

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.11.019

3D打印ABS材料表面长方形织构的摩擦学性能

吴华杰, 陈文刚, 周晓菲, 尹红泽, 王雨豪

(西南林业大学机械与交通学院, 昆明 650224)

摘要: 为了研究丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料表面及织构的摩擦学性能,以线宽1.75 mm的ABS线材为基材,基于UM架构3D打印机,利用熔融沉积成型(FDM)技术制备光滑无织构ABS试样和表面具有长方形微凹坑织构的织构化ABS试样。对长方形织构表面和无织构光滑表面进行了模拟分析,采用多功能摩擦磨损试验机对织构化试样进行了富油摩擦试验,利用体式显微镜观察表面织构磨痕形貌,探究不同载荷(5, 10, 20 N)及不同转速(100, 200, 300 r/min)对织构化试样摩擦学性能的影响。有限元分析软件COMSOL分析表明,凹坑的存在使得油液内部产生空化现象,产生流体动压润滑效应,长方形织构使得其表面承载力比无织构提升了约2.54倍。摩擦试验结果证明,在不同载荷下,3种转速对织构化试样的摩擦系数影响趋势各不相同;在较低转速下,载荷较低的织构化试样摩擦系数较小,而在高转速下,采用适中的载荷可获得较低的摩擦系数。当转速为300 r/min、载荷为10 N时,织构化试样具有较好的减摩抗磨性能,平均摩擦系数低至0.022。与光滑无织构试样相比,织构化ABS试样具有较好的减摩抗磨效果。

关键词: 3D打印; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 减摩抗磨; 流体动压润滑效应; 长方形织构

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)11-0117-10

Tribological Properties of Rectangular Texture on Surface of 3D Printed ABS Material

Wu Huajie, Chen Wengang, Zhou Xiaofei, Yin Hongze, Wang Yuhao

(School of Machinery and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract : In order to study the tribological properties of the surface and texture of acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS) materials, taking ABS filament with line width of 1.75 mm as the base material and using a 3D printer based on the UM architecture, the smooth non-textured ABS samples and the textured ABS samples with rectangular micro-concave texture were prepared by fused deposition molding (FDM) technology. The rectangular textured surface and smooth non-textured surface were simulated and analyzed. The oil-rich friction tests of the textured samples were carried out on multi-functional friction and wear testing machine, the wear scar morphology of surface texture was observed by stereo microscope, and the effects of different loads (5, 10, 20 N), different rotational speeds (100, 200, 300 r/min) on the tribological properties of the textured samples were explored. The finite element analysis software COMSOL analysis shows that the existence of the concaves causes cavitation in the oil, resulting in a hydrodynamic lubrication effect, and the bearing capacity of the surface of the rectangular texture increases by about 2.54 times compared with non-textured. The friction experimental results show that under different loads, the influences of the three rotational speeds on the friction coefficient of the textured samples are different. At low rotational speed, the friction coefficient of the textured samples with low load is lower, while at high rotational speed, the lower friction coefficient can be improved with moderate load. The anti-friction and anti-wear properties of the textured ABS sample are better when the load is 10 N and the rotational speed is 300 r/min, the average friction coefficient is as low as 0.022. Compared with the smooth non-textured ABS sample, the textured ABS sample has better anti-friction and anti-wear effects.

Keywords : 3D printing ; acrylonitrile-butadiene-styrene plastic ; anti-friction and anti-wear ; hydrodynamic lubrication effect ; rectangular texture

基金项目: 国家自然科学基金项目(51865053), 国家外国专家项目(G2021039004), 云南省农业联合专项项目(202101BD070001-051)

通信作者: 陈文刚, 教授, 博士, 研究方向为机械摩擦磨损机理及控制、材料表面复合改性、微纳米尺度机械摩擦磨损特性研究等

收稿日期: 2022-08-24

引用格式: 吴华杰, 陈文刚, 周晓菲, 等. 3D打印ABS材料表面长方形织构的摩擦学性能[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(11): 117-126, 145.

Wu Huajie, Chen Wengang, Zhou Xiaofei, et al. Tribological properties of rectangular texture on surface of 3D printed ABS material[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11): 117-126, 145.

3D打印是一种通过逐点、逐线、逐面添加物料来构成具有复杂结构的三维零件的加工工艺,是一种新型的增材成型技术。3D打印初期只能用于快速成型制造,但随着材料与技术的发展,其已经步入了一个新的发展阶段。随着零件直接制造技术的不断进步,3D打印制造技术突破了产品结构形式的限制,从而实现产品结构轻量化、高性能化和功能集成化,并且为机械结构的拓扑优化设计提供了技术实现途径^[1-4]。3D打印技术包括熔融沉积成型(FDM)、选择性激光烧结(SLS)、分层实体制造(LOM)等。FDM技术中应用最广泛的材料是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)和聚乳酸(PLA),其中ABS材料具有耐磨、剪切拉伸强度高、耐腐蚀等特点,可用于摩擦、医疗等领域。然而通过对ABS材料表面摩擦方面的研究发现,由于增材成型过程中的物理变化导致其摩擦力发生改变,表面的减摩抗磨性能表现不尽如人意。Rosenzweig等^[5]将3D打印的ABS材料作为支架应用于医疗领域的软骨组织修复工程,以协助软组织退化的患者,ABS支架能够为组织工程提供机械稳定性,然而在软骨和体外诊断组织再生的应用中,还应当考虑改善力学性能。乔雯钰等^[6]以ABS为基体,以复合改性填料制备改性ABS丝材,对其力学性能展开研究,结果表明在ABS中添加不同材料,对ABS试样的拉伸强度有一定影响,同时发生的物理变化也对材料流动性有较大影响。马赛赛等^[7]对ABS材料的摩擦学性能进行了研究,发现与传统模压成型方式相比,FDM工艺制备的ABS试样具有较低的摩擦系数,然而磨损量较高。ABS材料在摩擦领域的应用日益广泛,对于减少其摩擦系数、提高其耐磨性能的研究已成为热点,同时也是其工业应用的重要因素。

