

发动机支点柔性圆周炭石墨 密封材料 PV 值试验

宋延礼¹, 刘平², 鄢鹏¹, 夏尚能¹, 刘力¹, 沈欣¹

(1. 自贡东新电碳有限责任公司

四川省特种炭石墨材料工程技术研究中心, 四川 自贡 643000;

2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 根据高空长航时航空发动机支点柔性圆周炭石墨密封材料的实际服役工况, 从高摩擦线速度 (60~130 m/s)、轻载 (30~400 kPa) 和温度 (25~600 °C) 的角度出发, 自主设计动态试验测试台, 评测国内部分现役机型用炭石墨密封材料的 PV 值, 并通过装机论证 PV 值试验的可行性。试验结果表明: 采用 80 m/s 恒速, 逐级增加载荷测得 XX1#-1、XX2#-1、XX3#-1、XX4#-1 和 XX5#-1 的许用 $[PV]$ 值分别为 4.8、5.9、6.9、9.1、12.3 MPa·m/s。采用 300 kPa 定载, 逐级增加线速度测得 XX2#-2、XX3#-2、XX4#-2 和 XX5#-2 的许用 $[PV]$ 值分别为 6.0、8.0、10.0、12.0 MPa·m/s。经某研究所装机论证发现当试验样的许用 $[PV]$ 值小于发动机的许用 $[PV]$ 值时, 易出现异常磨损, 并伴随燃气泄漏; 当试验样的许用 $[PV]$ 值大于发动机的许用 $[PV]$ 值时, 能为发动机支点炭石墨密封材料选型提供材料特性数据, 为发动机炭石墨密封材料的研究提供鉴别方法。此外, 该试验方法将大大节约发动机用石墨密封材料选型的时间成本、人力成本和装机论证经费的投入成本。

关 键 词: 航空发动机; 高空长航时; 炭石墨密封材料; PV 值; 许用 $[PV]$ 值

中图分类号: V263.1⁺4

文献标志码: A

Experiment on PV value of fulcrum flexible circumferential carbon graphite sealing material for engine

SONG Yanli¹, LIU Ping², YAN Peng¹, XIA Shangneng¹, LIU Li¹, SHEN Xin¹

(1. Sichuan Provincial Engineering Technology Research Center of Special Carbon-Graphite Materials,

Zigong Dong Xin Carbon Company, Limited, Zigong Sichuan 643000, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to evaluate the PV value of the carbon graphite sealing material used in the aero-engines of some current models at home, the dynamic test bench was independently designed according to the actual service conditions of the fulcrum flexible circumferential carbon graphite sealing material for engine at high altitude-long endurance, under the condition of high friction linear velocity (60 — 130 m/s), light load (30 — 400 kPa) and temperature (25 — 600 °C). The test results showed that the allowable $[PV]$ values of XX1#-1, XX2#-1, XX3#-1, XX4#-1 and XX5#-1, using a constant speed of 80 m/s and gradually increasing the load, were 4.8, 5.9, 6.9, 9.1, 12.3 MPa·m/s, respectively. The allowable $[PV]$ values of XX2#-2, XX3#-2, XX4#-2 and XX5#-2, using a permanent load of 300 kPa and increasing the linear velocity step by step, were 6.0, 8.0, 10.0 and 12.0 MPa·m/s, respectively. The installation demonstration of

收稿日期: 2021-07-30

作者简介: 宋延礼(1969—), 男, 工程师, 主要从事航空炭石墨密封材料研究。

通信作者: 刘平(1992—), 男, 博士生, 主要从事航空炭石墨密封材料研究。E-mail: LP996781020@163.com

引用格式: 宋延礼, 刘平, 鄢鹏, 等. 发动机支点柔性圆周炭石墨密封材料 PV 值试验[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2830-2839. SONG Yanli, LIU Ping, YAN Peng, et al. Experiment on PV value of fulcrum flexible circumferential carbon graphite sealing material for engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2830-2839.

an institute found that the test samples were prone to abnormal wear and gas leakage, when the allowable $[PV]$ value of the test sample was less than the allowable $[PV]$ value of the engine. When the allowable $[PV]$ value of the test sample was greater than the allowable $[PV]$ value of the engine, this method can not only provide material characteristic data for selection of the engine fulcrum carbon graphite sealing material, but also contribute to the research of the engine carbon graphite sealing material identification method. In addition, the time cost, labor cost and installation demonstration cost of graphite sealing material selection for engine will be also greatly reduced through this test method.

Keywords: aeroengines; high altitude-long endurance; carbon graphite sealing material; PV value; allowable $[PV]$ value

航空发动机柔性圆周炭石墨密封是有别于端面密封的一种特殊径向密封形式,一般由 3~7 瓣组合而成,由周向拉伸弹簧箍紧到高速旋转的主轴表面构成径向密封面,瓣与瓣间有斜口搭接和主、侧、盖组合搭接密封,端面在轴向压缩弹簧的作用下靠在密封座的端面上形成二次密封界面,相对不产生圆周运动,协同限制径向密封泄漏。

随着我国航空事业的发展,要求新一代航空发动机柔性圆周炭石墨密封需满足以下 3 个基本要求:①主轴支点炭石墨封严装置在整个发动机寿命周期内空气泄漏量必须要低,否则将导致发动机的滑油分离发生困难,造成滑油消耗增大。②随着航空发动机压气机的效率和涡轮温度的提高,发动机主轴石墨封严装置的使用环境越来越恶劣(主要表现在密封对磨面的线速度和环境温度迅速提高),就要求炭石墨材料具有优异的抗氧化性能和高线速度服役性能。③随着作战任务需求,发动机的使用寿命从几百小时提高到几千小时,对主轴支点封严装置的设计、制造与试验提出了前所未有的要求^[1-5]。以现役某机型搭配发动机为例,其典型工况环境要求线速度为 60~130 m/s,封严油和封气温度为 176~535 ℃,摩擦副 PV 值为 1.24~11.77 MPa·m/s(通过设计所计算)。

