doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210721001

# 电射流法沉积的 ZrO, 织构化表面及其摩擦磨损特性\*

张志慧 邓建新 王 冉 李学木 葛栋梁 吴佳星 (山东大学机械工程学院 济南 250061)

摘要:精密器械中的微摩擦零件的增摩需求逐渐被重视,电射流沉积法可以低成本制备出增摩表面。利用溶胶凝胶法制作 ZrO。溶液,通过电射流沉积技术结合掩膜板在 316L 不锈钢表面制备具有仿生图案的二氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)织构化表面,测试织构 化表面的亲水性和不同加载力下的摩擦磨损性能,并与相同试验条件下的光滑基体、薄膜作对比。结果表明:利用电射流沉 积技术通过掩膜板制备织构化增摩表面的方法简单可行,织构化表面与基体和薄膜相比亲水性更弱,与光滑基体相比在小加 载力下其摩擦因数增加约 70%,磨损率下降约 50%,有明显的增摩、耐磨效果。电射流法借助掩膜板沉积的 ZrO<sub>2</sub> 织构化表面 可为微摩擦零件表面的增摩耐磨提供一种新方式。

关键词: ZrO<sub>2</sub> 表面膜层; 电射流沉积; 增摩; 微织构; 掩膜板 中图分类号: TG174;TH140

> **Preparation and Tribological Properties of ZrO<sub>2</sub> Micro-texture Surface Fabricated by Electrohydrodynamic Atomization**

ZHANG Zhihui DENG Jianxin WANG Ran LI Xuemu GE Dongliang WU Jiaxing (Institute of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The increasing demand of micro-friction parts in the precision machining is gradually valued, and it can be satisfied by electrohydrodynamic atomization. A zirconium dioxide  $(ZrO_2)$  film with a bionic micro-texture pattern is prepared on the surface of 316L stainless steel by electrohydrodynamic atomization with a mask. The  $ZrO_2$  solution is prepared by sol-gel method. Then the hydrophilicity and tribological property of  $ZrO_2$  micro-texture surface are evaluated. The results are compared with the smooth substrate and the  $ZrO_2$  films which has the same number of layers under the same test conditions. It is identified that the method using the electrohydrodynamic jet deposition to prepare the  $ZrO_2$  micro-texture surface with the smooth substrate, the micro-texture surface has remarkable friction-increasing effects. The friction coefficient increases by ~ 70%, and the wear rate decreases by ~ 50% under small loading. Thus, the  $ZrO_2$  micro-texture surface made by electrohydrodynamic atomization with mask is a new way to be used as a friction-increasing surface of the micro-friction parts.

Keywords: ZrO2 surface film; electrohydrodynamic atomization; friction-increasing; micro-texture; mask

0 前言

目前机械行业向着高精尖的方向稳步发展,精 密加工与超精密加工技术在零件的性能、质量、可靠 性方面发挥着重要作用,而精密器械的微摩擦传动 零件占据举足轻重的地位。其中超声波电机由于小 型轻量、低速大转矩和真空下无需润滑油的特点而 受到精密器械、航空航天、计算机和生物医学等领域 的青睐<sup>[14]</sup>。超声电机依靠转子与定子间的摩擦接 触提供转矩,而如何提高接触面间摩擦因数来增大 精密器械的力矩,且保证零件有足够的耐磨性,是当 下不断深入研究的重点。赵盖等<sup>[5]</sup>用超声精细加

<sup>\*</sup> 山东省重点研发计划资助项目(2019TSLH0315)。

Fund: Supported by Key Research and Development Program of Shandong Province (2019TSLH0315). 20210721 收到初稿, 20210912 收到修改稿

工的方法在超声电机的转子外端面和聚合物摩擦材 料基底表面制作了不同图案的凹凸微织构,发现其 能够明显增加输出力矩和工作效率,且织构间隙可 以减少磨粒磨损。织构化表面在微摩擦精密器械的 干摩擦增摩领域中有广泛的应用前景。

