

Al-Zn-Mg-Cu 合金新型等通道 转角双向镦挤变形行为

李 萍, 魏 李, 段自豪, 王 雪, 薛克敏

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 以超高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金为研究对象, 采用数值模拟和实验相结合的方法对其等通道转角双向镦挤过程进行分析。结果发现, 变形过程可以分为近局部镦粗、剪切变形、最后填充 3 个阶段, 变形结束后试样根据金属流动和网格畸变程度划分为小变形区、不变形区、剪切变形区、剧烈变形区。不同加载方式使变形区域发生不同程度偏移, 上下冲头速度差越大, 变形均匀性越差, 速度比为 1 时可获得最大的应变量为 3.97, 且变形均匀性系数最低为 1.89。同时, 对不同路径下的多道次变形行为进行研究, 发现 4 道次结束后, B 路径比 A 路径变形更加均匀充分, 其变形均匀性系数降低了 29%, 剪切变形区占比提升了 14%。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; 等通道双向镦挤 (ECADE); 有限元模拟; 变形均匀性

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)08-2550-06

大塑性变形技术通过在成形过程中对试样施加很高的静水压力, 使其在较低温度下获得较大的变形量, 而且不发生破裂等缺陷^[1-4]。其中高压扭转 (high-pressure torsion, HPT) 工艺在诸多大塑性变形技术中剪切能力最强, 可获得超细晶组织, 但只适用于圆盘状小尺寸试样^[5-8]。等通道转角挤压法 (equal channel angular pressing, ECAP) 作为大塑性变形中的典型代表, 被广泛用于获得晶粒细小、组织均匀、三维尺寸较大的块状高性能材料^[9-11]。但变形抗力大的试样在通过剪切区时容易出现开裂及冲头偏载等问题^[12]。双向等通道挤压 (dual equal channel extrusion, DECE) 是在等径角挤压工艺基础上开发的一种新的大塑性变形工艺, 可快速实现材料的剧烈塑性变形, 很好地解决了试样变形的左右不对称问题, 避免了传统 ECAP 工艺存在的偏载^[13], 但这种挤压方式仍存在变形不均匀问题。本工作在此基础上提出等通道转角双向镦挤 (equal channel angular dual-directional extrusion, ECADE) 方法, 采用有限元模拟和物理实验相结合的方法, 研究了新型高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金热变形过程中的变形行为, 探索了不同工艺条件对变形的影响规律, 为改善 Al-Zn-Mg-Cu 性能提供理论基础和依据^[14-16]。

ECADE 原理如图 1 所示, 其结构是在 DECE 的基础上增加 1 个竖直通道, 实现了整个金属流动通道在水平方向和竖直方向上的完全对称。在挤压过程中, 上下冲头在竖直方向上同时运动, 试样在模具约束下流动变形, 在 4 个通道转角处发生近似纯剪切变形, 分流进入 2 个水平通道。试样完全进入水平通道后, 挤压结束, 变形完成后试样形状维持不变。同时, 在相邻道次间采用 2 种置样方式, 获得不同的挤压路径, 如图 2 所示。

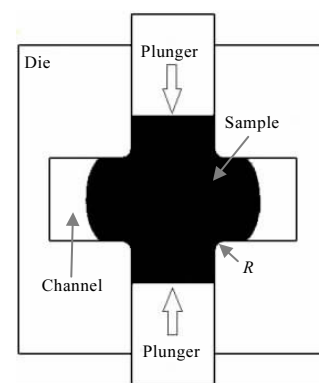


图 1 ECADE 工艺原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of ECADE

1 实 验

收稿日期: 2018-08-25

项目基金: 国家自然科学基金 (51675154, 51575153); 中国博士后科学基金 (2017M621994)

作者简介: 李 萍, 女, 1973 年生, 博士, 教授, 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009, E-mail: li_ping@hfut.edu.cn

