

激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展

万 轶, 熊党生

(南京理工大学 材料科学与工程系, 江苏 南京 210094)

摘要: 介绍了激光表面织构化的过程及其摩擦学研究现状, 讨论了激光表面织构的形状、直径、深度、取向和密度等结构参数对润滑状态及其磨损机理的影响, 指出今后可将先进涂层技术和激光表面织构化结合起来, 在混合/边界润滑状态下获得较低的摩擦系数, 并应加强以润滑理论为基础的研究, 预先模拟、计算出表面微结构的最佳参数以达到实际摩擦工况的润滑要求。

关键词: 激光; 表面织构化; 润滑; 摩擦学

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595 (2006) 06-0603-05

机械系统的摩擦性能对提高承载能力和服役寿命很重要, 减磨已成为保护环境、提高效率的迫切要求^[1~3]。通过改变润滑油的化学成分以及降低润滑油粘度可以减少润滑油中硫、磷含量^[4,5], 降低环境污染; 另一种合理的方法是表面精加工, 如对表面进行抛光、研磨等, 但受材料性质和加工精度的影响, 粗糙度始终受到限制^[6,7]。近年来关于各种摩擦表面如汽缸/活塞系统、密封面及导轨等的激光织构化取得了突破^[8~10]。现在, 磁性存储器的表面通常需要织构化且作为微电子机械系统中防止粘附静摩擦的手段^[11]。研究表明^[12,13], 将含少量硫、磷的低粘度润滑油与表面工程技术结合起来, 如微米/纳米表面织构及图案化技术, 即使在少油或者高速运行条件下也可以获得更高的燃油效率和更长的使用寿命。

1 表面织构化技术

1.1 各种表面织构技术特点

固体表面形貌对其摩擦行为及抗磨性影响很大, 因此摩擦系统的功效可以通过选择适当的表面处理而不是单纯将其光滑化来改进^[14]。各种表面工程技术的发展引起了人们的关注, 应离子刻蚀^[15]、表面喷丸处理^[16]、电子束刻蚀、机械微刻^[17]及激光表面织构等为接触微结构提供了有利工具。与其他表面处理技术相比, 如反应离子刻蚀需辅助装置或特殊气氛, 喷丸处理对环境污染较大, 电子束和光刻技术的成本较高等, 而激光表面织构可以在大气

环境中进行且对环境无污染, 制作简单无需掩膜且耗时短, 设备成本较低, 加工对象范围宽, 可控制适当的尺寸和形貌。

1.2 不同波长激光与材料表面的相互作用

脉冲激光微加工技术是利用激光脉冲对固体直接加工, 熔化的金属通常沿着凹坑内壁流动, 到达相当数量时就会向外抛出生凝固, 略微凸出在金属表面, 在环绕工作点附近的区域形成“热影响区”, 从而在周围材料中形成微观或宏观裂纹。而紫外波段输出的准分子激光可以直接切断材料表面的分子或原子结合键, 实现对聚合物和瓷器等非金属材料进行钻孔、光刻及表面处理等多种微细加工, 热扩散影响较小。随着激光脉冲时域宽度从纳秒 (10^{-9} s) 量级直至飞秒 (10^{-15} s) 量级, 其具有阈值小、加精度可以达到微米甚至更小量级的特点, 且热影响区小。

2 激光织构化的摩擦学研究

2.1 表面织构化的应用概况

在机械制造行业, 减少机械零部件滑动接触的摩擦和磨损日趋重要, 并要求具有高效、长寿命及高可靠性, 同时我们期望能够提高机械承载能力及燃油效率。近年来对机械行业摩擦表面的激光织构化已取得了突破^[18~21], 如将其用于汽车内燃机中的汽缸/活塞、滑动轴承套、发动机导轨、密封环以及频繁启动/停车的部件等, 可以避免由于干摩擦引起的突然温度升高。

基金项目: 国防基础研究项目 (K1703060819)。

收稿日期: 2006-06-22; 修回日期: 2006-10-18 联系人熊党生, e-mail: xiongds@163.com

作者简介: 熊党生, 男, 1960年生, 教授, 博士生导师, 目前主要从事复合材料及生物摩擦学等研究。

在计算机硬盘和 MEMS 系统中,摩擦副的间隙尺度一般处于纳米级甚至为零间隙,因受尺寸效应的影响在表面产生较大的粘着力和摩擦力. 磁性存储器的表面通常都进行织构化且作为 MEMS 系统中防止粘附和静摩擦的手段^[22,23],大柔性微结构的形成减小了系统对静摩擦的敏感性. Suh 等^[24]利用激光技术在磁头或磁盘表面制造微小隆起或凹陷 (如图 1 所示)以增加接触表面的粗糙度,减小表面接触

