

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0575-04

准分子激光精密加工陶瓷、玻璃等硬脆材料的研究*

江 超 胡少六 王又青 李 波 龙 华 敖育红

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

提要 采用波长 248 nm 的 KrF 准分子激光器, 对 Al_2O_3 陶瓷片及玻璃片的精密加工进行了研究, 探讨了各种工艺参数对加工质量的影响规律。同时研究了激光工艺参数对材料表面粗糙度的影响, 并且对加工后工件的表面形貌进行了分析。

关键词 准分子激光器, 激光精密加工, 脉冲切割, 工艺研究

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

Study on Precision Machining Ceramics and Glass by Excimer Laser

JIANG Chao HU Shao-liu WANG You-qing LI Bo

LONG Hua Ao Yu-hong

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

Abstract In this paper, the process studying of precision machining ceramics tile and glass tile with KrF ($\lambda = 248$ nm) excimer laser were carried out, the effects of processing parameters on quality of precision machining were studied. The effect of laser parameters on surface roughness of workpieces were studied too. The surface topography of machined workpiece was analyzed.

Key words excimer laser, laser precision machining, pulse cutting, process studying

1 引 言

陶瓷和玻璃有突出的物理、化学性质, 而且用途广泛。它们的应用中都必须加工成一定的形状。由于这些材料既硬又脆, 用传统的加工方法(化学机械加工法、喷水研磨法、超声波加工法等^[1~3])加工时, 工件容易产生裂纹, 而且比较费时、加工周期长, 并且很难加工成复杂的外形。随着激光器的出现, 新的加工方法产生了, 为这类材料的加工提供了便利。

以前人们大都用红外波段的激光来进行加工, 使用的激光器是: CO_2 激光器和 YAG 激光器。作用的机理是激光与材料相互作用的热效应, 因此只要材料的热物理性质好, 就能够加工它, 而不管它的机械性质如何。但是由于这些波长的激光在加工过程中, 要产生热应力, 因此加工硬脆材料时容易产生裂纹。为了克服加工的缺陷, 人们进行了大量的研究工作。近年来人们开始利用准分子激光器进行加

工工程陶瓷的研究, 这方面研究还是刚开始, 还有许多课题有待人们去研究。准分子激光器的激光波长短, 属于紫外和深紫外光谱段, 有强的脉冲能量和光子能量, 高的重复频率, 窄的脉冲宽度等性能, 而大多数的金属和非金属材料对紫外光都有强烈的吸收, 这些使准分子激光器在加工方面有独特的优势。因此准分子激光加工为“冷”加工, 加工时热应力小, 不易产生裂纹, 而且不影响周围材料, 材料去除量易控制, 所以特别适合陶瓷与玻璃等硬脆材料加工。

2 实验设备、材料

使用的主要实验设备为: 准分子激光器用德国制造的 EMG201MSC, 波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光, 频率为 1~80 Hz, 最大平均功率为 32 W, 单脉冲能量 400 mJ, 脉冲宽度 28 ns, 光斑尺寸 21 mm \times 8 mm; 扫描电镜(SEM); 表面粗糙度测量仪; 透镜、光阑和反射镜; 精密三维工作台; 计算机(用来控制三维工作台工作)。实验材料: 普通 K9 玻璃镜片, 厚度 1 mm; Al_2O_3 陶瓷片, 纯度为 85%, 厚度

* 教育部高等学校骨干教师资助计划、激光技术国家重点实验室开放基金(9907)资助课题。

1 mm;丙酮溶液,用来清洗工件的表面。

3 实验方法与实验过程

实验系统的示意图如图 1 所示。把加工的工件固定在三维工台上,准分子激光经过光学系统处理后照射到工件上,准分子激光的能量、脉冲个数和激光器的频率都可以控制。通过计算机控制工作台运动来进行加工,根据实验的需要可以让工作台作各种不同的运动。运用 SEM 观察加工面的形貌,分析加工过程中的变化;用光学粗糙度测量仪来测量工件的表面粗糙度;剥离量用孔的平均深度除以脉冲个数来计算;还可以用 AES 来分析激光与材料作用处发生的化学反应。整个实验都在空气中进行。

