

氧化铝陶瓷基片 CO₂ 激光钻孔 最佳条件之探讨

张铭峰 郑劭家 张胜雄 刘海北

(中央大学光电科学研究所 台湾)

提要 利用 CO₂ 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交互作用, 来探讨氧化铝陶瓷基片钻孔的最佳模式。

关键词 CO₂ 激光, 钻孔, 氧化铝陶瓷片

1 引 言

高能量的激光光束应用在材料加工上, 在近几年的快速发展中, 已获得大多数使用者的肯定。无论是激光光束品质的调制, 加工机具的控制, 加工参数的设定, 材料的变化等等问题, 都引起了相当多研究者的兴趣。

在这些激光加工中, 研究的主题不外乎是钻孔、切割、焊接等条件的考量, 光学系统的变化, 热传导的问题等复杂的因素。而也都有相当合理的结论: 如 M. von Allen^[1]以数学模式讨论 Nd·YAG 激光对铜的钻孔速率, Yilbas^[2]曾以光学聚焦及加工环境气压变化对金属材料的钻孔进行研究, P. S. Wei 和 J. Y. Ho^[3]对钻孔时材料上的能量分布加以考量, R. W. Olson 等^[4]考虑到高斯光束聚焦点位置对钻孔深度之探讨, Yilbas^[5]再次讨论光束聚焦腰部位置对钻孔成形的效应等。但是有关钻孔时辅助气体吹气压力、脉冲频率、脉冲能量及平均功率等的变化以及其交互作用后对钻孔所造成的影响等课题, 则甚少提到。大部分研究激光钻孔的实验探讨都以金属材料为主。事实上, 属非金属材料的氧化铝陶瓷因其硬度、强度、绝缘性、导热性质的特殊能力, 在电子工业中已大量用来作为 IC 基板、多层陶瓷基板等, 但也因使用形状的日趋复杂, 在陶瓷基片初胚成形后进行钻孔、切割等工作, 也更加重要。以钻孔为例, 若品质良好, 则除钻孔外, 将来若以连续钻孔进行切割时, 应也可以得到较佳的品质。因此, 本文即以传统加工较难处理的氧化铝陶瓷基片为探讨的对象, 改以激光为加工工具, 并改变加工参数探讨加工条件以获得一较佳的钻孔品质及模式, 此模式亦将推广到切割的应用上。

2 实 验

2.1 实验设备

本文中所使用的 CO₂ 激光本体由 PRC 公司生产, 并配以三菱公司 320M 数控控制器, 总

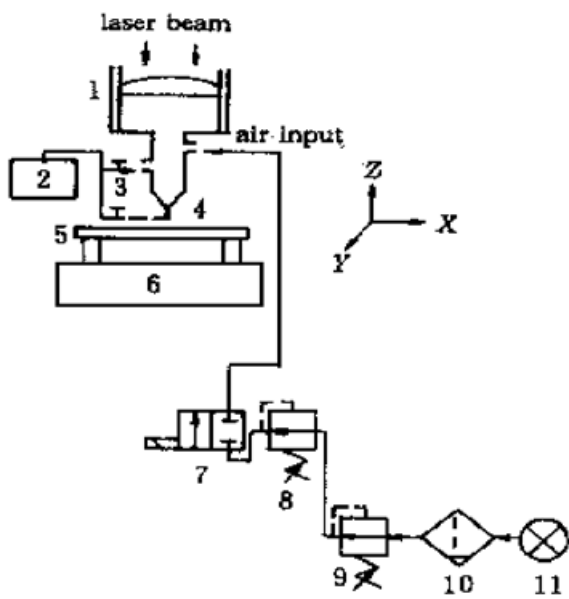


图1 实验装置

1: 聚焦镜; 2: 数字空气压力计; 3: 阀; 4: 喷嘴; 5: 工件; 6: $x-y$ 台; 7: 2/2 螺线管操作阀; 8, 9: 减压阀; 10: 过滤器; 11: 空气压缩机

Fig. 1 The experiment setup

1: focusing lens; 2: digital air pressure gauge; 3: valve; 4: nozzle; 5: workpiece; 6: $x-y$ table; 7: 2/2 solenoid operated valve; 8, 9: reducing valve; 10: filter; 11: air compressor

型号为 LPA-600S。由激光本体输出之激光光束直径为 12 mm TEM₀₀ 单模, 使用 5' 聚焦镜, 经 CNC 控制焦点三维空间位移精度为 10^{-3} mm, 吹气喷嘴之口径为 2 mm, 并确保吹气之稳定性, 经空气压缩机输出之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 程式控制开启与否, 使吹气与激光之输出达到最佳同步。喷嘴内之气压则随时可由数位表读取。但为了测量最后由吹气喷嘴吹出之气体压力, 则在吹气喷嘴处加装一测压器, 测得之压力值亦以数位显示之。但测量完毕后即移除, 如图 1 所示。

