

文章编号 1004-924X(2026)11-1743-19

氧化锆陶瓷表面减摩抗磨微结构的飞秒激光加工

杨方雨^{1,2}, 褚东凯^{1,2*}, 姚鹏^{1,2*}, 唐志亮^{1,2,3}, 吕欣鑫^{1,2}, 屈硕硕^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 齐鲁工业大学(山东省科学院)机械工程学院, 山东 济南 250353)

摘要:陶瓷材料因具备高硬度、优异耐磨性与良好的化学稳定性,在工程摩擦副中得到了广泛应用。然而,陶瓷材料本征脆性使其在干摩擦或边界润滑条件下易产生严重的应力集中,导致磨损加剧甚至早期失效。表面微结构技术是调控界面接触状态、提升摩擦学性能的有效手段。因此,本文提出了氧化锆(ZrO_2)陶瓷表面减摩抗磨微结构的飞秒激光加工研究。基于有限元模拟、响应面法(Response Surface Methodology, RSM)参数优化与润滑摩擦磨损试验,系统探究了微槽几何参数对陶瓷摩擦界面应力分布及磨损行为的影响机制。有限元结果表明,扫描间距、沟槽深度和沟槽取向对陶瓷表面最大等效应力分布具有显著影响,其中较小的间距和较大的沟槽深度易引起应力集中,合适的沟槽取向有助于重新分配接触应力。响应面分析表明,激光能量是影响微槽深度与宽度的主导因素,扫描速度起抑制作用,扫描次数则通过累积烧蚀促进沟槽扩展。摩擦磨损试验显示,在最优参数下, ZrO_2 陶瓷平均摩擦系数从 0.57 降至 0.358 4,降幅为 37.12%,磨损体积为 $0.267 \times 10^6 \mu m^3$ 。飞秒激光制备的微槽结构可有效实现陶瓷材料的减摩与耐磨强化,为提升陶瓷摩擦副服役性能提供了可行方案。

关键词:陶瓷材料;飞秒激光;微槽结构;摩擦磨损;有限元模拟

中图分类号: TH117; TB32 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263411.1743

CSTR: 32169.14.OPE.20263411.1743

Friction-reducing and wear-resistant micro-textures on zirconia ceramic surfaces processed by femtosecond laser

YANG Fangyu^{1,2}, CHU Dongkai^{1,2*}, YAO Peng^{1,2*}, TANG Zhiliang^{1,2,3}, LYU Xinxin^{1,2}, QU Shuoshuo^{1,2}

(1. Center for Advanced Jet Engineering Technologies (CaJET), School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education, Jinan 250061, China;

3. School of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

* Corresponding author, E-mail: chudongkai@sdu.edu.cn; yaopeng@sdu.edu.cn

Abstract: Ceramic materials are widely used in engineering friction pairs because of their high hardness,

收稿日期:2026-03-20;修订日期:2026-04-14.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFC2413301);山东省重大科技创新工程项目(No. 2023CXGC010207);国家自然科学基金资助项目(No. U23A20632);山东省自然科学基金重大基础研究项目(No. ZR2023ZD34)

excellent wear resistance, and chemical stability. However, their intrinsic brittleness makes them susceptible to severe stress concentration under dry friction or boundary lubrication, leading to aggravated wear and premature failure. Surface micro-texturing has been recognized as an effective strategy for regulating interfacial contact states and improving tribological performance. In this study, femtosecond laser processing was employed to fabricate friction-reducing and wear-resistant micro-textures on zirconia (ZrO_2) ceramic surfaces. Finite element simulations, response surface methodology (RSM) optimization, and lubricated friction and wear tests were integrated to systematically elucidate the effects of micro-groove geometric parameters on stress distribution and wear behavior at the ceramic friction interface. The finite element results show that scanning interval, groove depth, and groove orientation significantly influence the maximum equivalent stress distribution on the ceramic surface. Smaller scanning intervals and greater groove depths tend to induce stress concentration, whereas an appropriate groove orientation facilitates the redistribution of contact stress. The RSM analysis indicates that laser energy is the dominant factor governing groove depth and width, while scanning speed exerts an inhibitory effect and the number of scanning passes promotes groove expansion through cumulative ablation. Friction and wear tests demonstrate that, under the optimized parameters, the average friction coefficient of ZrO_2 ceramics is reduced from 0.57 to 0.358 4, corresponding to a reduction of 37.12%, with a wear volume of $0.267 \times 10^6 \mu m^3$. These results demonstrate that femtosecond laser-fabricated micro-groove structures can effectively enhance the friction-reducing and wear-resistant performance of ceramic materials, providing a feasible approach for improving the service reliability of ceramic friction pairs.

Key words: ceramic materials; femtosecond laser; micro-groove textures; friction and wear; finite element simulation

1 引言

陶瓷材料具有高硬度、优异耐磨性、良好化学稳定性与耐高温性能^[1-4],被广泛应用于刀具、机械密封、柱塞泵及耐磨结构件等工程领域^[5-9]。在高载荷、高频往复运动及腐蚀环境等复杂服役条件下,陶瓷材料较金属材料通常表现出更优异的尺寸稳定性与抗介质侵蚀能力^[10-11]。氧化锆(ZrO_2)陶瓷凭借高硬度以及强度与断裂韧性的良好匹配,在工程摩擦副中具有重要应用潜力。然而,在实际工况中,陶瓷构件常处于干摩擦或边界润滑状态,接触界面易出现较大摩擦阻力与严重的局部应力集中。受陶瓷本征脆性制约,其磨损过程常伴随微裂纹萌生、扩展及脆性剥落,导致摩擦系数升高、磨损机制复杂且不稳定。上述问题会加速表面损伤演化、降低摩擦学性能,最终引发早期失效,制约陶瓷摩擦副在高可靠性装备中的长期稳定服役^[12]。

通过表面工程手段改善陶瓷摩擦界面的力学状态与磨损行为,已成为提升陶瓷摩擦副服役

性能的关键课题。最近研究表明,构筑合理的表面微纳织构可有效调控界面应力分布与磨屑运动行为,实现显著减摩耐磨效果,为陶瓷材料摩擦学性能提升提供了有效途径^[13-16]。目前,研究人员已发展多种陶瓷表面微织构制备工艺。传统机械加工方法(如微铣削、微磨削)可在金属材料上实现精度良好的表面织构加工^[17-18],但存在刀具磨损严重、加工力大与材料脆性强等问题,难以保证加工稳定性,且易诱发表面裂纹与亚表面损伤。物理及化学刻蚀技术(包括湿法刻蚀、反应离子刻蚀)可高分辨率地制备微纳尺度表面结构^[19-20],但通常需要复杂的掩模工艺、制备流程冗长,且普遍存在加工效率低、材料适用性受限等不足。电火花加工、超声加工和磨料射流加工等非传统加工方法也用于硬脆陶瓷材料^[21-22],但其加工精度易受放电不稳定性、刀具振动及材料随机去除等因素影响,难以在加工效率与形貌可控性之间实现理想平衡。

激光加工因具有非接触、能量调控灵活等优势,在陶瓷微织构制备中展现出独特优势^[23-26]。

尤其是飞秒激光,凭借超短脉冲宽度与典型的“冷加工”特性,为高硬度脆性陶瓷的微结构制备提供了有效手段。飞秒激光加工过程中,能量在极短时间内沉积,材料去除以非热机制为主,可显著抑制热扩散及相关热损伤。因此,飞秒激光能够在 ZrO_2 陶瓷表面制备热影响区极小的微米级直线沟槽织构,并保持较高的几何精度与加工均匀性^[27-29]。已有研究证实了激光制备陶瓷微结构的摩擦学增益。Xing 等^[30]采用纳秒激光在 Al_2O_3/TiC 陶瓷表面制备规则微沟槽,使陶瓷-钢摩擦副的稳态摩擦系数降低 20%~35%,磨损量显著下降。Ji 等^[31]利用皮秒激光在氧化锆陶瓷表面制备微米级沟槽,在最优织构参数下摩擦系数最大降幅达 30%~40%,磨损稳定性明显提升。Chen 等^[32]采用皮秒激光在 SiC 陶瓷表面制备规则微沟槽织构,水润滑条件下稳态摩擦系数由 0.22 降至 0.167,配副钢球的磨损体积显著降低。

本文采用飞秒激光在 ZrO_2 陶瓷表面制备规则排布的微沟槽织构,系统研究其在润滑条件下的摩擦磨损性能。采用有限元模拟分析微结构参数对摩擦应力分布及接触特性的影响,采用响应面法对关键织构参数进行优化,获得有利于降低摩擦应力、改善界面载荷分布的最优参数组合。通过精准调控飞秒激光加工参数,制备出深度、宽度、间距及取向可控的微槽织构。结合润滑摩擦磨损试验与磨损形貌分析,全面对比不同织构的减摩耐磨效果,阐明摩擦界面演化、润滑状态调控及磨屑行为的内在作用机制。

2 实验

2.1 实验材料

本实验所用氧化锆 (ZrO_2) 陶瓷块均采购自中国斯泰科材料有限公司,尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。对偶材料为氧化锆陶瓷球,同样由中国斯泰科材料有限公司提供,陶瓷球直径为 10 mm 。

表 1 陶瓷块/球试样的材料性能

Tab. 1 Material properties of ceramic block/ball samples

Materials name	Block/Ball sample
Material properties	(ZrO_2 ceramic)
Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	6 000
Modulus of elasticity/GPa	210
Poisson's ratio	0.3
Vickers Hardness/GPa	14

2.2 摩擦行为的有限元分析

如图 1(a)所示,建立球-面接触条件下 ZrO_2 陶瓷表面的三维有限元模型。模型上部为陶瓷球,下部为原始光滑陶瓷基体。陶瓷球半径设为 $R=1\text{ mm}$,法向施加 15 N 的恒定载荷,以模拟实际摩擦磨损试验中的接触工况。为减小边界效应对应力分布的影响,保证接触区域内应力计算精度,陶瓷基体尺寸设定为 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 。

为探究不同织构参数对应力分布特征的影响,在陶瓷基体表面构建周期性 V 型微槽织构,如图 1(b)所示。织构参数主要包括扫描间距 d 、

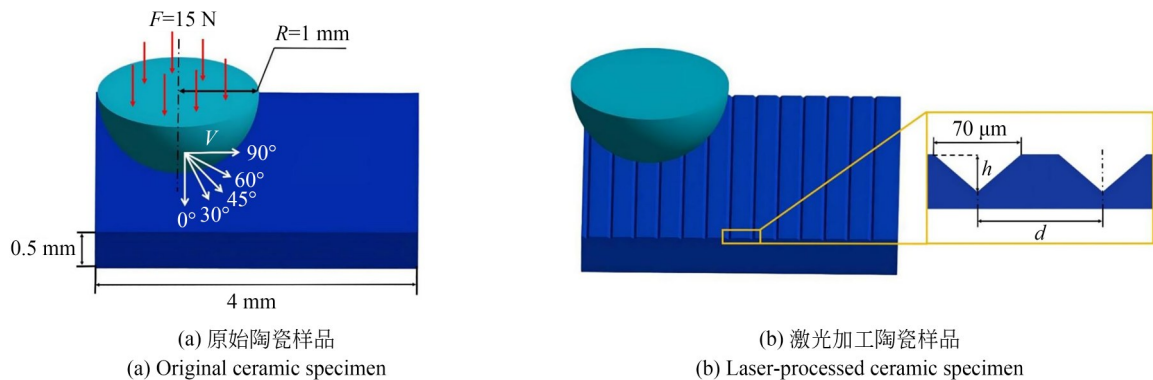


图 1 球-面接触条件下 ZrO_2 陶瓷表面仿真模型

Fig. 1 Simulation model of ZrO_2 ceramic surface under sphere-surface contact conditions

