

# 飞机表面水基清洗剂对金属材料腐蚀及氢脆性能影响研究

Effect of Water-based Cleaning Compound for Aircraft Exterior Surface on Metals Corrosion and Hydrogen Embrittlement

李 斌<sup>1</sup>, 张晓云<sup>1</sup>, 汤智慧<sup>1</sup>, 左新章<sup>2</sup>, 宇 波<sup>1</sup>  
(1 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 中国石油大学, 北京 102249)

LI Bin<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoyun<sup>1</sup>, TANG Zhihui<sup>1</sup>,  
ZUO Xin zhang<sup>2</sup>, YU Bo<sup>1</sup>( 1 Beijing Institute of Aeronautical Materials,  
Beijing 100095, China; 2 China University Petroleum, Beijing 102249, China)

摘要: 研究了 AHC-1 及 AHC-5 两种飞机表面水基清洗剂对飞机表面典型金属材料的腐蚀性能及高强度钢氢脆性能的影响, 探讨了应用缓蚀剂控制高强度钢氢脆的有效性以及用电化学极化法预测高强度钢在清洗剂中的氢脆倾向性。

关键词: 飞机; 清洗剂; 缓蚀剂; 腐蚀; 氢脆; 电化学极化

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)06-0055-06

**Abstract:** Effect of AHC-1 and AHC-5 water-based cleaning compounds for aircraft exterior surface on the corrosion of aircraft typical metals and the hydrogen embrittlement for high strength steel was studied. The effectivity of controlling hydrogen embrittlement by the inhibitor and the possibility of predicting hydrogen embrittlement through electrochemical polarization method were discussed.

**Key words:** aircraft; cleaner; inhibitor; corrosion; hydrogen embrittlement; electrochemical polarization

清洗是最常用的飞机腐蚀控制手段之一。飞机表面清洗剂主要用于机身外表面或机舱内部某些部位的清洗, 主要有水基型和溶剂型, 还有一些特种清洗剂, 如具有研磨作用的含研磨剂清洗剂, 不会划伤清洗表面的含特种橡胶微粒清洗剂等。飞机是高技术高价值产品, 清洗飞机时最重要的是安全性, 飞机表面清洗剂除了对表面污垢有良好的去除性外, 还必须保证对接触到的飞机金属材料和非金属无不良影响。AHC-1 飞机表面水基清洗剂<sup>[1,2]</sup>和 AHC-5 飞机表面水基乳液型清洗剂是北京航空材料研究院近年来参照美军标 MIL-PRF-85570D( II 型)<sup>[3]</sup>技术指标研制的产品, AHC-1 清洗剂对飞机表面普通型油污有去污效果良好, AHC-5 清洗剂对飞机表面普通型油污及含润滑油、液压油等顽固型油污均有良好清洗效果。AHC-1 和 AHC-5 均为可生物降解的环保型清洗剂, 与飞机表面涂层、有机玻璃、橡胶、密封剂、绝缘导线等非金属材料相容性良好。本工作主要研究 AHC-1 及 AHC-5 清洗剂对飞机表面常用金属材料的全浸腐蚀、缝隙腐蚀、低氢脆镀锡层腐蚀性能以及高强度钢氢脆性能的

影响, 探讨了应用缓蚀剂控制高强度钢氢脆以及用电化学极化法预测高强度钢在清洗剂中的氢脆倾向性。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

选用国产飞机表面常用的典型金属及镀覆层材料。

#### (1) 全浸腐蚀实验材料

7A04-T6 铝合金、7B04-T6 铝合金、TC4 钛合金、45 钢、化学氧化的 MB2 镁合金、化学氧化的 MB8 镁合金。试样尺寸: 50mm × 25mm × ( 1~ 4) mm。镁合金按 HB/Z 5078- 1978《镁合金化学氧化工艺》中规定的明矾法进行铬酸盐化学氧化。

