

文章编号: 1001-3806(2010)01-0105-04

高能激光辐照诱导声波频率特性的实验研究

秦海永, 张永康*, 袁蓓, 尤建

(江苏大学 江苏省光子制造科学与技术重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了研究高能激光辐照诱导声波的频率特性以及实验条件对其的影响, 采用宽频声传感器接收实验过程中产生的声波, 并导入 MATLAB 中处理, 得到其功率谱密度图。激光冲击实验采用铝箔吸收层、水以及不同约束状态下的 K9 玻璃约束层, 对实验中产生声波的功率谱密度图做了详细分析, 取得了图中最大峰值频率的分布数据。结果表明, 不同约束层以及约束层的不同约束状态都会对声波功率谱密度最大峰值频率的分布有较大影响, 而激光能量密度对其影响很小, 同时该实验结果对激光冲击强化实现在线检测有重要指导意义。

关键词: 激光技术; 激光冲击强化; 声波; 功率谱密度

中图分类号: O421+.6; TG665

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.030

Experimental study on the characteristics of the frequency of acoustic wave induced by high power laser

QIN Hai-yong, ZHANG Yong-kang, YUAN Bei, YOU Jian

(Jiangsu Provincial Key Laboratory for Science and Technology of Photon Manufacturing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the frequency of acoustic waves induced by high power laser, the acoustic waves were received by a wide band acoustic sensor. Then they were imported to MATLAB and calculated to obtain the power spectral density (PSD). After the analysis of the PSD of the acoustic waves induced by Nd:glass laser with water or K9 optical glass under different conditions as overlay, the frequencies at the maximum peak of the PSD were obtained. It is discovered that the frequencies are strongly influenced by different overlay or the overlay under different conditions, instead of the laser power density. The outcome provides important guiding significance to the realization of the on-line monitoring of the laser shock processing.

Key words: laser technique; laser shock processing; acoustic wave; power spectral density

引言

激光冲击强化 (laser shock processing, LSP) 是利用高功率密度 (10^9 W/cm^2)、短脉冲 (纳秒级) 的激光束透过辐照于透明约束层辐照于金属材料表面的吸收层。吸收层材料吸收激光能量, 瞬时汽化形成高温高压等离子体, 等离子体向周围空间迅速膨胀, 形成高压冲击波 (冲击波峰值压强达吉帕量级)。如此高压高速冲击波作用于金属材料并在其内部传播, 使金属材

料表层发生塑性变形, 形成密集、稳定的位错结构, 产生残余压应力, 从而提高金属材料多种机械性能 (强度性能、耐腐蚀性能、耐磨性能、疲劳性能等)^[1-4]。冲击波同时也将向其它方向膨胀, 作用于吸收层外的透明约束层 (如水或玻璃), 使其发生振动甚至破碎。约束层的振动或破碎后形成向外喷射的颗粒扰动周围的空气, 产生空气中传播的机械波。

目前, 国内外对激光冲击理论的研究主要集中在激光与材料相互作用机理、冲击波理论模型, 以及激光参量、约束层、吸收层等因素对冲击强化效果的影响等方面, 应用研究则主要集中在激光冲击后材料各项机械性能的改变^[5]。然而, 对激光冲击强化过程中产生的声现象的专门文献报道则很少, 仅有美国于 2001 年以后公布了 3 个关于激光冲击强化在线检测的专利。这 3 个专利分别通过监控冲击过程中产生的声波的不同特性, 如特征频率、剩余能量的飞行时间等, 实现在线检测, 提高了激光冲击强化的效率和可靠性^[6-8]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50705038; 50675089; 50735001); 江苏省高新技术资助项目 (BG2007033); 教育部博士点基金资助项目 (20050299004); 江苏省“六大人才高峰”第三批项目 (06-D-023)

作者简介: 秦海永 (1976-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光冲击强化在线检测的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2008-11-26; 收到修改稿日期: 2008-12-15

