

文章编号: 1004-4353(2016)03-0241-05

# 微凹半圆图形表面织构的摩擦特性研究

闫萌萌, 张文倩, 任靖日\*

( 延边大学工学院 机械工程系, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 采用销-盘式摩擦试验机,在常温、常压及石蜡油润滑条件下,对不同密度的微凹半圆和圆图形织构进行摩擦特性试验. 利用 Stribeck 曲线分析接触压力、图形密度、几何形状、滑动方向以及图形间距对摩擦性能的影响. 结果表明,不同密度的微凹半圆图形织构,在 A、B 两个滑动方向下,摩擦系数的变化有明显的不同,但其变化会随着密度的增加而降低;微凹半圆图形织构的摩擦特性好于微凹圆形织构,当摩擦为 A 方向、密度为 15%、间距为 162  $\mu\text{m}$  时,微凹半圆图形织构的摩擦系数最小.

**关键词:** 微凹半圆图形; 微凹圆图形; 密度; Stribeck 曲线; 摩擦特性

**中图分类号:** TH117.1

**文献标识码:** A

## Study on the friction properties of micro patterned half-circle shape

YAN Mengmeng, ZHANG Wenqian, REN Jingri\*

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

**Abstract:** Tribological experiment on the micro patterned half-circle and circle shape of different density was carried out using pin-on-disc friction pair at normal pressure and temperature and liquid lubricating. The effects of contact force, density, geometry, sliding direction and shape spacing on tribological characteristics were analyzed by using stribeck curve. The result shows that different density of micro patterned half-circle shape on A and B sliding direction, the variation of friction coefficient was obvious differences, with the increase of the density, the variation of friction coefficient decreased. The density was 15%, the friction coefficient of A sliding direction was smallest, and the friction properties of micro patterned half-circle shape was better than micro patterned circle shape, the best spacing was 162  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** Micro patterned half circle shape; micro patterned circle shape; density; Stribeck curve; friction property

### 0 引言

近年来,随着纳米技术和超精密加工技术的不断发展,表面织构化技术<sup>[1]</sup>在降低摩擦系数的应用上取得了巨大进步,如活塞环、发动机气缸、滑动轴承、机械密封等. 早期的表面织构化技术主要是基于机械或化学方法<sup>[2]</sup>在接触面上加工出各种形状的微图形来实现,但此方法存在加工精度

低、加工质量差等缺点. 2002 年, G. Ryk 等<sup>[3]</sup>通过实验验证了激光表面织构化技术在改善零部件摩擦性能方面的优越性,但采用此方法加工出来的微图形容易出现毛刺、飞边等现象. 近年来,有学者研究发现照相平板印刷术及湿化学腐蚀方法在加工表面微图形方面具有加工质量好、加工效率高的特点,并利用该方法研究了微凹坑及交叉凹槽织构的摩擦特性,得出了微凹坑的最佳尺寸和

\* 通信作者: 任靖日(1960—),男,博士,教授,研究方向为机械摩擦学及表面工程.

密度以及交叉凹槽的最佳宽度、角度和间距<sup>[4-6]</sup>. 鉴于以上研究,本文利用照相平板印刷术及湿化学腐蚀方法得出了微凹半圆图形和微凹圆图形结构的 Stribeck<sup>[7]</sup>曲线,并利用该曲线分析了在不同密度的微凹半圆图形结构在 A、B 两个方向的摩擦特性以及微凹半圆与圆图形结构在不同密度、不同间距下的摩擦系数大小.

1 试验部分

1.1 试样制备

上试样均采用尺寸为 $\phi 6\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的黄铜圆柱销,下试样均采用尺寸为 $\phi 40\text{ mm}$ 的轴承钢圆盘.利用照相平版印刷术及湿化学腐蚀方法制作试样表面的规则微凹半圆图形和微凹圆图形的形貌,如图 1 所示.试样表面上的微凹半圆图形的密度为 5%、10%和 15%,微凹圆图形的密度为 10%、20%和 30%.上、下试样的硬度均为 60 HRC.

