

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.12.015

## 直升机驾驶舱内零部件黑色无机膜层适用性研究

王朝琳<sup>1</sup>, 刘瑞良<sup>2\*</sup>, 米南<sup>1</sup>, 宋斌<sup>1</sup>, 刘泉利<sup>2</sup>, 文颖慧<sup>1</sup>, 吴心元<sup>3</sup>, 谢晓东<sup>2</sup>,  
刘梓航<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150066; 2. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 天津航空机电有限公司, 天津 300308; 4. 哈尔滨科汇涂层技术有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对直升机驾驶舱内仪表板、驾驶员操纵杆等零部件的防视觉疲劳、耐腐蚀性、尺寸精度、耐磨性等特殊性能需求, 开展常用黑色无机膜层适用性研究。对黑色镀覆层、PVD 多元梯度纳米黑色涂层及低温渗氮-黑色氧化复合层(LTN-O)开展宏观及微观形貌、紫外及可见光吸收率及反射率、干湿交替中性盐雾试验及磨损率检测并做对比分析。结果表明: 经纳米封闭后几组黑色镀层、PVD 黑色涂层、LTN-O 黑色复合层均可满足盐雾试验要求; 电镀锌-镍合金黑色钝化、PVD 黑色涂层及 LTN-O 黑色复合层的耐磨损性能优于其它膜层; PVD 黑色涂层和 LTN-O 黑色复合层薄、厚度公差小; LTN-O 黑色复合层及 PVD 黑色涂层与其它黑色镀层相比, 对紫外及可见光漫反射的吸收率低。

**关键词:** 黑色膜层; 光的吸收; 耐腐蚀性; 摩擦磨损; 尺寸精度

**中图分类号:** TQ153.2      **文献标识码:** A

## Study on the applicability of black inorganic films for the components in the cockpit of a helicopter

Wang Zhaolin<sup>1</sup>, Liu Ruiliang<sup>2\*</sup>, Mi Nan<sup>1</sup>, Song Bin<sup>1</sup>, Liu Quanli<sup>2</sup>, Wen Yinghui<sup>1</sup>,  
Wu Xinyuan<sup>3</sup>, Xie Xiaodong<sup>2</sup>, Liu Zihang<sup>4</sup>

(1. AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Tianjin Aviation Electromechanical Co., Ltd., Tianjin 300308, China; 4. Harbin Kehui Coating Technology Co., Ltd., Harbin 150001, China)

**Abstract:** The applicability of black inorganic films was studied, as the anti-visual fatigue, corrosion resistance, dimensional accuracy, wear resistance and other special performance requirements, for parts of the helicopter cockpit instrument panel and pilot joystick etc.. Macro and micro morphology, UV and visible light absorption and reflectivity, dry-wet alternate neutral salt spray test of black coating, PVD multi-gradient nano-black coating and low-temperature nitriding-black oxidation composite layer (LTN-O) were detected and compared. The results show, after nano-sealing, groups of black coating, PVD black coating and LTN-O black composite layer can meet the requirements of salt spray test; the resistance of zinc-nickel alloy black passivation, PVD black coating and LTN-O black compos-

收稿日期: 2023-08-15

修回日期: 2023-09-25

作者简介: 王朝琳(1976—), 女, 本科, 高级工程师, email: alincyb@163.com

\*通讯作者: 刘瑞良, email: liuruiliang@hrbeu.edu.cn

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2023E060)

ite layer is superior to other coatings; PVD black coating and LTN-O black composite layer is thinner, and thickness tolerance is smaller; compared with other black coatings, LTN-O black composite layer and PVD black coatings have lower absorption of UV and visible diffuse reflectance.

