

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0039- 05

铝合金连续铸造喷水冷却的换热系数^①

贾 非, 金俊泽

(大连理工大学 铸造工程研究中心, 大连 116024)

[摘 要] 基于边界条件替换法建立了铝合金连续铸造喷水冷却过程的换热系数计算模型。采用实验测量铸锭冷却过程的表面温度和温度场数值计算相结合的方法, 确定了铸锭表面温度为 100~ 500 ℃和喷水密度为 11.3~ 27.8 L/(m²·min) 时的换热系数, 结果表明在不同的表面温度区间内, 换热系数随着喷水密度增加而增大; 当喷水密度相同时, 随着铸锭表面温度升高, 换热系数迅速降低。

[关键词] 连续铸造; 铝合金; 冷却/凝固控制; 换热系数

[中图分类号] TG 249.1

[文献标识码] A

铝合金连续铸造过程中, 喷水冷却的效果不仅影响铸锭的表层和内部质量, 也是裂纹和板坯宽面变形等铸造缺陷产生的重要影响因素^[1]; 尤其是电磁铸造, 由于没有铸模的一次冷却区, 金属的液柱高度对铸造过程十分敏感, 所以加强对冷却强度的控制就变得非常必要^[2]。

换热系数是表征冷却强度的参数, 也是凝固过程数值模拟时处理边界条件所必需的。它既与喷水密度、水温、喷水形式等冷却因子有关, 也与铸锭材质、表面状态及温度等非冷却因子有关, 其中喷水密度和铸锭的表面温度对换热系数的影响比较明显^[3]。关于钢的连续铸造^[4,5]和板坯热轧^[6~8]过程换热系数的研究比较多, 得到了一些经验计算公式; 但是这些过程的表面温度范围比铝合金连续铸造过程高得多, 冷却方式一般采用水幕冷却或喷雾冷却, 与喷水冷却过程也有一定差别, 因此利用这些结果建立铝合金连续铸造过程时的冷却控制模型就会产生较大的偏差。本文作者采用边界条件替换法建立二维喷水冷却换热系数的计算模型, 对换热系数的变化规律进行分析。

1 实验

实验装置如图 1 所示。实验时, 在铸锭的表面附近沿宽面均匀设置 4 组铠装热电偶, 用来测量铸锭的表面温度变化, 每一组包含 2 支热电偶, 它们

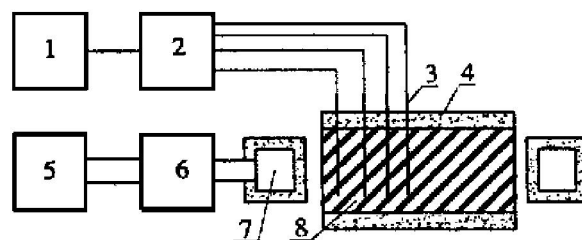


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

1—Computer; 2—Temperature sensor; 3—Thermocouple;
4—Adiabatic layer; 5—Pump; 6—Flowmeter;
7—Cooling chamber; 8—Aluminum ingot

距铸锭表面的距离分别为 5 mm 和 10 mm。

实验条件见表 1。将铸锭在电阻加热炉中加热至 510 ℃, 然后按不同的条件在实验装置中进行喷水冷却。喷水的方向与铸锭表面垂直。铸锭冷却过程中, 将测温点的温度变化通过测温仪输入计算机, 计算后得出铸锭冷却过程中的表面温度和换热系数的关系。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Alloy	Ingot size /mm	Surface roughness /μm	Surface temperature /℃
5 182	120×120×180	5~ 10	50~ 500
Flow density /(L·m ⁻² ·min ⁻¹)		Recording time interval /s	Spraying hole diameter /mm
11.3~ 27.8		0.5	2.5

① [基金项目] 国家自然科学基金重大资助项目(59995442)

[收稿日期] 2000- 10- 19; [修订日期] 2001- 02- 02

[作者简介] 贾 非(1973-), 男, 博士研究生。

2 换热系数的计算模型

2.1 表面温度的确定

在铸锭的表面附近,铸锭的温度变化可以用一维热传导公式表示:

$$c_p \rho \frac{\partial}{\partial t} \theta(x, t) = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta(x, t) \quad (1)$$

