

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.01.003

## pH 对无氰电镀镉钛合金性能的影响

李旭勇<sup>1</sup>, 陈 韦<sup>1</sup>, 张东升<sup>1</sup>, 吴群英<sup>1</sup>, 李 琮<sup>1</sup>, 徐雪源<sup>1</sup>, 王春霞<sup>2\*</sup>

(1. 中航工业洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330063;

2. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 无氰电镀镉钛工艺被广泛用于航空产业, 但仍然存在镀液不稳定的技术难题, 其中镀液的 pH 值是一个关键影响因素。为探究 pH 值的影响, 采用静置试验、透过率测试、Zeta 电位表征等方法研究了镀液的稳定性, 通过场发射电子显微镜以及 X 射线衍射仪对镀层的微观结构进行了分析, 采用模拟海水浸泡实验测试了镀层的耐蚀性, 并通过渗氢曲线和钛含量测试分析了镀层的氢脆性能。结果表明: 镀液 pH 值是影响镀液稳定性的主要因素。当镀液 pH 为 6.5~6.8 时, 镀液透过率在 100% 左右, 镀液的 Zeta 电位较高, 稳定性最好; 当镀液 pH 值大于 6.8 时, 镀液稳定性急剧下降。当镀液 pH 为 6.5~6.8 时, 镀层表面细致, 晶粒尺寸较小, 镀层的耐蚀性最好, 镀层钛含量较高, 抗渗氢能力较强。

**关键词:** pH; 镉钛合金; 稳定性; 耐蚀性; 氢脆

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

## Effect of pH on properties of cadmium titanium alloy electroplated without cyanide

Li Xuyong<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1</sup>, Zhang Dongsheng<sup>1</sup>, Wu Qunying<sup>1</sup>,Li Qiong<sup>1</sup>, Xu Xueyuan<sup>1</sup>, Wang Chunxia<sup>2\*</sup>

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330063, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The cyanide-free cadmium-titanium plating process is now widely used in the aviation industry, but there are still technical challenges of unstable plating solution, in which the pH value of the bath is a key influencing factor. In order to explore the influence of pH value, the stability of the coating solution was studied by static test, transmittance test and Zeta potential characterization, the microstructure of the coatings was analyzed by field emission electron microscopy and X-ray diffractometer, the corrosion resistance of the coating was tested by simulated seawater immersion experiment, and the hydrogen embrittlement properties of the coating were analyzed by hydrogen permeation curve and titanium content test. The results show that the pH value of the plating solution is the main factor affecting the stability of the bath, when the pH of the bath is 6.5~6.8, the transmittance of the bath is about 100%, the Zeta potential of the bath is high, and the stability of the bath is the best, and when the pH value of the bath is greater than 6.8, the stability of the bath decreases sharply. When the pH of the bath is 6.5~6.8, the surface of the plating layer is fine, and the grain size is small, the corrosion resistance of the coating are the best, the

收稿日期: 2024-02-01

修回日期: 2024-03-29

作者简介: 李旭勇 (1985—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为腐蚀与防护, email: 605218644@qq.com

通信作者: 王春霞 (1976—), 女, 硕士, 高级实验师, 研究方向为腐蚀与防护, email: 26012@nchu.edu.cn

titanium content of the coating is high, and the resistance to hydrogen permeability is strong.

**Keywords:** pH; Cd-Ti alloy; stability; corrosion resistance; hydrogen embrittlement

电镀镉钛合金是超高强度钢十分有效的防护工艺之一。在电镀镉的过程中加入少量的钛元素,能够使镀层的结晶更加细致、结合力也更好<sup>[1]</sup>。这主要是因为镉和钛的晶体结构均为密排六方体,因此通过加入少量的钛可以填充镉的晶体缺陷,进而提高合金镀层的耐蚀性能<sup>[2]</sup>。电镀过程中,阴极表面生成的还原氢会与钛化合物反应,诱导钛在阴极表面沉积,减少氢的渗入,并且得到的合金镀层有微裂纹,使镀层和基体中的氢易于排出,因此镉-钛合金镀层具有低氢脆性<sup>[3]</sup>。目前我国航空产业常用的氰化镀镉钛工艺,虽然有着良好的低氢脆性能和防护性能,但氰化镀镉钛镀液获取的镀层的钛含量不高,并且对环境和人体危害极大<sup>[4]</sup>。而无氰电镀镉钛工艺具有镀液无剧毒氰化物、钛盐稳定、不需要循环过滤等优势,并且镀层具有优异的抗腐蚀性能和低氢脆性能<sup>[5-6]</sup>。