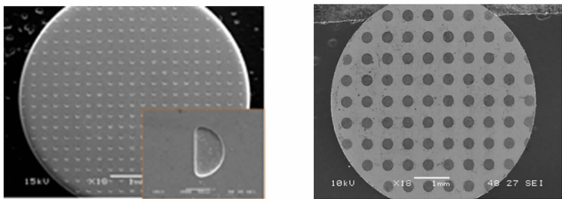
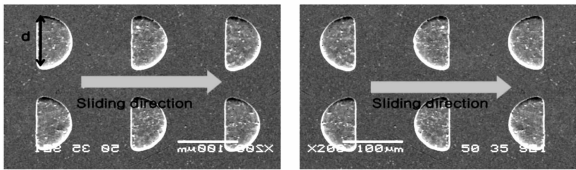


图 1 微凹半圆图形和微凹圆图形的表面形貌

1.2 试验方法

摩擦试验采用瑞士产 CSEM 摩擦试验仪;微凹半圆图形的滑动方向如图 2 所示;销-盘摩擦副接触方式如图 3 所示;实验在常温常压及石蜡油液体润滑下进行,转速范围为 9.6~143.3 r/min,载荷为 13.8~92 N,分 7 个载荷;其他摩擦实验条件见表 1.用测力传感器检测摩擦力,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.为了使实验数据更加合理准确,在每次实验开始时,预先进行 5 min 试运转,然后进行试验.采用 Stribeck 曲线分析不同密度的微凹半圆图形在不同润滑状态下的摩擦参数变化,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,其关系式为  $S = \frac{\mu v D}{L}$ ,式中  $S$  为无量纲参数, $\mu$  为动力黏度系数( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), $v$  为滑动速度( $\text{m/s}$ ), $D$  为接触直径( $\text{m}$ ), $L$  为垂直载荷( $\text{N}$ ).



(a) A 方向 (b) B 方向

图 2 微凹半圆图形的滑动方向

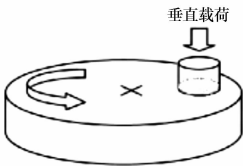


图 3 销-盘摩擦副接触示意图

表 1 微凹半圆图形和微凹圆图形结构摩擦试验条件

参数	工作条件
接触方式	销-盘
盘的材料	轴承钢
销的材料	黄铜
销上微凹半圆直径 $d/\mu\text{m}$	100
销上微凹半圆密度 $\rho/\%$	5, 10, 15
销上微凹半圆深度 $h/\mu\text{m}$	4-6
销表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	0.008Ra, 0.016Rmax
盘表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	0.039Ra, 0.052Rmax
盘的直径 $d/\text{mm}$	40
销的直径 $d/\text{mm}$	6
载荷范围 $w/\text{N}$	13.8~92
转速范围 $n/(\text{r/min})$	9.6~143.3
润滑剂	石蜡油
试验温度	室温

2 结果与分析

2.1 微凹半圆图形密度及方向对摩擦性能的影响

图 4(a)和(b)为 A、B 滑动方向下 5%密度的微凹半圆图形结构的 Stribeck 曲线.从图 4(a)和(b)中可以看出:在 5%密度下,A 方向曲线在无量纲参数小于  $10^{-6}$ 时摩擦系数呈迅速下降趋势,超过  $10^{-6}$ 后稍有上升后趋于平稳,显示出较好的减摩特性;而 B 方向的摩擦系数变化不明显.

图 4(c)和(d)为 A、B 滑动方向下 10%密度的微凹半圆图形结构的 Stribeck 曲线.从图 4(c)和(d)中可以看出:在 10%密度下,A 方向曲线在无量纲参数小于  $10^{-6}$ 时摩擦系数呈迅速下降趋势,超过  $10^{-6}$ 后稍有上升后趋于平稳;其摩擦系数整体稳定性好于 B 方向,显示出较好的减摩特性.

图 4(e)和(f)为 A、B 滑动方向下 15%密度的微凹半圆图形结构的 Stribeck 曲线.从图 4(e)

