

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.001

# 结构声发射的数值模拟及实验研究<sup>\*</sup>

陈苇波<sup>1</sup>, 钟舜聪<sup>1,2,3\*</sup>, 朱志彬<sup>4,5</sup>, 伏喜斌<sup>5</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 福建省医疗器械和生物技术重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 华东理工大学 承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237; 4. 福州大学 石油化工学院, 福建 福州 350108; 5. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000)

**摘要:** 由于声发射源产生的瞬态弹性波会在传播过程中产生各种频率和模态的声发射信号, 这给应用声发射技术进行无损检测带来一定困难。针对声发射信号在实际介质中传播的复杂性, 为了研究弹性波的传播对波形的影响, 提出了利用有限元方法模拟声发射信号在薄铝板的传播及几何形状边界反射过程, 得到声发射波形的时域特征, 进一步分析了声发射信号在铝板中的传播特性; 搭建了与有限元模型相应的声发射断铅实验系统来采集断铅信号。试验及研究表明, 利用声发射断铅实验系统获得的信号与有限元计算方法得到的模拟信号基本吻合, 说明有限元数值计算方法可以作为分析声发射信号传播过程的一种手段; 该结果为基于声发射的结构缺陷检测技术提供了数值模型, 同时声发射技术用于无损检测也有了更精确的理论基础。

**关键词:** 声发射; 有限元方法; 断铅

中图分类号: TH878; TH3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0545-04

## Numerical simulation and experiments of structural acoustic emission

CHEN Wei-bo<sup>1</sup>, ZHONG Shun-cong<sup>1,2,3\*</sup>, ZHU Zhi-bin<sup>4,5</sup>, FU Xi-bin<sup>5</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Key Laboratory of Medical Instrument and Pharmaceutical Fechnology, Fuzhou 350002, China; 3. Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 4. School of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 5. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** Transient elastic waves produced by acoustic emission sources could generate acoustic emission signals with various frequencies and modals in propagation, which lead to some difficulties using acoustic emission in non-destructive testing. Aiming at investigating the propagation of acoustic emission signal, finite element method was used to simulate the propagation of acoustic emission signals in thin aluminum and the reflection waves from structure boundary. Time-domain waveform of acoustic emission was obtained and its propagation characteristics could be extracted from this model. Pencil-lead breaks system was built to simulate and collect the acoustics emission signal. The simulation results well agreed with the one obtained from pencil-lead breaks experiments. The results indicate that finite element numerical method can be an effective method to analyze the propagation of acoustic emission. It provides the numerical model for acoustics emission based structural damage detection and precise theoretical foundations of using acoustic emission in non-destructive testing.

**Key words:** acoustic emission(AE); finite element method; pencil-lead break

收稿日期: 2013-12-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51005077); 教育部高校博士学科点科研基金资助项目(博导类, 20133514110008); 国家卫生和计划生育委员会科研基金资助项目(WKJ-FJ-27); 福建省杰出青年基金资助项目(2011J06020); 福建省质量技术监督局科技资助项目(FJQ12013095, FJQ12012024); 福建省高等学校学科带头人培养计划(闽教人(2013)71号)

**作者简介:** 陈苇波(1990-), 男, 福建泉州人, 主要从事无损检测方面的研究. E-mail: luoshao168@126.com

**通信联系人:** 钟舜聪, 男, 研究员, 博士生导师. E-mail: zhongshuncong@hotmail.com

## 0 引 言

声发射是指材料内部局部快速释放能量形成弹性波的一种物理现象<sup>[1]</sup>。借助于传感器探测,经记录和分析声发射信号推测声发射源性质的技术称为声发射技术。相比超声、X射线、涡流等其他无损检测方法,声发射检测技术是一种动态的检测方法。只要明确来自缺陷的声发射信号,就可以长期连续地监视缺陷的安全性<sup>[2]</sup>。

声发射信号本质上是一种频率和模式丰富的弹性波,实际传感器测量得到的声发射信号是各种模态弹性波以及复杂背景噪声的叠加。当该弹性波在介质中传播时,在边界和缺陷处产生反射和模态转换<sup>[3]</sup>,信号变得复杂,使检测人员难以对声发射源的位置和物理性质做出准确判断。一般情况下,可通过计算满足边界条件下的控制微分方程来获得弹性波传播问题的解析解。但是在实际应用中,试件的复杂几何形状以及介质中可能存在的缺陷都会使边界条件变得十分复杂,所以获得弹性波在复杂介质传播过程的解析解几乎不可实现。解决这个问题的另一种有效途径是采用有限元数值计算方法。

