

铝/镁搅拌摩擦焊-钎焊焊接接头微观组织结构

刘浩, 陈玉华, 陈超

(南昌航空大学 焊接工程系, 南昌 330063)

摘要: 目的 研究不同工艺参数下钎料 Zn 的添加对 Al/Mg 异种金属搅拌摩擦焊-钎焊焊接接头组织和性能的影响。方法 以厚度为 0.05 mm 的纯 Zn 作为钎料, 对 3 mm 厚的 2A12-T4 态铝合金和 4 mm 厚的 AZ31 变形镁合金, 进行搅拌摩擦焊-钎焊的复合焊接, 分析锌夹层的添加对接头微观组织与力学性能的影响。结果 当添加 Zn 中间层时, 接头钎焊区缓解了拉伸断裂趋势, 在焊接速度为 23.5 mm/min, 旋转速度为 375 r/min 时, 接头抗拉剪力达到 5.5 kN, 复合焊接接头的钎焊焊缝由搭接区、固相扩散区、钎焊区组成。结论 钎料的添加有效阻止了 Al-Mg 系金属间化合物的形成。

关键词: 铝/镁异种金属; 复合焊接; 钎焊

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.05.006

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)05-0038-07

Microstructure of Al/Mg Joints Produced by Friction Stir Welding-brazing

LIU Hao, CHEN Yu-hua, CHEN Chao

(Department of Welding Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The paper aims to study influences of adding brazing filler metal Zn under different process parameters on microstructure and mechanical properties of Al/Mg joints made by friction stir welding-brazing. Pure Zn with a thickness of 0.05 mm was used as brazing filler metal. The friction stir welding-brazing was used to weld 3 mm thick 2A12-T4 aluminum alloy and 4 mm thick AZ31 deformed magnesium alloy. The effects of Zn interlayer on microstructure and mechanical properties of joints were analyzed. When adding Zn intermediate layer, the joint brazing zone alleviated the tensile fracture trend. When the welding speed was 23.5 mm/min and the rotating speed was 375 r/min, the tensile shear of the joint reached 5.5 kN. The Brazing weld of composite welded joints was composed of overlapping areas, solid phase diffusion areas and brazing areas. The addition of brazing filler metal effectively prevents the formation of Al-Mg intermetallic compounds.

KEY WORDS: Al/Mg dissimilar metals; hybrid welding; brazing

轻质铝和镁合金在航空航天、汽车工业等领域的应用越来越广泛,合理选用低密度的轻质金属既能降低能耗,又能获得性能良好的产品^[1-3]。铝合金、镁合金都具有密度低、比强度高、比弹性模量高、导热高等优点^[4],在设计制造铝/镁复合结构零件的过程

中,对两种金属的焊接是不可避免的。

由于铝、镁化学性质活泼,在晶体结构等物理性能方面存在很大的差异。铝/镁异种金属焊接加工的主要问题有易形成金属间化合物、易产生气孔、易形成表面氧化膜以及易形成裂纹^[5-6]等,这些问题在一

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 江西省优势科技创新团队建设专项计划(20171BCB24007); 江西省青年科学家培养计划(20153BCB23038); 航空科学基金(2017ZE56010)

作者简介: 刘浩(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为先进材料连接技术。

通讯作者: 陈玉华(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为新材料及异种材料焊接、电弧增材制造等。

一定程度上对这两种金属在工业领域中的应用带来了阻碍，其中影响最大的是接头中生成的 Al-Mg 金属间化合物^[7]。国内外学者对铝/镁异种金属的焊接进行了大量的研究^[8-9]，研究的主要问题就是通过不同的工艺控制两种金属在焊接过程中产生的金属间化合物的量和分布，从而提高焊接接头的性能^[10]。日本学者 Rattana Borrisutthekul^[11]采用激光焊对 1 mm 厚的 AZ31B 镁合金板和 A5052-O 铝合金板进行中心搭接焊接和边缘搭接焊接，由于在焊缝的底部会生成 Al₃Mg₂ 和 Mg₁₇Al₁₂ 金属间化合物，使得接头的强度下降；Takehiko 和 Yoshitaka 等^[12]通过在 AZ31B 镁合金和 1050 纯铝电阻点焊接头的焊缝中加入 Ag 中间层，使得在一定的范围内，接头强度随着添加 Ag 箔的厚度增加而增大。Liuchun Zhong 等^[13]对 AZ31 镁合金与 2024 铝合金进行搅拌摩擦点焊，无中间夹层时铝-镁界面处产生厚度约为 5 μm 的连续金属间化合物层，接头拉剪载荷仅为 0.8 kN。锌夹层添加后，接头拉剪载荷提高了 75%，达到 1.4 kN。然而，关于用 FSW 夹杂 Zn 的 Al 与 Mg 的异种合金焊接的

