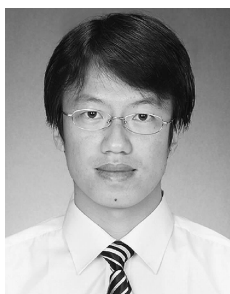


# 织构对搅拌摩擦加工镁合金力学性能的影响研究现状

杨晓康<sup>1</sup>, 王文<sup>2</sup>, 王快社<sup>2</sup>, 高雪<sup>2</sup>, 赵凯<sup>2</sup>, 郭红举<sup>2</sup>

(1. 西部钛业有限责任公司, 陕西 西安 710201)

(2. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)



杨晓康

**摘要:** 镁及镁合金的力学性能主要影响因素包括晶粒尺寸、织构和第二相, 其中, 织构对镁及镁合金的力学行为影响较为复杂。搅拌摩擦加工 (Friction Stir Processing, FSP) 后的镁及镁合金织构变化复杂, 因此对搅拌摩擦加工过程中镁及镁合金织构演变规律的研究具有重要意义。在介绍镁及镁合金形变系统的基础上, 综述了镁及镁合金板材在搅拌摩擦加工过程中的织构演化规律及形成机理, 织构的演化与材料所受应力状态和流动状态有关。分析了织构对室温拉伸性能的影响, 出现各向异性现象, 其实质是织构的软化和硬化效应; 织构对超塑性行为的影响, 织构对镁及镁合金塑性变形机理的影响。最后探讨了 FSP 镁及镁合金未来需深入研究的方向。

**关键词:** 搅拌摩擦加工; 镁合金; 织构; 力学性能

**中图分类号:** TG146.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2015)06-0482-05

## Research Status on Effect of Texture on the Mechanical Properties of Friction Stir Processed Magnesium Alloy

YANG Xiaokang<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>2</sup>, WANG Kuaishe<sup>2</sup>, GAO Xue<sup>2</sup>,  
ZHAO Kai<sup>2</sup>, GUO Hongju<sup>2</sup>

(1. Western Titanium Technologies Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

(2. College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Main factors affecting the mechanical properties of magnesium and magnesium alloys include grain size, texture and the second phase, among which the effect of the texture is more complicated. The evolution of texture of magnesium alloy is complex during friction stir processing (FSP), so related study on the deformation system and texture evolution of magnesium alloy is of great significance in friction stir processing. Based on the introduction of deformation system of magnesium alloy, texture evolution regulation and mechanism of friction stir processed magnesium alloy are summarized, the evolution of texture is related to the stress state and flow state of the material. Then the effect of texture on the tensile properties of the room temperature, the superplastic behavior and the plastic deformation mechanism of magnesium and magnesium alloy are analyzed in detail. Finally, the further research directions for FSP magnesium and magnesium alloy are discussed.

**Key words:** friction stir processing; magnesium alloy; texture; mechanical properties

## 1 前言

镁及镁合金作为最轻的金属结构材料, 具有比强度

和比刚度高、阻尼性和减震性好、电磁屏蔽和抗辐射能力强、机加工性能优良等一系列优点, 在汽车和 3C 领域具有重要的应用价值和广泛的应用前景, 具有替代钢和铝的潜力<sup>[1-2]</sup>。但镁及镁合金室温成型性和塑性较差, 限制其广泛应用。Mishra 等<sup>[3]</sup>在搅拌摩擦焊接技术的基础上提出了搅拌摩擦加工 (Friction Stir Processing, FSP) 技术, FSP 的工作原理比较简单: 一个由搅拌针和轴肩组成的加工工具高速旋转使搅拌针插入工件, 当轴肩与工件表面接触后, 工具沿预定方向运行, 使材料产

收稿日期: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51404180, 51274161); 西安建筑科技大学青年科技基金 (QN1303)

第一作者: 杨晓康, 男, 1982 年生, 博士研究生, Email: yangxiaokang2000@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.06.10

