

## 边界润滑条件下表面微细结构减摩特性的研究\*

王晓雷 王静秋 韩文非

(南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室 江苏南京 210016)

**摘要:** 表面结构 (Surface texture) 已被证明是一种提高表面承载力和改善表面摩擦学特性的有效方法。然而在边界润滑条件下, 结构对表面摩擦性能的影响机制仍未明确。利用纳米压痕仪在碳钢表面制作了具有不同密度和深度 (125 ~ 500 nm) 的划痕的点阵, 并通过改进的四球试验机对其在边界润滑下的摩擦性能进行了评价。试验载荷为 100 ~ 300 N, 相对滑动速度为 0.19 ~ 1.33 m/s。研究发现: 在边界润滑条件下, 深度为 125 nm 的低密度“划痕”点阵具有良好的减摩效果。

**关键词:** 表面结构; 边界润滑; 摩擦; 划痕

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2007) 12-036-4

## Effect of Surface Texture on Friction Reduction under Boundary Lubrication

Wang Xiaolei Wang Jingqiu Han Wenfei

(Jiangsu Key Laboratory of Precision & Micro-manufacturing Technology,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Surface texture has proven to be effective to improve the load carrying capacity and tribological properties of contacting surfaces. However, it is still unclear how surface texture influences the tribological properties under boundary lubrication condition. Five kinds of scratch patterns were fabricated on the steel surface with various depth and density (125 ~ 500 nm) by a nano-indenter, and their tribological properties were evaluated under boundary lubrication using a modified four-ball tester at the load of 100 ~ 300 N and relative sliding speed of 0.19 ~ 1.33 m/s. It is shown that a low dense pattern of scratches with the depth of 125 nm has an obvious friction reduction effect.

**Keywords:** surface texture; boundary lubrication; friction; scratch

纳米技术的出现开创了技术革命的新时代。与此同时, 世界在能源、航空航天、运输等领域仍然面临着效率、可靠性和耐久性的挑战。1999年美国能源部披露: 美国车辆发动机及传动系统减少摩擦与磨损, 每年可节约 1 200亿美元<sup>[1]</sup>。摩擦与磨损仍然是影响世界经济的重要因素。

减小摩擦提高能源效率始终是摩擦学工作者追求的目标。近半个多世纪以来, 科学家们在空气动力学、减摩和耐磨材料、表面镀层、润滑油和减摩添加剂方面已取得巨大进展。相对而言, 摩擦副表面的物理和化学结构的设计仍是一个薄弱环节。

表面结构 (Surface texture), 即在摩擦面上加工出具有一定尺寸和排列的凹坑或微小沟槽的点阵, 已经被证明是改善表面摩擦学特性的一个有效手段。表面结构的利用已有悠久的历史。如滑动轴承轴瓦上人

为的“刮痕”; 发动机气缸壁上 45° 倾斜的加工条纹; 以及高尔夫球上的浅坑都是降低摩擦的有效手段。激光、微小磨粒喷射以及 MEMS 等现代加工技术的发展, 使得对不同材质表面微米甚至纳米尺度表面结构的精确加工成为可能, 为表面结构的应用拓展了全新的空间。1991年 Ranjan 在计算机硬盘盘片的起动停止区 (Start/stop zone) 采用激光技术加工了由直径 20 μm, 深 10 nm 左右的凹坑组成的点阵, 成功地降低了盘片与磁头的吸附力, 减小了摩擦, 延长了使用寿命<sup>[2]</sup>。2000年本田公司采用微小陶瓷球高速喷射的方法处理活塞的摩擦面。该方法形成的随机分布的凹坑 (Micro dimple, 直径 200 μm, 深数微米) 呈现出明显的减摩效果, 仅此处理一项, 就降低发动机整体机械损失达 2.2%<sup>[3]</sup>。

就机制而言, 人们研究最为充分的是流体动压润滑机制<sup>[4]</sup>。即每个微小形貌都可以认为是一个微小的流体动压润滑轴承, 在相对滑动过程中产生额外的流体动压力, 从而促进表面流体润滑的形成, 增加表面的承载能力。实验已证明, 在相对高速轻载的接触条

\*基金项目: 国家 863 计划项目 (2006AA04Z321)。

收稿日期: 2007-07-18

作者简介: 王晓雷 (1963—), 男, 教授, 博士。E-mail: xl\_wang@nuaa.edu.cn.

