

石墨密封材料高温摩擦磨损行为及预测

闫玉涛¹, 李雪娟², 胡广阳³, 胡添琪¹, 孙志礼¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 沈阳 110043;

3. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 利用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机研究了石墨 M210 密封材料高温下摩擦磨损性能, 采用扫描电子显微镜(SEM)观察分析了磨损表面形貌. 基于试验数据, 通过灰色理论 GM(1,1)建立了摩擦因数和磨损率预测模型. 结果表明: 石墨 M210 密封材料摩擦系数呈先增大再减小, 而后趋于一稳定值, 试验温度为 450 °C 时, 摩擦系数最小; 磨损率随着试验温度升高而增大. 试验温度在低于 300 °C, 磨损表面具有明显的黏着、撕裂和无序的塑流动痕迹, 高于 400 °C 时, 塑流动痕迹具有明显的方向性, 出现了剥落和断裂痕迹. 温度较低时, 石墨材料表面主要是水汽物理吸附膜起润滑作用, 随着试验温度升高, 由物理吸附膜润滑逐渐转向反应膜润滑. 基于试验数据建立了精度等级均为 1 级的摩擦因数和磨损率的预测模型.

关键词: 石墨 M210; 高温; 摩擦系数; 磨损率; 预测模型

中图分类号: V233.5; TH117.1

文献标志码: A

Friction/wear behaviors and predication of graphite seal material under high temperature

YAN Yu-tao¹, LI Xue-juan², HU Guang-yang³, HU Tian-qi¹, SUN Zhi-li¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Shenyang Liming Aero-engine Group Corporation,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110043, China;

3. Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The tribological properties of graphite M210 seal material under high temperature were investigated on a HT-1000 high temperature friction/wear tester. The worn surface of graphite pin was observed by scanning electronic microscope (SEM). The predication model on friction coefficient and wear rate was established by grey theory GM (1,1) based on the test data. The results show that the friction coefficient of graphite M210 seal material gradually augmented, then gradually diminished, and reached a steady value with the test time. The value of friction coefficient was minimal when the temperature was 450 °C. The wear rate increased with the temperature rise. The worn surface was characterized by obvious adhesion, laceration and unordered plastic flow under temperature 300 °C. The plastic flow trace had obvious directivity, and the desquamation and the rift were found on the worn surface when the temperature was above 400 °C. The lubrication action was mostly depend-

ent of the physically absorbed film by water vapor at lower temperature. With the temperature rise, the lubrication action turned to reaction film, and the lubrication of physical adsorbed film disappeared. The predication model for friction coefficient and wear rate was established based on test data by the gray theory, and the precision grade of the model was the first grade by the grade verification.

Key words: graphite M210; high temperature; friction coefficient; wear rate; predication model

航空发动机动力传输系统密封技术的提高是改善发动机性能的主要途径之一,密封的性能退化、结构故障及其导致的航空发动机故障是引起飞机计划外更换航空发动机的主要原因之一^[1-3]. 图 1 为航空发动机主轴承腔石墨圆周密封原理图,采用接触式动密封,主要用来阻止轴承腔滑油泄漏.密封性能退化的主要原因是石墨密封环磨损、热变形及随动特性^[1,4-5].

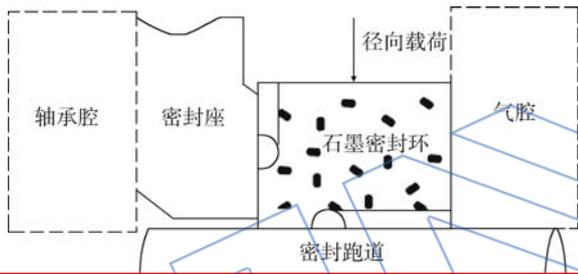


图 1 航空发动机主轴承腔石墨圆周密封原理
Fig. 1 Conception of graphite circumference seal of main bearing of aero-engine

