

# 532 nm 激光铣削 Y-TZP 陶瓷实验研究

李 健 季凌飞 胡 炎 蒋毅坚

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

**摘要** 采用波长为 532 nm 的短脉冲激光(脉宽 6 ns)对 Y-TZP 陶瓷进行铣削实验研究。探究了单次刻蚀槽宽与功率的关系,分析脉冲数与材料阈值的关系,确定材料阈值。并且探究了铣削量及质量随激光工艺参数的变化规律,确定最优工艺参数,进一步进行了脉冲激光铣削微米级二维结构的工艺实验。研究结果表明槽宽的平方与脉冲峰值功率的对数呈线性关系,根据此关系式计算出光斑半径与实际测量值相符。材料阈值随脉冲数增加而降低,在扫描速度、功率和重复频率的最优匹配下,可实现最大铣削量为 1.35 mm<sup>3</sup>/min。在优化工艺参数下,完成直径 500 μm 的盲孔和宽 200 μm、高 100 μm 的台阶方槽二维结构无裂纹铣削加工,结构边缘无残渣堆积,表面粗糙度为 3.746 μm。

**关键词** 激光器; 二维铣削; 阈值; 累积效应; Y-TZP 陶瓷

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0806002

## Experimental Study on Milling of Y-TZP Ceramic by 532 nm Laser

Li Jian Ji Lingfei Hu Yan Jiang Yijian

*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** A short pulse(6 ns)laser with wavelength of 532 nm is employed to mill Y-TZP ceramic. The relationship between power and groove width by single-pass machining is explored, and the relationship between threshold and pulse number is analyzed to make sure the threshold of Y-TZP. Also the variation of removal rate and quality with different parameters is analyzed to determine the optimal process parameters further. the micron-sized two-dimension structure is conducted further. The results show that the square of groove width is proportional to logarithmic peak pulse laser power, and the calculated laser spot radius is matched with measured value. The material threshold decreases with the increase in the number of pulses. The removal rate is up to the maximum, 1.35 mm<sup>3</sup>/min, in the optimum combination of scanning speed, power and repetition rate. The blind hole of diameter 500 μm and steps in square cavity structure of width 200 μm and depth 100 μm are obtained by optimizing laser processing parameters. The two-dimension structures are no crack and better processing quality and the surface roughness  $R_a$  is 3.746 μm.

**Key words** lasers; two dimension milling; threshold; accumulation effects; Y-TZP ceramic

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 140.3538

## 1 引 言

生物陶瓷作为生物硬组织的代用材料,与金属生物材料和传统无机材料相比,既能解决金属易腐蚀、金属磨屑会引起周围生物组织发生变化等问题,又能满足传统无机材料无法达到的力学性能和耐久性的要求<sup>[1-2]</sup>。其中的氧化锆陶瓷材料因其优良的耐高温、耐腐蚀及耐磨损性能,特别是其远高于氧化铝陶瓷的断裂韧性,已作为代表性生物陶瓷材料在人体硬组织修复体方面引起了越来越广泛的关注<sup>[3]</sup>。氧化锆作为生物材料的研究开始于 20 世纪 60 年代末,1994 年,Cales 等<sup>[4]</sup>首次报导了氧化锆全髋关节应用于植入体的研究

收稿日期: 2015-02-05; 收到修改稿日期: 2015-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51275011,50875006)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0007)、北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201310005005)

作者简介: 李 健(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光加工陶瓷材料方面的研究。E-mail: lijian012@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 季凌飞(1971—),女,博士,研究员,主要从事材料的激光制备、加工与改性技术等方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn(通信联系人)

工作。氧化锆在弱酸条件下具有较好的化学稳定性,同时能够保持较好的断裂韧性和弯曲强度,因此可以胜任牙科及骨科替换假体的临床应用<sup>[5-6]</sup>。但在作为植入体与部件良好结合重要保证的氧化锆桥台的应用中,Sui等<sup>[7]</sup>发现植入体与氧化锆桥台之间普遍存在微间隙( $19.38 \pm 1.34 \mu\text{m}$ ),间隙会导致细菌滋生及影响抗裂强度,减少部件使用寿命,因此,提高氧化锆桥台的制造精度势在必行。

