



## 轴肩倾角对摩擦搅拌加工铝合金表层 细晶结构的影响

杨 濂, 袁鸽成, 郭海斌, 林凌峰

(广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006)

**摘要:** 在轴肩倾角分别为 $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $4^\circ$ 的条件下, 对6082-T4铝合金板材进行摩擦搅拌加工(FSP); 借助光学显微镜(OM)、透射电子显微镜(TEM)、X射线衍射仪(XRD)、电子背散射衍射技术(EBSD)等测试手段, 研究了FSP轴肩倾角对板材表层晶粒和第二相形貌与分布以及晶体取向的影响规律。结果表明: 所有FSP加工样品表层均呈现均匀分布的超细等轴晶及近球状第二相粒子形貌。且随轴肩倾角 $\theta$ 的减小, 表层晶粒平均尺寸略微下降并可细化至 $3.10\ \mu\text{m}$ , 第二相粒子平均尺寸无明显变化并均可细化至 $0.30\ \mu\text{m}$ 以下, 该层晶体的剪切织构 $E\{111\}\langle 110\rangle$ 和 $F\{111\}\langle 112\rangle$ 的强度增加。这种带有较强E、F剪切织构的超细等轴晶结构的形成与FSP加工特有的强剪切形变及动态再结晶行为相关。

**关键词:** 轴肩倾角; 搅拌摩擦加工; 铝合金板材; 表层结构

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2243-08

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

**引文格式:** 杨 濂, 袁鸽成, 郭海斌, 等. 轴肩倾角对摩擦搅拌加工铝合金表层细晶结构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2243–2250. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42393

YANG Lian, YUAN Ge-cheng, GUO Hai-bing, et al. Effect of shoulder tilt angle on surface fine grain structure of aluminum alloy by friction stir processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2243–2250.

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42393

不对称轧制、等径角挤压及表面喷丸等剧烈塑性变形方法(Severe plastic deformation, SPD)是细化金属材料组织并优化性能的有效手段<sup>[1-5]</sup>。与上述加工模式相比, 先进的摩擦搅拌加工(Friction stir processing, FSP)一方面依靠其轴肩高速旋转的周向剪切及其前进方向的顶锻剪切形变使材料发生剧烈塑性流动, 另一方面通过加工过程中强烈的形变及摩擦热效应使加工区温度达到再结晶温度, 或许是引入强剪切形变及动态再结晶而改善材料微结构更有效的途径。以往的研究表明, FSP加工可在被加工材料轴肩作用的表层(Shoulder affected layer, SAL)以及搅拌中心区(Stir center zone, SCZ)形成细

等轴晶结构<sup>[6-8]</sup>。如图1所示, 该细晶结构在厚度方向几乎可贯穿整个材料, 其中, 表层细晶结构厚度可达2~3 mm。这种细等轴晶的晶粒形貌和尺寸无疑受控于加工过程中剪切形变程度与热效应。而在FSP加工的众多因素中, 轴肩倾角是影响剪切形变程度和热效应的重要因素之一<sup>[9-11]</sup>。近年, ZHANG等<sup>[12]</sup>研究轴肩倾角对热效应及材料流动行为的影响, 也证实了上述观点。然而, 目前有关FSP加工材料微结构的研究报道大多集中在搅拌加工不同区域的晶粒形貌的对比, 而对表层晶粒及第二相尺寸影响因素及其形成过程的研究报道较为少见, 尤其是轴肩倾角对表层晶粒尺寸和晶体取向的研究还鲜

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2017A010103018); 广东省自然科学基金资助项目(2014A030313518)

收稿日期: 2021-09-23; 修订日期: 2021-11-22

通信作者: 袁鸽成, 教授, 博士; 电话: 13310898435; E-mail: gchyuan@gdut.edu.cn

见报道。因此,本文以6082铝合金板材为研究对象,研究轴肩倾角对FSP加工铝合金板材表层晶粒和第二相特征及其晶体取向的影响规律,旨在为FSP加工铝合金材料微结构的改善及性能的优化提供研究基础。

## 1 实验

实验材料为工业生产的6 mm厚6082-T4铝合金热轧薄板。FSP加工倾角多为 $3^\circ$ ,加工条件为:转速950 r/min,加工速度300 mm/min,下压量0.5 mm,轴肩倾角分别为 $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $4^\circ$ 。加工区横截面宏观形貌特征如图1所示(AS为前进侧,RS为后退侧;ND为法方向,TD为横向),加工后在铝合金板材表层的轴肩作用层(SAL)部位采用线切割方法切取试样若干,经磨抛及覆膜处理制得金相试样,经磨制及电解抛光制得晶体取向测试试

