

机械密封磨合过程软质环端面形貌变化的分形表征^{*}

魏 龙¹, 常新中², 张鹏高¹

(1. 南京化工职业技术学院 a. 流体密封与测控技术研究所 b. 江苏省流体密封与测控工程技术研究开发中心, 南京 210048; 2. 河南化工职业学院, 郑州 450042)

摘 要: 为研究和掌握机械密封磨合过程中软质环端面形貌的变化规律, 在自制的机械密封试验装置上对 2 套 B104a-70 型机械密封进行了 2 种弹簧比压下的磨合试验, 采用 AF-LI 型轮廓仪测量不同工作时段软质环的端面形貌参数, 运用分形理论对磨合过程中表面形貌的变化规律进行表征研究。结果表明: 软质环端面存在明显的磨合阶段, 随着磨合过程的进行, 分形维数 D 和特征分形参数 τ^* 迅速增大, 特征尺度系数 G 迅速减小, 当进入正常磨损阶段后, 它们都保持较稳定的数值, 稳定值分别为 $D \approx 1.636, G \approx 5.7 \times 10^{-9} \text{ m}, \tau^* \approx 1\ 030 \mu\text{m}$ 。特征分形参数表征磨合表面变化规律的灵敏性高, 表征效果好。端面载荷对端面分形参数的变化趋势无显著影响, 且对进入正常磨损阶段后的端面分形参数的影响很小, 但载荷大磨合期短, 弹簧比压为 0.15 MPa 和 0.3 MPa 时, 磨合时间分别约为 170.5 h 和 110.5 h。

关键词: 机械密封; 软质环; 磨合; 表面形貌; 分形参数

中图分类号: TH136

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0078-05

Fractal Characterization of Changing of Surface Topography of the End Face of Soft Ring in Running-in Procedure for Mechanical Seal

WEI Long¹, CHANG Xin-zhong², ZHANG Peng-gao¹

(1a. Fluid Sealing Measure and Control Institute, b. Fluid Sealing Measure and Control Engineering Research and Development Center in Jiangsu Province, Nanjing College of Chemical Technology, Nanjing 210048; 2. Henan Vocational College of Chemical Technology, Zhengzhou 450042)

Abstract: In order to research and master the changing rules of surface topography in the running-in procedure of the end face of soft ring for mechanical seal, the running-in tests of two different spring pressures in two sets of B104a-70 mechanical seals were tested on the self-designed mechanical seal testing device. Surface topography parameters of different working periods of soft ring were measured by AF-LI profilometer. The changing rules of surface topography in running-in procedure was studied on the characteristic by fractal theory. The results show that there is an obvious running-in stage on the end face of soft ring, fractal dimension D and characteristic fractal parameter τ^* increase rapidly, and characteristic length scale G decreases rapidly along with running-in procedure, and each of them keeps a stable value for $D \approx 1.636, G \approx 5.7 \times 10^{-9} \text{ m}, \tau^* \approx 1\ 030 \mu\text{m}$ when entering into the normal wearing stage. The characteristic fractal parameters sensitively characterize running surfaces changing rules well. Load of end face has no significant influence on the trend of the fractal parameter of the end face, and it has little influence on the fractal parameter of the end face when in the normal wearing stage. However, the running-in period is short when load is large, and the running-in time is about 170.5 h and 110.5 h respectively when the spring pressure is 0.15 MPa and 0.3 MPa.

Key words: mechanical seal; soft ring; running-in; surface topography; fractal parameter

0 引 言

磨合是机械密封使用初期摩擦副端面所必须经历的重要磨损过程, 它对防止密封端面发生

咬合、获得低磨损率的稳定持续工作状态、延长机械密封使用寿命等都有重要影响。机械密封摩擦副的动环和静环通常采用一硬一软两种材料配对使用^[1-2], 工作时变形及磨损主要发生在软质环上。为了方便分析问题, 一般将机械密封硬质环与软质环的接触, 简化为刚性理想光滑平面与粗糙表面的接触^[3-6]。密封环端面形貌的变

