

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.04.004

圆凹坑织构对线接触摩擦副摩擦学性能的影响^{*}

项 欣, 陈 平, 李俊玲, 李云龙

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 根据摩擦试验中圆盘试样的旋转方向,用 YLP-20 型激光加工系统在圆柱销试样回转面不同区域(前端、后端、中间)加工规则分布的表面织构,利用 UMT-3 摩擦磨损仪进行单向旋转摩擦试验,研究表面织构分布区域对摩擦副摩擦学行为的影响。结果表明:在载荷 10 N、滑动速度 0.003~0.628 m/s 时,不同分布区域的织构对摩擦副的摩擦学行为影响不同,相比无织构试样,分布于试样回转面中间部分的织构对摩擦副起到了减摩作用。这是由于中间织构通过形成局部流体动压润滑作用提高了摩擦副的承载能力,降低了接触表面的摩擦因数,同时通过储存磨屑,减少了表面磨损。前后端织构产生的流体动压润滑效应很小,磨损严重,导致其摩擦因数高于中间织构和无织构试样的摩擦因数。

关键词: 表面织构; 分布区域; 线接触; 摩擦因数; 油润滑

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0033-06

Influence of Dimple Texture on Tribological Behavior of Line Contact Friction Pairs

XIANG Xin, CHEN Ping, LI Jun-ling, LI Yun-long

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: To investigate the effect of the distribution area of surface texture on the tribological behavior of friction pair, a YLP-20 laser processing system was used to process the surface texture with regular distribution in different cylindrical rotary surface areas respectively, and the single tribological test under the condition of rotating was conducted by a Tribo-meter (UMT-3). Test results show that the textures of different distribution areas(front, back and middle texture of line contact specimen) have different effects on the tribological behaviors of friction pairs, and textures in the middle of the line contact specimen have better effect of friction pairs on reducing friction under the experimental conditions that the load is 10 N and the sliding speeds are 0.003-0.628 m/s compared with non-textured sample. The reason is that surface textures reduce the friction coefficient of the contact surfaces and improve the bearing capacity of the friction pairs by forming local hydrodynamic pressure lubrication. Moreover, surface textures reduce the surface wear by storing particles. The front-end textured sample and back-end textured sample have higher friction coefficients because of their more serious grinding cracks and more particles, and they have minimal effect of hydrodynamic pressure lubrication.

Keywords: surface texture; distribution area; line contact; friction coefficient; oil lubrication

0 引 言

据统计,约 80%零件损坏和 40%能量损失由各种形式的摩擦磨损引起^[1]。因此,控制摩擦、减少磨损、改善润滑性能对节约能源和原材料十分重要^[2]。研究表明^[3-4],与传统摩擦学理论中摩

擦副表面越光滑越好的观点不同,表面织构作为人为加工的表面形貌,已经成为一种改善表面摩擦学性能的有效手段,且圆凹坑织构作为相对成熟的织构图案,被广泛应用于各类研究中。如,Shen 等^[5]研究指出球冠形凹坑织构面积比越大

收稿日期: 2015-05-04; 修回日期: 2015-06-21; 基金项目: * 中央高校基本科研业务费专项(FRF-TP-12-067A)

通讯作者: 陈平(1973-),女(汉),副教授,博士;研究方向:表面织构摩擦学效应; Tel: (010) 6233 2357; E-mail: chenp@ustb.edu.cn

网络出版日期: 2015-07-02 15:26; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150702.1526.001.html>

引文格式: 项欣,陈平,李俊玲,等.圆凹坑织构对线接触摩擦副摩擦学性能的影响[J].中国表面工程,2015,28(4):33-38. Xiang X, Chen P, Li J L, et al. Influence of dimple texture on tribological behavior of line contact friction pairs[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 33-38.

