



100 t电弧炉熔池搅拌工艺优化模拟及应用

曾召鹏, 杜习乾, 王 耀, 马建超
(江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625)

摘要:针对某厂100 t电弧炉出钢自开率低的问题,使用Fluent软件研究了炉壁氧枪不同偏转角度下的熔池流动特性。研究发现,当氧枪偏转角度由 0° 增加至 30° 后,基本消除了EBT死区,但钢液对炉壁冲刷强度提高了148.4%。为了平衡炉壁冲刷和熔池搅拌,确定1[#]、3[#]、4[#]氧枪偏转 10° ,2[#]氧枪偏转 30° 的优化方案。实践应用表明,优化后电弧炉出钢自开率由75.2%增加到95.6%,平均出钢温度降低 6°C ;在ML08Al钢上的应用数据表明,终点钢水氧质量分数降低20.9%,终点炉渣T. Fe质量分数降低21.6%。

关键词:电弧炉; 氧枪; 数值模拟; 偏转角度; 熔池搅拌

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00051 **中图分类号:**TF741.5

Optimization and Simulation of Stirring Process for 100 t Electric Arc Furnace Bath and Its Application

Zeng Zhaopeng, Du Xiqian, Wang Yao, Ma Jianchao
(Institute of Research of Iron and Steel, Shagang, Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625, China)

Abstract: In view of the low free-opening rate of 100 t Electric Arc Furnace (EAF) in a factory, using Fluent software to study the flow characteristics of liquid bath with different deflection angles of oxygen lance. It is found that when the deflection angle of oxygen lance increases from 0° to 30° , the EBT dead zone is virtually eliminated, but the impact strength of molten steel on furnace wall increases by 148.4%. In order to balance the impact strength of furnace wall and liquid bath stirring, the optimization scheme of 1[#], 3[#] and 4[#] oxygen lance deflection of 10° and 2[#] oxygen lance deflection of 30° is determined. The practice shows that the free-opening rate increases from 75.2% to 95.6%, the average tapping temperature is reduced by 6°C . The application data on ML08Al steel show that the end-point oxygen in molten steel is reduced by 20.9%, and the end-point T. Fe content mass fraction in slag is reduced by 21.6%.

Key Words: Electric Arc Furnace; Oxygen Lance; Numerical Simulation; Deflection Angle; Liquid Bath Stirring

电弧炉以废钢、铁水为主要原料进行生产,因其流程短、产品多样的特点成为现代钢铁工业的主要生产方式之一^[1-2]。电弧炉炉壁氧枪具有很强的穿透力,除供氧外,还能起到搅拌熔池的作用^[3],使用炉壁氧枪喷吹供氧能够加速熔池反应^[4],优化炉壁氧枪布置方式可以改善流场形态,提高冶炼效率^[5-6],相关研究表明^[7-8],氧气射流在法线方向上的偏转可以有效降低熔池中的低速区体积,有利于熔池温度及成分的均匀。总的来讲,合理的流场可以显著提高电弧炉冶炼效率,降低生产成本,故对其进行优化研究具有重要意义。研究人员通常使用数值模拟的方法对电弧炉流场进行研究,然而,目前针对炉壁氧枪侧吹超音速射流下的电弧炉流场相关研究较少,因此,有必要对其进行深入研究。

某厂100 t电弧炉以50 t铁水+70 t废钢的配料方式冶炼ML08Al、SWRCH35K等低碳冷镦钢,出钢时长期存在出钢孔自开率低于80%的情况,出钢后发现部分炉次EBT区域存在未熔废钢,表明熔池内温度均匀性差。为提高EBT区域温度,确保正常出钢,生产中采用延长通电时间和提高供氧强度的方式进行冶炼,导致电弧炉出钢温度普遍高于 1615°C ,同时在冶炼低碳冷镦钢(如ML08Al钢)时,有58.6%的炉次终点钢水 $w[\text{O}]$ 高于0.08%,出钢过氧化现象严重^[9-10]。

本文主要使用Fluent软件对某厂100 t电弧炉在不同氧枪偏转角度下的熔池流动特性进行研究,优化了氧枪偏转角度,为大型电弧炉合理选择吹氧工艺提供参考。

1 计算原理及方法

1.1 基本假设

主要研究的是氧枪偏转角度对熔池流场的影响,为兼顾模拟准确度和效率,基本假设如下:(1)钢液被视为连续均匀且不可压缩的粘性流体;(2)忽略炉渣及炉内化学反应;(3)氧气被视为可压缩理想流体且不考虑氧枪的二次燃烧。

1.2 数学模型

VOF (Volume of Fluid) 模型可以通过求解一组动量方程,并跟踪整个计算域中每种流体的体积分数来模拟两种或多种不混溶的流体^[11-12],本文采用 VOF 模型模拟射流交互。

(1)VOF 体积控制方程为

$$\frac{1}{\rho_g} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g v_g) \right] = S_{\alpha_g} + \sum_{i=1}^2 (m_{lg} - m_{gl}) \quad (1)$$

(2)连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

(3)动量守恒方程(N-S 方程)为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F \quad (3)$$

(4)能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot [v(\rho E + p)] = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h \quad (4)$$

