

# Al<sub>2</sub>O<sub>3sf</sub>/LY12 复合材料液固挤压成形中温度场演变的三维有限元分析\*

王振军 齐乐华 周计明 杨方  
(西北工业大学机电学院, 西安 710072)

**摘要** 建立了液固挤压 Al<sub>2</sub>O<sub>3sf</sub>/LY12 复合材料三维非稳态传热过程的有限元数学模型, 并对其进行了三维热传导数值模拟, 直观地显示出材料内部和表面在不同时刻、不同位置的三维温度场分布及其演变情况。模拟结果表明, 坯料内部和表面的温度场在保压过程中分布均匀, 而在挤压过程中则随时间推移而剧烈波动, 从而造成坯料表面局部过热, 由此导致制件表面龟裂现象的发生。模拟结果与实验结果基本吻合, 为合理确定工艺参数和保证成形质量奠定了理论基础。

**关键词** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/LY12 复合材料, 液固挤压, 三维有限元法, 温度场演变, 热传导

**中图法分类号** TG37, TB331 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2007)08-0857-06

## 3D FEM ANALYSIS ON THE TEMPERATURE FIELD DURING LIQUID-SOLID EXTRUSION PROCESS OF Al<sub>2</sub>O<sub>3sf</sub>/LY12 COMPOSITES

WANG Zhenjun, QI Lehua, ZHOU Jiming, YANG Fang

School of Mechatronic, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Correspondent: QI Lehua, professor, Tel: (029)88460447, E-mail: qilehua@nwpu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50575185) and Aeronautic Science Foundation of China (No.05G53048)

Manuscript received 2006-12-04, in revised form 2007-03-23

**ABSTRACT** The 3D finite element model which characterized the heat conduction in the liquid-solid extrusion process of Al<sub>2</sub>O<sub>3sf</sub>/LY12 composites was established, and the 3D temperature field was obtained. The results indicated that during the pressure-keeping stage, the temperature fields at the surface and inner part of the billet distributed evenly. In the extrusion process, however, they fluctuated tempestuously, which led to partial overheating on billet surface and resulted in superficial crack. The simulated results were verified by the experimental ones. The work laid a foundation for the rational choice of process parameter to enhance product quality.

**KEY WORDS** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/LY12 composite, liquid-solid extrusion, 3D finite element model, temperature field, heat conduction

液固挤压工艺是近年来开发的连续成形金属基复合材料管、棒材的新工艺, 具有工序少、成本低、制件性能好等特点, 应用前景广阔<sup>[1]</sup>。坯料的温度分布及其演变是影响成形稳定性和制件质量的重要因素, 通过数值模拟掌握坯料的温度分布及其演变规律, 从而合理制定工艺参数控制温度场分布及其演变过程, 是保证成形过程稳定性和

制件质量的有效手段, 并在实践中对复合材料液固挤压工艺的研究和应用起到了有益的指导作用<sup>[2,3]</sup>。

近年来, 随着计算机硬件和软件技术的发展, 三维有限元技术不断成熟, 并已从学术研究领域进入工程化应用阶段。国内外学者对金属及其复合材料锻压、轧制和挤压等成形工艺的传热过程进行了三维数值模拟, 这些研究考虑了三维空间换热和边界摩擦对坯料内部传热过程的作用, 直观显示了材料内部和表面在不同角度和方位下温度分布的演变过程, 有力地推动了热塑性成形工艺的研究和应用, 从文献[4—6]报道来看, 国内外研究大多限于固态热塑性成形领域。本文建立了 Al<sub>2</sub>O<sub>3sf</sub>/LY12 复合材料液固挤压工艺热传导过程的有限元数学模型, 旨在通过三维

\* 国家自然科学基金项目 50575185、中国航空科学基金项目 05G53048 和陕西省自然科学基金项目 2005E23 资助  
收到初稿日期: 2006-12-04, 收到修改稿日期: 2007-03-23  
作者简介: 王振军, 男, 1974 年生, 讲师, 博士

