

卜庆涛, 刘圣彪, 胡高伟, 等. 含水合物沉积物声学特性——实验模拟与数值模拟的对比分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 56-67.

含水合物沉积物声学特性

——实验模拟与数值模拟的对比分析

卜庆涛^{1,2}, 刘圣彪³, 胡高伟^{1,2*}, 刘昌岭^{1,2}, 万义钊^{1,2}

(1 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071;

3 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘要:含水合物沉积物声学特性在水合物勘探中非常重要。针对含水合物沉积物声学特性, 前人通过实验模拟及岩石物理建模已取得一定的进展, 但基于实验条件开展的数值模拟及其结果的对比研究仍鲜有涉及。笔者拟采用实验室物理模拟与实验储层数值模拟相结合的方法, 通过物理实验模拟获得水合物储层声学特征。在此基础上, 以实验物理模型以及声波采集系统为基本构建对应条件下的近似地质模型和声波观测系统, 分别在 50 kHz 和 80 Hz 频率条件下获得具有不同水合物饱和度储层的波形记录和波场快照, 并获得不同时间点和饱和度条件下的储层速度, 对比分析实验模拟与数值模拟获得结果的异同。研究表明在 3 种模拟条件下获得的不同时刻的含水合物储层声速对应关系良好, 数值模拟结果很好地印证了实验室模拟实验的结果, 表明在实验室内进行相应物理模型的岩石物理模拟实验具有可行性。将实验模拟与数值模拟结果同野外探测数据对比分析, 具有一致的变化趋势, 表明物理模拟实验和数值模拟结果对野外勘探数据分析具有重要的指导意义。

关键词:天然气水合物; 声学特性; 实验模拟; 数值模拟; 对比分析

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.079

0 引言

天然气水合物作为新型能源储量丰富^[1-3], 是 21 世纪非常重要的潜在能源。随着我国海域天然气水合物的试采成功, 天然气水合物作为一种新型能源亟待开发和利用^[4-6]。目前, 地球物理探测技术仍是海洋天然气水合物勘探监测的重要手段^[7-8]。天然气水合物与孔隙流体相比, 具有较高的弹性波

参数。因此, 含水合物沉积层一般具有较高的纵波速度和横波速度^[9-11]。由于水合物对温度、压力十分敏感, 在常温常压下极易发生分解, 野外工作难以获取准确的水合物饱和度数据, 并与纵横波速度建立相应的联系, 通常采用模拟实验的办法建立水合物饱和度与声速之间的关系模型, 以期利用地震波参数和声波测井数据对储层资源量进行估算与评价。

针对天然气水合物声学特性模拟实验研究, 前人已进行了大量的室内实验研究, 获得了丰富的基础数据资料。Winters 等^[12]研究了水合物对不同类型沉积物声学特性的影响; Priest 等^[13-14]先后研究了“过量气+定量水”、“过量水+定量气”及“溶解气”体系中生成的水合物对沉积物纵横波速影响。Hu 等^[15-18]研究了水合物在固结沉积物、松散沉积物和南海沉积物样品中的生成、分解规律及声速等的变化特征。Bu 等^[19-21]利用青岛海洋地质研究

收稿日期: 2020-06-09

资助项目: 国家自然科学基金(41906067); 中国博士后科学基金(2018M632634); 山东省自然科学基金(ZR2019BD051); 山东省博士后创新项目(201902050)

作者简介: 卜庆涛(1988—), 男, 博士, 主要从事海洋地质学与天然气水合物方面的研究工作。E-mail: bqt881110@163.com

* 通讯作者: 胡高伟(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地质学与天然气水合物方面的研究工作。E-mail: hgw-623@163.com

所的天然水合物地球物理实验装置开展了系列实验,建立了动态渗漏体系下水合物声学实验体系^[19],在一维声学探测的基础上拓展了二维水合物声学探测技术^[20],并结合水合物微观分布,获得了水合物分解过程中的声学特性^[21]。综上,近年来水合物声学特性通过实验模拟及岩石物理建模已取得一定的进展,针对含水合物储层的声学性质已获得一定的认识。

然而,水合物声学岩石物理实验的成本较高,所需时间较长,只能通过实验室尺度实验获得规律性认识,对于较大尺度的实验无法开展。因此,开展声学数值模拟,是进行水合物声学特性研究的一个有效途径。针对海底沉积物声学特性的数值模拟主要可分为射线追踪和波动方程数值模拟 2 种方法,相对而言后者更具优势,并可细分为有限元法、伪谱法和有限差分法等具体方法。其中,有限差分法因占用内存小,计算速度快等优点而被广泛使用。Zhu 等^[22]基于 Biot 理论,利用有限差分方法实现了油气储层介质弹性波场的数值模拟,并获得了层状模型地面记录等多种波场特征。孟庆生等^[23]、彭传正等^[24]基于 BISQ 模型利用有限差分方法,对双相各向异性裂隙介质的波场特征实现了数值模拟,并详细分析了各种特征。Leclaire 等^[25]建立了适用于含水合物沉积物介质的两固一流声学理论,推导出相应的声波方程,并应用该模型对冻土层中声波的传播进行了研究。方跃龙^[26]为了分析声波在含水合物沉积层的传播情况以及偏振对实验结果的影响,在三维模型中模拟了纵横波形和频谱图,并在二维模型中模拟了不同时刻下纵横波的传播声场情况。此外,许马光^[27]、杨佳佳等^[28]均基于 Biot 介质理论,利用有限差分方法研究了含水合物储层的声学特征。

笔者采用实验模拟和数值模拟相结合的方法,通过物理实验模拟获得含水合物储层声学特征,在此基础上构建实验物理模型尺度下的近似地质模型,在不同频率和不同水合物饱和度条件下获得储层速度结果,并获得不同饱和度条件下的波形记录和波场快照,对比分析实验模拟与数值模拟获得结果的异同,探讨数值模拟对实验室实验模拟结果的验证作用。

1 研究方法

1.1 实验模拟方法

实验在自主研发的含水合物沉积物速度剖面结构特性研究实验装置上进行^[20]。实验装置由压力控制系统、制冷系统、高压反应釜和数据采集系统组成(图 1)。气瓶、增压设备和压力传感器组成压力控制系统,用以控制和监测高压反应釜内的气体压力;制冷系统由制冷机和低温水浴池组成,用于控制高压反应釜体的温度;高压反应釜体内部有沉积物样品、温度探针、TDR 探针和超声波换能器,可在高压反应釜中进行水合物形成实验并探测实验过程中各参数;数据采集系统用来对参数进行实时监控和采集,声学探测主要采用纵向剖面上的 4 对超声波换能器,与每对弯曲元换能器对应,布置了 4 对 TDR 探针,每对 TDR 探针探测每个层位的水合物饱和度,另外,每个层位布设 4 支温度探针,4 个层位共布设了 16 支 Pt100 探针,用以监测温度。

