



5 流连铸中间包挡墙优化设计及工业应用

李大明¹, 翟万里¹, 石可伟¹, 陈 事¹, 王亚栋²

(1 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司, 淮安 223001; 2 北方工业大学, 北京 100144)

摘 要:针对淮钢 5 流中间包流场不均导致夹杂物去除效率低、温度波动大的问题,对中间包挡墙进行重新设计。相较于原方案,挡墙整体外形保持不变,重点对导流孔的位置、孔径及倾角进行优化。经 CFD 仿真与工业试验验证:通过侧开导流孔、缩小孔径、提高倾角,第 3 流的响应时间延长 89.1 s,峰值时间延长 160.3 s,平均停留时间延长 179.9 s,死区体积占比降低 19.7%。流场参数的改善延长了夹杂物的上浮路径与停留时间,提升了夹杂物去除能力;依托更均匀的流场分布,第 1 与第 3 流的实际温差由 3~5℃降至 0~2℃,验证了流场均匀性对传热过程的调控作用。在轴承钢等难浇钢种的生产中,优化方案下第 3 流塞棒的波动幅度显著降低,优特钢轧材的夹杂物检验合格率由 95% 提升至 98%,证实流场优化具备工业级稳定性,对提升钢液洁净度具有重要意义。

关键词:连铸中间包; 挡墙优化; 流场模拟; 停留时间分布; 夹杂物

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250572 **中图分类号:**TF777. 2

Design of Dam Wall for 5-strand Continuous-casting Tundish Based on Numerical Simulation

Li Daming¹, Zhai Wanli¹, Shi Kewei¹, Chen Shi¹, Wang Yadong²

(1 Jiangsu Shagang Group Huaigang Special Steel Co., Ltd., Huaian 223001, China;

2 North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract : Aiming at the problems of low inclusion removal efficiency and large temperature fluctuations caused by the uneven flow field of the 5-strand tundish in Huaigang Steel, the tundish dam wall was redesigned. Compared with the original scheme, the overall shape of the dam wall remained unchanged, and the main optimizations were made to the position, aperture and inclination angle of the diversion holes. CFD simulation and industrial tests confirmed that: by opening the diversion holes on the side, reducing the hole diameter, and increasing the inclination angle, the response time of the 3rd strand increased by 89.1 s, the peak time increased by 160.3 s, the average residence time increased by 179.9 s, and the dead zone volume was reduced by 19.7%. The optimized flow field parameters enhanced the inclusion removal capacity by expanding the floating path and residence time of inclusions; relying on a more uniform flow field distribution, the temperature difference between the 1st and 3rd strands was reduced from 3℃-5℃ to 0℃-2℃, verifying the regulatory effect of flow field uniformity on heat transfer processes. In the production of difficult-to-cast steel grades such as bearing steel, the fluctuation amplitude of the stopper rod in the 3rd strand of the optimized scheme was significantly reduced, and the qualification rate of inclusion inspection for high-grade special steel rolled products was increased from 95% to 98%, which confirmed that the flow field optimization has industrial-level stability and significance for improving the cleanliness.

Key Words : Tundish; Dam Wall Optimization; Flow Field Simulation; RTD Curve; Inclusion

随着连铸技术向高效化、纯净化方向发展,中间包控流装置对均匀化流场、强化夹杂物上浮的核心作用愈发凸显^[1]。通过调控挡墙导流孔的孔径、空间位置及倾角,可重构中间包流场结构,延长钢水停留时间、压缩死区体积,实现多流温度梯度均匀化^[2-3]。然而,奇数流连铸中间包(以五流为例)因中间流次冲击区受结构对称性约束,湍动能耗散路径受阻,钢水质量对流场参数的敏感性显著高于偶数流配置^[4]。淮钢 210 方五机五流大方坯连铸机,

各流钢水的纯净度及塞棒调控稳定性差异显著,已成为优特钢批量稳定生产的瓶颈。

针对上述问题,本文采用 Fluent 软件构建中间包流场数值模型,解析不同控流方案下的流场演化机制,并结合实际中间包温度、生产过程塞棒稳定性与长期夹杂物检验结果,验证流场优化的工业效能,为同类连铸装备的流场调控提供理论与实践参考。