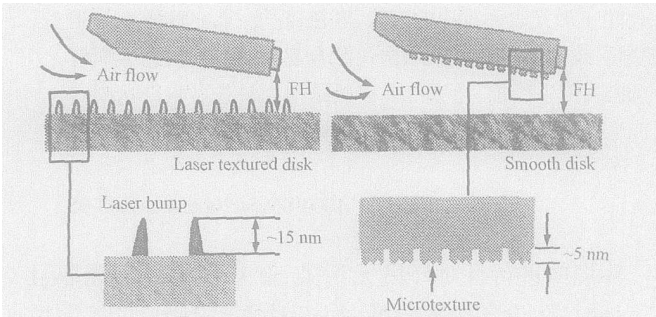


Fig 1 Laser textured slider and disc
图 1 激光织构化的磁头 磁盘

面积及摩擦和粘着.

2 2 表面织构化参数对摩擦性能的影响

2 2 1 表面织构的形貌和密度

Schreck 等^[25]模拟汽缸/活塞的运动,利用 Nd:YAG 脉冲激光对 100Cr6 表面进行织构化处理,形成坑型和交叉型 2 种表面微结构 (见图 2),研究了 2 种织构密度对材料摩擦性能的影响 (见图 3). 结果表明,摩擦系数随着织构密度的增加而降低,而 2 种微结构形状的减磨效果区别不大.

宋起飞等^[26]在汽车制动盘 (毂)材料铸铁表面刻出具有规则分布的凹坑、条纹和网格等形态,研究其摩擦磨损性能. 结果表明:随着单元体间距增加,其耐磨性下降,凹坑状试样磨损量增加幅度最大,网格状试样最小,条纹状试样居中;摩擦系数随单元体间距增加而减小,其中网格状试样变化较小,凹坑状试样变化较大.

我们曾模拟端面密封环的摩擦形式,在 GCrl5 密封环上形成环形排列的 3 种不同密度微孔 (直径约 200 μm),测试其在乏油条件下摩擦系数随载荷和滑动距离的关系 (见图 4). 可以看出:高密度微孔使接触表面的粗糙度增大,因此在滑动初期摩擦系数较高,属于摩擦副的跑合阶段;随着滑动距离和载荷增加,3 种密度密封环的摩擦系数均呈阶梯型逐渐下降趋势,并保持在较低水平,其中高密度密封环的摩擦系数最低,而低密度摩擦环在摩擦过程中摩擦

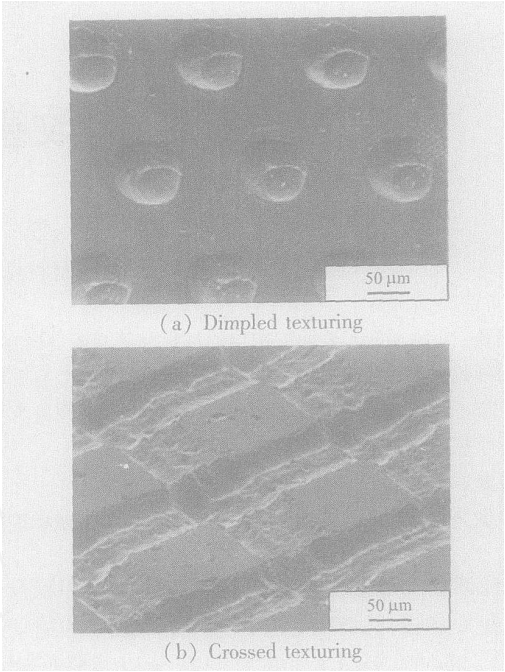


Fig 2 Morphology of different structures
图 2 不同织构化处理表面微结构形貌

系数变化不大,基本和光滑试样保持一致.

