

具有分形特征的织构表面的润滑减摩性能研究

王洪涛^a, 李艳^a, 朱华^b

(中国矿业大学 a.理学院, b.机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:目的 利用数值模拟方法研究具有分形特征的方形织构在全膜润滑条件下的摩擦学性能。方法 采用三维建模软件 Solidworks 建立了具有分形特征的织构表面模型, 通过计算流体力学软件 Fluent, 详细计算分析了织构深度、尺度及相对滑动速度等参数对摩擦系数和动压承载能力的影响, 并对分形织构和等面积比的规则阵列织构表面进行了对比研究。结果 增加分形织构的深度能小幅度地减小表面摩擦系数, 而缩小织构的尺度则可以明显降低表面的摩擦系数, 织构表面的压力系数正比于织构尺度和相对滑动速度, 反比于织构深度。分形织构和规则阵列织构的对比研究发现, 相同面积比条件下二者的摩擦系数基本一致, 而分形织构在承载能力上明显优于规则阵列织构。结论 在材料表面设计具有分形特征的织构能有效地改善摩擦副表面的滑动摩擦性能, 为表面减摩织构设计提供了一种新思路。

关键词: 摩擦系数; 动压承载; 表面织构; 分形; 润滑

中图分类号: TG356.16 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)09-0182-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.027

Lubrication and Anti-friction Properties of Textured Surfaces with Fractal Characteristics

WANG Hong-tao^a, LI Yan^a, ZHU Hua^b

(a. School of Science, b. School of Mechanical Electrical Engineering,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the tribological property of textured surface with fractal characteristics under full film lubrication conditions by numerical simulation method. **Methods** The model of surface texture with fractal characteristics was built by SolidWorks. The effect of depth, scale and sliding velocity on friction coefficient and load-carrying capacity were analyzed in detail by computational fluid dynamics Fluent. And then the results of fractal textures and regular array textures were compared. **Results** The results showed that the coefficient of friction was reduced slightly as the depth increased, but reduced significantly with the scale of texture unit. The pressure coefficient of surface was proportional to the scale and sliding velocity and inversely proportional to the depth of texture. The friction coefficient of fractal texture and regular array texture were nearly coincident for the same area ratio, but the load-carrying capacity of fractal texture was superior to that of regular array texture. **Conclusion** The fractal texture arranged on the surface of material can improve the tribological properties of friction pair and provide a novel idea to design anti-friction textured surface.

收稿日期: 2016-03-21; 修订日期: 2016-06-03

Received: 2016-03-21; Revised: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51375480, 50975276)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375480, 50975276)

作者简介: 王洪涛 (1978—), 男, 博士, 主要研究方向为材料摩擦学。

Biography: WANG Hong-tao (1978—), Male, Doctor, Research focus: tribological properties of materials.

KEY WORDS: coefficient of friction; load-carrying capacity; textured surface; fractal; lubrication

理论和实验研究证明: 在摩擦副表面设计织构能够有效地增加表面的抗磨性能和承载能力, 减小表面间的摩擦力^[1-3]。对比研究证明: 相对于平行沟槽和交叉网格型织构, 具有离散特征的各种形貌的凹坑织构对摩擦副动压润滑性能的提升有较大贡献, 其中尤以几何形状简单、对称性高的球形^[4-7]、柱形^[8-12]和方形^[13-15]织构备受重视, 而且大量的研究结果也显示此类几何形貌的织构在减摩和增加承载能力方面确实具有一定的优势。

