

# 表面处理对铝合金盐雾环境下的腐蚀特性试验研究

程文礼<sup>1,2</sup>, 杨慧<sup>1,2</sup>, 任德杰<sup>3</sup>, 何二锋<sup>4</sup>, 李玉峰<sup>3</sup>

- (1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;  
2. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300;  
3. 南京赛宝工业技术研究院, 苏州 215011;  
4. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610041)

**[摘要]** 采用盐雾试验研究了不同表面处理状态下的 2124-T851 铝合金试样在盐雾环境下的腐蚀特性, 按 96h 一循环拍照记录了 960h 内试样的表面腐蚀状态。结果表明: 未经过表面处理的铝合金试样随腐蚀时间的增加, 表面腐蚀程度逐渐增加, 表面磷酸阳极化(PAA)处理后并喷涂底胶及底漆的试样具有较好的耐腐蚀性。通过比较, 发现喷涂 BR-127 和 TB06-9 试样在试验过程中均未出现腐蚀点, 说明 BR-127 及 TB06-9 具有较好的耐盐雾腐蚀性。

**关键词:** 铝合金; 盐雾腐蚀; 腐蚀机理; 磷酸阳极氧化; 表面处理

## Experimental Study on Corrosion Characteristics of Aluminum Alloy in Salt Spray Environment

CHENG Wenli<sup>1,2</sup>, YANG Hui<sup>1,2</sup>, REN Dejie<sup>3</sup>, HE Erfeng<sup>4</sup>, LI Yufeng<sup>3</sup>

- (1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;  
2. AVIC Composites Co., Ltd., Beijing 101300, China;  
3. Nanjing CEPREI Industrial Technology Research Institute, Suzhou 215011, China;  
4. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

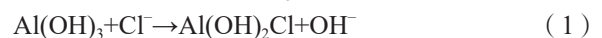
**[ABSTRACT]** The corrosion characteristics of 2124-T851 aluminum alloy samples under different performance treatment conditions in salt spray environment were studied by salt spray test. The surface corrosion state of the sample within 960h was recorded by photograph every 96h a cycle. The results show that the surface corrosion of aluminum alloy samples surface without treatment gradually increases with the increase of corrosion time, the sample with surface phosphoric acid anodized (PAA) and sprayed with primer has good corrosion resistance. By comparison, it was found that there was no corrosion point in the test of BR-127 and TB06-9, which shows that BR-127 and TB06-9 have good salt spray corrosion resistance.

**Keywords:** Aluminum alloy; Salt spray corrosion; Corrosion mechanism; Phosphoric acid anodization; Surface treatment

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.12.092

2124-T851 铝合金是 Al-Cu-Mg 系高强高韧性铝合金, 具有优良的机械加工特性, 其厚板的伸长率和断裂韧度高于常规 2024 铝合金, 广泛应用于航空航天结构<sup>[1]</sup>。但由于铝合金对腐蚀环境的敏感性, 易发生局部腐蚀, 影响结构完整性和安全性。盐雾腐蚀就是一种常见和最有破坏性的大气腐蚀, 由于自然界的盐雾是强电解质, 其中 NaCl 占电解质的 77.8%, 电导很大, 能加速电极反应使阳极活化, 加速腐蚀。盐雾对铝合金的腐蚀是以电化学方式进行的, 其诱导因素是铝合金表面生成的致密氧化膜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 遭到破坏, 破坏过程中起主要作用

的是氯离子(Cl<sup>-</sup>), Cl<sup>-</sup> 离子半径很小, 只有 1.81×10<sup>-10</sup>m, 具有很强的穿透能力, 容易在铝合金表面的活性位置, 如氧化膜不完整或材质不均匀处发生吸附, 随着时间的延长, 吸附在表面的离子与氧化膜发生化学反应, 氧化膜减薄、破裂直至裸露铝溶解。经过一系列的反应, 形成最终产物可溶于水的 AlCl<sub>3</sub><sup>[2-4]</sup>。反应步骤为:



为了提高铝合金的耐腐蚀性, 需对其进行表面处

理,如阳极氧化、化学钝化及施加涂层等,目前国内外学者对铝合金的腐蚀特性及表面阳极化处理有了较多的研究<sup>[5-9]</sup>。实际工程应用中,铝合金表面阳极化处理后,还需在表面进行防腐底胶及底漆的喷涂,进一步增强其耐腐蚀性。本文研究了2124-T851铝合金表面未经处理及表面磷酸阳极化处理后喷涂不同底胶和底漆后试样的盐雾腐蚀特性,为相应的结构设计安全提供指导。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验用2124-T851铝合金试样(组分见表1<sup>[10]</sup>),尺寸100mm×50mm×8mm(长×宽×厚),共分4类,其中1类铝合金表面不进行阳极化处理,2~4类按HB/Z 197-1991《结构胶接铝合金磷酸阳极化工艺规范》进行表面磷酸阳极氧化(Phosphoric Acid Anodized, PAA),磷酸阳极氧化作用是为增加底胶附着力,处理后的试样喷涂底胶和底漆,试样类别、表面处理状态及数量见表2。漆膜喷涂按GB/T 1727-1992《漆膜一般制备法》制备,其中SY-D9防腐底胶由北京航空材料研究院生产,固化制度为120℃/2h,长期使用温度-55~70℃;BR-127防腐底胶由美国Cytec公司生产,固化温度范围较大(93~177℃),长期使用温度-55~149℃,本研究使用固化制度为120℃/0.5h, TB06-9 锌黄丙烯酸聚氨酯底漆由天津灯塔涂料有限公司生产,本文研究固化制度为60℃/12h。

### 1.2 试验方法

试验按GJB 150.11A-2009《军用装备试验室环境试验方法 盐雾试验》标准进行试验,试验箱采用南京赛宝工业技术研究院CEEC-YW-1000盐雾试验箱,盐雾试验条件见表3,试验时间为连续喷雾24h→干燥24h→连续喷雾24h→干燥24h交替进行,96h/循环,

共计960h。干燥期间,温度保持在15~35℃,相对湿度≤50%。

试验步骤如下:

(1)在试验的标准大气条件下,对试样进行试验前外观检查并拍照记录。

(2)试验前,试验箱应经过16~24h空载试车,当确定可保持稳定的试验条件时,方可进行试验(在5d内使用过的试验箱不必空载试车)。

(3)将试样与试验箱垂直平面呈15°~30°角放在试验箱内支架上,如图1所示。保证试样之间以及与试验箱壁之间距离不小于150mm,各试样不应相互遮挡,同时不应与其他金属和吸水性材料接触,保证盐雾能自由地沉降在其受试表面上。

(4)将试验箱内温度调至35℃,使试样在该温度下保持2h。

(5)连续喷雾24h。

(6)喷雾结束后,打开试验箱,让试样在温度为

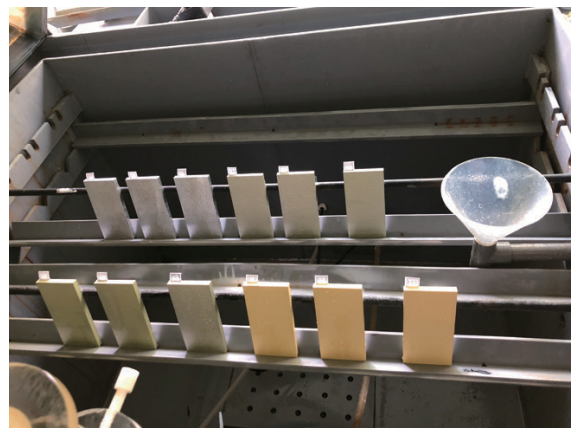


图1 试样摆放

Fig.1 Sample placement

表1 2124铝合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2124 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
< 0.10	0.16	4.46	0.50	1.68	< 0.10	< 0.10	< 0.10	余量

表2 试样类别、表面处理状态及数量

Table 2 Sample types, surface treatment status and quantity

类别	试样表面处理状态	试样数量/件
1	—	3
2	PAA+SY-D9	3
3	PAA+BR-127	3
4	PAA+BR-127+TB06-9	3

表3 盐雾试验条件

Table 3 Salt spray test conditions

温度 / ℃	盐溶液				盐雾沉降率 / (mL·80cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	喷雾 方式
	成分	浓度 / %	允差 / %	pH 值		
35	NaCl	5	±1	6.5~7.2	1~3	间歇 喷雾

