

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.08

镁/镀锌钢异种金属电阻点焊接头显微组织与力学性能

蒋德平¹, 邹雨宏², 李明珠², 周 杨³, 姚宗湘^{2*}, 王 刚², 张 龙²

1. 重庆科技大学 工程训练中心, 重庆 401331

2. 重庆科技大学 机械与智能制造学院, 重庆 401331

3. 重庆科技大学 冶金与动力工程学院, 重庆 401331

摘要: 采用电阻点焊的方法对AZ31B镁合金/HC260YD+Z镀锌钢异种金属进行了焊接试验, 研究了焊接电流对接头力学性能、断裂模式和微观组织的影响。结果表明, 随着焊接电流的增加, 接头的熔核直径逐渐增大, 而压痕深度和拉剪力却呈现先增加后降低的趋势。当焊接电流较小时(小于8 kA), 接头的断裂模式为界面断裂, 电流增大到10 kA时, 接头的失效模式转变为部分熔核被拔出的纽扣型断裂; 当焊接电流10 kA、焊接时间24 cycle、电极压力2.0 kN时, 接头抗剪力最大, 为3.83 kN; 镁侧HAZ受焊接热影响形成粗大等轴晶, 熔核中心主要为等轴树枝晶, 而边缘区则为柱状树枝晶, 在熔核区晶界处还析出有少量的Mg-Al第二相。接头界面处有金属间化合物Fe₂Al₃形成, 导致界面区平均硬度高于镁侧。

关键词: 电阻点焊; 微观组织; 拉剪力; 断口形貌

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0071-09

Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welding Joints Between Magnesium/Galvanized Steel Dissimilar Metals

JIANG Deping¹, ZOU Yuhong², LI Mingzhu², ZHOU Yang³, YAO Zongxiang^{2*}, WANG Gang², ZHANG Long²

1. Engineering Training Center, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

2. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

3. School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

Abstract: Welding experiments on dissimilar metals of AZ31B magnesium alloy and HC260YD+Z galvanized steel were conducted using resistance spot welding. The effects of welding current on the mechanical properties, fracture modes, and microstructure of the joints were investigated. The results show that as the welding current increases, the nugget diameter of the joint gradually increases, while the indentation depth and tensile shear force first increase and then decrease. When the welding current is low (less than 8 kA), the fracture mode of the joint is interfacial fracture. As the current increases to 10 kA, the failure mode changes to button fracture with partial nugget pull-out. The joint achieves the maximum shear strength of 3.83 kN under the welding conditions of 10 kA current, 24 cycles welding time, and 2.0 kN electrode pressure. In the heat-affected zone on the magnesium side, the microstructure mainly consists of coarse equiaxed grains, while the nugget center is composed of fine equiaxed dendrites, and the edge zone is dominated by columnar dendrites. A small amount of the Mg₁₇Al₁₂ second phase precipitates at the grain boundaries within the nugget zone. Intermetallic compounds, mainly Fe₂Al₃, form at the joint interface, leading to an average hardness in the interfacial region that is higher than that on the magnesium side.

收稿日期: 2026-01-01 修回日期: 2026-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(52175288); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1236, CSTB2022NSCQ-MSX1577)

作者简介: 蒋德平(1976—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事轻合金材料成形工艺研究。

通讯作者: 姚宗湘(1978—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事高性能材料焊接工艺及微电子封装可靠性等研究。E-mail: yaozongx@cqust.edu.cn。

Keywords: resistance spot welding; microstructure; tensile shear strength; fracture morphology

引用格式:蒋德平,邹雨宏,李明珠,等. 镁/镀锌钢异种金属电阻点焊接头显微组织与力学性能[J]. 电焊机,2026,56(5):71-79.

Citation:JIANG Deping, ZOU Yuhong, LI Mingzhu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welding Joints Between Magnesium/Galvanized Steel Dissimilar Metals[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 71-79.

0 引言

车辆轻量化、节能、环保和安全已成为当今工业发展的必然趋势,也是汽车设计者和生产商所关注的主要问题之一^[1-3]。融合多种轻量化材料协同发挥各自性能优势来设计混合结构^[4-6],这一先进理念已在航空航天、新能源汽车及高端装备等领域广泛应用。钢仍然是车辆车身主体材料,而镁及其合金作为目前最轻的工程材料,具有良好的比强度、散热性和抗冲击载荷性等,被称为“21 世纪绿色工程金属材料”^[7],在车辆轻量化方面有着巨大的应用潜力。镁-钢混合车身搭接结构的设计与制造正成为驱动汽车轻量化向纵深发展的重要突破口^[8-9]。

然而,镁合金和钢在物理与化学性能方面差异较大,两者不能生成固溶体或金属间化合物,属于典型的不反应难固溶材料,直接连接极为困难。目前,镁/钢异种金属的连接方法主要包括 MIG 熔钎焊^[2,10]、摩擦焊^[11-12]和激光焊^[13-15]等,这些方法在特定条件下也能实现镁/钢异种金属的连接,但普遍存在接头强度较低、使用范围受限等问题。电阻点焊具有操作便捷、工艺简单、热输入低及焊接变形小等优点,在汽车白车身制造中应用最为广泛,是镁/

钢异种材料连接最具工程应用前景的方法之一。近年来,镁/镀锌钢电阻点焊的研究已取得一定进展。实验表明镁合金和镀锌钢板能形成较好的焊接接头,然而关于镁/钢异种材料电阻点焊的机理研究报道并不多见,需要进一步研究。

