

搅拌摩擦加工方向对 AZ61 镁合金组织和力学性能的影响

罗锡才,刘灏霖,康利梅,刘怡飞,林洁林,陈文尉,李助军

广州铁路职业技术学院,广东 广州 510430



摘要:采用搅拌摩擦加工技术(Friction stir processing, FSP)对轧制态 AZ61 镁合金进行单道次加工,利用 EBSD 和 SEM/EDS 及室温拉伸、显微硬度测试等表征手段,研究了加工方向对加工区域微观组织演变及其对力学性能的影响规律.结果表明:沿轧制方向(Rolling direction, RD)和横向(Transverse direction, TD)FSP 制备的镁合金晶粒尺寸分别为 $3.5\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$,基面施密特因子平均值分别为 0.42 和 0.34;沿 RD 方向制备的镁合金中第二相呈细小弥散分布,而 TD 方向的第二相颗粒较为粗大;两个方向制备的镁合金抗拉强度相当,沿 RD 和 TD 方向制备的镁合金的屈服强度分别为 90 MPa 和 104 MPa、伸长率分别为 34.8% 和 28.6%,而 RD 方向制备的镁合金硬度高于 TD 方向.屈服强度与霍尔佩奇关系不符,受织构影响,而硬度分布符合霍尔佩奇关系.

关键词:搅拌摩擦加工;AZ61 镁合金;加工方向;组织演变;力学性能

中图分类号: TG306

文献标识码: A

引文格式:罗锡才,刘灏霖,康利梅,等. 搅拌摩擦加工方向对 AZ61 镁合金组织和力学性能的影响[J]. 材料研究与应用,2021,15(3):203-209.

LUO Xicai, LIU Haolin, KANG Limei, et al. Effect of friction stir processing direction on the microstructure and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(3): 203-209.

镁及镁合金作为轻质结构材料,具有低密度、高比强度和良好的加工性等优点,在 3C、汽车、航空、航天及国防军工等高端装备制造领域具有巨大的应用价值^[1-2].但由于镁合金为密排六方结构,在室温下塑性较差,严重影响其变形能力,进而制约了其广泛应用^[3-5].细化晶粒是有效提升镁合金室温塑性的有效途径之一,通过大塑性变形的可以显著细化晶粒,如等通道转角挤压^[6]和多向锻造^[7]等.但这些传统方法工艺过程复杂、能耗高、成本高、样品尺

寸较小,且获得的组织均匀性较低,导致非均匀塑性变形,进而降低镁合金的塑性加工性能.

搅拌摩擦加工(Friction stir processing, FSP)是一种细化镁合金组织,从而获得良好力学性能的高效加工技术^[8-10].研究表明,常规 FSP 制备的镁合金晶粒尺寸可细化到 $10\ \mu\text{m}$ 以下^[11-12].Yu 等人^[13]研究了搅拌摩擦加工 AZ31 镁合金动态再结晶晶粒尺寸与加工参数之间的关系,构建模型来定量评估它们之间的关系.提高应变速率或降低加工温度均

收稿日期:2021-08-02

基金项目:广东普通高校重点项目(自然)(2019GZDXM015);广州铁路职业技术学院教科研重点项目(GTXYZ1901);广东省普通高校创新团队(自然科学)(2020KCXTD043)

作者简介:罗锡才(1983—),男,博士,特聘副教授,从事轻质合金塑性变形及材料连接研究, E-mail: meluoxicai@mail.scut.edu.cn.

通信作者:刘灏霖(1974—),男,实验师,从事金属材料加工及连接, E-mail: liuhaolin@gtxy.edu.cn

可提高 Zener-Hollom 参数,从而提高细化效果.通过强制冷却降低加工温度峰值,达到细化晶粒的目的. Du 等人^[14]在 FSP 过程中采用液氮强制冷却,成功制备出纳米级晶粒的 AZ61 镁合金. 搅拌头的几何尺寸影响材料的流动及热量分布,从而对组织演变产生显著影响. 因此,搅拌头的设计也备受科研工作者的关注^[15]. 目前,国内外学者对 FSP 制备的镁合金超塑性进行了大量研究且多集中在铸造镁合金^[16-17],但对轧制镁合金的 FSP 研究较少. 对于轧制镁合金,沿轧制和垂直于轧制方向的力学性能存在明显的各向异性,这种各向异性必然对其 FSP 加工后的组织和力学性能产生重要影响.

