

铝带坯连续铸轧凝固过程的数值模拟^①

史 荣 崔小朝 孙斌煜

(太原重型机械学院一系, 太原 030024)

陆锁柱

(太原铝厂, 太原 030024)

摘 要 推导了二维传热的焓式有限元控制方程, 开发了准三维焓式有限元计算程序, 并用该程序分析了太原铝厂双辊倾斜式铝带铸轧机在稳定生产条件下, 各工艺参数间的关系及提高铸轧机生产能力的途径, 本程序具有随时输出金属在铸轧区凝固状态的功能, 可用于生产过程中的动态跟踪。

关键词 连续铸轧 凝固传热 有限元法

铝带坯连续铸轧是一项正在发展中的新工艺与新技术, 其优越性十分明显, 它能缩短生产工艺流程, 获得尽可能高的经济效益。然而, 连续铸轧又是一种很复杂的金属凝固过程, 一方面金属要连续散热凝固, 另一方面又要在轧制力的作用下产生一定变形, 两者相互制约, 相互影响, 因此, 深入研究铸轧过程金属凝固规律及塑性变形理论, 不但是推动铸轧技术发展的基础, 而且也是实现铸轧过程自动控制的关键。目前已有许多学者做了这方面的工作, 但多数是针对正在实验中的带钢连续铸轧的热态分析^[1], 而对于已用于生产的铝带坯连续铸轧理论很少有人问津。为促进有色金属连续铸轧理论的发展, 作者采用焓式有限元法计算了铝带在铸轧过程中的凝固状态, 并以太原铝厂 $d 650/1600\text{mm}$ 双辊倾斜式连铸机为机型, 分析了铸轧速度、冷却强度、浇注温度等参数间的关系, 跟踪了铸轧区内各截面的凝固状态以及温度状态, 并将计算结果以图形的形式展示在读者面前, 该算法对实现铸轧过程的计算机动态模拟具有重要价值。

1 伴有相变的焓式有限元方程

在双辊铝带坯连续铸轧过程中, 熔融金属被连续地注入两辊表面及辊端侧堰所组成的结

晶器中, 铸轧辊使金属液形成凝固壳, 随着轧辊转动, 凝固壳逐渐增厚直至完全凝固, 因此在凝固过程中存在一个随时间变化的“移动界面”, 属于典型的伴有相态变化的热传导问题, 这类问题在数学上是一个强非线性问题, 解的叠加原理不能使用, 数值解法显示了明显的优越性^[2]。

1.1 焓式有限元基本方程及计算模型

为建立铝液凝固过程导热焓式有限元方程, 必须对实际生产过程中的复杂问题进行理想化处理, 突出其基本矛盾, 使问题的求解成为可能。因此, 对连续铸轧的凝固过程作如下假设:

- (1) 固相率与温度成线性关系;
- (2) 忽略轧制方向的传热, 设其为二维导热问题;
- (3) 不考虑金属流动过程中的热损耗。

经过上述假设, 可建立铝带坯凝固的导热微分方程, 即:

$$\rho c \frac{\partial h}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中 c 为定压比热; h 为单位质量热焓; ρ 为物质密度; k 为物质的导热系数; T 为控制容积的温度; t 为时间; x, y 分别为铸轧坯厚度和宽度方向。

当凝固区域内存在相态变化时, 比焓与温

度的关系可表示为:

$$T = \begin{cases} h/c, & h \leq cT_m \\ T_m, & cT_m \leq h \leq T_m + l_s \\ (h - l_s)/c, & h \geq cT_m + l_s \end{cases} \quad (2)$$

式中 T 为控制容积温度; T_m 为控制容积相变温度; l_s 为相变潜热

采用 Galerkin 法对(1)式进行变换^[3], 并利用有限元法将铸轧区分成 E 个单元和 n 个节点, 将连续温度场离散到 n 个节点上, 可得到单元 E 内的积分计算式:

$$\iint_E [k(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial w_l}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y}) - \rho c W_l \frac{\partial h}{\partial t}] dx dy - \int_{j m} k W_l \frac{\partial h}{\partial n} ds = 0 \quad (3)$$

式中 E 为三角形单元($l = i, j, m$); W_l 为加权系数。

对所有单元合成, 得到焓式有限元计算公式:

$$([K] + [N]/\Delta t)\{h\}_t = ([N]/\Delta t)\{h\}_{t-\Delta t} + \{P\}_t \quad (4)$$

式中 $[K]$ 为刚度矩阵; $[N]$ 为变焓矩阵; Δt 为时间步长; $\{h\}_t$ 为 t 时刻各节点热焓; $\{P\}_{t-\Delta t}$ 为 $t - \Delta t$ 时刻各节点热焓; $\{P\}_t$ 为 t 时刻右端列向量。

