

纳秒双脉冲激光的控制方法

王学军 孟繁禹 李 猛 王静波 高光波

(中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要 研究了用于航空发动机涡轮叶片气膜孔加工的双脉冲激光控制方法。报道了采用两台闪光灯抽运的电光调 Q 激光器偏振组束产生 100 ns 左右时间间隔的双脉冲激光的实验结果。共轴的双脉冲激光的时间间隔可以在零到几百纳秒之间自由调节。双脉冲最大相对定时抖动小于 5 ns。双脉冲激光器的重复频率 40 Hz, 双脉冲能量大于 400 mJ。

关键词 激光技术; 双脉冲激光; 偏振组束; 定时抖动; 触发延迟

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0203004

Nanosecond Dual Pulse Laser Controlling Method

Wang Xuejun Meng Fanyu Li Meng Wang Jingbo Gao Guangbo

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100024, China)

Abstract Double-pulse laser controlling method used for film cooling holes processing of aircraft engine turbine blade is studied. Double-pulse laser experimental results of producing approximately 100 ns temporal delay between the pulses with polarization beam combining by two sets of flash-lamp pumped electrooptical Q-switched laser are reported. The interval of co-aligned double-pulse laser can be turned freely from 0 to several hundred nanoseconds. The maximal timing jitter of double-pulse laser is less than 5 ns. The repetition rate of double-pulse laser is 40 Hz, and output energy per double-pulse laser is more than 400 mJ.

Key words laser technique; double-pulse laser; polarization beam combination; timing jitter; trigger delay

OCIS codes 140.3580; 140.3540; 140.3298

1 引 言

激光加工精密小孔在航空发动机制造中具有重要应用。例如,联合攻击战斗机的喷气发动机包含超过 1.2×10^6 个气膜冷却孔。这些用激光加工的直径为 0.2 mm,深径比可达 50 的冷却孔,面密度高达 $100 / \text{cm}^2$ 。为了提高涡轮发动机的效率,在过去的 10 年中涡轮的温度由于新材料和冷却技术的进步而得到极大的提高。为了进一步改善联合循环电力设备的效率,需要提高燃烧室出口的温度达到 $1520 \text{ }^\circ\text{C}$,同时联合降低冷却液的质量流量^[1]。这两项改进可以通过喷气冷却高热载涡轮组件来实现。由于对激光打孔效率的需求,完成的许多工作都致力于理解和改善激光打孔的基础过程。

虽然,几乎伴随着激光的出现就已经开始激光

打孔的研究,但是直到 1980 年 Ross^[2] 提出脉冲串打孔技术,人们才开始认识到激光脉冲整形对于激光打孔的重要性。2005 年美国通用原子公司的 Forsman 等^[3] 提出一种双脉冲打孔技术。双脉冲是一对在时间上靠得很近的纳秒激光脉冲,脉冲间隔一般小于 200 ns。与同等能量的单脉冲相比,双纳秒脉冲可以把激光打孔速率提高数倍,同时可以改善激光打孔质量。2009 年华中科技大学王晓东等^[4] 报道的在德国完成的双脉冲打孔实验进一步验证了双脉冲的打孔效率。

目前,自由运转的 1 ms 脉宽的长脉冲激光已广泛应用于航空发动机叶片打孔。但是长脉冲打孔总存在再铸层问题。与长脉冲相比,调 Q 短脉冲激光可以通过提高脉冲重复频率来改善打孔速度,并且

收稿日期: 2010-06-17; **收到修改稿日期**: 2010-08-22

基金项目: 航空科学基金(2008ZE25006)资助课题。

作者简介: 王学军(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事激光物理、技术及应用等方面的研究。