基于上述苛刻的服役环境,炭石墨材料因具有优异的化学稳定性、高导热性、自润滑性、可加工性和低膨胀系数等优异的性能,在航空发动机封严系统占据着不可取代的地位^[6-9]。但炭石墨材料因制备工艺和制备方法不同,以及自身均质性较差、脆性较大、随机尖端微裂纹分布明显等问题,导致其综合性能和批次稳定性差异较大。因此,发达国家纷纷制定了相应的航空炭石墨密封材料选型标准,优选出静动态综合性能优异的炭石墨密封材料后,再组装成套环上机试验;这将大大缩短研制周期,节约数百亿美元的试验费

用。相较于发达国家,我国航空航天用炭石墨密封材料的研发起步相对较晚,在炭石墨密封材料选型方面往往更倾向于关注其静态物理指标,如抗折强度、抗压强度、肖氏硬度、摩擦因数、开气孔率、导热率和热膨胀系数等。通常,首先判断炭石墨密封材料的静态指标是否达到选型标准;然后将其加工成标准样件,在低线速度、高温、轻载荷下进行动态性能测试;最后将相应优选出来的坯体加工成成套密封环送某研究所进行发动机装机,进行上机试验验证。但是,炭石墨材料动态性能测试的线速度较低,与发动机支点实际工作线速度相差甚远,不能较真实地反映材料的综合性能,导致其在动态性能指标方面的评价仍显乏力^[10-11]。诸如:清华大学摩擦学国家重点实验室的 UMT-2 型微摩擦磨损试验机、UMT-3 型可控环境摩擦磨损仪和 MR-H5 II 型高速环块磨损试验机的温度、压力、线速度可调,其主轴转速范围分别为 0.001~5 000、0.001~5 000 r/min 和 10~3 500 r/min。合肥工业大学 MM200 型摩擦磨损试验机是国内摩擦磨损试验机的一种基本机型,可做各种金属材料及非金属材料在滑动摩擦、滚动摩擦、滚滑复合摩擦等多种状态下的耐磨性能试验,并可模拟各种材料在干摩擦、湿摩擦、磨料磨损等不同工况下摩擦磨损试验,下试样轴转速为 200 r/min,上试样轴转速为 180 r/min。兰州中科 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机用于研究高温条件下被测材料摩擦磨损性能,样品台转速范围为 100~2 800 r/min。西安顺通 MM6000 型摩擦材料试验机主要用于摩擦材料、刹车材料的性能试验,试验转速范围为 500~6 000 r/min。北京粉末冶金研究所 MPV-1500 型摩擦试验机主要适用于塑料、粉末冶金、合金轴承等材料摩擦性能及 PV 值测定,无极变速范围为 10~2 650 r/min^[12]。

因此,如何更真实、有效地去评价航空发动

机用炭石墨密封材料在高摩擦线速度、轻载和低温工况下的动态机械性能变得尤为关键。

基于此,本文基于公司授权专利技术(ZL20172 0989003.1)的基础,加装发动机主轴状态摩擦环(材料40CrNiMoA 镀铬,表面粗糙度为 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$,径向跳动在 $0.04\ \mu\text{m}$ 以内)和温控设备,从高摩擦线速度($60\sim 130\ \text{m/s}$)、轻载($30\sim 400\ \text{kPa}$)和温控($25\sim 600\ ^\circ\text{C}$)的角度出发测试现役部分机型炭石墨密封材料的 PV 值后,将坯料加工成封严环,送某研究所进行装机试验,验证 PV 值试验的可行性。此外,本方案少有报道,其将为发动机支点炭石墨密封材料选型提供材料特性数据,为发动机支点炭石墨密封材料的研究提供鉴别方法;将大大节约航空发动机用石墨封严材料选型的时间成本、人力成本和上机论证经费等投入成本。

1 PV 值测试

1.1 PV 值测试原理

将炭石墨密封材料加工成标准样块作为静试样,对偶件作动试样,对试样进行径向加载。在径向负载的作用下,与摩擦副滑动面作相对运动,沿滑动面切线方向产生摩擦力,通过力臂作用传到摩擦力传感器上,转变为电信号,记录仪自动记录摩擦力矩的大小^[12]。通过插入试样中心的热电偶测量不同时间下的摩擦温度,同时也可根据需求对试样进行加热,测试其在不同温度状态下的摩擦磨损行为,通过测试的数值就能计算出炭石墨材料在某温度下的 PV 值。本文不对试样进行外加热,主要探测试样产生的摩擦磨损热条件下的 PV 值。

就 PV 值而言,目前学术界对 PV 值有两种观点:一种观点认为载荷 P 与磨损率呈指数关系,速度 V 与磨损率呈幂函数关系;另一种观点认为在摩擦面温度相同的条件下,速度 V 的影响只是行程的影响。两种观点各有所长,第一种观点适合评价航空炭石墨材料试样的选型;第二种观点适合评价航空炭石墨材料的寿命。针对本试验,更倾向于采用第一种观点去评价材料的 PV 值。

PV 值是指材料承受外界施加摩擦条件的能力($\text{MPa}\cdot\text{m/s}$); P 表示材料在垂直受力方向上的单位投影面积所受的压力(MPa); V 表示材料摩擦表面与对摩副相对滑动的线速度(m/s)^[13]。 PV 值又分为许用 $[PV]$ 值和极限 PV 值,许用值 $[PV]$ 值通常表示材料的工作特性,一般取极限 PV 值的

$2/3$ 左右;极限 PV 值表示材料在一定滑动速度下,材料能承受压强的极限值,或在一定压强下材料能承受滑动速度的极限值。

本试验采用定速-变载或定载-变速的试验方法进行极限 PV 值测试,其判断标准在于填埋在试样中心的监测热电偶显示试样温度出现异常或按周期测量试样的磨损值出现异常。当所选用的实际工况 PV 值小于许用 $[PV]$ 值时,表示材料能在该工况下安全使用;当大于许用 $[PV]$ 值时,则可能因边界润滑膜承载超过极限强度而导致发生异常磨损,进而引发航油泄漏。另外,在一定的温度 t 条件下, P 或 V 无穷小时,并不意味着另一数值能无穷大,而应该针对每一种航空炭石墨密封材料的服役工况,在给出许用 $[PV]$ 值的同时,还应该给出各自允许的极限 P 和极限 V 。在实际使用中,如果炭石墨材料的工作 PV 值太大,就会影响自润滑性能,造成温度升高,摩擦因数增大,缩短使用寿命。因此,研究和测定炭石墨材料的极限 PV 值等性能可以为设计部门提供正确使用炭石墨密封材料的数据,也可为生产部门产品质量的提高起促进作用^[12-18]。

