

## 新型等径角挤压工艺下的 5052 铝合金变形行为的有限元模拟

董蔚霞, 王晓溪, 夏华明, 朱珍

(徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221018)

**摘要:** **目的** 采用新型复合大塑性变形技术正挤压-等径角挤压工艺(FE-ECAP), 研究 5052 铝合金在室温条件下的变形行为。**方法** 基于有限元分析软件 DEFORM-3D, 在 FE-ECAP 工艺下对 5052 铝合金进行有限元模拟, 研究变形过程中挤压载荷、等效应变、金属流动速度等场量的分布规律。**结果** 5052 铝合金在 FE-ECAP 变形过程中, 挤压载荷曲线呈双峰形态分布, 在挤压模口附近达到第一次峰值, 第二次出现在转角处, 挤压载荷值为 347 kN, 同时也是整个挤压过程的最大值; 经过 FE-ECAP 变形后, 等效应变大量累积, 使得主要变形区达到了高度均匀的变形状态; 坯料外转角处金属的流动速度值大于内转角处的流动速度值。**结论** 根据以上结果分析, 在 FE-ECAP 工艺下, 为使变形坯料性能优越, 应尽量提高坯料变形的均匀性。

**关键词:** FE-ECAP; 变形行为; 有限元模拟; 5052 铝合金

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.03.008

**中图分类号:** TG376.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2015)03-0043-05

### Finite Element Simulation of 5052 Aluminum Alloy Deformation Behavior in a New Type of Equal Channel Angular Pressing Process

DONG Wei-xia, WANG Xiao-xi, XIA Hua-ming, ZHU Zhen

(School of Mechanical and Electrical, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221018, China)

**ABSTRACT:** The aim of this work was to use the new type of severe plastic deformation technology called Forward extrusion-equal channel angular pressing (Forward extrusion-equal channel angular pressing, FE-ECAP) to study the deformation behavior of 5052 aluminum alloy at room temperature. Based on the DEFORM-3D finite element simulation software, the deformation behavior of 5052 aluminum alloy was simulated under the FE-ECAP technology, and the squeezing load, equivalent strain and the distribution of velocity during the process of deformation were studied. During the FE-ECAP deformation process, the pressing load curve showed a distribution of double-mountain shape, the first peak value occurred around the mouth of the pressing die, the second one appeared at the corner, and the value of extrusion load reached 347 kN, which was the maximum value in the whole deformation process. After FE-ECAP deformation, the effective strain massively accumulated, which made the main deformation area reached a high degree of highly uniform deformation condition. The metal flow velocity at the outer corner of the billets was larger than the value of flow velocity at the inner corner. According to the results, under the FE-ECAP technology, the uniformity of billets deformation should be improved in order to enhance the performance of the deformed billets.

收稿日期: 2015-04-10

基金项目: 徐州工程学院 2014 年大学生创新创业基金(2014134); 江苏省大型装备检测与控制重点实验室开放课题(JSKLEDC201309)

作者简介: 董蔚霞(1993—), 女, 江苏连云港人, 学士, 主要研究方向为材料成形及控制工程。

通讯作者: 王晓溪(1985—), 女, 安徽淮北人, 博士, 讲师, 主要研究方向为先进塑性成形新技术新工艺、材料成形过程中的数值模拟。

**KEY WORDS:** FE-ECAP; deformation behavior; finite element simulation; 5052 aluminum alloy

随着材料科学技术的发展和加工工艺的日趋完善,块体超细晶材料因其具有优良的力学性能和物理性能,特别是在不断更新换代的电子产品中的广泛应用,备受材料界的重视,成为当前材料学领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。在众多制备块体超细晶材料的工艺方法中,大塑性变形工艺因其能够制备出大块、致密材料且无污染、成本低廉等优点,被公认为是最行之有效的办法<sup>[4]</sup>。等径角挤压(Equal channel angular pressing, ECAP)是一种典型的大塑性变形工艺,它在不改变坯料的横截面积和截面形状的前提下<sup>[5]</sup>,使得坯料在转角处受到剧烈的纯剪切变形,从而使晶粒得到细化。然而,该工艺通常需要多道次重复挤压才能获得更大的累积应变,进而使位错重排以得到超细晶组织<sup>[6-7]</sup>,如此反复投放、提取坯料,不仅导致挤压效率低下、增加成本、不利于工业上的大批量生产模式,而且使材料的有效利用长度大大降低。

