

## 激光胶接焊镀锌钢/铝合金的显微组织与性能

周惦武, 戴 婷, 徐少华, 刘金水

(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:** 采用光纤激光器对 1.4 mm 厚的 DC56D+ZF 镀锌钢和 1.2 mm 厚的 6016 铝合金平板试件进行有无胶层加入的激光搭接焊和耐蚀性实验, 利用卧式金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、微机控制电子万能试验机 etc 分析胶层加入前后焊接接头的金相组织、断口形貌、界面元素、腐蚀速度、腐蚀产物形貌与成分以及接头力学性能, 探讨胶层影响钢/铝焊接试样耐腐蚀性能的作用机制。结果表明: 激光功率 1650 W, 焊接速度 35 mm/s, 离焦量 +3.0 mm, Ar 为保护气体且流量为 20 L/min 的工艺条件下, 加入胶层, 焊接试样正面焊缝均匀连续, 无气孔和裂纹等缺陷; 胶层的加入改善了搭接焊中因间隙而产生的热传递受阻现象, 与未加胶层相比, 横截面金属平板试件间隙减少, 熔深值增大; 胶层受激光作用分解形成气体和固体残留物, 改变铝合金表面高反射率状况, 加大铝合金对激光能量的吸收, 钢/铝熔融金属冷却后互相嵌入, 与未加入胶层相比, 钢/铝界面分界线不十分连续; 激光焊接中加入胶层, 焊接接头抗剪强度与平均剪切力分别为 41.45 MPa 和 1.04 kN, 力学性能并没有因为胶层的加入而减弱; 同等腐蚀条件下, 焊接试样腐蚀方式为电偶腐蚀, 腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$ , 与未加入胶层相比, 焊接试样腐蚀速度减慢, 耐蚀性提高; 由于胶层具有绝缘性, 可以抑制阳极和阴极之间的电子交换, 减缓电偶腐蚀, 因此, 胶层的加入明显提高了钢/铝焊接试样的耐腐蚀性能。

**关键词:** 钢/铝异种金属; 激光胶接焊; 焊缝形貌; 耐腐蚀性能

**中图分类号:** TG457

**文献标志码:** A

## Microstructure and properties of galvanized steel/ aluminum alloy laser-adhesive hybrid bonding

ZHOU Dian-wu, DAI Ting, XU Shao-hua, LIU Jin-shui

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

**Abstract:** The fiber laser welding and corrosion resistance test with/without adhesive layer addition were carried out on the DC56D+ ZF galvanized steel with thickness of 1.4 mm and the 6016 aluminum alloy with thickness of 1.2 mm. By using optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry and tensile test, the microstructure, fracture morphology, interface element distribution, corrosion rate, corrosion morphology, composition and mechanical properties of joints were studied, the effect of adhesive layer on the corrosion resistance of weld joint was also discussed. The results indicate that addition of adhesive can improve the block of heat transfer caused by the interstice of overlap welding and the feature of welding are uniformly continuous without pore or flaw at the welding process parameters as follows, such as laser power of 1650W, welding speed of 35mm/s, defocusing amount of +3.0 mm, Ar as the protection gas and flowing at the speed of 20 L/min. Comparing with the sample without adhesive layer, the interstice of metal plate specimen decreases and the penetration is deeper, the adhesive layer is decomposed into gas and solid residue, thus, the aluminum alloy surface with high reflectivity feature is changed, and the laser energy absorption of aluminum alloy increases, the molten metals of steel and aluminum embed into each other after cooling. Comparing with the sample without adhesive layer, the steel and aluminum interface boundary is not continuous. In laser weld bonding, the average shearing strength and average shearing force of steel/Al joint are 41.45 MPa and 1.04 kN. The mechanical properties are

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划重点项目(2012AA111802); 湖南大学汽车车身国家重点实验室自主课题(71075003)

**收稿日期:** 2013-11-05; **修订日期:** 2014-02-28

**通信作者:** 周惦武, 教授, 博士; 电话: 13017297124; E-mail: ZDWe\_mail@126.com

not weakened by the addition of adhesive layer. Under the same corrosion condition, galvanic corrosion of welding specimen is found and corrosion product are  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$  and  $\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$ . Comparing with the sample without adhesive layer, the corrosion rate of the sample with adhesive layer decreases, and the corrosion resistance properties are improved. Because the adhesive layer has electric resistance and insulation properties, it controls electron exchange between the anode and the cathode, reduces galvanic corrosion effect which improves corrosion resistance of steel and aluminum welded specimen with adhesive layer addition.