E-mail: wangxuejunbbo@163.com

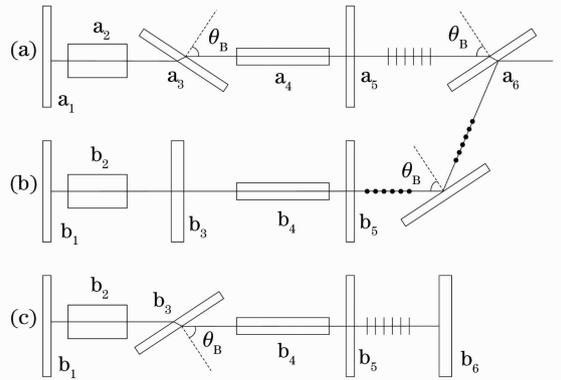
可以降低热影响区深度和再铸层厚度 10 倍以上^[5]。激光诱导等离子体产生的激光辐照区域屏蔽是利用高强度纳秒或皮秒短脉冲激光高速精细加工时出现的关键问题之一。由两个纳秒或皮秒构成的双脉冲串是获得最小等离子体屏障的有效方法之一^[6]。双脉冲的第一个脉冲在烧蚀区域上方产生一个半真空环境,把作用区域加热到一个较高温度,使得第二个脉冲加速已融化的金属流出小孔,并且降低了第二个脉冲的烧蚀阈值^[4]。因此双脉冲打孔技术的一个重要因素就是双脉冲时间间隔的控制。对于不同的材料,最佳脉冲间隔不同,因此要求脉冲间隔能够精确控制。关于纳秒双脉冲打孔的研究,目前报道不多^[3,4]。从已经报道的实验结果来看,对于 304 型不锈钢,双脉冲时间间隔控制在 30~150 ns 范围内,可以提高加工速度并改善加工质量。

在双脉冲打孔技术中,双脉冲激光时间间隔的控制是其核心技术之一。双脉冲的控制方法可以分为两类,一类是单台激光器产生双脉冲,另一类是双台激光器产生双脉冲。在第一类双脉冲控制方法中,又分为两种情况:1)把一台激光器发射的激光分为两束,其中一路激光经过适当延时后,通过偏振或者倍频再与另一路激光合为一束^[4]。这种方法的优点是脉冲时间延迟准确,没有抖动,缺点是延迟时间只能控制在例如 50 ns 左右的较短的时间内,而且对激光的光束质量要求很高。2)从一台激光器发射的高重复频率脉冲激光的序列中选取需要的双脉冲^[7,8]。这种方法的优点是脉冲间隔容易控制,缺点是装置较为复杂,适用于皮秒激光器。在第二类双脉冲控制方法中,也可以分为两种:1)串联激光器双脉冲控制方法^[9,10]。这类方法产生的双脉冲时间间隔一般都超过几微秒,不适于双脉冲打孔技术。2)并联激光器双脉冲控制方法。这类方法可以有效地将双脉冲的时间间隔控制在从零到几百纳秒的范围内。北京航空制造工程研究所从 2008 年开始航空科学基金纳秒双脉冲激光打孔技术研究^[11,12],采用的就是并联激光器双脉冲激光控制方法。本文报道了利用两台闪光灯抽运的电光调 Q 激光器偏振组束获得零到几百纳秒间隔的双脉冲激光的实验结果。该方法具有双脉冲激光能量大,控制装置简单等优点,属于低成本的先进航空制造新技术。

2 实验装置

偏振组束双脉冲激光实验装置如图 1 所示。图 1(a),(b)是通过激光器 1 和激光器 2 的 Nd:

YAG 激光棒光轴的横剖面,图 1(c)是通过激光器 2 光轴的纵剖面。激光器 1 的谐振腔由对 1064 nm 高反的平面高反射镜和对 1064 nm 的反射率为 20 % 的平面输出镜构成。谐振腔长 68 cm。靠近输出镜放置聚光腔。聚光腔为石英玻璃漫反射腔,其横剖面为跑道圆。采用双直管氙灯抽运方式,每个氙灯由独立的电源供电。氙灯石英管外壁与 Nd:YAG 棒的间距为 2 mm。Nd:YAG 棒的规格为 $\phi 6 \text{ mm} \times 112 \text{ mm}$ 。在激光棒的左侧放置只有一面镀膜的布儒斯特偏振片,并使镀膜面朝向激光棒,以便平行偏振光获得最大透射率。偏振片法线与光轴成布儒斯特角 θ_B ,大约 56.5° 。偏振片可以绕与纸面垂直的轴旋转,以获得最大平行偏振光透射率。在布儒斯特偏振片的左侧放置 KD*P 电光 Q 开关。电光 Q 开关的通光口径为 $\phi 12 \text{ mm}$ 。电光 Q 开关可以在有限范围内左右及俯仰转动。激光器 1 输出的偏振光的偏振方向与纸面平行。激光器 2 与激光器 1 的结构相似。只是激光器 2 的偏振片可以绕与纸面平行的轴转动,输出的偏振光偏振方向与纸面垂直。激光器 1 和激光器 2 输出的两束互相垂直的偏振光由偏振片合为一束激光。



a_1, b_1 : high reflection mirror; a_2, b_2 : KD*P crystal; a_3, b_3 : polarization plate; a_4, b_4 : Nd:YAG; a_5, b_5 : output mirror; a_6, b_6 : Brewster polarization plate