研究了 FSP 加工方向对轧制态 AZ61 镁合金组织演变和力学性能的影响,为提高轧制态 AZ61 镁合金的室温塑性提供理论依据和数据支撑.

1 材料及方法

1.1 实验材料

实验选用的材料为轧制态的 AZ61 镁合金,其尺寸为 200 mm×160 mm×6 mm,成分列于表 1. FSP 选用工具钢制成的搅拌头,轴肩直径 18 mm,搅拌针直径 7 mm,长度 5 mm. 在 FSW-RT31-003 型专用搅拌摩擦焊机上开展水下 FSP 实验,FSP 加工实验分别沿着基材的轧制(RD)方向和横向(TD),搅拌头旋转速度 800 rpm,前进速度 240 mm/min(简写为:824SFSP),下压量 0.2 mm,沿轧制(RD)方向加工的试样记为 824SFSP-RD,沿横向(TD)方向加工的试样记为 824SFSP-TD.

表 1 AZ61 镁合金化学成分

Table 1 Composition of AZ61 magnesium alloy

元素	Al	Mn	Zn	Mg
含量 $w/\%$	6.21	0.19	0.93	余量

1.2 组织观察

首先采用无水乙醇进行超声清洗试样表面,然后在酒精(60 mL)+乙酸(15 mL)+硝酸(5 mL)+水(20 mL)的电解液中进行常温电解抛光,抛光电

压为 5 V,时长为 6 s. 通过 Nova Nano SEM430 高分辨场发射(FEI, USA)和 SM-6380LV 钨灯丝(JEOL, Japan)电子显微镜观察试样的微观组织、第二相分布,并通过 SEM 自带的能谱分析仪(Inca300, Oxford, UK)对组织成分进行分析. 利用 SEM 上配置的牛津 HKL-Nordlys EBSD 探测器,在电压 40 kV、步长 0.5~5 μm 的条件下进行 EBSD 观察,并用 HKL-Channel 5 软件对 EBSD 结果进行分析,获得晶粒尺寸、织构等组织信息.

1.3 力学性能测试

拉伸试样在加工方向的搅拌区(Stir zone, SZ)选取,标距尺寸为 3 mm×1.5 mm×2.5 mm,在 AGS-X 型拉伸试验机(Shimazu, Japan)上采用应变速率为 $1.67\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 进行室温拉伸测试,拉伸方向平行于 FSP 加工方向. 采用 HVS-1000 型维氏硬度计,沿加工区横截面中心线位置测量显微硬度,载荷 100 g、保压时间 15 s,从前进侧(Advancing side, AS)向后退侧(Retreating side, RS)相隔 0.5 mm 测试点进行测试.

2 结果与讨论

2.1 微观组织分析

图 1 为轧制态 AZ61 镁合金基材 SEM 和 EBSD 微观组织及极图. 从图 1 可见,基材中第二相颗粒呈细小弥散分布. EBSD 统计结果表明,晶粒平均尺寸为 $8.9\pm 11.0\text{ }\mu\text{m}$,晶粒 C 轴沿着 ND 方向分布.

图 2 为沿 RD 和 TD 方向 FSP 加工后 AZ61 镁合金 SEM 组织形貌. 从图 2(a)和图 2(b)比较发现, RD 方向的第二相颗粒呈细小弥散分布,而 TD 方向的第二相颗粒的尺寸粗大且分布不均匀. EBSD 统计结果表明,沿 RD 方向经 FSP 加工后的晶粒尺寸为 $3.5\pm 2.5\text{ }\mu\text{m}$,沿 TD 方向经 FSP 加工后的晶粒尺寸为 $4.3\pm 5.7\text{ }\mu\text{m}$. 由此可见,沿 RD 方向 FSP 的晶粒尺寸更为细小且晶粒大小分布更为均匀(误差相对较小).

图 3 为沿 TD 方向经 FSP 加工后的组织放大图. EDS 分析结果指出,粗大的第二相颗粒主要由 Mg, Al 和 Mn 等元素组成.

