DOI: 10.3901/JME.2019.17.102

闸门底枢摩擦副 QT600-3/40Cr 摩擦学性能及 磨损表面功率谱密度表征*

秦红玲^{1,2} 郭文涛¹ 李雪飞¹ 赵新泽¹ 徐翔¹

(1. 三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室 宜昌 443000;

2. 河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室 洛阳 471000)

摘要: 为了研究低速重载下接触应力对 QT600-3/40Cr 摩擦学性能的影响, 以及表面功率谱密度与磨损机理、磨损速率间的对应关系, 在 MMW-1A 立式万能摩擦磨损试验机上, 采用销/盘配副面接触摩擦的形式, 对闸门底枢摩擦副 QT600-3/40Cr 在脂润滑条件下进行磨损试验研究, 获得不同接触应力作用下的摩擦学性能。通过扫描电镜 (SEM) 对 QT600-3/40Cr 的磨损机理进行探讨, 并结合一维表面功率谱密度(PSD_{1D})和二维表面功率谱密度 (PSD_{2D}) 对销试样磨损表面进行表征。结果表明, 当接触应力从 10.6 MPa 依次增加至 15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa 时, 磨损率依次增加 11%、109%、592%, 且磨损表面出现的犁沟现象逐渐严重, 磨损形式皆为磨粒磨损。与此同时, PSD_{1D} 和 PSD_{2D} 值也随之增加, 最大 PSD_{1D} 值依次增加 22%、94% 和 598%, 与磨损率的变化呈现相同趋势。PSD_{1D} 主要集中在 0~0.0075 μm⁻¹ 的空间频率范围内, PSD_{2D} 图存在明显的趋向性峰值分布, 表明销试样磨损表面具有明显的主导空间频率, 即磨损表面形貌具有一定的相似性, 磨损机理尚未发生变化。可见, PSD 对磨损机理与趋势的预测结果与 SEM 检测结果一致, 可用于辅助分析 QT600-3/40Cr 摩擦副磨损机理与趋势。

关键词: 闸门底枢; QT600-3/40Cr; 摩擦学性能; 磨损机理; 功率谱密度

中图分类号: TG704

Tribological Performance of Gate Bottom Pivot Friction Pair QT600-3/40Cr and Its Wear Surface Power Spectral Density Characterization

QIN Hongling^{1,2} GUO Wentao¹ LI Xuefei¹ ZHAO Xinze¹ XU Xiang¹

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, Yichang 443000;

2. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology,
Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000)

Abstract: In order to study the effect of contact stresses on gate bottom pivot friction pair QT600-3/40Cr under low-velocity heavy load condition, and the correlation among surface power spectral density, abrasion mechanism and velocity. The wear tests of the friction pair QT600-3/40Cr are carried out under the condition of grease lubrication with pin-disk contact under different contact stresses by means of the MMW-1A tester. The wear mechanism of QT600-3/40Cr is analyzed by scanning electron microscopy (SEM), and the wear surface of the sample is characterized by combining one-dimensional surface power spectrum density (PSD_{1D}) and two-dimensional surface power spectrum density (PSD_{2D}). The results show that the contact stress is increased from 10.6 MPa to 15.9, 19.1 and 21.1 MPa, the wear rate is increased by 11%, 109% and 592% gradually. On the other hand, the furrow phenomenon that appears on the damaged surface is gradually serious and the wear form is abrasive wear. At the same time, the PSD_{1D} and the PSD_{2D} values are increased, with the maximum PSD_{1D} value increasing by 22%, 94% and 598% respectively, showing the same trend as the change of wear rate. The PSD_{1D} is mainly concentrated in the space frequency range from 0 - 0.0075 μm⁻¹, the PSD_{2D} graph has obvious trend peak distribution. The wear surface of the pin sample has obvious dominant spatial frequency, it indicates that the

* 国家自然科学基金(51405265)、湖北省技术创新专项重大(2016AAA076)、高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室开放基金(201811)、湖北省教育厅科学技术研究计划重点(D20181206)和水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金(2017KJX01)资助项目。20181109 收到初稿, 20190319 收到修改稿

wear surface morphology has certain similarity and the wear mechanism has not changed. Furthermore, the prediction results of PSD on wear mechanism and trend are consistent with the SEM results, which can be used to assist analysis of QT600-3/40Cr friction pair wear mechanism and trend.