对表面织构润滑减摩性能的数值仿真研究一般选择单个织构进行建模, 在模型中引入周期性边界条件, 模拟真实的织构周期排布, 忽略了织构间的相互作用对结果的影响。而数值模拟研究结果显示, 织构单元间的相互作用及相对位置偏移率对润滑状态下的摩擦副表面的承载能力有显著的影响^[16-17]。Garrido^[18]指出在对表面织构进行减摩优化设计时, 必须同时考虑织构的密度、直径以及摩擦副的接触面积等因素对摩擦性能的影响, 适当地减小织构直径, 增加织构密度, 更有利于提升表面的减摩性能。朱华^[11]通过对比研究均匀织构和变密度织构的摩擦学性能, 发现密度为 10% 的表面织构在低载荷条件下有较明显的减摩效果, 而 30%-10%-30% 的变密度织构, 在高速大载荷工况下具有最佳的润滑减摩效果。于海武^[17,19]对圆形凹坑织构的几何参数进行了减摩优化设计, 并对凹坑的分布形式进行了探索, 结果发现, 通过对分布形式的优化可进一步使承载能力增强约 21.7%。可见织构的分布形式也是影响表面摩擦性能的重要因素, 而分形结构则对应着线、面、体的自相似排布, 把分形特征引入表面织构的减摩设计具有一定的科学意义。汪久根等^[20]研究了一次迭代的 Koch 雪花形貌的表面织构在高铁车厢表面的空气摩擦噪声问题, 发现 Koch 雪花织构内部能产生二次涡, 能显著降低高速列车表面的空气摩擦噪声, 并且发现确定性多尺度表面织构的降噪效果优于单一尺度的表面织构。而具有分形特征的表面织构在润滑状态下的减摩特性尚未见诸报道。

本文依据典型的谢尔宾斯基方毯结构, 设计了具有分形特征的表面织构, 并利用计算流体力学仿

真方法系统分析讨论了油润滑条件下织构的深度、大小等几何参数, 以及相对滑动速度对织构表面的摩擦力和动压承载能力的影响。

1 数值仿真设计

在数值仿真计算过程中, 不能忽略织构单元之间的耦合作用对计算结果的影响, 这种影响主要体现在最近邻织构单元之间, 而次近邻单元及更远的织构单元之间的影响呈指数减小, 一般可以忽略不计。Qiu 等^[21]的研究结论也指出, 沿运动方向上经过两个织构单元之后, 压力分布将出现周期性特征。据此, 本文的计算区域选择二次迭代的谢尔宾斯基方毯分形结构 (图 1), 兼顾 x 、 y 两个方向的近邻织构单元的相互作用。考虑到二次迭代的谢尔宾斯基方毯的对称性特征, 选择图 2 所示的几何区域进行理论建模。计算域尺寸为 $3000\ \mu\text{m} \times 6000\ \mu\text{m}$, 织构单元深度 H_p 分别为 10、20、30、40 μm 。摩擦副表面间距统一设定为 10 μm 。织构单元的面积一般也会对其摩擦性能有一定的影响, 由于分形特征下的织构单元的相对大小是固定的, 本文引入了织构的缩放因子来探讨织构单元的尺寸对计算结果的影响。缩放因子 $\text{SF}=1.0$ 时为全尺寸织构, SF 为 0.6~0.9 时为对应于相对全尺寸缩小 60%~90% 的织构, 缩放因子由 1.0 逐渐减小为 0.6, 间隔 0.1。为了探索摩擦副的相对滑动速度对计算结果的影响,

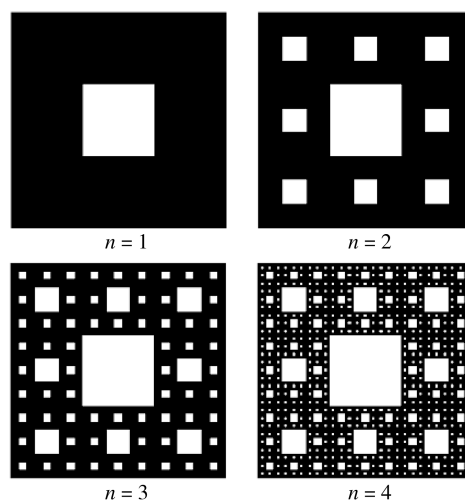


图 1 谢尔宾斯基方毯的生成过程

Fig.1 The formation process of Sierpiński carpet

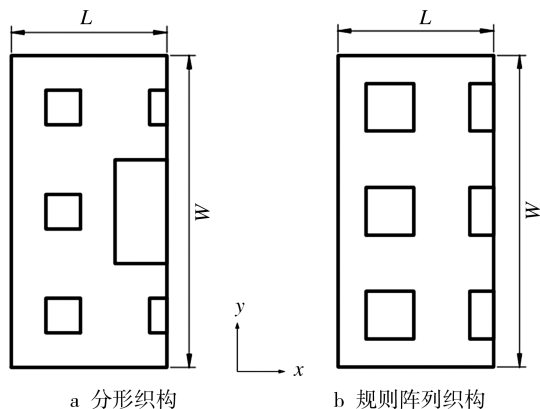


图 2 织构表面模型

Fig.2 Schematic vertical view of textured surface: a) fractal texture, b) regular texture