氧化锆(ZrO,)陶瓷是种新兴的增摩压电材 料<sup>[6]</sup>,具有较高的硬度、强度和韧性,良好的耐磨、 耐腐蚀性、化学稳定性、生物相容性等,已被广泛应 用于许多行业,如刀具涂层、薄膜材料、光学材料和 生物医学等<sup>[7-10]</sup>。以电射流打印技术制备 ZrO, 织 构化表面是一种新型的增材制造技术,它利用流体 在电场力和机械力作用下形成的稳定射流,结合工 作平台的运动,实现材料在常温常压下的非接触式 打印制造[11]。电射流技术可以直接将金属、金属化 合物、陶瓷等材料沉积出均匀而致密的薄膜[12],也 可以制作出叠层材料、梯度层材料等新型材料[13]。 与其他技术相比,电射流技术具有较高的沉积效率、 便于控制、材料范围广和成本低廉等特点[14]。 MENDEZ 等<sup>[15]</sup>利用模具进行热压印,制备出聚碳酸 酯微织构薄膜,发现它能明显抑制物体表面的细菌 增殖。WANG 等<sup>[16]</sup>利用电射流沉积技术在硅片上 打印了不同宽度、间距的 PZT 直线微结构。目前利 用电射流技术的织构化表面制备的常见方法有直写 成型法[17]、脉冲法[18]、金属掩膜板法[19],三者各有 优缺点。直写法的材料选择范围广、打印分辨率高, 但为了减小移动过程中对打印精度的影响,对 X-Y 移动平台的精度要求较高,更适用于单层织构的制 备:脉冲法则是利用可控的高压脉冲实现间断打印, 其控制更加复杂,对基底的平面度和导轨的运动精 度要求较高;掩膜板法则是借助金属光刻掩膜板实 现不同图案的打印,过程简单,虽然移除掩膜板可能 会影响织构边缘形貌,但烧结时晶粒的体积变化会 使影响减弱。目前利用电射流法制备织构化表面的 研究还有待深入。

本文根据仿生学原理设计了菱形织构掩膜板, 基于电射流法在基体表面制备出 ZrO<sub>2</sub> 织构化表面, 并测量了沉积的 ZrO<sub>2</sub> 织构化表面的物理性质,例如 表面形貌、织构高度、表面粗糙度等。以同等温度烧 结的光滑基体、相同喷涂层数的 ZrO<sub>2</sub> 薄膜作为对照 组,通过润湿性试验和摩擦磨损试验研究了织构化 表面的疏水性和耐磨性,为微摩擦零件的增摩问题 提供又一种解决方案。

## 1 材料与方法

## 1.1 样品制备

试验选用 15 mm×15 mm×4 mm 的 316 L 不锈 钢为基体材料,依次用 800、1200 目的砂纸进行表面 的打磨,并用 W 2.5 粒度号的金刚石喷雾抛光剂在 金相抛光机上处理,最后在无水乙醇中对其超声清 洗去除附着物,干燥待用。

选用阿拉丁公司生产的正丙醇锆 2 g、乙酸 0.5 g 和无水乙醇 9 g 充分混合,室温下置于磁力搅 拌器上以 500 r/min 搅拌 1 h,静置 24 h 得到稳定均 匀的 ZrO<sub>2</sub> 溶液,其特征见表 1,满足了形成锥射流 的物理条件: 黏度  $\eta < 1.338$  Pa·s、电导率 K >  $10^{-11}$ S/m、表面张力  $\sigma < 50$  mN/m<sup>[20]</sup>。

表 1 ZrO<sub>2</sub> 溶液的特征 Table 1 Characteristics of the ZrO<sub>2</sub> solution

			2	
Solution	Density $\rho_m / (g \cdot mL^{-1})$	Viscosity $\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	Conductivity $K / (\mu S \cdot cm^{-1})$	Surface tension $\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
$ZrO_2$	0. 836	1.447	0. 812	14. 952

