

激光打孔用声光调 Q 阶跃脉冲 Nd:YAG 激光器

郑义军, 李 强, 刘长娥, 张阔海, 王志敏, 左铁钊
(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要: 针对高质量激光打孔的应用要求,设计了一种高峰值功率脉冲激光器. 采用声光器件对脉冲 Nd:YAG 激光进行了腔内调制,提高了激光脉冲的峰值功率. 给出了激光器的结构、脉冲调 Q 的时序. 获得了脉宽 200 ns 的激光脉冲列,脉冲列的重复频率为 (5~50) kHz,脉冲能量为 30~80 mJ,脉冲峰值功率为 400 kW,输出激光束的光束质量为 3 mm·mrad,并对飞机发动机燃烧室用 1.5 mm 厚镍基高温合金进行打孔实验,获得了再铸层薄和微裂纹少的微孔.

关键词: 脉冲激光; 声光调 Q; Nd:YAG 激光器; 激光打孔

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2003)02-0218-03

激光被广泛地用于制备微孔。在一些特殊的应用中,如航空发动机部件气膜冷却需要数以千计的微孔,对小孔的质量有很高的要求,同时要求打孔效率高。影响激光打孔质量的因素很多,研究表明,激光脉冲的高峰值功率、窄脉冲宽度和高光束质量是减小孔壁再铸层厚度和裂纹深度,提高激光打孔质量的有效途径^[1]。采用电光调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光,由于脉冲重复频率较低,不能实现快速打孔^[2]。采用声光调 Q 连续 Nd:YAG 激光,解决了平均功率低的问题,但脉冲的峰值功率不够高,对较厚的板不能有效打穿^[3]。

作者根据高质量激光打孔的要求,研制了一种新的高峰值功率激光器,采用声光 Q 开关对脉冲 Nd:YAG 激光进行腔内调制,提高激光脉冲的峰值功率. 对腔的结构、激光的调制和输出特性进行了分析,获得了高峰值功率的激光脉冲列.

1 激光器的系统结构

1.1 谐振腔结构

声光调 Q 脉冲 YAG 激光器采用平-平腔型, 双氙灯脉冲泵浦的激光棒放置于谐振腔的光学中心, 声光 Q 开关放置于全反镜 M_1 的附近, 激光棒与输出镜 M_2 之间放置一横模选择光阑 D . 谐振腔腔长的选择基于 3 方面的考虑: 谐振腔在最大泵浦功率时不进入非稳定区; Q 开关的调制脉冲短; 尽可能好的光束质量. 设计谐振腔腔长 (光学长度) 为 700 mm, 激光棒直径 6 mm, 长 110 mm. 驱动源的最大功率为 100 W, 频率 27 MHz, 调制频率 5~50 kHz (见图 1).

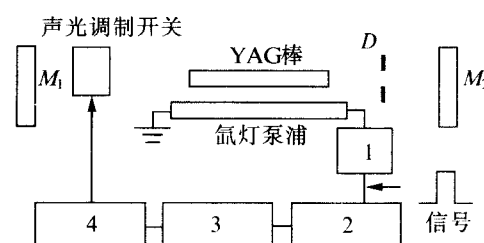


图1 声光调Q脉冲YAG激光器系统图

1.2 声光调制脉冲激光器调 Q 的时序

为实现对脉冲激光的调制,脉冲调 Q 声光调制器的调制信号须与激光器的灯泵浦脉冲同步,这是对脉冲激光器进行调 Q 的关键,其目的是使整个脉冲序列稳定输出,并且每一个脉冲有最大可能的相同能

收稿日期: 2002-10-29.

基金项目: 国防科工委重点实验室基金资助项目。

作者简介: 郑义军(1975-),男,硕士研究生。

量,即脉冲调Q单脉冲的最大能量.脉冲激光器的重复频率由脉冲信号发生器产生,由脉冲信号发生器给出的一定频率的信号被分为两路:一路用以触发激光电源1的外触发开关,点燃脉冲泵浦氙灯;另一路经可调延时器2延迟后,触发波形发生器3,产生方波脉冲序列,调制高频电源4,驱动声光Q开关.

