

AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头断裂机制

Fracture Mechanism of Friction Stir Welded

AZ31 Magnesium Alloy

张 华, 林三宝, 吴 林, 冯吉才, 宁金星

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

ZHANG Hua, LIN San-bao, WU Lin, FENG Ji-cai, NING Jin-xing

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 对 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头进行力学性能实验。拉伸、疲劳实验结果显示, AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度可以达到母材强度的 92.9%, 断裂位置在前进面的机械热影响区, 认为是前进面机械热影响区不均匀的层状组织和应力集中作用的结果。扫描电镜显示: 断口有明显的撕裂纹和纤维状组织。

关键词: 搅拌摩擦焊; 镁合金; 力学性能; 断口形貌

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2005)01-0033-04

Abstract: The mechanical properties on friction stir welded AZ31 magnesium alloy joint were studied. The tensile and fatigue testing results show that the strength of friction stir welded AZ31 magnesium alloy joint can reach to 92.9% of the base metal. The fracture location is on the thermal mechanical affected zone in the advancing side. This is because of the unequal stratum structure and the stress concentration on this zone. Obvious tearing crack and fiber tissue was observed by scanning electric microscopy.

Key words: friction stir welding; magnesium alloy; mechanical property; fractography

由于镁合金比强度高, 在运输业得到广泛的应用。镁合金结构的连接离不开焊接, 但镁合金熔点低、线膨胀系数及导热系数高, 导致镁合金在焊接过程中易出现氧化燃烧、裂纹及热影响区过宽等问题, 难以获得与母材性能相匹配的焊接接头^[1-3]。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, 简称 FSW)是由英国焊接研究所开发的一种新型固相连接技术, 具有诸如变形小、无裂纹、气孔等焊接缺陷, 焊接过程无须填充材料, 无飞溅, 操作安全等一系列优点, 使得以往通过传统熔焊方法无法实现焊接的材料可以通过 FSW 实现焊接, 被誉为“继激光焊后又一次革命性的焊接技术”, 并得到广泛的应用^[4-6]。

Esparza 等^[7]研究了 AZ31B 镁合金的搅拌摩擦焊接过程组织变化, 并指出熔核区包含具有大量位错的再结晶组织。Seung Huwan^[8]研究分析了 AZ61 镁合金搅拌摩擦焊接头的微观组织, 认为微观组织的演变是由于搅拌旋转运动引起的剪切变形。

虽然已有许多学者对搅拌摩擦焊进行了微观组织和力学性能方面的研究, 但是微观组织与力学性能之间的关系仍没有得到合理的解释。

本工作的主要目的是分析 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头断裂机制, 建立微观组织与力学性能之间的关系。

1 实验过程

实验采用热轧供应态 2.5mm 厚 AZ31 镁合金(质量分数: 3.1% Al, 0.88% Zn, 少量微量元素), 尺寸为 200mm×100mm×2.5mm。其力学性能见表 1。

表 1 AZ31 镁合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy

Alloy	σ_s /MPa	σ_b /MPa	Elongation/%
AZ31	167	259	9.5

搅拌摩擦焊接成形后, 挑选表面成形光滑、无表面气孔, 背部熔合良好的试件进行拉伸和疲劳实验。接头力学性能是在焊后状态进行的, 没有经过任何热处理及其他处理。搅拌摩擦焊接头一般比母材薄 1mm 左右, 轴肩与母材交界处容易发生应力集中。按照图 1 所示加工力学性能试件(单位: mm)。