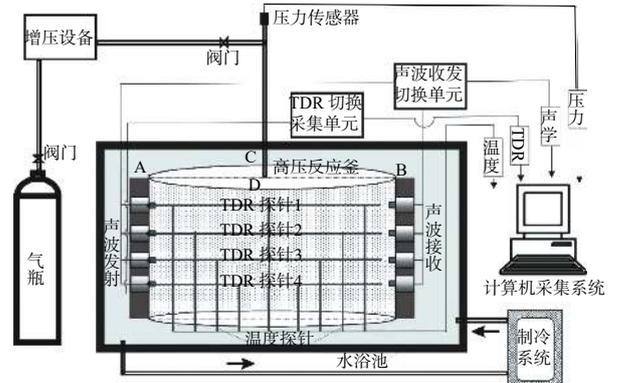


图 1 含水合物沉积物速度剖面结构特性研究实验装置简图
Fig.1 The apparatus used to measure the hydrate-bearing sediment velocity profile

本文分别采用 0.15~0.3 mm 粒径的砂(孔隙度为 38.33%)和 0.3~0.6 mm 粒径的砂(孔隙度为 39.88%)作为松散沉积物,来研究不同粒径下的水合物生成情况。水合物生成所需气体是纯度为 99.9% 的甲烷气体。实验溶液采用自行配制浓度为 0.03% 的十二烷基硫酸钠溶液(SDS 溶液),可以对天然气水合物的生成起促进作用。

实验采用超声探测技术和 TDR 技术分别测量沉积物样品的纵、横波速度和含水量。超声探测系

统由 Twave40612 高频任意波形发生器、AG1016 功率放大器、研祥工控机、超声波换能器、超声通道切换装置和示波器以及配套的软件程序所组成。4 对超声波换能器分别位于反应釜两侧,其发射端与接收端分别与功率放大器和通道切换装置相连。声波信号经波形发生器触发高斯脉冲信号后分别产生横波与纵波。在实验中横波的频率为 20 kHz 左右,纵波频率为 50 kHz 左右。纵波和横波信号分 2 个通道分别采集。为避免声学探头之间的互相干扰,以切换方式进行采集,利用通道切换装置,每隔一定时间分别记录每个层位的纵横波信号。时域反射系统由 TDR 信号发生器、4 对双棒型 TDR 探针以及工控机组成,探针长度为 0.27 m,测量精度为 $\pm(2\% \sim 2.5\%)$ ^[29]。TDR 测量含水量的过程为:根据 TDR 仪获取的波形得出样品的介电常数,再利用 Wright 等^[29]的经验公式计算含水量(θ_v),从而可以根据孔隙度(φ)和公式 $S_h = (\varphi - \theta_v) / \varphi \times 100\%$ 来计算水合物饱和度。

1.2 数值模拟方法

依据 Biot 理论,各向同性双相介质的二维二分量波动方程可以表示为^[30]:

x 分量:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + (\mu + \lambda_c) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} \right) + \quad (1)$$

$$\alpha M \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial x \partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial^2 w_x}{\partial t^2}$$

$$\alpha M \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} \right) + M \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial x \partial z} \right) = \quad (2)$$

$$\rho_f \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + m \frac{\partial^2 w_x}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial w_x}{\partial t}$$

z 分量:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + (\mu + \lambda_c) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \quad (3)$$

$$\alpha M \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \rho_f \frac{\partial^2 w_z}{\partial t^2}$$

$$\alpha M \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} \right) + M \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial x \partial z} \right) = \quad (4)$$

$$\rho_f \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + m \frac{\partial^2 w_z}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\kappa} \frac{\partial w_z}{\partial t}$$

式中: μ 、 λ_c 、 α 和 M 分别为双相介质本构方程系数;

μ 和 λ_c 分别为双相介质拉美系数, Pa;

ρ 、 ρ_f 、 m 、 η 和 κ 分别为双相介质总密度、流体密度、有效流体密度、流体黏度和双相介质渗透率;

u_i 和 w_i 分别为固体骨架位移和流体相对固体骨架位移。

其中,系数与介质弹性参数之间的关系详见文献^[30]。

基于上述双相各向同性波动方程,笔者综合考虑计算精度和计算速度,采用时间二阶和空间四阶的有限差分格式^[30],开展含水合物储层的声波波场及波形记录的数值模拟研究。

基于有限差分的数值模拟工作,受波动方程本身条件、空间网格大小、时间采样率和差分格式等限制,往往导致频散现象的发生。这种频散现象几乎无法避免,只能通过选取合适的参数来尽量减小频散。经试验得知,在针对双相介质的正演模拟研究中,要同时实现运算速度较快且算法稳定的目的,每个最短波长内包含的网格点数应在 10~20 个为最佳^[23]。

为得到更为理想的模拟结果,除采用离散多次透射(MTF)吸收边界条件之外,还在边界处添加人为衰减区域,以有效的消除声波反射的影响,该区域仅采用比较简单的吸收边界条件^[23]:

$$\text{att} = \exp[-c(n-i)^2] \quad (1 \leq i \leq n) \quad (5)$$

式中: n 表示衰减区域的总节点数;

c 为衰减系数。

2 实验模拟结果及数据分析

2.1 实验模拟过程

含水合物沉积物储层超声探测实验过程如下:

(1)向反应釜中加砂。由下而上依次为第 1 层至第 4 层,将实验用砂提前与 SDS 饱和水溶液混合均匀,第 1 层和第 3 层加入 0.15~0.30 mm 粒径的砂,第 2 层和第 4 层加入 0.30~0.60 mm 粒径的砂,装砂完毕后将反应釜封闭并检查其气密性。

(2)洗釜。先用真空泵将反应釜抽真空,然后向釜中通入一定压力(<1 MPa)的甲烷气,然后将气体排出,重复 2~3 次,从而将釜中的空气排出。

(3)利用起吊装置将反应釜垂直放置于低温水浴池中,再向水浴池中加入冷却液(纯水和乙二醇

的混合溶液), 直到冷却液没过反应釜为止。

(4) 加压。向釜中缓慢加入甲烷气直到反应釜内压力升到 6 MPa。然后保持 1 天, 使得甲烷气体能够充分渗入沉积物, 同时检验反应釜是否漏气。

(5) 打开温度压力监控软件、TDR 采集软件和超声速度采集软件, 开始采集数据。

(6) 分步降温来生成天然气水合物。启动循环水浴制冷系统, 先降到 9.5 °C 左右, 保持 24 小时后, 再降到 8.5 °C 左右, 再保持 24 小时, 以后每次降 1 °C, 一直降到 2.5 °C 左右为止。