1 模型的建立

1.1 基本理论

为简化计算,对中间包流场模型作出以下假设:流体为不可压缩的黏性流体,密度、黏度为常数;不考虑钢水温度变化导致的密度差异对流动的影响;不考虑中间包覆盖剂对流动的影响^[5-7]。采用标准 k-ε 湍流模型描述湍动能耗散率,结合连续方程和动量方程构建控制方程组,方程形式及参考取值参照文献^[8-9]。

流场停留时间分布根据“刺激-响应”法量化:向稳定流场的中间包入口注入示踪剂,追踪出口示踪剂浓度时序变化,计算结果按式(1)-(5)处理^[10-11]。

理论平均停留时间如式(1)。

$$\bar{t} = \frac{V}{nq} \quad (1)$$

式中, V 为中间包体积, m^3 ; n 为流数; q 为单流的体积流量, m^3/s 。

无量纲时间 θ , 用于跨方案流场对比, 如式(2)。

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (2)$$

式中, t 为中间包进水口添加示踪剂后的累计时间, s 。

出口 RTD 分布函数如式(3)。

$$E(\theta) = \frac{2\bar{t}qC(t)}{M} \quad (3)$$

式中, M 为该水口流出的示踪剂质量, kg ; $C(t)$ 为随时间 t 变化的示踪剂浓度。

无量纲平均停留时间, 如式(4), 反映实际流场的平均滞留特性。

$$\theta_{av} = \frac{\int_0^{2\theta} \theta E(\theta) d(\theta)}{\int_0^{2\theta} E(\theta) d(\theta)} \quad (4)$$

死区体积分, 量化流场“无效滞留区”占比, 如式(5)。

$$V_d = 1 - \frac{\theta_{av}}{\bar{t}} \quad (5)$$

1.2 模型及网格划分

中间包几何模型采用 1:1 比例构建, 网格划分类型为六面体单元, 基础网格尺寸为 2.5 cm。入口、出口、导流孔等流动复杂区域适当加密以提高计算精度, 网格总量约为 20 万, 如图 1 所示。为提高计算效率, 采用半模型开展数值模拟, 残差收敛标准设定为 10^{-5} 。浸入式水口顺序从右向左依次为第 1

流、第 2 流和第 3 流。

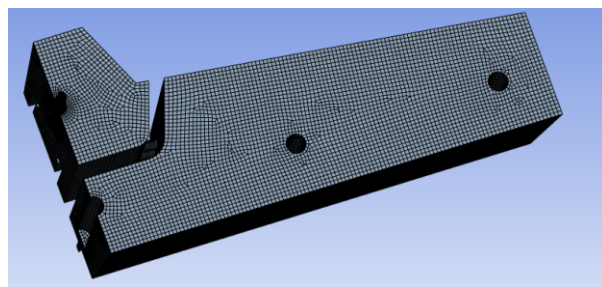


图 1 流体域几何及网格划分

Fig. 1 Fluid Domain Geometry and Mesh Division

1.3 边界条件

入口条件为中间包长水口按连铸拉速 1.1 m/min 设定入口质量流 15 kg/s, 钢水温度 1 823 K。出口条件为出钢口为压力边界, 表压设置为 0。壁面条件为中间包液面设为自由滑移壁, 半模型分割面设定为对称壁面。其余壁面为无摩擦不可滑移壁, 各壁面的热流量分别为: 液面 15 000 W/m², 侧面 3 500 W/m², 底面 1 500 W/m²。

示踪剂引入, 计算初始阶段, 中间包仅注入钢水, 流场达到稳态后, 注入与钢水同一物理性质的示踪剂, 通过追踪出口处示踪剂浓度的变化, 计算停留时间分布(RTD)曲线。

2 中间包挡墙设计和数值模拟

2.1 中间包挡墙设计

挡墙设计兼顾成本控制与现场安装便捷性, 采用简约化构型方案。设计两种挡墙模型, 其几何尺寸完全一致, 仅导流孔的布局参数不同, 如图 2 所示。图 2(a)为现有生产方案的基准设计, 图 2(b)基于夹杂物上浮时间、流场均匀性等重新设计。

