

ASP 连铸结晶器铜板热流和温度的研究

李秀刚 赵紫峰 王新华 张炯明

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要 根据在线实测的铜板温度以及 ASP (Angang Strip Production) 板坯连铸机冷却参数, 建立了 ASP 板坯结晶器 (高 1 000 mm, 铸坯断面 170 mm × 2 000 mm) 铜板传热模型以计算结晶器热流密度的分布函数和得出结晶器热流密度与结晶器高度的关系式。结果表明, 铜板温度和热流密度的分布具有相似的规律性, 结晶器内、外弧铜板宽度方向上中心和角部的热流波动分别约为 400 kW/m² 和 200 kW/m², 其温度差分别约为 30 °C 和 20 °C。

关键词 ASP 工艺 结晶器 温度 热流

A Study on Heat Flux and Temperature of ASP Concasting Mould Copper Plate

Li Xiugang, Zhao Zifeng, Wang Xinhua and Zhang Jiongming

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract According to measured copper plate temperature and cooling parameters of ASP (Angang Strip Production) slab caster at situ, a heat transfer model for ASP slab mould (height 1 000 mm, slab cross-section 170 mm × 2 000 mm) has been established to calculate the distribution function of mould heat flux and get the relational expression between heat flux and height of mould. Results show that the distribution of copper plate temperature is similar to that of heat flux; the fluctuations of heat flux between loose and fix copper plate at center and edge of mould wide direction are respectively about 400 kW/m² and 200 kW/m², of which the differences of temperature are respectively about 30 °C and 20 °C.

Material Index ASP Process, Mould, Temperature, Heat Flux

结晶器局部热流量较平均热流量更能反映结晶器钢水的凝固过程。连铸坯结晶器出口的凝固坯壳厚度, 坯壳的凝固组织均是由结晶器壁的热流量所控制。因此, 研究结晶器壁热流量 (局部热流量) 对实际生产有重要的指导意义, 而且在结晶器内钢水凝固过程的计算中, 多是采用局部热流量作为计算的边界条件。

1 计算方法和模型

在结晶器铜板上埋设热电偶, 第 1 排热电偶距结晶器顶面为 210 mm, 第 2 排热电偶距结晶器顶面为 325 mm, 第 3 排热电偶距结晶器顶面为 445 mm, 以测量铜板温度。

沿结晶器相同高度上, 在同一深度仅测得一点结晶器铜板的温度。因此, 不可能直接将结晶器铜板温度转化为热流量, 需利用数学模型进行计算, 最终得到经过验证的合理局部热流量。

1.1 基本假设条件

在建立数学模型时做如下假设: (1) 结晶器铜板、冷却水及连铸坯之间的传热为稳态, 即验证数学模型所用的结晶器铜板温度为某段时间内的平均值; (2) 根据现场观察, 完全可忽略结晶器水缝冷却

水的核态沸腾; (3) 假定水缝内冷却水为塞流, 并忽略冷却水与冷却水箱背板之间的传热; (4) 由于结晶器宽面铜板的宽度较大, 在计算传热时完全可以转化为二维传热, 在高度相同时, 结晶器窄面铜板横向温差较小, 计算铜板温度也可简化为二维来处理; (5) 认为结晶器铜板自上而下都有水缝。

1.2 基本传热方程

(1) 结晶器铜板内的传热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right] = 0 \quad (1)$$

式中: $\lambda(T_m)$ - 结晶器铜板的导热系数, 是温度的函数/[J · (s · °C · m)⁻¹]; T_m - 结晶器铜板温度/°C。

(2) 边界条件。结晶器铜板的顶面和底面:

$$\frac{\partial T_m}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\text{铜板的热面: } y < y_0, q(z) = 0 \quad (3)$$

$$y > y_0, \frac{\partial T_m}{\partial x} = q(z) \quad (4)$$

式中: y_0 - 弯月面距结晶器顶面的距离/m。

铜板冷面: $\lambda \frac{\partial T_m}{\partial z} = -h_w [T(x, z) - T_w]$ (5)

