

Ti-6Al-4V 钛合金等通道转角挤压的有限元模拟

Finite Element Simulation of Equal Channel Angular Pressing of Ti-6Al-4V Alloy

方晓强, 李淼泉, 林莺莺

(西北工业大学 材料学院, 西安 710072)

FANG Xiao-qiang, LI Miao-quan, LIN Ying-ying

(School of Materials Science and Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 运用有限元方法对 Ti-6Al-4V 钛合金 等温等通道转角挤压过程进行了模拟, 获得了摩擦因子、挤压角、过渡角等挤压参数对材料变形区的应变分布和挤压载荷的影响规律。结果表明: 摩擦因子的增大引起局部应变集中, 摩擦因子为 0.5 时, 最大挤压载荷比零摩擦条件时提高了 2.37 倍; 增大挤压角有利于获得均匀等效应变, 减小挤压载荷, 但同时减小了单次变形的应变量; 减小过渡角可以扩大均匀应变区域, 但过渡角过小会引起通道转角处的严重应变集中。

关键词: Ti-6Al-4V 钛合金; 等通道转角挤压; 有限元模拟

中图分类号: TG379 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2007)05-0057-04

Abstract: With the help of finite element method, the distribution of equivalent strain, extrusion load during the isothermal equal channel angular pressing (ECAP) of Ti-6Al-4V alloy under different shear factor of friction, channel and corner angle were studied. The results showed that the increasing factor of friction caused the strain concentration, since the maximum load was improved 2.37 times than that of no friction, when the shear factor of friction was 0.5. Increasing channel angle was beneficial for decreasing load and deformation homogeneousness, but reducing equivalent strain in each pass. In addition, decreasing corner angle was beneficial for increasing the extent of the homogeneous deformation, but exhibited severe strain concentration near the corner angle.

Key words: Ti-6Al-4V alloy; equal channel angular pressing; finite element simulation

20 世纪 80 年代初期, Segal^[1] 及其合作者最早提出并研究了不改变截面形状而获得强塑性变形的等通道转角挤压 (Equal Channel Angular Pressing, 简称 ECAP) 技术, 通过重复挤压, 材料获得了特殊的变形织构。20 世纪 90 年代以来, ECAP 作为一种能够有效获得超细晶的强塑性变形方法得到进一步的研究与应用^[2,3]。ECAP 变形可以制备晶粒尺寸小于 1 μ m 的超细晶材料, 到目前为止, 已开发了铝及铝合金、镁及镁合金、铜及铜合金、纯铁、纯镍、钛及钛合金等数十种超细晶材料, 材料的综合性能得到明显的改善和提高。

Ti-6Al-4V 钛合金是一种(α + β) 型钛合金, 其综合性能优良, 塑性和冲击韧性高, 是航空、航天领域应用最为广泛的一种钛合金。近年来, 钛合金的 ECAP 领域的研究越来越深入, 对于其 ECAP 变形工艺对晶粒细化的影响规律, 细化后 Ti-6Al-4V 钛合金的超塑性性能等做了大量的研究^[4-6]。然而 ECAP 变形其内部应变分布不均匀, 影响 ECAP 变形过程的因素很

多, 对于不同因素的情况还不十分清楚, 实验对定量研究 ECAP 变形机理和晶粒细化的微观机制存在局限性。

本工作利用有限元方法, 对 ECAP 变形过程进行了二维有限元模拟。模型采用平面应变模式, 对不同摩擦系数和模具结构下 ECAP 变形的模拟结果进行了对比和分析, 为初步确定合理的挤压工艺参数和 ECAP 模具设计提供了参考。应变模拟结果也为定量研究 ECAP 变形工艺过程中等效应变与晶粒细化的相互关系提供了可能。

1 有限元模拟模型

1.1 力学模型

图 1a 是等通道转角挤压的有限元力学模型和坯料的初始网格。图中挤压角 Φ 为 120°, 过渡角 Ψ 为 20°, 试样尺寸为 16mm \times 60mm, 厚度为 16mm。坯料

被离散成 960 个四边形单元, 1037 个结点, 单元最小尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。

