

工况周期波动下深海推进器密封摩擦副性能研究

徐理善¹, 陆俊杰¹, 宋慧²

(1. 浙大宁波理工学院, 315010, 浙江宁波; 2. 中国科学院海洋材料及相关技术重点实验室, 315201, 浙江宁波)

摘要: 针对深海推进器用机械密封在工况周期波动下磨损失效现象,在机械密封PV试验机上进行拟实工况测试,建立不同材质摩擦副配对在工况周期波动和定工况下的对照性试验,测试摩擦副实时摩擦系数、形貌演变、表面磨损等数据。试验结果表明:工况周期波动下的SSiC-M106K摩擦系数振幅频率高于恒定工况,且表面粗糙度由 $0.026\text{ }\mu\text{m}$ 上升至 $1.08\text{ }\mu\text{m}$,产生的磨粒对M106K表面造成二次磨损;另一方面,在3种不同材质的摩擦副配对中,SSiC-WC在工况周期波动下的摩擦系数最小且始终稳定在 $0.012\sim 0.027$ 范围。经SEM电镜测试后发现:以SSiC为动环的SSiC-WC摩擦副磨损程度较小,未出现犁沟效应,而SSiC-M106K表面出现明显磨痕,这是由于在滑动接触过程中磨料在石墨表面转移而导致磨损加剧。因此,SSiC-WC的摩擦配副更适应工况周期波动的服役环境。

关键词: 深海推进器;工况波动;机械密封;材料配副;摩擦;磨损

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202201012 **文章编号:** 0253-987X(2022)01-0104-09



OSID 码

Study on the Performance of Seal Friction Pair of Deep-Sea Propeller under Periodic Fluctuation of Working Condition

XU Lishan¹, LU Junjie¹, SONG Hui²

(1. Zhejiang University Ningbo Institute of Technology, Ningbo, Zhejiang 315010, China; 2. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China)

Abstract: Aiming at the wear failure phenomenon of mechanical seal for deep-sea propeller under periodic fluctuation, pseudo-real condition tests were carried out on the mechanical seal PV testing machine, and comparative tests of friction pairs of different materials under periodic fluctuation and fixed working condition were conducted to obtain the real-time friction coefficient, morphology evolution, surface wear and other data of the friction pairs. The test results show that the amplitude frequency of the SSiC-M106K pair's friction coefficient under periodic fluctuation is higher than that under constant condition, the surface roughness increases from $0.026\text{ }\mu\text{m}$ to $1.08\text{ }\mu\text{m}$, and the resulting wear particles cause secondary wear on the surface of M106K material. On the other hand, among the friction pairs of three different materials, the friction coefficient of SSiC-WC pair under periodic fluctuation is the smallest and always keeps in the range from 0.012 to 0.027 . SEM observation shows that the wear degree of the SSiC-WC friction pair with SSiC as the moving ring is low, and there is no ploughing effect, but there are

收稿日期: 2021-07-18。 作者简介: 徐理善(1996—)男,硕士生;陆俊杰(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905480);宁波市自然科学基金资助项目(2019A610161);固体润滑国家重点实验室基金资助项目(LSL-1912)。

网络出版时间: 2021-09-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210901.1732.005.html>

obvious wear marks on the surface of SSiC-M106K pair, which is due to the transfer of abrasive on the graphite surface in the process of sliding contact. Therefore, the friction pair of SSiC-WC is more suitable for the service environment with periodic fluctuation of working condition.

Keywords: deep-sea propeller; working condition fluctuation; mechanical seal; material pair; friction; wear

深海推进器是我国建设海洋强国的战略性装置^[1],对海洋资源的探索具有关键性作用。设备的旋转轴用机械密封直接影响深海推进器的密封效果、热控效率以及设备可靠性运行。如图 1 所示,深海推进器在航行时会连续下潜、上浮,海水压力以及航行速度都会对深海推进器密封性能影响较大,使其压力和转速都会受到影响和相应的改变。为了降低转轴机械密封承载压力,导致采用新型的压力补偿机构来平衡内外侧压差^[2]。但是,由于压力补偿装置和深海洋流波动,使得深海推进器机械密封处于端面比压波动和主轴转速波动的服役环境中,容易造成动静环端面变形使密封间隙液膜分布不均^[3-5],从而引起密封失效以及大幅泄漏,最终令深海推进器无法正常工作。

端面摩擦副材料和几何形状的静态信息与不同工况下试验测得的温度、扭矩、摩擦状态等动态信息相结合,综合分析端面流体膜和摩擦状态的变化情况,因此获得机械密封性能和使用寿命的影响规律^[15]。Zhao 等基于混合润滑损失模型,通过正交试验模拟了试验台结构参数和工况参数对动摩擦系数和磨损的交叉影响^[16-17]。另一方面,学者发现环表明形性处理对摩擦性能具有较大影响。例如,Adjemout 等利用激光开槽技术加工螺旋槽、球形、微窝型等织构来减小摩擦副间的摩擦磨损^[18-21]。尽管国内外专家学者在多领域下对机械密封性能进行了大量测试^[22-24],但是都围绕在恒定工况下的端面接触行为和摩擦状态演变规律分析,并未涉及变工况对摩擦副整体服役性能的探索,尤其是在速度与压力补偿机制下的机械密封领域更为缺乏。

因此,本文重点对工况周期波动下的机械密封摩擦副进行测试研究。基于机械密封 PV 试验机,对碳化硅(SSiC)与石墨(M106K)配副材料在工况周期波动与恒定工况下进行实时摩擦系数变化规律、表面温升速率以及形貌演变等试验数据的比较分析。随后,开展 3 种不同材质摩擦副配对下的摩擦性能规律研究,试图探寻深海推进器在工况波动下摩擦学性能优异的配副模式,为机械密封长寿命高可靠性提供依据。

