

放电沉积凸貌微织构表面动压润滑性能仿真研究

李一楠, 张勇, 冯天明, 兰红波, 彭子龙

(青岛理工大学 a.山东省增材制造工程技术研究中心
b.机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: **目的** 提出一种表面凸貌微织构的快速制造方法, 并对其表面动压润滑性能及减摩机制进行研究。**方法** 利用高低压复合放电沉积加工技术实现气体介质中金属或半导体材料表面凸貌微织构的制备。高压脉冲电压实现两极间介质的电离度, 低压直流放电实现电极材料蚀除, 并沉积在工件表面形成微织构。通过控制工具电极直径, 可获得直径 410 μm 、高 12 μm 尺度的凸貌微织构。利用 FLUENT 软件, 对该方法所获的凸貌微织构表面动压润滑性能进行仿真, 研究了不同高度、直径、面积比下, 表面微织构对润滑性能的影响规律。**结果** 织构面积比和动压润滑性能成正比关系: 随着面积比增大, 织构上表面平均压力增大。油膜上表面平均压力在高度为 7 μm 、直径为 500 μm 、面积比为 60%、对摩速度 0.5 m/s 时, 达到最大值 1.21×10^4 Pa。动压润滑性能随单个凸貌微织构高度的增加, 先增大后减小, 并在 7 μm 时达到最大。织构直径对润滑性能影响明显, 仿真结果表明, 在一定条件下, 加大织构直径可提高油膜上表面平均压力。**结论** 凸貌微织构采用增材制造方法, 减小了传统去除材料的织构制造方法导致的对材料强度的影响。该方法工艺简单, 成本低, 不需辅助其他加工条件。表面凸貌微织构的存在使两接触表面的间距减小, 形成收敛楔, 从而形成动压, 使润滑膜产生动压承载力, 改善了摩擦学性能。对凸貌微织构的结构参数(面积比、微织构高度、直径)进行仿真分析, 获得了织构结构参数对动压润滑特性的影响规律, 为后续研究提供了理论支持。

关键词: 放电沉积加工; 凸貌; 微织构; 织构设计; 面积比; 动压润滑特性

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0059-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.009

Simulation Study on Hydrodynamic Lubrication Performance of Convex Texture Surface Based on Discharge Deposition

LI Yi-nan, ZHANG Yong, FENG Tian-ming, LAN Hong-bo, PENG Zi-long

(a. Shandong Engineering Research Center for Additive Manufacturing,

b. School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a method to rapidly manufacture the convex micro texture surface and study the surface hydrodynamic lubrication performance and wear resistance mechanism. High and low voltage composite discharge

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2019-07-08

Received: 2019-02-22; **Revised:** 2019-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875300); 山东省重点研发项目(2018GGX103036); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE012, ZR2018MEE017)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875300), Key R&D Project of Shandong Province (2018GGX103036), and Project of Shandong Natural Science Foundation (ZR2017MEE012, ZR2018MEE017)

作者简介: 李一楠(1980—), 女, 博士, 主要研究方向为表面工程、焊接与连接。

Biography: LI Yi-nan (1980—), Female, Doctor, Research focus: surface engineering, welding and joining.

通讯作者: 彭子龙(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为再制造工程、3D 打印技术、微细加工技术。邮箱: pengzilong@qut.edu.cn

Corresponding author: PENG Zi-long (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: remanufacturing engineering, 3D printing and micro manufacturing. E-mail: pengzilong@qut.edu.cn

deposition technology was used to prepare convex micro texture surface of metal or semi-conductor in gas medium. High impulse voltage was adopted to realize the ionization degree of medium between two electrodes and low-voltage DC discharge was employed to remove the corrosion on electrode materials and form micro texture on piece surface through deposition. By controlling the electrode diameter of tools, the convex micro textures with diameter of 410 μm and height of 12 μm could be obtained. The hydrodynamic lubrication performance of the convex micro texture surface obtained by discharge deposition method was simulated by FLUENT software to study the influences of convex micro texture on the lubrication performance of metal surface under different height, diameters and area ratios. Texture area ratio was directly proportional to hydrodynamic lubrication performance. With the increase of the area ratio of surface micro texture, the average pressure on the surface of oil film increased. The maximum value of surface pressure on oil film reached 1.21×10^4 Pa under the condition of height of 7 μm , diameter of 500 μm , area ratio of 60% and relative velocity of 0.5 m/s. The hydrodynamic lubrication performance increased first and then decreased with the increasing height of single convex texture, and reached the maximum at 7 μm . The texture diameter had obvious influence on the lubrication performance. Simulation results showed that under certain conditions, increasing texture diameter could improve hydrodynamic lubrication performance. The convex micro texture can be fabricated by additive manufacturing method, which reduces the influence of material strength caused by traditional removal method. This method has unique advantages such as simple process, low cost and no requirement on other processing conditions. The surface micro textures reduce the spacing between two contact surfaces and form a convergence wedge which can generate dynamic pressure, thus resulting in the higher bearing capacity and better tribological performance. The influences of convex micro texture parameters including texture area ratio, texture height and diameter on hydrodynamic lubrication characteristics have been simulated and analyzed to provide theoretical support for further research.

