

板坯连铸结晶器热流量分布的研究*

张炯明¹⁾ 张立²⁾ 王新华¹⁾ 王立峰¹⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

2) 上海宝山技术中心新技术研究所, 上海 201900

摘要 利用结晶器拉漏预报的热电偶所测的结晶器铜板的温度, 采用数值模拟方法对连铸结晶器壁的热流量进行了计算. 详细给出不同工艺情况下, 结晶器壁铜板温度及瞬时热流量的分布, 并在此基础上对渣圈厚度进行了计算, 详细分析了连铸工艺参数对结晶器铜板温度、瞬时热流量及渣圈厚度的影响.

关键词 数学模型, 瞬时热流量, 铜板温度, 渣圈厚度

中图法分类号 TG249.7

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2003)12-1285-06

STUDY OF HEAT FLUX DISTRIBUTION IN CONTINUOUS CASTING MOLD

ZHANG Jiongming¹⁾, ZHANG Li²⁾, WANG Xinhua¹⁾, WANG Lifeng¹⁾

1) College of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2) New Technology Institute, Bao Steel Company, Shanghai 201900

Correspondent: ZHANG Jiongming, associate professor, Tel: (010)62333614, E-mail: jmz203@sina.com

Manuscript received 2003-04-17, in revised form 2003-06-18

ABSTRACT One mathematical model was used to calculate the local heat flux in mold by using the thermal-couple data of forecast leaking steel in mold. The temperature of copper plate and local heat flux of mold heat face were given under various operated conditions. Based on these calculations, the rim thickness of slag was calculated and the influenced factors on copper plate and local heat flux and rim thickness of slag were analyzed in detail.

KEY WORDS mathematical model, local heat flux, copper plate temperature, slag rim thickness

连铸结晶器铜板埋设热电偶测定结晶器铜板温度原用于拉漏预报, 如果结晶器铜板某处温度突然升高, 表明该处结晶器内的凝固壳有所减薄, 由这一升高的幅度及同一排热电偶温度之差, 并结合人工智能系统可以对漏钢进行预报, 这一技术已被世界上许多钢厂所采用, 如美国内陆钢铁公司, 日本的新日铁钢铁公司, 韩国浦项钢铁公司及我国的宝山钢铁公司都拥有这一技术^[1-3]. 利用结晶器壁铜板温度也可对结晶器壁的热流量进行研究, 文献[1]假设宽面板坯结晶器壁热流量可分为上部、中部及下部热流量三段, 利用结晶器宽面上三排 9 支热电偶的温度, 采用数学模型计算了上部、中部及下部的热流量. Brima-combe 等^[4] 等人在 Stelco Lake Erie 钢厂两流弧形板坯连铸结晶器上埋设 114 支热电偶, 详细地测量了结晶器铜板温度的变化, 并采用相应数学模型计算了结晶器壁的瞬时热流量. 结晶器热面铜板瞬时热流量在我国研究的

比较少, 而我国钢厂板坯连铸结晶器大多采用了热电偶的测量值对漏钢情况进行预报. 本文建立了结晶器铜板的数学模型, 并利用测得国内钢厂的结晶器铜板的热面温度, 对结晶器铜板温度、瞬时热流量及渣圈厚度进行计算.

1 基本方程及边界条件

由于结晶器拉漏预报的热电偶是采用一点测温, 如图 1 所示. 因此, 无法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, 以得到经过验证的合理瞬时热流量.

1.1 基本假设条件

由于结晶器铜板、连铸坯及冷却水之间的传热非常复杂, 因此, 在建立数学模型时, 需要做如下假设: (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, 结晶器窄面铜板

* 收到初稿日期: 2003-04-17, 收到修改稿日期: 2003-06-18

作者简介: 张炯明, 男, 1964 年生, 副教授, 博士

仅有纵向一排热电偶,且在高度相同时,窄面铜板横向温差较小,计算铜板温度也可简化为2维来处理;(5)冷却水水缝的总长度为结晶器铜板长度的92.7%,因此,可认为结晶器铜板自下而上都有水缝。

