

引用格式:韩智斌,马廉洁,姜印明,等.激光表面复合仿生织构对氧化锆陶瓷减摩性能的影响[J].材料工程,2025,53(11):174-181.
HAN Zhibin, MA Lianjie, JIANG Yinming, et al. Influence of laser surface composite biomimetic texturing on friction-reduction performance of zirconia ceramic[J].Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 174-181.

激光表面复合仿生织构对氧化锆陶瓷减摩性能的影响

Influence of laser surface composite biomimetic texturing on friction-reduction performance of zirconia ceramic

韩智斌^{1,2},马廉洁^{1,3*},姜印明¹,蒋涵存¹,贾 婧¹,谭雁清³

(1 东北大学 机械工程与自动化学院,沈阳 110819;2 华能山东石岛湾核电厂有限公司,山东 荣成 264312;3 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院,河北 秦皇岛 066004)

HAN Zhibin^{1,2}, MA Lianjie^{1,3*}, JIANG Yinming¹,
JIANG Hancun¹, JIA Jing¹, TAN Yanqing³

(1 School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co., Ltd., Rongcheng 264312, Shandong, China; 3 School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

摘要:基于氧化锆陶瓷材料磨损的现状和需求,针对单一织构化试样减摩性能问题,将不同织构类型进行组合,在生物体表提取仿生轮廓,设计多种新型的复合仿生织构。采用数值模拟和实验研究的方法分析复合仿生织构的减摩性能,进行 Reynolds 方程数值求解,研究复合织构类型对油膜承载力、压力分布区域及最大静压力的影响,并利用摩擦磨损试验机对其摩擦学性能进行实验探究。结果表明:复合仿生织构较其他织构类型具有更大的油膜承载力、更广的压力分布区域、更小的摩擦因数,其中,鳞形+羽毛形复合织构的综合减摩效果最佳;复合仿生织构的减摩机理主要归因于接触应力点的改变、压力的不对称分布及磨屑的储存性能,且复合织构的压力分布形式高度依赖于单一织构类型。

关键词:复合织构;仿生;摩擦性能;氧化锆陶瓷

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000360 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000360

中图分类号: TG117;TB32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0174-08

Abstract: Based on the current status and requirements of wear in zirconia ceramics, in response to the problem friction reduction performance of single-textured specimens, different texture types are combined to extract biomimetic contours from biological surfaces and design various novel composite biomimetic textures. The numerical simulation and the experimental investigation methods are used to analyze the friction reduction performance of composite biomimetic textures, solving the Reynolds equation numerically, studying the influence of composite texture types on oil film load capacity, pressure distribution area, and maximum static pressure, and conducting experimental exploration of the tribological performance using a friction and wear testing machine. The results indicate that composite biomimetic textures exhibit higher oil film load capacity, wider pressure distribution areas, and lower friction coefficients compared to other texture types, among them, the comprehensive anti-friction effect of the scale + feather composite texture is the best; the friction reduction mechanism of composite biomimetic textures can be mainly attributed to changes in contact stress points, the asymmetric distribution of pressure and abrasive storage properties, and the form of pressure distribution of composite texture is highly

dependent on a single texture type.

Key words: composite texture; biomimicry; friction performance; zirconia ceramic

氧化锆陶瓷具有耐磨、高强度、高韧性和化学稳定性强等特点,在高性能机械领域得到广泛应用^[1-2]。然而,在高负荷运转下,氧化锆陶瓷的表面容易受到摩擦磨损的影响,进而导致性能下降和使用寿命减少^[3-4]。目前,常利用表面工程技术改性氧化锆陶瓷的表面,以提升其摩擦磨损性能。表面织构技术作为一种常用的方法,通过在表面形成微观或纳米级别结构,在减小表面接触面积的同时提高润滑性能。而激光表面织构技术是一种利用激光束在试样表面形成复杂几何形状的减摩技术^[5-7],由于其高精度、高效性和可控性等特点,已成为减摩表面设计加工的一个重要手段^[8-9]。表面织构能够通过存储磨屑、二次润滑、流体动压效应及惯性效应等途径提高织构化表面的减摩性能。Li等^[10]在镍基复合材料表面加工了规则排列的凹坑织构,并进行摩擦磨损实验,研究表明,存储在凹坑内部的氧化物颗粒降低了高温下的摩擦因数,凹坑的面积占有率 S_p 为7.1%试样的磨损寿命延长了4倍以上。王泽霄等^[11]回顾了国内外表面织构减摩技术的研究进展,探究了织构形貌、几何参数、分布形式及润滑条件对减摩性能的影响,论证了织构化表面优异的减摩性能。韩智斌等^[12]为提高核主泵屏蔽电机石墨轴承的润滑性能,采用高速雕铣机在试样表面加工了不同形状、深度、面积占有率的凹坑织构,结果表明,随转速的增加,织构内部的动压效应增强,随着凹坑深径比和面积占有率的增加,摩擦因数呈现出先减小后增大的变化趋势。尽管国内外学者针对织构化表面的减摩性能展开了广泛的研究,但是大部分的研究主要集中于单一织构类型,难以满足不同工况下的摩擦磨损要求^[13]。为了进一步提高氧化锆陶瓷的摩擦磨损性能,研究人员通过设计复合织构结构,将不同形状的织构类型组合在一起,使试样具备更好的摩擦磨损性能^[14-16]。周云等^[17]利用皮秒激光器加工了四种复合型刀具,研究表明,合理的复合织构方案能够明显改善切削过程中的黏结磨损问题,延长刀具寿命。尹必峰等^[18]设计了槽腔及交叉沟槽两种复合织构,结合摩擦学性能实验,探究了复合织构对摩擦副润滑性能的影响,结果表明,复合织构的润滑性能明显优于单一织构,复合织构在上止点通过协同叠加形成高压油膜,减小了混合润滑的范围,弥补了空化区域油膜力的衰减。

