

# CO<sub>2</sub> 激光控制断裂切割氧化铝陶瓷基片 最佳条件的探讨

张铭峰<sup>1</sup> 张胜雄<sup>2</sup> 郑劭家<sup>2</sup> 刘海北<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 高雄科学技术学院机械系, 高雄; <sup>2</sup> 中央大学光电科学研究所, 中坜)

**提要** 利用 CO<sub>2</sub> 激光连续脉冲频率的快慢, 平均功率的大小, 加上辅助空气吹气压力的变化及其之间的相互作用, 探讨氧化铝陶瓷基片控制断裂切割的最佳模式。

**关键词** CO<sub>2</sub> 激光, 断裂切割, 氧化铝陶瓷片

## 1 引 言

激光切割氧化铝陶瓷与氧助切割金属材料的机制迥然不同, 它属于可控导向断裂, 当激光光束顺着预定的切割方向加热时, 在光点周围很小区域引起定向的加热梯度和随之生成的高机械应力。这种高应力使氧化铝陶瓷这类脆性材料形成小裂缝。只要加工参数选择并控制恰当, 裂缝严格沿着光束移动方向不断形成, 从而把材料切断。且因不是将材料加热至熔点以上的高温, 当可避免切缝熔珠的形成, 造成材料表面的不平整。

根据过去的测试, 对氧化铝陶瓷基片的钻孔加工实验结果, 我们掌握了相当程度的经验和加工参数与方法, 本文将以前脉冲频率的快慢, 平均功率的大小, 加上辅助空气吹气的变化及其之间的相互作用, 对氧化铝陶瓷基片控制断裂切割提出以下实验分析及结果。

## 2 实 验

本文中所使用的 CO<sub>2</sub> 激光本体为 PRC 公司生产, 并配以三菱公司 320 m 数控控制器, 总型号 LPA-600S, 由激光本体输出的激光光束直径为 12 mm TEM<sub>00</sub> 光束, 使用 5' 聚焦镜, 经 CNC 控制焦点, 三维空间位移精度为 10<sup>-3</sup> mm, 焦点上的光点大小为 0.15 mm, 吹气喷嘴直径为 2 mm, 并确保吹气的稳定性, 经空气压缩机输出的高压气体先经一组空气过滤器及调压阀先行降压至 200 kPa, 进入吹气喷嘴前再加装一电控调压阀, 此调压阀可由 CNC 程式控制开关, 使吹气与激光的输出达到最佳同步。喷嘴内的气压则随时可由数位表读取。但为测量最后由吹气喷嘴吹出的气体压力, 则在吹气喷嘴处加装一测压器, 测得的压力值亦以数位显示。但测量完毕后即移除。

本文所用氧化铝陶瓷基片为电子工业专用, 纯度为 96%, 厚度为 0.635 mm, 长宽各为 50 mm。经实验结果分析后, 将加工参数分别设定为: 激光束焦点调至试片表面, 使用单模超脉冲

(Super pulses), 频率在 50~ 100 Hz, 工作周期(Duty cycle) 设定为 30%, 喷嘴吹气压力在 10~ 30 kPa 之间, 激光平均功率为 45 W, 55 W 及 65 W。为了避免人为操作误差, 以确保实验结果的可信度, 以上条件均以 CNC 程式控制。

### 3 理论、实验结果与讨论

#### 3.1 理论预测

对此相同材质的陶瓷基片钻孔加工理论及结果<sup>[1]</sup>, 根据脉冲激光输出能量的形态, 假设每一脉冲能量为一点热源, 瞬间作用在材料上时, 其热传导的模式<sup>[1]</sup>为

$$T = T_{\infty} + \frac{E_0}{8\rho C_p (\pi\alpha t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4\alpha t}\right] \quad \alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (1)$$

式中  $T_{\infty}$  为材料在离热源点  $\infty$  处的温度或室温温度,  $E_0$  为激光每一脉冲的能量,  $\rho$  为材料密度,  $C_p$  为比热,  $t$  为作用在材料上的脉冲时间,  $r$  为热传导扩散半径,  $\alpha$  为热扩散系数,  $K$  为热传导系数, 以上数据可从 Coors Ceramic Company 发布资料中获得。

事实上, 氧化铝陶瓷基片在钻孔作业时, 若无辅助吹气冷却, 极易因热震效应而造成龟裂现象。但公式(1)中并未考虑辅助吹气所造成的冷却效应。为了了解本实验所假设的辅助吹气压力大小所造成的变化, 可利用 Minolta-Land Cyclops 52 温度测量仪, 在激光平均功率为 45 W, 55 W 及 65 W, 脉冲频率为 50 Hz 及 100 Hz, 在不同的辅助吹气压力下, 测得材料表面温度及未加辅助吹气时的表面温度, 据此推算出冷却系数  $C$  值, 其结果如表 1(a) 及表 1(b) 所示。所以公式(1) 应再乘上冷却系数  $C$  值后, 才可作为实际加工时不同吹气压力下需求激光能量的预估值。

