

[文章编号] 1004 - 0609(2002)06 - 1154 - 08

# 工艺参数对铝型材挤压变形规律的影响<sup>①</sup>

闫洪<sup>1, 2</sup>, 夏巨谌<sup>1</sup>, 李志刚<sup>1</sup>, 董湘怀<sup>1</sup>, 杨国泰<sup>2</sup>, 何成宏<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 塑性成型及模具技术国家重点实验实, 武汉 430074; 2. 南昌大学 机电学院, 南昌 330029)

**[摘要]** 通过引进一个反映金属流速不均衡性的参数——流速均方差, 有效地控制型材挤压成形时金属流动的不均匀性。采用有限变形弹塑性有限元方法, 对不同挤压参数(挤压比、摩擦因子)下铝型材挤压过程进行了数值模拟研究, 获得了挤压压力、流速均方差和型材件内部应力应变场随挤压参数变化的规律, 为铝型材挤压工艺参数优化提供了理论参考。

**[关键词]** 流速均方差; 铝型材挤压; 弹塑性有限元法; 工艺参数

**[中图分类号]** TG 376

**[文献标识码]** A

研究金属在挤压时的塑性变形规律是非常重要的, 因为它与挤压制品的组织、性能、表面质量、外形尺寸和形状精确度以及模具设计原则、模具的寿命等都有着十分密切的关系。坐标网格法<sup>[1]</sup>、低倍组织法<sup>[1]</sup>、视塑性法<sup>[2, 3]</sup>、光塑性法<sup>[4]</sup>、云纹法<sup>[5]</sup>以及硬度法<sup>[6]</sup>等是研究挤压变形规律的主要方法。由于物理模拟很难单独考虑某个工艺参数对金属成形过程的影响, 并且具有周期长、费用高等缺点, 因此, 通常需要借助于理论分析的手段来研究金属塑性变形规律。随着计算机技术和有限元方法的迅速发展, 利用塑性有限元法建立金属塑性成形过程的数学模型已引起人们的广泛重视<sup>[7, 8]</sup>。数值模拟技术可以方便地确定金属塑性成形过程各个阶段所需的变形功和载荷, 获得工件的内部应力、应变、温度分布和金属流动规律, 获得模具的应力、应变、温度分布和合理结构, 预测工件的成形形状、残余应力、缺陷、晶粒的粒度和取向分布, 是当前研究金属塑性变形规律的主要方法<sup>[9, 10]</sup>。本文作者采用有限变形弹塑性有限元方法, 对不同挤压参数下铝型材挤压过程进行了数值模拟研究, 获得了挤压压力、流速均方差和型材件内部应力应变场随挤压参数的变化规律。

## 1 分析方法和有限元模型的建立

在铝型材挤压过程中, 金属流速不均衡是导致

型材产生弯曲、扭拧、波浪等质量问题的主要原因。因此, 为了有效地控制挤压时金属流动的不均匀性, 本文引进了一个反映金属流速不均衡性的参数——流速均方差<sup>[11]</sup>。流速均方差的定义为

$$SDV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_z^i - v_z^{ave})^2}{N}} \quad (1)$$

式中  $N$ —所考虑区域(挤压出口端面)的节点数目,  $v_z^i$ —规定平面上节点轴向速度,  $v_z^{ave}$ —规定平面上平均轴向速度。

在挤压生产中, 通常以挤压比或变形程度来表示金属变形量的大小。挤压比定义为挤压筒截面积与制品截面积之比, 即

$$\lambda = S / S_1 \quad (2)$$

式中  $\lambda$ —挤压比,  $S$ —挤压筒截面积,  $S_1$ —制品截面积。

以壁板型材为挤压模拟对象, 其型材截面形状和尺寸见图 1 和表 1。有限元模拟的初始条件: 材料为铝合金 6062, 其流动应力应变关系为<sup>[12]</sup>

$$\bar{\sigma} = 209(\bar{\epsilon})^{0.122} \text{ N/mm}^2 \quad (3)$$

挤压筒直径 70 mm, 坯料高度 40 mm, 挤压工作带长度 4 mm, 模具与工件间的摩擦因子为 0.05~ 0.85, 挤压比为 6.23, 8.02, 12.02, 24.05。

由于壁板型材为对称零件, 取四分之一的模型进行计算, 以减少计算工作量。对初始坯料进行了非均匀性离散, 离散后的网格如图 2 所示。

① [基金项目] 江西省教育厅和华中科技大学塑性成形及模具技术国家重点实验室开放基金资助项目(02-6)

[收稿日期] 2002-02-26; [修订日期] 2002-04-15

[作者简介] 闫洪(1962-), 男, 副教授, 博士。

表 1 模拟计算的型材截面尺寸和挤压比

Table 1 Simulated section's dimensions and extrusion ratios

No.	A / mm	B / mm	$\lambda$
1	48	12.86	6.23
2	40	12	8.02
3	40	8	12.02
4	40	4	24.05

