

直升机传动系统用铝青铜-聚苯酯涂层磨损性能研究

余定君

(中国航发湖南动力机械研究所,湖南 株洲 412002)

摘要: 直升机行星传动系统由于结构紧凑、传递功率高、承载能力高、抗冲击和振动能力强及传动平稳等优点,在航空航天领域中得到了广泛应用。为了提高行星传动系统的轮系减速结构中行星齿轮的均载性,避免单个行星轮过载断齿失效,通常将其设计为以支承环浮动支承的太阳齿轮。然而,这种设计导致支承环与太阳齿轮之间的接触部位在工作时可能产生严重的微动磨损。因此,在支承环表面制备铝青铜-聚苯酯涂层,以提升其抗微动磨损性能。采用等离子喷涂工艺,将通过机械混匀的铝青铜和质量分数约5%的聚苯酯混合粉末(KF-1301)喷涂在以30Ni4CrMoA钢为基体的支承环表面。喷涂前试样表面需经刚玉砂喷砂处理,以提高表面粗糙度。通过扫描电子显微镜(SEM)和光学显微镜,对制备的涂层进行微观形貌和孔隙率分析。结果表明,涂层的孔隙率约为31.8%,表面洛氏硬度平均值为79.9 HR15Y,结合强度平均值为42.6 MPa。通过SRV-4微动摩擦磨损试验机,测试涂层的抗微动磨损性能。结果表明,涂层的摩擦系数平均值约为0.169,具有较好的减摩性能,磨损机制主要为磨粒磨损,同时伴有粘着磨损。对喷涂铝青铜-聚苯酯涂层的支承环进行零件级摩擦磨损试验,发现涂层无开裂、剥离、剥落和严重磨损等异常情况。对试验前后相同位置涂层的厚度进行测量,结果显示涂层的磨损量非常小。铝青铜-聚苯酯涂层具有较高的硬度、结合强度及较低的摩擦系数,可满足抗微动磨损涂层应用的技术要求,在模拟工作状态下其表现出优异的抗磨损性能,未出现明显的异常磨损现象,说明该涂层可有效地提高直升机传动系统的耐磨性和使用寿命。

关键词: 铝青铜;聚苯酯;抗微动磨损;涂层;等离子喷涂;直升机;传动系统;零件级磨损试验

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)04-0662-06

引文格式: 余定君. 直升机传动系统用铝青铜-聚苯酯涂层磨损性能研究[J]. 材料研究与应用,2024,18(4):662-667.

SHE Dingjun. Fretting Wear Test of Aluminum Bronze-Polyester Coating for Helicopter Transmission System[J]. Materials Research and Application,2024,18(4):662-667.

0 引言

直升机行星传动系统具有结构紧凑、传递功率大、承载能力高、抗冲击和振动的能力强及传动平稳等优点,应用领域十分广泛^[1]。为提高行星传动系统轮系减速结构中行星齿轮的均载性,同时避免单个行星轮出现过载断齿失效,将其设计为以支承环浮动支承的太阳齿轮。由于支承环与太阳齿轮之间不完全固定,因此二者接触部位会有相对运动,工作时可能产生严重的微动磨损。热喷涂等工艺制备的表面涂层,是解决此类问题的有效手段之一^[2]。

由于铝青铜粉末的耐蚀性能和强度均较高,是一种重要的铜基防护涂层原料,而软质的聚苯酯具有优异的自润滑性和耐磨性,因此铝青铜-聚苯酯涂层是一种比较理想的抗微动磨损涂层^[3-4]。通过机械将铝青铜粉末和聚苯酯混合形成铝青铜-聚苯酯混合粉末,采用大气等离子喷涂工艺制备富含聚苯

酯的多孔涂层,涂层中的孔隙可存润滑油起到润滑作用,而涂层中所含的聚苯酯也能在无油条件下起到很好的润滑减磨作用。但是,现阶段文献对铝青铜-聚苯酯涂层的报道多停留在试片级样品的表征方面,而缺乏模拟工况下的性能研究。本文对铝青铜-聚苯酯涂层的制备工艺、涂层微观形貌和抗微动磨损性能进行了研究,特别对有涂层的支承环进行了零件级摩擦磨损试验,以研究铝青铜-聚苯酯涂层的磨损性能。