图 1 偏振组束双脉冲激光实验装置示意图。(a)激光器 1 横剖面,(b)激光器 2 横剖面,(c)激光器 2 纵剖面
Fig. 1 Schematic of double-pulse laser polarization beam combining experimental setup. (a) cross section of laser 1, (b) cross section of laser 2, (c) longitudinal section of laser 2

两台激光器的冷却由一台水泵驱动的并联水路构成。闪光灯由 4 台独立的电源供电。激光输出能量由 EP1000P 激光功率/能量计测量。激光脉冲波形由双路激光脉宽仪探测,并由 TDS3052B 500 MHz 示波器显示。调 Q 激光脉冲触发信号由 AFG3102 信号发生器提供。

3 实验结果与讨论

3.1 时间延迟控制

实验结果可以分为 4 部分。1)时间延迟控制, 2)抖动测量, 3)共轴调节, 4)光束质量控制。下面依次进行讨论。

双脉冲激光最关键的首要问题是精确控制纳秒脉冲的相对时间延迟。只有将双脉冲激光的时间间隔控制在 $0 \sim 200 \text{ ns}$ 范围内, 才会对激光打孔的速率和打孔质量有影响。两台激光器的四只闪光灯由电源控制器同时触发。闪光灯触发信号同步精度为 $1 \mu\text{s}$ 。闪光灯的触发信号同时输入 AFG3102 信号发生器。AFG3102 把闪光灯触发信号相对延迟 $219.80 \mu\text{s}$ 和 $220 \mu\text{s}$ 后, 分别输出一个 $10 \mu\text{s}$ 的方波, 然后分别送入电光调 Q 驱动器。两路激光在相对于 $10 \mu\text{s}$ 的方波触发信号延迟约 $1 \mu\text{s}$ 后, 依次输出一个纳秒激光脉冲, 双脉冲的时间间隔约为 100 ns , 实验结果如图 2 所示。图 3 是放大显示的双脉冲激光。需要说明的是, AFG3102 的触发频率应该比闪光灯的触发频率大, 例如设为 1000 Hz , 以保证相应于每一个闪光灯触发都有一个纳秒激光脉冲输出。实验中发现, 输入两路电光调 Q 驱动器的触发信号时间差, 并不等于输出的双脉冲激光的时间间隔。由于两台电光调 Q 驱动器的电学特性并不完全一样, 并且两路激光器内部的增益与损耗情况也有所差异, 因此两路激光相对于触发信号的延迟时间并不相同。测出两路激光在相同时刻触发信号控制时的相对时间延迟后, 再调节两路激光电光调 Q 驱动器的相对触发延迟, 可以精确获得不同时间间隔的激光双脉冲。

