

DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊塑性金属流动特性及断裂行为

王希靖, 许有伟, 张亮亮, 魏万奎

(兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 在最优焊接参数下, 对 1 mm DP600 镀锌钢板和 3 mm AZ31 镁板进行无匙孔搅拌摩擦点焊试验, 焊后对接头分别进行横切、纵切及层切, 采用扫描电镜 (SEM) 分析焊接接头显微组织和断口形貌。结果表明, 镁钢间的混合主要发生在搅拌针作用区域, 形成“机械互锁”的组织形貌, 有利于增加两种材料的有效接触, 形成复相强化; 轴肩作用区镁钢间搅拌不明显, 界面较平滑, 镁钢界面形成了金属化合物以及氧化镁, 降低了接头的塑性和韧性。对 DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊焊接接头进行拉伸试验, 发现焊接接头从搭接界面上断裂, 断口呈“脉状花样”, 为延性断裂。

关键词: 塑性金属流动特性; 无匙孔搅拌摩擦点焊; DP600/AZ31

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)12-0057-04

0 序 言

镁合金是现代工业用合金中密度最轻的合金之一, 具有较高的强度质量比^[1]。DP600 双相钢具有高强度、高成形性等性能, 尤其适用于汽车车体的制造^[2]。随着镁合金应用领域的进一步拓展, 以及镁合金和钢二者应用的交叉性, 在某些环境中二者的复合结构可以替代钢结构, 有效地降低结构件重量, 为节能、环保提供切实可行的技术支持, 因此镁钢的连接问题受到国内外学者的广泛关注^[3]。

搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接技术, 尤其适用于轻合金^[4,5]。在焊接过程中, 搅拌工具与被焊材料之间通过摩擦和剧烈塑性变形产生热量使金属材料塑化, 在搅拌工具旋转带动作用下材料发生迁移, 再经轴肩锻压作用后得到高质量、无缺陷的焊接接头。文中试验采用自行研制的搅拌针可回抽式搅拌摩擦焊机。该设备具有成本低、制造简单、工艺简单易行、消除匙孔时间短等特点。

目前, 搅拌摩擦焊接研究的重点大多集中于研制适用于不同材料的焊接工具和工艺、焊接接头的性能及合理的结构设计等方面, 对焊接过程中材料流动机理的研究尚处于探索阶段。Li 等人^[6]研究了铝合金 2024 与铝合金 6061 异种金属搅拌摩擦焊接时材料的流动方式, 发现两种金属在搅拌摩擦焊接

过程中形成了复杂的具有涡流状特征的薄片夹层结构。北京航空制造工程研究所李继忠等人^[7]研究了平行和垂直排列的异种铝合金搅拌摩擦焊材料的流动行为, 发现在轴肩影响区受轴肩摩擦带动作用, 材料只在平行于焊缝的面上迁移, 在焊核区受搅拌针螺纹的影响材料表现为螺旋运动。Beygi 等人^[8]研究了铝/铜搭接搅拌摩擦焊焊接接头微观形貌, 发现铜以条带状嵌入铝中, 从而大大增加了焊接接头强度。在数值模拟方面, 虽然目前已有相关的研究报道, 但是受搅拌工具、焊接工艺参数和材料属性等诸多因素的影响, 且搅拌摩擦焊过程包括了塑性应力场、热力场、温度场、流变场等多种过程于一体, 目前还没有一种软件同时耦合这些复杂物理过程^[9,10], 大部分模拟研究中对边界条件均进行了简化和假设, 这与实际过程仍有较大差别。因此通过试验方法研究 DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊过程中塑性金属的流动特性, 对进一步解释其连接机理有重要意义。

1 试验方法

文中对 1 mm 厚 DP600 镀锌钢板与 3 mm 厚 AZ31 镁合金板进行搭接点焊试验 (钢板在上, 镁板在下), DP600 和 AZ31 的主要成分如表 1 和表 2 所示。经多次试焊得出最优焊接工艺参数: 转速 1 200 r/min, 搅拌针直径 6 mm, 伸出长度为 2 mm 轴肩下

压力 0.2 mm. 为了充分反映材料流动行为,焊后对接头分别进行横切、纵切及层切,将观测面经 400 号、800 号、1 200 号和 2 000 号砂纸水磨,再进行机械抛光后,利用两种材料背散射电子成像的差异,采用扫描电镜(SEM)分析焊后接头材料的分布. 为了进一步揭示焊接过程中塑性金属的流动特性,采用 XRD 及 SEM 进一步分析拉伸试样断口的扩散行为及断口形貌.

