

铝型材挤压过程有限元数值模拟^①

周 飞 彭颖红 阮雪榆

(上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

摘 要 采用三维刚-粘塑性有限元方法, 对一典型的铝型材非等温成形过程进行了数值模拟。分析了铝材挤压的3个不同成形阶段, 给出了成形各阶段的应力、应变和温度场分布情况以及整个成形过程中模具载荷随成形时间的变化情况。这些模拟结果为铝型材挤压的模具设计和设备选取提供了重要的依据。同时, 还对三维塑性变形的有限元数值模拟中关键技术的处理方法进行了探讨。

关键词 铝型材 工作带 数值模拟

中图法分类号 TG376.2

铝材以其重量轻、强度高、加工性能好、可焊接、耐腐蚀、美观等良好的特性, 越来越受到人们的青睐, 广泛应用于航空飞行器、铁道车辆、民用装饰材料及包装材料中^[1]。在铝材的挤压过程中, 由于构件截面形状复杂, 变形集中在局部狭长区域, 模具的受力复杂, 导致模具的使用寿命低。另一方面, 构件截面的特殊性, 使得变形过程中金属脱离工作带后经常发生翘曲, 严重影响着产品的平整性。因而, 如何提高铝型材挤压模具的使用寿命, 如何合理设计挤压模工作带的形状尺寸, 是各大铝型材生产厂家的重要课题。以有限元方法为代表的数值模拟在塑性成形中得到了较为广泛的应用^[2-6]。它可以形象地描述金属在模具型腔内的流动行为, 提供变形体及模具在成形过程中各种物理学场量的分布及变化规律, 从而为模具设计提供依据。本研究将结合我国最大的铝材生产基地西南铝加工厂的一典型铝型材构件, 对其非等温挤压成形过程进行模拟分析, 以提高其产品的质量和模具的使用寿命。

1 塑性成形有限元基本理论

1.1 刚塑性、刚粘塑性有限元基本方程

刚塑性、刚粘塑性材料在塑性成形过程中应满足下列基本方程:

- (1) 平衡方程;
- (2) 几何方程;
- (3) 本构方程;
- (4) 屈服准则;
- (5) 体积不可压缩条件;
- (6) 力和速度边界条件。

设变形体的体积为 v , 表面积为 S , 在 S_f 面上给定面力 F_i , 在 S_v 面上给定速度 U_i , 将变形体用四面体四节点单元进行离散, 采用罚函数法, 可得泛函

$$\pi = \int_v \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dv + \frac{\alpha}{2} \int_v \dot{\epsilon}_v^2 dv - \int_{S_f} F_i U_i dS \quad (1)$$

根据 Markov^[7] 变分原理, 当 $\delta\pi = 0$ 时可得真实解。对上式进行变分及线性化处理, 得到关于速度增量 ΔU 的有限元求解方程

$$[S]_{n-1} \cdot [\Delta U]_{n-1} = [R]_{n-1} \quad (2)$$

式(2)常用 Newton Raphson 迭代法进行求解。

1.2 热传导基本方程

对非等温塑性成形问题, 还必须考虑温度的变化。设 k 为材料的导热系数, ρ 为材料密

① 收稿日期: 1997-10-28; 修回日期: 1998-02-18 周 飞, 男, 27岁, 硕士, 工程师

度, c 为材料比热容, q_n 为法向热通量, α 为机械能向热能的转化率(通常取 $\alpha = 0.9$), 则考虑塑性变形热和摩擦生热的能量守恒方程可表示为

$$\int_v k T_i \delta T_i dv + \int_v \rho \bar{T} \delta T dv - \int_v \alpha \dot{\bar{\epsilon}} \delta T dv - \int_s q_n \delta T ds = 0 \quad (3)$$

用有限元网格将变形体离散化, 并采用差分法对时间域进行离散, 则式(3)可写成如下的差分方程:

$$(C/\Delta t + \beta K) T_n + [-C/\Delta t + (1-\beta)K] T_{n-1} = \bar{Q} \quad (4)$$

