

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

固体介质中超声应力场的定量测量*

安志武¹ 胡中韬^{1,2} 廉国选¹ 王小民^{1,2†}

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 回顾了基于动态光弹技术的超声应力测量方法,分析了各方法的优缺点。优化了现有光弹系统的前端光路,提出了电控旋转偏振和自动判读技术,研制了高稳定性的动态光弹实验系统。利用 Senarmont 补偿法实现了高精度的应力测量。多次重复测量结果表明,该系统测量结果的相对标准偏差小于 1%。光弹测量数据与电测结果相比,其相似系数为 99.95%,显著性水平小于 0.001,证明了测量结果的可靠性。

关键词 动态光弹技术,高稳定性,超声应力,定量测量

中图法分类号: O426 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)01-0083-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.012

Quantitative measurement of ultrasonic stress field in solid media

AN Zhiwu¹ HU Zhongtao^{1,2} LIAN Guoxuan¹ WANG Xiaomin^{1,2}(1 *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In this paper, methods of ultrasonic stress measurement based on dynamic photoelastic technique are reviewed, and the advantages and disadvantages of these methods are compared. The forepart optical path of the existing photoelastic system is optimized, and the electrically controlled rotating polarization and automatic interpretation technology are proposed, then a dynamic photoelastic experiment system with high stability is developed. High precision stress measurement is realized by Senarmont compensation method. The results of repeated measurements show that the relative standard deviation of the system is less than 1%. Compared with the results of electrical measurement, the Pearson correlation coefficient is 99.95% and the significance level is less than 0.001, which demonstrates the reliability of the measurement results.

Key words Dynamic photoelastic technique, High stability, Ultrasonic stress, Quantitative measurement

2017-11-20 收稿; 2017-12-01 定稿

*国家自然科学基金项目 (11374325, 11427809), 中国科学院声学研究所青年英才计划项目 (QNRC201615)

作者简介: 安志武 (1981-), 男, 河北人, 硕士生导师, 研究方向: 检测声学与无损检测。

† 通讯作者 E-mail: wangxiaomin@mail.ioa.ac.cn

1 引言

动态光弹成像系统可直接观察透明固体内声波的传播与散射现象^[1-2]。20世纪70年代, Dally^[3]指出了动态光弹法在缺陷检测以及断裂力学等方向的应用前景, Hall^[4]利用电火花光源的动态光弹系统, 首次观察到了玻璃中的超声脉冲图像。80年代, 中科院声学所^[5]研制出国际领先的动态激光光弹系统, 观察、解释和测量了超声传播与散射中的诸多现象。随后, 清华大学^[6]研究开发了采用LED光源的动态光弹系统, 中北大学^[7]、南昌航空大学^[8]也在用类似系统进行研究、教学工作。Ginzel等^[9-10]使用动态光弹系统研究了相控阵探头在固体中的辐射声场以及脉冲波在裂纹尖端的散射声场。

目前在超声学领域, 大部分光弹技术的应用场景以演示为主要目的, 对系统稳定性要求不高, 也不需要测量超声波应力。然而, 作为唯一能观测固体内部声场的实验方法, 将其由定性观察演示工具改进为定量观测的科研仪器, 具有重要的学科意义。

在光弹实验中, 等差线及等倾线是最基本的两个实验数据。在整数级等差线上的点, 容易得到其应力值。然而, 样品中的大部分点不在整数级次上, 为精确测定小数级次, 一般需用仪器即补偿法进行测定。补偿法可分为三类^[11-17]: 第一类是人为的制造一个已知相位差, 与被测点的未知相位差相抵消, 从而测得该点的小数级次。这一类包括拉力试件补偿法、石英楔体补偿法、变截面拉伸及纯弯曲试件等补偿法; 第二类是利用光弹系统本身的光学设备, 包括检偏镜补偿法、1/4波片补偿法等; 第三类是用光度计测取光强, 根据光强来计算小数级次。

固体中超声波的应力较小, 在大部分情况下, 产生的光弹条纹级数小于1级, 即偏振光相位差小于180°。对于散射声场而言, 在一般情况下相位差甚至远小于90°。因此相机所拍摄图像的灰度可近似认为正比于主应力差的平方, 这种方法由张守玉^[5]提出, 具有简便的特点。在实际操作中, 图像灰度法具有一些局限性: 首先是相机的动态范围和图片的色彩深度有限, 对于较大的光强, 图像容易饱和; 其次是图像灰度值仅能反应相对应力大小分布, 且在相位差较大的时候误差较大。图像灰度法的代表性工作有: 2014年, 安志武等利用图像灰度值, 分析了纵波直探头和横波直探头辐射声场特征^[1], 研究了圆柱散射声场的指向性特征^[2]。

