

板坯连铸结晶器铜板温度场的数值仿真

冯 科

徐楚韶 陈登福 陈光碧

(中冶赛迪工程技术股份有限公司炼钢室, 重庆 400013) (重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要 针对 1 400 mm × 170 mm 板坯连铸机结晶器铜板的结构优化改造, 基于控制容积的有限差分方法对改造前后两种铜板结构参数和深入式水口结构参数条件下结晶器铜板的三维稳态温度场进行了数值仿真研究。由仿真得出的结果表明, 结晶器宽面铜板经优化改造后(螺栓间距由 160 mm 改成 135 mm、冷却水槽由 63 条改为 55 条)传热效果明显增强: 在拉速为 1.4 m/min 时弯月面附近区域改造后结晶器内弧和外弧宽面热面铜板最高温度值分别比改造前结晶器降低了 15 °C 和 16 °C。

关键词 板坯连铸 结晶器铜板 温度场 仿真

Numerical Simulation of Temperature Field of Mould Copper Plate for Slab Continuous Casting

Feng Ke

(Department of Steelmaking, CISDI Engineering Co Ltd, Chongqing 400013)

Xu Chushao, Chen Dengfu and Chen Guangbi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract In accordance with optimum revamping of structure of mould copper plates for a 1400mm X 170mm slab caster, a numerical simulation for 3- dimensional temperature fields of mould copper plates with two kinds of copper plate and immersed nozzle structure parameters before and after revamping has been studied by finite difference control volume method. The results obtained by simulation showed that the heat transfer effects of copper plate for wide face of mould obviously increased by optimum revamping with bolts gap modified from 160mm to 135mm and cooling water channel number modified from 65 to 55, with casting speed 1.4 m/min, at region nearby meniscus, the maximum temperature of inner and out curved wide face copper plate of mould after revamping respectively decreased by 15 °C and 16 °C as compared with that of mould before revamping.

Material Index Slab Continuous Casting, Mould Copper Plate, Temperature Field, Simulation

作为一次冷却区, 结晶器是板坯连铸机中一个关键性的传热区域, 钢液的凝固潜热及显热大部分散失在该区域, 且随着以高拉速为核心的高效连铸技术的不断发展, 结晶器的工作环境更加恶劣。为尽量延长结晶器的使用寿命、稳定连铸机的操作和保证铸坯的生产质量, 必须对结晶器铜板的材质和结构进行合理设计以确保均匀强化冷却。在影响结晶器铜板传热效果的众多因素之中, 当铜板材质选定之后, 冷却水槽结构参数是最为重要的一个环节, 此外, 拉坯速度也具有较为明显的影响效果。应用数值仿真技术, 可以方便灵活地对各种冷却水槽结构参数设计条件下和不同的拉坯速度条件下结晶器铜板的传热特性进行研究, 为结晶器铜板结构的优化设计提供了一种有力的手段。

1 研究对象概述

在板坯连铸机结晶器铜板的结构优化改造中, 对改造前后的两种铜板结构参数和深入式水口结构参数条件下结晶器铜板的三维稳态温度场进行了数值仿真研究, 另外还讨论了拉坯速度对温度场的影响效果, 考虑到宽面铜板和窄面铜板温度场的数值求解方法相同以及文章篇幅所限, 此处仅对宽面内外弧铜板的仿真结果进行了分析说明。结晶器的断面尺寸为 1 400 mm × 170 mm, 其实际长度和有效长度分别为 840 mm 和 740 mm (即认为弯月面至结晶器顶部距离为 100 mm), 结晶器铜板优化改造前后的相关参数列于表 1 中, 对于表中的水槽断面尺寸一项应注意到, 对于优化后的结晶器铜板来说, 在螺栓两侧的水槽深度

表 1 改造前后结晶器铜板的结构参数

Table 1 Structure parameters of mould copper plate before and after revamping

结晶器铜板	螺栓间距/ mm	螺栓型号	冷却水 槽条数	水槽断面 尺寸/mm
宽面	优化前	160	60-M30×1.5	63
	优化后	135	72-M30×1.5	55
窄面	优化前	117	12-M24×1.5	9
	优化后	80	12-M24×1.5	7