鉴于此,本文以汽车车身常用的 AZ31B 镁合金和 HC260YD 镀锌钢板为研究对象,采用中频电阻点焊机进行试验,系统研究焊接电流对接头宏观形貌、力学性能、断裂模式及微观组织的影响规律,探究电流、熔核尺寸和力学性能之间的关系,为镁/高强镀锌钢异种金属点焊的工程应用提供理论参考和技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用 1.0 mm 厚的 AZ31B 镁合金和 1.0 mm 厚的 HC260YD+Z 镀锌钢(镀锌层厚度 0.02 mm)作为母材,其化学成分和力学性能分别如表 1、表 2 所示。试样尺寸均为 80 mm×30 mm×1.0 mm,焊接前采用砂纸打磨镁合金表面以清除氧化膜,随后用无水乙醇清洗镁合金及镀锌钢板表面,吹干备用。

表 1 母材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metals (wt. %)

母材	Al	Zn	Cu	Mn	Si	Ni	Fe	C	S	P	Ti	V	Nb	Mg	Fe
AZ31B	3.18	0.96	0.004	0.32	0.025	0.001	0.002	—	—	—	—	—	—	余量	—
HC260YD+Z	0.027	—	—	1.538	0.022	—	—	0.082	0.020	0.028	0.248	0.260	0.061	—	余量

表 2 母材力学性能

Table 2 Mechanical properties of base metals

牌号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	伸长率/%
AZ31B	274	173	8.9
HC260YD+Z	414	293	43.2

1.2 焊接方法

试验采用 RSW-DTB-90 型中频直流点焊机进行焊接,采用镁下钢上的搭接形式进行焊接,搭接长度 30 mm。焊接工艺参数如表 3 所示。

表 3 镁/钢电阻点焊工艺参数

Table 3 Resistance spot welding parameters of Mg/Steel

焊接电流/kA	焊接时间/cycle	电极压力/kN	保持时间/cycle
7~11	24	2	5

1.3 测试与表征

拉伸试验在 CMT-5105 型微机控制电子万能试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min,每组参数取 5 个试样的平均值作为最终结果。拉伸时在试样两端分别垫入 1.0 mm 垫片以消除附加力矩,拉伸试样

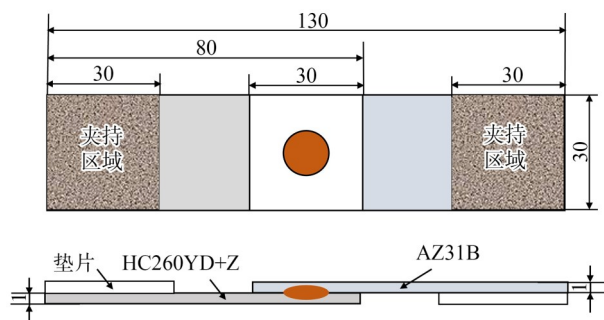


图1 点焊接头剪切试样示意(单位:mm)

Fig. 1 Tensile diagram of spot welded joint (Unit: mm)

示意如图1所示。

采用线切割沿熔焊中心垂直于板面方向切取金相试样,经砂纸打磨后抛光,采用苦味酸对镁合金侧腐蚀6~10 s。采用MDS300型金相显微镜观察接头显微组织;利用JSM-7800F型扫描电镜配合能谱分析仪(EDS)分析界面组织、断口形貌及元素分布;采用SmartLab-9型X射线衍射仪分析断口相组成,连续扫描宽度为 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $6^{\circ}/\text{min}$ 。

熔核直径及压痕深度每组参数测量3个试样取平均值。显微硬度测试在HV-100型硬度试验机进行,试验力为0.3 kgf,加载时间15 s。

2 试验结果与讨论

2.1 点焊接头宏观形貌与熔核特征

点焊接头的宏观特征通常采用熔核直径与压痕深度来表征,二者分别反映了接头的有效结合面积与表面成形质量。焊接电流是电阻点焊过程最关键的工艺参数之一,对接头的熔核直径、成形质量及力学性能都会产生较大的影响。镁/钢电阻点焊过程中,由于镁合金熔点(约 649°C)远低于钢(约 1500°C),焊接热输入仅能使镁侧完全熔化形成熔核,而钢侧始终保持固态,熔化的镁液通过润湿固态钢表面并在界面发生冶金反应实现连接,因此镁/钢点焊本质上属于“熔-钎焊”复合连接模式。鉴于钢侧组织变化较小,且接头断裂均发生于镁侧或界面,本文重点分析镁侧的形貌与微观组织。图2、图3为焊接电流7~11 kA时的宏观形貌和特征参数。

结合图2a、图3a,镁侧熔核直径随焊接电流增大呈非线性增长趋势。当焊接电流为7 kA时,热输

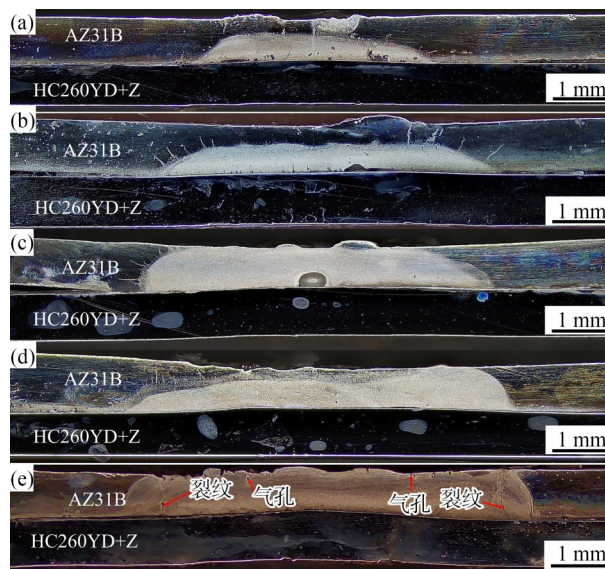


图2 不同焊接电流下的接头形貌:(a)7 kA;(b)8 kA;(c)9 kA;(d)10 kA;(e)11 kA

Fig. 2 Joint morphology at different welding current: (a) 7 kA; (b) 8 kA; (c) 9 kA; (d) 10 kA; (e) 11 kA