槽深 h 、结构取向角 θ 。其中,扫描间距取 100, 200, 300, 400, 500 μm ,槽深取 10, 20, 30, 40, 50 μm ,以系统分析结构几何尺寸对最大接触应力的影响规律;通过改变结构相对滑动方向的取向角($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$),进一步研究结构取向对应力集中行为的调控作用。仿真过程中,对磨球与结构表面采用摩擦接触模型。提取不同结构参数组合下陶瓷表面及亚表面区域的最大等效应力,对比分析结构几何形貌对应力分布特征与应力集中行为的影响^[33]。

2.3 激光表面结构

如图 2 所示,本实验采用 Spectra-Physics Spitfire Ace™ 钛蓝宝石飞秒激光系统制备微结构。激光器中心波长为 800 nm,最大重复频率 1 kHz,脉冲宽度为 35 fs。激光光束经焦距为 260 mm 的 f-theta 场镜聚焦,在试样表面形成直径约为 20 μm 的光斑。所有实验均在环境温度约 20 $^\circ\text{C}$ 、相对湿度约 20% 的可控条件下进行。采用单因素试验法系统研究飞秒激光加工参数对微槽深度与宽度的影响。表 2 为 ZrO_2 陶瓷的单因素试验方案,共测试 15 组参数组合,每组实验重复 3 次,以提高结果的可靠性与可重复性。单因素试验主要用于初步评估微槽形貌对各激

表 2 ZrO_2 陶瓷单因素实验设计

Tab. 2 Single-factor experimental design for ZrO_2 ceramics

Serial number	Laser energy/ mW	Scan speed/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Number of scans
1	100	10	60
2	200	10	60
3	300	10	60
4	400	10	60
5	500	10	60
6	200	10	60
7	200	20	60
8	200	30	60
9	200	40	60
10	200	50	60
11	200	10	20
12	200	10	40
13	200	10	60
14	200	10	80
15	200	10	100

光参数的敏感性及其变化规律,确定稳定可控的参数区间,为响应面法(Response Surface Methodology, RSM)试验中因素水平的合理选取及后续参数优化提供依据^[34]。

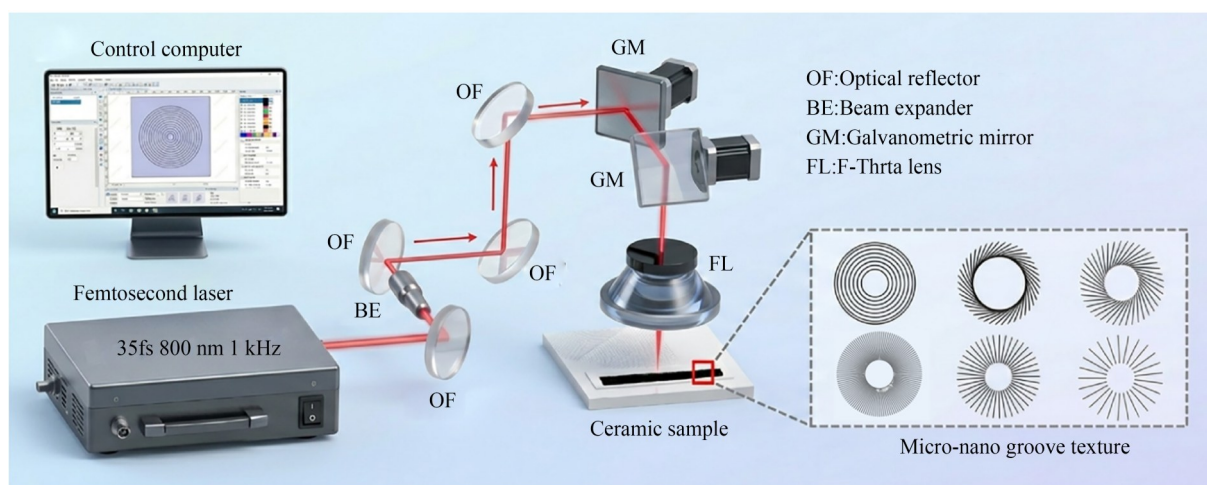


图 2 飞秒激光表面微结构加工示意图

Fig. 2 Schematic of femtosecond laser surface micro-texturing process

为系统研究飞秒激光加工参数对微槽几何形貌的综合影响,采用 Box-Behnken 试验设计(BBD)进行参数优化分析。实验设计共选取激光能量、扫描速度及扫描次数 3 个调控因子,以微

槽深度和微槽宽度作为响应变量,以全面表征微槽几何特征。针对 ZrO_2 陶瓷材料,分别建立基于 BBD 的响应面试验方案,各因素及其水平设置如表 3 所示。

表 3 基于 Box-Behnken 设计的响应曲面法因素水平

Tab.3 Factor levels of response surface methodology based on Box-Behnken design

Factor	Level		
	-1	0	1
Laser energy /mW	150	200	250
Scan speed/(mm·s ⁻¹)	10	20	30
Number of scans	40	60	80

2.4 表 征

为系统表征飞秒激光微织构处理后陶瓷表面的形貌特征,采用多种显微与分析技术对样品进行综合表征。利用扫描电子显微镜(SEM, JSM-7610F, 日本)对样品表面微观形貌进行观察,重点获取微沟槽织构的几何完整性及加工质量信息,包括沟槽边缘的锐利程度以及沟槽内部的微观结构特征。对摩擦磨损试验后的磨损区域进行对比形貌分析,以识别磨损碎屑堆积、犁削、黏着转移、微裂纹以及脆性剥落等典型磨损特征。采用能量色散谱仪(EDS, X-maxN, Ox-

ford, 英国)对样品表面的元素组成及其空间分布进行分析。通过对织构区域及磨损区域进行元素面分布(Elemental Mapping)分析,评估加工过程中可能发生的氧化行为和元素富集现象,以及摩擦过程中界面演化特征,例如对偶材料转移、磨损碎屑滞留或反应产物的形成等。利用激光共聚焦显微镜(LCM, VK-X200K, Keyence, 日本)对样品表面进行三维(3D)形貌重建与定量测量。获取微沟槽的深度、宽度、截面轮廓以及阵列均匀性等几何参数,并在指定测量区域内计算表面粗糙度参数,从而实现织构加工质量以及磨损后表面形貌变化的定量表征。

2.5 摩擦磨损测试

图 3 展示了润滑条件下摩擦磨损实验机理的示意图。摩擦磨损实验采用 BRUKER 公司生产的 UMT-TRIBOLAB 摩擦磨损试验机进行,在球-盘接触结构和旋转运动模式下开展测试。实验过程中,微织构陶瓷块固定作为下试样,陶瓷球作为对偶件并进行旋转运动,从而形成陶瓷-陶瓷摩擦副。选用直径为 10 mm 的氧化锆陶瓷球作为对偶球。

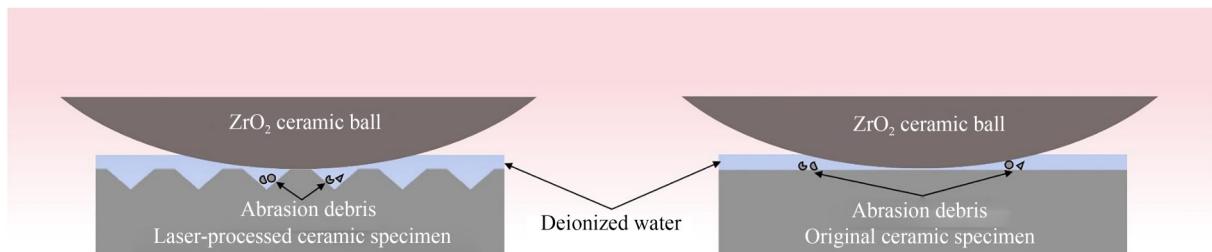


图 3 陶瓷表面摩擦磨损机理示意图

Fig. 3 Schematic illustration of friction and wear mechanisms on ceramic surfaces

实验参数设置如下:施加 15 N 的法向载荷;摩擦运动方式为圆周滑动运动,旋转半径为 2 mm,转速为 200 r/min,对应的线速度约为 42 mm/s。在实验过程中,向摩擦界面加入适量去离子水作为润滑介质,总摩擦时间设定为 30 min。

采用单因素轮换法(Single-Factor Rotation Method)依次研究各织构参数对摩擦磨损性能的影响规律。首先改变扫描间距,将其分别设定为 100, 200, 300, 400 和 500 μm ,以确定最优扫描间距。在此基础上,进一步研究沟槽深度对摩擦磨

损性能的影响,沟槽深度依次设定为 10, 20, 30, 40 和 50 μm 。在获得最优沟槽深度后,进一步探讨沟槽取向角的影响,其中沟槽方向与运动方向之间的夹角分别为 0°, 30°, 45°, 60° 和 90°。通过上述逐步优化过程,最终获得在减摩和抗磨性能方面表现最优的扫描间距、沟槽深度及取向角的参数组合。为了进一步定量评估激光表面织构对摩擦磨损行为的影响,采用对偶球的磨损体积损失来表征不同织构表面在不同润滑条件下的耐磨性能。磨损体积通过测量球表面磨斑直径进

行计算。对偶球的磨损体积可表示为^[34]:

$$V = \frac{\pi}{3} \left(R - \sqrt{R^2 - r^2} \right)^2 \left(\sqrt{R^2 - r^2} + 2R \right), \quad (1)$$

其中: r 为磨斑半径, R 为陶瓷球的半径。

3 结果与讨论

3.1 摩擦仿真结果

如图 4(a)和 4(b)所示,在球-平面接触条件下,ZrO₂陶瓷表面及其亚表层区域的等效应力主要集中在接触区域附近,并且在织构沟槽的边缘和底部位置出现明显的应力集中现象。与光滑表面相比,微织构的引入显著改变了接触区内的应力分布状态,使外加载荷在局部区域发生重新分配。相应提取的最大等效应力值进一步汇总,展示于图 4(c)~4(e)中。

图 4(c)展示了在不同扫描间距条件下陶瓷表面最大等效应力的变化规律。随着扫描间距增大,最大等效应力整体呈现出逐渐降低的趋势。这表明在较小扫描间距条件下,较高的织构

