

5052 铝合金胶接-磁脉冲焊接复合 接头盐雾腐蚀性能研究

韩子川, 柳泉潇潇, 彭定宸, 李光耀, 崔俊佳

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 研究 5052 铝合金板胶接-磁脉冲焊接复合接头的抗腐蚀性能和腐蚀路径。**方法** 以 AA5052 铝合金板为研究对象, 选用胶接-磁脉冲焊接复合工艺进行连接, 并在 35 ℃、质量分数为 5% 的氯化钠溶液中对样件进行中性盐雾腐蚀试验 6~18 d, 之后对接头的剪切性能进行测试, 再结合 SEM 对接头的腐蚀路径进行分析。**结果** 在中性盐雾腐蚀试验中, 腐蚀时间增加, 磁脉冲点焊接头和胶焊复合接头的质量损失率均增大, 峰值载荷下降, 且腐蚀 6~12 d 阶段内质量损失率和性能衰退均放缓。经过 18 d 的盐雾腐蚀后, 胶焊复合接头的峰值载荷下降了 6.4%, 而磁脉冲点焊接头则下降了 23.1%。胶层能延缓胶焊复合接头的力学性能衰退, 起到一定的防腐蚀作用。**结论** 在中性盐雾腐蚀试验中, 胶焊复合接头中的胶层可吸收盐雾液滴并阻碍其渗透, 并延缓接头的力学性能衰退。盐雾液滴的腐蚀路径为: 在磁脉冲点焊接头中, 大部分盐雾液滴渗透进入变形区的凹槽, 而在胶焊复合接头中盐雾液滴会被胶层吸收一部分。随着盐雾腐蚀的进行, 盐雾液滴会逐渐穿透胶层, 降低胶粘剂和母材之间的嵌合力以及胶粘剂之间的内聚力。此外, 少部分盐雾液滴流动至焊缝外侧, 逐渐向焊缝内侧浸入, 并溶解焊缝周围的金属, 造成点蚀区局部连通的现象。

关键词: 5052 铝合金板; 胶接-磁脉冲焊接; 盐雾腐蚀

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.04.011

中图分类号: TG498.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)04-0076-09

Research on Salt Spray Corrosion Performance of Magnetic Pulse Weld Bonding Joint of 5052 Aluminum Alloy

HAN Zi-chuan, LIU Quan-xiao-xiao, PENG Ding-chen, LI Guang-yao, CUI Jun-jia

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The purpose of this article is to study the corrosion resistance and corrosion path of the 5052 aluminum alloy plate magnetic pulse weld bonding (MPWB). The sample was placed in sodium chloride solution with a mass fraction of 5% at 35 ℃ for salt spray corrosion test. After 6-18 days, the shear performance degradation of the joint was tested, and the corrosion path of the joint was analyzed according to SEM. In the neutral salt spray corrosion test, the corrosion time increases, the mass loss rate of the MPW joint and MPWB joint both increase, the peak load decreases, and the mass loss rate and performance decline in the 6-12 d stage of corrosion are both slow down. After 18 days of neutral salt spray corrosion, the peak load of MPW joint dropped by 23.1%, while the peak load of MPWB dropped by 6.4%. In the neutral salt spray corrosion test, compared with magnetic pulse welding (MPW) joint, the adhesive layer in MPWB joint could absorb salt spray droplets and prevent them from penetrating the weld, thus delaying the deterioration of mechanical properties of the joint. By studying the corrosion path of salt

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51975202); 湖南省自然科学基金优秀青年科学基金 (2019JJ30005)

作者简介: 韩子川 (1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电磁焊接。

通讯作者: 崔俊佳 (1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为汽车车身轻量化设计与制造。

spray droplets, it was found that most of the salt spray droplets in MPW joint penetrated into the hump of deformation zone, while some of the salt spray droplets in MPWB hybrid joint were absorbed by the adhesive layer. However, as the corrosion continues, the salt spray droplets gradually penetrated the adhesive layer, reducing the bonding force between adhesive and base material and the cohesion between adhesive layers. A small number of salt spray droplets flowed to outside of the weld, and gradually penetrated the weld and dissolved the metal around, resulting in local pitting connection.

KEY WORDS: 5052 aluminum alloy plate; magnetic pulse weld bonding; salt spray corrosion

在国家提倡节能减排和环保的背景下,汽车轻量化的推进势在必行。随着高强钢、铝合金、碳纤维等轻量化材料在汽车领域中应用的快速增加,异种材料之间的连接问题也变得越来越重要^[1-6]。汽车在服役过程中经常处于潮湿高温的环境,同时氯化物和硫化物等物质均会对汽车造成腐蚀,削弱汽车的碰撞强度且损伤车漆,从而影响安全性和美观性。

传统的连接技术限制了铝合金在汽车工业中的应用^[7-8]。磁脉冲焊接(Magnetic pulse welding, MPW)是一种非接触式的固态焊接工艺,是以磁场中形成的洛伦兹力为驱动力,使飞板相对固定线圈产生加速运动,并与基板发生高速碰撞^[9-11]。整个焊接过程可在微秒级的时间内完成,是一种更加环保和高效的焊接方法。更重要的是,磁脉冲焊接过程中铝合金材料的温度低于熔点,与传统的熔焊技术相比能避免形成热影响区,很大程度上减少脆性化合物和内应力的产生,得到的接头强度甚至可以高于母材本身的强度^[12-14]。电磁脉冲焊接已经实现了铝-铝^[15]、铝-铜^[16]、铝-钢^[17]等材料的有效连接。

