碳化硅陶瓷超声辅助飞秒激光烧蚀机理与工艺研究

林颖亮[1,2] 陈晓晓[2,3*] 马晨斌[2] 李 奇[2,4] 张文武[2,3]
1.宁波大学机械工程与力学学院,宁波,315211
2.中国科学院宁波材料技术与工程研究所,宁波,315201
3.中国科学院大学,北京,100049
4.浙江工业大学机械工程学院,杭州,310023

摘要:采用一种超声辅助透镜飞秒激光烧蚀新方法,通过控制聚焦透镜高频振动实现动态能量密度调制,系统探究了激光功率与超声功率对碳化硅陶瓷烧蚀三维形貌的影响。结果表明:超声辅助可周期性改变光斑直径与能量密度分布,有效抑制等离子体屏蔽效应;低激光功率($P\leqslant5$ W)时,高超声功率(50%~70%)会降低能量沉积速率,导致烧蚀深度减小;高激光功率($P\geqslant13$ W)时,70%超声功率可使烧蚀深度达129.46 μm,较无超声工况提高54%,且热影响区氧元素密度显著降低。

关键词:碳化硅陶瓷;超声振动;激光加工;能量密度调制;激光烧蚀
中图分类号:TN249
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.022 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Study on Ultrasonic-assisted Femtosecond Laser Ablation Mechanism and Process of Silicon Carbide Ceramics

LIN Yingliang[1,2] CHEN Xiaoxiao[2,3*] MA Chenbin[2] LI Qi[2,4] ZHANG Wenwu[2,3]
1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang, 315211
2.Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315201
3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049
4.College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023

Abstract: This study employs a novel ultrasonic-assisted femtosecond laser ablation method based on a focusing lens. By controlling the high-frequency vibration of the focusing lens, dynamic modulation of the energy density is achieved. The effects of laser power and ultrasonic power on the three-dimensional ablation morphology of silicon carbide ceramics are systematically investigated. Experimental results indicate that ultrasonic assistance can periodically alter the spot diameter and energy density distribution, thereby effectively suppressing the plasma shielding effect. At a low laser power (≤5 W), high ultrasonic power levels (50%-70%) reduce the energy deposition rate, leading to a decrease in ablation depth. In contrast, at a high laser power (≥13 W), the ablation depth reaches 129.46 μm under 70% ultrasonic power, representing a 54% increase compared to the condition without ultrasonic assistance. Furthermore, the oxygen content in the heat-affected zone is significantly reduced under ultrasonic assistance. This work provides theoretical and technical support for ultrasonic-assisted femtosecond laser machining and offers new insights into achieving high-efficiency and high-quality laser processing of silicon carbide ceramics.

Key words: silicon carbide ceramics; ultrasonic vibration; laser processing; energy density modulation; laser ablation

0 引言

碳化硅陶瓷综合性能优异,广泛应用于航空航天、空间光学、半导体等领域[1-3],具有高硬度、耐磨损、耐高温及低膨胀系数等特性,成为航空发动机散热部件、高精度空间反射镜及高频半导体器件的核心材料[4-5],然而,其硬脆特性导致传统机械加工易产生表面裂纹,存在刀具磨损等问题[6-7]。激光加工作为一种非接触、高精度的加工技术,在碳化硅陶瓷等硬脆材料加工方面具有一定的工艺优越性[8]。然而,在高能量密度与高重复频率激光加工过程中,激光与材料作用区会产生等离子体屏蔽与热累积效应,成为制约加工质量和精度提高的关键瓶颈[9]。

近年来,能场复合加工技术被提出,旨在进一步提高激光加工材料的精度、效率、加工完整性,

收稿日期:2025-08-26
基金项目:国家自然科学基金(52375472,52350710794);宁波市自然科学基金重点项目(2022J291);宁波市重点研发计划(2023Z039);宁波市青年科技创新领军人才项目(2025QL061)

实现对加工过程中材料缺陷的抑制和形态的调控[10-11]。其中，超声辅助与激光加工的复合工艺备受关注[12-13]，该技术被用于改善加工过程，提高激光工艺效果。超声振动辅助激光加工已发展为以下两类主流技术路径。

一类是工件振动式超声辅助激光加工，即通过对工件施加高频振动实现工艺优化。XIA等[14]研究了不同超声功率对单脉冲激光钻孔的影响。ZHENG等[15]通过工件超声振动辅助激光钻孔，显著提高了微孔的深径比与壁面光洁度。WANG等[16]进一步验证，该方式不仅可改善激光钻孔性能，还能提高微孔热影响区的硬度。TODARO等[17]使用超声振动对316L不锈钢增材制造中的凝固过程进行调控，结果表明：超声的引入有利于晶粒柱状到等轴状的转变并促进了具有随机晶体纹理的细小等轴晶粒的形成。ALAVI等[18]发现，工件超声振动可增加材料去除效率，并促使加工区域形成等轴微观结构，减少加工缺陷。ZHENG等[19]提出了一种基于超声振动平台的飞秒激光抛光C/SiC的方法，超声场传递给材料的振动能量可增强近场对流，从而改善烧蚀颗粒的冷却，降低烧蚀颗粒与材料表面的黏附，提高加工表面质量。此类复合工艺方法需针对不同材料匹配特定共振频率，且大尺度构件加工时振动均匀性控制困难，影响加工一致性[20]。

另一类是透镜振动式超声辅助激光加工，即通过聚焦透镜高频振动调控激光与材料的作用状态，无需依赖工件特性。PARK等[21]探索了透镜超声振动辅助激光钻孔，提高了孔加工深径比。KANG等[22]针对超声振动辅助激光抛光(ultrasonic vibration-assisted laser polishing，UVLP)的需求，设计了以透镜为振动元件的UVLP激光加工头，采用连续激光结合机床移动对304不锈钢进行抛光，相比传统激光抛光(traditional laser polishing，TLP)显著降低了表面粗糙度，表面光洁度更优。其扫描速度受机床运动速度的限制，在硬脆材料的高速扫描加工方面存在技术瓶颈。

综上所述，透镜振动式超声辅助激光加工的研究仍存在硬脆材料适配性与工艺场景拓展的双重空白。针对上述研究缺口与工程需求，本文提出光路集成式透镜超声辅助飞秒激光加工方案：将超声振动透镜嵌入“脉冲激光→聚焦透镜→扫描振镜→场镜”的光路系统，不改变加工焦点运动，通过透镜高频振动实现“加工焦点处光斑直径与能量密度的周期性动态调制”。区别于传统的工件振动或透镜振动技术，该方法可实现激光能量密度的动态调制效果，改善激光加工中的等离子屏蔽与热累积效应；经扫描振镜与场镜协同作用，还能适配定点烧蚀、激光切割、异形刻槽等多场景加工需求。