减摩效果越明显; Tang等^[6]研究表明5%的圆凹坑面积率可以有效减少摩擦和磨损; Kummel等^[7]研究表明, 加工在刀具表面的圆凹坑织构可以显著提高刀具的抗磨性能, 延长其使用寿命; Chouquet等^[8]在DLC涂层表面加工了圆凹坑等形状的表面织构, 证明将织构技术与涂层技术相结合可以更好地改善材料表面的摩擦学性能; 华希俊等^[9]在钢表面加工微凹坑, 表明将激光微织构技术与固体润滑技术结合能有效提高表面润滑性能。这些研究工作使表面织构技术在实际工程应用^[10-11]和基础理论研究^[12]中均取得了很大进展。

但近年来对表面织构摩擦学性能的研究主要集中于点、面接触, 而对线接触摩擦副的试验研究和理论分析相对较少^[13-14], 且大部分集中于织构几何参数以及织构在不同工况条件下(如速度、时间不同)对摩擦学性能影响的研究。李兵等^[15]研究了滚滑比对线接触表面织构摩擦副的摩擦学性能影响, 结果显示滚滑比较小时摩擦因数随圆凹坑织构直径增大而增大。华希俊等^[16]研究了线接触油润滑条件下织构面积率对摩擦因数的影响, 结果表明摩擦因数随织构面积率的变化而变化, 且存在最优织构面积率使摩擦因数最小。考虑到线接触高副机构如齿轮机构在啮合过程中, 齿廓间会产生一定的相对滑动^[17], 两齿轮接触区域的位置和范围是变化的, 故文中从织构分布区域出发, 采用前人研究的圆凹坑织构最优参数, 利用UMT-3摩擦磨损仪在旋转条件下进行单向摩擦试验, 研究圆柱回转面不同区域上规则分布的表面织构对线接触摩擦副摩擦学性能的影响, 并通过理论分析线接触摩擦副表面织构分布区域对摩擦因数的影响, 为表面织构在线接触条件下对摩擦副摩擦学性能影响的研究提供参考依据。

1 试验与方法

1.1 材料及表面织构的设计

上试样为 $\phi 12\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的不锈钢圆柱, 回转面抛光处理, 其表面粗糙度 R_a 约为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$, 切去两侧多余材料, 保留中间 6 mm 以方便夹持。下试样为 $\phi 80\text{ mm} \times 2.8\text{ mm}$ 的不锈钢圆盘, 其表面粗糙度 R_a 约 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。根据摩擦试验中圆盘试样的旋转方向, 用YLP-20型激光加工系统在圆柱回转面上分别加工出如图1所示的表面织构, 凹坑

区域面积为 $8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的矩形, 凹坑孔径 $220\text{ }\mu\text{m}$, 深 $10\text{ }\mu\text{m}$, 凹坑平均间距 $420\text{ }\mu\text{m}$ 。其中, 图1(a)为未加工织构的试样(无织构试样), 1(b)为织构在回转面中间的试样(中间织构试样), 1(c)为织构在回转面前端的试样(前端织构试样), 1(d)为织构在回转面后端的试样(后端织构试样)。

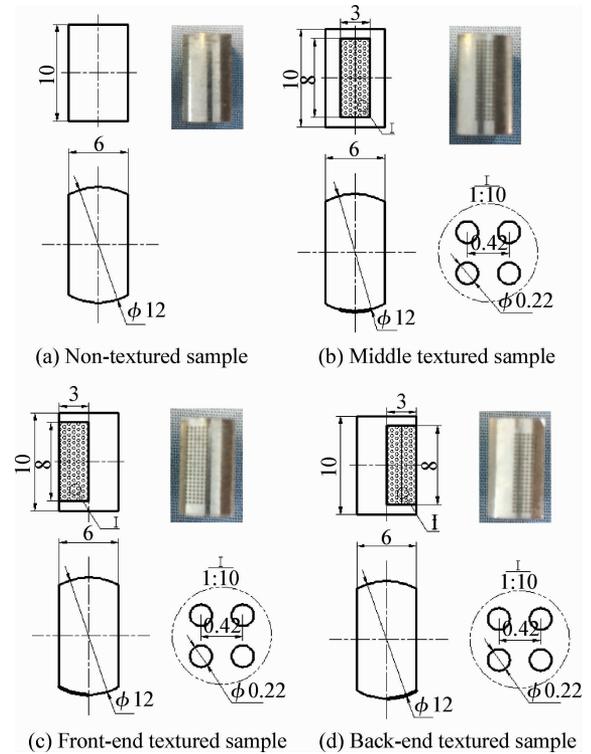


图1 不同分布区域的织构试样

Fig. 1 Sample of textures in different distribution areas (Unit: mm)

