

4种紧固件用涂层性能对比分析

靳磊¹, 郭建², 时卓², 王立东³, 常伟¹, 李文¹

(1.中国航空制造技术研究院 a.高能束流加工技术国家级重点实验室 b.先进表面技术航空科技重点实验室, 北京 100024; 2.辽宁省轻工科学研究所有限公司 特种涂层及涂料事业部, 沈阳 110000; 3.北京航为高科连接技术有限公司, 北京 100023)

摘要: **目的** 将4种不同涂料涂覆在相同紧固件上, 在相同测试条件下研究它们的表面形貌、耐腐蚀、抗疲劳等性能, 最后从中筛选出可替代传统 HW-A 的潜在涂料, 进一步丰富现役钛合金紧固件表面涂层材料品种。**方法** 利用 3D 共聚焦、电化学阻抗谱、中性盐雾、加速环境谱等方法评价紧固件表面涂层性能, 研究每种涂层的截面形貌、表面形貌、粗糙度、耐腐蚀、加速疲劳寿命等, 然后综合分析其关键性能。**结果** 采用 3D 共聚焦、电化学阻抗谱、中性盐雾、加速谱等方法初步摸清了 4 种涂料的性能特点, PTFE 涂料的表面粗糙度较 CZ 和 GO 降低约 50%, PTFE 电化学阻抗谱半径较其他 3 种涂层大大提高。加速谱更清晰表明, PTFE 涂料比现役 HW-A 铝涂料的疲劳寿命提高 22.8%, PTFE 涂料能满足当下性能需要。**结论** PTFE 涂料较市场上筛选出的石墨烯涂料、含铬酸盐聚氨酯涂料的施工性能更好、关键性能更优、更适合紧固件使用, 在未来产品应用中有较大的潜力。

关键词: 钛合金紧固件; 涂料; 形貌; 电化学阻抗谱; 耐中性盐雾; 加速谱; 综合性能

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)03-0046-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.03.006

Comparative Analysis on Properties of 4 Kinds of Coatings for Fasteners

JIN Lei¹, GUO Jian², SHI Zhuo², WANG Li-dong³, CHANG Wei¹, LI Wen¹

(1. a. Science and Technology on Power Beam Process Laboratory, b. Aviation Key Laboratory of Advanced Surface Engineering Technology, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 2. Special Coatings and coatings Business Division, Liaoning Light Industry Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 3. Beijing Hangwei High-tech Connection Technology Co., Ltd., Beijing 100023, China)

ABSTRACT: The work aims to apply 4 kinds of different coatings to the same fasteners to test their surface morphology, corrosion resistance and anti-fatigue under the same test conditions, screen out the potential coatings to replace traditional HW-A coatings, to enrich the varieties of surface coating materials for titanium alloy fasteners. 3D confocal, Ac impedance spectrum, neutral salt spray, accelerated spectrum and other methods were adopted to evaluate the properties of coatings on the fastener surface. The section morphology, surface morphology, roughness, corrosion resistance and anti-fatigue of each coating were

收稿日期: 2022-06-15; 修订日期: 2022-07-27

Received: 2022-06-15; Revised: 2022-07-27

基金项目: 稳定支持 (KZ562101113)

Fund: Stable Support Foundation of China (KZ562101113)

作者简介: 靳磊 (1984—), 男。

Biography: JIN Lei (1984-), Male.

引文格式: 靳磊, 郭建, 时卓, 等. 4种紧固件用涂层性能对比分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 046-054.

Jin Lei, GUO Jian, SHI Zhuo, et al. Comparative Analysis on Properties of 4 Kinds of Coatings for Fasteners[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 046-054.

studied and their key properties were analyzed comprehensively. The properties of the four kinds of coatings were initially determined by 3D confocal, Ac impedance spectrum, neutral salt spray, accelerated spectrum and other methods. The surface roughness of PTFE coatings was about 50% lower than that of CZ and GO coatings. The radius of PTFE electrochemical impedance spectrum was greatly improved than the other 3 kinds of coatings. The life of PTFE coatings was improved by 22.8% than that of the serving aluminum coatings HW-A, and PTFE coatings, which can basically meet the present production needs. Comparing with graphene coatings and polyurethane coatings containing chromate, PTFE coatings have the better workability, key properties and they are more suitable for fasteners and they have great potential in the future.

KEY WORDS: titanium alloy fasteners; coating; morphology; electrochemical impedance spectrum; neutral salt spray resistance; acceleration spectrum; comprehensive performance

钛合金紧固件由于质量轻、比强度高、热强性好等特性,在飞机、发动机和航天飞行器上的应用越来越多。国内外每架飞机使用的钛合金紧固件数量少则几万余件,多则几十万件^[1-4],钛合金紧固件已成为飞行器必备的零部件。钛合金紧固件起到连接不同材料、不同结构的作用,当钛合金紧固件与结构钢、铝合金、复合材料等材料接触时,由于电偶腐蚀、装配应力、缝隙腐蚀等多种损伤机制,造成紧固件自身或者紧固孔产生腐蚀、摩擦破损等,形成安全隐患^[5-7]。因此,钛合金紧固件防护涂层需要良好的耐腐蚀性能、较低的摩擦系数、均匀一致的厚度及良好的外观等。在钛合金紧固件多种防护涂层中^[8-10],酚醛树脂 Al 涂料最为优良,使用最为广泛,国内外飞行器中应用最为普遍。比如 Hi-Shear 294 钛合金紧固件铝涂层已广泛用于美国空军(F-22)及波音飞机(Boeing-777、Boeing-737等)上。目前美国 LSI 公司的 HI-KOTETM-NC 系列涂料(主要成分由酚醛树脂、片状 Al 粉等组成)具有良好的腐蚀抑制作用、优越的安装润滑性能、高的耐热性,能抵抗各种液压油、燃油、洗涤剂、清洗剂等侵蚀,是军工行业常采购的原材料。国内有近似于 HI-KOTETM-NC 的涂料品种,国产涂料组分与国外涂料组分大部分相同,通常由酚醛树脂、片状铝粉、铬黄、聚四氟乙烯等原料制成,满足了现役飞机的使用需求。但在多年、大范围使用过程中也发现一些小缺点,比如涂料涂覆后紧固件等零件表面毛糙、润滑性差,有时引起安装力不一致、安装后的紧固件易偏离孔中心,使用过程中螺纹牙易损伤;Al 涂料在严苛的腐蚀环境与应力下易产生鼓泡、脱落的碎屑吸水,引起紧固件孔壁腐蚀。以上 2 个缺点是本文的重点关注对象。