Key words: gate bottom pivot; QT600-3/40Cr; tribological property; wear mechanism; power spectral density

0 前言

船闸是重要的通航建筑,一旦出现故障亟待维修,其所在的水运航线将被迫停航,直接造成巨额经济损失^[1-2]。底枢摩擦副是支撑船闸闸门的的核心部件,其过度或异常磨损是导致船闸故障的主要原因之一,因此,研究闸门底枢摩擦副的摩擦磨损特性具有重要的意义。

摩擦磨损是由于两相互接触表面的相对运动引起的,因此接触区表面形貌及物理化学特性直接反映摩擦磨损状况。表面形貌可通过数学表征的方法进行定量描述,分为传统的表征和面向功能的表征两类。传统表征主要针对表面的几何结构,尤其是微凸体高度的表征,主要被用于零件加工中的制造精度控制。面向功能的表征则综合考虑了表面的整体信息,主要用于表征相互作用表面间的摩擦学特性和表面形貌的改变,可用于预测表面的实际使用性能。最早应用于科学研究和工程实际的是基于表面粗糙度等系列参数的传统表征法,包括轮廓均方根偏差(S_q)、轮廓算术平均偏差(S_a)、轮廓偏斜度(S_{sk})、轮廓陡度(S_{ku})和轮廓十点高度(S_z)等^[3]。由于磨损表面高度变化的非稳定随机性,用粗糙度等参数表征磨损表面存在很大的不确定性,即便两个完全不一样的表面也可能存在相同的粗糙度值。这是由于粗糙度值仅包含表面垂直方向的高度信息,并没有的横向空间形貌信息,这对磨损表面的分析非常不利^[4]。随后发展起来的基准参数法^[5]、分形法^[6-7]、Motif 法^[8]、小波分析法^[9],和逾渗法^[10]等,虽大量挖掘了表面形貌几何特征所蕴含的高度信息和空间信息,但仍然没有很好地弥补这一缺陷。表面功率谱密度(Power spectral density, PSD)是具有综合分析意义的概率统计函数,从频域上考虑问题,研究随机振动的各频率成分的统计含量^[11]。其不仅包含了表面垂直方向的高度信息,同时包含重要的横向空间频率分布,且具有量化的频谱描述功能,能提供完整的物体表面频谱信息,可弥补常用粗糙度表征参数所缺乏的准确性和随机性^[12-14]。张磊等^[15]通过一维功率谱密度(PSD_{1D})和二维功率谱密度(PSD_{2D})分析了硅基板单层 HfO_2 镀膜前后表面形貌出现的明显差异。谢庆等^[16]

通过 PSD 定量分析了材料表面形貌变化的趋势,认为 PSD 的各个空间频率分布与绝缘材料表面的各向同性或各向异性存在着一致性。岳巾英等^[17]运用 PSD 对光学表面粗糙度进行了评价,并指出 PSD 较常用粗糙度表征参数具有更准确的评判标准。NIESLONY 等^[18]采用 PSD 对不同切削速度下表面淬硬的轴类零件表面质量与系统刚度的关系进行了研究。目前,研究人员较多运用其指导光学光滑表面的加工和选择切削刀具的参数,对于基于 PSD 的摩擦副表面的摩擦磨损特性及趋势的分析与研究鲜有报道。QT600-3/40Cr 是闸门底枢摩擦副常用的配对副材料,应用于宝应、宿迁等水电站^[19]。本文以其为对象,研究低速重载下接触应力对 QT600-3/40Cr 摩擦学性能的影响。并结合 PSD_{1D} 和 PSD_{2D} 对磨损表面三维微观形貌进行综合表征,分析表征结果与磨损机理、磨损速率间的对应关系,以期为闸门底枢摩擦副磨损机理分析和磨损趋势预测提供一种新方法。

