

圆形烧蚀光斑的纵波声场分析

王玉庆¹, 郑晓彦¹, 马世榜²

(1. 郑州信息科技职业学院, 河南 郑州 450008; 2. 南阳师范学院 机电工程学院, 河南 南阳 473061)

摘要: 圆形烧蚀光斑具有轴对称性且易于获取, 在激光超声检测中有着广泛的应用。为了获得相应的纵波声场特性, 建立了激励源模型, 讨论了近场中声轴上声压幅值分布情况并获得了近场长度。利用面积积分, 推导出声压振幅的表达式, 并对远场中的声场能量进行了模拟。通过分析发现, 远场中的纵波能量关于声束轴线呈对称分布, 并且在轴线上达到最大值, 此外光斑大小直接影响着纵波声场指向性。搭建了一套激光超声非接触式测量系统, 基于互易原理并根据传播距离修正信号振幅, 获得了指向性实验数据, 验证了理论分析结果。

关键词: 激光超声; 圆形烧蚀光斑; 纵波声场; 非接触式测量

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.12.003

Investigation on the longitudinal wave sound field of circular ablation spot

WANG Yu-qing¹, ZHENG Xiao-yan¹, MA Shi-bang²

(1. Zhengzhou Vocational University of Information and Technology, Zhengzhou 450008, China;

2. School of Mechanic and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: The circular ablation spot is axisymmetric and easy to obtain, so it has a wide range of applications in laser ultrasonic inspection. In order to gain the corresponding characteristics of longitudinal wave sound field, an excitation source model is established. The amplitude distribution of sound pressure on the acoustic axis in the near field is discussed and the near field length is calculated. Using the area integral, the expression of the sound pressure amplitude in the far field is derived, and the sound field energy is simulated. Through analysis, it is found that the longitudinal wave energy is symmetrically distributed about the axis of the acoustic beam and reaches the maximum value on the axis. In addition, the spot size directly affects the directivity of the longitudinal wave sound field. A laser ultrasonic non-contact measurement system is set up. The signal amplitude is corrected according to the propagation distance, based on the reciprocity principle, directional experimental data is obtained and the theoretical analysis results are verified.

Key words: laser ultrasound; circular ablation spot; longitudinal wave sound field; non-contact measurement

1 引言

材料性能评价过程中, 激光超声检测技术具有分辨率高、超声波频带较宽的优点^[1], 并且能够实现非接触式测量, 可广泛应用于金属管道检测领

域^[2], 晶粒尺寸检测^[3], 钢轨探伤^[4-5], 复合材料评价^[6]等领域。圆光斑易于获得, 借助振镜系统可以方便地调节其在工件表面的位置, 进而实现工件的快速扫描检测。与热弹机制相比, 烧蚀机制下获得

基金项目: 河南省高校重点科研项目 (No. 18B460012) 资助。

作者简介: 王玉庆 (1978 -), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机电一体化, 无损检测技术方面的研究。E-mail: wyq-q@163.com

通讯作者: 马世榜 (1978 -), 男, 博士, 讲师, 主要从事机电一体化, 无损检测技术方面的研究。E-mail: mshibang@126.com

收稿日期: 2018-04-21; **修订日期:** 2018-05-24

的超声波信号幅值较大^[7],便于接收,因此在材料烧蚀量可接受的范围内,一般采用烧蚀机制进行激光超声检测。

纵波在工件测厚、缺陷检测及成像等领域有着广泛的应用,只有被测量区域处于纵波主声束范围内时,才能获得幅值较大的回波信号,以便有效检出缺陷并做出准确的定量评价。因此,了解和掌握激光超声纵波声场的能量分布规律,在工程应用中有着重要的意义。对于激光超声波声场的研究,马健分析与测量了脉冲激光斜入射状态下椭圆光斑的体波声场^[8],文献[9]、[10]则分别讨论了横波及表面波的指向性。然而,上述工作并未涉及圆形光斑的纵波声场,且仅对激光超声的远场分布情况做了分析讨论。事实上,超声近场中声场能量呈现无规律分布,是一个不容忽视和回避的话题。此外,换能器面积会对指向性的测量造成影响。在此,将圆形烧蚀光斑产生的材料喷溅视为等效垂直力源,依据声压幅值分析纵波的近场及远场,并模拟声场能量的空间分布。利用脉冲激光器,扫描振镜及干涉仪搭建了非接触式超声激励与接收系统,对理论分析进行了实验验证。