样,经磨制及电解双喷制得透射电镜测试样品。采用光学显微镜OM观察板材晶粒形貌。利用透射电子显微镜(TEM)观察第二相、位错及晶界特征。通过带有EDAX探头的FEI-Sirion 200场发射扫描电子显微镜(SEM)采集EBSD数据。借助图像分析软件Image Pro Plus分析OM下晶粒尺寸和TEM下第二相粒子尺寸,通过EBSD取向成像分析软件(OIM)分析晶粒度及大小角度晶界分布。采用Bruker D8 Discover型X射线衍射仪测定合金宏观组织。

## 2 实验结果

### 2.1 表层晶粒及第二相特征

不同倾角下FSP加工前后板材横截面SAL层晶粒形貌及晶粒尺寸分布分别如图2和3所示。如图2(a)所示,原始板材(BM)晶粒均沿轧制方向产生伸

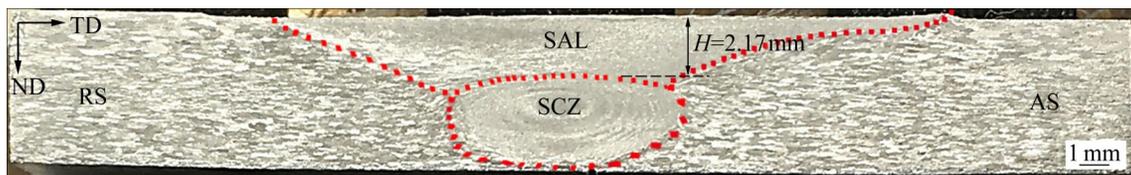


图1 加工区横截面宏观形貌特征

Fig. 1 Macroscopic morphology characteristics of machining area cross section

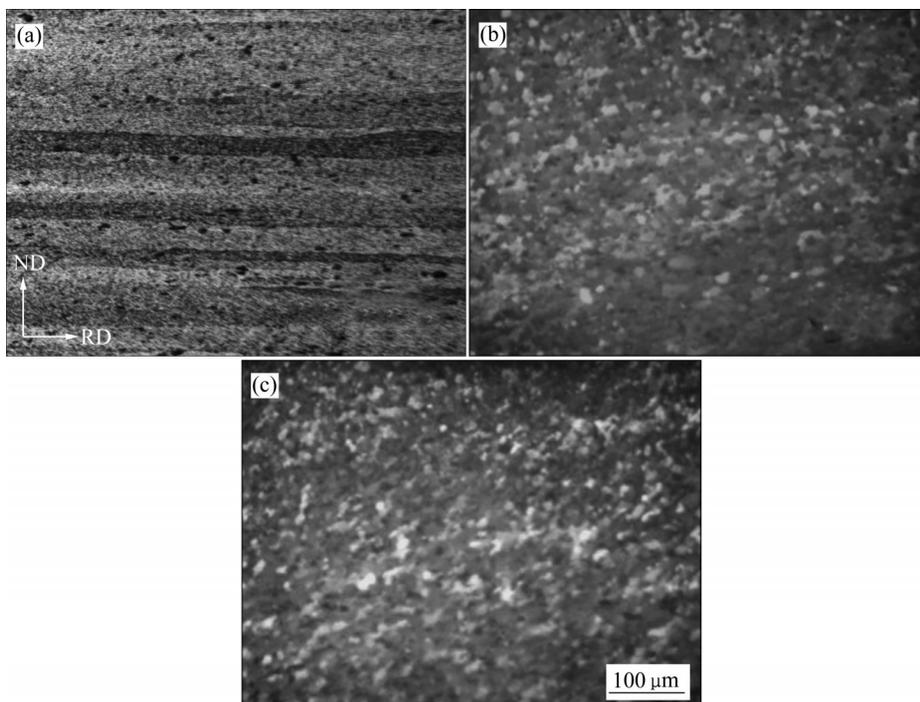


图2 轴肩作用层晶粒形貌OM像

Fig. 2 OM images of SAL grain morphologies: (a) BM; (b)  $1^\circ$ ; (c)  $3^\circ$

