

# 300M 钢表面金属陶瓷涂层的制备工艺及性能研究

冯抗屯<sup>1</sup> 肖细军<sup>1</sup> 陈小虎<sup>2</sup> 魏东博<sup>2</sup> 魏祥飞<sup>2</sup> 张平则<sup>2</sup>

(1. 中航飞机股份有限公司长沙起落架分公司制造工程部, 长沙, 410200;

2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 211106)

**摘要:**为推进金属陶瓷涂层在飞机起落架表面防护技术中更广泛的应用,制备了 IPcote 9183 和 IPcote 9184 两种金属陶瓷涂层并进行了微观组织、力学性能和防腐性能的研究,同时与传统电镀镉钛涂层进行了对比分析。结果表明,IPcote 9183 和 IPcote 9184 金属陶瓷涂层的最佳制备工艺分别为三次喷涂三次表干以及一次固化(三喷三表一固),两次喷涂两次表干以及一次固化(两喷两表一固);与传统电镀镉钛相比,两种金属陶瓷涂层具有良好的综合力学性能;IPcote 9184 涂层硬度最高,是 IPcote 9183 涂层的 7 倍,电镀镉钛涂层的 4 倍;IPcote 9183 弹性模量最好,IPcote 9184 次之,电镀涂层最差;IPcote 9183 的结合强度是电镀层的 4 倍。电镀镉钛试样和 IPcote 9184,9183 共同涂覆的试样表面在 720 h 中性盐雾试验中未出现明显的锈蚀痕迹。

**关键词:**金属陶瓷防腐涂层;喷涂;力学性能

**中图分类号:**TG174.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2015)05-0687-09

## Performance of Metallic-Ceramic Anti-corrosion Coating for Surface Protection of 300M Steel

Feng Kangtun<sup>1</sup>, Xiao Xijun<sup>1</sup>, Chen Xiaohu<sup>2</sup>, Wei Dongbo<sup>2</sup>, Wei Xiangfei<sup>2</sup>, Zhang Pingze<sup>2</sup>

(1. Division of Manufacturing Engineering, Changsha Aircraft Landing Gear Branch  
of Aircraft International Corporation Ltd., AVIC, Changsha, 410200, China;

2. College of Material Science And Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,  
Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** In order to promote the application of metal-ceramic composite for surface protection techniques of the aircraft landing gear, the microstructure, mechanical property and corrosion resistance of metallic-ceramic anti-corrosion coating are studied, and those of the cadmium titanium plating are also analyzed as comparisons. The IPcote 9183 and IPcote 9184 are prepared on the 300M steel by the new technological process named "three-time-spraying—three-time-drying—one-time-solidifying" and "two-time-spraying—two-time-drying— one-time-solidifying", respectively. In contrast with the cadmium titanium plating, two kinds of metal ceramic composite possess good comprehensive mechanical properties, and have better adhesion with the 300M steel. The hardness of the IPcote 9184 coating is the highest, which is as seven times as that of the IPcote 9183 coating and four times as that of the cadmium titanium plating. The modulus of the IPcote 9183 coating is the highest, while that of the cadmium titanium plating is the lowest. The adhesive strength of the IPcote 9183 coating, IPcote 9184 coating and the cadmium titanium plating is 48.7, 15.06 and 11.82 MPa, separately. There is no excessive corrosion on the cadmium titanium plating and the IPcote 9184,9183 in the neutral salt spray (NSS) test coating for 720 h.

**Key words:** metallic-ceramic anti-corrosion coating; spraying; mechanical properties

起落架结构与机体同寿是现代大型民用飞机的普遍要求,其寿命一般要求达到 6 万起落。民用飞机起落架选材主要应用 300M 钢、高强钛合金及铝合金等高性能材料,对其进行新型高性能表面防护工艺研究十分必要<sup>[1]</sup>。新型高性能表面防护工艺是保证现代大型飞机起落架与机体同寿的重要手段,其中包括:金属陶瓷防腐涂层涂敷,高速火焰喷涂工艺等。与普通电镀工艺相比较,MCAC 涂层涂覆工艺具有设备投资成本低、施工工艺简单方便、没有环境污染等优势,在国外大型民机起落架上也获得应用<sup>[2-3]</sup>。

超高强度钢起落架零件为配合表面防护,广泛采用的表面处理为电镀。由于镀镉或镀镉-钛表面处理工艺的特点,制造过程中容易引起环境污染,零件存在潜在的氢脆、镉脆等问题,不能很好地保证起落架使用安全及寿命。国外已广泛采用 IPcote 9183 金属陶瓷涂层代替镀镉或镀镉-钛镀层对零件进行防护,并进行了深层次的研究<sup>[2-8]</sup>。

IPcote 系列牺牲性高温防护涂层最初用于罗尔斯-罗伊斯航空发动机压缩机叶片及类似的发动机零件上,并且基于罗尔斯-罗伊斯喷气式航空发动机的要求,该系列涂料已经过多年的发展和改

良,从最初的仅含有三价铬和六价铬发展到目前由含有镁、磷酸盐、铬、铝等组成的复杂成分,应用领域也扩展到除罗尔斯-罗伊斯发动机之外的其他喷气式发动机制造,以及工业汽轮机零件的制造,同时也替代镀镉用于起落架零件和紧固件的防护<sup>[2]</sup>。目前中国已有学者对 IPcote 9183 系列进行了部分基础的研究,主要对其基本制备工艺标准和腐蚀性能进行了初步研究。但是在该涂层的实际制备和使用过程中仍存在表面质量不稳定、易于剥落的问题,而且涂层的微观形貌和基本力学性能也缺乏深入微观研究。本试验在 300M 钢表面制备 IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂层并且对涂层的制备工艺进行深化研究,同时对比分析电镀镉钛、IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂层的微观形貌、界面结构、力学性能和耐盐雾腐蚀性能,为其取代电镀涂层及大范围应用提供必要的理论依据。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料及设备