2 理论基础

脉冲激光烧蚀工件表面,在激光支持燃烧波的状态下,喷溅物质施加于材料表面的压应力 P_0 计算公式为^[11]:

$$P_0 = \frac{(AW)^2}{\rho L^2 + \rho LC_V(T_V - T_i)L^2} \quad (1)$$

式中, A, W 分别为被烧蚀材料的光吸收率、圆形光斑的功率密度; ρ, L, C_V 分别是材料密度、汽化潜热、比热; T_V, T_i 则分别是材料的汽化温度及初始温度。上述压应力在工件中能够激励出纵波、横波与表面波。

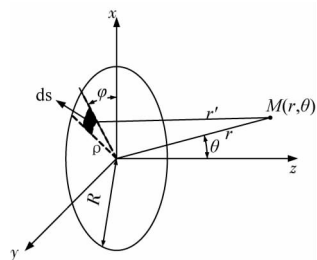


图1 激光超声激励源模型

Fig. 1 Laser ultrasonic excitation source model

将脉冲激光能量控制在微烧蚀材料的条件下,尚不足以产生激光支持的爆轰波,此时,压应力方向

与工件表面垂直^[12],可建立与圆形光斑等尺寸的超声波激励源模型,如图1所示。图中,点 M 为纵波声场中的任意一点, ds 为超声激励源中的面元, ρ 和 φ 分别为面元所处位置的半径与角度, R 为光斑半径, r, r' 则分别表示激励源中心点、面元与点 M 之间的距离。在不考虑介质衰减的情况下,对点 M 的声压进行求解,激励源中面元 ds 辐射的球面波在 M 点引起的声压^[13]为:

$$d_p = \frac{P_0 ds}{r'} \sin(\omega t - kr') \quad (2)$$

式中, ω 为圆频率,与超声波频率 f 之间的关系为 $\omega = 2\pi f$; t 为时间;波数 k 与纵波波速 c_s 及 ω 之间的关系为 $k = \frac{\omega}{c_s}$ 。式(2)中其余参数的含义同上文所述。

当 M 处于轴线(z 轴)上时, $\theta = 0$, $r' = \sqrt{\rho^2 + r^2}$, $d_s = \rho d_\varphi d_\rho$, 利用面积积分,获得整个激励源作用下 M 点的声压振幅为:

$$P_{mz} = 2P_0 \sin\left[\frac{\pi}{\lambda}(\sqrt{R^2 + r^2} - r)\right] \quad (3)$$

式中, λ 为纵波波长, $\lambda = \frac{c_s}{f}$ 。

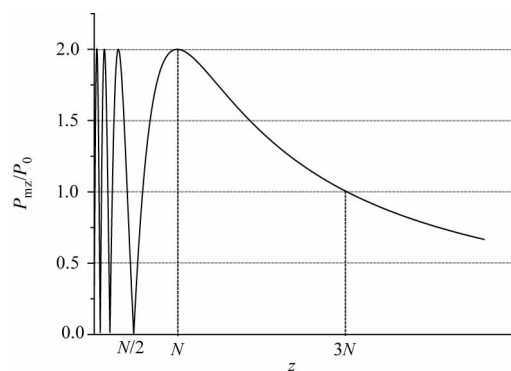


图2 声轴上的声压幅值分布

Fig. 2 The amplitude distribution of sound pressure on the acoustic axis

$R = 5 \text{ mm}, f = 5 \text{ MHz}$ 时,声轴上的声压幅值分布如图2所示,在近场区存在着由于纵波干涉造成的一系列极大值与极小值的区域。近场区中最后一个声压振幅极大值对应的 z 轴值称为近场长度 N ,由式(3)可得:

$$N = \frac{R^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (4)$$

如果在近场区进行检测定量,处于声压极小值处的较大缺陷回波可能较低,反之亦然,极易造成误

判,应当避免这种情况的发生而在远场中进行检测。对于相同波长的纵波而言,激光超声测量中常用的光斑半径远小于常规压电换能器的半径,相应的近场长度极小,可测得的厚度也越小。因此,在工件测厚领域,圆形烧蚀光斑具有不可比拟的优势。

当 M 距离激励源足够远时(即 $r' \gg R$),则有 $r' \approx r - \rho \sin \theta \cos \varphi$, 式(2)可表示为:

$$d_p = \frac{P_0 d_s}{r'} \sin[wt - k(r - \rho \sin \theta \cos \varphi)] \quad (5)$$

考虑到圆形激励源各面元发出的纵波到达 M 处的振幅差异很小,近似用 r 代替 r' , 同样地,对式(5)进行面积积分,并利用柱贝塞尔函数的性质,获得距离激励源足够远处 M 点的声压幅值:

$$P_z = \frac{P_0 \pi R^2}{\lambda r} \left[\frac{2J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta} \right] \quad (6)$$

上式中, J_1 是第一类第一阶贝塞尔函数,进一步可获得指向性函数:

$$D_c = \frac{2J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta} \quad (7)$$

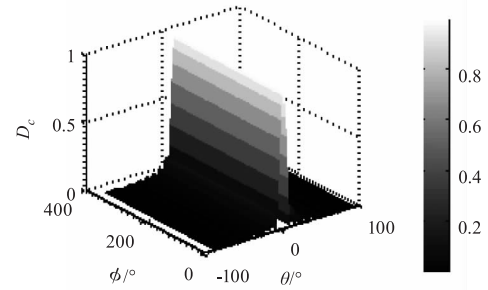
指向性函数直接反映了纵波能量的集中程度和几何边界。

3 声场模拟分析及实验验证

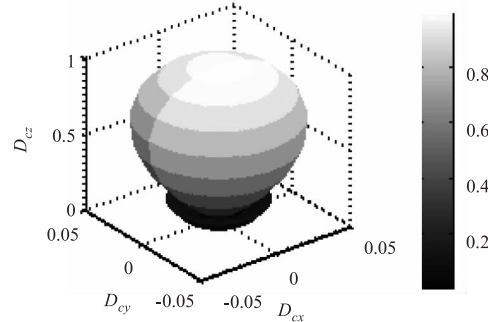
当测量点足够远时,根据式(7)模拟纵波能量在空间中的分布情况,如图3所示(以 $R = 5 \text{ mm}$, $f = 5 \text{ MHz}$ 为例)。图3(a)为球面坐标系中指向性函数的取值,声压幅值在轴线上达到最大;指向性函数在直角坐标系中的分布情况则如图3(b)所示。可看出:纵波声场能量分布仅与 θ 相关而与 φ 无关,在测量时选取任一轴截面即可; θ 取值关于工件内法线对称,说明纵波能量分布关于 z 轴对称,声束轴线即为工件内法线;远场任一横截面中, θ 相同、 φ 不同时, D_c 的取值分布在同一圆周上。

搭建如图4中的非接触式测量系统,脉冲激光器的波长、脉冲宽度分别为 1064 nm 、 8 ns , 激光出口处设置扩束系统,随后激光导入至二维扫描($x-y$ 平面)的振镜系统,经由焦距为 1600 mm 的场镜聚焦至工件表面。待测工件材料为铝,长 $\times$ 宽 $\times$ 厚度为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。工件另一侧,光学探头仅获取焦点处质点的振动信息,因此可忽略接收面积对指向性数据的影响。采用基于双波混合的干涉仪处理光信号并转换为电信号,其最大的优点为能够极大地消除外界低频噪声对探测信号的干

