

阳春新钢铁低碳钢全氧含量控制优化

Optimization on the Control of Oxygen Content in Low-carbon Steel at Yangchun New Steel

供稿|杨林¹, 王子贤², 张超杰², 张立强² / YANG Lin¹, WANG Zixian², ZHANG Chaojie², ZHANG Liqiang²

内容导读

针对阳春新钢铁炼钢厂 2024 年第 2 季度低碳钢全氧含量偏高的问题, 对影响钢中全氧含量的关键因素进行了系统分析。分析数据可知, 4—6 月部分钢材全氧质量分数最高达 247.3×10^{-6} , 且全氧质量分数超过 120×10^{-6} 的钢材比例在 4—6 月分别为 13.66%、12.37% 和 16.46%。为改善钢材的加工性能和提高钢水纯净度, 提出了优化转炉终点控制、精炼操作和过程控制的工艺措施。严格实施优化措施后, 钢材全氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 的比例提升至 95% 以上, 显著改善了钢材的质量。研究结果为低碳钢及其他品种钢的生产提供了技术支持和参考依据。

转炉炼钢过程中, 需要通过氧枪向熔池中供应大量氧气, 在吹炼结束时, 钢水中往往会含有过量的氧。如果在出钢过程中不进行有效的脱氧处理, 钢坯的浇注将会变得困难, 难以获得合格的连铸坯凝固组织。同时, 钢中含氧量较高容易导致连铸坯皮下气泡和疏松等缺陷的形成, 加剧硫对钢材的热脆性影响。氧在钢的凝固过程中, 还会以氧化物的形式大量析出, 从而显著降低钢材的塑性、冲击韧性等加工性能。因此, 控制钢材中的全氧含量至关重要。特别是在低碳钢生产中, 全氧含量的有效控制不仅决定了钢材的加工性能和表面质量, 还对钢材的抗腐蚀性、疲劳寿命等关键性能有着深远影响。

根据碳氧平衡理论, 在一定的温度和压力下,

转炉终点的碳氧积应为常数。然而实际生产过程中存在的动力学因素使得碳氧积的实际值往往在理论值附近波动。转炉吹炼终点钢水的氧含量对钢的纯净度具有重要影响。根据碳氧反应平衡原理, 随着钢中碳含量的降低, 氧含量势必升高。因此, 在出钢过程中, 确保一定碳含量的同时, 应尽量降低钢水中的氧含量。当碳含量一定时, 碳氧积的高低是衡量钢中氧含量的重要依据, 降低碳氧积有助于减少合金消耗, 减少脱氧过程中夹杂物的生成, 进而提高钢水的质量。

不少学者对钢中氧含量的控制进行了研究, 徐春杰等^[1]研究表明钢液中夹杂物颗粒的上浮时间与其粒径密切相关, 当夹杂物颗粒密度为 2700 kg/m^3 时, 静置 5 min 可使尺寸大于 $\phi 51 \mu\text{m}$ 的夹杂物颗粒

完成上浮；静置 10 min 时，尺寸大于 $\phi 36\ \mu\text{m}$ 的夹杂物颗粒可完成上浮。当夹杂物颗粒密度为 $2900\ \text{kg/m}^3$ 时，静置 5 min 内尺寸大于 $\phi 52\ \mu\text{m}$ 的颗粒可完成上浮；静置 10 min 内，尺寸大于 $\phi 37\ \mu\text{m}$ 的颗粒可完成上浮。对于密度为 $3100\ \text{kg/m}^3$ 的颗粒，静置 5 min 时大于 $\phi 53\ \mu\text{m}$ 的颗粒完成上浮，静置 10 min 时大于 $\phi 38\ \mu\text{m}$ 的颗粒完成上浮。赵亚飞等^[2]研究表明在保证钢水钙处理效果的同时，延长软吹时间可有效降低 SPHC-2 钢种钢水中的全氧含量。夏雪生^[3]研究发现影响钢水氧化性的主要因素包括：终点碳含量、钢水中余锰含量、钢水温度、操作工艺（如氧枪位置和流量）以及出钢过程中的下渣情况（下渣与否直接影响出钢时的氧含量）。李立刚等^[4]通过研究发现采取全程氩气密封和优化覆盖剂的加入可以有效降低首炉开浇过程中的氧含量，防止二次氧化。周丹等^[5]研究指出真空循环脱气精炼（RH）软吹时间对钢水中夹杂物的去除有显著影响。软吹前 25 min 内，钢中总氧质量分数从 12×10^{-6} 降至 8×10^{-6} ，在软吹 25~30 min 时，总氧含量略有回升。随着软吹时间的增加，钢中的大尺寸夹杂物（大于 $80\ \mu\text{m}$ ）基本去除，然而延长软吹时间导致的钢水温度下降可能对后续浇注产生不利影响。

