

# 超声横波检测的有限元模拟计算与分析

孙 朝 明

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所,四川 绵阳 621900)

**摘 要:**为探讨有限元方法研究超声横波检测问题的可行性与有效性,设计了斜探头检测带横孔试块的计算模型,利用 Ansys 软件使用二维平面应变模型进行了有限元计算。作为对照,利用声线法计算了声波的传播路径及波型转换情况,利用光弹试验观测了声波与横孔的相互作用。计算与分析结果表明,有限元计算结果可揭示出声波的传播规律,可观测到声波在界面上的反射、折射规律,可将声波与缺陷相互作用的前后过程可视化显示;超声横波检测的有限元模拟计算结果与声线法、光弹试验的结果,具有良好的吻合性。

**关键词:**超声检测;有限元方法;声线法;光弹试验

**中图分类号:**TG115.28

**文献标识码:**A

## Calculation and Analysis of Ultrasonic Transverse Wave Testing with Angle Probe by Finite Element Method

SUN Chaoming

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** For simulation of ultrasonic transverse wave testing with angle probe by finite element method (FEM), it is necessary to investigate the feasibility and effectiveness of this method. A work piece with side drilled hole was designed, and then simulation was carried out by Ansys software using a two-dimensional plane strain model. For comparisons, ray tracing method was used to calculate the propagation path of ultrasound and to analyze wave mode conversions on the interface. Besides, photo elastic experiment was carried out to observe the interaction between ultrasound and the side drilled hole. After calculation and analysis, the results showed that: From FEM results, the propagation of sound waves can be revealed, and the reflection and refraction of ultrasound can be observed at the interface, and the interaction process between ultrasound and the hole inside the work piece can be reproduced; the results from FEM simulation agree well with that from ray tracing method and that from photo elastic experiment.

**Key words:** ultrasonic testing; finite element method; ray-tracing method; photo elastic experiment

### 0 引言

传统的超声检测是以实践和经验为基础的一门技术,对于复杂的检测对象,在工艺方法制订、缺陷信号识别与定量方面都会遇到很大困难。计算超声学<sup>[1]</sup>以定量化为目标,可针对超声声场在介质中的传播、声场与缺陷的相互作用规律进行分析,从而较好地满足检测方法优化、缺陷定量与定位方面的需求。计算超声学中常用的建模方法包括解析法、数值法和半解析法。与其他的超声检测数值计算方法相比,有限元方法<sup>[2]</sup>在通用性方面表现更好<sup>[3-4]</sup>,它可以对任意形状的工件或缺陷进行建模,可实现各

向异性材料的分析,可应用于复合材料的超声检测问题分析<sup>[4-5]</sup>。在超声检测中,横波检测是广泛使用的一种方法。目前,在超声检测的有限元计算方面,还存在一些问题需要解决:

- 1) 如何对横波检测问题<sup>[6-7]</sup>进行有效的计算分析。
- 2) 如何验证有限元计算结果的准确性与可靠性。

为此,针对横波检测问题进行了有限元模拟计算,并对计算结果进行了分析,将计算结果与解析方法、光弹实验的结果进行了对比。

收稿日期:2014-03-09

作者简介:孙朝明(1977-),男,河南人,高级工程师,硕士生,主要从事超声、射线检测的研究。

## 1 超声检测的有限元模拟技术原理

超声脉冲激励信号  $V(t)$  作用于物体后,会使弹性物体介质内部的位移场、应变与应力张量场随时间  $t$  发生变化:

$$V(t) = \cos(2\pi f_c t) \exp(-t^2/4A^2) \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为超声波的频率;  $A = \sqrt{\ln 2}/(\pi \cdot bw)$ ,  $bw$  为信号的带宽(-6 dB)。

在弹性动力学中,综合运动平衡方程、物理方程、几何方程,采用位移法求解可得到 Navier 方程:

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u + \rho f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中:  $\nabla$  为矢性的 Hamilton 微分算子;  $\nabla^2$  为 Laplace 算子;  $\lambda, \mu$  为拉梅常数,与材料的弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  相关;  $\rho$  为材料密度;  $f$  为外加载荷;  $u$  为位移量。超声波在固体中的声波速度可通过  $\lambda, \mu, \rho$  计算得到。

二维情况下,根据哈密顿原理及拉格朗日泛函,式(2)可得到简化形式:

$$[M_e] \left[ \frac{\partial^2 U_e}{\partial t^2} \right] + [K_e] [U_e] = [F_e] \quad (3)$$

