

文章编号: 1001-3806(2016)05-0762-05

## 水射流激光复合刻蚀陶瓷的研究

谢兵兵, 袁根福\*

(江南大学 机械工程学院, 无锡 214122)

**摘要:** 为了改善激光直接刻蚀过程中形貌普遍较差的问题, 采用水射流激光复合刻蚀的方法, 以 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷为研究材料, 分析了有无水射流条件下的形貌差异以及不同成分陶瓷的形貌差异, 并在此基础上研究了水射流流速对刻蚀深度和蚀除量的影响。结果表明, 直接刻蚀时, 大量熔渣附于刻蚀表面, 刻蚀形貌较差, SiC 复相陶瓷 60% 以上直接气化解, 熔渣较少, 形貌稍好于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷; 复合刻蚀时, 刻蚀形貌有所变好, 且水射流流速在 24m/s 时的形貌要好于 16m/s 时的; 水射流流速越大, 材料的刻蚀深度和蚀除量越小, 流速每增大 2m/s 时, 材料的蚀除量平均减少 0.066mm<sup>3</sup> 左右, 相同流速下, SiC 复相陶瓷的蚀除量比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷大 0.4mm<sup>3</sup> 左右。此研究对提高刻蚀形貌和分析不同陶瓷的刻蚀机理是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 复合刻蚀; SiC 复相陶瓷; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷; 水射流

**中图分类号:** TN249

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3305.2016.05.030

### Research of water jet-laser complex etching of ceramics

XIE Bingbing, YUAN Genfu

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to improve the problems that the bad morphologies are very bad in the process of laser direct etching, the method of water jet-laser complex etching was adopted. With SiC composite ceramics and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics as studying object materials, the etched morphologies of different component ceramics with or without water jet were analyzed. On this basis, the effects of velocity of water jet on the etched depth and removal amount were studied. The results show that in the process of laser direct etching, a large amount of slag is attached to the etched surface, the etched morphologies are very bad, more than 60% of SiC composite ceramics are directly decomposed, the slag is less, so the morphology is better than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics slightly. In the process of water jet-laser complex etching, the etched morphologies are both turned better, and the morphology when velocity of water jet is 24m/s is better than that when 16m/s. The velocity of water jet is bigger, the etched depth and removal amount are smaller. The velocity of water jet increases every 2m/s, the removal amount reduces by an average of about 0.066mm<sup>3</sup>. In the case of the same velocity of water jet, the removal amount of SiC composite ceramics is about 0.4mm<sup>3</sup>, bigger than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. This study is helpful to improve the etched morphologies and analyze the etched mechanism of different ceramics.

**Key words:** laser technique; complex etching; SiC composite ceramics; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics; water jet

### 引言

SiC 复相陶瓷是在 SiC 基体中引入第二相(颗粒、晶须等), 可以显著增加材料的强度、硬度、断裂韧性和耐磨性<sup>[1-4]</sup>, 但作为难加工材料, 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷一样, 传统的磨削、车削等加工方法中经常会出现切削力大、温度上升快、砂轮磨损严重、材料断裂、加工表面粗糙等问题<sup>[5-6]</sup>。激光加工是一种无接触、无切削力、热影响小、清洁和可进行特殊面加工的加工方法, 解决了许

多传统机械加工方法中无法解决的问题, 在金属和非金属等各个工程领域中得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>。然而, 激光直接加工过程中, 材料在高功率激光束的轰击作用下, 会出现物相变化造成变质层不断累积、熔渣飞溅物在材料表面重新沉积, 基底材料因热应力造成机械损伤等现象, 严重影响了激光加工的质量<sup>[8]</sup>。针对这些问题, 国内外学者们纷纷提出复合加工方法, YUAN<sup>[9]</sup>, VASS<sup>[10]</sup> 等人分别研究了激光与化学复合刻蚀加工, 发现化学溶液腐蚀能够大大减少刻蚀表面的熔渣, 提高表面粗糙度。日本桥川制造所研制了电火花与激光复合精密微细加工系统<sup>[11]</sup>, 实现了高精度、大深径比的深孔加工。KONG<sup>[12]</sup>, LONG<sup>[13]</sup> 等人分别对水下激光刻蚀加工进行研究, 发现水的冷却作用可有效防止去蚀材料的二次粘附, 避免变质层形成。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175229)

作者简介: 谢兵兵(1989-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光精密加工方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: forygf@263.net

收稿日期: 2015-06-18; 收到修改稿日期: 2015-07-20

TAN<sup>[14]</sup>, PORTER<sup>[15]</sup> 等人提出水导激光加工的方法,把激光束耦合到水射流之中,加工后的陶瓷可达到极小的碎屑,热影响区(heat affecting zone, HAZ)小于10 $\mu\text{m}$ 。

