

航空煤油泵轴尾机械密封副材料特性

姜继海, 申 通, 杨 堃, 赵存然, 梁海健
(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为选择适合在航空煤油介质中工作的机械密封副材料,对材料的摩擦特性进行了研究,利用摩擦磨损试验机得到不同工况条件与表面粗糙度下材料的摩擦因数、温升,在原子力显微镜(AFM)下对 3 组典型配对材料的微观磨损形貌进行观测,分析磨粒磨损和黏着磨损的行为差异,计算磨损的关键参数。研究发现:聚四氟乙烯(PTFE)在既定条件下为性能最佳的软材料;硬材料表面粗糙度值为 0.05 时的摩擦性能最佳,不同硬材料间性能差异不大。研究发现 PTFE 在配磨材料上产生的犁沟效应最轻微,黏附的元素颗粒最少;黏着磨损会造成表面高度分布函数的偏移,利用离散化求解公式得到了黏着体积与平均黏着厚度。

关 键 词: 航空发动机燃油系统; 煤油泵; 机械密封; 摩擦特性; 磨粒磨损; 黏着磨损

中图分类号: V233.2; TH117.1 **文献标志码:** A

Material characteristics of mechanical seal in shaft end of aviation kerosene pump

JIANG Jihai, SHEN Tong, YANG Kun,
ZHAO Cunran, LIANG Haijian
(School of Mechatronics Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to select the mechanical seal materials suitable for working in aviation kerosene, the frictional characteristics of these materials were studied. Through the friction-wear tester, the friction coefficients and the temperature rise of materials were obtained under different working conditions and surface roughness. The microscopic wear morphology was observed for three groups of typical matching materials under the atomic force microscope (AFM). The differences between abrasive wear and adhesive wear were analyzed, and the key parameters of wears were calculated. It found that, when the conditions were set, polytetrafluoroethylene (PTFE) was the best soft material, and the hard materials got the best friction performance when their surface roughness equaled 0.05. Besides, different materials had few differences in their performance. It also found that PTFE caused the least amount of element migration on hard surface which, in turn, caused the smallest single abrasive grain grooves. The adhesive wear caused the migration of surface height distribution function. In addition, the adhesive volume and average adhesive thickness were inferred by discretization solving formula.

收稿日期:2017-04-07

基金项目:国家自然科学基金(51275123); 国家科技支撑计划(2014BAF08B06); 2011 年国家重大科技成果转化项目

作者简介:姜继海(1957—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事液压力元件与新型液压装置的科研和教学工作。

引用格式:姜继海,申通,杨堃,等.航空煤油泵轴尾机械密封副材料特性[J].航空动力学报,2018,33(9):2188-2197. JIANG Jihai, SHEN Tong, YANG Kun, et al. Material characteristics of mechanical seal in shaft end of aviation kerosene pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2188-2197.

Key words: aero-engine fuel system; kerosene pump; mechanical seal; frictional characteristics; abrasive wear; adhesive wear

航空发动机控制系统主要完成主、加力燃油的供油控制和发动机可变几何参数的控制功能,其中主燃油控制系统的性能和可靠性更是决定了整个控制系统的优劣和安全可靠^[1]。在目前的民用航空发动机中,液压机械式的燃油控制器仍然使用最为广泛^[2],该系统为实现高压、大流量、结构紧凑,通常采用球面配流的斜盘式轴向柱塞泵作为主燃油泵^[3]。

主燃油泵前端往往设置增压泵或其他增压装置,使得入口压力稳定提高,有力地改善液压泵的动态特性,并减少吸空现象的产生^[4]。但与此同时,泵壳内的液体压力会随之攀升,当压力超过 0.2 MPa 时,普通的骨架轴封将难以满足密封要求^[5]。与此相比,机械密封形式更为简洁,各组件配合精度较高,维护容易,在例如高速涡轮增压的动力装置中应用广泛^[6],燃油泵中常采用机械密封与皮碗密封相结合的结构形式^[7]。

机械密封环是整个机械密封装置中最为核心的结构,由于航空煤油的低黏度特性,它也是最容易发生失效的部件。基于密封副的材料属性,张玲洁^[8]针对 SiC 动环展开了丰富的强韧化研究,进行了众多的第二相烧结材料试验,并实现了 SiC 的低成本生产;韩国碳融合技术研究所^[9]通过多种钨化物和钴化物的冶炼结合,得到一种耐磨性优异的密封环材料;Kovalchenko^[10]与 Sumant 等^[11]分别进行了机械密封环表面镀膜的测试,提出了一种高耐磨性的超纳米金刚石(UN-CD)表面薄膜;Etsion、Halperin 等^[12-15]着重研究密封环表面纹理的优化,并提出了丰富的织构化加工策略,为密封环动压润滑研究提供参考。

本文研究目的是对煤油泵中机械密封副的材料优劣进行探究,通过宏观摩擦学试验研究不同配对材料在航空煤油环境中的摩擦性能,利用多种配合材料在不同工况下所表现出来的微观组织特征,综合讨论确定材料方案。

