doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.074

关节轴承配副表面 CrDLC 和 WDLC 薄膜摩擦学性能研究

牛荣军[1]　汪静静[1,2]　詹　华[3]　张　程[2]　熊　美[2]　汪瑞军[3]

(1.河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003; 2.金属材料磨损控制与成型技术国家地方联合工程研究中心, 洛阳 471003;
3.北京金轮坤天特种机械有限公司, 北京 100083)

摘要: 为满足大载荷直升机技术指标需求,使其旋翼系统配套的关节轴承在高承载能力同时,在复杂作业环境下具有更好的抗磨降磨能力,提升轴承的寿命性能指标。以大载荷直升机旋翼系统使用的某型号自润滑关节轴承为研究对象,在 9Cr18 关节轴承内圈基材表面通过非平衡磁控溅射分别制备 CrDLC 和 WDLC 2 种薄膜,分别利用扫描电镜、三维形貌仪、往复式球-盘摩擦磨损试验机和低速重载压摆摩擦磨损试验机等,对 2 种改性薄膜试样的微观结构、摩擦磨损性能以及磨痕形貌等进行测试试验。研究结果表明:在球-盘摩擦试验阶段初期,2 种薄膜的摩擦因数都呈逐渐增大的趋势,随着摩擦过程的进行,摩擦因数均趋于稳定且一直保持在一定的范围内波动;相对于 9Cr18 - CrDLC 试样,9Cr18 - WDLC 试样的摩擦因数稳定时间短,整体摩擦过程比较平稳,摩擦因数相对较低,表现出较好的摩擦性能;9Cr18 - WDLC 涂层与自润滑衬垫对磨过程相对平稳,摩擦因数在一定小范围波动,整体磨痕较浅,整体磨损体积较小,表现出较好的抗磨性。通过摩擦学性能分析可知,对于基材为 9Cr18 材料,选用 WDLC 薄膜,具有较好综合抗磨减磨性能。

关键词: 关节轴承; 表面改性; 类金刚石薄膜; 摩擦磨损

中图分类号: TH133.3; TG174.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)S2-0603-08

Tribological Properties of CrDLC and WDLC Films on Pairs Surface of Spherical Plain Bearing

NIU Rongjun[1]　WANG Jingjing[1,2]　ZHAN Hua[3]　ZHANG Cheng[2]　XIONG Mei[2]　WANG Ruijun[3]

(1. *School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471003, *China*
2. *National Joint Engineering Research Center for Abrasion Control and Molding of Metal Materials, Luoyang* 471003, *China*
3. *Beijing Golden Wheel Special Machine Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to meet the technical requirements of large-load helicopter, the spherical plain bearing of its rotor system has better anti-wear capability, wear-reduction and high bearing capacity in the complex working environment, so as to improve the life performance index of the bearing. A self-lubricating spherical plain bearing used in the rotor system of a new type helicopter with large load was studied. CrDLC and WDLC film coating, were prepared on the surface of 9Cr18 inner ring substrates of spherical plain bearing by unbalanced magnetron sputtering. The microstructure, friction and wear properties and wear scar morphology of two kinds of thin film coatings were tested and analyzed by scanning electron microscopy, three-dimensional topography, ball-disk friction and wear tester and low speed heavy load friction and wear tester. The results showed that the friction coefficients of the two film coatings were increased gradually at the beginning of the friction stage. With the progress of the friction process, the friction coefficients tended to be stable and kept fluctuating in a certain range. Compared with 9Cr18 - CrDLC specimens, 9Cr18 - WDLC specimens had shorter stability time of friction coefficient, more stable overall friction process and lower friction coefficient, showing better friction performance. Compared with 9Cr18 - CrDLC specimens, the wear process of 9Cr18 - WDLC coating and self-lubricating liner was relatively stable, the friction coefficient fluctuated in a small range, the overall wear scar was shallow, the overall wear volume was small, showing good wear resistance. The tribological

收稿日期: 2020-08-05　修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家"十三五"科技攻关项目(JPPT-2017-142)

作者简介: 牛荣军(1977—),男,副教授,博士,主要从事轴承摩擦学设计研究,E-mail: niurongjun@163.com

通信作者: 詹华(1982—),女,高级工程师,博士,主要从事表面工程研究,E-mail: zhanhua1101@163.com

properties showed that WDLC film coating had better wear resistance and anti-wear properties for 9Cr18 substrate material.

Key words: spherical plain bearing; surface modification; diamond-like carbon film; friction and wear

0 引言

随着近年来我国直升机技术的高速发展,旋翼式无人直升机具有使用简便、机动性好和续航能力强等特点,广泛应用于侦察、喷施、监控等领域[1-2]。自润滑关节轴承在外圈内球面黏结自润滑衬垫,外圈通过整体挤压成型工艺与球面内圈形成摩擦配副关系。由于自润滑关节轴承免维护、高承载、低摩擦和长寿命等特点,是高端机械装备的关键基础件[3-8]。随着大载荷旋翼直升机技术指标的提高,要求其旋翼系统配套的关节轴承具有高承载能力同时,在复杂作业环境下还应具有更好的耐盐雾、耐湿热和抗磨降磨能力。因此,需对常规的关节轴承配副材料进行表面改性,以改善关节轴承内圈材料与外圈黏附自润滑衬垫摩擦副间的摩擦学性能,以达到提升关节轴承使用寿命和可靠性的目标。

