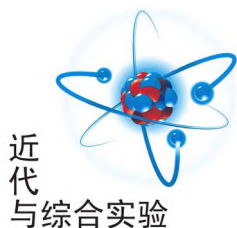


文章编号:1005-4642(2020)03-0012-06



近代  
与综合实验

## 声波层析成像的正演模拟

吴彦达<sup>1</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 王彬瑞<sup>1</sup>, 周杰<sup>2</sup>, 陈文娟<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580;

2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**利用 COMSOL 软件对单脉冲超声波在大理石介质中的传播规律进行了正演模拟, 得到不同大理石缺陷下的面声压场分布以及各端线处声压随时间变化规律. 首先对不同孔隙下大理石进行建模, 并且对模型添加瞬态压力声学、固体力学和静电物理场, 最后添加瞬态求解器采用向后差分公式法进行求解, 可以得到大理石板对侧的声压场分布规律.

**关键词:**声压场; 正演模拟; 向后差分; 单脉冲超声波; COMSOL

中图分类号: O426

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.03.002

层析成像技术, 是指利用从物体外部检测到的数据, 通过特殊的数字处理技术, 重建物体内部信息的技术, 也称作计算机辅助断层成像技术. 当能量波为声波时, 称为声波层析成像. 声波层析成像技术是地质勘探技术、数字计算机技术和数字图像识别技术相结合的产物, 是广泛用于医学、工业检测、地质勘探等多个领域的无损检测方法<sup>[1-3]</sup>. 目前关于声波层析成像的研究多集中在反演算法领域, 例如 ART 算法和 SIRT 算法<sup>[5-6]</sup>等. 随着计算机技术的高速发展, 出现了遗传算法、模拟退火算法等<sup>[7-11]</sup>非线性算法来求解反演问题. 本文利用 COMSOL 软件对单脉冲超声波在大理石中的传播进行仿真模拟, 并对不同大理石缺陷对应的声压分布规律进行研究, 同时分析了大理石内部的裂缝对声压场传播的影响.

### 1 仿真建模准备

#### 1.1 模型搭建及材料属性设定

在 COMSOL Multiphysics 中, 对实验中待测量的大理石模型及超声发射换能器进行建模. 通过改变大理石模型的几何参量及其内部缺陷等可以研究不同大理石构造对声压场的分布的影响. 外尺寸为 60 cm × 40 cm 的大理石内部缺陷及发

射换能器尺寸的几何模型图如图 1 所示, 各参量如表 1 所示.

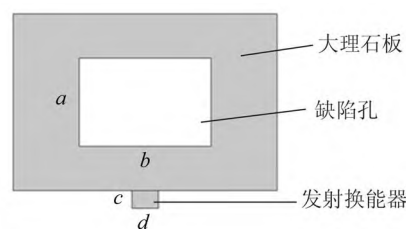


图 1 缺陷及发射换能器的几何模型

表 1 缺陷及发射换能器的参量 cm

a	b	c	d
20	30	4	6
15	10	4	6
20	20	4	8
20	20	4	4

设定大理石内部的声速、密度及发射换能器的密度、弹性矩阵、耦合矩阵和相对电容率. 针对不同性质的大理石部件, 可以通过改变其密度、声速等研究声压场分布.

#### 1.2 物理场设定及求解

对建立的大理石模型施加瞬态压力声场,

收稿日期: 2019-06-11; 修改日期: 2019-09-30

作者简介: 吴彦达(1999—), 男, 山东临沂人, 中国石油大学(华东)理学院 2017 级本科生.

通讯作者: 陈文娟(1969—), 女, 山东潍坊人, 中国石油大学(华东)理学院高级实验师, 硕士, 主要从事仪器管理与制作研究工作.