石墨材料具有低密度、高强度、高导热性及低膨胀性等性能,在接触式动密封中得到了广泛的应用^[6-8]. 文献[9]对不同粒径尺度合成石墨材料的摩擦因数对压力和滑动速度的敏感性进行了研究和预测,合成原料粒径的最佳尺度为 80~250 μm . 文献[10]研究了干摩擦、水润滑和蒸汽环境下石墨的摩擦磨损性能,蒸汽环境下的磨损率比干摩擦下大. 更多的研究是将石墨作为一种固体润滑介质做成复合涂层或复合材料,研究复合材料或复合涂层在常温下的摩擦磨损性能,分析其磨损机理和失效形式^[11-14]. 航空发动机主轴承腔石墨圆周密封材料工作温度高达 500 $^{\circ}\text{C}$,而高温下石墨密封材料的摩擦磨损性能是判定密封性能和可靠性的关键指标,本文采用高温摩擦磨损试验机对石墨 M210 密封材料的摩擦磨损性能进行了试验研究,分析了石墨 M210 密封材料的摩擦磨损机理,并通过灰色理论 GM(1,1)建立了温度

对摩擦因数和磨损率影响的预测模型,期望为石墨圆周密封的分析和设计提供试验依据.

1 试验方法

摩擦磨损试验在 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机上进行,采用销-盘式滑动摩擦副,载荷通过销试件夹具施加于摩擦副,盘试件作旋转运动,工作原理如图 2 所示. 销试件材料为石墨 M210,由某电碳厂采用超细粉技术对粉末粒度配比优选,生产结构均匀、致密,高机械强度的细颗粒石墨,表 1 为石墨 M210 密封材料物理力学性能,尺寸为 $\phi 4\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,盘试件材料为表面具有硬铬涂层的 40CrNiMoA,尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,采用 TR300 表面粗糙度测量仪测得盘试件的表面粗糙度为 0.7 μm . 试验条件:接触应力为 0.1 MPa,滑动速度为 150 mm/s,试验温度分别取 200,300,350,400,450 $^{\circ}\text{C}$ 和 500 $^{\circ}\text{C}$,试验时间为 20 min,每个实验条件下做 3 组试验,每组试验均

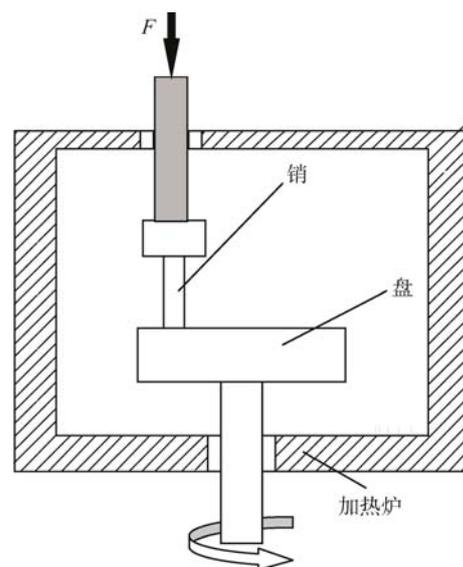


图 2 销-盘式滑动摩擦副示意图
Fig. 2 Schematic illustration of the pin-on-disk sliding friction pair

采用新试件, 试件在试验前后利用 SB4200DT 超声清洗器清洗 10 min, 摩擦因数通过测得的摩擦力矩经软件计算得到, 采用精度为 0.1 mg 的 TG328A 光电分析天平测量磨损前后的质量损失, 取 3 次测试平均值, 磨损率 W_r 为

$$W_r = \frac{\Delta W}{\rho FS} \quad (1)$$

式中 ΔW 为磨损质量损失 (mg); ρ 为石墨 M210 密封材料密度 (g/cm^3); F 为法向载荷 (N); S 为滑动距离 (m).

表 1 石墨 M210 密封材料的物理力学性能

Table 1 Physical/mechanical properties of graphite M210 seal material

密度/ (g/cm^3)	肖氏硬度/ HS	抗压强度/ MPa	抗折强度/ MPa	气孔率/ %
1.9	56	101	55	4.8

采用日本岛津公司 SSX-550 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试件磨痕的表面形貌, 分析石墨 M210 密封材料的磨损机理.