材料表面织构化已被大量研究证明可以有效地降低摩擦副的磨损,能够提高摩擦副的耐磨性,从而延长其使用寿命^[8-10]。将材料表面加工成具有微孔或沟槽的材料,能够捕捉容纳磨屑,有效地抑制三体磨损。在相对低速重载条件下,表面织构可以将润滑油贮存到凹坑中,从而实现“二次润滑”^[11],并且在流体流动时,摩擦副表面的凹坑或沟槽会形成微小的收敛、发散楔,流体会因为摩擦副的相对运动产生流体动压效应,从而提高了流体膜的承载力^[12-13]。此外表面织构也有利于改善材料自粘滑现

象^[14]。潘绍斌等^[15]采用销-盘试验方法,建立了具有表面织构的人工髋关节材料摩擦表面的数值模型,结果表明,表面织构会对销盘摩擦表面间的油膜压力分布产生影响。尹红泽等^[16]采用FDM技术,在ABS材料上制备楔形三角织构,结果表明,织构在减小摩擦、耐磨损方面有明显的方向性,为单轴移动零件的减摩、抗磨工作提供了实用的理论依据。李昊等^[17]研究光敏树脂表面楔形冠状织构的摩擦学性能,发现带有织构的试样具有更低的摩擦系数,当织构面积占有率为35%时,试样在大部分工况下具有最佳的减摩抗磨效果。然而目前表面织构技术减摩抗磨的研究主要集中在金属材料中,在其它材料方面也大多集中在理论上,而应用于ABS方面的研究还比较稀缺,对ABS表面织构的制备技术、基础理论及成形微观机理研究还没有广泛开展。笔者根据Reynolds方程的湍流平均运动方程,建立了具有润滑条件下的织构润滑计算模型,利用3D打印FDM技术,在ABS表面加工出长方形织构圆周阵列,在摩擦磨损试验机上进行回转式摩擦试验,从理论和试验两方面探究了不同转速和载荷对ABS表面摩擦系数的影响,从而为3D打印ABS在摩擦场合等方面的应用提供理论依据,为表面织构在ABS等相似材料上的减摩抗磨特性研究提供参考。

1 理论模型及仿真模拟

1.1 模型的建立

回转式摩擦试验是以富润滑油状态下销-盘平面对摩的转动为基础,以回转式运动的平面摩擦副为研究对象。由于长方形凹坑织构具有良好的各向同性性能,相比其它织构在横向和纵向上有着更大的接触面积,更适合进行单元长宽比及深径比方面的控制,因此选取长方形单凹坑织构模型的控制单元为研究对象。

假设上试样销的表面光滑,而下试样ABS表面呈长方形凹坑分布,销的下表面以一定的速度 v 与ABS试样上表面平行移动。将润滑油流体域的水平面作为 xoy 坐标平面,将坐标 z 方向设置为润滑油膜厚度方向。每个织构控制单元均为边长 L 的正方形,微凹坑呈长为 a 、宽为 b 的长方形,两摩擦副的间隙为 h_0 ,微凹坑深度为 h_p 。考虑润滑油油膜厚度的影响,长方形表面织构在油润滑条件下的物理模型如图1所示。

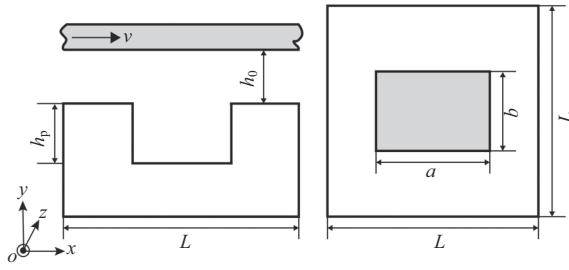


图1 两摩擦副下长方形表面单织构示意图

提出表面织构润滑油膜输出模型的假设:在考虑流体密度和黏度情况下发生的空化现象,为方便计算,对于Navier-Stokes(N-S)方程^[18]进行简化,最终可以得到以下N-S方程形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{r \partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial(\rho u_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

由此,可以得到对应的 Reynolds 方程,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \\ \frac{\omega}{2} \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, p 为油膜平均压力; r 为油膜半径; θ 为油膜间隙; μ 为动态黏度,取决于局部压强; u 为通道内的平均流体速度; z 为控制区域的节点坐标; ρ 为油膜密度; h 为名义油膜厚度; ω 为流体运动时的平均角速度; t 为流体运动所用时间。式(2)假定润滑剂为不可压缩流体,且润滑剂黏度为常数,流体方程在切向方向(空间曲面上)成立,忽略法向压差,忽略流体惯性力和惯性作用影响。

1.2 模型的求解及边界条件

在求解三维流体流动时的 Reynolds 方程时,对于复杂行为流体中的流动,如润滑油和ABS聚合物等的混合物溶液,需要用到 Oldroyd-B 流体的基准模型,其结果也被验证并纳入 COMSOL 模型库中。长方形表面织构的高 h_p 与通道高度 h_0 的纵横比为 1,需要将流体运动方程进行离散化求解,代入各值形成迭代方程再进行求解,由于该流体是聚合物在黏度为 μ_s 的牛顿流体溶剂中形成的润滑油溶液,其总应力应表示为:

$$\sigma = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + S(u) + T_e] + F \quad (3)$$

其中,通过代入 $S(u) = \mu_s [\nabla u + (\nabla u)^T]$ 和 $T_e = \sum_m T_{em}$ 的值对上述公式进行求解,由聚合物引起的额外应力贡献由上对流导数进行定义,从而进行计算:

$$\nabla T_{em} = \frac{\partial T_{em}}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T_{em} - [(\nabla u) T_{em} + T_{em} (\nabla u)^T] \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: I 为自由度(本模型刚性自由度为 3); $S(u)$ 是应变率; u 为 $u = (u, v)$ 是流速向量; F 是通道内的其它应力之和; μ_s 为聚合物黏度; T_{em} 为通道内流体的对流时间, T_e 为 T_{em} 之和。