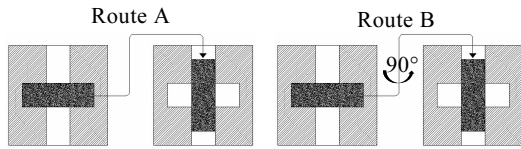


图 2 ECADE 工艺的 2 种挤压路径
Fig.2 Schematic illustration of ECADE routes

采用有限元模拟与宏观物理实验相结合的方法,对铸态 Al-Zn-Mg-Cu 合金的 ECADE 变形过程进行研究。模具通道截面尺寸为 24 mm×24 mm,水平通道长 72 mm,综合成形载荷大小和剪切变形效果在水平通道与垂直通道转角处采用 3 mm 的圆角过渡。对坯料用 4 节点四面体网格进行划分,同时将基于在 Gleeble-1500 热模拟机上进行恒应变速率等温压缩实验所获得的真实应力-应变曲线输入 Deform-3D 软件中,进行有限元模拟。根据 Al-Zn-Mg-Cu 合金的塑性成形温度范围和实际工装条件,选定变形温度为 350 °C,冲头速度为 0.6 mm/s,步长为 0.2 mm,模具和坯料之间采用剪切摩擦模型,摩擦因数为 0.12,分别对不同加载方式、路径和道次下的变形过程进行有限元分析。同时,采用 TD 网格模拟和物理网格实验,共同分析变形过程中的材料流动和变形程度,并采用特征点追踪的方式表征试样不同区域的变形规律。沿 A、B 路径 4 道次试样的水平中线和垂直中线分别进行间隔为 2 和 1 mm 的硬度测试,验证有限元模拟中不同路径下的多道次变形规律。其中每个点测试 3 个硬度值,取算数平均值作为最终的维氏硬度值。测试仪器为 200HV-5 维氏硬度计,施加载荷为 200 g,保压时间 15 s。

实验前,采用 DK77 电火花数控线切割机将试样切割加工成 24 mm×24 mm×72 mm 的块状坯料。将坯料和模具分别在电阻式加热圈和 KSL-1100X 箱式电阻炉中加热至 350 °C,为保证试样和模具温度均匀,均对其进行 30 min 的保温处理。随后借助自行研制的 YD34F-630t 等温精密塑性成形机,在自行设计的模具上进行等温变形工艺实验。实验过程中为减小坯料与模具之间的摩擦,采用石墨进行润滑。

2 结果及分析

2.1 金属变形过程分析

ECADE 变形过程的载荷行程曲线如图 3 所示。根据 ECADE 的变形特点,结合载荷变化情况,可将其变形过程大致分为 3 个阶段:(I) 近局部镦粗阶段:随着冲头的移动,坯料在冲头的挤压作用下发生屈服,

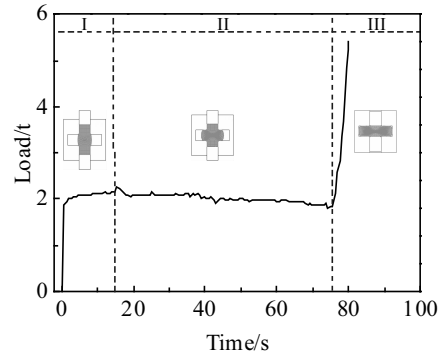


图 3 ECADE 下试样变形过程载荷-时间曲线
Fig.3 Load-time curve during ECADE processing

中间部位发生类似局部镦粗变形,材料屈服前载荷急剧上升,镦粗时保持平稳;(II) 剪切变形阶段:金属进入水平通道,金属通过转角处时发生近似纯剪切变形,剪切效果由模具转角处向内部逐渐降低,试样左右两端金属受到摩擦力作用呈现一定尺寸的圆弧状,此阶段载荷基本保持平稳;(III) 最后充填阶段:这一阶段类似于闭式模锻最后充填整形,载荷急剧上升。

