

# 等径弯曲通道变形镁合金的搅拌摩擦焊接

王快社<sup>1</sup>, 王文<sup>1</sup>, 徐可为<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055 2 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 研究了等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金的搅拌摩擦焊工艺, 对焊缝的成形特点和力学性能进行了分析。试验结果表明, 对厚为 15mm 的等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金板, 工艺参数对焊缝成型有很大的影响, 成型性能对焊接速度的敏感程度较铝合金板要大, 当焊接速度为 37.5mm/m in 和搅拌头旋转速度为 750r/m in 时, 可以获得较好的焊接质量。

**关键词:** 等径弯曲通道变形; 搅拌摩擦焊接; 镁合金; 力学性能

中图分类号: TG453<sup>+</sup> 9

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2007)03-0051-04

等径弯曲通道变形 (Equal Channel Angular Pressing ECAP) 是 1981 年由前苏联 Segal 等人提出的一种独特的制备高性能、超细晶金属块体材料的加工方法<sup>[1]</sup>。通过晶粒细化的强化方式增大材料的强度。俄罗斯的 Vladimir V. Stolyarov 对商业纯钛在一定温度下进行等径弯曲通道变形然后冷挤压的工艺细化晶粒, 从而提高了强度<sup>[2]</sup>。C. W. Su 研究了机械合金化和等径弯曲通道变形的镁合金的机械性能, 发现机械性能显著提高。等径弯曲通道变形对温度和加工道次数比较敏感<sup>[3]</sup>。Akihito Yamashita 也发现等径弯曲通道变形镁合金的机械性能得到明显改善<sup>[4]</sup>。镁合金的大量使用, 必将面临连接问题。采用常规熔化焊接时, 易产生裂纹、气孔等缺陷。搅拌摩擦焊 (friction stir welding FSW) 是英国焊接研究所 (TWI) 于 1991 年发明的新型固相连接方法<sup>[5-8]</sup>。搅拌摩擦焊接过程示意图如图 1 所示。到目前为止, 关于等径弯曲通道变形镁合金的焊接问题国内外还鲜有报道。本实验研究针对等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金进行了搅拌摩擦焊接, 并对焊缝的成型特点和微观组织、力学性能结合焊接质量图表进行了分析。

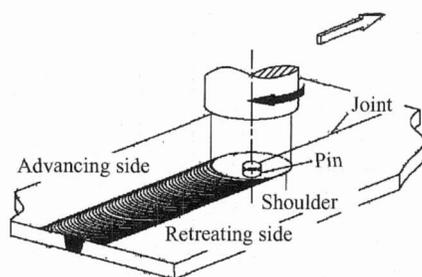


图 1 搅拌摩擦焊接示意图

Fig 1 Schematic diagram of friction stir welding

## 1 试验材料与方法

等径弯曲通道变形试验选用 AZ31 镁合金, 它属于镁-铝-锌系不可热处理强化变形镁合金。AZ31 镁合金化学成分 (wt%) 为 3.7~4.7Al, 0.30~0.60Mn, 0.8~1.4Zn, 余量为 Mg。利用线切割机切成 15mm×30mm×100mm 的焊接试样备用以进行搅拌摩擦焊接。

表 1 搅拌摩擦焊接工艺参数

Table 1 Parameters of FSW welding

| No | Rotation speed / rpm | Welding speed / mm min <sup>-1</sup> |
|----|----------------------|--------------------------------------|
| 1  | 1500                 | 95                                   |
| 2  | 950                  | 95                                   |
| 3  | 750                  | 60                                   |
| 4  | 750                  | 37.5                                 |

收稿日期: 2006-04-21; 修订日期: 2006-07-31

基金项目: 陕西省教育厅产业化项目 (04JC18); 西安市工业攻关项目 (GG04063) 资助

作者简介: 王快社 (1966), 男, 教授, 主要研究方向为材料加工新技术新工艺, (E-mail): wangkuaishe@yahoo.com.cn

进行搅拌摩擦焊接试验时, 首先将镁合金板接头端面用刨床刨平, 并用钢丝刷将工件待连接表面刷干净。试验所用设备是改装的 JCS-2 5-13 型立式数控铣床, 其搅拌头的旋转速度为  $375 \sim 2250 \text{ r/min}$ , 连接速度为  $20 \sim 375 \text{ mm/min}$ , 试样所用搅拌头形状及尺寸示意图如图 2 所示。实验时, 将待连接的两块镁合金板放在平台上对齐夹紧, 防止跑偏。对其进行搅拌摩擦焊接。

