

引用格式: Ding Xuexing, Jin Haijun, Zhao Haihong, *et al.* Friction Test Analysis on the Dry Running Gas Seal End Face Based on DLC Membrane[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(3): 117-122. [丁雪兴, 金海俊, 赵海红, 等. 基于 DLC 薄膜的干气密封端面摩擦试验分析[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(3): 117-122.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2018.03.023.

基于 DLC 薄膜的干气密封端面摩擦试验分析

丁雪兴, 金海俊, 赵海红, 俞树荣, 张伟政

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 在干气密封工程应用中为了降低动静环的变形, 出现了“硬对硬”的摩擦副设计, 但是存在端面磨损和密封失效等问题。因此, 在静环表面制备类金刚石碳膜(DLC)对改善干气密封运行情况 and 摩擦性能至关重要。首先利用磁控溅射法在静环表面制备了 $2\ \mu\text{m}$ 的 DLC 薄膜, 其次利用端面摩擦磨损试验机分析了不同工况下静环表面 DLC 薄膜的摩擦系数、温升和摩擦系数波动。并采用光学显微镜观察了静环的磨损表面形貌。试验结果表明: 随着转速与载荷的增大, 端面温升增大, 摩擦系数减小且摩擦系数的波动幅度也逐渐减小, 并在较短时间内保持稳定。这是由于 DLC 薄膜表面的石墨化进程与高润滑性; 同时, 随着载荷的增大, 未出现较为严重的表面擦痕, 说明 DLC 薄膜改善了端面间的摩擦特性, 从而减缓了动静环表面的损伤。试验结果对提高干气密封端面摩擦特性有一定的指导作用。

关键词 干气密封; 类金刚石薄膜; 摩擦磨损; 温升; 波动

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2018)03-0117-06

干气密封作为一种新型的非接触式机械密封, 是由 20 世纪 60 年代末根据气浮轴承的工作原理发展而来的^[1-2]。近年来, 随着干气密封不断被使用在石化设备中, 其结构参数及动力学特性已趋于成熟^[3], 但是在干气密封开启和停车过程中, 密封副在接触与非接触转变的过程中, 密封端面之间难免产生摩擦磨损、热变形和泄漏量突然增大的现象^[4-6]。Zou 等^[7]研究指出动静环的角偏差加剧了密封端面的磨损; 高志等^[8]研究指出, 干气密封启动阶段动压效应不足会导致两端面间存在显著的接触和摩擦。而在高压干气密封中, 由于密封介质压力较高, 静环(石墨环)容易发生变形导致密封失效, 所以大量采用“硬对硬”(动静环材料均为碳化硅)的摩擦副设计, 但是在使用过程中发现硬环之间在启动过程温升、磨损情况都十分严重^[9]。基于此, 在干气密封碳化硅环表面制备类金刚石碳膜(DLC, diamond-like carbon)以此提高端面的摩擦学性能^[9]。

DLC 是一类含有金刚石结构(sp^3 杂化键)和石

墨结构(sp^2 杂化键)的非晶碳膜的总称, 它具有高硬度、高弹性模量、低摩擦系数、低热膨胀系数、自润滑性和耐磨损等优良性能^[10]。在干摩擦条件下, DLC 薄膜会因摩擦导致表面发生一定程度的石墨化, 为摩擦副提供润滑作用, 所以表现出了良好的特性^[11-12]。另外, 研究表明^[13], 干摩擦条件下在 Si_3N_4 陶瓷以及 SiC 表面采用 Si 作为过渡层并沉积 DLC 薄膜, 均可大幅降低 2 种陶瓷材料表面的摩擦系数; 文献^[14-16]研究发现 DLC 薄膜的摩擦系数随着载荷与转速的增加而逐渐降低。对于端面密封, 国内外专家学者已经从动力学、摩擦学角度进行了大量的研究, 但是对于 DLC 薄膜的摩擦学性能的规律性认识, 尤其是不同的转速和载荷等操作工况对 DLC 薄膜密封环的摩擦学性能影响规律研究较为匮乏。

根据高压干气密封的工作情况和结构特性, 对静环进行 DLC 薄膜处理, 并通过摩擦学试验机对密封副的摩擦系数、温升、磨损情况等进行研究和分析, 探索高压干气密封环表面 DLC 薄膜的摩擦机理

收稿日期: 2017-12-27; 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51565029, 51165020); 甘肃省自然科学基金资助项目(145RJZA083)