(5)湍流方程(标准 $k - \varepsilon$ 双方程模型)为

$$\frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\rho \partial (u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中

$$G = \mu_t \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$u_{eff} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中: m_{lg} 为液相流向气相的质量,kg; m_{gl} 为气相流向液相的质量,kg; u_i, u_j 为笛卡尔坐标系上的速度矢量, m/s; v 为流体速度, m/s; x_i, x_j 为方向矢量; ρ 为平均流体密度, kg/m³; p 为压力, Pa; F 为外部体积力, N; g_i 为*i*方向上的重力加速度, m/s²; λ 为导热系数, W/(m·K); T 为温度, K; H 为总焓值, kJ/mol; k 为脉动

动能, J; μ 为黏度系数, Pa·s; μ_{eff} 为有效粘度系数, Pa·s; μ_t 为湍流黏度系数, Pa·s; G 为湍流动能, J; ε 为湍流耗散率。 $k - \varepsilon$ 双方程模型中的 5 个经验常数采用 Launder B E 和 Spalding D B 的推荐值^[13]: $C_1=1.44, C_2=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, C_\mu=0.09$ 。

2 模拟方案

2.1 电弧炉模型及网格

某厂 100 t 电弧炉主要工艺技术参数见表 1, 由此建立了 1:1 的流体域模型, 模型全部采用 6 面体结构化网格, 并对氧枪和超音速射流核心区作网格加密处理, 网格总数量约为 150 万, 100 t 电弧炉模型如图 1 所示。

表 1 100 t 电弧炉主要工艺技术参数

Table 1 Main process technological parameters of 100 t EAF

项目	参数
公称容量/t	100
平均出钢量/t	100
最大容量/t	120
留钢量/t	20
熔池直径/mm	6 100
100 t 钢液熔池深度/mm	900
炉壁氧枪数量/只	4
氧枪出口设计流速/Ma	2.0
氧枪拉瓦尔管入口直径/mm	30
氧枪拉瓦尔管收缩段长度/mm	13
氧枪拉瓦尔管收缩段直径/mm	22
氧枪拉瓦尔管扩张段长度/mm	117
氧枪拉瓦尔管出口直径/mm	28

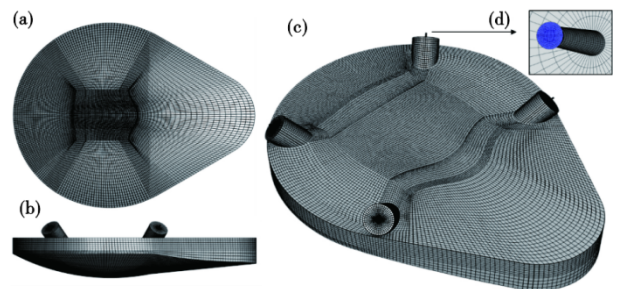


图 1 100 t 电弧炉模型:(a)底视图,(b)侧视图,(c)主视图,(d)氧枪视图

Fig. 1 100 t EAF model : (a) bottom view , (b) side view , (c) front view , (d) Oxygen lance view

2.2 边界条件

模拟计算过程采用的边界条件为:(1)氧枪入口设为压力入口,数值大小按照实际供氧强度转

化;(2)出口设置为压力出口;(3)所有壁面均设为无滑移边界条件。模拟过程求解瞬态流场方程,计算过程中的热物参数见表 2。

表 2 计算参数

Table 2 Calculation parameters

项目	参数
钢液密度/(kg·m ⁻³)	7 000
钢液黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	6.50×10 ⁻³
氧气密度/(kg·m ⁻³)	理想气体
氧气黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	1.919×10 ⁻⁵
氧气导热率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.024 6
氧气热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	909
氧气温度/K	298

2.3 模拟方案

某厂 100 t 电弧炉使用 4 支炉壁氧枪沿法线方向对中吹炼,氧枪在水平面沿法线方向的偏转角度为 0°,氧气射流推动钢液流股对冲如图 2 所示。

由于某厂 100 t 电弧炉结构限制,炉壁氧枪最高偏转角为 30°,本模拟实验主要探究氧枪沿法线

偏转对熔池的影响,为规避钢液对冲造成的动能损失,设计 4 组试验方案,见表 3,其中,方案 1 为原型,100 t 电弧炉炉壁氧枪布置方式如图 3 所示。实验设备为惠普 Z840 工作站,各方案计算时间均 > 360 h。

表 3 试验方案

Table 3 Experimental Scheme

试验方案	氧枪偏转角度/(°)			
	1#	2#	3#	4#
1	0	0	0	0
2	10	10	10	10
3	20	20	20	20
4	30	30	30	30

3 计算结果分析与讨论

3.1 超音速氧气射流验证

为验证氧气射流计算的准确性,将计算结果与氧枪设计参数进行对比,马赫数(M_a)计算公式为。

$$M_a = \frac{u_m}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}} \quad (10)$$