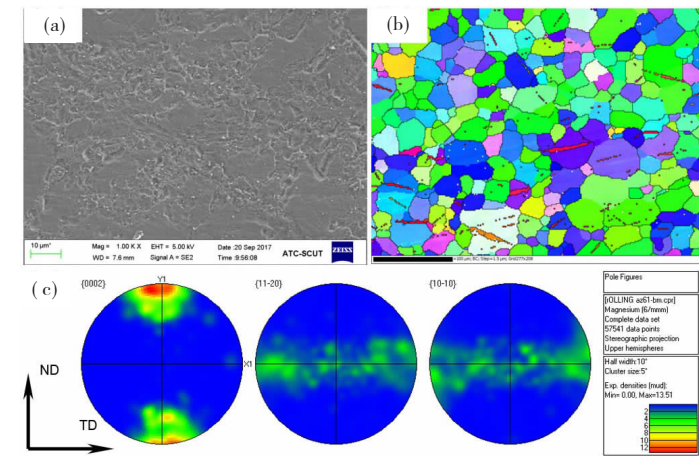


图 1 轧制态 AZ61 微观组织
(a)SEM; (b) 反极图; (c)极图

Fig. 1 Microstructure of rolled AZ61 magnesium alloy
(a) SEM; (b) inverse pole figure; (c) pole figure.

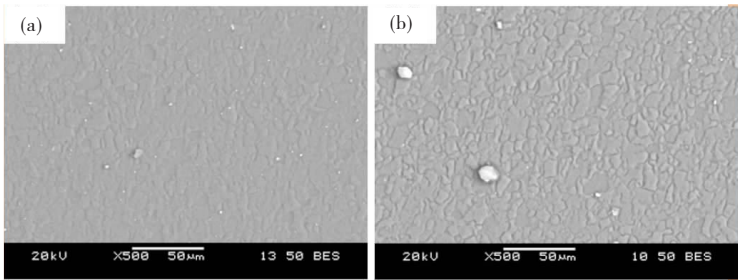


图 2 搅拌摩擦加工 SEM 微观组织形貌
(a)824SFSP-RD; (b)824SFSP-TD

Fig. 2 SEM microstructure morphologies of FSP

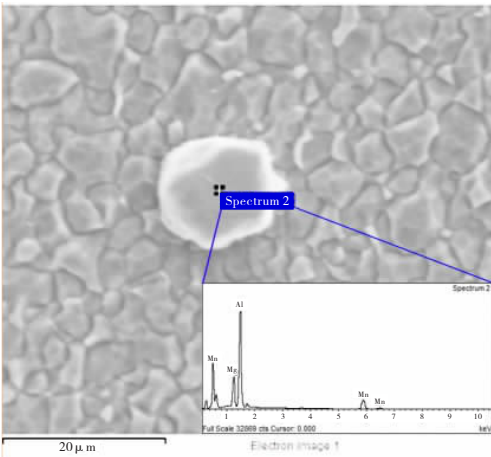


图 3 FSP AZ61 第二相 EDS 分析

Fig. 3 EDS analysis of the second phase in FSP AZ61

织构上的差异,会对轧制态 AZ61 镁合金的力学性能产生重要影响. 图 4 为沿 RD 和 TD 方向的经 FSP 加工的 AZ61 合金的极图. 从图 4 可见: 824SFSP-RD 试样的 $\{0002\}$ 基面的 C 轴向 ND 方向倾斜约 23° , 向 TD 方向倾斜 16° ; 824SFSP-TD 试样的 $\{0002\}$ 基面的 C 轴向 ND 方向倾斜约 20° , 向 RD 方向倾斜 69° .

2.2 室温拉伸性能

图 5 和表 2 为母材和不同 FSP 加工方向 AZ61 镁合金的室温拉伸结果. 从图 5 可见, 沿 TD 方向加工的 AZ61 镁合金的应变硬化能力明显高于 RD 方向的, 说明 TD 方向的塑性变形能力低于 RD 方向; 母材 TD 方向的应变硬化能力也高于 RD