2.2 实验过程

本文中所使用的试片为电子工业用, 纯度为 96%, 厚度为 0.635 mm 的氧化铝陶瓷基片。激光光束焦点调至试片表面, 使用 TEM₀₀ 单模超脉冲 (super pulse), 频率在 600~1000 Hz 范围, 工作周期 (duty cycle) 设定为 30%, 喷嘴吹气压力在 60~100 kPa 之间, 激光平均功率在 80~120 W 范围。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 程式控制之。

为求得钻孔孔径值之可信度, 以同样的条件, 在试片上 6 个不同的位置上钻孔, 再以工具显微镜配合精度为 10^{-3} mm 的光学尺对每一钻孔各测量其 $x-y$ 方向的直径值后加以平均, 可得一个孔径数据, 并在这 6 个孔径数据中去除差异较大者, 而选取 5 个孔径以算出平均值及标准差。

3 热传理论与实验结果之对照

3.1 理论预测

事实上, 以激光对材料钻孔条件的研究, 有众多不同的论点。大家对不同的材料、不同加工条件的考虑目标, 都在于寻找一个较佳的加工模式。

而在本文中将探讨的试片材料为氧化铝陶瓷基片, 其物理性质有别于一般的金属材料, 且以一般传统的机械方法加工有其困难之处: 除了其高熔点及硬度甚高外, 热震效应造成材料龟裂也是此材料难以热能为加工方式的一大主因。因此在本文中, 假设了对氧化铝陶瓷基片钻孔产生影响的三个条件, 并提出实验结果以进行讨论。此三个条件分别为: (1) 以激光连续模式进行氧化铝陶瓷材料钻孔, 会造成热震龟裂的现象, 此已为大家所认知, 因此我们使用脉冲模式。但事实上, 脉冲频率的快慢, 主要影响了激光能量和材料间交互作用时间的长短, 而若以足够达到材料熔点的能量而言, 脉冲频率的快慢却又会造成热传导而扩散了温度梯度的范围, 进而影响了钻孔孔径的大小; (2) 如果不改变脉冲频率而增大激光功率能量, 一定也会造成材料热扩散面积的加大, 钻孔的孔径必然会受到影响; (3) 为了避免以上两种条件之间的互相影

响,一般在钻孔加工时会考虑加上辅助气体。由于以激光钻孔氧化铝陶瓷基片时无须以氧气辅助,故采用空气即可。此时我们所在乎的,是辅助空气吹气压力的大小,及此压力是否会影响到脉冲频率及激光能量变化间的相互效应,进而改善钻孔的品质。

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,其热传导的公式^[6]为

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

$$\alpha = k/\rho C_p$$

式中 T_{∞} 为材料的室温温度, E_0 为激光每一脉冲的能量, ρ 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, α 为热扩散系数, k 为热传导系数。以上数据可由 Coors Ceramic Company 发布之资料中获得。

事实上,氧化铝陶瓷基片在钻孔作业时,若无辅助吹气的冷却,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。为了了解本文所假设的辅助吹气压力大小所造成的改变,利用 Minolta-Land Cyclops 52 温度测量仪,在平均功率为 53 W,脉冲频率为 300 Hz,无辅助吹气时,量得受照点温度为 1600℃。而当辅助吹气压力为 60 kPa, 80 kPa 及 100 kPa 时,量得温度分别为 768℃, 736℃及 704℃,推算出冷却系数 c 值应为: 0.44, 0.46, 0.48。所以公式(1)应再乘上冷却系数 c 值后,才可作为实际钻孔时在不同吹气压力下,须求激光能量的预估值。

因此,公式(1)应改写为

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

c 值为冷却系数,于喷射辅助气体时其值应小于 1。

以脉冲频率为 600 Hz,辅助空气吹气压力为 100 kPa 时为例,利用公式(2)作电算模拟每一脉冲能量作用在氧化铝陶瓷基片时热量分布之状况,如图 2 所示。预估平均功率在 93 W 时,钻孔中心温度可达到基片熔点(2045℃),而将形成最小孔径。

3.2 实验结果及讨论

根据以上的估算,在实际钻孔实验后的结果如图 3(a) ~ (c) 所示。脉冲频率分别为 600 Hz, 800 Hz 及 1000 Hz,横坐标表示激光平均功率(W),工作周期如前所述设定为 30%,纵坐标表示钻孔孔径尺寸(mm)大小,并以平均值及标准差作图表示。各图中表示了同一脉冲频率下,辅助空气吹气压力分别为 60 kPa, 80 kPa 及 100 kPa 时所造成钻孔孔径的变化。