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能

石墨 M210 密封材料在不同试验温度下的摩擦因数随试验时间的变化规律如图 3 所示. 从图 3 可以看出: 摩擦副的平均摩擦因数随着试验温度的升高而降低, 不同试验温度下的摩擦因数均呈现先增大再减小, 最后趋于某一稳定值, 该摩擦因数的稳定值就是试验条件下的平均摩擦因数. 但是, 不同试验温度下摩擦因数的变化仍有较大的不同, 在 200 °C 和 500 °C 下, 摩擦因数在减小后又出现一个增大的变化, 500 °C 时的摩擦因数为 200 °C 时的 54%, 500 °C 试验条件下摩擦因数的变化梯度最大, 当试验时间达到 15 min 后, 摩擦因数趋于稳定. 试验温度为 300 °C 时, 摩擦因数变化比较平稳, 降低梯度小, 但波动较大. 在 350, 400 °C 和 450 °C 试验环境温度下, 摩擦因数的变化规律趋于相同, 且摩擦因数较小, 当试验时间达到 10 min 后, 摩擦因数已达到稳定值, 450 °C 时摩擦因数最小为 0.0317. 根据不同试验温度下摩擦因数的变化规律分析可知: 石墨 M210 密封材料的环境温度应控制在 350~450 °C 之间, 减少摩擦性能最佳, 摩擦生热小, 可以降低因摩擦生热产生的热变形对密封性能的影响, 提高密封的可靠性和工作寿命.

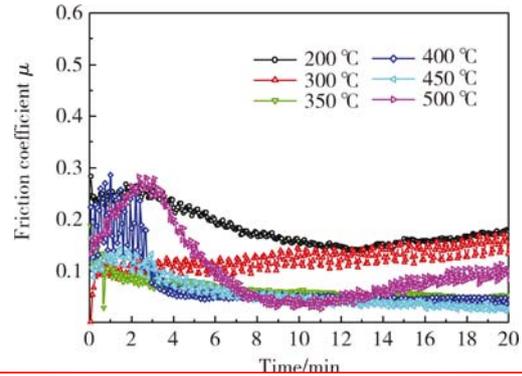


图 3 不同试验温度下石墨 M210 密封材料摩擦因数随试验时间变化曲线

Fig. 3 Variation of friction coefficient with test time at different temperatures for graphite M210 seal material

图 4 所示为不同试验温度下石墨 M210 密封材料的磨损率. 从图 4 中可以看到, 温度对石墨 M210 密封材料的耐磨性能具有较大的影响. 在温度为 200 °C 和 300 °C 条件下, 石墨 M210 密封材料的磨损率基本相同且较小, 500 °C 条件下的磨损率最大为 $7.848 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 是 200 °C 下磨损率的 2.96 倍. 温度在 350~450 °C 之间时, 石墨 M210 密封材料的磨损率基本相同, 在 450 °C 条件下, 磨损率略有增大. 从磨损率分析可知, 在温度低于 300 °C 时, 磨损率较小, 其耐磨性能较好, 但是航空发动机主轴密封的温度一般较高, 在使用石墨 M210 密封材料时, 温度应控制在 350~450 °C 之间, 可以提高密封的可靠性和使用寿命, 这与其具有较好的减摩性能相对应.

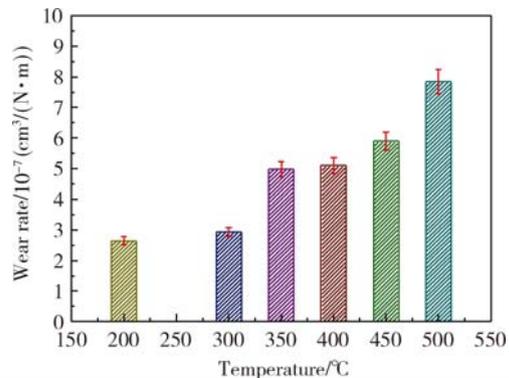


图 4 不同试验温度下石墨 M210 密封材料磨损率

Fig. 4 Variation of wear rate at different temperatures for graphite M210 seal material

