

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.013

# 杂质铜离子对 300M 超高强度钢无氰电镀 镉钛镀层性能的影响

谌 宏, 吴 煜, 王春霞\*

(南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 无氰电镀镉钛工艺在航空工业领域获得了广泛的应用, 然而镉钛镀液容易引入杂质铜离子, 进而致使镀液呈现红色。为深度探究杂质铜离子带来的影响, 通过阴极极化曲线和循环伏安曲线测试镀液的阴极过程, 借助场发射电子显微镜以及 X 射线衍射仪对镀层的微观结构予以了分析, 运用塔菲尔曲线剖析了镀层的耐蚀性, 并且通过渗氢曲线和钛含量测试解析了镀层的抗氢脆性能。其结果显示: 杂质铜离子会让镀层表面趋向粗糙, 一旦镀液中的杂质铜离子浓度超出 0.078 g/L, 镀层的晶粒尺寸就会增大, 镀层中的钛含量降低, 镀层的耐蚀性会陡然下降, 抗渗氢的能力也会随之减弱。

**关键词:** 杂质铜离子; 镉钛合金; 耐蚀性; 氢脆

**中图分类号:** TQ153.1

**文献标识码:** A

## Effect of impurity copper ions on the performance of cadmium titanium plating without cyanide electroplating of 300M ultra-high strength steel

Chen Hong, Wu Yu, Wang Chunxia\*

(College of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University,  
Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The cyanide-free cadmium-titanium plating process has been widely used in the aviation industry. However, cadmium-titanium plating solution is prone to introduce impurity copper ions, which in turn causes the bath to appear red. In order to deeply explore the influence of impurities of copper ions, the cathode process of the plating solution was tested by cathodic polarization curve and cyclic voltammetry curve, the microstructure of the coating was analyzed by field emission electron microscopy and X-ray diffractometer, the corrosion resistance of the coating was analyzed by the Tafel curve, and the hydrogen embrittlement resistance of the coating was analyzed by the hydrogen infiltration curve and titanium content test. The results show that the impurity copper ions will make the surface of the coating rougher, and once the concentration of impurity copper ions in the plating solution exceeds 0.078 g/L, the grain size of the coating will increase, the titanium content in the coating will decrease, the corrosion

收稿日期: 2024-10-13

修回日期: 2024-10-24

作者简介: 谌宏(1999—), 在读硕士, email: 3335950039@qq.com

通信作者: 王春霞(1976—), 女, 硕士, 高级实验师, email: 26012@nchu.edu.cn

引用信息: 谌宏, 吴煜, 王春霞. 杂质铜离子对 300M 超高强度钢无氰电镀镉钛镀层性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 83-89.

Chen Hong, Wu Yu, Wang Chunxia. Effect of impurity copper ions on the performance of cadmium titanium plating without cyanide electroplating of 300M ultra-high strength steel[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 83-89.

resistance of the coating will decrease sharply, and the resistance to hydrogen permeation will also be weakened.

**Keywords:** impurity copper ions; Cd-Ti alloy; corrosion resistance; hydrogen embrittlement

在当今的工业领域,材料的性能和质量始终是决定产品优劣的关键因素。超高强度钢,以其卓越的综合性能,在航空航天、汽车制造、机械工程等众多领域占据着举足轻重的地位。然而,当涉及到超高强度钢零件时,其防护要求之高,令人瞩目<sup>[1]</sup>。超高强度钢零件,由于常常处于极端的工作环境中,不仅需要具备出色的机械性能,还对防护涂层有着近乎苛刻的要求<sup>[2]</sup>。高耐蚀性,是其防护的首要指标,这意味着镀层必须能够抵御各种化学物质的侵蚀,长时间保持零件的完整性和稳定性<sup>[3]</sup>。同时,为了确保零件在使用过程中的可靠性,基体还不能发生氢脆现象,这对于镀层的质量和性能提出了极高的要求。此外,随着环保意识的日益增强,绿色环保也成为了防护工艺不可忽视的重要方面<sup>[4]</sup>。