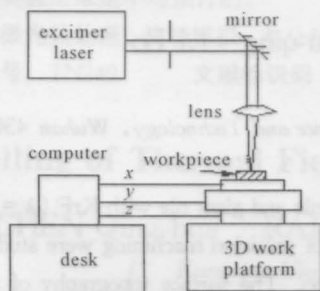


图 1 实验系统设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

4 实验结果与讨论

4.1 材料剥离量与准分子激光能量密度的关系

图 2 表示陶瓷和玻璃两种材料在激光作用脉冲个数 2400 时剥离量与激光能量密度之间的关系。从中可以看出,在激光能量密度变化时玻璃的剥离量比 Al_2O_3 的剥离量要大。而且激光的能量密度愈

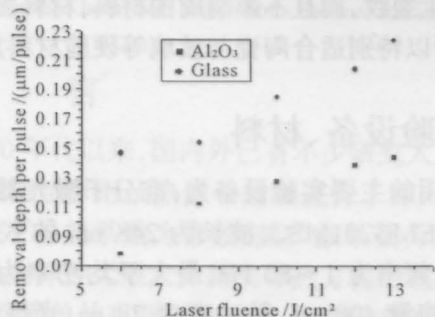


图 2 在激光脉冲为 2400 时,切割剥离量与激光能量密度的关系

Fig. 2 Removal depth per pulse vs. laser fluence for a constant number of pulses (2400)

大剥离量愈大,它们之间是单调的,但它们并不是严格的线性关系。玻璃比 Al_2O_3 有高的剥离量是由于两者的物理性质的差异。 Al_2O_3 的熔化温度和汽化温度比玻璃的低,而玻璃的热传导率比 Al_2O_3 高,热在玻璃材料中的传导比 Al_2O_3 更快。为了弥补热传导的损失,玻璃单位体积内吸收的能量更高,这些很好地说明了它的剥离量大的原因。

4.2 材料剥离量与准分子激光脉冲个数的关系

图 3 表示在激光能量密度一定时,剥离量与激光脉冲个数的关系。当脉冲数比较小时剥离量比较大,脉冲数增大时剥离量就明显减少,当脉冲数达到一定的数值时,剥离量就基本上保持恒定的值不变。两种材料的变化趋势是一样的,由于两种材料的物理性质差异,它们的数值有差别。上面的结论解释为:当激光脉冲数少时,残留物对剥离的影响很小;脉冲数大时残留物增多,它对剥离的影响比较大;当脉冲数增大到一定数值时,由于剥离量很小,那么残留物的影响就不那么明显了。

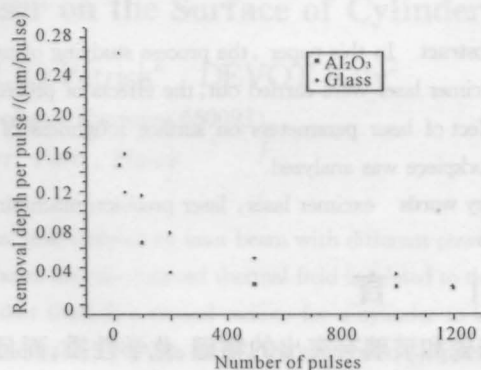


图 3 在激光能量密度为 4 J/cm^2 时,切割剥离量与脉冲数的关系

Fig. 3 Removal depth per pulse vs. the number of pulses at a laser fluence of 4 J/cm^2