并将其边界设置为硬声场边界条件;对发射端超声换能器施加固体力学和静电场,在发射端超声换能器与大理石板的交界面处施加声-结构多物理场. 超声换能器接入脉冲电压信号为

$$U = 2 \exp \left[ \frac{t - 1.5 T_0}{0.5 T_0} \right]^2 \cdot \sin (2\pi f_0 t), \quad (1)$$

式中,  $T_0$  为声波的周期,  $f_0$  为信号的频率. 该脉冲函数的图像如图 2 所示.

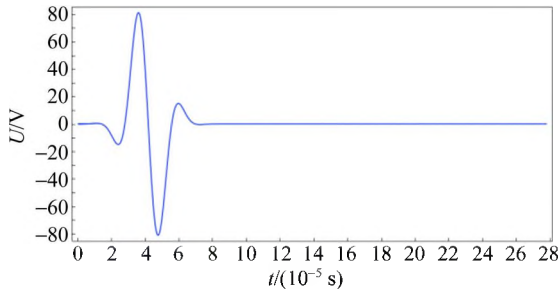


图 2 脉冲函数图像

对超声换能器施加脉冲电压信号后,产生脉冲超声波形,进而可以研究该脉冲声波在大理石内部传播时的声压场分布.

对建立的模型进行网格剖分,在超声换能器以及大理石表面建立自由三角形网格. 为了保证求解时的精度,在超声换能器处将最大单元格大小设定为波长的 1/12. 网格剖分如图 3 所示.

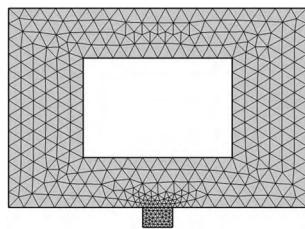


图 3 模型网格剖分示意图

采用瞬态求解器求解该声压场的分布. 为使求解结果具有较高的精度,时间步进方法设定为向后差分公式法,且将求解器的步长设定为自由.

## 2 仿真结果分析

### 2.1 大理石内部声压场分布规律

设定超声换能器的发射频率为 36 kHz, 声波在大理石内部传播的周期为  $T_0$ . 求解时,在每个周期内等距选取 50 个解,分析解在 13 个周期内的分布. 在 4 个等距选择的时间点下声压场的分布如图 4 所示,图中红蓝颜色分布代表当前时刻

