

表面微织构对 45#钢摩擦副表面摩擦学性能影响的实验研究

王丽丽, 郭少辉, 魏聿梁, 袁国腾

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: **目的** 通过在摩擦副表面进行激光微织构加工, 研究不同分布形式的微织构对摩擦副的减摩作用效果, 为微织构摩擦副在实际工程应用中的设计与选用提供参考。**方法** 选取 45#钢作为摩擦材料制备环环接触的摩擦副, 通过激光微雕刻在试件表面加工一定尺寸的微织构, 在油润滑条件下, 利用万能摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验, 并通过超景深三维显微镜观察磨损表面, 研究不同微织构在油润滑方式下对摩擦副的减摩作用机理及具体影响规律。**结果** 带有合理分布形式微织构的摩擦副接触表面能产生明显的动压润滑效应, 其中径向沟槽微织构和凹坑状微织构在稳定磨损阶段的摩擦系数明显小于光滑表面, 分别能减小摩擦系数 16%和 11%, 局部网状微织构的摩擦系数与光滑表面没有明显差异, 周向沟槽微织构的摩擦系数大于光滑表面。带有径向沟槽和凹坑微织构的摩擦副相比于光滑表面, 温升有所降低, 而周向沟槽和局部网状微织构随着摩擦表面磨损的加剧, 温升更加明显, 下试件分布有微织构的摩擦副接触表面摩擦系数要明显小于上试件分布有微织构的摩擦副。磨损局部放大图中, 凹坑状微织构表面产生的磨粒剥落痕迹要明显浅于光滑试件表面, 说明微织构能有效存储磨损磨粒, 减少二次磨损对摩擦表面的破坏。**结论** 表面微织构能有效改善摩擦副的润滑性能, 合理选择微织构分布形式和分布位置, 才能最大限度地发挥微织构的减摩效果。

关键词: 表面微织构; 摩擦系数; 润滑油温度; 动压效应; 表面磨损

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0149-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.021

Experimental Study on the Influence of Surface Microtexture on the Tribological properties of 45# Steel Friction Pairs

WANG Li-li, GUO Shao-hui, WEI Yu-liang, YUAN Guo-teng

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out laser micro texture processing on the surface of friction pairs to study the anti-friction effect of micro texture in different distribution forms on friction pairs and then provide a reference for the design and selection

收稿日期: 2018-04-03; 修订日期: 2018-07-14

Received: 2018-04-03; **Revised:** 2018-07-14

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2017M612304); 山东省博士后创新项目专项资金资助 (201701016); 山东科技大学杰出青年科技人才支持计划资助 (2015JQJH104); 青岛市博士后研究人员应用研究项目资助 (263); 高效洁净机械制造教育部重点实验室 (山东大学) 资助; 国家自然科学基金项目 (51305242)

Fund: China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2017M612304), Shandong Provincial Postdoctoral Innovation Foundation (201701016), SDUST Research Fund (2015JQJH104), Qingdao Postdoctoral Research Funded Project (263), the Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture at Shandong University, Ministry of Education, National Natural Science Foundation of China (51305242)

作者简介: 王丽丽 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事摩擦学方面研究。邮箱: wang-ly-ly@163.com

Biography: WANG Li-li (1979—), Female, Ph. D., Associate professor, Research focus: tribology research. E-mail: wang-ly-ly@163.com

