

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190506001

速度和载荷对凹坑织构乏油润滑摩擦学性能的影响

牛一旭^{1,2}, 逢显娟^{1,2,3}, 李亚军^{1,2}, 上官宝^{1,2}, 张永振¹

(1. 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 471023; 2. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 3. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 摩擦副表面加工特定的织构后会在不同速度和载荷以及严重乏油的条件下运行, 比如设备的启停阶段。因此有必要研究极度乏油条件下速度和载荷对凹坑织构表面摩擦学性能的影响, 为表面织构的实际应用进行前期探索。利用激光加工技术在 45 钢表面加工凹坑织构; 在 UMT-2 型多功能摩擦磨损试验机上, 采用球-盘式分别对织构和未织构试样进行乏油滑动试验; 利用三维表面轮廓仪和扫描电镜等分析试样表面的磨损形貌。结果表明: 相比于未织构试样, 凹坑织构在不同速度和载荷下均能有效延长摩擦面间的乏油润滑状态, 有良好的减摩效果, 可降低摩擦因数约 68%~75%。载荷对织构表面的摩擦学性能影响较大, 在一定范围内摩擦因数随着载荷的增大而降低; 但载荷过高时, 在摩擦后期会出现摩擦因数的突然升高, 表面磨损严重。

关键词: 滑动速度; 载荷; 凹坑织构; 乏油润滑; 摩擦学性能

中图分类号: TG174.44; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)06-0140-10

Effects of Sliding Speed and Load Levels on Tribological Properties of Dimple-Textured Surfaces Under Starved Lubrication

NIU Yixu^{1,2}, PANG Xianjuan^{1,2,3}, LI Yajun^{1,2}, SHANGGUAN Bao^{1,2}, ZHANG Yongzhen¹

(1. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The frictional pairs with specially designated surface textures would serve in extremely starved lubrication under different sliding speed and load levels, when the machine starts up and shuts down. Therefore, it is essential to study the tribological properties of the dimple-textured surface in these conditions for the preliminary investigation of the application of dimple textures. The dimple textures were fabricated on 45 steel surfaces by laser processing. Experiments of textured and untextured specimens under starved lubrication were carried out on the UMT-2 multifunctional friction and wear tester using the ball-on-disk configuration. Morphologies of the worn surfaces were characterized by three-dimensional profile-meter and scanning electron microscope. The results show that the dimple-textured specimens can extend the period of starved lubrication regime under different sliding speed and load levels, and the friction coefficient can be reduced by about 68%–75% compared to the untextured specimens. The load levels have a significant influence on the tribological properties of the textured specimens. To some degree the friction coefficient decreases with the increase of the load level. However, server wear and dramatic increase of the friction coefficient are observed in the late period when the textured surface is overloaded.

Keywords: sliding speed; load levels; dimple textures; starved lubrication; tribological properties

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-10-14

通信作者: 逢显娟 (1981—), 女 (汉), 副教授, 博士; 研究方向: 材料干摩擦学与表面工程; E-mail: xjpang2001@haust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (U1404504); 固体润滑国家重点实验室开放课题 (LSL-1710); 河南省科技厅工业攻关项目 (182102210291)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1404504), Open Foundation of State Key Laboratory of Solid Lubrication (LSL-1710) and Project of Department of Science and Technology of Henan Province (182102210291)

引用格式: 牛一旭, 逢显娟, 李亚军, 等. 速度和载荷对凹坑织构乏油润滑摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 140-149.

NIU Y X, PANG X J, LI Y J, et al. Effects of sliding speed and load levels on tribological properties of dimple-textured surfaces under starved lubrication[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 140-149.

0 引言

表面织构化是一种表面改性方法,即采用各种技术手段在相对光滑的摩擦副表面上加工出具有一定尺寸和排列的几何形貌,从而改善材料表面摩擦学性能。表面织构技术为摩擦学领域研究开辟了新的方向,成为近年来摩擦学领域的研究热点,得到了广泛关注^[1-2]。在各种表面织构的制备方法中,激光表面织构化技术以其加工效率高、加工精度高以及对环境无污染等优点,成为一种应用较为广泛的表面工程技术^[3]。

目前,织构化已应用在很多材料表面,如发动机的汽缸/活塞、滑动轴承、密封环,高尔夫球表面、磁存储介质和 M/NEMS 的表面等,有效改善了摩擦副摩擦磨损性能。Etsion 等^[4-6]利用激光技术,对机械密封端面、活塞环、推力轴承等零件进行织构化处理,并通过理论模型分析优化了织构参数,得到了良好的减摩效果。纪敬虎等^[7-9]对 45 钢摩擦副表面微凹槽织构进行了相关摩擦学理论及试验研究,并利用“单脉冲同点间隔多次”的激光加工工艺解决了机械密封端面跨尺度织构的制造难题,为此类问题的研究提供了新思路。

然而,目前关于织构化的部分试验及理论分析模型主要适用于完全油润滑条件下,而在实际润滑工况中,比如设备的启停阶段,常常会出现润滑失效,即乏油的情况,极度乏油将会使得齿轮、轴承等传动系统失效,造成严重的后果^[10-11]。在乏油润滑或干摩擦条件下,由于缺少相应的基础理论模型^[12],一般通过试验方法来研究织构参数、工况条件和摩擦磨损性能之间的关系。L. Galda 等^[13]采用销-盘式摩擦副研究了乏油条件下凹坑参数对滑动表面摩擦学性能的影响,对比未织构表面,深径比约为 0.11、织构密度为 3%、凹坑深度为 17 μm 的凹坑织构表面具有最优减摩效果,可降低摩擦因数约 60%。熊党生等^[14]对不锈钢进行激光表面织构化,在乏油条件下以环-盘接触方式与 PTFE 配副进行滑动摩擦试验,结果表明织构密度为 7.9%~8.8% 时,表面织构的减摩耐磨效果最明显。胡天昌等^[15]在乏油润滑条件下,采用栓-盘式摩擦磨损试验机研究了激光织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响。结果表明,织构面的摩擦因数与磨损均明显小于光滑面;在低载低速下较小孔径织构面摩擦因数较小;随着速度