**Keywords:** black film; light absorption; corrosion resistance; friction and wear; dimensional accuracy

直升机驾驶舱内零部件不直接与海水、海雾等高盐、高温、高湿的腐蚀环境接触,但随着直升机在恶劣的海洋环境下及沿海一带服役时间的增加,镀层磨损及锈蚀问题时有发生<sup>[1]</sup>。为减少飞行员视觉疲劳,在设计中选择对光的吸收率较高的黑色和深灰色为主色调进行装饰,其中驾驶员操纵杆等使用较为频繁、仪表板上的螺钉等为可拆卸紧固件,对防磨损性能要求较高。直升机制造中,部分关键构件之间存在紧密配合、间隙配合等装配关系,对防护装饰用膜层厚度有严格的控制要求。为此在直升机驾驶舱内零部件的设计及制造中根据性能需求有针对性的选择黑色镀覆层及涂层显得尤其重要。

黑色具有庄重感,被称为具有永久魅力的色调。传统的黑色镀覆层有黑铬、黑镍、镀锌及电镀锌-镍合金黑色钝化,还有近年发展起来的PVD多元梯度纳米黑色涂层和低温热扩渗-氧化复合涂层(LTN-O)。黑铬层由铬和三氧化二铬的水合物组成,在电沉积方法获得的黑色镀层中耐磨性最好,长时间使用时颜色会逐渐减退,但其耐久性、耐蚀性和太阳能选择吸收性一直是独一无二的<sup>[2]</sup>。黑镍镀层是一种合金镀层,一般含镍40%~60%、锌20%~30%、硫10%~15%、有机物10%左右,在电镀过程中,硫氰酸中的硫变为硫离子,并与镍生成黑色的硫化镍<sup>[3]</sup>。为提高镀层与金属基体的结合力和镀层的耐蚀性,通常采用镀锌层作为中间层。与黑铬层相同,黑镍作为降低反光系数的防护-装饰镀层,常用于光学仪器、武器、航空仪表、铭牌及照相器材生产中。镀锌与镀锌-镍黑色钝化工艺,在金属表面直接

进行电解沉积镀层后进行铬酸盐转化处理,生成黑色钝化层并显著提高其耐蚀性能。含镍6%~10%的Zn-Ni合金镀层其耐蚀性在镀锌层的3倍以上,广泛用于汽车钢板上锌层的替代,在航空航天领域亦有应用。PVD技术具有高质高效加工、环保等特点,一些国家已将涂层及其材料的发展列入战略材料。PVD技术制备的涂层具有表面光洁度高、耐磨性好、热稳定性强等优点,成为表面工程、光电子学领域和新型号飞行器预先研究的方向<sup>[4-13]</sup>。热扩渗-氧化复合技术(包括QPQ技术)具有结合力好、耐磨性和耐蚀性高等优势,在直升机起落架部位关键构件中得到应用<sup>[14-15]</sup>。以上两项技术可解决传统镀覆层在环境中稳定性差等问题,具有广阔的应用潜力。

相关资料对以上几类黑色无机膜层制备工艺及其性能有介绍,但缺少基于直升机驾驶舱内金属零部件服役特性需求的详细研究和综合论述,为此开展相关研究验证为飞行器的设计、制造提供参考,并为黑色无机涂层在其它行业的应用提供借鉴。

## 1 试验

### 1.1 试样材料及制备

试件组别及制备要求见表1。选取直升机驾驶舱内驾驶员操纵杆及螺钉等零件中较为常用,且易腐蚀的金属材料30CrMnSiA(材料标准GJB 2151)加工试样,试样规格按性能测试方法要求,表面粗糙度 $R_a=0.8$ 。将试样按照表面处理类型电镀锌-镍、电镀锌-镍合金黑色钝化、镀锌-镍合金黑色钝化,以及PVD黑色涂层、LTN-O黑色复合涂层进行分组。

表1 膜层类型及制备

Tab.1 Type and preparation of films

组别	膜层类型	制备要求
1	电镀锌-镍	镀锌 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 后电镀锌-镍,镀后涂防锈油,部分试样做纳米封闭处理。
2	电镀锌-镍合金	预镀锌后电镀锌-镍合金30 min,镀后涂防锈油,部分试样做纳米封闭处理。
3	电镀锌-镍合金黑色钝化	镀锌 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 后黑色钝化处理,部分试样做纳米封闭处理。
4	电镀锌-镍合金黑色钝化	镀锌-镍 $8\mu\text{m} \sim 12\mu\text{m}$ 后黑色钝化处理,部分试样做纳米封闭处理。
5	PVD多元梯度纳米黑色涂层	物理气相沉积AlTiN(C)梯度纳米涂层,部分试样做纳米封闭处理。
6	低温渗氮-氧化复合层(LTN-O)	430℃低温渗氮后于510℃下氧化处理,部分试样做纳米封闭处理。