为替代传统 Al 涂料(目前国内可生产此品种涂料的厂家有 4 家左右),丰富现役涂料品种,本研究根据目前涂料性能及未来使用要求,从市场上筛选出聚氨酯与石墨烯涂料。这 2 种涂料具有极多的优点,已经得到大量研究者的证实,并在不同行业得到了应用^[11-20]。同时,本研究根据相关文献^[21-25],知悉了 PTFE 涂料的优点也较多,是钛合金紧固件表面使用的潜在优质涂料,因此本研究自行设计合成了 1 种

PTFE 涂料,所以该研究总共涉及 4 种涂料:目前现役使用的 Al 树脂涂料,标记为 HW-A;市售成熟的含有铬酸盐的聚氨酯底涂用涂料,标记为 CZ;市售成熟的石墨烯掺杂改性聚氨酯涂料,标记为 GO;自行设计合成的 PTFE 掺杂改性聚氨酯涂料,标记为 PTFE。本研究主要对这 4 种涂料性能进行初步比较,并给予筛选结论。

1 试验

1.1 材料设计与合成

1.1.1 HW-A 铝涂料

HW-A 是一种含有酚醛树脂、片状铝粉、铬黄(质量分数约 5.2%)、特种助剂及稀释剂等物质组成的涂料,与美国 Hi-Shear 294 钛合金紧固件铝涂层具有近似的组分与使用性能。

1.1.2 市售涂料

公司 CY 研发的石墨烯重防腐涂料 GO,可长期在潮湿、高温环境下使用,该材料是聚氨酯树脂与石墨烯优异性能的技术合成,可带锈施工。性能指标:耐酸性 ≥ 200 h,耐湿热性 $\geq 1\,000$ h,耐盐雾性 $\geq 3\,500$ h,耐摩擦 ≥ 10 万次,附着力 ≥ 21 MPa。

公司 XA 研发的聚氨酯底漆涂料 CZ,聚氨酯质量分数为 60%以上,内含一定的环保型钛镍黄(质量分数约 1.2%),以及铁红、铬酸盐等其他填料。性能指标:耐酸性 ≥ 200 h,耐湿热性 $\geq 1\,000$ h,耐盐雾性 $\geq 3\,500$ h,耐摩擦 ≥ 10 万次,附着力为 17.2 MPa。

以上 2 家公司涂料的主要组分均是聚氨酯,但两者填料种类不同,从性能数据上看差别不大。

1.1.3 自研 PTFE 涂料

1) PTFE 粉末表面改性。将粒径 $D_{50}=2$ nm 的 PTFE 粉末在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干 2 h,然后采用 KH560 偶联剂处理(使用量为 PTFE 粉末质量的 1.5%),KH560 偶联剂可使 PTFE 表面产生活性自由基,从而提高 PTFE 与原始涂料的融合性。

2) 喷涂前配料。称取 2 g 的改性 PTFE 纳米粉

末,直接掺入 200 g 的 A1 涂料中(相当于 1%的 PTFE),然后放入机械搅拌器中搅拌 5 min,搅拌速度为 1 500 r/min。

将乙二醇乙醚醋酸酯稀释剂掺入上述溶液中,搅拌 3 min,并静置 8 min。涂料与乙二醇乙醚醋酸酯的体积比为 1:2。

1.2 涂覆工艺

1.2.1 紧固件涂覆机

采用 60#砂处理紧固件 3 min 后,再用紧固件专用涂料涂覆机喷涂,涂覆机转速为 3.0 r/s,泵速为 1.0 r/s,时间为 60 min。各成分的体积比为:HW-A:乙二醇乙醚醋酸酯=1:2;PTFE:乙二醇乙醚醋酸酯=1:2;CZ:稀释剂(酮类和酯类)=38:9;GO:稀释剂(酮类和酯类)=38:9。

1.2.2 空气喷涂

喷涂参数:喷嘴直径为 2 mm,喷枪压力为 4 kg/cm²,喷涂黏度(涂-4 杯)为 20 s。拟获得的干膜厚度为 7~10 μm。根据喷涂实际情况,采用厚度梳规确定喷涂时间,单道喷涂时间约 0.5 min。以上涂料喷完后,在 80 ℃固化 120 min 后取出即可。

1.3 性能测试方法

1.3.1 形貌观察

采用光学显微镜观察涂层的微观形貌。在形貌观察前,将待检测涂层样品线切割制成 1 cm×1 cm 大小,并选用 400#、1000#、1200#金相砂纸按照从粗到细的顺序进行制样、抛光。

1.3.2 表面形貌与粗糙度

3D 共聚焦法:利用逐点照明和空间针孔调制来去除样品非焦点平面的散射光。相比于传统成像方法,该方法可提高光学分辨率和视觉对比度。

按照 GB 3505《表面粗糙度 术语 表面及其参数》进行测试。采用中线制评定表面粗糙度,在高度特性参数常用的参数值范围内(R_a 为 0.025~6.3 μm, R_z 为 0.1~25 μm),优先选用 R_a 。

1.3.3 电化学阻抗谱测试

采用 Autolab PGSTAT302N 电化学工作站测试涂层的电化学性能,电解液为 3.5%的 NaCl,10 mm×10 mm 铂为对电极,饱和甘汞电极为参比电极。待开路电位稳定后进行电化学阻抗谱测试,电化学阻抗谱扫描频率为 10⁵~10⁻² Hz,从高频开始进行扫描,振幅为 10 mV/s,正弦扰动电位为±10 mV。

