

高功率激光冲击处理装置及其驱动冲击波实验研究

吴 边¹ 王声波² 朱 灵¹ 郭大浩² 吴鸿兴²⁽¹⁾ 中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥, 230031; ⁽²⁾ 中国科学技术大学强激光技术研究所, 合肥, 230026)

摘要 对实验研制的高功率、短脉冲强激光冲击处理装置进行了输出特性研究,其输出能量不稳定性及激光脉冲功率不稳定性分别为 $\pm 3.8\%$ 和 $\pm 6.5\%$ 。采用透镜列阵的焦斑均匀化系统使光强分布起伏度达到 $\pm 12\%$ 。并利用新型压电传感器(PVDF压电传感器)对其引发的激光冲击波压力进行了实时测量。

关键词 激光冲击处理 透镜列阵 焦斑均匀化 PVDF压电传感器 激光冲击波

Research of properties of the shock wave induced by high power laser and laser shock processing equipment

Wu Bian¹ Wang Shengbo² Zhu Ling¹ Guo Dahao² Wu Hongxing²⁽¹⁾ Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031⁽²⁾ Institute of High Power Laser Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract We research the output properties of high power, short pulse strong laser shock processing equipment, the output unstable degree of energy and the output unstable degree of laser pulse power is respectively $\pm 3.8\%$ and $\pm 6.5\%$. we adopt focal spot uniformization system of lens array and make the risen and fallen degree of light intensity only to $\pm 12\%$. We utilize new type piezoelectricity gauge (PVDF piezoelectricity gauge) to carry on real-time measurement to laser-induced shock wave pressure.

Key words laser shock processing(LSP), lens array, focal spot uniformization, PVDF piezoelectricity gauge, laser-induced shock wave

激光冲击处理技术是利用高功率脉冲激光辐照金属材料表面产生的高温高密度等离子体的喷射爆炸所形成的冲击应力波,来提高金属材料的硬度与抗疲劳强度等性能的一种新颖材料改性处理技术^[1-3]。激光冲击波技术在材料的冲击改性处理,特别是金属的冲击强化处理、材料的冲击精密成型等领域得到广泛的应用。对金属材料进行激光冲击精密成形与激光冲击强化处理,都必须使金属材料能产生塑性变形。这要求激光冲击波峰值压力必需大于相应材料的动态屈服强度,因此需要激光冲击波峰值压力能达到 1GPa 左右,即要求作用于材料的激光功率密度必需达到 $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上^[4-6],并且要求输出激光束焦斑光能量均匀分布。本文研制了一套高功率密度($\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)、短脉冲(ns 级)的强激光冲击处理装置,对铝合金、高温合金、不锈钢、45#钢、球墨铸铁等材料进行冲击处理都获得显著的冲击形变与冲击强化处理效果。

高功率强激光器装置

整个高功率激光装置由激光器系统、激光电源、激光能源系统与焦斑均匀化系统四部分组成。

1. 激光器系统组成与光路排布

激光器系统主要由电光调 Q 激光振荡器、三级激光放大器及光隔离器、空间滤波器等组成。其光路排布见图 1 所示。

在整个激光器系统中, M_1 为 1054nm 90° 全反后腔片, M_2 为前腔输出半反片, $M_3 \sim M_6$ 为 1054nm 45° 全反片。PC 为普克尔盒,Q-OS 为调 Q 振荡器,DP 为可饱和吸收隔离器, PA_1 、 PA_2 、MA 为

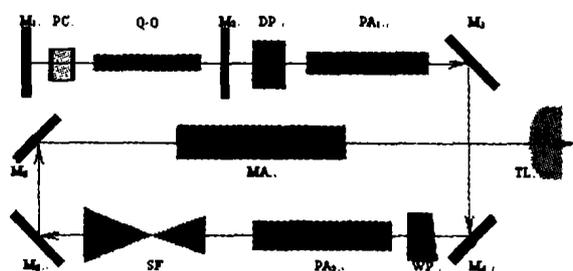


Fig. 1 The optical path diagram of laser system

激光放大器, WP 为 $\lambda/4$ 波片反向光隔离器, SF 为空间滤波器。输出激光通过焦斑均匀化系统 TL 对光束进行处理后, 再对金属材料靶体进行冲击。