件下，表面织构的流体动压效果明显。本文作者曾对水润滑下碳化硅陶瓷的承载能力及表面织构的影响进行过系统的研究。通过实验获得的表面织构特征参数对承载能力的影响规律与按流体动压理论得到的理论分布呈现类似的趋势，说明即使在水润滑条件下，通过表面织构获得的流体动压润滑效果是显著的<sup>[5]</sup>。

在非液体润滑的条件下，表面织构的工作机制包括：容纳磨损颗粒，减少由于磨粒耕犁作用而产生的高摩擦<sup>[6]</sup>；以及在硬盘和微小机电系统等场合，减少表面的接触面积，从而降低两表面间表面力的作用等<sup>[2]</sup>。

边界润滑条件下表面织构的作用及其工作机制是近年来人们开始关注的一个焦点。在相对低速重载条件下，两表面间的流体动压效果无足轻重，而接触表面间的边界摩擦特性决定着整体的摩擦特性。由于边界润滑条件下的摩擦因数较高，且许多大型机械的摩擦副工作于这种状态，实现边界润滑条件下摩擦特性的改善具有重要意义。目前针对边界润滑条件下的表面织构的研究还处于起步阶段，对于边界条件下织构的润滑机制，最一致的认识是织构可以作为润滑液的存储空间，在需要时为周围的接触面提供润滑<sup>[7]</sup>。但对于什么是织构设计的关键参数，目前还没有统一的认识。

本研究作者利用纳米压痕仪进行了金属表面的织构加工，对“划痕”状织构及其摩擦学特性进行了初步研究。

1 实验设计

1.1 实验方法

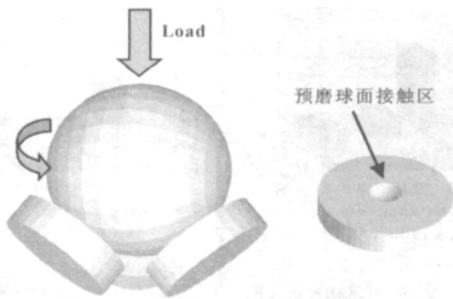


图 1 试样接触条件

Fig 1 Specimens and contact condition

为控制实验条件为边界润滑或以边界润滑为主的混合润滑，采用钢球为上试验件，盘状试样为下试验件。摩擦试验在改装后的四球试验机上完成，试样的接触条件如图 1 所示，球在垂直载荷的作用下与下面 3 个盘状试样接触，球受驱动绕垂直轴转动。上试样为 25 级 ANSI E-52100 钢球，直径 12.7 mm，硬度 HRC 64 ~ 66。下试样为 52100 钢经调质处理，直径

6.35 mm，厚度 2.5 mm。为避免点接触产生剧烈的磨损，盘状试验件上的接触点在试验前进行了球面化预磨，如图 1 所示。球面接触区的直径为 0.5 mm 左右。

1.2 表面织构的设计及制作

利用 Hysitron 公司的纳米压痕仪进行了本研究中表面织构的制作。通过控制金刚石压头的垂直力以及捩头的横向运动距离，可使金刚石压头在试样表面产生如图 2 所示的划痕。划痕深度和宽度可通过垂直力控制，其长度由横向运动长度控制。通过位置编程可在试样表面加工出按一定规则排列的“划痕”的点阵，即为本研究的织构。

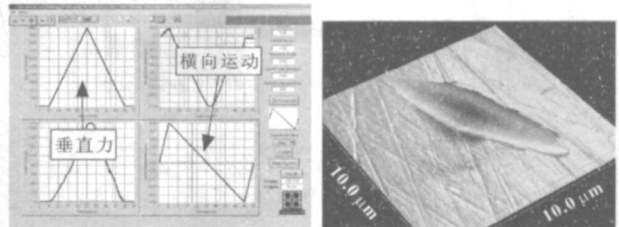


图 2 垂直力和横向运动方向及“划痕”的 AFM 图像

Fig 2 The functions of normal load and lateral movement of the indenter and the AFM image of a scratch