2.2 ECADE 网格实验

将变形试样沿纵向中心面切割成两半,在其中一半的剖面上用等高尺均匀刻画出 2 mm×2 mm 的网格,随后将两半试样沿剖面一侧合在一起进行 ECADE 实验,变形前后的网格分别如图 4a 和图 4b 所示。图 4c 为等效应变分布图,结合网格法实验可将变形后试样分为 4 个区域:左右两端部为小变形区,此区域变形量较小,且极不均匀,流动过程中在摩擦作用下表层金属与内部金属存在一定的速度差,容易产生裂纹;

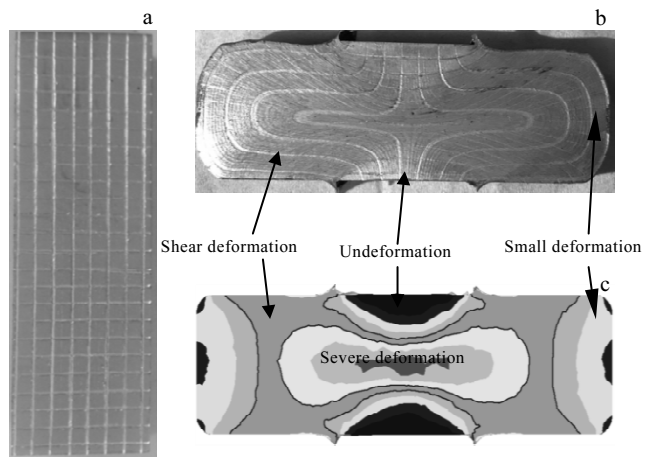


图 4 ECADE 实物网格图与等效应变云图
Fig.4 Physical grid before (a) and after (b) ECADE and equivalent strain distribution (c)

与上下两冲头接触区域为不变形区，此区域网格基本未发生变形，变形末期像楔形插入金属中；试样芯部区域为剧烈变形区，此区域变形量最大，并呈现“一”字型分布于试样中心；剪切变形区对称分布于试样两侧，该区域等效应变量大且应变分布均匀，是整个变形试样中体积占比最高的区域。

为探索不同加载方式对变形的影响，在单向压力机上借助碟形弹簧和浮动模架，实现上下冲头不同速度比的 ECADE 实验。实验过程中上滑块下行速度稳定在 0.6 mm/s，初始速度参数及变形后等效应变统计值如表 1 所示。不同加载方式的物理和模拟网格如图 5 所示，可以看出，当速度差出现时，流速快的一侧金属会向流速慢的一侧发生偏移，造成变形区域出现偏移，速度差越大，偏移越明显，最大达到 6.1 mm。选取变形后试样纵截面内的一系列点，根据公式 (1) 对其进行变形均匀性系数计算^[17]：

$$\delta = \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{\epsilon_{\text{avg}}} \quad (1)$$

其中， ϵ_{\max} , ϵ_{\min} 和 ϵ_{avg} 分别为截面内一系列点的最大、最小及平均等效应变。由表 1 可知，当速度比为 1 时，变形均匀系数和等效应变方差的数值均最小，表明此时试样内部变形最为均匀，上下冲头速度差越大，变形均匀性越差。传统 ECAP 过程中，金属流动速度由内角向外角逐渐增大，各部位速度差的存在导致变形量由内角向外角依次递减。而 ECADE 中，如图 6 所示为 ECADE 过程速度场分布，当上下冲头速度比为 1 时，两端金属以相同速度流动，在试样芯部合流进入水平通道，沿内角向中心处由于速度一致，从而保证了变形的均匀性。

2.3 等效应变分析

为了更加清晰地观察试样各区域的变形规律，分别选取变形后位于各变形区的 4 个点进行追踪，即剧烈变形区 P₁、小变形区 P₂、剪切变形区 P₃ 和不变形区 P₄。各点等效应变变化如图 7 所示。可以看出，ECADE 变形过程各部位应变分布规律与传统 ECAP 的由外角到内角应变依次增大规律并不一致。P₂ 和 P₄ 在变形

表 1 ECADE 不同加载方式初始速度及等效应变统计值
Table 1 Initial velocity and equivalent strain by ECADE in different loading ways