通过对激光冲击强化过程中产生的机械波的研究,了解冲击过程中产生的机械波的特性,可以指导我国的激光冲击强化在线检测技术。毕竟在目前美国公布的3个专利中并没有严格的数据论证和实验基础,且这3个专利在实际应用中如外界存在较强干扰时,容易产生错误的检测结果。作者通过采集大量激光冲击强化实验中产生的声波,得到大量的数据,对这些数据进行数学处理,发现了采用铝箔吸收层、水以及不同约束状态下的K9玻璃做约束层时,冲击强化产生声波的频率特征。

1 实验理论

激光冲击强化过程中产生声波是一个较为复杂的过程。激光辐照于材料表面产生向外迅速膨胀的等离子体,等离子体作用于与之紧密接触的约束层。因等离子体与约束层作用时间非常短,约为70ns。在如此短的时间内,即使是流动的水层也可以看做是静止的水层或是水做的“板材”。当等离子体对此“板材”(水或K9玻璃)有力的作用时,将使其振动,其振动可用如下板的振动方程近似表示^[9]:

$$\frac{EK^2}{\rho(1-\sigma^2)} \nabla^4 \eta + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中, E 为材料杨氏模量, K 为板材截面回转半径, ρ 为材料密度, σ 为材料泊松比, $\eta(t,x,y)$ 代表板中心面上任何一点在垂直方向的位移。对于不同的边界条件,(1)式解的形式也大不相同。但可从方程中看到板振动的简正频率与材料的密度、杨氏模量和泊松比有关。

约束层在等离子体作用下,剧烈振动,甚至破碎形成射向空气中的高速运动颗粒。此时,板的振动或高速运动的颗粒将会使空气振动,产生包含丰富频率成分的机械波。由于机械波中的高频部分在空气中的衰减很快,传播距离比较短,所以传播一定距离后,其高频部分几乎可以忽略不记。此时,机械波的大部分能量将分布于20Hz~20kHz的频率范围内,即处于人耳可听域,也叫声波,故本文中的实验采用宽频声传感器接收声波^[10-11]。

由于激光冲击强化在封闭的工作室内进行,冲击强化过程中产生的声波在工作室传播时,将被室内物体表

面多次反射,形成反射波。这些声波和声反射波在空气中传播的过程中,能量不断耗散,振幅将不断减小,最后消失。最终被宽频传感器接收,声波将由原始声波和多次反射后振幅逐渐衰减的声信号。同时,由于房间内没有移动的物体,不会发生多普勒效应,所以声波在传播、反射过程中的频率不会发生变化,即被检测声波的频率分布于20Hz~20kHz范围内。在声波的采样过程中,为了避免出现混叠误差,由Shannon采样定理,有些文献中亦称之为Nyquist采样定理:

$$f_s \geq 2f_h \quad (2)$$

式中, f_s 为采样频率, f_h 为被采样信号的最高频率。一般取2倍~5倍,本文中采样频率取 $f_s = 2.4f_h = 48\text{kHz}$ 。

2 试验设计

激光冲击强化试验在江苏大学强激光技术研究所进行,实验装置如图1所示。冲击强化实验室为

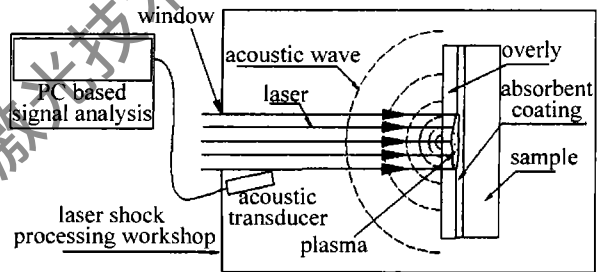


Fig. 1 The schematic diagram of LSP

可以封闭的225cm×272cm×240cm的房间。实验中采用的Nd:glass高功率激光器。该激光器由以下部分组成:1级调Q钕玻璃(∅15mm×200mm)激光振荡器,谐振腔长1200mm;1级前置钕玻璃(∅15mm×200mm)放大器和1级钕玻璃(∅20mm×520mm)激光主放大器。激光波长为1.054μm,脉冲宽度约为23ns,能量约15J~25J,有效光斑直径为8mm,脉冲重复频率为0.5Hz,激光脉冲为准高斯分布。

