

剧烈塑性变形对 AZ31 镁合金微观组织演化的影响

徐淑波^{1,2}, 张小东¹, 景财年¹, 林晓娟¹, 刘鹏¹

(1. 山东建筑大学, 山东 济南 250101)

(2. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 等截面通道角挤压 (equal channel angular extrusion, ECAE) 是制备无疏松孔洞大块超细晶材料的重要方法之一。通过刚塑性有限元法对 ECAE 进行三维数值仿真, 采用单元点映射方法, 结合三维模型转换进行了 A, Ba, Bc 和 C 多次挤压路线的有限元连续仿真, 得出了圆形截面挤压试样等效应变分布及其变形均匀性规律, 同时, 给出了多次挤压不同挤压路线等截面通道角挤压晶粒细化机理。通过变换挤压路线可以改变挤压试样内部微观组织结构。随着挤压次数的增加, 不同挤压路线对应挤压试样均得到有效细化, 与其它挤压路线相比, 路线 Bc 和 C 能够得到大角度晶界的等轴晶粒分布的挤压试样。同时, 通过实验得到的各路线挤压试样对应的微观结构演化规律与模拟分析得到的应变分布规律一致。

关键词: 等截面通道角挤压; 有限元数值模拟; 单元点映射法; 超细晶; 挤压路线

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1607-06

材料的内部微观结构对外在力学性能有重要影响, 通过霍尔-佩奇公式可知, 一般情况下材料平均组织越细小其屈服强度和硬度越高^[1,2], 因此, 探索可显著细化材料晶粒的方法具有重要的应用前景。等截面通道角挤压 (equal channel angular extrusion, ECAE) 过程^[3,4]是现有制备块状超细晶材料最具工业化前景的技术之一, 其晶粒细化的原理在于使试样通过一个具有一定拐角的等横截面通道的模具循环挤压, 在不改变挤压试样横截面形状的基础上, 使挤压试样逐次挤出得到较高的应变从而不断破碎晶粒, 制备出块状超细晶材料^[5-8]。

镁及镁合金室温低塑性严重限制了该金属的应用, 采用 ECAE 工艺在逐次挤压过程中, 通过剧烈塑性形变方法可显著提高镁合金的塑性, 同时通过转换试样在模具凹模型腔中的位置可有效提高挤压试样的微观组织的均匀分布, 得到强度、硬度和塑性性能显著上升的镁合金。因此, 近年来开展了对各挤压路线具体晶粒细化机理的研究^[6-9], 其中多数是基于试验总结, 从晶体学的角度进行分析, 且互有矛盾之处^[9-14]。目前, 有限元分析方法成为解决工程中复杂问题的有力工具, 通过材料成形过程数值仿真, 可以得到挤压试样变形过程所需的载荷, 金属流动规律和工件内部应力、应变分布的数字化表达^[15,16]。

在有限元研究方面, 对于单次 ECAE 挤压, 很多研究者系统研究了变形机理, 为 ECAE 研究给出了详细的分析结论^[11]。针对多次挤压工艺^[16], 由于圆形挤压试样涉及三维变形, 同时挤压路线 Ba 和 Bc 的实现需要挤压试样逐次旋转 90°, 故只能通过三维有限元分析才能实现。因此, 开展各挤压路线三维变形机理研究十分必要。本实验利用光学电子显微镜观测原始试样和变形后试样微观组织的演化情况, 并对 4 种不同路线挤压 4 次试样进行透射电镜分析, 结合有限元分析结果, 研究镁合金 ECAE 剧烈塑性变形对材料微观组织的重要影响。

1 ECAE 塑性力学变形机理分析

采用滑移线法对 ECAE 变形进行简化, 视解决的问题为平面变形的理想刚塑性问题。图 1 是忽略摩擦情况下的 ECAE 力学分析矢量图。假设 ECAE 变形发生在 zx 坐标平面内, 变形试样在型腔内沿挤压方向均以相同的速度 V 前进, 塑性变形区滑移线分别为 α 和 β 线。变形试样前端不受力, 因此, 主应力 σ 和凸模挤压力 P 按如下公式计算:

$$\sigma = -k \cot \varphi, \quad P = 2k \cot \varphi \quad (1)$$

其中, k 是应力剪切因子, φ 取模具拐角的 1/2。通过

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金 (41305124); 山东省高等学校科技计划 (J13LA02)

