

# 碳酸盐岩孔洞模型中超声波传播特性

周游<sup>1,2,3</sup>, 陈乔<sup>1,3</sup>, 程亮<sup>4</sup>, 曹海岸<sup>5</sup>, 谢治国<sup>2</sup>, 刘竟成<sup>6</sup>

1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714
2. 重庆矿产资源开发有限公司, 重庆 401120
3. 甘肃省油气资源研究重点实验室, 兰州 7300000
4. 中国石油川庆钻探工程公司地质勘探开发研究院, 成都 610500
5. 中国石油西南油气田分公司蜀南气矿, 泸州 646000
6. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331

**摘要** 以孔洞型碳酸盐岩的小岩柱为对象, 采用二维超声波数值模拟与物理模型实验相结合的方法, 从运动学及动力学角度, 研究了多频率下超声波在不同尺寸、形状及分布的孔洞模型中的传播特性。结果表明, 不连续分布的单孔洞, 其尺寸变化对声波速度几乎无影响但与衰减系数呈正相关, 在相同尺寸下随测试频率的增加声波速度有增加的趋势, 衰减系数与频率间呈幂函数递增关系; 圆形孔洞、方形孔洞对声波速度影响与孔隙度有关, 孔隙度9%为临界值, 低于9%时影响不敏感(可忽略), 高于9%时圆形孔洞对衰减系数的影响大于正方形孔洞的影响; 椭圆形孔洞的影响与其纵横比有关, 纵横比大于1时, 随纵横比增加衰减系数的变化幅度较小, 反之则衰减系数的变化幅度较大; 随孔洞分布集中度的增加, 声波速度呈线性规律减小, 衰减系数呈线性规律增加。

**关键词** 碳酸盐岩孔洞模型; 超声波; 声波速度; 衰减系数

声波是研究、表征岩石孔隙度及机械力学性质的重要资料。但近年来, 超声波在缝洞型地层中传播时, 表现出了与在传统孔隙介质中传播有较大区别的现象, 这对于该类地层利用超声波资料来获取地层参数带来不确定性, 甚至导致完全错误的认识。孔洞介质中超声波传播规律及影响因素的正演研究是该类地层声波资料解释与应用的基础。因此, 近年来随着油气工业的勘探对象越来越多地面向深海相碳酸盐岩地层, 国内外针对该领域的研究也随之增多。

Baechle、Eberli、Weger等<sup>[1-5]</sup>系统地研究了碳酸盐岩中不同类型的多尺度孔洞、流体对声波传播速度的影响。贺振华等<sup>[6-7]</sup>根据物理模型相似性原则制作了单孔洞缝物理模型和不同孔洞密度的物理模型, 研究认为孔洞密度变化对地震波动力学特征参数(振幅、衰减等)的影响远远大于对运动学特征(速度等)的影响。姚姚等<sup>[8-9]</sup>发展了常规随机介质模型, 提出叠加型多尺度随机介质模型和区域多尺度随机介质模型模拟构造随机溶洞介质模型的新方法。魏建新等<sup>[10-13]</sup>应用地

震正演计算和物理模型(包含孔洞大小、形状、洞内填充物变化3种物理模型)模拟研究碳酸盐岩孔洞型储层声学响应, 从定性角度分析了孔洞对绕射双曲线的影响。陈乔、梁利喜等<sup>[14-15]</sup>从波动理论出发, 利用有限差分法, 研究裂缝模型和孔洞结构对超声波衰减特性的影响, 获得了缝洞型碳酸盐岩地层超声波传播的基础认识。王森<sup>[16]</sup>利用相同方法开展孔洞型储层孔隙度预测研究, 探讨了Wyllie平均时间公式的适用范围。

归纳起来, 现有的研究主要集中在地震勘探领域, 测井领域相对较少, 在数值模拟计算和岩心测试中很少考虑多频率的影响。同时, 在复杂孔洞型地层中非均质性所带来的不同源数据间的相似性问题一直未得到合理解决。为了对声波测井资料的解释及应用提供理论依据, 本文以孔隙结构为孔洞型地层岩心的小岩柱为对象, 以二维超声波数值模拟和物理模型实验为手段, 从孔洞的尺寸、形状、分布三个方面入手, 研究孔洞模型中超声波传播规律。

收稿日期: 2016-11-13; 修回日期: 2017-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502287); 甘肃省油气资源研究重点实验室开放基金项目(SZDKFJJ20160605); 重庆市基础与前沿研究计划重点项目(cstc2015jcyjBX0120); 重庆市国土资源和房屋管理局科技计划项目(CQGT-KJ-2015044)

作者简介: 周游, 工程师, 研究方向为矿产勘探开发, 电子信箱: 1170533262@qq.com; 陈乔(通信作者), 副研究员, 研究方向为岩石物理, 电子信箱: chen-qiao@cigit.ac.cn

引用格式: 周游, 陈乔, 程亮, 等. 碳酸盐岩孔洞模型中超声波传播特性[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 64-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.008

## 1 数值模拟理论基础

### 1.1 波动理论

用  $U$  表示某一时刻  $t$  二维空间上任一点  $(x,y)$  处的位移,  $m$ , 二维声波方程为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{1}{V^2(x,y)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中,  $V(x,y)$  为纵波的传播速度,  $m/s$ 。该方程的差分表达式为

$$\begin{aligned} & [U(x+\Delta x,y,t) - 2U(x,y,t) + U(x-\Delta x,y,t)]/(\Delta x)^2 + \\ & [U(x,y+\Delta y,t) - 2U(x,y,t) + U(x,y-\Delta y,t)]/(\Delta y)^2 = \\ & [1/V^2(x,y)][U(x,y,t+\Delta t) - 2U(x,y,t) + U(x,y,t-\Delta t)]/(\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

在计算区域  $0 \leq x \leq a$ 、 $0 \leq y \leq b$  内, 取  $\Delta x = a/M$ 、 $\Delta y = b/N$ 。其中,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为差分网格的水平距离和垂直距离,  $m$ ;  $\Delta t$  为差分网格的时间,  $s$ ;  $M$ 、 $N$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的网格数的最大值。

令

$$\begin{aligned} \alpha_{i,j} &= V(i\Delta x, j\Delta y) \cdot \Delta t / \Delta x \\ \beta_{i,j} &= V(i\Delta x, j\Delta y) \cdot \Delta t / \Delta y \end{aligned} \quad (3)$$

