

# 铝合金化学氧化膜盐雾试验后腐蚀点 评定方法研究

郑洪<sup>1</sup>, 彭涛<sup>1</sup>, 舒畅<sup>2</sup>, 杨燕<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>

(1.航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091;

2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** **目的** 制定飞机用 2024 铝合金表面阿洛丁 1200S 化学氧化膜盐雾试验后腐蚀点的评定依据。**方法** 通过开展铝合金化学氧化膜盐雾试验, 分别利用目视、SEM 微观、能谱分析和电化学阻抗测试等手段, 表征盐雾试验后的腐蚀形貌及特征。**结果** 试验后样品表面出现的典型腐蚀特征尺寸大于或等于 0.15 mm 时, 正常视力的检测人员均能目视可见。目视可见的黑点、典型彗星状拖尾或只有彗星尾巴等形貌处的化学转化膜和基材已腐蚀, 局部有腐蚀点的膜层, 其耐蚀性大幅下降, 失去对侵蚀性介质的阻挡能力。**结论** 仅出现不符合目视可见和基体腐蚀特征, 不能判定为腐蚀点。当出现肉眼可见的黑点, 典型彗星状拖尾或只有彗星尾巴等形貌, 可判定为腐蚀点。在实际生产检验检测过程中, 可采取类似方法研究腐蚀点的评判方法, 建立铝合金表面处理盐雾试验后腐蚀图谱和腐蚀点评定准则。

**关键词:** 铝合金; 化学氧化膜; 阿洛丁 1200S; 腐蚀点; 评定方法

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)04-0070-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.010

## Corrosion Evaluation Method of Aluminum alloy Chemical Oxidation Film after Salt Spray Test

ZHENG Hong<sup>1</sup>, PENG Tao<sup>1</sup>, SHU Chang<sup>2</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>, WANG Hui

(1. Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The evaluation basis of corrosion point on surface of 2024 aluminum alloy for aircraft after salt spray test of alodine 1200S chemical oxide film is established. The corrosion morphology and characteristics of aluminum alloy chemical oxide film after salt spray test are characterized by visual, SEM microscopic, energy spectrum analysis and electrochemical impedance test. After the test, when the size of typical corrosion characteristics on the surface of the sample is greater than or equal to 0.15 mm, all the inspectors with normal vision can visually see it. The visible black spots, the typical cometary tail or only the comet tail and other morphologies of the chemical transformation film and substrate have been corroded, and the corrosion resistance of the film layer with local corrosion points has decreased significantly, losing the ability to block the corrosive me-

收稿日期: 2020-10-12; 修订日期: 2021-01-04

Received: 2020-10-12; Revised: 2021-01-04

作者简介: 郑洪(1974—), 男, 主要研究方向为材料理化测试和表面处理工艺控制技术。

**Biography:** ZHENG Hong (1974—), Male, Research focus: physical and chemical testing of materials and surface treatment process control technology.

引文格式: 郑洪, 彭涛, 舒畅, 等. 铝合金化学氧化膜盐雾试验后腐蚀点评定方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 070-076.

ZHENG Hong, PENG Tao, SHU Chang, et al. Corrosion evaluation method of aluminum alloy chemical oxidation film after salt spray test[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 070-076.

dium. The corrosion point can not be determined as only the non-compliance with the visible and matrix corrosion characteristics. When black spots are visible to the naked eye, the typical cometary tail or only the comet tail can be judged as corrosion spots. Similar methods can be adopted to study the evaluation method of corrosion spots in the actual production inspection and test, and the corrosion maps and evaluation criteria of corrosion spots after the salt spray test of aluminum alloy surface treatment can be established.

**KEY WORDS:** aluminum alloy; chemical oxidation film; Alodine-1200S; corrosion pitting; evaluation method

阿洛丁化学氧化是现代航空制造业中铝及铝合金表面处理的一种重要工艺。铝及铝合金经过阿洛丁化学氧化后,表面生成一层非晶质的氧化物和铬酸盐保护层,起到防腐、提高底漆附着力等作用<sup>[1-2]</sup>。实际生产过程中,通过铝合金化学转化膜试片的盐雾试验结果检验其耐蚀性,盐雾试验后,试片表面符合相关要求视为合格<sup>[3-5]</sup>。常用的判定标准为腐蚀点数量,例如,盐雾试验后单个试片上不超过 5 个腐蚀点,3 个试片总面积上不超过 9 个腐蚀点,说明铝合金化学转化膜耐蚀性合格。NADCAP 化学处理审核标准 AC 7108<sup>[6]</sup>对典型腐蚀点的特征进行了明确:试片表面上可见的圆的、长长的或不规则坑点,从坑点下拖出彗星尾巴样或线状或晕圈样的形貌,坑点内或附近伴有少量的腐蚀产物。当试片表面宏观形貌具有上述 2 个及 2 个以上特征,可判定为腐蚀点。当试片表面宏观形貌只呈现 1 个特征时,须作进一步的分析方可判定为腐蚀点。