本工作基于有限元分析方法,对氧化锆陶瓷表面的复合织构进行数值模拟,探究不同复合织构类型对

氧化锆陶瓷摩擦磨损性能的影响。同时,使用激光表面织构技术,在氧化锆陶瓷表面制备出不同的复合织构类型,并通过摩擦磨损实验验证数值模拟结果,分析复合织构对摩擦磨损性能的作用机理,为氧化锆陶瓷表面复合织构技术的应用提供理论依据和实验指导。

1 研究方法

1.1 数值模拟方法

1.1.1 仿生轮廓的提取

自然界的生物经亿万年的进化,在其体表形成各种不同的结构^[19],例如鲨鱼皮的鳞凸结构、鸟类的流线形羽毛、沙漠蜥蜴体表的微凸起等。在漫长的生长进化过程中,这些生物的减阻结构已经经历成千上万次的自然筛选,体表微结构的耐磨性能不断提升,以应对复杂的自然环境。学者们对仿生织构化表面的减摩性能展开了广泛的研究,揭示了仿生织构的减摩机理。但在仿生轮廓提取的过程中,往往采用过度简化的仿生轮廓^[20-21]。虽然简化的轮廓能够减少计算时间和减小加工难度,但会丧失大部分的生物学性能。本工作受鱼体表面鳞片结构、鸟类体表羽毛形结构及枫叶外部轮廓(如图1所示)减阻现象的启发,提取鳞片、羽毛和枫叶的仿生轮廓,同时在提取的过程中尽可能保留仿生轮廓的完整性,用于设计仿生织构化试样的减摩结构。

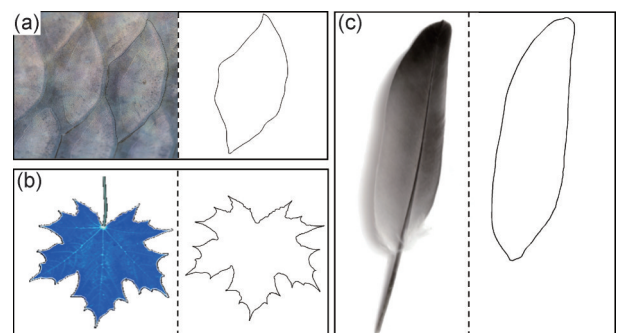


图1 鳞片(a)、枫叶形(b)、羽毛形(c)仿生轮廓的提取
Fig.1 Extraction of bionic profiles in form of scales(a), maple leaves(b), and feathers(c)

1.1.2 几何模型

图2为流体单元模型,图中F+S为方+三角形复合织构,L+M为鳞形+羽毛形复合织构,F+C为方+圆形复合织构,L+Y为鳞形+叶形复合织构,F+L为方+鳞形复合织构,Non-textured为无织构试

样。设置单元模型的长度为 $1120\ \mu\text{m}$,宽度为 $560\ \mu\text{m}$,为使织构形状参数具有可比性,所有织构单元模型保持恒定的织构深度和面积占有率。为确定织构深度和形状等参数设计的合理性,需确保所有织构形状的面积保持一致,均为 $0.0628\ \text{mm}^2$ 。

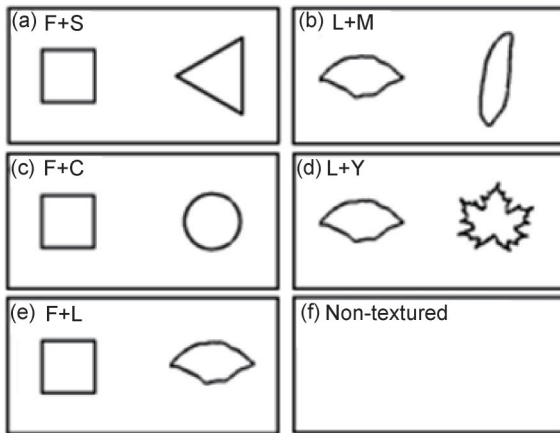


图2 流体模型

(a)方+三角形;(b)鳞形+羽毛形;(c)方+圆形;(d)鳞形+叶形;
(e)方+鳞形;(f)无织构试样

Fig.2 Fluid models

(a)F+S;(b)L+M;(c)F+C;(d)L+Y;(e)F+L;(f)non-textured

1.1.3 网格

在数值模拟中,网格的尺寸和质量对计算结果的精度和效率至关重要。为了充分节约计算资源,本工作进行网格独立性验证。图3为网格单元数和油膜承载力的关系。可知随着网格的细化,油膜承载力逐渐增加,但当网格单元数达到 2.5×10^6 个时,油膜承载力几乎不再显著变化,表明采用 2.5×10^6 个网格单元可以确保计算结果的精度。