2.2 实验模拟结果

应用实验装置进行了同一实验条件下的多轮次水合物形成实验, 实验重复性良好, 表明探测装置工作稳定, 实验结果可靠。选取其中一轮次实验结果进行分析, 由于得到实验数据较多, 在此选取具有代表性的数据进行分析。在 0 h、54 h、148 h、245 h 为声速特殊变化时间点, 分别代表水合物生成前、水合物开始生成、水合物生成过程和水合物生成结束时间。实验过程中各个层位的温度、压力、水合物饱和度和声波速度变化见图 2。

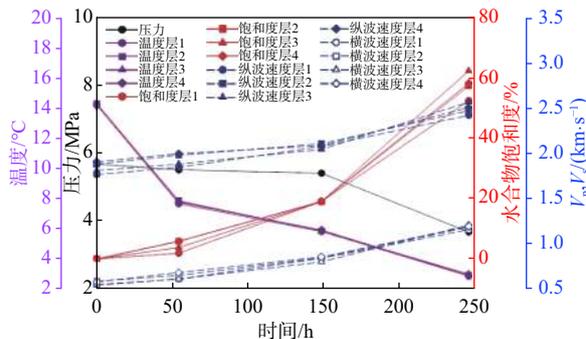


图 2 不同时间点各层温度、压力、水合物饱和度和纵横波速度

Fig.2 The temperature, pressure, saturation and acoustic velocities of each layer at different time

在 0 h, 水合物还未达到生成条件, 层 2 和层 4 的纵横波速度稍大于层 1 和层 3。随着温度的下降, 反应釜内压力逐渐降低至 5.5 MPa, 在 54 h 开始有少量水合物生成, 层 2 和层 4 水合物饱和度要稍大于层 1 和层 3 水合物饱和度, 并且对应层位的纵横波速度表现出相同的趋势。在 148 h 以后, 温度继续下降, 压力出现快速下降期, 水合物饱和度开始明显升高, 各层位之间饱和度差异较小, 进入水合

物大量生成阶段。在 245 h, 进入水合物生成末期, 温度降至 3 °C 附近, 并基本保持不变, 反应釜内压力已降至 3.68 MPa, 水合物饱和度达到 60% 左右, 且层 3 和层 4 的水合物饱和度要稍高于层 1 与层 2, 可能由于封闭的反应釜体, 上部同气体接触更好, 造成水合物饱和度的差异。在 245 h 各层纵横波速度基本相近, 表明在水合物生成阶段末期, 沉积介质对沉积物声速影响不大。

针对水合物微观分布特征对水合物声学特性的影响, 前人已经进行了一定的研究^[29], 并获得了水合物形成过程中纵横波速度与水合物微观分布较好的对应关系, 研究表明在水合物形成阶段初期, 起主导作用的胶结模式的水合物引起了声波速度的快速增加, 随后在以悬浮模式占主导地位的水合物形成阶段, 声波速度体现较缓慢的增加, 当水合物饱和度达到 60% 以后, 大量的水合物以胶结模式同沉积物接触, 并造成声波速度的较快的增加 (图 3)。

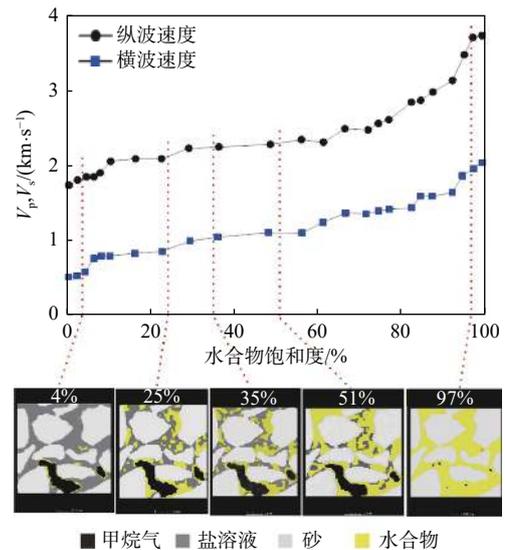


图 3 水合物生成过程中声波速度对应水合物微观分布状态 (据文献 [31] 修改)

Fig.3 Acoustic velocities and the corresponding hydrate morphology during hydrate formation (modified from reference [31])

3 数值模拟结果

3.1 数值模拟工作基础

依据超声波物理模型实验应遵循相似性准则^[32], 即时间、空间和物理特征 3 方面的相似要求, 并表

明在物理特征相似中只要考虑地震波的传播速度相似即可满足实验要求。针对特定超声波物理实验模型,建立近似地质模型进行数值模拟研究,因其物理特征一致,所以仅当2种模型的模型尺度相似比和声波波长相似比相等即可,对波长和频率关系转换后可得如下比例关系式^[33]:

$$\frac{L_{\text{实验}}}{L_{\text{数模}}} = \frac{f_{\text{数模}}}{f_{\text{实验}}} \quad (6)$$

其中, L 表示模型空间尺度, f 表示模型震源频率。

基于实验模拟中沉积物样品以及实验结果所获得的水合物饱和度和对应条件下的CT扫描图像(用于判定水合物在沉积物孔隙系统中的微观分布形式,详见第2.2节),笔者结合等效介质理论^[34]计算得到具有不同水合物饱和度及相应水合物微观分布实验样品中双相介质的弹性参数,作为数值模型的输入参数,详见表1。

表1 实验样品各层位在不同水合物饱和度条件下的数值模型输入参数

Table 1 The input parameters of the numerical model for each layer of the experimental sample under different hydrate saturations

时间	层位	K_f /GPa	K_m /GPa	K_{dry} /GPa	P_m /(g/cm ³)	ρ_f /(g/cm ³)	κ /(10 ⁻¹⁵ m ²)	ϕ /%
0 h	层4	2.5	58.32	1.209	2.692	1.032	2.0	39.8
	层3	2.5	58.32	1.334	2.692	1.032	1.53	38.3
	层2	2.5	58.32	1.209	2.692	1.032	2.0	39.8
	层1	2.5	58.32	1.334	2.692	1.032	1.53	38.3
54 h	层4	2.6	47.383	1.175	2.676	1.032	1.32	37.5
	层3	2.57	50.319	1.28	2.684	1.032	1.18	36.9
	层2	2.6	47.383	1.175	2.676	1.032	1.32	37.5
	层1	2.53	53.656	1.288	2.686	1.032	1.34	37.6
148 h	层4	2.87	38.538	1.395	2.644	1.032	0.467	32.2
	层3	2.87	38.806	1.509	2.656	1.032	0.363	31
	层2	2.87	38.538	1.395	2.644	1.032	0.467	32.2
	层1	2.87	38.806	1.509	2.656	1.032	0.363	31
245 h	层4	4.15	58.32	1.046	2.692	1.032	2.0	39.8
	层3	4.35	58.32	1.155	2.692	1.032	1.53	38.3
	层2	4.11	58.32	1.046	2.692	1.032	2.0	39.8
	层1	3.89	58.32	1.155	2.692	1.032	1.53	38.3