试验采用涂料为英国 Indestructible Paints 公司生产的 IPcote 系列涂料中 IP9183-R1 和 IP9184-R1,涂料的物理特性如表 1 所示。

表 1 IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂料物理特性  
Tab. 1 Physical parameters of IPcote 9183 and IPcote 9184

涂料	混合比	稀释剂	供应粘度/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	颜色	粗糙度等级	涂层厚度/(mm·层 <sup>-1</sup> )	寿命/月
IPcote 9183	单组份产品	水或其他特殊介质	20.29,直接使用	铝色	无光泽	0.020	12
IPcote 9184	单组份产品	水或其他特殊介质	2.95,直接使用	褐绿	无光泽	0.015	12

基体试样材料采用 300M 钢,尺寸为 110 mm×110 mm×6 mm。试样表面状态模拟起落架超高强度钢典型零件的加工工艺,主要经过表面粗加工、热处理、精加工和表面喷丸强化。

涂料使用前须采用自动搅拌装置对其进行均匀混合。喷涂过程采用 W-71-3S 型喷枪在具有抽风除尘装置的专用喷涂柜中进行。粘度测试采用涂-4 粘度计测试,涂-4 粘度几何尺寸和光洁度符合 GB1723—79 规定。喷涂试样固化处理采用由泰州素能热工设备公司生产的 RH-45-2 电热烘箱。采用 CM8822 铁基非铁基涂层测厚仪对制备好的 IPcote 9183 涂层和 IPcote 9184 涂层不同位置进行厚度测试。

### 1.2 试样的微观组织分析和力学性能测试

采用 JSM-6360L 型扫描电子显微镜(Scan-

ning electron microscope,SEM)和能谱仪(Energy dispersive spectrometer,EDS)观察电镀、IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂层的表面、截面形貌及其成分分布。

表面显微硬度试验采用 401MVA 型维氏硬度仪。测试 300M 钢基体时载荷为 0.980 7 N,测试涂层时则载荷均为 0.245 2 N,加载时间均为 15 s。每组试验重复测试 5 次取其平均值。

纳米压入实验采用日本岛津公司 SHIMADZU 生产的 DUH-W201 型超显微硬度计。加载载荷为 150 mN,加载速度为 1.323 9 mN/s,保压时间 10 s。在纳米压痕压头压入过程中,产生的动态硬度、纳米硬度以及弹性模量,根据标准 ISO 14577-1 的要求计算得到。

涂层的结合强度是非常重要的性能参数,对涂

层的磨损、剥落和使用寿命等有显著的影响。常用的试验方法有胶接拉脱法、杯突法、弯曲、扭转法等结合力测试方法。本试样按照标准 HB5476—91 进行胶接拉脱法测涂层结合力试验。测试设备选用由日本岛津生产的 EHF-UV100k1-040-0A 涂层-基体综合力学性能试验机。选用拉伸模式,加载速率为 1 kN/min。测试之前,对偶件需经过丙酮清洗、棕刚玉喷砂和第二次丙酮清洗处理,测试用试样需经丙酮清洗处理。然后分别在对偶件和基体相对的表面上均匀涂覆 E-7 环氧树脂胶并对粘,确保二者同心度。放入加热炉中 100 ℃ 保温 3 h,取出即可进行拉伸实验。

试样原理如图 1 所示,拉伸过程中,拉力随着时间线性增大,涂层剥落时所对应的载荷即为涂层失效时的载荷。由式(1)可计算获得涂层结合力(MPa)。

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

(1)

式中: $F$  为涂层剥落时的临界载荷; $S$  为对偶件与涂层的接触面积。

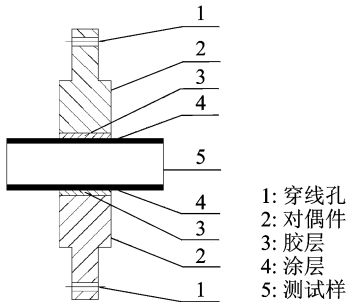


图 1 结合强度测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of adhesive strength test

1.3 盐雾试验

盐雾试验采用采用 SK-60A 精密盐雾试验机。用 AB 胶将试样封边缘与底面密封,只暴露 100 mm×100 mm 大小的表面进行实验,按照 GBT 10125—2006 要求将未保护面朝上并倾斜一定角度放入试验箱进行连续式喷雾盐雾试验,试验期间每天拍照,并记录试样表面变化。

2 IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂层的制备工艺

2.1 喷涂工艺流程

IPcote 9183 和 IPcote 9184 涂层制备的主要工艺为:吹砂—丙酮清洗试样表面—喷涂—表干—固化(190 ℃±10 ℃,≥20 h)。

2.2 涂层制备工艺

制备涂层所用喷涂压力为 0.8 MPa;气体流量为 0.4 kg/cm<sup>2</sup>;喷涂距离为 30~50 mm。

喷涂过程中若喷涂压力过小,则喷出的涂料太少,喷枪至零件表面距离相对较大时涂料分散面积大,导致不能完全覆盖试样表面。喷涂压力过大时,喷出的涂料过多,喷枪至零件表面距离相对较小,喷至零件表面的涂料过多,涂料粘度偏小,由于重力作用向下流动,产生堆积,严重时导致堆积部位涂层开裂。因此,在制备涂层时,需严格控制喷涂参数。