2.2 磨损机理探讨

图 5 为不同试验温度下石墨 M210 密封材料

磨损表面的 SEM 照片. 在试验温度较低时, 磨损表面具有明显的黏着和撕裂, 石墨表面材料表现为无序的塑流动痕迹(图 5(a)和图 5(b)). 图 5(c) 为 350℃ 试验温度下的磨损表面形貌, 表面较平滑, 塑流动痕迹明显减弱, 出现了明显的剥落痕迹. 图 5(d) 为 400℃ 试验温度下的磨损表面形貌, 塑流动痕迹出现了较明显的方向性, 与滑动速度方向具有一致性, 主要表现为黏着磨损. 随着试验温度不断增大, 石墨磨损表面除了存在黏着、塑流动痕迹外, 还出现了断裂迹象(图 5(e)和图 5(f)). 这些磨损机理与不同试验温度下的减摩耐磨性能相对应. 分析认为: 石墨晶体中碳原子的 3 个价电子同相邻碳原子的电子互相交盖, 形成呈三角形的共价键, 第 4 个价电子位于交盖区的法

线位置, 可在层面内运动, 石墨层面碳原子含有未成键的自由电子, 具有较高的活性^[15]. 在空气条件下, 当试验温度较低时, 在石墨材料表面主要是水汽物理吸附膜起润滑作用, 当温度升高到 200℃ 以上时, 吸附于摩擦表面的水分子将有 50% 左右发生解吸, 润滑效果降低, 随着试验温度的逐步升高, 石墨材料摩擦表面的物理吸附膜发生破坏, 润滑作用很快降低, 导致摩擦因数有所增大. 当温度升高到 350℃ 至 400℃ 时, 石墨摩擦表面物理吸附膜的润滑作用消失, 此时, 碳原子与氧原子之间的热化学反应显著加速, 随着摩擦过程中新裸露的石墨表面碳原子与氧原子之间反应的进行, 石墨表面能降低, 反应产物在石墨表面形成具有减摩作用的反应膜, 从而降低了摩擦因数.

