

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.02.004

适用于航空零部件的无氰镀锌工艺腐蚀性能研究

王尧伟¹, 邱媛¹, 杨堃¹, 周游¹, 徐浩天², 张烨元², 刘一楠²

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司 工程技术中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 为评估无氰镀锌工艺在航空零部件中的适用性, 对无氰镀锌试样进行了中性盐雾试验、酸性盐雾试验、酸性大气试验、周浸腐蚀试验及湿热试验, 并与传统氰化镀锌工艺进行对比。结果表明: 无氰镀锌经钝化后处理的试样在中性盐雾试验 720 h 内未出现红锈, 在酸性盐雾试验 480 h 内未出现红锈。无氰镀锌经钝化后处理的试样在周浸腐蚀试验 120 h 后腐蚀等级为 3 级, 优于氰化镀锌经钝化后处理试样的 7 级。无氰镀锌试样在酸性大气试验 4 个循环后仅出现轻微变色, 未出现白锈或红锈。无氰镀锌试样在湿热试验 15 个循环后仅出现少许点状白锈, 未出现红锈。研究结果表明, 无氰镀锌工艺在耐腐蚀性能方面优于或等同于传统氰化镀锌工艺, 适用于航空零部件的表面防护处理。

关键词: 无氰镀锌; 腐蚀性能; 盐雾试验; 酸性大气试验; 航空零件

中图分类号: TQ153

文献标志码: A

Investigation of corrosion behavior in cyanide-free zinc plating for aviation components

WANG Yaowei¹, QIU Yuan¹, YANG Kun¹, ZHOU You¹, XU Haotian², ZHANG Yeyuan², LIU Yinan²

(1. Engineering Technology Center, Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, China; 2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: To evaluate the applicability of cyanide-free zinc plating in aviation components, neutral salt spray tests, acid salt spray tests, acid atmosphere tests, periodic immersion corrosion tests, and damp heat tests were conducted on cyanide-free zinc-plated samples, with comparative analysis against traditional cyanide zinc plating processes. The results show that passivated cyanide-free zinc-plated samples exhibit no red rust within 720 h in neutral salt spray tests. Passivated cyanide-free samples show no red rust within 480 h in acid salt spray tests. In periodic immersion tests, passivated cyanide-free samples achieve a corrosion grade of 3 after 120 h, outperforming the grade 7 of passivated cyanide-plated samples. Cyanide-free samples display only slight discoloration without white/red rust after four acid atmosphere test cycles. After 15 damp heat test cycles, cyanide-free samples develop only minor spot-like white rust with no red rust. The study demonstrates that the cyanide-free zinc plating process exhibits equal or superior corrosion resistance compared to traditional cyanide processes, making it suitable for surface protection of aviation components.

Keywords: cyanide-free zinc plating; corrosion performance; salt spray test; acidic atmosphere test; aviation components

收稿日期: 2025-02-26

修回日期: 2025-04-30

通信作者: 王尧伟(1995—), 博士, 工程师, 研究方向为表面处理技术, e-mail: 1261828096@qq.com

引用信息: 王尧伟, 邱媛, 杨堃, 等. 适用于航空零部件的无氰镀锌工艺腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(2): 37-43.

WANG Yaowei, QIU Yuan, YANG Kun, et al. Investigation of corrosion behavior in cyanide-free zinc plating for aviation components[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(2): 37-43.

随着航空制造技术的快速发展和武器装备服役环境的日益严苛,航空零部件的耐腐蚀性能要求不断提高^[1-3]。镀锌作为一种常见的表面处理工艺,广泛应用于航空零部件的防腐保护中^[4]。通过在金属表面形成一层致密的锌镀层,镀锌工艺能够有效提高材料的耐腐蚀性能,延长其使用寿命^[5]。在传统的氰化镀锌工艺中,由于其生产过程中涉及有毒化学品^[6],且污染较为严重,目前已逐渐被无氰镀锌工艺所取代。无氰镀锌不仅有效避免了氰化物的危害,还具备较为优良的防腐蚀性能,成为航空制造领域中越来越重要的表面处理技术^[7]。