为了弥补 ECAP 工艺上的不足,文中在传统 ECAP 工艺的基础上,提出了一种更为有效、细晶能力更强、材料有效利用长度更大的新型大塑性复合变形技术,即正挤压-等径角挤压工艺(Forward extrusion-equal channel angular pressing, FE-ECAP),并借助于大型商业模拟分析软件 DEFORM-3D,对 5052 铝合金在室温条件下的变形行为进行模拟分析,获得了挤压变形过程中挤压载荷、等效应变、金属流动速度等场量的分布规律。以上这些研究将对发展新型复合大塑性变形技术、优化模具结构以及高效率制备块体超细晶材料具有重要的指导意义。

## 1 FE-ECAP 工艺原理

FE-ECAP 工艺综合了 FE 和 ECAP 两种变形工艺的特点,其工艺原理如图 1 所示。在传统 ECAP 模具通道入口处增加一段横截面面积更大的正挤压入口通道,在外力作用下,坯料从模具的入口通道被挤入,经过挤压模口进入竖直通道,紧接着通过模具转角,最后从水平通道中平稳挤出。在整个变形过程中,由于坯料首先在挤压模口处发生一次剧烈的塑性变形,有效长度大大增加,材料原始晶粒也得到一定程度的细化。随后,坯料在模具转角部位发生第二次剧烈的纯剪切变形,组织得到进一步细化。虽然经过两次剧烈的塑性变形,但是坯料并没有产生破坏,且经过两

次塑性变形后累积大量的应变,有利于获得均匀的超细晶组织<sup>[8-9]</sup>。由此可见,FE-ECAP 工艺在能够获得块体超细晶材料的前提下,同时也实现了“一次挤压,两次变形,有效长度增加”复合变形的目的。与传统 ECAP 工艺相比,FE-ECAP 变形工艺挤压效率高,模具结构简单,变形复合连续,有利于实现工业化的广泛应用。

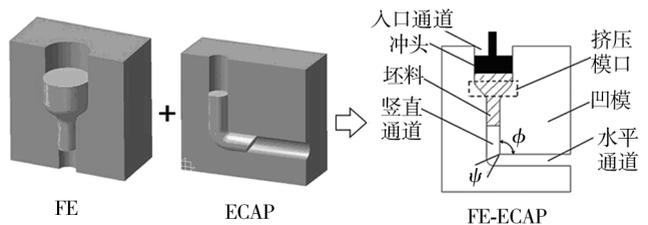


图 1 FE-ECAP 工艺原理

Fig. 1 Principle of FE-ECAP

## 2 5052 铝合金 FE-ECAP 变形过程的有限元模拟

### 2.1 有限元模型的建立

在三维造型软件 Pro/E 中完成实体建模并经完整装配,导入到 DEFORM-3D 中进行模拟。坯料原始尺寸为  $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,材料为 5052 铝合金,变形温度为室温( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ),变形速度为  $2 \text{ mm/s}$ 。本次模拟网格划分采用四面体单元,划分单元数量为 15 000。图 2 为有限元网格划分示意图,为防止变形过程中因网格发生严重畸变而破坏坯料、阻止变形,将网格设置成自动重划分模式<sup>[10-12]</sup>。模具和冲头都设为刚性材料,两者之间除了在变形中因接触而产生摩擦外并不发生塑性变形,接触摩擦设为常剪切摩擦,摩擦因子

