

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2020.04.004

腐蚀环境下异质自冲铆接头静力学性能研究

冯震, 邢保英, 何晓聪, 曾凯, 靳文豪

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

摘要:为研究钢铝异质自冲铆接头在盐腐蚀和酸腐蚀中静力学性能的变化,对DP590-5052自冲铆试件进行干湿周浸加速腐蚀实验,通过腐蚀动力学和静力学测试分析不同腐蚀时间接头的失重量、失效模式和静失效载荷性能。结果表明,盐腐蚀环境中钢铝试件(YDA)组失重量呈现上升趋势,腐蚀速率则逐渐减小;酸腐蚀(SDA)组试件失重量先上升后下降,腐蚀速率也呈现出相同的趋势。酸腐蚀对接头失效模式影响更为显著。两种腐蚀对接头静强度均有影响,接头对盐性环境的抗腐蚀性能较小。

关键词:盐腐蚀;酸腐蚀;自冲铆;周浸实验;静力学实验

中图分类号:TH131.1

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2020)04-0025-05

Study on Static Mechanical Properties of Heterogeneous Self-piercing Riveted Joints in Corrosion Environments

FENG Zhen, XING Baoying, HE Xiaocong, ZENG Kai, JIN Wenhao

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

Abstract: In order to study the change of static mechanical properties of heterogeneous self-piercing riveted joints in steel-aluminium for salt and acid corrosion, dry-wet periphery immersion accelerated corrosion test was carried out on self-piercing riveted specimens in DP590-5052 (DA). The weight loss, failure mode and static load performance of joints at different corrosion times were analyzed by corrosion kinetics and static test. The results show that in salt corrosion environment, the weight loss of steel-aluminium specimens (YDA) group shows an upward trend, while the corrosion rate decreases; in acid corrosion, the weight loss of steel-aluminium specimens (SDA) group first increases and then decreases, and the corrosion rate also shows the same trend. The effect of acid corrosion on joint failure mode is more significant. The static strength of the joint are affected by both kinds of corrosions, and the corrosion resistance of the joint to salt environment is smaller.

Key words: salt corrosion; acid corrosion; self-piercing riveting; peripheral immersion test; static test

为解决能源消耗和环境污染问题,在实现汽车轻量化中主要是通过车身结构采用铝、镁合金等轻质金属,考虑到其制备和加工成本,通常是在全钢车

身中引入铝合金等轻金属材料^[1]。然而传统连接技术很难实现异种板材之间的连接,自冲铆作为机械冷成形技术,为异种板材间的连接提供了新思路,以

收稿日期:2019-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565022);云南省人才培养项目(14118935);云南省应用基础研究计划青年项目(14051848)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51565022); Yunnan Province Talent Training Project (14118935); Yunnan Basic Research Program Youth Project (14051848)

作者简介:冯震(1995—),男,硕士研究生,主要从事薄板连接技术研究。

通信作者:邢保英(1986—),女,博士研究生,主要从事薄板连接技术研究。

引用格式:冯震,邢保英,何晓聪,等. 腐蚀环境下异质自冲铆接头静力学性能研究[J]. 有色金属工程,2020,10(4):25-29.

FENG Zhen, XING Baoying, HE Xiaocong, et al. Study on Static Mechanical Properties of Heterogeneous Self-piercing Riveted Joints in Corrosion Environments[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(4): 25-29.

其独特优势成为最有发展潜力的新型连接技术^[2-3]。车身常年暴露在室外会使防护层脱落,会使钢铝异质自冲铆接头遭受不同环境的腐蚀,如盐雾、工业废气及酸雨等,使接头的性能下降,甚至导致失效。

