



多道搭接 FSP6061 铝合金的组织与性能

刘 强^{1,2}, 王 淼¹, 张亚雄¹, 刘满平^{1,2}

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013;

2. 江苏大学 江苏省高端结构材料重点实验室, 镇江 212013)

摘 要: 采用 50% 搭接率不同冷却方式的多道搭接搅拌摩擦加工技术, 对厚度为 4 mm 的 6061 铝合金板材进行改性加工。通过拉伸试验、维氏硬度试验、晶间腐蚀试验、金相显微镜、扫描电镜和透射电镜等分析加工区域材料的力学性能、晶间腐蚀性能和显微组织。结果表明: 多道次水冷搅拌摩擦加工晶粒细化最显著, 得到超细晶组织; 相比于空冷搅拌摩擦加工, 水冷可明显减小加工区的软化程度; 在满足力学性能的基础上, 母材经多道次水冷搅拌摩擦加工后, 耐晶间腐蚀性能有了显著提高。

关键词: 6061 铝合金; 搅拌摩擦加工; 再结晶; 力学性能; 晶间腐蚀

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Microstructure and properties of 6061 aluminium alloy processed by multi-pass friction stir process

LIU Qiang^{1,2}, WANG Miao¹, ZHANG Ya-xiong¹, LIU Man-ping^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of High-end Structural Materials, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The 6061 aluminium alloy was modified by multi-pass friction stir process (FSP) by different cooling methods at overlapping percentage of 50%. The mechanical properties, intergranular corrosion behavior and microstructure of processed zone were investigated by tensile test, vickers hardness test, intergranular corrosion test, optical microscopy, SEM and TEM observation. The results show that grain refinement is the most effective by multi-pass FSP by water cooling and the ultrafine-grained microstructure is obtained. Comparing to FSP with air cooling, water cooling can significantly reduce softening degree in stirred zones. On the basis of ensuring mechanical properties, the resistance of intergranular corrosion is better by multi-pass FSP with water cooling.

Key words: 6061 aluminium alloy; friction stir process; recrystallization; mechanical property; intergranular corrosion

超细晶金属材料作为“21 世纪的新材料”, 因其具有细小的晶粒、独特的结构和良好的力学性能而受到材料科学界的广泛关注^[1]。采用大塑性变形 (SPD) 加工金属材料被证明是得到超细晶 (UFG) 材料的有效方法^[2-3]。搅拌摩擦加工 (Friction stir processing, FSP) 是一种基于搅拌摩擦焊 (由美国密苏里大学的 Mishra 教授于 1999 年提出^[4-5]) 原理发展而来的大塑性变形

新技术, 它是利用高速旋转的搅拌头与加工材料发生扭转、摩擦等作用, 促使搅拌区经历剧烈的塑性变形, 发生动态再结晶, 实现微观结构的致密化、均匀化和晶粒细化^[6-8], 从而改善材料的表面性能。

以往关于搅拌摩擦加工的研究主要集中在单道次或在同一道次位置重复多次加工, 这样仅能制备宽度为搅拌针直径大小的细晶材料, 制约了其应用。近年

基金项目: 江苏省材料摩擦学重点实验室基金资助项目 (Kjsmex2011004); 江苏大学高级人才基金资助项目 (11JDG140); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012715)

收稿日期: 2014-12-28; 修订日期: 2014-05-12

通信作者: 刘 强, 教授, 博士; 电话: 13952861392; E-mail: lq88611338@163.com

来,因多道搭接搅拌摩擦加工(Multi-pass FSP)能够获得大范围组织和性能均匀的细晶材料^[9-11],而受到人们广泛关注。HOFMANN 等^[12]对 6061 铝合金水下多道搭接 FSP 加工后的材料进行透射电镜分析,观察到核心区晶粒尺寸约 200 nm,并证实水冷的 FSP 晶粒比空冷的更细小,但他们并未做相关的力学及腐蚀性能测试;PRADEEP 等^[13]对 5086 铝板进行多道搭接 FSP,分析了从开始到结束不同加工区域的组织和性能,结果显示不同加工区性能没有明显差异,重叠区组织和性能均匀,但他们并未对加工区与母材的性能作对比分析;AL-FADHALAH 等^[14]发现 6063 铝合金经多道搭接 FSP 加工后,重叠区域晶粒细化显著,其硬度不及母材,通过后期热处理,硬度略有回升,但该研究没能很好地解释重叠区硬度下降与晶粒细化的矛盾,以及后期热处理对重叠区硬度提升的原因。

多道搭接 FSP 涉及热量的循环累积,对材料组织、性能影响比单次 FSP 要复杂,不同道次和冷却方式对搅拌摩擦加工材料的影响尚未进行系统全面的研究^[15-16]。基于此,本文作者采用不同冷却方式的多道搭接 FSP,将轧制 6061-T6 铝合金板加工成大块细晶材料,以研究 FSP 前后 6061 铝合金组织结构变化对力学与腐蚀性能影响的机理。

1 实验

将厚度为 4 mm 的轧制态 6061 铝合金板切割成 300 mm × 150 mm × 4 mm 的试样,把切割试样 540 固溶 2 h 后立即水淬,然后在 170 °C 的烘箱中进行 3 h 时效,以此 T6 态的 6061 铝合金板样作为 FSP 加工母材。

FSP 在 FSW-3LM-002 型搅拌摩擦焊机上进行,搅拌头尺寸为轴肩直径 16 mm,搅拌针直径 4 mm、长 3.8 mm。FSP 过程中控制轴肩压入工件表面深度为 0.1 mm,旋转速度为 1000 r/min,行进速度为 100 mm/min,用水管喷水对加工区域进行强制冷却。多道次加工以焊机主轴为基准平行于前道次行走方向加工,相邻道次中心间距为 2 mm,使前后道次搅拌区有 50%的重叠。试验选取了 4 组不同冷却条件下单道次和多道次加工的试样,并对其进行显微组织和性能研究。具体试样状态如表 1 所示。