1.3.4 耐中性盐雾性能测试

采用中性盐雾试验箱进行耐中性盐雾性能测试,标准为 GJB 150.11A—2009《军用装备实验室环境试验方法第 11 部分盐雾试验》。采用 5%的 NaCl 溶液,

pH 值为 6.5~7.2,试验环境温度为 35 ℃,饱和桶湿度为 47 ℃,80 cm²的盐雾沉降量控制在 1~3 mL/h。每 48 h 观察涂层发生的变化。

1.3.5 加速谱测试

环境加速谱主要包括 3 大谱块,分别为湿热试验(温度为 43 ℃,相对湿度 RH 为 95%,暴露时间为 7 d)、浸润试验(温度为 35 ℃,浸 10 min,晾干 50 min)及常温疲劳试验(恒幅试验载荷的应力 $\sigma_{\max}$ =110 MPa, $\sigma_{\min}$ =20 MPa,循环次数为 500 次, f =5 Hz、温度为 53 ℃)。1 个循环周期约 8 d,每个循环完成后,对紧固件的腐蚀情况进行评价,记录,而后继续重复各谱块。

2 结果及分析

2.1 单一紧固件宏微观形貌

2.1.1 宏观形貌

阳极氧化、HW-A 涂料、GO 涂料、CZ 涂料、PTFE 涂料 4 种材料制备的紧固件形貌如图 1 所示。可见,5 种紧固件的颜色明显不同,这是由不同的树脂、填料、固化剂致使的涂层颜色不一。

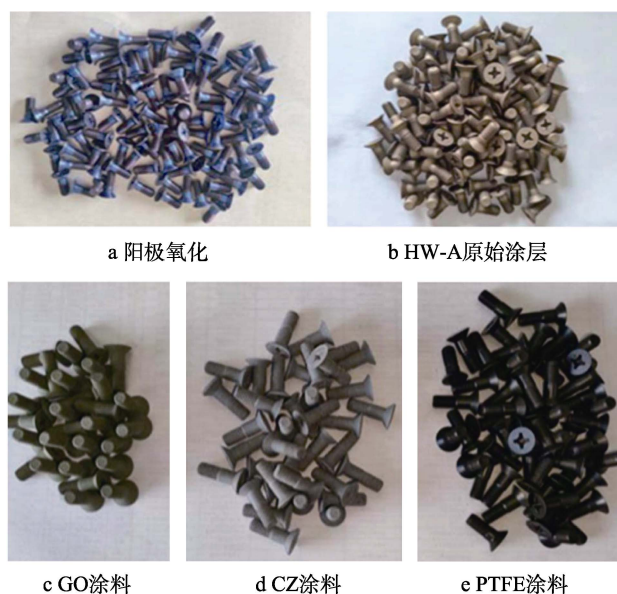


图 1 不同表面处理/涂料涂覆的钛合金紧固件
Fig.1 Titanium alloy fasteners with different surface treatments/coatings: a) anodized; b) HW-A; c) GO; d) CZ; e) PTFE

为清晰对比本研究自研涂层与外购涂层形貌,将紧固件放大,如图 2 所示。可见,GO 涂层与 CZ 涂层形成的紧固件螺帽有少量的凸起物,形状类似毛刺,而 PTFE 涂层更加光滑,表面更为细腻。说明 GO 与 CZ 涂料中的树脂、稀释剂与氧化石墨烯、钛镍黄、铁红以及铬酸盐等相容性并非最佳,也有可能是这些填料在涂料中发生了部分团聚,因此造成



图 2 不同表面处理/涂料涂覆的钛合金紧固件
Fig.2 Titanium alloy fasteners with different surface treatments/coatings: c) GO coating; d) CZ coating; e) PTFE coating

了紧固件涂覆后表面不光滑，外观难以符合紧固件产品要求。

2.1.2 截面形貌

分析涂有 HW-A、GO、CZ、PTFE 涂料的紧固件的微观形貌，如图 3 所示。可见，GO 涂料、CZ

涂料表面有一定的凹凸不平，而 PTFE 涂层截面形貌致密，厚度更加均匀，无凸起物。PTFE 涂层表面更光滑细腻，微观形貌一致性较 GO、CZ 更为良好。据推测，PTFE 性能应该更好，但还要通过其他试验进一步验证。