近年来,国内外学者对无氰镀锌工艺的镀层质量和废水处理等方面进行了研究。MALINOVIĆ BN等^[8]采用电凝聚法研究了无氰镀锌工艺中酸性和碱性镀锌后的漂洗废水处理。徐春红等^[9]通过对比无氰碱性镀锌和氰化镀锌工艺的均镀能力、深镀能力以及镀层腐蚀电位、耐蚀性和氢脆性等性能,系统评估了无氰碱性镀锌在航空标准件中的应用潜力。吴群英等^[10]研究了无氰镀锌溶液的分散能力、沉积特性以及镀层质量等工艺特性。吕玲等^[11]研究了不同金属杂质对碱性锌酸盐镀锌层结构及耐蚀性的影响,分析了杂质对镀液成分、镀层致密性及其耐蚀性能,为优化镀锌工艺提供了理论依据。然而,现有研究针对航空零部件在复杂环境下的腐蚀性能研究仍然不足,尤其是无氰镀锌工艺在酸性大气、湿热等极端环境中的表现尚未得到系统评估。

本文旨在研究适用于航空零部件的无氰镀锌工艺,并系统评估其在多种腐蚀环境下的性能表现。通过对无氰镀锌试样进行一系列腐蚀性能测试,包括中性盐雾试验、酸性盐雾试验、酸性大气试验、周浸腐蚀试验及湿热试验等,深入探讨无氰镀锌工艺在航空零部件中的适用性与可靠性。基于对试验结果的系统分析,本文将为无氰镀锌工艺在航空工业中的推广与应用提供依据。

1 实验方法

1.1 溶液成分、工艺条件及配制方法

无氰镀锌镀液在无氰电镀工艺中发挥着至关重要的作用。本文使用的无氰镀锌镀液配方来自中国航发北京航空材料研究院。其成分为:

镀锌后主要涉及的后处理工艺为磷化和钝化。其中磷化处理溶液的主要成分为:硝酸钡(Ba(NO₃)₂) 30~40 g/L,硝酸锌(Zn(NO₃)₂·6H₂O) 10~20 g/L,磷酸二氢锌(Zn(H₂PO₄)₂·2H₂O) 8~

12 g/L。磷化处理的温度控制在80~85 °C,时间为3~6 min。磷化处理后,镀锌层的颜色应为灰色至黑色。钝化处理溶液的主要成分为:铬酐(CrO₃) 3~7 g/L,硫酸(H₂SO₄) 0.1~0.5 mL/L,硝酸(HNO₃) 1~2 mL/L,高锰酸钾(KMnO₄) 0.10~0.15 g/L,冰醋酸(CH₃COOH) 0.5~2.0 mL/L,溶液pH应保持在0.9~1.4,温度为25 °C,钝化处理时间为5~20 s。带凹槽和小孔的零件放入钝化槽液中初期要抖动2~3次,然后固定不动直至钝化结束。钝化后的镀锌层应是连续的,颜色为带有彩虹色的金黄色。

表1 无氰镀锌镀液成分及工艺条件

Tab.1 Composition of cyanide-free zinc plating solution and process conditions

序号	溶液成分及项目	控制范围
1	氧化锌/(g·L ⁻¹)	12~18
2	氢氧化钠/(g·L ⁻¹)	110~175
3	CFX-A/(mL·L ⁻¹)	14~16
4	CFX-B/(mL·L ⁻¹)	1~3
5	温度/°C	15~45
6	电流密度(挂镀)/(A·dm ⁻²)	2~5
7	电流密度(滚镀)/(A·kg ⁻¹)	10~15
8	滚镀转速/(r·min ⁻¹)	6~12
9	阴阳极面积比	1:2~1:3

本次试验按照表1要求共配制无氰镀锌槽液200 L。电镀槽配有槽液自动过滤和阴极移动装置。无氰镀锌槽液的具体配制过程为:①在清洁后的镀槽中加入50 L的水;②称取28 kg的氢氧化钠加入槽中;③用少量水将3.4 kg的氧化锌调成糊状,并把糊状氧化锌边搅拌边缓慢加入氢氧化钠溶液中;④加水至约150 L体积,充分溶解,搅拌均匀,冷却;⑤加420 mL次级光亮剂CFX-A和56 mL主光亮剂CFX-B并搅拌;⑥补充纯水至200 L,打开过滤系统对槽液进行过滤;⑦采用铁板做阴极,以0.2~0.5 A/dm²的电流密度处理24 h;⑧试镀合格后,溶液即可备用。