1 试验部分

1.1 摩擦磨损试验

摩擦磨损试验在 MMW-1A 立式万能摩擦磨损试验机上进行,采用销/盘配副面接触摩擦的形式,对脂润滑条件下闸门底枢摩擦副 QT600-3/40Cr 的摩擦磨损性能进行试验研究。通过调研国内闸门尺寸的分布情况,根据闸门宽度 B 将闸门分为: $B = 4$ m(特小型)、 $B = 6$ m(小型)、 $B = 9$ m(中型) $B = 15$ m(大型)四种类型,并将葛洲坝船闸和三峡船闸单独定义为特大型船闸和最大型船闸。在选取几座典型闸门运行参数的基础上,制定相关试验参数如表 1 所示。分析表 1 数据可知,相对滑动线速度的范围为 $0.007 \sim 0.032$ m/s,非常低,故影响底枢摩擦副摩擦磨损性能的主要因素是接触应力,则选定接触应力分别为 10.6 MPa、15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa、25.0 MPa,滑动速度 V 为 0.032 m/s 作为试验条件。销试样采用球墨铸铁 QT600-3,尺寸为 $\Phi 5$ mm $\times$ 13 mm。盘试样采用 40Cr,尺寸为 $\Phi 16$ mm $\times$ 54 mm $\times$ 9 mm,销、盘试样的主要性能参数如表 2 所示。试验开始前,销、盘试样均依次采用 400#、800#、1000#、1200#和 1500#水砂纸打磨,使之表面粗糙度 R_a 在

0.4 μm 以下,而后用丙酮清洗。采用 3[#]极压锂基脂作为润滑介质,其主要质量指标如表 3 所示,试验

开始前预涂在销、盘接触面,每组试样的试验时间 $t=360\text{ min}$ 。

表 1 国内几座典型闸门的相关参数

船闸名称	单扇闸门宽 B/mm	单扇闸门重 G/t	底枢蘑菇轴头直径 d/mm	最大接触应力 σ/MPa	相对滑动线速度 V $/(\text{m/s})$	等效加载力 F/N
白鱼潭(特小型)	4 400	17	180	10.6	0.007	190
宝应(小型)	6 200	20	200	11.3	0.013	205
西津(中型)	9 100	54	280	15.9	0.018	286
蚌埠(大型)	13 900	121	360	25.0	0.028	450
葛洲坝 2 [#] (特大型)	19 700	600	800	21.1	0.024	380
三峡(最大型)	20 200	850	1000	19.1	0.032	345

表 2 销、盘试样的主要性能参数

材料牌号	热处理方式	表面平均显微硬度/HV	抗剪强度 $\delta\tau/\text{MPa}$	屈服强度 $\delta s/\text{MPa}$
QT600-3	正火 HB200	245	213	370
40Cr	表面淬火 HRC45	642	453	785

表 3 试验用 3[#]极压锂基润滑脂的主要质量指标

参数	数值
相似黏度/(Pa·s)	645
工作锥入度/0.1mm	232
滴点/ $^{\circ}\text{C}$	200
剪切安定性/0.1mm	239
防腐蚀性	合格

摩擦因数由试验机自动记录,为了更加精确地研究摩擦副配对的合理性,本文采用组合磨损量来表征摩擦副的磨损率,其以摩擦副两配合表面磨损后的位置变化来度量,并在组合磨损量的测量中进行三次测量后取平均值。结合测长法和表面轮廓法测量销试样磨损量,如图 1a 所示,采用精度为 0.001 mm 的游标卡尺沿着销试样的轴向方向测量试验前后销试样端面高度 h_1 和 h_2 ,之后采用精度为 0.001 μm 的 ST400 型三维表面轮廓仪测量试验前后表面轮廓的变化量,即磨痕的最大深度 $h_{\max 1}$ 和 $h_{\max 2}$,即得到销试样的磨损量

$$h_x = (h_1 - h_{\max 1}) - (h_2 - h_{\max 2}) \quad (1)$$

盘试样采用表面轮廓法来测量其磨损量,即采用三维表面轮廓仪测量试验前后与销试样端面接触处表面轮廓的变化量,如图 1b 所示。分别取磨痕最大深度 $h_{\max 3}$ 和 $h_{\max 4}$,得盘试样的磨损量

$$h_p = h_{\max 4} - h_{\max 3} \quad (2)$$

图 1 组合磨损量计算模型

则销、盘的组合磨损量

$$H = (h_1 - h_2) + (h_{\max 2} - h_{\max 1}) + (h_{\max 4} - h_{\max 3}) \quad (3)$$

根据磨损率的定义,以单位时间内单位载荷下材料的磨损量表示,即得到组合磨损率

$$wr = \frac{H}{FD} \quad (4)$$

式中, wr 是组合磨损率; H 是组合磨损量; F 是试验时的施加载荷; D 是试验全程滑动的距离, $D = tv$, t 是试验持续时间, v 是试验设定滑动速度。

通过 JSM-7500F 型冷场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对磨损后销试样表面的微观形貌进行观测,以便对脂润滑条件下闸门底枢摩擦副 QT600-3/40Cr 在低速重载工况下的磨损机理进行分析。