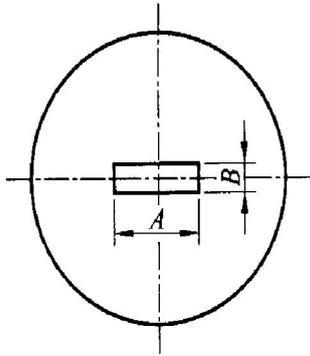


图 1 模拟计算的型材截面形状  
Fig. 1 Geometry of simulated section

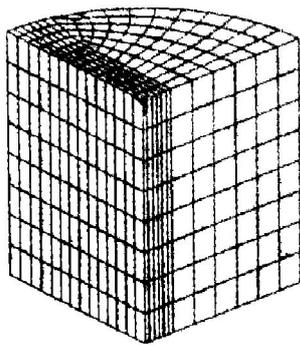


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

## 2 模拟计算结果分析

### 2.1 挤压比对应力应变分布的影响

#### 2.1.1 挤压比对挤压压力的影响

在摩擦因子  $m = 0.25$ , 挤压比分别取 8.02, 12.02, 24.05 时, 对挤压过程进行了计算, 得到了挤压压力在不同挤压比下随行程变化的曲线, 如图 3 所示。可以看出, 在相同条件下, 随挤压比增大, 变形压力增大, 因此挤压压力增大。

#### 2.1.2 挤压比对流速均方差的影响

图 4 所示是流速均方差随挤压比的变化曲线。

由图中可知, 流速均方差随挤压比增加而增大。对于铝合金 6063T5, 最佳挤压比范围为 50~ 90<sup>[13]</sup>。当挤压比超过一定程度时, 若挤压模结构尺寸设计不够合理时, 流速均方差的增大容易造成因流速差异过大而导致挤压件产生弯曲、拧扭、裂纹等缺陷, 甚至堵模现象。

#### 2.1.3 挤压比对应力应变分布的影响

图 5 和图 6 所示分别为挤压比为 8.02 和 24.05 时径向应力、周向应力分布情况。从图中可以看出, 挤压比较小时, 出口端部存在拉应力区, 随着挤压比的增加, 端部拉应力区逐渐减小并最终消失。