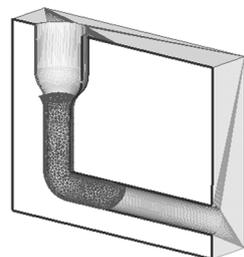


图 2 有限元网格划分

Fig. 2 Mesh in FEM

为0.12。模具的内、外转角角度分别为  $\phi = 90^\circ, \psi = 90^\circ$ ;入口通道为  $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 竖直通道为  $\phi 15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 水平通道为  $\phi 15 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

## 2.2 FE-ECAP 模拟结果及分析

### 2.2.1 挤压载荷分析

图3是室温条件下5052铝合金在FE-ECAP工艺复合挤压变形过程中的挤压载荷-行程曲线。可以看出整个变形过程分为4个阶段,即快速增加阶段I、快速增加阶段II、急剧下降阶段III、稳定变形阶段IV,图4是FE-ECAP变形过程示意图。

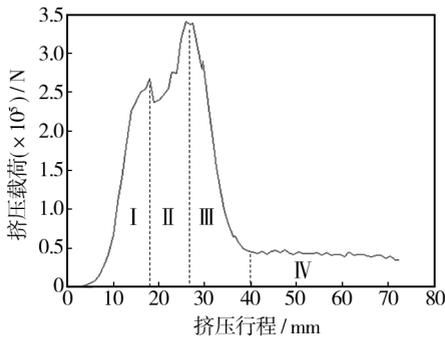


图3 挤压载荷-行程曲线

Fig. 3 The extrusion load-stroke curve

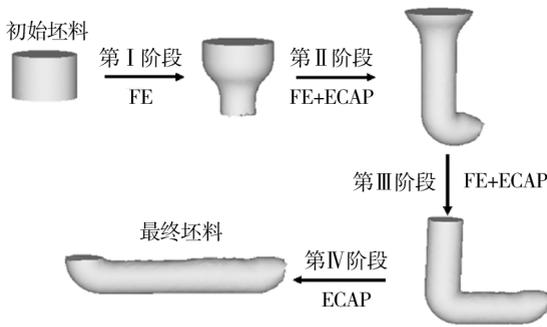


图4 FE-ECAP变形过程示意

Fig. 4 Deformation process of FE-ECAP

1) 快速增加阶段 I: 该阶段在外力的作用下坯料依次通过挤压模口, 挤压载荷随着行程的增加而增大, 挤压行程接近 20 mm 时载荷达到 262 kN, 第一个峰值出现。这是因为坯料在冲头的作用下首先发生墩粗变形, 向四周膨胀直至与挤压筒内壁完全接触, 此后, 坯料受到来自冲头和挤压筒内壁的三向压应力, 开始不断进入到竖直通道中, 并在模口部分发生剧烈塑性变形。

2) 快速增加阶段 II: 该阶段入口通道内的坯料逐渐减少, 坯料所受的三向压应力和摩擦力也随之减

小, 因此在极短行程内挤压载荷出现下降现象。然而, 由于坯料逐渐通过模具转角时受到剧烈的剪切作用力, 挤压载荷很快又随着行程的增加而逐渐增大, 直到第 2 个挤压载荷峰值的出现, 此时的峰值为 347 kN, 也是整个挤压过程载荷最大值。

3) 急剧下降阶段 III: 随着变形的继续, 坯料逐渐离开挤压模口进入竖直通道和水平通道, 此时坯料所受的三向压应力和摩擦力不断减小, 挤压载荷随着行程的增加而不断下降。

4) 稳定变形阶段 IV: 此时坯料已完全离开挤压模口进入竖直通道和水平通道, 仅发生 ECAP 变形, 相比前 3 个阶段, 坯料此时受力较均匀, 变形较稳定, 由于摩擦力的存在, 挤压载荷呈现微小波动, 基本保持不变。

