

激光与光电子学进展

磁场对激光凹坑织构表面摩擦磨损性能的影响

李毅, 于爱兵*, 陈秋洁, 赵硕

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

摘要 表面织构化处理可以改善材料的磨损性能, 激光加工工艺因其具有高精度和高效率等优势而常常被用于各种材料表面织构的制备。随着电磁技术的发展, 更多的摩擦副在磁场环境中服役。为了探究外加磁场对凹坑织构表面摩擦磨损的影响, 在 45° 钢试样表面使用激光加工出凹坑织构, 分别在普通条件与外加磁场条件下进行摩擦磨损实验, 测试摩擦系数、磨损量和润滑油粘度, 观察磨损表面及凹坑内部容屑情况。实验结果表明, 在油润滑的条件下, 外加磁场使凹坑织构试样的摩擦系数降低, 磨损量减小, 粘着磨损减轻。外加磁场可以提高润滑油粘度、凹坑的容屑能力和油膜承载力, 有助于改善激光凹坑织构表面的摩擦磨损性能。

关键词 激光光学; 激光; 织构; 磁场; 磨损

中图分类号 TH117.1 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714005

Effect of Magnetic Field on Friction and Wear Properties of Laser Surface Textured

Li Yi, Yu Aibing*, Chen Qiujie, Zhao Shuo

School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract Surface texture treatment can improve the wear properties of the materials. Laser processing technology is often used for the preparation of surface texture of various materials because of its advantages of high precision and high efficiency. With the development of electromagnetic technology, more friction pairs serve in magnetic field environment. In order to analyze the effect of applied magnetic field on the friction and wear of the dimple textured surface, the dimple texture is fabricated with laser on the surfaces of the 45° steel specimens, and wearing experiments are carried out under two experimental conditions, such as normal and applied magnetic field. Coefficient of friction, lubricating oil viscosity and wear mass loss of the worn specimens are measured. Worn surfaces and wear debris are observed with microscope. The experimental results show that under oil-lubricated conditions, applied magnetic field reduces the coefficient of friction, wear mass loss and adhesive wear on laser textured surface. Applied magnetic field can improve the oil viscosity, the capacity of trapping wear debris of textured dimples and the carrying capacity of oil film, which can improve the tribological properties of the laser dimple textured surface.

Key words laser optics; laser; textures; magnetic field; wear

OCIS codes 140.3390; 140.3460

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51875294)

通信作者: *yuaibing@nbu.edu.cn

1 引言

随着电磁技术在工程中的应用范围不断扩大,越来越多的摩擦副在磁场环境中服役,如磁悬浮列车的转向器和制动系统^[1]以及电磁炮^[2]等,而且相关学者开展了外加磁场对摩擦副影响方面的研究工作。Kumagai等^[3]采用纯镍与45#钢试样进行干摩擦磨损实验,当磁场强度达到50 A/m时,试样的磨损量显著下降,进一步增加磁场强度,磨损量降幅减小。董祥林等^[4]的研究工作表明外加磁场有助于减少中碳钢的摩擦系数与磨损量,提高工件表面的摩擦学性能。魏永辉等^[5]的研究工作表明外加磁场的耐磨减摩效果与铁磁性材料的磁导率呈正相关。Dehghani等^[6]在切削合金钢的过程中施加磁场可以降低刀具后刀面的磨损量。上述研究工作表明,外加磁场能够提高无织构试样表面的摩擦磨损性能。表面织构化处理可以改善材料的磨损性能,有助于提高机械系统的承载力与使用寿命^[7-8]。激光加工工艺因其具有高灵活性、高精度、易控制和高效率等优势而常常被用于各种材料表面织构的制备^[9]。近些年来,激光凹坑织构(LST)的应用受到了广大学者的关注。例如,Vlădescu等^[10]在内燃机活塞配对副的表面制备了激光凹坑织构,指出在极端的磨损条件下,表面织构仍可以显著降低摩擦力;

