表明, 合理的非均匀供气方案可使混匀时间缩短19%~29%, 死区占比降低26%以上, 终点碳氧积稳定控制在0.0022以下, 并有效缓解底吹元件与炉衬寿命失配问题。结合绿色化、智能化发展趋势, 展望了非均匀供气技术与高废钢比冶炼、底吹喷粉、智能化控制等方向的融合前景, 为转炉底吹工艺的升级优化提供理论参考。

关键词

转炉, 底吹, 非均匀供气, 熔池搅拌, 混匀时间, 数值模拟

Research Status and Prospect of Non-Uniform Bottom Gas Supply Technology in Converters

Weiwei Feng¹, Xinyu Sui², Jiarui Wang¹, Mengchen Wei¹, Zeshui Liu¹, Xinyu Gao^{1*}

¹School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

²School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: March 20, 2026; accepted: April 14, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

Non-uniform bottom gas supply technology in converters enhances bath stirring efficiency by

*通讯作者。

文章引用: 冯伟伟, 隋昕宇, 汪嘉芮, 韦梦晨, 刘泽水, 高新宇. 转炉底吹非均匀供气技术研究现状与展望[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 264-270. DOI: 10.12677/ms.2026.164093

differentially regulating gas flow distribution among bottom-blowing elements or adopting asymmetric arrangement, thereby constructing non-uniform flow fields within the molten pool. This approach significantly improves horizontal mixing, shortens mixing time, reduces dead zone proportion, and optimizes metallurgical reaction kinetics. This paper systematically reviews the research status of this technology from the perspectives of mechanism, physical and numerical simulation, optimization of gas supply elements and layout, industrial application effects, and integration with emerging processes. Studies indicate that a reasonable non-uniform gas supply scheme can reduce mixing time by 19%~29%, decrease dead zone proportion by over 26%, and stabilize the end-point carbon-oxygen product below 0.0022, while effectively alleviating the service life mismatch between bottom-blowing elements and furnace lining. In line with green and intelligent development trends, the integration of non-uniform gas supply technology with high scrap ratio melting, bottom powder injection, and intelligent control is discussed, providing theoretical support for the optimization of converter bottom-blowing processes.

Keywords

Converter, Bottom Blowing, Non-Uniform Gas Supply, Bath Stirring, Mixing Time, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

转炉炼钢是当前全球钢铁工业的主流炼钢工艺，其技术迭代对行业实现节能减排、降本增效的核心目标具有决定性的推动作用[1]。顶底复吹工艺凭借熔池搅拌充分、终点碳氧积低、钢铁料损耗小等技术优势，已成为现代转炉炼钢的核心工艺模式[2]。其中，底吹工序通过底部供气元件向熔池喷入搅拌气体，可显著强化熔池内的传质传热与冶金反应速率，对提升钢水洁净度、降低冶炼成本具有关键作用。

但随着溅渣护炉技术的广泛应用与转炉炉龄的持续提升，底吹系统的服役稳定性面临严峻挑战。工业生产中，进入炉役中后期后，底吹元件易出现不同程度的堵塞、磨损与侵蚀，导致实际供气均匀性大幅下降，熔池搅拌效能显著衰减。传统均匀底吹供气模式基于对称流场设计，在炉役后期元件工况劣化后，极易出现搅拌性能失稳、熔池混合不充分等问题[3]。更为突出的是，国内多数转炉底吹元件服役寿命不足 5000 炉，而转炉炉衬寿命普遍突破 8000 炉，二者的寿命失配已成为制约顶底复吹工艺长期高效运行的核心瓶颈。