作者简介: 徐淑波, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 山东建筑大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250101, 电话: 0531-66368065, E-mail: xushubosd@163.com

滑移线法在模具拐角塑性变形区进行求解，得到 β 滑移线方向的纯剪切应变：

$$\gamma_\beta = \frac{[v_s]}{v_n} = \cot \varphi \quad (2)$$

在弯角挤压变形过程中，得到的剪切应变为：

$$\gamma_\alpha = \psi / 180 \quad (3)$$

当， $\psi = 0^\circ$ 时，ECAE 的等效应变为：

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \varphi = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot \frac{\Phi}{2} \quad (4)$$

2 有限元方法

2.1 有限元模型

经典塑性力学对解决 ECAE 变形进行了较多的简化，不能对挤压试样各场量分布进行详细分析，本研究通过刚塑性有限元法对 ECAE 进行三维数值仿真。采用单元点映射方法，结合三维模型转换进行了 A、Ba、Bc 和 C 多次挤压路线的有限元连续分析。数值分析模型中，模具为刚性，挤压试样几何尺寸为 $\phi 12 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的镁合金圆棒。挤压材料为刚塑性 AZ31 镁合金符合 $\bar{\sigma} = C \bar{\varepsilon}^m \bar{\varepsilon}^n$ ，其中， $C = 205 \text{ MPa}$ ， $m = 0.114$ ， $n = 0.044$ ，其它仿真参数由表 1 给出。

2.2 有限元方法

图 2 给出了镁合金多次 ECAE 挤压有限元分析流程图，建立三维有限元模型，得到镁合金多次 ECAE 挤压的优化路线和合适挤压次数，探索制备高强度、高韧性的大角晶界的等轴晶分布挤压试样的方法。

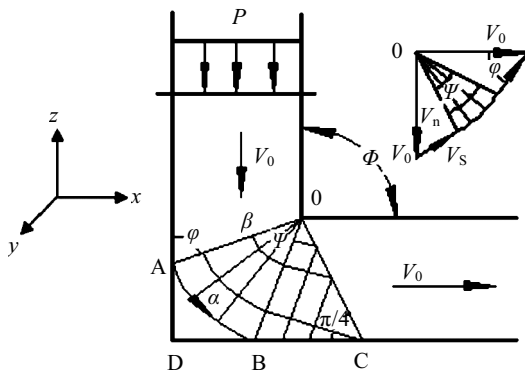


图 1 ECAE 变形机理滑移线法分析

Fig.1 Slip line theory analysis of the deformation mechanism pattern during ECAE process

表 1 等方形截面通道弯角挤压数值仿真参数

Table 1 Parameters for the simulation of the square-section channel extrusion process

Material	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Time increment/s	Friction
AZ31	250	56	0.2

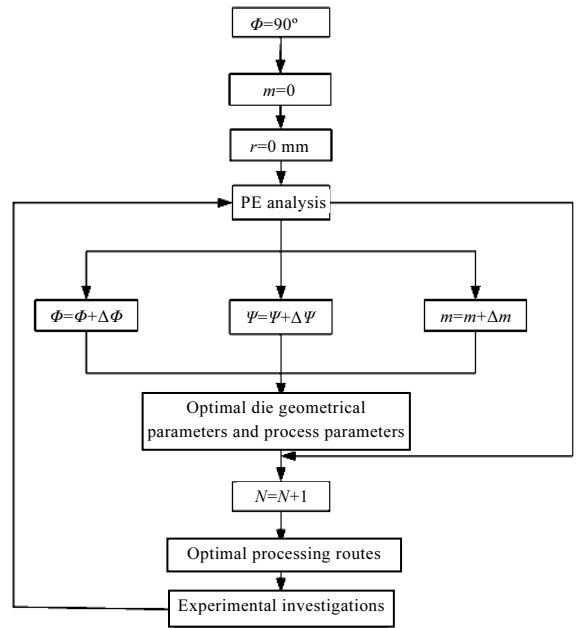


图 2 ECAE 工艺有限元分析流程图

Fig.2 Flow chart for parametric analysis algorithm of ECAE process

3 多次挤压变形分布规律

3.1 变形特征

图 3 给出了 AZ31 镁合金试样初次挤压得到的等效应变分布图。试样中心变形区变形比较均匀，定义为主变形区。挤压试样前端由于在挤压过程中不受力，是整个变形过程中的特殊部分，定义为料头区，在实验分析中首先去除。对于还没完全变形的部分定义为料尾区，在整个挤压过程中，可以看出挤压长度对变形分布没有影响，后续分析取图 3 所示主变形区截面进行分析。

