

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160510004

滑动摩擦结合面磨合磨损表征方法与影响因素

李万钟¹, 徐颖强¹, 孙 戡¹, 刘楷安¹, 曾天微²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2. 长安汽车有限公司研究总院, 重庆 401120)

摘 要: 定量分析研究磨合磨损的表征方法与影响因素对于获得低磨损率的稳定持续工作状态、保证摩擦副工作性能和使用寿命都具有重要意义。基于质量磨损量, 构建了滑动摩擦磨合磨损的表征方法, 得到一种新的磨合磨损相关参数计算模型。采用球-盘摩擦副, 得到磨削抛光表面、周向纹理表面与径向纹理表面3种表面形貌的样件在不同工况下的质量磨损量, 分析了法向载荷、滑动速度和初始表面状态3种因素对摩擦副结合面磨合磨损的影响, 推出磨合磨损阶段的质量磨损率和磨损系数随时间的变化规律。结果表明: 载荷和转速均与初始质量磨损率正相关; 在磨合磨损初期, 周向纹理表面的质量磨损量和质量磨损率较高; 在整个磨合磨损过程中, 磨削抛光表面的磨损系数较为稳定, 径向纹理表面的磨损率最低, 而钢球对磨件的磨损量却最大, 在低速或低载时体现的尤为明显。

关键词: 滑动摩擦; 磨合磨损; 磨损率; 表面形貌

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)01-0125-07

Characterization Methods and Influence Factors of Running-in Wear Between Sliding Joint Surfaces

LI Wan-zhong¹, XU Ying-qiang¹, SUN Jian¹, LIU Kai-an¹, ZENG Tian-wei²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072; 2. Changan Automobile Research Institute Co. Ltd., Chongqing 401120)

Abstract: Quantitative analysis of characterization methods and influencing factors of running-in wear is of great significance for stable working state with low wear rate, excellent friction performance and long service life. Characterization methods of sliding running-in wear was established and a new calculation model of relevant parameters was obtained based on the wear mass loss. With ball-disk friction pair, wear mass loss of grinding polishing surface, circumferential textured surface and radial textured surface were obtained under different operating condition. The influences of loading, revolving speed and initial surface morphology on sliding joint surfaces were investigated. Rule of mass wear rate and wear coefficient changing with time were derived in running-in wear stage. The results show that, loading and revolving speed are positively correlated with initial mass wear rate. At the beginning of the running-in wear, circumferential textured surface has higher mass wear loss and wear rate. In the whole process of running-in wear, wear coefficient of grinding polishing surface is relatively stable, wear rate of radial textured surface is the lowest. Nevertheless, the wear mass of its paired three balls is the largest, especially for lower speed or loading.

Keywords: sliding friction; running-in wear; wear rate; surface topography

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-11-09

网络出版日期: 2017-01-03 11:17; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170103.1117.008.html>

通讯作者: 徐颖强(1961—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 微接触强韧化疲劳与可靠性设计方法; E-mail: xuyngqng@nwpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(50875214, 10672134, 11072196); 西北工业大学博士论文创新基金(CX201420)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(50875214, 10672134, 11072196) and Doctorate Foundation of Northwestern Polytechnical University(CX201420)

引文格式: 李万钟, 徐颖强, 孙戡, 等. 滑动摩擦结合面磨合磨损表征方法与影响因素[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 125-131.

LI W Z, XU Y Q, SUN J, et al. Characterization methods and influence factors of running-in wear between sliding joint surfaces[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 125-131.

0 引言

磨合过程的实质是一个摩擦副从机械加工的原始状态经动态磨损而达到稳定的低磨损阶段的过程^[1],是涉及摩擦副材料、表面几何特征、接触状况以及介质的物理化学特性等多因素的动力学过程^[2]。与稳定磨损相比,磨合过程磨损量大,摩擦结合面形态发生急剧变化,通常的磨损率比稳定磨损的磨损率大50~100倍^[3],磨合磨损量直接影响摩擦副的使用寿命。因此,磨合对于防止发生咬合、获得低磨损率的稳定持续工作状态、延长使用寿命等都有重要影响^[4]。