方案 1 和方案 2 导流孔的孔径、倾角设计见表 1, 其中前倾角是该导流孔中轴线在 XY 面的投影与 X 轴的夹角, 上倾角是该导流孔中轴线在 XZ 面的投影与 X 轴的夹角。导流孔 1 孔径从 140 mm 缩至 70 mm, 前倾角由 0° 调整为 12°, 引导水平流向更均匀; 导流孔 2 孔径从 120 mm 缩至 90 mm, 前倾角从 57° 降至 12°, 上倾角统一为 15°, 通过“缩孔+倾角归一化”策略, 优化流场路径长度与抬升效应。

2.2 数值模拟结果及讨论

2.2.1 流线计算结果及讨论

方案 1 的钢水流线如图 3(a)所示, 根据流线图可知, 方案 1 流场主要存在两方面问题: 一是第 1 流

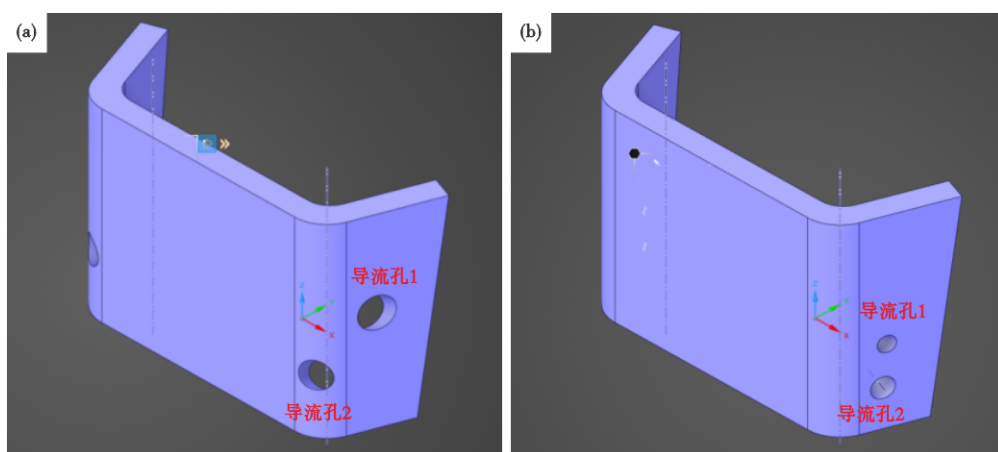


图2 挡墙设计:(a)方案1,(b)方案2

Fig. 2 Design of Dam wall : (a) Option 1, (b) Option 2

表1 中间包挡墙设计方案

Table 1 Design of Tundish Flow Control Devices

方案	挡墙导流孔1			挡墙导流孔2		
	孔径/ mm	前倾角/ (°)	上倾角/ (°)	直径/ mm	前倾角/ (°)	上倾角/ (°)
1	140	0	31.5	120	57	33
2	70	12	15	90	12	15

附近钢水流速普遍低于0.06 m/min,钢水主要在静压力的驱使下沿着能耗较低的路径流动,可能导致死区体积显著增大;二是部分钢水从导流孔至第2、3流出钢口流线长度偏短,夹杂物上浮时间匮乏,结瘤概率大幅度提升。

方案2的钢水流线如图3(b)所示,根据流线图可知,钢水抵达第3流的流线长度显著增加,提高了整个中间包流场的活跃性和稳定性,钢水停留时间有效延长,有利于夹杂物的去除;但须注意,方案2中第3流流场参数与第1流和第2流会存在显著差别,多流流动均匀性仍需深入研究。

2.2.2 停留时间分布曲线计算结果及讨论

追踪出口处示踪剂浓度随时间的变化,经过无量纲化后得到流场RTD曲线如图4所示。由图4可

知,方案2相比方案1,第3流RTD曲线峰值较低,这是因为该流钢水流线延长,“短路流”的流场特征受到抑制;同时第3流RTD曲线存在两个峰值,说明从导流孔出来的钢水,多数是经过大环流后到达第3流出口,少部分不可避免直接分流至该出口,保留了部分方案1特征。