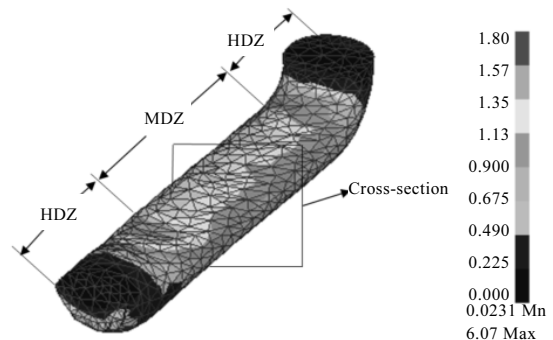


图 3 ECAE 首次挤压试样等效应变分布

Fig.3 Effective strain contours of the workpiece simulated with ECAE processing

3.2 变形分布均匀性

采用单元点映射法分析了多次 ECAE 各路线挤压过程，为 ECAE 挤压路线优化调整、得到均匀的微观组织给出了相应的理论依据。图 4 给出路线 A 逐次挤压试样截面等效应变云图，1~4 次挤压试样的等效应变云图分布规律基本一致，即应变值从上到下逐渐递减，在试样下表面处略上升，结合图 5 等效应变分布

曲线可知，路线 A 不能改变挤压试样的变形不均匀程度，不建议在实验中采用。

图 6 给出了路线 Ba 等效应变分布曲线。在逐次挤压过程中，试样沿其长度中心轴线方向依次顺时针旋转 90°挤压，然后再逆时针旋转 90°进行挤压，如此反复，但其等效应变分布仍有很大梯度，继承了单次挤出试样变形不均匀特点，也不建议在实验中采用。

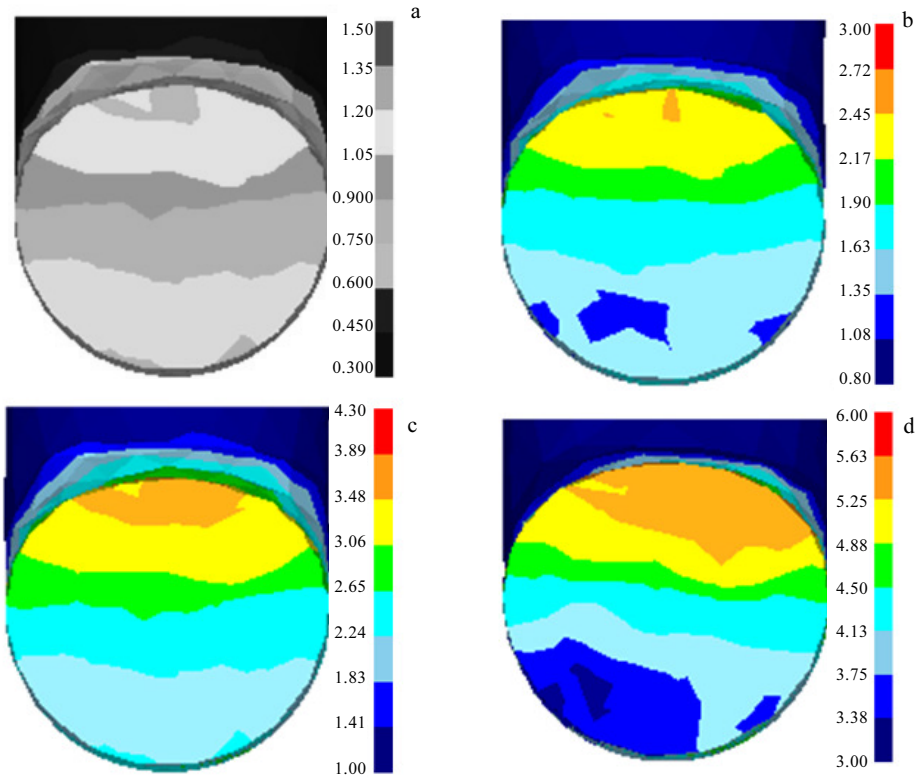


图 4 模具拐角为 90°按路线 A 挤压得到的试样横截面等效应变分布

Fig.4 Effective strain distribution across the workpiece width for route A at $\Phi=90^\circ$: (a) 1 pass, (b) 2 pass, (c) 3 pass, and (d) 4 pass