1.2 膜层制备工艺

电镀工艺流程:有机溶剂除油→玻璃微球喷砂→预镀锌或预镀镍(按需)→电镀黑铬/黑镍/锌/锌-镍合金→后处理(涂油/黑色钝化/纳米封闭)

PVD 涂层工艺流程:有机溶剂除油→玻璃微球喷砂→等离子体溅射清洗→多元梯度纳米涂层沉

积→后处理(按需进行纳米封闭)

LTD-O 复合层工艺流程:有机溶剂除油→低温等离子体渗氮→氧化→后处理(按需进行纳米封闭)

1.3 性能测试

各种黑色膜层的测试项目及测试方法见表 2。

表 2 测试项目及测试方法

Tab.2 Test items and test method

测试项目	方法	标准或依据
外观	目视检查对比 6 组试样外观;采用 Thermo Scientific Apreo 2S 高分辨率电子显微镜(SEM)观察黑色膜层微观形貌。	—
厚度	手持式涡流测厚仪对膜层进行厚度检测并记录实测值。	—
光的吸收与反射	通过光谱仪检测并对比镀、涂层对 0 ~ 800 nm 紫外可见光漫反射的吸收率和反射率。	—
结合力	按照镀、涂层质量控制要求,分别采用划痕法和挤压法进行结合力检测。	GB/T 5270
耐蚀性	进行 96 h 干湿交替中性盐雾试验,其中 48 h 在盐雾箱内,取出后不冲洗在试验室环境下放置 48 h,观察镀层表面是否出现红色锈蚀。	GJB 150.11A
耐蚀性	进行 96 h 干湿交替中性盐雾试验,其中 48 h 在盐雾箱内,取出后不冲洗在试验室环境下放置 48 h,观察镀层表面是否出现红色锈蚀。	GJB 150.11A
耐磨损性能	利用球-盘式摩擦磨损试验机检测试样表面镀、涂及渗氮氧化复合涂层的耐磨性能,获得各类膜层的磨损率并观察磨痕形貌,对磨球为 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ,采用 5 N 的载荷和 201 r/min 的转速对磨 1800 s。	ASTM D5706

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

在天然散射光线下目视检查试样外观(见图 1),6 组试样表面膜层结晶均匀、细致,呈无光黑

灰色至黑色,浸油后及做纳米封闭后的的试样表面颜色加深。镀覆后的试样局部有轻微的夹具印和水印,在棱角处有不明显的彩色条纹;PVD 涂层及 LTN-O 复合涂层无以上缺陷。6 组试样表面黑色膜层的 SEM 照片见图 2,各类膜层表面细致平整。