但目前的无氰电镀镉钛溶液不够稳定,新配制的槽液不易维护,放置一段时间或者停产一段时间后,槽液容易出现悬浮物,镀层表面也会出现细条纹,镀层易发黑、起皮,最终导致镀层质量下降<sup>[7]</sup>。通过前人的研究发现镀液的pH值对镀液的稳定性影响较大。因此通过对不同pH值下的镀液进行比较,进而确定无氰电镀镉钛镀液的最佳pH值的范围。

## 1 实验

### 1.1 镀层制备

镀层制备的阴极材料为低碳钢,尺寸:65 mm×50 mm×1 mm;阳极采用镉板,尺寸:120 mm×70 mm×5 mm;渗氢曲线试验中采用的基体试片为M300高强度钢,形状为圆形薄片,尺寸:0.35 mm×Φ50 mm。

前处理工艺:阳极镉板采用800#砂纸打磨后,用去离子水洗;试片采用400#、800#、1200#砂纸按顺序打磨,之后采用流动水洗,并用吹风机吹干,再依次进行化学除油(适量去污粉的水溶液,50℃,10~15 min)、热水洗、活化(室温下,体积分数为30%的HCl,浸泡10 s)和去离子水洗。无氰镀镉钛镀液的基础配方和工艺参数如表1所示<sup>[8-9]</sup>。

以经过前处理的试片作为阴极,镉板为阳极。采用恒流法进行电镀,时间为20 min,电流密度为2 A/dm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。

**表 1 无氰镀镉钛镀液配方及工艺参数**

**Tab.1 Formulation and process parameters of cyanide-free cadmium titanium plating solution**

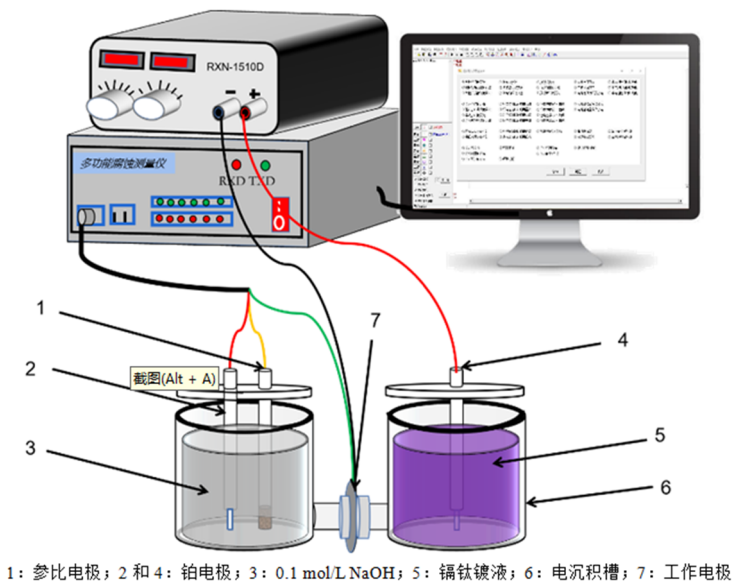
工艺组成	工艺参数
金属钛盐/(g·L <sup>-1</sup> )	2~5
金属镉盐/(g·L <sup>-1</sup> )	15~25
乙二胺四乙酸/(g·L <sup>-1</sup> )	30~40
氨三乙酸/(g·L <sup>-1</sup> )	100~130
氯化铵/(g·L <sup>-1</sup> )	110~130
醋酸铵/(g·L <sup>-1</sup> )	20~30
pH	6.3~7.2

### 1.2 表征方法

利用UV-5800型紫外可见分光光度计进行镀液吸光度和镀层钛含量测试;采用Nova Nano SEM450型场发射扫描电子显微镜对镉钛镀层进行微观表面形貌观察;采用D8ADVANCE-D8X型X射线衍射仪对镀层结构进行表征,实验条件:铜靶,室温,扫描角度20°~80°,扫描速度5°/min<sup>[11]</sup>。

