

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.04.009

## 不同钢铁表面无氰镀镉钛和氰化镀镉钛镀层性能差异

郝江华<sup>1</sup>, 高晓颖<sup>1\*</sup>, 王浩军<sup>1</sup>, 段党全<sup>1</sup>, 詹中伟<sup>2</sup>, 张骥<sup>2</sup>(1. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089; 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:** 在不同钢铁基体表面进行无氰镀镉钛和氰化镀镉钛, 对比不同钢铁基体表面两种工艺的镀层氢脆性能、疲劳性能和拉伸性能。结果表明: 300M 钢和 4340 钢进行无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后的氢脆性能差异不明显。300M 钢和 50CrVA 钢进行无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后, 疲劳性能有较小的变化。50CrVA 钢进行无氰镀镉钛后疲劳极限相比裸材降低了 1.5%, 进行氰化镀镉钛后疲劳极限相比裸材提高了 5.0%; 300M 钢进行无氰镀镉钛后疲劳极限相比裸材增加了 3%; 进行氰化镀镉钛后疲劳极限相比裸材降低了 7%。无氰电镀镉钛对 300M 钢和 50CrVA 钢基体拉伸性能影响较小, 相比于裸材, 各项指标数值波动均在 5% 以内。

**关键词:** 电镀镉钛; 疲劳; 氢脆; 拉伸性能

**中图分类号:** TQ153.2      **文献标识码:** A

## Differences in performance between cyanide free cadmium titanium plating and cyanide plated cadmium titanium plating on different steel surfaces

Hao Jianghua<sup>1</sup>, Gao Xiaoying<sup>1\*</sup>, Wang Haojun<sup>1</sup>, Duan Dangquan<sup>1</sup>, Zhang Zhongwei<sup>2</sup>,  
Zhang Qi<sup>2</sup>(1. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China; 2. Aviation Key  
Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material,  
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Surface Engineering Institution, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Cyanide free cadmium titanium plating and cyanide cadmium titanium plating were performed on the surfaces of different steel substrates, and the hydrogen embrittlement, fatigue, and tensile properties of the coatings were compared between the two processes on the surfaces of different steel substrates. The results show that there is no significant difference in hydrogen embrittlement performance between 300M steel and 4340 steel after cyanide free cadmium titanium plating and cyanide plated cadmium titanium plating. After cyanide free cadmium titanium plating and cyanide plated cadmium titanium plating on 300M steel and 50CrVA steel, there was a small change in fatigue performance. After cyanide free cadmium titanium plating on 50CrVA steel, the fatigue limit was reduced by 1.5% compared to the bare material, and after cyanide plating on cadmium titanium, the fatigue limit was increased by 5.0% compared to the bare material. After cyanide free cadmium titanium plating at 300M steel, the fatigue limit increased by 3% compared to the bare material. After cyanide plating cadmium ti-

收稿日期: 2023-09-12

修回日期: 2024-02-27

作者简介: 郝江华(1984—), 男, 本科, 高级工程师, email: haojianghua6625@163.com

\*通信作者: 高晓颖(1992—), 女, 博士, 工程师, email: nycious@163.com

tanium, the fatigue limit was reduced by 7% compared to bare materials. Cyanide free electroplating of cadmium titanium has little effect on the tensile properties of 300M steel and 50CrVA steel matrices, and compared to bare materials, the fluctuation of various index values is within 5%.

**Keywords:** cadmium titanium plating; fatigue; hydrogen embrittlement; tensile property

电镀镉钛凭借高耐蚀性、低氢脆性等优点,在钢铁零件表面得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。镉钛镀层对于钢是一种阳极性镀层,特别适于与海水、海雾直接接触的零件防护,防护性能优于镉、锌镀层<sup>[4-6]</sup>。国外先进飞机超高强度钢(如F/A18、F-22、B767、JSF35等)均采用了镉-钛镀层进行防护<sup>[7-9]</sup>。目前,电镀镉钛已经被成熟应用在40CrNi2Si2MoVA钢、16Co14Ni10Cr2Mo钢、30CrMnSiNi2A钢等超高强度钢的防护上,并达到了美军标MIL-STD-1500要求<sup>[10-12]</sup>。目前所使用的电镀镉钛工艺含有氰化物。氰化物有剧毒,不仅对人体和环境有的危害,也在储存、运输和后处理等方面带来了麻烦<sup>[13-15]</sup>。航空工业一直在推进绿色环保表面处理工艺替代高污染工艺,无氰电镀镉钛工艺也是其中一项<sup>[16-18]</sup>。