采用表面工程技术对摩擦副表面进行处理是降低摩擦因数、改善材料耐磨性能的有效方法之一。类金刚石(Diamond-like carbon,DLC)薄膜是一系列含有 SP^2 键和 SP^3 键非晶碳膜物质的总称,具有优异的物理化学性能,其中包括高硬度、低摩擦因数、高耐磨性以及化学惰性等,其较低的摩擦因数和磨损量使之成为一种理想的表面摩擦学改性材料[9-17]。不同工艺方法制备的 DLC 膜的性能也会有所不同。常用的制备方法有真空阴极电弧沉积法、离子束沉积法以及磁控溅射法。由于制备技术的限制,导致薄膜存在内应力高和韧性低等缺陷,金属掺杂是降低 DLC 膜内应力、提高其机械性能的一种有效方法[18-20]。

本文以大载荷直升机旋翼系统使用的某型号自润滑关节轴承为研究对象,在基体材料为 9Cr18 的套圈表面采用磁控溅射法分别制备铬掺杂类金刚石(CrDLC)薄膜和钨掺杂类金刚石(WDLC)薄膜,利用扫描电镜、三维形貌仪、往复式球-盘摩擦磨损试验机和低速重载摩擦磨损试验机等,研究 2 种薄膜试样的摩擦磨损性能,揭示内圈薄膜改性与自润滑衬垫的摩擦磨损机理,以期为高承载、长寿命关节轴承摩擦副选材和薄膜性能评估提供参考依据。

1 试验

1.1 试样制备

基体材料选用 9Cr18 不锈钢,首先将基体材料依次经过 240 号、600 号、1 000 号和 1 500 号砂纸打磨,分别用 3.5 μm 和 1.5 μm 的金刚石抛光剂抛光。然后采用丙酮和酒精进行超声波清洗 10 ~ 15 min,在 80℃下干燥后装入样品工装中备用。最后采用磁控溅射方法制备铬掺杂类金刚石(CrDLC)薄膜和钨掺杂类金刚石(WDLC)薄膜。

1.2 试验条件

为更真实地模拟所研究试样的工况条件,对试样的接触状态和摩擦性能进行准确定量分析,本文采用图 1 所示的往复式球-盘摩擦磨损试验机对 2 种薄膜试样进行摩擦磨损性能分析。测试条件:以洛阳轴承研究所有限公司生产的 Φ6 mm 陶瓷球为试验对磨球,负载为 10 N,往复线速度为 200 mm/min,往复距离为 5 mm(双向),测试时间为 240 min。

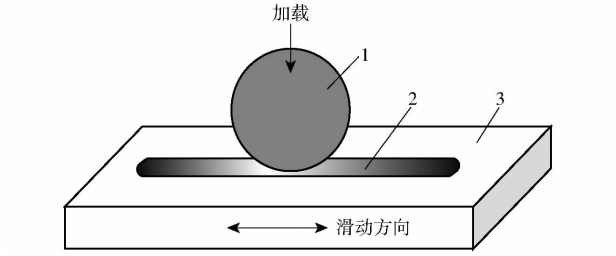


图 1 往复摩擦磨损试验机接触副示意图

Fig. 1 Schematic of contact pair between reciprocating friction and wear tester

1. 陶瓷球 2. 磨痕 3. 试样

1.2.1 试验接触压力确定

在球-盘摩擦磨损试验中,陶瓷球与薄膜试样之间接触状态为点接触,需通过确定加载载荷以模拟试样的实际表面接触压力状态。

对磨陶瓷球所用材料的主要成分为氮化硅,该材料弹性模量为 315 GPa、泊松比为 0.26;盘所用材料弹性模量为 209 GPa、泊松比为 0.3。根据弹性力学点接触理论[21-22],采用数值计算方法进行计算,球-盘点接触的主要性能计算结果如表 1 所示。

表 1 球-盘点接触性能计算结果

Tab. 1 Calculation results of contact performance of spherical discs

径向载荷/N	接触圆半径/mm	弹性变形量/mm	最大接触压力/MPa
2	0.034 0	3.84×10^{-4}	827.7
4	0.042 8	6.10×10^{-4}	1 042.9
6	0.049 0	7.99×10^{-4}	1 193.8
8	0.053 9	9.69×10^{-4}	1 313.9
10	0.058 1	1.10×10^{-4}	1 415.4

通过赫兹接触压力计算可以看出，要模拟实际薄膜的接触工况条件，正常工作接触压力 p 约为 300 MPa。通过分析计算可知接触压力 p 达到 300 MPa 时，加载载荷只需要 0.2 N 左右即可。但在实际测试过程中发现，小载荷加载力不稳定。通过多次试样测试发现在径向载荷为 10 N 时，整个往复摆动摩擦过程比较平稳。通过表 1 可以看出，当试验负荷为 10 N 时，点接触的接触压力已经达到 1 400 MPa 以上，但未超过内圈薄膜实际工况的极限接触压力水平，且通过加大载荷提高接触压力水平，是常用的加速试验手段。试样测试结果表明，在此应力水平下薄膜没有压溃，240 min 干摩擦后薄膜也没磨穿，因此本研究将此径向载荷作为试验载荷用于后续薄膜摩擦磨损试验测试。