首先在 300M 钢基体表面制备 IPcote 9183 涂层。IPcote 9183 涂层制备主要采用 3 种方法,分别为“一喷一固”“三喷三表一固”和“四喷四表一固”。图 2(a)为“一喷一固”法制备的涂层宏观照片,由图中可知,在 300M 钢试样底部,涂层由于堆积过后出现了开裂现象。图 2(b)为“四喷四表一固”法制备的涂层宏观照片,该方法制备的涂层由于喷涂次数过多,导致涂层厚度过大,在固化过程中产生的应力过大导致开裂。图 2(c)为“三喷三表一固”制备涂层的宏观照片,涂层表面均匀完整,无明显的肉眼可见缺陷。

利用厚度仪分别对 3 种工艺制备的涂层进行厚度测试。测试过程中每个试样表面随机测量 8 组数据,具体结果如表 2 所示。其中 A,B,C 分别代表“一喷一固”“四喷四表一固”和“三喷三表一固”制备工艺。可以发现,A,B 两种涂层的厚度均太厚,所以表面出现很明显的缺陷。

由以上分析可知,由于涂料 IPcote 9183 的粘度较低,在喷涂过程中容易形成流痕或者局部堆积。因此 IPcote 9183 涂层最终制备工艺采用“三

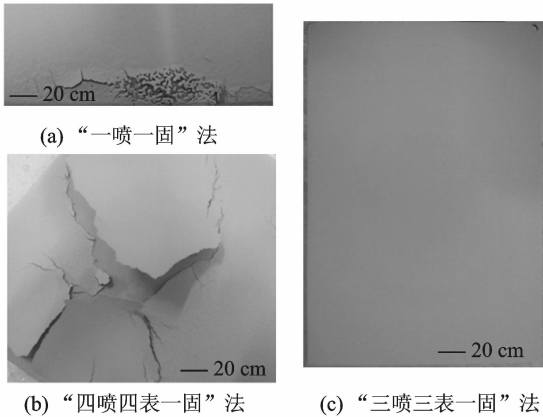


图 2 IPcote 9183 不同喷涂工艺的涂层宏观照片

Fig.2 Surface images of IPcote 9183 coating obtained by different spraying technologies

表 2 IPcote 9183 涂层不同工艺厚度  
Tab. 2 Thickness of IPcote 9183 coating  $\mu\text{m}$

工艺	1	2	3	4	5	6	7	8
A	88.8	79.3	99.6	129.0	115.0	89.6	104.0	122.0
B	125.0	105.0	104.0	110.0	134.0	128.0	117.0	125.0
C	44.0	48.0	51.0	47.0	52.0	46.8	49.0	50.5

喷三表一固”制备法。“三喷三表一固”是指在喷涂过程中,进行 3 次重复喷涂,要求第 1 次喷涂厚度比第 2 次和第 3 次喷涂厚度小;一般第 1 次喷涂厚度要求 7~10  $\mu\text{m}$ ,第 2、3 次喷涂厚度要求 15~20  $\mu\text{m}$ 左右。因为水性涂层 IPcote 9183 属于易挥发性涂料,所以每次喷涂之后必须进行物理表干,若表干不充分,容易导致后 1 次喷涂过程中产生流挂现象。喷涂 3 次之后进行固化,固化温度 190  $^{\circ}\text{C}$ ,时间 20 h。

IPcote 9183 涂层制好后,在其表面进行 IPcote 9184 涂层的制备。IPcote 9184 涂层采用“两喷两表一固”法和“一喷一固”法。图 3(a)为采用“一喷一固”法制备的涂层,试样在喷涂之后便开始出现明显的流痕,涂料容易在底部沉积,形成的涂层厚度不均匀。图 3(b)为采用“两喷两表一固”法制备的涂层,可以看出涂层表面均匀,没有明显的流痕。

IPcote 9184 涂料粘度比 IPcote 9183 粘度小,为 2.95  $\text{mm}^2/\text{s}$ 。制备该涂层制备工艺采用“两喷两表一固”法。“两喷两表一固”法是指在喷涂过程中,重复两次喷涂,而且要求第 1 次喷涂厚度比第 2 次喷涂厚度小;第 1 次喷涂厚度为 4~8  $\mu\text{m}$ ,第 2 次喷涂的厚度为 8~12  $\mu\text{m}$ 。每次喷涂之后须进行物理表干,待已喷好的 IPcote 9184 彻底表干,再进行二次喷涂。两次喷涂之后进行固化,固化温度和时间与 IPcote 9183 相同。

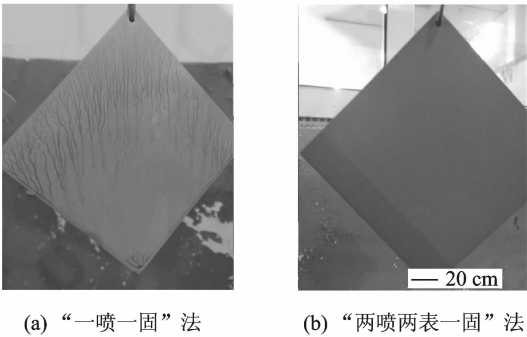


图 3 IPcote 9184 不同喷涂工艺的涂层宏观照片  
Fig. 3 Surface images of IPcote 9184 coating obtained by different technologies

