

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.04

# 超声换能器声场的激光可视化研究

郭佩文<sup>1,2</sup>, 史亦韦<sup>2,3,4</sup>, 卢超<sup>1</sup>, 梁菁<sup>2</sup>, 王晓<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095; 4. 材料检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 为了提高超声检测的灵敏度和检测精度, 优化检测工艺参数, 充分了解超声换能器形成的声场至关重要。搭建了超声换能器声场的激光可视化实验平台, 利用超声换能器在试样中激发出超声波, 利用激光散斑接收试样表面某点在一段时间内的位移, 再通过扫查获得一定区域内质点的位移, 进而形成多时刻的质点位移场, 以此实现超声场的动态显示。利用该系统对超声换能器声场的扩散情况进行了探测, 探测结果与理论计算结果基本一致。

**关键词:** 超声换能器; 声场; 可视化; 激光散斑; 位移场

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2018)02-0013-05

## Study on Laser Visualization of Sound Field of Ultrasonic Transducer

GUO Peiwen<sup>1,2</sup>, SHI Yiwei<sup>2,3,4</sup>, LU Chao<sup>1</sup>, LIANG Jing<sup>2</sup>, WANG Xiao<sup>2</sup>

(1. Nanchang Hangkong University Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang 330063, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;

4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China)

**Abstract:** To improve sensitivity and precision of ultrasonic testing, parameters of detecting process are optimized, it is important to fully understand sound field formed by ultrasonic transducer. A laser visualization experimental platform for ultrasonic transducer sound field was set up by using an ultrasonic transducer to emit ultrasound in specimen, a laser speckle to receive one point displacement of specimen surface in a period of time and then through the scanning to obtain the displacement of particles in a certain area. Thereby a multi-time particle displacement field is formed in order to achieve the dynamic display of ultrasonic field. Diffusion of sound field of an ultrasonic transducer was detected by the system, and the detection results are consistent with theoretical calculations.

**Key words:** ultrasonic transducer; sound field; visualization; laser speckle; displacement field

## 0 引言

超声检测是国内外无损检测技术中使用频率最高、应用最为广泛且发展较快的一种技术方法<sup>[1]</sup>。超声换能器的声场分布情况直接影响检测结果, 为了更好地了解超声换能器的声场分布, 对超声换能器声场进行探测进而实现可视化研究至关重要。

声场指的是充满声波的空间, 或在介质中声振动所波及的质点占据的范围。通常采用声场中各质点的声压、声强、声阻抗、位移或速度等物理量对声场进行描述<sup>[2]</sup>。本文主要通过质点的微小振动位移来表征声场, 进而实现对超声换能器产生的超声场的可视化。

目前, 对于超声场的可视化主要有以下手段: 第一, 基于波动方程, 建立超声波声场的数学模型, 并

进行模拟仿真成像, 这种方法理论性强, 并非实测结果<sup>[3]</sup>; 第二, 利用水听器测量超声波在水中的三维声压分布, 可对三维声场进行实时和精确成像。但它必须尽可能是宽带、线性和无方向性的, 且测量结果受水听器特性的影响较大<sup>[4]</sup>; 第三, 通过测量铝箔因超声作用而产生的变形情况, 实现超声场的二维定量表征及成像。这种方法能形成声场图像信息, 但不能形成随时间变化的动态图像, 同时所测声场必须达到使铝箔变形的强度<sup>[5]</sup>; 第四, 采用纹影成像法实时获得换能器的全部声场分布, 它是基于超声波产生的密度梯度使光束发生偏转, 利用纹影法配合高速照相机使液体中的瞬态声场可视化。但是对于低频换能器, 需要的纹影仪器必须具备高灵敏度, 仪器要求较高<sup>[6]</sup>。此外, 还有球靶法和基于光弹性原理的动态光弹数字

