

干摩擦磨损过程中表面粗糙度的定量描述*

刘洪涛 靳晶 曹守范 葛世荣

(中国矿业大学材料科学与工程学院 徐州 221116)

摘要 基于金属磨损试验以及得出的摩擦系数和磨损形貌的变化规律,用轮廓算术平均偏差 R_a 、均方差 σ 、统计分布参数、偏态系数 R_{sk} 和峰态系数 R_{ku} 等可用于分析摩擦副磨损表面特性的典型表面粗糙度表征参数,定量分析了磨损过程中表面粗糙度的变化规律。结果表明,磨损稳定后, R_a 和 σ 逐渐降低,磨损表面凸峰是钝峰,轮廓高度分布越来越符合正态分布且数据分布越来越集中。

关键词 材料表面与界面, 磨损, 表面粗糙度, 表征参数, 分布, 机理

分类号 TH117

文章编号 1005-3093(2011)05-0483-06

The Quantitative Analysis of Surface Roughness in the Dry Friction

LIU Hongtao** JIN Jing CAO Shoufan GE Shirong

(School of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

* Supported by National Natural Science Foundation of China No.51075387.

Manuscript received July 21, 2011; in revised form August 11, 2011.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0516)83591916, E-mail:tribocumt@126.compar

ABSTRACT Based on the wear test of metal materials and the variation law of friction coefficients and the surface topographies of wear, the variation of surface roughness during the process of wear was quantitatively studied by using the typical characterizing parameters such as arithmetical mean deviation of the profile (R_a), mean square error (σ), statistical distribution parameters, coefficient of skewness (R_{sk}) and coefficient of kurtosis (R_{ku}). The results indicated that after the wear was stable, R_a and σ were both decreased gradually and the profile peaks on the wear surface were blunt. In addition, the distribution of profile's height was more and more near normal distribution and the data were more and more concentrated.

KEY WORDS surface and interface in the materials, wear, surface roughness, characterizing parameters, distribution, mechanism

磨损是一个复杂的动态过程,它涉及到对偶副的材料、运动、结构、力学等各个方面,在机械设计和摩擦学设计中起到非常重要的作用^[1-4]。摩擦表面形貌直接反映机械零件的磨损、疲劳和腐蚀等特征行为,不同磨损过程后的磨损表面形貌差别很大,不同的摩擦表面状态也会影响摩擦副的性能,因此,摩擦表面形貌是判定磨损机理最直接、最主要的判据^[5-7]。

表面粗糙度是用于描述表面微观形貌最常用的参数,是定量描述表面微观形貌最重要的方法。表面粗糙度对零件的摩擦学特性、耐疲劳性、耐腐蚀性有很大的影响。就对摩擦磨损的影响而言,表面越粗

糙,摩擦阻力越大,磨损越快,耐磨性越差,但过分光滑,也会增加摩擦磨损^[8-10]。到目前为止,人们已提出数十种描述表面粗糙度特征参数,其中轮廓算术平均偏差、轮廓高度分布的偏态和峰态、轮廓峰的自相关函数和支撑面积曲线等被用于摩擦副粗糙表面接触力学和磨损表面的分析^[11]。

在以往的磨损表面研究中,主要是针对磨损后粗糙表面整体形貌进行分析,抑或仅是对不同加工状况下不同摩擦表面进行分析,针对摩擦表面某一特定点在磨损过程中随时间变化进行表面形貌变化分析的研究较少。本课题主要采用三维表面形貌测量技术,对摩擦表面某一特定区域在磨损过程中三维表面形貌的变化进行研究,从而提供一种分析磨损机理的方法。本文基于金属磨损试验以及得出的摩擦系数和磨损形貌的变化,用表面粗糙度的表征参数中可用于分析摩擦副磨损表面特性的几个参数来定量分析磨

* 国家自然科学基金 51075387 资助项目。

2011 年 7 月 21 日收到初稿; 2011 年 8 月 11 日收到修改稿。

本文联系人: 刘洪涛

损过程中表面粗糙度的变化,为磨损机理分析提供一定的依据。

1 实验方法

采用销-盘式磨损方式进行滑动磨损试验,如图1所示。销材料为 GCr15 钢,经球化退火、淬火和低温回火,硬度为 HRC61。盘材料为 40Cr 钢,经调质处理,硬度为 HRC27。销的直径为 4 mm,两试样在试验前均用 1200 目金相砂纸对摩擦表面进行表面处理。