Velocity/mm·s ⁻¹	0.3:0.3	0.2:0.4	0.1:0.5	0:0.6
ϵ_{\max}	3.97	3.60	3.80	3.46
ϵ_{avg}	0.892	1.00	1.06	1.09
ϵ_{vari}	0.490	0.533	0.529	0.526
δ	1.89	2.25	2.05	1.91

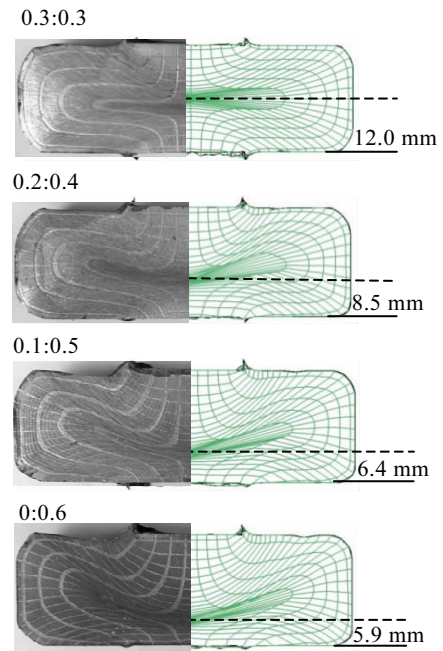


图 5 ECADE 不同加载方式物理和模拟网格示意图

Fig.5 Physical and simulation grid by ECADE in different loading ways

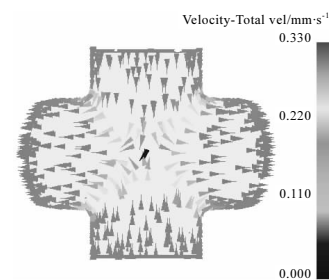


图 6 ECADE 变形过程速度场分布图

Fig.6 Velocity field distribution diagram of ECADE

过程中应变最小甚至为 0，P₂ 只参与了类似局部微粗和最后充填整形阶段，没有经历剪切变形，而 P₄ 一直处于冲头接触区域，基本未发生变形，因而这两处的应变较低。P₃ 点在变形初期做平移运动，应变量为 0，进入剪切变形后，应变显著提高，剪切变形完成后，应变保持稳定。P₁ 点在金属流动过程处于上下两部分金属合流的部位，此处金属流向发生剧烈转变，在整个变形过程等效应变始终上升最快，直到变形结束后，应变达到最大 3.38，比经历剪切变形的 P₃ 点提高了 260%。

2.4 路径和道次对变形的影响

图 8 给出了 A 路径 4 个道次等效应变分布云图。可以看出，A 路径下多道次变形试样等效应变分布规

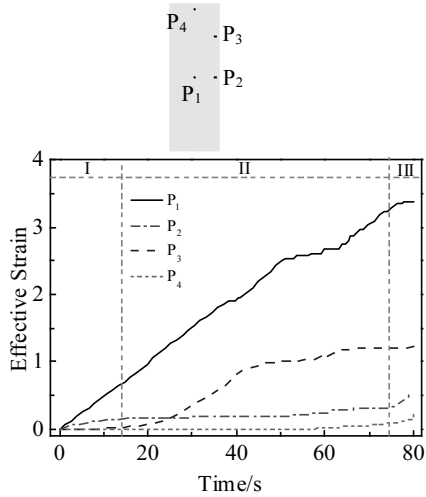


图 7 ECADE 追踪点的等效应变曲线图

Fig.7 Equivalent strain curves of tracking points of ECADE

律与 1 道次变形基本保持一致, 随着道次增加, 各部位平均等效应变逐渐加大。此路径下, 多道次挤压是

小变形区与不变形区的交替变换, 因此这 2 个区域始终得不到剪切变形量的累积。4 道次变形后, 试样整体平均等效应变约为 3.64, 而处于中间均匀变形区的占比达到约 73%。