将铸锭表面处的温度 θ_0 , 距表面 5 mm 处的温度 θ_1 和距表面 10 mm 处的温度 θ_2 进行差分近似,

$$c_p \rho \frac{[\theta_1(t + \Delta t) - \theta_1(t)]}{\Delta t} = \frac{\lambda}{(\Delta x)^2} [2\theta_1(t) - 2\theta_2(t) + \theta_0(t)] \quad (2)$$

$$\theta_0(t) = 2\theta_1(t) - \theta_2(t) + \frac{c_p \rho (\Delta x)^2}{\lambda \Delta t} [\theta_1(t + \Delta t) - \theta_1(t)] \quad (3)$$

式中 c_p —比热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ —密度, kg/m^3 ; λ —导热系数, $W/(m \cdot K)$; $\theta(t)$ —当前计算时刻的温度, $^{\circ}C$; $\theta(t + \Delta t)$ —下一计算时刻的温度, $^{\circ}C$ 。

将实验中测得的 $\theta_1(t)$, $\theta_1(t + \Delta t)$ 和 $\theta_2(t)$ 代入式(3), 就可以计算出铸锭的表面温度 $\theta_0(t)$ 。

2.2 边界条件替换模型

实验时铸锭的上下表面用绝热材料覆盖, 可以忽略铸锭沿纵向的传热, 认为铸锭在冷却过程中热量仅由喷水冷却向四周方向传出。

根据铸锭冷却面的边界条件, 首先由式(3)计算得到 $\theta_0(t)$, 然后利用计算机对铸锭冷却过程进行数值模拟, 得到铸锭的温度场。本文中采用交替方向显式格式的有限差分法进行计算。

无内热源时的二维热传导方程^[9]为

$$c_p \rho \frac{\partial}{\partial t} \theta(x, y, t) = \lambda \frac{\partial^2}{\partial x^2} \theta(x, y, t) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \theta(x, y, t) \quad (4)$$

在二维的直角坐标系下, 与 (i, j) 单元相邻的 4 个单元为 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$ 及 $(i, j+1)$, 将式(4)用泰勒公式展开, 有

$$c_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \bigg|_{x+\Delta x} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \bigg|_x \right] / \Delta x + \lambda \left[\frac{\partial \theta}{\partial y} \bigg|_{y+\Delta y} - \frac{\partial \theta}{\partial y} \bigg|_y \right] / \Delta y \quad (5)$$

差分离散化后, 有

$$c_p \rho \frac{[\theta_{(i,j)}^{t+1} - \theta_{(i,j)}^t]}{\Delta t} =$$

$$\lambda \left\{ \frac{[\theta_{(i-1,j)}^t - 2\theta_{(i,j)}^t + \theta_{(i+1,j)}^t]}{(\Delta x)^2} + \frac{[\theta_{(i,j-1)}^t - 2\theta_{(i,j)}^t + \theta_{(i,j+1)}^t]}{(\Delta y)^2} \right\} \quad (6)$$

对于边界单元, 喷水冷却传出的热流密度为

$$\dot{q}_s = h_w (\theta_s - \theta_w) \quad (7)$$

式(4~7)中 Δx , Δy 分别为 x , y 方向的空间步长, m; Δt 为时间步长, s; $\partial \theta / \partial x$, $\partial \theta / \partial y$ 为 x , y 方向的温度梯度, $^{\circ}C/m$; $\theta_{(i,j)}^t$, $\theta_{(i,j)}^{t+1}$ 分别为 (i, j) 单元当前时刻和下一计算时刻的温度, $^{\circ}C$; $\dot{q}_s$ 为表面热流密度, W/m^2 ; h_w 为表面换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; θ_s 为铸锭表面温度, $^{\circ}C$; θ_w 为冷却水温度, $^{\circ}C$ 。

很明显, 在已知铸锭温度场的条件下, 可以计算出边界单元的热流密度, 并由式(7)求到喷水冷却的换热系数 h_w 。

3 实验结果及分析

3.1 表面温度对换热系数的影响

铸锭表面温度对换热系数的影响见图2。实验记录的铸锭表面温度为 50~500 $^{\circ}C$, 换热系数随铸锭表面温度升高而增大, 在 150 $^{\circ}C$ 左右达到最大值。表面温度继续升高, 换热系数呈迅速下降趋势。根据沸腾传热理论^[10], 冷却过程在此温度范围内先后经历了汽膜沸腾、过渡沸腾、成核沸腾和强制对流换热 4 个过程。在强制对流区域(用水做冷却介质, 100 $^{\circ}C$ 以下时), 铸锭表面温度升高, 铸锭表面与冷却水的温差增大, 冷却能力提高, 换热系数增大。表面温度高于 100 $^{\circ}C$ 时, 在铸锭表面的过热液体中就会有气泡产生, 气泡迅速形成并脱离表

