

文章编号:1671-6833(2005)01-0065-04

# 热挤压工艺过程非稳态的有限元分析

冯启高<sup>1,2</sup>, 傅宇<sup>2</sup>

(1. 河南科技学院机电工程系, 河南 新乡 453003; 2. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 依据工艺试验所得数据, 采用有限元软件对铝棒材挤压成形过程的温度场进行了数值模拟, 得出了反映该过程温度场分布和变化情况的云图, 并结合实验研究和模拟结果对其工艺规律进行了深入分析. 研究表明: 保压时间是决定工艺稳定性和制件质量的重要工艺参数, 合适的保压时间可使挤压过程中变形区金属始终处于半固态, 保证工艺的顺利实施. 该结论为进一步设计优化工艺参数提供了理论依据.

**关键词:** 热挤压; 有限元法; 非稳态温度场  
**中图分类号:** TG 376.2 **文献标识码:** A

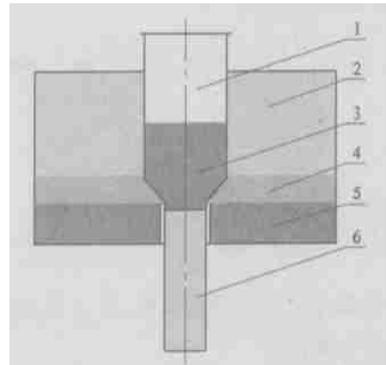
## 0 引言

金属热挤压是一种近年来发展起来的金属成形新工艺, 在成形有色金属材料方面具有突出的优点, 是 21 世纪具有广泛的应用前景的近净成形技术<sup>[1,2]</sup>. 但因整个工艺过程是集凝固、热传导和塑性变形为一体的复杂过程, 是一个非线性、多变量的时变系统, 难以建立确切的数学模型, 只能通过试验和理论分析相结合的方法来确定各工艺参数, 特别是成形过程温度场的确定, 对合理确定工艺参数控制成形质量意义重大<sup>[3]</sup>. 本文作者建立了铝棒材热挤压成形过程热传导有限数学模型, 根据已知的挤压条件, 通过有限元软件模拟了整个工艺过程的温度场分布和变化情况, 并结合实验和模拟结果对工艺内在规律进行了理论分析, 为工艺参数优化提供了科学依据.

## 1 含内热源的瞬态轴对称温度场有限元单元法及其方程组列式

由于在挤压变形过程中, 工件和模具始终保持轴对称(见图 1), 且塑性变形功产生的内热源及摩擦生热的热流只与  $r, z$  坐标有关. 因此, 挤压过程温度场的求解, 实际上是一个有内热源的轴对称不稳定热传导问题. 在柱坐标中场函数  $T(r, z, t)$  应满足的微分方程是<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \omega - r \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$



1. 冲头; 2. 挤压筒; 3. 热挤压金属; 4. 成形模  
5. 底板; 6. 制件

图 1 铝棒材热挤压工艺示意图

Fig. 1 Scheme of the Al bar forming process

式中:  $\lambda, \lambda_z$  为材料的热导率;  $c$  为材料的比热;  $\rho$  为材料的密度;  $r$  为半径;  $\omega$  为内热源(塑性功转化的热量).

初始条件为

$$T_0 = \Phi(r, z, 0) \quad (2)$$

边界条件为

在  $\Gamma_1$  边界上,

$$T = \Phi(r, z, t) \quad (3)$$

在  $\Gamma_2$  边界上,

收稿日期:2004-09-20; 修订日期:2005-01-21

基金项目:河南省科技攻关项目(0424300007)

作者简介:冯启高(1964-),男,河南省灵宝市人,河南科技学院副教授,江苏大学博士研究生,主要从事材料科学与工艺方面的研究.

$$r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = r q(t) \quad (4)$$

在  $\Gamma_3$  边界上,

$$r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = r h (T - T_c) \quad (5)$$