针对上述行业痛点，国内外学者近年来提出了转炉底吹非均匀供气技术。该技术通过差异化调控不同底吹元件的供气流量，或采用非对称的底吹元件布置方式，重构熔池流场结构，进而改善熔池流动特性与混合效果。现有研究证实，非均匀供气模式可在熔池内形成大尺度非对称循环流动，显著强化水平方向的搅拌效能，最终实现混匀时间缩短、冶金反应动力学条件优化的目标[3]。本文系统梳理了转炉底吹非均匀供气技术的研究进展，从作用机理、研究方法、工业应用等维度进行全面综述，并对该技术的未来发展方向进行展望，以期对转炉底吹工艺的优化升级提供理论参考与技术支撑。

2. 非均匀底吹供气的作用原理

2.1. 熔池搅拌的流体力学基础

转炉熔池的搅拌效能，核心取决于气体射流与钢液之间的动量传递效率。当高压气体从底部供气元

件喷入高温熔池后, 会形成连续上升的气泡流; 气泡在浮力作用下上升的过程中, 会带动周围钢液产生定向运动, 进而形成全池循环流动。通常采用混匀时间、熔池平均流速、湍动能分布、死区占比等关键参数, 来定量表征熔池内的流动状态与搅拌效果[4] [5]。

其中, 混匀时间是指示踪剂在熔池内达到浓度均匀分布所需的时间, 是评价熔池搅拌效果最核心的量化指标, 其数值与底吹总流量、供气元件布置形式、熔池几何尺寸等参数密切相关[6]。流速分布则直观反映了熔池内钢液的运动活跃程度: 高流速区域是传质传热与冶金反应的核心区域, 而低流速的死区则会显著降低全池反应效率。

传统均匀供气模式下, 各底吹元件采用等流量供气, 熔池内形成对称的循环流场。该流场结构在炉役前期、元件工况稳定时可实现较好的搅拌效果, 但随着炉役推进, 底吹元件出现堵塞或不均匀磨损后, 原有的对称流场会被破坏, 最终导致搅拌效能大幅下降。

2.2. 非均匀供气改善熔池搅拌的核心机制

传统均匀供气模式的固有缺陷, 为非均匀底吹技术的研发提供了明确的优化方向。该技术通过人为构建非对称的供气条件, 在熔池内重构非均匀流场, 其强化搅拌的核心机制可归纳为以下三个方面。

1) 非均匀供气可导致熔池形成大尺度水平循环流动。基于 200 t 复吹转炉 1:12 水模型与数值模拟的耦合分析, 李中华等人[7]发现, 线性非均匀供气方案可在熔池内构建稳定的大尺度非对称循环流场, 显著强化全池对流传质效率, 最优工况下的混匀时间较均匀供气模式降低 19%~25%。值得注意的是, 顶底复吹条件下, 非均匀供气对混匀时间的优化幅度显著高于纯底吹工况, 证实了该技术与顶吹工艺的协同增效作用。

2) 非均匀供气可有效削减熔池内的死区占比。死区的存在会导致局部冶金反应不充分, 降低整体冶炼效率。现有数值模拟结果表明, 采用非均匀流量分配后, 熔池内低流速死区范围明显缩小, 活跃流动区占比显著提升; 其中 3:1 的非均匀流量分配工况下, 死区比例较均匀供气模式降低 26.23%, 活跃流动区占比提升 10.49% [3]。

3) 非均匀供气可显著增强熔池水平方向的搅拌强度。传统均匀供气形成的对称流场以垂直方向的循环流动为主, 水平方向的动量传递与物质交换能力较弱; 而非均匀供气诱导的非对称流场具有更强的水平速度分量, 可有效促进熔池不同径向区域的钢液混合。孙秀月等人[5]针对 260 t 转炉的冷态试验结果表明, 在总供气流量不变的条件下, 非均匀供气工况下, 距熔池底部越远的水平截面, 整体流速与速度梯度越大, 熔池混合均匀性越好。