鲍雨梅等^[11]开展了激光凹坑织构对生物陶瓷涂层表面摩擦磨损性能影响的研究,当圆形凹坑织构的面积覆盖率为25%时,激光凹坑织构的减摩效果最为明显;蒋雯等^[12]的研究工作表明在油润滑的条件下,7075铝合金表面加工凹坑织构后的摩擦系数降低了30%,显著改善了试样的摩擦性能。然而,有关外加磁场对织构表面摩擦磨损性能影响方面的研究工作相对较少,如外加磁场对润滑条件下的凹坑织构产生怎样的影响,以及外加磁场如何影响织构凹坑的容屑性能,上述工作仍需要研究。本文在45#钢试样表面激光加工出凹坑织构并在油润滑条件下进行摩擦磨损实验,比较凹坑织构试样表面在普通磨损和外加磁场作用下的摩擦磨损性能,分析凹坑织构表面的磨损机理。

2 实验

2.1 实验材料

试样材料选用45#钢,通过线切割机加工尺寸为45 mm×35 mm×5 mm的矩形试样并研磨抛光。试样表面的粗糙度 $R_a=0.05\ \mu\text{m}$,硬度为210.4 HV。摩擦副材料为直径5 mm的GCr15轴承钢对摩球,硬度为872.3 HV。45#钢和GCr15轴承钢对摩球均属于铁磁性材料,元素的质量分数如表1所示。润滑油选用牌号为L-HM46的抗磨润滑油。

表1 45#钢与GCr15轴承钢中的元素

Table 1 Elements in 45# steel and GCr15 bearing steel

unit: %

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
45#steel	0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	≤0.25	≤0.30	≤0.25		
GCr15	0.95-1.05	0.15-0.35	0.20-0.40	1.30-1.65			≤0.027	≤0.02

2.2 实验方法

采用YAG-W200B型激光焊接机在试样表面制备出激光凹坑织构,选取的激光加工参数:电流为

230 A,脉宽为0.2 ms,离焦量为3 mm,单点脉冲。制备得到的凹坑表面形貌如图1(a)所示,激光凹坑织构的剖面轮廓曲线如图1(b)所示。其中凹坑的尺

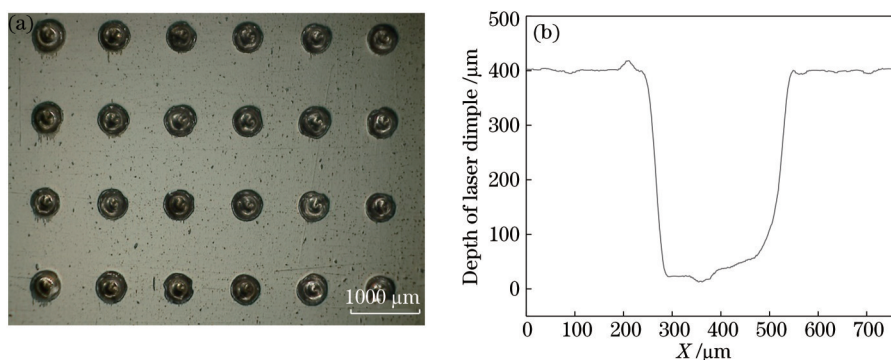


图1 激光凹坑织构。(a)织构表面;(b)凹坑的剖面轮廓曲线

Fig. 1 Laser surface texture. (a) Textured surface; (b) cross-section profile curve of laser dimple

寸参数:直径为 310 μm ,深度为 399 μm ,凹坑中心间距为 1 mm。试样经激光加工后用砂纸轻微打磨凹坑表面以去除凹坑周围的熔渣。采用 SFT-2M 型销盘式摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验,实验参数:载荷为 10 N,转速为 1000 r/min,磨损直径为 8 mm,磨损时间为 30 min。实验装置如图 2 所示。在外加磁场的磨损实验中,在磨损试验机的试样盘下面 20 cm 处放置三块相同磁感应强度的 Nd-Fe-B 永磁体,获得的磁感应强度为 24 mT。磨损实验结束后,使用 VHX-1000 型三维数字显微镜观察磨损表面与凹坑形貌;使用 FA2204B 型电子分析天平称取试样质量并记录,计算试样磨损前后的质量差,重复三次取平均值;在 24 mT 的磁感应强度下,使用乌氏粘度计对润滑油粘度进行测量,粘度计管径为 0.66 mm,管长为 150 mm。