近半个世纪以来,国外学者对摩擦部件的磨合磨损行为展开深入研究^[5-8],认为摩擦副表面微凸体材料塑性挤压、粘着磨损、磨粒磨损是磨合过程中的主要磨损形式。Zheng等人^[9]于1998年提出磨合磨损和稳定磨损阶段的数学模型,在此基础上,Rajesh等人^[10]提出了一套滑动摩擦副从磨合磨损到稳定磨损阶段的系统表征方法,并通过试验对该方法进行了验证。Bosman^[11]等人根据半解析法给出磨合表面形貌变化的预测模型,对真实工程表面进行了仿真预测,得到的结果真实可靠,证明了该模型的正确性。Wang^[12]等人用人口增长模型仿真磨合磨损,将磨损过程的磨损量计算模型分为3项:初始点高度、确定项和随机项,可仿真粗糙表面接触区域峰顶和峰谷的变化,结果表明粗糙表面接触区域微凸体的峰顶高度符合人口增长模型,磨损量的预测可用指数形式的公式表达,这也验证了文献^[9-10]中给出的表征方法的正确性。张移山^[1]利用磨合过程的数学模型分析研究了影响磨合过程的主要因素,从理论上实现了内燃机缸套和活塞环的磨合过程各阶段内燃机负荷和转速的优化组合。朱华和葛世荣等人^[13-15]从非线性科学原理出发,将磨合过程当作摩擦学系统的自组织过程,提出磨合吸引子的概念,并用分形方法对表面形貌进行分形表征和分形参数计算。

一般认为,接触载荷、相对运动速度、初始表面状态以及润滑状况等是影响磨合过程的主要因素,在滑动磨损过程中,接触表面间的接触状态对磨损影响很大,塑性接触比弹性接触引起磨损的可能性要大得多^[2]。由于磨合磨损过程是发生在材料表面层的微观动态过程,涉及到力学、材料学、物理学、化学和传热学等多个学科领域,很难实时观察,在理论和实践上都不够完善^[16-17],因

此,建立摩擦结合面磨合磨损的表征方法,定量分析研究其影响因素,对于保证摩擦副工作性能和使用寿命都具有重要意义。

1 滑动磨合磨损表征方法

摩擦副在磨合过程中的磨损机理以粘着磨损和磨粒磨损为主,这两种磨损机理导致磨损量与载荷、滑动速度以及磨损时间成正比,而与摩擦副材料的硬度成反比^[2-3, 18-21],即

$$M = K \frac{Fvrt}{H^*} \quad (1)$$

$$H^* = \begin{cases} \left(\frac{1}{H_1} + \frac{2}{H_2} \right)^{-1}, R_1 < R_2 \\ \left(\frac{2}{H_1} + \frac{2}{H_2} \right)^{-1}, R_1 = R_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为摩擦副的质量磨损量,mg; K 为磨损系数,mg·mm⁻³; F 为法向载荷,N; v 为滑动转速,r·min⁻¹; r 为公转半径,mm·r⁻¹; t 为磨损时间,min; H^* 为等效硬度,MPa; H_1 和 H_2 分别为摩擦副两构件材料硬度,并且 $H = 2.8\sigma_y$, σ_y 为材料的屈服极限,MPa; R_1 和 R_2 分别为摩擦副两构件结合面曲率半径,mm。

磨损率是表征磨损行为随时间变化的重要参数,磨损从磨合磨损阶段到稳定磨损阶段的过程中,磨损率呈指数级降低,用公式表达为^[9-10]:

$$w = (w_0 - w_s) e^{-bt} + w_s \quad (3)$$

式中: w 为质量磨损率,mg/min; w_0 为初始质量磨损率,mg/min; w_s 为稳定磨损时的质量磨损率,mg/min; b 为磨合磨损负相关系数,min⁻¹。