报道比较少，而且关于接头处添加 Zn 中间夹层形成钎焊区的研究还不够。

文中提出通过采用搅拌摩擦焊焊接 Al/Mg，并且添加中间层 Zn，一方面降低了焊接热输入，另一方面中间层 Zn 的添加又能抑制异种金属焊缝中脆性金属间化合物的产生。研究了中间层 Zn 对复合焊接接头的显微组织和力学性能的影响，为促进 Al/Mg 异种金属 FSW 结构的工程应用提供理论基础。

1 试验

焊接材料为规格为 200 mm×80 mm×3 mm 的 2A12-T4 态铝合金和经过挤压、轧制成形的规格为 300 mm×100 mm×4 mm 的 AZ31 变形镁合金，试验采用的钎料是纯度为 99.9% 的 Zn 箔，规格为 100 mm×40 mm×0.05 mm。

试验中，搅拌头采用的是 GH4169 高温合金。搅拌头轴肩为 18 mm、搅拌针表面加工有 M5 的左螺纹，其形状尺寸见图 1。

表 1 2A12 铝合金和 AZ31 镁合金化学成分 (质量分数)

Tab.1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy (mass fraction) %

合金元素	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Ni
2A12	余量	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.5	≤0.20	≤0.30	≤0.15	≤0.10
AZ31	2.5~3.5		余量	0.2~1.0	0.08	0.003	0.6~1.4		0.01

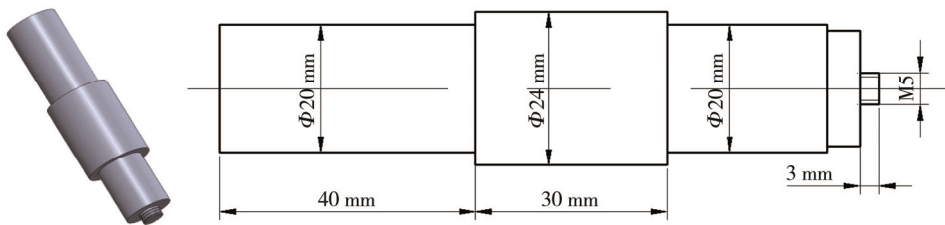


图 1 搅拌头尺寸

Fig.1 Geometric dimensioning of tool

试验采用的焊接形式为搭接，铝合金置于上侧，在搭接界面添加一层厚度为 0.05 mm 的纯锌作为钎料，见图 2。

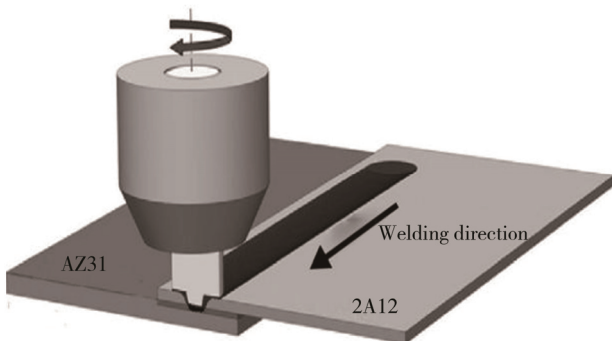


图 2 焊接示意图

Fig.2 Welding diagram

试验在 X53K 铣床改装的搅拌摩擦焊机上进行，焊接速度选择范围为 23.5~60 mm/min、旋转速度选择范围为 235~600 r/min。

2 结果分析

2.1 中间层材料 Zn 对 FSW-B 复合焊接接头钎焊区界面组织的影响

典型的 FSW-B 复合焊接接头横截面宏观形貌见图 3，分别在界面处取 A, B, C, D 这 4 个区域进行分析，这些区域分别为搭接区、轴肩作用边缘区、轴肩作用中心区、搅拌针作用边缘区。为了进一步对复合焊接接头钎焊区进行分析，对以上 4 个区域进行进一步的组织观察分析，其结果见图 4。