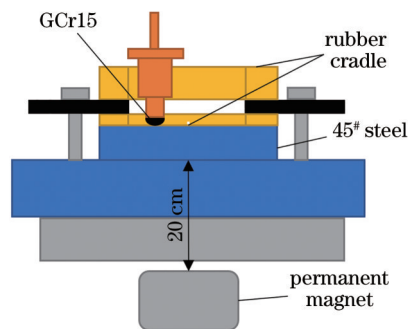


图 2 磨损实验装置
Fig. 2 Wear test apparatus

3 结果与讨论

3.1 摩擦系数与磨损量

在普通和外加磁场两种磨损实验条件下,激光凹坑织构表面的摩擦系数曲线如图 3 所示。在外加磁场的磨损实验条件下,凹坑织构试样的摩擦系数低于普通磨损实验条件,普通条件下的摩擦系数均值为 0.0785,外加磁场条件下的摩擦系数均值为 0.0678。与普通条件相比,外加磁场条件下的摩擦系数降低了 13.6%。试样与 GCr15 对摩球对摩 30 min 后,普通条件下试样表面的平均磨损量为 3.0 mg,外加磁场

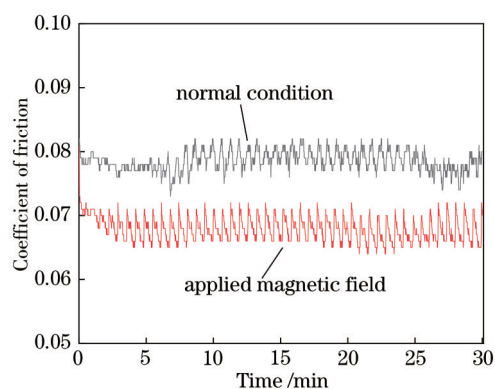


图 3 摩擦系数曲线

Fig. 3 Curves of coefficient of friction

条件下的平均磨损量为 2.1 mg,施加磁场后,试样表面的磨损量降低了 30%。上述实验结果表明,在润滑油条件下外加磁场有助于降低凹坑织构试样表面的摩擦系数和磨损量。

3.2 磨损机理

3.2.1 润滑油粘度

表 2 为润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间。磨损后润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间有所延长,而且在外加磁场磨损条件下润滑油流经毛细管所需要的时间最长。润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间可以反映出润滑油的粘度,乌氏粘度计的粘度计算方程为^[13] $\eta_1 = \eta_0 \gamma_1 t_n / (\gamma_0 t_0)$,其中 η_1 和 γ_1 分别为待测润滑油的粘度与质量, η_0 和 γ_0 分别为已知润滑油的粘度与质量, $\eta_0 = 46 \text{ mm}^2/\text{s}$, t_0 为磨损前润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间, t_n 为磨损后润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间, n 为实验分组序号。忽略润滑油质量的影响,根据润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间,润滑油的粘度计算结果如表 2 所示。与普通磨损实验条件下的润滑油相比,外加磁场后的润滑油在 25.0, 27.5, 30.0 $^\circ\text{C}$ 的温度条件下,粘度分别提高了 3.2%、4.5% 和 4.8%,可见在外加磁场的条件下,润滑油的粘度明显提升。实验过程中产生的细小磨屑分散在润滑油中,在普通实验条件下磨屑颗粒会随润滑油的流动而

表 2 润滑油流经乌氏粘度计毛细管的时间和润滑油的粘度

Table 2 Time for lubricating oil to flow through capillary tube of viscometer and viscosity of lubricating oil

Test condition	25.0 $^\circ\text{C}$		27.5 $^\circ\text{C}$		30.0 $^\circ\text{C}$	
	t/s	$\eta/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	t/s	$\eta/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	t/s	$\eta/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$
Before wear test	195.3	46.00	194.0	45.69	181.7	42.80
After wear test (normal condition)	213.4	50.26	206.5	48.63	189.1	44.55
After wear test (applied magnetic field)	220.2	51.86	215.8	50.82	198.2	46.70