密度会增强相邻沟槽之间的相互作用,使接触载荷更容易集中于局部区域,从而导致更明显的应力集中现象。相反,当扫描间距增大时,单位面积内的织构数量减少,有利于载荷在接触区域内更加分散地分布,从而有效缓解应力集中。图 4(d)给出了沟槽深度对最大等效应力的影响规律。结果表明,当沟槽深度从 10 μm 增加到 50 μm 时,最大等效应力显著增加。这主要归因于较深沟槽所带来的几何不连续性增强,从而在沟槽底部及边缘处产生更强的应力集中,使这些区域更容易承受较高的等效应力。因此,过深的表面织构并不利于降低接触应力,反而可能促进局部损伤或裂纹的萌生。图 4(e)展示了沟槽取向角对应力分布的影响。可以观察到,随着沟槽取向角的增加,最大等效应力呈现出先增大后减小的变化趋势,在中间角度时达到较高值,而在 0° 和 90° 时则表现出相对较低的应力水平。这表明织构取向在调控沟槽结构内部载荷传递行为方面具有重要作用。当沟槽与滑动方向呈一定倾

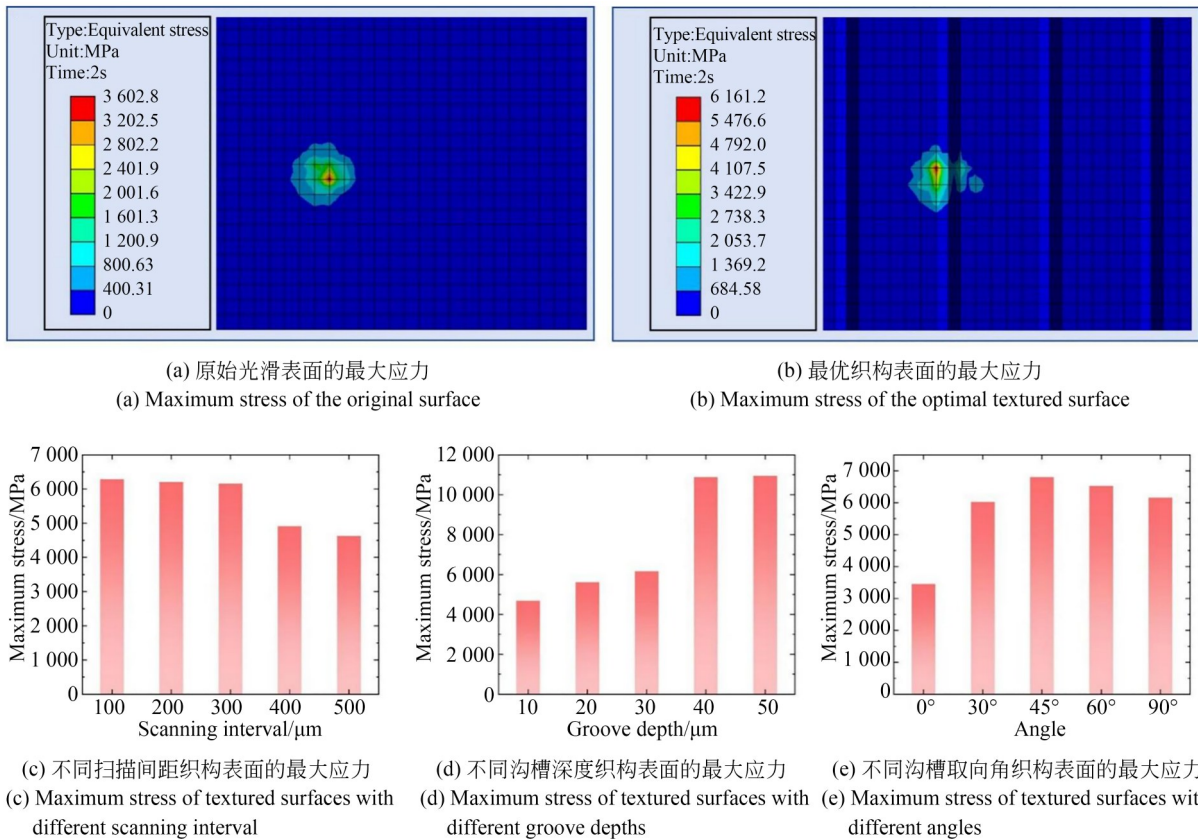


图 4 最大应力的有限元仿真结果

Fig. 4 Maximum stress results from finite element simulation

斜角度时,外加载荷更容易在沟槽边缘产生剪切应力与法向应力的叠加效应,从而加剧应力集中;而当沟槽方向与滑动方向平行或垂直时,应力传递路径相对简单,应力集中程度相应降低。

3.2 显著性分析

如表 4 所示,激光能量对氧化锆陶瓷沟槽宽度和沟槽深度均表现出极显著影响($p < 0.0001$),表明其是控制沟槽形貌形成的主导因素。扫描速度对沟槽宽度具有显著影响($p = 0.0002$),且对沟槽深度影响更为显著($p < 0.0001$),说明扫描速度通过调节激光作用时间和热输入过程,对沟槽几何形貌具有重要调控作用。扫描次数对沟槽宽度($p = 0.0017$)和沟槽深度($p < 0.0001$)均具有显著影响,其中对沟槽宽度的影响相对更为明显,表明多次扫描产生的累积能量效应对沟槽横向扩展具有更显著的促进作用。

3.3 沟槽深度与宽度的回归模型

利用 Design-Expert 软件对响应面实验数据进行统计分析,建立了描述沟槽深度和沟槽宽度的回归模型。在式(2)~式(3)中, e, s 和 n 分别表示激光能量(mW)、扫描速度(mm/s)以及扫描次数。

ZrO₂陶瓷沟槽深度的回归模型可表示为:

表 4 工艺参数对 ZrO₂陶瓷沟槽形貌的显著性分析

Tab. 4 Significant analysis of process parameters on groove morphology of ZrO₂ ceramics

Variable	Groove width(W)	Groove depth(D)
Laser energy/mW	<0.0001	<0.0001
Scan speed/(mm·s ⁻¹)	0.0002	<0.0001
Number of scans	0.0017	<0.0001

$$D = -14.4725 + 0.24485e - 1.27087s + 0.240562n - 0.01047es + 0.0025en - 0.009787sn + 0.000034e^2 + 0.066012s^2 - 0.001659n^2. \quad (2)$$

ZrO₂陶瓷沟槽宽度的回归模型建立如下:

$$W = -40.28875 + 0.762092e - 2.86221s + 0.8835n - 0.000705es + 9.95327 \times 10^{-19}en + 0.011525sn - 0.001053e^2 + 0.035821s^2 - 0.007026n^2. \quad (3)$$

如表 5 所示,给出了 ZrO₂陶瓷沟槽深度和沟槽宽度回归模型的方差分析结果。对于沟槽深度模型,其 p 值小于 0.0001,表明所建立的回归模型在统计学上具有高度显著性。该模型的失拟项(Lack of Fit)不显著($p = 0.1546$),说明模型能够较好地描述实验数据的变化趋势。同时,调

表 5 ZrO₂陶瓷回归模型的方差分析

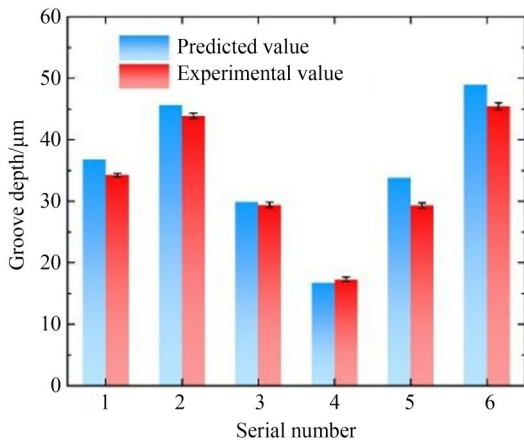
Tab. 5 Analysis of variance for ZrO₂ ceramic regression model

Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square error	F-value	p-value	Significance
For Groove depth						
Model	2865.89	9	318.43	141.62	<0.0001	Significant
Residual	11.24	5	2.25			
Lack of Fit	10.05	3	3.35	5.63	0.1546	Not significant
Pure error	1.19	2	0.5956			
Modified coefficient of determination=0.9891						
Predictive coefficient of determination=0.9432						
Signal-to-noise ratio=40.7685						
For Groove width						
Model	3119.19	9	346.58	55.54	0.0002	Significant
Residual	31.2	5	6.24			
Lack of Fit	28.85	3	9.62	8.18	0.1109	Not significant
Pure error	2.35	2	1.18			
Modified coefficient of determination=0.9723						
Predictive coefficient of determination=0.8518						
Signal-to-noise ratio=26.2898						

整决定系数(0.989 1)与预测决定系数(0.943 2)之间具有良好的-致性,且信噪比为40.768 5,远大于4,表明该模型具有良好的拟合精度和预测能力。对于沟槽宽度模型,模型的 p 值为0.000 2,同样表明该回归模型具有显著性。其失拟项不显著($p=0.110 9$),说明模型能够较好地反映沟槽宽度随工艺参数变化的规律。此外,调整决定系数(0.972 3)与预测决定系数(0.861 8)之间保持较好-致性,且信噪比为26.289 8,显著大于4,进一步证明该回归模型具有较好的拟合效果和可靠的预测能力。

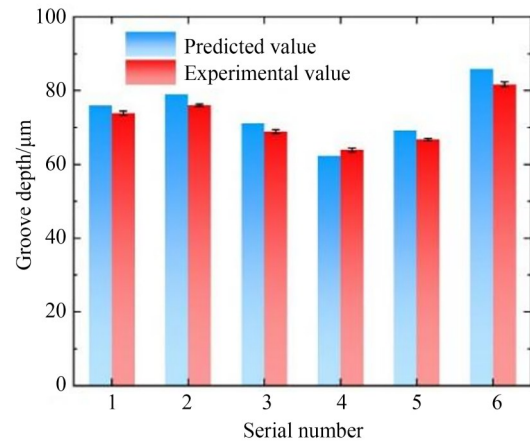
3.4 模型验证

对回归模型预测值与实验测量值进行了对比分析。由图5(a)可知,ZrO₂陶瓷沟槽深度的预测值与实验结果偏差较小,最大相对误差为13.31%,平均相对误差为5.98%。如图5(b)所示,ZrO₂陶瓷沟槽宽度预测值的最大相对误差为4.88%,平均相对误差为3.44%。回归模型的预测结果与实验测量值具有良好-致性,表明所建立的回归模型具有较高的预测精度,可用于飞秒激光加工过程中沟槽深度与沟槽宽度的预测与参数优化。