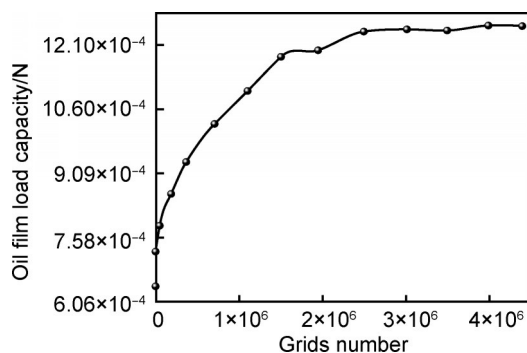


图3 网格数量和油膜承载力之间的关系

Fig.3 Relationship between grids number and oil film load capacity

1.1.4 数值模型及分析

(1) 控制方程

润滑剂的流动通常由连续性方程和动量方程

(Reynolds equations)控制,等温条件下不可压缩流体方程的表达式如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta(U\rho h) \quad (1)$$

式中: ρ 为液压油的密度; h 为油膜厚度; p 为液压油压力; η 为液压油的运动黏度; U 为上摩擦副的运动速度。

(2) 膜厚方程

$$h(x, y) = \begin{cases} h \notin \Omega \\ h + T(x, y) \in \Omega \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为织构深度; Ω 为织构区域。

1.1.5 设置边界条件

为排除计算参数对结果的影响,所有的仿真计算均采用相同的边界条件和参数设置。

(1) 边界条件:模型侧面设置为周期性边界条件,底面为无滑移壁面,上表面为滑移壁面。

(2) 不可压缩牛顿流体作为润滑介质,其密度为 $860\ \text{kg/m}^3$,黏度为 $0.03956\ \text{kg/ms}$,计算模型选用层流模型。

1.1.6 计算流体动力学结果验证

通过论证已发表文献原始数据^[22]与模拟数据之间的关系,发现二者具有相同的趋势且偏差在6%以内,该偏差在允许范围内,说明目前的数值模拟方法是可靠的。

1.1.7 摩擦性能的评价参数

两滑移表面在整个滑动过程中主要受到油膜承载力 W 的作用,织构减摩性能的评价参数主要是油膜承载力。

$$W = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} p(x, y) dx dy \quad (3)$$

式中: $p(x, y)$ 是静态压力分布函数; L_x, L_y 分别为单元体边长。

1.2 实验方法

1.2.1 实验材料及表面织构的制备

从氧化锆陶瓷柱塞上切取长方体试样,尺寸为 $8\ \text{mm} \times 6\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ 。由于柱塞腔内通常装有铜套,因此,滑靴试样使用直径为 $6\ \text{mm}$ 的铜球。在进行摩擦磨损实验前,使用超声波清洗柱塞试样和滑靴试样,以去除表面的油污,并使用磨抛机去除杂质。

利用飞秒激光在 ZrO_2 表面制备仿生织构,以精确控制激光扫描轨迹,并确保织构尺寸的准确性。织构均匀分布在内径为 $3.5\ \text{mm}$ 、外径为 $5.5\ \text{mm}$ 的圆环带内。

1.2.2 实验设备及摩擦磨损实验

所有实验均在NANOVEA摩擦磨损试验机上进

行。滑靴试样固定在上方,柱塞试样固定在下方的转子上,可相对于上方试样表面进行旋转。

为研究复合织构对织构化表面减摩特性的影响,按照面积相同原则设计各形状尺寸。柱塞试样的织构参数见表 1。

表 1 柱塞试样的织构参数

Table 1 Texturing parameters of plunger specimens

No.	Shape	Depth/ μm	Area occupancy rate/%
1 [#]	F+C	60	10
2 [#]	F+S	60	10
3 [#]	F+L	60	10
4 [#]	L+Y	60	10
5 [#]	L+M	60	10
6 [#]	Non-textured	0	0

为探究织构化试样在不同工况下的减摩性能,实验设置轻载(10 MPa)、中载(30 MPa)、重载(50 MPa)三种工况,在不同转速(50、100、150、200 r/min)下测试其减摩性能。使用 NTS 平台实时监测瞬时转速、摩擦因数及载荷,并使用 L-HM-46 抗磨液压油分析不同滑动速度及负载下织构的减摩性能。所有实验均在室温下进行,每组实验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 数值模拟结果

为探究织构形状对织构化表面减摩性能的影响,数值模拟中保持其他参数恒定($S_p=10\%$ 、 $h=20\ \mu\text{m}$ 、 $V=1\ \text{m/s}$)。图 4 为不同复合织构类型的压