由于外脉冲信号触发激光电源点燃氙灯泵浦到激光输出有一定的时间延迟(大约 $100\sim 200\mu\text{s}$),而外脉冲信号驱动声光Q开关的时间延迟很短,通过调节可调延时器,使声光Q开关的调制脉冲与激光脉冲同步.实验采用美国Stanford Research Systems生产的DG535数字延时器,其调整步长的范围为 1ps .波形发生器采用Stand Research Systems生产的DS345任意波形发生器.根据所采用激光电源的泵浦光脉冲宽度 $\Delta t=300\mu\text{s}$,调制声光Q开关短脉冲列发生器产生脉冲频率变化范围 $\Delta f=5\sim 50\text{kHz}$.笔者应用任意波形发生器编制了宽度为 $300\mu\text{s}$ 的调制脉冲列,该序列由 $1\sim 15$ 个矩形低频脉冲组成,其占空比为 $1:1$.

2 声光调Q脉冲激光输出

2.1 调制脉冲与激光脉冲的同步调整

产生稳定的声光调Q脉冲激光输出,首先需要调整可调延时器,使声光Q开关的调制脉冲与激光脉冲同步.先进行同步的初调,声光调制器的驱动不接入声光Q开关,激光器可产生自由运转脉冲,将波形发生器产生的脉冲信号与光电探测器检测的激光器自由运转脉冲信号同时送入示波器,通过比较并调节可调延时器,可实现声光Q开关的调制脉冲与激光脉冲基本同步(见图2,图中每格 $200\mu\text{s}$).将声光调制器的驱动接入声光Q开关,再进行同步的细调.通过光电探测器检测激光器调Q脉冲列的输出,调节可调延时器,获得稳定的声光调Q脉冲列激光输出,每一次泵浦可获得 $1\sim 15$ 个脉冲的脉冲列(见图3,图中每格 $20\mu\text{s}$).脉冲列的重复频率通过改变脉冲列发生器产生脉冲频率调整,产生脉冲列的重复频率为 $(5\sim 50)\text{kHz}$.

2.2 输出镜透过率的确定

因为声光脉冲激光器的输出镜透过率很难用解析式计算,所以用实验方法确定.在相同的泵浦功率、 50kHz 脉冲列的重复频率调制条件下,分别用反射率为 20% 、 37% 、 43% 、 50% 、 64% 、 70% 、 78% 、 90% 的输出镜进行实验,测量输出脉冲的能量 E_p ,结果见图4.从图中可看出,激光谐振腔输出镜 M_2 的最佳反射率是 64% .

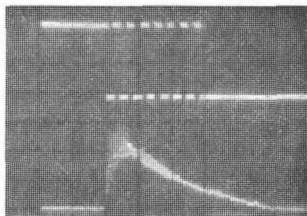


图2 调制脉冲与自由运转激光脉冲同步

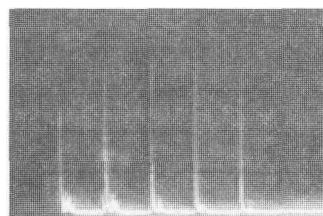


图3 声光调制激光脉冲列

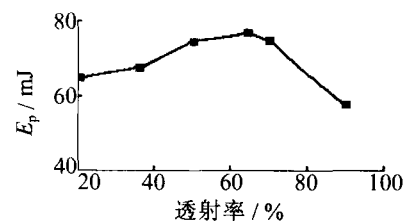


图4 输出镜透射率与输出能量的关系

2.3 声光调Q脉冲激光的输出特性

采用最佳输出镜透过率,测量脉冲列的输出能量,在重复频率为 $(5\sim 50)\text{kHz}$ 时,脉冲能量为 $30\sim 80\text{mJ}$.输出声光调Q激光脉冲脉宽约 200ns ,图5为通过示波器测得的脉冲序列的脉宽(每格 100ns).脉冲峰值功率约 400kW .由于激光器输出激光的束腰在输出镜处,用透镜聚焦输出激光束,采用“套孔法”测量透镜聚焦束腰和焦距处包含激光光强 86% 的半径及相应距离,求得输出激光束的光束质量^[4]为 $3\text{mm}\cdot\text{mrad}$.