由上式可以看出,当 $t=0$ 及 $t=\infty$ 时,质量磨损率 w 分别为 w_0 和 w_s 。对上式关于时间 t 积分:

$$M = -\left(\frac{w_0 - w_s}{b} \right) e^{-bt} + w_s t + C \quad (4)$$

式中: M 为质量磨损量,mg; C 为积分常数。又 $t=0$ 时, $M=0$,有

$$C = \frac{w_0 - w_s}{b} \quad (5)$$

此时,公式(4)可以写为

$$M = \left(\frac{w_0 - w_s}{b} \right) (1 - e^{-bt}) + w_s t \quad (6)$$

联立公式(1)和(6),得到磨损系数 K 与时间相关。

$$K = \frac{H^*}{Fvrt} \left[\left(\frac{w_0 - w_s}{b} \right) (1 - e^{-bt}) + w_s t \right] \quad (7)$$

2 材料与方法

2.1 试验材料

在相同的载荷下, 与面接触低副相比, 点接触高副的接触表面之间的真实接触面积小, 接触应力大, 对各项因素的影响表现更为明显, 并且在实际滑动摩擦构件中, 点接触高副的应用很多, 如滑动球轴承中滚动体与内外圈之间的接触、关节轴承中内圈外球面和外圈内球面之间的接触等^[22]。如图1(a)所示, 平面试环材料选用40Cr钢, 调质处理。40Cr钢是机械制造业使用最广泛的钢之一, 调质处理后具有良好的综合力学性能, 良好的低温冲击韧性和低的缺口敏感性, 用于制造承受中等负荷及中等速度工作的机械零件。钢球选用GCr15钢, 淬火处理。GCr15钢是一种合金含量较少, 应用最广泛的高碳铬轴承钢, 经过淬火加低温回火后具有较高的硬度、均匀的组织、良好的耐磨性、高的接触疲劳性能, 用于制作各种轴承套圈和滚动体, 力学性能见表1。

摩擦副初始表面形貌对磨合磨损特性影响表现在两方面: 一是磨合后表面形貌特征对稳定磨

损阶段摩擦副工作性能的影响; 二是磨合过程磨损量对摩擦副工作寿命的影响^[4]。为研究初始表面形貌对磨合磨损特性的影响, 探讨摩擦副相对运动方向与加工纹理之间的关系, 将试环样件的接触表面加工成磨削抛光表面、周向纹理表面和径向纹理表面3种(图1(b)(c)(d))。

从表2可看出, 周向纹理表面和径向纹理表面的表面粗糙度Ra在径向和周向上表现出了明显的方向性。采用3种初始表面目的在于研究表面纹理对摩擦磨损的影响: 磨削抛光表面对滑动摩擦没有方向性的影响, 周向纹理表面的纹理方向与滑动方向一致, 径向纹理表面的纹理方向与滑动方向垂直。文献^[1, 23]认为达到磨合状态的磨合表面粗糙度与初始粗糙度无关, 但是初始表面状态将影响达到磨合状态的时间和对磨件的磨损量^[24]。

表 2 不同试环的表面粗糙度

Surface preparation	Ra / μm	
	Circumferential direction	Radial direction
Grinding polishing	≤ 0.1	≤ 0.1
Circumferential texture	0.3~1.0	2~4
Radial texture	1~4	0.1~0.7

2.2 试验方法

采用球-盘摩擦副(图1(a))作为点接触高副, 在MMW-1万能摩擦磨损试验机上进行, 3个钢球在轴向均布载荷作用下, 紧贴试环表面共同绕中心轴公转, 公转半径为11.2 mm, 不发生自转, 平面试环固定不动。通过改变载荷、滑动速度以及初始表面状态3个磨合磨损的主要影响因素, 测试试样的磨损率。试验过程中采用分辨率为0.1 mg的JJ224BC电子天平进行质量磨损量监控, 每次称重前用丙酮溶液对样件进行清洗并烘干, 去除表面磨屑与杂质。

3 结果与讨论

3.1 质量磨损量

从表1可知, 球-盘摩擦副中平面试环的硬度远小于钢球的硬度, 因此重点分析平面试环的质量磨损量。载荷 $F=60、120$ 和 180 N , 转速 $v=20、50$ 和 80 r/min , 不同初始表面状态下的质量磨损量如图2所示。

