

厚板坯连铸二次冷却传热数学模拟

冯亮花^{1,2} 朱苗勇² 刘坤¹ 曹晋伟¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 辽宁科技大学材料科学与工程学院, 鞍山 114051)

摘要 在考虑二冷边界换热的条件下,建立了与厚板坯连铸机相适应的传热数学模型。用远红外测温仪测试 X65 管线钢 230 mm × 1 650 mm 铸坯表面温度,实验结果同模拟结果吻合较好。应用数学模型,对不同拉速下管线钢的连铸凝固过程进行了仿真计算,分析了拉速对出结晶器坯壳厚度、铸坯表面温度和液芯长度的影响,得出在给定的二冷条件下,为得到合理的铸坯表面温度,管线钢的拉速应为 0.9 ~ 1.2 m/min。

关键词 厚板坯 二次冷却 拉速 表面温度 数学模拟

Mathematical Simulation on Thermal Transmission of Secondary Cooling Process for Slab Concasting

Feng Lianghua^{1,2}, Zhu Miaoyong², Liu Kun¹ and Cao Jinwei¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004;

2 School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract With considering the boundary conditions for secondary cooling thermal transmission, a mathematical model for thermal transmission to suit slab caster has been established. The measurement results by using infrared thermoscope to measure the surface temperature of 230 mm × 1 650 mm slab of X65 pipeline steel conform to simulation results. The cast solidification of pipeline steel with different casting speed has been simulated and calculated by mathematical model to analyze the effect of casting speed on thickness of slab shell in mold, surface temperature of slab and length of liquid core, it is obtained that at given secondary cooling conditions, in order to obtain reasonable surface temperature of slab the casting speed of pipeline steel slab should be 0.9 ~ 1.2 m/min.

Material Index Slab, Secondary Cooling, Casting Speed, Surface Temperature, Mathematical Simulation

连铸过程中,出结晶器坯壳厚度、铸坯表面温度、液相穴长度等参数是生产操作及铸坯质量控制中最关心的冶金参数^[1]。本文根据某公司厚板坯连铸机结构条件,建立传热数学模型,对实际生产工艺条件下管线钢的表面温度进行测试来验证模型的可靠性,应用传热数学模型对不同拉速下管线钢的连铸凝固过程进行仿真计算,分析拉速对出结晶器坯壳厚度、铸坯表面温度、液相穴长度的影响规律。

1 凝固传热数学模型建立

1.1 凝固传热数学模型的基本假设

为简化方程及其边界条件,根据文献[2]作出如下假设:

(1)将液相的对流现象归为导热问题;(2)假设刚进入结晶器的钢液温度与浇铸温度相同;(3)钢的密度和质量热容视为不随温度变化的常数;(4)铸坯内弧和外弧传热条件对称;(5)连铸机内同一冷却区里水量分布均匀;(6)沿拉坯方向由温度梯度引起的传热很小,可忽略不计。

1.2 控制方程及其初始条件和边界条件

(1)控制方程。由于铸坯轴向传热比径向传热小得多,故可忽略沿 z 方向的传热,这样传热问题由三维简化成二维。基于铸坯在凝固过程中的对称性,取1/4断面为研究对象。如图 1(a)所示。设厚为 dx ,宽为 dy ,高为 dz 的铸坯微元体,按照传热学理论来建立微分方程^[3]为:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_0 \quad (1)$$

式中: T - 温度/°C; t - 时间/s; ρ - 密度/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_p - 质量热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]; λ - 导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]; S_0 - 凝固相潜热项。

(2)源项处理。假设潜热的释放与固相率的增长成正比。

$$S_0 = \rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2)$$

式中: L - 凝固潜热/($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$); f_s - 固相凝固分率。

采用等效比热法处理潜热。

$$\rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial t} = \rho \cdot L \frac{\partial f_s}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

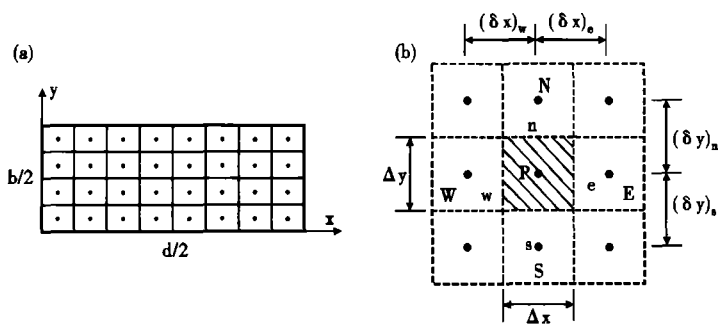


图 1 铸坯研究对象(a)和网格划分(b)
Fig. 1 Study object of slab (a) and divisional grid (b)