对板件的磁脉冲焊接工艺而言,接头的焊接质量和性能与很多参数相关,如放电参数(放电能量、放电系统电感)、外接线圈的几何参数(线圈工作区域的截面尺寸、材料)、工艺参数(放电电压、频率),以及焊接件的结构参数(金属板材的厚度,间隙)等。目前,国内外很多学者主要针对放电能量和焊接件的结构参数进行了相关深入的研究。S. D. Kore 等^[18]分别研究了放电能量、碰撞间隙和线圈几何尺寸对 Al-Fe 接头的影响。当放电能量过小时,碰撞速度较低,不利于形成高强度接头。当放电能量过大时,则接头内部会出现微观缺陷,对接头质量也是不利的。Tomokatsu 等^[19]发现随着放电能量的增大,焊接过程中的碰撞速度也不断增加,同时接头的强度也随之提高,此外还测量了金属板的碰撞速度等参数,对进一步的深入研究提供了数据支持。胶接是一种适用于多种轻质合金的连接技术,工艺过程简单,可作为辅助手段与各焊接工艺结合成新型复合连接技术,起到均匀分布应力、耐疲劳腐蚀、吸能减振、隔音等诸多作用^[20-23]。将两种连接方式进行结合,实现胶接-磁脉冲焊接复合连接(Magnetic pulse weld bonding, MPWB)。

在汽车服役过程中,腐蚀损伤是最为常见的损伤形式之一,因此国内外对焊接接头的腐蚀性能进行了大量研究。许冰等^[24]对 5052 铝合金和 HC420LA 高强钢的磁脉冲点焊接头进行了 48 h 盐雾腐蚀后,研究了接头强度的下降情况并通过微观分析揭示了腐蚀机理。顾玉芬等^[25]研究了 1060 铝合金和镀锌钢板的搭接电弧熔焊的腐蚀情况,试验表明焊接接头发生了电偶腐蚀,界面反应层金属间化合物不利于接头的耐腐蚀性能。目前对铝合金的胶接-磁脉冲焊接复合接头的中性盐雾腐蚀问题研究较少。为了评估 AA5052 胶接-磁脉冲焊接复合接头的服役性能,文中将研究不同周期的中性盐雾腐蚀后,胶焊复合接头的力学性能衰退和盐雾液滴的渗透途径。

1 试验

1.1 材料及工装

试验使用的材料为 AA5052,热处理状态为 O 态,其元素含量如表 1 所示。材料的力学性能参数为:弹性模量为 70.3 GPa,泊松比为 0.33,屈服强度为 90 MPa。试验所使用的板件尺寸为 100 mm×35 mm×1 mm,单搭接长度为 35 mm。由于金属板件存在毛刺和油污,会影响焊接间隙大小或胶粘剂质量,所以在试验前,先用金相砂纸将板件边缘毛刺打磨,后用酒精清洗表面,再用无尘布擦拭干净。

图 1 为板件磁脉冲点焊所用的工装及线圈。线圈必须要有优良的导电性能,良好的力学性能且不易损坏,因此选择铬锆铜作为线圈材料。铬锆铜线圈的周围被环氧树脂包裹,起到固定和绝缘的作用。平板线圈的外表面上覆有一层 0.5 mm 厚的黑色绝缘层,防止线圈与焊接试件接触从而出现漏磁现象。线圈在工作时,高频率的脉冲电流经过截面积为 4 mm×4 mm 的工作区域并产生磁场,焊接件受到洛伦兹力作用后发生变形而实现焊接。为避免平板线圈受力过大而发生变形,保证线圈的使用寿命,需填充电木支撑块在线圈的空隙中。

1.2 接头形式及连接工艺

文中在磁脉冲点焊连接结构的基础上加入胶粘剂,提出一种胶接-磁脉冲焊接复合接头结构,具

表 1 AA5052 的元素含量 (质量分数)
Tab.1 The element content of AA5052 (mass fraction)

Zn	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ti	Cu	Al
≤0.10	≤0.25	≤0.40	≤0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	≤0.15	≤0.10	余量

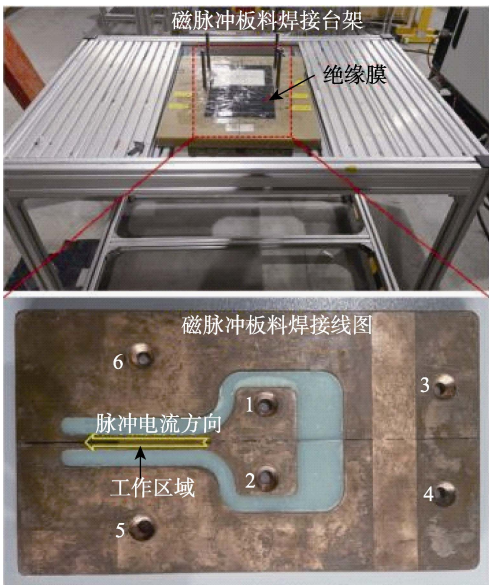


图 1 磁脉冲板焊工装及线圈
Fig.1 MPW tooling and coil

体结构如图 2。这种复合结构可结合磁脉冲焊接和胶接两种连接工艺的优点,即给焊缝提供较高的抗剥离强度,且周围的胶层起到密封减震、增强接头的抗剪切和耐腐蚀性的作用。胶焊复合接头的焊接间隙包括胶层厚度和预成形凹槽深度两个部分。由预试验和团队之前的研究结果可以发现^[26],胶层过厚会增大剪切过程中的偏距而降低胶接强度,故选取胶层厚度为 0.2 mm。

胶接和磁脉冲焊接的各种工艺参数都会影响复合接头的力学性能。文中所使用的磁脉冲放电设备的电容、线圈和工装均已确定,因此放电时的频率不可更改。Raelison 等^[27]的研究结果表明合适的焊接间隙能形成良好的焊接接头,因此需要在固定的放电能量下寻找合适的焊接间隙。在胶接的过程中,胶粘剂在高