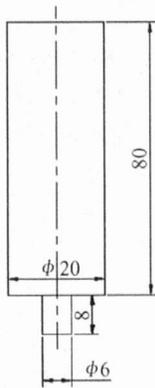


图 2 搅拌头形状及尺寸

Fig 2 Shape and sizes of stirrer

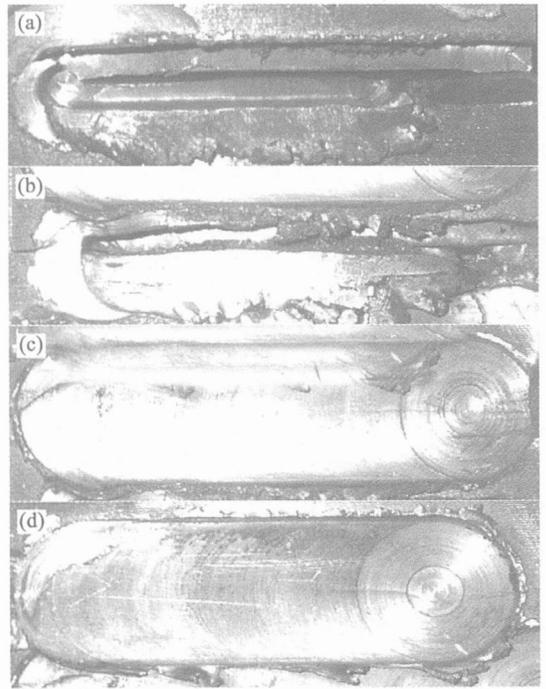


图 3 不同参数下的接头成型

Fig 3 Joint formation at different parameters

(a) 1<sup>#</sup>; (b) 2<sup>#</sup>; (c) 3<sup>#</sup>; (d) 4<sup>#</sup>

## 2 试验结果与分析

### 2.1 成型性能

相对铝合金搅拌摩擦焊接试验, ECAP 镁合金的焊缝成型比较特殊, 主要体现在:

(1) 焊接热输入量不能过大, 否则容易出现过烧现象。在试验过程中当搅拌头的旋转速度达到  $1500 \text{ r/min}$  时, 搅拌针附近的材料发生急剧变化并且有明火出现, 搅拌针由于温度过高而断裂, 焊接无法进行。

(2) 焊接速度不能过大, 当焊接速度为  $95 \text{ mm/min}$  时, 材料在前方被搅拌针挤出, 向后方流动的能力很差, 从而形成沟槽型缺陷。如图 3b 所示。这是因为镁合金的流动性能相对铝合金来说较差, 在旋转速度一定的情况下, 其成型性能有下降趋势。因此, 在本试验中当焊接速度调整到  $37.5 \text{ mm/min}$  时, 可以看出具有良好的焊缝成型。如图 3d 所示。

(3) 在焊接  $15 \text{ mm}$  的 ECAP 镁合金板材时, 由于搅拌头在插入过程中, 挤压材料的量较大, 材料呈泡沫状挤出, 所形成的挤压力较大, 本试验封闭的轴肩直径为  $20 \text{ mm}$ , 因此不稳定焊接状态比较明显, 因此可适当增大压入深度为  $1.5 \sim 2 \text{ mm}$  后, 焊接状态恢复较好。

### 2.2 接头显微组织与力学性能

从 4a 中可以看出: AZ31 镁合金母材晶粒比较粗大, 晶粒尺寸大约为  $50 \sim 70 \mu\text{m}$  之间, 晶粒大小不均匀, 晶界存在一定的析出物。两道次 ECAP 变形后的镁合金组织晶粒明显细化, 如图 4b 所示。但是可以发现存在着部分的粗大晶粒, 周围分布着弥散、细小的等轴晶粒。在 ECAP 变形过程中, 部分组织区域由于能量差异造成晶粒细化的程度不同, 从本实验可以看出, 两道次 ECAP 变形以后晶界首先开始破碎, 然后过渡到晶内, 随着驱动能的减小, 剪切力随之减小。从图 4c 中可以看出: 搅拌摩擦焊接接头的焊核区域, 晶粒明显细化, 晶粒大小差异变小, 呈近似等轴状, 晶粒尺寸约为  $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 。从图 4d 中可以看出: 由于此工艺参数条件下的热输入量较合适, 焊核区附近的热影响区域的过渡较平缓, 热机影响区域几乎观察不到。