数值模拟研究成形过程中坯料内部及表面的温度分布变化规律, 结合实验分析导致制件表面缺陷的内在因素, 为合理设计工艺参数、保证复合材料制件成形质量提供理论指导。

## 1 液固挤压工艺的有限元几何模型

图 1 为复合材料棒材液固挤压过程示意图。该工艺过程为: 将液态铝合金 LY12 浇入放有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维预制体的挤压筒内, 冲头下行、保压使液态金属完全浸渗到预制体中形成液态及半固态坯料, 随后冲头持续下行使坯料连续地从成形模出口处挤出, 形成复合材料棒材。该工艺过程中坯料传热与变形过程的协调是影响成形稳定性和制件质量的关键因素之一, 但因传热和变形过程均发生在模具内, 无法直接观察或测量, 而造成工艺参数选取实施的困难。借助三维热传导数值模拟可以揭示出坯料内部和表面的温度分布及其演变规律, 达到合理确定工艺参数、控制成形过程和提高制件成形质量之目的。

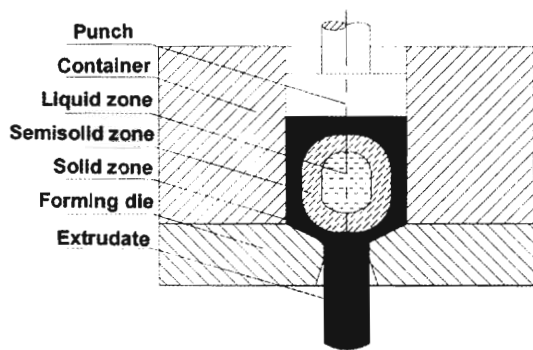


图 1 液固挤压工艺示意图

Fig.1 Illustration of the liquid-solid extrusion process

根据液固挤压成形过程的特点, 几何建模时可采取以下两点假设以降低模型的复杂程度和计算规模: (1) 考虑到模具尺寸远大于变形体, 在较短成形时间内模具温度变化较小, 且其变形量远小于坯料, 将模具视为恒温刚性体; (2) 模具和变形体在成形过程中始终保持轴对称, 取其四分之一作为研究对象。

液固挤压工艺的三维有限元几何模型及坯料网格划分见图 2。其中模具表面设为刚性传热面, 采用数值解析法描述其曲面形状; 采用热力耦合全积分三维 5 节点四面体单元将坯料离散成 5965 个单元和 1463 个节点。

## 2 三维热传导数学模型及关键问题处理

### 2.1 三维瞬态热传导问题微分方程

由于液固挤压过程中坯料内部纤维分布的随机性, 将坯料视为连续的各向同性介质, 由能量守恒定律和传热问题的 Fourier 定律可得瞬态热传导问题的微分方程

$$\frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_v}{\rho c} - \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

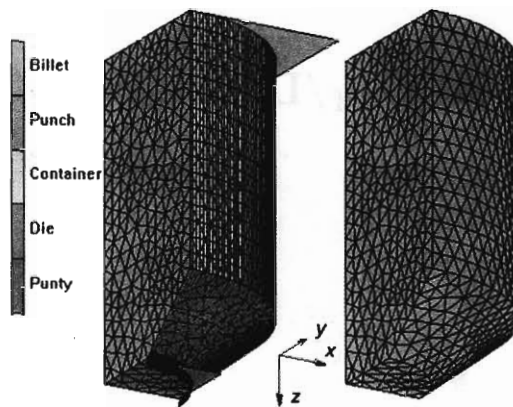


图 2 三维有限元几何模型及坯料网格划分

Fig.2 3D FE geometrical model and the meshed billet

式中,  $\lambda$  为坯料的导热系数;  $\rho$  为坯料的密度;  $c$  为坯料的比热容;  $T$  为随时间  $t$  和位置  $(x, y, z)$  变化的坯料内质点的温度;  $\dot{q}_v$  为内热源强度, 即单位体积塑性变形能产生的内热源率。

