

[文章编号] 1004- 0609(2001)01- 0015- 03

铝材连续铸挤动态凝固过程有限元分析^①

陈彦博, 温景林

(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110006)

[摘 要] 利用有限元法研究了连续铸挤工艺中液态金属的动态凝固过程。数值计算和实测结果表明, 摩擦热和变形热对铝材连续铸挤凝固区的温度场有较大影响, 采用等价比热法处理凝固潜热问题是切实可行的。通过速度场与温度场的耦合计算, 得到了凝固区的温度场分布情况。

[关键词] 连续铸挤; 凝固; 有限元法

[中图分类号] TG 113

[文献标识码] A

连续铸挤(CASTEX)是铝及其合金的先进挤压工艺, 用该法可以由液态金属直接生产出铝及其合金的管、棒和线等型材, 其基本生产过程如图 1 所示^[1~ 3]。液态金属从浇口浇入, 进入铸挤轮槽同铸挤靴构成的挤压腔体中, 在铸挤轮的带动下, 液态金属经历动态结晶→半固态加工→塑性变形 3 个阶段, 最后挤出模孔。液态金属在挤压腔体中的凝固行为比较复杂, 是伴随相变的动态结晶过程, 对该过程的金属凝固情况进行有限元(FEM)分析, 对保证整个工艺流程顺利进行具有重要意义。

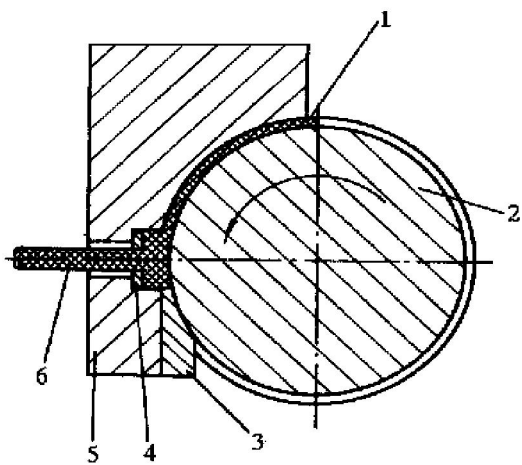


图 1 连续铸挤示意图

Fig. 1 Sketch map of CASTEX

1—Liquid metal; 2—Extrusion wheel; 3—Abutment;
4—Die; 5—Shoe; 6—Product;

1 问题的提出

挤压腔体中金属由液态到完全凝固过程中, 液态金属在铸挤轮施加的驱动力下流动, 同时伴随热交换, 要进行速度场与温度场的耦合分析, 会涉及

到相变时的凝固潜热, 这是一个十分复杂的问题, 必须对其做适当的简化。

1) 假设条件

①连续铸挤过程处于连续和稳定的状态;

②液态金属区域内无紊流发生, 其流动是受铸挤轮转动控制的层流;

③液态金属为不可压缩的牛顿流体;

④液态金属无泄漏。

2) 模型的处理

在挤压腔体中液态金属发生的是伴随热交换的三维流动, 因此可以建立一个三维有限元模型模拟金属坯料在挤压腔体内的流动及传热状况。为了减少计算量, 充分利用对称性, 将坯料沿子午面一分为二建立模型。

2 边界条件的处理

2.1 对称面

在稳定连续铸挤情况下, 铸挤轮内部的冷却水连续均匀流动, 所以铸挤区坯料的几何对称面两侧温度分布也对称, 因此认定对称面为热流 $Q = 0$ 的绝热边界条件^[4]。

2.2 自由表面

自由表面即浇注口表面, 当液态金属连续稳定浇入时, 可以认为新注入的金属带入的热量与辐射的热损失达到平衡, 坯料表面的温度为一定值, 即金属的浇注温度。

2.3 坯料与铸挤轮轮槽的接触面

连续铸挤过程中, 坯料与水冷的铸挤轮槽的温

① [收稿日期] 1999- 12- 06; [修订日期] 2000- 07- 10

[作者简介] 陈彦博(1973-), 男, 博士研究生。

差较大,在接触面上会发生热量交换,可按连续热流的热阻问题处理:

$$Q_i = h_i A (T - T_1) \quad (1)$$

式中 h_i —坯料与铸挤轮换热系数, T_1 —铸挤轮轮槽表面温度, A —接触面积。在实验时,将铸挤轮预热到 450 °C,并通水冷却,实测发现在实验中铸挤轮温度基本无变化,所以 T_1 可认定为 450 °C; 式(1)中换热系数 h_i 可通过式(2)确定:

$$q_1 = \frac{T(\text{H}_2\text{O}) - T_1}{R_1} = h_i [T(\text{H}_2\text{O}) - T_1] \quad (2)$$

式中 R_1 —复合热阻^[5], $R_1 = \frac{x}{k_s} + \frac{1}{h}$; x —轮槽底至冷却水管的距离; k_s —轮槽的导热系数; h —冷却水的对流换热系数。 h 可采用紊流换热准则计算^[6],由此可以确定边界条件中的换热系数。

