

基于ANSYS Fluent的仿生表面微结构仿真分析

敬乾明

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月28日; 录用日期: 2024年5月21日; 发布日期: 2024年5月28日

摘要

随着对表面微结构研究的不断深入, 表面微结构已经被研究证实具有较为优越的摩擦性能。为了研究仿生表面微结构对于材料表面摩擦学性能的影响, 本文基于仿生思想, 以自然界生物表面为原型抽象设计出三角形、梯形、正方形表面结构, 利用Fluent软件分别对不同形貌表面微结构进行流体润滑仿真分析, 分析对比了不同形貌的微结构对于油膜内部压力分布的影响。结果表明: 与光滑表面相比, 表面微结构的存在能够使表面油膜产生流体动压润滑效应, 能够有效改善摩擦副之间的摩擦学性能。其中梯形结构具有较大的平均正压力值, 和较小的负压, 摩擦学性能最好。三角形结构的静压力峰值比正方形和梯形结构峰值都要大, 峰值之间间距最小。为表面微结构设计的应用提供一定的理论指导和技术支撑。

关键词

仿生摩擦学, 流体仿真分析, 表面微结构, ANSYS Fluent, 空化效应

Simulation Analysis of Bionic Surface Micro-Texture Based on ANSYS Fluent

Qianming Jing

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2024; accepted: May. 21st, 2024; published: May. 28th, 2024

Abstract

With the deepening of the research on the surface micro-texture, the surface micro-texture has been proved to have superior friction properties. In order to study the influence of biomimetic surface micro-texture on the tribological properties of material surfaces, this paper abstractly designs triangular, trapezoidal and square surface textures based on the biomimetic idea and takes the natural biological surface as the prototype, and uses Fluent software to conduct fluid lubrication simulation analysis on the surface micro-texture of different morphologies. The influ-

ence of different morphologies on the pressure distribution in the oil film was analyzed and compared. The results show that compared with the smooth surface, the existence of micro-texture can produce hydrodynamic lubrication effect on the surface oil film, which can effectively improve the tribological properties between the friction pairs. Among them, trapezoidal texture has a larger average positive pressure value and a smaller negative pressure, so the tribological performance is the best. The peak static pressure of triangular texture is larger than that of square and trapezoidal texture, and the distance between the peaks is the smallest. It provides some theoretical guidance and technical support for the application of surface micro-texture design.

Keywords

Bionic Tribology, Fluid Simulation Analysis, Surface Micro-Texture, ANSYS Fluent, Cavitation Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

摩擦和磨损是一直困扰着世界各国工业发展的主要问题之一。传统摩擦学认为，相互接触的表面越光滑(粗糙度越小)，则其摩擦学方面的性能越优异，然而，1966年 Hamilton [1]提出了附加流体动压效应，经过 Etsion 等[2]的不断研究深化发现，在摩擦副表面加工一定的形貌织构能够有效地改善摩擦学性能。Wang 等[3]针对带有不同形状微凹坑织构的摩擦副，基于流体的 Navier-Stokes 计算方程，建立了二维有限元模型，分析了不同形状微凹坑织构产生的流体动力效应对摩擦副摩擦性能的影响。凹坑织构能够改善摩擦副的摩擦学性能。Tong 等[4]实验研究并分析表面织构降低摩擦磨损的相关机理。研究表明，产生流体动压，捕捉磨损碎屑以及存储润滑剂是表面织构减小摩擦和磨损的主要原因。Olver [5]和 Fowell [6]等提出了“入口吸力”，其中气穴作用于驱动接触式入口中的流体流动，并对封闭腔中的润滑剂加压，导致润滑剂夹带量增加，从而增加了负载。四川大学的于如飞等[7]利用商业软件 FLUENT 建立了圆形凹坑织构的二维和三维模型，研究了表面织构分布角度对其表面的承载力的影响。结果表明，分布角度在 30 度时，织构表面上的压力峰值最大。仿生摩擦学是摩擦学与生命科学的有机结合，旨在通过学习生物系统来探索和提高摩擦学系统和元件的性能，并研究减摩或增摩、粘附或抗粘附的机理，生物系统的抗摩和高效润滑。刘洋等[8]对鲨鱼皮进行了显微观测和水动力特性分析，并将仿生表面织构应用于水翼吸力面，结合数值模拟的方法验证了仿生微槽形织构的减阻性能。本文从自然界生物表皮微观结构出发，设计了表面织构几何形状。从白硅鱼鳞和沙蜥体表[9]提取了微观纹理的几何形状，并简化、抽象得到三角形、梯形和正方形仿生表面微织构。研究了表面微织构油膜压力分布的数值仿真，并对仿真结果进行分析，通过分析其仿真得到的压力分布图、速度矢量图和直方图来探究表面微织构在润滑条件下对摩擦表面产生的影响。为未来在不同领域选取合适形貌的表面织构、提升材料表面的摩擦学性能提供了参考。