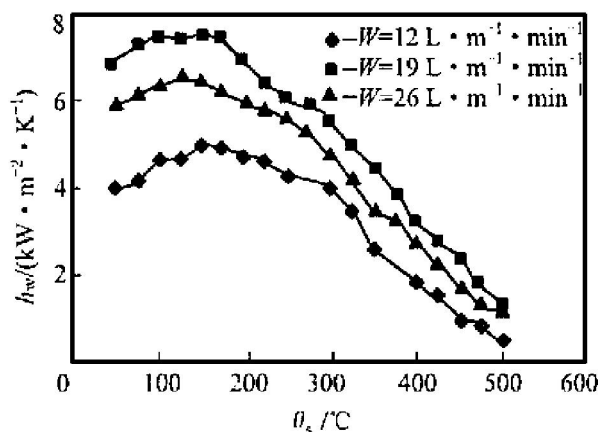


图2 铸锭的表面温度对换热系数的影响

Fig. 2 Influence of surface temperature on heat transfer coefficient

面时, 新的液体流向原来的气泡位置, 结果在铸锭表面产生强烈的对流作用。如果表面温度继续升高, 大量的气泡会发生聚合, 在铸锭表面形成蒸汽薄膜。随着表面温度升高, 这种薄膜效应逐渐增强, 由于蒸汽膜的绝热作用, 换热系数迅速下降。

3.2 喷水密度对换热系数的影响

喷水密度为单位时间、单位宽度铸锭表面上的喷水量, 本文采用冷却水流量除以铸锭的周长得到喷水密度。喷水密度对换热系数的影响规律如图 3 所示。在铸锭的表面温度相同时, 随着喷水密度的增加, 换热系数逐渐增大。提高喷水冷却的喷水密度, 水流的流速增加, 水流的冲击压力也增大。在强制对流和成核沸腾冷却区域, 水流的冲击可以加强铸锭表面冷却介质的对流及减缓冷却水的升温, 提高冷却效果。而在过渡沸腾和薄膜沸腾区域, 水流的冲击能够抑制蒸汽膜的产生, 降低蒸汽膜的绝热作用。

4 换热系数的数学模型

在一定的表面温度范围内, 将实验和计算

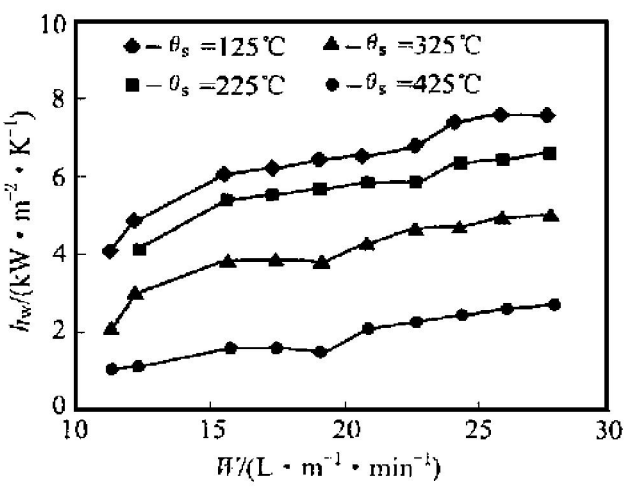


图 3 喷水密度对换热系数的影响

Fig. 3 Influence of cooling water density on heat transfer coefficient

得到的换热系数按表面温度分为 9 个区间, 对于各个温度区间, 分别将换热系数值按喷水密度和铸锭表面温度进行回归分析, 求出对应指数 n 和 m , 如图 4 和图 5 所示。

