

多向压缩对 7085 铝合金挤压材组织和力学性能的影响

莫纪平, 程晓农, 邓平安, 许晓静, 吴瑶, 蒋伟

(江苏大学, 江苏 镇江 212013)

摘要: 通过对合金进行 X 射线衍射 (XRD) 及电子背散射衍射技术 (EBSD) 分析、拉伸性能测试, 研究了多向压缩对合金组织和力学性能的影响。结果表明: 多向压缩可以显著细化合金晶粒 (由 87.7 μm 降低到 17.9 μm), 晶粒细化机制主要是动态再结晶; 提高抗拉强度 110 MPa, 合金主要通过时效强化和固溶强化。

关键词: 7085 铝合金; 多向压缩; EBSD; 晶粒细化

中图分类号: TG146.2[†]

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)08-2003-04

7XXX 铝合金因密度低, 比强度高, 是现代航空航天、武器装备领域不可或缺的关键结构材料。随着航空、航天等领域的高速发展, 对高强结构铝合金性能提出了越来越高的要求, 如何进一步提高 7XXX 系高强铝合金性能一直是一个备受关注的研究热点^[1-3]。

20 世纪 90 年代以高压扭转变形 (TSHP)、等径通道转角挤压 (ECAP) 及多向压缩 (MAC) 为代表的强烈塑性变形加工技术, 为人们开辟一条提高材料性能的新路径。而 TSHP 及 ECAP 加工主要受条件及材料尺寸的影响, 还处于实验室阶段^[4]。MAC 加工具有工艺简单、成本低及可以使用现有设备制备大块致密材料改善材料性能等优点, 而成为一种提高合金强韧性能的有效手段, 应用于工业化生产。

美国铝业公司推出的航空铝合金 7085 于 2002 年在美国铝业协会公司注册, 用于生产航空器厚板, 这是一种前所未有的超纯 7XXX 系合金, 目前有关多向压缩技术对 7085 铝合金性能影响的报道还较少, 本工作在此方面进行了一些初步的探索, 以期工业上制定相关工艺提供参考数据。

1 实验

试验使用的 7085 铝合金挤压材的成分 (质量分数) 为 Al-7.95Zn-1.80Mg-1.59Cu-0.15Zr-0.024Sr。取直径为 30 mm 的 7085 铝合金挤压材棒料 25.5 mm, 强化固溶 (470 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+490\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$) 处理, 室温水淬火, 然后 400 $^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ 过时效处理。挤压材经过上述预处理后利用 30 mm \times 30 mm 的正方形模具沿棒料轴向进行热

挤压, 最终挤压成 30 mm \times 30 mm \times 20 mm 的长方体。将该长方体一分为二, 一半进行多向压缩处理。图 1 中 1 面为原挤压材横截面 (垂直于原挤压材轴线的面), 2 面 3 面为原挤压材的纵截面 (平行于原挤压材轴线的面)。在接下来的 6 道次锻造过程中, 按照图 1 所示的工艺顺序进行 6 道次压缩, 每次压缩前进行 350 $^{\circ}\text{C}/10\text{ min}$ 预热。将经过和没有经过多向压缩的合金挤压材进行强化固溶 (470 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+490\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$) 和 T76 (121 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}+153\text{ }^{\circ}\text{C}/16\text{ h}$) 时效处理, 对 2 种合金挤压材进行拉伸测试、XRD 和 EBSD 分析。拉伸性能测试参照 GB/T228-2002 标准, 在 WDW-200G 微机高温电子万能试验机上进行。合金的衍射峰和其半高峰宽在 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪上测定, 设定设备的扫描速率为 5 $^{\circ}/\text{min}$, 扫描范围为 10 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$, Cu 靶 K α 射线, 波长 (λ) 为 0.154 06 nm。在配有 Oxford Instrument HKL EBSD 设备的 Zeiss Supra 55 SEM 上对合金进行扫描。

2 结果及讨论

2.1 EBSD 分析

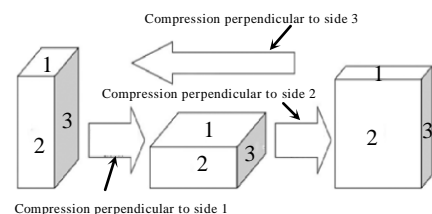


图 1 多向压缩工艺顺序

Fig.1 Order of multi-axial compression technology

收稿日期: 2014-08-21

基金项目: 江苏省工业科技支撑计划项目 (BE2008118); 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 (CXLX12-0620)