1.2 基本传热方程及边界条件

(1) 结晶器铜板内的传热微分方程为

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

水缝内冷却水的传热方程为

$$\rho_w u_w C_w l_w \frac{dt_w}{dz} = -h_w(t(x, z) - t_w) \quad (2)$$

式中, λ 为结晶器铜板的导热系数, $J/(s \cdot ^\circ C \cdot m)$; t_m 与 t_w 分别为结晶器铜板温度与冷却水温度, $^\circ C$; ρ_w 为结晶器冷却水密度, kg/m^3 ; u_w 为冷却水流速, m/s ; C_w 为冷却水比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; l_w 为冷却水水缝深度, m ; h_w 为冷却水与结晶器铜板间的换热系数, $J/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

(2) 边界条件

结晶器铜板的顶面

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

结晶器铜板的底面

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

结晶器铜板热面

$$y > y_0 \quad \frac{\partial t}{\partial x} = q(z) \quad (5)$$

$$y < y_0 \quad q(z) = q_{s-Cu} + q_{a-Cu} \quad (6)$$

$$q_{s-Cu} = STB \times VF \times (\varepsilon_s t_s^4 - \varepsilon_{Cu} t_{Cu}^4) \quad (7)$$

$$q_{a-Cu} = STB \times \varepsilon_{Cu} \times (t_a^4 - t_{Cu}^4) \quad (8)$$

式中, q_{s-Cu} 为保护渣与铜板间的辐射热流量, W/m^2 ;

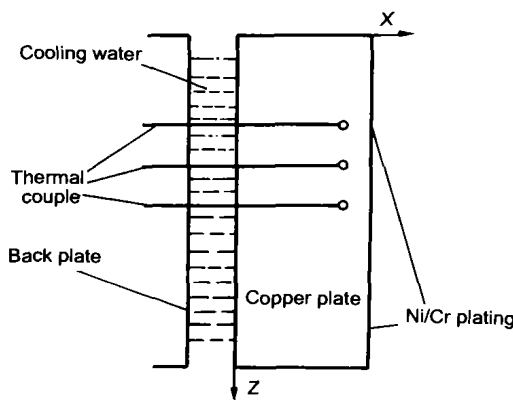


图1 结晶器铜板纵向传热计算示意图

Fig.1 Schematics of calculating longitudinal heat transfer of copper plate

q_{a-Cu} 为空气与铜板间的辐射热流量, W/m^2 ; y_0 为弯液面距结晶器顶面的距离, m ; STB 为 Stefan-Boltzmann 常数; VF 为弯液面上方结晶器铜板热面与保护渣面的角系数; ε_{Cu} 为铜板的黑度; ε_s 为保护渣的黑度; t_{Cu} 为铜板的表面温度, $^\circ C$; t_s 与 t_a 分别为保护渣的表面温度与空气湿度, $^\circ C$ 。

结晶器冷却水背板

$$q(z) = 0 \quad (9)$$

结晶器铜板冷面

$$\lambda \frac{\partial t_m}{\partial z} = -h_w(t(X, Z) - t_w) \quad (10)$$

1.3 参数的确定

计算所选用的参数主要来自文献 [4]: 冷却水缝水利学直径 $d_m = 0.0084 m$, 冷却水比热容 $C_w = 4182 J/(kg \cdot ^\circ C)$, 冷却水的密度 $\rho_w = 998 kg/m^3$, 冷却水的导热系数 $\lambda_w = 0.597 W/(m \cdot ^\circ C)$, 冷却水粘度 $\mu_w = 993 \times 10^{-6} N \cdot s/m^2$, 宽面铜板冷却水流速 $u = 4.0 - 7.27 m/s$, 窄面铜板冷却水流速 $v = 5.09 - 6.25 m/s$, 冷却水缝的长度 $L = 0.838 - 0.854 m$ 。

水缝中冷却水与结晶器铜板之间的换热系数为 [5]

$$h_w = 0.023 \times \frac{\lambda_w}{d_w} \times \left(\frac{\rho_w u_w d_w}{\mu_w} \right)^{0.8} \left(\frac{C_w \mu_w}{\lambda_w} \right)^{0.4} \quad (11)$$

1.4 渣圈厚度的计算

计算时做如下假设: (1) 忽略结晶器振动对结晶器壁热流量的影响; (2) 结晶器弯液面保护渣内的温度分布为稳态; (3) 传热方式仅有传导传热; (4) 忽略保护渣沿拉速方向的传热 (该方向的传热量仅有 $40 kW/m^2$) [6]; (5) 渣圈与结晶器壁间的热阻为一常数, $R_f = 0 - 5 \times 10^{-4} W^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C$, 对计算结果影响很小, 也可以被忽略 [7]; (6) 保护渣的凝固温度为保护渣的软化温度 ($1050 ^\circ C$); (7) 渣圈的导热系数为一常数. 根据 Fourier 定律, 可写出渣圈的传热方程

$$q_f(z) = \frac{t_{f,sol} - t_m(z)}{R_f + \frac{\delta_{rim}}{k_f}} \quad (12)$$