将式(3)代入式(1)中,可得:

$$\rho \left(C_p - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\text{令 } C_{p,eff} = \left(C_p - L \cdot \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \quad (5)$$

式中: $C_{p,eff}$ 为等价比热容。

在稳式迭代过程中要得到收敛的解,首先要保证各个变量的连续性,基于此点考虑构造 f_s 与 T 的关系式^[4]:

$$f_s = AT^3 + BT^2 + CT + D \quad (6)$$

$$\text{式中: } A = -\frac{2.0}{(T_s - T_l)^3}, B = \frac{3(T_s + T_l)}{(T_s - T_l)^3}$$

$$C = -\frac{6T_s T_l}{(T_s - T_l)^3}, D = \frac{T_l^2(3T_s - T_l)}{(T_s - T_l)^3}$$

(3) 定解条件的确定。

(a) 初始条件: 开始时间即 $t=0$ 时, 在结晶器弯月面处有: $T(x, y)|_{t=0} = T_c$ 。 T_c - 浇铸温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

(b) 边界条件:

① 铸坯中心对称面: $x=0, \frac{\partial T}{\partial x}=0; y=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0$ 。

② 结晶器: 窄面 $x=b/2, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q_m$;

宽面 $y=d/2, -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_m$ 。

③ 喷水冷却区。在四面喷水区:

$$x = b/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = (1 - 0.2) \{ h(T_s - T_w) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

$$y = d/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = (1 - 0.2) \{ h(T_s - T_w) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

$$273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

只有宽面喷水区:

$$x = b/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = (1 - 0.2) \{ \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

$$y = d/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = (1 - 0.2) \{ h(T_s - T_w) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

式中: 0.2 (20%) 表示夹辊导热占 0.17 (17%) 和空气对流给热占 0.03 (3%)。

④ 空冷区: 在空冷区以幅射换热和空气对流换热为主。

$$x = b/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = (1 - 0.17) \{ \alpha(T_s - T_a) + \varepsilon [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

$$y = d/2,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = (1 - 0.17) \{ \alpha(T_s - T_a) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \}$$

式中: q_m - 热流密度; h, α - 水与铸坯之间及空气与铸坯之间的对流换热系数; T_s - 铸坯表面温度; T_a - 室内空气温度。

⑤ 结晶器平均热流密度的确定。结晶器平均热流密度 (W/cm^2) 可以表示为:

$$q_m = 268.0 - \beta \sqrt{t_m} \quad (7)$$

式中: t_m - 钢水在结晶器内平均停留时间 (S), 可用

$$\text{下式表示: } t_m = \frac{L}{V} \times 60 \quad (8)$$

式中: L - 结晶器内钢水液高度/m; V - 拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)。

1.3 传热方程离散

采用有限差分法将方程离散成全稳格式 (如图 1b), 其差分方程为:

$$a_p T_p^{n+1} = a_E T_E^{n+1} + a_W T_W^{n+1} + a_N T_N^{n+1} + a_S T_S^{n+1} + b \quad (9)$$

$$a_E = \frac{k_e \cdot \Delta y}{(\delta x)_e}, a_W = \frac{k_w \cdot \Delta y}{(\delta x)_w}$$

$$a_N = \frac{k_n \cdot \Delta x}{(\delta y)_n}, a_S = \frac{k_s \cdot \Delta x}{(\delta y)_s}$$

内部节点:

$$a_p = a_p^0 + a_E + a_w + a_N + a_S - S_p \Delta x \Delta y \quad (10)$$

$$b = a_p^0 T_p^0 - Su \Delta x \Delta y \quad (11)$$

边界节点:

$$a_p = a_p^0 + a_E + a_w + a_N + a_S - 1/2 S_p \Delta x \Delta y \quad (12)$$

$$b = a_p^0 T_p^0 + 1/2 Su \Delta x \Delta y \quad (13)$$

离散后得到的代数方程采用 TDMA 算法进行求解。

2 模拟计算条件

本计算所模拟的厚板坯连铸机为直弧型连铸机,冶金总长为33 009.75 mm,结晶器长 900 mm,二冷段长 32 209.75 mm,铸坯厚 230 ~ 300 mm,宽 1 650 ~ 2 000 mm。二冷段共分 8 个区,15 个回路,冷却方式为气雾冷却,各环路压缩空气流量为1 500 m³/h。

