

文章编号: 1004-4353(2016)02-0165-04

不同密度的微凹波纹表面织构的摩擦特性

汤梓铭, 任靖日*

(延边大学工学院 机械工程系, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为研究不同密度的微凹波纹表面织构的摩擦特性,首先利用激光表面织构技术,对轴承钢试样表面进行微凹波纹织构化处理;其次采用销-盘摩擦副接触方式,在常温、常压及液体润滑的条件下,对不同密度的微凹波纹表面织构进行摩擦试验;最后借助扫描电子显微镜观察其表面形貌,并利用 Stribeck 曲线分析在不同实验条件下不同密度的微凹波纹织构表面的摩擦特性. 结果表明:在一定转速范围内,微凹波纹表面织构的减摩效果随压力的增加而提高,摩擦系数值随着微凹波纹密度的增加而降低,其中密度为 22.37% 的微凹波纹织构的减摩效果最好.

关键词: 微凹波纹表面织构; Stribeck 曲线; 摩擦特性

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A

Friction property for different density of
micro-wave surface texture

TANG Ziming, REN Jingri*

(Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In order to study the friction characteristics of micro-wave surface texture with different densities, the experiment was conducted as following. At first, the micro-wave surface texture on bearing steel were manufactured by the laser texture technology. Then, by using pin-on-disk type friction pairs, the friction experiments of micro-wave surface texture with different densities are carried out under the conditions of normal temperature, atmosphere pressure and fluid lubrication. Finally, by using SEM to observe the surface morphology and the Stribeck curves in different experiment conditions, the friction properties of micro-wave surface texture with different densities are analyzed. The results indicate that in a certain speed range, the reducing friction of micro-wave surface texture increases along with the increasing pressure, the friction value of micro-wave surface decreases with the increasing density and the 22.37% micro-wave shows the best reducing friction effect.

Keywords: micro-wave surface texture; Stribeck curve; friction property

表面织构^[1]是在材料表面上加工制备出具有一定尺寸和排列方向的图案阵列. 研究表明,表面织构化对延长机械使用寿命,提高材料摩擦副表面性能和润滑效果具有显著效果,越来越受到人们的重视^[2-5].
由于表面织构制造方法多、图形样式不同,且其排列方式、织构密度、织构径深比等因素存在差

异,其产生的摩擦效果有很大不同,因此针对不同表面织构图形寻求最佳表面图形参数一直成为国内外学者的研究重点之一,并已取得了一些研究成果^[6-10]. 刘一静等通过在活塞裙表面制作不同直径、不同深度的微米级表面织构,在模拟发动机的运行条件下,证明了表面织构在活塞/缸套的摩擦过程中具有很好的减摩效果^[11];纪敬虎等采用

激光器在 45 钢试样表面制备了 V 形凹槽织构, 利用销盘摩擦方式考察了 V 形凹槽的几何参数对表面摩擦性能的影响^[12]. 在目前众多表面加工技术中, 激光表面织构技术因可以在大气环境中进行, 并且制作简单, 无需掩膜耗时短, 加工对象范围宽, 易于控制尺寸和形貌而得到广泛应用^[13]. 鉴于此, 本文利用激光织构技术在轴承钢表面制作不同密度的微凹波纹表面织构, 在不同的试验条件下对其进行销-盘摩擦试验, 研究织构化试件在润滑油下的摩擦特性, 并利用 Stribeck 曲线分析润滑状态的变化, 用图像比较获取最佳的微凹波纹织构密度, 旨为轴承钢表面微凹波纹织构的设计和相關应用提供参考.

1 试验部分

1.1 试样制备

销试样采用尺寸为 $\phi 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的轴承钢. 利用激光加工系统加工出设计好的微凹波纹织构. 激光器的主要工作参数为: 波长 $1\ 064\text{ nm}$, 功率 13 kW , 频率 200 Hz . 在激光表面织构工艺实验前, 试样表面需要经过研磨抛光, 并采用无水乙醇进行去污处理. 通过调节光斑迁移距离来获得不同密度分布的波纹表面织构试样, 试样如图 1 所示. 圆盘试样采用尺寸为 $\phi 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的轴承钢, 如图 2 所示. 销盘试样硬度为 HRC60, 微凹波形间距 $W=100\text{ }\mu\text{m}$, 销试样的扫描电子显微镜 (SEM) 图如图 3 所示, 表 1 为试样的各参数和摩擦试验条件.