3 结果分析与讨论

3.1 涂层表面形貌及成分组成

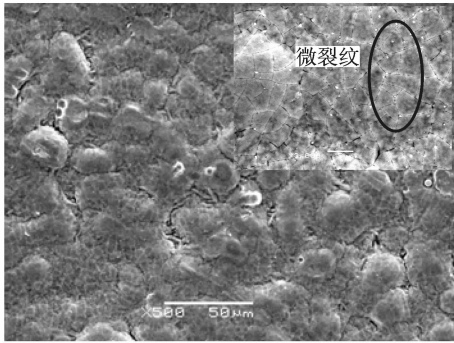
图 4 为不同涂层表面 SEM 形貌图和 EDS 分析图。由图 4 可知,IPcote 9183 涂层疏松多孔,致密度最低;电镀镉钛与 IPcote 9184 涂层则较为致密。由 SEM 图可知,电镀镉钛涂层中存在少量微裂纹;IPcote 9184 涂层有少量的孔洞,在其表面的粘结剂中均匀弥散着清晰的白色铝粉。由 EDS 分析可知,镉元素均匀地附着在 300M 钢基体表面,其中少量镉可能在电镀过程存在氧化现象;IPcote 9183 涂层表面的主要成分是铝元素,而氧、磷和镁等元素含量较少。高含量的铝元素主要来自于涂层表面的铝粉,铝粉含量较高有利于提高涂层的耐腐蚀性能。但是若涂层中的铝粉分布不均匀时,也可导致涂层表面不连续,涂层致密度低。IPcote 9184 涂层除含有 Al 元素外,还有较多含量的 Mg, Si, Al 和 O 等元素。由此分析,IPcote 9184 涂层主要由粘结相(磷酸铝、铬酸镁等)和弥散相 Al 粉构成,当其粘结相含量较多时,形成的涂层表面较为致密。

3.2 界面结构和成分分布

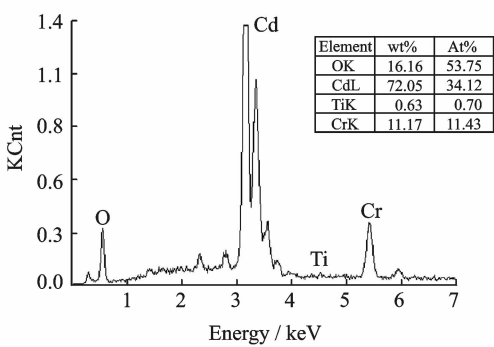
图 5 为电镀镉钛层截面 SEM 图及 EDS 分析图。由图 5 可以看出,电镀镉钛层的厚度约为 10  $\mu\text{m}$ ,且整体较为致密。涂层界面成分主要为镉、钛和少量氧元素。

图 6 为 IPcote 9183 涂层截面 SEM 图及 EDS 分析图。由图 6 可知,IPcote 9183 涂层厚度约为 44  $\mu\text{m}$ ,与表面微观特征相同,该涂层疏松多孔。涂层中孔隙较多,可能会导致涂层的强度和硬度下降,并增加涂层的脆性。由 EDS 结果可知,涂层主要由 Cr、Ti、P、Si、Al、Mg 及 O 等元素构成,并且涂层与基体结合附近的元素成分呈现梯度分布,表明涂层与基体结合较为良好。

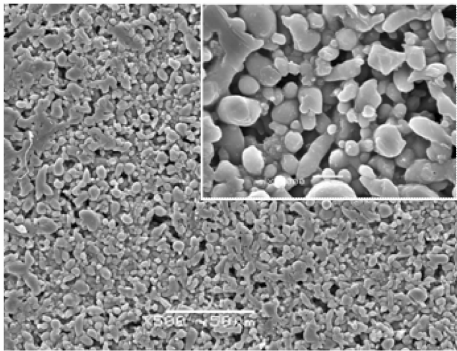
由 IPcote 9183 涂层(底漆)和 IPcote 9184(面漆)构成的涂层截面 SEM 图及 EDS 分析图如图 7 所示。由图 7 分析可知,该涂层厚度约为 80  $\mu\text{m}$ ,其中底漆约为 50  $\mu\text{m}$ ,面漆约为 30  $\mu\text{m}$ 。底漆 IPcote 9183 涂层疏松多孔,而面漆 IPcote 9184 则较为致密。面漆中白色的铝粉均匀地弥散在粘接相中,可显著提高面漆的耐腐蚀能力。由 EDS 分析结果知,涂层中含有 Cr、P、Si、Al、Mg 及 O 等元素。致密的表层面漆完整地覆盖在疏松多孔的 IPcote 9183 涂层,可大幅度提高 IPcote 9183 涂层的耐磨和耐蚀能力。



