

圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响

于海武 王晓雷 孙 造 袁思欢

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:通过建立具有规则圆柱形微凹坑分布的表面织构流体动压润滑模型,分析了微凹坑几何参数及微凹坑分布形式对流体动压润滑性能的影响。研究表明:在微凹坑直径及深径比不变时,存在最优的微凹坑面积率,约为30%;在微凹坑分布密度不变时,存在最优的深径比,约为0.027。在此最优微凹坑面积率及深径比下,本文创新性地通过优化微凹坑的分布形式,进一步提高了润滑膜承载力21.7%。研究结果对进一步的研究工作提供了理论依据,具有指导意义。

关键词:表面织构;几何参数;分布形式;承载力

中图分类号:TH117 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2010)02-0209-05

Theoretical Analysis on Hydrodynamic Lubrication of Cylinder Micro-dimple Surface Texture

Yu Haiwu, Wang Xiaolei, Sun Zao, Yuan Sihuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics &
Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A theoretical model is established to investigate the geometric parameters and arrangement pattern effect of cylinder micro-dimple surface texture on the hydrodynamic pressure generated between conformal contacting surfaces. With other fixed parameters, the optimum geometric parameters are discovered as follows: the area ratio is 30%, and the ratio of the depth to the diameter is 0.027. When these optimum parameters are selected, the fluid load carrying capacity increases 21.7% in the case of the rational textural pattern.

Key words: surface texture; geometric parameters; arrangement pattern; load carrying capacity

机械系统的摩擦学性能对提高其承载能力和服役寿命至关重要,减小摩擦磨损已成为保护环境、提高效率的迫切需要。近半个多世纪以来,科学家们在流体动力学、减摩及耐磨材料、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。

表面织构,即在摩擦副表面上加工出具有一定

尺寸和排列的微坑或微沟槽,已被证明是改善表面摩擦学特性的一种有效手段^[1-3],其原理是利用微坑或微沟槽产生的流体动压等润滑效果降低摩擦,提高表面承载力。

通过人工表面织构改善表面摩擦学特性的设计思想源于20世纪60年代,Hamilton^[4]等提出了利用表面微凸起来产生附加动压润滑效果的想法,即微凸起的一边与摩擦副的另一面之间形成收敛

基金项目:国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2006AA04Z321)资助项目;国家自然科学基金(50675101)资助项目。

收稿日期:2009-08-10;修订日期:2009-11-26

作者简介:于海武,男,博士研究生,1982年11月生;王晓雷(联系人),男,教授,博士生导师,E-mail:xl-wang@nuaa.edu.cn。

楔而产生流体动压力,而微凸起的另一边的发散楔产生的负压由于气穴的产生而得到了限制,最终为相对滑动表面产生了额外的承载能力。同世纪90年代,Etsion^[1-3]利用激光技术在机械密封表面加工出规则排布的微凹坑进行研究。研究表明,经过激光微坑造型端面的机械密封,可以产生流体动压开启力和具有一定刚度的流体膜,使密封面形成非接触。在相同工况下,与接触式机械密封相比,减小了摩擦副的摩擦力矩、表面温升和磨损率。

随着加工技术的发展,表面织构在计算机硬盘、轴承和密封、发动机系统中已得到了成功的应用。1991年,Ranjan^[5]采用激光技术在计算机硬盘盘片的起动停止区加工了直径20 μm、深10 nm左右的微坑组成的点阵,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。2000年,本田公司采用微小陶瓷球高速喷射的方法处理了活塞的摩擦面。该方法形成的随机分布的微坑(直径200 μm,深度0.6~1.8 μm)呈现出明显的减摩效果,仅此一项处理,就降低发动机整体机械损失达2%~2.6%^[6]。

表面织构的优化设计是表面织构技术的重要组成部分。近年来,国内外有关学者对此进行了大量的理论和试验研究^[2-4,7-10]。研究表明,选择合适的表面织构几何参数(深度、直径、面积率)可以使织构化表面达到最优的摩擦学性能。然而,就织构几何参数的选择而言,报道的结果之间分散性很大,目前还尚未形成具有指导意义的表面织构设计方法和理论。因此,此领域的研究还需进一步加强。本文通过建立圆柱形微凹坑表面织构的流体动压润滑模型,采用多重网格法分析了凹坑几何参数(凹坑面积率、深径比)对摩擦副润滑性能的影响,并对凹坑的分布形式进行了优化,以期为后续的研究提供理论依据。

