

文章编号: 1001-4888(2022)06-0875-06

## 热轧双相钢-铝合金黏接-自冲铆接头 不同腐蚀环境下的耐久性研究<sup>\*</sup>

赵腾飞, 邢保英, 何晓聪, 曾凯, 冯震

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南昆明 650500)

**摘要:** 为探究热轧双相钢-铝合金黏接-自冲铆接头(黏-铆复合接头)在不同腐蚀环境下的耐久性,以 0.6mol/L 的 NaCl 溶液和 0.02mol/L 的 NaHSO<sub>3</sub> 溶液作为腐蚀液,对热轧双相钢(DP590)-铝合金 5052 黏-铆复合接头进行干湿周浸交替腐蚀实验,通过腐蚀动力学和静力学测试,研究接头在不同腐蚀环境下的静力学性能和失效机理。发现盐性环境下试件损失量呈递增趋势,酸性环境下试件损失量先增大后减小。酸性环境下随腐蚀的进行,接头承受载荷的最大值逐渐减小,对接头的不良影响更为突出;盐性环境下接头承受载荷的最大值先增大后减小,但对胶层的破坏程度更严重。两种腐蚀环境对接头的失效形式无显著影响,均为铆钉从下板拉脱;盐性环境中接头搭接区域腐蚀更为严重,上板表面氧、氯元素含量明显增加。

**关键词:** 自冲铆接; 腐蚀环境; 静力学分析; 元素分析

**中图分类号:** TH131.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-21-169

### 0 引言

自冲铆接(SPR)是一种新型连接技术,常用来连接薄板材料<sup>[1]</sup>,可将多层不同种类的金属和非金属板材连接起来。SPR 在连接板材时不需要预钻孔<sup>[2]</sup>,连接速度可与电阻点焊相媲美,且在连接过程中不产生热量,具有稳定性高、工件变形小、易于实现自动化等优点,因此在轻合金及异种材料的连接中占有主导地位<sup>[3]</sup>,SPR 还克服了传统焊接工艺难以实现的连接可靠性,特别适用于铝合金与钢板材料的连接<sup>[4]</sup>。在实际工程应用中,铝合金与异种金属板材连接的构件易受外界环境的影响而发生腐蚀,从而会对其力学性能造成影响。

关于金属板材连接的腐蚀问题,国内外学者做了大量研究。王池权等<sup>[5]</sup>为了研究腐蚀环境下航空金属的疲劳性能,对两种航空铝合金材料进行了测定,结果表明在 3.5%NaCl 腐蚀环境下两种铝合金材料的疲劳性能均有所下降。Kotadia 等<sup>[6]</sup>研究了腐蚀环境下板材涂层类型对异质自冲铆接头性能的影响,结果发现锌铝镁涂层钢的耐腐蚀性是镀锌钢的 4 倍,造成这一现象的主要原因是镀有锌铝镁涂层的钢材在腐蚀过程中形成 Mg<sup>2+</sup> 和 Al<sup>3+</sup>,减慢了碱性锌盐 ZnO 的生成,从而降低了锌铝镁涂层钢材的腐蚀速率。申园园等<sup>[7]</sup>研究了 0359 铝合金的腐蚀行为,发现其表面的钝化膜以及腐蚀产物能够在一定程度上阻碍腐蚀的进行。Calabrese 等<sup>[8]</sup>研究了盐性环境对钢-铝异质自冲铆接头性能的影响,结果发现钢-铝异质自冲铆接头性能显著下降,导致这一现象发生的主要原因是板材搭接区域发生了电偶腐蚀使铝板变薄,板材与铆钉腿接触区域发生了缝隙腐蚀使内锁结构遭到了破坏。Karim 等<sup>[9]</sup>研究了不同

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-07-13; 修回日期: 2021-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52065034);云南省应用基础研究计划青年项目(14051848)

**通信作者:** 邢保英(1986—),女,博士研究生,副教授。主要从事薄板连接技术研究。Email: xbb0808@163.com

的铆接涂层对不同材料间自冲铆接接头腐蚀行为和强度退化的影响,发现与 Almac 涂层 SPR 接头相比,锌镍铆接表面与锌镍涂层铆钉之间的弱电偶耦合提高了锌镍涂层 SPR 接头的耐腐蚀性。王询等<sup>[10]</sup>为了探究铝合金胶接接头的界面强度和耐腐蚀性能的影响因素,对铝合金表面物理特性和化学特性进行了分析处理。