及载荷的增大,较大孔径织构面表现出更好的摩擦学性能。

在点接触状态下,由于存在局部应力集中,表面织构化材料的摩擦磨损性能与工况条件关系更加密切。而有关点、线接触摩擦副表面织构的研究主要集中于完全油润滑或乏油弹流润滑的条件下^[16-19],断油后极度乏油的相关研究较少。因此有必要研究极度乏油条件下速度和载荷对凹坑织构表面摩擦学性能的影响,为实际应用进行前期探索。

根据前期试验研究^[20],采用激光加工技术在 45 钢表面加工直径为 100 μm、织构密度为 10% 以及深度为 15 μm 的凹坑型织构。在不同速度和载荷条件下,采用球-盘式摩擦副分别对织构和未织构试样进行乏油滑动试验,研究凹坑织构表面在不同速度和载荷下的摩擦学性能。

1 试验

1.1 凹坑织构试样的制备

凹坑织构试样材料为正火态 45 钢盘,其规格为 $\Phi 30 \times 10$ mm,硬度为 201.9 HV。激光加工前,对 45 钢盘表面进行研磨抛光至表面粗糙度 $Ra \approx 0.1$ μm。采用 FPS31 型皮秒激光精细微加工设备(苏州德龙激光股份有限公司)在 45 钢盘试样表面加工凹坑织构。加工参数如下:激光波长 532 nm,脉冲频率 70 kHz,输出功率 3 W。

1.2 摩擦磨损试验

试验所用设备为 UMT-2 型多功能摩擦磨损试验机,摩擦副接触方式为球-盘式。下试样为织构和未织构的 45 钢盘,上试样为 $\Phi 6.35$ mm 的 GGr15 钢球, $Ra \approx 0.02$ μm,硬度为 62 HRC。

采用单因素试验方法,旋转半径设定为 2 mm。载荷一定为 12 N 时,转速分别为 240、480、720 和 960 r/min,即线速度分别为 0.05、0.1、0.15 和 0.2 m/s;转速一定为 480 r/min 时,载荷分别为 6、12、18 和 24 N。滑动距离均为 60 m,每组试验重复 3 次。试验用润滑油为 PAO4 基础油,运动粘度(40 ℃)为 16.8 mm²/s。使用移液枪在表面滴加 2 μL PAO4,然后用汽车雨刷的胶条刮去多余的润滑油,试验过程中不再添加润滑油,以此实现乏油润滑。对未织构化的 45 钢盘试样进行同样参数下的摩擦磨损试验,一方面可以

作为极端乏油工况的参考依据,另一方面可与织构试样的摩擦学性能形成对比。

1.3 材料表面形貌检测与表征

激光表面织构加工后,使用 Nano-focus 三维形貌仪对凹坑织构参数进行检测。乏油滑动摩擦磨损试验结束后,采用三维形貌仪和 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜对试样表面的磨痕形貌进行分析。

三维形貌仪能够直观反映出磨痕的宽度及深度,并且对磨痕截面进行分析计算,从而得到体积磨损率。利用扫描电子显微镜分析表面的磨损状态,进一步探讨材料表面的磨损机制。

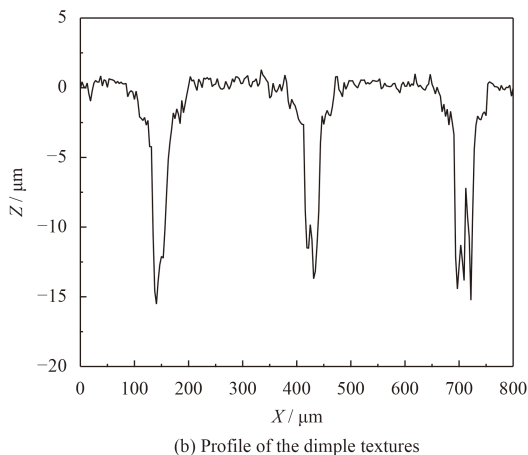
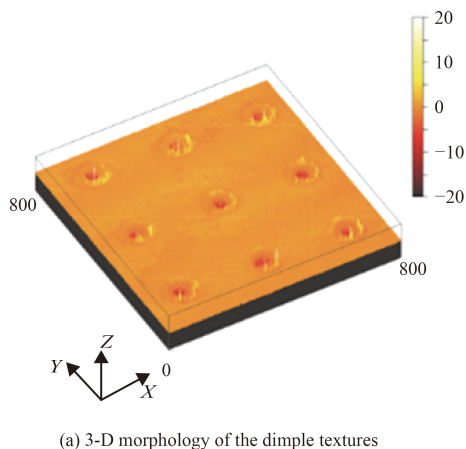


图1 凹坑织构的三维形貌及轮廓曲线

Fig.1 3-D morphology and profile of the dimple textures

2.2 不同速度下的摩擦学性能

2.2.1 摩擦因数变化

图2为不同速度下凹坑织构试样与未织构试样摩擦因数以及稳定阶段的平均摩擦因数。由于实际油膜厚度难于测量,因此根据未织构试样的摩擦因数变化大致判断乏油工况。从图2(b)可以看出,未织构试样的摩擦因数在经历最初短暂的低摩擦状态后,迅速升高。可以认为表面润滑油极少,不能维持较长时间的润滑状态,因而认定此条件为极端乏油工况。相比于未织构试样,不同速度下,织构试样的摩擦因数均能一直维持在较低水平,如图2(a)所示。滑动初始阶段为磨合期,织构试样的摩擦因数有所升高而后降低。随后进入稳定摩擦阶段,摩擦因数趋于相对平稳,并保持低摩擦状态至试验结束。不同速度下,织构试样可以有效降低极端乏油工况下摩擦接触面的摩擦因数,延长摩擦表面间的润滑接触状态。

2 结果与分析

2.1 表面凹坑织构形貌

采用三维轮廓仪对局部凹坑进行检测,其结果如图1所示。整个凹坑织构在盘试样表面呈 $21\text{ mm} \times 21\text{ mm}$ 的正方形排列。图1(a)为局部凹坑的三维形貌,图1(b)为凹坑织构的轮廓曲线。凹坑直径约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,中心间距约为 $280\text{ }\mu\text{m}$,深度为 $13\sim 15\text{ }\mu\text{m}$,与所设定的参数基本一致。对凹坑织构表面进行简单打磨后,在超声波清洗仪中用无水乙醇清洗 30 min 即可使用。