2.4 坯料与铸挤靴的接触面

同铸挤轮类似,此边界的热量交换也可按连续的热流热阻问题处理:

$$Q_j = h_j A (T - T_2) \quad (3)$$

式中 h_j —坯料与铸挤靴面换热系数, T_2 —铸挤靴温度。在实验前铸挤靴须预热到 500 °C,在实验中温度基本不变,可认定 T_2 为 500 °C。式中换热系数 h_j 的确定与式(1)中 h_i 的确定方法相同。

3 凝固潜热的处理

材料在铸挤过程中存在相变,在此过程中会放出凝固潜热,凝固潜热的处理可采用等价比热法^[7],其原理为在某一节点处于凝固区时,满足以下方程:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + Q = \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (4)$$

式中 t —节点温度; Q —凝固区内单位时间单位体积所释放的热量; τ —时间。将式(4)变换成不含内热源的等效差分方程^[9]:

$$\begin{aligned} & \lambda_{i,j} \frac{t_{i,j} - t_{i-1,j}}{\Delta x} \Delta y \Delta \tau + \\ & \lambda_{i,j} \frac{t_{i,j} - t_{i+1,j}}{\Delta x} \Delta y \Delta \tau + \\ & \lambda_{i,j} \frac{t_{i,j} - t_{i,j-1}}{\Delta y} \Delta x \Delta \tau + \\ & \lambda_{i,j} \frac{t_{i,j} - t_{i,j+1}}{\Delta y} \Delta x \Delta \tau = \\ & - c_{i,j}^* (t_{i,j}^{m+1} - t_{i,j}^m) \rho_{i,j} \Delta x \Delta y \Delta \tau \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\lambda_{i,j}$ —导热系数; $\rho_{i,j}$ —密度; $c_{i,j}^*$ —等效比热容, $c_{i,j}^* = c_{i,j} + \frac{Q_{i,j}}{\rho_{i,j}(t_{i,j}^m - t_{i,j}^{m+1})}$; $c_{i,j}$ —材料不

计凝固潜热时的比热容; $\frac{Q_{i,j}}{\rho_{i,j}(t_{i,j}^m - t_{i,j}^{m+1})}$ 是材料凝固潜热折合成的比热容。式(5)中的导热系数 $\lambda_{i,j}$ 和密度 $\rho_{i,j}$ 均为温度 $t_{i,j}$ 的函数,故

$$\rho_{i,j} = \frac{t_1^* - t_{i,j}}{t_1^* - t_2^*} \rho_s + \frac{t_{i,j} - t_2^*}{t_1^* - t_2^*} \rho_l,$$

$$\lambda_{i,j} = \frac{t_1^* - t_{i,j}}{t_1^* - t_2^*} \lambda_s + \frac{t_{i,j} - t_2^*}{t_1^* - t_2^*} \lambda_l$$

式中 ρ_s —材料固态时密度; ρ_l —材料液态时密度; λ_s —材料固态时导热系数; λ_l —材料液态时导热系数; t_1, t_2 —材料凝固开始和结束温度。

4 连续铸挤过程动态凝固过程的数值计算

对坯料与铸挤轮槽底面和侧面的接触施加切向载荷,而对坯料与铸挤靴的接触面则施加零速度约束,并以坯料的浇注温度为初始条件进行计算。计算程序框图如图 2。

5 计算结果及分析

当浇注铝液的温度为 720 °C,铸挤轮转速为 0.09 m/s,冷却水流量为 10 L/min 时,计算结果和实测值的情况对比见图 3。金属与铸挤轮槽侧壁接触处的温度等值线图和速度场如图 4 所示。由于连续铸挤工艺本身的限制,只能在铸挤靴侧面开测温