表 1 在不同 CO<sub>2</sub> 激光照射功率及吹气条件下的冷却系数

Table 1 Cooling coefficients under different CO<sub>2</sub> laser power and assisting gas pressure

(a) 脉冲频率为 50 Hz, 在不同条件下的冷却系数

(a) Cooling coefficients under different conditions when the pulse frequency is 50 Hz

Average laser power	45 W		55 W		65 W	
Pressure of assistant air	Temperature	Cooling coefficient	Temperature	Cooling coefficient	Temperature	Cooling coefficient
-	1168°C		1266°C		1334°C	
10 kPa	1110°C	0.950	1242°C	0.981	1278°C	0.958
20 kPa	1097°C	0.939	1226°C	0.968	1242°C	0.931
30 kPa	1088°C	0.932	1208°C	0.954	1218°C	0.913

(b) 脉冲频率为 100 Hz, 在不同条件下的冷却系数

(b) Cooling coefficients under different conditions when the pulse frequency is 100 Hz

Average laser power	45 W		55 W		65 W	
Pressure of assistant air	Temperature	Cooling coefficient	Temperature	Cooling coefficient	Temperature	Cooling coefficient
-	1176°C		1272°C		1347°C	
10 kPa	1120°C	0.952	1249°C	0.982	1285°C	0.954
20 kPa	1105°C	0.939	1238°C	0.973	1258°C	0.934
30 kPa	1090°C	0.927	1212°C	0.953	1218°C	0.912

因此, 公式(1) 应改写为

$$T = T_{\infty} + C \times \left[ \frac{E_0}{8\rho C_p (\pi\alpha t)^{3/2}} \right] \exp\left[ -\frac{r^2}{4\alpha t} \right] \quad (2)$$

C 值在喷射辅助气体时应小于 1。

再依此结果并以计算机分析发现, 当平均功率为 55 W, 吹气压力为 20 kPa, 脉冲频率为 100 Hz 时, 材料表面受照点上的温度约为 1200~ 1250℃。并未达到氧化铝陶瓷材料的熔点 (2045℃), 但却接近氧化铝陶瓷所能承受的最高工作温度。

### 3.2 实验结果及讨论

根据以上的估算, 实际切割后的结果如表 2 至表 4 所示。表 3 中平均功率为 55 W, 脉冲频率为 50 Hz 及 100 Hz, 辅助空气吹气压力分别为 10 kPa, 20 kPa 及 30 kPa,  $D_1$  表示激光能量在 0.1 s 作用在材料上时, 材料表面热扩散裂痕面积的直径,  $D_2$  表示材料表面热扩散区中材料近似熔解区的直径, 如图 1 所示。 $D_1/D_2$  表示扩散直径比, 此值越大, 裂痕扩散的机会越大, 并可以此扩散面积的重叠推算出控制断裂切割速度的快慢。