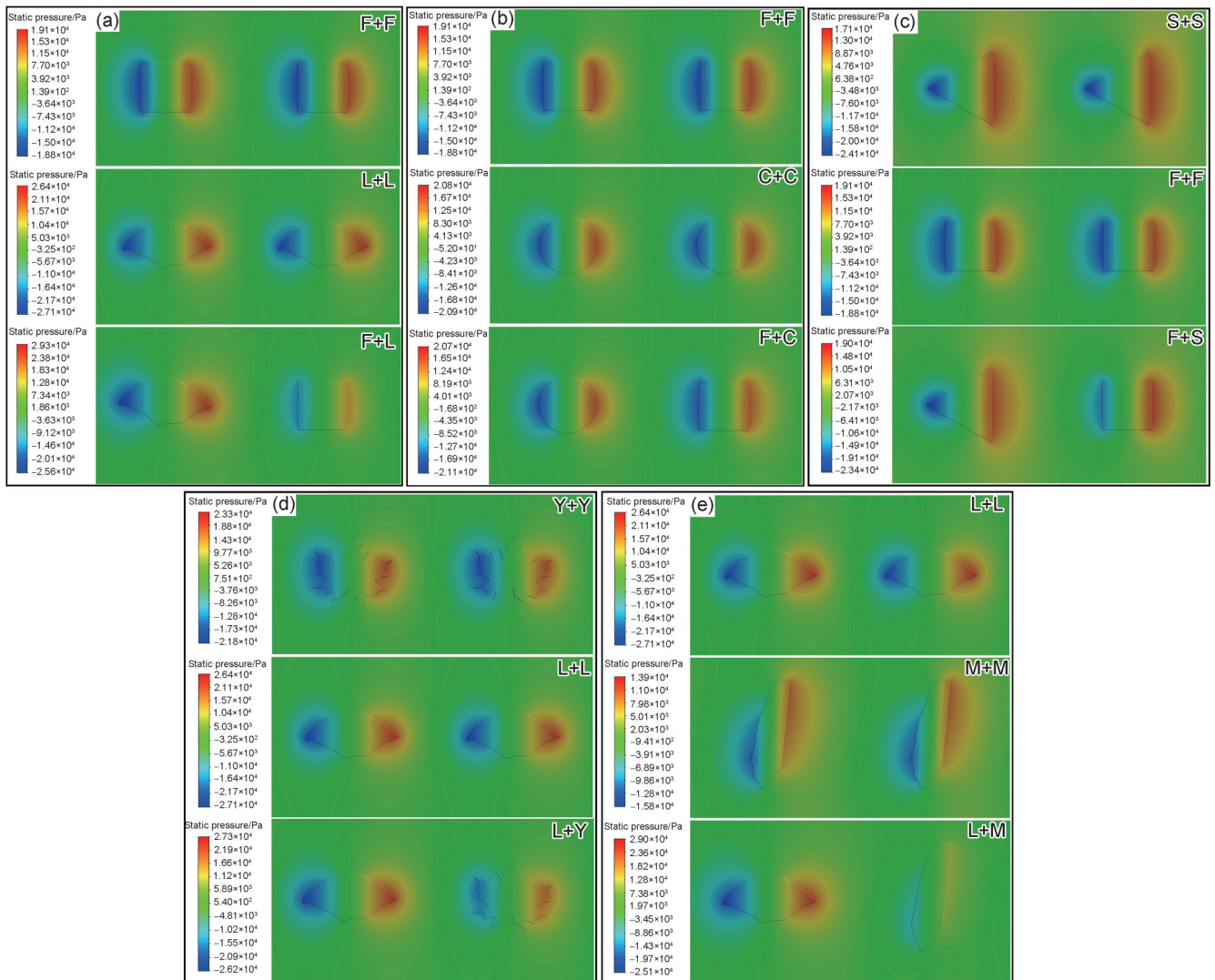


图 4 不同复合织构类型的压力分布

(a)方+菱形;(b)方+圆形;(c)方+三角形;(d)菱形+叶形;(e)菱形+羽毛形

Fig.4 Pressure distribution of different composite texture types

(a)F+L;(b)F+C;(c)F+S;(d)L+Y;(e)L+M

力分布。如图4(a)所示,方形及鳞形两个单一织构的正压区域及负压分布区域的范围完全对等,中轴线上的压力波形没有变化,而复合织构中方形织构的压力分布区域及大小较方形单一织构明显减小。图4(b)与方+鳞形复合织构的减摩规律类似,但方+圆形复合织构中的压力分布及大小较单一织构类型并未有明显的变化。如图4(c)所示,单一织构的压力分布规律与图4(a),(b)保持一致,在三角形单一织构中,由于三角形的排布并非对称分布,右端边的正压区域是左端边负压区域的数倍。在方+三角形复合织构中,其内部的方形织构左右两端边的压力分布区域并未同步减小或增大,左端边的负压分布区域及大小较方形单一织构显著下降,但是右端边的正压分布区域及大小较方形单一织构没有变化。如图4(d)所示,单一织构的压力分布规律依旧没有变化,鳞形+叶形复合织构中的枫叶形织构压力分布区域较单一织构类型的压力分布区域减小。如图4(e)所示,在复合织构类