1.2.2　试验频率及试验时间确定

图 2 为关节轴承结构示意图，图中 α 为关节轴承倾斜角，d_K 为关节轴承球面直径，根据 SKF 关节轴承产品目录手册，关节轴承内外圈相对滑动速度为[23]

$$v_s = 5.82 \times 10^{-7} d_m \beta f \qquad (1)$$

式中　β——摆动角　　f——摆动频率，Hz

d_m——节圆直径

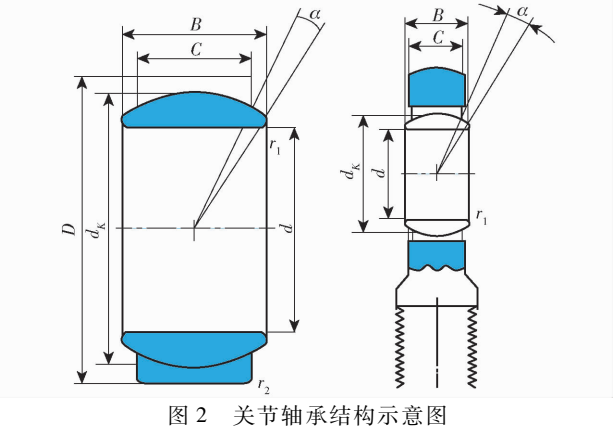


图 2　关节轴承结构示意图

Fig. 2　Structural sketch of spherical plain bearing

图 3 为关节轴承摆动角示意图，根据 AS81820 型低速重载关节轴承摩擦磨损试验测试要求[24-25]，摆动角取 25°，摆动频率取 0.17 Hz，初步取关节轴承节圆直径为 20 mm，则轴承球面滑动速度为 174 mm/min，需摆动 25 000 次，行程为

$$S = 5.0 \times 10^4 \beta d_m = 4.363\,3 \times 10^5 \text{ mm} \qquad (2)$$

由于接触压力增加至接近极限工况的 5 倍，试验测试中选择往复线速度为 200 mm/min，往复距离为 5 mm（双向），测试时间为 240 min。

2　内圈摩擦副表面薄膜性能分析

2.1　涂层截面微观结构分析

对 9Cr18 基材及其对应的 2 种薄膜进行分析。图 4 为 2 种试样的涂层截面微观结构扫描电镜图。由图 4 可知，2 种试样薄膜均可分为 3 层，薄膜厚度均匀一致性良好，膜基界面未见缺陷。

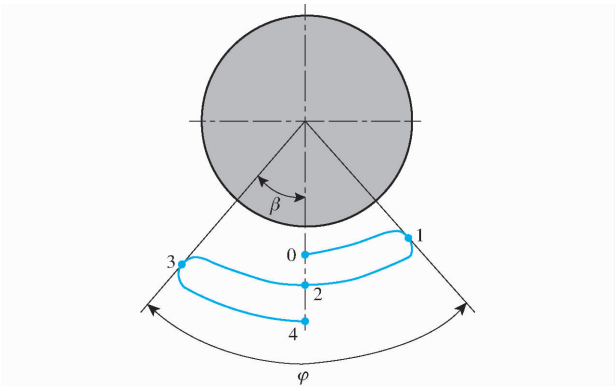


图 3　关节轴承摆动角度示意图

Fig. 3　Schematic of swing angle of spherical plain bearing

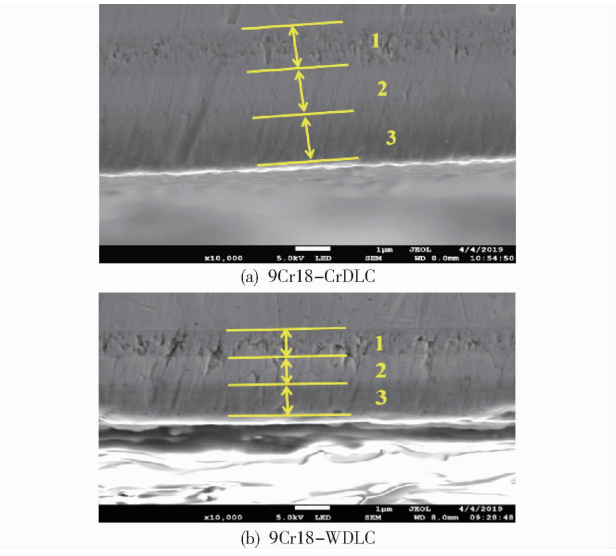
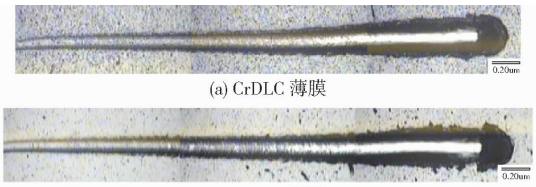


图 4　涂层截面微观结构扫描电镜图

Fig. 4　Scanning electron microscope of coating section

由图 4a 可以看出，基体为 9Cr18 不锈钢的 CrDLC 薄膜内部 2 层和 3 层结构之间的界面较为模糊，其他层界面较为清晰，第 1 层厚度约为 1.5 μm，第 2 层厚度约为 1.0 μm，第 3 层厚度约为 1.3 μm，薄膜总厚度约为 3.8 μm。由图 4b 可以看出，基体为 9Cr18 不锈钢的 WDLC 薄膜内部各层界面较为清晰，每层厚度均约为 1.0 μm，薄膜总厚度约为 3.0 μm。

