

碳基薄膜在航空轴承乏油问题中的应用研究

孙东¹, 王海新², 蒲吉斌², 刘金玲¹, 曹娜娜¹, 郭武明²

(1.中国航发哈尔滨轴承有限公司 研发中心, 哈尔滨 150000; 2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201)

摘要: **目的** 研究乏油工况下 GLC 和 DLC 两种碳膜在航空轴承上的应用。**方法** 通过磁控溅射技术在单晶硅片 P(100)、轴承钢样块和轴承套圈表面分别制备了 GLC 和 DLC 两种薄膜。利用扫描电镜 (SEM)、拉曼光谱对薄膜的截面和磨痕形貌及结构进行了分析。利用纳米压痕仪、摩擦磨损试验机 etc 对薄膜的力学性能和摩擦学性能进行了研究。利用轴承试验机对镀两种膜的轴承进行了对比研究。**结果** GLC 和 DLC 两种碳基薄膜均结构致密, GLC 薄膜含有更多的 sp^2 , DLC 薄膜含有更多的 sp^3 ; 两种薄膜硬度分别达到 18.2 GPa 和 22.2 GPa, 弹性模量分别达到 230.2 GPa 和 260.8 GPa, 干摩擦条件下, 薄膜摩擦系数分别低至 0.11 和 0.21。镀膜轴承在运转 0~10 h 时, 温升无明显差异; 10~30 h 过程中, 镀 GLC 薄膜轴承温升约为 40~45 °C, 而镀 DLC 薄膜轴承温升约为 50~55 °C。运转后, 轴承滚子上出现转移膜, 镀 GLC 薄膜的轴承磨损比镀 DLC 薄膜的轴承严重。**结论** 在乏油工况下, DLC 薄膜具有更加优异的环境适应性。

关键词: GLC 薄膜; DLC 薄膜; 磁控溅射; 摩擦学; 航空轴承; 乏油工况

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0218-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.029

Application Research of Carbon-based Films in Aeroengine Bearings under Oil Starvation Condition

SUN Dong¹, WANG Hai-xin², PU Ji-bin², LIU Jin-ling¹, CAO Na-na¹, GUO Wu-ming²

(1.R&D Center, AECC Harbin Bearing Co., Ltd, Harbin 150000, China; 2.Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies of Zhejiang, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

ABSTRACT: The work aims to study the application of GLC and DLC carbon films in aeroengine bearing under oil starvation condition. GLC and DLC thin films were prepared on the surface of single crystal silicon P(100), bearing steel and bearing ring by magnetron sputtering technique. The cross-section, wear morphology and structure of the films were analyzed by SEM and Raman. The mechanical properties and tribological properties of the films were studied by nano-indentation instrument and friction and wear tester. The bearing test machine was used to compare these two film-coated bearings. The structure of the GLC and DLC films were both compact. The GLC films contained more sp^2 , but DLC films contained more sp^3 . The hardness and

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-06-25

Received: 2018-11-29; Revised: 2019-06-25

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LZ17E050004)

Fund: Zhejiang Natural Science Foundation (LZ17E050004)

作者简介: 孙东 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为摩擦学。

Biography: SUN Dong (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: tribology.

通讯作者: 郭武明 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料表面工程。邮箱: guowuming@nimte.ac.cn

Corresponding author: GUO Wu-ming (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: material surface engineering. E-mail: guowuming@nimte.ac.cn

elastic modulus of the two films were up to 18.2 GPa, 22.2 GPa and 230.2 GPa, 260.8 GPa respectively. Under dry friction conditions, the friction coefficient was as low as 0.11 and 0.21, respectively. There was no significant difference in the temperature rise of the coated bearings between 0 to 10 h. The temperature rise of the GLC films bearing was about 40~45 °C during 10~30 h, while the temperature rise of the DLC films bearing was about 50~55 °C. The transfer film appeared on the bearing rollers and the bearing wear of GLC films was more serious than that of DLC films after the operation. The DLC films have better environmental adaptability under oil starvation condition.

KEY WORDS: GLC films; DLC films; magnetron sputtering; tribology; aeroengine bearing; oil starvation condition

随着近年来航空装备的发展,对轴承的可靠性要求越来越高,尤其是处于边界润滑,甚至是乏油工况下的轴承运转,受到越来越多的关注^[1]。为提高轴承的使用寿命,常规理想状态下,希望轴承滚动体和滚道之间能够形成润滑油膜,将工作表面有效隔离,即处于弹流润滑状态。但轴承在实际工作中,往往不能处于弹流润滑,而只能处于边界润滑状态。极少数情况下,由于设计或结构限制等原因,轴承处于乏油,甚至无油润滑状态。因此,仅仅依靠轴承基体材料已不能满足轴承的服役要求,因此采用自润滑涂层成为一种改善轴承润滑状态的有效途径^[2]。