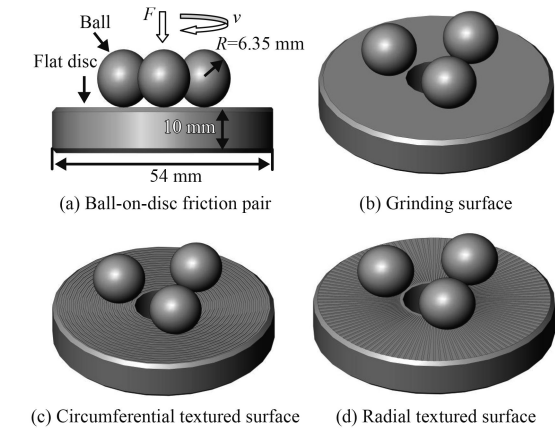


图 1 球-盘摩擦副与试环初始表面形貌

Fig.1 Ball-on-disc friction pair and surface topographies of flat disc

表 1 球-盘摩擦副材料的力学性能

Properties	Ball	Flat disc
Material	GCr15	40Cr
HRC	62~66	32~36
σ_v / MPa	1 394	785
E / GPa	209	209
$v / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0.3	0.3

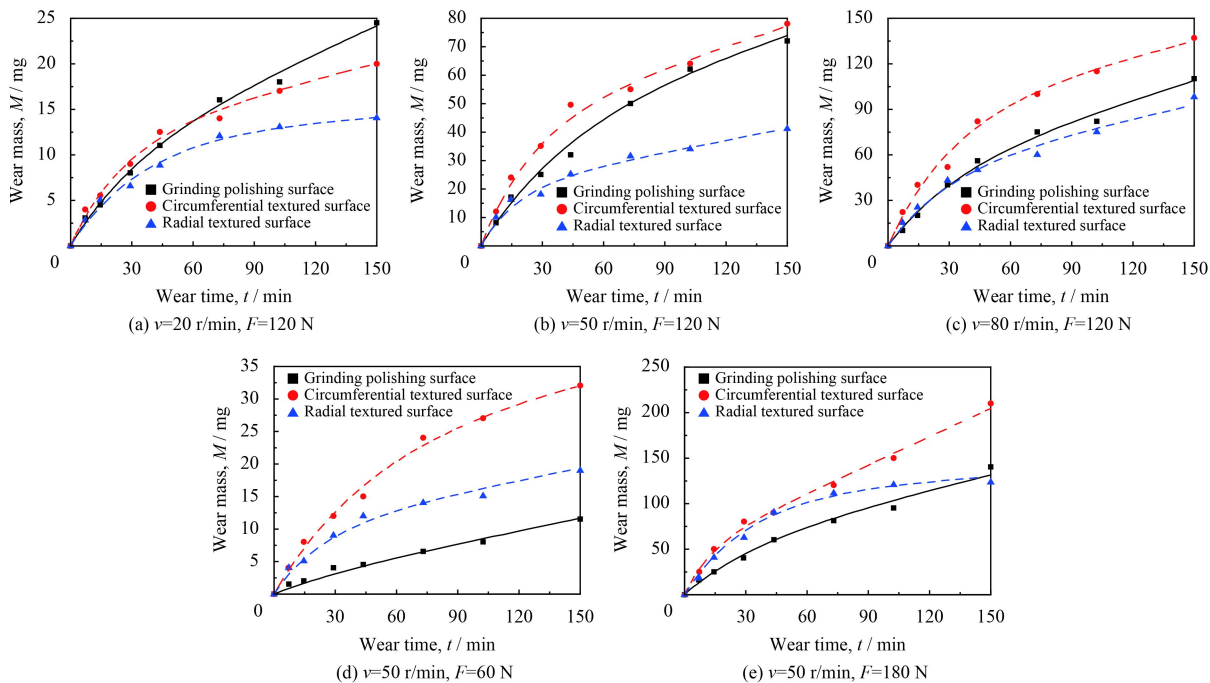


图2 不同因素对试环质量磨损量的影响

Fig.2 Effects of different factors on wear mass of flat disc

总的来说,周向纹理表面的质量磨损量较大,磨削抛光表面居中,径向纹理表面较小。这是因为周向纹理的存在,减小了摩擦副的真实接触面积,单个微凸体受到的载荷较大,承受超过材料屈服极限的接触压力,在磨合磨损初期更易发生塑性流动和撕裂,磨损产生的磨粒参与摩擦,导致摩擦机制以犁沟效应和磨粒磨损为主。而径向纹理表面的纹理方向与钢球运动方向垂直,使得径向纹理表面相较于周向纹理表面更难以发生塑性变形和微观切削,减小了径向纹理表面的质量磨损量。