本研究针对西飞公司对高强度钢无氰环保技术的需求,开展无氰电镀镉钛和氰化电镀镉钛在不同钢铁基体表面镀层性能的研究,通过性能试验,为替代现行氰化电镀镉钛工艺提供数据支撑。

## 1 试验

### 1.1 试样准备

进行室温旋转弯曲疲劳试验和拉伸性能试验的试样材料为300M钢和50CrVA钢,进行氢脆试验的试样材料为300M钢和4340 F519试棒。

### 1.2 试验项目

#### 1.2.1 疲劳试验

按HB 5287《金属材料轴向加载疲劳试验方法》测定同种基体材料、氰化镀镉钛及无氰镀镉钛后S-N曲线。试验频率为80~120 Hz,试验温度为室温,环境为空气;加载方式为轴向加载,载荷为正弦波,所用最小应力和最大应力之比 $R=0.1$ ,应力集中系数 $K_t=1$ 。采用成组法进行试验,选取4~5个不同应力水平载荷(每组应不少于3根试样)、高周疲劳周次最高为1000万次、置信区间在90%以上。

#### 1.2.2 氢脆试验

300M钢氢脆性能评价均按HB 5067.1《镀覆工

艺氢脆试验第1部分:机械方法》通过持久拉伸试验评价工艺的氢脆性能。4340 F519(1a.2)氢脆性能评价均按ASTM F519《Standard Test Method for Mechanical Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating/Coating Processes and Service Environments》通过持久拉伸试验评价工艺的氢脆性能。

#### 1.2.3 拉伸试验

按HB 5143《金属室温拉伸试验方法》测试同种基体材料、氰化镀镉钛及无氰镀镉钛后的拉伸试棒。

## 2 结果与讨论

### 2.1 50CrVA钢和300M钢经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后的疲劳性能

为了评价无氰镀镉钛和氰化镀镉钛对50CrVA钢和300M钢的影响,采用旋转弯曲疲劳测定不同电镀次数下的疲劳寿命,采用三参数非线性模型进行S-N曲线拟合。S为材料标准试件疲劳强度,N为疲劳寿命。

#### 2.1.1 50CrVA钢

50CrVA钢空白试样、无氰镀镉钛后试样和氰化镀镉钛后试样的疲劳实验结果分别见表1、2和表3,采用三参数模型进行S-N曲线拟合,拟合结果如图1所示。

对比表1、2和表3的数据,空白试样、无氰镀镉钛后试样和氰化镀镉钛后试样的疲劳极限分别为402 MPa、398 MPa和422 MPa。从结果来看,无氰镀镉钛疲劳极限相比裸材降低了1.5%,氰化镀镉钛疲劳极限相比裸材提高了5.0%。相对于裸材的疲劳极限,经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后,试样的疲劳极限变化幅度很小,对材料的使用不会造成太大的影响。

从图1来看,无氰电镀工艺处理后疲劳试棒的S-N曲线与基材的S-N曲线几乎一致,这说明无氰电镀镉钛工艺没有改变基材的疲劳性能;氰化电镀镉钛工艺处理后的疲劳试棒的疲劳性能略高于裸材,证明氰化电镀镉钛没有降低基材的疲劳性能。

表 1 空白试样疲劳性能

Tab.1 Fatigue performance of blank sample

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
成组法	第一级	500	$5.67 \times 10^4$	$6.68 \times 10^4$
			$4.07 \times 10^4$	
			$9.10 \times 10^4$	
			$9.51 \times 10^4$	
	第二级	460	$1.59 \times 10^5$	$2.08 \times 10^5$
			$2.31 \times 10^5$	
			$2.65 \times 10^5$	
			$1.95 \times 10^5$	
	第三级	430	$4.00 \times 10^5$	$5.56 \times 10^5$
			$8.65 \times 10^5$	
			$4.46 \times 10^5$	
			$6.2 \times 10^5$	
升降法	415		$7.76 \times 10^5$	疲劳极限 402 MPa
			$4.3 \times 10^5$	
			$8.72 \times 10^5$	
	400		$>10^7$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$1.35 \times 10^6$	
			$9.15 \times 10^6$	
	385		$>10^7$	
			$>10^7$	

2.1.2 300M 钢

300M 钢空白试样、无氰电镀镉钛后试样和氰化电镀钛后试样的疲劳实验结果分别见表 4、5 和表 6，采用三参数模型进行  $S-N$  曲线拟合，拟合结果如图 2 所示。