表 1 试验用 DP600 镀锌钢板化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of DP600 alvanized steel

C	Mn	Si	Cr	Ni
0.11	1.6	0.182	0.34	0.027
Nb	Ti	V	Mo	Fe
0.003 7	0.002	0.003 5	0.098	余量

表 2 试验用 AZ31 镁合金化学成分(质量分数,%)
Table 2 Chemical compositions of AZ31 magnesium ally

Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Mg
3.18	1.02	0.34	0.002	0.002 1	0.000 85	余量

2 焊后接头宏观形貌

DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊接头如图 1 所示,可以看出焊点表面平整,外形美观,呈椭圆形,中心无匙孔,周围飞边较少. 由于焊接过程中工件暴露在空气中,焊点周围有部分区域被氧化,颜色变黑.

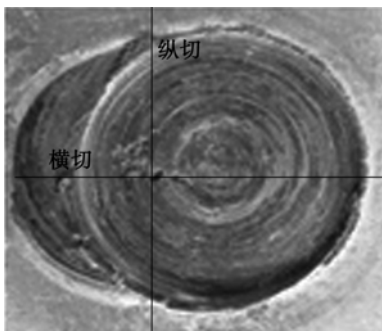


图 1 焊接接头形貌
Fig. 1 Weld joint morphology

3 塑性金属的流动特性

3.1 横切截面材料流动行为

DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊焊接接头横切截面宏观形貌如图 2 所示,图中 A 区域为搅拌针插入的位置,B 区域为搅拌针完全回抽的位置,C 区域为轴肩作用区. 采用背散射电子(BE)成像技术分析焊接接头横切截面不同区域的微观形貌如图 3

所示,搅拌针插入过程中(图 3a),由于焊接初始只有搅拌针与焊件摩擦产热,产生的热量较少,镀锌钢的温度较低,塑化程度较弱,在搅拌针摩擦挤压作用下,镀锌钢呈破碎的钢块独立分布在镁合金中;在搅拌针回抽和后退阶段(图 3b),轴肩与焊件摩擦产生大量的热量,使熔点较高的镀锌钢有了较好的塑性,在搅拌针及轴肩的挤压作用下产生褶皱状平移,以“钢钉”状嵌入镁合金中,对接头强度贡献较大. 轴肩作用区(图 3c),镁钢软化层只在各自所在平面上流动,镁钢间搅拌不明显,界面较平滑.

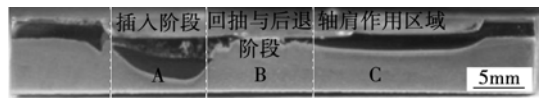
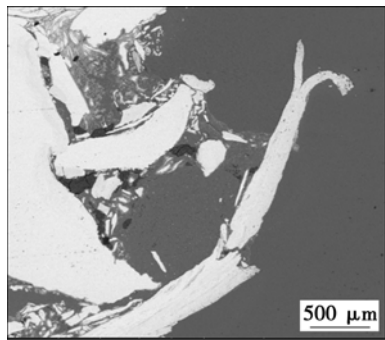
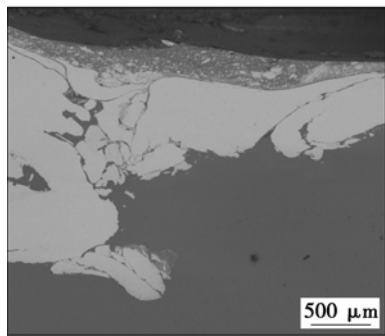


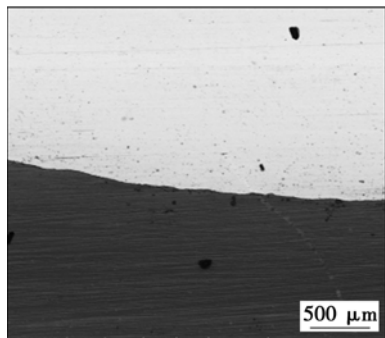
图 2 接头横切截面宏观形貌
Fig. 2 Macromorphology of joint cross section



(a) 搅拌针插入区



(b) 回抽和后退区



(c) 轴肩作用区

图 3 接头横切截面微观形貌
Fig. 3 Microcosmic morphology of joint cross section

3.2 纵切截面材料流动行为

DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊接头纵切截面宏观形貌如图 4 所示,可以看出,在搅拌针作用区域 DP600 和 AZ31 以弯钩状相互插入对方,形成了牢固的镁/钢点焊接头. 图 5 为接头不同区域的微观形貌,在搅拌针的作用下,前进侧的金属受到剧烈的剪切作用,塑性较差的镀锌钢被打碎,以颗粒状分布在镁合金基体中(图 5a);后退侧镁钢剧烈变形后围绕搅拌针被拉伸成交错的条带状结构(图 5b),仍与母材保持连续状态. 这种典型的组织特征有利于镁间钢的充分混合,从而有利于增加两种材料的有效接触,形成复相强化.

