

doi:10.3788/gzxb20184706.0614003

线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷材料的飞秒激光烧蚀性能

张军战¹, 张媛敏¹, 刘永胜², 张颖¹, 刘乾³

(1 西安建筑科技大学 材料与矿业学院 功能材料研究所, 西安 710055)

(2 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(3 西安中科微精光子制造科技有限公司, 西安 710199)

摘 要: 将不同脉冲数的飞秒激光作用于陶瓷材料表面, 研究了线偏振和圆偏振激光对氧化锆和氧化铝陶瓷材料烧蚀阈值的影响, 利用光学显微镜和扫描电子显微镜分析了烧蚀坑表面形貌, 利用激光扫描共聚焦显微镜确定了烧蚀坑深度. 结果表明: 两种材料在线偏振光下的饱和烧蚀阈值均小于在圆偏振光下的值; 当偏振态相同时, 氧化锆饱和烧蚀阈值小于氧化铝. 随脉冲数增加, 线偏振和圆偏振光下氧化锆烧蚀坑表面结构均由无序向有序发展, 出现了周期性环形波纹结构和纳米孔洞阵列. 与线偏振光相比, 圆偏振光对烧蚀坑深度的作用更明显, 且烧蚀坑表面形貌对能量密度变化比较敏感, 更容易产生周期性结构.

关键词: 飞秒激光; 偏振态; 点烧蚀; 多脉冲; 氧化锆陶瓷; 氧化铝陶瓷

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0614003-9

Femtosecond Laser Ablation Properties of ZrO_2 and Al_2O_3 Ceramics at Linear and Circular Polarized Light

ZHANG Jun-zhan¹, ZHANG Yuan-min¹, LIU Yong-sheng², ZHANG Ying¹, LIU Qian³

(1 Functional Material Laboratory, College of Materials & Mineral Resources, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2 State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3 Xi'an MicroMach Technology Co., Ltd, Xi'an 710199, China)

Abstract: The effects of linearly polarized and circularly polarized femtosecond laser on the ablation threshold of ZrO_2 and Al_2O_3 ceramics at different pulse numbers were investigated. The surface morphology of the ablated craters was analyzed by optical microscopy and scanning electron microscopy and the depth of the ablated craters was measured by laser scanning confocal microscopy. The results show that the saturation ablation threshold of the two materials at linearly polarized light is smaller than that of circularly polarized light. The saturation ablation threshold of ZrO_2 is smaller than that of Al_2O_3 at the same polarization state. With the increase of pulse numbers, the surface structures of ZrO_2 ablation craters develop from disorder to order, and periodic layer annular ripple structures and nanohole arrays are observed at linear and circular polarized light. Compared with linearly polarized light, the effect of circularly polarized light on the depth of ablated craters is stronger, and surface morphology is more sensitive to the change of laser fluence, at the same time, the periodic structures are more obvious.

Key words: Femtosecond laser; Polarization state; Point ablation; Multipulses; Zirconia ceramic;

基金项目: 西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题(No. SKLSP201640)资助

第一作者: 张军战(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为陶瓷材料合成与加工工艺. Email: xajzhang@xauat.edu.cn

通讯作者: 张颖(1972-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为高温陶瓷材料的制备与加工. Email: xayzhang@xauat.edu.cn

收稿日期: 2017-12-29; 录用日期: 2018-04-02

<http://www.photon.ac.cn>

Alumina ceramic

OCIS Codes: 140.3330; 140.3440; 140.7090; 240.5420

0 引言

陶瓷材料具有优异的力学和热学性能,然而,由于其脆性很大,在加工过程中会产生表面微裂纹,严重影响其使用性能,甚至会使材料提前失效^[1].因此,陶瓷材料加工困难,加工成本极高.近年来,陶瓷元件的小型化加工,尤其是特定功能性的陶瓷微结构的高效化、低成本、绿色化加工已成为现代制造及应用领域的重要发展趋势和研究方向^[2].20世纪80年代飞秒激光加工技术出现并快速发展^[3],其加工特点在于加工阈值确定、对材料的热效应和机械损伤极小、能避免等离子体效应、可突破衍射极限,很适合加工坚硬易碎的陶瓷材料^[4-6].

飞秒激光的偏振态是影响材料加工质量的重要因素.不同偏振光下激光诱导产生的结构不一样,线偏振光下材料表面会产生不同方向的周期性条纹结构;圆偏振光下会产生一些纳米级颗粒.造成这些结构现象差异的原因目前还存在争论.对于产生周期性条纹结构的解释机理有:入射光波和表面散射波干涉^[7-8]、表面等离子体波与后续入射激光干涉^[9-10]、二次谐波^[11-12]、非线性自组织动态模型^[13]、表面等离子体波偏振机制^[14];而纳米颗粒的产生主要是由于库仑爆炸^[15].此外,WANG L等^[16]揭示了线偏振光下产生的周期性亚波长波纹结构与深亚波长波纹结构的区别和联系,指出二者之间的结构演变由局部有效激光能量决定.LIU Y等^[17]发现当激光能量远高于烧蚀阈值时,入射激光与烧蚀坑表面反射光干涉,形成了一种周期性环形波纹结构,其不受偏振态影响.相关研究还发现,偏振态对材料的烧蚀阈值影响也很大,理论上认为材料烧蚀阈值差别较大主要原因是多光子电离程度不一样^[18-19].