在实际生产检验过程中,不同的检验人员对腐蚀点的评定有较大争议,主要集中在以下两个方面:1)各工艺规范只规定数量,未规定腐蚀点尺寸,不同检验人员视力和主观认知存在差异,如何量化确定目视可见腐蚀点的尺寸;2)试片表面宏观形貌只呈现 1 个腐蚀特征,即只有可见的坑点,或只有彗星尾巴样或线状或晕圈样形貌,如何判定为腐蚀点。

文中针对航空制造领域化学氧化工艺检验检测过程中存在的争议问题,以常用的阿洛丁 1200S 化学氧化膜为对象,开展盐雾试验。观察并跟踪记录化学氧化膜盐雾试验后呈现的宏微观腐蚀形貌特征变化,通过目视腐蚀点尺寸量化讨论、宏微观形貌分析和能谱分析,研究了化学氧化膜盐雾试验后腐蚀点的评定方法。

## 1 试验

### 1.1 试样

选取 2024-T3 铝合金试片为试样基材,规格为 254 mm×76.2 mm×1.02 mm(大试片)。按照航空产品铝合金化学转化膜层工艺规范要求,控制阿洛丁 1200S 溶液质量浓度为(7.5~12) g/L 范围,按溶剂清洗—装挂—碱洗—热水洗—冷水洗—脱氧—冷水洗—阿洛丁处理—冷水洗—下挂—干燥的流程进行表面处理。

表面处理后的铝合金阿洛丁 1200S 化学转化膜呈彩虹色,表面较为细腻,膜层连续无明显缺陷。将两件试样切割为 70 mm×70 mm×1.02 mm 试片(小试片)。两种规格的试片同时开展盐雾试验,其中大试片用于盐雾试验后外观观察和电化学测试,小试片用于盐雾试验后外观观察、金相观察和扫描观察等。

### 1.2 盐雾试验

按照 ASTM B117 进行,试验条件:盐溶液为 5%±1%(质量分数) NaCl 溶液, pH 为 6.5~7.2;盐雾沉降率为(1.0~2.0) mL/(80 cm<sup>2</sup>·h);试样与铅垂面呈夹角为 6°±2°安装;连续喷雾。取样后,用蒸馏水小心冲洗试样表面,并晾干,冲洗过程应尽量保护腐蚀产物不被破坏。冲洗后,在(35±2) °C 的烘箱干燥 1 h,然后进行中间检查。

### 1.3 形貌及特征表征

采用目视或 10 倍放大镜对试片表面宏观形貌检查,并用文字描述。利用金相显微镜和扫描电子显微镜(SEM)观察表面微观形貌。采用能谱仪检测具有暗斑、黑点和轻微彗星状拖尾等典型腐蚀特征部位的化学成分,列出各元素的原子个数比。

采用电化学测试系统进行数据测量,测试采用三电极体系,试样为工作电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极。试样在 3.5%氯化钠水溶液中浸泡 30 min 后,进行阻抗谱测试。EIS 测试均在室温下进行,工作面积为 3.14 cm<sup>2</sup>,频率扫描范围为 100 kHz~10 mHz,施加振幅为 15 mV 的正弦波扰动。

## 2 结果与讨论

### 2.1 目视可见腐蚀点尺寸的量化

在实际生产检验过程中,铝合金化学转化膜盐雾试验后腐蚀点的评判以目视为主,放大镜观察为辅助,不同检验人员对腐蚀点的主观判断直接影响着生产线某批次化学转化表面处理是否通过耐蚀性测试。为减小这种主观判断的差异,首先应量化确定目视可见腐蚀点的尺寸,以及在实际检测检验过程中确定腐蚀点尺寸的参照标准。

GB/T 20967<sup>[7]</sup>规定,进行一般目视检测时,检测人员的裸眼或矫正远距离视力应达 GB/T 11533<sup>[8]</sup>的视力等级 1.0。GB/T 11533 规定,视力等级 1.0 应分辨远视力表(测试距离 5 m)中视距边长为 7.27 mm 的视标。视标为 E 字,视标的 1/5 可视为最小可见尺寸。目视检测时,样品一般距眼睛 25~30 cm,根据远视力表的测试距离和最小可分辨尺寸计算出,检测距离 25~30 cm 可见的最小尺寸为 0.072~0.087 mm。由于 GB/T 11533 标准中视标颜色为黑色,视标为标准图样,相比其他颜色和不规则图形较为醒目,最小可见尺寸相对较小。在宏观腐蚀形貌检查过程中,典型腐蚀特征可能呈现各种颜色和不规则形貌,同时考虑不同检验人员主观认知差异,将最小可见尺寸的 2 倍(0.15~0.17 mm)确定为目视可见腐蚀点的尺寸。据不完全统计,市面上最小刻度为 1 mm 直尺的刻度线宽度约 0.15~0.17 mm。生产检验检测过程中,可用最小刻度为 1 mm 的直尺作为参照标准,快速确定腐蚀点尺寸范围。