作者简介: 莫纪平, 男, 1968 年生, 博士, 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013, E-mail: JPM1968@163.com

图 2 为 7085 铝合金试样的 EBSD 图。从图 2a 中可以看出, 未经 MAC 加工的铝合金组织整体上呈流线状, 晶粒分布极不均匀且尺寸较大。而经过 MAC 处理的铝合金其晶粒明显变小, 合金基体已演变成等轴细晶粒结构。

表 1 为从 EBSD 分析计算得到的平均晶粒尺寸 (\bar{L})、高角度晶界的百分比 (Σf_H)、低角度晶界的角度平均值 ($\bar{\theta}$)。从表 1 可以看出, 较未经 MAC 加工处理 7085 型铝合金挤压材试样, 经过 MAC 加工后合金的晶粒尺寸明显减小, 从原来的 87.7 μm 下降到 17.9 μm , 下降幅度明显; 而高角度晶界所占比例却有所增加, 从 73.4% 增加到 76.6%。

多向压缩对合金晶粒的细化主要通过两种机制: 一是在压缩初期的机械式击碎细化机制, 二是在压缩中后期的动态再结晶细化机制。多向压缩刚开始时, 外部压力先将粗大晶粒击碎成细长条状晶粒, 由于试样不断的翻转, 长条状的晶粒会进一步的破碎变小, 同时会在初始晶界附近形成一些大角度亚晶界。而随着压缩道次和应变量的增加, 逐渐增大的变形储能为动态再结晶提供驱动力。7085 铝合金具有较高的层错能, 加之多向压缩过程中变形比较大, 其形核机制是亚晶转动、聚合形核^[5,6]。这会导致晶内和晶界处亚晶界位向差增大, 所以高角度晶界所占的百分比会上升, 晶界的角度平均值有所升高。与此同时, 包括在压力加工过程中被打碎的金属间化合物和在过时效时从固溶体中析出的弥散粒子等合金的第二相粒子也能为动态再结晶提供形核点, 加快再结晶速度。弥散粒子还

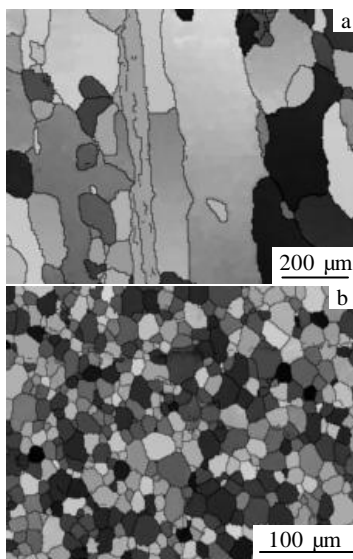


图 2 7085 铝合金试样的 EBSD 照片

Fig. 2 EBSD microstructures of 7085 (a) and 7085 MAC (b) alloy specimen

表 1 从 EBSD 分析计算得到的平均晶粒尺寸 (\bar{L})、高角度晶界的百分比 (Σf_H)、低角度晶界的角度平均值 ($\bar{\theta}$)

Table 1 Average values (\bar{L}) of grain size, percentage (Σf_H) of high-angle grain boundaries, and average values of low-angle grain boundaries ($\bar{\theta}$) from EBSD

Alloy	\bar{L}	Σf_H	$\bar{\theta}$
7085-3	87.67464	0.734	1.96635
7085-3 MAC J6	17.87114	0.766	3.95726

能有效地钉扎晶界而限制晶粒的长大, 细化再结晶晶粒的尺寸。

2.2 XRD 分析

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)、Cu $K\alpha$ 射线波长 (λ) 之间的关系, 一般用下面函数描述^[7]:

$$\frac{(\delta 2\theta)^2}{\tan^2 \theta_0} = \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\delta 2\theta}{\tan \theta_0 \sin \theta_0} \right) + 25 \langle e^2 \rangle \quad (1)$$