这样二维声波波动方程的显式差分近似的离散化形式可表达为

$$\begin{aligned} U_{ij}^{k+1} &= 2(1 - \alpha^2 - \beta^2)U_{ij}^k + \alpha^2(U_{i+1,j}^k + U_{i-1,j}^k) + \\ & \beta^2(U_{i,j+1}^k + U_{i,j-1}^k) - U_{ij}^{k-1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,

$$U_{ij}^k = U(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta t) (i=1,2,\dots,M; j=1,2,\dots,N; k=0,1,2,\dots,L)$$

### 1.2 波动方程有限差分求解

初始条件为

$$U_{ij}^1 = (1 - \alpha^2 - \beta^2)U_{ij}^0 + \frac{\alpha^2}{2}(U_{i+1,j}^0 + U_{i-1,j}^0) + \frac{\beta^2}{2}(U_{i,j+1}^0 + U_{i,j-1}^0) \quad (5)$$

左右边界按照常规反射边界处理, 而上、下边界 ( $y=0, y=b$ ) 则采用吸收边界条件<sup>[17]</sup>:

上边界为

$$U_{i,0}^{k+1} = U_{i,0}^k + U_{i,1}^k - U_{i,1}^{k-1} + \beta(U_{i,1}^k - U_{i,0}^{k-1} - U_{i,2}^k + U_{i,1}^{k-1}) \quad (6)$$

下边界为

$$U_{i,N-1}^{k+1} = U_{i,N-1}^k + U_{i,N-2}^k - U_{i,N-2}^{k-1} + \beta(U_{i,N-2}^k - U_{i,N-1}^{k-1} - U_{i,N-3}^k + U_{i,N-2}^{k-1}) \quad (7)$$

收敛性条件为

$$\frac{V\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

实验室超声波测试是采用透射法进行测量, 但由于岩心的非均质性及岩心内孔洞分布的不确定性, 给研究孔洞对声波传播特性的影响带来了极大困难。数值模拟则以被测试样为模型, 以实验室纵波探头的激发信号为振源, 基于波动理论和有限差分方法用 Matlab 编程来实现超声波透射实验的模拟。

## 2 模型建立及测试方法

### 2.1 数值模拟实验方法

本文主要目的在于模拟室内小岩柱超声波透射物理实

验。如图 1 所示, 设计的圆柱体岩心模型尺寸为  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 实体岩心速度为  $6200 \text{ m/s}$ , 孔洞中流体速度为  $340 \text{ m/s}$ 。提取实验室超声波探头激发信号作为数值模拟的输入波形, 保持声波传播方向不变, 如图 2 所示。将岩心纵向剖面区域划分成  $500 \times 250$  的网格, 空间网格精度为  $0.1 \text{ mm}$ , 时间网格精度为  $10 \text{ ns}$ 。

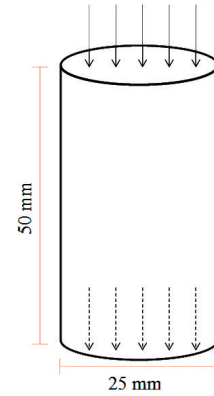


图 1 透射实验示意

Fig. 1 Schematic diagram of transmission experiment

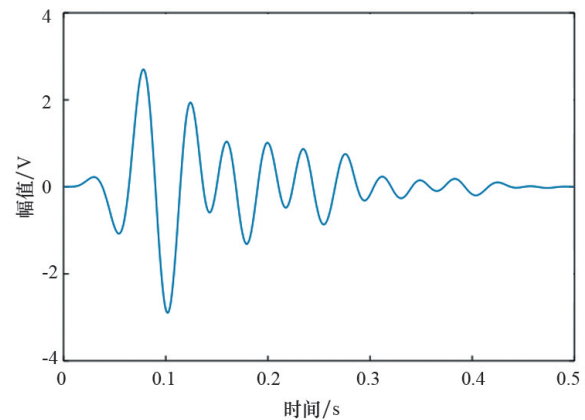


图 2 数值模拟的输入波形

Fig. 2 Input waveform for numerical simulation

通过调整岩心的孔洞模型参数来实现孔隙结构的变化, 对声波进行数值模拟, 具体步骤如下:

- 1) 载入孔洞模型参数, 通过数值计算获得波场快照图;
- 2) 从波场模拟结果中提取出接收端的输出波形;
- 3) 处理输出波形中的首波速度及幅值, 并按照信号对比法公式计算出衰减系数。

### 2.2 物理模拟实验方法

采用在基础岩心上钻孔的方式模拟不同含孔洞结构的岩心。实验用基础岩心采用多频超声波扫描的方式并综合其孔、渗、密度测量数据进行选择。声波测量采用透射法, 声波测试如图 3 所示。选用凡士林作为声波探头和岩心端面的声耦合剂, 声波测试条件为常温常压, 测量时在岩心两端面施加  $0.2 \text{ MPa}$  的接触压力, 以保证探头与岩心端面充分接触, 减小其接触面中的空气间隙增大接收能量。