将 FSP 试样用线切割机沿加工方向横向截取 20 mm × 8 mm × 4 mm 的金相试样,磨平抛光,用 keller 试剂(1% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO₃ + 95% H₂O(体积分数))侵蚀后,用 Leica DM 2500M 金相显微镜进行

表 1 各试样加工条件

Table 1 Processing conditions of different samples

Sample No.	Processing method	Cooling medium
1	Single-pass FSP	Air
2	Multi-pass FSP	Air
3	Single-pass FSP	Water
4	Multi-pass FSP	Water

观察。用 JSM-7001F 型扫描电镜观察试样表面形貌。

TEM 试样经机械减薄至 50 μm,在 33%硝酸+67%甲醇(体积分数)的电解液中双喷减薄后,在 JEM-2100(HR)上观察。

从加工区横截面的中心线起,向两边每隔 1 mm 处测试一点显微硬度。所用显微硬度计为 HV-1000 型,载荷为 1 N,加载时间为 10 s。

拉伸实验在 WDW-10 微机控制式电子万能试验机上进行,拉伸速率为 0.1 mm/s,载荷为 10 kN。拉伸试样是在加工核心区切割选取,分别从平行和垂直于加工方向取样,如图 1(a)所示,试样尺寸如图 1(b)所示。

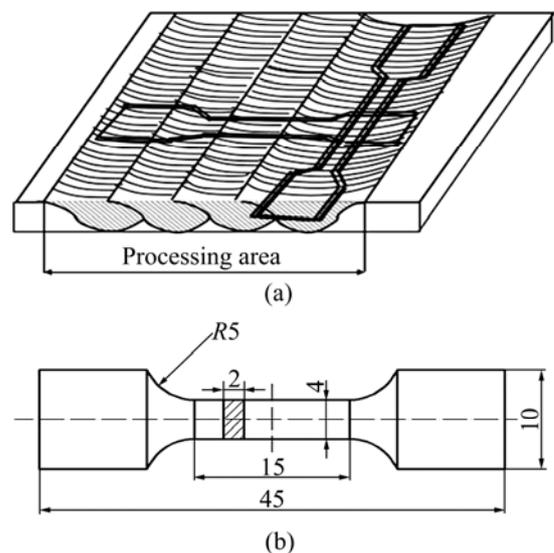


图 1 拉伸试样的示意图

Fig. 1 Schematic illustration of tensile specimen (Unit: mm): (a) Sampling method; (b) Dimension of tensile specimen

晶间腐蚀按 GB7998—87 标准进行。将试样清洗后,在 3% NaCl(质量分数)+10 mL/L HCl 腐蚀溶液中浸泡 24 h,温度保持在(35 ± 2) °C;将腐蚀试样剖开取截面抛光,用金相显微镜观察截面的晶间腐蚀形貌并测量腐蚀深度。

2 结果与分析

2.1 加工区宏观形貌

图 2(a)所示为试样 3 的表面形貌,可见加工试样表面有孔洞缺陷,这是由于水冷 FSP 过程中温度下降过快,以致前进侧金属未能被来自后退侧的塑性金属及时填充,而导致此区内金属量减少,最终在此处留下孔洞^[17]。图 2(b)所示为试样 3 的横截面形貌,图中清晰可见单道次加工区轮廓线,加工区由于受到剧烈

的塑性变形,其晶粒组织与析出相已发生转变。图 2(c)所示为试样 4 的表面形貌,试样是经过前后道次 50% 的重叠加工而成,加工表面平整光亮,无飞边缺陷产生。图 2(d)为试样 4 的横截面形貌,图中清晰可见前后道次重叠留下的界线,没有发现明显的缺陷。后道次加工可以在一定程度上弥补前一道次加工时留下的缺陷,可以看出,试样 4 的加工质量较好。

2.2 微观组织

图 3(a)和(b)所示分别为母材 6061-T4 和 6061-T6 铝合金的金相组织。由图 3(a)和(b)可以看出,母材晶

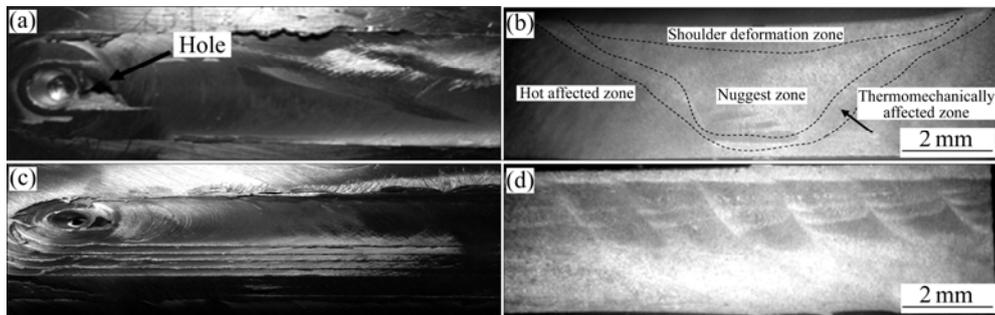


图 2 试样加工区宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of samples: (a) Surface morphology, sample 3; (b) Sectional morphology, sample 3; (c) Surface morphology, sample 4; (d) Sectional morphology, sample 4