(a) ZrO₂陶瓷沟槽深度回归模型验证

(a) Verification of the regression model for groove depth of ZrO₂ ceramics



(b) ZrO₂陶瓷沟槽宽度回归模型验证

(b) Verification of the regression model for groove width of ZrO₂ ceramics

图5 回归模型的验证结果

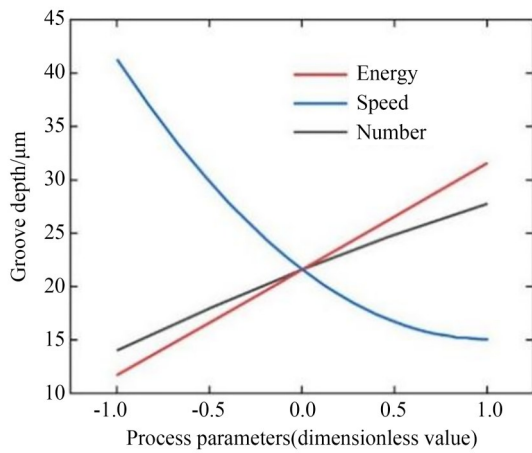
Fig. 5 Model verification of regression models

3.5 工艺参数及其交互作用对槽深与槽宽的影响

如图6(a)和6(b)所示,给出了ZrO₂陶瓷沟槽深度和宽度随工艺参数变化的规律。可以观察到,随着激光能量的增加,沟槽深度和宽度均呈现明显的上升趋势,说明较高的能量输入能够增强材料的去除能力,从而促进沟槽尺寸的扩大。随着扫描速度的增加,沟槽深度和宽度均逐渐减小,较高的扫描速度降低了单位面积上的能量沉积,削弱了材料的去除程度。扫描次数的增加同样会使沟槽深度和宽度逐渐增大,但其增长趋势相对平缓,且在较高扫描次数下增幅逐渐减小,表明多次扫描主要通过累积能量作用促进材料去除。在三种工艺参数中,激光能量对沟槽尺

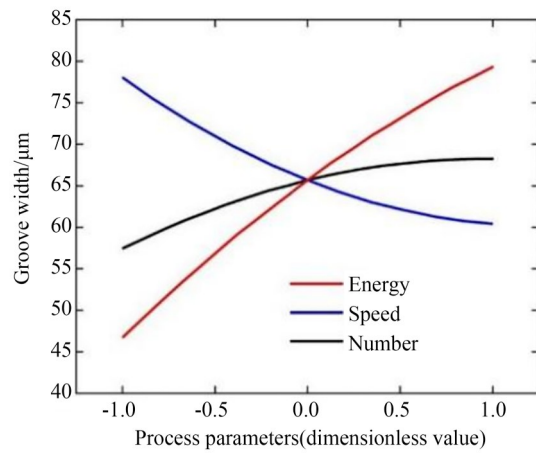
寸的影响最为显著,而扫描速度主要通过调节能量积累过程抑制沟槽尺寸的进一步扩大,扫描次数则通过累积能量输入对沟槽深度和宽度产生促进作用。

如图7(a)~7(c)所示,给出了ZrO₂陶瓷沟槽深度在不同工艺参数组合下的响应面变化规律。由于回归模型中包含非线性项,响应曲面整体呈现出一定的曲率变化,表明各工艺参数之间存在一定的耦合作用。当激光能量较高且扫描速度较低时,响应曲面的斜率明显增大,沟槽深度迅速增加,而在高扫描速度或较低能量条件下,沟槽深度变化相对平缓,显示出一定的抑制效应。如图7(d)~7(f)所示,展示了ZrO₂陶瓷沟槽宽度随不同工艺参数组合变化的响应面。与沟槽深



(a) 单一工艺参数对ZrO₂陶瓷沟槽深度的影响

(a) Effect of single process parameters on the groove depth of ZrO₂ ceramics

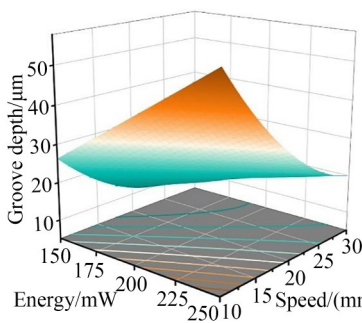


(b) 单一工艺参数对ZrO₂陶瓷沟槽宽度的影响

(b) Effect of single process parameters on the groove width of ZrO₂ ceramics

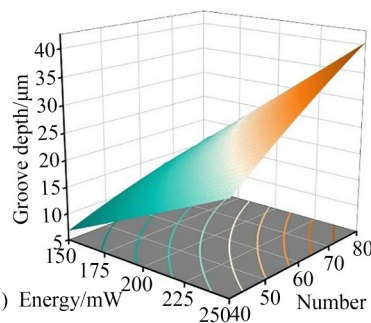
图 6 单一工艺参数对 ZrO₂陶瓷沟槽深度与宽度的影响

Fig. 6 Effects of single process parameters on groove depth and width of ZrO₂ ceramics



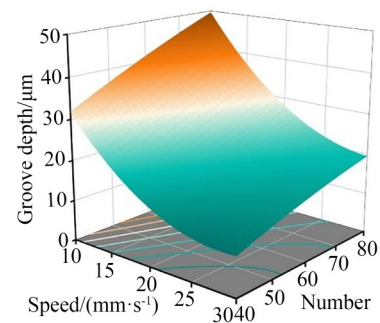
(a) 激光能量与扫描速度对沟槽深度的交互作用

(a) Interaction effects of laser energy and scanning speed on the groove depth



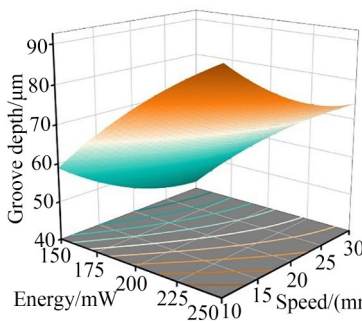
(b) 激光能量与扫描次数对沟槽深度的交互作用

(b) Interaction effects of laser energy and number of scanning passes on the groove depth



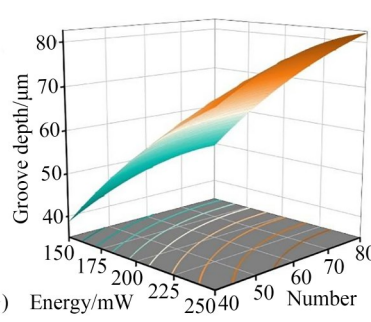
(c) 扫描速度与扫描次数对沟槽深度的交互作用

(c) Interaction effects of scanning speed and number of scanning passes on the groove depth



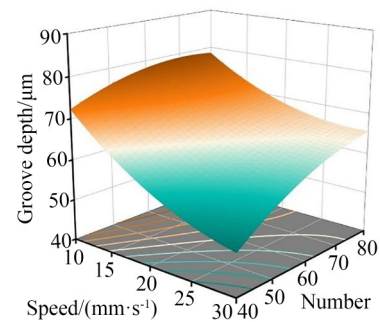
(d) 激光能量与扫描速度对沟槽宽度的交互作用

(d) Interaction effects of laser energy and scanning speed on the groove width



(e) 激光能量与扫描次数对沟槽宽度的交互作用

(e) Interaction effects of laser energy and number of scanning passes on the groove width



(f) 扫描速度与扫描次数对沟槽宽度的交互作用

(f) Interaction effects of scanning speed and number of scanning passes on the groove width

图 7 工艺参数对 ZrO₂陶瓷沟槽深度与沟槽宽度的交互作用

Fig. 7 Interaction effects of process parameters on groove depth and groove width of ZrO₂ ceramics

度类似,沟槽宽度同样表现出明显的非线性变化特征。随着激光能量和扫描次数的增加,沟槽宽度逐渐增大,而扫描速度的增加则会导致沟槽宽度减小。响应曲面在部分区域呈现较明显的弯曲形态,说明工艺参数之间存在较强的交互作用。其中,在高能量和多次扫描条件下,沟槽宽度增长更加明显,而在高扫描速度区域,沟槽宽度的变化趋势趋于缓和。

图 8(a)和图 8(b)分别展示了激光加工前后 ZrO_2 陶瓷的表面形貌及元素分布特征。由图 8(a)可见,加工前 ZrO_2 陶瓷表面整体较为平整光滑,未见明显缺陷或微观结构起伏,表明其初始表面状态良好。元素分析结果显示,样品中 Zr 元素质量分数为 83.34%, O 元素质量分数为 16.66%, 元素分布均匀,符合 ZrO_2 陶瓷的本征组

成特征。如图 8(b)所示,经激光加工后,陶瓷表面成功构建出规则有序的微沟槽结构,沟槽排列均匀、轮廓清晰,边界过渡较为完整。测量结果表明,沟槽深度约为 $30\ \mu\text{m}$,宽度约为 $60\ \mu\text{m}$,说明所采用的激光加工参数能够实现稳定且可控的结构制备。从形貌上看,沟槽侧壁相对完整,未出现明显塌陷或大面积剥落现象,表明材料去除过程较为温和且加工质量较高。元素分析结果进一步表明,加工后样品中 Zr 元素质量分数为 81.07%, O 元素质量分数为 18.93%。与加工前相比,元素含量仅发生轻微变化,且整体分布仍保持均匀,未观察到明显的元素偏析或成分迁移现象。这说明激光加工过程未引起显著的化学成分改变,沟槽区域仍保持良好的成分稳定性。

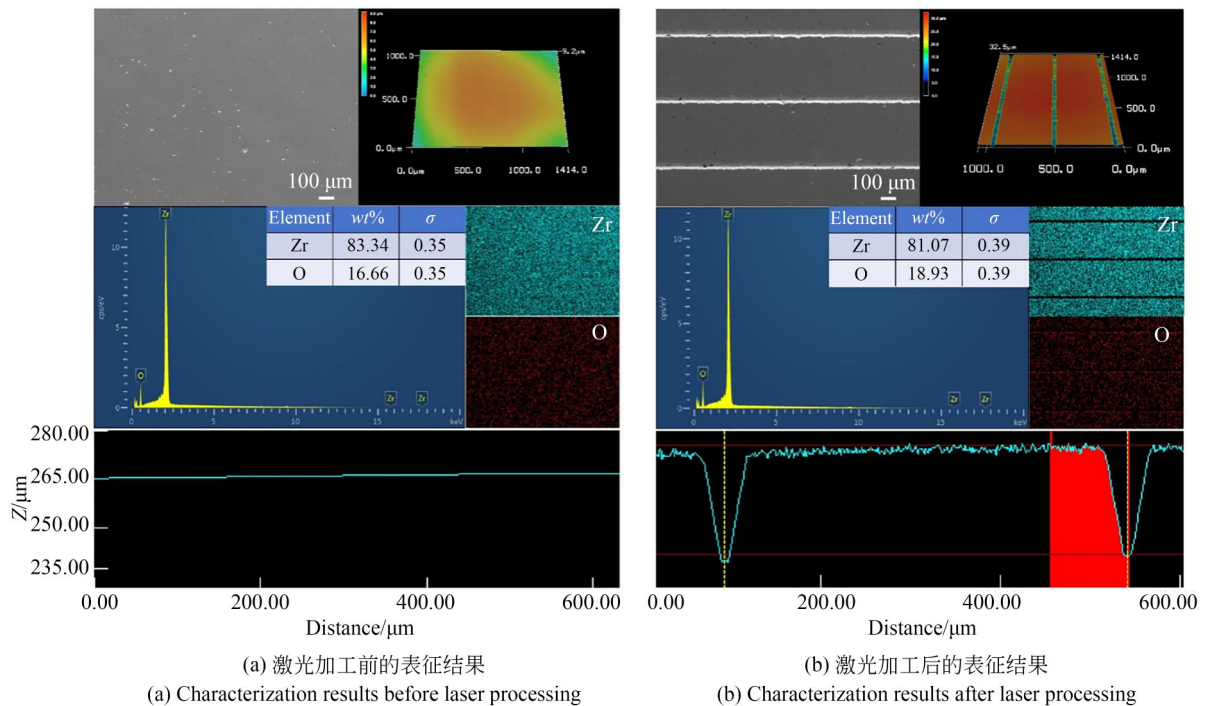


图 8 激光加工前后 ZrO_2 样品的 SEM、EDS 及共聚焦显微表征结果

Fig. 8 SEM, EDS, and confocal microscopy characterization results of ZrO_2 samples before and after laser processing