在众多的防护工艺中,无氰电镀镉钛合金凭借其独特的优势,成为了超高强度钢防护的优选方案之一。在电镀镉的过程中,少量钛元素的加入,使得镀层的结晶结构变得更加细致,同时抵抗氢的渗入<sup>[5]</sup>。然而,电镀镉钛合金工艺在实际应用中也面临着一些问题。其中,镉钛镀液在长期的使用过程中容易引入杂质铜离子,这一现象引起了研究人员的高度关注<sup>[6]</sup>。铜离子的侵入并非偶然,它来自于生产过程中的各个环节混入和原材料中的微量杂质引入。

当镀液中出现铜离子时,在电解过程中,镀液

会逐渐发红,这是铜离子存在的一个直观表现。随着铜离子含量的不断增加,情况愈发严重,甚至会有红色的铜粉末漂浮在镀液表面<sup>[7]</sup>。这些现象不仅仅影响了镀液的外观,更重要的是,它们暗示着镀液的性能可能正在发生着潜在的变化。

为了深入探究杂质铜离子对无氰电镀镉钛合金镀层性能的具体影响,研究人员展开了一系列严谨而细致的实验。为电镀镉钛合金工艺的优化和改进提供了科学依据。在实际生产中,通过严格控制原材料的质量、优化生产流程以及加强镀液的监测和维护,可以有效地减少杂质铜离子的引入,从而保证镀层的质量和性能。

对杂质铜离子对无氰电镀镉钛合金镀层性能影响的研究,不仅丰富了材料科学的理论体系,更在实际应用中为提升超高强度钢零件的质量和可靠性发挥了重要作用。这一研究将继续引领材料表面处理领域不断前行,为工业生产带来更多的创新和突破。

## 1 实验

### 1.1 镀层制备

镀层制备的阴极材料为300 M超高强度钢:尺寸为50 mm×25 mm×1 mm;阳极采用镉板,尺寸为120 mm×70 mm×5 mm;渗氢曲线试验中采用的基体试片为300 M超高强度钢,形状为圆形薄片,尺寸为Φ50 mm,厚度为0.35 mm。

表1 300M 超高强度钢成分

Tab.1 The composition of 300M ultra-high strength steel

元素	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	V
含量/%	0.41~ 0.46	0.65~ 0.95	1.60~ 2.00	0.65~ 0.90	1.45~ 1.80	0.30~ 0.40	>0.05

前处理工艺:打磨→流动水洗→化学除油(70 °C, 2 min)→热水冲洗→去离子水冲洗→活化(体积分数5% HCl, 活化时间10 s)→去离子水冲洗→电沉积Cd-Ti(镀层厚度8~12 μm)→流动水洗→吹干→组织表征→性能检测。

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>[8]</sup>。

### 1.2 铜离子的引入

采用无氰电镀镉钛镀液基础配方<sup>[9]</sup>,如表2所示。取5 L镀液,用10 dm<sup>2</sup>的铜片分别浸泡在1 L镀液中,采用分光光度计测试铜离子浓度,浸泡时间和

铜离子浓度如表3所示。

表 2 无氰镀镉钛镀液配方及工艺参数

Tab.2 Formulation and process parameters of cyanide-free cadmium titanium plating solution

镀液成分	工艺参数
Ti/(g·L <sup>-1</sup> )	2~5
Cd/(g·L <sup>-1</sup> )	15~25
EDTA/(g·L <sup>-1</sup> )	30~40
NTA/(g·L <sup>-1</sup> )	100~130
NH <sub>4</sub> Cl/(g·L <sup>-1</sup> )	110~130
CH <sub>3</sub> COONH <sub>4</sub> /(g·L <sup>-1</sup> )	20~30
pH	6.0~7.0

表 3 杂质铜离子浓度

Tab.3 Copper ion concentration of impurities

时间/天	铜离子浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
0	0
1	0.048
1.5	0.078
2	0.102
3	0.152

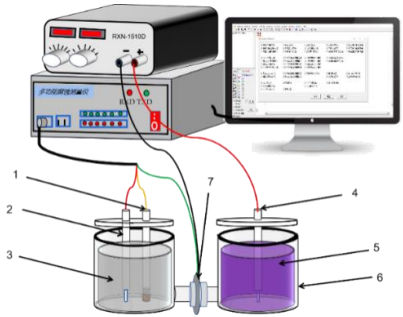
1.3 表征方法

利用UV-5800型紫外可见分光光度计进行镀液中杂质铜离子浓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>[10]</sup>。