针对金属的腐蚀,国内外学者已经做了大量研究。刘建国等^[4]利用 SEM 和 XRD 对 N80 钢锈层的腐蚀形貌和腐蚀产物组成进行观察和分析,发现模拟干湿交替的腐蚀速率远大于全浸区腐蚀速率。陈朝轶等^[5]研究铝合金在模拟海洋大气环境中的腐蚀行为,发现随腐蚀时间延长,铝合金表面的腐蚀产物不断增多,初期以点蚀为主,点蚀逐渐发展成为剥蚀,并产生龟裂。周和荣等^[6]对高强铝合金在不同 SO₂ 模拟环境中的腐蚀行为进行研究,发现表面腐蚀产物主要为氢氧化铝和硫酸铝水合物,形貌呈团状或圆状,并不断向外延伸扩展,呈现不均匀的凹凸形貌。陈菲等^[7]通过对镀锌高强钢盐雾腐蚀行为,得出随着盐雾时间的延长,腐蚀产物覆盖在镀锌板表面,阻碍纯锌层与腐蚀液的接触,减缓了腐蚀的进行。丁文有等^[8]研究了夹层结构自冲铆接头的腐蚀行为,发现不同腐蚀时间接头的失效模式与其内部的腐蚀行为有关。KOTADIA 等^[9]研究了板材的涂层类型和预处理在腐蚀环境中对异种金属自冲铆接头机械性能和失效机理的影响。SILVA 等^[10]研究了铝镁异种自冲铆接头的几何形状对其腐蚀性能的影响,发现电化学腐蚀中充当阴极的铆钉距阳极板边缘较远以及钉头沉入上板时,可以提高接头的耐腐蚀性。

目前,国内外学者对自冲铆接头在盐性和酸性腐蚀环境下静力学性能的差异研究较少。根据国家标准和相关论文,本文选取两种不同浓度的盐溶液和酸溶液,通过干湿周浸实验加速自冲铆接头在不同环境下的腐蚀,结合静力学实验,分析钢铝异质自冲铆接头的腐蚀行为及其力学性能,对今后自冲铆接头的防腐工作有重要意义。

1 实验

1.1 试件制备

实验所用材料为热轧双相钢 DP590(DP590)和铝合金 5052(AA5052),基板尺寸为 110 mm × 20 mm,DP590 厚 1.5 mm,AA5052 厚 2.0 mm。以单搭自冲铆接头为研究对象,试件结构如图 1 所示。

选择长度为 6 mm、硬度为 46 ± 2 HRC 的镀锌钢铆钉,采用德国 Bollhoff 公司的 RIVSET VARIO-FC(MTF)型自冲铆连接系统进行铆接。

最优铆接参数:预压紧压强 5 MPa、刺穿力 19 MPa 和整形力 10 MPa,行程 130.5 mm。

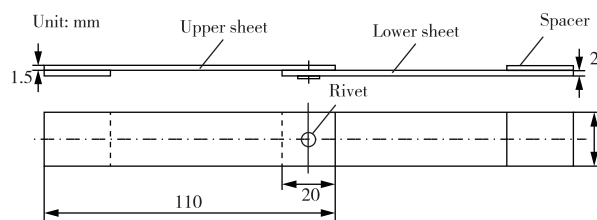


图 1 试件结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen structure

1.2 腐蚀周浸实验

根据金属和合金的腐蚀溶液周浸实验标准建立腐蚀实验箱,进行腐蚀实验。腐蚀溶液分别为 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液和 0.02 mol/L 的 NaHSO₃ 溶液,其中 NaCl 溶液腐蚀的试件简记为 YDA 组,NaHSO₃ 溶液腐蚀的试件简记为 SDA 组,利用恒温计将实验温度保持在 (25 ± 2) °C。干湿实验循环周期为 60 min,试件浸没 10 min,干燥 50 min。腐蚀实验总周期为 1 080 h,取样周期分别为 0、360、720 h 及 1 080 h。实验结束后,将腐蚀后的试样用蒸馏水冲洗,无水乙醇和丙酮进行擦拭,然后放入恒温箱中 24 h,取出称重。

1.3 静力学实验

使用 MTS Landmark 100 型电液伺服材料实验机对试件进行拉伸-剪切实验,拉伸速度为 5 mm/min,在试件两端使用垫片,尺寸分别为 25 mm × 20 mm × 2.0 mm 和 25 mm × 20 mm × 1.5 mm,每个周期至少测试 3 个试样。

2 结果与分析

2.1 腐蚀动力学

利用失重法获得腐蚀试件的腐蚀速率 $V^{[11]}$,结果见表 1。

$$V = \frac{W_0 - W_1}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中: V 为腐蚀速率 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); W_0 为腐蚀前质量均值 (g); W_1 为腐蚀后质量均值 (g); S 是试件表面积 (m^2); t 是腐蚀时间 (h)。

盐溶液中 YDA 组试件失重量随腐蚀时间的增加呈现上升趋势。腐蚀时间为 360 h 时,试件下板所残留的氧化膜对基体起到保护作用,上板与 NaCl 溶液迅速反应,腐蚀发生较快,总体腐蚀速率达到最大(见表 1),上板表面积聚大量不易分解的腐蚀产物,减缓了腐蚀进程,使得试件失重量最小。腐蚀时