温固化前有较高的流动性并且在固化过程中有较大的热膨胀性,因此涂胶面积的大小是非常重要的工艺参数。当涂胶面积过大时胶粘剂可能会流入焊接区域,进而影响焊接的效果,相反当涂胶面积过小会直接影响接头强度。也有研究表明随着涂胶面积增大,接头的峰值载荷增大,但是平均剪切强度会减小。因此达到较高接头强度的同时,应该尽量减小涂胶面积以节约成本,故需选择合适的涂胶面积工艺参数用于胶焊复合接头。根据研究结果以及预试验所得出的结论,最终选择搭接长度为 35 mm、焊接间隙为 1.2 mm、焊接能量为 30 kJ、未涂胶直径为 25 mm、胶层厚度为 0.2 mm 的工艺参数进行中性盐雾腐蚀试验。

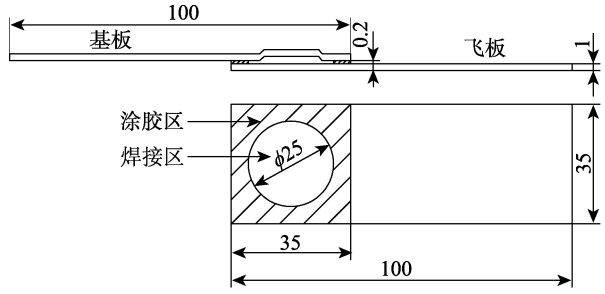


图 2 胶接-磁脉冲焊接接头结构
Fig.2 MPWB joint structure

1.3 中性盐雾腐蚀设备

根据 GB/T 10125—2012 标准,探究 AA5052 胶接-磁脉冲焊接复合接头的防腐蚀性性能,盐雾环境箱能人工加速模拟汽车服役中车身的腐蚀情况,文中用的盐雾腐蚀环境箱型号为 Q-FOG CCT-1100。试验时将胶接-磁脉冲焊接复合接头放入盐雾环境箱中悬空的斜槽架上,并将磁脉冲点焊接头作为对照组,环境箱及其放置形式如图 3 所示。主要的试验参数为:试

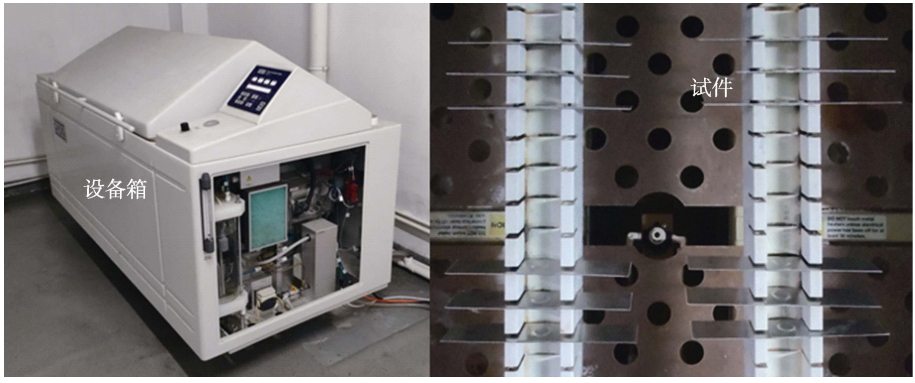


图 3 中性盐雾腐蚀环境箱及接头放置形式
Fig.3 Neutral salt spray corrosion environment box and joint placement form

验温度为 $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，氯化钠溶液质量分数为 5%，在室温环境下溶液的 pH 值为 6.5~7.2，试验周期分别为 6，12，18 d。

2 结果与分析

2.1 接头的剪切性能变化

经过盐雾腐蚀的试件每 6 d 取出一组，自然干燥 1 h 后洗去表面的残留溶液，吹干并对其进行称重。待以上处理完成后对试件进行准静态剪切测试，经过不同腐蚀时间后，两种接头搭接区的准静态剪切断面如图 4 所示。

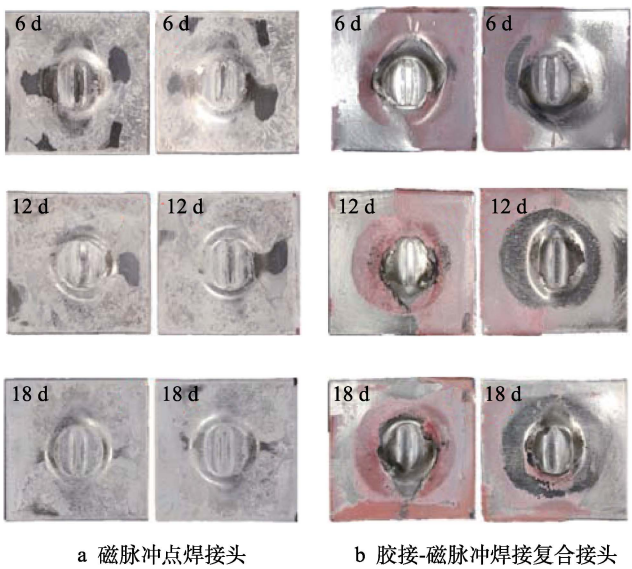


图 4 不同腐蚀时间后接头搭接区的准静态剪切断面形貌
Fig.4 Quasi-static shear section morphologies of the lap area of the joint after different corrosion times

试验结果表明所有的失效形式都是焊缝（和胶层）的失效，并且随着盐雾腐蚀时间的增加，在磁脉冲点焊接头搭接区的铝合金表面出现了越来越多的白色腐蚀痕迹，直至最终完全覆盖搭接区。胶焊复合接头仅在中心变形区边缘观察到少量白色盐雾痕迹。胶层的断口为薄层内聚失效和界面失效的混合失效形式，薄层内聚失效的比例随着腐蚀时间的增加而逐渐降低，而界面失效的比例会逐渐升高。以上现象表明盐雾液滴会逐渐穿透胶层，降低胶粘剂和母材之间的嵌合力以及胶粘剂之间的内聚力从而导致胶粘剂脱粘。