目前对不同腐蚀环境下钢-铝异质复合接头耐久性的研究较少。本文主要是对汽车车身常用的热轧双相钢(DP590)和铝合金 5052 两种板材所制备的黏-铆复合接头,在不同腐蚀环境下进行干湿交替周浸实验的研究,观察其腐蚀后力学性能的变化。

## 1 实验

### 1.1 试件制备

本文采用的上、下板材料分别为:热轧双向钢(DP590)和铝合金 5052(AA5052)。试件制备所采用的设备为德国 Bollhoff 公司生产的自冲铆连接设备以及镀锌钢铆钉,所用黏接剂为 3M-DP460 环氧树脂胶黏剂,试件及铆钉几何尺寸如图 1 所示。

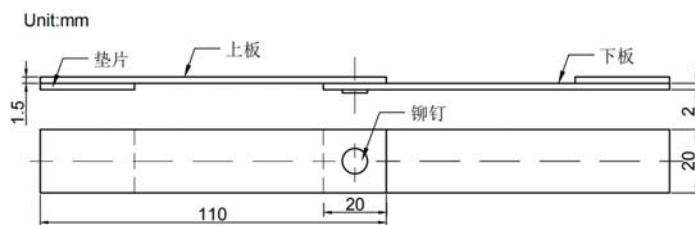


图 1 试件和铆钉几何尺寸

Fig. 1 Geometries of specimen and rivet

### 1.2 腐蚀实验

将制备好的试件分别放入 0.6mol/L 的 NaCl 溶液和 0.02mol/L 的 NaHSO<sub>3</sub> 溶液中进行腐蚀实验<sup>[11]</sup>,试验箱内温度保持在 (25±2)℃。腐蚀实验的总周期为 1080h,取出试件的周期分别为 360h、720h 和 1080h,对取出的试件通过去离子水、酒精和丙酮清洗,之后放置于干燥箱中干燥处理 24h,最后取出称重。

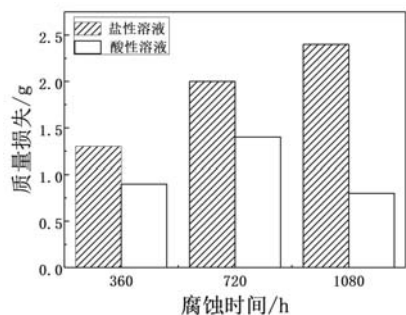


图 2 试件损失量

Fig. 2 Amount of specimen loss

### 1.3 静力学实验

采用 MTS-Landmark 100 电液伺服材料试验机进行静力学实验,试件被拉伸的速度为 5mm/min。在拉伸试件时,为避免产生附加扭矩,试件两端夹持垫片,即在 DP590 末端夹持尺寸为 25mm×20mm×2mm 的垫片,在 AA5052 末端夹持尺寸为 25mm×20mm×1.5mm 的垫片。

## 2 结果与分析

### 2.1 腐蚀动力学分析

通过称重测量,获得试件损失量变化情况,如图 2 所示。

盐性环境中随腐蚀时间的延长,试件损失量呈递增趋势。

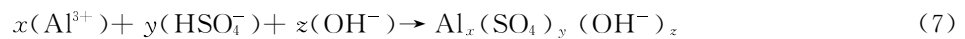
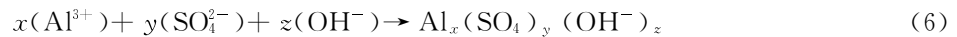
腐蚀前期试件下板的氧化膜以及上、下板之间的胶层起到了一定的保护作用,下板腐蚀效果没有上板明显,总体损失量不大;随腐蚀的进行,下板的氧化膜开始腐蚀,其腐蚀产物主要是 Al(OH)<sub>3</sub><sup>[12]</sup>。生成的 Al(OH)<sub>3</sub>再与 Cl<sup>-</sup>发生化学反应,过程如下<sup>[13]</sup>:



由化学方程式(3)可知,该化学反应产物为铝的氯化物,具有可溶性,因此下板的氧化膜逐渐被破

坏,下板失去保护,质量减小。随着腐蚀的进行,上板表面的腐蚀产物出现开裂现象,上、下板之间的胶层开始脱落,导致腐蚀加剧;当腐蚀时间达到 720h 时,上板表面的腐蚀产物开始脱落,暴露出来的板材与溶液接触,上板继续腐蚀,且胶层脱落严重,当腐蚀时间达到 1080h 时,试件损失量达到最大。

酸性环境中的试件损失量先增大后减小。腐蚀前期与试件在盐性环境中类似,随腐蚀的进行,试件损失量一直增加。但与盐性环境中不同的是,试件损失量在腐蚀时间为 720h 时达到最大,由于下板氧化膜的腐蚀产物中含有羟基基团和硫酸根<sup>[14]</sup>,其腐蚀机制为:



由化学方程式(6)、(7)可知,该化学反应最后产物为含铝的硫酸盐化合物,因为铝的硫酸盐化合物不溶于水,且黏着在下板表面,从而阻碍下板腐蚀的进行,当腐蚀时间达到 1080h 时,试件损失量相对减小。

由腐蚀动力学分析可知,随腐蚀的进行,试件在盐性环境中的损失量一直比酸性环境中的大,且在 1080h 时试件在盐性环境中的损失量几乎是酸性环境中的 3 倍。

## 2.2 静力学分析

由静力学实验获得的载荷-位移曲线如图 3 所示。根据接头承载部位的不同,将未腐蚀试件的载荷-位移曲线分成 A、B、C 和 D 四个区域,如图 3(a)所示。其中 A 区是胶层作为主要承载力的阶段;B 区为胶层失效阶段;C 区是接头内锁结构作为主要承载力的阶段;D 区为接头内锁结构失效阶段。

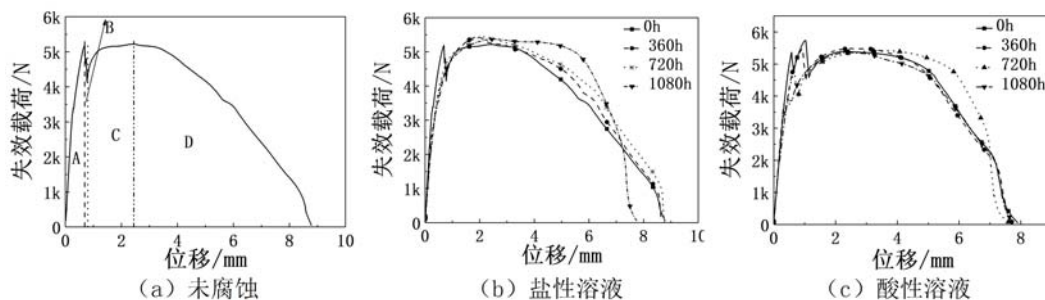


图3 不同腐蚀环境下的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves in different corrosive environments

从图 3(b)、(c)可知,盐性环境下,失效载荷随腐蚀的进行先增大后减小,由于试件在未腐蚀时,接头载荷主要靠内锁结构和黏接剂提供,随腐蚀的进行,胶层被破坏,内锁结构处开始腐蚀,并生成大量腐蚀产物,因此增大了板间的摩擦力,导致失效载荷增大,腐蚀时间为 720h 时达到最大;当腐蚀时间达到 1080h 时,胶层几乎完全被破坏,溶液渗透到接头内部,内锁结构腐蚀加剧,失效载荷减小。而酸性环境下,失效载荷随腐蚀时间的延长呈递减趋势,由于试件表面产生的腐蚀物附着在接头处,增强了对接头内锁结构的腐蚀,因此失效载荷一直降低。

从图 3 可知,酸性环境对接头内锁结构的承载能力破坏比较严重。短期内盐性环境对接头内锁结构的承载能力有所提升,但胶层更容易被破坏,当腐蚀时间仅 360h 时,区域 B 即胶层失效阶段已几乎不存在,而在酸性环境中,直到腐蚀时间为 1080h 时才出现类似情况。