图 9 给出了 B 路径 4 个道次的等效应变分布云图。可以看出, 多道次变形后, 等效应变依然呈上下左右均对称分布。B 路径变形时, 上一道次结束后的不变形区和剪切变形区分别变为下一道次的剧烈剪切变形区和头部小变形区, 3 个区域交替变换, 因此各区域均能受到剪切变形。4 道次结束后, 试样头部的等效应变量与其余部位基本一致, 但在与冲头接触部位仍存在少量的小变形区域, 芯部“一”字型最大等效应变明显减弱甚至消失, 试样整体平均等效应变约为 3.47, 而均匀变形区的占比达到了 86%。

对比发现, B 路径多道次变形比 A 路径更加均匀充分。图 10 分别给出了 2 种路径下 4 个道次的平均等效应变和变形均匀性系数, 可以看出, 两路径下的平均等效应变随着道次增加都在不断积累, 且差异不大。A 路径的变形均匀性系数随着道次增加逐渐下降至稳

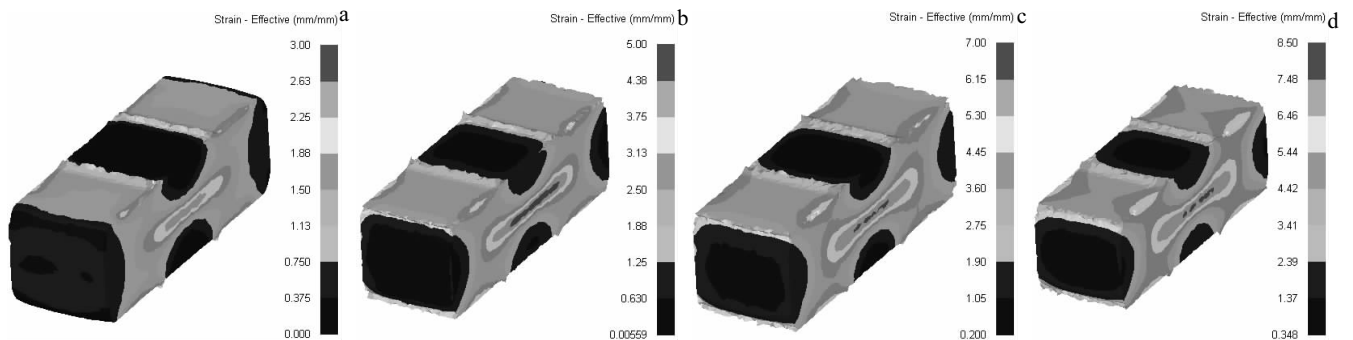


图 8 A 路径下 ECADE 变形后试样等效应变分布云图

Fig.8 Effective strain distribution after ECADE for route A: (a) 1st pass, (b) 2nd pass, (c) 3rd pass, and (d) 4th pass

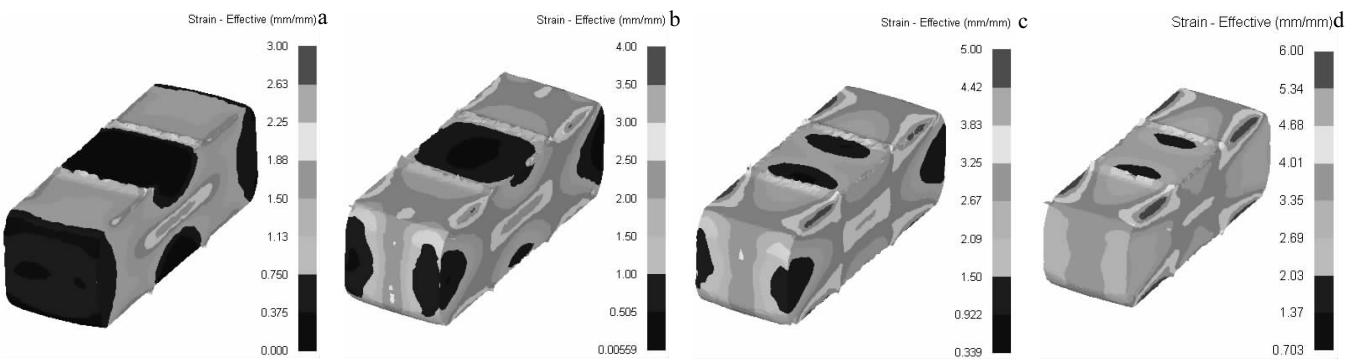


图 9 B 路径下 ECADE 变形后等效应变分布云图

Fig.9 Effective strain distribution after ECADE for route B: (a) 1st pass, (b) 2nd pass, (c) 3rd pass, and (d) 4th pass