AZ31 镁合金经过多道次挤压后抗拉强度为  $298 \text{ MPa}$ , 这是由于材料的屈服强度与晶粒大小存在着 Hall-Petch 关系, 同时晶粒细化不仅可以提高材料的强度, 而且可以提高其塑性, 对 AZ31 镁合金, 细晶强化是提高镁合金强度的有效方法之一。同时实验发现, 变形后试样强度增量初始随着变形程度的增加而增大, 但达到一定程度, 强度增量不再增大, 甚而有减小的趋势。研究表明<sup>[9]</sup>, 在较低的

变形程度下,随着变形程度的增加,晶粒发生细化,强度增加;而应变增大到一定程度后,由于较大的变形提供了更多的能量,使得相界的扩散能力增强,有机会吞并附近细小的晶粒,从而在一定条件下,使得

晶粒数量减少,尺寸变大。即超过临界值后,则进入晶粒长大阶段。从而出现随变形程度增大,强度增量不再增大反而有减小的趋势。

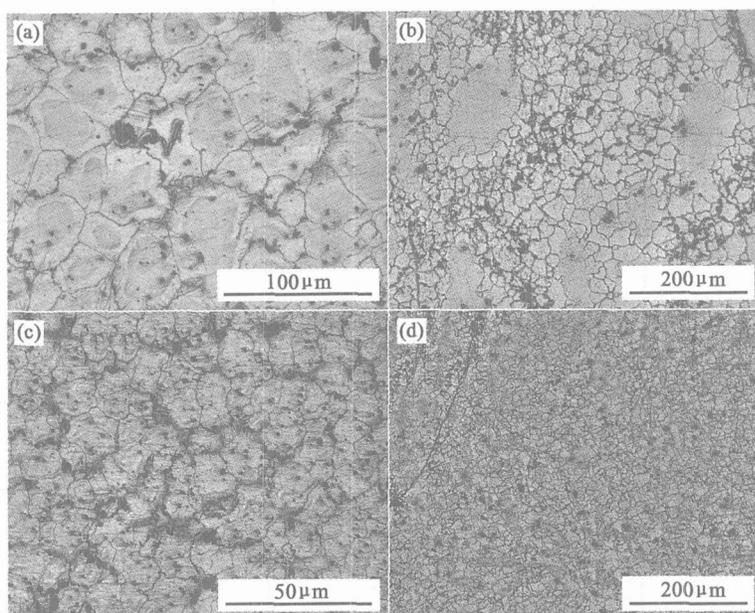


图 4 组织形貌 (a) AZ31 镁合金母材; (b) ECAP 变形后的镁合金组织; (c) 焊核; (d) 焊核附近的过渡区域

Fig. 4 Microstructure of (a) AZ31 alloy (b) AZ31 alloy processed by ECAP; (c) nugget zone (d) transition zone near nugget zone

在实验中对搅拌摩擦连接后的试样进行了拉伸力学性能测试,结果显示:有 70% 以上的试样断裂于母材,其余大部断裂于热影响区,只有少数断裂于焊缝处。通过对试样连接时的工艺参数进行分析,发现当参数选择合理时,焊缝抗拉强度可为母材强度 85% 以上。

由于旋转速度与连接过程的产热有关,随着旋转速度的提高,产热量增加,使得焊接线能量提高,使产生塑性变形的金属体积增大,搅拌针附近产生的塑性金属流动能力加大,容易形成良好的搅拌摩擦焊接接头。但旋转速度达到一定水平时,摩擦产生热量过高,使得焊缝处产生过烧组织,焊接组织晶粒粗大,反而降低了接头的抗拉强度。

对 15mm 厚的等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金板,合理的摩擦焊工艺参数为焊接头旋转速度 750r/min,焊接速度为 37.5~60mm/min,此时抗拉强度值在 225~275MPa 之间。