作者在上述水导激光加工和水下激光加工的基础上,提出水射流激光复合加工,水射流束与激光束异轴,一定压力的水射流束与激光束同步加工材料,利用水射流的冲刷作用,可以带走刻槽内的熔渣,也可以利用水射流的冷却作用,避免热应力形成微裂纹,有效提高刻蚀的加工质量。本文中以 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷为材料,分别在有水射流和无水射流条件下进行激光刻蚀实验,主要对直接刻蚀和复合刻蚀两种工艺条件下的形貌进行对比,以及不同成分的陶瓷在刻蚀过程中的形貌差异进行对比,并对复合刻蚀过程中水射流流速对刻蚀深度及蚀除量的影响进行研究。

### 1 实验材料和装置

实验材料选用 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷。SiC 复相陶瓷的尺寸为 20mm × 20mm × 3mm,其成分以 SiC 为主,还含有部分游离 Al 和少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,具体的成分及物理参量如表 1 所示。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的尺寸为 20mm × 20mm × 3mm, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数大于 0.98。

Table 1 Composition and physical parameters of SiC composite ceramics

composition	SiC	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
mass fraction	0.60 ~ 0.65	0.20 ~ 0.25	0.10 ~ 0.15
density/(g · cm <sup>-3</sup> )	3.215	2.70	3.95 ~ 4.1
mohs hardness	9.5 ~ 9.75	2.5 ~ 3	9.0
melting point/°C	—	660	2050
boiling point/°C	2830	2227	2980
thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	25.5 ~ 4.0	237	36

实验装置主要由激光系统和水射流系统两部分组成,实验装置实物图和示意图分别如图 1 和图 2 所示。激光系统采用 Nd<sup>3+</sup>:YAG 固体激光切割机,型号为 HGL-LMY500,电流强度在 100A ~ 400A 范围内连续可调,脉冲宽度在 0.2ms ~ 10ms 范围内连续可调,重复频率在 0Hz ~ 100Hz 范围内连续可调,辅助气体为氧气,压力大小在 0MPa ~ 0.5MPa 范围内连续可调,工作台可以三轴联动,工作台的移动通过数控系统控制。水射流系统的主要作用是喷射水射流,水射流流速可以通过旋转式开关调节:逆时针旋转开关,水射流流速增大;顺时针旋转开关,水射流流速减小。实验装备是在激光系统的基础上设置水射流系统,利用激光束和水射流束同步加工材料。这样一方面一定压力的水射流可以冲刷熔融物,使得熔融物飞离刻槽;另一方面,水射流也能迅速冷却材料的受热区域,减少残余热应

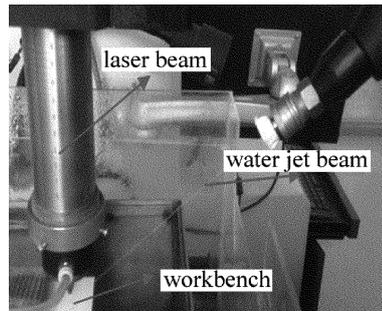


Fig. 1 Real diagram of experimental apparatus

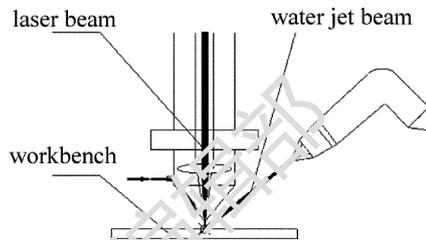


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

力,避免微裂纹。

### 2 激光直接刻蚀的形貌对比及分析

实验中,调节激光电流强度为 150A,脉冲宽度为 0.5ms,脉冲重复频率为 35Hz,激光扫描速率为 1mm/s,辅助气体氧气的压力为 0.5MPa,离焦量为 1.5mm,激光的扫描长度为 10mm。将 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光直接烧蚀的表面形貌和截面形貌进行对比,如图 3(20 倍放大图)所示。图 3a、图 3c 分别为激光直接刻蚀 SiC 复相陶瓷的表面和截面形貌;图 3b、图 3d 分别为激光直接烧蚀 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的表面和截面形貌。

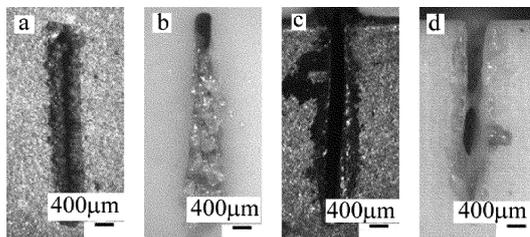


Fig. 3 Comparison of surface and sectional morphology of laser direct etching on SiC composite ceramics and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