1 试验条件

对于材料性能的摩擦学试验,选用端面摩擦磨损试验机(MMU-10)模拟机械密封环在实际工作时的工况环境,其主工作台部分见图 1。

如图 1 所示,在液压载荷的作用下,试验件完成垂直方向的加载动作,加载力大小可通过软件

控制;在交流伺服电动机的带动下,配合材料间完成旋转动作。其中试验机最大加载力可以达到 10 kN,摩擦力检测范围为 10~2 000 N。

经过设备的改进与完善,得到机械密封摩擦磨损试验总装置图见图 2。



图 1 试验机工作台结构图

Fig. 1 Structure diagram of testing machine workbench

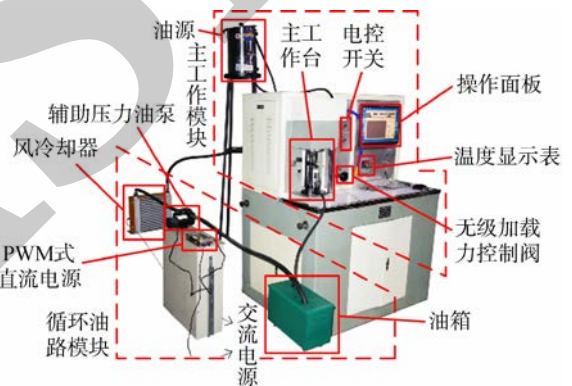


图 2 试验装置布置图

Fig. 2 Schematic diagram of testing apparatus

如图 2 所示,设备主要由 MMU-10 试验机、油箱、风冷却器、辅助泵、脉冲宽度调制(PWM)式直流电源构成,前两者构成了装置中的主工作部分,后三者则构成可持续的循环工作部分。设备参数方面,油箱的额定容积为 12 L,辅助泵的扬程为 15 m,功率为 120 W。

首先对机械密封副软、硬材料进行调研与选择。优异的机械密封组件往往具有较好的润滑性,刚度较好,不易变形,配合材料间硬度差值合适,契合度高。

对于软环,铜合金材料在强度和耐变形方面最为优越;碳石墨具有良好的自润滑性、耐腐蚀性和耐温性,目前适用范围最广;树脂同样具有良好的自润滑性,甚至可用于干摩擦环境。本试验软

材料选用锰黄铜 HMn60-3、浸钨石墨 M120D 和聚四氟乙烯 PTFE。

对于硬环,合金结构钢具有高强度和高刚度,在高压密封中应用较多;硬质合金的硬度高、线膨胀系数小,在行业中得到了丰富应用;工程陶瓷有突出的耐磨性,同时密度很小。本试验的硬材料选用合金渗氮钢 38CrMoAl、硬钴类硬质合金 YG15、工程陶瓷反应烧结 SiC。

2 试验原理

煤油泵轴尾机械密封结构见图 3,具体为接触式、平衡式、静止式、内流式密封结构。

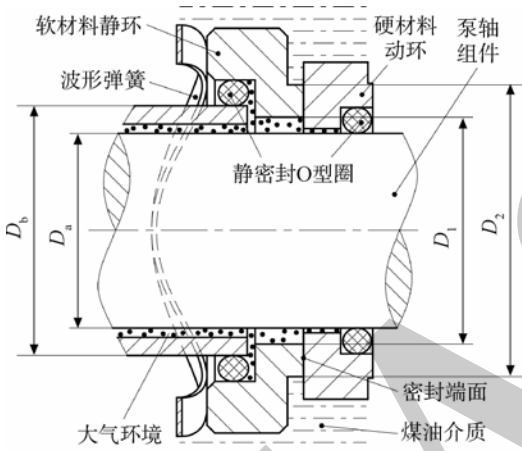


图 3 煤油泵机械密封结构图

Fig. 3 Structure diagram of mechanical seal in kerosene pump

机械密封的结构设计基于许用 $[p_c v]$ 经验法^[16],得到图 3 中的相关重要参数见表 1。

表 1 煤油泵机械密封主要设计参数

Table 1 Main design parameters of mechanical seal in kerosene pump			
参数	数值	参数	数值
密封压差/MPa	0.5~1.5	面积比	0.678
密封轴径 D_a /mm	12	弹簧比压/MPa	0.2
密封内径 D_1 /mm	14	膜压系数	0.5417
密封外径 D_2 /mm	18	载荷系数	0.878
平衡直径 D_b /mm	15.4	极限 $p_s v$ 值/ ((MPa·m)/s)	7.917
极限 $p_g v$ 值/ ((MPa·m)/s)	6.951	极限 $p_c v$ 值/ ((MPa·m)/s)	2.663

试验机采用固定尺寸的上、下试件,由于油杯

暴露于大气中,油液介质不存在额外压力,因此为研究材料在使用环境中的摩擦性能,需要将煤油泵环境中的工作压差值 p_s 换算为试验机的加载力比压 p_g 加载力 F'_g 。考虑油膜建立条件的区别,为了更客观研究材料的摩擦性能,令微凸体承载压力值 p_c 与周向速度 v 之积 $p_c v$ 值为转换参数,通过计算各环境下的 $p_c v$ 值是否相同,来判定两者的试验工况是否一致。煤油泵环境和试验环境的转换方式按图 4 所示关系进行。

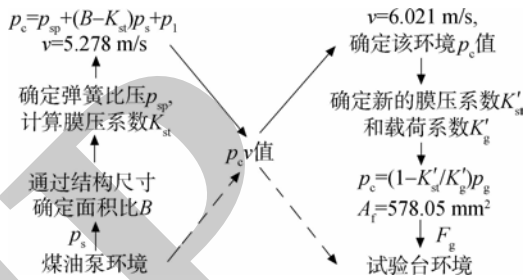


图 4 工况环境的转换关系

Fig. 4 Conversion relationship of working environment

表 1 计算出的极限 $p_c v = 2.663 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$,考虑到泵体压力脉动的存在,且使试验具有广延性,将 $p_c v$ 值的研究范围设定为 $1 \sim 5 \text{ (MPa} \cdot \text{m)/s}$,并将其作为后续研究重要的直接变量。设定试验机转速为 2300 r/min ,得到 $p_s - F'_g$ 转换关系见表 2。

表 2 $p_s - F'_g$ 转换关系

Table 2 Transformational relation from p_s to F'_g		
p_s /MPa	$p_c v$ /(MPa·m/s)	F'_g /N
0	1	203.8
0.58	2	407.6
1.966	3	611.5
3.36	4	815.3
4.747	5	1019.1

