

文章编号:1000-6893(2007)02-0432-06

# 快速凝固/粉末冶金高阻尼铝合金 挤压成形过程的数值模拟

文丽芳<sup>1</sup>, 马岳<sup>1</sup>, 黄晨光<sup>2</sup>, 李沛勇<sup>3</sup>, 徐惠彬<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

(3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

## Numerical Simulation of the Forming Process of RS/ PM High Damping Aluminum Alloy

WEN Li-fang<sup>1</sup>, MA Yue<sup>1</sup>, HUANG Chen-guang<sup>2</sup>, LI Pei-yong<sup>3</sup>, XU Hui-bin<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of

Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:**采用有限元分析软件 ANSYS,分析了快速凝固/粉末冶金 (Rapidly Solidified/ Powder Metallurgy, RS/ PM)高阻尼铝合金 FMS0714/ 10(Zr-30Al)的挤压成形过程,研究了模具与坯料间的摩擦条件和挤压比对阻尼铝合金成形过程的影响,探讨了挤压过程材料表面产生裂纹的机理,进行了成形工艺优化。研究表明:挤压过程中 FMS0714/ 10(Zr-30Al) 阻尼铝合金材料的流动与变形不均匀,导致了应力应变分布的不均匀:材料表面应力应变较大,芯部应力应变较小;表面过大的应变和轴向拉应力是表面裂纹的诱因;减小模具和坯料间的摩擦,增大挤压比,可以减小材料表面应力,使应变分布趋于均匀,从而减少材料表面损伤,优化材料表面质量,提高成品合格率。数值模拟的研究结果将为 FMS0714/ 10(Zr-30Al) 阻尼铝合金材料挤压工艺的制订以及新材料的设计和研制提供有益的参考。

**关键词:** 阻尼铝合金; 成形过程; 挤压; 表面缺陷; 数值模拟; 有限元方法

**中图分类号:** TB115; TG376.8 **文献标识码:** A

**Abstract:** The extrusion forming process of a rapidly solidified/powder metallurgy (RS/ PM) damping aluminum alloy, FMS0714/ 10(Zr-30Al), is studied using the finite element software ANSYS. The effects of friction coefficient and extrusion ratio on the forming process are investigated in a wide parametric variation region,  $f$ , 0-0.2;  $r$ , 2.78-8.65. Optimization of the forming process is performed to reduce the surface flaw of the material. Numerical results show that during the extrusion forming process the flow and deformation of the FMS0714/ 10(Zr-30Al) material are non-uniform, which results in the high stress and strain gradient. Stress and strain values near the surface are larger, while those near the center are smaller. Excessive surface strain and surface tensile stress, which are the main reasons for surface crack, can be reduced by enlarging the extrusion ratio and decreasing the friction between die and billet, thereby the material surface quality will be modified and the product qualification will be increased. The numerical simulation results can be treated as good references not only for constituting extrusion techniques of FMS0714/ 10(Zr-30Al) material, but also for designing and preparing new materials.

**Key words:** damping aluminum alloy; forming process; extrusion; surface flaw; numerical simulation; finite element method

航空航天科技的高速发展对结构材料提出了新的要求,要求材料除具有满足使用要求的结构力学性能外,还具有减振、降噪等功能。研制阻尼材料是极具发展潜力的减振降噪的途径。传统的金属材料往往由于阻尼值  $Q^{-1}$  较低而难以满足航

空材料结构减振的要求,因此近年来各国都投入大量人力和财力开展航空用高强度高阻尼轻合金的研究<sup>[1-3]</sup>。北京航空航天大学与北京航空材料研究院合作开展了快速凝固/粉末冶金 (Rapid Solidified/ Powder Metallurgy, RS/ PM) 阻尼铝合金材料的研制工作,研制的 LJ5 系列高温阻尼铝合金<sup>[4]</sup>具有优良的综合性能,其室温阻尼值  $Q^{-1}$  为  $1.5 \times$