目前,研究人员对不同偏振光下 CaF_2 、 MgF_2 、 ZnO 、 Al_2O_3 、 AlN 等陶瓷材料的烧蚀形貌进行了针对性研究^[10,12-13,20],但对不同偏振光下陶瓷材料烧蚀阈值的变化缺乏了解,尤其对接近实际加工条件的多脉冲下阈值的变化情况.另一方面,除了激光加工参数,陶瓷材料的结构和性能对其烧蚀特性也会产生影响,因此有必要了解陶瓷材料性能和烧蚀特性之间的关系,这对于实现飞秒激光在陶瓷材料加工领域的广泛应用具有重要意义.

氧化锆(ZrO_2)陶瓷因其高的断裂韧性和耐磨性^[21],常用于生物材料,如牙科植入体和膝关节等^[22];氧化铝(Al_2O_3)陶瓷则是一种使用广泛的陶瓷基板材料,常用于制造高功率射频电子电路基板和多芯片模块等^[23].本文选取 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷,采用不同脉冲数的飞秒激光对两种材料进行点烧蚀实验,研究了线偏振光和圆偏振光下多脉冲的累积效应以及其对烧蚀阈值、烧蚀坑直径、深度和表面形貌的影响,探讨了两种陶瓷材料的带隙、热导率和烧蚀阈值的关系.

1 实验与表征

1.1 实验样品

实验用 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷片的尺寸均为 $30\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,分别在丙酮和乙醇溶液中超声波清洗 30 min,以去除样品表面的污染物.将清洗后的样品放于温度为 100°C 的烘箱中干燥 12 h 备用.图 1 和表 1

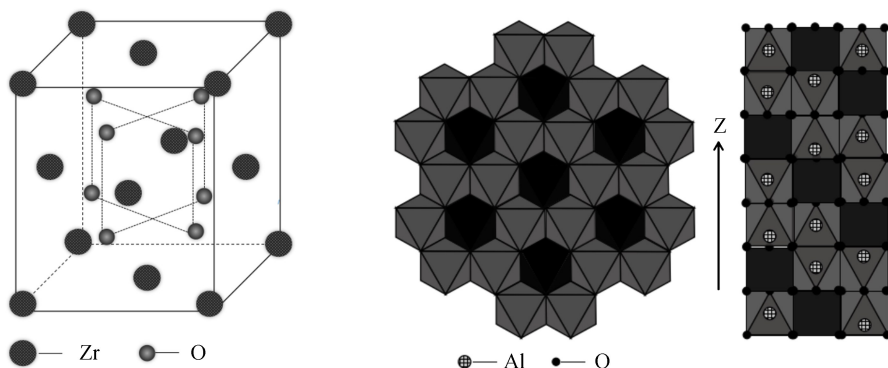


图 1 ZrO_2 和 Al_2O_3 的晶体结构
Fig.1 Crystal structure of ZrO_2 and Al_2O_3

表 1 ZrO_2 和 Al_2O_3 的基本性能Table 1 Fundamental characteristics of ZrO_2 and Al_2O_3

Sample	Maincrystalline phase	Relative density/%	Thermal conductivity/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	Hardness/GPa
ZrO_2 (YSZ)	<i>t</i> (tetragonal)	99.7	4	12.57
Al_2O_3	α	92.5	24	15.54

分别给出了两种陶瓷材料的晶体结构和基本性能.实验中的 ZrO_2 属四方晶系,结构中 Zr^{4+} 和 O^{2-} 所处的位置类似于萤石结构中 Ca^{2+} 和 F 的位置, Zr^{4+} 为 8 个 O^{2-} 所包围. Al_2O_3 属三方晶系,结构中 O^{2-} 作近似六方最紧密堆积, Al^{3+} 占据 2/3 的八面体空隙.

1.2 激光加工系统

实验中使用立陶宛 Light Conversion 公司生产的 Pharos 系列激光器,型号为 GA-2H-3H.加工过程中输出激光束的主要技术参数为:脉冲宽度 230 fs,波长 1 030 nm,重复频率 1 kHz,最大功率 6 W,最大单脉冲能量 1.5 mJ,焦点处光斑直径约为 30 μm ,光束能量符合高斯分布.图 2 为飞秒激光点烧蚀陶瓷材料的实验装置示意图.加工过程中,样品放置在三维移动平台上,保证激光束垂直照射聚焦于样品表面,并在每一次实验后移动到新的位置.采用功率计来测量激光功率,利用 1/4 波片可将线偏振光转换为圆偏振光.

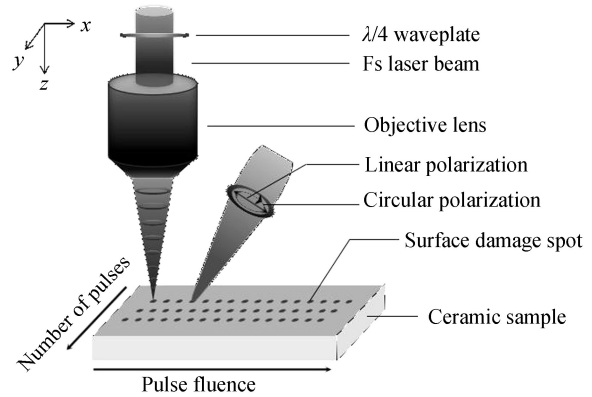


图 2 飞秒激光点烧蚀陶瓷材料示意图

Fig.2 Schematic diagram for femtosecond laserpoint ablation on the surface of ceramic