3 试验结果与分析

3.1 试件的表面磨损形貌分析

首先研究不同配对材料在 $p_c v$ 值梯度下的摩擦性能。3 种上试件和 3 种下试件两两配对,共 9 组,保持试件表面粗糙度一致,配对方案见表 3。

在进行 HMn60-3 作为上试件的试验时,观察发现表面摩擦力较大,摩擦因数不稳定,随时有干摩擦的风险,故表 3 中的 1、2、3 组试验只设定 $p_c v = 1, 2 \text{ (MPa} \cdot \text{m)/s}$ 。

表 3 摩擦学试验的材料配对组别

Table 3 Materials-paired group of tribological tests

组别	软材料	硬材料	$p_c v/$ (MPa·m)/s	单组 时间/s
1	HMn60-3	38CrMoAl	1,2	600
2	HMn60-3	YG15	1,2	600
3	HMn60-3	SiC	1,2	600
4	M120D	38CrMoAl	1,2,3,4,5	600
5	M120D	YG15	1,2,3,4,5	600
6	M120D	SiC	1,2,3,4,5	600
7	PTFE	38CrMoAl	1,2,3,4,5	600
8	PTFE	YG15	1,2,3,4,5	600
9	PTFE	SiC	1,2,3,4,5	600

首先得到 $p_c v=2\text{ (MPa} \cdot \text{m)}/\text{s}$ 下 HMn60-3 与硬材料的表面形貌见图 5,其中图 5(a)HMn60-3 配对材料为 YG15。下文与此处条件一致。

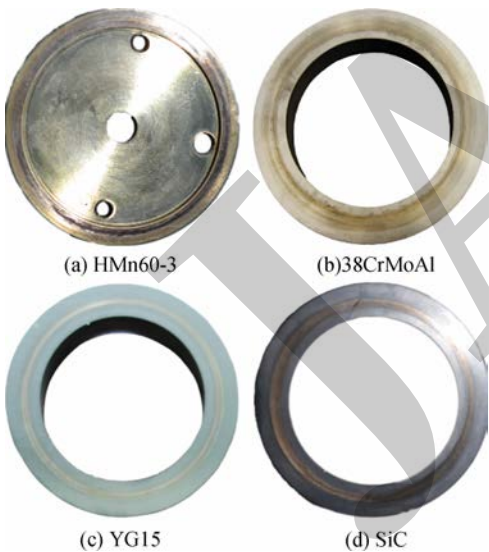


图 5 HMn60-3 与硬材料摩擦后的表面形貌
Fig. 5 Surface morphology after the friction between HMn60-3 and hard materials

图 5(a)中 HMn60-3 摩擦后靠近试件内径的区域发生了剥落,这说明材料经历了较为严重的黏着磨损或疲劳磨损;38CrMoAl 的表面清晰可见多处圆周向划痕,说明磨粒磨损严重;YG15、SiC 同 HMn60-3 的运行过程中,配合表面黏附了一层薄薄的 Cu, SiC 表面甚至出现裂纹,说明在试验后期黏着磨损占主要成分。

M120D 与硬材料的表面形貌见图 6。



图 6 M120D 与硬材料摩擦后的表面形貌
Fig. 6 Surface morphology after the friction between M120D and hard materials

观察图 6(a), M120D 的表面不存在肉眼可见沟槽,说明 M120D 刚性良好,剥落的磨粒容易被摩擦过程消化,也侧面反映了 M120D 具有良好的自润滑性;与此同时 38CrMoAl 表面出现两条明显的磨粒磨损痕迹;YG15 出现多条倾斜方向的细小沟槽;SiC 出现一条不明显的沟槽。这些擦伤对材料是正常且无害的。

PTFE 与硬材料的表面形貌见图 7。

通过图 7(a)发现 PTFE 配合表面在试验后同样未出现明显的沟槽,但存在几处轻微的擦伤,



图 7 PTFE 与硬材料摩擦后的表面形貌
Fig. 7 Surface morphology after the friction between PTFE and hard materials

该处与 M120D 存在差别的原因在于,PTFE 的强度与硬度均小于 M120D,同等工况下受下试件作用的形貌反馈更明显;而下试件的表面纹理与同 M120 配对的下试件的纹理一致,试件的宏观表面均具有同样的深色纹路,由于 PTFE 较软,这些痕迹很浅且不会对摩擦性能产生影响。

3.2 试件的摩擦学性能分析

3.2.1 配合材料在不同 $p_c v$ 值下的摩擦性能

针对本阶段试验的结果,HMn60-3 没有自润滑性,在低黏度的航空煤油中难以建立稳定的油膜,故认为其不适合作为煤油泵的密封软材料,接下来只将 M120D 和 PTFE 作为软材料的研究载体。

在 25~35℃ 的温度范围内,绘制 M120D、PTFE 与 3 类下试件在 5 组 $p_c v$ 值下的摩擦因数 f 曲线,对多组重复性试验取均值,即得到图 8 所示的摩擦因数关系图。

由图 8 曲线发现,M120D 和下试件的摩擦因数大小是 PTFE 和下试件的摩擦因数大小的 1.5~2.5 倍,若单纯将想得到更小的摩擦因数,PTFE 更为适宜;若考量实际摩擦环境下的平稳,M120D 更为适宜。

接下来测量各组材料在不同 $p_c v$ 值下的温升 Δt ,得到图 9 所示的变化曲线。

观察图 9 温升曲线发现

1) 随着摩擦试验的进行,温度值呈减速上升的趋势,在 200 s 的试验时长下,多数配对材料的温升已达到稳定;

2) 相对于 PTFE 配对摩擦带来的温升,M120D 材料配对下的温升明显更高,这取决于 M120D 的摩擦因数较小,从而温升较小;