KEY WORDS: discharge deposition; convex; micro texture; pattern design; area ratio; hydrodynamic lubrication characteristics

表面织构技术最早是基于仿生学理论提出的,通过对荷叶表面、鲨鱼外皮的研究发现,具有一定非光滑形态的表面比光滑表面具有更好的摩擦性能,对摩擦的两个接触表面具有一定规则凹坑或凸起,能有效改善摩擦性能,提高使用寿命^[1-4]。Hamilton 等^[5]通过对端面摩擦研究发现,规则的表面织构能有效改善接触面的摩擦性能。Fowell 等^[6]从流体动力角度,验证了表面织构的存在会显著改变动压性能和摩擦性能。Sahlin 等^[7]认为织构在润滑的过程中,由于收敛间隙的存在,润滑油流经间隙时,会产生动压效应,使润滑膜产生动压承载力,从而改善摩擦副的润滑性能。

近年,国内外学者通过仿真、实验研究等手段,对表面微织构致动压润滑现象及减摩效应进行了系统的研究,取得了较好效果^[8-10]。王威^[11]、王姣^[12]在 45 号钢板上加工不同尺寸参数的凸包和凸条型织构,研究了不同参数下凸包和凸条型织构对摩擦磨损的影响。研究表明,织构的存在减小了表面的摩擦系数,提高了耐磨能力。宋起飞等^[13]在铸铁材料上加工出网格、凸条型织构,摩擦实验表明织构的存在提高了两倍的耐磨性,改善了摩擦性能。于海武等^[14]基于 Reynolds 方程,建立了表面织构的润滑模型,并以此分析表面织构参数、微凹坑形状以及微凹坑排布形式等对润滑膜承载力的影响,得到凹坑织构的最优参数解。Caramia 等^[15]通过 FLUENT,对具有微变形的两个平行表面之间的流体动力润滑进行了 2D 数值研究,找到凹坑织构最优深度值。Han 等^[16]建立了不可压缩牛顿流体的 3D 流体动力润滑模型,对单个

织构进行了数值模拟,研究了几何参数对雷诺数润滑性能的影响。结果表明,随着微孔宽度和雷诺数的增加,润滑膜的承载能力单调增加,摩擦力和摩擦系数呈反向变化趋势。

目前,表面微织构的加工方法主要以去除加工为主,织构形貌多表现为凹坑、凹槽等凹面形貌,而对凸貌微织构对零件表面摩擦学性能的影响研究甚少。随着制造技术的进步,凸貌微织构作为表面织构的方法逐渐引起重视。与凹坑类型织构相比,凸貌微织构不但具有不会破坏试件的强度、刚度等物理属性的优点,还可以通过沉积不同属性的材料到试件,以提高和改善试件本身的疏水性、耐磨性等物理属性。在凸貌微织构的制造中,采用电火花沉积加工技术可实现金属材料的稳定沉积生长^[17],加工模式灵活简便,能量易于控制。彭子龙等^[18]在 2015 年报道了微能放电沉积加工应用于轨迹沉积的研究进展,他采用脉冲火花放电形式,实现了金属微结构的制作尝试。并且,高低压复合放电沉积技术的最新结果表明,沉积材料致密、形貌可控,并具有一定的孔隙率,属于多孔材料^[19]的范畴,这种特性使沉积物同时具有凸起形织构和凹坑形织构两种形貌,其多孔特性可在储存润滑油^[20-21]、容纳磨屑^[22-24]以及散热等方面发挥作用,进而改善界面润滑、摩擦条件。本文针对高低压复合放电沉积凸貌微织构表面,对不同直径、高度及面积比的凸貌微织构表面动压润滑性能进行仿真研究,获得最优织构尺寸对动压润滑性能的影响规律,为凸貌微织构获得最佳减摩效果提供理论指导。

1 凸貌微织构制备

如图 1 所示,在工具电极与工件基间接入高低压复合脉冲电压,在放电能量作用下,极间空气介质被电离击穿,形成弱电弧放电。电极材料熔化、气化,并沉积在工件表面形成沉积点(图 1a)。图 1b 为单个沉积点形成示意图。调节电极与工件的相对位

置,即可在工件表面形成特定结构的表面微织构(图 1c)。以对摩表面的运动方向为 X 轴,建立直角坐标系,试件 A (Specimen A) 是光滑的上模板,试件 B (Specimen B) 是加工凸貌微织构的下模板。试件 A 和试件 B 之间充满润滑油,为全润滑摩擦。

图 2a 所示为通过放电沉积方法,获得直径 408.17~419.29 μm 、高度 11.95~12.43 μm 的四点凸貌

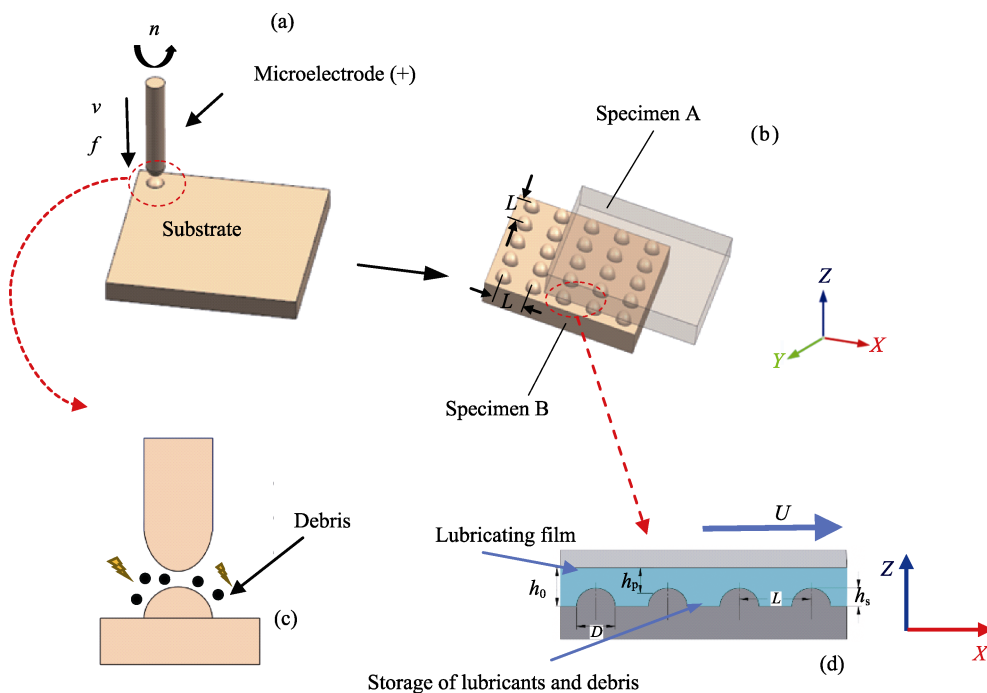


图 1 表面凸貌微织构制备及动压润滑模型建立

Fig.1 Fabrication of convex surface texture and establishment of hydrodynamic lubrication model