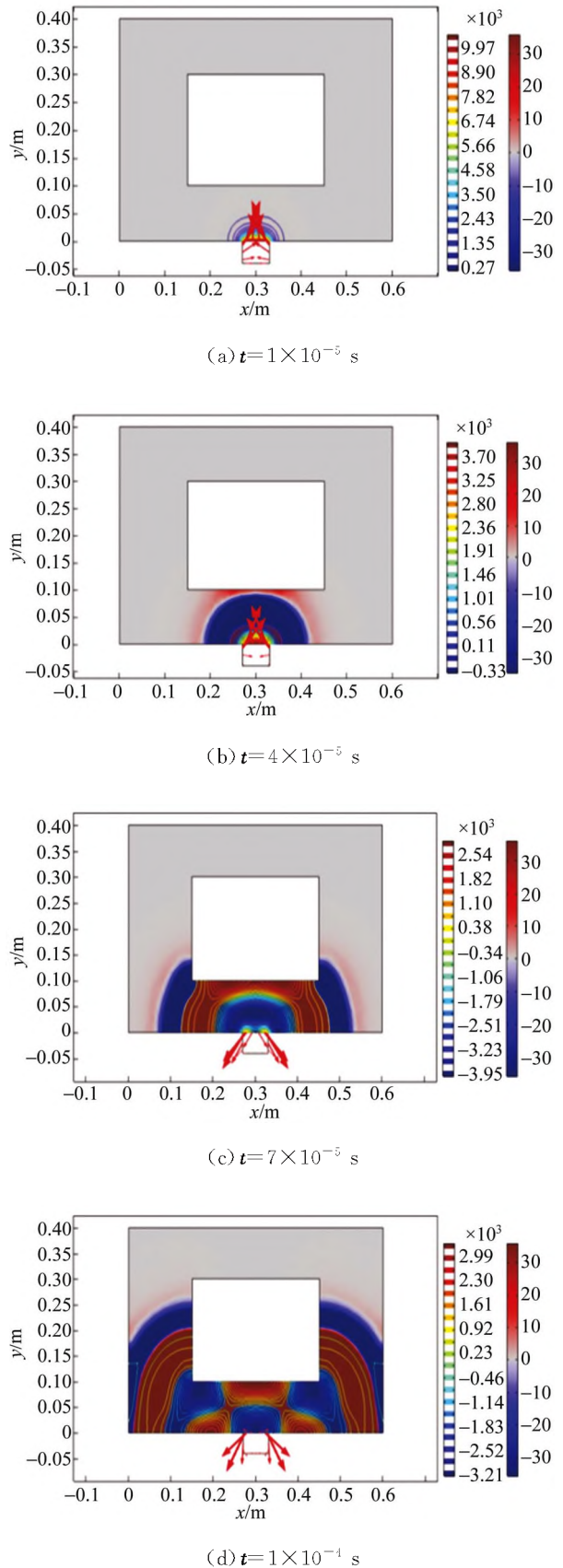
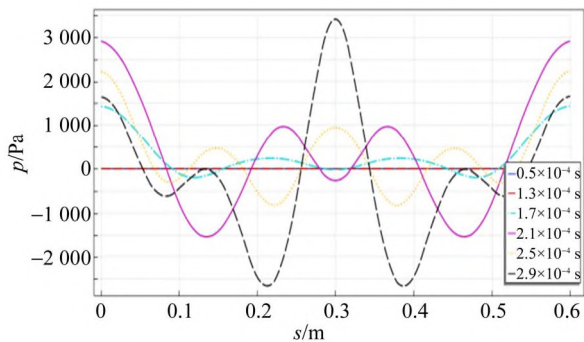


图 4 4 个等距时间点下大理石内部的声压场分布图

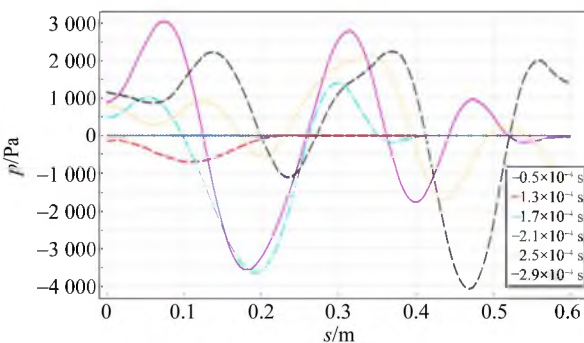
下大理石内部的声压场分布,其中红色代表声压为正,蓝色代表声压为负,灰色代表声压为零.

设定超声换能器的底端为辊支撑结构,使其底端固定不动,则超声换能器的其他三边的位移情况如图 4 中换能器周围箭头分布所示.由脉冲函数图像可知,在  $t=7 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,  $t=1 \times 10^{-1} \text{ s}$  时,施加在超声换能器上的激励电压为零,但在超声换能器的四周依然有位移分布,可见,超声换能器产生超声波具有滞后效应,在实际测量时应考虑这种影响.

在实际声波层析成像时,一般在发射换能器的对面设置接收换能器接收不同位置处的声信号,进而可以获得对应的声波在大理石内部的走时分布状况.其中,在接收面处放置接收换能器的数量以及各换能器之间的位置分布应如何确定,需要通过仿真进行优化设计.当发射换能器放置在大理石板中间位置及两端时,不同时间节点下接收端面上的声压分布如图 5 所示.