上述研究为降低钢水中的全氧含量提供了宝贵的理论和实践依据，但在实际生产中，低碳钢全氧含量的有效控制依然存在诸多问题和挑战。现有研

究主要集中在优化软吹时间和脱氧剂等方面，廖杨标等^[6]通过控制熔渣 FeO 含量、钢包精炼（LF）和真空循环脱气精炼（RH）炉离站氧质量分数，有效缩短静置时间以及优化连铸过程。刘建伟等^[7]通过研究 RH 真空过程中不同时间对低碳钢洁净度的影响，优化了软吹时间，发现延长真空时间能够有效减少夹杂物数量和尺寸。但对于如何在实际生产条件下稳定控制全氧含量的研究仍有较大不足，尤其是在复杂的工艺环境中，多个因素交互作用会导致全氧含量波动较大。本文针对阳春新钢铁炼钢厂低碳钢生产中的遇到的实际问题，系统分析了影响全氧含量的关键因素，通过对转炉终点控制、精炼工艺和过程控制等关键工艺的优化，提出了一套可行的全氧含量控制方案。该方案能够显著改善钢材的纯净度和加工性能，减少生产过程中的质量波动，为其他类型钢材的控制全氧含量提供借鉴。

低碳钢全氧含量影响因素

本研究基于阳春新钢铁炼钢厂 2024 年第 2 季度的低碳钢生产数据，分析了影响钢材全氧含量的主要因素，如表 1 所示。转炉终点碳含量、进站定氧含量、出站定氧含量、精炼在站时间、精炼软吹时间、拉速波动等过程控制参数均对钢材全氧含量存在一定影响。高终点碳含量、低进出站定氧含量、长精炼和软吹时间以及稳定的拉速均有助于降低钢材的全氧含量。

表 1 关键参数对低碳钢全氧质量分数 $\leq 120\times 10^{-6}$ 炉次占比影响

低碳钢全氧质量分数	终点碳质量分数 <0.04%	进站定氧质量分数 > 120×10^{-6}	出站定氧质量分数 > 50×10^{-6}	精炼在站时间<10 min	精炼软吹时间<5 min	拉速波动 $\geq 0.5\ \text{m/min}$
$\leq 120\times 10^{-6}$	42.51%	23.75%	1.60%	2.00%	11.78%	17.30%
> 120×10^{-6}	60.87%	35.87%	5.43%	4.35%	18.48%	22.83%

转炉终点钢水活度氧

图 1 所示为钢材全氧质量分数与转炉终点活度氧质量分数的趋势图。可以看出，转炉终点钢水的活度氧含量与钢材全氧含量呈正相关，即转炉终点活度氧含量越高，钢材全氧含量也越高。表明在炼钢过程中，转炉终点氧含量的有效控制对于降低钢材全氧含量至关重要。

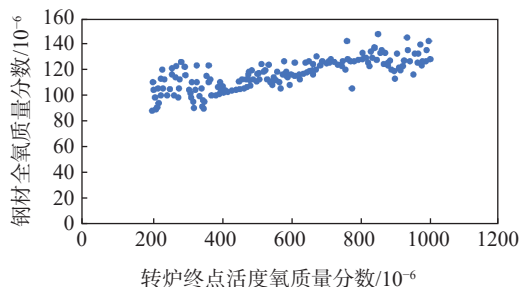


图 1 钢材全氧质量分数与转炉终点活度氧质量分数变化

(1) 转炉钢水终点碳氧分析

图2所示为2021年第2季度低碳钢转炉钢水终点碳氧积的分布情况。大部分碳氧积值围绕在理论曲线附近,仅有少数偏离较大,产生偏离主要是由于在定氧过程中定氧枪出现偏差。碳氧积的变化直接影响钢水中的氧含量,进一步影响钢材的最终质量。