1.3 实验表征

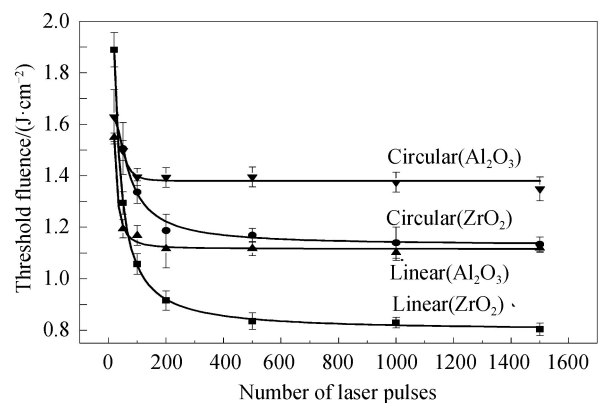
用光学显微镜 (Optical Microscope, OM; BX61) 测量烧蚀坑直径;用激光扫描共聚焦显微镜 (Laser Scanning Confocal Microscope, LSCM; OLS4000) 观察烧蚀坑三维立体形貌并测量烧蚀坑深度;用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM; JSM6390A) 观察烧蚀坑表面形貌.

2 结果与讨论

2.1 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 材料的烧蚀阈值

材料烧蚀阈值是指在激光功率密度辐照条件下,材料发生不可逆损伤,晶格变得不稳定时单层分子发生质量迁移所需的激光功率密度^[24-25].实验分别采用线偏振和圆偏振飞秒激光,分别以 20、50、100、200、500、1 000、1 500 个脉冲作用在 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷表面,利用光学显微镜测量烧蚀区域直径,根据烧蚀直径与脉冲强度的函数关系,计算出材料在不同脉冲数下的烧蚀阈值^[25]. ZrO_2 和 Al_2O_3 在线偏振光和圆偏振光下多脉冲烧蚀阈值与脉冲个数之间的关系如图 3.

从图 3 可以看出,两种陶瓷材料在线偏振光和圆偏振光下烧蚀阈值随脉冲个数的变化均呈现出相同的规律.当脉冲数较少时,随着脉冲数增加,烧蚀阈值迅速减小,超过 200 个脉冲时,这种变化逐渐趋于平缓并最终稳定于某个固定的值(饱和阈值).若以低于这个最小能量的脉冲激光去辐射材料表面,则材料表面不会产生任何损伤.当飞秒激光作用于材料时,随着脉冲数不断增加,激光辐射区域内材料会持续不断地产生缺陷,例如弗伦克尔电子-空穴对、色心等^[26],作用初期缺陷浓度会随着脉冲数的增加而急剧增大;后

图 3 ZrO_2 和 Al_2O_3 的烧蚀阈值随脉冲个数的变化规律Fig.3 Variation of ablation threshold of ZrO_2 and Al_2O_3 with the number of pulses

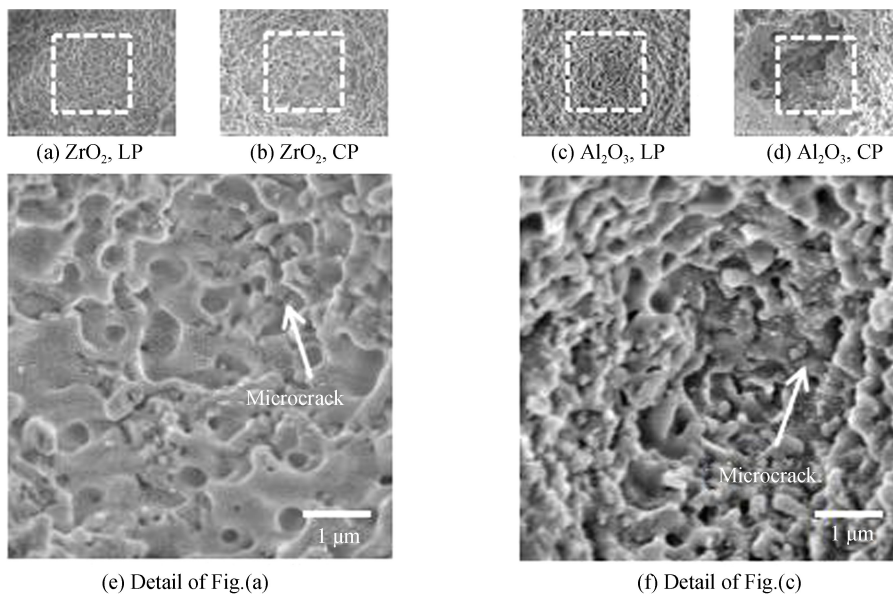
期,当脉冲数目继续增加时,浓度增速减缓并最终稳定.缺陷浓度的增加会导致激光和材料之间耦合程度加深,使材料烧蚀位置出现缺陷中心以及化学改性,即产生了累积效应^[27],这种效应使得激光能量更容易传递给材料,引起材料的损伤^[28],因此会产生如图3所示的烧蚀阈值随脉冲数变化的规律.经计算: ZrO_2 饱和烧蚀阈值为 $0.82 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ (线偏振光)和 $1.14 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ (圆偏振光), Al_2O_3 为 $1.11 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ (线偏振光)和 $1.37 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ (圆偏振光).

