

# 相控阵超声检测的有限差分模拟 及其在回波分析中的应用

张俊<sup>1</sup>, 丁辉<sup>1</sup>, 张益成<sup>1</sup>, 石一飞<sup>2</sup>

(1. 武汉大学无损检测中心, 武汉 430072; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:**基于有限差分数值方法, 建立相控阵超声检测数值模型。基于所建模型编程计算得到不同时刻相控阵探头发射声场分布图以及不同尺寸缺陷回波信号图。通过根部切槽相控阵检测试验验证了模型计算精度。利用斜切槽回波产生了山形波, 并基于有限差分模型分析了各个波形产生的机理。结果表明, 超声检测的数值模拟可以有效地用于变型波的识别。

**关键词:**相控阵超声; 有限差分; 变型波

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)08-0001-04

## Finite Difference Modeling of Phased Array Ultrasonic Testing and its Application to the Identification of Mode Conversion

ZHANG Jun<sup>1</sup>, DING Hui<sup>1</sup>, ZHANG Yi-Cheng<sup>1</sup>, SHI Yi-Fei<sup>2</sup>

(1. NDT Centre of Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Aero-Polytechnology China Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** The phased array ultrasonic testing model is built based on finite difference method, and the acoustic field of PA probe and the echo of different defects are calculated, the model is validated by mean of the experiment results of notch, a three peaks echo is achieved on a slit notchblock and the model is used to analyze the reason of every echo and the result indicates that numerical modeling of ultrasonic testing is an efficient tool for identification of mode conversion.

**Keywords:** Phased array ultrasonic testing; Finite difference method; Mode conversion

信号回波的有效识别一直是压力容器超声检测缺陷评定的关键。随着相控阵、TOFD等新技术的不断应用, 面对先进技术和复杂结构所产生的各类变型波, 若仅凭检测人员经验进行判别, 很难保证检测结果的可靠性。因此, 有必要探索合适的缺陷信号辅助分析方法。

因超声声场计算与模拟能够从理论上解释超声传播及其与缺陷作用的相互规律而得到广泛的关注。超声检测建模主要有解析法、数值法和半解析法<sup>[1-3]</sup>。目前, 发达国家主要基于半解析法开发了

一系列超声仿真商用软件, 如 Civa<sup>[4]</sup>、simSU NDT<sup>[5]</sup>、imagine3D<sup>[6]</sup> 和 UT-sim<sup>[4]</sup> 等, 辅助进行工艺验证、回波信号分析和人员培训等, 部分促进了超声检测可靠性的提高。但是半解析法在处理缺陷位置的波型转换及尖端衍射等综合问题方面有一定的局限性。数值法通过将介质离散化的方法从而可以处理较为复杂的情况, 目前在地震波等领域已经有了广泛的应用<sup>[7]</sup>。

文章尝试利用基于数值法的超声声场模拟来辅助变型波识别。首先基于有限差分方法, 建立了相控阵超声检测的数值模型, 并基于该模型计算了发射声场的瞬态分布图以及缺陷回波, 然后通过相控阵超声检测试验验证了模型计算精度, 最后将该模型应用于实际检测中由根部缺陷及结构产生的特殊波形的评定。

收稿日期: 2011-12-08

基金项目: 国防科技工业技术基础科研资助项目(Z052011T002)

作者简介: 张俊(1983—), 男, 博士后, 博士, 主要从事超声声场计算与检测可靠性研究。

## 1 相控阵超声检测有限差分模型

固体介质中弹性波的传播可以用波动方程来描述,有限差分方法通过离散网格的方式求解波动方程,然后依据一定的边界条件来得到各个时间点的声场分布。针对各向同性介质,固体中的声场方程可以用方程组表示:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{zz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & 0 \\ c_{13} & c_{11} & 0 \\ 0 & 0 & c_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $\rho$  为介质密度;  $v_x$  和  $v_z$  分别为在  $x$  和  $z$  方向上的速度分量;  $\tau_{xx}$  和  $\tau_{zz}$  分别为在  $x$  和  $z$  方向上的正应力分量;  $\tau_{xz}$  为剪切应力;  $c_{11}$ ,  $c_{13}$  和  $c_{55}$  为材料刚度系数。将求解区域在时间及空间上离散为交错的网格<sup>[7]</sup>,首先由第  $n$  个时间点的  $\sigma^n$  求第  $(n+1/2)$  时间点的  $v^{n+1/2}$ :