收稿日期:2005-10-19; 修订日期:2006-02-23  
通讯作者:马岳 E-mail: mayue@buaa.edu.cn

$10^{-2}$ , 达到高阻尼合金的阻尼水平 ( $Q^{-1} \sim 10^{-2}$ ), 是传统锻铝 LD7CS 合金阻尼值的 5 倍以上。

RS/PM 方法制备高温阻尼铝合金, 除了金属粉末的制备是一个关键因素外, 挤压成形工艺过程也是一个关键步骤, 其成形工艺参数显著影响最终材料的性能和使用寿命。

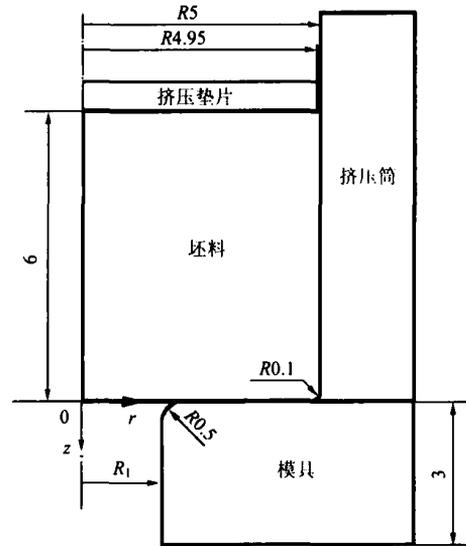
在金属成形领域, 有限元数值模拟技术相对于实际实验具有成本低、可重复性高、周期短等优点, 作为实际成形过程的辅助方法在近几年得到了广泛的应用<sup>[5-12]</sup>。本文采用 ANSYS 有限元分析软件, 模拟了 LJ5 系列 RS/PM 高阻尼铝合金材料之一 FMS0714/10 (Zr-30Al)<sup>[11]</sup> 的挤压成形过程, 结合实验, 分析成形过程中材料的流动规律和应力应变分布规律, 通过探讨模具与坯料间的摩擦条件和挤压比 (坯料初始横截面积和制品横截面积的比值) 对成形过程的影响规律, 进一步研究成形过程工艺参数对成形材料组织、性能的影响, 旨在得到使成形产品组织、性能较优的摩擦条件和挤压比, 为新材料的设计、研制和工艺制订提供有益的参考。

## 1 有限元模型

挤压筒和模具为圆筒形回旋体, 坯料初始状态为压实致密后的 FMS0714/10 (Zr-30Al) 高阻尼铝合金, 致密后材料密度已接近成形产品的密度, 后续挤压分析中将其近似处理为不可压缩的连续体。

(1) 计算模型分析 实际挤压成形过程是一个三维问题, 坯料的结构和载荷均关于  $z$  轴轴对称, 什算时可简化为二维轴对称模型, 取其轴面

(子午面) 的 1/2 为研究对象, 见图 1。为避免模拟挤压过程中材料在挤压筒和模具拐角处产生应力奇异, 尖角处使用小圆角过渡。采用二维四节点单元, 将实体坯料模型离散为 11 737 个节点, 11 520 个尺寸均匀的四边形单元。



单位: cm

$R_1$  — 模孔半径 (及制品半径)

图 1 挤压成形过程的几何模型

Fig. 1 Geometric modeling of extrusion process

(2) 材料模型分析 初始坯料的力学性能表现为弹塑性, 性能参数由压缩实验测得, 应力应变关系采用常用的双线性强化模型近似处理, 具体参数见表 1。挤压垫片、挤压筒和模具的变形很小, 视为刚体。

表 1 初始材料性能参数

Table 1 Initial properties of the material

材 料	材料参数				
	密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	弹性模量 / GPa	切线模量 / MPa	屈服强度 / MPa	泊松比
FMS0714/10 (Zr-30Al)	3	8.6	322	225	0.31

(3) 外摩擦条件 库仑摩擦。分析中采用了 3 种摩擦条件:  $f = 0$ ,  $f = 0.1$ ,  $f = 0.2$ ,  $f$  为摩擦因子。分析过程忽略了变形热和摩擦生热。

边界条件: 约束坯料和挤压垫片轴线上所有节点的径向位移自由度; 约束挤压筒和模具的所有自由度; 在挤压垫片上施加恒定的轴向速度,  $v_z = 0.5 \text{ mm/s}$ 。