图 7 所示为挤压比分别为 8.02 和 24.05 时的轴向应力分布情况。可以看出, 即使在挤压比较小时, 轴向应力仍然保持为压应力。

由图 8 和图 9 可知, 在挤压比较大时, 等效应力和等效应变数值愈大, 表明变形愈激烈。

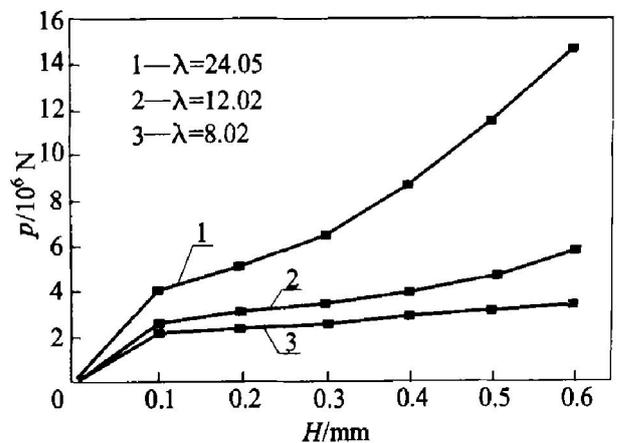


图 3 挤压压力随行程变化曲线  
Fig. 3 Extrusion pressure vs distance

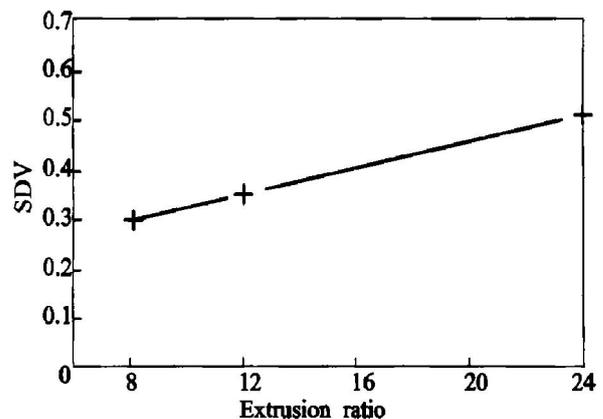


图 4 流速均方差随挤压比的变化曲线  
Fig. 4 SDV vs extrusion ratio

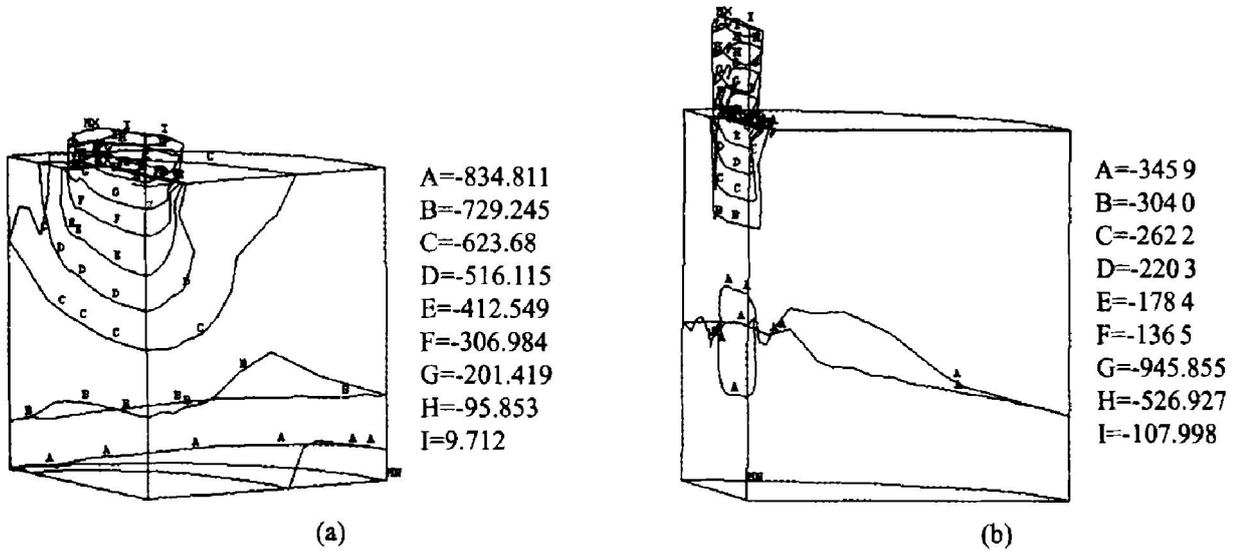


图 5 不同挤压比时的径向应力分布

Fig. 5 Radial stress distribution at different extrusion ratio  
(a)  $-\lambda = 8.02$ ; (b)  $-\lambda = 24.05$

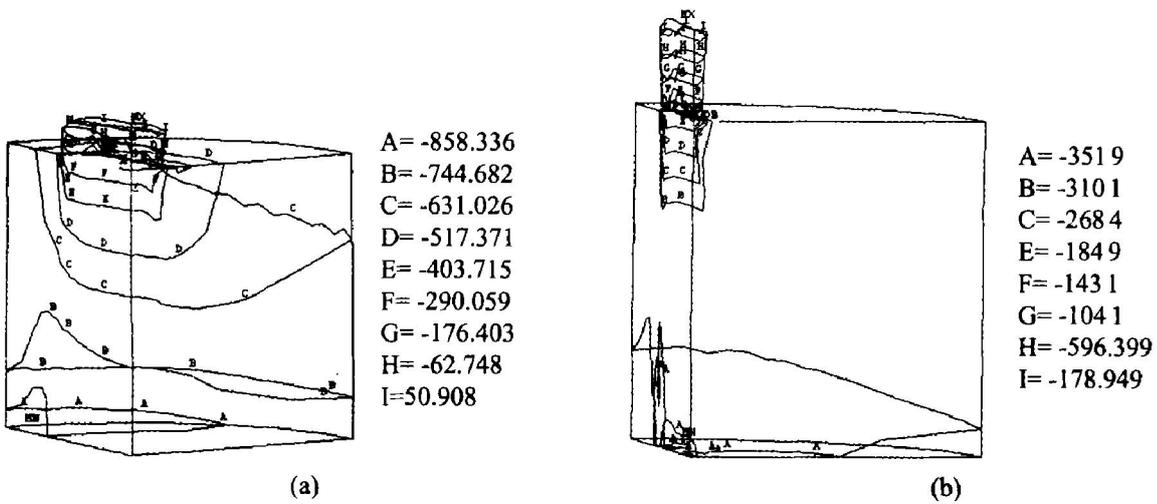


图 6 不同挤压比时的周向应力分布

Fig. 6 Tangential stress distribution at different extrusion ratio  
(a)  $-\lambda = 8.02$ ; (b)  $-\lambda = 24.05$