作为一种性能优异的硬质自润滑薄膜材料,碳基薄膜具有优异的力学和摩擦学性能,如硬度高、弹性模量大和摩擦磨损低等^[3-4]。Enke 等^[5]最早提出 DLC (类金刚石) 薄膜具有极低的摩擦系数,之后很多科研工作者围绕碳基薄膜的摩擦学性能开展了大量的研究工作^[6],发现可充分利用碳基薄膜低摩擦系数和低磨损率的特点,解决边界润滑条件下的自润滑问题^[7]。碳基薄膜的化学组成包括 sp^3 杂化碳原子、 sp^2 杂化碳原子和 H 原子,其三元相图如图 1 所示,性质介于石墨与金刚石之间。Jacob 和 Moller^[8]认为碳基薄膜可根据 sp^2 杂化键、 sp^3 杂化键和 H 含量的不同进行划分。根据三元相图(薄膜是否含氢),碳基薄膜可分为含氢类金刚石 DLC 薄膜和无氢类石墨 GLC 薄膜两种^[9]。滑动摩擦条件下对碳基薄膜的摩擦学研究已有很多,但滚动状态下的摩擦学性能尚不明确,也鲜有文献对此进行论述。鉴于某航空轴承的实际需

求,本文拟先对 DLC 和 GLC 两种碳膜进行力学性能和摩擦性能的对比如分析,再以滚动轴承为载体,通过地面台架实验的方法,对碳基薄膜的摩擦学性能进行研究。

1 实验

1.1 薄膜制备

本次实验仅对轴承套圈表面进行镀膜处理,陪伴件包括单晶硅片 P(100)和轴承钢样块。采用磁控溅射镀膜技术在样件及陪伴件表面沉积碳基薄膜,镀膜前,基底材料先后在丙酮和无水乙醇中各超声清洗 15 min 以上,以去除表面油污及其他杂质,再用氮气吹干,确保样品表面干燥洁净。

GLC 薄膜制备过程如下:先预抽真空至 3.0×10^{-3} Pa 以下,然后通入高纯 Ar 气,基底偏压加至 -400 V,利用氩气电离产生的等离子体对基底表面溅射清洗 30 min。随后,将偏压调至 -100 V,在基底表面沉积 Cr 过渡层。调整偏压到 -70 V,逐步减小 Cr 靶溅射功率并逐步使 C 靶功率增加至预设值,制备 GLC 碳膜,薄膜厚度约 3 μm 。

制备 DLC 薄膜的方法是:预抽真空至 3.0×10^{-3} Pa 或更低,并引入高纯氩气,向衬底施加 -500 V 的偏压,并使用氩等离子体溅射清洁衬底表面 30 min。随后,将偏压调至 -100 V,首先在基底表面沉积 Cr 过渡层。然后通入高纯乙炔气体,通过逐步减小 Cr 靶溅射功率的方法,制备梯度过渡层 Cr/DLC。最后调整偏压到 -700 V,调整 C_2H_2 : Ar 为 2:1,沉积表面纯 DLC 涂层,薄膜厚度约 3 μm 。

1.2 薄膜表征

通过 ZEISS EVO18 大腔体扫描电子显微镜 (SEM) 对镀膜后的硅片断面进行形貌观察和薄膜厚度测量。通过 MTS-nano G200 纳米压痕仪测定薄膜的硬度和弹性模量,考虑到基体对薄膜硬度的影响,压入深度不能超过薄膜厚度的 10% (300 nm),每个样品取 5 个点进行测量,取平均值。采用波长为 532 nm 的 Renishaw Via Reflex 型共聚焦显微拉曼光谱仪分析薄膜的键结构。采用 UMT-3 型多功能高温摩擦磨损试验机评价薄膜的摩擦学性能,对偶球为 $\phi 6$ mm

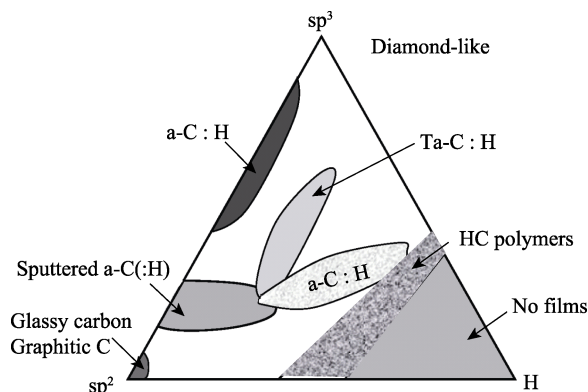


图 1 非晶碳三元相图

Fig.1 Ternary phase diagram of amorphous carbon

的 W9Cr4V2Mo 钢球, 具体实验参数为: 环境温度 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$, 湿度 $(40 \pm 5)\%$, 法向载荷 5 N, 频率 5 Hz, 移动距离 5 mm, 摩擦时间 60 min。采用 Alpha-Step IQ 型表面轮廓仪和 NJF-120A 型光学显微镜分别分析磨痕的三维轮廓及形貌。

1.3 轴承实验方案

本次验证实验选用 6C32206N4Q 型轴承, 该轴承为内圈无挡边的圆柱滚子轴承, 其结构简图如图 2 所示, 轴承尺寸 $d \times D \times B$ 为 30 mm \times 62 mm \times 16 mm, 滚动体尺寸为 $\phi 7.5$ mm \times 7.5 mm。

