doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210324003

# 3D 打印 ABS 材料表面楔形织构的摩擦性能\*

尹红泽 陈文刚 李镕冰 吴华杰 井培尧 陈 龙 宋文涛 谢 永 (西南林业大学机械与交通学院 昆明 650224)

**摘要:**为了制备出复杂、非对称的楔形三角织构,并验证织构具有减摩效果,以期此种表面织构在发动机部件中良好应用提供 理论支持和技术指导,以丙烯腈-苯乙烯-丁二烯(ABS)高分子材料为样品,利用 3D 打印技术(FDM)分别加工出具有楔形凹 坑表面试样与光滑表面试样。在 MRTR-1 摩擦磨损试验机上进行回转式销-盘摩擦磨损试验,用体式显微镜观察工作表面的 磨损形貌,通过 Fluent 有限元软件模拟仿真润滑油膜内部压力,并对仿真结果进行验证。研究结果表明,与光滑无织构试样 相比,表面楔形织构试样均有不同程度的减摩效果,且当尺寸为 2.7mm 和面积占有率为 15.94%时减摩效果最明显。尺寸 2.7 mm,固定转速 150 r/min,10 N 载荷和 5 N 载荷工况下,顺时针楔形织构的摩擦因数比逆时针楔形织构的摩擦因数低。这 是因为在润滑油流动方向上,非对称织构也呈现出不同的流体动压效应,顺时针楔形织构比逆时针楔形织构流体动压力更 大,承载力更高,减摩效果也就更好。可为复杂形状表面织构的制备与应用提供良好的理论支持与技术指导。 关键词: 3D 打印; ABS; 织构; 摩擦磨损; 面积占有率 中图分类号; TH117

## Friction Performance of Wedge-shaped Texture on the Surface of 3D Printed ABS Materials

YIN Hongze CHEN Wengang LI Rongbing WU Huajie JING Peiyao CHEN Long SONG Wentao XIE Yong

(College of Mechanical and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** In order to fabricate the complex and asymmetric wedge-shaped triangular texture and verify its antifriction effect, acrylonitrile-styrene-butadiene (ABS) polymer material was used as the sample, and 3D printing technology (FDM) was used to process the sample with wedge-shaped pitting surface and the sample with smooth surface. The rotary pin-disk friction and wear test was carried out on the MRTR-1 friction and wear testing machine, and the wear morphology of the working surface was observed with the type microscope. The internal pressure of the lubricating oil film was simulated by the Fluent finite element software, and the simulation results were verified. The results show that, compared with the smooth and non-textured samples, the surface wedge textured samples have different degrees of friction reduction effect, and the friction reduction effect is the most obvious when the size is 2. 7 mm and the area occupancy is 15.94%. The friction coefficient of the clockwise wedge texture is lower than that of the counterclockwise wedge texture under the loading conditions of 10 N and 5 N, with the size of 2. 7 mm, the fixed speed of 150 r/min and the loading conditions of 10 N and 5 N. This is because in the direction of lubricating oil flow, the asymmetric texture also presents different fluid dynamic pressure effects. Clockwise wedge texture has higher fluid dynamic pressure and higher bearing capacity than counterclockwise wedge texture, so the friction reduction effect is better. Theoretical support and technical guidance are provided for the preparation and application of complex-shaped surface textures.

Keywords: 3D printing; ABS; texture; friction and wear; occupancy rate

\* 国家自然科学基金(51865053)、云南省教育厅科学研究基金(2021Y223)和西南林业大学教学改革重点(ZD201902)资助项目。

Fund: National Natural Science Foundation of China (51865053), Scientific Research Fund of Yunnan Provincial Department of Education (2021Y223), and Key Teaching Reform Project of Southwest Forestry University (ZD201902). 20210324 收到初稿, 20210621 收到修改稿