间为 720 h 时,试件下板氧化膜被破坏,保护作用消失,腐蚀程度加剧,上板表面的腐蚀产物呈现破碎的层状或片状,出现锈层开裂及脱落,使得上板继续与 NaCl 溶液反应,并生成新的腐蚀产物,此时总体腐蚀速率变缓,但试件失重量继续增加。腐蚀时间为 1 080 h 时,腐蚀反应继续进行,腐蚀速率与 720 h 时基本相同,试件失重量最大。

表 1 不同腐蚀环境中试件腐蚀速率

Table 1 Corrosion rate of specimens in different corrosive environments

Group number	Corrosion time/h	Weight loss/g	Corrosion rate/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
YD5	360	0.500	0.156
	720	0.800	0.125
	1080	1.167	0.121
SD5	360	0.780	0.243
	720	2.450	0.382
	1080	1.450	0.151

酸溶液中 SDA 组试件失重量随腐蚀时间的增加呈现先增加后减小的趋势。腐蚀时间为 360 h 时,试件下板表面残留的氧化膜起到保护作用,一定程度上减少下板的腐蚀,上板则直接裸露,腐蚀反应迅速发生,生成的腐蚀产物附着在上板表面,阻碍了试件与腐蚀液的接触,此时腐蚀速率较大,试件失重量最小。腐蚀时间为 720 h 时,试件下板氧化膜遭到破坏,腐蚀反应加快,附着于上板表面的腐蚀产物局部出现开裂并且伴随脱落,其对内部试件的保护能力变弱,加速了试件的腐蚀,腐蚀速率达到最大,试件失重量最大。腐蚀时间为 1 080 h 时,生成新的腐蚀产物,使试件产生钝化,抑制了腐蚀的进行,此时腐蚀速率最小,试件被分解的质量小于腐蚀新产物生成的质量,试件失重量变小。

在腐蚀过程中,盐腐蚀环境中 YDA 组试件失重量呈现上升趋势,腐蚀速率则逐渐减小;酸腐蚀 SDA 组试件失重量先上升后下降,腐蚀速率先增大后减小。

2.2 接头失效模式分析

YDA 组接头失效模式如图 2 所示。YDA 组接头失效模式均为铆钉与下板分离,这是因为在拉剪实验中,机械内锁结构遭到破坏。然而由于腐蚀时间不同,接头失效过程中也伴随着不同的变形特征。0 h 试件下板铆孔区域膨胀变形较为严重,360 h 试件中仅有一个下板搭建区域出现轻微颈缩现象,其余试件下板的铆孔区域随腐蚀时间不同发生不同程度的撕裂,最后将铆孔撕裂。腐蚀时间为 360 h,搭

接区域腐蚀严重,铆接底部出现裂纹和腐蚀坑,腐蚀液开始与铆钉腿接触,生成的腐蚀产物对残余底厚有一定粘结作用。腐蚀时间为 720 h 和 1 080 h,其试件底部脱落,内锁结构破坏严重,下板搭接区域腐蚀坑密集,最终导致铆钉与下板分离同时铆孔被撕裂。