of micro texture friction pairs in practical engineering applications. In order to explore the friction reduction effect of different micro textures on friction surface, 45# steel was selected as friction material to prepare the ring to ring contact friction pair. The micro texture of a certain size was processed on the surface of the specimen by laser micro-carving. The friction experiment was carried out by the universal friction and wear tester under the condition of oil lubrication, and the worn surface was observed by three dimensional microscope to study the anti-friction mechanism and specific influence laws of different micro textures under lubrication mode. Experimental results showed that the contact surface of the friction pair with the rational distribution of micro texture could produce obvious dynamic lubrication effect. The friction coefficient of radial groove micro texture and pits micro texture was obviously smaller than that of smooth surface at stable wear stage. The friction coefficient could be respectively reduced by 16% and 11%. The friction coefficient of the local reticulation micro texture was not significantly different from that of the smooth surface and the friction coefficient of the circumferential groove texture was larger than that of the smooth surface. The friction pairs with the radial grooves and the concave micro texture had a lower temperature rise compared with the smooth surface, while the temperature rise of the circumferential grooves and the local reticular micro texture were more obvious with the increase of the friction surface wear. The friction coefficient of the frictional pair with micro texture distributed on the lower part of the specimen was significantly less than that of the friction pairs with micro texture on the upper part. The trace of abrasive particles on the surface of the pits micro texture surface was obviously lighter than that on the smooth specimen surface. Micro texture could effectively store wear debris and reduce damage of the second wear and tear on the friction surface. The surface micro texture can effectively improve the lubrication performance of the friction pair, the rational selection of the micro-texture distribution and distribution position can maximize the effect of the microtexture reduction.

KEY WORDS: micro-texture surfaces; friction coefficient; temperature of lubrication oil; hydrodynamic effects; surface wear

在机械设备,尤其是旋转机械工作过程中,合理有效控制摩擦,减小机械零部件磨损一直是机械研究的热点领域。传统的摩擦学理论认为,摩擦副的表面加工精度越高,接触表面越光滑,其摩擦性能越好,减摩效果更加有效。Hamilton 等^[1]最早提出在摩擦副表面通过加工微织构来获得流体动压效应,提高摩擦副润滑性能。大量的理论和实验研究表明,具有一定形貌结构的摩擦副表面,在合理润滑条件下反而具有更好的摩擦学性能^[2-4]。摩擦副表面微织构能有效改善摩擦副的摩擦性能,其主要作用机理主要包括 3 个方面:干摩擦条件下,微织构能存储摩擦过程中产生的微小磨粒,有效减少二次磨损对摩擦表面的破坏;流体润滑条件下,微织构能存储润滑介质,使润滑更加充分,而且能够产生额外的流体动压效应,增加摩擦表面承载力,有效提高摩擦副的承载性和稳定性^[5-6];混合润滑条件下,微织构在抑制磨粒磨损的同时,又可以产生流体动压效应,改善摩擦副润滑条件。韩静^[7]针对宏观纹理表面动压润滑问题,对微织构动压形成机理、微织构几何形貌和几何参数对摩擦副润滑性能规律等进行了研究。Etsion 等^[8]通过实验研究,证实了具有部分表面微结构的摩擦副摩擦系数得到有效降低。Chen 等^[9]通过在模具钢 TiN 涂层上加工微结构,实验研究了三角形微结构对 TiN 涂层表面摩擦磨损的影响规律。孙建国^[10]以环-环接触的 GCr15 轴承钢摩擦副为研究对象,通过正交实验研究了不同润滑方式、织构密度和不同工况下微织构的摩擦性能。华俊希等^[11]对 GCr15 试样表面进行激光微

织构加工,探究不同表面处理方式对试样摩擦系数的影响。林乃明等^[12]通过电化学方式对 316 不锈钢进行处理,获得表面微织构,并对织构表面进行离子氮化处理,研究了 316 不锈钢试样与 GCr15 钢球和 Si_3N_4 陶瓷球摩擦副的摩擦学行为规律。

目前摩擦副表面微织构的加工方法主要包括激光雕刻微加工技术^[13]、表面喷丸技术、超声冲击加工技术^[14]、刻电解加工技术、反应离子刻蚀技术等,应用最广泛的为激光雕刻微加工技术。本文通过激光雕刻微加工技术对 45#钢摩擦副表面进行微织构加工,通过摩擦磨损实验,对比分析不同微织构形式在油润滑条件下的减摩作用效果,并研究了微织构不同分布位置时的作用效果。

