

激光表面织构化生物陶瓷涂层及其摩擦磨损性能

鲍雨梅^{1,2}, 王成武¹, 金志伟¹, 吴霄¹, 鲍佳峰¹

¹浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014;

²浙江工业大学之江学院, 浙江 绍兴 312030

摘要 基于 Reynolds 方程和 P-C(Patir and Cheng)模型,分别建立了织构表面在流体动压润滑及混合润滑状态下的理论模型。采用有限差分法并结合数值迭代,利用 Matlab 编程对模型进行计算,获得计算域内的压力分布和织构表面的理论摩擦系数,以此作为织构表面摩擦学性能的判断标准。采用飞秒激光加工工艺,在氧化锆(ZrO₂)增强 HA(Hydroxyapatite,羟基磷灰石)生物陶瓷涂层表面,加工出具有不同排布方式的椭圆形织构阵列和不同面覆盖率的圆形织构阵列。在往复实验平台进行摩擦磨损实验,利用三维轮廓仪表征涂层的磨损深度,并验证了数值模型。

关键词 飞秒激光加工; 表面织构; HA 复合陶瓷涂层; 润滑模型; 摩擦磨损性能

中图分类号 TB39; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0203003

Textured Surface on a Bioceramic Coating via a Femtosecond Laser and its Friction and Wear Properties

Bao Yumei^{1,2}, Wang Chengwu¹, Jin Zhiwei¹, Wu Xiao¹, Bao Jiafeng¹

¹The MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

²Zhejiang College of Zhejiang University of Technology, Shaoxing, Zhejiang 312030, China

Abstract Numerical models of a textured surface under hydrodynamic and mixed lubrication conditions are established, respectively, based on the Reynolds equation and the P-C (Patir and Cheng) model. The models are solved via Matlab programming using the finite difference method combined with numerical iteration. The pressure distribution in the calculation domain and the theoretical friction coefficient of the textured surface are obtained, which are used as the criteria for judging the tribological properties of the textured surface. To explore the coating design parameters for improved wear resistance, an elliptical texture with different arrays and a circular texture with different coverage ratios are processed using a femtosecond laser on the surface of a zirconia-reinforced hydroxyapatite bioceramic coating. The friction and wear tests are conducted on a reciprocating test platform. The wear depth of the coating is characterized by a three-dimensional profiler, and the proposed numerical models are verified.

Key words femtosecond laser processing; textured surface; HA composite ceramic coating; lubrication model; friction and wear property

OCIS codes 350.3390; 160.1245; 160.1435

1 引 言

人工关节置换术是现代医学最成功的外科手术之一,而关节表面的磨损是导致无菌松动、骨溶解甚至植入物失效的最普遍原因^[1]。由陶瓷材料制成的

关节假体具有强度高、耐磨性好、耐腐蚀性强及生物相容性良好等优点,并能有效减少假体松动失效的发生概率。Ohgushi 等^[2]对陶瓷的人工髋关节配合形式进行了测试,实验结果显示,产生的磨损颗粒数是金属对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)的配合形

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2018-09-19; 录用日期: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(51105339)

* E-mail: baoym@zjut.edu.cn

式产生的磨损颗粒数的 1/200。

但陶瓷材料通常脆性较大,在应用中存在关节异响和假体碎裂等问题,因此研究者采用激光熔覆和等离子喷涂等方法将生物陶瓷材料(如羟基磷灰石,HA)涂覆在金属基体表面制备成复合材料,使之兼具金属优良的力学性能和生物陶瓷优良的生物活性,以满足人工关节材料的临床应用^[3-5]。

表面织构技术可提高轴承和机械密封表面的摩擦学性能^[6-7],在不同的润滑状态下,减摩机理也不尽相同,织构的形状、排列方式、面覆盖率及深径比均对摩擦磨损有很大影响^[8-11]。Choudhury 等^[12]研究圆形织构的排列方式(正方形、圆形、三角形)对减摩作用的影响,结果表明正方形阵列具有更佳的减摩效果;Zhang 等^[13]在常规织构形状基础上运用遗传算法对织构提出优化,并结合实验,指出子弹形和鱼形织构具有更低的摩擦系数。

研究表明,人体在不同行走状态下其关节处于不同的润滑状态,在行动较慢和负重较小时处于流体动压润滑状态,而行动较快和负重较大时处于混合润滑状态。大部分学者对于流体润滑条件下表面织构的润滑模型研究均是基于 Reynolds 方程开展的^[14-17],并且理论分析结果和实验研究结果均显示出较好的一致性。在混合润滑条件下,表面粗糙度对流体域润滑问题的分析和处理,普遍使用的方法有两种:第一种方法计算过程与常规的流体域润滑分析完全相同,只是在计算油膜厚度时须考虑表面真实粗糙度的影响,其计算量与工作量较大;第二种方法是利用统计平均的思想求解,即将粗糙表面通过统计参数进行表征从而来表述粗糙度对润滑性能的影响。Patir 和 Cheng 提出的平均流量模型(P-C 模型)^[18-20]便是其中具有代表性且最常用的理论模型,该方法计算量小且对于粗糙度考虑较为全面,因而被广泛采用。