本文以碳化硅陶瓷为研究对象，揭示超声辅助改善激光加工质量的内在机理，系统探究激光功率、超声功率对烧蚀三维形貌的影响规律，为硬脆材料高效高质激光加工提供创新工艺方法和基础支撑。

1 试验设置

试验所用光源为飞秒脉冲激光器(华日飞秒激光器IR-1000-100，激光波长1035 nm，重复频率1～100 kHz，脉冲宽度小于250 fs，冷却方式为水冷)、五轴运动控制系统、透镜超声振动装置(谐振频率：20 kHz，振幅通过输入功率调控实现)以及扫描振镜控制系统。光路传播路径：激光器发射高斯光束→超声辅助聚焦透镜(动态调制)→扫描振镜(方向控制)→场镜(二次聚焦)→碳化硅陶瓷工件，最终在加工平面形成随超声透镜振动周期性变化的光斑，实现光路内能量密度的主动调控。激光加工系统如图1所示。

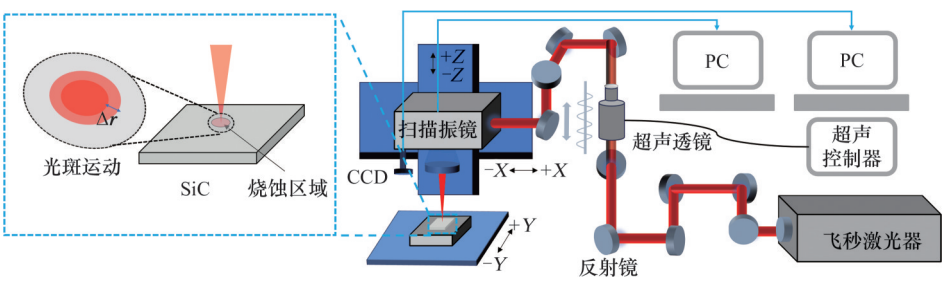


图1 超声辅助飞秒激光加工系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic-assisted femtosecond laser machining system

碳化硅陶瓷试件尺寸为15 mm×15 mm×5 mm，原始表面粗糙度Ra为1.61 μm。材料性能参数如表1所示[23]。

试验参数设计如表2所示，采用控制变量法探究激光功率(3～15 W)与超声功率(0～70%)对烧蚀形貌的影响，每组参数重复试验3次以确保数据可靠性。试验前通过五轴运动台调整焦距(离焦量Z=0 mm)，使用CCD观测试件表面进

表 1　碳化硅陶瓷材料的性能参数

Tab.1　Performance parameters of silicon carbide ceramics

密度/(g·cm^3)	弯曲强度/MPa	显微硬度/MPa	热膨胀系数/K^{-1}	热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})
3.2	500	2500	4.2×10^{-6}	60

表 2　超声辅助飞秒激光烧蚀的实验参数

Tab.2　Experimental parameters of ultrasonic-assisted femtosecond laser ablation

参数	值
离焦量 Z/mm	0
激光重复频率 F/kHz	100
激光功率 P/W	3、5、7、9、11、13、15
烧蚀时间 t/s	5
超声功率(百分比)P_u/%	0、30、50、70
超声频率 F_u/kHz	20

行定位，使用激光功率计测量激光功率；试验过程中，单次激光烧蚀时间为 5 s。

采用激光扫描共聚焦显微镜(放大倍率 400 倍)观测烧蚀特征三维形貌，测量烧蚀直径、烧蚀深度等关键几何参数；使用扫描电镜，观测微观形貌。通过能谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy，EDS)分析烧蚀表面元素分布。激光烧蚀特征表面形貌随激光功率和超声功率的变化如图 2 所示。

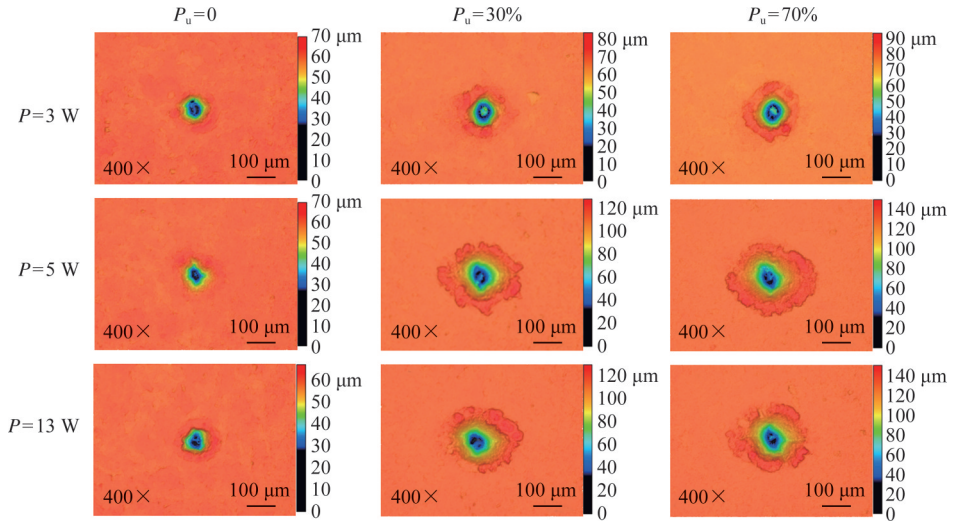


图 2　不同激光功率与超声功率组合下的烧蚀表面形貌

Fig.2　Ablation surface morphology under different combinations of laser power and ultrasonic power

2　动态激光光斑与能量密度分析

本研究采用“脉冲激光→超声辅助聚焦透镜→扫描振镜→场镜”的光路，基于高斯光束传输理论与简谐振动原理，构建了动态光斑调制模型。通过分析超声透镜的周期性振动对光束传输的影响，结合场镜聚焦特性，讨论加工表面的瞬时光斑直径变化，为能量密度调制分析提供理论支撑。动态能量密度分析相关符号和物理意义见表 3。

超声透镜在超声激励下沿光轴做简谐振动，其振动位移直接转化为超声透镜焦平面沿光轴方向的动态位移 $\Delta z(t)$，根据简谐振动方程：

$$\Delta z(t)=A\sin(2\pi F_u t) \tag{1}$$

其中，$2\pi F_u$ 为振动相位，决定不同时刻的超声透镜位移；振幅 A 由超声功率控制(功率越大，A 越大)；振动频率与超声系统固有频率一致，确保调制周期的稳定性。

将动态位移量代入高斯光束薄透镜传输公式，分析超声透镜对光束的第一次聚焦调制。入射激光束腰到超声透镜的实际距离为 $z_0+\Delta z(t)$，

表 3　动态能量密度分析相关符号和物理意义

Tab.3　Variables and their physical meanings related to dynamic energy density analysis