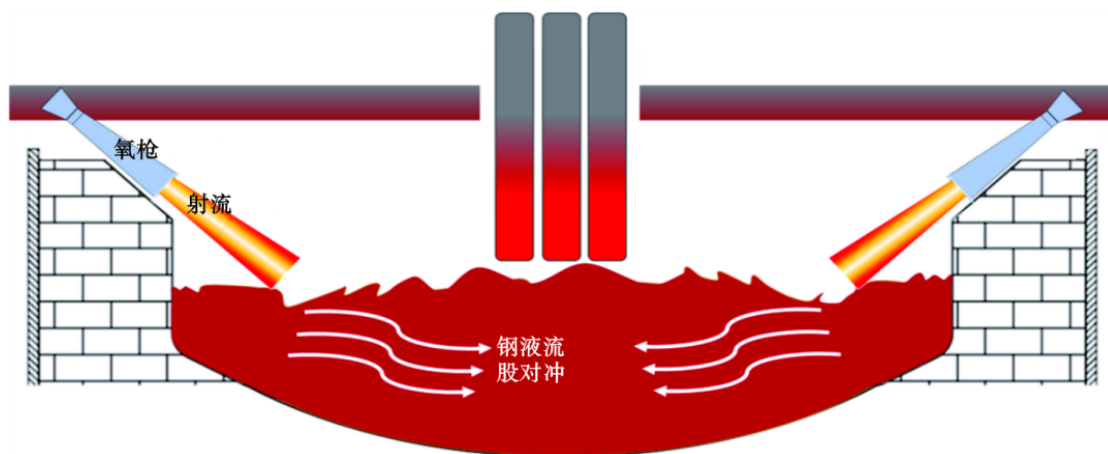


图 2 钢液流股对冲示意图

Fig. 2 Schematic diagram of molten steel flow collide

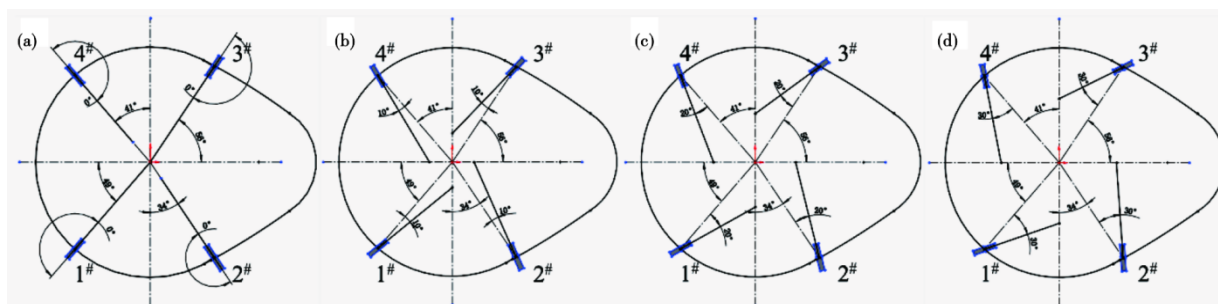


图 3 氧枪布置方式:(a)方案 1,(b)方案 2,(c)方案 3,(d)方案 4

Fig. 3 Arrangement of Oxygen lance : (a) scheme 1 , (b) scheme 2 , (c) scheme 3 , (d) scheme 4

式中： u_m 为射流中心速度，m/s； γ 为气体比热比； R 为气体常数； T 为射流中心温度，K。

氧气为双原子分子，比热比 γ 取 1.4，计算达到稳定时沿氧枪轴向马赫数分布如图 4 所示，结果表明，随着轴向距离增加，射流速度逐渐衰减，同时氧气射流在氧枪喉口处达到 1.0 Ma，在出口位置达到 2.0 Ma，射流计算结果符合氧枪设计。

3.2 不同氧枪偏转角度对熔池速度场的影响

不同氧枪偏转角度下电弧炉熔池速度分布如图 5 所示，不同氧枪偏转角度下电弧炉熔池横截面平均速度如图 6 所示。由图 5 和图 6 可知，熔池高速流动区主要集中在氧气射流出口核心处，方案 1 氧枪偏转角度为 0° ，钢液受氧气射流影响，由四周向中间聚拢，钢液流股中心对流区面积较大，熔池动

能损失严重，钢液表面流速高，内部流速低；方案 2 中心对流区面积开始减少，并在四周出现部分循环流；方案 3 中心对流区面积进一步减小，熔池循环加强，射流能量进一步转化为熔池循环动能；方案 4 中心对流区基本消失，钢液完全按照射流方向进行循环流动，熔池动能损失最少，内部流速高。综上所述，随着氧枪偏转，射流动能损失减小，电弧炉熔池循环效果加强。

3.3 不同氧枪偏转角度对熔池死区的影响

试验将熔池流速小于 0.02 m/s 的区域视为流动死区，不同氧枪偏转角度下熔池死区对比如图 7 所示，可以发现，在气液交互初期，超音速氧气射流与钢液发生强烈能量交换，在开始吹氧 3 s 内熔池死区体积迅速下降，开始吹氧 6 s 后熔池死区体积基本趋