由方程 (12) 可得出渣圈的厚度 δ_{rim} 的计算式

$$\delta_{rim} = \frac{k_f}{q_f(z)} (t_{f,sol} - t_m(z)) - k_f R_f \quad (13)$$

式中, k_f 为结晶器保护渣的导热系数, 为 $2.0 W/(m \cdot ^\circ C)$; $q_f(z)$ 为渣圈到结晶器壁的热流, 由数学模型计算; $t_{f,sol}$ 为保护渣的凝固温度, 为 $1050 ^\circ C$; $t_m(z)$ 为结晶器壁的热面温度, 可由数学模型计算; 渣圈与结晶器壁间的热阻 $R_f = 2 \times 10^{-4} W^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C$; z 为距弯液面的距离, m 。

利用编制的计算机程序, 在计算完结晶器壁的热面热

流量后, 就可以计算出弯液面附近的渣圈厚度.

2 计算结果分析

根据 1.2 中的基本方程及相应的边界条件, 采用数值计算的方法, 计算出各情况下, 结晶器壁的热流分布 (瞬时热流量). 计算时选用了国内某一钢厂连铸机的数据.

2.1 结晶器热流量及铜板温度的分布

图 2 为利用现场收集的数据, 采用数学模型计算得到某厂结晶器沿纵向结晶器壁的热流量的分布. 可以看出, 结晶器壁热流量分布基本上服从平方根定律, 南、北两宽面的热流明显高于东、西两窄面的热流. 北面热流平均较东、西面高 420 kW/m^2 ; 而南面弯液面热流与东、西面较接近, 随距结晶器顶面距离的增加, 其热流与东西面相差逐渐变大, 当距结晶器顶面为 600 mm 时, 南面热流与东、西面之差达到最大值 (350 kW/m^2), 其差值随距结晶器顶面距离的增加变化不大. 南、北两面的热流相差较大, 特别是在距结晶器顶面 272 mm (第一排热电偶) 以上, 在弯液面处南北两面的热流相差为最大 (380 kW/m^2), 北、南铜板两面平均相差为 130 kW/m^2 . 东、西两面的热流基本没有变化, 东、西两面热流平均相差仅有 25 kW/m^2 , 而在结晶器出口处相差为最大, 最大值也仅为 75 kW/m^2 .

图 3a—d 分别为结晶器东、西、北、南四面铜板的等温线. 可以看出, 结晶器各面铜板温度分布与相应的热流分布相一致, 东窄面铜板的温度分布与西窄面的分布相差不大, 只是由于西面的冷却水量及冷却水进出口温差较东面高, 尽管东面铜板的热流略高于西面, 但整个西面铜板温度却高于相同位置的东面铜板温度; 北、南两宽面铜板温度分布相差较大, 北面铜板热面 (工作面) 附近上半部的温度高于相同位置的南面铜板近 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 北面铜板热面附近下半部的温度也高于南面铜板相同位置 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上.

图 4 为结晶器南、北宽面铜板的冷、热温度分布. 可以看出, 南、北两宽面热面的温度相差较大, 南、北两宽面的平均温差为 $12.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 最大温差达 $32 \text{ }^\circ\text{C}$, 但南北两个冷面温度却相差不大, 冷面温度也较低, 最高处冷面温度为北面在距结晶器上口 180 mm 处, 仅为 $158 \text{ }^\circ\text{C}$. 值得注意的是在距结晶器顶面 404 mm 处, 南北铜板的热面

温度有很大的回升, 最高回升温度达 $43 \text{ }^\circ\text{C}$ (北面铜板). 造成这种现象的原因是由于在距结晶器顶面 404 mm 处镀 Ni 层厚度由 0.5 mm 增加到 3 mm , 使结晶器壁的热阻明显增加, 从而增加了结晶器铜板热面温度. 从理论上讲, 由于结晶器铜板温度的突然升高, 易使镀 Ni 层突然变厚处的应力集中, 发生镀 Ni 层的剥落, 此处是实际生产的薄弱环节, 建议能否采用以某种曲线 (抛物线) 形式过渡镀 Ni 层, 不易采用突然将镀 Ni 层由 0.5 mm 增至 3 mm .