1 分析模型

本文旨在对微凹坑润滑性能的基础理论研究,为研究方便,取做相对运动的平面摩擦副为研究对象。假设摩擦副上表面为光滑表面,下表面为具有规则微凹坑分布的表面。对于微凹坑表面,如图1所示。设每个微凹坑均处于一个假想的正方形控制单元内,凹坑深度为 h_p ,凹坑半径为 r_p ,凹坑面积占有率为 s_p ,则控制单元边长 L 可表示为

$$L = r_p \sqrt{\frac{\pi}{s_p}} \quad (1)$$

假设:(1)摩擦副处于全膜润滑状态。即摩擦副

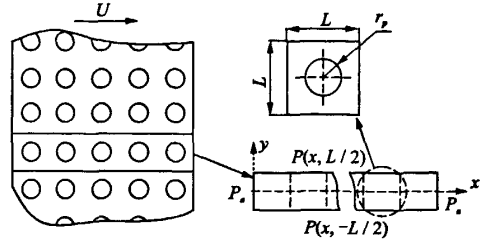


图1 织构化表面几何模型

两表面间被一层均匀的润滑膜分开,其厚度为 h_0 ,如图2所示;(2)由于润滑膜厚度 h_0 很小,可认为润滑膜膜压沿膜厚方向不发生变化;(3)润滑剂为牛顿流体,忽略其体积力和惯性力的影响。由此可以得到不可压缩流体在稳态层流条件下的压力控制方程如下

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

式(2)左边的两项表示由于压力梯度形成的润滑剂流动,右端项表示由于相对速度形成的润滑剂流动。式中: h 为润滑膜厚度, η 为润滑介质的动力粘度, U 为两表面间相对运动速度, p 为产生的润滑膜压力。

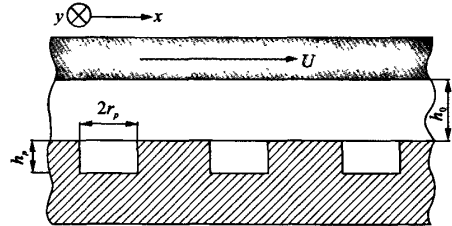


图2 平面摩擦副膜厚示意图

结合图1,2,摩擦副两表面间任意点的润滑膜厚度可由如下方程式表示

$$h(x, y) = \begin{cases} h_0 & (x, y) \in \Omega \\ h_0 + h_p & (x, y) \in \Omega \end{cases} \quad (3)$$

式中 Ω 为微凹坑区域。

为了简化计算和便于结果讨论,需要将式(2,3)化简为无量纲形式。从而,定义下列无量纲参数

$$X = \frac{x}{r_p}, Y = \frac{y}{r_p}, H = \frac{h}{h_0}, P = \frac{p}{p_0} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2,3),分别得到压力控制方程和膜厚方程的无量纲形式

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = \Delta \frac{\partial H}{\partial X} \quad (5)$$

式中 $\Delta = \frac{6U\eta r_p}{h_0^2 p_0}$,本文称之为工况系数。

$$H = \begin{cases} 1 & (X,Y) \in \Omega \\ 1 + \frac{h_p}{h_0} & (X,Y) \in \Omega \end{cases} \quad (6)$$

联立求解式(5,6),即可得到润滑膜的压力分布。在求解过程中必须设定合理的边界条件。根据文献[2,4]所述,织构化表面上,凹坑的压力分布呈周期性变化。因此,本文在计算过程中取与速度方向平行的一凹坑行作为计算域。如图1中所示,计算域的无量纲边界条件为

$$\begin{cases} P(X=0,Y) = P(X=\frac{NL}{r_p},Y) = 0 \\ P(X,Y=-\frac{L}{2r_p}) = P(X,Y=\frac{L}{2r_p}) \\ \frac{\partial P}{\partial Y}(X,Y=-\frac{L}{2r_p}) = \frac{\partial P}{\partial Y}(X,Y=\frac{L}{2r_p}) \end{cases} \quad (7)$$