对3次测量中稳定阶段织构试样与未织构试样的摩擦因数求取平均值,结果如图2(c)所示,右侧为织构试样平均摩擦因数的局部放大图。从图中可以看出,随着滑动速度增大,织构试样的平均摩擦因数略有变化,在 0.1 m/s 时具有最小的平均摩擦因数。速度大于 0.1 m/s 时,平均摩擦因数有所升高,但升高幅度并不大,约比 0.1 m/s 时的平均摩擦因数增加了 0.02 。而未织构试样的平均摩擦因数则随速度的增大而升高,大小约为 $0.5\sim 0.6$,远大于相同条件下织构试样的平均摩擦因数。经计算,相比于未织构试样,表面凹坑织构化后,稳定阶段的平均摩擦因数降低了约 75% 。

结合图2(a)(c)可以看出,不同速度条件下,织构试样的摩擦因数均能保持在低且平稳的状态,而且稳定阶段的平均摩擦因数相差不大。因此可以认为,速度对凹坑织构试样的摩擦因数影响较小。

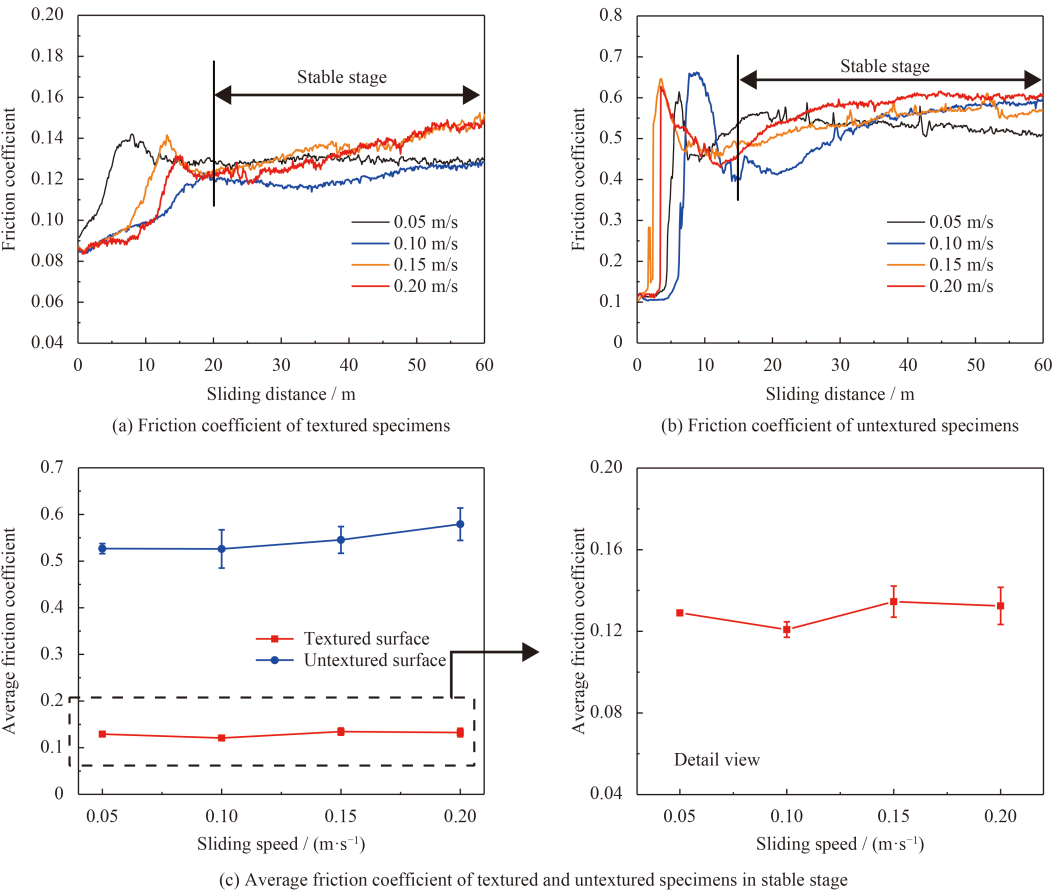


图 2 不同速度下织构试样与未织构试样的摩擦因数及稳定阶段平均摩擦因数

Fig.2 Friction coefficient and average friction coefficient in stable stage of textured and untextured specimens under different sliding speed

2.2.2 磨损率变化

图 3 为不同速度下, 织构试样与未织构试样的磨损率变化, 右侧图织构试样磨损率的局部放大图。从图中可以看出, 随着滑动速度增大, 织构试样的磨损率先下降后升高, 在 0.1 m/s 时磨损率最低。速度大于 0.1 m/s 时, 磨损率有所升高,