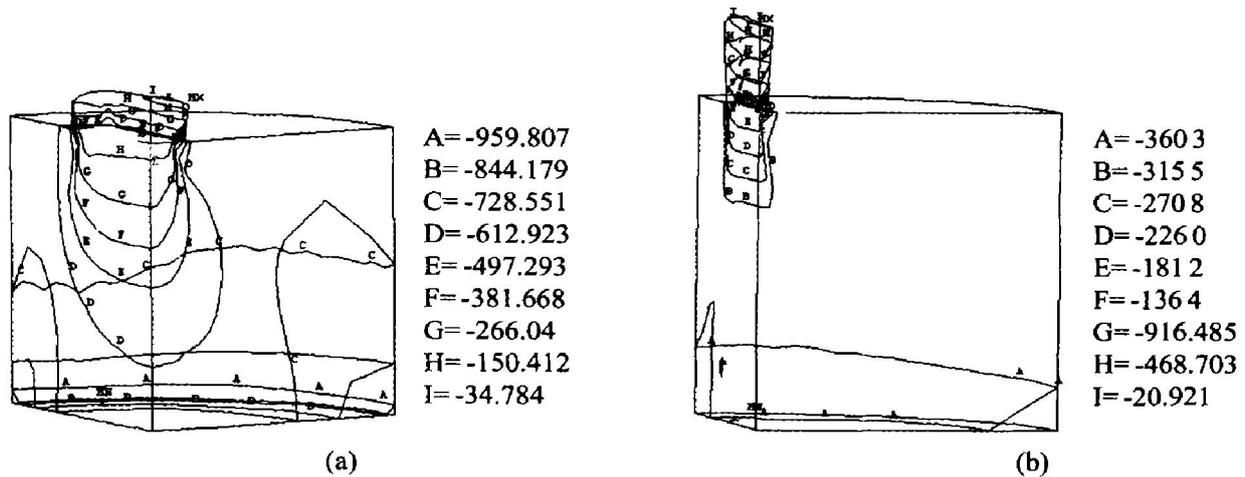


图 7 不同挤压比时的轴向应力分布

Fig. 7 Axial stress distribution at different extrusion ratio  
(a)  $-\lambda = 8.02$ ; (b)  $-\lambda = 24.05$

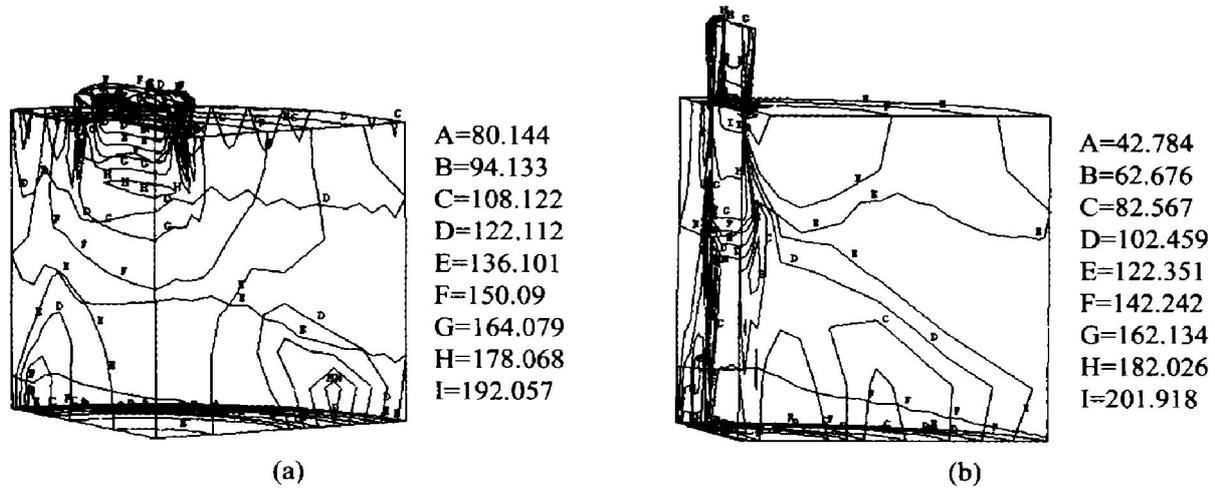


图 8 不同挤压比时的等效应力分布

Fig. 8 Equivalent stress distribution at different extrusion ratio (a) -  $\lambda= 8.02$ ; (b) -  $\lambda= 24.05$