2.2 拉速对结晶器壁热流量及渣圈厚度的影响

选定含碳量为 0.08% 钢液, 断面为 ($1200 - 1250$) $\text{mm} \times 230 \text{ mm}$ 的结晶器, 研究拉速对结晶器壁热流量的影响, 如图 5a, b 所示. 可以看出, 结晶器壁宽面热流明显高于窄面热流, 并随着拉速的增加, 结晶器壁各面的热流量增大, 拉坯速度由 0.9 m/min 增加到 1.44 m/min , 结晶器宽面热流平均增加了 370 kW/m^2 , 在弯液面处热流增加最大, 为 522 kW/m^2 , 窄面热流平均增加了 340 kW/m^2 , 在弯液面处热流增加最大, 为 530 kW/m^2 . 由于实测到拉速为 1.1 m/min 的热电偶温度第一排温度与拉速为 1.44 m/min (时间持续很短) 相差不大 (相差仅 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右), 使得在两种情形下, 结晶器上部热流相差不大.

图 6a, b 为拉速对宽面 (外弧)、窄面 (西面) 弯液面处渣圈厚度的影响. 由此可见, 随着拉速的提高, 弯液面处的渣圈厚度有所降低, 拉速由 0.9 m/min 增加到 1.4 m/min , 宽面 (外弧) 的渣圈厚度平均由 0.78 mm 降至 0.48 mm , 降低了 0.3 mm ; 窄面 (西面) 弯液面附近的渣圈厚度平均由 1.78 降至 0.86 mm , 降低了 0.92 mm , 且随距弯液面距离的增加拉速为 0.9 m/min 的窄面渣圈较厚为 2.7 mm . 拉速由 0.9 m/min 增加到 1.4 m/min , 负滑脱时间有所减小, 从 0.13 s 减小到 0.074 s (负滑脱率从 77.3% 降低到 73.1%), 弯液面处结晶器壁的热流量及结晶器壁铜板温度随拉速的升高也有所增加, 降低了弯液面处的保护渣的粘度, 这些原因都会使铸坯振痕深度有所降低.

2.3 钢中 C 含量对结晶器壁热流量及渣圈的影响

选定拉坯速度为 $1.0 - 1.04 \text{ m/min}$, 浇注温度为 $1530 \text{ }^\circ\text{C}$, 来研究钢液含碳量对结晶器窄面 (西面) 铜板热流量影响, 如图 7a 所示. 由图可见, 在结晶器弯液面附近, 含碳量为 0.25% 钢液的结晶器壁窄面热流最小, 这是由于浇注时钢水的过热度较其它含碳量的低. 在距弯液面 260 mm 以下, 含碳量为 0.1% 时结晶器窄面的热流量为最低, 这主要是由于该钢种发生包晶相变, 从而在铸坯与结晶器壁之间出现气隙, 使结晶器窄面热流量降低, 含碳量为 0.1% 时结晶器窄面热流量与含碳量为 0.25% 时结晶器窄面热流量相差不大, 平均相差仅为 50 kW/m^2 左右, 超低碳钢的结晶器窄面的热流量明显高于其它钢中

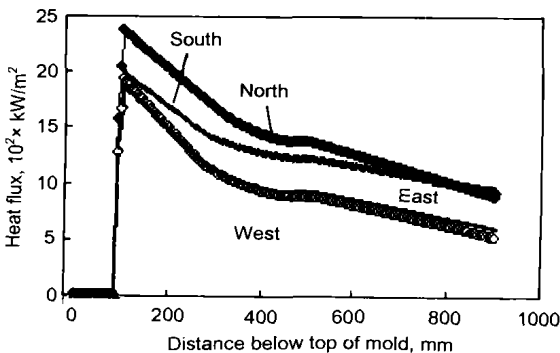


图 2 结晶器壁纵向热流分布

Fig.2 Lognitudinal heat flux distributions in mold

的结晶器窄面的热流量, 对含碳量为 0.006% 钢, 结晶器窄面的热流量平均分别较含碳量 0.1%, 0.25% 时结晶器窄面热流量高 450 kW/m², 390 kW/m², 造成这种现象的原因就是超低碳钢的结晶器冷却水流量是其它钢种冷却水流量的 1.3—1.4 倍. 图 7b 为钢液碳含量对结晶器窄面 (西面) 弯液面处渣圈厚度的影响. 由图可见, 碳含量为 0.1% 和 0.006% 时, 结晶器弯液面处的渣圈厚度基