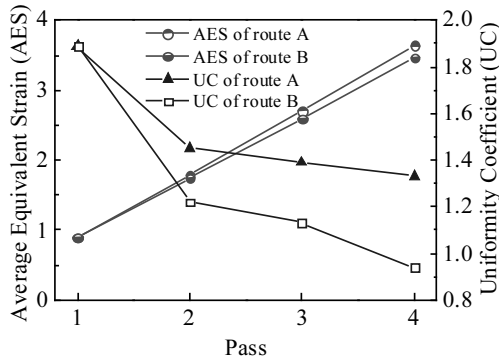


图 10 ECADE 两路径下不同道次变形后试样内部平均等效应变和变形均匀性系数

Fig.10 Average effective strain and uniformity coefficient after different passes deformation of ECADE

定值, 但 B 路径的变形均匀性系数则持续快速下降, 由 1 道次结束后的 1.89 下降到 4 道次结束后的 0.94, 比 A 路径 4 道次变形后的 1.33 降低了 29%。

4 道次变形试样水平中线 AC 方向和垂直中线 BC 方向的硬度分布如图 11 所示。可以看出, 4 道次变形后, A 路径下的试样由小变形区至剧烈变形区 (AC 线) 和未变形区至剧烈变形区 (BC 线) 硬度值均呈现明显的上升趋势, 类比变形均匀性系数, 计算可知其硬度均匀性系数分别约为 0.44 和 0.53, B 路径下 2 条中线上的硬度在较高值范围附近波动, 其硬度均匀性系数分别约为 0.11 和 0.12。由此说明, B 路径各区域均得到充分变形, 平均硬度值和分布均匀性均显著优于 A 路径, 这与模拟结果一致, 进一步验证了数值模拟的准确性。

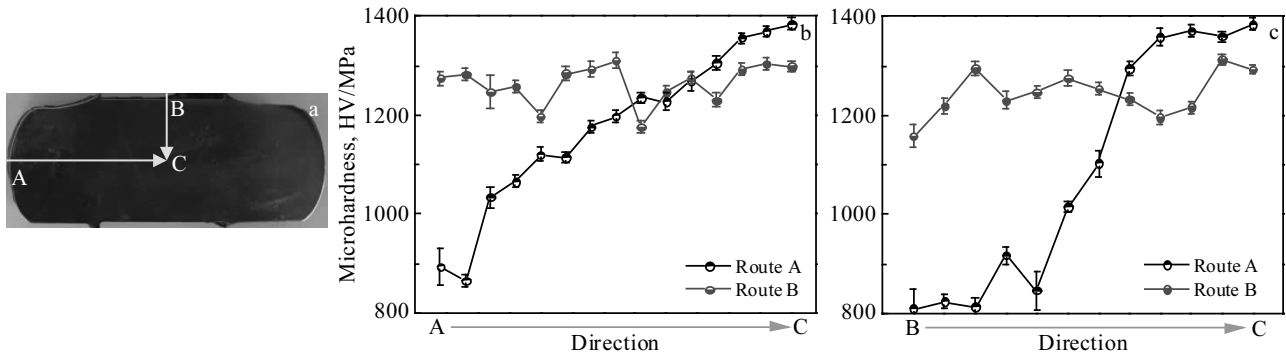


图 11 ECADE 两路径下 4 道次变形后试样特征区域的硬度测试位置和硬度值分布图

Fig.11 Hardness test position (a) and hardness distribution along horizontal direction (b) and vertical direction (c) after four passes deformation of ECADE

