

文章编号:1000-582x(1999)04-0097-(06)

② 97-102

薄板坯连铸凝固冷却与传热的数学模型

陈登福, 刘人达, 徐楚招, 颜广庭

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

TF777.7
TG249.7

摘要:在所建立的模型中,考虑了二冷区铸坯内外弧和横向上的冷却差别;首次提出了有效喷淋系数的概念;并针对不同拉速、不同冷却区域采用了变时间步长。模型中考虑了结晶器的直弧型、宽侧面及角部等的传热差异;用修正的等效比热法处理两相区的凝固潜热;考虑了钢液的强制对流对传热的影响。因此模型具有较高的精度且更符合实际。

关键词:连铸;薄板坯;传热;数学模型

中图分类号:TF 777

文献标识码:A

凝固, 冷却

随着连铸技术的迅速发展和计算机在连铸中应用的日益深化,建立连铸凝固过程数学模型进行仿真研究已成为连铸技术研究必不可少的手段^[1~5]。对于目前世界上正在重点开发和研究的薄板坯连铸技术,由于拉速高坯壳薄,容易出现质量问题;为实现薄板坯的连铸连轧,铸坯必须要有较高的和均匀的出坯温度。因而建立适合薄板坯连铸特点的凝固冷却数学模型来研究薄板坯连铸就具有特别重要的意义。

迄今为止,几乎未见到有薄板坯冷却传热数学模型的文献公开报导。有关的文献仅给出了某些铸机设计的二冷比水量及某些试验铸坯的温度计算和实测数据值。本文充分考虑了薄板坯连铸的特点,建立了高精度的二维数学模型。模型中提出的某些观点对板坯连铸乃至方坯连铸的凝固传热计算机模拟都具有重要意义。

1 模型的数学表达

1.1 凝固传热的基本方程

对于薄板坯连铸,忽略铸坯运行方向上的传热,认为连铸传热是稳态的,拉坯方向上铸坯某一空间点的温度不随时间而变。由以上假定并根据拉速 $V = \partial x / \partial \tau$ 的关系,可简化得出不考虑钢液的对流传热速度时,薄板坯随铸流移动坐标系的二维微分方程如下:

$$C_e \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (1)$$

其中, C_e 为等效比热,在固、液相区与原有比热相同。在两相区有:

• 收稿日期:1998-06-17

作者简介:陈登福(1963-),男,四川岳池人,重庆大学副教授,博士。主要研究方向:钢冶金及连续铸钢。

$$C_0 \rho = C - \rho \Delta H \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2)$$

以上公式中, C 、 ρ ——钢液的比热、密度; ΔH ——凝固潜热; λ_0 ——有效导热系数; V ——拉坯速度; f_s ——固相率分数; t ——铸坯内部任意处的温度; τ ——时间。

对(1)式,用差分法进行数值计算。差分法具有计算简单,计算时间短,适合连铸规则断面的特点。只要合理地选取时间和空间步长,能够保证模型精度。根据铸坯两侧面冷却的对称性和内外弧冷却的差异,计算取铸坯宽度方向的二分之一断面进行。

1.2 微分方程中有关参数的处理

1) 强制对流传热的处理

钢液通过伸入式水口对结晶器内钢液的冲击引起的强制对流传热主要影响结晶器区域,在二冷区已基本消失。根据已有研究成果^[1,6,7]和薄板坯连铸实际,将强制对流传热转换成有效导热处理,其有效导热系数为:

对液相区,从铸坯断面中心到液相线,有效导热系数从 5λ 变化到 2λ ,即

$$\lambda(x, y) = 5\lambda - 3\lambda(T_0 - T_l)/(T_0 - T_l) \quad (3)$$

两相区内,有效导热系数从 2λ 下降至 λ ,且随温度线性变化。即

$$\lambda(x, y) = 2\lambda - \lambda(T_l - T_s)/(T_l - T_s) \quad (4)$$

对固相区,有效导热系数为其本身的导热系数不变。

以上公式中, λ ——钢液静止时的导热系数; T_0 、 T_l ——钢液内部中心、任意位置 (x, y) 处的钢水温度; T_l 、 T_s ——钢液的液、固相线温度。