1 实验

1.1 摩擦副微织构的结构

实验采用接触方式为环环接触的摩擦副,如图 1 所示。其中上试样为转动试样,内径为 21 mm,外径为 25 mm,厚度 5 mm;下试样为固定试样,内径为 19 mm,外径为 27 mm,厚度 10 mm。上下试环均采用 45#钢作为实验材料,材料硬度在 55~58HRC 之间,极限值可达 62HRC,其抗拉强度 ≥ 600 MPa,屈服强度 ≥ 355 MPa,伸长率 $\geq 16\%$,具有较高的强度和较好的切削加工性。摩擦副微织构的制备是以激光雕刻的方式在下试样表面制备均匀分布的微织构形状。本研究的表面微织构形状包括微凹状、径向沟槽、

周向沟槽、局部网状四种。图 2 为微凹坑织构和径向沟槽织构示意图。图 2a 中的微凹坑具体参数为：单个凹坑直径 0.2 mm，深度 0.05 mm，周向分布数量

量 100 个。图 2b 中径向沟槽织构参数为：单个沟槽直径 0.1 mm，深度 0.05 mm，周向分布数量 100 个。

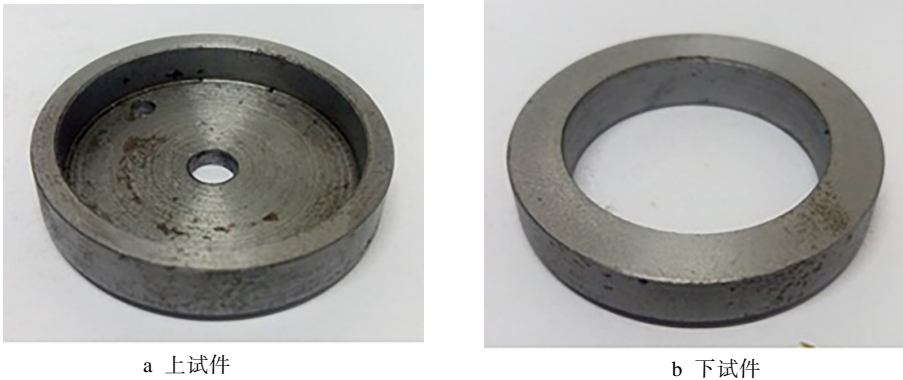


图 1 摩擦副上下试件实物图
Fig.1 Physical map for the upper and lower parts of the friction pair: (a) upper specimen; (b) lower specimen

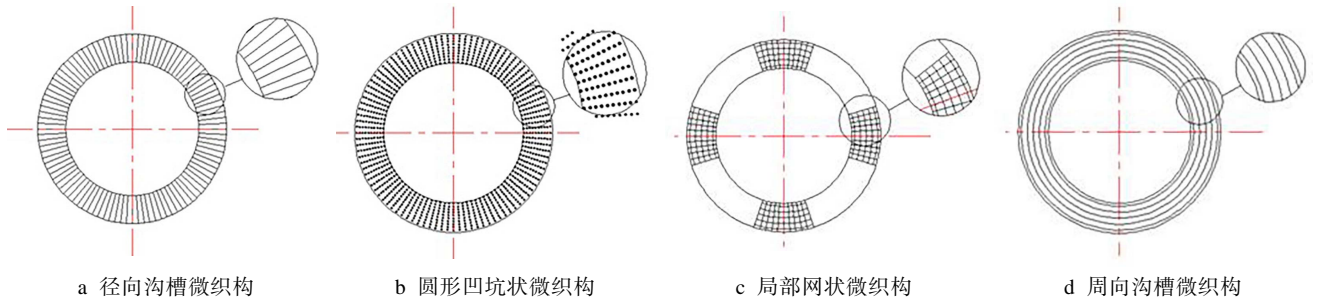


图 2 微织构分布二维示意图
Fig.2 Two-dimensional sketch map of micro texture distribution: (a) radial groove micro texture; (b) pits micro texture; (c) local reticulation micro texture; (d) circumferential grooves micro texture