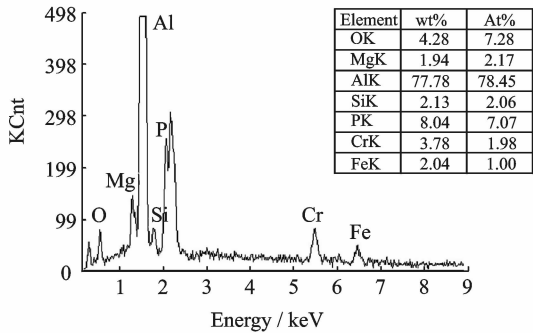
(a) 电镀镉钛表面SEM形貌图



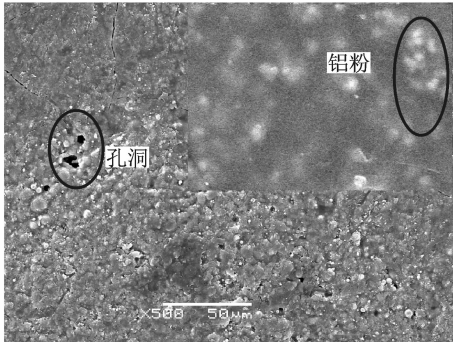
(b) 电镀镉钛表面EDS图



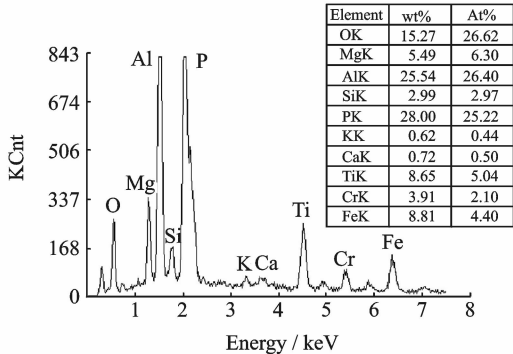
(c) IPcote 9183涂层表面SEM形貌



(d) IPcote 9183涂层表面EDS成分

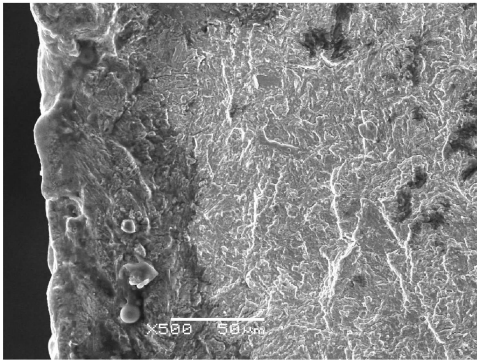


(e) IPcote 9184涂层表面SEM形貌

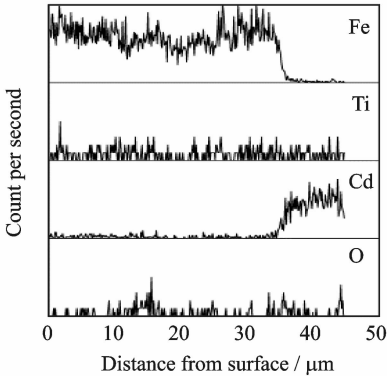


(f) IPcote 9184涂层表面EDS成分

图 4 不同涂层表面的 SEM 形貌图及 EDS 分析图  
Fig. 4 SEM and EDS images of different coating surface



(a) 截面SEM图



(b) EDS分析图

图 5 电镀镉钛层的截面 SEM 图与截面 EDS 成分分布  
Fig. 5 SEM and EDS images of cadmium titanium platingcross

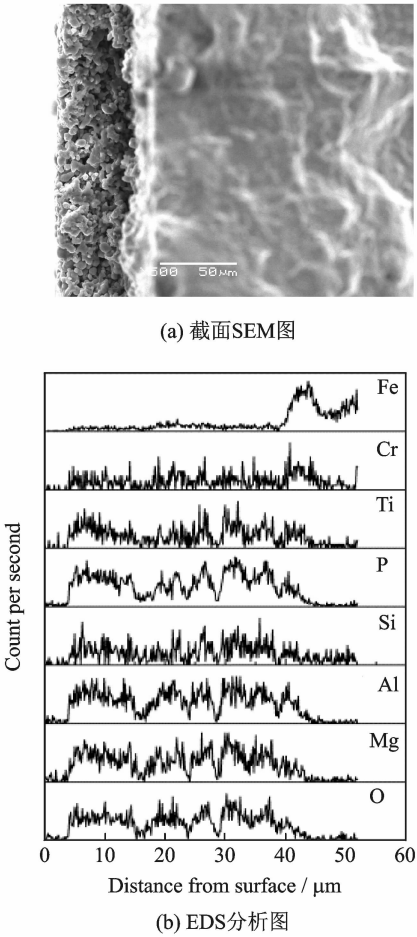


图 6 IPcote 9183 涂层的截面 SEM 图与截面 EDS 成分分布

Fig. 6 SEM and EDS images of IPcote 9183 coating cross

3.3 力学性能分析

对不同涂层的显微硬度测试结果如表 3 所示。由表 3 可见,300M 钢基体的显微维氏硬度最高,镀膜后硬度均降低。其中电镀镉钛平均硬度为 64.3 HV0.025;IPcote 9183 涂层硬度最低,为 34.0 HV0.025;IPcote 9184 涂层硬度约为 IPcote 9183 涂层的 7 倍,约为电镀镉钛涂层的 4 倍。相比于传统的电镀镉钛涂层,IPcote 9184 涂层硬度提高很多。对于 IPcote 9183 涂层,表面虽存在较多弥散相,但其组织疏松多孔,致使其强度和硬度降低。与表层致密度高的 IPcote 9184 涂层相比,其硬度有所降低。

表 3 基体与涂层的显微硬度比较

Tab. 3 Results of hardness testing of substrate and coating				
试样	300M 钢基体	电镀 镉钛	IPcote 9183	IPcote 9184
显微硬度	614	64	34	236.3
平均值	HV0.1	HV0.025	HV0.025	HV0.025

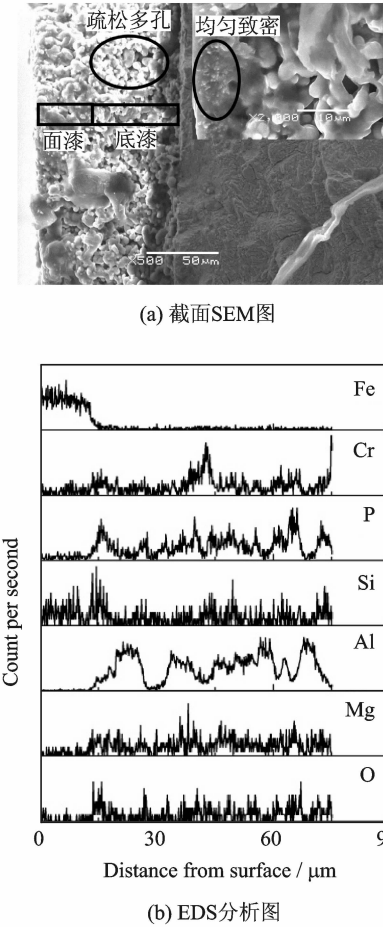


图 7 IPcote 9183 和 IPcote 9184 共同涂覆的涂层截面 SEM 图与截面 EDS 成分分布

Fig. 7 SEM and EDS images of IPcote 9183 + IPcote 9184 coating cross

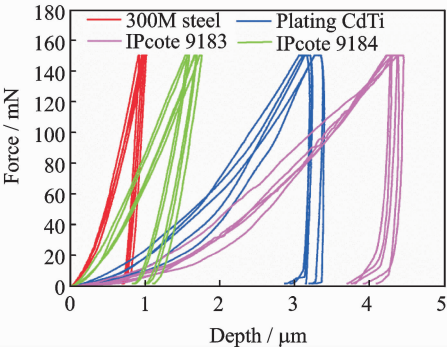


图 8 4 种试样 5 次纳米压入测试的载荷-位移曲线  
Fig. 8 Plots of nanoindentation test of different samples