1.2 工艺流程

本试验制备无氰镀锌零件或试件工艺流程为:镀前验收→预清洗→消除应力→吹砂→保护与装挂→除油→活化→镀前预处理→无氰镀锌→除氢→镀后处理→拆卸并干燥。

1.3 测试方法及试验材料

在本研究中,中性盐雾试验、酸性盐雾试验、

酸性大气试验、周浸腐蚀试验和湿热试验的试样材料为20号钢,其尺寸为50 mm×100 mm×(2±1) mm。各测试方法名称、试样材料、镀层厚度及测试标准见表2所示。

中性盐雾试验制备2组试样,表面处理方式分别为:①无氰镀锌+六价铬钝化;②氰化镀锌+六价铬钝化。按中华人民共和国国家标准人造气氛腐蚀试验-盐雾实验(GB/T 10125—2021)进行盐雾腐蚀试验^[12]。2组试样均有红锈出现或试验时间达到720 h时试验停止。试样镀层厚度8~12 μm,镀后钝化。

酸性盐雾试验制备4组试样,表面处理方式分别为:①无氰镀锌+钝化;②氰化镀锌+钝化;③无氰镀锌+磷化;④氰化镀锌+磷化。镀层厚度按9~15 μm控制。酸性盐雾试验所用盐为氯化钠,采用硫酸调制盐溶液,溶液的pH为3.5±0.5,盐溶液浓度为5%±1%,温度为(35±2) °C,溶液沉降率为(2±1) mL/(80 cm²·h),交替进行24 h喷盐雾和24 h干燥两种状态,试验共进行480 h,试验240 h不允许出现红锈,在第48、96、144、192、240和480 h时,观察记录试样的腐蚀形貌并拍照,按军用装备实验室环境试验方法-盐雾试验(GJB 150.11 A—2009)中的规定条件进行^[13]。

酸性大气试验制备2组试样,表面处理方式分别为:①无氰镀锌+钝化;②无氰镀锌+磷化。镀层厚度按9~15 μm。按照军用装备实验室环境试验方法-酸性大气试验(GJB 150.28—2009)的试验方法进行^[14],酸性大气试验溶液的pH为3.5±0.5,温度

(35±2) °C,溶液沉降率(2±1) mL/(80 cm²·h),喷雾2 h、贮存7 d为一个循环,共4次循环。每个循环结束后,观察记录试样的腐蚀形貌并拍照。

周浸腐蚀试验制备2组试样,表面处理方式分别为:①无氰镀锌+钝化;②氰化镀锌+钝化。镀层厚度按8~12 μm控制。周浸试验溶液的组成为5.0%±0.5%氯化钠,0.25%±0.05%过硫酸钠和0.02%的硫酸铵组成。试验溶液的pH应保持在4.8~5.2。溶液温度宜在(42±2) °C,相对湿度宜在75%±5%。试样的浸润周期为15 min,其中浸入溶液的时间为1.5 min。

其他试验条件按照中华人民共和国国家标准金属和合金的腐蚀-盐溶液周浸试验(GB/T 19746—2018)进行^[15]。航空工业对锌层的工艺要求为:周浸腐蚀11 h不得出现白锈,72 h不出现红锈,全部试片出现红锈后结束试验。记录每组试样开始出现腐蚀的时间、整个试验过程中试样的外观形貌变化,试验结束后对试样进行腐蚀等级评定。

湿热试验制备2组试样,2组试样表面处理方式分别为:①无氰镀锌+钝化;②无氰镀锌+磷化。镀层厚度按9~15 μm控制。湿热试验条件试验条件为:高温高湿阶段温度60 °C,相对湿度95%;低温高湿阶段温度30 °C,相对湿度95%。实验进行15个周期,每个试验周期为时长为24 h。每5个周期观察记录试样的腐蚀形貌并拍照。按照军用装备实验室环境试验方法-湿热试验(GJB 150.9A—2009)中7.3的规定方法进行试验^[16]。

