

PDM S表面织构润滑特性的研究

姜 亮, 马国亮, 王晓雷*

(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: 利用光刻-复模技术在 PDM S表面制作凹坑阵列型表面织构, 并采用球-盘式摩擦试验机对具有不同尺寸凹坑阵列的试样进行摩擦试验, 研究了软质材料表面织构在混合至流体动压润滑区域的润滑特性. 结果表明: 对于 PDM S材料, 凹坑直径是影响摩擦特性的主要因素之一. 与无织构试样相比, 在低速条件下 (0.005 m/s) 的混合润滑区域较小直径 ($d=50\ \mu\text{m}$) 的织构能够减小摩擦, 而较大直径 ($d=200\ \mu\text{m}$) 的织构表现出增大摩擦的效果. 在试验范围内凹坑的面积率越大, 表面织构的作用越显著.

关键词: PDM S; 软质材料; 表面织构; 混合润滑; 摩擦

中图分类号: TH 117.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2010)03-0262-06

Lubrication Properties of Surface Texture on PDM S

JIANG Liang MA Guo-liang WANG Xiao-lei*

(Jiangsu Key Laboratory of Precision &

Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Surface texture with different parameters was fabricated by the Lithography & Replica Molding technique on the soft material PDMS. The effects of surface texture on lubrication properties from mixed to hydrodynamic lubrication regimes were investigated by using a ball-on-disk tribometer. For PDMS, it was found that the diameter of dimples was one of the major factors which influence friction properties obviously. Compared with untextured sample, the pattern with small dimples (with a diameter of $50\ \mu\text{m}$) resulted a reduction of friction under mixed lubrication and at a low sliding velocity ($0.005\ \text{m/s}$), while the pattern with large dimples (with diameter of $200\ \mu\text{m}$) appeared to increase friction. Textures with high dimple area ratio (from 2.6% to 22.9%) have significances on tribological performance under experimental conditions.

Key words PDMS; soft material; surface texture; mixed lubrication; friction

软质材料的接触与摩擦现象普遍存在于人们的生活中, 例如汽车轮胎与地面^[1]、雨刮器与玻璃、轴与唇形密封圈等. 在大部分情况下, 摩擦力作为运动的阻力需要尽可能地减小. 因此, 提高软质材料润滑特性以减小摩擦的研究被日益重视. 上世纪 60 年代, Roberts 等^[2]采用玻璃-橡胶组成摩擦副进行摩擦试验, 发现在高载低速条件下的润滑膜厚度与弹流润滑膜理论值相一致. Vicente 等^[3-4]和 Bongaerts 等^[5]分别采用钢球-硅橡胶及 PDM S-PDM S 作为摩擦副, 实验证实了软质材料的润滑特性符合

Stribeck 曲线, 但不同表面粗糙度会使曲线发生偏移. 软质材料与硬质材料的弹性模量的差别, 使得相同条件下软质材料的变形较大. 实验研究表明, 这一现象很可能是导致软质材料在混合润滑和弹流润滑区域表现出的润滑特性与硬质材料有较大差别的主要原因之一^[6].

近几十年来, 表面织构技术已被证明是减小摩擦、提高承载能力的 1 种有效手段^[7]. 例如发动机气缸内的 45° 倾斜的网纹和高尔夫球表面的凹坑结构等, 都是利用表面织构减小摩擦的有效应用. 此外,

随着流体动压润滑区域的附加流体动压效应理论^[8]、干摩擦区域的容纳磨损颗粒理论^[9]以及边界润滑区域的“二次润滑”理论^[10]的相继出现, 以及大量的相关数值模拟计算^[11-13]和实验研究^[14-18]的进行, 表面织构技术已成为摩擦学研究的 1 个热点. 其中“二次润滑”理论认为在混合润滑条件下, 存在于表面织构中的润滑剂可作为二次补给源, 在摩擦副表面相对运动过程中被带入接触表面之间, 补充润滑剂的供给, 达到减小摩擦的作用. 然而, 这些研究绝大多数都是以金属、陶瓷等硬质材料为基础的, 对于同样应用广泛的软质材料而言, 针对表面织构润滑特性的研究却只有少量的理论计算^[19].