不同涂层的纳米试验获得的压入曲线如图 8 所示。由图 8 可知 300M 钢的压入深度最浅,其次为 IPcote 9184 涂层和电镀镉钛涂层,压入最深为 IPcote 9183 涂层。压入深度在一定程度上反映了材料的硬度,材料的硬度越大,压入深度越小。因此

300M 钢的硬度最大,IPcote 9184 涂层次之,电镀镉钛涂层和 IPcote 9183 涂层最小。由图 8 分析知,电镀镉钛和 IPcote 9183 涂层的卸载曲线基本上垂直于 Depth 坐标轴,两种涂层卸载后弹性回复很小,几近于无弹性回复,说明两种涂层的脆性很大。结合两种涂层表面结构分析知,电镀镉钛脆性大可能是由于表面微裂纹导致,而 IPcote 9183 涂层由疏松多孔结构造成。

纳米压入系统对压入曲线进行计算,获得硬度和弹性模量数据如表 4 所示。由表 4 结果可知,基体 300M 钢的硬度最大,为 6.101 GPa;3 种涂层中,IPcote 9184 的硬度最大为 2.092 GPa,约是电镀镉钛的 4 倍,IPcote 9183 涂层的 7 倍。这一结果与显微维氏硬度计测试结果基本一致。

表 4 基体与涂层的纳米压入硬度与弹性模量

Tab. 4 Hardness and modulus of nanoindentation test of substrate and coating

		MPa			
试样	300M 钢	电镀镉钛	IPcote 9183	IPcote 9184	
硬度平均值	6 101.14	540.08	301.00	2 092.21	
弹性模量平均值	$2.248\times10^{11}$	$4.655\times10^{10}$	$9.2604\times10^{10}$	$4.8224\times10^{10}$	

弹性模量是弹性材料的一种最重要、最具特征的力学性质,是物体弹性变形难易程度的表征。由表 4 知,电镀镉钛的弹性模量最小。基体 300M 钢的弹性模量最大,IPcote 9183 和 IPcote 9184 次之。弹性模量不仅与原子间结合力有关,还与涂层微观特征有关,如果涂层内含有较多的微观缺陷如气孔或者裂纹,则其弹性模量均较小。

很多学者认为,硬度不再是判断材料磨擦性能的唯一标准,材料的弹性模量也是需要考虑的重要因素<sup>[9-10]</sup>。有研究发现,涂层的磨擦性能与其硬度( $H$ )和弹性模量( $E$ )均有关系,与单纯硬度值相比, $H/E$  和  $H^3/E^2$  的值更能准确地反映材料抵抗塑性变形的能力和耐磨性能<sup>[11-13]</sup>。300M 钢基体,IPcote 9183 和 IPcote 9184 的  $H/E$  和  $H^3/E^2$  计算结果如表 5 所示。

表 5 基体与涂层的  $H/E$  和  $H^3/E^2$  值

Tab. 5 Results of  $H/E$  and  $H^3/E^2$  of substrate and coating

材料	$H/E$	$H^3/E^2$
300M 钢	$2.71\times10^{-2}$	$4.49\times10^{-3}$
IPcote 9183	$0.32\times10^{-2}$	$3.14\times10^{-6}$
IPcote 9184	$4.34\times10^{-2}$	$3.99\times10^{-3}$

层硬度大将近 3 倍,但其  $H/E$  和  $H^3/E^2$  值与 IPcote 9184 相差很小,表明两者抗塑形变形能力相近。IPcote 9183 的  $H/E$  和  $H^3/E^2$  值均很小,表明其抗塑变形能力较差。磨损的本质为材料表面的物质不断损失,而大部分材料表面的物质损失均与其塑性变形有关,因此  $H/E$  和  $H^3/E^2$  可以很大程度反映材料的抗磨损能力。

涂层拉伸试样结果如图 9 所示。由图 9 可见,电镀镉钛的拉伸强度最低,只有 11.82 MPa;IPcote 9183 的拉伸强度最高,约 48.7 MPa。此外,IPcote 9184 的结合强度为 15.06 MPa,约为 IPcote 9183 的 1/3,表明 IPcote 9184 涂层的结合强度低于底漆与基体。

结合强度是涂层的一个非常重要的参数,良好的结合强度是涂层不容易剥裂的重要基础。IPcote 9183 涂层作为打底层,比电镀层有着更优异的结合力。它可以很好地起到过渡作用。面漆 IPcote 9184 与底漆的结合力大于电镀层结合力,保证了两种涂层同时对基体起到良好的保护作用。

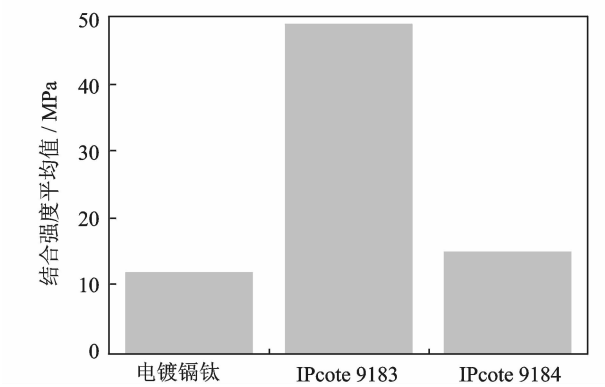


图 9 涂层结合强度测试结果示意图

Fig. 9 Results of adhesive strength test of coating

3.4 耐腐蚀性

不同涂层的中性盐雾试验结果如图 10,11 所示。实验结果表明:电镀镉钛、IPcote 9183 和 IPcote 9184 均对高强钢的耐蚀性能有着显著的提升,未经防护的高强钢基体在盐雾初期的 1 h 内表面已经开始出现腐蚀 12 h 后,高强钢表面已经全部锈蚀。高强钢在盐雾实验 12 h 内的表面状态变化如图 10 所示。