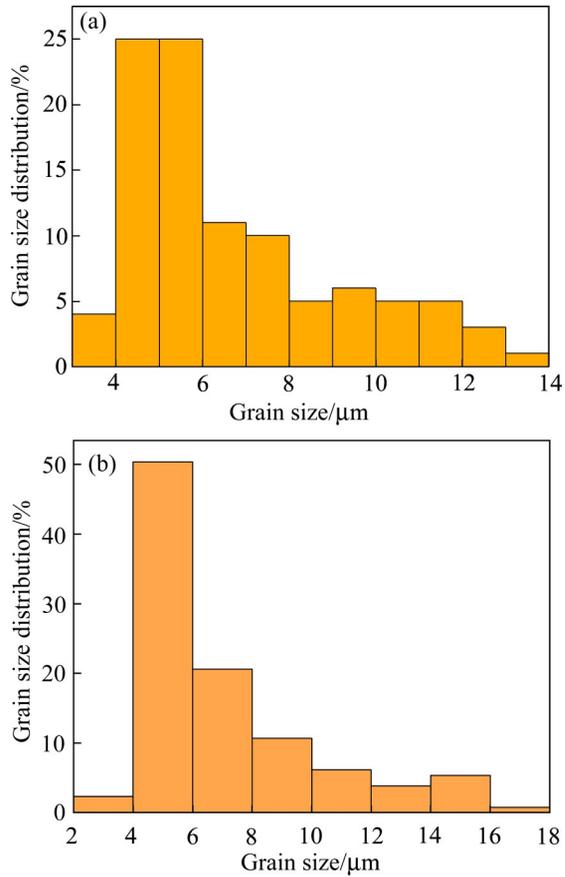


图3 轴肩作用层晶粒尺寸分布  
**Fig. 3** Grain size distribution of shoulder affected layer: (a) 1°; (b) 3°

长变形, 呈长条带状形貌, 图中ND和RD分别为板材法向及轧向。板材经不同倾角FSP加工后的SAL层晶粒形貌如图2(b)和(c)所示, 均形成明显均匀分布地细等轴晶组织; 随着倾角降低, SAL层平均晶粒尺寸从7.10 μm降至6.64 μm, 略有增大的趋势。这是由于FSP加工过程中高速旋转的搅拌头使板材发生强剪切形变, 使基体晶粒发生变形、破碎, 同时晶粒受到摩擦热和变形热产生的高温作用, 发生回复与动态再结晶, 形成细小均匀的晶粒。

图4所示为板材轴肩作用层的TEM像, BM第二相尺寸具有较大差异, 不同程度的位错在晶界和第二相附近聚集形成位错墙, 不利于材料发生塑性变形时的晶体滑移。不同倾角下FSP加工后, 第二相形状及尺寸无明显差异, 第二相粒子平均尺寸可细化至0.30 μm以下, 位错密度降低。这是由于轴肩作用层(SAL)在FSP加工过程经历了高温以及大

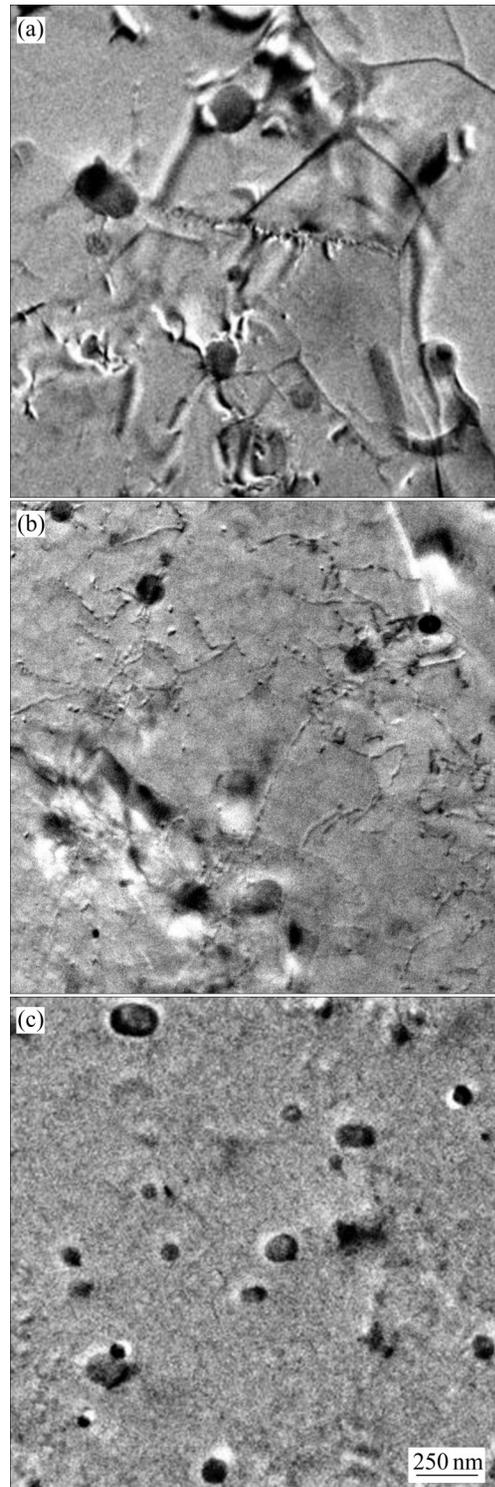


图4 轴肩作用层TEM像  
**Fig. 4** TEM images of FSP shoulder affected layer with different tilt angles: (a) BM; (b) 1°; (c) 3°

塑性变形, 第二相粒子被搅拌轴肩剧烈搅拌发生细化, 从短棒状变为近球状; 同时, SAL处发生动态再结晶, 位错发生攀移与交滑移, 异号位错相互抵消, 使位错密度下降。