轴承套圈及滚动体由 W9Cr4V2Mo 制成, 该材料主要成分如表 1 所示, 保持架为表面镀银处理的 QA110-3-1.5 材料。轴承实验在 T8-30 轴承试验机上进行, 实验前对轴承分别进行丙酮和乙醇超声清洗, 以去除油污等, 实验运转过程中无润滑。实验条件为: 径向载荷 3000 N, 转速 1000 r/min。实验分两个阶段进行, 第一阶段 10 h, 第二阶段 20 h, 共计 30 h。第一阶段主要对碳基薄膜的基本性能进行测试。第一阶段考核结束后, 对轴承进行分解检查, 通过目视检查,

如无明显失效, 则重新安装后进行后续考核。第二阶段主要对碳基薄膜的抗疲劳性能进行测试。第二阶段完成实验后, 对轴承表面形貌、滚道轮廓等进行检测。整个实验过程对轴承的温度进行监测, 如出现异常变化, 实验将被终止, 并对轴承拆机检查。



图 2 轴承结构简图

Fig.2 Diagram of bearing structure

表 1 W9Cr4V2Mo 材料成分
Tab.1 Composition of W9Cr4V2Mo material

Component	C	Cr	Mo	V	W	Mn	Si	P
Content/%	0.7~0.8	3.8~4.3	0.2~0.8	1.3~1.7	8.5~10	0.4	0.4	0.027

轴承的接触应力采用 cobra 软件进行计算, 由于内圈接触应力大于外圈接触应力 (大约为 1200 MPa), 故对内圈进行分析更能反映碳基薄膜的性能。

2 结果与讨论

2.1 薄膜形貌和结构

图 3 是 GLC 薄膜和 DLC 薄膜的截面显微照片。从图中可以看出, 薄膜断面光滑致密, 无明显缺陷, 总厚度约 3 μm 。薄膜表现为柱状结构生长, 主要是由于优先成核和结合在 a-C 基质中的纳米晶体颗粒促进柱状结构的生长导致^[10]。两种薄膜的断面形态没

有太大差别, 对薄膜耐磨性能的影响可以忽略不计。

图 4 是 GLC 和 DLC 薄膜的拉曼光谱及分峰拟合图。从图中可以看出, 制备的薄膜在 1000~1800 cm^{-1} 之间有一个宽化峰, 通过高斯拟合可以得到两个峰——1560 cm^{-1} 左右的非对称峰 (G 峰) 和 1380 cm^{-1} 附近的肩峰 (D 峰), 这是典型的非对称倾斜散射无定型碳结构。通常拉曼高斯拟合后通过分析 I_D/I_G 的变化, 可定性表征 DLC 中 sp^3 和 sp^2 含量的变化^[11-13]。从图中可以看出, GLC 薄膜中 I_D/I_G 比值远大于 1, 因此含有更多的 sp^2 结构; 而 DLC 薄膜中 I_D/I_G 比值小于 1, 因此 sp^3 含量更高, 这也是造成 DLC 薄膜硬度更大的原因。