生剧烈塑性变形,加之工具与工件间的摩擦热,使加工区域材料发生动态再结晶,形成等轴细晶结构。细化晶粒是提高镁及镁合金强塑性的有效方法之一<sup>[4]</sup>。研究表明,镁及镁合金的屈服强度随晶粒细化提高不明显或者甚至降低<sup>[5-9]</sup>。这主要是因为具有织构的多晶镁及镁合金,其力学性能受晶粒尺寸和晶粒取向分布的综合影响。

本文介绍了镁合金的形变系统和镁合金在搅拌摩擦加工过程中的织构演化规律,并综述了织构对搅拌摩擦加工镁合金力学性能的影响。

## 2 镁及镁合金的形变系统

镁及镁合金为密排六方晶体结构,滑移系的数目较少,轴比为1.624,密排面为 $\{0001\}$ ,密排方向为 $\langle 11\cdot$

20 $\rangle$ 。镁及镁合金的塑性变形主要是通过位错滑移与孪生来实现的。

位错滑移是镁及镁合金的重要变形机制,镁及镁合金的常见滑移系有a滑移和c+a滑移,如图1所示。在常温条件下变形,滑移系开动的临界剪切应力(CRSS)在各自滑移系上的差异非常显著,基面滑移系的CRSS值最低,约为0.6~0.7 MPa,柱面及锥面滑移系的CRSS约为基面滑移系的70倍。随着变形温度的升高,非基面滑移系的CRSS逐渐减小,非基面滑移的趋势增加,当温度达到600 K以上时,基面和非基面滑移系的CRSS值接近。XIN等<sup>[10]</sup>证明,当温度达到625 K时,基面滑移和非基面滑移可以同时启动。

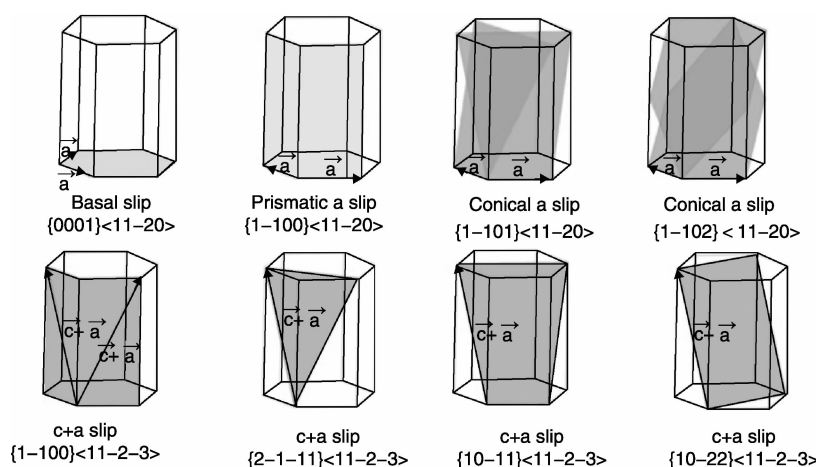


图1 镁及镁合金中常见的滑移系统<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Common slip systems in magnesium alloys<sup>[11]</sup>

除了位错滑移,在镁及镁合金中,孪生是一种重要的晶内塑性变形机制。只有当变形温度很低、应变速率极高或在变形后期位错堆积使滑移受阻时,孪生才能成为其塑性变形的机制<sup>[12]</sup>。镁及镁合金中有 $\{10-12\}$ 拉伸孪生、 $\{10-11\}$ 压缩孪生,以及 $\{11-22\}$ 、 $\{11-21\}$ 等晶面的孪生。其中, $\{10-12\}$ 拉伸孪生变形的临界驱动力最低。通常镁及镁合金中最容易发生变形的方式为基面a滑移及 $\{10-12\}$ 孪生变形,这也是镁及镁合金中形成强织构的主要原因。因为变形模式的单一化增强了晶粒取向与外加应力场的依赖性。镁及镁合金变形过程中,如果其他非基面滑移增加,以及其他孪生方式增加,而不是较单一的基面位错滑移和 $\{10-12\}$ 孪生,镁及镁合金的织构则会随之弱化<sup>[13]</sup>。