1.2 表面形貌测量

运用 ST400 三维表面形貌仪对销试样磨损表面进行微观形貌分析测量。在每个销试样的磨损表面上随机选取五个范围为 1 mm×1 mm 的正方形区域测量,得到三维表面轮廓高度信息 $z(x,y)$ ($0 \leq x, y \leq L$, L 为轮廓长度) 以及表征磨损表面形貌的粗糙度表征参数,并结合 Matlab 软件进行编程求得销试样磨损表面的 PSD_{ID} 图和 PSD_{ID} 图,以探讨功率谱密度和粗糙度表征参数及摩擦磨损性能之间的关系。

1.3 PSD 的定义

PSD 是一种概率统计方法,一般用于随机振动分析。随机信号是时域的无限信号,即随机过程在任意时刻都有可能以不同的方式实现,每个时刻都表现为不同的时间函数,导致随机信号的样本函数不是绝对可积的,因此不能直接对它进行傅里叶分

析。此时通常用具有统计特征的 PSD 作随机信号的分析依据, 即通过 PSD 可以看出随机信号的能量随着频率的分布情况, 从而对看似紊乱的随机信号做出定量分析。其数学模型如下。

假若随机信号 $u(t)$ 是一个满足傅里叶变换的函数, 则

$$u(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \exp(-i2\pi vt) dt \quad (5)$$

已知 $u(t)$ 是实函数, 则 $u(v)$ 与 $u(t)$ 之间满足巴塞伐(Parseval)公式, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |u(v)|^2 dv \quad (6)$$

对于磨损表面, $u(t)$ 表示表面轮廓曲线, 则式(6)左边表示 $u(t)$ 在 $(-\infty, \infty)$ 上的总能量, $|u(v)|^2$ 被称之为“能谱密度”, 表示单位频率所具有的能量。与能谱密度的定义相对应, PSD 被定义为

$$\text{PSD}(v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|u_T(v)|^2}{2T} \quad (7)$$

1.4 PSD 的计算方法

由 PSD 的定义可知, 对于试样磨损表面, PSD 的计算实则是表面轮廓高度的傅里叶计算。PSD_{ID} 先对表面轮廓逐行做一维傅里叶变换, 再求取所有行的平均值, 第 m 行的计算公式为

$$\text{PSD}_{IDm}(k_x) = \frac{d}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-2\pi i \frac{n}{N} k_x\right) z_m(n) w(n) \right|^2 \quad (8)$$

式中, 间隔 $d=L/N$; $k_x=0, 1, \dots, N-1$, $f_x = \frac{k_x}{Nd}$ 。

再将式(8)的 N 行序列进行平均, 即

$$\text{PSD}_{ID}(k_x) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \text{PSD}_{IDm} \quad (9)$$

(a) 磨损率随接触应力的变化柱状图

PSD_{ID} 是对表面轮廓直接做二维傅里叶变换, 其计算公式为

$$\text{PSD}_{ID}(k_x, k_y) = \frac{d_x d_y}{N^2} \left| \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left(-2\pi i \left(\frac{k_x N + k_y N}{N}\right)\right) z(m, n) w(m, n) \right|^2 \quad (10)$$

$$k_x, k_y = 0, 1, \dots, N-1 \quad f_x = f_y = \frac{k_x}{Nd} = \frac{k_y}{Nd}$$

2 结果与分析

2.1 接触应力对 QT600-3/40Cr 摩擦副摩擦学性能的影响

图 2a 为 QT600-3/40Cr 摩擦副磨损率随接触应力的变化趋势图。由图 2a 可知, 当接触应力从 10.6 MPa 依次增加至 15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa 时, 磨损率依次增加 11%, 109%, 592%。当接触应力增加至 25.0 MPa 时, 摩擦副出现严重胶合现象, 故图中未给出。可见, 接触应力对该类摩擦副磨损率影响非常显著。图 2b 为 QT600-3/40Cr 摩擦副摩擦因数随接触应力的影响趋势图。由图 2b 可知, 当接触应力为 10.6 MPa 和 19.1 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的摩擦因数很平稳, 波动较小; 当接触应力为 15.9 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的摩擦因数呈下降趋势; 当接触应力为 21.1 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的摩擦因数表现为先上升后下降; 当接触应力为 25.0 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的摩擦因数则因为胶合作用呈现剧烈振荡。可见, 随着接触应力的增大, QT600-3/40Cr 摩擦副的摩擦因数并没有表现出明显的趋向性。