渗氢曲线测试装置如图1所示，用CST-120型多功能腐蚀测量仪进行恒电位极化，渗氢电流的测量采用常见的四电极两回路体系<sup>[11]</sup>。在电沉积室中加入无氰镀镉钛溶液，用WLS-5型数字恒流电源作为电镀电源，进行电沉积；在极化室加入0.1 mol/L NaOH溶液；试验一开始，需要先对极化室内的300M超高强度钢片试件进行恒电位极化，去除溶液以及试件内部的氢，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>。

电化学测试时使用RST5200型三电极体系电化学工作站。电化学测试内容包括阴极极化曲线、循环伏安曲线和Tafel曲线等。三电极体系中，300M超高强度钢片试件和不同条件下获取的镀层作研究

电极，铂电极作辅助电极，甘汞电极作参比电极。



1: 参比电极；2, 4: 铂电极；3: 0.1mol/L NaOH；  
5: 镉-钛镀液；6: 电解槽；7: 工作电极

图 1 渗氢曲线测试装置

Fig.1 Test device for hydrogen permeation curve

2 结果与讨论

2.1 阴极极化曲线

不同铜离子浓度下镉钛镀液的阴极极化曲线见图2。当电位在-0.95 V左右时，开始出现镉的沉积，此时杂质铜离子浓度对极化曲线影响较小，阴极极化电位变化不大；当杂质铜离子浓度超过0.078 g/L时，会使镀液阴极过程中的析氢电位负移，沉积反应时析氢现象更加剧烈。可能原因如下：镀液中的杂质铜离子优先得到电子而析出，悬浮在阴极附近和阴极表面区域。同时，铜的电极电位较正，导致氢相对于铜的电位差比氢相对于镉的电位差更大，更容易析氢。同时镀液中的铜离子占据了大量的形核位点和析氢也会消耗能量，导致镉的形核进程减缓，镉离子前期更不容易形核，而已经形成的晶核更容易生长并长大，易使镀层晶粒尺寸增大，导致镀层孔隙增大，耐蚀性下降。

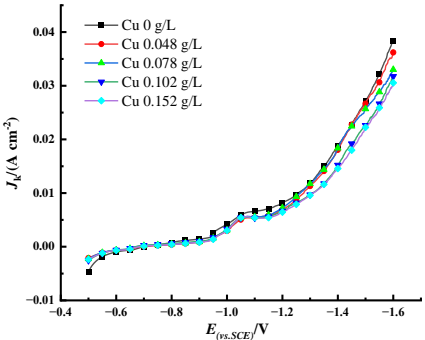


图 2 不同浓度杂质铜离子镀液的阴极极化曲线

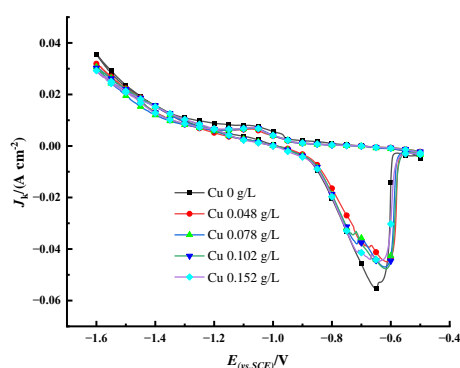
Fig.2 Cathodic polarization curves of copper ion plating solutions with different concentrations of impurities

2.2 循环伏安曲线

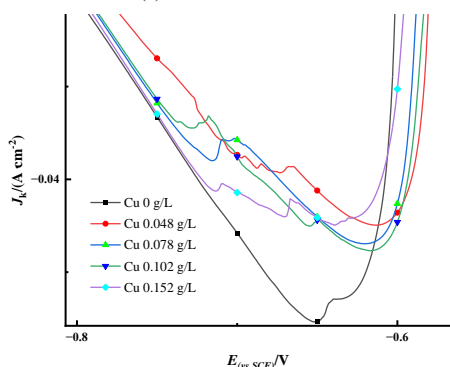
图3为(a)有不同铜离子的镉-钛镀液的循环伏安

曲线。当电位从 $-0.5\text{ V}$ 扫到 $-0.95\text{ V}$ 时,出现了还原峰,镀液中开始有红色粉末出现。当电位从 $-1.6\text{ V}$ 开始正向扫描时,到 $-0.85\text{ V}$ 左右时,出现了氧化峰,说明镉钛镀层开始溶解。图3(b)为局部放大图,正常镀液的阳极极化曲线出现了两个氧化峰,说明阳极过程开始是镉的溶解,由于镀层中的钛为 $\text{TiO}_2$ 不参与溶解,阴极过程中有大量氢气析出,电流效率降低,导致阳极过程镉溶解完全后,还存在部分铁基体的溶解。