和(f)中可以看出,在 15%密度下,B方向与 A 方向的摩擦系数的变化趋势基本相同,但 B 方向的摩擦系数大于 A 方向,A 方向显示出较好的减摩特性。

由以上分析可知,在 A、B 方向下,微凹半圆图形的密度对摩擦系数有重要影响,本文实验中的最佳密度含量为 15%,即在该密度下 A 方向的摩擦特性较好。

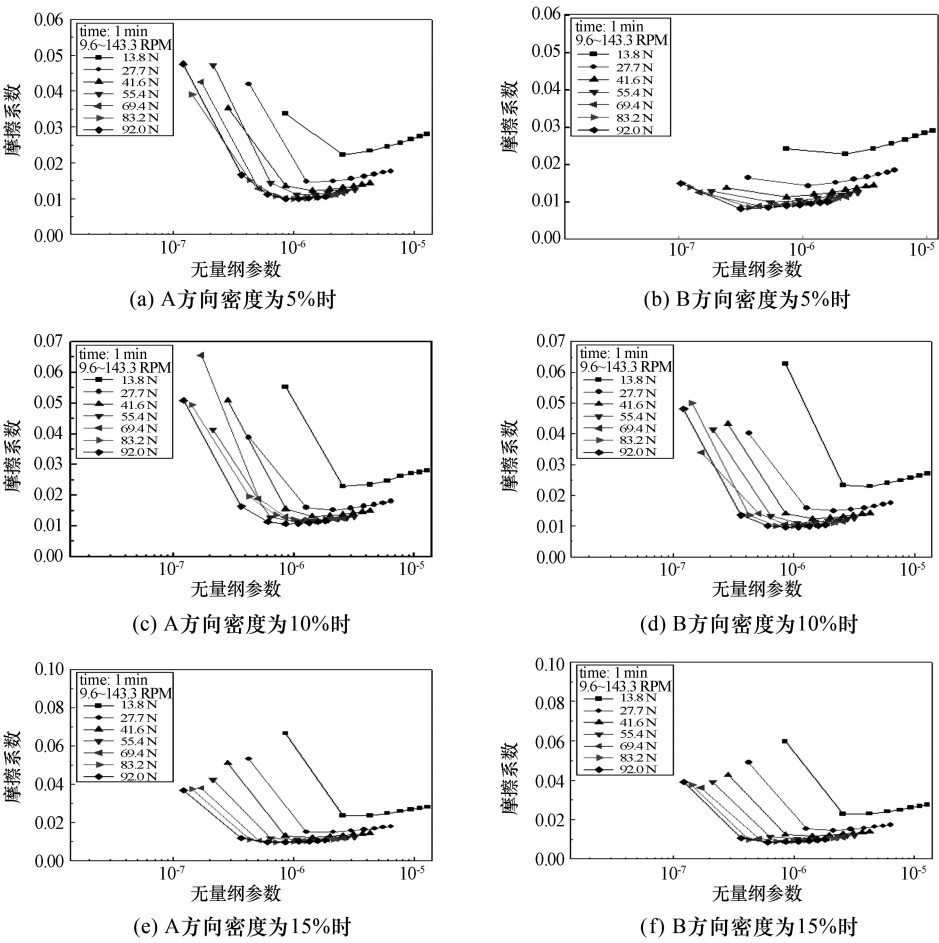


图 4 A、B 方向下不同密度的微凹半圆图形结构的 Stribeck 曲线

2.2 微凹圆图形密度对摩擦性能的影响

图 5 为不同密度微凹圆图形结构的摩擦系数曲线。从图 5(a)中可以看出,在结构间距小于  $200\text{ }\mu\text{m}$  时摩擦系数呈逐渐减小趋势,大于  $200\text{ }\mu\text{m}$  后略有上升,然后趋于平稳;从图 5(b)中可以看出,在间距小于  $200\text{ }\mu\text{m}$  时摩擦系数呈逐渐增大趋势,间距在  $200\sim 300\text{ }\mu\text{m}$  之间时摩擦系数变化不大,而大于  $300\text{ }\mu\text{m}$  后摩擦系数逐渐减小;从图 5(c)中可以看出,在间距小于  $200\text{ }\mu\text{m}$  时摩擦系数变化不大,在间距大于  $200\text{ }\mu\text{m}$  时摩擦系数逐渐减小。由以上可知,随着密度的增大,两凹痕的间距对摩擦系数有很大的影响,当密度为 30%、间距为  $400\text{ }\mu\text{m}$  时,摩擦系数最小。

2.3 几何形状及间距对摩擦性能的影响

图 6(a)和(b)为图形间距为  $280\text{ }\mu\text{m}$  时,密度为 5%的微凹半圆图形结构与密度为 10%的微凹圆图形结构的 Stribeck 曲线。从图 6(a)和(b)中可以看出,密度为 5%的微凹半圆图形结构的摩擦系数比密度为 10%的微凹圆图形结构的摩擦系数小得多,且密度为 5%的微凹半圆图形结构的摩擦系数更为稳定。

图 6(c)和(d)为图形间距为  $198\text{ }\mu\text{m}$  时,密度为 10%的微凹半圆图形结构与密度为 20%的微凹圆图形结构的 Stribeck 曲线。从图 6(c)和(d)中可以看出,此时二者的摩擦系数虽都不太稳定,但微凹半圆图形结构的摩擦系数明显小于微凹圆

图形结构.

