

轧制驱动-ECA大应变纯铝的强化机理

卢予东, 许晓静, 陆文俊, 蒋凌, 马文海, 郭云飞, 王子路

(江苏大学 先进制造与现代装备技术工程研究院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 研究了经过轧制驱动等通道转角大应变加工的商业纯铝的强化机理。基于XRD分析和Taylor公式的定量计算说明, 轧制驱动ECA大应变CP Al的内部位错密度很低。通过晶体微区取向分析技术(EBSD)对大应变材料内部的小角度界面和大角度界面进行表征, 发现材料内部大多数是小角度晶界; 基于Hall-Petch关系对大应变纯铝的强化机理进行定量分析, 得出其强化主要来自于小角度晶界强化。

关键词: 大应变; X射线衍射仪; 晶体微区取向分析技术; 强化机理

中图分类号: TH16; TG376

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)06-1451-04

细化晶粒是目前用于提高合金强度和塑性的一种有效手段。研究表明^[1], 深度塑性变形有利于晶粒尺寸的细化。轧制驱动等通道转角大应变技术(rolling-driven equal channel angular, 简称轧制驱动-ECA)为一种新型材料增强成形技术, 首先通过轧制轮将工件轧制到设计的厚度, 然后利用轧制驱动力将轧制后的工件连续送入等通道转角模具中, 当工件经过两通道交角时, 便产生了近似于纯剪切的变形, 从而进行大应变加工并连续输出成品金属材料。该技术综合了轧制技术连续生产、驱动力大的特征与等通道转角技术剪切应变大、对晶体取向调控能力大、组织细化程度高的特征, 显著提高材料力学性能^[2]。

本实验以商业纯铝为实验材料, 研究轧制驱动大应变技术对材料晶体微区取向的影响, 并对其强化机理进行了定量分析, 以期对轧制驱动-ECA大应变加工提供科学依据。

1 实验

试验用大应变材料为商业纯 Al (CP Al)。坯料的横截面尺寸为 10 mm×4 mm、长度为 500~1000 mm, 经 520 °C/2 h 风冷热处理后进行大应变加工。大应变加工采用轧制驱动等通道转角大应变技术。坯料在室温下冷轧, 仿真模拟得出轧制驱动力为 650 000 N mm; 轧制压下量为 50%, 异步轧速比(主动轧辊: 从动轧辊)为 0.1: 0.073 (rad/s); ECAP 模具的通道尺寸为 20 mm×2 mm; 实验经有限元动态模拟计算, 得出加工全过程的有效应变约为 1.5(其中异步轧制的

等效应变为 0.78, 弯曲变形的有效应变约为 0.06, ECAP 变形的有效应变约为 0.64)。

用 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪测定衍射峰及其半高峰宽, 扫描速率为 5°/min, Cu 靶 K α 线, 波长为 0.154 05 nm。采用晶体微区取向分析技术对大应变材料小角度界面和大角度界面表征, 在配有英国牛津仪器公司开发的 EBSD 系统 FEG-SEM 型场发射枪扫描电子显微镜上进行, 软件分析系统为 HKL-Channel5。

2 实验结果

2.1 XRD 分析

如图 1 所示为轧制驱动-ECA 大应变 CP Al 的 XRD 分析谱及半高峰宽。平均 XRD 相干衍射区尺寸 d 、晶格应变 $\langle e \rangle$ 与半高峰宽 $\delta_{2\theta}$ 、各衍射峰最高峰位置 θ_0 、波长 λ 之间的关系可用 Cauchy-Gaussian 函数描述^[3]:

$$\frac{(\delta_{2\theta})^2}{\tan^2 \theta_0} = \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\delta_{2\theta}}{\tan \theta_0 \sin \theta_0} \right) + 25 \langle e^2 \rangle$$

图 2 为 $(\delta_{2\theta})^2/\tan^2 \theta_0$ 与 $\delta_{2\theta}/\tan \theta_0 \sin \theta_0$ 之间的关系。经数学线性拟合, 求解出平均 XRD 相干衍射区尺寸和晶格应变。位错密度 ρ 与 XRD 相干衍射区尺寸 d 、平均晶格应变 $\langle e^2 \rangle^{1/2}$ 之间的关系一般可用下面函数关系描述^[4]:

$$\rho = 2\sqrt{3} \langle e^2 \rangle^{1/2} / (d \times b)$$

式中, b 为柏氏矢量, 对于 Al 等于 0.286 nm^[5]。经过数据计算得出位错密度数值很小。

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(51074079); 江苏省高校科研成果产业化推进项目(JH10-37); 江苏大学“拔尖人才培养工程基金”(1211110001); 江苏省高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12-0657)

作者简介: 卢予东, 男, 1988年生, 硕士生, 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: lyd880709@163.com