在求解时,边界条件是控制方程有效解的前提,求解上述方程时,必须设置适当的压力边界条件,以保证其与实际工况相符。采用魏森伯格数 $W_i = 0.05$ 和雷诺数 $Re = 1e^{-3}$ 进行求解。由于流动的对称性,只需对通道和长方形凹坑的上半部分进行建模,在通道中心线处采用零法向流动和零切向总应力的对称条件,在通道壁和长方形凹坑壁表面,模型采用无滑移边界条件。由于实验过程在室温条件下进行,对整个模型求解初值的参考压力水平设置为 $P_{ref} = 101\,325$ Pa (一个标准大气压下),参考温度 $T_{ref} = 293.15$ K,入口处的边界条件为完全展开的抛物线速度分布和相应的额外应力分量,取实验设定转速值 300, 200, 100 r/min,转换成流体流速为 0.275, 0.183, 0.092 m/s,在计算时,取控制区域边界的压力为 P_0 。

在凹坑处液体流动过程中由于有“气穴”现象的存在,表面之间形成了附加的流体动压力,因而引入 Reynolds 空化边界条件,能够在摩擦副相对运动时产生压力变化,当油膜发生流体动压润滑时,出口处的油膜压力设置为 P_0 ,压力梯度置零,长方形的表面织构参数和布置见表 1。

1.3 仿真模拟及分析

通过 Solidworks 软件为单个织构建立密封腔,模型将根据上述参数进行构建,将建立好的模型导入 COMSOL 中建立流体流域,并设置流体流向,长方形织构的二维、三维流体模型示意图如图 2 所示。运用有限差分法,在 Reynolds 方程的基础上,运用 COMSOL 软件对控制区域内的流体轨迹进行了模拟,建立 ABS 材料表面织构在全膜润滑下的

表 1 表面结构的计算参数

参数	数值
凹坑深度 h_p/mm	1
凹坑长度 a/mm	1.8
凹坑宽度 b/mm	1.5
织构控制单元边长 L/mm	3.93
最小油膜厚度 h_0/mm	1
润滑油动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.049
润滑油密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	860
流体流速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.275/0.183/0.092
载荷 q/N	10

理论模型,分析不同流速对长方形表面织构的油膜压力影响,通过对试验数据的分析,得出了达到最佳摩擦性能的最优试验参数,为销-盘实验的设计提供依据。

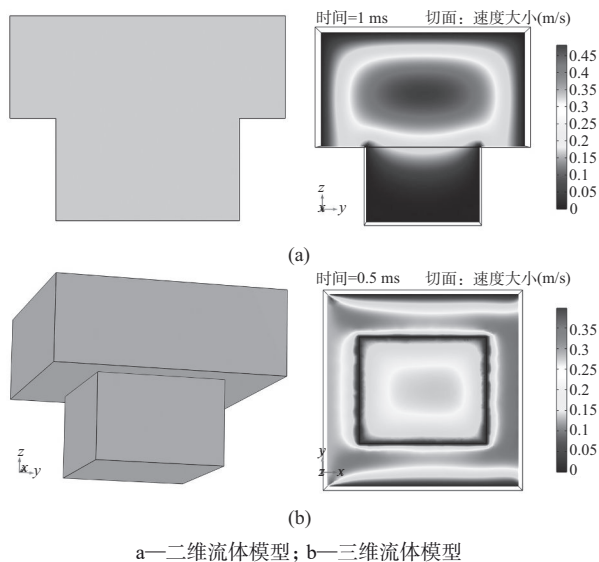


图2 长方形织构在二维、三维流体模型上的油膜速度变化图

不同流速下无织构和织构表面流体内部的压力变化如图3所示。在织构湍流模型中,存在着一部分流场,其中一部分流场的流体压力很低,而被判定为液体质量分数最低的一部分,也就是空穴的形成区域(即上述的空化现象),这主要是因为凹坑的“泵吸”效应,当流体经过时,非凹坑区的润滑油将向凹坑区流动,从而对凹坑流体的动压润滑产生影响。图3a和图3b是在流速0.092 m/s(转速100 r/min)、载荷10 N条件下无织构和长方形织构表面油膜内部压力变化图。对比两图可以看出,长方形织构的存在使得润滑油油膜内部压力梯度发生变化,无织构的油膜压力最高为17.41 Pa,长方形织构中的压力上升到21.51 Pa。图3b的长方形凹坑表面织构中,沿着速度方向,油膜压力从入口处分散到凹坑,在长方形凹坑顶部两个尖端形成收敛楔,长方