2. 激光工作物质的选定

由于钕玻璃的荧光谱线宽, 荧光寿命长, 在高能态可存贮很高的粒子反转数, 可获得的光放大能量大^[7], 且其在工艺上可做到光学均匀性良好的大尺寸激光棒, 故脉宽为 ns 量级的高功率脉冲激光系统通常采用钕玻璃作为放大器的工作物质。因此本装置选用受激辐射界面大的磷酸盐钕玻璃作为激光放大器系统与调 Q 激光振荡器的工作物质, 其中心波长为 1054nm。

为了有效遏制放大器系统的 ASE(放大自发辐射) 能量输出, 将每级放大器的钕玻璃激光棒有效长度均控制在 350mm 之内, 并将钕玻璃棒的两端面磨斜一定角度。

3. 光隔离器、空间滤波器的作用

光隔离器的主要作用为有效抑制激光系统的 ASE(放大自发辐射); 隔离由靶面反馈回的激光, 以防止由靶面反馈的激光对放大器系统的破坏。

空间滤波器主要作用是滤掉小尺度的光斑强度起伏, 防止小尺度自聚焦对放大器(特别是末级放大器)钕玻璃棒的损坏; 还起着扩束与光隔离的效果。

4. 焦斑均匀化系统

二元光学(衍射光学)元件的设计制作, 必须以预先给出激光束的初始光能量分布为前提, 对输出激光束光能量的初始分布状态极为敏感。本装置要求输出激光束能量在 1~20J 之间的大范围内可调, 输出激光束的光能量分布必然会有所变化, 采用二元光学技术难于取得好的均匀化效果, 故采用透镜列阵系统^[8]来实现焦斑光能量的均匀化分布。

透镜列阵是目前上海光机所“神光”装置靶场所采用的一种传输而有效的焦斑能量均匀化系统。它是由拼装在一起的若干小透镜列阵与一大透镜组合而成, 如图 2 所示。小透镜列阵把人射激光束分割

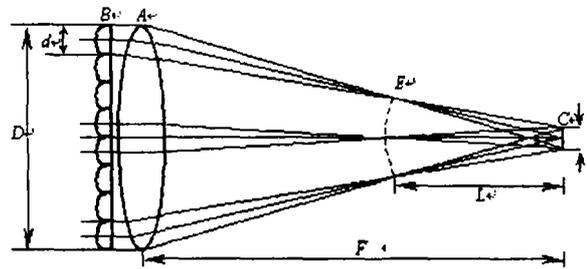


Fig. 2 The focusing system of lens array

成多个局部光束(子光束), 每一子光束在大小透镜组合焦点列阵面上聚焦后再发散, 并都近平顶的光能量分布。其最大优点在于对入射激光束光能量的初始分布没有太严格的要求。

若小透镜的直径、焦距分别 d 和 f ; 大透镜的直径、焦距分别为 D 和 F 。金属材料靶面上的光斑直径为 δ , 则他们之间的关系为: $\delta = FD / fM$

式中 $M = D/d$ 。十分明显, 当 M 值越大时, 靶面上的焦斑光能量分布均匀性就越好。

激光器总体输出性能结果

1. 激光脉冲能量与激光脉冲能量不稳定性

在整个激光器系统中可饱和吸收隔离器的大信号透过率约为 75%, 空间滤波器的透过率约为 70%, $\lambda/4$ 波片反向光隔离器的透过率约为 80%。由于这些元件对激光输出能量的衰减作用, 故激光器各主要工作参数见表 1。