本相同, 仅差 0.02 mm, 而当碳含量为 0.25% 时, 弯液面处的渣圈厚度有明显的增加, 增加了 0.25 mm, 这主要是由于碳含量为 0.25% 的钢液浇注温度 (1522 °C) 相对低些 (0.1% 的浇注温度为 1542 °C, 0.006% 的浇注温度为 1550 °C), 造成弯液面附近钢液温度及热流量也较低, 导致相应的渣圈厚度较薄.

碳含量对铸坯振痕的影响是非常复杂的, 特别是碳含

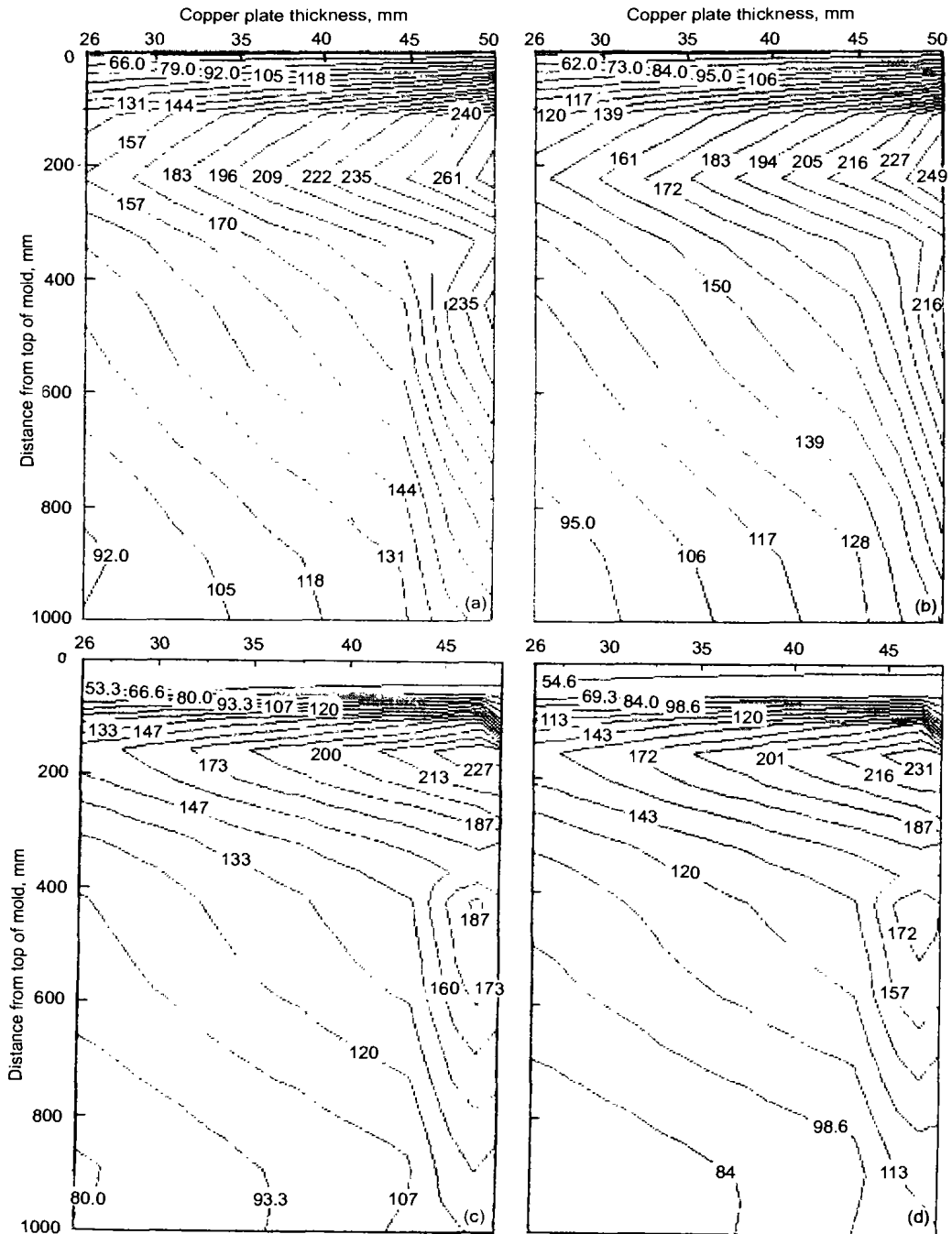


图 3 结晶器四面铜板的等温线

Fig.3 Temperature distributions on the mold copper plates

(a) isotherm of east copper plate

(b) isotherm of west copper plate

(c) isotherm of north copper plate

(d) isotherm of south copper plate