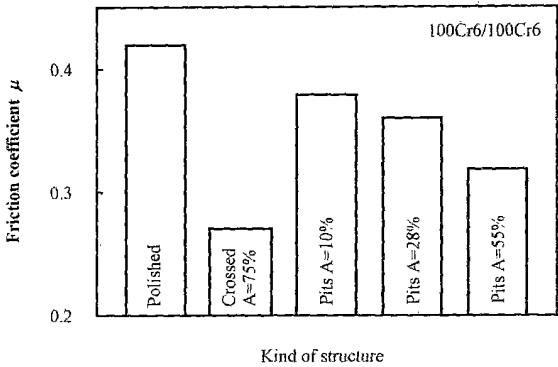


Fig 3 Friction coefficient vs sliding distance of two structures

图 3 两种微结构的摩擦系数与滑动距离的关系

2 2 2 表面织构的深径比

在对内燃机密封摩擦系统研究中发现,约 50% 的摩擦损伤来自于密封环. Etsion^[27]在密封环表面制造备出一系列微坑,研究了不同微孔直径、深度和面积对其摩擦性能的影响. 发现激光织构化技术中最重要的参数为坑的深径比,适当的深径比可以最大程度地增加油膜的刚度及其 p_v 值. 同时以雷诺方程为基础,计算了不同坑密度下密封环的平均流体压力分布及对摩擦力矩的影响 (见图 5).

在密封环表面织构化的对比试验中,织构化 WC

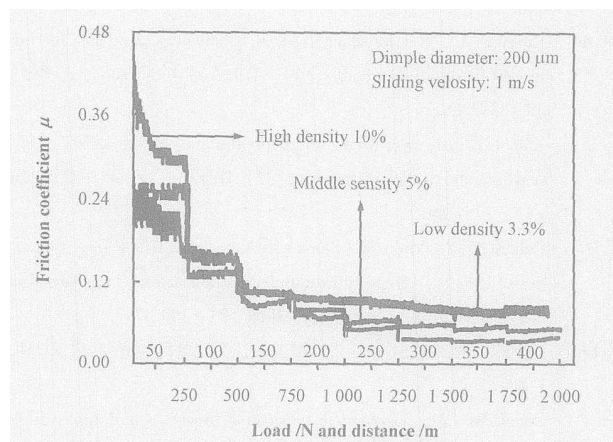


Fig 4 Friction coefficient of textured samples as a function of load and sliding distance

图 4 不同织构密度下载荷和滑动距离对摩擦系数的影响

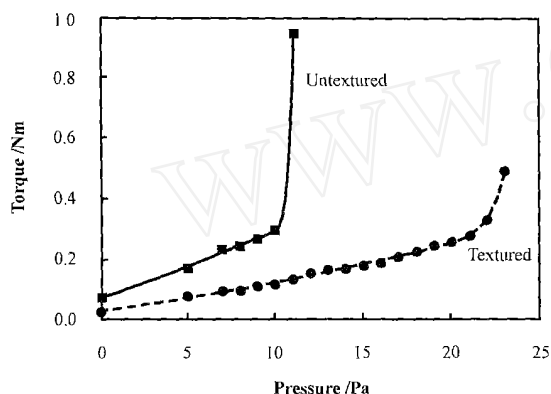


Fig 5 Friction torque vs sealed pressure for non-textured and partial textured seals

图 5 无织构与部分织构的密封压力与摩擦力矩的关系曲线

密封环的 1 个运行周期达 38 个月超过 10 000 h, 磨损低于 $1\text{ }\mu\text{m}$, 使用寿命比无织构密封环提高 3 倍, 而无织构密封环在相同周期中需要更换 4 次. 激光织构改善了机械密封的流体动力学和静力学润滑, 可以显著提高承载能力和抗磨损能力, 减少摩擦系数.

Ryk 等^[28]采用模型预测了表面织构化在平行配合面上产生的明显静力学效应, 得出产生最小摩擦应力的微坑深度与直径比的最佳值, 从而推断至少可以减少 30% 的织构化密封环磨损.

2.2.3 表面织构对润滑膜厚的影响

接触表面之间的润滑包括材料表面形貌以及润滑剂的物理和化学性质, 润滑剂的粘度和其他流变性能决定润滑膜厚度, 同样, 接触部件的表面粗糙度对其摩擦磨损性能影响很大. 通常我们将流体膜的厚度与接触表面的表面粗糙度 (λ 值) 作为评估, λ 值越大, 越容易达到流体润滑. 常规的微弹流数值解

表明^[29], 在滑动或滚动条件下, 流体粘度和材料弹性形变随润滑膜压力增加而显著增大, 粗糙峰处的压力使材料产生形变而避免粗糙峰互相接触, 因此不会产生材料磨损.