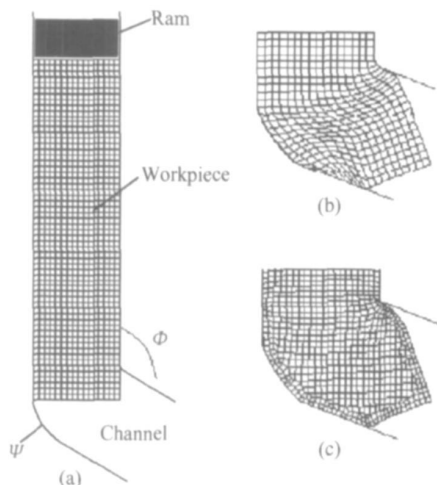


图 1 有限元模型及网格重划分

(a) 有限元模型; (b) 网格畸变; (c) 网格重划分

Fig. 1 Finite element model and remeshing

(a) finite element model; (b) mesh aberrance; (c) remeshing

1.2 网格重划分

等通道转角挤压的应变程度大, 变形过程中网格畸变严重, 网格重划分技术是保证模拟收敛不失真的有效方法。本模拟设定重划分参数如下: 网格与模具表面的干涉深度 0.02mm , 四边形单元角度偏转 40° , 每两步检查一次网格参数, 满足条件则自动重划分网格一次。重划分设定的目标网格最小尺寸为 $0.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ 。如图 1c 所示, 挤压过程网格进行重划分, 避免了网格畸变。图 1b 中未采用网格重划分技术, 网格畸变现象严重, 将严重影响模拟精度。

1.3 摩擦模型

金属塑性成形过程中的摩擦问题十分复杂, 目前还不能对变形体与模具的接触面间的摩擦机理给出准确的解释。一般有限元模拟中常见的摩擦模型有常摩擦模型、库仑摩擦模型、反正切函数模型等。本工作采用反正切函数模型, 即

$$F = -\frac{2fk}{\pi} \arctan \frac{v_n}{A} \quad (1)$$

式中: F 为摩擦应力; f 为摩擦因子; k 为剪切屈服强度; v_n 为接触面上变形体与模具的相对滑动速度; A 是比模具速度小几个数量级的正常数, 一般为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 。

2 模拟结果与分析

模拟条件如下: 原始坯料的宽度为 16mm , 长度为 60mm , 挤压温度为 850°C , 挤压速度为 0.1mm/s , 摩擦因子为 $0 \sim 0.5$, 挤压行程 60mm 。

ECAP 通过产生均匀切变来细化晶粒, 不但要通过变形获得尽量大的剪切应变, 还要保证变形的均匀性, 以获得均匀细化的超细晶材料。另一方面, 增大挤压载荷, 会降低模具的使用寿命, 过大的挤压载荷甚至会损坏模具。这决定了在模具设计和制定挤压工艺时, 要在获得更大均匀应变的前提下, 尽量降低 ECAP 挤压载荷。

2.1 摩擦因子的影响

挤压角 120° , 过渡角 20° 时, 不同摩擦因子条件下材料应变的分布情况如图 2 所示。从有限元模拟的结果来看, 最大应变值主要分布在试样前端下侧和经过通道内角摩擦的整个上表面。试样中间部分, 即挤压后发生均匀剪切变形的有效应变区域, 其应变值随摩擦因子增大而略有增大, 但一般都保持在 $0.5 \sim 0.8$ 范围内。从应变分布上看, 适当的摩擦作用有利于提高单次挤压的等效应变, 但摩擦因子过大, 会引起表面局部区域应变集中。当摩擦因子为 0.5 时, 最大应变值达到 2.21 , 是中间有效应变区域应变值的 3 倍以上, 产生了较为严重的应变集中。

不同摩擦因子下, 挤压载荷随时间的变化规律如图 3 所示, 摩擦因子从 $0, 0.1, 0.2$ 到 0.5 , 最大挤压载荷分别达到 $27.5, 40.6, 48.7, 92.7\text{kN}$, 挤压载荷随摩擦因子的增大明显增大。摩擦因子 $f = 0$ 时, 试样完全开始发生切应变后, 挤压载荷保持在恒定范围内。这是因为, 挤压力完全用于克服试样内部的塑性变形。而摩擦作用存在时, 挤压载荷达到峰值后开始减小, 随摩擦因子增大, 这种减小趋势越来越明显。这是由于试样与模具的接触面积随试样挤压的深入而不断减小, 由于摩擦造成的阻力不断减小。当 $f = 0.5$ 时, 最大挤压载荷比零摩擦条件时提高了 2.37 倍。

由于二维模拟忽略了前后两个挤压面的摩擦效应, 载荷模拟结果低于实际值, 但载荷的变化趋势和不同摩擦因子下载荷的相对大小还是能够较为准确地反映实际情况, 在模具设计时, 具有很好的参考意义。