采用纳米压痕仪制作表面织构的原因是：（1）已有实验结果表明，凹坑的深度与直径的比值是影响其摩擦学特性的重要参数，采用此方法可有效控制几何参数。（2）采用划痕法可以在不增加深度的前提下增大凹坑的面积。

实验中制作了 5 种具有不同深度和密度的织构。表 1 列出了其深度，间隔以及织构的标识符。

表 1 5 种织构特征及标识符

Table 1 The symbol and geometric feature of the patterns

织构	间隙/ $\mu\text{m}$	深度/ $\text{nm}$	标识符
T11	$a = 43, b = 56$	125	
T13	$a = 43, b = 56$	500	
T22	$a = 30, b = 40$	235	
T31	$a = 23, b = 28$	125	
T33	$a = 23, b = 28$	500	

如果设 T11 和 T13 的织构密度（单位面积内的划痕数）为  $D$ ，则 T22 的密度为  $2D$ ，T31、T33 的密度为  $4D$ 。

采用轻质矿物油作为润滑剂，其 40 时的运动粘度为  $25.1 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。为防止剧烈磨损，减少磨损对实验结果的影响，在润滑油中加入 2% 的抗磨添加剂和 1% 的抗氧化添加剂。

### 1.3 测试方法

试样的跑合及测试过程如图 3 所示。试样从 500 r/min 开始旋转，1 min 之内加载至试验值，运行 5 min 作为跑合，然后在 500 r/min (0.19 m/s)，1 500 r/min (0.54 m/s)，2 500 r/min (0.95 m/s)，3 500 r/min (1.33 m/s) 每一个转速停留 1 min 记录摩擦力。

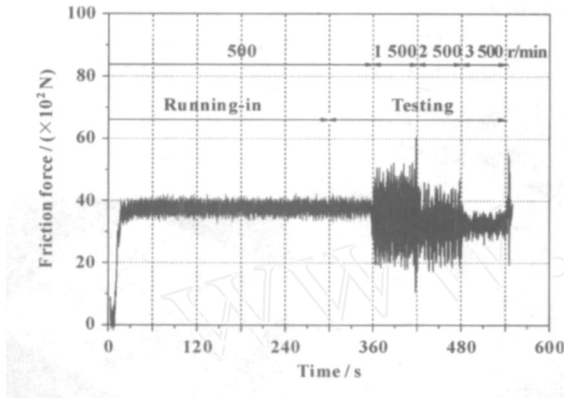


图 3 跑合及测试过程

Fig 3 Running-in and test procedure

实验中，依次在 100, 200 和 300 N 的垂直载荷下，重复上述过程以测得不同载荷和转速条件下的摩擦特性。在垂直载荷为 100, 200 和 300 N 时，球与下试验件的平均接触压力分别为 203, 407 和 610 MPa。