## 0 前言

3D 打印技术是快速成型技术的一种,又称为增 材制造(AM),是一种以三维模型文件为基础,运用 粉末状金属或塑料等可粘合材料,通过逐层打印的 方式来构造物体的技术<sup>[1-2]</sup>。3D 打印通常是采用数 字技术材料打印机来实现的,相较于传统的材料切 削加工技术,是一种"由下至上"材料累加的制造方 法<sup>[3]</sup>。该技术最早出现在 20 世纪 90 年代中期,如 今已在工业制造、生物医学、建筑工程、航空航天、国 防军事以及其他诸多领域都有所应用<sup>[4]</sup>。3D 打印 技术具有众多优势,其技术特点可以使它通过程序 设计出与自然界高度相似的微结构,实现复杂的、不 规则三维微结构制备<sup>[5]</sup>。3D 打印常用材料有尼龙 玻纤、耐用性尼龙材料、石膏材料、铝材料、钛合金、 不锈钢、橡胶类材料。本试验采用 3D 打印技术里 的挤压成型技术,属于熔融沉积式(FDM),材料选 用 ABS 树脂,是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物,是 一种强度高、韧性好、易于加工成型的热塑型高分子 结构材料。

传统摩擦学认为,相互接触的两个摩擦表面越 光滑,摩擦磨损越小,但随着众多学者的深入研究, 发现具有非光滑形态的纹理表面反而表现出更好的 摩擦学性能。表面织构技术作为改善摩擦副表面摩 擦学性能的一种有效手段已经被证实[6]。随着表 面织构技术在工程领域广泛应用,表面织构的制备 方法也越来越受到重视,目前主要的制备方法包括 机械加工技术、光刻技术、电解技术、激光加工技术 等方式<sup>[7]</sup>。LIDIA 等<sup>[8]</sup>通过压印的方法在摩擦副接 触表面分别制备了球、长滴和短滴形凹坑,研究结果 表明织构的存在显著的降低了摩擦因数。张高峰 等<sup>[9]</sup>通过压刻的方法,制备了平行沟槽和交叉沟槽 两种织构,采用球-盘式摩擦磨损试验方法进行了 微织构化硬质合金的摩擦磨损试验,试验结果表明 当摩擦副运动方向与织构方向垂直时更有利于降低 摩擦因数。MAHYAR 等<sup>[10]</sup>采用光刻技术系统制备 了圆锥形和圆柱形两种表面纹理,研究表明在相同 试验条件下,圆锥形织构的摩擦因数更低,更稳定。 张长桃等[11]通过光刻-电解技术对摩擦副的上试样 进行圆形凹坑的加工,采用环-环摩擦的方式研究 其摩擦磨损性能,结果表明凹坑深度为5μm时,表 面织构的减摩效果最好。谢永等<sup>[12]</sup>采用激光加工 技术在 304 钢表面制备出三角形微织构,摩擦方式 为球-盘,试验结果表明与无织构化表面相比,三角 织构表现出更好的摩擦性能。

传统的织构制作方法各有其优缺点,其中激光 加工技术以其效率高、精度高、无污染等特点被广泛 使用。但是现有的加工工艺在制备微观尺寸的织构 时,成本较高且灵活性较差,难以满足多尺度表面微 织构的制备需求。3D打印技术可以通过软件设计 出任意形状的织构,从而实现复杂的、非对称微织构 的制备。白亚雯等<sup>[13]</sup>为了提高钛合金(TC4)的耐 磨性,采用激光增材技术成形 CNTs/TC4 复合材料, 并在模拟体液环境下,对其生物摩擦学性能进行分 析,研究结果表明磨损率随着孔隙率的增加而减小。 沈璋文等<sup>[14]</sup>采用激光选区熔化铜纳米粉增材制造 的方法制备了表面凹槽形和凸起形两种微织构,仿 真分析了表面微织构对摩擦副间润滑油膜的增压特 性,结果表明与无织构摩擦副表面相比,织构表面摩 擦因数大幅度降低。

本研究利用 FDM 技术在 ABS 材料表面制备了 非对称结构的楔形三角织构,研究其减摩抗磨效果, 以期此种表面织构在发动机部件中良好应用提供理 论支持和技术指导。本试验采用的销-盘均是由 3D 打印机制作出来,探究了楔形三角织构尺寸、面积占 有率和润滑油流向,以及改变载荷及转速对摩擦磨 损的影响。同时,通过流体仿真软件,模拟润滑油在 试样表面流动时的内部压力,探究润滑油的不同流 动方向对织构表面摩擦学性能的影响。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料和打印条件