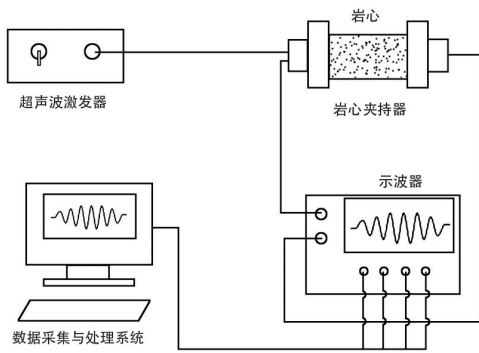


图3 岩石声波测试示意

Fig. 3 Schematic diagram of rock acoustic wave test

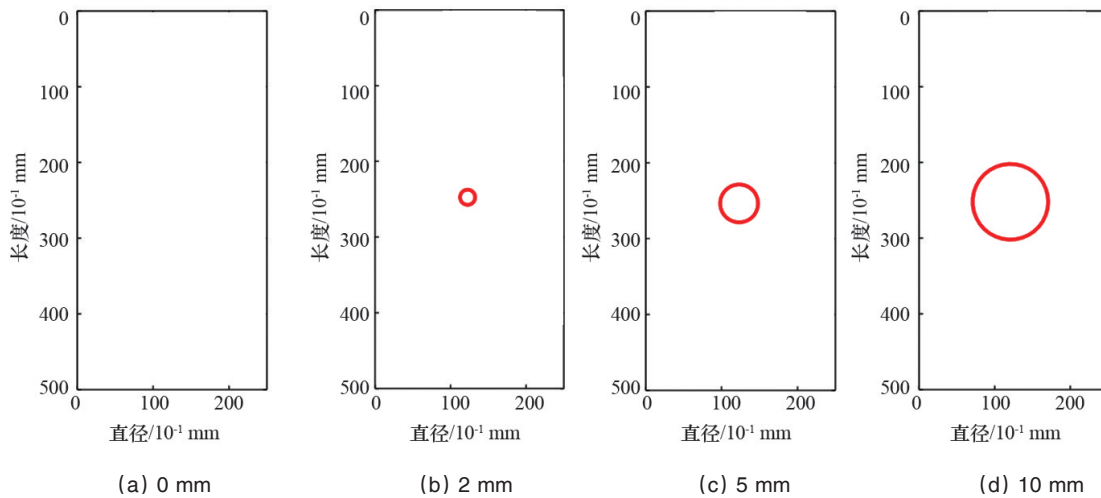


图4 数值实验单孔洞模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of numerical investigation for single hole model

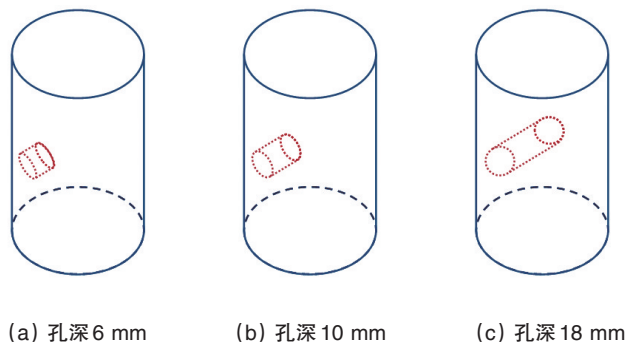


图5 物理实验单孔洞模型示意

Fig. 5 Schematic diagram of physical experiment for single hole model

当岩心处于完全均质状态时声波速度很稳定,当存在孔洞岩心处于非均质状态时声波速度发生了变化。但随单孔尺寸的改变,声波速度变化规律不明显,声波速度对单孔洞尺寸的影响不敏感。说明孔洞的存在会引起声波速度的下降,不过孔洞尺寸对首波速度几乎没有影响,因为首波速度

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 孔洞尺寸对超声波属性的影响

本研究主要考虑多孔介质中单孔洞尺寸对超声波传播规律的影响,并考虑了频率的影响。数值实验用频率为50、100、200、250、300、400、500、600 kHz和1.25、2.5 MHz共10个频率,4组模型A1、A2、A3、A4的单孔洞直径分别为0、2、5、10 mm,模型如图4所示。同时做了相应的物理实验,设计了3个不同尺寸的模型A5、A6、A7,如图5所示,其孔径均为6 mm,孔深分别为6、10、18 mm。

##### 3.1.1 孔洞尺寸对声波速度特性的影响

数值实验得到的声波速度变化规律如图6所示。

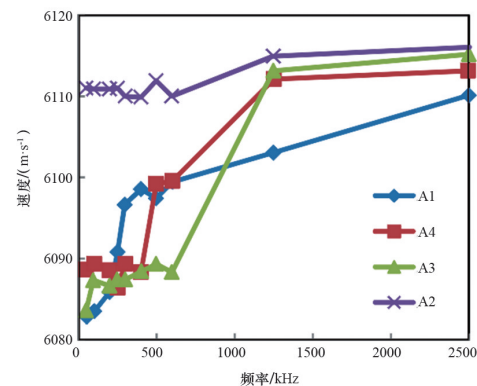


图6 数值实验声波速度变化规律

Fig. 6 Variation of wave velocity in numerical investigation

仅与传播速度最快的那条路径密切相关,虽然中间路径被孔洞截断,但是对两边的传播路径影响较小。

从图6可知,模型A2在1.25 MHz时发生了较为明显的频散,模型A3在500 kHz时发生了较为明显的频散,模型A4在200 kHz时发生了频散。在频散前声波速度相对稳定,变化

率在0.05%~0.2%,但随着实验频率的增加,在开始频散后速度的变化率增加至0.4%~0.6%,出现了较为明显的频散现象。

不同频率所对应的1/3波长如表1所示。结合表1进一步分析可知,当相应频率的1/3波长小于孔洞直径时开始出现频散,这为实验室超声波物理实验的探头选型提供了一定的理论依据。而在实际岩样中,孔洞直径一般为5~10 mm,

图7所示的物理实验结果也印证了数值实验结果,对于实验室的实际情况而言,250~500 kHz是开始发生频散现象的频段。在研究样品中,当孔洞尺寸在上述范围内时,物理实验可选择其中一种测试效果最好的频率进行研究,这样可大大减少物理实验工作量。

表1 不同频率所对应的1/3波长

Table 1 1/3 wave length for different frequencies

频率	50 kHz	100 kHz	200 kHz	250 kHz	300 kHz	400 kHz	500 kHz	600 kHz	1250 kHz	2500 kHz
1/3波长	41.3 mm	20.7 mm	10.3 mm	8.3 mm	6.9 mm	5.2 mm	4.1 mm	3.4 mm	1.7 mm	0.8 mm

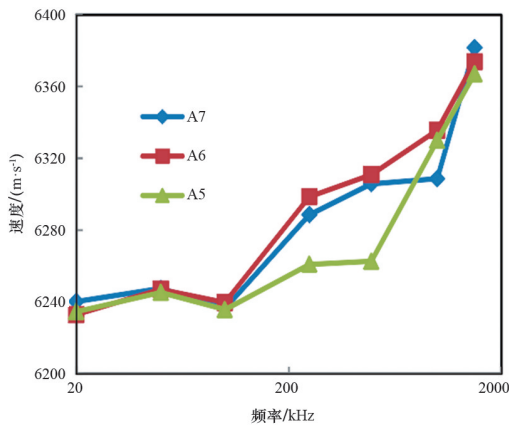


图7 物理实验声波速度变化规律

Fig. 7 Variation of wave velocity in physical experiment

### 3.1.2 孔洞尺寸对超声波衰减特性的影响

声波衰减系数是用来度量声波在介质中振动能量衰减大小的物理量。本文选择信号对比法进行衰减系数的处理分析,声波衰减主要由于材料的粘滞作用、摩擦损耗、波阵面的扩展、结构面的反射、折射作用引起,因此衰减性质能在一定程度上反映岩石的力学性质及岩体结构。