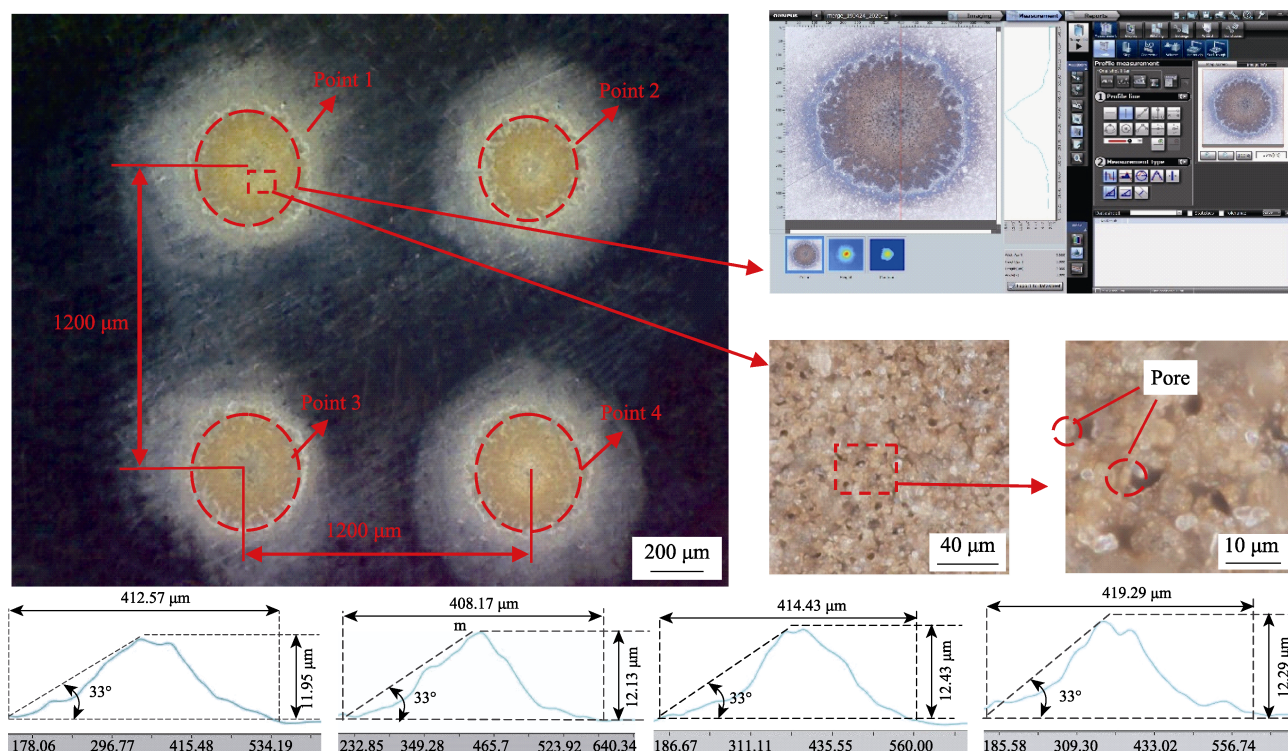


图 2 放电沉积凸貌微织构形貌

Fig.2 Morphology of discharge deposition point

微织构阵列的形貌。工具电极材料为黄铜,工件材料为45钢。加工参数为:高压1800 V、0.5 mA,低压20 V、250 mA。采用OLYMPUS DSX510光学数码显微镜对微织构三维形貌进行了测量。该显微镜的测量精度为0.01 μm,是一种非接触式三维形貌测量仪器。图2b为其测量界面,图2e为四个微织构的直径处测量数据放大图。可以看出,通过合理选择高低压复合放电沉积的工艺条件,能够稳定获得尺寸、形貌一致性较好的表面凸貌微织构阵列。该方法工艺简单,能量、织构排布方式易于控制。放电沉积凸貌微织构的尺寸取决于放电脉冲能量和工具电极直径。图2c、2d所示为微织构局部放大图,可以看出,织构沉积点表面形成了直径在5 μm左右且分布较均匀的微小空隙,属于典型的宏微复合结构,在表面织构领域将表现出独特的特点,这将在后续研究中深入开展研究。高低压复合放电沉积的加工参数如表1所示。

表1 放电沉积参数
Tab.1 Discharge deposition parameters

| Parameters | Value |
|----------------------------|-------|
| High voltage/V | 1800 |
| Current of high voltage/mA | 0.5 |
| Duty ratio/% | 50 |
| Low voltage/V | 20 |
| Current of low voltage/mA | 250 |
| Discharge gap/μm | 300 |
| electrode diameter/μm | 200 |

2 数学计算模型

2.1 动压润滑模型建立

设每个凸貌微织构均处于边长为 L 的长方体单元内,则在织构单元内摩擦副构件间润滑膜厚度 h_p 如公式(1)所示。

$$h_p = \begin{cases} h_0 & (x, y) \in A_c \\ h - h_s & (x, y) \in A_t \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_0 是最大油膜厚度, h_p 是两对摩件任意一点油膜厚度, h_s 是任意一点织构的高度, A_t 表示织构区域, A_c 表示非织构区域。

面积比 S_p 是指织构面积 A_t 占总面积的比值,如公式(2)。

$$S_p = \frac{\pi D^2}{4L^2} \quad (2)$$

以润滑膜平均压力 P_z 作为衡量润滑膜承载力大小的指标, P_z 值越大说明动压润滑膜承载能力越大,摩擦学性能越好,如公式(3)。 $P(x, y)$ 为 (x, y) 处的压力值, L 是织构的间距, $A_c + A_t$ 为计算单元的面积。

$$P_z = \frac{\iint P(x, y) dx dy}{A_c + A_t} \quad (3)$$

2.2 理论基础

凸貌微织构不同于凹坑织构,润滑油流经织构后,方向变化更加复杂,不但存在层内发散型流动,而且当液流沿凸貌微织构外表面做切向流动时,势必加剧层间干扰。本文采用湍流模型,更适合凸貌微织构的仿真模拟,选用 $k-\varepsilon$ 方程模型。润滑油密度 958 kg/m^3 ,黏度 $0.0452 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,将润滑油流动方向设为周期性边界。