表2 各测试方法名称、试样材料、镀层厚度及测试标准

Tab.2 Test methods, specimen materials, plating thickness and test standards

序号	测试方法名称	试样材料	镀层厚度/μm	测试标准
1	中性盐雾试验	20号钢	8~12	GB/T 10125—2021
2	酸性盐雾试验	20号钢	9~15	GJB 150.11A—2009
3	酸性大气试验	20号钢	9~15	GJB 150.28—2009
4	周浸腐蚀试验	20号钢	8~12	GB/T 19746—2018
5	湿热试验	20号钢	9~15	GJB 150.9A—2009

2 结果与讨论

2.1 中性盐雾试验

对①无氰镀锌+钝化处理;②氰化镀锌+钝化处理的两组试样进行中性盐雾试验。试样的镀层厚度控制在8~12 μm范围内。图1展示了两种镀锌层

在中性盐雾试验中的腐蚀形貌对比。

试验结果表明,无氰镀锌经钝化处理和氰化镀锌经钝化处理的试样在72 h均未出现白锈,336 h均未出现红锈,且720 h仍未出现红锈。满足航空工业工艺要求中锌钝化镀层72 h不得出现白锈,336 h不得出现红锈的要求。

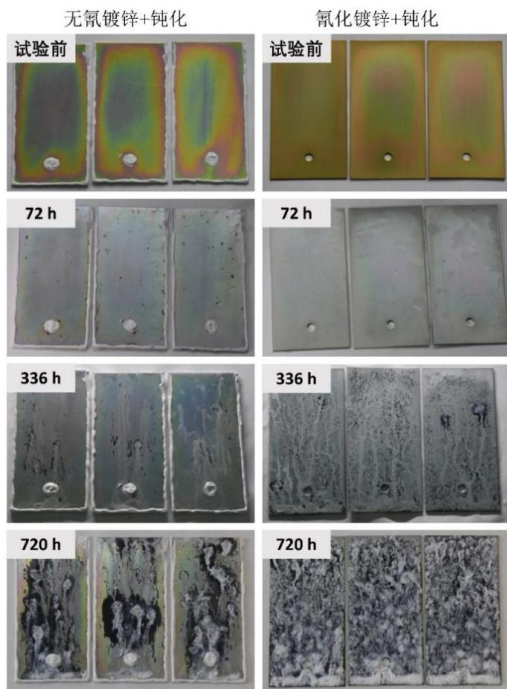


图 1 无氰镀锌和氰化镀锌中性盐雾试验结果

Fig.1 Neutral salt spray test results of cyanide-free galvanized and cyanide galvanized coatings

2.2 酸性盐雾试验

根据GJB 150.11A—2009进行酸性盐雾试验, 试验参数详见表3。本试验制备了4组试样, 分别为①无氰镀锌+钝化; ②氰化镀锌+钝化; ③无氰镀锌+磷化; ④氰化镀锌+磷化。镀层厚度控制在9~15 μm范围内。在试验过程中, 分别在48、96、144、192、240和480 h对试样的腐蚀形态进行了观察, 相关结果记录于图2中。

表 3 酸性盐雾试验条件

Tab.3 Conditions for the acidic salt spray test

试验阶段	试验参数		试验时间及循环方式
喷雾阶段	氯化钠溶液浓度	5%±1%	480 h (24 h 喷雾 +24 h 干燥, 为 1 个 循环, 共进行 10 循环)
	盐雾沉降率	(2±1) mL/ (80 cm ² ·h)	
	试验温度/°C	35±2	
	溶液 pH(硫酸调节)	3.5±0.5	
干燥阶段	温度/°C	15~35	
	相对湿度	≤50%	

