

长脉冲杂光对激光诱导冲击波的影响

管海兵 叶云霞 吴 忠 张 磊 张永康

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 研究了调 Q 激光器中微秒量级的长脉冲杂光对纳秒量级的主脉冲激光诱导冲击波的影响。通过调节调 Q 晶体的半波电压来改变晶体漏光和放大自发辐射的能量(长脉冲杂光),同时保持抽运功率不变,利用压电传感器聚偏氟乙烯(PVDF)测量了主脉冲激光诱导的冲击波。研究结果显示,随着漏光和放大自发辐射能量的增加,主脉冲激光能量下降,脉冲宽度增宽,导致主脉冲激光功率密度下降,主脉冲激光诱导的冲击波峰值压力下降;同时材料表面被烧蚀得越厉害,当激光总能量为 6.5 J,长脉冲杂光能量为 2280 mJ 时,铝箔被完全烧蚀。根据试验结果对激光诱导的峰值压力公式进行了修正,修正结果适合于长脉冲杂光存在时主脉冲激光诱导冲击波峰值压力的计算。

关键词 激光器; 调 Q 激光器; 长脉冲杂光; 激光冲击波

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0703007

Effects of Long Pulse-Width Stray Light on Shock Wave Induced by Laser

Guan Haibing Ye Yunxia Wu Zhong Zhang Lei Zhang Yongkang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The effects of the microsecond pulse-width stray light on the shock wave induced by the nanosecond pulse-width of master laser are studied. By adjusting the half-wave voltage loaded on the Q-crystal, the energy of the stray light can be changed. Meanwhile, the shock wave induced by the master laser would be measured by polyvinylidene fluoride (PVDF) under the condition of the unchanged pump power. The result indicates that with the increase of the energy of the stray light, the energy of the master laser decreases and the pulse width of it increases, so the power density of the master laser and the peak pressure induced by the master laser would decrease; in addition, when the whole laser energy is 6.5 J and the energy of the stray light is 2280 mJ, the aluminium foil is ablated thoroughly. According to the experimental result, the formula of the peak pressure induced by the laser has been revised, which can be applicable to the computation of the peak pressure induced by the master laser under the condition of the stray light.

Key words lasers; Q-switched laser; stray light of the long pulse-width; laser shock wave

OCIS codes 140.3390; 140.3430; 140.3440

1 引 言

自从第一台固体激光器诞生以来,激光技术已经引起了广大研究人员的兴趣。经过 40 多年的发展,激光技术已经渗透到国民经济的各个领域,主要涉及科学研究、工业、军工、医学及日常生活等各个领域,成为当前国际激光技术发展的重要方向之一。在金属材料加工方面,激光冲击处理技术已经得到广泛而深入的研究,激光冲击强化技术就是用高峰值脉冲激光诱导的冲击波对材料表面进行改性的技

术,在材料表面产生一层残余压应力,提高材料的抗疲劳、抗磨损性能,所以激光冲击处理属于激光与材料相互作用的范畴^[1~4]。

激光冲击处理技术面临的关键问题之一是表征激光冲击处理质量,其中激光诱导的冲击波强度作为衡量激光冲击处理质量的一种重要的方法之一,国内外学者对其做了深入的研究^[5~8]。然而,对于高功率激光器来说,由于调 Q 没有完全关闭导致主脉冲激光触发之前会有漏光现象,该漏光通过后续

收稿日期:2011-01-18; 收到修改稿日期:2011-03-19

基金项目:国家自然科学基金(50735001, 10804037)资助课题。

作者简介:管海兵(1986-),男,硕士研究生,主要从事激光加工和激光器件等方面的研究。E-mail: ghb_2007@163.com

导师简介:张永康(1963-),男,博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

的放大器后会逐渐被放大,影响主脉冲激光参数;同时放大自发辐射在高功率激光器中的存在是不可避免的;在激光冲击强化应用中,漏光和放大自发辐射对激光冲击处理的影响没有得到相应重视。由于放大自发辐射和漏光的脉冲宽度为微秒量级,相对于主脉冲脉冲宽度纳秒量级要宽得多,因此将放大自发辐射和漏光统称为长脉冲杂光。本文主要研究了长脉冲杂光对主脉冲激光诱导冲击波的影响,为激光冲击处理设备的研制提供了参考。

2 试验方法

2.1 试样制备

试验材料为 7050 铝合金,其化学成分如表 1 所示。用线切割法将试样加工成尺寸为 15 mm×20 mm×5 mm 的小块,表面用 100[#]~800[#] SiC 砂纸逐级打磨,再进行抛光处理,然后用乙醇清洗、风干。