通过提取图4的RTD曲线数据,计算流场关键参数,见表2。对比可知,两方案的1流、2流,响应时间 T_{res} ,峰值时间 T_p ,平均停留时间 T_{av} 、死区体积 V_d 变化较小,流场特性变化不大。方案2相比方案1,其优化效应主要体现在第3流,第3流 T_{res} 增加89.1 s, T_p 增加160.3 s, T_{av} 增加179.9 s, V_d 降低19.7%。停留时间延长、死区收缩虽利于夹杂物上浮,但是过长停留时间可能导致钢水温降加剧,需后续耦合温度场分析验证。

2.2.3 温度场计算结果及讨论

方案1钢水温度场如图5(a)所示,中间包冲击区外,第2、3流塞棒附近钢水温度较第1流高4~5℃。其本质是流场差异导致的热行为分化:第2、3流因流线“短路流”特征,钢水替换速率快,散热

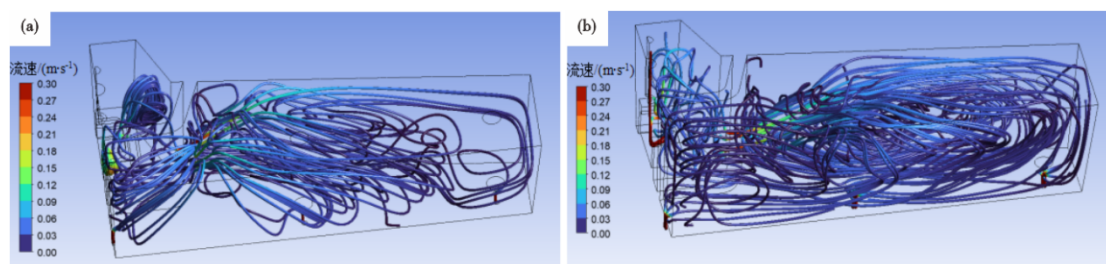


图3 钢水速度流线图:(a)方案1,(b)方案2

Fig. 3 Molten Steel Velocity Streamline : (a) Option 1, (b) Option 2

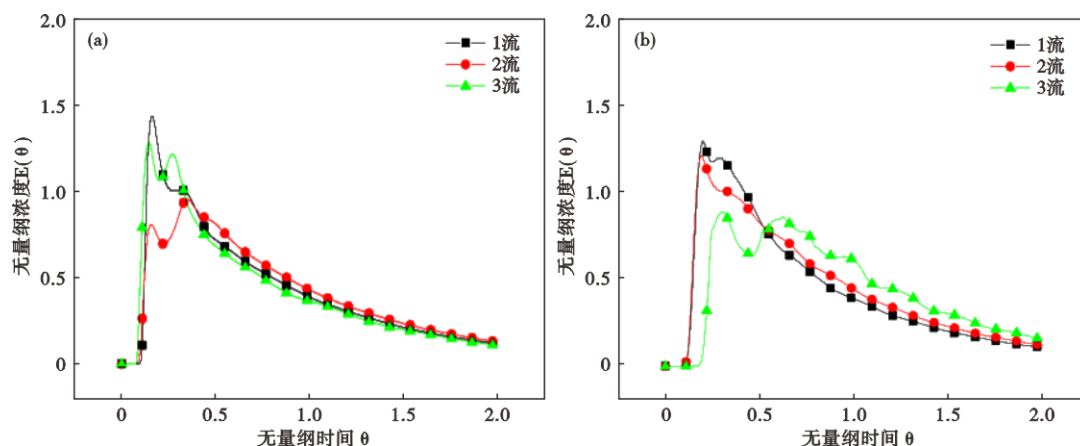


图4 方案1流场RTD曲线:(a)方案1,(b)方案2

Fig. 4 RTD Curves of Scheme 1: (a) Option 1, (b) Option 2

表2 中间包流场参数

Table 2 Parameter of Tundish Flow Field

方案	出钢口	T_{res}/s	T_{pk}/s	T_{av}/s	$V_d/\%$
1	out1	113.7	187.7	648.2	29.0
	out2	82.8	226.2	702.0	23.1
	out3	66.7	111.4	625.3	31.5
2	out1	89.3	179.2	644.5	29.4
	out2	84.1	171.3	676.5	25.9
	out3	155.8	271.7	805.2	11.8