3) 上试件为 PTFE 且 $p_c v > 3$ (MPa·m)/s 时,得到与不同硬材料配对摩擦的端面温度值由大到小的次序为 PTFE/YG15、PTFE/38CrMoAl、PTFE/SiC,这体现 SiC 在 $p_c v$ 值下散热性能好,但温升不单独表明材料自身特性,还反映材料间的契合程度。

3.2.2 硬材料表面 R_a 值对摩擦性能的影响

密封环的表面粗糙度 R_a 对使用性能有关键性影响。早稻田大学的 Tomioka 等^[17]研究了医疗血液泵中机械密封环表面粗糙度对泄漏的影响,设置了 $R_a=0.009,0.088,0.17\mu\text{m}$ 的梯度,认为血液介质下保证最佳摩擦性能的 $R_a=0.17\mu\text{m}$ 。

然而根据国内的工程经验,对于煤油介质,密封环光洁表面在 $R_a=0.05\mu\text{m}$ 时性能最佳^[18],此处分别设置 0.025、0.05、0.1 μm 的表面粗糙度 R_a 值。

为控制参数变量,本阶段设定软材料为 PTFE,下试件 3 种,表面粗糙度值 3 种, $p_c v$ 值工况 5 种。本次试验共 45 各阶段,各阶段采样时间为 600 s,采样频率为 1 Hz,根据以上得到图 10 所

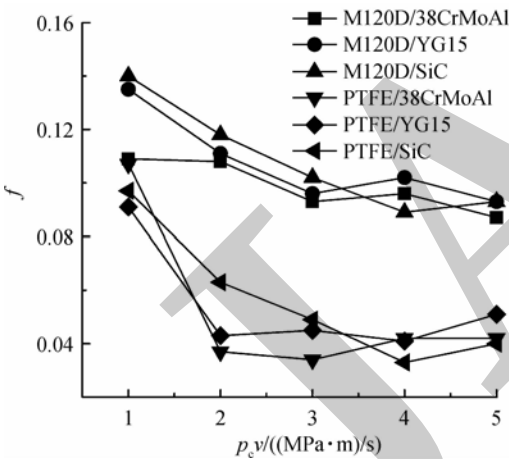


图 8 各组配合材料在不同 $p_c v$ 值下的摩擦因数曲线
Fig. 8 Friction factor curves of paired-materials in different $p_c v$

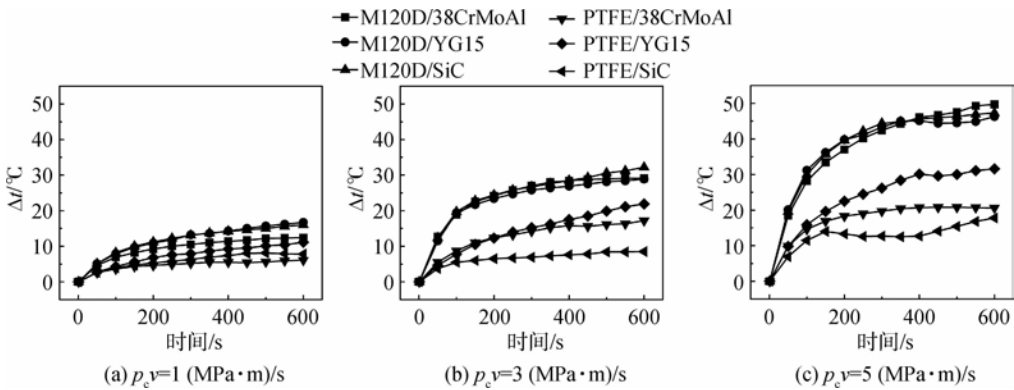


图 9 各组配合材料不同 $p_c v$ 值下的温升曲线

Fig. 9 Temperature rise curves of paired-materials in different $p_c v$

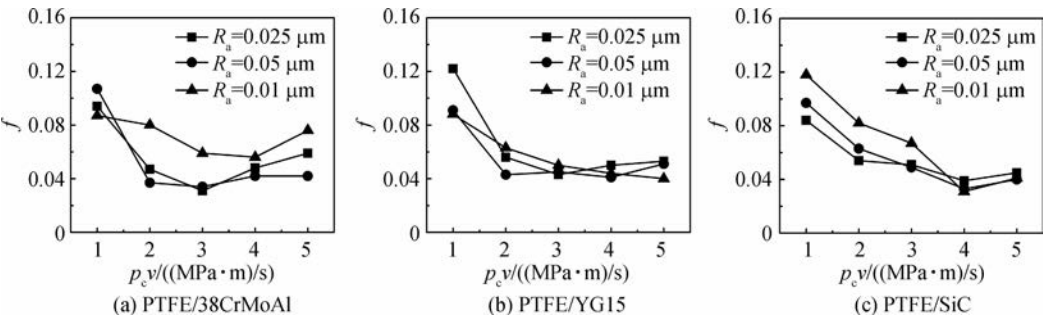


图 10 PTFE 与不同表面 R_a 值硬材料的摩擦因数曲线

Fig. 10 Friction factor curves of PTFE and hard materials with different surface roughnesses

示的各配对条件的摩擦因数大小。

由图 10 发现,各配对材料在 R_a 小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的精度表面下摩擦状态良好,摩擦因数 f 基本小于 0.1 ,此处用 R_{a1} 、 R_{a2} 、 R_{a3} 来分别表示 $R_a = 0.025, 0.05, 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 是的表面粗糙度,观察细节可得到该表面粗糙度梯度下的配对摩擦因数见表 4。

表 4 不同表面粗糙度下的摩擦因数

Table 4 Friction factor under surface different roughnesses

配对组	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}
PTFE/38CrMoAl	0.055 8	0.052 4	0.071 6
PTFE/YG15	0.064 8	0.052 4	0.071 6
PTFE/SiC	0.054 6	0.056 4	0.067 8

