

6061 铝合金双向等通道挤压金属流动规律研究

起华荣¹, 史庆南¹, 陶新姚², 刘兆华¹, 王效琪¹, 成佳¹

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

(2. 新光控股集团有限公司, 浙江 义乌 322023)

摘要: 以 6061 铝合金为对象采用数值模拟和实验验证的方法研究了双向等通道挤压过程金属流动规律。发现双向等通道技术能够在材料内部造成剧烈的剪切变形, 具有晶粒细化和形变强化作用, 可以通过调整摩擦系数对变形过程进行调控。通过对 6061 铝合金 A、B 2 种路径 4 道次双向等通道挤压发现, 双向等通道挤压具有强烈的形变强化作用, 在相同道次下, B 路径等效应变大于 A 路径。

关键词: 双向等通道挤压; 6061 铝合金; 金属流动规律; 形变强化

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)09-2317-05

等径角挤压能制备具有优异物理和力学性能的超细晶块体材料(晶粒尺寸 0.1~1 μm), 是一种具有工业化应用前景的大变形技术^[1-3]。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^[4-7]。国内外关于 DECE 制备超细晶金属材料的相关报道除用上限法对其变形过程进行分析以外^[8,9], 对 DECE 变形过程及变形行为的研究未见报道。6061 高强度铝合金, 在冷冻容器、低温器械与贮存箱, 消防压力器材, 军用器材、装甲板、导弹装置等方面有广泛应用前景, 采用双向等通道挤压提高其力学性能, 采用计算模拟和实验验证相结合的方法对 DECE 过程进行研究具有十分重要的学术和工程价值。

1 实验

采用 DEFORM 软件对双向等通道挤压过程进行有限元模拟, 对摩擦系数、内角半径、变形路径对双向等通道挤压的变形特征、载荷分布和应力-应变的影响进行分析研究; 对完全退火试样进行网格刻蚀, 进行 DECE 挤压实验, 对比研究金属流动规律。

实验原始材料为 6061 铝合金, 其特点有: (1) 良好的可成型性、可焊接性; (2) 强度高; (3) 可使用性好, 接口特点优良; (4) 易于加工, 易涂层; (5) 抗腐蚀性、抗氧化性好。化学成分如表 1 所示。

因试样需进行多道次旋转和反复挤压, 故选试样

表 1 6061 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy (ω/%)

Zn	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Si	Cr	Al
0.25	0.8~1.2	0.15	0.7	0.15~0.40	0.15	0.4~0.8	0.004~0.350	Bal.

底面为正方形。为防止 DECE 挤压时挤压冲头发生弯曲, 控制试样高度, 将 6061 铝合金用线切割加工成 10 mm×10 mm×45 mm。为获得均匀的组织和良好的塑性, 对试样进行 300 °C/24 h 均匀化退火, 炉冷。

备料切割采用 DK7732E 型数控线切割机; 热处理采用 ZR-15-9 真空炉, 功率为 4 kW, 额定电压 380 V, 炉腔尺寸为 590 mm×400 mm×400 mm, 最高温度为 1400 °C; 力学性能用 AG-X 万能材料试验机测量, 最大载荷: 100 kN。

2 结果及分析

2.1 挤压过程流动网格形状的变化

DECE 工艺金属流变过程如图 1 所示。

DECE 工艺对试样施加向下的挤压力, 试样在模具约束下向左、右凸出变形, 两侧同时受到剪切变形使晶粒细化。对试样实行不同的翻转, 产生了不同挤压路径, 获得不同的剪切变形效果。在挤压过程中, 研究试样几何形状和网格的变形对了解挤压变形过程中材料的变形行为具有重要的意义。

DECE 变形的特点是对称变形, 变形区主要集中在模具的 2 个拐角处, 变形过程大致可分为 5 个阶段:

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(u0837601)

作者简介: 起华荣, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 昆明理工大学材料学院, 云南 昆明 650093, 电话: 0871-65188201, E-mail: qihuaron@163.com