对比表 4、5 和表 6 的数据，空白试样、无氰电镀镉钛后试样和氰化电镀钛后试样的疲劳极限分别为 905 MPa、932 MPa 和 841 MPa。从结果来看，无氰电镀镉钛疲劳极限相比于裸材增加了 3%；氰化电镀钛疲劳极限相比于裸材降低了 7%。相对于裸材的疲劳极限，经过无氰电镀镉钛和氰化电镀钛后试样的疲劳极限变化幅度很小，对材料的使用不会造成太大的影响。

从图 2 结果来看，无氰电镀工艺处理后疲劳试棒的  $S-N$  曲线比基材的  $S-N$  曲线略高，这说明无氰电镀镉钛工艺对基材的疲劳性能没有不利影响。

表 2 无氰电镀镉钛后疲劳性能

Tab.2 Fatigue performance after cyanide free electroplating of cadmium titanium

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
成组法	第一级	500	$6.91 \times 10^4$	$9.02 \times 10^4$
			$9.70 \times 10^4$	
			$1.21 \times 10^5$	
			$8.04 \times 10^5$	
	第二级	460	$9.15 \times 10^4$	$1.95 \times 10^5$
			$2.10 \times 10^5$	
			$1.93 \times 10^5$	
			$1.72 \times 10^5$	
	第三级	430	$2.06 \times 10^5$	$4.21 \times 10^5$
			$6.70 \times 10^5$	
			$3.45 \times 10^5$	
			$3.09 \times 10^5$	
升降法	415		$6.22 \times 10^5$	疲劳极限 398 MPa
			$1.98 \times 10^6$	
			$8.68 \times 10^5$	
	400		$1.8 \times 10^6$	
			$>10^7$	
			$1.52 \times 10^6$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
	385		$>10^7$	
			$>10^7$	

2.2 300M 钢和 50CrVA 经过无氰电镀镉钛和氰化电镀钛后的拉伸性能

2.2.1 300M 钢

对 300M 钢空白试验、无氰电镀镉钛后和氰化电镀钛后的 300M 试棒进行拉伸实验，研究电镀镉钛工艺对 300M 拉伸性能的影响，实验结果见表 7。对比电镀镉钛后基材的抗拉强度，其中氰化电镀钛下降 0.5%，无氰电镀镉钛下降 1.8%；对比电镀镉钛后基材的断后伸长率，其中氰化电镀钛上升 1%，无氰电镀镉钛下降 1%；对比电镀镉钛后基材的屈服强度，其中氰化电镀钛下降 2.4%，无氰电镀镉钛下降 1.0%。综上可知，无氰电镀镉钛和氰化电镀钛工艺对基体拉伸性能影响不大，各项指标数值波动均在 5% 以内。

2.2.2 50CrVA 钢

对 50CrVA 空白试验、无氰电镀镉钛后和氰化

表3 50CrVA 经过氰化电镀镉钛后疲劳性能

Tab.3 Fatigue performance of 50CrVA after cyanide electroplating of cadmium titanium

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿命/ cycle
成组法	第一级	550	$4.6\times 10^4$	$4.21\times 10^5$
			$4.96\times 10^4$	
			$4.35\times 10^5$	
			$4.52\times 10^5$	
	第二级	500	$1.73\times 10^5$	$1.54\times 10^5$
			$1.96\times 10^5$	
			$1.27\times 10^5$	
			$1.29\times 10^5$	
	第三级	445	$5.23\times 10^5$	$5.98\times 10^5$
			$5.75\times 10^5$	
			$4.74\times 10^5$	
			$8.98\times 10^5$	
升降法	430		$>10^7$	疲劳极限 422 MPa
			$>10^7$	
			$2.50\times 10^6$	
			$3.10\times 10^6$	
	415		$1.70\times 10^6$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$1.83\times 10^6$	
	400		$>10^7$	
			$>10^7$	

表4 300M 钢空白试样疲劳性能

Tab.4 Fatigue performance of blank sample of 300M

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿命/ cycle
成组法	第一级	1100	$5.10\times 10^4$	$5.16\times 10^4$
			$2.80\times 10^4$	
			$4.40\times 10^4$	
			$4.20\times 10^4$	
	第二级	1050	$7.50\times 10^4$	$7.5\times 10^4$
			$8.10\times 10^4$	
			$8.40\times 10^4$	
			$6.20\times 10^4$	
	第三级	1000	$2.46\times 10^6$	$3.79\times 10^6$
			$6.52\times 10^6$	
			$4.78\times 10^6$	
			$2.69\times 10^6$	
升降法	960		$>10^7$	疲劳极限 905 MPa
			$8.03\times 10^5$	
			$4.11\times 10^6$	
	920		$4.67\times 10^6$	
			$3.75\times 10^5$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$2.95\times 10^6$	
	880		$>10^7$	
			$2.22\times 10^6$	