#### (2) 缝隙腐蚀实验材料

2A12-T3 包铝、2A12-T3 裸铝、7A04-T6 包铝、7A04-T6 裸铝、2A12-T3 裸铝铬酸阳极化、7A04-T6 裸铝铬酸阳极化。试样尺寸: 50mm × 100mm × ( 1~ 4) mm。铬酸阳极化按 HB/Z118- 1987《铝及铝合金铬酸阳极氧化工艺》进行。

(3) 低氢脆镀镉层腐蚀实验材料

30CrMnSiA 松孔镀镉 10~ 15μm, 30CrMnSiA 镀镉-钛 10~ 15μm, 30CrMnSiA 氯化铵镀镉 10~ 15μm。试样尺寸: 50mm × 25mm × ( 1~ 4) mm。松孔镀镉按 ASTM F1111—02《飞机维护用化学品对低氢脆镀镉层腐蚀性实验方法》规定的工艺镀覆, 镀镉-钛按 HB/Z 107—1986《高强度钢零件低氢脆镀镉-钛工艺》镀覆, 氯化铵镀镉溶液及工艺条件如下:

氯化镉( CdCl<sub>2</sub> · 2. 5H<sub>2</sub>O) 40~ 50g/L; 氯化铵( NH<sub>4</sub>Cl) 200~ 280g/L; 氯化钠( NaCl) 30~ 40g/L; 木工胶 1~ 2g/L; 硫脲( (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS) 7~ 10g/L; 室温, pH 值 4. 0~ 4. 5, 电流密度 0. 5~ 1. 2A/dm<sup>2</sup>, 阳极和阴极面积比 1: 1~ 2: 1。

(4) 高强度钢氢脆实验材料

40CrNi2Si2MnVA( 300M) 钢松孔镀镉、300M 钢镀镉-钛、30CrMnSiNi2A 氯化铵镀镉。试样尺寸符合 HB 5067. 1—2005《镀覆工艺氢脆实验 第 1 部分: 机械方法》中图 1 的要求。松孔镀镉、镀镉-钛、氯化铵镀镉的工艺同上。

1. 2 实验方法

金属材料全浸腐蚀实验按 ASTM F483—02《飞机维护用化学品全浸腐蚀实验方法》要求进行; 缝隙腐

蚀实验按《ASTM F1110—02 夹层腐蚀实验方法》要求进行; 低氢脆镀镉层腐蚀实验按 ASTM F1111—02《飞机维护用化学品对低氢脆镀镉层腐蚀性实验方法》要求进行; 氢脆性能实验参考 ASTM F519—1997《电镀过程及飞机维护用化学品机械氢脆性能实验方法》中缺口拉伸实验要求进行。

2 结果与讨论

2. 1 全浸腐蚀实验结果

飞机表面典型金属材料在 AHG-1 清洗剂和 AHG-5 清洗剂中的全浸腐蚀实验结果见表 1。结果显示, 钢、铝合金、钛合金、镁合金等的外观及质量变化值均符合技术指标规定要求, 而且质量变化值比技术指标规定值小 1~ 2 个数量级( 技术指标为 7A04-T6 铝合金、TC4 钛合金、45 钢的质量变化不超过 0. 04 mg( cm<sup>2</sup> · 24h)<sup>-1</sup>; 化学氧化的 MB2 镁合金的质量变化不超过 0. 20mg( cm<sup>2</sup> · 24h)<sup>-1</sup>), 说明两种清洗剂对多种金属材料均有较好的缓蚀作用。