本试验采用 ABS 塑料丝,直径 1.75 mm,材料 颜色为黑色,材料性能参数如表 1 所示,安装在太尔 时代 UP Plus2 和太尔时代 UP mini 两台 3D 打印机 上,用于打印特定结构的试样。打印机设置为层厚 0.2 mm,填充率 99%,打印速度在 10~100 mm/s,打 印尺寸 40 mm×40 mm×8 mm,打印喷嘴直径 0.4 mm,ABS 材料熔化温度 260°~270°,室温 20°, 打印试样前先将热床加热至 80°左右。

表 1 ABS 材料物理特性 Table 1 Physical properties of materials

Sample	Density/	Tensile	Tensile	Poisson's	Bending
	$(g\!/\mathrm{cm}^3)$	strength/MPa	modulus/MPa	ratio	strength/MPa
ABS	1.12	40	2160	0.39	70.0

#### 1.2 试样制备

研究采用销-盘摩擦副,摩擦方式为回转式运动,上下试样均采用 ABS 材料,上试样为 d=5 mm, h=15 mm 的销,下试样为 40 mm×40 mm×8 mm 的

正方形板,下试样接触表面有 3D 打印机制备的楔 形织构,销-盘接触如图1所示。首先用三维建模 软件(SOLIDWORKS)建立起所需模型,随后将模型 导入 3D 打印机内进行模型实体化的制作。将打出 的实体依次用规格为 400、600、800、1000 目的砂纸 在陶艺拉胚机(型号 BTH-BLP-BP03)上进行粗抛光 处理,在1200、1500、2000 目砂纸精抛时涂上适量 0.5 mm 金相抛光膏来恢复试样表面的光泽。将精 抛后的试样放入 KXT-163 超声波清洗机中进行超声 波清洗,清洗时将试样放入烧杯中,使抛光后的表面 朝下,将配好比例的乙醇溶液(无水乙醇:水=1:3)倒 入烧杯中,使乙醇溶液完全淹没试样。然后将烧杯放 入盛有清水的超声波清洗机中,使之在清洗的时候达 到共振效果,提高清洗效率,清洗2至3次,每次清洗 15 min。将清洗干净的试样放在通风处,使之自然风 干。为避免误差过大,上试样不做抛光处理。



图 1 销-盘接触三维图 Fig. 1 3D drawing of pin-disk contact

根据 3D 打印机精度设计试验织构表面是等边 三角形,织构最深处与表面三角形的边长相等,为了 获得更好的表面凹坑形貌,在 1.5~3 mm 之间设计 了 6 个不同织构参数,分别为 1.8、2、2.2、2、5、2.7、 3 mm。经摩擦磨损试验后,确定最佳织构参数,随 后对其进行一定范围内的面积占有率设计,在不同 面积占有率的情况下,摩擦磨损情况也不相同。由 于本试验研究的是非对称结构织构对摩擦因数的影 响,所以也设置了另外两种对比试验来探究楔形织 构的流体动压效应以及减摩效果,即顺时针楔形方 向和逆时针楔形方向,如图 2 所示,其中 2a 是顺时 针楔形织构,2b 是逆时针楔形织构。