1.2 摩擦学性能试验

试验前用机械抛光机对所有试样表面进行抛光, 并依次在丙酮和乙醇中各超声清洗 10 min , 用吹风机吹干。试验在UMT-3摩擦磨损试验机上进行, 采用下试样单向旋转, 上试样固定且相对下试样表面滑动的方式(如图2)。试验条件为: 室温 $22.5\text{ }^\circ\text{C}$, 载荷为 10 N , 润滑剂为长城牌汽油机油SE 15w-40, 旋转流变仪测得其粘度在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $0.293\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 $0.230\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。试验前在各试样表面滴两滴润滑油, 其体积约为 $2.5 \times 10^{-5}\text{ mL}$, 试验过程中不再滴加润滑油。试验转速分别为 $60, 300, 600, 1\ 800, 3\ 000, 6\ 000, 9\ 000$ 和 $12\ 000\text{ r/min}$, 即线速度分别为 $0.003, 0.015, 0.031, 0.094, 0.157, 0.314, 0.471$ 和 0.628 m/s 。各组试样均从最低速度(0.003 m/s)开

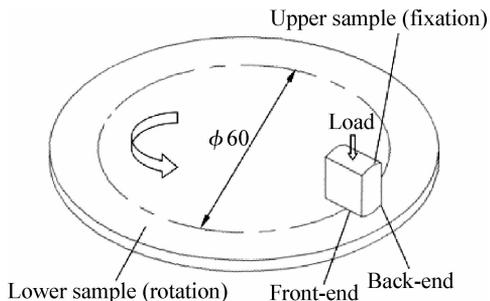
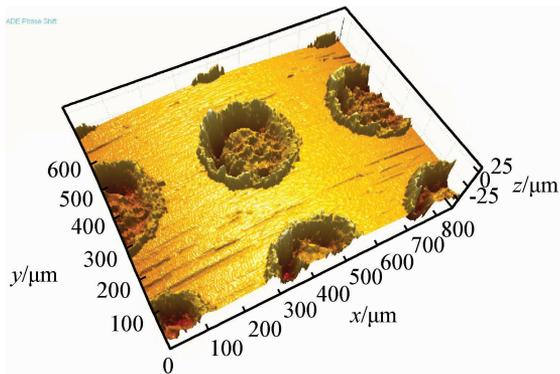


图 2 运动形式示意图

Fig. 2 Schematic image of motion form (Unit: mm)

始运行,每个速度下持续 2 min 后增加一次速度,直到达到最大速度(0.628 m/s)。为保证测试结果的准确性,每个试验进行两次取平均值。



(a) 3D profile of dimple texture



(b) Morphology of a single dimple

图 3 激光加工表面凹坑形貌

Fig. 3 Dimple morphologies of laser texturing surface

2.2 圆凹坑织构的摩擦学性能

图 4 给出了在油润滑条件下各组试样的摩擦因数随时间的变化。随着滑动时间的增加,试样摩擦因数逐渐降低,且每个试样在试验开始时的最低速度(0.003 m/s)下摩擦因数波动幅度较大,这可能是速度较低时,难以形成有效的润滑油膜,且试样处于磨合阶段,凹坑边缘仍残留毛刺所致。从图 4(a)(b)可以看出,无织构试样和中间织构试样在每个滑动速度下摩擦因数的波动幅度较小。相比而言,前端织构(图 4(c))和后端织构试样(图 4(d))的摩擦因数在每个滑动速度下波动幅度较大,且在较低速度下摩擦因数明显大于无织构试样与中间织构试样。这可能是由于前后端织构只有部分区域产生了流体动压润滑效应,试样处于边界润滑状态,且存在较大面积的凸峰接触,导致摩擦因数波动幅度较大。