孔洞尺寸及实验频率对衰减系数的影响如图8所示。从图8箭头方向衰减系数的变化规律可知,随着孔洞尺寸增加,超声波衰减系数明显增加,由于模型的求解中并没有考虑两相间的粘滞效应并且孔洞较大,上下界面没有闭合,因此这里衰减系数的变化,主要是由于随着孔洞尺寸的增加,岩心内横向方向上两相界面随之变大,即声波传播至孔洞处时反射界面变大,反射和散射引起的能量衰减增加。在孔洞尺寸一定的情况下,随着实验频率的增加,衰减系数与频率间呈现出指数函数关系,说明声波的衰减规律除了与岩体本身的力学性质和结构面紧密相关外,与测试的频率也有关系。

孔洞半径为5 mm时不同频率下的波场快照如图9所示。在频率为250 kHz时,其对应波长相对孔洞尺寸较大,因此从快照图中可以明显看出该频率下声波的绕射能力较强,能量损失较少。随着实验频率的增加,波长逐渐减小,在孔洞处的反射现象变强,导致能量衰减较为严重。

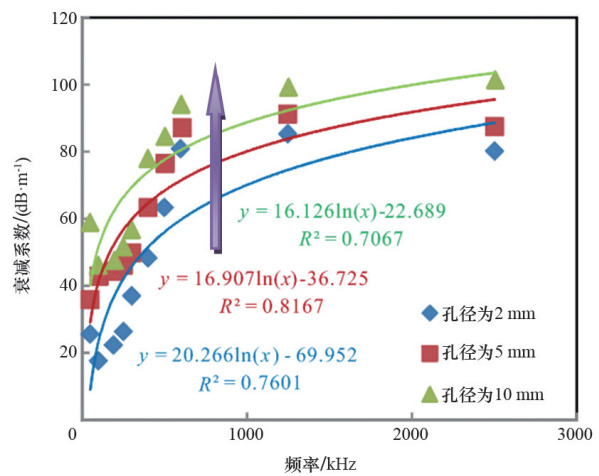


图8 孔洞尺寸和实验频率对衰减系数的影响

Fig. 8 Effect of hole size and test frequency on attenuation coefficient

### 3.2 孔洞形状对超声波属性的影响

主要研究孔洞介质中的孔洞形状对超声波传播规律的影响,研究频率为25、50、100、250、500 kHz和1.25、2.5 MHz共7个频率,设置了4种不同形状的孔洞,令方形孔洞的边长为 $L$ ,圆形孔洞半径为 $R$ ,椭圆形孔洞纵轴长度为 $L_a$ 、横轴长度为 $L_b$ , $L_a$ 与 $L_b$ 的比值定义为纵横比记作 $A_r$ 。模型参数如表2所示,模型孔洞形状如图10所示。

#### 3.2.1 孔洞形状对声波速度特性的影响

孔洞形状对声波速度影响的数值实验结果如图11所示。在孔隙尺寸恒定的前提下,不同形状间的声波速度很接近,不连续分布的单孔洞其形状的变化对声波速度影响不敏感,说明单孔洞的形状对声波速度的影响极小。随着实验频率的增加,各形状下的声波速度总体均呈上升趋势。在低频探头激发时,不同频率下的速度无显著变化,频散微弱。在频率高于250 kHz时开始出现频散现象,在高频1.25 MHz时频散表现得更加明显。利用不同形状下的频散特征可以对地层的孔隙结构特征做一些定性的判断,为储层评价及渗流特征研究提供依据。

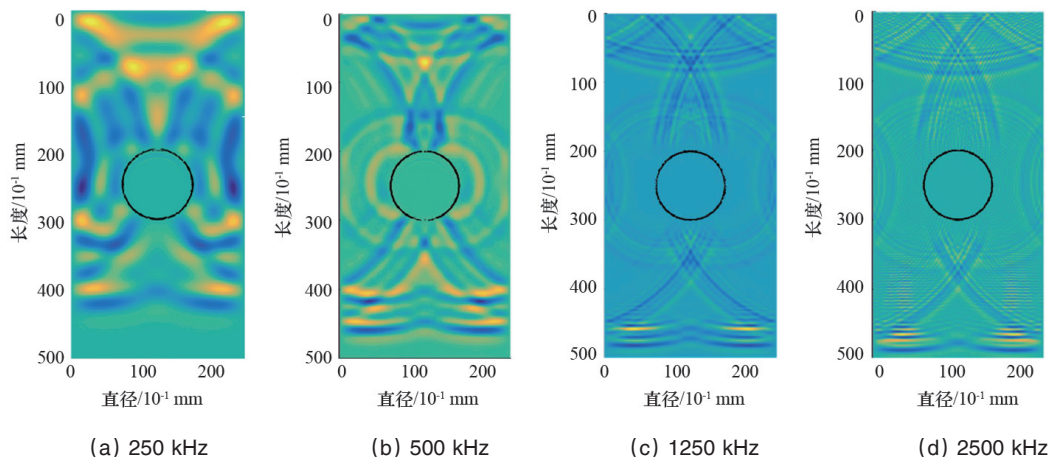


图9 孔洞半径为5 mm时不同频率下的波场

Fig. 9 Variation of wave field snapshot for single hole model ( $r=5$  mm) for different frequencies

表2 孔洞模型尺寸及参数

Tab. 2 Dimensional parameters of holes

孔洞形状	尺寸/mm	孔隙度/%
正圆	$R=1\sim 12$	0.25~36.19
方形	$L=1\sim 24$	0.08~46.08
椭圆1( $A_1 < 1$ )	$L_1=4, L_2=5\sim 12$	5.03~12.06
椭圆2( $A_1 > 1$ )	$L_1=5\sim 12, L_2=4$	5.03~12.06

### 3.2.2 孔洞形状及孔隙度对超声波衰减特性的影响

孔洞形状及孔隙度对超声波衰减特性影响的实验结果如图12所示。从图12(a)可知,当孔洞尺寸较小(孔隙度小于9%)时,可以忽略圆形和方形孔洞形状对声波速度的影响。当孔洞尺寸较大(孔隙度大于9%)时,圆形孔洞的衰减系数变化比正方形孔洞大。因此,孔隙度9%对圆形孔洞和方形孔洞是个临界值,小于9%时可忽略两形状的影响。该认识