图 5 为金属 Cr 和 W 元素掺杂碳基薄膜的划痕形貌，WDLC 薄膜与 CrDLC 薄膜相比表现为更晚露出基底，说明 WDLC 薄膜的膜基结合强度好于 CrDLC 薄膜，薄膜的临界载荷更大。对比 WDLC 和 CrDLC 膜基结合力测试数据，WDLC 薄膜的摩擦因数在加载力 35 N 的位置出现拐点，而 CrDLC 薄膜的摩擦因数在加载力 22 N 的位置出现了拐点，进一步说明 WDLC 薄膜具有更好的膜基结合力。



(a) CrDLC 薄膜

(b) WDLC 薄膜

图 5 不同元素掺杂碳基薄膜的划痕形貌

Fig. 5 Scratch morphology of carbon based films doped with different elements

2.2 摩擦磨损性能分析

2.2.1 摩擦性能分析

图 6 给出 2 种试样的 240 min 摩擦因数-时间曲线,其中每种试样测试 3 次总计 720 min。可以看出,由于对磨陶瓷球与试样往复移动使得摩擦因数在一定范围内波动,2 种对磨试样的整体趋势是:在摩擦阶段初期,摩擦因数逐渐增大,随着摩擦过程的进行,摩擦因数趋于稳定且一直保持在一定的范围内波动。

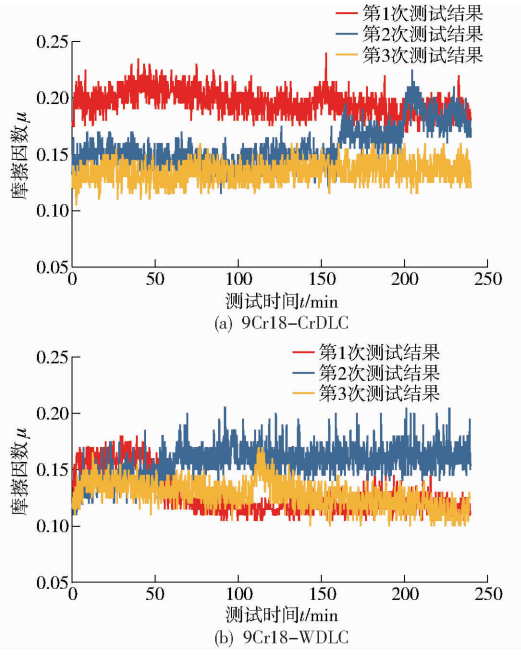


图 6 9Cr18 基材涂层试样摩擦因数动态变化曲线

Fig. 6 Friction coefficients dynamic variation curves of 9Cr18 substrate coating sample

由图 6 可知,初始阶段 2 种试样的摩擦因数均呈快速上升趋势,整体摩擦过程比较平稳,摩擦因数比较稳定,表现出较好的摩擦性能。

(1)由图 6a 可以看出,9Cr18 - CrDLC 试样与陶瓷球对磨的摩擦因数在 0.12 ~ 0.22 范围内波动,平均摩擦因数为 0.16 左右,摩擦因数相对较低,表现出较好的摩擦性能。

(2)由图 6b 可以看出,9Cr18 - WDLC 试样与陶瓷球对磨的摩擦因数在 0.10 ~ 0.20 范围内波动,试验初期摩擦因数快速上升,但在 25 min 后摩擦因数才逐渐下降。

(3)与 9Cr18 - CrDLC 试样比较可以发现,9Cr18 - WDLC 试样摩擦因数稳定时间稍微延长。

2.2.2 磨损性能分析

图 7、8 为 2 种试样在 240 min 对磨后采用三维形貌仪对磨痕进行三维扫描的形貌对比结果,用于 2 种试样磨损特性比较分析。

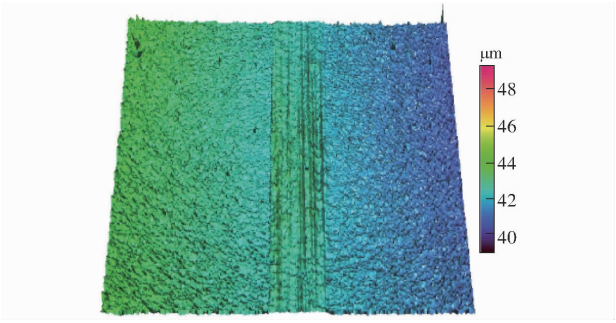


图 7 9Cr18 - CrDLC 试样磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of 9Cr18 - CrDLC specimens

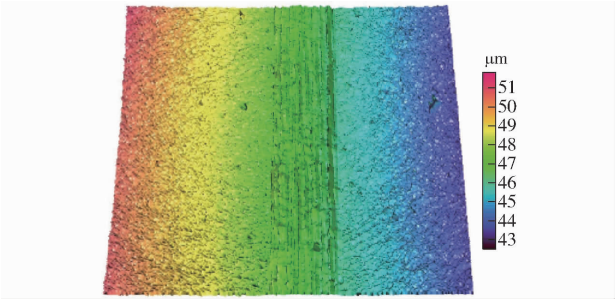


图 8 9Cr18 - WDLC 试样磨损形貌

Fig. 8 Wear morphology of 9Cr18 - WDLC specimens

由图 7、8 试样磨损形貌结果可以看出:

(1)9Cr18 - CrDLC 磨损形貌比较清晰,呈现明显划痕,而 9Cr18 - WDLC 试样由于试样平面度稍差,造成磨损形貌扫描有一定角度,划痕结果表明 9Cr18 - CrDLC 试样相对 9Cr18 - WDLC 试样耐磨性稍好,与陶瓷球对磨磨损较轻。