### 2 实验结果与讨论

实验得到的不同载荷和转速条件下的摩擦因数曲线如图 4 所示。

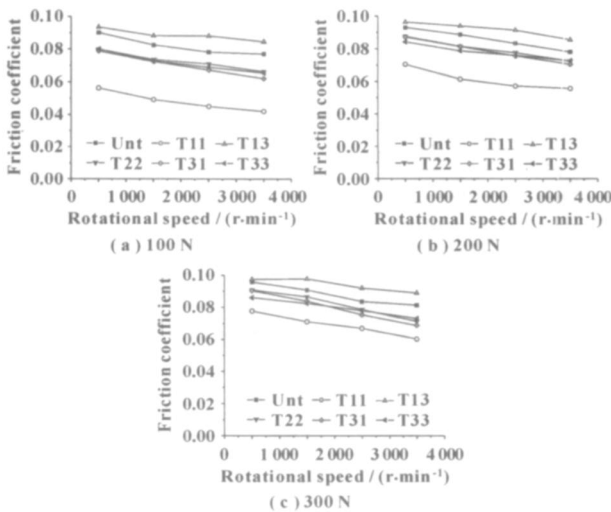


图 4 不同载荷和转速下的摩擦因数曲线

Fig 4 Friction coefficients at different load and rotational speed

### 2.1 速度的影响

在 500 r/min 下，无织构表面的摩擦因数在 0.09 ~ 0.1 之间，表明表面接近边界润滑状态，边界润滑的特性决定着总体的摩擦特性。

随着旋转速度的增加，所有表面的摩擦因数均有所下降，显示出随着速度的增加，由于相对滑动产生的流体动压效果逐渐加强，导致实际接触面积逐渐减少。无论有无织构，所有摩擦因数随速度的下降率几乎相同，显示出对所有表面，速度的影响程度没有明显区别。

### 2.2 表面织构的影响

同无织构表面相比，本研究有一种织构 T13 (低密度，500 nm 深) 的摩擦因数有所上升，其余 4 种织构具有显著的减摩效果。其中以 T11 (低密度，125 nm 深) 的减摩效果最为显著。在 100 N、3 500 r/min 条件下，与无织构表面相比，降低摩擦因数达 45%，在 300 N、500 r/min 的低速重载条件下，其摩擦因数的降低幅度仍达 18% 左右。

### 2.3 载荷的影响

图 5 为转速为 500 r/min、载荷分别为 100 和 300 N 条件下，各织构表面的摩擦因数降低率。对 T11 而言，在 100 N 载荷下，表面织构可导致摩擦因数降低 37%，但当载荷增加至 300 N 时，T11 的减摩效果下降至 18%。T13, T22, T31 与 T11 类似，减摩效果下降 1/2 左右。显示出在高接触压力条件下利用表面织构降低摩擦的难度要高于低接触压力条件。

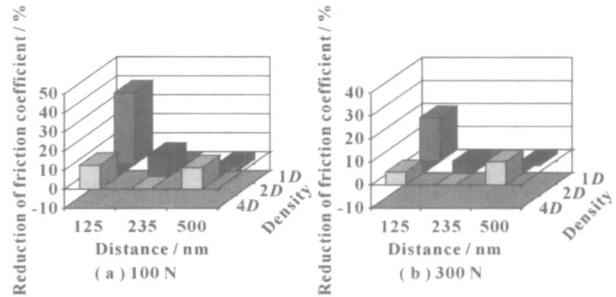


图 5 转速为 500 r/min 时不同载荷下织构的减摩效果

Fig 5 The friction reduction effects at different load and under the rotational speed of 500 r/min

与此相比，高密度，500 nm 深的织构 T33 在 100 N、500 r/min 时的减摩效果为 11.2%，在 300 N 时，仍达到 10.1%，显示出不同深度和密度的组合产生的不同效果。

### 2.4 边界润滑条件下的织构工作机制的分析

在本实验条件下表面织构可能的工作机制包括：

- (1) 随表面的磨损或变形，凹坑的体积缩小而凹坑

中存储的油液被挤出, 从而形成挤压膜; (2) 在相对滑动过程中, 存储在凹坑中的油液在摩擦力的驱动下流出凹坑, 从而形成对周围表面的润滑; (3) 结构的加工增加了接触面的粗糙度, 特别是“划痕”两边的飞边会在一定程度上增加摩擦。

对 T11而言, 凹坑的深度最小, 凹坑的体积亦为最小。所以, 由于磨损或变形引起的凹坑的体积变化率最大, 由此产生的挤压膜效应可能是其最佳减摩效果的主要原因。但随试验过程的磨损, 凹坑逐渐消失, 如图 6所示。所以在 300 N 载荷下, 其减摩效果明显小于 100 N 载荷的效果。

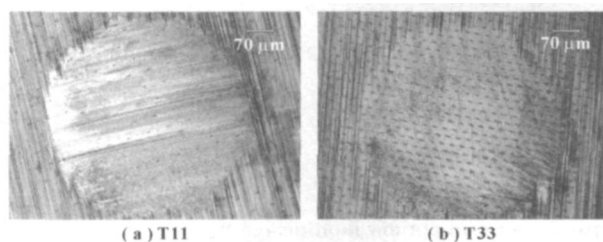


图 6 试验后 T11和 T33的光学显微镜照片 (300 N)