(4) 坯料和工模具间接触类型 自动单面接触 ASS2D。

(5) 运行环境 Win2000, 256 MB 内存。

挤压比 范围:  $= 2.78 \sim 8.65$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 挤压过程材料的流动规律

#### (1) 流动规律

图 2 是模拟得到的挤压过程进行到  $t = 24 \text{ s}$  时材料流动的平均速度场:  $v = \sqrt{v_r^2 + v_z^2}$ 。工艺参数:  $= 8.65$ ,  $f = 0.2$ 。

模拟结果可见, 各部分材料的流动不均匀, 材料芯部正对模孔, 流动所受阻力较小, 流动速度较快; 坯料和工模具接触面附近受到摩擦和约束, 流

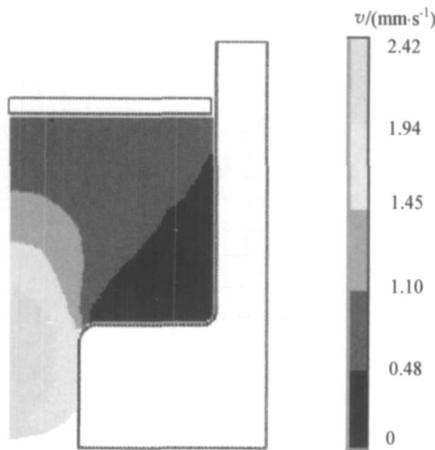


图2 挤压过程材料的速度场( $t = 24$  s)

Fig. 2 Velocity field in the workpiece of extrusion process at  $t = 24$  s

动速度较慢。

实际挤压过程中,材料流速的不均匀必将导致成形材料内各部分密度的不均匀,流速较小的地方密度小,致密度小的地方孔隙、缺陷多,容易成为裂纹源,成形材料服役时,此处更易破坏。

### (2) 摩擦条件对流动规律的影响

给定不同的摩擦条件,研究了  $\mu = 8.65$ 、其余工艺参数相同时材料的平均速度场。模拟结果表明随着坯料和挤压筒之间接触摩擦的增大,材料流动的不均匀程度增加。材料芯部的最大流速有所提高,表面(材料与模具的接触面及材料流出模孔后的自由表面)流速有所降低,芯部和表面的最大速度差增大。具体数值见表2。

表2 不同摩擦条件下材料芯部和表面流速

Table 2 The largest flow velocities at the surface and central portion of the workpiece in different friction conditions

摩擦因子	最大流速/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
	表面	芯部	差值
0	1.10	1.34	0.24
0.1	1.05	2.30	1.25
0.2	0.90	2.42	1.52

注:选取时间为  $t = 24$  s

材料和模具间的接触摩擦越大时,材料和挤压筒、模具间的黏着力增加,表层材料沿筒壁和模壁流动更为困难,材料流动不均匀程度提高,挤压过程中容易产生死区和缩尾缺陷<sup>[13]</sup>,从而降低成材率和制品质量。

### (3) 挤压比对流动规律的影响

给定不同的挤压比,研究了  $f = 0$ 、其余工艺参数相同时材料的速度场。模拟结果表明随着挤

压比的增大,材料芯部最大流速稍有增大,表面最大流速相差不大,表面与芯部的流速差变化不显著,而且没有规律性,见表3。

表3 不同挤压比条件下材料芯部和表面流速

Table 3 The largest flow velocities at the surface and central portion of the workpiece at different extrusion ratios

挤压比	最大流速/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
	表面	芯部	差值
2.78	1.00	1.02	0.02
4.34	1.00	1.22	0.22
6.25	0.95	1.28	0.33
8.65	1.10	1.34	0.24

注:选取时间为  $t = 24$  s

综上,挤压过程材料流速的不均匀给挤压制品的质量带来不利影响,导致挤压制品头部与尾部、表层与中心部的组织性能不均匀,增大摩擦会导致材料流动不均匀程度增加;而挤压比对材料流动规律的影响不大。因此,在材料的成形过程中,应尽量减少材料与模具间的摩擦,挤压比的确定须考虑更多因素<sup>[13]</sup>。