注:表中 K_f , K_m , K_{dry} , ρ_m , ρ_f , κ 和 ϕ 分别表示孔隙流体的等效体积模量,沉积物组成矿物的等效体积模量,沉积物骨架的等效体积模量,沉积物组成矿物的等效密度,孔隙流体的等效密度,沉积物的渗透率和沉积物的孔隙度。

3.2 超声频率条件下模拟结果

在上述基础上,根据相似准则建立与物理模型实验完全一致的近似地质模型,根据已经进行的超声物理实验模型,建立 x 和 z 方向均为 350 mm 的近似地质模型。震源频率为 50 000 Hz, 网格间距为 5 mm, 采样点数为 3 000 个, 采样频率为 0.000 000 1 ms, 发射换能器与接收换能器位置如图 4 所示, 经数值模拟分别得到 4 种状态下, 各层位中与发射换能器平行道(第 20 道、第 33 道、第 46 道、第 60 道)的波形记录。

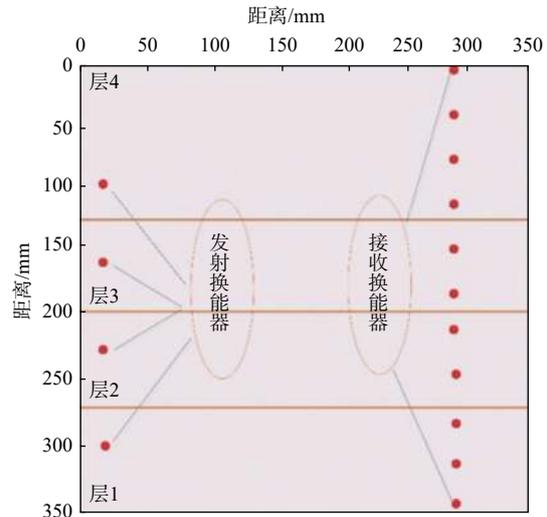


图4 模拟超声频率下近似地质模型

Fig.4 Approximate geological model under ultrasonic frequency conditions

通过模拟得到的与第2节实验模拟对应的4个时间点的波形记录及声波速度如图5所示。据图5所示模拟各阶段波形记录及相应的声波速度,模拟结果同实验结果相差较小,每个沉积层位也具有相似的模拟结果,模拟结果效果较好,具有较好的吻合度。在还未形成水合物的初始阶段,模拟得到层2与层4的声波速度要稍高于层1与层3,分别为1 971.09和1 984.13 m/s。而在水合物形成阶段中后期的148 h和245 h,模拟显示各层位的速度值差异性逐渐减小,沉积介质的属性影响不大,水合物饱和度才是影响声波速度的主要因素。由模拟结果可见,随着水合物饱和度的逐渐增加,各层位声波速度也是逐渐增大,同物理模拟实验结果有较好的对应性。

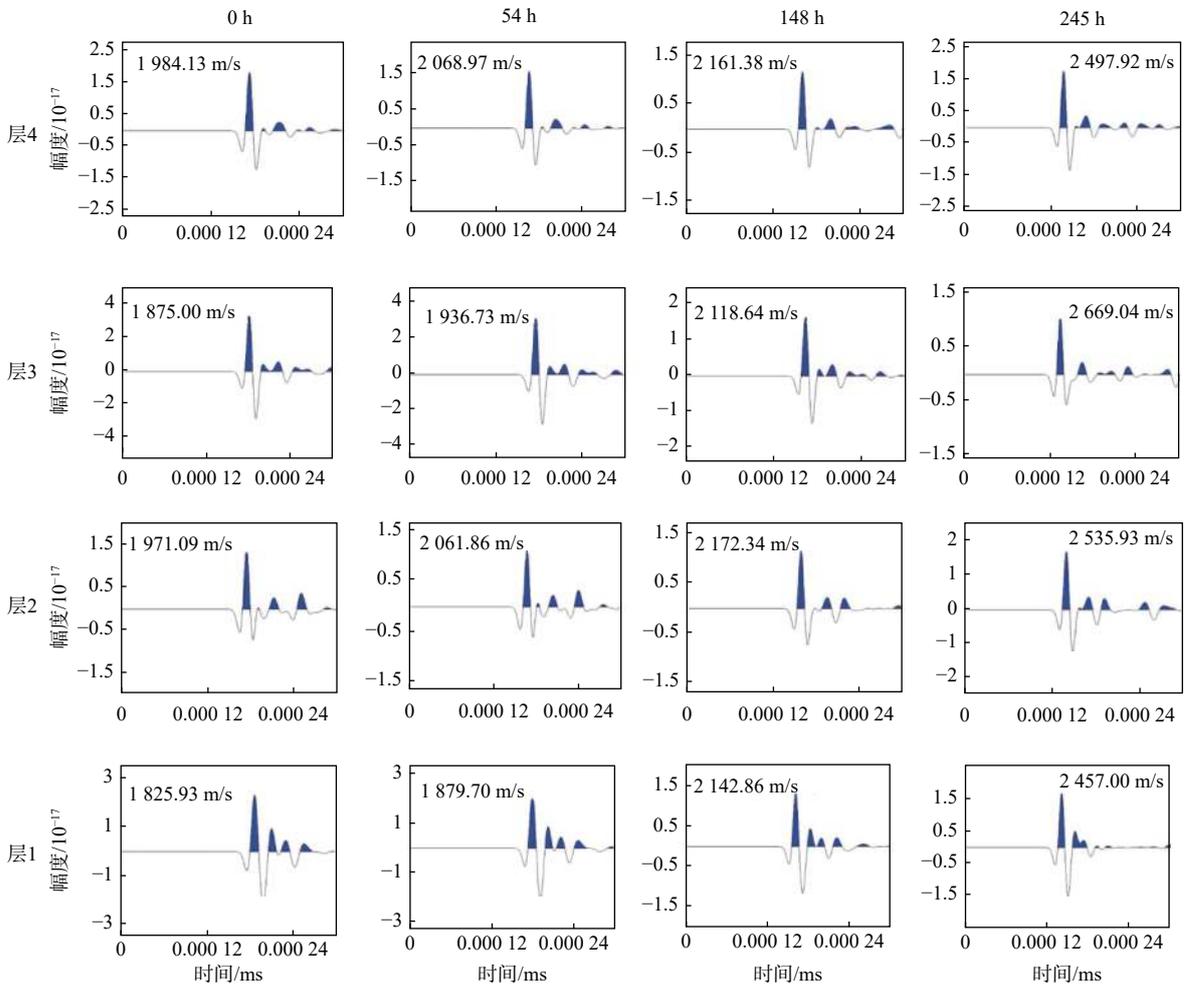


图 5 不同时间各层位波形记录

Fig.5 Waveform records of each layer at different time

3.3 地震频率条件下模拟结果

前述已经建立同物理模型实验完全一致的地质模型, 开展了相关模拟, 获得了较好的效果, 验证了模拟方法的可行性。室内模拟实验的局限性在于宏观尺度较小, 难以同野外勘探尺度相匹配, 因此, 在前述实验模拟和高频率震源频率模拟基础上, 进行低频率的尺度相对较大地质模型的模拟。建立 x 和 z 方向均为 250 m 的近似地质模型。震源频率为 80 Hz, 网格间距为 2 m, 采样点数为 1 500 个, 采样频率为 0.1 ms, 发射换能器与接收换能器位置如图 6 所示, 经数值模拟分别得到 4 种状态下(4 个时间点: 0 h、54 h、148 h、245 h), 各层位中与发射换能器平行道(第 30 道、第 50 道、第 80 道、第 100 道)的波形记录。