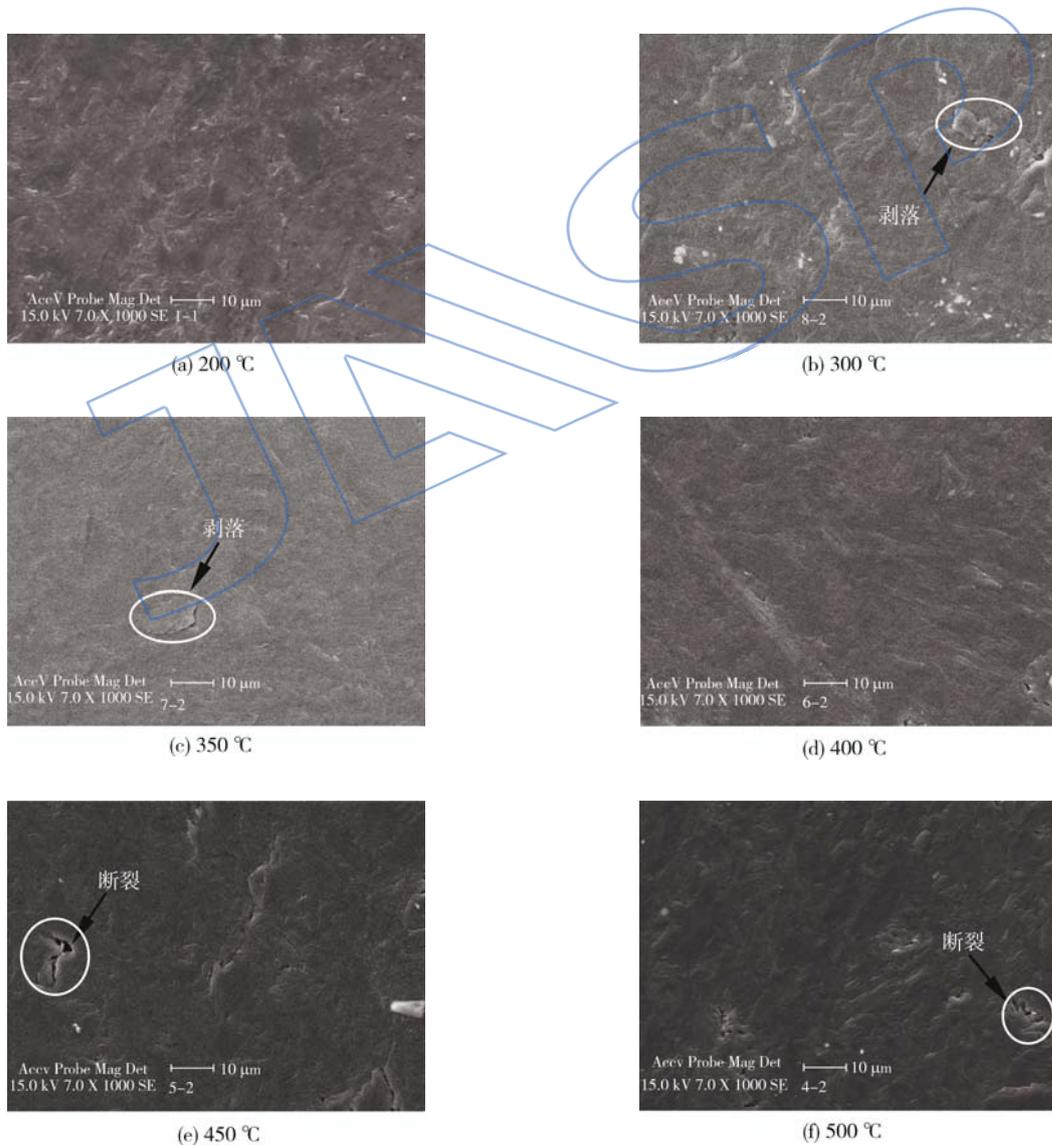


图 5 不同温度下石墨 M210 密封材料磨损表面形貌 SEM 照片

Fig. 5 Graphite M210 seal material SEM images of morphologies of worn surface under different temperature

当试验温度达到 500 °C 以上时,反应膜的形成和碳原子与氧原子之间的反应速度不断的失去平衡,润滑方式变成反应膜的残膜润滑,其减摩作用逐步减小,摩擦因数有所增大.随着试验温度的升高,石墨摩擦表面由物理吸附膜润滑逐渐转向反应膜润滑,反应膜的润滑是以牺牲石墨材料本身的质量为代价的,因此,磨损率随温度的增大而逐渐增大.

3 减摩耐磨性能预测模型建立

3.1 GM(1,1)模型

灰色系统是针对部分信息已知和部分信息未知的小样本、贫信息不确定系统进行研究,灰色系统模型对试验观测数据没有特殊要求和限制.GM(1,1)模型是 1 阶方程,一个变量的灰色模型,灰色预测就是通过对原始数据列的处理和灰色模型的建立,对系统的未来状态作出定量的预测.表 2 为 GM(1,1)模型精度等级判据,第一后验差指标为后验方差比,第二后验差指标为小误差概率,根据判据可以判定所建预测模型的可靠度和可用度^[16].

表 2 GM(1,1)模型精度等级判据

精度等级	p	C
1 级(好)	$0.95 \leq p$	$C \leq 0.35$
2 级(合格)	$0.80 \leq p < 0.95$	$0.35 < C \leq 0.50$
3 级(勉强)	$0.70 \leq p < 0.80$	$0.50 < C \leq 0.65$
4 级(不合格)	$p < 0.70$	$0.65 < C$

GM(1,1)模型的计算步骤如下:

1) 对一组原始数据列

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (2)$$

进行一次累加生成,得到数列

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(k), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (3)$$

式中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$$

2) 对 $x^{(0)}$ 作准光滑性检验

$$\phi(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} \quad (4)$$

3) 生成 $x^{(1)}$ 的紧邻均值等权数列

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(k) | k = 2, 3, \dots, n\} \quad (5)$$

式中

$$z^{(1)}(k) = 0.5[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

4) 对 $x^{(1)}$ 建立关于时间 t 的白化形式的 1 阶一元微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (6)$$

式中 a, b 为待解参数.