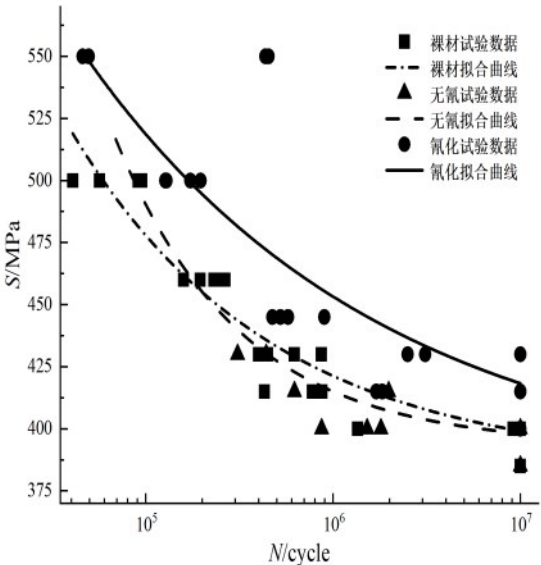


图1 50CrVa 试样旋转弯曲疲劳试验拟合 S-N 曲线

Fig.1 Fitting S-N curves for rotational bending fatigue test of 50CrVa sample

电镀镉钛后的 50CrVA 试棒进行拉伸实验,研究电镀镉钛工艺对 50CrVA 拉伸性能的影响,实验结果见表 8。对比电镀镉钛后基材的抗拉强度,其中氰化电镀镉钛上升 1.4%,无氰电镀镉钛上升 1.1%;对比电镀镉钛后基材的断后伸长率,其中氰化电镀镉钛下降 2.2%,无氰电镀镉钛下降 2.6%;对比电镀镉钛后基材的屈服强度,其中氰化电镀镉钛上升 4.7%,无氰电镀镉钛上升 4.2%。因此可以认为:无氰电镀镉钛和氰化电镀镉钛工艺对基体拉伸性能影响不大,各项指标数值波动均在 5% 以内。

2.3 300M 钢和 4340 钢经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后的氢脆性能

2.3.1 300M 钢

对 3 根空白试样进行抗拉强度测定,试验数据见表 9 所示,抗拉强度均值为 2605.12 MPa。

将经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛的 300M 钢试

表 5 300M 钢经过无氰电镀镉钛后疲劳性能

Tab.5 Fatigue performance of 300M after cyanide free cadmium titanium electroplating

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
成组法	第一级	1100	$6.30 \times 10^4$	$8.31 \times 10^4$
			$7.40 \times 10^4$	
			$1.84 \times 10^5$	
			$2.80 \times 10^5$	
	第二级	1050	$9.80 \times 10^5$	$4.38 \times 10^5$
			$3.46 \times 10^5$	
			$4.22 \times 10^5$	
			$2.58 \times 10^5$	
	第三级	1000	$2.88 \times 10^6$	$2.46 \times 10^6$
			$2.36 \times 10^6$	
			$2.19 \times 10^6$	
			$2.41 \times 10^6$	
升降法	415		$>10^7$	疲劳极限 932 MPa
			$5.55 \times 10^6$	
			$3.46 \times 10^6$	
	400		$>10^7$	
			$9.82 \times 10^6$	
			$9.54 \times 10^6$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
	385		$>10^7$	
			$>10^7$	

表 6 300M 钢经过氰化电镀镉钛后疲劳性能

Tab.6 Fatigue performance of 300M after cyanide electroplating of cadmium titanium

项目		载荷/ MPa	寿命/cycle	中值疲劳寿 命/cycle
成组法	第一级	1100	$3.95 \times 10^4$	$4.72 \times 10^4$
			$4.14 \times 10^4$	
			$8.56 \times 10^4$	
			$3.54 \times 10^5$	
	第二级	900	$9.04 \times 10^4$	$2.56 \times 10^5$
			$9.20 \times 10^4$	
			$2.50 \times 10^5$	
			$2.08 \times 10^6$	
	第三级	860	$1.75 \times 10^5$	$3.31 \times 10^6$
			$8.61 \times 10^6$	
			$6.21 \times 10^6$	
			$7.9 \times 10^6$	
升降法	830		$2.08 \times 10^5$	疲劳极限 841 MPa
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
			$>10^7$	
	800		$>10^7$	
			$>10^7$	
	700		$>10^7$	