2. 2 对低氢脆性镉镀层的腐蚀性

AHG-1 清洗剂和 AHG-5 清洗剂对低氢脆镉镀层的腐蚀性实验结果见表 2。该实验考察清洗剂对高强

表 1 全浸腐蚀实验结果  
Table 1 Results of total immersion corrosion

Test solution	Material	Result	
		Appearance	Mass change/ mg( cm <sup>2</sup> · 24h) <sup>-1</sup>
AHG-1 diluted with deionized water( 1: 9)	7A04-T6 aluminum alloy	No obvious change	- 0. 0010
	7B04-T6 aluminum alloy	No obvious change	- 0. 0015
	TC4 titanium alloy	No obvious change	+ 0. 0005
	45 steel	No obvious change	- 0. 0032
	MB2 magnesium alloy, chrome pickled	Passive film showed deep colour homogeneously	- 0. 0097
	MB8 magnesium alloy, chrome pickled	Passive film showed deep colour locally	- 0. 0098
AHG-5 diluted with deionized water( 1: 9)	7A04-T6 aluminum alloy	No obvious change	+ 0. 0016
	7B04-T6 aluminum alloy	No obvious change	+ 0. 0009
	TC4 titanium alloy	No obvious change	+ 0. 0012
	45 steel	No obvious change	- 0. 0012
	MB2 magnesium alloy, chrome pickled	Passive film showed deep colour homogeneously	- 0. 0293
	MB8 magnesium alloy, chrome pickled	Passive film showed deep colour locally	- 0. 0150

Note: mass increase “+”, mass loss “-”.

度钢低氢脆性镀层的腐蚀性,对国内飞机使用的三种高强度钢低氢脆性镀层无氰镀镉-钛镀层、松孔镀镉镀层和氯化铵镀镉层均进行了性能实验。表中实验结果显示,30CrMnSiA 镀镉-钛、30CrMnSiA 松孔镀镉及

30CrMnSiA 氯化铵镀镉在 AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂中的腐蚀性能相似,实验后质量变化值均远低于技术指标规定值(技术指标规定质量变化值不超过  $0.20\text{mg}(\text{cm}^2 \cdot 24\text{h})^{-1}$ )。

表 2 低氢脆性镉镀层的腐蚀实验结果

Table 2 Results of cadmium corrosion of low hydrogen embrittlement

Test solution	Material	Mass change/ $\text{mg}(\text{cm}^2 \cdot 24\text{h})^{-1}$
AHC 1, as received	30CrMnSiA steel Cd-Ti plated	- 0.0724
	30CrMnSiA steel Cd plated in accordance with ASTM F1111- 02	- 0.0608
	30CrMnSiA structural steel Cd plated from ammonium chloride bath	- 0.1209
AHC 1 diluted with deionized water(1: 9)	30CrMnSiA steel Cd-Ti plated	- 0.0784
	30CrMnSiA steel Cd plated in accordance with ASTM F1111- 02	- 0.0784
	30CrMnSiA structural steel Cd plated from ammonium chloride bath	- 0.0851
AHC 5, as received	30CrMnSiA steel Cd-Ti plated	- 0.0072
	30CrMnSiA steel Cd plated in accordance with ASTM F1111- 02	+ 0.0062
	30CrMnSiA structural steel Cd plated from ammonium chloride bath	- 0.0113
AHC 5 diluted with deionized water(1: 9)	30CrMnSiA steel Cd-Ti plated	+ 0.0146
	30CrMnSiA steel Cd plated in accordance with ASTM F1111- 02	+ 0.0062
	30CrMnSiA structural steel Cd plated from ammonium chloride bath	- 0.0102

Note: mass increase"+", mass loss"-.

2.3 缝隙腐蚀

飞机蒙皮存在大量的铝合金搭接结构,当清洗剂渗入搭接缝隙之中,有可能导致缝隙腐蚀。AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂的缝隙腐蚀实验结果显示,与空白去离子水对比,AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂有较好的缓蚀作用,不会导致铝合金发生缝隙腐蚀。两种清洗剂缝隙腐蚀实验结果均符合技术指标要求(技术指标规定清洗剂接触的铝合金表面腐蚀变色不超过 1 级)。表 3 为 AHC-1 清洗剂的缝隙腐蚀实验结果。

2.4 氢脆

飞机起落架、平尾大轴以及部分紧固件等采用 30CrMnSiNi2A,300M 等高强度钢材料,由于高强度钢对氢脆敏感,对其采用低氢脆镀镉防护层,如镀镉-钛、松孔镀镉、氯化铵镀镉等。清洗剂等化学品接触飞机高强度钢材料,有可能导致高强度钢发生氢脆。对