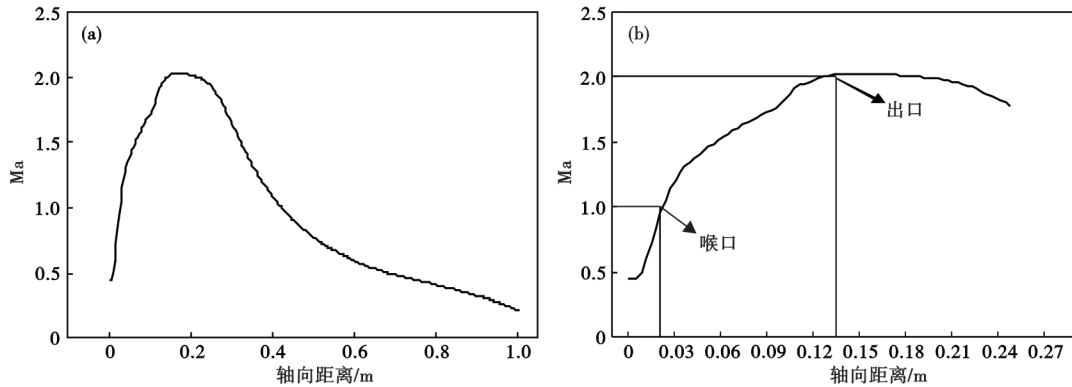


图 4 马赫数分布：(a)氧气射流马赫数分布，(b)拉瓦尔管马赫数分布

Fig. 4 Mach number distribution : (a) mach number distribution of oxygen jet , (b) laval tube Mach number distribution

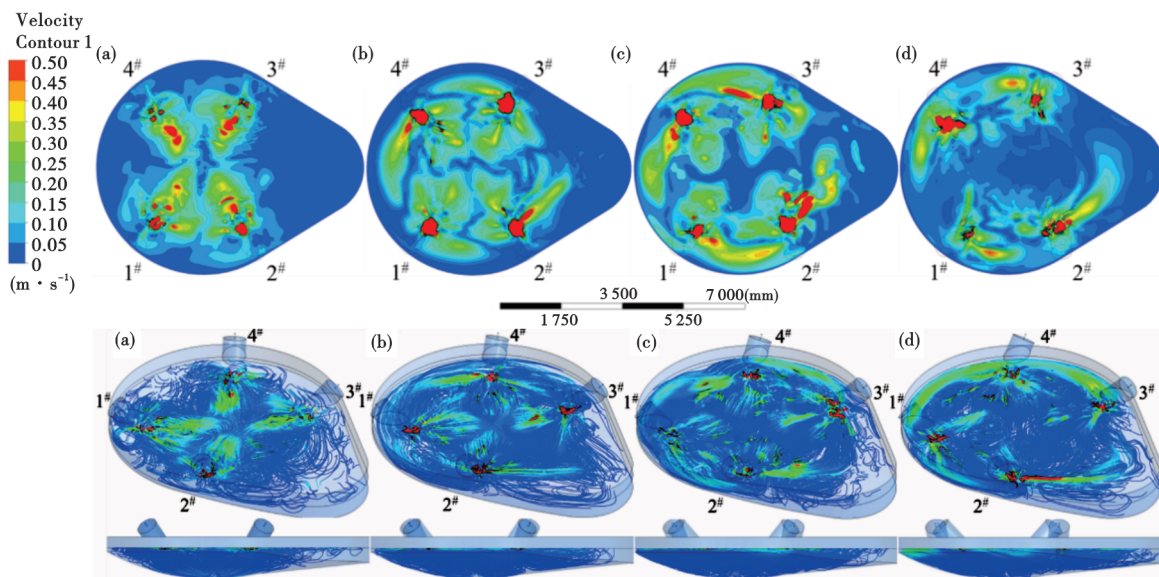


图 5 不同氧枪偏转角度下熔池速度分布：(a)方案 1，(b)方案 2，(c)方案 3，(d)方案 4

Fig. 5 Velocity distribution of molten steel in melting bath with different deflection angles of oxygen lance : (a) scheme 1 , (b) scheme 2 , (c) scheme 3 , (d) scheme 4

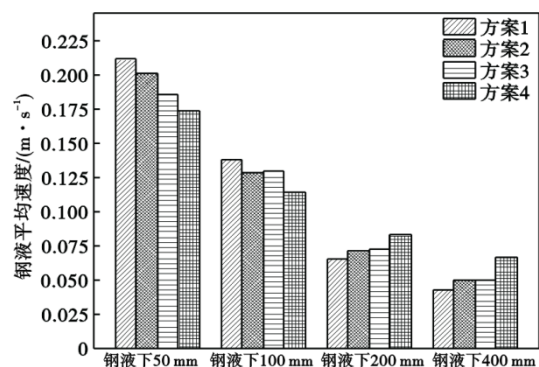


图 6 不同氧枪偏转角度下熔池横截面平均速度

Fig. 6 Average cross section velocity of molten steel in melting bath with different deflection angles of oxygen lance

于稳定,随着氧枪偏转角度增加,稳定状态的死区比例呈下降趋势,方案1至方案4的死区比例分别为 13.3%、9.0%、6.6%和 5.8%。

不同氧枪偏转角度下熔池死区分布如图 8 所示,同时图 8 中给出了不同氧枪偏转角度下的超音速射流流速分布,结果表明,方案 1 靠近 EBT 区域的

顶部和底部均存在大面积死区;方案 2 的 EBT 顶部死区开始减小;方案 3 的 EBT 死区体积进一步减小,同时熔池中心底部开始出现死区;方案 4 基本上消除了 EBT 死区。