1.2 方法

实验设备采用立式万能摩擦磨损试验机，如图 3 所示，该试验机由主轴、测力部分、加载装置控制系统等组成，可实现对点、线、面接触方式的摩擦副在无油润滑、滴油润滑和浸油润滑状态的模拟实验，并能精确显示实验中的载荷、转速、摩擦副等参数。本

实验中，油润滑采用 68#抗磨液压油，其运动黏度(40 ℃) 为 69.05 mm²/s，摩擦试验机的实验载荷设置为 100 N，实验转速为 90 r/min。上下试件在实验前通过无水酒精进行清洗，然后安装固定在试验机上，固定试验机的载荷和转速，实验时间为 30 min。摩擦副试件采用浸油润滑的润滑状态，以充分保证供油的充足和润滑油膜的稳定存在。实验中采用精确的热电偶对润滑油温升进行测量，实验结束后再次用无水酒精对上下试件进行清洗，然后用超景深三维显微镜观察摩擦副表面的磨损状态，根据实验过程中摩擦系数的变化和表面磨损的状态分析实验结果。

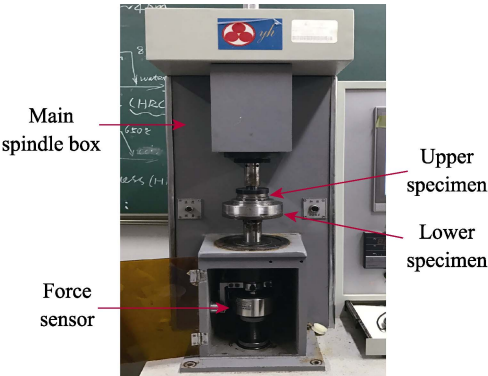


图 3 试验机局部实物图
Fig.3 Local physical drawing of test machine

2 结果与分析

2.1 微织构形式对摩擦副摩擦性能的影响

图 4 表示不同形式微织构的摩擦副在油润滑下的摩擦系数随时间的变化规律，图 5 表示稳定磨损阶段不同试件摩擦系数的平均值。为了便于说明摩擦副的润滑性能变化规律，实验时间 0~10 min 为摩擦副的初始磨合磨损阶段，10~30 min 为摩擦副的稳定磨

损阶段。由图4可以看出,在摩擦副初始磨合磨损阶段,表面光滑的试件摩擦系数要小于表面带微凹坑和周向沟槽微结构的试件,与径向沟槽和局部网状微结构的试件无明显区别,但光滑表面的试件摩擦系数变化规律比较稳定,波动幅度较小。这是因为初始阶段为工件的磨合磨损阶段,表面带有微结构的试件表面粗糙度和不平度要明显大于光滑试件,导致其初始润滑性能要明显差于光滑表面,流体动压效应并不能明显提高摩擦副的润滑性能,表面微结构对摩擦副摩擦性能的提高并不明显。

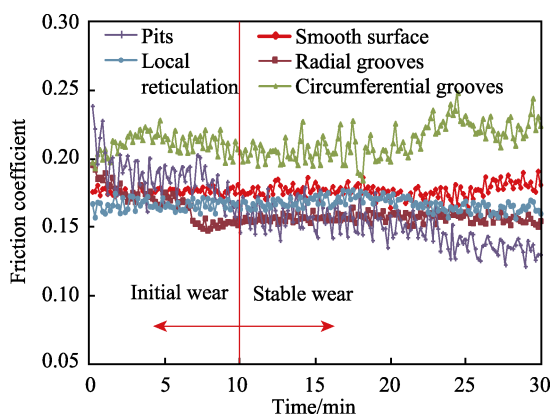


图4 不同形式微结构的摩擦副在油润滑下的摩擦系数
Fig.4 Friction coefficient for different types of micro texture friction pair under lubrication