300M 超高强度钢镀镉-钛、300M 钢松孔镀镉和 30CrMnSiNi2A 高强度钢氯化铵镀镉等三种高强度镀层均进行了清洗剂氢脆性能实验。结果显示,分别浸泡在 AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂(包括商品浓度溶液和 10%的去离子水稀释液)氢脆试样均通过 150h 的加载实验,未发生失效断裂,达到技术指标要求。说明 AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂不会导致高强度钢产生氢脆。

2.5 应用缓蚀剂解决清洗剂的氢脆性能问题

在飞机清洗剂研制过程中,必须高度重视对高强度钢氢脆性能的影响,本工作主要采用缓蚀剂解决清洗剂的氢脆性能问题。初期配方 AHC 曾出现此类问题。AHC 在稳定性、对金属腐蚀性、对非金属适应性等方面均合格,但在氢脆性能实验中,浸泡在商品浓度溶液的 300M 钢松孔镀镉试样先后有两根试样未达到 150h 即出现断裂,为判断该断裂是否为氢脆,用扫描

电镜观察了试样断口扫描电镜微观形貌见图 1。图 1 中显示, 1-1<sup>#</sup> 试样断口呈现沿晶和穿晶解理, 并有二次裂纹; 2-1<sup>#</sup> 试样断口呈现沿晶与准解理的穿晶扩展, 并

伴有大量二次裂纹。这些均为典型的脆性断口形貌。表明氢不仅聚集在晶界, 也渗透至晶粒内部, 导致镀镉的 300M 高强度钢发生氢脆断裂。

表 3 AHG 1 清洗剂的缝隙腐蚀实验结果

Table 3 Results of sandwich corrosion of AHG 1 cleaner

Test solution	Sample material	Apperance	Corrosion rating
Blank( deionized water)	2A12T3 alum inum alloy( clad)	Local slight discoloration	1
	7A04T6 alum inum alloy( clad)	No obvious change	0
	2A12-T3( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0
	7A04-T6( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0
AHG 1, as received	2A12T3 alum inum alloy( clad)	No obvious change	0
	7A04T6 alum inum alloy( clad)	No obvious change	0
	2A12-T3( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0
	7A04-T6( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0
AHG 1, dilute with deionized water( 1: 9)	2A12T3 alum inum alloy( clad)	No obvious change	0
	7A04T6 alum inum alloy( clad)	No obvious change	0
	2A12-T3( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0
	7A04-T6( bare, ch rom ic acid anodizing)	No obvious change	0

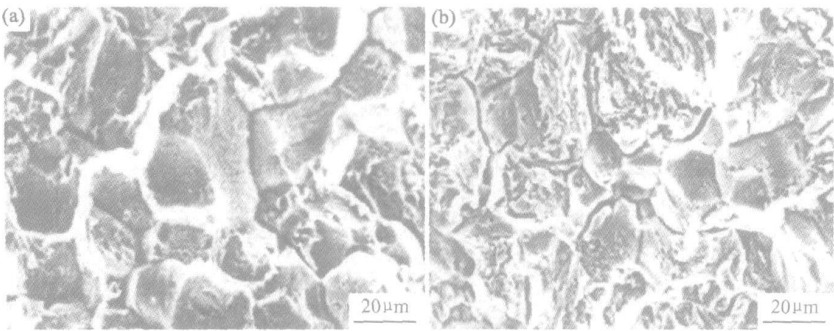
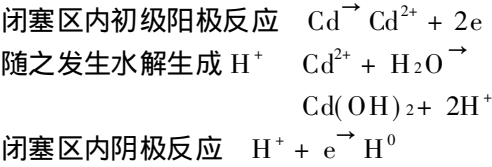


图 1 在 AHG 清洗剂中浸泡的 300M 钢镀 Cd 氢脆试样断口表面微观形貌 (a) 1-1<sup>#</sup> 试样; (b) 2-1<sup>#</sup> 试样