式(3)在  $\Gamma_1$  边界上给定温度,称第一类边界条件;式(4)在  $\Gamma_2$  边界上给定热流量,称第二类边界条件;式(5)在  $\Gamma_3$  边界上给定对流换热条件,称第三类边界条件。 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3$  就是求解域  $\Omega$  的全部边界。微分方程等效积分形式的伽辽金提法在空间域有限元离散后,就可得到其有限元求解方程。

首先,求解区域  $\Omega$  离散成由  $m$  个单元体和  $n$  个节点组成的有限元求解模型,在每个单元内的温度  $T(t)$  近似地用单元节点处的温度  $T_i(t)$  来描述

$$T(t) = \sum_{i=1}^n N_i(r, z) T_i(t) \quad (6)$$

将其代入场方程式(1)和边界条件式(4)和式(5)时,将产生余量

$$\begin{cases} R_\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + r \omega - r h (T - T_c) \\ R_{S_2} = r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} - r q \\ R_{S_3} = r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + r \lambda \frac{\partial T}{\partial z} - r h (T_c - T) \end{cases} \quad (7)$$

根据伽辽金法选择权函数,并令其与余量的加权积分为零,则

$$\int_{\Omega} R_\Omega N_j d\Omega - \int_{S_2} R_{S_2} N_j dS - \int_{S_3} R_{S_3} N_j dS = 0 \quad (8)$$

( $j = 1, 2, \dots, n$ )

将式(8)作分部积分,写成对单元积分的总和,则

$$\begin{aligned} & \sum_e \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial N}{\partial t} \left( \lambda \frac{\partial N}{\partial r} \right) + \frac{\partial N}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial N}{\partial z} \right) \right] [N]^e d\Omega + \\ & \sum_e \iint_{\Omega} p c [N] \frac{\partial T^e}{\partial t} d\Omega - \sum_e \iint_{\Omega} \omega [N] d\Omega - \sum_{e_2} \int_{S_2} r N q dS \\ & - \sum_e \int_{S_3} r h T_c [N] dS + \sum_e \int_{S_3} r h [N] (T)^e dS = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

写成有限元求解格式,有

$$[C] \{T^{\dot{}}\} + [K] \{T\} = \{\varphi\} \quad (10)$$

式中: $[C]$  为热容矩阵; $[K]$  为热传导矩阵; $\{\varphi\}$  为热流向量; $\{T^{\dot{}}\}$  为节点温度速率向量; $\{T\}$  为节点温度向量。

采用后差分方案来积分式(10),温度向量

$\{T\}$  对时间导数近似为

$$\frac{\partial \{T\}_i}{\partial t} = \frac{\{T\}_i - \{T\}_{i-\Delta t}}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: $\{T\}_i$  和  $\{T\}_{i-\Delta t}$  分别是  $t$  和  $t - \Delta t$  时刻的节点温度矢量; $\Delta t$  为时间步长。将上式代入式(10),得

$$\left[ \frac{[C]}{\Delta t} + [K] \right] \{T\}_i = \frac{[C]}{\Delta t} \{T\}_{i-\Delta t} + \{\phi\}_i \quad (12)$$

当材料的热容、比热等热物理参数和对流放热系数依赖于温度时,则上式代表非线性热传导问题,其后差分形式的温度递推格式为

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{[C](\{T^*\})}{\Delta t} + [K](\{T^*\}) \right] \{T\}^n = \\ & \frac{[C](\{T^*\})}{\Delta t} \{T\}^{n-1} + \{\phi\}_i(\{T^*\}) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\{T_1^*\} = \frac{1}{2} (3\{T\}^{n-1} - \{T\}^{n-2}) \quad (14)$$