#### 1.2 仿生织构化表面的设计

仿生织构即是将织构与自然界生物体表形 貌相结合,运用仿生学原理设计出具有一定外 形、尺寸和排列规律的阵列,是当下研究的热 点<sup>[21-23]</sup>。自然界的红点锦蛇的腹部鳞片具有非 光滑的微观结构,如图 1a 所示,这种半菱形凸结 构能够为蛇在运动捕食过程中增大与外界的摩 擦,可以实现爬树、快速爬行等。试验考虑织构 化表面的菱形尺寸过大会导致织构化表面更接 近平面薄膜,弱化仿生菱形的作用;而菱形尺寸 过小则会导致电射流法制备的菱形棱角钝化明 显,影响形貌;并综合考虑掩膜板的加工变形因 素,据此设计了图 1b 所示的厚度为 0.08 mm 的 菱形织构掩膜板。

#### 1.3 织构化表面的制备

沉积所用的设备为图 2 所示的电射流沉积试验 平台,主要由计算机、高压电源、CCD 相机、铝基板、 *X-Y*运动平台及注射泵、毛细软管、内径 0.4 mm 的 喷针组成。工作时,调节针头与基体间距为 0.3 mm 左右,注射泵以 0.6 μL/min 的速度均匀地将 ZrO<sub>2</sub> 溶液注入喷针,将高压电源调至 2.6~3.0 kV,使溶 液雾 化为锥射 流状态,借助 *X-Y* 移动平台以 15 mm/s 的速度均匀地喷涂在基体上,每喷涂一层 便依次置于 120 ℃、300 ℃ 的预热平台上各加热



(a) Micro-morphology of elaphe rufodorsata's abdominal scale<sup>[24]</sup>



#### 图 1 掩膜板示意图



60 s,以去除多余的有机溶剂,再逐步冷却至室温, 进行下一层的喷涂。喷涂完成后置于马弗炉中烧 结,试验的烧结温度分别设定为 600 ℃、700 ℃和 800 ℃,研究了不同烧结温度对表面形态的影响, 据此优化了烧结温度为 600 ℃。制备织构化表面 的方法是先利用有限元仿真优化加工层数为 2:8, 即喷完 2 层薄膜后置于马弗炉中 600 ℃下烧结, 随炉冷却至室温。取出样品后再将掩膜板固定在 基体上,按上述方式喷涂 8 层 ZrO<sub>2</sub>,移除掩膜板后 再次烧结,得到稳定的织构化表面。为了保证层 数相同,制备 ZrO<sub>2</sub> 薄膜时则是喷完 10 层后置于马 弗炉中 600 ℃下烧结。

#### 1.4 润湿性试验

为了表征织构化表面的润湿性,使用接触角测量装置(KrussDSA100,Kruss GMBH,德国)测量 每个样品上的液滴接触角,其原理如图 3a 所示。 将 1 滴去离子水(约 14  $\mu$ L)通过微量注射泵滴到 样品表面,待大约 10 s 后液滴形状不再变化,此时 利用 CCD 相机拍摄其外部轮廓,并利用图 3b 所示 的拟合圆测量出其接触角  $\theta_{ca}$ ,对每个样品表面的 液滴接触角进行 5 次测量取平均值,研究其表面 润湿性。



图 2 电射流沉积试验平台 Fig. 2 Electrohydrodynamic atomization platform

#### 1.5 摩擦磨损试验

利用多功能摩擦试验机(UMT-2型)进行摩 擦磨损试验,试验机加载力精度为0.01 N,采用球 -板接触式直线往复摩擦,摩擦球选用直径为 9.525 mm、表面粗糙度低于0.1 µm的45 钢,固定 在夹具中,对试样垂直加载一定大小的力,以 6 mm的滑移距离、3 mm/s的滑移速度往复运动 1 200 s,分析对比不同试样磨损后的磨痕形貌和 元素分布。试验以 600 ℃烧结后的光滑基体表面 (JT)、涂层基体表面(JTC)和织构化表面(JTZ)为 研究对象,对比了不同加载力下三者的摩擦磨损 性能和相应对磨球的磨损率,由此得到织构化表 面的摩擦特性。