1.2 PV 值测试试验台

图1为 PV 值试样尺寸规格图,由图可知加工试样的大小为 $40\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 12.5\ \text{mm}$,在试样顶部中心位置 $12.5\ \text{mm}\times 6.5\ \text{mm}$ 加工出直径为 $\Phi 1.5\ \text{mm}$ 的小孔。值得注意的是,为了模拟航空发动机实际工况,炭石墨材料加工的待测试样与摩擦环圆周表面所接触摩擦面的形状、结构和形式可以灵活设计和调控。图2为 PV 值试验台部分结构示意图,可测试炭石墨材料在不同对摩副下的 PV 值。1和4是40CrNiMoA镀铬光滑摩擦环,能模拟航空发动机柔性圆周炭石墨密封模式,在 P 较小, V 较大的情况下能产生气膜进行自润滑,磨损较小;2是40Cr2MoV镀铬螺旋摩擦环;3是50 Mn镀铬螺旋摩擦环,相较于1和4能排开气体的影

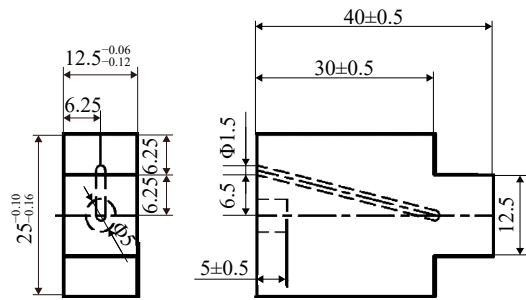
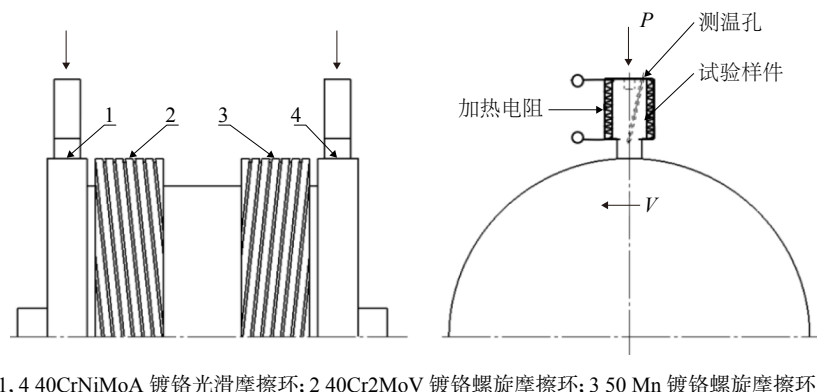


图1 PV 值测试样品尺寸规格(单位:mm)

Fig. 1 PV value test sample size specifications (unit: mm)

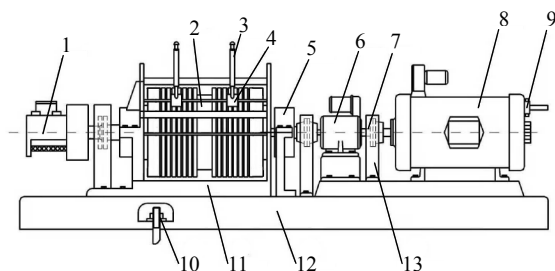


1, 4 40CrNiMoA 镀铬光滑摩擦环; 2 40Cr2MoV 镀铬螺旋摩擦环; 3 50 Mn 镀铬螺旋摩擦环。

图 2 PV 值试验台部分结构示意图

Fig. 2 Partial structure diagram of PV value test bench

响, 磨损更大。图 3 为 PV 值测试摩擦磨损试验台, 由图可知试验台主要由 13 部分构成。此外, 为减少高速条件下流动气体对 PV 值测试结果的影响, 可选用 2 个带螺旋槽的摩擦环; 为模拟发动机主轴支点密封的工作状态, 可选用 2 个光滑的摩擦环进行装机。



1 摩擦环机柄; 2 摩擦环; 3 试样压力器; 4 控温试样卡具盒;
5 轴承座; 6 转矩传感器; 7 联轴器; 8 调速电动机;
9 转速传感器; 10 工作台锁紧螺栓; 11 试验架;
12 大底板; 13 防护罩及控制系统。

图 3 PV 值摩擦磨损试验台

Fig. 3 PV value friction and wear test bench

1.3 PV 值测试步骤

1) 选择某企业生产的航空发动机用支点炭石墨密封坯体材料 XX1#、XX2#、XX3#、XX4#、XX5#、XX6# 为试样件, 对标中华人民共和国航空工业部标准, 判定材料符合物理标准, 如表 1。

2) 将步骤 1) 对标检测合格的坯体材料 ($\geq 40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$), 按照图 1 加工成符合要求的待测试样后, 超声清洗 30 min 后, 置于真空干燥箱中 110°C 干燥 12 h, 待用。

3) 将步骤 2) 加工好的试样装入试样卡具盒中后, 在试样侧面的小孔中 ($\Phi 1.5 \text{ mm}$) 插入测温热电偶, 采用恒速 (80 m/s) - 变载的试验方法, 在

30~410 kPa 区间内选定施加径向负荷。

4) 检查动态试验装置及控制系统运行是否正常, 选择对摩副, 如表 2。

5) 启动试验设备, 将试样和摩擦环进行磨合, 待磨合面积达 95% 以上时停机, 用量块及千分表比较测量初磨合试样的原始高度 (精确度为 0.000 1), 并记录。