1.3 参数的确定

水缝中冷却水与铜板之间的换热系数为:

$$h_w = 0.023 \times \frac{\lambda_w}{d_w} \times \left(\frac{\rho_w u_w d_w}{\mu_w} \right)^{0.8} \left(\frac{c_w \mu_w}{\lambda_w} \right)^{0.4}$$
 (6)

式中: λ_w - 冷却水导热系数/[W · (m · °C)⁻¹]; d_w - 冷却水缝水力直径/m; ρ_w - 冷却水密度/(kg · m⁻³); u_w - 冷却水流速/(m · s⁻¹); μ_w - 冷却水粘度/[N · (s · m⁻²)]; c_w - 冷却水比热容/[J · (kg · °C)⁻¹].

本文将计算域化为 52 × 202 个网格, 区域离散化时采用内节点法, 控制容积边界面的物性参数采用调和平均进行插值。采用 5 点差分格式对控制方程公式(1)和边界条件公式(2) ~ (6) 进行离散化, 然后用 VC++ 编制计算机程序, 进行求解。采用欠松弛(松弛因子 $\alpha = 0.8$) ADI 交替隐式迭代, 约迭代 700 步, 节点最终两步迭代最大绝对误差为 0.000 01, 所有节点的总迭代误差为 0.000 2。首先

假定结晶器铜板热面热流为某一分布, 经过数学模型计算出铜板及冷却水的温度分布, 与铜板相应点热电偶温度的实测值进行比较, 如满足要求(计算值与实测值温度之差的绝对值小于 0.5 °C), 停止计算, 否则, 重新调整结晶器热面热流, 再进行计算, 直至最终满足要求。结晶器参数见表 1。

表 1 结晶器工艺参数
Table 1 Process parameters of Mould

项目	参数
结晶器高度/mm	1 000
铸坯断面尺寸/(mm × mm)	170 × 2 000
拉速/(m · min ⁻¹)	1.3
宽面水流量/(m ³ · h ⁻¹)	324
窄边水流量/(m ³ · h ⁻¹)	26

2 结果分析和讨论

2.1 结晶器各面热流量

图 1、图 2 为计算所得的 1.3 m/min 拉速下结晶器内、外弧铜板角部、1/4 处和中心部位以及结晶器窄面沿结晶器壁纵向的热流量的分布图。

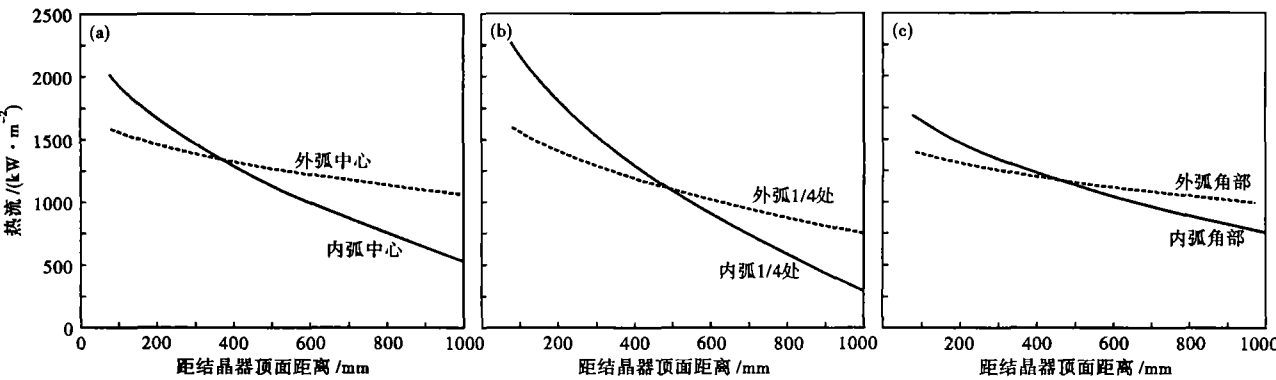


图 1 结晶器纵向宽面内外弧铜板中心(a), 1/4处(b), 角部(c)热流分布

Fig. 1 Longitudinal distribution of heat flux at center (a), 1/4 place (b) and edge (c) of mould wide direction of loose and fix copper plate