式中 $\bar{Q} = \beta Q_n + (1-\beta)Q_{n-1}$, β 为差分因子 ($\beta = 0 \sim 1$)。

2 三维有限元模拟中关键技术的处理

2.1 模具型腔的几何描述及动态边界处理

三维有限元模拟首先遇到的问题便是模具边界几何信息的描述。本研究的有限元模拟器中, 采用统一的 Bezier 曲面来描述模具型腔边界, 模具表面上任意一点的位置矢量, 可由下式求得^[8]

$$P(uv) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m P_{jk} \cdot B_k^n(u) \cdot B_j^m(v) \quad (5)$$

- 式中 u, v 为曲面参数坐标;
- m, n 为沿 u, v 方向上曲线的阶数;
- P_{jk} 为控制顶点的位置矢量;
- B_k, B_j 为控制顶点的基底函数。

有限元模拟中动态边界的处理是模拟系统的关键, 它直接影响着模拟的失真与否。这种动态边界的处理分为变形体自由节点同模具接触和接触节点脱离模具两个方面。变形体边界自由节点的触模可根据它与模具的相对运动及他们的相对位置来判别, 这种关系可用下式来进行描述

$$\begin{cases} \Delta_i = (P_d - P_i) / (U_d - U_i) \\ 0 < \Delta_i < \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中 Δ_i 为边界节点到达模具表面的最小时间; Δt 为当前加载步的时间步长; P_i, U_i 分别为节点 i 的位置和速度矢量; P_d 为节点 i 向模具表面法线方向投影点的位置矢量; U_d 为模具的运动速度。

若 Δ_i 满足式(6), 则节点 i 在该加载步上同模具接触, 对其施加边界约束条件。

触模边界节点的脱模判断, 可根据每加载步上节点沿模具表面法线方向的应力(或力)状态来确定。若它满足

$$\sigma_n \geq 0 \text{ 或 } F_{in} \geq 0 \quad (7)$$

则表明节点 i 与模具表面间的相互作用力为拉应力, 或者为拉力; 此时, 该节点 i 应当脱离模具。

2.2 变形体的离散化及其网格再划分

三维有限元分析遇到的最大困难莫过于对分析对象的离散化。目前, 任意空间几何形体的六面体单元网格自动生成还很难完全得以实现。本文采用四面体单元对变形体进行离散以及对畸变后的变形体网格进行重构, 并采用式(8)进行新旧网格系统间物理信息的传递, 同时根据新、旧边界节点在空间的位置关系, 实现边界条件的自动转换。

$$F_i(\zeta, \eta, \xi) = \sum_{j=1}^m N_j(\zeta, \eta, \xi) F_j \quad (8)$$

式中 m 为单元节点数, F_i 为新网格系统的场量, F_j 为旧网格系统的场量, N_j 为旧网格系统的形函数。

2.3 极限应变速率的选取

金属塑性成形过程往往是弹性区与塑性区并存, 有限元模拟中常用极限应变速度 $\dot{\epsilon}_0$ 来进行区分。对于刚粘塑性材料, 在每一加载步上, 对 $\dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0$ 的区域认为是弹性区(即刚性区), 对 $\dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_0$ 的区域则视为塑性区。

有限元模拟中, $\dot{\epsilon}_0$ 过大将影响模拟结果的精度, 而 $\dot{\epsilon}_0$ 过小相当于约束条件太少, 收敛性变差甚至不收敛(特别是挤压成形问题)。所以, 极限应变速率的选取非常重要。本研究选取 $\dot{\epsilon}_0 = (0.0100 \sim 0.0001) \cdot \dot{\epsilon}_v$, 其中 $\dot{\epsilon}_v$ 为当前加载步的平均应变速率。

3 铝型材非等温挤压过程模拟实例

铝型材一般以其截面图表示, 图 1 所示为一典型的铝型材产品截面图。对于这类截面形状相当复杂的铝型材产品, 挤压加工往往需要先进行预成形, 然后再加工成所需要的形状。本文选取如下的工艺条件对图 1 所示的铝型材挤压成形过程进行模拟:

挤压设备: 1 250 t 水压机;

挤压筒直径: 325 mm;

材料: LC4;

铸锭规格: $d 320 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$;

铸锭加热温度: 420~ 440 °C;

挤压筒加热温度: 350 °C;

挤压速度: 20 mm/s;

润滑条件: 石墨+ 机油。

由于模具的型腔表面比挤压头复杂, 为了节省计算时间, 本文对初始坯料进行非均匀性离散, 离散后的网格如图 2 所示。该网格包含 3 800 个四面体单元和 996 个节点。整个挤压过程可分为预成形、非稳定挤压成形和稳定挤压成形 3 个阶段, 经历了 8 次网格再划分, 得到的模具载荷—时间曲线如图 3 所示。

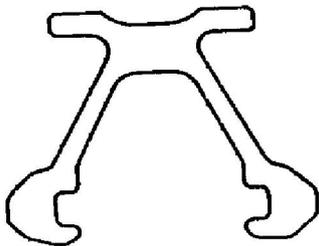


图 1 铝型材产品截面图

Fig. 1 Section of an aluminium material

预成形时, 坯料金属在挤压头的推动下, 一方面向四周扩散, 充填挤压筒; 另一方面沿着预成形模具表面向下流动。当金属充满预成形模腔时, 即完成了金属的预选分配。第一阶段结束, 成形时间为 0.983 s。该阶段中由于金属大量流入预成形模腔, 死区相对较少, 因而

成形比较容易, 挤压头承受的载荷较低, 如图 3 所示。图 4 为挤压变形后的网格, 图 5(a) 所示为预成形结束时变形体的等效应变分布。它表明, 在第一阶段的成形过程中, 变形主要集中在坯料顶端与预成形模接触的边沿区域。

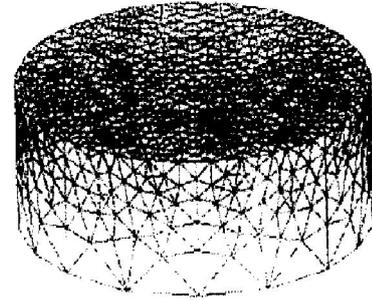


图 2 初始网格

Fig. 2 Initial mesh

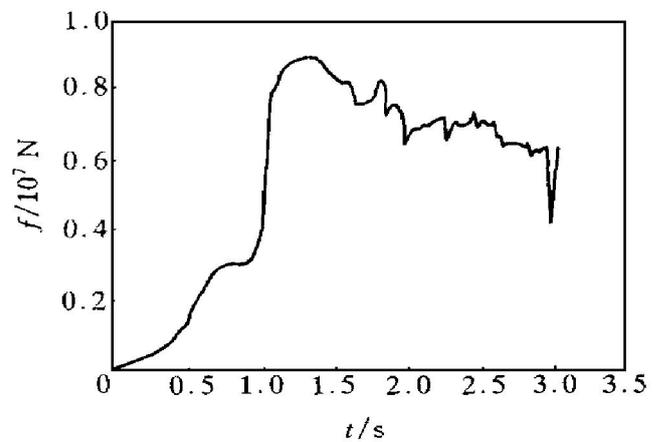


图 3 载荷—时间曲线

Fig. 3 Curve of load vs time

经过预成形的半成品金属进入终成形平面模后, 由于平面模模口形状狭长而又复杂, 金属的流动变得十分困难, 死区金属相对增多, 这就使得成形载荷急剧上升。直到前沿金属流出工作带, 成形载荷达到极限, 第二阶段结束。此时总的成形时间为 1.797 s。图 3 所示的曲线表明, 极限成形载荷为 $8.86 \times 10^6 \text{ N}$, 因此, 选用 1 250 t 的水压机进行成形。图 5(b) 所示为第二阶段结束时变形体等效应变的分布情况。由图中可以看出, 在第二阶段, 变形主要集中在平面模模口附近局部区域, 变形相当剧烈, 最大等效应变达到 4.2526。