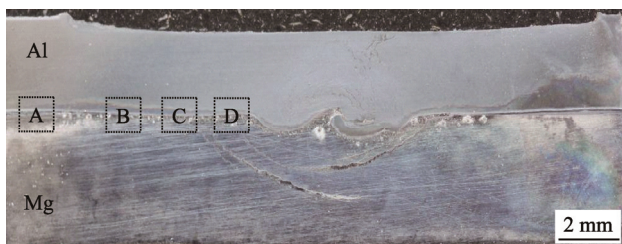


图3 复合焊接接头横截面宏观形貌

Fig.3 Macroscopic appearance of cross section of composite welded joint

图 4a, 4b, 4c, 4d 分别为图 2 中 A, B, C, D 各个区域的放大图, 从图 4a 可以看出, 该处的铝合金和镁合金界面存在的钎料 Zn 保持了原有状态。钎料与铝合金和镁合金母材都没有发生反应, 并且在铝/锌和锌/镁界面之间存在空隙。图 4b 中钎料 Zn 层与母材铝合金和镁合金依然存在明显的边界, 但是 Zn/Mg 界面的结合相对于图 4a 中略微得到改善。分析认为图 3 中 A 区由于不在搅拌头轴间的作用区, 焊接过程中无法获得足够的热量则无法使得钎料 Zn 达到熔点, 另外由于轴肩作用区域的锻压力也不足, 则导致该处易产生缝隙, 因此无法形成良好的钎焊焊缝。随着位置逐渐靠近搅拌头轴肩作用区, 温度和压力都逐渐增大, 如图 4c 和 4d 所示, 可以看出, 随着距离搅拌针作用区越近, 中间层钎料 Zn 的厚度在逐渐减小, 直至中间层钎料完全消失, 形成了一层与钎料 Zn、铝合金母材以及镁合金母材完全不同的组织。