式中:  $M_e$  为单元质量矩阵;  $K_e$  为单元刚度矩阵;  $F_e$  为单元载荷矩阵。利用 Newmark 法可对式(3)进行求解。

## 2 横波检测的有限元模拟计算方法

利用 Ansys 软件对超声检测进行有限元计算分析。在模拟计算时使用二维的平面应变模型。其计算步骤大致包括:选取分析模块(瞬态结构分析)、定义材料参数、建模、定义模型特性、划分单元网格、设定分析的相关参数(时间步、载荷步)、施加初始条件、施加载荷、求解、结果观察与分析。

斜探头与检测试块的三维结构如图1所示,在试块中加工有横孔、横槽。

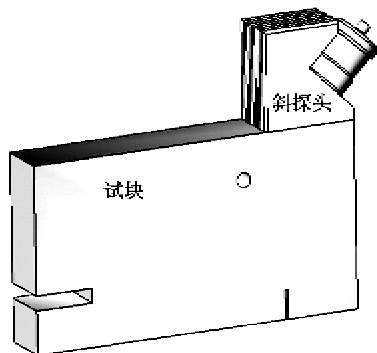


图1 斜探头与检测试块

### 2.1 斜探头建模方法

按尺寸构造出有机玻璃楔块平面,将载荷施加在楔块斜面与“换能器”底面的接触部位。

### 2.2 计算的参数

计算时所采用的斜探头中心频率为 2.5 MHz,  $k=1.5$ 。按式(1)产生超声激励信号时,  $A=0.15$ 。设定划分网格的尺寸为 0.1 mm,以等时间间隔 0.02  $\mu s$  进行计算,取 1 800 个载荷步(第 50 个载荷步即 1  $\mu s$  时达到激励脉冲峰值),计算总时长为 36  $\mu s$ 。

模拟计算时的材料参数如表1所示。由表可知,钢中的声速为 5 778 m/s(纵波)、3 142 m/s(横波),有机玻璃中声速为 2 745 m/s(纵波)、1 120 m/s(横波)。

表1 材料参数

| 材料名称 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量/Pa            | 泊松比  |
|------|-------------------------|--------------------|------|
| 钢    | 7 850                   | $2 \times 10^{11}$ | 0.29 |
| 有机玻璃 | 1 180                   | $4.15 \times 10^9$ | 0.4  |

### 2.3 计算方法优化

#### 2.3.1 基于声线法的计算

进行超声检测的有限元模拟时,由于需要较精细的网格划分,因此完成一次计算需要几小时。如果在计算时不能准确地建立模型,或计算载荷步设置不够,则需重新计算。如此反复,耗费时间。作为解决方法,在有限元计算开始前,利用声线仿真软件进行初步计算,以校验模型是否准确(如声束入射点、折射角度等),初步确定出声波到达缺陷所需时间、探头接收到回波的时间等。

声线法的计算结果如图2、表2所示。图2中,声波在钢中的折射角为 56.2°,表明所构造的斜探头  $k$  值为 1.49。由表2可知,在 6.03  $\mu s$  时,声波到

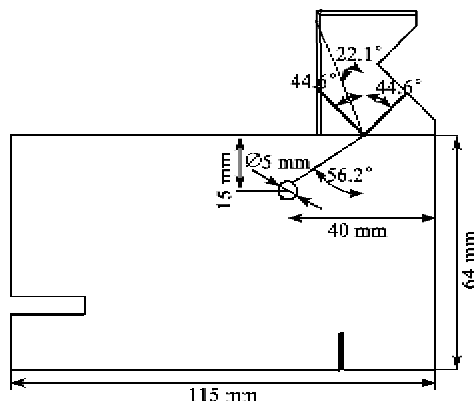


图2 声线法仿真分析

达有机玻璃、钢界面,并产生了反射纵波、反射横波、折射横波;在  $13.2\ \mu\text{s}$  时,折射横波到达横孔部位。由图 2、表 2 可看出,在有机玻璃、钢界面上声波的人射角度为  $44.6^\circ$ ;折射入钢试块的横波强度有所衰减,为人射声波强度的 17.9%。

表 2 声波传播的初步估算结果

| 声程长度/mm | 时间/ $\mu\text{s}$ | 信号强度   | 名称  | 说明     |
|---------|-------------------|--------|-----|--------|
| 16.47   | 6.03              | 100    | O   | 入射纵波   |
| 34.42   | 12.61             | 23.26  | OR  | 反射纵波   |
| 39.64   | 13.2              | 17.90  | OZ  | 折射横波   |
| 50.03   | 29.02             | 103.96 | OT  | 反射横波   |
| 52.70   | 17.25             | 6.22   | OZR | 孔反射后纵波 |
| 52.94   | 15.46             | 13.82  | OZT | 孔反射后横波 |