分析其主要原因在于,方案 1 射流对冲带动钢液向中心汇集,钢液流股相互交汇抵消,动能损失大,无法辐射带动 EBT 区流动。与方案 1 相比,方案 2 使得钢液流股存在交错,规避了部分动能损失,死区体积较方案 1 下降了 32.3%,但由于偏转角度小,对 EBT 区的辐射有限。方案 3 能进一步规避钢液流股对冲碰撞造成的动能损失,带动 EBT 区钢液循环流动,死区体积较方案 1 下降了 50.4%。随着氧枪偏转角度继续增加,方案 4 射流动能得到最大程度保留,能量损失最小,钢液流股沿射流发展方向得到充分循环,有效带动了 EBT 区域钢液流动,消除了 EBT 区域的钢液死区,同时死区由 EBT 区转移到熔池中心底部,死区体积较方案 1 下降了 56.4%。总的来讲,随着氧枪偏转角度增加,电弧炉 EBT 死

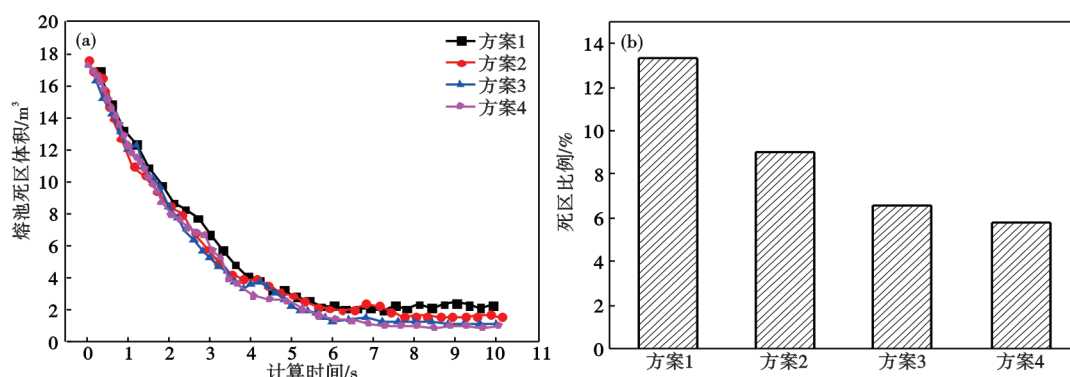


图 7 不同氧枪偏转角度下熔池死区对比:(a)死区体积随时间变化,(b)死区比例

Fig. 7 Comparison of dead zone of molten steel in melting bath with different deflection angles of oxygen lance : (a) dead zone volume changes with time , (b) Proportion of dead zones

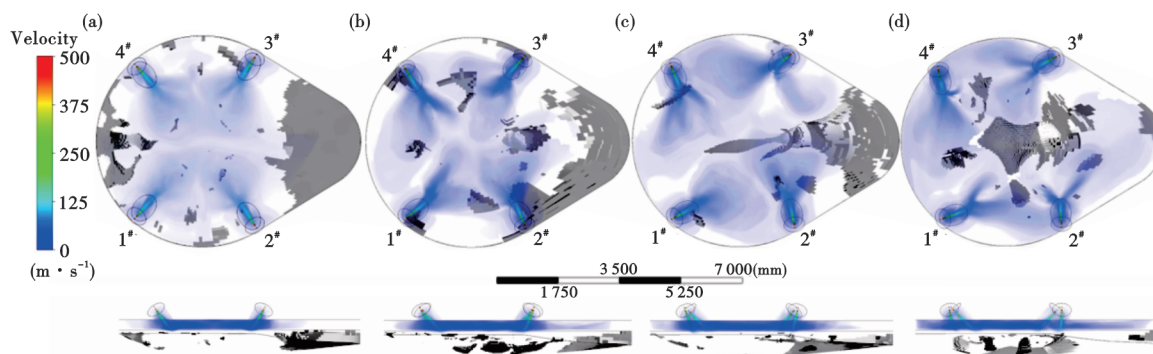


图 8 不同氧枪偏转角度下熔池死区分布:(a)方案 1,(b)方案 2,(c)方案 3,(d)方案 4

Fig. 8 Dead zone distribution of molten steel in melting bath with different deflection angles of oxygen lance : (a) scheme 1 , (b) scheme 2 , (c) scheme 3 , (d) scheme 4

区得到明显改善,死区分布逐渐转移到熔池中心底部。

3.4 不同氧枪偏转角度对炉壁的影响

钢液对炉壁的冲刷会加剧耐材损耗,降低炉衬使用寿命。氧气射流与熔池的相互作用如图 9 所示,炉壁冲刷如图 9(c)所示,可以看到钢液在氧气射流的冲击下扰动,熔池液面存在钢液飞溅,而炉壁冲刷的主要原因是氧气射流带动钢液向炉壁流动,造成电弧炉渣线处耐材的冲刷。

