

· 试验研究 ·

六流中间包场协同分析及流场优化

张美杰^{1,2} 林小龙¹ 黄奥¹ 汪厚植¹ 顾华志¹

(1 武汉科技大学,耐火材料与高温陶瓷重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,武汉 430081;

2 清华大学航天航空学院,热科学与动力工程教育部重点实验室,北京 100084)

摘要 采用场协同理论分析了连铸中间包内钢液流场与温度分布之间的关系,并对钢厂六流中间包进行了数值模拟计算。结果表明,当中间包不采用控流装置时,大部分区域钢液流场与温度梯度场协同性好,钢液温度梯度大,最大温差达 27 K,出口最大温差达 3 K,焓耗散值大,各出口 RTD(停留时间分布)曲线相差较大;当中间包内设置斜孔挡墙后,钢液流场与温度梯度场间的协同程度降低,钢液温度分布较均匀,最大温差为 12 K,各出口最大温差仅为 0.3 K,焓耗散值降低了 57.6%,各出口 RTD 曲线近似。

关键词 中间包 场协同 流场优化

Field Synergy Analysis and Fluid Flow Optimization of Tundish for Six Strands

Zhang Meijie^{1,2}, Lin Xiaolong¹, Huang Ao¹, Wang Houzhi¹ and Gu Huazhi¹

(1 Hubei Province Key Lab of Refractories and Ceramics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Key Lab for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The relation between distribution of temperature and fluid flow field in tundish for concasting has been analyzed by using theory of field synergy and the distribution of temperature and fluid flow field in a tundish for six strands at a steel works was simulated and numerically calculated. Results showed that as tundish without flow control devices, the synergy between temperature gradient field and fluid flow field was better, the temperature gradient of liquid steel was great i. e. the max temperature differential - 27 K and the max temperature differential at outlet - 3 K with large entrancy dissipation value and large difference between curves of residence time distribution at outlet; as tundish with baffles, the degree of synergy between temperature gradient field and fluid flow field decreased, the distribution of liquid steel was even i. e. the max temperature differential - 12 K and the max temperature differential at outlet - only 0.3 K, the value of entrancy dissipation decreased by 57.6% and the curves of residence time distribution at outlet were similar.

Material Index Tundish, Field Synergy, Fluid Flow Field Optimization

随着对钢种质量要求的提高,中间包在连铸中的冶金作用日益得到重视。对于多流中间包来说,除尽可能延长停留时间,促进夹杂物去除外,还应使各流钢液温度均匀,保证开浇的顺利进行。因此,人们通过在中间包内设置控流装置,改善钢液流动特性与温度分布,并通过 RTD 曲线分析判断各流流动的一致性^[1],通过水模型实验或数值模拟计算进行流场的优化。由于缺乏理论指导,控流装置的设置根据经验进行,对每种控流装置均需要重复性实验或计算,研究成本高,耗时长,且缺乏最优流场的判断标准。

过增元通过深入研究对流换热机制,提出了场协同理论^[2],随后的进一步研究中定义了焓的概念,并提出焓耗散极值原理^[3]作为实现最优流场的判断依据。焓耗散极值原理的提出及广泛应用^[4]为中间包控流装置的优化提供了新的思路,为实现

最优流场提供了理论依据。

本文首先利用场协同理论分析了中间包内钢液流场与温度分布之间的关系,并以钢厂实际六流中间包为模型,数值模拟计算了钢液流场及温度分布,分析了钢液流场与温度梯度场之间协同性与温度分布的关系,计算了焓耗散值,并与 RTD 曲线分析结果进行比较,讨论焓耗散极值原理在中间包控流装置优化中应用的可操作性。

1 中间包内对流传热过程场协同分析

中间包内钢液流动可看作非等温稳态湍流流动,假设钢液密度为常数,不考虑内热源时,其热量传输方程可表示为:

$$u \cdot \nabla (\rho c_p T) = \nabla \cdot [\lambda_{eff} \nabla (T)] \quad (1)$$

式中: u - 钢液的速度/($m \cdot s^{-1}$); T - 钢液的温度/K; ρ - 钢液的密度/($kg \cdot m^{-3}$); λ_{eff} - 有效导热系