## 2.2 腐蚀形貌结果

铝合金阿洛丁 1200S 化学转化膜在盐雾试验中,随试验时间的延长,逐渐出现膜层褪色、暗斑。当膜层局部破坏后,肉眼可见黑色或近似于黑色的斑点,然后逐渐出现彗星状拖尾和灰白色腐蚀产物。本研究目视检查时,用最小刻度为 1 mm 直尺快速确定典型腐蚀特征部位的尺寸范围。在此基础上,选择具有不同典型腐蚀特征的 33 个点进行宏微观形貌观察。其中 5 个测点表现为褪色,8 个测点表现为暗斑特征(尺寸 $\geq 0.5$  mm),3 个测点表现为暗斑和轻微黑点混合的特征(暗斑尺寸 $\geq 0.5$  mm,轻微黑点尺寸 $<0.15$  mm),7 个测点表现为黑点特征(尺寸 $\geq 0.15$  mm),5 个测点表现为彗星状拖尾特征(尺寸 $\geq 0.5$  mm),5 个测点表现为只有彗星尾巴特征(尺寸 $\geq 0.5$  mm)。

铝合金阿洛丁 1200S 化学转化膜盐雾试验后出现褪色、暗斑、暗斑及轻微黑点(轻微黑点尺寸 $<0.15$  mm)、黑点、彗星状拖尾等典型腐蚀特征的宏微观形貌如图 1 所示。可以看出,褪色在宏观上表现为表面膜层颜