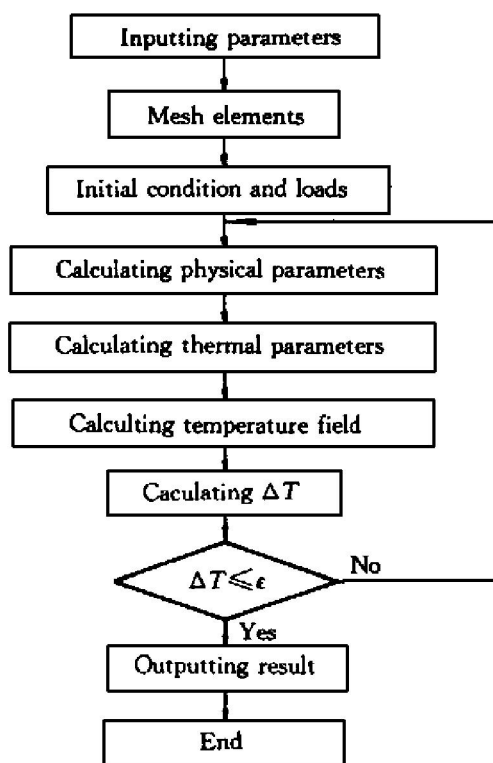


图 2 程序计算框图

Fig. 2 Flow chart of program

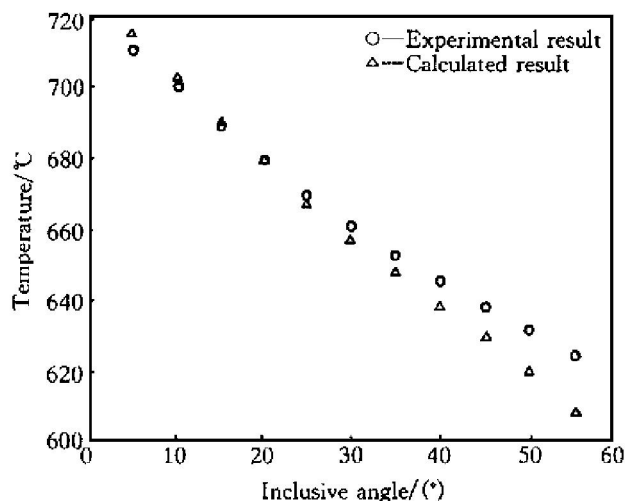


图 3 计算结果与实测结果的比较

Fig. 3 Comparison of calculated result with measured temperature

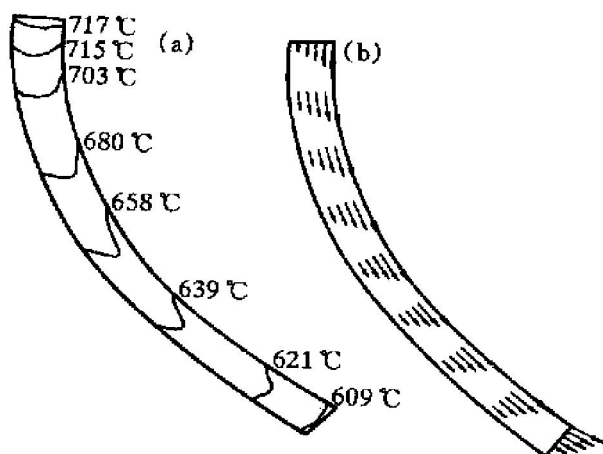


图 4 温度等值线图 and 速度场

Fig. 4 Temperature contours and velocity field
(a) —Temperature contours; (b) —Velocity field

槽, 所以图 3 中仅选用了坯料与轮槽侧壁接触面上

与测温槽位置相对应处的计算值, 测温点直径为 1 mm, 距被挤压金属 2.5 mm, 由图 3 可见, 计算值整体上与实测值吻合较好, 说明计算的结果是可信的, 但从图 3 中可以看到, 在包角较小时, 即在浇口附近位置时, 计算值高于实测值, 而在包角较大时, 实测值又高于计算值, 经分析认为, 由于在浇口处忽略了辐射热, 所以计算值高于实测值, 而在包角较大时, 液态金属已经完全凝固, 在运动过程中产生了大量的摩擦热, 而计算时并没有考虑到摩擦热的影响, 所以计算值比实测值要小。

[REFERENCES]

- [1] WANG Zhur-tang(王祝堂). Conform 挤压工艺及 Castex 铸挤工艺 [J]. Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1986(4): 29- 33.
- [2] Green D. Filed Match [P]. UK Patent: 1370894, 1971.
- [3] Rarade J A. Conform —The revolutionary process for continuous extrusion of aluminum tube from rod and scrap [J]. Light Metal Age, 1984, 42(4): 6.
- [4] LU Yu(陆煜) and CHENG Lin(程林). Theory Analysis of Heat Transfer(传热原理与分析) [M]. Beijing: Science Press, 1997. 6.
- [5] Incropera F P and Dewitt D P. Fundamentals of Heat Transfer [M]. Canada: John Wiley & Sons Inc, 1981. 44- 45.
- [6] Cebeci T and Bradshaw P. Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer [M]. New York: Springer-Verlag New York Inc, 1984.
- [7] LIU Gao-qi(刘高琪). Simulation of Temperature Field (温度场的数值模拟) [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1990.

FEM analysis of solidification process in producing aluminum product through CASTEX technique

CHEN Yan-bo, WEN Jing-lin

(College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China)

[Abstract] The solidification process of liquid metal in the CASTEX technique was studied by FEM(finite element method). The calculated and experimental results show that friction heat and deformation heat have great influence on the distribution of temperature and it is feasible to handle the latent heat of solidification process by equivalent specific heat method. The distribution of the temperature field in solidification zone was gained by coupling calculating of velocity field and temperature field.

[Key words] CASTEX; solidification; finite element method

(编辑 杨兵)