根据表 4 结果发现,PTFE/38CrMoAl 与 PTFE/YG15 配对组中 R_{a2} 的 f 最小,PTFE/SiC 中最小的是 R_{a1} ,但与该组的 R_{a2} 值很接近。

考虑到摩擦因数具有试验波动性,且无累积效应,故将更具有客观代表性的温升作为研究对象,得到不同配对材料的温升比较结果见图 11。

由图 11 发现温升具有更好的客观规律性。横向对比不同 R_a 值对应的温升大小,YG15 和

SiC 组别的温升图皆显示 $R_a = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 对应最小的温升值,该情况在 YG15 和 SiC 的组别均表现很明显,在 38CrMoAl 组别中也较明显,这吻合煤油介质中机械密封环加工面取 $R_a = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 的工程经验,故认为 $R_a = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 时摩擦性能较佳。

3.3 试件的微观磨损机理分析

为定量研究材料表面轮廓的变化趋势,对试件表面的微观磨损机理展开研究。基于材料的减摩耐磨机理,两表面正常运转时,软相材料基体上分布的细小硬相颗粒进行承载,受运转速度以及载荷值的影响,若增加 $p v$ 值大小,则硬相材料表面将被脱落颗粒擦伤,发生磨粒磨损;若 $p v$ 值增加到一个临界值,则产生黏着效应,同时生成黏着节点,使得软相材料表面发生脱落,磨屑物质转移至硬相材料。因此磨损就是粒子转移与转化的过程^[19]。将图 5 与图 7 中具有代表性的配对组 PTFE/38CrMoAl、HMn60-3/38CrMoAl、HMn60-3/YG15 作为本节研究对象。

3.3.1 硬材料表面径向上的元素分布测量

粒子的转移与转化伴随着元素的迁移,利用场发射环境扫描电子显微镜(FESEM)在毫米尺度径向扫描磨损区域,得到 3 组硬材料表面元素的体积分数分布见图 12。

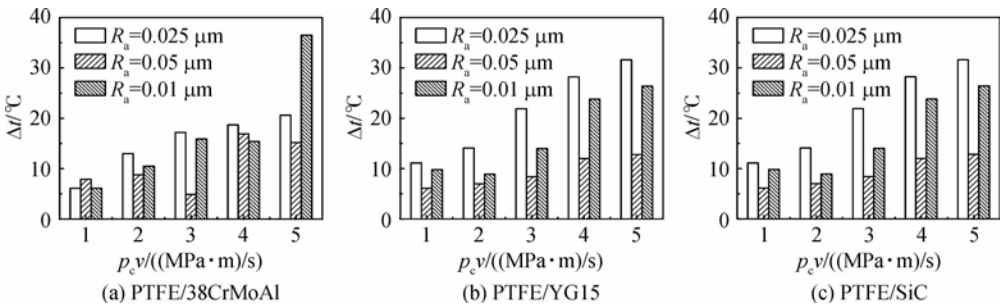


图 11 PTFE 与不同 R_a 值硬材料的温升曲线

Fig. 11 Temperature rise curves of PTFE and hard materials with different surface roughnesses

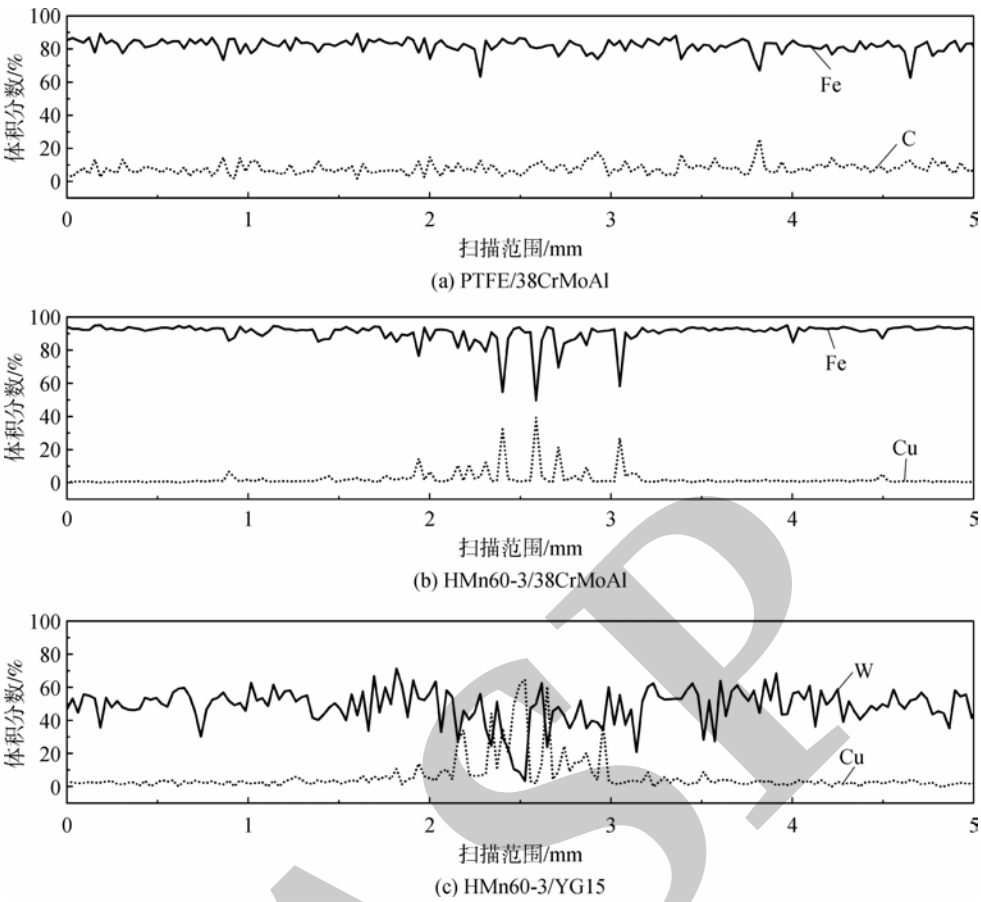


图 12 不同硬材料表面径向上的元素分布

Fig. 12 Element distribution in radial direction on the surface of different hard materials