收稿日期: 2011-05-24; 修回日期: 2011-06-07

基金项目: * 江苏省“六大人才高峰”资助项目(09-D-018)

作者简介: 魏 龙(1972—), 男(汉), 江苏江宁人, 副教授, 博士。

化是摩擦副在磨合过程中表现出来的重要特征, 磨合的效果主要通过端面形貌的有利变化来获得, 因此, 正确表征机械密封磨合过程中软质环端面形貌的固有特性, 掌握表面形貌的变化规律对了解机械密封摩擦副端面间的接触特性、泄漏通道状况, 以及减轻端面的摩擦磨损、提高端面的磨合质量具有重要意义。然而, 机械密封磨合过程中端面形貌变化的研究目前还未受到重视。

以往研究^[1,3-5]主要采用基于随机过程理论的表面形貌表征参数。用轮廓的算术平均偏差 R_a 和轮廓的均方根偏差 R_q 来表征机械密封摩擦副的端面形貌。 R_a 和 R_q 值是在一定测量条件下获得的统计学表征参数, 受测量仪器的分辨率和取样长度的影响较大, 具有多重尺度 (mm、 μm 和 nm 级, 甚至更小) 特性, 无法反映实际表面的复杂程度, 也不能用作表面形貌模拟的参量^[7]。

分形理论是 Mandelbrot^[8] 在 1975 首先提出来的, 目前已广泛应用到表面工程研究的许多方面, 如表面形貌模拟、接触、摩擦、磨损、泄漏等^[6,8-11]。研究表明^[12], 机械密封摩擦副端面磨损前后的轮廓曲线均具有各向同性的统计自仿射分形特性, 其分形特征与尺度无关, 可以提供存在于分形面上所有尺度范围内的全部粗糙度信息。文中在自制的机械密封试验装置上对 B104a-70 型机械密封进行磨合试验, 采用 AF-LI 型触针式表面轮廓测量仪对不同磨合阶段的软质环端面轮廓进行测量和数据采集, 运用分形理论对软质环端面形貌随磨合时间的变化规律进行表征研究。

1 分形表征参数

1.1 粗糙表面形貌的表征和分形参数的计算方法

对于具有自仿射分形特征的粗糙表面可以用处处连续但处处不可导且具有自仿射分形特征的 W-M 函数来表征和模拟, 其表达式为^[13]

$$z(x) = G^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi\gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad 1 < D < 2 \quad (1)$$

G 是特征尺度系数; D 是轮廓分形维数; γ 是控制表面起伏密度的参量, 一般取 $\gamma = 1.5$; n_1 是与粗糙表面轮廓的最低截止频率相对应的序数。

计算分形参数的方法有很多种, 对于较大的分形维数, 结构函数法计算精度较高^[14]。由于机

械密封摩擦副端面为研磨加工, 分形维数较大, 文中采用结构函数法计算端面轮廓的分形参数。

通过结构函数 $S(\tau)$ 确定分形参数 D 和 G 时, 将轮廓仪测量的轮廓高度 $z(x)$ 的模拟信号通过 A/D 转换后输入计算机, 计算机的取样间距为 Δt , 在取样长度 lr 上共采集 N 个点, 记为 $z(x_i) = z_i (i=0, 1, 2, 3, \dots, N-1)$, 令 $\tau = n\Delta t (n=0, 1, 2, 3, \dots)$ 则结构函数为:

$$S(\tau) = S(n\Delta t) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=0}^{N-n} (z_{i+n} - z_i)^2 \quad (2)$$

对 $S(\tau)$ 和 τ 在双对数坐标中作图, 可得一直线, 由直线的斜率 k_s 和截距 B 即可求出分形参数 D 和 G 。

$$D = 2 - \frac{k_s}{2} \quad (3)$$

$$G = 10^{\frac{B}{2(D-1)}} \left\{ \frac{(4-2D)\ln\gamma}{\Gamma(2D-3)\sin\left[(2D-3)\frac{\pi}{2}\right]} \right\}^{\frac{1}{2(D-1)}} \quad (4)$$