对比图 3a 和图 3b,可以看出, SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光直接刻蚀的表面形貌都很差,其中 SiC 复相陶瓷的表面形貌稍好于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,主要表现在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的刻蚀表面堆满了熔渣,熔渣几乎堵住了刻槽,而 SiC 复相陶瓷的表面虽然存在熔渣,但是熔渣数量远远少于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,并且 SiC 复相陶瓷能明显地观察到刻槽的缝隙。上述现象可以从以下几点来解释:(1)从激光烧蚀机理来考虑,激光直接刻蚀过程中,激光的能量密度很快便会超过材料的熔化阈值,材料去除以光热作用为主,大量熔融物在在辅助气体的

作用下沿着激光扫描方向向两边飞溅,飞溅物迅速冷却并重新凝固形成熔渣,随着二次粘附的不断增强,材料的刻蚀表面形成厚厚的重铸层,严重影响了刻蚀的表面形貌,这也就解释了 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在激光直接刻蚀作用下表面形貌都很差的原因;(2) SiC 复相陶瓷的表面形貌稍好于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的原因可以从材料特性来考虑, SiC 复相陶瓷以 SiC 为主, SiC 主要以气化蚀除为主,而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷纯度高,主要以熔化蚀除为主。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在高度密集的激光束作用下,熔化产生的大量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔融物迅速冷却凝固形成熔渣,随着熔渣不断累积,严重影响了刻槽的表面形貌,而 SiC 复相陶瓷在激光直接刻蚀过程中,质量分数为 0.60 左右的 SiC 直接汽化分解,极少存在熔渣,尽管游离 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生熔化时会产生熔渣,但由于其质量分数只有 0.4 左右,使得熔渣数量也远远小于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,因此 SiC 复相陶瓷的表面形貌更好。另外对比图 3c 和图 3d 可以看出, SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的截面形貌都要好于表面形貌,主要表现在截面的熔渣更少,这是由于激光直接刻蚀过程中,熔渣在辅助气体的吹除作用下,更容易从截面边缘缝隙处排出。

### 3 水射流激光复合刻蚀的研究

#### 3.1 复合刻蚀的形貌分析

实验中,调节激光电流强度为 150A,脉冲宽度为 0.8ms,脉冲重复频率为 35Hz,激光扫描速率为 1mm/s,辅助气体氧气的压力为 0.5MPa,离焦量为 1.5mm,激光的扫描长度为 10mm。在激光系统工艺参量不变的情况下,进行 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷水射流激光复合刻蚀的研究。

图 4a 和图 4b、图 4c 和图 4d(均为 20 倍放大图)分别为水射流流速为 16m/s、24m/s 时激光刻蚀 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的截面形貌。从图中可以看出,水射流激光复合刻蚀加工时,不管是 SiC 复相陶瓷,还是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,它们的截面形貌均明显好于激光直接刻蚀加工时的截面形貌。这是由于激光复合刻蚀过程中,陶瓷材料的比热容远远小于水射流,水射流的冷却作用迅速降低了刻槽的温度,减少热影响区,使得材料不易达到其熔化阈值,此时激光的去除方式主要以光化学作用为主,熔渣的数量相比于激光直接刻蚀时自然要少很多,而且激光与材料在水射流中发生作用时会伴随气泡的产生,不断产生的气泡发生破裂时有助于熔渣排出加工区域。另外水射流还可以冲刷一部分的熔渣,减少了熔渣在刻槽内的堆积,最大限度地减少熔渣,这正是水射流激光复合刻蚀的优势所在。对比图 4a 和图 4b、图 4c 和图 4d,当水射流流速为 24m/s

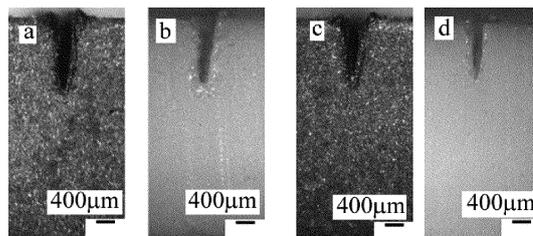


Fig. 4 Study of water jet-laser complex etching on SiC composite ceramics and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