图1中宽频声传感器放置于距离冲击点95cm处,接收不同激光能量下冲击强化过程中产生的冲击波。声传感器接收到的声信号通过电缆传输至电脑,电脑内置声卡将以48kHz的采样率对其进行模数转化。

实验条件如图2所示,吸收层均采用单面附胶的铝

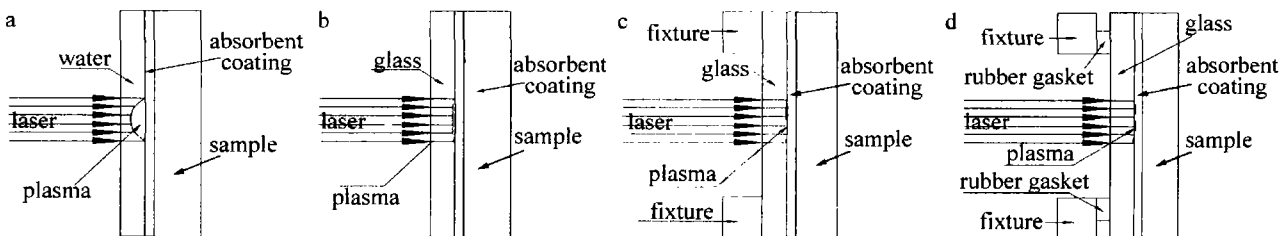


Fig. 2 The schematic diagram of overlay and absorbent coating under different conditions

箔紧贴于被冲击材料表面,防止烧伤材料,约束层则采用水和 3 种不同约束状态下的 K9 玻璃,以提高冲击效果。

图 2 中各实验的约束层种类即状态说明如下:图 2a 条件下,控制水流,在铝箔表面形成平缓流动、约为 3mm ~ 5mm 厚的水层作为约束层;图 2b 条件下,约束层 K9 玻璃由胶带粘接后固定于铝箔吸收层外,此外不再受其它力的作用;图 2c 条件下,采用钢制夹具将 K9 玻璃和表面已经粘接铝箔吸收层的试样夹紧固定;图 2d 条件下,对图 2b 的实验进行改进,在钢制夹具和 K9 玻璃间加装橡胶垫圈,使 K9 玻璃和铝箔吸收层之间结合更紧密。

3 实验数据处理

将实验中采集到的声波信号导入 MATLAB 中,对其进行处理,得到其功率谱密度图。功率谱密度(power spectral density, PSD)本质上就是傅里叶频谱分析,即将原来对时间域的振动描述转化为频率域的振动描述。根据帕塞瓦尔定理,即信号在时间域的总功率等于在频率域的总功率,可以得到随机过程的功率谱密度,它反映了随机过程统计参量均方值在频率域上的分布。换言之,即在各个频率域上,振动能量的概率分布。当外界存在干扰时,功率谱密度可以读出不同频率的振动激励所含振动能量的平均密度,剔除干扰,提高检测可靠性。

3.1 声波的功率谱密度图特征

图 3 为声波经过 MATLAB 处理后得到的典型功率谱密度图。从图 3 的功率谱密度图中可以看到,图

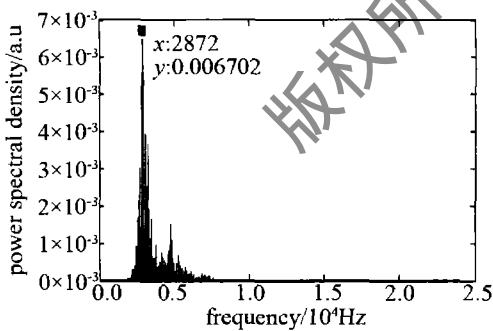


Fig. 3 Typical power spectral density of acoustic in the experiments

形由一系列不同频率的峰值构成,在频率为 2872Hz 处的峰值最大,峰值幅度为 0.006702。说明在此振动频率的振动能量最高,反映了激光冲击强化实验中产生的声波的频率特性。