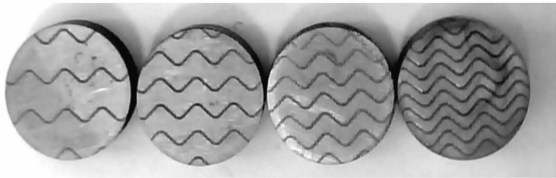


图 1 试样照片

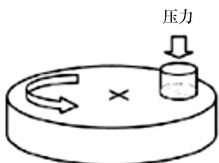


图 2 销-盘摩擦副接触示意图

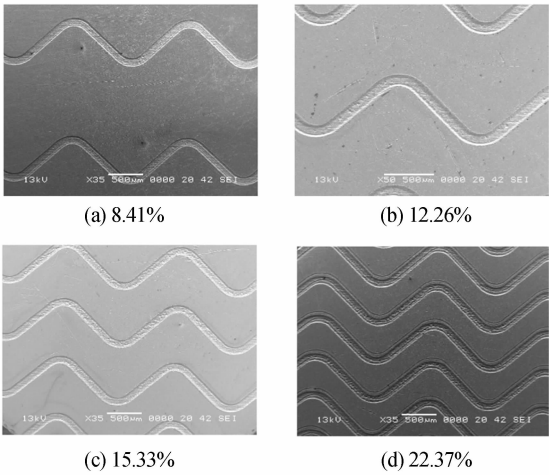


图 3 不同密度的微凹波纹织构形貌的 SEM 照片

表 1 微凹波纹织构摩擦试验条件

参数	工作条件
接触方式	销盘
圆盘材料	轴承钢
销材料	轴承钢
销直径/mm	4
销端面凹痕密度/%	8.41, 12.26, 15.33, 22.37
销端面凹痕深度/ μm	2
销端面粗糙度/ μm	Ra 0.008, Ramax 0.016
圆盘表面粗糙度/ μm	Ra 0.039, Ramax 0.052
圆盘直径/mm	60
负载范围/N	13.8~92
速度范围/(r/min)	9.6~143.3
润滑剂	石蜡 125/135
温度	室温

1.2 试验方法

摩擦试验用瑞士产 CSEM 摩擦试验仪, 试验采用销-盘摩擦副接触方式, 其试样间油润滑接触如图 4 所示. 试验机转速为 $9.6\sim 143.3\text{ r/min}$, 载荷为 $13\sim 92\text{ N}$. 用测力传感器检测摩擦力, 并利用模拟与数字转换器 (A/D) 转换数据, 由计算机计算摩擦系数并绘制摩擦系数变化曲线. 为了得到良好的试验数据, 在每次试验前, 预先进行 5 min 试运转, 然后开始测定所需要的试验数据.

为了分析减摩因素以及确定在不同实验条件下不同波纹密度的微凹波形表面的摩擦特性, 采用 Stribeck 曲线分析其摩擦特性. Stribeck 曲线是用摩擦系数与无量纲参数的变化来区别润滑状态, 其关系式^[14]为 $S=\frac{\mu v D}{L}$, 式中 S 为无量纲参

数, μ 为动力黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); v 为滑动速度 (m/s), D 为接触直径 (m), L 为垂直载荷 (N).

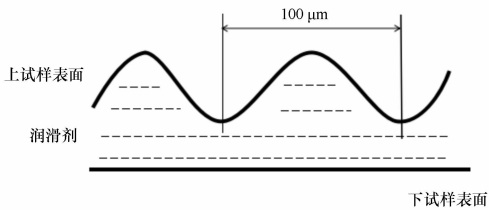


图 4 试样间油润滑条件示意图

2 结果与分析

利用所得试验数据绘制的 Stribeck 曲线如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 润滑区域形成了从边界润滑到流体润滑的转化过程. 图 5(a) 是密度为 8.41% 的微凹波纹结构. 由图 5(a) 可以看出: 随着横坐标值的增加, 摩擦系数呈逐渐降低并趋于平缓趋势; 当载荷为 69.4~92 N 时, 曲线在横坐标为 $1\text{E}-6$ 前处于边界润滑、混合润滑状态, 然后进入流体润滑状态; 当载荷为 13.8~55.4 N 时, 曲线在横坐标为 $1\text{E}-5$ 前处于边界润滑、混合润滑状态, 然后只有很小的一部分进入流体润滑状态. 通过比较可知, 在载荷较大的情况下润滑

区域会更早进入流体润滑状态, 减摩效果更好. 产生图 5 所示的原因是: 由于最初形成的油膜厚度较薄, 微凹波纹的存在增加了表面粗糙度, 因而在相互运动中增大了阻力, 摩擦系数较大; 随着润滑油膜厚度增加, 产生的油膜能够抵抗部分载荷, 摩擦系数逐渐减小; 当油膜在微凹部分中完全形成时, 摩擦系数变得稳定.

图 5(b)、(c)、(d) 是密度为 12.26%、15.33% 和 22.37% 的微凹波纹结构. 由图可知, 密度为 12.26% 和 15.33% 的摩擦系数下降的幅度比密度为 8.41% 时更快, 且曲线均在横坐标为 $1\text{E}-6$ 处进入流体润滑状态, 说明密度的增加对摩擦系数有一定的影响. 通过比较可知, 密度为 22.37% 的微凹波纹结构在横坐标为 $1\text{E}-7$ 处就进入流体润滑状态, 且绝大部分摩擦系数值在 0.001~0.005 范围内, 符合流体润滑下规定的摩擦系数范围; 因此, 本实验中密度为 22.37% 的微凹波纹结构的摩擦特性表现为最好. 通过图像可以得出, 微凹结构密度越小, 润滑油在摩擦副间起到润滑的效果就越小, 但随着结构密度的增加, 微凹结构产生的油膜区域面积增大, 润滑效果增强.