数/[W·(m·k)⁻¹],其值为钢液的导热系数 λ 与湍流导热系数 λ_t 之和,即 $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ (2)

湍流导热系数可通过湍流粘度与湍流 Pr 数按照下式求解 $\lambda_t = \mu_t / Pr$ (3)

将方程(1)在整个区域内积分,并利用高斯定理,忽略进出口处轴向热扩散,可得

$$\int_{\Omega} \rho c_p |u| |\nabla T| \cos\beta d\Omega = \int_S \vec{n} \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) dS \quad (4)$$

式中: β -速度场与温度梯度场之间的夹角。

方程式的左边表示速度场与温度梯度场之间的协同程度,右边表示系统的整体传热量。当中间包向外传递的热流固定时, β 越小(趋于0°)或越大(趋于180°),温度梯度越大,按照场协同理论^[2],此时速度场与温度梯度场之间的场协同程度好,换热得到强化;反之, β 趋于90°或270°时,温度梯度小,当 β 等于90°或270°时,流体间以纯导热方式传递热量,可以起到保温作用。

对于中间包来说,为了使钢液温度均匀分布,应尽可能使速度场与温度梯度场之间的夹角趋于90°或270°,降低场协同程度。

单位体积钢液的焓定义为^[3]:

$$e_{vh} = \frac{1}{2} \rho c_p T^2 \quad (5)$$

单位体积内的焓耗散为^[3]:

$$\Phi_h = \frac{1}{2} \lambda_{eff} (\nabla T)^2 \quad (6)$$

根据焓耗散极值原理^[3],在热流给定的情况下,当焓耗散取最小值时,温差最小。对于中间包来说,当壁面热流给定时,要使钢液温度分布均匀,则可通过调整流场与温度梯度场之间的协同角,使

焓耗散取较小的值。

2 数值计算

2.1 基本方程

假设中间包内钢液为不可压缩性粘性流体,不考虑界面波动,中间包内钢液流动为非等温湍流流动,钢液湍流流动方程、与流场耦合的热量传输方程同文献[5]。

2.2 计算条件

以钢厂六流中间包为几何模型,该中间包容积为1.586 m³,其结构示意图如图1所示。

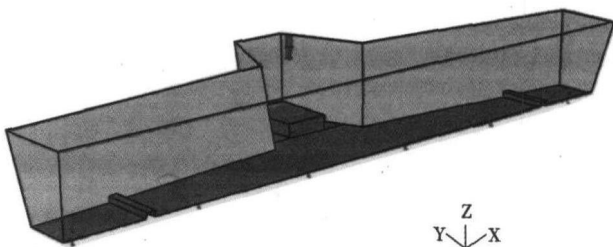


图1 六流中间包结构示意图
Fig. 1 Schematics of structure of tundish for 6 strand casting

通过在中间包内设置斜孔挡墙改变钢液流动特性与温度分布。本文采用两个斜孔挡墙对称布置,其结构及在中间包内的布置如图2所示。钢液的物性参数同文献[5],钢液入口平均速度为1.53 m/s,入口钢液温度1823 K,壁面为无滑移边界,热流为定值^[5],其中液面热流为36 kW/m²,X方向侧壁为3.8 kW/m²,Y方向侧壁为3.6 kW/m²,底部为1.4 kW/m²。因该中间包为对称结构,取其1/2进行计算分析。