这是因为，对于 CP Al 而言，钉扎大应变变形过程中位错的因素（如固溶合金元素、第二相等）很少，位错发生长距离滑移，淹没在晶界，材料内部不能有效累积位错。

2.2 EBSD 分析

图 3 和图 4 所示分别为 CP Al 经轧制和轧制驱动-ECA 大应变加工后的 EBSD 微观图 (a, b)、晶界角度 (c)、晶粒尺寸分布图 (d)。表 1 为从 EBSD 分析计算得到的平均晶粒尺寸 (\bar{l})、高及小角度晶界的分数 (f_H)、高及小角度晶界的角度平均值 ($\bar{\theta}$)。可以得出，CP Al 轧制驱动-ECA 大应变加工后，小角度晶界的百分比增大了；经大应变加工的 CP Al 中存在一定数量的大角度晶界，这是因为，对于 CP Al，钉扎大应变变形过程中位错的因素（如固溶合金元素、第二相等）很少，位错发生长距离滑移，部分晶界受到位错的集中淹没而使其晶界角度增大，变成大角度晶界，这与 XRD 分析是一致的。

2.3 强化机理分析

小角度晶界与晶粒内部位错所导致的强化与小角度晶界、晶粒内部位错之间的关系一般用下面的函数加以描述^[6,7]：

$$\sigma_{LAGB} + \sigma_p = M\alpha G[b^2\rho_0 + 3b(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}/L]^{1/2}$$

上述式中 M 、 α 、 G 、 b 分别为 Taylor 位向因子(不考虑织构时为 2.75^[8])、数值因子(0.24^[8])、剪切模量(26 GPa^[5])、柏氏矢量(0.286 nm^[5])。由 XRD 分析得出大

应变 CP Al 内部不能有效累积位错，因此位错密度 ρ_0 近似为零，晶粒内部位错几乎对强度提升没有贡献。将表 1 数据代入上述公式计算可以得出小角度晶界与晶粒内部位错导致的强化，其值列于表 2。

大角度晶界导致的强化与大角度晶界之间的关系一般用下面函数描述^[9]：

$$\sigma_{HAGB} = k_{H-P}(f/L)^{1/2}$$

将表 1 数据代入上述公式可以计算出大角度晶界导致的强化，其值列于表 3。可以看出，大应变 CP Al 大角度晶界导致的强化较低，这与观测到的 EBSD 微观图上经大应变加工的 CP Al 中存在一定数量的大角度晶界、但相对于小角度晶界就比较少这一事实相吻合。

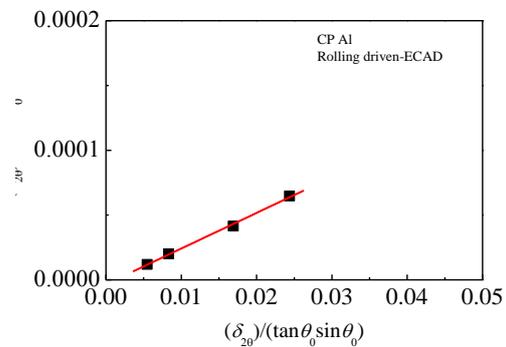


图 2 从 XRD 数据计算平均 XRD 相干衍射区尺寸和晶格应变
Fig.2 Integral breadth analysis for calculating the average crystallite size and lattice strain from XRD data