医学上可接受的植入体边缘差异为  $120 \mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>,这样的结构精度仅依赖于陶瓷成型及烧结技术的优化是无法达到的。目前在实际应用中,需要对陶瓷件进行后期精密加工,在保证尺寸精度和表面粗糙度的同时,还需考虑加工效率的提高。Kosmac等<sup>[9]</sup>研究发现传统的磨削与喷砂处理对Y-TZP医用陶瓷材料表面破坏严重且局部产生塑性变形,并发生单斜-四方晶系的转换。刘为桥等<sup>[10]</sup>尝试了激光辅助加热切削以解决陶瓷类硬脆材料的难加工问题,但存在刀具磨损的问题。相比之下,针对难加工材料而产生的激光铣削技术具有可以加工超硬材料、精度可控、无刀具磨损等特性,对于陶瓷复杂成型加工具有重要的研发意义<sup>[11-12]</sup>。西班牙穆尔西亚大学研究者 Delgado等<sup>[13]</sup>利用蓝宝石飞秒激光器( $120 \text{ fs}$ ,  $795 \text{ nm}$ )在氧化锆种植牙体上铣削出凹槽(宽  $30 \mu\text{m}$ ,深  $70 \mu\text{m}$ )及圆孔(直径  $30 \mu\text{m}$ ,深  $70 \mu\text{m}$ )阵列,这些微结构使种植牙体的有效面积分别增加了25%和15%,有效提高了氧化锆部件的生物相容性。飞秒激光热影响区域小,可以实现高精度的加工,但其加工效率仅为  $0.054 \text{ mm}^3/\text{min}$ <sup>[14]</sup>,利用飞秒激光进行铣削成形所面对的难题是加工效率低下,且价格昂贵,适用于特种薄材料或有特殊需要的零件的微纳加工<sup>[15]</sup>。Xin等<sup>[16]</sup>通过优化工艺参数,采用纳秒脉冲Nd:YAG激光( $60 \text{ ns}$ )对Y-TZP陶瓷进行加工研究,在激光平均功率为  $11.3 \text{ W}$ ,脉冲重复频率为  $30 \text{ kHz}$ 及扫描速度为  $50 \text{ mm/s}$ 的工艺参数下可实现 $\sim 2 \text{ mm}^3/\text{min}$ 的材料去除率。毫秒级脉冲激光平均功率较高,可提高材料的去除速率,但在毫秒级脉冲激光( $0.3\sim 5 \text{ ms}$ )对氧化锆加工的研究中发现<sup>[17]</sup>,加工表面会有一定厚度的重凝层( $\sim 100 \mu\text{m}$ )、热影响区以及表面微裂纹,这些无法避免的熔融物质的重凝和熔渣的覆盖,制约了表面质量的提高。尽管通过二次加工可提高型面质量<sup>[18]</sup>,但表面重凝层及所带来的表面裂纹问题,依然无法得到全面的解决,而氧化锆在加工中产生的任何微小裂纹都会影响其作为植入体的应用效果和应用寿命。所以考虑使用更短波长的纳秒级  $532 \text{ nm}$  激光,这将会有利于材料吸收激光能量并有效减少热作用的影响,有望成为硬脆性材料Y-TZP陶瓷微加工的理想工具,再利用激光加工工艺的可控性特点,配合扫描速度、脉冲重复频率以及功率的最优参数,可实现该类生物陶瓷高质量、高效率的加工。

本研究采用波长  $532 \text{ nm}$  的纳秒激光对Y-TZP陶瓷进行铣削实验,研究了单次刻槽宽度与功率的关系及多脉冲对阈值的影响,确定材料的损伤阈值。分析工艺参数对铣削量及质量的影响并探究其机理。以此为基础,考虑实际应用,进行Y-TZP陶瓷二维结构脉冲激光铣削实验,并获得结构尺寸控制精度可达百微米级的构件样品。

## 2 实验材料和装置

实验装置包括激光器、反射镜、 $x$ - $y$ 振镜和数控机床(CNC),如图1所示,激光由全反镜反射后进入振镜,通过振镜的场镜聚焦后获得直径约为  $60 \mu\text{m}$  的光斑。实验所用激光器的脉宽为  $6 \text{ ns}$ ,波长  $532 \text{ nm}$ 、脉冲重复频率为  $20\sim 100 \text{ kHz}$ ,最大输出功率  $32 \text{ W}$ 。