作者简介: 丁雪兴(1964-), 男, 江苏苏州人, 博士生导师, 研究方向为流体动密封技术。E-mail: dingxx1@163.com

以及不同工况参数对其摩擦学性能的影响,进一步完善高压干气密封的摩擦特性。

1 试验部分

1.1 试件制备

采用干气密封常用的“硬碰硬”结构,其结构及装配示意图如图 1 所示。其中,上试件为刻有微米级深度的螺旋槽的动环(SiC),下试件为表面制备了 DLC 薄膜的静环(SiC)。根据几何结构参数,制备动环和静环,随后在动环表面利用激光打标机进行

刻槽,槽型选用工程常用的螺旋槽;同时,对静环表面进行 DLC 薄膜工艺处理。

静环 DLC 薄膜制备过程为^[17]:采用磁控溅射法,将静环(SiC)在磁控溅射物理气相沉积系统上完成表面 DLC 薄膜的制备(溅射靶材选用纯度为 99.99% 的石墨,溅射气体为纯度 99.99% 的 Ar)。首先用丙酮和无水乙醇各超声清洗 10 min,通风烘干,随后将试件放入真空室,抽真空至 10^{-4} Pa,通氩气至 5×10^{-1} Pa,用离子源结合偏压溅射对静环表面进行等离子体清洗去除表面氧化层;当真空度达

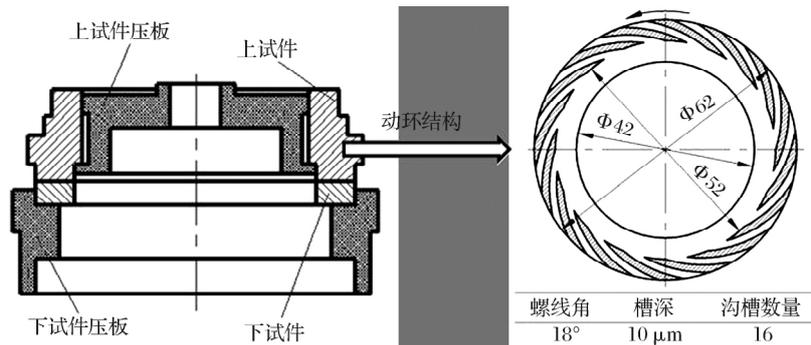


图 1 试件安装及动环结构示意图

Fig.1 Test specimen installation and rotating seal ring sketch map

到 3×10^{-1} Pa 时开始薄膜制备。

1.2 试验设备

选用 HDM-2 型端面摩擦磨损试验机进行试验,该试验机采用上试件旋转,下试件静止的端面接触滑动摩擦形式。上试件通过动环压板和紧固螺钉安装在主轴中心螺孔中,下试件安装在专用下试件盒中,并用静环压板固定,下试件盒由球面轴承支撑,其结构示意图如图 2 所示。

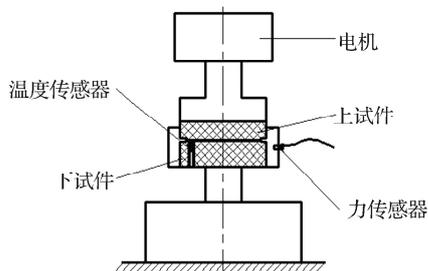


图 2 端面摩擦磨损试验机结构

Fig.2 End face friction wear testing machine structure chart

HDM-2 端面摩擦磨损试验机由试验系统和测试系统 2 部分组成。试验系统由主轴,上、下试件夹具、下试件盒、试验负荷加载装置、试验介质循环装置、试验介质加热与冷却装置等组成。测试系统主

要通过计算机和试验数据处理专用软件对载荷、转速、试验温度、摩擦力矩、摩擦系数等试验参数进行实时采集和处理,以数据图表形式给出统计试验结果。试验机主要技术指标如表 1 所列。此外,试验还用到了超声清洗机、烘干机和光学显微镜等仪器设备。

1.3 试验流程

试验在干摩擦条件下进行,根据前期的试验研究以及密封厂的经验值,干气密封在启动时端面间的比压一般为 0.1~0.8 MPa,转速为 300 r/min 左右,因此根据实际条件及密封环的大小选取 650 N、900 N、1 150 N 作为试验载荷,选取 150 r/min、300 r/min 和 500 r/min 作为试验转速。