扰^[14]。示波器则负责信号的显示与存储,其触发信号由脉冲激光器提供。工件表面处圆形光斑大小的调节通过扩束系统来实现。以工件朝向脉冲激光的面建立坐标系,面中心为坐标原点,工件相对一侧的面中心则为光学探头的焦点位置。



(a) 球面坐标系中的 D_c 分布



(b) 直角坐标系中的 D_c 分布

图3 纵波声场中的能量分布

Fig. 3 Energy distribution in longitudinal wave sound field

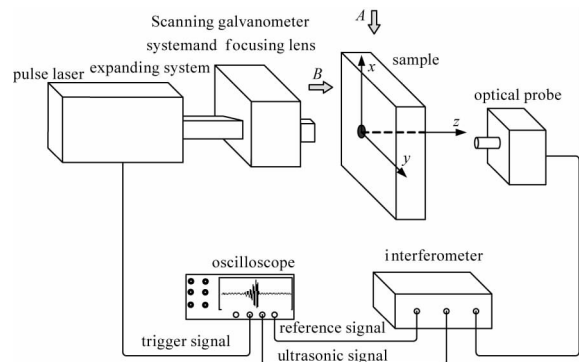


图4 纵波测量系统

Fig. 4 Measurement system for longitudinal wave

利用参考信号调节光学探头并将其固定,超声波激励点则可以方便地移动。根据互易原理^[15],将脉冲激光的扫描轨迹视为超声波的信号接收轨迹,与此同时,将超声波接收点 A 视为脉冲激光的烧蚀位置。为了验证上述纵波声场能量分布的模拟分析结果,设置脉冲激光的扫描点轨迹,如图5所示,图5(a)为 A 向的 yo 截面,此时 $\varphi = 90^\circ$,扫描点轨迹则根据 θ 取值间隔(5°)进行规划。图5(b)为 B 向

xoy 平面, $\theta = 20^\circ$, φ 每隔 20° 取值。由于场镜焦距远大于扫描轨迹两端点与工件中心的距离, 在扫描过程中忽略光斑形状的变化。

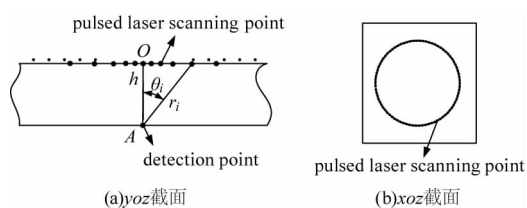


图5 扫描轨迹

Fig. 5 The scanning trajectory

圆形光斑半径 $R = 1 \text{ mm}$ 时, 图 6(a)、(b) 分别为 $O(0, 0, 0)$ 、 $B(0, 1.05 \text{ mm}, 0)$ 两扫描点对应的时域信号, 相对于 B 点, O 点的纵波幅值明显较高, 主要原因有以下两点: 首先, 根据前述分析, A 点正处于 O 点的声束轴线上, 所对应的声压幅值应为最大; 其次, 纵波在传播过程中存在着几何扩散衰减, 声压幅值与传播距离成反比。因此, 欲得到以 $|OA|$ 为半径圆周上的指向性数据, 还需要消除传播距离对声压幅值的影响, B 点对应的纵波声压幅值修正值 $P_{z,OB}$ 与测量值 $P_{z,B}$ 之间存在以下关系: $\frac{P_{z,B}}{P_{z,OB}} = \frac{|OA|}{|BA|} = \cos\theta$ 。此外, 纵波速度一定, 传播路径 BA 大于 OA , 导致了 B 点纵波信号的到达时间较长。对采集的纵波时域信号进行傅里叶变换, 获得图 6(c) 中的幅频特性, 可看出激光超声纵波信号是一个以 6.2 MHz 为中心的宽频信号。