型中的羽毛形织构的压力分布区域及其大小几乎为0。综上所述,复合织构较单一织构类型更容易形成不对称的压力分布区域,其中,鳞形+羽毛形织构及方+鳞形织构的协同作用最为显著。

图5为织构形状与油膜承载力和最大静压力的关系。由图5(a)可知,复合织构的油膜承载能力较单一织构显著提升,但不同类型的复合织构油膜承载力的增幅不一,其中,复合仿生织构的油膜承载力要显著大于其他类型的复合织构。图5(b)为织构形状与最大静压力的关系,可知,普通织构组合而成的复合织构,其最大静压力较单一织构没有显著提升,而是与两种普通织构类型中的最大静压力持平,而对于复合仿生织构,其最大静压力明显高于单一织构类型。综上所述,复合仿生织构较单一织构具有更大的油膜承载力和最大静压力,其中,鳞形+羽毛形织构油膜承载力最大,鳞形+羽毛形织构及方+鳞形织构具有最大的静压力值。

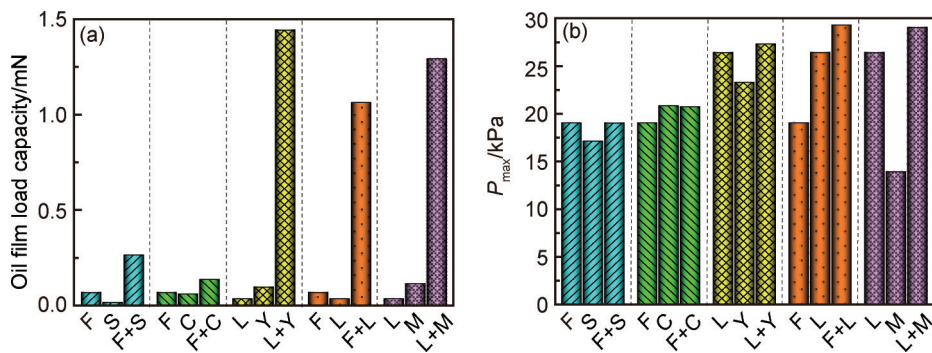


图5 织构形状与油膜承载力(a)和最大静压力(b)的关系

Fig.5 Relationship between texture shape and oil film load capacity(a) and maximum static pressure(b)

2.2 实验验证

2.2.1 摩擦因数

不同织构参数对表面织构的微流体承载效应具

有显著的影响,而摩擦因数 μ 是承载效应有效的表征方式之一。图6为不同转速 N 和不同载荷下复合织构类型与摩擦因数的关系,红色曲线表示复合织构在不

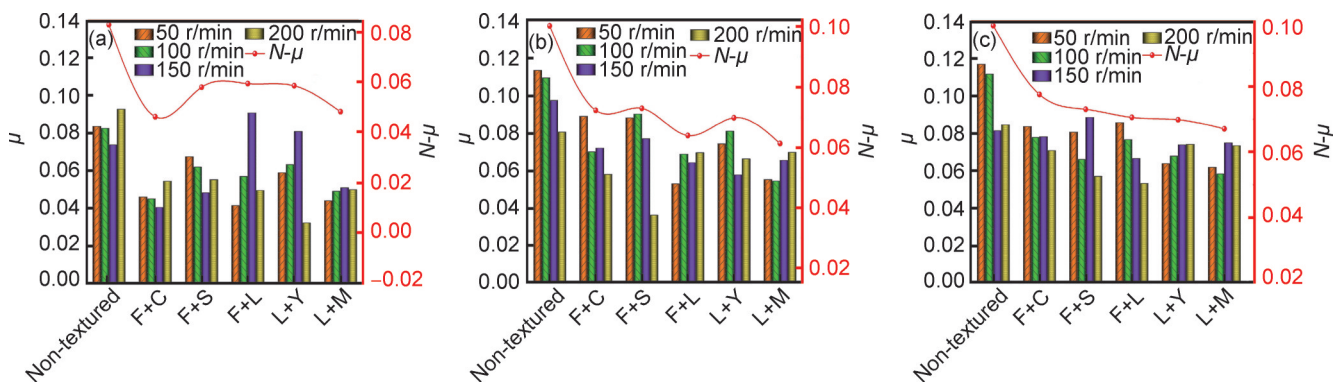


图6 各工况下复合织构类型与摩擦因数的关系 (a)轻载;(b)中载;(c)重载

Fig.6 Relation between composite texture type and friction coefficient under different working conditions

(a)light load;(b)moderate load;(c)heavy load

同转速下的综合减摩性能。如图 6(a)所示,在轻载工况下,复合织构展现出优良的减摩性能,平均摩擦因数均在 0.04~0.06 之间,方+圆形复合织构的减摩性能最佳,其平均摩擦因数在 0.04~0.045 之间,较无织构试样降低了 45% 左右,减摩效果显著;鳞形+羽毛形的仿生复合织构类型同方+圆形复合织构相近,亦取得了较好的减摩效果。如图 6(b)所示,在中载工况下,无织构试样的平均摩擦因数在 0.10 左右,复合织构化表面的平均摩擦因数均在 0.06~0.075 之间,减摩性能优越,鳞形+羽毛形的复合织构减摩性能最佳,较无织构试样降低了 40% 左右。如图 6(c)所示,重载工况下,无织构试样的平均摩擦因数稳定在 0.095 左右,织构化试样的平均摩擦因数在 0.06~0.08 之间,展现出较好的减摩性能,鳞形+羽毛形复合织构类型的减摩效果最佳,平均摩擦因数稳定在 0.062 左右,较无织构试样降低了 37% 左右。