### 2.2.2 等效应变的分析

等效应变的大小和分布状况能够反映出材料塑性变形的累积效果, 在一定程度上它与材料内部细化和变形均匀的程度密切相关<sup>[13-15]</sup>。图5为不同变形阶段坯料中心纵截面的等效应变分布图。从图5可以看出, FE 变形阶段, 在来自冲头和通道内壁的三向压应力的作用下, 使得坯料在挤压模口处能更好地发生剧烈的塑性变形, 变形较均匀, 等效应变呈现出较小的梯度分布, 应变值由外到内依次递减。在 FE-ECAP 变形阶段, 坯料通过模具转角, 在模具转角的剪切作用下, 坯料头部变形出现翘曲现象。此时, 在转角附近的等效应变呈现明显的层状分布, 并且等效应

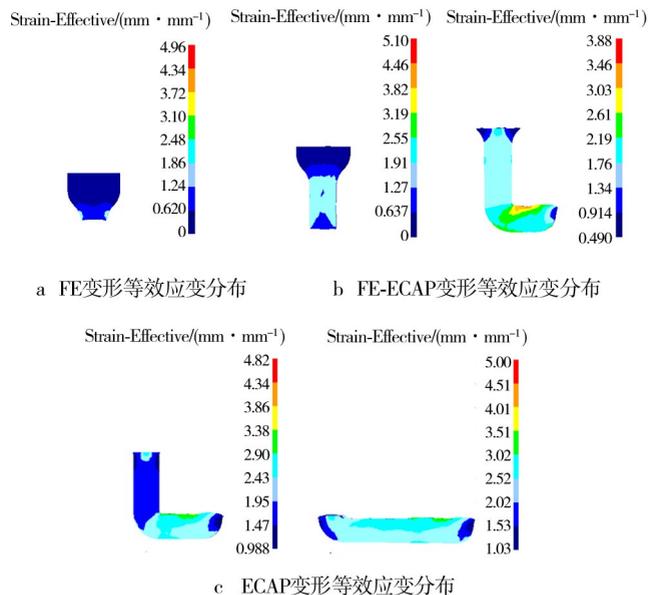


图5 各阶段变形坯料的等效应变分布

Fig. 5 The distribution of the equivalent strain of the deformed billets at different stages

变值从上到下依次减小。随着变形的继续,已完成 FE 和 FE-ECAP 变形的坯料进入完整的 ECAP 变形阶段,此阶段坯料变形相对平稳,如图 5c 所示,变形坯料的等效应变梯度明显减小,坯料整体变形均匀性得到显著提高,内部形成了一个大而均匀的主要变形区,坯料内部所累积的平均等效应变约为 2.27。

为了更清楚地表示坯料内部各质点在 FE-ECAP 过程中的变形效果,在最终变形坯料的主要变形区内,分别沿  $AB, CD, EF$  截取中心横截面的 9 个不同节点进行分析,如图 6 中心横截面的放大图所示,3 个截面上各跟踪点等效应变的大小如图 7 所示。从图 7 中可以发现,3 个截面上,9 个节点的等效应变值变化趋势基本一致,变化曲线在多个点处出现重叠现象,由此可见,每个节点在不同截面上其值变化不大,从而形成了一个大而均匀的主要变形区。

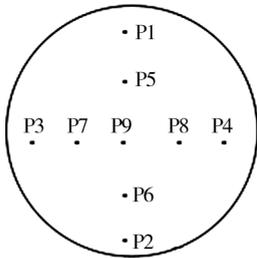


图 6 横截面(放大)跟踪点的选取

Fig. 6 The tracking point on the cross section(enlarged)

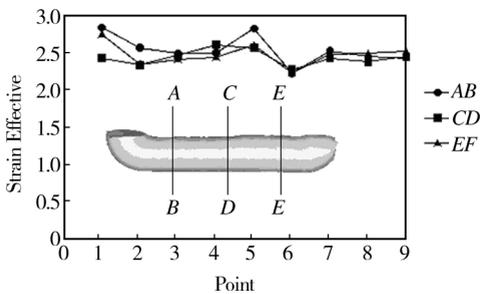


图 7 各点等效应变大小

Fig. 7 The equivalent strain of the tracking points

纵观这 9 个节点的等效应变值,最大值(P1)为 2.85,最小值(P2)为 2.29,两者相差甚微。由此可见,经过 FE-ECAP 变形后,等效应变大量累积,使得主要变形区达到了高度均匀的变形状态。为保证所获取的超细晶材料组织稳定、性能优越,并具有工业使用价值,应尽可能地提高坯料变形的均匀性。