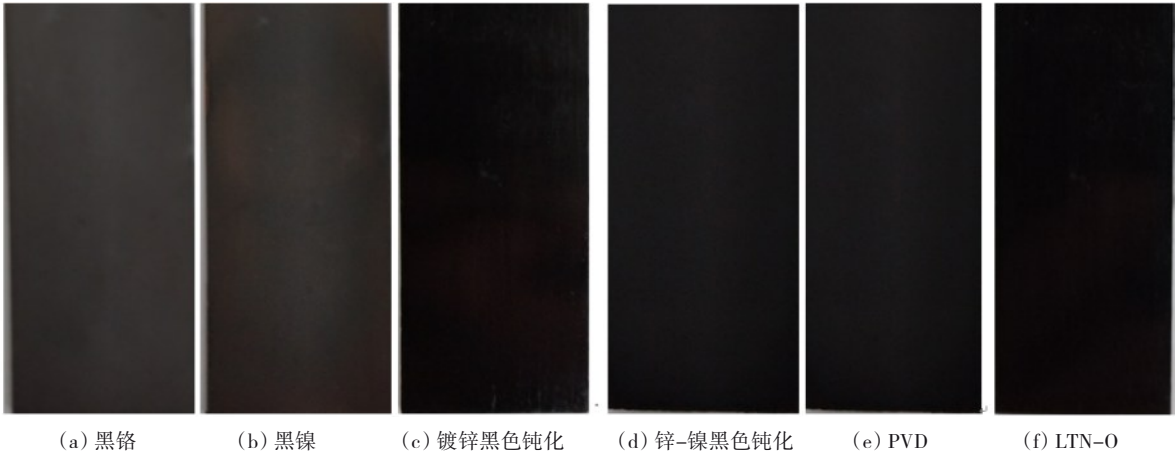


图 1 试样的宏观形貌

Fig.1 Macroscopic morphology of the samples

图 3 为 6 组试样表面黑色膜层的截面 SEM 照片。由图 3 可知,黑铬、黑镍、镀锌黑色钝化、锌-镍合金黑色钝化、PVD 涂层、LTN-O 复合层的厚度依次减少,最厚的黑铬涂层达到 36 μm,LTN-O 复合层

最薄,仅为 1.2 μm;镀锌和锌-镍合金黑色钝化膜层厚度一致,均在 10 μm 左右。电镀黑镍及黑铬的预镀层较厚,结构相对疏松,有效提高了电解沉积过程中镀层与金属基体的结合力。

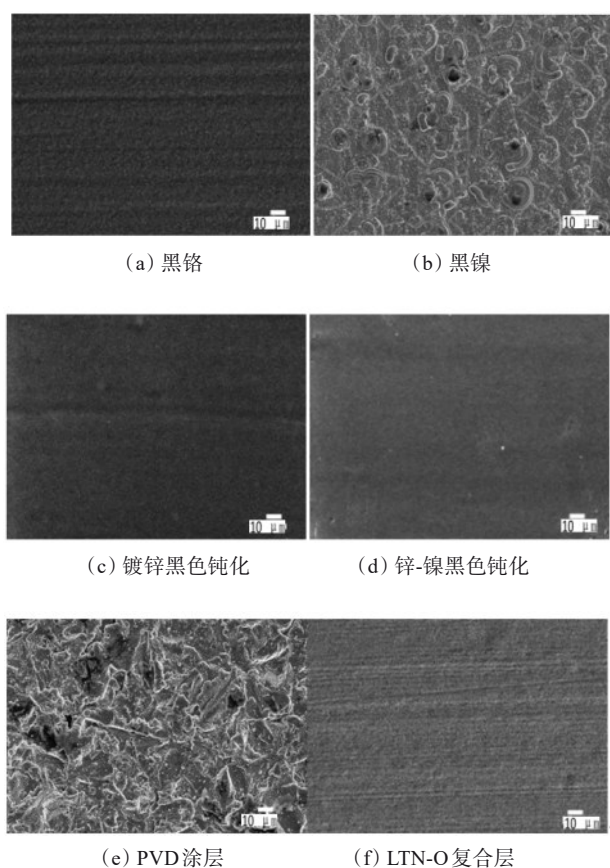


图2 试样表层黑色膜层表面SEM形貌

Fig.2 SEM morphology of the black films on the sample surface

## 2.2 厚度

6组试样表面镀、涂层厚度检测结果见表3。为保证镀层结合力及提高耐蚀性,黑镍、黑铬镀层在电镀前预镀铬或预镀锌处理,从图3可看出其预镀层较厚,整个镀覆层厚度公差累积 $\geq 10\ \mu\text{m}$ ,对于驾驶