采用离散方程组SIMPLE算法,入口处各方向的初始速度为0。由于本文是研究不同织构参数对动压性能的影响,因此只计算 P_z 为正的部分,即让负压为零^[25]。

标准 $k-\varepsilon$ 模型由湍动能 k 方程(如公式(4))及湍流耗散率 ε 方程(如公式(5))组成。湍动能 k 方程通过精确的方程推导得到,耗散率 ε 方程由经验公式得到的。湍流粘性系数如公式(6)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_j}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u_i + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(p\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u_i + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

$$u_i = \rho C_u \frac{k_2}{\varepsilon} \quad (6)$$

在上述方程中, G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能, G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能, Y_M 是湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, σ_k 和 σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流普朗特常数, S_k 、 S_ε 是用户定义的源项。方程中的常数 $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 C_u 、 C_u 都是经验常数。详细数据见表2。

表2 方程中经验常数
Tab.2 Empirical constant values in the equation

| Parameter | Numerical value |
|----------------------|-----------------|
| σ_k | 1.0 |
| σ_ε | 1.3 |
| $C_{1\varepsilon}$ | 1.44 |
| $C_{2\varepsilon}$ | 1.92 |
| C_u | 0.09 |

3 仿真结果及分析

3.1 相对运动速度的影响

相对运动速度 U 与平均无量纲润滑膜压力之间的关系如图3所示。从图中可以看出,随着相对运动

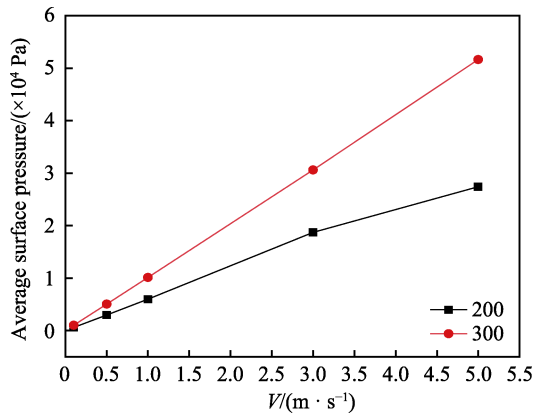


图 3 相对运动速度对动压润滑性能的影响
($h_s=15 \mu m$, $S_p=30\%$)

Fig.3 Influence of relative motion speed on dynamic pressure lubrication performance ($h_s=15 \mu m$, $S_p=30\%$)

速度 U 的增大, 平均无量纲润滑膜压力随之增大。这说明, 当相对运动速度 U 较大时, 有助于润滑膜流体动压力的产生。并且直径大的织构, 更有助于润滑膜流体动压力的产生。

3.2 织构面积比的影响

分析不同织构直径对油膜上表面平均压力的影

响, 对比表面织构高度 5、7、10、15 μm 条件下, 不同织构单元直径及面积比的共同作用对对摩表面动压润滑性能的影响, 结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 随着面积比的增大, 织构的上表面平均压力整体趋势增大, 而且直径越大, 增大越明显。这是因为织构越大, 收敛楔越长, 动压润滑性能越强。直径 500 μm 的织构动压润滑性能增大的幅度最大, 在高度 7 μm 、面积比 60% 时, 取得最大值 1.21×10^4 Pa。直径 100 μm 的织构动压润滑性能增大的幅度最小, 在高度 15 μm 、面积比 60% 时, 取得最大值 0.256×10^4 Pa。此外, 在高度 15 μm 时, 油膜上表面平均压力随面积比的增长幅度最小。

织构的动压润滑效果和面积比有着密切的关系: 当面积比过低时, 一方面收敛楔产生的动压在发散楔中得到充分的发散; 另一方面, 面积比的降低意味着织构整体数量的降低, 织构的动压润滑性能整体数值下降。当面积比增大时, 织构间的间距变小, 织构的收敛楔产生的动压性能在发散楔中不能完全“卸力”, 在进入下一个收敛楔时, 产生了更好的动压润滑效果。此外, 单位面积内织构数量的增多, 会使整体的动压润滑效果更加明显。