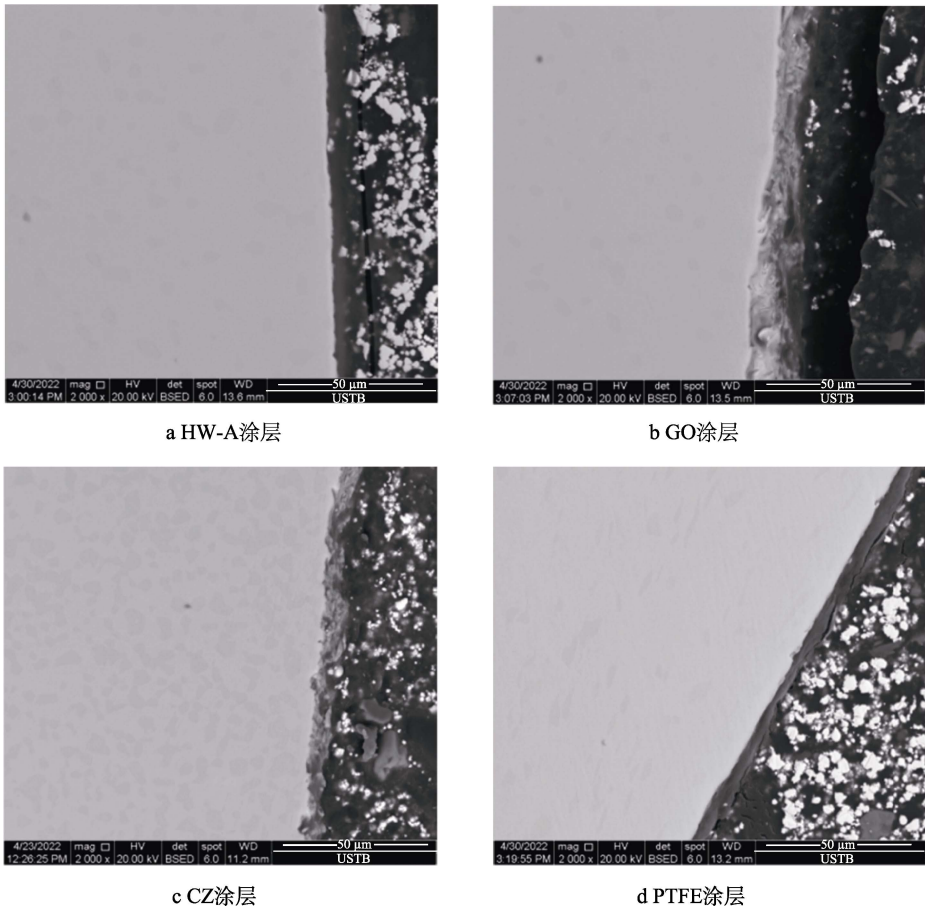


图 3 钛合金紧固件 4 种涂层的截面形貌
Fig.3 Section morphology of four kinds of coatings on titanium alloy fasteners

2.1.3 表面微观形貌及粗糙度

采用 3D 共聚焦法测试 4 种涂层的表面形貌（如图 4 所示），并总结形貌的几何参数，见表 1。从粗糙度最大、最小值看，PTFE 涂料的表面粗糙度较 CZ 和 GO 降低约 50%，可见 PTFE 涂层的形貌、厚度均匀性、表面质量最佳。

2.2 单一紧固件涂层电化学与耐中性盐雾性能分析

以上试验数据很难准确描述 HW-A、GO、CZ、PTFE 这 4 类涂料关键性能的好坏，因此需借助电化学、中性盐雾等其他技术手段深入研究。

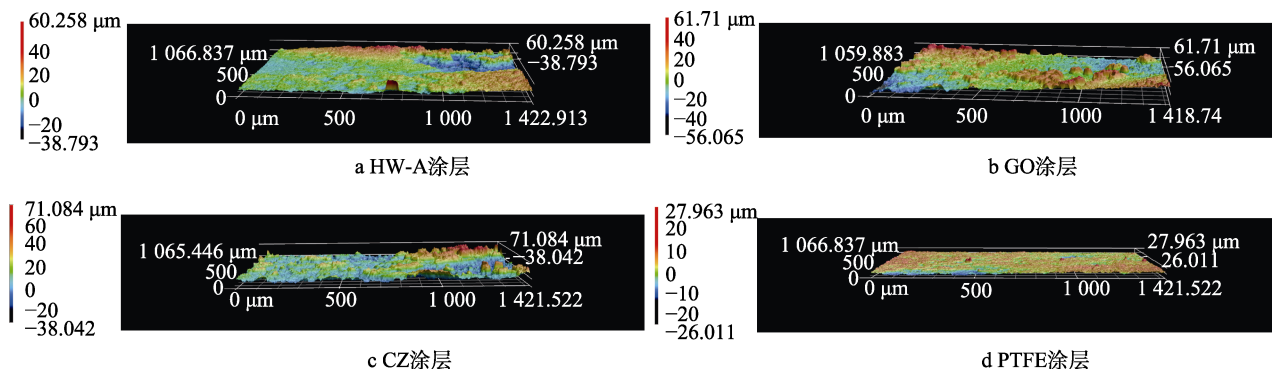


图4 4种涂料涂覆的钛合金紧固件形貌

Fig.4 Morphology of titanium alloy fasteners coated with four kinds of coatings

表1 共聚焦法测试的4种涂层表面形貌参数总结

Tab.1 Summary of surface morphology parameters of four kinds of coatings measured by confocal method

涂层	最低值	最高值	涂层粗糙度值最大差
HW-A	-38.3	60.3	98.6
GO	-56.1	61.7	117.8
CZ	-38.0	71.1	109.1
PTFE	-26	28	54

2.2.1 电化学阻抗谱

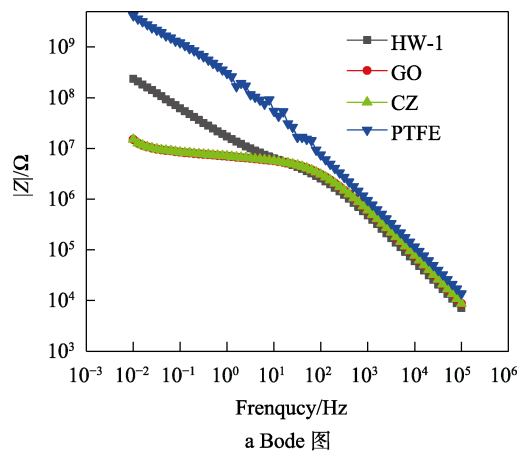
原始 HW-A 铝涂层、GO 涂层、CZ 涂层、PTFE 涂层的阻抗模值及电化学阻抗谱如图 5 所示。可见，PTFE 涂层低频率下的阻抗模值最大，高达 $4 \times 10^9 \Omega$ ，且阻抗半径最大，理论上其耐腐蚀性能最好。主要原因可解释为：1%（质量分数）的纳米 PTFE 具有优秀的填充效果，增强了涂层的交流阻抗值，有利于耐腐蚀性能的提高^[26-27]。GO 与 CZ 质量较差的原因可归结为，填料并未形成有效的物理阻隔，GO 颗粒之间可能形成了软团聚，即原始小颗粒团聚成大颗粒，大颗粒与涂料树脂间的缝隙、裂纹反而增多，因此加重了微观结构的缺陷及导电性，进而引起交流阻抗值变小。这种现象以往文章中也有类似报道^[28-31]，关于石墨烯分散及团聚的相关研究在此不作赘述。