$$v_{xi,k-1/2}^{n+1/2} = v_{xi,k-1/2}^{n-1/2} + \frac{T}{\rho} \cdot \left[ \frac{\tau_{xx,i+1/2,k-1/2}^n + \tau_{xx,i-1/2,k-1/2}^n}{h} + \frac{\tau_{xz,i,k}^n + \tau_{xz,i,k-1}^n}{h} \right]$$

$$v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} = v_{xi+1/2,k}^{n-1/2} + \frac{T}{\rho} \cdot \left[ \frac{\tau_{zx,i+1/2,k+1/2}^n + \tau_{zx,i+1/2,k-1/2}^n}{h} + \frac{\tau_{zz,i+1,k}^n + \tau_{zz,i,k}^n}{h} \right] \quad (2)$$

式中  $T$  为时间步长,  $h$  为空间步长。再由第  $(n+1/2)$  时间点的  $v^{n+1/2}$ , 求由第  $(n+1)$  个时间点的  $\sigma^{n+1}$ :

$$\tau_{xzi+1/2,k-1/2}^{n+1} = \tau_{xzi+1/2,k-1/2}^n + T \left[ c_{11} \frac{v_{xi+1,k-1/2}^{n+1/2} - v_{xi,k-1/2}^{n+1/2}}{h} + c_{13} \frac{v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi+1/2,k-1}^{n+1/2}}{h} \right]$$

$$\tau_{zxi+1/2,k-1/2}^{n+1} = \tau_{zxi+1/2,k-1/2}^n + T \left[ c_{13} \frac{v_{xi+1,k-1/2}^{n+1/2} - v_{xi,k-1/2}^{n+1/2}}{h} + c_{11} \frac{v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi+1/2,k-1}^{n+1/2}}{h} \right]$$

$$\tau_{xzi+1/2,k-1/2}^{n+1} = \tau_{xzi,k}^n + T c_{55} \cdot \left[ \frac{v_{xi,k+1/2}^{n+1/2} - v_{xi,k-1/2}^{n+1/2}}{h} + \frac{v_{xi+1/2,k}^{n+1/2} - v_{xi-1/2,k}^{n+1/2}}{h} \right] \quad (3)$$

反复迭代式(2)和(3)即可求得各个时间层的应力  $\sigma$  和速度  $v$ 。模型的初始条件即为相控阵探头在工件表面的激励。阵元激励信号为三周期正弦波加

汉宁窗信号。相控阵探头通过阵元的延迟来控制声束的偏转和聚焦,模拟相控阵声场的关键是计算延迟时间, L. Azar<sup>[8]</sup> 给出了延迟时间与声束偏转角和焦距的关系式:

$$t_j = \frac{F}{c} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{Nd}{F} \right)^2 - 2 \frac{Nd}{F} \sin \theta \right]^{1/2} - \left[ 1 + \left( \frac{(j-N)d}{F} \right)^2 - 2 \frac{(j-N)d}{F} \sin \theta \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

式中  $F$  为焦距;  $N$  为激发阵元数的一半;  $\theta$  为偏转角;  $j$  为阵元编号。

模型的边界条件为在介质的上下底面施加自由边界条件,即应力为零。若计算区域存在缺陷,在缺陷边界上也施加自由边界条件。为了避免计算区域左右边界反射波的影响,在左右边界施加 Mul 一阶近似吸收边界<sup>[9]</sup>。