## 2.2 表层动态再结晶行为

上述不同倾角下加工样品的OM分析结果表明, SAL层晶粒尺寸随轴肩倾角降低而减小, 且幅度并非十分显著。因此, 本实验仅任意选择了一种倾角为 $3^\circ$ 下的FSP加工样品进行EBSD测试, 更精确地分析晶粒尺寸及形貌, 并观察其再结晶行为, 其结果如图5所示。图5(a)和(b)所示分别为原始板材表层和倾角为 $3^\circ$ 的FSP加工板材SAL层晶粒形貌及大小角度晶分布图, 图中黑线代表大角度晶界(HAGB:  $>15^\circ$ ), 白线代表小角度晶界(LAGB:  $2^\circ\sim 15^\circ$ )。图6和7所示分别为对应图5的SAL层晶粒尺寸分布及其小角度晶界比例图。结合分析图6

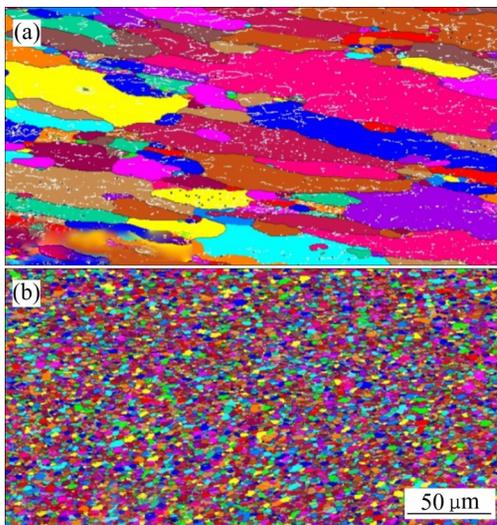


图5 FSP加工前后表层晶粒形貌及晶界分布的EBSD图  
Fig. 5 EBSD diagrams of surface grain morphology and grain boundary distribution before and after FSP: (a) Surface layer of BM; (b) SAL of processed plates

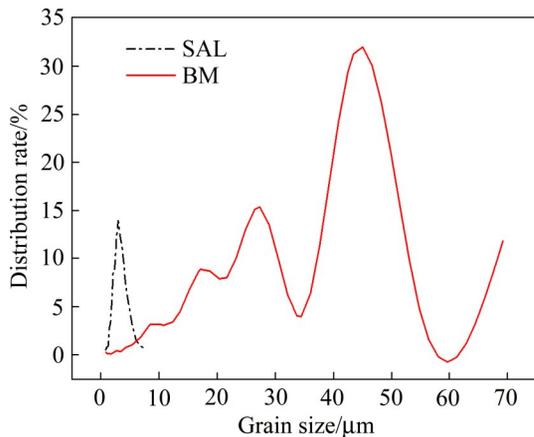


图6 FSP加工前后表层晶粒尺寸分布图  
Fig. 6 Grain size distribution of surface layer before and after FSP

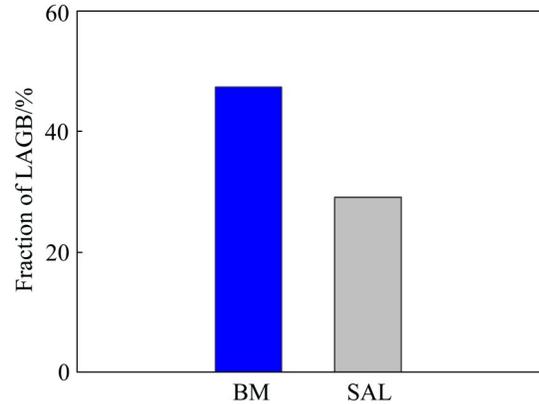


图7 表层小角度晶界比例图  
Fig. 7 LAGB fraction of surface layer

和7可知, 图5(a)所示的BM表层晶粒较粗大且分布不均, 呈现典型的热轧带状组织形貌, 平均晶粒度为 $35.58\ \mu\text{m}$ ; 晶粒内存在大量小角度晶界, 含量为47.38%。图5(b)所示的FSP加工后SAL层平均晶粒度为 $3.10\ \mu\text{m}$ , 属于典型的超细晶组织, 与OM分析结果相比细化程度更高。此外, 整体来看, SAL层小角度晶界含量为29.1%, 其密度比BM低, 部分晶粒内部没有小角度晶界。这表明, 在轴肩周向和纵向剪切作用下, 晶粒破碎和位错的滑移及相互作用使得板材产生较多的亚晶界。这些亚晶组织由于动态再结晶(DRX)的发生形成大角度晶界, 使得SAL层小角度晶界含量相对减少而大角度晶界比例相对提高。这一现象进一步表明, FSP加工板材发生了典型的DRX行为, 从而大幅细化表层晶粒; WANG等<sup>[13]</sup>和ZHAI等<sup>[14]</sup>的研究结果也证实了这一点。然而, 再结晶晶粒形貌和尺寸无疑受加工过程中的变形程度及热传输的影响, 而倾角只是影响这一热传输过程的因素之一。从上述所有倾角下的OM细晶形貌和代表性的 $3^\circ$ 倾角下的EBSD晶粒形貌可以推断, 在 $0^\circ\sim 4^\circ$ 倾角下SAL层均可发生明显的再结晶行为而生成超细晶(晶粒尺寸小于 $5\ \mu\text{m}$ ); 可是必须指出, 在其他较低倾角下FSP加工能否获得更为细小的超细晶组织仍有待进一步研究。

