doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.05.007

# 缸套磨损表面波纹度和粗糙度形貌特征变化规律\*

朱亚琼,沈 岩,金 梅,徐久军

(大连海事大学 船机修造工程交通行业重点实验室, 辽宁 大连 116026)

**摘** 要:以硼磷合金铸铁缸套与氮化铬活塞环为研究对象,通过设计贫油试验,获得了缸套从磨合磨损到 正常磨损直至异常磨损的三维表面形貌。基于多分辨率二维离散小波获得三维表面形貌的各层高频系数, 以二维功率谱密度进行高频系数分类,重构出磨损表面的形状误差、波纹度和粗糙度形貌。采用算术平均偏 差、坡度参数、峰顶曲率参数,量化描述波纹度和粗糙度形貌几何特征的变化规律。结果表明:多分辨率二维 离散小波可以提取不同磨损阶段的波纹度和粗糙度形貌;随着磨损的进行,波纹度和粗糙度形貌的算术平均 偏差、坡度参数、峰顶曲率参数均增大;当出现异常磨损时,波纹度形貌的算术平均偏差变化幅度大于粗糙度 形貌,粗糙度形貌的坡度变化幅度大于波纹度形貌,波纹度和粗糙度形貌的峰顶曲率参数变化幅度相近。

关键词:二维离散小波;波纹度;粗糙度

中图分类号: TH117.1

**文章编号:** 1007-9289(2014)05-0059-06

#### Metrological Characteristics of Cylinder Liner Wear Surface Waviness and Roughness

文献标志码:A

ZHU Ya-qiong, SHEN Yan, JIN Mei, XU Jiu-jun

(Key Lab of Ship-Machinery Maintenance & Manufacture, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning)

**Abstract**: The starvation experiment of boron phosphorus alloy cast iron cylinder and chromium nitride piston ring was designed. The cylinder liner samples including running-in normal wear and abnormal wear were obtained in the starvation experiment. Layers of high-frequency coefficients for three-dimensional surface topography were obtained by two-dimensional discrete wavelet and classified by two-dimensional power spectral density. Then cylinder shape error, waviness and roughness were reconstructed. The geometric characteristics of waviness and roughness were analyzed by the arithmetic mean deviation, the slope parameter, and the peak curvature parameter. The results show that the waviness and roughness of different wear state can be extracted by multi-resolution two-dimensional discrete wavelet. As the wear progresses, the arithmetic mean deviation, slope parameter, and peak curvature parameter of waviness increase. When abnormal wear occurs, the change magnitude of the arithmetic mean deviation for waviness is greater than roughness. The change magnitude of peak curvature parameter for roughness is greater than that of waviness. The change magnitude of peak curvature parameters for waviness is similar to that of roughness during the period.

Key words: two-dimensional discrete wavelet; waviness; roughness

0 引 言

在缸套与活塞环往复运动过程中,摩擦表面 微凸体之间以及微凸体与润滑油之间会产生相 互作用,相应的摩擦磨损规律会反映在摩擦副的 表面形貌上,其中表面形貌的波纹度和粗糙度与 摩擦副的局部承载能力和摩擦副界面的摩擦学

网络出版日期: 2014-09-12 08: 27; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140924.0919.002.html 引文格式: 朱亚琼, 沈岩, 金梅, 等. 缸套磨损表面波纹度和粗糙度形貌特征变化规律 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 59-64.

**收稿日期**: 2014-07-31; 修回日期: 2014-09-10; 基金项目: \* 国家重点基础研究发展计划(973)计划(编号略); 中央高校基本科研业 务费专项资金(3132014323)

作者简介:朱亚琼(1988-),女(汉),河北张家口人,硕士生;研究方向:船机摩擦学

特性直接相关。近年来,王伟伟等采用了纹理谱 方法描述工件表面纹理特征[1],李小兵等基于多 尺度理论对不同分形维数的 WM 函数三维表面 进行了表征[2],胡凤英研究了描述波纹度的主要 参数及波纹度的检测[3]。张志航等基于小波变 换的能量守恒特性得到粗糙度评定基准表面,从 而分离出粗糙度形貌<sup>[4]</sup>。Grzesik 等采用连续小 波变换对不同材料的一维粗糙度轮廓进行了提 取<sup>[5]</sup>, Pawel 等比较了3种滤波器提取一维表面 轮廓粗糙度和波纹度的差别<sup>[6]</sup>。而对于磨损过 程中三维表面形貌的特征提取和量化研究较少。 文中利用多分辨率二维离散小波的多尺度分析 特性,对不同磨损状态下缸套的三维表面形貌进 行特征提取,采用统计学参数量化描述波纹度和 粗糙度形貌的几何特征在磨损过程中的变化规 律,为摩擦副表面形貌设计及抗黏着磨损性能的 (即拉缸)提升提供指导。