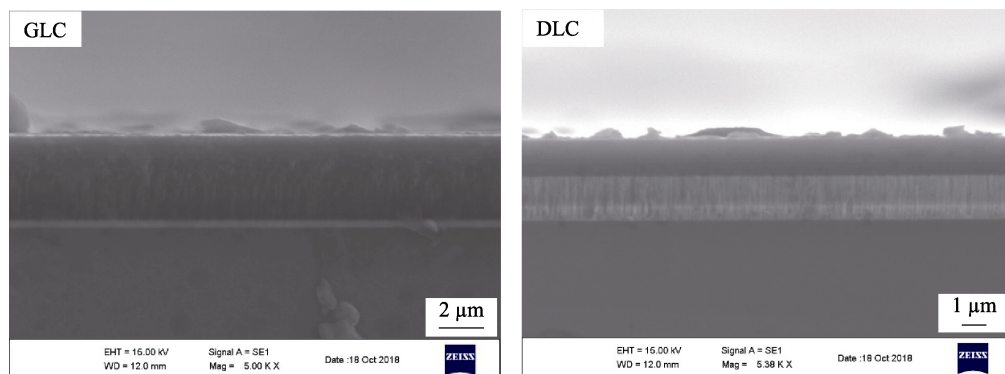


图 3 碳基薄膜的断面形貌图

Fig.3 Cross section morphologies of carbon-based films

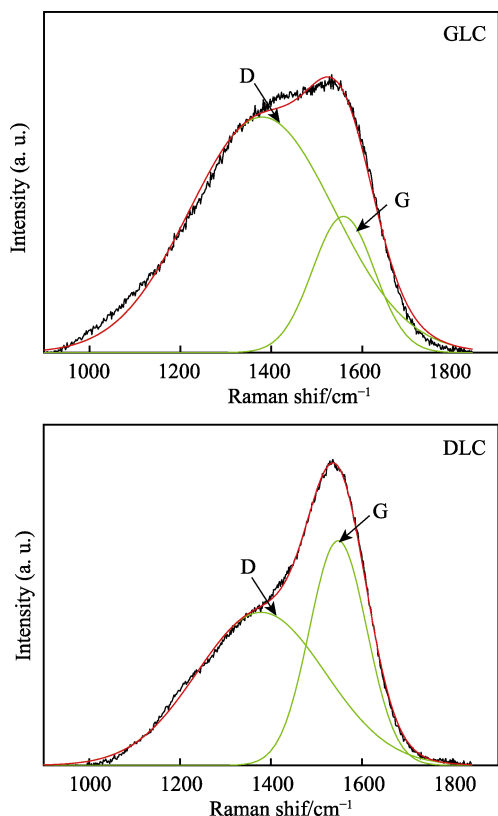


图 4 GLC 和 DLC 薄膜的拉曼光谱及分峰拟合图
Fig.4 Raman spectra and peaks deconvolution of GLC and DLC films

2.2 薄膜的硬度和弹性模量

GLC 和 DLC 薄膜的硬度及弹性模量如图 5 所示。由图可知, DLC 薄膜的硬度和弹性模量分别达到 22.2 GPa 和 260.8 GPa, 均高于 GLC 薄膜 (硬度和弹性模量分别是 18.2 GPa 和 230.7 GPa)。一般来说, 薄膜的机械性能 (硬度和弹性模量) 与薄膜中 sp^3 键的含量有关, 即薄膜中 sp^3 键的含量越高, 硬度越大^[14-15]。结合上面的拉曼光谱分析可知, DLC 薄膜因含有更多的 sp^3 键而具有更高的硬度和弹性模量。

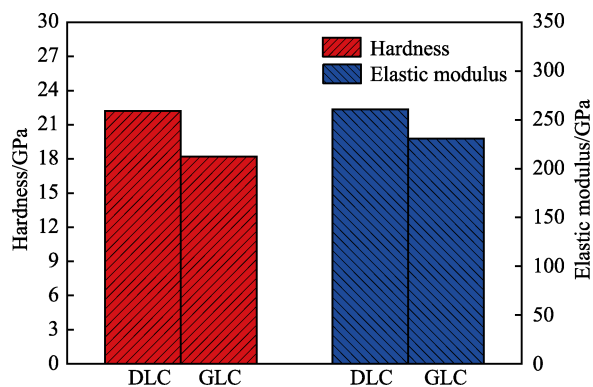


图 5 GLC 和 DLC 两种薄膜的硬度及弹性模量对比图
Fig.5 Hardness and elastic modulus of GLC and DLC films

2.3 薄膜的摩擦性能

无油润滑环境中 GLC 和 DLC 薄膜的摩擦系数、

磨痕形貌及三维轮廓的对比结果分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出, 在无油润滑的工况下, GLC 薄膜的摩擦系数在经过短暂的跑和期后, 很快进入平稳期, 稳定在 0.11 左右。而 DLC 薄膜在相同工况下的摩擦系数明显高于 GLC 薄膜, 达到 0.21。从图 7 中可以看出, 经过相同时间的摩擦实验后, GLC 薄膜的磨痕深度达到 800 nm 左右, 而 DLC 薄膜的磨痕深度只有 300 nm 左右。这是因为, DLC 薄膜硬度更大, 虽然摩擦系数高于 GLC 薄膜, 但具有更好的耐磨损性能。