本文首先在流体动压润滑及混合润滑状态下,分别建立基于 Reynolds 方程和 P-C 模型的织构表面润滑模型,并采用有限差分法结合数值迭代的方法,利用 Matlab 进行数值求解,获得计算域内的压力分布和织构表面的理论摩擦系数。进而以模拟的最优织构参数为基础,采用飞秒激光加工技术在含 30% 质量分数的 ZrO₂ 的 HA 涂层上加工出不同排布形式的椭圆凹坑织构和不同覆盖率的圆凹坑织构,采用扫描电子显微镜(SEM)对涂层表面进行表征,在牛血清润滑状态下进行摩擦磨损实验,将结果与数值分析进行比较,验证了

所提出理论模型的合理性,为人工关节的实际应用提供一定的理论指导。

2 数值分析

在流体动压润滑状态与混合润滑状态下,分别讨论了不同的表面织构参数(圆形织构的直径及覆盖率,椭圆形织构的排布方式)对摩擦系数的影响规律,根据人工关节实际运动情况,取相对表面间运动速度为 $v=0.1$ m/s,润滑剂黏度选用牛血清黏度 $\eta=0.05$ Pa·s^[21]。

2.1 流体动压润滑数值分析

2.1.1 流体动压润滑模型

二维不可压缩流体动压润滑 Reynolds 的一般形式为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y}\right) = 6v\eta \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, x, y 为平行于摩擦副表面的坐标系; p 为产生的油膜压力,单位为 Pa; η 为润滑剂的动力黏度,单位为 Pa·s; h 为摩擦副间油膜厚度,单位为 m; v 为两摩擦副相对运动速度,单位为 m/s; t 为摩擦时间,单位为 s。

因研究的是稳态润滑,膜厚不随时间变化,因此(1)式又可简化为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y}\right) = 6v\eta \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (2)$$

织构计算参数包括面覆盖率 S_p (织构单元占控制单元的比)、凹坑深度 h_p 、圆形织构半径 r 、椭圆形织构半长轴 a 和半短轴 b ,控制单元边长 L 。

圆形织构示意图如图 1 所示,图中,控制单元边长可表示

$$\text{圆形织构: } L = r \sqrt{\frac{\pi}{S_p}}, \quad (3)$$

$$\text{椭圆形织构: } L = \sqrt{\frac{\pi ab}{S_p}}, \quad (4)$$

控制单元基于网格划分,网格上每点的压力值以相邻四点压力值为基础,即利用五点差分法并结合超松弛迭代进行计算。

2.1.2 边界条件

考虑到计算速度与精度的影响,在流体润滑计算中多采用 Reynolds 边界条件,即润滑膜起始点位置的压力为零时,润滑膜终点出现在发散区内,在此位置润滑膜压力和压力法向梯度同时为零。

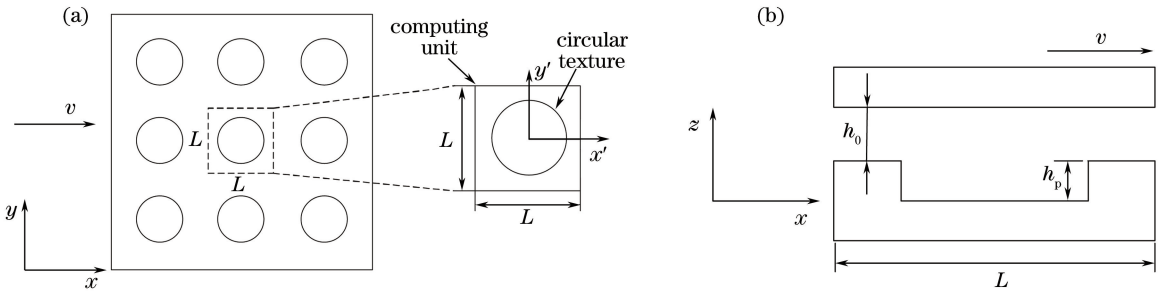


图 1 模型示意图。(a)圆形织构几何模型；(b)膜厚示意图

Fig. 1 Model schematics. (a) Geometry model of circular texture; (b) illustration of film thickness

2.1.3 程序验证

为了验证流体动压润滑模型程序的可靠性,采用相同的织构参数和操作参数并与文献[22]中的计算结果进行对比。织构参数为:织构单元边长 $L = 0.5 \text{ mm}$;圆形织构半径 $r = 0.1 \text{ mm}$;基础膜厚 $h_0 = 5 \text{ }\mu\text{m}$;圆凹坑深度 $h_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$ 。操作参数为:移动速度 $v = 0.625 \text{ m/s}$;润滑剂黏度 $\eta = 0.09845 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。对比结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,计算的承载力、摩擦力与摩擦系数均与文献中的结果相吻合,说明该程序具有一定可靠性。

表 1 承载力、摩擦力和摩擦系数的对比

Table 1 Comparison of bearing capacity, friction and coefficient of friction

	Bearing capacity	Friction	Coefficient of friction
Results of this paper	0.0286	0.00280	0.0979
Results of Ref. [22]	0.0277	0.00279	0.1011
Relative error / %	3.25	0.36	3.16

2.1.4 不同织构参数对摩擦系数的影响

为使仿真与后续实验工况更接近,油膜厚度 h_0 通过求解油膜压力 p 与设定的外载荷 F 进行比较迭代修正求得。计算参数为:相对表面间运动速度为 $v = 0.1 \text{ m/s}$,润滑剂黏度选用牛血清黏度 $\eta =$