与螺栓高度取为相同值,即由通常的 20 mm 增大至 24 mm。

考虑到结晶器的弧度,其厚度在高度方向上具有一定变化,内弧宽面铜板厚度从上至下由 42.22 mm 逐渐增加至 50.93 mm 再减小至 42.22 mm,外弧宽面铜板厚度从上至下由 49 mm 逐渐减小至 40.43 mm 再增加至 49 mm。结晶器铜板材质为 Cr-Zr-Cu 合金,这三种元素的质量分数大致为 98%、0.5%~1.5% 和 0.05%~0.3%,该合金不仅具有较高的强度和硬度,而且还具有良好的导电性、导热性、耐磨性和耐蚀性,是目前已知的制作结晶器铜板的一种较为理想的合金材料。为加强表面硬度、提高耐磨性和延长使用寿命,结晶器铜板采用 Ni-Fe 合金电镀工艺,镀层厚度的确定基于结晶器上部区域加大导热性、下部区域增强耐磨性这一原则,其设计值分别为 0.5 mm(上部)和 1.5 mm(下部),考虑到合金镀层对铜板传热的影响,上部和下部区域热阻分别增加约 4.5% 和 20%。

结晶器总体冷却用水量为 389 t/h,其中宽面铜板内外弧冷却用水量均为 170 t/h,结合铜板的冷却水槽结构参数可以推导出各冷却水槽相应的冷却水流速,对于新老结晶器宽面铜板来说,计算获得的冷却水槽流速分别为 8.585 m/s 和 7.495 m/s。铸机的典型拉坯速度为 1.2 m/min 和 1.4 m/min,浇铸温度的变化范围为 1 525~1 540 ℃,冷却水进出结晶器的温度差变化范围为 6~9 ℃,数值仿真研究中不妨考虑取上限值,另外,浇铸钢种为 Q235 普碳钢。

2 模型简化假设

实际的板坯连铸生产过程具有复杂的边界条件和工艺条件,几乎不太可能对其进行完全精确的解析求解,在推导结晶器铜板传热的控制微分方程之前,通常都必须针对具体的研究对象作出

一些合理的假设。本文根据板坯连铸的实际工艺特点,提出了以下几点简化及假设条件:

(1) 不考虑连铸过程中拉坯速度的波动和变化,结晶器铜板的三维温度场近似视为稳态值,且在笛卡尔直角坐标体系下对问题进行描述;

(2) 考虑到结晶器铜板结构的对称性,数学模型中宽面铜板温度场的三维计算域空间取为一个具有代表性的螺栓间距宽度;

(3) 冷却水槽与铜板交界面之间的传热系数在整个结晶器高度方向上保持恒定,冷却水温度从水槽入口至出口的温度保持线性变化形式;

(4) 结晶器铜板的合金镀层和固定螺栓处理为相同形状的铜板,但要考虑合金镀层在铜板上、下部对传热的影响效果(与其厚度有关);

(5) 忽略结晶器振动和自由液面波动对铜板传热的影响;

(6) 忽略结晶器铜板顶部和底部表面及其与支承板相接触的后背面的热流效应。

3 数学模型描述

3.1 控制守恒方程

结晶器铜板的三维稳态传热可视为简单的单相传导传热过程,模型中以温度 T 为控制变量,则其控制微分方程表达如下(笛卡尔直角坐标系):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中: x 、 y 和 z 分别代表结晶器铜板的宽度、厚度和高度方向。

3.2 传热边界条件

(1) 结晶器热面铜板与铸坯的接触面。该接触面的热流密度 q 满足以下关系式,即:

$$q = -\lambda_{Cu} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

式中: n 为接触面的法线方向,对于宽面铜板,则 $n = y$ 。

在弧型结晶器中,由于铸坯外弧与结晶器壁接触更紧密,传热应较大一些。沿结晶器高度方向上,钢水凝固壳的厚度逐渐增加,局部热流密度呈下降趋势。随着拉速的提高,相同凝固壳厚度在结晶器内的位置逐渐下移。为确保计算的精确性,在数学模型中采用铸坯断面在结晶器内的停

留时间 τ 作为参考变量,对结晶器高度上的热流密度 q 进行了分段计算^[1]。

(2) 结晶器冷却水与铜板水槽之间的接触面。该接触面的热流密度计算式如下:

$$q = h_w \cdot (T - T_w) = -\lambda_{cu} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3)$$

式中: h_w -接触面传热系数,单位 $W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}$,可根据经验式来加以确定^[2],即:

$$h_w = 0.023 \cdot \left(\frac{D \cdot v_w \cdot \rho_w}{\mu_w} \right)^{0.8} \cdot \left(\frac{c_w \cdot \mu_w}{\lambda_w} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\lambda_w}{D} \right) \quad (4)$$