渗氢曲线测试:如图1所示,采用CST-120型多功能腐蚀测量仪进行恒电位极化,用于渗氢电流的测量,采用常见的四电极两回路体系。在电沉积室中加入无氰镀镉钛溶液,采用WLS-5型数字恒流电源进行电沉积;在极化室加入0.1 mol/L NaOH溶液;试验一开始,需要先对极化室的M300钢片进行恒电位极化去除溶液以及M300钢片内部的氢,极化电压150 mV,当极化电流下降至2 μA后,电沉积室开始通电进行电沉积,并开始记录时间—电流关系曲线,电沉积电流密度为2 A/dm<sup>2</sup>,时间12 000 s<sup>[12]</sup>。

电化学测试:使用RST5200型电化学工作站测试镀层相关性能,使用三电极体系进行测试。电化学测试包括Tafel曲线等测试,研究电极为不同条件下获取的镀层,辅助电极为铂电极,参比电极为甘汞电极,实验时溶液处于静止状态。进行电化学测试时,扫描速率、扫描范围及其他相关参数依据不同实验条件进行调整。



1: 参比电极; 2 和 4: 铂电极; 3: 0.1 mol/L NaOH; 5: 镉钛镀液; 6: 电液积槽; 7: 工作电极

图 1 电化学渗氢装置简图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical hydrogen infiltration unit

2 结果与讨论

2.1 镀液稳定性分析

将不同pH值的镀液在相同环境下放置60 d后，对镀液进行观察，结果如表2所示。当pH为7.0和7.2时镀液产生白色沉淀，而pH为6.3、6.5和6.8的镀液均没有发现沉淀及浑浊物的存在。为进一步准确判断镀液的澄清度，对镀液进行透过率测试，结果如图2所示。镀液pH在7.0和7.2时，透过率均比较低，这是因为镀液pH比较高时，镀液中的 $\text{TiO}^{2+}$ 会进行水解，生成白色氢氧化钛沉淀，在pH为7.2时，镀液的透过率更高一些，是因为镀液的pH更高， $\text{TiO}^{2+}$ 水解更彻底，水解产物沉淀到底部。pH在6.3时，镀液透过率在95%左右，这是因为氨三乙酸，EDTA等络合剂，在碱性条件下溶解性较好，而在pH为6.3偏酸性条件下时溶解性降低，有部分析出形成小颗粒物质悬浮在镀液中所致。pH在6.5和6.8时，镀液透过率均在100%左右，说明在此pH下，没有络合剂的析出， $\text{TiO}^{2+}$ 也未发生水解，溶液相对非常稳定澄清。因此，pH为6.5和6.8时，镀液的透过率均比较高，有着较好的镀液稳定性。

Zeta电位是一个表征分散体系稳定性的重要指标，它的数值与胶态分散的稳定性相关。Zeta电位的绝对值（正或负）越高，体系越稳定，Zeta电位的绝对值越低，胶体越倾向于凝结或凝聚，即吸引力超过了排斥力<sup>[13]</sup>。采用Zeta电位仪分别测量不同pH值下镀液的Zeta电位，得出不同pH值下镀液体系的

稳定性特征，结果如图3所示。

表 2 镉钛镀液静置 60 d 后的状态

Tab.2 The state of cadmium titanium plating solution standing for 60 days

镉钛镀液 pH 值	镉钛镀液状态
6.3	镀液呈现出淡黄色，透明
6.5	镀液呈现出淡黄色，透明
6.8	镀液呈现出淡黄色，透明
7.0	镀液底部有大量白色沉淀，镀液中有白色悬浮物，混浊，不透明
7.2	镀液底部有大量白色沉淀，镀液上部分呈现出淡黄色，悬浮物较少，略混浊