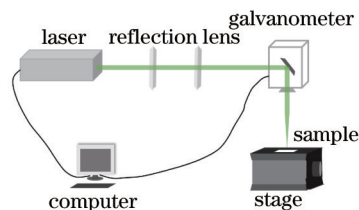


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

实验样品为Y-TZP陶瓷(含有摩尔分数为3%的 $\text{Y}_2\text{O}_3$ ),采用压缩空气作为辅助气体,气压约为  $2 \text{ MPa}$ 。铣削后样品超声波清洗  $3 \text{ min}$  以去除可能的残渣。利用Olympus OLS-3100型激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)测量划槽尺寸(深度和宽度)和铣削表面粗糙度。其中粗糙度的测量选用面粗糙度的方式,测量区域均匀分

布在铣削面内,每次测量范围为  $500\ \mu\text{m}\times 500\ \mu\text{m}$ ,多次( $\geq 3$ )测量取平均值作为比较值。采用 Hitachi SU8020 型扫描电子显微镜(SEM)对加工区域表面的微观形貌进行观察,探究工艺参数对铣削表面精度的影响。根据实际应用,通过铣削深度控制和优化工艺参数,完成了盲孔和台阶方槽 Y-TZP 陶瓷二维结构的微米级铣削加工实验。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 烧蚀阈值与累积效应

Y-TZP 陶瓷的带隙为  $5\ \text{eV}$ ,是一种宽带隙( $>2\ \text{eV}$ )的陶瓷材料,因此其对可见光或是近红外光吸收非常低,激光烧蚀材料时首先会发生光学击穿。当激光能量低于光学击穿所需的能量阈值,材料对激光的吸收很小不能使材料去除;当能量达到一定值,材料被局部击穿并发生烧蚀,进而去除材料。对于高频脉冲激光,探究其单脉冲烧蚀阈值十分困难,因此利用重叠脉冲激光划线扫描材料表面进行阈值研究是一种可循的方法。实验中设定激光重复频率为  $100\ \text{kHz}$ ,扫描速度为  $150\ \text{mm/s}$ ,改变激光功率对 Y-TZP 陶瓷表面进行划槽,采用共聚焦显微镜测量槽宽,获得槽宽与激光功率之间的关系,如图 2(a)所示。实验结果表明随着激光功率的增加,凹槽宽度增加,并趋于饱和。这是因为当脉冲能量密度大于烧蚀阈值后,表面凹槽的宽度会随着能量密度的增加而逐渐接近光斑直径,但由于激光光强呈高斯分布,光斑中心区域温度高,边缘区域的能量密度未能达到阈值,所以凹槽宽度小于于光斑直径并最终趋于饱和。对于高斯光束,其能量分布为

$$I(r) = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_c^2}\right), \quad (1)$$

式中  $\omega_c$  为聚焦光斑半径,  $I_0$  为光斑中心能量密度,  $r$  为与光斑中心的距离。单脉冲烧蚀点或槽的宽度与脉冲峰值功率的关系为<sup>[19]</sup>

$$D_a^2 = 2\omega_c^2[\ln(I) - \ln(I_{th})] = 2\omega_c^2[\ln(P_p) - \ln(P_{p,th})], \quad (2)$$

式中  $D_a$  为单脉冲烧蚀点的直径,  $I_{th}$  为阈值能量密度,  $P_p$  和  $P_{p,th}$  分别为脉冲峰值功率和脉冲峰值功率阈值。根据(2)式烧蚀点直径或槽宽的平方  $D_a^2$  应与脉冲峰值功率的对数  $\ln(P_p)$  呈线性关系。根据实验数据,绘制脉宽  $6\ \text{ns}$ ,重频  $100\ \text{kHz}$  激光单次烧蚀 Y-TZP 凹槽宽度与峰值功率对数曲线,结果如图 2(b)所示,符合(2)式的线性关系,线性拟合后计算出脉冲峰值功率阈值为  $33.11\ \text{W}$ ,光斑半径  $\omega_c$  为  $30.82\ \mu\text{m}$ ,与实际测量值基本相符。因此,根据(2)式和光斑半径及峰值功率阈值计算得出  $532\ \text{nm}$  绿光纳秒激光烧蚀 Y-TZP 陶瓷阈值为  $6.65\ \text{J/cm}^2$ 。