因此, 为了研究表面织构在软质材料上的润滑特性, 特别是在具有较大接触形变条件下的润滑特性和作用机理, 本研究在 PDMS 材料上制作了表面织构, 通过摩擦学试验开展了表面织构对软质材料润滑特性影响的初步研究.

1 实验部分

1.1 试样制备

PDMS 是一种低弹性模量的软质材料, 其全称为聚二甲基硅氧烷 [Poly(dimethylsiloxane)]. 由于具有低表面能、极好的耐久性、绝缘性和热稳定性而常用于制作高聚物微流控芯片和软光刻技术.

本试验选用 PDMS (Sylgard184 Dow Corning Corp. USA) 作为试样制备材料, 在其表面进行表面织构的制作. 将 PDMS 本体及固化剂按质量比 10: 1 混合, 并搅拌均匀, 置于真空箱内完全脱气备用. 图 1 所示为试样表面织构的制作工艺过程: (a) 在经过清洗的 SiO_2 玻璃基片上涂覆 1 层光刻胶; (b) 通过紫外线曝光、显影等过程, 在 SiO_2 玻璃基片上形成具有一定几何尺寸的光刻胶圆柱阵列作为模具; (c) 将脱气后的混合物浇注至模具中, 在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温干燥箱内放置 12 h ^[6]; (d) 冷却后脱模得到所需试样. 制得的 PDMS 试样性能参数为: 邵氏硬度 HA50 弹性模量 E 为 1.0363 MPa .

由于 PDMS 材料属于高分子聚合物, 当使用另外一种硬质材料与其配对摩擦时, 可能在硬质材料表面出现聚合物转移膜, 转移膜一旦形成则会对摩擦副的润滑特性产生很大的影响^[20]. 因此, 为了避免可能导致的不良影响, 试验中的上、下试样均采用 PDMS 材料制作. 其中上试样是直径为 12.7 mm 的 PDMS 光滑球面, 表面粗糙度 R_a 为 $20\sim 30\text{ nm}$. 下试样直径为 50 mm , 厚度 5 mm 的 PDMS 圆片, 表面粗

糙度 R_a 为 $2\sim 5\text{ }\mu\text{m}$. 图 2 所示为试样的外观及表面织构形貌. 本文采用的表面织构均为圆形凹坑阵列, 凹坑直径分别为 50 、 100 和 $200\text{ }\mu\text{m}$, 凹坑面积率分别为 2% 、 10% 、 15% 和 22% , 凹坑深度均为 $5\text{ }\mu\text{m}$. 其中, 凹坑面积率即为凹坑占整个表面积的百分比, 计算公式为 $r = \pi d^2 / 4 l^2$.

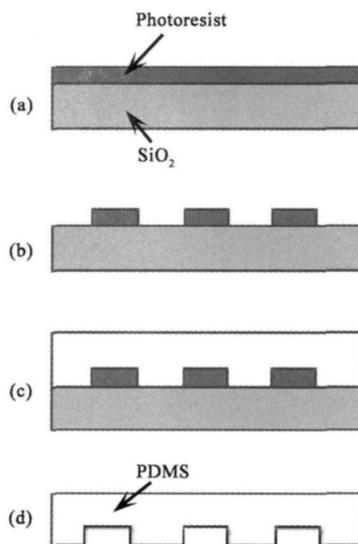


Fig 1 The process of sample fabrication

图 1 试样制作的工艺过程

1.2 试验方法

采用球-盘式摩擦试验机在室温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 60% 左右条件下进行摩擦试验. 试验机由砝码加载, 载荷固定为 0.95 N , 下试样以滑行速度为 $0.005\sim 0.200\text{ m/s}$ 旋转. 上试样固定在弹性悬臂梁末端, 试验过程中通过电涡流传感器及计算机将悬臂梁的变形信号转换为所需的摩擦力值.

由于水的黏度较小, 在摩擦试验中为了达到流体润滑则需要很高的滑行速度^[6]. 本文采用了黏度较高的甘油与水的混合溶液作为润滑剂, 其中甘油的体积分数为 90% . 用 NDJ-1 型旋转式黏度计对混合溶液及去离子水的黏度, 测量结果如表 1 所示. 混合溶液及去离子水的接触角分别为 110° 和 114° .