变量符号	物理意义	单位
λ	脉冲激光波长	nm
ω_0	激光入射超声透镜前的束腰半径	mm
f_1	超声辅助聚焦透镜焦距	mm
f_2	场镜焦距	mm
A	超声透镜沿光轴振动的振幅	μm
F_u	超声透镜振动频率	kHz
t	时间变量	s
z_0	入射激光束腰到超声透镜的静态固定距离	mm
$\Delta z(t)$	超声振动引发的动态位移	μm
$\omega_1(t)$	超声透镜出射光束在静态焦平面处的瞬态光斑半径	μm
$\omega_{surf}(t)$	加工表面瞬时光斑半径	μm
$D(t)$	加工表面瞬时光斑直径	μm
z_{R0}	入射光束瑞利长度	mm

由于 $\Delta z(t)$(μm 级)远小于 z_0(mm 级)，忽略二次项的影响，超声透镜出射光束在静态焦平面的瞬态束腰半径 $\omega_1(t)$[22]为

$$\omega_1(t)=\frac{\omega_0 f_1}{\sqrt{\left(z_0-f_1+\Delta z(t)\right)^2+z_{R0}^2}} \tag{2}$$

将式(1)代入式(2)，因项数$A^2\sin^2(2\pi F_u t)$值极小，可忽略，简化得

$$\omega_1(t)\approx\frac{\omega_0 f_1}{\sqrt{K+2(z_0-f_1)A\sin(2\pi F_u t)}} \tag{3}$$

$$K=(z_0-f_1)^2+z_{R0}^2$$

式中：K为光路固有常量，由初始参数决定。

超声透镜出射的动态光束经扫描振镜(仅改变传播方向，不影响光束参数)入射至场镜。由于静态超声透镜焦平面到场镜的距离远大于光束瑞利长度，故光束到场镜时可视为远场入射，按照高斯光束远场聚焦，加工表面(场镜焦平面)的瞬时光斑半径$\omega_{surf}(t)$为

$$\omega_{surf}(t)=\lambda f_2/[\pi\omega_1(t)] \tag{4}$$

结合光斑直径与半径的关系$D(t)=2\omega_{surf}(t)$，将式(3)代入式(4)，最终得到加工表面光斑直径周期性调制公式：

$$D(t)=\frac{2\lambda f_2\sqrt{K+2(z_0-f_1)A\sin(2\pi F_u t)}}{\pi\omega_0 f_1} \tag{5}$$

高斯光束的能量密度遵循径向衰减规律，瞬时能量密度$I(r,t)$的表达式为

$$I(r,t)=\frac{2P}{\pi\omega_{surf}(t)^2}\exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_{surf}(t)^2}\right) \tag{6}$$

其中，P为激光功率，r为光斑径向距离。将$\omega_{surf}(t)$代入式(6)，结合式(5)可得动态能量密度方程：

$$I(r,t)=\frac{2P\omega_0^2 f_1^2}{\lambda^2 f_2^2\left(K+2(z_0-f_1)A\sin(2\pi F_u t)\right)}\cdot$$

$$\exp\left(-\frac{8r^2\omega_0^2 f_1^2}{\lambda^2 f_2^2\left(K+2(z_0-f_1)A\sin(2\pi F_u t)\right)}\right) \tag{7}$$

本研究中，激光脉冲重复频率F=100 kHz，超声透镜振动频率F_u=20 kHz。在一个完整的超声振动周期($T_u=1/F_u$=50 μs)内，包含$N=F/F_u$=5个激光脉冲。每个超声周期中，激光光斑直径和能量密度经历5次周期性调制。这种高频调制使激光与材料相互作用过程中，能量密度在时间域和空间域均呈现动态变化。超声辅助透镜调制通过空间域动态调整光斑尺寸，引起的光斑直径周期性波动使能量密度在“分散-集中”之间动态切换，分散阶段局部能量峰值降低，可抑制等离子体的过量生成；集中阶段有利于提高烧蚀坑底部的能量沉积效率。这种机制不仅有效弱化了等离子体屏蔽效应，还避免了加工效率损失。

3 结果和讨论

3.1 功率对超声辅助透镜激光烧蚀形貌的影响

当激光辐照至材料表面时，碳化硅中的电子通过多光子电离和雪崩电离等模式吸收激光能量，材料表面形貌被破坏，在烧蚀坑产生大量等离子体[24]。生成的等离子体与烧蚀碎屑在反冲压力的作用下迅速喷射到外部，在材料表面形成不同的烧蚀形态。超声辅助飞秒激光烧蚀碳化硅陶瓷的三维形貌整体呈现倒锥形结构，随着激光功率与超声功率的变化，其几何形态(烧蚀直径、深度及锥度)具有显著差异，通过不同功率组合下的形貌对比(图3、图4)，体现了烧蚀特征的演变特点。