(b) 摩擦因数随接触应力的变化曲线图

图 2 QT600-3/40Cr 随接触应力的变化

2.2 QT600-3/40Cr 摩擦副的磨损机理分析

图 3 为不同接触应力(10.6 MPa、15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa、25.0 MPa)下销试样磨损表面的

SEM 图($\times 400$)。由图 3a、3b、3c 可知, 随着接触应力的增大, 销试样磨损表面的犁沟现象越来越严重, 且磨损表面析出的石墨数量相应增多。由图

3d 可知, 当接触应力增加到 21.1 MPa 时, 销试样磨损表面同样呈现出明显的犁沟现象, 但此时似乎看不到析出的石墨, 而观察到许多亮白色的微小颗粒。

由图 3e 可知, 当接触应力增加到 25.0 MPa 时, 销试样磨损表面已完全流变, 发生了显著的塑性变形。

图 3 不同接触应力下销试样磨损表面的 SEM 图

分析认为, 当接触应力为 10.6 MPa 时, 此时销、盘摩擦副间具有完整的润滑脂膜, 销、盘摩擦面不直接接触, 摩擦主要来源于润滑脂内部的剪切力。相对滑动速度不变时, 摩擦因数基本恒定, 波动幅度很小(图 2b)。销、盘摩擦副表面间极微量的凸峰与凸峰的接触导致的磨损使销试样中的石墨析出(图 3a)。由图 3a 可知, 在析出的石墨周围磨损面非常平整, 还出现了不连续的润滑膜, 而石墨坑边缘却出现了裂纹、破损和显微切割现象。这是因为石墨质地较软, 本身易破裂, 而石墨的存在导致其周围的局部应力集中, 易发生变形, 从而出现裂纹现象, 这也是导致摩擦副磨损的主要原因。由图 3b 和图 3c 可知, 当接触应力增加到 15.9 MPa 时, 销试样磨损表面析出的石墨明显增多, 且出现了犁沟现象, 即润滑脂膜逐渐被破坏, 销、盘摩擦副表面间的凸峰与凸峰的直接接触增多, 磨损点增多, 由此导致更多石墨析出。石墨的自润滑性能改善了摩擦副的润滑条件, 摩擦因数下降。此时, 销、盘摩擦副仅出现轻微磨损。当接触应力增加到 19.1 MPa 时, 高的接触应力导致销、盘摩擦副表面间的凸峰与凸峰的直接接触进一步增多, 磨损加剧, 更多石墨析出, 摩擦因数轻微下降。但摩擦热导致接触表面温度升高, 润滑脂黏度下降, 润滑脂与石墨的协同润滑效应下降, 摩擦因数又呈现缓慢上升趋势。

此时, 销、盘摩擦副磨损较快。但销试样中石墨的数量有限, 当接触应力增加到 21.1 MPa 时, 即便磨损使石墨不断析出, 但润滑脂膜破坏严重, 摩擦副表面以直接接触为主, 润滑脂及石墨在相对滑动中不断被挤出摩擦副而被消耗。磨损表面出现硬质颗粒(亮白色的微小颗粒)(图 3d), 摩擦副呈现剧烈磨粒磨损状态。相对于接触应力 19.1 MPa 时, 磨损速率增加 231 %。当接触应力增加到 25.0 MPa 时, 便超过了销试样的许用接触应力, 导致摩擦副发生胶合现象, 此时摩擦因数呈现剧烈振荡现象, 销试样磨损表面完全流变。试验现象表明, 在许用接触应力范围内, 脂润滑条件下 QT600-3/40Cr 摩擦副在低速重载工况下的磨损形式主要是磨粒磨损。

2.3 磨损表面表征

图 4a 分别为接触应力 10.6 MPa、15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa 时销试样磨损表面相应的三维形貌, 右侧的颜色条代表表面微凸体高度变化, 图片下方为五次测得的粗糙度表征参数平均值。图 4b 为磨损表面粗糙度表征参数随接触应力的变化关系图。由图 4a 可知, 随着接触应力的增大, 销试样磨损表面的犁沟现象越来越明显, 微凸体高度变化增大, 摩擦表面质量变差, 磨损速率加快。对比图中粗糙度表征参数可知, 虽然两者的 Ssk 值完全一样, 但两者的表面形貌却存在较大差异。由图 4b 可知, 随着