当镀液中存在铜离子杂质后,浓度超过 $0.078\text{ g/L}$ 时,镀液的阳极过程出现了三个氧化峰。因为铜比氢更容易析出,而阴极过程出现了红色粉末也说明了铜的沉积,当镀液中铜离子浓度较高时,阴极沉积的铜在阳极溶解时会产生可以检测的阳极电流,导致阳极过程中又出现了铜的溶解峰,说明当镀液中铜离子杂质超过 $0.078\text{ g/L}$ 时,在电沉积过程中,镀层中会夹杂有部分铜存在。



(a) 循环伏安曲线主图



(b) 局部放大图

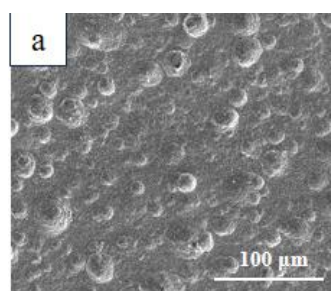
图3 不同浓度杂质铜离子镀液的循环伏安曲线

Fig.3 Cyclic voltammetry curves of copper ion plating solutions with different concentrations of impurities

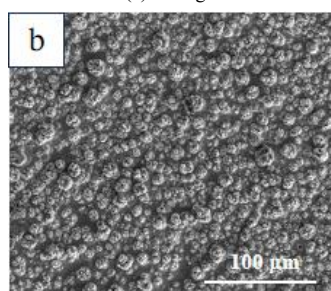
### 2.3 镀层微观形貌

利用场发射扫描电子显微镜分别观察不同浓度杂质铜离子下获得的无氰镉钛镀层表面微观形

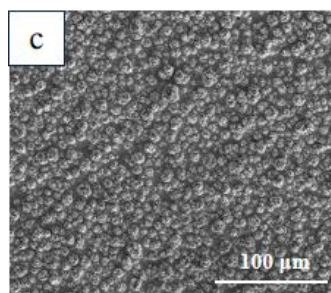
貌,如图4所示,对不同杂质铜离子镀液得到的镀层分析微观形貌。正常镀液表面比较平整,镀层上有凸起和微裂纹,方便在除氢时镀层中氢气的析出<sup>[13]</sup>。当镀液中存在铜离子时,镀层表面出现球状凸起,随着镀液中杂质铜离子浓度的增加,镀层表面球状凸起越来越粗大,表面也不平整。镀层表面呈现出花束状,顶部为球状<sup>[14]</sup>,并且表面还有较多小的凸起结构,应该是铜与镉发生了共沉积。由于铜离子的沉积电位较正,在电沉积过程中会先进行沉积,不同浓度杂质铜离子镀液的镀层表面形貌接近。



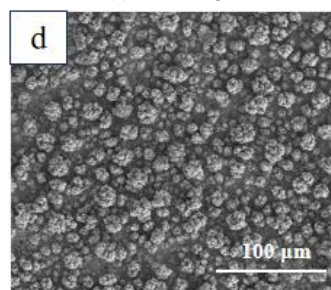
(a) Cu 0 g/L



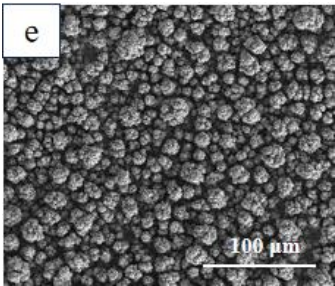
(b) Cu 0.048 g/L



(c) Cu 0.078 g/L



(d) Cu 0.102 g/L



(e) Cu 0.152 g/L

图 4 不同浓度杂质铜离子镀液的镀层的微观形貌

Fig.4 Microscopic morphology of coatings of copper ion plating solutions with different impurities

采用X射线衍射仪对不同浓度杂质铜离子下的镀液中获取的镀层进行表征,结果如图5所示。镀层中主要是Cd相,因为铜和钛的含量太低,很难从X射线衍射峰谱中检测到,衍射峰对应晶面主要是