1 试验装置与样件

1.1 机械密封 PV 试验机概述

本文采用 MGF-2 型机械密封 PV 试验机,如图 2 所示。该试验机由主轴,上、下试件夹具,上、下试件盒,加载装置,转动装置、带压流体循环装置,以及加热与冷却循环装置等组成。该试验机主要由传动系统、加载系统、带压流体循环系统以及测试系统组成。①传动系统:高速电机及主轴采用一体式结构,变频调速三相异步交流电动机→同步带和带轮→主轴→动环(摩擦盘)。②加载系统:试验机采用弹簧加载系统,实现试验力的自动加载与卸载。③带压流体循环系统:采用恒压变量水泵系统,实现自动控制试验水循环的压力及流量控制。④测试系统:试

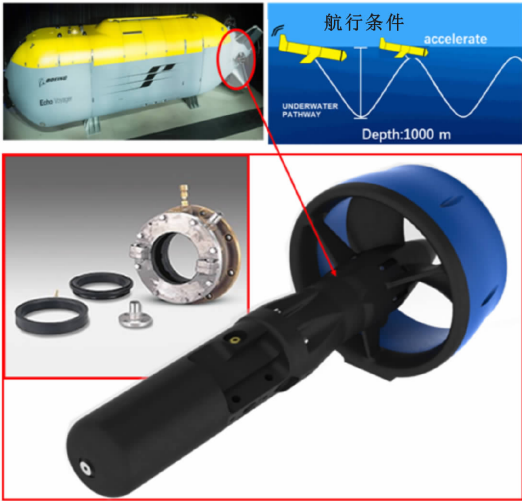


图 1 深海推进器与机械密封示意图

Fig.1 Schematic diagram of deep-sea propeller and mechanical seal

针对机械密封端面摩擦问题,国内外专家做了大量实验研究,涉及密封泄漏率、端面温升、PV 值、转矩、磨损率等性能参数变化规律^[6-11]。Tournier 等通过端面温度变化规律来判断液膜状态^[12];贾谦等考虑了涡轮泵密封件螺旋槽参数对机械密封性能的影响^[13];Lee 等发现密封环的周期性接触会产生高频谐振荡并最终导致密封环的磨损或瞬间失效^[14];胡小云通过采用信息融合技术,将机械密封

验过程中,数据采集在上试件和下试件安装传感器测量试验机转速与所施加载荷,将电信号进行放大后转换成物理信号并传输到外部设备。试验中每秒采集一次数据,并通过转换器等设备来实现数据显示。由于摩擦系数无法通过传感器直接测量,故试验中通过直接测量摩擦扭矩,再由摩擦扭矩换算出摩擦系数。

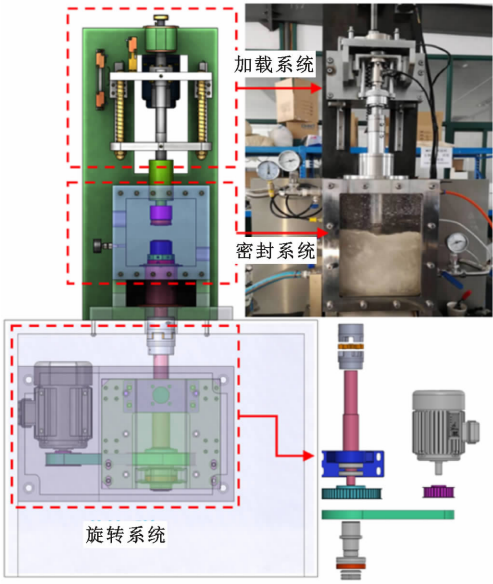


图 2 机械密封 PV 试验机

Fig. 2 Mechanical seal PV testing machine

上试件通过上压板和紧固螺钉装在主轴中心螺孔;下试件安装在专用下试件盒中,并用下压板固定。机械密封在运转时动环旋转,静环贴合动环保持静止,在试验台装置中,通过上试件(静环)加载,下试件(动环)旋转,令上下试件形成面接触下的旋

转摩擦,以此来模拟实际的机械密封动、静环的运行状态,并且在密封腔中通入带压流体,采用高强度可视化工程塑料制成,便于观察泄漏情况和密封结构运转情况,模拟机械密封在缓冲液下的真实运行环境。另一方面,对载荷、转速、温度以及摩擦副配对材料等参数进行调整和选择,使模拟的工况变化范围在机械密封 PV 试验机最高载荷 4 kN、最高转速 9 000 r/min、温度 0~80 ℃ 的参数范围内。

1.2 试验样件

深海推进器机械密封的常规密封配对材料为 SSiC(无压烧结碳化硅)与 M106K(石墨)^[25],但是由于机械密封服役环境存在工况周期波动,动环与静环形成的摩擦副长期处于接触式运行,导致机械密封提前失效。

为探寻深海推进器在工况波动下摩擦学性能优异的配副模式,本次试验采用 3 种配对方式:常规的 SSiC-M106K(无压烧结碳化硅与石墨);SSiC-WC(无压烧结碳化硅与无压烧结碳化硅);WC-SSiC(碳化钨与无压烧结碳化硅)。试件的结构尺寸如图 3 所示,试件的物性参数如表 1 所示。