2.3 计算方法

采用FLUENT6.1软件,耦合求解钢液流动与热

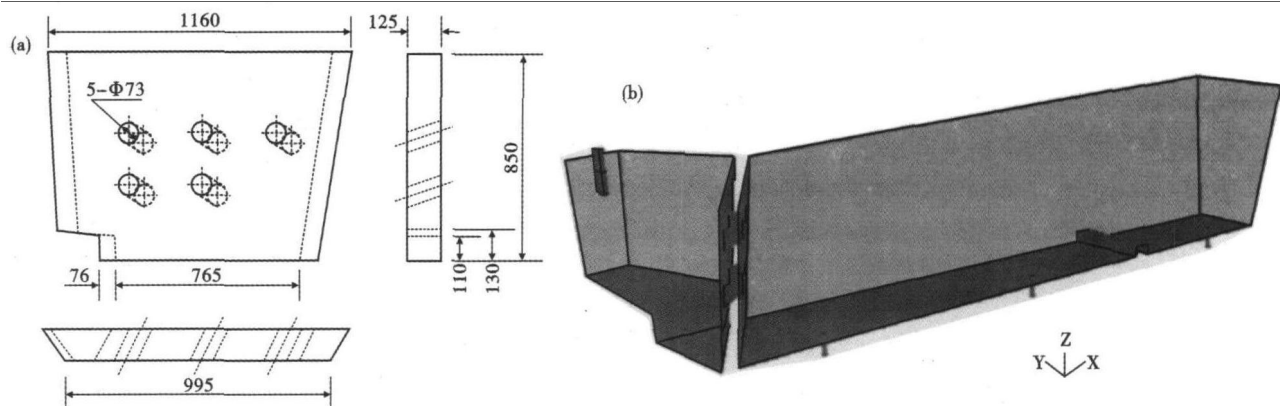


图2 斜孔挡墙结构(a)和斜孔挡墙在中间包内的布置图(b)

Fig. 2 Schematics of structure of dam with inclined hole (a) and layout of dam with inclined hole in tundish (b)

量传输方程,在获得稳定的流场与温度场后,按照文献[6]的方法求 RTD 曲线,并进行分析。速度场与温度梯度场间的协同角通过 FLUENT 的 UDF 功能求解,焓耗散根据文献[3,4]计算,并在总计算区域内积分。采用 simple 压力速度耦合算法。为了加强收敛,在求解过程中,首先采用一阶精度格式求解,然后采用二阶精度格式求解,在迭代过程中改变

松弛因子以获得收敛解。

3 结果与分析

3.1 无控流装置中间包

当不采用控流装置时,通过中间包出口中心截面的温度场及流线如图 3(a)所示,钢液流场与温度梯度场之间的协同角如图 3(b)所示。不同出口的

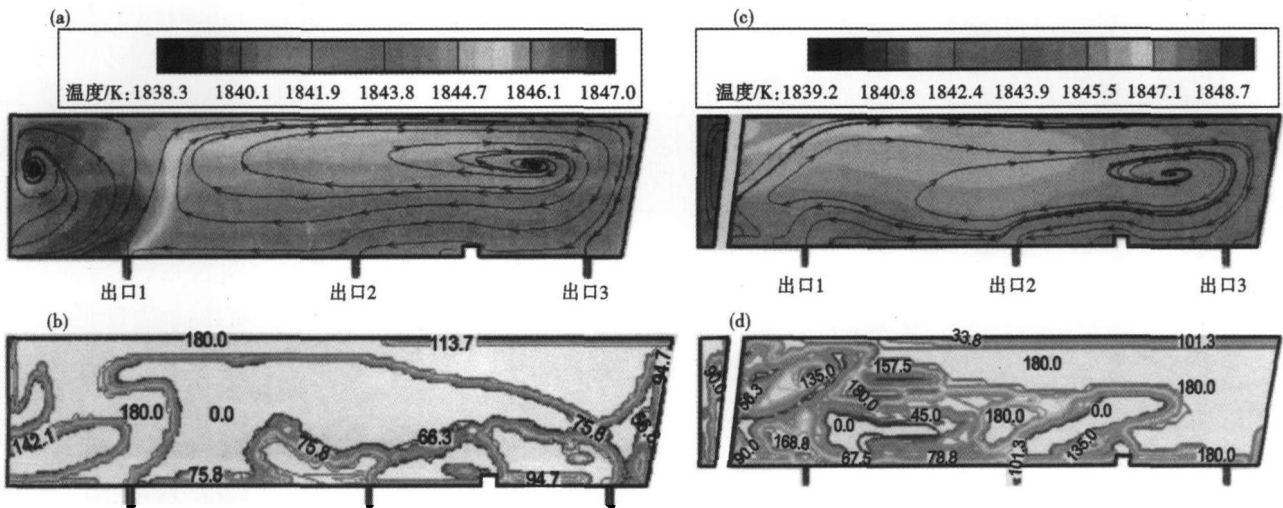


图 3 无控流装置中间包通过出口中心截面的温度场与流线(a)和速度场与温度梯度场的协同角度(b);安装斜孔挡墙中间包通过出口中心截面的温度场与流线(c)和速度场与温度梯度场的协同角度(d)