**Key words:** steel/Al alloy dissimilar metal; laser-adhesive hybrid bonding; weld appearance; corrosion resistance properties

随着现代交通运输工具轻量化战略的实施,钢/铝复合结构件发挥两种材料性能优势、减轻质量,在汽车、高速列车、船舶等行业有良好应用前景,然而异种金属的优质高效连接是制约钢/铝复合结构件在工程中推广应用的重大技术瓶颈<sup>[1-2]</sup>。实现钢/铝连接的方法主要有粘接、机械连接和焊接。粘接得到连接接头的力学性能有限,只能应用在一些性能要求较低的场合。机械连接虽得到较高性能的连接接头,但接头的气密性无法保证,接头质量大。激光焊用激光束作焊接热源,具有能量密度高、热输入量小、热量集中、热源易控制、焊缝深宽比大、热影响区窄、焊接变形小以及高效高自动化等诸多优点<sup>[3-5]</sup>,此外,焊接中加入胶层可增加金属板材对激光能量吸收,改变熔池流动性,避免熔池区母材熔入,获得良好连接性能,因此,激光胶接焊有望成为钢/铝一种新的连接方法<sup>[6-10]</sup>。镀锌钢中镀锌层可通过阴极保护及生成的腐蚀产物对钢基材起防护作用,因此,镀锌钢板成为目前使用范围最广的车身材料。为探索连接接头缺陷少、力学和耐腐蚀综合性能优良的钢/铝异种金属一种新的连接方法,本文作者以1.4 mm厚的DC56D+ZF镀锌钢和1.2 mm厚的6016铝合金平板试件作为研究对象,进行有无胶层加入的激光搭接焊和耐蚀性实验,利用卧式金相显微镜、扫描电镜、X射线衍射仪、微机控制电子万能试验机等手段,分析胶层加入前后焊接接头的金相组织、断口形貌、界面元素、腐蚀速度、腐蚀产物形貌与成分以及接头力学性能,探讨胶层影响钢/铝焊接试样耐腐蚀性能的作用机制,研究结果期望为钢/铝异种金属结构件激光焊接的推广应用提供重要理论和试验基础。

## 1 实验

激光胶接焊实验采用光纤激光器作为焊接热源,激光器型号为YLS-4000-CL,最大输出功率为4.0 kW,激光波长为1.070  $\mu\text{m}$ ;连续输出的激光模式为 $\text{TEM}_{00}$ ,

抛物反射镜聚焦,焦距镜长200 mm;焦斑直径为0.4 mm;光束发散角 $\alpha < 0.15 \text{ rad}$ 。实验材料为DC56D+ZF镀锌钢和6016铝合金,镀锌钢板的化学成分(质量分数,%)为:C 0.014, Si 0.008, Mn 0.118, S 0.030, P 0.014, Fe 余量,6016铝合金的化学成分为:Si 1-1.3, Cu 0.2, Mn 0.2, Mg 0.3-0.5, Fe 0.5, Al 余量。镀锌钢和铝合金的板料尺寸分别为1.4 mm $\times$ 100 mm $\times$ 30 mm和1.2 mm $\times$ 100 mm $\times$ 30 mm。焊接前用丙酮清洗试样以去除表面油污,用砂纸打磨以去除铝合金表面的氧化层,然后在搭接长度为30 mm的区域内涂上自制厚度约为0.1 mm的胶层,对板材试样施以一定的压力,在室温下自然固化24 h。焊接时,考虑到铝合金反射率高,采用镀锌钢板置于铝合金上侧的搭接形式,采用氩气为保护气体,激光胶接焊实验示意图如图1所示。实验以获得优良焊缝表面成形性和较大焊缝熔深为目标,确定最佳优化焊接工艺参数为:激光功率1650 W,焊接速度35 mm/s,离焦量+3.0 mm,Ar气为保护气体且流量为20 L/min。分析胶层加入对焊接接头组织与力学性能的影响时,未加入胶层的焊接工艺条件与加入胶层时的相同。

耐蚀性实验采用质量损失法来衡量胶层加入前后钢/铝焊接试样的腐蚀速度,即用腐蚀前后试样质量的变化来评定,腐蚀前后的试样均使用分辨率为0.1 mg的电子天平称取质量。腐蚀速度的计算公式如下:

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (1)$$

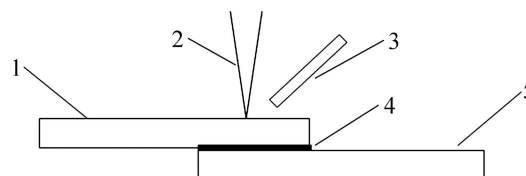


图1 钢/铝激光胶接焊示意图

**Fig. 1** Schematic diagram of steel/aluminum laser-adhesive hybrid bonding: 1—Galvanized steel; 2—Laser beam; 3—Blowing side protective gas; 4—Adhesive layer; 5—Aluminum alloy

式中:  $v$  为腐蚀速度( $\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$ );  $m_0$  为试样腐蚀前的质量( $\text{g}$ );  $m_1$  为试样清除腐蚀产物后的质量( $\text{g}$ );  $S$  为试样表面积( $\text{m}^2$ );  $t$  为腐蚀时间( $\text{h}$ )。

腐蚀试样制备时, 先用金相砂纸打磨样品表面, 露出基体, 再用丙酮清洗多次, 并在蒸馏水中超声清洗 15 min, 取出烘干; 接着称取 NaCl, 加蒸馏水, 配制质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液, pH 值为 7.0; 采用悬挂的方式把制备的样品浸泡到盐水溶液中, 浸泡时间为 240 h; 取出样品进行耐蚀性分析时, 用蒸馏水洗净表面, 并进行烘干。

利用体式显微镜观察试样正面焊缝的表面形貌和腐蚀后样品宏观形貌; 利用卧式金相显微镜观察试样横截面焊缝的显微组织; 利用微机控制电子万能试验机测试焊接试件的抗剪强度与平均剪切力; 采用配能谱仪的扫描电镜 FEI 2000 Quanta200 对试样断口形貌、焊缝界面与腐蚀产物的微观形貌与成分进行分析; 采用 D500 X 射线衍射仪分析腐蚀试样的主要物相。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊缝显微组织分析