#### 1.3 摩擦磨损试验

使用 MRTR-1 多功能摩擦磨损试验机对试样 进行回转式摩擦试验,用以测试表面楔形织构的摩 擦学性能。为避免偶然性因素,每组试验中都进行 3 至 4 次。上试样采用的销试样被安装在特定的夹 具上(图 3),销垂直于楔形织构的方向上并保证与 下实盘的接触区域完全覆盖织构。MRTR-1 多功能 摩擦磨损试验机的回转运动试验与一般摩擦磨损试 验机器不同,其是一个下试样做回转运动的机器。 将下试样固定在回转圆盘上(图4),试验中采用粘 度指数为68的100号基础油作为润滑油。试验具 体参数为:载荷是5N和10N,转速是150r/min和 200 r/min,摩擦时间是 60 min,摩擦副表面处于油 浸状态,通过改变上下试样的旋转直径(11.35、 15.56 mm)、载荷(5、10 N)、织构参数(1.8、2、2.2、 2.5、2.7、3 mm)、织构方向(顺时针、逆时针)和转速 (150、200 r/min)以及面积占有率的不同来研究 ABS 材料试样的摩擦磨损特性。所有试验均在室温 (20 ℃)相对湿度 70%±15%的大气条件下进行。摩 擦因数是由 MRTR-1 多功能摩擦磨损试验机在试 验中自动记录数据,数据采集时间是10s,通过滤波 采集。从摩擦试验机中取出试样,观测磨痕形貌,并 分析磨损机理。使用体式显微镜 XTL-100 观测磨 痕形貌。



#### 图 2 不同方向的表面楔形织构





图 3 上试样的装夹 Fig. 3 Clamping of the upper sample



图 4 下试样的装夹 Fig. 4 Clamping of the next sample

### 2 结果和讨论

#### 2.1 宏观形貌

如图 5 所示为从 3D 打印机中取出未经抛光处 理和抛光后的试样,表面三角形均为大小一致的等 边三角形,其边长为 2.7 mm, 凹坑最深处为 2.7 mm。从图中可以看出在表面三角形凹坑周围 存在很多微小孔隙,而无凹坑表面就没有孔隙。 LLNL(美国劳伦斯利弗莫尔国家试验室)的研究人 员 MATTHEWS Ibo 和其团队发现,激光照射金属粉 末造成的气体流动,是导致在打印过程中激光路径 附近的粉末被驱走的主要驱动力。这一"剥蚀"现 象导致了激光在进行下一段照射熔融的时候可用的 粉末减少,从而在成品部件中形成了微小的孔隙和 缺陷。作为塑料打印的一种熔融沉积技术(Fused deposition modelling, FDM),在凹坑周围的微小孔隙 的形成与金属打印出现孔隙的原因相似。图 5a 是 未抛光之前整个织构的局部放大图,图 5b 是未抛光 单个织构的放大图。图 5c 是精抛后整个织构的局 部放大图,图 5d 是精抛后单个织构的放大图。图 5e 是未抛光的原始表面局部放大图,图 5f 是精抛后 的光滑原始表面局部放大图。



为探究润滑油流动方回对试样表面摩擦因数的 影响,试验中采用 Fluent 流体分析软件,模拟了楔形 三角织构沿着顺逆时针流动的压力分布。

#### 2.2.1 仿真模型的建立

通过 CAD 制图软件建立图 6a 所示销-盘接触 示意图,图中圆形标注区域可通过 ANSYS 数值模拟 分析软件简化为图 6b 二维流体模型和图 6c 三维流 体模型。



## 2.2.2 边界条件及材料的设置

试验过程中是下试样固定在旋转轴上,故以流体模型有织构的表面为运动壁面,并给定速度0.237 m/s(200 r/min),流体区域的密度为801.4 kg/m<sup>3</sup>,动力黏度为0.0834 Ns/m<sup>2</sup>,流体进口和出口分别设置为压力进口和压力出口,其数值等于标准大气压,其余面均为固定壁面。

2.2.3 仿真结果与分析

(1) 楔形织构对油膜承载力的影响

图 7 所示是在转速 200 r/min 条件下 7a 无织构 表面油膜内部压力云图,以及 7b 楔形织构表面油膜 内部压力云图,对比 7a、7b 两图可以看出,楔形三角 织构的存在使得润滑油膜内部压力发生了梯度变



化,并且在织构内部,沿着速度方向,油膜压力在三 角形的左端先是出现了压力降低,在织构右端压力 升高,两侧形成了动压效应。这对增大油膜压力,提 高承载力,降低摩擦副间的摩擦因数有着积极作用。