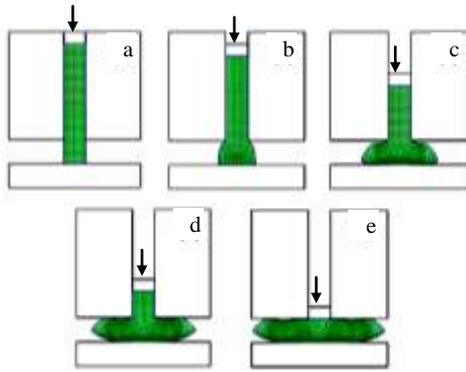


图 1 DECE 过程中几何变化

Fig.1 Deformation during DECE process

(1) 试样受到挤压力开始发生变形, 如图 1a 所示;
 (2) 试样在挤压力作用下发生类似镦粗向左、右凸出变形, 如图 1b 所示;
 (3) 凸出部分进入主要变形区发生剪切变形, 形成对称的剪切变形区, 且试样头部向上翘起, 与水平通道成一定夹角, 如图 1c 所示;
 (4) 试样头部继续向前移动, 与水平通道顶部接触, 此阶段试样并没有完全充满水平通道, 而是与通道的顶部形成一条狭长的缝隙, 试样头部形成“尖端”与水平通道构成上下 2 个夹角, 如图 1d 所示;
 (5) 继续挤压直至挤压杆底部与水平通道顶部平齐为止, 试样由“倒 T”形转变为“一”字形, 如图 1e 所示。试样底部被分为 2 个新的端部, 顶部被压为新的中部, 翻转样品, 反复挤压, 就能对材料实现剧烈的塑性变形, 达到细化晶粒的目的。

2.2 双向等通道挤压网格法实验

采用网格法研究塑性变形过程运动学过程, 反映出金属各部位的流动情况。实验步骤: (1) 把试样材料沿纵向中心线切割为两半, 取其一半在剖面上均匀刻蚀 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm 网格, 如图 2 所示;

(2) 进行不完全双向等通道挤压; (3) 取出试样, 观察网格变形。

DECE 的金属流动可分为 3 个区: 第 1 区是左右 2 个端部, 其变形极不均匀, 上下层金属往后拽, 中间金属往前顶, 产生强烈的搓扭; 第 2 区是均匀剪切变形区, 处于稳定变形状态, 对称分布于两侧; 第 3 区是挤压末端压入区, 上部分网格基本未变形, 像楔形插入金属中。

2.3 平均应力分布及缺陷分析

图 3 是 DECE 变形过程中某一时刻的平均应力云图。从图中可知, 在挤压开始部位, 试样处于压应力状态下, 发生镦粗变形后, 金属向两侧流动, 压应力逐渐减小, 拉应力逐渐增加, 点 C 最先处于正应力, 随后, 点 A 和 B 处于拉应力状态。

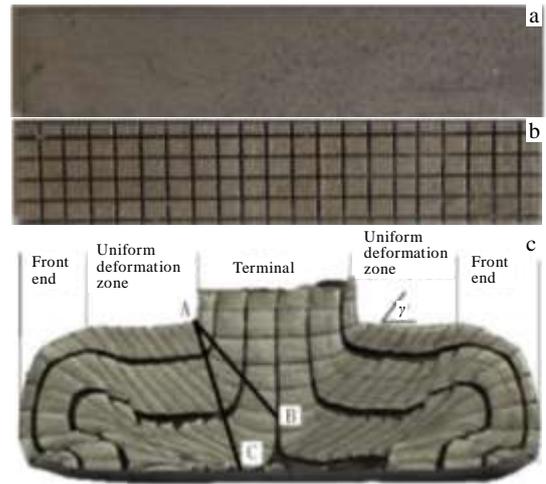


图 2 双向等通道挤压坐标网格

Fig.2 Coordinate grid method of DECE: (a) original, (b) divided grid, and (c) coordinate grid

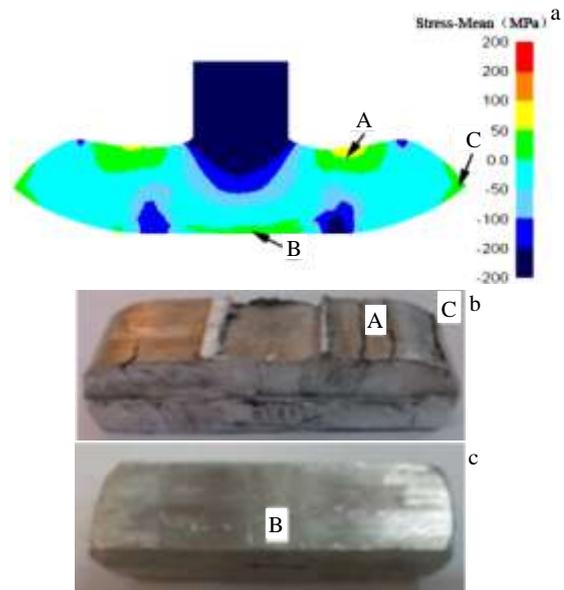


图 3 DECE 变形后试样的平均应力分布及裂纹位置

Fig.3 Mean stress distribution after DECE deformation (a) and the cracks location: (b) cracks at the point A and C, and (c) cracks at the point B