降低试样和模具通道间的摩擦因子能减小挤压载荷, 均匀应变分布。可以通过提高模具通道的光洁度和使用合适的润滑剂来减小摩擦因子, 提高 ECAP 的变形效果。

2.2 挤压角与过渡角的影响

挤压角 Φ 是决定剪切应变的最主要因素, 基本确定了单次变形的应变量。试样分别经挤压角 $90, 120, 135^\circ$ 一道次挤压后的应变分布情况如图 4 所示, 摩擦

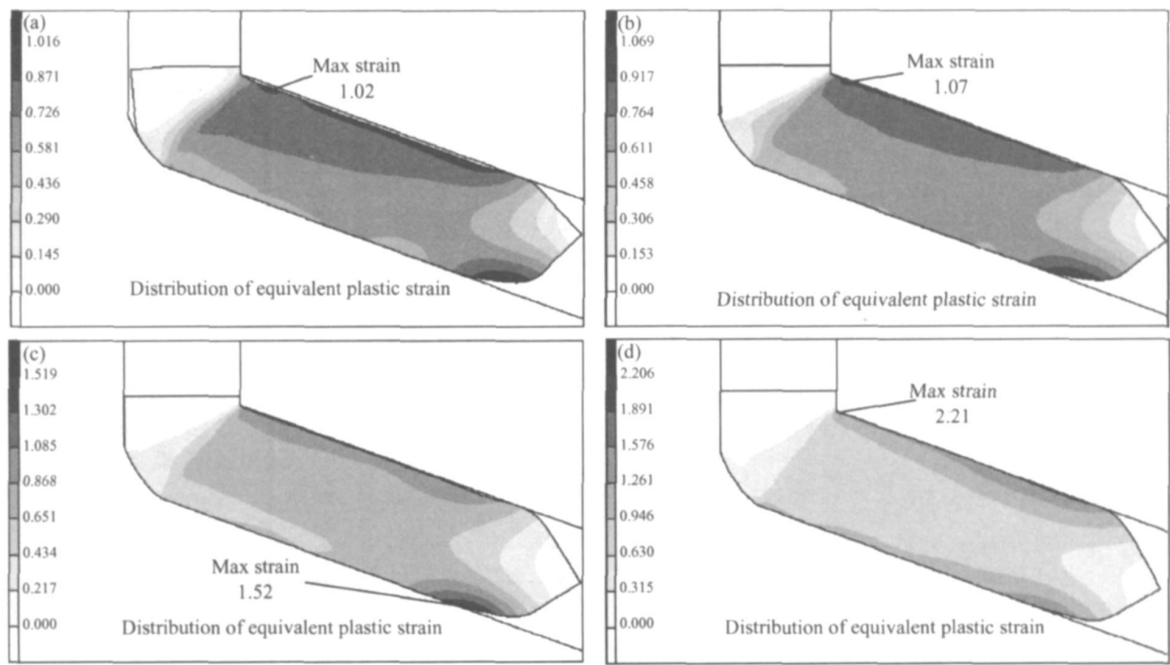


图2 摩擦因子对应变分布的影响

(a) $f = 0$; (b) $f = 0.1$; (c) $f = 0.2$; (d) $f = 0.5$
Fig. 2 Distribution of strain in different friction
(a) $f = 0$; (b) $f = 0.1$; (c) $f = 0.2$; (d) $f = 0.5$

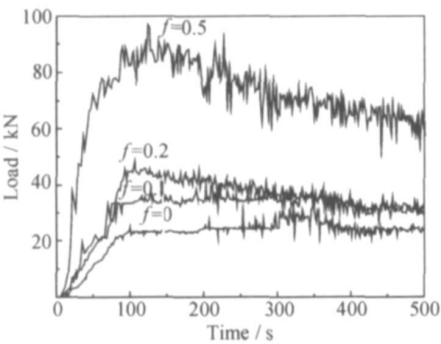


图3 摩擦因子对挤压载荷的影响

Fig. 3 Extrusion load in different friction

因子为 0.1, 挤压速度为 0.1mm/s, 图中 $\varepsilon_1 = 0.171$, $\varepsilon_2 = 0.343$, $\varepsilon_3 = 0.514$, $\varepsilon_4 = 0.686$, $\varepsilon_5 = 0.857$, $\varepsilon_6 = 1.029$, $\varepsilon_7 = 1.200$ 。由图 4 可见, 整体应变值随挤压角增大明显减小, 挤压角 135° 时, 有效产生剪切应变区域的应变值范围在 0.3~ 0.5, 挤压角 120° 时其范围在 0.5~ 0.8, 挤压角 90° 时则达到 0.8~ 1.2。最大应变随挤压角减小而明显增大, 挤压角为 90° 时, 最大应变值达到 1.68, 远远高于挤压角为 120° 时的最大应变值。