3. 非均匀底吹供气的应用研究

3.1. 物理模拟与数值模拟研究

转炉高温熔池内的流动行为难以实现实时在线观测, 因此物理模拟与数值模拟成为研究底吹搅拌特性的核心技术手段。

物理模拟研究方面, 研究人员通常基于相似原理, 采用水模型模拟高温钢液, 搭建缩比试验平台, 量化分析不同供气模式对熔池搅拌效果的影响。李中华等人[7]搭建了 200 t 复吹转炉 1:12 水模型, 对比分析了均匀与非均匀供气模式下, 纯底吹与顶底复吹两种工况的熔池混匀特性, 证实了线性非均匀供气对搅拌效果的优化作用, 且复吹工况下的优化幅度更为显著; 苑星五[6]以 260 t 工业转炉为原型, 搭建了 1:7 缩比水模型, 针对 6 组非对称集中布置方案开展试验, 结果表明纯底吹工况下, “小集团” 15°偏角布置方案的混匀效果整体优于 30°偏角方案; 随着外侧“小集团”间距的增大, 混匀时间呈先降低后升高的变化趋势。混匀时间随底吹总流量的增大而缩短, 但对流量变化的敏感度逐渐降低。孙秀月等人[5]同样

基于 260 t 转炉 1:7 冷态模型, 以死区占比、弱搅拌区占比与钢液平均流速为评价指标, 分析了不同布置方式与流量分配方案的流场特性, 结果表明 A3 布置方式下, 采用 1:2:3:4 的线性流量分配方案时, 熔池动力特性最优, 混匀时间较均匀供气模式缩短 18.42%, 同时死区与弱搅拌区占比显著降低, 钢液平均流速明显提升。

数值模拟方面, 计算流体力学 (CFD) 方法已成为解析熔池多相流行为、优化底吹工艺参数的核心工具。罗康等人[8]以 120 t 五孔氧枪顶底复吹转炉为原型, 基于 Fluent 平台建立了多相流数值模型, 对比分析了不同氧枪枪位与底吹流量的耦合作用效果。结果表明, 顶底复吹作用下, 钢液高速区主要集中在熔池表面, 氧枪高度为 1.8 m 时, 熔池冲击面积最大, 单孔底吹流量为 60 m³/h 时, 底吹搅拌效果最优; 曹余良等人[4]针对 150 t 复吹转炉, 从混匀时间、流场速度分布、流速区域占比等多个维度, 量化分析了底吹元件布置方式与内外环流量分配的影响规律, 发现内环元件偏转 15°、30°时, 可诱导熔池形成整体旋流流动, 显著改善钢液流动特性, 大幅缩短混匀时间。

3.2. 工业实践与冶金效果

目前, 非均匀底吹供气技术已在国内多家钢厂的不同吨位转炉上实现工业应用, 在冶金效果提升、成本控制与寿命适配等方面取得了显著成效。

终点碳氧积是评价底吹搅拌效果的核心冶金指标, 其数值直接反映了钢水的氧化程度与洁净度。鞍钢 260 t 转炉通过优化氧枪喷头参数与底吹非均匀供气制度, 将终点碳氧积稳定控制在 0.0022 左右; 邯宝炼钢厂 260 t 转炉通过优化底吹供气强度与作用时间、建立底吹风口动态维护机制, IF 钢终点氧含量均值从 0.048%降至 0.042%, 终渣全铁含量从 18.42%降至 15.17% [9]; 内蒙古建龙通过底吹全炉役寿命提升与非均匀供气技术攻关, 将全炉役终渣全铁含量从 15.33%降至 13.57%, 终点碳氧积稳定控制在 0.0018~0.0024 区间[10]。