## 2.3 表层晶体取向特征

图8所示为板材表层织构极图, 图9所示为板材表层取向函数分布截面图( $\varphi_2=45^\circ$ )。由图8可知, BM表层再结晶织构强度较高, 同时也含有少量

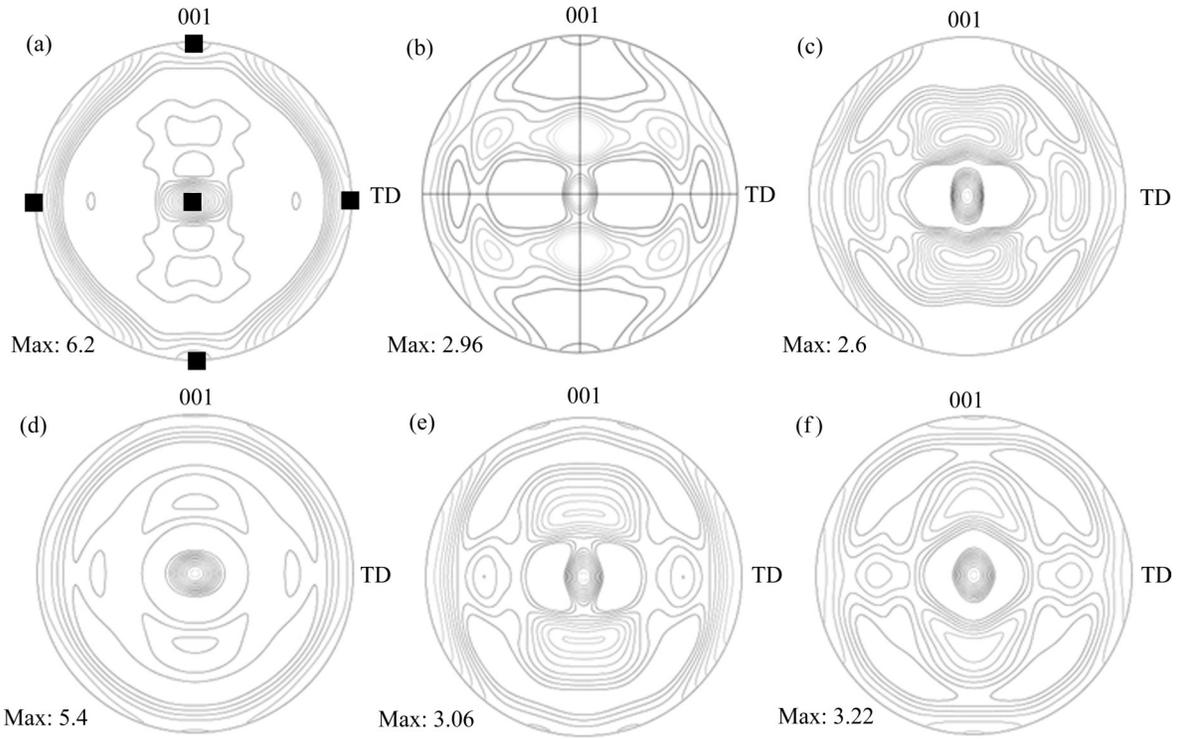


图8 板材轴肩作用层极图

Fig. 8 Pole diagrams of shoulder affected layer on sheet (■ Cube{001}<100>): (a) BM; (b) 0°; (c) 1°; (d) 2°; (e) 3°; (f) 4°