(002)、(100)、(101)、(110)、(112)和(201)<sup>[15]</sup>。当镀液中存在铜离子杂质时,衍射峰的位置基本保持不变,只是峰的强度有所变化。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4所示。

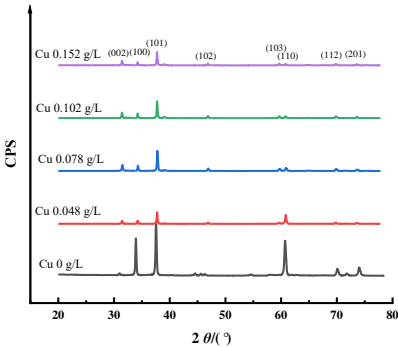


图 5 不同镀层 XRD 衍射图谱

Fig5 XRD diffraction patterns of different coatings

表 4 不同镀层主要晶向晶粒尺寸

Tab.4 Grain size of the main grain directions of different coatings

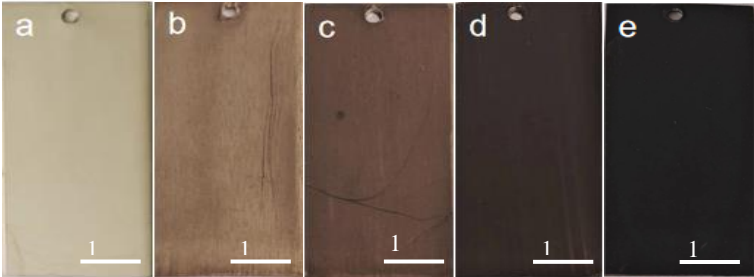
铜离子浓度 (g·L <sup>-1</sup> )	(002)晶面 /nm	(100)晶面 /nm	(101)晶面 /nm	(110)晶面 /nm	平均晶粒尺寸 /nm
0	29.1	40.9	37.2	29.8	34.25
0.048	36.2	37.3	41.1	35.4	37.50
0.078	37.9	44.3	42.0	33.6	39.45
0.102	42.1	51.5	49.5	37.0	45.03
0.152	32.9	68.2	60.1	45.1	51.58

从表4可以看出,不同晶面的晶粒尺寸有所差别,其中,(100)和(101)面的晶粒尺寸都比较粗大。从不同浓度杂质铜离子的镀液中获取的镀层的平均晶粒尺寸来看,正常镀液的晶粒尺寸是最小的,结晶最细致,当镀液中杂质铜离子含量较低时,对镀层晶粒尺寸影响较小,而当镀液中杂质铜离子浓度超过0.078 g/L时,镀层晶粒尺寸增大。其原因应该是在电沉积过程中,初期镀液中的杂质铜离子快

速沉积和析出悬浮在镀液中,提供了大量的形核位点,导致晶粒生长大于形核,并且铜和镉发生共沉积,导致镀层表面晶粒尺寸增大。据镀层微观形貌也可以看出,杂质铜离子浓度升高时,镀层表面明显的花束球状凸起越来越大,表面比较粗糙。

## 2.4 镀层宏观形貌

对电沉积后的镀层水洗吹干,如图所示是不同浓度杂质铜离子镀液的镀层的外观。



(a) Cu 0 g/L (b) Cu 0.048 g/L (c) Cu 0.078 g/L (d) Cu 0.102 g/L (e) Cu 0.152 g/L

图 6 不同镀层宏观形貌

Fig.6 Macroscopic morphology of different coatings



在正常状态下镀层为稻黄色，镀层表面光滑，当镀液中铜离子浓度较低时，镀层表面颜色开始带有棕色，并且表面看起来不光滑，有条纹。当铜离子浓度超过0.078 g/L时，镀层表面开始发黑，并且镀层表面容易出现灰黑色粉末。镀层中镉和铜一起沉积，镀层发黑应该是镀层中的铜被氧化，生成黑色氧化铜，同时根据镀层微观形貌可知，镀层表面呈现出花束球状，表面存在较多凸起，导致表面不平整。