对铸轧凝固过程, 各类边界的定解条件详见文献[3]。简化后的计算模型如图1所示。

1.2 铸轧区内的几何参数

在铸轧区内金属与铸轧辊的接触面为圆弧面, 由于轧辊直径远大于坯料厚度, 为简化计

算将其简化为线性区域(见图1), 于是任一位置 z 处带坯厚度 H_z 可表示为:

$$H_z = H_1 - (H_1 - H_s) \cdot z/L \quad (5)$$

式中 H_z 为铸轧坯铸轧区任一位置处厚度; H_s 为铸轧坯铸轧区出口处厚度; H_1 为铸轧坯铸轧区液面厚度。

$$H_1 = H_s + R - \sqrt{R^2 + (L - z)^2} \quad (6)$$

式中 L 为铸轧区长度; R 为铸轧棍半径。

根据质量连续性定理可得:

$$U_z \cdot H_z = U_s \cdot H_s \quad (7)$$

式中 U_z 为铸轧坯任一位置处沿拉坯方向的速度; U_s 为拉坯速度(恒速)。

$$\text{而 } U_z = \frac{dz}{dt} = U_s \cdot \frac{H_s}{H_z} \quad (8)$$

由(5) ~ (8) 式可得:

$$U_s \cdot H_s \cdot dt = [H_1 - (H_1 - H_s) \cdot z/L] dz \quad (9)$$

对(9)式积分, 并代入边界条件 $t = 0$ 时, $z = 0$ 可得截面位置座标与凝固时间的关系:

$$U_s \cdot H_s \cdot t = \{H_1 \cdot z - (H_1 - H_s) \cdot z^2\} / (2L) \quad (10)$$

$$z = \{LH_1 + [(LH_1)^2 + (H_1 - H_s) \cdot 2LH_1 t]^{1/2}\} / (H_1 - H_s) \quad (11)$$

1.3 计算参数

本计算以太原铝厂 $d 650/1600\text{mm}$ 倾斜式双辊铸轧机为目标机型, 其几何尺寸、工艺尺寸、工艺参数及铸坯的热物性等见表1。

图1 铝带坯铸轧计算模型

(a) — 计算模型; (b) — 简化模型

2 计算结果分析

对双辊连续式铸轧机铸轧区的建立至关重要,而该区域的建立主要与浇注温度、冷却强度、铸轧速度等工艺参数有关。在生产实践中,当某一参数变化影响铸轧区内熔体凝固时,一般调整铸轧速度使生产保持连续,所以铸轧速度是非常关键的参数,分析铸轧速度变化对建立铸轧区的影响及寻求提高速度的途径,在理论上与实践上都具有重要意义。

2.1 铸轧速度与铸轧区长度

大量研究表明,在稳定铸轧状态下铸造区

与变形区长度之比应在1/4~ 1/3 的范围内,铸轧速度的改变会明显改变上述比例关系。图2显示了当浇注温度为963 K,冷却强度 1.409×10^6 时,铸轧速度变化对铸造区长度的影响。其中图2(a)、(b)、(c)分别显示了铸轧速度为0.5、1.0和1.5 m/min 时的铸造区长度(L_1)值,图2(d)为铸轧速度与铸造区长度(或液芯长度)的关系曲线。由图2可见,当铸轧速度过低时,铸造区长度过短,将引起过渡冷却,使轧件变形抗力增加,加大了轧机负荷,速度进一步降低,铝熔体可能在供料嘴处凝固,使铸

表1 d650/1600 mm 倾斜式双辊铸轧机计算参数表

铸轧机(炮钢)		铝带坯(工业纯铝)			
铸轧辊外径	d 610~ 650 mm	熔体比热容	0.308 J/(kg• K)	带坯宽度	1 060 mm
铸轧辊长度	1 600 mm	固态比热容	0.214 J/(kg• K)	熔点	933.2 K
浇注温度	963~ 983 K	熔化潜热	93 J/ kg	导热系数	181.3 W/(m• K)
铸轧区长度	48 mm	出口厚度	7 mm	定压比热	774.7 J/(kg• K)
铸轧速度	0.8~ 1.2 m/ min	固态密度(293 K)	2 703 kg/ m ³		
冷却强度	1.409 08× 10 ⁶	液态密度(960 K)	2 439 kg/ m ³		

图2 铸轧速度变化对铸造区长度的影响

(a) — $U_s= 0.5$ m/ min, $L_1 = 4.58$ mm; (b) — $U_s= 1.0$ m/ min, $L_1 = 4.58$ mm;
(c) — $U_s= 0.5$ m/ min, $L_1 = 4.58$ mm; (d) — 铸轧速度与铸造区长度的关系曲线

轧过程中断。铸轧速度过高,凝固点偏向出口侧,金属凝固不充分,将造成热带、分层、内裂甚至轧漏。图2(b)为太原铝厂的双辊铸轧机目前采用的速度,此时铸造区长度大约占整个铸轧区长度的1/5,按图2(d)所给出的曲线,在其它参数保持不变的情况下,最佳的铸轧速度应该为1.2~ 1.6m/min,因此太原铝厂铸轧机的铸轧速度可进一步提高。