(2)9Cr18 - CrDLC 和 9Cr18 - WDLC 试样沿着磨损轨迹测试的二维截面磨损形貌吻合度较好,说明整个摩擦过程受力一致,摩擦过程相对比较稳定。

表 2 为 2 种薄膜试样对磨后磨损性能的比较结果。从磨损宽度和磨损深度方面进行对比可以发现,基材为 9Cr18 不锈钢,选用 CrDLC 薄膜其抗磨损性能稍好,但结合前述摩擦因数动态过程分析结果,WDLC 薄膜摩擦过程相对稳定,且摩擦因数较低。

2.2.3 摩擦磨损机理

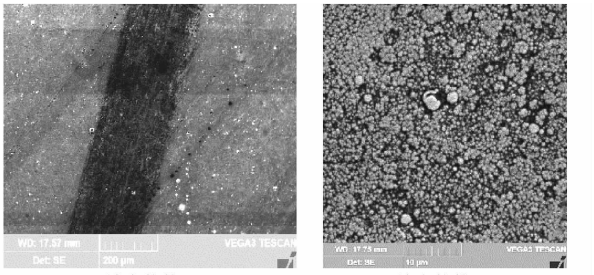
图 9、10 给出 2 种薄膜试样在 240 min 对磨后采用扫描电镜对磨痕表面进行三维扫描的结果,用于 2 种试样摩擦磨损机理的比较分析。

表 2　试样的磨损性能比较结果

Tab. 2　Comparison of wear properties of specimens

μm

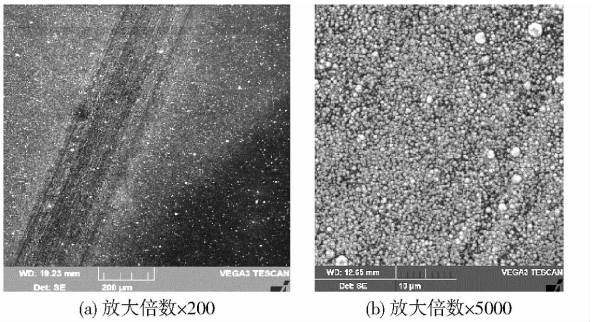
基材	薄膜	磨痕参数	试样测试 1	试样测试 2	试样测试 3	平均值
9Cr18	CrDLC	宽度	240	250	220	237
		深度	0.97	0.86	0.73	0.85
	WDLC	宽度	250	281	275	268
		深度	0.92	0.98	0.93	0.94



(a) 放大倍数×200　(b) 放大倍数×5000

图 9　9Cr18 – CrDLC 磨损表面扫描电镜图

Fig. 9　Scanning electron microscope of 9Cr18 – CrDLC wear surface



(a) 放大倍数×200　(b) 放大倍数×5000

图 10　9Cr18 – WDLC 磨损表面扫描电镜图

Fig. 10　Scanning electron microscope of 9Cr18 – WDLC wear surface

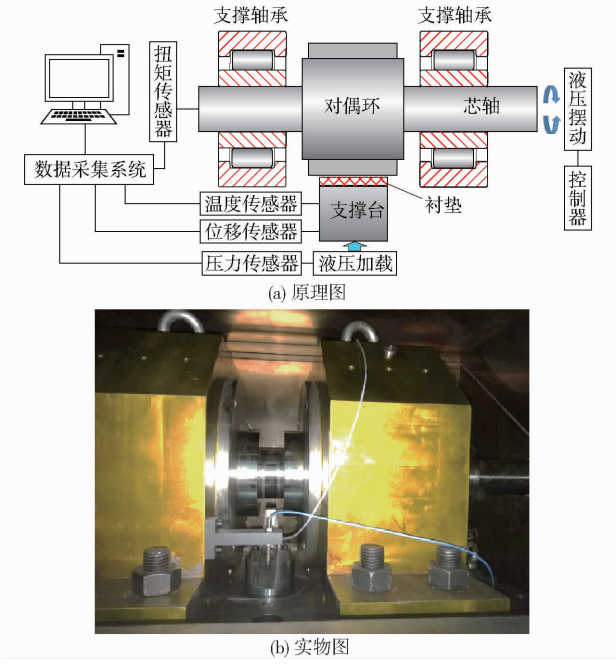
由图 9 可以看出，磨损表面存在比较明显的痕沟，说明 9Cr18 – CrDLC 薄膜与陶瓷球对磨过程主要以犁沟磨损形式产生材料损失。由于点接触区域面积很小，转移薄膜很难在对偶陶瓷球表面黏附形成转移膜。而在实际的关节轴承内圈涂层与织物衬垫对磨时，由于接触面增加，表面接触压力下降，对磨织物会转移到内圈薄膜表面，形成自润滑层，使得实际的摩擦磨损性能得到改善。结合前述磨损三维形貌结果可以发现，9Cr18 – CrDLC 薄膜磨损沟道明显。随着磨损深度和宽度增加，有助于降低接触表面压力，降低薄膜的磨损。

由图 10 可以看出，相对于 9Cr18 – CrDLC 薄膜与陶瓷球对磨结果，此试样磨损表面宽度增加，局部存在比较明显的痕沟，薄膜磨损仍是以犁沟磨损形式为主。由局部较深的磨痕说明薄膜表面平整度和粗糙度较大，造成接触局部区域应力升高。结合磨损三维形貌结果可以看出，9Cr18 – WDLC 薄膜表面磨损宽度较大，局部磨痕较深，从而造成整体磨损体积较大，抗磨性相对 9Cr18 – CrDLC 薄膜稍差。

