

文章编号: 0258-7025(2003)05-0467-04

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷激光铣削试验研究

袁根福, 曾晓雁

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷进行铣削加工试验。系统研究了工艺参数对铣削量和铣削面质量的影响规律, 并利用优化的铣削工艺对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷进行多种形状的铣削加工。

**关键词** 陶瓷学; 激光铣削; 铣削工艺; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Experimental Study of Laser Milling on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramics

YUAN Gen-fu, ZENG Xiao-yan

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University  
of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Experiments of laser milling were done on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics with Nd:YAG laser. The specialimts on the accounts of laser milling and milling surface quality with different parameters were studied systematically, and experiments of different shapes were also researched with optimized processes.

**Key words** ceramics; laser milling; milling process; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics

### 1 引言

随着科学技术的发展,工程陶瓷件的应用越来越广。一般陶瓷零件在毛坯烧结过程中有 20% 的收缩率<sup>[1]</sup>。陶瓷是由共价键、离子键或两者混合的化学键结合的物质,在常温下对剪切应力的变形阻力很大,且硬度高。由于陶瓷晶体离子间由化学键结合而成,化学键具有方向性,原子堆积密度低,原子间距离大,使陶瓷具有很大脆性<sup>[2]</sup>。用常规加工方法难以加工,特别是加工高精度、形状复杂的构件非常困难,而且导致精加工的费用增加(有的陶瓷件后续加工费用占整件费用的 70%),严重阻碍了精密陶瓷的推广应用,因此对精细陶瓷的后续加工,可以说是精细陶瓷应用的关键。近年来人们发明了多种加工方法,如超声波加工方法、激光加工方法等。由于激光加工具有效率高、非接触、柔性化、自动化、可靠性好等优点,因此,被广泛应用于陶瓷打孔、切割和划线等<sup>[3]</sup>。而利用激光来进行陶瓷的复杂成形

加工,是陶瓷激光加工的难点。铣削加工是一种很重要的成形加工方法,研究激光铣削,对扩大激光加工的应用范围和陶瓷复杂成形加工都是非常有意义的。

### 2 激光铣削原理

激光铣削就是使激光束按规定的图案,一层层扫描剥离(或称烧蚀)材料,类似于机械铣削过程。利用激光铣削,理论上可以铣削任何材料至所要求的尺寸。利用 Nd:YAG 脉冲激光来进行激光铣削,其实质是利用激光光斑部分重叠(图 1 所示)的单脉冲形成的密集孔群,来一层层剥离材料而达到成形的目的。

### 3 试验方法与设备

加工试样选用厚度足够的 95% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片。激光器采用华中科技大学激光公司生产的 Nd:

收稿日期:2002-03-04; 收到修改稿日期:2002-07-01

**作者简介:**袁根福(1964—),男,安徽建筑工业学院数理系副教授,华中科技大学激光技术国家重点实验室博士生,主要从事激光与物质相互作用和材料改性的研究。E-mail: forygf@263.net

YAG 固体脉冲激光器, 波长为  $1.06 \mu\text{m}$ , 脉宽和频率可调。激光输出能量的大小, 可以通过调节抽运灯电源电压来控制。激光经过透镜聚焦后垂直入射到工件表面。工作台由一台 586 微机自动控制。加工采用氧气作为辅助气体, 气压约为  $0.5 \text{ Mpa}$ , 喷嘴直径约为  $\phi 1.5 \text{ mm}$ 。试验通过改变不同的激光铣削工艺参数来探讨影响陶瓷激光铣削量和质量的规律。利用不同激光铣削工艺, 分别在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片上一次性铣出边长为  $3 \text{ mm}$  的方形槽。测量出槽的深度, 作为不同工艺激光铣削的铣削量大小的比较值。比较观察不同工艺激光铣削面的质量。利用优化的激光铣削工艺进行多种槽的试铣削, 用体视显微镜观察其形貌并照相。

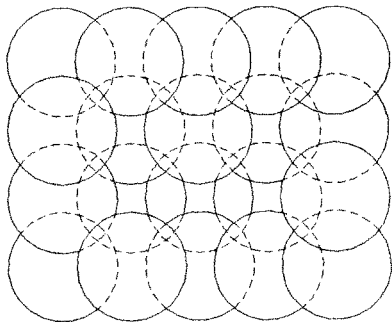


图 1 激光铣削原理示意图

Fig. 1 Principle schematic of laser milling

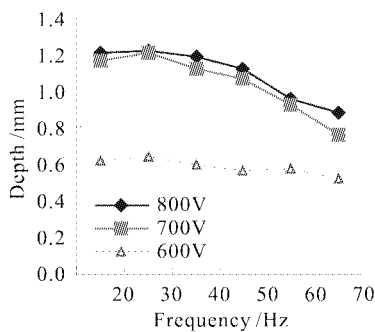


图 2 重复频率和激光输出能量与激光铣削量的关系

Fig. 2 Relationship among frequency, laser power and accounts of laser milling

### 4 试验结果与分析

#### 4.1 重复频率和激光输出能量对激光铣削量的影响

由于激光输出能量是由抽运灯电源电压控制的, 为了方便, 直接利用抽运灯电源电压作为衡量激光输出能量大小的指标。图 2 给出了在不同激光重复频率和输出能量条件下(脉宽  $0.5 \text{ ms}$ , 激光扫描

速度  $2 \text{ mm/s}$ )激光铣削量的变化规律。可以看出, 随着电源电压提高, 也就是激光输出能量的提高, 铣削量明显增加。但激光输出能量太大, 铣削量增加不明显, 这是由于激光能量太高, 在铣削面产生大量不易清除的熔渣的缘故。当激光重复频率较高时, 相同时间内试样加工区接受的激光能量较多, 加工面也易产生大量不易清除的熔渣, 反而使铣削量降低。当重复频率较低时, 铣削量也降低, 这是由于相邻光斑重叠度<sup>[4]</sup>低, 降低了孔深度, 从而降低铣削量。

#### 4.2 激光扫描速度和重复频率对激光铣削量的影响

图 3 给出了激光扫描速度和重复频率与铣削量的关系曲线。激光扫描速度是通过控制工作台移动速度来调节的。图 3 表示: 激光扫描速度太大和太小, 陶瓷的激光铣削量都比较小, 只有当扫描速度适中(如扫描速度为  $2 \text{ mm/s}$ ), 铣削量才明显增加。这是由于在相同的重复频率下, 扫描速度太大, 激光光斑重叠度很低, 铣削量明显降低; 当扫描速度太小, 同一时间内, 铣削面接受的激光能量太大, 容易产生过多不易清除的熔渣, 降低了铣削量。在高的扫描速度下( $3 \text{ mm/s}$ ), 铣削量随频率增加而增加, 在扫描速度为  $2 \text{ mm/s}$  时, 铣削量基本上随频率增加而降低。

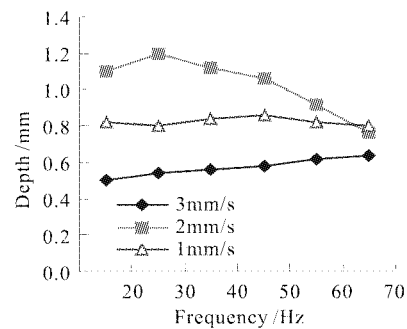


图 3 扫描速度和重复频率与铣削量的关系

Fig. 3 Relationship among scanning speed, frequency and laser milling

#### 4.3 激光输出能量和脉宽对激光铣削量的影响

图 4 是激光扫描速度为  $2 \text{ mm/s}$ , 重复频率为  $70 \text{ Hz}$  情况下, 抽运灯电源电压和脉宽与激光铣削量的关系曲线。可以看出, 抽运灯电源电压越高, 即激光输出能量越大, 激光铣削量越大。脉宽为  $0.5 \text{ ms}$  的铣削量明显比脉宽为  $0.2 \text{ ms}$  的铣削量高得多。这是由于长的脉宽可使激光形成的孔洞内的熔