1 试验材料与方法

1.1 原料

试样基体材料为30Ni4CrMoA钢,试样尺寸为25 mm×75 mm×4 mm。原料粉末为Cu8.5AlFe与聚苯酯(质量分数约5%)的混合粉末,即铝青铜-聚苯酯粉末(牌号KF-1301),生产厂家为矿冶科技

收稿日期:2023-01-04

作者简介:余定君,硕士,高级工程师,研究方向为直升机传动系统设计。E-mail:deanshaw@sohu.com。

集团有限公司。其中,粉末粒度为 11—125 μm 。

1.2 涂层制备方法

喷涂前用 46#刚玉砂对试样表面进行喷砂处理,以提高表面粗糙度。随后,采用等离子喷涂工艺在经喷砂粗化后的基体表面制备铝青铜-聚苯酯涂层。喷涂工艺参数列于表 1。

表 1 等离子喷涂工艺参数

Table 1 Parameters of plasma spraying process

工艺参数	数值
氩气流量	50—52 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
氢气流量	7.8—8.2 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
电流	540—550 A
电压	70—73 V
送粉气流量	2.0—2.5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
送粉率	60—80 $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$
喷涂距离	100—130 mm
喷枪移动速度	24—30 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
转速	300—500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$

1.3 涂层的表征

利用扫描电子显微镜(SEM, JSM5910),观察涂层的微观形貌。运用光学显微镜(Leica DM IRM)自带的图像处理软件,测定涂层的孔隙率。用表面洛氏硬度计(MH-5)测试涂层 HR15Y 硬度,其中载荷为 15 Kg、压头为 Y 型。按照标准 ASTM C633 中的方法,测试涂层的结合强度。使用 SRV-4 型微动摩擦磨损试验机,测试涂层的抗微动磨损性能,其中样品尺寸为 $\text{D}24\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,以直径 6 mm 的 SiC 球为摩擦副,试验温度 23 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 30%、载荷 30 N、频率 20 Hz、时间 30 min、振幅 1 mm。

1.4 零件级微动磨损试验

图 1 为喷涂铝青铜-聚苯酯涂层的典型零件支承环。涂层的厚度用三坐标仪测量。

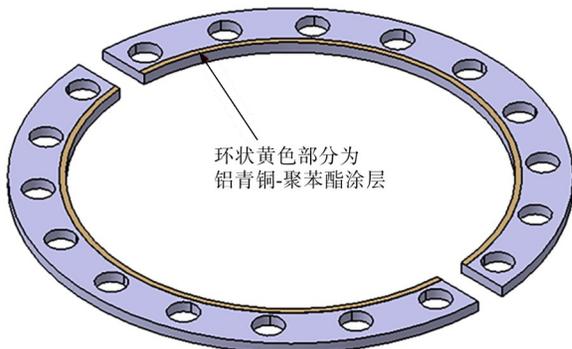


图 1 支承环减磨涂层

Figure 1 Locking plate with wear-resistant coating

图 2 为零件级摩擦磨损试验装置示意图。试验

时支承环水平放置,通过齿轮轴的法兰边用螺栓、螺母将齿轮轴垂直固定在设备安装座上,齿轮轴通过花键与太阳齿轮啮合,太阳齿轮通过支承环进行支撑。设备加载盘与太阳齿轮采用齿轮啮合,通过设置在加载盘上两个对称布置的轴向油缸对太阳齿轮施加扭矩载荷,并通过中心的轴向油缸对太阳齿轮施加一定量的径向位移,模拟支承环在工作过程中行星齿轮对其产生的径向位移。图 3 为支承环磨损试验加载方法示意图。油缸受 F_1 和 F_2 力的综合作用可对太阳齿轮施加扭矩载荷,产生较小的径向力 F_3 ,通过位移传感器测量太阳齿轮产生的径向位移。