变形过程中, 试样若处于拉应力状态, 容易萌生裂纹, 随着挤压道次的增加, 裂纹发生扩展, 逐渐形成断裂。图中 A 区为拉应力最大点, 试样在通道拐角处的应力集中点 B, 自由端部 C, 均处于拉应力状态, 实际挤压试样相应位置均易出现裂纹。

2.4 摩擦系数对流动网格的影响

图 4 模拟了不同摩擦系数下 DECE 流动网格变化示意图。随摩擦系数的增加, 水平网格线分布更均匀, 变形区网格流动也更均匀。摩擦系数 $\mu=0$ 时, 试样的

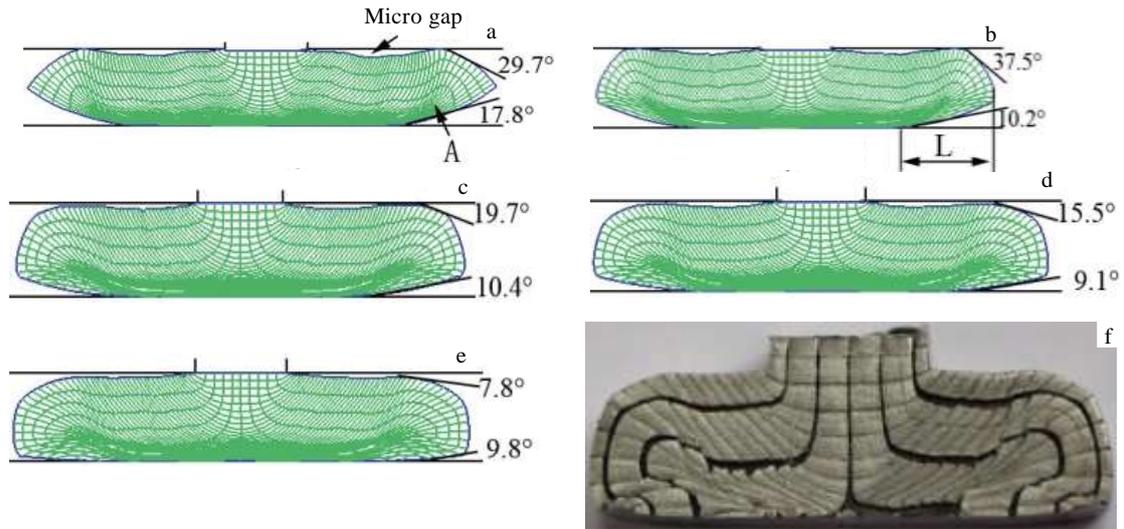


图 4 不同摩擦系数下 DECE 变形后的流动网格变化示意图和坐标网格试样

Fig.4 Flow net changes after DECE process with different friction coefficients: (a) $\mu=0$, (b) $\mu=0.2$, (c) $\mu=0.4$, (d) $\mu=0.5$, (e) $\mu=0.6$, and (f) coordinate grid of sample

头部呈一定角度的尖锐形状，向上翘起；随着摩擦系数增加，试样头部呈弧形，变得圆润。水平通道底部和顶部与试样存在摩擦，但底部受压，摩擦力大，所以金属往阻力相对较小的上部翘起；摩擦系数增大，水平通道上下两个面的摩擦力介入，使上端头上翘的趋势得到抑制，夹角下降，试样头部端头区缩短，变形均匀区增加。在 DECE 变形过程中会发生金属流线折叠现象，如图 4a 中的 A 所示。随摩擦系数增加，中间金属前冲减弱，折皱舒缓，与水平通道底部更贴合。试样头部与水平通道顶部相交后，会形成一定空隙。随摩擦系数的增加，空隙减小并逐步消失，这种空隙的形成及其面积、形状大小与模具的几何形状、试样的材料和摩擦等因素有关。通过模拟结果与实验情况对比， $\mu=0.5$ 比较接近实际情况。