根据流体润滑成膜理论,空化现象使整个流体膜不至于正负压力抵消,而失去承载能力。因此,在求解过程中还必须选择合适的空化边界条件才能得到较为近似的数值解。考虑到节省计算时间,同时不改变定性结果,本文采取 half-sommerfeld 边界条件。即:将所得压力分布的负压力至零,只取正压力作为衡量表面织构润滑性能的参考。为直观起见,本文的压力分布图形中仍然保留了负压力。

2 数值计算与结果分析

采用五点差分格式离散式(5,6),即可得到计算域内任意点的润滑膜压力方程式

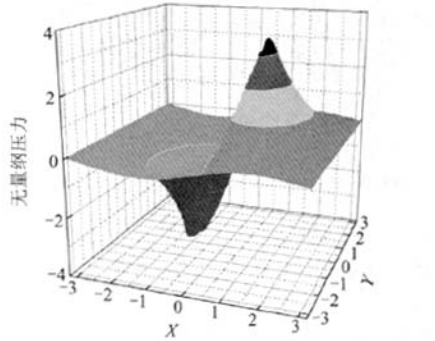
$$P_{i,j}^{(k+1)} = (1-\beta)P_{i,j}^{(k)} + [AP_{i,j}^{(k+1)} + BP_{i,j+1}^{(k+1)} + CP_{i+1,j}^{(k+1)} + DP_{i-1,j}^{(k+1)} - F]/E \quad (8)$$

式中: β 为松弛因子; $A = \frac{H_{i-1,j}^3}{\Delta X^2}$; $B = \frac{H_{i,j+1}^3}{\Delta Y^2}$; $C = \frac{H_{i+1,j}^3}{\Delta Y^2}$; $D = \frac{H_{i-1,j}^3}{\Delta X^2}$; $E = \frac{H_{i+1,j}^3 + H_{i-1,j}^3}{\Delta X^2} + \frac{H_{i,j+1}^3 + H_{i,j-1}^3}{\Delta Y^2}$; $F = \Lambda \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{\Delta X}$ 。

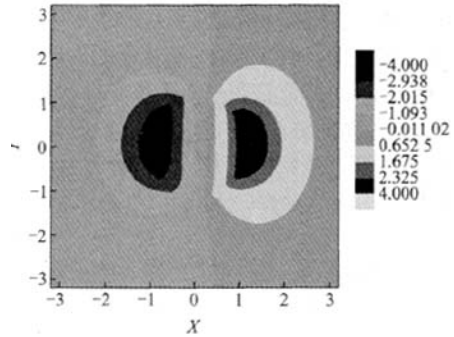
利用多重网格法求解式(8),得到一个计算域内的润滑膜压力分布,然后只取正压力部分求得平均无量纲压力 P_{av} 作为衡量表面织构承载能力的指标,以此分析表面织构几何参数(面积率、深径比)及织构分布形式对流体动压润滑效应的影响规律。在数值计算过程中,除被研究参数,其他参数不变。

图3为计算域内一个凹坑控制单元上的三维及二维无量纲润滑膜压力分布。从图中可以看出,在单元的右半部分润滑膜压力分布为正,且在微凹坑的右边缘处出现了压力的最大值。这是由于沿着速度方向,微凹坑的右边缘与摩擦副上表面之间形成收敛楔产生了流体动压力所造成的。相应地,由

于发散楔的作用,在单元的左半部分出现了负的压力分布。然而,由于气穴现象的存在,这些负压力的产生会受到抑制。从而,使润滑膜产生额外的承载力。



(a) 三维无量纲润滑膜压力分布



(b) 二维无量纲润滑膜压力分布

图3 一个凹坑控制单元上的三维及二维无量纲润滑膜压力分布

2.1 表面织构几何参数对润滑膜承载力的影响

本文在计算时,取 $\eta=0.0228 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 为定值, $U=0.5\sim 1.3 \text{ m/s}$, $h_0=1\sim 3 \mu\text{m}$ 。