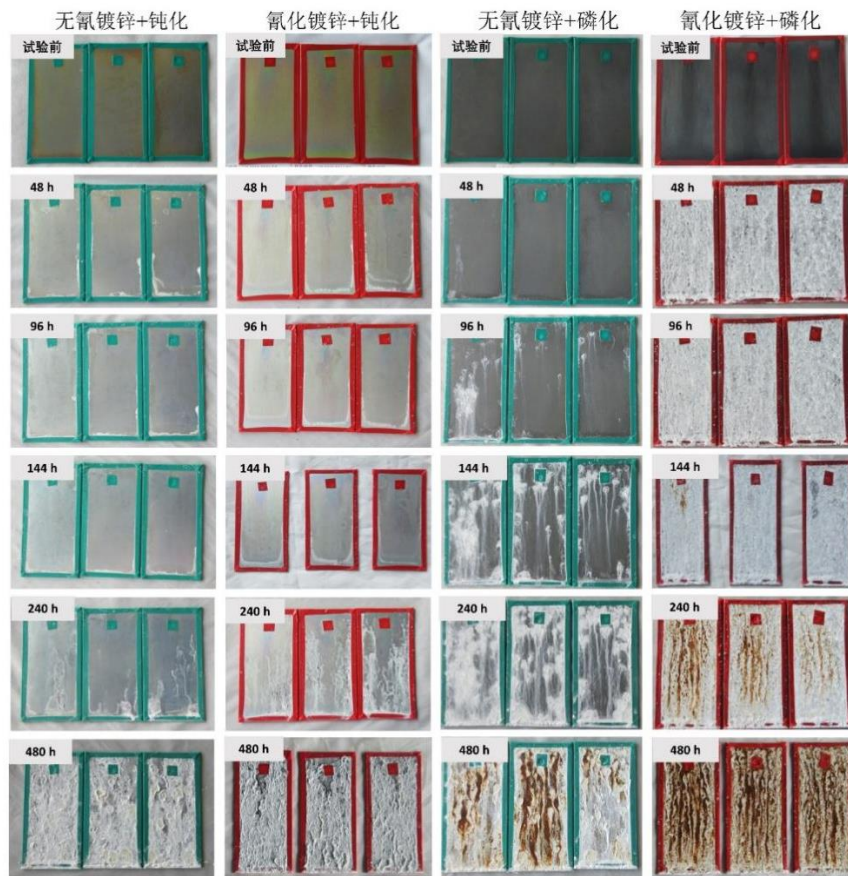


图 2 酸性盐雾试验试样形貌变化

Fig.2 Morphological changes of the specimens under acidic salt spray tests

试验结果表明,镀锌+钝化处理的试样在酸性盐雾实验中的耐蚀性优于镀锌+磷化处理的试样。无氰镀锌经钝化后处理和氰化镀锌经钝化后处理的试样在240 h内均未出现红锈,符合技术要求中240 h内不允许出现红锈的标准。然而,氰化镀锌+磷化的试样在144 h时出现了红锈,未能满足240 h不出现红锈的技术要求。至480 h时,无氰镀锌+钝化处理和氰化镀锌+钝化处理的试样依旧未出现红锈,而无氰镀锌+磷化处理和氰化镀锌+磷化处理的试样均出现了红锈。上述结果表明,无氰镀锌+钝化和氰化镀锌+钝化工艺在酸性盐雾环境中耐蚀性相

当,而无氰镀锌+磷化处理工艺的酸性盐雾耐蚀性优于氰化镀锌+磷化处理工艺。

2.3 周浸腐蚀试验

在周浸试验过程中,每24 h对试片进行外观检查和拍照,且不进行清洗。同时,每24 h测定一次溶液的pH,如pH超出4.8至5.2的设定范围,则使用5%的盐酸或5%的氢氧化钠溶液进行调整。当所有试片均出现红锈时,终止试验。试验完成后,根据破坏百分率判断腐蚀等级,具体方法如表4所示。周浸腐蚀试验中试样的形貌变化如图3所示,120 h周浸腐蚀试验后的腐蚀评级结果则见表5。

表4 外观腐蚀等级评定方法

Tab.4 Methods for rating apparent corrosion grades

腐蚀等级	1	2	3	4	5	6	7	8
腐蚀破坏百分率	≤0.03%	0.03%~0.1%	0.1%~0.3%	0.3%~1%	1%~3%	3%~10%	10%~30%	>30%