另一方面, 挤压角的减小会增大挤压载荷。如图 5 所示, 挤压角 Φ 从 135° 减小到 90° , 极限挤压载荷从 29.7kN 上升到 55.8kN, 增加了 87.9%, 明显增加了

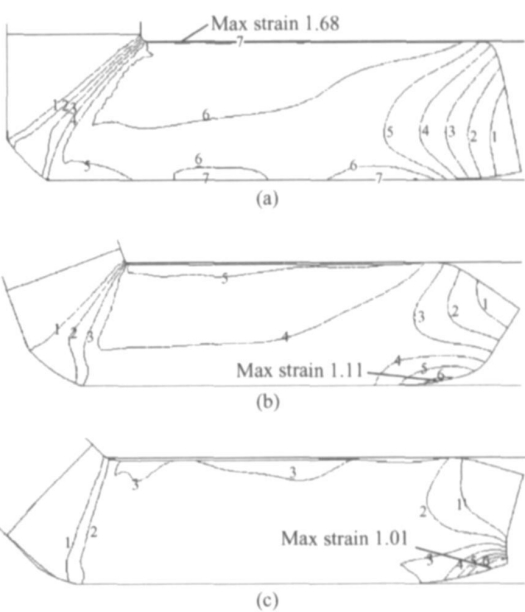


图4 挤压角对等效应变分布的影响
(a) $\Phi = 90^\circ$; (b) $\Phi = 120^\circ$; (c) $\Phi = 135^\circ$

Fig. 4 Distribution of strain in different channel angle
(a) $\Phi = 90^\circ$; (b) $\Phi = 120^\circ$; (c) $\Phi = 135^\circ$

模具的承受压力, 提高了模具的制造要求。综合考虑不同挤压角的应变分布和挤压载荷的模拟结果, 挤压角 120° 能有效兼顾较大的均匀应变和较低的挤压载荷两方面的要求。

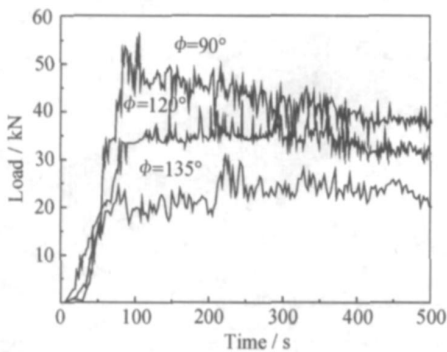


图 5 挤压角对载荷的影响

Fig. 5 Extrusion load in different channel angle

在挤压角 Φ 不变的情况下, 过渡角 Ψ 是影响挤压效果的另一个重要的模具参数。挤压角 Φ 为 120° , 摩

擦因子为 0.2, 过渡角 Ψ 分别为 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 条件下, 一道次 ECAP 变形后试样的应变分布情况如图 6 所示, 图中 $\bar{\epsilon}_1 = 0.127, \bar{\epsilon}_2 = 0.255, \bar{\epsilon}_3 = 0.382, \bar{\epsilon}_4 = 0.509, \bar{\epsilon}_5 = 0.636, \bar{\epsilon}_6 = 0.763$ 。从图 6 可以看出, 过渡角对整体应变大小的影响不大, 主要集中在 $0.5 \sim 0.7$ 范围内。过渡角越小, 发生有效切变的试样中间区域的应变均匀性越好, Ψ 从 60° 到 20° , 应变等值线 5 和 6 之间的核心有效应变区域越来越大。 Ψ 为 0° 时, 在通道外侧转角处形成变形死区, 产生极大的应变值。由此可见, 过小的挤压过渡角, 会造成变形区过于集中, 应变梯度大, 引起严重的应变集中现象, 不利于挤压。从模拟结果看, 选择 20° 过渡角挤压模具能产生较大且分布均匀的等效应变, 适合 Ti-6Al-4V 钛合金 ECAP 变形。