为准确地测量超声波应力, 在前述的几类方法中, 不需增加任何设备的旋转偏振器件法最为适合。在单色光弹实验中, 这一方法仅需使用一个对应光波长的小尺寸1/4波片, 我们称之为Senarmont补偿法^[5,12,18], 其步骤如下:

(1) 在平面偏振光场中定出被测点的主应力方向; 同步旋转起偏器与检偏器, 当起偏方向与该点任一主应力方向一致时, 该点图像消光。

(2) 旋转起偏镜及检偏镜, 使两偏振轴保持正交并与主应力方向成45°角, 此时被测点光强最大。

(3) 在检偏镜前放入1/4波片, 并使其快、慢轴与偏振轴平行。

(4) 转动检偏镜进行补偿, 直到被测点消光。检偏镜转过角度的2倍即为相位差。

Senarmont补偿法的优点是: (1) 直接测量相位差, 可得到绝对应力值; (2) 测量时以消光为准, 对光源能量稳定性和光强空间分布均匀性要求不高。在前人的工作中^[16], 利用该补偿法的测量精度在10%左右。但工作中尚存在一些问题: (1) 某些激光器发出的光脉冲为具有一定空间分布的线偏振光。空间分布不均匀对不同点的测量结果引入较大的误差。偏振光则会使不同方向的应力分量测量出现较大误差; (2) 实验操作中, 通过手动调节偏振系统, 引入操作误差; (3) 实验操作中, 通过人眼来判断光强的最强和最弱点, 引入较大的观测误差。

2 Senarmont补偿法

为清晰地表述Senarmont补偿法, 我们通过米勒矩阵来推导这一过程。入射光依次通过起偏器 P_1 、玻璃样品(内有声应力) S 、四分之一波片 Q_{45° 、检偏器 P_2 后, 出射光矢量可表示为

$$E_{\text{out}} = P_2 Q_{45^\circ} S P_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

令 P_1 的光轴方向为 x 轴, 有

$$P_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设 Δ 为待测玻璃样品 S 应力双折射相位差, θ 为应力双折射的快轴(即所测点主应力差的方向)与 x 轴方向夹角, 则 S 可表示为

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\sin \Delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta \cos 2\theta & 1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta & \sin \Delta \cos 2\theta \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\theta & -\sin \Delta \cos 2\theta & \cos \Delta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设 δ 为四分之一波片 S 引起双折射的相位差, γ 为其快轴与 x 轴的夹角, 则 Q_{45° 可表示为

$$Q_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta) \sin^2 2\gamma & (1 - \cos \delta) \sin 2\gamma \cos 2\gamma & -\sin \delta \sin 2\gamma \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\gamma \cos 2\gamma & 1 - (1 - \cos \delta) \cos^2 2\gamma & \sin \delta \cos 2\gamma \\ 0 & \sin \delta \sin 2\gamma & -\sin \delta \cos 2\gamma & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

检偏器 P_2 的光轴方向与 x 轴夹角为 α , 则:

$$P_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据光测力学知识, 可知探测器接收的光强 I_{out} 为出射光的斯托克斯矢量的第一项, 即

$$\begin{aligned} I_{\text{out}} = & \frac{1}{4} I_0 \left\{ 1 + \cos 2\alpha [1 - (1 - \cos \delta) \sin^2 2\gamma] \right. \\ & \times [1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta] \\ & + \frac{1}{4} \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) \\ & \times \sin 4\gamma (1 - \cos \Delta) \sin 4\theta \\ & - \cos 2\alpha \sin \delta \sin 2\gamma \sin \Delta \sin 2\theta \\ & + \frac{1}{2} \sin 2\alpha (1 - \cos \delta) \sin 4\gamma \\ & \times [1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta] \\ & + \frac{1}{2} \sin 2\alpha [1 - (1 - \cos \delta) \cos^2 2\gamma] \\ & \times (1 - \cos \Delta) \sin 4\theta \\ & \left. + \sin 2\alpha \sin \delta \cos 2\gamma \sin \Delta \sin 2\theta \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