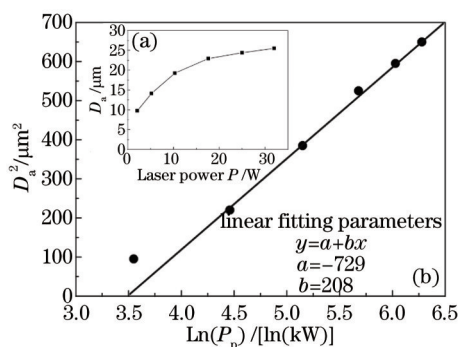


图2 脉冲单次烧蚀槽宽与功率关系曲线

Fig.2 Groove width as a function of laser power

纳秒级短脉冲激光烧蚀材料的主要机制是热破坏,光通过热传导将能量传递给材料晶格,达到熔点后材料熔化蒸发或气化而致去除。当多脉冲重复作用材料表面时,热量累积从而影响材料阈值。探究在重频  $100\ \text{kHz}$ ,扫描速度  $150\ \text{mm/s}$  的参数条件下,脉冲数对材料阈值的影响,其结果如图 3 所示。根据比尔-朗伯定律,光通过介质后衰减为

$$I(d) = I \exp(-\alpha d), \quad (3)$$

式中  $d$  为介质的传输距离,  $\alpha$  为介质吸收系数。

烧蚀深度  $h_a$  与激光能量密度关系<sup>[16]</sup>为

$$h_a = \frac{1}{\alpha} [\ln(I) - \ln(I_{th})]. \quad (4)$$

根据(4)式能量密度与烧蚀深度呈线性关系,对实验数据进行线性拟合,可得出其他工艺参数一定的条件下,5个脉冲和60个脉冲激光对材料的损伤阈值分别为 1.682 J/cm<sup>2</sup> 和 1.210 J/cm<sup>2</sup>。这符合 Jee 等<sup>[20]</sup>提出的累积模型,即

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{S-1}, \quad (5)$$

式中  $S$  为累积系数( $0 < S < 1$ ),材料的烧蚀阈值  $F_{th}$  随着脉冲数  $N$  的增加而降低。目前在短脉冲条件下针对多脉冲作用的累积效应主要有以下几种模型<sup>[21-22]</sup>:杂质加热中心模型、晶体有色吸收中心模型以及化学键破坏模型,然而这些模型均无法解释高纯陶瓷材料的脉冲累积效应。对于纳秒多脉冲作用于材料时,阈值随脉冲数增加而减小的机制应该属于介质热损伤模型<sup>[23]</sup>:当功率密度不变时,激光辐照中心点的温度不会改变,光斑尺寸不变,在多脉冲的情况下,沉积的热量变多导致表面径向温度分布情况改变,因此阈值降低。图 3(c) 显示激光刻蚀凹槽达到一定深度后,凹槽深度随着能量密度增加趋于饱和,这主要是因为,当能量密度较低时,激光刻蚀的凹槽较浅,凹槽内壁及微小颗粒对激光能量的吸收和散射作用所占的比重较小,随着能量密度的增加,刻槽深度增加,凹槽内壁对激光的散射及微小颗粒对激光的吸收消耗大部分激光能量,刻蚀能力被削弱,因此当激光刻蚀材料达到一定深度后会趋于饱和。

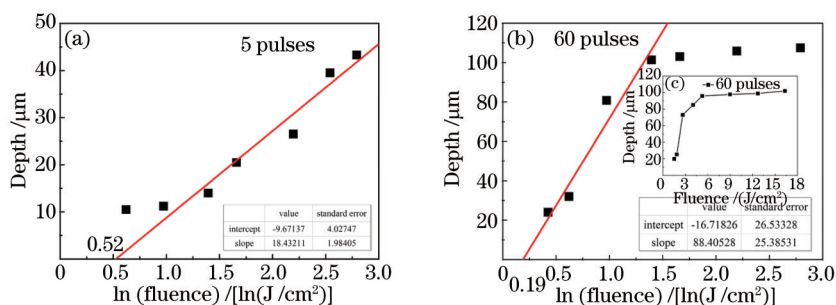


图3 多脉冲条件下烧蚀深度与激光能量密度关系

Fig.3 Variation of ablation depth with laser fluence in a condition of multi-pulse