2. CFD 模型建立

2.1. 仿生表面织构设计

如图 1 所示，本文通过白硅鱼鳞片表面，根据其体表鳞片缝隙阴影处为原型抽象设计出梯形表面织

构,以及对沙蜥体表鳞片抽象设计出三角形和正方形表面织构,保持单个织构和总的计算域的大小不变,其中织构的CAD示意图如图2所示。如图3所示,当油液进入凹坑的时候,会在凹坑的后半部分产生正的压力,而在前半部分处压力会减小。随着负压的降低,会出现空穴效应,凹坑上方会产生不对称的压力,呈现正压大,负压小的形态。本研究的流体仿真分析以不同形貌的微织构为研究对象,采用2022R1版ANSYS Fluent软件进行计算,分析其对表面流体动压效应的影响,数值模拟过程中涉及到的具体参数如表1所示。

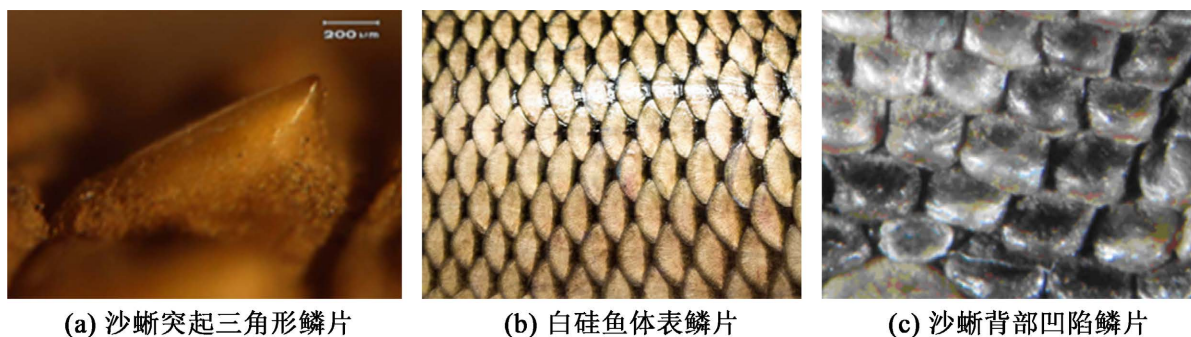


Figure 1. Biomimetic surface texture geometry
图1. 仿生表面织构几何形状

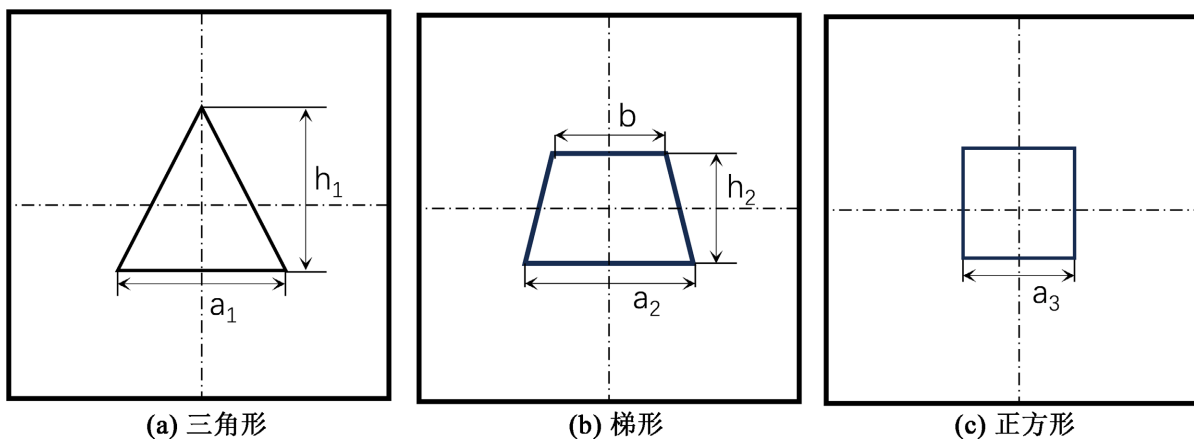


Figure 2. CAD diagram of three textures
图2. 三种织构CAD示意图

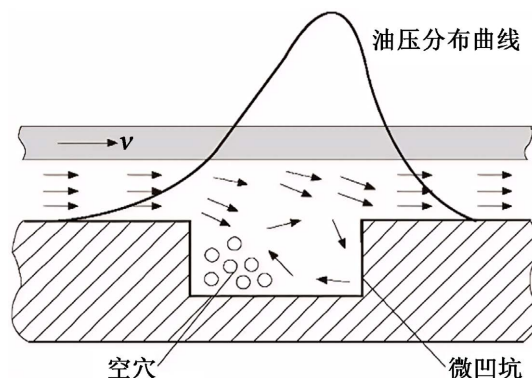


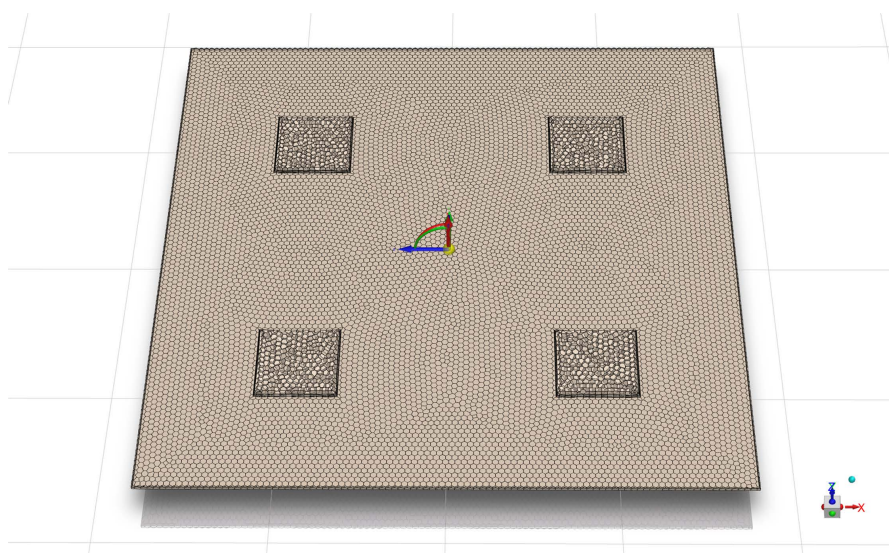
Figure 3. Schematic diagram of hydrodynamic pressure generated by surface texture
图3. 表面织构产生流体动压示意图

Table 1. Numerical simulation parameter**表 1.** 数值模拟参数

| 参数 | 数值 | 单位 |
|----------------------|-------------|-------------------|
| 计算区域 L | 1000 × 1000 | μm |
| 三角形底边 a1; 高 h1 | 150; 165 | μm |
| 梯形下底 a2; 上底 b; 高 h2 | 180; 90; 90 | μm |
| 正方形边长 a3 | 110 | μm |
| 环境压力 | 0.101325 | MPa |
| 油膜厚度 | 20 | μm |
| 织构深度 | 20 | μm |
| 润滑油 Castrol 5w-30 密度 | 849 | kg/m ³ |

2.2. 边界条件及网格模型

将三维模型导入到 ANSYS Fluent 软件。本文建立的是三维 CFD 周期单元模型，采用多面体网格进行网格划分，设置最大面网格 10 μm，为了保证计算结果的精确性，设置边界层 3 层，增长率生长率为 1.2，过度比为 0.272。网格划分方式如图 4 所示。