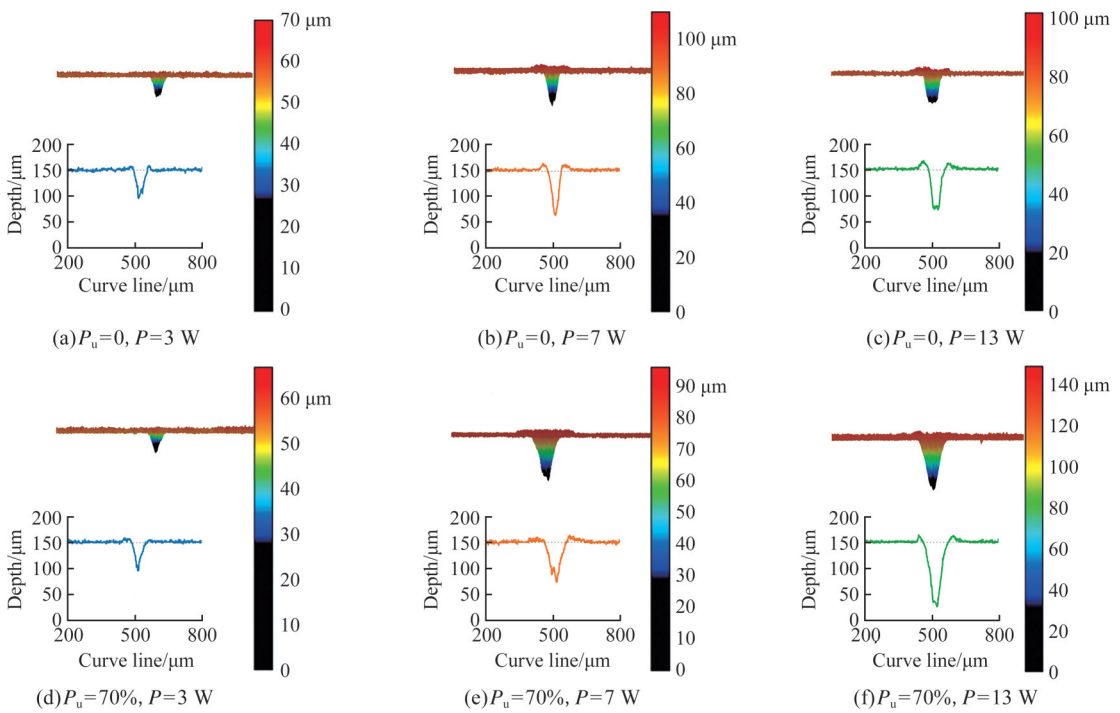


图3 不同激光功率的烧蚀形貌

Fig.3 The ablation morphologies under different laser powers

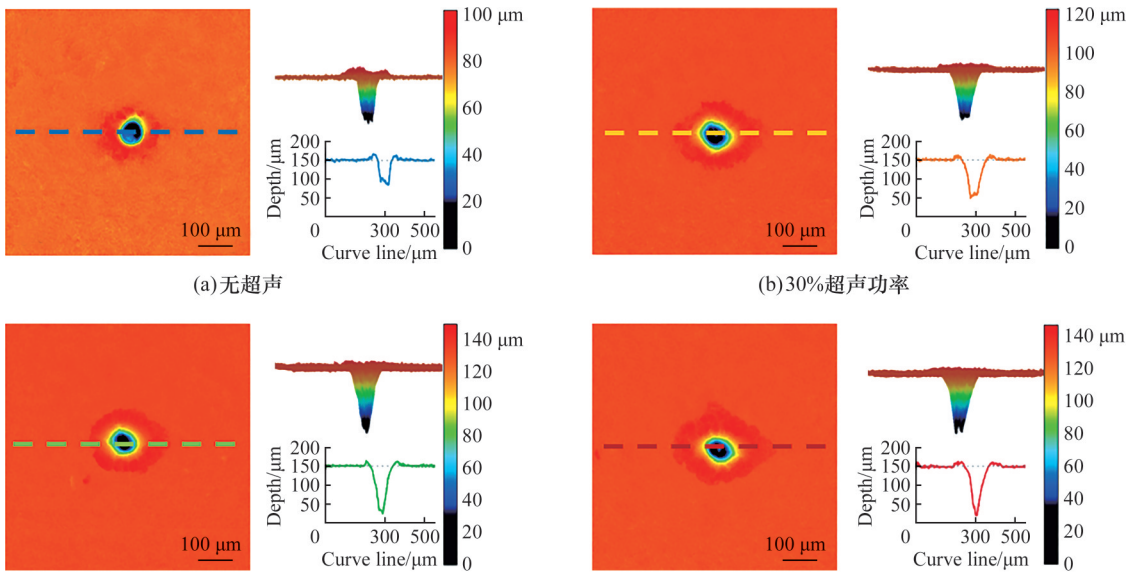


图4　不同超声功率对应的烧蚀形貌和截面轮廓（*P*=15 W）

Fig.4　The ablation morphologies and cross-sectional profiles corresponding to different ultrasonic powers (*P*=15 W)

从激光功率的独立影响来看，低激光功率（3 W）时，有、无超声辅助的烧蚀形貌差异微弱：烧蚀坑体积较小，锥度平缓，表面无明显熔融堆积或功率过度烧蚀痕迹（图3a无超声、图3d为70%超声）。这是因为低功率下激光能量密度仅略高于碳化硅烧蚀阈值，超声振动对能量密度的调制作用不足以显著改变材料去除过程，由此形貌特征趋于一致。中激光功率（7 W）时，烧蚀坑锥度显著增大，且超声辅助下锥度变化更明显（图3b无超声、图3e为70%超声功率）。这是因为低功率下激光能量密度仅70%超声功率）。这是因为中等能量密度下材料气化程度加剧，透镜超声振动通过周期性调制光斑大小与能量密度，使烧蚀坑从表面边缘至内部的气化速率梯度增大，最终导致锥度进一步扩张。高激光功率（13 W）时，超声辅助（70%超声功率）下烧蚀坑直径与深度大幅增加。这是因为在无超声条件下，高激光能量密度烧蚀产生大量等离子体与烧蚀碎屑，而超声辅助抑制了等离子体的产生，改善了等离子屏蔽效应。

在同一激光功率下，超声功率的调控作用进一步细化了烧蚀形貌的差异。以15 W高激光功率为例（图4），随着超声功率从0增至70%：烧蚀深度呈现出增大的趋势。这是因为在较高的激光功率下，单脉冲激光能量密度远高于碳化硅陶瓷的烧蚀阈值，随之产生的等离子屏蔽、热累积效应较为显著，制约了常规激光烧蚀的加工能力；超声辅助透镜通过周期性调制加工光斑直径，实现了激光能量密度的动态变化，从而改善等离子屏蔽、热累积等负面影响，提高了高重频、高能量下的激光烧蚀加工能力，随着超声功率的增大，这一改善效果在一定程度上有所增强。

3.2　功率对超声辅助透镜激光烧蚀深度和直径的影响

图5所示为不同激光功率与超声功率组合下碳化硅陶瓷的烧蚀深度及直径的变化规律。由图5可知，所有超声辅助工况的激光烧蚀直径均大于无超声工况的激光烧蚀直径，且随着超声功率的提高，烧蚀直径呈持续增加的趋势。这一现象的核心原因在于：光路内超声辅助聚焦透镜的周期性振动可动态调控光斑尺寸，超声功率的提高对应透镜振幅的增大，瞬时光斑直径的周期性波动幅度同步提高，扩大了激光与材料的作用面积，最终

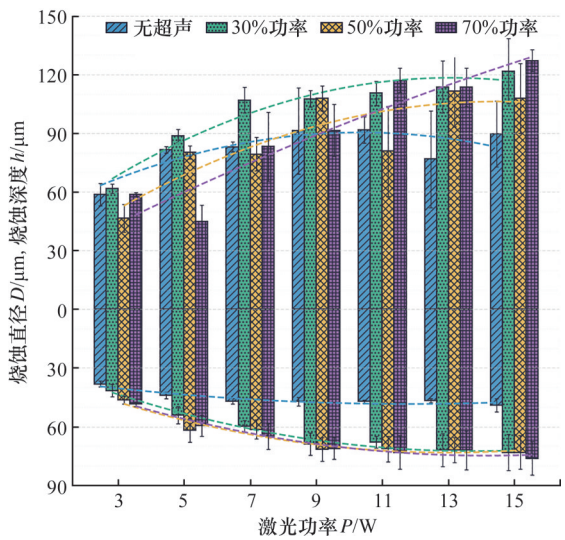


图5　不同激光功率、超声功率对烧蚀深度和直径的影响

Fig.5　Effects of different laser powers and ultrasonic powers on ablation depth and diameter

表现为烧蚀直径的增加。

低激光功率区间(P≤5 W)，当超声功率为50%、70%时，其烧蚀深度低于无超声条件下的烧蚀深度。这是因为随着超声功率的增加，对能量密度的周期性调制波动幅度显著增强，导致瞬时单脉冲能量密度低于材料烧蚀阈值的占比增加，进而降低激光能量在烧蚀深度方向的沉积速率，最终造成烧蚀深度减小。