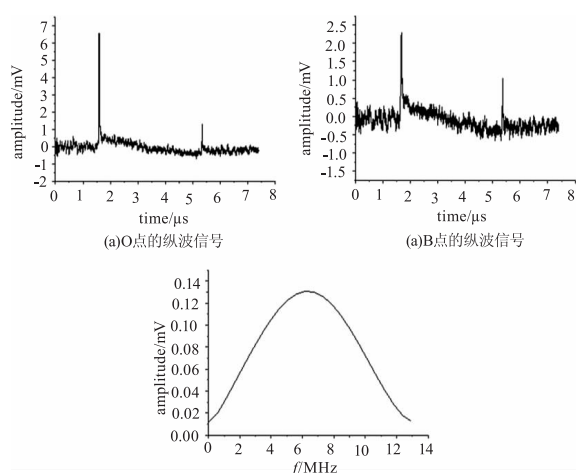


图6 纵波信号的时域与频域

Fig. 6 Time and frequency domains of longitudinal wave

对于沿图 5(a) 中扫描轨迹采集的纵波信号, 以 6.2 MHz 为中心进行窄带滤波后得到纵波信号幅值, 并考虑几何扩散衰减进行修正。以 O 点激励的

纵波幅值为参考, 对修正后的各点纵波幅值进行归一化处理, 获得轴截面中指向性数据的实验值。相应理论值可由式(7)得出, 如图 7(a) 所示。沿图 5(b) 中的扫描轨迹则可获得横截面中的纵波声压幅值分布情况, 圆轨迹上的各扫描点与信号接收点 A 之间的距离均相等, 那么实验获得的归一化数据也应该相等或比较接近, 即分布于同一半径的圆周上, 图 7(b) 反映出了这种情况。实验中, 还变换了光斑大小, 获得了 $R = 3 \text{ mm}$ 时的指向性数据, 如图 7(c)、图 7(d) 所示。通过对比可知, 圆光斑的尺寸越大, 纵波声场的指向性越强, 纵波能量就越集中。验证性实验同时还说明了实验数据与理论数据能够较好地吻合。

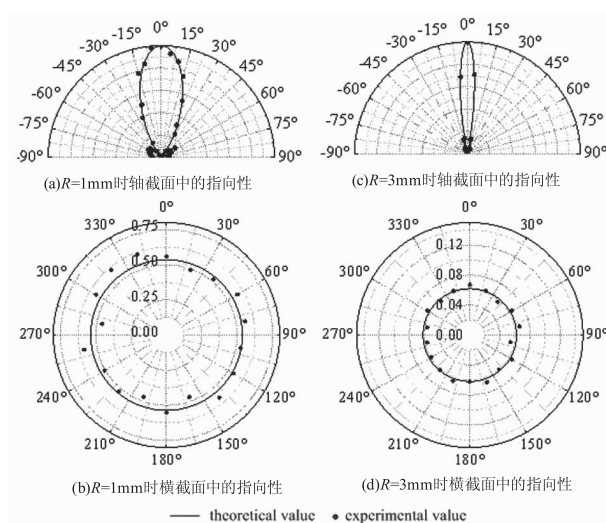


图7 纵波声场的理论计算值及实验值

Fig. 7 Theoretical calculation value and experimental value of longitudinal wave sound field

4 结论

针对圆形烧蚀光斑, 建立了纵波的激励源模型, 讨论了声束轴线上的声压幅值分布规律。与常规压电超声换能器对比后发现, 圆形烧蚀光斑激励的纵波声场近场长度较小, 在测厚领域具有优势。根据足够远处纵波声场的指向性函数, 模拟了声场的能量空间分布。借助非接触式测量系统, 考虑几何扩展衰减修正声压幅值, 并基于线性声学的互易原理, 对指向性函数进行了验证。通过分析可知: 纵波声场指向性随着圆形光斑尺寸增加而增强, 声场的声束轴线与工件表面垂直, 轴截面中声场能量关于该轴线对称并在轴线上达到最大值, 横截面中纵波声压幅值则分布在同一半径的圆周上。

