

表面脉冲超声波沿曲面爬行的可视化研究

连红运^{1,2†} 李燕山³ 陈以方²

(1 河南职业技术学院机械电子工程系 郑州 450046)

(2 清华大学机械工程系 北京 100084)

(3 中州大学工程技术学院 郑州 450015)

摘要 为了研究超声表面脉冲波在钢、铁等不透明曲面材料中的传播规律,我们采用和金属材料声速比较接近的光学玻璃作样品,利用研制的数字化动态光弹系统,分析了表面波和次表面波沿玻璃圆棒侧面传播时的行为,记录了不同时刻的横截面上的脉冲声场传播图像,求出了表面波和次表面波沿曲面爬行的传播速度。

关键词 瑞利波, 表面脉冲波, 动态光弹, 声场

Visualization of ultrasonic surface pulse waves creeping on a curved surface

LIAN Hong-Yun^{1,2} LI Yan-Shan³ CHEN Yi-Fang²

(1 Mechanical & Electronic Engineering Department, Henan Vocational & Technology College, Zhengzhou 450046)

(2 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(3 College of Information Engineering, ZhongZhou University, Zhengzhou 450015)

Abstract To study propagation of ultrasonic surface pulse waves in steel, iron on other opaci materials, we adopt optical glass as sample of study in which sound velocity is close to the velocity of metal materials. The propagation behaviors of the surface waves on the cylindrical surface of a glass cuiulan rod are analyzed by the means of dynamic digital photoelasticity technique. At different times, the images of the pulse waves propagating along the cylindrical surface are recorded. The propagation velocites of the surface waves creeping on the curved face are measured.

Key words Rayleigh wave, Surface pulse wave, Dynamic photoelasticity, Sound field

2006-10-19 收稿; 2008-06-18 定稿

作者简介: 连红运(1964 -), 男, 禹州市人, 副教授, 硕士, 研究方向: 超声成像、材料评估。

李燕山(1962 -), 男, 副教授, 博士。陈以方(1954 -), 男, 博士, 硕士生导师。

† 通信联系人 E-mail: lianhy03@126.com

1 引言

沿固体介质自由界面上传播的声表面波为瑞利波^[1]。瑞利波的质点在表面法线和传播方向所在平面内做椭圆运动,幅度在表面最大,沿垂直深度按指数衰减^[2]。由于瑞利波在材料表面传播远,而传播速度对同种介质是固定的,略小于横波速度,所以在无损检测中,常用来检测材料或工件表面的缺陷^[3]。

次表面波多半是出现在地声学上的^[4]。在所见报道中对此有许多不同的称呼:侧向波、蠕动纵波或快速表面波^[5,6]。本文沿用次表面波这个术语来描述其在固体曲面上的传播行为。无论是在理论或是实验上,人们对次表面波都进行过广泛的研究,其目的是探测各向同性介质的次表面层中的缺陷^[7-9]。

为了研究表面波和次表面波在固体曲面表面层中的传播规律,为超声探伤提供实验依据,验证已有的声学理论,我们用数字化动态光弹成像系统观察了表面波沿曲面的爬行情况。该系统通过 CCD 拍摄透明固体中应力波的传播图像,通过计算机可以对“冻结”的图像进行采集和存储,利用自主开发的软件系统对帧内的

图像数据能进行读取和处理,处理结果直接在监视器上显示出来,用黑白显示或伪彩色显示。可测量声波在一定时间间隔内传播的距离和波阵面间的夹角,计算出波的传播速度。用光标定位法读取任一象素的灰度值,能自动描绘波阵面的透射光强度随时间的变化曲线。

2 实验装置

本装置所用的光路见图 1。光源为高亮度 LED,激发它的电脉冲宽度为 20ns,光源发出的光脉冲 3db 带宽为 50ns,有较好的同步性能,对于 8MHz 以下的声脉冲可以分辨出单独的周期。凸透镜 L_1 和 L_2 焦距为 316mm (有效口径 $\phi = 120\text{mm}$),凹透镜 L_3 焦距为负 400mm (有效口径 $\phi = 46\text{mm}$)。CCD 选用的型号为松下 WV - CP230,灵敏度 F0.75 时为 0.6Lux。控制器在 0 时刻命令发出声激发脉冲,通过延时器,在 τ 时刻命令发出光脉冲。上述过程以较低的频率重复,就可以察或记录到被“冻结”在固体中的声场,延时时间在 0 ~ 99.9 μs 内可调,最小时间间隔为 0.1 μs ,相当于玻璃中传播距离约 0.6mm。