IPcote 9183 试样在盐雾实验过程中出现较严重锈蚀,如图 11 所示。240 h 时,试样表面中部开始出现轻微的点蚀现象,随后锈点开始逐步扩大;在 624 h 后,试样表面腐蚀情况开始稳定。由此说明 IPcote 9183 在盐雾试验 240 h 时,开始以点蚀形式出现腐蚀现象。涂层表面组织结构为疏松多孔结构,因此点蚀最先出现在涂层缺陷处或者孔隙



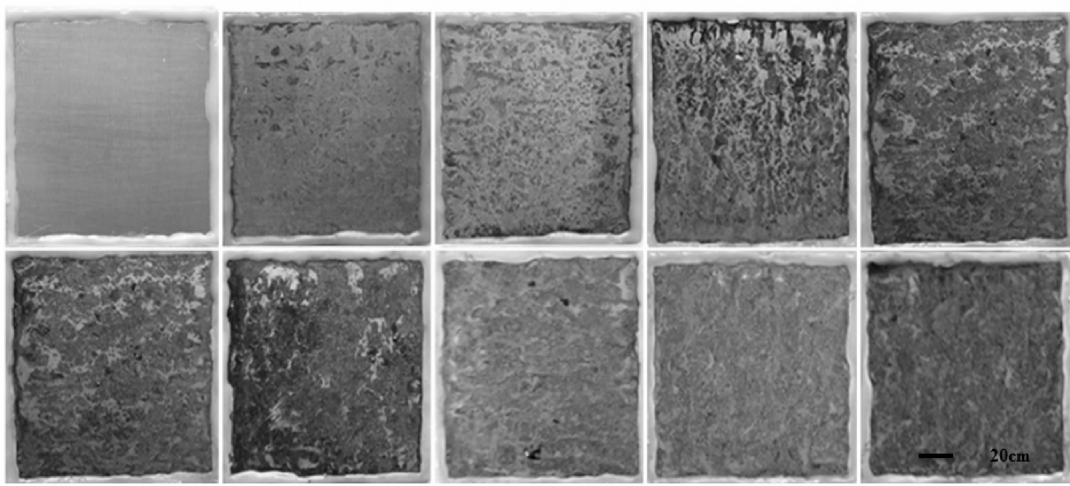


图 10 300M 钢高强钢基体前 12 h 盐雾腐蚀表面变化图  
Fig. 10 Morphology of corrosion of 300M steel in salt-mist test for 12 h

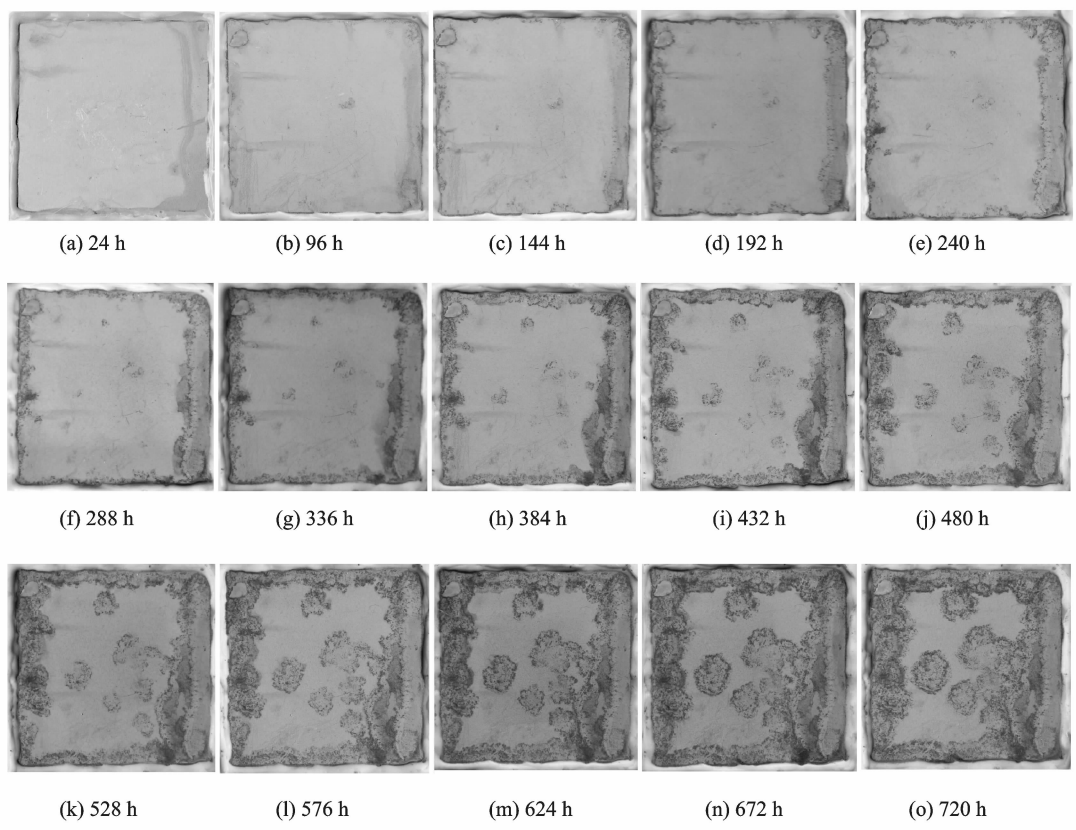


图 11 IPcote 9183 涂层在盐雾试验中不同时间腐蚀形貌  
Fig. 11 Morphology of corrosion of IPcote 9183 coating in salt-mist test for different time