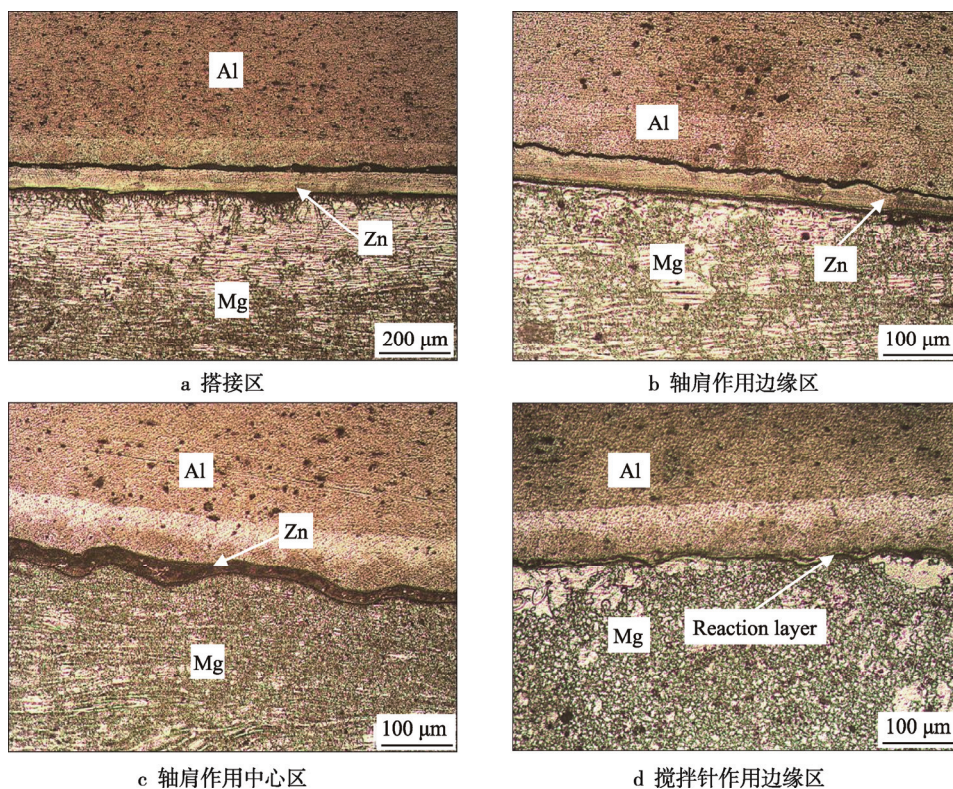


图4 复合焊接接头界面组织结构

Fig.4 Interface structure of composite welded joint

为了精确地定性分析在钎焊区域内添加的中间层钎料 Zn 与母材发生冶金反应之后生成产物的具体物相。选择了距离焊核区更近的复合焊接接头钎焊区域, 进行微区 XRD 测试。测试区域如图 5a 所示, 测试结果如图 5b 所示。从图 5b 可以看出, 所测试的区域不存在单质钎料 Zn, 而是被 Al-Zn, Mg-Zn 的金属间化合物以及固溶体所取代。同时其中还存在 $MgZn_2$ 这一金属间化合物, 铝-镁-锌三元合金中 IMC 热力学计算, 得出 $MgZn_2$ 的自由能远小于铝镁金属间化合物 Al_3Mg_2 以及 $Mg_{17}Al_{12}$ 的自由能^[14]。由于 Al_3Mg_2 以及 $Mg_{17}Al_{12}$ 是脆硬的金属间化合物, 数量越多焊缝的力学性能越差。 $MgZn_2$ 虽然是一种较脆的共晶组织, 但是 Mg-Zn 第二相颗粒的弥散分布特征可以很好地抑制裂纹的扩展, Ruigen Gan^[15]等的研究中也出现了该化合物, 测试区域没有检测到 Al-Mg 系金属间化合物的存在, 因此, 说明添加的中间层钎料 Zn 已经很好地阻隔了 Al 和 Mg 的相互反应, 从而达到了减少 Al-Mg 金属间化合物量的目的。

2.2 FSW-B 复合焊接接头微观组织与性能

不同工艺参数下异种合金复合焊接接头抗拉减力对搅拌头旋转速度的变化规律见图 6。可以看出, 在相同的焊接速度下, 随着搅拌头旋转速度的增加, 焊接接头的抗拉剪力都呈现先增大后减小的趋势。拉剪力最大时的加工参数为焊接速度 23.5 mm/min, 旋

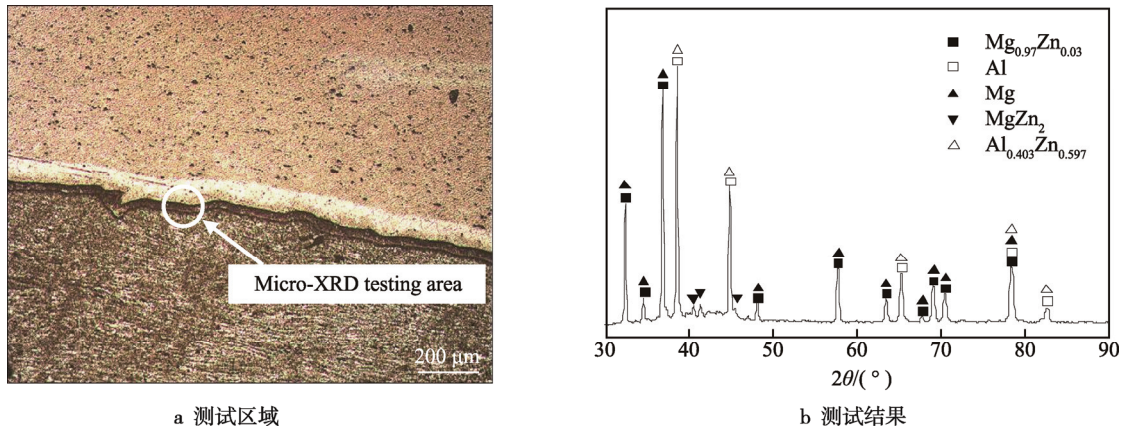


图 5 复合焊接接头钎焊区微区 XRD 测试结果
Fig.5 XRD test results of micro zone in brazing zone of composite welded joint

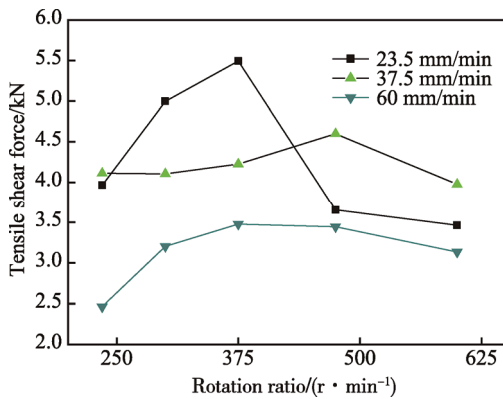


图 6 旋转速度对异种金属复合焊接接头抗拉剪力的影响
Fig.6 Influences of rotation speed on tensile shear strength of different metal composite welded joints