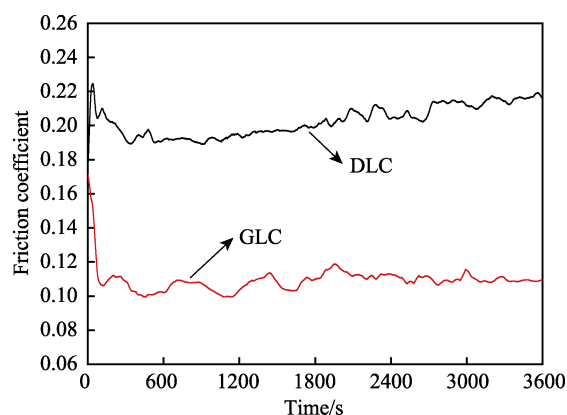


图 6 GLC 和 DLC 薄膜的摩擦系数对比图
Fig.6 Friction coefficient curves of GLC and DLC films

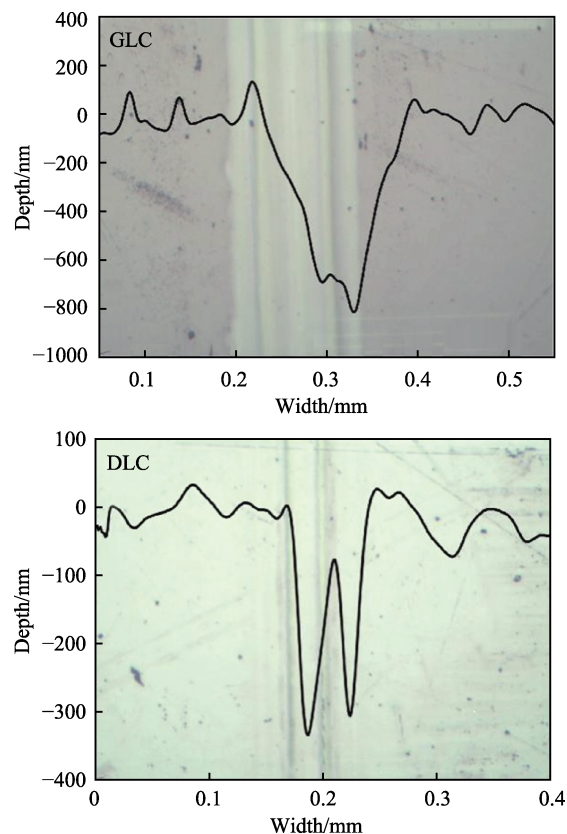


图 7 GLC 薄膜和 DLC 薄膜摩擦后的磨痕形貌及三维轮廓
Fig.7 Wear pattern and 3D profile of GLC and DLC films after friction

2.4 镀膜轴承的摩擦性能

图8是镀膜轴承运行温度变化趋势图。从图中可以看出, 镀 GLC 薄膜与镀 DLC 薄膜的轴承在 0~10 h 运行区间内, 温升情况并没有明显差异, 温度均由最开始的 28 °C 升高到 70 °C, 温升约为 40 °C。在 10~30 h 运行区间内, 虽然两种镀膜轴承运行温度均较第一阶段有所降低, 但两者温升存在比较明显的差异, 镀 GLC 薄膜轴承温升约为 40~45 °C, 而镀 DLC 薄膜轴承温升约为 50~55 °C。实验开始阶段温升高于第二阶段的原因是: 轴承开始运转的 0~10 h 运行区间内, 轴承处于磨合期, 轴承工作表面存在微凸体, 磨合的过程中, 接触区域微凸体会发生塑性变形甚至断裂, 该过程将产生大量热; 随着运行时间的推移, 轴承表面微凸体逐渐磨损消除, 产热量逐渐降低。与此同时, 因轴承运转过程中, 轴承腔不是完全密封状态, 其周围存在大量潮湿空气, GLC 薄膜表面的不饱和化学键会与氧气和水蒸气相结合, 使其发生钝化, 使接触表面的吸附作用显著降低^[14], 薄膜摩擦系数也随之下降, 导致运转产生的热量降低。

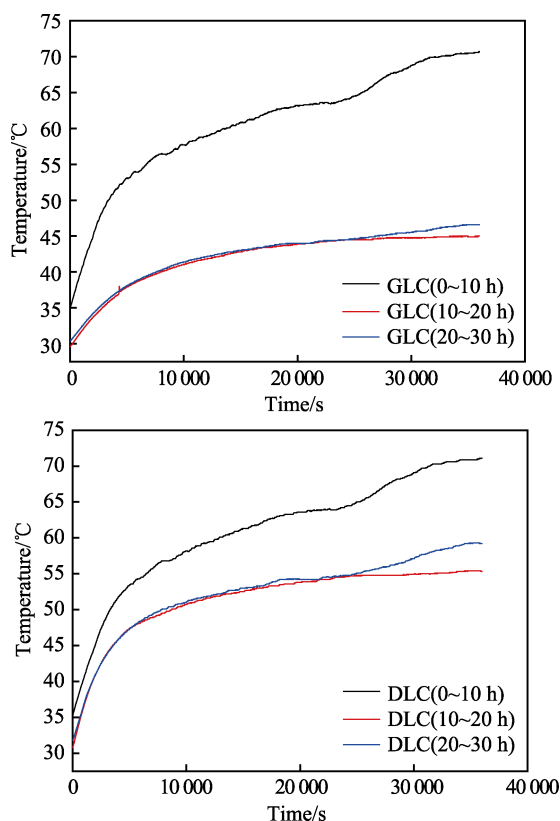


图8 镀膜轴承运行温度变化趋势图

Fig.8 Trend diagram of operating temperature of coated bearing

湿润环境下, 含氢的 DLC 在摩擦力的作用下, 表面的 C—H 键和 C—C 键发生断裂, 形成 C—O 和 C=O 键, 该化学反应导致键能显著提高。因此, 与最初的 C—H 键和 C—C 键相比, DLC 需要克服更多的摩擦阻力来实现相互位移^[16-18], 进而导致两种镀膜