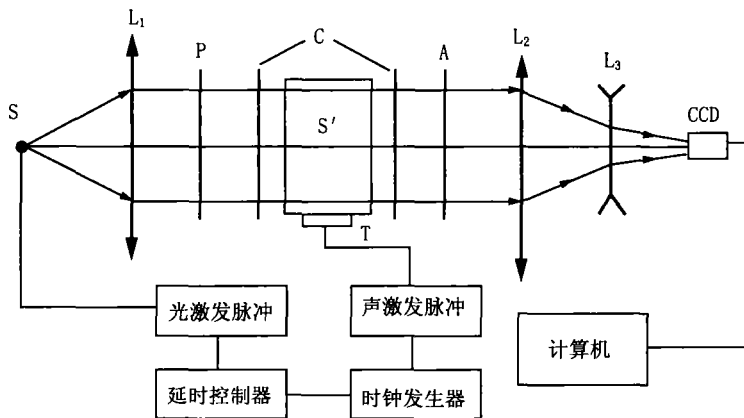


图 1 动态光弹装置示意图

图 1 中, S 为 LED 光源, L_1 为准直光束透镜, L_2 为成像透镜, L_3 为扩束凹透镜, P 为起偏振片, A 为检偏振片, C 为 $\lambda/4$ 波片, S' 为样品, T 为换能器。

样品用中国科学院上海光学精密机械研

究所制造的平面平晶(纵波速度 6023m/s, 密度 2.50g/cm³) (图 2), 其声速与工业中钢、铁等金属材料的声速相近, 可以用来模拟金属等不透明材料中的声传播行为^[10]。

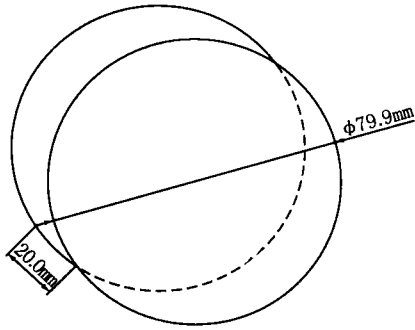


图 2 实验样品

3 表面波的激发和传播.

用 3#真空脂把圆形压电晶片(主频为 $f = 1.32\text{MHz}$, 直径 $\phi 17.74$, 电容 $C = 2.23\text{mF}$, 晶片厚度 $h = 0.74\text{mm}$)粘贴在有机玻璃楔块上, 再用 3#真空脂把有机玻璃楔块粘接在圆柱侧面上, 加热并排除真空脂中的气泡, 在常温下自然冷却. 粘贴晶片的平面和圆柱侧面切平面的夹角为 55° , 有机玻璃的纵波速度为 2717m/s , 相对于样品第二临界角约为 47° , 能满足产生表面波的条件.