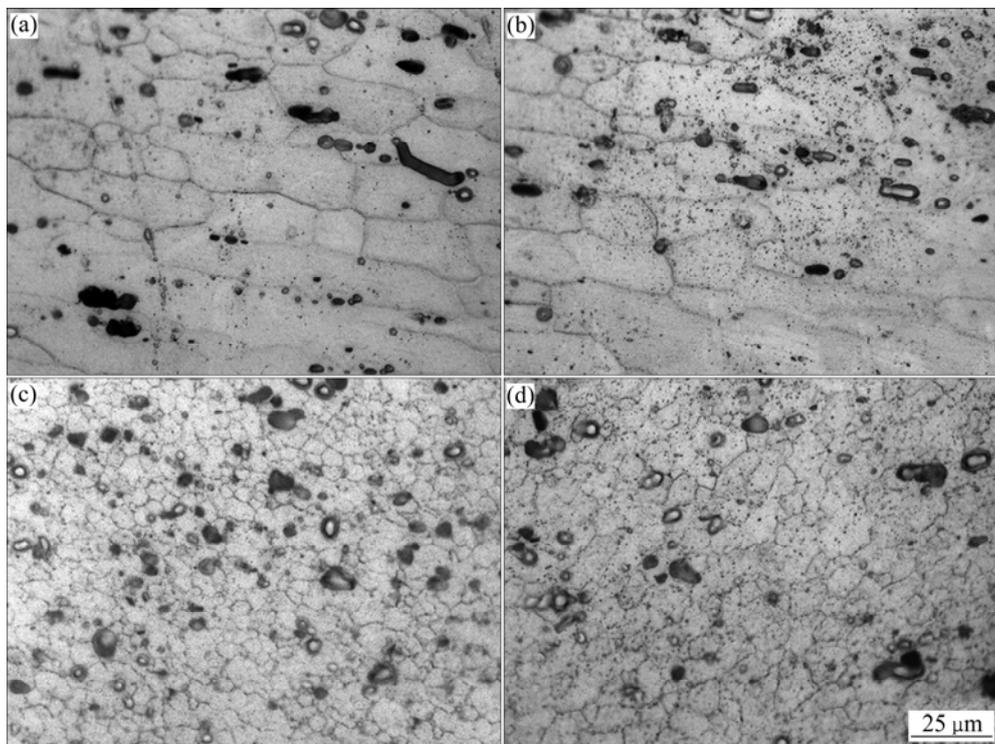


图 3 不同试样的金相组织形貌

Fig. 3 Optical microstructures of different samples: (a) 6061-T4 aluminium alloy; (b) 6061-T6 aluminium alloy; (c) Nugget zone of sample 1; (d) Nugget zone of sample 3

粒沿着轧制方向呈明显的长条状结构^[18]。T4 态母材第二相数量不多, 分布较稀疏; 经 T6 峰时效处理的 6061 铝合金存在着数量较多、密度较大的颗粒相。

图 3(c)和(d)所示分别为试样 1 和 3 的核区金相组织。相比于 T6 峰时效的 6061 铝合金母材, 核区晶粒已经明显细化成等轴的再结晶组织, 且这两组试样核区晶粒平均直径都只有约 10 μm , 说明水冷跟空冷条件下的单道次 FSP, 其核区晶粒大小差异不大。但试样 1 和 3 由于加工过程的冷却方式不同, 两者的第二相存在不同程度的变化。试样 1 由于在空冷状态下,

FSP 热累积作用对第二相的长大粗化作用更加显著。另外, 由于材料加工过程的温度由室温迅速上升至 450 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 而发生部分第二相的重新溶解。而试样 3 在强制水冷条件下, FSP 会降低热累积作用, 从而减少第二相的溶解、粗化倾向, 尽可能保持 T6 状态的弥散析出第二相的情况^[19]。

图 4(a)和(b)所示分别是 6061-T6 铝合金的 SEM 像及对应的第二相 EDS 能谱, 这些黑色的细小颗粒相为 Mg_2Si , 它们可作为强化相提高其力学性能。

图 5(a)和(b)所示分别为低倍率下试样 2 和 4 的多

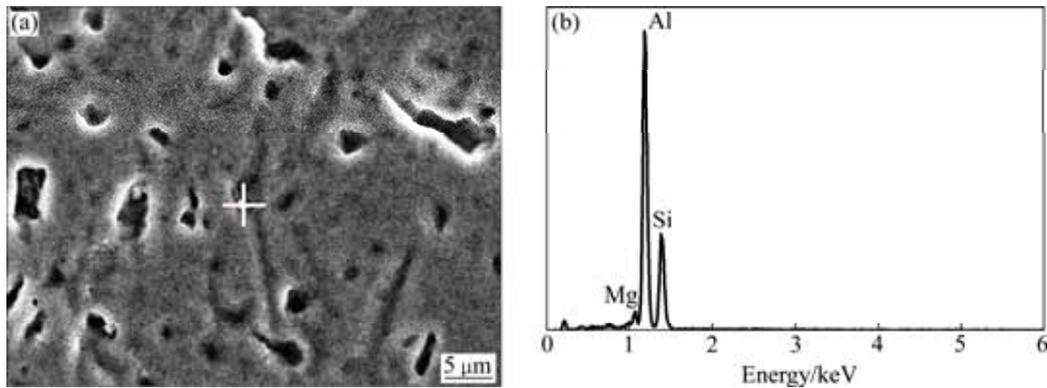


图 4 6061-T6 铝合金的 SEM 像及第二相颗粒的 EDS 能谱分析

Fig. 4 SEM image of 6061-T6 aluminum alloy (a) and EDS analyses of second phase particles (b)