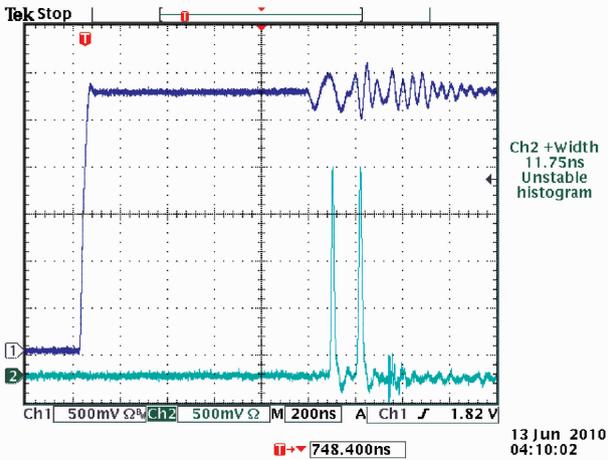


图 2 时间间隔约 100 ns 的双脉冲激光
Fig. 2 Approximately 100 ns interval double-pulse laser

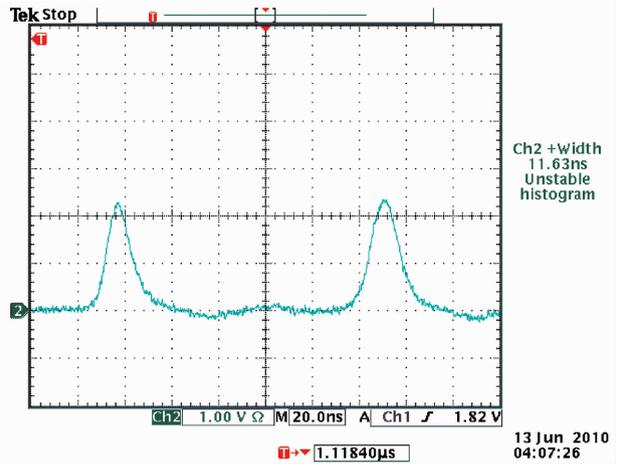


图 3 放大显示的双脉冲激光
Fig. 3 Zoomed-in displayed double-pulse laser

3.2 抖动测量

调 Q 脉冲的定时抖动来源于调 Q 驱动器和激光脉冲建立过程以及抽运能量的起伏。用无限余辉法测量双脉冲的相对定时抖动。测量方法如下: 双脉冲激光由双路激光脉宽仪的一路光纤探头探测即可, 探测到的光信号由脉宽仪转变为电信号并输入示波器, 设定该路信号为触发信号, 则第一个脉冲即作为计时零点, 在示波器上第二个脉冲与之相隔的距离即为双脉冲的时间间隔, 如图 3 所示。这样用无限余辉就可以记录双脉冲的第二个脉冲的每一次脉冲出现位置。如图 4 中底部的 T 及箭头所示, 第二个脉冲距离第一个脉冲的间隔约为 88 ns 时, 相对定时抖动最大值约为 5 ns 。使用双光纤探头分别测量两台激光器的激光脉冲, 定时抖动测量亦为 5 ns 。

3.3 共轴调节

由于两路激光的共轴度对激光打孔影响很大,

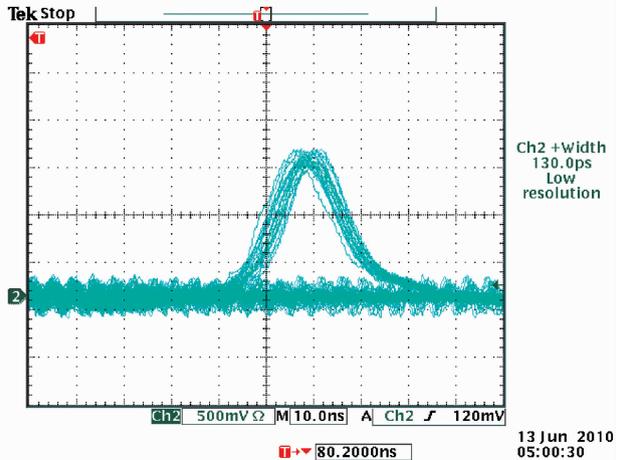


图 4 双脉冲激光相对定时抖动测量
Fig. 4 Relative timing jitter of double-pulse laser

因此必须讨论双脉冲激光的共轴性。在光路中使用了 3 mm 厚的布儒斯特偏振片,由此,使得光轴的相对高度发生 1.4 mm 的水平平移或上下平移。电光调 Q 晶体在使用时也需要左右和俯仰转动,寻找最好的激光关断方位。这样也使得激光通过电光晶体时,光轴将发生纵向或横向平移。因此需要将 Nd:YAG 棒放在靠近输出镜位置。由晶体棒光轴的高度确定出射激光的高度。这样当两路晶体棒的中心高度相同时,输出的激光的高度就可以保证相同。精确调整图 1 中激光器 2 腔外的布儒斯特反射片 b_6 ,就可以保证两路激光的共轴。用量程为 3.4 mJ 的 EP1000P 激光能量计测量图 1 中偏振片 a_6 的反射光及偏振片 b_6 的透射光,测量结果为零。