(2) 润滑油流动方向对楔形织构表面摩擦因数 的影响

当润滑油由楔形三角的底边流向顶角时,逆时 针楔形织构油膜内部压力云图 8a 所示,正压区产生 于润滑油流动方向的下游即三角形的角,由于收敛 区间较小,所以产生的正压力也较小。当润滑油由 楔形三角的角流向边时,顺时针楔形织构油膜内部 压力云图 8b 所示,正压区发生在三角形的边,产生 的收敛区间较大,其最大正压力也较大。顺时针楔 形织构能产生更大的正压力,分析其原因是由于顺 时针楔形织构比逆时针楔形织构的摩擦因数小。



(a) Counterclockwise wedge texture



(b) Clockwise wedge texture

图 8 楔形三角凹坑织构在不同方向上的 油膜内部压力云图

Fig. 8 Oil film internal pressure neogram of wedge-shaped triangular pit texture in different directions

#### 2.3 织构尺寸影响

本次试验首先探究了在 10 N 载荷以及固定转 速 200 r/min 条件下,改变表面楔形织构的边长与 深度尺寸参数(1.5、1.7、2、2.2、5、2.7、3 mm)来 研究楔形表面织构尺寸对 ABS 材料摩擦特性的影 响。试验全程在油润滑条件下进行,并且与光滑无 织构 ABS 表面的摩擦磨损试验作为对照试验,共设 计了7组试验。图9 是在 10 N、200 r/min 条件下, 不同尺寸参数下织构表面与无织构表面摩擦因数对 比结果。

下,在1.8~3 mm 区间内所有尺寸的表面织构试样 均比无织构试样的摩擦因数小,且波动较平稳。而 且从图 9 中可以看出在织构尺寸 1.8~2.5 mm 和 2.7~3 mm 之间,随着织构尺寸的增加摩擦因数有 增大的趋势,且在3 mm 时,摩擦因数达到最高,在 2.7 mm 时减摩效果最好,且摩擦因数波动最小。从 图 9 中可以看出在前 15 min 内摩擦因数的变化波 动比较大,而在15~20 min 以后达到摩擦稳定状态, 这是因为 ABS 材料作为高分子材料在其摩擦副表 面有一层氧化物,在前15 min 通过摩擦会将试样表 面的氧化物等保护物质破坏掉[15],在此期间摩擦因 数的波动会比较大,15 min 后保护物质被完全破坏 掉,上试样直接接触高分子材料的基体,高分子材料 的耐热性能较差,较高的表面温度会大大加快材料 的磨损。结果表明,在6组试验中,试样均保持着较 低的摩擦因数,这是因为 ABS 材料的耐磨性较好, 表面产生的磨屑较少,对楔形织构没有破坏或破坏 较轻,磨屑也没有堵住凹坑结构,且凹坑又能起到储 存润滑油的作用,在摩擦时产生"二次润滑",因此 摩擦因数相比无织构表面又低又稳定。



图 9 在 10 N 200 r/min 下不同尺寸参数织构表面 与光滑无织构表面的摩擦因数对比

Fig. 9 Comparison of friction coefficient between texture surface and smooth non-texture surface with different size parameters under 10 N 200 r/min

#### 2.4 织构面积占有率影响

获取最佳织构尺寸参数 2.7 mm 后,接下来便 对最佳尺寸织构的面积占有率进行了细致研究,通 过调整表面楔形凹坑的数量来改变其面积占有率。 试验共设计了 12 组参数,分别是在面积占有率为 10.98%、11.63%、12.28%、12.92%、13.57%、 14.21%、15.06%、15.94%、16.83%、17.71%、 18.60%、19.49%下。试验载荷依然是 5、10 N,转速 150 r/min,探究了不同载荷下,楔形织构的面积占