## 2.5 镀层耐蚀性

在3.5%氯化钠水溶液中测试镀层的塔菲尔曲线，测试结果如下。

如图7所示，当镀液中铜离子杂质浓度不超过0.078 g/L时，不同镀层的自腐蚀电位基本接近，在-0.88 V左右，而当镀液中铜离子杂质浓度超过0.078 g/L时，镀层自腐蚀电位变负，镀层的腐蚀倾向增大。镀层的耐蚀性具体看镀层的自腐蚀速率，对不同镀层的塔菲尔曲线进行拟合，数据如下表所示。当镀液中铜离子杂质浓度不超过0.078 g/L时，镀层的自腐蚀速率增加的较少，耐蚀性有所下降，而铜离子杂质浓度超过0.078 g/L时，镀层自腐蚀速率大幅度增加，镀层的耐蚀性大幅度下降。分析应该是镀层中有铜沉积，而铜的电位与镉的电位相差较大，容易形成原电池，导致镀层腐蚀速率增加，同时镉与铜的晶粒大小不一致，容易导致镀层中出现孔隙，导致镀层耐蚀性降低。

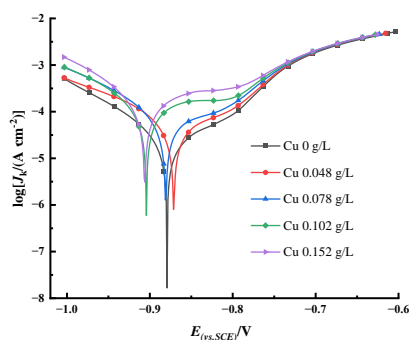


图7 不同镀层塔菲尔曲线

Fig.7 Tafel curves with different coatings

表5 塔菲尔曲线拟合结果

Tab.5 Tafel curve fitting results

杂质铜离子浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$I_{\text{corr}}/(\times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
0	-0.879 4	2.869 6
0.048	-0.900 4	7.009 9
0.078	-0.897 2	8.773 8
0.102	-0.897 1	14.758
0.152	-0.899 5	17.661

## 2.6 镀层钛含量

对不同镀层钛含量进行测试，取平均值，如图所示。

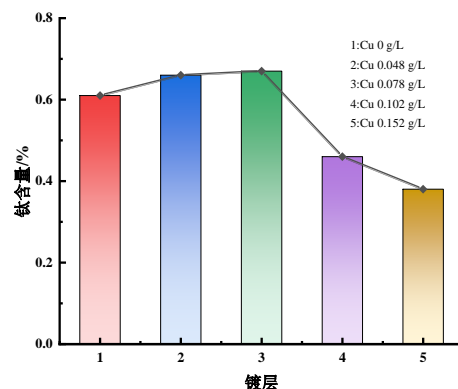


图8 不同镀层钛含量

Fig.8 Titanium content of different coatings

如图8所示，当铜离子杂质在0.078 g/L以下时，对镀层钛含量影响不大，基本都在0.6%~0.7%左右，当镀液中铜离子杂质超过0.078 g/L时，镀层钛含量急剧下降，下降到0.4%左右。由于镀层中的钛对氢有较强的吸收作用<sup>[16]</sup>，会储存在镀层当中，阻挡氢接触到基体，并且在后续的除氢过程中释放出去。说明杂质铜离子会使镀层钛含量下降，会降低镀层的抗氢脆性能<sup>[17]</sup>。分析应该是镀液中杂质铜离子浓度较高时，在电沉积过程中，铜离子的沉积电位比氢离子的更正，镀层表面附近铜离子大量得到电子析出悬浮在镀液中和沉积在镀层表面，镀层界面产生的还原氢减少，镀层界面pH上升较少，镀层界面产生的氢氧根离子减少，导致与镀液中的钛离子反应的氢氧根减少，生成的TiO<sub>2</sub>减少，从而导致镀层钛含量降低<sup>[18]</sup>。

## 2.7 渗氢曲线

如图9所示，在开始上升阶段，正常镀液的渗氢电流最大，达到了 $6.5 \times 10^{-5} \text{ A/dm}^2$ ，而含有杂质铜离子的镀液的渗氢电流更小一些，最高的为0.152 g/L铜离子的镀液，为 $3.8 \times 10^{-5} \text{ A/dm}^2$ ，其它的均在 $2 \times 10^{-5} \text{ A/dm}^2$ 左右。这是由于在开始电沉积时，镀液中的铜离子比氢更容易沉积，减少了还原氢的产生<sup>[19]</sup>。当镀液中杂质铜离子在0.078 g/L以下时，镀液的渗氢电流稳定在 $0.5 \times 10^{-5} \text{ A/dm}^2$ 左右，比正常镀液的稳定电流更低一些，说明含有微量杂质铜离子的镀液的镀层的抗渗氢能力略有增加，分析应该是在电沉积过程中镀液中析出的铜杂质减少了还原氢的产生，使渗透过去的还原氢减少，导致渗氢电