4.3 材料表面粗糙度与激光加工工艺参数的关系

1) 陶瓷表面粗糙度与激光加工工艺参数的关系如表 1, 2 所示。

表 1 激光能量密度为 1.2 J/cm^2 , 脉冲频率为 2 Hz 时, 激光脉冲数与表面粗糙度的关系

Table 1 Dependence of the surface roughness on the number of pulses at a laser fluence of 1.2 J/cm^2 and laser pulse frequency of 2 Hz

Number of pulses	Roughness				
	0	200	1000	5000	25000
$R_z/\mu\text{m}$	2.32	2	2.3	2.6	2.5

表2 激光脉冲数为500,脉冲频率为2 Hz时,激光能量密度与表面粗糙度的关系

Table 2 Dependence of the surface roughness on the laser fluence(J/cm^2) at 500 pulses and laser pulse frequency of 2 Hz

Laser fluence	0	0.4	0.8	1.2	4
Roughness					
$R_z/\mu m$	2.32	1.44	2.22	2.3	3.68

从表1,2实验数据,可以得出:(1)在激光能量密度和频率一定时,表面粗糙度随脉冲数的变化而变化;在脉冲数很小时表面粗糙度减小;脉冲数增加时粗糙度增大。但当脉冲数增大到一定程度时,它对粗糙度的影响是很小了。这可以从脉冲数增大到一定值时剥离量变化很小中得到解释。(2)在激光脉冲数固定为500、脉冲频率2 Hz时,当能量密度小于某个确定值($1.2 J/cm^2$)时,粗糙度反而减小;当大于这个确定值($1.2 J/cm^2$)时,粗糙度开始明显增大,能量密度越大粗糙度越大。这说明在加工 Al_2O_3 时有一个能量密度阈值。根据前面的结果,剥离量随能量密度的增大而增大,那么残留物就会越来越多,粗糙度也就会越来越大,因此随着能量密度的增大粗糙度就会增大。

从上面的实验中也可以看到,只要我们很好地控制激光的能量密度和脉冲个数,可以使材料的表面粗糙度变小,因此就可以对材料的表面进行抛光。

2)玻璃表面粗糙度与激光加工工艺参数的关系如表3所示。

表3 激光能量密度 $1.2 J/cm^2$,脉冲频率2 Hz时,激光脉冲数与表面粗糙度的关系

Table 3 Dependence of the surface roughness on the number of pulses at a laser fluence of $1.2 J/cm^2$ and a laser frequency of 2 Hz

Number of pulses	0	300	1000	15000
Roughness				
$R_z/\mu m$	0.35	3.52	3.84	14.17

从表3中数据可以看到,在激光能量密度和脉冲频率一定时,表面粗糙度随脉冲个数的增加显著地增加,这是由于玻璃的剥离量很大造成的。

如果在脉冲数和频率一定时,改变激光的能量密度,粗糙度也会有很大的变化。另外在实验中发现如果增大激光的脉冲频率,上面两种材料的粗糙度有明显的减少,这也为我们提高加工质量提供了

依据。

4.4 在激光加工下,材料的表面形貌

从形貌图4中可以看到,当没有激光作用时(a), Al_2O_3 表面是一些比较大的颗粒;当激光脉冲数比较少时(b),表面颗粒被融化在一起粗糙度明显降低;当脉冲数增加时(c)残留物明显增多,而且表面出现一些孔隙,表面粗糙度就明显增大;当脉冲数很大时(d)材料表面的空隙很大,脉冲数再增大时粗糙度变化就比较小了。



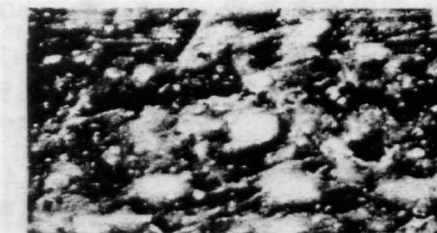
(a) $\times 2000$ 26 kV 10 μm



(b) $\times 2000$ 26 kV 10 μm



(c) $\times 2000$ 26 kV 10 μm



(d) $\times 2000$ 26 kV 10 μm

图4 激光能量密度为 $1.2 J/cm^2$, Al_2O_3 在不同脉冲数作用下用SEM拍摄的形貌
Fig. 4 SEM micrographs of Al_2O_3 irradiated areas at $1.2 J/cm^2$. (a) 0 pulses; (b) 200 pulses; (c) 5000 pulses; (d) 25000 pulses