时,刻槽的形状更加接近于标准的“V”形,其刻蚀形貌更好,这是由于 24m/s 的水射流较 16m/s 而言冲刷作用更强,表面残余熔渣更少,形貌更好。

#### 3.2 水射流流速对 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷刻蚀深度的影响

在上述实验参量的基础上,单因素考虑水射流流速对刻蚀深度的影响,并比较相同水射流流速下 SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的刻蚀深度。图 5 中的曲线表示了水射流流速对 SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷刻蚀深度的影响。从图中可以看出, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的刻蚀深度都会随着水射流流速的不断增大而逐渐变小,这主要是由于激光能量损失所致。在没有水射流的情况下,激光能量密度较大,材料吸收激光的能量较多,很快便能达到熔化阈值,随着激光束不断轰击,基底熔融物急剧膨胀,并对基底形成反冲击力,使得熔融物向外喷出,此时材料熔化蚀除比较明显,蚀除量较大。引入水射流以后,由于水的比热容较小,激光束的能量会迅速传递给水射流,这样材料能够吸收到的激光能量便会大大减少,并且水射流流速越大,水射流越容易散射,吸收激光的能量越多,激光的能量损失也就越多,使得材料吸收激光的能量越来越少,材料的刻蚀深度逐渐变小。

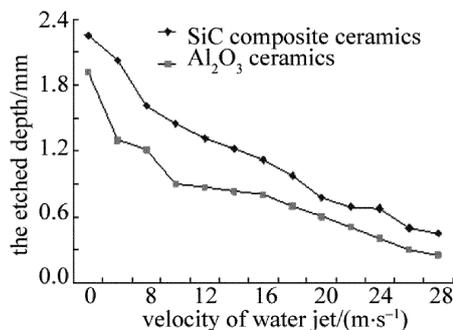


Fig. 5 Effects of velocity of water jet on the etched depth of SiC composite ceramics and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

从图 5 中还发现,在相同水射流流速下, SiC 复相陶瓷的刻蚀深度要大于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷,这主要是由于材料的特性不同所致, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在激光作用下以熔化蚀除为主,由于纯度高,熔化比较均匀,在 2050℃ 开始熔化,短时间内大量熔融物在刻槽基底堆积,甚至堵住

刻槽,刻蚀深度较小,而 SiC 复相陶瓷中质量分数为 0.60 左右的 SiC 以气化分解为主,尽管 SiC 复相陶瓷中因为含有部分 Al 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,表面也会存在一些熔融物,但是少量的熔融物对刻蚀深度的影响较小。

### 3.3 水射流流速对 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷蚀除量的影响

激光刻蚀的蚀除量是激光加工效率的重要指标,在上述实验参量的基础上,单因素研究水射流流速对材料蚀除量的影响,并比较相同水射流流速下 SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量。蚀除量可以通过加工材料的截面积与激光扫描长度的积求得,材料的截面可以近似看成“V”槽,“V”槽面积通过三角形面积求得。图 6 示出了水射流流速对 SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷蚀除量的影响曲线。从图 6 中可以看出,水射流流速对材料的蚀除量影响较大,主要表现在:(1)水射流流速低于 4m/s 时, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量都很大,这是由于水射流流速较小时,单位面积内激光能量损失很少,从而激光能够刻蚀出较大的蚀除量;(2)水射流流速在 0m/s ~ 28m/s 内,水射流流速越大, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量越小,且发现水射流流速每增加 2m/s 左右时, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量平均减少 0.066mm<sup>3</sup> 左右,这是由于水射流流速越大,单位面积内激光的能量损失越多,材料刻蚀深度大幅度减小,尽管水射流冲刷作用增强,使得后续激光不会受到熔融物的阻挡,进而能有效对基底材料进行刻蚀加工,但总体而言,刻蚀深度受到激光能量损失的影响较大,因此,材料的蚀除量会变小;(3)水射流流速增大到 28m/s 时, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量都低于 0.6mm<sup>3</sup>,这是由于过大的水射流流速导致激光能量大幅度减小,单位面积内激光的能量损失较多, SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的激光刻蚀范围大幅度缩小,材料的蚀除量也就必然减少。

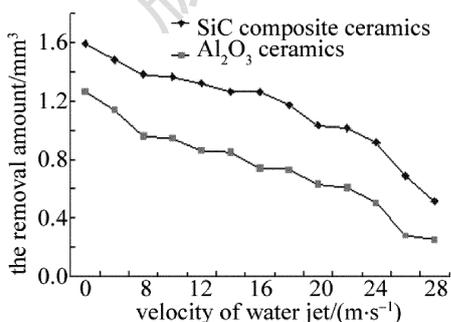


Fig. 6 Effects of the velocity of water jet on the removal amount of SiC composite ceramics and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