但仍远小于相同条件下未织构试样的磨损率。经计算, 凹坑织构试样的磨损率比未织构试样平均降低了约 90%。

根据摩擦因数与磨损率的变化可以看出, 在不同速度条件下, 织构试样均能够保持较低的摩擦因数和磨损率, 改善材料表面的摩擦学性能。

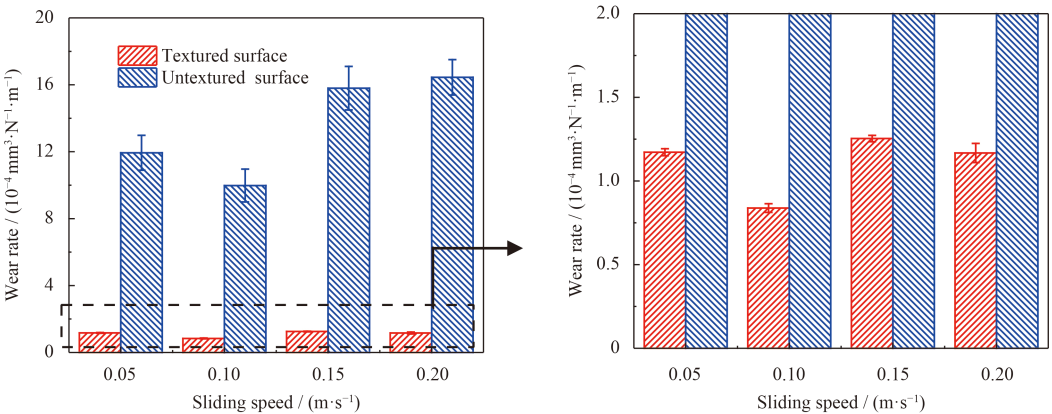


图 3 不同速度下织构试样与未织构试样的磨损率变化

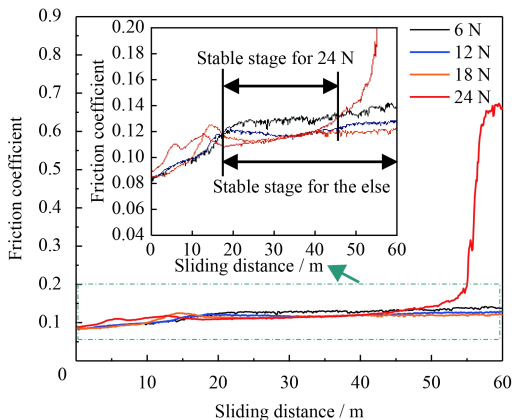
Fig.3 Variations of wear rate for textured and untextured specimens under different sliding speed

2.3 不同载荷下的摩擦学性能

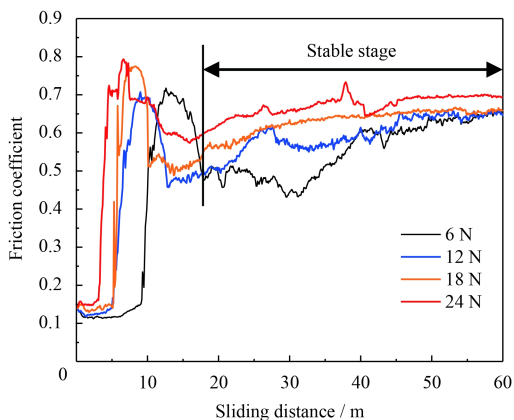
2.3.1 摩擦因数变化

图4为不同载荷下凹坑织构试样与未织构试样摩擦因数以及稳定阶段的平均摩擦因数。图4(a)为4种载荷条件下,滑动过程中织构试样摩擦因数的动态变化,图中左上角为局部放大图。从图中可以看出,摩擦起始阶段,摩擦副处于磨合状态,

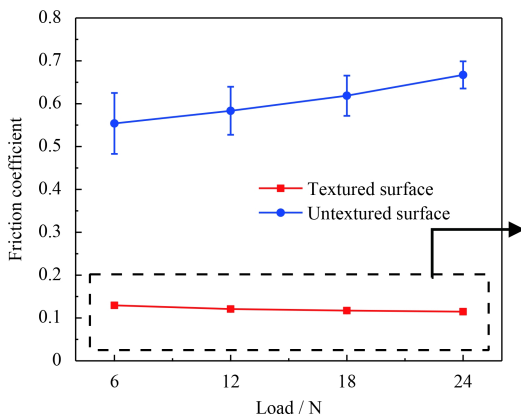
摩擦因数不断升高,载荷较大时,摩擦因数也较大。随着滑动距离增加,进入稳定摩擦阶段,摩擦因数波动较小。滑动距离大于50 m时,24 N条件下的摩擦因数突然升高至0.67左右,与45钢和GCr15钢球干摩擦时的摩擦因数相当^[20],而较低载荷下的摩擦因数一直保持稳定至试验结束。



(a) Friction coefficient of textured specimens



(b) Friction coefficient of untextured specimens



(c) Average friction coefficient of textured and untextured specimens in stable stage

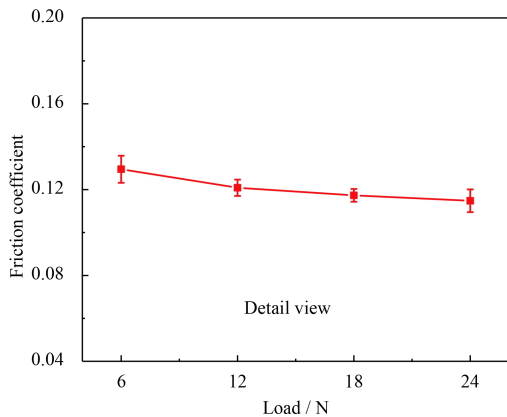


图4 不同载荷下织构试样与未织构试样的摩擦因数及平均摩擦因数

Fig.4 Friction coefficient and average friction coefficient in stable stage of textured and untextured specimens under different load levels

图4(b)给出了不同载荷下未织构试样的摩擦因数变化。可以看出,摩擦因数变化具有明显的阶段性特征。在摩擦起始阶段,摩擦因数较低,且载荷越小此阶段持续时间越长,所对应的摩擦因数也越低。滑动一定距离后,摩擦因数迅速升高而后有所降低。随着滑动距离继续增加,摩擦因数变得相对稳定。在摩擦后期,摩擦因数均呈不断升高的趋势,直至试验结束。

对稳定阶段织构试样与未织构试样的摩擦因数求取平均值,结果如图4(c)所示,右侧为织构

试样平均摩擦因数的局部放大图。从图中可以看出,随着载荷增大,织构试样的平均摩擦因数有所降低,但整体差别不大。而未织构试样的平均摩擦因数则随载荷的增大而升高。结合图4(a)(c)可以看出,虽然稳定阶段织构试样的摩擦因数随载荷增大而降低,但载荷过高时,稳定阶段持续时间较短,滑动一定距离后,织构试样摩擦因数出现突然升高。由此可见,载荷对织构试样的摩擦因数影响较大。

乏油状态下,凹坑织构可以作为微型储油

器, 在摩擦过程中为摩擦接触面持续提供润滑油, 起到二次润滑的作用^[15]。因此, 相比于未织构试样, 凹坑织构在较大速度和载荷下仍能有效延长摩擦副间的润滑接触状态, 降低摩擦因数。

2.3.2 磨损率变化

图 5 为不同载荷水平下织构试样与未织构试样的磨损率变化, 右侧为织构试样磨损率局部放大

大图。从图中可以看出, 载荷小于 24 N 时, 随着载荷增加, 织构试样的磨损率略有降低, 载荷为 18 N 时的磨损率最低。与未织构试样相比, 织构试样的磨损率大约降低了 86%~92%。载荷为 24 N 时, 织构试样的磨损率大幅增加, 远大于前 3 种载荷下织构试样的磨损率, 但仍小于同一载荷下未织构试样的磨损率。