为保证差分格式的稳定性,时间步长  $T$  和空间步长  $h$  必须满足<sup>[7]</sup>:

$$\frac{T}{h} \leq \frac{1}{\sqrt{3} c_p} \quad (5)$$

式中  $c_p$  为纵波波速。

## 2 相控阵超声检测模拟计算及试验验证

基于上述有限差分模型,编程计算相控阵超声检测根部切槽的声场传播瞬态图以及回波图,制作根部切槽试块并进行相控阵检测试验,验证计算结果精度。工件材质为普通碳钢,厚度为 30 mm,相控阵仪器为 Olympus 公司生产,探头一次可激发 16 阵元,探头频率为 5 MHz,阵元单位宽度 0.5 mm,间隙 0.1 mm,长度 10 mm。根部切槽高度为 5 mm,宽度为 0.4 mm。计算时间步长为 0.01  $\mu$ s,空间步长为 0.1 mm。

### 2.1 瞬态发射声场及与缺陷相互作用

图 1 为相控阵探头激发的 45° 纵波声场分布图。图 1(a) 为  $t=3.6 \mu$ s 的分布图,可见,相控阵探头通过控制阵元的延迟,得到了偏角为 45° 的纵波偏转声束,同时在约 26° 方向也出现了较小的横波声束,两者基本满足 Snell 定律。当  $t=7.2 \mu$ s 时,纵波基本到达缺陷边界,如图 1(b)。在到达缺陷边界之前,部分旁瓣波在底面处产生反射作用。纵波到达缺陷之后,波束开始分解,如图 1(c) 所示,一部分波束继续沿着原有方向传播,一部分波束在缺陷表面反射,同时通过波型转换产生较强的横波,在缺陷尖端处还观察到衍射波,这类衍射波即为 TOFD 检测所用波型。从图 1(d) 可以看到,当  $t=10.8 \mu$ s 时,

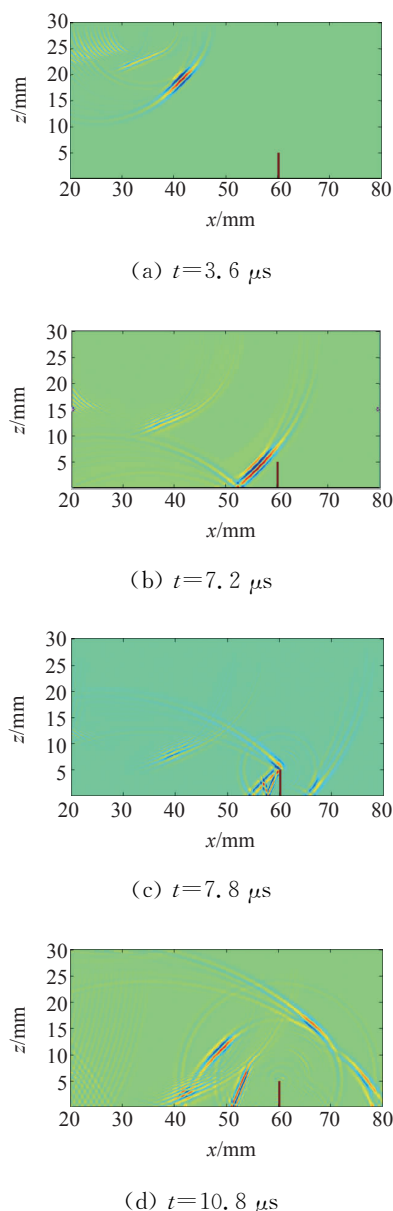
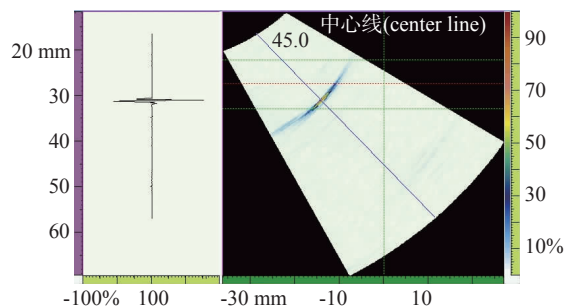