选择凹坑直径 $d_p=150 \mu\text{m}$,凹坑深度 $h_p=4 \mu\text{m}$ 不变,通过改变控制单元的边长来改变凹坑分布密度。图4所示为3种不同工况系数 Λ 下,无量纲平均压力 P_{av} 随凹坑面积率的变化曲线。从图中可以看出,无量纲平均压力 P_{av} 随着凹坑面积率 s_p 的增大,呈现先迅速增大而后缓慢减小的趋势,在大约 $s_p=30\%$ 处达到最大值。这表明,存在一个最优的凹坑面积率,可以使表面织构对润滑膜承载力发挥最大的影响。图中的工况系数 Λ 可以通过改变名义润滑膜厚度 h_0 、摩擦表面相对运动速度 U 以及润滑膜粘度 η 的值来改变。通过大量的计算结果发现,无量纲平均压力 P_{av} 随着 Λ 的增大而增大,尤其是在凹坑面积率为30%时, P_{av} 的增幅比其他面积率情况下都大。这说明润滑膜承载力的大小与摩擦

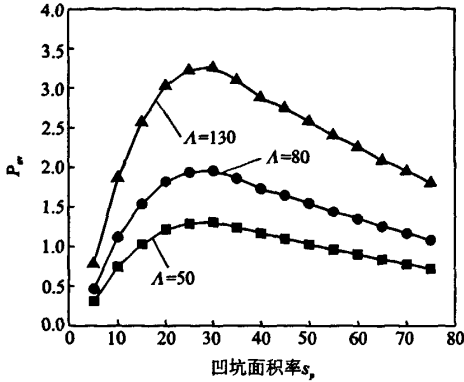


图4 无量纲平均压力 P_{av} 与凹坑面积率的关系曲线

副的运行状态密切相关。

图5所示为在4种不同面积率下,无量纲平均压力 P_{av} 随凹坑深径比的变化曲线。从图中可以看出,在4种不同面积率下, P_{av} 值随着 ϵ 值呈现先增大后减小的趋势,都存在一个最佳深径比使得 P_{av} 值最大,最优的 ϵ 值一般不超过0.035。当凹坑面积率为30%时,最佳深径比为0.027,此时,无量纲平均压力 P_{av} 相比初始深径比为0.0133时增加了22.7%。

上述计算结果与该领域 Etsion 的多篇文献结果相近。综上所述,通过适当选取圆柱形微凹坑几何参数,可以优化其对流体动压润滑性能的影响。

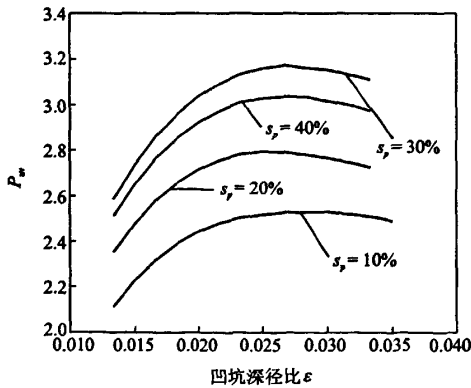


图5 无量纲平均压力 P_{av} 与凹坑深径比的关系曲线

2.2 表面织构分布形式对润滑膜承载力的影响

以往的研究中,为了便于计算,人们都是从阵列分布的微坑中取出代表性的一个^[11-13]或一系列^[4,14-15]进行分析,并且主要集中在织构几何参数对润滑性能影响的研究,而考虑凹坑分布形式对织构润滑性能影响的研究还相对甚少。本文中,研究凹坑分布形式对织构润滑性能的影响,源于考虑润

滑膜压力产生时凹坑间的相互作用,即每个凹坑的压力产生都不是孤立的,它受到周围凹坑的影响。为了解凹坑间的这种相互作用,本文首先计算了 3×3 凹坑的润滑膜压力分布情况,计算时取边界条件 $P(X=0, Y) = P(X=3L, Y) = P(X, Y=0) = P(X, Y=3L) = 0$, 得到二维润滑膜压力分布如图6所示。从图中可以看出,与速度平行方向的凹坑之间,润滑膜压力产生无相互作用,而与速度垂直方向上的凹坑间润滑膜压力产生是相互影响的。由此可以推断,优化凹坑在速度垂直方向上的分布形式可以进一步增大润滑膜的承载能力。