第  $i$  次迭代时,  $\{T^*\}$  用平均温度表示成

$$\{T_i^*\} = \frac{1}{2} (\{T^{n-1}\} + \{T_{i-1}\}^n) \quad (15)$$

计算时程序根据设定的收敛准则检查  $\{T_{i-1}\}^n - \{T_i^*\} \leq$  小于给定容许误差,则计算结束。

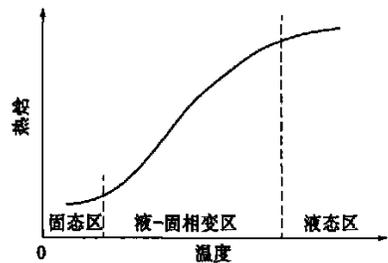


图2 用热焓的变化描述结晶潜热

Fig. 2 Latent heat described by the variations of enthalpy

## 2 温度场模拟过程中关键问题的处理

### 2.1 结晶潜热的处理

由于制件不断向模具及环境散失热量,整个过程始终存在液态金属凝固为固态而释放结晶潜热。模拟时应考虑结晶潜热对制件的温度变化的影响。对潜热有等价比热法,热焓法和温度回升法等处理方法。本文通过热焓法来处理结晶潜热<sup>[3]</sup>。

根据固态、热挤压和液态温度区间内纯铝的密度和比热及其凝固时的潜热,由式(16)计算得到不同温度区间内的热焓值。

$$H = \int c(T) dT \quad (16)$$

通过菜单 PREPROCESSOR > MATERIAL PROPS

> MATERIAL MODELS, 打开 DEFINE MATERIAL

MODEL BEHAVIOR 对话框, 在其中的 ENTHALPY FOR MATERIAL NUMBER 1 对话框中为变形材料输入各个温度下的热焓值.

### 2.2 塑性功转化的内热源的计算

加工过程中固态或半固态金属的塑性变形会因塑性变形功转化为热量形成内热源, 影响系统温度变化从而改变材料物性影响整个过程<sup>[9]</sup>. 塑性变形功转化的内热源  $\omega$  可由下式计算

$$\omega = \eta \bar{\sigma} \dot{\epsilon}^p \quad (17)$$

式中:  $\omega$  为塑性应变能转化成的热源密度;  $\eta$  为热转化效率, 通常取  $\eta = 0.9 \sim 0.95$ ;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\dot{\epsilon}^p$  为等效塑性应变速率. ANSYS 软件中内热源的生成率作为体载荷施加于单元上模拟变形体单元的塑性功生热. 通过 SOLUTION > DEFINEDS > APPLY > THERMAL > HEAT GENERAT 施加生热率.

### 2.3 对流传热边界条件

该过程中同时存在模具表面与周围空气的对流换热和制件部分表面与模具表面与空气的对流换热. 它们都属于第三类边界条件即对流传热系数和流体的主流温度已知. 模拟时对流传边界条件作为面载荷施加于实体的外表面, 计算与流体的热交换.

### 2.4 接触传热边界条件

根据试验研究, 加压成形时制件与模具间的真正接触面积增加, 传热系数增大. 模拟时采用的传热系数为: 施压前 0.936、挤压前期 1.3、挤压后期 1.6 (单位  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ). ANSYS 软件中在建立接触对的过程中菜单操作如下: MODELING > CONTACT PAIR > CONTACT WIZARD, 在 ADD CONTACT PAIR 对话框中将接触传热系数赋给 THERMAL CONTACT CONDUCTANCE.

## 3 模拟结果与分析

利用有限元软件对棒材成形过程中制件和模

具的温度场进行了模拟, 并对模拟结果进行了研究分析. 模拟时采用的材料热物性参数见表 1.

表 1 纯铝的物理性能参数

Tab. 1 The physical properties of pure aluminum

状态	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
固态	$2.588 \times 10^3$	$1.0058 \times 10^3$	183.68
固液态	$2.576 \times 10^3$	$1.0430 \times 10^3$	88.80
液态	$2.565 \times 10^3$	$1.0720 \times 10^3$	74.32

图 3 所示为保压过程中制件和模具温度场的模拟情况, 在温度场云图中, 坯料中部的灰色代表液态, 其他颜色的不同深浅代表了材料不同的凝固程度和模具各部分不同的温度分布. 可以看出随着保压过程的进行, 外层金属逐渐形成凝固层, 液相区逐渐变小. 同时对比发现制件下部靠近成形模口处温度下降较其他部位快, 优先凝固, 这种温度分布为随后的挤压的顺利进行创造了良好的温度条件.