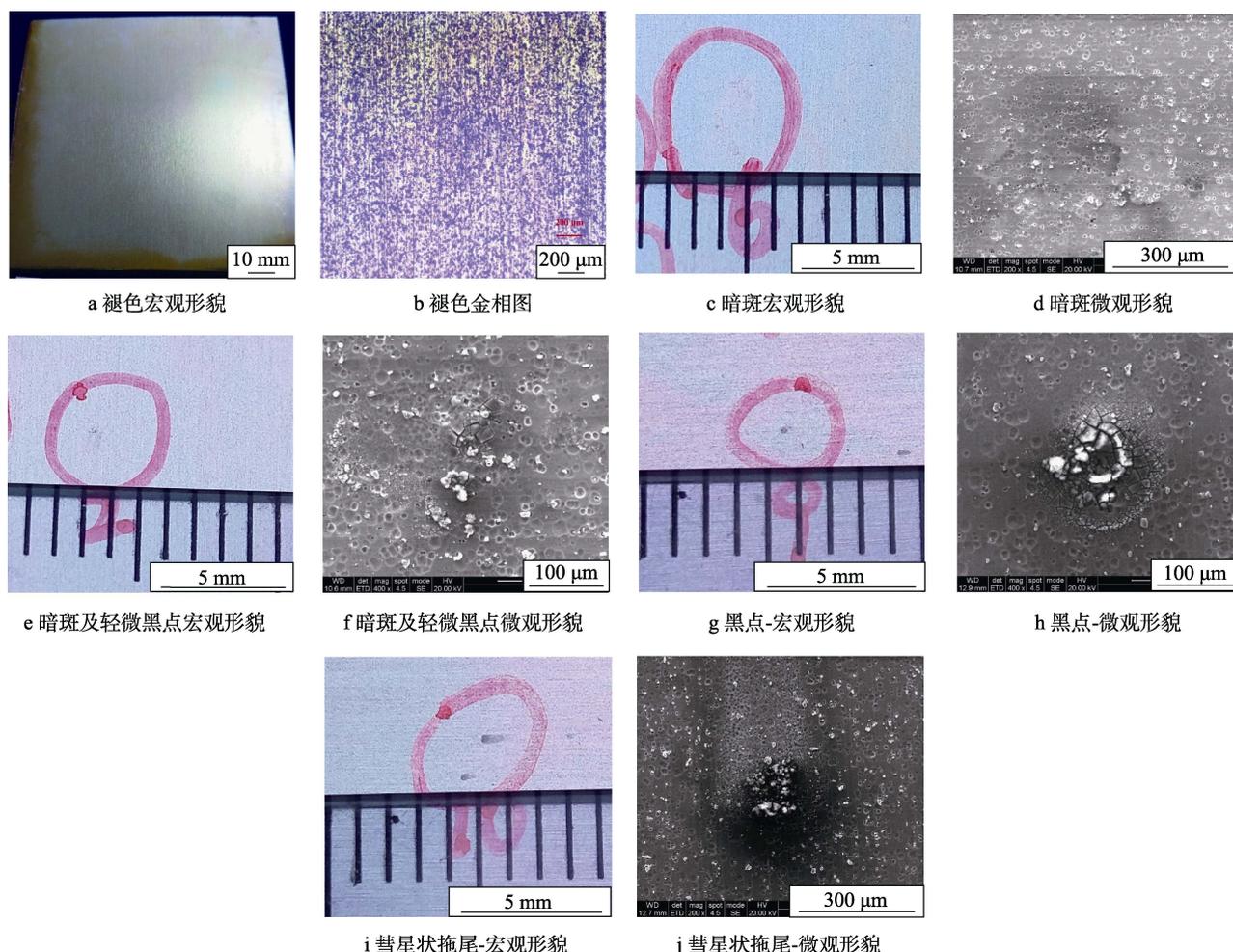


图 1 铝合金阿洛丁 1200S 化学转化膜典型宏微观腐蚀形貌

Fig.1 Typical macro and micro corrosion morphology of alodine 1200S chemical conversion coating on aluminum alloy: a) macroscopic fading morphology; b) fading metallographic; c) macro morphology of dark spot; d) micro morphology of dark spot; e) macro morphology of dark spot and slight black spot; f) micro morphology of dark spot and slight black spot; g) macro morphology of black spot; h) micro morphology of black spot; i) macro morphology of comet tail; j) micro morphology of comet tail

色变浅, 微观上膜层完好, 无明显变化。暗斑在宏观上表现为膜层褪色后局部颜色变深或发白所致的斑点, 暗斑与周围膜层颜色有一定差异, 但不明显, 微观上表现为膜层变色及少量肉眼难以发现的开裂破损。当膜层开裂扩展到  $50\ \mu\text{m}$  以上, 在宏观上隐约可见黑色或近似于黑色的斑点, 见图 1e。通过 SEM 微观观察可判断这些轻微黑点部位的化学转化膜层腐蚀开裂, 但在宏观上难以分辨轻微黑点与表面沾污的区别。当膜层腐蚀开裂进一步加深或扩展到  $0.15\ \text{mm}$  以上时, 宏观上可见黑色或近似于黑色的坑点(黑点), 颜色与周围膜层颜色形成鲜明对比, 微观上表现为腐蚀开裂破损, 并逐渐往外扩散, 黑点中心有明显腐蚀产物堆积。典型的彗星状拖尾(图 1i, 尺寸  $\geq 0.5\ \text{mm}$ )是黑点进一步腐蚀发展形成的长的或不规则灰黑色斑点, 彗星头部至尾部颜色逐渐变淡, 微观上表现为彗星头部腐蚀严重开裂破损, 且有明显腐蚀产物堆积, 头部至拖尾处开裂程度逐渐减弱。有些彗星状拖尾(如图 2a 所示)的彗星头部不明显, 只有彗星尾巴。SEM 微观观察(如图 2b 所示)发现, 彗星尾巴样部位的膜层腐蚀开裂破损, 局部有块状脱落, 偶有少量腐蚀产物从坑点冒出。