图 9 所示在转速为 200 r/min、载荷 10 N 条件

有率对摩擦因数的影响。试验全程在油润滑条件下,并且与光滑无织构表面在相同试验条件下进行对照试验。图 10a 是在 10 N、150 r/min 的条件下,不同面积占有率的织构表面与光滑无织构表面的对比结果;图 10b 是在 5 N、150 r/min 的条件下,不同面积占有率的织构表面与光滑无织构表面的对比结果。



on friction coefficient

图 10a 所示为载荷 10 N、转速 150 r/min 的条 件下,不同面积占有率对摩擦因数的影响。从图中 可以看出,当面积占有率为 14.21%、18.60%时,有 织构表面摩擦因数与光滑无织构表面接近,但从趋 势来看,光滑无织构表面的摩擦因数呈现一个快速 上升的趋势,而面积占有率为 14.21%、18.60%的织 构表面的摩擦因数上升趋势较为缓慢;当面积占有 率为 17.71%、15.94%、12.92%、19.49%、10.98%、 12.28%、11.63%、13.57%、15.06%、16.83%时,织 构表面的摩擦因数明显小于光滑无织构表面,因此 都能起到减摩的作用,并且在 16.83%时减摩效果 最明显。图 10b 所示为载荷 5 N、转速 150 r/min 的 条件下,不同面积占有率对摩擦因数的影响。从图 中可以看出,当面积占有率为18.60%时,有织构表 面摩擦因数比光滑无织构大,当面积占有率为 19.49%时,有织构的摩擦因数随着时间的增长无限 接近于无织构的摩擦因数,并且看未来的趋势,后面 势必会超过无织构的摩擦因数,这证明当面积占有 率大于18.60%时,对材料的减摩性能是不利的;而 当面积占有率为11.63%、12.28%、14.21%、 12.92%、10.98%、15.06%、16.83%、13.57%、 15.94%、17.71%时,有织构的均比无织构的摩擦因 数小,这证明楔形凹坑的面积占有率在10.98%~ 17.71%之间均能起到减摩的作用,并且在15.94% 时减摩效果最明显。

#### 2.5 织构顺逆时针影响

本研究设计的表面织构是楔形织构,为非对称 结构,所以在润滑油条件下,流体在零件表面间润滑 油流动状态更为复杂,加之空化现象对摩擦因数的 影响也存在差异。王婷等[15]设计了一种正弦状织 构,结果表明非对称型织构在一定的条件下比对称 凹坑织构有更好的动压润滑性能,并且在单向运动 的情况下,非对称织构比对称凹坑织构有更优秀的 承载力。张瑜等[16]设计了5种体积相同的非对称 截面轮廓构型,采用 CFD 方法对非对称微织构滑块 模型进行仿真分析,结果发现低速工况下,空化与惯 性耦合作用不明显,但随着速度的增加,非对称表面 楔形织构增强因空化产生的惯性效应,延缓空化的 发生,提高了滑块承载力。本试验是在设计面积占 有率的基础上,设计了两种方向的表面楔形织构顺 时针楔形织构(润滑油由三角形的顶角流向底边) 和逆时针楔形织构(润滑油由底边流向三角形的顶 角)。图 11 是在载荷 10 N、150 r/min 不同面积占有 率下,顺逆时针楔形织构的摩擦因数对比图。图 12 是在载荷 5 N、150 r/min 不同面积占有率下,顺逆时 针楔形织构的摩擦因数对比图。

图 11 所示为 10 N、150 r/min 条件下,不同的 面积占有率对应的顺逆时针摩擦因数对比,从图中 可以看出面积占有率为 12.28%、13.57%、19.49% 时顺时针表面织构的摩擦因数明显小于逆时针织构 的摩擦因数。图 12 所示为 5 N、150 r/min 条件下, 不同的面积占有率对应的顺逆时针摩擦因数对比, 从图中可以看出面积占有率为 10.98%、13.57%、 14.21%、16.83%、19.49%时顺时针表面织构的摩擦 因数均小于逆时针表面织构的摩擦因数。试验中下 试样盘是按 150 r/min 的转速顺时针的转动,结合 仿真结果也可以验证顺时针楔形三角织构能够产生 更大的流体动压力。同时,摩擦试验结果也表明非 对称织构具有方向性,润滑油沿着不同方向流动的 表面织构有着不同的减摩效果。可以将这类非对称

表面织构用于具有单向运动机械部件的表面设 计中。





Fig. 11 Comparison of clockwise friction coefficients under different area occupancy rates at 10 N rotation speed of 150 r/min



图 12 载荷 5 N 转速 150 r/min 不同面积占有率下,顺逆时针摩擦因数的对比

Fig. 12 Comparison of clockwise friction coefficients under different area occupancy rates at 5 N rotation speed of 150 r/min

