

文章编号:2095-0411(2016)06-0068-05

纯铝 T 型等通道变形有限元模拟研究

魏坤霞^{1,2}, 马志俊¹, 魏 伟^{1,2}, 杜庆柏¹, 胡 静^{1,2}

(1.常州大学 材料科学与工程学院,江苏 常州 213164;2.江苏省材料表面科学与技术重点实验室,江苏 常州 213164)

摘要:对纯铝 T 型等通道变形(T-ECAP)进行了三维 DEFORM 有限元模拟分析和实验验证,研究了摩擦系数和挤压速度对载荷-位移曲线、应力应变分布的影响规律。随着摩擦系数的增加,T-ECAP 变形最大载荷增大,模拟载荷-位移曲线与实测曲线的变化趋势基本一致,分析了实测结果偏离模拟结果的可能原因。变形区的等效应力数值大于其他部位,挤压速度对变形区中的最大等效应力影响不大。等效应变主要分布在变形区和坯料底部的中心区域,且最大等效应变集中在坯料底部的中心区域。

关键词:T 型等通道变形;纯铝;有限元分析;载荷-位移;应力应变分布

中图分类号:TG 146.21;TG 379

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.06.013

Finite Element Analysis of Pure Aluminum Processed by T-Shaped Equal Channel Angular Pressing

WEI Kunxia^{1,2}, MA Zhijun¹, WEI Wei^{1,2}, DU Qingbo¹, HU Jing^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: Finite element analysis was carried out on pure Al during T-shaped equal channel angular pressing (T-ECAP) by DEFORM-3D software, and the simulation results were verified by the actual experiment. Effect of friction coefficient and pressing speed on load-displacement curves and distribution of stress and strain were investigated. With an increase of friction coefficient, the maximum load of T-ECAP increases. The variation tendency of the simulated load-displacement curves is almost consistent with the measured curves. The possible reasons were analyzed for the deviation of the measured load-displacement curves to the simulated load-displacement curves. The equivalent stress in plastic deformation zone is larger than that in the other zone. The pressing speed has little effect on the maximum equivalent stress. The equivalent strain is mainly distributed in the plastic deformation zone and the center zone in the bottom of billet. The maximum equivalent strain is in the center zone in the bottom of billet.

Key words: T-shaped equal channel angular pressing; pure Al; finite element analysis; load-displacement; distribution of stress and strain

收稿日期:2016-03-29。

基金项目:江苏省自然科学基金资助(BK20131144);江苏省研究生培养创新工程项目(苏教办研[2014]1号)。

作者简介:魏坤霞(1973—),女,河南巩义人,硕士,副教授,主要从事纳米金属材料、材料成形加工技术研究。

T型等通道挤压变形(T-shaped Equal channel angular pressing, T-ECAP)在不改变材料横截面尺寸的情况下产生剪切变形,可以有效细化晶粒,且单道次变形最大真应变1.39,从而减少挤压道次、提高工作效率^[1-2]。Mg-1.5Mn-0.3Ce合金经T-ECAP四道次热挤压后,晶粒大小由轧制态 $35\mu\text{m}$ 细化至 $2\mu\text{m}$ ^[3];ZK60镁合金四道次变形后,A路径的平均晶粒尺寸由退火态时的 $88.5\mu\text{m}$ 细化至 $2.4\mu\text{m}$,Bc路径的平均晶粒尺寸则细化至 $4.6\mu\text{m}$,但组织更均匀^[4]。在不同挤压速度下,7003铝合金挤压一道次后,晶粒均明显细化,晶粒尺寸最小为 $20\mu\text{m}$ ^[5]。一道次T-ECAP挤压变形可以将纯铝晶粒细化到 $1\mu\text{m}$ 以下,但是微观组织存在不均匀性^[6]。

国外已有学者研究了低熔点金属(如Pb-Sn合金等)的T型通道挤压变形力学、组织演变和力学性能^[1-2,7]。T-ECAP单道次变形量大,直接观察或获得变形区的应力和应变等信息比较困难,且在变形过程中存在几何非线性、物理非线性、边界条件的多边形性和几何求解精度问题等^[8]。截至目前,T-ECAP变形的三维有限元模拟研究尚未见报道。本文以纯铝作为研究对象,使用DEFORM-3D软件对T-ECAP变形过程进行三维有限元模拟分析,研究了摩擦系数、挤压速度对载荷-位移曲线、应力和应变分布规律的影响。