Fig.1 Fracture morphology of 300M Cd plated hydrogen embrittlement specimen after soaking in AHG cleaner (a) specimen 1-1<sup>#</sup> ; (b) specimen 2-1<sup>#</sup>

进一步分析产生氢脆的原因, 认为是由于镀镉层腐蚀引起的“后脆”。高强度钢采用的松孔镀镉或镉-钛镀层, 存在许多微孔或微裂纹(这有利于电镀后烘烤除氢)。图 2 和图 3 分别为松孔镀镉和镉-钛镀层的扫描电镜微观形貌, 清楚显示了松孔镀镉层中存在的微孔及镉-钛镀层中的微裂纹。当试样浸泡在清洗剂中, 一旦镀镉层或镉-钛镀层出现轻微腐蚀, 这些微孔或微裂纹就将成为腐蚀闭塞区。闭塞区内的阳极反应为 Cd 的溶解及 Cd<sup>2+</sup> 的水解, 阴极反应为析氢反应。由于 Cd<sup>2+</sup> 的水解, 使闭塞区内氢离子浓度增加, pH 值降低, 而 pH 值的降低以及闭塞区内的缺氧状态又会降低析氢电位, 从而促进析氢反应的进行, 闭塞区内这种自催化腐蚀使闭塞区内阴极表面(钢基体)上将有大量

新生态原子氢析出, 并部分吸附在钢表面, 成为氢脆的诱发因素。



由上述腐蚀机理判断, 为避免清洗剂导致高强度钢发生氢脆, 关键是控制闭塞区内 Cd 的阳极溶解。在清洗剂中添加少量抑制 Cd 腐蚀的缓蚀剂可以有效阻止闭塞区内的自催化腐蚀, 这是解决氢脆问题的最佳途径。针对镀层孔隙较多且微小的特点, 经分析筛选, 选择了含氮杂环有机缓蚀剂 HNW, 该缓蚀剂与 Cd 螯合能形成络合物并吸附在镀层表面, 形成致密稳

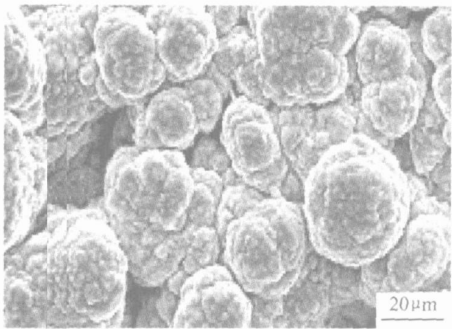


图 2 含孔隙的高强度钢松孔镀镉层表面微观形貌

Fig. 2 Surface morphology of Cd plating on high strength steel with pores

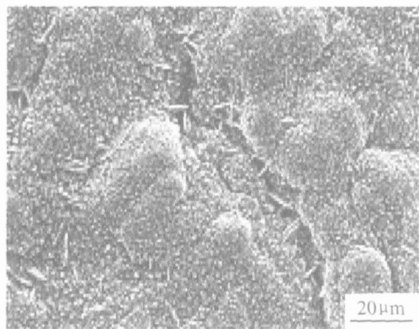


图 3 含微裂纹的高强度钢镉 钛镀层表面微观形貌

Fig. 3 Surface morphology of Cd Ti plating on high strength steel with cracks

定的保护膜,有效阻止闭塞区内电化学反应的进行<sup>[4]</sup>。经过实验验证,在清洗剂中仅添加 0.1% 的 HNW 即可达到抑制氢脆的目的,在 AHG-1 和 AHG-5 清洗剂中均添加了缓蚀剂 HNW,均取得了满意的效果。