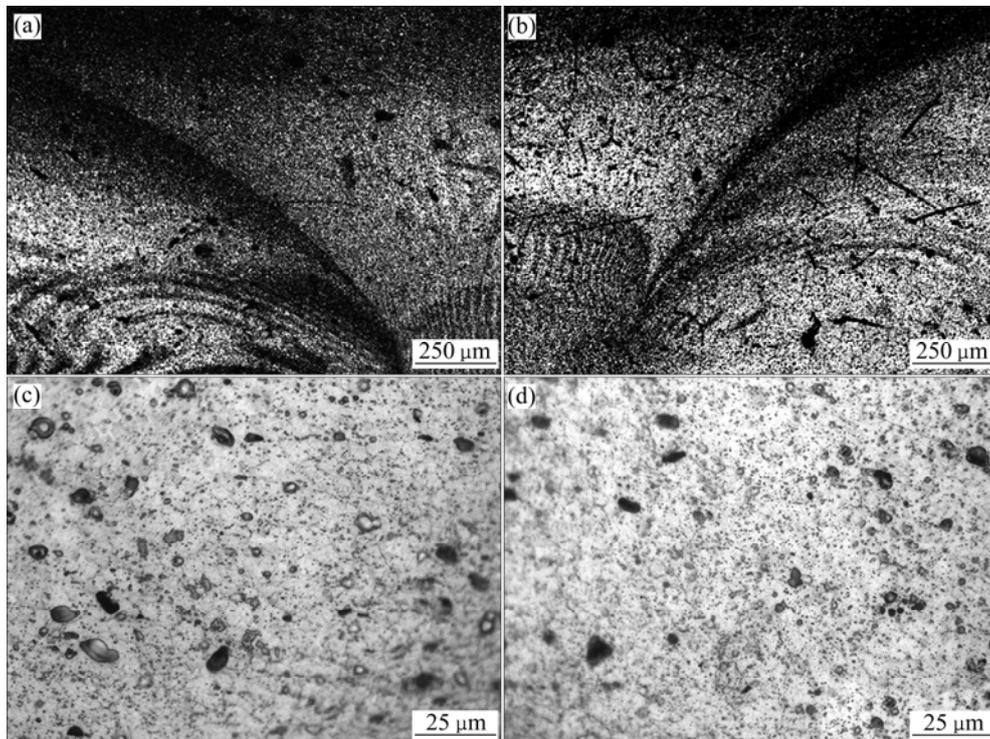


图 5 多道次 FSP 不同放大倍率试样的金相组织

Fig. 5 Optical microstructures of samples at different magnification and multi-pass FSP: (a) Lower magnification, sample 2; (b) Lower magnification, sample 4; (c) Higher magnification, sample 2; (d) Higher magnification, sample 4

道搭接 FSP 金相组织。由图 5(a)和(b)可以清晰看出, 前后两道次重叠加工在核区留下的重叠线, 重叠区域发生两次剧烈的塑性变形, 形成更加细小的晶粒。图 5(c)和(d)所示分别为高倍率下试样 2 和 4 重叠区域的金相组织, 母材经过多道搭接的搅拌摩擦加工, 金属的流动性明显改善, 加工区金属发生均匀的塑性流变。相比于单道次 FSP, 多道次搭接 FSP 核区晶粒更加细小, 由于核区的精细结构, 在 500 倍光镜下已很难清晰地观察晶粒。试样 2 第二相发生了团聚粗化; 试样 4 经过强制水冷, FSP 加工热量的积累较小, 减小了

过时效的作用, 阻碍第二相溶解、粗化的倾向, 保留了 T6 状态下弥散析出的细小第二相。

图 6(a)和(b)所示分别为 T6 态母材不同放大倍率的 TEM 像。图 6(a)中由于母材晶粒尺寸较大, 视野中难以找到完整晶粒, 晶界处分布着连续的析出相。由图 6(b)中可以清晰看到晶粒内部的弥散析出相 β'' 相, 这些析出相对位错起到钉扎作用, 阻碍位错滑移, 起到弥散强化效果。同时, 在高密度位错区, 位错之间彼此发生缠结, 形成位错网, 位错移动变得困难, 对材料有显著强化效果。