2.5 路径对变形的影响

因为双向等通道挤压是对称变形，所以只存在 2 种变形路径，即，样品始终不翻转的 A 路径，和每挤压一次翻转 90° 的 B 路径，选择不同的挤压路径，变形效果各不相同。

图 5 为 A 路径 DECE 变形等效应变分布图。由图可以看出，A 路径变形情况下，1 道次变形后，试样的等效应变分布呈对称分布，最小等效应变区分布于试样两端和中部；2 道次变形后，最小等效应变区仍分布在两端和中部，但不再呈对称分布；3 道次变形后，最小等效应变区仍分布在试样两端和中部，区域明显减小；4 道次变形后，试样的最小等效应变区进一步减小，中部最小等效应变区消失，中部剧烈变形区增大。通

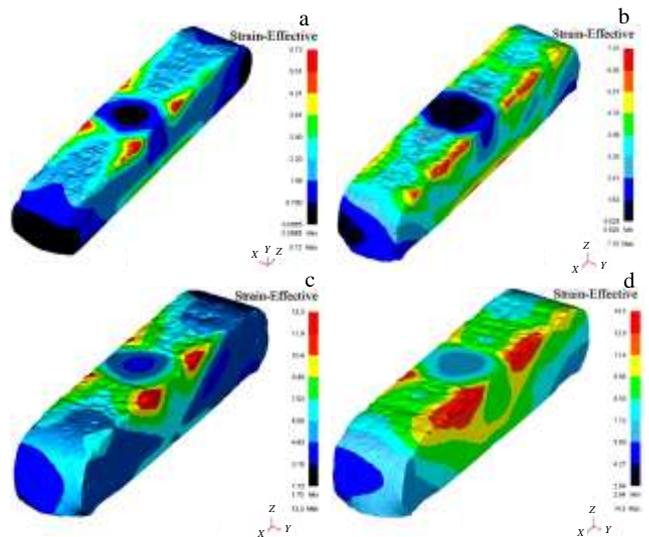


图 5 A 路径 DECE 变形后试样的等效应变分布图

Fig.5 Effective strain distribution after DECE for path A: (a) 1st pass, (b) 2nd pass, (c) 3rd pass, and (d) 4th pass

过 4 道次挤压，试样中部和两边的最小等效应变区逐渐减小，压头两侧应变区逐渐增大，表明 A 路径 DECE 挤压具有良好的大变形效果，能够在试样中实现剧烈的塑性变形，但左右变形不对称，均匀性略差。

图 6 为 B 路径 DECE 变形等效应变分布图。由图可以看出，B 路径变形情况下，1 道次变形后，试样的等效应变分布呈对称分布，最小等效应变区分布于试样两端和中部；2 道次变形后，最小等效应变区在试样两端，中部最小应变区域消失。因为试样顺时针

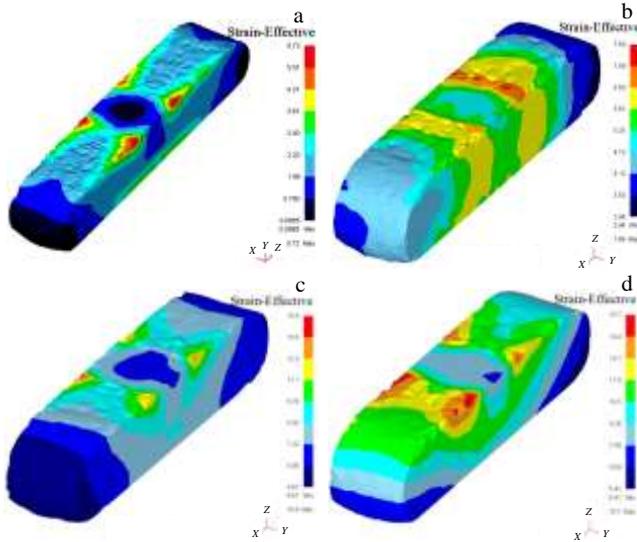


图 6 B 路径 DECE 变形后试样的等效应变分布图

Fig.6 Effective strain distribution after DECE for path B:
(a) 1st pass, (b) 2nd pass, (c) 3rd pass, and (d) 4th pass