采用 PT-1A 型体吸收能量计对输出激光能量进行了测量, 其测量结果为: $E \leq 23.75J$ 。

在激光器系统运转状态下测量一定时间间隔的 10 次输出激光脉冲能量, 采用统计方法算出每个脉冲的平均能量的相对偏差和平均能量, 即得到能量不稳定性。10 次测量结果见表 2。

Table 1 The working parameter of Laser

Pumped energy density (J/cm^2)	Q modulation oscillator	Pulsed laser amplifier I	Pulsed laser amplifier II	Pulsed laser amplifier III
design value	108	51	38	37
working value	54.38	30.18	22.17	21.65

Table 2 The energy numerical table

Number(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average value
Energy(J)	21.63	21.38	22.75	21.63	23.75	23.25	22.25	22.88	22.50	20.88	$E' = 22.29$

Table 3 The power relative value

Number(n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	average value
Peak value (P)	7.2	6.8	5.6	7.0	7.0	6.8	6.9	7.2	7.2	6.9	$P' = 6.86$

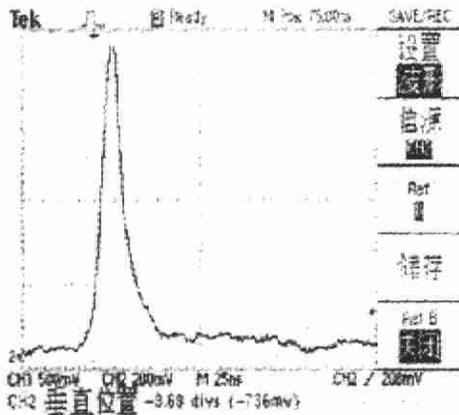


Fig. 3 The waveform of laser pulse

由测量结果计算得到:标准偏差

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum E^2 - nE'^2}{n}} = 0.857J$$

则相对偏差为 σ_E / E' , 即能量不稳定性为 $\pm 3.8\%$ 。

2. 激光脉冲宽度(FWHM)与激光脉冲功率不稳定性

采用 Tektronix 公司的存储示波器(带宽 100MHz, 相应时间 0.9ns)对输出脉冲波形进行了测量, 其结果见图 3.1 所示。从图中可知, 输出激光脉冲宽度: $\tau \leq 20ns$ (16~20ns)

测量 10 次激光脉冲波形的峰值(激光脉冲峰值功率相对值), 按统计方法算出平均相对功率及相对偏差, 该相对偏差可表征为功率的不稳定性。10 次测量结果见表 3。

由测量结果计算得到:标准偏差 $\sigma_p = 0.445$

则相对偏差为 $\sigma_p / P' = 6.5\%$, 即激光脉冲功率不稳定性为 $\pm 6.5\%$ 。

3. 激光输出光强分布

采用透镜列阵焦斑均匀化系统对输出激光进行均匀化处理后, 可达到的靶面光斑光强分布起伏度为 $\pm 12\%$, 采用二维 CCD 测量结果见图 4 所示。

激光冲击波测量结果

实验中采用中国科大研制的聚偏二氟乙烯(PVDF)新型压电传感器^[9]及 PM3320A 型数字示波器记录激光冲击波压力和电压波形。测量系统结构如图 4 所示。实验靶件选用厚度分别为 1.25mm, 2mm 的普通铝材料(表面抛光), 在 PVDF 压电传感器背面固定一有机玻璃垫块, 使其同 PVDF 压电膜声阻抗基本匹配以减少激光冲击波的反射。靶材受激光冲击区直径为 7mm。

使用 PVDF 测得的电压信号 $V(t)$ 与冲击波压力 $P(t)$ 之间满足以下关系^[10]:

$$P(t) = \frac{K}{A} \int_0^t \frac{V(t)}{R} dt$$

式中 t 为时间, R 为与 PVDF 并联的电阻 (25 Ω), A 为作用区面积, K 为经 Hopkinson 压杆定标的动态定标系数 (6.6 $\times 10^8 Pa \cdot cm^2 / \mu c$)。于是便可通过测量的冲击波电压波形得到冲击波压力波形(见图 5, 激光冲击 2mm 铝靶的测量结果)