图 3(a) 中,我们发现当脉冲频率固定时(此图中脉冲频率为 600 Hz),激光平均功率的增加,并未能造成钻孔孔径的正比增大趋势,而会造成由大渐小而后再变大的现象,并在某一平均功率时出现一最小孔径值。其实这个现象是可以理解的,以图 3 中辅助空气吹气压力为 100 kPa 时为例,在激光平均功率为 80~ 95 W 之间时,因辅助气体的吹送,造成热量的流失,使得一次

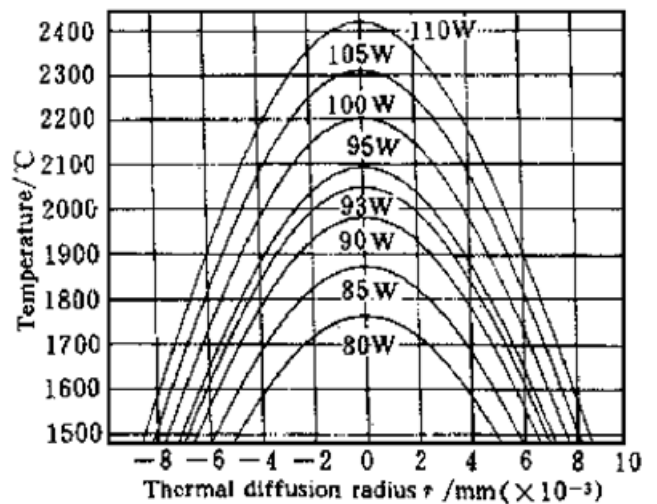


图2 脉冲频率为 600 Hz 时,不同激光平均功率下计算机模拟的温度分布与热扩散半径的关系

Fig. 2 At pulse frequency = 600 Hz, computer simulated temperature distribution versus thermal diffusion radius at different laser average power

脉冲激光能量无法完成钻穿,而必须经多次脉冲提供能量,因此也造成热量扩散面积的增加而扩大孔径;在平均功率为 95 W 时,钻孔中心温度刚好达到熔点,而形成了最小孔径;在激光平均功率为 95~120 W 之间时,因脉冲能量的增加,热量扩散的面积更加扩大,因此钻孔孔径又