图 2 所示为最佳优化焊接工艺参数条件下钢/铝和

钢/胶层/铝焊缝的微观形貌。未加入胶层时, 焊缝熔深为 0.4 mm(见图 2(a)), 加入胶层后, 焊缝熔深为 0.5 mm(见图 2(b))。由于胶层的加入, 使上下板紧密连接, 减弱了由于板间间隙而导致热量传递受阻现象, 一定程度上提高了下侧未融化铝合金板的表面温度<sup>[11-12]</sup>, 故加入胶层后焊缝熔深增加。图 2(c)和(d)所示分别为焊接试样加入胶层前后焊缝区的显微组织。发现晶粒均为柱状晶, 与未加入胶层相比, 加入胶层后, 无夹杂、裂纹、气孔等明显缺陷。

### 2.2 焊缝界面微观形貌与成分分析

图 3 所示为加入胶层前后焊缝界面附近的 SEM 像。发现未加入胶层时, 熔池底部钢/铝界面分界线连续(见图 3(a)), 而加入胶层后, 两种金属互相嵌入(见图 3(b))。对界面层的底部进行放大观察(图 3(c)和图 3(d)), 对微区进行能谱分析, 结果如表 1 所列。可见未加入胶层时, I、II 区域主要为富 Al 的 Fe-Al 金属间化合物, 其中 I 区域 Fe 和 Al 元素的摩尔比均接近 1:2, II 区域 Fe 和 Al 元素的摩尔比均接近 1:3, 从 Fe-Al 二元相图推测来看, I、II 区域分别为  $\text{FeAl}_2$  和  $\text{FeAl}_3$  金属间化合物。I、II 区域还含有 Mg 和 Zn 元素, 可能是焊接过程中锌蒸气和镁蒸气没有完全逸出而残留在焊缝中; 加入胶层后, III 区域 Fe 和 Al 元素的摩尔

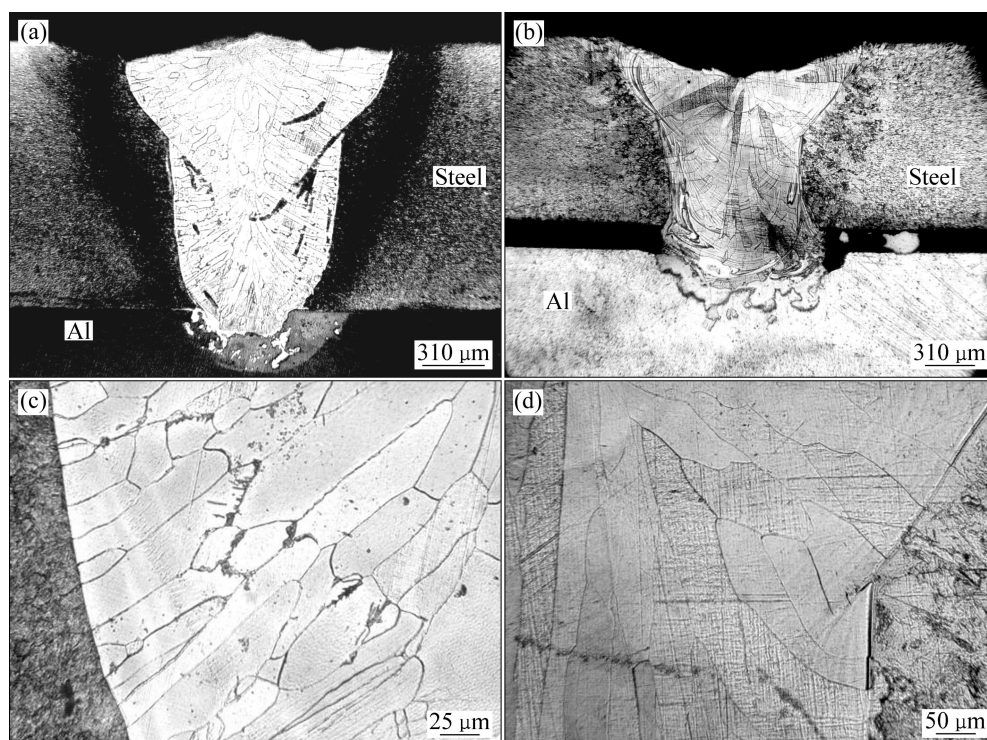


图 2 钢/铝合金和钢/胶层/铝合金焊接接头的显微组织

Fig. 2 Microstructures of steel/Al joint (a), steel/adhesive layer/Al alloy joint (b), weld zone of steel/Al alloy (c) and weld zone of steel/adhesive layer/Al alloy (d)