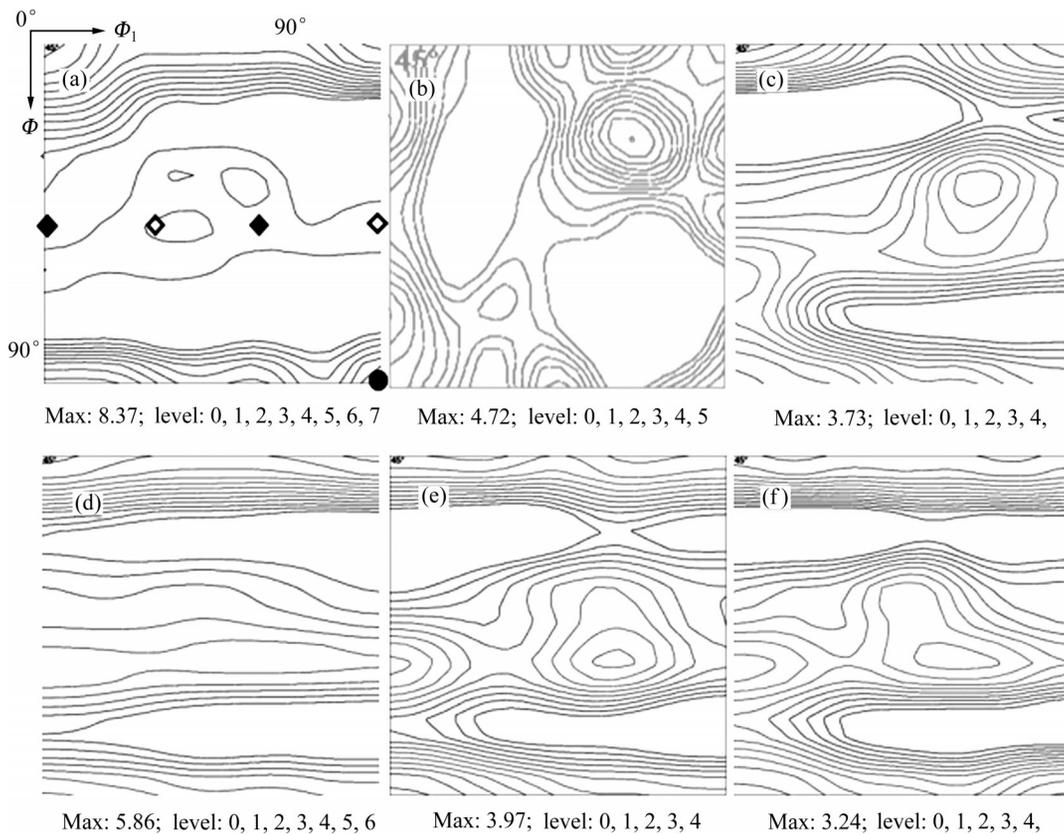


图9 板材轴肩作用层ODF截面图

Fig. 9 ODF cross section diagrams of shoulder affected layer on sheet ( $\phi_2=45^\circ$ , ◆ E{111}<110>, ◇ F{111}<112>, ● Goss{110}<001>): (a) BM; (b) 0°; (c) 1°; (d) 2°; (e) 3°; (f) 4°

E{111}<110>、F{111}<112>剪切织构,这主要由原始板材在热轧过程中的高温与轧辊的剪切作用所致。经FSP加工后,高速旋转的轴肩向板材表层引入剧烈剪切变形,同时伴随着轴肩与板材间的摩擦热以及材料的变形热,使板材表层晶体取向发生较大变化。随着轴肩倾角减小,板材表层剪切织构强度均发生不同程度降低,且倾角为 $0^\circ$ 时对应的E、F剪切织构强度最高(分别为3.75和4.36);而再结晶织构Cube{001}<100>和Goss{110}<001>强度不断降低(最大值分别为3.20和3.77)。

### 3 分析与讨论

如前所述,热输入对板材表层微结构的演变有着重要的影响。FSP加工的热输入较为复杂,影响因素较多。目前,对于FSP过程中的热输入问题,已有部分学者提出相关模型,对热输入和温度进行准确地预测较为困难,至今仍没有模型可准确地预测倾角引起对热输入的影响<sup>[13,15]</sup>。总的来说,FSP加工的热输入主要源于摩擦热和变形热。HEURTIER等<sup>[15-16]</sup>提出了热输入量的计算公式(1)和(2):

$$Q_s = \frac{2\pi}{3} \mu p \omega R_s^3 \quad (1)$$

$$Q_p = 2\pi R_p h k \tau \frac{V_p}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: $Q_s$ 和 $Q_p$ 分别为轴肩和搅拌针热输入量; $\mu$ 为摩擦因数; $p$ 为轴向压力; $\omega$ 为搅拌角速度; $R_s$ 和 $R_p$ 为轴肩半径和搅拌针半径; $h$ 为工件厚度; $\tau$ 为材料的平均剪切应力; $k$ 为导热系数。在实验倾角范围内,搅拌针均完全插入铝板中,可认为它对铝板造成的摩擦热及变形热基本相同,即 $Q_p$ 一致。因此,不同倾角下热输入的变化主要源于 $Q_s$ 。由于 $R_s$ 、 $\mu$ 、 $\omega$ 不随着倾角改变而发生变化,因此决定 $Q_s$ 的关键参数为轴向压力 $p$ 。如图10所示,轴向压力 $p$ 可分解为正压力 $p_z$ 及水平力 $p_y$ :

$$p = \frac{p_z}{\cos \theta} \quad (3)$$

在实验倾角范围内,若保持轴肩下压量恒定,正压力 $p_z$ 需保持不变。根据式(4),随轴肩倾角 $\theta$ 减小,轴向压力 $p$ 降低;进而由式(1)可知,热输入量 $Q$ 减少,从而温度下降,不利于再结晶晶粒生长。这与本文板材表层平均晶粒尺寸随倾角降低略微细化的研究结果相吻合。