2 结果与分析

2.1 圆凹坑织构的三维形貌

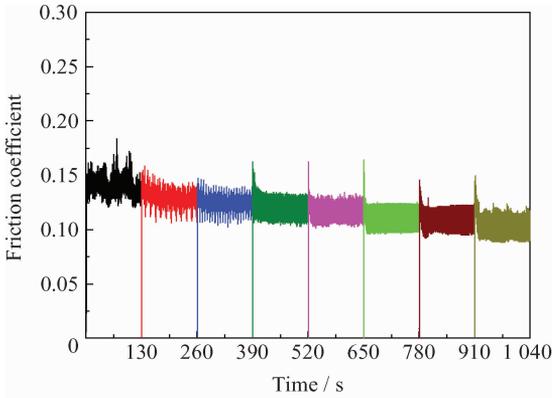
图 3 为圆凹坑形表面织构的三维形貌。在激光加工凹坑的过程中,空气中伴随着金属气味,说明激光去除的材料有一部分直接进入空气中,加工后试样表面有金属氧化物残渣,说明激光去除的材料有一部分被空气氧化并溅落到试样表面。从图 3(a)可以看出,激光加工的凹坑周围产生了明显的毛刺,这表明激光去除的金属材料融化后,一部分堆积到了凹坑边缘;从图 3(b)中清晰可见织构内部被激光的光热效应所烧蚀的痕迹。

图 5 所示为织构试样与无织构试样的 Stribeck 曲线,其中各点分别对应图 4 中各速度下摩擦试验所测出的平均摩擦因数。

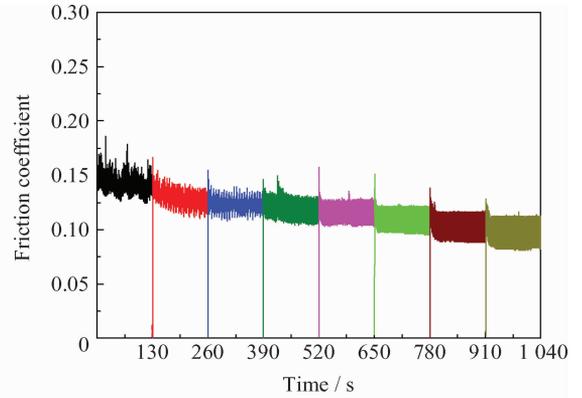
由于文中润滑油粘度和载荷均为定值,根据润滑参数的计算公式^[9],润滑参数的取值取决于速度的变化。从图 5 中可以看出,低速下中间织构试样与无织构试样的摩擦因数几乎相同,且低于前端和后端织构试样的摩擦因数;随着速度的增加,中间织构试样的摩擦因数降低的速度明显快于无织构试样,且前端和后端织构试样的摩擦因数降低的幅度、速度明显高于无织构试样。当润滑参数为 0.031 m/s 和 0.628 m/s 时,中间织构试样的摩擦因数较无织构试样分别降低了 19% 和 27%,这说明随着速度的增加,织构降低摩擦因数的能力逐渐体现出来。且从图中还可以看出,中间织构试样的摩擦因数最低,对线接触摩擦副起到了很好的减磨润滑作用。这可归

因于凹坑织构具有存储润滑油的能力,且随着速度的增加,加快了凹坑内的润滑油在接触区域的流动,增加了润滑。中间部分加工织构对线接触

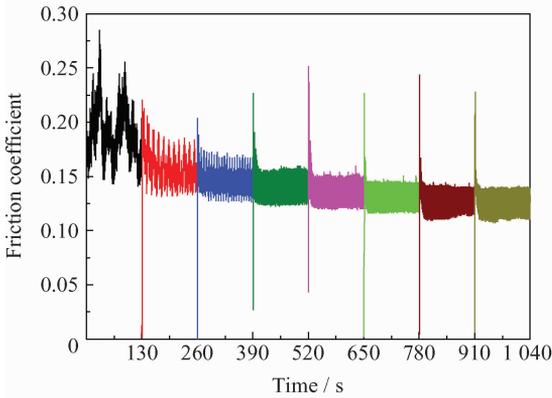
摩擦副的减摩效果,主要归因于圆凹坑表面织构通过产生局部流体动压润滑效应,提高了摩擦副的承载能力,降低了接触表面的摩擦因数。