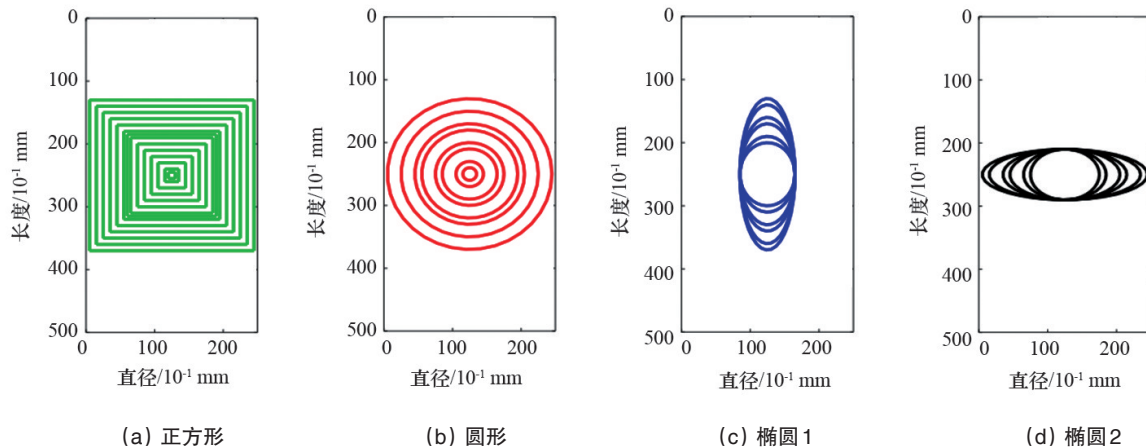


图10 单孔洞模型孔洞形状示意

Fig. 10 Schematic diagram of the hole shape in single hole model

可以用于对孔洞的孔隙度及形状的判断。从图12(b)可知,在椭圆模型中,当孔洞的纵横比 $A_1$ 大于1时,随孔洞尺寸的增加衰减系数的变化幅度较小;当孔洞的纵横比小于1时,随着孔洞尺寸的增加衰减系数的变化幅度较大。

不同孔洞形状及孔隙度条件下的波场快照如图13所示。在相同探头频率下,当孔隙度小于9%时主要体现绕射性质,所以相同孔隙度下,圆形和正方形孔洞的声波衰减系数变化幅值很接近。当孔隙度大于9%时,正方形孔洞在左

右边界发生绕射,只是在上边界产生反射以及在4个棱角位置发生散射,而圆形孔洞在波场中整个上半圆均主要体现反射和散射性质,并且由于圆形孔洞的球形度大于正方形孔洞,所以在相同孔隙度下,当孔隙度较大时圆形孔洞的衰减大于方形孔洞。

当孔隙度随着孔洞纵横比( $A_1 < 1$ )增加而变大时,孔洞的纵向尺寸也逐渐增大,由于仅有孔洞顶、底处的声波参与了叠加反射,在波场中主要体现绕射,所以孔洞纵向尺寸对声

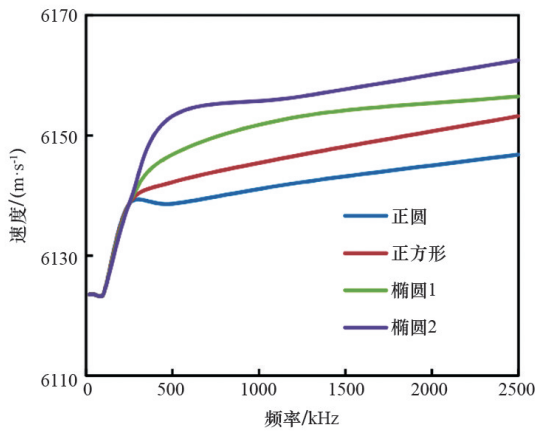


图 11 孔洞形状对声波速度特性的影响  
Fig. 11 Effect of hole shape on wave velocity

波衰减系数影响较小。当孔隙度随着孔洞纵横比( $A_r > 1$ )减小而变大时,孔洞的横向尺寸越大,反射界面也越大,波场中引起的反射较为强烈,孔洞的横向尺寸越大,引起的能量衰减越大。

### 3.3 孔洞分布对超声波属性的影响

在面孔率保持一致的条件下,构成面孔率的孔洞尺度及类型相同(半径为0.4 mm 正圆形孔,个数均为60)。孔洞质心坐标均服从随机正态分布函数,通过调整函数的方差 $\sigma$ (分别为10、20、30、40、50、60),改变孔洞在岩心中的分布特征,使得孔洞由非均质分布逐渐变为均质分布,对应的数值模拟模型如图14所示,分别记为B1、B2、B3、B4、B5、B6。

同时,进行了室内物理模型实验研究。不同孔洞分布对应的物理模型分别记为B7、B8、B9、B10、B11,5种模型的孔洞个数均为6个,孔径均为1.6 mm,孔深均为6 mm,对应的钻孔方案如下。

物理模型B7,沿着岩心的一个端面,先每隔45°在与端面垂直的方向上钻孔3个,然后再沿着该端面上的径向对称位置,与端面垂直方向钻孔3个。

物理模型B8,沿着岩心侧面的同一条母线,每隔6 mm,垂直于侧面钻孔6个。

物理模型B9,在离端面10 mm处的圆形平面上,每隔的45°垂直与侧面钻孔3个,然后在离端面20 mm处的圆形平面

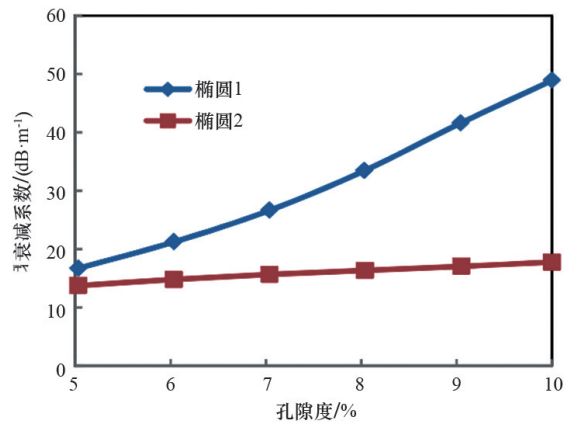
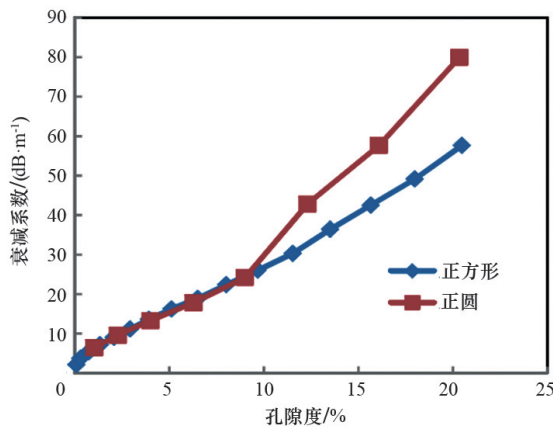