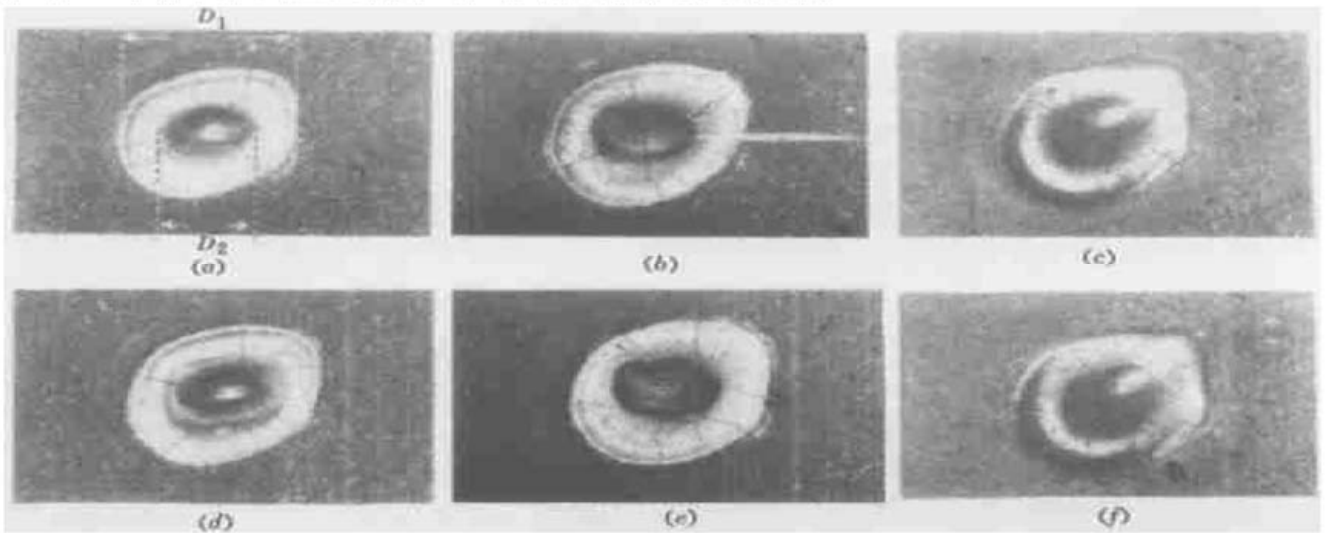


图 1 激光平均功率为 55 W, 脉冲频率及吹气压力不同时, 材料表面热扩散裂痕情形。裂痕  $D_1$  及无裂痕孔径  $D_2$  的大小见表 3

脉冲频率为 50 Hz 时, 空气吹气压力: (a) 10 kPa; (b) 20 kPa; (c) 30 kPa

脉冲频率为 100 Hz 时, 空气吹气压力: (d) 10 kPa; (e) 20 kPa; (f) 30 kPa

Fig. 1 Cracks on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic plates caused by laser with different pulse frequencies and pressures of assistant air, refer table 3 for sizes of  $D_1$  and  $D_2$

pulse frequency= 50 Hz, pressures of assistant air: (a) 10 kPa; (b) 20 kPa; (c) 30 kPa

pulse frequency= 100 Hz, pressures of assistant air: (d) 10 kPa; (e) 20 kPa; (f) 30 kPa

表 2 平均功率为 45 W 时的扩散直径比

Table 2 Ratios of diffusion diameters when the laser average power is 45 W

Pressure of assistant air	10 kPa			20 kPa			30 kPa			
	Pulse frequency	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$
50 Hz		0.268	*	*	0.265	*	*	0.249	*	*
100 Hz		0.275	*	*	0.270	*	*	0.249	*	*

\* 表示无裂痕。

表 3 平均功率为 55 W 时的扩散直径比

Table 3 Ratios of diffusion diameters when the laser average power is 55 W

Pressure of assistant air	10 kPa			20 kPa			30 kPa		
	Pulse frequency	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm
50 Hz	0.328	0.178	1.843	0.319	0.150	2.127	0.315	0.206	1.529
100 Hz	0.328	0.178	1.843	0.320	0.150	2.133	0.316	0.208	1.519

表 4 平均功率为 65 W 时的扩散直径比

Table 2 Ratios of diffusion diameters when the laser average power is 65 W

Pressure of assistant air	10 kPa			20 kPa			30 kPa		
	Pulse frequency	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm
50 Hz	0.346	0.201	1.721	0.339	0.180	1.883	0.332	0.220	1.509
100 Hz	0.352	0.208	1.692	0.341	0.182	1.874	0.338	0.225	1.502

表 5 平均功率为 55 W 时的不同脉冲频率及吹气压力时的扩散直径比

Table 5 Ratios of diffusion diameters under different pulse frequencies and pressures of assistant air when the laser average power is 55 W

Pressure of assistant air	10 kPa			20 kPa			30 kPa		
	Pulse frequency	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm	$D_1/D_2$	$D_1$ /mm	$D_2$ /mm
50 Hz	0.328	0.178	1.843	0.319	0.150	2.127	0.315	0.206	1.529
100 Hz	0.328	0.178	1.843	0.320	0.150	2.133	0.316	0.208	1.519
200 Hz	0.329	0.178	1.848	0.322	0.153	2.105	0.319	0.208	1.534
300 Hz	0.334	0.178	1.876	0.325	0.156	2.083	0.321	0.208	1.543
400 Hz	0.331	0.175	1.891	0.326	0.156	2.090	0.322	0.211	1.526
500 Hz	0.334	0.177	1.887	0.329	0.156	2.109	0.322	0.210	1.533

由表 2 至表 4 分析,  $D_1/D_2 = 2.133$  为最大值, 其平均功率为 55 W, 脉冲频率为 100 Hz 及辅助吹气压力为 20 kPa。为了再次验证此参数的可靠性, 在平均功率为 55 W 时, 改变辅助空气吹气压力及脉冲频率交叉的作用, 其实验结果如表 5 所示。

由以上实验结果, 我们选定激光平均功率为 55 W, 脉冲频率为 100 Hz, 辅助空气吹气压力为 20 kPa 为最佳控制断裂切割加工的基本参数。再以此参数推算切割速度。