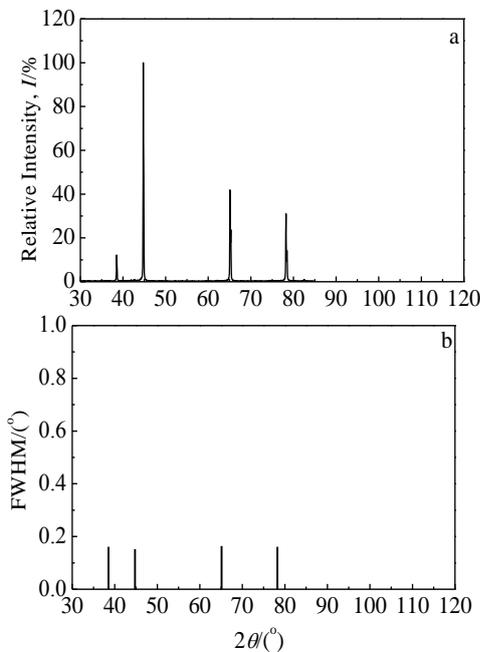


图 1 XRD 分析谱及半高峰宽

Fig.1 XRD pattern (a) and FWHM (b) for the CP Al by rolling driven ECA

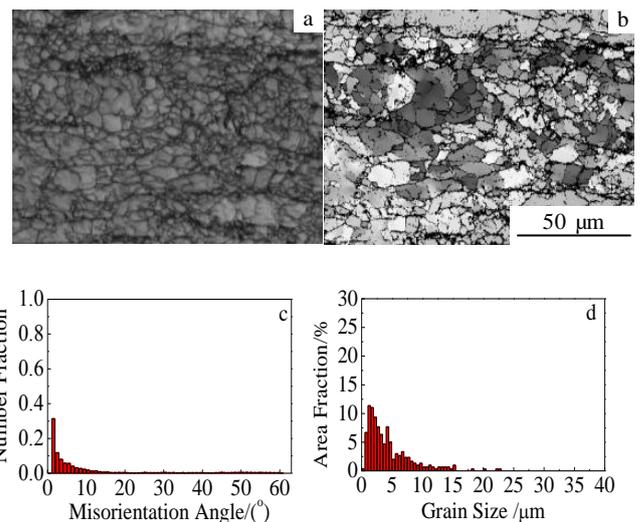


图 3 CP Al 经轧制加工后的 EBSD 微观图、晶界角度、晶粒尺寸分布图

Fig.3 EBSD microstructures (a, b) and misorientation angel (c) and grain size (d) of the CP Al after rolling

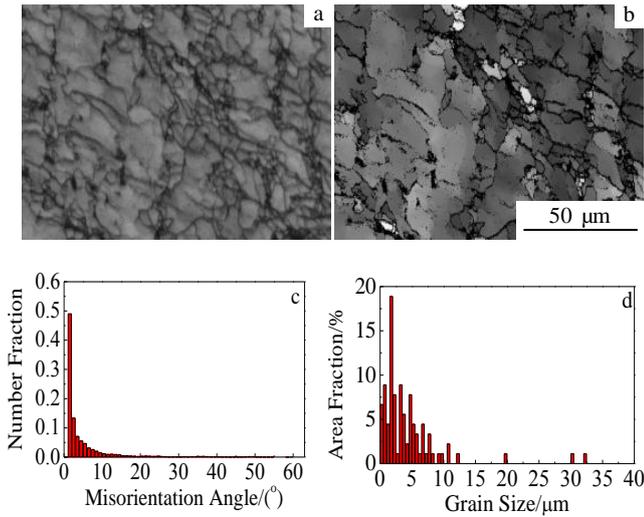


图 4 CP Al 经轧制驱动 ECA 大应变加工后的 EBSD 微观图、晶界角度、晶粒尺寸分布图

Fig.4 EBSD microstructures (a, b) and misorientation angel (c) and grain size (d) of the CP Al after rolling driven-ECA

对于 CP Al，其固溶元素很少，元素固溶导致的强化很低，此处不予以考虑。大应变 CP Al 的强度主要有晶格摩擦应力(σ_{P-N})、小角度晶界与晶粒内部位错

导致的强化($M\alpha G[b^2\rho_0 + 3b(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}/L]^{1/2}$)、大角度晶界强化 ($(k_{HP}^2 f/L)^{1/2}$) 这 3 部分组成，一般用下面函数描述^[10-12]：

$$\sigma = \sigma_{P-N} + \sigma_{SS} + M\alpha Gb[\rho_0 + \frac{3(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}}{bL}]^{1/2} + k_{HP}(\frac{f}{L})^{1/2}$$

表 4 所示为大应变 CP Al 的强化因素。拉伸试验得到的材料屈服强度为 119.95 MPa，如图 5，与理论数据的差在可考虑的误差范围之内。可以看出，对于大应变 CP Al 而言，其强化主要来自于小角度晶界与晶粒内部位错导致的强化；而由于晶粒内部位错密度很低，位错

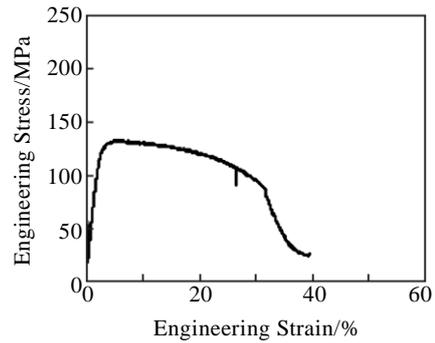


图 5 拉伸应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve in tension for the CP Al rolling driven-ECA

表 1 从 EBSD 分析计算出的平均晶粒尺寸、高及小角度晶界的分数、高及小角度晶界的角度平均值

Table 1 Average grain size, the percent of HAGBs and LAGBs, the average grain boundary of HAGBs and LAGBs calculated from EBSD data