图 12 孔洞形状及孔隙度对声波速度衰减系数的影响  
Fig. 12 Effect of hole shape and porosity on the attenuation coefficient

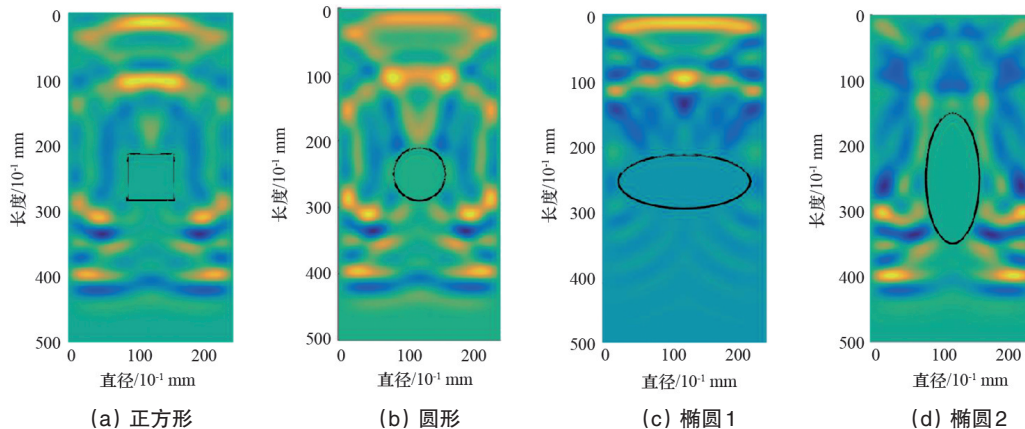


图 13 不同孔洞形状及孔隙度条件下的波场快照  
Fig. 13 Wave field snapshot for different hole shapes

上,每隔的 $45^\circ$ 垂直与侧面钻孔3个,并满足后3个孔在轴向的投影与前3个孔在轴向的投影关于径向对称。

物理模型B10,从离端面10 mm处的圆形平面出发,每隔5 mm垂直于侧面钻孔,这6个孔在轴向的投影与B9一致。

物理模型B11,在离端面15 mm处的圆形平面上,垂直于侧面钻孔6个,这6个孔在轴向的投影与B9一致。

本次测试均选用250 kHz的频率进行研究。

孔洞分布状态与声波速度关系的实验结果如图15所示。从数值模拟的结果可以看出,随着孔洞分布函数方差的递增,声波的速度总体呈线性规律的趋势减小。物理模型实验结果也表明随孔洞在传播路径上分布集中度的减小,速度逐渐减小。由于孔洞分布离散化程度的增加,不同的传播路径上的波至受孔洞影响的概率变大,很难接收到完全不受孔

洞影响的声波速度,声波在孔洞界面的反射作用或反复的反射与绕射作用,使传播路径发生偏移,由此导致接收端的时间增加,即声波速度减小。

孔洞分布状态与衰减系数关系的实验结果如图16所示。无论是数值实验还是物理实验,均表现出随孔洞分布集中度的减小衰减系数呈线性规律减小。当正态分布函数方差增大时,孔洞分布的离散程度越来越高,两相分布均匀,并且由于孔洞尺寸较小而实验频率相对较大,岩芯骨架与气相的动力模量相差很大,作为一种应力波,当声波传至孔洞界面处时,在骨架与气相之间产生一定的应变相位差,从而在两相界面处产生内摩擦而使机械能转化为热能,较大地消耗能量,导致了声波衰减系数越来越大。

