

圆坯连铸凝固传热数学模型及应用

唐海燕¹ 李京社¹ 韩丽敏¹ 温德松^{1,2}

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 天津钢管集团有限公司炼钢厂,天津 300301)

摘要 建立了34Mn5V钢Φ400 mm圆坯连铸过程中的凝固传热数学模型,运用该模型计算得到的二冷各区控制点的表面温度与现场实测结果一致。用该模型计算得出,钢水过热度对铸坯表面温度影响较小,拉速和二冷区冷却强度对铸坯温度影响较大。生产实践表明,当生产Φ400 mm铸坯的拉速达到0.4~0.6 m/min时,自动控制的二次冷却制度能满足工业连铸要求,可得到优质铸坯。

关键词 二冷控制 传热模型 圆铸坯 表面温度

Math Model and Application for Heat Transfer during Solidification of Concasting Round Bloom

Tang Haiyan¹, Li Jingshe¹, Han Limin¹ and Wen Desong^{1,2}

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Steelmaking Plant, Tianjin Pipe Co Ltd, Tianjin 300301)

Abstract Math model of heat transfer during solidification of Φ400 mm concasting round bloom of steel 34Mn5V has been established and surface temperature values at controlling location of each secondary zone calculated by the model showed no difference to that measured at production ground. It is obtained with calculation by model that the effect of liquid superheating extent on surface temperature of bloom is minor but the effect of casting speed and secondary cooling intensity on temperature of bloom is larger. Production practice showed that the automatic control secondary cooling system met the requirements of industrial concasting Φ400 mm round bloom with cast speed 0.4~0.6 m/min to get quality cast bloom.

Material Index Secondary Cooling Control, Heat Transfer Model, Round Bloom, Surface Temperature

天津钢管集团公司生产的主要圆坯规格为Φ210、Φ270、Φ310、Φ350 mm。炼钢厂为配合公司发展,给460机组提供合格的大规格坯料,从2006年开始对不同钢种进行了单流热负荷试验和全流热试生产,成为国内首家在弧形半径为10.5 m的连铸机上生产出Φ400 mm圆坯的厂家。为解决生产中出现的较高拉速下(>0.5 m/min)比较严重裂纹缺陷、铸坯质量不稳定等现象,建立了针对天津钢管炼钢厂工艺条件的Φ400 mm圆坯连铸凝固传热数学模型。通过模型分析了各种工艺参数对铸坯温度、坯壳厚度、凝固终点的影响,确立了大断面圆坯二冷段合理的工艺参数。

1 铸坯凝固传热数学模型

为简化计算,作如下假设^[1]:(1)钢的热物性参数仅与温度相关,与空间位置无关;(2)铸坯的物理特性为各向同性;(3)忽略沿拉坯方向的传热;(4)铸坯表面的辐射传热与支撑辊的接触传热以及二冷水的冷却传热,采用综合传热系数一并考虑;(5)忽略结晶器振动对凝固过程传热的影响。

根据圆坯形状和边界条件的对称性,选择带有

柱坐标的二维轴对称模型,其传热方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \Phi} \right) + q_v \quad (1)$$

式中: ρ -钢液密度/[kg·m⁻³]; C_p -热容/[J·(kg·°C)⁻¹]; λ -导热系数/[W·(m·°C)⁻¹]; q_v -内热源/[J·(m³·s)⁻¹]; Φ -圆柱坐标的方位角/rad; T -温度/°C; t -时间/s。

几何条件: $0 \leq r \leq R$

初始条件 $t=0$ 时, $T=T_0$ (T_0 为浇注温度/°C)。

边界条件:

$$(1) \text{ 结晶器内。 } -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q_{\text{结}}$$

按照文献[2]、现场测温的结果和模拟仿真计算,按分段函数考虑结晶器热流分布:

$$\left. \begin{aligned} l \leq 0.05 \text{ m} & \quad q = (0.95 + 6l) \times 10^6 \\ 0.05 \text{ m} < l \leq 0.3 \text{ m} & \quad q = (1.3 - l) \times 10^6 \\ 0.3 \text{ m} < l \leq 0.5 \text{ m} & \quad q = (0.9125 + 0.25l) \times 10^6 \\ 0.5 \text{ m} < l \leq 0.73 \text{ m} & \quad q = (1.55 - l) \times 10^6 \end{aligned} \right\} (2)$$

式中: l -距弯月面的距离/m; $q_{\text{结}}$ -结晶器热流密度/

($W \cdot m^{-2}$)。

(2)二冷区。通常以综合传热系数 h 来描述二冷区铸坯表面的传热过程:

$$q = h(T_b - T_w) \quad (3)$$

天津钢管连铸机二冷区分为足辊段和 3 个扇形冷却区,计算中根据现场情况在大量预模拟的基础上确定了不同冷却段的冷却公式和传热系数:

$$\begin{cases} h_1 = 0.40 w^{0.289} \\ h_2 = 0.31 w^{0.391} \\ h_3 = 0.23 w^{0.468} \\ h_4 = 0.18 w^{0.468} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_i - 不同冷却段的传热系数/[$kW \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$]; w - 水流密度/[$L \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$]。