### 2.3.2 选区域计算

原有模型中试块面积较大,而计算时只需观察斜探头中的声波传播、与横孔间的作用过程。为节约时间,对模型大小进行了裁剪处理,只选取包含探头与试块横孔的合适区域进行计算。

## 3 有限元模拟结果分析

### 3.1 声波在有机玻璃中的传播

在未达到有机玻璃、钢界面前,声波在有机玻璃内传播。从第 120 个载荷步(声传播  $1.4\ \mu\text{s}$ )的计算结果(见图 3)可观察到换能器发出的声波在各向同性固体中传播的基本形式,包括沿声束方向向前传播的纵波、从探头边缘向两边传播的边缘纵波。

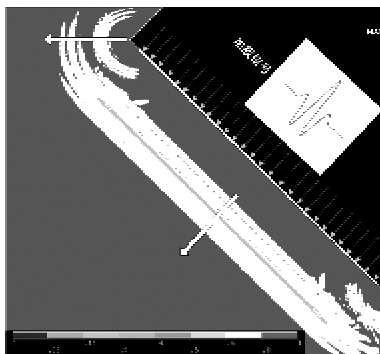


图 3 第 120 个载荷步时的计算结果

### 3.2 波型转换

在第 350 个载荷步(声传播  $6.0\ \mu\text{s}$ )时的计算结果如图 4 所示。此时,声波在钢、有机玻璃界面发生反射、折射,在结果图像上可对相应的角度进行测量。将有限元计算结果与声线法计算结果进行比较发现,入射声波与折射声波的角度基本上没有偏差,而波型转换后的反射横波角度则有  $2.7^\circ$  的偏差(见表 3)。其原因是声线法计算时所用参数(钢中纵波  $5\ 905\ \text{m/s}$ 、横波  $3\ 230\ \text{m/s}$ ,有机玻璃中纵波  $2\ 730$

$\text{m/s}$ 、横波  $1\ 460\ \text{m/s}$ )中有机玻璃的横波声速与有限元方法的声速参数存在较大差异。

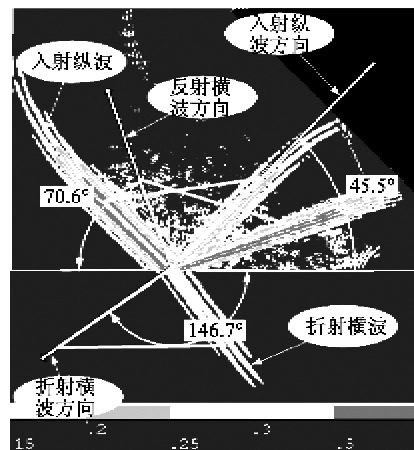


图 4 第 320 个载荷步时的计算结果

表 3 波型转换时的角度

| 角度   | 声线法结果        | 有限元结果        |
|------|--------------|--------------|
| 入射波  | $44.6^\circ$ | $44.5^\circ$ |
| 折射声波 | $56.2^\circ$ | $56.7^\circ$ |
| 反射横波 | $22.1^\circ$ | $19.4^\circ$ |

### 3.3 与散射体的相互作用

在钢试块中,声波与横孔散射体将发生相互作用。查看有限元计算结果的第 740、755、770、783 个载荷步(依次对应于声传播  $13.8\ \mu\text{s}$ 、 $14.1\ \mu\text{s}$ 、 $14.4\ \mu\text{s}$ 、 $14.7\ \mu\text{s}$ )时的结果,可以看到整个相互作用过程,如图 5 所示。

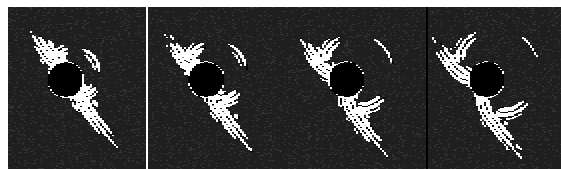


图 5 声波与横孔作用的有限元计算结果

## 4 光弹试验的对比分析

超声探头所激发的声波在工件内的传播情况,可以使用光弹试验的方法来观测。工件由石英玻璃加工而成,由于工件为透明状态,因此使用光弹成像试验系统可观测到声波在工件内的传播情况。