1 实验方法

采用Solidworks建立纯铝的三维几何模型,如图1所示。挤压速度为12、60、120mm/min和180mm/min;摩擦系数为0、0.1、0.15;坯料与模具间导热系数设定为 $11\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k}^{-1})$;模具材料选取H13钢,材料数据库中为AISI-H-13[1450~1850F(800~1000℃)],坯料为纯铝,材料数据库中为

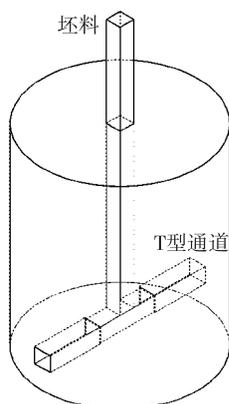


图1 三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D model

Al-1100,COLD[70F(20℃)],模拟参数见表1。

表1 模拟参数

摩擦系数	0,0.1,0.15
挤压速度/(mm/min)	12,60,120,180
导热系数/(W/(m·k ⁻¹))	11
模具材料	AISI-H-13[1450~1850F(800~1000℃)]
纯铝	Al-1100,COLD[70F(20℃)]
环境温度	20℃
网格数	5000
网格类型	四面体

将纯铝棒加工成 $12\text{mm}\times 12\text{mm}\times 80\text{mm}$,经 400°C 退火处理1h后,在YE-1000微机控制四柱式液压机上进行T-ECAP挤压。将 $12\text{mm}\times 12\text{mm}\times 80\text{mm}$ 的坯料剖分为2个 $12\text{mm}\times 6\text{mm}\times 80\text{mm}$ 试样,在一个试样的表面刻画出 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的方格,用胶水将剖分的试样粘合起来进行T-ECAP挤压,观察网格变形状况。

2 结果与讨论

2.1 载荷-位移曲线

当挤压速度为60mm/min时,不同摩擦系数对载荷-位移曲线的影响如图2所示。可以看到,随着位移的增大,变形载荷逐渐增大,达到最大载荷,然后呈下降趋势。随着摩擦系数的增加,最大载荷增大。从实测的载荷-位移曲线中可以看到,最大载荷与摩擦系数0.1时很接近,两者的载荷-位移曲线的变化趋势也一致。因此,纯铝与模具内壁的摩擦系数应接近0.1,与文献[9-10]数据吻合。

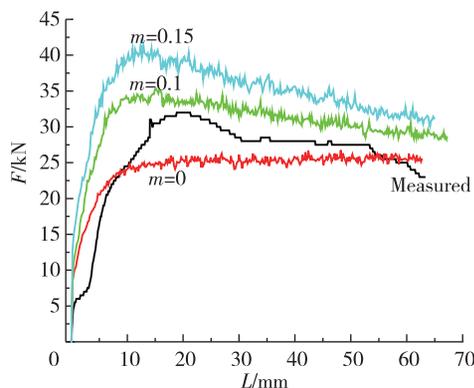


图2 摩擦系数对载荷-位移曲线的影响

Fig.2 Effect of friction factor on the load-displacement curves

在摩擦系数为0.1时,不同挤压速度对载荷-位移曲线的影响如图3所示。可以看到,12mm/min时,有限元模拟曲线与实测曲线变化趋势基本一致。

随着挤压速度的增大,在挤压初期,模拟曲线与实测曲线完全一致,位移逐渐增大后,尽管载荷-位移曲线变化趋势比较吻合,但是两者出现偏离,模拟曲线高于实测结果。正如图 2 分析结果,纯铝与模具内壁的摩擦系数接近 0.1,但是实际挤压时,坯料和模具内腔均采用 MoS₂ + 机油润滑,实际摩擦系数可

能小于 0.1,这是实际最大挤压载荷低于模拟结果的原因之一;此外,由于坯料表面与模具内壁之间被 MoS₂ 粉和机油分隔,实际的导热系数偏小,变形过程中产生的温度较高,容易发生动态再结晶的情况^[11],导致实际最大挤压力偏低。