两种接头腐蚀不同的时间后进行准静态剪切测试，其结果如表 2 所示，并根据数据点绘制得到图 5。结果表明磁脉冲点焊接头的质量损失率呈现先下降后上升的趋势，证明其经历了加速腐蚀的过程，当腐蚀进行 6~12 d 时，氯化钠溶液在 AA5052 铝合金板的表面逐渐形成了 Al_2O_3 薄膜^[28]，阻碍了铝合金基体

与盐雾液滴的直接接触，导致腐蚀速率稍有下降；腐蚀 12~18 d 时，NaCl 溶液电解出大量的 Cl^- 吸附在铝板的表面并与 Al^{3+} 形成络离子，逐渐穿透氧化膜并形成了点蚀小孔。这些小孔内的活化态金属和小孔外的钝化态氧化膜促发了自催化氧化还原反应，使点蚀面积和深度进一步增大^[29]，因此腐蚀速率明显加快。由于胶层拥有一定的密封作用且能够吸收较多的盐雾液滴，导致胶焊复合接头质量损失率在腐蚀 6~18 d 中一直保持较低的水平。由两种接头的力学性能衰退曲线可以看出，随着腐蚀时间的延长，两种接头的力

表 2 不同腐蚀时间后磁脉冲点焊与胶焊复合接头的准静态剪切结果
Tab.2 Quasi-static shear results of MPW and MPWB joints after different corrosion times

接头类型	腐蚀时间/d	质量损失率/(g·m ⁻²)	峰值载荷/N	失效形式
磁脉冲点焊	0	0	3186.8	焊缝
	6	1.61	2809.6	焊缝
	12	2.42	2683.2	焊缝
	18	3.95	2451.4	焊缝
胶焊复合	0	0	6561.2	胶层/焊缝
	6	0.87	6348.3	胶层/焊缝
	12	1.25	6309.6	胶层/焊缝
	18	1.53	6142.3	胶层/焊缝

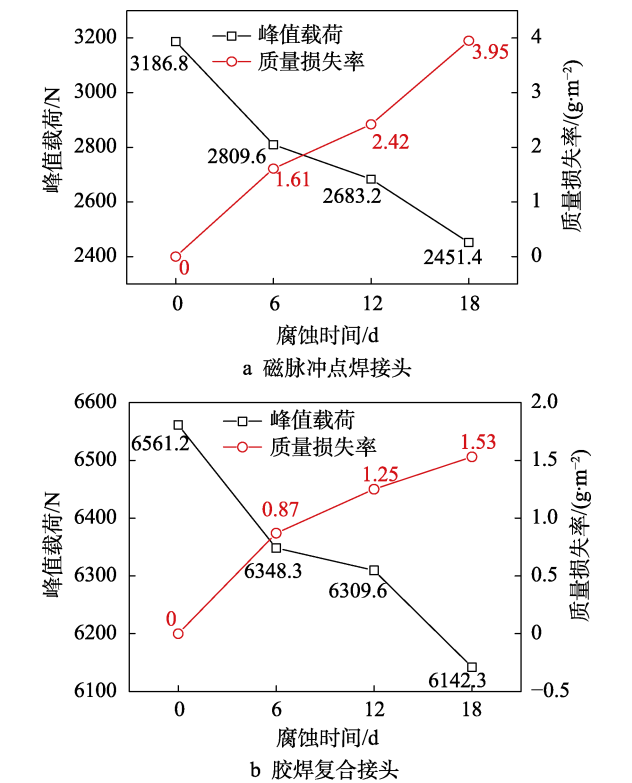


图 5 不同腐蚀时间后磁脉冲点焊与胶焊复合接头的质量损失率与性能衰退
Fig.5 Weight loss rate and performance degradation of MPW and MPWB joints after different corrosion times

学性能均逐渐降低。当腐蚀 6~12 d,两种接头峰值载荷的衰退速率放缓;当腐蚀 12~18 d 时,胶焊复合接头的峰值载荷下降更明显。经过 18 d 的中性盐雾腐蚀后,磁脉冲点焊接头的峰值载荷下降了 23.1%,而胶焊复合接头的峰值载荷下降了 6.4%。

2.2 接头的腐蚀路径分析

为了探究磁脉冲点焊和胶焊复合接头的腐蚀路径和规律,分别在两种接头中选取搭接区边缘处 A 点、焊缝内侧 B 点和焊缝外侧 C 点作为观测点进行能谱测试,如图 6 所示。

不同腐蚀时间后磁脉冲点焊接头中 A,B,C 这 3 个观测点的各元素质量分数的统计情况见图 6,将各观测点的氯元素和氧元素的质量分数整理得到图 7。可知在相同腐蚀时间下,B 点 Cl⁻的质量分数最高,A 点次之,C 点最低。随着腐蚀时间的增加,3 个观测点处的 Cl⁻含量均逐渐上升,且腐蚀 6~12 d 时各点 Cl⁻质量分数的增长率最大。结合腐蚀的痕迹可推测出盐雾液滴的渗透路径,由于试件与水平面呈 45°放置,在重力的作用下液滴从搭接边的一侧开始,沿着

搭接区轴线方向渗透。由于 B 点处于变形区的凹槽内,液滴更容易沿着 A—B 路径滴入凹槽聚集,因此 B 点处 Cl⁻的浓度最高,此外也有少部分液滴沿着 A—C 路径流向焊缝外侧的 C 点。

根据表 3 可知,不同腐蚀时间后 A 点的氧元素质量分数一直大于 40%。B 点的氧元素质量分数在腐蚀 6 d 时最高为 46.86%,随着 Cl⁻逐渐渗透到凹槽,破坏了表面的氧化膜,所以腐蚀 12 d 时 B 点的氧元素质量分数大幅下降至 6.62%。C 点由于在焊接过程中受到射流的清洗作用,腐蚀初期该处的氧元素含量较低而铝元素含量较高。在腐蚀时间小于 12 d 时 Cl⁻浓度不高,C 点主要发生氧化反应,该处氧元素质量分数从 20.28%上升到 51.89%。腐蚀 18 d 时,随着 Cl⁻浓度的增加,C 点处表面的氧化膜遭到破坏,其氧元素质量分数下降至 45.56%。