3 温度测试实验及仿真结果验证

为了尽可能地减少测量现场的烟尘、水汽及距离变化、物体局部被遮等因素对测温结果的影响,这里采用红外双色测温仪(HWSG-2H)来测量铸坯表面温度。

3.1 实验方案

本研究过程中根据现场的实际条件,制定了以下测量方案:(1)根据铸坯冷却的对称性,本测量只取了铸坯内弧的一半及一个侧面;(2)在第 6、7 冷却区内弧表面实行温度的跟踪测量;(3)对铸坯的横向方向,采用中心处、1/4处、1/8和边部 4 个点的位置进行测量。

3.2 测温结果和分析

为准确而真实的分析,对所测数据进行了分析和处理,整理后的表面温度数据如表 1 所示。

分析得出,此管线钢连铸过程中铸坯在二冷区的宽面横向温度分布的特点有:(1)铸坯表面温度

表 1 铸坯表面温度测试结果/°C

Table 1 Measured results of surface temperature of slab /°C

距弯月面距离/ mm	宽面位置			
	1/2	1/4	1/8	棱边
14 466.75	840	839	914	871
15 576.75	817	834	893	856
16 316.75	815	799	878	867
17 426.75	784	837	893	864
18 166.75	883	909	931	839
19 276.75	829	861	921	817
20 016.75	818	856	922	834
21 126.75	813	886	934	807

注:拉速 1.2 m/min,浇铸温度 1 546 °C,230 mm × 1 650 mm 铸坯, X65 管线钢。

的最高点在铸坯表面约 1/8 处,而不是中间部位或 1/4 处。(2)在第 6 冷却区 1/8 和 1/4 处的温差相对较大,在 7 冷却区棱边与 1/8 处的温差相对较大,1/4 处和 1/2 处温差相对较小。

将以上测试数据在横向进行平均,同模拟计算后内弧宽面温度的计算平均值进行对比,如图 2 所示。由图 2 可知,除个别点外,大部分模拟计算值和测量值都能够很好的吻合。

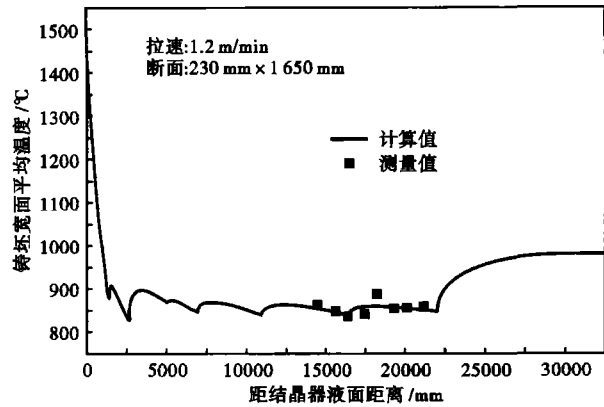


图 2 X65 管线钢铸坯宽面平均温度计算值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between calculated value and measured value for average surface temperature of wide side of X65 pipeline steel slab

4 不同拉速下的管线钢凝固冷却过程分析

4.1 拉速对出结晶器坯壳厚度的影响

出结晶器坯壳最小厚度 e_0 是保证铸坯不拉漏的必要条件,它可表示为拉速和钢水温度的函数,对板坯 $e_0 = 15$ mm。拉速对出结晶器坯壳厚度有着显著的影响,拉速提高使结晶器的瞬时热流密度增加,但铸坯在结晶器内停留时间变短,出结晶器坯壳厚度减小。由图 3(a) 计算结果可知,拉速每增加 0.2 m/min, e_0 减小约 3 mm,当拉速大于 1.3 m/min 时, e_0 会小于 15 mm,所以在正常生产过程中,拉速应 ≤ 1.3 m/min。

4.2 拉速对铸坯表面温度的影响

如图 3(b) 所示,为内弧宽面温度在不同拉速下沿拉坯方向上的分布。由图 3(b) 可知,在同一拉速下,随着拉坯距离的逐渐增加,表面温度逐渐升高;每一区的表面温度有一定的波动,但范围较小;在足辊区,由于出结晶器时铸坯表面温度较低,而造成温度有较大的回升。

拉速增大,铸坯的表面温度升高。由图 3(b) 可知,当拉速在 0.7 ~ 0.8 m/min 时,铸坯表面温度低于 850 °C,且第一段的温度回升超过 100 °C/m,违反了冶金准则,所以 0.8 m/min 以下的拉速不能作