流动,但在外加磁场的条件下,磨屑颗粒将沿磁力线方向移动,增大润滑油流动的阻力,从而导致润滑油的粘度增大^[14]。Kovalchenko 等^[15]的研究工作表明在使用较高粘度的润滑油,激光凹坑织构表面的摩擦系数更小。润滑油粘度的提高有助于提高润滑油膜的厚度^[15-16],较厚的润滑油膜有助于摩擦副处于最佳的润滑状态,提高油膜的承载能力,降低摩擦力,减少磨损^[16]。因此,在外加磁场条件下摩擦系数和磨损量均能够降低。

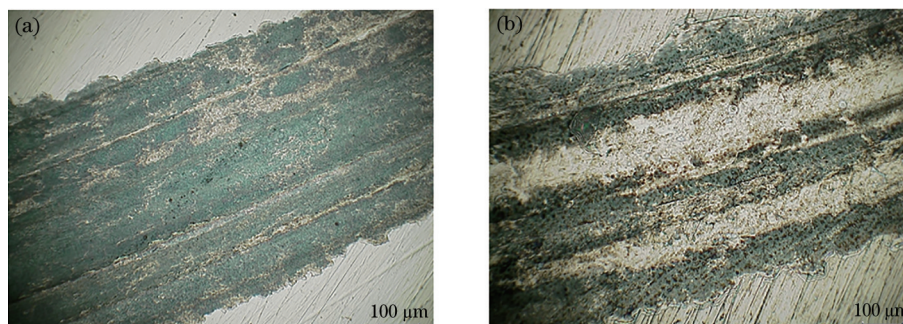


图 4 磨损表面的微观形貌。(a)普通条件;(b)外加磁场条件

Fig. 4 Micro-morphology of worn surface. (a) Normal condition; (b) applied magnetic field condition

3.2.3 容屑

图 5 为磨损实验后试样凹坑内部的容屑情况。从图 5(a)可以看到,在普通磨损实验条件下磨屑堵塞了洞口,这是因为铁磁性材料在磨损过程中,凹坑织构表面的磨屑与磨痕均产生了摩擦磁化,并将磨屑吸附在凹坑边缘,从而形成磨屑的“搭桥现象”^[19],降低了凹坑的容屑能力。在外加磁场的条件下,凹坑边缘只观察到少量磨屑,但在凹坑底部观察到大量磨屑,如图 5(b)和图 5(c)所示。对于铁磁性材料的试样而言,材料内部通常有无数个磁畴,在普通条件下这些

3.2.2 磨损表面

图 4 为试样磨损表面形貌。从图 4(a)可以看到,普通条件下试样表面的粘着磨损现象较严重。在外加磁场的条件下,试样表面的粘着磨损相对减轻,如图 4(b)所示。外加磁场条件下润滑油的粘度得到提高,Dorgham 等^[17]和 Singh 等^[18]的研究工作表明润滑油粘度的提升有助于提高润滑油膜的承载能力,降低了摩擦副间的摩擦力^[16],从而减轻了试样表面的粘着磨损。

磁畴的取向通常是随机的^[20],在外加磁场的条件下,磁畴方向与外加磁场方向一致,整个试样呈磁性,磨屑较为均匀的附着在凹坑内壁,避免了磨屑在凹坑表面的堆积现象。上述结果表明,受摩擦磁化现象的影响,普通条件下凹坑织构的容屑能力降低。凹坑容屑能力的降低会导致更多磨屑进入摩擦副中,加剧试样表面的磨损^[21]。在外加磁场的条件下,凹坑内部仍留出了一定的容屑空间。相较于普通条件,外加磁场后凹坑的容屑能力有所提升,有助于减轻试样表面的磨损,提高凹坑织构表面的耐磨性。