参考文献:

- [1] LIU Hui, ZHENG Bin, WANG Zhaoba, et al. Time dependence of laser-induced Rayleigh wave for detecting surface defect depth[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 669–673. (in Chinese)
刘辉, 郑宾, 王召巴, 等. 激光瑞利波的时间依赖性探测表面缺陷深度[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 669–673.
- [2] Wu T C, Kobayashi M, Tanabe M, et al. The use of flexible ultrasound transducers for the detection of laser-induced guided waves on curved surfaces at elevated temperatures[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1285.
- [3] YIN Anmin, YANG Quan, HE Fei, et al. Grain size measurement in low carbon steel sheets by laser ultrasonics [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(2): 11–19. (in Chinese)
殷安民, 杨荃, 何飞, 等. 基于激光超声的低碳钢平均晶粒尺寸无损检测方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(2): 11–19.
- [4] Zhong Y, Gao X, Luo L, et al. Simulation of laser ultrasonics for detection of surface-connected rail defects [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(4): 70.
- [5] Kenderian S, Cerniglia D, Djordjevic B B, et al. Laser-air hybrid ultrasonic technique for dynamic railroad inspection applications [J]. *OR Insight*, 2010, 47(6): 336–340.
- [6] Quintero R, Simonetti F, Howard P, et al. Noncontact laser ultrasonic inspection of Ceramic Matrix Composites (CMCs) [J]. *Ndt & E International*, 2017, 88: 8–16.
- [7] Seo H, Kim J G, Yoon S, et al. Determination of laser beam intensity to maximize amplitude of ultrasound generated in ablation regime via monitoring plasma-induced airborne sound[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2015, 16(13): 2641–2645.
- [8] MA Jian, ZHAO Yang, ZHANG Zhenzhen, et al. Acoustic field directivity of longitudinal wave generated by oblique laser based on combustion wave [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(2): 19–23. (in Chinese)
马健, 赵扬, 张振振, 等. 斜入射激光支持燃烧波时纵波声场的指向性[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(2): 19–23.
- [9] LIU Pinxiao, MA Shibang, HUANG Rongjie. Investigation on the directivity pattern of laser-generated shear wave field [J]. *Laser Journal*, 2015(9): 40–43. (in Chinese)
刘品潇, 马世榜, 黄荣杰. 激光超声横波声场指向性的研究[J]. *激光杂志*, 2015(9): 40–43.
- [10] LIU Pinxiao, MA Shibang, HUANG Rongjie. Research on directivity of Rayleigh surface wave under linear laser ablation [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1049–1053. (in Chinese)
刘品潇, 马世榜, 黄荣杰. 线状烧蚀光源作用时瑞利表面波的指向性研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1049–1053.
- [11] Aussel J D, Brun A L, Baboux J C. Generating acoustic waves by laser: theoretical and experimental study of the emission source [J]. *Ultrasonics*, 1988, 26(5): 245–255.
- [12] Lindley R A, Gilgenbach R M, Ching C H, et al. Resonant holographic interferometry measurements of laser ablation plumes in vacuum, gas, and plasma environments [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(9): 5457–5472.
- [13] ZHOU Guanglin, CHEN Jian, BI Chuanxing, et al. Two error calculation methods of point sound source sound field [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(2): 208–211. (in Chinese)
周广林, 陈剑, 毕传兴, 等. 点声源声场两种声强计算方法误差分析[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(2): 208–211.
- [14] Zhao Y, Ma J, Zhang Z, et al. Application of two mixing wave interferometer on laser ultrasonic detection of thermal barrier coating [C]// *Asia-Pacific Optical Sensors Conference*, 2014: Th1A. 8.
- [15] Lyonnet F, Cassereau D, Cugnet M F. Parametric study of an ultrasonic non-destructive testing problem based on the reciprocity principle and a hybrid numerical method [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(3): 1939–1939.