6) 将步骤 5) 中取下的试样再次装入试样卡具中, 将装置的圆周线速度设定为 80 m/s, 实时观测试样温度、摩擦因数, 每 30 min 记录一次, 运行满 2 h 后, 取下试样后用量块及千分表比较测量高度, 并计算磨损量。

7) 按 20 kPa 逐级增加负荷, 重复步骤 6), 直到极限 PV 值的表征现象 (单位时间内温度或磨损值骤然上升) 出现或设备超限不运行时停止试验, 关停试验设备, 取下试样, 计算许用 $[PV]$ 值。

8) 根据步骤 7) 求的许用 $[PV]$ 值判定其符合哪一发动机体系, 将相应坯体加工成封严环, 送某研究所装机。在同样的试验条件下验证, 运行一段时间后停机, 观察炭石墨材料是否出现异常磨损、疲劳磨损、开裂、脆断和漏油等现象。如正常进行下一步试验, 反之终止试验。

9) 如步骤 8) 验证正常, 将步骤 2) 加工好的试样装入试样卡具后, 在试样侧面的小孔中 ($\Phi 1.5 \text{ mm}$) 插入测温热电偶, 采用恒定载荷 (300 kPa) - 变速的试验方法, 在 10~80 m/s 区间内设定滑环的圆周线速度。

10) 重复步骤 4) 和步骤 5) 后, 取下试样再次装入试样卡具中, 将载荷设定为 300 kPa, 实时观测试样温度、摩擦因数, 每 30 min 记录一次, 运行满 2 h 后, 取下试样后用量块及千分表比较测量

高度并计算磨损量。

11) 按 10 m/s 逐级增加线速度, 重复步骤 10), 直到极限 PV 值的表征现象出现, 关停试验设备, 取下试样, 计算许用 $[PV]$ 值。

12) 根据步骤 11) 的许用 $[PV]$ 值判定其符合哪一发动机体系, 将相应坯体加工成炭石墨封严

环, 送至研究所装机。在同样的试验条件下验证, 运行一段时间后停机, 观察样件是否出现异常磨损、开裂、脆断和漏油等现象来论证试验台和测试方法的可行性和合理性。

13) 为排除试验方法的随机误差, 每组试样进行 3 次测试论证。

表 1 炭石墨密封材料的性能参数

Table 1 Properties parameters of carbon graphite sealing material

性能参数	XX1#	XX2#	XX3#	XX4#	XX5#	XX6#
抗折强度/MPa	77	83	62	72	67	85
抗压强度/MPa	176	167	120	156	143	196
体积密度/(g/cm ³)	1.98	1.93	1.93	1.95	1.90	2.0
肖氏硬度/HS	86	83	63	83	89	85
开气孔率/%	3.0	1.4	2.1	1.2	1.7	0.7
热氧化失重/(mg/(cm ³ ·h)) (500 ℃×2 h)	0.8	0.8	0.9	0.6	0.5	0.4

表 2 对摩副材料的性能参数

Table 2 Performance parameters of anti-rubber pair materials

编号	材料名称	表面粗糙度/ μm	径向跳动/mm	直径/mm	螺距/mm	槽宽/mm	螺旋升角/($^\circ$)
1	40CrNiMoA 镀铬	0.2~0.4	0.04	450			
2	40Cr2MoV 镀铬	0.4~0.8	0.03	450	10.0	3	6
3	50Mn 镀铬	0.4~0.8	0.04	450	12.5	3	6
4	40CrNiMoA 镀铬	0.2~0.4	0.03	450			

2 结果与讨论

本文通过控制变量法从变载荷(P)和线速度(V)的角度来评价炭石墨材料, 未对试样进行加热。基于炭石墨材料的特殊性, 一般温度大于 200 ℃ 时炭石墨材料对温度才会比较敏感^[10,19]。本文中所提及 PV - t 中的温度(t)主要源于试样与对摩副之间所产生的摩擦热。因此, 极限 PV 值的本征出现点主要关注试样在单位时间内磨损值骤然上升的临界点。

图 4 为采用不对试样和摩擦副升温, 80 m/s 恒速, 在 30~410 kPa 变载的试验方法测试得到 PV 值与 t 、 W 的特征曲线(表 3)。由图 4 可知, 不同试样的温度曲线均出现波动, 这归因于环境温度的影响。由图 4(a)可知, XX1#-1 试样温度在 89 ℃ 时出现拐点, 单位时间内磨损值陡然上升, 极限 PV 值为 7.2 MPa·m/s, 极限点磨损值为 0.137 5 mm/h, 许用 $[PV]$ 值为 4.8 MPa·m/s; 经加工成封严环送至某研究所 XX 机型(该支点 PV 值要求达到 11.0 MPa·m/s)装机论证发现, 发动机在台

架试验 20 h 出现了快速异常磨损, 并伴随燃气泄漏。由图 4(b)可知, XX2#-1 试样温度为 55 ℃ 时出现拐点, 极限 PV 值为 8.8 MPa·m/s, 极限点磨损值为 0.015 5 mm/h, 许用 $[PV]$ 值为 5.9 MPa·m/s, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 4.0 MPa·m/s)。由图 4(c)可知, XX3#-1 试样温度为 52 ℃ 时出现拐点, 极限 PV 值为 10.4 MPa·m/s, 极限点磨损值为 0.006 mm/h, 许用 $[PV]$ 值为 6.9 MPa·m/s, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 6.0 MPa·m/s)。由图 4(d)可知, XX4#-1 试样温度为 75 ℃ 时出现拐点, 极限 PV 值为 13.6 MPa·m/s, 极限点磨损值为 0.005 8 mm/h, 许用 $[PV]$ 值为 9.1 MPa·m/s, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 8.0 MPa·m/s)。由图 4(e)可知, XX5#-1 试样温度为 61 ℃ 时出现拐点, 极限 PV 值为 18.4 MPa·m/s, 极限点磨损值为 0.003 3 mm/h, 许用 $[PV]$ 值为 12.3 MPa·m/s, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 11.0 MPa·m/s)。