形凹坑内部流体分散形成发散楔,表面形成附加的流体动压力,对提升表面油膜承载力、降低摩擦副间摩擦系数起着积极作用,也证明长方形织构对油膜承载力有正向影响。

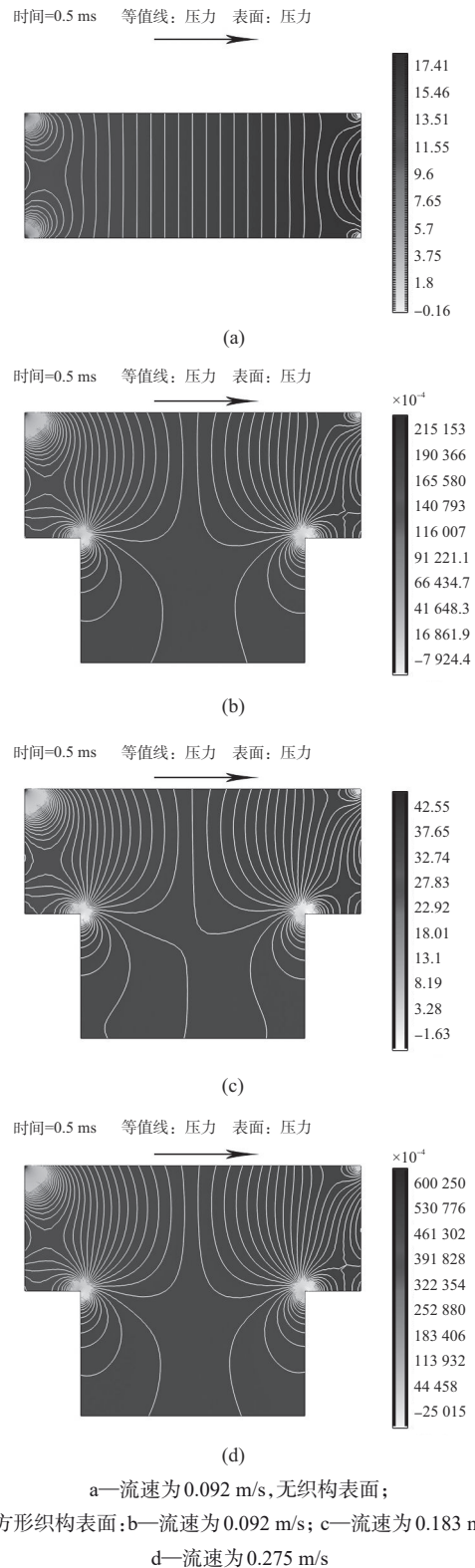


图3 长方形织构与无织构光滑表面流体内部压力变化对比

当润滑油由不同速度从入口流向出口时,由于“空穴”现象的影响,流体速度改变流体内部空气的局部压强变化,导致流体的动压力数值发生变化,因此速度对长方形织构流体动压润滑效应也有着较大的影响。选取长方形凹坑长 $a=1.8\text{ mm}$,凹坑宽 $b=1.5\text{ mm}$,凹坑深度 $h_p=1\text{ mm}$,研究润滑油流动速度对长方形织构流体动压润滑效应的影响机制。图3b、图3c、图3d是在载荷 10 N 的条件下,以 $0.092, 0.183, 0.275\text{ m/s}$ 不同的流体速度进行仿真模拟得到的压力变化情况。可以看出,当流体流速增大时,凹坑对表面的承载力产生了一定的影响,并在润滑油的粘滞作用下压力呈现出逐步增加的趋势。然而从图3d与图3b、图3c数值模拟压力值对比看出,在流速为 0.275 m/s (转速 300 r/min)的微凹坑内部的等高线最为密集且数值最大,流体动压力最大达到 60.02 Pa ,由此能够判断得出其承载的流动压强最大。

由以上分析得出,模型表面织构的流体速度在一定程度上对流体动压润滑效果有影响,通过对长方形表面微织构和无织构光滑表面进行模拟分析,对比能够看出在 10 N 载荷的条件下,不同流速下长方形微织构的表面承载力均得到了提升,提升幅度从低到高依次是 $0.092, 0.183, 0.275\text{ m/s}$,其中最大流体动压力依次为 $21.51, 42.55, 60.02\text{ Pa}$,由模型数值求解验证得出,长方形织构流体流速达到 0.275 m/s (转速 300 r/min)时的表面承载力比流体流速在 0.092 m/s (转速 100 r/min)时无织构光滑表面承载力提升了约2.54倍。

2 实验部分

2.1 主要原料

ABS粒料:C-13-02,黑色,直径 1.75 mm ,密度 1.04 g/cm^3 ,熔点 240°C ,熔体流动速率 12 g/10 min ,拉伸强度 43 MPa ,弯曲强度 66 MPa ,弯曲弹性模量 $1\,177\text{ MPa}$,吸水率 0.3% ,北京太尔时代科技有限公司。

2.2 主要仪器与设备

线材挤出机:泰坦E3D V6型,深圳市启庞科技有限公司;

3D打印机:UM架构双Z轴型,喷嘴直径 0.4 mm ,精度为 0.02 mm ,打印范围 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,自研;

金相试样磨抛机:PG-1S型,三思永恒科技(浙

江)有限公司;

超声波清洗机:SB25-12DTDS型,宁波新艺超声设备有限公司;

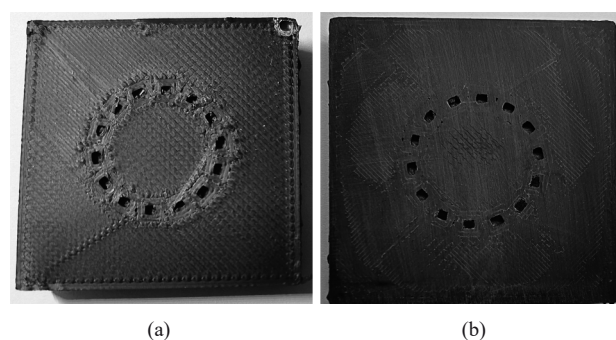
MRTR-1型多功能摩擦磨损试验机:MR-070型,济南蓝波试验设备有限公司;

电子分析天平:FA324C型,上海衡际科学仪器有限公司;

体式显微镜:XTL-100型,济南恒旭试验机技术有限公司。

2.3 试样制备

在三维建模Solidworks软件上建立长 40 mm 、宽 40 mm 、高 5 mm 的试样模型,将模型导入切片软件Simplify3D进行切片处理并在3D打印机上打印出实体。具体打印流程为:由丝材挤出机制备线宽直径为 1.75 mm 的ABS丝材,然后将丝材送至加热喷头,经过加热、熔化,从挤出头挤出粘结到工作平面,然后快速冷却并凝固;每一层截面完成后,工作台下降一层高度,再继续进行下一层的造型,如此重复。打印过程中会产生平行线型凹槽,如图4a所示,打印机设置层厚 0.1 mm ,填充率 80% ,打印速度 40 mm/s ,喷头温度 240°C ,打印时热床温度加热至 110°C 左右。将打印出的ABS试样表面依次使用 $320, 800, 1\,200, 1\,500$ 目的砂纸在金相试样磨抛机上进行粗抛处理,将 0.5 mm 金相抛光膏加入到抛光布中,进行表面抛光处理,得到的表面如图4b所示。



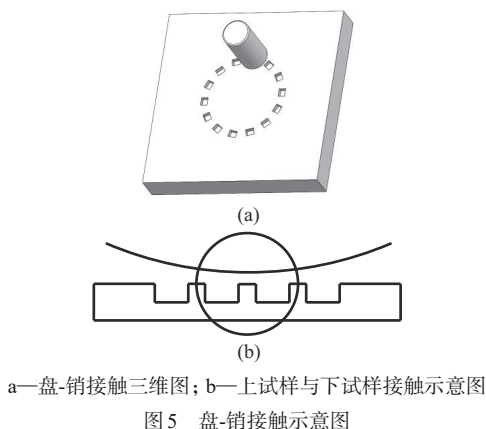
a—抛光前; b—抛光后

图4 ABS试样抛光前后表面对比

2.4 测试与表征

在MRTR-1型多功能摩擦磨损试验机上进行富油摩擦试验。采用销-盘摩擦副,摩擦方式为回转式转动,上试样采用 304 圆柱销,下试样采用ABS材料,上试样为直径 $d=6\text{ mm}$ 、高度 $h=12\text{ mm}$ 的销,下试样表面为3D打印机制备的长方形织构化ABS试