在脱磷脱碳效率提升方面, 非均匀供气技术展现出显著优势。姚柳洁等人[10]在 210 t 转炉上开展的工业试验结果表明, 采用非均匀底吹供气模式后, 脱碳与脱磷效率均较常规均匀供气工艺有所提升。其中对角线双元件差异化供气方案的优化效果最为显著, 脱碳、脱磷效率分别达到常规工艺的 1.07 倍与 1.06 倍, 终点碳氧积较常规工艺降低 10.54%; 唐武等人[11]针对底吹后搅工艺的研究表明, 相较于后搅 60 s 的工艺, 后搅 120 s 时脱磷率提升 9.6%, 脱磷率提升 5.4%, 脱碳率提升 11.07%, 钢水活度氧降低 6.92%, 进一步证实了底吹制度优化对冶金反应的强化作用。

终点成分控制与成本效益方面, 李安林等人[12]针对配备 2 块与 4 块透气砖的转炉, 建立了与冶炼制度相适配的多套非均匀底吹供气模式, 工业应用后复吹炉龄平均提升至 7000 炉以上, 实现了复吹系统与炉衬寿命的同步; 同时终渣全铁含量降低 3.25 个百分点, 终点钢水氧活度降低 103×10^{-6} , 碳氧积稳定在 0.0026, 合金收得率显著提升; 王鹏飞等人[13]针对 210 t 大型转炉, 通过优化氧枪高度、底吹元件布置与非均匀供气流量, 将最短冶炼时间压缩至 12 min, 工业应用后吨钢脱氧成本降低约 10.04 元, 同时钢水中氧化铝夹杂物含量显著下降, 钢水洁净度大幅提升。

底吹与炉龄同步的行业难题上, 非均匀供气技术结合元件优化也取得了关键突破。刘芳等人[14]针对迁钢 210 t 转炉, 优化了底吹阀门站管路布置与阀门控制逻辑, 配合非均匀供气制度, 取得了良好的应用效果与经济效益; 尚游等人[15]针对莱钢型钢炼钢厂转炉底吹工艺落后的问题, 通过调整底吹枪空间分布、优化非均匀供气参数、稳定炉底与强化“炉渣-金属蘑菇头”维护, 实现了全炉役碳氧积的稳定控制, 有效解决了炉役后期底吹效能衰减的问题。

3.3. 特殊工艺与新技术融合应用

随着钢铁工业绿色化、高效化发展, 非均匀底吹供气技术与各类新兴冶炼工艺深度融合, 展现出广

阔的应用前景。

针对当前高废钢比转炉冶炼的行业需求,汪宙等人[16]采用物理模拟与数值模拟相结合的方法,探究了底吹流量与供气模式对废钢熔化行为的影响。结果表明,增大底吹流量与采用非均匀供气模式,均可显著加速熔池内废钢熔化;底吹总流量从 160 Nm³/h 提升至 400 Nm³/h 时,废钢完全熔化时间缩短 44.44%;相较于传统均匀供气模式,2:1 流量分配的非均匀供气方案可使废钢完全熔化时间缩短 35.19%。

转炉底喷粉强化冶炼工艺方面,底吹 O₂-CO₂-石灰粉工艺凭借高效脱磷、洁净冶炼的优势成为研究热点。王春阳等人[17]系统研究了该工艺的脱磷机理,指出其工业化应用的核心限制在于设备复杂度高、底吹元件寿命短;目前国内学者已针对该技术开展了系统的工业试验,为其规模化应用奠定了基础。

钢水成分精准控制方面,针对高端钢种生产中氮含量超标的行业痛点,张利武等人[18]开发了钢水氮含量动态控制工艺,通过吹炼末期氮-氩切换的非均匀底吹供气模式,在终点碳含量达到 0.18%~0.20% 时提前切换底吹气体,将终点氮含量均值从 0.0035%~0.0045% 降至 0.0022%~0.0032%,满足了高端钢种的生产要求。

低碳冶炼技术方面,非均匀底吹技术也为转炉极限碳排放控制提供了技术支撑。雷豪等人[19]指出,转炉底吹 O₂-CO₂-CaO 技术、基于 CO₂ 循环利用的底吹炼钢技术、高冷料比下底喷生物质炭技术等新兴工艺,均可与非均匀供气技术深度融合,成为转炉炼钢实现近零碳排放的核心技术路径。

4. 非均匀供气系统的关键参数及其优化策略

4.1. 流量分配

流量分配比例是影响非均匀底吹效果的最直接、最核心的参数。现有研究表明,并非流量差异越大越好,而是存在一个最优的分配区间。孙秀月等[5]发现,在“小集团”布置方式下,线性 1:2:3:4 的流量分配能最大程度缩短混匀时间。姚柳洁等[10]在 210 t 转炉上的工业试验也证实,对角线布置下的非均匀供气可使脱碳效率提升 7%,碳氧积降低 10.54%。李中华等[7]的研究表明,流量分配比为 2:1 时效果最佳,而比例过大则会导致大流量侧搅拌过强,形成局部冲击,反而增加能量耗散。这说明流量分配存在一个协同与内耗的临界点。

4.2. 元件空间布置

底吹元件的空间布置决定了气泡流的初始分布,进而决定了熔池的宏观流场结构。“小集团”与非对称布置:苑星五[6]和孙秀月等[5]的研究一致表明,将底吹元件集中布置成“小集团”,并采用非对称方式,能有效消除对称布置时流股间的能量抵消,形成单一的大循环流,显著降低死区体积。内外环与偏心布置,曹余良等[4]针对内外环布置的研究发现,内环偏角 15°、并适当增大内环流量占比,能有效改善钢液流动。而姚柳洁等[10]则指出,对角线位置的底吹元件采用非均匀供气,搅拌效果最优。这表明,布置方式需要与流量分配策略紧密结合。

4.3. 元件结构设置

供气元件的结构是保障非均匀供气稳定、高效、长寿命运行的硬件基础。从单孔到多孔:方文等[20]的研究指出,MHP 多孔塞元件通过增加通气通道,提升了供气的均匀性和调节灵活性,但同时也存在流量上限,受元件强度和压力限制。环缝式元件的优势:为解决传统毛细管式元件易堵塞、寿命短的问题,乔庭鹤[21]和赵鸣等[9]开发并优化了“双环缝”底吹元件。这种结构通过环状缝隙供气,气流冷却效果好,能在端部快速形成稳定的“炉渣-金属蘑菇头”,从而将元件寿命从 3000 炉大幅提升至 8000 炉以上,为底吹与炉龄同步提供了关键硬件支持。该结构也成为实现非均匀供气长期稳定运行的理想选择。

5. 面临的挑战

尽管非均匀底吹供气技术展现出巨大的潜力，但其大规模工业应用仍面临以下挑战，需在技术推广中予以重视。

5.1. 炉衬寿命的潜在布局影响及对策

非均匀供气模式下，局部区域尤其是大流量底吹元件附近的搅拌强度显著增强，可能加剧该区域炉衬和底吹元件本体的侵蚀速率。纪建华等[22]的研究指出，供气强度不均会导致炉底侵蚀不均，形成局部凹坑，影响炉型稳定和元件寿命。若控制不当，可能抵消非均匀供气带来的整体效益。这需要与动态维护技术相结合。一方面，可通过优化流量分配比，避免局部流量过大；另一方面，需采用如纪建华等提出的“动态维护”策略，根据侵蚀情况实时调整供气参数和补护炉工艺，或采用乔庭鹤[21]设计的“双环缝”等长寿元件，确保全炉役期内各元件的通畅性和炉底侵蚀的均匀性。

5.2. 实现流量动态精准控制的仪表与控制系统要求

非均匀供气的核心在于“按需供气”，这对流量控制的精确性和响应速度提出了极高要求。张利武[18]和付海东等[23]的实践表明，要实现基于冶炼阶段或炉气分析的动态切换和调节，需要高精度的质量流量计、快速响应的气动调节阀以及可靠的自动控制系统。此外，多路气体（N₂/Ar）的切换与分配，对阀门站的密封性和响应同步性要求更高。系统滞后或控制不准，不仅达不到优化效果，反而可能破坏冶炼稳定性。必须升级底吹阀门站，采用更高级的自动化仪表(如科里奥利质量流量计)，并结合先进的PLC/DCS控制系统，为数据驱动的智能决策模型提供可靠的执行基础。