流降低<sup>[20]</sup>。同时微量沉积的铜可能会对前期镀层的孔隙起填充作用,阻挡部分还原氢渗透过去,使前期上升的最大渗氢电流减少。而当镀液中杂质铜离子浓度超过0.078 g/L时,在前期电沉积过程中,杂质铜离子浓度较高,析氢减弱,产生的还原氢减少,开始渗透过去的还原氢也较少。但是杂质铜离子含量较高,导致镀层钛含量降低,镀层中钛的减少导致对还原氢的吸收减少,同时镀层上沉积的铜更多,铜与镉的晶粒大小不一致,根据镀层微观形貌也可知,镀层晶粒尺寸增大,镀层孔隙率增加。因此,高浓度杂质铜离子下的镉钛镀层的抗渗氢能力减弱。

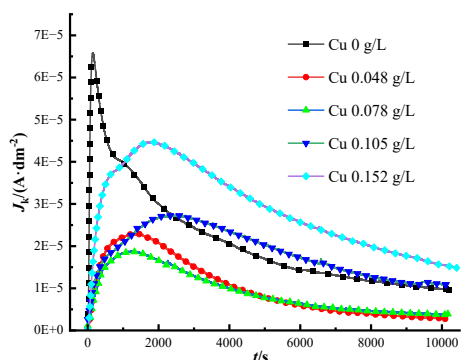


图 9 不同杂质铜离子镀液的渗氢曲线

Fig.9 Hydrogen infiltration curves of copper ion baths with different impurities

### 3 结论

本文系统研究了杂质铜离子对300M超高强度钢无氰电镀镉钛镀层性能的影响,通过实验研究获得的主要结论有:

(1) 镀液中存在杂质铜离子,对阴极过程的镉离子沉积电位影响不大,但会导致阳极过程镀液的电流效率降低,镀层中会夹杂铜;

(2) 镀液中存在杂质铜离子,会使镉钛镀层表面变粗糙,使镀层表面由平整凸起变成花束球状,镀层的晶粒尺寸增大,择优取向基本不发生改变;

(3) 镀液中存在杂质铜离子,当浓度超过0.078 g/L时,镀层会发黑,镀层的自腐蚀速率大幅度升高,镀层耐蚀性降低;镀层钛含量从0.6%左右降低到0.4%左右,使镀层的抗渗氢能力下降。

### 参考文献

[1] 宣晓东. 高强度钢的表面防护及氢脆问题[J]. 电镀与精

饰, 1998(3): 27-29.

- [2] 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.
- [3] 李江, 李博, 焦遥, 等. AF1410 超高强度钢表面防护工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2020(8): 23-26.
- [4] 郝江华, 高晓颖, 王浩军, 等. 不同钢铁表面无氰镀镉钛和氰化镀镉钛镀层性能差异[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(4): 59-65.
- [5] 李旭勇, 李琼, 魏娜, 等. 无氰镉钛镀液中钛离子浓度对镀层性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(12): 15-24.
- [6] 郭崇武, 王小东. 氯化钾无氰镀镉故障分析与处理[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(23): 1271-1272.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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. EDTA 体系电镀镉及镉—镍合金工艺及性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [13] 汤智慧, 张晓云, 陆峰, 等. 镀层结构与氢脆关系研究[J]. 材料工程, 2006(10): 37-42.
- [14] 陈琛骞, 张文娟, 夏柳, 等. 镉电解沉积过程中共存阳离子的反应行为[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 11(7): 1-10.
- [15] 肖涛, 谢焕钧, 柳鑫, 等. 柠檬酸铵对 5, 5-二甲基乙内酰胺配位体系碱性无氰镀镉的影响[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(8): 46-51.
- [16] 郭敏, 彭乔. 钛及其合金的氢脆腐蚀[J]. 辽宁化工, 2001(8): 345-348.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [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.