图 3 是经过 MAC 加工后试样的 3 个面的 XRD 分析谱和半高峰宽图。图 4 为经 MAC J6 加工并强化固溶 T76 时效处理后 7085 铝合金 $(\delta 2\theta)^2 / \tan^2 \theta_0$ 与 $\delta 2\theta / (\tan \theta_0 \sin \theta_0)$ 之间的关系。通过线性回归, 计算出 XRD 相干衍射区尺寸和晶格应变, 其结果列于表 2。位错密度 (ρ) 与 XRD 相干衍射区尺寸 (d)、平均晶格应变 ($\langle e^2 \rangle^{1/2}$) 之间的关系可以用如下函数描述^[7]:

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

式中, b 为柏氏矢量, 对于 Al, 值为 0.286 nm。通过上式可以计算出 7085 型铝合金的位错密度, 其值列于表 2。位错对强度的贡献 (σ_p) 与位错密度 (ρ) 之间的关系一般可用 Taylor 函数关系描述为:

$$\sigma_p = M \alpha G b \rho^{1/2} \quad (3)$$

式中, M 、 α 、 G 、 b 分别为 Taylor 位向因子 (不考虑织构时为 3.06)、数值因子 (0.24)、剪切模量 (26 GPa) 和柏氏矢量。

从表 2 可以看出, 经过 MAC 加工强化固溶 T76 时效处理 7085 铝合金位错对强度的贡献较低, 这有可能是由于强化固溶的固溶温度较高且保温时间较长, 而经 MAC 处理后内部的位错较多, 造成合金再结晶驱动力加大, 使位错大量被消耗掉。其中 7085-3 MAC J6-1 及 2 面为零, 这主要是由于其值过小造成。

2.3 拉伸测试

从表中 3 可以看出经 MAC 6 道次加工的 7085 铝合金挤压材的抗拉强度较未经 MAC 加工的合金, 抗拉强度提高了 110 MPa, 提高了近 18.5%, 提高幅度

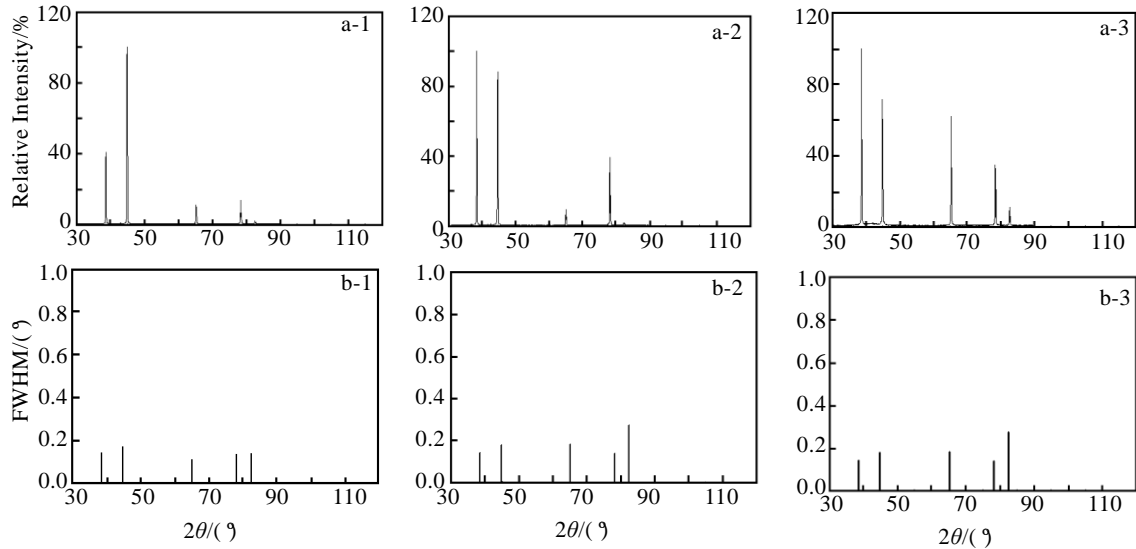


图 3 7085 MAC 铝合金试样 XRD 分析谱和半高峰宽

Fig.3 XRD patterns (a) and FWHM (b) of 7085 MAC alloy (1, 2, 3 indicate three planes of plane 1, plane 2, plane 3 in Fig.1)