板材表层不仅受到平行于FD方向的剪切作用,而且还受到旋转轴肩的周向剪切作用,因此该层金属的剪切形变相当复杂。在上述两种剪切作用的共同影响下,等轴晶粒持续偏转,其{111}密排面趋向于平行剪切面,形成不同晶向的{111}面剪切织构<sup>[17-18]</sup>。然而,此处表层金属的晶体取向不仅与材料剪切形变有关,还受控于前述FSP强烈的热效应

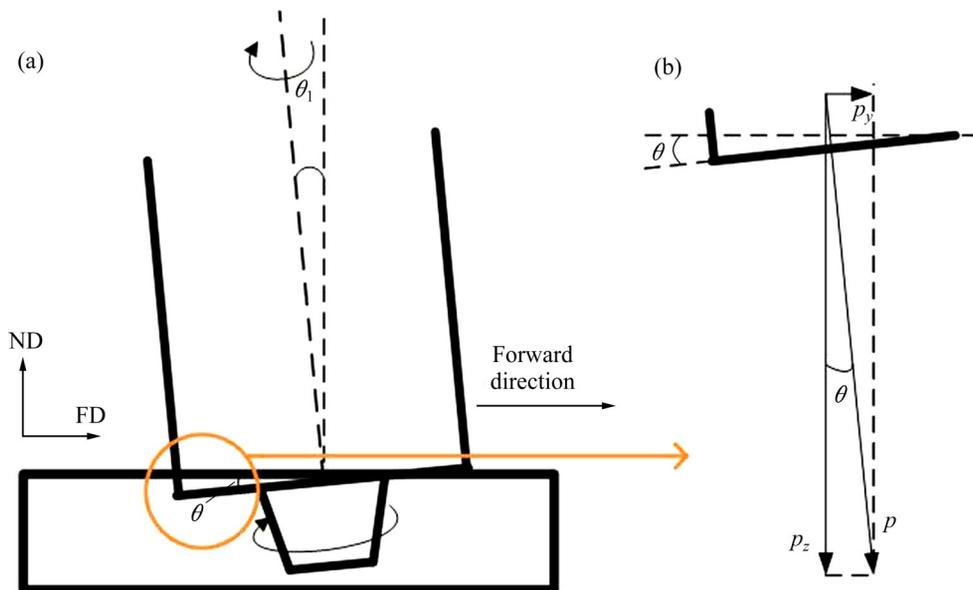


图10 FSP加工示意图及受力分析

Fig. 10 Schematic diagrams of FSP processing and stress analysis: (a) Machining process; (b) Stress analysis

造成的再结晶行为。如前所述, 随着倾角降低,  $p$  减小, 热输入量  $Q$  下降, 不利于再结晶织构形成, 因而上述剪切织构强度相对增加。

## 4 结论

1) FSP 加工过程中, 板材发生回复与动态再结晶, 轴向作用层形成均匀分布的超细等轴晶及第二相粒子。随轴肩倾角减小, 加工板材表层晶粒尺寸略微下降。平均晶粒尺寸、第二相粒子尺寸分别可细化至  $3.10\ \mu\text{m}$  和  $0.30\ \mu\text{m}$ 。

2) FSP 加工后, 板材表层 E、F 剪切织构强度增加。随着轴肩倾角  $\theta$  减小, 由于热输入量  $Q$  下降, 不利于再结晶织构形成, 再结晶织构强度降低, E、F 剪切织构强度提高。