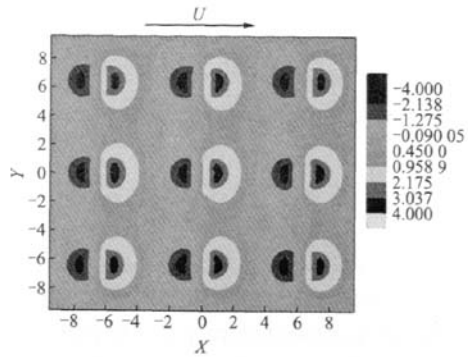


图6 九凹坑二维压力分布图

考虑到以单凹坑或单凹坑列作为计算域时,边界条件会对计算结果产生影响,所以本文取 10×10 凹坑单元大小的区域作为计算域,来分析凹坑分布形式对润滑性能的影响。如图7所示,固定计算域内最底部一行凹坑,其他的凹坑行相对最底部凹坑行向右错动,以使原凹坑列与速度方向呈一定角度 α , 从而来改变凹坑的分布形式。 α 的变化范围为 $90 \sim 45^\circ$ 。计算时选取前面得到的最佳微凹坑几何参数 $s_p = 30\%$, $\epsilon = 0.027$ 。本研究在 α 角度的变化范围内选取几种特定角度,对计算域内的压力分布进行了计算,然后取计算域中央处的一个凹坑单元计算 P_{av} 值,计算结果如图8所示。从图中可以看出,存在一个最优的角度 $\alpha = 70^\circ$ 时,使得无量纲平均压力 P_{av} 最大,相比 $\alpha = 90^\circ$ 及 $\alpha = 45^\circ$ 时增加了21.7%。 $\alpha = 70^\circ$ 时计算域内的润滑膜压力分布如图9所示。从图中分析可知,造成上述结果的原因是由于原凹坑列上相邻两凹坑的直线距离变大,从而使压力峰值具有更大的延续范围。综上所述,在优化表面织构几何参数的基础上,对表面织构的分布形式进行优化可以进一步提高表面织构对流体润滑性能的影响。当然,由于本文所取角度有限,对此方面的研究仍需进一步深化。

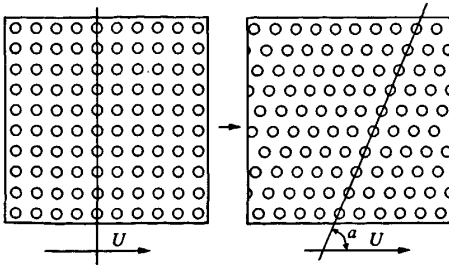


图7 微凹坑分布形式示意图

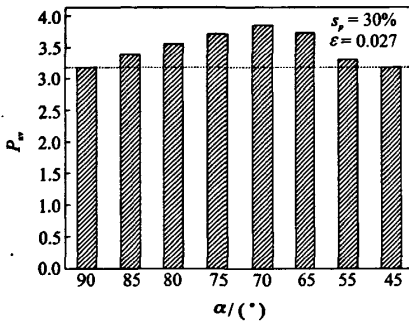


图8 不同角度 α 下的无量纲平均压力

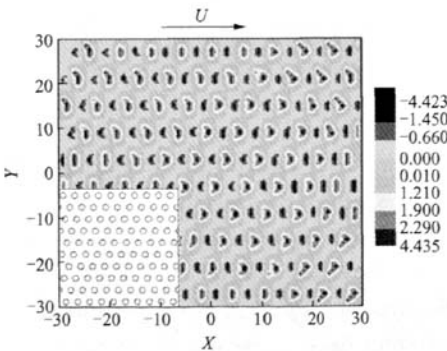


图9 $\alpha=70^\circ$ 时计算域内润滑膜压力分布

3 结束语

本文以平面摩擦副为例,建立了具有圆柱形微凹坑分布的表面织构流体动压润滑模型,利用多重网格法求解了微凹坑所引起的润滑膜压力分布.得到了微凹坑的最优几何参数,并在此最优几何参数下,研究了微凹坑分布形式对流体润滑性能的影响.研究表明,在本文研究的范围内通过改变微凹坑分布形式可以使表面织构的承载能力进一步提高21.7%。

参考文献:

[1] Etsion I, Burstein L. A model for mechanical seals

with regular microsurface structure[J]. Tribology Transactions, 1996,39(3):677-683.