轴承摩擦系数的差异。摩擦系数的差异可导致轴承温升的不同, 该结果与前文试样滑动摩擦学实验结果一致。

轴承在运行 10 h 后, 进行分解检查, 如图 9 所示。从图中可以看出, 镀 DLC 和镀 GLC 轴承套圈滚道均有周向磨损痕迹带, 磨损轻微, 目视检查均没有出现大面积失效, 且磨损形貌无肉眼可见明显差异。其中, 滚动体表面失去金属光泽, 呈黑色, 为继续进行后续实验考核, 对碳基薄膜的性能进行进一步分析, 仅对轴承外观进行检查, 没有对轴承进行破坏分析。复装后进行 20 h 后续实验, 完成 30 h 实验后拆解检查发现, 两轴承滚道表面呈现出不同的外观特征: GLC 薄膜表面磨损明显大于镀 DLC 薄膜表面, 滚道接触区失去原有光泽, 磨损区域呈现灰白色, 与斜坡非接触区存在明显差异, 且存在零星的片状磨损痕迹; DLC 薄膜磨损较为轻微, 滚道接触带除存在个别的周向磨损痕迹外, 整体与斜坡非接触处相近。滚动摩擦条件下, GLC 薄膜的耐磨损性能不如 DLC 薄膜, 该结果与前文滑动摩擦结果吻合。

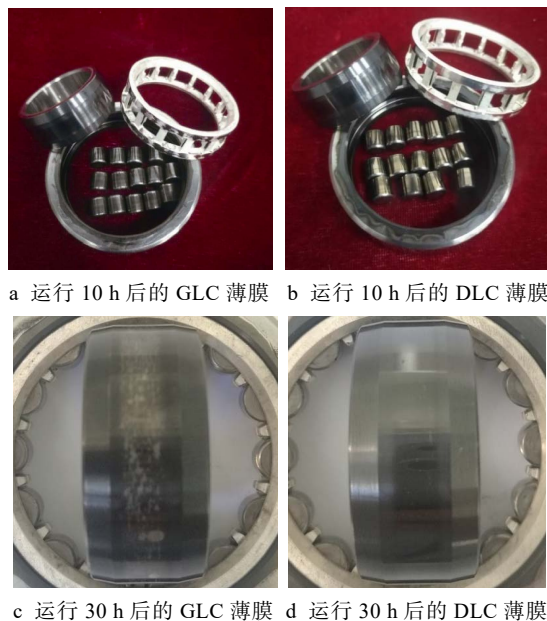


图9 实验后轴承形貌

Fig.9 Bearing morphology after test: a) GLC film after 10 h; b) DLC film after 10 h; c) GLC film after 30 h; d) DLC film after 30 h

对轴承内圈滚道进行扫描电子显微观察, 结果如图 10 所示。通过图 10a (50 倍) 可观察到, DLC 形貌呈现出点状, 无规则分布于滚道表面; 图 10b 为 50 倍下 GLC 的表面形貌, 其出现长条状的片状剥落, 剥落面积明显大于 DLC 的剥落, 剥落长度方向沿轴承滚动体周向方向; 图 10c 为 500 倍下 DLC 剥落形貌图, 视场中可见一个长度约为 20 μm 的大块剥落区域, 其余剥落的尺寸较小, 在滚道中还可见轻微的周向犁沟形貌; d 为 500 倍下 GLC 剥落形貌图, 剥落坑贯穿整个视场, 剥落坑右侧呈现“悬崖”状断裂形