表 1 7050 铝合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 7050 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	5.7~6.7

2.2 试验装置

用高功率钕玻璃激光器进行冲击处理 7050 铝合金表面,激光波长为 1.054 μm,输出激光用焦距为 2 m 聚焦系统聚焦,聚焦光斑直径为 5 mm。试样用 0.1 mm 厚铝箔作为涂层,以 K9 玻璃作为约束层,其厚度为 2 mm。保持抽运功率不变,微调 KDP 晶体外加电压来改变线偏振光通过晶体产生的相位差,使得 Q 开关不完全关闭,导致主脉冲激光输出之前有相应的光漏出。保持抽运功率不变,用型号为 NOVA II 型激光能量计分别测出长脉冲杂光能量和相应的总能量,测量方法如下:保持 Q 开关一直处于关闭状态,即主脉冲激光就不会输出,此时在激光器输出口测量能量,为长脉冲杂光能量,然后使激光器正常工作,Q 开关按照设定的时间工作,在激光器输出口测量能量,为激光总能量,该总能量包括主脉冲激光能量和长脉冲杂光能量。

激光诱导的压电波形用压电传感器聚偏氟乙烯(PVDF),膜厚 30 μm,灵敏度 127 mm/N,测量时两级并联一个 25 Ω 的电阻,并用示波器进行测量,示波器型号为 DL9140,带宽为 1 GHz,同时用光电二极管接收激光作为示波器的触发信号,如图 1 所示。

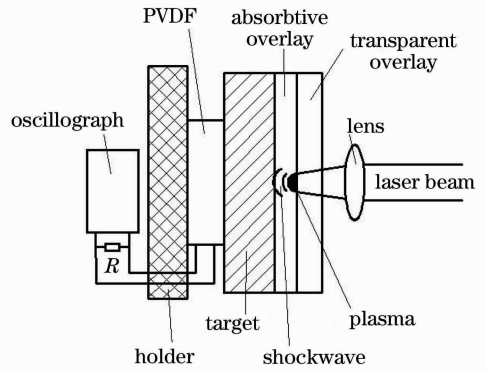


图 1 激光诱导压力波测量示意图

Fig. 1 Sketch of the measurement of the shock wave induced by the laser

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

由于抽运功率保持不变,且激光器的稳定性为 5% 左右,所以激光总输出能量保持不变。通过测量得到长脉冲杂光能量分别为 401, 526, 712, 875, 1397, 1723 和 2280 mJ;激光总能量为 6.5 J;激光诱导的压力波形通过压电传感器(PVDF)将力信号转为电信号由示波器显示出来,图 2 是长脉冲能量为 712 mJ 时 PVDF 测得的信号图。图中 CH1 通道为触发信号,垂直方向每格代表 2 V,CH2 通道为压力波信号,垂直方向每格代表 1 V;两条通道的水平方向每格为 100 μs。

图 3 是对图 2 中 A 信号和 B 信号在时间上展宽的示意图。结合图 2,3 可以得出:A 信号和 B 信号为 PVDF 测得的压力波信号,A 信号相对于 B 信号提前 230 μs 左右,该时间是研制该激光系统时调 Q 脉冲输出效率最高时的时间,是试验结果。说明 A 信号压力波的产生是由于长脉冲杂光作用于铝箔表面产生等离子体诱导的压力波,但是由于长脉冲

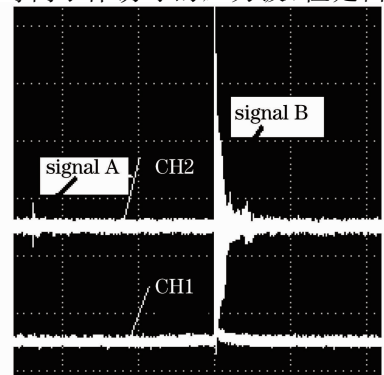


图 2 压力波信号

Fig. 2 Signal of the pressure wave

杂光的能量比较小,且脉冲宽度相对比较宽,相应的功率密度不高,所以诱导产生的压力波在材料内部衰减的较快,图 3(a)显示的压力波在材料内部传播了一个周期就衰减为零,说明在 $230 \mu\text{s}$ 内,长脉冲杂光不足以维持压力波的周期性传播,因此主脉冲激光触发之前,长脉冲杂光对铝箔主要起烧蚀作用。另外, A 信号压力波相对于 B 信号的压力波幅值比较小,图中 A 信号压力波幅值为 415 mV , B 信号第一个周期压力波幅值为 4.1550 V , A 信号的压力波强度不能使材料发生塑性变形,对材料不起强化作用。

