

薄板坯连铸结晶器铜板的三维传热分析*

杨刚¹⁾ 李宝宽¹⁾ 于洋²⁾ 齐凤升¹⁾

1) 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004

2) 天津大学机械学院, 天津 300072

摘要 建立了薄板坯连铸结晶器铜板的三维传热数学模型, 特别是对结晶器铜板冷面的水槽和背板部分采用了交替配置不同的边界条件处理, 利用 Visual Fortran 语言自编程序计算结晶器铜板温度场. 通过对一典型薄板坯连铸结晶器铜板模拟分析, 发现铜板热面温度呈现云层分布, 冷面温度呈冰柱状分布. 分析了各种工艺参数(拉速、铜板厚度、冷却水流速等)对结晶器铜板温度场的影响, 典型位置上的计算结果与现场测量数据符合较好, 为优化生产工艺参数和结晶器设计提供理论依据和实际参考数据.

关键词 薄板坯连铸, 三维传热, 结晶器, 铜板, 温度场

中图分类号 TG249.7

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)03-0332-05

THREE DIMENSIONAL HEAT TRANSFER OF COOLING COPPER PLATE OF THIN SLAB CONTINUOUS CASTING MOLD

YANG Gang¹⁾, LI Baokuan¹⁾, YU Yang²⁾, QI Fengsheng¹⁾

1) School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

2) School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

Correspondent: LI Baokuan, professor, Tel: (024)83672216, E-mail: lbk6382@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50474085)

Manuscript received 2006-06-05, in revised form 2006-10-17

ABSTRACT A mathematical model has been developed for three-dimensional heat transfer to analyze the temperature field on the cooling copper plate of the thinslab continuous casting mold. Especially, the different boundary conditions are applied alternatively for the cooling slots and back plate of cold face of mold copper plate. The self-developed computer code in the visual Fortran language is used to solve the temperature field. Numerical results show that the temperature distribution on the hot face of copper plate is cloudy-shaped, and that on the cold face is icicle-shaped. The influences of operational parameters (casting speed, copper plate thickness and cooling water flow rate) on the copper plate temperature field are analyzed. Calculated values of temperature at typical positions agree well with the measured ones. These results are helpful to optimize the operational parameters and mold design.

KEY WORDS thin slab continuous casting, three dimensional heat transfer, mold, copper plate, temperature field

结晶器是薄板坯连铸的关键设备之一, 其主要功能是把钢液的热量通过铜板传递给冷却水, 从而促进钢液的凝固成型. 结晶器铜板的传热及温度场对薄板坯质量有重要影响, 掌握薄板坯连铸结晶器铜板的传热特性对准确实施漏钢预报、安全使用结晶器、预测结晶器铜板裂纹形成位置等具有重要意义.

已有一些学者对结晶器铜板温度场进行了理论分析和实验测量, Samarasekera 等人^[1]和张慧等人^[2]分别采用热电偶测温的方法给出了铜板热流密度的分布, 由于测点有限且一些位置难于放置热电偶, 故该法也难于全面掌握铜板的传热特性. Thomas 等^[3]采用有限元软件计算了薄板坯漏斗形结晶器铜板的温度场和应力场, 该计算中冷面边界条件采用等效处理方法. Lu 等人^[4]将结晶器铜板传热视为二维稳态处理, 对铜板的温度场和应力场进行了计算. 迄今为止的研究结果仍不能充分掌握结晶器铜板的传热特征.

本文基于有限体积法发展薄板坯连铸结晶器铜板三

* 国家自然科学基金和宝钢集团联合基金资助项目 50474085

收到初稿日期: 2006-06-05, 收到修改稿日期: 2006-10-17

作者简介: 杨刚, 男, 1978年生, 硕士生

维传热模型,考虑冷却水槽对铜板温度场的影响,分析薄板坯连铸结晶器铜板温度分布特性,分析工艺参数对铜板温度场的影响,为工艺操作和结晶器优化设计提供了重要的参考数据。