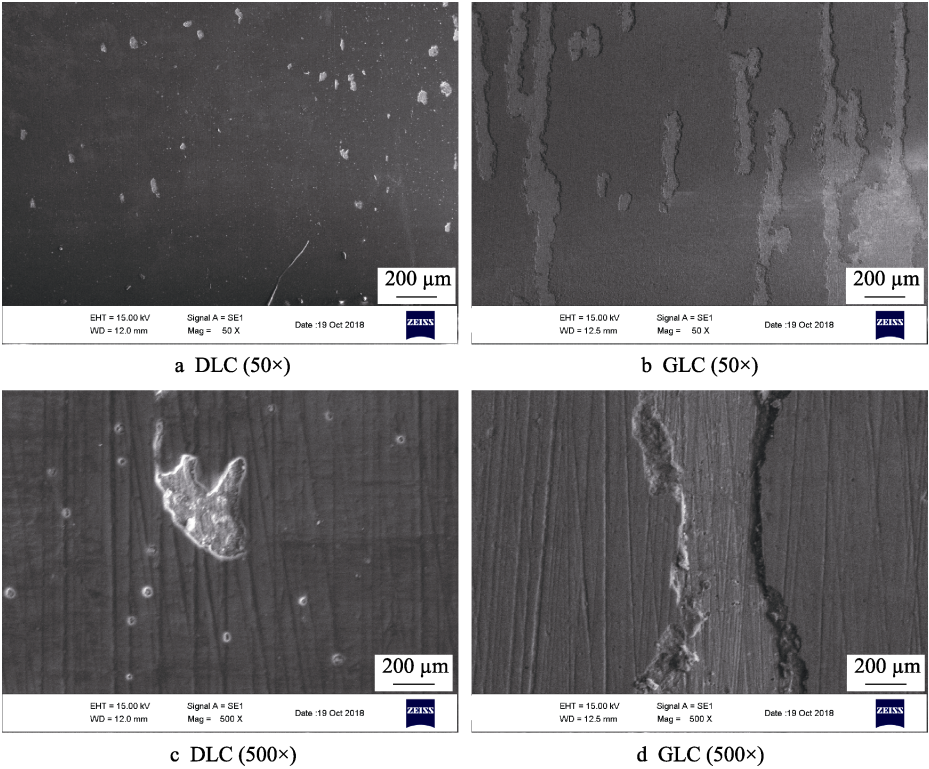


图 10 轴承滚道 SEM 照片
Fig.10 SEM photo of bearing raceway

貌，剥落坑底部和原始滚道出现明显台阶。此外，在剥落坑周围还可见与 DLC 表面类似犁沟形貌。

使用泰勒圆度仪对完成实验后的轴承滚道进行几何形貌分析，两轴承滚道圆度、直线度变化不大，但 GLC 轴承内圈滚道粗糙度 Ra 发现显著变化，实验后变为 $0.43\text{ }\mu\text{m}$ ，而 DLC 仅为 $0.049\text{ }\mu\text{m}$ 。

在无油工况下，碳基薄膜 GLC 和 DLC 均在运转过程中出现剥落，其中 GLC 的剥落面积明显大于 DLC，同时，剥落的碎屑会在轴承滚道产生犁沟形貌。由轮廓检测可知，DLC 的磨损深度明显低于 GLC。综上，DLC 薄膜表现出强于 GLC 薄膜的表面耐磨损性能。

经过 30 h 的运转，滚子已无金属光泽，表面被黑色物质覆盖，分布较均匀且较为致密，如图 11 所示。

为确定滚动体粘着物是否为碳基薄膜形成的转

移膜，采用拉曼光谱仪对其进行检测。DLC 和 GLC 均属于碳基薄膜，其原子结构和键合特征介于金刚石和石墨之间。单晶石墨在 1580 cm^{-1} 附近具有单个拉曼峰（G 峰），金刚石的特征拉曼峰位于 1332 cm^{-1} 处^[19]。图 12 是 GLC 滚动体和 DLC 滚动体表面的拉

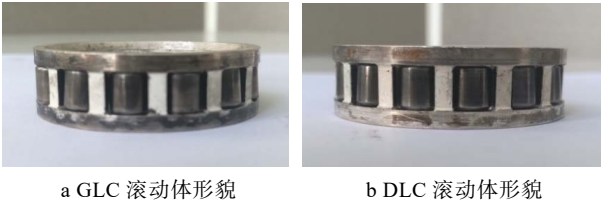


图 11 实验后滚动体形貌
Fig.11 Rolling body morphology after test: a) rolling body with GLC films; b) rolling body with DLC films

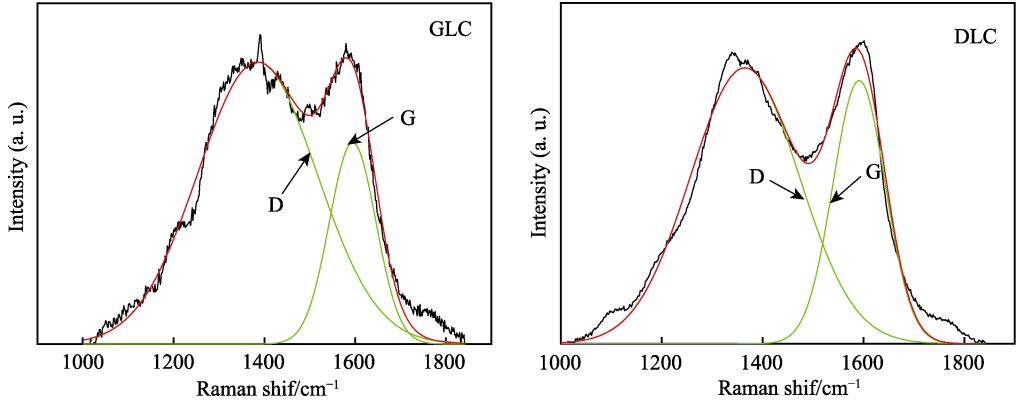


图 12 滚动体表面拉曼光谱及分峰拟合图
Fig.12 Raman spectra and peaks deconvolution of rolling body surface

曼光谱曲线及高斯拟合图。从图中可以看出,这是典型的碳质结构特征,拥有在 1350 cm^{-1} 附近的 D 峰和 1580 cm^{-1} 附近的 G 峰,而且两个特征峰比值 I_D/I_G 均大于 1,说明滚动体上的黑色物质主要是硬度相对较低且含有更多 sp^2 键结构的碳膜。

转移膜的生成实现了对滚动体和滚道碳基薄膜的分离,有效地避免了两者的直接接触,降低了摩擦过程中的剪切力,使镀碳基薄膜轴承表现出更加优异的摩擦学性能,这也对第二阶段轴承运转温度的降低起到了积极的作用。转移膜的形成,为提高轴承润滑性能,顺利通过实验考核,提供了必要的条件。

3 结论

1) GLC 和 DLC 碳基薄膜均结构致密, GLC 薄膜含有更多的 sp^2 , DLC 薄膜含有更多的 sp^3 。DLC 薄膜的硬度和弹性模量均高于 GLC 薄膜,分别达到 22.2 GPa 和 260.8 GPa 。干摩擦条件下, GLC 薄膜摩擦系数低于 DLC,为 0.11。