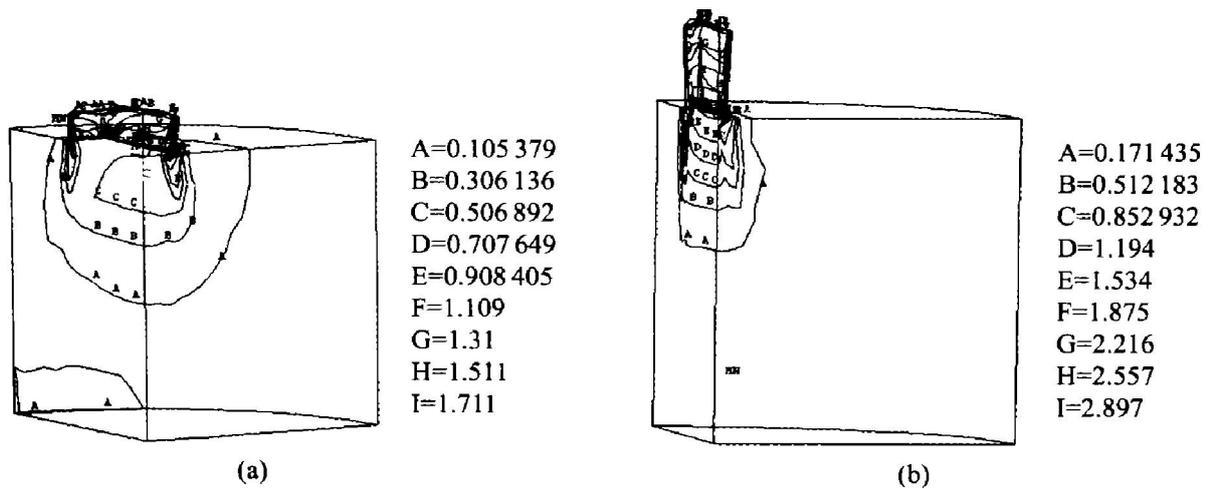


图 9 不同挤压比时的等效应变分布

Fig. 9 Equivalent strain distribution at different extrusion ratio (a) -  $\lambda= 8.02$ ; (b) -  $\lambda= 24.05$

## 2.2 摩擦因子对应力应变分布的影响

### 2.2.1 摩擦因子对挤压压力的影响

图 10 所示为挤压比  $\lambda= 6.23$  时, 在不同的摩擦因子条件下, 挤压压力随变形增量步的变化曲线。可以看出, 当摩擦因子从 0.05 增加到 0.85 时, 挤压压力增加了 14.4%。说明摩擦因子的变化对挤压压力的影响是较敏感的。

### 2.2.2 摩擦因子对流速均方差的影响

图 11 所示为挤压比  $\lambda= 6.23$  时, 流速均方差随摩擦因子的变化曲线。可以看出, 当摩擦因子从 0.05 增加到 0.45 时, 流速均方差是递减的; 随后摩擦因子从 0.45 增加到 0.85 时, 流速均方差稍有增加。因此, 实际铝型材挤压生产中应不进行润滑

为宜。

### 2.2.3 摩擦因子对应力应变分布的影响

图 12 和图 13 所示分别为径向应力和周向应力的分布图。由图可知, 坯料在出口端部的径向应力出现拉应力, 拉应力值随摩擦因子的增大而增大。摩擦因子对周向应力的影响和对径向应力的影响规律基本相同。

图 14 所示为挤压比  $\lambda= 6.23$ , 摩擦因子  $m$  分别为 0.05 和 0.85 时轴向应力的分布情况。由图中可知, 坯料在出口端部轴向应力有出现拉应力的趋势, 拉应力值随摩擦因子的增大而减小, 同时, 随着摩擦因子的增大, 型材中存在的压应力值将显著提高。

由图 15 和图 16 可知, 摩擦因子对等效应力和等效应变分布的影响不显著。

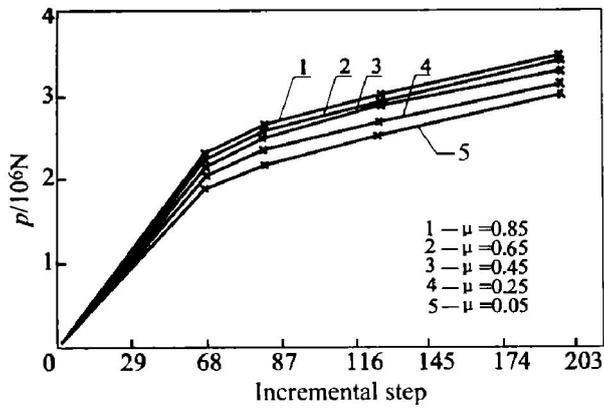


图 10 挤压压力随变形增量步的变化曲线  
**Fig. 10** Extrusion pressure vs deforming incremental step

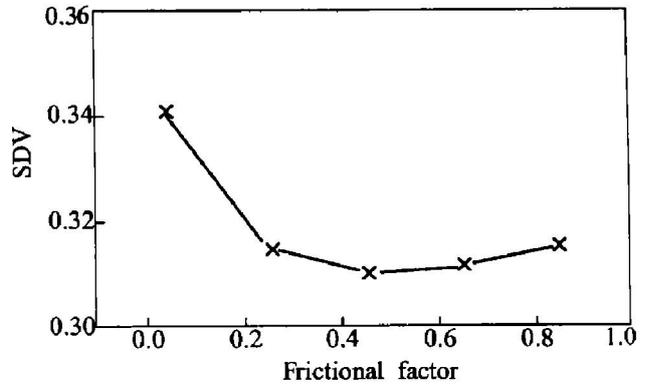
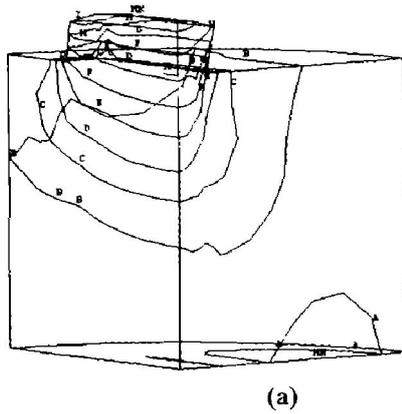
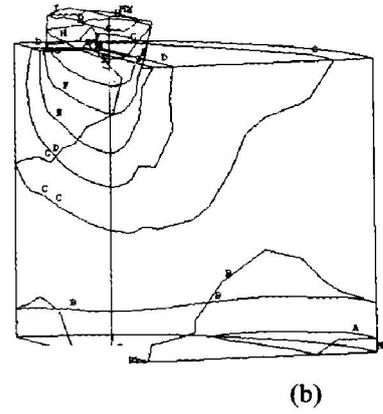


