

无氰镀镉工艺在航空领域的工程化应用研究

郭宇超^{1,*}, 张冲¹, 张帝¹, 李学敏¹, 马琨¹, 崔斌¹, 邱旭¹, 张骐²

1. 中国航发北京航科发动机控制系统科技有限公司, 北京 101100

2. 中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095

摘要: [目的] 针对氰化物镀镉工艺毒性大、污染严重的问题, 开展无氰镀镉工艺在航空制件上的工程化应用研究, 以推动绿色环保表面处理技术对传统高污染工艺的替代。[方法] 通过霍尔槽试验、连续生产试验、陈化试验, 以及扫描电镜(SEM)、盐雾试验、划格试验、氢脆性测试等多种手段, 研究了 CFG-SN 无氰镀镉的镀液分散能力、稳定性、镀速, 以及镀层的外观、微观形貌、结合力、耐腐蚀性与氢脆性, 并与氰化物镀镉工艺进行对比。[结果] CFG-SN 无氰镀镉液成分稳定, 最佳工艺参数为电流密度 1 A/dm²、pH 6.5~7.0; 其镀速与分散能力与氰化物镀镉相当, 镀层外观光亮略低但仍符合航空工业标准, 不过存在一些微观孔隙; 镀层结合力良好, 耐盐雾腐蚀性能满足 HB 5362-1986 要求, 氢脆性合格。[结论] 无氰镀镉工艺在关键性能上接近甚至达到氰化物镀镉水平, 且具有环保优势, 具备在航空领域工程化应用并替代氰化物镀镉的可行性, 符合绿色制造发展要求。

关键词: 航空领域; 高强度; 无氰镀镉; 分散能力; 稳定性; 耐腐蚀性; 氢脆性

中图分类号: TQ153.1+7

文献标志码: A

文章编号: 1004-227X(2026)04-0050-08

Industrial application of cyanide-free cadmium plating technology in aviation field

GUO Yuchao^{1,*}, ZHANG Chong¹, ZHANG Di¹, LI Xuemin¹, MA Kun¹, CUI Bin¹, QIU Xu¹, ZHANG Qi²

1. AECC Beijing Hangke Engine Control System Technology Ltd., Beijing 101100, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract: [Objective] To address the issues of high toxicity and severe pollution associated with cyanide cadmium plating, this study investigates the engineering application of cyanide-free cadmium plating on aerospace components, aiming to promote the replacement of traditional highly polluting processes with green and environmentally friendly surface treatment technologies. [Method] The throwing power, stability, and plating rate of the CFG-SN cyanide-free cadmium plating bath, as well as the appearance, microstructure, adhesion, corrosion resistance, and hydrogen embrittlement of Cd coatings, were studied through Hull cell test, continuous production test, aging test, scanning electron microscopy (SEM), salt spray test, cross-cut adhesion test, and hydrogen embrittlement test. A comparative analysis was conducted with cyanide cadmium plating. [Result] The CFG-SN cyanide-free cadmium plating bath exhibited stable composition, with optimal process parameters of current density 1 A/dm² and pH 6.5-7.0. The plating rate and throwing power of cyanide-free plating were comparable to those of cyanide cadmium plating. Although the cyanide-free Cd coating brightness was slightly lower than that of cyanide Cd coating, it still met aerospace industry standard, despite the presence of some microscopic pores. The Cd coating demonstrated good adhesion, corrosion resistance satisfying HB 5362-1986 requirements, and acceptable hydrogen embrittlement performance. [Conclusion] The cyanide-free cadmium plating process achieves key performance indicators close to or on par with cyanide cadmium plating, while offering significant environmental advantages. It demonstrates feasibility for engineering application in the aerospace field as a replacement for cyanide cadmium plating, aligning with the requirements of green manufacturing development.

Keywords: aerospace field; high-strength steel; cyanide-free cadmium plating; throwing power; stability; corrosion resistance; hydrogen embrittlement

镉是一种具有银白色金属光泽的软质金属, 其标准电极电位约为-0.40 V(相对于标准氢电极, 略正于铁的标准电极电位(-0.44 V)。然而在含氯离子(如 NaCl 溶液)环境中, 镉的腐蚀电位会负移至铁以下, 故钢铁基体表面 Cd 镀层的防护机制随服役环境改变而有所不同。在中性盐雾及碱性气氛条件下, 镀镉

收稿日期: 2025-12-05 **修回日期:** 2025-12-16

第一作者: 郭宇超(1997-), 男, 工程师, 研究方向为表面处理。

通信作者: 张冲(1984-), 男, 工程师, 研究方向为表面处理。

引用格式: 郭宇超, 张冲, 张帝, 等. 无氰镀镉工艺在航空领域的工程化应用研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 50-57.