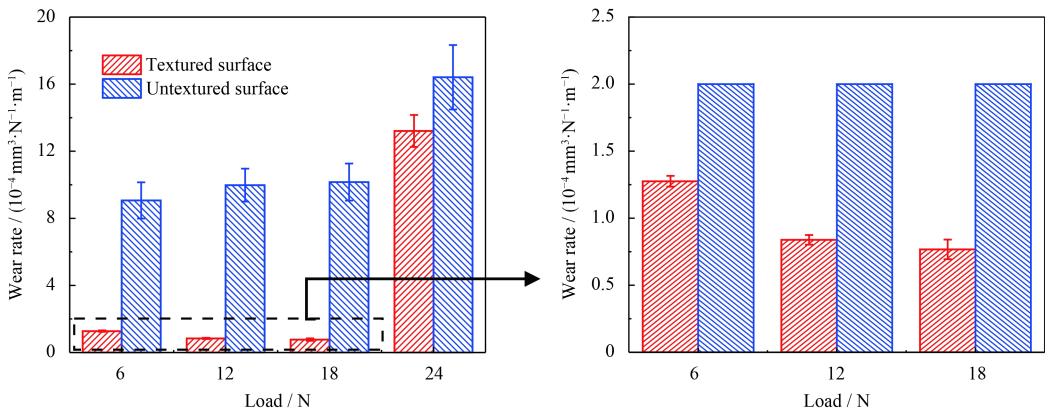


图 5 不同载荷下织构与未织构试样的磨损率变化

Fig.5 Variations of wear rate for textured and untextured specimens under different load levels

在滑动过程中, 织构试样处于较长时间的低摩擦润滑状态, 能够减少摩擦副表面的直接接触, 从而有效降低磨损。值得注意的是, 载荷过高时, 虽然摩擦后期才出现摩擦因数的突然升高, 但继续滑动距离仅约 10 m, 就导致了磨损率的大幅升高。

2.4 凹坑织构试样的磨损形貌与磨损机制

2.4.1 织构试样磨损表面的三维形貌

不同速度下织构试样磨损表面的三维形貌以及磨痕轮廓曲线如图 6 所示。4 种滑动速度下, 织构表面磨痕宽度分别约为 297、287.1、295.5 和 301.2 μm , 磨痕深度分别约为 3.5、1.98、3.1 和 2.2 μm 。

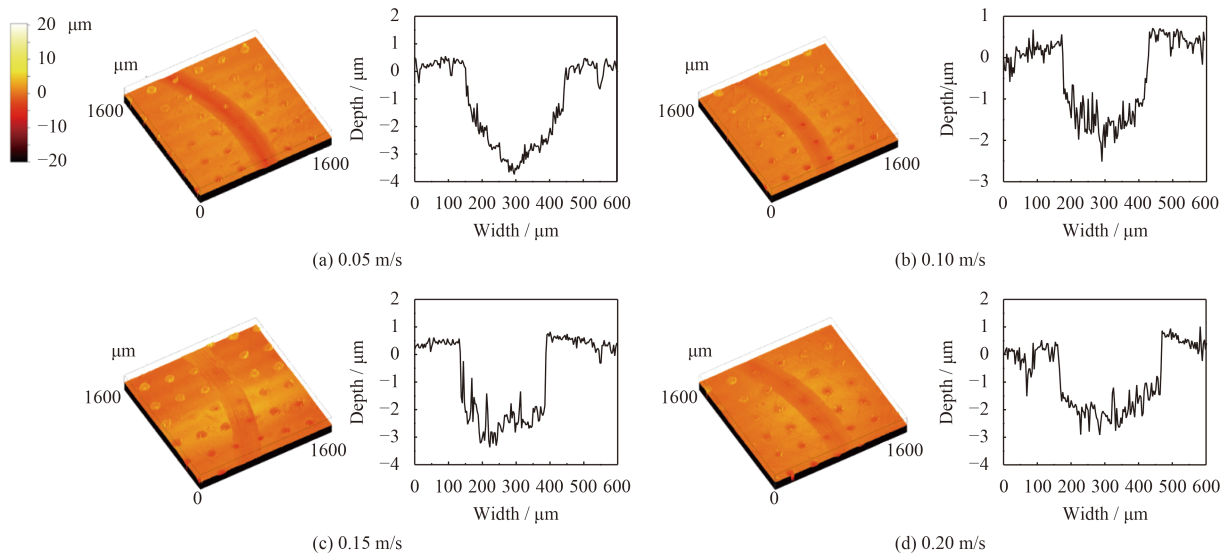


图 6 不同速度下织构试样磨损表面的三维形貌

Fig.6 3-D morphologies of the worn surfaces for textured specimens under different sliding speed levels

可以看出,随着滑动速度增加,织构磨痕宽度与深度变化相差不大。相较而言,速度为 0.10 m/s 时的磨痕宽度与深度较小。不同速度条件下,磨痕宽度均大于凹坑织构的中心间距,均能覆盖摩擦轨迹上的织构。而且,磨痕深度均远小于凹坑深度,凹坑织构可以一直存在至试验结束。由此可知,速度对凹坑织构表面磨损性能影响较小,在较大速度条件下,凹坑织构试样依旧具有较好的减小摩擦降低磨损的作用。

图 7 为不同载荷下织构试样磨损表面的三维形貌以及磨痕轮廓曲线。在载荷为 6、12 和 18 N

条件下,磨痕宽度分别为 206.2、287.1、287.7 μm ,随着载荷增加,磨痕宽度和深度略有增加。载荷为 6 N 时,磨痕宽度并未完全覆盖摩擦轨迹上所接触的织构;而载荷为 12 和 18 N 时,磨痕变宽,与织构接触面积变大,最终完全覆盖了摩擦轨迹上的织构。载荷为 24 N 时,试样表面磨痕宽度急剧增大至 1000 μm ,磨痕深度超过原本的织构深度,凹坑织构被完全磨掉,表面磨损严重。由此可见,适当增加载荷,有利于增加摩擦面间的织构接触面积,从而充分利用凹坑织构所储存的润滑油,以保持较长时间的低摩擦磨损状态。