2) 潜热的处理

潜热的处理有多种方法。但不论用何种方法,潜热处理其精度高低的关键是凝固前沿固相率的形态。等效比热法认为,固相率随温度线性变化,两相区内潜热平均计入比热中,此法计算简便但有一定的误差。考虑到计算简便和使微分方程形式上在液、固、两相区相统一的特点,笔者用修正等效比热的方法(认为固相率随温度非线性变化)处理。钢水凝固基本符合液相溶质成分完全均匀,固相无扩散的假设。则凝固前沿液相溶质浓度分布符合 Scheil 方程

$$C_L = C_0(1 - f_s)^{k-1} \quad (5)$$

对二元合金,若固相线和液相线随合金成分的变化为直线,则有:

$$C_L = C_0(T_l - T)/(T_l - T_s) \quad (6)$$

将上式代入(5)式有:

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right)^{1/(k-1)} \quad (7)$$

上式中, k ——平衡分配系数; C_0 ——溶质元素平均含量。

由于钢水是多元合金,如要用(7)式非线性函数求固相率,其溶质只能用影响最大的元素如碳代替。这样处理将给计算带来误差,因而不太适宜用此法求固相率。参照(7)式,固相率可用下式表示:

$$f_s = 1 - \left(\frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^P \quad (8)$$

其中系数 P 为不同常数值时,研究表明差分数值计算与分析解也有一定差异。取 P 为固相

率的函数

$$P = P_2 + (P_1 - P_2)f_s \quad (9)$$

合理选取 P_1 、 P_2 的值可使差分数值计算误差最小,与分析解结果最接近^[8]。其最合理的一组值为: $P_1 = 1.25$, $P_2 = 0.75$ 。

根据隐函数和复合函数的求导法则可确定出固相率随时间的变化关系为:

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = -\frac{(1-f_s)}{(T-T_s)} \cdot \frac{P_2 + (P_1 - P_2)f_s}{\left[1 + (P_1 - P_2)(1-f_s)\ln\left(\frac{T-T_s}{T_1-T_s}\right)\right]} \quad (10)$$

2 结晶器边界条件的确立

所研究的薄板坯连铸机,类似MDH型。铸机采用直弧型结晶器,二冷区有九个冷却小段,第一段为足辊段,最后一段为空冷段。针对上述薄板坯铸机,模型中边界条件的确立考虑了如下因素:

- 1) 直弧型结晶器的直线段两宽面传热相同。
- 2) 弧线段两宽面传热有一定差异,弧线段铸坯外弧与器壁接触更紧密,传热较大。
- 3) 宽侧面热流有一定差别,由于冷却与铸坯表面尺寸关系的差别,结晶器中上部侧面热流稍大。结晶器中下部,由于侧面出现气隙时间较早,程度较大,此时宽面热流较大。宽侧面热流的差异还与拉速有关。

4) 结晶器锥度和所用保护渣的性能。

5) 角部传热特点。

根据上述论述,为保证薄板坯结晶器传热符合实际,结晶器边界条件用文献[9]中的结果按时间回归得到的公式进行计算。

3 二冷区边界条件的确立

3.1 二冷区的四种传热方式及内外弧冷却的差异

1) 夹辊区传热 二冷区相邻夹辊间存在4种方式的传热。夹辊区的传热为^[10]。

$$q = 11513.7 T_w^{0.36} V^{-0.29} (2\alpha)^{-0.16} \quad \text{W/m}^2 \quad (11)$$

$$2\alpha = 0.3116 + 4.6105 Z \quad (12)$$

式中, T_w ——铸坯表温, $^{\circ}\text{C}$; V ——拉速, m/min ; 2α ——夹辊与铸坯接触部分弧长所对应的角度, ($^{\circ}$); Z ——离弯月面的距离(当 Z 大于 4.5 m 时,保持 4.5 m 的值不变), m 。

2) 水冲击区传热 对水冲击区,所用喷咀有两大类,即扁喷咀和圆锥型喷咀。其喷淋水与铸坯表面间的传热系数用下式计算。

$$h = aT_w^b w^c \quad \text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

式中, w ——水流密度, $\text{L/m}^2 \cdot \text{s}$; a 、 b 、 c ——回归系数,其值通过连铸表面传热系数测定仪测定。

3) 水聚集蒸发区传热 根据所用喷咀性能及已有的研究结果用下式计算。

$$Q_w = 0.30 Q (\text{内弧}) \quad \text{W} \quad (14)$$

4) 辐射区和空冷段的传热 用辐射传热公式计算。

5) 内外弧冷却的差异 对外弧,由于喷淋水的重力影响,一部分在水冲击区未蒸发的水掉落地面,沿铸坯下流在夹辊处聚集蒸发的水较少。因此,内外弧冷却的差异主要表现在水聚集蒸发区传热的不同。由此文中对水聚集蒸发区外弧的传热进行了修正,为

$$Q_w = \left[0.30 - 0.10 \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{Z}{12.176} \right) \right] Q \quad (\text{外弧}) \quad (15)$$