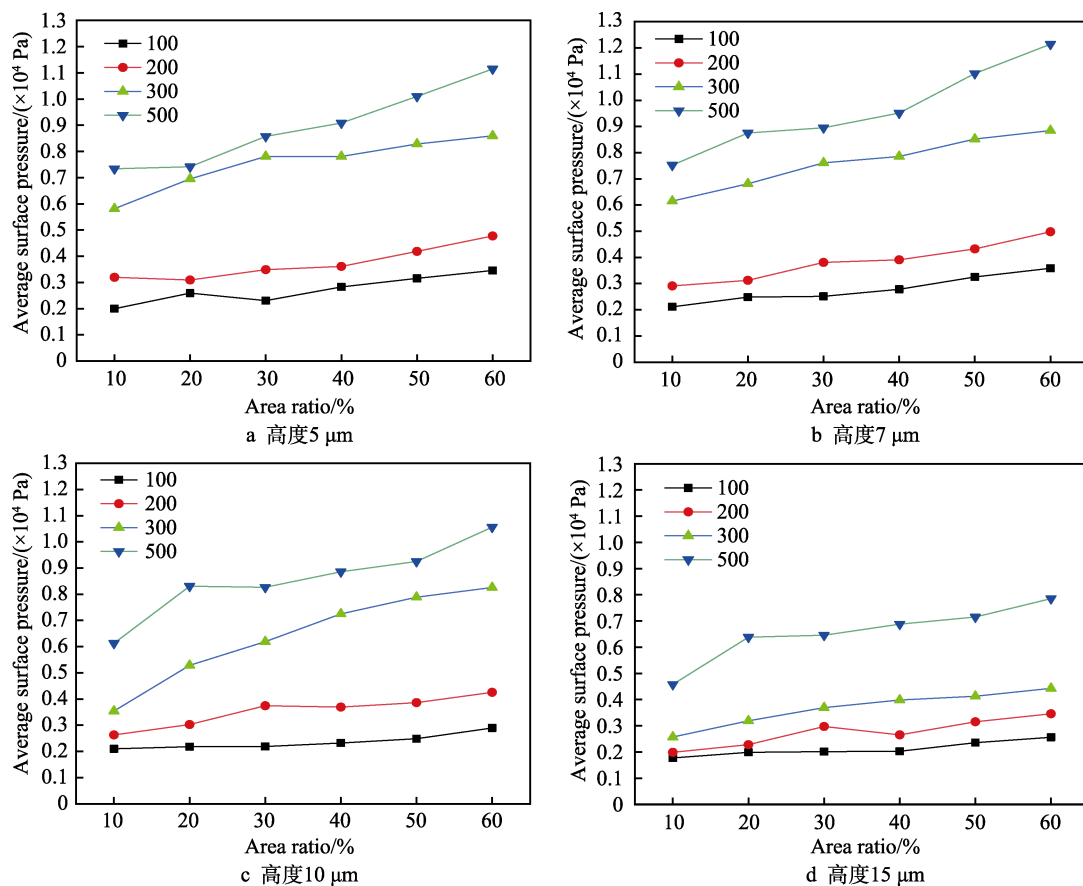


图 4 不同织构高度下油膜上的表面平均压力 ($U=0.5$ m/s)

Fig.4 Average surface pressure of oil film at different texture heights ($U=0.5$ m/s): a) height of 5 μm ; b) height of 7 μm ; c) height of 10 μm ; d) height of 15 μm

3.3 织构高度的影响

分析不同织构高度对油膜上表面平均压力的影响,对比单个表面织构直径 100、200、300、500 μm 条件下,不同织构单元高度及面积比对摩擦表面动压润滑性能的影响,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着高度的增加,油膜上表面压力先增大后减小,在高度为 7 μm 时取得最大值。

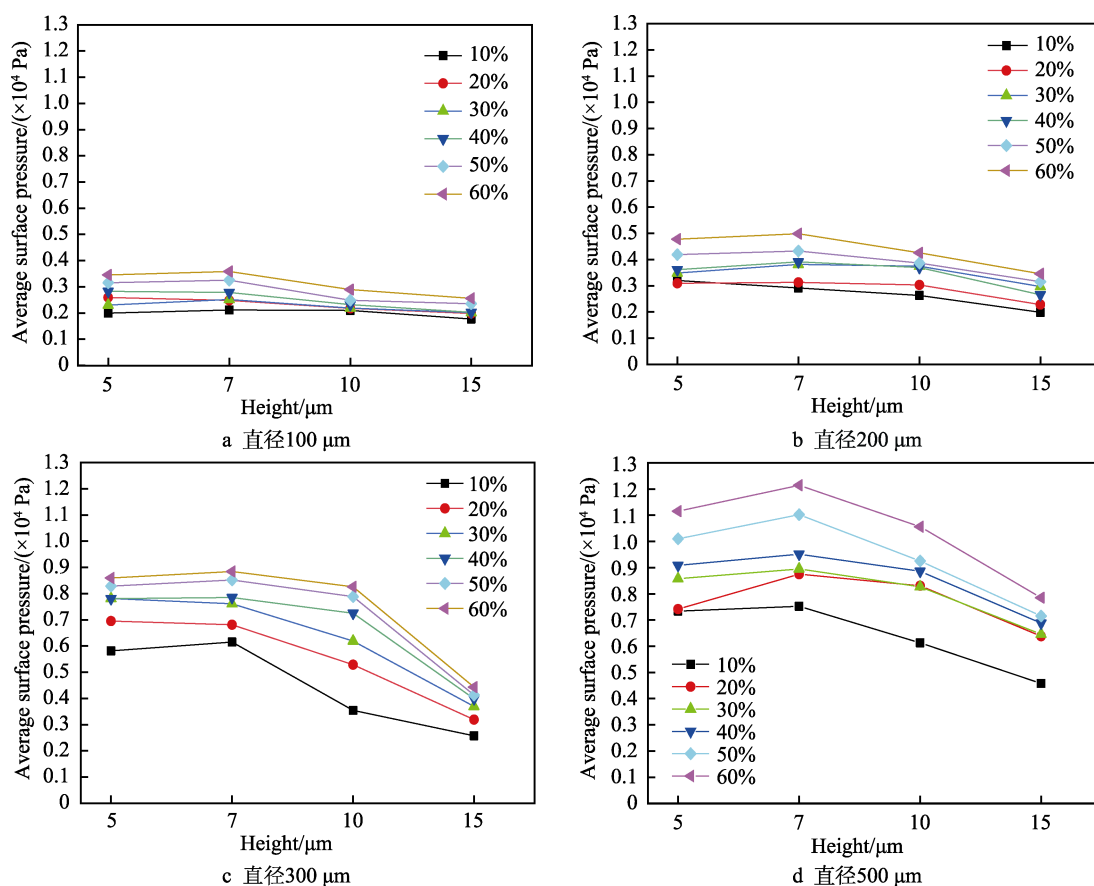


图 5 不同织构直径下油膜上表面平均压力 ($U=0.5$ m/s)

Fig.5 Average surface pressure of oil film under different texture diameter ($U=0.5$ m/s): a) diameter of 100 μm ; b) diameter of 200 μm ; c) diameter of 300 μm ; d) diameter of 500 μm

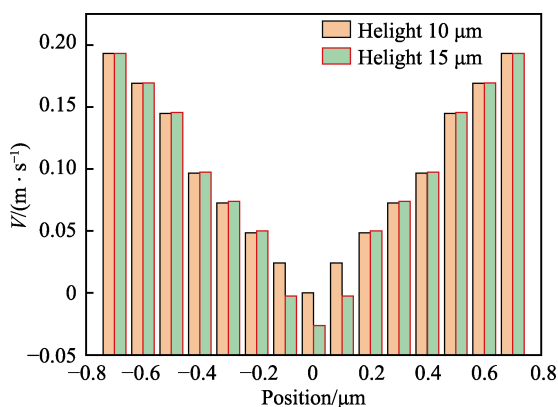


图 6 中心截面速度图 ($U=0.5$ m/s, $d=100$ μm , $h_0-h_s=10$, $S_p=40\%$)