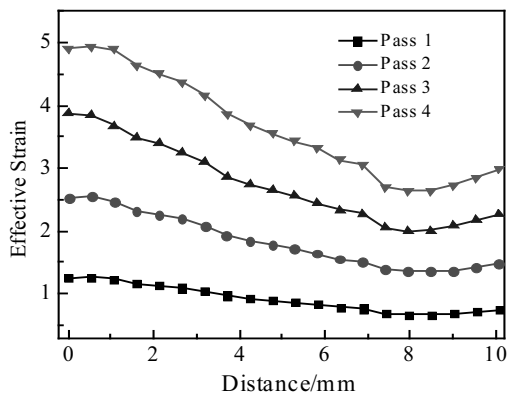


图 5 路线 A 逐次挤压时的等效应变分布

Fig.5 Effective strain distribution across the workpiece width for route A at $\Phi=90^\circ$

图 7 给出了路线 Bc 等效应变分布曲线。试样沿其长度中心轴线方向依次顺时针旋转 90°逐次挤压，沿变形分布梯度最大的方向分析。挤压试样截面变形渐趋均匀，旋转 4 次达到 360°，转回初始位置时，其横截面变形分布最为均匀。可见，挤压试样在模具型腔中的放置方位对挤压试样变形分布影响较大。因此，通过选择优化的挤压路线，尽最大可能减少实验的次数，获得横截面变形分布十分均匀的挤压试样。

图 8 给出了路线 C 等效应变分布曲线。由于试样沿其长度中心轴线方向依次顺时针旋转 180°逐次挤压，其试样变形为偶数次时的等效应变分布较为均匀。对于模具拐角为 90°的 ECAE 变形，一般挤压 4 次即可达到足够形变，因此，通过路线 Bc 和路线 C 4 次挤压

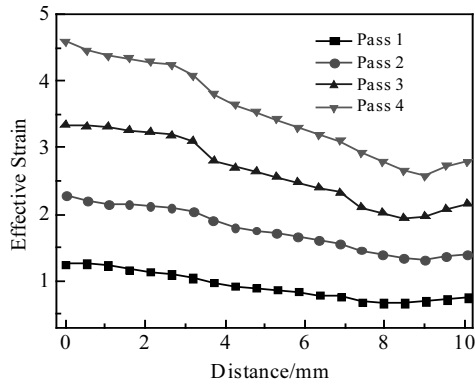


图 6 路线 Ba 逐次挤压时的等效应变分布

Fig.6 Effective strain distribution across the workpiece width for route Ba at $\Phi=90^\circ$

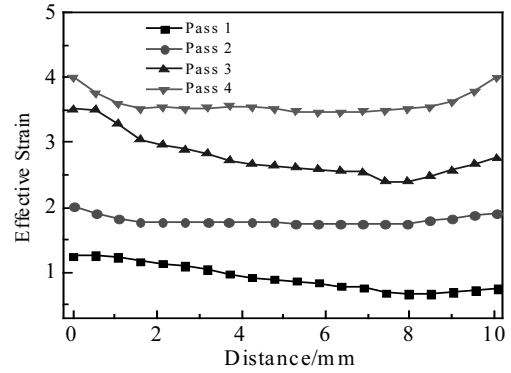


图 8 路线 C 逐次挤压时的等效应变分布

Fig.8 Effective strain distribution across the workpiece width for route C at $\Phi=90^\circ$