3.2 不同实验条件下产生的声波的功率谱密度图最大峰值频率分布

统计不同实验条件下声波的 PSD 图最大峰值处频率和峰值幅度,以频率作横坐标,峰值幅度作纵坐

标,做出与图 2 相对应实验条件下产生的声波的 PSD 最大峰值频率和它的幅值分布图,并在图中标示出每组频率数据分布的平均值、中间值和标准差,如图 4 所示。

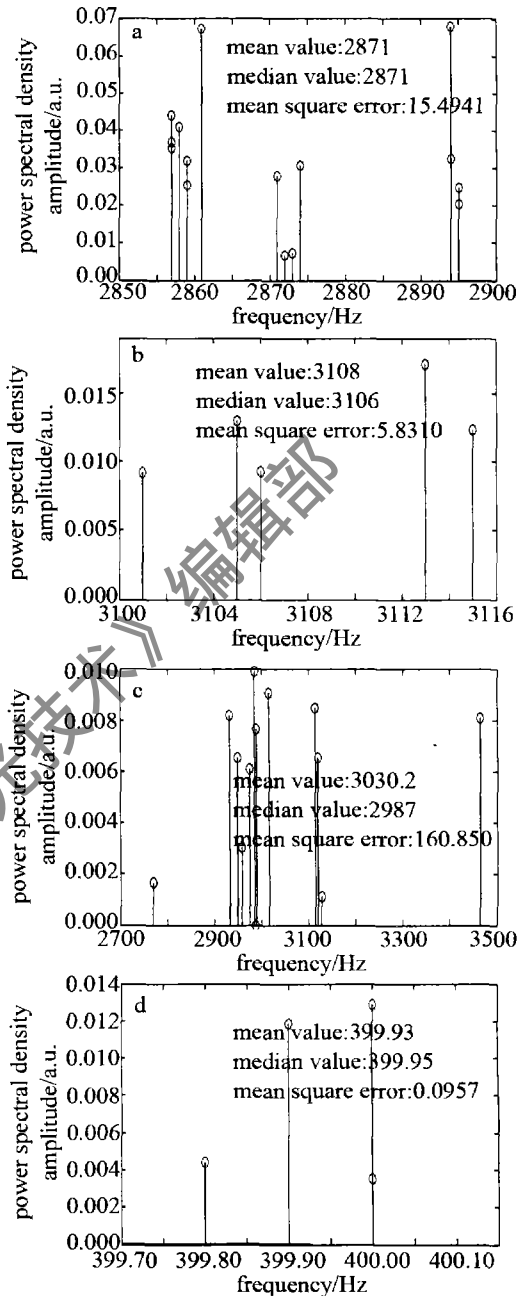


Fig. 4 The distribution of the frequency at the maximum peak of the PSD

4 实验结果与讨论

对声波数据的分析表明,激光冲击强化过程中不同的约束层以及约束层所处状态,对产生的声波的最大能量频率有较大影响,而激光能量对该频率的影响小,但对该频率的峰值幅度有很大影响。

4.1 不同材料约束层对声波 PSD 最大峰值频率的影响

从图 4a 和图 4b 可以看到,采用水和 K9 玻璃两种不同材料作约束层时,产生的声波的 PSD 最大峰值频

率分布。其中 K9 玻璃产生的声波的 PSD 最大峰值频率平均值为 3106Hz, 为水作约束层时平均频率 2871Hz 的 1.082 倍。实验结果说明, 采用不同约束层时, 发生振动的“板”各种属性不同, 其振动的简正频率也不相同, 故产生声波的能量最大振动频率也不相同, 即声波的 PSD 最大峰值所处频率也不相同。