图1 不同时刻发射声场的瞬态分布图

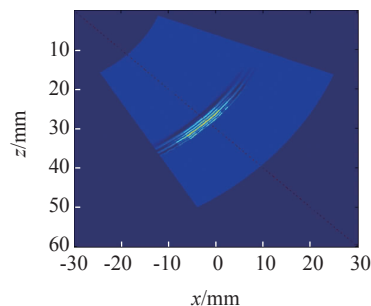
分解之后的各种波型独自在工件中传播,其中反射纵波则沿原路返回并被探头接受,若采用超声探头在其他位置进行信号接收,则可以接收到变型横波和衍射波,因此,该方法可以为各种超声检测方法的工艺设计提供理论指导。

## 2.2 缺陷回波计算及验证

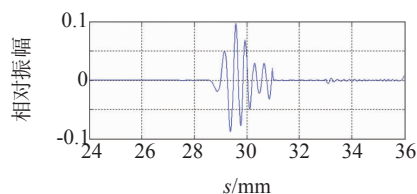
图2为深度5 mm切槽的试验及计算得到的A扫描信号及扇扫图像记录。在试验时,相控阵发射阵元中心距切槽的水平距离为30 mm。从图2(a)试验扇扫图可以看到,45°声束得到的回波最强,此时对应的A扫描信号回波位置在30 mm左右位置,这也与声场瞬态分析结果相符合,即该信号为切槽与底面所形成的端角处的回波信号。图2(b)和2(c)为



(a) 试验结果:A扫和扇扫图



(b) 计算结果:扇扫图



(c) 计算结果:A扫图

图2 5 mm深根部切槽相控阵检测回波

计算得到的扇扫图和A扫描信号,可以看到和试验结果较为吻合,而且射频信号的相位也较为一致。

图3为计算及实测1~9 mm范围不同深度切槽回波相对dB值(与 $\phi 1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 横孔比较)的结果。可以看到,当缺陷高度较小时,回波幅值随着缺陷高度增加而增加。当缺陷高度 $>4 \text{ mm}$ 时,回波幅值趋于饱和,这是因为当缺陷高度较小时,部分发射声束会越过缺陷继续传播,随着高度增加,能够

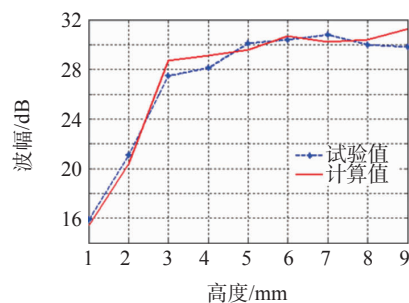


图3 实测波幅与计算波幅比较

越过缺陷的声束越来越小,而当缺陷高度增加到一定程度时,所有声束都将与缺陷发生作用,此时回波幅值将趋于稳定。从图 3 还可以看到,理论计算结果和试验结果基本吻合,差值均在 2 dB 以内。

### 3 回波分析应用

在工程检测中,经常碰到由于变型波等干扰波的存在而导致误判的问题,如中厚板焊缝横波探伤中由于焊缝加强高处的波型转换而产生的伪缺陷波等<sup>[10]</sup>。文章设计并制作如图 4 所示斜切槽试块,以模拟实际检测中经常出现的山形波。试块厚度为 20 mm,材质为碳钢,斜切槽的倾斜角为  $60^\circ$ ,高度为 3 mm。利用相控阵探头在距离切槽中心水平距离为 20 mm 的位置进行检测,得到检测结果如图 5 所示。从图 5(a)扇扫图可以看到,该斜切槽产生了 3 个独立的图像,在  $45^\circ$  声束方向,出现了类似山形波,在这种情况下极有可能造成误判。图 5(b)和 5(c)为利用有限差分模型计算得到的斜切槽扇扫图和  $45^\circ$  声束 A 扫图,可以看到和试验结果基本吻合,说明该模型能够较好地模拟斜切槽相控阵检测的回波。

