

搅拌摩擦加工 AZ31 镁合金高温变形行为研究

沈福欣 徐 勇 彭 聪 应国民 陈乐平
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 利用 Sans CMT4104 型拉伸试验机对搅拌摩擦加工(Friction Stir Processing,FSP)AZ31 镁合金在变形温度为 250~400 ℃、应变速率为 0.001~0.05 s⁻¹ 条件下的高温变形行为进行研究。结果表明,FSP 处理后,镁合金平均晶粒尺寸减小到 3.89 μm。热变形过程中,随着变形温度升高和应变速率降低,加工区晶粒逐渐粗化。当变形温度为 300~350 ℃,应变速率为 0.001~0.005 s⁻¹ 时,材料的伸长率均超过 100%,表明 FSP 加工后镁合金具有良好的超塑性。在不同热变形条件下,AZ31 镁合金的真应力-真应变曲线均出现峰值,且峰值应力随变形温度的升高和应变速率的降低而减小。综合流变应力和微观组织分析发现,适合 AZ31 镁合金的热变形工艺参数范围是变形温度为 300~350 ℃、应变速率为 0.001~0.005 s⁻¹。

关键词 AZ31 镁合金;高温变形;微观组织;动态再结晶

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Temperature Deformation Behavior of AZ31 Magnesium Alloy after Friction Stir Processing

Shen Fuxin, Xu Yong, Peng Cong, Ying Guomin, Chen Leping
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The high temperature deformation behavior of AZ31 magnesium alloy after friction stir processing (FSP) under deformation temperature of 250 ~ 400 ℃, strain rate of 0.001 ~ 0.05 s⁻¹ were investigated by Sans CMT4104 tensile testing machine. The results show that after FSP treatment, the average grain size of magnesium alloy is decreased to 3.89 μm. In the process of hot deformation, with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate, the grain is coarsened gradually. When the deformation temperature is 300~350 ℃ and the strain rate is 0.001~0.005 s⁻¹, the elongation of the alloy reaches over 100%, which indicates that the magnesium alloy has desirable superplasticity after FSP processing. Under different thermal deformation conditions, the true stress-strain curves of AZ31 magnesium alloy show peak values, and the peak stress is decreased with the increase of deformation temperature and the decrease of strain rate. According to the flow stress and microstructure analysis, the suitable thermal deformation parameters of AZ31 magnesium alloy are 300~350 ℃, and the strain rate is 0.001~0.005 s⁻¹.

Key Words: AZ31 Magnesium Alloy, High Temperature Deformation, Microstructure, Dynamic Recrystallization

镁合金因其密度低、比强度和比刚度高等特点,被广泛应用于汽车、电子、航空航天等领域。AZ31 镁合金是一种具有较高抗振能力和吸热性能的变形镁合金,主要用于制造发动机齿轮机匣、油泵和油管等零件。但是,镁合金的晶体结构为密排六方结构,较少的滑移系导致其塑性较差,室温下成形性差,严重限制了镁合金在某些领域的应用。

目前,细化晶粒是改善 AZ31 镁合金成形性的重要

方式,研究者对此进行了大量研究,如采用快速凝固技术^[1]、等径角挤压^[2]和叠轧^[3]等可以有效地细化镁合金晶粒尺寸。此外,对镁合金进行 FSP 处理可以很好地改善组织^[4]。俞良良等^[5]通过单道次 FSP 加工 AZ31 镁合金板材,发现减少热输入量可以减小镁合金的晶粒尺寸,主要的织构类型为基面织构及纤维织构。高雪等^[6]研究发现,镁合金的超塑性与材料的织构、析出相、热稳定性等因素有关,但是与晶粒尺寸呈非线性关系。

收稿日期:2022-11-24;修改稿收到日期:2023-01-25
第一作者简介:沈福欣,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail: 1586917449@qq.com
通信作者:徐勇,男,1978 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail: xuyong@nchu.edu.cn
引用格式:沈福欣,徐勇,彭聪,等. 搅拌摩擦加工 AZ31 镁合金高温变形行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 085-1 088.
SHEN F X, XU Y, PENG C, et al. High temperature deformation behavior of AZ31 magnesium alloy after friction stir processing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 085-1 088.

史国栋等^[7]研究了 AZ31 镁合金在高温拉伸中的动态再结晶行为,发现温度越高,动态再结晶越完全,且平均晶粒尺寸随变形速率的升高而减小。利用水下 FSP 加工的方法可以将晶粒细化至 1.9 μm,获得优异的超塑性^[8]。目前关于 FSP 处理后镁合金高温变形行为的研究报道较少,本研究在对 AZ31 镁合金进行 FSP 处理后,采用等温恒变速率高温拉伸试验,分析了 FSP 后 AZ31 镁合金在不同热变形条件下的显微组织和力学性能,为 AZ31 镁合金的应用提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 AZ31 镁合金板材,厚度为 3 mm,其化学成分见表 1。由 X53K 型立式铣床改装的搅拦摩擦焊机对板材进行 FSP 加工,使用的搅拌针长为 2.5 mm,宽为 4 mm。选用搅拌头加工速度为 37.5 mm/min,搅拌头转速为 600 r/min,下压量为 0.1 mm。拉伸试样沿着加工方向线切割取样,试样标距段位于搅拌摩擦加工区(Stir Zone, SZ)中心位置,加工后使用砂纸适当研磨试样表面,直至拉伸试样厚度为 2.5 mm,具体尺寸见图 1。

高温拉伸试验在 Sans CMT4104 型拉伸试验机上进行,变形温度分别为 250、300、350 和 400 ℃,应变速

表 1 AZ31 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloys %						
wt%						
Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Mg
2.8	0.9	0.24	<0.01	0.004	<0.01	余量

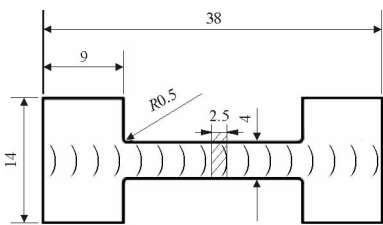
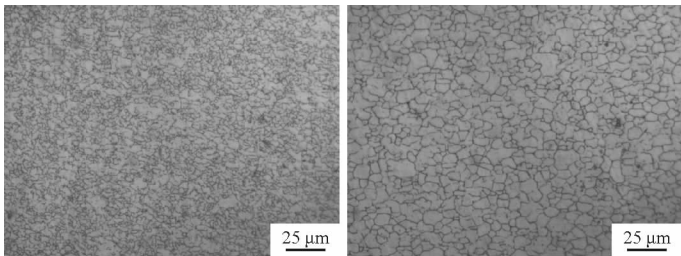


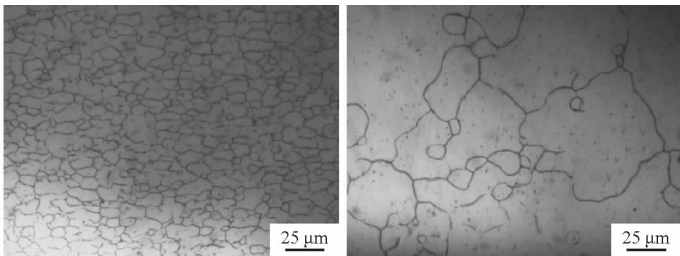
图 1 拉伸试样的形状和尺寸

Fig.1 Profile and dimensions of tensile specimens



(a) 250 ℃

(b) 300 ℃



(c) 350 ℃

(d) 400 ℃

图 3 FSP 后 AZ31 镁合金在应变速率为 0.001 s⁻¹、不同变形温度下的变形显微组织

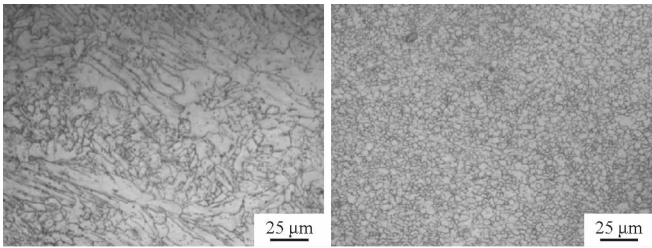
Fig.3 High temperature deformation microstructure of AZ31 magnesium alloy after FSP at strain rate of 0.001 s⁻¹ and different deformation temperatures

率分别为 0.05、0.01、0.005 和 0.001 s⁻¹。为了保留镁合金的高温变形组织,变形结束后迅速将试样置于水中冷却。将变形后的试样沿轴线切割制备金相试样,经打磨抛光后,用腐蚀剂(1 mL 的 HNO₃ + 1 mL 的 CH₃COOH + 1 g 的 H₂C₂O₄ + 150 mL 的 H₂O)进行腐蚀,使用 XJR-6A 光学显微镜观察试样的显微组织。

2 试样结果与分析

2.1 微观组织分析

图 2 为 AZ31 镁合金板材在 FSP 前后的显微组织。由图 2a 可知,原始板材的显微组织中,晶粒大小非常不均匀,细小的等轴晶与粗大晶粒混合分布,平均晶粒尺寸为 9.11 μm。一些晶粒在轧制过程中明显被拉长,形成分布不均的变形带^[9]。图 2b 为 FSP 后的显微组织,可见晶粒明显细化且分布均匀,平均晶粒尺寸减小到 3.89 μm。这是由于在加工过程中,因为搅拌头剧烈的搅拌作用,使加工区材料发生塑性变形、混合、破碎和热暴露^[10],材料在热力学耦合作用下发生动态再结晶,形成等轴状的再结晶晶粒^[11]。



(a) 加工前

(b) 加工后

图 2 AZ31 镁合金板材在 FSP 前后的显微组织

Fig.2 Microstructure of AZ31 magnesium alloy sheet before and after FSP

图 3 为 FSP 加工 AZ31 镁合金试样在应变速率为 0.001 s⁻¹、变形温度为 250~400 ℃条件下高温拉伸后断口附近的显微组织,水平方向为拉伸方向。可以看出,在应变速率为 0.001 s⁻¹ 的条件下,随变形温度升高,平均晶粒尺寸增大。当变形温度为 250 ℃ 时,由于

温度较低,且镁合金的滑移系较少,在塑性变形过程中,孪晶和位错难以通过运动实现重组^[7],动态再结晶的程度不高,少量晶粒合并长大,平均晶粒尺寸为 6.89 μm ,见图 3a。当温度升高到 300 和 350 $^{\circ}\text{C}$ 时,镁合金中原子的扩散速率增加,位错的滑移、攀移更容易发生,加快了动态再结晶的形核,动态再结晶全部完成,晶粒有一定程度的长大,平均晶粒尺寸分别为 7.69 μm 和 11.15 μm ,见图 3b 和图 3c。当变形温度进一步升高到 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,在热作用下晶粒异常长大,形成粗大晶粒,并且在粗晶周围分布着少量细小晶粒,平均晶粒尺寸为

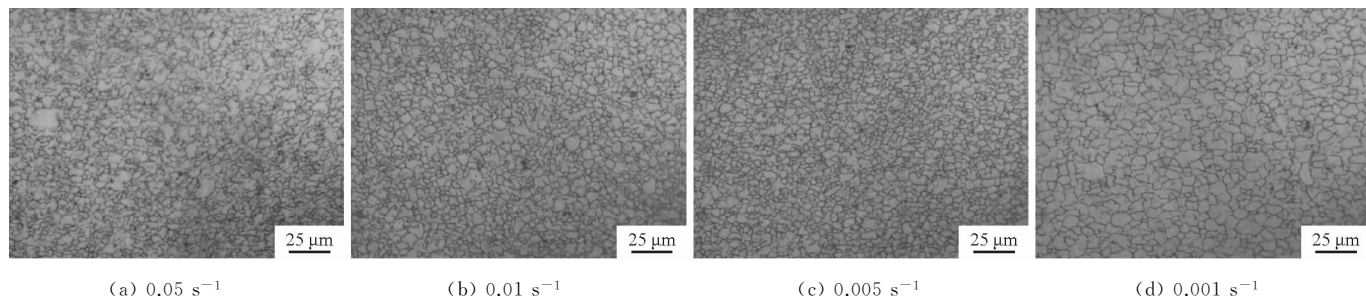


图 4 FSP 后 AZ31 镁合金在变形温度 300 $^{\circ}\text{C}$ 、不同应变速率下的变形显微组织

Fig.4 High temperature deformation microstructure of AZ31 magnesium alloy after FSP at 300 $^{\circ}\text{C}$ and different strain rates

晶粒有足够的时间长大^[12]。

2.2 真应力-真应变曲线

图 5 为 FSP 加工 AZ31 镁合金分别在不同变形温度和不同应变速率条件下的真应力(σ)-真应变(ϵ)曲线。可以看出,当应变速率一定时,流变应力均是先急剧增加并到达峰值,随后流变应力基本保持稳定状态,在试样断裂后急剧下降。这是因为在达到峰值应力前加工硬化起主导作用,在塑性变形过程中,位错密度不断增大,储能升高,发生了动态回复和动态再结晶,软化作用逐渐增强,当加工硬化和再结晶为主的软化达到动态平衡后,流变应力便趋于稳定^[13]。当应变速率一定时,随着变形温度升高,稳态流变应力减小,稳态变形阶段持续时间变长,但是当温度为 400 $^{\circ}\text{C}$ 时,持续时间反而缩短,见图 5a。这是因为温度过高使试样晶粒粗化

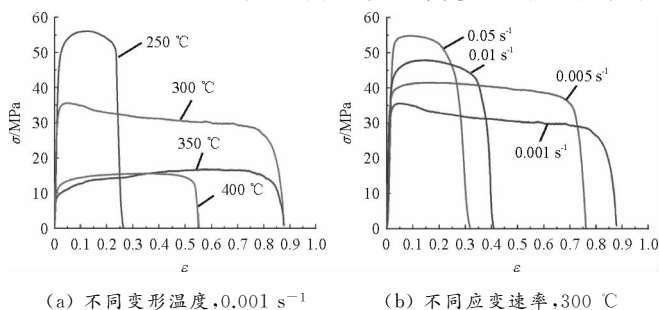


图 5 FSP 后 AZ31 镁合金在不同高温变形条件下的真应力-真应变曲线

Fig.5 True stress-strain curves of AZ31 magnesium alloy after FSP under different high temperature deformation conditions

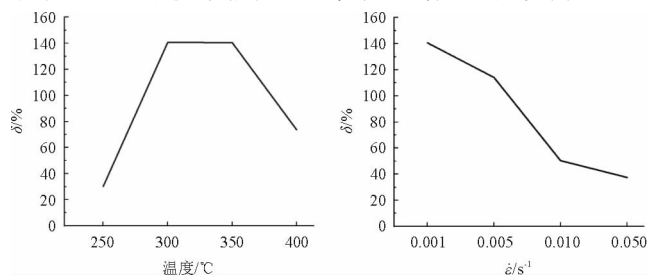
28.57 μm 。

图 4 为 FSP 加工 AZ31 镁合金在变形温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为 0.001~0.05 s^{-1} 条件下高温拉伸后断口附近的显微组织(水平方向为拉伸方向)。从图 4a 可以看出,当应变速率为 0.05 s^{-1} 时,由于变形时间短,动态再结晶未充分进行,还保留了部分细小的晶粒,平均晶粒尺寸为 4.44 μm 。随着应变速率降低,晶粒尺寸越来越均匀,且发生不同程度的长大,加工区的平均晶粒尺寸分别长大至 4.95、5.22 和 7.69 μm 。这是因为应变速率越小,试样的变形时间越长,动态再结晶越充分,

严重,抵消了再结晶软化作用,使试样很快发生失效断裂导致。当变形温度一定时,随着应变速率减小,稳态流变应力减小,稳态阶段持续时间延长,见图 5b。这是因为应变速率越小,变形时间越长,单位时间内启动的位错数目越少,使加工硬化作用减弱,同时动态再结晶的软化加剧^[13],二者之间的动态平衡被打破,稳态阶段无法再保持,因此试样发生断裂失效。

2.3 变形温度和应变速率对伸长率的影响

图 6 为 FSP 加工 AZ31 镁合金分别在不同变形温度和不同应变速率条件下的伸长率(δ)。由图 6a 可以发现,当应变速率为 0.001 s^{-1} 时,随变形温度升高, AZ31 镁合金的伸长率有较大提高,在 300 和 350 $^{\circ}\text{C}$ 均超过了 100%,这是因为温度升高使镁合金有更多的滑移系被激活,变形能力增强,降低晶界处的位错密度,同时增强了晶界扩散能力^[13]。但是,当变形温度为 400 $^{\circ}\text{C}$



(a) 不同变形温度,0.001 s^{-1} (b) 不同应变速率,300 $^{\circ}\text{C}$

图 6 FSP 后 AZ31 镁合金在不同高温变形条件下的伸长率
Fig.6 Elongation of AZ31 magnesium alloy after FSP under different high temperature deformation conditions

时,温度过高导致晶粒粗化严重,甚至异常长大,在应力集中的作用下,晶界滑移过程中容易形成孔洞^[12],进而使试样失效断裂,伸长率反而下降,见图6a。变形温度为300℃,当应变速率为0.001和0.005 s⁻¹时,试样的伸长率分别为140.6%和114.1%,材料表现出超塑性,但是当应变速率增大到0.01 s⁻¹后,单位应变的变形时间缩短,晶界没有足够的时间进行扩散和滑移,位错密度增大^[13-14],伸长率分别降至50.4%和37.5%。

2.4 变形温度和应变速率对峰值应力的影响

图7为FSP加工AZ31镁合金分别在不同变形温度和不同应变速率条件下的峰值应力。从图7a中可以看出,在应变速率一定时,峰值应力随着温度的升高而不断下降。这是因为温度升高增大了金属原子热振动的振幅,加剧了位错的滑移或攀移,合金吸收较多的变形能^[15],使得再结晶软化增强,同时储热增加使原子间结合力降低,并降低材料的临界剪切应力。当提高温度至300℃时,峰值应力下降最快,说明温度超过300℃时,AZ31镁合金的塑性变形能力有明显的提升。从图7b可以发现,在变形温度一定时,峰值应力随着应变速率的增大而明显上升,这是因为提高应变速率使塑性变形时间缩短,动态再结晶不充分,位错大量增殖,材料内部的应力集中更明显,变形抗力增加^[15]。此外,当应变速率为0.05 s⁻¹或变形温度为250℃时,峰值应力曲线的斜率较大,说明在这些条件下,峰值应力的敏感性较大。

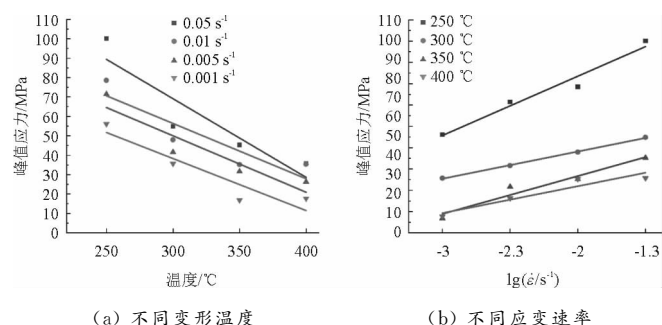


图7 FSP后AZ31镁合金在不同高温变形条件下的峰值应力
Fig.7 Peak stress of AZ31 magnesium alloy after FSP under different high temperature deformation conditions

3 结论

(1)FSP加工AZ31镁合金在一定的高温拉伸变形条件下具有良好的超塑性,但是在变形温度超过350℃后,会因为储热过大而使再结晶晶粒异常长大,进而对试样伸长率产生不利影响;在应变速率为0.05 s⁻¹时,由于变形时间短,动态再结晶无法充分进行,试样会快速失效断裂。

(2)FSP加工AZ31镁合金的流变应力随着变形的进行迅速达到峰值,随后达到动态平衡直至试样断裂。适当提高变形温度、降低应变速率可以使稳态持续时间更长。材料的变形温度越低、应变速率越大,峰值应力越大。

(3)在热变形过程中,参数的变化对FSP加工AZ31镁合金微观组织的影响很大,流变应力与应变速率、变形温度的关系也密不可分。试验后发现,当选择变形温度为300~350℃,应变速率为0.001~0.005 s⁻¹时材料具有较好的性能。

参考文献

- [1] 盛绍顶,严红革,陈振华.快速凝固粉末冶金AZ91镁合金的组织性能[J].矿冶工程,2010,30(1):69-72.
- [2] 周超. AZ31镁合金等径角挤压晶粒细化及组织均匀性研究[D].成都:西华大学,2015.
- [3] 管笛,曲美晶,花福安.累积叠轧温度对AZ31镁合金组织和性能的影响[J].金属热处理,2021,46(11):78-83.
- [4] 项超.搅拌摩擦加工镁合金的超塑性[J].热加工工艺,2021,50(18):10-14.
- [5] 俞良良,张郑,王快社,等.搅拌摩擦加工对AZ31镁合金微观组织及力学性能的影响[J].材料导报,2018,32(8):1289-1293.
- [6] 高雪,张郑,王文,等.搅拌摩擦加工AZ31细晶镁合金超塑性行为[J].稀有金属材料与工程,2016,45(7):1855-1860.
- [7] 史国栋,乔军,何敏,等.铸轧AZ31镁合金在高温拉伸中的动态再结晶行为[J].中国有色金属学报,2013,23(7):1796-1804.
- [8] 柴方.水下搅拌摩擦加工AZ系镁合金组织演变和变形机理的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [9] 刘迪. AZ31镁合金多道次轧制板材的显微组织及力学性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 王快社,王文,郭犇,等.搅拌摩擦加工铸态AZ31镁合金组织与性能研究[J].稀有金属材料与工程,2010,39(7):1275-1278.
- [11] 韩若冰,沙桂英,徐荣正,等.搅拌摩擦加工工艺对AZ31镁合金显微组织与拉伸性能的影响[J].热加工工艺,2016,45(2):56-59.
- [12] 乔柯,王晨曦,刘明霞,等.搅拌摩擦加工AZ31超细晶镁合金超塑性行为[J].塑性工程学报,2021,28(4):105-111.
- [13] 王孟君,姜海涛,任杰,等.AZ31B镁合金高温拉伸变形行为的研究[J].金属热处理,2008(11):44-47.
- [14] 乔军,边福勃,何敏,等.铸轧AZ31镁合金的高温拉伸性能[J].北京科技大学学报,2013,35(4):503-509.
- [15] 李建军,杨小红,王忠堂.GH4169高温合金热变形力学性能研究[J].热加工工艺,2020,49(12):49-52.

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com