图 12(a)中 5 mm 的扫描范围内元素分布均匀,38CrMoAl 的基质元素 Fe 体积分数保持稳定,而 PTFE 内的 C 元素数量同样稳定,说明端面的粒子未产生嵌入与黏着现象;图 12(a)、图 12 (b)的结果存在较大差异,扫描范围中心区域的 Fe 元素体积分数多次降至 60% 以下,且相应的 Cu 元素上升到 30%~40%,表明配对过程中较多的 Cu 原子通过机械作用和化学作用黏附在硬材料的配对区域;图 12(c)中曲线存在明显的高度落差,局部点的 Cu 元素体积分数超过了作为 YG15 主要构成的 W 元素体积分数,说明 Cu 元素在端面产生了严重的涂覆,在长时间的磨合运转下,摩擦副的作用性质将发生改变,摩擦性能将会大幅衰减。

3. 3. 2 磨粒磨损的特征分析

磨粒磨损是在端面 p_v 值增加的背景下,颗粒与表面间出现集中载荷导致材料发生一定程度的剥落的现象。定义单个犁沟深度为 h ,底面直径 d ,圆锥母线与中心线夹角为 θ ,接触表面在水平上投影为 A ,垂直面投影为 S ,则圆锥体磨粒磨

损模型^[19]如图 13 所示。

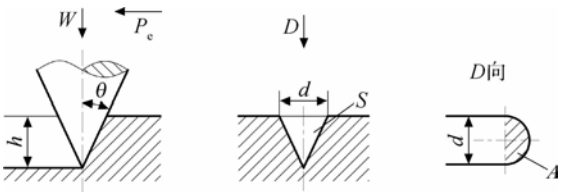


图 13 磨粒磨损的圆锥体模型

Fig. 13 Cone model of abrasive wear

若材料屈服强度 σ_s ,法向载荷 W 、犁沟力 P_e 、犁沟效应产生摩擦因数 f_e 为

$$W = A\sigma_s = \frac{1}{8}\pi d^2\sigma_s \tag{1}$$

$$P_e = S\sigma_s = \frac{1}{2}dh\sigma_s \tag{2}$$

$$f_e = \frac{P_e}{W} = \frac{4h}{\pi d} = \frac{2}{\pi}\cot\theta \tag{3}$$

当圆锥磨粒运动距离为 s 时,磨损体积为 $V = sh^2\tan\theta$,得到磨粒的体积磨损度为

$$\frac{dV}{ds} = h^2\tan\theta \tag{4}$$

考虑到原子力显微镜(AFM)测量精度高,对绝缘体的测量效果突出,数据量化研究方便,故利用其来研究材料的微观磨损行为。

首先对 PTFE/38CrMoAl 的一条典型犁沟进行测量,得到图 14 所示的 $80\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$ 范围的 x 、 y 、 z 三轴轮廓分布曲线。

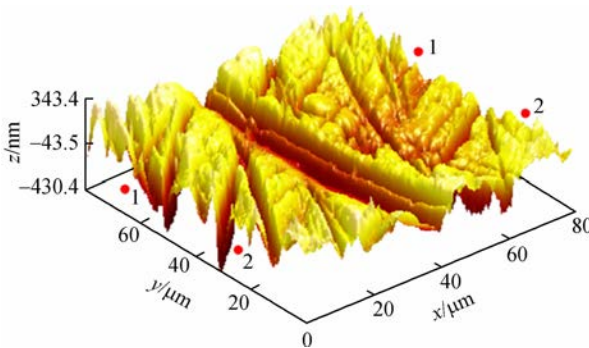


图 14 PTFE/38CrMoAl 三维轮廓曲线
Fig. 14 Three-dimensional contour curve of PTFE/38CrMoAl

由图 14 发现,PTFE 作为上试件时,表面轮廓的峰谷距只有 $0.77\text{ }\mu\text{m}$,此时犁沟宽度较窄,磨粒周围区域仍保持初始的加工表面纹理,说明该磨粒对配合表面的破坏程度较低,不会使临近区域发生变形。

保持单区域 $80\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$ 的扫描范围,得到 HMn60-3/38CrMoAl 犁沟的轮廓曲线如图 15。

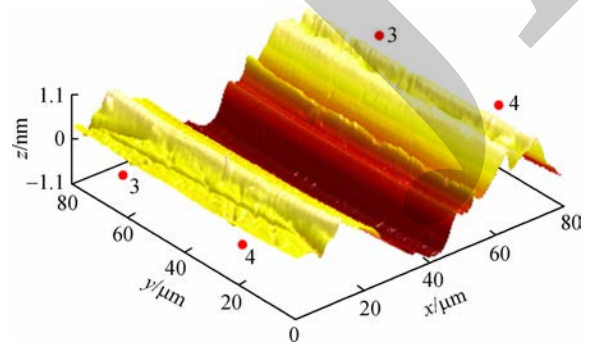


图 15 HMn60-3/38CrMoAl 三维轮廓曲线
Fig. 15 Three-dimensional contour curve of HMn60-3/38CrMoAl

观察图 15 发现,该犁沟的径向宽度超过了扫描范围的一半,峰谷距达到了 $2.2\text{ }\mu\text{m}$,此时周围区域已不再保持原有的加工纹理,说明该磨粒对配合表面破坏严重,属于大颗粒的磨粒磨损。