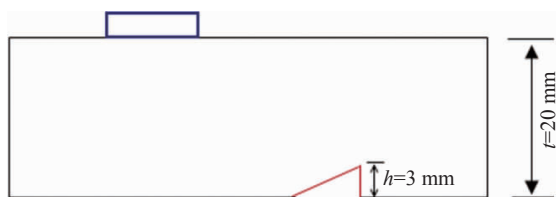
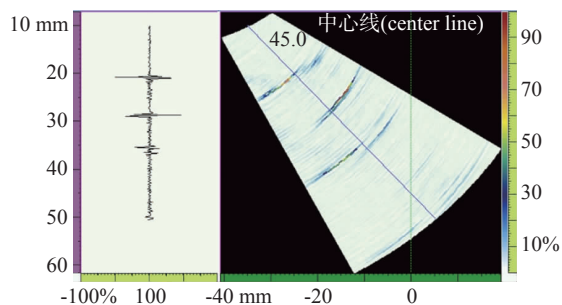


图 4 检测示意图

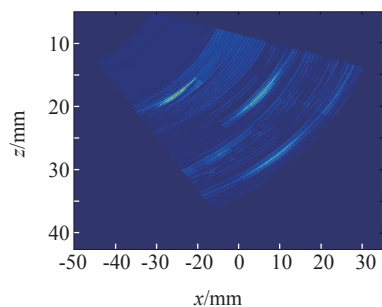
因此,针对这类山形波,可以通过波形传播过程的可视化显示来分析其形成。图 6 为  $45^\circ$  声束在  $7 \mu\text{s}$  时刻得到的介质正应力和剪切应力分布图。可以看到,此时声束与缺陷相互作用已经完毕,反射后除了反射纵波之外,还产生了较强的变型横波。基本可以判断 A 扫图中第一个回波为斜切槽直接反射纵波,主要是由底面和切槽形成的端角处反射,第二个回波为切槽反射后上表面的二次反射得到,而第三个回波为变型横波在上表面反射之后形成,同时还可以观察到沿着切槽表面传播的波以及切槽尖端的衍射波。所以说通过可视化的应力分布,可以较为直观地观察到变型波的产生机理。

### 4 结论

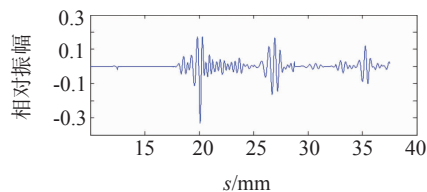
(1) 基于有限差分方法和 Mul 一阶近似吸收边界公式,结合相控阵延迟法则,建立了相控阵超声检测的数值模型。



(a) 试验结果: A 扫和扇扫图

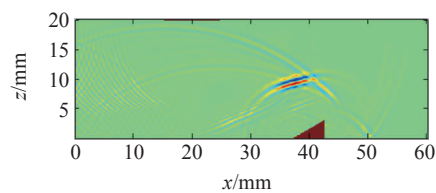


(b) 计算结果: 扇扫图

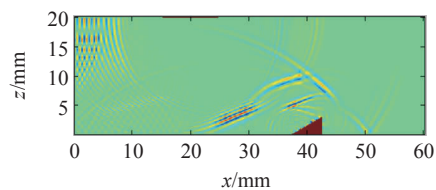


(c) 计算结果: A 扫图

图 5 斜切槽相控阵检测回波



(a) 正应力



(b) 剪切应力

图 6  $t=7 \mu\text{s}$  时的应力分布图

(2) 编程计算了不同时刻相控阵探头发射声场分布图以及不同尺寸缺陷的回波信号,并与试验结果进行比较,计算结果与试验结果比较吻合。

(下转第 9 页)



表 1 CPU 与 GPU 重建时间比较

方法	投影角度×迭代次数	投影数据	重建时间/s
CPU	80×10	128×128	1 140.1
GPU	80×10	128×128	8.75
GPU	120×10	128×128	12.93