图 6(e)和(f)为图形间距为 162  $\mu\text{m}$  时,密度为 15%的微凹半圆图形结构与密度为 30%的微凹圆图形结构的 Stribeck 曲线.从图 6(e)和(f)中

可以看出,密度为 15%的微凹半圆图形结构的摩擦系数变化趋势与密度为 30%的微凹圆图形结构的变化趋势基本相同,但 15%的微凹半圆图形结构的摩擦系数明显低于微凹圆图形结构.

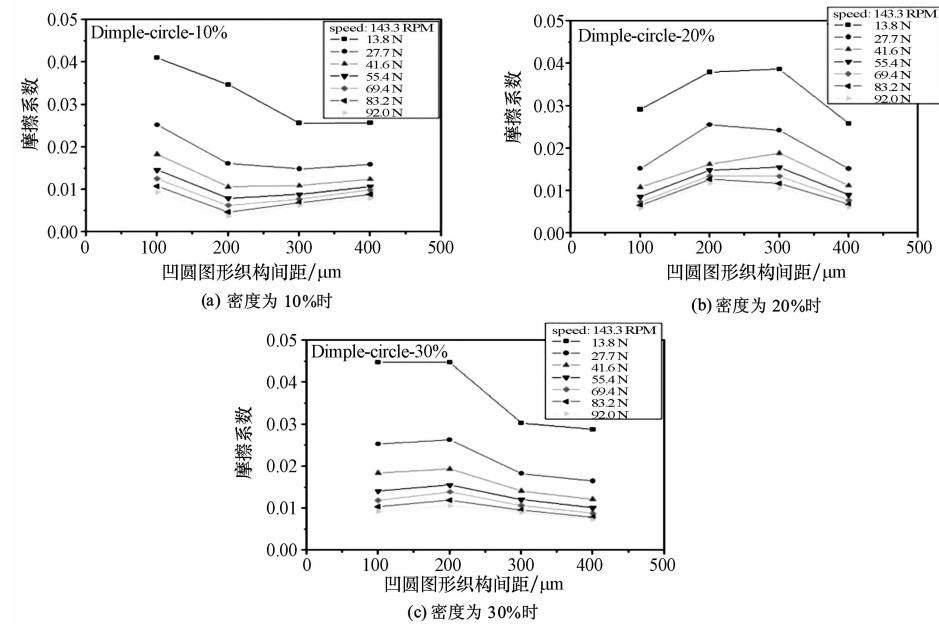


图 5 不同密度时微凹圆图形结构的摩擦系数曲线

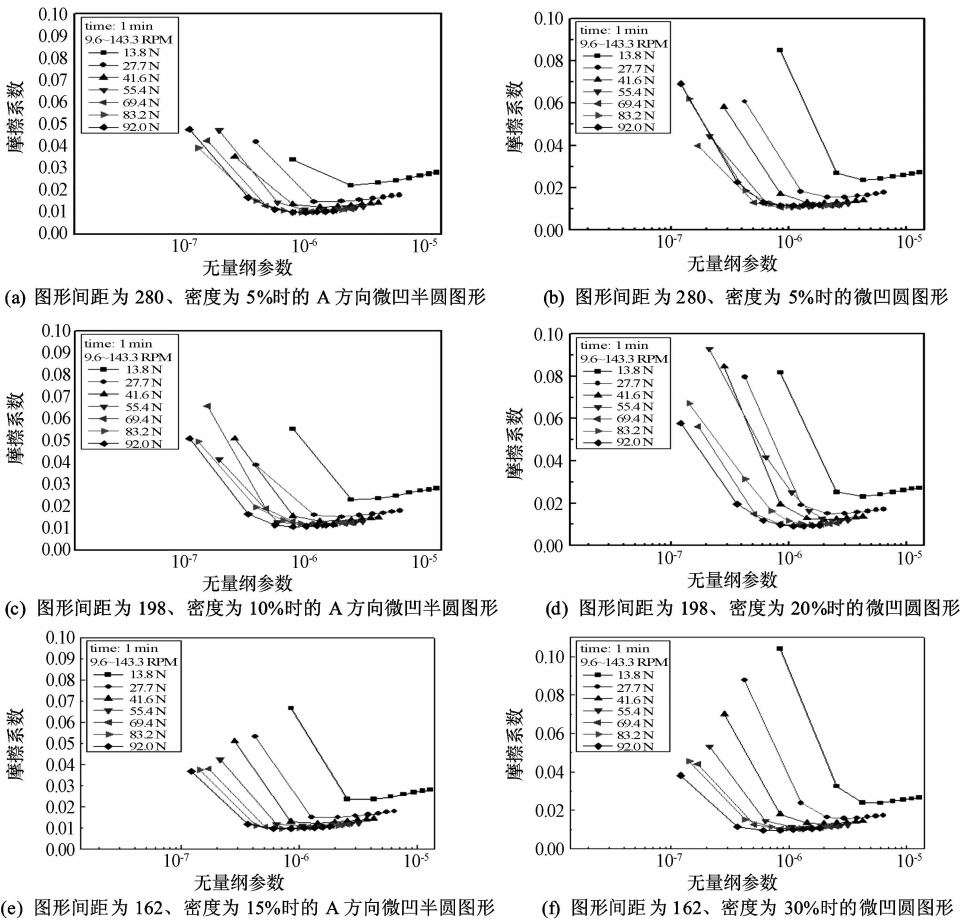


图 6 不同间距、不同密度的参微凹半圆图形与微凹圆图形结构的 Stribeck 曲线

由以上分析可知,微凹图形的几何形状和间距对摩擦系数都有重要的影响,在相同密度和间距下,微凹半圆图形织构的摩擦系数要明显低于微凹圆图形织构,微凹半圆图形的最佳密度和间距值分别为 15%和 162  $\mu\text{m}$ .

图 7 为不同间距、不同密度的微凹半圆图形织构与微凹圆图形织构的摩擦系数图. 由图 7 可以看出,间距为 162  $\mu\text{m}$ 、密度为 15%的微凹半圆图形织构与间距为 162  $\mu\text{m}$ 、密度为 30%的微凹圆图形织构的摩擦系数最低,但微凹半圆图形织构的摩擦系数相对更低.

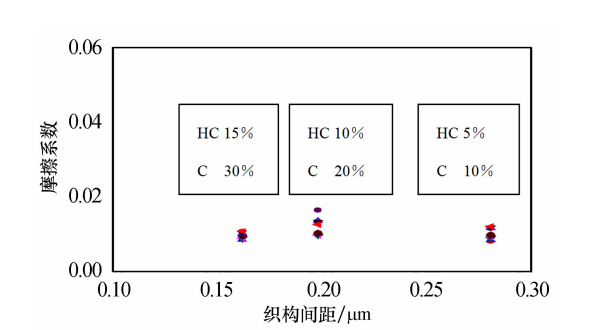


图 7 不同间距、不同密度的微凹半圆图形与微凹圆图形织构的摩擦系数

3 结论

通过上述分析可以得出以下结论: 1)不同密度的微凹半圆图形织构在不同方向上的减摩效果不同,A 方向的减摩特性优于 B 方向,且最佳密度是15%;2)图形间距相同情况下,微凹半圆织

构的减摩特性要好于微凹圆形织构,当间距为 162  $\mu\text{m}$ 、密度为 15%时微凹半圆织构的减摩特性最佳. 本文主要研究了微凹图形织构的滑动方向、密度、间距等因素对摩擦因素的影响,没有考虑微凹图形的大小、深度等因素,今后将对此做进一步的探讨.

参考文献:

[1] Ronen A, Etsion I, Kligerman Y. Friction-reducing surface texturing in reciprocating automotive components[J]. Tribology Transaction, 2001, 44 (3): 359-366.

[2] Galda L, Pawlus P, Sep J. Dimple shape and distribution effect on characteristics of stribeck curve[J]. Tribology International, 2009, 42:1505-1512.

[3] Ryk G, Kligerman Y, Etsion I. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(4):444-449.

[4] 任靖日,赵德金,蔡荣勳. 不同密度的微小凹痕减摩特性研究[J]. 润滑与密封,2008,33(8):23-24.

[5] Suh Min-soo, Chae Young-hun, Kim Seock-sam, et al. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction[J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1508-1517.

[6] 王晓雷,王静秋,韩文非. 边界润滑条件下表面微细织构减摩特性的研究[J]. 润滑与密封,2007(12): 36-39.

[7] 任靖日,赵德金,蔡荣勳,等. 混合及流体动力润滑下规则微小凹痕图形表面的摩擦特性研究[J]. 摩擦学学报,2008,28(3):198-202.