3 结 论

1) ECADE 过程可分为 3 个阶段: 近局部镦粗阶段、剪切变形阶段、最后充填阶段。变形结束后, 除头部和与冲头接触部位变形较小外, 其余部位均保持较高应变水平。

2) 不同加载方式会影响试样的变形均匀性, 上下冲头速度差越大, 试样变形均匀性越差。当速度比为 1 时, 上下金属流速一致, 在交汇处不发生偏移, 保证了流动的对称性, 试样变形均匀性最佳。

3) 不同路径的多道次 ECADE 均可实现试样的剧烈剪切变形, 但变形均匀性存在差异。B 路径由于各变形区域的交替变换, 可使试样各区域得到充分剪切变形。4 道次结束后, 其变形均匀性系数显著降低至 0.94, 均匀变形区占比高达 86%。

参考文献 References

[1] Zhao Xin(赵 新), Gao Yuwei(高聿为), Nan Yun(南 云) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2003, 17(12): 5

[2] Azushima A, Kopp R, Korhonen A et al. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2008, 57(2): 716

[3] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. *Progress in Materials Science*[J], 2000, 45(2): 103

[4] Son I J, Nakano H, Oue S. *Materials Transactions*[J], 2006, 69(10): 892

[5] Ma Junlin(马俊林), Li Ping(李 萍), Xue Kemin(薛克敏) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2016, 23(4): 107

[6] Zhilyaev A P, Langdon T G. *Progress in Materials Science*[J], 2008, 53(6): 893

[7] Xu C, Horita Z, Langdon T G. *Acta Materialia*[J], 2007,

- 55(1): 203
- [8] Loucif A, Figueiredo R B, Baudin T *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2012, 532: 139
- [9] Yu Yandong(于彦东), Zhou Hao(周 浩). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(2): 296
- [10] Valiev R Z, Langdon T G. *Progress in Materials Science*[J], 2006, 51(7): 881
- [11] Liu H L, Li P, Xue K M *et al. Rare Metals*[J], 2016(3): 1
- [12] Chen Kehua(陈克华), Liang Wei(梁 伟), Wang Shunqi(王顺旗) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(2): 352
- [13] Qi Huarong(起华荣), Shi Qingnan(史庆南), Tao Xinyao(陶新姚) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(9): 2317
- [14] Liu S D, Chen B, Li C B *et al. Corrosion Science*[J], 2015, 91: 203
- [15] Marlaud T, Malki B, Henon C *et al. Corrosion Science*[J], 2011, 53(10): 3139
- [16] Srivatsan T S. *Journal of Materials Science*[J], 1992, 27(17): 4772
- [17] Wang Xiaoxi(王晓溪), Xue Kemin(薛克敏), Li Ping(李 萍). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2014, 24(6): 1414

Deformation Behavior Analysis of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Processed by Equal Channel Angular Dual-directional Extrusion

Li Ping, Wei Li, Duan Zihao, Wang Xue, Xue Kemin
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The deformation behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy during equal channel angular dual-directional extrusion (ECADE) processing was studied by numerical simulation and experiments. The results show that the ECADE process can be divided into three stages: local upsetting, shearing deformation and final filling. Also, the processed sample can be divided into undeformed zone, small deformation zone, shear deformation zone and severe deformation zone according to the metal flow and mesh distortion. Different loading ways of the upper and lower punches lead to the deviation of deformation zone, and the sample has less deformation homogeneity along with the more velocity difference between the two punches. The most homogeneous deformation with maximum strain of 3.97 and deformation uniformity coefficient of 1.89 is obtained when the velocity ratio is 1:1. In addition, the deformation behavior under different routes was investigated. It is found that the deformation is more homogeneous under 4 passes of route B compared with that of route A, having a 29% reduction in deformation uniformity coefficient and a 14% increase in shear deformation zone proportion.

Key words: Al-Zn-Mg-Cu alloy; equal channel angular dual-directional extrusion (ECADE); finite element simulation; deformation homogeneity

Corresponding author: Xue Kemin, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, P. R. China, Tel: 0086-551-62905110, E-mail: xuekm0721@sina.com