分别设定相对滑动速度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m/s 对织构表面的润滑滑动摩擦性能进行计算。

利用 ICEM 网格化工具对整个计算区域采用全六面体网格进行划分,并对网格无关性进行分析,发现在油膜厚度方向(z 轴)上把网格尺寸加密到 $2\text{ }\mu\text{m}$,而 x 、 y 轴两个方向网格尺寸平均设定为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,即可满足网格无关性要求。所有模拟数据均采用 Ansys Fluent 软件包在曙光 5000A 高性能科学计算平台上计算得到的数据。

设定摩擦副的相对滑动方向为 y 轴方向,并且在运动方向的两个边界上分别引入周期性边界条件,沿 x 方向的两个边界设定为对称边界。对于织构入口区域可能产生的空化现象,采用 Reynold 边界条件进行处理。设定上表面为做平行往复滑动的光滑平面,下表面为静止的织构化表面,摩擦副工作在全膜润滑条件下,且相对滑动时满足无滑移边界条件。不考虑温湿度等环境因素对润滑油性能的影响,润滑油密度及动力黏度为常数,分别设定为 $\rho=850\text{ kg/m}^3$, $\eta=0.04678\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。流场的压力和速度分布可通过求解流体的 Navier-Stokes 方程得到,不可压缩牛顿流体的 Navier-Stokes 方程的三个坐标轴分量形式为方程(1) — (3):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left[\left(\frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \right. \\ \left. \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \right] \quad (1) \\ \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} \right) \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \right. \\ \left. \frac{1}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial z \partial y} \right) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

流体对摩擦副上表面的承载能力可以用作用于光滑上表面的压力系数 C_p 来表征:

$$C_p = \frac{1}{q_0} \sum_{i=1}^n (p_i - p_0) \quad (4)$$

式中: p_i 为面积元 A_i 上的压强; p_0 为标准大气压; q_0 为参考动压 (Pa), $q_0 = \rho_0 v_0^2 / 2$; ρ_0 和 v_0 分别为参考密度和参考速度,计算中分别取默认值 1.225 kg/m^3 和 1 m/s 。沿运动方向上的摩擦系数 C_f 表示为:

$$C_f = \sum_{i=1}^n A_i \eta \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]_i \cdot \frac{2}{\rho v^2 A} \quad (5)$$

式中: A 为计算区域的总面积。

2 结果及讨论

2.1 深度的影响

织构深度对表面的摩擦性能有一定影响,图 3 为两种不同织构尺寸条件下摩擦系数与织构深度的关系。当两表面相对滑动速度为 1.0 m/s ,织构深度由 $10\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时,摩擦系数均呈现出减小的趋势,且大尺度表面 ($\text{SF}=1.0$) 的摩擦系数由 0.134 降到 0.128 ,降幅约 4.5% ,而小尺度表面 ($\text{SF}=0.6$) 的摩擦系数则由 0.048 降至 0.046 ,降幅约 4.2% 。结果说明,织构深度不论对大尺度

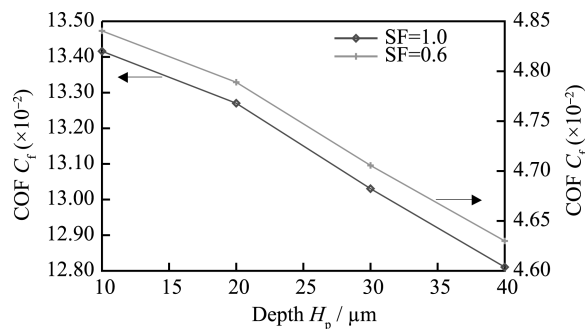


图 3 摩擦系数与织构深度的关系 ($v=1.0\text{ m/s}$)
Fig.3 Coefficient of friction vs. depth of texture unit ($v=1.0\text{ m/s}$)