选取 3 个相同的 DLC 薄膜环,每个环选择 1 个载荷,分别在 3 组转速下进行试验。首先对环进行清洗烘干,安装在试验机上,然后调试试验机并施加载荷与转速,开始试验。试验过程中观察计算机上数据的变化情况并记录,待摩擦系数稳定时(每次试验总时长约 5 min)停机,取出试件清洗烘干。9 组试验都结束后,将 3 个 DLC 薄膜环分别在光学显微镜上观测表面磨损情况。

表 1 试验机主要技术指标

Table 1 Main technical index of testing machine

项目名称	试验载荷	主电机功率	转速	下试样外侧面温度测量范围	油箱温度测控范围	摩擦力矩
技术参数	50~2 000 N	5.5 kW	0~5 800 r·min ⁻¹	室温~200 ℃	室温~150 ℃	0~17.3 N·m
示值误差	±0.5%			±1 ℃	±5 ℃	±0.5%

2 结果与讨论

2.1 不同工况下的摩擦系数测试分析

图 3 为不同转速与载荷下平均摩擦系数的变化情况。由图 3 中可以看出,当转速一定,载荷由 650 N 增大到 1 150 N 时,平均摩擦系数均在减小。当载荷由 650 N 增大到 900 N 时,150 r/min 转速下平均摩擦系数由 0.094 降低到了 0.080,降低的较快;而 300 r/min 和 500 r/min 时降低的较慢。载荷由 900 N 增大到 1 150 N 时,3 个转速下平均摩擦系数降低的幅度大致相同。这是由于摩擦主要发生在一部分的接触点上,随着载荷的增加,接触点数目和各接触点的尺寸增多,从而加速了 DLC 薄膜表面的石墨化进程以及石墨化程度,使得摩擦系数降低。

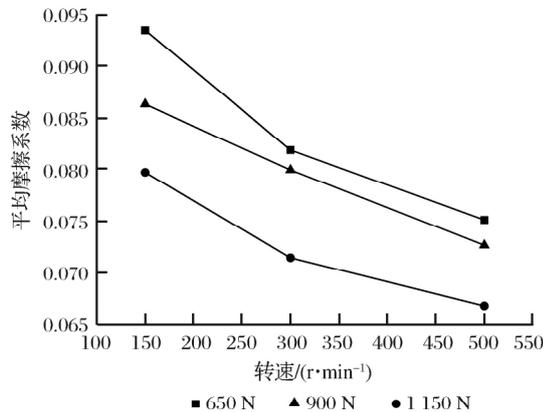


图 3 摩擦系数随载荷与转速的变化

Fig.3 Tendency chart of friction coefficient with the loading and rotate speed

当载荷不变,转速由 150 r/min 增大到 500 r/min 时,平均摩擦系数也在减小。由于转速越快,单位时间圆周方向摩擦的次数越多,且摩擦产生的热量大于热量的扩散,导致 DLC 薄膜表面的石墨化程度越高,因而摩擦系数就会降低。但与增大载荷时的摩擦过程相比,增大转速时摩擦系数降低的相对较大,这是由于增大载荷会导致实际接触面积的增加,但对温度的影响较小,因此载荷对摩擦系数的影响没有转速明显。

2.2 不同工况下的端面温升测试分析

不同转速与载荷下端面温升的变化情况如图 4

所示。从图 4 可看出,端面温升随着转速与载荷的增大而增大。当载荷不变时,转速由 150 r/min 增大到 300 r/min 时端面温升增大的较快,而在 300 r/min 到 500 r/min 时,温升增大变慢。同样,当转速不变时,载荷由 650 N 增大到 900 N 时,端面温升增大的要比由 900 N 到 1 150 N 过程快。

这是由于增大载荷,端面间的接触面积变大;而增大转速,单位时间圆周方向摩擦的次数越多。这都使得摩擦产生的热量增多,从而端面温升增大。但随着摩擦过程的进行,摩擦力在逐渐减小,DLC 薄膜的石墨化程度越高,而螺旋槽的动压效应也逐渐产生,使得端面摩擦状态发生了变化。同时,摩擦生热与周围空气之间换热接近平衡。因此,端面温升在后期变化较为平缓。