通过模拟得到对应 4 个时间点的波形记录及声波速度如图 7~10 所示, 标记线表示声波起跳点

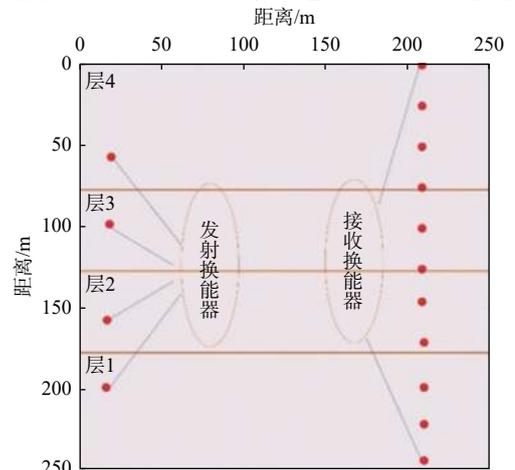


图 6 模拟低频条件下近似地质模型

Fig.6 Approximate geological model under low-frequency conditions

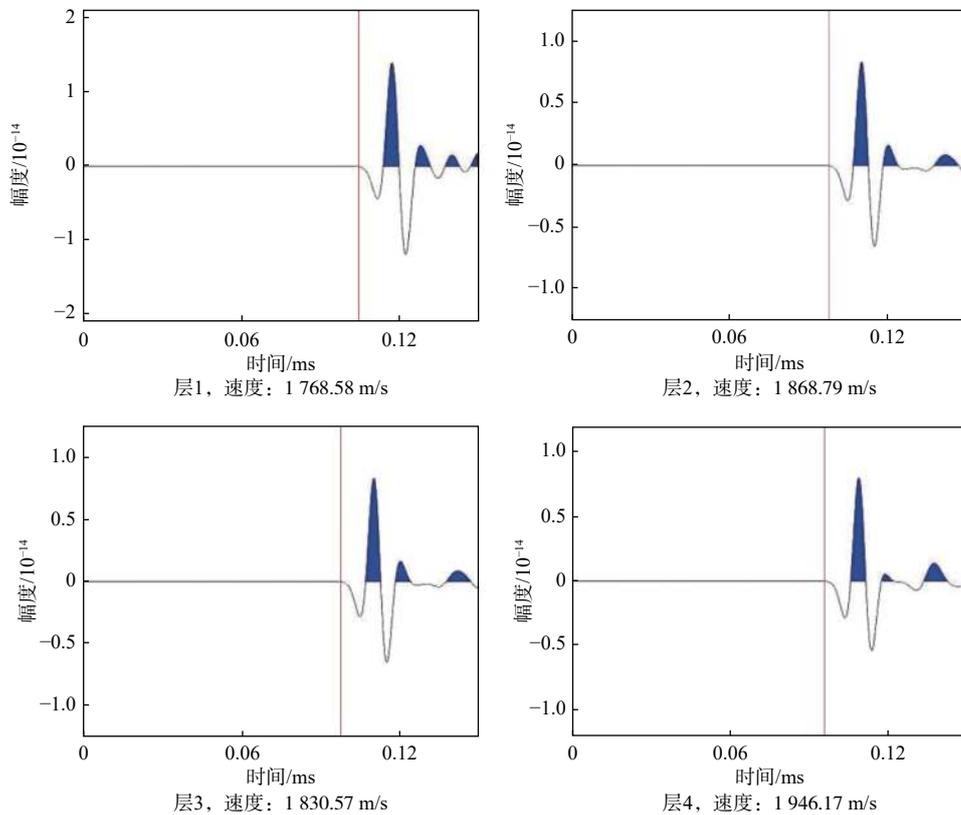


图7 0 h 各层位波形记录及速度模拟结果

Fig.7 Waveform records and velocity simulation results of each layer at 0 h

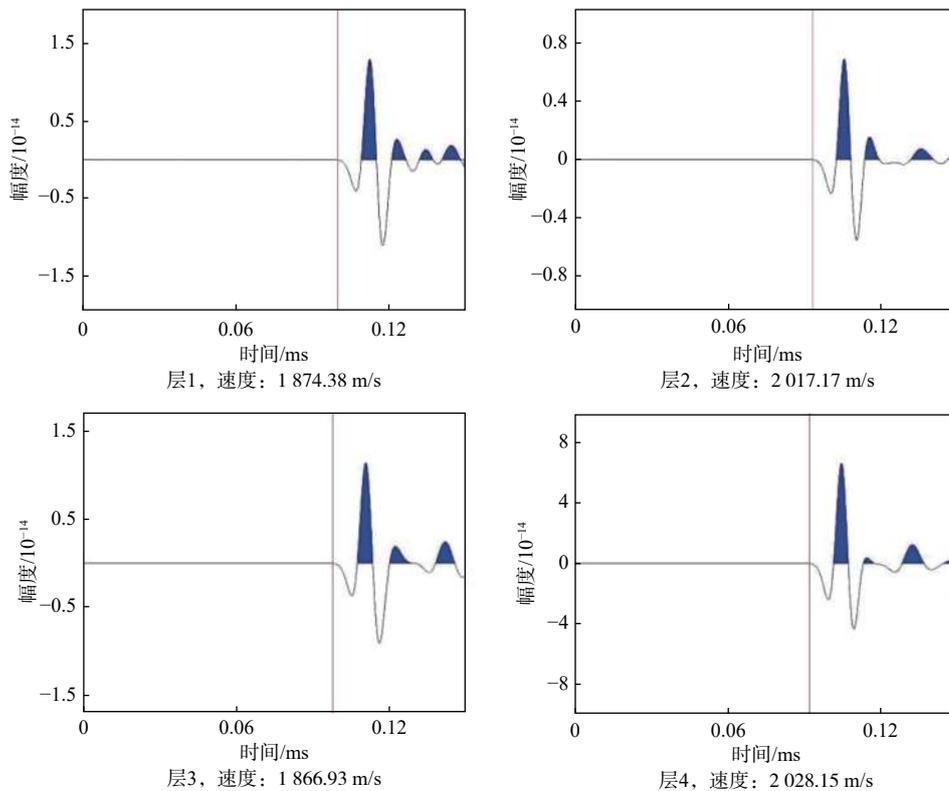


图8 54 h 各层位波形记录及速度模拟结果

Fig.8 Waveform records and velocity simulation results of each layer at 54 h

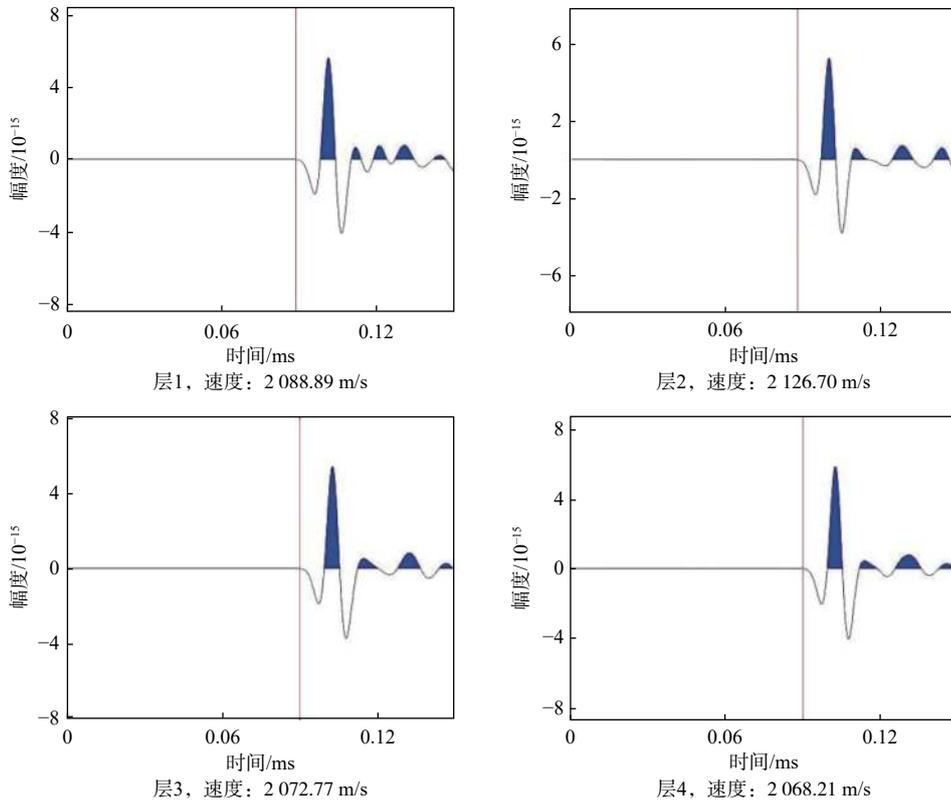


图 9 148 h 各层位波形记录及速度模拟结果

Fig.9 Waveform records and velocity simulation results of each layer at 148 h