高激光功率区间(P≥13 W)，引入超声辅助下的烧蚀深度远大于无超声的烧蚀深度，以P_u=70%、P=15 W为例，烧蚀深度达129.46 μm，较无超声条件(83.76 μm)提高54%，超声振动的加工效率得到了显著的提高。核心机制在于光路内超声辅助对激光能量密度的周期性调制，且超声功率越高，对等离子体生成的抑制作用越强，可有效缓解等离子体屏蔽效应与热累积问题，从而提高激光能量在烧蚀坑内部的吸收效率，最终实现加工效率与烧蚀深度的同步提高。

当超声功率为30%时，其烧蚀深度在全激光功率区间均大于无超声工况，这一现象可归因于30%超声功率对应的微振幅高频振动特性：低激光功率下，该微振幅调制可在扩大烧蚀区域的同时避免激光能量密度过度分散；而50%～70%超声功率对应的大振幅会导致能量密度过度分散，反而降低材料去除效率。此外，高激光功率下，30%超声功率仍能维持较高的材料去除率。

图6所示为不同工艺参数对烧蚀深径比的影响。低激光功率区间(3～5 W)：激光能量密度仅略高于碳化硅烧蚀阈值，高超声功率(50%～70%)的大振幅调制会导致烧蚀直径显著扩大。以5 W为例，无超声时烧蚀直径为44.09 μm、深度为81.61 μm；70%超声功率下烧蚀直径增至59.50 μm，深度却降至44.87 μm，单位面积能量密度峰值低于阈值，深径比随之降至0.75；30%超声功率的小幅能量调控可平衡能量密度与加工面积，此时烧蚀深度达88.55 μm、直径为54.09 μm，深径比稳定在1.64附近。

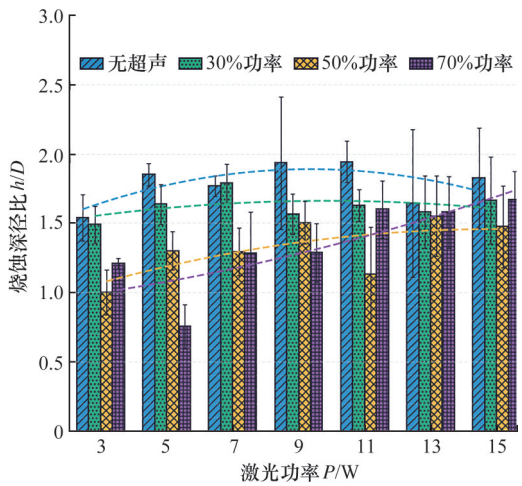


图6 激光功率与超声功率对烧蚀深径比的影响

Fig.6 Effects of laser power and ultrasonic power on ablation aspect ratio

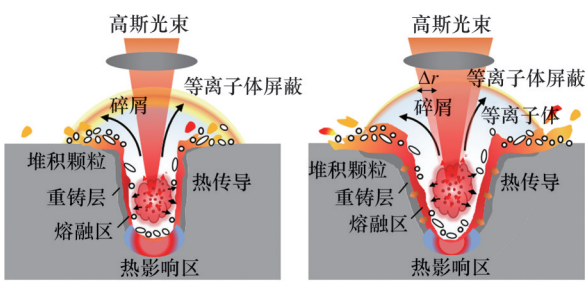
中激光功率区间(7～11 W)：激光能量足以支撑材料气化，能量密度“集中-分散”的动态调控显现协同效应。以7 W为例，无超声时烧蚀深度为83.05 μm、直径为46.93 μm；30%超声功率下，集中阶段高能量密度推动深度增至106.96 μm，分散阶段通过扩大加工光斑直径，使烧蚀直径增大至59.79 μm，深度与直径的增长速率趋于平衡，深径比稳定在1.79。

高激光功率区间(13～15 W)：无超声加工时高能量密度易引发等离子体屏蔽，阻碍激光能量向坑底传递，导致深度增长受限，以15 W为例，无超声工况下烧蚀深度仅89.68 μm、直径49.13 μm；引入70%高超声功率后，通过“分散-集中”双阶段协同调控：分散阶段，扩展光斑范围，减少等离子体的过量生成，以改善屏蔽效应；集中阶段，高能量密度穿透剩余等离子体层强化坑底气化，推动深度增至127.13 μm，虽直径同步扩大至76.14 μm，但深度的增长占主导，深径比维持在1.67的稳定水平。

综上，光斑直径调控遵循“低激光功率小振幅、高激光功率大振幅”的参数适配原则。

3.3 超声辅助激光烧蚀机理分析

图7所示为常规飞秒激光烧蚀和超声辅助飞秒激光烧蚀的机理。飞秒激光加热电子的时间尺度和电子-声子耦合的时间尺度(<1 ps)远小于热扩散的时间尺度(>0.1 s)，在单个激光脉冲的作用下产生热场。当激光重复频率较高时，相邻脉冲之间的时间间隔较短，下一个脉冲在前一个脉冲形成的热场消失之前已经到达材料表面。这



(a)常规飞秒激光烧蚀机理 (b)超声辅助飞秒激光烧蚀机理

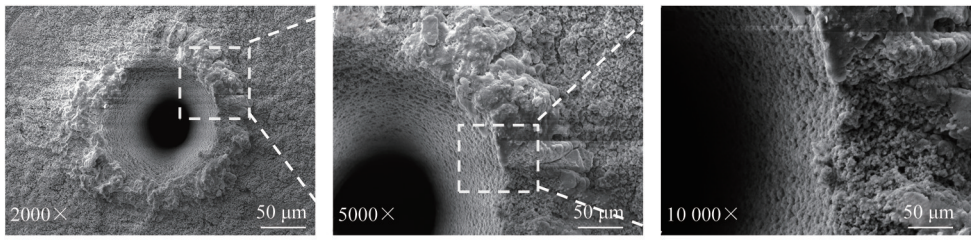
图7 常规与超声辅助飞秒激光烧蚀机理示意图

Fig.7 Schematic diagrams of conventional and ultrasonic-assisted femtosecond laser ablation mechanisms

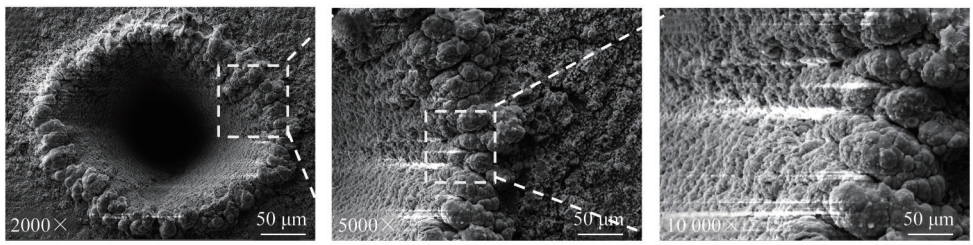
会导致相邻脉冲形成的热场叠加，从而使热量不断积累[25]，烧蚀坑中心的高温会促使材料分解气化，反冲压力驱动混合气体飞溅并产生大量等离子体，这些等离子体对激光能量的吸收与反射，会降低烧蚀坑底部的能量吸收效率，进而限制烧蚀深度的提高。