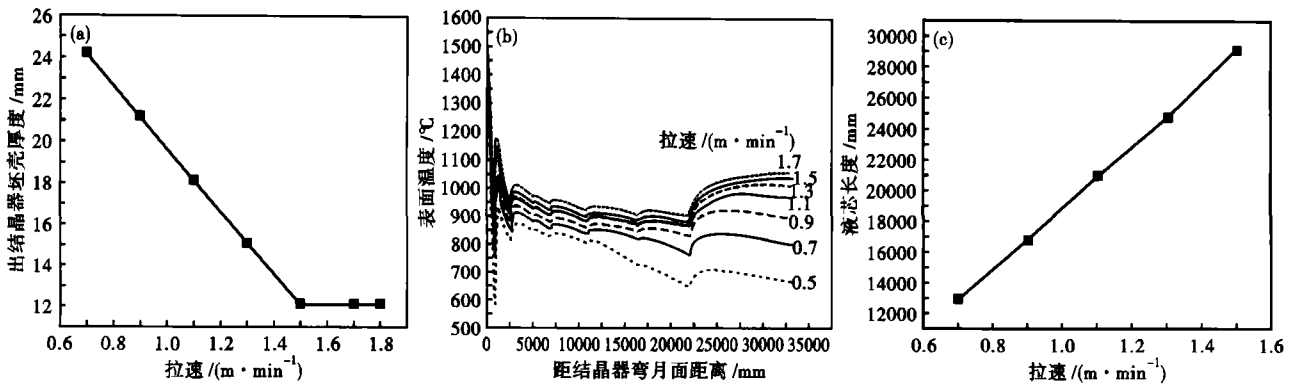


图 3 拉速对出结晶器坯壳厚度(a),铸坯表面温度(b)和铸坯液芯长度(c)的影响,230 mm × 1 950 mm, X70 钢

Fig. 3 Influence of casting speed on thickness of 230 mm × 1 950 mm slab shell out of mold (a), slab surface temperature (b) and length of liquid core (c), steel X70

为常规拉速,只适用于开浇或浇铸末期的情况,而在正常生产过程中不能以此范围的拉速所对应的水表控制二冷水量。

拉速在 0.9 ~ 1.2 m/min 时,各段铸坯的表面温度变化较均匀,随着拉速的增大,铸坯的表面温度升高。但观察整个图,表面温度均在 900 ~ 1 000 °C,避开了第 3 脆性区;各段铸坯表面温度均在一定的范围内波动。当拉速大于 1.3 m/min 时,第 1 段温度超过了 1 100 °C,因此大于 1.3 m/min 的拉速也不能作为常规拉速,这同图 3(b)分析结果相同。

4.3 拉速对液相穴长度的影响

拉速对铸坯液芯长度的影响很显著。拉速提高,液芯的长度增加,由图 3(c)可知,断面为 230 mm × 1 950 mm,拉速由 0.8 m/min 提高到 1.4 m/min 时,对于 X70 管线钢液芯长度由 15.998 9 m 延至 28.546 38 m,拉速每提高 0.2 m/min,铸坯液芯长度约增加 3.8 m。

5 结论

(1)厚板坯管线钢连铸过程,铸坯宽面表面温

度最高点在铸坯宽面约 1/8 处,而不是中间部位或 1/4 处。

(2)拉速对铸坯的凝固过程有很大的影响,尤其对表面温度、出结晶器坯壳厚度和液芯长度影响较大,为了使足铸坯表面温度合理,管线钢连铸的常规拉速应为 0.9 ~ 1.2 m/min,如果需要提高拉速,应该进一步优化二冷水控制。

辽宁省自然科学基金资助项目(20072211)

参考文献

- 1 蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺.北京:冶金工业出版社,1994
- 2 萨莫伊洛维奇.连续铸钢的热过程.北京:冶金工业出版社,1987
- 3 陶文铨.数值传热学.西安:西安交通大学出版社,2001
- 4 杨宏亮.连铸内流动与凝固传热过程的数值模拟:[硕士学位论文].沈阳:东北大学,1995

冯亮花(1974-),女,博士生,讲师,辽宁科技大学毕业,冶金传输数值模拟。

收稿日期:2008-09-19

欢迎订阅 2009 年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

全国各地邮局均可订阅(可破订)

2009 年上半年如漏订,可汇款至杂志社补订,收款后即寄杂志

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司 邮编:435001