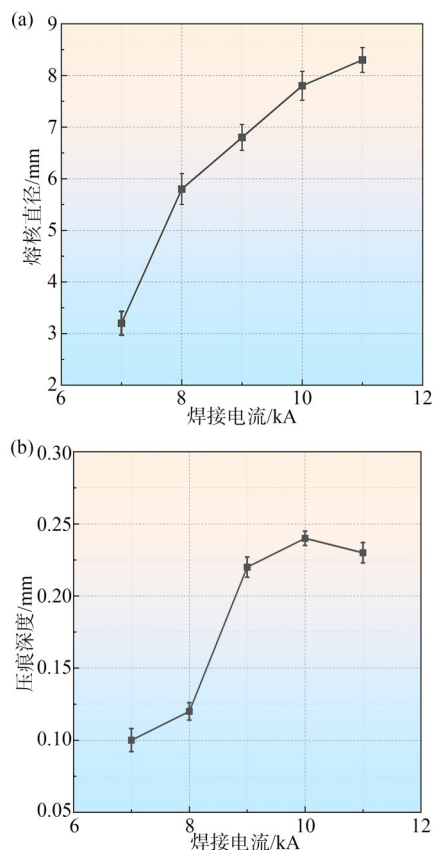


图3 焊接电流对镁侧接头宏观特征的影响:(a)熔核直径;(b)压痕深度

Fig. 3 Effect of welding current on macroscopic characteristics of joints: (a) Molten core diameter; (b) Depth of indentation

入较低,镁合金基体仅接触面发生局部熔化,熔核平均直径仅为3.34 mm,镁/钢界面未形成有效的冶金结合,结合面上可观察到未熔合区域(见图2a);当电流增至8~10 kA时,焦耳热的指数级增长($Q=I^2RT$)显著加速了镁合金的熔融进程,熔核直径快速增大至7.76 mm(10 kA),截面形貌呈现典型的“驼峰”形熔核特征(见图2d),表明镁/钢界面已形成较充分的冶金结合;当电流提升至11 kA时,熔核直径进一步增至8.11 mm,但接头镁侧焊透率过高,出现裂纹与气孔等缺陷(见图2e),并伴有明显飞溅,接头性能降低。

镁侧压痕深度随焊接电流增加呈先升后降的趋势(见图3b)。焊接电流在7~10 kA区间内变大时,压痕深度由0.10 mm增至0.23 mm,这与电极压力作用下液态熔核的体积膨胀效应直接相关,熔池体积的增大加剧了电极对软化金属的挤压变形使得压痕深度增加;当电流增至11 kA时,压痕深度反而下降至0.22 mm,这是因为过高的热输入导致熔融状态下的镁合金黏度降低、流动性增强,有效分散了电极压力集中作用,最终导致压痕深度下降。

2.2 接头力学性能

图4为焊接电流在7~11 kA变化时对接头拉剪性能的影响。各参数的测试结果如表4所示。

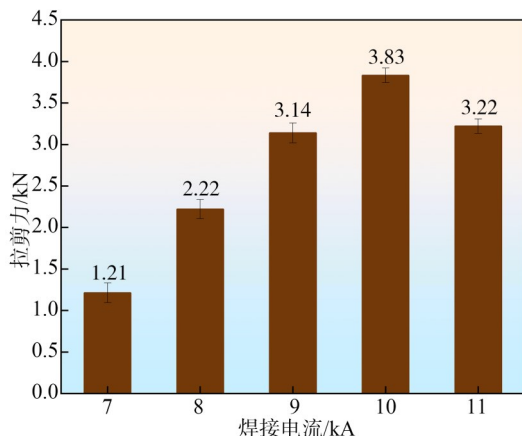


图4 不同焊接电流下接头剪切力的变化情况

Fig. 4 Tensile shear force of the joint at different welding current

接头拉剪力随焊接电流增大呈先增后减小的抛物线型变化规律。当焊接电流为7 kA时,热输入不足,镁/钢界面冶金反应不充分,熔核直径仅为3.34 mm,接头拉剪力仅为1.21 kN;随着焊接电流增大到10 kA,热输入增加使熔核直径增至7.76 mm,

表4 接头力学性能测试结果及断裂模式

Table 4 Results of joint mechanical performance tests and fracture modes

焊接电流/kA	熔核直径/mm	拉剪力/kN	断裂模式
7	3.34	1.21	界面断裂
8	5.81	2.22	界面断裂
9	6.79	3.22	界面断裂
10	7.76	3.83	纽扣断裂
11	8.11	3.14	纽扣断裂(含缺陷)

接头拉剪力达到最大值,为3.83 kN;当超过10 kA时,过大的热输入导致焊接过程中产生大量飞溅,接头焊透率较高,接头处产生热裂纹和气孔,削弱了接头的强度,导致拉剪力降低。

