

镍基 718 材料表面修饰类型的有限元仿真优化设计

齐晓华, 魏冠义, 文晓娟

(郑州铁路职业技术学院, 郑州 451460)

摘要: **目的** 研究不同凹坑形状组合分布对表面特性的影响规律, 进一步提高微造型表面的摩擦学性能和承载能力。**方法** 利用有限元仿真技术和单因素仿真设计, 分析比较半球形、方形、三角形三种凹坑形状混合分布的微造型表面, 对镍基 718 高温合金摩擦学性能的影响。**结果** 分析获得了不同速度和载荷下, 不同微造型表面对油膜承载力和摩擦系数的影响规律。半球形、方形、三角形三种凹坑形状共同存在的微造型表面的承载能力最好, 而半球形凹坑和方形凹坑组合分布的微造型表面的摩擦系数最小。**结论** 对镍基 718 高温合金材料进行表面凹坑修饰, 可以显著提高油膜的承载能力, 有利于完整润滑油膜的形成。不同凹坑形状的组合分布对材料摩擦学性能和承载能力的影响非常大, 随着速度和载荷的增大, 各微造型表面的摩擦系数差别减小, 凹坑形状及组合分布对摩擦学性能的影响减弱。

关键词: 镍基 718 高温合金; 表面微造型; 凹坑形状; 摩擦系数; 油膜承载能力

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)12-0147-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.024

Simulation Optimization Design of Surface Finish Types for Inconel 718 Alloy in Finite Element Method

QI Xiao-hua, WEI Guan-yi, WEN Xiao-juan

(Zhengzhou Railway Vocational & Technology College, Zhengzhou 451460, china)

ABSTRACT: The work aims to further improve tribological properties and carrying capacity of micro-textured surface, and study the law of effects of different dimples combined distribution on surface properties. Finite element simulation technology and single factor design were used to analyze and compare effects of micro-textured surface textured with all hemispheric dimples, square dimples and triangle dimples on tribological properties of Inconel 718 alloy. Law of the effects of different micro-textured surfaces on bearing capacity and friction coefficient of oil film was analyzed and obtained. The micro-textured surface textured with all three dimple shapes exhibited the best bearing capacity. And the micro-textured surface with hemispheric dimples and square dimples had the minimum friction coefficient. For the Inconel 718 high-temperature alloy surface textured with modified dimples, the bearing capacity of oil film can be improved significantly, which is beneficial to the formation of complete oil film. Combined distribution of different dimple shapes has great significance on tribological properties and bearing capacity of material. Moreover, the gap among friction coefficients of different micro-textured surfaces narrows as the velocity and load increase, which implies that dimple shapes and combined distribution have weaker effects on tribological properties.

KEY WORDS: Inconel 718 high temperature alloy; surface micro-texture; dimple shape; friction coefficient; bearing capacity of oil film

收稿日期: 2017-05-04; 修订日期: 2017-06-19

Received: 2017-05-04; Revised: 2017-06-19

基金项目: 河南省科技厅科技公关项目 (162102210379)

Fund: Supported by Science and Technology Public Relations Project in Henan Province (162102210379)

作者简介: 齐晓华 (1980—), 女, 讲师, 研究方向为机械工程及自动化。

Biography: QI Xiao-hua (1980—), Female, Lecturer, Research focus: mechanical engineering and automation.

镍基 718 高温合金属于难加工材料,主要用于航空航天发动机中,零件形状十分复杂,零件精度要求很高,因此镍基 718 合金的加工效率和零件加工表面质量是航空航天技术水平的关键问题之一^[1]。如何提高镍基 718 材料的摩擦学性能,对于延长航空航天器零部件使用寿命至关重要。

统计表明,世界一次能源的 1/3 消耗于摩擦,60% 的机械材料损耗源于磨损。控制摩擦、改善润滑、减少磨损已成为节约能源和原材料、提高部件使用寿命、增加材料可靠性的重要措施^[2-3]。材料表面纹理的密度、走向和图案形状、尺寸、分布等特征,都会影响接触应力、润滑成膜能力及压力分布形态,进而影响材料的承载能力和耐磨性能^[4]。故通过材料表面的图形化设计和材料表层结构的组合设计,可以有效提高摩擦副的摩擦学性能和承载能力。