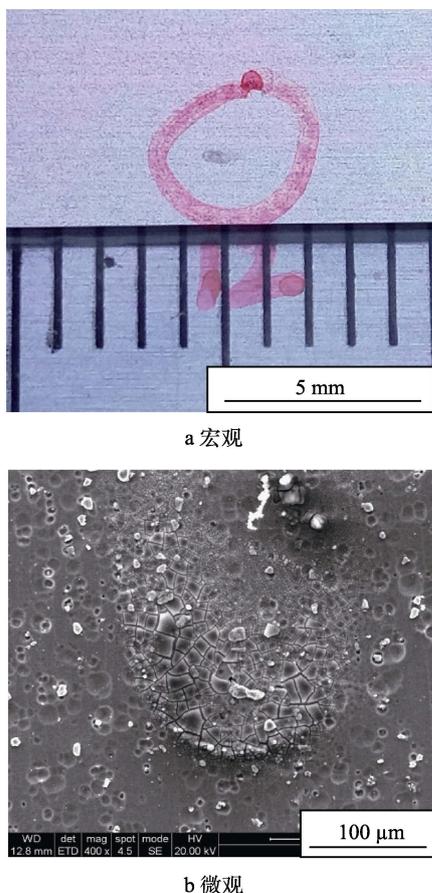


图 2 彗星尾巴宏观形貌

Fig.2 Macro and micro morphology of comet tail: a) macro-graph; b) micrograph

铝合金阿洛丁 1200S 化学转化膜典型腐蚀特征的宏微观形貌分析表明, 褪色和暗斑仅为化学氧化膜层表现状态发生变化, 不能判定为腐蚀点。尺寸  $>0.15\ \text{mm}$  的黑点和尺寸  $\geq 0.5\ \text{mm}$  的典型彗星状拖尾符合目视可见和基体腐蚀的特征, 可明确判定为腐蚀点。暗斑和轻微黑点特征、只有彗星尾巴特征应进一步结合能谱分析确定其腐蚀程度<sup>[9]</sup>。

## 2.3 能谱分析结果

采用能谱仪检测了原始完好阿洛丁 1200S 化学转化膜层, 盐雾试验后 2024-T3 裸材腐蚀点和化学转化膜上暗斑、暗斑及轻微黑点混合、黑点、彗星状拖尾、只有彗星尾巴等典型腐蚀特征部位的化学成分结果见表 1。原始化学转化膜主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  组成, 但由于原始膜层太薄, 仅  $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ , 能谱仪可透过膜层检测到部分基体元素, 使检测结果中 Al 元素占比达 70%以上, 氧元素占比为 21%~28%, Al 和 O 的原子个数比 ( $n_{\text{Al}}:n_{\text{O}}$ ) 约为 3:1。

与原始膜层相比, 7 个暗斑测点与 3 个暗斑及轻微黑点混合测点所含的化学元素仍为 Al、O、Cr、Cu, 未引入其他元素, 但 Al 元素明显减少, O 元素明显增加,  $n_{\text{Al}}:n_{\text{O}}$  逐渐减小, 绝大部分在 2:1~1:1 之间。根据原子个数比推算, 腐蚀介质已穿透表面微孔, 进入了氧化膜底部, 引起了少量腐蚀, 腐蚀极其轻微, 且主要发生于化学转化膜层下。能谱仪仍可透过膜层检测到基体 Al 元素, 使  $n_{\text{Al}}:n_{\text{O}}$  远小于铝合金裸材腐蚀产物中 Al 和 O 的原子个数比。

与暗斑、暗斑和轻微黑点部位的化学成分相比, 黑点部位的 Al 元素进一步减少, O 元素增加,  $n_{\text{Al}}:n_{\text{O}}$  从 3:1 逐渐减小到 1:2~1:3, 接近 2024-T3 裸材腐蚀产物的 Al、O 原子个数比。根据黑点部位 Al、O 原子个数比推算, 黑点部位处腐蚀已深达基体, 基体中 Al 腐蚀生成  $\gamma\text{-AlOOH}$ , 再生成  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。因  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  具有较强的吸附性, 盐雾中少量  $\text{Cl}^-$  吸附在腐蚀产物中。典型彗星状拖尾部位的化学成分极为接近黑点部位的化学成分, 是因为彗星头部腐蚀严重, 部分基体腐蚀产物冒出坑点, 其宏微观形貌与黑点基本一致。与典型彗星状拖尾、黑点部位的化学成分相比, 只有彗星尾巴部位的  $n_{\text{Al}}:n_{\text{O}}$  约为 2:3。根据原子个数比推算, 能谱仪已难以检测到基体 Al 元素, 彗星尾巴部位的化学成分主要由腐蚀产物和氧化膜贡献, 腐蚀介质已穿透表面微孔, 引起基体中 Al 腐蚀, 生成的腐蚀产物体积较大, 引起表层化学氧化膜开裂脱落。

综合宏微观形貌分析和 EDS 分析, 只有彗星尾巴特征符合目视可见和基体腐蚀的特征, 可判定为腐蚀点, 而暗斑及轻微黑点混合特征不能判定为腐蚀点。

表 1 2024 阿洛丁 1200S 试样盐雾试验后典型腐蚀特征部位的化学成分 (原子个数比)

Tab.1 Chemical composition (atomic number ratio) of typical corrosion features of 2024 Alodine 1200S sample after salt spray test