(a) 发射换能器位置在大理石板中间



(b) 发射换能器位置在大理石板两端

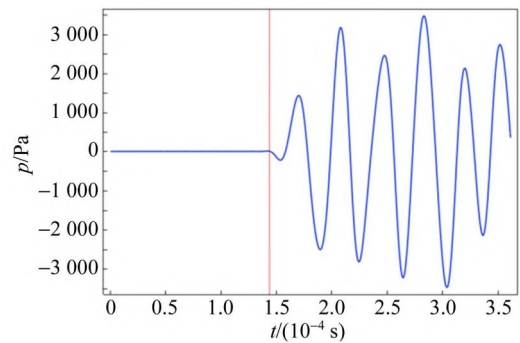
图 5 不同时间节点下接收端面上声压场分布图

由 5(a) 图可知,当发射换能器被放在大理石板中间时,在接收端面上的声压为沿中轴线对称分布,且在某些时间节点下,接收端面处各点的声

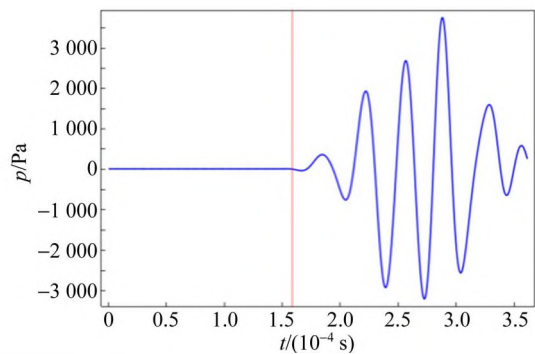
压分布梯度较大,在实际设置接收换能器时,应考虑用较小的接收换能器探头,且紧密排布.由图 5(b) 可知,当把发射端超声换能器放置在大理石板一端时,在  $1.7 \times 10^{-1} \text{ s}$  之前,超声波几乎没有传到大大理石的右半部分,相对于左端面,声波会延迟约  $1 \times 10^{-1} \text{ s}$ ,而且此种状况下接收端面处的声压分布极不规律.

### 2.2 声波层析走时传播规律

在实际声波层析成像时,需要研究各处接收到的声波在大理石内部的走时情况.由于施加给发射端超声换能器的电压激励为脉冲波,且第 1 个波为下降波,所以在分析接收端面上各个点的声压随时间变化规律时,其第 1 个起落点时刻即为声波第 1 次到达的时刻.图 6 为接收端面端点处和中间点处声压随时间变化情况.



(a) 接收面端点处



(b) 接收面中点处

图 6 接收面上端点和中点处声压变化

由图 6 可知,发射脉冲波仅为单脉冲波,但各接收点处收到多个脉冲波,可见,当大理石内部有缺陷孔存在时,发射的脉冲波在缺陷端处会经过多次反射,最终会有多个叠加波会聚到接收处.图 6 中红色竖线标记的位置即为第 1 个超声波到达接收点处时对应的时刻,将该时刻减去脉冲激

励的起落点时刻即为在当前接收点处声波在大理石中的传播时间.

图 7 分析了超声换能器分别在大理石板中间和一端时,接收面上各点接收到的声波在大理石中的传播时间. 由图 7 可知,当超声换能器放置在大理石发射面中间时,接收端面上声波的传播时间大致呈轴对称分布,其中,接收端面的中点与发射超声换能器之间的直线距离最短,但声波的传播时间最长,可知当缺陷孔分布在大理石板中间时,超声波绕过缺陷孔后再传播到接收端面中点处. 当超声换能器放置在大理石板一端时,接收端面上各点接收到的声波传播时间依次逐渐增加,但由于有中间缺陷存在,传播时间随距离的增加并不为线性增加.