不同氧枪偏转角度下的熔池液面钢液流线图如图 10 所示,可以看到,方案 1 钢液流股大部分向中聚拢,仅存在小股钢液向后流动冲刷炉壁;方案 2 钢液流股分为两部分,一部分向中聚拢,一部分沿熔池循环流动,但未明显接触到炉壁,对炉壁的影响较小;方案 3 钢液流股大部分沿炉壁循环流动,明显冲刷炉壁;方案 4 钢液流股完全沿炉壁循环流动,对炉壁的冲刷明显。同时发现 2# 氧枪推动的钢液在电弧炉偏心区得到充分发展,对消除 EBT 死区有着积极作用,钢液流股距离炉壁较远,对炉壁影响小,因此,2# 氧枪偏转后对炉壁的冲刷较小。

不同氧枪偏转角度下炉壁受力分布如图 11 所示,可以看到,随着氧枪偏转角度增加,炉壁受射流冲击加剧,冲击影响范围扩大,方案 1 至方案 4 的炉壁平均受力分别为 0.95、1.14、2.10、2.36 Pa,方案 4 的平均炉壁受力较方案 1 增加了 148.4%。总的来讲,氧枪偏转使得钢液流股与弧形炉壁存在交汇,氧枪偏转角度越大,炉壁冲刷越严重,但 EBT 区氧枪偏转对炉壁无明显影响。

4 优化方案及应用效果

4.1 优化方案设计

实际生产中,为平衡熔池搅拌效果和炉壁冲刷强度,采用组合式氧枪布置的优化方案 5,即 1#、3#、4# 氧枪偏转 10°,2# 氧枪偏转 30°,优化方案 5 与原工艺方案 1 对比如图 12 所示。

方案 5 流场如图 13 所示,图 13(a)为熔池液面钢液流线图,图 13(b)为熔池死区分布,同时图中给出了超音速射流流速分布,图 13(c)为熔池液面形态,可以发现,在 2# 氧枪带动下,EBT 区钢液得到充分的搅拌循环,基本上消除了 EBT 死区,同时能够

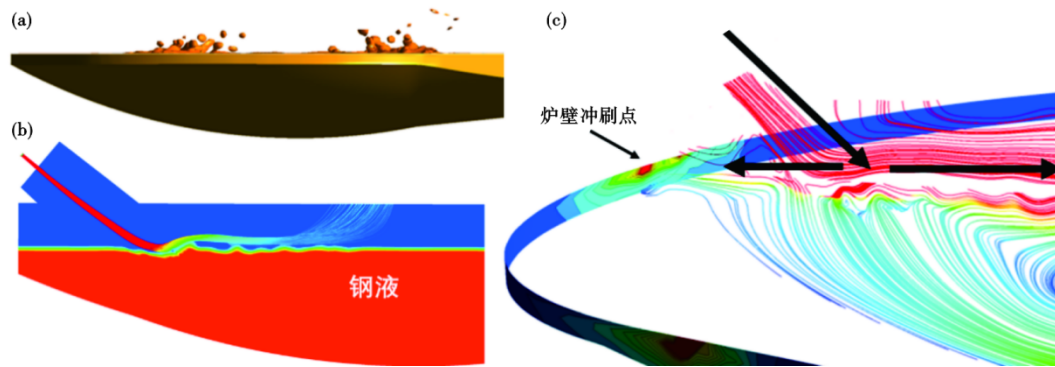


图 9 氧气射流与熔池的相互作用:(a)熔池液面形态,(b)气液相图,(c)炉壁冲刷示意

Fig. 9 Oxygen jet interacts with melting bath : (a) molten steel morphology , (b) gas-liquid diagram , (c) impact strength of furnace wall

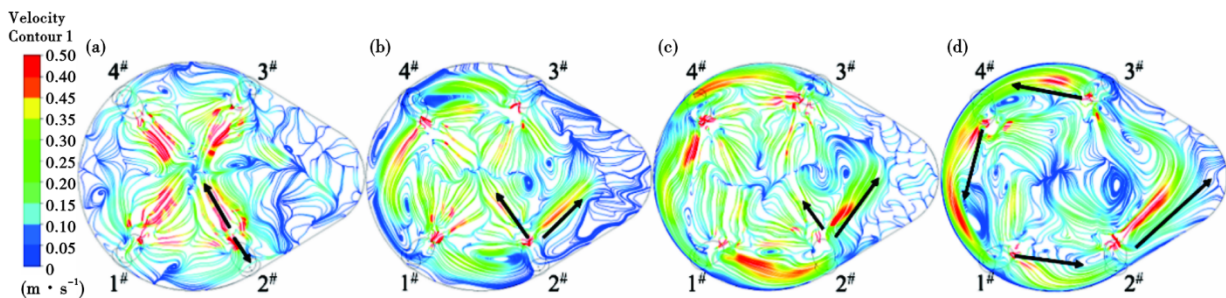


图 10 不同氧枪偏转角度下钢液流线图:(a)方案 1,(b)方案 2,(c)方案 3,(d)方案 4

Fig. 10 Motion pattern of molten steel with different deflection angles of oxygen lance : (a) scheme 1 , (b) scheme 2 , (c) scheme 3 , (d) scheme 4