样在一定载荷下进行持久拉伸,12 组试样在 200 h 内均未发生断裂,试验数据见表 10,符合标准 ASTM F519—2017a 氢脆性能要求,试样氢脆性能合格。实验结果说明重复电镀对 300M 钢的氢脆性能影响不大,在可接受范围内。

2.3.2 4340 钢

对 3 根空白试样进行抗拉强度测定,试验数据见表 11 所示,抗拉强度均值为 2353 MPa。

将经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛的 4340 钢试样在一定载荷下进行持久拉伸,12 组试样在 200 h 内均未发生断裂,试验数据见表 12,符合标准 ASTM F519—2017a 氢脆性能要求,试样氢脆性能合格。实验结果说明重复电镀对 4340 钢的氢脆性能影响不大,在可接受范围内。

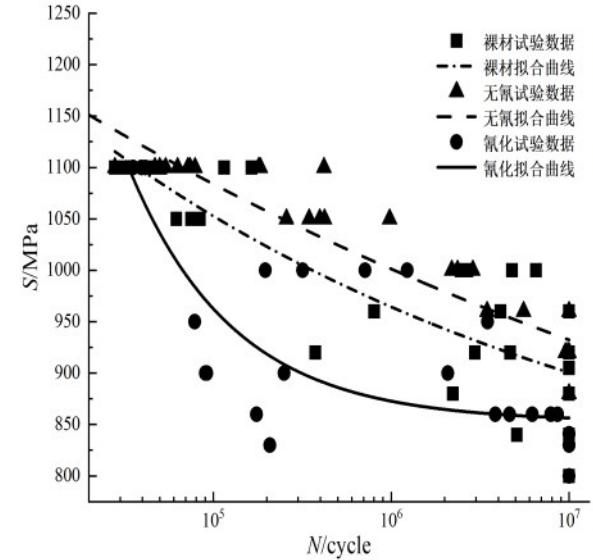


图 2 300M 试样旋转弯曲疲劳试验拟合 S-N 曲线

Fig.2 Fitting S-N curves for rotational bending fatigue test of 300M sample



表7 300M钢镀镉钛后的拉伸性能  
Tab.7 Tensile properties of 300M sample

试样	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	断后伸长率 $\delta_5$ /%	屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ /MPa
空白	2001	10.0	1687
无氰电镀镉钛	1963	10.1	1646
氰化电镀镉钛	1990	9.9	1670

表8 50CrVA试样无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后的拉伸性能  
Tab.8 Tensile properties of 50CrVA samples after cyanide free cadmium titanium plating and cyanide plated cadmium titanium plating

试样	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	断后伸长率 $\delta_5$ /%	屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ /MPa
空白	744	23.0	614
无氰电镀镉钛	752	22.4	643
氰化电镀镉钛	755	22.5	640

表9 300M钢空白试样抗拉强度  
Tab.9 Tensile strength of blank sample of 300M steel

试样号	直径/mm	抗拉强度/ MPa	抗拉强度均 值/MPa
1	4.527	2541.42	2605.12
2	4.523	2609.09	
3	4.522	2664.85	

表10 300M钢镀镉钛后试样的氢脆试验数据  
Tab.10 Hydrogen embrittlement test data of 300M steel samples plated cadmium titanium

试样号	表面处理工艺	缺口处直 径/mm	试验载荷/ N	持续时 间/h
1	氰化电镀镉钛	4.532	31517	>200
2		4.533	31530	
3		4.524	31405	
4		4.535	31558	
5		4.527	31447	
6		4.526	31433	
7	无氰电镀镉钛	4.521	31364	>200
8		4.523	31391	
9		4.529	31475	
10		4.525	31419	
11		4.515	31281	
12		4.527	31447	

表11 4340钢空白试样抗拉强度  
Tab.11 Tensile strength of blank sample of 4340 steel

试样号	直径/mm	抗拉强度/ MPa	抗拉强度均 值/MPa
1	4.526	2401	2353
2	4.524	2317	
3	4.527	2341	

表12 4340钢镀镉钛后的氢脆试验数据  
Tab.12 Hydrogen embrittlement test data of 4340 steel

试样号	表面处理工艺	缺口处直 径/in	试验载 荷/N	持续时 间/h
1	氰化电镀镉钛	0.2358	49719	>200
2		0.2349	49361	
3		0.2346	49256	
4		0.2346	49277	
5		0.2346	49298	
6		0.2350	49487	
7	无氰电镀镉钛	0.2344	49277	>200
8		0.2349	49508	
9		0.2348	49487	
10		0.2346	49424	
11		0.2353	49740	
12		0.2347	49508	