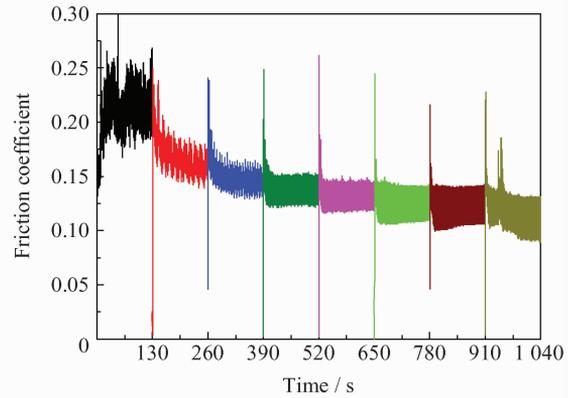
(a) Non-textured sample



(b) Middle textured sample



(c) Front-end textured sample



(d) Back-end textured sample

图4 油润滑条件下不同分布区域织构的摩擦因数随时间的变化

Fig. 4 Friction coefficient curves of different distribution textures with time under oil lubrication condition

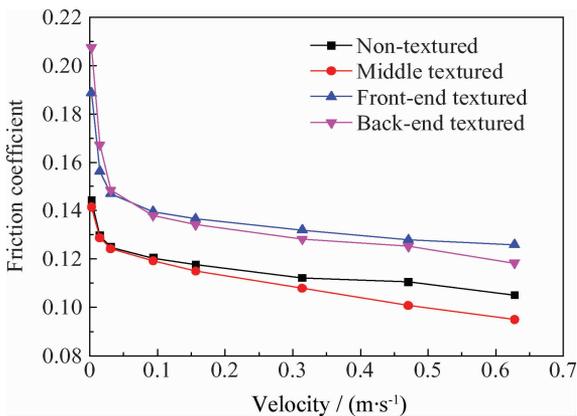


图5 织构试样与无织构试样的 Stribeck 曲线

Fig. 5 Stribeck curves of textured and non-textured surfaces

图6所示为稳定载荷下圆凹坑型表面织构流体动压润滑形成机理示意图。向右所指箭头

表示上接触面向右运动,同时带动接触面间的润滑介质向右运动(相对于下表面),A处箭头所指方向表示此位置附近润滑介质的压力相对于原始平面降低,这是由于润滑介质进入凹坑区域时空间发散所致;B处箭头所指方向表示此位置附近的润滑介质受到的压力相对于原始平面提高,这是由于润滑介质流过凹坑最低处后空间收敛所致。与无织构试样表面相比,A处附近油膜压力降低,B处附近油膜压力提高,由于液体特殊的力学性能,即可以承受压力而不能提供拉力,故A处附近润滑介质的油膜压力不能无限降低,最多降低至空穴压力,这是因为压力降低太多会产生空化现象从而限制压力的进一步降低,而B处附近润滑介质的油膜压力可以持续提高,所以对于整个润滑表面来说,凹坑的存在提供了更高的

支持力,进而提高了承载能力。而在外界承载能力不变的情况下,织构的这种作用提高了润滑油膜厚度,降低了表面的摩擦因数。图 5 中,前后端织构试样的摩擦因数大于中间织构及无织构的摩擦因数,这可能是由于试样前后端织构与配合端面只有部分区域接触,在这种情况下,织构产生的流体动压润滑效应较小,使相互接触的试样处于边界润滑状态,导致其摩擦因数较高。另外,后端织构的摩擦因数略低于前端织构的摩擦因数,这可能是由于前后端织构与配合端面的接触区域有所不同所致,因为在试验过程中,前端织构尾部与配合端面接触较多,而后端织构首部与配合端面接触较多,但其具体原因还有待进一步分析研究。

图 7 所示为试样磨痕形貌。从图 7(a)中可以清楚的看到无织构试样的磨痕较密,表面无规则分布着许多磨损颗粒,相比而言,中间织构试样的磨痕较浅(图 7(b)),表面磨粒较少,且多存储于凹坑中。而从图 7(c)和图 7(d)看出,前端和后端织构试样的磨损均较为严重,表面存在较大的磨损颗粒。这可能是由于前后端织构产生的

流体动压润滑效应很小,虽然可以存储部分磨粒,但磨粒较大,使试样与配合端面之间形成三体摩擦,产生了犁沟。而中间织构产生了流体动压润滑效应,提高了油膜的承载能力,增加了膜厚,同时存储了润滑油和磨粒。无织构试样虽然没有储油存屑的能力,但其表面没有激光加工后的毛刺,故出现了图 5 中无织构试样的摩擦因数高于