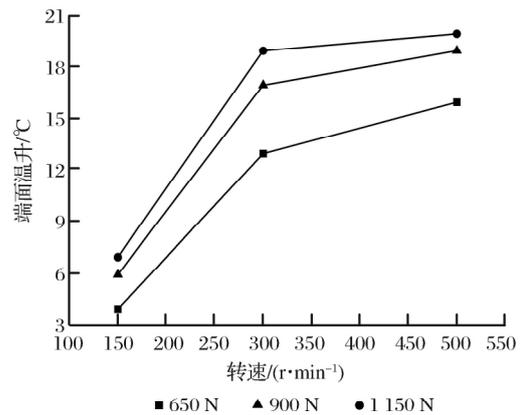


图 4 端面温升随转速与载荷的变化

Fig.4 Tendency chart of end face temperature rise with rotate speed and loading

2.3 磨损表面形貌分析

将试验结束后的 DLC 薄膜环进行表面形貌测量,在 3 个环表面的内径区域,用光学显微镜进行测量。

测量结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着载荷的增大,表面的磨痕越来越多,磨损越严重。这是由于载荷较小时,摩擦副接触面间实际接触面积小,接触主要为微凸体接触,微凸体之间存在机械互锁作用,表面磨痕较少。而当载荷比较大时,薄膜表面和对磨件表面的微凸体均很快被磨平,其表面晶粒在较大的摩擦切应力作用下产生磨屑。在接触区

形成的磨屑积累,同时,摩擦过程中产生的热量以及粗糙峰对DLC薄膜引起的压力导致表面磨痕增多,

磨损严重。但是,从图5中也可以发现,表面磨痕增加的速率不高,也没有明显的磨损和破坏,说明DLC

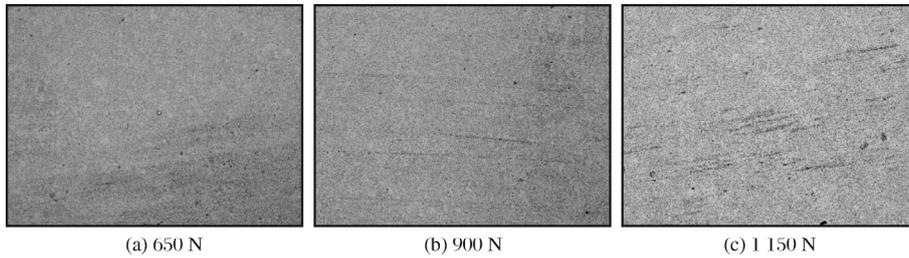


图5 DLC薄膜密封环在650 N、900 N和1150 N的磨损表面形貌

Fig.5 Wear surface topography of dlc membrane with a force of 650n,900n and 1150n

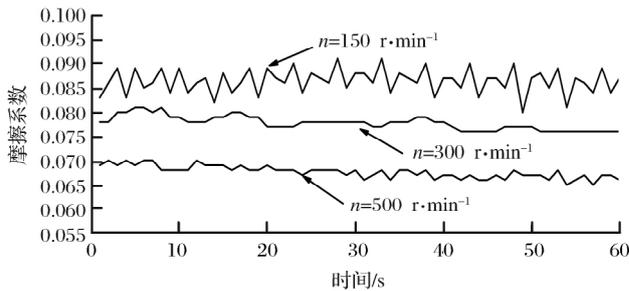
薄膜对端面的摩擦性能有很大的改善。

2.4 摩擦系数波动分析

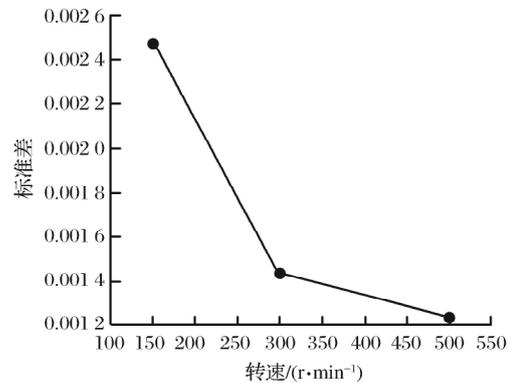
为了更好地反映摩擦系数的波动幅度,引入了

反映摩擦系数离散程度的指标-标准差如图6所示。

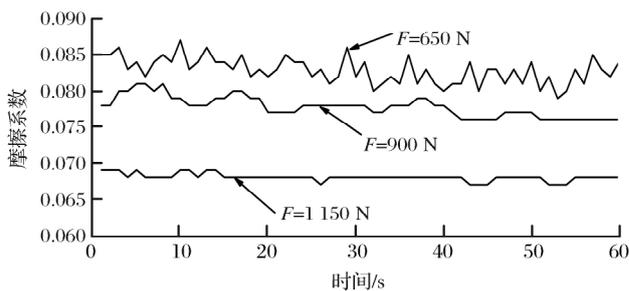
选取摩擦过程中的一段进行分析,图6(a)为载荷900 N时,不同转速下的摩擦系数动态变化;图6(c)