### 2.2 液固挤压过程的初始条件和边界条件

式 (1) 所示的非稳态热传导微分方程要有针对特定问题的解, 还必须提供定解条件, 即初始条件和边界条件

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - q + h(T - T_\infty) = 0 \quad (3)$$

式中,  $q$  为由于导热引起的边界上的热量散逸;  $h$  为综合换热系数;  $T_\infty$  为周围介质温度;  $n$  为边界外法线方向。当  $\lambda$  和  $q$  取不同的值时, 式 (3) 可转化为不同的换热边界条件。

液固挤压过程数值模拟时采用的初始条件和边界条件分别为: 坯料自由表面的对流及辐射等效换热系数取  $0.4 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ , 坯料与模具间的接触换热系数取  $23 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ , 接触表面上产生的摩擦热平均分配给坯料与模具; 挤压筒和成形模温度分别为  $360$  和  $230 \text{ C}$ , 冲头和顶杆温度分别为  $150$  和  $120 \text{ C}$ , 环境温度为  $20 \text{ C}$ 。

### 2.3 塑性变形功和凝固潜热

在液固挤压成形过程中, 固态和半固态坯料的塑性变形功大部分转化为热量, 传热微分式 (1) 中内热源强度  $\dot{q}_v$  的计算公式为

$$\dot{q}_v = \alpha_P \cdot \bar{\sigma} \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad (4)$$

式中,  $\alpha_P$  为塑性变形功转换为热能的比例系数, 本文模拟时取  $0.9$ ;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\dot{\bar{\epsilon}}$  为等效应变速率。

与固态热塑性成形工艺不同, 液固挤压过程是一个液态、半固态和固态共存并连续转变的过程, 因此数值模拟时必须考虑凝固潜热的影响<sup>[3]</sup>。本文采用热焓法处理凝固潜热, 复合材料  $\text{Al}_2\text{O}_{3\text{sf}}/\text{LY12}$  状态改变时的焓变计算如下:

$$\Delta H = \begin{cases} \int \rho(T)c(T)dT & T < T_s \\ \int_{T_s}^{T_m} \rho(T)c(T)dT + L & T_s \leq T \leq T_m \\ \int \rho(T)c(T)dT & T > T_m \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\rho(T)$  和  $c(T)$  分别为材料在不同温度区间内的密度和比热容,  $L$  是材料的潜热,  $T_s$  和  $T_m$  分别为基体金属的固相线和液相线温度。

### 2.4 摩擦和摩擦生热

摩擦及摩擦生热对液固挤压过程有重要影响, 本文采用反正切函数剪切摩擦模型, 即

$$\tau_f = -mk \cdot \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_r}{v_0}\right) \quad (6)$$

式中,  $\tau_f$  为摩擦应力;  $m$  为摩擦因子;  $k$  为剪切屈服极限,  $k = \bar{\sigma}/\sqrt{3}$ ;  $v_r$  为变形体与模具接触面上的相对滑动速度;  $v_0$  为常数, 本文取模具速度的  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  倍。

作用在坯料边界的摩擦热流密度  $q_f$  可由下式计算:

$$q_f = \beta_f |\tau_f| |v_r| \quad (7)$$

式中,  $\beta_f$  为热分配系数, 本文取 0.5。

本文采用双曲正弦本构方程描述 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/LY12 复合材料在半固态及高温固态下的流变力学行为<sup>[7]</sup>

$$\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{13} [\sinh(0.0246\sigma)]^{3.7} \exp\left(\frac{-224053}{RT}\right) \quad (8)$$