磨损率计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$\omega = \frac{V}{Fl}$$

$$V = \frac{2}{3}\pi R^3 - \frac{1}{3}\pi (2R^2 + r^2) \sqrt{R^2 - r^2} \vec{x} + r$$

ω为磨损率, F 为载荷, l 为滑动距离, V 为磨损体积, R 为磨球半径, r 为对磨球上磨损面半径。



(a) Equipment





2 结果与分析

### 2.1 仿生织构化表面制备时的烧结温度优化

氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)在常温状态下具有较好的物理 性能,热膨胀率与 316L 不锈钢相近,是一种克服了 普通陶瓷脆性易碎缺点的产品。通常情况下氧化锆 在常温下以单斜晶相 m-ZrO<sub>2</sub> 的状态存在,温度上升 到1163 ℃过程中会逐步转变成四方晶相 t-ZrO<sub>2</sub>,再 上升至2370 ℃时则转换成立方相 c-ZrO<sub>2</sub>。单斜晶 相与四方晶相之间的这种相转换会产生体积变化, 造成陶瓷表面出现微裂缝<sup>[25]</sup>。图 4 为扫描电子显 微镜下不同烧结温度后的氧化锆织构化表面形貌, 由600 ℃烧结后的 SEM 图 4a 可见表层较为均匀致 密,无明显的裂缝或气孔,但有少量的团聚物,这是 由于喷涂过程中,部分团聚物或大颗粒率先沉积到 表层,并以此为中心形成小电极,吸引液滴向此处聚 集,造成局部微小凸起。图 4b 为 700 ℃烧结后的 SEM 图, 与 800 ℃烧结后的图 4c 相比, 裂缝数量相 对较少且裂缝宽度较小。这是由于在 600~800 ℃ 温度烧结时,氧化锆发生可逆的同素异构变化,有部 分单斜晶相转变为四方晶相,并伴随着约5%的体 积收缩变化,而在冷却至室温过程中,四方晶相回复 为单斜晶相,体积膨胀约8%,从而造成开裂<sup>[26]</sup>。而 且,800 ℃时发生相转换的 m-ZrO。所占比例更大, 所以裂缝更多更明显。600 ℃烧结后的 ZrO<sub>2</sub> 织构 化表面形貌已经无明显缺陷,且由于四方相氧化锆 (t-ZrO<sub>2</sub>)在承载时由应力诱发产生四方相→单斜相 (t→m)的转化,其产生的体积效应会吸收大量的断 裂能,从而产生相变增韧,获得高韧性、高耐磨性的 表面。为了在冷却后获得更多的 t-ZrO,,需要将烧 结温度尽可能升高,使烧结时有更多的单斜相转化 为四方相。故将600℃定为烧结温度。







#### 2.2 织构化表面形貌

将 600 ℃ 制备出的织构化表面置于共聚焦显微 镜 LSM800 下观察并提取其剖面,由图 5 可知微织 构高度达到 0.5  $\mu$ m,菱形块内部表面较为平整,但 边缘有约 0.3  $\mu$ m 的凸峰,这是由于喷涂时 ZrO<sub>2</sub> 溶 液具有一定的表面张力,发生毛细现象吸附在掩膜 板菱形缝的侧壁。试验测得制备的织构化表面的面 粗糙度 Sa 为 0.376  $\mu$ m,说明织构化表面较为平整。

对 600 ℃烧结后的氧化锆织构化表面进行 EDS 能谱分析得到图 6a,其中 Fe 元素占主导,并伴随

Cr、Ni 等基体中的元素,可知烧结时发生了明显的 扩散现象,316L 基体中大量元素扩散到 ZrO<sub>2</sub> 薄膜 中,这有利于增强基体与 ZrO<sub>2</sub> 层间的结合力,有利 于后续的摩擦磨损试验。图 6b 为经 600 ℃烧结后 ZrO<sub>2</sub> 的 XRD 图谱,与标准 XRD 图谱 m-ZrO<sub>2</sub>(JCPDS 37-1484)、t-ZrO<sub>2</sub>(JCPDS 50-1089)比较,可见明显 的单斜晶相与四方相并存的状态。降温过程中由于 表面受到的基体约束较少,四方相更容易发生马氏 体相变退回单斜相,内部的四方相则维持在亚稳定 状态。在材料表面会因晶相体积的变化产生残余压 应力,可与后续的摩擦磨损试验引入的外界拉应力 部分抵消,是一种有利的表面强化增韧现象。