同一载荷(120 N)不同速度下,对比图2(a)(b)(c)可以看出,无论何种初始表面形貌,转速越高,平面试环的质量磨损量越大,并且纹理表面受到转速的影响更加明显,因为转速越高,在相同时间内同一接触区域磨损次数越多,表面纹理凸峰越快被碾平,其磨损量曲线逐渐向磨削抛光表面靠拢。同一转速(50 r/min)不同载荷下,对比图2(b)(d)(e),载荷越高,平面试环的质量磨损量越大。载荷较低时,磨削抛光表面的磨损量最小,这是因为相比纹理表面,磨削抛光表面的真实接触面积较大,表面的单个微凸体上承受的接触压力较小,更多参与接触的微凸体发生弹性变形,减小了磨损量。

3.2 质量磨损率

根据3.1得到的质量磨损量的试验结果,对公式(6)关于时间 t 进行微分,结合公式(3)得到不同因素下随时间变化的质量磨损率 w ,如图3所示。

总的来说,在磨合磨损初期,周向纹理表面的初始磨损率 w_0 略高,当加载载荷为180 N时,周向纹理表面和径向纹理表面的初始磨损率 w_0 分别是磨削抛光表面的2.37倍和1.81倍。

在磨合磨损中后期,随着磨合磨损的进行,纹理表面的磨损率下降趋势较快,其稳定磨损率在磨合磨损中后期,随着磨合磨损的进行,纹理表面的磨损率下降趋势较快,其稳定磨损率 w_s 逐渐向磨削抛光表面靠拢,这是由于纹理表面的微凸体逐渐被磨掉,而表面轮廓凹谷处的形貌基本保持不变,也说明初始表面形貌越接近磨合状态时的形貌特征,磨合时间则越短,磨合质量越高^[25]。

在整个磨合磨损过程中,径向纹理表面的磨损率最低,这与其纹理方向与摩擦运动方向不同有关。当钢球滑动到与之运动方向垂直的径向纹理位置时,摩擦阻力增大,一方面使得滑动摩擦中的跃动现象较之另外两种表面更加明显,在相同时间内减小了有效摩擦时间;另一方面加剧了钢球对磨件的磨损,增加了钢球与试样的真实接触面积,使得径向纹理表面微凸体承受的接触压