2.3 断裂模式

接头断裂模式也是评价点焊接头性能的重要参考指标。本试验中观察到从界面断裂到纽扣断裂的明显转变,二者分别对应低电流与高电流。

2.3.1 界面断裂

图5为焊接电流8 kA时镁/钢点焊接头的断裂宏观形貌。可以看出,在焊接电流较低时,热输入不足导致镁/钢界面未能充分发生冶金反应,界面结合强度较低,在拉剪力作用下试样在界面结合处断裂,断口较为平整,且没有明显的宏观变形,因此可判断接头以界面断裂为主,这种断裂形貌被认为是低质量接头的标志^[16]。为进一步判定接头界面的断裂模式,采用扫描电镜及能谱分析仪分别对图5钢侧以及镁侧断口表面局部区域进行扫描和分析测试,如图6所示。钢侧断口(见图6a)表面较光滑,解理区面积较大,是典型的脆性断裂;镁侧断口(见图6b)虽可见少量韧窝,但仍以脆性断裂为主要特征。由此推测,低电流下接头以脆性断裂为主。

对钢侧断口区域进行XRD分析,结果如图7所示,界面检测到少量的 Fe_2Al_3 和 MgZn_2 化合物。界面

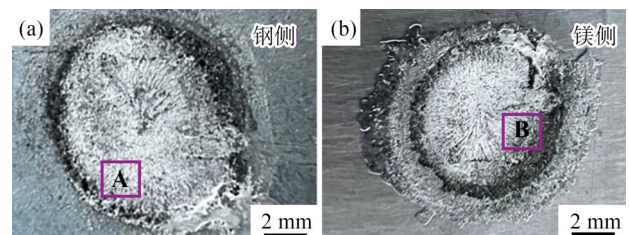


图5 焊接电流8 kA下接头断裂形貌:(a)钢侧;(b)镁侧

Fig. 5 Fractographic appearance of the joint at 8 kA: (a) Steel side; (b) Mg side

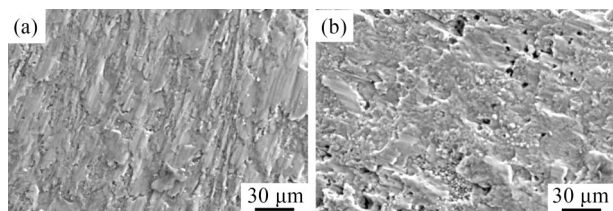


图6 图5中A、B局部区域放大后形貌:(a)A区;(b)B区
Fig. 6 Magnified views of local regions A and B in Figure 5: (a) region A in Figure 5; (b) region B in Figure 5

处少量 MgZn_2 共晶组织的存在使得外部气体难以渗入熔核内部,促进了镁/钢界面的紧密接触,有利于元素的充分扩散,为两者间的良好连接创造了有利条件^[17]。这些少量化合物的检出,既证实了镁/钢界面在焊接过程中形成了 Fe_2Al_5 金属间化合物,也表明界面IMC层仍然是影响接头力学性能的重要因素之一。

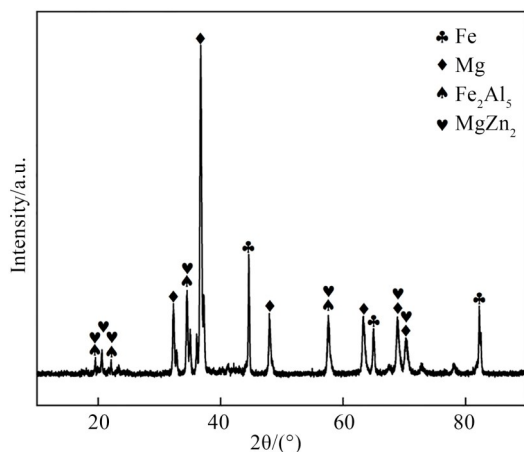


图7 接头断口界面XRD图

Fig. 7 XRD pattern at the interface of the joint with Al intermediate layer added

2.3.2 纽扣断裂

当焊接电流增大时,焊接区的热量增大,熔核尺寸增大,熔核的强度也相应增大。图8a、8b为焊接电流10 kA时镁/钢点焊接头的断裂试样宏观形貌。当热输入增大时,拉剪时部分熔核从镁侧被拔出,呈纽扣断裂特征,较高的热输入促使镁/钢界面处发生了充分的冶金反应并形成了连续的 Fe-Al 化合物过渡层,界面结合强度明显提高。此时界面结合强度已超过镁侧熔核自身的强度,裂纹不再沿界面扩展,而是向镁侧熔核内延伸,发生纽扣断裂。图8c为图8b中C处放大的显微组织,可见镁侧熔核断口上分布着稀疏的撕裂棱和大小不一的韧窝,表现出明显的韧-脆混合断裂特征。发生纽扣断裂的

接头抗剪强度一般高于界面断裂接头^[18]。综上,最佳参数为焊接电流10 kA、焊接时间24 cycle、电极压力2.0 kN,此时接头获得最大抗剪力3.83 kN。