此外, 由于甘油易吸收空气中的水分而稀释, 测量了甘油溶液在相同条件摩擦试验前后的浓度变化, 经过 15 min 试验后发现甘油溶液的体积分数由 90% 降为 89.9% , 黏度为 $84.1\text{ mPa}\cdot\text{s}$. 因为各条件下的单次试验时间均小于 15 min , 因此不考虑甘油溶液在试验前后的浓度、黏度变化对试验结果造成的影响.

在本试验中, 为了获得稳定状态时的摩擦系数,

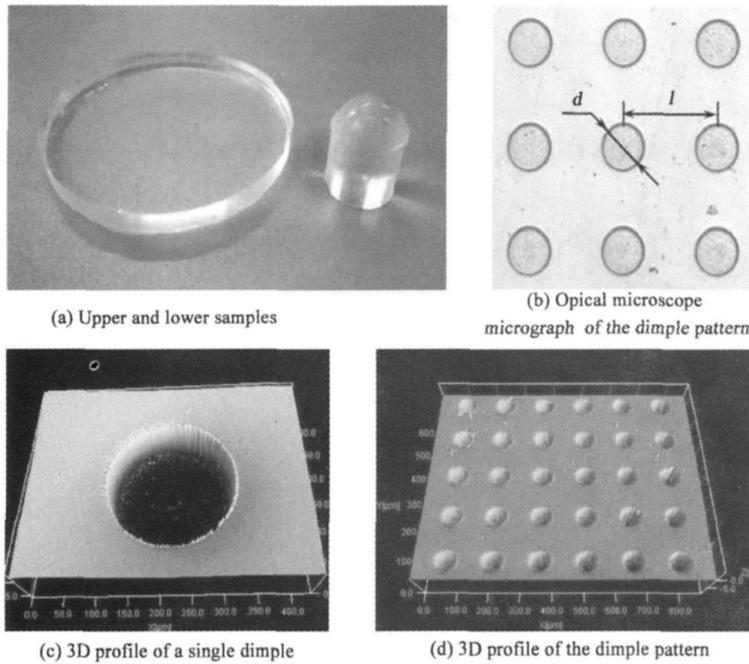


Fig 2 Specimen and the surface texture

图 2 试样及表面织构

试样首先在 0.04 m/s 的滑行速度下跑合 5 m , 然后分别在不同转速条件下进行试验, 每个速度下滑行 2 m , 以 2 m 内的摩擦系数平均值作为该速度条件下的平均摩擦系数。

表 1 去离子水与甘油溶液的黏度测量值 (25°C)

Table 1 Viscosity of

deionized water and glycerol solution (25°C)

Lubricant	Viscosity, $\eta / (\text{mPa}\cdot\text{s})$
Deionized water	0.9
90% glycerol solution	84.4

2 结果与讨论

2.1 润滑状态

图 3 所示为试样在不同速度下的摩擦系数变化情况。可以看出随着速度的增加, 平均摩擦系数呈先逐渐降低后上升的趋势, 与 Stribeck 曲线的变化趋势一致。当速度在 $0.020 \sim 0.200 \text{ m/s}$ 范围时, 平均摩擦系数呈近似线性增长的趋势, 其值在 $0.026 \sim 0.057$ 范围内。参考 Bongaerts 等^[5]的数据进行判断, 在此条件下, 试验应处于流体动压润滑状态。此外, 当滑行速度为 0.020 m/s 时, 平均摩擦系数达到最小值, 约为 0.02 左右, 而 Bongaerts 等^[5]获得的最小摩擦系数值约为 0.003 左右, 这可能是由于本试验中数据采集存在间隔, 并未获得最低的摩擦系数。

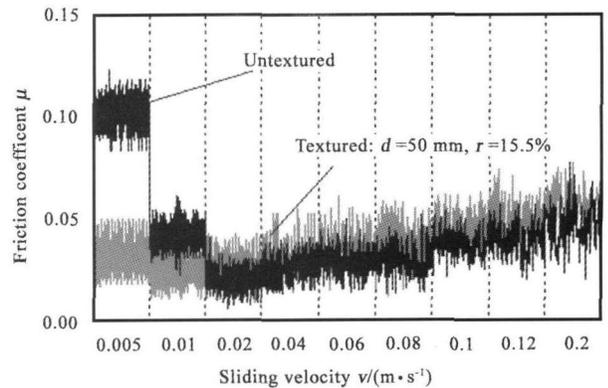


Fig 3 Frictional traces under different sliding velocities

图 3 不同速度下的摩擦系数变化

当滑行速度在 $0.005 \sim 0.010 \text{ m/s}$ 范围时, 由于无法形成连续的润滑膜, 所以此时试验处于混合润滑状态。在此状态下, 图 3 中无织构试样的平均摩擦系数在 $0.042 \sim 0.102$ 范围内, 有织构试样的平均摩擦系数的数值在 $0.026 \sim 0.034$ 范围内。