体处于沸腾状态的时间长,熔体喷出量大,形成较深的孔洞,从而增加了铣削深度。

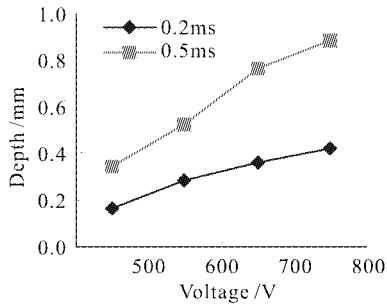


图 4 电压和脉宽与铣削量的关系

Fig. 4 Relationship among voltage, pulse width and accounts of laser milling

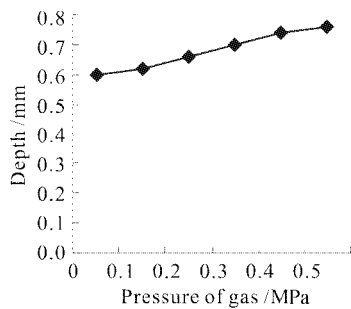


图 5 气体压力与铣削量的关系

Fig. 5 Relationship between pressure of gas and laser milling

#### 4.4 辅助气体的压力对激光铣削量的影响

图 5 为其他参数一定时,辅助气体压力的变化对铣削量的影响。具体工艺参数为:电压 700 V,脉宽 0.5 ms,扫描速度 2 mm/s,重复频率 50 Hz。由图 5 可见,激光铣削量随着气体压力增加而增加,压力增加到一定值后,铣削量增加速度变缓。辅助气体增加铣削量的原因是由于辅助气体增加了激光作用于试样产生喷溅物的飞溅速度,从而使熔体喷溅物飞离铣削面,减少了熔体在铣削面的凝结。气体压力越大,飞溅速度越大,熔体在铣削面凝结的几率越低,从而铣削深度越大。

#### 4.5 铣削工艺对 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光铣面质量的影响

前面已经指出,大能量、高频率和较低的扫描速度,容易在铣削面产生过量的不易清除的熔渣。大能量(电压为 700 V)和低重复频率(30 Hz)铣削的表面布满孔洞(图 6(a)和(b)),表面粗糙度  $R_a$  为 10~12,因此表面需要研磨后才能应用。这些孔洞形成的原因可能是由于激光束焦深有一个范围,激光束形成的“刀尖”难以位于同一平面的缘故。高重复

频率(70 Hz)和低能量(电压为 500 V)的组合,表面质量较好,  $R_a$  可达 2~4(图 7)。测得试样的激光铣削尺寸精度为 IT7~8。值得说明的是:激光铣削的精度很大程度上取决于数控工作台的精密程度,由于受条件的限制,影响了本试验精度。

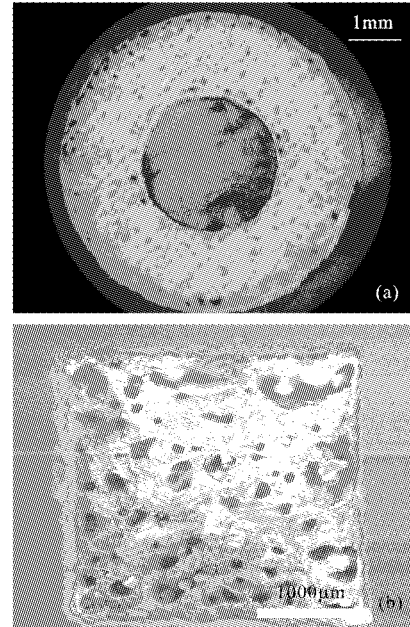


图 6 (a) 高能量、低频率铣削面;  
(b) 高能量铣削面扫描电镜图

Fig. 6 (a) Milling surface of high power and low frequency; (b) SEM's picture of high power milling surface