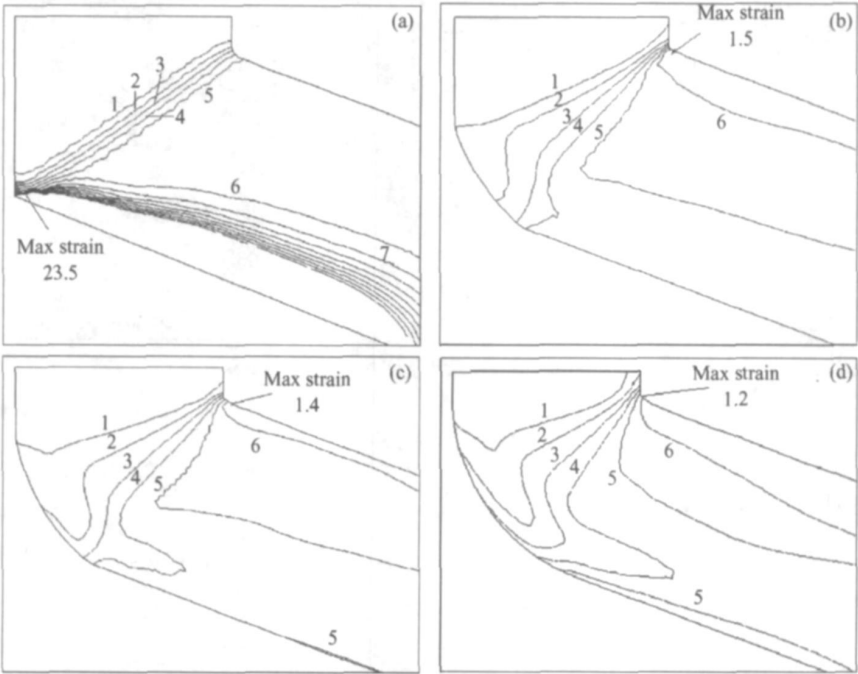


图 6 过渡角对等效应变分布的影响 (a) $\Psi=0^\circ$; (b) $\Psi=20^\circ$; (c) $\Psi=40^\circ$; (d) $\Psi=60^\circ$

Fig. 6 Distribution of strain in different corner angle (a) $\Psi=0^\circ$; (b) $\Psi=20^\circ$; (c) $\Psi=40^\circ$; (d) $\Psi=60^\circ$

为了定量描述不同摩擦条件, 不同挤压角度下, 经过一道次 ECAP 变形后试样中间有效变形区域的等效应变的分布不均匀性, 这里引入参数 C_x ^[7], 定义如下:

$$C_x = \left(\frac{\bar{\epsilon}_{\max} - \bar{\epsilon}_{\min}}{\bar{\epsilon}_{\text{ave}}} \right) \quad (2)$$

其中, $\bar{\epsilon}_{\max}, \bar{\epsilon}_{\min}, \bar{\epsilon}_{\text{ave}}$ 分别表示指定区域的最大、最小和平均等效应变。数据是根据区域内所用节点的应变值统计获得, 取样不包含试样两头未发生有效切变的区域, 结果如表 1 所示。统计结果表明, 随摩擦因子增大, 平均等效应变值增大, 但分布不均匀性也相应增大; 相同摩擦条件下, 随挤压角增大, 平均等效应变值减小, 而

不均匀性也降低了。

表 1 模拟等效应变结果

Table 1 The simulated result of equivalent plastic strain

Channel angle	Friction coefficient	$\bar{\epsilon}_{\text{ave}}$	$\bar{\epsilon}_{\max}$	$\bar{\epsilon}_{\min}$	C_x
120°	0	0.699	0.821	0.603	0.25
	0.1	0.716	0.835	0.633	0.28
	0.2	0.778	1.019	0.684	0.43
	0.5	0.956	1.330	0.765	0.58
90°	0.1	0.999	1.311	0.854	0.46
135°	0.1	0.448	0.469	0.389	0.18

- [25] MARUCCI M L. AncorMax D: a unique binder-lubricant for high-density applications [J]. MPR, 2003, 58 (supl): 16–17.
- [26] HALE T. P/M premix plus lubricant builds high-density parts [J]. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(8): 18.
- [27] NARASIMHAN K S. Specialised alloys for modern sintering techniques [J]. Furnaces International, 2003, 1(3): 15–16, 18.
- [28] POSZMIK G, MARUCCI M L. Technology pushes green strength up in single press and sinter cycle [J]. MPR, 2004, 59 (7): 26–28, 31–32.
- [29] JOHNSON P K. P/M industry: trends in 2005 [J]. Advanced Materials & Processes, 2005, 163(3): 25–28.
- [30] JAMES W B. High-density processing of powders [J]. Int J Powder Metall, 2005, 41(5): 31–36.
- [31] POSZMIK G, LUK S H. Binder treated products for higher densities and better precision [A]. LAWCOCK R, WRIGHT M. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials 2003 [C]. Princeton, NJ: MPIF, 2003. 33–44.
- [32] POSZMIK G, MARUCCI M L. Processing P/M components to high density using an advanced lubricant/binder system [A]. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials 2005 [C]. Princeton, NJ: MPIF, 2005. 1–7.