## REFERENCES

- [1] 杜红, 袁鸽成, 丁灿培, 等. 微量 Zr 对不对称轧制 Al-0.8Mg-0.9Si 合金板织构及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1860-1866.  
DU Hong, YUAN Ge-cheng, DING Can-pei, et al. Effects of trace Zr on the solid solution texture and properties of Al-0.8Mg-0.9Si alloy sheets by asymmetrical rolling[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 1860-1866.
- [2] FENG Long-biao, YUAN Ge-cheng, LI Xiao-hui, et al. Grain refinement and texture evolution of Mg-1Zn-1Gd alloy in equal channel angular pressing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(10): 3325-3331.
- [3] 王晓溪, 张翔, 张磊, 等. 工业纯铝等通道球形转角挤压数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1360-1366.  
WANG Xiao-xi, ZHANG Xiang, ZHANG Lei, et al. Numerical simulation and experimental investigation of commercially pure aluminum during equal channel angular extrusion with spherical cavity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1360-1366.
- [4] ZHAN Ke, ZHANG Ya-long, BAO Lei, et al. Surface characteristic and wear resistance of QT-700-2 nodular cast iron after laser quenching combing with shot peening treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 423: 127589.
- [5] ALYANI A, KAZEMINEZHAD M. Annealing behavior of aluminum after low-temperature severe plastic deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 824: 121810.
- [6] DENG Qing-chen, WU Yu-juan, SU Ning, et al. Influence of friction stir processing and aging heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Mg-Gd-Zr alloy[J]. Additive Manufacturing, 2021, 44: 102036.
- [7] LI S, LUAN B F, LIAO Z N, et al. Effect of friction stir processing and subsequent annealing on microstructure and mechanical properties of a metastable  $\beta$ -Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 822: 141660.
- [8] ALI L F, KUPPUSWAMY N, SOUNDARARAJAN R, et al. Microstructural and wear behaviour of Al 6063-W nanocomposites developed using friction stir processing[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(12): 5462-5473.
- [9] VIGNESHKUMAR M, PADMANABAN G, BALASUBRAMANIAN V. Influence of tool tilt angle on the formation of friction stir processing zone in cast magnesium alloy ZK60/SiC<sub>p</sub> surface composites[J]. Metallography, Microstructure, and Analysis, 2019, 8(1): 58-66.
- [10] MOHAMMED M H, SUBHI A D. Exploring the influence of process parameters on the properties of SiC/A380 Al alloy surface composite fabricated by friction stir processing[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2021, 24(5): 1272-1280.
- [11] SHANMUGANATAN S P, KIRAN M B, JOHN J. Effect of input parameters on friction stir processing of AA2014-T6 using response surface methodology[J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2019, 14(1): 78-96.
- [12] ZHANG Wen-jing, LIU Hui-hong, DING Hua, et al. Grain refinement and superplastic flow in friction stir processed Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 901-911.
- [13] WANG Jian, WANG Xiao-wei, LI Bo, et al. Interface repairing for AA5083/T2 copper explosive composite plate by friction stir processing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(9): 2585-2596.
- [14] ZHAI Ming, WU Chuan-song, SU Hao. Influence of tool tilt angle on heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 98-112.
- [15] MORADI M M, JAMSHIDI A H, JAMAATI R, et al. Effect of SiC nanoparticles on the microstructure and texture of friction stir welded AA2024/AA6061[J]. Materials Characterization, 2019, 152: 169-179.

- [16] HEURTIER P, JONES M, DESRAYAUD C, et al. Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 171(3) : 348-357.
- [17] SONG M, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(6) : 605-615.
- [18] 许峰, 杨莉, 熊义峰, 等. 搅拌摩擦加工 Al-Pb 表面复合材料的微结构和织构[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(3): 957-962.
- XU Feng, YANG Li, XIONG Yi-feng, et al. Microstructure and texture of Al-Pb surface composites fabricated by friction stir processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 957-962.
- [19] 袁鸽成, 梁春朗, 刘洪, 等. 搅拌摩擦焊焊接 5083 铝合金板材焊核区的晶体取向[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 79-82, 117.
- YUAN Ge-cheng, LIANG Chun-lang, LIU Hong, et al. Crystal orientation in nugget zone of friction stir welded 5083 aluminum alloy plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 79-82, 117.

## Effect of shoulder tilt angle on surface fine grain structure of aluminum alloy by friction stir processing

YANG Lian, YUAN Ge-cheng, GUO Hai-bing, LIN Ling-feng

(Faculty of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The friction stirring processing (FSP) was performed on 6082-T4 aluminum alloy sheets at shoulder tilt angles of  $0^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  and  $4^\circ$ , respectively. By means of optical microscope (OM), transmission electron microscope (TEM), X-ray diffraction (XRD) and electron backscattering diffraction (EBSD), the effects of FSP shoulder tilt angle on the morphology and distribution characteristics of grains and the second phase, as well as the crystal orientation in the plate surface were analyzed. The results show that the surface morphologies of all FSP processed samples exhibit uniform distribution of ultrafine equiaxed crystals and second-phase particles. The average surface grain size decreases slightly and can be refined to  $3.10\ \mu\text{m}$  with the decrease of tilt angle, while the average particle size of the second phase has no significant change and can be refined to less than  $0.30\ \mu\text{m}$ . and the strengths of the shear textures E and F of the layer increase. The formation of ultrafine equiaxed crystal structure with strong E and F shear texture is related to the strong shear deformation and dynamic recrystallization behavior characteristic of FSP processing.

**Key words:** shoulder tilt angle; friction stir process; aluminum alloy sheet; surface microstructure

**Foundation item:** Project(2017A010103018) supported by the Science and Technology Project in Guangdong Province, China; Project(2014A030313518) supported by Natural Science Foundation in Guangdong Province, China

**Received date:** 2021-09-23; **Accepted date:** 2021-11-22

**Corresponding author:** YUAN Ge-cheng; Tel: +86-13310898435; E-mail: gchyuan@gdut.edu.cn

(编辑 李艳红)