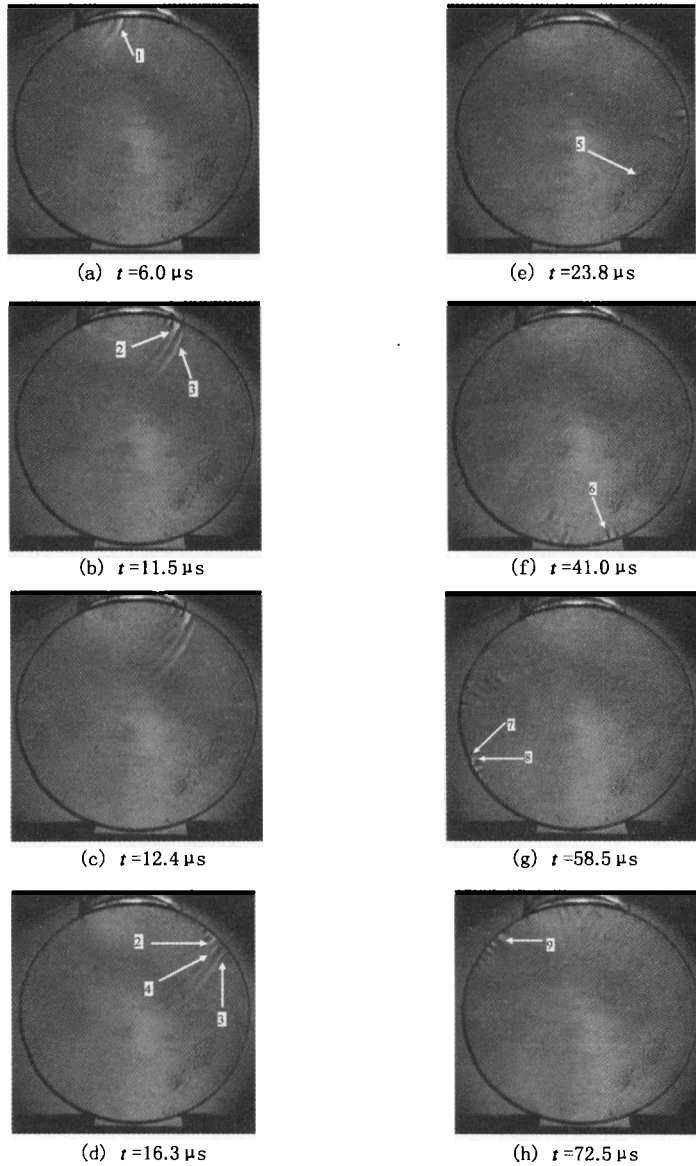


图 3 超声表面波沿圆柱面爬行的序列图片

图3(a)~(h)是实验结果。超声脉冲波从斜劈折射到圆柱内时($t=3.7\mu\text{s}$),首先观察到一个亮条纹1,即图3(b)中的明条纹2、3,起初是重合在一起的,3指向的条纹速度大于2指向的斑状条纹。当条纹2和3逐渐分离时(图3(b)),条纹3和圆柱侧面之间有间断,到 $t=16.3\mu\text{s}$ 时,2和3指向的条纹完全分离如图3(c)。经过约 $2.8\mu\text{s}$ 的时间间隔,条纹3和圆柱侧面相连接,并继续沿圆柱侧面爬行。2指向的斑状条纹表示瑞利波,利用软件系统记录其爬行时间,测出不同时刻两个波阵面之间的圆周角,求出爬行距离,计算出瑞利波速度约为 3240m/s ;3指向的条纹表示次表面波的头波,用同样的方法求出其速度约为 4319m/s 。经过一段时间,在2和3之间出现第二个次表面波条纹4(图3(d))。图3(e)表示两个次表面波条纹几乎消失,5是样品的商标图案。次表面波的头波条纹从沿圆柱侧面传播,衰减到几乎看不见(图3(g)),爬行的角度(相对于圆柱面的中心轴)约为 125° 。

图3(f)中6表示瑞利波条纹逐渐消失的情形;图3(g)表示第一个亮斑条纹完全消失,原来的第二个斑状明条纹成为第一个斑状明纹8,斑状暗纹7继续传播。斑状明纹8在传播的过程中,逐渐变亮边宽,即图3(h)中9指向的斑状亮条纹。在整个观察时间内($0\sim 99.9\mu\text{s}$),盯住瑞利波第一个斑状明纹,它可以沿圆柱侧面爬行一周以上。当爬行角度在 $180^\circ\sim 360^\circ$ 之间时,第一个斑状明纹在传播过程中有两次渐渐变暗以至消失,最后变为暗斑,原来的第二个斑状明纹变亮变宽,再爬行一段时间,波前斑状亮纹也慢慢消失变为暗纹,接着后面的斑状明纹也逐渐变亮边宽,并继续沿圆柱侧面传播。

4 结论

从拍摄的表面波声场光弹图片可知,由于衰减,瑞利波和次表面波沿圆柱曲面爬行光斑逐渐变暗并消失,同时也说明表面波群速度低于相速度,前面变暗说明能量没有跟上^[3]。群速是脉冲调制包络的速度,在实际检测表面缺陷中这个速度很重要。因为电学测量到的一般是脉冲信号的包络,测出的传播速度是群速度。

参 考 文 献

- [1] 应崇福,张守玉,沈建中. 超声在固体中的散射. 北京:国防工业出版社,1994:162-170.
- [2] Auld B. A and Kino G. S. Normal mode theory for acoustic waves and their application to the interdigital transducer, *IEEE Trans.* 1971. 18: 898-908.
- [3] Basatskaya L. V and Ermolov L. N Theoretical study of ultrasonic longitudinal subsurface waves in solid media, *Defektoskopiya*1980, 7: 58-65.
- [4] J. L. Rose. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press,1999. 何存福,吴斌等译. 固体中的超声波. 北京:科学出版社,2004:79-80.
- [5] Couchman, J. C. and Bell J. R. Prediction, detection and characterization of a fast surface wave produced near the first critical angle, *Ultrasonics*, 1978,16 :272-274.
- [6] Heelan, P. A. On the theory of head waves, *Geophys*, 1953, 18 :871-876.
- [7] Nikiforov, L. A. and Kharitonov, A. V. Parameters of longitudinal subsurface waves excited by angle-beam transducers, *Defektoskopiya*,1981, 6: 80-85.
- [8] Pilarski, A. and Rose, J. L. Utility of subsurface longitudinal waves in composite material characterization, *Ultrasonics*,1989 27:226-233.
- [9] Uberall, H. *Surface waves in acoustics. Physical Acoustics*. New York: Academic Press. 1973. Vol. X, 1-60.
- [10] N. Kudo H Ouchi K. Yamamoto H Sekimizu, A simple Schlieren system for visualizing a sound field of pulsed ultrasonic waves. *Journal of Physics*,2004, Conference Series 1:146-149.