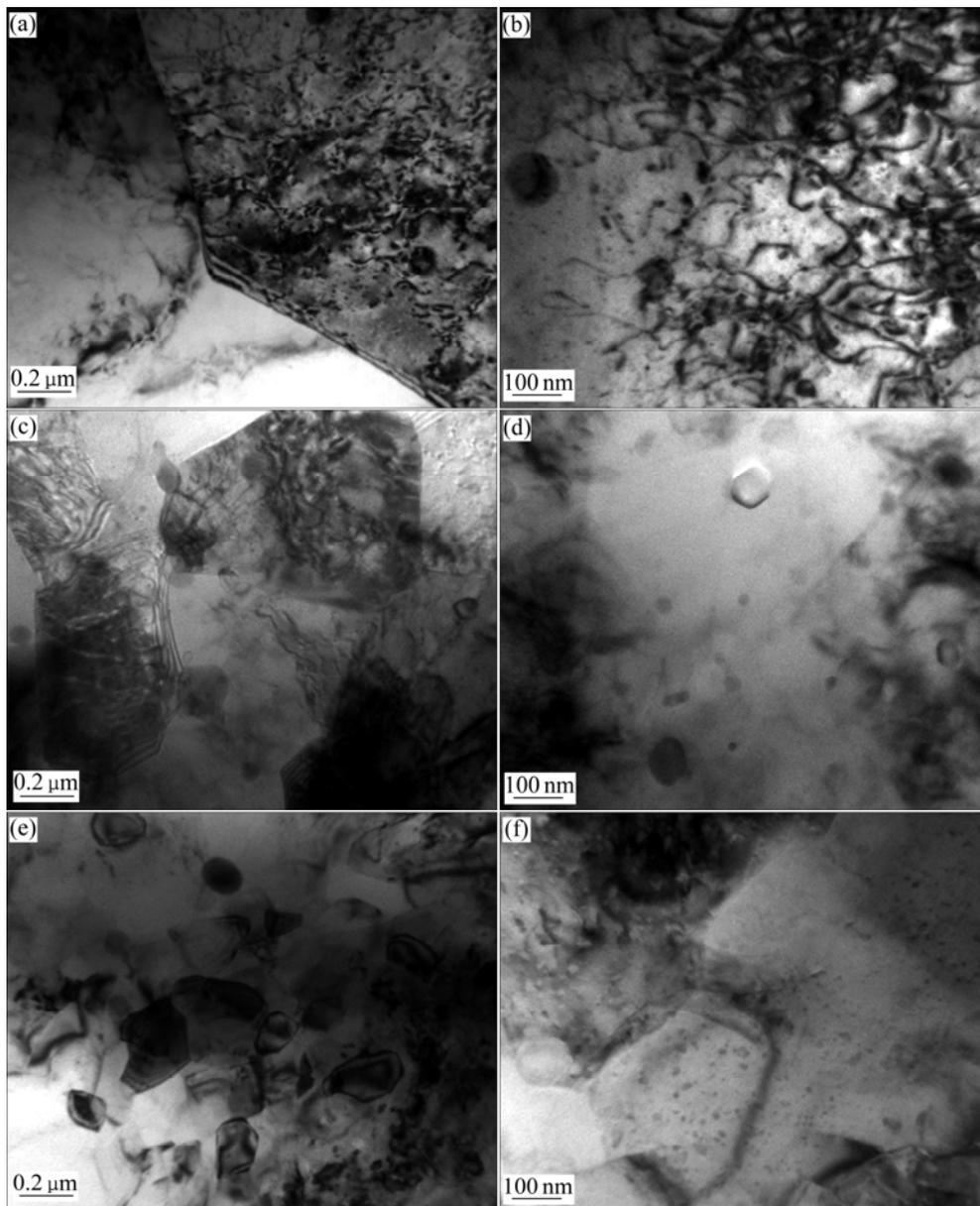


图 6 各试样的不同放大倍率下的 TEM 像

Fig. 6 TEM images of different samples under different magnifications: (a) Lower magnification, T6 base material; (b) Higher magnification, T6 base material; (c) Lower magnification, sample 2; (d) Higher magnification, sample 2; (e) Lower magnification, sample 4; (f) Higher magnification, sample 4

图 6(c)和(d)所示分别为多道次搭接空冷 FSP 核区的 TEM 照片。从图 6(c)发现晶粒已经明显细化成等轴的再结晶组织, 尺寸约为 $1\ \mu\text{m}$, 小于单道次空冷 FSP 的晶粒。重叠区的再次大塑性变形, 进一步细化了晶粒, 虽然, 多道次有热循环累积会造成再结晶晶粒长大, 但大塑性变形细化晶粒的作用, 显然更加显著。由图 6(d)可见, 再结晶晶粒内部只有极少量加工前留下的弥散析出相, 由于受加工过程热循环累积作用, 析出相发生重溶, 未溶析出相则发生粗化, 由 $\beta'' \rightarrow$ 圆形 $\beta' \rightarrow$ 球状 β , 弥散强化效果降低; 与 T6 态母材相比, FSP 加工空冷后, 晶内位错密度明显减少, 这是由于高温回复和动态再结晶引起位错脱钉, 异号位错相遇发生抵消, 因此, 位错强化效果也不如母材的显著。

图 6(e)和(f)所示为多道次搭接水冷 FSP 核区的 TEM 像。由图 6(e)可见, 相比于空冷 FSP 的核区, 水冷 FSP 核区的晶粒细化程度更高。这说明加工过程中, 水冷对热累积的抑制作用明显, 温度降低, 晶粒长大现象得到抑制^[20]。由图 6(f)可见, 晶粒内部和晶界处分布的细小弥散析出相 β'' 仍然很多, 只有极少量的大颗粒相, 水冷也减小了析出相发生过时效的趋势; 晶粒内部的位错密度同样因动态回复和再结晶而减小。这些变化都将对加工区力学性能产生很大的影响。

2.3 力学性能

图 7(a)所示为单道次搅拌摩擦加工区截面维氏硬度分布情况, T6 母材(Base material, BM)的硬度为 93.2HV, FSP 加工后的硬度分布呈现 W 形, 距离核区(Nuclear zone, NZ)越远的热影响区, 其硬度越接近于 T6 态母材的, 原因是热影响区没有剧烈塑性变形, 且 FSP 产生的摩擦热使得越靠近核区的热影响区温度越高, 强化相溶解、粗化现象越明显, 其硬度比两侧热影响区的硬度低。核区硬度明显低于 T6 态母材的, 但稍高于热机影响区的, 这是 FSP 过程引起的动态回复和再结晶使变形材料发生软化, 但是晶粒细化又在一定程度上提高了核区硬度。试样 3 的各区域硬度均明显高于试样 1 的, 说明强制水冷对 FSP 的组织控制和性能改善起到了明显作用。

图 7(b)所示为多道次搅拌摩擦加工区截面维氏硬度分布情况。由图 7(b)可以看出, 空冷多道次 FSP 的各部分硬度在 (35~55HV), 从加工开始到结束部分的硬度呈曲折上升的趋势, 且变化幅度大; 而水冷多道次 FSP 的各部分硬度为 65~75HV, 硬度普遍高于试样 2 的, 但稍低于 T6 母材的, 从加工开始到结束部分不存在明显的硬度上升, 硬度变化幅度较小。这说明水