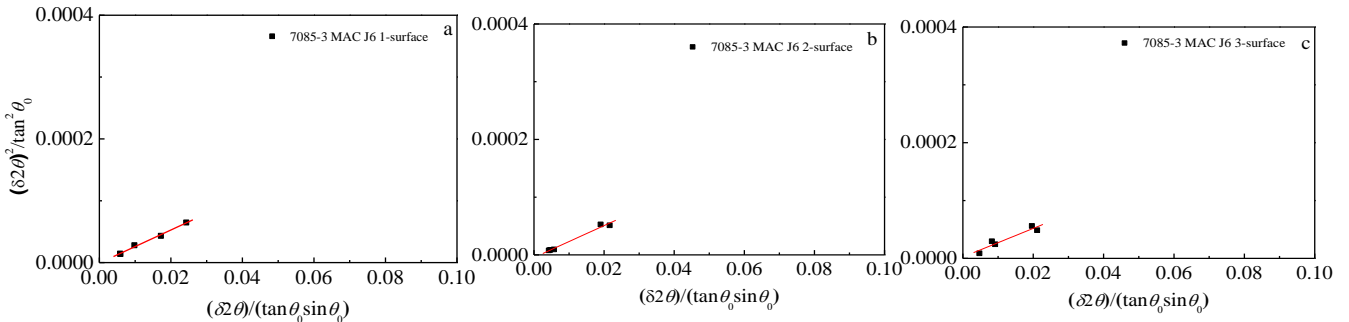


图 4 从 7085-3 MAC J6 的 XRD 数据计算的 XRD 相干衍射区尺寸和晶格应变

Fig.4 Integral breadth analysis to calculate average crystallite size and lattice strain from XRD data for 7085-3 MAC J6 on three planes: (a) plane 1, (b) plane 2, and (c) plane 3

表 2 从 7085-3 MAC J6 的 XRD 数据计算出的一些微观结构与力学性能的特征参数

Table 2 Some microstructural and mechanical features calculated parameters from XRD data for 7085-3 MAC J6 on three planes

Parameters	Plane 1	Plane 2	Plane 3
d_{Ave}/nm	77.70	75.82	82.37
$\langle e^2 \rangle^{1/2}/\%$	0	0	0.03108
$\rho/\times 10^{14} m^{-2}$	0	0	0.6036
σ_p/MPa	0	0	4.243

Note: d_{Ave} -average grain size; e -lattice strain; ρ -dislocation density; σ_p -dislocation contribution to the strength

明显，伸长率提高了 11.3%，MAC 加工大幅度提高了合金的拉伸性能。

合金的屈服强度构成可以用下面的公式^[8-9]表示：

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + \sigma_p + \sigma_{LAGB} + \sigma_{HAGB} + \sigma_{ss} + \sigma_t \quad (4)$$

其中， σ_0 为晶格摩擦应力（同种材料其值相同），

表 3 7085 铝合金的拉伸性能

Table 3 Tensile properties of 7085-3 and 7085-3 MAC J6 alloys

Alloy	Tensile strength/MPa	Elongation/%
7085-3	594.80	10.60
7085-3 MAC J6	704.83	11.80

晶粒内部位错强化， σ_{LAGB} 为低角度晶界强化， σ_{HAGB} 为高角度晶界强化， σ_{ss} 为固溶强化以及 σ_t 为时效强化。主要讨论 σ_p 、 σ_{LAGB} 及 σ_{HAGB} 对合金性能的影响，可以用下面公式进行表示^[8-9]：

$$\sigma_{LAGB} + \sigma_p = M\alpha G(b^2\rho_0 + 3b(1-f)\bar{\theta}_{LAGB}/L)^{1/2} \quad (5)$$

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

式中， M 、 α 、 G 、 b 分别为 Taylor 位向因子（不考虑织构时为 3.06）、数值因子（0.24）、剪切模量（26 GPa）和柏氏矢量（0.286 nm）。考虑到表 2 中计算的结果，计算中位错强化对合金的强度的贡献不大，计算中位