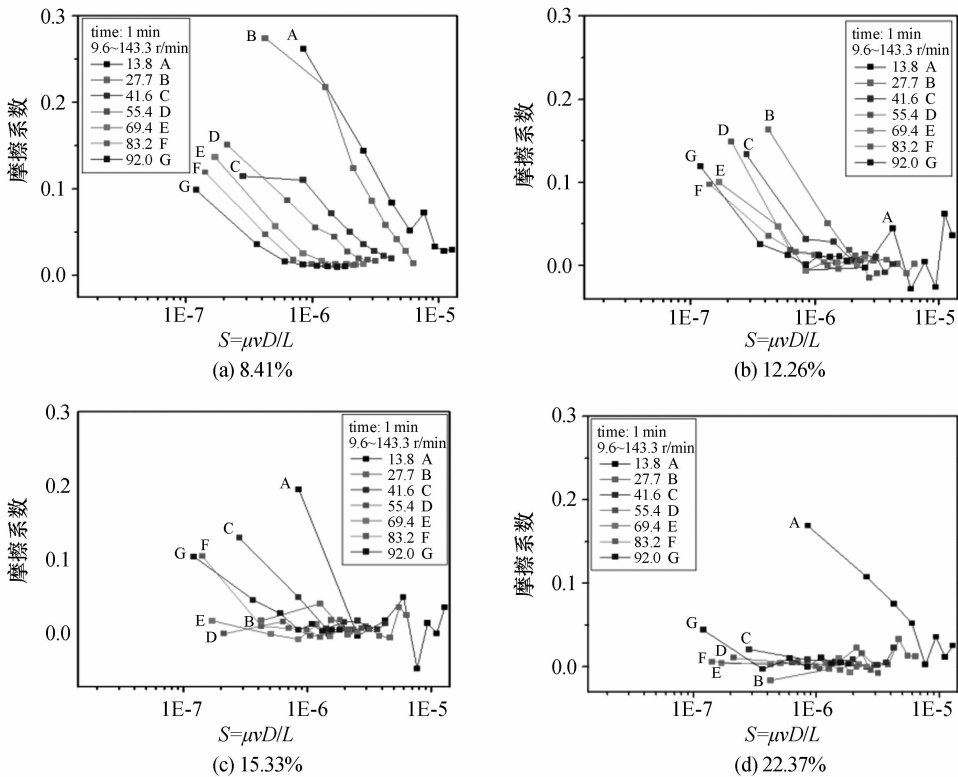


图 5 不同密度的微凹波形图形的 Stribeck 曲线

3 结论

本文通过激光加工方式在轴承钢表面制备出不同密度的微凹波纹图形织构,研究其在润滑油下的摩擦特性.结果表明:微凹波纹图形能够降低表面的摩擦系数,且随着载荷的增加摩擦系数降低;在波纹图形的其他几何参数相同的情况下,随着微凹波纹织构密度的增加,摩擦系数减小并较快进入流体润滑状态;通过对 4 组不同密度的微凹波纹织构进行比较发现,密度为 22.37% 的微凹波纹织构的摩擦特性最好.本文对波纹图形织构减摩效果作了初步的研究,今后将针对其他复杂织构图形或对几种不同的织构图形在相同试验条件下的摩擦特性进行研究.

参考文献:

[1] Etsion I, Halperin G, Brizmer V. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings[J]. Tribology Letters, 2004, 17(2): 295-300.

[2] Marchetto D, Rota A, Calabri L, et al. AFM investigation of tribological properties of nano-patterned silicon surface[J]. Wear, 2008, 265: 577-582.

[3] Sung I H, Lee H S, Kim D E. Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano-scale[J]. Wear, 2003, 254: 1019-1031.

[4] 历建全,朱华.表面织构及其对摩擦学性能的影响[J].润滑与密封,2009,34:94-97.

[5] 赵文杰,王立平,薛群基.织构化提高表面摩擦学性能的研究进展[J].摩擦学学报,2011,6:622-631.

[6] Etsion I, Burstein L. A model for mechanical seals with regular micro-surface structure[J]. Tribology Transactions, 1996, 39(3): 677-683.

[7] Wang X, Kato K, Adachi K. The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 294-301.

[8] 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.

[9] 张保森,张凯,周衡志.激光表面织构结构参数对其摩擦学性能的影响[J].热加工工艺,2014,24: 129-132.

[10] 王霄,张广海,陈卫,等.不同微细造型几何形貌对润滑性能影响的数值模拟[J].润滑与密封,2007, 8: 66-68.

[11] 刘一静,袁明超,王晓雷.表面织构对发动机活塞/缸套摩擦性能的影响[J].中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 866-877.

[12] 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, 4: 107-111.

[13] 万轶,熊党生.激光表面织构化改善摩擦学性能的研究进展[J].摩擦学学报,2006,6: 603-607.

[14] Dowson D. History of Tribology[M]. London: Longmans, 1979.