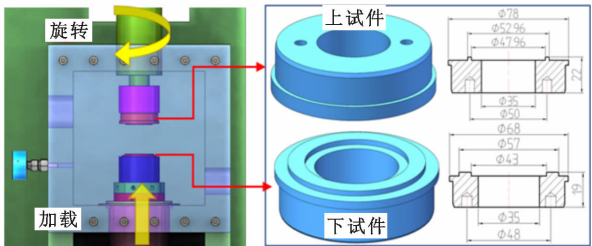


图 3 机械密封试件尺寸及安装图

Fig. 3 Dimensions and installation drawing of mechanical seal test pieces

表 1 材料物性参数表

Table 1 Physical property parameters of materials

材料	密度 $\rho/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	导热系数 $\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	弹性模量 E/GPa	热膨胀系数 $\alpha_T/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	泊松比 ν	粗糙度 $R_s/\mu\text{m}$
M106K	1.68	148.00	13.79	4.9	0.200	0.026
SSiC	3.10	7.96	400.00	4.1	0.140	0.019
WC	15.63	65.00	719.00	6.9	0.275	0.017

2 试验方案与流程

2.1 试验方案

某型号深海推进器的运行参数^[25]如表 2 所示,从表中可以发现,航速在 1~5 m/s 波动,压力在 0.5~5.3 MPa 波动,从而导致深海推进器用机械密封服役环境为工况周期波动而并非恒定工况,工

况在变化过程中,转速和压力都随着时间发生改变,使流体膜一直波动,无法形成稳定且有效的流体动压膜,导致动、静环产生接触而失效。

深海推进器采用内装平衡型非接触式密封结构^[4],密封内径与外径如表 2 所示,由于试验台运行以载荷和转速为控制对象,经过式(1)和式(2)转换,将深海推进器压力转化为端面所承受载荷。同时,

表 2 某深海推进器用机械密封运行工况参数^[25]

Table 2 Operating parameters of mechanical seal for a deep-sea propeller

参数	数值
最大深度 h/km	1
喷水推进速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1~5
工作压力 p_c/MPa	0.5~5.3
动环内径 $D_{1\text{in}}/\text{mm}$	43
动环外径 $D_{1\text{out}}/\text{mm}$	57
静环外径 $D_{2\text{out}}/\text{mm}$	52.96
静环内径 $D_{2\text{in}}/\text{mm}$	47.96

将航行速度转化为主轴转速,得到密封载荷范围为 0.2~2.1 kN、转速范围为 1 000~2 000 r/min,样件根据表 2 中密封结构尺寸进行加工设计。

端面承受载荷为

$$F_{\text{cmin}} = \frac{\pi}{4}(D_{2\text{out}}^2 - D_{2\text{in}}^2)p'_c = 0.2 \text{ kN} \quad (1)$$

$$F_{\text{cmax}} = \frac{\pi}{4}(D_{2\text{out}}^2 - D_{2\text{in}}^2)p''_c = 2.1 \text{ kN} \quad (2)$$

本次试验分为 2 组。

(1)试验分组方案一:工况周期波动与定工况下常规材料 SSiC-M106K 摩擦副试验。以 SSiC-M106K 为试验对象,在工况周期波动下载荷 0.2~2.1 kN、转速 1 000~2 000 r/min 范围内和定工况参数为 1 kN 和 2 000 r/min 的条件下进行模拟测试,测量实时摩擦系数和表面形貌等试验数据。

(2)试验分组方案二:不同材料的摩擦副配对试验。以工况周期波动下 SSiC-M106K、SSiC-WC 和 WC-SSiC 为试验对象,工况周期波动分别通过定速变载、定载变速和变载变速进行模拟测试,测量实时摩擦系数和表面形貌等试验数据。

2.2 试验流程

2.2.1 定工况试验流程

(1)在试验机上输入相关设定参数,主要包括试验组对材料编号,试验件密封端面内径、外径,试验启动转速,根据深海推进器平均航行时间接近 1 h 的工况条件,结合试验台设备以及试验周期,设定密封环运行时间为 2.5 ks,并设定扭矩、温度、最大加载力等。

(2)正确安装试验件,检查密封环浮动性。

(3)预加载力 50~80 N,使动静环端面贴合后加载力调零,继续加载至试验要求值 0.2 kN,进行气密性检查。

(4)气密性检查合格后,将密封腔循环注入水,

在 200 r/min 开始运转后手动加速至 2 000 r/min,随后自动增大加载力至 2.1 kN,观察摩擦扭矩、摩擦系数等。

2.2.2 工况周期波动试验流程

(1)在试验机上输入相关设定参数,主要包括试验组对材料编号,试验件密封端面内径、外径,试验启动转速,根据深海推进器平均航行时间接近 1 h 的工况条件,结合试验台设备以及试验周期,设定密封环运行时间为 2.5 ks,并设定扭矩、温度、最大加载力等。

(2)正确安装试验件,检查密封环浮动性。

(3)预加载力 50~80 N,使动静环端面贴合后加载力调零,继续加载至试验要求值 0.2 kN,进行气密性检查。

(4)定速变载试验。气密性检查合格后,将密封腔循环注入水,在 2 000 r/min 开始运转,随后自动增大加载力至 2.1 kN,并逐步自动降低加载力至 0.2 kN,观察摩擦扭矩、摩擦系数等。

(5)定载变速试验。气密性试验合格后,将密封腔循环注入水,在 1 000 r/min 开始运转,随后自动提升速度至 2 000 r/min,并逐渐手动降低转速至 1 000 r/min,观察摩擦扭矩、摩擦系数等。