式中,  $\dot{\epsilon}$  为复合材料的应变率,  $\sigma$  为流变应力,  $R$  为普适气体常数。

## 3 数值模拟结果与分析

依据已建立的有限元模型, 对液固挤压成形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/LY12 棒材工艺进行非稳态传热过程三维数值模拟, 得到了保压时间为 10 s、挤压时间为 8 s、挤压速度为 7 mm/s 的工艺条件下坯料内部和表面温度分布演化过程的数值模拟结果。

### 3.1 保压过程中坯料的温度分布及演变

图 3 为保压过程中坯料内部的温度场分布及其演变

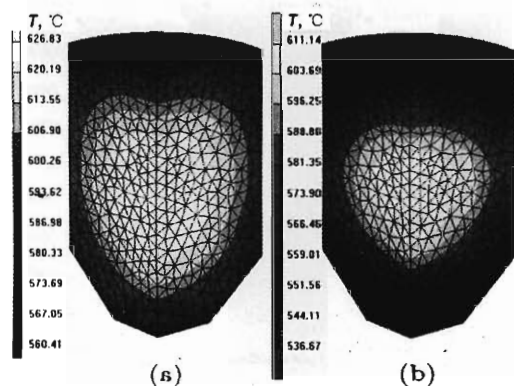


图 3 保压阶段坯料内部的温度分布云图

Fig.3 Inner temperature distributions of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/LY12 billet for 5 s (a) and 10 s (b) during the pressure-keeping stage

规律. 由图可见, 随保压时间增大, 坯料整体温度迅速下降且内部温度梯度逐渐增大, 保压结束时坯料中心部位为液相, 外层为高温固相, 二者之间则为不同液相分率的半固态金属. 图 4 为保压阶段坯料表面温度分布云图. 由图可见, 坯料表面等温线基本为均匀圆周线, 说明坯料与模具间接触充分从而界面换热也比较均匀. 分析保压结束时各横截面内温度分布如图 5 所示. 由图可见, 横截面内等温线有一定波动, 表明了坯料不同径向位置上传热速率的差异性. 图 6a 为保压过程中坯料上的 5 个典型位置点, 分别为中心位置的 744 点、与顶杆接触的 608 点、与冲头接触的 663 点、与成形模接触的 757 点以及与挤压筒接触的 769 点. 图 6b 为图 6a 中 5 个典型位置点在保压过程中的温度变化曲线. 从图 6b 可以看出, 保压开始的 0.5 s 内, 坯料中心的 744 点因远离边界所以温度变化率较小, 随后由于坯料与模具之间热传导作用的增强, 导致温度下降速率增大. 当其温度降至液相线下后, 结晶潜热的释放使其温度下降速率减缓, 此时温度曲线出现了较明显的温度平台. 后期基体金属的液相分率减小而结晶潜热

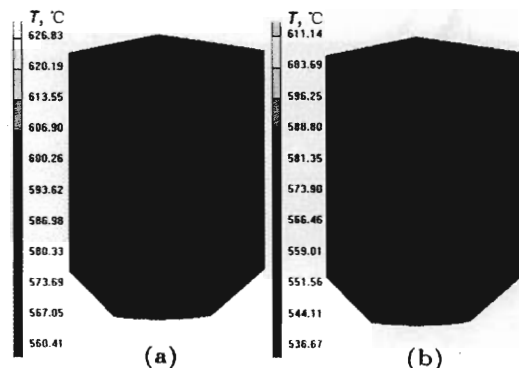


图 4 保压阶段坯料表面的温度分布云图

Fig.4 Exterior temperature distributions of the billet for 5 s (a) and 10 s (b) during the pressure-keeping stage