综上所述,尽管操作条件的变化会对最优复合织构类型有一定的影响,但具有最佳减摩性能的织构化表面仍以复合仿生织构为主。在各工况下,鳞形+羽毛形织构普遍具有较低的摩擦因数,综合减摩性能最佳。

2.2.2 磨损质量

为更好地描述复合织构化试样的摩擦磨损性能,利用高精天平称重上摩擦副的磨损质量。图 7 为重载工况下无织构化和五种织构化试样所对应上摩擦副的磨损质量。可知,方+三角形复合织构、鳞形+羽毛形复合织构、鳞形+叶形复合织构试样在不同转速工况下均展现出优异的减摩性能,但不同工况

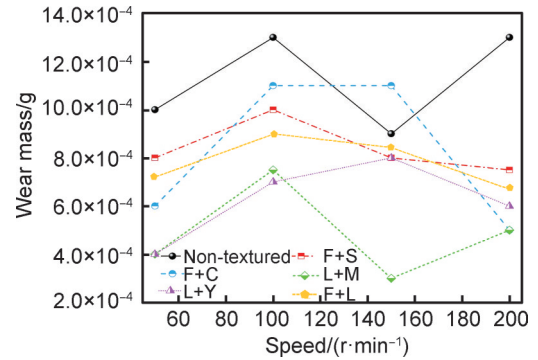


图 7 不同复合织构类型所对应上摩擦副的磨损质量
Fig.7 Wear mass of upper friction pair corresponding to different composite texture types

下的减摩程度各不相同。150 r/min 的转速下,方+圆形复合织构试样相对应上摩擦副的磨损质量略大于无织构试样,其他转速下该试样亦表现出较好的减摩性能。五种织构化试样所对应上摩擦副的磨损质量随转速的增加,均呈现出先增大后减小的趋势。在各工况下,鳞形+羽毛形复合织构所对应上摩擦副的磨损质量最小,减摩性能最佳。

2.2.3 磨损形貌

图 8 为 ZrO_2 -Cu 摩擦副在重载、低速工况下磨损的不同织构化试样的表面形貌。可以看出,无织构试样表面具有明显的划痕和部分黏着物,说明表面发生严重的磨粒磨损和轻微黏着磨损。与无织构试样相比,复合织构试样表面划痕几乎消失,这是因为织构的存在阻断了凹痕的扩展。图 9 为摩擦磨损实验前后织构化试样对比图,可以看到,实验前后织构内部积聚大量磨屑,磨屑大都为黑色黏着物。

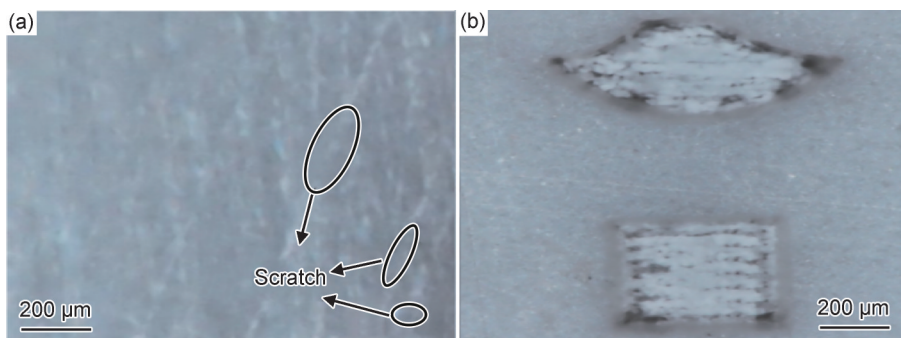


图 8 ZrO_2 -Cu 摩擦副在重载、低速工况下磨损表面形貌 (a) 无织构试样; (b) 复合织构试样
Fig.8 Surface morphologies of ZrO_2 -Cu friction pairs under heavy load and low speed conditions
(a) non-textured specimen; (b) composite texture specimen