图 11 流速均方差随摩擦因子的变化曲线  
**Fig. 11** SDV vs frictional factor

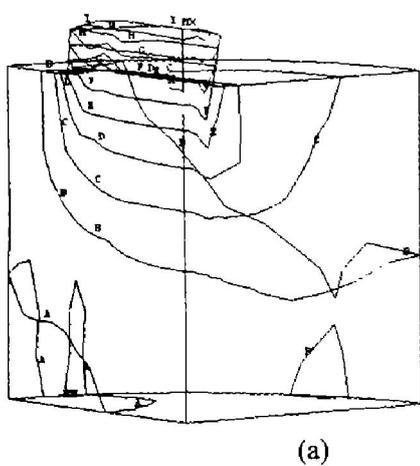


A = -795.237  
 B = -691.552  
 C = -587.866  
 D = -484.181  
 E = -380.495  
 F = -276.81  
 G = -173.124  
 H = -69.439  
 I = 34.246

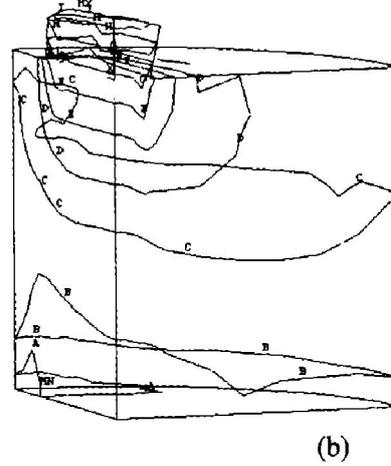


A = -901.996  
 B = -784.357  
 C = -666.718  
 D = -549.079  
 E = -431.44  
 F = -313.801  
 G = -196.163  
 H = -78.524  
 I = 39.115

图 12 不同摩擦因子时的径向应力分布  
**Fig. 12** Radial stress distribution at different frictional factor  
 (a)  $-m = 0.05$ ; (b)  $-m = 0.85$



A = -819.226  
 B = -714.112  
 C = -608.999  
 D = -503.885  
 E = -398.772  
 F = -293.658  
 G = -188.544  
 H = -83.431  
 I = 21.683



A = -908.318  
 B = -791.428  
 C = -674.537  
 D = -557.647  
 E = -440.757  
 F = -323.867  
 G = -206.976  
 H = -90.086  
 I = 26.804

图 13 不同摩擦因子时的周向应力分布  
**Fig. 13** Tangential stress distribution at different frictional factor  
 (a)  $-m = 0.05$ ; (b)  $-m = 0.85$

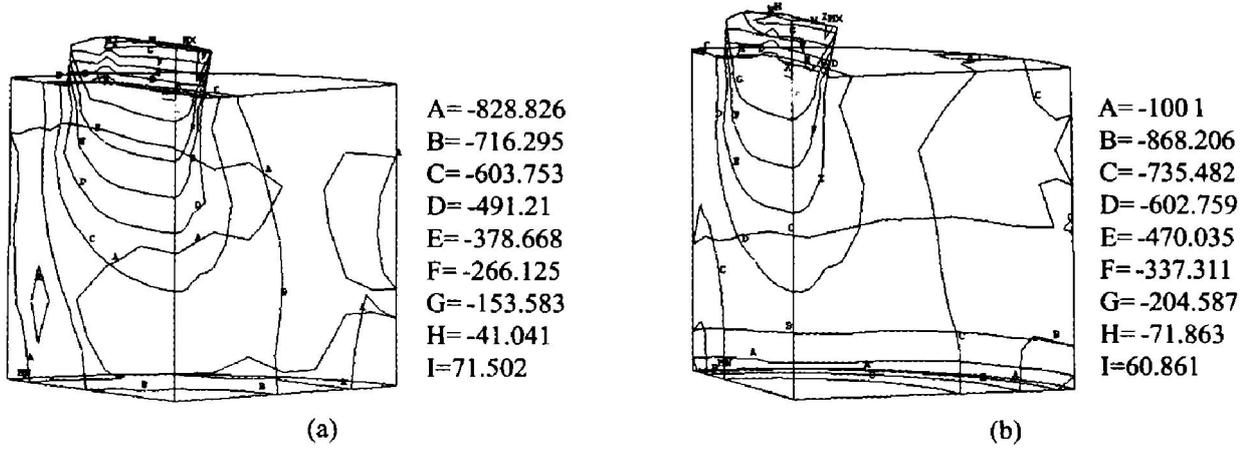


图 14 不同摩擦因子时的轴向应力分布

Fig. 14 Axial stress distribution at different frictional factor  
(a)  $m = 0.05$ ; (b)  $m = 0.85$