磨损试验在 MMW-1 立式万能摩擦磨损试验机上进行,干摩擦,销以 24 mm 的直径在盘表面上绕盘做圆周滑动,相对转速为 100 r/min,试验机载荷 100 N。试验过程中每隔 2 min 暂停一次,观察盘试样表面标记定点处的表面形貌并扫描出定直线上的表面轮廓高度,总试验时间为 30 min。磨损表面形貌测试设备为 MiaoXAM2.5X-50X 超高精度三维轮廓仪,垂直分辨率为 0.1 nm,实验所采取的水平测试范围为 $800\ \mu\text{m}\times 600\ \mu\text{m}$ 的矩形区域。试验前在盘

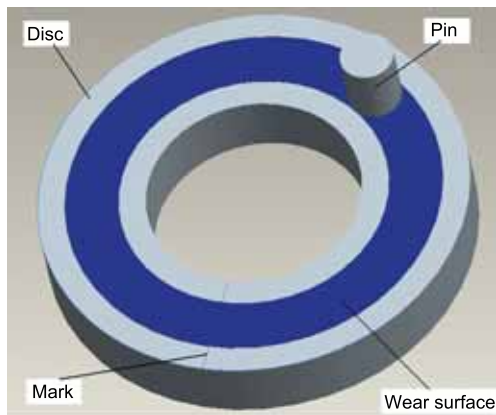


图1 销-盘滑动磨损试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pin-on-disc sliding wear test

试样表面销的滑动面上用探针沿径向划出一道细线,观察磨损表面形貌时,细线与测量系统的 X 轴对齐,沿 X 轴方向移动测试范围中心点使其与摩擦接触环面的中心对齐。

2 结果与讨论

2.1 摩擦系数与磨损机理定性分析

图2为试样在整个磨损过程中摩擦系数的变化曲线,可以看出,曲线前半部分的变化基本符合摩擦磨损的基本原理,摩擦系数在经过初始阶段的大幅波动(此时处于磨损的磨合期)后逐渐趋于稳定;在 1-18 min 这段时间里(此时处于磨损的稳定期),摩擦系数平稳中略有降低;19 min 以后摩擦系数开始明显下降,21 min 之后摩擦系数又趋于平稳,直到实验结束,摩擦系数一直稳定在 0.35。

磨损表面定点的三维形貌图由三维形貌仪得出,图3所示为第 18 min 磨损表面定点的三维形貌图。通过对磨损表面定点磨损形貌的变化分析其磨损机理,磨合期磨损方式主要为粘着和磨粒磨损^[11,12],摩擦副表面微凸体破坏、压碎和塑性变形,刮擦摩擦表面,形成较深的犁沟和较大尺寸的磨粒。摩擦系数较大且波动幅度较大;磨损稳定期磨损表面较深犁沟的数量以及深度并无较大变化,但分布在犁沟表面以及其它磨损面上的小凸峰在磨损过程中被磨平或磨小,光滑度提高,摩擦系数变小,波动幅度也变小。19 min 后犁沟的表面以及其他磨损面逐渐平滑,摩擦面间出现球形或类球形的磨粒在摩擦面间滚动,从而使摩擦系数发生明显降低,磨损减少。