图 4 中在所有温度范围内, n 的等效值取各温度区间的平均值, 为 0.68。

由图 5 可以看出, 换热系数的最大值出现在铸

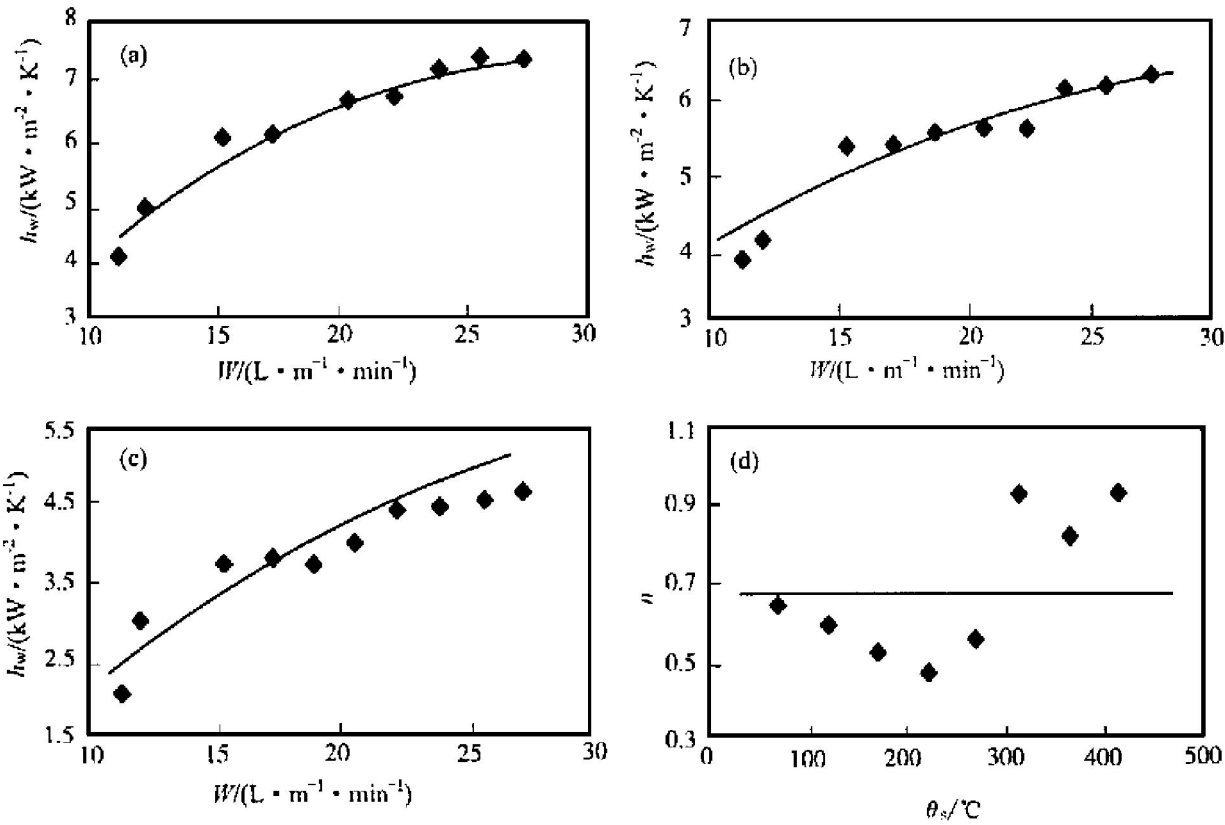


图 4 换热系数与喷水密度之间的关系

Fig. 4 Relationship between heat transfer coefficient and cooling water density

(a) $\theta_s=100\sim150\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $\theta_s=200\sim250\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $\theta_s=300\sim350\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) —Exponent n