3　内圈配副材料改性表面与衬垫的摩擦学性能试验

3.1　试验设备和试样制备

为了验证内圈配副材料改性与自润滑织物衬垫对磨是否能满足低频重载摆动指标要求，模拟关节轴承圆周方向往复摆动的实际使用工况条件，将试样在低速重载压摆摩擦磨损试验机上进行试验，试验原理如图 11 所示。



(a) 原理图

(b) 实物图

图 11　低速重载摩擦磨损试验机原理和实物图

Fig. 11　Schematic and physical map of low speed heavy load friction and wear tester

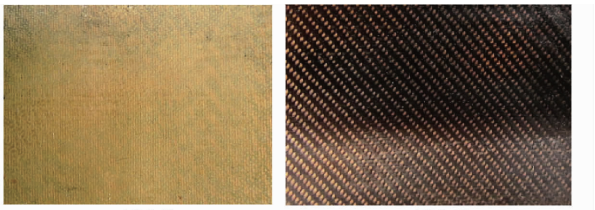
试验材料为聚四氟乙烯（PTFE）纤维织物复合材料衬垫，厚度为（0.38 ± 0.02）mm，宽度为（40 ± 0.05）mm，长度为 53 mm。具体制备工艺为：将 PTFE 按一定质量分数分散在适量溶剂中，用超声波混合均匀。接着加入一定量的酚醛缩醛黏结树脂，进一步超声混合，磁力搅拌分散均匀。织物在含有 PTFE 的黏结树脂溶液中反复浸渍、刷涂，然后将织物黏结于曲率半径为（50 ± 0.05）mm、弧度为（60 ± 0.50）°的固定试样台上，基材为 9Cr18，并在 170℃和 0.2 MPa 下固化 3 h。对偶环基材为 9Cr18，摩擦面进行薄膜改性处理，尺寸为 Φ50 mm × 50 mm，表面粗糙度 R_a 为 0.16 μm。芯轴材料采用 9Cr18。

3.2　试验结果与分析

3.2.1　编织衬垫摩擦面状态分析

在相同工况条件下，对同一类型自润滑编织衬

垫,不同内圈配副材料的 2 种试样进行累积 2.5×10^4 次摆动摩擦性能试验,摩擦前后衬垫表面状态对比如图 12 所示。



(a) 试验前 (b) 试验后

图 12 试样试验前后衬垫表面变化

Fig. 12 Surface topography change of lining fabric before and after test

由图 12 可以看出,原始衬垫表面呈青黄色且表面未见纤维状。经过摩擦试验后,衬垫表面可以看出明显的编织纤维纹路,而且衬垫的表面光滑平整,在衬垫的中间部位颜色较深,磨损较明显,且形成一定厚度自润滑转移膜,有助于降低摩擦因数,减轻衬垫磨损。

3.2.2 摩擦磨损性能分析

图 13 给出在相同工况条件下,不同内圈配副材料的 2 种试样对同一类型自润滑编织衬垫试验过程中摩擦因数随摆动次数的变化曲线。由图 13 可知,摩擦初始阶段,不同载荷和速度下的摩擦因数均先急剧下降,后缓慢回升。这一过程与试验前静载 15 min,试验时由静摩擦因数转变为动摩擦因数相对应。随着摩擦副循环次数的增多,摩擦因数稳定在一定范围内波动,平均摩擦因数分别为 0.056 和 0.078。

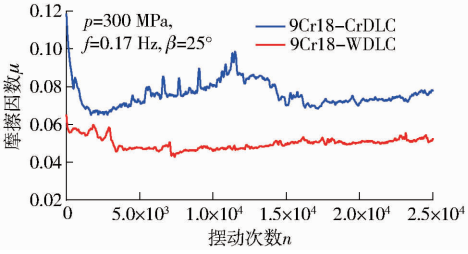


图 13 摩擦因数随摆动次数的变化关系

Fig. 13 Relationship between friction coefficient and swing number

由图 13 可知,9Cr18 - WDLC 涂层与自润滑衬垫对磨过程相对平稳,摩擦因数在一定小范围波动;而 9Cr18 - CrDLC 涂层与自润滑衬垫对磨过程中,摩擦因数在中间阶段波动较大,整个摩擦过程稳定性稍差,当达到约 1.5×10^4 次时,摩擦因数波动范围减小,进入相对较平稳摩擦过程。说明载荷对织物衬垫的摩擦学性能具有重要影响,低速重载条件下摩擦过程相对平稳。

图 14 为在相同工况条件下,不同内圈配副材料的 2 种试样对同一类型自润滑编织衬垫试验过程中衬垫磨损深度随摆动次数的变化曲线。摆动过程中衬垫材料不断重复向对偶面转移、脱落和挤出,因此衬垫厚度不断减小,磨损量不断增大。