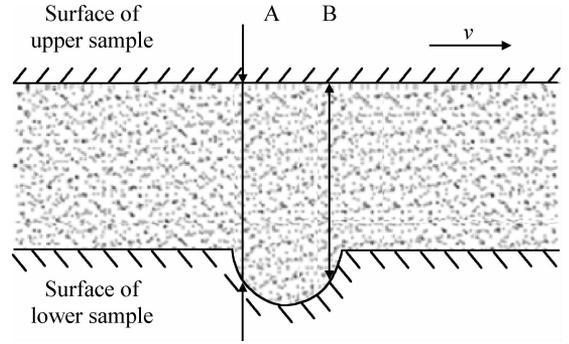
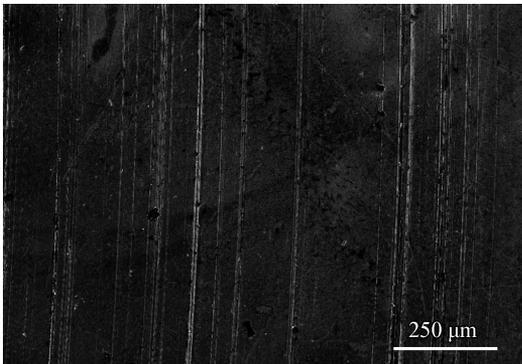
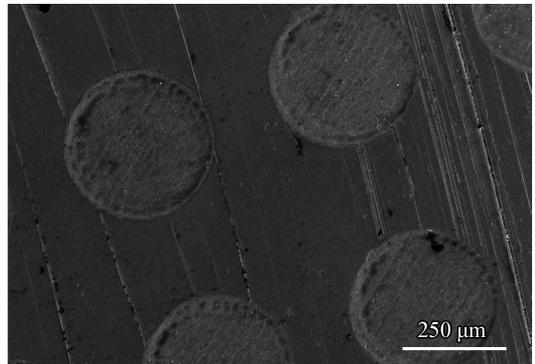


图 6 稳定载荷下圆凹坑织构流体动压润滑形成机理示意图

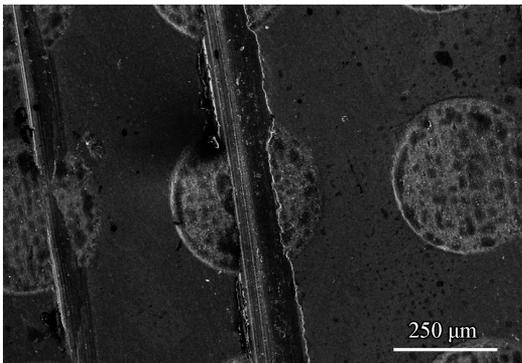
Fig. 6 Schematic image of the formation mechanism of the hydrodynamic pressure lubrication of dimple texture under stable loading



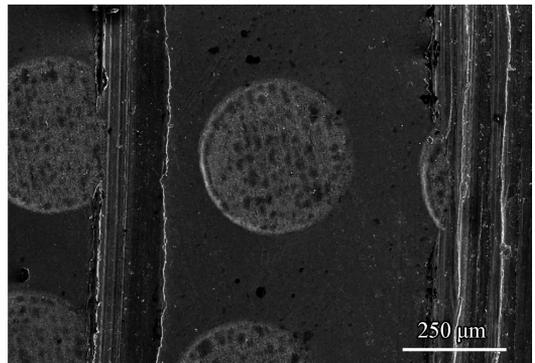
(a) Non-textured sample



(b) Middle textured sample



(c) Front-end textured sample



(d) Back-end textured sample

图 7 不同分布区域织构试样的磨痕形貌

Fig. 7 Wear scar morphologies of different distribution textures of samples

中间织构试样摩擦因数,但二者均比前后端织构试样摩擦因数低的试验结果。另外,从图中可以看出,前端织构试样的磨损颗粒更大更多,这也可能是导致其摩擦因数略高于后端织构试样的摩擦因数的原因。