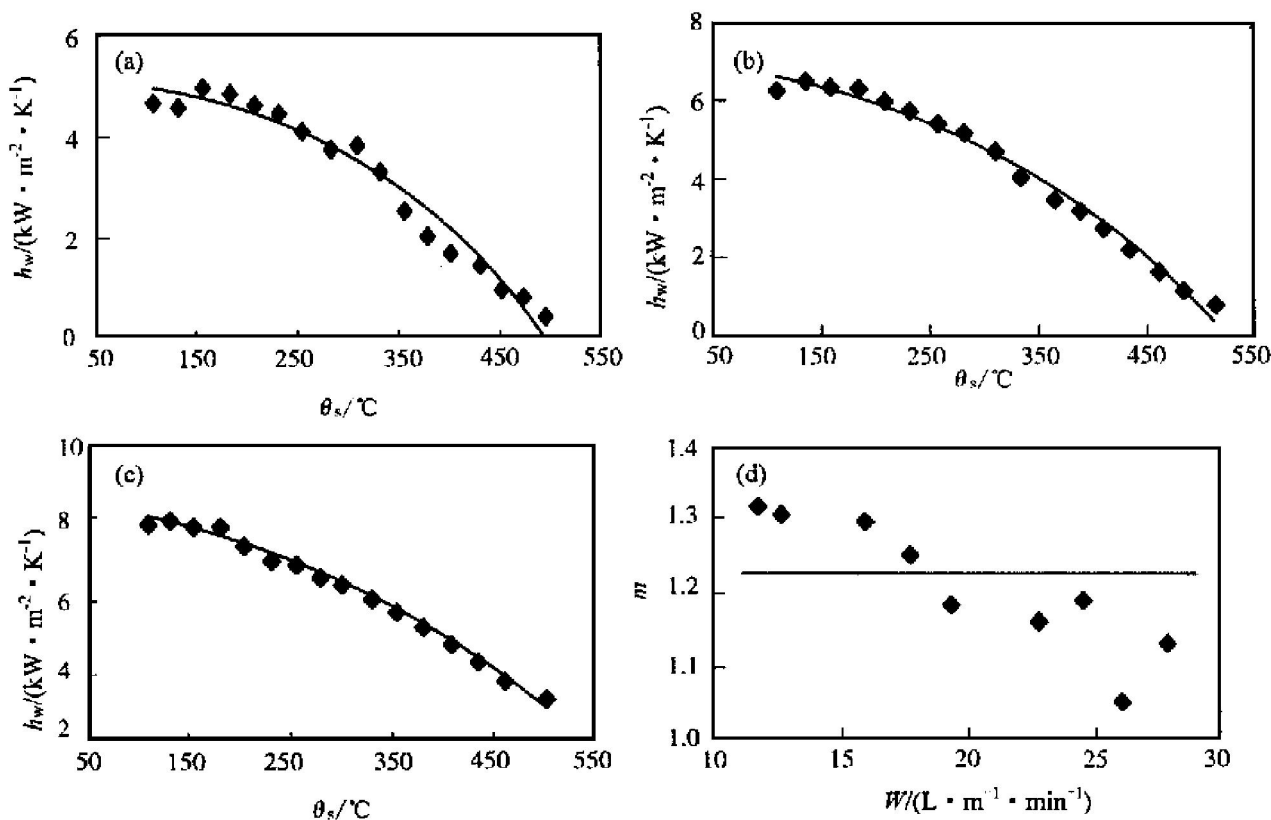


图5 换热系数与表面温度之间的关系

Fig. 5 Relationship between heat transfer coefficient and surface temperature

(a) — $W = 11.3 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$; (b) — $W = 19.2 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$; (c) — $W = 27.8 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$; (d) — Exponent m

锭的表面温度为 150°C 左右, 在成核沸腾区域内, 换热系数变化不大。在连续铸造和电磁铸造过程中, 铸锭铸模和感应器出口处的表面温度大约为 500°C , 而着水点的温度为 150°C 左右。因此, 分析表面温度为 $100 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 范围内的换热系数变化, 不仅可以揭示沸腾换热的冷却规律, 结果也适用于连续铸造的冷却控制和凝固过程模拟。

当喷水密度改变时, 指数 m 的数值略有差异, 在喷水密度为 $11.3 \sim 27.8 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$ 的范围内, m 的平均值为 1.21 。

由以上的分析可以看出, 换热系数与喷水密度之间具有正指数关系, 而与铸锭的表面温度之间则呈负指数关系。综合考虑这 2 个冷却因子的影响, 可以建立换热系数的数学模型, 即

$$h_w = c \cdot (W^{0.68} \cdot \theta_s^{-1.21})^l \quad (8)$$

式中 c 和 l 为待定系数, 将实验中得到的全部换热系数值及其对应的喷水密度及表面温度代入式 (8), 利用最小二乘法进行回归分析, 结果如图 6 所示, 得到 $c = 7.3 \times 10^5$, $l = 1.13$ 。因此, 在实验选取的范围内, 换热系数的经验计算公式为