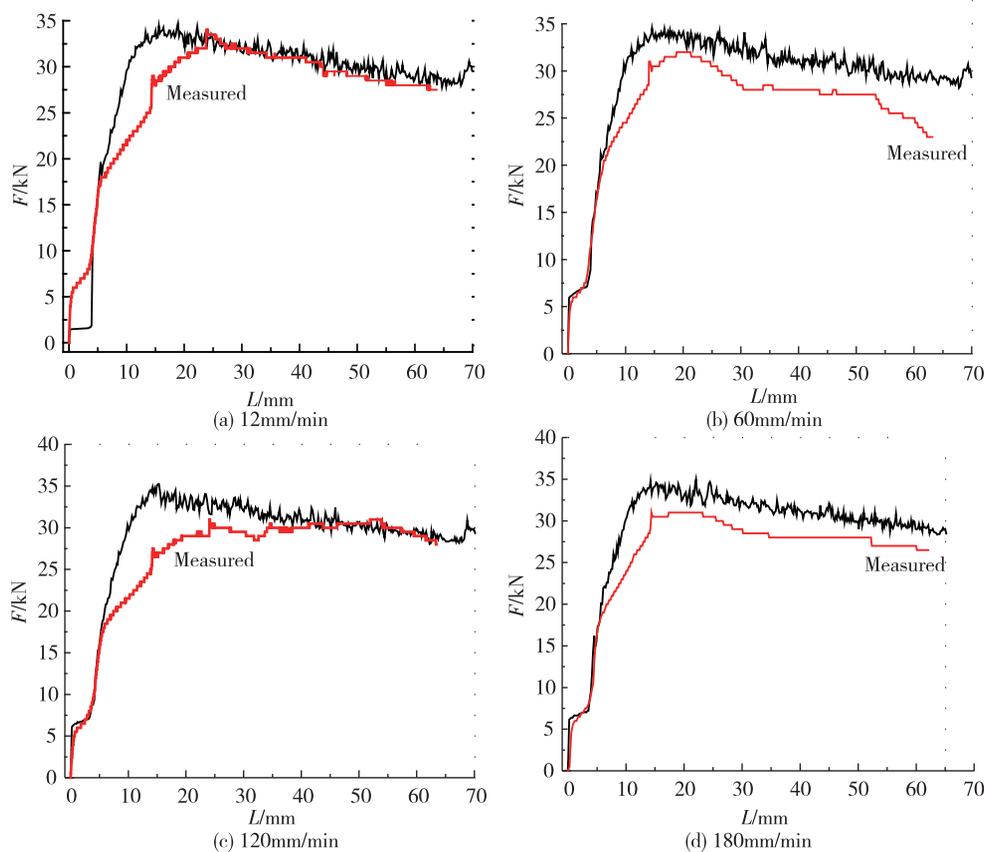


图 3 不同挤压速度下模拟结果与实测载荷-位移曲线对比

Fig.3 Comparison of load-displacement curves between FEM simulation and the measured curves

此外,对比模拟的载荷-位移曲线与实测曲线,在挤压初始阶段(0~5mm),载荷-位移曲线出现曲折。这是因为在模拟时考虑了坯料的间隙度,即坯料与模具内壁之间的距离。模具内腔为 12mm × 12mm 的方形通道,尽管坯料理论上可以加工为同样的形状和尺寸,但是考虑实际挤压时,方便试样放入模腔,坯料的实际尺寸会略小于模具内腔尺寸。图 3 中模拟挤压速度对载荷-位移曲线影响时,间隙度为 0.15mm,因此挤压初始阶段,挤压力迅速直线上升,达到材料屈服强度后,坯料开始填充模具内

腔,载荷-位移曲线呈现曲折段(0~5mm),且与实测曲线非常吻合。图 2 在研究摩擦系数对载荷-位移曲线的影响时,间隙度为 0,因此在挤压初始阶段(0~5mm),模拟的载荷-位移曲线近似为直线。

2.2 应力分布

应力是单位面积上的载荷。为了使塑性变形中的复杂应力状态能与材料单向状态下的屈服强度或抗拉(压)强度相比较,把复杂应力状态的应力值折合成单向应力状态的应力值,即等效应力 σ_e :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

式中 σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) 为变形体中一点的应力状态,包含 9 个应力分量。在摩擦系数为 0.1,间隙度

为 0.15mm 时,挤压速度对等效应力分布的影响如图 4 所示。通过分析等效应力的等高线分布,可以

看到,变形区的等效应力数值大于其他部位,并且在变形区中的最大等效应力数值基本一致,换言之之挤压速度对变形区中的最大等效应力影响不大。对比

分析,可以发现在挤压速度 60mm/min 时,等效应力的等高线分布基本都在变形区中,分布比较均匀,并且具有较好的对称性。

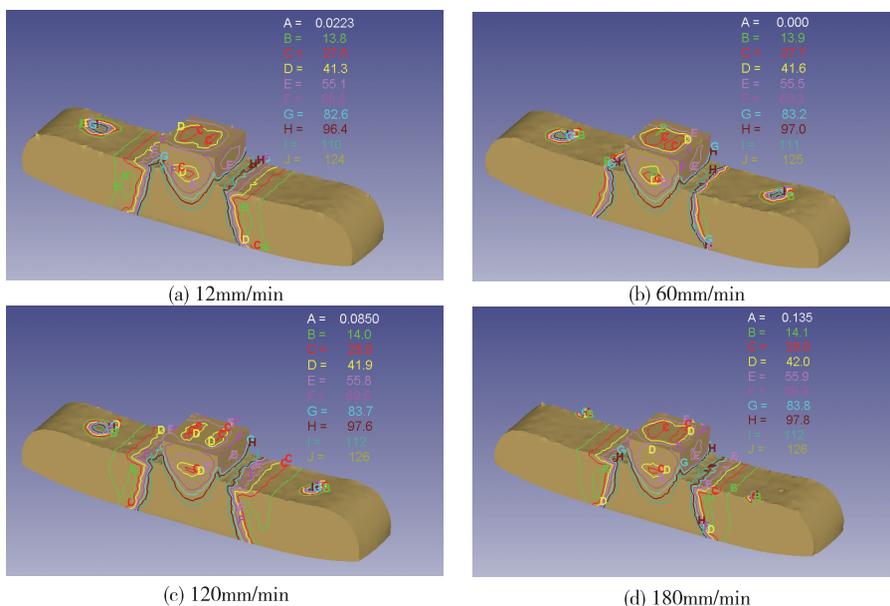


图 4 不同挤压速度下纯铝 T-ECAP 变形的等效应力分布图(第 330 步,单位:MPa)

Fig.4 Equivalent stress distribution of pure Al processed by T-ECAP with different pressing speeds

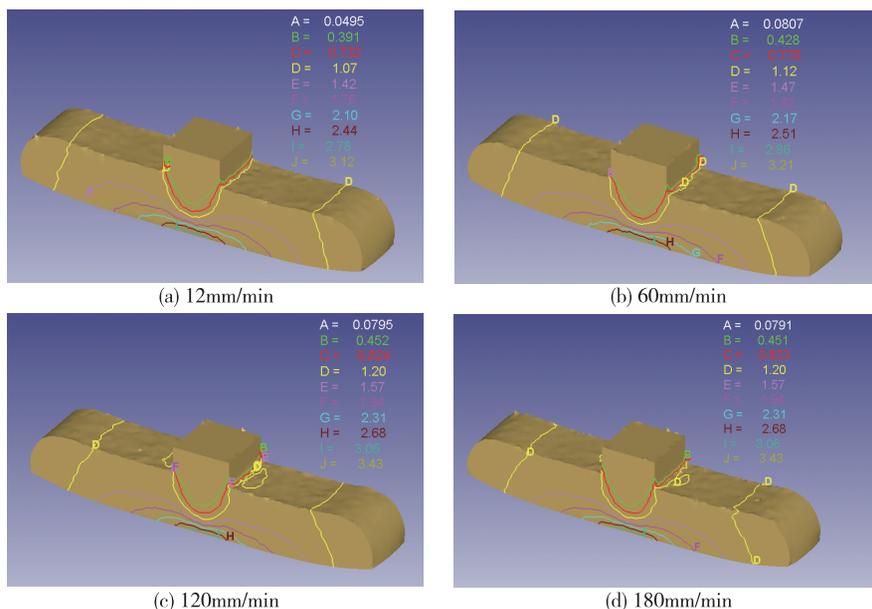


图 5 不同挤压速度下纯铝 T-ECAP 变形的等效应变分布图(第 330 步,单位:MPa)

Fig.4 Equivalent strain distribution of pure Al processed by T-ECAP with different pressing speeds

2.3 应变分布

应变属相对变形,它是由位移引起的。应变张量 ϵ_{ij} 与位移梯度 $\frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ 张量之间的关系为:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

如果物体中的位移场已知,则可由几何方程(2)求得应变场。为了使不同应变状态下的变形具备可比性,定义了等效应变 ϵ_e :

$$\epsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 6(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2)} \quad (3)$$