2.2 表面粗糙度的定量分析

由三维形貌仪上测得的试验数据绘出摩擦表面上定点的表面轮廓高度曲线,图4为在摩擦磨损整个过程中依次选取的具有代表性的磨损表面的表面轮廓高度曲线。

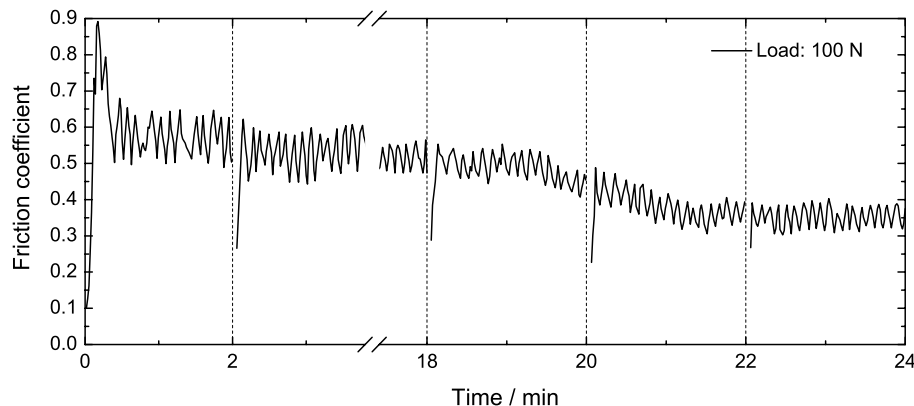


图2 摩擦系数在整个磨损过程中的变化曲线

Fig.2 The variation curve of the friction coefficient in the whole period of wear

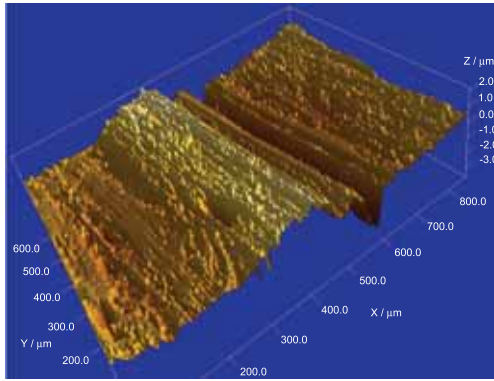


图 3 第 18 min 磨损面定点处的三维表面形貌

Fig.3 Three-dimensional surface topography of a specific spot at the 18th minute

轮廓算术平均偏差 R_a 是最早提出用于评定表面粗糙度的参数, 已被国际上绝大多数国家采用。轮廓算术平均方差 R_a 和均方差 σ 被普遍应用于机械零件加工表面的粗糙度表征, 也是目前摩擦副表面粗糙度描述的主要参数。但是这些参数只与轮廓凸峰的相对高度差有关, 只是一维的单参数, 因此只能描述同样加工方式所获得的同类表面的粗糙度。为了知道轮廓凸峰高度的布局 and 集中程度, 可以用统计分布函数来描述 [11]。

除了粗糙表面的凸峰高度之外, 凸峰形态是摩擦学研究中的重要问题, 因为凸峰形态直接关系到表面的接触力学行为, 对摩擦磨损行为有直接的影响 [13]。分布形状参数可以很好的描述凸峰的形态。