## 2.3 接头失效形式

黏-铆复合接头在两种腐蚀环境中的失效形式如图 4 所示,失效形式均为铆钉从下板拉脱。盐性环境下随腐蚀时间的延长,接头 M 处的腐蚀程度比其他区域更为严重,在腐蚀时间为 360h 时部分试件的接头 M 处被撕裂,且下板 N 处开始出现裂纹。当腐蚀时间为 720h 和 1080h 时,N 处底部出现大面积脱落,内锁结构明显失效,下板接头搭接区域出现大量白色腐蚀物。而酸性环境中,随腐蚀的进行,接头搭接区域内部未发生明显的腐蚀现象,仅边缘处出现轻微腐蚀,这是因为胶层的密封作用阻止了溶液渗

透到搭接区域内部。但随着腐蚀的进行,上板表面的腐蚀产物开始脱落,暴露出来的板材与溶液进一步反应,上板材料变薄,且强度下降,M 处的弯曲度以及下板 N 处的挤压和膨胀变形更为明显。

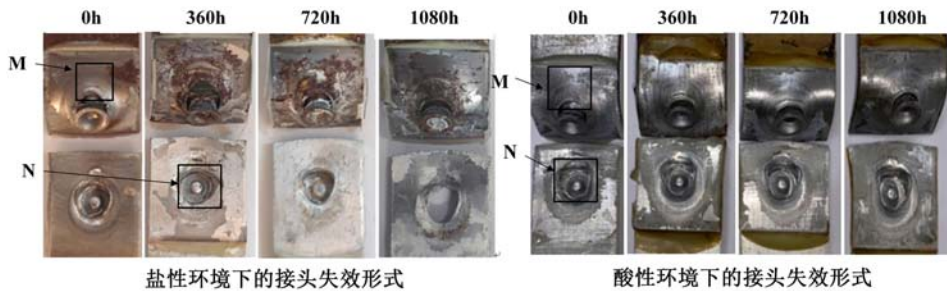


图 4 不同腐蚀环境下的接头失效形式

Fig. 4 Failure modes of joints in different corrosive environments

利用 X 射线能谱仪提取搭接区域表面成分,搭接区域表面元素含量如图 5 所示。盐性环境下,接头搭接区域上板表面 O 元素的含量呈递增趋势,当腐蚀时间为 1080h 时 O 元素达到最多;当腐蚀时间为 360h 时,上板表面开始出现 Cl 元素和 Al 元素,此时胶层已被破坏。随腐蚀的进行,搭接区域表面附着大量腐蚀物,阻碍了该区域的进一步腐蚀,Cl 元素轻微下降。但由于部分腐蚀物的脱落,暴露出的板材与溶液继续反应,所以在腐蚀时间为 1080h 时,上板搭接区域 Cl 元素含量继续增加。接头下板搭接区域表面元素在腐蚀前期,Cl 元素越来越多,但与上板不同,当腐蚀时间为 720h 时达到最多,当腐蚀时间为 1080h 时含量开始减少,下板 Cl 元素整体含量低于上板,说明在腐蚀过程中 Cl 元素更易吸附于上板搭接区域表面。