### 2.3 等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金的焊接质量图表

首先按照力学性能试验结果绘制焊接质量图表,按照 XYZ 的顺序将数据输入程序,注意需要将

Z 列数据(即抗拉强度值)转化为随机的 XYZ 矩阵模式,然后利用图表功能绘制出等高线填充图表。

针对等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金,进行搅拌摩擦焊接后。按照上述方法得到接头的焊接质量图表。如图 5 所示。

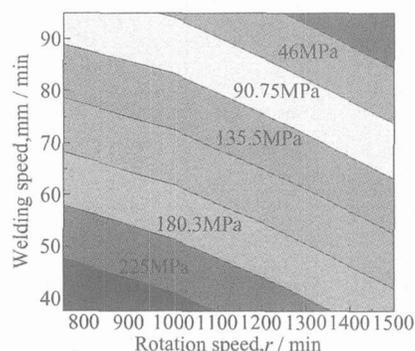


图 5 焊接质量图表

Fig. 5 Quality graph of welds

对于等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金的搅拌摩擦焊接接头而言,转速与焊接速度的比值  $v/r$  失去了明显的单一型斜率特征,在二维坐标变化的情况下,抗拉强度值具有随机性。

### 3 结论

(1) 可用搅拌摩擦焊成功实现等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金板的连接, 当工艺参数合适时, 接头成形良好。

(2) 对 15mm 厚的等径弯曲通道变形 AZ31 镁合金板, 合理的摩擦焊工艺参数为焊接头旋转速度 750r/min, 焊接速度为 37.5~60mm/min。随着搅拌头旋转速度的提高, 产热量增加, 搅拌针附近产生的塑性金属流动能力加大, 容易形成良好的搅拌摩擦焊接接头。但旋转速度达到一定水平时, 摩擦产生热量过高, 使得焊缝处产生过烧组织, 焊接组织晶粒粗大, 接头抗拉强度降低。

(3) 焊接速度对于焊缝成型有很大的影响, 成型性能对焊接速度的敏感程度较铝合金板要大, 在焊接速度过大时接头出现连续性沟槽缺陷, 导致力学性能有较大下降。

#### 参考文献:

[1] SEGAL V M, REZNIKOV V I, DROBYSHEK I A E, *et al*. Plastic Working of Metals by Simple Shear [J]. Russian Metallurgy (Engl. Translation), 1981 (1): 99-115.  
[2] SFOLYAROV Vladimir V, ZHU Yuntian T, LOW E Terry

C, *et al*. Valiev. Microstructure and properties of pure Ti processed by ECAP and cold extrusion [J]. Materials Science and Engineering A 303 (2001): 82-89.  
[3] SU C W, CHUA B W, LU L, *et al*. Properties of severely plastically deformed Mg alloys [J]. Materials Science and Engineering (A), 2005, 402: 163-169.  
[4] YAMASHITA Akhino, HORITA Zenji, LANGDON Terence G. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation [J]. Materials Science and Engineering A 300 (2001): 142-147.  
[5] THOMAS W M, NEEDHAM J C, DAWES C J, *et al*. Friction stir butt welding [P]. International patent application number PCT/GB92/02203 and GB patent application 9125978 & 1991-12-06.  
[6] 柯黎明, 邢丽, 刘鸽平. 搅拌摩擦焊工艺及其应用 [J]. 焊接技术, 2000, 29(2): 7-8.  
[7] COLLIGAN K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum [J]. Welding Journal, 1999, 13(3): 14-16.  
[8] FLORES Olga Valeria, KENNEDY Christine, MURRILL E, *et al*. Microstructural issues in a friction-stir welded aluminum alloy [J]. Scripta Material, 1998, 38(5): 703-708.  
[9] 郑立静, 王春晖, 侯亮卓, 等. 热加工对铸造 AM50 镁合金显微结构和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2005, 29(5): 615-617.

## Friction Stir Welding of Magnesium Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing

WANG Kua+she<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, XU Ke-wei<sup>2</sup>

(1. College of Metallurgy engineering Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** An investigation was carried out on the FSW of AZ31 magnesium alloy processed by equal channel angular pressing with a thickness of 15mm. The basic characterization of the weld formation and the mechanical properties of the joints were discussed. The result shows that the effect of welding parameters on welding quality was evidence and welding quality is sensitive of traveling speed. Sound joint can be obtained when welding speed is 37.5mm/min and rotating rate of welding pin is 750r/min.

**Key words** equal channel angular pressing (ECAP); friction stir welding; magnesium alloy; mechanical property