**Figure 4.** 3D Fluid Meshing (Square)**图 4.** 三维流体网格划分(正方形)

仿真计算边界条件：如图 5 所示，计算域设置周期进出口边界，周期边界在 FLUENT 中进行设置，设置周期边界的目的是为了模拟微型凹坑织构绕着 z 轴的周期分布：流体从右侧流入后从左侧流出，然后再从左侧以相同的方式流入下一个计算域的右侧边界。将计算域沿着 y 方向的壁面设为周期边界，沿着 x 方向的壁面设为对称边界，同时假设在 z 方向上无滑移。将微织构下壁面设置为滑动壁面，运动速度为 1 m/s，上壁面为静止壁面，采用流体动力学标准 $k-\epsilon$ 湍流模型，油膜密度为 849 kg/m³ 动力粘度为 0.009718 Pa·s。

本文选择 PRESTO 离散方法，该模型易于收敛。FLUENT 中动量的离散方式选择 Second Order Upwind

方式，该方式适用于四面体网格，收敛快，计算速度较慢。体积分数选择 QUICK。经过计算得到的油膜压力分布如图 6 所示。

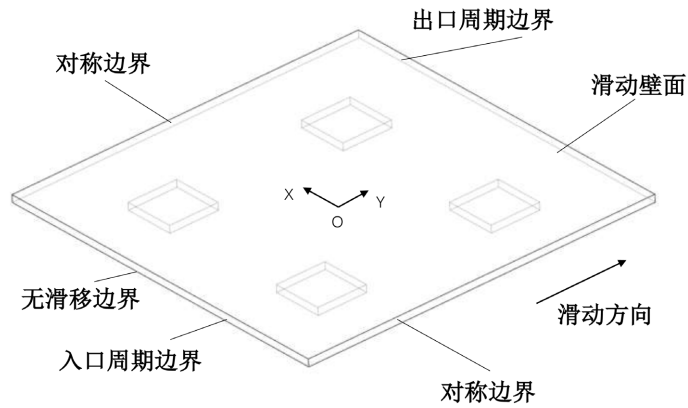


Figure 5. Boundary settings
图 5. 边界设置

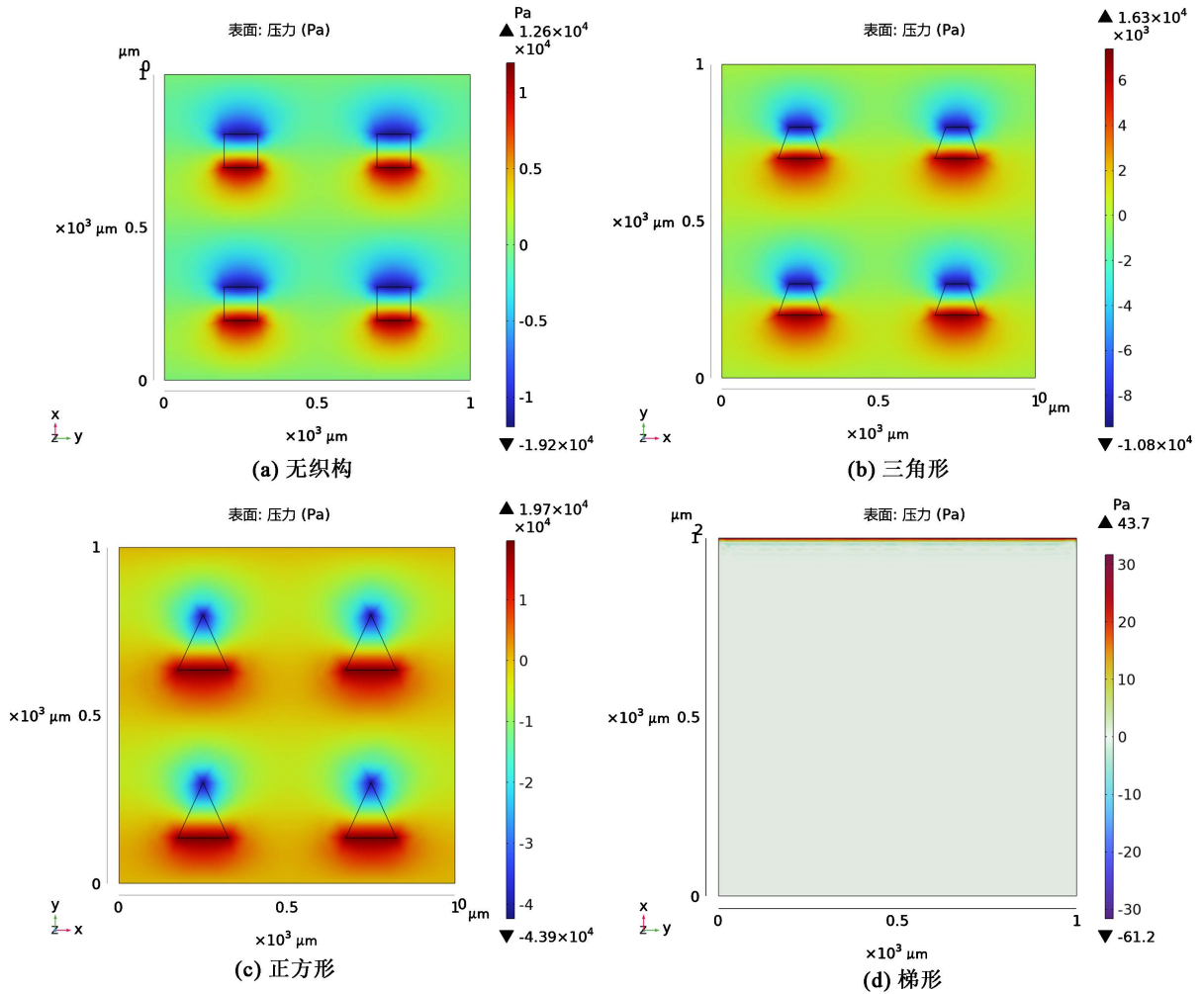