量在 0.09%—0.14% 范围内，即使没有结晶器振动和保护渣做润滑剂，其凝固表面也表现为凸凹不平，这导致了气隙的产生降低结晶器的传热 [8]。发生这种现象的原因是由于中碳钢包晶反应的结果，含碳量为 0.1% 时体收缩最大。

2.4 冷却水流量对结晶器壁热流量的影响

图 8 为不同冷却水量情况下结晶器铜板宽面（外弧面）的热流量分布。由此可见，随着结晶器冷却水量的减少，结晶器壁热流量有所降低，结晶器冷却水量由 3513 L/min 减少到 2507 L/min，结晶器壁热流量平均降低 210 kW/m²，随距结晶器顶面距离的增加，结晶器

壁热流值降低幅度有所减小，且在结晶器出口处结晶器壁热流量降低最低，为 125 kW/m²，而在弯液面处结晶器壁热流量变化最大，水流量降低了 1006 L/min，结晶器壁弯液面处热流量减少了 380 kW/m²。

结晶器冷却水量对结晶器壁热流量的影响有正反两方面作用，一方面是结晶器冷却水量的变化，使得冷却水与结晶器铜板之间的传热系数发生变化，结晶器冷却水量的降低，冷却水与结晶器铜板间的传热系数有所降低，使得结晶器壁的热流量减小；另一方面是结晶器冷却水量的