## 2.2 材料中的应力、应变

### (1) 应力、应变分布规律

实际挤压过程中发现,材料表面容易产生裂纹缺陷,裂纹的产生通常和应力、应变有关。模拟得到材料的等效应力和等效应变分布结果如图3

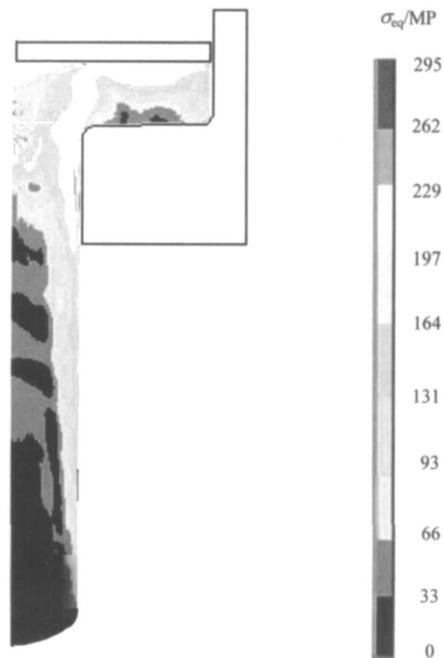


图3 材料的等效应力场( $\mu = 8.65, f = 0$ )

Fig. 3 Equivalent stress field in the extrudate material for  $\mu = 8.65$  and  $f = 0$

和图 4 所示。模拟条件： $\mu = 8.65, f = 0$ , 挤压垫片压下量为 4 cm。

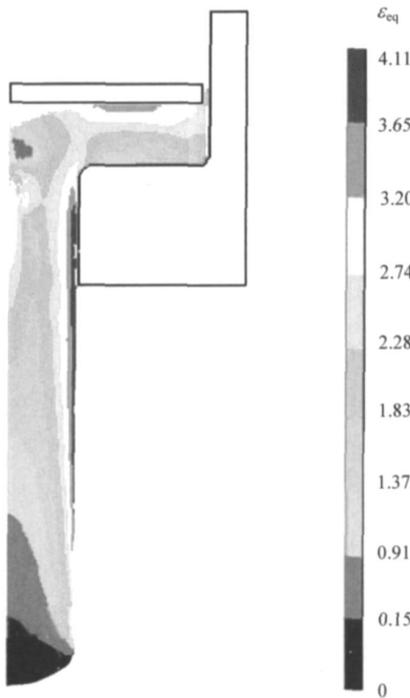


图 4 材料的等效应变场 ( $\mu = 8.65, f = 0$ )

Fig. 4 Equivalent strain in the extrudate material for  $\mu = 8.65$  and  $f = 0$

挤压过程为不均匀变形,材料中流速的不均匀加剧了应力和应变分布的不均匀。材料表面附近应力应变及其梯度较大,芯部附近应力应变较小,因此材料成形过程中表面产生裂纹的可能性较大。

为了进一步研究材料表面裂纹形成的机理,分析了压下量为 4 cm 时材料某横截面上各方向的应力分布规律,选取的截面位于模口下 1 cm 处(即  $z = 4$  cm,后文中分析的截面均为此截面),模拟结果见图 5 和图 6。图中:横轴为坯料半径; $r$