在众多有限元分析软件中,ABAQUS 以其强大的非线性分析处理能力,已逐渐成为分析工程技术问题的首选软件<sup>[4]</sup>。借助于高性能的计算机,ABAQUS 能有效地模拟弹性波在介质中的传播过程。

本研究利用 ABAQUS 有限元软件模拟声发射信号在铝板中的传播及边界的反射作用,通过有限元软件计算得到声发射的时域波形,搭建相对应的实验平台,对断铅情况下的声发射信号进行采集,最后对比数值模拟结果和实验结果,验证有限元数值计算方法可以有效地分析声发射的传播过程,为基于声发射的结构缺陷检测技术提供良好的理论基础。

## 1 声发射有限元模型及结果分析

### 1.1 有限元模型

本研究利用有限元软件 ABAQUS 模拟断铅(Hsu-Neilsen)<sup>[5]</sup>信号在铝板中的传播。有限元模型分析时,采用自由边界条件,同时为了避免其他边界的反射作用的累加,选用铝板几何尺寸为 500 mm × 380 mm,厚度为 2.88 mm。

声发射源和传感器的位置如图 1 所示。

直接到达信号传播路径如图 1 中的路线“(1)”,本次有限元模拟所考虑的反射路径如图 1 中的路线“(2)”。断铅信号先从路径“(1)”传播至传感器位置并被检测接收,又经路径“(2)”传播到铝板边界,并反射回到传感器位置。

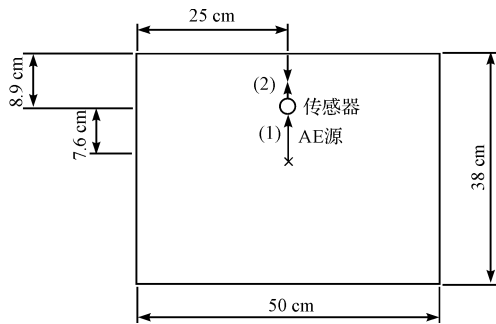


图 1 有限元模型几何尺寸

在该模型中,横波在介质的最小波长  $\lambda_{\min}$  可通过下式计算得到<sup>[6]</sup>:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{C_T}{f_{\max}} \quad (3)$$

式中: $G$ —铝板剪切模量, $C_T$ —横波波速, $\lambda_{\min}$ —最小波长。

其中,弹性模量为 70 GPa,密度  $\rho$  取 2 700 kg/m<sup>3</sup>,泊松比  $\nu$  取 0.33,AE 信号的最高频率  $f_{\max}$  取 500 kHz<sup>[7]</sup>。最小网格  $L_e$  应满足下式:

$$L_e < \frac{\lambda_{\min}}{10} < 0.6917 \text{ mm} \quad (4)$$

此处取网格大小为 0.5 mm。

合理的时间步长  $\Delta t$  同样是有限元正确模拟弹性波传播的关键。为了保证弹性波在铝板传播过程中的最大频率分量的周期至少是  $\Delta t$  的 20 倍,可依下式<sup>[8]</sup>来计算:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}} = 100 \text{ ns} \quad (5)$$

根据 Hamstad et al<sup>[9-10]</sup> 的论证,取幅值为 1 N,产生和断铅实验相一致的波形,且按下式  $T(t)$  曲线变化的体积力作为激励:

$$T(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ (0.5 - 0.5 \cos(\pi t / \tau)), & 0 \leq t \leq \tau \\ 1, & t > \tau \end{cases} \quad (6)$$

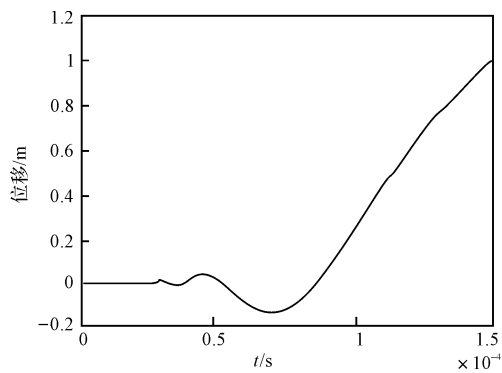
式中: $\tau$ —相当于实际当中声发射源快速释放能量的时间,取  $\tau = 1.5 \mu\text{s}$ ;  $t$ —总的计算时间,取  $t = 150 \mu\text{s}$ 。