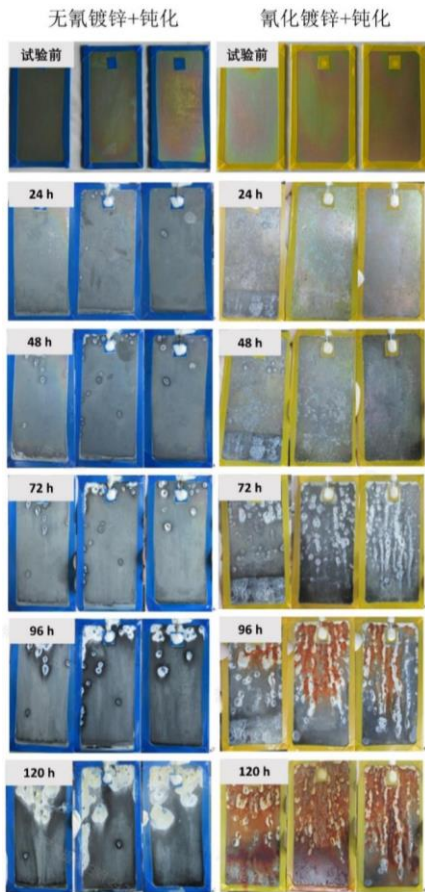


图3 周浸腐蚀试验试样形貌变化

Fig.3 Morphological changes of the specimens under cyclic immersion corrosion tests

周浸对比试验结果表明,无氰镀锌经钝化后处理和氰化镀锌经钝化后处理的试样均未在24 h内

表5 120 h 周浸腐蚀试验后腐蚀评级结果

Tab.5 Corrosion rating results after a 120 h cyclic immersion corrosion tests

序号	电镀工艺	后处理工艺	腐蚀等级
1	无氰镀锌	六价铬钝化	3级
2	无氰镀锌	六价铬钝化	3级
3	无氰镀锌	六价铬钝化	3级
4	氰化镀锌	六价铬钝化	7级
5	氰化镀锌	六价铬钝化	7级
6	氰化镀锌	六价铬钝化	7级

出现白锈。此外,两种工艺在72 h内均未出现红锈。两种工艺周浸试验出现白锈和红锈的时间相当,均符合技术要求中11 h内不得出现白锈,72 h内不得出现红锈的标准。试验持续120 h后,无氰镀锌加钝化处理的试样的腐蚀等级为3级,而氰化镀锌加钝化处理的试样腐蚀等级为7级。这表明在红锈出现后,无氰镀锌的腐蚀区域的扩散速度慢于氰化镀锌,无氰镀锌工艺在耐腐蚀性方面比氰化镀锌具备优势。

2.4 酸性大气试验

按照GJB 150.28—2009开展酸性大气试验。制备两组试样,第一组为无氰镀锌+钝化处理,第二组为无氰镀锌+磷化处理。镀层厚度控制在9~15 μm。酸性大气试验参数见表6。每个循环结束记录试样的腐蚀形貌,结果见图4。

表 6 酸性大气试验条件

Tab.6 Conditions for the acidic atmospheric tests

项目	试验参数
溶液	每 4 L 蒸馏水中分别加入 11.9 mg (6 μL)硫酸(浓度 95%~98%)和 8.8 mg (6 μL)硝酸(浓度 68%~71%)
溶液 pH(偏离)	3.5±0.5(稀硫酸或氢氧化钠调)
80 cm ² 平均沉降量	(2±1) mL/(80 cm ² ·h)
试验箱内温度	(35±2) °C
试验时间	喷雾 2 h+贮存 7 d 为 1 个循环, 共 4 个循环

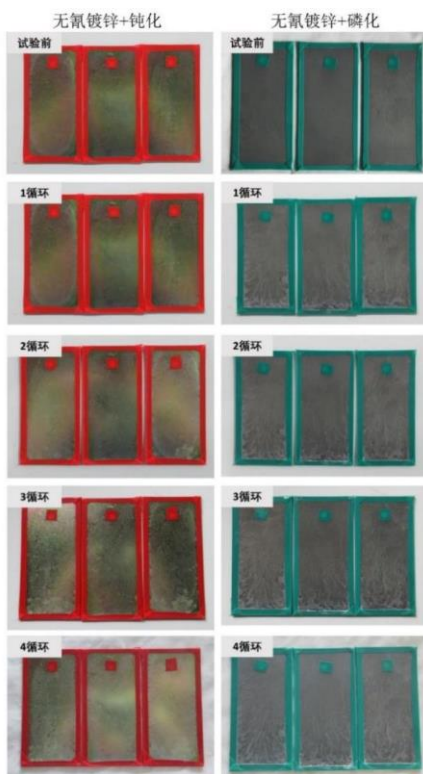


图 4 酸性大气试验试样形貌变化

Fig.4 Morphological changes of the specimens under acidic atmospheric tests

试验结果显示, 经过4个酸性大气循环后, 无氰镀锌试样加钝化后处理与无氰镀锌试样加磷化后处理均未出现白锈或红锈。腐蚀状态主要表现为轻微变色, 这表明无氰镀锌试样在抵抗酸性大气腐蚀方面满足标准要求。