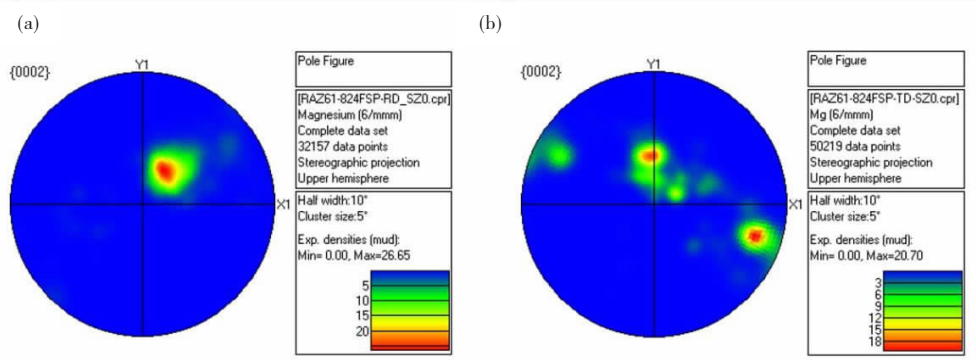


图 4 FSP 的 AZ61 搅拌区的极图
(a)824SFSP-RD;(b)824SFSP-TD

Fig. 4 Pole figures in of FSPed AZ61 in stirring zone

方向的,经 FSP 加工后母材的屈服强度和应变硬化能力大幅降低,进而使得加工态 AZ61 镁合金获得良好的室温塑性. 由表 2 可知,与母材相比,沿 RD 和 TD 方向加工的镁合金伸长率分别提升了 135. 1%和 116. 7%;沿 TD 方向加工的 AZ61 镁合金的屈服强度比沿 RD 加工的高 15. 6%、抗拉强度略高于 RD 方向,但伸长率仅为沿 RD 方向加工的

82. 2%,这些变化趋势和母材一致,体现出一定的组织遗传性. 晶粒尺寸统计结果表明,沿 RD 方向的 AZ61 镁合金晶粒更细,但屈服强度却小于 TD 方向,这是由于镁合金为典型的密排六方结构,屈服强度除受到霍尔佩奇关系影响外还受到织构的较大影响^[18].

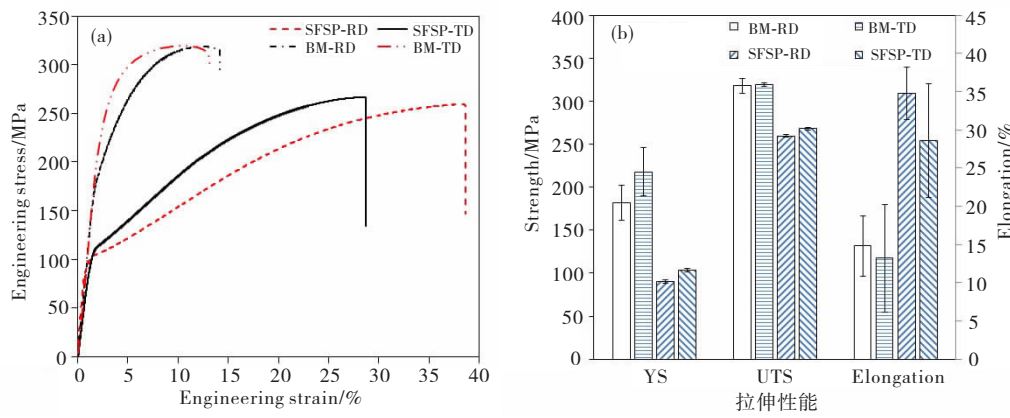


图 5 不同 FSP 加工方向拉伸性能
(a)工程应力—应变曲线;(b) 拉伸性能柱状图

Fig. 5 Tensile properties of the FSP along with different processing directions

(a)engineering stress-strain curves;(b) histogram for tensile properties of FSPed samples

表 2 不同 FSP 加工方向 AZ61 镁合金拉伸性能

Table 2 Tensile properties of the BM and FSPed AZ61 magnesium alloy along different directions

试样	测试方向	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
BM	RD	182±20	318±9	14. 8±4
	TD	218±28	319±2	13. 2±7
SFSP	RD	90±1. 9	260±1. 6	34. 8±3. 4
	TD	104±2. 1	268±1. 7	28. 6±7. 5

拉伸变形时晶粒取向分布会影响滑移系启动的临界应力值, RD 方向试样的晶粒取向相比 TD 方向的更倾向于 45° 方向分布, 这更有利于基面滑移系在较低应力下启动, 因此表现出较低的屈服强度而塑性较好. 同时, 通过进一步计算施密特因子来分析织构对拉伸性能的影响. 图 6 为沿 RD 和 TD 方向经 FSP 加工后 AZ61 镁合金组织通过对 EBSD 结果进行施密特因子分析的结果. 从图 6 可见, 沿 RD 和 TD 方向加工的 AZ61 镁合金平均施密特因子大小分别为 0.42 和 0.34. 众所周知, 施密特因子越大, 越容易启动临界应力较低的滑移系, 进而降低材料的屈服强度、减低材料的应变硬化能力及提高材料的塑性变形能力. 因此, 在晶粒尺寸较小的情况下, 沿 RD 方向经 FSP 加工的 AZ61 镁合金的屈服强度仍低于 TD 加工方向的, 而伸长率高于 TD 加工方向的.