样,销-盘接触如图5所示。试验参数为:载荷5,10,20 N,转速100,200,300 r/min,时间120 min。试验数据由摩擦磨损试验机测出,每隔10 s滤波采集一次。为避免试验误差,每次试验结束后更换上试样,试验在室温 $[(22 \pm 1)^\circ\text{C}]$ 、相对湿度为 $40\% \pm 5\%$ 的大气条件下进行。试验前后,用超声波清洗机对ABS试样进行超声波清洗,清洗前将试样放入烧杯中,将无水乙醇与水按1:1的比例倒入烧杯中,清洗时间为15 min,最后将试样烘干。利用体式显微镜观察试样磨损的表面形貌,并测量试样磨损表面形貌参数。



3 结果与讨论

3.1 不同转速下长方形织构对ABS材料摩擦性能的影响

在确定织构深径比为0.56的条件下,同时以光滑的无织构ABS的摩擦磨损试验为参考,设计了6组实验。主要探究了在5,10,20 N载荷下改变不同转速(100,200,300 r/min)时长方形织构化ABS试样的摩擦性能。图6给出的是5,10,20 N载荷条件下不同转速对长方形织构化ABS表面摩擦系数的影响结果。由图6a看出,在5 N载荷的条件下,织构化试样的摩擦系数与转速变化基本呈正相关关系,随着试验时间延长,转速100 r/min下的摩擦系数比200 r/min和300 r/min的都低,并且在试验40 min左右从磨合磨损阶段快速进入稳定磨合阶段,摩擦曲线波动较小。由图6b看出,在载荷为10 N、转速为300 r/min的条件下,长方形织构化试样的摩擦系数相对最小,其次为200 r/min,摩擦系数最大为100 r/min,转速变化与摩擦系数呈反比关系,试验摩擦系数结果与数值模拟仿真结果完全对应。由图6c看出,在20 N载荷的条件下,摩擦系数最小的为200 r/min,而100 r/min与300 r/min的摩擦系数较为接近,

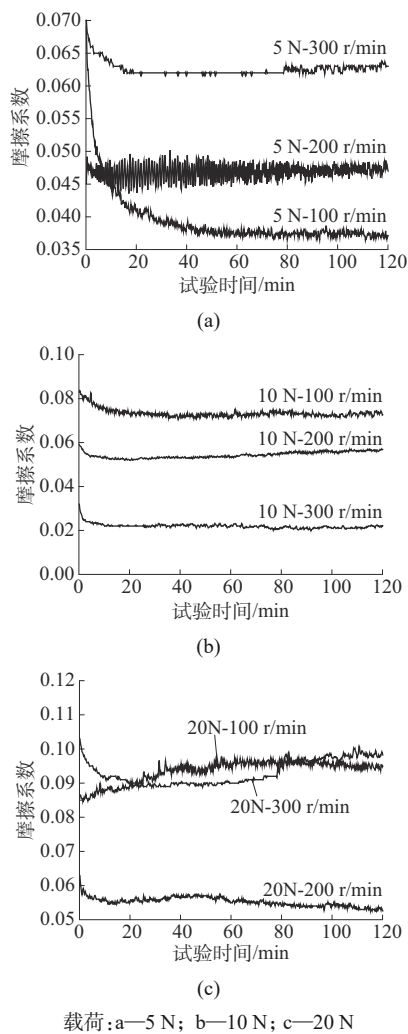


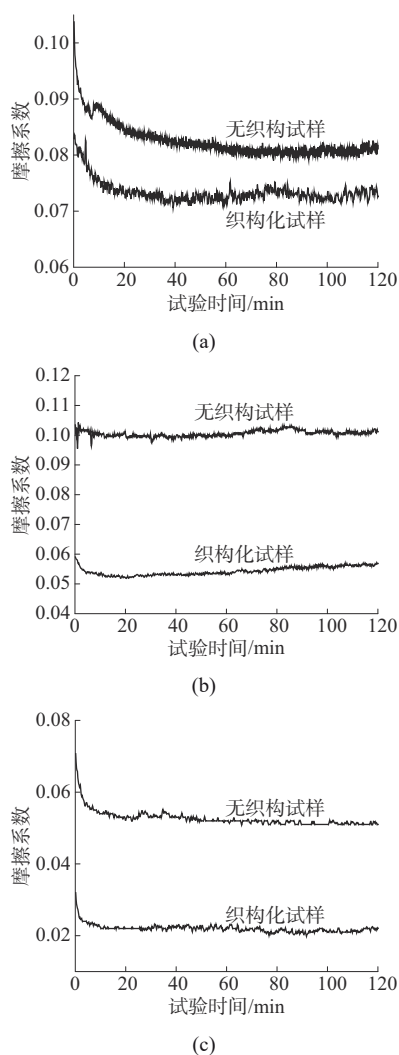
图6 不同载荷下转速为100,200,300 r/min时的织构化ABS试样摩擦系数对比

平均摩擦系数为0.936,0.938,差距并不明显,此时长方形织构化试样在转速200 r/min的减摩效果最好。

由图6可知,在载荷分别为5,10,20 N时,长方形微织构表面不同转速对织构化ABS试样的摩擦状态有较大影响。在5 N载荷下,100 r/min的试样具有较小的摩擦系数,转速越高,ABS试样摩擦副表面的摩擦系数越大,在低载条件下,两对摩件接近量小,使得织构化试样表面没有建立有效的润滑油膜,织构无法在高速情况下建立有效的润滑油膜,高转速可能使试样的减摩抗磨特性变差。在10 N载荷下,通过图3仿真结果证明,当载荷增大、转速升高时,两对摩件接近量增加,织构表面会产生一层连续的油膜,使得两摩擦副表面的直接接触减少,并且由于织构的存在,也减小了相对接触面积,有利于产生流体动压作用,提升油膜的承载能力,