Fig.6 Center section velocity diagram ($U=0.5$ m/s, $d=100$ μm , $h_0-h_s=10$, $S_p=40\%$)

织构高度对润滑性能有重要的影响。小直径(100、200 μm)的织构在低面积比(10%、20%)下,其高度对动压润滑性能影响较小。当高度低的时候,收敛楔产生的动压润滑性能小,织构减摩效果不明显;当高度过高的时候(如图 6 所示),织构底部的回流效果增强,形成“旋涡”,产生湍流,影响了润滑性能的提高,进而影响摩擦性能。因此,存在最优高度使织构的动压润滑效果达到最好。

3.4 织构直径的影响

分析不同织构直径对油膜上表面平均压力的影响,结果如图 7 所示。可以看出,随着织构直径的增大,油膜上表面最大压力值也增大。这是因为在摩擦过程中,由于织构的存在,油膜的厚度在织构区和非织构区存在变化,在润滑液流近织构时,润滑膜厚度变薄,形成收敛楔,因此产生动压,从而使油膜上表面压力值增大。直径越大,收敛楔越长,动压润滑效果越充分,从而油膜上表面平均压力值也越大。但实际上,织构的动压润滑性能随直径增大而增大仅在一定范围内成立。这是因为当直径足够大时,直径与摩擦接触面比值过大,不能将摩擦面看作无限大时,压力将会被限制。但同样的,当摩擦接触面足够大时,

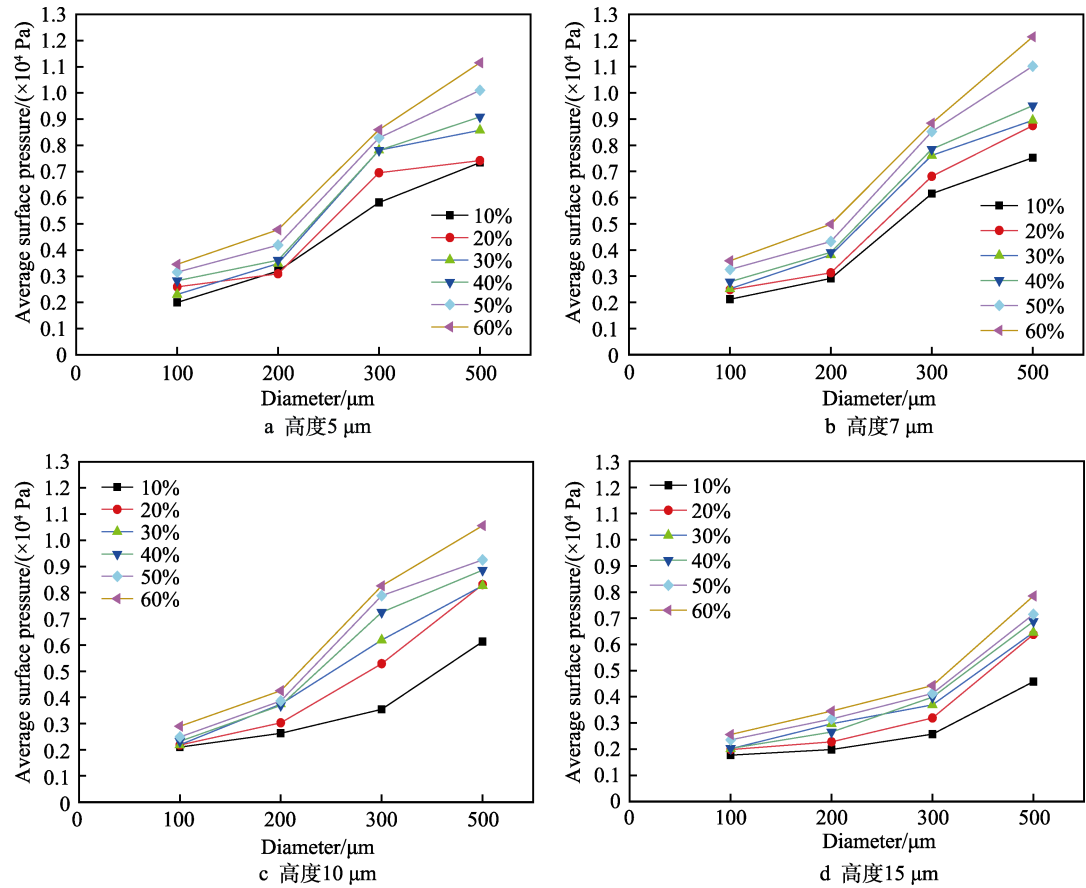


图 7 不同直径下油膜上表面平均压力 ($U=0.5\text{ m/s}$)
Fig.7 Average surface pressure of oil film under different diameters ($U=0.5\text{ m/s}$):
a) height of 5 μm ; b) height of 7 μm ; c) height of 10 μm ; d) height of 15 μm

直径越大，动压润滑性能越好^[26]。

4 凸貌微织构表面对摩实验验证

采用 MFT-EC4000 电化学腐蚀摩擦磨损试验机进行摩擦实验。织构参数为直径 500 μm 、高度 7 μm 、面积比 60%，试验参数如表 3 所示。

表 3 相关摩擦实验参数
Tab.3 Related friction experimental parameters

| Parameters | Value |
|---|--------|
| Speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) | 0.1 |
| Friction time/min | 20 |
| Lubrication viscosity/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ | 0.0452 |
| Lubricating fluid density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 958 |
| Diameter of grinding ball/mm | 6 |