率最大的地方,随后开始扩展。

电镀镉钛和 IPcote 9184 涂覆和 9183 共同涂覆的试样在 720 h 盐雾过程中表面未出现明显的锈蚀痕迹,两种涂层的抗腐蚀能力较好。

4 结 论

(1)IPcote 9183 涂层和 IPcote 9184 涂层的最

佳制备工艺为“三喷三表一固”和“两喷两表一固”。制备的两种涂层表面均匀,无明宏观缺陷。

(2)IPcote 9183 涂层表面疏松多孔,致密度最低。电镀镉钛涂层与 IPcote 9184 涂层表面则较为致密。电镀镉钛层表面有较多微裂纹;IPcote 9184 涂层表面存在少量的孔洞。电镀层厚度约 10 μm,且界面较为致密。IPcote 9183 涂层厚度约为



44  $\mu\text{m}$ ,界面疏松多孔。IPcote 9184(面漆)和 IPcote 9183(底漆)共同涂覆涂层厚度约为 80  $\mu\text{m}$ ,其中底漆约为 50  $\mu\text{m}$ ,面漆约为 30  $\mu\text{m}$ 。

(3)300M 钢基体的显微维氏硬度最高,为 614 HV0.1。电镀层的平均硬度 64 HV0.025;IPcote 9183 涂层硬度最低,为 34 HV0.025;IPcote 9184 涂层硬度为 236 HV0.025,是 IPcote 9183 涂层的 7 倍,约是电镀镉钛涂层的 4 倍。

(4)电镀涂层的弹性模量最小,脆性太大。基体的弹性模量最大,IPcote 9183 次之,最小为 IPcote 9184。电镀镉钛的结合强度最低,只有 11.82 MPa,IPcote 9183 的拉伸强度最高,约 48.7 MPa。IPcote 9184 的结合强度为 15.06 MPa,约为 IPcote 9183 的 1/3。

(5)盐雾实验表明,高强钢基体 12 h 出现锈蚀,IPcote 9183 在 240 h 开始出现锈蚀,电镀镉钛试样和 IPcote 9184,9183 共同涂覆的试样在 720 h 盐雾过程中表面没有出现明显的锈蚀痕迹。

## 参考文献:

- [1] 李铭.大型飞机起落架制造技术[J]. 航空制造技术, 2008(21): 68-71.  
Li Ming. Technology of large aircraft landing gear manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(21): 68-71.
- [2] 王维. IPcote 9183 金属陶瓷涂层制备及其性能[J]. 腐蚀与防护, 2011(6): 480-482.  
Wang Wei. Performance of metallic-ceramic anti-corrosion coating IPcote 9183[J]. Corrosion & Protection, 2011(6): 480-482.
- [3] 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.  
Liu Peng, Cai Jianping, Wang Xudong, et al. Progress of aircraft landing gear material protection Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 67-71.
- [4] 沈以赴, 李永灿, 陈成, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面机械合金化制备铜涂层研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5): 762-768.  
Shen Yifu, Li Yongcan, Chen Cheng, et al. Investigation of coating of alumina ceramic surface by metallic Cu Through Mechanical Alloying[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(5): 762-768.
- [5] 李寒松, 张刚雷, 胡孝均. 基于柠檬酸金钾的电镀金工

艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 757-762.

Li Hansong, Zhang Ganglei, Hu Xiaoyun. Study of gold electrical plating process based of on gold potassium citrate[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(5): 757-762.

- [6] 李闯, 张明, 魏小辉, 等. 飞机起落架收放液压系统设计、分析与实验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 225-231.  
Li Chuang, Zhang Ming, Wei Xiaohui, et al. Design, analysis and experimental validation for hydraulic extension/retraction system of aircraft landing gear[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(2): 225-231.
- [7] 周克崧, 邓春明, 刘敏, 等. 300M 钢基体上高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳和抗盐雾腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 671-676.  
Zhou Kesong, Deng Chunming, Liu Min, et al. Characterizations of fatigue and salt spray corrosion resistance of HVAF sprayed WC-17Co and WC-10Co4Cr coatings on the substrate of 300M steel[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 671-676.
- [8] 周克崧, 邓春明, 刘敏. 超音速火焰喷涂 WC 涂层替代电镀硬铬: 疲劳和摩擦磨损性能[J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 48-54.  
Zhou Kesong, Deng Chunming, Liu Min. WC coatings as candidate to hard chrome plating: Characterization of fatigue and friction and wear[J]. China Academic Journal Electronic Publishing, 2009, 11(10): 48-54.
- [9] Huang J, Zhang P Z, Wu H F, et al. Investigation of W-Mo alloyed layer synthesised by double glow plasma surfacemetallurgy[J]. Surf Eng, 2011, 27: 113-117.
- [10] Chen J, Li X Y, Ji R, et al. Nanomechanical properties of duplex treated 42CrMo4 steel[J]. Surf Eng, 2013, 29: 462-467.
- [11] Chen J, Guo X L, Tang Q, Nanomechanical properties of grapheme onpoly(ethylene terephthalate)[J]. Carbon, 2013, 55: 144-150.
- [12] Beake B D, Bell G A, Goodes S R, et al. Improved nanomechanical test techniques for surfaceengineered materials[J]. Surf Eng, 2010, 26: 37-49.
- [13] Leyland A, Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: A nanocomposite coating approach to optimizedtribological behavior[J]. Wear, 2000, 246: 1-11.