Fig. 3 Temperature field and flow lines (a) and synergy angles of speed field and temperature gradient field (b) at outlet center section of tundish without flow control devices; temperature field and flow lines (c) and synergy angles of speed field and temperature gradient field (d) at outlet center section of tundish with baffles

无因次 RTD 曲线如图 4 所示,RTD 曲线分析及各出口截面平均温度、焓耗散值如表 1 所示。

不采用控流装置的中间包内,高温钢液由入口以较大的速度注入中间包后,首先沿底部由距离入口最近的出口 1 流出,然后依次由出口 2、出口 3 流

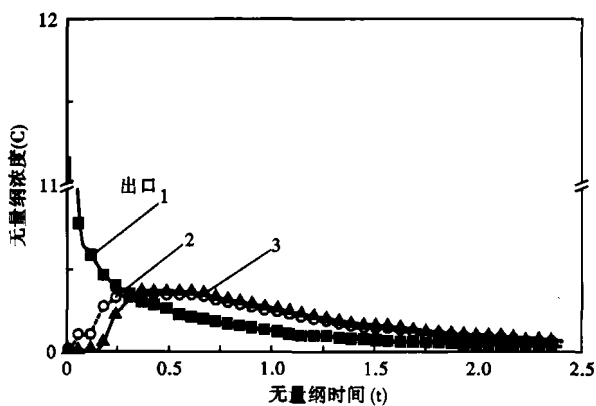


图 4 无控流装置中间包 3 个不同出口的停留时间分布 (RTD) 曲线

Fig. 4 Residence time distribution curves at three different outlet of tundish without flow control devices

表 1 无控流装置中间包计算结果

Table 1 Calculated results for tundish without flow control devices

项目	相应时间/s	峰值时间/s	平均停留时间/s	温度/K	焓耗散/[J·K·(m ³ ·s) ⁻¹]
出口 1	1	13	419.1	1 846.4	2.27 × 10 ⁵
出口 2	24	342	763.9	1 843.4	2.27 × 10 ⁵
出口 3	99	396	824.1	1 843.1	2.27 × 10 ⁵

出。在出口 1 与入口之间及出口 2、出口 3 上方形成两个回流,如图 3(a)所示。钢液流动的不均匀性导致中间包内温差较大,中间包内最大温差达 27 K,出口 1 处钢液的平均温度比出口 3 高 3K。由图 3(b)可知,在中间包的大部分区域,钢液流场与温度梯度场之间的协同角为 0°或 180°,协同程度高,因此存在较大的温度梯度;只有在靠近壁面的边界层以外小部分区域,协同角为 90°左右,温度梯度小。整个中间包内的焓耗散较大。

由图 4 所示的 RTD 曲线图也可看出,示踪剂在出口 2、出口 3 的相应时间、峰值时间及平均停留时间均远大于出口 1,因此出口 1 处钢液的温度大于

出口 2 及出口 3 处,这与场协同角对温度分布的影响一致。

3.1 安装斜孔挡墙的中包

安装斜孔挡墙后,中包内不同出口的 RTD 曲线如图 5 所示,通过出口中心截面钢液温度分布及流线如图 3(c)所示,钢液流场与温度梯度场之间的协同角如图 3(d)所示,RTD 曲线分析及各出口截面平均温度、焓耗散如表 2 所示。

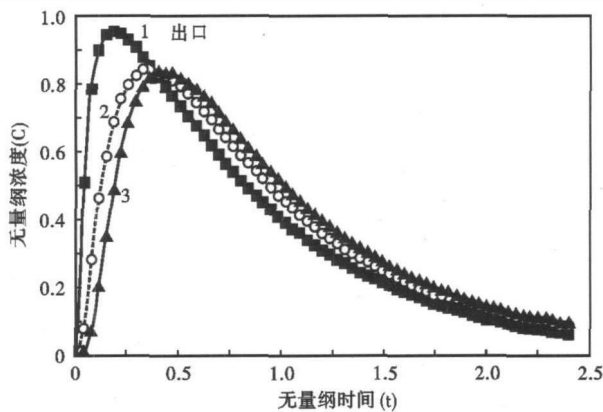


图 5 安装斜孔挡墙中包不同出口的停留时间分布 (RTD) 曲线

Fig. 5 Residence time distribution curves at three different outlet of tundish with baffles