对具有凸貌微织构的表面和光滑表面进行摩擦对比实验，并对数据用 IBSS 软件进行分析，得到平均摩擦系数及拟合曲线如图 8 所示。

图 8 摩擦系数变化情况显示，在对摩过程中，凸貌微织构表面摩擦系数小于光滑表面，凸貌微织构表面最大摩擦系数和平均摩擦系数分别为 0.138 和

0.087，光滑表面最大摩擦系数和平均摩擦系数分别为 0.172 和 0.111。相对于光滑表面，凸貌微织构表面平均摩擦系数减小了 21.6%。

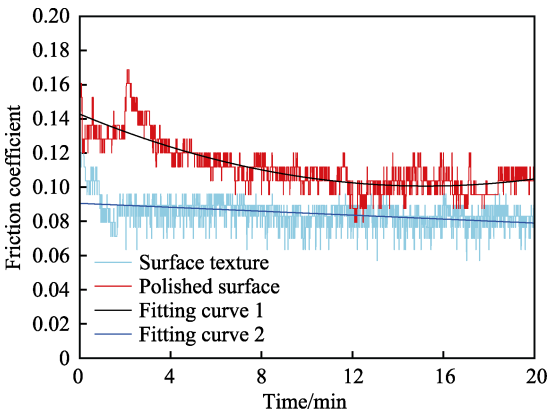


图 8 摩擦系数对比
Fig.8 Comparison of friction coefficient

凸貌微织构表面和光滑表面在摩擦过程中，摩擦系数均先增大后减少，随后趋于稳定。摩擦过程中，凸貌微织构表面摩擦系数的波动程度小于光滑表面。凸貌微织构表面在摩擦 1 min 后，摩擦系数趋于稳定，光滑表面在运行至 4 min，摩擦系数才趋于稳定。总

来说,凸貌微织构表面在整个摩擦过程中,摩擦系数变化幅度较小,整体比较稳定,而光滑表面摩擦系数波动较大。实验结果表明,凸貌微织构的存在提高了对摩表面的动压润滑性能,减小了摩擦系数,证明了理论分析的正确性。

5 结论

1) 利用放电沉积加工方法制备金属零件凸貌微织构是可行的,该方法在表面织构形式设计方面具有高度的灵活性。

2) 表面凸貌微织构的存在使两接触表面的间距减小,形成收敛楔,从而形成动压,使润滑膜产生动压承载力,改善了摩擦学性能。

3) 对所制备的表面织构的动压润滑性能进行了仿真研究,优化了单个织构的设计尺寸。结果表明,织构面积比和动压润滑性能成正比关系,油膜上表面平均压力在对摩速度为 0.5 m/s、织构高度为 7 μm 、直径为 500 μm 、面积比为 60%时,可取得最大值 $1.21 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

4) 凸貌微织构表面与光滑表面的摩擦对比实验证明,凸貌微织构的存在能有效降低摩擦系数,改善摩擦性能,其平均摩擦系数相对于光滑表面减小了 21.6%,证明了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] EVANS C J, BRYAN J B. "Structured", "textured" or "engineered" surfaces[J]. *Annals of the CIRP*, 1999, 48(2): 541-556.
- [2] OBIKAWA T, KAMIO A, TAKAOKA H, et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting[J]. *International journal of machine tools & manufacture*, 2011, 51(12): 966-972.
- [3] PRATAP T, PATRA K. Mechanical micro-texturing of Ti-6Al-4V surfaces for improved wettability and bio-tribological performances[J]. *Surface and coatings technology*, 2018, 349: 71-81.
- [4] 王丽丽, 郭少辉, 魏聿梁, 等. 表面微织构对 45#钢摩擦副表面摩擦学性能影响的实验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(12): 149-154.
WANG Li-li, GUO Shao-hui, WEI Yu-liang, et al. Experimental study on the influence of surface microtexture on the tribological properties of 45# steel friction pairs[J]. *Surface technology*, 2018, 47(12): 149-154.
- [5] HAMLITON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by microirregularities[J]. *Journal of basic engineering*, 1966, 88(1): 177.
- [6] FOWELL M T, MEDINA S, OLIVER A V, et al. Parametric study of texturing in convergent bearings[J]. *Tribology international*, 2012, 52(3): 7-16.
- [7] SAHLIN F, GLAVATSKIH S B, ALMQVIST T, et al. Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication[J]. *Tribology*, 2005, 127(1): 96-102.
- [8] MA Chen-bo, ZHU Hua. An optimum design model for textured surface with elliptical-shape dimples under hydrodynamic lubrication[J]. *Tribology international*, 2011, 44(9): 987-995.
- [9] 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.
- [10] WOLOSZYNSKI T, STACHOWIAK G W. Evaluation of discretisation and integration methods for the analysis of hydrodynamic bearings with and without surface texturing[J]. *Tribology letters*, 2013, 51(1): 25-47.
- [11] CHAI Guo-bing, WANG Wei, YU Ai-bing. Influence of edge preparation on cutting tool wear[J]. *Applied mechanics and materials*, 2012, 201-202: 1178-1181.
- [12] WANG Jiao, WANG Hao. Vibration polishing edge preparation for cemented carbide inserts[J]. *Applied mechanics and materials*, 2012, 201-202: 4.
- [13] 宋起飞, 周宏, 李跃, 等. 仿生非光滑表面铸铁材料的常温摩擦磨损性能[J]. *摩擦学报*, 2006, 26(1): 24-27.
SONG Qi-fei, ZHOU Hong, LI Yue, et al. Friction and wear behavior of bionic non-smooth surface cast iron at room temperature[J]. *Tribology*, 2006, 26(1): 24-27.
- [14] 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. Effects of micro-dimple arrangements on tribological performance of sliding surfaces[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(6): 943-948.
- [15] GARAMIA G, CARBONE G, DE Palma P. Hydrodynamic lubrication of micro-textured surfaces: Two dimensional CFD-analysis[J]. *Tribology international*, 2015, 88: 162-169.
- [16] HAN J, FANG L, SUN J, et al. Hydrodynamic lubrication of micro dimple textured surface using three-dimensional CFD[J]. *Tribology transactions*, 2010, 53(6): 860-870.
- [17] PENG Z L, WANG Z L, JIN B D. Micro-forming process and microstructure of deposit by using micro EDM deposition in air[J]. *Key engineering materials*, 2008, 375-376: 153-157.
- [18] 彭子龙, 方东, 刘永红, 等. 微细放电沉积金属微结构增材制造工艺及装备[J]. *电焊机*, 2015, 45(10): 73-76.
PENG Zi-long, FANG Dong, LIU Yong-hong, et al. Process and equipments design of micro metal structure additive manufacturing by micro electrical discharge deposition[J]. *Electric welding machine*, 2015, 45(10): 73-76.
- [19] 任露泉, 王再宙, 韩志武. 激光处理非光滑凹坑表面耐磨试验的均匀设计研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2002, 20(2): 214-216.
REN Lu-quan, WANG Zai-zhou, HAN Zhi-wu. Research on wear resistance of concave nonsmoothed surface with well-distribution design[J]. *Materials science & engineering*,