经过不同腐蚀时间后,胶接焊复合接头中 A,B,C 这 3 个观测点的各元素质量分数如表 4 所示,将氯元素和氧元素的质量分数整理得到图 8。可以发现在相同腐蚀时间的条件下 A 点的 Cl⁻质量分数最高而 B 点最低。随着腐蚀时间增加,A 点的 Cl⁻含量迅速上

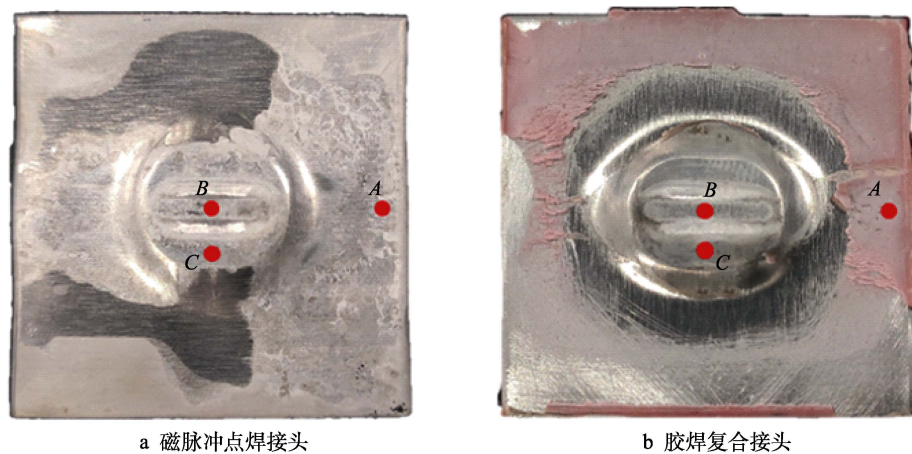


图 6 两种接头搭接区断口中的观测点
Fig.6 Observation points in the fracture of the overlap zone of the two types of joints

表 3 不同腐蚀时间后磁脉冲点焊接头各观测点的能谱结果

Tab.3 Energy spectrum results of each observation point of the MPW joints after different corrosion times

选取点	腐蚀时间/d	质量分数/%				
		O	Na	Cl	Al	Mg
A	6	48.20	1.20	3.69	45.21	1.70
	12	50.51	5.50	7.57	36.09	0.33
	18	41.74	3.98	10.25	43.50	0.53
B	6	46.86	1.84	5.32	44.48	1.50
	12	6.62	9.55	18.14	63.55	2.14
	18	4.21	14.56	25.44	54.35	1.44
C	6	20.28	0.52	1.12	76.38	1.70
	12	51.89	2.14	4.04	41.00	0.92
	18	45.56	3.60	7.81	42.21	0.81

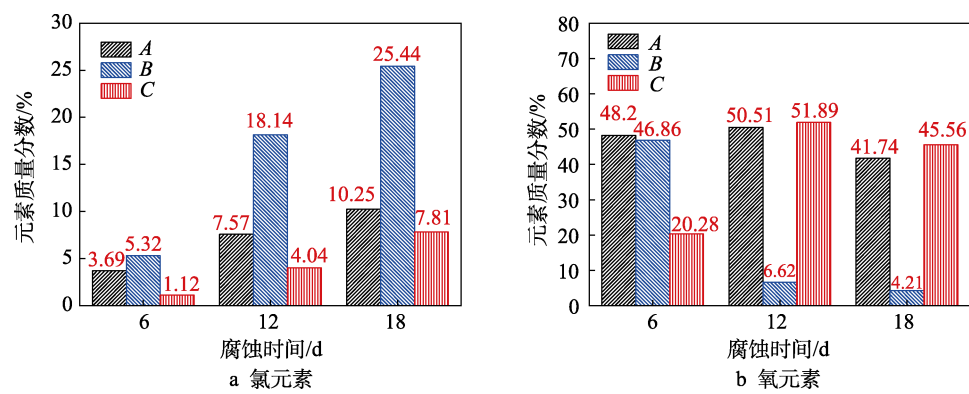


图 7 不同腐蚀时间后磁脉冲点焊接头各观测点的氯和氧元素质量分数
Fig.7 Cl and O mass fractions of the observation points of the MPW joints after different corrosion times

升,B 点的 Cl^- 含量基本保持不变,而 C 点的 Cl^- 含量逐渐上升。结合断口中的盐雾痕迹可推测出盐雾液滴的渗透路径,由于存在孔隙吸附作用和—OH、—NH 等亲水基,胶层吸收了大量的盐雾液滴^[30],导致 A 点处 Cl^- 含量迅速增加。随着腐蚀的进行,盐雾液滴沿着圆形的胶层边缘流动,路径为 A—C,导致焊缝外侧 C 点的 Cl^- 浓度逐渐上升。对于焊缝内侧的 B 点,由于胶层有效阻碍了大部分 Cl^- 的渗透,盐雾液滴缺少 A—B 流动路径,且焊缝具有一定的密封作用,所以较低浓度的 Cl^- 无法完全穿透焊缝进入 B 点。

由于磁脉冲焊接过程中产生的射流能清洗掉大部分氧化膜,因此 B 和 C 两点处在腐蚀初期氧元素的含量较低。随着腐蚀时间的延长,C 点的氧元素质量分数从 9.23%增加至 39.71%,之后便保持平衡。分析可知,虽然盐雾液滴逐渐沿 A—C 路径流入 C 点,腐蚀 12 d 时 C 点的 Cl^- 质量分数仅为 2.02%,处于较低水平,此时 C 点主要发生了氧化反应。当腐蚀 18 d 时,C 点的 Cl^- 质量分数上升至 8.62%,抑制了氧化反应因此氧元素含量不再增加。对于搭接边缘的 A 点,随着 Cl^- 含量的快速上升,氧元素含量逐渐降低。