图7b所示的超声辅助飞秒激光烧蚀，本研究中，激光脉冲重复频率F=100 kHz，超声透镜振动频率F_u=20 kHz。在一个完整的超声振动周期内能够对5个激光脉冲光斑进行调控，进而实现瞬时激光能量密度的周期性重构。在高激光功率工况下，能量密度的“分散-集中”动态切换发挥着关键作用：分散阶段可有效降低局部能量峰值，抑制等离子体的过量生成，改善等离子屏蔽效应；集中阶段则能穿透剩余等离子体层，提高烧蚀坑底部的能量沉积效率。这种动态调控显著改善了等离子体屏蔽效应，减少激光能量的反射与损耗，降低热累积对加工质量的影响，最终使烧蚀坑底部材料得到充分去除，高功率下烧蚀区域对激光能量的有效利用率大幅提高。

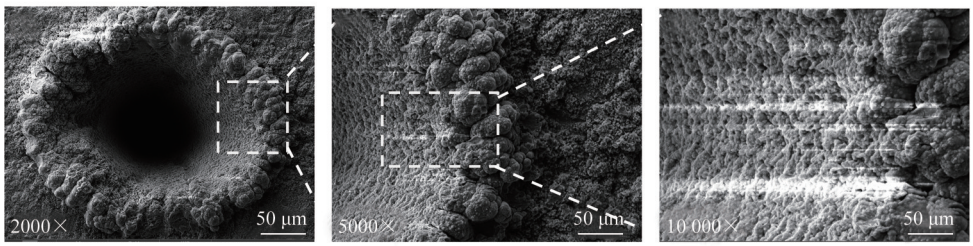
由图8可以看出，烧蚀凹坑内壁分布着熔融材料飞溅和白色沉积颗粒，使得烧蚀表面凹凸不平。烧蚀坑四周由烧蚀产物堆积形成不规则的环状凸起结构，烧蚀坑外围分布着团絮状物质和白色沉积颗粒。在烧蚀坑表面边缘处，出现了由多个白色颗粒组成的絮状团聚物。在激光烧蚀碳化硅陶瓷的过程中，烧蚀区域中心材料温度达到材料分解和升华的温度，使得烧蚀区域内的材料迅速气化生成C、Si、O等元素的混合气体，与烧蚀坑中心的距离增加，材料温度不断降低，不足以使得碳化硅陶瓷分解、气化[26]。烧蚀坑中心的激光能量极高，材料的气化受温度梯度和反冲压力的



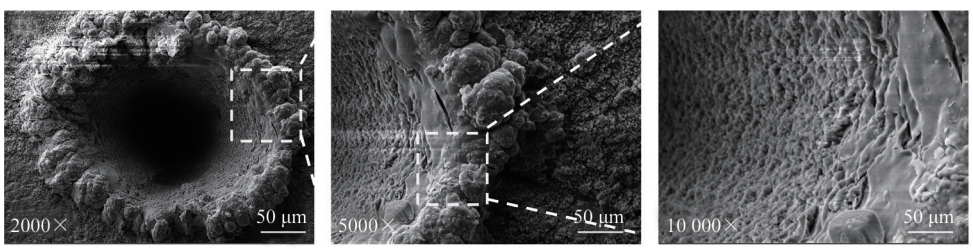
(a)无超声



(b)30%超声功率



(c)50%超声功率



(d)70%超声功率

图8　不同超声功率的加工特征微观形貌（P=15 W）

Fig.8　Microscopic morphology of machining characteristics under different ultrasonic powers (P=15 W)

共同作用，使得混合气体从烧蚀中心向外飞溅。随着远离烧蚀区域中心，混合气体温度降低，逐渐形成微小颗粒。这些颗粒附着在烧蚀坑内壁，在烧蚀坑表面上方的混合气体则冷却凝固呈圆周环绕堆叠在烧蚀坑表面。烧蚀坑中心向外延伸，其内壁附着的纳米颗粒体积逐渐增大和堆积密度逐渐减小；内壁由纳米颗粒组成的絮状物相比材料表面堆积的纳米颗粒更为光滑。在激光烧蚀加工过程中，烧蚀坑中心区域因能量密度累积，使得该区域温度与反冲压力急剧增大，在反冲压力与温度梯度的共同驱动下，混合气体由内向外急剧喷射，产生加速喷射流场。该流场靠近烧蚀坑中心因流体动力学效应导致混合相密度梯度锐减，而随着径向距离的增大，烧蚀产物的输运速率降低，致使附着于加工侧壁的熔融颗粒平均粒径呈现梯度递增趋势。

观察图8a～图8d可发现，引入超声辅助透镜，其烧蚀坑直径明显大于无超声情况下的烧蚀直径；随着超声功率百分比的增大，表面组成絮状团聚物的白色颗粒体积显著增大，且超声条件下的烧蚀坑周围的环绕堆积物显著增加。由图8d右边两幅图观察到内壁光滑的絮状物。这可能是因为超声辅助能够周期性地调控能量密度，随着超声功率占比的增大，平均能量密度降低，使得混合气体冷却凝固时，颗粒有更充足的时间生长和团聚。因此，超声辅助下的纳米颗粒、絮状物体积增大。

图9所示为不同超声功率百分比下烧蚀表面的元素分布，从左往右元素依次是C、O、Si。可以把烧蚀区域分为三大区域：中心的烧蚀去除区、烧蚀边缘区、热影响区。烧蚀去除区呈现黑色，这是因为烧蚀坑具有一定深度，观测设备无法扫描该区域。烧蚀边缘区富含大量的O元素。如图9所示，可以看到烧蚀边缘区氧元素分布密集，但该区域的硅和碳元素与原始表面相比稀疏。这是因为等离子体是在激光烧蚀过程中产生的，其中含有容易与正离子结合的氧离子[27]。可以推测，烧蚀去除区的碳化硅陶瓷在高温高压的作用下分解形成硅和碳。在中心反冲压力的作用下，这两种元素被喷出区域，然后与空气中的氧气反应，产生二氧化硅和二氧化碳等产物。从烧蚀去除区溅射的产物在激光产生的高温高压环境下与空气中的氧离子发生化学反应，生成硅和碳氧化物。氧化物聚集形成的大部分固体物质都落在此区域。在化学反应过程中，物质转化的可能方程如下[24]：