近几年来,对表面纹理结构的设计、制备及其摩擦磨损和润滑性能的研究分析,已经成为摩擦学和表面工程学科的热点问题^[5-8]。彭旭东等^[9]比较了在端面开启力与闭合合力平衡的状态下,“凹”、“凸”两种微织构端面密封的性能特性。结果表明,在相同工况和面积比的条件下,“凹”型微织构端面密封的综合性能优于“凸”型微织构端面密封。Wang 等^[10]分析了圆柱形、球冠形、锥形、六角形、三角形、正方形等截面形状的点状纹理,对两滑动表面摩擦润滑性能的影响。研究结果表明,球冠形截面形状形成油压的区域明显大于圆柱形和圆锥形截面形状的油压区域,在相同表面占有率和纹理深度下,正三角形截面形状的有效油膜压力的区域较大,在相对滑动的表面中形成的间隙较大,因而摩擦系数较小。Han 等^[11]利用三维有限元仿真技术,研究了流体润滑下半球形凹坑的直径、深度及雷诺数对油膜压力和摩擦系数的影响规律,并对半球形凹坑进行了尺寸优化。

虽然对表面微织构的研究很多,而且在微型体的形状、分布、面积比、深径比等方面进行了深入研

究^[12-15],但是目前研究主要着眼于单独一种凹坑形状的组合分布研究与对比分析,对于不同凹坑形状的组合排列分布对材料摩擦学性能的研究很少,而且对镍基 718 高温合金这种难加工材料的微造型研究也较少。基于此,本文利用有限元仿真技术,研究了弹性流体润滑条件下,三种不同凹坑形状(半球形、方形、三角形)的不同组合分布对镍基 718 高温合金的摩擦学性能及承载能力的影响规律,并对比优选出了不同速度条件下摩擦学性能最好的微观凹坑形状。

1 三维有限元模型

以镍基 718 高温合金作为基材,在工件表面进行不同凹坑形状的微造型。Inconel 718 高温合金的主要性能如表 1 所示^[16]。

表 1 镍基 718 高温合金主要力学性能

Tab.1 Main mechanical properties of Inconel 718 high temperature alloy

Density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elasticity modulus E/GPa	Yield strength/MPa	Poisson's ratio μ
8240	199.9	550	0.3

1.1 有限元模型的建立

根据零件使用场合不同,零件摩擦副工作运行的润滑状态也有很大的差异。大部分实际工况条件下,理想的流体润滑是很难实现的。轻载或中载条件下,润滑油供应充足时,摩擦副一般都处于弹性流体润滑状态。此时摩擦副表面间既存在完全被油膜隔离的固液接触,又存在润滑油膜被破坏后的固固接触,因此所建立的有限元模型必须同时包括固体之间的滑动接触及固体与润滑油膜之间的滑动接触两部分。故本文利用 ABAQUS 流固耦合功能,建立了包括微造型表面、润滑油膜和光滑固体表面三部分的精确有限元模型,如图 1 所示。