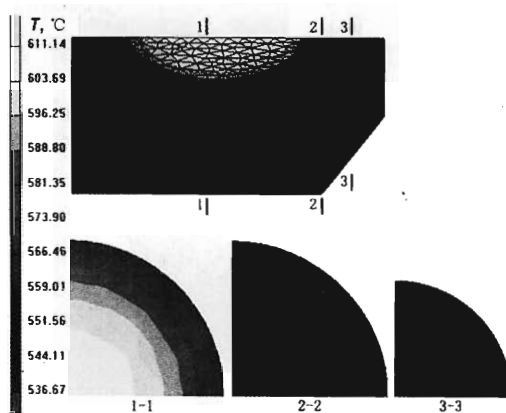


图 5 保压结束 (10 s) 时各横截面内温度分布

Fig.5 Temperature distributions in several cross sections of the billet for 10 s during the pressure-keeping stage

释放速率降低, 导致其温度变化曲线有所下降。

与 744 点相比, 608, 663, 757 和 769 点因与模具紧密接触且温差较大, 热交换剧烈, 导致温度下降速率在保压一开始就很大。随保压进行铸件与模壁间传热效率不断减小, 同时内部液体散热渐缓, 铸件内部温度梯度减小, 图 6 中坯料边界上的 4 个点在保压 1 s 左右时凝固速率

有明显降低。其中 663 点和 769 点温度下降速率的改变幅度略大于 608 点和 757 点, 原因在于冲头和挤压筒的初始温度高于成形模, 从而导致 663 点和 769 点与冲头和挤压筒之间具有较小的温差。随后保压过程中内部液态金属开始凝固而释放出结晶潜热, 从而使各点保持较为稳定的温度下降速率。

### 3.2 挤压过程中变形体温度分布及演变

图 7 是挤压过程 (0—8 s) 中坯料内部和表面温度分布演变的模拟结果。由图可见, 挤压前期坯料心部基体金属为液相分率很高的液-固态, 成形模内金属为固相分率较高的固-液态, 成形模出口部位的金属为高温固相状态 (图 7a); 挤压中期坯料内基体金属几乎全部变成了温差很小的半固态 (图 7b); 挤压后期坯料经充分热传导, 加之金属的凝固潜热释放殆尽, 坯料温度分布趋于均匀一致并处于凝固完毕的高温固态 (图 7c)。分析坯料各横截面内温度分布云图 (图 8) 可见, 坯料内各径向位置上的温度分布不同, 原因是挤压过程中坯料表面与模壁接触状态改变而导致界面换热状态的变化。此外, 由于变形区内各点塑性变形功产生的内热源强度差异也加重了出口处坯料内部横截面内温度分布的不均匀性。

图 9 给出了挤压过程中坯料表面温度分布及演变的模拟结果。由图可以看出, 在挤压过程中由于坯料与模壁的接触和摩擦状态不断改变而导致其表面的摩擦热流分布变化剧烈, 所以在挤压过程中坯料表面温度分布很不均匀, 存在局部区域过热现象。由于材料强度随温度升高而降低, 若挤压速度或模具温度控制不当, 坯料表面温度过高的局部区域极易被表面应力撕裂而在挤出制品的表面出现裂纹。