若 $\hat{a} = [a, b]^T$, 运用最小二乘法求得

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

式中

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

5) 解出 \hat{a} 后,就可得到白化形式的微分方程的解

令 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$, 得事件响应模型

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

6) 将结果累积还原,即可得到预测值

$$x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) \quad (9)$$

发展系数 a

$$a = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) - \sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) z^{(1)}(k)}{\sum_{k=2}^n (z^{(1)}(k))^2 - \frac{1}{n-1} \left(\sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) \right)^2} \quad (10)$$

灰色作用量 b

$$b = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{k=2}^n x^{(0)}(k) + a \sum_{k=2}^n z^{(1)}(k) \right] \quad (11)$$

对于式(2)原始序列相应的预测模型模拟序列为

$$\hat{X}^{(1)} = [\hat{x}^{(1)}(1), \hat{x}^{(1)}(2), \dots, \hat{x}^{(1)}(n)] \quad (12)$$

残差序列为

$$e^{(0)} = [e(1), e(2), \dots, e(n)] = [x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(n)] \quad (13)$$

则残差平均数 \bar{e} 为

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e(k) \quad (14)$$

残差标准差 S_e 为

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e(k) - \bar{e}]^2} \quad (15)$$

实际数标准差 S_x 为

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2} \quad (16)$$

式中 \bar{x} 为平均数.

后验方差比 C 为

$$C = S_e/S_x \quad (17)$$

小误差概率 p 为

$$p = P\{|e^{(0)}(i) - \bar{e}| < 0.6745 S_x\} \quad (18)$$

3.2 温度对石墨 M210 密封材料摩擦磨损性能影响预测

预测模型建立使用的试验数据为试验条件下所测得的石墨 M210 密封材料摩擦因数和磨损率,具体的试验数据见表 3 所示.

表 3 石墨 M210 密封材料测试试验数据

Table 3 Test data of graphite M210 seal material

试件	温度/℃	摩擦因数	磨损率/ 10 ⁻⁷ (cm ³ /(N·m))
1	200	0.1726	2.649
2	300	0.1496	2.943
3	350	0.0475	4.987
4	400	0.0429	5.101
5	450	0.0317	5.896
6	500	0.0931	7.848

3.2.1 摩擦因数预测模型

不同温度下石墨 M210 密封材料的摩擦因数已知数列为

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2) \cdots x^{(0)}(6)] = [0.1726, 0.1496, 0.0475, 0.0429, 0.0317, 0.0931]$$

根据灰色预测理论可得,发展系数 $a=0.2804$, 灰色作用量 $b=0.1798$.

则摩擦因数预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \left[0.1726 - \frac{b}{a}\right] e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (19)$$

模型精度检验,根据试验数据求得

$$S_e = 0.0175, \quad S_x = 0.0545, \quad \bar{e} = 0.00031$$

则后验方差比

$$C = S_e/S_x = 0.3211$$

小误差概率

$$p = P\{|e^{(0)}(i) - \bar{e}| < 0.6745 S_x\} = 1$$

对照模型精度等级判据表 2 可知,预测模型精度等级为 1 级,精度好.

3.2.2 磨损率预测

不同载荷下石墨 M210 密封材料的磨损率已知数列为

$$x^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2) \cdots x^{(0)}(6)] = [2.649, 2.943, 4.987, 5.101, 5.896, 7.848]$$

根据灰色预测理论可得,发展系数 $a = -0.2000$, 灰色作用量 $b=2.5760$.

则磨损率预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \left[2.649 - \frac{b}{a}\right] e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a} \quad (20)$$

模型精度检验,根据试验数据求得

$$S_e = 0.4161, \quad S_x = 1.7619, \quad \bar{e} = 0.0153$$

则后验方差比

$$C = S_e/S_x = 0.2362$$

小误差概率

$$p = P\{|e^{(0)}(i) - \bar{e}| < 0.6745 S_x\} = 1$$

对照模型精度等级判据表 2 可知,预测模型精度等级为 1 级,精度好.

4 结 论

1) 得到了石墨 M210 密封材料高温试验条件下的摩擦因数和磨损率的变化规律. 摩擦因数呈现先增大再减小,而后趋于某一稳定值. 试验温度为 450℃ 时,摩擦因数最小,摩擦热导致的热变形最小;磨损率随试验温度的升高而增大. 摩擦磨损规律的研究为工程应用提供了试验基础.