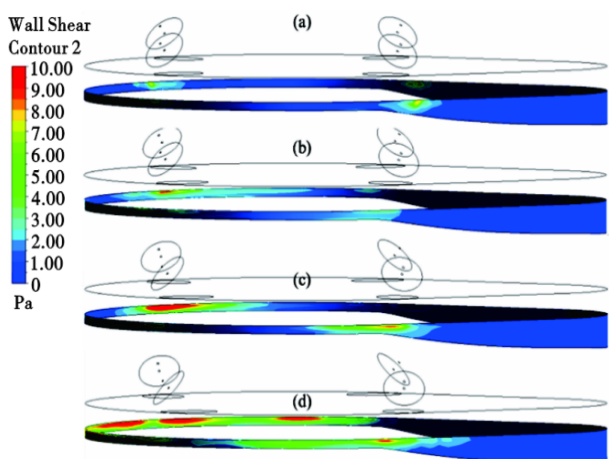


图 11 不同氧枪偏转角度下炉壁受力分布:(a)方案 1,(b)方案 2,(c)方案 3,(d)方案 4

Fig. 11 Impact strength of furnace wall with different deflection angles of oxygen lance: (a) scheme 1 , (b) scheme 2 , (c) scheme 3 , (d) scheme 4

保证熔池中心部的搅拌效果,钢液循环效果较好,最终死区比例为 6.9%,较原工艺的方案 1 下降了 48.1%,炉壁平均受力为 1.27 Pa,在可接受范围内

较原工艺高 33.7%。

4.2 工业应用

基于以上数值模拟计算结果,开展 100 t 电弧炉熔池优化的工业应用,现应用优化方案 5 进行冶炼,统计出钢自开率、出钢温度和出钢孔疏通时间。优化方案正常冶炼 500 炉次,选取原工艺条件下 500 炉冶炼数据进行对比,工艺优化前后冶炼数据对比见表 4,结果表明,应用优化方案后,出钢自开率由 75.2% 提高到了 95.6%,平均出钢温度降低了 6 °C,炉均出钢孔疏通时间缩短了 1.7 min。

为研究优化方案对钢液过氧化的影响,以典型 ML08Al 低碳冷镢钢为例,统计终点钢水 [O] 质量分数和炉渣 T.Fe 质量分数。统计结果如图 14 所示,数据表明,应用优化方案后 ML08Al 钢终点钢水 $w[O]$ 超过 0.08% 的炉次占比由 58.6% 降低到 10.2%;优化方案与原工艺终点平均钢水 $w[O]$ 分别为 0.065 1%、0.082 3%;优化方案与原工艺平均炉渣 T.Fe 质量分数分别为 24.3%、31.0%;优化方案的终点钢水 [O] 质量分数与炉渣 T.Fe 质量分数相对于原工艺分

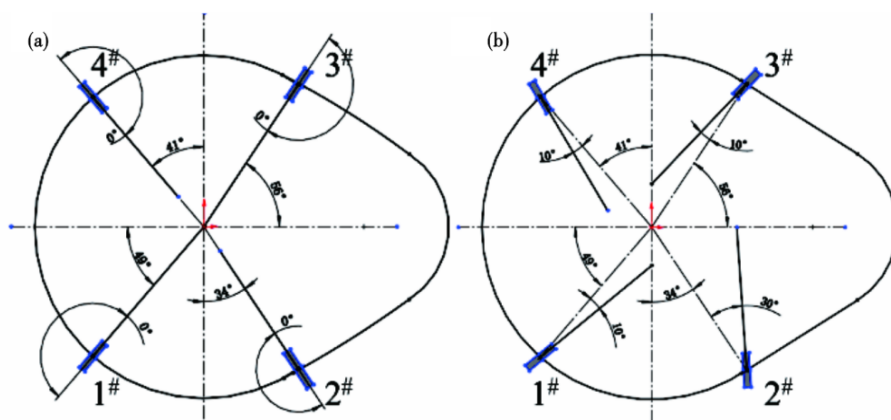


图 12 优化方案对比:(a)方案 1,(b)方案 5

Fig. 12 Comparison of optimization schemes : (a) scheme 1 , (b) scheme 5

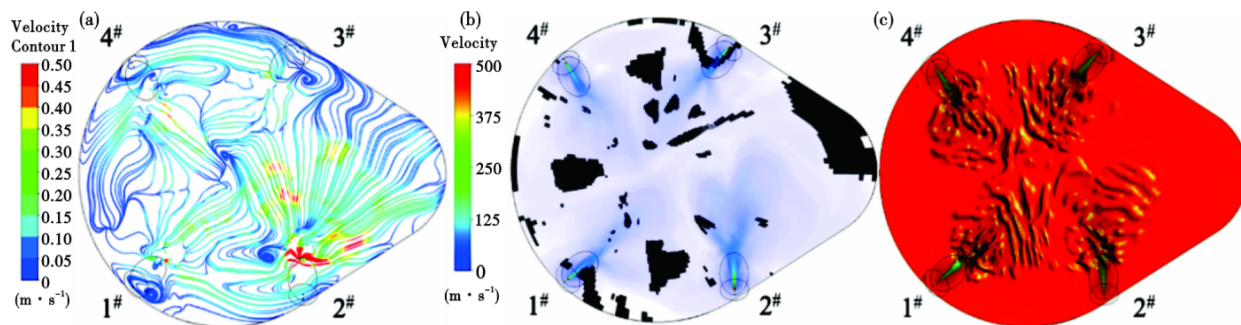


图 13 方案 5 流场:(a)熔池流速分布,(b)熔池死区分布,(c)熔池液面形态

Fig. 13 Scheme 5 flow field : (a) molten steel velocity distribution , (b) molten steel dead zone distribution , (c) molten steel morphology