### 3.2 工艺参数对激光铣削量的影响

铣削量是评价加工效率的重要因素,在重频 100 kHz,扫描间隔 20 μm 条件下,图 4(a)给出了在不同扫描速度和功率条件下,铣削量的变化规律。随着扫描速度增加,材料的去除速率先增加后降低,当扫描速度低于 150 mm/s 时,扫描速度越低,单位面积内接收的光斑数越多即加工区域吸收激光能量增加,容易产生过多不易清除的熔渣,降低了材料的去除速率。相反,当扫描速度大于 150 mm/s 时,在高频情况下,脉冲重叠度随着扫描速度的增加而降低,不易将材料去除影响铣削量,因此优化扫描速度可提高铣削量。图 4(b)反映出铣削量随重复频率的变化规律,当功率一定时,铣削量随着重复频率的增加而降低。根据图 4 和图 5 可确定最优加工工艺参数为扫描速度 150 mm/s,功率 17.5 W,重复频率 100 kHz,纳秒 532 nm 激光对 Y-TZP 陶瓷的去除速率可达 1.35 mm<sup>3</sup>/min,表面粗糙度为 4.236 μm。

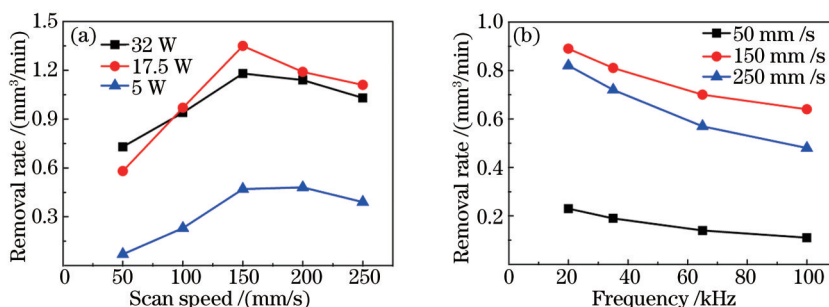


图4 (a) 扫描速度、功率与铣削量的关系; (b) 扫描速度、重复频率与铣削量的关系

Fig.4 (a) Relationship between scan speed, power and removal rate; (b) relationship between scan speed, repetition rate and removal rate

### 3.3 脉冲重叠率、离焦量对铣削表面粗糙度的影响

激光铣削技术是采用规则排列的密集激光脉冲形成的孔群来去除材料。单脉冲烧蚀材料形成的孔可近似看作具有一定锥度的圆锥孔,当脉冲重叠时,会出现圆锥孔上端相交而下端并没有相交的情况,因此造成加工区域粗糙,需要通过优化脉冲重叠率而加以改善。图5表明铣削表面粗糙度 $R_a$ 随脉冲重叠率的增加而减小。

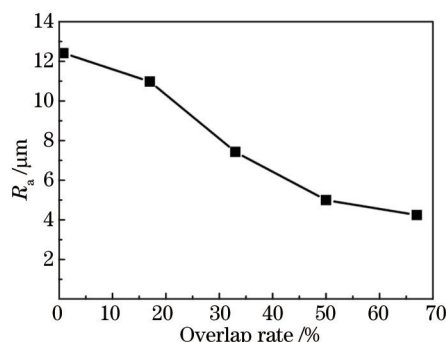


图5 表面粗糙度与重叠率的关系

Fig.5 Relationship between roughness and overlap rate

在激光参数(频率 100 kHz,速度 150 mm/s,功率 17.5 W)以及扫描间隔(20  $\mu\text{m}$ )不变的情况下,激光离焦量的变化对脉冲重叠率产生影响,进而影响加工区域表面粗糙度。离焦量增加,光斑面积增大,离焦处光斑半径 $\omega_z$ 可通过瑞利长度公式,即

$$z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}, \quad (6)$$

计算,为

$$\omega_z = \omega_0 \left( 1 + \frac{z^2}{z_R^2} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