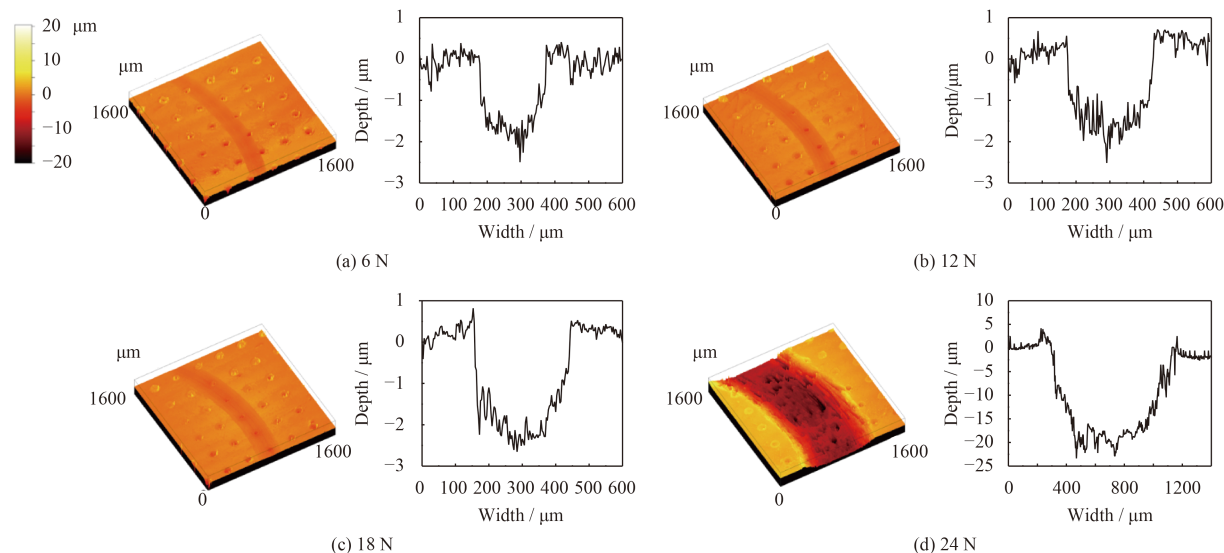


图 7 不同载荷下织构试样磨损表面的三维形貌

Fig.7 3-D morphologies of the worn surfaces for textured specimens under different load levels

2.4.2 凹坑织构磨损形貌及磨损机制

不同速度下试样磨损表面的凹坑织构微观形貌如图 8 所示,图中标出了摩擦磨损试验后凹坑织构的直径。相比于原始织构直径,摩擦试验后凹坑直径均有所减小。速度为 0.05 m/s 和 0.10 m/s 时的凹坑直径相差不大;速度增大至 0.02 m/s 时,凹坑直径明显减小。说明滑动过程中,凹坑会被不断磨耗,速度较大时的凹坑织构磨耗相对严重。试样表面的磨损主要为轻微的磨粒磨损,而且速度对织构表面磨损形式影响并不显著。凹坑织构的存在有利于改善表面摩擦磨损性能。

图 9 不同载荷下试样磨损表面的凹坑织构微观形貌。载荷为 6~18 N 时,凹坑织构试样表面的磨损主要是轻微的磨粒磨损;而且随着载荷增加,织构直径不断减小;然而,在试验行程内,

织构依然存在,并未被完全磨掉。当载荷为 24 N 时,织构则被完全磨掉,表面出现严重的黏着磨损。载荷过高时,凹坑织构的磨耗加速,滑动一定距离后,凹坑会被完全磨掉。此时,摩擦面接触状态急剧恶化,摩擦因数迅速升高,进入干摩擦状态,大量摩擦热的累积使得表面出现严重的黏着磨损,最终导致磨损率的大幅升高。

通过对比不同速度和载荷下织构试样的摩擦因数和磨损形貌,可以认为凹坑织构降低摩擦因数和减小磨损的作用主要有两个方面,即摩擦面间凹坑织构的接触面积和凹坑以及其中润滑油的磨耗速率。图 10 为摩擦磨损过程中磨痕宽度以及凹坑直径变化示意图。

一方面,在滑动摩擦过程中,摩擦副接触状态由点接触向面接触逐渐转变^[13],接触宽度有所

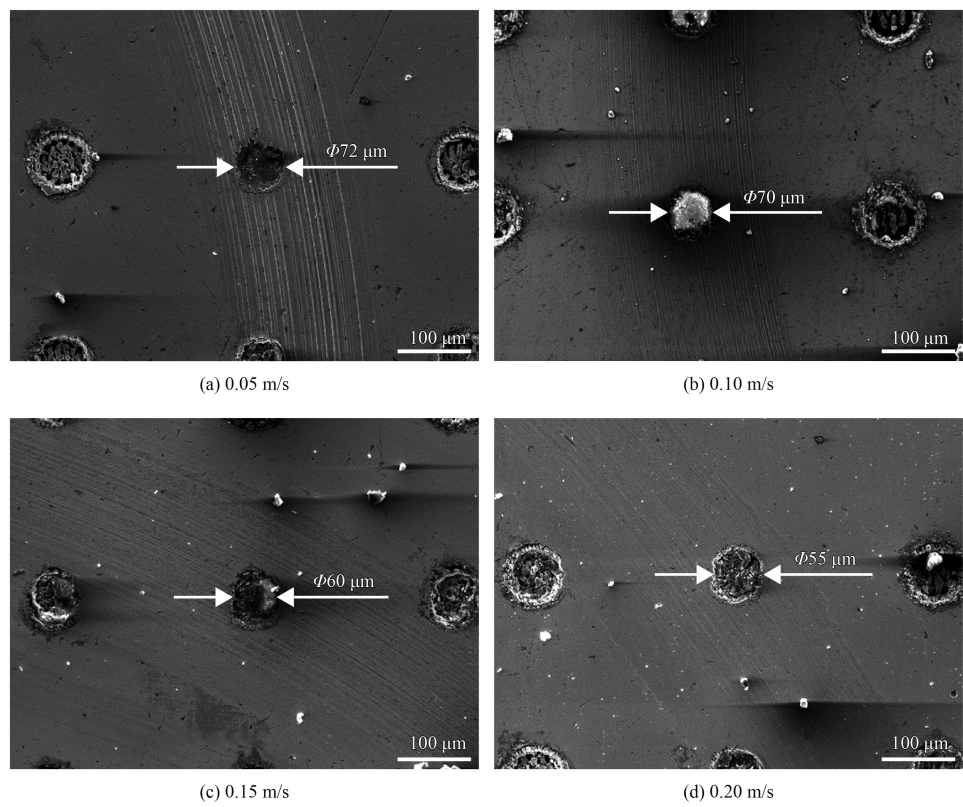


图 8 不同速度下试样磨损表面的凹坑结构微观形貌

Fig.8 Micro-morphologies of dimple texturing specimens under different sliding speed levels