(6)变速变速试验。气密性试验合格后,将密封腔循环注入水,在 1 000 r/min 开始运转,随后自动提升速度至 2 000 r/min,同时自动增大加载力至 2.1 kN,然后通过手动降低转速至 1 000 r/min,自动降低加载力至 0.2 kN,观察摩擦扭矩、摩擦系数等。

3 结果分析与讨论

3.1 工况周期波动与定工况下 SSiC-M106K

摩擦系数

在相同的试验环境下,对 SSiC-M106K 配对副分别进行了加载加速和降载降速的工况变化,载荷在 0.2~2.1 kN、转速在 1 000~2 000 r/min 范围内的共同波动工况,以及载荷为 1 kN、转速为 2 000 r/min 的恒定工况下的摩擦系数如图 4 所示。在工况周期波动下,摩擦系数先波动上升,然后逐渐下降,最小达到了 0.016。在定工况条件下,摩擦系数从启动开始增加到 0.137,然后保持稳定,波动幅度越来越小,平均值为 0.123。通过对比 2 种不同工况下的摩擦系数,可以看到定工况下摩擦系数平稳波动,工况周期波动在连续不稳定环境中振荡较大,极易对摩擦副表面造成损伤。

对工况周期波动和定工况下的 M106K 进行表

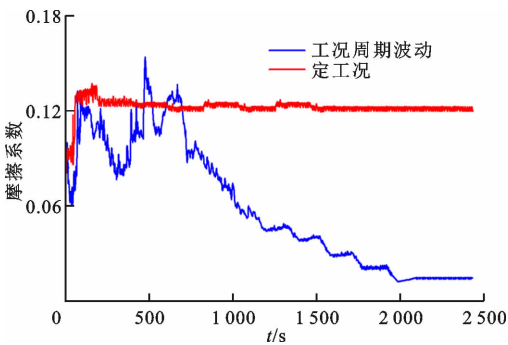
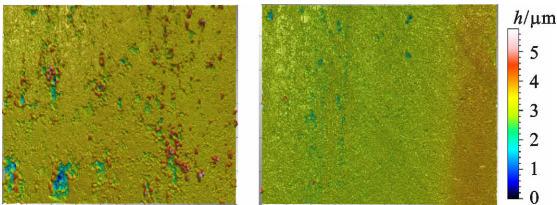


图 4 工况周期波动与定工况下 SSiC-M106K 配对副摩擦系数

Fig. 4 Friction coefficient of the SSiC-M106K pair under periodically fluctuating and constant conditions

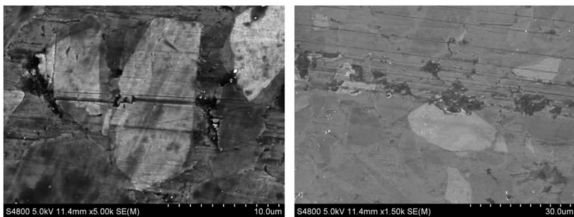
面形貌和 SEM 表面磨损测试,如图 5 和图 6 所示。工况周期波动下的密封试件 M106K 的粗糙度由试验初的 $0.026\text{ }\mu\text{m}$ 增大到了 $1.08\text{ }\mu\text{m}$,而定工况下的粗糙度由 $0.026\text{ }\mu\text{m}$ 增大到了 $0.254\text{ }\mu\text{m}$,说明工况周期波动下的摩擦副表面形貌较为恶劣。另一方面,通过电镜图分析发现:工况周期波动下的 M106K 表面粗糙峰面已被磨平,表面呈现出明显的磨损现象,主要为磨粒磨损,但是定工况下的 M106K 磨损程度轻微且痕迹浅。这是由于工况周期波动下的 SSiC-M106K 摩擦副出现波动,造成石墨表面出现磨粒并存储在摩擦副界面,造成二次磨损,进一步加剧摩擦表面磨损。因此,工况周期波动对摩擦副表面损伤的影响不可忽视。



(a) 工况周期波动 (b) 定工况

图 5 工况周期波动与定工况下 M106K 表面形貌图

Fig. 5 Surface morphology of M106K under periodically fluctuating and constant conditions



(a) 工况周期波动 (b) 定工况

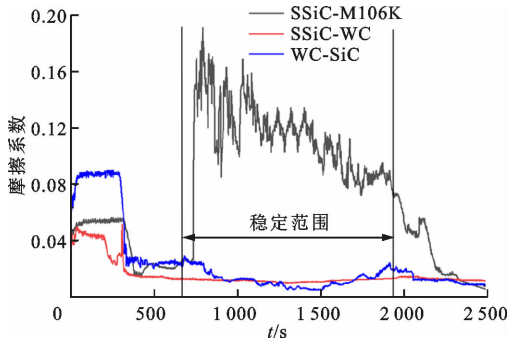
图 6 工况周期波动与定工况下 M106K 表面磨损图

Fig. 6 Surface wear diagram of M106K under periodically fluctuating and constant conditions

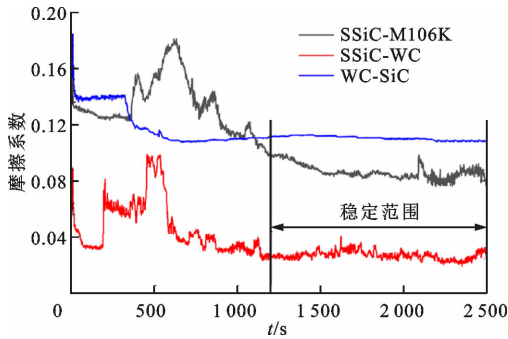
3.2 工况周期波动下不同材料配对的摩擦副试验

3.2.1 工况周期波动下不同材料配对的摩擦系数以工况周期波动下 SSiC-M106K、SSiC-WC 和 WC-SSiC 为试验对象,工况周期波动通过定速变载,定载变速和变载变速进行模拟测试,如图 7 所示。