转速度 375 r/min, 此时抗拉剪力达到了 5.5 kN。当焊接速度为 37.5 mm/min, 旋转速度为 475 r/min 时, 抗拉剪力达到峰值。由 3 条曲线可以看出, 焊接速度的变化必须与对应的旋转速度相匹配, 才能获得力学性能良好的焊接接头, 但是当焊接速度为 60 mm/min 时, 在不同的旋转速度下焊接接头的抗拉剪力都比较小, 曲线基本没有出现峰值。这说明了焊接速度与旋转速度的提高, 虽然保证了对焊缝的热输入, 而对接头的机械搅拌作用以及钎焊范围却发生了改变, 钎料的大量熔化导致了进入焊核的钎料增多, 在轴肩尺寸相同的情况下, 钎焊的宽度就相应减小了, 导致接头的抗拉剪力减小, 所以选择匹配的旋转速度与焊接速度是获得优良接头的一个重要保证。

铝/镁异种合金焊接接头拉伸的载荷和变形曲线见图 7, 其中虚线为搅拌摩擦焊-钎焊复合焊接接头的拉伸变形曲线, 可以看出, 随着载荷的逐渐增大, 拉伸变形也在增大, 但是当拉伸载荷达到 3.5 kN 时出现波动。在试验过程中观察到, 此时接头的钎焊区域已经完全断裂, 承受载荷的只有搅拌摩擦焊区域, 因此, 可以认为, 在复合焊接接头的拉伸过程中, 钎焊区域能够首先吸收部分拉伸载荷, 对缓解接头的断裂趋势

有一定辅助作用, MgZn₂ 化合物的存在也验证了这一点, 从而增加了接头的抗拉剪性能, 该结果与 Yuhua Jin 等研究中出现的钎料锌在断面上的存在降低了裂纹趋势的描述相符^[15]。FSW-B 焊接接头的断口宏观形貌以及 SEM 分析见图 8。由图 8a 可以看出, 复合焊接接头的断裂发生在 Al/Zn 界面。对图 8a 中的区域 B 和 C 进行 SEM 分析, 其形貌见图 8b 和 8c, 其中图 8c 和图 8e 分别对应图 8b 和图 8c 的放大。从图 8b 和图 8c 可以看出, 断口宏观较为光滑, 呈现河流花样, 表明接头断裂方式为脆性断裂。这与图 7 中复合焊接接头的载荷和位移曲线所呈现的结果相一致, 进一步得到了验证。从图 8d 可以看出, 该区域为搅拌摩擦焊接区域。接头的断口宏观形貌出现了光滑的解理面, 对局部进行进一步放大, 如图 8e 所示, 可以发现大量的解理台阶面和层状的撕裂棱。对接头的断口分析发现, 在断口中没有出现韧窝等塑性断裂的特征, 而是以河流花样和解理台阶为主的脆性断裂特征, 并且, 河流花样主要出现在靠近搅拌针作用的钎焊区域, 而解理台阶则出现在搅拌针作用的区域, 因此, 可以认为, 复合焊接接头的断裂方式为脆性断裂。