GUO Y C, ZHANG C, ZHANG D, et al. Industrial application of cyanide-free cadmium plating technology in aviation field [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 50-57.

钢铁件具有良好的耐腐蚀性能^[1]。在高温高湿的海洋大气环境下，异种材料间若存在较大的腐蚀电位差，极易构成腐蚀原电池从而加速腐蚀，常规耐蚀镀层在此类苛刻条件下的防护能力往往受限。Cd 镀层既能凭借其致密结构有效阻隔腐蚀介质接触钢铁基体，又因其在海洋大气中的腐蚀电位略低于铁而转变为阳极性镀层，对钢铁实施牺牲阳极保护。此时，铁与镉之间适宜的电位差足以驱动有效的阴极保护，却又不致因电位差过大而令镀层过快消耗。此外，Cd 镀层不仅具备自润滑特性，还能与铝合金材料兼容，故特别适用于航空航天领域螺纹等连接件的腐蚀防护^[2]。

航空工业当前广泛采用的氰化物镀镉工艺虽具有镀液性能稳定和维护简单、镀层品质好等优点，但其使用的剧毒氰化物对人员健康与生态环境危害极大^[3-6]。面对日益严苛的绿色制造政策要求，特别是《安全生产治本攻坚三年行动方案(2024-2026年)》的正式推行，研发无氰镀镉替代技术已势在必行^[7-11]。本研究立足笔者所在公司对高污染表面处理工艺绿色替代的迫切需求，针对无氰镀镉层的综合性能进行了检测与评估，以期为实现高污染氰化物工艺的绿色替代提供关键的数据支撑。

1 实验

1.1 无氰镀镉配方和工艺

选用中国航发北京航空材料研究院航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室的 CFG-SN 无氰电镀镉工艺，配方和工艺条件如表 1 所示。

表 1 无氰镀镉工艺配方

Table 1 Bath composition and process conditions of cyanide-free cadmium plating

项目	控制范围	试验取值
Cd ²⁺ (以 CdCl ₂ ·2.5H ₂ O 形式加入)	15 ~ 25 g/L	20 g/L
配位剂 CFG-A	60 ~ 80 mL/L	70 mL/L
配位剂 CFG-B	200 ~ 260 mL/L	230 mL/L
配位剂 CFG-D	5 ~ 15 mL/L	10 mL/L
氯化铵	100 ~ 130 g/L	115 g/L
乙酸铵	20 ~ 30 g/L	25 g/L
pH	6.0 ~ 7.0	6.8
温度	10 ~ 40 °C	30 °C
电流密度	0.5 ~ 1.5 A/dm ²	1 A/dm ²
阳极材料	Cd-2 或 Cd-3	Cd-2
阴阳极面积比	1 : (2 ~ 3)	1 : 2

1.2 工艺流程

采用航空领域常用高强度钢 30CrMnSiA 和 1Cr17Ni2 作为基材，尺寸均为 100 mm × 50 mm × (1 ~ 4) mm。无氰镀镉和氰化物镀镉的工艺流程都为如下：镀前验收→有机除油→消除应力→保护→装挂→电解除油→流动热水洗→流动冷水洗→弱浸蚀→流动冷水洗→预镀镍(按需)→流动冷水洗→电镀镉→流动冷水洗→干燥→拆解和去保护→除氢→光化→流动冷水洗→低铬钝化→流动冷水洗→干燥。

1.3 性能检测

1.3.1 镀液分散能力

通过霍尔槽试验对镀液进行分散能力(T)测试。采用 267 mL 霍尔槽，阴极为 100 mm × 65 mm × 0.2 mm 的铜片，阳极为 Cd-2 镉板，电流为 1 A，电镀时间为 20 min。电镀完毕，利用 Fischer XDL230 X 射线测厚仪测量试片近端 2 ~ 10 cm 处的镀层厚度，取样间距 1 cm，依次记为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 、 δ_5 、 δ_6 、 δ_7 、 δ_8 、 δ_9 。根据式(1)计算镀液分散能力(T)。

$$T = \frac{\delta_i}{\delta_2} \quad (1)$$

1.3.2 镀速

根据 1.3.1 的厚度检测结果，计算霍尔槽试片上不同部位(即不同电流密度下)的镀速(v)。

1.3.3 外观

以 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片为基材,在试验工艺参数下进行镀镉并钝化,然后在天然散射光线或无反射光的白色透射光下目视检查镀层外观,注意光照度不应低于 300 lux。