Figure 6. Surface oil film pressure distribution of different micro-textures
图 6. 不同形貌微织构的表面油膜压力分布图

3. 仿真结果及分析

从图中可以看出,与无织构表面相比,织构的存在改变了摩擦表面的油膜压力分布。织构表面润滑层的压力产生了波峰和波谷。润滑油液会先从流经波谷区域,再流经波峰区域。产生这种分布方式的原因:单个的微织构可以看成收敛的微楔形,当摩擦副相对于织构经过时,会先挤压织构内的润滑油液,增加收敛区润滑剂的压力,从而形成波峰;当对摩擦副远离织构时,又会使织构内润滑油液发散从而减小动压力,因此会形成波谷。对比三种微织构图压力分布图,收敛区形貌有角度的织构所产生的正压力要比对称织构(正方形)要高,如图6所示具有表面微织构的表面均比无织构表面有更好的流体润滑效应,其中三角形、正方形和梯形的最大正压力分别为19.7 kPa、12.6 kPa和16.3 kPa,可以看出三角形织构形貌的油膜正压力极值效果最好。其中三角形织构由于收敛区域角度更小空间更窄,润滑油液流经该区域后产生的负压更为集中,所以导致有较高的负压力。对比图(b)、图(c)和图(d)的油膜压力分布图可以看出,作为具有角度的微织构,三角形织构比正方形和梯形织构产生的负压力大的多,这主要是由于流体流入口处会产生发散区域,从而使负压极值减小,而三角形微织构入口区域由于明显的发散区域存在,这就导致三角形织构入口处存在较大的负压力值。