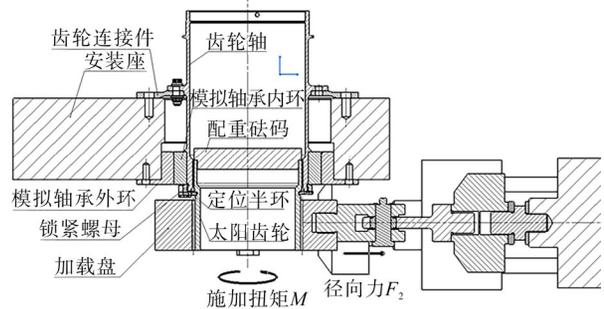


图 2 支承环摩擦磨损试验装置

Figure 2 Fretting wear test equipment for locking plate

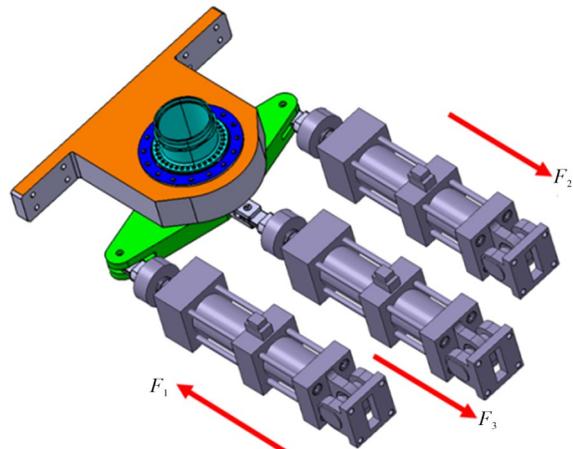


图 3 支承环磨损试验加载方法

Figure 3 Force loading method of for fretting wear test of locking plate

用于零件级摩擦磨损试验的涂层厚度约为 1.1 mm,试验前需进行载荷确定。通过在太阳齿轮上部增加配重砝码以加速磨损,确保一定时间内支承环涂层出现可计量的磨损量,且磨损厚度不超过 0.10 mm。试验后进行目视检查,并用三坐标测量仪测试磨损后的涂层厚度。

2 结果与讨论

2.1 涂层的组织结构及结合强度

图 4 为喷涂态铝青铜-聚苯酯涂层的横截面微观形貌。从图 4 可见,涂层中比较均匀地分布着灰

黑两相,其中灰色相为铝青铜,黑色相为聚苯酯和孔隙。在以铝青铜为骨架形成的连续涂层中,比较均匀的分布着软相(聚苯酯)和孔隙,这种涂层结构属

于比较典型的可磨耗封严涂层结构,该结构有利于调控涂层宏观硬度,保证在微动磨损时涂层不会成片剥落,同时也不会损伤摩擦副材料。

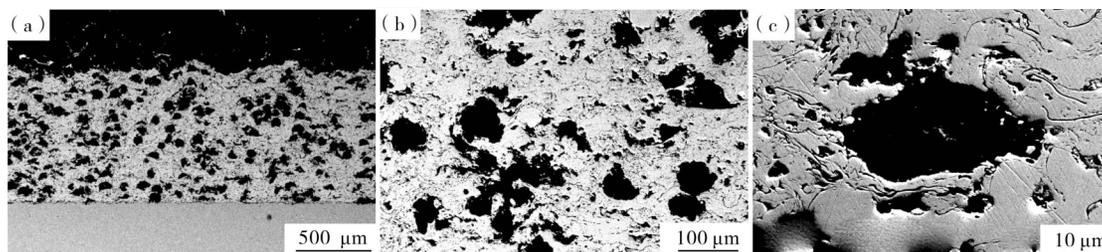


图4 喷涂态铝青铜-聚苯酯涂层微观形貌

Figure 4 Cross-sectional SEM micrographs of aluminum bronze-polyester coating

利用Leica DM IRM金相显微镜所带的图像分析软件,测定涂层的孔隙率约为31.8%。由于图像分析软件无法完全区分孔隙和聚苯酯,因此孔隙率包括了涂层中孔隙和聚苯酯的含量。涂层硬度及强度测试结果列于表2。由表2可知,涂层表面洛氏硬度平均值为79.9 HR15Y,涂层结合强度平均值为42.6 MPa。图5为结合强度测试后试样的形貌。从图5可见,断裂均发生在涂层内。综上所述,较高的硬度保证了涂层的耐磨性,较高的结合强度又确保了涂层不容易剥落,从而满足了抗微动磨损涂层应用的技术要求。