		$\geq 15^\circ$			$\geq 1^\circ$		$1\sim 15^\circ$		
		$\bar{L}/\mu\text{m}$	f_H	$\bar{\theta}/(\circ)$	$\bar{L}/\mu\text{m}$	$\bar{\theta}/(\circ)$	$\bar{L}/\mu\text{m}$	f_L	$\bar{\theta}/(\circ)$
CP Al	Rolled	7.9	0.1870	37.8529	1.4970	10.4	0.3879	0.8129	4.0961
CP Al	Rolled-ECAPed	9.1349	0.0665	28.8993	2.1793	5.02	1.5825	0.9334	3.3210

表 2 小角度晶界导致的强化

Table 2 Strengthening contribution coming from the LAGBs

		$\bar{\theta}_{LAGB}/(\circ)$	f	$L/\mu\text{m}$	$M\alpha G[b^2\rho_0 + 3b(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}/L]^{1/2}/\text{MPa}$
CP Al	Rolled-ECAPed	3.3210	0.0665	2.1793	79.1967

表 3 大角度晶界导致的强化

Table 3 Strengthening contribution coming from the HAGBs

		f	$L/\mu\text{m}$	$(k_{HP}^2 f/L)^{1/2}/\text{MPa}$
CP Al	Rolled-ECAPed	0.0665	2.1793	6.99

表 4 大应变 CP Al 的强化因素

Table 4 Factors contributing to the strength of the large straining CP Al

		σ_{P-N}/MPa	$M\alpha G[b^2\rho_0 + 3b(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}/L]^{1/2}/\text{MPa}$	$(k^2 f/L)^{1/2}/\text{MPa}$	σ/MPa
CP Al	Rolled-ECAPed	20	79.1967	6.99	106.1867

导致的强化很小, 因此, 可以得出轧制驱动-ECA 大应变纯铝的强化主要来自于小角度晶界强化。

3 结 论

1) 基于 XRD 分析和 Taylor 公式的定量计算说明, 对于大应变 CP Al 而言, 钉扎大应变变形过程中位错的因素 (如固溶合金元素、第二相等) 很少, 位错发生距离滑移, 淹没在晶界, 材料内部不能有效累积位错, 其内部位错密度很低。

2) 基于 Hall-Petch 关系对大应变纯铝的强化机理进行定量分析得出, 由于晶粒内部位错密度很低, 位错导致的强化很小, 且大角度晶界导致的强化较低, 所以其强化主要来自于小角度晶界与晶粒内部位错导致的强化。

参考文献 References

- [1] Jin Li(靳 丽), Lin Dongliang(林栋梁), Mao Dali(毛大立) *et al. Journal of Shanghai Jiaotong University*(上海交通大学学报)[J], 2005, 39(11): 1775
- [2] Wu Shiding(吴世丁), Li Qiang(李 强), Jiang Chuanjian(姜传碱) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报) [J], 2000, 36(6):

602

- [3] Youssef K M, Scattergood R O, Murty K L *et al. Scripta Materialia*[J], 2006, 54 (2): 251
- [4] Xu Xiaojing(许晓静), Song Tao(宋 涛), Fan Zhen(范 真) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(2): 621
- [5] Korznikov A V, Safarov I M, Nazarov A A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 1996, 206 (1): 39
- [6] Luo P, McDonald D T, Xu W *et al. Scripta Materialia*[J], 2012, 66(10): 785
- [7] Luo P, McDonald D T, Xu W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 538 (15): 252
- [8] Song Tao(宋 涛), Xu Xiaojing(许晓静), Fan Zhen(范 真) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2012, 41(2): 373
- [9] Hughes D A, Hansen N. *Acta Materialia*[J], 2000, 48(2): 2985
- [10] Bowen J R, Prangnell P B, D Juul Jensen *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 387-389(15): 235
- [11] Hansen N, Huang X, Ueji R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 387-389(15): 191
- [12] Hansen N. *Scripta Materialia*[J], 2004, 51(8): 801

Strengthening Mechanism of the Large Straining CP Al Processed by Rolling Driven-ECA

Lu Yudong, Xu Xiaojing, Lu Wenjun, Jiang Ling, Ma Wenhai, Guo Yunfei, Wang Zilu

(Engineering Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The strengthening mechanism of the large straining CP Al processed by rolling driven-ECA (Equal Channel Angular) was investigated. A theoretical calculation based on XRD analysis and Taylor equation indicates that the dislocation density of the large straining CP Al by rolling driven-ECA is very low. Low angle grain boundary and high angle grain boundary were measured by a crystal micro area orientation analysis technique and the results demonstrate that the low angle grain boundary is much more. Strengthening mechanisms of the large straining CP Al were quantitatively calculated based on the Hall-Petch relationships, and it is concluded that the strengthening mainly comes from the low angle grain boundary.

Key words: large straining; XRD; EBSD; strengthening mechanism

Corresponding author: Xu Xiaojing, Professor, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Jiangsu 212013, P. R. China, E-mail: xjxu67@ujs.edu.cn