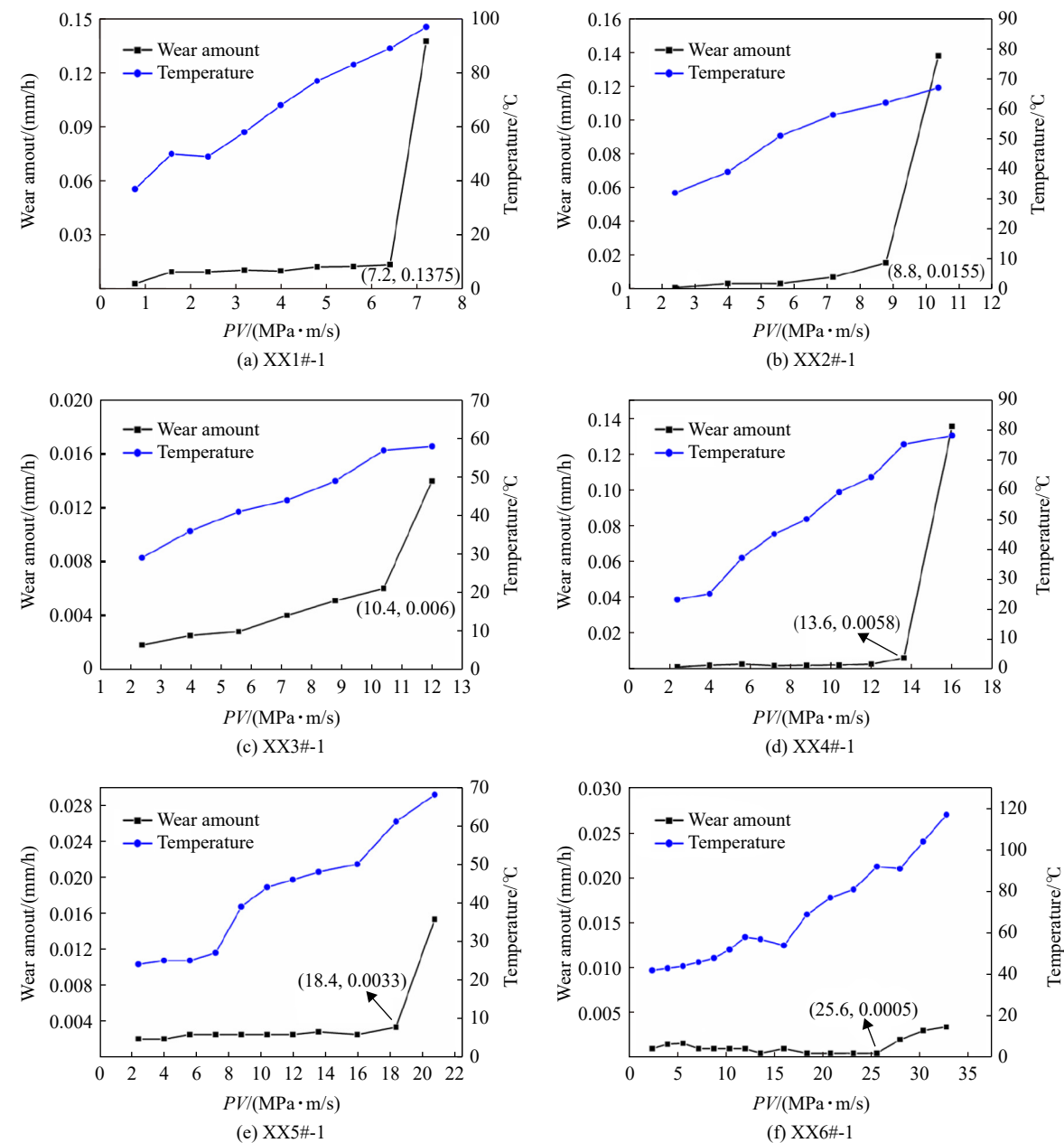


图 4 炭石墨密封材料恒速时的 PV 值与温度和磨损量的特征曲线

Fig. 4 Characteristic curves of PV value, temperature and wear amount of carbon graphite sealing material at constant velocity

表 3 炭石墨密封材料恒速时的 PV 值试验及验证结果汇总

试样编号	极限 PV 值/ (MPa·m/s)	极限点磨损值/ (mm/h)	样件温度/ ℃	许用 $[PV]$ 值/ (MPa·m/s)	发动机设计要求 许用 $[PV]$ 值/(MPa·m/s)	验证结果
XX1#-1	7.2	0.137 5	89	4.8	≥ 11.0	发动机应用异常
XX2#-1	8.8	0.015 5	55	5.9	≥ 4.0	发动机应用正常
XX3#-1	10.4	0.006 0	52	6.9	≥ 6.0	发动机应用正常
XX4#-1	13.6	0.005 8	75	9.1	≥ 8.0	发动机应用正常
XX5#-1	18.4	0.003 3	61	12.3	≥ 11.0	发动机应用正常
XX6#-1	≥ 32.8			≥ 21.8		待验证

由图 4(f) 可知, XX6#-1 试样, 极限 PV 值不小于 32.8 MPa·m/s, 许用 $[PV]$ 值不小于 21.8 MPa·m/s,

超过本试验设备量程, 从经验判断 XX6#-1 样品有望用作高空长航时航空发动机炭石墨封严材料,

待进一步验证。

图 5 为采用不对试样和摩擦副升温, 300 kPa 定载, 10~80 m/s 变速的试验方法测试得到 PV 值与温度、磨损量的特征曲线(表 4)。由图 5 可知,