1.3.4 结合力

以 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片为基材,在试验工艺参数下进行镀镉并钝化,得到 8~12 μm 的 Cd 镀层。采用划格法检测镀层结合力:先用 30°锐刃硬质钢划刀在镀层表面划若若干条间距约 2 mm 的平行线,划痕深达基体,再划若若干条与之垂直的线,然后采用耐高温美纹胶带粘贴于镀层表面,用手压出多余气泡使胶带完全贴合镀层,随后将胶带快速揭起。各线之间任一部位无镀层剥落,判定镀层结合力合格。

1.3.5 耐腐蚀性

以 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片为基材,在试验工艺参数下进行镀镉并钝化,得到 8~12 μm 的 Cd 镀层。参照 GB/T 10125-2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》进行中性盐雾腐蚀试验。

1.3.6 微观形貌

以 30CrMnSiA 试片为基材,在试验工艺参数下进行镀镉并钝化,完成制样后使用日本电子 7900F 型扫描电子显微镜(SEM)观察镀层的表面形貌。

1.3.7 氢脆性

选用 1Cr17Ni2(抗拉强度 920 MPa)、30CrMnSiA(抗拉强度 1 930 MPa)和 30CrMnSiNi2A(抗拉强度 2 536 MPa)材质的缺口圆棒拉伸试样为基体,在试验工艺参数下进行镀镉,然后在(190 ± 10) °C 的温度下除氢 24 h,得到 12~18 μm 的 Cd 镀层。参照 HB 5067.1-2005《镀覆工艺氢脆试验 第 1 部分:机械方法》对不同材质的试棒进行拉伸试验,其中 1Cr17Ni2 镀镉试棒使用悬臂梁应力腐蚀试验机,30CrMnSiA 与 30CrMnSiNi2A 镀镉试棒则采用 WDML-50 型慢应变速率拉伸应力腐蚀试验机。

1.3.8 槽液稳定性

1.3.8.1 连续生产试验

配制 500 L 标准镀液,进行为期 2 个月的连续生产试验,每个工作日至少施镀 1 次并静置过夜,每周分析 1 次,记录镀液中各成分含量变化。

1.3.8.2 陈化试验

配制 2 份 1 L 标准镀液,分别静置于室温避光暗处和自然光下。每周分析 1 次,记录镀液中各成分含量变化。试验期间仅补加去离子水,以维持镀液体积为 1 L。

2 结果与讨论

2.1 镀液分散能力和镀速

表 2 所示为霍尔槽试验结果。从近端到远端(即随电流密度减小),Cd 镀层厚度逐渐减小。当电流密度大于 3.5 A/dm² 时,霍尔槽试片出现镀层发黑、变粗糙现象;当电流密度为 0.50~3.50 A/dm² 时,镀层完整细致,说明该体系无氰镀镉液可在该电流密度范围内进行有效施镀。取距离近段 7 cm 处(对应电流密度为 1.02 A/dm²)的镀层厚度 δ_6 ,采用式(1)计算得到无氰镀镉液的分散能力约为 74%,氰化物镀镉在相同条件下的分散能力约为 83%,说明该无氰镀镉液的分散能力与氰化物镀镉液接近,满足实际生产的需求。

根据表 2 的厚度数据可计算得到不同电流密度下的镀速。如图 1 所示,随着电流密度升高,镀速逐渐增大。当电流密度从 0.50 A/dm² 升至 1.50 A/dm² 时,镀速快速增大,施镀过程的反应较平和。电流密度大于 1.50 A/dm² 后,镀速增长变慢,电镀过程中明显可见有大量气泡析出,此时阴极析氢严重,阴极电流效率降低,不仅导致镀速的增幅减小,还易造成氢脆。综合考虑,宜将电流密度控制在 1.00 A/dm² 左右。

2.2 镀层性能

2.2.1 外观

图 2 所示为 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片经不同体系镀镉钝化后的外观。可见几组试片镀镉层均为彩虹色,且结晶细致均匀,有金属光泽,均满足 HB 5036-1992《镉镀层质量检验》的要求。相对而言,

表 2 霍尔槽试片不同部位的镀层厚度
Table 2 Coating thickness at different positions of the Hull cell specimen