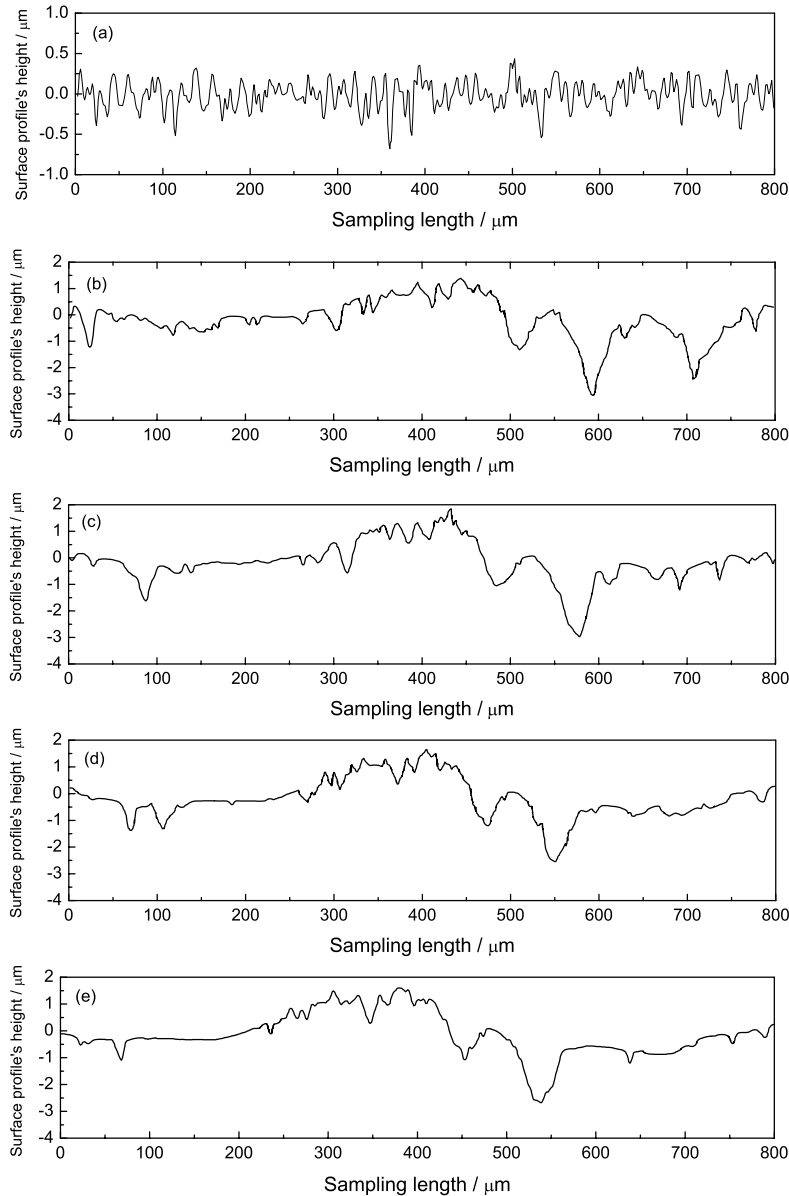


图 4 典型时间点时表面轮廓高度的变化曲线

Fig.4 The variation curves of the surface profile's height at typical time point, (a) before wear; (b) 2nd minute; (c) 10th minute; (d) 18th minute; (e) 24th minute

因此,在本文中轮廓算术平均偏差、统计分布参数和分布形状参数是用来分析表面粗糙度变化情况的主要参数。

2.2.1 轮廓算术平均偏差 轮廓算术平均偏差 R_a 的数学计算式为:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z - m| dx \quad (1)$$

其中, L 为采样长度, z 为轮廓偏差, m 为轮廓凸峰高度的均值。

参照于 m 的轮廓凸峰高度均方差 σ 为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (z - m)^2 dx} \quad (2)$$

对图 4 典型时间点时表面轮廓高度的变化曲线进行统计分析,得出轮廓算术平均偏差 R_a 和均方差 σ 随磨损时间的变化曲线,如图 5 所示。可以看出磨损前表面 R_a 和 σ 都较小,相对比较光滑,2 min 时 R_a 和 σ 均急剧增大,表面粗糙度明显增大,这主要是因为此时处于磨损过程的磨合期,磨损表面的微凸体发生挤压、咬合和破碎,粘着磨损和磨粒磨损比较严重,造成表面破坏。2 min 以后处于磨损过程的稳定期,粘着磨损和磨粒磨损大大降低,另外由于犁沟表面以及其它磨损面上的小凸峰被磨平或磨小, R_a 和 σ 均逐渐降低。

2.2.2 统计分布参数 正态分布是粗糙表面轮廓的统计分析中最常见、最重要的一种分布,正态分布的概率密度函数可由两个参数决定,一个是均值 a ,另一个是方差 σ 。正态分布的概率分布函数是:

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{-\infty}^x p(z) dz \\ &= \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] dz \end{aligned} \quad (3)$$

若对概率分布函数进行正态化处理,即获得均值

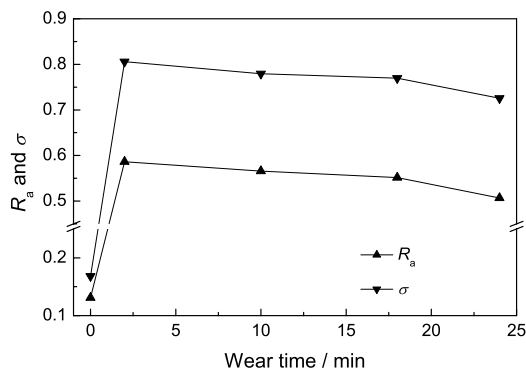


图 5 轮廓算术平均偏差 R_a 和均方差 σ 随磨损时间的变化曲线

Fig.5 The variation curves of R_a and σ with time

为 0 和方差为 1 的正态分布,其变量转换如下:

$$x^* = \frac{x - a}{\sigma} \quad (4)$$

因此,概率密度函数转化为:

$$p(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x^*)^2}{2}\right] \quad (5)$$