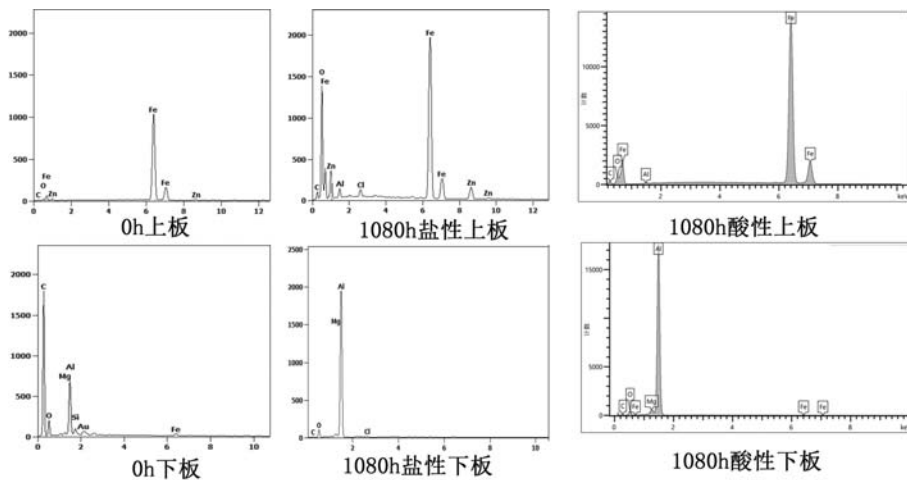


图 5 接头搭接区域表面元素含量

Fig. 5 Surface element content of lap joint area

酸性环境下,当腐蚀时间为 360h 时,搭接区域上板表面边缘处 Fe 元素含量降低,O 元素含量升高,前期溶液浓度较大,搭接区域边缘处胶层被破坏,致使边缘处发生氧化腐蚀。随腐蚀的进行,搭接区域周围附着大量腐蚀产物再加上胶层的密封作用,使溶液无法渗入到接头内部,阻碍了进一步腐蚀,当腐蚀时间为 1080h 时,该区域元素相对于 0h 时无明显变化。在腐蚀前期接头下板搭接区域表面元素无明显变化,但在 720h 时,有部分试件的下板搭接区域边缘处开始出现 S 元素,证明此时边缘处的胶层和氧化膜已被破坏。随着腐蚀的进行,该区域周围生成的不可溶物以及氧化膜阻碍了腐蚀的进行,当腐蚀时间为 1080h 时,由于边缘处生成铝的硫酸盐化合物开始脱落,所以此时 S 元素的含量很少,无法呈现在能谱图上。

由搭接区域表面元素变化可知,盐性环境对黏-铆复合接头搭接区域内部的破坏更为严重,该区域表面元素变化更大。酸性环境由于胶层的保护作用,对黏-铆复合接头搭接区域内部的破坏程度并不明

显。

### 3 结论

(1) 随腐蚀时间的延长,试件在盐性环境中的损失量呈递增趋势,酸性环境中的损失量呈先增大后减小的趋势;试件在盐性环境中的损失量比酸性环境中的大。

(2) 酸性环境对接头内锁结构的承载能力破坏更严重,而短期内盐性环境对接头内锁结构的承载能力有所提升。盐性环境对胶层的破坏程度更为严重。

(3) 两种腐蚀环境对黏-铆复合接头的失效形式无显著影响,均为铆钉从下板拉脱;盐性环境中接头搭接区域腐蚀效果更为明显,Cl元素更易吸附于该区域上板表面,而在酸性环境中该区域腐蚀现象并不明显。