$0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,其他参数保持不变。

图 2 所示为不同织构形状下织构单元的无量纲压力分布图,其中图 2(a)为直径 $d = 250 \text{ }\mu\text{m}$,面覆盖率为 10% 的圆形微凹坑单元;图 2(b)为相同面覆盖率且夹角 $\alpha = 0^\circ$ 的椭圆形织构单元;图 2(c)为相同面覆盖率且夹角 $\alpha = 90^\circ$ 的椭圆形织构单元。从图中可以看到,在润滑剂进入织构的区域即发散区域,润滑膜压力为负值;相反地,在润滑剂流出织构的区域即收敛区域,润滑膜压力为正值。由于在计算过程中考虑了空化现象,对发散处压力采用 Reynolds 边界条件进行修正,因此在整个计算域内润滑膜压力积分为正值,说明在一个织构单元内产生了额外的流体动压力。另外,润滑膜压力在收敛区域存在最大压力值,并将图 2 的(a)、(b)和(c)进行对比,可以看到 $\alpha = 0^\circ$ 的椭圆形织构单元其收敛区域最大压力值最大,而 $\alpha = 90^\circ$ 的椭圆形织构其收敛区域的最大压力值最小。表 2 所示为数值求解所得的三种织构的摩擦系数,可以看到 $\alpha = 0^\circ$ 的椭圆形织构单元的摩擦系数最小,说明在相同面覆盖率(10%)的情况下, $\alpha = 0^\circ$ 的椭圆形织构单元动压效应最好,并能提供更多的额外承载力,两摩擦副之间的接触压力降低,从而摩擦副的摩擦磨损性能提高。

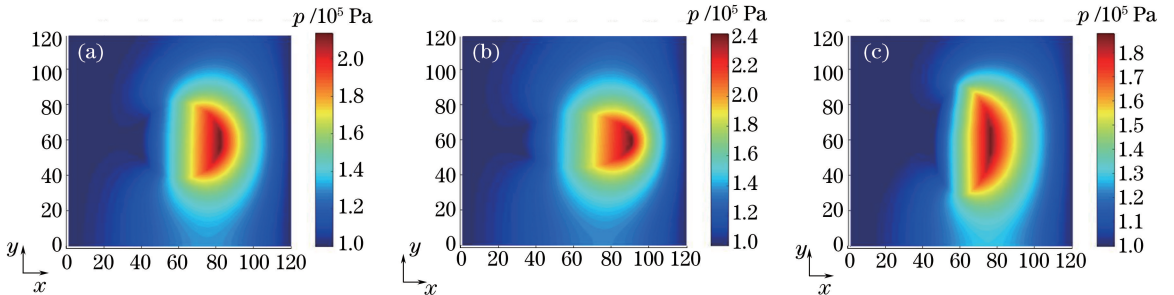


图 2 具有不同织构形状的织构单元在流体动压润滑条件下的无量纲压力分布图。

(a)圆形织构；(b)椭圆形织构 ($\alpha = 0^\circ$)；(c)椭圆形织构 ($\alpha = 90^\circ$)

Fig. 2 Dimensionless pressure distribution of textured elements with different texture shapes under hydrodynamic lubrication.

(a) Circular texture; (b) elliptical texture ($\alpha = 0^\circ$); (c) elliptical texture ($\alpha = 90^\circ$)

表 2 不同织构形状在流体动压润滑条件下的摩擦系数
Table 2 Coefficient of friction of different texture shapes under hydrodynamic lubrication

Circular texture	Elliptical texture ($\alpha=0^\circ$)	Elliptical texture ($\alpha=90^\circ$)
0.0823	0.0740	0.0912

2.2 混合润滑数值分析

在混合润滑的计算中,P-C 模型考虑了粗糙度对于流体动压力和流体剪切力的影响,其比传统的 Reynolds 方程更加准确。平均流量 Reynolds 方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varphi_x \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varphi_y \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y}\right) = 6v\left(\varphi_c \frac{\partial h}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \varphi_s}{\partial x}\right), \quad (5)$$

式中: p 为油膜压力; h 为油膜厚度; η 为润滑剂黏度; v 为摩擦副上下两粗糙表面的相对速度; σ 为综合粗糙度,即上下表面粗糙度(即 σ_1 、 σ_2)的综合均

方根值,公式表示为 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$; φ_x 、 φ_y 分别为沿 x 、 y 方向的压力流量因子,表示粗糙表面间平均压力流量与光滑表面间的压力流量之比; φ_s 为剪切流量因子,考虑了两个粗糙表面相对滑动时产生的附加流量的影响; φ_c 为接触因子。后续计算推导过程与上文流体动压模型类似。

2.2.1 不同织构形状对摩擦系数的影响

图 3 所示为不同形状织构微凹坑通过混合润滑计算模型求解所得计算域内无量纲压力分布图。从图中可以看到,由于混合润滑计算模型中引入了粗糙度参数,并由于混合润滑状态下膜厚较小,粗糙峰微凸体会提供一部分承载力,因此计算域内最大压力值较流体动压润滑状态下的要大,这与理论分析相符。但由于粗糙峰间摩擦力的影响,计算求得的摩擦系数相较于流体动压润滑模型下求得的数值要大,见表 3。混合润滑计算模型中织构形状对摩擦系数的影响与流体动压润滑模型一致,求解均显示长轴平行上表面运动方向的椭圆形织构摩擦系数最小。