控制断裂切割加工结果的成败, 关键在于每一脉冲能量所造成的热扩散面积上的裂痕是否能互相连结。其最大连结模式为两裂痕扩散区相切, 而最小连结模式为两裂痕扩散区半径重叠。并可预估其切割速度关系如下:

$$\text{最大切割速度: } D_1 \times \text{脉冲频率} = 0.32 \times 100 = 32 \text{ mm/s}$$

$$\text{最小切割速度: } (D_1/2) \times \text{脉冲频率} = (0.32/2) \times 100 = 16 \text{ mm/s}$$

以此预估数据, 辅以实验验证, 切割长度为 60 mm, 横跨试片长度, 每隔 10 mm 切割一道。图 2 所示为其控制断裂裂痕连结情形, 图中央较大裂痕区为激光脉冲中心点, 实际加工结果其控制断裂切割速度约为 21.7 mm/s 为最佳条件, 由图 2 可见, 其切缝表面裂痕不太均匀, 但经拨断后, 以表面粗糙度计(Mitutoyo Surf test 301)测量其粗糙度为  $R_a = 1.47 \mu\text{m}$ , 相当于机械加工的

精密切割, 肉眼观察其断面, 有相当好的平整度。

## 4 结 论

首先我们对 CO<sub>2</sub> 激光控制断裂切割加工氧化铝陶瓷基片的可行性做了加工参数及机制的分析和了解, 并提出辅助吹气在加工机制上的影响且测量其冷却系数, 作为热传导模式的修正值。列出了三个互相影响加工品质的条件为: 激光平均功率的大小、脉冲频率的大小及辅助空气吹气压力的大小, 并以实验观察其相互作用后的结果, 结论如下:

1) 陶瓷材料种类甚多, 加工方式亦不尽相同。根据氧化铝陶瓷材料的特殊物理性质, 若以激光为主要加工方式时, 应以脉冲模式为最佳;

2) 控制断裂切割是以裂痕连结导向为加工的主要方式, 因此低功率、短脉冲是可行的加工模式;

3) 为避免过高的吹气压力造成裂痕异常扩散而破裂, 应考虑运用低压辅助空气吹气;

4) 利用上列的三个相互作用条件, 评估控制断裂切割时的裂痕效应, 可预测切割速度的范围;

5) 由表 3 及表 5 可看出脉冲频率为 50 Hz 时, 其  $D_1/D_2$  值与脉冲频率为 100 Hz 时相当接近, 此结果表示脉冲频率比其他加工参数有较大的选择空间。

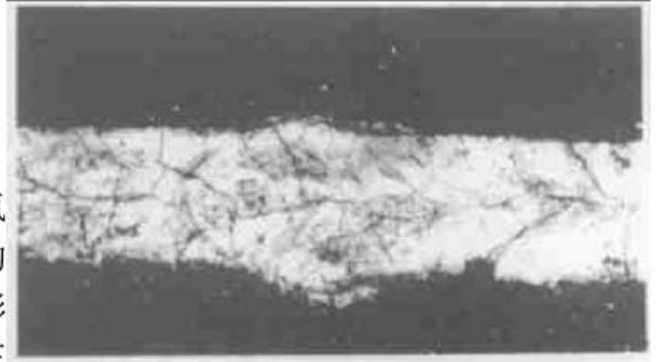


图 2 激光平均功率为 55 W, 脉冲频率为 100 Hz, 辅助空气吹气压力为 20 kPa, 切割速度为 21.7 mm/s 时, 材料裂痕连结情形 (100 倍)

Fig. 2 Cracks on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic plate surface when laser average power is 55 W, pulse frequency is 100 Hz, pressure of assistant air is 20 kPa and speed of cutting is 21.7 mm/s

## 参 考 文 献

- 1 Chang Mingfeng, Cheng Chaochia, Chang Shengsiung *et al.*. Investigation of optimized drilling conditions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic plate by CO<sub>2</sub> laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, 26(5): 449~ 454 (in Chinese)

## Investigation of Optimized Cutting Conditions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Plate by Pulsed CO<sub>2</sub> Laser

Chang Mingfeng<sup>1</sup> Chang Shengsiung<sup>2</sup> Cheng Chaochia<sup>2</sup> Liu Haipei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Kaohsiung Institute of Technology, Kaohsiung  
<sup>2</sup>Institute of Optical Science, Center University, Zhongli

**Abstract** This article investigates the influence of the factors such as frequency of CO<sub>2</sub> laser pulses, laser average power and the pressure of assistant air on the quality of cutting. The optimized conditions to cut ceramics for example Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are discussed.

**Key words** CO<sub>2</sub> laser, laser cutting, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic