

# AZ91 镁合金搅拌摩擦加工后的组织与性能

吕勤云, 沙桂英, 王洪顺

(沈阳航空工业学院, 沈阳 110136)

**摘要:** 采用 400 rpm-100mm /m in, 800 rpm-100mm /m in, 800 rpm-200mm /m in 三种工艺参数对铸态 AZ91 镁合金进行搅拌摩擦加工 (FSP) 处理, 并对合金加工前后的显微组织和拉伸性能及微观断裂机制进行分析。结果表明, 经 800rpm-100mm /m in 工艺 FSP 处理后, 合金的显微组织明显细化, 延伸率和抗拉强度显著提高, 综合拉伸性能最好, 且拉伸断口主要表现为韧性断裂的特征。这主要是由于在 FSP 过程中合金发生动态再结晶, 使合金晶粒显著细化及粗大相的溶解和破碎所致。

**关键词:** AZ91 镁合金; 搅拌摩擦加工; 显微组织; 性能

**中图分类号:** TG113.25

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-5053(2008)04-0027-04

搅拌摩擦焊 (Friction stir welding, FSW) 是 1991 年英国焊接研究所 (The Welding Institute, TWI) 针对焊接性差的铝合金、镁合金等轻质有色金属开发的一种新型固相连接技术, 自开发以来主要用于工件的连接。近几年, 一些专家学者将该项技术发展成为一种用于材料改性的搅拌摩擦加工技术 (Friction stir processing, FSP), 其原理与 FSW 相同, 只是加工的对象不再是两个分离的板材, 而是一个整体板材, 旨在通过搅拌针的搅拌作用改善工件的微观组织, 从而提高材料的性能, 并通过控制加工参数实现不同的加工目的, 也可以进行多道式覆盖加工, 从而实现大面积改性<sup>[1]</sup>。FSP 技术已经成功应用于高强铝合金和铸态铝合金, 效果十分显著, 合金性能有很大程度提高<sup>[2,3]</sup>。关于在镁合金中的应用已有报道, F. Y. Hung 等人<sup>[4,5]</sup>将 FSP 技术应用到 AZ31 镁合金, 并对加工处理后的镁合金进行拉伸实验。结果表明, 在适宜的加工参数下, AZ31 镁合金的强度和延展性大幅增强。这些力学性能的提高归功于微观组织的细化、均匀化以及孔洞的消除。

随着汽车工业的发展, 压铸镁合金的生产迅速扩大, 对其致密性、微观组织和力学性能的要求也越来越高, 目前改善镁合金组织性能的方法主要有合金化、晶粒细化、半固态成型、热处理等<sup>[6,7]</sup>。本工

作针对汽车工业极具应用潜能的 AZ91 铸造镁合金, 采用刚刚兴起的 FSP 先进材料改性技术, 对其进行加工处理, 探讨 FSP 对 AZ91 镁合金组织与性能的影响, 为优选 FSP 工艺参数及镁合金在汽车、航空航天及通讯电子等行业领域中的应用提供技术支撑。

## 1 试验材料及方法

试验材料为普通的铸造 AZ91 镁合金。采用 FSW-51M-020 型搅拌摩擦焊机对合金进行 FSP 处理, 具体工艺参数示于表 1, 板材尺寸为 100mm × 500mm × 15mm。利用 Olympus 7.0 金相显微镜观察合金母材与加工区显微组织。采用 AG-5000A 电子万能试验机测试合金的拉伸力学性能, 拉伸试样几何如图 1, 拉伸加载方向平行于 FSP 处理方向。用 KYKY-2800B 型扫描电镜观察分析断口。

表 1 AZ91 合金搅拌摩擦加工工艺参数

Table 1 FSP processing parameters of AZ91 alloy

| Technology No | Sample No | Technology parameters |
|---------------|-----------|-----------------------|
| 1             | AZ-1      | 400rpm-100mm /m in    |
| 2             | AZ-2      | 800rpm-100mm /m in    |
| 3             | AZ-3      | 800rpm-200mm /m in    |

Notes: the first part of the technology parameter is tool rotation rate, and the next part is traverse speed

收稿日期: 2007-06-03; 修订日期: 2007-11-06

作者简介: 吕勤云 (1981-), 女, 硕士, 主要从事轻质结构材料组织与性能方面的研究。

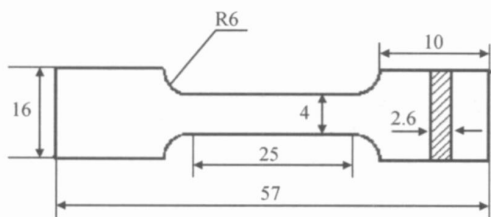


图 1 拉伸试样形状及尺寸 / mm

Fig 1 Shape and dimension of tensile specimen

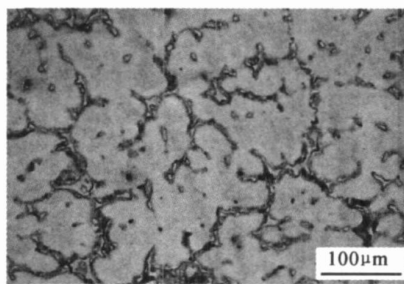


图 2 AZ91合金的显微组织

Fig 2 Microstructure of AZ91 alloy

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 AZ91 镁合金的显微组织

图 2 是加工前 AZ91 镁合金的显微组织。由图 2 可看出, AZ91 镁合金的铸态组织是由  $\text{-Mg}$  基体固溶体,  $\text{-Mg}$  和  $\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  离异共晶组织组成, 晶界上  $\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  呈条块状分布, 晶内  $\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相呈颗粒状分布。

### 2.2 FSP 处理对 AZ91 镁合金显微组织的影响

图 3 是经三种不同工艺参数 FSP 处理后 AZ91 镁合金的显微组织照片。对比图 2 和图 3 可以看出, 经  $800\text{rpm}-100\text{mm}/\text{min}$ ,  $800\text{rpm}-200\text{mm}/\text{min}$  工艺参数 FSP 处理后, AZ91 镁合金的显微组织显著细化, 加工前平均晶粒尺寸大约为  $170\ \mu\text{m}$ , 加工后大

约近  $30\ \mu\text{m}$ 。但在图 3a 中却看不到常规的晶粒组织, 而是呈现出类似于卫星云图的流线状组织。这是由于搅拌摩擦针头的转速较低, 摩擦所生热量少, 使加工区未发生动态再结晶而以加工硬化为主, 因此形成了旋转的纤维线, 且不很均匀。由图 3b~d 可看出, FSP 处理工艺参数不同, 晶粒大小也有所不同, 在搅拌针的旋转速度一定的情况下, 板材进给速度减小, 晶粒尺寸略有增大, 但组织的均匀性稍好。这是由于进给速度减小, 加工过程中产生的热量能促进动态再结晶较充分地进行。相反, 板材进给速度加快, 加工过程中产生的热量会减少, 动态再结晶过程不宜充分进行, 从而影响合金显微组织均匀性的改善(图 3d)。

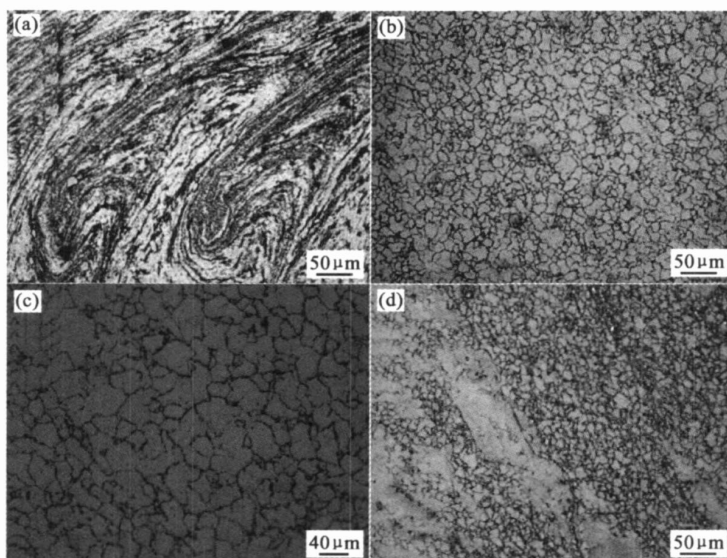


图 3 不同加工参数处理后 AZ91 镁合金的显微组织

Fig 3 Microstructure of AZ91 alloy processed with different parameters

(a)  $400\text{rpm}-100\text{mm}/\text{min}$ ; (b)  $800\text{rpm}-100\text{mm}/\text{min}$ ; (c) local magnification of fig (b); (d)  $800\text{rpm}-200\text{mm}/\text{min}$

### 2.3 FSP 处理对 AZ91 镁合金拉伸性能的影响

分别对加工前与加工后的试样进行拉伸试验。结果如表 2。由表 2 可见,与母材相比,FSP 处理后 AZ91 镁合金的拉伸性能均显著提高,特别是加工参数为 800rpm-100mm/m in 的 AZ-2 试样综合力学性能最好,抗拉强度为 290.5MPa(提高 179.7MPa),屈服强度为 104.9MPa(提高 32.3MPa),延伸率为 17.9%(提高 15.1%)。这主要是由于 AZ-2 试样获得较均匀、极细小的等轴晶所致。而且,由表 2 还可以看到,FSP 处理后合金的力学性能与加工参数有很大关系。在搅拌针旋转速度相同时,板材进给速率减小,抗拉强度和延伸率升高,屈服强度则降低。当板材进给速度减少时加工过程中产生的热量增加,合金中的  $Mg_{17}Al_{12}$  相溶解增多,产生的固溶强化作用增强,沉淀强化作用减小,导致屈服强度降低(从 120.4MPa 降到 104.9MPa),这与 Mahoney 研究的结果基本吻合。他在研究 FSW 对 7075A-T651 室温下拉伸力学性能的影响时发现,加工后加工区屈服强度有所降低,他认为强度的降低主要因为先

前存在位错的减少和细小沉淀强化相的消除,当对加工后的样品进行时效处理后,屈服强度又会增加<sup>[8]</sup>。此外,由于脆性  $Mg_{17}Al_{12}$  相的溶解可大大降低位错运动阻力,使合金的塑性变形能力增强,进而使延伸率提高。另一方面,随着合金变形能力的增强,导致加工硬化历程延长,从而导致合金的抗拉强度提高(由 254.1MPa 提高到 290.5MPa)。当板材进给速率一定,搅拌针旋转速度增加时,拉伸性能的变化规律与上述基本一致。上述合金性能变化主要是由 AZ-1 试样以冷变形强化为主,AZ-2 试样发生较充分的动态再结晶所致。同时 AZ-2 试样的屈服强度较低也受较多热量传输的影响,而 AZ-1 试样的延伸率较高可能与拉伸方向平行于纤维线方向有关。

综合以上分析,加工参数对 AZ91 镁合金组织与性能的影响是有一定的规律的。一般来说,搅拌针的旋转速度增大,组织细化,综合性能提高,但一味地增加旋转速度,由于产热过量,晶粒发生长大,性能会跟着下降。同理,当板材进给速度减小时,产热增多,组织较细小、均匀,性能较好,但当进给速度过小时,会使组织粗化,力学性能下降。因此,基于本试验研究结果,800rpm-100mm/m in 的参数为铸造 AZ91 镁合金搅拌摩擦加工处理的最佳工艺参数,可以取得较好的综合力学性能。

### 2.4 AZ91 镁合金 FSP 处理后的拉伸断口形貌

图 4 为不同参数加工的 AZ91 镁合金试样拉伸断口的 SEM 照片。由图 4 可见,AZ91 镁合金经 FSP

表 2 AZ91 合金的拉伸力学性能

Table 2 Mechanical properties of AZ91 alloy

| Sample No. | Technology parameters | $\sigma_b / \%$ | $\sigma_{0.2} / \text{MPa}$ | $\delta_5 / \%$ |
|------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| AZ-0       |                       | 2.8             | 72.6                        | 110.8           |
| AZ-1       | 400rpm-100mm/m in     | 10.6            | 135.1                       | 267.5           |
| AZ-2       | 800rpm-100mm/m in     | 17.9            | 104.9                       | 290.5           |
| AZ-3       | 800rpm-200mm/m in     | 11.0            | 120.4                       | 254.1           |

Note: AZ-0 is the AZ91 alloy sample unprocessed by FSP.

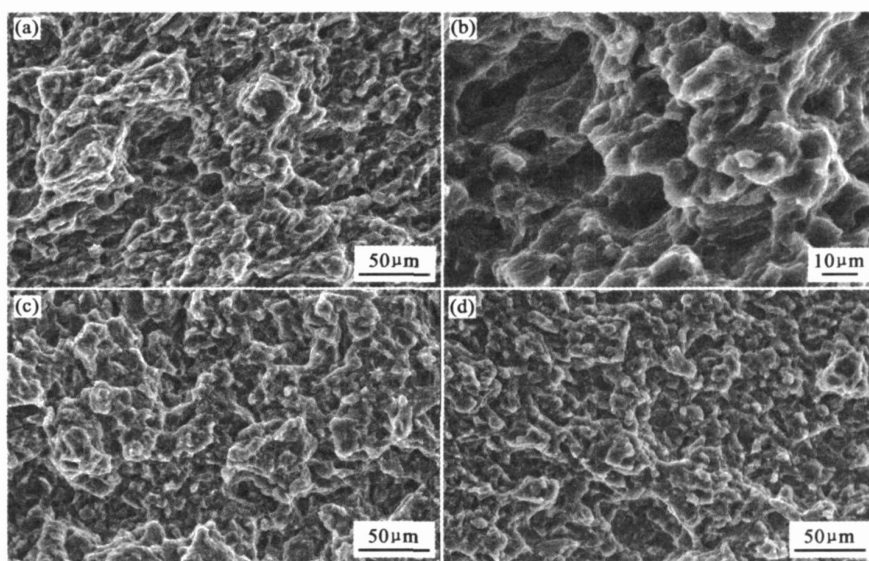


图 4 不同加工参数处理后拉伸试样的 SEM 断口形貌

Fig 4 Fractographs of friction stir-processed tensile samples of AZ91 alloy

(a) 400 rpm-100mm/m in (b) local magnification of fig (a); (c) 800rpm-100mm/m in (d) 800rpm-200mm/m in

经 FSP 处理后拉伸断口主要表现为韧性断裂, 断口中均有较多的韧窝, 但在 AZ-1 试样的断口中有少量的沿晶断口和二次裂纹, 而在 AZ-2 试样的断口中韧窝较深些, 这与前面的性能变化是吻合的。

### 3 结 论

(1) 搅拌摩擦加工技术用于铸造镁合金改性是有效可行的, 400rpm-100mm/m in, 800rpm-100mm/m in, 800rpm-200mm/m in 工艺参数下进行 FSP 处理均可显著提高 AZ91 镁合金拉伸性能, 但 400rpm-100mm/m in 工艺参数下 AZ91 镁合金未发生动态再结晶, 而在 800rpm-100mm/m in 和 800rpm-200mm/m in 工艺参数下 AZ91 镁合金发生动态再结晶。

(2) 采用 800rpm-100mm/m in 工艺参数进行搅拌摩擦加工, AZ91 镁合金可获得晶粒细小、均匀的等轴晶组织和优异的拉伸性能。与母材相比, 延伸率提高 15%, 抗拉强度增加 179 MPa, 屈服强度增加 32 MPa。

**致谢** 本研究的搅拌摩擦加工是在中国科学院金属研究所完成的, 在试验过程中得到马宗义老师的指导和支持, 在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

[1] MA Z Y, SHARMA S R. Effect of multiple-pass friction stir

processing on microstructure and tensile properties of a cast aluminum-silicon alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54 (9): 1623-1626

[2] SU J Q, NELSON T W. Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 405 (1-2): 277-286

[3] MA Z Y, SHARMA S R. Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 433 (1-2): 269-278

[4] HUNG F Y, SHIH C C. Microstructures and high temperature mechanical properties of friction stirred AZ31-Mg alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 428 (1-2): 106-114

[5] ESPARZA J A, DAVIS W C. Friction-stir magnesium alloy AZ31B [J]. *Journal of Materials Science Letters* 2002, 21: 917-920

[6] 刘生发, 黄尚宇, 徐萍. Ce 对 AZ91 镁合金铸态组织细化的影响 [J]. *金属学报*, 2006, 42 (4): 443-448

[7] LI Y, ZHANG D T. Microstructure and tensile behavior of hot extruded AZ91 alloys at room temperature [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 2002, 9 (5): 352-355

[8] MAHONEY M W, RHODES C G, FLINTOFF J G, *et al*. Properties of Friction-Stir Welded 7075-T651 Aluminum [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1998, 29 A: 1955-1964

## Microstructure and Properties of Friction Stir-Processed AZ91 Magnesium Alloy

L Qir-yun, SHA Gui-ying, WANG Hong-shun

(Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract** Friction stir processing was applied to AZ91 magnesium alloy with 3 different parameters: 400rpm-100mm/m in, 800rpm-100mm/m in, 800rpm-200mm/m in. The microstructure, tensile properties and micro-fracture mechanism of the alloy were analyzed before and after processing. The results suggest that the friction stir processing at the parameter of 800rpm-100mm/m in can cause apparent grain refinement, significant improvement in ductility and ultimate strength, best comprehensive tensile strength of the AZ91 alloy. Moreover, the fracture of the alloy takes on a feature of toughness fracture. The improvement in microstructure and properties was due to the dynamic recrystallization during FSP, which refined the grains of the alloy efficiently and the dissolution and brokenness of the phase during FSP.

**Key words** AZ91 magnesium alloy; friction stir processing; microstructure; properties