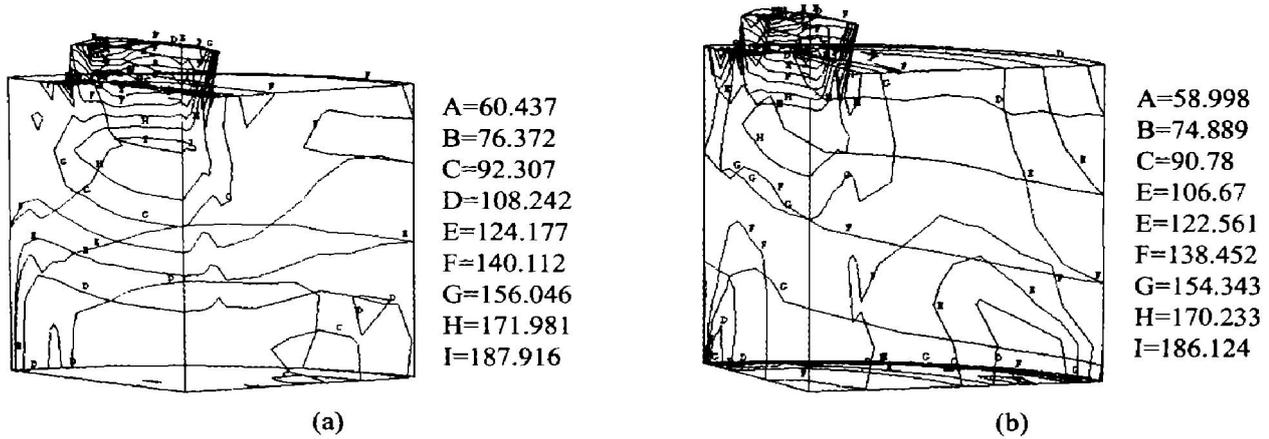


图 15 不同摩擦因子时的等效应力分布

Fig. 15 Equivalent stress distribution at different frictional factor  
(a)  $m = 0.05$ ; (b)  $m = 0.85$

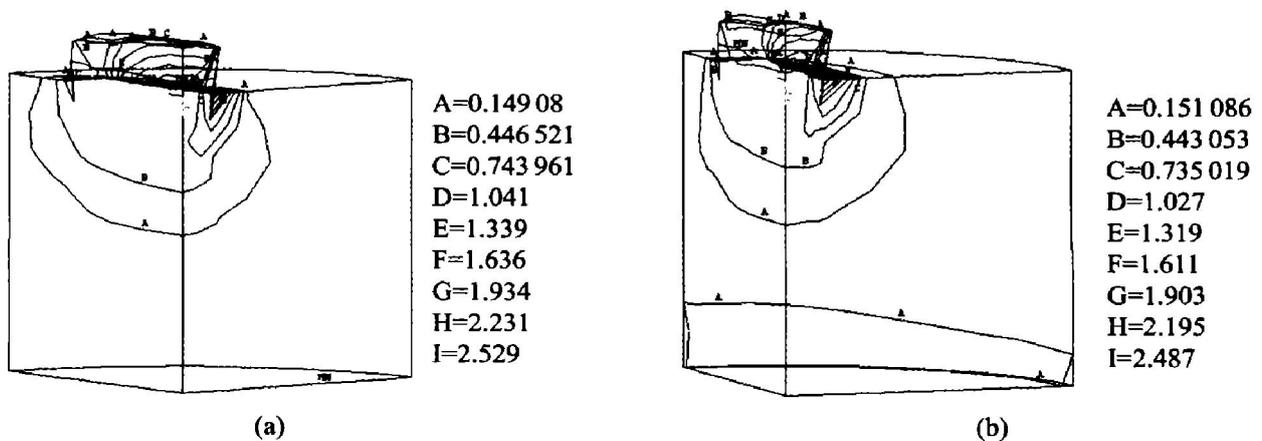


图 16 不同摩擦因子时的等效应变分布

Fig. 16 Equivalent strain distribution at different frictional factor  
(a)  $m = 0.05$ ; (b)  $m = 0.85$

### 3 结论

采用有限元模拟技术, 对不同挤压工艺参数下铝型材挤压过程进行了数值模拟研究, 得到了挤压比、摩擦因子等工艺参数对挤压压力、流速均方差和型材试件内应力应变分布影响的变形规律。

1) 流速均方差作为评价塑形变形时金属流动速度不均衡性指标, 对于保证铝型材挤压顺利完成具有重要的意义。

2) 挤压比愈大, 挤压力愈大, 压应力个数愈多, 压应力数值愈大, 愈不容易产生拉应力, 对挤压成形愈有利。考虑到流速均方差也随之增大, 当挤压比超过一定程度时, 若挤压模结构尺寸设计不够合理时, 流速均方差的增大容易造成因流速差异过大而导致挤压件产生弯曲、拧扭、裂纹等缺陷, 甚至堵模现象。故挤压比不宜太小太大, 实际生产中应合理选择挤压比的大小。