翻转 90°，将变形剧烈的侧面转正，所以其表面最小应变区消失；3 道次变形后，端部最小变形区显著增大，中部也出现了最小变形区。这是因为第 2 次翻转使 1 道次时的试样底面转而朝上，未变形区参与剪切变形，因此表面最小应变区增大，实质则是材料翻转，使变形更为透彻；4 道次变形后，试样的最小等效应变区进一步减小，位于两端呈对称分布。

相比之下，A 路径看似变形剧烈，但实质上所有

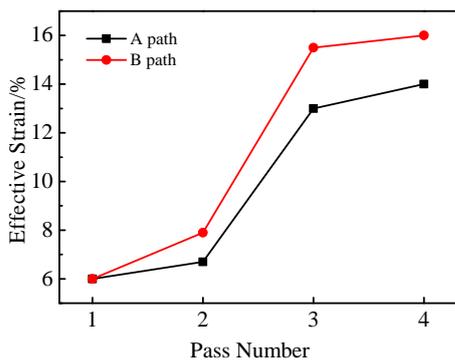


图 7 最大等效应变量与道次的关系曲线

Fig.7 Relation curves between maximum effective strain and pass

变形均在试样上半部进行，因此变形并不透彻；而 B 路径，看似最终还在两端部留下了深色区域，但实质上由于试样的翻转，B 路径变形更为透彻，对称性和均匀性更好。图 7 说明了这一问题。由图 7 可以看出，从第 2 道次开始，B 路径的最大等效应变量大于 A 路径相同道次的最大等效应变量。由于 A 路径试样方向固定不变，因此剪切变形量和变形深度有限；而 B 路径由于进行了试样的 90° 翻转，后一道次对前一道次的侧向进行剪切变形，因此，晶粒受到三维方向的切割，变形更剧烈，更透彻，更均匀。

3 结 论

- 1) 双向等通道挤压过程中，在试样的端部、底部和颈部处于拉应力状态，容易产生裂纹。
- 2) 双向等通道挤压过程中，摩擦力的改变可改变试样端部形貌，普通等通道挤压摩擦系数取 $\mu=0.5$ 较接近实际。
- 3) 双向等通道挤压能够对材料产生剧烈的塑性变形，但相比之下，B 路径比 A 路径变形更透彻，形变强化能力更强。

参考文献 References

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

[2] Khakbaz F, Kazeminezhad M. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2012, 14(1): 20

[3] Vinogradov A, Orlov D, Estrin Y. *Scripta Materialia*[J], 2012, 67(2): 209

[4] Regina Cardoso K, Muñoz-Morris M, Valdes Leon K *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 587: 387

[5] Mogucheva A, Babich E, Ovsyannikov B *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 560: 178

[6] Mani B, Jahedi M, Mohammad H P *et al.* *Powder Technology* [J], 2012, 219: 1

[7] Yoon S C, Jeong H G, Sunghak L *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2013, 77: 202

[8] Zhu C, Du F, Jiao Q *et al.* *Materials & Design*[J], 2013, 52: 23

[9] Fan G, Zheng M, Hu X *et al.* *Materials Science and Engineering A* [J], 2012, 556: 588

Metal Flow of 6061 Aluminum Alloy Processed by Dual Equal Channel Extrusion

Qi Huarong¹, Shi Qingnan¹, Tao Xinyao², Liu Zhaohua¹, Wang Xiaoqi¹, Cheng Jia¹

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

(2. Neoglory Holdings Group CO., LTD, Yiwu 322023, China)

Abstract: The metal flowing law of 6061 aluminium alloy in the dual equal channel extrusion process was researched by numerical simulation and experiments. Results show that the dual equal channel extrusion technique can cause severe shear deformation within the material, which possesses a grain refinement and deformation strengthening effect. The deformation process is controlled by adjusting the friction coefficient. Four passes dual equal extrusion with A and B paths was performed on the 6061 aluminum alloy. Results show that dual equal channel extrusion has a strong effective strain, and at the same pass, path B has a greater strain strengthening ability than path A.

Key words: dual equal channel extrusion; 6061 aluminum alloy; metal flowing law; strain strengthening

Corresponding author: Qi Huarong, Ph. D., Lecturer, School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China, Tel: 0086-871-65188201, E-mail: qihuarong@163.com