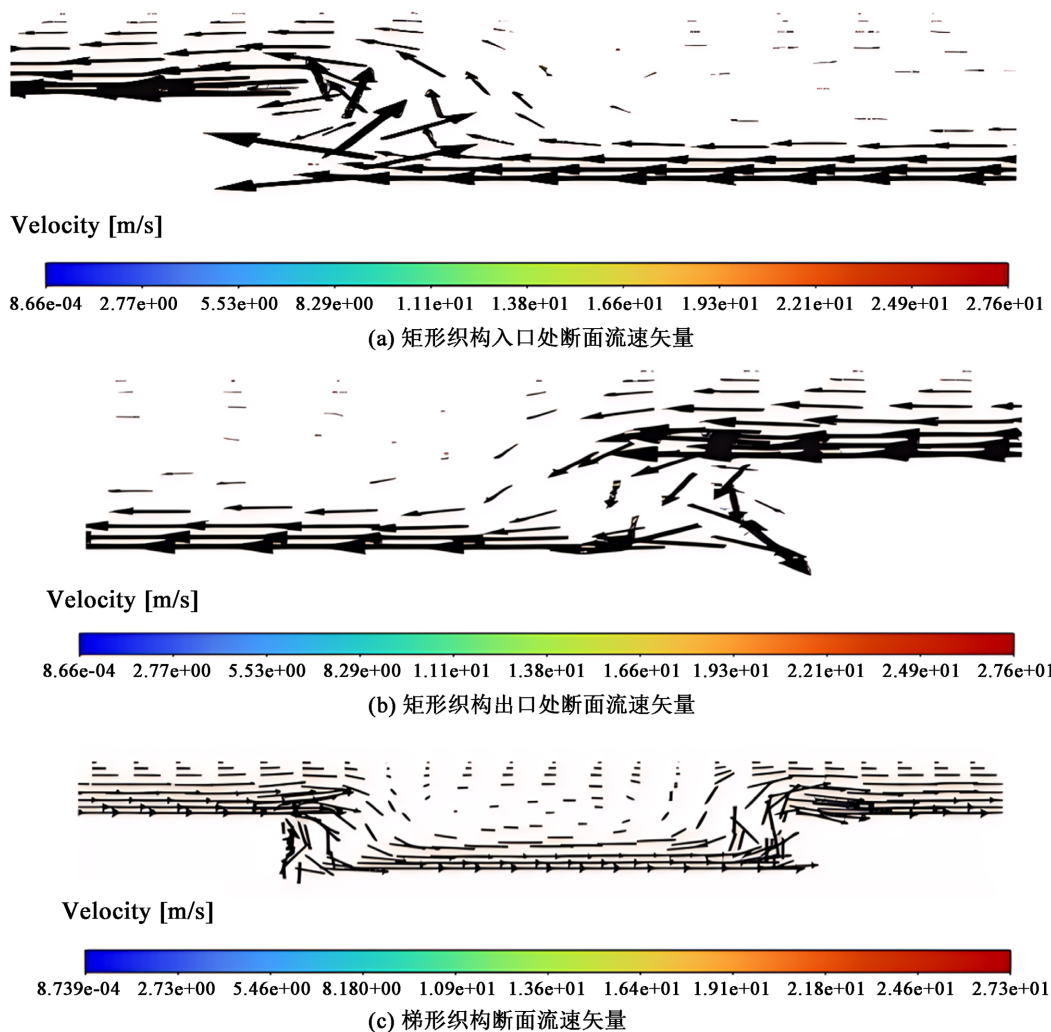


Figure 7. Velocity vector diagram of rectangular texture and trapezoidal texture

图7. 矩形织构和梯形织构速度矢量图

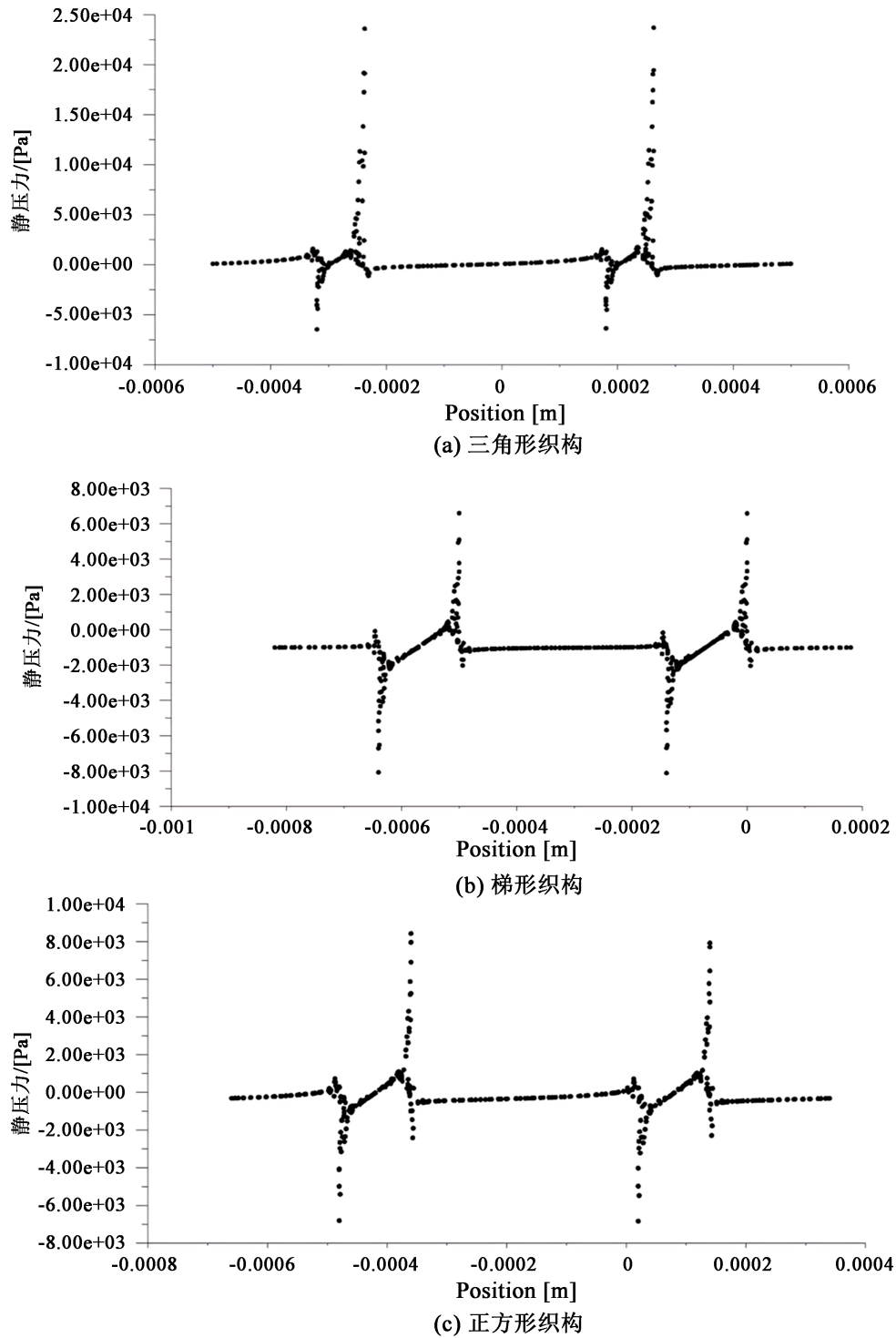


Figure 8. x-y histogram of static pressure of three morphologies
图 8. 三种形貌织构静压力的 x-y 直方图

对比梯形织构与正方形织构入口处，梯形织构相较于正方形织构产生负压力值更小，是因为织构流体之间产生相互作用分别在入口处附近和出口处附近产生涡流现象，从分布图中可以看出梯形结构出口产生正压力区域比负压力区域更大，是因为在局部压力降低产生气泡，液体中气体随着流体流入高压区

域, 气泡瞬间塌缩从而导致出口处压力升高。

如图 7 所示为矩形和梯形的流速矢量图, 可以看出, 润滑油进入矩形织构边界处, 部分油液由于运动空间扩大和形成发散区域产生负压后的速度矢量方向朝向反方向形成涡流; 而当润滑油液流经出口附近时, 由于织构内部油液要向出口方向流出, 因此导致油液运动空间相对缩减, 所以便形成了收敛区域导致产生了高压。由于织构尺寸相对较小(织构面积占计算域面积 5%), 油液流经织构时产生涡流, 因此会对内部油膜产生类轴承效果, 这有利于提升仿生表面织构的摩擦学性能。

同时, 为了更好的分析不同织构形貌(正方形、三角形和梯形)的表面织构对摩擦副表面性能的影响, 以单个织构的对称轴为截面, 生成 x-y 直方图如图 8 所示, 直观分析各个织构内部压力变化趋势。