其中 I_0 为入射光强。在前述的 Senarmont 补偿法操作中, δ 为 $\pi/2$, γ 为 0° , θ 与偏振轴成 45° 角, 设 β 为检偏器 P_2 的光轴方向与 y 轴夹角, 最终可得出射光强表达式:

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0}{2} \sin^2 \left(\frac{2\beta - \Delta}{2} \right). \quad (7)$$

从式(7)中可以看出, 当旋转检偏器, 使 β 为应力双折射相位差 Δ 的 $1/2$ 时, 输出的光强为 0。此为 Senarmont 补偿法的物理解释。

3 动态光弹系统的优化

3.1 前端光路优化

脉冲激光器相比于 LED 光源具有能量高、脉冲短等优点。脉冲激光器发射的激光束, 具有单模或多模的空间分布, 表现为高斯分布或多个光斑。现有的基于激光器的动态光弹超声成像系统, 一般采用高斯分布的基横模激光器, 不对光束能量的空间分布进行整形, 激光直接扩束后, 仍然具有原来的空间分布, 因此不能对样品进行均匀曝光, 导致图像中心部分偏亮, 造成测量误差。

改进的动态光弹实验系统前端光路如图 1 所示, 其目的是调制产生能量分布均匀的平行入射光束, 并抑制光锥效应、杂散光和像差等不利因素。另外一个优点是对激光器发出的光脉冲进行漫散射, 确保其无特定偏振方向, 可消除对所测点应力方向的限制。图 1 的光路包括 5 个步骤, 分别是: (1) 发射: 脉冲激光器发射脉冲激光束。(2) 匀化: 通过光束匀化器件 (实验中用的是多层毛玻璃) 对激光器发射的光束进行匀化处理, 以形成强度均匀的光束。匀化后, 光束成为具有均匀光强分布, 但面积较大的

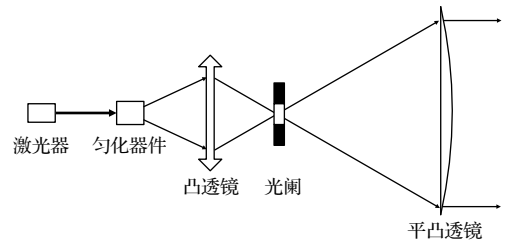


图1 动态光弹实验系统前端光路

Fig. 1 Forepart optical path of dynamic photoelastic experiment system

漫射光斑。(3) 会聚:利用凸透镜对漫射光斑进行会聚。(4) 滤光:将光阑放置在透镜的成像位置,调节光阑的通光孔径,对会聚光束进行限制,使其通光孔成为近似点光源。此步骤可以抑制光锥效应并消除部分杂散光的影响。(5) 准直:用平凸透镜对光束进行准直,形成均匀的平行光。平凸透镜的凸面正对平行光,可以减小由扩束带来的像差。

3.2 自动判别技术

实验中有两个参数的测量最为关键,一是被测点主应力方向的判定,二是检偏器旋转角度的判定。这两个参数若直接手动旋转镜架,目视读取,将带来非常大的误差。我们设计了电动旋转镜架,其采用步进电机控制,分辨率为 0.01° ,绝对定位精度可达 0.02° 。通过软件控制镜架的旋转和相机的采集,每旋转检偏器一个角度,同时测量该点的光强,旋转 180° 后,可绘制一个周期的变化曲线。然后根据式(7),对实验测量值进行拟合,通过拟合后的曲线来判读两个参数,可以获得较高的精度。

4 测量结果与分析

此处给出一个测量纵波换能器辐射声场中某点主应力大小的例子。光弹图像如图2所示,超声换能器置于样品上方,向下辐射声波。下方最亮的条纹为纵波,后面的条纹为边缘横波。实验中所测点以“+”标记,该点的声波可认为是平面纵波,容易通过主应力差求得超声传播方向的主应力大小,相关方法可参阅文献[5],此处不再赘述。对该点的相位差进行10次独立重复测量,每次测量结果均通过前述的自动判别方法得到,实验数据和拟合曲线如图3所示。由于光源发射的是单色光,可用相机采集的图像灰度值来代表相对光强值。由于相机采集的是8位图像,其最大灰度值为255,因此实验数据出现平顶现象。考虑到我们判读的是灰度最小值,平顶不会对测量结果产生影响。10次测量得到 β 的平均值为 25.78° (相位差为 β 的2倍,即 55.16°),相对标准偏差为0.91%,证明实验系统和测量方法具有较高的稳定性。