### 2.2.3 速度场的分析

由图 8 可以看出,坯料在挤压模口附近的速度呈

明显的梯状分布,速度值由上到下依次增加。而坯料在转角处的速度呈较小的梯状分布,并且内转角处的速度值明显小于外转角处的速度值,靠近转角部位的坯料在竖直通道内与在水平通道内的速度值相等,大小分布非常均匀,由此可见,此时坯料的变形较稳定。由图 9 中的表面速度矢量图可以看出,金属质点在不同部位速度方向发生微小变化,在挤压模口向竖直通道过渡阶段,坯料尾部的速度方向各异,但是从整体来看,速度方向基本与主流方向一致。

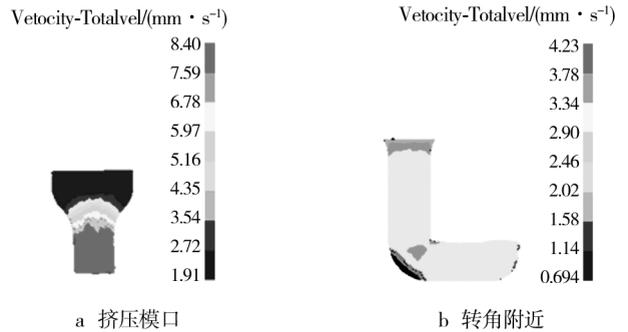


图 8 中心纵截面速度分布

Fig. 8 Velocity distribution on longitudinal section

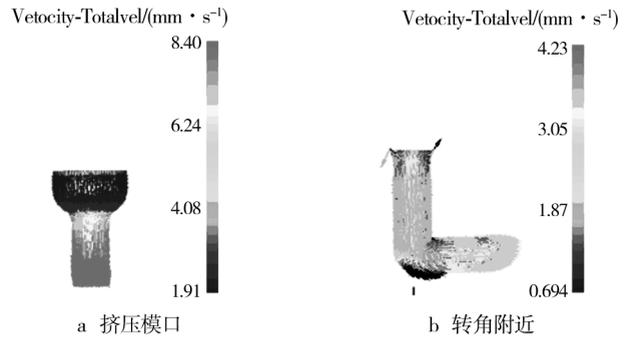


图 9 坯料表面速度矢量分布

Fig. 9 Outer surface-velocity distribution on longitudinal section

## 3 结论

1) 将 5052 铝合金在室温条件下的 FE-ECAP 挤压变形过程划分为 4 个阶段,即快速增加阶段 I、快速增加阶段 II、急剧下降阶段、稳定变形阶段。

2) 在模具转角的剪切作用下,坯料头部变形出现翘曲现象,在最后的 ECAP 变形阶段,变形坯料的等效应变梯度明显减小,坯料整体变形均匀性得到显著提高,内部形成了一个大而均匀的主要变形区。