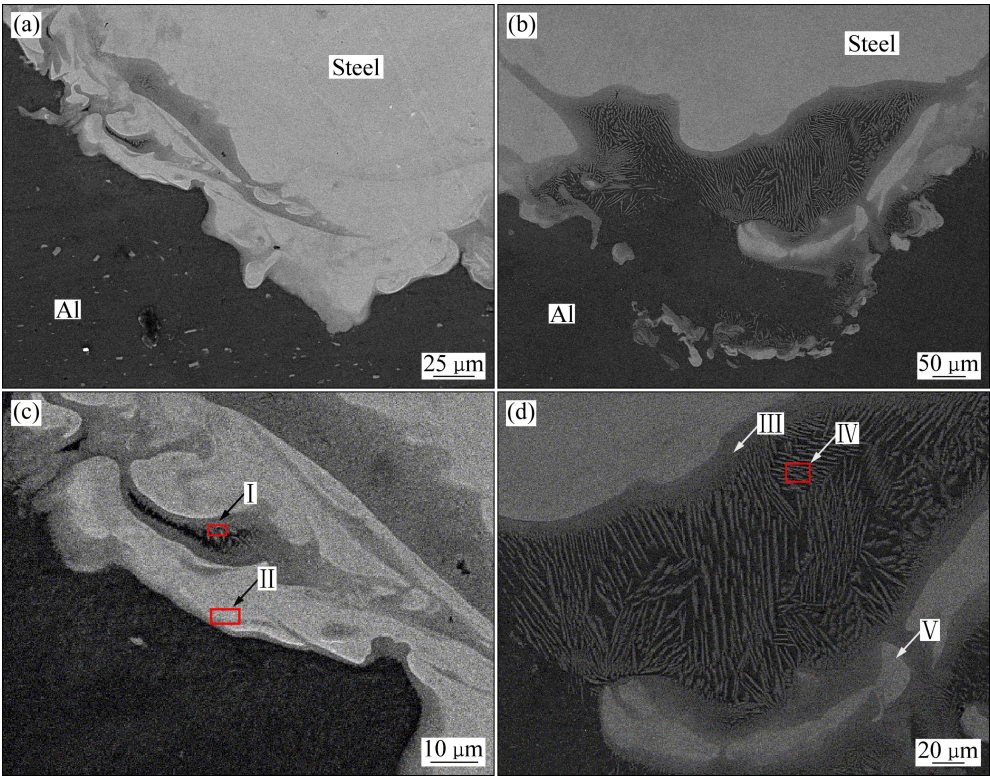


图 3 钢/铝合金和钢/胶层/铝合金界面层的 SEM 像

Fig. 3 SEM images of steel/Al and steel/adhesive layer/Al alloy interface layer: (a) Steel/Al alloy joint; (b) Steel/adhesive layer/Al alloy joint; (c) Enlarged view of Fig. 3(a); (d) Enlarged view of Fig. 3(b)

表 1 钢/铝和钢/胶层/铝焊接接头不同区域的 EDS 分析

Table 1 EDS analysis results of steel / Al and steel/adhesive layer/Al weld joint shown in Fig. 3

| Zone No. | Mole fraction/% |       |      |      |
|----------|-----------------|-------|------|------|
|          | Fe              | Al    | Mg   | Zn   |
| I        | 25.53           | 69.08 | 4.57 | 1.11 |
| II       | 31.21           | 63.38 | 2.03 | 3.38 |
| III      | 27.08           | 70.46 | 2.46 | —    |
| IV       | 44.02           | 54.14 | 1.84 | —    |
| V        | 8.83            | 86.94 | 4.23 | —    |

比均接近 1:1, 表明生成了 FeAl 金属间化合物; IV 区域的主要成分为 Al; V 区域 Fe 和 Al 元素的摩尔比均接近 1:3, 表明生成了 FeAl<sub>3</sub> 金属间化合物。III、IV、V 区域均发现含有少量 Mg 元素, 而未发现 Zn、C、O 元素, 说明加入胶层后, 在焊接过程中, 胶层由于沸点较低受热汽化后连同分解的产物随金属蒸气一同逸出熔池外, 锌蒸气也充分逸出, 而镁蒸气未完全逸出。加入胶层后, 气化更剧烈, 使熔池中下部的搅拌更加充分和均匀, 产生的金属蒸气在熔池的搅拌中被充分排出, 因而焊缝中未发现气孔、夹杂等焊接缺陷

的产生(见图 2(d))。此外, 铝的熔点比钢的熔点低, 胶层受激光作用分解, 由于在下侧铝合金表面形成一层很薄的气体和固体残留物, 明显改变铝合金表面高反射率的状况, 加大铝合金对激光能量的吸收, 因而熔融金属冷却后互相嵌入, 与未加入胶层相比, 钢/铝界面分界线变得不十分连续(见图 3(b))。

2.3 力学性能与断口形貌

未加入胶层试样的平均剪切力为 1.05 kN, 抗剪强度为 42.15 MPa, 加入胶层试样的平均剪切力为 1.04 kN, 抗剪强度为 41.45 MPa, 与未加入胶层相比, 发现试样的力学性能并没有因为胶层的加入而减弱(见图 4)。图 5 所示为加入胶层钢/铝激光焊接头断裂后的剪切试样和断口处的微观形貌。由图 5 可以看出, 断口表面具有一些浅而小的韧窝(见图 5(b)和(d)), 断面上有较短、不连续、汇合特征不明显的河流状花样(见图 5(c)); 焊缝区断裂形貌表现为韧性断裂与准解理断裂的混合形貌<sup>[13]</sup>。