图 10 为挤压过程中坯料上 744 和 769 点的温度变

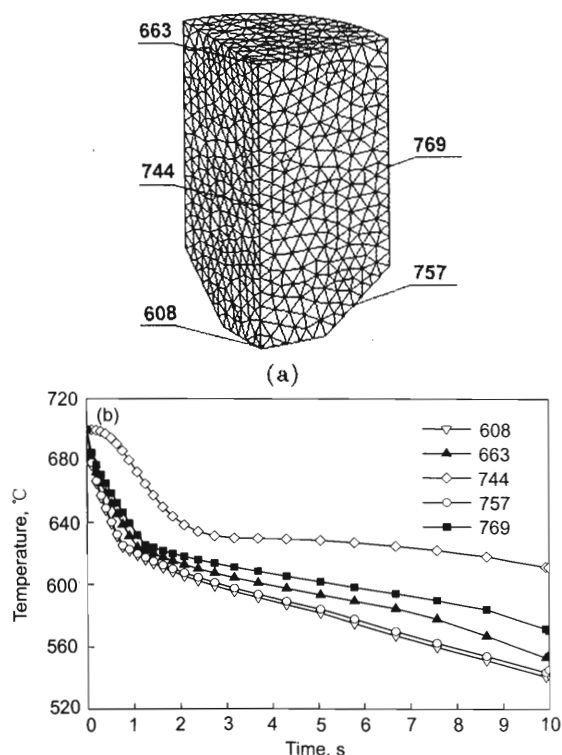


图 6 保压阶段典型点的温度-时间演变曲线

Fig.6 Typical nodes (a) and curves of temperature vs time at typical nodes during pressure-keeping stage (b)

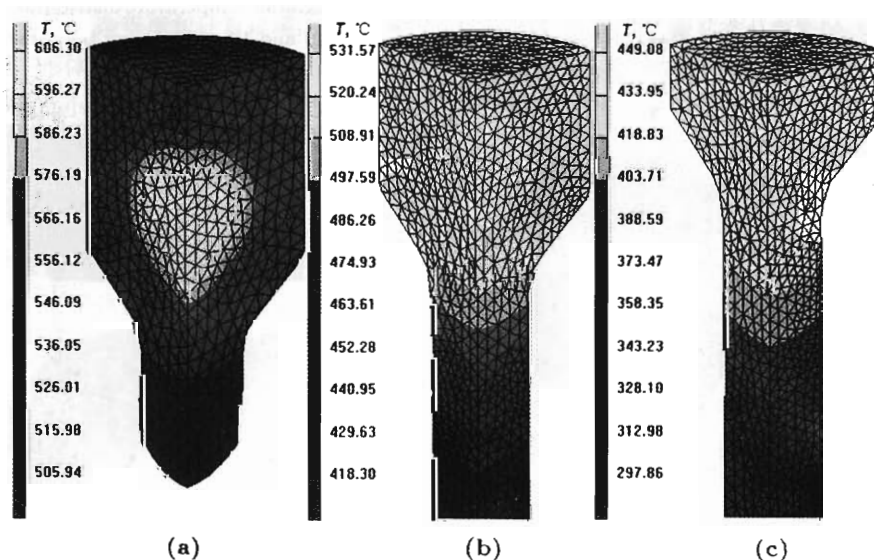


图 7 挤压阶段坯料内部的温度分布云图

Fig.7 Inner temperature distributions of the billet during the extrusion process for 1 s (a), 3 s (b) and 6 s (c)

化曲线. 由图可以看出, 与保压过程这两点的温度变化曲线 (图 6b) 相比波动较大, 原因是挤压阶段不仅存在相对稳定的热传导和凝固潜热释放, 还存在不稳定的塑性功热

和边界摩擦热流 (图 9 反映出挤压过程中坯料表面温度分布变化不均匀的现象). 分析 769 点温度演变曲线可知, 该点在流经成形模时有较大的瞬时升温, 而表面局部过热会造成该区域高温固态金属的晶界重熔及基体与纤维结合界面的熔化剥离, 降低了材料的抗剪及抗拉强度, 在表面摩擦切应力和拉应力作用下易于被撕裂而产生表面裂纹. 图 11 为相同实验参数下挤出的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>sf/LY12 复合材料棒材制件的表面形貌照片. 由图可以明显看出其表面的龟裂缺陷. 由此可见坯料表面温度高低及其均匀性是影响制件表面质量的关键因素之一. 应采取控制挤压速度、调节模具温度或改善润滑等措施严格控制坯料表面温度分布, 避免制件表面龟裂缺陷的产生.