$$SiC(s)=Si(g)+C(g)$$

$$SiC(s)+2O_2(g)=SiO_2(s)+CO_2(g)$$

$$SiC(s)+O_2(g)=SiO(g)+CO(g)$$

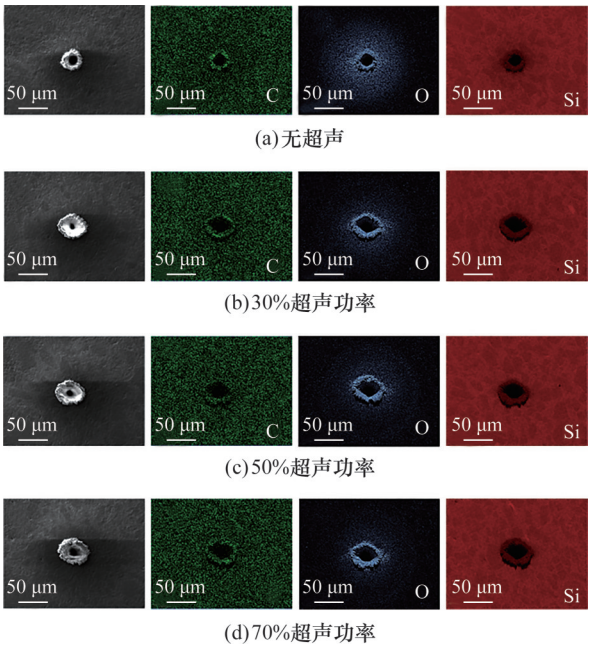


图9 不同超声功率百分比下EDS的C，O，Si元素分布（P=15 W）

Fig.9 EDS elemental distribution of C，O and Si under different ultrasonic power percentages（P=15 W）

图9 O元素的密度分布中，烧蚀边缘外，有一圆形O元素区域，该区域为热影响区。其O元素密度低于烧蚀边缘区O元素密度，但与原始表面相比，其O元素含量有明显增加。这可能是因为激光热堆积的影响，一方面，烧蚀坑周围远离中心区域仍保持一定温度，在此温度下，一些碳化硅也可能与氧气反应形成少量氧化物。另一方面，少量较小的氧化物落在烧蚀影响区，导致氧含量增加。同时，随着距辐射中心距离的增加，温度降级氧化物的含量逐渐降低。如图10所示，超声条件下的烧蚀表面氧元素的含量百分比显著降低，进一步佐证了超声辅助透镜通过周期性调制能量密

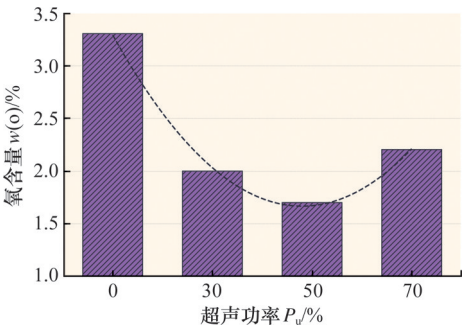


图10 不同超声功率百分比下EDS的O元素含量变化（P=15 W）

Fig.10 Variation of EDS O element content under different ultrasonic power percentages（P=15 W）

度，抑制材料的氧化反应，形成碳氧化物，改善了烧蚀热累积。

4　结 论

1)本文阐明了光路内超声辅助聚焦透镜对激光束的调控机制。超声透镜沿光轴高频振动(20 kHz)可实现加工表面光斑直径与能量密度的周期性动态调控，调制幅度由超声功率定量控制(功率越高，振幅越大)。该机制无需依赖工件共振特性，有效解决了传统工件振动式超声辅助工艺的材料适配难题，同时通过扫描振镜与场镜协同，实现了定点烧蚀、高速扫描切割等多场景加工适配。

2)明确了功率适配规律与加工效率提高效应。低激光功率($P\leqslant5$ W)下，高超声功率(50%～70%)会加剧能量密度波动，导致瞬时能量密度低于烧蚀阈值的占比增加，降低烧蚀深度；高激光功率($P\geqslant13$ W)时，超声辅助可显著抑制等离子体屏蔽与热累积效应，70%超声功率下(15 W激光)烧蚀深度达129.46 μm，较无超声工况增大54%，加工效率大幅提高。30%超声功率为全功率区间最优适配参数，低功率下可避免能量过度分散，高功率下仍能维持高材料去除率。

3)探究了超声辅助对加工质量的改善作用。超声辅助可显著扩大烧蚀坑直径，并延长烧蚀过程中熔融颗粒冷却时间，促进白色颗粒团聚与絮状物的形成；同时，提高超声功率可降低热影响区氧元素含量(从3.3%降至1.7%)，减少氧化缺陷，缩小热影响区范围，提高加工表面完整性。

参考文献：

[1] WILLANDER M, FRIESEL M, WAHAB Q U, et al. Silicon Carbide and Diamond for High Temperature Device Applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2006, 17(1): 1-25.

[2] SAMANT A N, DAHOTRE N B. Laser Machining of Structural Ceramics—a Review[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(6): 969-993.

[3] PUSHPAKARAN B N, SUBBURAJ A S, BAYNE S B, et al. Impact of Silicon Carbide Semiconductor Technology in Photovoltaic Energy System[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 971-989.

[4] BINNER J, PORTER M, BAKER B, et al. Selection, Processing, Properties and Applications of Ultra-high Temperature Ceramic Matrix Composites, UHTCMCs—a Review[J]. International Materials Reviews, 2020, 65(7): 389-444.

[5] PADTURE N P. Advanced Structural Ceramics in Aerospace Propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 804-809.

[6] GU Yan, ZHU Wenhui, LIN Jieqiong, et al. Subsurface Damage in Polishing Process of Silicon Carbide Ceramic [J]. Materials, 2018, 11(4): 506.

[7] XU Gang, DAI Yutang, CUI Jianlei, et al. Simulation and Experiment of Femtosecond Laser Polishing Quartz Material[J]. Integrated Ferroelectrics, 2017, 181(1): 60-69.

[8] MEIJER J. Laser Beam Machining (LBM), State of the Art and New Opportunities[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 2-17.

[9] FAN Zhengjie, PEI Zhiming, SHE Zukun, et al. Dual-directional Ultrasonic Vibration-assisted Femtosecond Laser Drilling of Film Cooling Holes[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 180: 111484.

[10] 姚喆赫，张群莉，王梁，等. 激光复合制造技术研究进展[J]. 电加工与模具，2022(1)：1-13.
YAO Zhehe, ZHANG Qunli, WANG Liang, et al. State-of-the-art Review on Laser Hybrid Manufacturing Technology[J]. Electromachining & Mould, 2022(1): 1-13.

[11] WANG Wenjie, ZOU Ping, XU Jilin, et al. Regulating Mechanisms of Ultrasonic Vibration on the Bulge Formation in Laser Polishing[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 487: 130947.

[12] 姚喆赫，潘成颢，迟一鸣，等. 超声复合激光制造技术研究进展[J]. 中国激光，2024，51(4)：41-59.
YAO Zhehe, PAN Chenghao, CHI Yiming, et al. Research Progress of Ultrasonic Assisted Laser Manufacturing Technology (Invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(4): 41-59.