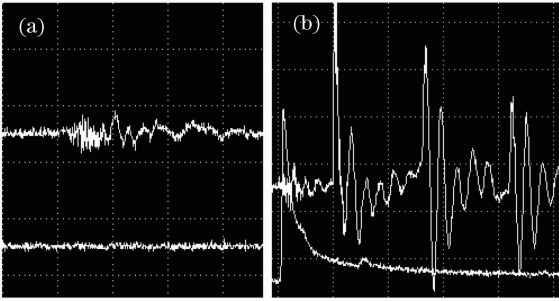


图 3 A 信号 (a) 和 B 信号 (b) 示意图

Fig. 3 Sketch of the (a) signal A and (b) B

3.2 试验分析

在保持抽运功率不变的前提下,长脉冲杂光通过放大级时消耗了大量的亚稳态粒子数,降低了能级间的粒子反转数,导致放大级的储能效率下降,当主脉冲通过放大级时,增益就下降^[9];而激光总能量保持不变,所以相应的主脉冲能量就会减小;同时长脉冲杂光能量导致了激光脉冲宽度的增宽,如图 4 所示。

因此,在保持抽运功率不变的前提下,增加长脉冲杂光能量导致了主脉冲能量下降以及脉冲宽度增加,在材料表面产生的激光功率密度就相应降低。

激光产生的峰值压力^[2]为

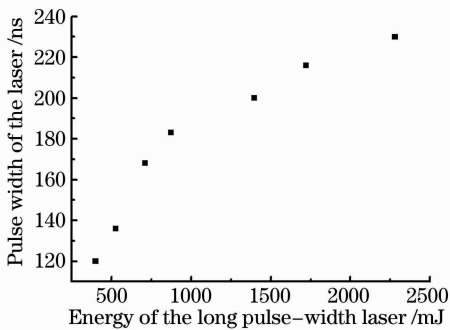


图 4 试验中长脉冲杂光能量对主脉冲激光脉宽的影响
Fig. 4 Effect of the energy of the long pulse-width stray light on the master pulse-width in experiment

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

式中 $\alpha = 0.1$ 为内能转化为热能的系数; I_0 为入射激光功率密度; Z 为靶材与约束层合成冲击波声阻抗。由(1)式可知,主脉冲激光能量下降和脉冲宽度的增宽使得激光产生的峰值压力下降,如图 5 所示。

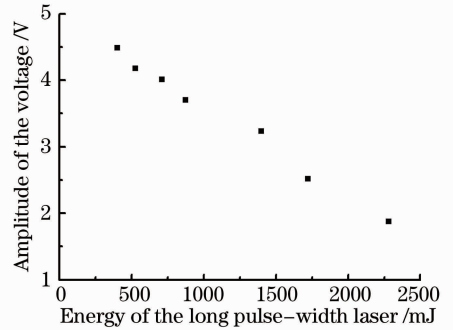


图 5 长脉冲杂光能量对压力波电压幅值的影响

Fig. 5 Effect of the energy of the long pulse-width stray light on the amplitude of the pressure voltage

4 冲击波峰值压力公式的修正

由于长脉冲杂光能量的增加降低了主脉冲激光能量,增加了主脉冲的脉冲宽度,因此相应的激光功率密度就会下降。根据(1)式可以得出冲击波峰值压力就会下降,但是(1)式中 I_0 为主脉冲激光的功率密度,由于长脉冲杂光的存在,主脉冲激光的能量和脉冲宽度都发生了变化,因此有必要对(1)式进行修正。下面将推导长脉冲杂光对主脉冲激光诱导冲击波峰值压力的关系式。

首先,主脉冲激光能量 $E_0 = E_2 - E_1$, 其中 E_2 和 E_1 分别为保持抽运功率不变时激光的总能量和长脉冲杂光能量,这两个参数可以通过激光能量计测出;根据图 4 主脉冲激光脉宽与长脉冲杂光能量的关系,并且利用增长型指数对图 4 进行拟合,如

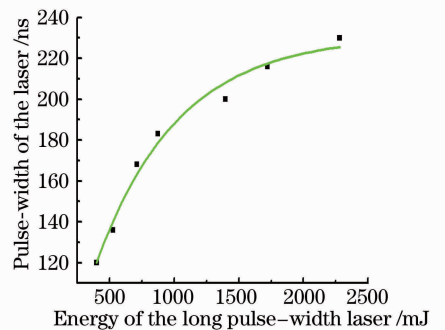


图 6 主脉冲激光脉宽与长脉冲杂光能量的关系拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve between the master pulse width and the energy of the long pulse-width stray light