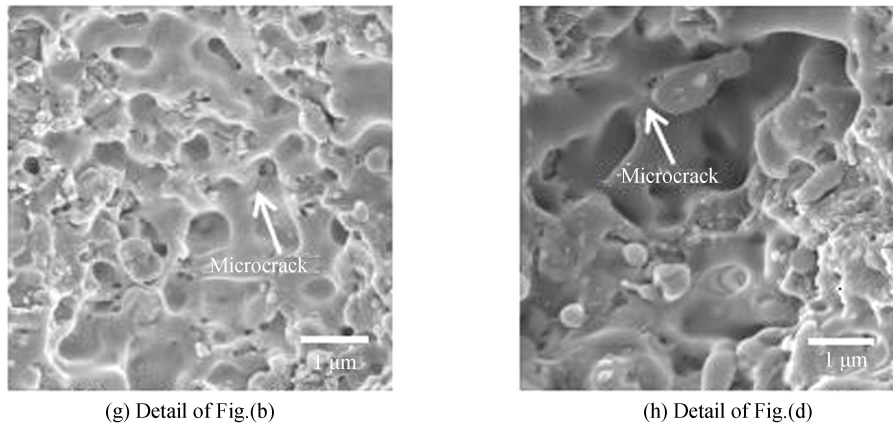
从图3中还可以看出,相同激光条件下,两种陶瓷材料在线偏振光下的饱和烧蚀阈值均比圆偏振光下低.这是因为高能量的飞秒激光作用于固体材料时,价带束缚电子漂移距离变得比原子间距离大,电子很可能与邻近原子发生散射.由于激光在固体内部频繁地散射,电子自身的周期运动被打乱,电子靠近原子核吸收光子的能力有所减弱,从而在激光的作用下材料在导带中形成一个自洽的电场^[29],价电子在这个电场中产生相移现象,这种相移现象导致吸收光子能量的自由电子振动方向发生改变.对于圆偏振光,激光电场矢量是旋转的,会产生相移现象,因此在特定方向上吸收多光子产生电离的能量减少.而对于线偏振光,不会出现相移现象.因为其电场矢量是非旋转的,电子角动量守恒,尤其是对于四阶或更高阶多光子吸收,所以导致线偏振光下材料的电离率大于圆偏振光^[20,30-31],线偏振光下材料更容易电离出自由电子而产生烧蚀.因此,线偏振光下两种陶瓷材料的饱和烧蚀阈值均比圆偏振光低.

对比图3中 ZrO_2 和 Al_2O_3 两种材料的烧蚀阈值,发现不论在线偏振光下还是圆偏振光下, ZrO_2 的饱和烧蚀阈值均比 Al_2O_3 低.从多光子吸收角度来分析,由于 ZrO_2 带隙 E_g 为 $5.5 \sim 5.8 \text{ eV}$ ^[32], Al_2O_3 带隙 E_g 为 8.5 eV ^[33],对于波长为 1030 nm 的飞秒激光而言,单个光子能量只有 1.2 eV ,必然会发生多光子吸收. ZrO_2 中的价带束缚电子至少吸收4光子能量才能激发到导带进而电离出自由电子,而 Al_2O_3 中的价带电子则要吸收7光子能量,即 ZrO_2 吸收光子数比 Al_2O_3 少.因此,相比于 Al_2O_3 , ZrO_2 材料更容易产生表面损伤.此外, ZrO_2 的热导率远低于 Al_2O_3 (见表1)也有可能是导致 ZrO_2 饱和烧蚀阈值低于 Al_2O_3 的原因之一.飞秒激光点烧蚀过程中,自由电子与晶格热交换时间在皮秒量级^[34],晶格热弛豫时间在微秒量级^[35],均远远大于飞秒激光的持续时间.但是相关文献中也报道了飞秒激光加工材料过程中热效应的存在^[36].本实验中脉冲宽度为 230 fs ,接近自由电子与晶格热交换时间.图4是脉冲数为50, ZrO_2 和 Al_2O_3 的实际烧蚀能量密度(φ_0)分别为 $1.94 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $2.08 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 烧蚀坑的 SEM 照片,其中图4(e)、(g)、(f)、(h)是图4(a)、(b)、(c)、(d)虚线框区域的放大照片.由图4明显看出二者在线偏振光和圆偏振光下均出现微裂纹, ZrO_2 微裂纹条数约为 $12 \sim 15$ 条(线偏振光)和 $15 \sim 20$ 条(圆偏振光); Al_2O_3 约为 $4 \sim 6$ 条(线偏振光)和 $7 \sim 10$ 条(圆偏振光).这表明 ZrO_2 产生的微裂纹明显多于 Al_2O_3 .为了消除材料烧蚀阈值的差异对微裂纹产生的影响,引入了相对能量密度 φ_r ,即

$$\varphi_r = \frac{\varphi_0}{F_{\text{th},N}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, φ_0 为实际烧蚀能量密度, $F_{\text{th},N}$ 为该材料对应脉冲数下的烧蚀阈值.

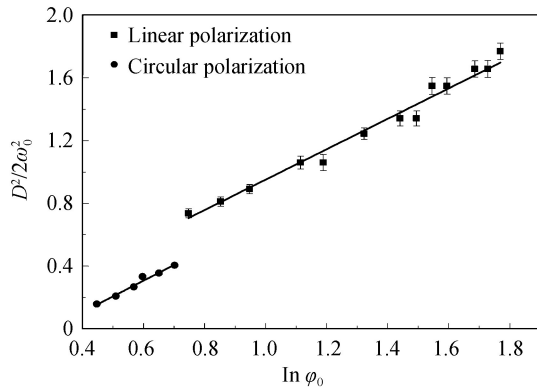
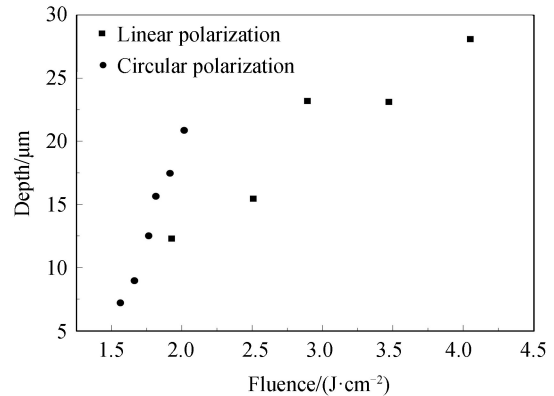