2.6 用电化学极化法预测清洗剂对高强度钢氢脆性能影响<sup>[4-6]</sup>

采用 ASTM F519 规定的缺口拉伸力学试样进行清洗剂氢脆性能研究,试样加工要求高,实验时间长(技术指标要求所有试样通过 150h 拉伸),实验费用昂贵。在清洗剂配方研制过程中,不可能经常性地应用该方法对清洗剂进行氢脆性能检测。针对清洗剂导致高强度氢脆的主要是镀镉层的闭塞区自催化腐蚀而引起的电化学析氢反应,本工作提出用电化学极化法预测清洗剂对高强度钢氢脆性能影响。通过电化学极化法测定碳钢松孔镀镉试样在不同清洗剂配方溶液中的腐蚀电流及腐蚀电位,若腐蚀电位正移至安全保护区或有效保护区内,腐蚀电流降低,这就从热力学及动力学两方面阻碍了新生态氢原子的产生,可使高强度钢免受腐蚀及氢脆影响。表 4 为不同配方的电化学极化实验和相应的氢脆实验结果。

表 4 结果显示,与不含缓蚀剂 HNW 的 AHC 比较,添加 HNW 的 AHC-1 清洗剂商品浓度溶液的腐蚀电位由- 824mV 正移至- 728mV,而稀释后的使用浓度溶液的腐蚀电位由- 733mV 正移至- 654mV,腐

表 4 不同清洗剂配方的电化学极化及氢脆实验结果

Table 4 Results of electrochemical polarization test and hydrogen embrittlement test with different cleaner

Cleaner	Test solution	Test method	Result
AHC (without inhibitor HNW)	As received	Electrochemical polarization test	Corrosion potential (mV): - 824; Corrosion current density(μA/cm <sup>2</sup> ): 10.3
		ASTM F519 hydrogen embrittlement test	The first test: two specimens did not fail with 150h , one specimen failed within 24h The second test: two specimens did not fail with 150h , one specimen failed within 10h
	Dilute with deionized water(1: 9)	Electrochemical polarization test	Corrosion potential (mV): - 733; corrosion current density(μA/cm <sup>2</sup> ): 7.02
		ASTM F519 hydrogen embrittlement test	All three specimens did not fail with 150h
AHG 1( containing 0.1% inhibitor HNW)	As received	Electrochemical polarization test	Corrosion potential (mV): - 728; corrosion current density(μA/cm <sup>2</sup> ): 1.66
		ASTM F519 hydrogen embrittlement test	All three specimens did not fail with 150h
	Dilute with deionized water(1: 9)	Electrochemical polarization test	Corrosion potential (mV): - 654; corrosion current density(μA/cm <sup>2</sup> ): 1.51
		ASTM F519 hydrogen embrittlement test	All three specimens did not fail with 150h

蚀电流降低幅度也较大, 表明了缓蚀剂有效抑制了镀镉钢的电化学腐蚀。同时也反映出当电化学极化法测得的清洗剂腐蚀电位在- 650~ - 740mV 之间时, 配方溶液的氢脆性能均合格。由于实验数据有限, 不能完全给出 300M 超高强度钢准确的安全保护区或有效保护区的电位区间, 但- 650~ - 740mV 的区间值可

作为参考值。  
由此可见, 应用电化学极化这一快速实验方法, 可以较好地预测清洗剂对高强度钢氢脆性能影响。在清洗剂研究过程中, 通过电化学实验首先确定配方溶液的腐蚀电位在安全保护区内, 且腐蚀电流较小, 再进行氢脆性能检测, 可有效提高研究工作效率, 节约研究经费。

3 结论

- (1) AHC-1 清洗剂和 AHC-5 清洗剂对飞机表面钢、铜、铝、镁等多种金属材料有良好缓蚀作用, 不会导致铝合金缝隙腐蚀及高强度钢发生氢脆。
- (2) 清洗剂中添加少量抑制 Cd 腐蚀的缓蚀剂

(上接第 25 页)

曲线有较小的失重速率。经过 160℃/2h→200℃/2h 热处理以后, 在 930~ 970cm<sup>-1</sup> 处和 1480cm<sup>-1</sup> 处的 -OH 吸收峰减弱, 在 1220cm<sup>-1</sup> 处的酰胺( 酰亚胺) C—N 吸收峰增强, 1700cm<sup>-1</sup> 左右的> C= O 吸收峰略向低频偏移且低频子峰增大; 在 2240cm<sup>-1</sup> 处的 -C≡N 吸收峰略减小, 而出现了新的 -C= N—吸收谱带。