3.4 光束质量控制

在抽运电压为 600 V 时,单路调 Q 输出脉冲能量 240 mJ,脉冲宽度 12 ns,重复频率为 40 Hz 时,双脉冲输出功率 19 W,光束发散角小于 0.5 mrad。由于激光打孔对激光器的功率、脉宽、光束质量都有较高的要求,但这些参数之间又相互制约,因此必须适当调整激光器的参数。而且激光打孔速率依赖于激光功率,这就要求提高激光器的重复频率,从而导致激光光束质量变坏。研究表明,通过腔内补偿来提高光束质量,不如适当拉长激光器腔长简单有效。例如,实验中曾尝试利用真空滤波器限制激光器的横模以及选用不同的谐振腔结构。这些方法的缺点是光路结构复杂,激光光斑光强分布很不均匀,输出功率降低,实验结果皆不理想。当仅仅采用较长的腔长,例如 1.5 m,光束发散角小于 0.5 mrad。虽然较短的腔长可以获得较短的激光脉冲^[13],例如,在本实验中,在腔长最短的情况下,抽运电压为 500 V 时,激光脉宽为 10 ns,但是,适当拉长腔长并不会使脉宽变得很大,在本实验中是 12 ns,却使激光光束质量得到显著改善。

4 结 论

简要评述了获得脉冲间隔为 100 ns 左右的双脉冲激光的各种方法。报道了利用两台并联的闪光灯抽运的电光调 Q 激光器,通过偏振组束,产生 0~200 ns 左右的时间间隔的双脉冲激光的实验结果。该方法获得双脉冲相对定时抖动小于 5 ns。脉冲宽

度 12 ns。证明了该种装置可以用于双脉冲激光打孔研究。该技术对于推动航空发动机气膜孔加工技术的进步具有一定的意义。

致谢 感谢李忠建、田立龙、胡文华、马鹤祥、张永正、王益、任士龙、顾宝玲、姜锦锋和程云龙在实验准备过程中给予的建议和帮助。

参 考 文 献

- 1 K. Walther, M. Brajdic, E. W. Kreutz. Enhanced processing speed in laser drilling of stainless steel by spatially and temporally superposed pulsed Nd:YAG laser radiation [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, **35**(9-10): 895~899
- 2 S. -O. Ross. Laser drilling with different pulse shapes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(9): 5061~5063
- 3 A. C. Forsman, P. S. Banks, M. D. Perry *et al.*. Double-pulse machining as a technique for the enhancement of material removal rates in laser machining of metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(3): 033302
- 4 X. D. Wang, A. Michalowski, D. Walter *et al.*. Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(2): 148~153
- 5 J. F. Ready, D. F. Farson. LIA Handbook of Laser Materials Processing [M]. Orlando: Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc. 2001. 471~512
- 6 R. Gilmore, M. Armas, A. Forsman. Two pulses are better than one [J]. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing*, 2005, **20**(2): 20~23
- 7 B. R. Campbell, T. M. Lehecka, V. V. Semak *et al.*. Effect of the double pulse format for picosecond pulse laser drilling in metals [C]. ICALEO 2007, Congress Proceedings, 2007, Paper M906, 45~51
- 8 B. R. Campbell, R. C. Campbell, T. M. Lehecka *et al.*. Performance of picosecond laser pulse drilling, including an evaluation of the double pulse machining method [C]. in Proc. 4th International WLT, 2007, Conference on Lasers in Manufacturing, 605~611
- 9 K. Spariosu, W. Chen, R. Stultz *et al.*. Dual Q-switching and laser action at 1.06 and 1.44 μm in a Nd³⁺:YAG-Cr⁴⁺:YAG oscillator at 330 K [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(10): 814~816
- 10 Chen Changshui, Pan Tao, Zhang Yishi *et al.*. Dual wavelength and dual pulse Q-switched frequency doubling of tunable Cr:LiSAF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1819~1821
陈长水, 潘涛, 张艺士等. 双波长双巨脉冲调 Q 倍频 Cr:LiSAF 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1819~1821
- 11 X. J. Wang. Improving double-pulse laser drilling quality with detection of breakthrough [C]. CLEO/Pacific Rim 2009, Shanghai, China, 2009, TuP13-07, 1~2
- 12 X. J. Wang. The influence of double pulse laser on drilling speed and quality [C]. PICALO 2010, Wuhan, China, Volume 4, Paper 104, 1~7
- 13 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of Lasers (5th edition) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 220~228
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理(第 5 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 220~228