冷却对多道次 FSP 的热循环累积作用有明显的抑制作用, 使得加工过程始终保持较低的温度状态, 硬度变化不明显; 而空冷多道次 FSP 热循环的累积作用比水冷要复杂得多, 温度反复升高下降, 前道次加工区域要受到后道次加工过程中的热积累, 最后一道次受到的热影响最小, 因此, 从开始到结束, 部分受到的热积累程度逐渐减小, 使得软化作用逐渐降低, 硬度表现为递增的趋势。

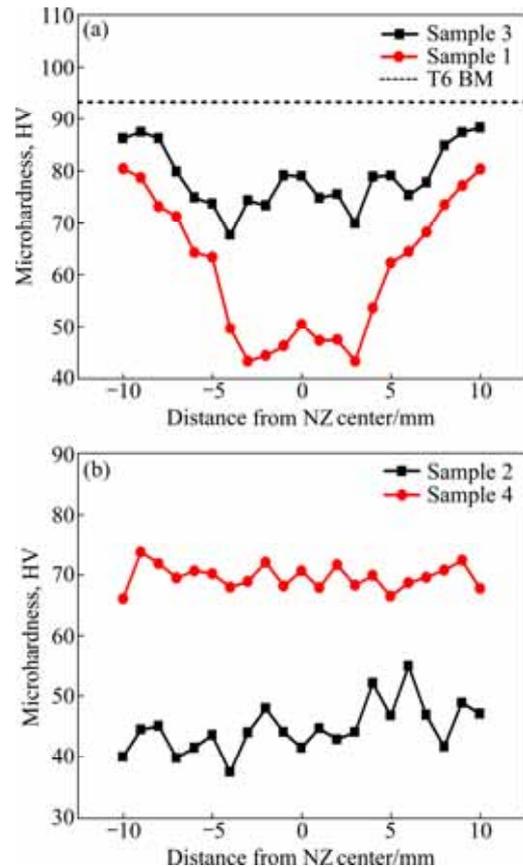


图 7 不同试样的搅拌摩擦加工区显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distributions in processed region of different samples: (a) Microhardness profile of single-pass samples; (b) Microhardness profile of multi-pass samples

图 8 所示为各试样的应力-应变曲线, 其力学性能如表 2 所列。其中图 8 和表 2 中, $2^\#//\text{FSP}$ 为平行于空冷 FSP 方向选取的拉伸试样; $2^\#\perp\text{FSP}$ 为垂直于空冷 FSP 方向选取的拉伸试样; $4^\#//\text{FSP}$ 为平行于水冷 FSP 方向选取的拉伸试样; $4^\#\perp\text{FSP}$ 为垂直于水冷 FSP 方向选取的拉伸试样。T6 态母材的高强度来源于析出相弥散强化与位错强化的共同作用。经空冷 FSP 拉伸试样平行于加工方向的极限强度仅达到 160 MPa, 为 T6 态母材强度的 53%, 伸长率为 22.4%; 垂直方向的极限强度为 152 MPa, 伸长率 26.2%。由此可以看出,

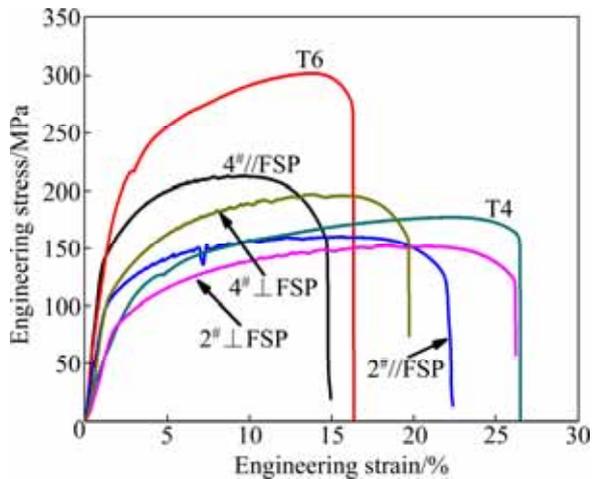


图 8 各试样的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of different samples

这两个方向的拉伸强度没有明显差异，垂直方向比水平方向的伸长率稍高。水冷 FSP 相比于空冷 FSP，其强度有了明显提高，拉伸试样平行于加工方向的极限强度升至 213 MPa，为母材的 71%，伸长率为 15.1%；垂直方向的极限强度为 196 MPa，伸长率 19.7%，平行方向比垂直方向的强度较高，伸长率略有下降。拉

表 2 6061 铝合金经不同处理的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6061 alloy after different treatments

Sample	Ultimate strength/MPa	Elongation/%	Microhardness, HV
2 [#] FSP	160	22.4	
2 [#] FSP	152	26.2	
4 [#] FSP	213	15.1	
4 [#] FSP	196	19.7	
6061-T4	180	26.5	43.6
6061-T6	301	16.4	93.2

伸试样性能的变化是其内部组织结构变化的体现，与上面组织结构分析是匹配的。因此，水冷 FSP 细晶强化和弥散强化效果要优于空冷 FSP 的。水冷 FSP 强度和硬度低于 T6 态母材的原因是细晶强化和弥散强化的共同作用小于位错密度降低引起的软化作用。