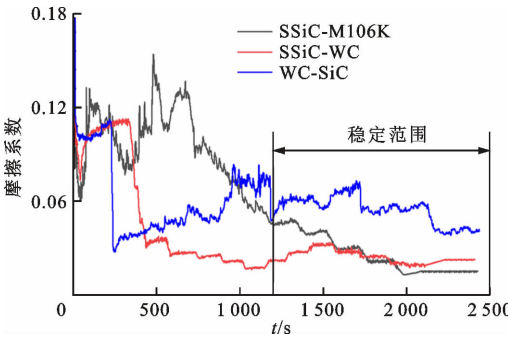
如图 7a 所示,当转速保持 $2\,000\text{ r/min}$,连续波动载荷 $0.2\text{—}2.1\text{—}0.2\text{ kN}$ 时,SSiC-M106K 配对副的摩擦系数 $0.109\,9$ 比 SSiC-WC 和 WC-SiC 配对副高出约 10 倍,其中 SSiC-WC 和 WC-SiC 配对副的摩擦系数先上升后降低并逐渐保持平稳,在载荷升至 1.2 kN 后上述 2 种配对的摩擦副长时间停留在



(a) 定速变载



(b) 定载变速



(c) 变载变速

图 7 工况周期波动下不同材料配对摩擦系数变化规律

Fig. 7 Variation rule of friction coefficient of different materials under periodic fluctuations at working condition

0.01 附近波动,而 SSiC-WC 配对副的摩擦系数随着载荷波动都呈现出较为稳定的趋势,摩擦系数维持在 0.012。这是由于因为属于硬与软接触,SSiC-WC 和 WC-SiC 端面间比 SSiC-M106K 更快地形成一层润滑液膜,能在更短的时间内对载荷波动做出调整,而且在 SSiC-WC 配对进行摩擦试验中 WC 自身硬度与强度都高于 SSiC,更适宜承受高载荷。因此,SSiC-WC 配对副在定速变载下的优势更大。

如图 7b 所示,当载荷稳定在 1 kN 不变时,转速从 1 000 r/min 增加至 2 000 r/min 后持续减小至 1 000 r/min 的波动情况下,SSiC-WC 配对副的摩擦系数变化规律与 SSiC-M106K 的类似,但前者的摩擦系数变化区间在 0.03~0.09 之间,明显低于后者,而 WC-SiC 配对副的摩擦系数表现为先缓慢上升后逐渐减小到 0.1 左右并维持稳定状态,摩擦系数明显高于 SSiC-M106K 和 SSiC-WC。另一方面,通过比较转速下降阶段稳定范围内的摩擦系数变化情况,SSiC-WC 配对副的平均值为 0.026 9,明显低于其他 2 种配对方式。这是由于 SSiC-WC 摩擦副表面能快速形成液膜,导致其摩擦系数小于 SSiC-M106K;与此同时,SSiC-WC 中的 SSiC 为动试件(转速),相比 WC 来说转动惯量小,从而 SSiC-WC 在定载变速下的摩擦性能优势更大。

从图 7c 中可以看出,当载荷在 0.2~2.1 kN 和转速在 1 000~2 000 r/min 范围内共同波动时,加速加载阶段 SSiC-M106K 的摩擦系数一直在 0.005~0.016 范围内波动变化,而 SSiC-WC、WC-SSiC 配对副的摩擦系数都是先增加后急速减小至 0.025。随后,SSiC-WC 的摩擦系数继续缓慢下降,而 WC-SSiC 的摩擦系数则缓慢上升。这是由于 WC 在作为动环过程中刚度与惯性较大,导致摩擦副在接触过程中存在明显的摩擦振动;在降速降载时,SSiC-WC、WC-SSiC 配对副都是先增加后减小,而 SSiC-M106K 保持稳定下降。通过比较下降阶段稳定范围内的平均摩擦系数,SSiC-M106K 和 SSiC-WC 均为 0.024,但 WC-SiC 为 0.054。对比 3 种工况摩擦系数变化趋势可以发现,实际运行中转速对

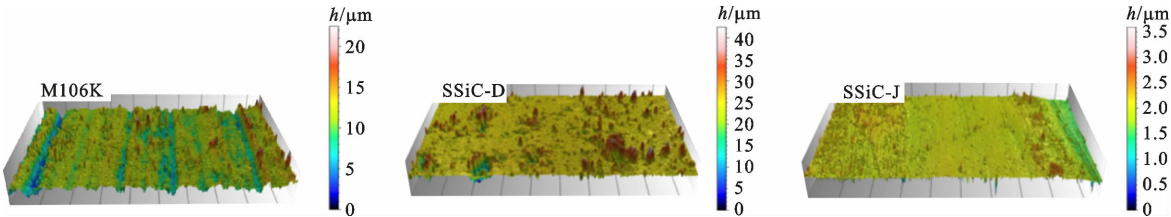
机械密封的影响程度占主导,转速的变化会减弱由于负载增大所引起的接触摩擦。综合来看,SSiC-WC 配对副的摩擦学性能优于其他 2 种。