从图中可以看出各个形貌的织构直方图都有两个明显的变化峰值, 它们分别在织构的入口处出现最大负压力, 出口处出现最大正压力。这是因为润滑油液在流经织构边界区域时产生发散区以及收敛区所产生的压力变化。如图所示流体从入口(从左至右)流经织构边界时有一个小的峰值, 是由于发生空化效应使局部的压力增加, 进而使发散区压力的减小程度小于收敛区的压力增加程度。其中三角形织构的静压力峰值比正方形和梯形织构峰值大, 峰值之间间距最小, 这是因为三角形织构作用的区域较小, 对油液流经织构时其产生的静压力起集中作用。对比三角形和梯形织构, 虽然三角形具有较大的正压力, 但是从图 8(a)可以看出其压力点非常稀疏, 对比而言梯形织构虽然没有最大静压力, 但是其平均压力比三角形织构大。对比三种织构峰值之间的间距可以看出, 正方形峰值间距大于梯形大于三角形, 因此可以推断出流体润滑状态下的表面微织构具有的角度对其正压力有加强效应, 但是正方形的最大负静压力值比梯形的值大, 是因为油液流经梯形织构出口时所接触的 x-z 轴截面接触面积比正方形的大, 所以产生最大静压力比正方形大, 较大的正压力进而对入口处的负压产生影响。由此可见, 梯形织构在最大正压力极值虽比三角形小, 但其产生的平均正压力较大, 与此同时产生的负压比正方形织构的小, 这将有效地增加了梯形微织构流体润滑的承载能力, 改善了材料接触面的摩擦学性能。

4. 结论

通过上述仿真可以得出如下结论:

1、相较于光滑平面, 微织构的存在能够使表面油膜产生流体动压润滑效应, 能够有效改善摩擦副之间的摩擦学性能。其中油膜内部的压力发生了明显的梯度变化, 是因为润滑油液流入口流体发散产生负压, 当局部压力降低到液体的饱和气压以下时, 液体发生空化现象形成气泡, 能够有效的提高的流体润滑的承载能力。

2、从压力分布图和直方图可以看出三角形织构的静压力峰值比正方形和梯形织构峰值大, 峰值之间间距最小。相较于三角形织构和正方形织构, 梯形织构所产生的平均正压力值较大, 负压较小, 这将有效的增加了梯形微织构流体润滑的承载能力, 因此梯形织构更有利于提升材料接触面的摩擦学性能。

本文通过仿生学从动物体表提取设计处三角形、梯形和正方形三种织构, 并进行了流体润滑仿真对比, 研究讨论了相同面密度情况下, 织构对最大压力值和织构作用区域所造成的影响, 可为今后关于表面织构技术的研究提供参考。

参考文献

- [1] Han, J., Fang, L., Sun, J., *et al.* (2010) Hydrodynamic Lubrication of Micro-Dimple Textured Surface Using Three-Dimensional CFD. *Tribology Transactions*, **53**, 860-870. <https://doi.org/10.1080/10402004.2010.496070>
- [2] Etsion, I. and Sher, E. (2009) Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings. *Tribology International*, **42**, 542-547. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.015>
- [3] Wang, L., Guo, S., Wei, Y., *et al.* (2018) Research on the Influence of Micropits Structure on the Tribological Perfor-

- mance of Friction Pairs. *ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology*, **233**, 208-210. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1350650118770336>
- [4] Tong, J., Moayad, B. and Ren, L. (2004) Biomimetics in Soft Terrain Machines: A Review. *International Agriculture Engineering Journal*, **13**, 71-86.
- [5] Olver, A., Fowell, M., Spike, H. and Pegg, I. (2006) 'Inlet Suction', a Load Support Mechanism in Non-Convergent, Pocketed, Hydrodynamic Bearings. *Sage Journals*, **220**, 105-108. <https://doi.org/10.1243/13506501JET168>
- [6] Fowell, M., Olver, A., Gosman, A., *et al.* (2007) Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings. *Journal of Tribology*, **129**, 151-159. <https://doi.org/10.1115/1.2540089>
- [7] 于如飞, 寇鑫, 陈渭. 基于 CFD 的新型表面织构仿真分析[J]. 工程设计学报, 2021, 28(4): 466-472.
- [8] 刘洋, 陈帅, 王子, 等. 仿生表面结构对水翼水动力特性的影响研究[C]//《水动力学研究与进展》编委会, 中国力学学会, 中国造船工程学会, 集美大学. 第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 上海:《水动力学研究与进展》杂志社, 2020: 7.
- [9] 高峰. 沙漠蜥蜴耐冲刷磨损耦合特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.