时间短,温度较高;第1流附近区域流动活跃度低,散热路径长,温度较低,最终不同流次之间形成显著温度梯度。

方案2钢水温度场如图5(b)所示,与方案1相比,第1流塞棒附近温度升高,第3流降低,流间温度降低至2~3℃,这与流场优化直接关联,即第3流流线延长使温降更平缓,整体热分布更均衡。

3 中间包挡墙试验结果和讨论

3.1 难浇钢种的流场稳定性验证

针对轴承钢GCr15、含硫含铝钢等难浇钢种,通过塞棒位置波动特征反推流场优化效果。方案1生产GCr15时,第3流塞棒呈现大幅度波动,如图6(a)

所示。这是因为头炉开浇二次氧化显著,生成较多的氧化铝夹杂物,同时,第3流呈现短路流特征,钢水中的夹杂物上浮时间不足,导致塞棒或水口结瘤物脱落。方案2投用后,生产同样钢种的塞棒曲线如图6(b)更趋平稳,证明流场优化有效延长第3流的夹杂物上浮时间,抑制了塞棒或水口结瘤。

3.2 钢水温度场的验证

为验证温度场模拟结果的可靠性,选取同一钢种,在流场达到稳定时开展对比试验:用热电偶同步监测第1流和第3流钢水温度,热电偶插入深度200 mm,各采集50炉数据以规避偶然误差,用第3流钢水温度与第1流钢水温度做差,温差结果如图7所示。由图7可知,方案1第3流温度显著高于第1流,这与温度场模拟结果比较一致。而方案2依托更均匀的流场分布,将第1流和第3流之间的实际温差绝对值由3~5℃压缩至0~2℃,部分温差呈现负值,即第3流钢水温度略低于第1流,这是钢水流线较长,散热较多所致,与数值模拟的结果在趋势上是一致的。