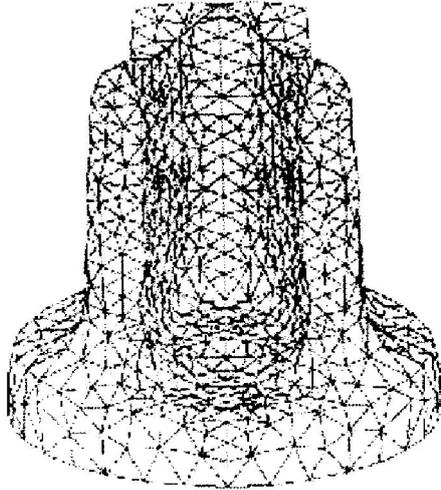


图4 变形网格

Fig. 4 Deformation mesh

挤压成形过程中，一旦金属流出工作带，挤压就进入稳定成形阶段。在该阶段的成形过程中，由于大量金属已流出工作带，他们强大的牵附作用使成形变得相对容易得多，成形载荷也明显减小，载荷曲线也变得比较平缓。图5(c)所示为坯料挤出相当长度以后变形体的等效应变分布情况，它说明稳定挤压阶段，变形仍集中在模口附近。由图4可以看出，挤压成形过程中，由于模具表面摩擦力的作用，心部金属的流动明显快于表层，从而使得成形件的顶端呈锥形；另一方面，由于模口截面各部分不均匀，金属流经工作带时各部分速度也有快

有慢，这就使得工件顶端崎岖不平。

如图6(a)，(b)，(c)所示分别为3个不同挤压成形阶段变形体内温度场的分布情况。由于模具预热温度与坯料初始成形温度接近，成形体与模具有热交换相对较少，成形过程中变形体的温度升高则主要来自于塑性变形生热和摩擦生热，因而变形体温度场的分布与其等效应变的分布一致。

如图7(a)，(b)，(c)所示分别为3个不同挤压成形阶段变形体内沿挤压方向应力场分量的分布情况。预成形阶段，由于挤压头和预成形模腔的双向挤压作用，变形体顶端主要受压应力作用。在以后的终挤压成形过程中，平面模模口附近表层金属由于受模具型腔的约束继续承受压应力，而脱模后的金属则承受拉应力的作用。

4 结论

本文通过对一典型铝型材非等温挤压成形过程的三维有限元数值模拟，形象地描述了铝型材挤压的3个不同成形阶段以及整个成形过程中载荷随加载时间的变化情况。模拟表明，坯料进入模口至完全流出工作带这段时间的成形是铝型材挤压最为困难的阶段，因而预成形有模具及平面模的合理设计是铝型材挤压成败