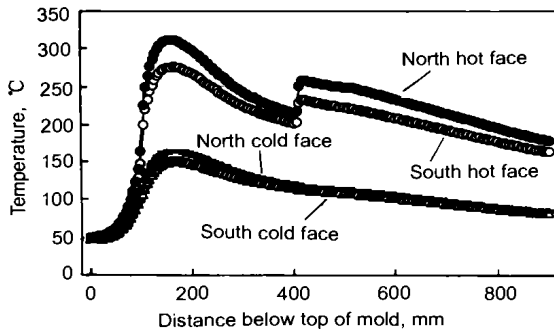


图 4 结晶器宽面铜板的冷、热面温度分布

Fig.4 Temperature distributions on hot and cold faces of copper plate

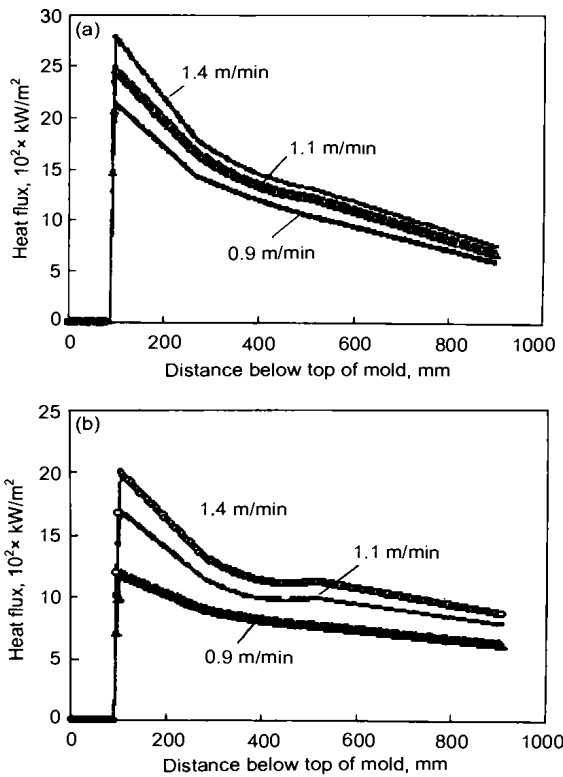


图 5 拉速对结晶器宽面、窄面热流影响

Fig.5 Effects of casting speed on heat flux of wide (a) and narrow (b) faces

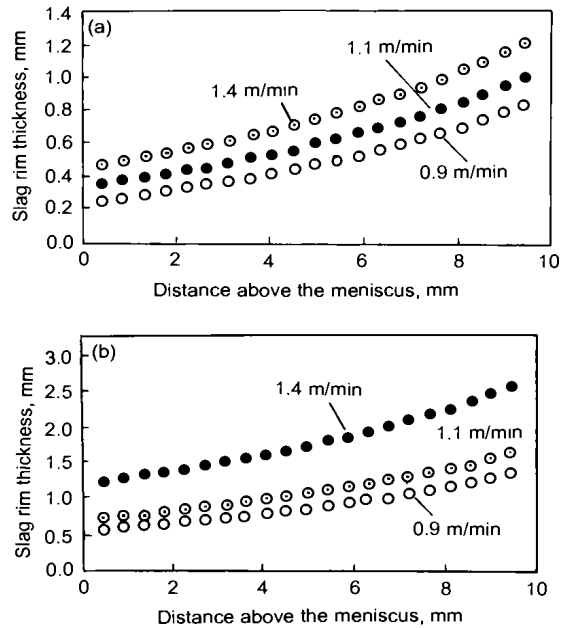


图 6 拉速对宽面、窄面弯液面处渣圈厚度的影响

Fig.6 Effects of casting speed on slag rim thickness of wide (a) and narrow (b) faces

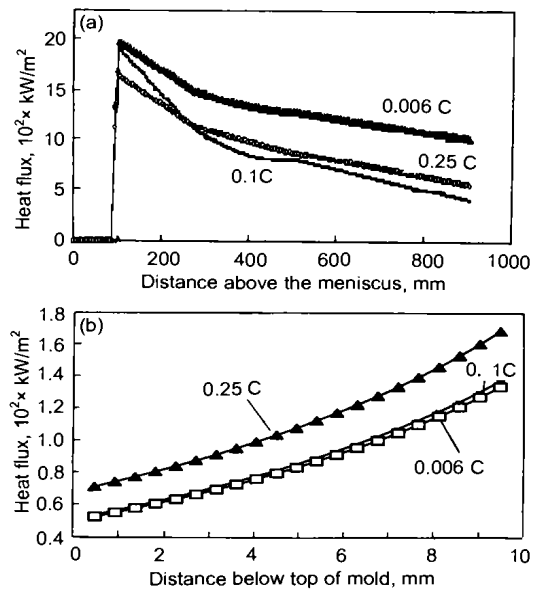


图 7 钢中碳含量对结晶器窄面热流量及其弯液面处渣圈厚度的影响

Fig.7 Effects of carbon content in steel on slag rim thickness of wide (a) and narrow (b) faces