3.6 摩擦磨损性能

如图 9(a)~9(c)所示,展示了在不同沟槽参数条件下 ZrO_2 陶瓷摩擦系数(COF)随时间变化的曲线,而图 9(d)~9(f)则给出了相应的平均摩擦系数结果。由图 9(a)可以看出,在不同扫描间距条件下,COF 曲线在初始磨合阶段后逐渐趋于

稳定。随着扫描间距的增加,COF 呈现出先降低后升高的变化趋势,并在 $400\ \mu\text{m}$ 的扫描间距处达到最小值。当扫描间距较小时,沟槽分布较为密集,容易增强接触界面的剪切扰动,从而导致 COF 偏高;而当扫描间距过大时,沟槽数量减少,减摩和储屑能力减弱,也会使 COF 再次升高。

如图 9(b)所示,随着沟槽深度的增加,COF 同样表现出先降低后升高的变化趋势,并在 30 μm 的沟槽深度处获得最低值。较浅的沟槽难以有效储存磨损碎屑并改善界面接触状态,而过深的沟槽则会削弱表面的有效承载面积,并在沟槽边缘产生额外的应力集中,从而导致 COF 上升。如图 9(c)所示,随着沟槽角度的增加,COF 呈现出先升高后降低的变化趋势。当沟槽角度为 90° 时,即沟槽方向与滑动方向垂直,此时沟槽能够

更有效地阻挡并重新导向磨损碎屑,从而破坏连续的接触路径并降低界面剪切作用,使 COF 达到最低值。图 9(d)~9(f)所示的平均 COF 结果进一步验证了上述变化规律,在扫描间距为 400 μm 、沟槽深度为 30 μm 、沟槽角度为 90° 的最优参数组合下,ZrO₂陶瓷的最小平均 COF 为 0.358 4,与未织构表面的 COF 为 0.57 相比,降低了约 37.12%,表明通过合理设计沟槽几何参数能够显著提升 ZrO₂陶瓷的摩擦学性能。

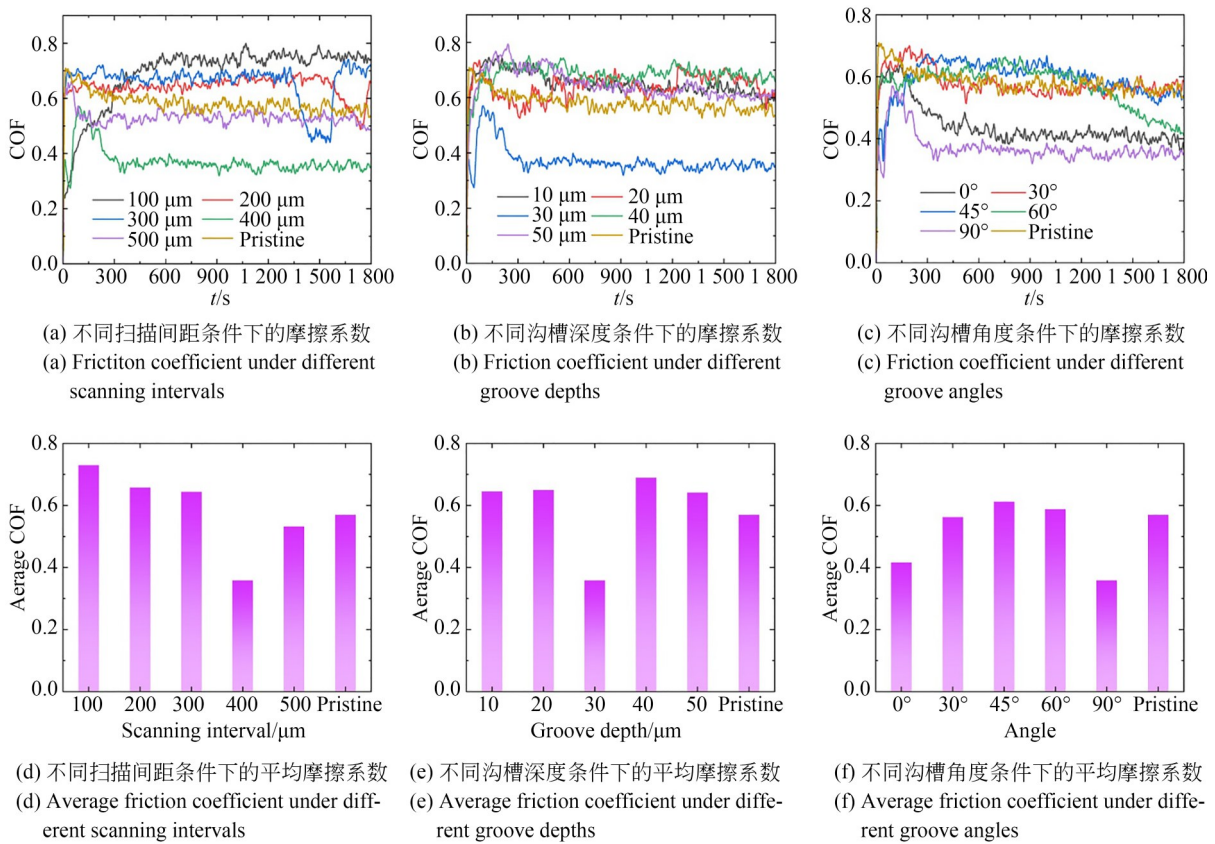
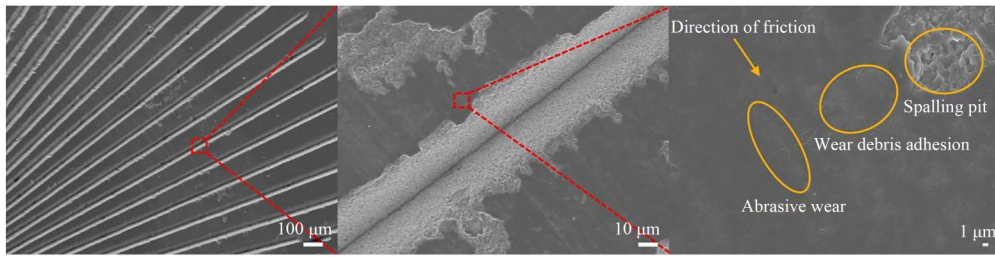


图 9 不同激光加工参数下 ZrO₂陶瓷的摩擦系数及平均摩擦系数

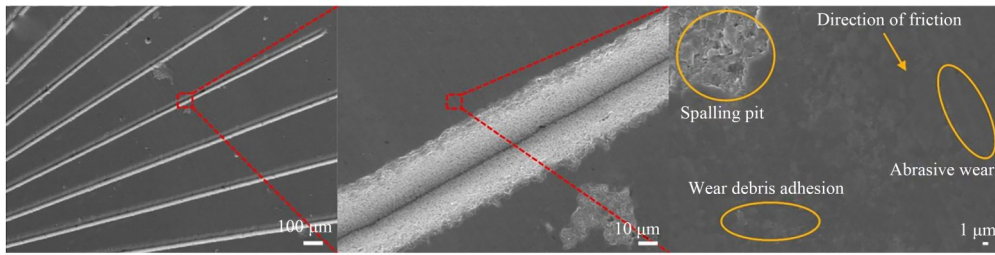
Fig. 9 Friction coefficient and average friction coefficient of ZrO₂ ceramics under different laser processing parameters

图 10 展示了不同微扫描间距(100~500 μm)条件下 ZrO₂陶瓷磨损后的 SEM 形貌。从整体磨损痕可以看出,各样品均沿摩擦方向形成连续的磨损带,但磨损特征及损伤程度随扫描间距变化显著。如图 10(a)所示,当扫描间距为 100 μm 时,高倍形貌中可观察到大量连续的磨粒犁削沟槽,同时伴随明显的磨屑黏附以及较大的剥落坑,表明过密的沟槽使接触界面在滑动过程中频繁跨越沟槽边缘,诱发严重的局部应力集中,从而促

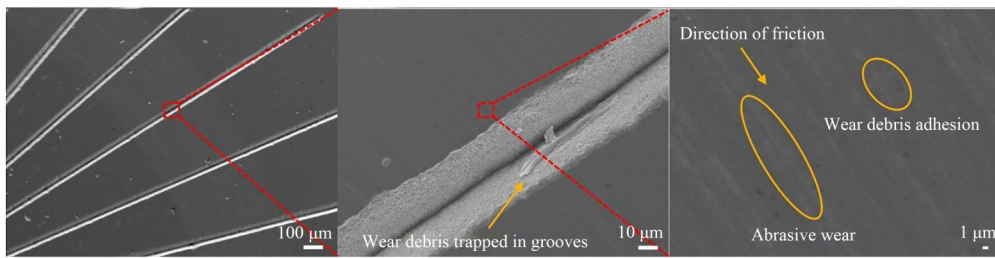
进脆性剥落和疲劳裂纹的产生。如图 10(b)所示,当扫描间距增加至 200 μm 时,可观察到较为明显的磨粒磨损特征以及较大的剥落坑,说明应力集中效应仍未得到有效缓解。如图 10(c)所示,当扫描间距为 300 μm 时,磨损形貌明显改善,磨损表面趋于平整,犁削沟槽变浅且分布更加均匀,磨屑黏附显著减少,同时部分磨屑被捕获在沟槽内部,表明沟槽开始有效发挥储屑与导屑作用,微裂纹数量及剥落坑尺寸均明显降低,



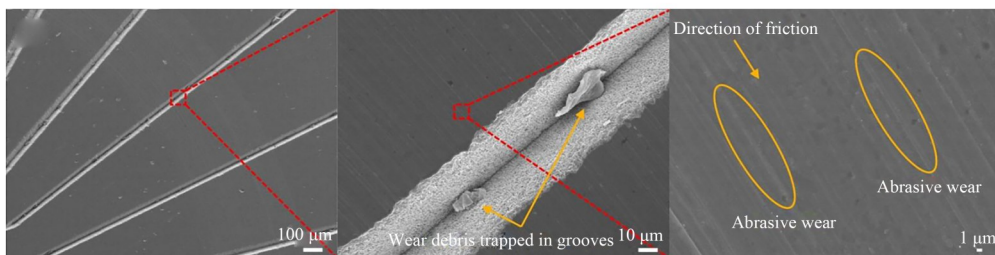
(a) 扫描间距为100 μm 时的磨损形貌
(a) Wear morphology at a scanning interval of 100 μm