1 物理模型

本文的研究对象为薄板坯连铸结晶器铜板,生产钢种为低碳钢 09CuPTiCrNi。结晶器铜板分为宽面铜板、窄面铜板两种,冷却系统结构类似。宽面铜板的宽度即为结晶器的宽度,铜板内热面镀不等厚镍层,外侧冷面均布竖直方向冷却水槽和螺孔。工作时,宽窄各两块铜板通过螺栓与外围冷却箱体相连,构成一无顶无底的矩形空腔。钢液借助引锭杆通过空腔使铸坯初步成型。铜板随结晶器振动,冷却水沿水槽在铜板与冷却箱间自下而上快速流过起到冷却作用。

薄板坯连铸结晶器铜板宽面的冷却水通道结构如图1所示。

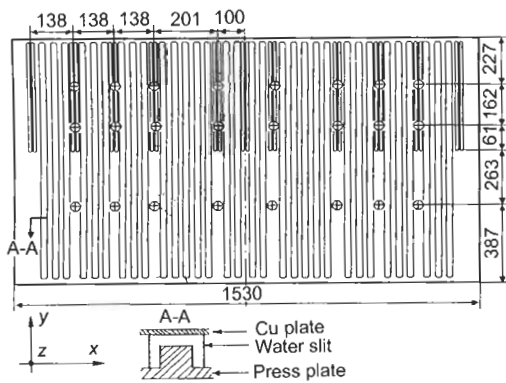


图1 薄板坯结晶器铜板冷却结构示意图

Fig.1 Sketch of cooling structure of copper plate of the thin slab continuous casting mold (in unit of mm)

考虑到宽面铜板过热量大且易损,是影响钢坯质量和结晶器寿命的限制因素,本文以宽面铜板为研究对象,结晶器的宽度为 1.53 m,厚度为 0.025 m,高度为 1 m,弯月面至结晶器顶部距离为 0.1 m。

2 结晶器铜板温度场的数学模型

2.1 模型的简化假设

(1) 不考虑连铸过程中拉坯速度的变化,结晶器铜板的三维温度场近似视为稳态值,且在直角坐标系下对问题进行描述;(2) 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,在结晶器同一高度上冷却水温处处相等;(3) 将漏斗型结晶器铜板简化为平直型铜板,不考虑漏斗形状对铜板温度场的影响;(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,不考虑合金镀层对铜板传热的影响效果;(5) 结晶器铜板材料各向同性,各热物性参数不随温度变化。

2.2 控制守恒方程

结晶器铜板的三维稳态传热可视为单相传导传热过程,模型中以温度 θ 为控制变量,则其控制微分方程表达如下^[5]:

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

式中, x, y, z 分别代表结晶器铜板的宽度、高度、厚度方向的坐标。

2.3 传热边界条件

(1) 结晶器热面铜板与铸坯的接触面^[6]: 给出进入铜板热面的热流密度 $q(\text{kW}/\text{m}^2)$

$$q = 2680 - 335\sqrt{\tau} \quad (2)$$

式中, τ 为铸坯在结晶器内弯月面下滞留时间, s, $\tau = \frac{L}{v}$ (其中 L 为钢水在结晶器内高度, m, v 为铸坯的拉坯速度, 本计算取 $v=4.2 \text{ m}/\text{min}$)。

另外,为了模拟气隙条件,本计算把角部的热流减小到标准宽面值的 67%^[7]。

(2) 本文将铜板冷面分为水槽和背板两个部分,文献[4]采用等效换热条件处理,本工作交替采用不同的边界条件进行处理以考虑冷却水槽对温度场的影响。

a) 结晶器冷却水与铜板水槽之间的接触面^[8]: 给出换热系数 h_w 及冷却水温度。

$$h_w = 0.023 \times \left(\frac{D \times v_w \times \rho_w}{\mu_w} \right)^{0.8} \times \left(\frac{C_w \times \mu_w}{\lambda_w} \right)^{0.4} \times \frac{\lambda_w}{D} \quad (3)$$