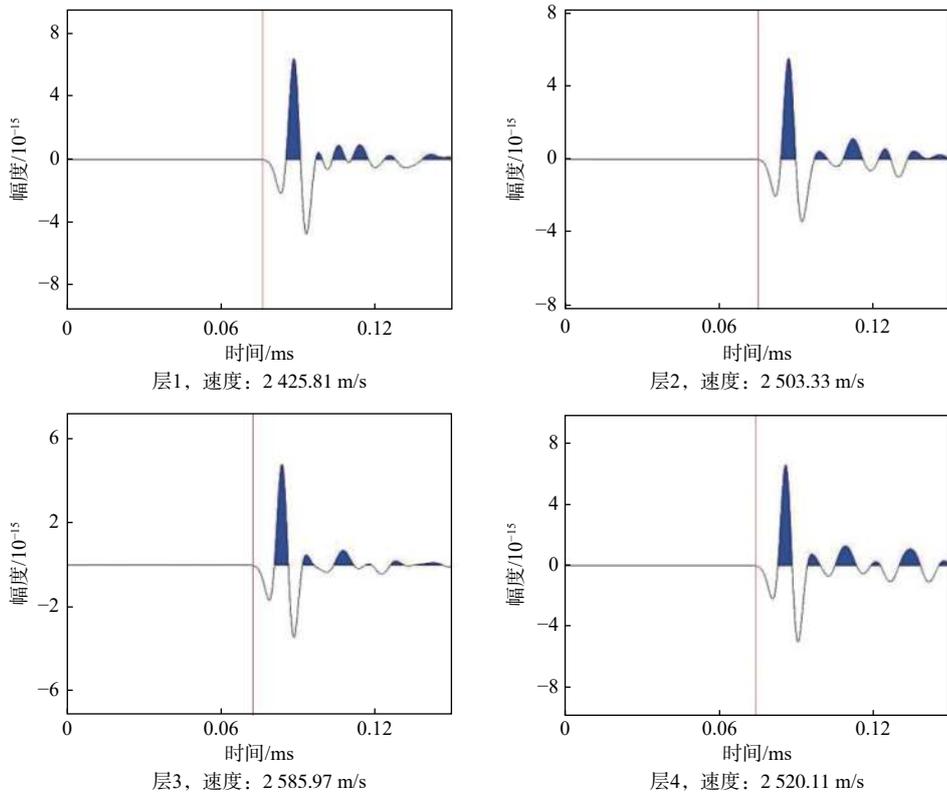


图 10 245 h 各层位波形记录及速度模拟结果

Fig.10 Waveform records and velocity simulation results of each layer at 245 h

位置,即声波初至时间,并给出固体位移波形记录相应的声波速度。声波速度值同实验模拟及超声频率建立地质模型的模拟结果较为一致,各对应层位声波速度值接近,误差较小。

在前述研究的基础上,变换声波采集系统如图11所示,经数值模拟分别得到4种状态下的4个层位0.06 s时刻的声波快照以及第60道的波形记录。由于各层地质模型为均匀各向同性介质,声波在同一层位地质模型中各个方向上的传播速度均相等,这也是波场快照中波前为圆形的原因(图12)。同时可以观察到,随着时间的增加,声波由模型中心向外不断传播的过程,波前不断向外扩展。波场快照中,同时也显示出4层介质中声波传播的反射和折射现象。根据不同时间点的波

场快照图,计算得到快纵波速度分别为1 746.7、1 941.7、2 116.4、2 339.2 m/s。

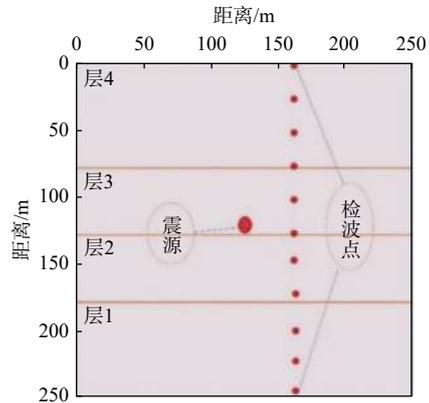


图11 震源位于中间的地质模型
Fig.11 The geological model with the seismic source in the middle