上式中, Q_w ——水聚集蒸发区传热量, W; Q ——两相邻夹辊间的总传热量, W。

3.2 铸坯宽面横向上水流密度的变化规律

研究的薄板坯铸机均使用水喷咀。对喷咀雾化均匀性测试表明,宽面表面上扁喷咀水流,在中心部位密集,边缘附近水流较稀疏,中心与边缘密度的差值约为1倍。在铸坯横向上喷咀多个布置,相互间水流有一定交叉。基于此本文把横向上水流密度的变化处理成三个区域,即

(a) S_1 区域:中部大部分区域水流密度不变为 w 。

(b) S_2 区域:角部附近区域水流密度逐渐降低至原有的 $1/2$ 。此时水流密度为

$$w_x = 0.5w[1 + (S_2 - x)/S_2] \quad (\text{当 } w_x = w \text{ 时, } x = 0) \quad (16)$$

(c) S_3 区域:靠近角部区域水流密度为零,只有辐射传热($w = 0$),见图1。

3.3 铸坯喷淋水的有效喷淋系数

从铸机的生产来看,喷咀的布置为适应不同断面和在二冷中后期降低冷却强度的要求,必然会出现在铸坯横向上某些地方水未能完全喷满;而某些情况下某些部位水又有一部分喷出铸坯之外的情形。于是就有了铸坯接受的有效喷水量和实际喷水量的差别。作者首次考虑到这种差别,提出了有效喷淋系数的概念,见下式。

$$Q = EQ \quad (17)$$

式中, Q ——铸坯接受的有效喷水量, L/min; Q ——喷咀的实际喷水量, L/min; E ——有效喷淋系数。所研究的铸机的有效喷淋系数可根据铸坯宽面横向上水流密度的变化规律确定。对 $60 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 断面,二冷区内外弧 E 值处于 $0.9283 \sim 0.9884$ 之间,侧面 E 值为 0.6584 。对 $60 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 断面,二冷区内外弧 E 值处于 $0.7195 \sim 0.8862$ 之间。

4 时间步长的讨论

时间步长和空间步长的选择对模型的计算会带来一定的误差。对空间步长,可选取较小的值来提高计算精度。对时间步长,笔者在模型中采用了变时间步长。首先通过计算表明,显示差分方程的稳定性条件要求各冷却区的最大时间步长不同。因此从差分数值计算理论上提出了需在各冷却区采用不同的时间步长。

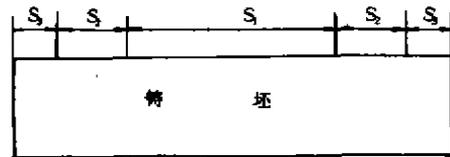


图1 铸坯横向上水冲击区水流密度分布

其次,在连铸边界的五个冷却区中,每一个区域在拉坯方向上的长度是不同的,夹辊区的长度最短。因此为计算准确起见,在五个区采用了不同时间步长,特别是在夹辊区采用很小的时间步长。

第三,薄板坯连铸拉速变化范围较大。若同一冷却区采用相同时间步长会使高拉速下一个时间步长范围内在拉坯方向上铸坯移动距离 ΔZ 太大。因此不同拉速下同—冷却区采用了不同时间步长。

综上所述,为保证计算有足够精度,模型中采用了变化的和较小的时间步长。其值列于表 1 中。

表 1 模型中采用的变时间步长

拉速/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	结晶器区	辐射区及空冷段	水冲击区	夹辊区	水聚集蒸发区
6.0~4.5	0.10	0.12	0.11	0.04	0.10
4.5~3.0	0.14	0.17	0.15	0.06	0.14
3.0~1.5	0.18	0.22	0.19	0.08	0.18

5 计算实例

对断面为 $60\text{ mm}\times 900\text{ mm}$ 的薄板坯,浇注 16Mn 钢,注温为 1530°C 时,应用上述数学模型进行仿真计算,得到了铸坯温度场的变化规律。其中 5.0 m/min 和 4.0 m/min 拉速下,薄板坯中心温度(曲线①)及外弧宽面中心温度(曲线②)的变化规律示于图 2 和图 3 中。从图中可以看出,铸坯表面温度在二冷喷淋区基本不变,波动较小。