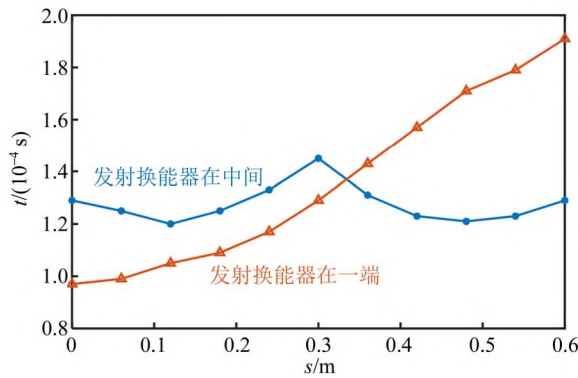
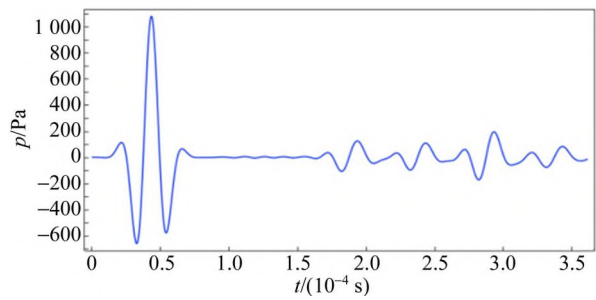


图 7 接收端面上各点接收到声波的传播时间

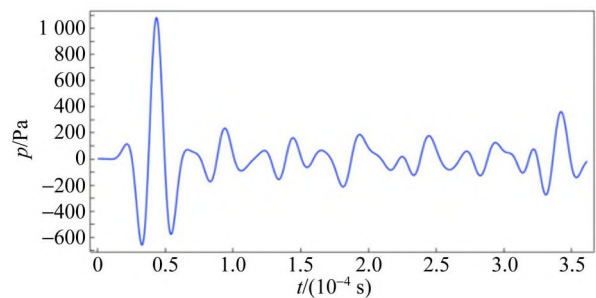
### 2.3 大理石内部结构对换能器声压分布的影响

仿真中的超声换能器具有可逆压电效应,因此,对发射端超声换能器探测到的声压分布规律进行分析也可以得到大理石内部的缺陷孔分布状况. 分别对上文缺陷孔结构和同等外形尺寸下无缺陷孔的大理石进行建模仿真,得到发射端超声换能器处声压随时间分布如图 8 所示.

由图 8 可知,2 种不同介质下,超声换能器在初始时刻均有单脉冲声压激励,该激励由单脉冲声压产生,后续较为杂乱的小峰为声压场遇到大理石边界或缺陷孔后反射回的声压分布. 当大理石介质均匀时,声压传到大理石板对面边界处才反射超声波,因此超声换能器处探测到的返回声压较滞后;而当大理石内部有缺陷孔时,超声波遇到缺陷孔边界即反射,故在超声换能器上可以提前探测到反射声压,实际进行超声探测时可据此大致判断大理石内部是否存在缺陷孔.



(a)均匀介质大理石



(b)有缺陷孔大理石

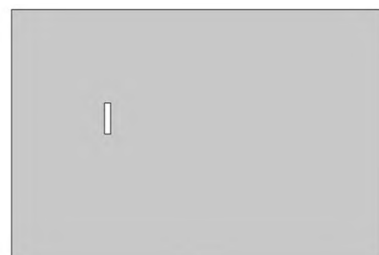
图 8 发射端超声换能器处声压随时间分布

### 3 大理石内微小裂缝对声压场分布的影响

大理石内部的裂缝往往会对材料的使用寿命造成极大影响,利用软件仿真,可以得知大理石内部的裂缝对声压场分布的影响. 分别对 1 块介质分布均匀的大理石板和相同尺寸下带有微小裂缝的大理石板进行建模,如图 9 所示.



(a)正常大理石板



(b)有裂缝的大理石板

图 9 正常及有裂缝大理石的建模图

为方便分析,依然在大理石板底面中间位置添加超声换能器,并给予单脉冲激励.