3) 摩擦因子对变形体内应力分布的影响彼消此涨, 但摩擦因子愈小, 流速均方差愈大, 故实际铝型材挤压生产中应不进行润滑为宜。

#### [ REFERENCES ]

- [ 1 ] 时泽贡. 铝合金带板热挤压时模具工作带形状对金属流动平衡的影响[J]. 轻合金加工技术, 1985(6): 13 - 17.  
SHI Ze-gong. Effect of die bearing shape in hot extrusion of aluminum alloy piece on metal flow balance [J]. Qinghejin Jiagong Jishu, 1985(6): 13 - 17.
- [ 2 ] Sliwa R, Zasadzinski J. Surface cracking of bars in the metal extrusion process: part - I [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1987(14): 325 - 341.
- [ 3 ] Sliwa R, Zasadzinski J. Surface cracking of bars in the metal extrusion process: part - II [J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1987(14): 343 - 362.
- [ 4 ] 赖曾美, 卢志辉. 光塑性三维应变分析方法及应用[J]. 山东工业大学学报, 1991(增刊): 82 - 96.  
LAI Zeng-mei, LU Zhi-hui. 3D photoplastic strain analysis method and application [J]. Journal of Shandong Polytechnical University, 1991(suppl): 82 - 96.
- [ 5 ] 曹起骧. 密栅云纹法原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.  
CAO Qi-xiang. Principle and Application of Moire Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1983.
- [ 6 ] 北京机电研究所. 常用冷挤压钢材冷挤压件机械性能的研究[J]. 锻压技术, 1980(3): 10 - 16.  
Beijing Research Institute of M/E Technology. Study on mechanical performance of cold extruded pieces with common cold extruded steels [J]. Forging & Stamping Technology, 1980(3): 10 - 16.
- [ 7 ] 彭颖红, 彭大暑, 左铁镛. CONFORM 连续挤压变形过程的刚粘塑性有限元分析[J]. 中国有色金属学报, 1993, 3(4): 42 - 47.  
PENG Ying-hong, PENG Da-shu, ZUO Tie-yong, et al. Rigid-viscous plastic finite element analysis for CONFORM extrusion forming process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1993, 3(4): 42 - 47.
- [ 8 ] 周 飞, 彭颖红, 阮雪榆. 铝型材挤压过程有限元数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(4): 637 - 642.  
ZHOU Fei, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. Numerical simulation of aluminum material extrusion process by finite element method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(4): 637 - 642.
- [ 9 ] 闫 洪, 包忠诩, 柳和生, 等. 角铝型材挤压过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 202 - 205.  
YAN Hong, BAO Zhong-xu, LIU He-sheng, et al. Numerical simulation of angle aluminum [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 202 - 205.
- [ 10 ] YAN Hong, BAO Zhong-xu, XIA Ju-chen. Optimization of technological parameters for profile extrusion process and its numerical simulation [A]. BIN Hong-zan, et al. 17th International Conference Computer Aided Production Engineering [C]. Trowbridge, Wiltsire, UK: The Cromwell Press, 2001. 185 - 188.
- [ 11 ] 闫 洪. 型材挤压成形理论分析和数值仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2001.  
YAN Hong. Theory Analysis for Profile Extrusion Forming and the Numerical Simulation Research [D]. Nanchang: Nanchang University, 2001.
- [ 12 ] Altan T. Modern Forging, Material and Technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
- [ 13 ] 刘静安. 铝型材挤压模具设计、制造、使用及维修[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.  
LIU Jing-an. Design, Manufacture, Practice and Maintain for Extrusion Die of Aluminum Profile [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.

## Effect of technological parameters on profile extrusion forming process

YAN Hong<sup>1, 2</sup>, XIA Ju-chen<sup>1</sup>, LI Zi-gang<sup>1</sup>, DONG Xiang-huai<sup>1</sup>, YANG Guo-tai<sup>2</sup>, HE Cheng-hong<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Plastic Forming Simulation and Die & Mould Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Nanchang University, Nanchang 330029, China)

**[ Abstract ]** The non-homogeneous metal flow during the extrusion forming process was well controlled by introducing a non-equilibrium parameter of metal flow, the mean-square deviation of velocity (SDV). The finite deformation elastoplastic finite element method was used to carry out the numerical simulation research on the profile extrusion process with different extrusion parameters (such as extrusion ratio, frictional factor). The change laws of the extrusion pressure, SDV and stress-strain fields with the extrusion parameters were obtained. It is theoretic consideration to optimize the technological parameters of the profile extrusion.

**[ Key words ]** mean-square deviation of velocity; profile extrusion; elastoplastic finite element method; technological parameter

(编辑 袁赛前)