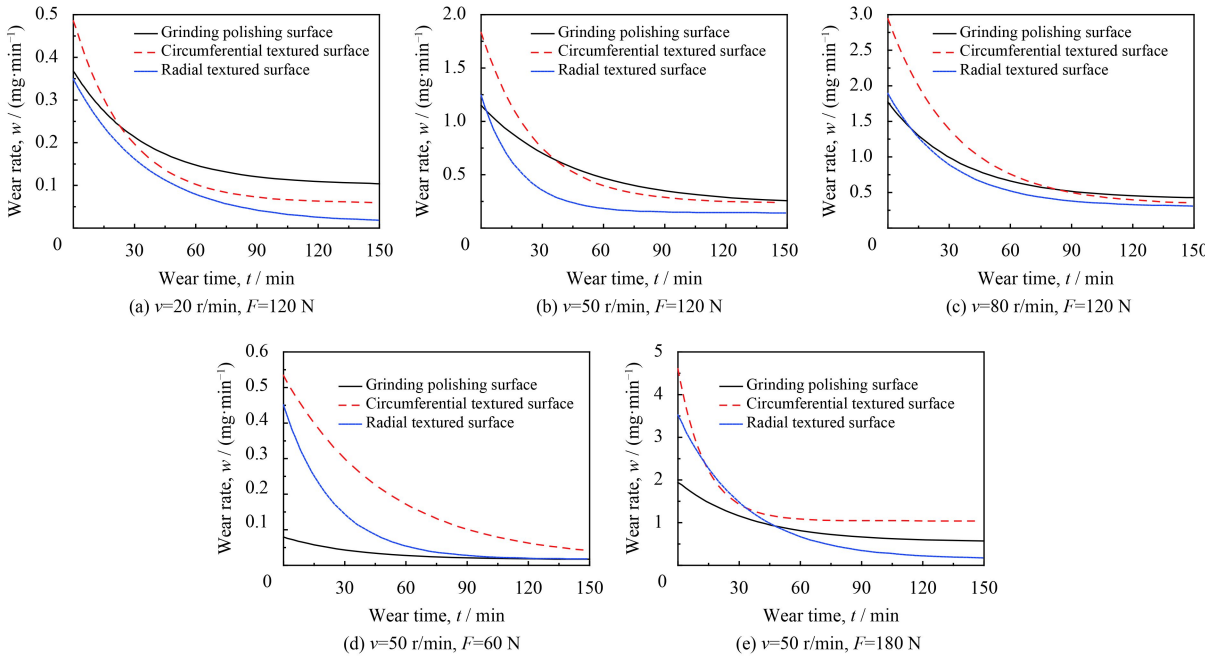


图 3 不同因素对试环磨损率的影响

Fig.3 Effects of different factors on wear rate of flat disc

力减小。图3清楚表示了不同因素下由磨合磨损阶段向稳定磨损阶段过渡的过程。

3.3 磨损系数

磨损系数反映了摩擦副材料的耐磨性能，磨损系数越小，表明摩擦副材料越耐磨。根据上述试验结果，结合公式(7)，得到磨损系数 K 与磨损时间 t 的关系(图4)。可以看出，即使是同种材料，

磨损系数不是定值，会由于工况和初始表面状态的不同，而有所差别。同时还可以看出，在磨合磨损初期，周向纹理表面耐磨性能最差，随着磨损的进行，多种磨损形式共同作用(犁沟磨损、磨粒磨损、黏着磨损等)，由磨合磨损向稳定磨损过渡的同时，3种表面的磨损性能逐渐靠拢。此外，对于低转速($v=20$ r/min，图4(a))和低载荷($F=$