2.2 表面织构对摩擦系数的影响

图 4 为不同参数表面织构试样与无织构试样的摩擦系数曲线对比。在流体动压润滑区域, 所有的织构均表现出增大摩擦系数的特性, 相比无织构试样, 摩擦系数增幅在 $9.4\% \sim 32.1\%$ 范围内, 且大部分织构试样平均摩擦系数随速度呈线性增长趋势。导致该现象的原因可能是流体动压状态下, 由于织构的存在, 产生了附加流体动压效应使润滑膜的膜厚

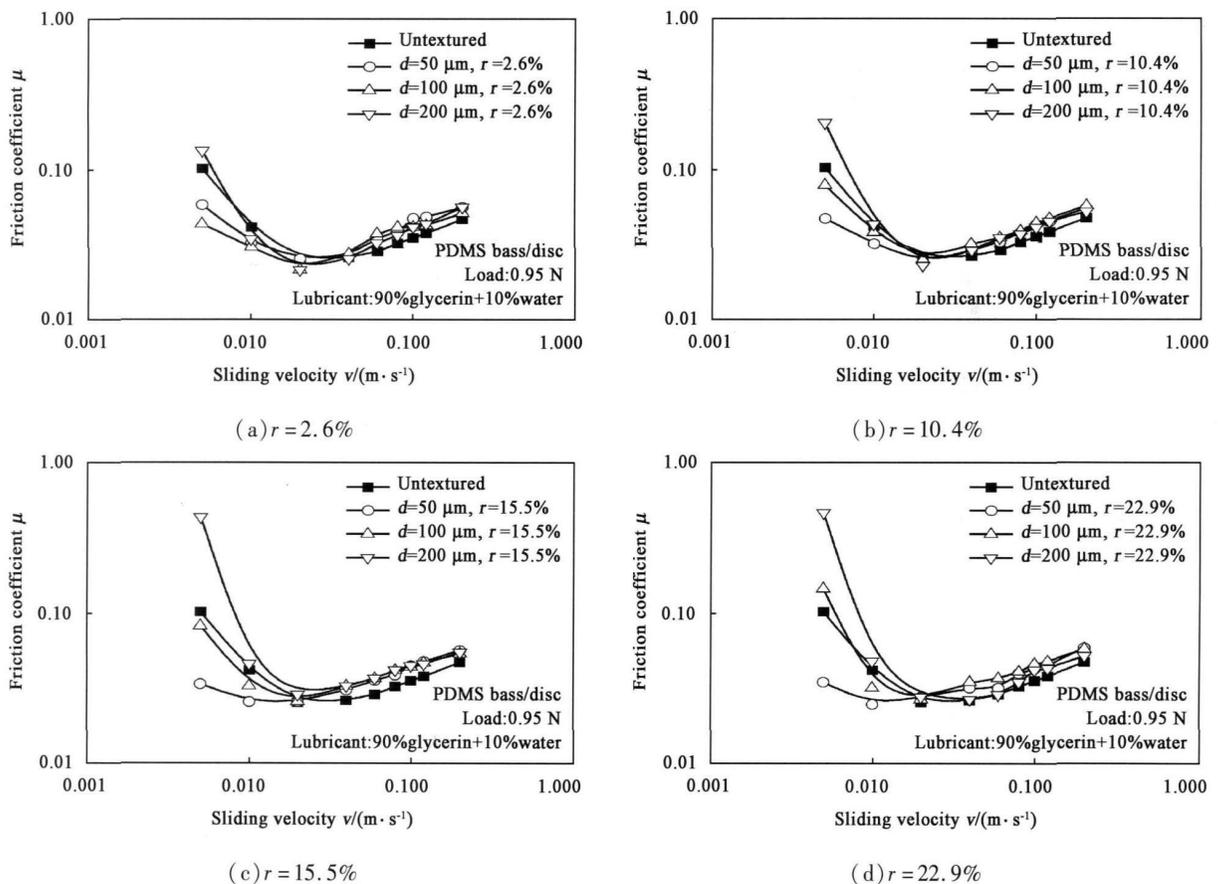


Fig. 4 Effects of surface textures with different parameters on lubrication

图 4 不同参数表面织构对润滑状态的影响

增加,从而增加了流体的黏滞阻力,使其摩擦系数比无织构表面更大。

图 4(a)和(b)中,在混合润滑区域,当凹坑面积率为 2.6%和 10.4%时,直径为 50 μm 和 100 μm 的织构均使摩擦系数有所减小,而直径为 200 μm 的织构却使摩擦系数稍有增大。图 4(c)和(d)中,在混合润滑区域,当凹坑面积率上升至 15.5%和 22.9%时,直径为 100 μm 的织构与无织构表面相近,而直径为 50 μm 的织构使摩擦系数明显减小,直径为 200 μm 的织构使摩擦系数明显增大。滑行速度为 0.005 m/s时,无织构试样的平均摩擦系数为 0.102 与之相比,直径为 50 μm ,面积率为 15.5%的织构使平均摩擦系数减小至 0.034 降幅为 66.7%;直径为 200 μm ,面积率为 22.9%的织构使平均摩擦系数增大至 0.455,增幅为 346.1%。

此外, Stribeck 曲线中存在 1 个由混合润滑至流体动压润滑的拐点,在该点处的摩擦系数值最小。当采用直径为 50 μm 的织构试样进行试验时发现,拐点有向左偏移的现象。这是由于织构的存在更有利于润滑膜的形成。与无织构试样相比,在较低速度条

件下即可进入流体动压润滑状态。这与硬质材料的研究结果相似^[21]。而且,随着面积率的上升,该现象更为明显[图 4(c)、(d)]。但织构直径为 100 μm 和 200 μm 时这个现象并不明显。

2.3 不同参数表面织构的“二次润滑”效应