表 2 斜孔挡墙中包计算结果

Table 2 Calculated results for tundish with baffles

项目	相应时间/s	峰值时间/s	平均停留时间/s	温度/K	焓耗散/ $[J \cdot K \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}]$
出口 1	34	348	679.1	1 844.6	9.62×10^4
出口 2	58	362	689.2	1 844.6	9.62×10^4
出口 3	142	557	842.1	1 844.3	9.62×10^4

中包内设置斜孔挡墙后,钢液通过斜孔挡墙向上流动,到达液面后沿着壁面向下流动,并沿包底流向各出口。到达出口 1、出口 2 的时间延长,因此两出口处钢液的平均温度近似相等。从图 3(d)可知,挡渣坝左侧包括出口 1、出口 2 的区域场协同程度低,温度分布较均匀;在靠近右侧壁及液面处,场协同程度高,协同角为 180° ,存在较大的温度梯度,从而使出口 3 的温度下降。但与不采用斜孔挡墙比较,中包内最大温差仅为 12 K,各出口温度近似相等。

根据焓耗散极值理论^[3],当热流固定时,焓耗散越大,传递的热量越多,温差越大,反之,要得到较小的温差,应使焓耗散取较小的值。当中包内安

装斜孔挡墙后,整个中包内的焓耗散为 $9.62 \times 10^4 J \cdot K / (m^3 \cdot s)$,比不采用斜孔挡墙降低了 57.6%,这与温度场的变化及 RTD 分析结果是一致的。

4 结论与展望

(1)根据场协同理论与焓耗散极值原理,中包内钢液流场与温度梯度场间的场协同角趋于 90° 或 270° 时,钢液温度分布越均匀,焓耗散值越小。

(2)不安装控流装置的多流中包,大部分区域钢液流场与温度梯度场间的协同程度高,温度梯度大,温度分布不均匀,最大温差达 27 K 左右,出口最大温差为 3 K,总区域内焓耗散值较大,不同出口的 RTD 曲线相差较大。

(3)多流中包内设置斜孔挡墙后,大部分区域钢液流场与温度梯度场间的协同程度降低,温度分布较均匀,最大温差为 12 K 左右,各出口最大温差仅为 0.3 K,总区域内焓耗散值降低了 57.6%,不同出口的 RTD 曲线相差不大。

(4)采用场协同理论与焓耗散分析中包内控流装置对流场与温度分布的影响,取得了与 RTD 曲线分析一致的结果。因此,焓耗散极值原理可用于中包控流装置的优化设计,以实现温度的均匀分布。

国家科技攻关计划项目资助(2005BA325C)

973 计划前期研究专项资助(2009CB626605)

参考文献

- 1 郑淑国,朱苗勇.多流连铸中包各流流动特性一致性的判别.过程工程学报,2006,6(4):522
- 2 过增元.换热器中的场协同原则及其应用.机械工程学报,2003,39(12):1
- 3 过增元,梁新刚,朱宏晖.焓—描述物体传递热量能力的物理量.自然科学通报,2006,16(10):1288
- 4 Chen Qun, Ren Jianxun, Meng Ji-an. Field Synergy Equation for Turbulent Heat Transfer and its Application. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50, 5334
- 5 Morales Lpez-Ramfrez R D, Palafox-Ram J, Zacharias S D. Numerical and Modeling Analysis of Liquid Steel in a Tundish of Fluid Flow and Heat Transfer with Different Flow Control Devices. ISIJ International, 1999, 39(5):455
- 6 张美杰,汪厚植,黄 奥.气幕挡墙中包钢水流动的数值模拟.特殊钢,2006,27(1):30

张美杰(1972-),女,博士,副教授,武汉科技大学毕业,工业炉内流场仿真模拟和优化,窑炉设计和改造。

收稿日期:2009-02-20