式中: D -冷却水槽(简化为方形断面)的当量直径,对于宽面铜板的多数冷却水槽以及固定螺栓两侧的冷却水槽来说,其当量直径分别为 11.287 mm 和 12.364 mm; v_w -冷却水槽流速,其值在第一节中已作说明; ρ_w -冷却水密度,且满足 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ_w -结晶器冷却水的动力粘度,且满足 $\mu_w = 1.02 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$; λ_w -冷却水导热系数,且满足 $\lambda_w = 0.59854 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ 。

基于(4)式并结合新老结晶器铜板各自的冷却水槽流速,可得出相应接触面的传热系数,即:对于新结晶器铜板,其多数冷却水槽以及固定螺栓两侧冷却水槽的接触面传热系数分别为 $64483 \text{ W} \cdot ^\circ \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $63319 \text{ W} \cdot ^\circ \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$;而对于老结晶器铜板,其冷却水槽的接触面传热系数为 $57846 \text{ W} \cdot ^\circ \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(3) 结晶器铜板的冷面(与冷却水槽无接触)和侧面以及顶部和底部表面。可以认为这些面没有发生热交换。

3.3 数值离散方法

本文基于控制容积有限差分方法,对结晶器

铜板传热数学模型的控制微分守恒方程进行了数值离散处理^[3]。文中采用非均匀网格形式对结晶器宽面铜板的计算域进行了离散处理,新老结晶器宽面铜板的计算域所划分的网格单元数分别为 28 644($31 \times 11 \times 84$)和 37 884($41 \times 11 \times 84$),模型的求解过程中采用简单的高斯-赛德尔逐点迭代方法来计算各离散控制单元的温度值,且初始温度场赋值为环境温度 20°C 。

4 仿真计算结果

通过数值仿真运算,对于 1.2 m/min 和 1.4 m/min 两种典型的拉速条件下,针对结构优化前后的结晶器铜板分别获得了其相应的宽面铜板宽度、厚度及高度方向上温度的变化情况。仿真表明,新老结晶器宽面铜板具有变化规律相似的对称温度分布,新结晶器铜板温度较之老结晶器有一定程度的降低,温度波动情况明显有所改善(曲线的变化趋势相对趋于平缓),且铜板温度随拉速增加而增大(热面铜板的变化更为明显)。宽面铜板宽度中心点处(即对应于计算域内螺栓中心线的位置)温度明显高于两侧,对于拉速 1.4 m/min 时的新老结晶器弯月面处内弧和外弧宽面各自对应的热面温度最大差异值分别为约 14°C 和 15°C ,且所对应的冷面温度最大差异值则分别为约 6.6°C 和 7.0°C 。内弧与外弧宽面铜板之间的温度差别并不太大,对于热面和冷面铜板,其最大差值分别约为 2.8°C 和 1.6°C 。另外,冷却水槽的排列方式造成冷面温度呈波浪形分布,曲线中的最低点即对应于冷却水槽所处的位置。

从图 1 中可以看出,相同条件下新老结晶器的温度分布曲线具有相似的变化规律,对于热面

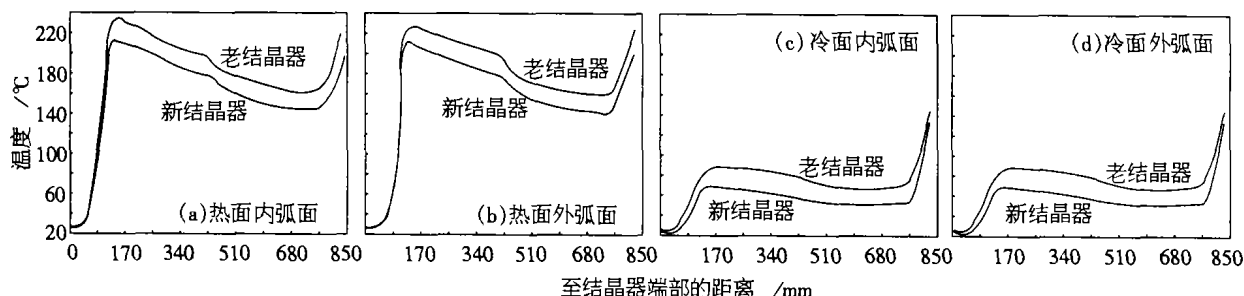


图 1 宽面铜板热面(a,b)和冷面(c,d)中心点温度在结晶器高度方向上的分布

Fig.1 Temperature distribution of center point of hot face (a,b) and cold face (c,d) for wide face copper plate of mould along height direction