对接头断口图 8c 区域进行 EDS 能谱分析, 结果见图 9a。从能谱分析可以发现, 在断口区域内存在

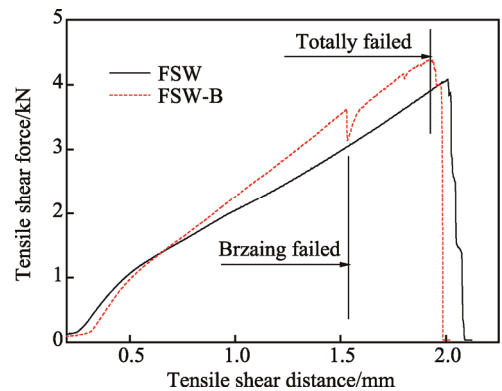


图 7 焊接接头的拉伸变形曲线
Fig.7 Tensile deformation curve of welded joints

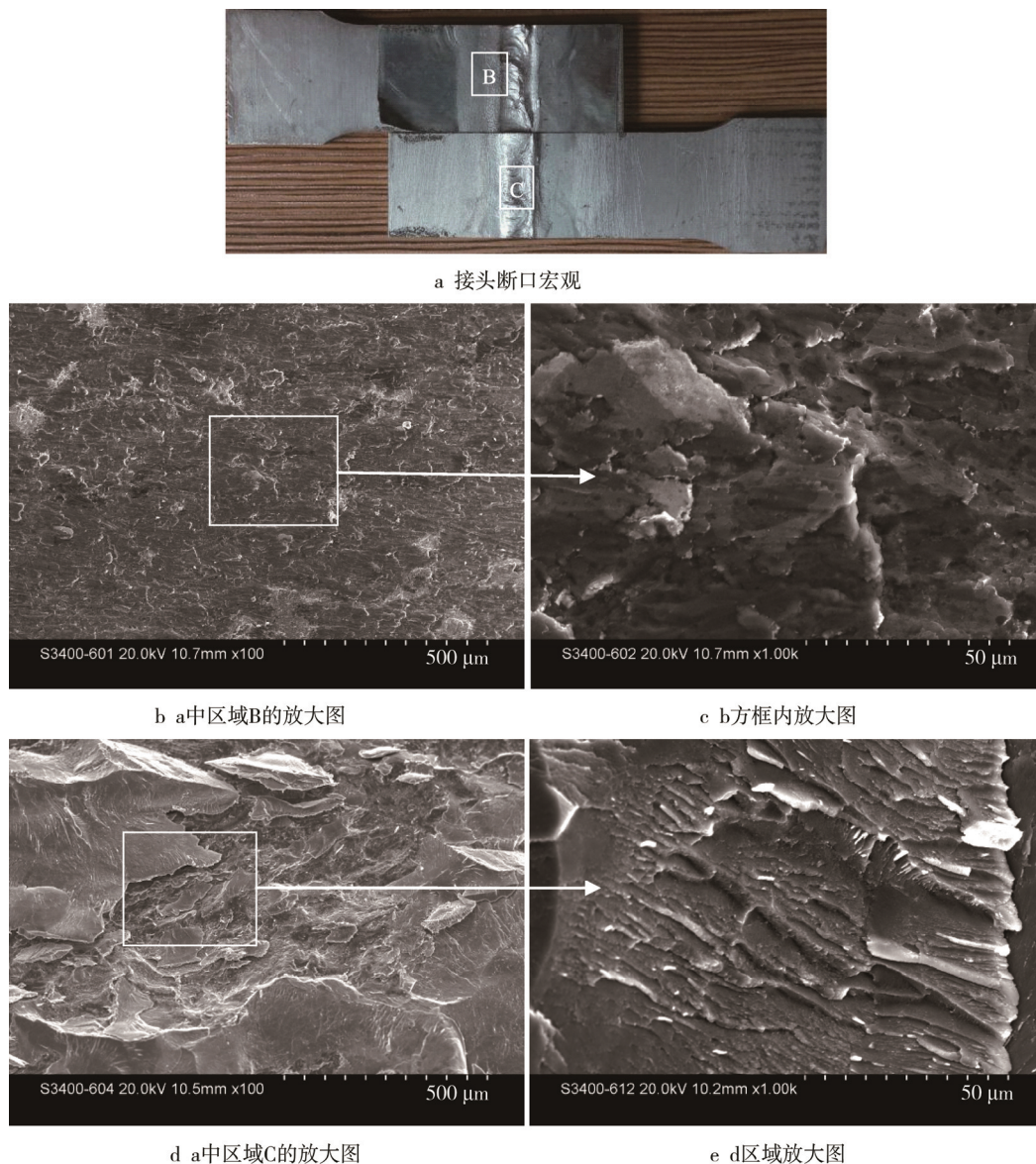


图8 复合焊接接头断口宏观形貌 SEM 分析
Fig.8 SEM analysis of fracture morphology of composite welded joint