3.3 夹杂物的控制效果

基于以上研究结果,对方案2挡墙进行批量推

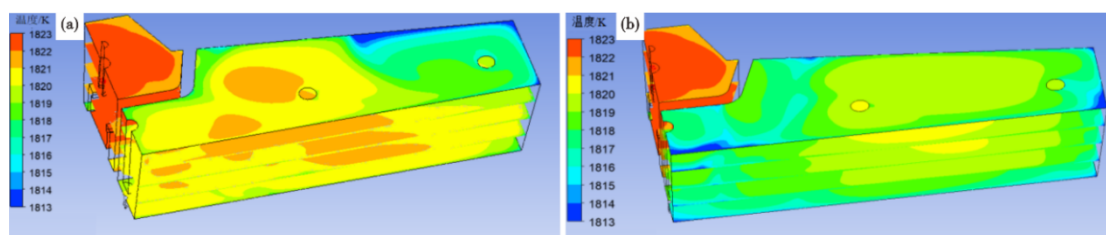


图5 钢水温度:(a)方案1,(b)方案2

Fig. 5 Molten steel Temperature: (a) Option 1, (b) Option 2

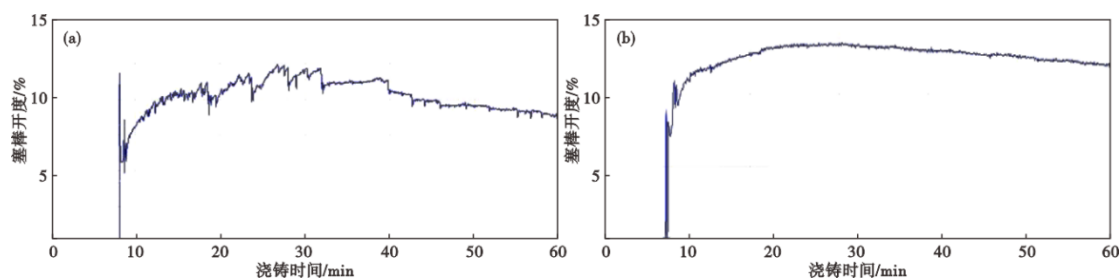


图6 方案1塞棒位置曲线:(a)方案1,(b)方案2

Fig. 6 Opening Degree of Stopper Rod:(a) Option 1, (b) Option 2

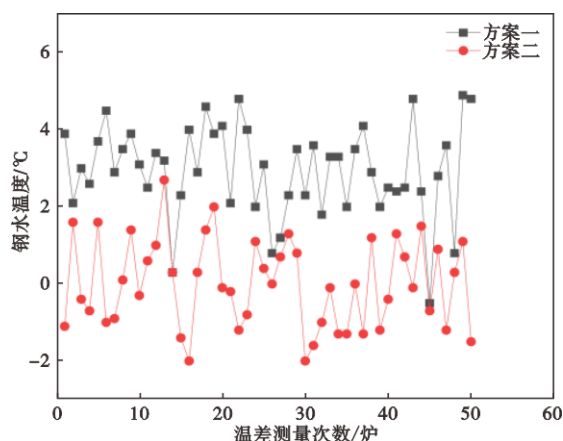


图7 第1流和第3流钢水温差测量

Fig. 7 Molten steel temperature difference of strand 1 and strand 3

广试验,为有效验证流场对钢水纯净度的改善作用,本研究分别对两种方案6个月的夹杂物情况进行大数据统计,结果表明,使用方案2代替方案1后,铸坯轧制后夹杂物检验合格率由95%提高到

98%,夹杂物去除效率的改善具有统计学显著性。

4 结论

1)针对中间包控流需求设计两种挡墙方案。通过侧开导流孔、缩小孔径、提高倾角,第3流响应时间增加89.1 s,峰值时间增加160.3 s,平均停留时间增加179.9 s,死区体积缩减19.7%,流场参数的改善通过拓展夹杂物上浮路径与驻留时长,显著强化了夹杂物去除能力。

2)方案2与方案1相比,依托更均匀的流场分布,将第1流和第3流之间的实际温差绝对值由3~5℃压缩至0~2℃;部分温差测量结果,第3流钢水温度略低于第1流,这是钢水流程较长,散热较多所致,与数值模拟在趋势上是一致的。

3)在轴承钢等难浇钢种生产中,方案2的第3流塞棒位置波动幅度显著降低;批量推广方案2,优特钢轧材夹杂物检验合格率由95%提升至98%,证实流场优化对洁净度的提升具备工业级稳定性与显著性。

参考文献

- [1] 包燕平,王 敏. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2019.
- [2] 谭文萱,孙彦辉,宋思程,等. 七流中间包流场的优化与模拟[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(6):682-691.
- [3] 王海达,陈 列,张亚楠,等. 五机五流非对称连铸机中间包流场流动特性研究[J]. 特钢技术, 2023, 29(3):1-7.
- [4] 徐海伦,马春武,李 智,等. 基于数值模拟的七流中间包控流装置设计[J]. 钢铁钨钛, 2012, 33(4): 40-46.
- [5] Hans-Jürgen Odenthal, Blling R, Pfeifer H. Numerical and physical simulation of tundish fluid flow phenomena[C]//Japan-germany Seminar on Fundamentals of Iron & Steelmaking. 2002.
- [6] Bensouici M, Bellaouar A, Tal-Bi K. Numerical Investigation of the Fluid Flow in Continuous Casting Tundish Using Analysis of RTD Curves[J]. 钢铁研究学报:英文版, 2009, 16(2): 22-29.
- [7] Kumar A, Mazumdar D, Koria S C. Modeling of fluid flow and residence time distribution in a four-strand tundish for enhancing inclusion removal[J]. ISIJ International, 2008, 48(1): 38-47.
- [8] 李玉峰,孙彦辉,宋思程,等. 六流中间包挡墙优化的数值模拟和工业实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(3):7-13.
- [9] 陈 洋,刘卫东,赵大同,等. 三流方坯连铸中间包结构优化的数值模拟和应用[J]. 特殊钢, 2019, 40(1):7-11.
- [10] Sheng D Y, Yue Q. Modeling of fluid flow and residence-time distribution in a five-strand tundish [J]. Metals, 2020, 10 (8) : 1084.
- [11] 王 锦,刘宇航,刘 威,等. 基于中间包冲击区的流场优化[J]. 中国冶金, 2023, 33(4):97-103.