图4 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 烧蚀坑的表面微裂纹Fig.4 Surface microcracks of ZrO_2 and Al_2O_3 ablated craters at linear and circular polarized light

计算可得:在 50 个脉冲下,图 4 中线偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 的相对能量密度分别为 150% 和 174%;圆偏振光下分别为 129% 和 161%。线偏振光和圆偏振光下激光辐射 Al_2O_3 表面的相对能量密度均大于 ZrO_2 ,但却观察到 ZrO_2 烧蚀坑底部的微裂纹明显多于 Al_2O_3 ,说明这与材料自身的物理性质有关.分析认为这应该这是由于 ZrO_2 的热导率远低于 Al_2O_3 ,当激光能量传递到 ZrO_2 材料时,热量无法有效传递出去,导致激光作用区存在相对较高的温度和较大的温度梯度,从而在局部热应力的作用下产生较多的微裂纹.而 Al_2O_3 能够更有效地将激光能量传递出去,从而减少了激光对材料表面带来的损伤,使得其阈值相对较高。

2.2 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 材料的烧蚀坑形态变化

根据 ZrO_2 在线偏振光和圆偏振光下的烧蚀数据,考虑到激光束腰半径的变化,绘制了 $D^2/2\omega_0^2$ 随 $\ln\phi_0$ 的变化曲线, D 为烧蚀坑直径, ω_0 为束腰半径,如图 5 所示。

图5 ZrO_2 烧蚀坑 $D^2/2\omega_0^2$ 随 $\ln\phi_0$ 的变化规律Fig.5 Relationship between $D^2/2\omega_0^2$ of ZrO_2 ablation craters and $\ln\phi_0$ 图6 ZrO_2 烧蚀坑深度随能量密度的变化规律Fig.6 Relationship between depth of ZrO_2 ablation craters and laser fluence

由图 5 可以看出,线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑 $D^2/2\omega_0^2$ 随 $\ln\phi_0$ 增加而增大,且线偏振光下 $D^2/2\omega_0^2$ 大于圆偏振光.由于线偏振光下材料的电离率比圆偏振光下大,在其他加工参数相同的条件下,线偏振光下材料更容易产生烧蚀现象,使得 $D^2/2\omega_0^2$ 增大.图 6 表征了线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑深度随激光能量密度的变化情况.由图可以看出,线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑深度随能量密度增加而增大.与线偏振光相比, ZrO_2 在圆偏振光下烧蚀坑深度增加较快,受能量密度的影响较大.2.1 节中提到,飞秒激光烧蚀 ZrO_2 过程中原子吸收多光子能量电离出大量自由电子,进而形成高温、高压的等离子体,随着等离子体密度增加,其对激光能量的吸收将变得十分充分,使得晶格温度快速升高形成过热液体,并最终在气化反冲力的作用下喷射出去,导致激光辐射区域材料去除,深度增加^[37].由图 5 可知线偏振光下垂直于激光束方向上,价带束缚电子通过多光子电离的能量较多,当能量输入一定时,在平行激光束方向上材料对能量的吸收

减少,使得价带束缚电子电离数减少,最终使得线偏振光下烧蚀坑深度比圆偏振光下小.因此,在实际应用飞秒激光加工微孔的过程中,与线偏振光相比,圆偏振光下应该具有更高的精度和效率.

2.3 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑表面形貌变化

当激光能量密度为 $2.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 脉冲数 N 为 50, 100, 200, 500, 1 500 时, 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑的 SEM 照片如图 7. 由图可以看出, 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑表面结构的变化随脉冲数增加均呈现相同趋势, 即由无序向有序发展. 当脉冲数为 50 个时, 线偏振光和圆偏振光下烧蚀坑底部均出现了随机分布的微裂纹、不均匀的微米颗粒以及孔洞结构如图 7(a) 和 (f); 当脉冲数为 100 个时, 烧蚀坑表面依旧分布一些不均匀的微米或纳米级颗粒以及孔洞结构, 但是颗粒和孔洞的尺寸均有所减小如图 7(b) 和 (g); 当脉冲数为 200 个时, 烧蚀坑壁上颗粒变得更小, 形成一些密实的纳米颗粒, 表面出现周期性环形波纹结构和明显的熔化现象. 相比线偏振光, 环形波纹结构在圆偏振光下更明显如图 7(c) 和 (h); 当脉冲数为 500 个时, 波纹表面密实的纳米颗粒有定向发展的趋势, 依稀可见一些纳米孔洞阵列结构如图 7(d) 和 (i); 当脉冲数为 1500 个时, 在线偏振光和圆偏振光下烧蚀坑壁上均观察到明显的周期性环形波纹结构, 且沿着底部向上周期性逐渐减弱. 同时, 在这种波纹结构表面均观察到明显的纳米孔洞阵列如图 7(e) 和 (j). 由此可见, 在 200 个脉冲以前, 这种环形表面结构基本形成, 当脉冲数大于 200 时, 随着脉冲数的增加, 这种环形波纹结构进一步得到完善. LIU Y 等的飞秒激光点烧蚀实验也得到类似形貌, 他认为周期性环形波纹结构是入射的激光场与烧蚀坑表面的反射光干涉造成的, 与通常激光诱导周期性表面结构的形成机理不同, 其不受偏振态影响, 并用如图 8 所示的模型对这种周期性环形波纹结构作了解释^[17]. 图中尖角为 φ 的三角形表示烧蚀坑界面, 在 o-e-c 区域里, 波矢量为 \mathbf{k}_2 的烧蚀坑上表面的反射激光场与波矢量为 \mathbf{k}_0 的入射激光场发生干涉, 导致周期性激光强度垂直于 $\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_2$, 因此产生了环形波纹结构. 此外, 对于这种波纹结构表面观察到的纳米孔洞阵列, 认为是由于后续激光入射到层状环形波纹表面, 造成其表面电场的再分配. 相关研究表明, 原始波纹的长度和深度对纳米孔洞阵列的形成至关重要^[38]. 因此, 当其它条件相同时, 飞秒激光在较多的脉冲数下能够诱导产生层状环形波纹结构和纳米孔洞阵列.