2.4 腐蚀速度

表 2 所列为腐蚀前后焊接试样的质量变化和腐蚀



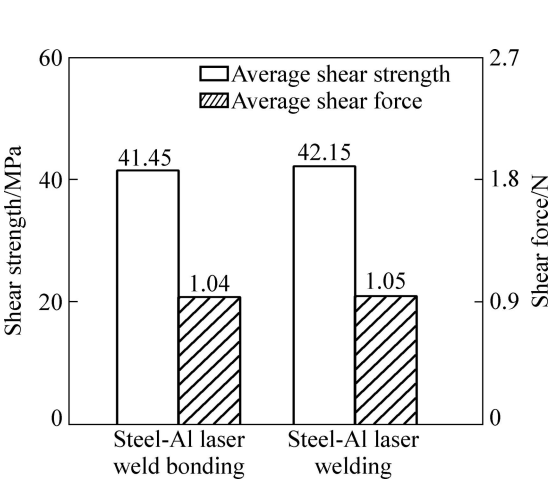


图 4 焊接接头的抗剪强度与剪切力

Fig. 4 Shear strength and shear force of laser weld joint

速率。其中 1、4 号对应最佳优化焊接工艺条件下未加胶层、加入胶层的试样样品，为分析胶层加入对焊接试样腐蚀速率影响，还将如下两种焊接试样腐蚀前后质量变化和腐蚀速率一并列于表 2 中，即激光功率 1650 W，焊接速度 35 mm/s，离焦量+2.0 mm，加胶层，对应 2 号样品；激光功率 1600 W，焊接速度 32 mm/s，离焦量+3.0 mm，加胶层，对应 3 号样品；结果发现，1、2、3、4 号试样样品腐蚀速度分别为 0.4、0.18、0.29

和 0.27 g/(m<sup>2</sup>h)，其中 1 号样品的的腐蚀速率最大，而 2、3、4 号样品的腐蚀速率较小，表明同等腐蚀条件下，与未加入胶层相比，加入胶层焊接试样的腐蚀速度明显减慢。

表 2 腐蚀前后质量变化和腐蚀速率

Table 2 Quality change and corrosion rate before and after corrosion

| Sample No. | Mass before corrosion/g | Mass after corrosion /g | Corrosion rate/(g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| 1          | 0.783                   | 0.777                   | 0.4                                                  |
| 2          | 0.945                   | 0.942                   | 0.18                                                 |
| 3          | 0.793                   | 0.789                   | 0.29                                                 |
| 4          | 0.567                   | 0.564                   | 0.27                                                 |

2.5 腐蚀形貌

图 6 所示分别为表 2 中 1、2、3、4 号样品在浸泡实验结束后主要腐蚀产物的的微观形貌。发现 1 号样品表面形成了大量细小的颗粒状腐蚀产物；2 号样品腐蚀过程中产生了大量的丝状腐蚀产物，由颗粒状腐蚀产物聚集构成；3 号和 4 号样品表面腐蚀产物主要为针状和丝状腐蚀产物。通过腐蚀产物初期生长规律的观察发现，经过 48 h 的腐蚀浸泡实验，4 个样品表

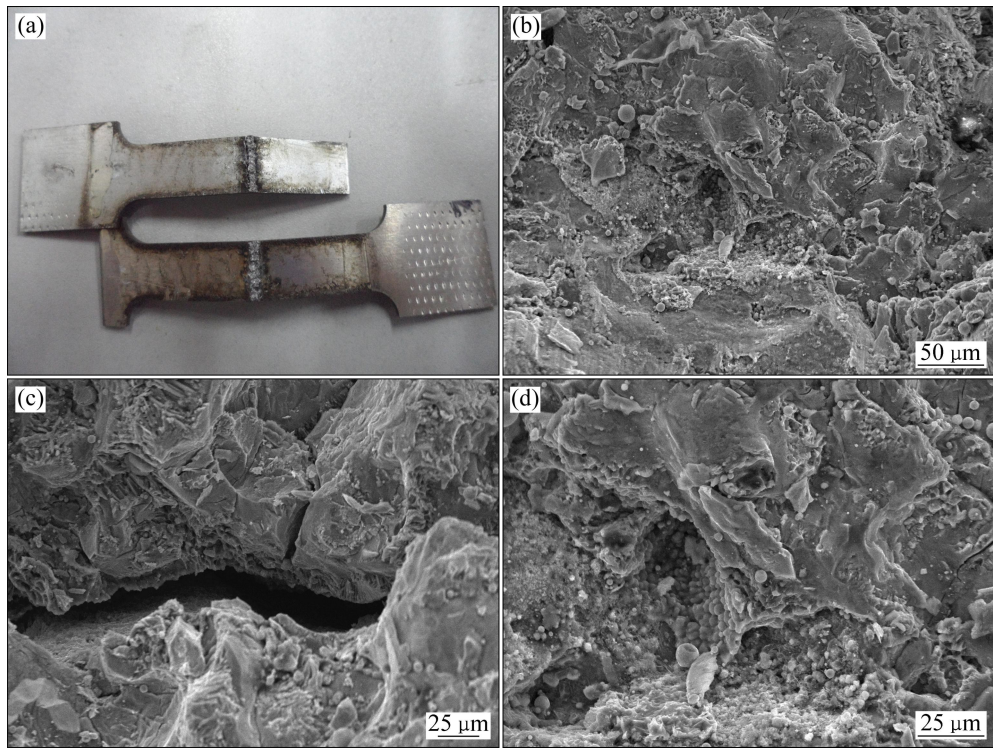


图 5 钢/铝激光胶接焊接头的剪切断裂试样和断口微观形貌

Fig. 5 Failure adhesive bonded joint in tensile shear test (a) and different multiples of SEM images of laser weld bonding steel/Al joint fracture: (a) Failure adhesive bonded joint; (b) Shallow dimple; (c) River pattern; (d) Small dimple