3 结 论

(1) 织构分布于试样回转面不同区域(前端、后端、中间)对摩擦副的摩擦学行为影响不同,在载荷 10 N,滑动速度 0.003~0.628 m/s 的试验条件下,分布于线接触试样中间的织构起到了减摩作用。这是由于表面织构通过形成局部流体动压润滑效应提高了摩擦副的承载能力,降低了接触表面的摩擦因数。

(2) 前端和后端织构试样摩擦因数较高的原因可能是由于只有部分区域形成流体动压润滑效应,脱落的磨粒形成三体摩擦,产生犁沟,导致试样表面磨损严重,其对摩擦磨损的机理还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 王素华,吴新跃. 基于摩擦学的表面织构技术应用研究进展[J]. 工具技术, 2011, 45(12): 7-11.
Wang S H, Wu X Y. Research on applications of surface texturing based on tribology[J]. Tool Engineering, 2011, 45(12): 7-11 (in Chinese).
- [2] Tang W, Zhou Y K, Zhu H, et al. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact [J]. Applied Surface Science, 2013, 2(13): 199-204.
- [3] 陈平,李云龙,邵天敏. 不锈钢表面条纹织构倾斜角对摩擦性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(10): 1315-21.
Chen P, Li Y L, Shao T M. Influence of incline angle of striated surface texture on friction behavior of stainless steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(10): 1315-21 (in Chinese).
- [4] Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings [J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542-547.
- [5] Shen D, Wang W Z, Kong I J. Effect of surface texturing on lubrication performance of ball-on-disc point contacts [J]. Tribology, 2012, 32(6): 570-576.
- [6] Tang W, Zhou Y K, Zhu H, et al. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact [J]. Applied Surface Science, 2013, 273: 199-204.
- [7] Kummel Johannes, Braun Daniel, Gibmeier Jens, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization [J]. Journal Materials Processing Technology, 2015, 215: 62-70.
- [8] Chouquet C, Gavillet J, Ducros C, et al. Effect of DLC surface texturing on friction and wear during lubricated sliding [J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 23: 367-371.
- [9] 华希俊,刘明,杜志华,等. 织构化表面固体润滑性能试验[J]. 江苏大学学报, 2014, 35(1): 92-95.
Hua X J, Liu M, Du Z H, et al. Property experiments of solid lubrication of laser texturing surface [J]. Journal of Jiangsu University, 2014, 35(1): 92-95 (in Chinese).
- [10] Shinkarenko A, Kligerman Y, Etsion I. The effect of surface texturing in soft elastic-hydrodynamic lubrication [J]. Tribology International, 2009, 42(2): 284-292.
- [11] Grabon Wieslaw, Koszela Waldemar, Pawlus Pawel, et al. Improving tribological behavior of piston ring-cylinder liner frictional pair by liner surface texturing [J]. Tribology International, 2013, 61(2): 102-108.
- [12] Li K M, Hu Y X, Yao Z Q. Experimental study of micro dimple fabrication based on laser shock processing [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 216-225.
- [13] 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): 1118-23.
- [14] Ivan Krupka, Petr Sperka, Martin Hartl, et al. Effect of real longitudinal surface roughness on lubrication film formation within line elastohydrodynamic contact [J]. Tribology International, 2010, 43(12): 2384-9.
- [15] 李兵,胡兆稳,王静,等. 激光微加工凹坑表面的表征及摩擦特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(12): 1764-8.
Li B, Hu Z W, Wang J, et al. Characterization of laser-textured concave surface and investigation of its tribological property [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2011, 34(12): 1764-8 (in Chinese).
- [16] 华希俊,陈美云,符永宏,等. 线接触摩擦副织构化表面动压润滑性能[J]. 润滑与密封, 2013, 38(1): 1-5.
Hua X J, Chen M Y, Fu Y H, et al. Hydrodynamic lubrication performance of textured surface under linear contact [J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(1): 1-5 (in Chinese).
- [17] 朱小星,王宝雨,杨乐毅,等. 齿廓间相对滑动对滚轧齿轮齿廓金属流动的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(2): 246-251.
Zhu X X, Wang B Y, Yang L Y, et al. Effect of relative sliding on tooth profiles metal flow during gear roll forming [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(2): 246-251 (in Chinese).