后都可得到变形较为均匀的挤压试样，并且 4 次挤压也可以作为一个循环。

图 9 为 A, Ba, Bc 和 C 4 种挤压路线对应累积 4 次挤压得到的等效应变分布曲线。可知，路线 A 横截面变形分布极不均匀，路线 Bc 和路线 C 曲线相对路线 A 和 Ba 的曲线更为平滑，其中路线 Bc 能够得到最为均匀的变形分布。镁合金应用最大技术难题是镁合金的晶体结构是密排六方 (hcp) 晶格，晶体中只存在着 3 个可动的滑移系导致镁合金难于塑性成形，通过 ECAE 法研究镁合金的最终目的是：得到的超细晶镁合金由于位错的增殖，晶界增多、晶界角度变大、晶粒的均匀细化最终使镁合金具有低温塑性。因此，具有实用价值的挤压试样必须得到较为均匀的变形，挤压路线 Bc 是最理想挤压路线。

4 多次挤压变形微观组织演化规律

4.1 首次挤压材料微观组织

图 10 为挤压温度为 250 °C 时，取未加工退火试样、挤压试样料头区、主变形区和料尾区的光学微观组织照片。图 10a 未加工退火试样的晶粒较为粗大、均匀。图 10b 料头区晶粒组织得到一定细化，但是存在粗大组织，不均匀。图 10c 主变形区晶粒微观组织得到细化的同时，组织无明显大晶粒，但是晶粒分布不均匀。图 10d 料尾区晶粒微观组织较为粗大，其原因在于部分组织形变量较小，若多个挤压试样依次进行挤压，将不存在料尾区。

4.2 多次挤压变形微观结构演化

图 11 给出了 4 种挤压路线对应试样透射电镜照片。其中图 11a~11d 为按路线 A, 路线 Ba, 路线 Bc

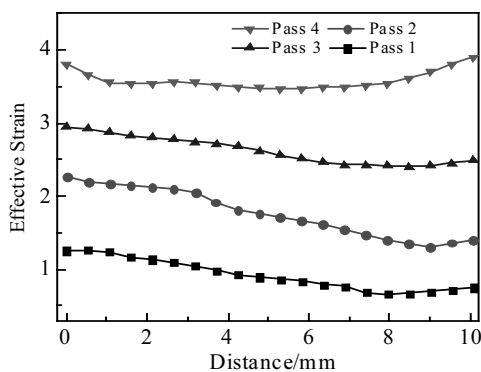


图 7 路线 Bc 逐次挤压时的等效应变分布

Fig.7 Effective strain distribution in the cross-section of workpiece for route Bc at $\Phi=90^\circ$

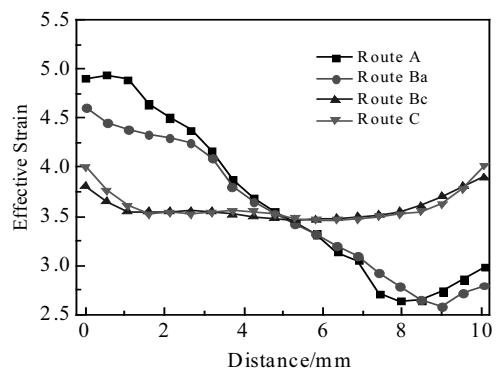


图 9 模具拐角 90°时路线 A、Ba、Bc 和 C 经 4 次挤压后的等效应变分布规律

Fig.9 Effective strain distribution of route A, Ba, Bc and C for 4 passes at $\Phi=90^\circ$