2.3 讨论

模拟及实验结果说明织构类型及织构参数影响 ZrO_2 的摩擦性能,这是因为,织构类型和织构参数均会影响织构化表面的微观流体动压轴承效应、惯性效

应及泵吸作用,进而影响两摩擦副之间的润滑状态。

复合织构较单一织构具有不对称的压力分布区域及压力大小,但不对称分布形式由复合织构类型决定,这是因为润滑剂流经复合织构化表面时,织构内

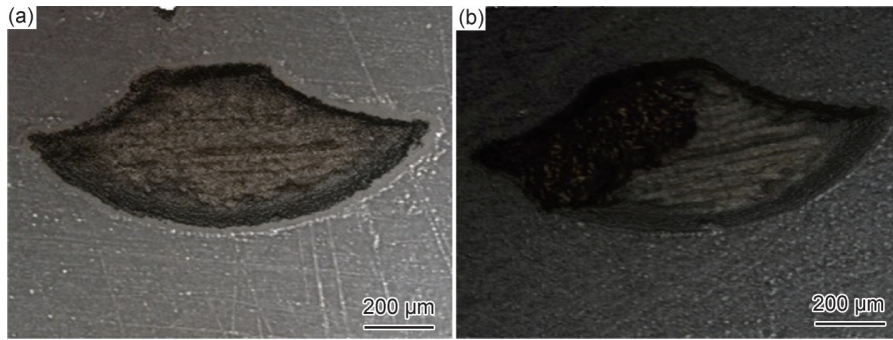


图9 摩擦磨损实验前(a)后(b)织构化试样对比

Fig.9 Comparison of texturing specimens before(a) and after(b) friction and wear test

形状的不对称分布会改变润滑剂的流动特征(流向、大小等),进而影响正负压的分布。以方+鳞形及方+三角形两种复合织构为例,方+鳞形复合织构中方形织构的左右两端边同步减小,而方+三角形复合织构中的方形织构只有左端边的负压区域显著减小,右端边的正压区域几乎没有变化,说明复合织构内的压力分布形式由复合织构类型决定,此与Scaraggi等^[23]的研究结论一致。模拟结果表明,鳞形+羽毛形复合织构具有更为不对称的压力分布,其中,羽毛形单一织构的压力几乎为0,这是因为羽毛形织构受邻近织构的影响较为显著,织构之间的协同作用较为明显。

织构形状与油膜承载力关系的模拟结果表明,鳞形+羽毛形复合织构较其他织构类型具有较大的油膜承载力和最大静压力值,复合织构的承载力均大于单一织构类型,但减摩程度各不相同。复合仿生织构的油膜承载力明显优于复合普通织构,这主要归因于仿生形状经大自然亿万年的自然选择和适应优化,较普通织构更容易满足流体动压润滑条件,除此之外,复合普通织构与单一织构类型的最大静压力相近,而复合仿生织构的最大静压力明显高于单一织构类型,说明并不是所有单一织构类型的组合都能显著提升织构化表面的减摩性能。

鳞形+羽毛形复合织构具有较低的摩擦因数,综合减摩效果最佳,在轻载、中载、重载工况下的减摩性能分别提高了45%,40%,37%,这主要归因于两摩擦副表面接触应力点的改变。在摩擦磨损实验的过程中,普通织构化表面会受到循环应力的作用,接触应力点的位置始终不会改变,进而加大较软材料摩擦副表面的剥蚀,而复合织构的存在,使得接触应力点不断发生变化,对较软材料的剥蚀作用不会在同一个位置上,在两摩擦副滑动的过程中,仿生复合织构化表面可以产生良好的收敛效应,润滑油流过时,在复合织构内部区域形成涡流效应,从而在织构化表面产生阶梯形压力油膜,从而减缓摩擦磨损环境的恶化。

鳞形+羽毛形复合织构的磨损质量曲线普遍低于其他织构类型,这是由于鳞形与羽毛形织构之间的组合更容易实现油膜的铺展和运输,在两摩擦副接触表面间形成稳定且完整的油膜,较好地避免两摩擦副的直接接触。磨损质量随转速的增加出现先增大后减小的趋势,低速和高速下的磨损质量普遍低于中速工况,这是因为低速工况下,两摩擦副的相对摩擦距离较短,而高速工况下,虽然相对摩擦距离激增,但随转速的增加,离心力变大,更多的润滑剂进入两摩擦副表面间,改善了两摩擦副之间的润滑状态,较低速工况更容易形成流体动压效应。无织构试样表面有划痕,这是因为在两摩擦副的挤压作用下,摩擦副表面的凸起部位最先剥落并形成磨屑,若清理不及时,磨屑将随摩擦副表面移动,逐渐转化为磨粒,在犁沟效应的作用下破坏两摩擦副的表面形貌,使工况进一步恶化。而织构化试样的表面划痕较少,主要是因为表面织构延伸了流体动压现象的发生范围,实验过程中润滑油不断被挤出,补充到对偶表面形成连续油膜,且凹坑的存在阻断了划痕的进一步扩展,大量磨屑存储于织构内部,脱离两摩擦副表面。

3 结论

(1)复合仿生织构较其他织构具有更大的油膜承载力、更广的压力分布区域、更小的摩擦因数,减摩性能更好。其中,鳞形+羽毛形复合织构的综合减摩效果最佳。

(2)鳞形+羽毛形织构在各工况下均有较低的摩擦因数及较小的磨损质量。

(3)复合仿生织构的减摩机理主要归因于接触应力点的改变及压力的不对称分布,其主要通过压力分布区域的非对称分布、接触应力点位置的改变及磨屑存储影响其减摩性能。复合织构的压力分布形式高度依赖于单一织构类型。