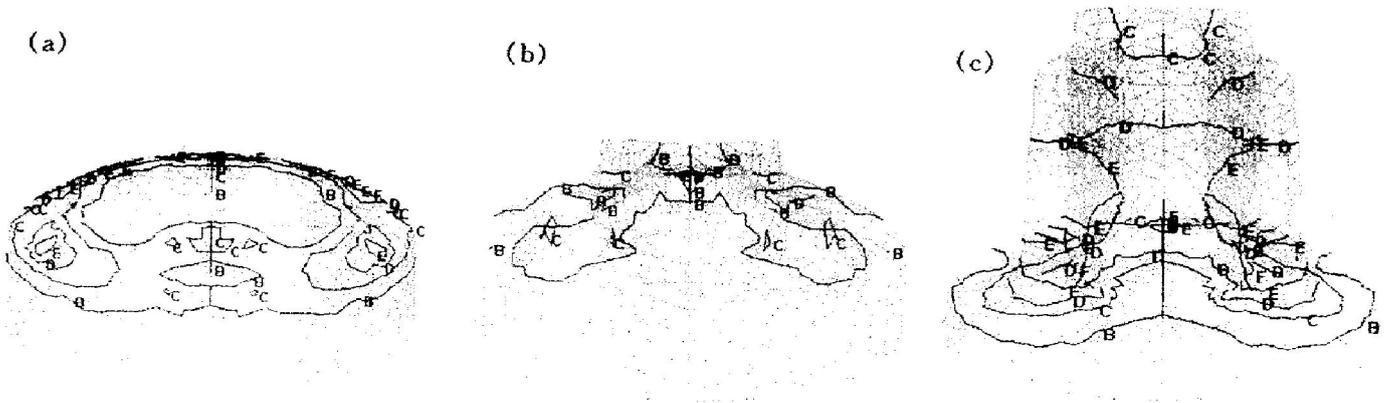


图5 成形过程中的等效应变分布

Fig. 5 Distributions of equivalent strain

- (a) —A: 0.001 0; B: 0.229 7; C: 0.448 3; D: 0.666 9; E: 0.885 0 F: 1.104 1
- (b) —A: 0.073 8; B: 0.909 6; C: 1.745 3; D: 2.581 1; E: 3.416 9; F: 4.252 6
- (c) —A: 0.430 3; B: 0.979 5; C: 1.528 7; D: 2.077 9; E: 2.627 1; F: 3.176 3

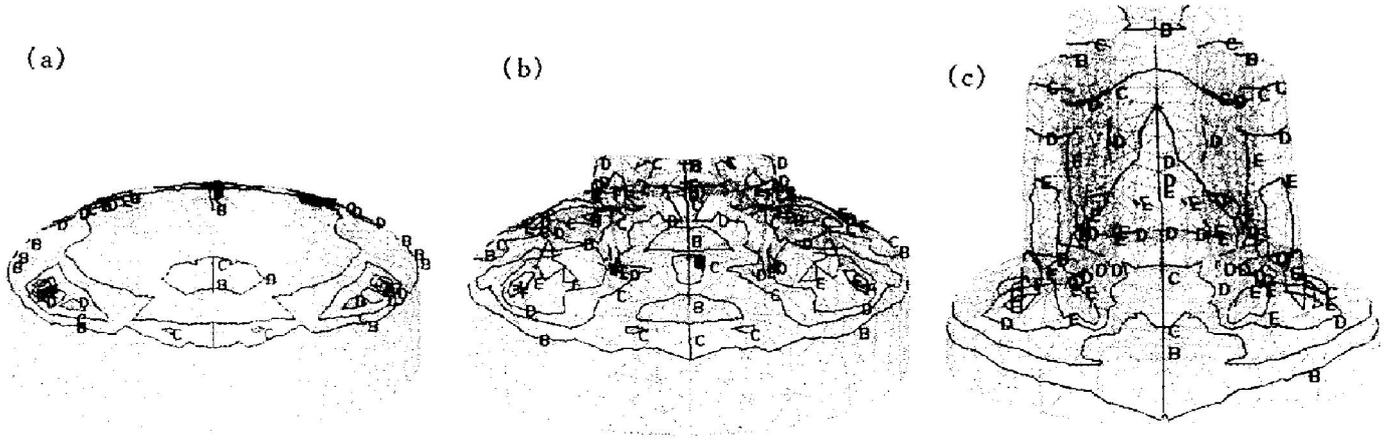


图 6 成形过程中的温度场分布

Fig. 6 Distributions of temperature field (°C)

- (a) —A: 450. 81; B: 488. 78; C: 526. 78; D: 564. 72; E: 602. 68; F: 640. 65
- (b) —A: 452. 25; B: 494. 98; C: 537. 72; D: 580. 45; E: 623. 18; F: 665. 91
- (c) —A: 459. 94; B: 535. 92; C: 611. 89; D: 687. 87; E: 763. 85; F: 839. 82