错密度为 0。将表 1 中的相关数据代入上述公式，得到表 4。

从表中可发现，7085 铝合金经 MAC 加工后低角度晶界、高角度晶界对屈服强度的贡献值分别达到 16.8、8.3 MPa，比未经 MAC 加工的相应值提高了 11.1、4.6 MPa。晶界强化对合金屈服强度的贡献合计只有 15.7 MPa，相对于 MAC 加工后合金的抗拉强度提高了 110 MPa，说明 MAC 加工对合金的强化机制主要是固溶强化和时效强化。MAC 加工能促使未溶及难溶化合物破碎溶解，使析出相原子回溶到基体中去，增加了合金固溶时的固溶度，提高了合金的时效沉淀强化效果，大幅提高了合金的强度。由于 MAC 加工可改善铝合金在铸造过程中的缩松、收缩裂纹等缺陷，极大的细化晶粒，同时提高晶粒的等轴化程度，使得晶界滑移更容易在再结晶晶粒之间开动和协调，变形阻力减小^[10]，合金可承受的塑性变形量增加，因而伸长率也相应提高了 11.3%，但是比抗拉强度 18.5% 的提高幅度要略低，这可能是析出在晶界间起钉扎作用的 Al_3Sc 、 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 等第二相粒子造成的。

表 4 7085 型铝合金晶界强化

Table 4 Grain boundaries strengthening of 7085 type aluminum alloy

Alloy	$\sigma_{\text{LAGB}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{HAGB}}/\text{MPa}$
7085-3	5.709194	3.659601
7085-3 MAC J6	16.82042	8.281295

3 结 论

1) MAC 加工可以显著细化合金的晶粒，晶粒的尺寸从 87.7 μm 下降到 17.9 μm ，晶粒细化机制主要是机械击碎和动态再结晶。

2) 较未经 MAC 加工合金相比，经 MAC 加工 7085 合金的抗拉强度提高 110 MPa，伸长率提高了 11.3%。

3) 位错强化及晶界强化对经 MAC 加工强化固溶 T76 时效 7085 型铝合金挤压材强度的贡献较小，主要强化机制为固溶沉淀强化。

参考文献 References

- [1] Yuuji Kimura, Setsuo Takaki. *Material Japan*[J], 1997, 36(11): 1062
- [2] Ning Xinglong(宁兴龙). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2001, 30(5): 330
- [3] Zhao Zhilong(赵志龙), Zhang Hainan(张海南). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2000, 29(5): 304
- [4] Zhang Tingjie(张廷杰), Zhang Xiaoming(张小明), Tian Feng(田锋) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2001, 30(5): 335
- [5] Cui Zhongqi(崔忠圻). *Metallurgy and Heat-Treat*(金属学与热处理)[M]. Beijing: China Machine Press, 1991
- [6] Li Huizhong(李慧中), Zhang Yonghong(张永红). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(2): 110
- [7] Xu Xiaojing(许晓静), Zhang Xuefeng(张雪峰), Cao Jinqi(曹进琪) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(S2): 395
- [8] Marcello Cabibbo. *Materials Science & Engineer A*[J], 2013, 560: 413
- [9] Luo P, McDonald D T, Xu W et al. *Scripta Materialia*[J], 2012, 66: 785
- [10] Jian Weiwei(简炜炜), Kang Zhixin(康志新), Li Yuanyuan(李元元). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2008, 18(6): 1005

Effect of Multi-axial Compression on Microstructure and Mechanical Properties of 7085 Aluminum Alloy Extrusions

Mo Jiping, Cheng Xiaonong, Deng Ping'an, Xu Xiaojing, Wu Yao, Jiang Wei
(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The effect of multi-axial compression on microstructure and mechanical properties of 7085 aluminum alloy extrusions was investigated by X-ray diffraction (XRD), electron back-scattered diffraction (EBSD) and tensile test. The results show that multi-axial compression could refine the grain size (from 87.7 μm to 17.9 μm) with the grain refinement mechanism of dynamic recrystallization, increase the tensile strength by 110 MPa which is primarily attributed to solution strengthening and aging strengthening.

Key words: 7085 aluminum alloy; multi-axial compression; EBSD; grains refinement

Corresponding author: Mo Jiping, Ph. D., School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China, Tel: 0086-511-88792058, E-mail: JPM1968@163.com