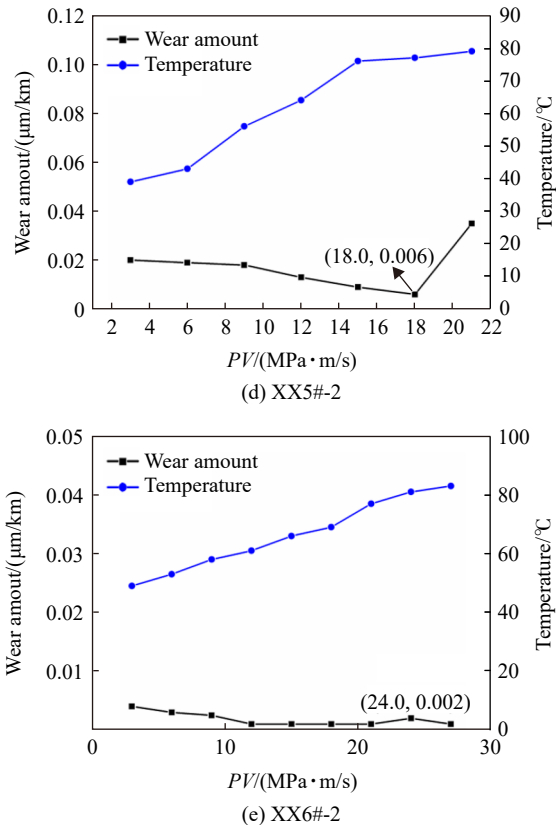
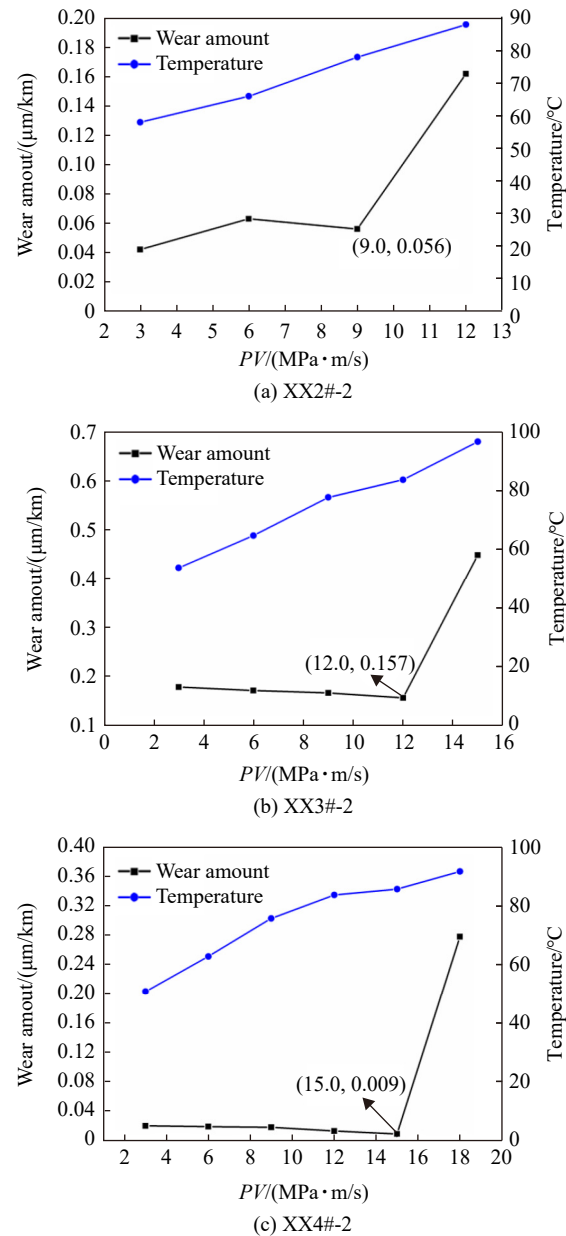


图 5 炭石墨密封材料恒载时的 PV 值与温度和磨损量的特征曲线

Fig. 5 Characteristic curves of PV value, temperature and wear amount of carbon graphite sealing material at permanent load

不同试样的温度曲线均出现波动, 这归因于环境温度的影响。由图 5(a)可知, XX2#-2 试样温度为 70°C 时出现拐点, 极限 PV 值为 $9.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 极限点磨损值为 $0.056 \mu\text{m}/\text{km}$, 许用 $[PV]$ 值为 $6.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$; 经加工成封严环送至某研究所 XX 机型(该支点 PV 值要求达到 $11.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$)装机论证发现, 发动机在台架试验 20 h 出现了快速磨损, 并伴随燃气泄漏。由图 5(b)可知, XX3#-2 试样温度为 87°C 时出现拐点, 极限 PV 值为 $12.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 极限点磨损值为 $0.157 \mu\text{m}/\text{km}$, 许用 $[PV]$

表 4 炭石墨密封材料恒载时的 PV 值试验及验证结果汇总

Table 4 Summary of PV value test and results verification of carbon graphite sealing materials at permanent load

试样编号	极限 PV 值/ ($\text{MPa}\cdot\text{m/s}$)	极限点磨损值/ ($\mu\text{m}/\text{km}$)	样件温度/ $^{\circ}\text{C}$	许用 $[PV]$ 值/ ($\text{MPa}\cdot\text{m/s}$)	发动机设计 要求许用 $[PV]$ 值/ ($\text{MPa}\cdot\text{m/s}$)	验证结果
XX2#-2	9.0	0.056	70	6.0	≥ 11.0	发动机应用异常
XX3#-2	12.0	0.157	87	8.0	≥ 6.0	发动机应用正常
XX4#-2	15.0	0.009	86	10.0	≥ 8.0	发动机应用正常
XX5#-2	18.0	0.006	77	12.0	≥ 11.0	发动机应用正常
XX6#-2	≥ 27.0			≥ 18.0		待验证

值为 $8.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 $6.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$)。由图 5(c)可知, XX4#-2 试样温度为 86°C 时出现拐点, 极限 PV 值为 $15.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 极限点磨损值为 $0.009 \mu\text{m/km}$, 许用 $[PV]$ 值为 $10.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 $8.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$)。由图 5(d)可知, XX5#-2 试样温度为 77°C 时出现拐点, 极限 PV 值为 $18.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 极限点磨损值为 $0.006 \mu\text{m/km}$, 许用 $[PV]$ 值为 $12.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 经论证发动机装机试验使用情况正常(该支点 PV 值要求达到 $11.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$)。由图 5(e)可知, XX6#-2 试样超出试验台 PV 值测试范围, 无明显拐点出现, 可以判定极限 PV 值 $\geq 27.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 许用 $[PV]$ 值 $\geq 18.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$, 待装机进行验证。