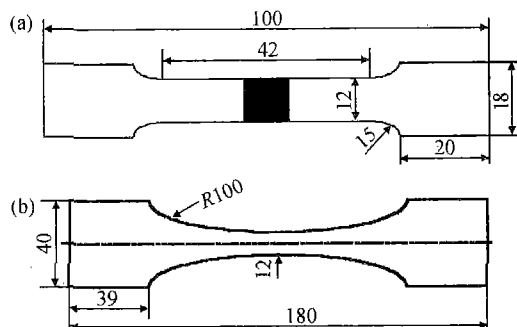


图 1 力学性能实验尺寸 (a) 拉伸实验; (b) 疲劳实验

Fig. 1 Dimensions of mechanical tests

(a) tensile; (b) fatigue

2 结果讨论

2.1 力学性能

拉伸实验结果显示 AZ31 镁合金 FSW 接头可以达到母材等强度。当旋转速度 $R=1500\text{r/min}$, 焊接速度 $v=95\text{mm/min}$ 时 (1 号试样), 接头抗拉强度为 240.6MPa , 达到母材强度的 92.9% 。拉伸实验也为低周疲劳实验选用应力水平提供了依据。

由低周疲劳实验可知 (表 2), 加载应力由接头抗拉强度的 0.5 提高到 0.6 时, 试样的疲劳寿命显著下降。对于 1 号试样, 当加载应力为接头强度的 0.7 时, 断裂循环次数为母材的 0.6 左右, 疲劳断裂与拉伸断口位置一样在机械热影响区。旋转速度 $R=750\text{r/min}$ 、焊接速度 $v=47.5\text{mm/min}$ 时 (3 号试样), 试样拉伸强度低, 其断裂循环次数非常低, 裂纹从焊缝的底部萌生, 断口显示底部存在未焊合区域。

表 2 疲劳结果

Table 2 The results of fatigue

No.	Welding parameter		σ_b /MPa	Fatigue strength	
	Welding speed /($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Rotation speed /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)		Cycle stress /MPa	Cycle
1	95	1500	240.6	$110(0.5\sigma_b)$	47524
				$144(0.6\sigma_b)$	13431
				$168(0.7\sigma_b)$	10757
2	375	1500	214	$105(0.5\sigma_b)$	17079
				$126(0.6\sigma_b)$	5556
3	47.5	750	210	$110(0.5\sigma_b)$	7879
Base metal	—	—	—	168	17929

2.2 断口分析

1 号试件接头强度高, 拉伸件在机械热影响区呈 45° 剪切断裂, 断口组织细密 (图 2a), 而 2 号试件接头强度较差, 在焊缝处垂直断裂, 只在焊缝正面有一小部

分剪切断裂组织。可见, 在较小的转速和进给速度下不易形成良好的搅拌摩擦焊接头。断口扫描分析可知接头为较明显的延性断裂 (图 2b)。

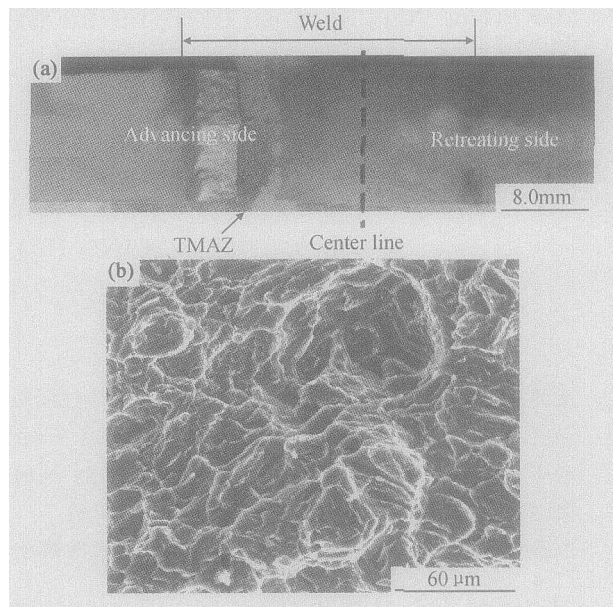


图 2 拉伸断裂位置及断口扫描 (1 号试样)