2.5 湿热试验

按照GJB 150.9 A—2009中7.3的规定方法进行湿热试验。两组试样的表面处理方式分别为: ① 无氰镀锌+钝化; ② 无氰镀锌+磷化。镀层厚度控制在9~15 μm。湿热试验参数见表7。每5个周期记录试样的腐蚀形貌, 结果见图5。

表 7 湿热试验条件

Tab.7 Conditions for the humidity and heat tests

试验阶段	温度/°C	相对湿度	保持时间/h	循环
升温	30→60	95%	2	每周期 24 h, 共 15 周期
高温高湿	60	95%	6	
降温	60→30	95%	8	
低温高湿	30	95%	8	

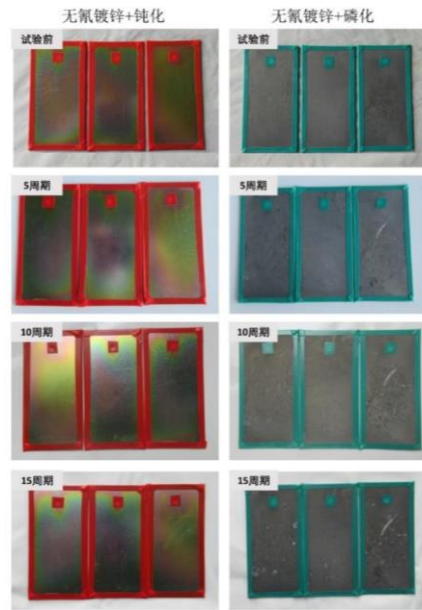


图 5 湿热试验试样形貌变化

Fig.5 Morphological changes of the specimens under humidity and heat tests

试验结果表明, 无氰镀锌加钝化后处理和无氰镀锌加磷化试样在湿热15循环后均未出现红锈, 腐蚀状态均为少许点状白锈。

2.6 氢脆性能试验

为测试无氰镀锌工艺的氢脆性能, 本文选用高强度钢30CrMnSiA进行氢脆性能试验。根据氢脆原理, 对镀锌后氢脆敏感的缺口试样施加静载荷进行持久拉伸, 以评价无氰镀锌和氰化镀锌的氢脆倾向及氢脆性能。镀锌层厚度控制在15~21 μm。拉伸试样的尺寸如图6所示。

对电镀后的试样进行(190±10) °C, 4 h的除氢操作。根据试样截面积计算试验加载载荷, 所加载荷

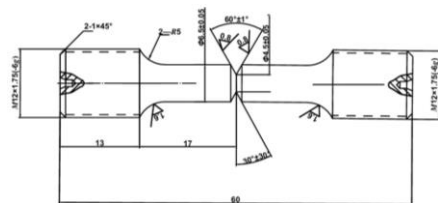


图 6 缺口圆棒拉伸试样图

Fig.6 Diagram of notched round bar tensile specimen

为镀锌前试样缺口截面积乘以缺口试样平均抗拉强度值的75%。经拉伸试验测得试样的抗拉强度为1 917 MPa。加载静力载荷200 h, 氢脆性能试验结

果如表8所示。经钝化与磷化两种后处理工艺下的所有镀锌试样在200 h静力拉伸后均未发生断裂, 表明无氰镀锌工艺氢脆性能满足航空工业工艺要求。

表8 无氰镀锌氢脆试验参数及结果

Tab.8 Cyanide-free zinc plating hydrogen embrittlement test parameters and results