## 3 镁及镁合金 FSP 织构的演化规律

密排六方结构镁及镁合金的对称性较低,在加工过

程中较易形成变形织构,形成的织构对其性能有很大影响,因此,研究织构演化规律至关重要。

与搅拌摩擦焊接头类似,整个搅拌摩擦加工区分为轴肩影响区(Shoulder Friction Zone, SFZ)、搅拌区(Stir Zone, SZ)、热机械影响区(Thermal Mechanical Affected Zone, TMAZ)、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)和母材(Base Material, BM)(图2)。镁及镁合金 FSP 区域织构分布及演变较复杂,在不同区域形成不同的织构<sup>[7, 14]</sup>。Park SHC 等<sup>[14]</sup>最早发现加工区域基面(0001)织构沿搅拌针呈圆柱面分布,在后续的研究中,Woo W<sup>[5,7]</sup>、李波等<sup>[15]</sup>



图2 搅拌摩擦加工 AZ31 镁合金的横截面宏观照片<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Cross-sectional macrophotograph of AZ31 magnesium alloy after FSP<sup>[15]</sup>

发现了类似的织构分布,其分布分别见图 3 和图 4。SZ 织构演化与材料应力状态和流动状态有关<sup>[23]</sup>。FSP 镁及镁合金加工区域上部材料在轴肩旋转作用下产生的压应力使剪切面与加工件表面平行<sup>[14, 18]</sup>,下部材料在搅拌针的剪切作用下流动,使材料沿搅拌针圆柱面发生剪切变形<sup>[17]</sup>。

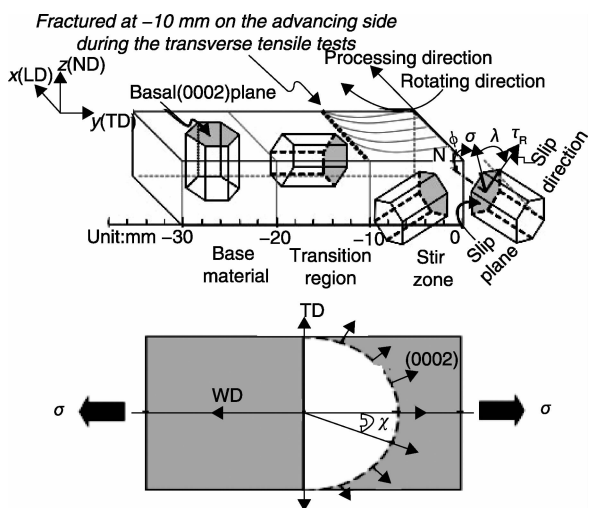


图 3 镁及镁合金 FSP 加工区域织构分布示意图<sup>[5, 7]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of basal plane tracing from the base material, transition region, to stir zone on the advancing side of the FSP Mg plate<sup>[5, 7]</sup>

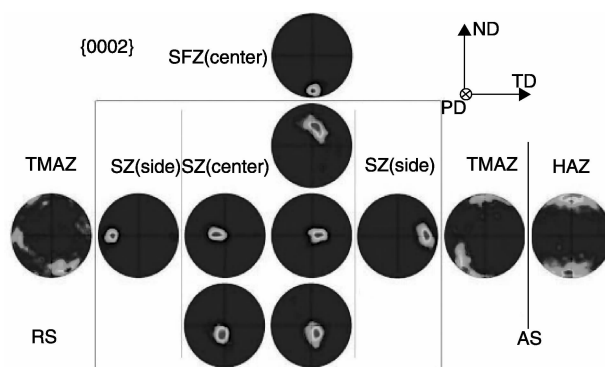


图 4 FSP AZ31 镁合金加工区域不同区域 {0002} 极图<sup>[15]</sup>

Fig. 4 {0002} pole figures of different regions of AZ31 magnesium alloy after FSP<sup>[15]</sup>

