

自由运转与声光调 Q Nd:YAG 激光打孔的比较*

王智勇 李强 鲍勇 王旭葆 左铁钊

(国家产学研激光技术中心北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022)

提要 在分析自由运转 Nd:YAG 激光、连续声光调 Q Nd:YAG 激光和脉冲声光调 Q Nd:YAG 激光脉冲对打孔材料的相互作用的基础上,通过试验对这几类激光器打孔进行了比较,分析及试验结果表明,脉冲声光调 Q Nd:YAG 激光器可获得再铸层小、无裂纹的高质量激光打孔。

关键词 激光打孔, 声光调 Q, Nd:YAG 激光

中图分类号 TN248.1⁺3; TN249 文献标识码 A

Comparison of Drilling between Free-running and Acoustic-optical Q-switched Laser

WANG Zhi-yong LI Qiang BAO Yong WANG Xu-bao ZUO Tie-chuan

(National Center of Laser Technology, College of Laser Engineering at Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract On the basis of analysis on interaction between processing materials and three types of lasers, i. e., free-running, CW-acoustic-optical Q-switched and PW-acoustic-optical Q-switched Nd:YAG laser, the experiments on laser drilling with these lasers were carried out. It was shown from analysis and experiments, PW-acoustic-optical Q-switched Nd:YAG laser can be used in drilling to attain high quality drilling holes with less recast layer and free cracks.

Key words laser drilling, acousto-optical Q-switch, Nd:YAG laser

1 引言

同传统的打孔方法相比,如机械打孔、化学蚀刻打孔、电火花打孔、电子束打孔等,激光打孔具有打孔速度快、效率高、打孔孔径小、无接触、能在空气中传输、打孔深径比高、可加工任意材料、环保等优点,是未来打孔的发展方向^[1]。但是受多方面因素的影响,激光打孔并没有在工业中得到广泛的应用,其中主要的原因是激光打孔所采用的激光器不能满足要求^[2]。到目前为止,激光打孔所采用的激光器主要为 Nd:YAG 激光器,工业应用中常见的包括自由运转脉冲 Nd:YAG 激光器、声光调 Q Nd:YAG 激光器和新近出现的超短脉冲固体激光器。这些激光器在打孔中存在或多或少的严重问题,限制了激光打孔的应用。如果要使激光打孔在工业中取得突破,需要采用新型的激光器。

对于自由运转的脉冲 Nd:YAG 激光器^[3],虽然

加工效率高,但存在诸如打孔质量差、孔锥度大、打孔重复性差、孔壁存在裂纹和再铸层、孔内有金属沉积等缺点,这使得自由运转激光打孔只能用于要求不高的地方。为了解决自由运转激光器打孔所存在的问题,在 20 世纪 90 年代,开始采用声光调 Q Nd:YAG 激光器来进行打孔,获得了令人满意的打孔效果。但是采用光束质量比较差的打标机用声光调 Q Nd:YAG 激光器打孔还不能达到工业应用的目的^[4,5],存在诸如对厚金属板不能加工、金属沉积和大热影响区等问题。最近几年,为解决激光打孔质量不好的问题,出现了采用超短脉冲固体激光器打孔的方法。虽然这类激光打孔方法能获得高质量精细的打孔质量,但是由于超短脉冲激光器价格昂贵,而且平均能量比较低,不能获得高速度的激光打孔,同样限制了激光打孔在工业中的应用。

本文在分析了自由运转脉冲激光器、连续声光调 Q Nd:YAG 激光器和脉冲声光调 Q Nd:YAG 对金属的打孔作用过程的基础上,进行了打孔的试验分析和比较研究,提出了一种新型的打孔激光器。

*北京市科技新星计划资助课题。

2 激光脉冲对打孔过程的影响

自由运转的 Nd:YAG 激光器分为连续和脉冲两类,如果对自由运转的连续 Nd:YAG 激光器进行调 Q 处理后就得到连续调 Q Nd:YAG 激光器,打标机一般就属于该类型激光器。同理,对自由运转的脉冲 Nd:YAG 激光器进行调 Q 处理后就得到脉

冲调 Q Nd:YAG 激光器。自由运转脉冲 Nd:YAG 激光器、连续调 Q Nd:YAG 激光器和脉冲调 Q Nd:YAG 激光器输出激光光脉冲如图 1 所示。这三种激光器是激光打孔的常用激光器。不同的激光脉冲对打孔过程的影响不同。