化成像法,但都分别局限于液体介质和透明介质中<sup>[7-8]</sup>。

由于运用光学方法对声场和声源极少存在干扰,又能利用光波短波长这一特性对声场参数进行高精度绝对测量而深受人们关注<sup>[9-10]</sup>。本文立足于超声换能器声场的激光可视化研究,搭建了超声换能器声场激光可视化平台,利用激光散斑干涉测振技术对试样表面质点一段时间内的微小振动位移进行探测,通过区域扫查,得到一定范围内全部质点在一段时间中的振动情况,以此表征超声换能器产生的超声声场。分别从声场随时间变化,声场随厚度变化,声场随超声换能器晶片直径变化等三个方面,对试验结果进行了分析,最后将实测声场扩散特征与理论分析的声场扩散特征进行比较,以验证该方法的准确性。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

根据超声声场理论,超声换能器近场区的声压分布不均匀,声场轴线上的声压出现极大值和极小值的交替变化,其变化过程和相关性质较为复杂,缺少一定的规律性,且在实际检测过程中一般避免在近场区进行操作,因此全部试验所使用的试样的厚度都大于换能器声场近场区的长度。

试验采用实际检测中最为常用的 V110 和 V109 两种型号的超声换能器,其中心频率均为 5 MHz,晶片直径分别为 0.635 cm 和 1.27 cm。由两种超声换能器的参数可知,V109 换能器的晶片直径大,产生的振动能量高,同时,换能器晶片直径大,半扩散角减小,声束指向性好,使得振动能量更为集中,而 V110 换能器的特点则与之相反。

根据已知的铝合金试样中的声速、换能器的晶片直径和换能器的频率得到波源直径  $D_s$  和波长  $\lambda$ ,近场区长度的计算公式为

$$N = \frac{D_s^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D_s^2}{\lambda} \quad (1)$$

求出试验用的 V109 换能器和 V110 换能器的近场区长度  $N$  分别为 32 mm 和 8 mm。因此,取一个长 244 mm、宽 80 mm、高 90 mm 的长方体铝合金厚板,且沿长度方向为其轧制方向。垂直于轧制方向将厚板分割成厚度为 32, 50, 65.5, 96 mm 的四个试样并将其表面磨光,如图 1 所示。

### 1.2 试验方法

试验搭建的超声换能器声场激光可视化平台如图 2

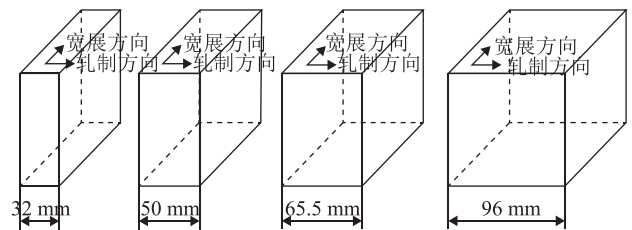


图 1 铝合金试样示意图

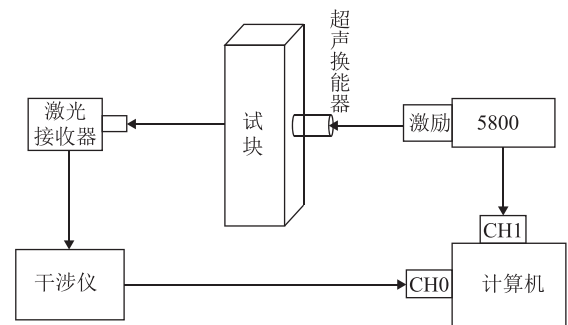


图 2 激光可视化平台结构图

所示。该试验平台由计算机、信号发生器(泛美 5800)、超声换能器、激光接收器和干涉仪搭建组成。

试验利用以激光干涉原理为基础的激光散斑干涉测振技术,对试样表面质点的微小振动位移进行探测。激光散斑干涉是指被测物体表面的散射光产生的散斑与另一参考光相干涉,当被测试样的表面发生微小振动时,散斑与参考光之间的光程差发生变化,输出的干涉条纹也会随之移动<sup>[11-14]</sup>。通过对输出的干涉条纹进行分析处理,就可以得到试样表面质点的微小振动位移信号<sup>[15-18]</sup>。试验中采用的激光散斑接收器的输出信号电压与所测表面质点的位移满足关系式