### 参考文献:

- [1] Calabrese L, Bonaccorsi L, Proverbio E, et al. Durability on alternate immersion test of self-piercing riveting aluminium joint[J]. Materials and Design, 2013, 46:849—856.
- [2] 刘洋,何晓聪,邓聪. 黏接剂对钛合金异质自冲铆接头力学性能的影响[J]. 实验力学, 2017, 32(1):131—136 (LIU Yang, HE Xiacong, DENG Cong. Impact of adhesive agent on mechanical properties of heterogeneous self-piercing riveted titanium alloy joint[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):131—136 (in Chinese))
- [3] Wu J, Chen C, Ouyang Y, et al. Recent development of the novel riveting processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(1-2):19—47.
- [4] 黄志超,刘帅红,赖家美,等. 结构胶对钢铝自冲铆接接头力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(7):157—162 (HUANG Zhichao, LIU Shuaihong, LAI Jiamei, et al. Influence of structural adhesive on mechanical properties of steel-aluminum self-piercing riveted joints[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(7):157—162 (in Chinese))
- [5] 王池权,熊峻江. 3.5%NaCl 腐蚀环境下 2 种航空铝合金材料疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11):225—230 (WANG Chiquan, XIONG Junjiang. Relative tests on fatigue properties of aluminum alloys in 3.5% NaCl corrosion environment[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11):225—230 (in Chinese))
- [6] Kotadia H R, Rahnama A, Sohn I R, et al. Performance of dissimilar metal self-piercing riveting (SPR) joint and coating behaviour under corrosive environment[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39:259—270.
- [7] 申园园,陈朝轶,李军旗,等. 风电系统散热器用 0359 铝合金的盐雾腐蚀行为[J]. 表面技术, 2017, 46(10):22—28 (SHEN Yuanyuan, CHEN Chaoyi, LI Junqi, et al. Salt spray corrosion behavior of 0359 aluminum alloy used in radiator of wind power system[J]. Surface Technology, 2017, 46(10):22—28 (in Chinese))
- [8] Calabrese L, Proverbio E, Pollicino E, et al. Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2015, 50(1):10—17.
- [9] Karim M A, Jin H B, Dong H K, et al. Assessment of rivet coating corrosion effect on strength degradation of CFRP/aluminum self-piercing riveted joints[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 393:1—12.
- [10] 王询,林建平,万海浪. 铝合金表面特性对其胶接性能影响的研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(8):123—131 (WANG Xun, LIN Jianping, WAN Hailang. Research progress in effect of aluminum surface properties on adhesively bonded performance[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(8):123—131 (in Chinese))
- [11] 靳文豪,邢保英,何晓聪,等. 不同腐蚀环境下铝合金自冲铆接头静力学性能研究[J]. 材料导报, 2019, 33(16):2725—2728 (JIN Wenghao, XING Baoying, HE Xiacong, et al. Study on static properties of self-piercing riveted joints in aluminum alloy under different corrosive environments[J]. Materials Reports, 2019, 33(16):2725—2728 (in Chinese))
- [12] 张奇峰,李晋,陆慧. 防锈铝板表面腐蚀原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2002(12):562—564 (ZHANG Qifeng, LI Jin, LU Hui. Analysis on corrosion of anti-rust aluminum plate[J]. PTCA(Parta:PhysicalTesting), 2002(12):562—564 (in Chinese))
- [13] 杨帆,陈朝轶,李玲,等. Cl<sup>-</sup> 浓度对 0359 铝合金在模拟海洋大气环境中腐蚀的影响[J]. 现代机械, 2012(1):79—81, 94 (YANG Fan, CHEN Chaoyi, LI Ling, et al. Influence of Cl<sup>-</sup> concentration on corrosion behavior of

- 0359 aluminum alloy in simulated marine atmosphere environment[J]. Modern Machinery, 2012(1):79—81, 94 (in Chinese))
- [14] 周和荣, 李晓刚, 董超芳, 等. 铝合金在  $\text{NaHSO}_3$  溶液中干湿周浸腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(6):345—350 (ZHOU Herong, LI Xiaogang, DONG Chaofang, et al. Dry and wet etching behavior of aluminum alloy in  $\text{NaHSO}_3$  solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(6):345—350 (in Chinese))

## Study on durability of bonding-self-piercing riveting joints in hot rolled dual phase steel-aluminum alloy under different corrosion environments

ZHAO Tengfei, XING Baoying, HE Xiaocong, ZENG Kai, FENG Zhen

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China)

**Abstract:** In order to explore the durability of hot rolled dual phase steel-aluminum alloy bonding-self-piercing riveting joints (adhesive-riveted composite joint) in different corrosion environments, the adhesive-riveted composite joint in hot-rolled dual phase steel(DP590) and aluminum alloy 5052 was tested by cyclic wet dry immersion corrosion test with 0. 6mol/L NaCl solution and 0. 02mol/L  $\text{NaHSO}_3$  solution as corrosion solution. The static mechanical properties and failure mechanism of the joint in different corrosive environments were studied. It is found that in the salt environment, the loss amount of specimen increases. But in the acid environment, the amount of specimen loss first increases and then decreases. In the acid environment, the maximum load of the joint decreases with the corrosion, and the adverse effect on the joint is more prominent. In the salt environment, the maximum load of the joint first increases and then decreases, but the damage to the adhesive layer is more serious. Moreover, the two corrosion environments have no significant effect on the failure mode of the joint, and the rivet is pulled off from the lower plate. In the salt environment, the corrosion in the lap joint area is more serious, and the contents of O and Cl on the surface of the upper plate increase significantly.

**Keywords:** self piercing riveting; corrosive environment; static analysis; elemental analysis