一般来说,混合润滑状态是边界润滑、弹流润滑、流体动压润滑等的共同组合。因此表面织构在混合润滑区域的作用机理主要包括“二次润滑”效应及附加流体动压效应 2 部分。当试验处于混合润滑状态时,其滑行速度较低为 0.005 m/s 润滑液的流体动压效应很小,因此该条件下“二次润滑”效应可能是表面织构产生作用的主要机理。由“二次润滑”理论可知,接触区域内的凹坑作为二次补给源,其个数和分布可能是主要的影响因素。

通过赫兹接触理论计算所得的上下试样的赫兹接触半径为 1.9 mm,由此可以推算出接触区域内的平均凹坑个数 N ,如表 2 所示。虽然黏弹性材料在接触过程中的接触区域大小会随时间变化,但此处只是为了进行定性比较,因此使用赫兹接触理论进行计算。值得注意的是,在试样转动过程中,接触区域

中的实际凹坑个数是会变化的. 例如直径 200 μm , 面积率为 2.6% 的织构在实际接触中的凹坑个数在 8~12 之间变化, 变化幅度相对较大 (- 11.1% ~ 33.3%), 而直径较小, 面积率较大的织构也同样存在类似的变化, 但是由于基数较大, 其变化的相对幅度较小.

表 2 接触区域内凹坑的平均个数 (N)

Table 2 The average number of dimples in contact area (N)

$d / \mu\text{m}$	The average number of dimples N			
	$r = 2.6\%$	$r = 10.4\%$	$r = 15.5\%$	$r = 22.9\%$
50	150	601	895	1 323
100	38	150	224	331
200	9	38	56	83

图 5 所示为滑行速度为 0.005 m/s 时, 各种织构与无织构试件摩擦系数的比值 (μ/μ_0) 随 N 的变化趋势. 图 5 中可见, 当凹坑直径为 100 和 200 μm 时, 随着面积率的增大, 接触区内的凹坑个数随之上升, 摩擦系数也随之增大; 凹坑直径为 50 μm 时却表现出了相反的结果. 并且随着面积率的增大, 织构的作用越来越显著. 当保持凹坑面积率不变时, 随着直径的减小, 接触区内的凹坑个数随之上升, 织构的分布也越趋均匀, 织构的减摩效果越趋明显. 直径为 200 μm 的织构始终表现出增摩的效果, 直径为 50 μm 的织构始终表现出减摩的效果.