近端距离/cm	电流密度/(A·dm ⁻²)	厚度/μm
2	5.10	11.2
3	3.50	10.0
4	2.90	9.4
5	1.90	8.8
6	1.40	8.0
7	1.02	7.4
8	0.67	6.6
9	0.37	5.2
10	0.10	2.4

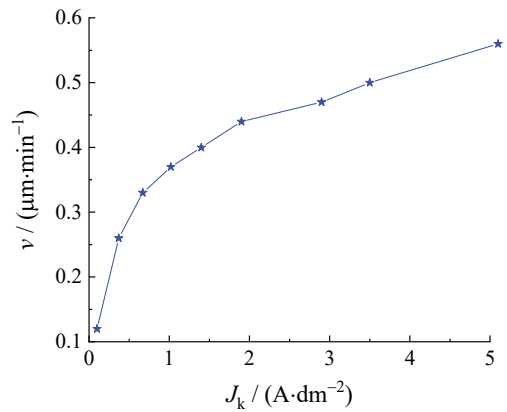


图 1 不同电流密度下无氰镀镉工艺的镀速
Figure 1 Plating rate of cyanide-free cadmium plating at different current densities

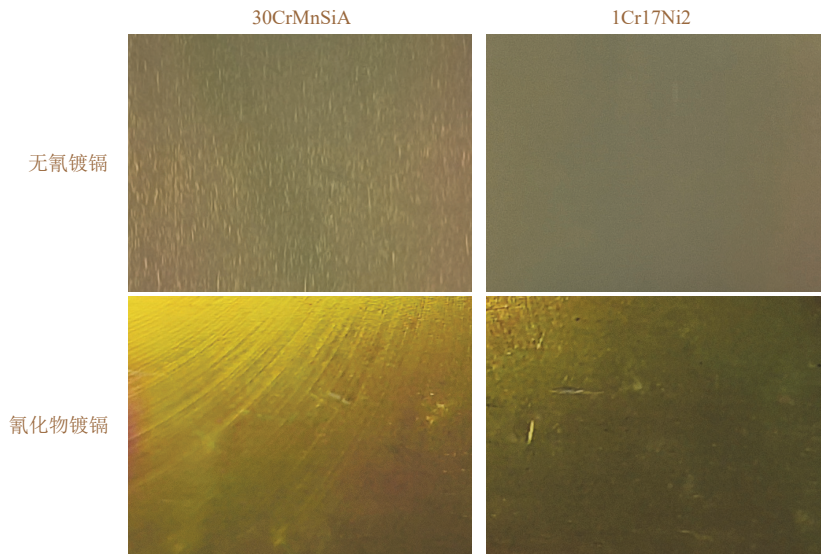


图 2 不同基体表面不同体系 Cd 镀层的外观
Figure 2 Appearance of Cd coatings on different substrates plated from different baths

无氰镀镉层的光亮度不如氰化物镀镉层，并且氰化物镀镉层为银白色，而无氰镀镉层为灰白色，不过可通过后续光化处理使其呈现显银白色。

2.2.2 结合力

如图 3 所示，划格试验后 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 基体上的无氰镀镉层均无起皮、起泡现象，结合力良好。

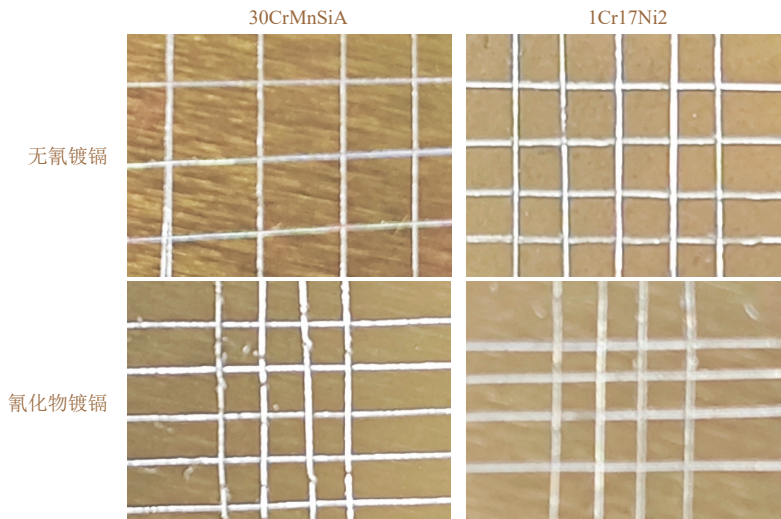


图 3 不同基体表面不同体系 Cd 镀层的划格试验结果
Figure 3 Cross-cut test results of Cd coatings on different substrates plated from different baths

2.2.3 耐蚀性

1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 的镀镉 + 钝化试片经中性盐雾腐蚀试验不同时间后的外观如图 4 和图 5 所示。经过 96 h 的盐雾腐蚀后, 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片表面的无氰镀镉层和氰化物镀镉层表面的钝化膜颜色均变淡, 但未出现白锈现象, 均满足 HB 5362-1986 《飞机常用金属防护层耐蚀性 质量检验》的要求。经过 360 h 的盐雾腐蚀后, 所有试片的 Cd 镀层均未出现红锈, 但无氰镀镉 30CrMnSiA 试片表面出现腐蚀坑点, 均符合 HB 5362-1986 标准。盐雾试验 1 000 h 后, 无氰镀镉的 1Cr17Ni2 和 30CrMnSiA 试片, 表面都只出现腐蚀坑点, 无白锈、红锈, 满足标准要求。

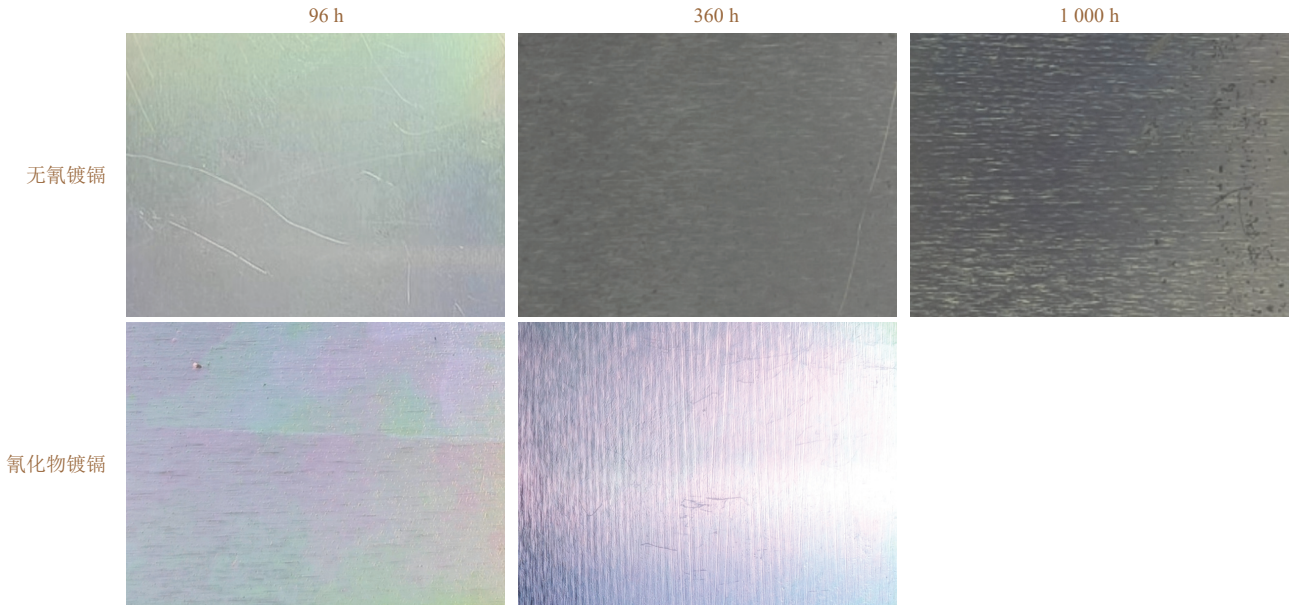


图 4 30CrMnSiA 表面不同体系 Cd 镀层 NSS 试验不同时间后的外观

Figure 4 Appearances of Cd coatings on 30CrMnSiA plated from different baths after NSS test for different durations



图 5 1Cr17Ni2 表面不同体系 Cd 镀层 NSS 试验不同时间后的外观

Figure 5 Appearances of Cd coatings on 1Cr17Ni2 plated from different baths after NSS test for different durations

2.2.4 微观形貌

图 6 为 30CrMnSiA 试片表面无氰镀镉层和氰化物镀镉层的微观表面形貌。无氰镀镉层和氰化物镀镉层的晶粒大小都较均匀, 但无氰镀镉层中微观孔隙较多, 而氰化物镀镉层整体更加致密。虽然无氰镀镉层的微观孔隙较多, 但从耐蚀性检测结果可知其耐蚀性良好, 并且微孔的存在有利于除氢时氢原子的排出。

2.2.5 氢脆性

参照 HB 5067.1-2005 对不同材质镀镉试棒进行拉伸试验, 结果表明, 1Cr17Ni2 镀镉试棒在 10 771 N 载荷下持续拉伸 200 h 未断裂; 30CrMnSiA 镀镉试棒在 23 180 N 载荷下持续拉伸 200 h 未断裂; 30CrMnSiNi2A

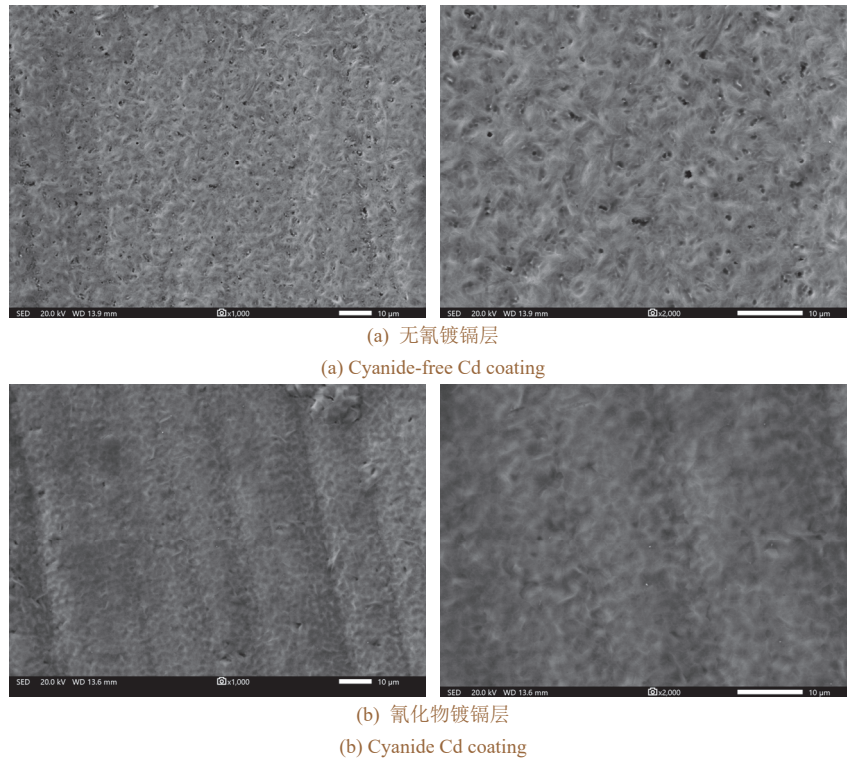


图 6 无氰镀镉层与氰化物镀镉层的表面形貌

Figure 6 Surface morphologies of Cd coatings plated from cyanide-free and cyanide baths

镀镉试棒在 30 445 N 载荷下持续拉伸 200 h 未断裂。这说明该无氰镀镉工艺的氢脆性可满足航空领域绝大多数镀镉制件的要求。

2.3 槽液稳定性

2.3.1 连续生产试验结果

图 7 为连续生产试验过程中无氰镀镉液中各主要成分浓度和 pH 随时间的变化。从中可见，在为期 2 个月连续生产试验中，配位剂 CFG-A 和配位剂 CFG-B 的浓度在滴定误差范围内基本保持稳定，而镉离子浓度因阳极镉板的持续溶解得到补充，整体在误差范围内呈缓慢的下降趋势；相比之下，pH 的波动较大，并且试验期间发现在 pH 为 6.5 时，一些形状复杂的制件表面镀层开始出现局部粗糙、毛刺乃至分层等现象。因此，生产过程中需密切监测 pH 的变化并及时进行调整。

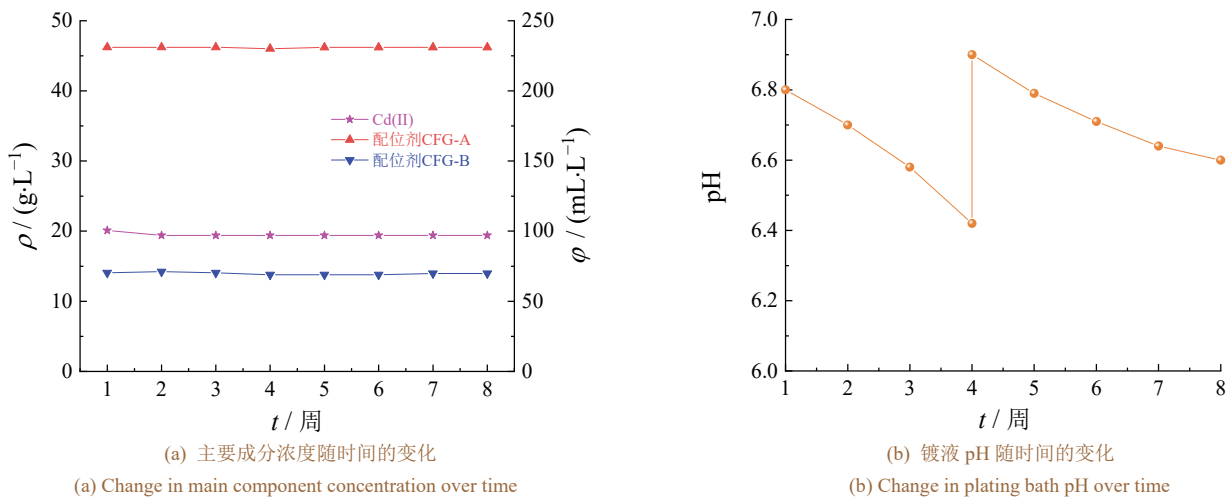


图 7 连续生产试验结果

Figure 7 Continuous production test result

2.3.2 陈化试验结果

图 8 分别是无氰镀镉液在避光和自然光照条件下主要成分浓度和 pH 的变化。经长时间存放后无氰镀镉液中的 Cd(II)、配位剂 CFG-A 和配位剂 CFG-B 在实验误差范围内总体保持稳定，基本不受光照与存放

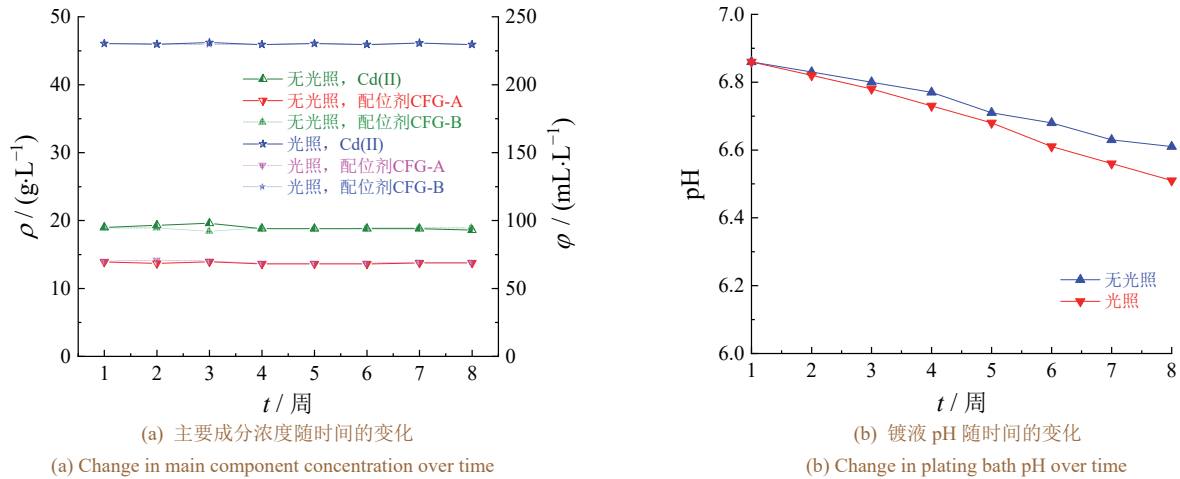


图8 陈化试验结果
Figure 8 Aging test result

时间的影响。然而, 镀液 pH 呈现缓慢下降趋势, 这主要与镀液中氨的挥发有关。在光照条件下 pH 的下降略为明显, 可能是因为氨在光照条件下挥发更快。

3 结论

对比了无氰镀镉工艺与氰化物镀镉工艺的镀液性能与镀层性能, 以探究无氰镀镉工艺在航空领域工程化应用的可行性, 得出以下结论:

- 1) 本研究采用的无氰镀镉体系综合性能良好, 在镀液稳定性、镀速及分散能力方面均与传统氰化物镀镉工艺相近。所得镀层外观、结合力、耐蚀性及氢脆性均满足航空工业领域相关标准的要求, 具备替代传统氰化物镀镉的工程化应用可行性。
- 2) 该无氰镀镉体系的最佳工艺参数为: 电流密度 1 A/dm², pH 6.5 ~ 7.0。实际生产中需重点关注镀液 pH 的稳定性, 其下降易导致复杂零件表面镀层出现粗糙、毛刺等现象, 因此应定期监测与调整镀液 pH。
- 3) 无氰镀镉层在微观结构上虽较氰化物镀镉层孔隙稍多、致密性略差, 但仍表现出良好的耐蚀性, 并且微孔结构有利于除氢过程中氢的逸出, 对降低氢脆风险具有积极的意义。
- 4) 槽液稳定性试验表明, 该体系无氰镀镉液的主要成分在连续生产及长期静置过程中均较为稳定, 具备较好的生产适用性。

无氰镀镉作为一种绿色电镀技术, 在航空航天领域正逐步替代传统氰化物电镀, 用于发动机部件、连接器及轻合金的防腐与功能化处理。该工艺在保持优异耐蚀性、可靠性与高温适应性的同时, 显著降低了环境和安全风险, 符合日趋严格的环保法规与可持续制造要求, 已成为支撑航空航天绿色发展的重要工艺之一。目前, 笔者所在单位已实现该无氰镀镉工艺的工程化应用与初步推广, 实践表明其能够满足相关标准与实际生产要求, 具备全面替代氰化物镀镉工艺的技术可行性。

参考文献:

[1] 张玉清, 陈同彩, 王春霞, 等. 添加剂对无氰镀镉工艺性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43 (8): 16-20.
ZHANG Y Q, CHEN T C, WANG C X, et al. Effect of additives on the performance of cyanide-free cadmium plating [J]. Plating and Finishing, 2021, 43 (8): 16-20.

[2] 宋宜强, 皮志超, 张泽齐, 等. 钢铁表面无氰镀镉及其性能研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51 (5): 48-53, 73.
SONG Y Q, PI Z C, ZHANG Z Q, et al. Progress in cyanide-free cadmium plating on steel surface and its properties [J]. Machine Building & Automation, 2022, 51 (5): 48-53, 73.

[3] 郭崇武. 新型酸性无氰镀镉工艺的开发研究[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35 (5): 250-255.
GUO C W. Development research on novel acidic cyanide-free cadmium plating process [J]. Electroplating & Finishing, 2016, 35 (5): 250-255.

[4] 徐长云, 杨昭, 刘爽华. 脉冲镀镉工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2020, 40 (3): 19-22.
XU C Y, YANG Z, LIU S H. Study on pulse cadmium electroplating process [J]. Electroplating & Pollution Control, 2020, 40 (3): 19-22.

[5] 翟敏, 安浩. 工艺参数对镀镉层厚度的影响研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15 (1): 18-19.
ZHAI M, AN H. Effect of electroplating process parameters on thickness of cadmium coating [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15 (1): 18-19.

[6] 李涛. 降低钢铁零件在镀镉过程中的氢脆性[J]. 电镀与精饰, 2012, 34 (8): 34-36.
LI T. Improvement of hydrogen embrittlement of steel products during cyanide cadmium plating [J]. Plating and Finishing, 2012, 34 (8): 34-36.

- [7] 陆峰, 汤智慧, 孙志华, 等. 航空材料环境试验及表面防护技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
LU F, TANG Z H, SUN Z H, et al. Environmental Test and Surface Protection Technology of Aeronautic Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [8] 周德惠, 谭云. 金属的环境氢脆及其试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
ZHOU D H, TAN Y. Environmental Hydrogen Embrittlement Testing Methods of Metals [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [9] 林茜, 刘小乐, 王春霞, 等. 无氰镀镉钛镀液的稳定性分析[J]. 材料保护, 2017, 50 (10): 78-81.
LIN X, LIU X L, WANG C X, et al. Stability analysis of cyanide-free cadmium-titanium plating solution [J]. Materials Protection, 2017, 50 (10): 78-81.
- [10] 郭敏智, 谢焕钧, 柳鑫, 等. 5,5-二甲基乙内酰胺体系无氰镀镉层的结构及耐蚀性[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43 (3): 1-9.
GUO M Z, XIE H J, LIU X, et al. Microstructure and corrosion resistance of Cd coating electroplated from a cyanide-free 5,5-dimethylhydantoin bath [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43 (3): 1-9.
- [11] 龚自强, 李柱祥, 肖鹏, 等. 镍离子对氨羧配位体系无氰镀镉工艺的影响[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42 (21): 1-6.
GONG Z Q, LI Z X, XIAO P, et al. Effect of nickel ion on cyanide-free cadmium electroplating with amino carboxylic complexing agent [J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42 (21): 1-6.

【编辑：周新莉】