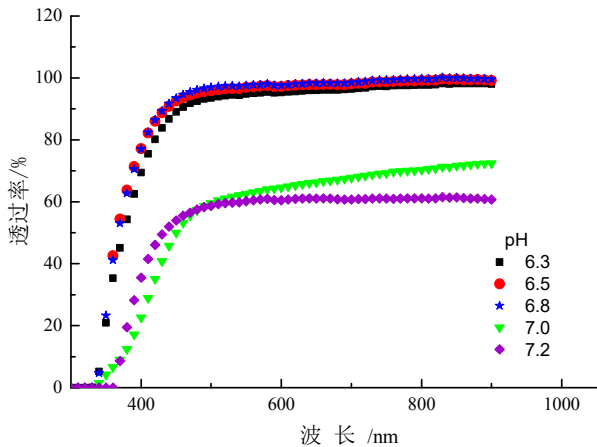


图 2 镉钛镀液不同 pH 值下的透过率

Fig.2 Transmittance of cadmium-titanium baths with different pH values

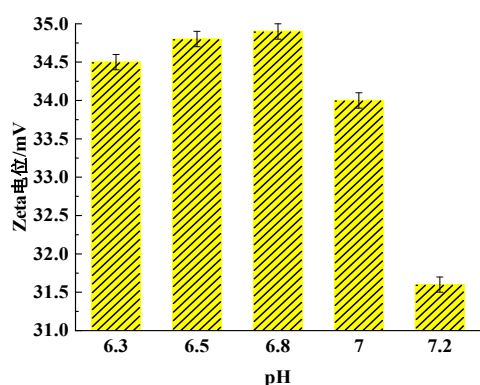


图3 镉钛镀液不同pH下的Zeta电位

Fig.3 Zeta potential of cadmium-titanium bath with different pH values

由图3可见,当pH为6.3时,镀液Zeta电位为34.5 mV。随着pH值的增大,Zeta电位数提高,当pH为6.8时,Zeta电位达到最大值34.9 mV,随后镀液Zeta

电位值迅速下降。该结果表明当在pH为6.3~6.8时,镀液体系较稳定;镀液pH值超过6.8时,镀液中的部分成分会随着pH的增加而趋于凝聚,镀液稳定性迅速下降,即镀液的稳定性随pH值先增加后降低。该结果与透过率测试分析结果一致。

## 2.2 镀层微观结构分析

利用场发射扫描电子显微镜分别观察不同pH下获得的无氰镉钛镀层表面微观形貌,如图4所示。当pH为6.3时,镀层孔洞较多,这是因为镀液的pH比较低时,电镀过程中容易析氢,有大量气泡吸附在镀层表面。pH在6.5~6.8时,镀层孔洞较少,这是由于镀液pH提高,在电镀过程中,产生气泡比较细密,并且迅速脱离镀层表面。而当pH在7.0~7.2时,由于镀液中的 $\text{TiO}^{2+}$ 水解,在镀液中有较多水解产物,易移动到阴极表面,在电沉积作用下,夹杂到镀层中,导致镀层较粗糙。

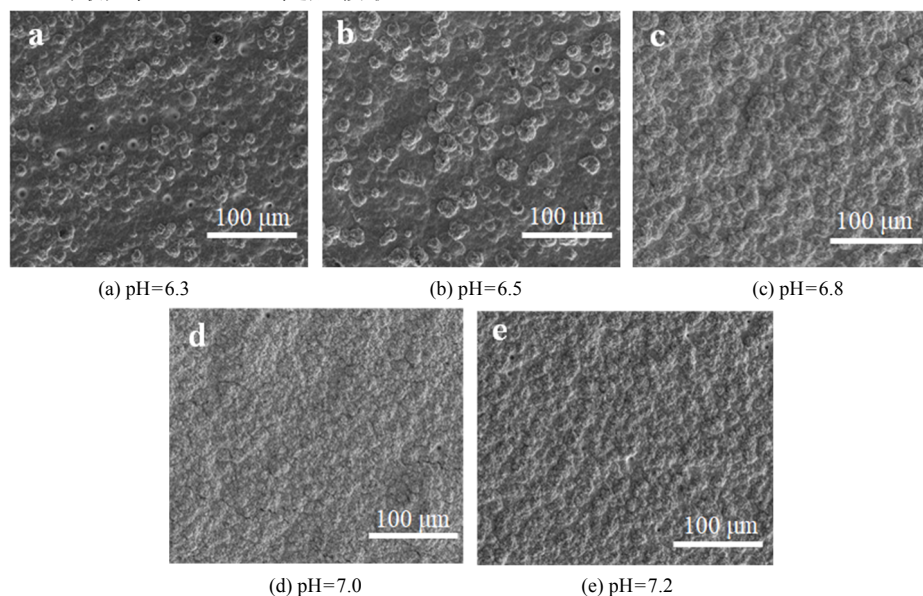


图4 不同pH值的镀液中获得的镀层的微观形貌

Fig.4 Micromorphology of coatings obtained from plating solutions with different pH values