#### 2.6 磨损形貌分析

在载荷 5 N、转速 150 r/min 的条件下,光滑无 织构表面与顺逆时针楔形三角织构表面的磨痕如图 13 所示,在固定载荷和转速下,图 13a 光滑无织构 表面有明显的犁沟和划痕,这是由于在摩擦过程中 产生的磨屑与试样表面相互作用产生的。图 13b、 13c 所示分别为逆时针楔形织构表面和顺时针楔形 织构表面,从图中可以明显看出楔形凹坑的周围没 有明显的犁沟和划痕,这是因为在摩擦过程中产生 的磨屑大部分都储存在凹坑织构中,试样与磨屑的 相互作用较少,材料的磨损方式主要为黏着磨损。 结合仿真结果也能验证织构表面相比光滑无织构表 面具有明显的减摩抗磨作用,并且顺时针楔形织构 相比逆时针楔形织构减摩抗磨效果更好。同时,由 于 3D 打印的特殊性,在凹坑周围形成的微小孔隙 也能起到储存磨屑和润滑油的作用,对减摩也有一 定的促进作用。

## 3 结论

(1) 通过 3D 打印技术在 ABS 材料表面制备出 形貌较好的非对称楔形三角织构,并验证此种织构 具有良好的减摩效果。这一技术可以对自然界中高 度相似的、复杂的、非对称的、不规则微织构仿生提 供可能。



(a) Smooth texture firee surface



(b) Counterclockwise

(c) Clockwise wedge wedge texturedsurface

图 13 在 5 N、150 r/min 条件下光滑无织构表面 与顺逆时针楔形三角织构磨痕对比图

Fig. 13 Comparison of wear marks between smooth non-textured surface and clockwise and counterclockwise wedge-triangular texture under 5 N and 150 r/min conditions

(2)楔形三角织构在不同尺寸和面积占有率下 均表现出不同程度的减摩效果,当织构尺寸为 2.7 mm时,摩擦因数最低且最稳定。仿真结果结合 试验结果验证了顺时针楔形织构(润滑油由三角形 的顶角流向底边)表现出更为良好的摩擦性能。

(3)仿真结果证明非对称的楔形三角织构在减 摩抗磨中有方向性,当润滑油从角流向边时具有更 好的流体动压效应,试样表面的摩擦因数也较小,可 以将这一种非对称织构应用于单向运动的机械部件 中,如发动机活塞等。

老 文 献

[1] 李云云, 贾仕奎, 张向阳, 等. 3D 打印成型工艺及 PLA 材料 在打印中的应用最新进展[J]. 应用化工, 2020, 49(12): 3185-3190, 3194.

> LI Yunyun, JIA Shikui, ZHANG Xiangyang, et al. The latest development of 3D printing molding process and the application of PLA materials in printing [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12): 3185-3190, 3194. (in Chinese)

[2] 刘珌卿, 刘国庆. 3D 打印技术在汽车制造与维修领域应用 研究[J]. 产业创新研究, 2020(20): 32-33.

LIU Junqing, LIU Guoqing. Application research of 3D printing technology in automobile manufacturing and maintenance [ J ]. Industrial Innovation Research, 2020 ( 20 ): 32-33. ( in Chinese)

- [3] 伏欣. 国内增材制造(3D打印)技术发展现状与研究趋势
  [J]. 中国高新技术企业, 2016(24): 27-28.
  FU Xin. The development status and research trend of domestic additive manufacturing (3D printing) technology [J]. China High-tech Enterprises, 2016(24): 27-28. (in Chinese)
- [4] 唐通鸣, 张政, 邓佳文, 等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究 现状与发展趋势 [J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 228-230, 234.

TANG Tongming, ZHANG Zheng, DENG Jiawen, et al. Research status and development trend of 3D printing technology based on FDM [J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6): 228-230, 234. (in Chinese)

 [5] 朱炜军,衣雪梅,王美玲. 3D 打印 UV 与 ABS 材料仿生表面 摩擦学性能[J].河北大学学报(自然科学版),2020, 40(3):240-248.