$$h_w = 7.3 \times 10^5 W^{0.77} \theta_s^{-1.36} \quad (9)$$

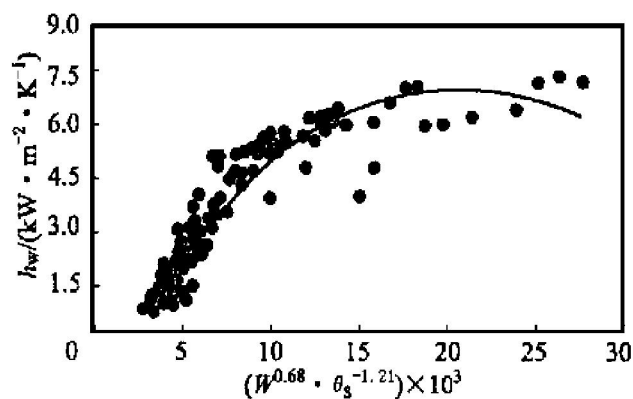


图6 换热系数的数学模型

Fig. 6 Mathematical model of heat transfer coefficient

5 结论

1) 基于边界条件替换法建立了铝合金连续铸造过程喷水冷却控制模型, 利用该模型可以计算喷水冷却过程的边界换热系数。

2) 在实验研究范围内, 随着表面温度的降低和喷水密度的增加, 换热系数增大。

3) 在铸锭表面温度为 $100 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 、喷水密度

为 $11.3 \sim 27.8 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$ 的区域, 换热系数的经验公式为 $h_w = 7.3 \times 10^5 W^{0.77} \theta_s^{-1.36}$ 。

[REFERENCES]

- [1] Drezet J M, Rappaz M. Modeling of ingot distortions during direct chill casting of aluminum alloys [J]. Metall Trans, 1996, 27A(10): 3214– 3225.
- [2] ZHANG Xing-guo(张兴国), JIN Jun-ze(金俊泽), CAO Zhi-qiang(曹志强). 电磁铸造中试工艺参数的研究[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4(12): 171– 174.
- [3] Tsunekawa M, Hayashi N, Uno T. Effects of various cooling conditions on the characteristic properties of aluminum DC ingots [J]. Light Metals (In Japanese), 1996, 46(3): 132– 137.
- [4] Mitsutsuka M. Heat transfer coefficients in the surface temperature range of $400 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ during water-spray cooling of hot steel product [J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (in Japanese), 1983, 69(2): 268– 274.
- [5] Matsuno J I, Nakato H, Ooi H. An analysis of solidification rate and surface temperature of continuous casting slabs [J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (in Japanese), 1974, 60(7): 1023– 1032.
- [6] Mitsutsuka M, Fukuda K. Cooling characteristics and heat transfer coefficients during fog cooling of hot steel plates [J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan (in Japanese), 1979, 65(6): 608– 616.
- [7] WEI Guang(韦光), DONG Xi-man(董希满), WANG Jin-min(王进民). 水幕冷却高温钢板对流换热系数的研究[J]. Iron and Steel (钢铁), 1994, 29(1): 22– 26.
- [8] QIN Guo-qing(秦国庆), XIONG Xiao-ming(熊晓明). 钢板水幕冷却的分析[J]. Journal of Iron and Steel Research (钢铁研究学报), 2000, 12(1): 63– 66.
- [9] CHEN Hai-qing(陈海清), LI Hua-ji(李华基), CAO Yang(曹阳). 铸件凝固过程数值模拟[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991. 19– 23.
- [10] YU Jing-lu(俞景禄), WEI Ji-he(魏季和). 冶金中的传热传质现象[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981. 296– 299.

Heat transfer coefficient during cooling water of continuous casting of aluminum alloy

JIA Fei, JIN Jun-ze

(Research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, P. R. China)

[Abstract] Based on the substitution method of boundary condition, a calculation model of the heat transfer coefficient in continuous casting of aluminum alloy during the process of water cooling was established, and the effects of surface temperature and cooling water density on heat transfer coefficient were analyzed. As a result, an empiric formula was founded by the mean square regression. The results show that when the surface temperature is in the range of $100 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, and cooling water density is in the range of $11.3 \sim 27.8 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{min})$, the heat transfer coefficient increase with the increase of the cooling water density and the decrease of the surface temperature.

[Key words] continuous casting; aluminum alloy; cooling/solidification control; heat transfer coefficient

(编辑 杨 兵)