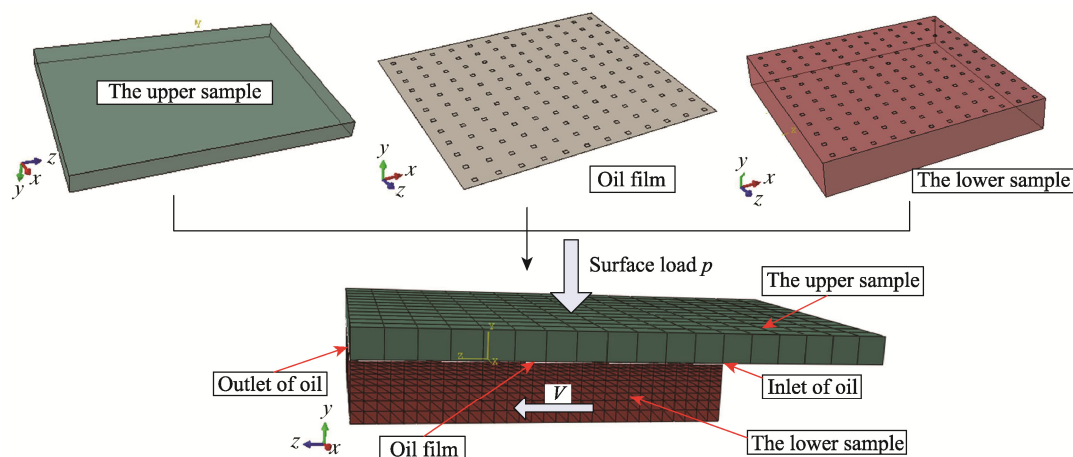


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

上试样为光滑固体，同样采用镍基 718 高温合金，尺寸为 12 mm×18 mm×1 mm。上试样分别以不同速度沿 Y 方向匀速运动，并对上试样施加一定的压强作为初始载荷。微造型表面为下试样，尺寸为 12 mm×12 mm×2 mm，凹坑形状分别为半球形、方形和三角形的不同组合。凹坑间距为 1 mm，深为 15 μm，每个试样表面共分布有 100 个微型凹坑。

润滑油膜位于上下试样之间，初始最小厚度为 2 μm。油膜附着于微造型表面和光滑固体试样的上表面，并沿厚度方向产生速度梯度。润滑油密度 ρ 为 875 kg/m³，动力黏度为 0.059 Pa·s。计算流体雷诺数可知，润滑油处于层流状态。

1.2 边界条件及网格划分

仿真时将下试样完全固定，上试样固定 X 方向的移动及 Y、Z 方向的转动。设置油膜各表面为无滑移壁面，并设置相应的液体入口和出口。具体边界条件如图 1 所示。

上试样采用八节点线性六面体单元（C3D8R），单元边长为 1 mm，共划分网格 144 个单元；下试样采用二次四面体单元（C3D10），采用自下而上递进的加密方式，凹坑表面单元最小边长为 0.08 mm，从而保证微观凹坑区域网格分布周密合理，共划分网格 265 467 个单元。液体试样采用 8 节点线性流体四面体单元（FC3D4），单元边长为 0.2 mm，共划分网格 14 172 个单元。

1.3 流体动力学方程

假设流体为牛顿流体，采用雷诺方程来求解油膜压力，如公式(1)所示^[17]。

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho h^3}{\eta}\frac{\partial p}{\partial y}\right)=$$

(1)

$$12\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho Uh)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho Vh)+\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}\right]$$

式中：ρ 为润滑剂密度；U、V 为两接触表面沿 X、Y 方向的平均速度（ $U=(U_1+U_2)/2$ ， $V=(V_1+V_2)/2$ ）；h 为油膜厚度；p 为所受压强；η 为润滑剂动压黏度。

相较于微观凹坑尺寸，表面粗糙度值非常小，可以忽略不计，故油膜厚度可以简化为：

$$h(x,y)=\begin{cases} h_0 & (x,y)\notin\Omega \\ h_0+h_t & (x,y)\in\Omega \end{cases}$$

(2)

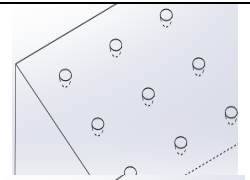
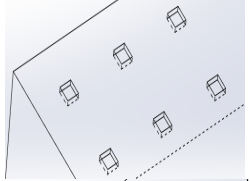
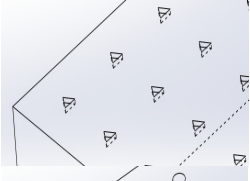
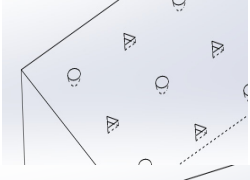
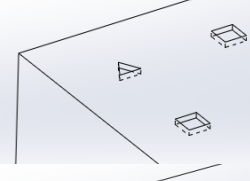
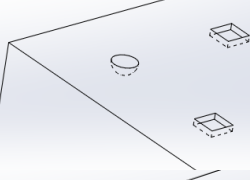
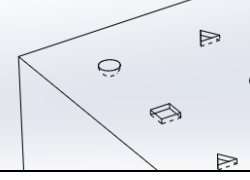
式中：h₀ 为最小油膜厚度；h_t 为凹坑深度；Ω 为凹坑区域。