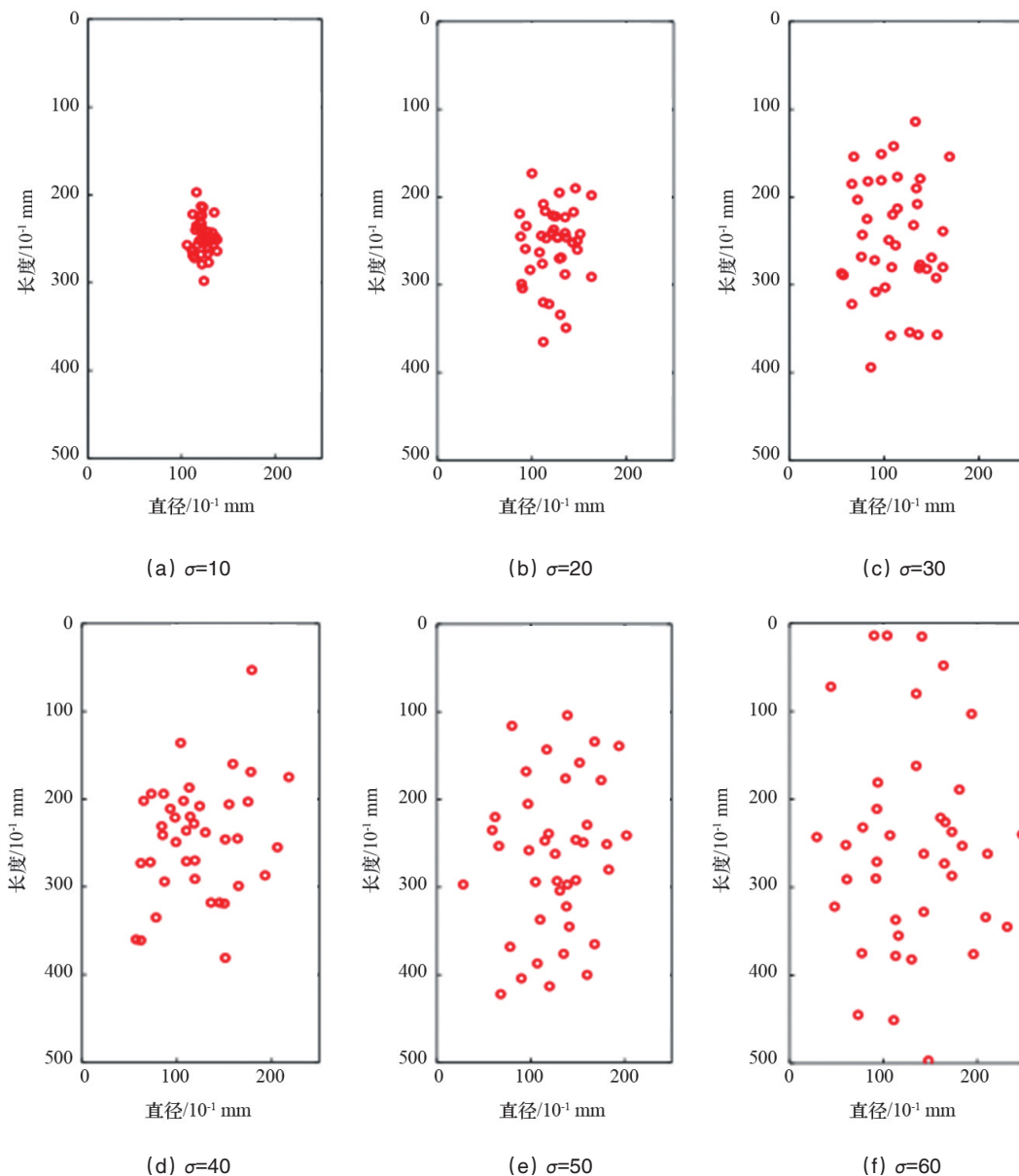


图14 不同孔洞分布对应的数值模拟模型

Fig. 14 Numerical simulation model for different holes distribution

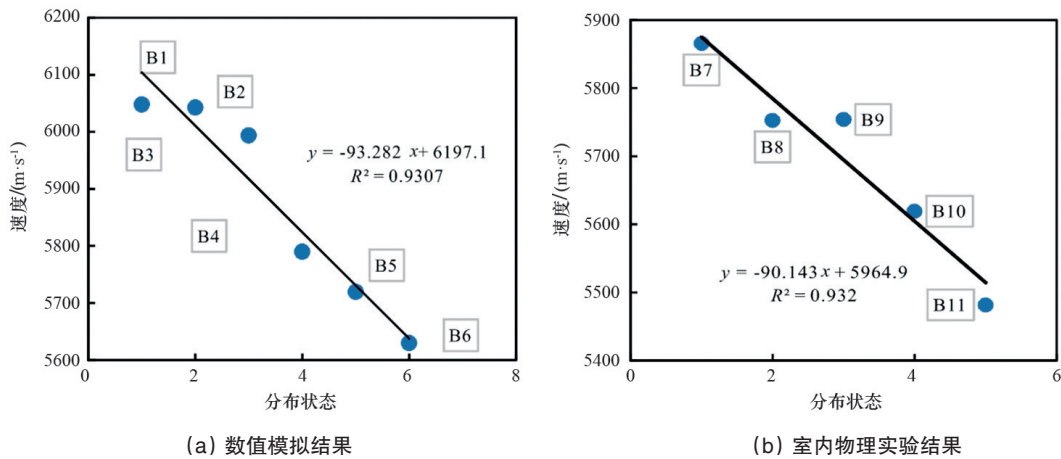


图 15 孔洞分布状态与声波速度的关系

Fig. 15 Relationship between hole distribution and wave velocity

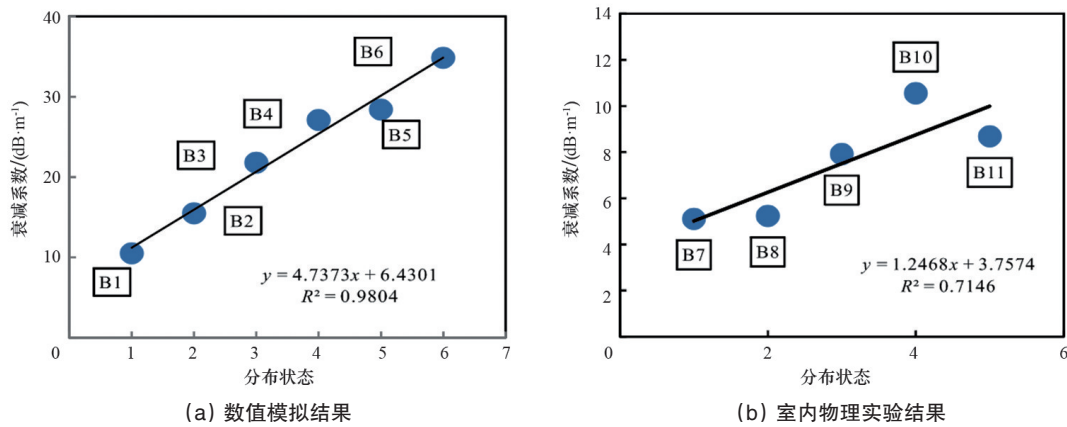


图 16 孔洞分布状态与衰减系数的关系

Fig.16 Relationship between hole distribution and attenuation coefficient

#### 4 结论

从孔洞的尺寸、形状、分布3个方面入手,探析了孔洞模型超声波传播特性,得出如下结论。

1) 不连续分布的单孔洞其尺寸变化对声波的传播速度几乎没有影响,在相同尺寸下,随实验频率的增加,速度有增加的趋势,并且在1.25 MHz时开始出现较为明显的频散现象。随着孔洞尺寸增加,超声波衰减系数也明显变大;在孔洞尺寸一定的情况下,随着实验频率的增加,衰减系数与频率间呈现出对数函数关系。