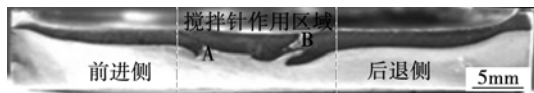
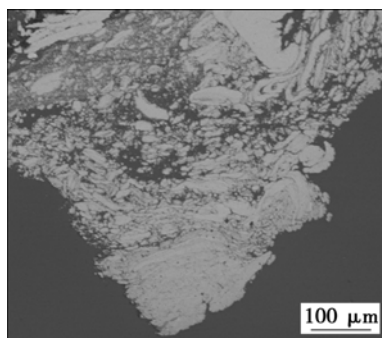
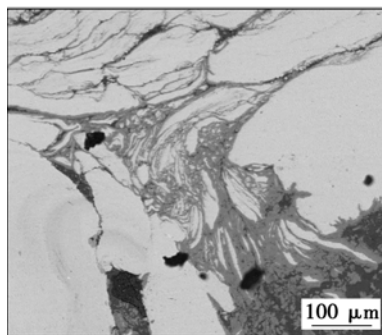


图 4 接头纵切截面宏观形貌

Fig. 4 Macro diagram of joint longitudinal section



(a) 前进侧



(b) 后退侧

图 5 接头纵切截面微观形貌

Fig. 5 Microcosmic diagram of joint cross section

3.3 纵切截面材料流动行为

为了研究搅拌头对镁钢间垂直方向的搅拌作用,去除焊点上表面的镀锌钢后的宏观形貌如图 6 所示,可以看出焊点处的两种金属即使经过了剧烈搅拌,仍未充分混合,镁钢界面清晰可见,即深色为

DP600,浅色为 AZ31. 在搅拌区被焊材料发生了剧烈塑性变形,前进侧镀锌钢被拉伸成细长形结构,后退侧镀锌钢经搅拌后向焊接反方向堆积,随着搅拌针的行进,拉伸变形材料在搅拌针后端的“空腔”积聚,并在轴肩的挤压作用下形成致密的焊缝. 图 6 中 A 点的微观形貌如图 7 所示,可以看出,受到轴肩的挤压及旋转摩擦作用,插入镁合金中的镀锌钢界面较为平整.

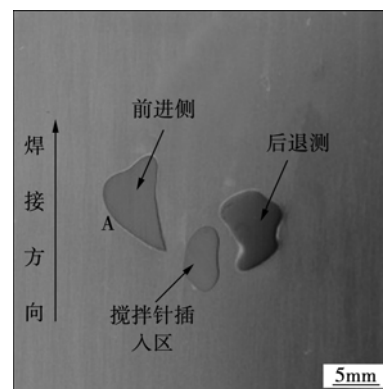


图 6 接头层切截面宏观形貌

Fig. 6 Macro diagram of joint cross section of crosscutting

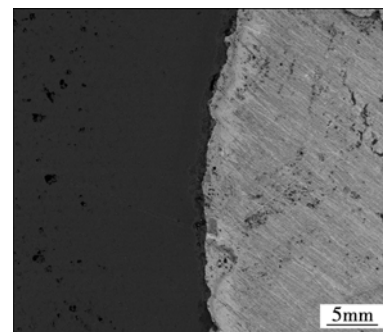


图 7 接头层切面微观形貌

Fig. 7 Microcosmic diagram of joint layer section

4 断裂行为

DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊接头拉伸试验断口的宏观形貌如图 8 所示. 对轴肩作用区进行 XRD 分析,如图 9 所示,可以看出除了 Fe、Mg 元素外,还有诸如 Fe_3Al , MgFeAlO_4 , MgO 等金属化合物以及氧化物,说明界面在轴肩的摩擦热和顶锻力作用下,两个主元素在界面处发生了相互扩散,形成了冶金结合. 由断口形貌知,镁板(图 6a)从钢板(图 6b)上撕裂下来,这主要是因为轴肩作用区仅靠脆性的金属间化合物连接,降低了接头的塑性和韧性,且在拉伸过程中镁钢搭接界面存在的宏观裂纹,

尖端发生局部塑性和黏弹性变形,因此裂纹优先沿着搭接界面扩展. 搅拌针作用区域,镁板上有凹坑,且有“钢钉”发生断裂,说明在焊核区,钢和镁的搅拌比较充分,连接牢固,形成“机械互锁”的组织形貌,其接头的力学性能也比较好.