$$V = F \cdot s \quad (2)$$

式中: $V$ 为输出电压; $s$ 为质点的离面位移; $F$ 为光电转换系数。

试验中,通过调节激光焦距,使  $F$  保持在  $100 \text{ V}/\mu\text{m}$  左右。实验平台的具体工作流程如下。

在信号发生器给超声换能器一个激励信号的同时,给通道 1(CH1)一个同步信号,使计算机开始计时并准备接收由通道 0(CH0)传来的信号,实现信号发生器和干涉仪的同步。当激光照射在试样背面某一位置时,超声换能器发射的超声波穿透试样,试样背面激光照射位置产生的表面微小振动位移被激光接收器接收,并通过干涉仪形成电信号,通过 CH0 传给计算机,最终形成 A 扫图形,以此表征某一点的振动位移随时间的变化情况,如图 3 所示。

再通过二维扫查(扫查面积  $50 \times 50 \text{ mm}$ )得到各点

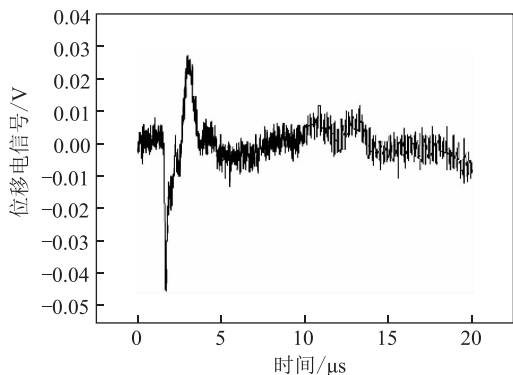


图3 某一点的 A 扫图

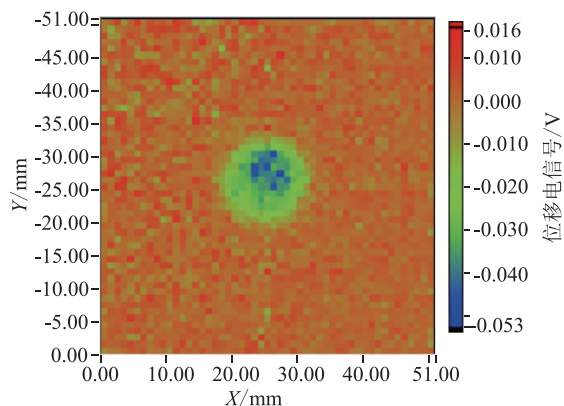


图4 某一时刻的 C 扫图

的 A 扫图。采用全波采集记录下各点的 A 扫描波形，将所有被扫描点在某一时刻的振动幅值进行成像，得到某一时刻表面振动位移的 C 扫图，如图 4 所示。对比不同时刻表面振动位移 C 扫图，可以反应声场的扩散情况。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 超声换能器声场随时间变化的激光可视化