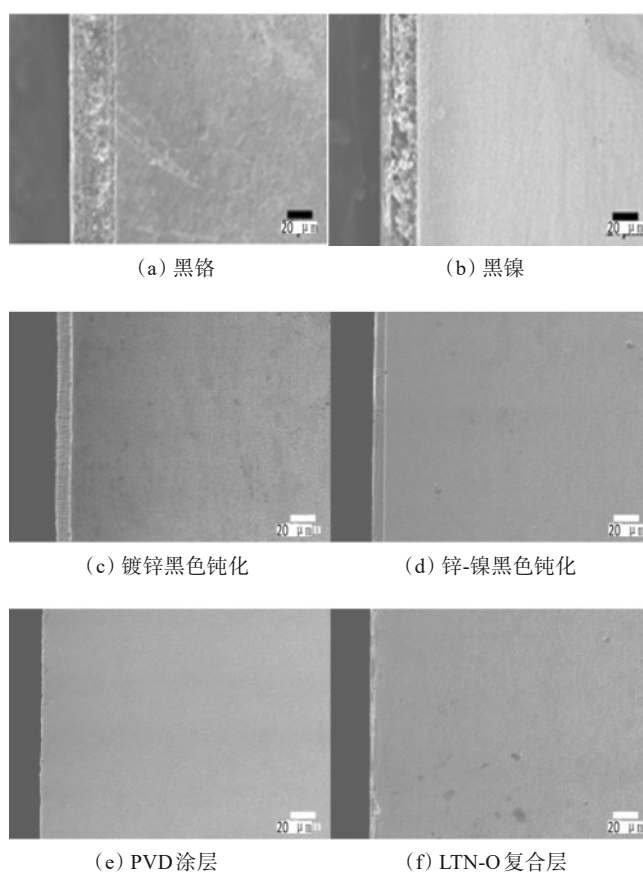


图3 试样表面黑色膜层截面SEM照片

Fig.3 SEM photographs of the cross section of the black film on the sample surface

舱内驾驶员操纵杆、螺钉及螺栓等有装配关系或局部精度要求的零件,在零件设计阶段须预留足够的尺寸公差;而PVD多元梯度纳米黑色涂层和LTN-O复合涂层厚度较薄,且厚度公差较小,厚度公差小于 $2\ \mu\text{m}$ ,适用于尺寸精度要求较高的螺纹紧固件及紧密配合表面的防护。

表3 膜层厚度和结合力检验结果

Tab.3 Thickness of films and test result of film adhesion

组别	膜层类型	膜层厚/ $\mu\text{m}$	结合力检验	
			现象	结论
1	电镀黑铬	30 ~ 40	挤扁处镀层无起皮、脱落	合格
2	电镀黑镍	20 ~ 30	挤扁处镀层无起皮、脱落	合格
3	镀锌黑色钝化	8 ~ 12	垂直交叉处镀层无脱落	合格
4	锌-镍合金黑色钝化	8 ~ 12	垂直交叉处镀层无脱落	合格
5	PVD多元梯度纳米黑色涂层	2 ~ 3	挤扁处涂层无起皮、脱落	合格
6	LTN-O复合层	0.5 ~ 1.5	挤扁处复合层无起皮、脱落	合格



2.3 结合力

镀锌及锌-镍合金黑色钝化层采用划痕法检测结合力。在被检查的镀层表面用划格器钢针划 4~6 条 1 mm 间距的平行线,深达基体金属,再划 4~6 条与此垂直 1 mm 间距的平行线(划线应按同一方向),在垂直交叉处不应有脱落现象。镀黑铬及黑镍层采用挤压法,将被检验的试样用虎钳夹紧,挤扁处不应起皮、脱落,基体金属或镀层虽发生龟裂,但不应起皮或脱落,镀层结合力仍为合格。检验结果见表 3,镀层结合力均符合镀覆层相关质量检测要求。从成膜机理分析,镀覆层为电化学沉积、梯度纳米黑色涂层为 PVD 真空物理气相多元沉积,而 LTN-O 复合涂层为低温离子渗氮与氧化技术形成,为金属基体近表面成分及组织结构的变化,结合力远高于前 5 组膜层。

2.4 耐蚀性

6 种黑色膜层的中性盐雾试验检测结果见表 4。检测结果 1 中试样电镀黑镍及黑铬后仅做涂油处理,其中电镀黑铬、镀锌黑色钝化及电镀锌-镍合金黑色钝化层表面无锈蚀,黑镍及 PVD 多元梯度纳米

黑色涂层表面出现红色点状腐蚀;检测结果 2 中试样在镀、涂后最终表面采用纳米封闭剂进行了封闭处理,经 96 h 干湿交替中性盐雾试验后,6 组试样表面均未出现红色锈蚀。