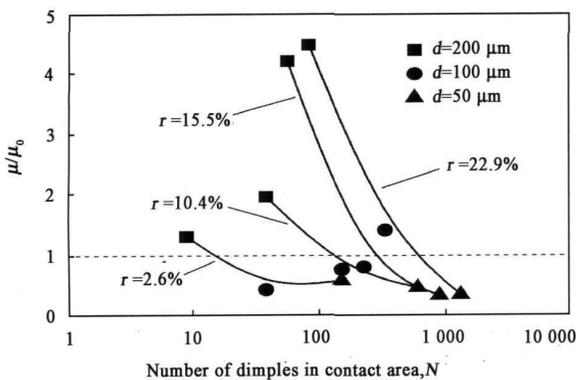


Fig 5 The μ/μ_0 as a function of number of dimples in contact area (N)

图 5 摩擦系数

之比 μ/μ_0 随接触区内凹坑个数 N 的变化趋势

由此可知, 在混合润滑区域, 摩擦系数并不随着接触区域内凹坑个数的增加而减小, 凹坑直径的大小是表面织构体现增摩或减摩趋势的关键因素, 而

凹坑面积率的变化则决定了增摩或减摩效果的显著程度. 造成这个现象的原因可能是混合溶液的接触角为 110° , 显示出较差的浸润性, 这导致润滑液在受压情况下容易被挤出接触区域, 甚至可能形成局部干摩擦, 而织构的存在, 可以通过储存的方式阻止润滑液的流失, 从而改善润滑状态, 减小摩擦. 然而, 当织构直径过大时 (如直径为 200 μm), 在相同面积率条件下, 织构之间的间隙较大, 可能仍然存在局部的干摩擦现象, 并且在接触区域的边缘, 由于较大直径的凹坑不易与球形面形成封闭的承载压力单元, 当这些压力单元失效时, 很可能与上试样之间发生明显的刮擦现象, 因而导致了大直径织构的摩擦系数不降反升. 简而言之, 较小直径织构由于分布较均匀, 能够较好地提供润滑液补给, 且在接触区域边缘没有明显的刮擦现象, 因而始终可以减小摩擦, 并且随着面积率的上升, 减摩效果更为明显; 而较大直径织构由于间隙较大, 润滑液补给不够充分, 加上可能存在的明显刮擦现象, 则会使得摩擦系数增大, 且随着面积率的上升, 刮擦现象更为明显, 使摩擦系数不断增大.

2.4 与硬质材料的区别

对硬质材料而言, 不同参数表面织构的摩擦学特性已经有了较多的实验研究. 其中, 大部分研究结果均表明: 在适当的面积率条件下, 凹坑直径 50~400 μm 的表面织构均能产生明显的减摩效果; 凹坑的面积率在 3% ~ 15% 左右的表面织构体现出较好的减摩效果, 而当面积率大于 20% 时, 表面织构的减摩效果均不明显, 有的甚至增大摩擦^[15-17].

与之相比, 本文对软质材料的研究结果有着明显的区别: 在试验所用的织构参数范围内, 无论面积率如何变化, 凹坑直径较小 ($d = 50 \mu\text{m}$) 的织构始终表现出减摩效果, 凹坑直径较大 ($d = 200 \mu\text{m}$) 的织构始终表现出增摩的效果; 随着凹坑面积率的增大, 表面织构影响的显著程度也不断增大, 在面积率增大至 22.9% 时, 较小直径的织构体现出最好的减摩效果, 较大直径的织构表现出最明显的增摩效果.

由此可见, 表面织构在软质材料和硬质材料上的影响有明显的区别. 为了进一步研究软质材料上表面织构参数的影响, 需要进行更加深入的研究, 例如提高凹坑的面积率等.