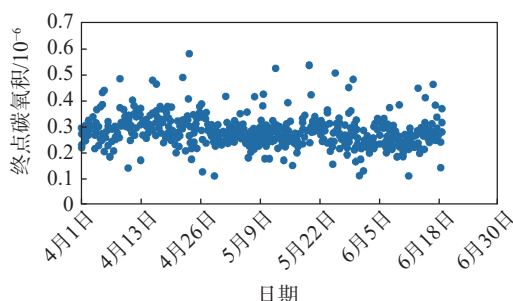
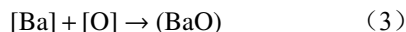
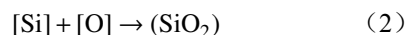
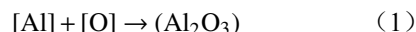


图2 2021年第2季度低碳钢转炉钢水终点碳氧积分布图

(2) 转炉钢水终点活度氧与脱氧产物分析

低碳钢出钢钢水通常采用高铝含量铝锰铁和硅

铝钡合金进行脱氧,主要涉及的脱氧反应如式(1)~(4)所示:



2021年第2季度定氧炉数681炉,低碳钢转炉终点活度氧含量统计如表2所示:

铝合金是低碳钢主要的脱氧剂。在脱氧反应式(1)~(4)中,铝元素表现出极强的脱氧能力。假设钢水中过量的氧全部被铝脱氧剂消耗,通过计算可以得出消耗过量氧气产生的脱氧产物 Al_2O_3 的质量,钢水量按120 t/炉计算,结果如表3所示。随着转炉终点活度氧质量分数升高,脱氧产物 Al_2O_3 的生成量增多,增加了去除脱氧产物的难度。如果这些脱氧产物不能有效去除,将导致钢材中的全氧含量大幅升高,进而影响钢材的加工性能和质量。

表2 第2季度低碳钢转炉终点活度氧统计

10^{-6}

最大值, $w_{\max}$	最小值, $w_{\min}$	平均值, w_{ave}	$w_{\geq 0.04}$	$w_{< 0.04}$
1000.00	400.00	716.71	636.10	795.79

注: $w_{\geq 0.04}$ 和 $w_{< 0.04}$ 分别表示 $w(\text{C}) \geq 0.04\%$ 和 $w(\text{C}) < 0.04\%$ 条件下碳钢转炉终点活度氧的平均值。

表3 转炉钢水终点活度氧含量与生成脱氧产物 Al_2O_3 质量关系

比较	活度氧差值/ 10^{-6}	Al_2O_3 增加量/ 10^{-6}	Al_2O_3 增加质量/(kg/炉)
$w_{\max} - w_{\min}$	600.00	1275.00	153.00
$w_{\max} - w_{\text{ave}}$	283.29	601.99	72.24
$w_{\max} - w_{\geq 0.04}$	363.90	773.29	92.79
$w_{< 0.04} - w_{\geq 0.04}$	159.69	339.34	40.72

精炼出站钢水活度氧

图3所示为钢材全氧含量随精炼出站钢水活度氧含量变化的趋势图。钢材全氧含量与出站钢水的活度氧含量也呈正相关。进一步说明了在精炼过程中控制钢水氧含量的重要性。

精炼钢水软吹时间

图4所示为钢材全氧含量随精炼钢水软吹时间变化趋势图,可以看出两者存在负相关关系,即精炼钢水的软吹时间越长,钢材的全氧含量越低。在精炼过程中适当延长软吹时间有助于降低钢材中的