Yuan W 等<sup>[16]</sup>主要研究了 FSP 镁及镁合金 SZ 不同厚度处的织构演变规律(图 5)。在距加工上表面 0 ~ 0.5 mm 处,织构演变是由轴肩和搅拌针协同作用产生,轴肩的压应力和水平剪切应力使晶粒的 c 轴与加工件表面垂直,搅拌针剪切作用使晶粒的 c 轴与加工件表面平行;随深度的增加,轴肩剪切作用消失,搅拌针的剪切应力起主导作用,通过剪切变形主导织构变化;在 1.5 mm 处,搅拌针的剪切作用使基面织构 c 轴与 FSP 加工方向(Processing Direction, PD)平行。

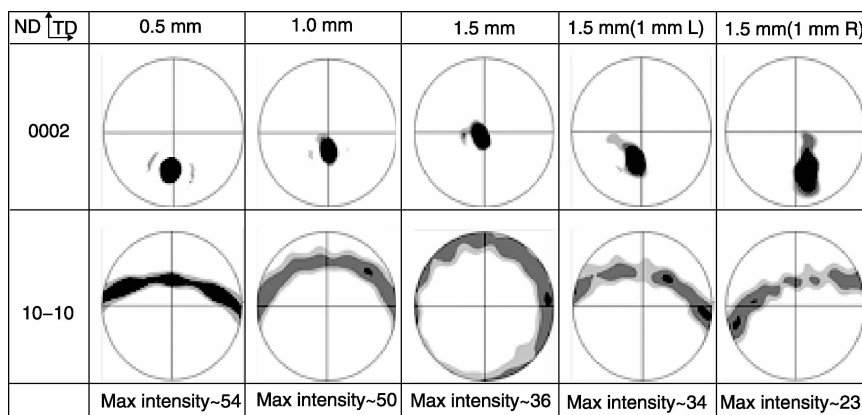


图 5 FSP AZ31 镁合金 SZ 区不同位置的 {0002}、{10-10} 极图<sup>[16]</sup>

Fig. 5 {0002} and {10-10} pole figures of FSPed AZ31 at various locations within the weld nugget<sup>[16]</sup>

## 4 镁及镁合金织构对力学性能的影响

### 4.1 织构对室温拉伸性能的影响

对于不可热处理强化镁合金,晶粒尺寸和晶粒取向是影响镁及镁合金室温力学性能的主要因素,当织构软化或硬化对强度的贡献大于晶粒细化对强度的贡献时,FSP 镁及镁合金的 SZ 屈服强度出现各向异性或晶粒尺寸和屈服强度关系不能满足经典的 Hall-Petch 方程<sup>[5-6, 8, 19-21]</sup>,出

现低  $k$  值。

Wang Y N 等<sup>[5]</sup>拟合了 AZ31 镁及镁合金热挤压和 FSP 试样的 Hall-Petch 方程,沿 PD 方向发现低的摩擦应力  $\sigma_0$  和应力集中因子  $k$  值。Yuan W 等<sup>[6]</sup>的研究工作中沿 PD 方向的拉伸结果与文献<sup>[5]</sup>一致,具有较低的  $\sigma_0$  和  $k$  值(图 6),这是因为经过 FSP 后的基面织构 c 轴沿加工件的法向 ND 向 PD 方向发生转动, Schmid 因子为 0.3,处于软取向。

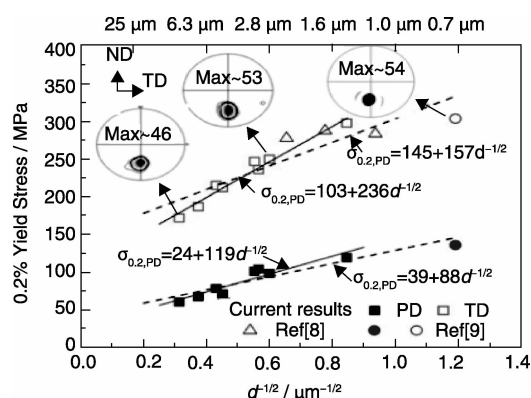


图6 沿PD和TD方向晶粒尺寸和屈服强度的关系及晶粒尺寸对应的极图<sup>[6]</sup>

Fig. 6 The variations of 0.2% yield stress against grain size  $d^{-1/2}$  for FSP AZ31 tested in PD and TD along with previous data, and insets are representative basal pole figures with pole intensities for three average grain sizes<sup>[6]</sup>