2.4 晶间腐蚀性能

图 9 所示为各试样的晶间腐蚀形貌。T4 态铝合金最大晶间腐蚀深度为 100 μm；T6 态铝合金呈现严重

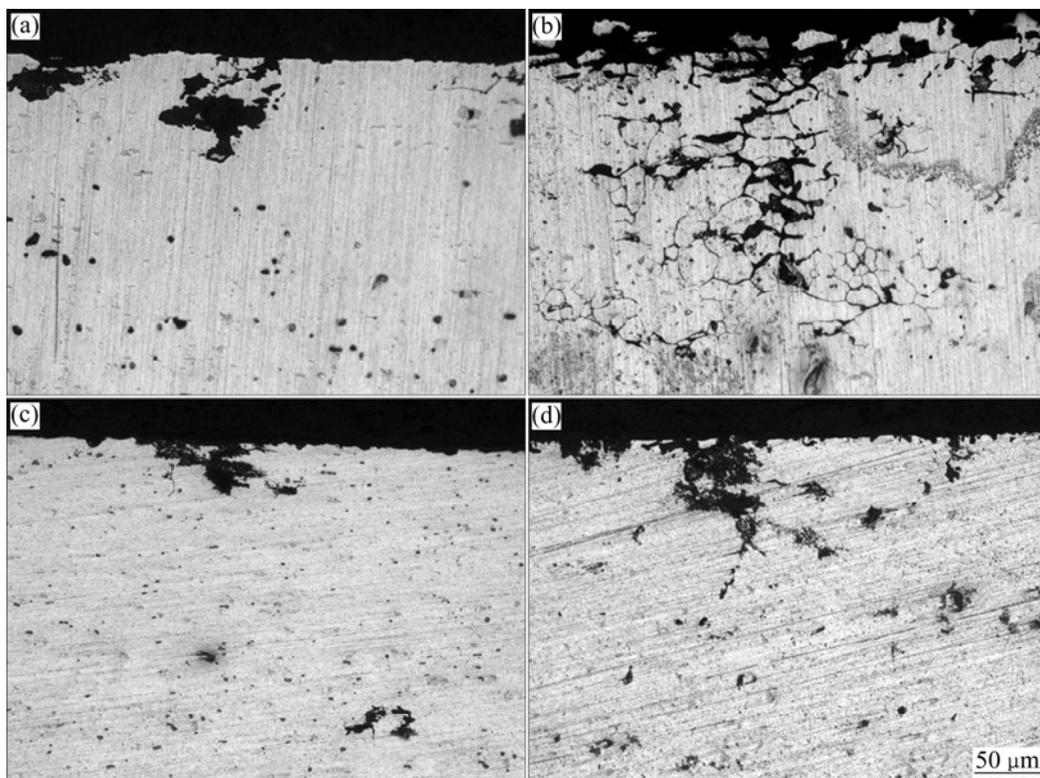


图 9 各试样的晶间腐蚀形貌

Fig. 9 Intergranular corrosion micrographs of different samples: (a) 6061-T4 aluminium alloy; (b) 6061-T6 aluminium alloy; (c) Sample 2; (d) Sample 4

的晶间腐蚀状况, 表层晶粒已相互剥离而发生脱落, 最大腐蚀深度约为 $280\ \mu\text{m}$; 而经过 FSP 加工处理的材料, 其晶间腐蚀性能明显提高, 在空冷和水冷状态下, 多道次 FSP 加工区最大腐蚀深度分别仅为 $40\ \mu\text{m}$ 和 $105\ \mu\text{m}$, 表层较完好, 没有发生严重的剥落现象。铝合金的晶间腐蚀性能与晶界处析出相的分布状态及晶粒组织有密切关联。轧制态板材晶粒为条状结构, 呈现小角度晶界, 经过 T6 峰时效处理, 晶内弥散析出了细小的 β'' 和 β' 相, 而晶界处连续分布的析出相与晶界的无析出带存在电位差, 构成连续的腐蚀通道, 使得耐晶间腐蚀性能大大降低。经过 FSP 处理后, 核区晶粒明显细化, 呈大角度等轴晶组织, 改善了晶界处溶质原子的分布, 减小了形成原电池的趋势, 且在加工过程中, 高温停留时间较长, 析出相发生重溶, 或发生团聚粗化, 由 $\beta'' \rightarrow$ 圆形 $\beta' \rightarrow$ 球状 β 相, 使得晶界处电化学差异变小, 析出相不连续分布, 阻隔了晶间腐蚀通道, 因此, 晶间腐蚀性能大幅提高^[21-22]。

3 结论

1) 单道次 FSP 试样的核区晶粒明显小于母材的, 但空冷和水冷条件下, 核区晶粒尺寸相差不大, 都只有约 $10\ \mu\text{m}$; FSP 试样的硬度分布呈“W”形, 单道次水冷 FSP 对抑制弥散析出相的重溶、长大作用明显, 是导致其核区硬度高于空冷 FSP 的原因。

2) 相比于多道次空冷 FSP, 采用多道次水冷 FSP 可明显降低核区温度, 抑制再结晶长大和弥散析出相的重溶、粗化现象, 降低加工区软化程度。但水冷 FSP 加工区力学性能不及母材的, 其根本原因是动态回复过程中, 位错密度大幅减小, 细晶强化作用不足以弥补加工区强度硬度的损失。

3) T6 态母材有严重的晶间腐蚀倾向, 而母材经过多道次 FSP 表面改性后, 加工区材料耐晶间腐蚀性能得到明显改善。主要原因是由于晶粒细化和第二相重溶、粗化引起的晶界处析出相不连续分布, 对晶界腐蚀通道起阻隔作用。

4) 采用多道次搭接水冷 FSP 成功实现 6061-T6 铝合金板材表面大面积的改性加工, 加工后的材料在保持较高力学性能的基础上, 其表面耐晶间腐蚀性能有了显著提高, 为铝合金抗晶间腐蚀提供了新途径。

REFERENCES

[1] 张小龙. 超细晶铝合金搅拌摩擦焊接接头腐蚀性能研究[D].

西安: 西安建筑科技大学, 2009: 7-8.

ZHANG Xiao-long. Studies on corrosion resisting property of friction stir welded joint of ultrafine-grain aluminium alloy [D].

Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009: 7-8.