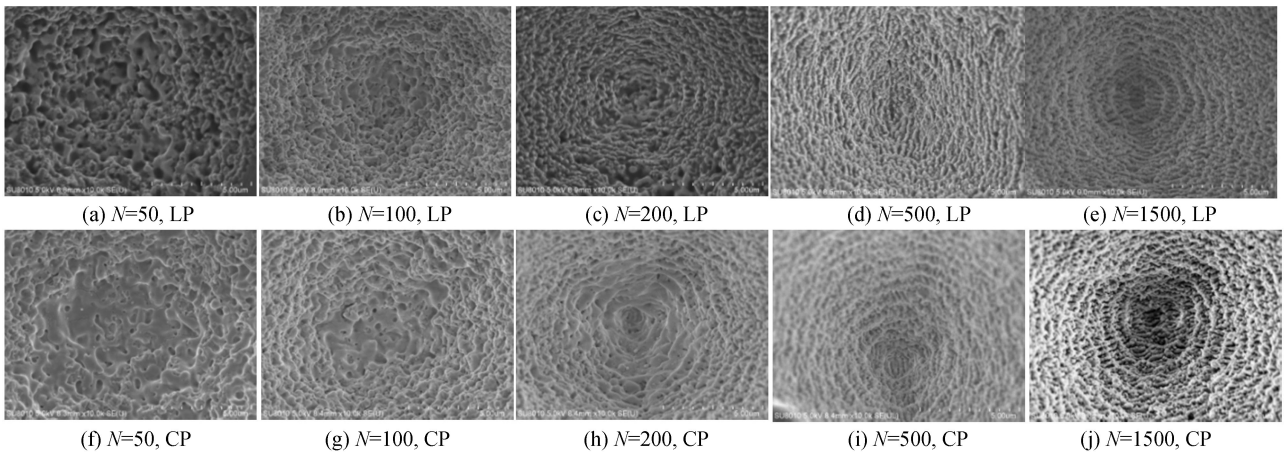


图 7 不同脉冲数下线偏振和圆偏振激光烧蚀 ZrO_2 表面形貌 ($\varphi_0 = 2.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig.7 Surface morphology of ZrO_2 ablated by linear and circular polarized laser at different pulse numbers ($\varphi_0 = 2.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$)

当脉冲数为 500, 能量密度为 $1.51 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑的 SEM 照片如图 9. 与图 7(d)、(i) 比较, 可以看出, 能量密度由 $1.51 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加至 $2.19 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 线偏振光和圆偏振光下均更容易观察到周期性环形波纹结构, 尤其是对于圆偏振光, 这种周期性结构更加理想. 这说明与线偏振光相比, 圆偏振光下烧蚀坑表面的周期结构对能量密度变化比较敏感.

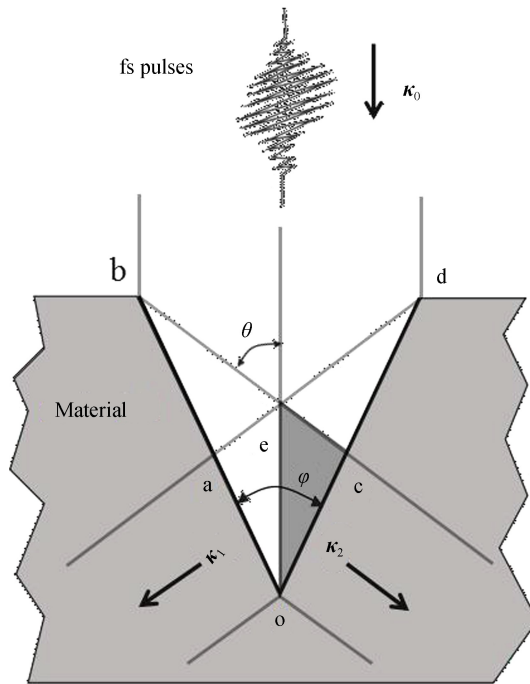


图 8 周期性环状波纹结构形成模型示意图

Fig.8 Schematic of the model for the formation of periodic annular surface structure

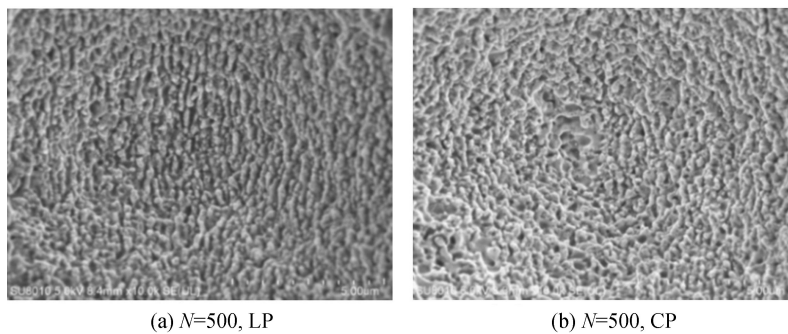


图 9 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 烧蚀坑的 SEM 照片 ($\varphi_0 = 1.51 J \cdot cm^{-2}$)