5.3. 技术改造的投资回报周期与经济性分析

进行非均匀供气技术改造，需要投入资金用于阀门站升级、新型供气元件购置以及控制系统开发。评估其经济性是钢厂决策的关键。王鹏飞等[13]在 210 t 转炉上的实践表明，通过优化底吹工艺，吨钢可节省脱氧成本约 10.04 元。汪宙等[16]发现，通过非均匀底吹加速废钢熔化，可显著提升生产效率。然而，初期投资如更换为双环缝元件、升级阀门站也需纳入成本核算。钢厂应进行详细的投资回报分析。短期看，因缩短冶炼周期、降低合金消耗带来的直接成本节约是主要的效益来源。长期看，延长底吹元件寿命、减少炉衬修补、提升钢水质量带来的溢价，是更为重要的隐性效益。乔庭鹤[21]的研究提供了一个很好的范例，其改进后的元件虽有一定初始成本，但通过大幅延长寿命和降低消耗，最终实现了吨钢成本降低约 2.2 元。推广时，需结合具体炉型、钢种和原有设备基础，进行个性化的经济性评估。

6. 结论与展望

转炉底吹非均匀供气技术，通过差异化调控底吹元件流量分配或采用非对称元件布置方式，在熔池内构建大尺度非对称循环流动，可显著强化熔池水平方向搅拌效能，削减死区占比，大幅缩短混匀时间。物理模拟与数值模拟研究结果证实，合理的非均匀供气方案可使熔池混匀时间较均匀供气模式降低 19%~29%，死区占比降低 26%以上，钢液平均流速提升约 18%。

非均匀底吹供气的搅拌效能受流量分配比、元件布置方式、供气元件结构、渣层参数等多因素耦合影响。其中，流量分配比存在最优适配区间，2:1 或 3:1 的分配比在多数工况下可取得最优搅拌效果；底吹元件采用非对称集中布置、内环适当偏转，可显著优化熔池流场结构；环缝式等新型供气元件，可有效提升底吹系统的服役寿命与运行稳定性。

工业实践结果表明，非均匀底吹供气技术可将转炉终点碳氧积稳定控制在 0.0022 以下，显著降低终

渣全铁含量,提升脱磷脱碳效率,减少脱氧剂消耗,降低吨钢冶炼成本;同时可有效解决底吹元件与炉衬寿命失配的行业难题,实现全炉役底吹效能的稳定发挥。

面向钢铁工业绿色化、智能化、高端化的发展方向,非均匀底吹供气技术未来可从以下四个方向开展深入研究与应用拓展:一是深化与高废钢比冶炼、底吹喷粉强化冶炼等新兴工艺的融合,充分发挥协同增效作用,拓展技术应用场景;二是开发全炉役智能化底吹控制技术,基于炉役阶段、冶炼钢种、炉内工况的实时变化,动态优化非均匀供气模式,实现底吹效能的全周期最优控制;三是深化非均匀供气条件下熔池多相流与冶金反应动力学的耦合研究,进一步揭示非均匀流场强化冶金反应的内在机理,为工艺优化提供更坚实的理论支撑;四是开发更长寿命、高稳定性、适配非均匀供气的新型底吹元件,实现全炉役高效稳定复吹。随着技术的持续迭代,非均匀底吹供气技术必将在转炉炼钢的高效绿色发展中发挥更为重要的作用。