利用典型轮廓法在图 14 中分别选择两组垂直犁沟向的特征端点 1-1、2-2,类似的在图 15 中

选择 3-3 及 4-4,以进一步定量研究磨损的几何参数特征。得到其形貌曲线如图 16。

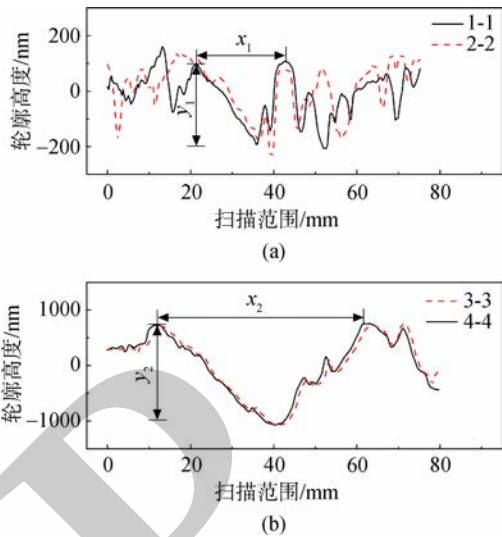


图 16 PTFE/38CrMoAl 与 HMn60-3/38CrMoAl 的单轮廓曲线对比
Fig. 16 Comparison of single contour curves with PTFE/38CrMoAl and HMn60-3/38CrMoAl

利用图 16 中的圆锥体几何特征,对得到的各配对组参数结果进行对比,见表 5。

表 5 不同软材料和 38CrMoAl 之间的磨损属性参数
Table 5 Wear attributive parameters between 38CrMoAl and different soft materials

参数	软材料	
	HMn60-3	PTFE
$d/10^{-5}\text{ m}$	4.96	2.15
$h/10^{-6}\text{ m}$	1.8	0.299
$\theta/^{\circ}$	85.78	88.18
摩擦因数 f_c	0.047	0.02
体积磨损度/ 10^{-11} m^2	4.39	0.281

由表 5 得到,38CrMoAl/HMn60-3 的单磨粒摩擦因数是 38CrMoAl/PTFE 的 2.35 倍,体积磨损度更是达到 15.62 倍, HMn60-3 的单元区间磨粒数量很高,使其摩擦因数及磨损量将远高于 PTFE。造成此结果的原因是 PTFE 具有自润滑性,配合摩擦过程中转移的软相颗粒降低了局部压力,其承受高 $p_c v$ 值的能力随之增强。

3.3.3 黏着磨损的特征分析

在接触式机械密封中,端面的实际接触面积往往不到其几何面积的 0.1%,一旦端面载荷超

过接触峰点所能承受的最大压力,粒子就会发生镶嵌甚至压溃,因此黏着磨损就是配合面接触峰点不断产生黏着、破坏再黏着的过程。

图 5(c)中 YG15 的表面黏着现象严重,在原子力显微镜下对其展开观测,同样将扫描范围设置为 $80\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$,得到三维轮廓曲线见图 17。

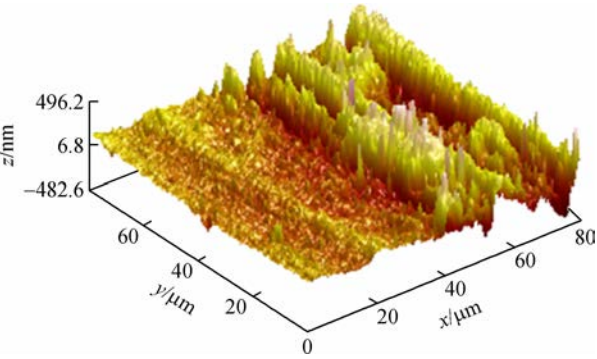


图 17 HMn60-3/YG15 三维轮廓曲线
Fig. 17 Three-dimensional contour curve of HMn60-3/YG15

因为 YG15 硬度很大,在其表面形貌加工良好的情况下,发现其测量区域的轮廓峰谷距只有 $0.979\text{ }\mu\text{m}$ 。非磨损区域与磨损区域有清晰的断崖式过渡,磨损区充满毛刺和沟槽,非磨损区平坦光滑,两个区域均为 $40\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$ 的范围大小。

绘制非磨损区、磨损区及总观测范围的高度分布函数,以研究黏着磨损中黏着和磨损这两个过程的并联关系,两者高度分布函数见图 18,图中 $\psi(z)$ 为各轮廓高度 z 的分布密度值。

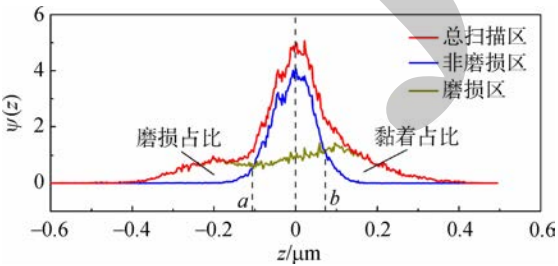


图 18 HMn60-3/YG15 高度分布密度曲线
Fig. 18 Height density distribution curves of HMn60-3/YG15

由图 18 发现非磨损区高度分布函数 $\psi_1(z)$ 的峰态 K_1 大于磨损区高度分布函数 $\psi_2(z)$ 的峰态 K_2 ,是因为非磨损区的高度分布函数曲线的局部分布性更强。定义 $\psi_1(z)$ 和 $\psi_2(z)$ 交点的横坐标为 a, b , $\psi_1(z)$ 和 $\psi_2(z)$ 的微元大小 δz 一样,且相对于横坐标的积分面积均为 1,故图 18 所示的