- 2002, 20(2): 214-216.
- [20] SHIMIZU I, ANDREASEN J L, BECH J I, et al. Influence of workpiece surface topography on the mechanisms of liquid lubrication in strip drawing[J]. *Journal of tribology*, 2001, 123(2): 359-370.
- [21] DOBRICA M B, FILLON M, PASCOVICI M D, et al. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using an mass-conserving numerical approach[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology*, 2013, 224(J8): 737-750.
- [22] LING T D, LIU P, XIONG S, et al. Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement [J]. *Tribology letters*, 2013, 52(1): 113-122.
- [23] ENOMOTO T, SUGIHARA T, YUKINAGA S, et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. *CIRP annals-manufacturing technology*, 2012, 61(1): 571-574.
- [24] 张娜, 杨发展, 刘绪超, 等. 表面织构激光加工技术研究现状分析[J]. *工具技术*, 2018, 52(11): 3-6.
- ZHANG Na, YANG Fa-zhan, LIU Xu-chao, et al. Development situation of surface micro texture with laser processing[J]. *Tool engineering*, 2018, 52(11): 3-6.
- [25] 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.
- [26] 张辉, 张东亚, 林平. 无限大接触面圆坑织构参数优化[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(8): 23-27.
- ZHANG Hui, ZHANG Dong-ya, LIN Ping. Parametric optimization of circular micro-pit textures in infinite contact area[J]. *Lubrication engineering*, 2013, 38(8): 23-27.

(上接第58页)

- PENG Xiang-yang, ZHOU Hua-min, PAN Chun-ping. Damage condition of overhead transmission lines in Guangdong power grid caused by icing disaster in 2008 and analysis on key impacting factors[J]. *Power system technology*, 2009, 33(9): 108-112
- [2] HU J, LAN B, KE X, et al. Artificial icing and AC flashover tests on glass insulators with silicone acrylate resin hydrophobic coatings[J]. *IEEE transactions on dielectrics & electrical insulation*, 2016, 23(2): 1038-1047.
- [3] 罗茜, 王亚莉. 飞机结冰对于飞行安全的重大危害分析[J]. *科技视界*, 2012(20): 125-126.
- LUO Qian, WANG Ya-li. Analysis of major hazards of aircraft icing on flight safety[J]. *Science & technology vision*, 2012(20): 125-126.
- [4] 周莉, 徐浩军, 龚胜科, 等. 飞机结冰特性及防除冰技术研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(6): 105.
- ZHOU Li, XU Hao-jun, GONG Sheng-ke, et al. Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and de-icing technology[J]. *China safety science journal*, 2010, 20(6): 105.
- [5] GUO P, ZHENG Y, WEN M, et al. Icephobic/anti-icing properties of micro/nanostructured surfaces[J]. *Advanced materials*, 2012, 24(19): 2642-2648.
- [6] GWAK Y, PARK J I, KIM M, et al. Creating anti-icing surfaces via the direct immobilization of antifreeze proteins on aluminum[J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 12019.
- [7] NGUYEN T B, PAR S, LIM H. Effects of morphology parameters on Anti-icing performance in superhydrophobic surfaces[J]. *Applied surface science*, 2018, 435: 585-591.
- [8] RUAN M, LI W, WANG B, et al. Preparation and anti-icing behavior of superhydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates[J]. *Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids*, 2013, 29(27): 8482-8491.
- [9] 弯艳玲, 奚传文, 董宾, 等. 微纳复合沟槽形铝合金表面的结冰性能[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(4): 87-93.
- WAN Yan-ling, XI Chuan-wen, DONG Bin, et al. Icing performance of micro-nano composite grooves on aluminum alloy surface[J]. *China surface engineering*, 2018, 31(4): 87-93.
- [10] 张群会, 李贵敏, 蔺宝华, 等. 基于最大熵-方差模型的图像分割方法[J]. *计算机技术与发展*, 2011, 21(6): 43-46.
- ZHANG Qun-hui, LI Gui-min, LIN Bao-hua, et al. Threshold image segmentation based on maximum entropy-variance model[J]. *Computer technology and development*, 2011, 21(6): 43-46.
- [11] MORGNER U, KÄRTNER F X, CHO S H, et al. Sub-two-cycle pulses from a kerr-lens mode-locked Ti: Sapphire laser[J]. *Optics letters*, 1999, 24(6): 411-413.
- [12] RAHMAWAN Y, MOON M W, KIM K S, et al. Wrinkled dual-scale structures of diamond-like carbon (DLC) for superhydrophobicity[J]. *Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids*, 2010, 26(1): 484-491.
- [13] HINDMARSH J P, RUSSELL A B, CHEN X D. Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a suspended freezing water droplet[J]. *International journal of heat & mass transfer*, 2003, 46(7): 1199-1213.
- [14] VARANASI K K, DENG T, SMITH J D, et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces [J]. *Applied physics letters*, 2010, 97(23): 234102-234104.
- [15] MOKHTARIAN F, SUOMELA R. Curvature scale space for robust image corner detection[C]//International Conference on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE Computer Society, 1998.