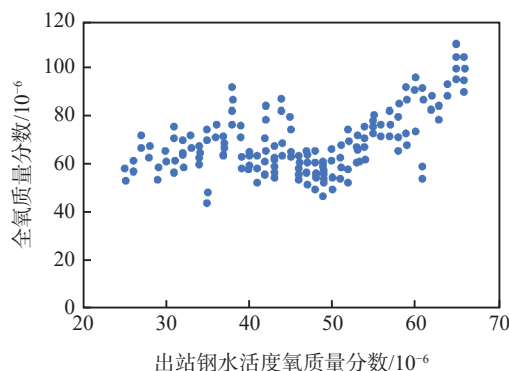


图3 钢材全氧质量分数与精炼出站钢水活度氧质量分数趋势图

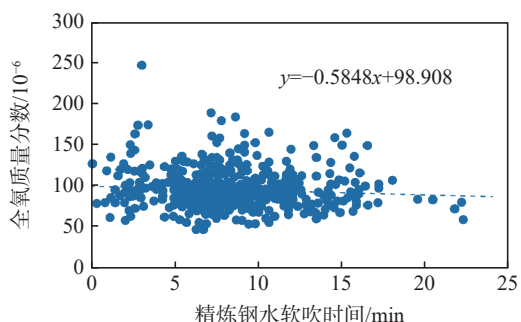


图4 钢材全氧质量分数随精炼钢水软吹时间变化趋势图

全氧含量，从而改善钢材的整体质量。

全氧含量控制优化研究

在低碳钢生产中，控制全氧含量受多种因素影响具有一定的挑战性。为了有效降低钢材的全氧含量，从转炉终点控制、出钢挡渣、精炼操作以及过程控制4个方面进行了详细的分析和研究，结合理论基础提出了一系列优化措施：

转炉终点控制

> 难点

对于低碳钢生产，转炉终点的碳含量控制范围较窄。如果终点碳含量过高，成品容易超出钢种标准；而终点碳含量过低则会导致钢水过氧化，活度氧含量升高，脱氧产物增多，这些产物难以有效去除进而影响低碳钢质量^[8]。根据氧化还原反应动力学，碳和氧的反应速率 r 见式(5)：

$$r = k \cdot [C]^m \cdot [O]^n \quad (5)$$

式中， k 是温度相关的速率常数， $[C]$ 和 $[O]$ 分别为钢水中碳和氧的浓度， m 和 n 为反应级数，表示碳和氧浓度对反应速率的影响程度。

为了优化终点碳含量和活度氧含量的控制，通过控制反应温度来调整速率常数 k ，进而控制氧化还原反应的速率。不同温度下的反应速率可通过Arrhenius方程计算得出：

$$k = A e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

式中， A 是预指数因子（频率因子），表示反应分子碰撞频率的常数； E_a 是活化能，表示反应所需克服的能量障碍； R 是气体常数； T 是反应的绝对温度。通过温度可以影响反应速率常数，进一步控制碳和氧的反应速率。在实际生产中，通过提高温度

可以加快反应速率，使碳和氧的反应更加迅速有效，从而实现更精确的终点控制。

此外，Gibbs自由能变化与反应平衡常数之间的关系如式(7)所示：

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K \quad (7)$$

在特定温度 T 下，Gibbs自由能变化与反应的平衡状态相关联。平衡常数 K 表示在平衡状态下，反应物和生成物的浓度比。当 $\Delta G < 0$ 时，反应向生成物方向进行；当 $\Delta G > 0$ 时，反应向反应物方向进行。

在钢水氧化还原反应中，通过调控温度和反应物浓度，可以改变反应的平衡常数，从而实现对终点活度氧含量的精确控制。特别是在低碳钢的生产过程中，通过对温度和反应物浓度的调控可以优化终点氧化还原反应的条件，确保活度氧含量控制在最佳范围内。

> 优化措施

加强转炉终点控制。对低碳钢终点碳含量进行严格控制，碳质量分数设定为0.04%~0.06%，控制终点进站活度氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 。若终点渣氧化性较高，应倒渣后再出钢，以减少氧化性渣对钢水的影响。

出钢挡渣控制

出钢过程中选择合适的挡渣技术至关重要。目前广泛应用的挡渣技术包括滑板挡渣法、气动挡渣法和挡渣棒挡渣法^[9]。滑板挡渣法通过上滑板与下滑板之间的流钢孔错位来控渣出钢，挡渣成功率高达99%，并且对前期渣和后期渣均能进行有效阻挡。气动挡渣法利用高压氮气射流将炉渣挡回炉内，但该方法对设备的要求较高，容易对出钢口造成损害。挡渣棒挡渣法操作简单、成本较低，但主要依赖人工操作，挡渣效果受人为因素影响较大。并且由于出钢口较大，出钢过程中容易发生下渣或夹渣现象，引起钢水的返氧和回磷问题，进一步导致钢材质量下降，甚至可能引发钢种改判，造成经济损失。

精炼操作控制

下渣后的钢水精炼操作难度较大。一方面，需要增大吹氩量以促进大颗粒夹杂物上浮，有效减少

钢水中的夹杂物，提升钢材的纯净度^[10]。然而过高的吹氩量可能导致夹杂物的去除效率下降，甚至引发钢水的二次氧化反应增加钢水氧含量，对钢水质量产生负面影响。优化吹氩量既要确保形成足够的气泡携带夹杂物上浮，又要避免过度吹氩带来的不良后果。