表 4 不同腐蚀时间后胶焊复合接头各观测点的能谱结果
Tab.4 Energy spectrum results of each observation point of MPWB joint after different corrosion times

选取点	腐蚀时间/d	质量分数/%				
		O	Na	Cl	Al	Mg
A	6	78.20	0.82	3.37	15.85	1.76
	12	74.78	1.51	10.90	10.76	2.05
	18	57.43	2.98	36.21	3.04	0.34
B	6	1.62	0.14	0.29	94.67	3.28
	12	3.09	0.52	0.20	92.45	3.74
	18	2.10	0.24	0.30	94.54	2.81
C	6	9.23	0.28	0.17	87.10	3.22
	12	39.71	0.79	2.02	54.62	2.85
	18	39.05	7.63	8.62	42.76	1.95

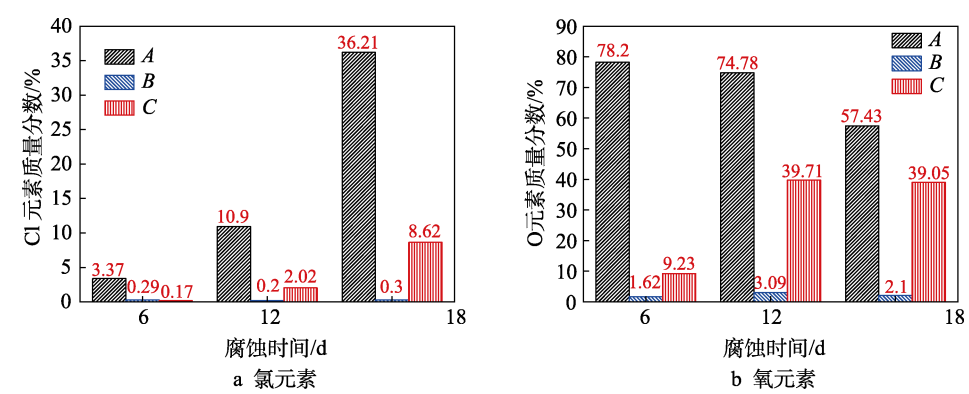


图 8 不同腐蚀时间后胶焊复合接头各观测点的氯和氧元素质量分数
Fig.8 Cl and O element mass fractions at each observation point of the MPWB joint after different corrosion times

腐蚀过程中 *B* 点的氧元素含量一直保持很低,这是因为 *B* 点始终处于与外界隔绝的焊缝内侧,没有盐雾液滴浸入,无法发生原电池反应。

2.3 焊缝的 SEM 微观形貌

对腐蚀 6 d 和 18 d 后胶焊复合接头断口上各观测

点进行 SEM 微观形貌,如图 9 所示。随着腐蚀时间的增加,*C* 点处的白色盐雾颗粒明显增加,而 *B* 点处没有盐雾痕迹。

图 10 是腐蚀 6 d 和 18 d 后胶焊复合接头焊缝的 SEM 微观形貌。腐蚀 6 d 时,焊缝中可观察到清晰的等轴和剪切韧窝;腐蚀 18 d 时,断口中等轴和剪切

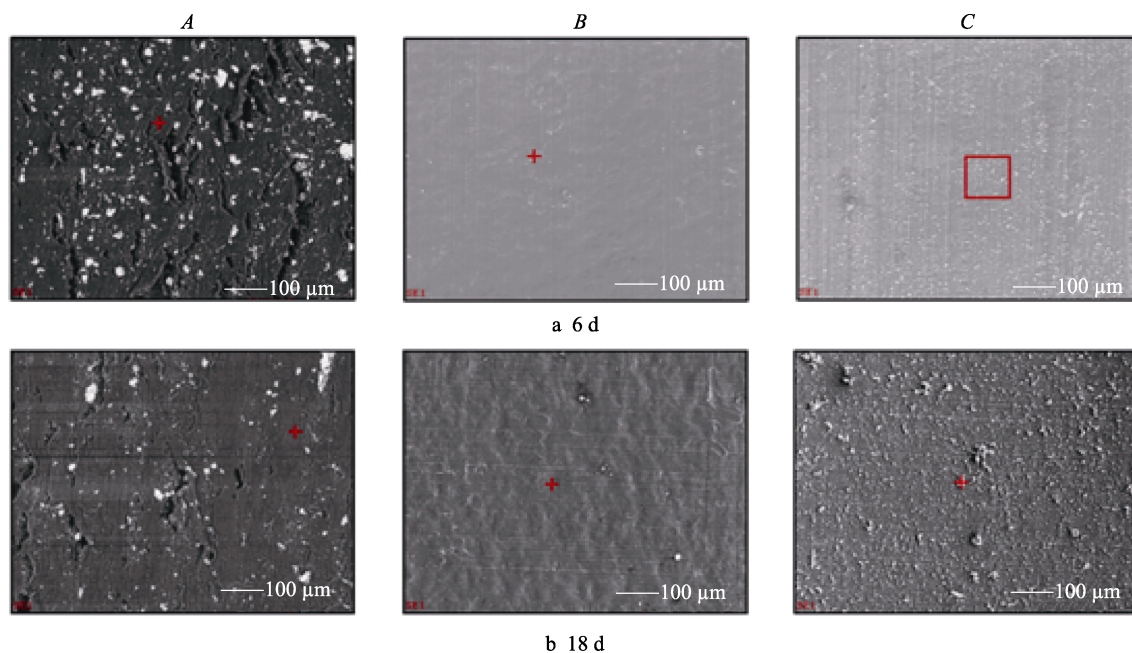


图 9 腐蚀 6 d 和 18 d 后胶焊复合接头断口各观测点处的 SEM 微观形貌

Fig.9 SEM microscopic morphologies of each observation point of the fracture of the MPWB joint after corrosion for 6 days and 18 days