表 4 优化方案统计数据
Table 4 Optimized scheme statistics

试验方案	氧枪偏转角度/(°)				出钢自开率/%	平均出钢温度/°C	炉均出钢孔疏通时间/min
	1#	2#	3#	4#			
1	0	0	0	0	75.2	1 620	2.1
5	10	30	10	10	95.6	1 614	0.4

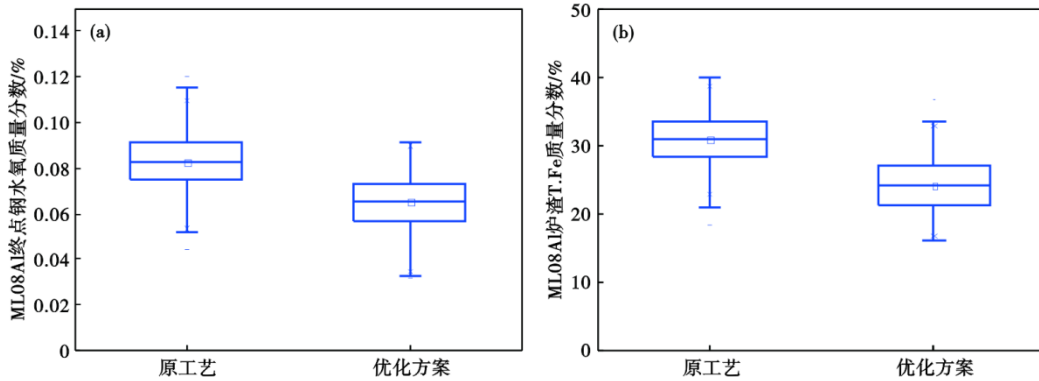


图 14 ML08Al 钢统计数据: (a) 终点钢水氧质量分数, (b) 炉渣全铁质量分数

Fig. 14 ML08Al steel statistics : (a) End point oxygen mass fraction of molten steel, (b) T. Fe mass fraction content of slag

别降低了 20.9% 和 21.6%, 改善显著。

5 结论

(1) 数值模拟结果显示, 与氧枪偏转角度为 0° 相比, 10° 、 20° 和 30° 偏转角度下, 熔池死区比例分别减少了 32.3%、50.4% 和 56.4%, 平均炉壁受力分别增加了 20.0%、121.1% 和 148.4%。

(2) 随着氧枪沿法线偏转角度的增加, 熔池死

区比例减小, 死区位置由 EBT 区逐渐转移至熔池中心; 氧枪偏转使得钢液流股与炉壁存在交汇, 偏转角度越大, 炉壁受力越大; EBT 区氧枪偏转有利于消除 EBT 死区, 同时对炉壁的影响较小。

(3) 结合数值模拟和实际应用进行分析, 将炉壁氧枪进行小范围偏转同时将 EBT 区氧枪大角度偏转, 有利于促进 EBT 区钢水循环, 提高出钢自开率, 改善因过吹导致出钢温度高和钢水过氧化的问题。

参考文献

- [1] 李士琦, 孙 华, 郁 健, 等. 我国电弧炉炼钢技术的进展讨论[J]. 特殊钢, 2010, 31(6): 21-25.
- [2] 杨宁川, 黄其明, 何腊梅, 等. 炼钢短流程工艺国内外现状及发展趋势[J]. 中国冶金, 2010, 20(4): 17-22.
- [3] 陈军召, 张彦辉, 谈岸童, 等. 喷吹微粒脱磷法在 130 t 电弧炉炼钢中的应用[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 34-38.
- [4] 杨春梅, 颜慧成. 电弧炉炼钢中碳氧二次燃烧的影响因素和应用[J]. 特殊钢, 2004, 25(6): 36-38.
- [5] 陈绍春, 李京社, 朱 荣, 等. 超音速氧气射流对电弧炉熔池作用三相流数值模拟研究[J]. 图学学报, 2013, 34(1): 66-70.
- [6] Odenthal H J, Kemminger A, Krause F, et al. Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (EAF)[J]. Steel Research International, 2018, 89(1): 1700098.
- [7] 何春来, 黄其明, 杨宁川, 等. 电弧炉炼钢氧枪优化布置研究[J]. 工业加热, 2013, 42(3): 59-62+65.
- [8] 王 丹, 郭志红, 霍彦朋, 等. 130 t 直流电弧炉喷吹过程的优化模拟[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 46-53.
- [9] 罗奎奎, 吕凯辉. Q195 钢过氧化的危害及原因分析[J]. 中国冶金, 2016, 26(1): 53-58.
- [10] 李立凯, 高 放, 王 敏, 等. 废钢比对转炉钢液过氧化的影响及配料调优[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 39-45.
- [11] 张 健, 方 杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67-70.
- [12] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [13] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.