Fig.9 SEM images of ZrO_2 ablated craters at linear and circular polarized light ($\varphi_0 = 1.51 J \cdot cm^{-2}$)

3 结论

本文以 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷材料为研究对象,研究了多脉冲下线偏振光和圆偏振光对其烧蚀性能的影响.研究表明:

1)线偏振光和圆偏振光下,随着脉冲数增加, ZrO_2 和 Al_2O_3 的烧蚀阈值均逐渐减小并最终稳定于某个固定值. ZrO_2 饱和烧蚀阈值为 $0.82 J \cdot cm^{-2}$ (线偏振光)和 $1.14 J \cdot cm^{-2}$ (圆偏振光), Al_2O_3 为 $1.11 J \cdot cm^{-2}$ (线偏振光)和 $1.37 J \cdot cm^{-2}$ (圆偏振光).

2)线偏振光对材料表面烧蚀区域的影响较大,而圆偏振光对烧蚀坑深度影响比较大.

3)线偏振光和圆偏振光下,随脉冲数增加 ZrO_2 烧蚀坑结构均由无序向有序发展.在较多的脉冲数下, ZrO_2 烧蚀坑均出现明显的周期性环形波纹结构和纳米孔洞阵列.与线偏振光相比,圆偏振光下烧蚀坑表面的周期结构对能量密度变化比较敏感.

参考文献

- [1] ZHANG Jun-zhan, WANG Yu-qian, ZHANG Ying, *et al.* Effect of feeding speed on micro-hole drilling in TiC ceramic by femtosecond laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1565-1571.
张军战,王禹茜,张颖,等.飞秒激光进给速度对 TiC 陶瓷微孔加工的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(6): 1565-1571.
- [2] JIANG Tao. Research on ultrashort laser texturing of functionality micro-structured surfaces[D]. Harbin: Harbin Institute

- of Technology, 2012: 1-4.
- 姜涛. 功能性微结构表面的超短脉冲激光加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 1-4.
- [3] XIAO Rong-shi, ZHANG Huan-zhen, HUANG Ting. Recent progress in femtosecond pulsed laser processing research [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **52**(17): 176-186
肖荣诗, 张寰臻, 黄婷. 飞秒激光加工最新研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, **52**(17): 176-186.
- [4] XIA Bo, JIANG Lan, WANG Su-mei, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(2): 1-12.
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, **40**(2): 1-12.
- [5] SERBIN J, OVSIANIKOV A, CHICHKOV B. Fabrication of woodpile structures by two-photon polymerization and investigation of their optical properties[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(21): 5221.
- [6] GITTARD S D, NARAYAN R J. Laser direct writing of micro- and nano-scale medical devices[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2010, **7**(3): 343-356.
- [7] LI Chen, CHENG Guang-hua. Linearly, radially and azimuthally polarized femtosecond laser induced periodic surface structures on amorphous alloy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8): 0832001.
李晨, 程光华. 线性、径向和环向偏振飞秒激光诱导非晶合金周期性表面结构[J]. 光子学报, 2016, **45**(8): 0832001.
- [8] ZHAO Quan-zhong, MALZER S, WANG Li-jun. Formation of subwavelength periodic structures on tungsten induced by ultrashort laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(13): 1932.
- [9] REIF J, VARLAMOVA O, COSTACHE F. Femtosecond laser induced nanostructure formation: self-organization control parameters[J]. *Applied Physics A*, 2008, **92**(4): 1019-1024.
- [10] ZHANG Cheng-yun, MAN Wen-qing, JIE Hai, et al. Study on micro-nano structure and wetting characteristics of Al₂O₃ ceramic induced by femtosecond laser[J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2017, (4): 22-26.
张成云, 满文庆, 揭海, 等. 飞秒激光诱导 Al₂O₃ 陶瓷表面微纳结构及润湿特性研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2017, (4): 22-26.
- [11] RAN Ling-ling, GUO Zhong-yi, QU Shi-liang. Self-organized periodic surface structures on ZnO induced by femtosecond laser[J]. *Applied Physics A*, 2010, **100**(2): 517-521.
- [12] DUFFT D, ROSENFELD A, DAS S K, et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: A comparative study on ZnO[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(3): 3688.
- [13] REIF J, VARLAMOVA O, UHLIG S, et al. On the physics of self-organized nanostructure formation upon femtosecond laser ablation[J]. *Applied Physics A*, 2014, **117**(1): 179-184.
- [14] WANG Lei, CHEN Qi-dai, CAO Xiao-wen, et al. Plasmonic nano-printing: large-area nanoscale energy deposition for efficient surface texturing[J]. *Light Science & Applications*, 2017, **6**(12): e17112.
- [15] ZHONG Min-jian, GUO Guang-lei, YANG Jun-yi, et al. Femtosecond pulse laser-induced self-organized nanostructures on the surface of ZnO crystal[J]. *Chinese Physics B*, 2007, **89**(3): 707-709.
- [16] WANG Lei, XU Bin-bin, CAO Xiao-wen, et al. Competition between subwavelength and deep-subwavelength structures ablated by ultrashort laser pulses[J]. *Optica*, 2017, **4**(6): 637-642.
- [17] LIU Yi, BRELET Y, HE Zhan-bing, et al. Laser-induced periodic annular surface structures on fused silica surface[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(25): 3688.
- [18] WU Dong-jiang, YAO Long-jiang, MA Guang-yi, et al. Influence of polarization state on the surface quality of quartz glass processed by femtosecond laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(2): 31-37.
吴东江, 姚龙元, 马广义, 等. 偏振态对飞秒激光加工石英玻璃表面质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**(2): 31-37.
- [19] KIM S H, SOHN I B, JEONG S. Parallel ripple formation during femtosecond laser grooving of ceramic[J]. *Applied Physics A*, 2011, **103**(4): 1053-1057.
- [20] TEMNOV V V, SOKOLOWSKI T K, ZHOU P, et al. Multiphoton ionization in dielectrics: Competition of circular and linear polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(23): 237403.
- [21] ZHANG Tian-yu, KONG Bin, CHEN Min-sun, et al. Anti-laser performance test of aluminum alloy plates reinforced by ceramic coating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(6): 0606002.
张天宇, 孔斌, 陈敏孙, 等. 陶瓷涂层加固铝合金薄板的抗激光性能测试[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(6): 0606002.
- [22] MANICONE P F, ROSSI I P, RAFFAELLI L. An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications[J]. *Journal of Dentistry*, 2007, **35**(11): 819-826.
- [23] PERRIE W, RUSHTON A, GILL M, et al. Characterization of ultrafast microstructuring of alumina (Al₂O₃) [C]. SPIE, 2005, **5714**: 43-52.
- [24] XIN Jian-ting, TAN Fang, LUO Guo-qiang, et al. Ablation effect of multi pulse femtosecond laser on germanium materials[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(7): 1753-1757.
辛建婷, 谭放, 罗国强, 等. 多脉冲飞秒激光对锗材料的烧蚀效应[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(7): 1753-1757.