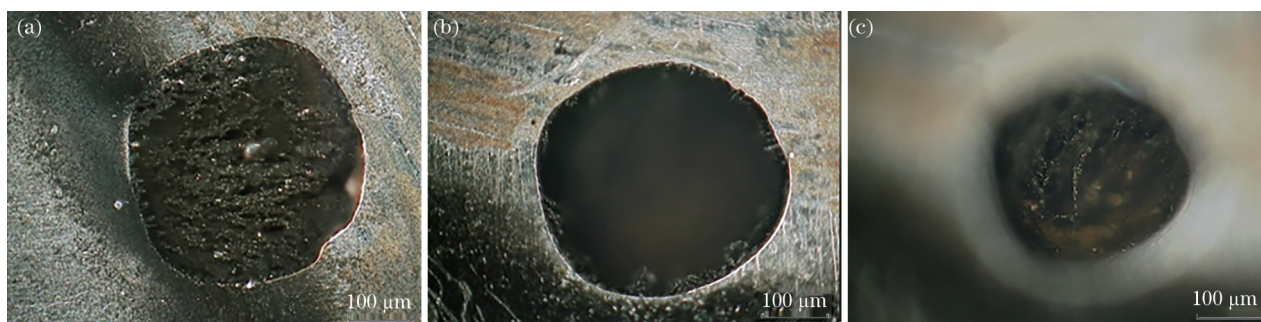


图 5 凹坑容屑情况。(a)普通条件;(b)外加磁场条件下的凹坑表面;(c)外加磁场条件下的凹坑底部

Fig. 5 Chip capacity of dimple. (a) Normal condition; (b) dimple surface under applied magnetic field condition; (c) dimple bottom under applied magnetic field condition

3.2.4 楔形效应

凹坑织构捕获磨屑的过程如图 6 所示。在润滑油条件下,对摩球经过凹坑后会产生不对称的油压

分布,在凹坑出口一侧润滑油产生一定的升力^[22]。升力源于流体动力润滑的楔形效应^[23],当凹坑深度接近 0 时,润滑油所产生的升力接近 0,油压分布曲

线近似于直线,如图 6(a)所示。在普通磨损条件下,吸附在凹坑边缘的磨屑会堵塞洞口,凹坑深度近似为 0。苏峰华等^[24]指出当凹坑深度减小时,楔形效应所产生的润滑油升力降低,导致摩擦副间的摩擦力增大,加剧磨损。从图 6(b)可以看到,外加磁场可以避免因摩擦磁化产生的磨屑搭桥现象,凹坑边缘的磨屑附着量减少,凹坑能够发挥容屑的作用,楔形效应所提供的油膜升力增加。不同条件下的凹坑结构伪色图如图 7 所示。分别对比图 7(a)和

图 7(b)中 A 和 B 处的磨损表面,可以观察到外加磁场后凹坑入口处和出口处粘着磨损减轻。从图 6(b)可以看到,楔形效应在凹坑出口一侧提供的油膜升力最高,从而明显地减轻了凹坑出口一侧的粘着磨损。因此,外加磁场提高了凹坑容屑能力,所以流体动力润滑的楔形效应增强,油膜承载力提升,摩擦力降低,所以减轻了试样表面的粘着磨损,降低了摩擦系数,改善了凹坑结构表面的摩擦磨损性能。

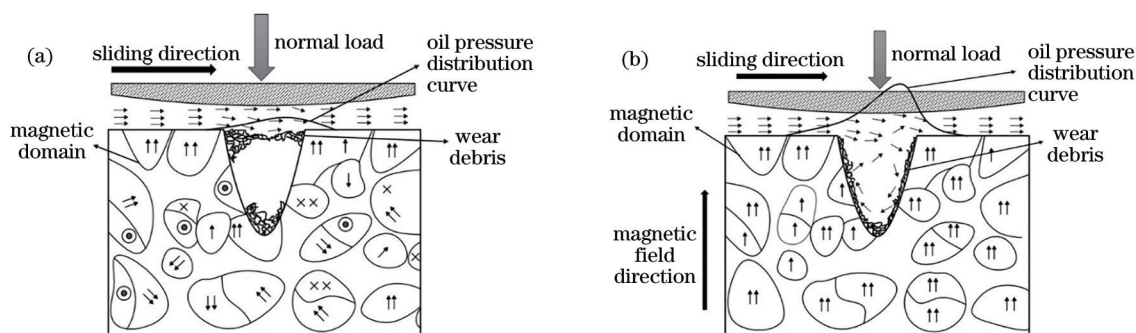


图 6 凹坑结构捕获磨屑过程的示意图。(a)普通条件;(b)外加磁场条件

Fig. 6 Schematic of wear debris trapping process of dimples. (a) Normal condition; (b) applied magnetic field condition