铜板,相应位置处内弧面温度较高,而对于冷面铜板,则外弧面温度较高,且新结晶器对应的温度分布曲线均位于老结晶器的下方,拉速 1.4 m/min 时弯月面附近区域新结晶器内弧和外弧宽面热面铜板最高温度值分别比老结晶器降低了 15 °C 和 16 °C,较之热面铜板,新老结晶器冷面铜板温度的变化趋势则显得相对平缓。另外,内弧和外弧铜板温度在结晶器高度方向上具有相似的变化情况,相应于结晶器高度方向上热流密度先增大后减小的变化趋势,热面及冷面铜板温度同样呈现先升高后降低的变化趋势。且随着拉速的提高,相应的铜板温度也有所增加。在结晶器顶部 100 mm 区域内热面铜板温度上升速度较快且冷面铜板温度升幅相对较缓,在结晶器出口处附近,由于冷却水槽的长度稍短,故铜板温度会有较大回升。

从图 2 中可以看出,相同结晶器高度位置处从热面铜板至冷面铜板,温度逐渐降低,且在冷却水槽周围各接触面温度均低于 70 °C,因此冷却水不会产生沸腾。另外,结晶器铜板优化改造之后的冷却效果有所增强,拉速 1.4 m/min 时新老结晶器弯月面处内弧和外弧宽面的热面温度最大差异值分别约 15 °C 和 16 °C,且铜板温度同样随着拉速的提高而有所增加。

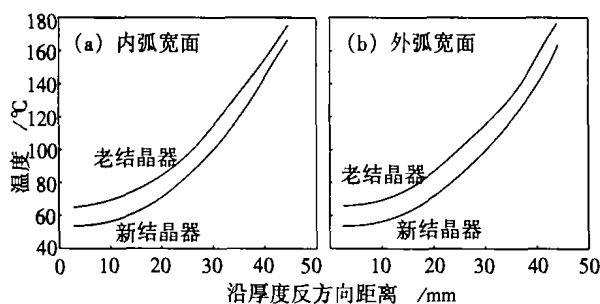


图2 弯月面处宽面铜板宽度中心点温度在厚度方向上的分布

Fig.2 Temperature distribution of center point of width for wide face copper plate of mould at meniscus along thickness direction

1.2 m/min 拉速下各温度分布曲线接近 1.4 m/min 拉速下的各温度分布曲线。

文献[4]中同样针对板坯结晶器铜板温度场进行了数值仿真运算及实验测试对比,其获得的宽面铜板相应温度场与本文的仿真结果相比较,具有非常相似的变化规律,且两者之间的差别仅在于所模拟对象的具体条件(包括铜板宽度和厚

度、拉速、冷却水量及水槽结构)以及仿真计算中所采用的热流条件有所不同,说明本文采用的结晶器铜板温度场的数值仿真研究方法具有一定的合理性。

由上述仿真获得的温度场结果及分析不难看出,结晶器宽面铜板在进行了结构优化改造之后的传热效果有了比较明显的增强且冷却更为均匀,在相同工艺条件下(包括冷却水量和拉速)其热态工作环境有所改善,有利于延长结晶器铜板的使用寿命。

5 结论

(1) 结晶器宽面铜板温度场在不同的拉速条件下具有相似的分布规律,但随着拉速的增加,相应位置处铜板温度值有所升高,且热面温度的变化趋势较之冷面更为剧烈。

(2) 在结晶器高度方向上,铜板温度在弯月面处大幅增加,在弯月面以下附近区域则处于高温区,随着拉坯距离的继续增加,铜板温度总体上呈下降趋势,且在结晶器下部水槽以外部分,由于冷却效果减弱,铜板温度会有较大程度的回升。

(3) 在相同的拉速条件下,结构优化改造后的结晶器铜板相应位置处所对应的温度值较之改造前的结晶器铜板有了明显的降低,且热面温度的变化更为显著,说明结晶器铜板改造后的传热效果明显增强,冷却状况更为均匀,其热态工作环境具有较大改善。

参考文献

- 冯科.Q235钢方坯高拉速连铸二次冷却制度的研究[硕士论文].重庆大学材料科学与工程学院,2000
- Ferreti A, Podrini M, Schino G D. Submerged Nozzle Optimization to Improve Stainless Steel Surface Quality at Terni Steelworks. In: Steel-making Conference Proceedings. Detroit: AIME 1985:49-57
- 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算(第一版).北京:科学出版社,1984
- 钢铁研究总院,北京冶金设备研究院,西安重型机械研究所,攀枝花钢铁公司.高拉速连铸结晶器关键技术研究.国家“九五”重点科技攻关课题《高效板坯连铸技术研究》专题研究报告.1999

冯科,男,30岁,博士。主要从事连铸冶金过程中凝固传输现象的数值仿真研究。

收稿日期:2004-07-15