接触应力的增大, 粗糙度表征参数 Sq 、 Sa 、 Ssk 和 Sz 值趋势混乱, 没有呈现一定的规律性。只有 Sku 值与接触应力表现出正相关性, 即随着接触应力的

增大, Sku 值也随之增大。可见, 粗糙度表征参数中只有部分参数与磨损表面状态有良好的对应关系, 用该体系来表征磨损表面状态存在很大的随机性。

图 4 销试样磨损表面的三维形貌图及粗糙度表征参数

图 5a 分别为接触应力 10.6 MPa、15.9 MPa、19.1 MPa、21.1 MPa 时销试样磨损表面相应的 PSD_{ID} 图, 图 5b 为相应的 PSD_{IID} 图。由图 5a 可知, PSD_{ID} 主要集中在 $0 \sim 0.0075 \mu\text{m}^{-1}$ 的空间频率范围内, 说明接触应力在 10.6~21.1 MPa 之间时销试样磨损表面具有明显的主导空间频率, 即磨损表面形貌具有一定的相似性, 磨损机理尚未发生变化。随着接触应力的增大, 销试样磨损表面对应 PSD_{ID} 值增大, 表明销试样表面质量逐渐变差, 表面精度逐渐丧失, 磨损速度加快。以上结论皆与 SEM 检测结果一致。此外, 当接触应力从 10.6 MPa 增加至 21.1 MPa 时, 最大 PSD_{ID} 值依次增加 22%、94% 和 598%, 其磨损速率依次增加 11%、109% 和 592%, 说明最大 PSD_{ID} 值的增速与磨损速率的增速相一致, 通过 PSD 的检测结果可以预测摩擦副 QT600-3/40Cr 在不同接触应力作用下磨损速率的变化情况。由图 5b 可知, 随着接触应力的增大, 销试样磨损表面对应 PSD_{IID} 值也随之增大, 表明销试样表面质量变差, 磨损加剧。分析图 5b 可知, 销试样磨损表面对应 PSD_{IID} 仅在 x 或 y 某个单方向上有明显的峰值分布, 且空间分布范围很大, 而另一方向上分布的峰值和空间范围都很小, 反映出销试样磨损表面有比较明显的单方向纹理, 即为磨损表面的犁沟现象。由图 5 可知, 销

试样磨损表面对应 PSD_{IID} 在 x 和 y 方向上分布的峰值和空间范围都比较均匀, 反映出销试样磨损表面没有比较明显的纹理, 这是因为此阶段销试样磨损表面的磨屑多, 干扰了 PSD_{IID} 信息的获取。分析结果表明, 磨损表面的 PSD_{ID} 和 PSD_{IID} 与摩擦副的摩擦学特性有良好的对应关系, 即 PSD_{ID} 和 PSD_{IID} 值越大, 摩擦副的磨损表面质量越差, 磨损速率越快。

3 结论

(1) 当接触应力不高于 19.1 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的磨损率会随着接触应力的增大而增大, 但增速缓慢, 当接触应力高于 19.1 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的磨损率会呈现倍数增长, 并导致摩擦副很快失效。

(2) 当接触应力不高于 25.0 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的磨损形式主要为磨粒磨损, 当超过 25.0 MPa 时, QT600-3/40Cr 摩擦副的磨损形式变为胶合磨损。

(3) PSD_{ID} 和 PSD_{IID} 值越大, 摩擦副的磨损三维表面质量越差, 磨损速率越快。PSD 对磨损机理与趋势的预测结果与 SEM 检测结果一致, 可用于辅助分析 QT600-3/40Cr 摩擦副磨损机理与趋势。