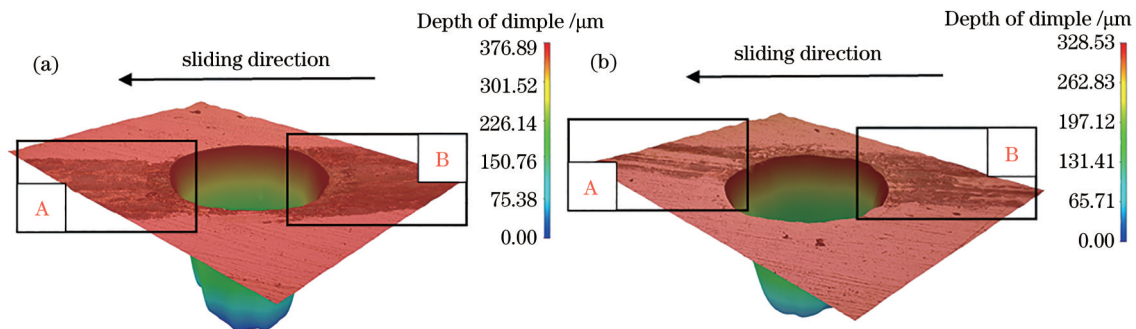


图 7 凹坑结构伪色图。(a)普通条件;(b)外加磁场条件

Fig. 7 Pseudo-color image of dimple texture. (a) Normal condition; (b) applied magnetic field condition

4 结 论

在油润滑条件下,与普通磨损实验条件相比,外加磁场降低了激光凹坑结构表面的摩擦系数与磨损量。外加磁场提高了润滑油的粘度,粘度的提升有助于提高润滑油膜的厚度与承载力;同时,外加磁场避免了由摩擦磁化导致磨屑堵塞洞口的现象,凹坑结构的容屑能力增强,使楔形效应所产生的润滑油升力提高,提升了油膜的承载力。外加磁场提高了润滑油的粘度、凹坑的容屑能力和油膜的承载力,有助于改善激光凹坑结构表面的摩擦磨损性能。

参 考 文 献

- [1] He R, Liu C X, Li N. Fuzzy control of the integrated system of electromagnetic brake and friction brake of car[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (24): 83-87.
何仁, 刘存香, 李楠. 轿车电磁制动与摩擦制动集成系统的模糊控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 83-87.
- [2] Wang G H, Xie L, Wang Q, et al. Analysis on electromagnetic mechanics in electromagnetic railgun [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2011, 32(1): 69-71, 76.
王刚华, 谢龙, 王强, 等. 电磁轨道炮电磁力学分析