[2] Halperin G, Greenberg Y, Etsion I. Increasing mechanical seals life with laser-textured seal faces[C]// 15th Int Conf on Fluid Sealing. Maastricht: Mechanical Engineering PUBL, 1997.

[3] Etsion I, Kligerman Y, Halperin G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces[J]. Tribology Transactions, 1999,42(3):511-516.

[4] Hamilton D B, Walowit J A, Allen C M. A theory of lubrication by micro-irregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966,88(1):177-185.

[5] Ranjan R, Lambeth D N, Tromel M, et al. Laser texturing for low-flying-height media[J]. Journal of Applied Physics, 1991,69(8):5745-5747.

[6] Ogihara H, Kido T, Yamada H, et al. Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement[J]. HONDA R&D Technical Review, 2000,12(2):93-98.

[7] 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(3):189-197.

[8] Wang X L, Kato K, Adachi K, et al. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed [J]. Tribology International, 2001,34(10):703-711.

[9] Wang X L, Kato K. Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing[J]. Tribology Letters, 2003,14(4):275-280.

[10] 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,2007,32(12):36-39.

[11] 彭旭东,杜东波,李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报,2006,26(4):367-371.

[12] 高飞,顾磊. 普通导轨表面微凹坑润滑的数值模拟和试验研究[J]. 煤矿机械,2006,27(7):38-41.

[13] 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):66-68.

[14] Kligerman Y, Etsion I. Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seal[J]. Tribology Transactions, 2001,44(3):472-478.

[15] Raeymaekers B, Etsion I, Talke F E. A model for magnetic tape/guide friction reduction by laser surface texturing[J]. Tribology Letters, 2007,28(1):9-17.

圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响

作者: [于海武](#), [王晓雷](#), [孙造](#), [袁思欢](#)
作者单位: [南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016](#)
刊名: [南京航空航天大学学报](#) **ISTIC EI PKU**
英文刊名: [JOURNAL OF NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS & ASTRONAUTICS](#)
年, 卷(期): 2010, 42(2)
被引用次数: 7次

参考文献(15条)

1. Etsion I;Burstein L [A model for mechanical seals with regular microsurface structure](#) 1996(03)
2. Halperin G;Greenberg Y;Etsion I [Increasing mechanical seals life with laser-textured seal faces](#) 1997
3. Etsion I;Kligerman Y;Halperin G [Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces](#)[外文期刊] 1999(03)
4. Hamilton D B;Walowit J A;Allen C M [A theory of lubrication by micro-irregularities](#) 1966(01)
5. Ranjan R;Lambeth D N;Tromel M [Laser texturing for low-flying-height media](#) 1991(08)
6. Oghihara H;Kido T;Yamada H [Technology for reducing engine rubbing resistance by means of surface improvement](#) 2000(02)
7. Wang X L;Kato K;Adachi K [Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water](#)[外文期刊] 2003(03)
8. Wang X L;Kato K;Adachi K [The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed](#)[外文期刊] 2001(10)
9. Wang X L;Kato K [Improving the anti-seizure ability of SiC seal in water with RIE texturing](#)[外文期刊] 2003(04)
10. [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](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2007(12)
11. [彭旭东](#); [杜东波](#); [李纪云](#) [不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响](#)[期刊论文]-[摩擦学学报](#) 2006(04)
12. [高飞](#); [顾磊](#) [普通导轨表面微观凹坑润滑的数值模拟和试验研究](#)[期刊论文]-[煤矿机械](#) 2006(07)
13. [王霄](#); [张广海](#); [陈卫](#) [不同微细造型几何形貌对润滑性能影响的数值模拟](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2007(08)
14. Kligerman Y;Etsion I [Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seal](#)[外文期刊] 2001(03)
15. Raeymaekers B;Etsion I;Talke F E [A model for magnetic tape/guide friction reduction by laser surface texturing](#)[外文期刊] 2007(01)