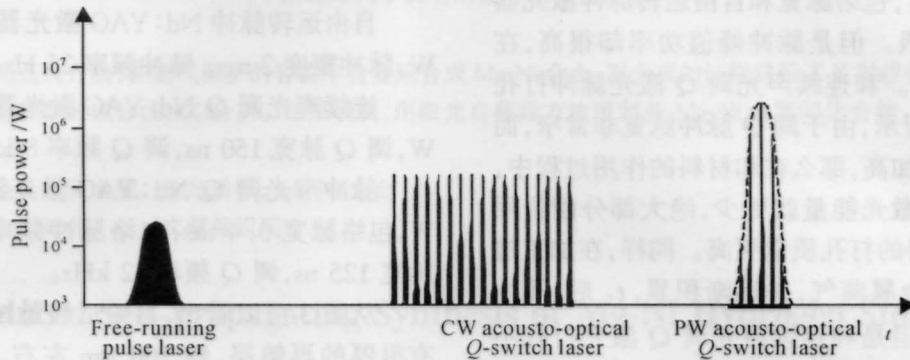


图 1 三种激光器光脉冲示意图

Fig.1 Diagram of three types of laser pulses

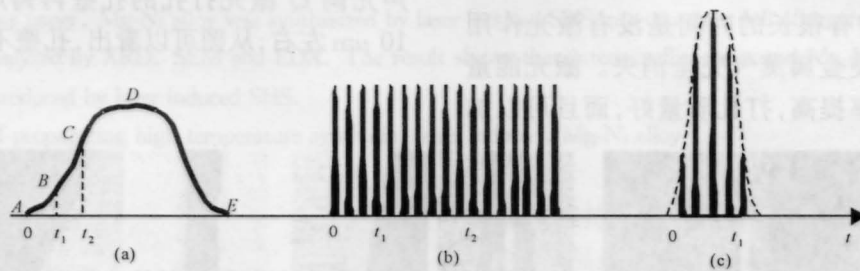


图 2 各种激光器打孔过程示意图

Fig.2 Diagram of drilling process of different lasers

2.1 自由运转脉冲激光对打孔过程的影响

自由运转激光脉冲的脉宽一般为毫秒量级,脉冲峰值功率在 $10^4 \sim 10^5$ W 之间。如图 2(a)所示,自由运转激光脉冲打孔分为 3 个阶段。AB 阶段:在此阶段,激光功率比较低,与材料相互作用时,起到加热材料的作用,使材料的温度升高并达到熔点。BC 阶段:激光功率进一步升高,材料的温度继续升高,然后熔化并迅速达到沸点而蒸发。在这一阶段受蒸气反冲作用,以及辅助吹除气体的作用,熔化的金属会从孔中喷出。CDE 阶段:激光功率继续升高,除提供更大的反冲压力外,激光还会与金属蒸气发生作用,形成激光诱导的等离子体。等离子体及金属蒸气将会对激光束产生散射等作用,从而导致激光作用在孔底材料上的有效能量降低,而其他大部分的激光能量被散射到孔壁,导致孔壁热影响区的扩大,金属沉积和裂纹等。由于等离子体及金属蒸气

对激光束的作用是很复杂和无规的,没有可重复性,因而对于采用多次脉冲才能打穿的厚金属板材,就不能预测多少脉冲才能打穿,所加工的孔也没有重复性,而且形状也不规则。

2.2 连续声光调 Q 激光对打孔过程的影响

连续声光调 Q 激光脉冲脉宽一般为 100 ns 级左右,脉冲峰值功率在 $10^5 \sim 10^6$ W 之间。脉冲频率在 10 kHz 左右。由于调 Q 脉冲脉宽非常窄,脉冲峰值功率也非常高,那么在和材料的作用过程中,如图 2(b)所示,用于加热材料所用激光能量就比较少,大部分能量用于蒸发材料,因而采用连续声光调 Q 激光器可以获得比较高的打孔质量。但是随着打孔过程的继续,孔的深度增加,经过时间 t_1 后,孔内充满金属蒸气,由于脉冲频率比较高,金属蒸气来不及从孔中逸出就和后续激光束发生作用,产生等离子体屏蔽效应,经过一定的时间,到 t_2 后,等离子