### 1.2 有限模拟结果分析

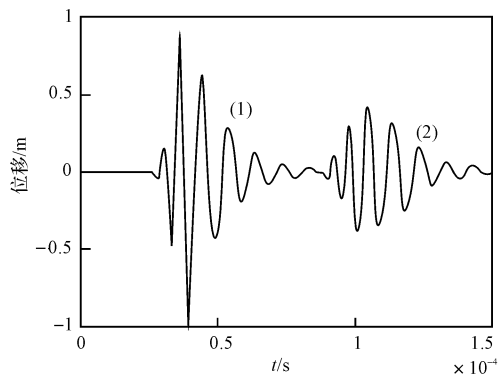
在铝板表面的断铅实验中,主要是产生  $A_0$  反对称波。其有限元模拟结果如图 2 所示。

在图 2(a) 的有限元计算的位移曲线结果中,100  $\mu\text{s}$  ~ 150  $\mu\text{s}$  位移随时间线性增长,导致无法识别到边界的反射信号,因为低频的  $A_0$  反对称波是一种低

速、幅值高的弹性波,会覆盖边界反射回来的弹性波。



(a) 有限元模拟的原始信号



(b) 有限元模拟滤波后的信号

图2 有限元模拟结果

为了研究声发射信号在铝板中的边界反射作用,需将有限元模拟结果的低频  $A_0$  信号事先进行滤波处理。还考虑到实际声发射传感器都是具有一定的工作频率范围的,在实验中所用的传感系统采用的频带为 100 kHz ~ 200 kHz。为了跟实验的条件一致,本研究设计了一个频带为 100 kHz ~ 200 kHz 的带通滤波器,对有限元模拟的原始信号进行滤波处理。

相比 ChebyshevII、Elliptical、Bessel 等函数,Butterworth 函数性能稳定且容易实现<sup>[11]</sup>。本研究选用 Butterworth 函数作为本次设计带通滤波器的最优传递函数,建立滤波器的数学模型(传递函数)。

Butterworth 滤波器传递函数如下式所示:

$$H(s) = \frac{Z(s)}{P(s)} = \frac{K}{(s-p(1))(s-p(2))L(s-p(n))} \quad (7)$$

该滤波器没有零点,极点为  $[p(1), p(2), \dots, p(n)]$ ,滤波器的增益为  $K$ ,幅值响应特性平坦,并且随着频率增大平滑单调下降。本研究通过选取适当的阶数,使得幅值特性接近矩形,且滤波器过渡带狭窄。

笔者通过 Matlab 软件设计了一个阶数为 4 的 Butterworth 带通(100 kHz ~ 200 kHz)滤波器,利用该滤波器对如图 2(a)所示的信号进行滤波处理,得到如图 2

(b)所示的滤波之后的信号。

直接到达的声发射信号被检测到的波形如图 2(b)中“(1)”所示,边界反射回来的弹性波所引起的波形如图 2(b)中“(2)”所示。

## 2 实验验证

在有限元分析基础上,笔者搭建了一套与模拟模型相对应的断铅实验平台,以验证该模拟过程的有效性。

断铅产生的声发射信号在薄铝板中传播,断铅位置及传感器位置皆和有限元模型一致。其中,此处采用美国 PAC 公司开发的 SAMOS 声发射数据采集系统对断铅信号进行采集。该系统是目前集成度较高、价格相对较低的系统,并且具备声发射传感器、前置放大器、主放大器、信号采集和分析等基本单元。

实验过程的系统参数设计如表 1 所示。

表1 测试参数的设置

参数类型	参数值
采样频率/MHz	3
阈值/dB	45
前置放大倍数/dB	40
预触发时间/us	0

实验中须注意:在粘贴好传感器后,需要先调整好数据采集系统的参数。检测传感器的灵敏度时,在传感器附近须用断铅模源进行校核,使得信号幅值都在 95 dB 以上,如果未达到 95 dB,则需重新对传感器进行耦合,以提高该传感器的灵敏度<sup>[12]</sup>。

声发射检测系统的组成如图 3 所示。

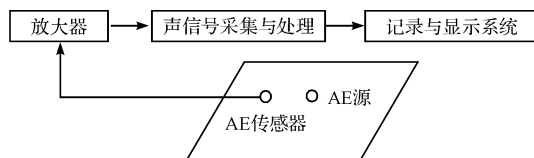


图3 声发射检测系统组成图

声发射断铅实验平台实物图如图 4 所示。本研究在如图 1 所示的声发射源位置用直径 0.5 mm HB 铅笔芯折断模拟声发射源,用 SAMOS 系统记录所接收的信号。