图 6 所示。图 6 的拟合公式为

$$\tau = C \exp(E_1/t) + D, \quad (2)$$

式中 τ 为主脉冲激光脉宽, C 为 -209.24511 , t 为

633.80675 , D 为 231.23934 。因此主脉冲激光功率密度为

$$I_0 = \frac{E_0}{\tau S} = \frac{E_2 - E_1}{[-209.24511 \exp(E_1 / -633.80675) + 231.23934] S}, \quad (3)$$

式中 S 为激光光斑的面积。将(3)式代入(1)式可得修正后的主脉冲激光诱导的冲击波幅值压力公式为

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{\frac{E_2 - E_1}{[-209.24511 \exp(E_1 / -633.80675) + 231.23934] S}}. \quad (4)$$

从(4)式可以看出,长脉冲杂光能量的增加会相应降低主脉冲诱导的冲击波幅值压力,降低了激光冲击强化金属的作用。

图 7 显示了当抽运功率不变,即激光总能量保持不变,不同长脉冲杂光能量时铝箔表面的烧蚀现象,图 7(a)~(c)分别对应于长脉冲杂光能量为 712, 1397, 2280 mJ 时的烧蚀现象。从图中可以看出,长脉冲杂光对铝箔的烧蚀作用逐渐增强,当长脉冲杂光能量为 2280 mJ 时,铝箔被烧蚀至穿透,使得部分激光能量直接作用于材料表面,降低了材料的机械性能^[10],降低了激光冲击强化的作用。

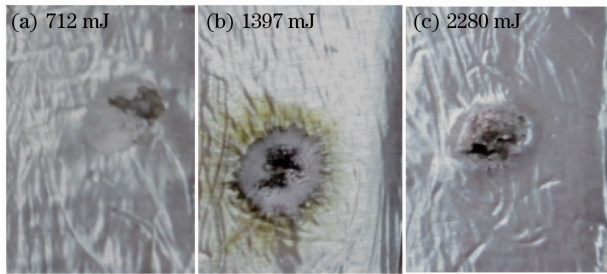


图 7 激光对铝箔表面的烧蚀示意图

Fig. 7 Sketch of aluminum foil ablated by the laser

综上所述,调 Q 固体激光器中长脉冲杂光的存在降低了激光冲击强化金属的作用,因此,在激光冲击强化设备的研发过程中,必须抑制长脉冲杂光。

5 结 论

通过调节调 Q 晶体的半波电压来调节漏光和放大自发辐射能量(长脉冲杂光),同时保持激光器抽运功率不变,研究了长脉冲杂光对主脉冲激光诱导冲击波的影响:

1) 长脉冲杂光能量的增加导致激光放大器储能效率降低,直接降低了主脉冲能量,降低了激光诱导的冲击波幅值;

2) 长脉冲杂光能量的增加导致了主脉冲激光脉宽的增加,降低了主脉冲激光的功率密度,降低了

激光诱导的冲击波幅值;

3) 长脉冲杂光能量的增加会使铝箔被烧蚀至穿透,导致部分激光能量直接作用于材料表面,降低了材料的机械性能,降低了激光冲击强化的作用。

同时根据试验数据对激光诱导的冲击波峰值压力公式进行了相应的修正,该公式可以应用于调 Q 激光器长脉冲杂光存在时主脉冲激光诱导的冲击波峰值压力的计算。

参 考 文 献

- 1 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27** (12): 1213~1229
- 2 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 3 A. Kinga, A. Steuwer, C. Woodward *et al.*. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **435 - 436**: 12~18
- 4 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 5 A. S. Mark, E. R. Richard. Laser induced stresses versus mechanical stress power measurements during laser ablation of solids[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(22): 3227~3229
- 6 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3): 1497~1502
- 7 T. J. Magee, R. A. Armistead, P. Krehlt. Laser-induced stresses in coated and uncoated targets[J]. *Appl. Phys.*, 1975, **8**(5): 498~504
- 8 Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photomechanics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5885~5891
- 9 顾永玉,张永康,张兴权等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5885~5891
- 10 Wang Chunyu, Lu Yutian, Zhu Xiaolei. Effect of amplified spontaneous emission on performance of all solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 433~437
- 11 王春雨,陆雨田,朱小磊. 放大自发辐射对全固态激光器调 Q 性能的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 433~437
- 12 Patrice Peyre, C. Carboni, P. Forget *et al.*. Influence of thermal and mechanical surface modifications induced by laser shock processing on the initiation of corrosion pits in 316L stainless steel[J]. *J. Mater. Sci.*, 2007, **42**(16): 6866~6877