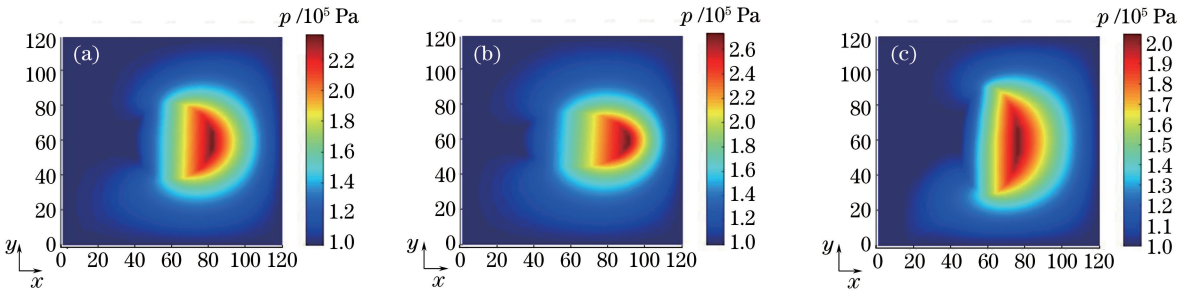


图 3 具有不同织构形状的织构单元在混合润滑条件下的无量纲压力分布图。

(a) 圆形织构; (b) 椭圆形织构($\alpha=0^\circ$); (c) 椭圆形织构($\alpha=90^\circ$)

Fig. 3 Dimensionless pressure distribution of textured elements with different texture shapes under mixed lubrication.

(a) Circular texture; (b) elliptical texture ($\alpha=0^\circ$); (c) elliptical texture ($\alpha=90^\circ$)

表 3 不同织构形状在混合润滑条件下的摩擦系数

Table 3 Coefficient of friction of different texture shapes under mixed lubrication

Circular texture	Elliptical texture ($\alpha=0^\circ$)	Elliptical texture ($\alpha=90^\circ$)
0.1642	0.1562	0.1729

2.2.2 面覆盖率对摩擦系数的影响

图 4 所示为不同织构形状下摩擦系数随织构面覆盖率的变化曲线,从图 3 可知,混合润滑状态下,织构形状及面覆盖率对摩擦系数的影响趋势与流体动压润滑状态下大体一致,均是 $\alpha=0^\circ$ 的椭圆形微凹坑织构表面摩擦系数最小,且在一定区间内摩擦系数随织构面覆盖率的提高而减小。另外,从图 4 中可以看到,随着织构面覆盖率的提高,不同织构形状间的摩

擦系数差距逐渐减小。

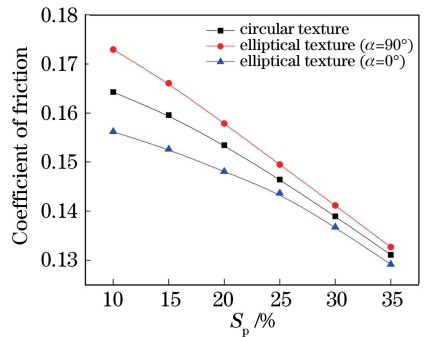


图 4 不同织构形状的摩擦系数随织构面覆盖率的变化曲线

Fig. 4 Curves of friction coefficient of different texture shapes with coverage ratios

3 实验验证

根据数值分析的模拟结果,在复合涂层的基础上设计不同的织构参数进行摩擦磨损实验,将得出的实验结果与数值分析进行对比,从实际情况分析模拟的可靠性。

3.1 HA/ZrO₂ 复合涂层及织构的制备

实验采用的涂层材料为 ZrO₂ 和 HA,按照按照 3:7 的质量比(基于团队以前研究结果^[3-4,21])进行机械混合,然后采用 DH1080 型等离子喷涂设备在钛合金板(TC₄)进行喷涂。涂层分为两层,分别为 ZrO₂ 增强相涂层与 HA/ZrO₂ 复合陶瓷涂层,涂层厚度均为 0.2 mm。复合涂层制备示意图如图 5 所示。

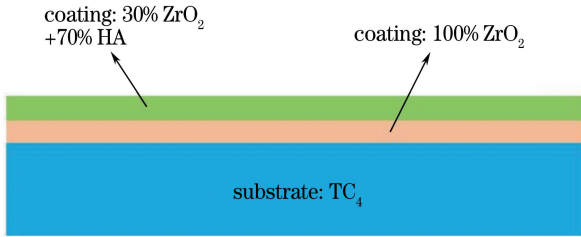


图 5 复合涂层制备示意图

Fig. 5 Illustration of composite coating preparation

3.2 表面织构参数设计及制备

采用飞秒激光加工表面织构,激光冲击陶瓷材料时,高能激光束在极短时间内集中作用于工件的极小范围内,被照射区域在极短时间内吸收热量升温,温度瞬间达到熔点和沸点,工件表面材料熔化并蒸发进而形成孔^[23]。激光波长为 340 nm,功率为 7 W。设计制备直径为 250 μm 的圆形微凹坑,面覆率为 10%,20%,25%,30%;椭圆织构选择 10% 的面覆率,其长轴长为 300 μm,短轴长为 150 μm,采用长轴与陶瓷销运动方向夹角(即 α)呈 0°,45°,90° 的三组不同排列方式进行对比实验。采用 SEM 对