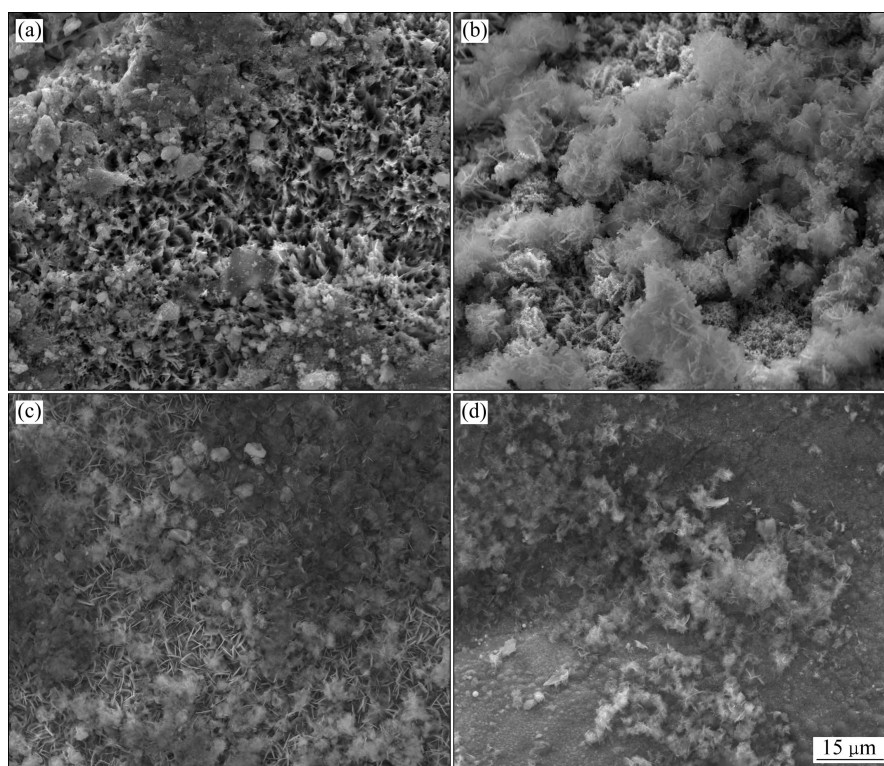


图 6 焊接试样上表面腐蚀产物的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of welding specimen surface corrosion products of samples 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d) after corrosion

面均没有明显腐蚀产物生成, 经过 56 h 的浸泡实验, 1、2、3 号样品局部区域出现尺寸较小的点状腐蚀产物, 而 4 号样品生成点状腐蚀产物; 经过 120 h 的浸泡实验, 样品表面围绕先期生成的点状腐蚀产物形成了不规则的团状腐蚀产物, 其中 1 号样品表面腐蚀产物呈灰黑色, 其他样品表面腐蚀产物均为白色, 随着浸泡时间的增加, 直至浸泡实验结束, 腐蚀试样表面的团状腐蚀产物边缘向外延伸, 形成丝状腐蚀产物。

图 7 所示分别为表 2 中 1、2、3、4 号样品采用超声清洗方法去除腐蚀试样表面腐蚀产物的微观形貌。发现 1 号样品腐蚀产物呈块状脱落, 出现剥层腐蚀现象; 2、3 号样品出现了密集的细小点蚀坑, 有轻微的剥层腐蚀发生; 4 号样品表面没有出现点蚀坑。可看出, 1 号样品腐蚀最严重; 2、3 号样品出现一些细小的点蚀坑, 腐蚀较轻微; 4 号样品基体表面良好, 腐蚀产物只附着在样品表面。表明加入胶层焊接试样的耐腐蚀性能优越于未加入胶层焊接试样的。

## 2.6 腐蚀产物及耐腐蚀性能作用机制分析

表 3 所列为 1、2、3、4 号样品腐蚀产物能谱及 X 射线衍射仪的分析结果。发现所有样品腐蚀产物主要成分均含有 O、Fe 和 Zn 元素, 但 2、3、4 号样品 Zn

元素相对含量比 1 号样品多, 可见胶层的存在, 减轻了镀锌钢中镀锌层的腐蚀, 对钢基材能起防护作用。

本研究的耐蚀性实验结果表明: 同等腐蚀条件下, 未加胶层激光焊接试样比加入胶层激光焊接试样腐蚀快。由于实验腐蚀环境为质量分数为 3% 的 NaCl 水溶液, 腐蚀初期阶段, NaCl 的存在, 在钢表面形成了无数个腐蚀微电池, 随着反应的进行,  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Fe}^+$  向阴极区域移动,  $\text{OH}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  向阳极溶解区移动, 在活性阳极区形成  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 。但  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  腐蚀产物膜并不稳定, 会分解为  $\text{FeO}$  或与溶解于液体中的  $\text{O}_2$  氧化成  $\text{FeOOH}$  (注: 反应进行过程如式(2)和(3)), 因此, 未加入胶层的 1 号样品腐蚀产物主要为表 3 所列的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$ 。