[2] 刘满平, 王 俊, 蒋婷慧, 吴振杰, 谢学锋, 刘 强, Hans J. ROVEN. 高压扭转大塑性变形 Al-Mg 铝合金中的层错和形变孪晶[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1383-1392.

LIU Man-ping, WANG Jun, JIANG Ting-hui, WU Zheng-jie, XIE Xue-feng, LIU Qiang, Hans J. ROVEN. Stacking faults and deformation twins in Al-Mg alloys subjected to high pressure torsion [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(6): 1383-1392.

[3] 康志新, 彭勇辉, 赖晓明, 李元元, 赵海东, 张卫文. 剧塑性变形制备超细晶/纳米晶结构金属材料的研究现状和应用展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 587-598.

KANG Zhi-xin, PENG Yong-hui, LAI Xiao-ming, LI Yuan-yuan, ZHAO Hai-dong, ZHANG Wei-wen. Research status and application prospect of ultrafine grained and/or nanocrystalline metallic materials processed by severe plastic deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 587-598.

[4] MISHRA R S, MAHONEY M W. Friction stir processing: A new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys[J]. Materials Science Forum, 2001, 357: 507-514.

[5] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1): 1-78.

[6] MA Z Y. Friction stir processing technology: A review [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(3): 642-658.

[7] 王快社, 林兆霞, 周龙海, 孔 亮, 王 文. 搅拌摩擦加工铸态铝铁合金的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(5): 1270-1275.

WANG Kuai-she, LIN Zhao-xia, ZHOU Long-hai, KONG Liang, WANG Wen. Microstructure of friction stir processed as-cast Al-Fe alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1270-1275.

[8] 黄春平, 柯黎明, 邢 丽, 刘鹤平. 搅拌摩擦加工研究进展及前景展望[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(1): 183-188.

HUANG Chun-ping, KE Li-ming, XING Li, LIU Ge-ping. Research progress and prospect of friction stir processing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(1): 183-188.

[9] EL-RAYES M M, EL-DANAF E A. The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of aluminum alloy 6082 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(5): 1157-1168.

[10] WOO W, CHOO H, BROWN D W, VOGEL S C, LIAW P K, FENG Z. Texture analysis of a friction stir processed 6061-T6 aluminum alloy using neutron diffraction[J]. Acta Materialia,

- 2006, 54(15): 3871–3882.
- [11] LIU F C, MA Z Y, CHEN L Q. Low-temperature superplasticity of Al-Mg-Sc alloy produced by friction stir processing[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(11): 968–971.
- [12] HOFMANN D C, VECCHIO K S. Submerged friction stir processing (SFSP): An improved method for creating ultra-fine-grained bulk materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1): 234–241.
- [13] PRADEEP S, PANCHOLI V. Effect of microstructural inhomogeneity on superplastic behaviour of multipass friction stir processed aluminium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 561: 8–87.
- [14] AL-FADHALAH K J, ALMAZROUEE A I, ALORAIER A S. Microstructure and mechanical properties of multi-pass friction stir processed aluminum alloy 6063[J]. Materials & Design, 2014, 53: 550–560.
- [15] 武佳蕾, 王快社, 周龙海, 王文. 搅拌摩擦加工技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39(9): 150–153.
WU Jia-lei, WANG Kuai-she, ZHOU Long-hai, WANG Wen. Development of friction stir processing[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(9): 150–153.
- [16] CUI G R, MA Z Y, LI S X. The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al-Mg alloy[J]. Acta Materialia, 2009, 57(19): 5718–5729.
- [17] 李博, 沈以赴, 胡伟叶. 伸缩式搅拌头厚铝板搅拌摩擦焊缺陷及其补焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 62–71.
LI Bo, SHENG Yi-fu, HU Wei-ye. Friction stir welded defects and repairing weld process of thick aluminum plates with telescopic stir-pin[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 62–71.
- [18] 朱东晖, 陈江华, 刘春辉, 黄昌军, 王时豪, 陈敬, 顾媛. Al-Mg-Si 与 Al-Zn-Mg 合金异质焊接接头力学性能和微观结构的关系[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 293–301.
ZHU Dong-hui, CHENG Jiang-hua, LIU Chun-hui, HUANG Chang-jun, WANG Shi-hao, CHEN Jing, GU Yuan. Relationship between mechanical properties and microstructure of AlMgSi and AlZnMg dissimilar welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 293–301.
- [19] 王快社, 孔亮, 王文, 林兆霞, 王峰. 强制冷却搅拌摩擦加工 2024 铝合金的组织性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(5): 1053–1056.
WANG Kuai-she, KONG Liang, WANG Wen, LIN Zhao-xia, WANG Feng. Microstructure and properties of forced cooling friction stir processed 2024 aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(5): 1053–1056.
- [20] HOFMANN D C, VECCHIO K S. Submerged friction stir processing (SFSP): An improved method for creating ultra-fine-grained bulk materials[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1): 234–241.
- [21] 潘道召, 王芝秀, 李海, 郑子樵. 双级时效对 6061 铝合金拉伸性能和晶间腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 435–441.
PAN Dao-zhao, WANG Zhi-xiu, LI Hai, ZHENG Zi-qiao. Effects of two-step ageing treatment on tensile properties and intergranular corrosion of 6061 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 435–441.
- [22] 李海, 潘道召, 王芝秀, 郑子樵. T616 时效对 6061 铝合金拉伸及晶间腐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2010, 46(4): 494–499.
LI Hai, PAN Dao-zhao, WANG Zhi-xiu, ZHENG Zi-qiao. Influence of T616 Temper on tensile and intergranular corrosion properties of 6061 aluminum alloy[J]. Acta Metal Sinica, 2010, 46(4): 494–499.

(编辑 李艳红)