实际问题中的大理石裂缝位置处一般为空气,在裂缝处的声波的传播速度约为 340 m/s,而声波在大理石中的传播速度约为 4 000 m/s,依据最小作用量原理<sup>[12]</sup>,为了简化模型计算,将裂缝位置处设置为硬声场壁边界,最终求得声压场接近裂缝位置时对应的声压分布如图 10 所示.

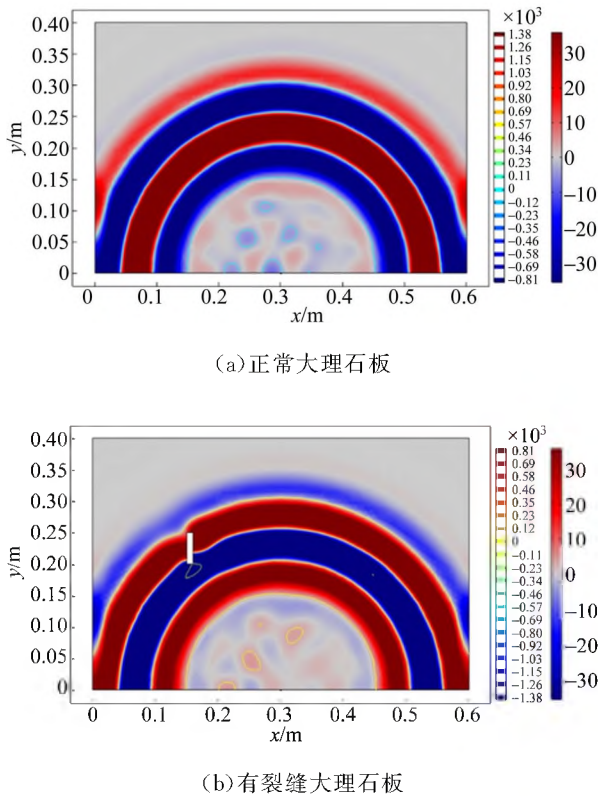


图 10 正常及有裂缝大理石板的声压场分布

由图 10 可知,对于介质均匀分布的大理石板,单脉冲超声波以超声脉冲源为中心,呈圆弧状向四周扩散.当圆弧状声压场经过裂缝时,裂缝会对声压场的传播有轻微阻碍,使圆弧状的声压场分布产生波动.受裂缝干扰后的声压场在传播到大理石对侧时其原本沿轴线对称分布的声压场会受到干扰.实际工程应用时探测出大理石对侧的声压场分布随时间变化情况,并根据其沿轴线的对称性分布判断是否存在缺陷孔.

不同时刻对应的大理石板对侧声压场的分布如图 11 所示.由大理石板对侧不同时刻声压场分布规律可知,当大理石板为均匀材质时,声压场沿轴线对称分布;当大理石板内部存在裂缝时,裂缝对声压场的扰动使得声压场在大理石板对侧分

布沿轴线不对称,而且由于裂缝反射的影响,不同时刻其声压场高峰位置大致交错呈现.在实际工程探测时,可以据此得知大理石板内部是否存在裂缝.