以上结果表明:电镀黑镍涂油及 LTN-O 涂层直接使用,其耐蚀性不足;可通过涂覆纳米封闭剂提高镀、涂、渗层的耐蚀性,满足驾驶舱内部零件耐盐雾腐蚀要求。

2.5 防反光性能

6 组试样对紫外、可见光的吸收率和反射率检测结果见图 4。其中黑镍和镀锌及锌-镍合金黑色钝化层对光的吸收率较高;PVD 多元梯度纳米黑色涂层及 LTN-O 复合层相对较低,但 LTN-O 复合层对光的吸收率高于 PVD 多元梯度纳米黑色涂层,接近 4 种黑色镀覆层。Al67Ti23 的 PVD 涂层对光的吸收率明显高于 Al70Ti30。PVD 多元梯度纳米黑色涂层对光的吸收率最低,后续研究中,应在保留其它性能的基础上,可将 PVD 涂层对紫外可见光漫反射吸收率的提升作为研究方向,通过涂层中 Al-Ti 比例及其它元素含量的调控制备黑色涂层。

表 4 耐蚀性检测结果

Tab.4 Results of corrosion resistance test

组别	膜层类型	检测结果 1	检测结果 2
1	电镀黑镍	局部有红色点状锈蚀	无红色锈蚀
2	电镀黑铬	局部有红色点状锈蚀	无红色锈蚀
3	电镀锌黑色钝化	无红色锈蚀	无红色锈蚀
4	电镀锌-镍黑色钝化	无红色锈蚀	无红色锈蚀
5	PVD 多元梯度纳米黑色涂层	局部轻微红色点状锈蚀	无红色锈蚀
6	LTN-O 复合层	无红色锈蚀	无红色锈蚀

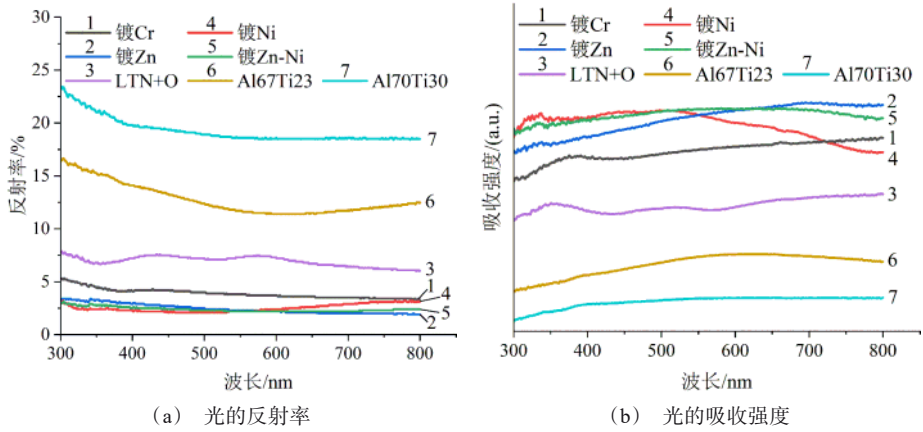


图 4 光的吸收与反射

Fig.4 Absorption and reflection of light

## 2.6 磨损

150倍磨痕的SEM图像见图5。由图5不同种类黑色涂层磨痕形貌可以看出,相较于金属基体表面的磨痕宽度,黑铬、镀锌黑色钝化、锌-镍合金黑色钝化和LTN-O层明显变窄,黑镍层的磨损宽度相较于金属基体磨痕宽度显著增加,由 $878.88\text{ }\mu\text{m}$ 增

加到了 $1182.15\text{ }\mu\text{m}$ ,这与该涂层的磨损率相对应,说明黑镍层的耐磨性能最差。LTN-O复合层的磨痕宽度相较于金属基体也出现了变大的趋势,这可能是由于其表面粗糙度值相较于其它涂层高,对磨球造成了严重的磨损,所以在磨损时出现了较宽的磨痕。