图 4 为挤压过程中制件及模具的温度场分布云图, 清楚地显示了整个挤压过程中不同时刻制件内部的温度场、液态金属的形态变化以及模具内部的温度分布和变化情况. 可看出, 随着制件被挤出, 液相区逐渐变小, 并且未凝固的下液面有下移趋势, 变形区上部制件总是维持在固相率较高的固-液态, 下部制件则总是维持在刚刚凝固完的固态高温状态.

图 5 为保压时间过短 ( $t = 30\text{s}$ ), 即挤压过早的温度场模拟情况. 可以看出由于保压时间过短, 挤压过程中冲头下行速度大于液态金属凝固所导致的固-液界面的上行速度, 液相区位置逐渐下移, 导致制件被挤出时, 成形模出口处仍有部分金属处于液态. 挤压时, 变形区上部始终应保持有液态金属, 而在制件挤出时位于成形模出口处的金属必须为固态, 才能使挤压过程正常进行, 若此处的液态金属未凝固就进入模孔而被挤出, 将会导致棒材断裂, 挤压过程中断, 这与试验情况相符.

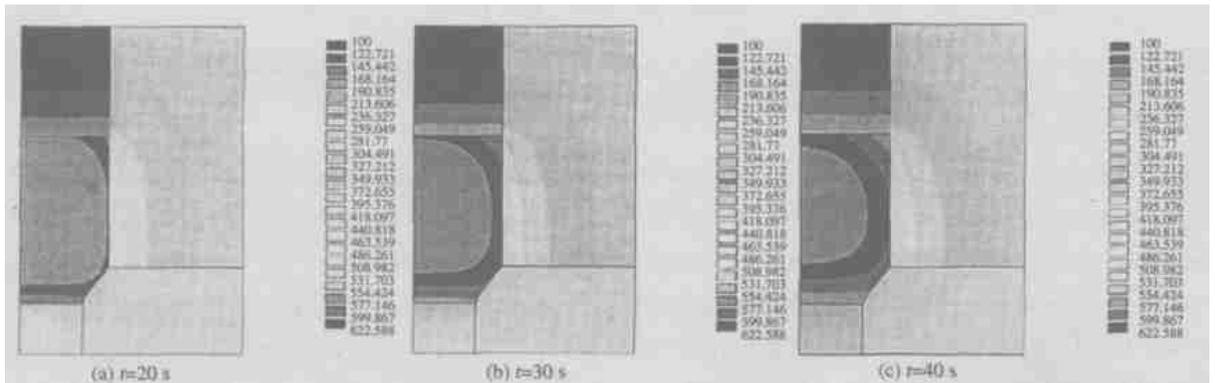


图 3 保压过程的温度场模拟情况 (单位  $^\circ\text{C}$ )

Fig. 3 Simulation of the temperature field in the period of maintaining press process