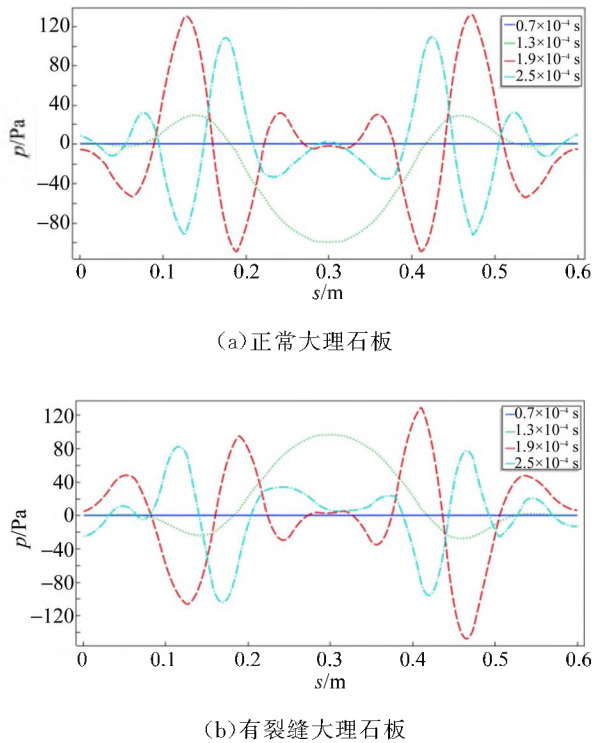


图 11 正常及有裂缝大理石板对侧声压场分布

### 4 结 论

利用 COMSOL 软件对单脉冲超声波在不同缺陷及裂缝大理石中的传播进行了仿真研究,并得到对应的声压场分布及声波走时变化规律.当大理石内部存在缺陷孔时,缺陷孔会阻碍声压场的传播,造成超声走时的滞后及超声换能器处反射声压的超前;大理石内部的裂缝也会对圆弧状声压场造成轻微阻碍,使其在大理石板对侧的声压场呈现不对称分布,且高峰声压随时间交错排列.利用仿真得到的声压场在大理石板对侧的分布规律,可以帮助实际超声探测时判断大理石内部的缺陷种类及位置.

### 参考文献:

[1] Wilson D K, Ziemann A A, Ostashev V E, et al. An overview of acoustic travel-time tomography in the atmosphere and its potential applications [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2001,87(6): 721-730.

- [2] Spindel R C, Na J, Dahl P H, et al. Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: A pilot experiment [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2003, 28(2):297-302.
- [3] 石林珂,孙懿斐. 声波层析成像技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(1):122-125.
- [4] Wang L V. Ultrasound-mediated biophotonic imaging: a review of acousto-optical tomography and photo-acoustic tomography [J]. *Disease Markers*, 2003/2004, 19(2/3):123-138.
- [5] 李昌彪,宋建平,夏克文. 井眼径向声波层析成像算法研究[J]. *天然气工业*, 2004(1):36-39,104-105.
- [6] Jansen D P, Hutchins D A, Ungar P J, et al. Acoustic tomography in solids using a bent ray SIRT algorithm [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1991, 6(3):131-148.
- [7] 戚秀真. 混凝土超声无损检测层析成像技术研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- [8] 黄靓,黄政宇,汪优. 结构混凝土超声波层析成像的反演算法研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(5):26-30.
- [9] 曹辉,陈国金,郭建,等. 频率域 2.5-D 井间波形层析成像及其实际应用[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3):915-923.
- [10] Gebauer B, Scherzer O. Impedance-acoustic tomography [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 2008, 69(2):565-576.
- [11] Razansky D, Distel M, Vinegoni C, et al. Multi-spectral opto-acoustic tomography of deep-seated fluorescent proteins in vivo [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(7):412-417.
- [12] Laude V, Wilm M, Ballandras S. Least action principle for the estimation of the slowness and the attenuation of pseudo surface acoustic waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(12):10084-10088.

## Forward modeling of sonic tomography

WU Yan-da<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, WANG Bin-rui<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, CHEN Wen-juan<sup>1</sup>

(1. College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. School of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The propagation of single-pulse ultrasonic waves in different marble media distributions was simulated using COMSOL software. The distribution of surface acoustic pressure field under different marble defects and the variation of acoustic pressure at each end line with time were obtained. The marble with different pores was firstly modeled, and the transient pressure acoustic field and coupled solid mechanics and electrostatic field were added to the model. Finally, the transient solver was applied to solve the problem by using the backward difference formula method. The distribution of acoustic pressure field on the side was obtained.

**Key words:** acoustic pressure field; forward modeling; backward difference; single pulse ultrasound; COMSOL

[责任编辑:任德香]