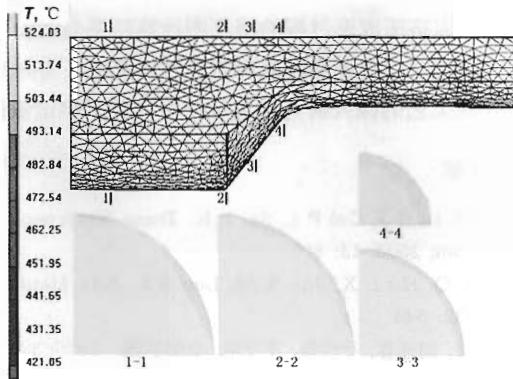


图 8 挤压 2 s 各截面内的温度分布

Fig.8 Temperature distributions in cross sections of the billet for 2 s in the extrusion process

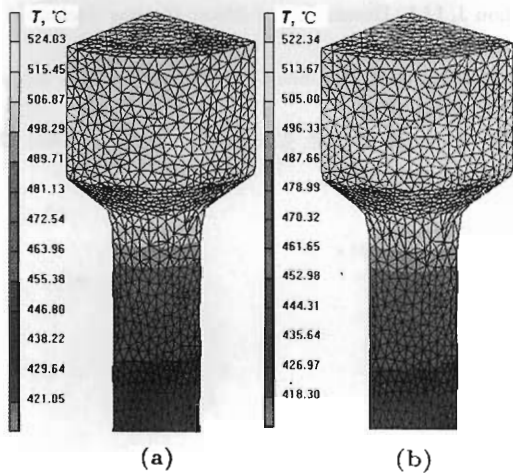


图 9 挤压阶段坯料表面的温度分布云图

Fig.9 Temperature distributions on the surface of billet extruded for 2 s (a) and 2.5 s (b) in the extrusion process

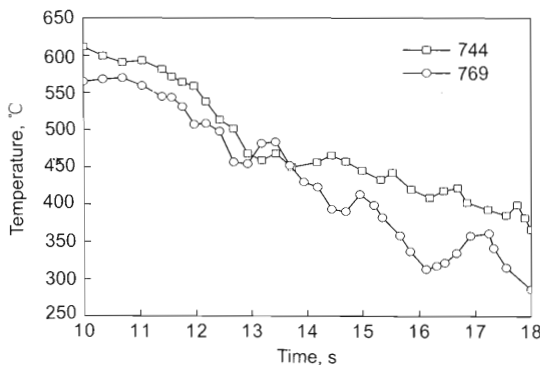


图 10 挤压过程中跟踪点的温度 - 时间演变曲线

Fig.10 Curves of temperature vs time of typical nodes in extrusion process

### 3.3 挤压力变化曲线的分析与验证

图 12 是液固挤压成形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>sf/LY12 复合材料棒材过程中, 挤压力曲线的实验值与模拟值的比较. 可以看出, 计算挤压力的最大值比实验值偏高, 这可能是实际过程中摩擦系数随坯料温度降低而逐渐减小, 造成后期实际所需的最大挤压力有所降低; 而计算采用了在粘性条件下较大的摩擦系数且保持恒值, 从而导致后期挤压力计算值