图 5 菱形织构化表面形貌及其参数

Fig. 5 Appearance and parameters of rhombus-texture surface



图 6 600 ℃烧结后 ZrO<sub>2</sub> 织构化的表面分析 Fig. 6 Spectrum of ZrO<sub>2</sub> rhombus-texture surface after sintering at 600 ℃

#### 2.3 热应力仿真及沉积层数优化

为了增强织构化表面与基体的结合力,试验 考虑先在基体表面喷涂 ZrO<sub>2</sub> 均匀薄膜作为基层, 烧结之后再在其上覆盖掩膜板,以同样的方式制 备特定图案的 ZrO<sub>2</sub> 织构化表面。为了减少烧结后 的残余热应力,利用 ANSYS 有限元仿真的瞬态热 应力分析,确定最佳的织构高度与底层薄膜高度 的比例,仿真所需的参数如表 2 所示。首先建立 薄膜模型(15 μm×15 μm×2 μm),在其上建立菱 形凸起,依次增加织构的高度并对可能的应力集 中部位进行渐近线网格划分,提高模拟精度。按 照实际情况模拟 600 ℃烧结后冷却至室温 25 ℃, 得到如图 7a 所示的最大等效残余热应力变化曲线 图,得知随着底层薄膜与织构高度比逐渐增大,其 最大等效残余热应力不断减小,但织构高度较大 时下降趋势较缓慢。结合图 7b~7e 可见,2:8 时 织构与薄膜的交接处残余热应力为蓝色,应力最 小,更能保证织构的热稳定性。故选择先喷涂 2 层 ZrO<sub>2</sub> 薄膜,烧结完成后覆盖掩膜板,再喷涂 8 层 制备织构化表面。

表 2 316L 不锈钢和 ZrO <sub>2</sub> 材料的	物理参数
------------------------------------	------

Table 2Physical parameters of 316L stainless steel and ZrO2 materials									
Materials	Poisson	Density	Elastic Modulus	Coefficient of thermal	Coefficient of thermal	Specific heat capacity			
	ratio $\mu$	$ ho_m/(\mathrm{g}\cdot\mathrm{mL}^{-1})$	<i>E/</i> GPa	expansion $\alpha/(10^{-6} \cdot K^{-1})$	conductivity $\lambda / (\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$	$c/(\mathbf{J} \cdot \mathbf{g}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$			
316L	0.3	7.98	206	16	15.21	0.5			
$ZrO_2$	0.3	5.7	220	10.8	2.09	0.4			

#### 2.4 织构化表面的润湿性

图 8 显示了稳定后的三种样品表面的去离子水 滴的接触角  $\theta_{ea}$ 。光滑基体 JT 表面的  $\theta_{ea}$  为 65. 2°, 涂层基体 JTC 表面和织构化涂层 JTZ 表面的接触角 均在 70°以上,且 JTZ 表面接触角更大,说明虽然同 为亲水性表面,但与光滑基体 JT 相比,利用电射流