工艺种类	无氰电镀+钝化			无氰电镀+磷化		
	项目	缺口直径/mm	加载力/N	200 h 拉伸结果	缺口直径/mm	加载力/N
1	4.532	23 192.8	未断裂	4.545	23 326.1	未断裂
2	4.529	23 162.1	未断裂	4.531	23 182.6	未断裂
3	4.526	23 131.4	未断裂	4.532	23 192.8	未断裂
4	4.532	23 192.8	未断裂	4.534	23 213.3	未断裂
5	4.531	23 182.6	未断裂	4.530	23 172.3	未断裂
6	4.535	23 223.5	未断裂	4.525	23 121.2	未断裂

3 结论

对无氰镀锌试样进行了中性盐雾试验、酸性盐雾试验、酸性大气试验、周浸腐蚀试验及湿热试验, 并与传统氰化镀锌工艺进行对比。

(1) 无氰镀锌经钝化后处理的试样在中性盐雾试验中72 h未出现白锈, 720 h未出现红锈, 满足航空工业对镀锌钝化镀层的工艺要求。

(2) 无氰镀锌经钝化后处理的试样在酸性盐雾试验中, 480 h内未出现红锈, 耐蚀性与氰化镀锌经钝化后处理的试样相当, 且显著优于磷化后处理试样。

(3) 周浸对比试验结果表明, 无氰镀锌经钝化后处理和氰化镀锌经钝化处理的试样均未在24 h内出现白锈, 72 h内出现红锈, 满足航空工业工艺要求。无氰镀锌经钝化后处理的试样在周浸腐蚀试验120 h后腐蚀等级评定为3级, 优于氰化镀锌经钝化后处理试样的7级。

(4) 无氰镀锌试样在酸性大气试验中, 经过4个循环后仅出现轻微变色, 未出现白锈或红锈; 在湿热试验中, 无氰镀锌试样经过15个循环后仅出现少许点状白锈, 未出现红锈。

参考文献

- [1] 陈卓, 金国, 崔秀芳, 等. 耐海洋环境腐蚀燃机热障涂层材料研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(13): 45-58.
- [2] 宋佳, 王璐, 袁福河, 等. 耐海洋环境腐蚀的航空发动机封严涂层技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2016, 1(14): 37-46.
- [3] 汪亚克, 刘建明, 李健, 等. 中低温可磨耗封严涂层耐蚀性能研究进展[J]. 热喷涂技术, 2024, 16(4): 12-22.
- [4] 秦智礼, 郭崇武. 高耐蚀性镀锌合金防护层在航空航

天领域的应用[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(9): 14-17.

- [5] 李会芬, 邹忠利, 李春龙. 镀锌层表面无铬钝化工艺的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 137-143.
- [6] 李雨, 刘定富, 舒刚. 氰化电镀废液的处理[J]. 环保科技, 2015, 21(1): 45-48.
- [7] 林少凯, 唐春, 朱小玲, 等. 环保型无氰镀锌工艺研究[J]. 广东化工, 2024, 51(18): 18-21.
- [8] MALINOVIĆ B N, PRERADOVIĆ M, BJELIĆ D, et al. Treatment of wastewater from cyanide-free zinc plating[J]. Contemporary Materials, 2024, 15(1): 40-52.
- [9] 徐春红, 郭群, 段前坤, 等. 航空标准件无氰碱性镀锌的可行性研究[J]. 电镀与精饰, 2016, 38(3): 42-46.
- [10] 吴群英, 许磊, 夏媛, 等. 无氰碱性镀锌工艺性能的研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 76-82.
- [11] 吕玲, 王力强, 廖广其, 等. 不同金属杂质对碱性锌酸盐镀锌层结构及耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(12): 17-22.
- [12] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验: GB/T 10125—2021[S]. 中国标准出版社, 2021.
- [13] 国家国防科技工业局. GJB 150.11A—2009 军用装备实验室环境试验方法第11部分: 盐雾试验[S]. 北京: 国防科工局, 2009.
- [14] 国家国防科技工业局. GJB 150.28—2009 军用装备实验室环境试验方法 第28部分: 酸性大气试验[S]. 北京: 国防科工局, 2009.
- [15] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183). 金属和合金的腐蚀 盐溶液周浸试验: GB/T 19746—2018[S]. 中国标准出版社, 2018.
- [16] 国家国防科技工业局. GJB 150.9A—2009 军用装备实验室环境试验方法 第9部分: 湿热试验[S]. 北京: 国防科工局, 2009.