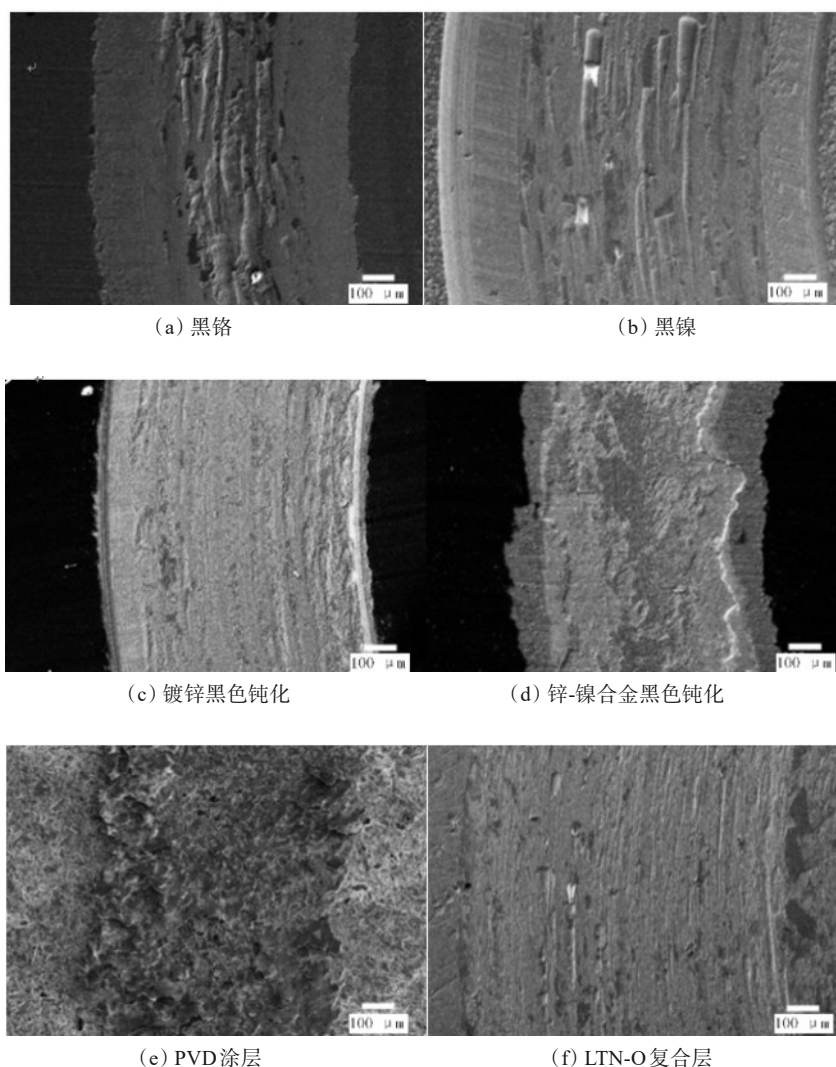


图5 黑色膜层表面磨痕SEM图像

Fig.5 SEM images of surface abrasion of black films

图6为不同涂层的磨损速度。单纯从几类无机膜层的硬度来说,由高到底依次为PVD多元梯度纳米黑色涂层与LTN-O复合层、电镀黑铬、黑镍、锌-镍合金黑色钝化、镀锌黑色钝化,其中镀锌层质地最软,但在磨损中锌层质量损失是最小的,可能由于磨损后的锌层无片状磨屑剥落的原因。从几种膜层的

磨痕形貌看,30CrMnSiA金属基体主要发生的是磨粒磨损,磨损的粒子沿滑动方向产生了明显的划痕,并在局部出现严重的黏着磨损。

黑铬层和黑镍层主要发生的是严重的磨粒磨损和黏着磨损,在黑铬层的磨痕中心位置出现了大量较宽的犁沟,并且伴随着片状磨屑剥落,而黑镍层的

磨粒磨损和黏着磨损相较于黑铬涂层来说较轻微,这是由于在黑镍层的中间存在着疏松的镀锌层,这就造成磨粒磨损的颗粒硬度不是很大,进而减轻了其磨损的强度。镀锌层和锌-镍合金镀层相似,主要发生的是轻微的磨粒磨损和疲劳磨损,并且由于其硬度较低,所以产生的磨痕深度较厚,由锌-镍合金镀层的磨痕形貌还能看出存在着非摩擦区域的膜层剥落,这与其结合力低有很大关系。PVD 多元梯度纳米黑色涂层与 LTN-O 复合层主要发生的是黏着磨损,并且在磨痕的中心位置存在轻微的磨粒磨损,表明两种膜层有着较高的硬度,且与金属基体结合力较强。