采用X射线衍射仪对不同pH值的镀液中获取的镀层进行表征,结果如图5所示。由图5可见,镀层中主要是Cd相,因为钛的含量太低,很难从X射线衍射峰谱中检测到,衍射峰对应晶面主要是(100)、(101)、(102)、(110)、(112)、(201) [14]。当pH变化时,衍射峰的峰位基本保持不变,但是峰的相对强度有所变化。为进一步研究镀层性能,使用jade软件对XRD谱图进行拟合,得到不同镀液中获取的镀层的晶粒尺寸,结果如表3所示。

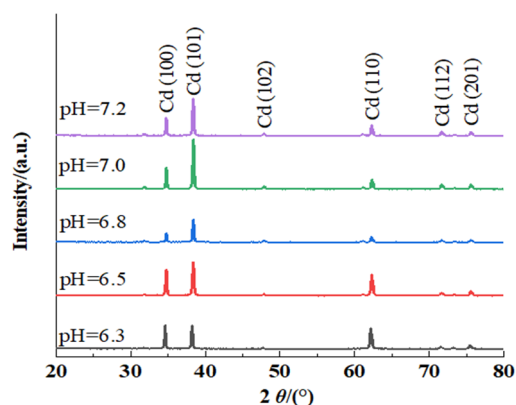


图5 不同pH值的镀液中获得的镀层的XRD谱图

Fig.5 XRD patterns of coatings obtained from plating solutions with different pH values

表 3 不同 pH 值的镀液中获得的镀层的晶粒尺寸

Tab.3 Grain size of coatings obtained from plating solutions with different pH values

pH	晶面指数(hkl)	晶粒尺寸/nm	平均晶粒尺寸/nm
6.3	100	>1 000	682
	101	827	
	102	378	
	110	678	
	112	421	
	201	464	
6.5	100	>1 000	620
	101	746	
	102	421	
	110	590	
	112	407	
	201	472	
6.8	100	571	500
	101	483	
	102	331	
	110	481	
	112	402	
	201	404	
7.0	100	>1 000	704
	101	756	
	102	492	
	110	680	
	112	460	
	201	533	
7.2	100	>1 000	715
	101	778	
	102	324	
	110	669	
	112	428	
	201	496	

从表3可以看出，不同晶面的晶粒尺寸有所差别，其中，（100）面的晶粒尺寸都比较粗大。从不同pH的镀液中获取的镀层的平均晶粒尺寸来看，pH为6.8时的晶粒尺寸是最小的，结晶最细致，其次是pH为6.5和6.3。而pH为7.0和7.2的镀液比较浑浊，由于有悬浮物和水解产物，电镀时这些杂质会占据形核活性位点，导致晶粒生长大于形核，因此镀层的晶粒比较粗大。因此在pH取值为6.5~6.8时，镀层

晶粒尺寸较为细小，这与镀层形貌测试结果一致。

2.3 镀层耐腐蚀性能分析

将不同pH值的镀液中获得的电镀锡钛合金试片放入模拟海水的3%的NaCl溶液中分别浸泡0 d、3 d以及6 d，之后采用1 mV/s的扫描速率对浸泡后的试片进行Tafel曲线测试，测试结果如图6所示，拟合后得到的自腐蚀电位（ $E_{\text{corr}}$ ）和自腐蚀电流（ $I_{\text{corr}}$ ）如表4所示。