15~35℃,相对湿度≤ 50% 条件下干燥 24h。

(7) 重复步骤(5)~(6)20次,共进行 10 个循环(96h/循环),试验时间共计 960h,试验过程中每 96h 对试样进行外观检查。外观检查采用湿纱布去除试样表面积盐,然后在试验的标准大气条件下对试样的表面腐蚀情况检查并拍照记录。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀结果

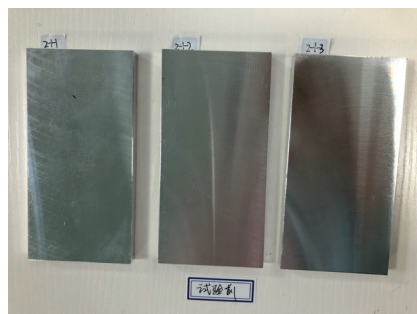
试验根据不同腐蚀时间对试样表面状态进行拍照记录,结果见表 4。

### 2.2 表面处理对比

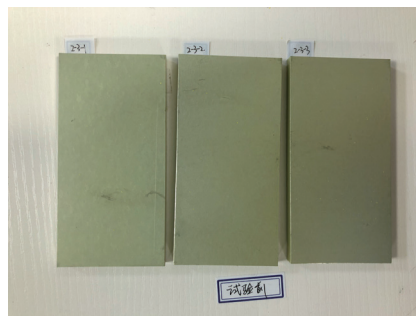
由表 4 可以看出,表面处理对腐蚀的影响较大。试验选取了表面未处理的试样和 PAA+BR-127 底胶试样的腐蚀情况进行对比分析,图 2 为未腐蚀前的试样表面状态,图 3 为腐蚀 96h 后试样状态,可以看出,未处理的试样表面出现了大面积腐蚀,而同样试验时间下的 PAA+BR-127 试样未出现腐蚀。腐蚀 960h 后试样状态如图 4 所示,未处理的试样腐蚀面积增大,腐蚀程度增加, PAA+BR-127 试样仍未出现腐蚀,这是由于表面未处理的铝合金试样与盐溶液中氯离子发生电化学反应而被腐蚀,而表现喷涂 BR-127 的试样未出现腐蚀,这是因为 BR-127 是一种改进环氧防腐底胶,其在铝合金表面固化后形成高分子聚合物膜,阻止或延缓了盐溶液中氯离子和水分子的渗入,起到了保护金属表面,抑制腐蚀的作用。

### 2.3 表面状态对比

试验考察了 PAA+SY-D9、PAA+BR-127 两种表面处理状态分别在 480h 和 960h 腐蚀后的试样表面特性,



(a) 未处理



(b) PAA+BR-127

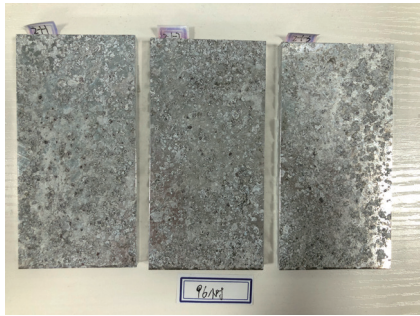
图2 试验前试样状态

Fig.2 Sample status before experiment

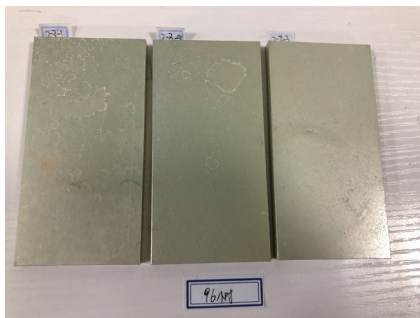
表4 盐雾试验记录结果

Table 4 Test results of salt spray

试验时间 / h	样品			
	1 裸片	2 PAA+SY-D9	3 PAA+BR-127	4 PAA+BR-127+TB06-9
6	大面积腐蚀	无	无	无
192	整面腐蚀	无	无	无
288	整面腐蚀	无	无	无
384	整面腐蚀	无	无	无
480	整面腐蚀	1 腐蚀点	无	无
576	整面腐蚀	1 腐蚀点	无	无
672	整面腐蚀	1 腐蚀点	无	无
768	整面腐蚀	1 腐蚀点	无	无
864	整面腐蚀	1 腐蚀点	无	无
960	整面腐蚀	2 腐蚀点	无	无