3.2.2 工况周期波动与定工况下不同材料配对的表面磨损 针对工况周期波动下的不同摩擦副配对 SSiC-M106K、SSiC-WC 和 WC-SSiC 进行了形貌测试,通过观察材料的表面磨损形貌可知,动、静环中的软质材料表面更易磨损。提取了 SSiC-M106K 中的 M106K、SSiC-WC 中的 SSiC(标记为 SSiC-D)和 WC-SSiC 中的 SSiC(标记为 SSiC-J)结果,如图 8 所示,以及在表 3 中列出了上述 3 种材料的平均粗糙度。在工况周期波动下的定速变载、定载变速和变速变载下的 SSiC-D 粗糙度最小,表面形貌最平整,而 M106K 的粗糙度最大并且表面存在明显的不平整,从而推断出在工况周期波动下的机械密封摩擦副配对材料不适宜硬度较大的 SSiC 和自润滑性较好的 M106K 配对,应采用硬度和刚性均更好的 SSiC 与 WC 进行配对,其中 SSiC 作为摩擦副配对中的动试件,具有更好的减摩增润效果。

表 3 试验后密封试件表面平均粗糙度

Table 3 Average surface roughness of the seal specimen after test			
工况	$R_s/\mu\text{m}$		
	M106K	SSiC-D	SSiC-J
定速变载	1.330	0.554	0.644
定载变速	1.120	0.381	0.400
变速变载	0.885	0.259	0.350

针对工况周期波动后的不同摩擦副配对 SSiC-M106K、SSiC-WC 和 WC-SSiC 进行了电镜扫描,提取了 SSiC-M106K 中的 M106K、SSiC-WC 中的 SSiC 和 WC-SSiC 中的 SSiC,结果如图 9 所示。由图 9a 可知,在定速变载下,SSiC-D 的大部分表面磨损较轻,但 M106K 表面的磨损形式主要为磨粒磨损,沿微动方向出现了犁沟分布。这是因为 M106K 在运行时产生的大量磨屑聚集,同时载荷不断波动,造成二次磨粒磨损。SSiC-J 的磨损程度介于 SSiC-



(a)定速变载

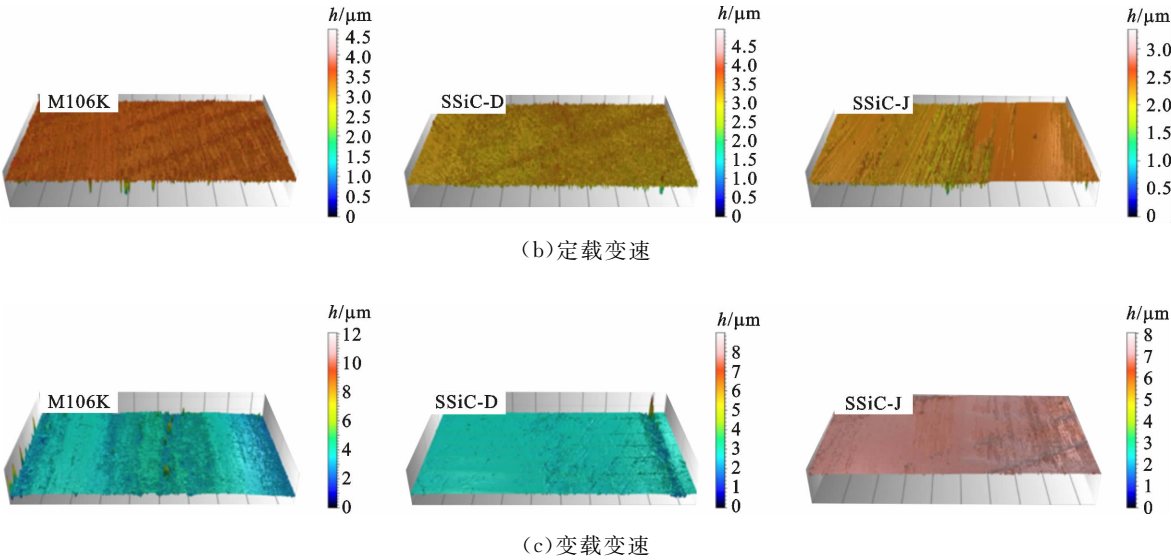


图 8 工况周期波动下不同材料配对副的形貌图

Fig. 8 Morphology of different material pairs under periodic fluctuation of working condition