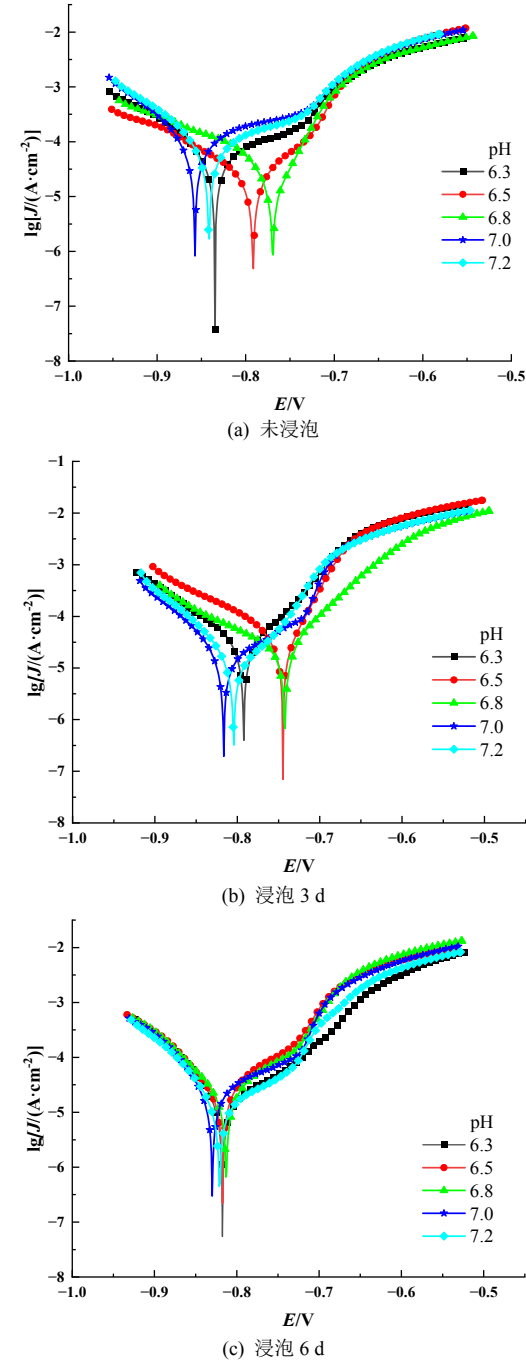


图 6 不同 pH 值的镀液中获得镀层的塔菲尔曲线

Fig.6 Tafel curves of coatings obtained from plating solutions with different pH values



表4 塔菲尔曲线拟合结果

Tab.4 Fitting results of Tafel curves

pH	浸泡时间/天	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$I_{\text{corr}}/(\times 10^{-5} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2})$
6.3	0	-0.835 7	8.716 5
	3	-0.793 1	1.111 6
	6	-0.818 4	6.616 9
6.5	0	-0.792 4	1.077 3
	3	-0.745 6	0.541 6
	6	-0.818 3	6.606 9
6.8	0	-0.770 0	0.994 6
	3	-0.743 1	0.441 1
	6	-0.813 4	5.616 9
7.0	0	-0.858 3	10.978 0
	3	-0.817 4	6.416 9
	6	-0.829 9	7.926 7
7.2	0	-0.842 1	10.115 0
	3	-0.805 1	4.346 4
	6	-0.821 3	7.477 5

$E_{\text{corr}}$ 用于判断腐蚀倾向,  $E_{\text{corr}}$ 越负, 腐蚀的倾向越大; 而 $I_{\text{corr}}$ 用于判断腐蚀的实际速度,  $I_{\text{corr}}$ 越小, 实际的腐蚀速度越小<sup>[15]</sup>。从图6的Tafel测试结果和表4的拟合结果可以看出, 在未进行浸泡时, pH为6.3、7.0和7.2时的自腐蚀电位都比较负, 而pH为6.5和6.8的自腐蚀电位相比较于其他更正; 这说明在未浸泡时, pH为6.3、7.0、7.2的镀液中获得镀层的自腐蚀倾向更大。pH为6.8时的自腐蚀电位最正, 为-0.770 0 V, 自腐蚀电流也是最小的为 $9.946 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。浸泡3 d后, pH为6.5和6.8的自腐蚀电位相较于其他的更正, 且pH为6.8时的自腐蚀电流最小为 $4.411 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。浸泡6 d后, 不同pH下的自腐蚀电位均十分接近, 在-0.82 V左右, 不同pH下的自腐蚀电流密度也十分接近, 这是因为大量的腐蚀产物附着在镀层表面, 阻止了镀层的进一步腐蚀; 但pH为6.8的自腐蚀电流仍然是最小的为 $5.616 9 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。综上可以看出, 当镀液的pH为6.5~6.8时, 未浸泡和浸泡后的试片的腐蚀倾向和腐蚀速度都是比较小的, 耐蚀性更佳。