(a) 断裂位置; (b) 断口扫描

Fig. 2 Fracture locations and fractography of tensile test

(a) fracture location; (b) fractography

图 3 表示的是疲劳断裂位置及断口扫描图。图 3a 显示断裂位置在焊缝中心处 (3 号试样), 裂纹从焊缝底部萌生向上部扩展, 只有上表面很少的区域显示韧性断裂, 说明底部未焊合。一方面因为焊接压力不够, 另一方面是因为焊接参数的选择不合理, 没有形成足够条件的塑性区域, 焊缝中上部牢固的结合而背部没有充分的搅拌结合。断口扫描显示 (图 3c), 断口没有疲劳断裂的典型特征。图 3b 试样的疲劳断裂位置在机械热影响区。这和该试样的拉伸断裂位置一致, 距离焊缝中心有一段距离, 说明搅拌摩擦焊的薄弱部分在机械热影响区, 熔核区和机械热影响区都可以得到良好的结合, 断口扫描显示试样为撕裂纹和纤维状组织, 循环应力强度水平高, 局部变化可能与晶粒取向的局部变化有关 (图 3d)。

2.3 显微组织

1 号试件的断裂无论是拉伸还是疲劳试件, 均发生在机械热影响区, 而且在靠近前进面的一侧。其原因分析如下:

从宏观上分析, 在压入量较大时, 可以看出回撤面的厚度略高于前进面的厚度, 在压入量适宜时回撤面厚度仍略高于前进面厚度或回撤面金属致密程度略高于前进面; 且机械热影响区与热影响区交界处不是平滑过渡 (图 2a, 3a), 易产生应力集中。因此, 前进面机

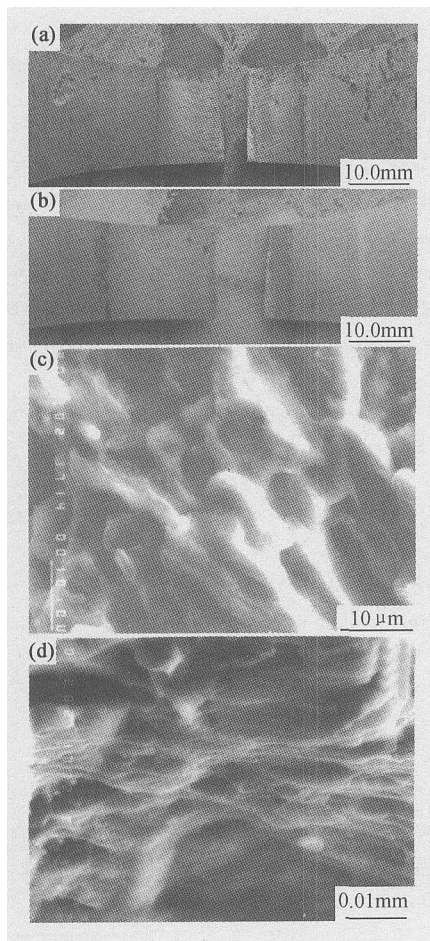


图3 疲劳断裂位置及断口扫描 (a) 3号试样;(b) 1号试样;
(c) 断口扫描(3号试样):(d)断口扫描(1号试样)

Fig. 3 Fracture locations and fractography of fatigue test
(a) fracture location of No. 3 specimen; (b) fracture location of
No. 1 specimen; (c) fractography of No. 3 specimen;
(d) fractography of No. 1 specimen

机械影响区成为焊接接头力学性能相对薄弱的环节,因此发生了断裂。

从微观上分析,接头金相图如图4所示。可见,焊缝处晶粒细小均匀,力学性能优良;而热影响区与母材交界处晶粒大小不均匀,且有明显的层状结构,杂质也相对较多,因此力学性能不良,易发生断裂。而前进面与母材交界处的晶粒更加不均匀,因此断裂发生在前进面与母材交界的热影响区。

2.4 接头断裂机制分析

分析认为,搅拌摩擦焊接头的断裂过程,是由于轴肩与母材过渡处易产生应力集中。接头比母材要薄,是接头的薄弱环节。焊接过程搅拌头向焊接方向倾斜 2° ,从而使搅拌头在旋转过程中,处于搅拌头前进面的金属始终受压,而处于搅拌头回撤面的金属始终受拉,容易导致搅拌头两侧的焊缝金属不均匀,前进面比回撤面还要薄些,使前进面成为整个接头应力集中最大的区域。