式中 $\omega_0$ 为聚焦光斑半径, $z$ 为离焦量, $\lambda$ 为入射等光波长。通过(6)式和(7)式可计算出激光离焦-4.5 mm,光斑直径为 511  $\mu\text{m}$ ,在此离焦量条件下的光斑重叠率为 96%,此时铣削材料表面均匀,如图6(a)所示;与未离焦的相比,表面没有明显脉冲重叠的痕迹,如图6(b)中标记。分别测量陶瓷原样、激光聚焦铣削表面和离焦-4.5 mm

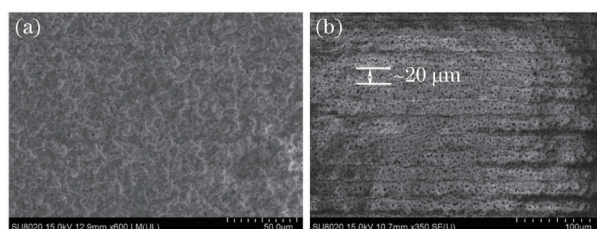


图6 (a) 激光离焦-4.5 mm 铣削 Y-TZP 陶瓷表面; (b) 激光未离焦铣削 Y-TZP 陶瓷表面

Fig.6 (a) Milled surface with focus offset of -4.5 mm; (b) milled surface without focus offset

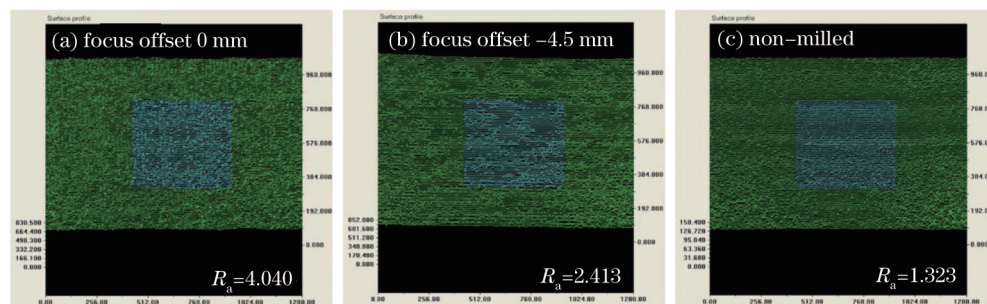


图7 粗糙度测量结果。(a) 激光聚焦铣削表面粗糙度 $R_a=4.040 \mu\text{m}$ ; (b) 激光离焦-4.5 mm 铣削表面粗糙度 $R_a=2.413 \mu\text{m}$ ;  
(c) Y-TZP 陶瓷原样表面粗糙度 $R_a=1.323 \mu\text{m}$

Fig.7 Surface roughness results. (a)  $R_a=4.040 \mu\text{m}$  without focus offset; (b)  $R_a=2.413 \mu\text{m}$  with focus offset of -4.5 mm;  
(c)  $R_a=1.323 \mu\text{m}$  of Y-TZP ceramic

铣削表面的粗糙度,其结果如图7所示,未离焦加工与离焦-4.5 mm 铣削相比,表面粗糙度由 4.040  $\mu\text{m}$  降低到 2.413  $\mu\text{m}$ ,接近材料粗糙度 1.323  $\mu\text{m}$ 。当激光以负离焦的状态对材料进行加工时,光束会以会聚的形式进入材料,孔壁很少能直接接受光能量,因此材料气相少,熔融物的喷射力小,孔形由锥形向桶形过渡,激光焦点在材料表面以下,可直接照射到孔壁,使材料获得良好的气化效果,熔融物质将填充和融化孔与孔的连接处,所以负离焦加工样品的表面粗糙度较低。