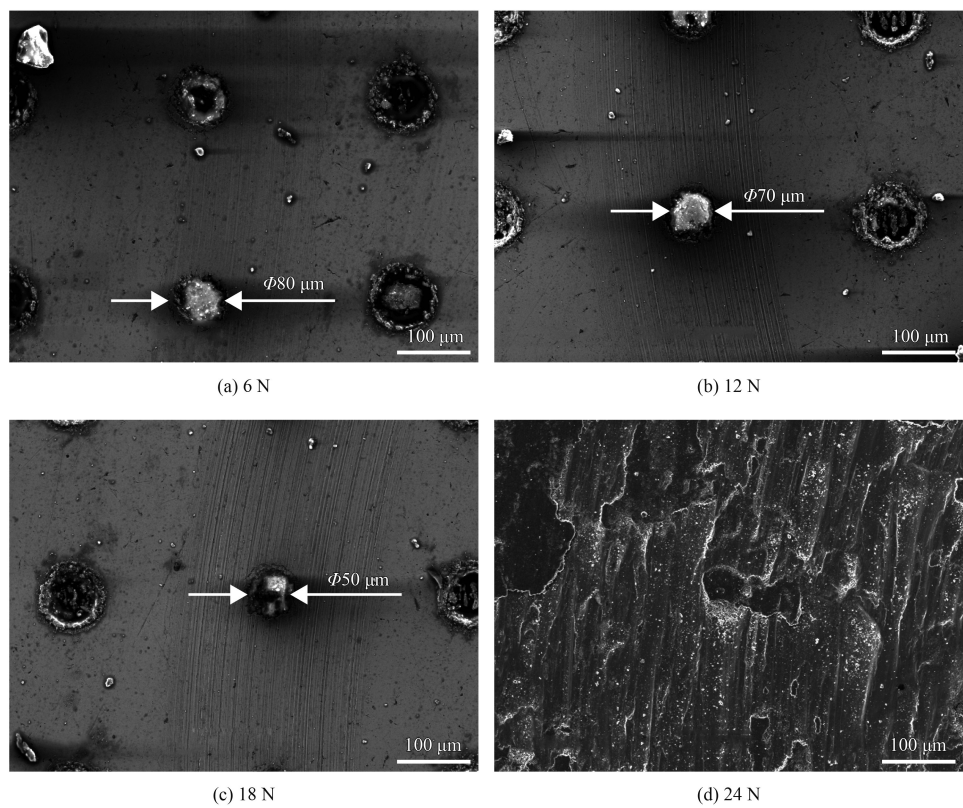


图 9 不同载荷下试样磨损表面的凹坑结构微观形貌

Fig.9 Micro-morphologies of dimple texturing specimens under different load levels

增加，接触面间的织构数目与面积增大，如图 10(a) 所示。此时摩擦状态由磨合阶段进入稳定摩擦阶段，摩擦因数变得相对平稳。由于凹坑织构能够储存润滑油并捕捉磨屑^[15]，因此在稳定摩擦阶段，摩擦面间接触的凹坑织构面积越大，越有利于增加接触面中的润滑油量，从而使摩擦副间可以保持较低且较稳定的摩擦因数。此外，图 10(a) 中凹坑织构呈矩阵排列，而摩擦副运动方式为旋转，当载荷较小时，磨痕宽度较小，会出现磨痕未完全覆盖凹坑织构的现象。而载荷增大时，磨痕宽度有所增加(如图 7 所示)，接触面间的凹坑面积也随之增加，因而有利于降低稳定阶段织构试样的摩擦因数。不同速度下(载荷均为 12 N)，磨痕宽度相差不大且均能覆盖摩擦轨迹上的凹坑织构，对其稳定阶段的摩擦因数影响不显著。

另一方面，摩擦磨损过程中，凹坑织构以及其中的润滑油会被不断消耗。随着滑动距离增加，凹坑直径不断减小，其中的润滑油也不断减少，如图 10(b) 所示。当载荷较小时，凹坑织构的磨损速率较小，能够长期存在并持续为摩擦面提供润滑油。而载荷过大时，凹坑织构磨损速率较大，滑动一段距离后，即被完全磨掉，二次润滑失效。此时摩擦副进入干摩擦状态且磨痕轨迹上有大量磨屑堆积，接触表面状态迅速恶化，摩擦因数急剧升高。随着摩擦继续进行，大量摩擦热的累积使得接触表面出现严重的粘着磨损，导致磨损率迅速升高。不同速度条件下，织构磨痕的宽度与深度变化相差不大且磨痕深度均远小于凹坑深度。虽然速度较大时，凹坑织构磨耗较大，但是并未被完全磨掉，凹坑织构能够一直存在，从而有效降低摩擦因数并减小磨损。