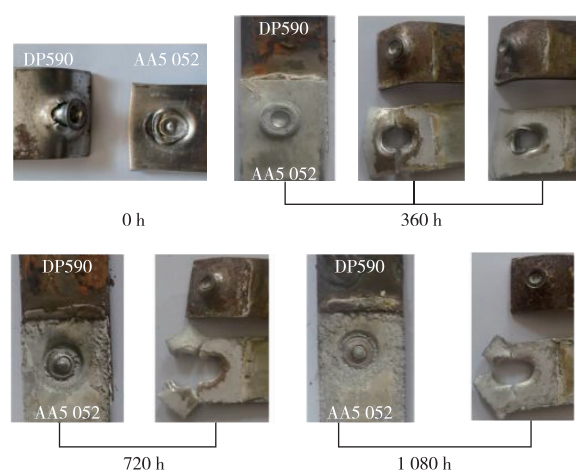


图 2 盐腐蚀各阶段接头失效模式

Fig. 2 Failure modes of joints in different stages of salt corrosion

SDA 组接头失效模式如图 3 所示。0 h 试样失效模式主要为铆钉与下板分离,同时个别试样会出现底部脱落,这是残余底厚较薄所致。360 h 试样失效模式主要为铆钉与下板分离,而一个试样为铆钉断裂失效。接头搭接区域存在间隙,腐蚀液通过间隙进入内锁结构,开始与铆钉腿接触,镀锌层的存在虽减缓了对铆钉腐蚀的进程,但腐蚀产物的生成对残余底厚有一定粘结作用,同时导致接头底部脱落。720 h 试样失效模式为铆钉与下板分离、铆钉断裂。此时搭接区域板材间的腐蚀产物增多,间隙增大,腐蚀液与铆钉腿接触面积扩大,镀锌层保护能力减弱,铆钉腐蚀加剧,内锁结构内部腐蚀产物开始增多,最终导致失效。1 080 h 试样失效模式为铆钉与下板分离。这是随着腐蚀时间的增长,搭接区域板间腐蚀产物明显增多,内锁结构内部腐蚀产物积聚较多,对残余底厚粘结作用更加明显,同时内锁结构遭到严重破坏,使得此时接头失效。

通过分析接头失效模式,可以发现酸腐蚀对异种自冲铆接头失效模式影响显著。随着腐蚀时间的延长,盐腐蚀未改变接头失效模式,但会影响失效过程中接头的变形特征及其程度;酸腐蚀会影响接头的失效机理,从而接头呈现出两种失效模式。

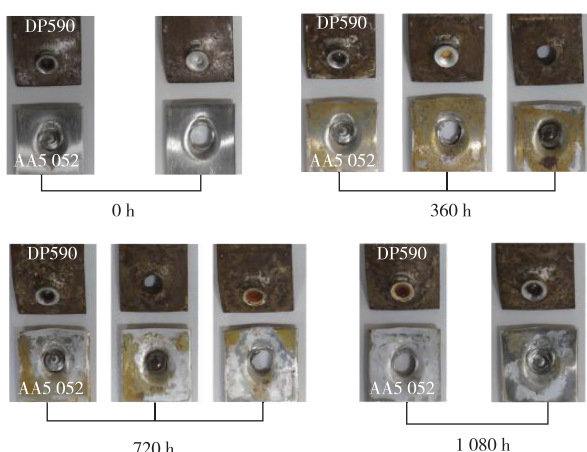


图3 酸腐蚀各阶段接头失效模式

Fig. 3 Failure modes of joints in different stages of acid corrosion

2.3 接头静失效载荷分析

根据静力学测试结果,获得不同腐蚀时间失效载荷折线图,如图4所示。

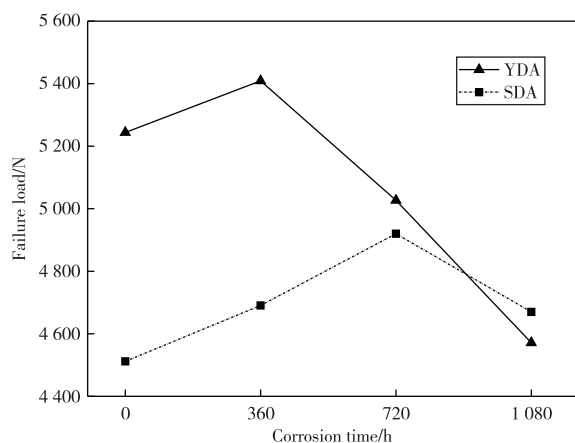


图4 试件接头失效载荷均值折线图

Fig. 4 Line chart of failure load mean of joints

盐溶液中 YDA 组接头失效载荷上升和下降的有效速率分别为 0.459 N/h 和 1.164 N/h,360 h 接头静失效载荷达到最大值,1080 h 为最小值。起初,未腐蚀接头失效载荷由机械内锁结构提供。腐蚀时间为 360 h,在下板的铆接区域及铆钉周围可观察到一层白色的盐薄夹层^[12](见图 2),该腐蚀产物的存在增大了板间的摩擦力,此时试件失重量最小,腐蚀对板材的强度和机械内锁结构影响较小,所以接头失效载荷呈上升趋势。随腐蚀时间的增长,板间生成的腐蚀产物越来越多,使得间隙增大,摩擦力减小,同时试件底部脱落,机械内锁结构破坏严重,接头失效载荷急剧下降。