3 摩擦磨损机理分析

1) 从温度角度分析, 本文未对摩擦副和试样升温, 其温度主要归因于试样与对摩擦副间产生的摩擦热。试样极限 PV 值表征的出现点归因于试样表面的疲劳与磨粒磨损和摩擦面温度升高造成水蒸气蒸发, 导致润滑膜的重构速度不足以匹配磨损和解吸附速度^[20]。

2) 从载荷角度分析, 线速度恒定, 载荷越大, 试样的表面越快变光滑归因于疲劳和磨粒磨损。载荷逐渐变大, 疲劳和磨粒磨损将变得更为剧烈, 润滑膜的吸附重构和热解附能力不断平衡。当最终达到平衡时, 其将在试样的摩擦表面逐渐形成较为稳定的润滑膜, 从而 PV -磨损量趋于稳定。当载荷进一步加大, 试样的疲劳和磨粒磨损加剧, 上述平衡被破坏, 导致磨损加剧, 出现极限 PV 值本征现象^[21]。

3) 从线速度角度分析, 载荷恒定, 速度越快, 疲劳和磨粒磨损越快, 试样的表面越快变光滑归因于疲劳和磨粒磨损机制。线速度低时, 摩擦面产生的摩擦热较少, 磨损较慢, 从而解吸附的速度也相应较慢。当润滑膜的重构速度大于磨损和解吸附速度时, 试样表面产生的润滑膜不会被破坏, PV -磨损量值趋于稳定。当线速度进一步加快, 试样摩擦面的摩擦热增加, 疲劳和磨粒磨损变快, 水蒸气蒸发, 造成润滑膜的重构速度小于磨损和解吸附速度, 导致磨损加剧, 出现极限 PV 值本征现象^[22]。

4 结论及展望

1) 采用 80 m/s 恒速, 逐级增加载荷测得 XX1#-1、XX2#-1、XX3#-1、XX4#-1 和 XX5#-1 的许用 $[PV]$ 值分别为 4.8 、 5.9 、 6.9 、 $9.1 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 和 $12.3 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$; 采用 300 kPa 定载, 逐级增加线速度测得 XX2#-2、XX3#-2、XX4#-2 和 XX5#-2 的许用 $[PV]$ 值分别为 6.0 、 8.0 、 10.0 、 $12.0 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$ 。经某研究所装机论证发现当试样的许用 $[PV]$ 值小于发动机的许用 $[PV]$ 值时, 易出现异常磨损, 并伴随燃气泄漏; 当试样的许用 $[PV]$ 值大于发动机的许用 $[PV]$ 值时, 能为发动机支点炭石墨密封材料选型提供材料特性数据, 为发动机炭石墨密封材料的研究提供鉴别方法。

2) 基于炭石墨密封材料试样物化性能、静动态性能的差异性, 通过控制单一变量、正交试验等方法可测试材料的 PV 值。本文 XX6#试样表现出优异的动态性能, 在不对试样升温、定速变载、变载定速的试验条件下未能观测到极限 PV 值表征出现点, 归因于测试条件和设备极限条件选择。基于 XX6#试样优异的性能, 有望用作高空长航时航空发动机支点柔性圆周密封材料。因此, 需进一步探索合适的测试方法, 诸如: 测试 XX6#试样在 525°C (包含摩擦热), 110 m/s 和 300 kPa 条件下的极限 $[PV]$ 值表征现象出现点, 计算得到许用 $[PV]$ 值。

3) 发动机支点柔性圆周炭石墨密封材料 PV 值试验中发现同样的试验载荷在许用 $[PV]$ 值范围内, 线速度越高单位里程磨损值越小。上述现象可能与高速流动气体有关, 是否可以从空气动力学的角度出发, 针对发动机支点密封结构设计, 建立数学模型进行预测。另外, 针对发动机封严系统而言, 炭石墨材料占据重要核心地位, 研究炭石墨材料的特性参数, 建立摩擦副配对试验及评价方法; 研究炭石墨材料在不同温度、压力和线速度下磨损量、摩擦因数、摩擦热效应和成膜性; 分析磨损面的物理化学结构变化, 分析炭石墨密封材料的摩擦磨损机理和机制, 提出在变温、变速和变载等不同工况环境下如何抑制炭石墨材料发生异常磨损的方法具有现实意义。

4) 发动机支点密封要求在轻载、高温、高速的条件下保证正常的使用寿命, 某研究所 TAXX 发动机地面模拟试验器能较好进行模拟试验, 能综合表征柔性圆周支点密封装置在封严高温气体、

主轴高速运转条件下的使用性能。但是,试验成本较高,影响因素较多,测试周期较长。基于此,是否可以将一个复杂的问题分解为1~2个简单的试验,诸如:石墨密封材料的耐高温热氧性能采用抗氧化性能试验(航空用碳石墨密封材料试验方法:HB5367)来表征;石墨密封材料轻载高速条件下的使用寿命采用 PV 值与磨损值测试来间接衡量。并考虑型号不同的研制阶段选择不同的试验方案,材料选型时选择简单可靠的试验项目,发动机性能试验时安排综合模拟试验。

5) 本文侧重于工程化应用,围绕航空发动机炭石墨密封材料的选型现状,提出一种能模拟航空发动机真实工况的试验台。通过控制变量法测试了某国某企业生产的航空发动机用支点炭石墨密封材料的 PV 值,并加工成成套密封环送至某研究所进行上机论证试验方案的可行性。但是,全文未结合试样件对其进行摩擦磨损面的微观形貌、晶体结构、元素变化和相关的的作用机制进行讨论。下一阶段,团队将借助扫描电子显微镜(SEM)、拉曼光谱(Raman)、X射线衍射仪(XRD)和X光电子能谱仪(XPS)等分析测试手段对 PV 值试样块的磨损面进行综合分析。

参考文献:

- [1] 黄湘龙, 刘李, 郭陵松. 主减速器石墨密封碗密封失效分析[J]. 工业技术创新, 2019, 6(2): 28-31.
HUANG Xianglong, LIU Li, GUO Lingsong. Analysis on the failure of the graphite sealing bowl in the main reducer[J]. Industrial Technology Innovation, 2019, 6(2): 28-31. (in Chinese)
- [2] 陈磊. 航空发动机刷式密封泄漏性能与结构优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
CHEN Lei. Studies on leakage characteristics and structure optimization of aeroengine brush seal[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [3] 《中国石油和化工》编辑部. 高性能石墨密封材料自主生产[J]. 中国石油和化工, 2019, 338(4): 72.
China Petroleum and Chemical Industry Editorial Department. Independent production of high-performance graphite sealing materials[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2019, 338(4): 72. (in Chinese)
- [4] 王利恒. 石墨圆周密封装置密封面接触应力特性研究[J]. 机械工程师, 2019(11): 123-129.
WANG Liheng. Study on contact stress of circumference graphite seal instrument[J]. Mechanical Engineer, 2019(11): 123-129. (in Chinese)
- [5] 孙健伟. 高温高速旋转轴接触式密封材料研制及其密封性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SUN Jianwei. Research on contact sealing material and performance for high speed and high temperature rotary shaft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] TU Chuanjun, HONG Lirui, SONG Tenghui, et al. Superior mechanical properties of sulfonated graphene reinforced carbon-graphite composites[J]. Carbon, 2019, 148: 378-386.
- [7] HE Zhao, LIU Zhanjun, SONG Jinliang, et al. Fine-grained graphite with super molten salt barrier property produced from filler of natural graphite flake by a liquid-phase mixing process[J]. Carbon, 2019, 145: 367-377.
- [8] SHEN Ke, CAO Xinlei, HUANG Zhenghong, et al. Microstructure and thermal expansion behavior of natural microcrystalline graphite[J]. Carbon, 2021, 177: 90-96.
- [9] 徐凯松. 石墨密封应用发展现状的进展研究[J]. 炭素, 2019(4): 44-46.
XU Kaisong. Research on development of graphite seal[J]. Carbon, 2019(4): 44-46. (in Chinese)
- [10] 闫玉涛, 李雪娟, 胡广阳. 石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 314-320.
YAN Yutao, LI Xuejuan, HU Guangyang. Friction/wear behaviors and predication of graphite seal material under high temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 314-320. (in Chinese)
- [11] 邓少刚, 郭丽潇, 梁宇. 载荷对HTR-PM高温气冷堆用石墨球磨损性能的影响[J]. 辐射防护, 2019, 39(6): 510-516.
DENG Shaogang, GUO Lixiao, LIANG Yu. Effect of loads on wear performance of graphite pebbles used in HTR-PM high temperature gas cooled reactor[J]. Radiation Protection, 2019, 39(6): 510-516. (in Chinese)
- [12] 马华农. MPV-1500型摩擦试验机在测量含油轴承摩擦系数和 PV 值中的应用[J]. 粉末冶金技术, 1990, 8(3): 161-164.
MA Huanong. Application of type MPV-1500 friction testing machine for measuring friction coefficient and PV value of oil-impregnated bearing[J]. Powder Metallurgy Technology, 1990, 8(3): 161-164. (in Chinese)
- [13] 马华农. 粉末冶金含油轴承 PV 值及其测定[J]. 粉末冶金技术, 1989, 7(2): 101-107.
MA Huanong. Determining method of PV value of P/M self-lubrication bearing[J]. Powder Metallurgy Technology, 1989, 7(2): 101-107. (in Chinese)
- [14] 沈锡华. 机械密封端面摩擦副的许用值[J]. 化工设备与管道, 1977(2): 3-7.
SHEN Xihua. Permissible value of the friction pair on the end face of the mechanical seal[J]. Process Equipment and Piping, 1977(2): 3-7. (in Chinese)
- [15] 程熊. 高 PV 值的气体润滑轴向滑动环密封[J]. 工程设计, 1995(1): 38-44.
CHEN Xiong. Gas-lubricated axial sliding ring seal with high PV value[J]. Konstruktion, 1995(1): 38-44. (in Chinese)
- [16] 张鹤, 邢庆坤, 张静. 高 PV 值密封环的热负荷建模分析与试验验证[J]. 润滑与密封, 2016, 41(4): 115-118.
ZHANG He, XING Qingkun, ZHANG Jing. Modeling and experimental study on thermal load estimation for seal under high PV value[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(4): 115-118. (in Chinese)
- [17] 左孝桐. 机械密封 PV 值的试验研究[J]. 流体机械, 1986(11): 37-38.
ZUO Xiaotong. Experimental research on PV value of mechanical seal[J]. Fluid Machinery, 1986(11): 37-38. (in Chinese)
- [18] 王菁. 方向性椭圆微孔密封表面 PV 值特性实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
WANG Jing. Experimental study on behavior of PV value of micro-

- inclined-ellipse-dimpled surface on mechanical seal[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [19] 薛雯. 高强石墨的高温摩擦磨损机理试验研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- XUE Wen. Friction and wear mechanism test research of high-strength graphite in high temperature[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 胡添琪. 高温下石墨密封材料摩擦磨损性能研究及预测[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- HU Tianqi. Friction and wear performance research and forecast of graphite sealing materials in high temperature[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012. (in Chinese)
- [21] 刘清平, 徐笑词, 何友成. 薄膜涂层摩擦学性能的灰色分析与预测[J]. [润滑与密封](#), 2003(4): 53-58.
- LIU Qingping, XU Xiaoci, HE Youcheng. The grey forecast on the tribological behaviors of the film[J]. [Lubrication Engineering](#), 2003(4): 53-58. (in Chinese)
- [22] 胡亚非, 王启立, 刘颀, 等. 石墨密封材料润滑膜形成规律及摩擦磨损研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 223-226.
- HU Yafei, WANG Qili, LIU Qi, et al. Research on forming rule of lubricant film and friction-wearing of graphite composite materials [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 39(2): 223-226. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)