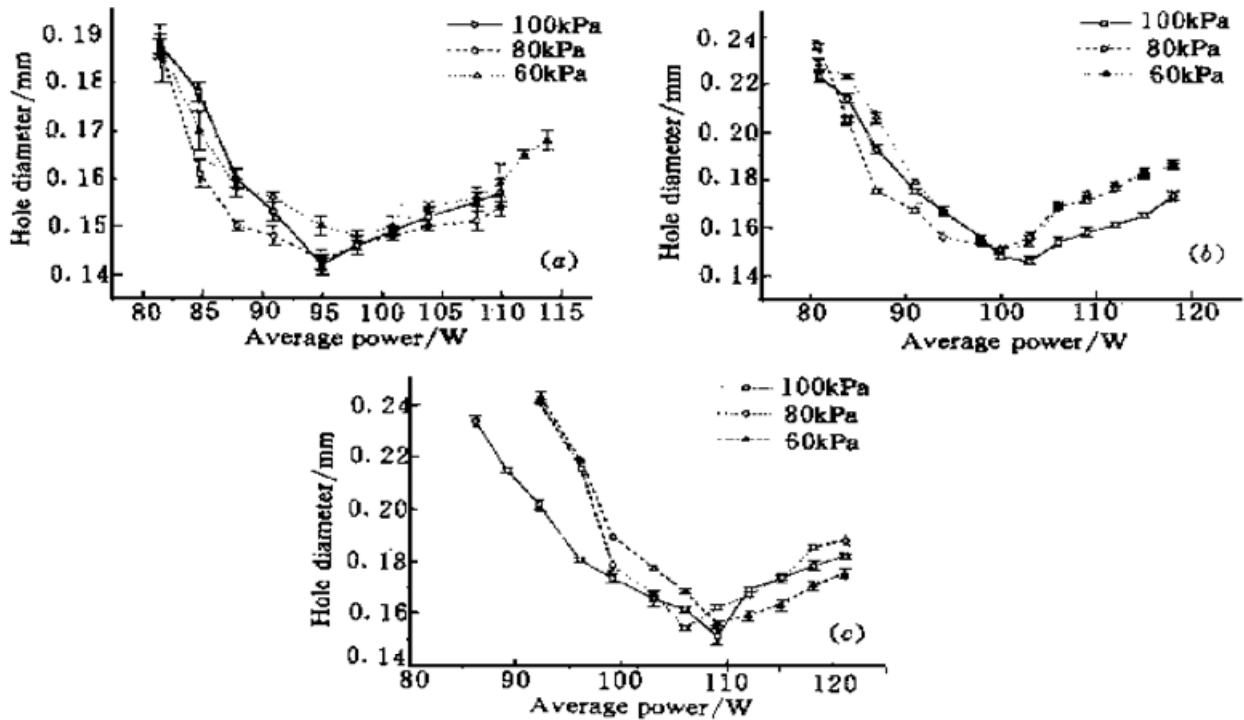


图 3 不同辅助气压时小孔直径随激光平均功率的变化

Fig. 3 Hole diameter versus laser average power at different pressures of assistant air

(a) pulse frequency= 600 Hz; (b) pulse frequency= 800 Hz; (c) pulse frequency= 1000 Hz

再次变大了。观察图 3 (b) 及(c), 其实验结果也出现相同而稳定的情况。

以上的数据及讨论可合并为图 4, 三条数据线各表示不同的辅助空气吹气压力值。当激光平均功率固定为 100 W, 在同一脉冲频率时吹气压力越大则钻孔孔径尺寸越小, 且在脉冲频率

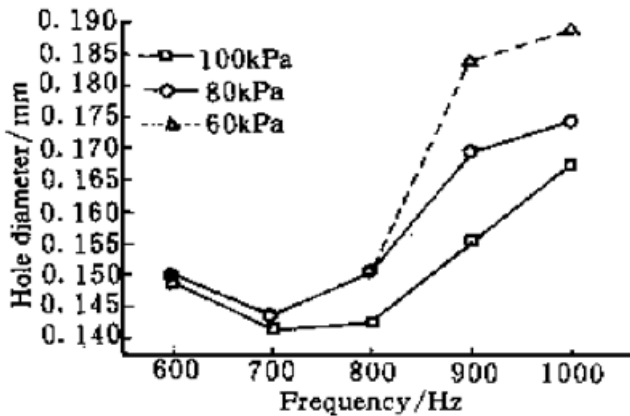


图 4 平均激光功率为 100 W 时,小孔直径随激光频率和辅助气压的变化

Fig. 4 At laser average power= 100 W, hole diameter versus pulse frequency and different pressures of assistant air

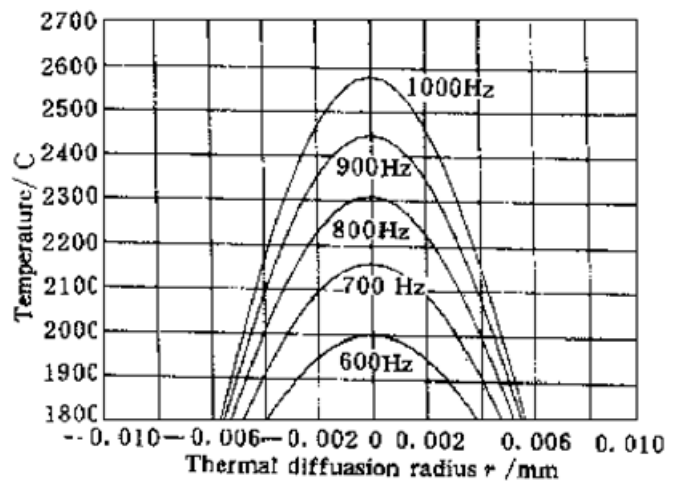


图 5 平均激光功率为 100 W 时,不同脉冲频率下温度分布与热扩散半径的关系

Fig. 5 At laser average power= 100 W, temperature distribution versus thermal diffusion radius at different laser pulse frequency

为 700 Hz 将得一最小孔径值。

再利用公式(2)作电算模拟分析,以图 4 中之脉冲频率、平均功率为参数,取吹气辅助空气压力为 100 kPa 为例,可得图 5 之热量分布图。可以发现当频率为 700 Hz 时,每一脉冲能量作用在氧化铝陶瓷基片上之热量刚好达到熔点温度,而频率越高,热量越大,热传导扩散开的半径也逐渐增加了,这是造成钻孔孔径扩大的主因。但对同一频率及同一脉冲能量,吹气压力越高时冷却速度也越快,而阻止其扩散半径的变大。因此,吹气压力越大时,钻孔孔径尺寸也就越小。