Woo W 等<sup>[7]</sup>研究了 FSP 镁及镁合金加工区域(0002)基面织构分布情况及其对拉伸行为的影响。结果表明,在 FSP 过程中剪切变形条件下,基面织构发生转动且重排,织构强度弱化,在 PD 方向 Schmid 因子较大,基面织构易滑移, SZ 的抗拉强度为 200 MPa,低于母材的抗拉强度 250 MPa。王赛香等<sup>[14]</sup>在 FSP 镁及镁合金加工区域发现同样的现象。关于此现象,在等通道转角挤压(Equal Channel Angular Pressing, ECAP)变形的 AZ61、AZ31 合金研究中有类似的情况。在 ECAP AZ61 的研究中发现,随着挤压道次的增加,晶粒尺寸减小,伸长率明显增大,但合金的屈服强度却降低,认为其主要原因是镁及镁合金经 ECAP 变形后晶界和织构的影响大于细晶强化的贡献<sup>[19-20]</sup>。同时也认为对于镁及镁合金,特别是对于不可热处理强化镁合金而言,当晶粒细化到一定程度后,合金的变形行为发生了明显的改变,传统的细晶强化对细晶镁合金性能影响不显著<sup>[21]</sup>。可见,镁及镁合金的力学性能并不单纯遵守 Hall-Petch 关系,这是因为多晶镁及镁合金材料的力学性能同时受到晶粒尺寸和晶体织构等因素的影响。

## 4.2 织构对超塑性行为的影响

织构对超塑性的影响比对室温的力学性能的影响弱,在该方面开展的针对性研究较少,多数研究者认为镁及镁合金超塑性变形机理倾向于以晶界滑移(Grain Boundary Sliding, GBS)为主的多机制叠加理论<sup>[22]</sup>,目前织构对超塑性的影响还存在争论。

Panicker 等<sup>[23]</sup>对 AM60 镁及镁合金做了研究,发现织构对超塑性无影响,而 Kaibyshev<sup>[24]</sup>和 Lin 等<sup>[25]</sup>的实验表明, MA15 和 AZ31 镁及镁合金中织构对流变应力和超

塑性的延伸率都有影响,但这也有可能是晶粒形状、尺寸和分布以及晶界结构所致。Yang Q 等<sup>[26]</sup>制备出晶粒尺寸相同且呈等轴、均匀分布的试样,研究了织构对 FSP ZK60 镁及镁合金超塑性行为的影响。结果表明,当超塑性变形温度高于 225 °C 时,织构强度明显弱化。因此,织构对 FSP ZK60 镁及镁合金超塑性变形过程中流变应力的影响较小。

## 4.3 织构对镁及镁合金塑性变形机理的影响

镁及镁合金 FSP 加工后 SZ 半椭圆形的织构分布表明 SZ 晶粒的 c 轴从边部到中心再到边部与拉伸方向呈 ~10° 到 90° 然后再到 ~10° 的分布形态。镁及镁合金拉伸过程中的塑性变形机理可用图 7 总结,给出了镁及镁合金室温拉伸时晶粒各种取向与滑移和孪生的理论临界剪切应力/施密特因子(CRSS/m)的关系<sup>[9]</sup>。当晶粒 c 轴与拉伸方向角度为 0° ~ 36° 时,孪生的比值最小,容易启动;当晶粒 c 轴与拉伸方向角度为 36° ~ 75° 时,基面滑移的比值最小,容易启动;当晶粒 c 轴与拉伸方向角度为 75° ~ 90° 时,棱柱面滑移的比值最小,容易启动。同时,随着角度的增大,理论 CRSS/m 也越来越大。

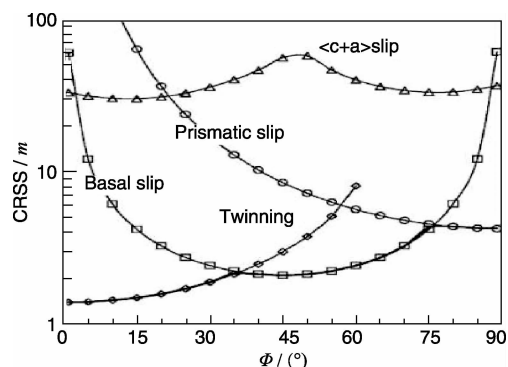


图7 理论 CRSS/m 与拉伸应力方向和晶粒 c 轴夹角的关系<sup>[9]</sup>

Fig. 7 Prediction of the values for CRSS/m as a function of the inclination of the c-axis to the direction for tension<sup>[9]</sup>

## 5 结 语

FSP 技术的开发和应用才刚刚开始,具有广阔的应用前景。目前,对于镁及镁合金 FSP 研究还不够深入,可以从以下几个方面进行深入研究:①镁及镁合金的力学性能影响因素主要包括晶粒尺寸、织构和第二相,通过实验手段分离这些主要因素,定量阐明单因素对力学性能的影响;②由于变形镁及镁合金的各向异性限制其广泛应用,开展稀土镁合金 FSP 研究,实现明显弱化或随机化织构,以期改善镁及镁合金各向异性,提高合金强韧性;③深入研究织构对镁合金超塑性行为的影响,织构弱化的因素及织构的弱化速度,研究织构和 GBS 的关系、织构和 GBS 协同作用对超塑性的影响等。