3 结论

a 表面织构在软质材料 PDM S 上对润滑特性影响明显区别于硬质材料.

b. 在流体动压润滑区域, 不同参数的织构均使摩擦系数增大. 而在混合润滑区域, 不同参数的表面织构产生了不同的作用: 凹坑直径较小的织构表现出很好的减摩效果, 最大降幅为 66% ($d = 50 \mu\text{m}$, $r = 15.5\%$, $v = 0.005 \text{ m/s}$), 并使 Stribeck 曲线中混合至流体动压润滑的拐点发生左移; 而凹坑直径较大的织构则体现出了明显的增摩效果, 最大增幅为 346% ($d = 200 \mu\text{m}$, $r = 22.9\%$, $v = 0.005 \text{ m/s}$).

c. 凹坑面积率的增大使得表面织构作用的显著性随之上升, 在本试验范围内采用最大面积率, 即 $r = 22.9\%$ 时, 较大直径织构的增摩效果和较小直径织构的减摩效果均最为显著.

4 致谢

本研究得到国家自然科学基金 (50675101) 和江苏省青蓝工程的资助, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Roberts A D, Lane J D. Friction of rubber on ice in the presence of salt [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* 1983, 16: 275–285
- [2] Roberts A D, Swales P D. The elastohydrodynamic lubrication of a highly elastic cylindrical surface [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics* 1969, 2: 317–326
- [3] Vicente J, Stokes J R, Spikes H A. The frictional properties of newtonian fluids in rolling–sliding soft–EHL contact [J]. *Tribology Letters* 2005, 20: 273–286
- [4] Vicente J, Stokes J R, Spikes H A. Lubrication properties of non-adsorbing polymer solutions in soft elastohydrodynamic (EHD) contacts [J]. *Tribology International* 2005, 38: 515–526
- [5] Bongaerts J H H, Fourtouni K, Stokes J R. Soft-tribology: Lubrication in a compliant PDMS–PDMS contact [J]. *Tribology International* 2007, 40: 1531–1542
- [6] Lee S, Spencer N D. Aqueous lubrication of polymers: Influence of surface modification [J]. *Tribology International* 2005, 38: 922–930
- [7] Wang X L, 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] Hamilton D B, Wabwitt J A, Allen C M. A theory of lubrication by micro-irregularities [J]. *Journal of Basic Engineering* 1966, 88(1): 177–185
- [9] Suh N P, Mosleh M, Howard P S. Control of friction [J]. *Wear* 1994, 175 (1–2): 151–158
- [10] Lo S W, Wilson W R D. A theoretical model of micro-pool lubrication in metal forming [J]. *Journal of Tribology* 1999, 121: 731–738
- [11] Etsion I, Kligerman Y, Halperin G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal face [J]. *Tribology Transactions* 1999, 42 (3): 511–516
- [12] Han Z W, Xu X X, Ren L Q. Regression analysis of micro-friction and wear on concave non-smooth surface [J]. *Tribology*, 2005, 25 (6): 578–582 (in Chinese) [韩志武, 许小侠, 任露泉. 凹坑形非光滑表面微观摩擦磨损试验回归分析 [J]. *摩擦学学报*, 2005, 25 (6): 578–582].
- [13] Wang X, Zhang G H, Chen W, et al. Numerical study of different micro-asperities on hydrodynamic lubrication [J]. *Lubrication Engineering* 2007, 32 (8): 66–73 (in Chinese) [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, 32 (8): 66–73].
- [14] Etsion I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing [J]. *Tribology Letters* 2004, 17 (4): 733–737
- [15] Wang X L, Kato K, Adachi K, et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water [J]. *Tribology International* 2003, 36: 189–197
- [16] 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
- [17] Wakuda M, Yanouchi Y, Kanzaki S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact [J]. *Wear* 2003, 254: 356–363
- [18] Han Z L, Wang J D, Chen D R. Drag reduction by dimples on surfaces in plane–plane contact lubrication [J]. *Tribology* 2009, 29 (1): 10–16 (in Chinese) [韩中领, 汪家道, 陈大融. 凹坑表面形貌在面接触润滑状态下的减阻研究 [J]. *摩擦学学报*, 2009, 29 (1): 10–16].
- [19] Shinkarenko A, Kligerman Y, Etsion I. The effect of surface texturing in soft elasto–hydrodynamic lubrication [J]. *Tribology International* 2009, 42: 284–292
- [20] Bhushan B. Introduction to tribology [M]. John Wiley & Sons New York, 2002 (in Chinese) [布尚 B. *摩擦学导论* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006].
- [21] Wang X L, Kato K, Adachi K. The critical condition for the transition from HL to ML in water-lubricated SiC [J]. *Tribology Letters* 2004, 16 (4): 253–258