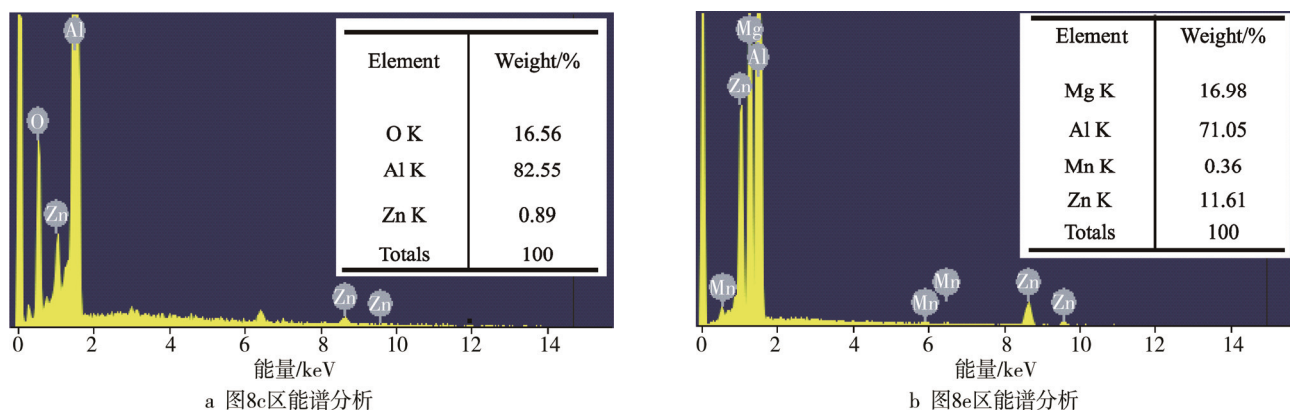


图9 图8c, e 区域的 EDS 分析
Fig.9 EDS analysis in region c and e of Fig.8

大量的 Al 约占质量分数的 82.55%，而 Zn 较少约占质量分数的 0.89%，同时并没有发现 Mg 元素。由于

图 8b 为铝侧，可以认为断裂发生在偏铝侧，所以 Al 元素占比很大，同时，由于 Zn 钎料熔化后，在搅拌

头轴肩的作用下被大量挤出, 从而 Zn 在该区域存在的量较少。对接头断口图 8e 区域进行 EDS 能谱分析, 其结果见图 9b。在 EDS 结果中发现, 该区域存在的 Al 约占质量分数的 71.05%, 相对图 8c 区域有所降低, 同时还存在质量分数为 16.98% 的 Mg 元素以及质量分数为 11.61% 的 Zn 元素, 并且 Zn 元素的含量明显超过了 AZ31 镁合金母材中 Zn 元素的量, 因此可以断定, 有部分钎料 Zn 进入到了该区域中。与传统的采用搅拌摩擦焊接铝/镁的结果相比, 可以认为, 在该区域由于 Zn 钎料的添加, 有效阻止了 Mg 和 Al 的相互接触、反应^[16]。

3 结论

1) 在复合焊接接头的拉伸过程中, 钎焊区域能够首先吸收部分拉伸载荷, 对缓解接头的断裂趋势有一定的辅助作用, 能够增加接头的抗拉剪性能。拉剪力最大时的加工参数为焊接速度为 23.5 mm/min, 旋转速度为 375 r/min, 此时抗拉剪力达到了 5.5 kN。

2) 复合焊接接头的断裂方式为脆性断裂, 在断口区域内存在大量的 Al 且含少量 Zn, 同时并没有发现有 Mg, 因此可以认为, Zn 钎料的添加有效阻止了 Mg 和 Al 的相互接触、反应。

3) 复合焊接接头的钎焊焊缝主要分为搭接区、固相扩散区、钎焊区。搭接区的钎料保持固态, 焊接过程中没有熔化也没有形成冶金反应; 固相扩散区的钎料在焊接过程中保持固态, 在轴肩的热和力作用下发生扩散形成连接, 钎焊区的钎料熔化后, 与母材发生冶金反应, 形成钎焊焊缝。焊缝的主要组成为 Al 和 Mg 与 Zn 的固溶体以及 MgZn₂ 金属间化合物, 没有生成 Al-Mg 系金属间化合物。

参考文献:

- [1] 段亚丽. 点焊工艺参数对汽车用镁铝异种合金接头组织和性能的影响[J]. 电焊机, 2014, 44(11): 166—168.
DUAN Ya-li. Effect of Spot Welding Parameters on Microstructure and Properties of Mg-Al Alloy Joints Used in Automobiles[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(11): 166—168.
- [2] 刘飞, 张兆栋, 刘黎明. TIG 填充丝对接焊接镁铝异种金属[J]. 焊接学报, 2011, 32(10): 49—52.
LIU Fei, ZHANG Zhao-dong, LIU Li-ming. TIG-filled Zinc Wire Butt Joint Welding Magnesia-aluminum Alloy [J]. Welding Institution, 2011, 32(10): 49—52.
- [3] 王志敏, 汪永阳, 步贤政, 等. 铝镁合金激光-MIG 复合焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2015, 35(2): 203—207.
WANG Zhi-min, WANG Yong-yang, BU Xian-zheng, et al. Study on Laser-MIG Composite Welding Technology of Aluminum Magnesium Alloy[J]. Application of Laser, 2015, 35(2): 203—207.
- [4] 王恒, 刘黎明, 柳绪静. 镁铝异种材料 TIG 焊接接头扩散行为分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 5—8.
WANG Heng, LIU Li-ming, LIU Xu-jing. Analysis on Diffusion Behavior of TIG Welding Joint of Magnesia-Aluminum Heterogenous Materials[J]. Welding Institution, 2005, 26(7): 5—8.
- [5] 孟艳东. 镁合金/铝合金 CMT 焊接技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2016.
MENG Yan-dong. Research on CMT Welding Technology of Magnesium Alloy/Aluminum Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu Keji University, 2016.
- [6] 张建, 罗国强, 沈强, 等. 添加 Ni 箔中间层的 Mg-Al 扩散焊接接头界面结构和力学性能[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 13—17.
ZHANG Jian, LUO Guo-qiang, SHEN Qiang, et al. The Boundary Structure and Mechanical Properties of Mg-Al Diffusion Welded Joint with Middle Layer of Ni Foil Were Added[J]. Materials Engineering, 2015, 43(1): 13—17.
- [7] 陈影, 付宁宁, 沈长斌, 等. 镁/铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 93—96.
CHEN Ying, FU Ning-ning, SHEN Chang-bin, et al. Analysis of Microstructure and Properties of Mg/Al Mixed Metal Friction Stir Welding Lap Joints[J]. Welding Institution, 2012, 33(7): 93—96.
- [8] YANG J, NI D R, WANG D, et al. Friction Stir Welding of As-Extruded Mg-Al-Zn Alloy with Higher Al Content, Part I: Formation of Banded and Line Structures[J]. Materials Characterization, 2014, 96: 142—150.
- [9] SHEN J, LI Y, ZHANG T, et al. Preheating Friction Stir Spot Welding of Mg/Al Alloys in Various Lap Configurations[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 20(1): 1—10.
- [10] LIU Fei, REN Da-xin, LIU Li-ming. Effect of Al Foils Interlayer on Microstructures and Mechanical Properties of Mg-Al Butt Joints Welded by Gas Tungsten Arc Welding Filling with Zn Filler Metal[J]. Materials and Design, 2013, 46: 419—425.
- [11] RATTANA Borrisutthekul, MIYASHITA Yukio, YOSHIHARU Mutoh. Dissimilar Material Laser Welding Between Magnesium Alloy AZ31B and Aluminum Alloy A5052-O[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2005, 6: 199—204.
- [12] TAKEHIKO W, YOSHITAKA S. Resistance Spot

- Welding of a Magnesium Alloy AZ31B Plate to a 1050 Aluminum Plate Using Ag Insert Metal[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 2004, 54(7): 293—297.
- [13] 徐荣正, 刘春忠, 倪丁瑞, 等. 锌夹层添加对镁-铝异种金属搅拌摩擦点焊接头组织与性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 18—25.
XU Rong-zheng, LIU Chun-zhong, NI Ding-rui, et al. Effect of Zn Interlayer on Microstructure and Properties of Mg-Al Mixed Metal Friction Spot Welding Joints[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 18—25.
- [14] 肖长源. Al/Mg 异种金属搅拌摩擦焊金属间化合物的形成机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- XIAO Chang-yuan. Study on Formation Mechanism of Intermetallic Compounds in Al/Mg Mixed Metal Friction Stir Welding[D]. Chengdu: Xi'nan Jiaotong University, 2016.
- [15] RUIGEN Gan, JIN Yu-hua. Friction Stir-induced Brazing of Al/Mg Lap Joints with and without Zn Interlayer[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 23(6): 1—8.
- [16] XU R Z, NI D R, YANG Q, et al. Influencing Mechanism of Zn Interlayer Addition on Hook Defects of Friction Stir Spot Welded Mg-Al-Zn Alloy Joints[J]. *Materials and Design*, 2015, 69: 163—169.