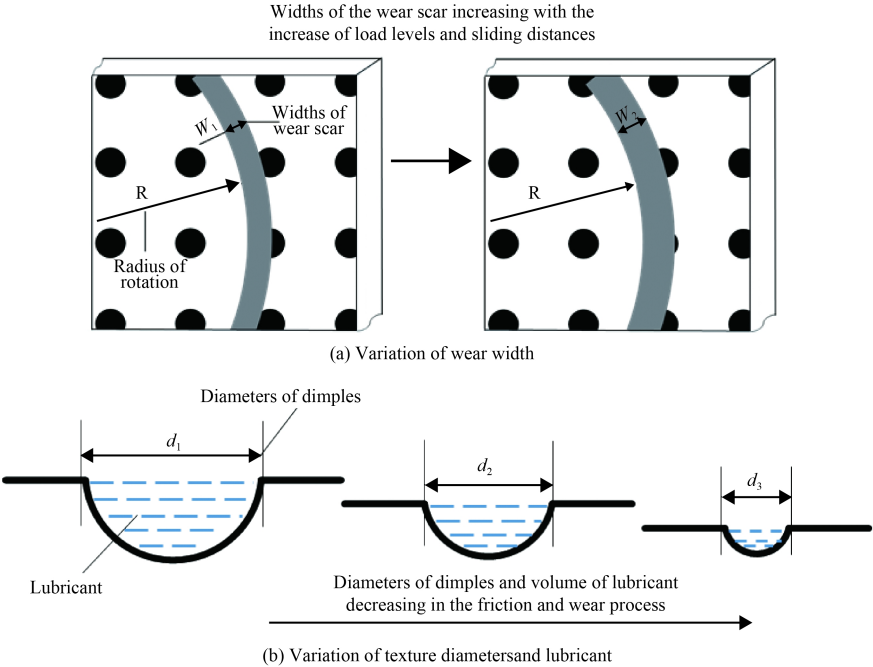


图 10 摩擦磨损过程中磨痕宽度与凹坑直径变化示意图

Fig.10 Diagrams of the variation for wear width and texture diameter in the friction and wear process

3 结 论

文中采用球-盘式摩擦副分别对织构和未织构试样进行乏油滑动试验，研究了凹坑织构表面在不同速度和载荷下的摩擦学性能。

(1) 在乏油滑动条件下，凹坑织构表面在不同的速度水平下均具有良好的摩擦磨损性能，减摩耐磨效果显著。

(2) 载荷对织构表面的摩擦磨损性能影响较大。一定范围内摩擦因数随着载荷的增大而降低；但载荷过高时，当织构凹坑完全磨掉后，摩擦后期会出现摩擦因数突然升高，表面磨损严重。

(3) 相比于未织构试样，凹坑织构试样在不同速度和载荷下均能有效延长乏油润滑状态，有良好的减摩效果，可降低摩擦因数约 68%~75%，降低磨损率约 86%~92%。

参考文献

- [1] IBATAN T, UDDIN M S, CHOWDHURY M A K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 272: 102-120.
- [2] 许璐, 郑锦华, 吴双, 等. 表面织构改善摩擦特性的研究进展[J]. *工具技术*, 2018, 52(4): 7-12.
- XU L, ZHENG J H, WU SH, et al. Recent development on surface texturing for improving tribological properties[J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(4): 7-12 (in Chinese).
- [3] 郑晓辉, 宋皓, 张庆, 等. 激光表面织构化对材料摩擦学性能影响的研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(9): 68-74.
- ZHENG X H, SONG H, ZHANG Q, et al. Effect of laser surface texturing on tribological properties of materials: a review[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(9): 68-74 (in Chinese).
- [4] ETSION I, KLIGERMAN Y, HALPERIN G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces[J]. *Tribology Transactions*, 1999, 42(3): 511-516.
- [5] ETSION I, HALPERIN G, BRIZMER V, et al. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(2): 295-300.
- [6] ETSION I, SHER E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings[J]. *Tribology International*, 2009, 42(4): 542-547.
- [7] 纪敬虎, 符永宏, 华希俊, 等. 45 钢表面制备 V 形凹槽及其摩擦学特性[J]. *中国表面工程*, 2014, 27(4): 107-111.
- JI J H, FU Y H, HUA X J, et al. Tribological properties of 45 steel surface with V-grooves[J]. *China Surface Engineering*, 2014, 27(4): 107-111 (in Chinese).
- [8] 纪敬虎, 符永宏, 王祖权, 等. 激光表面跨尺度织构化机械密封摩擦性能[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 452-456.
- JI J H, FU Y H, WANG Z Q, et al. Tribological property of mechanical seal with laser-induced multi-scale surface texturing[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 452-456 (in Chinese).
- [9] 纪敬虎. 摩擦副表面微凹槽织构相关摩擦学理论及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012: 103-110.
- JI J H. Analytical and experimental investigation on the tribological properties of friction pairs with micro-grooves surface textures[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012: 103-110 (in Chinese).
- [10] 邵飞先. 乏油条件仿生耦合齿轮材料的摩擦磨损行为[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 61-69.
- SHAO F X. Friction and wear behavior of bionic coupling gear material under starved lubrication conditions[J]. Changchun: Jilin University, 2015: 61-69 (in Chinese).
- [11] 黄卓. 滑动轴承当前的改进方向[J]. *机械工程与自动化*, 2017, 202(3): 211-213, 215.
- HUANG Z. Current improvements of sleeve bearing[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017, 202(3): 211-213, 215 (in Chinese).
- [12] ETSION I. State of the art in laser surface texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127: 248-253.
- [13] GALDA L, SEP J, PRUCNAL S. The effect of dimples geometry in the sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions[J]. *Tribology International*, 2016, 99: 77-84.
- [14] XIONG D S, QIN Y K., LI J L, et al. Tribological properties of PTFE/laser surface textured stainless steel under starved oil lubrication[J]. *Tribology International*, 2015, 82: 305-310.
- [15] 胡天昌, 丁奇, 胡丽天. 激光表面织构化对 GCr15 钢摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(5): 447-451.
- HU T CH, DING Q, HU L T. The effect of laser texturing of GCr15 steel surfaces on their tribological properties[J]. *Tribology*, 2011, 31(5): 447-451 (in Chinese).
- [16] WAKUDA M, YAMAUCHI Y, KANZAKI S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact[J]. *Wear*, 2003, 254: 356-363.
- [17] ANDERSSON P, KOSKINEN J, VARJUS S, et al. Micro-lubrication effect by laser-textured steel surfaces[J]. *Wear*, 2007, 262(3-4): 369-379.
- [18] WANG X L, LIU W, ZHOU F, et al. Preliminary investigation of the effect of dimple size on friction in line contacts[J]. *Tribology International*, 2009, 42(7): 1118-1123.
- [19] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact[J]. *Wear*, 2011, 271(9-10): 1719-1725.
- [20] 李亚军, 逢显娟, 孙乐民, 等. 激光表面织构化对 45 钢摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(8): 147-154.
- LI Y J, PANG X J, SUN L M, et al. Effects of laser surface texturing on friction and wear properties of 45 steel[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(8): 147-154 (in Chinese).