3 结论

(1)以50CrVA为基材,镉钛镀层未对基体疲劳性能产生显著负面影响,裸材、无氰镀镉钛、氰化镀镉钛的疲劳极限分别为:402 MPa、398 MPa、422 MPa,无氰镀镉钛疲劳极限相比裸材降低了1.5%,氰化镀镉钛疲劳极限相比裸材提高了5.0%.;以300M钢为基材,镉钛镀层未对基体疲劳性能产生显著负面影响,裸材、无氰镀镉钛及氰化镀镉钛的疲劳极限分别为:905 MPa、932 MPa、841 MPa,无氰镀镉钛疲劳极限相比于裸材增加了3%;氰化镀镉钛疲劳极限相比于裸材降低了7%。相对于裸材的疲劳极限,经过无氰镀镉钛和氰化镀镉钛后试样的疲劳极限变化幅度很小,对材料的使用不会造成太大的影响。

(2)300M钢氢脆试棒经过氰化和无氰镀镉钛后进行200 h延迟拉伸未断裂;按照ASTM F519的规定,4340钢1a.2氢脆试棒经过氰化和无氰镀镉钛后进行200 h延迟拉伸未断裂。无氰电镀镉钛和氰

化电镀镉钛工艺对不同钢材的氢脆性能的影响不大;

(3)综合不同基材影响,无氰电镀镉钛对基体拉伸性能影响较小,相比于裸材,各项指标数值波动均在5%以内。

### 参考文献

- [1] 汤智慧,陆峰,张晓云,等. 高强度钢防护现状[C]//第四届全国腐蚀大会论文集. 北京: 中国腐蚀与防护协会, 2003: 561-564.
- [2] 屠振密. 电镀合金原理和工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 273.
- [3] 秦月文,刘佑厚. 腐蚀环境中Q420qD钢十字接头的疲劳性能试验与数值研究[J]. 材料保护, 2021, 12(1): 67-71.
- [4] 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): 81-84.
- [5] 李博. 控制超高强度钢零件电镀渗氢,预防氢脆发生的方法[J]. 新技术新工艺, 2015(9): 100-102.
- [6] 刘佑厚. 飞机用高强度钢的防护[C]//中国腐蚀与防护学会航空航天表面工程专业委员会技术论文集. 南昌, 1992: 27-40.
- [7] 张允诚,胡如南,向荣. 电镀手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 1011-1012.
- [8] Nascimento M P, Souza R C, Pigatin W L, et al. Effect of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 Aeronautical steel [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 607-618.
- [9] 柳玉波. 表面处理工艺大全[M]. 北京: 中国计量出版社, 1996: 139-142.
- [10] 赵志江,杨宝利. 弹簧的氢脆断裂特征与原因分析[J]. 国防技术基础, 2006, 3(8): 41-43.
- [11] 张雅,方军,刘金龙,等. 1Cr15Ni4Mo3N钢螺栓的断裂分析[J]. 热处理, 2020, 35(5): 53-56.
- [12] 张挺,赵峥,倪莉,等. 高强度螺栓氢脆问题研究[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(7): 28-32.
- [13] Watanabe H, Hayashi S, Honma H, et al. Microbump formation by noncyanide gold electroplating[J]. Journal of the Electrochemistry Society, 1999, 146(2): 574-582.
- [14] Sato J, Kato M, Otani H, et al. Development of new electrolytic and electroless gold plating processes for electronics applications[J]. Journal of the Electrochemistry Society, 2002, 149: 168-174.
- [15] 秦足足,李建三,徐金来,等. 国内外无氰镀铜工艺研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(3): 149-152.
- [16] 毕晨,刘定富,曾庆雨,等. 丁二酰亚胺体系无氰镀银添加剂的研究[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(3): 131-135.
- [17] Krishnan R M, Kanagasabapathy M, Jayakrishnan S, et al. Electroplating of copper from a non-cyanide electrolyte[J]. Plating and Surface Finishing, 1995, 82(7): 56-59.
- [18] 王宗雄,鲍新华,周长虹,等. 无氰镀锌工艺的应用及典型配方[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(1): 34-39.