另一方面，需要严格控制钢水的回磷现象，避免因钢水过度氧化导致品种改判进而产生废钢。精炼过程中的回磷现象主要发生在炉渣氧化性较低的情况下。为了防止回磷现象的发生，应优化炉渣成分，通过调节 CaO 和 FeO 的比例来保持适度的氧化性。同时，控制精炼温度和时间也对回磷现象有所影响，过高的温度会促进钢水中的磷回溶，而过长的精炼时间则可能导致钢水的过度氧化，影响最终产品的质量。

过程控制

钢材全氧含量的变化是由多种过程控制因素共同作用的结果，包括转炉操作、精炼工艺、连铸过程、炉渣管理、吹氩工艺、合金添加顺序等。这些因素相互交替、影响复杂，因此，需要对各工序进行详细分析，以全面了解和控制钢材全氧含量。首先，转炉操作中的氧化性气氛直接决定了钢水的初始氧含量，过高的氧化性气氛会增加脱氧剂的消耗并生成更多的氧化物夹杂。通过优化供氧控制和吹氧时间，可以有效降低初始氧含量。其次，精炼工艺的优化，如适当的吹氩操作、脱氧剂的合理使用以及炉渣成分的合理调节，均会降低钢材全氧含量。此外，连铸过程中的温度控制和拉速的稳定性同样影响钢材的全氧含量，温度过高或拉速波动过大会引起钢水重新吸氧或混入夹杂物，因此应加强连铸温度及拉速控制，减少中间包的过热度波动和连铸拉速的波动，确保浇铸过程的稳定性和钢材质

量。加强精炼过程控制：精炼在站时间控制在 14~18 min，软吹时间至少保持 5 min。在出站前 6~10 min 进行 Si-Ca 线喂入操作，以促进夹杂物的去除和钢水纯净度的提升。优质的炉渣管理能够覆盖钢水表面，阻止氧侵入，吸附氧化物夹杂物，炉渣的黏度和碱度需要精确调整以发挥最佳效果。最后，合金元素的添加顺序和添加时机也需要精心规划，以确保合金元素与残余氧完全反应，避免氧化损失，从而有效控制钢水中的氧含量。

全氧含量控制优化实验验证

在低碳钢的生产过程中，严格执行上述优化措施后，全氧含量的控制效果显著，如表 4 所示。2024 年 7—11 月钢材的全氧含量控制取得了良好成绩，特别是 7 月、8 月、9 月和 11 月，钢材全氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 的比例均达到了 95% 以上（见表 5），表明在这些月份优化措施执行的持续性和有效性较高。然而，10 月份钢材全氧含量控制效果相对较差，仅有 89.13% 的钢材全氧含量达标，这种情况可能是工艺参数的波动或控制措施的执行不稳定所致，例如软吹时间不足或拉速波动过大。总体来看，11 月份的控制效果最为显著，全氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 的钢材占比达到了 97.22%，说明优化措施在该月份得到了更加严格的执行，工艺条件控制稳定。例如，终点碳质量分数 $< 0.04\%$ 的炉次比例为 30.41%，进站氧质量分数超过 120×10^{-6} 的占比为 20.48%。此外，软吹时间保持在 5 min 以上的炉次比例达到了 95% 以上，而拉速波动较大的炉次占比仅为 15.20%，这些工艺条件的优化有效促进了全氧含量的稳定控制。通过严格控制终点碳含量、延长软吹时间和减少拉速波动，能够显著降低全氧含量，提升钢材的纯净度和质量。

表 4 11 月关键参数对低碳钢全氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 炉次占比影响

						%
终点碳质量分数 $< 0.04\%$	进站氧质量分数 $> 120 \times 10^{-6}$	出站氧质量分数 $> 50 \times 10^{-6}$	在站时间 $< 10 \text{ min}$	软吹时间 $< 5 \text{ min}$	拉速波动 $\geq 0.5 \text{ m/min}$	
30.41	20.48	2.06	0	4.64	15.20	

表 5 2024 年 7—11 月生产低碳钢全氧质量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 占比

7月	8月	9月	10月	11月	%
95.17	95.20	96.25	89.13	97.22	

通过本次实验验证，以下几个方面的效益效果证明优化措施具有可行性：

（1）钢材全氧含量显著降低。实施优化措施后，2024 年 7 月、8 月、9 月、11 月份钢材全氧质

量分数 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 的占比达到了95%以上,显著降低了钢材的全氧含量。从图5中可以看出,11月份生产的低碳钢全氧质量分数大多集中在 $80 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$,与采取优化措施前相比,低碳钢全氧质量分数波动明显减少,全氧质量分数在 120×10^{-6} 以上的钢材比例大幅降低。表明通过控制措施,大部分钢材全氧含量能够维持在较低的水平。