减小了摩擦力,尤其在载荷10 N、转速300 r/min时,油膜润滑性能显著。当载荷达到20 N,转速为100, 300 r/min时,材料表面压痕明显、剥落严重,其原因是低转速无法获得油膜额外的承载力,不能有效地控制住摩擦状态,而高转速会造成受力叠加,由于表面织构提供的额外表面承载力有上限,这会严重破坏ABS材料表面;而转速为200 r/min时,表面的磨屑和破坏程度较低,油膜承载力的提升状态最优。以上表明,在高载荷下,需要调整到合适的转速才能体现良好的摩擦特性。因此,转速的变化对织构化试样表面连续润滑油膜的产生和表面承载力的提高有很大影响。

图7主要探究在载荷10 N条件下不同转速(100,200,300 r/min)时长方形织构化试样与光滑无织构试样表面摩擦特性的对比情况。由图7可以看



转速:a—100 r/min; b—200 r/min; c—300 r/min
图7 载荷为10 N时不同转速下织构化与无织构ABS试样摩擦系数对比

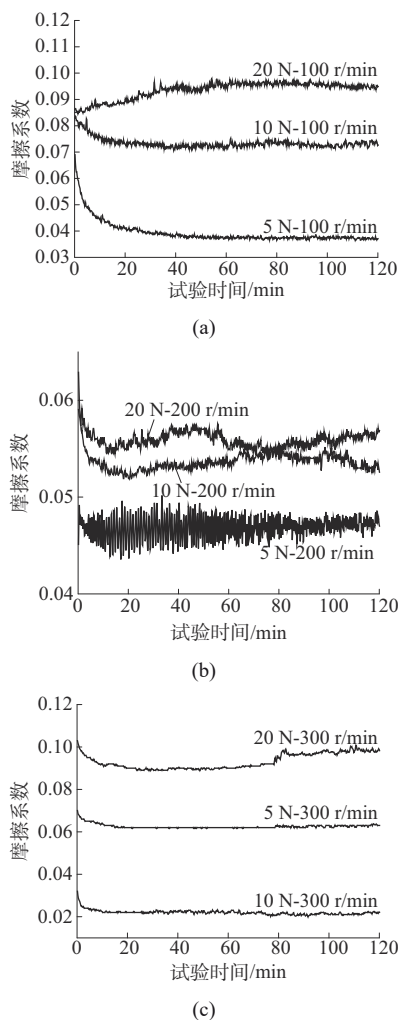
出,在转速为100 r/min时,与无织构试样相比,织构化试样的平均摩擦系数降低了10.9%。在转速为200 r/min时,与无织构试样相比,长方形织构化试样的平均摩擦系数下降了45.7%。在转速为300 r/min的条件下,织构化试样的平均摩擦系数比无织构试样的更低,降幅达到58.1%。

由图7可知,在载荷10 N、三种不同转速条件下,长方形织构化试样的摩擦系数均比无织构试样的低,织构的存在能够有效提升试样表面承载力,说明在ABS试样上制备长方形织构具有良好的减摩效果。

3.2 不同载荷下长方形织构对ABS材料摩擦性能的影响

主要探究了在100,200,300 r/min转速下改变不同载荷(5,10,20 N)时长方形织构化ABS材料的摩擦性能,对ABS材料表面织构压力是否能引发额外承载力的问题进行研究。图8为在转速相同条件下,改变不同载荷对织构化ABS试样摩擦特性的影响。由图8a看出,在转速为100 r/min条件下,织构化试样的摩擦系数与载荷的增长呈正比趋势。由图8b看出,在转速为200 r/min条件下,摩擦系数最小的载荷为5 N,10 N和20 N的摩擦系数较为接近,平均摩擦系数为0.0545,0.055,差距并不明显,但在20 min以后,载荷为10 N的试样出现摩擦系数上升趋势,而载荷20 N的试样在摩擦进行到50 min时摩擦系数下降。由图8c看出,在转速为300 r/min条件下,其中10 N的摩擦系数最小,平均摩擦系数为0.022,其次为5 N,最大为20 N,平均摩擦系数为0.938。

由图8可知,在100,200,300 r/min三种不同转速下,长方形织构表面不同载荷对织构化ABS试样的摩擦状态有一定影响。在100 r/min的低转速下,载荷为5 N的试样具有较小的摩擦系数,而增加载荷会增大试样的摩擦系数,说明在低转速时,织构表面不能形成连续的流体动压润滑油膜,因此较高的载荷会加大试样表面的接触面积,使其摩擦系数增大。而在200 r/min转速下,载荷为5 N的试样仍然具有较小的摩擦系数,载荷为10 N和20 N的试样摩擦系数比载荷为5 N的试样大,但是它们之间平均摩擦系数相差不大,说明当长方形织构化试样获得较大转动惯量时,能够在表面形成一层润滑油膜,但是此转速下织构对表面承载力的提升有限