1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

Stop oil

所用材料为带有珩磨纹的硼磷合金铸铁缸 套,其布氏硬度为192 HB,珠光体的维氏硬度为 168 HV<sub>0.01</sub>,表面粗糙度为 0.72 μm。物理气相 沉积法制备的氮化铬活塞环,氮化铬沉积层的厚 度约为 30 μm,其维氏硬度为 704 HV<sub>1.0</sub>。润滑油 牌号为 RP-4652D,粘度等级相当于国际标准 SAE15W-40。

采用电火花线切割机直接从缸套和活塞环 零件切割得到试样,即将内径为110 mm、长度为 43 mm、壁厚为 10 mm 的缸套,沿圆周方向分 40 等份,沿长度方向切割 43 mm 得到缸套试样, 将内径为70 mm、外径为110 mm、厚度为3 mm的 活塞环沿圆周方向分 20 等份得到活塞环试样。

#### 1.2 试验方法

在对置往复式摩擦磨损试验机上进行硼磷 合金铸铁缸套-氮化铬活塞环配对副试样的摩擦 试验,试验机往复运动行程为 30 mm。采用贫油 试验方法[7]模拟缸套-活塞环试样的摩擦状态转 化过程,试验条件如表1所示,每组试验重复3~ 5次。每组试验分为3个阶段,在磨合期连续充 分供油,流量保持在每分钟3滴(约1mL),高载 磨合阶段结束时停止供油,其余试验参数保持不 变直至试样拉缸,试验结束。

Table 1   Parameters of the starvation experiment				
Experiment period	Temperature/ °C	Speed/( $r \cdot min^{-1}$ )	Load/MPa	Time/min
Low load run-in period	120	200	10	10
High load run-in period	180	200	40	60

表1 贫油试验各阶段试验参数

200

图1是贫油试验过程中摩擦力的演变趋势,分 别在高载磨合阶段、正常磨损阶段和异常磨损阶段 得到相应的缸套试样,即图1矩形框标记处。

180





采用 OLYMPUS-OLS4000 三维共聚焦激 光扫描显微镜分别在原始试样、磨合试样、正常 磨损试样和异常磨损试样的止点处进行形貌数 据采集,其中采样大小为 468 µm×468 µm,采样 点数为768×768。

40

60 To scuffing

#### 2 波纹度和粗糙度的形貌提取

#### 2.1 二维离散小波变化

通过三维共聚焦激光扫描显微镜得到4种 形貌的三维数值信号。由于是三维数值信号故 采用二维离散小波。为保持每次分解的信号分 辨率不变,故采用多分辨率分析。多分辨率的二 维离散小波的 Mallat 分解算法如下<sup>[8]</sup>:

$$a_{j+1}(n,m) = \sum_{l} \sum_{k} \overline{h}(2m-l) \overline{h}(2n-k) a_{j}(k,l)$$
  

$$d_{j+1}^{1}(n,m) = \sum_{l} \sum_{k} \overline{g}(2m-l) \overline{h}(2n-k) a_{j}(k,l)$$
  

$$d_{j+1}^{2}(n,m) = \sum_{l} \sum_{k} \overline{h}(2m-l) \overline{g}(2n-k) a_{j}(k,l)$$
  

$$d_{j+1}^{3}(n,m) = \sum_{l} \sum_{k} \overline{g}(2m-l) \overline{g}(2n-k) a_{j}(k,l)$$
  
(1)

其中  $a_{j+1}$  对应  $a_j$  的低频成分,  $d_{j+1}^1$  对应纵向 高频成分(水平边缘),  $d_{j+1}^2$  对应横向高频成分 (垂直边缘), 而  $d_{j+1}^3$  则对应两个方向上的高频成 分(斜线方向)。

Mallat 重构算法<sup>[8]</sup>如下:

$$a_{j+1}(n,m) = \sum_{k} \sum_{l} h(n-2k)h(m-2l)a_{j}(k,l) + \\\sum_{k} \sum_{l} g(n-2k)h(m-2l)d_{j}^{1}(k,l) + \\\sum_{k} \sum_{l} h(n-2k)g(m-2l)d_{j}^{2}(k,l) + \\\sum_{k} \sum_{l} g(n-2k)g(m-2l)d_{j}^{3}(k,l)$$
(2)