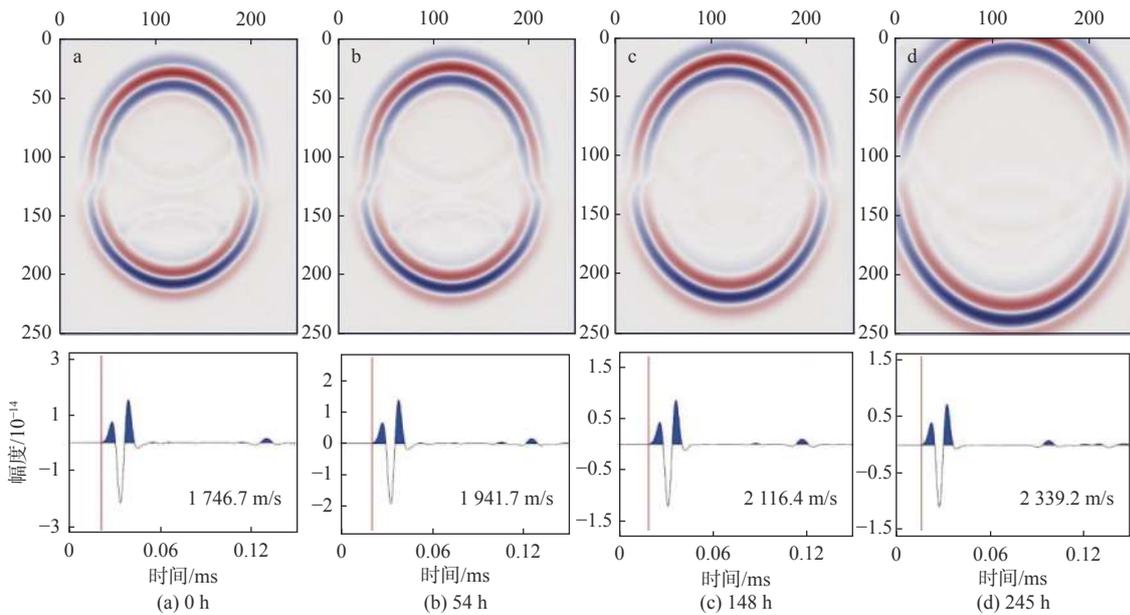


图12 0.06 s时刻波场快照及波形记录

Fig.12 Wavefield snapshots and waveform records at 0.06 s

4 实验结果对比分析

使用实验模拟与数值模拟相结合的方法,获得含水合物储层的系列声波特性(表2)。通过实验模拟获得实验条件下含水合物沉积物的声波特性,在此基础上,以模拟实验装置模型为基本构建地质模型,获取不同时刻波形记录,并进一步模拟了低频率大尺度的地质模型,获得声波传播的波场快照和

波形记录。综合上述实验结果,对获取的数据进行综合分析。

由表2所示,在3种模拟条件下获得的不同时刻的含水合物储层声速对应关系良好,数值模拟结果很好的印证了实验室模拟实验的结果,表明在实验室内进行相应物理模型的岩石物理模拟实验具有可行性,获取的实验结果可靠并具有指导性。为了进一步验证实验结果在我国南海沉积物中的适应性,将获取的实验数据与神狐海区 SHB 和 SH2

表 2 实验模拟与数值模拟纵波速度对比
Table 2 Comparison of P-wave velocity between experimental simulation and numerical simulation

		/(m/s)		
		实验模拟(超声 频率50 kHz)	数值模拟(震源 频率50 kHz)	数值模拟(震源 频率80 Hz)
0 h	层4	1 905.97	1 984.13	1 946.17
	层3	1 807.22	1 875.00	1 830.57
	层2	1 880.87	1 971.09	1 868.79
	层1	1 762.63	1 825.93	1 768.58
54 h	层4	1 996.00	2 068.97	2 028.15
	层3	1 880.87	1 936.73	1 866.93
	层2	1 977.58	2 061.86	2 017.17
	层1	1 845.01	1 879.70	1 874.38
148 h	层4	2 084.78	2 161.38	2 068.21
	层3	2 043.59	2 118.64	2 072.77
	层2	2 105.26	2 172.34	2 126.70
	层1	2 074.68	2 142.86	2 088.89
245 h	层4	2 504.17	2 497.92	2 520.11
	层3	2 564.10	2 669.04	2 585.97
	层2	2 469.13	2 535.93	2 503.33
	层1	2 417.40	2 457.00	2 425.81

站位^[35-36]获得的声速及水合物饱和度间关系的数据一同标绘到图 13 中。神狐海区各站位的声速来自于测井数据,水合物饱和度由电阻率和孔隙水氯离子浓度变化估测而来。由于野外获取水合物饱和度有限,但实验模拟与数值模拟实验结果同野外探测数据走势一致,具有良好的变化趋势。通过实验室物理模拟与实验储层数值模拟相结合的方法,获得水合物储层声学特征,在不同频率和不同水合物饱和度条件下获得储层速度结果,并获得不同时间点和饱和度条件下的波场快照,通过对比分析实验模拟与数值模拟获得结果,表明数值模拟对实验模拟结果具有良好的验证作用。将实验尺度、数值模拟尺度和野外探测结果对比分析,验证了实验室

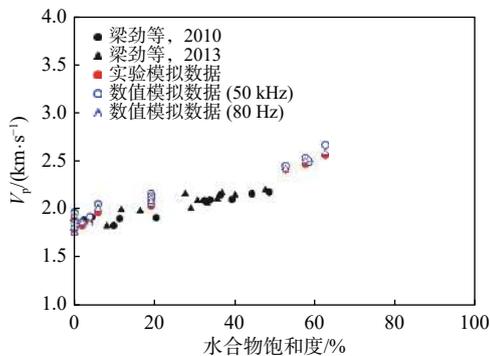


图 13 实验数据对比图

Fig.13 Comparison of experimental data

实验结果的可靠性,实验模拟和数值模拟结果对野外勘探分析具有重要的指导意义。基于在实验中取得的含水合物储层声学特性的认识,开展相应水合物储层的数值模拟研究,以数值模拟结果为依据进而分析原位储层地震波传播规律及速度,将更加有利于原位储层的精准识别,同时对水合物资源的准确评估具有重要意义。

5 结论

(1)含水合物沉积物声学特性的室内实验模拟工作与数值模拟工作具有良好的对应,数值模拟结果很好的印证了实验室模拟实验的结果,在实验室内进行相应物理模型的岩石物理模拟实验具有可行性,获取的实验结果可靠并具有指导性。