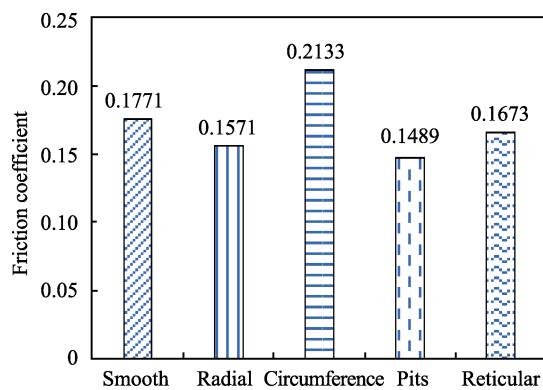


图5 稳定磨损阶段不同试件摩擦系数的平均值
Fig.5 Average value for friction coefficient of different specimens at stable wear stage

在稳定磨损阶段,表面带有径向沟槽和凹坑状微结构的试件摩擦系数要明显小于光滑试件,这是因为随着摩擦的进行,径向沟槽和凹坑状微结构产生的动压效应有效降低了摩擦系数,而且微结构能存储润滑油和磨粒,有效减少二次磨损的产生。局部网状微结构整体摩擦系数稍有降低,减摩作用效果并不明显。周向沟槽微结构并没有有效地降低摩擦副摩擦系数,根据流体动压效应形成的定义,当相对运动接触表面存在一定的楔形间隙,且流体的相对流动方向是从大间隙入口流向小间隙出口时,由于压力流和剪切流的存在,可以形成稳定的承载润滑油膜,即流体楔形动压效应,而周向沟槽微结构的沟槽为圆周方向并和摩

擦副运动方向一致,没有明显的楔形间隙,所以不能有效形成动压效应。随着磨损的进行,由于周向沟槽表面的粗糙度大于光滑表面,周向沟槽反而加重了磨损表面磨粒磨损的产生,导致摩擦系数有增大的趋势。

不同分布形式的表面微结构作用效果能从图5中明显地显示出来,在油润滑条件下,周向沟槽微结构并不能提高摩擦副的摩擦性能,而径向沟槽微结构、凹坑状微结构和局部网状微结构都能有效地降低摩擦副的摩擦系数,提高其润滑性能,其中凹坑状和径向沟槽微结构的作用效果最明显,分别能减小摩擦系数16%和11%。图4和图5的实验数据说明,合理形式分布的表面微结构才能有效降低摩擦副的摩擦系数,保证摩擦副润滑油的供油充分,改善摩擦副的摩擦性能。

图6为不同形式微结构摩擦副润滑油温度随时间的变化规律。可知表面微结构在初始磨合磨损阶段,并不能降低润滑油温升,有效提高摩擦副的摩擦性能。在稳定磨损阶段,带有径向沟槽和凹坑微结构的摩擦副,由于微结构的存在,摩擦副润滑油供油更加充分,且微结构能减小摩擦副接触面积,相比于光滑表面,能有效降低温升;而周向沟槽和局部网状微结构并没有产生明显的作用效果,随着摩擦表面磨损的加剧,温度升高的幅度更大,降低了摩擦副的摩擦性能。图6中温升变化反映出来的不同形式微结构对摩擦副摩擦性能的影响规律,与图4、图5中摩擦系数所反映的变化规律一致。

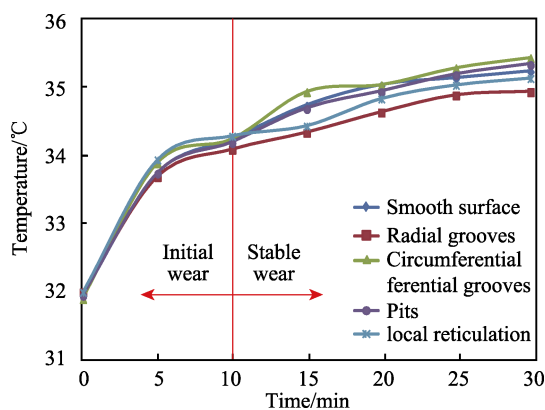


图6 不同形式微结构摩擦副润滑油温度
Fig.6 Lubricating oil temperature for different types of micro texture friction pairs