本文读者也读过(10条)

1. [王晓雷](#); [王静秋](#); [韩文非](#); [Wang Xiaolei](#); [Wang Jingqiu](#); [Han Wenfei](#) [边界润滑条件下表面微细织构减摩特性的研究](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#)2007, 32(12)
2. [朱华](#); [历建全](#); [陆斌斌](#); [马晨波](#); [Zhu Hua](#); [Li Jianquan](#); [Lu Binbin](#); [Ma Chenbo](#) [变密度微圆坑表面织构在往复运动下的减摩作用](#)[期刊论文]-[东南大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 40(4)
3. [于海武](#); [袁思欢](#); [孙造](#); [王晓雷](#); [Yu Hai-wu](#); [Yuan Si-huan](#); [Sun Zao](#); [Wang Xiao-lei](#) [微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响](#)[期刊论文]-[华南理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2011, 39(1)

4. [秦襄培, 陈汉新, QIN Xiang-pei, CHEN Han-xin UHMWPE人造表面结构摩擦学研究\[期刊论文\]-武汉工程大学学报](#) 2009, 31(12)
5. [阮鸿雁, 吕建军, 司辉, 刘会霞, 王霄, Ruan Hongyan, Lü Jianjun, Si Hui, Liu Huixia, Wang Xiao 多圆弧与三角形复合结构表面的动压润滑性能\[期刊论文\]-江苏大学学报\(自然科学版\)](#) 2010, 31(3)
6. [历建全, 朱华, Li Jianquan, Zhu Hua 表面织构及其对摩擦学性能的影响\[期刊论文\]-润滑与密封](#) 2009, 34(2)
7. [高东海, 刘焜, 袁根福, GAO Dong-hai, LIU Kun, YUAN Gen-fu 激光微加工凹坑表面形貌摩擦特性的试验研究\[期刊论文\]-合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 31(10)
8. [严东升, 刘伟, 王晓雷 表面织构对铸铁摩擦副摩擦性能的影响\[会议论文\]-2008](#)
9. [宋曼, 曲宁松, 钱双庆, 李寒松, 杨培剑, Song Man, Qu Ningsong, Qian Shuangqing, Li Hansong, Yang Peijian 微小凹坑阵列的电解转印加工试验研究\[期刊论文\]-电加工与模具](#) 2009(5)
10. [李敦桥, 刘小君, 黄毅, 刘焜, LI Dun-qiao, LIU Xiao-jun, HUANG Yi, LIU Kun 规则凹坑表面的连通性分析\[期刊论文\]-合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2009, 32(11)

引证文献(8条)

1. [邓海顺, 祁胜, 于海武, 王晓雷 轴向柱塞泵配流副低压区结构化数值分析\[期刊论文\]-农业机械学报](#) 2011(6)
2. [于海武, 袁思欢, 孙造, 王晓雷 微凹坑形状对试件表面摩擦特性的影响\[期刊论文\]-华南理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(1)
3. [张文谦, 朱华, 马晨波, 周元凯, 唐玮 表面凹痕织构动压承载性能的CFD分析\[期刊论文\]-润滑与密封](#) 2011(9)
4. [彭旭东, 余宝瑛, 孟祥铠, 李纪云 不同排布方向性椭圆孔液体润滑机械密封性能的研究\[期刊论文\]-摩擦学学报](#) 2013(5)
5. [郎达学, 苏华 表面织构靴底流体动压指尖密封的性能分析\[期刊论文\]-航空学报](#) 2012(8)
6. [于海武, 邓海顺, 黄巍, 王晓雷 微凹坑相对位置变化对表面减摩性能的影响\[期刊论文\]-中国矿业大学学报](#) 2011(6)
7. [邱孝聪, 樊曙天, 伍勇 表面织构改善摩擦磨损性能的研究进展\[期刊论文\]-润滑与密封](#) 2013(8)
8. [林起崧, 魏正英, 王宁, 陈渭 织构滑移表面对滑块轴承摩擦学性能的影响\[期刊论文\]-华南理工大学学报\(自然科学版\)](#) 2013(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_njhkht201002015.aspx