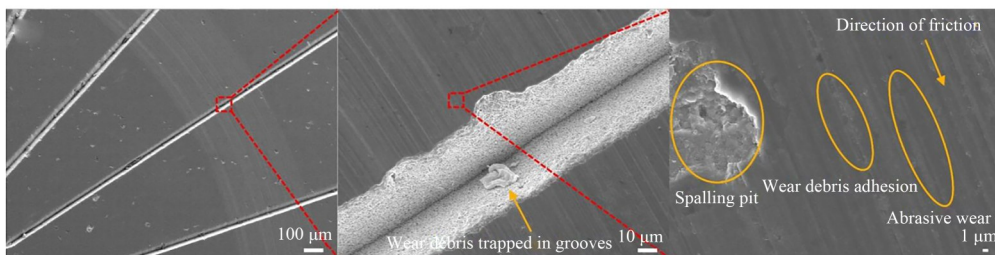
(b) 扫描间距为200 μm 时的磨损形貌
(b) Wear morphology at a scanning interval of 200 μm



(c) 扫描间距为300 μm 时的磨损形貌
(c) Wear morphology at a scanning interval of 300 μm



(d) 扫描间距为400 μm 时的磨损形貌
(d) Wear morphology at a scanning interval of 400 μm



(e) 扫描间距为500 μm 时的磨损形貌
(e) Wear morphology at a scanning interval of 500 μm

图 10 不同扫描间距条件下, ZrO_2 陶瓷表面在滑动摩擦 1800 s 后的磨损形貌 SEM 图

Fig. 10 SEM micrographs of wear morphologies on ZrO_2 ceramic surfaces with different scanning intervals after 1 800 s of sliding friction

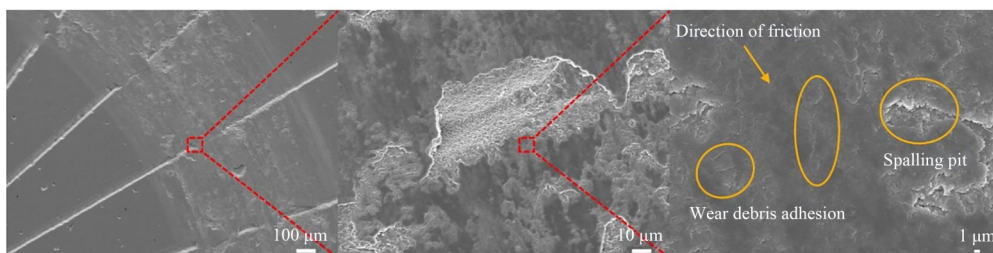
摩擦界面稳定性增强。如图 10(d)所示,当扫描间距为 $400\ \mu\text{m}$ 时,样品表现出最佳的减摩抗磨性能,磨损表面较为光滑,仅存在轻微且均匀的磨粒磨损,几乎未观察到明显的剥落坑,磨屑主要被困于沟槽内部而非堆积在接触界面,从而有效抑制第三体磨损,同时适中的沟槽密度避免了过多边缘接触引起的应力集中,使摩擦系数和磨损量均达到最低。如图 10(e)所示,当扫描间距进一步增大至 $500\ \mu\text{m}$ 时,磨损程度再次加剧,沟槽间距过大导致储屑能力下降,磨屑易在沟槽之间的平坦区域堆积并反复参与摩擦过程,从而强化磨粒犁削作用,同时出现一定数量的微裂纹和剥落坑,磨损机制重新恶化。

图 11 展示了不同沟槽深度($10\sim 50\ \mu\text{m}$)条件下 ZrO_2 陶瓷磨损后的 SEM 形貌。如图 11(a)所示,当沟槽深度为 $10\ \mu\text{m}$ 时,沟槽较浅,其对磨屑的容纳能力有限,高倍形貌中可观察到明显的破碎以及较多的磨屑黏附,同时伴随较大的剥落坑,表明浅沟槽难以有效缓解接触界面的磨粒堆积与应力集中,导致磨损较为严重。如图 11(b)所示,当沟槽深度增加至 $20\ \mu\text{m}$ 时,磨损情况有所改善,但仍可观察到一定数量的剥落坑和微裂纹,说明沟槽对磨屑的调控作用有所增强但仍不足以显著稳定摩擦界面。如图 11(c)所示,当沟槽深度为 $30\ \mu\text{m}$ 时,磨损形貌明显优化,磨损表面较为平整,磨粒犁削沟槽浅且分布均匀,可观察到磨屑被有效捕获在沟槽内部,表明沟槽在该深度下能够充分发挥储屑与导屑作用,微裂纹和剥落坑明显减少,摩擦界面稳定性最佳。如图 11(d)所示,当沟槽深度进一步增加至 $40\ \mu\text{m}$ 时,虽然沟槽仍具有一定的储屑能力,但局部区域开始出现较明显的剥落坑和微裂纹,说明过深沟槽可能引起结构削弱及局部应力集中,导致磨损加剧。如图 11(e)所示,当沟槽深度为 $50\ \mu\text{m}$ 时,磨损程度进一步恶化,可观察到较明显的磨粒磨损、磨屑黏附以及剥落坑,同时沟槽边缘局部破损加剧,表明过深沟槽削弱了表面承载能力,使接触界面稳定性下降。

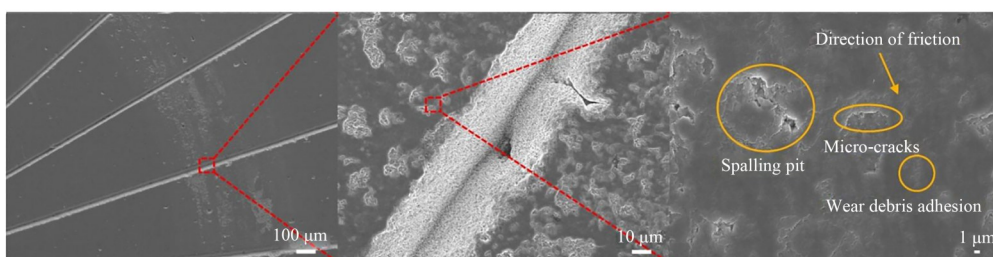
图 12 展示了不同沟槽取向角度($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 90°)条件下 ZrO_2 陶瓷磨损后的 SEM 形貌。如图 12(a)所示,当沟槽取向为 0° 时,沟槽方向与滑动方向基本一致,沟槽对磨屑的拦截和调控作

用较弱,磨屑易在接触界面滞留并反复参与摩擦,可观察到明显的表面分层剥离以及磨屑黏附现象,界面黏着与剥落损伤较为严重。如图 12(b)所示,当沟槽角度为 30° 时,可观察到较大的剥落坑以及明显的磨粒磨损区域,表明界面应力集中与磨屑堆积问题尚未有效缓解。如图 12(c)所示,当沟槽角度为 45° 时,仍存在一定数量的剥落坑,再次出现明显的磨屑黏附,说明该角度下沟槽对磨屑的调控能力有限。如图 12(d)所示,当沟槽角度为 60° 时,磨损形貌明显改善,磨损表面趋于平整,磨粒磨损程度减弱,剥落坑数量明显减少,说明此时沟槽能够更有效地引导并分散磨屑,同时降低局部应力集中,从而提升界面稳定性。如图 12(e)所示,当沟槽角度为 90° 时,样品表现出最佳的磨损形貌特征,磨损表面最为光滑,仅存在轻微且均匀的磨粒磨损,几乎未观察到微裂纹和剥落坑,同时磨屑被有效阻挡并部分捕获于沟槽内部。

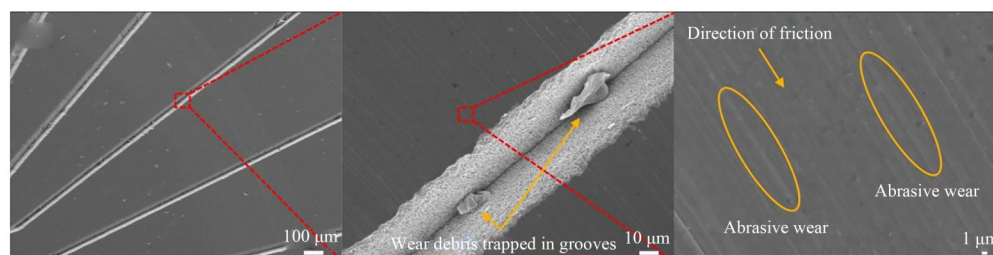
如图 13(a)所示,给出了 ZrO_2 陶瓷在不同扫描间距条件下的磨损体积变化规律。当扫描间距为 $100\ \mu\text{m}$ 时,磨损体积达到最大值 $5.27\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。随着扫描间距的增加,磨损体积逐渐降低,在 $300\ \mu\text{m}$ 时出现明显下降,并在 $400\ \mu\text{m}$ 时达到最小值 $0.267\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。当扫描间距进一步增大至 $500\ \mu\text{m}$ 时,磨损体积有所回升,表明过大的扫描间距会削弱沟槽结构对磨损碎屑的储存和调控作用。图 13(b)展示了 ZrO_2 陶瓷在不同沟槽深度条件下的磨损体积变化。当沟槽深度为 $10\ \mu\text{m}$ 时,磨损体积最小,为 $0.217\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。随着沟槽深度增加至 $20\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$,磨损体积有所增大但仍保持在较低水平,在 $30\ \mu\text{m}$ 时为 $0.267\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。当沟槽深度进一步增加至 $40\sim 50\ \mu\text{m}$ 时,磨损体积明显增大,并在 $50\ \mu\text{m}$ 时达到最大值 $9.56\times 10^6\ \mu\text{m}^3$,说明过深的沟槽会降低表面承载能力并加剧局部磨损。如图 13(c)所示,给出了不同沟槽角度条件下 ZrO_2 陶瓷的磨损体积变化。当沟槽角度为 0° 时,磨损体积最小,为 $0.21\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。随着沟槽角度的增加,磨损体积先增大后减小,在 45° 时达到最大值 $4.82\times 10^6\ \mu\text{m}^3$;当沟槽角度为 90° 时,磨损体积减小到 $0.267\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。当沟槽方向与滑动方向平行时,摩擦副在滑动过程中较少跨越沟槽边缘,从而减弱了沟槽边缘对