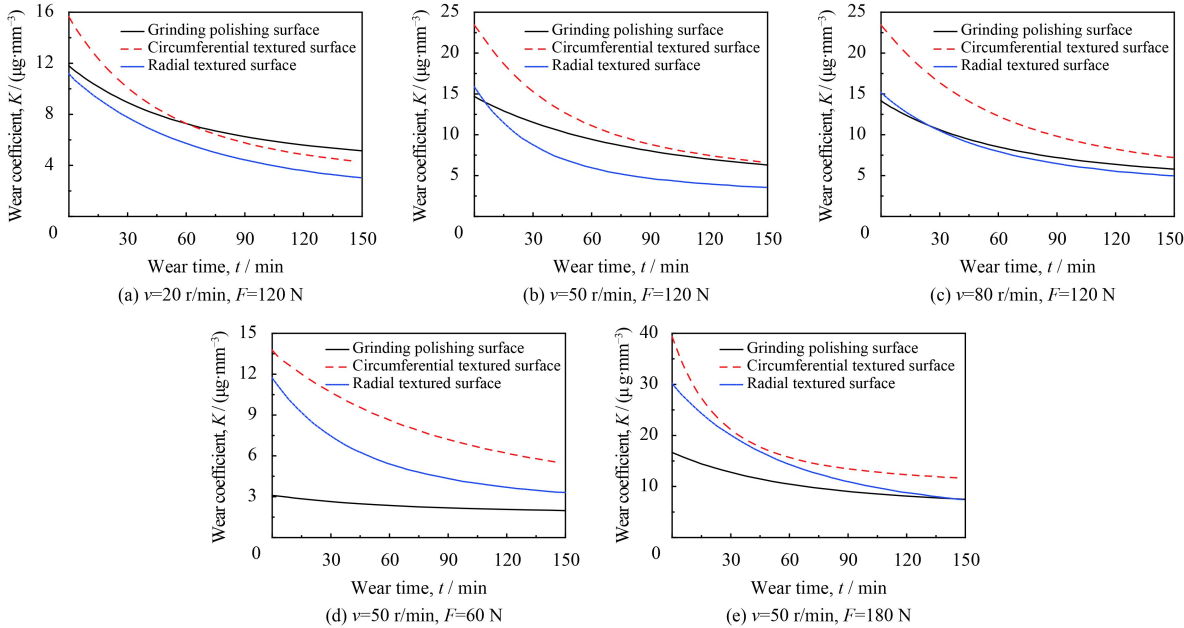


图 4 不同因素对磨损系数的影响

Fig.4 Effects of different factors on wear coefficient

60 N, 图4(d)), 磨削抛光表面的磨损系数 K 相较另外两种表面而言, 变化趋势很小, 可以认为, 在低转速或低载荷的情况下, 磨削抛光表面的磨损系数比较稳定。

3.4 对磨件磨损量

由于钢球紧贴在平面试环上做滑动摩擦(图1(a)), 不发生滚动, 虽然钢球硬度远大于平面试环, 但其并不是理想刚体, 随着磨损的进行, 钢球与平面试环的接触部位会发生磨损, 由点接触高副向面-面接触低副转变。图5记录了当平面试环的质量磨损量 $\Delta M=0.1$ g时, 3个钢球的磨损量。可以看出, 在低速或低载的状态下, 钢球更易发生磨损; 径向纹理表面的钢球对磨件磨损量最大, 一方面是因为磨合时间长, 另一方面是因为径向纹理表面的纹理方向与摩擦副相对运动方向垂直, 导致径向纹理表面相较于周向纹理表面更难以发生塑性变形和微观切削, 加大了对钢球的运动阻力, 延长了磨损时间的同时也大大加剧了钢球在滑动摩擦中的磨损量; 而周向纹理表面的纹理方向与摩擦副相对运动方向相同, 在减小真实接触面积的同时对钢球起到了一定的保护作用, 使得钢球磨损量降低。

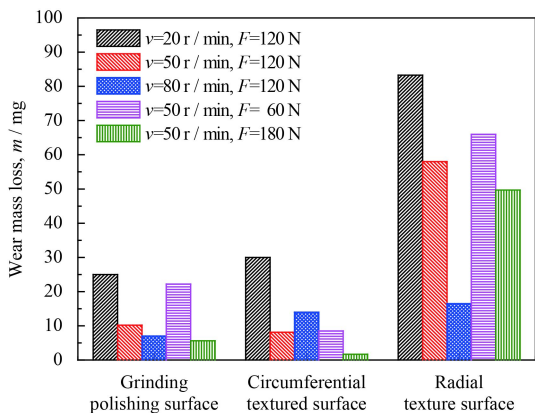


图5 不同因素下3个钢球的磨损量

Fig.5 Wear mass loss of three balls under different factors

4 结 论

基于质量磨损量的试验结果, 得到磨损率和磨损系数随时间的变化规律, 构建了滑动摩擦磨合磨损的表征方法, 分析了法向载荷、滑动速度和初始表面状态3种因素对摩擦副结合面磨合磨损的影响, 得到3点主要结论。

(1) 无论何种初始表面形貌, 质量磨损量都与

载荷和转速正相关, 载荷和转速越大, 平面试环的质量磨损量越大。

(2) 在磨合磨损初期, 周向纹理表面的质量磨损量和质量磨损率较高; 在整个磨合磨损过程中, 径向纹理表面的磨损率最低, 钢球的磨损量却最大, 在低速或低载时体现的尤为明显, 这与其纹理方向与摩擦运动方向不同有关。