- [25] ZHAO Qing-liang, JIANG Tao, DONG Zhi-wei, *et al.* Ablation threshold and material removal mechanisms of SiC processed by femtosecond laser[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(21): 173-177.
赵清亮, 姜涛, 董志伟, 等. 飞秒激光加工 SiC 的烧蚀阈值及材料去除机理[J]. 机械工程学报, 2010, **46**(21): 173-177.
- [26] LONZAGA J B, AVANESYAN S M, LANGFORD S C, *et al.* Color center formation in soda-lime glass with femtosecond laser pulses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(7): 4332-4340.
- [27] DAS D K, MCDONALD J P, YALISOVE S M, *et al.* Femtosecond pulsed laser damage characteristics of 7% Y_2O_3 - ZrO_2 thermal barrier coating[J]. *Applied Physics A*, 2008, **91**(3): 421-428.
- [28] GÓMEZ D, GOENAGA I. On the incubation effect on two thermoplastics when irradiated with ultrashort laser pulses: Broadening effects when machining microchannels[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**(4): 2230-2236.
- [29] BULGAKOVA N M, STOIAN R, ROSENFELD A, *et al.* A general continuum approach to describe fast electronic transport in pulsed laser irradiated materials: The problem of Coulomb explosion[J]. *Applied Physics A*, 2005, **81**(2): 345-356.
- [30] DU D, LIU X, MOUROU G. Reduction of multi-photon ionization in dielectrics due to collisions[J]. *Applied Physics B*, 1996, **63**(6): 617-621.
- [31] JOGLEKAR A P, LIU H, SPOONER G J, *et al.* A study of the deterministic character of optical damage by femtosecond laser pulses and applications to nanomachining[J]. *Applied Physics B*, 2003, **77**(1): 25-30.
- [32] HEIROTH S, KOCH J, LIPPERT T, *et al.* Laser ablation characteristics of yttria-doped zirconia in the nanosecond and femtosecond regimes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(1): 1527.
- [33] LI Xiao-xi, JIA Tian-qing, FENG Dong-hai, *et al.* Ablation mechanism of alumina under ultrashort pulsed laser irradiation[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2004, **53**(7): 2154-2158.
李晓溪, 贾天卿, 冯东海, 等. 超短脉冲激光照射下氧化铝的烧蚀机理[J]. 物理学报, 2004, **53**(7): 2154-2158.
- [34] BEATA Z, NIKITA M, VICTOR T, *et al.* Time-resolved observation of band-gap shrinking and electron-lattice thermalization within X-ray excited gallium arsenide[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(3): 1304-1310.
- [35] HIRAO K, MIURA K, SAKAKURA M, *et al.* Heating and rapid cooling of bulk glass after photoexcitation by a focused femtosecond laser pulse[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 16800.
- [36] KIM S H, SOHN I B, JEONG S. Ablation characteristics of aluminum oxide and nitride ceramics during femtosecond laser micromachining[J]. *Applied Surface Science*, 2009, **255**(24): 9717-9720.
- [37] VANTHANH K, YUNCAN M, JINHAI S. Fabrication of through holes in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **289**: 529-532.
- [38] ZHANG Cheng-yun, YAO Jiang-wu, LAN Sheng, *et al.* Effects of plasma confinement on the femtosecond laser ablation of silicon[J]. *Optics Communications*, 2013, **308**(11): 54-63.

Foundation item: The Fund of State Key Laboratory of Solidification Processing in NWPU (No. SKLSP201640)

引用格式: ZHANG Jun-zhan, ZHANG Yuan-min, LIU Yong-sheng, *et al.* Femtosecond Laser Ablation Properties of ZrO_2 and Al_2O_3 Ceramics at Linear and Circular Polarized Light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0614003

张军战, 张媛敏, 刘永胜, 等. 线偏振光和圆偏振光下 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷材料的飞秒激光烧蚀性能[J]. 光子学报, 2018, **47**(6): 0614003