表2 涂层HR15Y硬度及结合强度
Table 2 HR15Y hardness and bond strength of aluminum bronze-polyester coating

参数	测量值	平均值
涂层硬度(HR15Y)	71.4、79.6、84.1、81.8、80.3、82.2	79.9
结合强度/MPa	40.5、43.5、43.8	42.6

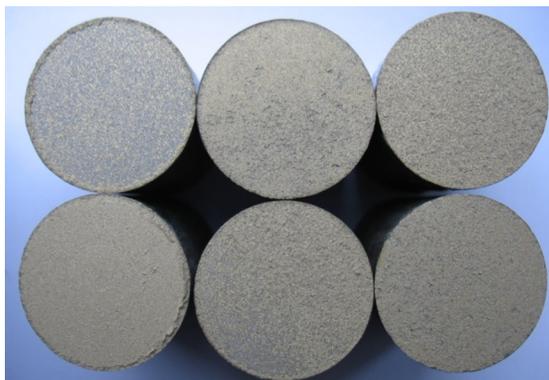


图5 结合强度试样测试后形貌

Figure 5 Morphology of Bond strength samples after tensile test

2.2 涂层抗微动磨损性能

图6为摩擦磨损后涂层摩擦系数的变化图。从图6可见,在摩擦磨损30 min内,试样的摩擦系数值变化不大,比较稳定。表3为微动磨损测试结果。由表3可知,3次测试的摩擦系数的平均值约为

0.169,磨痕的平均宽度约为918 μm。结果表明,涂层摩擦系数低,具有较好的减摩性能。

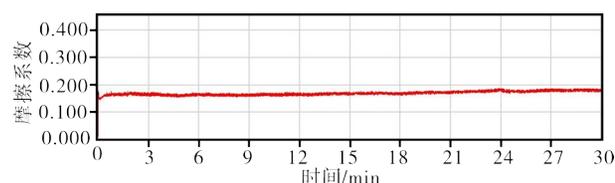


图6 涂层摩擦系数在30 min内的变化情况

Figure 6 Friction coefficient of coating within 30 minutes

表3 涂层微动磨损测试结果
Table 3 Experimental results of fretting wear test

摩擦系数				磨痕宽度/μm			
1	2	3	平均值	1	2	3	平均值
0.169	0.163	0.175	0.169	909	932	912	918

采用扫描电镜观察微动磨损测试后的铝青铜-聚苯酯涂层表面微观形貌,结果如图7所示。从图7可见,磨痕区域的形貌为典型的磨痕形貌,不同位置的磨痕宽度有所波动,沿着磨球运动的方向存在犁沟,在磨痕边缘有白色的聚苯酯出现。表明,涂层磨损机制以磨粒磨损为主,同时伴随有粘着磨损。

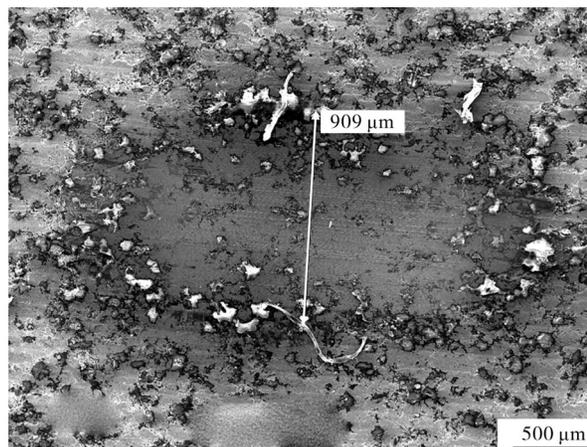


图7 涂层典型磨痕形貌

Figure 7 Micrograph of coating wear track

2.3 零件级磨损性能

零件级磨损试验完成后,对零件外观进行宏观检查,结果如图8所示。从图8可见,喷涂涂层的支承环完整且光滑,涂层无开裂、剥离、剥落和严重磨损等异常情况,但涂层局部出现磨损痕迹。这是由于支承环是通过周围均布的4组螺栓固定,但支承环的直径较大,而径向宽度只有不到30 mm,且总体厚度约6.5 mm,即支承环的总体轴向刚度较小,因此试验时螺栓固定部位附近的涂层与摩擦副接触,导致在试验时先出现磨损情况。