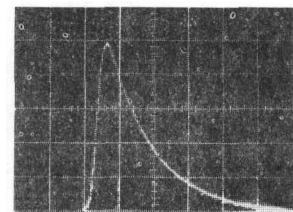


图5 激光调制脉冲列的脉宽

2.4 打孔试验

针对飞机发动机用高温镍基合金进行了打孔对比实验,其孔壁剖面图见图6.相对于自由运转激光器,经调制后的激光器打出的微孔其再铸层的厚度从 $35\mu\text{m}$ 减小到不足 $10\mu\text{m}$,微裂纹也得到了很好的抑制.

3 结论及分析

实验结果表明,采用声光Q开关可实现对脉冲激光的调制,获得短脉宽的激光脉冲列. 输出激光脉冲峰值功率提高近两个量级,初步的打孔实验表明,孔壁再铸层厚度减小. 通过提高声光Q开关的关断损耗,可进一步提高输出激光脉冲峰值功率;外加放大级的方式也可进一步提高输出激光脉冲峰值功率. 通过提高泵浦脉冲的重复频率,可提高输出激光的平均功率. 通过声光调Q阶跃式脉冲激光器的研制,使得激光脉冲的包络得到了进一步的控制,很大程度上提高了激光打孔的可控性. 此外,根据需要,还可以在电源里采用充-放电回路,储能电容选用不同的值并充以不同的电压,以获取适当的脉冲包络形状,进一步提高对脉冲波形的控制以提高激光打孔的质量.



图6 自由运转脉冲激光器与调制脉冲激光器脉冲序列打孔的剖面对比图

参考文献:

- [1] CHEN W T, LOSTSHAW A L, ORTIZ, et al. Laser drilling of advanced materials: effects of peak power, pulse format, and wavelength[J]. Journal of Laser Applications, 1996(8): 233-239.
- [2] KUMKAR M. Periodical Q-switch lasers with high average power[J]. SPIE, 1994, 2206: 510-515.
- [3] BOSTANJOLO G. Processing of Ni-based aero engine components with repetitively Q-switched Nd:YAG lasers[J]. SPIE, 1996, 2789: 145-157.
- [4] WRIGHT D, GREVE P, FLEISCHER J, et al. Laser beam with divergence and beam propagation factor—An international standardization approach[J]. Optical and Quantum Electronics, 1992, 24: s993-s1000.

Pulse Nd:YAG Laser for Drilling Modulated by Acousto-optic Q-switch

ZHENG Yi-jun, LI Qiang, LIU Chang-e, ZHANG Kuo-hai, WANG Zhi-min, ZUO Tie-chuan
(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: According to the application requirement of high-quality drilling, the authors design a novel high peak-power acousto-optical Q-switched pulse Nd:YAG laser. AOM is used in cavity to modulate pulse Nd:YAG laser for improving peak-power of laser pulse. The set-up and Q-switching pulse sequence of laser are given. The Q-switch pulse train of laser with the duration of 200 ns during each flash-lamp pulse is obtained. The repetition rate of the train is (5~50) kHz, the pulse energy is 30~80 mJ, and the peak power is more than 400 kW with an output beam parameter product of about 3 mm · mrad. The laser has been used to drill the Ni-alloy of 1.5 mm thick, resulting in thinner recast layer and less micro cracks.

Key words: pulse laser; acousto-optic Q-switch; Nd:YAG laser; laser drilling