2.2.2 中性盐雾试验

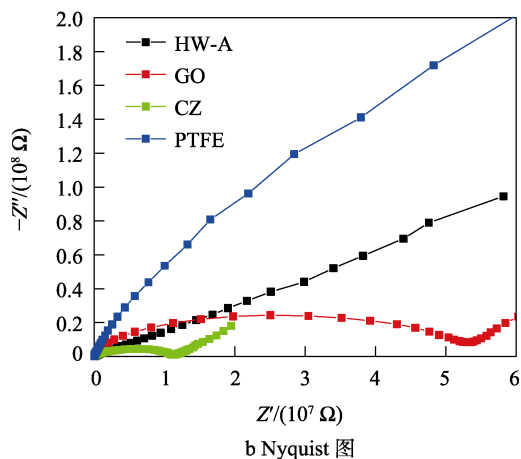
紧固件不会单独使用，通常在铝合金板材表面装配，因此将带有 4 种不同涂层的钛合金紧固件拧入安装孔，观察腐蚀现象，如图 6 所示。可见，中性盐雾腐蚀 4 000 h 后，紧固件依然无明显腐蚀倾向，仅仅是铝合金厚板基材氧化变黑，紧固件表面仅有部分 NaCl 白色颗粒粘附。总体来看，这 4 种涂层的耐腐蚀性能均非常良好。原因可解释为，航空领域使用的 HW-A 铝涂层具有很长寿命，市场上筛选的 2 种 GO、CZ 涂料也非常优质，说明对筛选的原则、涂料组分与寿命相关性等均非常了解。同时另一重要原因是，紧固件基体材料为 TC4 钛合金，而钛合金的耐腐蚀

性能极佳，基本不会发生生锈，因此涂层/TC4 钛合金组合具有特佳的耐腐蚀性能。

仔细观察紧固件发现，HW-A 铝涂层表面较为干净，无 NaCl 盐沉积，而 PTFE 表面沉积了较多的 NaCl，GO、CZ 涂层表面沉积了少量的 NaCl。因此，仅从形貌上得出的洁净程度为：HW-A > GO $\approx$ CZ > PTFE。经过清洗后发现，4 类紧固件均未发生腐蚀。因此，这 4 类钛合金紧固件从腐蚀形貌上无法给予最准确的性能优劣判断。

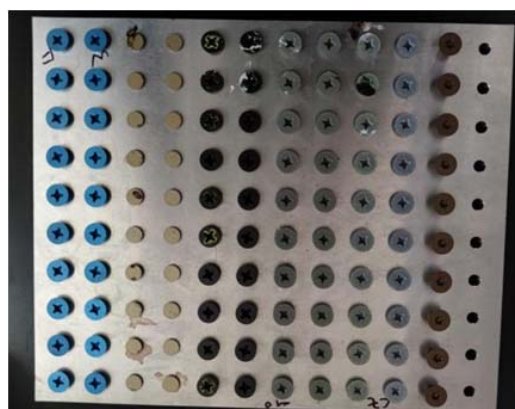


a Bode 图

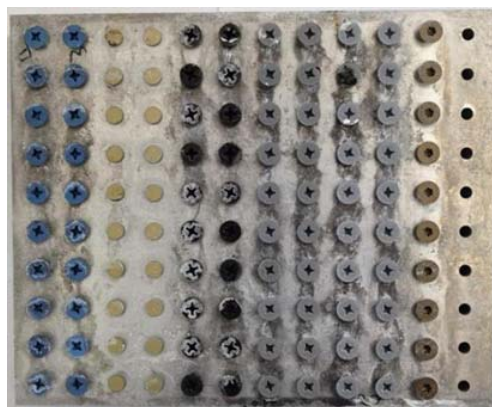


b Nyquist 图

图5 制备态 HW-A、GO、CZ、PTFE 涂层的电化学阻抗谱
Fig.5 Electrochemical impedance spectroscopy of prepared HW-A, GO, CZ, PTFE modified coatings



a 制备态涂层



b 腐蚀 4 000 h 后的涂层

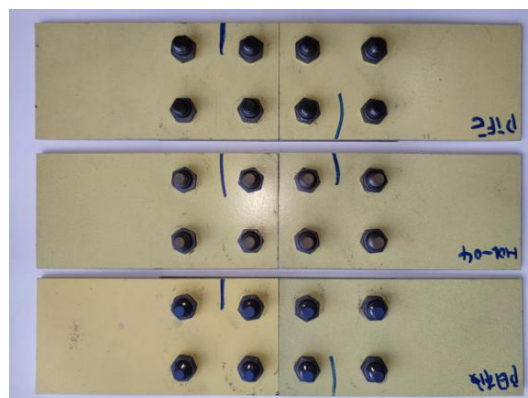
图 6 不同表面处理/涂料涂覆的钛合金紧固件装配系统
(从左致右分别为阳极氧化、HW-A、GO、CZ、PTFE)

Fig.6 Titanium alloy fasteners with different surface treatments/coatings (anodized, HW-A, GO, CZ, PTFE, respectively from left to right): a) coating as prepared; b) coating after 4 000 h corrosion

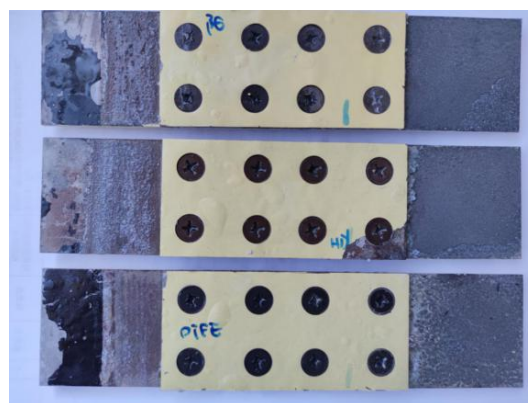
2.3 加速谱性能分析

从电化学阻抗谱初步获得了各涂层紧固件的耐腐蚀性能优劣, 此方法是科研领域常用的技术手段。但从工程角度讲, 加速环境谱下的性能才是紧固件性能好坏关键判据之一, 才是考核紧固件性能的更重要方法^[32-35]。根据 1.3.5 加速谱测试方法进行测试, 4 种涂层在不同循环阶段的宏观形貌如图 7 所示(因 GO 和 CZ 为外购材料, 并非自行合成, 因此暂未展示相关试验过程图片)。