(2) 发泡和热处理时, MAA/AN/AM 共聚物的分子链上发生了一系列“原位成环”反应, 包括: AM 链节之间, MAA 链节与 AM 链节之间的缩合酰亚胺化反应, MAA 链节与 AN 链节之间的重排酰亚胺化和部分 AN 链节梯形结构化反应等。

(3) 结构中的刚性六元酰亚胺环以及梯形结构大大增强了分子链的刚性, 使 MAA/AN/AM 共聚物泡沫具有优异的力学和耐热性能。

参考文献

[1] 卢子兴, 赵明洁. 泡沫塑料力学性能研究进展[ J ]. 力学与实践, 1998, 20(2): 1- 9.  
[2] SABINE S, WERNER G, NORBERT R, et al. Method for producing block shaped polymethacrylimide foamed materials[ P ]. U S Patent: 6, 670, 405, 2003- 12 30.

HNW 可以有效控制镀镉层的闭塞区内自催化腐蚀, 避免高强度钢发生氢脆。

(3) 应用电化学极化法, 可以较好地预测飞机表面清洗剂对高强度钢氢脆性能的影响。

参考文献

[1] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. 飞机表面清洗剂及清洗技术[ J ]. 材料保护, 2001, 34( 增刊): 74- 75.  
[2] 李斌, 张晓云, 司徒振民. 飞机外表面清洗剂 AHC-1 的研制[ J ]. 材料工程, 1999, (3): 28- 31.  
[3] MIL-PRF-85570D, Cleaning Compound, Aircraft Exterior[ S ].  
[4] 张晓云, 李斌, 熊家锦, 等. 用电化学极化方法研究缓蚀剂对高强度钢氢脆性能的影响[ J ]. 腐蚀与防护, 2000, 21(2): 67- 69.  
[5] 秦月文, 熊家锦, 吴再思, 等. 镉- 钛镀层导致 30CrMnSiNi2A 钢后脆的研究[ J ]. 中国腐蚀与防护学报, 1983, 3(2): 97- 102.  
[6] 李斌, 张晓云, 汤智慧, 等. 飞机表面清洗剂配方研制过程中的快速实验方法探讨[ J ]. 洗净技术, 2003, (2): 31- 36.

收稿日期: 2006- 10- 17; 修订日期: 2006- 12- 10  
作者简介: 李斌( 1967- ), 女, 高级工程师, 主要研究方向为航空材料腐蚀与防护, 联系地址: 北京 81 号信箱 5 分箱( 100095)。

[3] DEAN J D, STARLINGER A. The new sandwich composites design of the latest transrapid maglev vehicles [ A ]. Proceedings of the 17th International SAMPE Europe Conference of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering[ C ]. Basel Switzerland: the Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1996. 32- 33.  
[4] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理[ M ]. 上海: 复旦大学出版社, 2001. 101- 102.  
[5] 印永嘉, 奚正开, 李大珍. 物理化学简明教程[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 87- 89.  
[6] 王善琪. 高分子化学原理[ M ]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993. 118- 119.  
[7] 马占鏢. 甲基丙烯酸酯树脂及其应用[ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 10- 13.  
[8] 西鹏, 高晶, 李文刚. 高技术纤维[ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 73- 75.  
[9] 王茂章, 贺福. 碳纤维的制造、性质及其应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 1984. 26- 28.  
[10] 唐建国. 聚丙烯腈热结构化研究进展[ J ]. 高分子通报, 1995, (4): 229- 233.

收稿日期: 2006- 09- 08; 修订日期: 2006- 12- 18  
作者简介: 刘铁民( 1970- ), 男, 博士研究生, 主要从事聚合物加工、改性及高性能泡沫塑料的研究, 联系地址: 西北工业大学理学院应化系( 710072)。