#### 4 结论

对 SART 算法采用 CUDA 语言在 GPU 上实现了并行加速,采用了两个关键技术,即基于射线驱动正投影算法与基于体素驱动的反投影算法。在正投影步骤中采用了 GPU 特有的三维纹理结构进行三线插值,大大加速了正投影计算。与传统的 CPU 计算速度比较,在不降低图像重建质量的基础上,速度有了大幅度提高,工程应用前景广阔。

#### 参考文献:

- [1] Cabral B, Cam N, Foran J. Accelerated volume rendering and tomographic reconstruction using texture mapping hardware[C]. Symposium on Volume Visualization, 1994:91—98.
- [2] Chidlow K, Möller T. Rapid emission tomography reconstruction[C]. Proceedings of the 2003 Eurographics/IEEE TVCG Workshop on Volume Graphics, NY, USA, 2003, ACM 15—26.
- [3] Fang Xu, Klaus Mueller. Accelerating popular tomographic reconstruction algorithms on commodity PC graphics hardware[J]. IEEE Transactions, Nuclear Science, 2005(52):654—663.

(上接第 4 页)

(3) 利用斜切槽模拟了实际检测中常出现的山形波,并基于有限差分模型的计算,分析了各个回波的产生机理。结果表明,超声检测数值模拟可以用于变型波的识别。

#### 参考文献:

- [1] Chapman R K, Pearce J E. Recent in-house developments in theoretical modelling of ultrasonic inspection[J]. Insight NDT, 2007, 49(2):93—97.
- [2] Kazys R, Mazeika L. 3D Analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates[J]. Ultrasonics, 2006, 44(1):1127—1130.
- [3] Satyanarayan L, Sridhar C. Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves[J]. Pressure Vessels

- [4] Scherl H, Keck B, Kowarschik M, et al. Fast GPU-based CT reconstruction using the Common Unified Device Architecture (CUDA)[C]. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2007:4464—4466.
- [5] Lu Y, Wang W, Chen S, et al. Accelerating algebraic reconstruction using CUDA-Enabled GPU[C]. 2009 Sixth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009:480—485.
- [6] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic reconstruction techniques(ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography[J]. Theoretical Biology, 1970(29):471—481.
- [7] Andersen A H, Kak A C. Simultaneous algebraic reconstruction technique(SART): a superior implementation of the ART algorithm[J]. Ultrasonic Imaging, 1984(6):81—94.
- [8] Siddon R L. Fast calculation of the exact radiological path for a three-dimensional CT array[J]. Medical Physics, 1985, 12(2):252—255.
- [9] Li N, Zhao HX, Cho SH, et al. A fast algorithm for voxel-based deterministic simulation of X-ray imaging[J]. Computer Physics Communications, 2008, 178(7):518—523.
- [10] 史怀林, 孙丰荣, 姜威, 等. CT 图像 SART 重建技术的 CUDA 并行实现[J]. 计算机应用, 2011, 31(5):1245—1248.
- [11] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992:77—78.

- and Piping, 2007, 84(12):716—729.
- [4] Calmon P. Recent Development in NDT Simulation[C]. Paris: WCU2003, 2003:443—446.
- [5] Wirdelius H. The Application of Mathematical Modeling of Ultrasonic NDT in the Qualification Process[C]. Brondby 7th ECNDT, 1998, 3(11):1—4.
- [6] Bostrom A, Bovik P. Ultrasonic scattering by a side-drilled hole[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 140(13):3493—3505.
- [7] 孙卫涛. 弹性波动方程的有限差分数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [8] Azar L, Shi Y, Wooh S C. Beam focusing behavior of linear phased arrays[J]. NDT & E International, 2000, 33(3):189—198.
- [9] 李太宝. 计算声学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [10] 吴有为. 中厚板焊缝超声波探伤中的波型转换辨析[J]. 无损检测, 2009, 31(8):622—624.