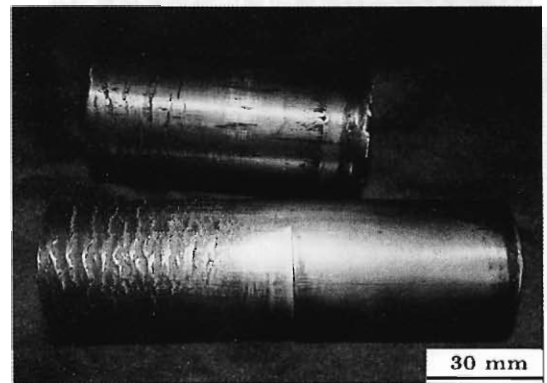


图 11 液固挤压复合材料制件的表面裂纹

Fig.11 Cracks on the surface of the lique-solid extruded composite samples

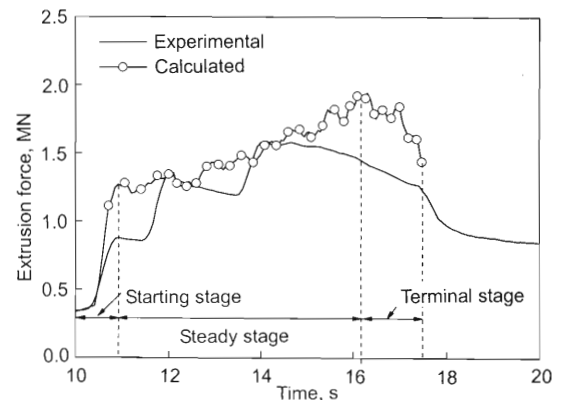


图 12 挤压力变化的实验曲线与数值模拟曲线比较

Fig.12 Curves of extrusion force variation obtained from the experiment and numerical simulation

偏高。除此之外，计算结果基本反映了实验曲线的变化规律，表明本文建立的有限元模型和采用的数值模拟方法是可行的。

根据挤压力变化特点，可将挤压过程大致分为挤压启动、稳定挤压和挤压结束 3 个阶段。启动阶段，挤压力迅速上升使已凝固坯料产生塑性变形，并克服与模具间较高的粘着静摩擦力而产生相对运动。还可看出，实验曲线开始的斜率比计算曲线的斜率小，这是因为实际含有微孔洞和界面缺陷的坯料在压力作用下逐渐致密充满模腔，而计算曲线是在理想致密的坯料状态得到的，即假设没有以上缺陷，所以其开始斜率比较大。进入稳定挤压阶段后，挤压力有不同快慢程度的上升，这是由于随挤压进行坯料内部温度和应变率分布的不均匀性会引起不同部位流动应力的变化。但在整体上随坯料温度下降须增大挤压力才能克服材料逐渐增大的变形抗力而维持其塑性变形。挤压结束阶段，参与变形的坯料所剩无几且与模壁的接触面积逐渐减少而摩擦力减少，所以挤压力开始下降，直至挤压过程的结束。

#### 4 结论

(1) 建立了复合材料液固挤压非稳态传热过程的三维有限元数学模型，通过对模型中关键问题的处理，得到了坯料内部和表面不同方位的温度场分布及其演变规律。

(2) 坯料的温度场在保压过程中分布均匀，而挤压过程中因塑性功和摩擦热的作用而使温度场分布不均且变化剧烈，坯料表面因局部过热而使该区域的材料强度降低是导致实验中制件表面龟裂的内在因素。

(3) 液固挤压成形过程的挤压力计算结果与实验结果基本吻合，有限元模型及数值模拟较好地反映了实际成形过程，为该工艺的深入研究和实际应用提供了理论依据。

#### 参考文献

- [1] Qi L H, Li H J, Cui P L, Shi Z K. *Trans Nonferrous Met Soc Chin*, 2003; 13: 803
- [2] Ren X Q, Hu L X, Sun X M, Luo S J. *Acta Metall Sin*, 1996; 32: 544  
(任向前, 胡连喜, 孙晓梅, 罗守靖. 金属学报, 1996; 32: 544)
- [3] Qi L H, Cui P L, Shi Z K, Li H J. *Acta Metall Sin*, 2002; 38: 549  
(齐乐华, 崔培玲, 史忠科, 李贺军. 金属学报, 2002; 38: 549)
- [4] Hartley P, Pillinger I. *Comput Method Appl Mech Eng*, 2006; 195: 6676
- [5] Pater Z. *J Mater Process Technol*, 2006; 173: 201
- [6] Zhou J, Li L, Duszczuk J. *J Mater Process Technol*, 2004; 146: 203
- [7] Zhou J M, Qi L H, Chen G D, Zhang Y B. *J Plast Eng*, 2005; 12(5): 58  
(周计明, 齐乐华, 陈国定, 张跃冰. 塑性工程学报, 2005; 12(5): 58)