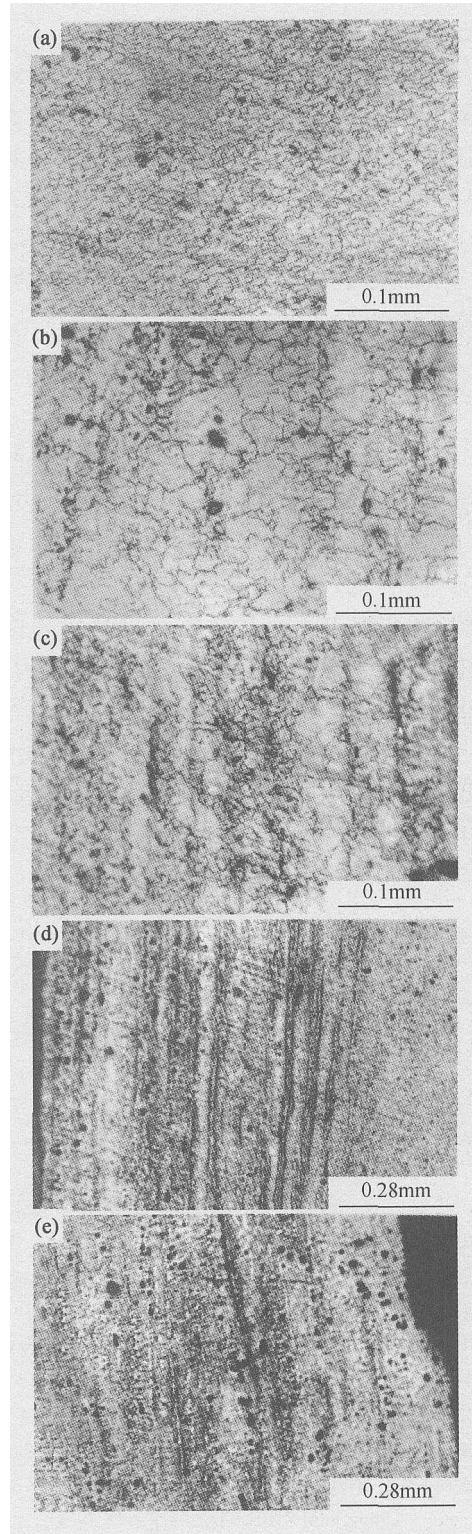


图4 焊缝金相照片 (a)焊核;(b)前进面侧焊核;
(c)回撤面侧焊核;(d)前进面侧母材;(e)回撤面侧母材
Fig. 4 Light microscopy of the friction stir weld
(a) weld nugget; (b) weld nugget in advancing side;
(c) weld nugget in retreating side; (d) base metal in
advancing side; (e) base metal in retreating side

焊接速度较大时,孔洞首先在合金里搅拌头搅拌不均匀的区域产生,因为当搅拌头行走过后,塑性金属

还来不及填充留下的空洞,就继续向前行走了,从而容易产生不均匀的焊缝。此外,当搅拌头在旋转过程中,如果压紧力不够大,导致焊缝里的金属向上溢出,留下空洞。空洞形成后,在随后的变形过程中进一步长大,但尺寸长大很小,最后变形被局限在大空洞之间的基体内,并在基体内形成小空洞,这些小空洞不断长大、聚集,直至最终断裂。因此,搅拌摩擦焊接头的断裂应

3 结论

(1) 搅拌摩擦焊接头拉伸强度与焊接速度和搅拌头旋转速度有密切关系,当焊接速度为 95mm/min,旋转速度为 1500r/min 时,接头强度系数可达 92.9%。

(2) 接头断裂发生在前进面机械热影响区处,是前进面机械热影响区不均匀的层状组织和应力集中作用的结果。

(3) 拉伸实验和疲劳实验结果一致,接头的抗拉强度满足使用要求,在循环载荷条件下也可以满足使用要求。

参考文献

[1] 袁序弟. 镁合金在汽车工业的应用前景[J]. 汽车科技, 2002,

(3): 1—4.