2 仿真设计

将三种凹坑形状（半球形、方形、三角形）进行组合设计，然后对下试样表面进行微造型建模，如表

2 所示。采用单因素实验，研究不同速度（0.5、1、1.5、2 m/s）、不同载荷（10、50、100、150 MPa）条件下，具有不同凹坑形状表面的油膜承载能力和摩擦系数变化，并分析原因。

表 2 凹坑形状及组合分布
Tab.2 Dimple shapes and combinatorial distribution

Pat-terns	Shapes and distribution	Size/μm	Depth/μm	Model
No.1	○ ○ ○	200(Dia-meter)	20	
No.2	□ □ □	200(Sid-e)	20	
No.3	△ △ △	200(Sid-e)	20	
No.4	○ △ ○	200	20	
No.5	□ △ □	200	20	
No.6	○ □ ○	200	20	
No.7	○ □ △	200	20	

3 结果与讨论

表面织构可以产生附加流体动压效应，使油膜的承载能力得到提高，改善润滑性能。本文分别研究了流体润滑条件下，不同凹坑形状组合分布对油膜承载能力的影响规律，及弹性流体润滑条件下，不同凹坑形状组合分布对摩擦系数的影响。

3.1 不同凹坑形状组合分布对油膜承载能力的影响

研究表面微造型凹坑对油膜承载能力的作用,首先控制油膜最小厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 保持不变,上试样承受 $10\ \text{MPa}$ 压强,以不同速度匀速滑动,模型如图 2 所示(以半球形凹坑和方形凹坑组合分布为例),此时摩擦副处于流体润滑状态。

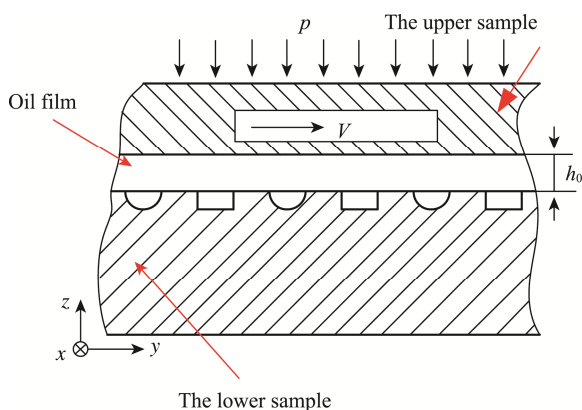


图 2 有限元模型简化示意图

Fig.2 Simplified schematic diagram of finite element model

图 3 为典型单一凹坑二维油膜压力展示(单一圆形、方形和三角形凹坑),可以看出,在凹坑区域,油膜压力逐渐增大,达到凹坑右边界后,油膜压力开始逐渐下降。所以凹坑的产生有利于接触面间动压效应的产生,使油膜压力增大,从而增强油膜承载能力,提高接触面的润滑性能。

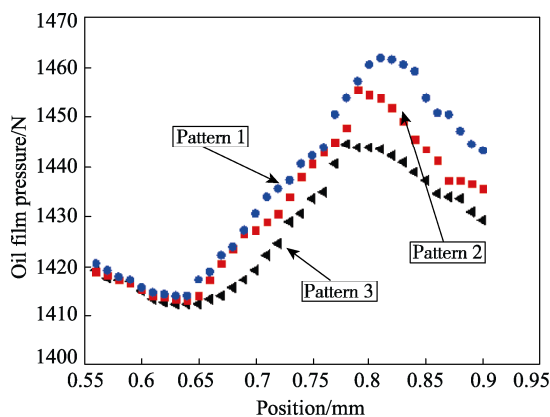


图 3 典型单一凹坑区域二维油膜压力展示

Fig.3 2D oil film pressure in typical single dimple area

有限元分析结束后,在油膜压力趋于平稳区域取其平均值,计算获得平均油膜压力。然后在将不同速度与载荷下的各种凹坑形状分布组合的油膜压力进行了对比分析,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,三种单一形状的凹坑修饰表面(第 1—3 组),油膜的承载能力最小,其中,三角形凹坑的油膜承载能力是所有凹坑形状组合中最差的,