表面或是小尺度表面均具有一定的润滑减摩作用,但是作用较小。

2.2 织构尺寸的影响

摩擦副工作于全膜润滑条件下,表面间的摩擦力为粘性润滑介质的剪切力。根据流体润滑理论可知,剪切力正比于相对滑动速度。图 4 为织构深度为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时的摩擦系数随相对滑动速度的关系。织构表面的最大尺寸为 $3000\text{ }\mu\text{m}\times 6000\text{ }\mu\text{m}$, 然后进行缩放, 缩放因子依次为 0.9、0.8、0.7、0.6。对于所有尺寸条件下的织构表面, 均表现出线性正比关系, 当速度由 0.2 m/s 提高到 1.0 m/s 时, 相应的摩擦系数的增加幅度约为 404.6%。

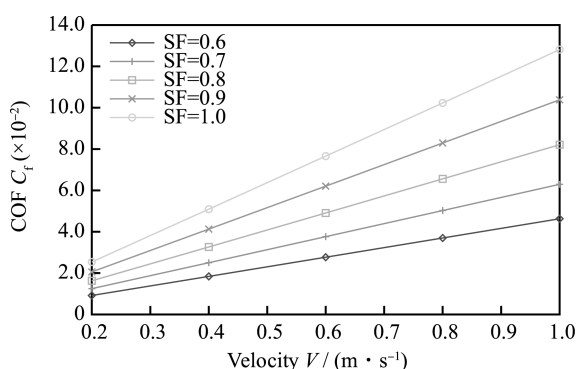


图 4 不同尺寸织构表面的摩擦系数与相对滑动速度的关系 ($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$)

Fig.4 Coefficient vs. velocity for textured surface with different scales ($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$)

相对于织构深度, 织构表面的尺度对摩擦系数的影响要大得多。图 5 为不同深度条件下摩擦系数与表面尺度的关系。当缩放因子由最大值 1.0 减小到 0.6 时, 表面尺度由 $3000\text{ }\mu\text{m}\times 6000\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐减小到 $1800\text{ }\mu\text{m}\times 3600\text{ }\mu\text{m}$ 。当深度为 $40\text{ }\mu\text{m}$, 相对滑动

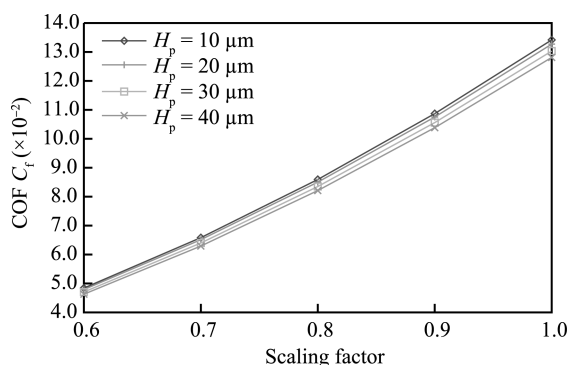


图 5 摩擦系数与表面尺度的关系 ($v=1.0\text{ m/s}$)

Fig.5 Coefficient of friction vs. scale of textured surface ($v=1.0\text{ m/s}$)

速度为 1.0 m/s , 缩放因子由 1.0 降到 0.6 时, 相应的摩擦系数由 0.128 降低至 0.046, 降幅为 64.1%。而其他不同深度条件下的降幅分别为 63.7% ($H_p=30\text{ }\mu\text{m}$)、63.9% ($H_p=20\text{ }\mu\text{m}$)、64.2% ($H_p=10\text{ }\mu\text{m}$)。结果说明, 选择小尺度的织构能有效地实现减摩, 该结论与文献报道吻合^[18]。