2) 短时间内使用, GLC 和 DLC 薄膜均没有出现明显的失效。碳基薄膜在滚动接触时的失效形式主要是剥落失效。

3) 转移膜的形成避免了滚动体与滚道碳基薄膜的直接接触,对于镀碳基薄膜轴承润滑性能起到了至关重要的作用。

4) 滚动摩擦下,两种碳基薄膜显示出与滑动摩擦相同的摩擦学特性。其中,虽然镀 GLC 薄膜轴承温升低于镀 DLC 薄膜轴承,但 DLC 薄膜硬度高,耐磨性更强,显示出更加优良的自润滑性能。

参考文献:

- [1] 白新瑞, 刘晓玲. 乏油条件下圆柱滚子轴承的弹流润滑分析[J]. 润滑与密封, 2013, 38(1): 45-50.
BAI Xin-rui, LIU Xiao-ling. Analysis of elastohydrodynamic lubrication for cylindrical roller bearings under starved oil-supply condition[J]. Lubrication engineering, 2013, 38(1): 45-50.
- [2] 李博雅, 曹志强. 金属基固体自润滑复合涂层及其制备技术研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 32-38.
LI Bo-ya, CAO Zhi-qiang. Metal-based solid self-lubricating composite coating and its preparation technology[J]. Surface technology, 2017, 46(9): 32-38.
- [3] ERDEMIR A, DONNET C. Tribology of diamond-like carbon film: Recent progress and future prospects[J]. Journal of physics D: Applied physics, 2006, 39: 312-319.
- [4] SCHARF T W, PRASAD S V. Solid lubricants: A review[J]. Journal of materials science, 2013, 48: 511-531.
- [5] ENKE K, DIMIGEN H, HUBSCH H. Frictional-properties of diamond-like carbon layer[J]. Applied physics letter, 1980, 36: 291-292.
- [6] 蔡建宾. 磁控溅射非晶碳基薄膜的结构设计与机械性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
CAI Jian-bin. Microstructure design and properties of a-C based films by magnetron sputtering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [7] TOPOLOVEC M K, LOCKWOOD F, SPIKES H. Behaviour of boundary lubricating additives on DLC coatings[J]. Wear, 2008, 265(11): 1893.
- [8] JACOB W, MOLLER W. On the structure of thin hydrocarbon films[J]. Applied physics letter, 1993, 36: 1771-1773.
- [9] 王福, 谢明玲, 张广安, 等. 含硅无氢非晶碳基薄膜的摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 93-100.
WANG Fu, XIE Ming-ling, ZHANG Guang-an, et al. Friction and wear properties of Si-containing H-free amorphous carbon-based films[J]. China surface engineering, 2017, 30(1): 93-100.
- [10] SWIATEK L, OLEJNIK A, GRABARCZYK J, et al. Multi-doped diamond like-carbon coatings (DLC-Si/Ag) for biomedical applications fabricated using the modified chemical vapour deposition method[J]. Diamond & related materials, 2016, 67: 54-62.
- [11] ROBERTSON J. Diamond-like amorphous carbon[J]. Materials science and engineer R, 2002, 37(4-6): 129-281.
- [12] FERRARI A C, ROBERTSON J. Interpretation of raman spectra of disordered and amorphous carbon[J]. Physical review B, 2000, 61(20): 14095-14107.
- [13] CUI W G, LAI Q B, ZHANG L, et al. Quantitative measurements of sp^3 content in DLC films with raman spectroscopy[J]. Surface & coatings technology, 2010, 205(7): 1995-1999.
- [14] 王永军, 李红轩, 吉利, 等. 非平衡磁控溅射制备类石墨碳膜及性能研究[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 056103.
WANG Yong-jun, LI Hong-xuan, JI Li, et al. Preparation and properties of graphite-like carbon films fabricated by unbalanced magnetron sputtering[J]. Acta phys sin, 2012, 61(5): 056103.
- [15] 薛群基, 王立平. 类金刚石碳基薄膜材料[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
XUE Qun-ji, WANG Li-ping. Diamond-like carbon-based film material[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] LI Hong-xuan, XU Tao, WANG Cheng-bing, et al. Friction-included physics and chemical interactions among diamond-like carbon film, steel ball and water and/or oxygen molecules[J]. Diamond and related materials, 2006, 15: 1228-1234.
- [17] TILLMANN W, VOGLI E, HOFFMANN F. Wear-resistant and low-friction diamond-like-carbon (DLC)-layers for industrial tribological applications under humid conditions[J]. Surface & coatings technology, 2009, 204: 1040-1045.
- [18] DONNET C, LEMOGNE T, PONSONNET L, et al. The respective role of oxygen and water vapor on the tribology of hydrogenated diamond-like carbon coatings[J]. Tribology letter, 1998(4): 259-265.
- [19] JIANG Jia-ren, ZHANG Sam, ARNELL R D. The effect of relative humidity on wear of a diamond-like carbon coatings[J]. Surface & coatings technology, 2003, 167: 221-225.