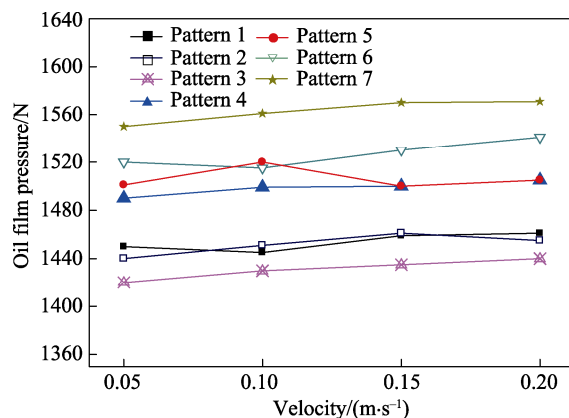


图 4 油膜压力随速度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of oil film pressure as a function of velocity

而半球形凹坑与方形凹坑的油膜承载能力相近。三组两种凹坑形状交叉排布的微造型表面(第 4—6 组)的油膜承载能力比较接近,都较为优异。三种凹坑形状共同存在的第 7 组微造型表面的油膜承载能力最大,说明不同凹坑形式的交叉排布有利于润滑油的滞留和流动,从而更容易形成完整的润滑油膜,提高微造型表面的承载能力。综合 7 组微造型表面,在载荷一定的条件下,三种凹坑形状共同存在时,微造型表面的油膜承载能力最好,而只有三角形凹坑分布的微造型表面的油膜承载能力最差。随着速度的增大,油膜承载能力逐渐增大,但变化非常小,这说明对于微造型表面,速度在一定范围内变化时,对油膜承载能力的影响不大。

3.2 不同形状组合分布凹坑表面对摩擦系数的影响

利用流固耦合有限元模型,模拟弹性流体润滑条件下润滑油膜随着上试样运动的变化,研究了不同微造型表面的摩擦系数随速度和载荷的变化规律。图 5 为半球形凹坑表面,在载荷为 $10\ \text{MPa}$ 、不同速度条

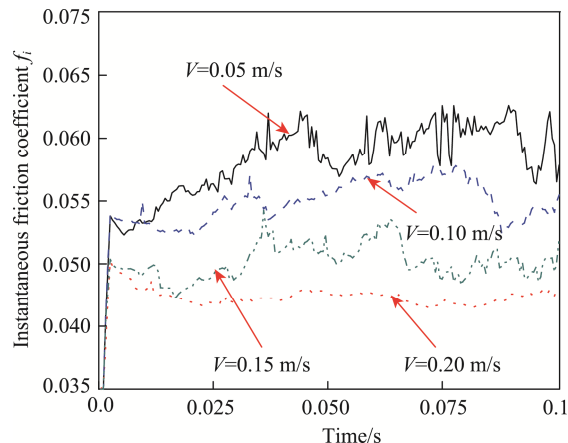
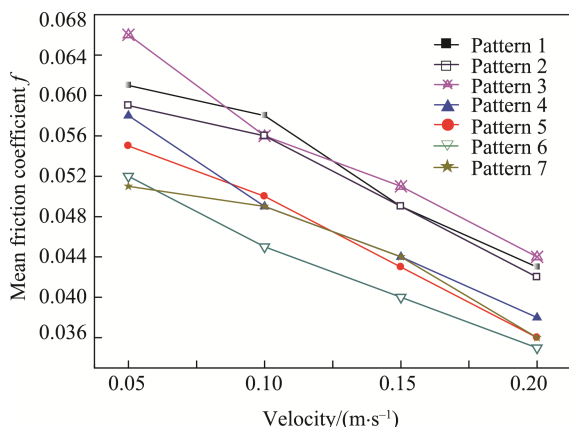