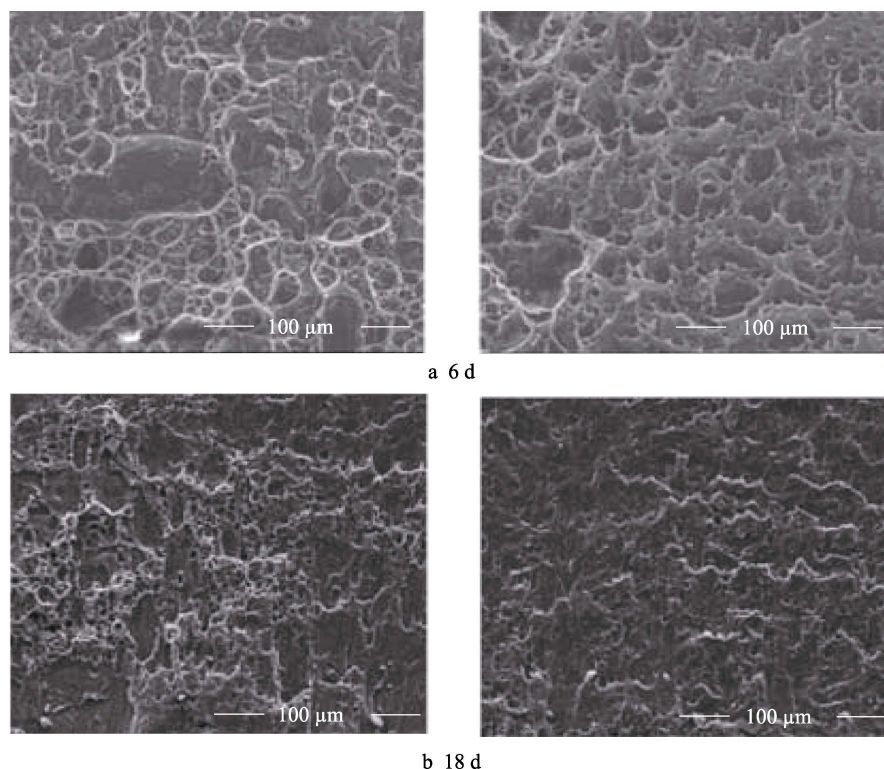


图 10 腐蚀 6 d 和 18 d 后胶焊复合接头焊缝的 SEM 微观形貌

Fig.10 SEM microscopic morphologies of the welded joint of MPWB joint after corrosion for 6 days and 18 days

韧窝数量减少, 露出部分光滑的母材, 出现点蚀区的局部连通现象。当盐雾液滴在焊缝外侧 C 点逐渐积累到一定浓度后, 会向焊缝内侧浸入, 逐渐溶解焊缝周围的金属。虽然没有完全浸入焊缝内侧, 盐雾液滴会影响焊缝的质量和紧密程度。

3 结论

1) 在中性盐雾腐蚀试验中, 腐蚀时间越长磁脉冲点焊接头和胶焊复合接头的质量损失率均增大, 峰值载荷下降, 且腐蚀 6~12 d 阶段内质量损失率和性能衰退均放缓。经过 18 d 的盐雾腐蚀后, 胶焊复合接头的峰值载荷下降了 6.4%, 而磁脉冲点焊接头的 23.1%。胶层能延缓胶焊复合接头的力学性能衰退, 起到一定的防腐蚀作用。

2) 结合能谱测试和显微观察手段可推测出腐蚀路径, 磁脉冲点焊接头中, 液滴在重力的作用下主要从搭接区的边缘沿着轴线方向渗透至变形区的凹槽内, 直接对焊缝产生影响, 少部分液滴流向焊缝外侧。胶焊复合接头中, 在孔隙吸附和—OH、—NH 等亲水基的作用下, 胶层会吸收大量盐雾液滴。随着腐蚀的进行, 部分盐雾液滴会逐渐穿透胶层, 降低胶粘剂和母材之间的嵌合力以及胶粘剂之间的内聚力, 导致薄层内聚失效的比例逐渐降低, 而界面失效的比例逐渐升高。当盐雾液滴沿着胶层的圆形轮廓流动至焊缝外侧并聚集达到一定浓度后, 才会向焊缝内侧浸入, 逐渐溶解焊缝周围的金属, 造成点蚀区的局部连通现象, 对焊缝的质量和紧密程度产生一定影响。

参考文献:

- [1] CUI J J, WANG S L, YUAN W, et al. Effects of Stand-off Distance on Magnetic Pulse Welded Joints between Aluminum and Steel Elements in Automobile Body[J]. *Automotive Innovation*, 2020, 3(3): 231—241.
- [2] 熊永锋, 廖祯松, 马天宇, 等. 铝-铜外导槽式磁脉冲焊接接头组织与性能[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(6): 170—177.
XIONG Yong-feng, LIAO Zhen-song, MA Tian-yu, et al. Microstructure and Properties of Aluminum-Copper Outer Channel Magnetic Pulse Welding Joints[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(6): 170—177.
- [3] WANG S L, LIANG W, DUAN L M, et al. Effects of Loading Rates on Mechanical Property and Failure Behavior of Single-Lap Adhesive Joints with Carbon Fiber Reinforced Plastics and Aluminum Alloys[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106: 2569—2581.
- [4] JIANG H, SUN L, DONG D, et al. Microstructure and Mechanical Property Evolution of CFRP/Al Electro-magnetic Riveted Lap Joint in a Severe Condition[J]. *Engineering Structures*, 2019, 180: 181—191.
- [5] 李光耀, 陈侣侣, 耿辉辉, 等. 5182Al/HC340LA 异种金属件磁脉冲焊接数值模拟与试验验证[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(3): 155—162.
LI Guang-yao, CHEN Lv-lv, GENG Hui-hui, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification of Magnetic Pulse Welding of 5182Al/HC340LA Dissimilar Metal Parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25(3): 155—162.
- [6] JIANG H, ZENG C C, LI G Y, et al. Effect of Locking Mode on Mechanical Properties and Failure Behavior of CFRP/Al Electromagnetic Riveted Joint[J]. *Composite Structures*, 2020: 113—162.
- [7] KANG H T, ACCORSI I, PATEL B, et al. Fatigue Performance of Resistance Spot Welds in Three Sheet Stack-Ups[J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 129—138.
- [8] HAHN M, WEDDELING C, LUEG-ALTHOFF J, et al. Analytical Approach for Magnetic Pulse Welding of Sheet Connections[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 230: 131—142.
- [9] BROECKHOVE J, WILLEMSSENS L, FAES K, et al. Magnetic Pulse Welding[J]. *Sustain Constr Des*, 2010, 1: 21—28.
- [10] WANG S L, ZHOU B B, ZHANG X, et al. Mechanical Properties and Interfacial Microstructures of Magnetic Pulse Welding Joints with Aluminum to Zinc-Coated Steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 788: 139425.
- [11] GARG A, PANDA B, SHANKHWAR K. Investigation of the Joint Length of Weldment of Environmental-Friendly Magnetic Pulse Welding Process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5): 2415—2426.
- [12] BEN-ARTZY A, STERN A, FRAGE N, et al. Interface Phenomena in Aluminum-Magnesium Magnetic Pulse Welding[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2008, 13(4): 402—408.
- [13] ZHANG Y, BABU S, PROTHE C, et al. Application of High Velocity Impact Welding at Varied Different Length Scales[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(5): 944—952.
- [14] GENG H H, XIA Z H, ZHANG X, et al. Microstructures and Mechanical Properties of the Welded AA5182/HC340LA Joint by Magnetic Pulse Welding[J]. *Materials Characterization*, 2018, 138: 229—237.
- [15] MEHDI P, AMIR A, SARVARI M, et al. Investigation of Structural and Mechanical Properties of Magnetic Pulse Welded Dissimilar Aluminum Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 292—304.
- [16] RAOELISON R, RACINE D, ZHANG Z, et al. Magnetic Pulse Welding: Interface of Al/Cu Joint and Inves-

- tigation of Intermetallic Formation Effect on the Weld Features[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(4): 427—434
- [17] YU H, DANG H, QIU Y. Interfacial Microstructure of Stainless Steel/Aluminum Alloy Tube Lap Joints Fabricated via Magnetic Pulse Welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 297—303
- [18] KORE S, DATE P, KULKARNI S. Electromagnetic Impact Welding of Aluminum to Stainless Steel Sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1): 486—493
- [19] AIZAWA T, KASHANI M, OKAGAWA K. Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints[J]. Welding Journal, 2007, 86(5): 119—124
- [20] BARNES T, PASHBY I. Joining Techniques for Aluminium Spaceframes Used in Automobiles: Part — Adhesive Bonding and Mechanical Fasteners[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 99(1): 72—79.
- [21] CUI J, WANG S, CHEN S, et al. Strength and Failure Analysis of Adhesive Single-Lap Joints Under Shear Loading: Effects of Surface Morphologies and Overlap Zone Parameters[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 238—247.
- [22] LEENA K, ATHIRA K K, BHUVANESWARI S, et al. Effect of Surface Pre-Treatment on Surface Characteristics and Adhesive Bond Strength of Aluminum Alloy[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016, 70: 265—270.
- [23] ZHENG R, LIN J, WANG P C, et al. Effect of Adhesive Characteristics on Static Strength of Adhesive-Bonded Aluminum Alloys[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2015, 57: 85—94.
- [24] 许冰, 欧航, 柳泉潇潇, 等. 5052 铝合金-HC420LA 高强度钢磁脉冲焊接接头盐雾腐蚀性能[J]. 中国机械工程, 2019, 30(12): 1506—1511.
- XU Bing, OU Hang, LIU Quan-xiao-xiao, et al. Salt Spray Corrosion Properties of 5052 Aluminum Alloy-HC420LA High-Strength Steel Magnetic Pulse Welding Joints[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(12): 1506—1511.
- [25] 顾玉芬, 李杰, 石珂, 等. 铝/钢异种金属电弧熔钎焊接接头的腐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 758—765.
- GU Yu-fen, LI Jie, SHI Ji, et al. Corrosion Performance of Aluminum/Steel Dissimilar Metal Arc Fusion Brazing Joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 758—765.
- [26] 陈硕琛. 车身用铝合金板件胶粘性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 24—37.
- CHEN Shuo-chen. Research on Adhesive Performance of Aluminum Alloy Panels for Body[D]. Changsha: Hunan University, 2018: 24—37.
- [27] RAOELISON R N, BUIRON N, RACHIK M, et al. Efficient Welding Conditions in Magnetic Pulse Welding Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(3): 372—377.
- [28] 李涛, 冯海涛, 李晓刚, 等. 2A12 铝合金在含 Cl⁻ 环境中的腐蚀行为和规律研究[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(3): 43—48.
- LI Tao, FENG Hai-tao, LI Xiao-gang, et al. Corrosion Behavior and Law of 2A12 Aluminum Alloy in Cl⁻ Containing Environment[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(3): 43—48.
- [29] 吕耀辉, 刘玉欣, 魏世丞, 等. 7A52 铝合金等离子弧焊接头盐雾腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 65—69.
- LYU Yao-hui, LIU Yu-xin, WEI Shi-cheng, et al. Research on Salt Spray Corrosion Behavior of 7A52 Aluminum Alloy Plasma Arc Welding Joints[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(6): 65—69.
- [30] 郑锐, 林建平, 吴倩倩, 等. 结构胶胶接汽车车身金属接头抗环境腐蚀性能研究进展[J]. 材料工程, 2015, 43(3): 98—105.
- ZHENG Rui, LIN Jian-ping, WU Qian-qian, et al. Research Progress on Environmental Corrosion Resistance of Structural Adhesive Bonding of Metal Joints of Automobile Body[J]. Materials Engineering, 2015, 43(3): 98—105.