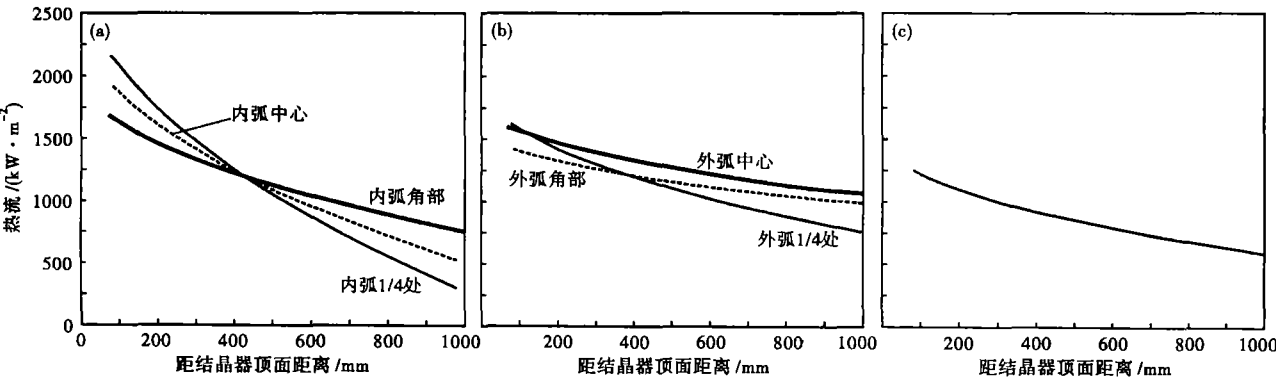


图 2 结晶器纵向宽面内弧(a), 外弧(b)和窄面铜板(c)的热流分布

Fig. 2 Longitudinal distribution of heat flux of mould wide loose side (a), fix side (b) and mould narrow side (c) copper plate

结晶器壁热流量分布基本上服从平方根定律。结晶器上部两宽面的热流相差较大,在结晶器弯月面处内、外弧的热流相差最大,中心内弧与外弧的热流相差约 400 kW/m^2 ,角部内弧与外弧的热流均相差 200 kW/m^2 ,1/4处内弧与外弧热流相差更是高达 550 kW/m^2 。但是,结晶器内弧铜板热流沿结晶器纵向变化较外弧大,在距结晶器顶面 $\leq 400 \text{ mm}$,结晶器外弧铜板的热流逐渐高于内弧铜板。内弧铜板中心与角部的热流相差较大,达到 400 kW/m^2 ;外弧铜板中心到角部的热流相差较小,约为 200 kW/m^2 ,而且沿结晶器纵向热流变化趋势较小。结晶器窄面

铜板热流较小,在弯月面处热流约为 1250 kW/m^2 。

2.2 结晶器铜板温度

由图3、图4可见,从结晶器顶面往下,随着距离的增大,结晶器内外弧铜板的冷、热面温度升高,热面与冷面的温度差增大,在弯月面附近,结晶器铜板的冷、热面温度达到最高。其中,内弧铜板热面横向中心、1/4、角部位置处温度分别为 $220, 240, 190^\circ\text{C}$;外弧铜板热面横向中心、1/4、角部位置处温度分别为 $195, 295, 175^\circ\text{C}$;窄边铜板热面温度为 155°C 左右,冷面温度为 85°C 左右。而后,温度逐渐降低。此外,结晶器铜板热面温度比冷面温度高 $40 \sim 80$