图 5 半球形凹坑修饰表面瞬时摩擦系数 f_i 对比

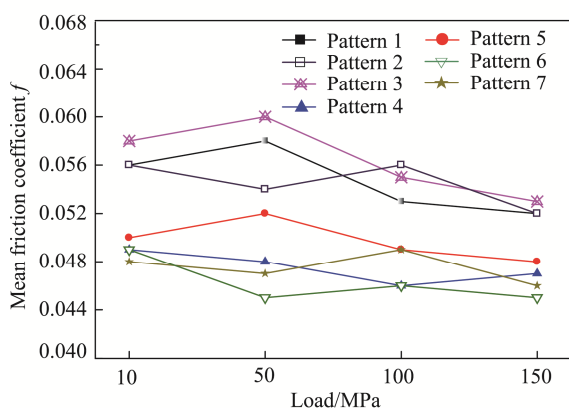
Fig.5 Comparison of instantaneous friction coefficient f_i for surfaces textured with hemispherical dimples

件下的瞬时摩擦系数 f_i 对比。从图 5 可以看出, 随着速度的增大, 半球形凹坑表面的摩擦系数逐渐减小, 而且在 0.035 s 后, 摩擦系数基本趋于稳定, 可以用于后续的对比如分析。

摩擦系数稳定后, 取其平均值, 对不同微造型表面的平均摩擦系数随速度和载荷的变化进行分析, 如图 6 所示。



a 平均摩擦系数随速度的变化(载荷为10 MPa)



b 平均摩擦系数随载荷的变化(速度为0.1 m/s)

图 6 不同微造型表面平均摩擦系数对比

Fig.6 Comparison of mean friction coefficient f for different micro-textured surfaces: (a) variation curve of mean friction coefficient as a function of velocity; (b) variation curve of mean friction coefficient as a function of load

从图 6a 可以看出, 不同微造型表面的平均摩擦系数基本分为两个梯度: 只有一种凹坑形状的第 1—3 组微造型表面为第一梯度, 摩擦系数较大, 其中三角形凹坑表面的摩擦系数最大; 两种凹坑形状及三种凹坑形状组合排布的第 4—7 组微造型表面为第二梯度, 摩擦系数较小, 其中半球形凹坑与方形凹坑组合排布的第 6 组微造型表面的摩擦系数最小。分析说明: 相较于单一凹坑形状的微造型表面, 不同凹坑形状组合排布有利于润滑油的存储和流动, 从而可以改善润滑油对接触副表面的润滑效果, 提高接触表面的摩擦学性能。横向沿速度变化方向分析, 随着速度的增大, 各微造型表面的平均摩擦系数都有所降低, 说

明提高滑动速度有利于润滑油膜的形成。而对比不同速度运动时不同微造型表面平均摩擦系数的变化程度, 发现速度为 0.05 m/s 时, 不同微造型表面的摩擦系数变化范围明显大于速度为 0.2 m/s 时的摩擦系数变化范围, 说明随着速度的增大, 微造型凹坑形状对接触副表面的摩擦学性能的影响逐渐减小。因为随着速度的增大, 接触副表面间的动压效应增强, 更容易形成良好的润滑油膜, 从而减弱了微造型凹坑对润滑油膜形成的作用。

图 6b 为不同微造型表面平均摩擦系数随载荷变化的规律。整体来看, 7 组微造型表面的摩擦系数同样可以分为两个梯度, 与图 6a 相似: 第 1—3 组微造型表面为第一梯度, 摩擦系数较大, 在载荷较小时, 三角形凹坑表面的摩擦系数最大, 随着载荷的增大, 三组微造型表面的摩擦系数逐渐接近; 第 4—7 组微造型表面为第二梯度, 摩擦系数较小, 其中半球形凹坑与方形凹坑组合排布的第 6 组微造型表面的平均摩擦系数最小, 但与其他三组的差异很小。而横向沿载荷变化方向分析, 随着载荷的增大, 各微造型表面的摩擦系数略有减小, 但是波动相比于随速度的变化明显较小, 说明载荷变化对于微造型表面的摩擦系数的影响较小。类似的, 随着载荷的增大, 各微造型表面的摩擦系数的变化范围也在逐渐减小, 说明载荷增大会降低微造型凹坑对润滑油膜形成的有利作用, 从而使减摩效果下降。

4 结论

1) 对镍基 718 高温合金材料进行表面凹坑修饰, 可以使接触副间的动压效应增强, 显著提高油膜的承载能力, 有利于完整润滑油膜的形成。

2) 不同凹坑形状的分布对材料摩擦学性能的影响非常大。本文设计的不同凹坑形状组合分布中, 半球形凹坑与方形凹坑搭配组合的微造型表面具有最小的摩擦系数, 而单一三角形凹坑表面的摩擦系数最大。