织构试样进行显微观测,其观测结果如图 6 和图 7 所示。可以看到,通过飞秒激光加工所得的试样,其涂层表面微凹坑阵列排布均较为整齐,且微凹坑具有较好的边缘轮廓,对于同一试样中的微凹坑,其织构参数(圆直径,椭圆长轴长、短轴长)也表现出较好的一致性。但是在微凹坑底部依然可以看到有熔融物堆积。经过测量,圆形织构平均直径约为 252.66 μm;椭圆长轴长约为 303.18 μm,短轴长约为 148.40 μm,实验结果大致符合设计要求。图 8 是圆形微凹坑沿直径方向的平均轮廓曲线及椭圆形微凹坑沿长轴和短轴方向的平均轮廓曲线图。从图中可以看到,通过飞秒激光加工所得的微凹坑其孔壁具有一定锥度。另外即使采用飞秒激光加工工艺,微凹坑底部依然有激光熔融杂质的堆积,故微凹坑在深度方向上波动较大,微凹坑深度为 (55±5) μm。

3.3 摩擦磨损实验

本文的摩擦磨损性能测试采用设备为 UMT-3 多功能摩擦磨损试验机(CENTER FOR TRIBOLOGY, INC, UMT-3 0945, USA),运动形式为往复运动^[24],接触方式为销-块接触,润滑液为标准新生牛血清。人体正常行走时,髋关节摩擦副之间的接触压力大小为 0.6~2.6 MPa,髋关节和股骨头之间的线速度为 0.1~0.4 m/s^[21]。本次实验设定往复速度为 0.1 m/s,对于不同面覆率的织构试样,需采用不同直径的氧化铝陶瓷销作对磨副,保证载荷恒为 1 MPa,磨损时间为 30 min。

3.4 结果和讨论

对摩擦磨损实验所得数据进行处理,可得到试样摩擦系数随试验时间的变化曲线,如图 9 所示。从图中可以看出,当达到稳定磨损后,涂层表面有微凹坑织构的试样摩擦系数均明显小于无织构试样,说明微凹坑织构对于 HA 复合生物陶瓷涂层材料

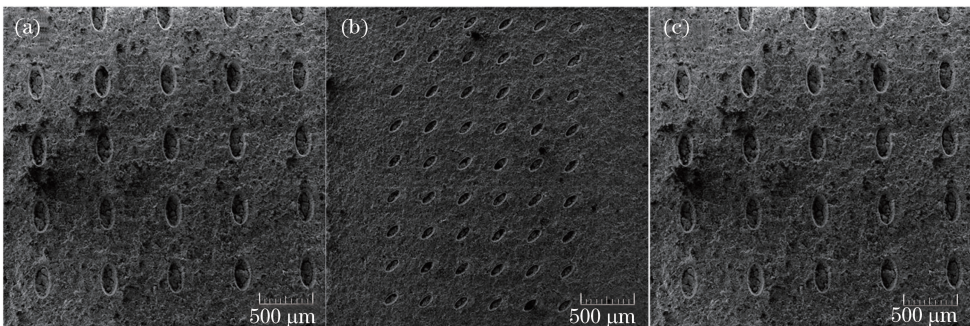


图 6 具有不同排布形式的椭圆形织构阵列的 SEM 图。(a) α=0°;(b) α=45°;(c) α=90°

Fig. 6 SEM figures of elliptical texture arrays in different arrays. (a) α=0°; (b) α=45°; (c) α=90°

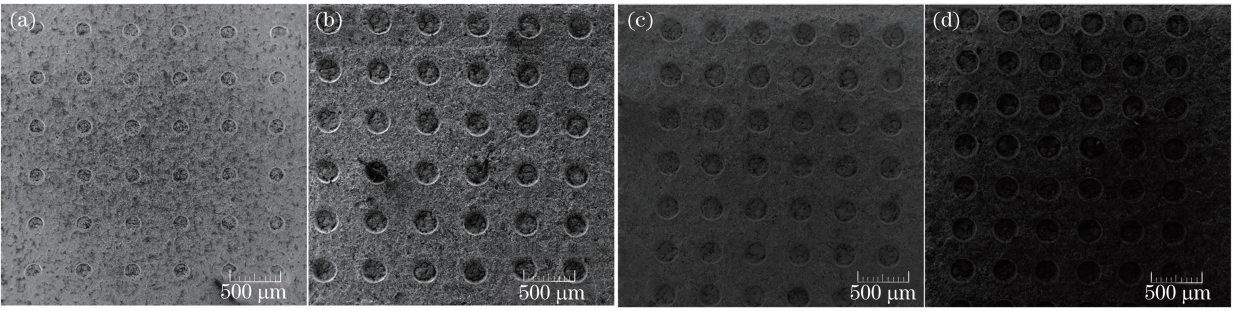


图 7 具有不同面覆率的圆凹坑阵列的 SEM 图。(a) $S_p=10\%$; (b) $S_p=20\%$; (c) $S_p=25\%$; (d) $S_p=30\%$

Fig. 7 SEM figures of circular texture arrays with different coverage ratios.