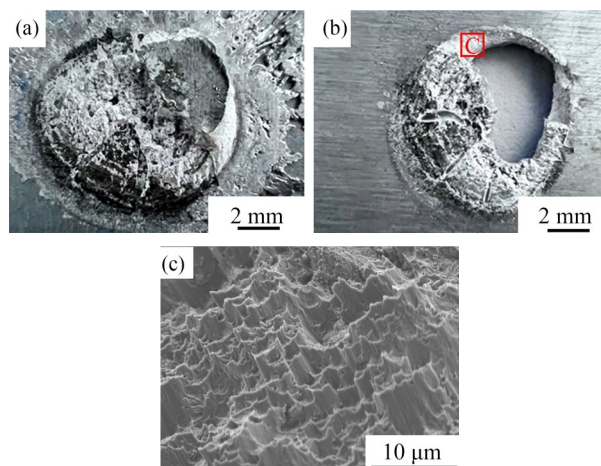


图8 焊接电流10kA下接头断裂形貌

Fig. 8 Fractographic appearance of the joint at 10 kA

2.4 接头微观组织

选定最佳工艺参数(焊接电流10 kA,焊接时间24 cycle,电极压力2.0 kN)下的接头进行微观组织分析。镁/钢点焊属于“熔-钎焊”复合连接模式,钢侧始终未熔化,组织变化较小,因此重点分析镁侧微观组织及界面特征。

2.4.1 镁侧组织特征

镁侧主要由熔核区(FZ)、热影响区(HAZ)及母材区(BM)三部分组成,金相组织如图9所示。HAZ(见图9b)主要为粗大的等轴晶,平均晶粒尺寸较母材区有所增大,这种粗大的晶粒一般情况下会表现出较差的力学性能。焊接热循环促使低熔点的 β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 共晶组织在晶界持续析出易引起应力集中并诱发裂纹,可能导致点焊接头发生脆性破坏^[19]。FZ的I区(见图9c)为柱状树枝晶,呈现明显的联生结晶特征,其形成机理为:焊后熔融状态的镁受水冷电极作用急剧冷却,产生了大的过冷度,熔融金属以半熔化HAZ晶粒为基底发生非均匀形核。由于熔核边缘组织与未熔化镁合金基体在化学成分和晶体结构上高度相似,加之电极压力的协同作用,晶粒呈现典型的联生结晶特征。FZ的II区(见图9d)主要由等轴树枝晶组成。随着凝固过程持续进行,熔核中心因散热困难而形成较小的温度梯度,产生显著的成分过冷现象,液相中大量形核,

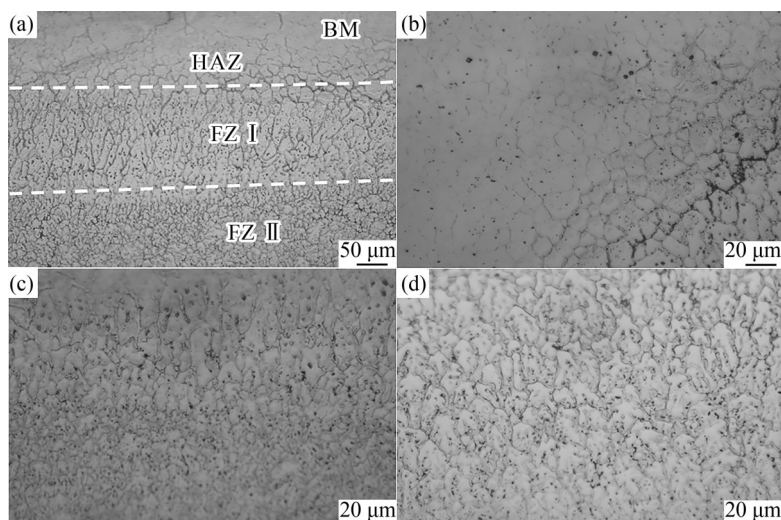


图9 接头镁侧显微组织:(a)母材至熔核区域的显微组织;(b)热影响区;(c)、(d)分别为熔核I和II区的放大图

Fig. 9 Microstructure of magnesium alloy side of joints: (a) Microstructure characteristics of the area from base metal to molten core; (b) the heat affected zone; (c) and (d) magnified views of FZ I and FZ II, respectively

各方向生长速率趋于一致,形成等轴树枝晶组织。

2.4.2 熔核区析出相与缺陷

图10a为镁侧近界面熔核区SEM形貌。对位置1、2进行EDS点扫描分析,结果见表5,根据元素百分比推断,镁侧熔核区晶界上主要析出Mg-Al第二相。这种第二相以弥散的形式均匀分布在熔核区晶界处,对接头的力学性能具有双重影响:一方面阻碍晶界移动,起到晶间强化作用,提高接头性能;另一方面,这些低熔点的共晶组织很容易在晶界处引起应力集中,诱发后期裂纹。由图10b可知,镁侧界面附近熔核区存在明显的孔洞,这是因为电阻点焊过程中熔核区在极短时间内经历快速加热和冷却,该区域的液态金属在冷却过程中因镁合金的高热导率会发生快速凝固收缩,凝固收缩后期顶锻力不足,导致熔核内部产生缩松和缩孔等缺陷。

2.4.3 界面元素扩散与金属间化合物

为进一步分析接头界面处的元素扩散行为,对接头进行EDS线扫描和面扫描,如图11所示。选取镁侧(位置1)、界面IMC区域(位置2)及钢侧(位置3)三个特征区域进行扫描,EDS结果见表6。镁侧(位置1)以Mg元素为主(82.55 at.%),含少量Al和O元素,未检测到Fe。这与Fe-Mg二元相图的热力学特性相吻合——镁与铁的熔点差异大,两者之间难以形成固溶体和金属间化合物,Fe难以向镁侧扩散。界面IMC区域(位置2)呈现出复杂的多元素共