1.2 特征分形参数

葛世荣等研究表明^[15], 仅用分形维数 D 或特征尺度系数 G 都不能对粗糙表面进行惟一表征。只有把分形维数和特征尺度系数结合起来, 才有可能实现表面的惟一性表征。并在 1997 年将分形维数 D 和特征尺度系数 G 相结合, 提出了称为“特征粗糙度”的新参数 τ^* , 之后又将其称为“特征分形参数”^[8], 其表达式为

$$\tau^* = \left\{ \frac{\Gamma(2D-3)\sin\left[(2D-3)\frac{\pi}{2}\right]}{(4-2D)\ln\gamma} \right\}^{-\frac{1}{4-2D}} G^{\frac{D-1}{2-D}} \quad (5)$$

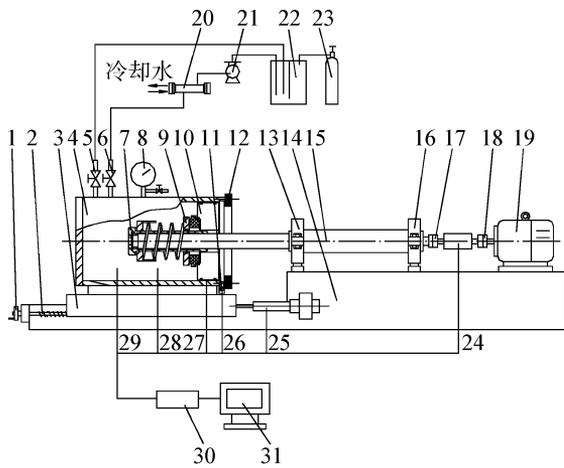
由式(5)可知, 特征分形参数 τ^* 随着分形维数 D 的增大而增大, 随着特征尺度系数 G 的增大而减小。因此, 特征分形参数 τ^* 不仅能反映分形维数 D 所反映的表面轮廓的复杂性, 而且能反映特征尺度系数 G 所反映的表面轮廓的粗糙度水平。且 τ^* 值越大, 表面越光滑。

2 机械密封端面磨合试验

2.1 试验装置与测量仪器

磨合试验是在自行研制的机械密封试验

机^[16-17]上进行的。试验机由机械系统和计算机数据采集系统两大部分组成,如图1所示。



1.手轮;2.丝杆;3.拖板;4.密封腔;5°.试验介质入口阀;6°.试验介质出口阀;7.轴套;8.压力表及放空阀;9.机械密封;10.静环座;11.测漏点;12.密封腔后端盖;13、16.轴承;14.底座;15.主轴;17、18.联轴器;19.电动机;20.冷却器;21.循环泵;22.稳压罐;23.氮气瓶;24.转速扭矩传感器;25.位移传感器;26.测漏传感器(称重传感器);27.力测量传感器;28.介质温度传感器;29.介质压力传感器;30.信号调理器及采集卡;31.计算机

*注:阀5和6实际位置在密封腔侧面

图1 机械密封试验机组成示意图

Fig. 1 The sketch map of test machine of mechanical seals

端面轮廓的测量采用AF-LI型触针式表面轮廓测量仪,其性能指标为:测针半径为 $2\ \mu\text{m}$,测量范围为 $x=0\sim 50\ \text{mm}$ 、 $y=0\sim 50\ \text{mm}$ 、 $z=\pm 3\ \text{mm}$,测量分辨率为 $\Delta x=0.5\ \mu\text{m}$ 、 $\Delta y=0.5\ \mu\text{m}$ 及 $\Delta z=0.005\ \mu\text{m}$ 。

2.2 试件与试验参数

采用2套B104a-70型机械密封作为试件,其结构形式为内装、单端面、单弹簧、传动套传动,部分平衡型。摩擦副材料为硬质合金YG8(硬质环)对浸渍树脂碳石墨M106K(软质环)。摩擦副端面尺寸为:软质环内径69 mm、外径78 mm,硬质环内径62 mm、外径82 mm。