### 2.2 功率谱密度

为获得每层小波系数的频率成分,故选择功 率谱密度<sup>[9]</sup>进行分析。功率谱密度可直接由 Fourier 变换的形式计算得到,由于所得到的小波系数 仍是二维数值信号,故采用二维傅里叶变换:

$$H(f_{x}, f_{y}) = \lim_{l_{y}, l_{y} \to \infty} \int_{-l_{y}}^{l_{y}} \int_{-l_{y}}^{l_{y}} z(x, y) e^{-j2\pi(xf_{y} + yf_{y})} dx dy$$
(3)

式中,  $f_x$ 和  $f_y$ 分别是 x和 y两个垂直方向的 空间频率,  $l_x$ 和  $l_y$ 是在 x和 y方向上三维连续表面 的长度, z(x, y)是位置(x, y)处的垂直坐标。

功率谱密度则是:

$$G(f_{x}, f_{y}) = \lim_{l_{x}, l_{y} \to \infty} \frac{1}{4l_{x}l_{y}} H(f_{x}, f_{y}) H^{*}(f_{x}, f_{y})$$

$$= \lim_{l_{y}, l_{y} \to \infty} \frac{1}{4l_{x}l_{y}} |H(f_{x}, f_{y})|^{2}$$

$$= \lim_{l_{y}, l_{y} \to \infty} \frac{1}{4l_{x}l_{y}} |\int_{0}^{l_{y}} \int_{0}^{l_{x}} z(x, y) e^{-j2\pi(xf_{y} + yf_{y})} dx dy |^{2}$$
(4)

式中, H\*(f<sub>x</sub>, f<sub>y</sub>)是傅里叶变换的共轭。

#### 2.3 波纹度和粗糙度形貌的提取

通过对小波基幅值特性和相位特性的分析<sup>[10]</sup>,并结合表面形貌特征提取的要求,选择

bior6.8 小波基对试验获得的不同磨损状态下表面 形貌数据进行分解,得到10层高频系数和1层低 频系数。由于超过10层以后信息量较少,基本达 到分解要求,故小波分解层数为十层,然后通过功 率谱密度计算各层高频小波系数的频率成分。 图 2是原始表面形貌经小波分解后得到的各层高 频系数的功率谱密度。从图中可以看出第一层高 频系数的频率成分均有,将其化为噪音信号,可能 是由于仪器误差造成,第二层到第四层高频系数的 频率成分较多,相对集中在高频处,故将其化为粗 糙度,第五层到第八层高频系数的频率成分较为单 一,相对集中在低频处,故将其化为波纹度,第九层 和第十层的高频系数的频率均为单一峰,且频率较 低,故将其和低频系数化为形状误差。图3为提取 的原始试样形状误差、波纹度和粗糙度。从图中可 以看出多分辨率二维离散小波变换可以提取波纹度 和粗糙度形貌。为了比较不同磨损状态的波纹度和 粗糙度形貌特征的变化,故将不同磨损状态的波纹 度和粗糙度也按上述方法进行了提取,如图4所示。

#### 3 波纹度与粗糙度的几何特征

由于三维图形有很好的视觉效果,但是难于 定量的描述,故根据统计学参数的原理对波纹度 和粗糙度的几何特征进行了提取,即算术平均偏 差、坡度参数、峰顶曲率参数。

### 3.1 算术平均偏差

算术平均偏差 R。是形貌上各点高度的算术 平均值,其反映了形貌高度变化的连续性。

$$R_{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} | z(x_{i}) |$$
 (5)

式中:n为采样点数,z(x<sub>i</sub>)为各点轮廓高度。

#### 3.2 坡度参数

坡度参数 R<sub>s</sub> 是表面形貌上各点斜率的均方 根,其反应了形貌坡度的陡峭程度。

$$R_{s} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{z(x_{i+1}) - z(x_{i})}{h}\right)^{2}} \qquad (6)$$

式中:h 表示轮廓上相邻两采样点的间距。

#### 3.3 峰顶曲率参数

峰顶曲率参数 R。表示各点粗糙峰顶曲率的 算术平均值,其反映了形貌峰顶的尖平与否。

$$R_{\rm c} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{z(x_{i+1}) - 2z(x_i) + z(x_{i-1})}{h^2}\right)^2}$$
(7)







图 3 原始试样的表面三维形貌 Fig. 3 Three-dimensional surface morphologies of the original cylinder samples