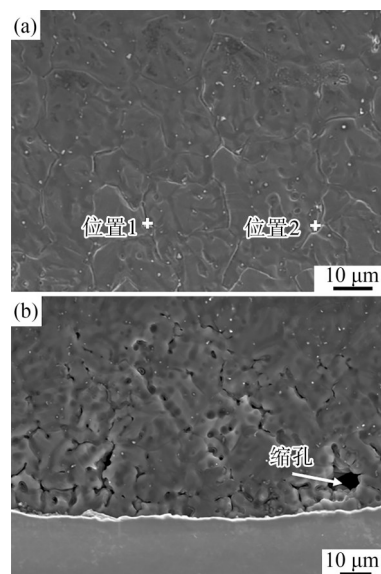


图10 镁侧界面附近显微组织:(a)熔核中心区;(b)界面处

Fig. 10 Microstructure near the interface on the magnesium side: (a) core zone; (b) interface

表5 点焊接头界面EDS分析结果(原子分数,%)

Table 5 EDS analysis results of interfacial chemical composition of spot welded joint (at. %)

位置	Mg	Al	Zn
1	69.43	27.73	2.84
2	72.23	24.52	3.25

存特征,含Mg、Fe、Al、Zn元素。钢侧(位置3)以Fe元素为主(82.99 at.%),同时含有少量的Mg(3.91 at.%)和O(12.2 at.%),尽管Mg与Fe不直接反应,但Zn的液态过渡层为Mg-Fe原子提供了扩散通道,导

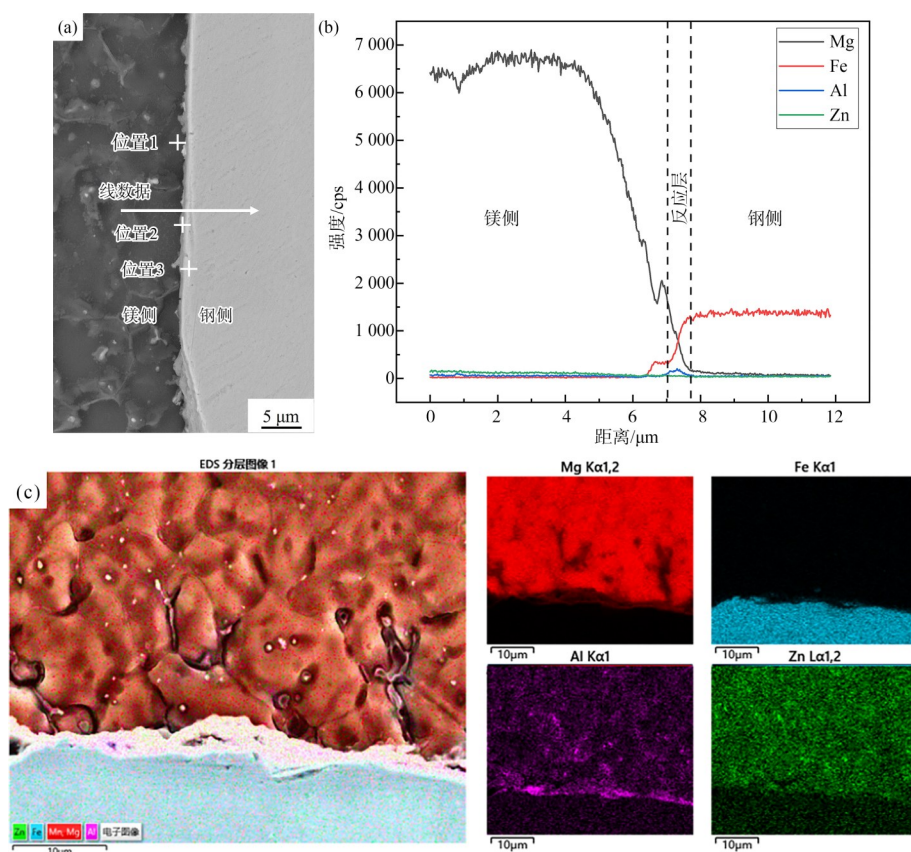


图 11 镁/钢接头微观组织: (a)接头界面; (b)线扫描; (c)面扫描

Fig. 11 Microstructure of magnesium/steel joint: (a) joint interface; (b) line scan; (c) surface scan

表 6 点焊接头界面点扫描分析结果(原子分数, %)

Table 6 Spot Weld Head Interface Point Scan Analysis Results (at. %)

位置	Mg	Al	Fe	Zn	O
1	82.55	0.27	—	—	17.18
2	8.52	61.73	28.42	1.33	—
3	3.91	0.53	82.99	0.37	12.2

致少量Mg向钢侧渗透。

在点焊过程中,电极会将液态锌、Mg-Zn低熔点共晶反应物以及破碎的氧化物挤出焊接中心,这些化合物随后填充于点焊接头的环形区域,有效阻隔了外界气体渗入,形成类似真空的保护环境^[17]。这可能是位置2处未检测到O元素的主要原因。

2.4.4 界面金属间化合物的形成

镁/镀锌钢点焊时,Zn与Mg剧烈反应导致界面Mg元素缺失,使镁合金中的Al原子暴露和富集,同时Zn层的挤出使Fe元素也在界面富集,在浓度梯度与焊接温度共同驱动下,Al与Fe相互扩散并反应生成Fe-Al金属间化合物,导致界面区域Al元素相对浓度有所增加(见图11b)。根据Fe-Al二元相图,