- [2] 许小忠, 刘强, 程军. 镁合金在工业及国防中的应用[J]. 华北工学院学报, 2002, 23(3): 190—192.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册第二册—材料的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 521—522.
- [4] THOMAS W M, NICHOLAS E D. Friction stir welding for the transportation industries [J]. Materials & Design, 1997, 16(4/6): 269—273.
- [5] SANDERSON A, PUNSHON C S, RUSSELL J D. Advanced welding processes for fusion reactor fabrication [J]. Fusion Engineering and Design, 2000, 49—50(1): 77—87.
- [6] WILLIAMS S W. Welding of airframes using friction stir [J]. Air & Space Europf, 2001, 3(3/4): 64—66.
- [7] ESPARZA J A, DAVIS W C, TRILLO E A, et al. Friction-stir welding of magnesium alloy AZ31B [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(2): 917—920.
- [8] 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 (2): 161—166.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2002AA331160)

收稿日期: 2003-07-24; 修订日期: 2004-11-05

作者简介: 张华(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事镁合金搅拌摩擦焊接工艺及机理的研究, 联系地址: 黑龙江哈尔滨工业大学焊接系(150001)。

(上接第 32 页)

- 6063 composite [J]. Trans Nonferrous Mat Soc China, 2003, 13 (2): 289—293.
- [2] 曾汉民. 高技术新材料要览[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. [3] ZHANG De-ku, CHEN Yan-bin, et al. Mechanism of laser welding of SiC reinforced LD2 aluminum metal matrix composite [J]. China Welding, 2001, 10(2): 140—144.
- [4] 赵明久, 吕毓雄, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料(SiCp/2024)的扩散焊接[J]. 材料研究学报, 2000, 14(2): 136—140.
- [5] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] LIU Li-ming, ZHU Mei-li, et al. Studying of micro-bonding in diffusion welding joint for composite[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A135, : 103—107.
- [7] 陈彦宾, 张德库, 等. 激光焊接铝基复合材料钛的原位增强作用[J]. 应用激光, 2002, 22(3): 320—322, 338.
- [8] 夏德顺. 铝基复合材料焊接研究述评[J]. 导弹与航天运载技术, 1999, 6: 38—46.
- [9] 董月玲, 黄继华, 等. 碳化硅增强铝基复合材料连接研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(11): 63—65, 81.
- [10] 曲文卿, 王奇娟, 张彦华. 铝基复合材料与铝合金的 TLP 扩散连接[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 67—70.

- [11] WANG H M, CHEN Y L, YU L G. In-situ weld-alloying/ laser beam welding of SiC/6061Al MMC [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A293: 1—6.
- [12] H W DE VRIES and G DEN OUDEN. Influence of welding on structure of Al-Mg-Si matrix composites [J]. Material Science and Technology, 1999, (2): 202—206.
- [13] 栾国红, 郭德伦, 等. 铝合金的搅拌摩擦焊[J]. 焊接技术, 2003, 23(1): 1—4.
- [14] JOHN A WERT. Microstructures of friction stir weld joint between an aluminum-base metal matrix composite and a monolithic aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 607—612.
- [15] 张田仓, 周荣林, 南利辉. SiC_p/2024Al 复合材料搅拌摩擦焊接技术研究[A]. 第十次全国焊接会议论文集(第 1 册)[C]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. 243—246.
- [16] 张田仓, 郭德伦, 等. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究[J]. 机械工程学, 2002, 38(2): 127—130.

收稿日期: 2004-09-13; 修订日期: 2004-12-15

作者简介: 李敬勇(1963—), 男, 博士生, 副教授, 主要研究方向为有色金属及新材料连接技术等, 联系地址: 江苏科技大学材料学院(212003)。