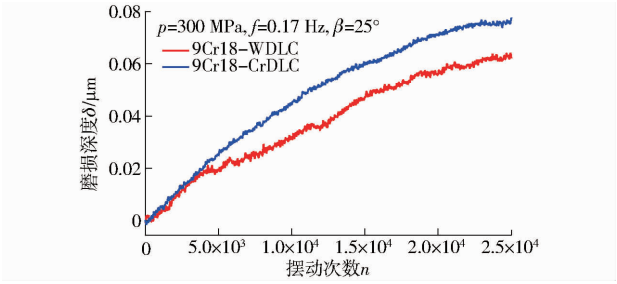


图 14 磨损深度随摆动次数的变化关系

Fig. 14 Relationship between wear deep and swing number

由图 14 可以看出,在摩擦试验的初始阶段,磨损量上升较快,主要原因是此阶段衬垫材料在较粗糙的内圈对偶面的犁沟磨损作用下[25],衬垫材料不断向对偶面转移,当对偶面的粗糙波谷被织物衬垫填充以后,转换为衬垫与对偶面上的自润滑转移膜间的摩擦作用,从而摩擦因数和磨损率下降。此后,随着摩擦摆动次数的增加,逐渐达到稳定磨损阶段,磨损量维持在一个较低的水平。在摩擦加速试验摆动 2.5×10^4 次时,衬垫都未磨穿,性能试验证明 2 种内圈配副材料和织物衬垫都满足磨损性能要求,其中 9Cr18 - WDLC 涂层与自润滑衬垫对磨表现出更好的耐磨性。

衬垫与摩擦环摩擦过程中,自润滑衬垫材料会在剪切作用下于摩擦环与衬垫间形成一定厚度的自润滑膜(图 15),形成自润滑织物衬垫与转移膜摩擦作用,从而减小摩擦阻力。由于摩擦环上附着的转移膜不稳定,可以用摩擦副间形成的转移膜厚度和均匀稳定性来进行相关分析。

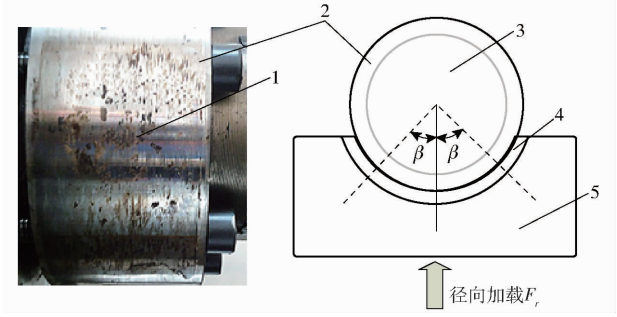


图 15 对偶环上形成的转移膜

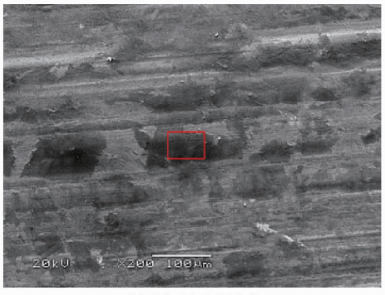
Fig. 15 Transfer films formed on dual ring

1. 转移膜 2. 对偶环 3. 芯轴 4. 织物衬垫 5. 支撑台

摩擦环与衬垫之间形成的自润滑膜层在低速重载下相对均匀稳定(图 16),增加载荷导致衬垫与对磨面的接触面积增大,增加了聚合物的粘附能力,更容易产生转移膜,形成自润滑衬垫与转移膜之间的摩擦,从而减小了接触面处的剪切强度。合适的载荷、速度和摩擦温度能够形成均匀稳定的转移膜,达



(a) 9Cr18-CrDLC



(b) 9Cr18-WDLC

图 16　内圈对偶环上形成的转移膜 SEM 图像

Fig. 16　SEM photographs of transfer films formed on dual ring of inner ring

到良好的摩擦性能并保持相对稳定的摩擦润滑状态。

4　结论

(1)在球-盘摩擦性能试验阶段初期,2 种薄膜的摩擦因数都呈逐渐增大的趋势,随着摩擦过程的进行,摩擦因数均趋于稳定且一直保持在一定的范围内波动。

(2)球-盘摩擦性能试验表明,相对于 9Cr18 - CrDLC,9Cr18 - WDLC 试样整体摩擦过程比较平稳,摩擦因数相对较低,表现出较好的摩擦性能,由磨损表面扫描电镜图可以看出,9Cr18 - CrDLC 和 9Cr18 - WDLC 试样磨损表面有比较明显的痕沟,薄膜磨损主要是以犁沟磨损形式为主。

(3)涂层与自润滑衬垫摩擦性能试验表明,相对于 9Cr18 - CrDLC 试样,9Cr18 - WDLC 薄膜与自润滑衬垫对磨过程相对平稳,易在对偶面形成自润滑转移膜,摩擦因数在一定小范围波动,整体磨痕较浅,磨损体积较小,表现出较好的抗磨性。

参　考　文　献

[1] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 5 - l3.
HE Xiongkui. Improving severe draggling actuality of plant protection machinery and its application techniques [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 5 - l3. (in Chinese)

[2] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194 - 201.
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194 - 201. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130534&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034. (in Chinese)

[3] 刘大为,卢伟,王修善,等. 联合收割机旋风分离清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2016(5): 8 - 13.
LIU Dawei, LU Wei, WANG Xiushan, et al. Research status and development trend of cyclone separating cleaning unit of combine harvesters[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2016(5): 8 - 13. (in Chinese)

[4] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5):53 - 58.
SU Binbin, XU Yang, JIAN Jianming. The actuality of development and research of wear resistant part for agricultural machinery[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53 - 58. (in Chinese)

[5] 王乐刚, 张晓辉,冷峻, 等. 谷物联合收获机清选装置疲劳寿命分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 282 - 287.
WANG Legang, ZHANG Xiaohui, LENG Jun, et al. Fatigue life analysis of grain combine harvester cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.):282 - 287. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s037&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.037. (in Chinese)