典型腐蚀特征	编号	O	Al	Cr	Cu	Cl
原始完好膜层	1	21.32	74.40	2.37	1.91	—
	2	26.02	70.14	1.97	1.87	—
	3	23.13	72.55	2.10	2.22	—
	4	27.85	68.50	1.77	1.88	—
	5	24.80	71.17	1.91	2.12	—
2024-T3 裸材腐蚀点	1	72.54	24.95	—	—	2.51
	2	72.31	25.79	—	—	1.91
	3	70.57	27.96	—	—	1.47
	4	72.76	25.74	—	0.98	0.52
	5	72.73	27.27	—	—	—
暗斑 (≥0.5 mm)	4-2	55.70	41.55	1.69	1.06	—
	4-5	31.15	65.51	1.24	2.10	—
	4-6	45.13	52.74	1.11	1.02	—
	4-7	40.85	56.26	1.46	1.44	—
	5-2	34.72	61.83	1.73	1.72	—
	5-3	48.23	49.13	1.35	1.29	—
	5-4	46.84	49.63	2.08	1.46	—
暗斑和轻微黑点	4-1	47.02	50.29	1.46	1.22	—
	4-3	40.41	56.60	1.80	1.19	—
	5-1	57.12	37.91	1.60	3.38	—
黑点 (≥0.15 mm)	4-4	52.23	44.73	1.51	1.16	0.36
	1-1	69.52	29.89	0.58	—	—
	2-1	62.81	34.44	1.38	0.70	0.67(S)
	2-2	69.09	28.40	1.02	0.75	0.75(S)
	2-3	62.63	34.74	1.27	0.75	0.61(S)
	3-2	73.39	25.28	—	—	1.33
只有彗星尾巴样 (≥0.50 mm)	3-1	50.45	45.20	1.82	1.98	0.55(Fe)
	3-4	56.92	40.63	0.67	0.67	0.56(0.51(S))
	3-5	56.13	40.27	1.46	1.50	0.64(S)
	3-6	56.15	35.31	1.17	0.93	6.44
	3-7	55.99	40.00	1.54	0.77	1.25(0.46(S))
	3-12	52.52	43.52	2.00	1.37	0.59(S)
	典型彗星状拖尾 (≥0.50 mm)	3-3	61.56	34.22	1.32	1.55
3-8		59.12	37.91	1.60	1.38	—
3-10		60.70	35.71	0.88	0.77	1.94
3-11		59.94	36.56	1.71	1.21	0.58(S)

## 2.4 电化学分析结果

基于目视可见和典型腐蚀特征部位的研究结果, 文中将尺寸  $\geq 0.15$  mm 的黑点评判为腐蚀点。为进一

步验证评判结果, 利用电化学测试方法研究了盐雾试验前后膜层出现黑点部位的耐蚀性能变化。2024 铝合金阿洛丁 1200S 化学氧化膜原始膜层与盐雾腐蚀后膜层有黑点试样的电化学阻抗谱如图 3 所示。可以看出, 与原始化学氧化膜层相比, 局部有黑点膜层试样的容抗弧半径大幅减小, 且低频区有轻微上翘现象。采用等效电路 R(QR)解析原始膜层的信息, 膜层阻抗约  $3.85 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ; 采用 R(QR)W 解析局部有黑点膜层的信息, 膜层阻抗约  $5.3 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 比原始膜层阻抗降低了 86.2%。说明此时涂层的耐蚀性大幅下降, 对  $\text{Cl}^-$  等侵蚀介质的阻挡能力大幅下降<sup>[10-13]</sup>。电化学分析结果表明, 涂层基体一旦出现了肉眼可见的黑点, 即可将黑点判断为腐蚀点。

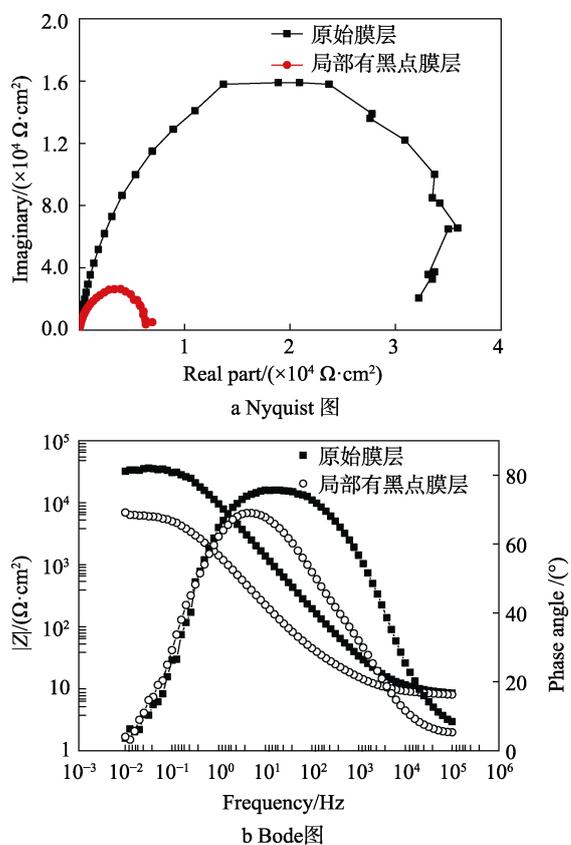
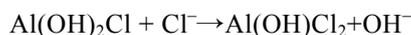
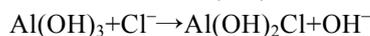