2.2 铸轧速度与浇注温度

铸轧速度与浇注温度间的关系较为明显,当铸温高时必需降低铸轧速度,以保证铝液充分凝固;反之,当注温偏低时必须增加速度,以防止过度冷却。满足稳定铸轧条件时浇注温度提高10℃,拉速应相应降低约2mm/s。

根据材料的冶金特性,铝的浇注温度应保持在958~ 963 K,所对应的铸轧速度约为1.4~ 1.6m/min,由注温与铸轧速度之间的关系亦可说明太原铝厂所采用的速度偏低。

2.3 铸轧速度与冷却速度

在满足连续铸轧条件下,冷却强度是影响铸轧速度的重要因素,表2所示浇注温度为963 K,改变冷却强度对铸轧速度的影响,计算结果表明,只要冷却水温差提高1℃,冷却强度可增大一倍,铸轧速度明显提高。可见,设法提高铸轧辊与冷却水的换热效率,是提高铸轧机生产能力的重要措施。

3 铸轧过程的动态跟踪

采用焓式有限元法,对表1所示工艺条件下的生产过程进行了动态跟踪,其结果表明,当 $z < 1.4\text{ mm}$ 时,(见图1),金属全部为液态;当 $z \geq 1.4\text{ mm}$ 时,凝固壳开始形成,并逐渐增厚;当 $z = 12.2\text{ mm}$ 时,金属全部凝固。因此 $1.4\text{ mm} \leq z \leq 12.2\text{ mm}$ 为表1所示条件下的金

表2 冷却强度与铸轧速度的关系

浇注温度	冷却强度	铸轧速度
963 K	1.4090×10^6	16.6 mm/s
	$2 \times 1.40908 \times 10^6$	33 mm/s
	$3 \times 1.40908 \times 10^6$	65 mm/s

属凝固区,此时铸造区与变形区长度之比为1..4,铸轧过程较为稳定。

图3为铸坯中心温度与表面温度的变化情况,在铸轧区内,中心温度高于表面温度,铸

图3 铸坯中心温度与表面温度的变化曲线

轧结束后,带坯在空气中冷却,中心温度与表面温度趋于一致,计算结果与文献[4]所提供的实验数据相吻合,因此该算法可用于生产过程中的动态跟踪,同时可用于各种工艺状态下的计算机“铸轧实验”。

参考文献

1 张 奇等. 上海金属, 1991, (4): 14.

2 陈海清等著. 铸件凝固过程数值模拟. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.

3 孔祥谦著. 有限元法在传热学中的应用. 北京: 科学出版社, 1986.

4 马锡良著. 铝带坯连续铸轧生产. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.

(下转105页)

LOW-TEMPERATURE HEAT CAPACITY OF EACH PHASE IN Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ ALLOY

Yang Guanjuan

Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Baoji 721014

Hao Shiming

Department of Materials Science and Engineering

Northeastern University, Shenyang 110006

ABSTRACT The heat capacities of Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ and Nb₈₀Ti₁₄Ni₆ alloys in the temperature range from 60 to 350 K were measured by means of an adiabatic calorimeter, and experimental data of heat capacity of Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ alloy were fitted by the least square method. The heat capacity of TiNi phase in Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ alloy was calculated on the basis of additivity of molar heat capacity. The transition peak between 215 K and 260 K was associated with the reverse thermoelastic martensitic transformation. Transformation start temperature, transformation finish temperature, transformation enthalpy and entropy were determined to be $A_s = 222$ K, $A_f = 255$ K, $\Delta H = 411.9 \pm 2.5$ J•mol⁻¹, $\Delta S = 1.76 \pm 0.01$ JK⁻¹•mol⁻¹, respectively.

Key words Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ alloy heat capacity thermoelastic martensitic transformation adiabatic calorimeter
(编辑 朱忠国)

(上接101页)

NUMERICAL SIMULATION FOR SOLIDIFICATION OF ALUMINIUM-STRIP IN CONTINUOUS CASTING AND ROLLING PROCESS

Shi Rong, Cui Xiaochao, Sun Binyu

Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024

Lu Suozhu

Taiyuan Aluminium Plant, Taiyuan 030024

ABSTRACT An enthalpy control equation with FEM for heat transfer process in two dimensions and its software FEM were developed. This software was used to analyze the relation of various operational parameters for the steady production of the Twin-Roller Aluminium Casting-Rolling Machine in Taiyuan Aluminium Plant, and the way of raising the Machine's production. Since the software has immediate simulating function for solidification process of the metal in casting-rolling region, so it can be used in metal dynamic trailing in producing process.

Key words continuous casting-rolling solidifying heat transfer finite element method

(编辑 彭超群)