从图 6 中还发现,在相同水射流流速下, SiC 复相陶瓷的蚀除量都要比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷大 0.4mm<sup>3</sup> 左右,这可以通过材料的物理性能来解释, SiC 复相陶瓷中 SiC

成分较多,在激光刻蚀作用下,大量 SiC 可以直接分解,很少有熔渣堆积在刻槽内,使得刻槽的蚀除量大一些,而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷在激光刻蚀作用下,主要以熔化蚀除方式为主,水射流虽然冲刷了部分熔渣,但依然存在大量 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔融物堆积在刻槽内,影响后续激光对基底材料的加工,使得刻槽的蚀除量相对小一些。

## 4 结 论

采用对比分析的方法,以 SiC 复相陶瓷和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷为材料,进行了激光直接刻蚀和水射流激光复合刻蚀的研究。

(1)激光直接刻蚀时,材料很快达到熔化阈值,材料去除以光热作用为主,大量熔融物不断凝固形成熔渣堆积在刻槽表面,刻蚀形貌较差。 SiC 复相陶瓷质量分数为 0.6 以上直接气化分解,熔渣较少,刻蚀形貌要好于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷。

(2)水射流激光复合刻蚀时,激光能量部分传递给水射流,材料不易达到熔化阈值,熔渣较少,水射流不断冲击产生的气泡破裂时也有助于熔渣的排出,另外水射流还可以冲刷部分熔渣,因此复合刻蚀的形貌变好,并且流速为 24m/s 的形貌要好于 16m/s。

(3)当水射流流速越大,激光的能量损失越多,材料的刻蚀深度和蚀除量越小,且水射流流速每增大 2m/s 时, SiC 复相陶瓷与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的蚀除量减少 0.066mm<sup>3</sup> 左右。相同水射流流速下, SiC 复相陶瓷的蚀除量都要比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷大 0.4mm<sup>3</sup> 左右。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG X H, AN Y M, HAN J C, *et al.* Graphene nanosheet reinforced ZrB<sub>2</sub>-SiC ceramic composite by thermal reduction of graphene oxide[J]. RSC Advances, 2015, 5(58):47060-47065.
- [2] XIE Y P, CHENG L F, MEI H, *et al.* Effect of SiC Particles on mechanical properties of laminated (SiC<sub>w</sub> + SiC<sub>p</sub>)/SiC ceramic composites[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12(3):535-541.
- [3] JING Y N, DENG X Y, LI J B, *et al.* Fabrication and properties of SiC/mullite composite porous ceramics[J]. Ceramics International, 2014, 40(8):1329-1334.
- [4] RAK Z S. A process for C<sub>f</sub>/SiC composites using liquid polymer infiltration[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2001, 84(10):2235-2239.
- [5] WU X F, WANG Y, ZHANG H Z. Experimental research on laser assisted machining of Silicon Nitride ceramics[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5):1457-1462 (in Chinese).
- [6] ZHANG X F, YU G Q, JIANG L W. Application of alumina ceramic[J]. Foshan Ceramic, 2010, 20(2):38-43 (in Chinese).
- [7] YUAN G F, ZENG X Y. Laser forming research on brittle inorganic materials and the application status[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2002, 39(6):47-51 (in Chinese).
- [8] LING L, LOU Q H, LI S Z, *et al.* Microcutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser[J]. Laser Technology,

- 2004,28(2):132-134(in Chinese).
- [9] YUAN G F, YAO Y S, CHEN X H, *et al.* Experimental study on the quality of material surface applied laser-chemical combined etching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1):281-283(in Chinese).
- [10] VASS C, OSVAY K, CSETE M, *et al.* Fabrication of 550nm gratings in fused silica by laser induced backside wet etching technique [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19):8059-8063.
- [11] QIAO Ch R. Development of EDM/Laser compound precision fine machining system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004, 17(2):46-50(in Chinese).
- [12] KONG L R, ZHANG F, DUAN J, *et al.* Research of water-assisted laser etching of alumina ceramics [J]. Laser Technology, 2014, 38(3):330-334(in Chinese).
- [13] LONG Y H, XIONG L C, SHI T L. Experimental research of micro-machining silicon by excimer laser ablation in air and under water [J]. Laser Technology, 2006, 30(6):567-569(in Chinese).
- [14] TAN Y L. Water jet guided laser technology[J]. Superhard Material Engineering, 2013, 25(3):47-50(in Chinese).
- [15] PORTER J A, LOUHISALMI A, KARJALAINEN J A, *et al.* Cutting thin sheet metal with a water jet guided laser using various cutting distances, feed speeds and angles of incidence [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(9/10):961-967.

版权所有 © 《激光技术》编辑部