2.2 试件表面的磨损情况分析

图7为不同试件表面的磨损情况。结合图5和图6的分析,凹坑状和径向沟槽微结构对降低摩擦的作用效果最明显,因此重点针对这两种工况下的磨损进行分析。由图7a—c可以看出,试件表面随摩擦转动方向出现了明显的磨损痕迹,都有明显的犁沟状磨痕存在,但是带有微结构的试件表面(图7b、c)犁沟状磨痕深度要明显浅于光滑试件(图7a),且犁沟相对宽度比较窄,说明表面微结构的动压效应和储油作

用能对磨损表面起到有效的减摩作用。通过对比图 7d 和图 7e 可以看出, 摩擦副表面除了犁沟状磨痕, 都还产生了明显的磨粒磨损和粘着磨损, 有磨粒剥离现象产生, 但凹坑状微织构表面产生的磨粒剥落痕迹要明显浅于光滑试件表面。以上实验结果表明, 摩擦

副在摩擦过程中主要产生沿运动方向的犁沟状磨痕和表面磨粒磨损, 相对于光滑表面, 微织构表面能有效存储润滑油和磨粒, 给摩擦副提供更好的润滑条件, 润滑油膜能有效持续地产生, 明显提高摩擦副表面的摩擦性能。

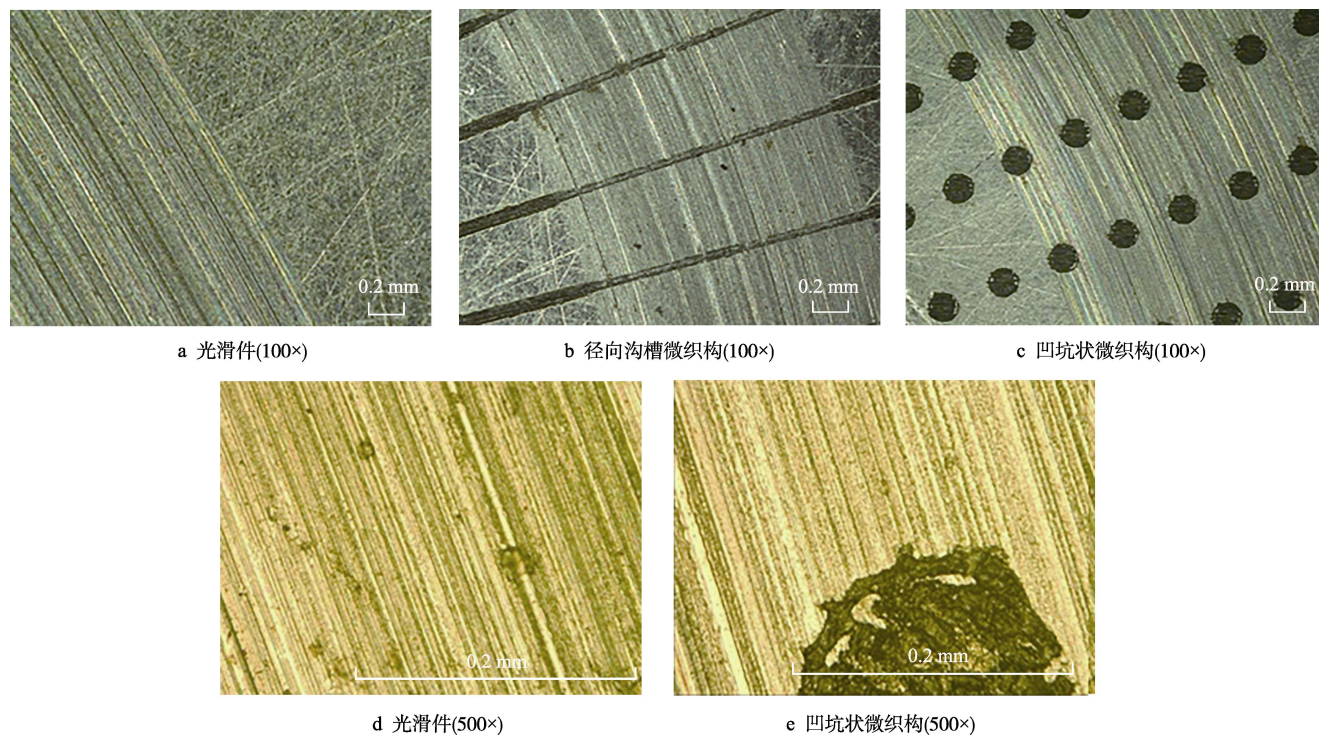


图 7 不同摩擦试件表面磨损局部放大图

Fig.7 Local magnification diagram for the surface wear of different friction specimens: (a) smooth parts-100 times; (b) radial groove parts-100 times; (c) pits parts-100 times; (d) smooth parts-500 times; (e) pits parts-500 times

2.3 微织构不同位置对摩擦副摩擦性能的影响

图 8 为表面微织构在上下试件不同位置时, 四种摩擦副的摩擦系数变化规律: (1) 上下试件都采用抛光的光滑表面试件; (2) 上试件微织构作用时, 下试件采用抛光的光滑表面试件; (3) 下试件微织构作用

时, 上试件采用抛光的光滑表面试件; (4) 上下试件微织构共同作用时, 下试件微织构形式采用径向沟槽微织构, 上试件微织构形式为不均匀分布的表面微凸起结构。