图 3 2024 阿洛丁 1200S 化学氧化膜的交流阻抗谱  
Fig.3 Impedance spectroscopy of 2024 alodine 1200S chemical oxide film

## 2.5 腐蚀机理探讨

铝合金阿洛丁化学转化膜层主要由  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) 和  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ( $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ) 组成。盐雾试验中,  $\text{Cl}^-$  容易吸附在化学转化膜层表面, 并在膜层微孔中扩散, 与氧化膜中  $\text{Al}(\text{OH})_3$  发生如下反应<sup>[14-16]</sup>:



整个过程中, 生成的  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})\text{Cl}_2$  部分

扩散至膜/溶液界面, 部分参与下一步反应,  $\text{Cl}^-$  缓慢通过微孔向内扩散。打通扩散路径后,  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  与铝基体作用, 生成  $\gamma\text{-AlOOH}$ , 然后, 在  $\gamma\text{-AlOOH}$  上又生成  $\text{Al}(\text{OH})_3$ <sup>[17-20]</sup>。由于迁移路径长, 扩散困难, 使得腐蚀产物在孔内聚集, 形成蚀核。对于较薄或有缺陷的氧化膜,  $\text{Cl}^-$  迁移到微孔底部较快, 蚀核生成较快。当聚积的腐蚀产物越来越多, 腐蚀产物将胀破氧化膜, 形成细小龟裂纹。当聚积的腐蚀产物未胀破氧化膜层时, 宏观上仅表现为变色或暗斑。当龟裂纹继续发展, 腐蚀深度加深, 宏观上逐渐可见黑色或近似于黑色的坑点。

### 3 结论

针对经过阿洛丁 1200S 化学转化处理的飞机用 2024 铝合金盐雾试验后的典型腐蚀特征, 可采用以下方法进行评判:

1) 仅出现暗斑特征, 无肉眼可见黑点, 或暗斑上有零星肉眼可见但难以分辨的轻微黑点 (尺寸  $\leq 0.15 \text{ mm}$ ), 不是铝合金基体的腐蚀特征, 不能判定为腐蚀点。

2) 出现肉眼可见的黑点 (尺寸  $\geq 0.15 \text{ mm}$ ), 典型彗星状拖尾或只有彗星尾巴等形貌, 说明该部位处化学转化膜和基材已腐蚀, 符合铝合金的基体腐蚀特征, 应判定为腐蚀点。

不同基材化学转化膜盐雾试验后的腐蚀特征有差异, 在实际生产检验检测过程中, 可根据需要针对多种基材开展盐雾试验, 采取类似方法研究腐蚀点的评判方法, 建立铝合金表面处理盐雾试验后腐蚀图谱和腐蚀点评定准则。