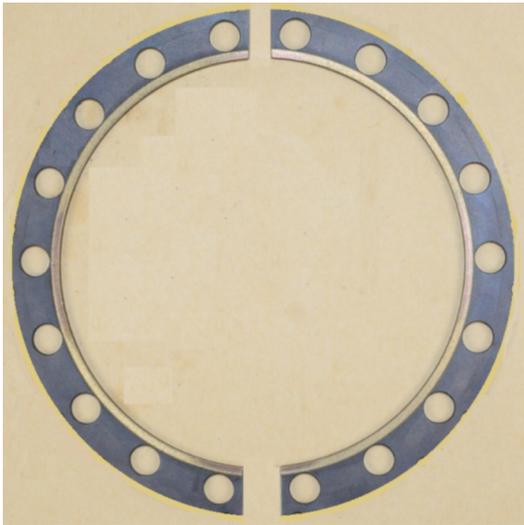


图8 零件级磨损试验后支承环涂层宏观磨损情况
Figure 8 Coating surface after wear test on locking plate

通过体视镜对试验后的支承环涂层进行检查,结果如图9所示。从图9可见,涂层没有发现明显的开裂、剥离、剥落、严重磨损等异常情况,但涂层表面会出现一定程度的磨损。磨损部位一般呈褐色,而红褐色部位是支承环涂层与相配摩擦件之间微动磨损造成的,同时支承环涂层部位也会出现局部轻微凹凸不平的磨损,这属于正常的磨损现象。

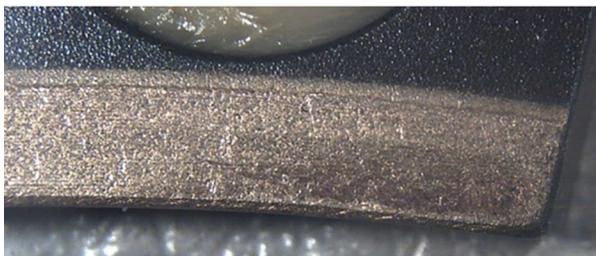


图9 涂层磨损情况(放大7倍)
Figure 9 Coating surface after wear test (7×)