一般地, 机械部件在稳定运行阶段处于全膜润滑, 而在低速或运行/停车阶段时效率降低, 处于混合/边界润滑状态. 在跑合阶段时润滑油被挤出接触区, 油膜太薄以至不能形成足够的边界膜, 因此摩擦系数较高. 因此, Pettersson 等^[30]提出将表面织构化作为润滑油存储器, 在跑合或低速时可以将微结构中的润滑剂引入高接触载荷区域, 作为低速下低压路径进口, 从而增加润滑膜厚度, 降低混合润滑条件下的磨损.

Kovalchenko 等^[31]研究了不同密度的表面织构化钢盘在不同滑动速度下的润滑膜厚. 结果表明: 在较低滑动速度条件下, 随着速度增加, 试样的摩擦系数逐渐降低, 光滑盘和低密度织构盘的表面粗糙度相近, λ 值主要受润滑油膜的影响, 表面织构增加了油膜厚度, 因此其摩擦系数比光滑盘低, 但高密度织构使其表面粗糙度增大而产生严重磨损; 在较高滑动速度下, 随着速度增加, 接触表面进入完全流体润滑, 油膜厚度不再增加, 激光织构化盘和光滑盘表面的摩擦行为相似.

3 结束语

激光织构化技术是在机械零件表面形成有规律的人造表面形貌, 可以起到捕捉磨粒而减少犁沟形成、作为储油器给接触表面提供润滑剂以防止咬合、产生流体动压效应以增加承载能力 3 方面的作用, 并且激光与零件表面相互作用时会产生表面硬化, 对所形成的表面形貌起到保护作用. 目前国内外对激光织构化试验研究已经有了一定的基础, 但缺乏相应的理论依据, 我们认为今后应着重以下几个方面的研究:

(1) 根据实际摩擦工况和润滑要求, 以润滑理论研究为基础, 预先模拟、计算出表面微结构的几何形状、深度及分布等参数的最佳值, 以获得稳定的润滑状态;

(2) 在激光织构化的形貌选择中, 对点状形貌的研究最多, 其它形貌的研究相对较少, 有待进一步开展对不同材料体系和激光工艺参数之间的影响关系, 以及激光加工过程对材料组织和性能影响等方面的研究;

(3) 应将激光织构化处理与表面改性技术结合

形成表面三维结构,弥补甚至消除各自的局限性,发展表面精细图案,在混合、边界润滑条件下获得优异的摩擦磨损性能。

参考文献:

- [1] Nakada M. Trends in engine technology and tribology[J]. *Tribology International*, 1994, 27 (1): 3-8.
- [2] Priest M, Taylor C M. Automobile engine tribological-approaching the surface[J]. *Wear*, 2000, 241: 193-203.
- [3] Merlo A M. The contribution of surface engineering to the product performance in the automotive industry[J]. *Surface and Coating Technology*, 2003, 174-175: 21-26.
- [4] Wallfahner U, Bowen L. High performance semisynthetic automotive engine oils using polymer esters as an antiwear booster[J]. *Lubrication Engineering*, 1997, 53: 23-28.
- [5] 郭志光,刘维民.新型无硫、磷有机钼化合物润滑油添加剂对钢/钢摩擦副摩擦磨损性能影响研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (2): 97-101.
Guo Z G, Liu W M. Tribological behavior of molybdenum coordination compound without sulfur and phosphorus as oil additive for steel-steel contact[J]. *Tribology*, 2006, 26 (2): 97-101.
- [6] Wong H C, Umehara N, Kato K. The effect of surface roughness on friction of ceramics sliding in water[J]. *Wear*, 2001, 218: 237-243.
- [7] Masuda M, Ujino M, Shimoda K, *et al*. Development of titanium nitride coated shim for a direct acting OHC engine[P]. *SAE Paper*, 1997, 970002.
- [8] 杨卓娟,韩志武,任露泉.激光处理凹坑形仿生非光滑表面试件的高温摩擦磨损特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2005, 25 (4): 374-378.
Yang Z J, Han Z W, Ren L Q. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surfaces at high temperature[J]. *Tribology*, 2005, 25 (4): 374-378.
- [9] 于新奇,刘美红,蔡仁良.激光加工多孔端面非接触机械密封的性能研究[J]. *流体机械*, 2005, 33 (1): 20-24.
Yu X Q, Liu M H, Cai R L. Study on performance of non-connecting mechanical seals with laser textured micro-pore face[J]. *Fluid Machinery*, 2005, 33 (1): 20-24.
- [10] 万轶,熊党生.激光纹理化改善不锈钢摩擦性能的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38 (7): 137-139.
Wan Y, Xiong D S. Laser-texturing improving tribological properties of stainless steel[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38 (7): 137-139.
- [11] Hung Tan A n, Wei Cheng Sung. A novel textured design for hard disk tribology improvement[J]. *Tribology International*, 2006, 39: 506-511.
- [12] Holmberg K, Ronkainen H, Matthews A. Tribology of thin coatings[J]. *Ceramics International*, 2000, 26: 787-795.
- [13] Dumitru G, Romano V, Weber H P, *et al*. Laser treatment of tribological DLC films[J]. *Diamond Rel Mater*, 2003, 12: 1 034-1 040.
- [14] Erdemir A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication[J]. *Tribology International*, 2005, 38: 249-256.
- [15] Xiaolei Wang, Koji Kato. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. *Tribology Letters*, 2003, 14 (4): 275-280.
- [16] Uehara Y, Wakuda M, Yamauchi Y, *et al*. Tribological properties of dimpled silicon nitride under oil lubrication[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24: 369-373.
- [17] 闫利文.微机械制造工艺及其应用[J]. *现代制造工程*, 2004, 3: 83-85.
Yan L W. Micromechanical fabrication processes and applications[J]. *Machinery Manufacturing Engineer*, 2004, 3: 83-85.
- [18] Du D, He Y F, Sui B, *et al*. Laser texturing of rollers by pulsed Nd: YAG laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161: 456-461.
- [19] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction reducing surface-texturing in reciprocating automotive components[J]. *Tribology Transaction*, 2001, 44 (3): 359-366.
- [20] Etsion I, Halperin G, Technion. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. *Sealing Technology*, 2003 (3): 6-10.
- [21] 彭旭东,杜东波,李纪云.不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (4): 367-371.
Peng X D, Du D B, Li J Y. Effect of different section profile micro-pores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal[J]. *Tribology*, 2006, 26 (4): 367-371.
- [22] 李艳宁,唐洁,胡小唐,等.脉冲激光微加工技术在 MEMS 中的应用[J]. *压电与声光*, 2005, 27 (2): 185-189.
Li Y N, Tang J, Hu X T, *et al*. Applications of pulsed laser microfabrication technology in MEMS[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2005, 27 (2): 185-189.
- [23] Zhou L, Beck M, Katzen H H, *et al*. The effect of slider texture on the tribology of near contact recording sliders[J]. *Tribology Letters*, 2004, 16 (4): 297-304.
- [24] Suh A Y, Lee S C, Polycapou A A. Adhesion and friction evaluation of textured slider surfaces in ultra-low head-disk interface[J]. *Tribology Letter*, 2004, 17 (4): 739-749.
- [25] Schreck S, Zum Gahr K H. Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 247: 616-622.
- [26] 宋起飞,周宏,李跃,等.仿生非光滑表面铸铁材料的常温摩擦磨损性能[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26 (1): 24-26.
Song Q F, Zhou H, Li Y, *et al*. Friction and wear properties of cast-iron material with bionic non-smooth surface under normal temperature[J]. *Tribology*, 2006, 26 (4): 374-378.
- [27] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17 (4): 733-737.
- [28] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components[J]. *Tribology Transaction*, 2002, 45: 444-449.
- [29] 温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].北京:清华大学出版社,2002.

- [30] Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors[J]. *Tribology International*, 2006, in public: 1-4.
- [31] 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: 219-225.

Study of Laser Surface Texturing for Improving Tribological Properties

WAN Yi, X DNG Dang-sheng

(*Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: Laser surface texturing as an approach for the application of sliding contact components has provided very outstanding tribological performance. This paper introduces laser texturing processing and tribological status of laser surface texturing in industry. The effect of laser-textured structural factors such as shape, diameter, depth, orientation and density on friction mechanism and lubricating state was discussed. With the integration of advanced coating technologies with laser texturing, lower friction coefficient can be achieved under mixed-boundary lubricated condition. It was suggested to focus on the theoretical research of laser-textured optimal parameter by simulating and computing to achieve lubricating demands under practical working condition.

Key words: laser, surface texturing, lubrication, tribology

Author: X DNG Dang-sheng, male, born in 1960, Professor, e-mail: xiongds@163.com