Fig. 4 Waviness and roughness morphologies under different wear state

#### 3.4 波纹度和粗糙度的几何特征

图 5 是不同磨损状态下波纹度和粗糙度算 术平均偏差的变化规律。可以看出,不同磨损状 态下的波纹度和粗糙度的算术平均偏差均是先 下降后升高,但是波纹度的变化幅度较大。这表 明在充分供油的条件下,随着磨损的进行,由于 珩磨纹、尖峰及毛刺等被磨合的较为平整,故波 纹度和粗糙度的高度降低,停止供油后,波纹度 和粗糙度的高度略微增加,随着磨损的加剧直至 异常磨损,表面形貌又变得凹凸不平,故波纹度 和粗糙度的高度急剧增加,但是波纹度的高度变 化幅度较大。





图 6 是不同磨损状态下波纹度和粗糙度坡 度参数的变化规律。可以看出,不同磨损状态下 的粗糙度的坡度参数均大于波纹度的,其中原始 试样波纹度的坡度参数大于磨合试样的,磨合试 样波纹度的坡度参数与正常磨损试样的相近,异 常磨损试样波纹度的坡度参数急剧增加;原始试 样粗糙度的坡度参数和磨合试样、正常磨损试样 的相近,异常磨损试样粗糙度的坡度参数也是急 剧增加,其变化幅度大于波纹度的。



图 7 是不同磨损状态下波纹度和粗糙度峰 顶曲率参数的变化规律。可以看出,不同磨损状 态下的波纹度和粗糙度峰顶曲率参数的变化规 律与坡度参数的变化规律基本相同,不同的是异 常磨损试样波纹度和粗糙度的峰顶曲率参数虽 急剧增加但变化趋势相同。





这表明不同磨损状态下,波纹度形貌的坡度 的陡峭程度和峰顶的尖锐程度都小于粗糙度的。 在充分供油的条件下,随着磨损的进行,波纹度 和粗糙度形貌的坡度的陡峭程度和峰顶的尖锐 程度均减小,但是波纹度的变化幅度较大;停止 供油后,波纹度和粗糙度形貌的坡度的陡峭程度 和峰顶的尖锐程度略微增加,随着磨损的加剧直 至异常磨损,波纹度和粗糙度形貌的坡度的陡峭 程度和峰顶的尖锐程度急剧增加,但是粗糙度形 貌的坡度的陡峭程度的变化幅度大于波纹度的, 两者峰顶的尖锐程度的变化幅度相近。

#### 4 结 论

以硼磷合金铸铁缸套与氮化铬活塞环为研 究对象,通过设计贫油试验,获得了缸套从磨合 磨损到正常磨损直至异常磨损的三维表面形貌。

(1)多分辨率二维离散小波可以提取不同磨损阶段的波纹度和粗糙度形貌。

(2)随着磨损的进行,波纹度和粗糙度形貌的 算术平均偏差、坡度参数、峰顶曲率参数均增大。 (3)当出现异常磨损时,波纹度形貌的算术 平均偏差变化幅度大于粗糙度形貌,粗糙度形貌 的坡度变化幅度大于波纹度形貌,波纹度和粗糙 度形貌的峰顶曲率参数变化幅度相近。

## 参考文献

- [1] 王伟伟,胡东.基于纹理谱分析的工件表面质量识别研究[J].机械制造,2009,47(535):44-47.
- [2] 李小兵,王清华. 基于多尺度理论的三维表面形貌表征研 究[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(2): 119-120.
- [3] 胡凤英. 波纹度参数的研究及检测 [J]. 内燃机配件, 2006, 2: 38-39.
- [4] 张志航,崔海,丁海娟,等. MWEDM表面三维粗糙度的 小波评定基准面[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(9): 1185-9.
- [5] Grzesik W, Brol S. Wavelet and fractal approach to surface roughness characterization after finish turning of different work piece materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2522-31.
- [6] Pawel Dobrzanski, Pawek Pawlus. Digital filtering of surface topography: Part I. Separation of one-process surface roughness and waviness by Gaussian convolution, Gaussian regression and spline filters [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 647-650.
- [7] 金梅,沈岩,朱亚琼,等. 基于贫油试验方法的镀铬缸套-喷钼活塞环抗黏着性能研究 [J]. 车用发动机,2012,203 (6):43-45.
- [8] 王慧琴.小波分析与应用[M].北京:北京邮电大学出版 社,2011:41-69.
- [9] 李成贵. 三维表面微观形貌的二维功率谱表征 [J]. 计量 学报, 2004, 25(1): 11-15.
- [10] Fu S Y, Muralikrishnan B, Raja J. Engineering surface analysis with different wavelet bases [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125: 844-852.

**作者地址:** 辽宁省大连市甘井子区凌海路1号 116026 大连海事大学船机修造工程交通行业重点实验室 Tel: (0411) 8472 3376 E-mail: dlmuzya@163. com

(责任编辑:常青)