体屏蔽严重,将大量的激光能量转移到孔壁,所以,连续声光调 Q 激光器适合对薄板打孔,对于厚板会出现自由运转脉冲激光器打孔所存在的问题。

2.3 脉冲声光调 Q 激光对打孔过程的影响

脉冲声光调 Q 激光脉冲脉宽和频率与连续声光调 Q 激光脉冲脉宽和频率一样,也分别为 100 ns 级和 10 kHz 左右,包络脉宽和自由运转脉冲激光器相同,为毫秒量级。但是脉冲峰值功率却很高,在 $10^6 \sim 10^7$ W 之间。和连续声光调 Q 激光脉冲打孔一样,如图 2(c)所示,由于调 Q 脉冲脉宽非常窄,而脉冲峰值功率更加高,那么在和材料的作用过程中,用于加热材料的激光能量就更少,绝大部分能量用于蒸发材料,获得的打孔质量更高。同样,在加工过程中,也将产生金属蒸气,并逐渐积累, t_1 后,孔内充满金属蒸气。但是和连续声光调 Q 激光打孔不同的是, t_1 过后,脉冲已经终止,孔内的金属蒸气将逐渐消失。由于包络的脉冲频率为 10^2 Hz 量级,包络脉冲的占空比在 0.1 左右,甚至更低,因此在后面一个脉冲到来之前有很长的时间是没有激光作用的,有足够的时间使金属蒸气完全消失。激光能量利用率高,打孔效率提高,打孔质量好,而且可以加

工厚的金属板。

3 实验结果与分析

图 3 所示为自由运转脉冲 Nd:YAG 激光器、连续声光调 Q Nd:YAG 激光器和脉冲声光调 Q Nd:YAG 激光器打孔后的照片。打孔所用参数如下:

自由运转脉冲 Nd:YAG 激光器:平均功率 350 W,脉冲宽度 2 ms,脉冲频率 25 Hz;

连续声光调 Q Nd:YAG 激光器:平均功率 500 W,调 Q 脉宽 150 ns,调 Q 频率 8 kHz;

脉冲声光调 Q Nd:YAG 激光器:平均功率 90 W,包络脉宽 0.4 ms,包络脉冲频率 100 Hz,调 Q 脉宽 125 ns,调 Q 频率 12 kHz。

从图 3 可以看出,自由运转脉冲激光打孔孔壁有很厚的再铸层,约 100 μm 左右,且再铸层有裂纹;连续声光调 Q 激光打孔孔壁再铸层厚度比较小,约 50 μm 左右,也存在微小的裂纹;而采用脉冲声光调 Q 激光打孔的孔壁再铸层厚度非常小,约 10 μm 左右,从图可以看出,孔壁不存在裂纹。

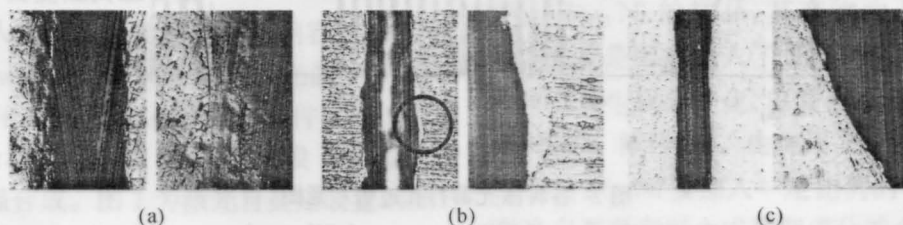


图 3 三种类型 Nd:YAG 激光打孔结果。(a) 自由运转脉冲激光;(b) 连续声光调 Q 激光;(c) 脉冲声光调 Q 激光

Fig.3 Drilling results for three types of Nd:YAG lasers. (a) Free-running pulse laser; (b) CW acousto-optical Q-switch laser; (c) PW acousto-optical Q-switch laser

4 结论与展望

从激光对打孔过程的分析 and 打孔试验结果可知,脉冲声光调 Q 激光具有良好的打孔性能。目前试验采用图 2(c)的脉冲调 Q 激光的包络线为高斯分布,有一部分能量脉冲峰值功率还不够高,这一部分能量被用作加热打孔材料,造成孔壁的再铸层的存在。如果采取一定的调制手段,使得激光包络线为方形的,形成阶跃包络线,将避免高斯包络线所带来的不足,从而获得无再铸层、无裂纹的激光打孔。

参 考 文 献

1 A. G. Corfe, R. C. Crafer. *Laser Drilling*. Eurolaser

Academy

- 2 X. Chen, W. T. Lotshaw, A. L. Ortiz *et al.*. Laser drilling of advanced materials: effects of peak power, pulse format, and wavelength. *J. Laser Applications*, 1996, **8**: 233~239
- 3 S. C. Tam *et al.*. A review of the laser processing of aircraft components. *J. Mater. Processing Technol.*, 1990, **23**:177~194
- 4 B. I. Sarady, T. Beck, G. Phillipps *et al.*. Bohren von Superlegierungen mit einem guetegeschalteten Nd:YAG-laser. *Laser und Optoelektronik*, 1995, **27**(6):47~51
- 5 H. K. Toenshoff, F. von Alvensleben. Micro drilling with a Nd:YAG-Q-switch-laser. *Proc. SPIE*, 1993, **1864**:96~107