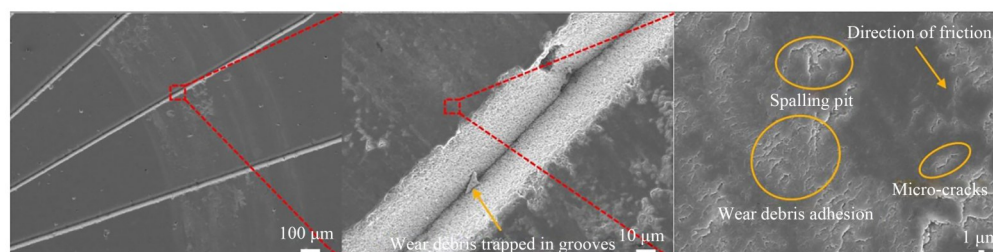
(a) 沟槽深度为10 μm 时的磨损形貌
(a) Wear morphology at a groove depth of 10 μm



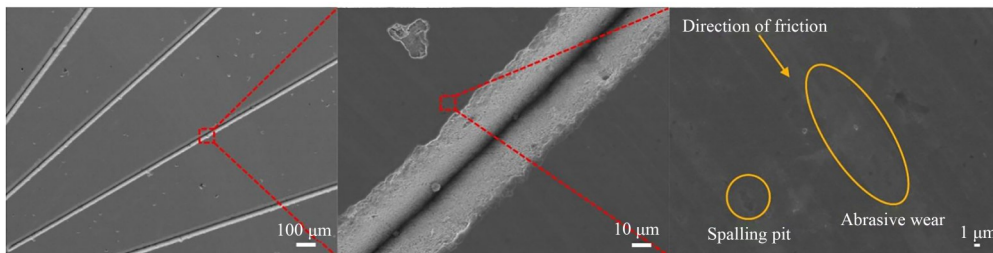
(b) 沟槽深度为20 μm 时的磨损形貌
(b) Wear morphology at a groove depth of 20 μm



(c) 沟槽深度为30 μm 时的磨损形貌
(c) Wear morphology at a groove depth of 30 μm



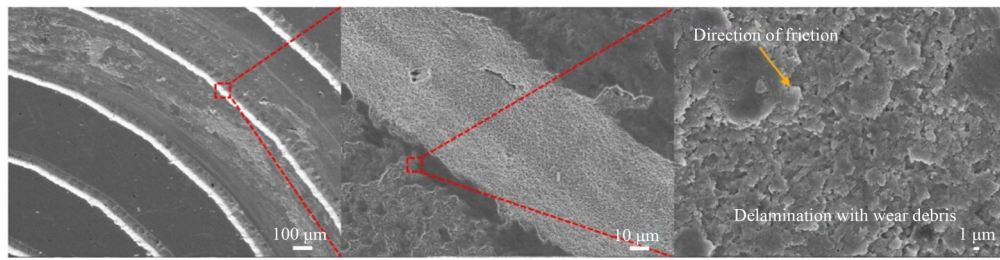
(d) 沟槽深度为40 μm 时的磨损形貌
(d) Wear morphology at a groove depth of 40 μm



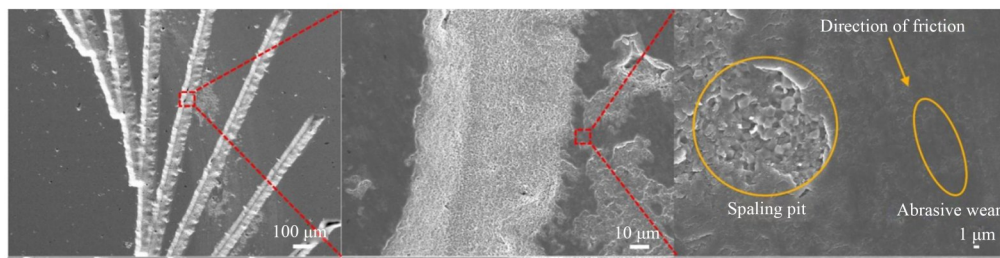
(e) 沟槽深度为50 μm 时的磨损形貌
(e) Wear morphology at a groove depth of 50 μm

图 11 不同沟槽深度条件下 ZrO_2 陶瓷表面在滑动摩擦 1 800 s 后的磨损形貌 SEM 图像

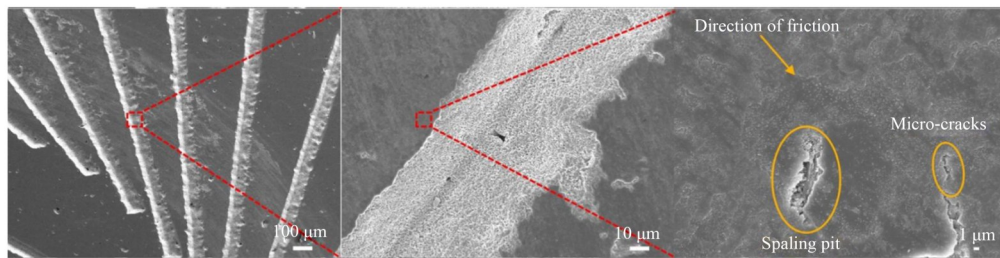
Fig. 11 SEM micrographs of wear morphologies on ZrO_2 ceramic surfaces with different groove depths after 1 800 s of sliding friction



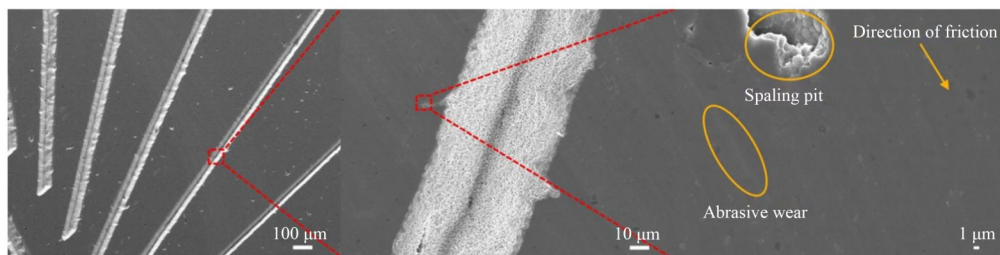
(a) 沟槽角度为0°时的磨损形貌
(a) Wear morphology at a groove angle of 0°



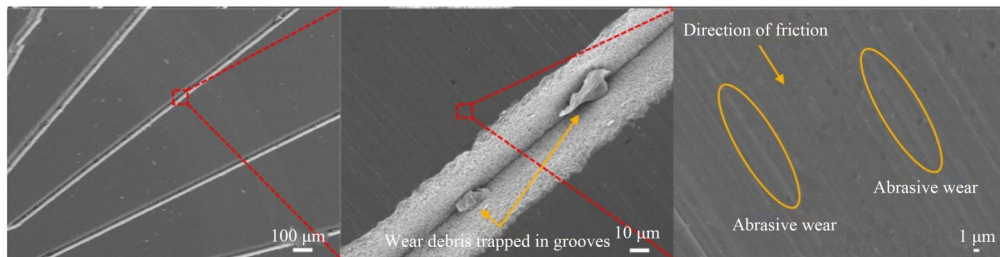
(b) 沟槽角度为30°时的磨损形貌
(b) Wear morphology at a groove angle of 30°



(c) 沟槽角度为45°时的磨损形貌
(c) Wear morphology at a groove angle of 45°



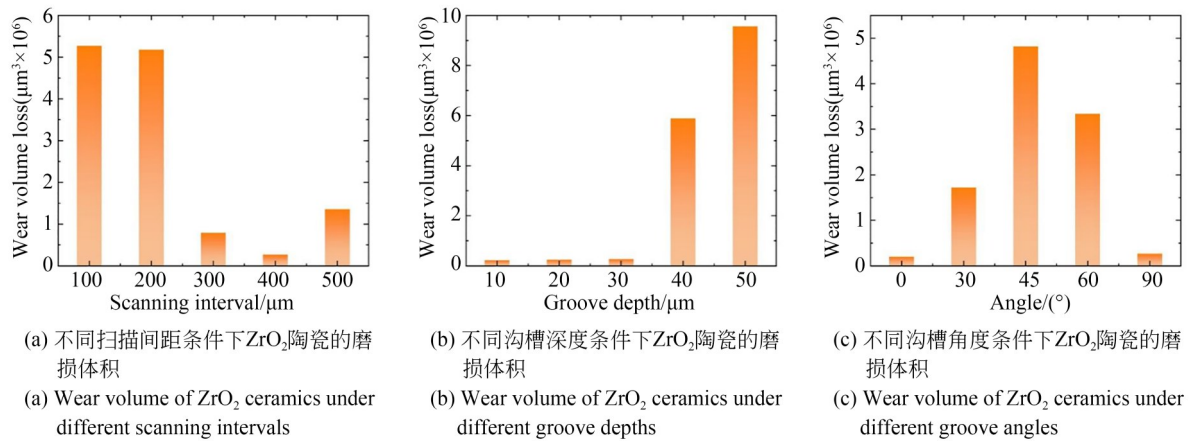
(d) 沟槽角度为60°时的磨损形貌
(d) Wear morphology at a groove angle of 60°



(e) 沟槽角度为90°时的磨损形貌
(e) Wear morphology at a groove angle of 90°

图 12 不同沟槽角度下 ZrO₂陶瓷表面滑动摩擦 1 800 s 后的磨损形貌 SEM 图像

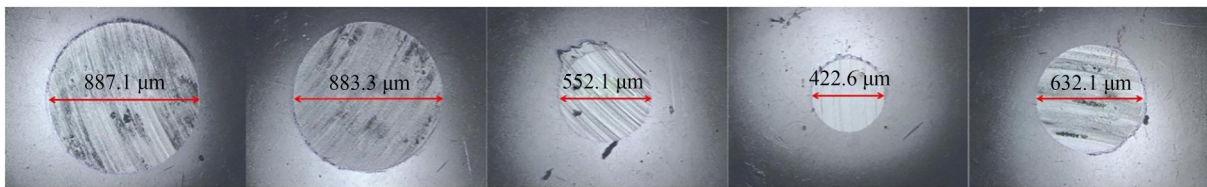
Fig. 12 SEM micrographs of wear morphologies on ZrO₂ ceramic surfaces with different groove angles after 1 800 s of sliding friction

图 13 不同织构参数条件下 ZrO₂陶瓷磨损体积对比Fig. 13 Comparison of wear volume of ZrO₂ ceramics under different texture parameters

对偶表面的犁削作用和局部应力扰动,因此磨损量较低。当沟槽角度为 90°时,沟槽能够有效截断连续接触路径并为磨损碎屑提供储存空间,因此同样表现出较低的磨损量。对比有限元分析结果可以发现,仿真与实验在总体趋势上具有一致性,即应力集中程度较低的织构参数通常对应较小的磨损体积。0°与 90°取向在仿真中均表现出较低的应力集中水平,0°取向由于沟槽与滑动方向平行,有利于形成连续承载路径并分散接触应力,在实验中表现出最小的磨损体积,与仿真结果在抗磨损性能方面具有良好一致性。而在摩擦系数方面,90°取向表现更优,这主要源于其沟槽垂直于滑动方向,有利于润滑介质储存与磨屑排出,从而降低界面剪切阻力,而 0°取向易导