参考文献

- [1] XU J, JI M, LI L, et al. Improving wettability, antibacterial and tribological behaviors of zirconia ceramics through surface texturing [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(3): 3702-3710.
- [2] CHEN Y W, MOUSSI J, DRURY J L, et al. Zirconia in bio-medical applications [J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2016, 13(10): 945-963.
- [3] ZHANG X, WU X, SHI J. Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 9029-9048.
- [4] BASU B, KALIN M, KUMAR B V M. Friction and wear of ceramics: principles and case studies [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.
- [5] MAO B, SIDDAIAH A, LIAO Y, et al. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: a review [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 153-173.
- [6] BOIDI G, GRÜTZMACHER P G, KADIRIC A, et al. Fast laser surface texturing of spherical samples to improve the frictional performance of elasto-hydrodynamic lubricated contacts [J]. *Friction*, 2021, 9(5): 1227-1241.
- [7] 陈平, 项欣, 李俊玲, 等. 沟槽型结构摩擦学性能数值模拟与实验研究 [J]. *材料工程*, 2016, 44(6): 31-37.
CHEN P, XIANG X, LI J L, et al. Experimental and numerical investigation on tribological performance of grooved texture [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(6): 31-37.
- [8] LU P, WOOD R J K. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—a review [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2020, 8(4): 043001.
- [9] HU D, GUO Z, XIE X, et al. Effect of spherical-convex surface texture on tribological performance of water-lubricated bearing [J]. *Tribology International*, 2019, 134: 341-351.
- [10] LI J, XIONG D, DAI J, et al. Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite [J]. *Tribology International*, 2010, 43(5/6): 1193-1199.
- [11] 王泽霄, 陈文刚, 张禄中, 等. 几何特征及工况条件对表面织构摩擦特性影响研究 [J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 89-100.
WANG Z X, CHEN W G, ZHANG L Z, et al. Research progress on the influence of geometric characteristics and working conditions on the friction characteristics of surface texture [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 89-100.
- [12] 韩智斌, 王立辉, 张秀丽, 等. 凹坑织构对石墨材料水润滑性能的影响 [J]. *润滑与密封*, 2020, 45(12): 81-85.
HAN Z B, WANG L H, ZHANG X L, et al. Influence of dimple texture on water lubrication performance of graphite material [J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(12): 81-85.
- [13] 阮鸿雁, 吕建军, 司辉, 等. 多圆弧与三角形复合织构表面的动压润滑性能 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(3): 254-258.
RUAN H Y, LYU J J, SI H, et al. Hydrodynamic lubrication performance on multi-textured surface structured by multi-arcs and triangle textures [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(3): 254-258.
- [14] SIJU A S, GAJRANI K K, JOSHI S S. Dual textured carbide tools for dry machining of titanium alloys [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, 94: 105403.
- [15] SHARMA V, PANDEY P M. Comparative study of turning of 4340 hardened steel with hybrid textured self-lubricating cutting inserts [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, 31(14): 1904-1916.
- [16] GUI C, MENG F. Comparative study of spherical dimple and bump effects on the tribological performances of journal bearing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2019, 233(1): 139-157.
- [17] 周云, 何玉洋, 杨泽檀, 等. 复合织构刀具切削铝合金的性能 [J]. *中国表面工程*, 2022, 35(3): 281-288.
ZHOU Y, HE Y Y, YANG Z T, et al. Performance of hybrid textured tools in cutting aluminum alloy [J]. *China Surface Engineering*, 2022, 35(3): 281-288.
- [18] 尹必峰, 钱晏强, 卢振涛, 等. 缸套表面复合织构润滑性能理论及实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(9): 74-80.
YIN B F, QIAN Y Q, LU Z T, et al. Theoretical and experimental study on lubrication performance of composite textures on cylinder liners [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(9): 74-80.
- [19] 谭娜, 邢志国, 王海斗, 等. 基于仿生原理的几何构型及其功能性的研究进展 [J]. *材料工程*, 2018, 46(1): 133-140.
TAN N, XING Z G, WANG H D, et al. Research progress on geometric texturing and function based on bionic theory [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(1): 133-140.
- [20] VIDYASAGAR K E C, PANDEY R K, KALYANASUNDARAM D. Improvement of deep groove ball bearing's performance using a bionic textured inner race [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, 18(4): 974-990.
- [21] LI H, ZHOU H, ZHANG D P, et al. Influence of varying distribution distance and angle on fatigue wear resistance of 40Cr alloy steel with laser bionic texture [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 277: 125515.
- [22] 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.
YU R F, KOU X, CHEN W. Simulation analysis of novel surface texture based on CFD [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2021, 28(4): 466-472.
- [23] SCARAGGI M, MEZZAPESA F P, CARBONE G, et al. Friction properties of lubricated laser-microtextured-surfaces: an experimental study from boundary-to hydrodynamic-lubrication [J]. *Tribology Letters*, 2013, 49: 117-125.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975113)

收稿日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-09-13

通讯作者: 马康洁(1970—), 男, 教授, 博士, 研究方向为难加工材料加工理论与技术、智能制造核心理论与关键技术、精密超精密磨削技术及生物制造技术, 联系地址: 河北省秦皇岛市海港区泰山路143号东北大学秦皇岛分校控制工程学院(066004), E-mail: neumalianjie@163.com

(本文责编: 王 晶)