式中, D 为冷却水槽的当量直径, m; $D = 4A/l$, 其中, A 为浸湿面积, l 为浸湿周长, m; v_w 为冷却水的流速, 本计算取 $v_w=10.5 \text{ m}/\text{s}$; ρ_w 为冷却水的密度, kg/m^3 ; μ_w 为结晶器冷却水的动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; λ_w 为冷却水的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$; C_w 为冷却水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$ 。经计算, $h_w=44300 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。本计算中,冷却水进结晶器的温度为 39.7 C ; 冷却水出结晶器的温度为 47.5 C 。

b) 结晶器铜板冷面与背板接触面^[9]: 给出有效换热系数 $h_a=10000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 及背板初始温度 $\theta_0=20 \text{ C}$ 。

(3) 结晶器铜板的上顶面及侧面^[9]: 给出空气冷却换热系数 $h_c=110 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 及空气环境温度 $\theta_\infty=20 \text{ C}$ 。

(4) 结晶器铜板的下底面^[9]: 给出空气冷却换热系数 $h_b=1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 及空气环境温度 $\theta_\infty=200 \text{ C}$ 。

(5) 结晶器钢液面以上的铜板热面^[10]: 给出有效换热系数 $h_r=1.10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 及环境温度 $\theta_\infty=1500 \text{ C}$ 。

2.4 控制方程的离散

基于控制容积法原理采用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, 主网格单元数为 $(102 \times 102 \times 22)$, 模型的求解过程采用 Gauss-Seidel 逐点迭代方法来计算各离散控制单元的温度值, 收敛准则为待求温度两次迭代值相对误差小于 1.0×10^{-4} , 计算机程序采用 FORTRAN 语言独立编制, 边界条件采用附加源项法处理, 初始温度场赋值为环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 计算结果及分析

为了更直观的展示计算结果, 本文将铜板三维温度场的计算结果表达为二维图形. $z=0.025\text{ m}$ 的 x, y 面为铜板热面, $z=0$ 的 x, y 面为铜板冷面; $y=0.9\text{ m}$ 为弯月面位置. 铜板热面温度分布云图如图 2 所示.

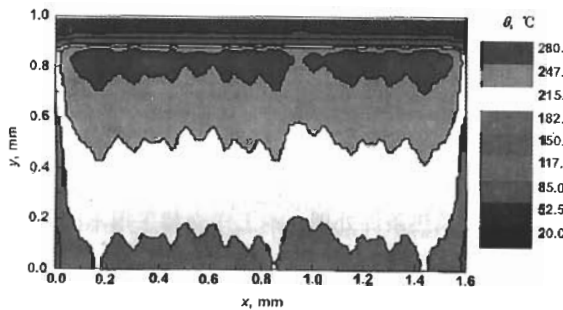


图 2 铜板热面温度分布云图

Fig.2 Cloudy-shaped temperature contour on the hot face of copper plate of mold ($z=0.025\text{ m}$; meniscus position: $y=0.9\text{ m}$)

由图可以观察到温度场分布呈现云层状. 自结晶器铜板顶部向下至弯月面, 铜板温度迅速升高, 由程序计算结果知温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在弯月面以下 $0-0.06\text{ m}$ 区域内, 热流很小; 温度最高区域出现在弯月面下 $0.06-0.15\text{ m}$ 处, 最高温度为 $261\text{ }^{\circ}\text{C}$, 低于铜板的软化再结晶温度 (约为 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$), 满足铜板的正常工作条件. 铜板的最高温度区域不是连续的, 而是在铜板中央区域的温度低于两侧的温度, 这与水口插入和结晶器钢水流场在此形成非活跃区有关. 在弯月面以下 0.15 m 至铜板底部区域内, 铜板温度又逐渐降低, 铜板底部温度约为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. 沿结晶器横向温度按水槽的分布呈波浪形, 即背面是水槽的位置其热面温度较低, 而其它位置热面温度较高. 另外, 铜板热面底部某些区域温度有所回升, 这是因为冷却水槽距铜板底部还有 0.05 m 的距离, 水槽与铜板底部没有发生接触导致底部传热较差.

结晶器冷面铜板温度分布如图 3 所示, 明显呈现冰柱状分布. 从铜板顶部自弯月面, 铜板温度从 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增大到 $92\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在弯月面下 0.1 m 处, 温度达到最大值 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 然后自上而下温度开始降低, 结晶器出口处温度最低值为 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$. 值得指出的是, 与冷却水直接接触的冷却水槽铜板处的温度均未超为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此水槽内不会发生水垢

现象. 但是应该注意铜板的温度受水质、水速和水压的影响十分敏感, 所以在生产中要加以注意定期用软水清洗铜板以防止水垢的产生.