3) 金属流动速度与坯料所处位置有关,挤压模口内部金属流动速度较外表面的大,且分布不均,坯料在转角处的速度呈层状分布,并且内转角处的速度

值明显小于外转角处的速度值,但是整体上速度与主流方向是保持一致的。

### 参考文献:

- [1] 刘晓燕,赵西成,杨西荣,等. ECAP 变形制备超细晶金属材料变形行为的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(5):11—15.  
LIU Xiao-yan, ZHAO Xi-cheng, YANG Xi-rong, et al. Progress in Research on Deformation Behavior of Ultrafine-grained Metallic Materials Processed by ECAP[J]. Materials Review, 2011, 25(5):11—15.
- [2] 王玉梅,张会. 等径角挤压工艺的研究进展[J]. 材料导报,2014(9):87—91.  
WANG Yu-mei, ZHANG Hui. Research Progress of Equal Channel Angular Pressing[J]. Materials Review, 2014(9):87—91.
- [3] 陈娜. 工业纯铝棒等径角挤压数值模拟与试验研究[D]. 南宁:广西大学,2013.  
CHEN Na. Simulation and Experimental Study on Equal Channel Angular Pressing for Commercial Pure Aluminum Bar[D]. Nanning:Guangxi University, 2013.
- [4] 杨智强,史庆南,起华荣,等. 6061 铝合金等通道挤压工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(2):123—127.  
YANG Zhi-qiang, SHI Qing-nan, QI Hua-rong, et al. Finite Element Analysis of 6061 Aluminum Alloy by Equal Channel Angular Pressing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2010, 30(2):123—127.
- [5] CHEN E, DUCHÊNE L, HABRAKEN A M, et al. Multiscale Modeling of Back-stress Evolution in Equal-channel Angular Pressing: from One Pass to Multiple Passes [J]. Journal Materials Science, 2010, 45(17):4696—4704.
- [6] 李建国,王莉,郭道强,等. 多道次连续挤压 3003 铝合金的组织与性能[J]. 热加工工艺,2011(24):36—39.  
LI Jian-guo, WANG Li, GUO Dao-qiang, et al. Microstructure and Properties of Multi-pass Continuous Extrusion 3003 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2011(24):36—39.
- [7] 王占学. 塑性加工金属学[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.  
WANG Zhan-xue. Metal Plastic Processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [8] GOLOVIN I S. Grain-boundary Relaxation in Copper before and after Equal-channel Angular Pressing and Recrystallization[J]. The Physics of Metals and Metallography, 2010, 110(4):405—413.
- [9] 王晓溪. 纯铝粉末等径角挤扭工艺数值模拟及实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.  
WANG Xiao-xi. Numerical Simulation and Experimental Investigation on Pure Aluminum Powder Consolidate during Equal Channel Angular pressing and Torsion [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [10] 胡建军,李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程[M]. 北京:北京大学出版社,2011.  
HU Jian-jun, LI Xiao-ping. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Tutorial [M] Beijing: Peking University Press, 2011.
- [11] 谭险峰,余成龙,谢保华. 基于 Deform-3D 不同背压等通道转角挤压的计算机仿真[J]. 热加工工艺,2014(21):145—148.  
TAN Xian-feng, YU Cheng-long, XIE Bao-hua. Computer Simulation of ECAE with Different Back Pressures Based on Deform-3D[J]. Hot Working Technology, 2014(21):145—148.
- [12] 李凌风,巩子天纵,李萍. 纯铝粉末等径角挤压固结模拟及实验研究[J]. 精密成形工程,2014,6(4):24—30.  
LI Ling-feng, GONG Zi-tian-zong, LI Ping. Consolidation Simulation and Experimental Research of Pure Aluminum Powder Materials during Equal Channel Angular Pressing [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(4):24—30.
- [13] 李元元,肖志瑜,刘允中,等. 粉末短流程成形固结技术的研究及展望[J]. 中国材料进展,2011,30(7):1—9.  
LI Yuan-yuan, XIAO Zhi-yu, LIU Yun-zhong, et al. Research on Powder Metallurgy Short Process Forming and Consolidation Technique and Its Prospect [J]. Materials China, 2011, 30(7):1—9.
- [14] 刘百宣,王瑞,覃寿同,等. 基于 DeForm-3D 冷缩径过渡锥面冷整形工艺研究[J]. 精密成形工程,2015,7(1):56—60.  
LIU Bai-xuan, WANG Rui, QIN Shou-tong, et al. Cold Reshaping Process of Ironing Cone Based on DEFORM-3D [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(1):56—60.
- [15] JOO Soo-Hyun, YOON Seung-Chae, JEONG Ha-Guk, et al. Deformation Behavior of Consecutive Workpieces in Equal Channel Angular Pressing of Solid Dies[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(22):7877—7882.