试验介质为清水,试验参数如表1所示。

表1 机械密封试验参数

Table 1 Test parameters of the mechanical seals

试件编号	弹簧比压 p_s/MPa	介质压力 p/MPa	介质温度 $\theta/^\circ\text{C}$	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
A	0.15	0.5	20	2 900
B	0.30	0.5	20	2 900

2.3 试验程序

试验前先对软质环端面径向轮廓进行测量。将测量好的机械密封安装于试验装置中,调整好工作参数,开机试验。运行一段时间后停机,取出密封件擦净,对软质环端面径向轮廓进行测量。重复以上步骤。

由AF-LI型触针式表面轮廓测量仪测得的轮廓坐标模拟信号经A/D转换为离散的数字信号以数据库文件存入计算机。为减小测量误差,每一磨程结束后,对软质环磨损表面沿周向均匀分布的四处(事先做好标记)分别进行测量,对测量结果取平均值。每次测量表面轮廓时取样间距为 $0.4\ \mu\text{m}$ 、取样长度为 $1.25\ \text{mm}$ 、取样点数为3 125。

2.4 试验结果与分析

试验得到的不同运行时间软质环端面的分形维数 D 、特征尺度系数 G 和特征分形参数 τ^* 如表2所示。

图2为软质环端面分形维数 D 、特征尺度系数 G 与运行时间 t 的关系曲线。从表2和图2可以看出,机械密封软质环端面存在明显的磨合阶段。在磨合初期,端面比较粗糙, D 较小, G 较大。随着磨合过程的进行,端面趋于光滑, D 增大, G 减小。当A试件运行170.5 h左右,B试件运行110.5 h左右时,端面变得很光滑,磨合过程结束。此后,进入正常磨损阶段, D 和 G 值分别围绕一稳定值($D\approx 1.636$ 、 $G\approx 5.7\times 10^{-9}\ \text{m}$)上下微幅波动。这表明,磨合过程中软质环端面形貌分形参数 D 和 G 的变化具有规律性,分形参数能够客观地反映表面轮廓的复杂程度和粗糙度水平。与传统的表面粗糙度表征参数 R_a 和 R_q 相比,分形参数对磨合表面的表征更具科学性和可靠性。

试验结果表明,分形参数 D 和特征尺度系数 G 在磨合及正常磨损阶段均有一定的波动性。一方面是由于磨损试验是通过摩擦副运行一段时间后拆下密封件测量端面轮廓,这样就中断了磨损过程,使运行工况、表面接触状态、摩擦状况、摩擦温度等发生了一定的变化,从而使各阶段所获得的磨损表面信息与实际连续运行下的信息不完全一致,引起了分形参数 D 和 G 值的微幅波动;另一方面,从微观上看,摩擦副表面本身是处于重复摩擦而剥离形成新表面的连续新陈代谢的动态过程,必然会出现一定的波动性,这也反映出了摩擦学系统的复杂性。

表 2 不同运行时间的软质环端面轮廓分形参数

Table 2 Fractal parameters of profiles of soft ring at different running time

试件	累积运时 时间 t/h	分形维 数 D	特征尺度系 数 $G/(10^{-9} m)$	特征分形参 数 $\tau^*/\mu m$
A	0	1.5651	11.838	61.964
	0.5	1.5724	11.637	72.541
	1.5	1.5849	11.349	95.691
	3.5	1.5909	10.485	121.160
	10.5	1.5961	9.818	149.107
	18.5	1.5982	9.151	173.408
	26.5	1.6022	8.533	211.155
	34.5	1.6092	7.936	279.230
	50.5	1.6128	7.366	343.612
	74.5	1.6166	6.742	437.034
	110.5	1.6214	6.302	555.689
	134.5	1.6287	6.061	729.626
	170.5	1.6303	5.600	874.864
	204	1.6331	5.533	971.745
	240	1.6370	5.629	1062.564
	276	1.6318	5.459	955.934
	312	1.6347	5.649	984.021
	348	1.6363	5.648	1033.856
B	0	1.5613	11.462	60.301
	0.5	1.5690	11.072	72.697
	1	1.5759	10.913	84.584
	1.5	1.5816	10.493	99.943
	2.5	1.5845	10.166	110.829
	3.5	1.5887	9.635	130.598
	7.5	1.5904	9.241	143.835
	15.5	1.5937	8.533	173.701
	27.5	1.5996	8.227	209.912
	36.5	1.6034	7.653	256.279
	54.5	1.6097	7.370	317.362
	62.5	1.6152	6.742	421.093
	76.5	1.6228	6.244	586.664
	110.5	1.6312	5.998	799.030
	134.5	1.6324	5.778	882.870
	158.5	1.6360	5.792	980.175
	174.5	1.6358	5.786	975.986
	198.5	1.6384	5.711	1081.591
222.5	1.6365	5.762	1004.336	
246.5	1.6373	5.824	1010.096	
286.5	1.6381	5.725	1066.983	