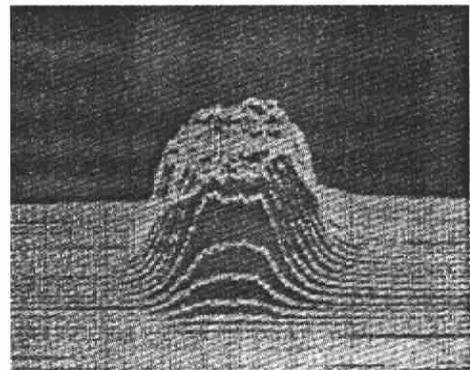


Fig. 4. Two dimensional plot of laser intensity distribution

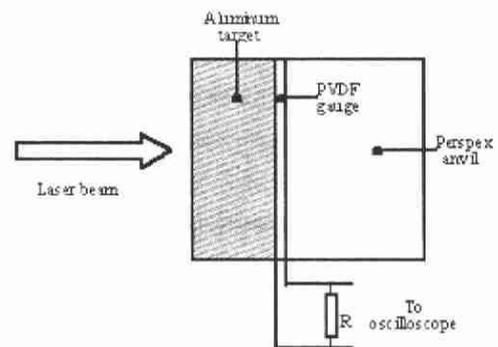


Fig. 5 Configuration of target system

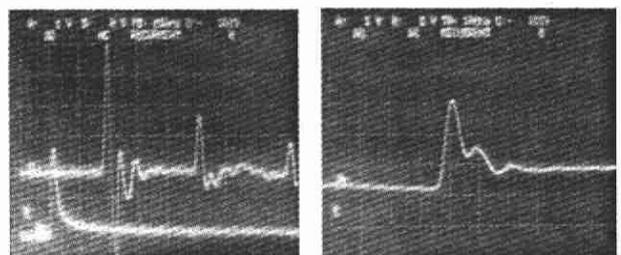


Fig. 6(a) Laser pulse (channel B), piezoelectrical (channel A) wave (b) shock pressure wave

根据文献^[4]中的(4)式和文献^[11]中的(6)式, 计算得到激光冲击波在铝靶表面的峰值值约为 2.78GPa 左右, 达到并超过了使金属材料产生塑性变形所需的激光冲击波峰值压力。

结论

采用焦斑均匀化系统使激光输出光强分布起伏度达到 $\pm 12\%$, 保证了输出激光束焦斑光能量的均匀分布。这对强激光驱动冲击波来对金属材料进行表面强化处理的实际应用起着重要的作用。

参考文献 (下转第 116 页)

更高阶次的多项式拟合,虽然结果会更精确,但多项式的阶次越高,拟合对噪声越敏感,而实际中的信号都是有噪声的,这样容易产生不准确的预测,因此6次多项式拟合的函数,可作为溶液盐度—光强关系的数学模型,拟采用它。

3. 对盐度—光强函数关系的指数拟合

我们尝试指数拟合。分别以2、10、e为底,对盐度—光强函数关系进行指数拟合,结果如图8~11所示。

从溶液盐度—输出光强关系的指数拟合结果发现:2为底的指数拟合曲线,随着阶数的升高与测量值逐渐接近,以10、e为底的指数拟合均不成功。

同多项式拟合一样,随着阶次升高,相对误差逐渐变小。计算结果显示:3阶拟合的误差最大相对误差为0.0872,4阶拟合的误差最大相对误差为0.0317,此时的盐度—光强关系近似表达式为:

$$\log_2 y = -9.2056 x^4 + 12.5174 x^3 - 7.5669 x^2 + 0.63858 x + 0.18575 \quad (2)$$