## 参考文献 References

- [1] Aghion E, Bronfin B, Eliezer D. The Role of Magnesium Industry in Protecting the Environment [J]. *Materials Processing Technology*, 2001 (117): 381–383.
- [2] Chen Zhenhua(陈振华). *Wrought Magnesium and Magnesium Alloy* (变形镁及镁合金) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [3] Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, *et al.* High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al Alloy [J]. *Scripta Mater*, 2000 (42): 163–168.
- [4] Liao X Z, Zhou F, Lavernia E J, *et al.* Deformation Twins in Nano-Crystalline Al [J]. *Appl Phys Lett*, 2003 (83): 5 062–5 064.
- [5] Wang Y N, Chang C I, Lee C J, *et al.* Texture and Weak Grain Size Dependence in Friction Stir Processed Mg-Al-Zn Alloy [J]. *Scripta Mater*, 2006 (55): 637–640.
- [6] Yuan W, Panigrahi S K, Su J Q, *et al.* Influence of Grain Size and Texture on Hall-Petch Relationship for a Magnesium Alloy [J]. *Scripta Mater*, 2011 (65): 994–997.
- [7] Woo W, Choo H, Brown D W, *et al.* Texture Variation and Its Influence on the Tensile Behavior of a Friction-Stir Processed Magnesium Alloy [J]. *Scripta Mater*, 2006 (54): 1 859–1 864.
- [8] Wang Saixiang(王赛香), Zhang Datong(张大童). 搅拌摩擦加工 MB8 镁及镁合金的组织与力学性能分析 [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys* (特种铸造及有色合金), 2011, 31(1): 83–86.
- [9] Barnett M R, Zohreh Keshavarz, Beer A G, *et al.* Influence of Grain Size on the Compressive Deformation of Wrought Mg-3Al-1Zn [J]. *Acta Materialia*, 2004 (52): 5 093–5 103.
- [10] Xin R L, Wang B S, Zhou Z, *et al.* Effects of Strain Rate and Temperature on Microstructure and Texture for AZ31 during Uniaxial Compression [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(s2): 594–598.
- [11] Xu Zeren(徐泽人). *Study on the Effect of Cold Rolling Deformation on the Microstructure and Properties of AZ31 Magnesium and Magnesium Alloy in Friction Stir Welding* (冷轧变形对搅拌摩擦焊接 AZ31 镁及镁合金微观组织与性能影响的研究) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [12] Chang Lili(常丽丽). *Texture Evolution and Mechanical Properties of Wrought Mg and Mg Alloy AZ31* (变形镁及镁合金 AZ31 的组织演变与力学性能) [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2009.
- [13] Ding Wenjiang(丁文江), Jin Li(靳丽), Wu Wenxiang(吴文祥), *et al.* 变形镁及镁合金中的织构及其优化设计 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2011, 21(10): 2 371–2 381.
- [14] Park S H C, Sato Y S, Kokawa H. Effect of Micro-Texture on Fracture Location in Friction Stir Weld of Mg Alloy AZ61 during Tensile Test [J]. *Scripta Materialia*, 2003 (49): 161–166.
- [15] Li Bo(李波). *Microstructure, Texture and Properties of AZ31 Magnesium and Magnesium Alloy by Friction Stir Process and Friction Stir Welding* (搅拌摩擦加工和搅拌摩擦焊接 AZ31 镁及镁合金微观组织、织构与性能研究) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] Yuan W, Mishra R S, Carlson B, *et al.* Effect of Texture on the Mechanical Behavior of Ultrafine Grained Magnesium Alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2011 (64): 580–583.
- [17] Sato Y S, Hiroyuki K, Ikeda K, *et al.* Microtexture in the Friction-Stir Weld of an Aluminum Alloy [J]. *Metall Mater Trans*, 2001 (32): 941–948.
- [18] Park S H C, Sato Y S, Kokawa H. Basal Plane Texture and Flow Pattern in Friction Stir Weld of a Magnesium Alloy [J]. *Metall Mater Trans*, 2003 (34A): 987–994.
- [19] Kim W J, Hong S I, Kim Y S, *et al.* Texture Development and Its Effect on Mechanical Properties of an AZ61 Mg Alloy Fabricated by Equal Channel Angular Pressing [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(11): 3 293–3 307.
- [20] Tao Jun(陶俊). *Effect of Texture and Grain Size on Mechanical Properties of Wrought Magnesium and Magnesium Alloy AZ31* (织构和晶粒尺寸对变形镁及镁合金 AZ31 力学性能的影响) [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [21] Kang Zhixin(康志新), Peng Yonghui(彭勇辉), Kong Jing(孔晶). 等通道转角挤压变形 Mg-1.5Mn-0.3Ce 镁及镁合金的组织、织构与力学性能 [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2009, 38(3): 4–8.
- [22] Gao Xue(高雪), Zhang Zheng(张郑), Wang Kuaishe(王快社), *et al.* 搅拌摩擦加工镁及镁合金超塑性最新研究进展 [J]. *Materials Review* (材料导报), 2014, 28(3): 138–142.
- [23] Panicker R, Chokshi A H, Mishra R K, *et al.* Microstructural Evolution and Grain Boundary Sliding in a Superplastic Magnesium AZ31 Alloy [J]. *Acta Mater*, 2009, 57(13): 3 683–3 693.
- [24] Kaibyshev O A, Kazachkov I V, Alexandrov I V. The Investigation of Texture Formation during Superplastic Deformation of the Zn-22% Al Alloy [J]. *Acta Metallurgica*, 1984, 32(4): 585–589.
- [25] Lin H K, Huang J C, Langdon T G. Relationship between Texture and Low Temperature Superplasticity in an Extruded AZ31 Mg Alloy Processed by ECAP [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 402(1–2): 250–257.
- [26] Q Yang, Feng A H, Xiao B L, *et al.* Influence of Texture on Superplastic Behavior of Friction Stir Processed ZK60 Magnesium Alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012 (556): 671–677.

(编辑 惠琼)