ZHU Weijun, YI Xuemei, WANG Meiling. 3D printing UV and ABS bionic surface tribological properties [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2020, 40(3): 240-248. (in Chinese)

- [6] LU G, SHI X, ZHANG J, et al. Effects of surface composite structure with micro-grooves and Sn-Ag-Cu on reducing friction and wear of Ni3Al alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 387: 125540.
- [7] 胡璐瑶. 纳秒激光表面织构的可控底部形状形成机理研究
  [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
  HU Luyao. Research on the formation mechanism of controllable bottom shape of nanosecond laser surface texture [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [8] LIDIA Galda, PAWEL Pawlus, JAROSLAW Sep. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve
   [J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1505-1512.
- [9] 张高峰,龙石山,汤爱民,等.基于划痕法制备的微织构硬质合金摩擦磨损试验研究[J].中国机械工程,2014,25(16):2143-2148.
  ZHANG Gaofeng, LONG Shishan, TANG Aimin, et al. Friction and wear test of micro-textured cemented carbide prepared by scratch method [J]. China Mechanical Engineering, 2014,25(16):2143-2148. (in Chinese)
- [10] AFSHAR-MOHAJER M, ZOU M. Multi-scale in situ tribological studies of surfaces with 3D textures fabricated via two-photon lithography and replica molding [ J/OL ]. Advanced Materials Interfaces, [ 2020-04-12 ]. https://doi. org/10. 1002/admi. 202000299.
- [11] 张长桃,王美玲,王晓雷.表面织构对金属-聚甲醛材料摩擦副磨损行为与机理的影响[J].表面技术,2017,46(6): 9-14.

ZHANG Changtao, WANG Meiling, WANG Xiaolei. The effect of surface texture on the wear behavior and mechanism of metalpolyoxymethylene friction pair [J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 9-14. (in Chinese)

[12] 谢永,宋文涛,陈文刚,等.三角表面微织构对 304 钢摩擦
 学性能的影响[J].表面技术,2021,50(4):225-234.
 XIE Yong, SONG Wentao, CHEN Wengang, et al. The effect of

triangular surface micro-texture on the tribological properties of

304 steel[J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 225-234. (in Chinese)

 [13] 白亚雯,刘志超,程智明,等. 3D 打印 CNTs/TC4 复合材料 微观结构及摩擦学性能研究[J].应用激光,2020,40(3): 399-403.

> BAI Yawen, LIU Zhichao, CHENG Zhiming, et al. Research on the microstructure and tribological properties of 3D printed CNTs/ TC4 composites [J]. Applied Laser, 2020, 40(3): 399-403. (in Chinese)

- [14] 沈璋文. 激光选区熔化铜纳米粉温度场仿真及减摩微织构制造研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
  SHEN Zhangwen. Temperature field simulation of laser melting of copper nanopowder and research on anti-friction microtexture manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] 王婷,傅连东,湛从昌,等.正弦状非对称织构的动压润滑 性能[J].机械设计与制造,2020(3):103-106.
   WANG Ting, FU Liandong, ZHAN Congchang, et al. Dynamic pressure lubrication performance of sinusoidal asymmetric texture

[J]. Machine Design & Manufacturing, 2020(3): 103-106.(in Chinese)

- [16] 张瑜,陈国定,王琳,等. 空化与惯性效应耦合作用下的非 对称表面微织构滑块承载力分析[J].西北工业大学学报, 2017,35(6):1026-1032.
  ZHANG Yu, CHEN Guoding, WANG Lin, et al. Bearing capacity analysis of asymmetrical surface micro-textured slider under the coupling effect of cavitation and inertia[J]. Journal of
  - Northwestern Polytechnical University, 2017, 35 (6): 1026-1032. (in Chinese)

作者简介: 尹红泽,男,1995年出生,硕士。主要研究方向为机械摩 擦磨损机理及控制。

E-mail:704399291@ qq. com

陈文刚(通信作者),男,1973年出生,教授,博士,博士研究生导师。 主要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。

E-mail:chenwengang999@163.com