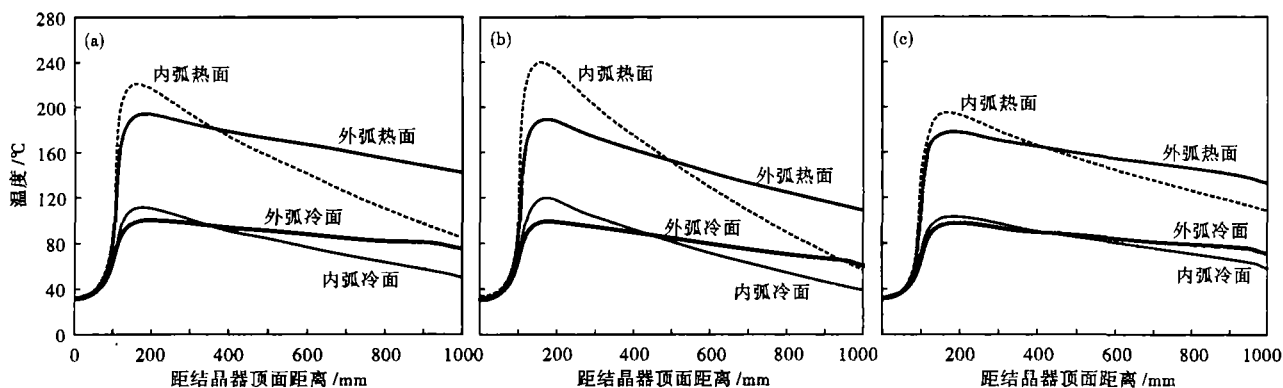


图3 结晶器纵向内外弧铜板冷、热面横向中心(a)、1/4处(b)、角部(c)的温度分布

Fig.3 Longitudinal distribution of temperature at center (a), 1/4 place (b) and edge (c) of mould cold and hot side across direction of loose and fix copper plate

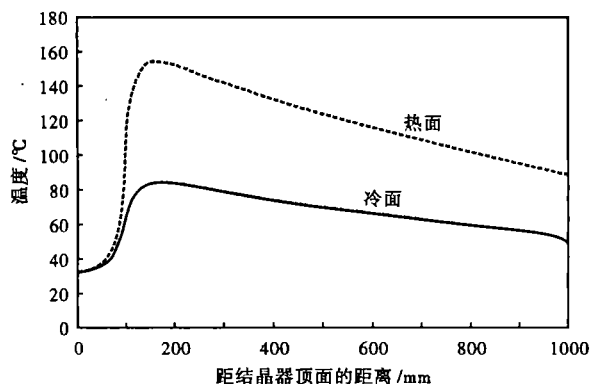


图4 结晶器纵向右侧窄面铜板冷、热面温度分布图

Fig.4 Longitudinal distribution of temperature of mould right copper plate narrow face cold and hot side

$^\circ\text{C}$ 。结晶器内、外弧铜板热面横向上温度波动约 30°C 。

3 结论

(1)内弧铜板热流沿结晶器纵向变化较外弧大,在结晶器弯月面处内、外弧的热流相差最大,在

$200 \sim 550 \text{ kW/m}^2$ 。结晶器内、外弧铜板中心到角部的热流差分别约为 400 kW/m^2 和 200 kW/m^2 。

(2)从结晶器顶面往下,随着距离的增大,结晶器内外弧铜板的冷、热面温度升高,热面与冷面的温度差增大,在弯月面附近,结晶器铜板的冷、热面温度达到最高,而后,温度逐渐降低。

(3)结晶器内外弧铜板温度相差不大,而结晶器内外弧铜板的冷面与热面温度相差 $40 \sim 80^\circ\text{C}$ 。结晶器内弧铜板温度横向上波动在 30°C 左右,外弧铜板温度横向上波动在 20°C 左右。

(4)结晶器宽面铜板的温度高于其窄面的温度,结晶器宽面铜板热面温度更是明显高于窄面铜板的热面温度。

李秀刚(1978-),男,博士生,北京科技大学,钢的冶炼及连铸研究。

收稿日期:2008-05-04