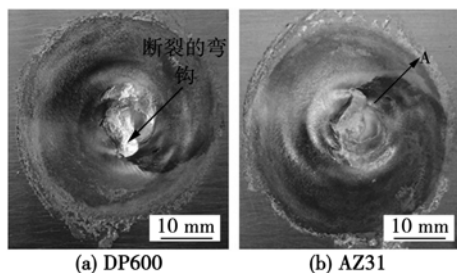


图 8 断口宏观形貌

Fig. 8 Macro morphology of fracture

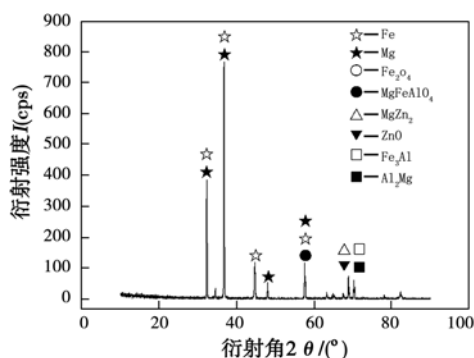


图 9 拉伸断裂接头 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of tensile fracture joint

分别对断口轴肩作用区及搅拌区进行扫描电镜微观形貌分析如图 10 所示,可以看出,断口呈“脉状花样”,为延性断裂. 这是由于镁钢的力学属性存在较大差异,在拉伸过程中,焊点搭接界面上形核的微孔穴不断扩展并相互连接形成;另外,可以看出,轴肩作用区域“脉状花样”较搅拌针作用区域密集,这是由于裂纹在轴肩作用区沿着镁钢界面扩展时尖

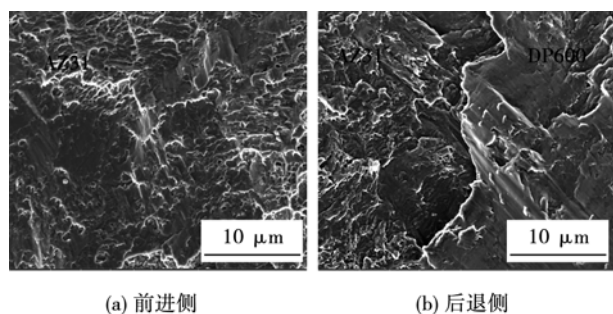


图 10 断口微观形貌

Fig. 10 Fracture microcosmic morphology

端塑性区域较大,扩展较快,产生的小孔数量较多. 在搅拌区,插入镁合金中的“钢钉”阻碍了裂纹的扩展,塑性区域减小,形成的小孔数量减少,裂纹扩展的步长增加,因此脉状花样减少.

5 结 论

(1) 对 DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊接头分别进行横切、纵切及层切,发现镁钢间的混合主要发生在搅拌针作用区域,形成“机械互锁”的组织形貌,有利于增加两种材料的有效接触,形成复相强化;轴肩作用区镁钢间搅拌不明显,界面较平滑,镁钢界面形成了金属化合物以及氧化镁,降低了接头的塑性和韧性.

(2) 对 DP600/AZ31 无匙孔搅拌摩擦点焊接头进行拉伸试验,发现焊接接头从搭接界面上断裂,断口呈“脉状花样”,为延性断裂.

参考文献:

- [1] 曾荣吕,柯 伟,徐永波,等. Mg 合金的最新发展及应用前景. 金属学报, 2001, 37(7): 672-685.
Zeng Ronglü, Ke Wei, Xu Yongbo. Recent development and application of magnesium alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 672-685.
- [2] 马明图. 先进汽车用钢[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 王希靖,赵 钢,张忠科,等. 镁-钢异种金属无匙孔搅拌摩擦点焊工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2012, (17): 153-155.
Wang Xijing, Zhao Gang, Zhang Zhongke, et al. Process research on friction stir spot welding without keyhole between magnesium and steel dissimilar alloys[J]. Hot Working Technology, 2012, 41 (17): 153-155.
- [4] 王希靖,赵 刚,刘 骁,等. 一种轻质合金-钢无匙孔搅拌摩擦点焊方法及装置中国, CN102319952A[P]. 2012-01-18.
- [5] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍,等. 搅拌摩擦焊接过程的试验测量及分析[J]. 焊接学报, 2010, 32(2): 67-70.
Yan Dongyang, Shi Qingyu, Wu Aiping, et al. Measurement and analysis of friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 32(2): 67-70.
- [6] Li Y, Murrl E, Clure J C M. Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 Al to 6061 Al. Scripta Materialia, 1999, 40(9): 1041-1046.
- [7] 李继忠,马正斌,董春林. 异种铝合金搅拌摩擦焊材料流动行为研究[J]. 材料工程, 2014(6): 1-4.
Li Jizhong, Ma Zhengbin, Dong Chunlin. Material flowing behaviors of friction stir welding by dissimilar aluminum alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(6): 1-4.