实验样品(K9玻璃)的应力光学系数 B 为 $2.7 \times 10^{-12}/\text{Pa}$,厚度 d 为3 cm,绿光波长 λ 为532 nm,K9玻璃的折射率 $n_e \cong 1.519$,主应力差为

$$\Delta\sigma = \lambda\alpha / (360Bd \cdot n_e) = 0.663 \text{ MPa}, \quad (8)$$

易得,纵波传播方向上的主应力大小为0.91 MPa。

下面我们设计实验对该系统的线性度进行评估,并将结果与常规的电测结果进行对比。利用步进衰减器(步长为1 dB)来调节超声换能器的激励电压,测量不同激励电压下的主应力大小,从而得到主应力大小随激励电压变化的数据,如图4所示。可知二者具有良好的线性相关性。

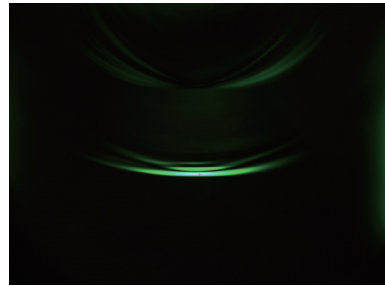


图2 超声换能器的辐射声场

Fig. 2 Radiated sound field of ultrasonic transducer

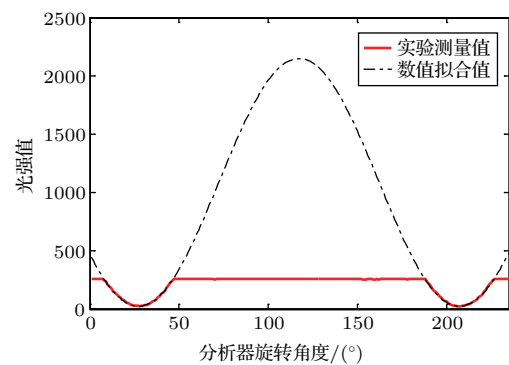


图3 检偏器旋转时的光强变化

Fig. 3 The change of light intensity with the polarizer rotating

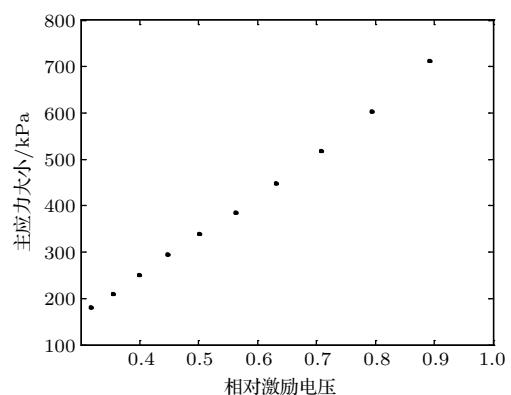


图4 主应力大小随激励电压变化的数据

Fig. 4 Variation of principle stress magnitude with excitation voltage

为保证测量位置的一致性,在光弹实验中,将所测点调节到6 cm处,而在电测实验中,用6 cm的样品进行测量,在发射换能器对侧放置一个小直径的接收换能器,通过示波器读取接收电压值随激励电压变化的数据,如图5所示。直观地来看,图4与图5的数据非常相似。从统计上来说,两组实验数据之间的皮尔逊相关系数 $r = 99.95\%$,显著性水平 $p < 0.001$,说明两组数据之间具有极强的线性相关性。因此,光弹实验结果可以对电测值进行高精度拟合。另外,光弹法可以直接给出主应力大小的绝对值,是电测法不具备的优点。