(2)实验模拟与数值模拟实验结果同野外探测数据走势一致,具有一致的变化趋势。物理模拟实验和数值模拟结果对野外勘探数据分析具有重要的指导意义。室内尺度难以开展的模拟实验可以通过有效数值建模的方式进行含水合物储层声学特性分析,以获取有效参数供野外数据分析参考。

参考文献:

- [1] Boswell R, Collett T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4: 1206-1215.
- [2] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1633-1652.
- [3] 孙运宝, 赵铁虎, 蔡峰. 国外海域天然气水合物资源量评价方法对我国的启示[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(1): 31-39.
- [4] Li J F, Ye J L, Qin X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. China Geology, 2018, 1(1): 5-16.
- [5] 孙致学, 朱旭晨, 刘奎, 等. 联合深层地热甲烷水合物开采方法及可行性评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 146-156.
- [6] 李彦龙, 陈强, 胡高伟, 等. 神狐海域W18/19区块水合物上覆层水平渗透系数分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 157-163.
- [7] 业渝光. 天然气水合物实验探测和测试技术[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(6): 37-43.
- [8] 龚建明, 廖晶, 尹维翰, 等. 北印度洋马克兰增生楔天然气水合物的成藏模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 148-155.

- [9] Pecher I A, Henrys S A, Wood W T, et al. Focussed fluid flow on the Hikurangi Margin, New Zealand — Evidence from possible local upwarping of the base of gas hydrate stability[J]. *Marine Geology*, 2010, 272(1/4): 99-113.
- [10] 孙建孟, 罗红, 焦滔, 等. 天然气水合物储层参数测井评价综述[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 715-723.
- [11] Ye J L, Wei J G, Liang J Q, et al. Complex gas hydrate system in a gas chimney, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 104: 29-39.
- [12] Winters W J, Waite W F, Mason D H, et al. Methane gas hydrate effect of sediment acoustic and strength properties[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 127-135.
- [13] Priest J A, Best A I, Clayton C, et al. A laboratory investigation into the seismic velocities of methane gas hydrate-bearing sand[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B04102.
- [14] Priest J A, Rees E V L, Clayton C. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: B11205.
- [15] 胡高伟, 业渝光, 张剑, 等. 松散沉积物中天然气水合物生成、分解过程与声学特性的实验研究[J]. *现代地质*, 2008, 22(3): 465-474.
- [16] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic properties of gas hydrate-bearing consolidated sediments and experimental testing of elastic velocity models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: B02102.
- [17] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic properties of hydrate-bearing unconsolidated sediments measured by the bender element technique[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 635-647.
- [18] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic response of gas hydrate formation in sediments from South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 52: 1-8.
- [19] Bu Q T, Hu G W, Ye Y G, et al. The elastic wave velocity response of methane gas hydrate formation in vertical gas migration systems[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(3): 555-569.
- [20] Bu Q T, Hu G W, Ye Y G, et al. Experimental study on 2-D acoustic characteristics and hydrate distribution in sand[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(2): 1012-1026.
- [21] Bu Q T, Hu G W, Liu C L, et al. Acoustic characteristics and micro-distribution prediction during hydrate dissociation in sediments from the South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2019, 65: 135-144.
- [22] 孟庆生, 何樵登, 朱建伟, 等. 基于BISQ模型双相各向同性介质中地震波数值模拟[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(2): 217-221.
- [23] 阚光明. 海底沉积物声波传播特性及数值模拟[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [24] 彭传正, 李才明, 王明春. 基于改进BISQ模型的地震波场数值模拟[J]. *物探化探计算技术*, 2007, 29(1): 15-18.
- [25] Leclair P, Cohen - Ténoudji F, Aguirre - Puente J. Extension of Biot's theory of wave propagation to frozen porous media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, 96(6): 3753-3768.
- [26] 方跃龙. 含水合物松散沉积物的二维超声成像技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [27] 许马光. 基于双相介质理论的天然气水合物识别方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [28] Wright J F, Nixon F M, Dallimore S R, et al. A method for direct measurement of gas hydrate amounts based on the bulk dielectric properties of laboratory test media[C]//The Proceedings of the 4th International Conference on Gas Hydrates. Yokohama, 2002: 745-749.
- [29] Zhu X, Memechan G A. Numerical simulation of seismic responses of poroelastic reservoirs using Biot theory [J]. *Geophysics*, 1991, 56(3): 328-339.
- [30] 杨佳佳, 何兵寿, 张建中. 海底天然气水合物 OBS 多分量地震正演模拟[J]. *应用地球物理*, 2014, 11: 418-428.
- [31] Wu N Y, Liu C L, Hao X L. Experimental simulations and methods for natural gas hydrate analysis in China[J]. *China Geology*, 2018, 1(1): 61-71.
- [32] 赵群, 郭建, 郝守玲, 等. 模拟天然气水合物的岩石物理特性模型实验[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 649-655.
- [33] 彭一民, 孙进忠. 超声地震模型实验相似准则[J]. *勘察科学技术*, 1987(5): 52, 58-61.
- [34] Helgerud M, Dvorkin J, Nur A, et al. Elastic wave velocity in marine sediments with gas hydrates: Effective medium modeling[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 2021-2024.
- [35] 梁劲, 王明君, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域含天然气水合物沉积层的速度特征[J]. *天然气工业*, 2013, 33(7): 29-35.
- [36] 梁劲, 王明君, 陆敬安, 等. 南海神狐海域含水合物地层测井响应特征[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 506-514.

ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF HYDRATE-BEARING SEDIMENTS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATIONS RESULTS

BU Qingtao^{1,2}, LIU Shengbiao³, HU Gaowei^{1,2*}, LIU Changling^{1,2}, WAN Yizhao^{1,2}

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Acoustic characteristics of hydrate-bearing sediments are very important in hydrate exploration. So far, some important research progresses have been reached in experimental simulation and rock physics modeling. However, the numerical simulation based on experimental conditions and comparative studies between the above are still lacking. This paper intends to obtain the acoustic characteristics of hydrate reservoir through physical experiment simulation by combining laboratory physical simulation together with experimental reservoir numerical simulation. On the basis, a geological model is constructed based on the simulated experimental device model, and the reservoir velocity results obtained at the frequencies of 50 kHz and 80 Hz under different hydrate saturation conditions, and the wave field snapshots at different time points and saturation conditions are obtained. Comparative analysis of the similarities and differences are carried out between the results obtained by experimental simulation and numerical simulation. The research shows that the correlation between the wave velocity of the hydrate reservoir at different times obtained under the three simulation conditions is good. The numerical simulation results confirm the results of the laboratory simulation experiments, suggesting that it is feasible to carry out corresponding rock physical simulation experiments in laboratory. Comparing the results of experimental simulation and numerical simulation experiment with field detection data, there is a consistent change trend, indicating that the results of physical simulation experiment and numerical simulation have important guiding significance for field exploration data analysis.

Key words: natural gas hydrate; acoustic characteristics; experimental simulation; numerical simulation; comparative analysis