Al₂O₃ 铝基复合材料, 显著地改善了铝合金的强度、硬度等力学性能。

(2) RE/Al₂O₃ 铝基复合材料的硬度可达到母材的 160%, 不同比例的稀土对复合材料的硬度性能影响不大。

(3) 经过搅拌摩擦加工后的接头抗拉强度达到了母材的 94%, 断后伸长率达到母材的 80% 以上。但纯复合材料的抗拉强度是母材的 163%, 断后伸长率为母材的 69.7%。

(4) 在试验工况下, 复合颗粒中纳米稀土氧化物含量的比例对材料力学性能的提高影响不大。

参考文献:

- [1] 贺地球, 邓 航, 周鹏展. 2219 厚板搅拌摩擦焊组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(9): 13-16.
He DiQiu, Deng Hang, Zhou Pengzhan. Analysis and performance of friction stir welding organization 2219 plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(9): 13-16.
- [2] 王春炎, 曲文卿, 姚君山, 等. 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 77-80.
Wang Chunyan, Qu Wenqing, Yao Junshan, *et al.* Head of microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 77-80.
- [3] Liu H J, Fu H, Maeda M. Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Material, Science Letters, 2003, 22(15): 1061-1063.
- [4] Ohishi K, McNelley T R. Microstructural modification of as-cast Ni-Al bronze by friction stir processing[J]. Metallurgical and Materials Transaction A 2004, 35: 2951-2961.
- [5] 王开东, 常丽丽, 王铁农, 等. 搅拌摩擦加工技术制备 Ti 颗粒增强 AZ31 镁基复合材料[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 418-423.
Wang Kaidong, Chang Lili, Wang Yinong, *et al.* Preparation of Mg-AZ31 based composites with Ti particles by friction stir processing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(3): 418-423.
- [6] 钱锦文, 李京龙, 熊江涛, 等. 搅拌摩擦加工原位反应制备 Al₃Ti-Al 表面复合层[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 61-64.
Qian Jinwen, Li Jinglong, Xiong Jiangtao, *et al.* Preparation of Al₃Ti-Al composite surface layer friction stir processing in situ reaction system[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 61-64.
- [7] GL You, NJ Ho, PW Kao. In-situ formation of Al₂O₃ nanoparticles during friction stir processing of Al-SiO₂ composite[J]. Materials Characterization, 2013, 80: 1-8.
- [8] Hossein Izadi, AdrianP Gerlich. Distribution and stability of carbon nanotubes during multi-pass friction stir processing of Carbon nanotube/aluminum composites [J]. Carbon, 2012 (50): 4744-4749.
- [9] 陈迎春, 刘会杰, 冯吉才. 2219-0 铝合金的搅拌摩擦焊接[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 65-68.
Chen Yingchun, Liu Huijie, Feng Jicai. Friction stir welding of 2219-0 aluminium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(1): 65-68.
-
- 作者简介:** 肖长源, 男, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事搅拌摩擦加工/焊工艺方面研究. 发表论文 1 篇. Email: 657151057@qq.com
- 通讯作者:** 李 达, 男, 副教授, 硕士研究生导师. Email: hardfasting@126.com
-
- [上接第 60 页]
- [8] Beygi R, Kazeminehad M, Kokabi A H. Microstructural evolution and fracture behavior of friction-stir-welded Al-Cu laminated composites[J]. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2013, (45): 361-370.
- [9] 杜岩峰, 白景彬, 田志杰, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊温度场的三维实体耦合数值模拟[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 57-60.
Du Yanfeng, Bai Jingbin, Tian Zhijie, *et al.* Investigation on three-dimensional real coupling numerical simulation of temperature field of friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 57-60.
- [10] 张洪武, 张 照, 陈金涛, 等. 搅拌摩擦焊接过程的有限元模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(9): 13-18.
Zhang Hongwu, Zhang Zhao, Chen Jintao, *et al.* Finite element analysis of friction stir welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(9): 13-18.
-
- 作者简介:** 王希靖, 男, 1956 年出生, 教授, 博士生导师. 主要从事焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术及焊接质量控制方面的研究工作, 发表论文 120 余篇. Email: wangxj@lut. cn
- 通讯作者:** 许有伟, 男, 硕士研究生. Email: xuyouwei_lut@163.com