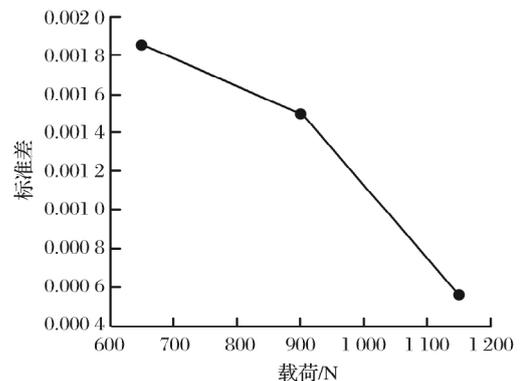
(a) 900 N 时, 不同转速下的摩擦系数动态变化图



(b) 900 N 时, 不同转速下摩擦系数的标准差



(c) 300 r/min 时, 不同载荷下的摩擦系数动态变化图



(d) 300 r/min 时, 不同载荷下摩擦系数的标准差

图6 摩擦系数波动分析

Fig.6 Analysis graphics of friction coefficient

为转速300 r/min时,不同载荷下的摩擦系数动态变化;图6(b)和图6(d)分别为图6(a)和图6(c)所对应的载荷与转速下摩擦系数的标准差。

由图6(a)和图6(b)可以看出,在转速由150 r/min增大到500 r/min时,标准差从0.00247

降低到了0.00124。这说明随着转速的增大,摩擦系数的波动幅度越来越小。从图6(c)和图6(d)可以看出,载荷由650 N增加到1150 N时,标准差从0.00179降低到了0.0005。这说明随着载荷的增大,摩擦系数的波动幅度也在减小,即摩擦系数越来越

越稳定。

摩擦系数的波动幅度越小,说明摩擦状态越稳定,从而减少了干气密封两环间的碰磨和不对中,减轻环的磨损,提高了端面的摩擦学性能。摩擦系数的波动幅度影响着摩擦振动,从而也影响着密封失效,因此在后续的研究中,有必要将摩擦系数的波动幅度与摩擦振动进行更深入的分析。

3 结论

针对高压干气密封副“硬对硬”所暴露的缺陷,提出表面镀膜技术,通过磁控溅射法在干气密封静环表面制备了 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 DLC 薄膜,利用端面摩擦磨损试验机进行试验,研究了不同工况参数下密封环表面 DLC 薄膜的摩擦磨损特性,同时采用光学显微镜观察了 DLC 薄膜环的磨损表面形貌。试验结果表明:

(1) DLC 薄膜静环在干气密封“硬碰硬”结构中体现了良好的摩擦学特性,由于高载荷和转速加快了 DLC 薄膜表面的石墨化进程与石墨化程度,因此密封环表面的摩擦系数随着载荷与转速的增加而降低,端面温升则随着载荷与转速的增加而升高。

(2) 随着载荷与转速的增大,摩擦系数的波动幅度逐渐减小,摩擦状态更加稳定,减少了干气密封两环间的碰磨和不对中,减轻了环的磨损。

(3) DLC 薄膜的高硬度特性使得其在摩擦磨损试验中表面磨损不严重,随着载荷的增大,其表面磨痕稍有增多。但是,表面擦痕增加的速率不高,也没有明显的磨损和破坏,说明 DLC 薄膜对端面的摩擦性能有很大的改善。

因此,在干气密封环表面制备 DLC 薄膜可以改善端面摩擦磨损性能,这为“硬对硬”结构的干气密封失效问题提供了一定的理论指导,提高了工程实际应用价值。

参考文献:

[1] 刘飞,朱维兵.干气密封发展概况及其特性分析[J].机械设计与制造,2010,48(11):261-263.
[2] Cao H, Liu Y, Lin C J. Failure Analysis and Transformation of Hydrogen Compressor Dry Gas Seal[C]// Applied Mechanics

and Materials. Trans Tech Publications, 2013.