加入胶层的 2 号、3 号样品腐蚀产物除了  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$  外, 还生成  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$  (如表 3 所列), 主要是微电池反应中, 随着反应的进行,  $\text{Zn}^+$  向阴极区域移动,  $\text{OH}^-$ 、 $\text{Cl}^-$  向阳极溶解区移动。其腐蚀过程包括氧化物或氢氧化物的形成、 $\text{Cl}^-$  的腐蚀和腐蚀产物的形成过程; 4 号样品腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、



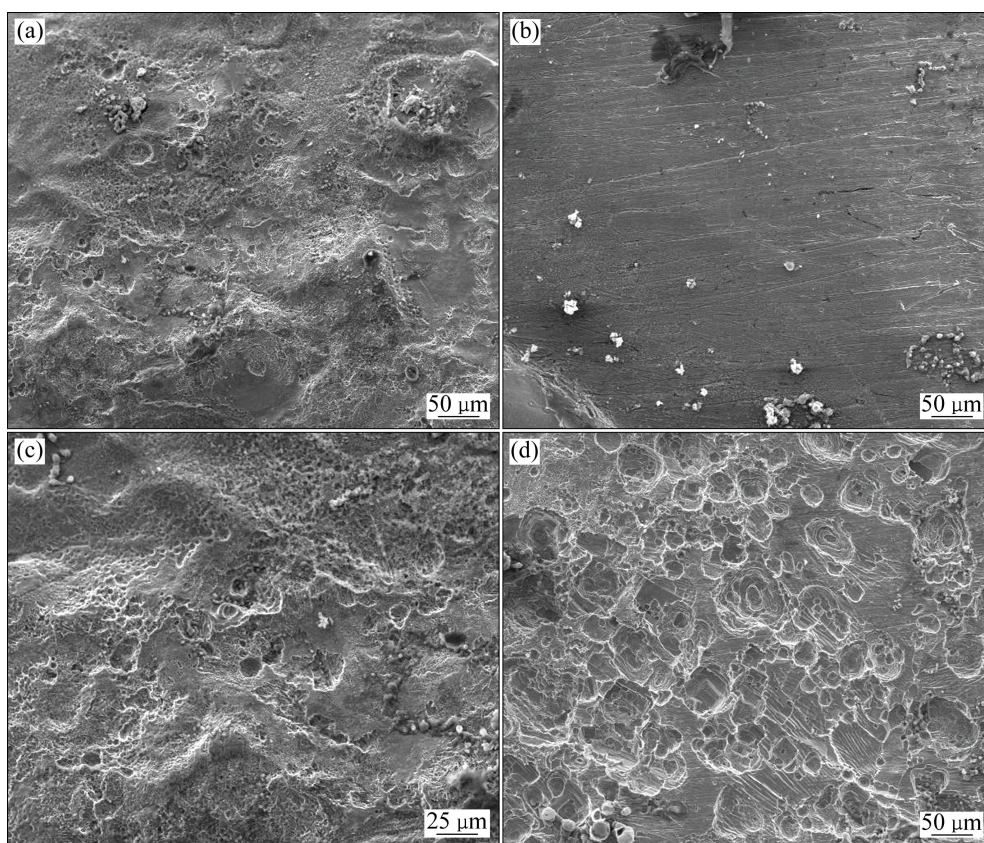


图 7 去除腐蚀产物后表面 SEM 像

Fig. 7 SEM images of surface of samples 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d) by removing corrosion products after corrosion

表 3 腐蚀产物能谱及 X 射线衍射仪分析结果

Table 3 Corrosion analysis results of spectrum and X ray diffraction

| Sample No. | Mole fraction/% |       |       | Main phase                                                                                                        |
|------------|-----------------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | Fe              | O     | Zn    |                                                                                                                   |
| 1          | 50.25           | 42.34 | 7.41  | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、<br>$\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$                                             |
| 2          | 9.85            | 52.64 | 37.51 | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、<br>$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{C}_{12}\text{H}_2\text{O}$ |
| 3          | 14.85           | 59.03 | 26.12 | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、<br>$\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{C}_{12}\text{H}_2\text{O}$ |
| 4          | 16.52           | 52.43 | 31.05 | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、<br>$\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$                   |

$\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$ ，但能谱分析结果中出现了 Zn 元素，主要是腐蚀样品从盐水溶液中取出后保存方式造成的，Cl<sup>-</sup>的存在会造成锌的氢氧化物的局部溶解，故 XRD 检测未发现含锌腐蚀产物的存在。

通常情况下，异种金属在同一电解液中直接接触

会构成电偶电池。电位较负的金属腐蚀速率快，而电位较正的金属腐蚀速率慢。对镀锌钢/铝合金激光焊接试样而言，构成电偶电池为镀锌钢板上的锌和铁以及铁和铝。由于锌的电位较铁更负，电偶腐蚀中，首先腐蚀的是锌层，虽然镀锌层对钢板有保护作用，但随着腐蚀时间的增长，锌层会被腐蚀掉而露出钢板，此时钢板就与铝板接触构成电偶电池，由于铁的电位较铝负，故钢板先腐蚀，铝板后腐蚀。加入胶层，由于胶层具有绝缘性，可抑制阳极和阴极之间的电子交换，减缓电偶腐蚀作用，因此，加入胶层可提高钢/铝焊接试样的耐腐蚀性能<sup>[14-15]</sup>。