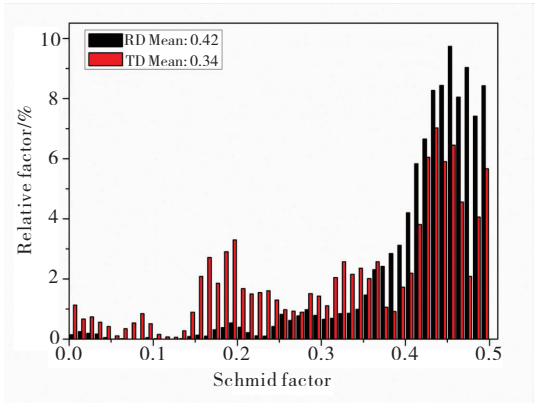


图 6 不同 FSP 加工方向 AZ61 基面织构的施密特因子分布

Fig. 6 Schmidt factor distribution in basal plane of AZ61 at different FSP processing directions

2.3 显微硬度分布

图 7 为不同 FSP 加工方向 AZ61 镁合金横截面的硬度分布图. 从图 7 可以看出: SZ 中 RD 加工方向的硬度略高于 TD 加工方向的, TD 加工方向的硬度分布跳动较大, 这是由于 TD 加工方向的晶粒尺寸更大且误差较大所致, 因此与拉伸性能不同, 硬度分布符合霍尔佩奇规律; RD 方向的第二相颗粒尺寸较小且呈弥散分布, 其溶解到镁基体中产生的固溶强化也是造成 RD 加工方向硬度高的原因; 在 SZ 前进侧, TD 加工方向的硬度明显高于 RD 方向, 而在后退侧硬度差异不明显, 这主要和 FSP 工艺在前

进侧和后退侧塑性金属的非对称流动密切相关.

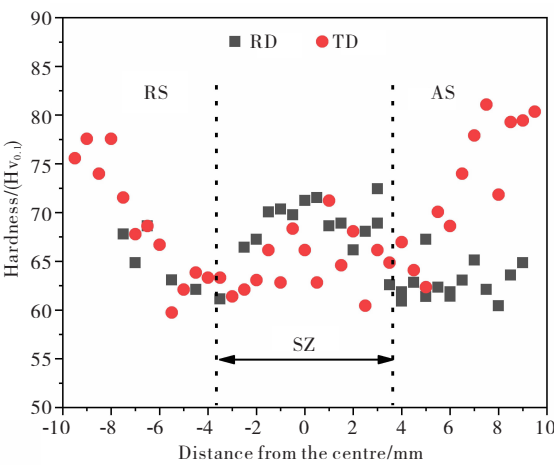


图 7 不同 FSP 加工方向 AZ61 横截面中心线硬度分布
Fig. 7 Microhardness distribution of the AZ61 cross-sectional centre line at different processing directions

3 结 论

- (1) 经 FSP 加工后 A261 镁合金基材的晶粒尺寸发生明显细化, 从轧制态的 $8.9 \pm 11.0 \mu\text{m}$ 细化到 RD 方向加工后的 $3.5 \pm 2.5 \mu\text{m}$ 和 TD 加工方向的 $4.3 \pm 5.7 \mu\text{m}$. 与 TD 加工方向相比, RD 方向加工的 AZ61 镁合金第二相颗粒的较小且呈弥散发布.
- (2) 沿 RD 和 TD 方向 FSP 加工的 AZ61 镁合金的抗拉强度相当, 屈服强度分别为 90 MPa 和 104 MPa, 伸长率分别为 34.8% 和 28.6%. 受织构影响较大, RD 方向施密特因子较大, 拉伸时就越容易启动临界应力较低的滑移系, 进而表现出较低的屈服强度, 但提高了材料的塑性变形能力.
- (3) SZ 中沿 RD 加工方向的硬度略高于 TD 加工方向, 硬度分布符合霍尔佩奇关系.

参考文献:

[1] LIU Y, REN H, HU W C, et al. First-principles calculations of strengthening compounds in magnesium alloy: A general review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32: 1222-1231.