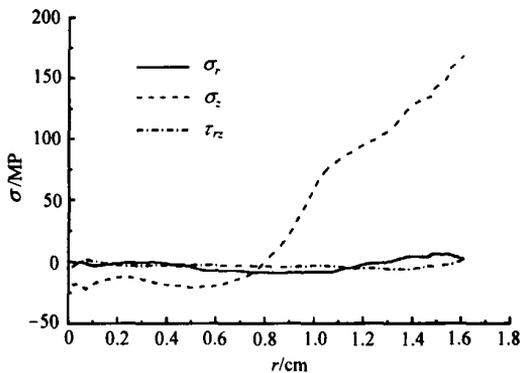


图 5  $z = 4$  cm 处材料横截面上的应力分布

Fig. 5 Distributions of stress components at cross section  $z = 4$  cm

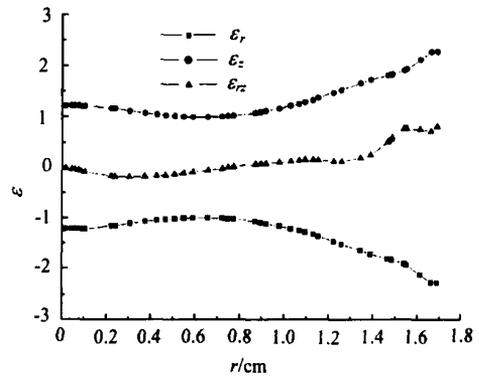


图 6  $z = 4$  cm 处材料横截面上的应变分布

Fig. 6 Distributions of strain components at cross section  $z = 4$  cm 为径向应力; $\sigma_z$  为轴向应力; $\tau_{rz}$  为  $r-z$  平面上的剪切应力; $\epsilon_r$  为径向应变; $\epsilon_z$  为轴向应变; $\epsilon_{rz}$  为  $r-z$  平面上的剪切应变。

在径向的不同位置, $\sigma_r$  和  $\tau_{rz}$  的值差别很小, $\sigma_z$  差别较大; $r < R_1/2$  时( $R_1$  为制品半径), $\sigma_z < 0$ ,为压应力,应力变化很平缓; $r > R_1/2$  时, $\sigma_z > 0$ ,为拉应力;与材料表层距离越近,轴向拉应力及其变化梯度越大,在材料表层应力最大。由此可知,轴向应力  $\sigma_z$  是诱发表面裂纹的主要原因。应变结果中材料的应变状态在轴向为拉应变,径向为压应变; $\epsilon_{rz}$  在径向的不同位置差别较小,但在材料芯部和表面,差值也达到了 0.5 以上;应综合考虑  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  和  $\tau_{rz}$  对材料表面状态的影响,故以下的应变分析中采用等效应变。

(2) 摩擦条件对应力应变的影响

选取不同的摩擦条件,分析了挤压比恒定时( $\mu = 8.65$ )材料在  $z = 4$  cm 横截面上的轴向应力和等效应变,如图 7 和图 8 所示。

3 种摩擦条件下应力曲线的形状大致相同,无摩擦( $f = 0$ )和有摩擦条件下的曲线相比,曲线

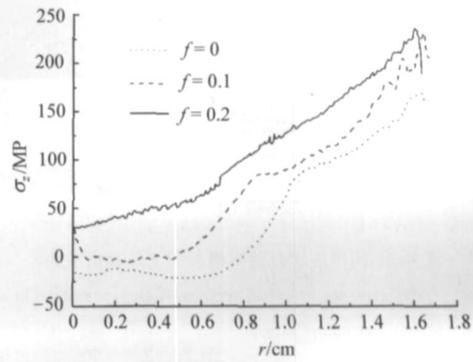


图 7 不同摩擦条件下材料横截面上的轴向应力

Fig. 7 Axial stresses at extrudate section in different friction conditions

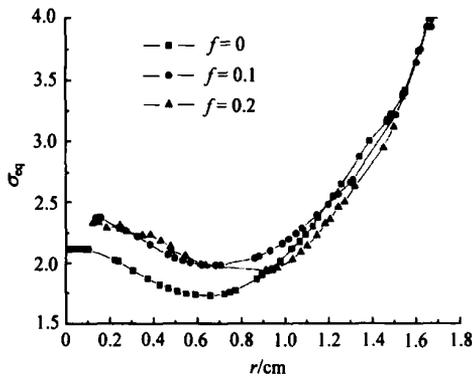


图 8 不同摩擦条件下材料横截面上的等效应变

Fig. 8 Equivalent strains at cross section of the extrudate in different friction conditions