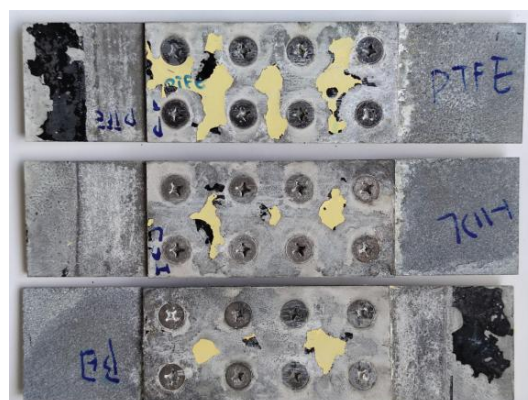
从图 7 可见, 循环第 3 周期时, 原始涂料 HW-A 周边发生了少量的脱落, 而 PTFE 样板仅发生鼓泡, 并未脱落, 说明 PTFE 引起的丝状腐蚀较弱。这可能是由于 PTFE 涂料与黄色面漆具有更好的相容性, 更接近自腐蚀电位。在循环第 4 周期时, PTFE 紧固件系统表面腐蚀情况优于 HW-A 涂层(见图 7c)。疲劳试验继续进行, 获得阳极氧化、HW-A、GO、CZ 及 PTFE 的平均寿命分别为 2 018、2 887、2 728、2 641、3 545 次, 可见 GO 与 CZ 较原始 HW-A 涂层寿命下降, 而 PTFE 相对原始涂层寿命提高 22.8%。



a 0 循环



b 3 循环



c 4 循环



d 断裂形貌

图 7 不同循环周期下的 4 种紧固件装配件形貌对比
Fig.7 Comparison of morphology of four fastener assemblies under different cycle periods: a) 0 cycle; b) 3 cycles; c) 4 cycles; d) fracture morphology

主要原因可解释为,紧固件为钛合金材料,较铝合金板材具有更高的自腐蚀电位,因此钛合金紧固件不是腐蚀的薄弱环节,很难发生腐蚀损伤。不同紧固件表面处理后,被夹持板电偶腐蚀和缝隙腐蚀的程度会不一样,即紧固件涂层的自腐蚀电位高,表面质量均匀,性能更一致,就会使被夹持铝合金板材腐蚀,微动磨损程度减轻,缝隙处存在的阴阳极会少或者电池腐蚀驱动力小,于是整个被夹持系统的疲劳寿命就较长。根据疲劳寿命结果,可反推 GO 与 CZ 紧固件引起的板材缝隙腐蚀严重,在高低应力下更容易发生断裂。考虑到本研究的装配方式、拧紧应力、被夹持板材性能、盐雾试验、疲劳试验、紧固件几何尺寸、涂层厚度等参数均一致,只有紧固件表面涂覆涂层不一样,因此最终可归结为 PTFE 涂层提高了紧固件系统的综合性能,使循环寿命提高幅度达 22.8%。

同时本研究采用的加速谱测试方法,1 个循环周期相当于飞机在某严苛服役环境下的寿命为 1 a^[32,36],这是航空领域加速谱设计常遵循的规律之一,加速太快可能导致研究规律失真,加速太慢会导致试验周期过长。本研究的加速约为日历寿命的 45.6 倍,是航空工业针对某部位形成的加速谱,该加速谱已推广使用 6 年,试验测试与实际情况基本一致。因此,可简单得出如下结论,原始 HW-A 涂层在严苛使用环境下 5.7 a 会有很高的失效风险,因此在 5.7 a 之前会进行修理,或者说 5.7 a 是该部位的使用警戒线,是发生故障隐患的重要时间节点,而使用新型的 PTFE 涂料可将这一部位的寿命延长到 7 a(如图 8 所示)。事实上,飞机的装配还需要密封剂、垫片、湿装配甚至橡胶帽等,因此实际上飞机的维修时间要长于 5.7 a。本研究只是为降低密封剂、垫片、湿装配这些工艺对紧固件装配系统的影响,并未和实际飞机装配工艺一致。因为装配方式复杂反而增加了 PTFE 涂层防腐机制的研究难度,隐藏 PTFE 改善机制真相,造成数据失真。如果使用密封剂、垫片、湿装配这些技术,此紧固件装配件的寿命至少在 10 a 以上,这和实际情况一致。

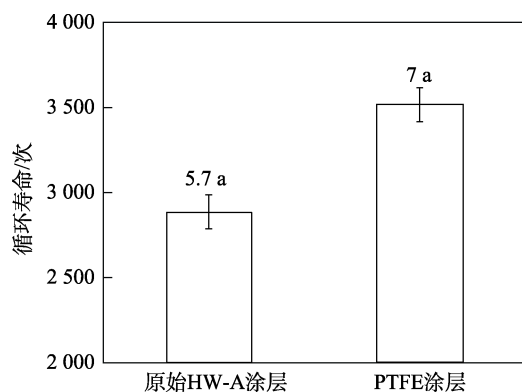


图8 原始涂料与改性涂料性能对比

Fig.8 Performance comparison between original and modified coatings

2.4 涂料与涂层性能综合分析

4 种涂料性能各异,部分指标并未严格按照特定规律排序,因此从如下几方面综合考虑。

1) 外观和表面粗糙度。GO、CZ 涂料制备的紧固件较为粗糙,外观上较难达到高度一致性要求,尽管 GO、CZ 涂层在中性盐雾试验后,表面 NaCl 颗粒粘连少,但紧固件需要装配,对拧紧力矩、装配均有高度要求,因此 GO、CZ 不是最佳选择,综合分析 PTFE 效果最好。因为 PTFE 改性涂层固化过程中,降低了涂层的表面张力,使涂料的流平性更好,最后形成的涂层表面平滑,表面孔洞直径小。与 GO、CZ 涂料表面的粗糙面(乳突结构、纳米微米粒子的软聚集等)相比,PTFE 的乳突结构非常薄,对涂层粗糙度的影响非常小,可忽略不计。