法制备的氧化锆涂层的亲水性较弱,且织构化表面 的亲水性更弱,表面能更低,对水的吸附能力较弱, 更适合用于干摩擦试验,制备增摩材料等。



#### 2.5 摩擦因数与磨损率

由图 9a~9c 不同加载力条件下试样表面的摩 擦因数曲线得知,光滑基体 JT 表面的摩擦因数在 1 N、2 N 时稳定为 0.3,在 4 N 的 350 s 时由 0.3 上 升到 0.48,这是因为烧结后的基体表面有一层氧化 膜,在小载荷下能起到减摩作用,而在 4 N 时表面膜 磨损而出现摩擦因数上升的现象。与 JT 相比,ZrO<sub>2</sub> 薄膜 JTC 具有明显的减摩效果,1 N 加载力下的摩 擦因数约为 0.15,是光滑基体的一半,在 650 s 后摩 擦因数剧烈波动并逐步升高至 0.3,此时薄膜被磨 穿而逐渐失去减摩效果。2 N 加载力下的摩擦因数 约为 0.13,在 500 s 后开始上升,减摩时间缩短。在 加载力为 4 N 时摩擦因数稳定在 0.15 左右且波动 较小,涂层寿命更长,在 730 s 时摩擦因数小幅度上 升,但仍然有较好的减摩效果。结合图 9 d 磨球的 磨损率与图 10 薄膜 JTC 磨痕可知,薄膜能大幅度降低磨损率,当加载力为1N、2N、4N时,其对应磨球的磨损率分别为相同条件下 JT 试样的 3.66%、5.36%、1.00%。磨痕主要为黏着磨损,并且随着加载力增加,磨痕的宽度不断加大。摩擦学黏着理论认为物体移动过程中,需要克服表面微凸体间由于塑性变形而产生的的啮合力和接触后产生的黏结,同时还要提供物体相互位移所需要的切向力。在力较小时,微观阻力的影响大,磨球与涂层间的黏着现象严重,加快了涂层的失效,致使其摩擦因数较高且寿命较短。随着力的增大,微观阻力的影响减弱,但磨损率增加。而4N加载力下薄膜没有被磨穿,磨损率大幅度降低。

ZrO<sub>2</sub> 织构化表面 JTZ 具有明显的增摩效果。 1 N 载荷下摩擦因数从 0.4 逐步上升到 0.5 左右, 并有较大波动,因为在力较小的情况下,微观阻力和 黏着现象的影响较大,造成摩擦力不稳定的现象。 2 N 加载力下摩擦因数在 150 s 内快速升高到 0.5 左右并保持稳定。当力增大到 4 N 时摩擦因数在 100 s 时急剧上升后迅速下降,并略低于 JT 的摩擦 因数,这是由于 JTZ 的表面织构在较大加载力下被 迅速损毁,部分 ZrO<sub>2</sub> 碎片进入摩擦轨道,起到了一 定的减摩效果。对于织构化表面 JTZ,相应力条件 下其对应磨球的磨损率分别为相同力条件下光滑基 体对应磨球磨损率的 48.13%、41.91%、70.18%。 结合图 11 JTZ 表面的磨痕形貌可知,在干摩擦条件





Fig. 9 Instantaneous friction coefficient and wear rate of three samples under different forces



图 10 不同加载力下的 JTC 磨痕形貌及 EDS 元素分析 Fig. 10 Appearance and EDS spectra of JTC sample under different loading forces



图 11 不同加载力下的 JTZ 磨痕形貌及 EDS 元素分析 Fig. 11 Appearance and EDS spectra of JTZ sample under different loading forces

下,JTZ 表面的磨痕槽在1N 时宽度为171 μm,主要 为磨粒磨损,少量的磨损碎屑黏附在磨损轨道上,这 些磨损颗粒是二氧化锆碎片和从对磨球上转移出的 金属颗粒的混合物。随着加载力增加,磨痕宽度增 大,磨痕内部有明显的黏着物,在滑动疲劳和剪应力的作用下转为较严重的黏着磨损,并且由 Zr 元素分布看出 4 N 时织构化表面的 ZrO<sub>2</sub> 材料被明显挤压 到磨痕的两侧,磨痕内 Fe 元素含量增加,这是织构 化表面被磨穿,磨球与基体对磨所致,此时织构化表面已经失去增摩效果。