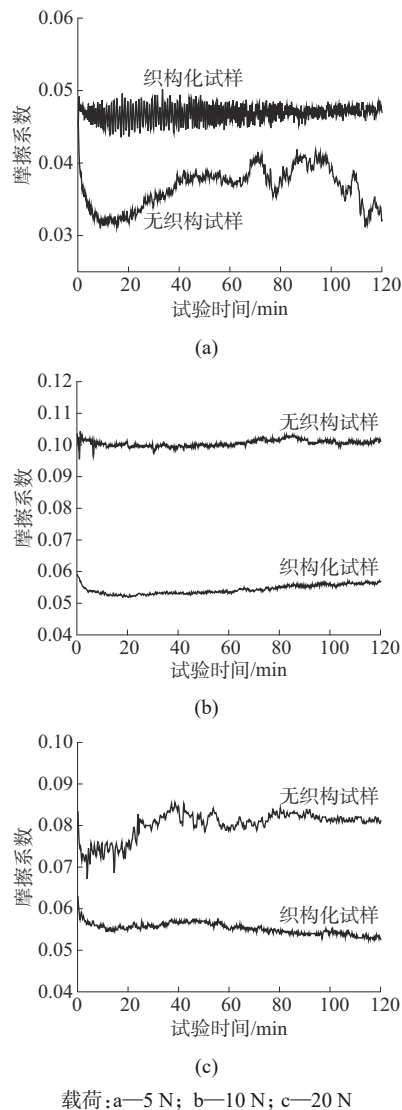


转速:a—100 r/min; b—200 r/min; c—300 r/min
图8 不同转速下载荷为5,10,20 N时的织构化ABS试样摩擦系数对比

度,载荷为10 N和20 N的试样摩擦系数高,并且在试验时间将近80 min时,两者的摩擦系数出现交叉。出现这种现象可能的原因是载荷为20 N的试样由于长时间重载摩擦,其摩擦面温度升高引起熔化临界状态,使得两对摩件接近量增大,塑性形变减小,剪切时摩擦力减小,所以摩擦系数相对减小;载荷为10 N的试样摩擦系数升高的原因可能是由于局部出现剥落层,从而导致试样表面阻力升高,进而使得摩擦系数增大。在300 r/min更高转速下,转动惯量持续增大,在合适的载荷下,织构表面形成连续的流体动压润滑油膜,获得足够的表面承载力,体现出良好的减摩效果,主要原因是长方形织构对表面的承载力提升较大^[19],能够抵消载荷产生的一部分压力,使得试样在转速300 r/min、载荷为10 N条件下的摩擦特性显著,而高载高速对ABS材

料表层的破坏力极大,因此载荷为20 N的试样摩擦系数相对高很多,载荷为5 N的试样摩擦系数也较高,其原因可能是,由于局部的油膜承载力较大,致使两对摩试样发生偏移,此时使得摩擦表面局部受压增大,摩擦系数升高。相对于转速,载荷的增大有助于形成流体动压润滑油膜,但是也会对ABS材料表面产生较大的破坏。当载荷较低时,对摩试样的接近量较小,不能形成连续的润滑油膜,而在20 N的高载荷时,由于织构提供的额外表面承载力不足,对试样表面破坏较为严重,使得产生更多的磨屑和更大的摩擦力。因此,在高转速下,采用适中的载荷可以为长方形织构提供连续的表面油膜压力,进而提升其承载力。

图9主要探究在200 r/min条件下改变不同载荷



载荷:a—5 N; b—10 N; c—20 N
图9 转速为200 r/min时不同载荷下织构化与无织构ABS试样摩擦系数对比

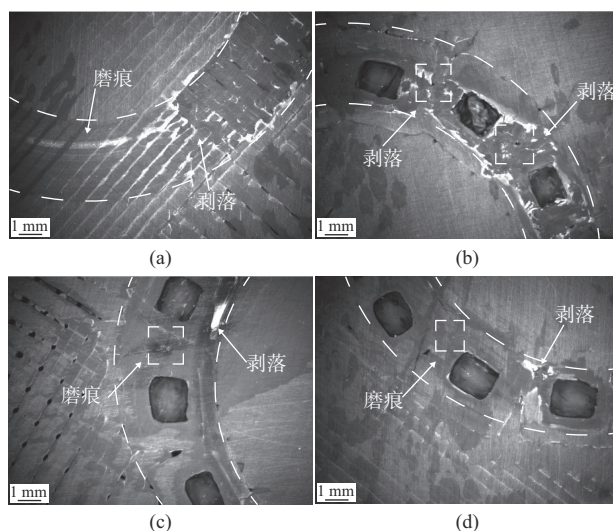
(5, 10, 20 N)时长方形织构化试样与光滑无织构试样表面摩擦特性的对比情况,得出不同载荷条件下,ABS试样在无织构和织构情况下的摩擦力变化。图9a显示了在转速200 r/min和载荷5 N的情况下,织构化试样的平均摩擦系数比无织构的平均摩擦系数高30.6%,从摩擦系数曲线上看,光滑无织构试样的摩擦系数在试验时间内处于磨合磨损阶段,摩擦系数上下起伏波动较大。图9b显示,在转速为200 r/min、载荷为10 N的条件下,织构化试样摩擦系数比无织构试样摩擦系数低。图9c显示,在转速200 r/min及载荷20 N下的织构化试样摩擦系数比无织构摩擦系数小,平均摩擦系数下降31.3%。

由图9可知在转速200 r/min、三种不同载荷条件下,在5 N低载荷时长方形织构化试样摩擦系数比无织构的较高。这是因为,在低载荷时,织构化试样上的压痕集中在一个点上,从而导致了载荷分布不均匀,摩擦力增大,并且界面为边界润滑,纵向油膜的压力降低,两对摩件接近量变大,产生较大剪切力,因此摩擦系数很大,而无织构试样的载荷分布较为均匀,虽然没有长方形织构提供额外的油膜承载力,但是由于负载较轻,产生的剪切力对ABS试样表面的破坏还并不大。在10 N和20 N载荷时,长方形表面织构化试样的摩擦系数均比无织构试样的低,织构能够有效提升试样表面承载力,说明高载荷下长方形织构具有良好的减摩性能,长方形凹坑能够储存润滑油和磨屑,增加了油膜的压力,使织构表面产生了动压润滑,并在界面之间形成了一层润滑油,提高了摩擦副的承载力,同时织构的存在也使接触面积减小,减小了直接接触所带来的粘附力,降低了摩擦力。

3.3 磨损形貌分析

图10是使用体式显微镜对长方形织构化试样与无织构试样的磨痕形貌进行观察所得到的微观照片。图10a是在转速200 r/min、载荷10 N条件下的光滑无织构ABS试样表面磨痕微观照片,可以看出,无织构试样表面摩擦区域处中央有清晰的磨痕,磨痕区域表皮有剥落现象,分析表明主要是发生明显的磨粒磨损,磨料在受力的作用下被压进摩擦面,形成压痕,使其塑性表面形成层状或鳞片状的剥落物。图10b显示在转速100 r/min、载荷10 N条件下的长方形织构化试样摩擦磨损状态,可以看出,织构中间发生较为明显的黏着磨损机理,在织