3) 不同凹坑形状的分布对油膜承载能力也有一定影响。本文设计的不同凹坑形状组合分布中, 半球形、方形和三角形凹坑组合的微造型表面油膜承载能力最好, 同样单一三角形凹坑表面的油膜承载能力最差。

4) 随着速度和载荷的增大, 各微造型表面的摩擦系数差别减小, 凹坑形状及组合分布对摩擦学性能的影响减弱。

参考文献:

- [1] 路彦君. 镍基高温合金 Incone1718 微铣削残余应力与加工硬化研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2016.

- LU Yan-jun. Researches on Residual Stress and Work Hardening on Micro-milling Nickel-base Superalloy Inconel 718[D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2016.
- [2] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [3] 周仲荣. 摩擦学发展前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHOU Zhong-rong. Tribology Development Frontier[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] ETSION I. Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing[J]. Tribology Letters, 2004, 17(4): 733-737.
- [5] 张恩阳. 表面微凹坑阵列对流体动压润滑性能的影响 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
ZHANG En-yang. The Impact of Surface Micro-dimple Array on Hydrodynamic Lubrication[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [6] 王延庆. 钢表面凹坑纹理的制备及摩擦学性能研究 [D]. 江苏: 中国矿业大学, 2010.
WANG Yan-qing. Study on Preparation and Tribological Properties of Dimple-texture on the Steel Surface[D]. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2010.
- [7] 陈傲, 王书文, 蒋春燕. 激光表面织构对铸铁摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 163-169.
CHEN Ao, WANG Shu-wen, JIANG Chun-yan. Effect of Laser Surface Texturing on Frictional and Wear Performance of Cast Iron[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 163-169.
- [8] VLĂDESCU S C, MEDINA S, OLIVER A V, et al. The Transient Friction Response of a Laser-textured, Reciprocating Contact to the Entrainment of Individual Pockets[J]. Tribology Letters, 2016, 62(2): 19.
- [9] 彭旭东, 杜东波, 盛颂恩, 等. 端面微形体对液体润滑机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(4): 352-356.
- PENG Xu-dong, DU Dong-bo, SHENG Song-en, et al. Effect of Face Asperity Geometry on Performance of a Liquid Lubricated Face Seal[J]. Tribology, 2007, 27(4): 352-356.
- [10] WANG X, ADACHI K, OTSUKA K, et al. Optimization of the Surface Texture for Silicon Carbide Sliding in Water[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(3): 1282-1286.
- [11] HAN J, FANG L, SUN J, et al. Hydrodynamic Lubrication of Microdimple textured Surface Using Three-dimensional CFD[J]. Tribology Transactions, 2009, 53(6): 860-870.
- [12] WOS S, KOSZELA W, PAWLUS P. The Effect of Both Surfaces Textured on Improvement of Tribological Properties of Sliding Elements[J]. Tribology International, 2016, 113: 182-188.
- [13] SHEN X H, TAO G C. Tribological Behaviors of Two Micro Textured Surfaces Generated by Vibrating Milling under Boundary Lubricated Sliding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(9): 1995-2002.
- [14] SHEN C, KHONSARI M M. Numerical Optimization of Texture Shape for Parallel Surfaces under Unidirectional and Bidirectional Sliding[J]. Tribology International, 2015, 82: 1-11.
- [15] 王洪涛, 李艳, 朱华. 具有分形特征的织构表面的润滑减摩性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 182-187.
WANG Hong-tao, LI Yan, ZHU Hua. Lubrication and Anti-friction Properties of Textured Surfaces with Fractal Characteristics[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 182-187.
- [16] 宋新玉. 镍基合金 Inconel 718 高速切削刀具磨损机理研究[D]. 山东: 山东大学, 2010.
SONG Xin-yu. Tool Wear Mechanisms in High Speed Machining Nickel-based Alloy Inconel 718[D]. Shandong: Shandong University, 2010.
- [17] LI J, CHEN H. Evaluation on Applicability of Reynolds Equation for Squared Transverse Roughness Compared to CFD[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(4): 963-967.