Fig 6 Optical images of T11 and T33 after the test of 300 N

对于 T33而言, 凹坑的深度和密度均为本实验中最大。一方面, 凹坑中的油液可为接触面提供良好的润滑。另一方面, 由于表面粗糙化引起的摩擦的升高也应高于其它试样。所以, 在 500 r/min、100 N 条件下, 其减摩效果并不比其它织构显著。但当载荷增至 300 N 时, 凹坑的飞边由于磨损而消失, 而其油液的存储能力开始显示出润滑效果, 所以在其它织构存在减摩效果明显降低的同时, T33 仍保持着 10% 的减摩

效果。

### 3 结论

为改善边界润滑条件下金属的摩擦学特性, 利用纳米压痕仪制作了具有不同深度和密度的“划痕”状表面织构, 并进行了摩擦学评价。实验结果表明, 具有 125 nm 深度的低密度“划痕”点阵获得了良好的效果, 在 3 500 r/min、100 N 条件下, 其摩擦因数较无织构表面降低了 47%; 在 500 r/min、300 N 的低速重载条件下, 获得降低摩擦因数 18% 的效果。

### 参考文献

- [1] 张嗣伟. 无所不在的摩擦大有可为的摩擦学 [N]. 中国教育报, 2005 - 03 - 07.
- [2] R Ranjan, D N Lambeth, M Tromel, et al Laser Texturing for Low Flying Height Media [J]. J Applied Physics, 1991, 69 (8): 5745 - 5747.
- [3] H Oghara, et al Technology for Reducing Engine Rubbing Resistance by Means of Surface Improvement [J]. HONDA R & D Technical Review, 2000, 12 (2): 93 - 98.
- [4] D B Hamilton, J A Walwit, C M Allen Hamilton. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. J Basic Engineering, 1966, 88 (1): 177 - 185.
- [5] Wang X, et al Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water [J]. Trib Int, 2003, 36: 189 - 197.
- [6] N P Suh, M Mosleh, P S Howard Control of Friction [J]. Wear, 1994, 175 (1/2): 151 - 158.
- [7] U Pettersson, S Jacobson Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding [J]. Tribology Letters, 2004, 17 (3): 553 - 559.

(上接第 29 页)

- [5] 周飞, 戴振东, 加藤康司. 碳基薄膜水润滑性能的研究进展 [J]. 润滑与密封, 2006 (7): 185 - 195.  
Zhou Fei, Dai Zhendong, Kato K Progress in Water Lubrication of Carbon-based Coating [J]. Lubrication Engineering, 2006 (7): 185 - 195.
- [6] H Ronkainen, S Varjus, K Holmberg Friction and wear properties in dry, water-and oil-lubricated DLC against alumina and DLC against steel contacts [J]. Wear, 1998, 222: 120 - 128.
- [7] J C Sánchez-López, M Belin, C Donnet, et al Friction mechanisms of amorphous carbon nitride films under variable environments: a triboscopic study [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 160 (2/3): 138 - 144.
- [8] H Ronkainen, S Varjus, K Holmberg Tribological perform-

ance of different DLC coatings in water-lubricated conditions [J]. Wear, 2001, 249: 267 - 271.

- [9] 高鹏, 徐军, 邓新绿, 等. 微波 ECR 全方位离子注入制备类金刚石碳膜的结构及摩擦学性能研究 [J]. 物理学报, 2005, 54 (7): 3241 - 3246.  
Gao Peng, Xu Jun, Deng Xinlu, et al Structure and tribology properties of diamond-like carbon films prepared by microwave electron cyclotron resonance plasma source ion implantation [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54 (7): 3241 - 3246.
- [10] Zhang W, Tanaka A, Wazumi K, et al Structural, mechanical and tribological properties of diamond-like carbon films prepared under different substrate bias voltage [J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11: 1837 - 1844.