图4 断铅实验平台实物图

检测前的试验准备就绪后,开始采集断铅信号。断铅实验得到的信号幅值响应如图 5 所示。

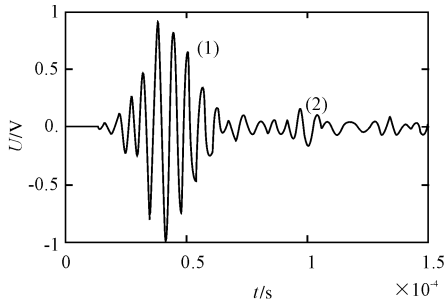


图 5 试验断铅信号

在图 5 中,“(1)”是直接到达的断铅信号被传感器所检测到的信号,“(2)”是断铅信号经图 1 中的路径“(2)”边界反射回到传感器所在位置被传感器接收的信号。由于实验中所用的采集系统中已经对信号进行了滤波处理,直接对比图 2(b)和图 5,可明显地看到  $A_0$  反对称波及其边界的反射信号。

由于传感器的传递效应的影响,导致实验所得信号幅值与模拟信号并不一致,并且由于有限元模拟信号是采集传感器中心位置的信号,而在实际断铅实验中,弹性波传到传感器边界的时候就会被传感器所检测到产生电压信号,故模拟声发射信号和实际断铅信号在到达时间上会有所偏差。

### 3 结束语

在实际的非理想介质条件下,声发射信号的产生及传播是一个复杂的过程。本研究通过有限元数值计算方法模拟声发射信号的产生以及记录其时域波形,其结果与断铅实验结果能够较好地吻合。在有限元分析时只要采用足够小的积分时间步长、单元长度大小和合适的边界条件,通过有限元方法就能比较正确地模拟出弹性波的传播过程。

该方法有助于人们对声发射信号传播过程的理解,为声发射检测手段中准确找出发射源的位置,和确定其物理性质提供可靠帮助。另外,该方法可为基

于声发射的结构缺陷检测技术提供数值模型,使声发射技术用于无损检测有了更精确的理论基础。

### 参考文献 (References):

- [1] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 李孟源,尚振东,蔡海潮,等. 声发射检测及信号处理[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 金挺,孙智,孙利民. 纹扩展声发射有限元模拟及其信号时频分析[J]. 振动、测试与诊断,2007,27(1):288-291.
- [4] 张建华,丁磊. ABAQUS 基本入门与案例精通[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [5] PROSSER W H, HAMSTAD M A, GARY J, et al. Reflections of AE waves in finite plates: finite element modeling and experimental measurements[J]. *Acoustic Emission*, 1999,17(1/2):37-47.
- [6] HAN S J, PALAZOTTO A N, LEAKEAS C L. Finite-element analysis of lamb wave propagation in a thin aluminum plate[J]. *Aerosp*,2009(22):185-197.
- [7] PROSSER W H, HAMSTAD M A, GARY J, et al. Finite element and plate theory modeling of acoustic emission waveforms[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1999, 18(3):83-90.
- [8] HILL, FORSYTH S A, MACEY P. Finite element modeling of ultrasound, with reference to transducers and AE waves[J]. *Ultrasonics*,2004(42):253-258.
- [9] HAMSTAD M A, GARY O'G. Modeling of buried acoustic emission monopole and dipole sources with a finite element technique[J]. *Acoustic Emission*,1999,17(3-4):97-110.
- [10] GARY, HAMSTAD M A. On the far-field structure of waves generated by a pencil- break on a thin plate[J]. *Acoustic Emission*,1994,12(3-4):157-170.
- [11] 戴金伟,陈增禄,毛惠丰,等. Butterworth 带通滤波器设计[J]. 西安工程科技学院学报,2007,21(3):367-370.
- [12] 于金涛,丁明理. 复合材料声发射信号传播特性试验研究[J]. 电机与控制学报,2012,16(8):108-112.

[编辑:罗向阳]

#### 本文引用格式:

陈苇波,钟舜聪,朱志彬,等. 结构声发射的数值模拟及实验研究[J]. 机电工程,2014,31(5):545-548.

CHEN Wei-bo, ZHONG Shun-cong, ZHU Zhi-bin, et al. Numerical simulation and experiments of structural acoustic emission[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(5):545-548.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>