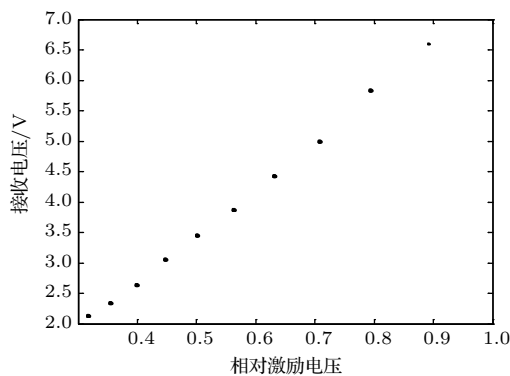


图5 接收电压随激励电压变化的数据

Fig. 5 Variation of received voltage with the excitation voltage

5 结论

通过对光弹实验系统的软硬件优化,研制了高稳定性的超声应力测量系统。由于光弹法测量的是二维应力,即认为在光的传播方向上,应力没有变化,这仅在一定情况下近似成立。对于三维声场应力的测量,尚需进一步研究。本文以纵波为例,介绍了其传播方向主应力的测量步骤,对于其他类型的声波,其主应力差的获取方式与纵波相同,但主应力与主应力差的关系有所不同,需要具体分析。关于本系统所测主应力大小的绝对误差及校正方法,尚需进一步研究,将另文讨论。

参 考 文 献

- [1] 金士杰, 安志武, 廉国选, 等. 光弹法测量超声换能器声场[J]. 应用声学, 2014, 33(2): 107–111.
Jin Shijie, An Zhiwu, Lian Guoxuan, et al. Photoelastic quantification of ultrasonic beams radiated by transducers[J]. J. Appl. Acoust., 2014, 33(2): 107–111.
- [2] An Z, Jin S, Lian G, et al. Investigation on the directivity of ultrasonic scattering field using dynamic photoelastic technique[C]//Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications(SPAWDA), 2014 Symposium on. IEEE, 2014: 408–411.
- [3] Dally J W. An introduction to dynamic photoelasticity[J]. Experimental Mechanics, 1980, 20(12): 409–416.
- [4] Hall G. Ultrasonic wave visualization as a teaching aid in non-destructive testing[J]. Ultrasonics, 1977, 15(2): 57–69.
- [5] 应崇福, 张守玉, 沈建中. 超声在固体中的散射[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [6] 诸国楨, 孙耀, 傅德永. 用动态光弹法记录的超声脉冲沿固-固界面的传播过程[J]. 应用声学, 2004, 23(2): 7–10.
Zhu Guozhen, Sun Yao, Fu Deyong. Propagation of ultrasonic pulse along solid-solid interface recorded by the dynamic photoelastic method[J]. J. Appl. Acoust., 2004, 23(2): 7–10.
- [7] 肖开丰. 超声波在弹性固体传播的数值模拟及动态光弹的实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2008.
- [8] Liu L B, Li M H, Liu X F, et al. Development of multi-channel dynamic photoelasticity imaging system[J]. NDT, 2010, 32(8): 634–636.
- [9] Ginzel E, Stewart D. Photo-elastic visualisation of phased array ultrasonic pulses in solids[C]. 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, 2004.
- [10] Ginzel E, Honarvar F, Yaghootian A. A study of time-of-flight diffraction technique using photoelastic visualisation[C]. The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT, Tehran, Iran, 2008.
- [11] 天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [12] Kurzynowski P. Senarmont compensator for elliptically birefringent media[J]. Optics Communications, 2001, 197(4): 235–238.
- [13] Wang B, Hellman W. Accuracy assessment of a linear birefringence measurement system using a Soleil-Babinet compensator[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(11): 4066–4070.
- [14] Lin Y, Zhou Z Y, Wang R W. Optical heterodyne measurement of the phase retardation of a quarter-wave plate[J]. Optics Letters, 1988, 13(7): 553–555.
- [15] Badoz J, Silverman M P, Canit J C. Wave propagation through a medium with static and dynamic birefringence: theory of the photoelastic modulator[J]. Journal of the Optical Society of America, A, 1990, 7(4): 672–682.
- [16] 张守玉, 王丽生. 透明固体中声应力的光弹法定量测量[J]. 声学学报, 1984, 9(3): 135–144.
Zhang Shouyu, Wang Lisheng. Quantitative measurement of the ultrasonic stresses in a transparent solid by the photoelastic method[J]. Acta Acustica, 1984, 9(3): 135–144.
- [17] Williams P A, Rose A H, Wang C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement[J]. Applied Optics, 1997, 36(25): 6466–6472.
- [18] Hayashi Y, Matsumoto K, Kudo M. The diffusion mechanism of tin into glass governed by redox reactions during the float process[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 282(2): 188–196.