综合分析可知,低载荷条件下薄膜JTC 能够起 到明显的减摩作用,磨损率仅为相同加载力下光滑 基体的1%~5%,且在大加载力条件下减摩效果更 好。低载荷条件下织构化表面JTZ 能够起到明显的 增摩作用,与光滑基体相比磨损率下降 50%以上, 但在较大力条件下会被快速磨穿失效。

#### 3 结论

利用电射流沉积法在基体上制备织构化表面的 方法简单可行,且可随时更换掩膜板来制备不同的 图案。制得的织构化表面有更弱的亲水性,与 ZrO<sub>2</sub> 薄膜相比,织构化表面在较小加载力下增摩效果更 好,大加载力下容易被破坏。薄膜则在较大加载力 下减摩效果更好,小加载力下容易被破坏。织构化 表面与光滑基体相比,在小加载力下摩擦因数增加 ~70%,磨损率下降~50%,呈现出明显的增摩耐磨 效果,可作为微摩擦零件的增摩表面。

#### 参考文献

- [1] RYNDZIONEK R, SIENKIEWICZ U. A review of recent advances in the single- and multi-degree-of-freedom ultrasonic piezoelectric motors [J]. Ultrasonics, 2021(3): 106471.
- YU H, LIU Y, TIAN X, et al. A precise rotary positioner driven by piezoelectric bimorphs: Design, analysis and experimental evaluation [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 313: 112197.
- [3] PENG J, MA L, LI X, et al. A novel synchronous micro motor for intravascular ultrasound imaging [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2019, 66(3): 802-809.
- [4] KANG D, KIM K, KIM D, et al. Optimal design of high precision XY-scanner with nanometer-level resolution and millimeter-level working range [J]. Mechatronics, 2009, 194: 562-570.
- [5] 赵盖,雷浩,宋敬伏,等.一种基于表面织构的超声电机用 增摩结构:CN211296596U[P].2020-08-18.
   ZHAO G, LEI H, SONG J F, et al. A friction-increasing structure for ultrasonic motor based on surface texture: CN211296596U[P].2020-08-18. (in Chinese)
- [6] 汪溢汀,曹敏. 推荐两种在摩擦材料中作增摩成分的新型优质原料[C]//第九届中国摩擦密封材料技术交流暨产品展示会.上海:中国摩擦密封材料协会,2007:130-132,136.
  WANG Y T, CAO M. Two new raw-materials for friction-increasing[C]//The 9th China Friction & Sealing Material Technology Exchange and Product Exhibition. Shanghai: China Friction & Sealing Material Association, 2007: 130-132, 136. (in Chinese)

- [7] MITTRA J, KAVALUR A, KUMBHAR N T, et al. Effectiveness of pulsed laser deposited ZrO<sub>2</sub> surface film over autoclaved oxide film on a Zr alloy for hydrogen barrier application [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404 (5): 126548.
- [8] LI X, DENG J, GE D, et al. Rapid crystallization of electrohydrodynamically atomized ZrO<sub>2</sub> thin films by laser annealing[J]. Applied Surface Science, 2020, 510(Apr. 30): 145510. 1-145510. 11.
- MADHUSUDHANA R, NAYYASHREE K C, KRISHNAMURTHY L, et al. Synthesis and characterization of zirconium oxide ZrO<sub>2</sub> films on AA5052 and glass substrates [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 10651(1): 012018.
- [10] LI X, DENG J, LU Y, et al. Tribological behavior of ZrO<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> coating surfaces with biomimetic shark-skin structure [J]. Ceramics International, 2019, 45(17): 21759-21767.
- [11] MAHALINGAM S, EDIRISINGHE M J. Novel preparation of nitrogen-doped titanium dioxide films[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2008, 41(21): 215406.
- [12] MUHAMMAD N M, NAEEM A M, DURAISAMY N, et al. Fabrication of high quality zinc-oxide layers through electrohydrodynamic atomization [J]. Thin Solid Films, 2012, 520(6): 1751-1756.
- [13] SUN J, DENG J, LI X, et al. Preparation and tribological properties of MoS<sub>2</sub>-based multiple-layer structured films fabricated by electrohydrodynamic jet deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125334.
- [14] LI X, DENG J, YUE H, et al. Wear performance of electrohydrodynamically atomized WS<sub>2</sub> coatings deposited on biomimetic shark-skin textured surfaces [J]. Tribology International, 2019, 134(5): 240-251.
- [15] MENDEZ A R, TAN T Y, LOW H Y, et al. Micro-textured films for reducing microbial colonization in a clinical setting[J]. Journal of Hospital Infection, 2018, 98(1): 83-89.
- [16] WANG D, ZHU X, LIANG J, et al. Electrohydrodynamic jet printing of PZT thick film micro-scale structures [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(13): 3475-3483.
- [17] YANG X, JIANG X, YIN Z, et al. An economic and concise method to solve nozzle clogging issue during electro hydrodynamic printing[J]. International Journal of Modern Physics B, 2019, 33(23): 1950260.
- [18] WANG D, ZHA W, FENG L, et al. Electrohydrodynamic jet printing and a preliminary electrochemistry test of graphene micro-scale electrodes [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2016, 26(4): 045010.
- [19] LI X, DENG J, MENG Y. One-step mask patterning of micro lead zirconate titanate arrays by electrohydrodynamic atomization
   [J]. Ceramics International, 2020, 46(17): 27570-27578.
- [20] 李学木.基于电射流的 PZT 厚膜制备及其性能表征[D].大连:大连理工大学,2017.
   LI X M. Fabrication and characterization of PZT thick films