图 5 不同接触应力下销试样磨损表面的功率谱密度图

参 考 文 献

- [1] 殷恋飞, 丁建宁, 岳陆游, 等. 几种人字门底枢材料的摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封, 2006(11): 130-132. YIN Lianfei, DING Jianning, YUE Luyou, et al. The friction and wear behavior of some materials used for bottom pintles of miter gates[J]. Lubrication Engineering, 2006(11): 130-132.
- [2] 陈一梅, 马丽佳, 王建民. 船闸底枢可靠性模型及其应用[J]. 东南大学学报, 2011, 41(1): 205-209. CHEN Yimei, MA Lijia, WANG Jianmin. Reliability model of lock bottom assembly and its application[J]. Journal of Southeast University, 2011, 41(1): 205-209.
- [3] THOMAS T R. The characterization of changes in surface topography during running[M]. London: Mechanical Engineering Publications, 1997.
- [4] FANG S J, HAPLEPETE S, CHEN W, et al. Analyzing atomic force microscopy images using spectral methods[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(12): 5891-5898.
- [5] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterization three-dimensional surface topography III[J]. Wear, 1994, 178 (1): 45-60.
- [6] 朱华, 葛世荣, 陈国安. 磨合表面形貌变化的分形表征[J]. 机械工程学报, 2001, 37(5): 68-71. ZHU Hua, GE Shirong, CHEN Guoan. Characterization of surface topography during running-in process with fractal parameter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(5): 68-71.
- [7] 周超, 高诚辉. 基于离散傅里叶变换的分形粗糙表面轮廓合成与研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 99-103. ZHOU Chao, GAO Chenghui. Study of synthesized fractal surface's profiles based on discrete Fourier transform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(17): 99-103.
- [8] 张维强, 陈国强. 基于地貌学的零件表面三维形貌评定[J]. 机械设计与研究, 2007, 23(2): 76-79. ZHANG Weiqiang, CHEN Guoqiang. 3D micro-geometry of machine part surface based on geomorphology[J]. Machine Design and Research, 2007, 23(2): 76-79.
- [9] 王余松, 张学良, 温淑花, 等. 分形粗糙表面特征长度

- 尺度参数小波识别法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 185-192.
- WANG Yusong, ZHANG Xueliang, WEN Shuhua, et al. Wavelet method identifying the characteristic length scale parameter of fractal rough surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(05): 185-192.
- [10] 张彤, 刘小君, 董磊, 等. 三维表面形貌的逾渗特性表征[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2933-2942.
- ZHANG Tong, LIU Xiaojun, DONG Lei, et al. Percolation characterization of three-dimensional surface topography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2933-2942.
- [11] 于光, 李鹏, 赵清亮, 等. 超精密加工表面特性的功率谱密度表征与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 29-32.
- YU Guang, LI Peng, ZHAO Qingliang, et al. Characterization of ultra-precision machined surfaces with power spectral density[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 29-32.
- [12] ITOH T, YAMAUCHI N. Surface morphology characterization of pentacene thin film and its substrate with under-layers by power spectral density using fast Fourier transform algorithms[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(14): 6196-6202.
- [13] DASH P, MALLICK P, RATH H, et al. Surface roughness and power spectral density study of SHI irradiated ultra-thin gold films[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(2): 558-561.
- [14] JARDIM P L G, HOROWITZ F, FELDE N, et al. Determination of the Wenzel roughness parameter by the power spectral density of functional alumina surfaces[J]. Thin Solid Films, 2016, 606: 57-62.
- [15] 张磊, 程鑫彬, 张锦龙, 等. 光学表面功率谱密度的表征[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3707-3712.
- ZHANG Lei, CHENG Xinbin, ZHANG Jinlong, et al. Characterization of power spectral density of optical surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3707-3712.
- [16] 谢庆, 王幼男, 刘利珍, 等. 基于功率谱密度分析的针电极下环氧树脂不同老化程度表面形貌研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(4): 56-60, 66.
- XIE Qing, WANG Younan, LIU Lizhen, et al. Study on surface morphology of epoxy resin with different ageing degrees under pin-pin electrode based on power spectral density analysis[J]. Insulation Materials, 2017, 50(4): 56-60, 66.
- [17] 岳巾英, 王泰升, 李素文. 利用功率谱密度评价离子束抛光光学元件表面粗糙度[J]. 光学技术, 2017, 43(3): 208-211.
- YUE Jinying, WANG Taisheng, LI Suwen. Using the power spectral density to evaluate the surface roughness of optical elemention beam polishing[J]. Optical Technique, 2017, 43(3): 208-201.
- [18] NIESLONY P, KROLczyk G M, WOJCIECHOWSKI S, et al., Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning[J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 91-101.
- [19] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册金属结构(一)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- Hydropower Plant Electromechanical Design Manual Compilation Team. Hydropower plant electromechanical design manual metal structure(一)[M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1988.
-
- 作者简介: 秦红玲, 女, 1978 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为摩擦学及表面工程。
- 徐翔(通信作者), 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为摩擦学及表面工程。
- E-mail: xu_xiang@ctgu.edu.cn