基金项目

2026年大学生创新创业训练计划项目基金资助。

参考文献

- [1] 李长海,徐安军,刘旋.转炉炼钢几个关键技术的研究进展[J].炼钢,2024,40(1):1-8+46.
- [2] Yao, L., Zhu, R., Dong, K., Wei, G., Zhao, F. and Tang, Y. (2021) Influence of the Non-Uniform Bottom Blowing Gas Supply Mode on the Dynamic Conditions of Molten Pool during the Converter Steelmaking Process. *Ironmaking & Steelmaking*, **48**, 180-190. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1758996>
- [3] Chen, S., Wang, Z., Chen, N., Li, J. and Liu, Q. (2024) Effect of Gas Distribution Mode on Bath Stirring and Mixing in a Bottom-Blown Converter. *Steel Research International*, **95**, Article 2300702. <https://doi.org/10.1002/srin.202300702>
- [4] 曹余良,张红军,武豪,等.150t转炉底吹优化对熔池钢液搅拌行为的影响[J].钢铁研究学报,2025,37(4):462-473.
- [5] 孙秀月,刘坤,高新宇,等.转炉底吹“小集团”非均匀供气对熔池混匀的影响[J].云南冶金,2023,52(6):76-84.
- [6] 苑星五.260吨复吹转炉底枪布置优化及熔池内流动行为研究[D]:[硕士学位论文].鞍山:辽宁科技大学,2022.
- [7] 李中华,杨晓江,周泉林,等.复吹转炉底吹非均匀供气对熔池搅拌混匀的影响[J].钢铁研究学报,2020,32(9):788-795.
- [8] 罗康,辛同泽,魏代春,等.120t转炉顶底复吹过程多相流数值模拟研究[J].炼钢,2024,40(5):29-37.
- [9] 赵鸣,徐涛,王俊刚,等.包钢大型转炉环缝式复吹技术的研究与开发[J].钢铁,2025,60(2):59-66.
- [10] 姚柳洁,杨建平,高攀,等.210t转炉非均匀底吹供气模式的水模拟研究[J].工业加热,2023,52(7):46-49+62.
- [11] 唐武,迟云广,罗荣华,等.转炉底吹后搅对终点平衡及冶金效果的影响[J].中国冶金,2025,35(4):40-49.
- [12] 李安林,梁新腾,翁建军.复吹转炉底吹供气制度的研究与应用[J].钢铁,2010,45(4):26-30.
- [13] 王鹏飞.降本增效:大型顶底复吹转炉工艺优化[J].金属世界,2026(1):31-36.
- [14] 刘芳.转炉底吹工艺在迁钢的应用及优化[J].重型机械,2017(1):24-28.
- [15] 尚游.转炉底吹工艺优化的研究与实践[J].冶金信息导刊,2020,57(5):27-31.
- [16] 汪宙,陈爽,马宗涛,等.非均衡底吹对铁碳熔池废钢熔化行为影响的模拟研究[J].材料导报,2025,39(14):188-195.
- [17] 王春阳.转炉底吹O₂-CO₂-石灰粉工艺脱磷机理研究[D]:[博士学位论文].北京:北京科技大学,2025.
- [18] 张利武.转炉炼钢工程钢水氮含量控制工艺设计研究[J].山西冶金,2025,48(8):169-171.
- [19] 雷豪.转炉炼钢工艺极限碳排放技术要点分析[J].安家,2024(9):268-270.
- [20] 方文,吴令,游香米,等.转炉底吹MHP供气元件的选用研究[J].炼钢,2018,34(6):7-10+29.
- [21] 乔庭鹤.复吹转炉底吹供气元件的优化研究[D]:[硕士学位论文].鞍山:辽宁科技大学,2015.
- [22] 纪建华,冯磊,雷晶,等.炼钢转炉底吹寿命提升技术的研究及应用[J].山西冶金,2025,48(11):171-174+178.
- [23] 付海东,崔弘,杨小龙,等.150t转炉底吹系统动态控制工艺优化[J].包钢科技,2024,50(6):39-43.