### 3.4 Y-TZP 陶瓷二维结构铣削成型

在实际的生物医学应用中,需要对 Y-TZP 陶瓷进行精准尺寸的后续加工,因此根据以上实验研究,利用优化工艺参数,在功率 17.5 W、重频 100 kHz、扫描速度 150 mm/s 下对 Y-TZP 陶瓷进行二维结构铣削,包括直径 500  $\mu\text{m}$  的盲孔和宽 200  $\mu\text{m}$ ,高 100  $\mu\text{m}$  的台阶方槽结构,如图 8 所示。铣削的盲孔周围无材料残渣堆积,台阶方槽内部无裂纹,表面粗糙度为 3.746  $\mu\text{m}$ 。纳秒脉冲激光在保证铣削效率的同时可以高质量的完成 Y-TZP 陶瓷的铣削加工,通过优化工艺参数和配合合理的加工路径,可以实现铣削深度和加工表面粗糙度的控制,完成具有复杂结构的 Y-TZP 陶瓷部件的激光铣削加工。

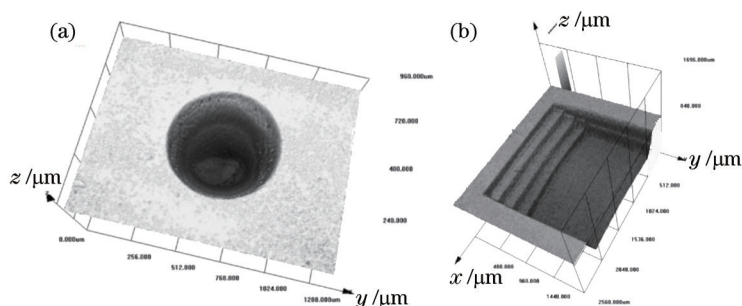


图8 激光铣削 Y-TZP 陶瓷二维结构。(a) 盲孔结构; (b) 台阶方槽结构

Fig.8 Two-dimension structure milled by laser. (a) Blind hole; (b) steps in square cavity structure

## 4 结 论

使用波长为 532 nm 的短脉冲激光铣削 Y-TZP 陶瓷,改变工艺参数,通过单次划槽,及多脉冲烧蚀,探究其烧蚀规律并研究其最优工艺参数,分析加工机理并得出以下结论:

1) 由于激光能量的高斯分布,单次聚焦刻槽宽度随着功率增加而增加,并趋于饱和,根据  $D_a^2$  与  $\ln(P_p)$  关系可计算出光斑半径约为 30  $\mu\text{m}$ ,与实际测量值相符。由于多脉冲的累积效应,短脉冲(6 ns)激光作用 Y-TZP 陶瓷的阈值随脉冲数增加而降低;

2) 重叠频率、扫描速度、功率对铣削量存在影响,根据实验数据得出铣削量的变化规律,获得最优工艺参数,在扫描速度 150 mm/s,重频 100 kHz,功率 17.5 W 条件下可实现最大铣削量 1.35  $\text{mm}^3/\text{min}$ 。脉冲重叠率影响铣削区域表面粗糙度,离焦-4.5 mm 加工其表面粗糙度与聚焦加工相比,由 4.040  $\mu\text{m}$  降低到 2.413  $\mu\text{m}$ 。因此在实际应用中,应结合加工要求选择合适的激光脉冲重叠率;

3) 采用优化激光铣削工艺参数,完成边缘质量较好,无裂纹的二维结构加工,其中盲孔直径 500  $\mu\text{m}$ ,台阶方槽结构宽度 200  $\mu\text{m}$ 、高度 100  $\mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Zhou, Li Zhi, Cai Jun. The development and present situation of bioceramics[J]. Journal of Dalian University, 2001, 22(6): 57-61, 68.  
王 宙,李 智,蔡 军. 生物陶瓷材料的发展与现状[J]. 大连大学学报, 2001, 22(6): 57-61, 68.
- 2 Cui Fuzhai, Guo Muyao. Applications of bioceramics and its future[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2010, 30(7): 1343-1347.  
崔福斋,郭牧遥. 生物陶瓷材料的应用及其发展前景[J]. 药物分析杂志, 2010, 30(7): 1343-1347.
- 3 Hench L L. Bioceramics: From concept to clinic[J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74(7): 1487-1510.
- 4 Cales B, Stefani Y. Mechanical properties and surface analysis of retrieved zirconia hip joint heads after an implantation time of two