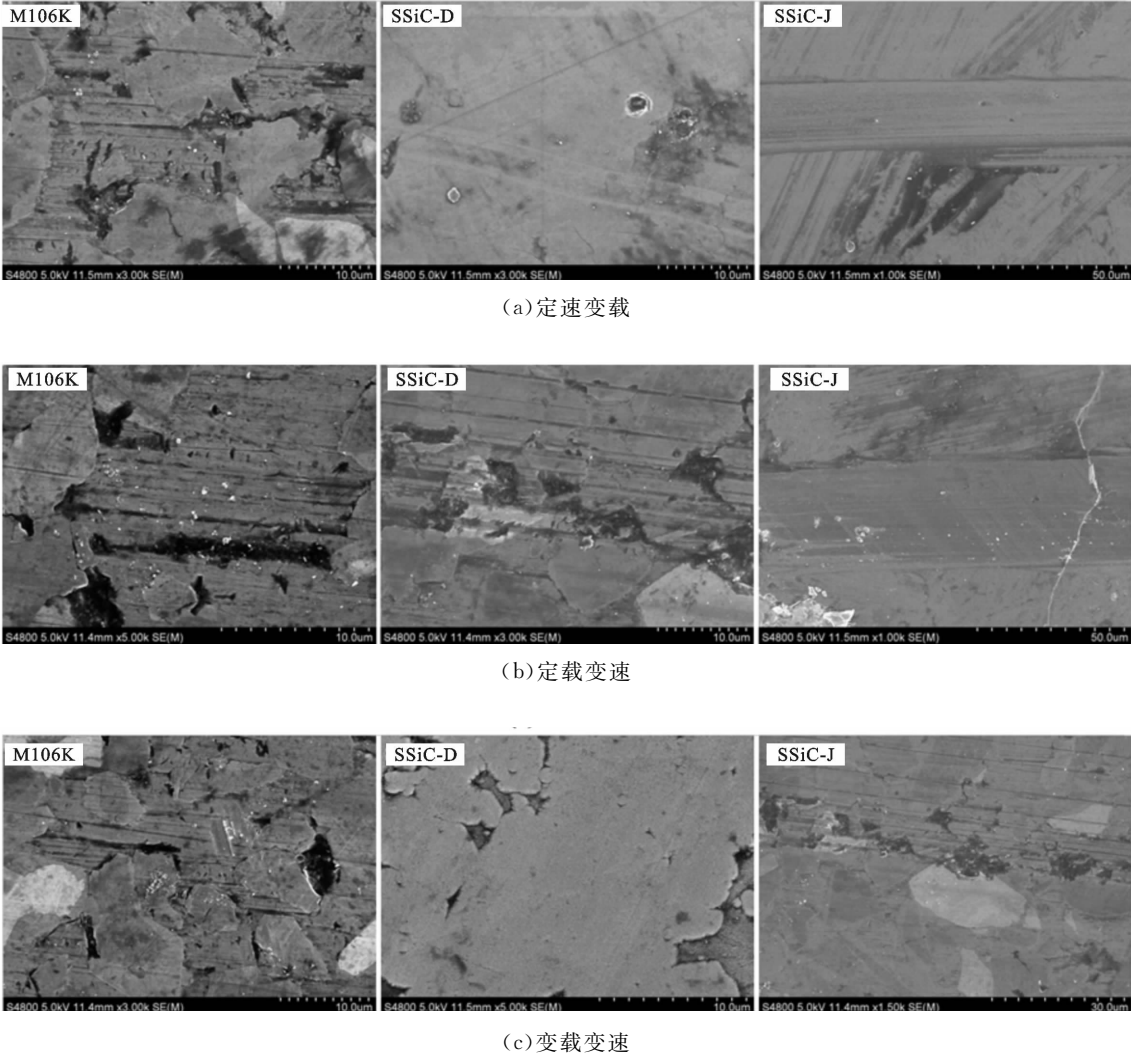


图 9 工况周期波动下不同材料配对副的表面磨损图

Fig. 9 Surface wear diagrams of different material pairs under periodic fluctuation of working conditions

D与M106K之间。从图9b中可知,在定载变速下的M106K表面磨损最为严重,其表面有磨损脱落后的浸渍物颗粒填充,这主要是因为M106K的自润滑作用,在滑动接触过程中磨料在石墨表面转移,而SSiC-D与SSiC-J的磨损程度较为接近,都有一定的划痕。从图9c中可知,在变速变载下SSiC-D表面基本没有划痕,说明在转速与载荷同时周期波动下,SSiC-WC的配对形成具有较为完整的液膜,并且动试件SSiC可以更好地保持稳定。综上所述,在3种工况周期波动下,M106K磨损都较为严重,主要由SSiC表面的切削效应和表面的部分黏着磨损导致,而SSiC-D表面磨损较轻,从而证实了在工况周期波动下,SSiC-WC的配对形式具有更好的摩擦学性能。

4 结 论

本文重点对工况周期波动下的机械密封摩擦副进行测试研究,对无压烧结碳化硅(SSiC)与石墨(M106K)配副材料在工况周期波动与恒定工况下的进行对比试验,进而研究不同材质摩擦副配对的摩擦性能规律,得到以下结论。

(1)SSiC-M106K在定工况下的摩擦系数较为平稳,在工况周期波动下的SSiC-M106K摩擦系数大幅振动。工况周期波动试验后的M106K表面粗糙峰面已被磨平,表面呈现出明显的磨粒二次磨损现象。

(2)在实际运行中转速对机械密封的影响程度占主导,转速的变化会减弱由于负载增大所引起的接触摩擦。

(3)在工况周期波动下的机械密封摩擦副配对材料不适宜硬度较大的SSiC和自润滑性较好的M106K配对,应采用硬度和刚性均更好的SSiC与WC进行配对,其中SSiC作为摩擦副配对中的动试件,具有更好的减摩增润效果。

参考文献:

- [1] 高艳波,李慧青,柴玉萍,等. 深海高技术发展现状及趋势[J]. 海洋技术,2010,29(3):119-124.
GAO Yanbo, LI Huiqing, CHAI Yuping, et al. The development of deep ocean high technology[J]. Ocean Technology, 2010, 29(3): 119-124.
- [2] DOUST T G, PARMAR A. An experimental and theoretical study of pressure and thermal distortions in a mechanical seal[J]. ASLE Transactions, 2016, 29(2): 151-159.