(a) $S_p=10\%$; (b) $S_p=20\%$; (c) $S_p=25\%$; (d) $S_p=30\%$

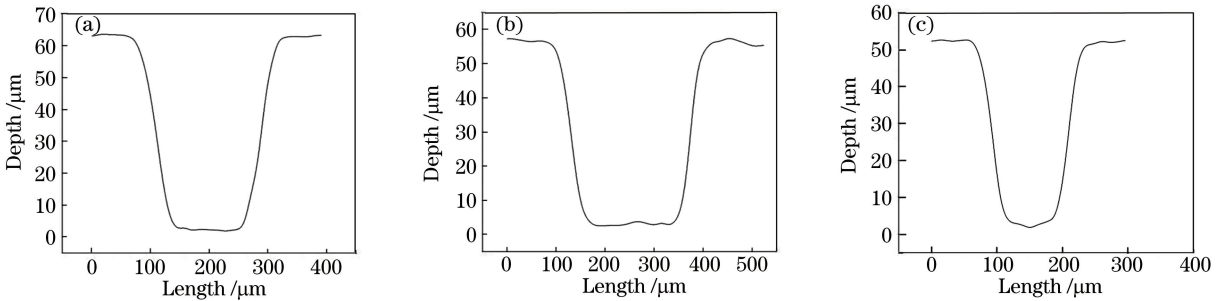


图 8 微凹坑的平均三维轮廓曲线图。(a) 圆凹坑结构沿直径方向; (b) 椭圆结构沿长轴方向; (c) 椭圆结构沿短轴方向

Fig. 8 3-D contour curves of micro-pit texture on average. (a) Curve of circular pit texture along diameter direction; (b) curve of elliptical texture along the long axis; (c) curve of elliptical texture along the short axis

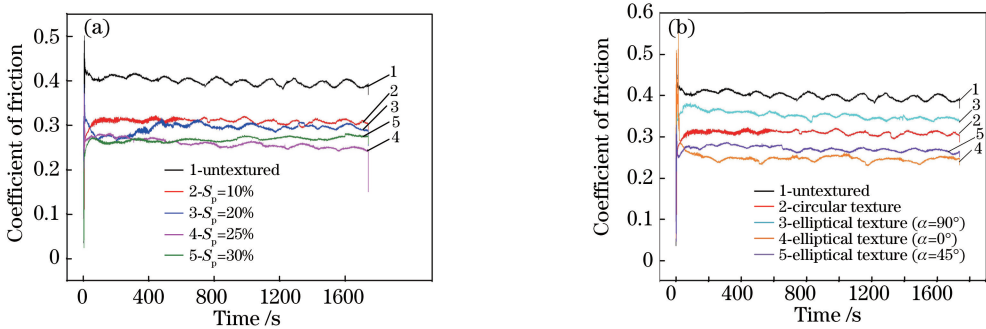


图 9 不同条件下的结构试样的摩擦系数曲线。(a) 具有不同面覆率的圆形结构; (b) 不同结构形状

Fig. 9 Coefficient of friction curves of texture sample under different conditions.

(a) Circular texture of different coverage ratios; (b) texture of different shapes

确实能起到改善其摩擦学性能的作用。对比面覆率为 10%、20% 和 25% 的圆形微凹坑结构试样摩擦系数变化曲线可知, 在稳定磨损状态, 其摩擦系数随结构面覆率的提高而减小, 面覆率为 25% 的试样摩擦系数最小, 摩擦系数为 0.251, 如图 9(a) 所示。

图 10 是用 SEM 观测到的面覆率为 25% 和 30% 的结构涂层经 30 min 磨损后的微观形貌图。从图中可以看到, 面覆率为 30% 的结构表面有明显脱落的涂层材料颗粒附着和堆积形成的粗糙峰, 且底部也堆积有更多的磨屑, 导致其摩擦系数高于面覆率为 25% 的结构试样。

对比图 9(b) 中曲线 3、曲线 4 和曲线 5 可以看到, 椭圆形结构排列方式不同, 对涂层表面减磨性能的影响较为明显, 其中 $\alpha=90^\circ$ 的结构试样摩擦系数最大, 相同面覆率下, 其比圆形结构试样的摩擦系数大, 而 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=45^\circ$ 试样均比圆形试样小。其中 $\alpha=0^\circ$ 的椭圆试样摩擦系数最小, 摩擦系数为 0.248。为此分析其原因: 认为 $\alpha=90^\circ$ 的微凹坑润滑剂流过时由于孔区狭长, 如一道“峡谷”横在润滑剂流通道上, 因此相较于 $\alpha=0^\circ$ 的椭圆形微凹坑, 润滑液流通性较差; 另外, 从图 2 看出, 横向排布的椭圆形微凹坑最大承载力比竖向排布的微凹坑小, 所以其所