按图 1 所示的超声横波检测模型设置情况进行试验,观测到的结果如图 6 所示。对比图 5 可知,光弹试验所观测到的结果与有限元计算结果相似。

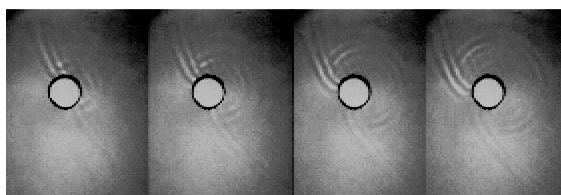


图 6 利用光弹法观察声波与孔的作用过程

## 5 结束语

通过有机玻璃楔块及带横孔的检测试块模型,利用有限元法对超声横波检测中声波的传播过程进行了计算。对计算结果进行分析,可认识到声波在各向同性固体中的传播特性、声波在界面上的波形转换规律、声波与散射体的作用过程。对于横波检测的数值计算而言,有限元法是一个有效的模拟计算工具,其分析结果与利用解析方法、光弹试验得到的结果具有良好的吻合性。

为了更好地对检测方法进行优化分析,还应检测中的回波信号进行定量化分析。由于在有限元模拟计算时使用了简单的二维平面模型,声波在有机玻璃楔块内形成了多次的反射,对检测回波信号造成了很大干扰,因此本文中未能获取到理想的探头回波信号,计算模型还有待于进一步完善。

另外,有限元法计算耗时太长(有限元模型有31万节点,在16CPU、SMP并行计算时约需21 h),对于复杂结构的三维模型难以进行有效的计算。因此,应用有限元法时还需在计算模型优化(如在模型中加入吸声边界条件),提高运算速度(如并行计算加速、基于GPU加速)方面进行探索。

### 参考文献:

- [1] 丁辉. 计算超声学:声场分析及应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

(上接第1017页)

关系,根据具体结构尺寸进行仿真优化,能得到较优的阻尼层芯厚度,如算例中若仅从材料成本和声辐射特性来说,层芯厚度为1 mm时最优。

3) 整体上来说,增大 $a_x$ 或 $a_y$ ,结构辐射声压都有降低的趋势,且都在晶格常数为均布状态时达到最低。

### 参考文献:

- [1] BERANEK L L, WORK G A. Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1949, 21(4):419-428.
- [2] WANG Tong'an, SOKOLINSKY V S, RAJARAM S, et al. Assessment of sandwich models for the prediction of sound transmission loss in unidirectional sandwich

- [2] LUDWIG R, LORD W. A finite-element formulation for the study of ultrasonic NDT systems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1988, 35(6):809-820.
- [3] KISHORE N N, SRIDHAR I, IYENGAR N G R. Finite element modelling of the scattering of ultrasonic waves by isolated flaws[J]. NDT&E International, 2000, 33:297-305.
- [4] DATTA D, KISHORE N N. Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modelled by finite element method [J]. NDT&E International, 1996, 29(4):213-223.
- [5] DELRUE S, ABEELE K V D. Three-dimensional finite element simulation of closed delaminations in composite materials[J]. Ultrasonics, 2012, 52:315-324.
- [6] 李树榜, 李书光, 刘学锋. 裂纹超声散射的有限元模拟[J]. 无损检测, 2007, 29(1):27-31.
- LI Shubang, LI Shuguang, LIU Xuefeng. Finite element modeling of ultrasonic wave scattering on cracks [J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(1):27-31.
- [7] 刘长福, 牛晓光, 李中伟, 等. 基于 Ansys 的超声纵/横波传播仿真计算[J]. 无损检测, 2011, 33(6):15-18.
- LIU Changfu, NIU Xiaoguang, LI Zhongwei, et al. Simulating calculation of propagations of ultrasonic longitudinal/transverse wave based on Ansys [J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(6):15-18.

panel[J]. Applied Acoustics, 2005, 66:245-262.

- [3] WANG Tong'an, LI Shan, NUTT S R. Optimal design of acoustical sandwich panels with a genetic algorithm[J]. Applied Acoustics, 2009(70):416-425.
- [4] DENLI H, SUN J Q. Structural-acoustic optimization of sandwich structures with cellular cores for minimum sound radiation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007(301):93-105.
- [5] SHEN C, XIN F X, LU T J. Theoretical model for sound transmission through finite sandwich structures with corrugated core[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47:1066-1072.
- [6] 王海英. 夹层结构振动声辐射特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [7] 李增刚, 詹福良. Virtual lab Acoustics 声学仿真计算高级应用实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.