相对较为平缓,压应力的范围最大;摩擦系数越大,压应力范围越小,轴向应力值也越大。 $f = 0.2$  时,该截面上已经没有压应力,全部表现为拉应力。

无摩擦时材料中的应变值较有摩擦时有所降低,芯部较为明显,表面处 3 种摩擦条件下应变值接近相等。

由此可见,虽然摩擦条件对材料应变的影响不显著,但是减小模具和坯料间的摩擦,可以改善材料中的应力分布,扩大压应力的范围,从而能够有效地预防裂纹源、微裂纹和材料表面损伤,提高成品率和材料的表面质量。

(3) 挤压比对应力应变的影响

选取不同的挤压比,分析了无摩擦时材料中  $z = 4 \text{ cm}$  横截面上轴向应力和等效应变的分布,如图 9 和图 10 所示,其中横坐标为相对半径  $R_r = r/R_1$  ( $r$  为径向坐标,  $R_1$  为制品半径)。

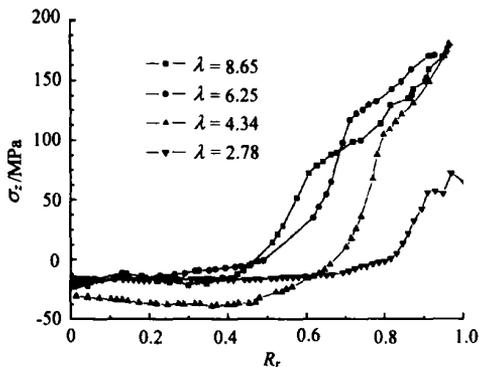


图 9 不同挤压比时材料横截面上的轴向应力

Fig. 9 Axial stresses at cross section of the extrudate at different extrusion ratios

挤压比对材料芯部的应力影响不大,挤压比较大时,表面应力的差异也不明显;但是随着挤压比的增大,材料横截面上压应力的范围减小。

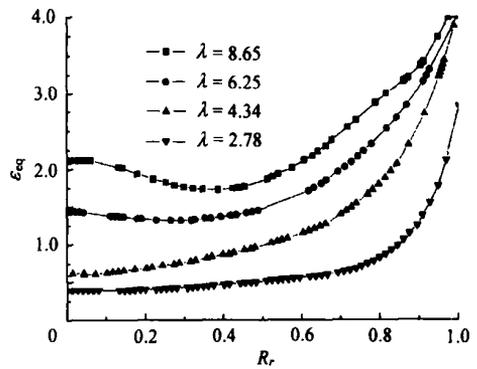


图 10 不同挤压比时材料横截面上的等效应变

Fig. 10 Equivalent strains at cross section of the extrudate at different extrusion ratios

挤压比越大,材料芯部应变越大;挤压比较大时,表面应变值大小相当;挤压比越大,变形越深入材料内部,材料横截面上应变梯度越小,应变分布越均匀。

以上模拟结果表明增大挤压比可以增大材料横截面上压应力的范围,同时使应变分布更均匀,从而能够抑制表面裂纹的产生,提高制品表面质量。

实验测得了不同挤压比条件下成形材料的拉伸性能,见图 11。结果表明,随着挤压比的增大,材料的抗拉强度和屈服强度也基本是增长趋势,增大挤压比也有利于材料力学性能的提高。

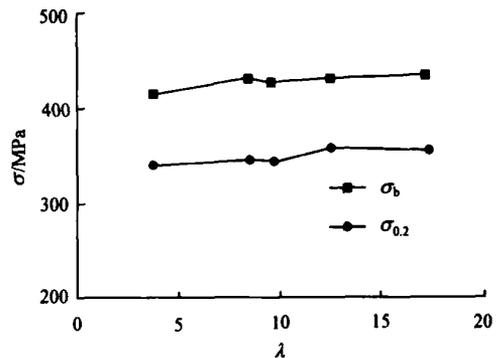


图 11 成形材料的力学性能和挤压比的关系

Fig. 11 Experimental mechanical properties of the extrudate material at different extrusion ratios

3 结 论

(1) RS/PM 阻尼铝合金 FMS0714/10 (Zn-30Al) 在挤压成形过程中材料流动速度不均匀,导致成形材料组织、性能和应力应变分布不均匀;材料表面密度较小,应力应变值较大;芯部密度较大,应力应变值较小;材料表面容易产生裂纹。