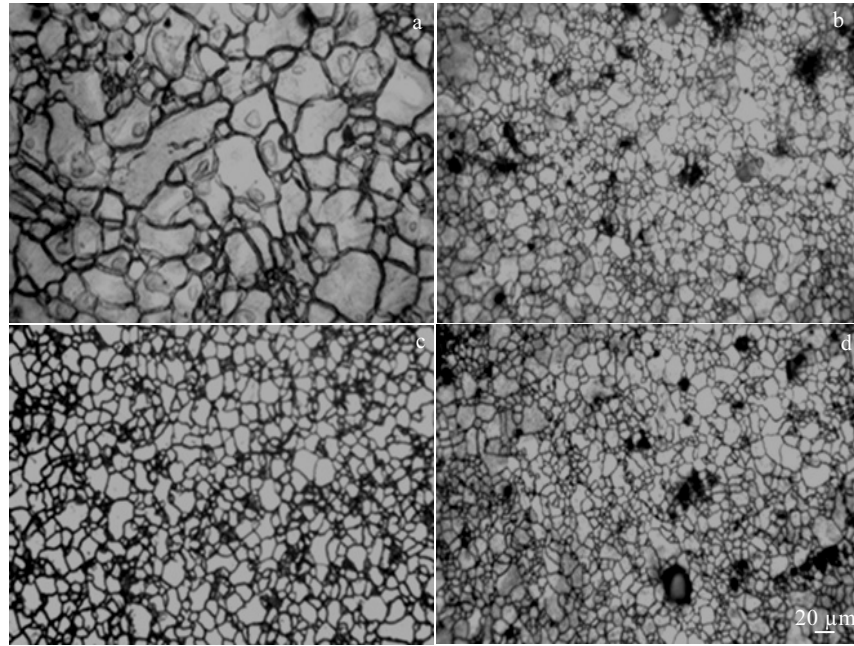


图 10 挤压试样不同部位的金相组织

Fig.10 Optical images of ECAE pressed samples: (a) as-annealed unprocessed sample, (b) the head of deformation zone, (c) the main deformation zone, and (d) the tail deformation zone

和路线 C 挤压 4 次后的微观结构照片。比较可知，各路线挤压 4 次后的晶粒微观组织均达到超细化结构，同时在晶粒上散布着大量条形或网状位错线，能显著提高镁合金的强度和硬度，但是不同路线对应的晶粒晶界取向差别较大，其中挤压路线 Bc 和 C 细化效果较好，其晶粒均为大角等轴晶。其中图 11a 中晶粒晶界取向为小角度细长型晶粒，而图 11b 视场中晶粒也为小角度长轴晶，可知，路线 A 和路线 Ba 得到的挤压试样不能使更多的晶界参与到晶界滑移中，从而较难提高镁合金的塑性。而图 11c 和图 11d 中的晶粒几

乎均为大角度等轴晶，大角度晶界的开裂引起高的晶界扩散激活能，可使更多的晶界介入到晶界滑移中，从而提高镁合金的塑性。

综上分析，剧烈塑性变形过程中晶粒主要缺陷为位错，通过不断的变形累积、增殖，逐渐产生位错线，通过位错滑移最终达到晶界增多，晶粒细化。与此同时，改变线路，使产生的位错增殖速度和位错线形状改变，达到晶界角度的改变，从而使图 11c 对应线路 Bc 减少了 {0002} 基面织构，提高了镁合金的低温塑性。

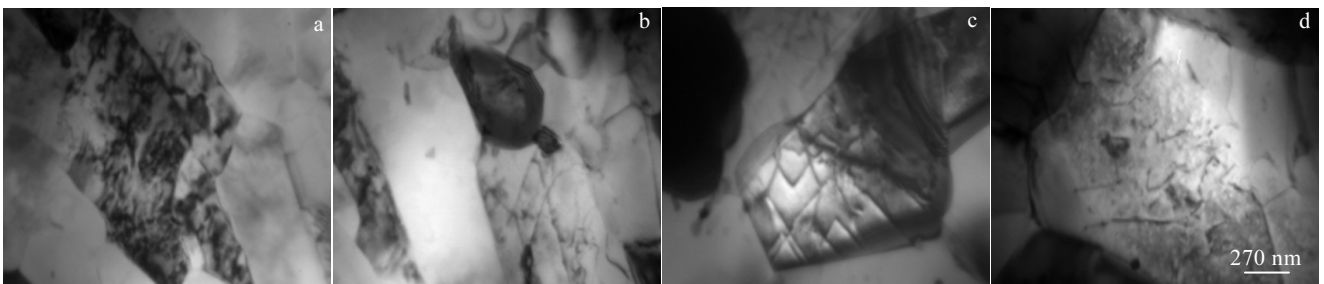


图 11 4 种挤压路线挤压 4 次对应试样透射电镜照片

Fig.11 TEM images for AZ31 Alloys after 4 passes ECAE process: (a) route A, (b) route Ba, (c) route Bc, and (d) route C

5 结 论

1) 镁合金 ECAE 单次挤压试样具有不均匀的应

变分布，通过单元点映射方法实现了：路线 A、路线 Ba、路线 Bc 和路线 C 4 种路线的 4 次挤压三维有限元分析，路线 A 和 Ba 挤压试样变形分布不均匀；路