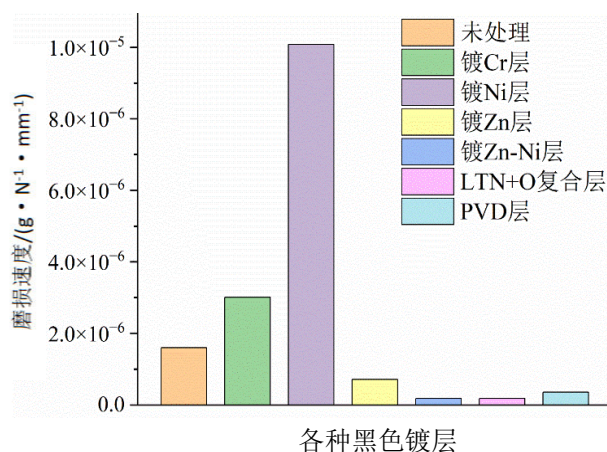


图6 黑色膜层摩擦学性能

Fig.6 Tribological properties of black films

### 3 结论

通过6类无机黑色膜层基于直升机驾驶舱内零部件设计及制造性能需求的测试分析,得出以下结论:

(1) 黑铬、黑镍、镀锌黑色钝化、镀锌-镍合金黑色钝化及PVD多元梯度纳米黑色涂层、LTN-O复合层结合力均能够满足航空产品质量控制要求,其中所列黑色金属镀层对光的吸收能力高于PVD多元梯度纳米黑色涂层及LTN-O复合层,后续将持续开展后两类膜层在紫外可见光漫反射中的吸收率及反射率研究。

(2) PVD多元梯度纳米黑色涂层及LTN-O复合层具有耐磨损性好、膜层薄、厚度尺寸公差小等优势,适用于有耐磨性及尺寸精度要求较高零件的表

面处理。

(3) 镀锌-镍合金黑色钝化及LTN-O复合层的耐蚀性及耐磨性较强,可用于服役环境恶劣或反复拆卸零部件的防护。

### 参考文献

- [1] 张允诚, 胡如南, 向荣. 电镀手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007, 1.
- [2] 安茂忠. 电镀理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003, 5.
- [3] 付淑英, 柳碧清, 李荣. 太阳光谱选择性吸收薄膜研究综述[J]. 新余高专学报, 2009, 14(3): 92-94.
- [4] 张安琴, 林筠. AlTiN涂层替代TiN涂层的可行性分析[C]. 中国航空学会. 探索创新交流—第六届中国航空学会青年科技论坛文集(下册). 北京: 航空工业出版社, 2014: 304-306.
- [5] 杨剑, 沙鹏, 李伟, 等. 转子钢20Cr13表面硬质PVD涂层摩擦磨损性能分析[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023(3): 1-7.
- [6] 吕坤, 王海英, 董华. 太阳能选择性吸收涂层的现状及发展[J]. 中国涂料, 2003(4): 44-46.
- [7] 谢光明. 中高温太阳选择性吸收表面[J]. 太阳能, 2000(2): 22-23.
- [8] 文明芬, 郭忠诚, 杨显万. 新型太阳能选择性吸收涂层的现状及发展[J]. 太阳能学报, 1998, 19(2): 217-219.
- [9] 杨永刚, 王世成, 倪沛然, 等. 粉末法制备太阳能电池 $Cu_2ZnSnS_4$ 薄膜吸收层[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(1): 24-29.
- [10] 费敬银, 周爱梅, 王宝珑. 太阳能光谱选择性低电流黑铬镀层的研究[J]. 太阳能学报, 1991, 12(3): 334-336.
- [11] 方容川. 固体光谱学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [12] 黄岩彬, 殷志强, 史月艳. 太阳光谱选择性吸收表面光学性能计算[J]. 太阳能学报, 1995, 16(2): 185-190.
- [13] 张霖, 赵腾, 陈大鹏, 等. 太阳能选择性吸收薄膜研究进展及展望[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 50(3): 57-62.
- [14] 薄鑫涛. 渗氮+氧处理处理工艺[J]. 热处理, 2019, 34(2): 60-61.
- [15] 沈明礼, 朱圣龙. 先进铝化物涂层制备技术进展[J]. 航空制造技术, 2016(21): 105-109.
- [16] Gerth J, Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel[J]. Wear, 2006, 264(9), 225-229.