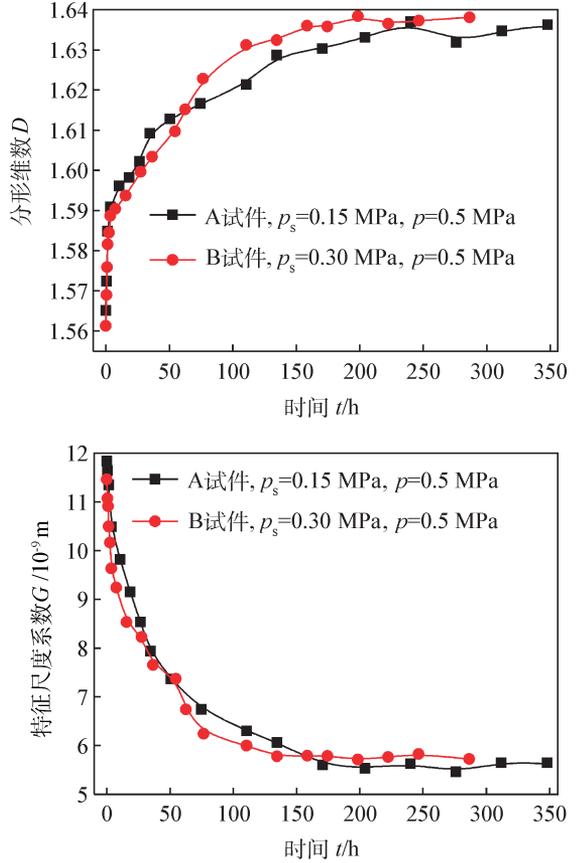


图 2 分形参数与运行时间的关系曲线

Fig. 2 The curve of the relationship between fractal parameters and running time

图 3 为软质环端面特征分形参数 τ^* 与运行时间 t 的关系曲线。试验结果表明,特征分形参数 τ^* 的变化与磨损过程中表面形貌的变化具有较好的对应关系,即随着磨合过程的进行,表面

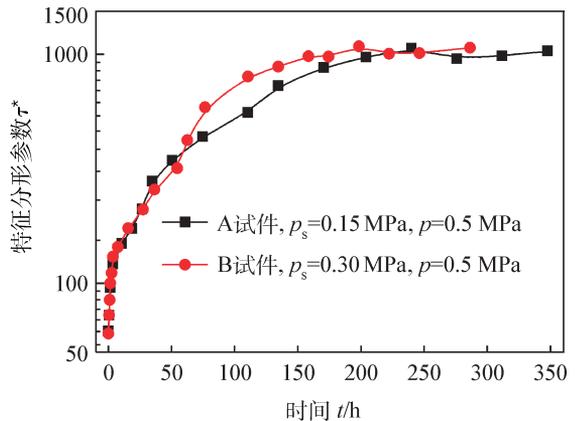


图 3 特征分形参数 τ^* 与运行时间 t 的关系曲线

Fig. 3 The curve of the the relationship between characteristic fractal parameter and running time

变得逐渐光滑,特征分形参数 τ^* 以较快的速度增大;而当进入正常磨损阶段后, τ^* 值围绕一定值上下小幅波动($\tau^* \approx 1030 \mu\text{m}$)。而且,相对分形维数 D 和特征尺度系数 G ,特征分形参数 τ^* 对表面形貌的变化表现出很高的灵敏性。