酸溶液中 SDA 组接头失效载荷上升和下降的

有效速率分别为 0.567 N/h 和 0.694 N/h,720 h 接头失效载荷达到最大值。360 h 时板间缝隙有腐蚀产物生成,增加了板间摩擦力,此时腐蚀对内锁结构影响较小,因此失效载荷增大。720 h 时腐蚀产物增多,摩擦力增大,内锁结构内部腐蚀产物也增多,铆钉腿与板间的摩擦力增大,使得失效载荷继续上升。腐蚀时间为 1080 h,板间腐蚀产物和内部的腐蚀产物继续增多,严重破坏内锁结构,同时板材性能下降明显,接头失效载荷开始下降。

可以发现,盐性和酸性环境均对接头静强度有显著影响,其中接头对盐性环境的抗腐蚀性能较小。

3 结论

1)在腐蚀过程中,YDA 和 SDA 组试件在腐蚀前期失重量趋势相同;但在最终两者差异较大,YDA 组试件失重量继续增加,而 SDA 组则减小。YDA 组腐蚀速率逐渐减小,而 SDA 组则先增大后减小。

2)随着腐蚀时间的延长,盐腐蚀未改变接头失效模式,但会影响失效过程中接头的变形特征及其程度;酸腐蚀会影响接头的失效机理,从而接头呈现出两种失效模式。可见酸腐蚀对异种自冲铆接头失效模式影响显著。

3)盐性和酸性环境均对接头静强度有显著影响,其中接头对盐性环境的抗腐蚀性能较小。

参考文献:

- [1] 李永兵,马运五,楼铭,等.轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J].机械工程学报,2016,52(24):1-23.
LI Yongbing,MA Yunwu,LOU Ming,et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering,2016,52(24):1-23.
- [2] 何晓聪.薄板材料连接新技术[M].北京:冶金工业出版社,2016:1-2.
HE Xiacong. New technology for joining thin materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016:1-2.
- [3] HE X, GU F, BALL A. Recent development in finite element analysis of self-piercing riveted joints[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012,58(5/6/7/8):643-649.
- [4] 刘建国,李言涛,侯保荣. N80 钢模拟全浸区和干湿交替试样的腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2012,33(11):925-927.
LIU Jianguo, LI Yantao, HOU Baorong. Corrosion

- behavior of N80 steel under immersion and wet-dry cyclic condition[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(11):925-927.
- [5] 陈朝轶,李玲,王家伟,等. 3003 铝合金盐雾加速腐蚀行为[J]. 轻金属, 2014(2):54-58.
- CHEN Chaoyi, LI Ling, WANG Jiawei, et al. Accelerated corrosion behavior of 3003 aluminum alloy in salt water spray[J]. Light Metals, 2014(2):54-58.
- [6] 周和荣,马坚,李晓刚,等. 高强铝合金在不同 SO_2 模拟环境中的腐蚀行为及相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2011, 31(6):446-452.
- ZHOU Herong, MA Jian, LI Xiaogang, et al. Corrosion behaviors and relativity of high strength aluminum alloy in different simulated SO_2 environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2011, 31(6):446-452.
- [7] 陈菲,刘立学,刘靖宝. 镀锌 C-Mn-Al-Mo 系双相高强度盐雾腐蚀行为研究[J]. 天津冶金, 2019, 38(1):53-56.
- CHNE Fei, LIU Lixue, LIU Jingbao. Study on salt-spray corrosion behavior of galvanized C-Mn-Al-Mo dual-phase high strength steel[J]. Tianjin Metallurgy, 2019, 38(1):53-56.
- [8] 丁文有,何晓聪,邢保英,等. 夹层结构自冲铆接头的腐蚀行为及力学性能[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3):81-85.
- DING Wenyong, HE Xiaocong, XING Baoying, et al. Corrosion behavior and mechanical properties of sandwich structure self-piercing riveted joint[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(3):81-85.
- [9] KOTADIA H R, RAHNAMA A, SOHN L 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.
- [10] SILVA E L, HOCHÉ D, BOUALI A C, et al. Digital modelling of the galvanic corrosion behaviour of a self-piercing riveted AZ31-AA5083 hybrid joint[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(6):529-545.
- [11] 林鑫,杜敏,李成杰,等. DH36 钢焊接件海水腐蚀行为研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(3):70-74.
- LIN Xin, DU Min, LI Chengjie, et al. Study on corrosion behavior of seawater in DH36 steel welded parts[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(3):70-74.
- [12] 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.