$(-\infty, a)$ 的封闭曲线区域为磨损区的磨损占比, $(b, +\infty)$ 的封闭曲线区域为磨损区的黏着占比,利用占比值可推导出 $40\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$ 磨损区的磨损体积与黏着体积的表达式(式(5)和式(6))。

$$V_1 = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} [\psi_1(z_i) - \psi_2(z_i)] \cdot \frac{S_2}{\psi(z_0)} \delta z \tag{5}$$

$$V_2 = \sum_{j=b}^{+\infty} \sum_{i=j}^{+\infty} [\psi_1(z_i) - \psi_2(z_i)] \cdot \frac{S_2}{\psi(z_0)} \delta z \tag{6}$$

将图 18 中的曲线进行遍历积分求和,计算出单区域中 $40\text{ }\mu\text{m}\times 80\text{ }\mu\text{m}$ 磨损区的磨损体积 $V_1 = 2.187 \times 10^{-16}\text{ m}^3$,黏着体积 $V_2 = 2.279 \times 10^{-16}\text{ m}^3$ 。换算出磨损区域的平均磨损厚度为 $0.0683\text{ }\mu\text{m}$,平均黏着厚度 $0.0712\text{ }\mu\text{m}$,整体厚度增加 $0.0029\text{ }\mu\text{m}$,说明黏着与磨损的过程具有相同的展开速率,且同步进行。

4 结 论

本文从航空煤油泵轴尾机械密封设计步骤中最关键的材料配对设计着手,通过 MMU-10 摩擦磨损试验机的手段进行了宏观摩擦学试验,通过 AFM 对配对材料结合面的微观磨损行为进行了研究,根据分析处理结果得到如下结论:

1) 以 $p_c v$ 值作为试验环境转换的媒介参数,设定了 5 组 $p_c v$ 值工况,设定了 3 组软材料 HMn60-3、M120D、PTFE,设定了 3 组硬材料 38CrMoAl、YG15、SiC,各因素交叉试验,通过分析运转过程的摩擦因数 f 与温升 Δt ,发现 PTFE 的 f 指标与 t 指标最优,M120D 具有最好的工作稳定性,而 HMn60-3 在大 $p_c v$ 值工况下的摩擦性能较差。通过分析不同表面粗糙度值下的摩擦因数大小,发现硬材料表面 $R_a = 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 时的性能状态最佳;

2) 基于材料的减摩耐磨机理,完成了材料的微观磨损行为分析。根据圆锥体模型的研究,在磨粒磨损机理的理论基础上,计算了 HMn60-3/38CrMoAl、PTFE/38CrMoAl 两组配对副的单磨粒摩擦因数与体积磨损度,最后分析了 HMn60-3/YG15 的黏着磨损表面形貌,通过统计学算法,计算了其平均磨损厚度与平均黏着厚度。

3) 将宏观试验数据和微观分析结果进行结合,发现在变形量不足以影响性能的前提下,PTFE 是性能最佳的软材料;下试件材料属性差异较小,摩擦性能基本一致,同时发现硬材料表面粗

糙度为 $R_a=0.05\text{ }\mu\text{m}$ 时具有最佳的摩擦性能;另外,黏着磨损往往伴随磨粒磨损,两者对材料的破坏速率基本一致,工作时应尽力避免。

参考文献:

[1] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 375-382.
ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 375-382. (in Chinese)

[2] 刘长福, 邓明. 航空发动机结构设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

[3] 陈永琴, 苏三买, 常博博. 航空燃油柱塞泵运动学参数计算的坐标法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 466-470.
CHEN Yongqin, SU Sanmai, CHANG Bobo. Coordinates calculation method for kinematics parameter of aeroengine fuel piston pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 466-470. (in Chinese)

[4] 王存堂, 徐国芳, 陈刚, 等. 油箱液体增压器的结构与性能分析[J]. 液压与气动, 2008(3): 64-66.
WANG Cuntang, XU Guofang, CHEN Gang, et al. Structure and performance analysis of liquid booster for oil tank [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2008(3): 64-66. (in Chinese)

[5] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[6] 张国渊, 赵伟刚, 陈焱, 等. 非接触动静结合型机械密封的主动可控性及其脱开机理[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2515-2522.
ZHANG Guoyuan, ZHAO Weigang, CHEN Yao, et al. Active controllability and separation mechanical of non-contact hydrostatic mechanical seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2515-2522. (in Chinese)

[7] 柳荫. 某型高压燃油泵的设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
LIU Yin. Research and design of a high pressure fuel pump [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)

[8] 张玲洁. 颗粒、晶须强韧化碳化硅陶瓷在密封环中的应用

[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

ZHANG Lingjie. Preparation of silicon carbide ceramics reinforced by particles or/and whiskers and their application in mechanical seals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

[9] KIM D K, SHOU I J. A study on the metal carbide composite diffusion bonding for mechanical seal[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(2): 1479-1483.

[10] KOVALCHENKO A M. Development of ultrananocrystalline diamond (UNCD) coatings for multipurpose mechanical pump seals[J]. Wear, 2011, 270(3/4): 325-331.

[11] SUMANT A V, KRAUSS A R, GRUEN D M, et al. Ultrananocrystalline diamond film as a wear-resistant and protective coating for mechanical seal applications[J]. Tribology Transactions, 2005, 48(1): 24-31.

[12] ETSION I, MICHAEL O. Enhancing sealing and dynamic performance with partially porous mechanical face seals [J]. Tribology Transactions, 1994, 37(4): 701-710.

[13] ETSION I, BURSTEIN L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.

[14] ETSION I, KLIGERMAN Y. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seals faced[J]. Tribology Transactions, 1999, 42(3): 511-516.

[15] HALPERIN I E G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 430-434.

[16] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[17] TOMIOKA J, MIYANAGA N. Effect of surface roughness of mechanical seals for rotary blood pumps under blood sealing[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, 2014, 8(1): 1-9.

[18] 郝木明. 机械密封技术及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.

[19] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

(编辑: 王碧珺)