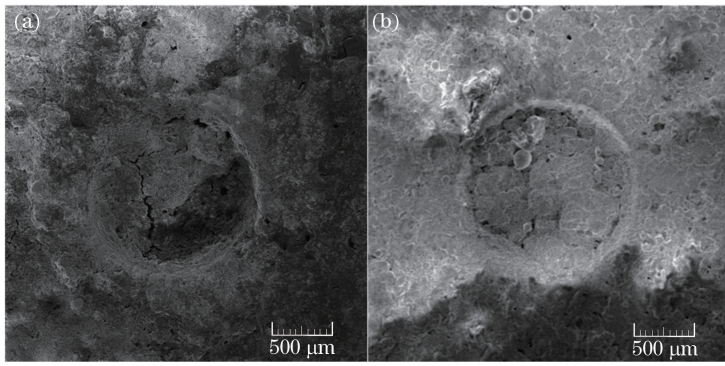


图 10 涂层磨损后的表面形貌。(a) $S_p=25\%$; (b) $S_p=30\%$

Fig. 10 Surface morphology of coating after wear. (a) $S_p=25\%$; (b) $S_p=30\%$

能提供的额外承载力较小,最终导致摩擦系数比 $\alpha=0^\circ$ 的大。

图 11(a)所示为不同织构面覆盖率涂层试样的平均磨损深度,可以直观地看到,所有试样中无织构的涂层试样磨痕最深,其平均磨损深度为 $43.6 \mu\text{m}$,而织构面覆盖率为 25% 的涂层试样磨损后所测得平均磨损深度最低,磨损深度为 $16.4 \mu\text{m}$ 。各织构试样的磨痕深度也与上文所示的摩擦系数变化曲线图相对应,摩擦系数越大的织构试样磨痕越深。综上分析,在本次实验中,对于通过等离子喷涂工艺制备所得的 HA 复合生物陶瓷涂层来说,其表面最优的圆形微凹坑面覆盖率在 25% 左右。并且在织构面覆盖率小于 25% 的区间内,涂层的耐磨性随着面覆盖率的增

大而提高。在流体润滑区域,每个织构表面在发生相对运动时会形成不对称的压力分布,每一个织构单元就好像一个滑动轴承,在微织构的周围和上方产生流体动压力。随着织构面覆盖率的增大,涂层表面的圆形微凹坑分布越来越密,在摩擦接触区域内所包含的织构数量逐渐增多,因此其所获得的承载力越大,摩擦系数就越小。

而对于不同形状的织构试样,结果如图 11(b)显示,摩擦系数与磨损深度的对应性较为一致,摩擦系数越小的试样其磨损深度越小,夹角 $\alpha=0^\circ$ 的椭圆形织构磨损深度最小,磨损深度为 $16.1 \mu\text{m}$ 。综上分析,在本次实验中,对于 HA 复合生物陶瓷涂层来说,最优的织构为 $\alpha=0^\circ$ 的椭圆形微凹坑。

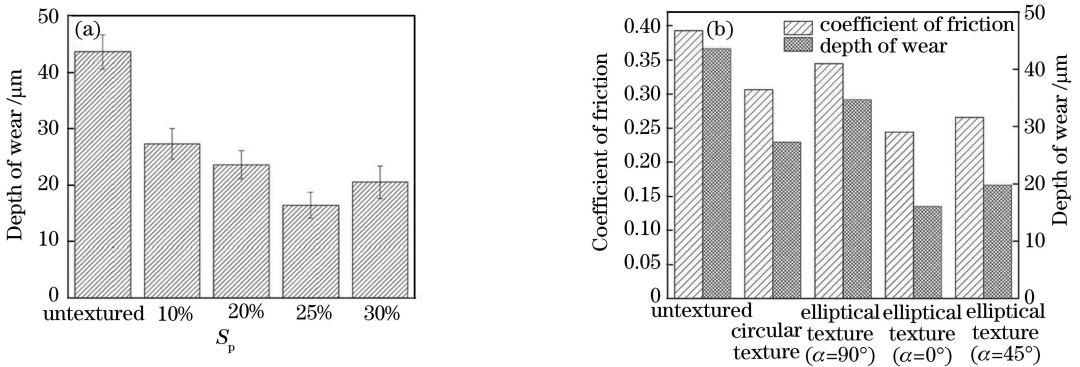


图 11 实验结果。(a)圆形织构试样在不同面覆盖率下的磨损深度;(b)不同织构形状的磨损深度及摩擦系数

Fig. 11 Experimental results. (a) Wear depth of circular texture with different coverage ratios; (b) wear depth and coefficient of friction of texture with different shapes

4 结 论

通过研究不同面覆盖率、不同形状及不同排布方式的织构试件在牛血清环境下的摩擦磨损,并结合流体动压润滑及混合润滑状态下的数值分析进行比较,得出以下结论:

1) 在牛血清润滑状态下,圆形微凹坑织构中面

覆盖率为 25% 的试样表现出最佳的摩擦磨损性能。且在低于 25% 情况下,该性能随面覆盖率增大而提高,高于 25% 后摩擦磨损性能反而降低;椭圆织构试样中,夹角 $\alpha=0^\circ$ 的织构试样的摩擦磨损性能较 $\alpha=45^\circ$ 及 $\alpha=90^\circ$ 更佳。