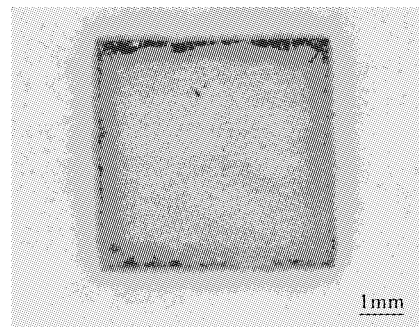


图 7 低能量、高频率铣削面

Fig. 7 Milling surface of low power and high frequency

## 5 工艺参数优化与多样铣削

根据上述试验结果与分析,激光铣削工艺参数对陶瓷铣削量和铣削面质量的影响很大,为了提高陶瓷激光铣削效率和降低铣削面粗糙度,有必要对激光铣削工艺进行优化。当需要较大的铣削速率时,激光脉宽应选用 0.5 ms,重复频率宜选 30~40

Hz, 激光扫描速度应选 2 mm/s 左右, 抽运灯电源电压以 700 V 左右为宜。为了降低激光铣削面粗糙度, 可以采用降低激光输出能量同时提高重复频率来达到, 但其铣削速度较低。为了保证陶瓷的激光铣削既有高效率, 铣削面又能满足较低粗糙度的要求, 可以先选用如上所述的工艺进行较高速粗铣, 然后再利用高频率(重复频率大于 70 Hz)和低能量(电压 500 V)工艺进行精铣。利用优化的工艺可以在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片上铣出各种精细图形(图 8, 9), 深度 2 mm 左右。图形尺寸精度 IT7~8, 铣削面粗糙度  $R_a$  为 7~8, 圆度 0.05, 对边平行度 0.04。激光铣削  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷面总的来说比较粗糙, 可以通过研磨来达到使用要求。

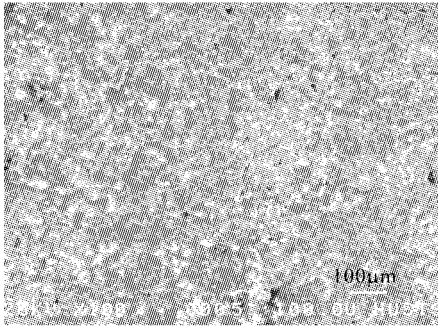


图 8 低能量铣削面扫描电镜图

Fig. 8 SEM's picture of low power milling surface

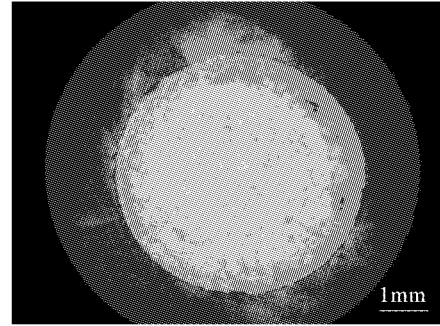


图 9 直径 8 mm 的盲孔

Fig. 9 Blind hole with 8 mm diameter

### 参 考 文 献

- 1 Jia Zhixin, Ai Dongmei, Zhang Qinhe *et al.*. The state of the machining technology of engineering ceramic materials [J]. *Materials for Mechanical Engineering* (机械工程材料), 2000, **24**(1):2~4 (in Chinese)
- 2 Ni Wen, Li Jianping, Fang Xing *et al.*. *Mineral Material Science Introduction* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 156~158 (in Chinese)
- 3 Toshiyuki Miyasak, Hajime Migazawa, Tadao Murakawa *et al.*. *Laser Machining Technology* [M]. The Press Industry Ltd. Co., 1994. 25 ~ 140 (in Japanese)
- 4 Li Xiangyou, Zeng Xiaoyan, Liu Yong *et al.*. Study of YAG laser cutting process with stainless steel sheet [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(12):1125~1129 (in Chinese)