可见,要达到小于1%的误差,必须进行5阶以上的指数拟合。这时的表达式不如多项式更有效。

(上接第138页)

能有效地预防假道形成。另外,并发出血也是一个值得注意的问题。这可能与下列因素有关:全身情况所致如凝血机制障碍、妇女经期等;解剖结构异常致操作困难或假道形成;暴力所致泪小点、泪小管撕裂;能量选择过大,致局部泪道灼伤,出血。为尽量减少出血,笔者建议:术前应仔细询问病史,检查,严格掌握适应症,避免暴力操作,激光能量的选择应遵循“避高就低”原则等。

激光泪道成形术是目前治疗泪道阻塞较新的,开展较多的手术。通过临床观察分析,我们认为KTP激光治疗泪道阻塞确实安全、有效,并发症少。

(上接第105页)

参考文献

- [1] B. P. Fairand, et al., *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(3):1497
- [2] P. Peyre, et al., *Optical and Quantum Electronics*, 1995, 27: 1213
- [3] 张永康等, *中国科学, E 辑*, 1997, 27(1):28~34
- [4] 洪昕等, *中国激光*, 1998, 25(8):743~747
- [5] 张宏等, *航空学报*, 1997, 18(2):248~251
- [6] 张宏等, *中国激光*, 1996, 23(12):1112~1116

结论

通过对盐度光纤传感实验得到的数据进行多项式拟合和指数拟合,发现对光强—盐度函数关系,两种拟合方式的结果都不理想;对盐度—光强函数关系多项式拟合,结果则显示采用多项式拟合的方法,可得到二者间较理想的近似函数关系,且六次(或稍高次)多项式函数较为合适。

此多项式函数的数学模型,将盐度和输出光强两参数关系加以精确量化,使探头的输出光强与相应盐度的关系变得更加清晰准确,并使此盐度光纤传感系统的数据处理程序得到简化。在一定的精度要求下,输出光强数据快速的转换为相应的盐度输出,有利于此盐度光纤传感系统朝着实时测量和实用化方向发展。

参考文献

- [1] 张延华等, *计算机应用研究*, 1999年,第7期:3-6.
- [2] 陈桂明, *MATLAB 数理统计(6. x)*, 科学出版社, 2002, 148-157.
- [3] 韩悦文等, *激光生物学报* (待发表).

但对于多部位阻塞或慢性泪囊炎的疗效还有待于进一步提高。

参考文献

- [1] 王智崇, 陈家祺, *鼻泪管阻塞的治疗现状*, *中国实用眼科杂志*, 2001, 19, 3
- [2] 孙叙清, 戴青, 黄薇, 等, *激光插管治疗鼻泪道阻塞*, *实用医药杂志*, 1993, 6, 15
- [3] 蔡明权, 王智, 水迎波, *简易 U 形插管术治疗泪道阻塞的远期观察*, *泪液学杂志*, 1992, 2, 13
- [4] 吕红玲, 孙康, 陆强, *KTP 激光泪道形成的临床疗效观察*, *临床眼科杂志*, 2003, 1, 47
- [5] 刘岩, 张劲松, 马玉龙, 等, *激光泪道成形术治疗阻塞性泪道疾病的疗效观察*, *中华眼科杂志*, 2003, 39, 533

- [7] W. Koechner, *Solid State Laser Engineering*, Copyright (c) Springer - Verlag Berlin Heidelberg 1976, 1988, 1996, 1999
- [8] 丘悦等, *中国激光*, 1995, 22(1):27~31
- [9] 李欣增等, *中国专利*, 专利号:92242887.5
- [10] J. P. Romain, et al., *High-pressure Science and Technology-1993*, American Institute of Physics, 1994, 1915~1919
- [11] F. Cottet et al., *Phys. Rev. A*, 1982, 25(1):576~579