2) 在孔隙尺寸恒定前提下,不连续分布的单孔洞其形状的变化对声波速度影响不敏感,在高频率处出现频散现象。

3) 在多孔洞情况下,随孔洞分布集中度的增加,声波速度呈现线性规律减小,衰减系数呈现出线性规律增加。

#### 参考文献(References)

- [1] Baechle G T, Weger R, Eberli G P, et al. The role of macroporosity and microporosity in constraining uncertainties and in relating velocity to permeability in carbonate rocks[M]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004. Houston, Texas, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2004: 1662-1665.
- [2] Baechle G, Al-Kharusi L, Eberli G, et al. Effect of spherical pore shapes on acoustic properties in carbonates[M]//AAPG Annual Meeting Abstracts 2007. California: American Association of Petroleum Geologists, 2007: 7.
- [3] Colpaert A, Baechle G T, Brevik I, et al. Elastic properties and fluid substitution in carbonate rocks from experimental velocity data and pore shape analysis[EB/OL]. [2016-08-29]. <https://www.researchgate.net/publication/237785028>.
- [4] Baechle G T, Colpaert A, Eberli G, et al. Effects of microporosity on sonic velocity in carbonate rocks[J]. *The Leading Edge*, 2008, 27(8): 118-125.
- [5] Weger R J, Eberli G P, Baechle G T, et al. Quantification of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates[J]. *Aapg Bulletin*, 2009, 10(93): 1297-1317.
- [6] 曹均, 贺振华, 黄德济, 等. 孔洞储层地震波特征响应的物理模型试验研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(6): 576-582.  
Cao Jun, He Zhenghua, Huang Deji, et al. Seismic responses to pore-hole reservoir by physical modeling[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(6): 576-582.

- [7] 李琼, 贺振华, 黄德济, 等. 单孔洞缝模型超声波试验测试与分析[J]. 石油物探, 2007, 46(1): 100-104.  
Li Qiong, He Zhenghua, Huang Deji, et al. Ultrasonic experiment and analysis of single fracture-cave physical model[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(1): 100-104.
- [8] 姚姚, 唐文榜. 深层碳酸盐岩岩溶风化壳洞缝型油气藏可检测性的理论研究[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(6): 623-629.  
Yao Yao, Tang Wenbang. Theoretical study of detectable cavern-fractured reservoir in weathered Karst of deep carbonate[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(6): 623-629.
- [9] Yao Y, Sa L M, Wang H X. Research on the seismic wave field of karst cavern reservoirs near deep carbonate weathered crusts[J]. Applied Geophysics, 2005, 2(2): 94-102.
- [10] 季敏, 魏建新. 孔洞物理模型数据的地震响应特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 197-200.  
Ji Min, Wei Jianxin. Analysis of seismic response of pore-cave physical model data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(2): 197-200.
- [11] 王立华, 魏建新. 溶洞物理模型的地震响应及其属性分析[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3): 291-296.  
Wang Lihua, Wei Jianxin. Seismic response of karst cave physical model and analysis of its attributes[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(3): 291-296.
- [12] 李凡异, 魏建新. 碳酸盐岩溶洞横向尺度变化的地震响应正演模拟[J]. 石油物探, 2009, 48(6): 558-562.  
Li Fanyi, Wei Jianxin. Forward simulation of seismic response in carbonate caverns with varied lateral scale[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2009, 48(6): 558-562.
- [13] 魏建新, 狄帮让, 王立华. 孔洞储层地震物理模型研究[J]. 石油物探, 2008, 47(3): 156-160.  
Wei Jianxin, Di Bangrang Wang Lihua. Seismic physical modeling for cavern reservoir[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(3): 156-160.
- [14] 陈乔, 刘向君, 梁利喜, 等. 裂缝模型声波衰减系数的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2044-2052.  
Chen Qiao, Liu Xiangjun, Liang Lixi, et al. Numerical simulation of the fractured model acoustic attenuation coefficient[J]. Chinese Journal of Geophys, 2012, 55(6): 2044-2052.
- [15] 梁利喜, 周龙涛, 刘向君, 等. 孔洞结构对超声波衰减特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊): 3208-3214.  
Liang Lixi, Zhou Longtao, Liu Xiangjun, et al. Study of effect of pore structure on ultrasonic attenuation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl): 3208-3214.
- [16] 王森, 刘向君, 陈乔, 等. 碳酸盐岩储层孔隙度超声波评价数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 0267-0273.  
Wang Sen, Liu Xiangjun, Chen Qiao, et al. Carbonate reservoir porosity ultrasonic evaluation by numerical simulation[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 0267-0273.
- [17] Reynold A C. Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems[J]. Geophysics, 1978, 43(6): 1099-1110.

## Characteristics of ultrasonic propagation in carbonate rock pore model

ZHOU You<sup>1,2,3</sup>, CHEN Qiao<sup>1,3</sup>, CHENG Liang<sup>4</sup>, CAO Hai'an<sup>5</sup>, XIE Zhiguo<sup>2</sup>, LIU Jingcheng<sup>6</sup>

1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Science, Chongqing 400714, China
2. Chongqing Mineral Resources Development Company, Chongqing 401120, China
3. Key Laboratory of Petroleum Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China
4. Institute of Geological Exploration and Development of oil Chinese Chuanqing Drilling Engineering, Chengdu 610500, China
5. Shu'nan Gas Mine, Petrochina Southwest Oil & Gas Field Company, Luzhou 646000, China
6. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China

**Abstract** This paper studies the characteristics of ultrasonic propagation in a model of a small pillar of the pore-cave type carbonate rock of different size and shape and distribution and in ultrasonic multi frequency, using the numerical simulation method of two-dimensional ultrasound and physical model experiments, from the perspective of kinematics and dynamics. The results show that in the single pore-cave discontinuous distribution, the size change almost has no effect on the velocity but is correlated with the attenuation coefficient positively; in the case of the same size, with the increase of the test frequency, the velocity increases, with the attenuation coefficient and the frequency in an exponential increasing relation. The influence of the hole shape (round holes or square holes) is related with the porosity. The porosity of 9% is the critical value. When it is less than 9%, the effects can be neglected; when it is more than 9%, the influence of circular holes is greater than that of square holes on the attenuation coefficient. The influence of elliptical holes is related with the aspect ratio, when the aspect ratio is greater than 1, with the increase of the aspect ratio, the attenuation coefficient changes little, whereas the attenuation coefficient varies greatly when the aspect ratio is less than 1. With the increase of the concentration of the pore distribution, the wave velocity decreases linearly, and the attenuation coefficient increases linearly.

**Keywords** carbonate pore model; ultrasonic wave; wave velocity; attenuation coefficient

(责任编辑 韩星明)