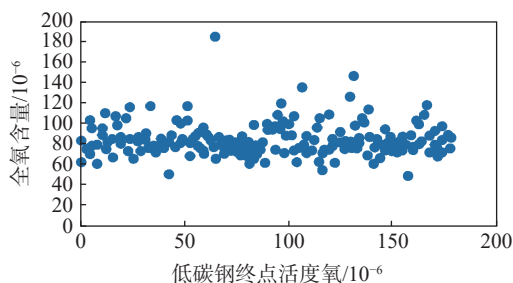


图5 11月份低碳钢全氧含量分布图

(2) 钢材加工性能提升。由于全氧含量降低,钢材具有更好的加工性能和韧性,钢材的加工性能得到了显著提高。

(3) 为品种钢生产奠定了技术基础。本次全氧含量控制的优化实验证明了优化措施的有效性和稳定性,不仅改善了当前的生产工艺,为未来的品种钢生产积累了宝贵的技术经验,奠定了坚实的基础。

结束语

(1) 转炉终点控制是降低钢材全氧含量的关键因素,合理控制终点碳含量和活度氧有助于提高钢水纯净度,终点碳质量分数应控制在0.04%~0.06%,进站活度氧质量分数应 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 。通过优化转炉终点的工艺控制,显著减少了钢水中的氧含量,提升了钢材的整体质量。

(2) 精炼工艺优化显著降低了全氧含量,延长精炼软吹时间、控制精炼在站时间以及出站前进行Si-Ca线喂入操作,有效降低了钢材中的全氧含量。精炼在站时间应控制在14~18 min,精炼软吹时间应

至少保持5 min,在出站前6~10 min进行Si-Ca线喂入操作,以促进夹杂物的去除和钢水纯净度的提升。

(3) 全氧含量显著降低,钢材加工性能提升,严格实施优化措施后,钢材全氧含量 $\leq 120 \times 10^{-6}$ 的达标率超过95%,11月份钢材达标率为97.22%。

(4) 本研究的创新点在于针对低碳钢生产中全氧含量高的问题,提出并验证了一系列可行的优化措施。这些措施不仅成功降低了全氧含量,还显著提升了钢材的加工性能和品质。研究成果为低碳钢及其他品种钢的生产提供了科学指导。

参考文献

- [1] 徐春杰,赵振,徐信锋,等.钢液夹杂物粒径与上浮时间关系研究.铸造技术,2018,39(4):747
- [2] 赵亚飞,李洪波,高振伟,等.SPHC-2钢种总氧和夹杂物控制技术与实践.甘肃冶金,2023,45(4):81
- [3] 夏雪生.炼钢脱氧工艺及夹杂物控制措施分析.冶金与材料,2019,39(5):168
- [4] 李立刚,霍立国,温娜娜,等.轴承钢首炉全氧含量的控制//2019全国高效连铸应用技术及铸坯质量控制研讨会论文集.扬州,2019:391
- [5] 周丹,许用会,史进强,等.RH软吹时间对钢水中夹杂物行为的影响.河南冶金,2022,30(1):10
- [6] 廖扬标,潘艳华,王彦林,等.方坯冶炼超低碳钢中包氧含量控制生产实践.宝钢技术,2024(4):57
- [7] 刘建伟,薛燕,吴计雨,等.低碳钢RH真空时间对钢水洁净度的影响.炼钢,2024,40(3):27
- [8] 蔡伟,吴巍,杨利彬,等.转炉炼钢自动控制技术发展及展望.中国冶金,2024,34(4):10
- [9] 袁晓峰,王斌.典型转炉出钢挡渣技术发展现状.河北冶金,2023(12):28
- [10] 陈福荣.精炼工操作中各相界面的动力学行为研究.冶金与材料,2024,44(3):16

作者简介:杨林(1988—),男,湖南省湘潭市人,钢铁冶炼职业。2009年毕业于湖南冶金职业技术学院大学钢铁冶金专业,主要研究方向:转炉冶炼。120吨转炉热模型、辅料模型研究,低铁耗转炉冶炼及护炉研究。E-mail:413851309@qq.com。