2) 由于数值模拟是基于较为理想的实验条件下进行的,因而与实验测得的结果存在较大差异。但

是,从不同面覆盖率的圆形织构和不同排列方式的椭圆织构的实验结果来看,其变化趋势均与理论呈现出一致性。本文利用理论与实验相结合的方法探究了不同织构参数对涂层表面摩擦系数的影响,为织构在生物陶瓷领域研究的开展与设计提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] Roy T, Choudhury D, Ghosh S, *et al.* Improved friction and wear performance of micro dimpled ceramic-on-ceramic interface for hip joint arthroplasty [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1): 681-690.
- [2] Ohgushi H, Kotobuki N, Funaoka H, *et al.* Tissue engineered ceramic artificial joint: *ex vivo* osteogenic differentiation of patient mesenchymal cells on total ankle joints for treatment of osteoarthritis [J]. *Biomaterials*, 2005, 26(22): 4654-4661.
- [3] Bao Y M, Gao H M, Xu J S, *et al.* Phase analysis of bioceramic coatings by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1003005.
鲍雨梅, 高海明, 许景顺, 等. 激光熔覆生物陶瓷涂层物相分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003005.
- [4] Bao Y M, Gao H M, Chai G Z, *et al.* Preparation and characterization of fluorinated hydroxyapatite coating by laser cladding and plasma spraying [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0806003.
鲍雨梅, 高海明, 柴国钟, 等. 激光熔覆与等离子喷涂制备 FHA 涂层及其性能研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0806003.
- [5] Zhao J X, Qiao Y L, Xue Y C, *et al.* Fabrication of SiTiOC multiphase ceramic coating based on laser pyrolyzing of polydimethylsiloxane with titanium powder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1003002.
赵吉鑫, 乔玉林, 薛胤昌, 等. 基于激光裂解含 Ti 粉聚二甲基硅氧烷的 SiTiOC 复相陶瓷涂层制备 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1003002.
- [6] Wang H T, Li Y, Zhu H. Lubrication and anti-friction properties of textured surfaces with fractal characteristics [J]. *Surface Technology*, 2016, 45(9): 182-187.
王洪涛, 李艳, 朱华. 具有分形特征的织构表面的润滑减摩性能研究 [J]. *表面技术*, 2016, 45(9): 182-187.
- [7] Lu X B, Khonsari M M. An experimental investigation of dimple effect on the stribeck curve of journal bearings [J]. *Tribology Letters*, 2007, 27(2): 169-176.
- [8] Li J L, Xiong D S, Wu H Y, *et al.* Tribological properties of laser surface texturing and molybdenizing duplex-treated stainless steel at elevated temperatures [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 228(8): S219-S223.
- [9] Li J L, Xiong D S, Dai J H, *et al.* Effect of surface laser texture on friction properties of nickel-based composite [J]. *Tribology International*, 2010, 43(5/6): 1193-1199.
- [10] Khalid M, Mujahid M, Khan A N, *et al.* Effect of arc current on microstructure, texturing and wear behavior of plasma sprayed CaZrO₃ coatings [J]. *Ceramics International*, 2013, 39(3): 2293-2302.
- [11] Ding Q, Wang L P, Wang Y X, *et al.* Improved tribological behavior of DLC films under water lubrication by surface texturing [J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(2): 439-449.
- [12] Choudhury D, Vrbka M, Mamat A B, *et al.* The impact of surface and geometry on coefficient of friction of artificial hip joints [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 72: 192-199.
- [13] Zhang H, Hua M, Dong G Z, *et al.* Optimization of texture shape based on genetic algorithm under unidirectional sliding [J]. *Tribology International*, 2017, 115: 222-232.
- [14] Mattei L, di Puccio F, Piccigallo B, *et al.* Lubrication and wear modelling of artificial hip joints: a review [J]. *Tribology International*, 2011, 44(5): 532-549.
- [15] Etsion I. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication [J]. *Friction*, 2013, 1(3): 195-209.
- [16] Uddin M S, Ibatan T, Shankar S. Influence of surface texture shape, geometry and orientation on hydrodynamic lubrication performance of plane-to-plane slider surfaces [J]. *Lubrication Science*, 2017, 29(3): 153-181.
- [17] Waseem A, Temizer İ, Kato J, *et al.* Micro-texture design and optimization in hydrodynamic lubrication via two-scale analysis [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 56(2): 227-248.
- [18] Patir N, Cheng H S. An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication [J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1978, 100(1): 12-17.
- [19] Wu C W, Zheng L Q. An average reynolds equation for partial film lubrication with a contact factor [J]. *Journal of Tribology*, 1989, 111(1): 188-191.
- [20] Patir N, Cheng H S. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces [J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1979, 101(2): 220-229.

- [21] Bao Y M, Xu J S, Gao H M, *et al.* Friction and wear properties of plasma-sprayed ZrO_2 reinforced hydroxyapatite coatings in bovine serum environment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(6): 1777-1783.
鲍雨梅, 许景顺, 高海明, 等. 牛血清环境下等离子喷涂 ZrO_2 增强羟基磷灰石涂层的摩擦磨损性能 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(6): 1777-1783.
- [22] Ma C B, Zhu H, Sun J J. Applicable equation study of lubrication calculation of surface texture based on CFD analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(15): 95-100,106.
马晨波, 朱华, 孙见君. 基于 CFD 分析的表面织构润滑计算适用方程研究 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(15): 95-100,106.
- [23] Niu W Y, Yu A B, Wu J Z, *et al.* Influence of laser process parameters on taper and heat affected zone of glass ceramic hole [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 031601.
牛威杨, 于爱兵, 吴剑钊, 等. 激光工艺参数对玻璃陶瓷孔锥度和热影响区的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 031601.
- [24] Ma C B, Zhu H, Zhang W Q, *et al.* Tribological property of textured surface under reciprocating motion[J]. *Tribology*, 2011, 31(1): 50-55.
马晨波, 朱华, 张文谦, 等. 往复条件下织构表面的摩擦学性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(1): 50-55.