采用三坐标仪(精度0.001 mm)对试验前后支承环涂层的厚度进行测量,在涂层部位的周向共布9个测量点(见图10)。通过对试验前后测量结果

进行整理,计算出9个位置测量点涂层厚度的平均值及磨损部位(只考虑计量出现磨损的部位)厚度的平均值,测量结果列于表4。

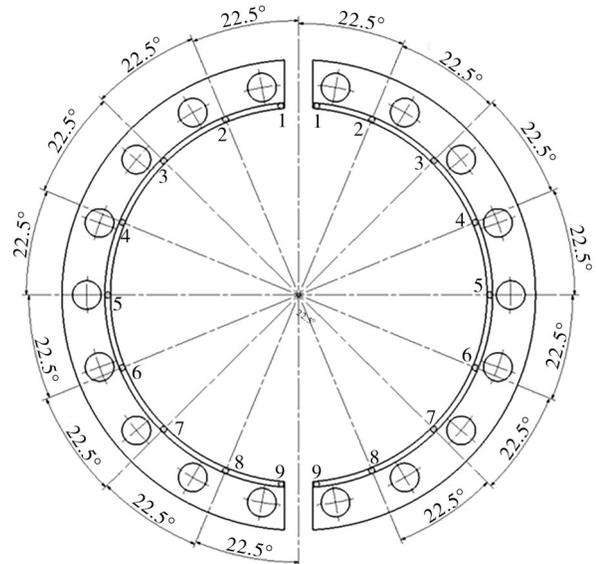


图10 支承环涂层部位测量点位置

Figure 10 Thickness measurement positions on the locking plate

由表4可知,试验前左、右侧支承环9个测量点的厚度变化很小,试验后左、右侧支承环9个测量点的厚度只在出现明显磨损痕迹的部位才有较大的变化量。试验前,左侧支承环9个测点厚度平均值为6.537 mm,厚度最大值(左5号位置)与最小值(左7号位置)差值为0.043 mm,右侧支承环9个测点厚度平均值为6.542 mm,厚度最大值(右5号位置)与最小值(右7号位置)差值为0.042 mm;试验后,只在出现明显磨损痕迹的部位厚度值才有较大的变化量,左侧支承环9个测点的平均值为6.536 mm,厚度最大值(仍为左5号位置)与厚度最小值(仍为左7号位置)差值0.039 mm,右侧支承环9个测点厚度平均值为6.539 mm,厚度最大值(仍为右5号位置)与厚度最小值差值(右3号位置)差值0.038 mm;试验前后,左侧单个测量点厚度最大差值为0.003 mm(左5号和左9号位置),右侧单个测量点最大厚度差值为0.016 mm(右3号位置)。

对比试验前后的支承环涂层部位的厚度测量数据,得出如下结论。(1)左侧支承环对应同样位置测量最大磨损量为0.003 mm、最小磨损量为0;1、2和7号位置磨损量出现负值,应该是测量点位置误差造成的;左侧磨损量最大点为5号位置,该位置在试验前厚度最厚且是支撑位置,故更容易磨损。(2)右侧支承环对应同样位置测量最大磨损量为0.016 mm、最小磨损量为0;6、7、8和9号位置磨损量出现

表4 试验前后支承环涂层部位厚度测量结果

Table 4 Thickness measurement results of the locking plate

				/mm			
左侧	试验前	试验后	均差值	右侧	试验前	试验后	均差值
1	6.548	6.549	-0.001	1	6.546	6.539	0.007
2	6.534	6.536	-0.002	2	6.537	6.529	0.008
3	6.530	6.529	0.001	3	6.536	6.520	0.016
4	6.543	6.542	0.001	4	6.553	6.542	0.011
5	6.558	6.555	0.003	5	6.564	6.558	0.006
6	6.538	6.537	0.001	6	6.544	6.551	-0.007
7	6.515	6.516	-0.001	7	6.522	6.534	-0.012
8	6.524	6.523	0.001	8	6.531	6.535	-0.004
9	6.544	6.541	0.003	9	6.541	6.542	-0.001
试验前厚度平均值	6.537	6.536	0.001	试验前厚度平均值	6.542	6.539	0.003
磨损位置厚度平均值	6.540	6.538	0.002	磨损位置厚度平均值	6.547	6.538	0.009

负值,应该也是测量点位置误差造成的;右侧磨损量最大点为3号位置。(3)支承环左、右侧的9个测量点的平均磨损厚度分别为0.001和0.003 mm。若只考虑出现磨损部位的位置,支承环左侧出现磨损部位测量点的平均磨损厚度为0.002 mm,右侧平均磨损厚度为0.009 mm。综上所述,试验后的涂层磨损量不大,说明涂层的抗微动磨损性能优良。

3 结论

利用铝青铜-聚苯酯粉末,采用等离子喷涂工艺制备了抗微动磨损的铝青铜-聚苯酯涂层。

(1)涂层具有较高的硬度和结合强度,以及较低的摩擦系数。较高涂层硬度保证了涂层的耐磨性,而较高的结合强度又确保了涂层不容易剥落,可满足作为抗微动磨损涂层应用的技术要求。

(2)通过典型试验件在模拟工作状态下的磨损试验,发现试验后的涂层表面未出现开裂、剥落和严重磨损等异常情况,测量试验前后同样位置涂层磨损量非常小。验证了涂层具有较好的耐磨性,能满足零件状态的耐磨性能要求。

参考文献:

[1] 胡升阳,方宗德,徐颖强,等.内齿圈结构类型柔性及均载与动载特性对比分析[J].重庆大学学报,2021(12):1-14.

[2] 朴钟宇,徐滨士,王海斗,等.表征涂层接触疲劳寿命方法的试验研究[J].中国机械工程,2009,20(13):1616-1618.

[3] 孙忠武,宋丙红,张彦飞.聚苯酯-铝青铜工艺技术研究[J].科技展望,2016(3):70-71.