2) 机翼壁板、机身等部位使用大量的钛合金紧固件,此处受剪切力、电偶腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、发动机释放的高热量引起的受热老化等情况非常复杂,单一性能(盐雾、电化学、价格、颜色、施工性、固化)的考虑均是片面的。本研究综合以上几方面全盘考虑,认为 PTFE 涂料较原始 HW-A、GO、CZ 更适合应用于紧固件表面防护,在生产施工中更为简单、质量更有保证,尤其是紧固件夹持系统的加速谱试验数据更能证明这一点。

3 结论

本文对于 TC4 钛合金紧固件的 HW-A、GO、CZ、PTFE 涂层性能进行了 6 方面性能的考核,结论如下:

1) 尽管涂有 PTFE 涂层的紧固件系统(装配件)在中性盐雾腐蚀下有白色 NaCl 沉积,但 PTFE 涂层具有更低的粗糙度、表面更光滑、电化学阻抗值最大等优异性能。

2) 在湿热、浸润、常温疲劳 3 种复杂环境下进行严苛测试,结果表明,PTFE 较原始 HW-A 涂层的耐疲劳寿命提高了 22.8%。

3) HW-A、GO、CZ、PTFE 这 4 种涂料/涂层,PTFE 的综合性能最佳,其次是原始 HW-A 涂料。

参考文献:

- [1] 倪沛彤,韩明臣,张英明,等. 宇航飞行器紧固件用钛合金的发展[J]. 钛工业进展, 2012, 29(3): 6-10.
NI Pei-tong, HAN Ming-chen, ZHANG Ying-ming, et al. Development of Titanium Fasteners Applying in Space Navigation[J]. Titanium Industry Progress, 2012, 29(3): 6-10.
- [2] 张利军,王幸运,郭启义,等. 钛合金材料在我国航空紧固件中的应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 129-133.

- ZHANG Li-jun, WANG Xing-yun, GUO Qi-yi, et al. Application of Titanium Alloy in Chinese Aircraft Fastener[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 129-133.
- [3] 郑建锋, 王旭. 民用飞机钛合金紧固件表面处理的应用与研究[J]. 上海涂料, 2012, 50(5): 17-20.
- ZHENG Jian-feng, WANG Xu. The Application and Research of the Surface Treatment for Civil Aircraft Titanium Alloy Fasteners[J]. Shanghai Coatings, 2012, 50(5): 17-20.
- [4] 刘风雷, 殷跃军, 刘丹, 等. 钛合金紧固件涂铝技术[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(4): 352-354.
- LIU Feng-lei, YIN Yue-jun, LIU Dan, et al. Aluminum Coating Technology for Titanium Alloy Fasteners[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(4): 352-354.
- [5] 张晓云, 汤智慧, 孙志华, 等. 钛合金的电偶腐蚀与防护[J]. 材料工程, 2010, 38(11): 74-78.
- ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, SUN Zhi-hua, et al. Galvanic Corrosion and Protection between Titanium Alloy and other Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(11): 74-78.
- [6] 王曰义. 钛及其合金在流动海水中的腐蚀及对其他金属材料的电偶腐蚀作用[J]. 金属学报, 2002, 38(S1): 623-625.
- WANG Yue-yi. Corrosion Resistance of Titanium Alloys to Flowing Seawater and Galvanic Couple Corrosion Effect on other Metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(S1): 623-625.
- [7] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 等. 高强合金与钛合金的电偶腐蚀行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 124-127.
- LIU Jian-hua, WU Hao, LI Song-mei, et al. Galvanic Corrosion Behavior between Titanium Alloy and High-Strength Alloys[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 124-127.
- [8] 徐良. 航空钛合金紧固件铝涂层性能规范研究[J]. 航空标准化与质量, 2012(1): 32-36.
- XU Liang. The Specification of Aluminum Pigmented Coating for Aerospace Titanium Alloy Fasteners[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2012(1): 32-36.
- [9] 房昺, 张鹏飞, 原玲, 等. 钛合金紧固件用铝涂层的性能与应用[J]. 涂料工业, 2013, 43(5): 17-22.
- FANG Bing, ZHANG Peng-fei, YUAN Ling, et al. Properties and Application of Al-Based Coatings for Titanium Alloy Fasteners[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(5): 17-22.
- [10] 王淑芹. 铝颜料的国外状况[J]. 中国涂料, 1994, 9(2): 44-48.
- WANG Shu-qin. Foreign Situation of Aluminum Pigment[J]. China Paint, 1994, 9(2): 44-48.
- [11] 菅晓霞, 宋育芳, 梁益, 等. 聚氨酯型可自修复涂料的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 247-252.
- JIAN Xiao-xia, SONG Yu-fang, LIANG Yi, et al. Preparation and Properties of Self-Healing Polyurethane Coating[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 247-252.
- [12] 陆刚. 聚氨酯树脂涂料发展潜力分析[J]. 化学工业, 2014, 32(8): 12-16.
- LU Gang. Analysis of Polyurethane Resin Coating Development Potential[J]. Chemical Industry, 2014, 32(8): 12-16.
- [13] 欧文, 邹新阳, 周如东, 等. 高固体分聚氨酯航空涂料的配方设计要点[J]. 涂料工业, 2015, 45(8): 83-87.
- OU Wen, ZOU Xin-yang, ZHOU Ru-dong, et al. Preliminary Discussion on the Formulation Design of High-Solid Polyurethane Aviation Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(8): 83-87.
- [14] 周如东, 王李军, 朱亚君, 等. 高固体分聚氨酯航空涂料的研制[J]. 涂料技术与文摘, 2015, 36(9): 35-42.
- ZHOU Ru-dong, WANG Li-jun, ZHU Ya-jun, et al. Preparation of High Solid PU Aircraft Coatings[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2015, 36(9): 35-42.
- [15] 王耀文. 聚苯胺与石墨烯在防腐涂料中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- WANG Yao-wen. The Synthesis and Application of Polyaniline and Graphene Nanosheets in Anti-Corrosion Coatings[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [16] 朱建康, 李爽, 张双红, 等. 石墨烯防腐涂层“腐蚀促进行为”解决策略的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 126-139.
- ZHU Jian-kang, LI Shuang, ZHANG Shuang-hong, et al. Research Progress on Solution Strategy of “Corrosion-Promotion Behaviour” of Graphene Anticorrosion Coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 126-139.
- [17] SINGH RAMAN R K, TIWARI A. Graphene: The Thinnest Known Coating for Corrosion Protection[J]. JOM, 2014, 66(4): 637-642.
- [18] PRASAI D, TUBERQUIA J C, HARL R R, et al. Graphene: Corrosion-Inhibiting Coating[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1102-1108.
- [19] LIU Shuan, GU Lin, ZHAO Hai-chao, et al. Corrosion Resistance of Graphene-Reinforced Waterborne Epoxy Coatings[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(5): 425-431.
- [20] YE Yu-wei, ZHANG Da-wei, LIU Tong, et al. Improvement of Anticorrosion Ability of Epoxy Matrix in Simulate Marine Environment by Filled with Superhydrophobic POSS-GO Nanosheets[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 364: 244-255.
- [21] 吴昊. PTFE基复合涂层的疏水性与摩擦学性能[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- WU Hao. Hydrophobicity and Tribological Properties of PTFE-Based Composite Coatings[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [22] 吴昊, 朱丽娜, 岳文, 等. PTFE复合涂层的摩擦学性能及疏水性能研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 284-288.