典型时间点磨损表面轮廓高度的概率分布情况如图 6 所示,可见磨损前表面轮廓高度的分布非常符合于正态分布,且数据较集中;2 min 结束后的磨损表面轮廓高度分布与正态分布相差较大,数据分布范围较大;由图 6c-e 图中轮廓高度分布的变化趋势可以看出,分布越来越服从正态分布且数据的分布也越来越集中,结合磨损形貌可以说明磨损表面上较深的犁沟虽仍然存在,但总体来说表面越来越光滑。

2.2.3 分布形状参数 描述分布形态的常用参数是偏态系数 R_{sk} 和峰态系数 R_{ku} 。

偏态系数是描述凸峰统计分布曲线偏离中线位置的参数,它的计算式为:

$$R_{sk} = \frac{1}{\sigma^3 L} \int_0^L (z - m)^3 dx \quad (6)$$

偏态系数 R_{sk} 描述了凸峰高度方向的形状变化,负值时轮廓凸峰呈现钝峰形状;正值时轮廓凸峰呈现尖峰形状;为零时轮廓凸峰是钝峰上出现尖峰的复合形状。所以,从摩擦学的接触表面承载能力要求来看,表面轮廓的偏态系数为负数时较好。偏态系数也是表面轮廓相对于基准面的对称性的度量,它的绝对值可以反映出表面高度分布的对称性程度^[14]。

峰态系数 R_{ku} 表示凸峰统计分布曲线的尖峭程度,它的计算式为:

$$R_{ku} = \frac{1}{\sigma^4 L} \int_0^L (z - m)^4 dx \quad (7)$$

峰态系数表示高度分布曲线的凸起程度,或者表示概率的分散或集中程度,是形貌高度分布的峰度和峭度的度量。当高度分布曲线为正态分布曲线时, $R_{ku}=3.0$,若 $R_{ku} < 3.0$,则为低峰态或负峰态,表示高度分布的概率较分散;若 $R_{ku} > 3.0$,则为高峰态或正峰态,表示高度分布的概率较集中^[14,15]。

磨损过程中偏态系数和峰态系数的变化如图 7 所示,可以看出,磨损过程中磨损表面的凸峰一直是钝峰,2 min 以后偏态系数的变化说明,一方面,磨损会造成粗糙表面凸峰变钝,从而使磨损表面的承载能力变强;另一方面,磨损表面轮廓高度分布的对称性逐渐提高,集中性越来越好。这也与图 6 所示结果相