从形貌图 5 中可以看到,当没有激光作用时(a)玻璃表面是很光滑的;当激光脉冲数比较少时(b),表面被融化空隙开始出现,粗糙度明显增大;当脉冲数很大时(c)残留物明显增多、表面孔穴增大,表面粗糙

度就变得很大。

从两种材料用激光打出的孔(图 6)可以发现陶瓷的残留物严重影响孔的质量,而玻璃的残留物对孔的影响比较小,打出的孔质量比较好。

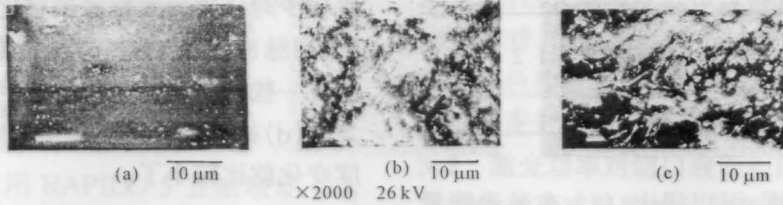


图 5 在激光能量密度为 1.2 J/cm² 时,玻璃在不同的脉冲数作用下用 SEM 拍摄的形貌

Fig.5 SEM micrographs of Glass irradiated areas at 1.2 J/cm². (a) 0 pulses; (b) 200 pulses; (c) 25000 pulses

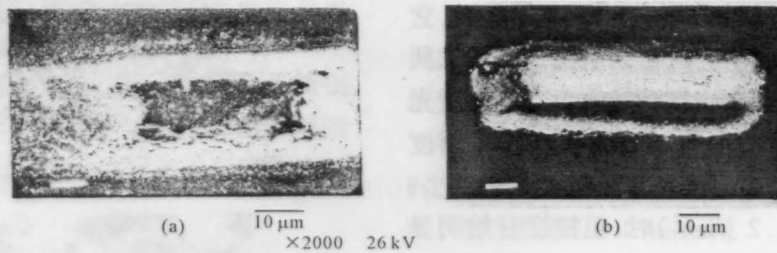


图 6 两种材料打出的孔的形貌. (a) Al₂O₃; (b) 玻璃

Fig.6 SEM micrographs of hole of (a) Al₂O₃ and (b) glass

5 结 论

经过准分子激光与陶瓷和玻璃这两种材料的相互作用的研究,发现激光的能量密度、脉冲个数、频率等对材料的剥离量、表面粗糙度、表面形貌、打孔的质量有很大的影响。选择不同的参数可以对陶瓷进行切割和表面抛光;对玻璃进行切割和打孔。而且两种材料的加工工艺参数有一定的差异。

参 考 文 献

1 L. Chen, E. Siores, W. C. K. Wong. Optimising

abrasive waterjet cutting of ceramic materials. *J. Materials Processing Technology*, 1998, **74**:251~254

2 K. P. Rajurkar, Z. Y. Wang, A. Kuppattan. Micro removal of ceramic material (Al₂O₃) in the precision ultrasonic machining. *Precision Engineering*, 1999, **23**:73~78

3 J. Li, P. Cheung, J. C. M. Li. Materials removal and energy dissipation during sawing of polycarbonate and glass. 1999 P II :S1359~6454 00049-X

4 V. Oliveira, R. Vilar, O. Conde. Excimer laser ablation of Al₂O₃-TiC ceramics: laser induced modifications of surface topography and structure. *Applied Surface Science*, 1998, **127~129**:831~836