由图2和图3还可以看出,载荷对端面分形参数 D 、 G 、 τ^* 的变化趋势无显著影响,且载荷对进入正常磨损阶段后的端面分形参数值影响很小,但载荷大磨合期短。因此,对于机械密封可以在运行初期适当提高载荷来缩短磨合期,而不影响进入正常磨损阶段后的工作状态。

3 结 论

(1) 机械密封软质环端面存在明显的磨合阶段,随着磨合过程的进行,软质环端面趋于光滑,分形维数 D 和特征分形参数 τ^* 迅速增大,特征尺度系数 G 迅速减小;进入正常磨损阶段后,它们基本保持不变($D \approx 1.636$ 、 $G \approx 5.7 \times 10^{-9} \text{m}$ 、 $\tau^* \approx 1030 \mu\text{m}$)。

(2) 载荷对端面分形参数的变化趋势无显著影响,且对进入正常磨损阶段后的端面分形参数的影响很小,但载荷大磨合期短,弹簧比压为0.15 MPa和0.3 MPa时,磨合时间分别约为170.5 h和110.5 h。

(3) 特征分形参数 τ^* 对轮廓分形维数 D 和特征尺度系数 G 的变化效果进行了叠加,因此其表征磨合表面变化规律的灵敏性高,表征效果好。

参考文献

[1] 顾永泉. 机械密封实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[2] 魏龙. 密封技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[3] Lebeck A O. Hydrodynamic lubrication in wavy contacting face seals—a two dimensional model [J]. *TASME Journal of Lubrication Technology*, 1981, 103: 578-586.

[4] 杨惠霞, 顾永泉. 考虑微凸体塑性变形的接触式机械密封混合摩擦特性计算 [J]. *石油化工设备*, 1998, 27(4): 29-32.

[5] 丁雪兴, 程香平, 李国栋, 等. 机械密封混合摩擦微极流场数值模拟 [J]. *石油化工高等学校学报*,

2008, 21(2): 63-67.

[6] 魏龙, 顾伯勤, 冯秀, 等. 机械密封摩擦副端面接触分形模型 [J]. *化工学报*, 2009, 60(10): 2543-2548.

[7] Vandenberg S, Osborne C F. Digital image processing techniques, fractal dimensionality and scale-space applied to surface roughness [J]. *Wear*, 1992, 159: 17-30.

[8] 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[9] 陈辉, 胡中元, 王慧, 等. 粗糙表面分形特征的模拟及其表征 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 219-223.

[10] Sun Jian-jun, Wei Long, Feng Xiu, et al. Leakage prediction method for contacting mechanical seals with parallel faces [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 23(1): 7-15.

[11] 李新梅, 王勇, 栗文洗, 等. 基体表面分形维数对瓷釉涂层/金属基体密着性的影响 [J]. *中国表面工程*, 2005, 15(2): 35-35.

[12] Wei Long, Gu Boqin, Feng Xiu. Fractal characteristics of end faces of carbon-graphite seal rings [C]. 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Hunan, China; IEEE Computer Society, 2009, 2: 813-816.

[13] Majumdar A, Bhushan B. Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces [J]. *Journal of Tribology (ASME)*, 1990, 112(4): 205-216.

[14] 周新聪, 萧汉梁, 严新平, 等. 磨损表面轮廓曲线分形维数的计算方法 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2001, 25(4): 419-421.

[15] 葛世荣, Tonder K. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究 [J]. *摩擦学学报*, 1997, 17(1): 73-80.

[16] 魏龙, 顾伯勤, 孙见君. 机械密封计算机辅助试验装置的研制 [J]. *润滑与密封*, 2006, 31(4): 136-139.

[17] 刘其和, 孙见君, 魏龙. 基于 Labview 的机械密封试验数据采集系统 [J]. *润滑与密封*, 2008, 33(7): 91-95.

作者地址: 南京市沿江工业开发区葛关路 625 号 210048
南京化工职业技术学院
Tel: (025) 5837 1314
E-mail: weilong1972@163.com