不同时刻下，V110 换能器在 70 mm 厚度试样背面产生的表面振动位移如图 5 所示。

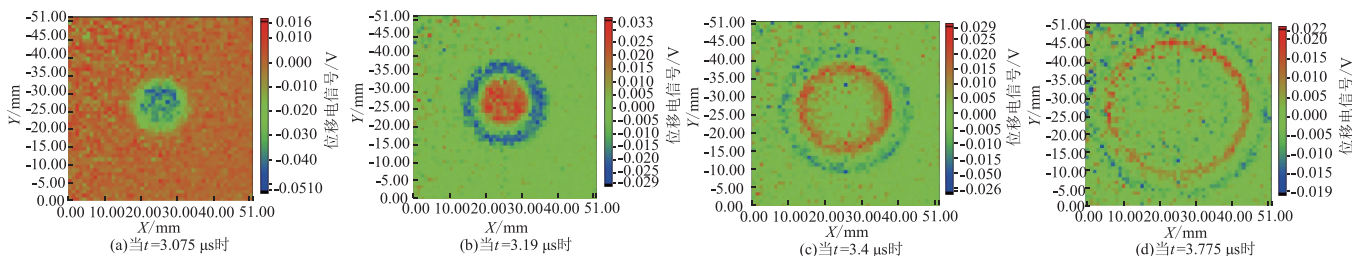


图5 随时间变化的超声换能器声场 C 扫图

由图 5 可见，当超声波刚刚传递到试样表面时，质点振动主要集中在轴线附近，随时间增加，振动逐渐从轴线向外传递，且沿各方向的传递速度一致，因此形成的质点振动等高线呈现圆形。这一现象还可说明超声传播路径上材料无明显各向异性。