由图 8 可以看出, 微织构的布置位置对摩擦副摩擦性能有明显的影响。微织构分布在下试件表面时, 在稳定磨损阶段, 微织构试件的摩擦系数要明显小于上下试件都是光滑表面的摩擦系数, 说明下试件微织构有效提高了摩擦副的摩擦性能, 减少了磨粒磨损和粘着磨损等对表面的破坏, 因此微织构分布在下试件表面时作用效果最佳, 图 4—7 的分析主要针对微织构分布在下试件表面时的工况进行。

微织构分布在上试件表面时, 从初始磨损阶段到稳定磨损阶段, 试件的摩擦系数都明显大于光滑表面, 这是因为上试件微织构并没有产生有效的流体动压效应, 微凸起的存在破坏了润滑油膜的持续稳定润滑效果, 同时上试件微凸起结构增大了接触面的初始粗糙度和不平度, 在摩擦过程中更容易产生磨粒脱落, 加剧对接触表面的磨损破坏。

上下试件都带有微织构时, 通过前面的上试件单独微织构和下试件单独微织构与光滑表面的摩擦系

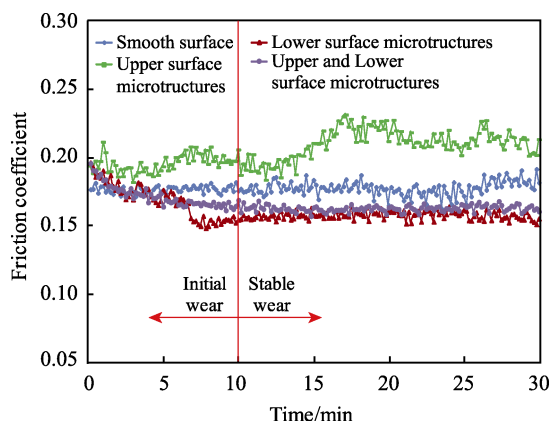


图 8 不同织构分布位置时摩擦副摩擦系数

Fig.8 Friction coefficient of friction pairs at different texture positions

数对比可知:下试件单独径向沟槽微织构作用效果最佳,从而可以弥补上试件微凸起织构所产生的负面影响。因此在稳定磨损阶段,上下试件都带有微织构时的摩擦系数小于光滑表面的摩擦系数,而大于下试件单独微织构时的摩擦系数。

3 结论

1) 相比于摩擦副光滑接触表面,带有合理分布形式微织构的摩擦副接触表面能产生明显的动压润滑效应,提高油膜承载性能,其中径向沟槽和凹坑状微织构减摩效果最明显,分别能减小摩擦系数 16% 和 11%,局部网状微织构减摩作用效果并不明显,而周向沟槽反而导致摩擦系数有增大的趋势。带有径向沟槽和凹坑微织构的摩擦副相比于光滑表面能有效降低温升,而周向沟槽和局部网状微织构随着摩擦表面磨损的加剧,温度有所升高,这与不同织构形状摩擦副的摩擦系数变化规律一致。