- [J]. 火炮发射与控制学报, 2011, 32(1): 69-71, 76.
- [3] Kumagai K, Suzuki K, Kamiya O. Study on reduction in wear due to magnetization[J]. Wear, 1993, 162/163/164: 196-201.
- [4] Dong X L, Jian X G, Bi H Y, et al. Effect of a magnetic field on sliding friction and wear of medium carbon steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(6): 577-580.
董祥林, 简小刚, 毕红运, 等. 磁场对中碳钢滑动摩擦磨损的影响[J]. 金属学报, 1999, 35(6): 577-580.
- [5] Wei Y H, Zhang Y Z, Chen Y. Influence of magnetic field interfering on dry-sliding tribological characteristics of materials with different magnetic properties[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 102-110.
魏永辉, 张永振, 陈跃. 磁场干涉对不同磁性材料干摩擦学特性的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 102-110.
- [6] Dehghani A, Amnieh S K, Tehrani A F, et al. Effects of magnetic assistance on improving tool wear resistance and cutting mechanisms during steel turning[J]. Wear, 2017, 384/385: 1-7.
- [7] Hua X J, Zhang J L, Xie X, et al. Laser concave/convex micro-texture process of GCr15 bearing steel surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302009.
华希俊, 张加力, 解玄, 等. GCr15 轴承钢表面的激光凹/凸微结构工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302009.
- [8] Shang D Z, Zhang J, Feng A X, et al. Effect of surface texturization on microstructure and mechanical properties of laser welded copper/steel joint[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902004.
尚大智, 张健, 冯爱新, 等. 焊面结构化对铜/钢激光焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902004.
- [9] Ge L C, Ma J J, Cao Y P, et al. Influence of micro texture and its parameters on the effect of lubrication reduction[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(8): 921-928.
葛良辰, 马剑军, 曹宇鹏, 等. 激光微加工在微结构技术中的应用及研究进展[J]. 激光与红外, 2019, 49(8): 921-928.
- [10] Vlădescu S C, Fowell M, Mattsson L, et al. The effects of laser surface texture applied to internal combustion engine journal bearing shells—an experimental study[J]. Tribology International, 2019, 134: 317-327.
- [11] Bao Y M, Wang C W, Jin Z W, et al. Textured surface on a bioceramic coating via a femtosecond laser and its friction and wear properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0203003.
鲍雨梅, 王成武, 金志伟, 等. 激光表面结构化生物陶瓷涂层及其摩擦磨损性能[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0203003.
- [12] Jiang W, Zhang Z Y, Gu Q M, et al. Tribological properties of micro-pit texture generated by composite processing[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(11): 85-89.
蒋雯, 张朝阳, 顾秦铭, 等. 复合工艺制备的表面微凹坑结构的摩擦性能研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(11): 85-89.
- [13] Zhang C J, Liu Y L. A critical assessment of the principle of ubbelohde viscosimeter[J]. Journal of Sichuan Medical College, 1983, 14(4): 382-387.
张崇俊, 刘亚兰. 论乌氏粘度计原理[J]. 四川医学院学报, 1983, 14(4): 382-387.
- [14] Wang L J, Guo C W, Yang Z Y, et al. Experimental research on load capacity of Fe_3O_4 ferrofluid in magnetic field[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(5): 22-24.
王利军, 郭楚文, 杨志伊, 等. 磁场作用下的 Fe_3O_4 磁流体承载能力的试验研究[J]. 润滑与密封, 2006, 31(5): 22-24.
- [15] Kovalchenko 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.
- [16] Wen S Z, Huang P. Principle of tribology[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 1-2, 175-176, 490-495.
温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1-2, 175-176, 490-495.
- [17] Dorgham A, Azam A, Parsaeian P, et al. Nanoscale viscosity of triboreactive interfaces[J]. Nano Energy, 2021, 79: 105447.
- [18] Singh Y, Kumar Singh N, Sharma A, et al. Effect of ZnO nanoparticles concentration as additives to the epoxidized *Euphorbia Lathyris* oil and their tribological characterization[J]. Fuel, 2021, 285: 119148.
- [19] Yu A B, Niu W Y, Hong X, et al. Influence of tribomagnetization on wear debris trapping processes of textured dimples[J]. Tribology International, 2018, 121: 84-93.
- [20] Gao F M, Fan J C, Zhao K P, et al. *In situ* observation of the magnetic domain in the process of ferroalloy friction[J]. Tribology International, 2016,

- 97: 371-378.
- [21] Gachot C, Rosenkranz A, Hsu S M, et al. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement[J]. *Wear*, 2017, 372/373: 21-41.
- [22] Hamilton D B, Walowit J A, Allen C M. A theory of lubrication by microirregularities[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1966, 88(1): 177-185.
- [23] Pettersson U, Jacobson S. Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17(3): 553-559.
- [24] Su F H, Mao C, Li Z J. Experiment and simulation study on the effect of texture depth on tribological properties of stainless steel surface under oil lubricating condition[J]. *Tribology*, 2019, 39(2): 181-187.
- 苏峰华, 毛川, 李助军. 织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(2): 181-187.