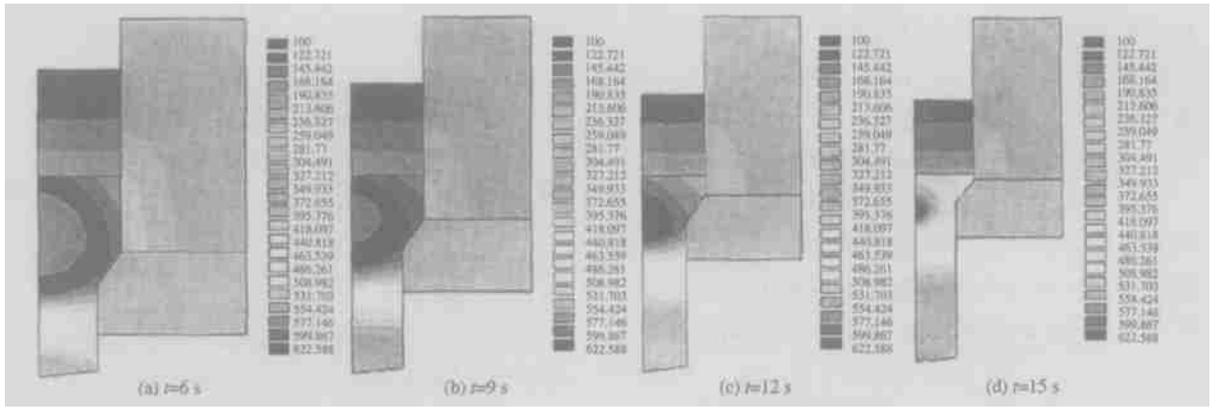


图4 挤压过程的温度场分布云图(单位:℃)

Fig. 4 Simulation of the temperature field in extrusion process

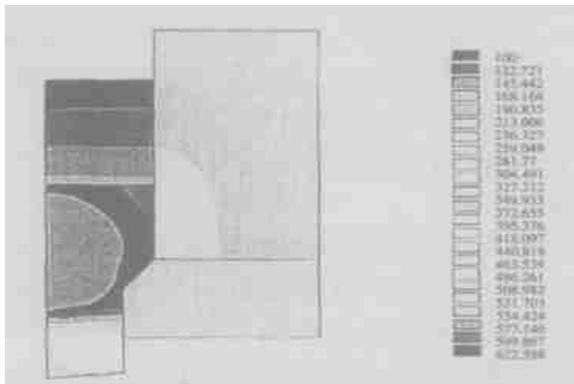


图5 挤压t = 36s时温度场模拟情况

Fig. 5 Simulation of the temperature field in extrusion process

### 4 结论

(1) 所建立的热挤压传热分析有限元模型,解决了结晶潜热和塑性变形功对过程温度场分布和变化的影响,反映了该工艺过程的真实情况。

(2) 通过对挤压过程温度场的有限元模拟,揭示了该工艺过程中内部金属液-固转变情况和模具的温度分布情况,与理论分析和试验结果

基本一致。

(3) 该研究为优化设计热挤压工艺参数提供了有效的理论依据。

### 参考文献:

- [1] 罗守靖,田文彤.21世纪最具发展前景的近净成形技术——半固态成形[A].机械工业出版社.第一届半固态金属加工技术研讨会论文集[C].北京:机械工业出版社,2000.46~51.
- [2] 蒋鹏,贺小毛,张秀峰.半固态成形技术的研究概况与发展前景[J].热加工工艺,1999,(1):42~44.
- [3] 谢水生,潘洪平,丁志勇.半固态金属加工技术研究现状与应用[J].塑性工程学报,2002,19(2):1~11.
- [4] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [5] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,1999.
- [6] 谢水生,王祖唐.金属塑性成形工步的有限元数值模拟[M].北京:冶金工业出版社,1997.
- [7] 刘清梅,关振卿,关绍康.双金属复合过程非稳态温度场的研究[J].郑州大学学报(工学版),2002,23,(4):36~38.

## The FEM Analysis of the Transient Temperature Field in Thermal extrusion Process

FENG Qigao<sup>1</sup>, FU Yu<sup>2</sup>

(1. Mechanical-electrical Engineering Department, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** According to the data obtained from experiment, the temperature field in this process is simulated using the FEM software. By comparing simulated results with the experiment study, the inner regularities of the process can be deeply explored, which shows that the maintaining press time which decides the stability of the process and the quality of deformed work is the most important process parameter. The proper time should guarantee that there is semi-solid metal remains in deforming areas during extrusion. The study provides a theoretic basis for parametric optimization of the bar thermal extrusion process.

**Key words:** thermal extrusion; FEM; transient temperature field