润滑介质作用于上表面的压力系数是摩擦副间承载能力的反应, 增加承载能力能有效改善润滑状态, 减少磨损。研究表明, 织构表面能够提供优于光滑表面的动压承载。图 6 显示了相对滑动速度为 1.0 m/s 条件下压力系数和表面尺度之间的关系。对于较浅的织构 ($H_p=10\text{ }\mu\text{m}$), 当缩放因子由 1.0 降为 0.6 时, 压力系数降低约 60.5%。而对于较深的织构, 压力系数降低约 62.7%。对于同一织构表面尺度, 随着织构深度的增加, 压力系数逐渐减小, 承载能力下降。

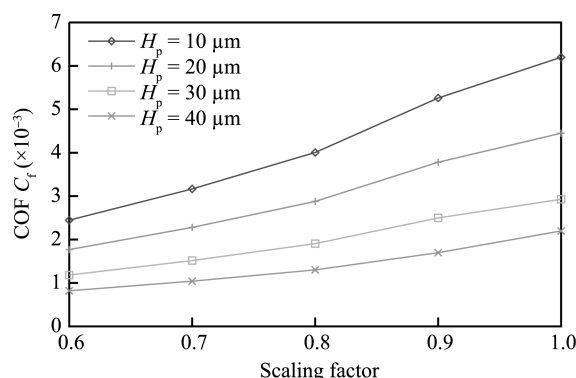


图 6 压力系数与表面尺度的关系 ($v=1.0\text{ m/s}$)

Fig.6 Coefficient of pressure vs. scale of textured surface ($v=1.0\text{ m/s}$)

2.3 排布模式的影响

为了对比分形织构和传统规则阵列织构在润滑减摩性能上的差异, 建立了对应的规则阵列的方形织构模型 (图 2)。织构的面积比定义为织构面积与织构表面的总面积之比, 是影响织构表面摩擦性能的重要参量。具有二次迭代谢尔宾斯基方毯分形特征的表面织构的面积比恒定为 21%。为了分析织构的排布形式对摩擦性能的影响, 通过计算调整了规则阵列织构单元的大小, 保证分形织构 (图 2a) 和规则阵列织构 (图 2b) 的面积比相同。通过对比研究发现, 两种织构排布形式下的摩擦力基本一致, 说明织构的排布形式并不是影响表面间摩擦力的主要因素 (图 7)。分形织构设计并不能显著降低全膜润滑状态下的表面摩擦力, 而分形织构

对提高摩擦副表面间的承载能力有一定的贡献。由图8可知,对于不同尺度的织构表面,分形织构排在提升承载能力上均优于规则阵列排布织构。在相同的深度、面积比及相对滑动速度条件下,分形织构表面的承载能力较规则阵列排布织构表面提升约1.05倍。

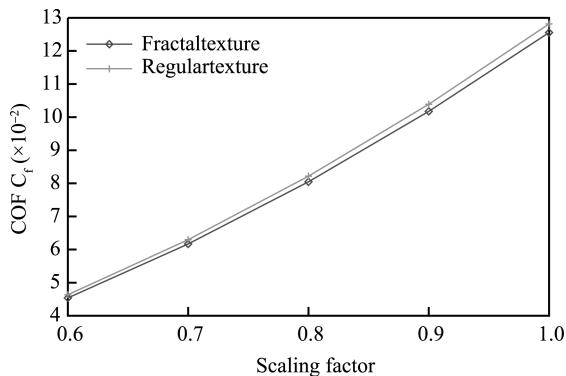


图7 分形织构和规则阵列织构摩擦系数对比
($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$, $v=1.0\text{ m/s}$)

Fig.7 Comparison of friction coefficient under fractal and regular array texture ($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$, $v=1.0\text{ m/s}$)

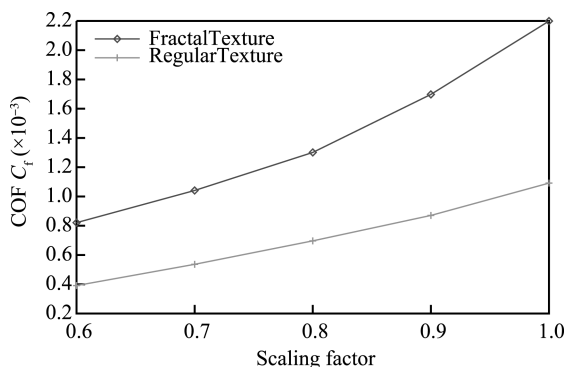


图8 分形织构和规则阵列织构压力系数对比
($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$, $v=1.0\text{ m/s}$)