式中 ε_{ij} ($i, j = x, y, z$) 为变形体中一点的应变状态, 包含 9 个应变分量。在摩擦系数为 0.1, 间隙度为 0.15mm 时, 挤压速度对等效应变分布的影响如图 5 所示。通过分析等效应力的等高线分布, 可以看到, 等效应变主要分布在变形区和坯料底部的中心区域, 且最大等效应变集中在坯料底部的中心区域, 网格变形的物理模拟也表明该区域存在一个类三角形区域, 即变形死区^[12], 如图 6 所示。

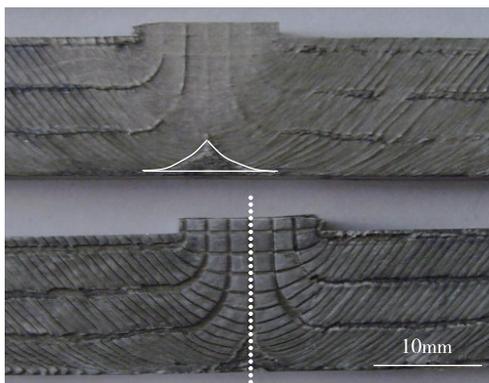


图 6 挤压速度 60mm/min 时纯铝 T-ECAP 挤压变形网格实物图

Fig.6 Experimental grids deformation of pure Al processed by T-ECAP with pressing speed of 60mm/min

图 6 为挤压速度 60mm/min 纯铝 T-ECAP 挤压时的变形网格实物图。可以看到, 在坯料底部标识的类三角形区域为变形死区, 在变形区域中, 越靠近变形死区的网格, 其剪切变形越严重, 变形量也越大; 其次, 沿试样中心, 网格变形的程度是左右对称的, 这与图 4 等效应力和图 5 等效应变的分布规律相吻合。

3 结 论

1) T-ECAP 变形最大载荷随着摩擦系数的增加而增大, 纯铝与模具内壁的摩擦系数接近 0.1。有限元模拟的载荷-位移曲线与实测曲线变化趋势基本一致, 分析了实测结果偏离模拟结果的可能原因。

2) 变形区的等效应力数值大于其他部位, 挤压速度对变形区中的最大等效应力影响不大。

3) 等效应变主要分布在变形区和坯料底部的中心区域, 且最大等效应变集中在坯料底部的中心区域。随着挤压速度的增大, 剪切变形区中的最大等效应变逐渐增大。

参考文献:

- [1] SRINIVAS R V, KASHYAP B P, PRABHU N, et al. T-shaped equi-channel angular pressing of Pb-Sn eutectic and its tensile properties [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 486: 341-349.
- [2] TALEBANPOUR B, EBRAHIMI R. Upper-bound analysis of dual equal channel lateral extrusion [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 1484-1489.
- [3] 康志新, 彭勇辉, 桑静, 等. T 型通道挤压变形 Mg-1.5Mn-0.3Ce 合金的超塑性和组织演变 [J]. *金属学报*, 2009, 45(9): 1117-1124.
- [4] 孔晶, 侯文婷, 彭勇辉, 等. T 型通道挤压变形 ZK60 镁合金的组织与力学性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(6): 1199-1204.
- [5] 姜义, 史庆南, 王璐, 等. 挤压速度对双通道等径角挤压 7003 铝合金组织的影响 [J]. *金属热处理*, 2013, 38(12): 58-61.
- [6] 魏伟, 马志俊, 魏坤霞, 等. T 型 ECAP 变形纯铝微观组织与力学性能研究 [J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2015, 27(2): 30-34.
- [7] TALEBANPOUR B, EBRAHIMI R, JANGHORBAN K. Microstructural and mechanical properties of commercially pure aluminum subjected to dual equal channel lateral extrusion [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 527: 141-145.
- [8] 赵柏森, 王怀建, 李海峰. 金属塑性成形工艺有限元数值模拟技术 [J]. *热加工工艺*, 2010, 39(4): 86-90.
- [9] Reihanian M, EBRAHIMI R, MOSHKARSAR M M. Upper-bound analysis of equal channel angular extrusion using linear and rotational velocity fields [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(1): 28-34.
- [10] JUNG J, YOON S C, JUN H J, et al. Finite element analysis of deformation homogeneity during continuous and batch type equal channel angular pressing [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, 22(11): 3222-3227.
- [11] LEE J C, SEOK H K, SUH J Y. Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing [J]. *Acta Materialia*, 2002, 50: 4005-4019.
- [12] WEI K X, LIU P, MA Z J, et al. An upper bound analysis of T-shaped equal channel angular pressing [J]. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2015, 21(1): 4-12.

(责任编辑:李艳)