Al与Fe可形成 Fe_2Al_5 、 FeAl 、 FeAl_2 、 FeAl_3 及 Fe_3Al 等多种金属间化合物。热力学分析表明, Fe_2Al_5 的吉布斯自由能最低,其次为 FeAl_3 ,表明在热力学条件下,界面会优先生成 Fe_2Al_5 化合物,并可能伴随少量 FeAl_3 的形成^[20]。结合位置2的成分分析(原子比 $\text{Fe}:\text{Al}\approx 2:5$),可确定界面金属间化合物为 Fe_2Al_5 。这些数量有限的金属间化合物层使镁合金与钢之间形成了有效的连接,增强了界面的结合强度。界面区域Mg和Zn含量较少的原因可能是:点焊的热机械共同作用使镀锌层熔融并挤出熔核中心,塑性环在接合区域边缘形成有效密封,对焊接过程起良好保护作用,镁合金与钢得以直接接触形成Fe-Al界面IMC层,同时Mg与Zn在界面边缘处形成低熔点Mg-Zn共晶物,导致界面区域Zn含量较低^[21]。

2.5 点焊接头显微硬度分析

硬度测试不仅能反映材料组织形成的演变规律,还可作为判断界面脆性化合物生成的重要依据。图12为焊接电流10 kA时点焊接头显微硬度

分布。由图 12 可知,镁侧近界面处平均硬度值约为 54.25 HV(镁母材硬度约为 51.10 HV),界面区域硬度值约为 71.90 HV(因压痕尺寸远超界面尺寸,因此界面区域硬度值只能反映界面硬度变化规律,不能准确反映界面硬度值),钢侧近界面处平均硬度值约为 175.47 HV,高于镀锌钢母材的平均硬度约 130 HV。镁侧熔核中心晶粒为柱状树枝晶且晶界析出的 $Mg_{17}Al_{12}$ 强化相使得镁侧熔核区平均硬度略高于镁母材区。在结合界面硬度突然增大,其原因可能是因为界面 IMC 发生了冶金反应生成了少量的 Fe-Al 金属间化合物,这种金属间化合物属于脆性相,因此硬度得到了提高。钢侧高硬度现象主要由双重机制导致:首先,钢的导电率远低于镁合金,从而引发焦耳热效应,使其作为一个热铁砧去加热镁合金;其次,电极强制冷却形成的陡峭温度梯度使钢侧峰值温度达马氏体相变临界点,通过固态相变形成高密度马氏体组织,显著提升局部硬度。

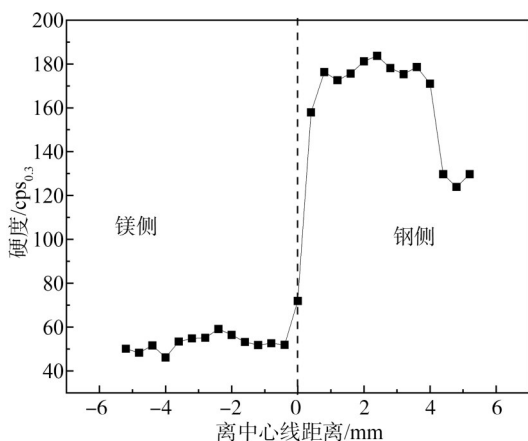


图 12 接头显微硬度分布示意

Fig. 12 Schematic diagram of joint microhardness distribution

3 结论

(1)在电极压力与焊接时间恒定的条件下,随着焊接电流从 7 kA 增至 11 kA,熔核直径持续增大,而压痕深度与拉剪力均呈先上升后下降的趋势。当焊接电流为 10 kA 时,压痕深度和拉剪力达到最大值;当电流达到 11 kA 时,会发生明显的飞溅现象。在焊接电流 10 kA、焊接时间 24 cycle、电极压力 2.0 kN 时,可以获得外观和质量都良好的接头,接头的抗剪强度最好,最大拉剪力为 3.83 kN。

(2)当焊接电流较小时,断裂主要沿着镁/钢接触界面断开,发生界面断裂,主要表现出脆性断裂的特征;当焊接电流较大时,接头发生纽扣断裂,此时镁/钢点焊接头断口表现为韧-脆混合断裂特征。

(3)镁/钢电阻点焊接头包含母材区(BM)、热影响区(HAZ)及熔核区(FZ)三部分。镁侧 HAZ 受焊接热影响形成粗大等轴晶,熔核中心主要为等轴树枝晶,而边缘区则为柱状树枝晶,此外,熔核区晶界处析出的少量 $Mg_{17}Al_{12}$ 第二相使其平均硬度提升至 54.25 HV。钢侧受焊接热作用使得近界面马氏体含量增加,使得近界面处平均硬度提高到 175.47 HV。镁/钢界面处的金属间化合物主要为 Fe_2Al_5 ,少量的金属间化合物使得界面硬度提高到 71.90 HV。

参考文献:

- [1] Suski C A, Silva Filho J F, Cortez A, et al. The environmental impact of lightweight body in white structures in vehicle manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449: 141833.
- [2] 沈小琨,赵一帆,万葛,等. Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(12): 1647-1653.
SHEN X K, ZHAO Y F, WAN G, et al. Influence of Zn Interlayer on Structure and Properties of Mg/Steel Friction Stir Lap Welding [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12): 1647-1653.
- [3] 冷宸,汪晓勇,彭红兵,等. 镀锌层和焊接速度对镁/钢 MIG 焊接头微观组织的影响[J]. 热加工工艺, 2024(19): 44-49.
LENG C, WANG X Y, PENG H B, et al. Effect of Zinc Coating and Welding Speed on Microstructure of Magnesium/Steel MIG Welded Joint [J]. Hot Working Technology, 2024(19): 44-49.
- [4] Tao Tao, Liu J S, Zhou D W, et al. Microstructure and properties of magnesium/steel dissimilar metals by interlayer assisted laser welding [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(03): 765-776.
- [5] 王伟东. 混合材料正在成为全球汽车产业发展新趋势 [J]. 中国有色金属, 2020(17): 42-43.
WANG W D. Hybrid materials are becoming a new trend in the global automotive industry [J]. China Nonferrous Metals, 2020(17): 42-43.
- [6] Kudiiarov V, Lyu J, Semyonov O, et al. Prospects of hybrid materials composed of MOFs and hydride-forming

- metal nanoparticles for light-duty vehicle hydrogen storage[J]. *Applied Materials Today*, 2021, 25: 101208.
- [7] Delogu M, Zanchi L, Dattilo C A, et al. Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability perspective[J]. *Materials Today Communications*, 2017, 13: 192–209.
- [8] 郭兴伍, 陈娟, 李晔, 等. 镁/钢异种板自冲铆连接及耐腐蚀性能研究[J]. *机械设计与制造*, 2023(01): 116–119. GUO X W, CHEN J, LI Y, et al. Study on High Speed Self-Piercing Riveting Connection of Magnesium/Steel Dissimilar Plates and its Corrosion Resistance[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023 (01): 116–119.
- [9] Fei L, Jiang F, Zhang P, et al. Strategies of reducing the heat-affected zone in Mg/steel resistance riveting welding joints for improving joint quality [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 124: 1316–1329.
- [10] 朱海霞, 曹睿, 李雅范, 等. 镁-裸钢板异种金属冷金属过渡熔钎焊连接机理[J]. *焊接学报*, 2016, 37(05): 77–80. ZHU H X, CAO R, LI Y F, et al. Joining mechanisms of cold metal transfer welding-brazing of Mg to bare steel [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2016, 37(05): 77–80.
- [11] 赵一帆, 胡心彬, 沈小琨. 工艺参数对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响[J]. *湖北工业大学学报*, 2024, 39(2): 23–28. ZHAO Y F, HU X B, SHEN X K. Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium-Steel Joint by Friction Stir Lap Welding [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2024, 39(2): 23–28.
- [12] 刘骁, 王希靖, 景文霞, 等. AZ31B 镁合金/镀锌钢无匙孔搅拌摩擦点焊结合方式[J]. *焊接学报*, 2016, 37(8): 17–20. LIU X, WANG X J, JING W X, et al. Bonding mechanism of friction stir spot welding of magnesium to galvanized steel [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2016, 37(8): 17–20.
- [13] Tao T, Liu J, Zhou D, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welding of AZ31B magnesium alloy and DP590 Dual-Phase steel with concave groove joint [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 72: 227–239.
- [14] He Z, Liu J, Zhou D, et al. Effect of Al-foil addition on microstructure and temperature field of laser fusion welded joints of DP590 dual-phase steel and AZ31B magnesium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(10): 2669–2680.
- [15] Rong Y, Li H, Cheng D, et al. Study on microstructure and properties of Mg/Steel laser welding-brazing joint assisted by alternating magnetic field with Ni interlayer [J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2021, 4(4): 416–422.
- [16] Wei S T, Li Y Y, Lu S P. Similar and dissimilar resistance spot weldability of Q & P980 and TWIP1180 steels [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2022, 27(2): 77–83.
- [17] 郑森, 程东海, 陈益平, 等. 镁/钢异种材料电阻点焊接头中 Zn 的作用机理[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2015, 29(04): 62–66. ZHENG S, CHENG D H, CHEN Y P, et al. Mechanism of Zn in the Joint of Magnesium and Steel by Resistance Spot Welding [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences)*, 2015, 29(04): 62–66.
- [18] 崔俊佳, 董东营, 王琼, 等. DP780 双相钢电阻点焊接头动态载荷下失效行为研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(2): 70–79. CUI J J, DONG D Y, WANG Q, et al. Failure Behavior Analysis of Resistance Spot Welding Joints of DP780 Dual-phase Steel under Dynamic Load [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(2): 70–79.
- [19] 陈益平, 邵景辉, 胡德安, 等. 镁/钢异种材料点焊接头力学性能及显微组织分析[J]. *焊接学报*, 2013, 34(4): 101–104. CHEN Y P, SHAO J H, HU D A, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of dissimilar metal spot welded joint between magnesium alloy and steel [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2013, 34(4): 101–104.
- [20] 李鹏, 邹存柱, 董红刚, 等. Fe/Al 异质金属接头界面组织演变、生长动力学及力学性能[J]. *材料工程*, 2022, 50(05): 43–51. LI P, ZOU C Z, DONG H G, et al. Interfacial microstructure evolution, growth kinetics and mechanical properties of Fe/Al dissimilar metal joints [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(05): 43–51.
- [21] 郑森, 程东海, 陈益平, 等. AZ31B 镁合金/镀锌钢板电阻点焊接头形成机理[J]. *焊接学报*, 2017, 38(02): 83–86. ZHENG S, CHENG D H, CHEN Y P, et al. Joint formation mechanism of AZ31B magnesium alloy and SPHC galvanized steel by resistance spot [J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2017, 38(02): 83–86.