Fig 8 Comparison of pressure coefficient under fractal and regular array texture ($H_p=40\text{ }\mu\text{m}$, $v=1.0\text{ m/s}$)

图9给出了织构缩放因子 $SF=1.0$ 、深度 $H_p=40\text{ }\mu\text{m}$ 、相对滑动速度 $v=1.0\text{ m/s}$ 的条件下,摩擦副上表面的压强分布图。可见,对于规则阵列的织构,在织构单元的流体入口端压强较低,在流体的出口端压强较高。而相对于规则阵列分布的常规织构表面,具有分形特征的织构表面上各织构单元之间的相互影响更加显著。一次迭代的织构单元流体出入口端的压强分布辐射影响了相邻的二级迭代的织构单元,致使织构表面的压强分布起伏明显。一二级迭代单元间的强相互作用是分形织构表面的承载能力优于规则阵列织构的原因。

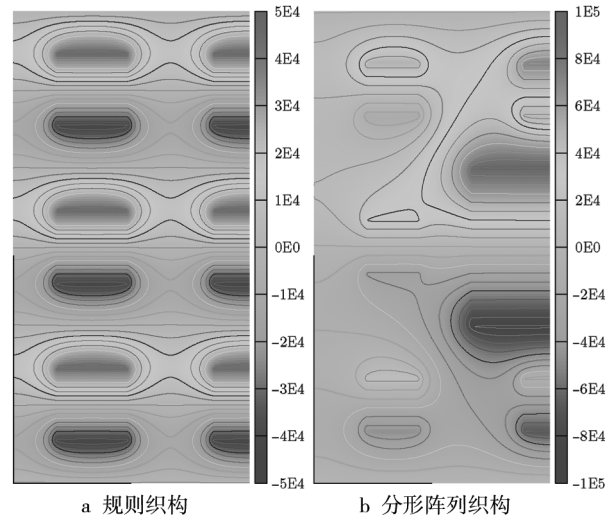


图9 摩擦副上表面压强分布

Fig.9 Contour of pressure on top surface: a) regular array texture, b) fractal texture

3 结论

1) 增加分形织构的深度能降低表面摩擦系数,但是降幅很小,约4.5%。

2) 织构的尺寸效应对润滑减摩性能的影响比较大,缩放因子由1.0减小至0.6时,摩擦系数减小幅度约为64%。

3) 织构表面的压力系数与织构尺度和相对滑动速度成正比,与织构深度成反比。

4) 分形织构与规则阵列织构在同面积比条件下,摩擦系数基本上没有差别,而分形织构表面的压力系数相对规则阵列织构表面有较大提升。

参考文献

- [1] ETSION I, SHER E. Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 542—547.
- [2] BLUNT L, XIAO S. The Use of Surface Segmentation Methods to Characterise Laser Zone Surface Structure on Hard Disc Drives[J]. Wear, 2011, 271(3/4): 604—609.
- [3] BRAUN D, GREINER C, SCHNEIDER J, et al. Efficiency of Laser Surface Texturing in the Reduction of Friction under Mixed Lubrication[J]. Tribology International, 2014, 77: 142—147.
- [4] MA C, ZHU H. An Optimum Design Model for Textured Surface with Elliptical-Shape Dimples under Hydrodynamic Lubrication[J]. Tribology International, 2011, 44(9): 987—995.
- [5] YIN Bi-feng, LI Xiao-dong, FU Yong-hong, et al. Re-