构处内部能够清晰看到试样的磨屑,分析原因可能是由于转速低导致未能在表面形成一层润滑油膜,并且试样连接处的强度并不十分牢固,黏着节点的强度高于摩擦副中较软材料的剪切强度,导致基体表面的摩擦加剧,使得摩擦系数升高。图10c是在载荷10 N、转速200 r/min下长方形织构化试样的磨损状态,在磨擦区域对比可以看到,织构处的磨痕比无织构处的磨痕要少,说明表面织构能够提升表面承载力,减少磨损,可以看到在织构旁边有比较深的磨痕,并且有一处出现裂痕,这可能是应力场变化发生的微观疲劳现象,其主要发生在磨合阶段,是非发展性的磨损。图10d为在载荷10 N、转速300 r/min下长方形织构化试样发生的磨损状态,可以看出,摩擦区域磨痕较浅,有轻微的磨粒磨损,与无织构试样相比较轻,织构形状完好,发生的摩擦磨损比较微小,使得试样摩擦系数很小,具有良好的减摩抗磨效果。



a—无织构试样, 10 N-200 r/min;
长方形织构化试样: b—10 N-100 r/min;
c—10 N-200 r/min; d—10 N-300 r/min

图10 不同载荷及转速下长方形织构化试样与无织构试样的磨痕微观形貌

4 结论

(1)通过对长方形织构表面和无织构光滑表面进行模拟分析,发现长方形织构的存在可以产生较好的楔形效应,会使织构内部的压力梯度改变,沿流体速度方向,织构内部的压力发散,织构左、右两端的压力增大,从而导致流体形成了动压效应,长方形微织构表面承载力相比光滑无织构提升了约2.54倍,织构化的流体动压润滑效应得到叠加。另

外,表面织构的流体速度对油膜承载能力有较大影响,提升幅度依次为0.092,0.183,0.275 m/s,数值模拟结果得出流速(转速)的提升使织构对应位置上的油膜压力呈现增长状态。

(2)对长方形织构化试样和光滑无织构试样进行摩擦磨损试验,对两者摩擦性能进行了对比,除载荷5 N、转速为200 r/min的对比组之外,其余摩擦条件下长方形织构化试样的摩擦系数均比无织构试样低,由此表明在ABS试样上制备长方形织构具有良好的减摩效果,说明长方形织构的油膜内部压力对油膜承载力有较大提升,同时长方形表面织构能够引起ABS试样表面的流体动压润滑效应。

(3)对不同载荷、不同转速下的长方形织构试样摩擦性能进行了对比。在载荷为定值时,不同转速对长方形织构的摩擦系数影响较大,载荷为5 N时,转速变化与摩擦系数基本呈正相关关系;载荷为10 N时,不同转速(100,200,300 r/min)条件下的试验结果与仿真结果高度吻合,转速变化与摩擦系数呈反比关系;载荷为20 N时,高转速和低转速的摩擦系数均高。当转速相同、载荷为变量时,在100 r/min条件下尚不能形成流体动压油膜,载荷越大,摩擦系数越大;在转速200 r/min时在织构化试样表面形成润滑油膜,载荷对摩擦系数的影响也发生不同变化;在转速300 r/min时,由于高载荷和低载荷对ABS试样表面产生不同的摩擦方式,使得摩擦系数增大。其中,载荷为10 N、转速为300 r/min的长方形织构试样具有较好的减摩抗磨性能。

(4)对长方形织构化试样与无织构试样的磨痕形貌进行分析,发现无织构ABS试样在摩擦过程中会产生较为明显的磨粒磨损机理,有面积表皮剥落和较深的磨痕,长方形织构试样主要发生的摩擦机制为黏着磨损,受凹坑内部油膜承载力影响,在载荷为10 N的条件下,转速越高,发生的表面剥落现象和产生的磨痕就越少。

参考文献

- [1] 陈硕平,易和平,罗志虹,等. 高分子3D打印材料和打印工艺[J]. 材料导报,2016,30(7):54-59.
Chen Shuping, Yi Heping, Luo Zhihong, et al. The 3D printing polymers and their printing technologies[J]. Materials Reports, 2016,30(7):54-59.
- [2] Guo L, Qiu J X. Combination of cloud manufacturing and 3D printing: Research progress and prospect[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(5):1 929-1 942.
- [3] 黄卫东. 材料3D打印技术的研究进展[J]. 新型工业化, 2016, 6(3): 53-57.
Huang Weidong. Research progress of material 3D printing technology[J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(3):53-57.
- [4] 孔甜甜, 阙鑫禹, 薛平, 等. FDM技术制备高分子复合材料研究进展[J]. 塑料工业, 2017, 45(3):45-49.
Kong Tiantian, Kan Xinyu, Xue Ping, et al. Research progress of preparation of polymer composites by FDM technology[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(3):45-49.
- [5] Rosenzweig D H, Carelli E, Steffen T, et al. 3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposus tissue regeneration [J]. International journal of molecular sciences, 2015, 16(7):15 118-15 135.
- [6] 乔雯钰, 徐欢, 马超, 等. 3D打印用ABS线材性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(3):18-23.
Qiao Wenyu, Xu Huan, Ma Chao, et al. Research on properties of ABS filament used in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):18-23.
- [7] 马赛赛, 詹胜鹏, 贾丹, 等. 成型方式对ABS塑料摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2020, 45(9):57-63.
Ma Saisai, Zhan Shengpeng, Jia Dan, et al. Effect of molding method on tribological properties of ABS plastics[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(9):57-63.
- [8] Arslan A, Masjuki H H, Kalam M A, et al. Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: A review[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2016, 41(6):447-481.
- [9] Wu Z, Bao H, Xing Y Q, et al. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(5):1 241-1 277.
- [10] 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, 34(4):414-419.
Wang Hongtao, Zhu Hua. Effect of cylindrical micro-pit's distribution form on tribology properties of textured surface[J]. Tribology, 2014, 34(4):414-419.
- [11] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23):84-95.
Wang Jinqiu, Wang Xiaolei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23):84-95.
- [12] 陈文刚, 冯少盛. 表面微织构钛合金在不同对磨角度下的减摩抗磨特性[J]. 功能材料, 2015, 46(22):22 080-22 084.
Chen Wengang, Feng Shaosheng. The antifriction and antiwear properties of the surface micro-stripe texture Ti6AL4V under different friction direction[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(22):22 080-22 084.