[4] 杨文言,邵天敏,刘会刚.铝青铜涂层微动磨损特性的扫描电镜观察[J].电子显微学报,1998,17(5):597-598.

[5] 云海涛,刘通,刘建明,等.铜铝聚苯酯涂层性能研究[J].热喷涂技术,2021,13(4):14-22.

[6] 刘通,刘建明,郭丹,等.热喷涂铜铝聚苯酯封严涂层制备和性能研究[J].热喷涂技术,2020,12(1):57-61.

[7] 柳元元,朱如鹏.基于公理设计的直升机主减速器功能结构分析[C].南京:中国航空学会,2015:461-467.

[8] 陆凤霞,朱如鹏,沈稼耕.啮合相位对行星齿轮系固有特性的影响分析[C].南京:中国航空学会,2015:235-242.[9]

[9] 沈瑞,扶碧波,黄臻荣,等.内外花键间隙对行星轮系均载特性的影响分析[J].机械强度,2021(4):997-1001.

[10] 吴贵智,张广安,蒲吉斌,等.航空发动机叶片榫头润滑及抗高温微动CuNiIn/MoS₂多层涂层的制备及性能[C].武汉:中国表面工程协会,2014:72-74.

[11] 郝雪第,张宏亮,褚秀萍,等.复合材料涂层耐磨性的试验[J].河北理工学院学报,1999,21(2):34-38.

[12] 余定君,李卫侠,代伟,等.高性能减磨功能涂层摩擦磨损试验研究[J].南华动力,2023(2):154-159.

[13] MIGUEL J M, GUILLE MANY J M, COSTA S. Effect of the spraying process on the microstructure and tribological properties of bronze-alumina composite coatings [J]. Surface and Coating Technology, 2010, 205(7):2184-2190.

[14] CUI H K, WANG C L, TONG Z H. Erosion resistance improvement of polymer matrix composites by detonation-sprayed multilayered coatings [J]. Therm Spray Tech, 2021(30):394-404.

[15] 陈子木,胡正伟,王倩妮,等.薄壁结构工业CT尺寸测量误差与极限[J].材料工程,2020,48(8):169-176.

Fretting Wear Test of Aluminum Bronze-Polyester Coating for Helicopter Transmission System

SHE Dingjun

(AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Helicopter planetary transmission systems are widely used in the aerospace field due to their compact structure, high power transmission capability, high load-bearing capacity, strong resistance to impact and vibration, and smooth operation. In these systems, the reduction gear structure is designed to improve the load sharing among planetary gears and prevent overloading and gear tooth breakage in individual planetary wheels by supporting the sun gear with a floating ring gear. However, the incomplete fixation between the ring gear and the sun gear can lead to severe fretting wear at their contact points during operation. This study aims to enhance the fretting wear resistance of aluminum bronze-polyester coatings by preparing and evaluating these coatings. Aluminum bronze and approximately 5% mechanically mixed polyester powder (KF-1301) were plasma-sprayed onto the 30Ni4CrMoA steel substrate. Prior to spraying, the sample surface was treated with corundum sandblasting to increase surface roughness. The prepared coatings were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy, revealing a porosity of approximately 31.8%. The average surface Rockwell hardness of the coatings was 79.9 HR15Y, and the average bond strength was 42.6 MPa. The fretting wear resistance of the coatings was tested using the SRV-4 fretting friction wear tester. The results indicated an average friction coefficient of about 0.169, demonstrating good friction reduction performance. The primary wear mechanism was abrasive wear, accompanied by adhesive wear. Part-level friction wear tests on support rings coated with aluminum bronze-polyester showed no cracking, peeling, spalling, or severe wear. Thickness measurements before and after the tests indicated minimal wear. In conclusion, the aluminum bronze-polyester coating exhibits high hardness, bond strength, and a low friction coefficient, meeting the technical requirements for anti-fretting wear applications. Part-level wear tests confirmed that the coating performs excellently under simulated working conditions, showing no significant abnormal wear. Therefore, the aluminum bronze-polyester coating can effectively improve the wear resistance and service life of helicopter transmission systems.

Keywords: aluminum bronze; polyester; fretting wear resistance; coating; plasma spraying; helicopter; transmission system; part-level wear tests

(学术编辑:孙文)