- [3] 胡琼,孙见君,涂桥安,等. 剖分式机械密封技术研究现状及关键问题探讨[J]. 化工进展,2015,34(5):1207-1214.
HU Qiong, SUN Jianjun, TU Qiaoan, et al. Development of split mechanical seal technology and discussions of key issues[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(5): 1207-1214.
- [4] 单晓亮. 鱼雷热力装置机械密封温度场研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
- [5] LI C H. Thermal deformation in a mechanical face seal[J]. ASLE Transactions, 1976, 19(2): 146-152.
- [6] 颜建辉,康蓉,黄金鑫,等. MoSi₂-Mo₅Si₃-Mo₅SiB₂/SiC配对副的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报,2019,39(3):366-373.
YAN Jianhui, KANG Rong, HUANG Jinxin, et al. Friction and wear properties of MoSi₂-Mo₅Si₃-Mo₅SiB₂ composite against SiC[J]. Tribology, 2019, 39(3): 366-373.
- [7] 王旭东,汪彩芬,朱彩强,等. 三种机械密封材料的摩擦磨损性能研究[J]. 材料导报,2017,31(S1):463-466,476.
WANG Xudong, WANG Caifen, ZHU Caiqiang, et al. Study on friction and wear properties of three kinds of mechanical seal materials[J]. Materials Reports, 2017, 31(S1): 463-466, 476.
- [8] 王建吉,弥宁,刘涛. 涡旋压缩机齿顶密封材料摩擦磨损性能的研究[C]//2017年第七届全国地方机械工程学会学术年会暨海峡两岸机械科技学术论坛论文集. 文昌:全国地方机械工程学会,2017:836-841.
- [9] 姚秀敏,王晓洁,刘学建,等. 碳化硅/碳化钨硬面密封摩擦副的摩擦磨损性能和机理研究[J]. 无机材料学报,2019,34(6):673-678.
YAO Xiumin, WANG Xiaojie, LIU Xuejian, et al. Friction-wear properties and mechanism of hard facing pairs of SiC and WC[J]. Journal of Inorganic Materials, 2019, 34(6): 673-678.
- [10] 黄亮,易丹青,李荐,等. 干摩擦条件下WC-Ni/SiC摩擦副的摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封,2008,33(3):82-85.
HUANG Liang, YI Danqing, LI Jian, et al. Friction and wear properties of WC-Ni cemented carbide sliding against SiC ceramics on dry condition[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(3): 82-85.
- [11] 郑尧,付光卫,赵祥,等. 浸渍石墨/38CrMoAlA(喷涂)配对密封摩擦副的干摩擦性能[J]. 润滑与密封,2020,45(12):52-59.
ZHENG Rao, FU Guangwei, ZHAO Xiang, et al. Dry friction properties of impregnated graphite/

- 38CrMoAlA(sprayed) paired sealing friction pair [J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(12): 52-59.
- [12] TOURNERIE B, REUNGOAT D, FRENE J. Temperature measurements by infrared thermography in the interface of a radial face seal [J]. *Journal of Tribology*, 1991, 113(3): 571-576.
- [13] 贾谦, 王建磊, 崔展, 等. 引入螺旋槽制造误差的机械密封性能分析及优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(11): 46-55.
- JIA Qian, WANG Jianlei, CUI Zhan, et al. Performance analysis and optimization of mechanical seal with spiral groove manufacturing error [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(11): 46-55.
- [14] LEE A S, GREEN I. Higher harmonic oscillations in a noncontacting FMR mechanical face seal test rig [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 1994, 116(2): 161-167.
- [15] 胡小云. 机械密封端面信息采集及应用 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [16] ZHAO Weigang, ZHANG Guoyuan, DONG Guangueng. Friction and wear behavior of different seal materials under water-lubricated conditions [J]. *Friction*, 2021, 9(4): 697-709.
- [17] PASCAL D, PHILIPPE H, COUTOULY J F, et al. Friction and wear studies using Taguchi method: application to the characterization of carbon-silicon carbide tribological couples of automotive water pump seals [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009(9): 24. 1-24. 10.
- [18] ADJEMOUT M, BRUNETIÈRE N, BOUYER J. Friction and temperature reduction in a mechanical face seal by a surface texturing: comparison between TEHD simulations and experiments [J]. *Tribology Transactions*, 2018, 61(6): 1084-1093.
- [19] BRUNETIÈRE N, ROUILLON M. Fluid flow regime transition in water lubricated spiral grooved face seals [J]. *Tribology International*, 2021, 153: 106605.
- [20] LI Kangmei, YAO Zhenqiang, HU Yongxiang, et al. Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication [J]. *Tribology International*, 2014, 77: 97-105.
- [21] GALDA L, SEP J, PRUCNAL S. The effect of dimples geometry in the sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions [J]. *Tribology International*, 2016, 99: 77-84.
- [22] 夏延秋, 林飞虎, 冯欣. Ti-Ag/TiN-Ag 和 Ti-Cu/TiN-Cu 镀层在脂润滑下的载流摩擦学性能 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(3): 137-146.
- XIA Yanqiu, LIN Feihu, FENG Xin. Current-carrying tribological properties of Ti-Ag/TiN-Ag and Ti-Cu/TiN-Cu coatings under grease lubrication [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(3): 137-146.
- [23] 丰晓春, 贾均红, 高强, 等. 添加 $\text{Ag}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$ 的 NiAl 基复合材料的高温摩擦学性能及高温润滑机理研究 [J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(2): 187-196.
- FENG Xiaochun, JIA Junhong, GAO Qiang, et al. High temperature tribological properties and high-temperature lubrication mechanism of NiAl-based composites with the addition of $\text{Ag}_2\text{Nb}_4\text{O}_{11}$ [J]. *Tribology*, 2021, 41(2): 187-196.
- [24] 徐鲁帅, 王赞磊, 张帆, 等. 扰变工况下不同表面结构机械密封瞬态特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(1): 56-63.
- XU Lushuai, WANG Yunlei, ZHANG Fan, et al. Transient characteristics of mechanical seals with different surface structures under disturbance conditions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(1): 56-63.
- [25] 高磊. 喷水推进型深海滑翔机动力学建模与低能耗控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

(编辑 荆树蓉)