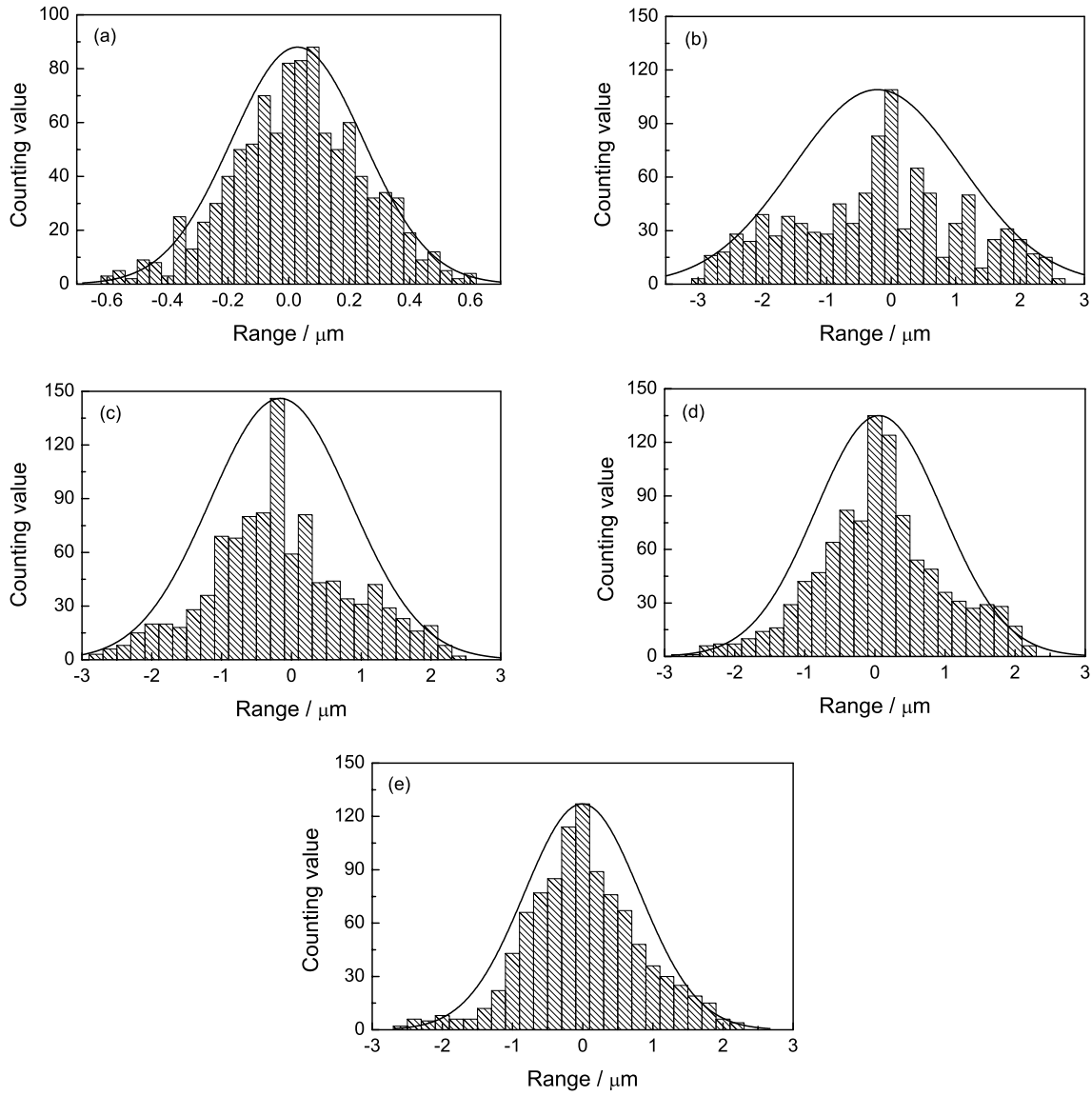


图 6 典型时间点时表面轮廓高度的概率分布图及正态拟合曲线

Fig.6 The probability distribution graphs and their normal fitting curves of the surface profile's height at typical time point, (a) before wear; (b) 2nd minute; (c) 10th minute; (d) 18th minute; (e) 24th minute

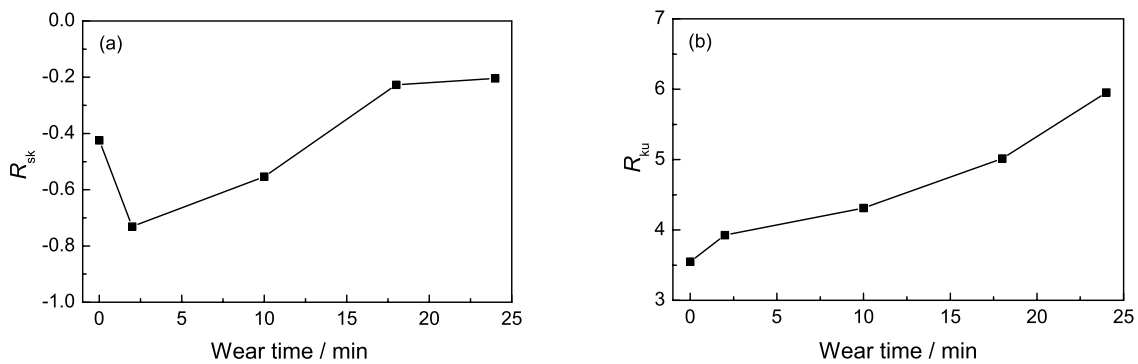


图 7 磨损过程中偏态系数 R_{sk} 和峰态系数 R_{ku} 的变化曲线

Fig.7 The variation curves of the coefficient of skewness (R_{sk}) (a) and the coefficient of kurtosis (R_{ku}) (b) with time

符合。

3 结 论

1. 磨损过程中, 轮廓算术平均偏差 R_a 和均方差 σ 随磨损时间先急剧增大后逐渐减小, 轮廓高度分布越来越符合正态分布且数据分布越来越集中, 说明磨损过程中表面粗糙度先增大后减小, 符合摩擦磨损的基本原理。