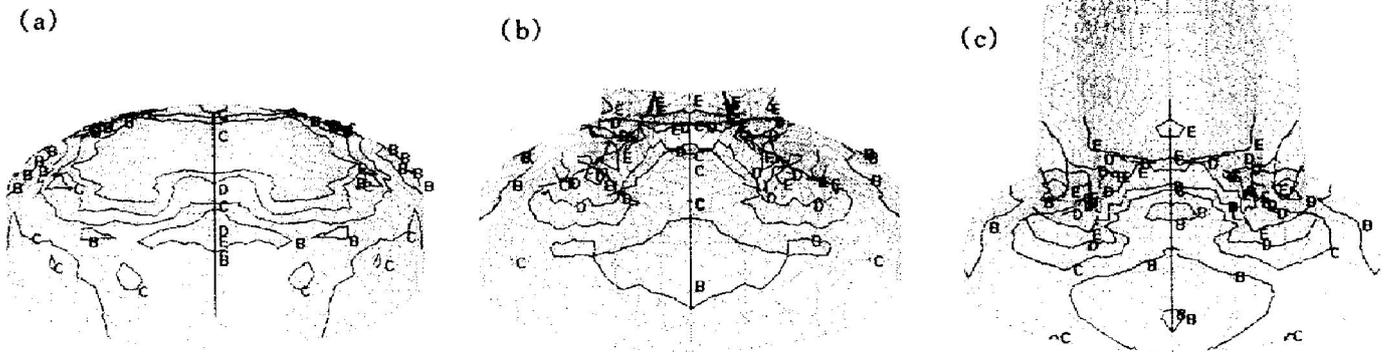


图 7 成形过程中沿挤压方向应力场分量的分布

Fig. 7 Distributions of stress component along extrusion direction (10^4 Pa)

- (a) —A: 251. 45; B: - 195. 64; C: - 139. 83; D: - 84. 03; E: - 28. 22; F: 27. 59
- (b) —A: - 394. 00; B: - 293. 69; C: - 193. 39; D: - 93. 09; E: 7. 21; F: 107. 52
- (c) —A: - 273. 43; B: - 206. 28; C: - 139. 14; D: - 72. 00; E: - 4. 85; F: 62. 29

的关键。由此可以看出，有限元模拟的结果，对铝型材挤压的模具设计及工艺优化具有十分重要的指导意义。随着有限元模拟技术的不断完善及其同实验技术的有效结合，它必将成为塑性成形工程设计人员的有力工具。

REFERENCES

1 Liu Jing'an(刘静安). Journal of Central South University of Technology(中南工业大学学报), 1995,

26(3): 1- 11.

2 Peng Yinghong(彭颖红), Peng Dashu(彭大暑), Zuo Tiejong(左铁镛) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1993, 3(4): 42- 47.

3 Peng Yinghong(彭颖红), Ruan Xueyu(阮雪榆), Zuo Tiejong(左铁镛) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1994, 4(3): 60- 64.

4 Peng Yinghong(彭颖红), Zhou Fei(周 飞), Ruan Xueyu(阮雪榆) *et al.* The Chinese Journal of Nonfer-

- rous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(Suppl 2): 8-11.
- 5 Tang J, Wu W T and Walters J. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 46: 117-126.
- 6 Hermann M and Ruf A. Metal Forming Process Simulation in Industry. Stuttgart: Stuttgart University Press, 1994: 82.
- 7 Kobayashi S, Oh S I and Altan T. Metal Forming and the Finite Element Method. New York: Oxford University Press, 1989: 175.
- 8 Sun Jianguang(孙家广), Chen Jian(陈健) and Gu Kaining(辜凯宁). Computer Aided Geometric Modeling Technologies. Beijing: Tsinghua University Press, 1990: 120-135.

NUMERICAL SIMULATION OF ALUMINIUM MATERIAL EXTRUSION PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

Zhou Fei, Peng Yinghong and Ruan Xueyu

*National Die and Mold CAD Engineering Research Center,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, P. R. China*

ABSTRACT A nonthermal extrusion process of a typical aluminium material has been simulated by three dimensional rigid visoplastic finite element method. Three different stages of the extrusion process were described in detail. In every stage, the distributions of stress, strain and temperature field and the curve of load versus time were also given to assist in design of dies and the selection of equipments for the aluminium extrusion process. Meanwhile, the technological treatments of FEM for simulating three dimensional plastic deformation process were also discussed.

Key words aluminium material working area numerical simulation

(编辑 黄劲松)