(3)空冷区边界条件为:

$$q = \varepsilon\sigma[(T_b + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (5)$$

式中: ε - 辐射系数,钢铁材料取 0.8; σ - 波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T_b - 铸坯表面温度/ $^\circ C$; T_a - 空气温度/ $^\circ C$ 。

2 现场基本条件和模型验证

34Mn5V 钢成分(%)为: 0.34C、0.24Si、1.05Mn、0.010P、0.006S、0.015Al, 采用经验公式^[3,4]计算得液相线和固相线温度分别为1501 $^\circ C$ 和1382 $^\circ C$ 。

6 流弧形连铸机的弧形半径 10.5 m,冶金长度 31.5 m,结晶器有效长度 0.73 m,足辊段(二冷 1 区)和二冷 2、3、4 区的长度分别为 0.80、4.00、3.00、2.40 m,拉速 0.4 ~ 0.6 m/min,铸坯断面 $\Phi 400$ mm。

表 1 为不同拉速下各控制点表面温度实测值和

模拟值的比较(控制点 1、2、3、4 分别对应于二冷各区末端,实测值是多组数据的平均值)。由表 1 看出,实测值与计算值误差都在 4.0% 以内。

表 1 各个控制点铸坯表面温度实测值和模拟计算结果的比较

Table 1 Comparison between measured value and calculated value of surface temperature of bloom at each control location

拉速/ ($m \cdot min^{-1}$)	控制点	实测值/ $^\circ C$	计算值/ $^\circ C$	相对误差/ %
0.45	1	1050	1030	1.90
	2	981	968	1.33
	3	926	927	0.11
	4	909	880	3.19
0.50	1	1059	1060	0.09
	2	1003	1009	0.60
	3	961	977	1.66
	4	942	939	0.32

3 结果分析

3.1 过热度对铸坯表面温度的影响

由图 1(a)可见,当钢水过热度为 20 $^\circ C$ 和 40 $^\circ C$ 时,铸坯表面温度曲线基本重合,当过热度为 60 $^\circ C$ 时,温度差稍稍增大。实际生产中钢水过热度控制在 25 ~ 35 $^\circ C$ 为宜。

3.2 拉速对铸坯温度的影响

从图 1(b)和表 2 可见,拉速每增加 0.05 m/min,铸坯出结晶器的表面温度增加 50 $^\circ C$ 左右,出二冷区的表面温度增加 80 ~ 100 $^\circ C$,液芯长度增加 1.5 m 左右。从图 1(c)可见,提高拉速则铸坯出结晶器时的坯壳变薄,容易出现拉漏或铸坯变形、裂纹等缺陷。在基础冷却条件下,拉速分别为 0.40、0.45、0.50、0.55、0.60 m/min 时,铸坯出结晶器的坯壳厚度分别为 19、17、16、13、12 mm,即当拉速大于 0.5 m/min 时,出结晶器时坯壳较薄,因而基础配水

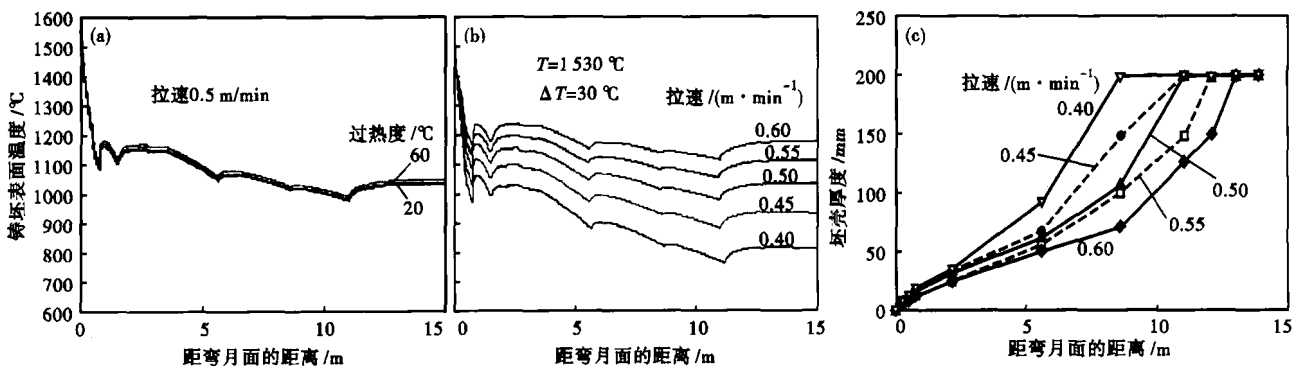


图 1 过热度 (a) 和拉速 (b) 对铸坯表面温度的影响; (c) 不同拉速下坯壳厚度生长曲线

Fig. 1 Effect of liquid superheating extent (a) and cast speed (b) on surface temperature of bloom; (c) Growth curves of bloom shell with different cast speed

表2 不同拉速下出二冷铸坯中心温度和液芯长度

Table 2 Central temperature and liquid-core length of bloom at outlet of secondary cooling zone with different cast speed

拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	出二冷区铸坯中心温度/ $^{\circ}\text{C}$	液芯长度/ m
0.40	1 096	7.46
0.45	1 221	8.86
0.50	1 324	10.42
0.55	1 413	12.05
0.60	1 442	13.89

量是不合适的。如要提高拉速应配合采取其它措施,如加强结晶器和二冷的冷却强度等。

3.3 冷却强度对铸坯温度的影响

根据现场条件计算了 $T = 1530^{\circ}\text{C}$, 过热度 $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$ 时不同拉速下二冷各区的冷却强度(指相当于基础水量的倍数)对铸坯温度和液芯长度的影响(表3)。可以看出,各种拉速下随着冷却强度的增加,各控制点处铸坯的表面温度和出二冷中心温度均有明显下降,冷却强度对铸坯温度的影响显著。

表3 不同拉速下冷却强度对铸坯温度和液芯长度的影响
Table 3 Effect of intensity of cooling on temperature and liquid-core length of bloom with different cast speed

拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	冷却强度/倍	控制点铸坯表面温度/ $^{\circ}\text{C}$				铸坯出二冷中心温度/ $^{\circ}\text{C}$	液芯长度/m
		1	2	3	4		
0.4	0.75	1 098	1 064	1 027	985	1 225	8.47
	0.80	1 070	1 027	986	940	1 199	8.22
	0.85	1 043	990	945	895	1 173	7.99
	0.90	1 030	953	903	850	1 147	7.80
	1.00	960	878	818	760	1 096	7.47
0.5	0.90	1 133	1 103	1 080	1 049	1 386	11.04
	1.00	1 102	1 041	1 015	977	1 324	10.41
	1.05	1 060	1 009	977	939	1 308	10.10
	1.10	1 037	978	942	901	1 291	9.89
	1.15	1 014	946	907	864	1 272	9.68
0.6	1.00	1 170	1 146	1 134	1 129	1 442	13.89
	1.20	1 085	1 036	1 016	1 008	1 424	12.36

4 模型的工业应用

4.1 模型指导下的二冷配水

用 Gleeble-1500 热应力/应变模拟机,在恒应变速率下,对连铸的 34Mn5V 试样从 1300°C 到 750°C 进行拉伸实验,以断面收缩率为主要指标对其塑性区进行测试。结果表明 34Mn5V 钢没有高温脆性区,其低温脆性区温度范围在 $750 \sim 950^{\circ}\text{C}$,在拉矫时要避开这一温度区间,从而减少裂纹的产生。

根据高温性能测试结果和冶金准则,确定二冷各控制点 1、2、3、4 的目标表面温度分别为 1100 、 1050 、 1020 、 990°C 。根据模拟计算的结果,对典型拉速制定了二冷区的冷却水量(表4)。

表4 34Mn5V 钢各拉速下的冷却水量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)Table 4 Cooling water rate for steel 34Mn5V with different cast speed /($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)

拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	足辊段	二冷2区	二冷3区	二冷4区	总水量
0.40	26	30	26	26	108
0.45	32	36	32	32	132
0.50	35	40	35	35	145
0.55	38	44	38	38	158
0.60	42	48	42	42	174

4.2 铸坯质量

$\Phi 400$ mm 铸坯试验连续进行了 4 炉,共生产出 9 支(7 支 9000 mm; 2 支 4500 mm) 34Mn5V 铸坯。铸坯内部质量全部合格,其中,芯部裂纹最高为 1.5 级,缩孔最高为 0.5 级,中心疏松 1 级,低倍酸浸的柱状晶评为 3 级,与使用结晶器电磁搅拌的铸坯相比,柱状晶略显发达。测量计算等轴晶比率,本次试验(未使用结晶器电磁搅拌)的 $\Phi 400$ mm 铸坯等轴晶比率为 37.5%,而正常情况(使用结晶器电磁搅拌)的铸坯等轴晶比率为 45% ~ 50%。

5 结论

(1) 过热度对铸坯温度的影响较小,过热度每增加 10°C ,铸坯表面温度仅增加 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 拉速对铸坯温度影响很大,拉速每增加 0.05 m/min,铸坯出二冷室时表面温度增加 $80 \sim 100^{\circ}\text{C}$, $\Phi 400$ mm 圆坯稳定生产的合适拉速为 0.5 m/min。

(3) 34Mn5V 钢的低温脆性区为 $750 \sim 950^{\circ}\text{C}$,矫直时要避开这一温度区间。

(4) 对应于不同的拉速,可以调整二冷各区的冷却强度来获得合适的铸坯表面温度。采用优化的二冷区配水参数铸坯内部质量合格,等轴晶比率为 37.5%。

参考文献

- 曹晓兵,梁爱生.连铸机二冷区传热系数的研究.太原重型机械学院学报,1999,20(4):288
- 李永林.大断面连铸圆坯的凝固过程及矫直变形研究[博士学位论文].北京:北京科技大学,2005
- 蔡开科.连续铸钢.北京:科学出版社,1990
- 蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺.北京:冶金工业出版社,1995

唐海燕(1970-),女,博士,讲师,研究方向为纯净钢的工艺与理论。

收稿日期:2009-01-12