(2) 成形过程中坯料和模具之间的摩擦系数影响成形材料组织、性能和应力应变分布。减小材料和模具之间的接触摩擦,可增大材料表面密度,降低材料表面拉应力,提高成形材料表面质量;挤压比较大时,摩擦系数对材料中的应变场影响不大。

(3) 增大挤压比,能够改善材料表面的应力状态,使变形更深入材料内部,材料应变更均匀,成形材料性能提高;所以从提高材料表面质量和性能出发,应选择较大的挤压比。

### 参 考 文 献

- [1] 李沛勇,戴圣龙.高阻尼铝基复合材料的研究动向[J].航空材料学报,2000,20(3):164-171.  
Li P Y,Dai S L. Trends in high damping aluminum matrix composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(3): 164-171. (in Chinese)
- [2] 张小农,吴人杰,张荻.高阻尼金属基复合材料的发展途径[J].材料开发和应用,1997,12(3):4548-4552.  
Zhang X N,Wu R J,Zhang D. Approaches to developing a new kind of metal matrix composites with high damping capacity [J]. Development and Application of Materials, 1997, 12(3): 4548-4552. (in Chinese)
- [3] Sastry S, Krishna M, Uchil J. A study on damping behavior of acuminate particulate reinforced ZA-27 alloy metal matrix composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2001, 314: 268-274.
- [4] 李沛勇,戴圣龙,刘大博,等.低密度高阻尼金属/金属复合材料[J].材料科学与工艺,1999,7(增刊):91-95.  
Li P Y,Dai S L,Liu D B,et al. Low density high damping metal/metal composites [J]. Material Science and Technology, 1999, 7(sup): 91-95. (in Chinese)
- [5] Reddy N V, Sethuraman R, Lal G K. Upper-bound and finite element analysis of axisymmetric hot extrusion [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57: 14-22.
- [6] Sofuoglu H, Gedikli H. Physical and numerical analysis of three dimensional extrusion process [J]. Computational Material Science, 2004, 31: 113-124.
- [7] Arif A F M. On the use of non-linear finite element analysis in deformation evaluation and development of design charts for extrusion process [J]. Finite Element in Analysis and Design, 2003, 39: 1007-1020.
- [8] Duan X J, Velay X, Sheppard T. Application of finite element method in the hot extrusion of aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 369: 66-75.
- [9] 周立强,杨庆国,杨务滋.冷挤压有限元分析[J].湖南冶金,2003,31(6):12-15.  
Zhou L Q, Yang Q G, Yang W Z. Finite element methods analysis of the process of cold extrusion [J]. Hunan Metallurgy, 2003, 31(6): 12-15. (in Chinese)
- [10] 黄晨光,段祝平.激光微弯曲成形机理的数值研究[J].中国激光,2002,29(3):281-285.  
Huang C G, Duan Z P. Numerical simulation on the microscale bending induced by pulsed laser beam [J]. Chinese Journal of Laser, 2002, 29(3): 281-285. (in Chinese)
- [11] 胡忠,王本一,刘庄,等.三通挤压工艺过程的二维弹塑性有限元模拟[J].塑性工程学报,1996,3(2):33-40.  
Hu Z, Wang B Y, Liu Z, et al. 3-D elastoplastic FEM simulation of the whole forging process of a T-joint part [J]. Journal of Plasticity Engineering, 1996, 3(2): 33-40. (in Chinese)
- [12] Zhang Z H, Wang F C, Cheng J W, et al. Numerical simulation of extrusion pressure in the process of hydrostatic extrusion [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 10(1): 63-68.
- [13] 谢建新,刘静安.金属挤压理论与技术[M].北京:冶金工业出版社,2001.  
Xie J X, Liu J A. Theory and technology of metal extrusion [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001. (in Chinese)

#### 作者简介:

文丽芳(1981-)女,硕士研究生。主要研究方向:材料成形过程数值模拟。

E-mail:wlf@mse.buaa.edu.cn

马岳(1961-)女,副教授,博士后。主要研究方向:阻尼材料和金属间化合物。

E-mail:mayue@buaa.edu.cn

(责任编辑:蔡斐)