- [33] HANEJKO F J. High-performance single press/single sinter processing [J]. International Journal of Powder Metallurgy, 2005, 41(5): 37–44.
- [34] POSZMIK G, MARUCCI M L, NARASIMHAN K S. Single pressed single sintered PM products for high density, high performance applications [A]. PANNINGER H, RATZI R. Euro PM 2004 Conference Proceedings [C]. Vienna: EPM A, 2004. 75–80.
- [35] ARNHOLD V, DOLLMEIER, KRUSHANOV V, et al. Advanced techniques for the production of high density powder metal parts [A]. PANNINGER H, RATZI R. Euro PM 2004 Conference Proceedings [C]. Vienna: EPM A, 2004. 558–563.
- [36] CAPUS J M. PM progress towards wrought steel gear performance [J]. Powder Metallurgy, 2003, 46(4): 301.

基金项目: 国家科技攻关项目 (MKPT-2004-09ZD); 中南大学研究生创新项目 (040117)

收稿日期: 2006-08-03; 修订日期: 2007-01-26

作者简介: 叶途明 (1975–), 男, 博士研究生, 主要从事高性能粉末冶金铁基材料的温压成形技术的研究, 联系地址: 长沙市中南大学校本部粉末冶金研究院 (410083)。

(上接第 60 页)

考虑 Ti-6Al-4V 钛合金对应变速率的敏感性, 在 ECAP 过程中, 其挤压速度控制在 0.1~0.3 mm/s 的范围内。在这种较低的挤压速度下, 等温挤压过程中产生的变形和摩擦热能够通过模具传导而充分发散, 所以此处不再考虑温升效应。

3 结论

(1) 运用有限元软件建立了 Ti-6Al-4V 钛合金等通道转角挤压过程的力学、网格和摩擦模型。有限元模拟结果表明, 最大应变值主要分布在试样前端下侧和经过通道内角摩擦的整个上表面。

(2) 摩擦因子过大会引起表面局部区域应变集中, 挤压载荷随摩擦因子的增大而显著增大, 摩擦因子 0.5 时, 最大挤压载荷比零摩擦条件时提高了 2.37 倍。

(3) 应变值和挤压载荷随挤压角增大而显著减小, 挤压角过小会引起应变集中。挤压角 120° 能有效兼顾大的均匀应变和较低的挤压载荷两方面的要求。

(4) 减小过渡角可以扩大产生均匀等效应变的有效区域, 但过渡角过小会引起通道转角处的严重应变集中。

参考文献

- [1] SEGAL V M, REREZNIKOV V I, DROBYSHEVSKIY A D, et al. Plastic working of metals by simple shear [J]. Russ Metall,

1981, 1: 99–115.

- [2] VALIEV R Z, KORZNIKOV A V, MULYKLOV R R. Structure and properties of ultrafine grained materials produced by severe plastic deformation [J]. Materials Science and Engineering, 1993, A168: 141–148.
- [3] VALIEV R Z, KRASILNOKOV N A, TSENEV N K. Plastic deformation of alloys with submicron grained structure [J]. Materials Science and Engineering, 1991, A137: 35–40.
- [4] KO Y G, JUNG W S, SHIN D H, et al. Effects of temperature and initial microstructure on the equal channel angular pressing of Ti-6Al-4V alloy [J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 197–202.
- [5] SEMENOV A I P, RAABG I, SAITOVA L R, et al. The effect of equal channel angular pressing on the structure and mechanical of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A387–389: 805–808.
- [6] YOUNG G K, WOO G K, CHONG S L, et al. Microstructure influence on low-temperature superplasticity of ultrafine grained Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2005, A25: 156–159.
- [7] LIS, BOURKEM A M, BEYERLEIN I J, et al. Finite element analysis of the plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A382: 217–236.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50371068)

收稿日期: 2006-10-18; 修订日期: 2007-03-22

作者简介: 方晓强 (1980–), 男, 硕士研究生, 研究方向是塑性成型与控制, 联系地址: 西安市西北工业大学 542 信箱 (710072)。