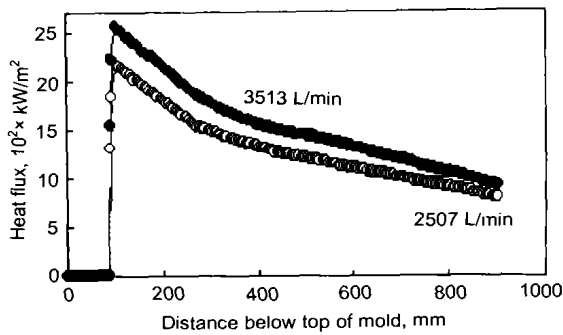


图8 结晶器冷却水量对结晶器宽面热流量影响

Fig.8 Effect of mold cooling water amount on heat flux of wide face

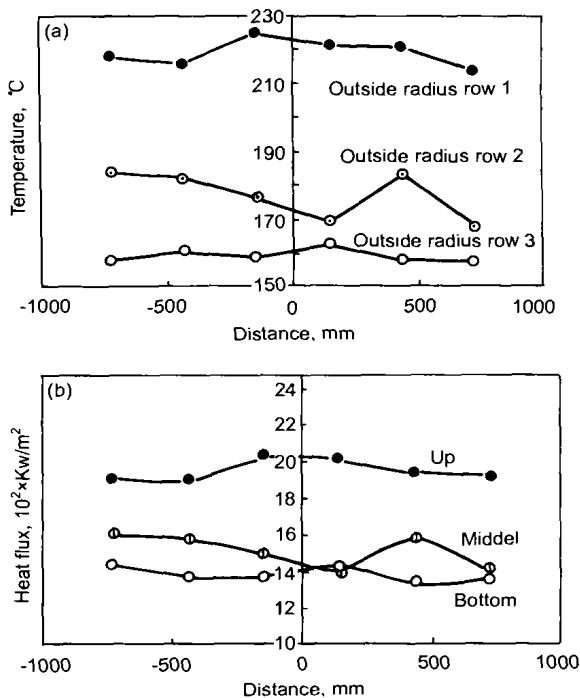


图9 沿铜板宽度方向宽面温度分布及热流量分布

Fig.9 Temperature (a) and heat flux (b) distributions along with slab wide direction (outside radius row 1, 2 and 3 corresponding to the 1st, 2nd and 3th outside radius thermal-couples on copper plate of mold)

变化,使得结晶器铜板热面温度发生变化,结晶器冷却水量的减少,结晶器铜板热面温度升高,使得结晶器壁的热流量有所增加.对国内某厂连铸生产的实际情况下,统计了大量的生产实际数据(铜板温度,拉速,冷却水流量及温差),发现结晶器冷却水流量的增加,其结晶器壁热流量也增加.

2.5 结晶器壁横向热流分布

图9a, b为沿宽面(外弧)铜板宽度方向(横向)温度

的分布与及温度相对应沿宽面铜板宽度方向上热流量分布.由图可见,沿铜板横向结晶器壁热流量分布基本与沿铜板横向温度分布相一致,其热流波动方式与铜板测温的波动方式相同,只是第二排与第三排热流相差很小,因为第二排镀Ni层厚度为0.5 mm,而第三排镀Ni层厚度为3 mm,造成铜板热面到第三排测温点的热阻增加,使得与第三排测温点相同高度的热面温度较高,这就造成第二排结晶器壁热流量与相同位置的第三排热流量较为接近.

3 结论

(1) 根据钢厂实测数据,计算出结晶器宽面铜板热流量高于窄面铜板的热流量 350—450 kW/m²,且两宽面铜板的热流量呈明显的不对称.

(2) 距结晶器顶面 404 mm 处镀 Ni 层厚度的突然增加,造成各铜板的热面温度有很大的回升,易使镀 Ni 层突变处的应力集中,发生镀 Ni 层的剥落,建议能否采用以某种曲线(抛物线)形式过渡镀 Ni 层,不易将镀 Ni 层突然变厚.

(3) 随着拉速的增加,结晶器壁各面的热流量增大,拉速由 0.9 m/min 增加到 1.44 m/min,结晶器宽面热流平均增加了 370 kW/m²,窄面热流平均增加了 340 kW/m².随着拉速增加结晶器壁的渣圈厚度也明显减小.

(4) 钢液含碳量为 0.1% 的结晶器窄面热流量与含碳量为 0.25% 的结晶器窄面热流量相差不大,平均相差仅为 50 kW/m² 左右.超低碳钢采用较大的冷却水量使得超低碳钢的结晶器窄面的热流量明显高于其它钢中的结晶器窄面的热流量.生产高碳钢时(0.25%C),结晶器壁渣圈厚度明显降低.

参考文献

- [1] Collur M M, Borrebach D R, Kardibin R A. *13th PTD Conference Proceedings*, Nagoya: 1995: 163
- [2] Sung L K. *ISS Steelmaking Conference Proceedings*, 1994: 347
- [3] Bao Steel Company. *No.1, No.2 Casting Machine Equipment (third part) (Inner data)*, 1990
(上海宝山钢铁总厂炼钢厂. 宝钢 1 号, 2 号板坯连铸机机械设备(之三), 内部资料, 1990 年)
- [4] Mahapatra R B, Brimacombe J K, Samarasekera I V, Walker N, Paterson E A, Young J D. *Metall Trans B*, 1991; 22: 861
- [5] Szekely J, Themelis N J. *Rate Phenomena in Process Metallurgy*, New York: Wiley-Interscience, 1971, 65
- [6] Szekely J, Yadoya R T. *Metall Trans B*, 1973; 14: 1379
- [7] Riboud P V, Larrecq M. *Iron Steel Soc*, 1979; 62: 78
- [8] Singh S N, Blazek K E. *Iron Steel Soc*, 1976; 59: 264