另一方面，从图 5 还可以看到，各质点先远离表面，然后发生回弹，产生向着表面内部的位移，此后

不再有明显的远离表面的位移，这是由于超声换能器激励的超声脉冲宽度窄，脉冲之后的振动得到了有效的阻尼，已被杂波覆盖。

### 2.2 超声换能器声场随试样厚度变化的激光可视化

采用 V109 换能器，在厚度不同的四个试样中，分别取中心位置振幅最高时刻的各质点振幅并绘制成三维图，如图 6 所示。

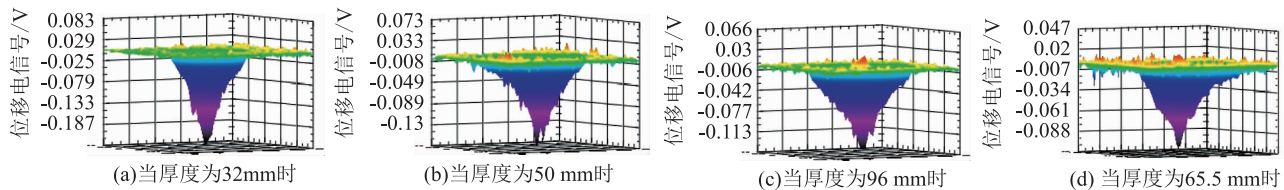


图6 不同厚度试样在振动峰值时刻的振动三维图

从图 6 中可以看到，不同试样的表面振幅的分布均呈现出较为规则的圆锥形，轴线位置振幅最大。理论上，换能器远场区中心轴线上的声压最高，偏离中

心轴线声压逐渐降低，且同一横截面上声压的分布完全对称<sup>[19-20]</sup>。又因为声场的声压和质点振幅成正比关系，因此实验结果与理论分析一致。

各试样中振幅峰值与厚度的关系如图 7 所示。

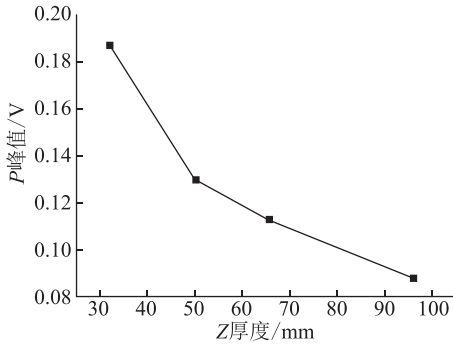


图 7 厚度 - 峰值直角坐标图

由图 7 可见，随着铝合金试样厚度的增加，振幅峰值依次递减。这是由于位于远场区声场的声压随距离的增加而单调减小，实验结果与理论分析结果一致。

根据声束扩散理论，试样厚度  $Z$  与声束直径  $D$  的关系式为

$$D = 2Z \tan(70 \frac{\lambda}{D_s}) \quad (3)$$

式中： $D_s$  为波源直径； $\lambda$  为波长。

各试样中心位置振幅最高时刻的声场 C 扫图如图 8 所示。

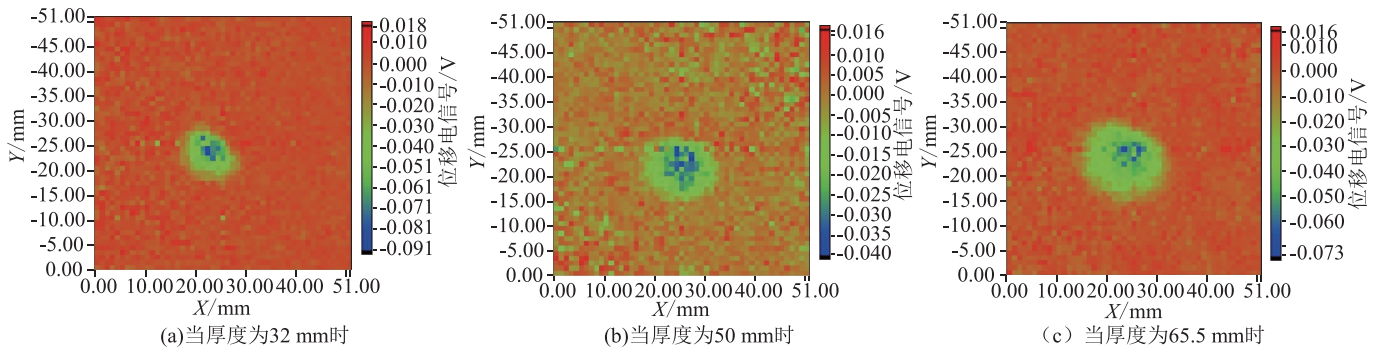


图 8 不同厚度试样在振动峰值时刻的声场 C 扫图

由图 8 可测得各试样中声束直径，根据声场扩散理论计算的各试样中的理论声束直径与实测值对比如表 1 所示

表 1 声束直径理论计算值与实测值对比 mm

Z	理论值	实测值
32	7.744	8
50	12.1	12
65.5	15.851	16

由表 1 可见，实测声束直径与理论计算的声束直径保持基本一致。

### 2.3 超声换能器声场随换能器晶片直径变化的激光可视化

在 70 mm 厚铝合金试样上，V109 换能器和 V110 换能器中心位置振幅最高时各质点振幅如图 9 所示。

可以看到，不同晶片直径超声换能器在同一试样上产生的振动存在明显差异。V109 换能器产生的质点振动位移约为 V110 产生的位移的 4 倍，振动所影响的面积也远大于后者。这是因为，V109 的晶片直径大，产生的振动能量高，同时，换能器晶片直径大，半扩散角减小，声束指向性好，使得振动能量更为集中。

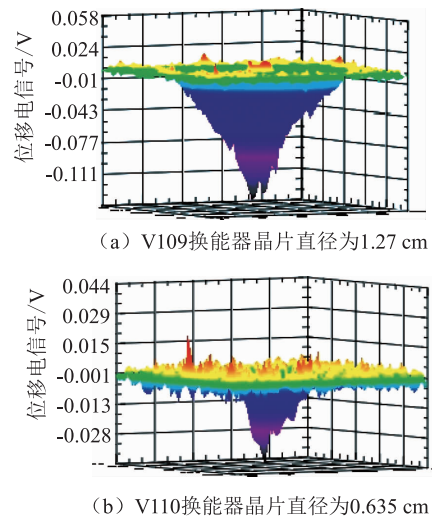


图 9 不同晶片直径下超声换能器声场的最高峰值时刻 3D 图

这一结果说明利用该方法可以实现超声换能器声场的有效检测。

### 3 结论

在远场区超声换能器声场呈轴对称分布，微小振动位移的最大值位于中心轴线上，声场的能量主要集中在轴线附近，随着时间的变化，超声换能器声场的



微小振动位移逐渐从中心轴线向外传递。利用搭建的激光可视化平台,能够形象直观的检测到超声换能器声场随时间变化这一动态过程。

超声换能器声场强度随传播距离增加而减小,声轴线上的微小振动位移量相应地随试样厚度增加而减小,利用搭建的激光可视化平台,能够直观的反映出这一变化趋势。通过声束直径的实测值与理论值对比,证实了利用此激光可视化方法对超声换能器声场测量的准确性。