[13] 王以珅，张咪娜，王大锋，等. 超声振动辅助金属熔化成形技术研究进展[J]. 中国激光，2024，51(24)：2402101.
WANG Yishen, ZHANG Mina, WANG Dafeng, et al. Advances in Ultrasonic Vibration-assisted Metal Melting and Forming Technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(24): 2402101.

[14] XIA Kaibo, REN Naifei, WANG Houxiao, et al. Analysis for Effects of Ultrasonic Power on Ultrasonic Vibration-assisted Single-pulse Laser Drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 279-287.

[15] ZHENG H Y, HUANG H. Ultrasonic Vibration-assisted Femtosecond Laser Machining of Microholes[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(8): N58.

[16] WANG Houxiao, ZHU Sukai, XU Guoxiang, et al. Influence of Ultrasonic Vibration on Percussion Drilling Performance for Millisecond Pulsed Nd:YAG Laser[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 133-139.

[17] TODARO C J, EASTON M A, QIU D, et al. Grain Refinement of Stainless Steel in Ultrasound-assisted Additive Manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101632.

[18] ALAVI S H, HARIMKAR S P. Melt Expulsion during Ultrasonic Vibration-assisted Laser Surface Processing of Austenitic Stainless Steel[J]. Ultrasonics, 2015, 59: 21-30.

[19] ZHENG Qingzhen, MEI Xuesong, JIANG Gedong, et al. Investigation on Ultrasonic Vibration-assisted Femtosecond Laser Polishing of C/SiC Composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(11): 4656-4672.

[20] YANG Zhichao, ZHU Lida, ZHANG Guixiang, et al. Review of Ultrasonic Vibration-assisted Machining in Advanced Materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 156: 103594.

[21] PARK J K, YOON J W, CHO S H. Vibration Assisted Femtosecond Laser Machining on Metal[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(6): 833-837.

(下转第**2048**页)

High Cobalt Molybdenum Stainless Bearing Steel[J]. Iron & Steel, 2018, 53(12): 77-85.
[10] NISHIJIMA, KANAZAWA. Stepwise S-N Curve and Fish-eye Failure in Gigacycle Fatigue[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1999, 22(7): 601-607.
[11] 徐励, 纪炳炎. 缺口小裂纹的疲劳扩展速率[J]. 北京科技大学学报, 1991, 13(6): 604-607.
XU Li, JI Bingyan. On the Short Fatigue Crack Propagation Rate at Notch[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1991, 13(6): 604-607.
[12] 郭军. 高温轴承钢疲劳行为与可靠性增长的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
GUO Jun. Study on Fatigue Behavior and Reliability Growth of High Temperature Bearing Steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
[13] AID A, AMROUCHE A, BOUIADJRA B B, et al. Fatigue Life Prediction under Variable Loading Based on a New Damage Model[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 183-191.
[14] CHABOCHE J L, LESNE P M. A Non-linear Continuous Fatigue Damage Model[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(1): 1-17.
[15] KLECKA M A, SUBHASH G, ARAKERE N K. Microstructure - property Relationships in M50-Nil and P675 Case-hardened Bearing Steels [J]. Tribology Transactions, 2013, 56(6): 1046.
[16] BHATTACHARYA B, ELLINGWOOD B. Continuum Damage Mechanics Analysis of Fatigue Crack Initiation [J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(9): 631-639.
[17] 于宜冰, 贺自强, 贺小帆, 等. 基于损伤力学的轴承钢旋弯疲劳寿命预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(8): 2585-2594.
YU Yibing, HE Ziqiang, HE Xiaofan, et al. Rotating Bending Fatigue Life Prediction of Bearing Steel Based on Damage Mechanics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(8): 2585-2594.
[18] MURAKAMI Y, USUKI H. Quantitative Evaluation of Effects of Non-metallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steels. II: Fatigue Limit Evaluation Based on Statistics for Extreme Values of Inclusion Size[J]. International Journal of Fatigue, 1989, 11(5): 299-307.

（编辑 陈 勇）

作者简介：刘晓宇，男，1992年生，硕士研究生。研究方向为表面工程技术。发表论文1篇。周丽娜*（通信作者），女，1987年生，高级工程师、博士。研究方向为金属热处理及表面改性。发表论文10余篇。E-mail：zhoulina626@126.com。

本文引用格式：
刘晓宇，杨晓峰，周丽娜，等. 高应力下G13Cr4Mo4Ni4V渗碳轴承钢旋转弯曲疲劳行为与损伤模型[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：2038-2048.
LIU Xiaoyu, YANG Xiaofeng, ZHOU Lina, et al. Rotational Fatigue Bending Behavior and Damage Model of G13Cr4Mo4Ni4V Carburized Bearing Steels in High Stress[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 2038-2048.

（上接第2037页）

[22] KANG Di, ZOU Ping, WU Hao, et al. Research on Ultrasonic Vibration-assisted Laser Polishing of the 304 Stainless Steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 403-417.
[23] CHEN Jianbo, CHEN Xiaoxiao, ZHANG Xuanhua, et al. Effect of Laser Incidence Angle on the Femtosecond Laser Ablation Characteristics of Silicon Carbide Ceramics [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172: 107849.
[24] ZHAI Zhaoyang, ZHANG Yanchao, CUI Yahui, et al. Investigations on the Ablation Behavior of C/SiC under Femtosecond Laser[J]. Optik, 2020, 224: 165719.
[25] EATON S, ZHANG Haibin, HERMAN P, et al. Heat Accumulation Effects in Femtosecond Laser-written Waveguides with Variable Repetition Rate[J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4708-4716.
[26] TONG Yonggang, BAI Shuxin, ZHANG Hong, et al. Laser Ablation Behavior and Mechanism of C/SiC Composite [J]. Ceramics International, 2013, 39(6): 6813-6820.
[27] ZHAI Zhaoyang, WEI Chen, ZHANG Yanchao, et al. Investigations on the Oxidation Phenomenon of SiC/SiC Fabricated by High Repetition Frequency Femtosecond Laser [J]. Applied Surface Science, 2020, 502: 144131.

（编辑 陈 勇）

作者简介：林颖亮，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为硬脆难加工材料激光加工。陈晓晓*（通信作者），男，1986年生，研究员、博士研究生导师。研究方向为高效精密智能化激光加工技术与装备、多能量场复合制造理论、工艺及系统等。E-mail：chenxiaoxiao@nimte.ac.cn。

本文引用格式：
林颖亮，陈晓晓，马晨斌，等. 碳化硅陶瓷超声辅助飞秒激光烧蚀机理与工艺研究[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：2029-2037.
LIN Yingliang, CHEN Xiaoxiao, MA Chenbin, et al. Study on Ultrasonic-assisted Femtosecond Laser Ablation Mechanism and Process of Silicon Carbide Ceramics[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 2029-2037.