- [3] 李双喜,宋文博,张秋翔,等.干式气体端面密封的开启特性[J].化工学报,2011,62(3):766-772.
[4] Su H, Rahmani R, Rahnejat H. Thermo Hydrodynamics of Bidirectional Groove Dry Gas Seals with Slip Flow[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 110: 270-284.
[5] 胡继卫,张学信.透平氨压缩机组干气密封磨损原因分析和解决措施[J].化肥工业,2017,44(1):35-37.
[6] 彭旭东,刘坤,白少先,等.典型螺旋槽端面干式气体密封动压开启性能[J].化工学报,2013,64(1):326-333.
[7] Zou M, Dayan J, Green I. Feasibility of Contact Elimination of a Mechanical Face Seal through Clearance Adjustment[J]. Transactions of the ASME-A-Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(3): 478-484.
[8] 高志,林允滨,黄伟峰,等.干气密封启动过程中的声发射信号特征[J].清华大学学报:自然科学版,2013,53(3):319-322, 329.
[9] 王泽平,毕晓明.循环氢压缩机高压干气密封“硬对硬”摩擦副国产化技术分析[J].化工设备与管道,2015,52(3):57-61.
[10] 张而耕,陈强.类金刚石涂层的研究进展及其应用[J].粉末冶金工业,2015,25(5):60-65.
[11] Vercammen K, Van Acker K, Vanhulsel A, et al. Tribological Behaviour of DLC Coatings in Combination with Biodegradable Lubricants[J]. Tribology International, 2004, 37(11): 983-989.
[12] 白越,黄敦新,曹萍,等.类金刚石薄膜在干摩擦、油和脂润滑条件下的摩擦学性能分析[J].真空科学与技术学报,2011,31(5):555-559.
[13] Wang Y, Wang L, Xue Q. Improvement in the Tribological Performances of Si_3N_4 , SiC and WC by Graphite-like Carbon Films under Dry and Water-lubricated Sliding Conditions[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(8): 2770-2777.
[14] Carroll B, Gogotsi Y, Kovalchenko A, et al. Effect of Humidity on the Tribological Properties of Carbide-derived Carbon (CDC) Films on Silicon Carbide[J]. Tribology Letters, 2003, 15(1): 51-55.
[15] Field S K, Jarratt M, Teer D G. Tribological Properties of Graphite-like and Diamond-like Carbon Coatings[J]. Tribology International, 2004, 37(11): 949-956.
[16] 李红轩,徐洮,陈建敏,等.直流射频等离子体增强化学气相沉积类金刚石碳薄膜的结构及摩擦学性能研究[J].摩擦学学报,2004,24(1):1-5.
[17] 王涛,刘磊,陈果,等.高质量类金刚石薄膜的制备与性能分析[J].原子能科学技术,2017,59(6):1145-1152.

Friction Test Analysis on the Dry Running Gas Seal End Face Based on DLC Membrane

Ding Xuexing, Jin Haijun, Zhao Haihong, Yu Shurong, Zhang Weizheng

(College of Petrochemical Industry, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract In the application of dry running gas seal, the friction pair design of 'Glass to Glass' developed in order to decrease the deformation of dynamic and static rings, but abrasion on end face and seal failure happen. As a consequence, diamond-like carbon film (DLC) made in the surface of stationary seal rings is vital for the improvement of operation of dry running gas seal and friction performance. A 2 μm DLC membrane was made in the surface of stationary seal rings through magnetron sputtering, whereafter, friction wear testing machine was used to analyze friction coefficient, temperature rise and fluctuation of friction coefficient of DLC membrane on the surface of stationary real rings under different working conditions. And optical microscope was used to observe morphology of wear surface of stationary seal ring. The test results show that: With the increase of rotation speed and loading, the temperature rise increased, and friction coefficient decreased and fluctuation range also gradually reduced, and kept a stability in a relatively short time. This is due to graphitization and high lubricity of the surface of DLC membrane. At the same time, as a loading increases, there was not any serious surface scratch, which shows that DLC membrane improved the friction characteristics between end faces, and reduced the destruction of the surface of dynamic and stationary seal rings. Testing results have a certain guidance for the improvement of the friction characteristics of the dry running gas seal end faces.

Key words Dry running gas seal; DLC membrane; Frictional wear; Temperature rise; Fluctuation