[6] 郑恩来, 张航, 朱跃, 等. 含间隙超精密压力机柔性多连杆机构动力学建模与仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 375 - 385.
ZHENG Enlai, ZHANG Hang, ZHU Yue, et al. Dynamic modeling and simulation of flexible multi-link mechanism including joints with clearance for ultra-precision press[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 375 - 385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170150&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.050. (in Chinese)

[7] 李德水, 陈国定, 余永健. 基于拟动力学高速角接触球轴承动态特性分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 730 - 739.
LI Deshui, CHEN Guoding, YU Yongjian. Analysis on dynamic characteristics of high speed angular contact ball bearing based on quasi-dynamic[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 730 - 739. (in Chinese)

[8] 刘镇星, 刘占生, 于香宇, 等. 舰船摇摆作用下滑动轴承-齿轮副系统动力学分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 226 - 234.
LIU Zhenxing, LIU Zhansheng, YU Xiangyu, et al. Dynamic analysis of journal bearing-gear system under swing movement of the ship[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(17): 226 - 234. (in Chinese)

[9] SUN Weiwei, LI Muqin, WU Mingzhong, et al. Uniformity of Si-containing diamond-like carbon films deposited at different positions by mesh hollow cathode discharge[J]. Results in Physics, 2019, 14(7): 1 - 9.

[10] MADHUSMITA P, KRISHNAN R, KISHORE K M, et al. Influence of particulate on surface energy and mechanical property of diamond-like carbon films synthesized by pulsed laser deposition[J]. Applied Surface Science, 2019, 484(8): 1176 - 1183.

[11] 曾志翔, 李红轩, 王立平. 环境气氛对类金刚石薄膜摩擦学行为的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005(5): 123 - 125.
ZENG Zhixiang, LI Hongxuan, WANG Liping. Influence of ambient gas on the frictional behaviors of diamond-like carbon films[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005(5): 123 - 125. (in Chinese)

[12] 詹华, 汪瑞军, 李振东, 等. 盐雾腐蚀条件下 Ti 合金表面功能薄膜的摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2018,47(9): 118 - 124.
ZHAN Hua, WANG Ruijun, LI Zhendong, et al. Friction and wear properties of functional films on Ti alloy surface under salt spray corrosion conditions[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 118 - 124. (in Chinese)

[13] 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7):144 - 147.
REN Luquan, YANG Zhuojuan, HAN Zhiwu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144 - 147. (in Chinese)

[14] 贾洪雷, 罗晓峰, 王文君, 等. 耕作部件耦合仿生表面结构制备方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 130 - 135.
JIA Honglei, LUO Xiaofeng, WANG Wenjun, et al. Research on coupling bionics surface texture for tillage component[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 130 - 135. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s020&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.020. (in Chinese)

[15] 高红霞, 崔晓康, 海伟, 等. 犁铧表面耐磨层的消失模铸渗工艺研究[J]. 铸造技术, 2010, 31(9):1205 - 1208.
GAO Hongxia, CUI Xiaokang, HAI Wei, et al. Study on evaporation pattern casting-infiltration technology of wear resistant layer on plough share surface[J]. Foundry Technology, 2010, 31(9):1205 - 1208. (in Chinese)

[16] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 滑动频率对超音速等离子喷涂 Mo 涂层载流摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 196 - 205.
HUI Yang, LIU Guimin, YAN Tao, et al. Effect of sliding frequency on tribological property of Mo coating deposited by supersonic plasma spraying technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 48(10): 196 - 205. (in Chinese)

[17] 韩雪峰, 朱张校, 王昆林, 等. 提高电弧喷涂层与基体结合强度的新工艺[J]. 表面技术, 2001, 30(5): 24 - 25.
HAN Xuefeng, ZHU Zhangxiao, WANG Kunlin, et al. New technology of improving bond strength of spraying layer and substrate[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 30(5): 24 - 25. (in Chinese)

[18] ZHANG T F, DENG Q Y, LIU B, et al. Wear and corrosion properties of diamond like carbon (DLC) coating on stainless steel, CoCrMo and Ti6Al4V substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 273(3):12 - 19.

[19] CHANG Yinyu, WANG Dayung, WU Weite. Catalysis effect of metal doping on wear properties of diamond-like carbon films deposited by a cathodic-arc activated deposition process[J]. Thin Solid Films, 2002, 420(12): 241 - 247.

[20] 张书姣, 吴艳霞, 朱丽楠, 等. 金属掺杂类金刚石薄膜研究进展[J]. 航空制造技术, 2017(13): 77 - 82.
ZHANG Shujiao, WU Yanxia, ZHU Linan, et al. Research progress of metal doped diamond-like darbon films[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(13): 77 - 82. (in Chinese)

[21] 方兵, 张雷, 曲兴田, 等. 角接触球轴承动力学建模与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 215 - 219.
FANG Bing, ZHANG Lei, QU Xingtian, et al. Dynamic modeling and experiment of angular contact ball bearing [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 215 - 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120638&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.038. (in Chinese)

[22] HARRIS T A, KOTZALAS M N. Advanced concepts of bearing technology[M]. New York: Taylor& Francis, 2006.

[23] SKF. SKF spherical plain bearings and rod ends[M]. SKF Group, 2011.

[24] BYUNG C K, DONG C P, HAK S K, et al. Development of composite spherical bearing[J]. Composite Structures, 2006, 75: 231 - 240.

[25] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.