事实上若以连续激光作为钻孔的加工模式,虽然也可以利用辅助空气达到冷却的效果,但因连续能量的提供,依旧会造成龟裂或钻孔孔径的极度扩大。以图 6 为例,图 6 (a) 为连续激光功率为 148 W 时钻孔之孔径结果,图 6 (b) 为本文所提供之脉冲激光频率为 700 Hz,平均功率为 148 W 时钻孔之孔径结果。激光能量作用在氧化铝陶瓷基片上的时间均为 1 s,辅助空气吹气压力均为 80 kPa,但测量钻孔结果为:图 6 (a) 中之孔径为 0.448 mm,而图 6 (b) 中之孔径仅为 0.177 mm。

综观以上的实验结果及理论分析,肯定了本文中所提出的三个条件:在脉冲频率、平均功率及辅助空气吹气压力的交互作用下,对氧化铝陶瓷基片钻孔的作业可获得一最佳的模式。

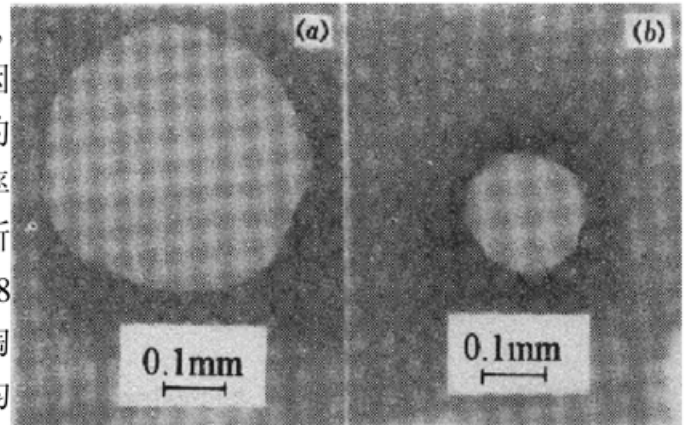


图 6 不同激光模式的小孔直径
激光功率为 148 W, 辅助气压为 80 kPa
(a) 连续输出; (b) 脉冲输出(700 Hz)

Fig. 6 Hole diameter at different laser models
laser power= 148 W, pressures of assistant air= 80 kPa
(a) cw mode; (b) pulse mode (700 Hz)

4 结 论

(1) 陶瓷材料种类甚多,加工方法亦不尽相同,但若以激光为主要方式时,自应以脉冲模式为最佳。

(2) 若激光平均功率固定,而仅增减脉冲的频率,则钻孔孔径尺寸并未与脉冲频率呈正比趋势,且在某频率时产生一最小的孔径值。

(3) 若脉冲频率固定,仅增减激光的平均功率,则钻孔孔径尺寸并未与激光平均功率呈正比趋势,且在某平均功率时产生一最小的孔径值。

(4) 因此,在激光平均功率、脉冲频率再加上辅助空气吹气压力等三个条件交互作用下,对氧化铝陶瓷基片的钻孔孔径的品质,可得一最佳的结果。充分掌握钻孔条件后,将着手进行最佳切割条件之研究。

参 考 文 献

- 1 M. von Allmen. Laser drilling velocity in metals. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(12): 5460~ 5463
- 2 B. S. Yilbas, F. Begh. The examination of optimal focus settings with material thickness at atmospheric and subatmospheric pressures of air and oxygen in laser drilling of metals. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1988, **202**(B2): 123~ 127
- 3 P. S. Wei, J. Y. Ho. Energy considerations in high-energy beam drilling. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 1990, **33**(10): 2207~ 2217
- 4 R. W. Olson, W. C. Swope. Laser drilling with focused Gaussian beams. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(8): 3688~ 3696
- 5 B. S. Yilbas, M. Sami. Study into the effect of beam waist position on hole formation in the laser drilling. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1996, **210**: 271~ 277
- 6 D. Poulikakos. Conduction Heat Transfer. America, Prentice-Hall Inc., 1994. 192~ 193

Investigation of Optimized Drilling Conditions of Al₂O₃ Ceramic Plate by CO₂ Laser

Chang Mingfeng Cheng Chaochia Chang Shenghsiung Liu Haipei
(*Institute of Optical Science, Central University, Taiwan*)

Abstract CO₂ laser is a desirable tool to drill ceramics such as Al₂O₃. Drilling of Al₂O₃ ceramics has several problems to be solved: such as high melting point, high hardness degree and crack coming from thermal shock. This study investigates the influence of factors such as frequency of pulses, laser average power and the pressure of assistant air on the quality of drilling. Their mutual influence on the hole size is discussed.

Key words CO₂ laser, drilling, Al₂O₃ ceramic plate