## 2.4 氢脆性能分析

### 2.4.1 镀层钛含量分析

将在pH值为6.3、6.5、6.8、7.0和7.2的镀液中获得镀层进行钛含量分析, 获得相应的钛含量<sup>[16]</sup>, 结果如图7所示。由图7可见, 镀层中钛含量随镀液

pH的变化呈现先升高后降低的趋势。当镀液pH在6.8时, 镀层中的钛含量最高, 这是因为pH较低时, 镀液中的钛离子活性低, 随镀液pH的升高, 镀层中钛活性升高, 镀层中钛含量升高。而pH为7.0~7.2时, 由于镀液中的 $\text{TiO}^{2+}$ 大量水解, 镀液中钛离子浓度降低, 导致镀层中钛含量较低。镀层中的钛含量对抗渗氢有较大的影响, 镀层钛含量越高, 抗渗氢性能越好, 越能减少氢脆的发生<sup>[17-18]</sup>。

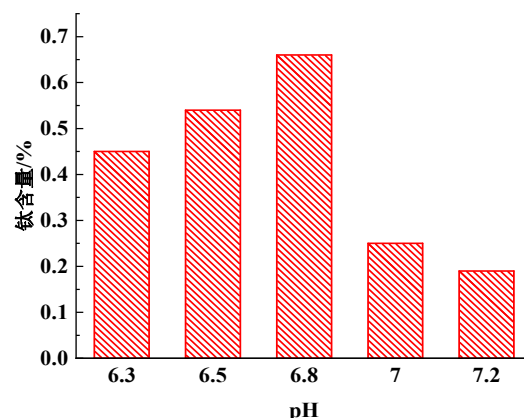


图7 不同 pH 值的镀液中获得镀层的钛含量

Fig.7 Titanium content of coatings obtained from plating solutions with different pH values

### 2.4.2 渗氢曲线分析

对不同pH的镀液的电沉积过程中的渗氢行为进行测试, 对比镀液pH对渗氢机理的影响。实验时, 先由极化室对M300钢片进行恒电位极化去除极化室内溶液以及M300基体内部的氢, 极化电压为150 mV, 当极化电流下降至 $0.5 \mu\text{A/cm}^2$ 左右后, 开始通电进行电沉积, 沉积电流密度为 $2.0 \text{ A/dm}^2$ , 记录时间-电流关系曲线<sup>[19]</sup>。

由图8可见, 电沉积开始后电流快速上升。这是因为电沉积过程中产生了大量的活性氢原子, 经过电极表面吸附和扩散到达极化室阴极面被氢氧化钠溶液氧化掉<sup>[20]</sup>。由于pH为7.0和7.2的镀液放置半年, 镀液浑浊, 镀液中有大量白色胶体析出, 影响了镀液的整体性能。本实验主要研究pH为6.3、6.5和6.8的渗氢阶段。可以发现, 镀液pH为6.5和6.8时, 短时间就达到峰值电流, 最大电流分别为 $1.45 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 和 $1.08 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 然后开始下降。而镀液pH为6.3时极化电流达到峰值的时间更晚, 峰值更高, 约在1380 s时达到 $3.6 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。在2 000 s内, pH为6.5和6.8时渗氢电流开始达到稳定阶段, pH为6.5的镀层使渗氢电流降至 $8 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 左右, pH为6.8

时的镀层的稳定渗氢电流更小, 为 $5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 左右, 而pH为6.3的镀层的渗氢电流还在降低, 降低速率较慢, 说明pH为6.8的镀层防止氢渗透的能力最好, 其次是pH为6.5的。并且根据之前镀层的微观形貌和钛含量分析, pH为6.5和6.8的镀层的晶粒尺寸较小, 孔隙率低, 同时阴极表面生成的还原氢会与镀液中的钛离子反应, 诱导钛在阴极表面沉积, 减少还原氢的渗入, 说明pH为6.8和6.5的镀液获得的镀层对于还原氢的阻挡能力更好, 镀层抗渗氢能力强。

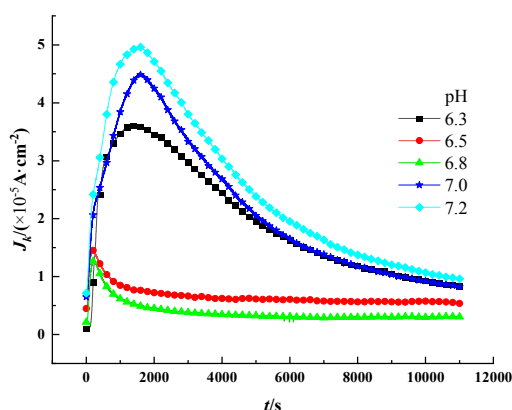


图 8 不同 pH 的镀液的电沉积过程中的渗氢曲线

Fig.8 Hydrogen infiltration curves during electrodeposition of baths at different pH

### 3 结论

本文研究了镀液pH对无氰镀镉钛镀液稳定性与镀层性能的影响, 主要获得以下结论:

(1) 在pH为6.3~6.8时, 镀液的稳定性最好, 镀液pH大于6.8时, 稳定性变差, 短时间内就会出现分层现象。

(2) 镀液pH为6.5~6.8时, 镀层结晶细致均匀, 钛含量为0.5%~0.7%, 镀层具有良好的抗渗氢能力。

(3) 镀液pH为6.5~6.8时, 镀层的耐蚀性最好。通过模拟海水浸泡的试验发现, 在镀液的pH取值为6.3~7.2之间所获得的镉钛镀层, 在初始和第3天时, pH为6.8的条件下获得的镀层的自腐蚀速率最小, 而在第6天时, 各镀层的自腐蚀速率较接近。

### 参考文献

[1] 刘鹏, 蔡健平, 王旭东, 等. 飞机起落架材料防护技术

现状及研究进展[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 67-71.

[2] 冯丽蓉. 无氰电镀金合金研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2008(10): 10-12.

[3] 刘仁志. 无氰电镀工艺技术现状[J]. 表面工程资讯, 2004, 4(3): 1-3.

[4] 郝江华, 刘煜. 无氰镀镉钛工艺研究及应用[J]. 世界有色金属, 2020(3): 194-195.

[5] 汤智慧, 陆峰, 张晓云, 等. 氯化铵镀镉与无氰镀镉-钛镀层性能对比研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 22-25.

[6] 涂贵生, 王举, 龙聘魁, 等. 高强度钢低氢脆镀镉钛工艺的应用[C]//低碳环保表面工程学术论坛论文集. 贵阳: 低碳环保表面工程学术论坛, 2010: 135-139.

[7] 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.

[8] 航空航天工业部 621 所. GB/T 13322—1991 金属覆盖层低氢脆镀钛电镀层[S]. 北京: 国家技术监督局, 1992.

[9] 航空航天工业部 621 所, 北京航空学院, 372 厂. HB/Z 107—1986 高强度钢零件低氢脆镀镉-钛工艺[S]. 行业标准-航空, 1986.

[10] 张玉清, 王春霞, 吴光辉, 等. 电流密度对无氰镉-钛合金镀层的影响[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(10): 38-41.

[11] 谭小生, 王春霞, 曹鑫帅, 等. 脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠对电沉积铜薄膜性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 366-374, 403.

[12] 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.

[13] 赵静, 李波, 蒋刚. pH 值对硅油乳液 Zeta 电位及其制备的影响[J]. 化学研究与应用, 2005(3): 386-388.

[14] 林茜. 无氰电镀镉-钛合金工艺及电沉积行为研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.

[15] Liu S B, Shohji I, Iioka M, et al. Micro-brazing of stainless steel using Ni-P alloy plating[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1094.

[16] 张国焕, 秦月文, 刘佑厚. 镉和镉-钛镀层的晶体取向对高强钢氢脆的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1985(1): 54-63, 90-91.

[17] 宇波, 汤智慧, 彭超, 等. 无氰电镀镉-钛合金对钢基体氢脆性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(11): 1-4.

[18] 罗明生, 陈玮, 潘梓鑫, 等. 钛离子对无氰电镀镉耐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2022, 55(11): 78-82, 106.

[19] 施雨湘. 分析氢渗透曲线的方法[J]. 武汉水运工程学院学报, 1986(1): 75-84.

[20] 吴欣欣. 高强度钢电镀镉过程中渗氢机理研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.