4.2 不同约束层状态对声波 PSD 最大峰值频率的影响

图 4b、图 4c 和图 4d 为采用相同吸收层和约束层, 但约束层 K9 玻璃约束状态不同时, 产生的声波 PSD 最大峰值所处频率的分布特征图。在图 2b 所示条件下, K9 玻璃用胶带固定, 每次固定时对 K9 玻璃产生的压力均由粘贴使用的胶带提供, 而胶带所能提供的压力是有限的, 所以整体上可以认为每次实验时 K9 玻璃受力相同。从频率分布图上的标示可以看到频率分布的标准差较小为 5.8301。而图 4c 的频率分布比图 4b 分散, 使频率的分布的标准差达到了 160.850, 几乎是图 4b 的 30 倍。这是因为采用钢制夹具对 K9 玻璃装夹时, 由于两者的硬度都很大, 接触面不光滑或者装夹过程中两个接触面不平行, 都会使 K9 玻璃受力不均匀, 甚至使 K9 玻璃某处翘起, 形成约束层和吸收层之间的缝隙, 影响 K9 振动或者对冲击波的传递, 也很难保证每次装夹效果相同。图 4d 所示为中间加一橡胶垫圈时产生的声波 PSD 最大峰值所处频率分布, 其标准差最小, 因为橡胶垫圈有较好的柔韧性, 可以使 K9 玻璃均匀受力, 而不是像图 4c 条件下使玻璃在某处翘起, 所以每次实验中产生的声波频率特征几乎是相同的, 频率分布集中, 即标准差很小, 为 0.0957。综上所述, 在图 2b、图 2c 和图 2d 实验条件下, 由于 K9 玻璃约束层的约束不同, 即边界条件不同, 其振动的简正频率也不相同, 所以它们产生的声波的 PSD 最大峰值所处频率平均值也将不同。

4.3 激光能量对声波 PSD 最大峰值频率和幅值的影响

从图 4 中可以看到, 在激光冲击过程中, 各实验条件下产生的声波的 PSD 最大峰值频率分布非常集中, 但 PSD 最大峰值幅度却并非如此, 即激光能量对频率的影响较小, 但对其幅值相反。此外从 (1) 式中可以说明, 板振动的简正频率与板的固有属性和初始条件相关, 而与引起振动的外力无关。

5 结论

采用水和不同约束状态下的 K9 玻璃作约束层, 利用 MATLAB 软件对激光冲击强化过程中产生的声波做了分析和研究。详细讨论了不同实验条件下产生的声波的 PSD 最大峰值频率分布规律。采用水和紧密粘接的 K9 玻璃做约束层时, 在激光冲击强化时产生的声波的 PSD 最大峰值频率平均值大于前者。不同约束状态下的 K9 玻璃作约束层时, 其中采用专用钢制夹具夹紧时产生的 PSD 最大峰值频率分布分散, 标准差大, 而当橡胶垫圈存在时, 产生声波的 PSD 最大峰值频率最低, 仅为 400Hz, 且频率分布的标准差也很小, 为 0.0957。该实验结果为实现激光冲击强化的在线检测提供了实验基础。

参考文献

- [1] COUTURIER S, de RESSÉGUIER T, HALLOUIN M, *et al.* Shock profile induced by short laser pulses [J]. *J A P*, 1996, 79(12): 9338-9342.
- [2] OCANA J L, MOLPECERES C, MORALES M, *et al.* A model for the coupled predictive assessment of plasma expansion and material compression in laser shock processing applications [J]. *Proc SPIE*, 2000, 3885: 252-263.
- [3] OCANA J L, MOLPECERES C, PORRO J A, *et al.* Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 238(9): 501-505.
- [4] MOLPECERES C, PORRO J A, GOMEZ G, *et al.* Experimental assessment of materials treatment by laser shock processing [J]. *Optica pura y Aplicada*, 2003, 36(1): 51-57.
- [5] SUH U W, JAMES D R. Laser shock peening quality assurance by acoustic analysis; United States, 0030062349 [P]. 2003-04-03.
- [6] BRIAN M D. Real time laser shock peening quality assurance by natural frequency analysis; United States, 006914215 [P]. 2005-06-05.
- [7] BRODDUS J, Jr. Laser shock peening system with time-of-flight monitoring; United States, 0070119824 [P]. 2005-11-30.
- [8] ZHANG Y, ZANG S, ZANG X, *et al.* Investigation of the surface qualities of laser shock processed zones and the effect on fatigue life of aluminum alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 92(1): 104-109.
- [9] DU G H, ZHU Zh M, GONG X F. Basic theory of acoustics [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 107 (in Chinese).
- [10] KIM T, LEE J M, CHO S H, *et al.* Acoustic emission monitoring during laser shock cleaning of silicon wafers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(9): 1010-1020.
- [11] CONESA S, PALANCO S, LASERNA J J. Acoustic and optical emission during laser-induced plasma formation [J]. *Spectrochimica Acta*, 2004, B59(9): 1395-1401.