2. 磨损过程中偏态系数和峰态系数的变化反映出磨损过程中磨损表面的凸峰一直是钝峰, 这样的表面承载能力较强, 2 min 以后磨损表面轮廓高度分布的对称性逐渐提高, 集中性越来越好。

参 考 文 献

- 1 A.I.Dmitriev, M.Schaggott, V.L.Popov, Direct modelling of surface topography development in a micro-contact with the movable cellular automata method, *Wear*, **268**, 877(2010)
- 2 E.Y.A.Worniyoh, V.K.Jasti, C.F.Higgs, A review of dry particulate lubrication: powder and granular materials, *Journal of Tribology*, **129**, 438(2007)
- 3 S.Mezlini, M.B.Tkaya, M.E.Mansori, H.Zahouani, P.Kapsa, Correlation between tribological parameters and wear mechanisms of homogeneous and heterogeneous material, *Tribology Letter*, **33**, 153(2009)
- 4 WEN Shizhu, Centurial review and prospect—The development tendency of tribology, *China Journal of Mechanical Engineering*, **36**(6), 1(2000)
(温诗铸, 世纪回顾与展望—摩擦学研究的发展趋势, *机械工程学报*, **36**(6), 1(2000))
- 5 YUAN Chenqing, LI Jian, YAN Xinping, Tribological testing technology and its development, *Tribology*, **22**(4s), 447(2002)
(袁成清, 李 健, 严新平, 摩擦学测试技术及其发展, *摩擦学学报*, **22**(4s), 447(2002))
- 6 G.Straffelini, G.Bizzotto, V.Zanon, Improving the wear resistance of tools for stamping, *Wear*, **269**, 693(2010)
- 7 Z.K.Zhang, Y.Y.Zhang, Y.S.Zhu, A new approach to analysis of surface topography, *Precision Engineering*, **34**, 807(2010)
- 8 LI Fenlan, TANG Wenyan, DUAN Haifeng, HAO Jianguo, New development in research of non-contact surface roughness measurement, *Laser & Infrared*, **37**(6), 498(2007)
(李粉兰, 唐文彦, 段海峰, 郝建国, 非接触式表面粗糙度测量研究新进展, *激光与红外*, **37**(6), 498(2007))
- 9 CHAO Caixia, YANG Shengmiao, XIU Shichao, Characteristics of the point grinding surface texture and its effects on evaluation parameters of the surface roughness, *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, **32**(6), 846(2011)
(晁彩霞, 杨圣淼, 修世超, 点磨削纹理特征及对表面粗糙度评定参数的影响, *东北大学学报(自然科学版)*, **32**(6), 846(2011))
- 10 JI Shengya, SUN Lemin, Influence of surface roughness on electric-current friction and wear properties of copper-base PM/QCr0.5 couples, *Lubrication Engineering*, **36**(3), 69(2011)
(冀盛亚, 孙乐民, 表面粗糙度对铜基粉末冶金/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能影响的研究, *润滑与密封*, **36**(3), 69(2011))
- 11 GE Shirong, ZHU Hua, *Fractal in Tribology* (Beijing, China Machine Press, 2005) p.85, p.227
(葛世荣, 朱 华, *摩擦学的分形*, (北京, 机械工业出版社, 2005) p.85, p.227)
- 12 WEN Jianping, ZHEN Minghui, CHENG Wenkong, YU Na, Structural design and tribological properties for aluminium-plastics self-lubricating composites, *China Mechanical Engineering*, **17**(21), 2292(2006)
(温建萍, 甄明辉, 程文孔, 俞 娜, 铝-塑自润滑材料的结构分析与摩擦磨损性能, *中国机械工程*, **17**(21), 2292(2006))
- 13 P.S.Agarwal, V.Rao, A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **45**, 609(2005)
- 14 CHEN Yu, CAO Ping, PU Chengzhi, LIU Yeke, LI Na, Experimental study of effect of water-rock interaction on micro-topography of rock surface, *Rock and Soil Mechanics*, **31**(11), 3452(2011)
(陈 瑜, 曹 平, 蒲成志, 刘业科, 李 娜, 水-岩作用对岩石表面微观形貌影响的试验研究, *岩土力学*, **31**(11), 3452(2010))
- 15 B.Bhushan, *Introduction to Tribology* (New York, John Wiley & Sons, 2002) p.29