图 4 为热面、冷面、热面与冷面的中间面 ($z=0.0125\text{ m}$) 三个截面在铜板中央位置上 ($x=0.765\text{ m}$) 温度随高度变化的曲线. 三条曲线具有相同的温度分布规律, 结晶器铜板宽面对称中心温度在顶部比较低, 在接近弯月面处温度急剧升高 (在弯月面下 0.06 m 处温度达到最大值, 热面温度最大值为 $255\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷面温度最大值为 $99\text{ }^{\circ}\text{C}$, 中间面温度最大值为 $173\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而后温度又急剧下降, 在结晶器出口处温度有所升高. 热面、冷面及中间面结晶器出口铜板温度分别为 $177, 77, 125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

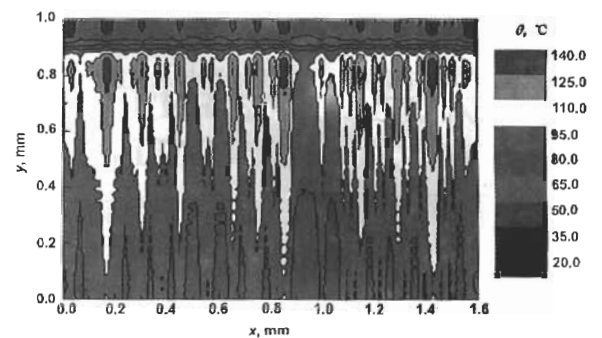


图 3 结晶器铜板冷面温度分布云图

Fig.3 Icicle-shaped temperature contour on the cold face of copper plate of mold ($z=0$; meniscus position: $y=0.9\text{ m}$)

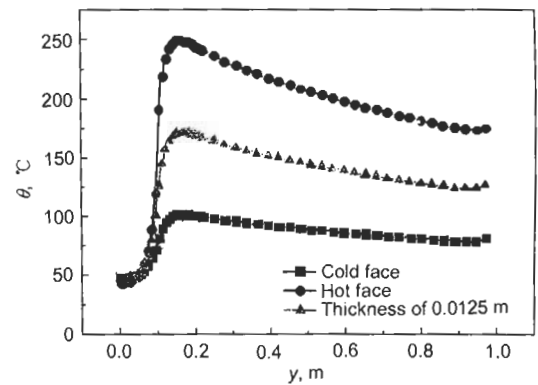


图 4 结晶器冷、热面铜板温度曲线

Fig.4 Temperature profiles along height y on the cold face and hot face of the mold ($z=0.0125\text{ m}$; $x=0.765\text{ m}$; meniscus position: $y=0.1\text{ m}$)

4 模型的验证

张慧等^[2]在研究薄板坯结晶器的热流密度时, 采用在铜板中安插热电偶的办法在珠江钢厂实测了漏斗型结晶器铜板的温度. 实际测量温度与本计算所得温度对比如图 5 所示 (曲线 A 和曲线 C 为在距离铜板热面 0.0159 m , 高度分别为 0.773 和 0.387 m 实测的温度曲线; 曲线

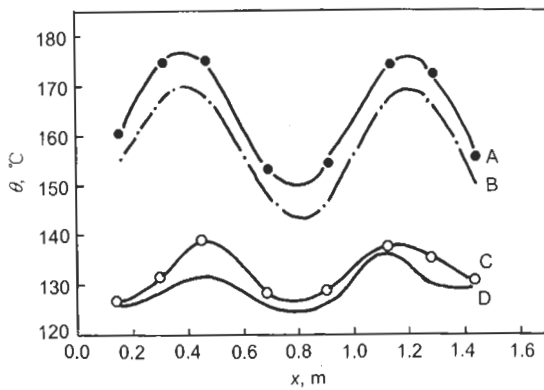


图5 铜板温度计算值与实测值的比较

Fig.5 Comparison of measured (A, C) and calculated (B, D) temperatures a distance of at 0.0159 m from hot face (A and B—measured and calculated temperature profiles at $y=0.773$ m and $z=0.0091$ m, respectively; C and D—measured and calculated temperature profiles at $y=0.387$ m and $z=0.0091$ m, respectively)