### 3 结论

1) 激光功率 1650 W，焊接速度 35 m/s，离焦量 +3.0 mm，Ar 为保护气体且流量为 20 L/min 的最佳工艺条件下，加入胶层后，焊接试样正面焊缝均匀连续，无气孔、裂纹等缺陷。

2) 胶层的加入改善了搭接焊中因间隙而产生的

热传递受阻现象,与未加胶层相比,横截面金属平板试件间隙减少,熔深值增大;胶层受激光作用分解形成气体和固体微粒残留物,改变铝合金表面高反射率状况,加大铝合金对激光能量吸收,钢/铝熔融金属冷却后互相嵌入,与未加入胶层相比,钢/铝界面分界线不十分连续。

3) 激光焊接中加入胶层,焊接接头抗剪强度与平均剪切力分别为 41.45 MPa 和 1.04 kN,力学性能并没有因为胶层的加入而减弱;同等腐蚀条件下,焊接试样腐蚀方式为电偶腐蚀,腐蚀产物主要为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}(\text{OH})$ 、 $\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}\text{CO}_3$ ,与未加入胶层相比,焊接试样腐蚀速度减慢,耐蚀性明显提高;

4) 由于胶层具有绝缘性,抑制阳极和阴极之间的电子交换,减缓电偶腐蚀作用,加入胶层,提高了钢/铝焊接试样的耐腐蚀性能。

## REFERENCES

- [1] 吴 军, 李 亮. 激光焊接工艺对铝-钢焊接质量影响研究[J]. 焊接技术, 2000, 29(5): 19-21  
WU Jun, LI Liang. Investigation on laser welding quality of Steel-Al[J]. Welding Technology, 2000, 29(5): 19-21.
- [2] 雷 振, 秦国梁, 林尚扬, 王旭友. 基于激光-MIG 复合热源的 5A02 铝合金/镀锌钢熔-钎焊[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 94-98  
LEI Zhen, QIN Guo-liang, LIN Shang-yang, WANG Xu-you. Fusion-brazing joining for dissimilar metals between 5A02 aluminium alloy and zinc-coated steel based on laser-MIG hybrid welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 94-98
- [3] 彭 利, 周恺武, 徐少华, 彭 平, 刘金水. 镀 Zn 钢-6016 铝合金激光焊接组织性能与第一原理计算[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 230-238.  
PENG Li, ZHOU Dian-wu, XU Shao-hua, PENG Ping, LIU Jin-shui. Laser lap welding structural properties and first-principle computation of zinc-coated steel and 6016 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 230-238.
- [4] BRETZ T, LAZARZ, BLANCHARD H J. Adhesive bonding and corrosion protection of a die cast magnesium automotive door[J]. Magnesium Technology, 2004: 113-119.
- [5] QI X, SONG G. Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding[J]. Mater Des, 2010, 31: 605-609.
- [6] LIU X J, HUANG R S, WANG H Y. Improvement of TIG lap weldability of dissimilar metals of Al and Mg[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2007, 12: 258.
- [7] ZHAO L M, ZHANG Z D. Effect of Zn alloy interlayer on interface on microstructure and strength of diffusion-bonded Mg-Al joints[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 83.
- [8] 王红阳, 张兆栋, 刘黎明. 胶层对镁铝异种金属激光胶接焊过程中热量传递的影响[C]//轻金属与高强材料焊接国际论坛, 北京: 机械工业出版社, 2008: 94-99.  
WANG Hong-yang, ZHANG Zhao-dong, LIU Li-ming. The effect of the adhesive on the thermal conduction in laser welded bonding Mg to Al process[C]//International Forum on Light Metals and High Strength Material, Welding. Beijing: China Machine Press, 2008: 94-99.
- [9] 刘黎明, 王红阳, 王 恒, 宋 刚. 镁合金激光胶接焊接头微观及力学性能[J]. 中国机械工程, 2007, 18(3): 352-356.  
LIU Li-ming, WANG Hong-yang, WANG Heng, SONG Gang. Microstructural characteristics and mechanical properties of laser weld bonded joints in magnesium alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(3): 352-356.
- [10] 任大鑫, 刘黎明, 镁合金激光胶接焊胶层作用分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 266-270.  
REN Da-xin, LIU Li-ming. Analysis of the adhesive layer of laser weld bonding joints in magnesium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 266-270.
- [11] CHEN W C, ACKERSON P, MOLIAN P. CO<sub>2</sub> laser welding of galvanized steel sheets using went holes[J]. Materials and Design, 2009, 30: 245-251.
- [12] 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 34-40.  
CHEN Wu-zhu. Laser welding and cutting quality control[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 34-40.
- [13] LIU L M, WANG H Y. The effect of the adhesive on the microcracks in the laser welded bonding Mg to Al joint[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 507A: 22-28.
- [14] 林玉珍, 杨德钧. 腐蚀和腐蚀控制原理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 8-11.  
LIN Yu-zhen, YANG De-jun. Corrosion and corrosion control principle[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 8-11.
- [15] 刘秀晨, 安成强. 金属腐蚀学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 148-149.  
LIU Xiu-chen, AN Cheng-qiang. Metal corrosion science[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 148-149.

(编辑 李艳红)