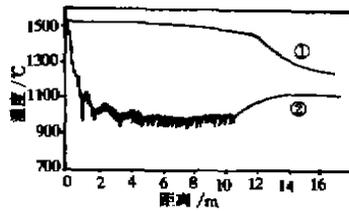


图 2 薄板坯中心、外弧宽面中心温度的变化规律
拉速: 4.0 m/min

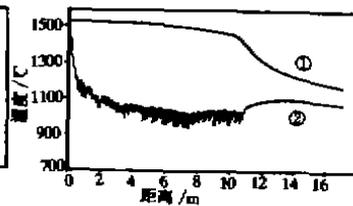


图 3 薄板坯中心、外弧宽面中心温度的变化规律
拉速: 5.0 m/min

6 结 论

作者建立了薄板坯连铸凝固传热与冷却过程的数学模型。模型中考虑了钢液的强制对流对凝固传热的影响;引入了修正的等效比热法处理两相区的凝固潜热;考虑了结晶器的直弧型、宽面、侧面、角部等的传热差异;考虑了二冷区铸坯内外弧和横向上的冷却差别;首次提出了有效喷淋系数的概念;针对不同拉速、不同冷却区域采用了变时间步长。因此模型在理论上具有较高的精度并能更符合薄板坯连铸的实际。

所建立的数学模型中提出的一些观点和思想对板坯连铸及方坯连铸的凝固传热计算机

模拟也具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] SAMARASEKERA I V, BRIMACOMBE J K. Application of Mathematical Models for the Improvement of Billet quality[A]. Steelmaking Conference Proceedings[C]. Warrendale, PA, U. S. A.; the Iron and Steel Society, Inc., 1991, 91~103.
- [2] STEFANO BAROZZI, PIERGIORGIO FONTANA, PASQUALINO PRAGLIOLA. Computer Control and Optimization of Secondary Cooling during Continuous Casting[J]. Iron and Steel Engineer, 1986, 63(11):21~26.
- [3] 周筠清. 板坯连铸冷却过程的二维数学模型[J]. 钢铁, 1986, 21(2): 66~70.
- [4] 陈登福, 颜广庭, 刘人达. 方坯连铸凝固传热数学模型[J]. 重庆大学学报, 1994, 17(1): 112~116.
- [5] 程鸣涛, 倪满森. 水平连铸中断面圆坯凝固过程的数学模拟[J]. 钢铁研究学报, 1996, 8(4):10~13.
- [6] 李强, 温崇哲. 结晶器内钢液凝固的边界元法分析[J]. 重型机械, 1990, (5): 39~42.
- [7] 萨莫伊洛维奇. 连续铸钢的热过程. 北京:冶金工业出版社, 1987, 112~117.
- [8] 雷新泉. 用差分法求解金属凝固传热问题的一个注记[J]. 钢铁研究, 1992, (5): 35~39.
- [9] MAHAPATRA R B, BRIMACOMBE J K, SAMARASEKERA I V. Mold Behavior and its Influence on Quality in the Continuous Casting of Steel Slabs: Part Two[J]. Mold Heat Transfer, Mold Flux Behavior, Formation of Oscillation Marks, Longitudinal Off-Corner Depressions, and Subsurface Cracks. Metallurgical Transactions B, 1991, 22B(12): 875~888.
- [10] 陈登福, 颜广庭. 连铸二冷区的夹辊与铸坯间传热研究[J]. 炼钢, 1991, 7(1):39~43.

The Mathematical Model of Cooling and Heat Transfer for the Solidification of Thin Slab during Continuous Casting Process

CHEN Deng-fu, LIU Ren-du, XU Chu-shao, YAN Guang-ting

(Faculty of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: In the established model, the cooling differences are considered between the surface of inner radius and that of outer radius, and in the transverse direction of thin slab. And the conception for the effective coefficient of spraying water in continuous casting is firstly put forward. According to different casting speeds and different cooling zones, different time step lengths are adopted. In this model the heat transfer differences are thought over among vertical and curved zones, wide and narrow surfaces as well as angular zone of mould. The method of the corrected equivalent specific heat is used to deal with latent heat. The influence of forced convection is considered on heat transfer. Therefore, the model has higher accuracy and is consistent with the practice.

KEYWORDS: continuous casting; thin slab; heat transfer; mathematical model

(责任编辑 吕赛英)