- to three years[J]. *J Mater Sci: Mater M*, 1994, 5(6-7): 376-380.
- 5 Piconi C, Maccauro G. Zirconia as a ceramic biomaterial[J]. *Biomaterials*, 1999, 20(1): 1-25.
- 6 Jin Enlong, Jiao Yanjun. Application of zirconia ceramics in dental use[J]. *International Journal of Stomatology*, 2007, 34(1): 62-64.  
金恩龙, 焦艳军. 氧化锆陶瓷在口腔医学领域中的应用[J]. *国际口腔医学杂志*, 2007, 34(1): 62-64.
- 7 Sui X X, Wei H S, Wang D S, *et al.*. Experimental research on the relationship between fit accuracy and fracture resistance of zirconia abutments[J]. *J Dent*, 2014, 42(10): 1353-1359.
- 8 Mclean J W, Fraunhofer V. The estimation of cement film thickness by an in vivo technique[J]. *Brit Dent J*, 1971, 131(3): 107-111.
- 9 Kosmač T C, Edomir O, Marion L. The effects of dental grinding and sandblasting on ageing and fatigue behavior of dental zirconia (Y-TZP) ceramics[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2008, 28(5): 1085-1090.
- 10 Liu Weiqiao, Yan Cuo, Xie Linchun, *et al.*. Research on parameter selection of pulsed-assisted machining of alumina ceramics[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0703005.  
刘为桥, 鄢 铨, 谢林春, 等. 脉冲激光辅助切削氧化铝陶瓷工艺参数选取的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0703005.
- 11 Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Experimental study of laser milling on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(5): 467-470.  
袁根福, 曾晓雁. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷激光铣削试验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(5): 467-470.
- 12 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan. Status and prospect of laser milling[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(5): 8-9.  
李祥友, 曾晓雁. 激光铣削技术的发展现状与展望[J]. *激光杂志*, 2007, 28(5): 8-9.
- 13 Delgado R R A, Calvo G J L, Moreno P, *et al.*. Femtosecond laser microstructuring of zirconia dental implants[J]. *J Biomed Mater Res B*, 2011, 96B(1): 91-100.
- 14 Perrie W, Rushton A, Gill M, *et al.*. Femtosecond laser micro-structuring of alumina ceramic[J]. *ASS*, 2005, 248(1-4): 213-217.
- 15 Yang Huan, Huang Shan, Duan Jun, *et al.*. Contrastive study on laser ablation of single-crystal silicon by 1030 nm femtosecond laser and 355 nm nanosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013,40(1): 0103003.  
杨 焕, 黄 珊, 段 军, 等. 飞秒与纳秒激光刻蚀单晶硅对比研究[J]. *中国激光*, 2013,40(1): 0103003.
- 16 Wang X, Shephard J D, Dear F C, *et al.*. Optimized nanosecond pulsed laser micromachining of Y-TZP ceramics[J]. *J Am Ceram Soc*, 2008, 91(2): 391-397.
- 17 Dear F C, Shephard J D, Wang X, *et al.*. Pulsed laser micromachining of yttria-stabilized zirconia dental ceramic for manufacturing [J]. *Int J Appl Ceram Tec*, 2008, 5(2): 188-197.
- 18 Parry J P, Shephard J D, Dear F C, *et al.*. Nanosecond-laser postprocessing of millisecond-laser-machined zirconia (Y-TZP) surfaces[J]. *Int J Appl Ceram Tec*, 2008, 5(3): 249-257.
- 19 Liu J M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes[J]. *Opt Lett*, 1982, 7(5): 196-198.
- 20 Jee Y, Becker M F, Walser R M. Laser-induced damage on single-crystal metal-surfaces[J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, 5(3): 648-659.
- 21 Chmel A E. Fatigue laser-induced damage in transparent materials[J]. *Mat Sci Eng B*, 1997, 49(3): 175-190.
- 22 Gallais L, Natoli J, Amra C. Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses[J]. *Opt Express*, 2002, 10(25): 1465-1474.
- 23 Luo Jin, Liu Zhichao, Chen Songlin, *et al.*. Theoretical research of multi-pulses laser induced damage in dielectrics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013(12): 3301-3306.  
罗 晋, 刘志超, 陈松林, 等. 多脉冲激光辐照下介质损伤理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, (12): 3301-3306.

栏目编辑: 张浩佳