超声换能器晶片直径越大,超声换能器声场轴线上的微小振动位移越大,整个超声换能器声场也就越强。利用激光可视化平台,能够反映上述规律,验证了该方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] 王淑莲. 超声检测技术的发展与应用[C]//99 全国机电一体化学术研讨会论文集, 上海. 1999: 135 - 137.
- [2] 蒙海英. 基于 MATLAB 的超声波声场模拟及可视化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [3] 景妮, 杨录, 张艳花. 超声声场的三维模拟及可视化研究[J]. 山西电子技术, 2012(5): 90 - 91, 94.
- [4] 朱雨虹, 潘强华. 基于水听器的超声探头声场研究方法[C]//第五届无损检测高等教育发展论坛学术交流会议论文集, 重庆. 2014: 215 - 220.
- [5] 郭璇, 杨艳玲, 李星, 等. 基于 Matlab 的超声空化场测量与可视化分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 719 - 726.
- [6] 徐峥, 陈皓, 钱梦霖, 等. 线聚焦超声在液体中的声场成像与数值模拟[C]//2013 年全国功率超声学术会议论文集. 昆山: 2013: 3 - 5.
- [7] 李雄兵, 胡宏伟, 倪培君, 等. 基于图像处理的超声探头声场测量[J]. 图学学报, 2011, 32(4): 27 - 30.
- [8] 张秀奇, 李燕山, 连红运, 等. 超声脉冲纵波在固体中传播的可视化研究[J]. 河南科学, 2006, 24(6): 813 - 816.
- [9] Nagai S. Acoustic power measurement using an optical heterodyne method[J]. Ultrasonics, 1985, 23(2): 77 - 82.
- [10] Reibold R. The Measurement of Ultrasonic Power Using an Acousto - Optic Method[J]. Acta Acustica United with Acustica, 1976, 36(3): 214 - 220.
- [11] 曹勇, 熊伟, 沈斌, 等. 激光干涉原理在振动测量中的应用[J]. 现代电子技术, 2009, 32(21): 210 - 212.
- [12] 钱梦霖, 高文, 胡文祥. 低功率超声换能器辐射声场的激光干涉检测[J]. 声学学报, 2001, 26(2): 97 - 103.
- [13] 姚肇康, 张立, 梁华翰. 散斑全息干涉法测量面内位移和应变[J]. 上海力学, 1980(4): 52 - 62.
- [14] 何小东. 刚体微小横向位移的激光散斑干涉测量法[J]. 广西物理, 1997, 18(1): 33 - 35.
- [15] 吴健, 严高师. 光学原理教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [16] 李小兵. 激光散斑法实时测量目标角振动的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [17] 段小艳, 任冬梅. 激光干涉法微位移测量技术综述[J]. 计测技术, 2012, 32(6): 1 - 5.
- [18] 郑柱. 电子散斑相关技术及其在工程检测中的应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [19] 郑辉, 林树青. 超声检测[M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.
- [20] 彭应秋, 李坚, 权义萍, 等. 超声检测中的声场特性及应用分析[J]. 无损检测, 2003, 25(12): 612 - 615.

收稿日期: 2017 - 11 - 07

基金项目: 北京市科技计划课题(Z141100002814002)



郭佩文(1992 -), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为无损检测(超声检测方向)。就读于南昌航空大学测试计量技术及仪器(无损检测)专业。硕士期间, 参与到“大规格铝合金锻件残余应力研究”项目中分支项目子课题, 并完成学位论文。