based on electrohydrodynamic jet deposition [D]. Dalian: Dalian

University of Technology, 2017. (in Chinese)

[21] 李杰,黄镕敏,王超磊,等.仿生微织构与氟硅烷修饰对6061 铝合金浸润性的影响[J].中国表面工程,2020,33
 (2):29-36.

LI J, HUANG R M, WANG C L, et al. Effects of biomimetic microtexture and fluoroalkylsilane modification on wettability of 6061 aluminum alloy[J]. China Surface Engineering, 2020, 33 (2): 29-36. (in Chinese)

- [22] 侯启敏,杨学锋,王守仁,等.仿生织构类型及其对表面摩 擦性能影响[J].中国表面工程,2020,33(3):18-32.
  HOU Q M, YANG X F, WANG S R, et al. Bionic texture types and their influence on surface friction properties [J]. China Surface Engineering, 2020, 33(3):18-32. (in Chinese)
- [23] 缪晨炜,郭智威,袁成清.仿生多尺度沟槽织构对表面摩擦 性能的影响[J].中国表面工程,2019,32(1):22-30.
  MIAO C W, GUO Z W, YUAN C Q. Effects of bionic multiscales groove textures on surface tribological properties [J]. China Surface Engineering, 2019, 32 (1):22-30. (in Chinese)
- [24] 张占立. 蛇类爬行动物腹鳞的材料特性及摩擦学行为研究
   [D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
   ZHANG Z L. Research on material characteristic and tribological

behavior for vental scale of snakes [ D ]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)

- [25] 林振汉,林钢,吴亮,等.氧化锆系的相结构和转变[J].稀 有金属,2003,27(1):49-52.
  LIN Z H, LIN G, WU L, et al. Phase structure and transformation of zirconia system [J]. Rare Metal, 2003, 27 (1):49-52. (in Chinese)
- [26] 管吴, 贡湘君, 刘荣, 等. 不同晶型结构纳米 ZrO<sub>2</sub> 的稳定化制备[J]. 材料研究学报, 2014, 28(2): 139-143.
  GUAN H, GONG X J, LIU R, et al. Preparation of stable nanosized ZrO<sub>2</sub> particles with different crystallographic structures
  [J]. Materials Research Journal, 2014, 28 (2): 139-143. (in Chinese)

作者简介: 张志慧, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向 为电射流法增材制造和表面微织构。

E-mail:zhang\_zhihui@126.com

邓建新(通信作者),男,1966年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为刀具涂层技术、微织构刀具和摩擦磨损。 E-mail:jxdeng@sdu.edu.cn