2) 在摩擦过程中,摩擦副主要产生沿运动方向的犁沟状磨痕和表面磨粒磨损。相对于光滑表面,径向沟槽和凹坑微织构表面能有效存储润滑油和磨损磨粒,降低润滑油温升,保证润滑油膜的稳定,并减少磨损磨粒产生的二次磨损。

3) 表面微织构分布在下试件表面时,能有效产生流体动压效应和储存磨损磨粒,有效提高摩擦副性能。上试件表面的微凸起织构并不能起到有效的作用,反而会增加摩擦副接触表面的粗糙度和不平度,加速接触表面的磨损破坏,降低摩擦副的摩擦性能。

参考文献:

- [1] HAMILTON D B, HALAVITJ A. A theory of lubrication by micro irregularities [J]. Journal of basic engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [2] LIANG X X, LIU Z L. Hydrodynamic lubrication of partial textured sliding journal bearing based on three-dimensional CFD[J]. Industrial lubrication and tribology, 2016, 68(1): 106-115.
- [3] GRAHON W, KOSZELA W, PAWLUS P, et al. Improving trihological behaviour of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing[J]. Trihology international, 2013, 61(2): 102-108.
- [4] 马晨波, 朱华, 历建全. 摩擦副不同表面织构化的润滑减摩性能试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(2): 244-248.
MA Chen-bo, ZHU Hua, LI Jian-quan. Experimental study of tribological properties of texture on different surfaces of frictional pairs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(2): 244-248.
- [5] KOVALCHENK O A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact[J]. Tribology international, 2005, 38(3): 219-225.
- [6] SCHREC K S, GAHR K. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties[J]. Applied surface science, 2005, 247(4): 616-622.
- [7] 韩静. 宏微观表面纹理的润滑及摩擦性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
HAN Jing. On the lubrication and friction properties of macroscale and microscale surface texture[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2013.
- [8] ETSION L, SHE R E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. Tribology international, 2009, 42(4): 542-547.
- [9] CHEN P, XIANG X. Effect of triangular texture on the tribological performance of die steel with TiN coatings under lubricated sliding condition[J]. Applied surface science, 2016, 10(389): 361-368.
- [10] 孙建国. 滑动轴承摩擦副微织构表面自润滑技术及性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
SUN Jian-guo. Study on self-lubricating technology and property on micro-textured surface of sliding bearing couple[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [11] 华希俊, 解玄, 张培耘, 等. 微织构自润滑表面在油介质中的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 35-40.
HUA Xi-jun, XIE Xuan, ZHANG Pei-yun, et al. Tribological properties of micro-textured self-lubricating surface in oil medium [J]. China surface engineering, 2017, 30(2): 35-40.
- [12] 林乃明, 谢瑞珍, 郭俊文, 等. 表面织构-离子氮化复合处理改善 316 不锈钢的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 58-68.
LIN Nai-ming, XIE Rui-zhen, GUO Jun-wen, et al. Improvement in tribological property of 316 stainless steel via surface texturing-plasma nitriding duplex treatment[J]. China surface engineering, 2016, 29(2): 58-68.
- [13] 张云, 电赵峰, 黄文剑. 摩擦副工作表面微坑超声加工方法的研究[J]. 中国机械工程, 2004(14): 60-62.
ZHANG Yun, DIAN Zhao-feng, HUANG Wen-jian. Study on ultrasonic machining method of micro-pits of working surface between friction pairs[J]. China mechanical engineering, 2004(14): 60-62.
- [14] 房善想, 赵慧玲, 张勤俭. 超声加工技术的应用现状及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 22-32.
FANG Shan-xiang, ZHAO Hui-ling, ZHANG Qin-jian. The application status and development trends of ultrasonic machining technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 22-32.