#### 参考文献:

- [1] 田野, 赵永岗, 刘春伟, 等. 阿洛丁 1200S 化学氧化膜耐蚀性影响因素探讨[J]. 航空科学技术, 2014, 25(1): 51-53.  
TIAN Ye, ZHAO Yong-gang, LIU Chun-wei, et al. Effect factors investigation of corrosion resistance for Alodin 1200S chemical conversion coating[J]. Aeronautical science & technology, 2014, 25(1): 51-53.
- [2] 穆强, 朱智勇, 张晓丽, 等. 铝及铝合金化学氧化在航空结构材料中的应用[J]. 山东化工, 2015, 44(4): 94-95.  
MU Qiang, ZHU Zhi-yong, ZHANG Xiao-li, et al. Application of chemical oxidation of aluminum and aluminum alloys in aerospace structural material[J]. Shandong chemical industry, 2015, 44(4): 94-95.
- [3] 刘兴平, 程红霞. 改善阿洛丁 1200S 化学转化膜耐蚀性的研究[J]. 材料保护, 1999, 32(11): 16-17.  
LIU Xing-ping, CHENG Hong-xia. Study on improving corrosion resistance of Alodine 1200S chemical conversion film[J]. Materials protection, 1999, 32(11): 16-17.
- [4] 隆小庆, 邵荣宽. 2024 铝合金化学转化膜与磷化底漆耐蚀性的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(3): 156-159.  
LONG Xiao-qing, SHAO Rong-kuan. Investigation of corrosion-resistance of chemical conversion film and phosphating primer on 2024 aluminum alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(3): 156-159.
- [5] 马登龙, 梁燕萍. 铝合金表面无铬导电转化膜工艺改进研究[J]. 表面技术, 2008, 37(5): 49-51.  
MA Deng-long, LIANG Yan-ping. Study on process improvement for chrome-free chemical conversion film on aluminum alloy[J]. Surface technology, 2008, 37(5): 49-51.
- [6] NADCAP- AC 7108, 化学处理审核标准[S].  
NADCAP- AC 7108, Nadcap audit criteria for chemical processing[S].
- [7] GB/T 20967—2007, 无损检测 目视检测 总则[S].  
GB/T 20967—2007, Non-destructive testing—Visual[S].
- [8] GB/T 11533—2011, 标准对数视力表[S].  
GB/T 11533—2011, Standard for logarithmic visual acuity charts[S].
- [9] 张琪, 汪笑鹤, 孟超. 铝合金的实验室盐雾试验腐蚀行为图像特征提取[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 79-83.  
ZHANG Qi, WANG Xiao-he, MENG Chao. Image feature extraction of corrosion of aluminum alloy laboratory salt spray test[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(2): 79-83.
- [10] 钱建刚, 李获, 王纯, 等. 镁合金阳极氧化膜腐蚀过程的电化学阻抗谱研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(8): 1280-1284.  
QIAN Jian-gang, LI Di, WANG Chun, et al. EIS study on corrosion process of anodized film on AZ91D magnesium alloy[J]. Raremetal materials and engineering, 2006, 35(8): 1280-1284.
- [11] 孙志华, 章妮, 蔡健平, 等. 航空铝合金涂层体系加速老化试验前后电化学阻抗变化[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 746-751.  
SUN Zhi-hua, ZHANG Ni, CAI Jian-ping, et al. Electrochemical impedance varieties of zinc yellow polypropylene coated aluminum alloy used in aircraft during the accelerated degradation test[J]. ACTA Aeronautica et astronautica sinica, 2008, 29(3): 746-751.
- [12] 张伟, 王佳, 赵增元, 等. 有机涂层失效过程的电化学阻抗和电位分布响应特征[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(4): 762-766.  
ZHANG Wei, WANG Jia, ZHAO Zeng-yuan, et al. Studies on deterioration process of organic coatings using EIS and SKP[J]. Chemical journal of chinese universities, 2009, 30(4): 762-766.
- [13] 马景灵, 文九巴, 卢现稳, 等. 铝合金阳极腐蚀过程的电化学阻抗谱研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(6): 373-376.  
MA Jing-ling, WEN Jiu-ba, LU Xian-wen, et al. Electro-

- chemical impedance spectroscopy of aluminum alloy anode during corrosion process[J]. Corrosion & protection, 2009, 30(6): 373-376.
- [14] 周和荣, 李晓刚, 董超芳. 铝合金及其氧化膜大气腐蚀行为与机理研究进展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 1-9.  
ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang. Review of atmospheric corrosion behavior and mechanism of aluminum alloys and its anodic film[J]. Equipment environmental engineering, 2006, 3(1): 1-9.
- [15] 卞贵学, 陈跃良, 张勇, 等. 飞机用铝合金腐蚀行为和腐蚀预测研究现状及问题分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 48-55.  
BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Research status and problems analysis on corrosion behavior and corrosion prediction of aircraft aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(5): 48-55.
- [16] 赵鹏辉, 左禹, 赵景茂. 几种 Al 合金阳极氧化膜的孔蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 15(2): 82-85.  
ZHAO Peng-hui, ZUO Yu, ZHAO Jing-mao. Pitting corrosion behavior of anodization film of three aluminum alloys[J]. Corrosion science and protection technology, 2008, 15(2): 82-85.
- [17] BOCKRIS J Q M, MINEVSKI L V. On the mechanism of the passivity of aluminum and aluminum alloys[J]. Journal of Electrochemical Society, 1993, 349(1-2): 375-414.
- [18] DASQUET J P, CAILLARD D, CONFORTO E, et al. Investigation of the anodic oxide layer on 1050 and 2024-T3 aluminum alloys by electron microscopy and electrochemical impedance spectroscopy[J]. Thin solid films, 2000, 371: 183-190.
- [19] 钱建才, 邹洪庆, 方敏, 等. 铝合金阳极氧化膜防护性能及失效规律研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 58-62.  
QIAN Jian-cai, ZOU Hong-qing, FANG Min, et al. Protective performance and failure behavior on anodized aluminum alloy[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(3): 58-62.
- [20] 邵敏华, 林昌健. Al 合金点腐蚀及研究方法[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 147-151.  
SHAO Min-hua, LIN Chang-jian. A review of investigation on pitting corrosion of aluminum alloys[J]. Equipment environmental engineering, 2002, 14(3): 147-151.