

航空透明件表面波声弹效应^{*}

魏 智 周晓军 程耀东

(浙江大学机械系 杭州 310027)

1998 年 3 月 20 日初稿

1999 年 10 月 10 日定稿

摘要 表面波作为超声波的一种特殊形式,由于其传播特性,使得通过改变频率检测距物体表面不同深度处的初始应力成为可能,因此,各种材料的表面波声弹理论与实验技术的研究不断受到重视。本文从弹性波和有限变形理论出发,推导了表面波在有初始应力的各向同性弹性体中传播时,物体表面应力与超声波传播速度之间的一般关系。对作为飞机坐舱的航空透明件 YB-3 有机玻璃试件进行了声弹性实验,同时还给出了由实验数据回归的三次多项式声弹公式。实验结果表明,此类材料中声表面波的传播速度对其中的应力的依赖关系只在很小的范围内是近似线性的,而在其强度极限内总体上为非线性关系。

关键词 航空透明件, 表面波, 声弹性, 应力, 超声检测

Surface wave acoustoelasticity of aerospace transparency

Wei Zhi Zhou Xiaojun Cheng Yaodong

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Surface wave, as a special form of ultrasonic wave, makes it possible to probe initial stress at various depths below the surface by changing its frequency. In this paper the propagation of Rayleigh surface wave in an isotropic elastic material subjected to a homogenous stress is studied theoretically. The formula for the velocity change of surface wave versus the change in the applied static stress is investigated numerically. Acoustoelastic experiment for a specimen of aerospace transparency is also carried out. The result shows the nonlinear relation between sound velocity and applied stress.

Key words Aerospace transparency, Surface wave, Acoustoelasticity, Stress, Ultrasonic NDT

1 引言

随着高分子材料在现代工程中应用范围的扩大和对其性能要求的提高,对此类材料力学

性能的研究和评价显得越来越重要。航空、航天、汽车及舰船工业等使用的透明固体材料(PMMA),不仅要求有很好的物理及化学性能,而且还要有足够的结构强度和使用寿命。

^{*} 国家自然科学基金资助项目

航空透明件不象金属材料那样具有弹性好和强度大等特点,它对于缺口和应力集中等都非常敏感,抗裂纹扩展能力很差,而且由工作或残余应力引起的潜在破坏危险也很大。制造以及飞行过程中造成的结构荷载及由此所造成的应力银纹与疲劳性裂纹也会直接影响正常工作和安全。因此对此类材料的工作和残余应力的无损检测,从而对其力学性能特别是在役工作状态和使用寿命的评价和估计,显得越来越重要,以避免严重的累计损伤和重大事故。航空透明件在使用中其表面裂纹和表面应力是引起各种破坏的主要因素之一。研究具体波型和检测对象的声弹关系以及可付诸实测的相应的声速检测技术是其中的基础。本文在建立一般各向同性体表面波声弹关系的基础上,通过实验研究航空透明件的表面波声弹效应,以利于此类构件表面工作或残余应力的超声无损检测。

2 表面波声弹理论

超声测量仪器携带方便,可实现现场、在役以及自动化检测。固体中弹性波的各种模式都与应力有关,声弹性的内容比光弹性更加丰富,所以声弹效应概念一提出便引起人们的浓厚兴趣。但由于应力引起的超声指标变化相当小,要测出这个变化需要灵敏和精确的测量仪器,再加上材料织构和粗晶等的竞争效应,声弹性应力测量的实际应用显得举步维艰,其理论和测试技术的发展也较缓慢。近二十年来,由于超声的发射、检测以及信息处理理论和技术的发展,构件应力声弹检测的实际应用取得进展。针对体波入射的应力检测理论和实验技术已日臻成熟^[1-5]。与此相比,利用表面波测量物体表面的初始(或残余)应力的研究面临的课题要多一些。Hirao M.^[6]曾研究了金属中的形变与声表面波传播速度间的关系, Makhort F. G.^[7]也讨论了低碳钢中表面波传播速度与初始应力的近似线性关系。

当半无限大固体中已有初始应力 σ_{ij} 存在

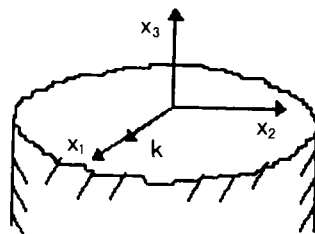


图 1 半无限大固体的坐标与波矢

时,如果取如图 1 所示的坐标系,那么表面波在其中传播时,用有限变形理论表示的运动方程为^[1]

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{lm} u_{k,lm} + (S_{klrs} u_{r,s})_{,l} \quad (1)$$

这里 u_i 是任意点的位移分量,为书写方便,这里使用了简化记号 $f_{,l} = \partial f / \partial x_l$, 其中

$$\begin{aligned} S_{klmn} = & \lambda \delta_{kl} \delta_{mn} + \mu (\delta_{kn} \delta_{lm} + \delta_{km} \delta_{ln}) \\ & + 2\lambda (\varepsilon_{kl} \delta_{mn} + \varepsilon_{kl}) + [-\lambda \delta_{kl} \delta_{mn} \\ & - \mu \delta_{kn} \delta_{lm} + (\lambda - \mu) \delta_{km} \delta_{ln}] \varepsilon \\ & + 2\mu (\varepsilon_{kn} \delta_{lm} + \varepsilon_{lm} \delta_{kn} \\ & + \varepsilon_{km} \delta_{ln} + \varepsilon_{ln} \delta_{km}) \end{aligned} \quad (2)$$

$\varepsilon = \varepsilon_{kk}$, λ 和 μ 是 Lamé 常数(二阶弹性常数)。当表面波的波矢沿 x_1 或 x_2 轴向且坐标轴是主方向时,边界条件可表示成

$$\text{在 } x_3 = 0, \begin{cases} \sigma_{mj} u_{3,m} + S_{3jrs} u_{r,s} = 0 \\ \sigma_{3j} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

($j = 1, 2, 3$)

根据表面波的传播特性^[8],可以将沿主方向传播的表面波之位移分量 u_j 写成

$$u_j = U_j \exp\{k[\beta x_3 + i(x_i - v_i t)]\} \quad (4)$$

($i = 1, 2 \quad j = 1, 2, 3$)

式中 U_j 是振幅, β 为常数, $k = \omega/v$ 是波数。

如果变形是均匀的,当表面波的传播方向分别为 x_1 和 x_2 时,将(4)代入(1)和(3)并

利用非零条件可得

$$\begin{aligned} & [\lambda + \alpha_{1i}\alpha_{2i}(\lambda + 2\mu)] \\ & \cdot [1 - \frac{(2\lambda + \mu)\sigma}{\mu(3\lambda + 2\mu)}] \\ & + \lambda(1 + \frac{\sigma_{ii}}{\mu}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$(i = 1, 2)$$

这里 σ 的下标 i 不求和, 而且

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{11} + \sigma_{22}, \\ \alpha_{1i} &= \sqrt{1 - (v_i/v_l)^2}, \\ \alpha_{2i} &= \sqrt{1 - (v_i/v_s)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$(i = 1, 2)$$

$v_i (i = 1, 2)$ 是表面波沿坐标轴 x_1 与 x_2 方向的传播速度, v_l 和 v_s 为无应力时介质中的纵波和横波速度。由此可知, 表面波速度与材料中的表面应力一般存在复杂的非线性关系, 在实际测量时根据不同的材料和应力等条件可以作出具体假设, 以方便实际检测。就区别于金属的航空透明件类特殊材料而言, 尚需通过大量实验研究来确定其不同受力阶段的表面波声弹关系, 进而指导表面应力的超声无损检测。

对于单向 (比如 x_1 轴向) 应力情况, 由式 (5) 可得沿同方向传播的表面波速度与应力的关系式

$$\begin{aligned} & [\lambda + \alpha_{11}\alpha_{21}(\lambda + 2\mu)] \\ & \cdot [1 - \frac{(2\lambda + \mu)\sigma_{11}}{\mu(3\lambda + 2\mu)}] \\ & + \lambda(1 + \frac{\sigma_{11}}{\mu}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

此时, 波速 v_1 与应力同 λ 和 μ 等材料常数存在固定关系, 在其他常数已知的情况下, 当测得构件的表面波速度后便可利用 (7) 式求出应力的值。

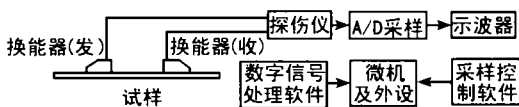


图2 实验过程与设备框图

3 实验与分析

3.1 实验过程与仪器设备

本文按图2所示流程设计实验, 利用专门研制的航空透明件表面波超声换能器进行了超声测量, 该换能器为纵波折射斜探头, 其中的晶片为 $9 \times 11 \text{ (mm}^2\text{)}$ PZT, 中心频率为 5MHz, 透声楔由自行研制的特性硅橡胶透明材料制成。

我们的实验采用双换能器一收一发形式, 利用 CTS-26A 探伤仪触发并接收超声信号, 由采样频率为 100MHz 的数据总线采集板将从探伤仪内部引出的触发脉冲信号和未经检波的检测回波信号转换为数字信号并输入至 PC 机, 通过专门设计的采样控制程序对检测信号的时域波形处理后, 便可得到声速的数值。实验用试件为厚度 3.5mm, 宽 20mm 和长 250mm 的 YB-3 有机玻璃平板, 其拉伸强度 (在实验温度为 11℃ 时) 约为 50Mpa^[9]。加载装置为自行研制的高分子构件表面应力实验台^[10], 载荷施加方向与换能器布置参见图3。



图3 试件载荷与换能器布置示意图

3.2 实验结果分析

在单向拉伸情况下, 本文在室温 21℃ 条件下测量了不同应力时的表面波速度, 测量结果如图4所示中的圆圈所示。图中的实线为实验数据的三次多项式回归结果, 其关系式为

$$(v - v_0)/v_0 = a_0 + a_1\sigma + a_2\sigma^2 + a_3\sigma^3 \quad (8)$$

其中 $a_0 = -1.85 \times 10^{-3}$, $a_1 = -9.38 \times 10^{-3}$, $a_2 = 1.12 \times 10^{-3}$, $a_3 = -3.93 \times 10^{-5}$, σ 的量纲是 MPa, 无应力时试件的表面波速度为 $v_0 = 1039 \text{ m/s}$ 。实际测得 YB-3 航空透明件无应力时的几个材料常数分别为 $\lambda = 5.718 \text{ GPa}$, $\mu = 1.422 \text{ GPa}$, $v_l = 2683 \text{ m/s}$, $v_s = 1094 \text{ m/s}$ ^[11], 于是利用式 (7) 可得不同声速下的应力值, 其计

算结果在图 4 中由星号示出。

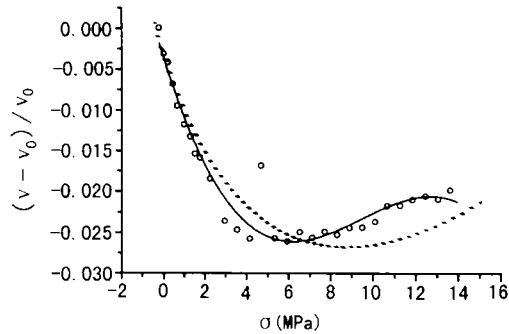


图 4 试件中表面波传播速度随同方向拉应力的改变

由实验结果可知,试件中超声传播速度与其中应力存在非线性关系。在开始一段区域内,当应力增大时,声速逐渐减小,而且二者接近线性关系。但当应力超过一定值(图中约为 7MPa)后,随着应力的增加,声速却慢慢增大。这与一般金属的情形不一致,因而,即使在线弹性范围内,也不能简单地套用金属材料的表面波声弹关系。理论计算值与实验结果在趋势上是一致的,而且在应力小于 8MPa 时二者吻合较好。试件在加载过程中的应变软化效应和温度影响以及试件实际应力值与理论计算值的误差,造成二者的差异在应力值较高处变大。鉴于实验条件所限,本文尚未就更高应力水平下的声速—应力关系进行研究。由于有机玻璃类玻璃状非晶态高分子材料的弹性与其分子间的位垒作用有着密切关系,所以关于此类材料或构件表面波声弹性的实质,还需做深入的,尤其是大量的实验研究。

4 结论

本文推导了表面波声弹性的一般关系,设计并实施了航空透明件表面波声弹实验。实验结果同时验证了式 (7) 所表示高分子材料中声表面波传播速度对其中应力的依赖关系。揭示出应力—变形线弹性范围内的非线性声弹性质,将对此类材料声弹性理论与实验技术的研究起到借鉴作用。关于此类材料或构件表面波声弹性的实质还需进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Takuoka T,Iwashimjzu Y. *Int.J.Solids Structures*, 1968. V4: 383-388.
- 2 Crecraft D S. *J.Sound Vib*, 1967. 5(1): 173-192.
- 3 Blinky J, Sachse W. *Experimental Mechanics*, 1967. Dec: 448-453.
- 4 Fukuoka H, Toda H, Naka H. *Experimental Mechanics*, 1983. Mar: 120-128.
- 5 Hull D R, kautz H E, Vary A. *Material Evaluation*, 1985. V43 Oct: 1455-1460.
- 6 Hirao M, Fukuoka H, Hori K. *Journal of Applied Mechanics*, 1981. V48 Mar: 119-124.
- 7 Makhort F G, Gushcha O I, Chernoochenko A A. *Soviet Applied Mechanics*, 1990. V26 n4: 347-350.
- 8 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. 22-24.
- 9 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 (5). 北京: 中国标准出版社, 1989. 192-204.
- 10 梁卫旗,周晓军,莫锦秋. 电力安全技术, 1996. 31(5): 49-52.
- 11 魏智,周晓军,王冠宙等. 航空工程与维修, 1999. (189): 41-42.

欢迎订阅《应用声学》

国内邮发代号: 2-561 国外发行代号: BM607

定价: 6.00 元 / 期 全年 36 元

全国各地邮局均可办理订阅