致磨屑沿沟槽迁移并发生局部堆积,增加摩擦阻力。因此,有限元分析主要反映接触应力分布规律,而摩擦磨损实验体现了润滑与第三体作用下的综合响应,二者在磨损趋势上具有一致性,但在摩擦行为上存在差异,从不同尺度共同揭示了微织构的作用机制。

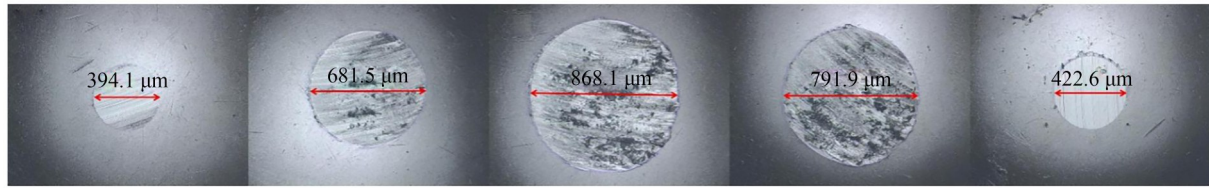
为了进一步直观验证不同沟槽参数条件下磨损体积的差异,图 14 给出了 ZrO₂陶瓷摩擦副中对偶陶瓷球磨斑直径的图像。其中,图 14(a)对应不同扫描间距条件,图 14(b)对应不同沟槽深度条件,图 14(c)对应不同沟槽角度条件。图中的红色标注表示磨斑直径,用于表征对偶球的实际磨损程度。在最优加工参数组合条件下,对偶球的磨斑直径约为 422.6 μm (彩图见期刊电子版)。



(a) 不同扫描间距(100~500 μm)条件下ZrO₂陶瓷球的磨斑图像
(a) Wear scar images of ZrO₂ ceramic balls under different scanning intervals (100~500 μm)



(b) 不同沟槽深度(10~50 μm)条件下ZrO₂陶瓷球的磨斑图像
(b) Wear scar images of ZrO₂ ceramic balls under different groove depths (10~50 μm)



(c) 不同沟槽角度($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)条件下 ZrO_2 陶瓷球的磨斑图像
(c) Wear scar images of ZrO_2 ceramic balls under different groove angles ($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)

图 14 ZrO_2 陶瓷球摩擦后磨斑的共聚焦显微表征结果

Fig. 14 Confocal microscopy characterization of the wear scar on the ZrO_2 ceramic ball after friction

4 结 论

本文系统探讨了表面微沟槽结构对 ZrO_2 陶瓷摩擦磨损行为的调控机制。通过综合运用有限元仿真、响应面法参数优化以及摩擦磨损实验,从应力分布特征、结构参数影响规律以及实际磨损响应等多个方面揭示了沟槽几何形貌对陶瓷摩擦界面力学行为及磨损性能的内影响机制。结果表明,合理设计微沟槽参数能够有效调控界面应力状态与磨屑行为,从而显著提升陶瓷材料的耐磨性能。有限元仿真结果表明,扫描间距、沟槽深度和沟槽取向对陶瓷表面的最大等效应力分布具有显著影响,其中较小的间距和较大的沟槽深度易引起应力集中,而合理的沟槽取向有助于重新分配接触应力;响应面分析揭示了激光能量、扫描速度及扫描次

数对沟槽深度与宽度的耦合作用,实现了沟槽几何形貌的定量调控与预测;实验结果与有限元仿真结果具有良好一致性。合理的沟槽结构设计能够有效减弱应力集中、促进磨屑排出并稳定摩擦界面。在最优条件下,其平均摩擦系数降低至 0.358 4,降幅达 37.12%,对应磨损体积为 $0.267 \mu m^3 \times 10^6$ 。

作者贡献声明:

杨方雨:初稿写作,方法验证,可视化呈现;

褚东凯:论文审核与指导;

姚 鹏:论文审核与指导,提供资源,项目管理;

唐志亮:实验数据整理和分析;

吕欣鑫:参数优化,数据整理和分析;

屈硕硕:论文审核。

参考文献:

- [1] GUO X Z, WANG R, ZHENG P, *et al.* Pressureless sintering of multilayer graphene reinforced silicon carbide ceramics for mechanical seals[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2019, 118 (7) : 409-417.
- [2] XING H Y, ZOU B, LIU X Y, *et al.* Effect of particle size distribution on the preparation of ZTA ceramic paste applying for stereolithography 3D printing[J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 314-322.
- [3] SEO Y K, EOM J H, KIM Y W. Process-tolerant pressureless-sintered silicon carbide ceramics with alumina-yttria-calcia-strontia[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(2): 445-452.
- [4] WU C, LIU Z, ZHAO H J, *et al.* Effect of the grease thickener on tribological properties of $Si_3N_4/GCr15$ contact interface and the performance in hybrid ceramic ball bearing[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(11): 16857-16867.
- [5] BAKAN E, MACK D E, MAUER G, *et al.* High-Temperature Materials for Power Generation in Gas Turbines[M]. *Advanced Ceramics for Energy Conversion and Storage*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 3-62.
- [6] KARADIMAS G, SALONITIS K. Ceramic matrix composites for aero engine applications: a review[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3017.
- [7] WANG X L, GAO X D, ZHANG Z H, *et al.* Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(9): 4671-4688.
- [8] WANG T, HUANG W F, LIU X F, *et al.* Experimental study of two-phase mechanical face seals

- with laser surface texturing[J]. *Tribology International*, 2014, 72: 90-97.
- [9] ZHAO W G, ZHANG G Y, DONG G N. Friction and wear behavior of different seal materials under water-lubricated conditions[J]. *Friction*, 2021, 9(4): 697-709.
- [10] ZHANG W. A novel ceramic with low friction and wear toward tribological applications: Boron carbide-silicon carbide[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 301: 102604.
- [11] ZHANG W, YAMASHITA S, KITA H. Progress in tribological research of SiC ceramics in unlubricated sliding—a review[J]. *Materials & Design*, 2020, 190: 108528.
- [12] FAN W J, HUANG W F, LIU Y, *et al.* State evolution of dry gas seal during repeated start-stop operation using acoustic emission method[J]. *Tribology Transactions*, 2020, 63(1): 173-181.
- [13] CHEN K Y, YANG X F, ZHANG Y F, *et al.* Research progress of improving surface friction properties by surface texture technology[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(9): 2797-2821.
- [14] WANG Z Q, YE R H, XIANG J B. The performance of textured surface in friction reducing: a review[J]. *Tribology International*, 2023, 177: 108010.
- [15] WASSMANN T, KREIS S, BEHR M, *et al.* The influence of surface texture and wettability on initial bacterial adhesion on titanium and zirconium oxide dental implants[J]. *International Journal of Implant Dentistry*, 2017, 3(1): 32.
- [16] GUO P, ZOU B, HUANG C Z, *et al.* Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 12-22.
- [17] HAN J J, MA R, HAO X Q, *et al.* Experimental research on deep-and-narrow micromilled grooves using a self-fabricated PCD micro-cutter[J]. *Micromachines*, 2021, 12(10): 1170.
- [18] SU F K, ZHANG Z Z, YAO P, *et al.* Fabrication of cylindrical microlens array on RB-SiC moulds by precision grinding with MAWJ-textured diamond wheels[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 6893.
- [19] DE ZANET A, SALVO M, CASALEGNO V. Surface modification of SiC to improve joint strength via a Corona plasma treatment[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(16): 23492-23497.
- [20] CHEN J L, LU X Z, WEN Q L, *et al.* Review on laser-induced etching processing technology for transparent hard and brittle materials[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9): 2545-2564.
- [21] RAO X S, ZHANG F H, LI C, *et al.* Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5): 2751-2762.
- [22] ZHAO Y H, KUNIEDA M, ABE K. EDM mechanism of single crystal SiC with respect to thermal, mechanical and chemical aspects[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 138-147.
- [23] CHEN X Y, LI Y L, RAO W P, *et al.* Study on friction and wear of 9Cr18 steel with composite treatment of laser shock processing and surface texturing[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 37: 1119-1133.
- [24] CHEN X Z, HUANG Y, RONG Y M, *et al.* Two-step laser processing of micro/nano-composite structures on PS-SiC surfaces for superior friction performance under water-lubrication[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(18): 26171-26184.
- [25] RAJURKAR A, CHINCHANIKAR S. Investigation on the effect of laser parameters and hatch patterns on the dimensional accuracy of micro-dimple and micro-channel texture geometries[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2024, 18(10): 7021-7038.
- [26] LI G X, LI X A, HE G C, *et al.* Surface quality and material removal rate in fabricating microtexture on tungsten carbide via femtosecond laser[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1143.
- [27] WANG X D, YU H B, LI P W, *et al.* Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106687.
- [28] LIN Z Y, HONG M H. Femtosecond laser preci-

- sion engineering: from micron, submicron, to nanoscale[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 2021/9783514.
- [29] HUANG J Y, GUAN Y C, RAMAKRISHNA S. Tribological behavior of femtosecond laser-textured leaded brass [J]. *Tribology International*, 2021, 162: 107115.
- [30] XING Y Q, DENG J X, WANG X S, *et al.* Effect of laser surface textures combined with multi-solid lubricant coatings on the tribological properties of Al_2O_3/TiC ceramic[J]. *Wear*, 2015, 342/343: 1-12.
- [31] JI M, XU J Y, CHEN M, *et al.* Enhanced hydrophilicity and tribological behavior of dental zirconia ceramics based on picosecond laser surface texturing [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(6): 7161-7169.
- [32] CHEN X, WANG C Y, JIANG J Y, *et al.* Effect of picosecond laser texturing on the friction behavior of silicon carbide in hybrid ceramic bearings under dry and water lubrication[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(18): 29857-29869.
- [33] CHENG H, ZHOU F, FEI Z H. Dry friction properties of friction subsets and angle related to surface texture of cemented carbide by femtosecond laser surface texturing [J]. *Coatings*, 2023, 13(4): 741.
- [34] HE C S, YANG S C, ZHENG M L. Analysis of synergistic friction reduction effect on micro-textured cemented carbide surface by laser processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 155: 108343.

作者简介:



杨方雨(2002—),男,山东东营人,硕士研究生,2024年于西安建筑科技大学获得学士学位,主要从事超快激光微纳制造和陶瓷表面减摩抗磨方面的研究。E-mail: 1428964681@qq.com

通讯作者:



褚东凯(1991—),男,山西吕梁人,博士,副教授,硕士生导师,2020年于中南大学获得博士学位,主要从事超快激光微纳制造、仿生吸波功能性表面制备、超精密加工技术方面的研究。E-mail: chudongkai@sdu.edu.cn

通讯作者:



姚鹏(1979—),男,博士,教授,博士生导师,2002年、2005年于东北大学分别获得学士和硕士学位,2011年于东北大学(日本)获得博士学位,主要从事磨削与超精密加工技术、智能制造与检测技术和超快激光微纳加工技术方面的研究。E-mail: yao-peng@sdu.edu.cn