[2] MANSOOR P, DASHARATH S M. A review paper on magnesium alloy fabricated by severe plastic deformation technology and its effects over microstructural and mechanical properties-science direct

- [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 356-364.
- [3] 李非凡, 雷丽萍, 方刚. 镁合金塑性变形及延性断裂预测研究进展(上)—宏观本构模型的开发及应用[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27: 1-13.
- [4] KULWANT S, GURBHINDER S, HARMEET S. Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ61 magnesium alloy joint[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018(6): 292-298.
- [5] LIU W J, JIANG B, LUO S Q, et al. Mechanical properties and failure behavior of AZ61 magnesium alloy at high temperatures[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53: 8536-8544.
- [6] FIGUEIREDO R B, LANGDON T G. Grain refinement and mechanical behavior of a magnesium alloy processed by ECAP[J]. *Journal of Materials Science*, 2010, 45: 4827-4836.
- [7] SAITO Y, UTSUNOMIYA H, TSUJI N, et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials development of accumulative rolling-bonding process[J]. *Acta Materialia*, 1999, 47 (2): 579-583.
- [8] LUO X C, CAO G H, ZHANG W, et al. Ductility improvement of an AZ61 magnesium alloy through two-pass submerged friction stir processing[J]. *Materials*, 2017, 10 (3): 253-264.
- [9] CHAI F, ZHANG D, Li Y. Microstructures and tensile properties of submerged friction stir processed AZ91 magnesium alloy [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2015, 3 (3): 203-209.
- [10] WANG W, HAN P, PENG P, et al. Friction stir processing of magnesium alloys: A review[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33 (1): 43-57.
- [11] CHANG C I, DU X H, HUANG J C. Producing nanograined microstructure in Mg-Al-Zn alloy by two-step friction stir processing[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59 (3): 356-359.
- [12] MOHAN A, YUAN W, MISHRA R S. High strain rate superplasticity in friction stir processed ultrafine grained Mg-Al-Zn alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 562: 69-76.
- [13] YU Z, CHOO H, FENG Z, et al. Influence of thermo-mechanical parameters on texture and tensile behavior of friction stir processed Mg alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2010, 63 (11): 1112-1115.
- [14] DU X H, WU B L. Using friction stir processing to produce ultrafine-grained microstructure in AZ61 magnesium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18 (6): 562-565.
- [15] LORRAIN O, FAVIER V, ZAHROUNI H, et al. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210 (4): 603-60.
- [16] QIAO K, WANG C X, LIU M X, et al. Superplastic behavior of ultrafine grained AZ31 magnesium alloy by friction stir processing [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (4): 105-111.
- [17] GAO X, ZHANG Z, WANG W, et al. Superplasticity of fine-grained AZ31 magnesium alloy prepared by friction stir processing[J]. *Rare metal Materials and Engineering*, 2016, 45 (7): 1855-1860.
- [18] LUO X C, CAO G H, ZHANG W, et al. Ductility improvement of an AZ61 magnesium alloy through two-pass submerged friction stir processing [J]. *Materials*, 2017, 10: 253.
- [19] CHAI F. Microstructure evolution and deformation mechanism of the AZ series magnesium alloy prepared by submerged friction stir processing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

Effect of friction stir processing direction on the microstructure and mechanical properties of AZ61 magnesium alloy

LUO Xicai, LIU Haolin, KANG Limei, LIU Yifei, LIN Jieli, CHEN Wenwei, LI Zhujun
Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 510430, China

Abstract: Friction stir processing (FSP) is utilized to process the rolled AZ61 magnesium alloy in a single pass. EBSD, SEM or EDS, tensile testing at room temperature and microhardness testing were conducted

to investigate the effect of processing direction on the microstructural evolution and mechanical properties of the stirring zone. The results indicate that the grain sizes of AZ61 magnesium alloy prepared by friction stir processed (FSPed) along the rolling direction (RD) and transverse direction (TD) is 3.5 μm and 4.3 μm , respectively. For the RD and TD processing directions, the average basal Schmidt factor value is 0.42 and 0.34, respectively. The second phase of FSPed AZ61 magnesium alloy in the RD is refined and dispersed distribution, while of the second phase particles in the TD direction are relatively coarse. The tensile strength of the magnesium alloy prepared in the RD and TD directions is equivalent, the yield strength of RD and TD is 90 MPa and 104 MPa, respectively. The elongations are 34.8% and 28.6% in the RD and TD, respectively. The microhardness in the RD is higher than that of in the TD. The yield strength is inconsistent with the Hall-Patch relationship, and is affected by the texture, while the microhardness distribution conforms to the Hall-Patch relationship.

Key words: friction stir processing; AZ61 magnesium; processing direction; microstructure evolution; mechanical properties