- WU Hao, ZHU Li-na, YUE Wen, et al. Tribological Properties and Hydrophobic Properties of PTFE Composite Coatings[J]. Materials Review, 2018, 32(S1): 284-288.
- [23] 夏建荣, 高启超, 高仁金, 等. PTFE/天然生漆复合涂料的制备与性能[J]. 中国生漆, 2020, 39(4): 41-44.
- XIA Jian-rong, GAO Qi-chao, GAO Ren-jin, et al. Preparation and Properties of PTFE/Natural Lacquer Composite Coating[J]. Journal of Chinese Lacquer, 2020, 39(4): 41-44.
- [24] 赵泽鹏, 黎相孟, 严鑫. 聚四氟乙烯涂层制备及润湿性研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 9-12.
- ZHAO Ze-peng, LI Xiang-meng, YAN Xin. Study on Preparation and Wettability of Polytetrafluoroethylene Coatings[J]. Machine Building & Automation, 2021, 50(2): 9-12.
- [25] 邵晶晶, 任芝龙, 杨雅伦, 等. 磁控溅射制备聚四氟乙烯低温超疏水薄膜[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(2): 154-160.
- SHAO Jing-jing, REN Zhi-long, YANG Ya-lun, et al. Low Temperature Super-Hydrophobicity of Magnetron Sputtered Polytetrafluoroethylene Coatings[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(2): 154-160.
- [26] 胡惠文. PTFE 植入体表面具有抗菌特性的高细胞相容性复合涂层的构建及评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- HU Hui-wen. Preparation and Evaluation of Biocompatible, Antibacterial Composite Coatings on PTFE Implants[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [27] AMIRUDIN A, THIENY D. Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Study the Degradation of Polymer-Coated Metals[J]. Progress in Organic Coatings, 1995, 26(1): 1-28.
- [28] 许向阳. 纳米金刚石的解团聚与稳定分散研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- XU Xiang-yang. Deagglomeration and Stable Dispersion of Detonation Nanodiamond Particles[D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [29] 易响. 萘系非离子表面活性剂的制备及其对石墨烯分散性探究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- YI Xiang. The Preparation of Naphthalene Series Non-ionic Surfactant and Its Effect on the Dispersion of Graphene[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [30] 聂蕊. 超分散石墨烯/环氧树脂的制备及其性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- NIE Rui. Preparation and Properties of Super-Dispersed Graphene/Epoxy Resin[D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2019.
- [31] YANG Hua-feng, SHAN Chang-sheng, LI Feng-hua, et al. Covalent Functionalization of Polydisperse Chemically-Converted Graphene Sheets with Amine-Terminated Ionic Liquid[J]. Chemical Communications (Cambridge, England), 2009(26): 3880-3882.
- [32] 刘治国, 齐阳, 李旭东. 航空金属材料仿真加速腐蚀试验环境谱编制方法研究[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(6): 357-360.
- LIU Zhi-guo, QI Yang, LI Xu-dong. Preparation of Environmental Spectrum of Accelerated Corrosion Test for Aeronautical Metal Materials[J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(6): 357-360.
- [33] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
- ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [34] HSIEH C T, CHEN Jin-ming, KUO Rong-rong, et al. Influence of Surface Roughness on Water- and Oil-Repellent Surfaces Coated with Nanoparticles[J]. Applied Surface Science, 2005, 240(1-4): 318-326.
- [35] WENG Rui, ZHANG Hai-feng, LIU Xiao-wei. Spray-Coating Process in Preparing PTFE-PPS Composite Super-Hydrophobic Coating[J]. AIP Advances, 2014, 4(3): 031327.
- [36] 季佳, 崔腾飞, 徐璐, 等. 直升机极区海洋环境加速试验环境谱研究[J]. 环境技术, 2021, 39(2): 54-59.
- JI Jia, CUI Teng-fei, XU Lu, et al. Study on Environmental Spectrum of Helicopter Polar Marine Environment Accelerated Test[J]. Environmental Technology, 2021, 39(2): 54-59.

责任编辑: 刘世忠