(3) 磨损系数会受到载荷、滑动速度以及初始表面状态的影响, 在磨合磨损阶段向稳定磨损阶段变化的过程中, 纹理表面和磨削抛光表面的磨损系数逐渐接近。

参考文献

- [1] 张移山, 孔宪梅, 陈大融. 磨合过程的摩擦学设计研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(4): 38-41.
ZHANG Y S, KONG X M, CHEN D R. Tribological design of the running-in process[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38(4): 38-41 (in Chinese).
- [2] 葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 226-271.
GE S R, ZHU H. Fractal in tribology[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 226-271 (in Chinese).
- [3] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第4版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 290-296.
WEN S Z, HUANG P. Principles of tribology(fourth edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 290-296 (in Chinese).
- [4] 张耕培. 基于表面形貌的滑动磨合磨损预测理论与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
ZHANG G P. Study on prediction of sliding running-in wear based on surface topography[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013 (in Chinese).
- [5] SCREENATH A V, RAMAN N. Running-in wear of compression ignition engine: factors influencing the conformance between cylinder liner and piston ring[J]. Wear, 1976, 38(2): 271-289.
- [6] LLIUC I. Reaction products in and around the wear track in the lubricated mild wear regime[J]. Wear, 1984, 93(3): 271-279.
- [7] KANG S C, LUDEMA K C. The breaking-in of lubricated surfaces[J]. Wear, 1986, 108: 375-384.
- [8] PAWLUS P. A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in[J]. Wear, 1994, 176(2): 247-254.
- [9] ZHENG M, NAEIM A H, WALTER B, et al. Break in liner wear and piston ring assembly friction in a spark-ignited engine[J]. Tribology Transactions, 1998, 41(4): 497-504.
- [10] KUMAR R, PRAKASH B, SETHURAMIAH A. A system-

- atic methodology to characterise the running-in and steady-state wear processes[J]. *Wear*, 2002, 252(5/6): 445-453.
- [11] BOSMAN R, HOL J, SCHIPPER D J. Running-in of metallic surfaces in the boundary lubrication regime[J]. *Wear*, 2011, 271(7/8): 1134-1146.
- [12] WANG Z J, ZHOU Q H. Applying a population growth model to simulate wear of rough surfaces during running-in[J]. *Wear*, 2012, 294-295: 356-363.
- [13] 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 H, GE S R, CHEN G A. Characterization of surface topography during running-in process with fractal parameter[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2001, 37(5): 68-71 (in Chinese).
- [14] 朱华, 葛世荣, 李刚, 等. 磨合试验及磨合吸引子初探[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(1): 1-3.
ZHU H, GE S R, LI G, et al. Test of running-in process and preliminary analysis of running-in attractors[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(1): 1-3 (in Chinese).
- [15] 朱华, 葛世荣, 吕亮, 等. 磨合吸引子的演变规律[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(3): 99-104.
ZHU H, GE S R, LV L, et al. Evolvement rule of running-in attractor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(3): 99-104 (in Chinese).
- [16] 温诗铸. 世纪回顾与展望——摩擦学研究的发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2000, 36(6): 1-6.
WEN S Z. Centurial review and prospect-the development tendency of tribology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 36(6): 1-6 (in Chinese).
- [17] 葛世荣, 朱华. 摩擦学复杂系统及其问题的量化研究方法[J]. *摩擦学学报*, 2002, 22(5): 405-408.
GE S R, ZHU H. Complicate tribological systems and quantitative study methods of their problems[J]. *Tribology*, 2002, 22(5): 405-408 (in Chinese).
- [18] HU Y Z, LI N, TONDER K. A dynamic system model for lubricated sliding wear and running-in[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 1991, 113(3): 499-505.
- [19] BRAKE M R. An analytical elastic-perfectly plastic contact model[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(22): 3129-3141.
- [20] BARTIER O, HERNOT X, MAUVOISIN G. Theoretical and experimental analysis of contact radius for spherical indentation[J]. *Mechanics of Materials*, 2010, 42(6): 640-656.
- [21] KOGUT L, JACKSON R L. A comparison of contact modeling utilizing statistical and fractal approaches[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2006, 128(1): 213-217.
- [22] 华子恺. 人工关节润滑技术与摩擦学测试研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
HUA Z K. Research on artificial joint lubrication and tribological test technology[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011 (in Chinese).
- [23] ROWE G W, KALISZER H, TRMAL G, et al. Running-in of plain bearings[J]. *Wear*, 1975, 34(1): 1-14.
- [24] SREENATH A V, RAMAN N. Mechanism of smoothing of cylinder liner surface during running-in[J]. *Tribology International*, 1976, 9(2): 55-62.
- [25] STOUT K J, DAVIS E J. Surface topography of cylinder bores-the relationship between manufacture, characterization and function[J]. *Wear*, 1984, 95(2): 111-125.

(责任编辑: 王鑫)