B 和曲线 D 为相应位置上本计算得到的温度曲线)。图中可以看出，两组曲线的变化趋势基本相同且最大温差为 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，因此本模型及计算过程是合理的。

5 工艺参数对结晶器铜板温度场的影响

图 6a 为拉速分别为 1.0, 1.8, 2.4, 4.2 和 5.6 m/min 时铜板热面中央位置随高度变化的温度曲线。计算中除拉速外其余模拟条件均不改变。

由计算结果可以看出，结晶器宽面铜板温度场在不同的拉速条件下具有相似分布规律，但随着拉速的增加，相应位置处铜板的温度值有所升高。最高温度均处于弯月面下 0.06 m 左右，最高温度分别为 225, 239, 245, 255, $257\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可以看出，在拉速超过 4.2 m/min，其余传热条件不改变的情况下，热面温度升高的幅度不大，仅为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 6b 为铜板厚度分别为 0.015, 0.025 和 0.05 m 情况下铜板热面中央位置随高度变化的温度曲线。本计算中的铜板厚度指的是冷却水到铜板热面的距离，即铜板的有效厚度。

从计算结果可以看出，结晶器铜板厚度对热面温度场影响较大。当铜板厚度为 0.015 m 时，热面最高温度为 $193\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当铜板厚度为 0.025 m 时，热面最高温度为 $254\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当铜板厚度为 0.05 m 时，热面最高温度达到 $393\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用较薄的铜板可减小热阻，从而降低铜板的热面温度，但是选择结晶器铜板厚度时，还要考虑固定尺寸和固定螺栓的安装，以保证使用过程中铜板所需的强度和刚度及抗变形能力。因此，在强度允许前提下铜板越薄越好。

结晶器内一次冷却是保证连铸过程顺利进行的关键，图 7 为利用数学模型计算冷却水流速分别为 6, 8

和 10.5 m/s 情况时铜板热面中央位置温度随高度变化的情况。可以看出，铜板热面温度随冷却水流速的增大而减小，这是因为水流速的增加增大了冷却水与铜板的传热系数，因而导致了铜板热面温度的降低。当冷却水流速为 6 m/s 时，铜板热面最高温度为 $266\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；而在水流速为 8 m/s 时，热面最高温度降低为 $227\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；但当流速达到 10.5 m/s 时，热面最高温度仅降低了 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可以看出，

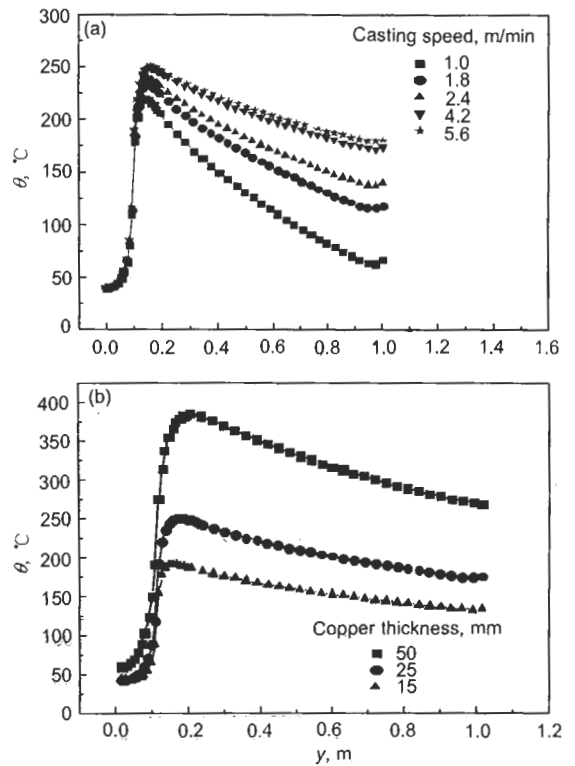


图6 拉速与铜板厚度对结晶器铜板热面温度的影响

Fig.6 Influences of casting speed (a) and copper thickness (b) on the profiles of hot face temperature ($x=0.765$ m, $z=0.025$ m; meniscus position: 0.1 m)