线 Bc 和 C 挤压试样横截面变形分布相对非常均匀, 其中, 路线 Bc 挤压试样变形分布均匀程度随挤压次数上升逐渐改善, 因此, 通过选择优化的挤压路线, 可为挤压实验提供科学的挤压路线规划。

2) 模具型腔形状、工艺参数、挤压次数和挤压路线对挤压过程有重要影响, 对于路线 A、Ba、Bc 和 C 4 种挤压路线一般以挤压 4 次为一个周期基本达到晶粒细化极限, 由于位错不断增殖和湮灭, 使产生的晶界能处于一种不平衡状态, 晶粒的晶界在增多的同时又不断产生迁移发生融合, 从而晶粒细化达到极限, 其细化晶粒的分布均匀程度直接与挤压路线一致。

3) 剧烈塑性变形过程中晶粒主要缺陷为位错, 通过大变形累积、增殖, 逐渐产生位错线, 位错滑移实现晶界增多, 晶粒细化, 与此同时, 改变线路, 使产生的位错增殖速度和位错线形状改变, 达到晶界角度的改变, 减少 {0002} 基面织构, 提高了镁合金的低温塑性。

参考文献 References

- [1] Estrin Y, Murashkin M, Valiev R *et al.* *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*[M]. London: Woodhead Publishing Press, 2011: 468
- [2] Zhao R, Han J Q, Liu B B *et al.* *Materials & Design*[J], 2016, 94: 195
- [3] Segal V M, Reznikov V I, Drobyshvskiy A E *et al.* *Russian Metallurgy*[J], 1981, 19(1): 99
- [4] Valiev R Z. *Nanostructured Metals and Alloys*[M]. London: Woodhead Publishing Press, 2011: 3
- [5] Inoue T, Horita Z, Somekawa H *et al.* *Acta Materialia*[J], 2008, 56(20): 6291
- [6] Sun Bing(孙兵), Zhang Yingbo(张英波), Quan Gaofeng(权高峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(2): 404
- [7] Xu C, Horita, Z, Langdon T G *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(18): 6059
- [8] Xu S, Zhao G, Luan Y *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 176(1-3): 251
- [9] Basavaraj V P, Uday C, Kumar T *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2015, 17(1): 88
- [10] Bouaksa F, Rodas C O, Zaïria F *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2014, 85(4): 244
- [11] Lu C, Deng G Y, Tieu A K *et al.* *Acta Materialia*[J], 2011, 59(9): 3581
- [12] Zha M, Li Y, Ragnvald H *et al.* *Acta Materialia* [J], 2015, 84: 42
- [13] Han Fuyin(韩富银), Wang Ping(王萍), Tian Linhai(田林海) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(7): 1497
- [14] Dogan E, Vaughan M W, Wang S G *et al.* *Acta Materialia*[J], 2015, 89: 408
- [15] Xu S, Zhao G, Ren G *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 176(1-3): 251
- [16] Xu S, Zhao G, Ren G *et al.* *Computational Materials Science* [J], 2008, 44(2): 247

Effect of Severe Plastic Deformation on the Microstructure Evolution of AZ31 Magnesium Alloys

Xu Shubo^{1,2}, Zhang Xiaodong¹, Jing Cainian¹, Lin Xiaojuan¹, Liu Peng¹

(1. Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

(2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Equal channel angular extrusion (ECAE) process has the capability to produce bulk nonstructural materials without loose holes. Using commercial metal forming finite element code, ECAE process was analyzed numerically in the present research. It combined the node reflection method and three-dimensional model switching to realize multi-extrusion process of Routes A, Ba, Bc and C by the finite element method. The distribution of accumulated effective strain and the influence rules of deformation uniformity in round billets were obtained, and the grain refining mechanism of equal channel angular multi-extrusion for different processing routes was given. The results show that changing the extrusion route can alter the microstructure of the workpiece, which can be gradually refined in each route with the number of extrusion increasing. It is found that route Bc and C can get larger angle grain boundaries and more uniform equiaxed grain distribution than other routes. In addition, the microstructure evolutions of different multi-pass ECAE processing routes are consistent with FE analyses.

Key words: equal channel angular extrusion; finite element numerical analysis; reflection method; ultra-fined grain; processing routes

Corresponding author: Xu Shubo, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China, Tel: 0086-531-66368065, E-mail: xushubosd@163.com