- search on Tribological Performance of Cylinder Liner by Micro-laser Surface Texturing[J]. *Advanced Science Letters*, 2011, 4(4): 1318—1324.
- [6] 姜亮, 马国亮, 王晓雷. PDMS表面织构润滑特性的研究[J]. *摩擦学学报*, 2010(3): 262—267.
JIANG Liang, MA Guo-liang, WANG Xiao-lei. Lubrication Properties of Surface Texture on PDMS[J]. *Tribology*, 2010(3): 262—267.
- [7] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing[J]. *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 2005, 127(3): 632—638.
- [8] YU H, WANG X, ZHOU F. Geometric Shape Effects of Surface Texture on the Generation of Hydrodynamic Pressure between Conformal Contacting Surfaces[J]. *Tribology Letters*, 2010, 37(2): 123—130.
- [9] TANG W, ZHOU Y, ZHU H, et al. The Effect of Surface Texturing on Reducing the Friction and Wear of Steel under Lubricated Sliding Contact[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 273: 199—204.
- [10] ZHOU Y, ZHU H, TANG W, et al. Development of the Theoretical Model for the Optimal Design of Surface Texturing on Cylinder Liner[J]. *Tribology International*, 2012, 52: 1—6.
- [11] 朱华, 历建全, 陆斌斌, 等. 变密度微圆坑表面织构在往复运动下的减摩作用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(4): 741—745.
ZHU Hua, LI Jian-quan, LU Bin-bin, et al. Friction Reduction Effect of Micro Round Dimple Surface Texture with Variable Density in Reciprocating[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(4): 741—745.
- [12] HU T, ZHANG Y, HU L. Tribological Investigation of MoS₂ Coatings Deposited on the Laser Textured Surface[J]. *Wear*, 2012, 278—279: 77—82.
- [13] 王晓雷, 韩文非, 加藤康司. 碳化硅陶瓷的水润滑特性及其表面微细织构的优化设计[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(4): 457—460.
WANG Xiao-lei, HAN Wen-fei, KATO K. Surface Texture Optimal Design for Silicon Carbide under Water Lubrication[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(4): 457—460.
- [14] HE B, CHEN W, WANG Q. Surface Texture Effect on Friction of a Microtextured Poly (Dimethylsiloxane) (PDMS)[J]. *Tribology Letters*, 2008, 31(3): 187—197.
- [15] 于海武, 袁思欢, 孙造, 等. 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 106—110.
YU Hai-wu, YUAN Si-huan, SUN Zao, et al. Effect of Micro-dimple Shapes on Tribological Properties of Specimen Surfaces[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2011, 39(1): 106—110.
- [16] 王洪涛, 朱华. 圆柱形微凹坑排布形式对织构表面摩擦性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2014(4): 414—419.
WANG Hong-tao, ZHU Hua. Effect of Cylindrical Micro Pit's Distribution Form on Tribology Properties of Textured Surface[J]. *Tribology*, 2014(4): 414—419.
- [17] 于海武, 邓海顺, 黄巍, 等. 微凹坑相对位置变化对表面减摩性能的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(6): 943—948.
YU Hai-wu, DENG Hai-shun, HUANG Wei, et al. Effect of Micro-dimple Arrangements on Tribological Performance of Sliding Surfaces[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(6): 943—948.
- [18] GARRIDO A H, GONZÁLEZ R, CADENAS M, et al. Tribological Behavior of Laser-Textured NiCrBSi Coatings[J]. *Wear*, 2011, 271(5/6): 925—933.
- [19] 于海武, 王晓雷, 孙造, 等. 圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(2): 209—213.
YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, SUN Zao, et al. Theoretical Analysis on Hydrodynamic Lubrication of Cylinder Micro-dimple Surface Texture[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(2): 209—213.
- [20] 汪久根, 陈仕洪. Koch雪花表面织构设计与高铁空气摩擦噪声分析[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 78—83.
WANG Gen-jiu, CHEN Shi-rong. Bionic Design of Koch Snowflake Surface Texture and Its Effects on Air Frictional Noise of High Speed Train [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 78—83.
- [21] QIU M, DELIC A, RAEYMAEKERS B. The Effect of Texture Shape on the Load-carrying Capacity of Gas-lubricated Parallel Slider Bearings[J]. *Tribology Letters*, 2012, 48(3): 315—327.