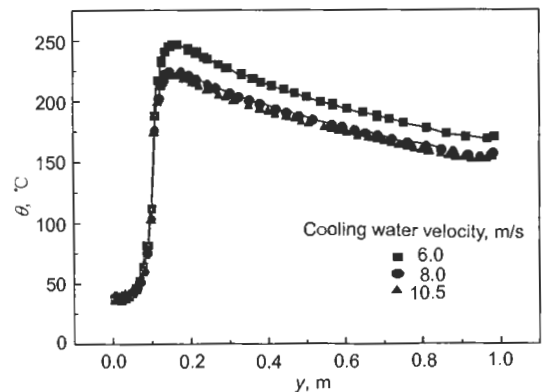


图7 冷却水流速对结晶器热面铜板温度的影响

Fig.7 Influence of cooling water velocity on the profiles of hot face temperature ($x=0.765$ m, $z=0.025$ m; meniscus position: 0.1 m)

当水流速超过 8 m/s 时, 增加冷却水流速对结晶器铜板温度场的影响作用不是很大.

6 结论

(1) 薄板坯连铸结晶器的热面铜板温度场呈现云层状分布, 冷面温度场呈现冰凌状分布. 结晶器铜板温度场沿高度方向看, 从结晶器顶部至弯月面处温度逐渐升高, 弯月面下 60 mm 左右铜板热面温度最高, 可达 261 °C, 是铜板工作条件最恶劣的部分. 随着拉坯方向距离的继续增加, 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, 铜板温度会有所回升.

(2) 结晶器铜板温度场沿宽度方向看温度分布很不均匀, 温度呈波浪式分布, 相邻两组水缝间的筋温比水缝区的温度高. 正常生产条件下, 即拉速为 6 m/min 以下, 结晶器的热面温度低于铜的再结晶温度, 证明该结晶器的设计是合理的.

(3) 随着拉坯速度的增加, 结晶器铜板的热面温度有所升高, 但拉速不宜过高, 否则会影响铸坯质量及发生漏钢事故, 拉速以 4—6 m/min 为宜. 结晶器铜板热面温度随铜板厚度的增加而增加, 因此在保证铜板强度和刚度的情况下, 应尽量减小铜板的厚度.

(4) 高的冷却水流速可获得较高的冷却强度, 从而降

低铜板的热面温度. 当冷却水流速超过 8 m/s 时, 增加流速对结晶器铜板温度场的影响作用不是很大.

参考文献

- [1] Samarasekera I V, Brimacombe J K. *Trans ISS*, 1984; 5: 79
- [2] Zhang H, Tao H B, Liu A Q, Zhang Z B, Wang J B, Zhuang H Z. *Iron Steel*, 2005; 40(7): 25
(张 慧, 陶红标, 刘爱强, 张振彪, 王进步, 庄汉洲. 钢铁, 2005; 40(7): 25)
- [3] Thomas B G, Park J K, Sok Y U. *Metall Mater Trans*, 2002; 33B: 425
- [4] Lu M J, Kuo Y Y, Ong T H, Lin C H. *Steelmaking Conf Proc*, 1996; 241: 246
- [5] Mahapatra R B, Samarasekera I V, Brimacombe J K. *Metall Trans*, 1991; 22B: 861
- [6] Samarasekera I V, Brimacombe J K. *Steelmaking Conf Proc*, 1991; 189: 196
- [7] Thomas B G, Li G, Moitra A, Habing D. *Ironmaking Steelmaking*, 1998; 12: 125
- [8] Won Y M, Yeo T J, Oh K H, Park J K, Choi J, Yim C H. *ISIJ Int*, 1998; 38: 53
- [9] Na X Z, Zhang H, Gan Y, Zhang X Z. *Iron Steel (Suppl)*, 2000; 35: 233
(那贤昭, 张 慧, 干 勇, 张兴中. 钢铁 (增刊), 2000; 35: 233)
- [10] Thomas B G. *Metall Mater Trans*, 1994; 25B: 443