2) 当试验温度为 300℃ 以下,磨损表面具有明显的黏着、撕裂和无序的塑流动痕迹,高于 400℃ 时,塑流动痕迹具有较明显的方向性,并出现了剥落和断裂痕迹. 石墨棱面碳原子含有未成键的自由电子,具有较高的活性. 试验温度较低时,在石墨材料表面主要是水汽物理吸附膜起润滑作用,随着试验温度的升高,摩擦表面由物理吸附膜润滑逐渐转向反应膜润滑.

3) 在试验数据基础上,利用灰色系统理论建立了石墨 M210 密封材料的摩擦因数和磨损率温度影响的预测模型,并进行了模型精度检验. 精度等级为 1 级,为石墨 M210 密封材料性能预测提供了依据.

参考文献:

[1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 12 册[M]. 北京:航空工业出版社,1998.
[2] 毕中南,董建新,张麦仓,等. 一种航空发动机密封用镍基合金组织稳定性的实验研究及理论计算[J]. 航空学报,

- 2010,31(3):643-649.
- BI Zhongnan, DONG Jianxin, ZHANG Maicang, et al. Experimental study and theoretical calculation on structure stability of a nickel-based superalloy for seals in aeroengine [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(3): 643-649. (in Chinese)
- [3] 林基恕, 张振波. 21世纪航空发动机动力传输系统的展望 [J]. *航空动力学报*, 2001, 16(2): 108-114.
- LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21 century [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(2): 108-114. (in Chinese)
- [4] Pescosolido A, Dobek L. Development of high misalignment carbon seals [R]. AIAA-2001-3625, 2001.
- [5] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究 [J]. *航空发动机*, 2012, 38(3): 1-4.
- HU Guangyang. Application research of seal technologies for aeroengine [J]. *Aeroengine*, 2012, 38(3): 1-4. (in Chinese)
- [6] Sorokina N E, Redchitz A V, Ionov S G, et al. Different exfoliated graphite as a base of sealing materials [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2006, 67(5/6): 1202-1204.
- [7] SONG Yongzhong, ZHAI Gengtai, SONG Jinren, et al. Seal and wear properties of graphite from MCMBs/pitch-based carbon/phenolic-based carbon composites [J]. *Carbon*, 2006, 44(13): 2793-2796.
- [8] 高亮, 梁涛. 抗氧化碳-石墨密封材料的研制 [J]. *机械工程材料*, 2004, 28(7): 35-36.
- GAO Liang, LIANG Tao. Development of oxidation-resistant sealing material of carbon-graphite [J]. *Material for Mechanical Engineering*, 2004, 28(7): 35-36. (in Chinese)
- [9] Dilip K, Ghosh A K, Bijwe J. Analysis of load-speed sensitivity of friction composites based on various synthetic graphites [J]. *Wear*, 2009, 266(1/2): 266-274.
- [10] Hirani H, Goilkar S S. Formation of transfer layer and its effect on friction and wear of carbon-graphite face seal under dry, water and steam environments [J]. *Wear*, 2009, 266(11/12): 1141-1154.
- [11] MA Wenlin, LU Jinjun, WANG Jingbo. Sliding friction and wear of Cu-graphite against 2024, AZ91D and Ti6Al4V at different speeds [J]. *Wear*, 2009, 266(11/12): 1072-1081.
- [12] WANG Haidou, XU Binshi, LIU Jiajun, et al. Microstructures and friction-reduction performances of the graphite coatings [J]. *Materials Letters*, 2005, 59(13): 1683-1686.
- [13] ZHANG Xinrui, PEI Xianqing, WANG Qihua. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂ [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4414-4420.
- [14] CAI Bin, TAN Yefa, WANG Xiaolong, et al. Tribological properties of Ni-based alloy composite coating modified by both graphite and TiC particles [J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(11): 2426-2432.
- [15] Yen B K. Roles of oxygen in lubrication and wear of graphite in dusting and ambient conditions [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1995, 14(21): 1481-1483.
- [16] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2010.