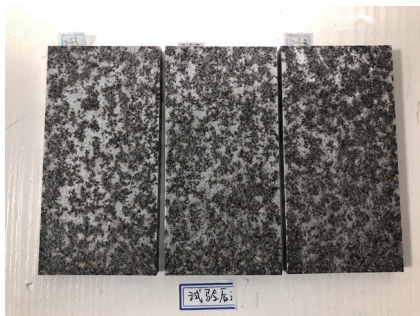


(a) 未处理

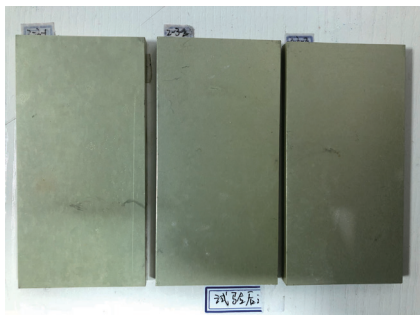


(b) PAA+BR-127

图3 腐蚀96h后试样状态  
Fig.3 Sample status after 96h corrosion



(a) 未处理



(b) PAA+BR-127

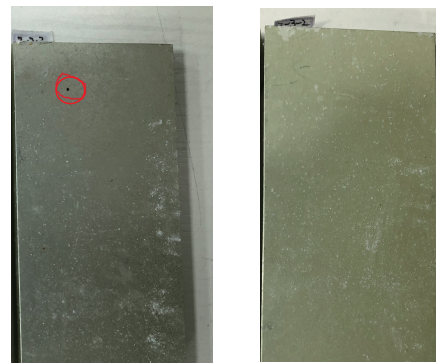
图4 腐蚀960h后试样状态  
Fig.4 Sample status after 960h corrosion

如图 5 所示。可以看出, PAA+SY-D9 试样在经过 480h 腐蚀后出现 1 个腐蚀点, 960h 后出现 2 个腐蚀点, 但腐蚀点均未扩散, 说明 SY-D9 具有一定的防腐蚀特性, 这是因为 SY-D9 为环氧结构, 其在铝合金表面固化后同样形成高分子量聚合物膜, 抑制了铝合金的电化学腐蚀。相比 PAA+BR-127 试样在 960h 后未出现腐蚀, 说明 BR-127 底胶的防腐特性更好。

另外, 由于工程应用中用于胶接结构的铝合金零件表面需要喷涂底胶, 但对于不胶接的零件, 除底胶外还需要喷涂表面底漆, 试验考察了 PAA+BR-127+TB06-9 在经过 960h 后的腐蚀情况。由图 6 可以看出, TB06-9 丙烯酸聚氨酯防腐底漆表面未出现颜色变化, 且擦拭过程没有底漆脱落, 说明铝合金试样未被腐蚀, TB06-9 底漆具有较好的抗腐蚀特性。

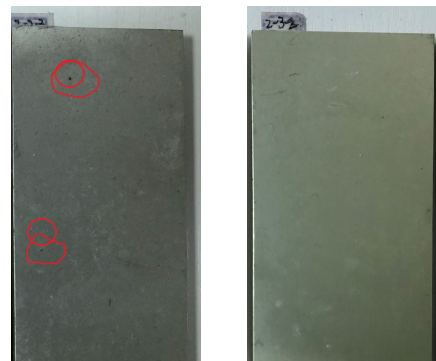
### 3 结论

铝合金经表面磷酸阳极化(PAA)处理后喷涂 SY-D9、BR-127 底胶均具有较好的耐盐雾腐蚀性, 试验表明, BR-127 比 SY-D9 具有更好的耐盐雾腐蚀性, TB06-9 底漆同样具有较好的耐盐雾腐蚀性。



PAA+SY-D9 PAA+BR-127

(a) 480h



PAA+SY-D9 PAA+BR-127

(b) 960h

图5 两种表面处理状态  
Fig.5 Two surface treatment states



图6 PAA+BR-127+TB06-9腐蚀960h  
Fig.6 PAA+BR-127+TB06-9 after 960h corrosion

### 参考文献

[1] 林刚, 林慧国, 赵玉涛. 铝合金应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 484.  
LIN Gang, LIN Huiguo, ZHAO Yutao. Aluminum alloy application manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 484.

[2] 李云涛, 李晓宁, 包俊成, 等. 2024 铝合金盐雾腐蚀评估及腐蚀形貌分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 864-868.  
LI Yuntao, LI Xiaoning, BAO Juncheng, et al. Corrosion evaluation and morphology analysis of 2024 aluminum alloy in salt spray[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(9): 864-868.

[3] BENSALAH W, FEKI M, WERY M, et al. Chemical dissolution resistance of anodic oxide layers formed on aluminum[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7): 1673-1679.

[4] 张仁群, 王斌, 岳涛, 等. 浅析国军标 GJB150 与美军标 MIL-STD-810F 盐雾试验[J]. 环境技术, 2008, 26(5): 42-45, 26.  
ZHANG Renqun, WANG Bin, YUE Tao, et al. Analysis of the salt fog test between GJB150 and MIL-STD-810F[J]. Environmental Technology, 2008, 26(5): 42-45, 26.

[5] WANG Z Y, MA T, HAN W, et al. Corrosion behavior on aluminum alloy LY12 in simulated atmospheric corrosion process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(2): 326-334.

[6] LIU W L, MU Z T, JIN P. Accelerated corrosion test and corrosion failure distribution model of aircraft structural aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S3): 1485-1488.

[7] 生海, 董超芳, 肖葵, 等. pH 值对 2024-T351 铝合金在 NaCl 溶液中电化学反应行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(2): 107-110, 132.  
SHENG Hai, DONG Chaofang, XIAO Kui, et al. Effect of pH on electrochemical behavior of 2024-T351 aluminium alloy in NaCl solution[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(2): 107-110, 132.

[8] 高堂铃, 付刚, 王冠, 等. 结构胶接用抑制腐蚀底胶的制备和性能研究[J]. 黑龙江科学, 2015, 6(7): 12-15.  
GAO Tangling, FU Gang, WANG Guan, et al. Investigations on the

preparation and properties of a corrosion inhibiting primer for structural bonding[J]. Heilongjiang Science, 2015, 6(7): 12-15.

[9] 韩允, 赵连红, 张红飞, 等. 5% NaCl 盐雾环境对铝合金铆接防护结构性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11): 51-55.

HAN Yun, ZHAO Lianhong, ZHANG Hongfei, et al. Influence of 5% NaCl salt spray environment on the performance of aluminum alloy riveted protection structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11): 51-55.

[10] 刘铭, 张坤, 戴圣龙, 等. 航空用 Al-Cu-Mg 铝合金疲劳行为研究[J]. 航空材料学报, 2014, 34(1): 76-81.

LIU Ming, ZHANG Kun, DAI Shenglong, et al. Fatigue performance of Al-Cu-Mg aluminum alloy for aviation[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(1): 76-81.

通讯作者: 程文礼, 硕士、高级工程师, 研究方向为复合材料, E-mail: 13552018131@163.com。

(责编 大漠)

(上接第91页)

Designing Manuel of Fastener Connector Editorial Committee. Designing manual of fastener connector[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.

[7] 李英亮. 紧固件概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

LI Yingliang. Fasteners basics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

[8] 王立东, 刘风雷, 赵庆云. 收口量对钛合金自锁螺母锁紧性能的影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(23/24): 79-82.

WANG Lidong, LIU Fenglei, ZHAO Qingyun. Influence of crimping dimension on locking properties of titanium alloy self-locking nut[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(23/24): 79-82.

[9] 国防科学技术工业委员会. HB 7686—2001 使用温度高于 425°C 的 MJ 螺纹自锁螺母通用规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2001.

Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense. HB 7686—2001 General specification for nuts, self-locking, with maximum operating temperature more or equal to 425°C[S]. Beijing: Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense, 2001.

[10] 国防科学技术工业委员会. HB 7687—2001 使用温度高于 425°C 的 MJ 螺纹自锁螺母试验方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2001.

Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense. HB 7687—2001 Test method for nuts, self-locking, with maximum operating temperature more or equal to 425°C[S]. Beijing: Commission on Science, Technology, and Industry for National Defense, 2001.

通讯作者: 孙景冬, 硕士, 工程师, 研究方向为航空发动机用紧固件设计, E-mail: albertmax@126.com。

(责编 大漠)