

模拟岩芯中天然气水合物超声检测技术

顾轶东^{1,2}, 林维正², 张 剑³, 业渝光³

(1. 锡山经济开发区规划局, 无锡 214101; 2. 同济大学声学研究所, 上海 200092; 3. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 天然气水合物广泛分布在大陆、岛屿的斜坡地带以及海洋和一些内陆湖的深水环境, 基于双相多孔媒质理论, 分析和研究在孔隙中天然气水合物发生相变过程引起的多孔介质物性的变化而导致的声波传播的改变, 可以找出其中的变化规律, 对于研究岩芯中的天然气水合物具有重要的理论意义和实际价值。在模拟岩芯中天然气水合物发生相变过程中, 纵波和横波速度随着孔隙度的增大而减小; 衰减随着孔隙度的增大而增大, 这些结果表明了实验结果与理论结果基本吻合, 并为进一步的实验工作打下了良好的基础。

关键词: 岩芯; 天然气水合物; 超声; 声速; 幅度

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-03-0218-04

Detection of nature gas hydrates in rocks using ultrasound

GU Yi-dong^{1,2}, LIN Wei-zheng², ZHANG Jian³, YE Yu-guang³

(1. Programming Bureau of Xishan Economic Development Zone, Wuxi 214101; 2. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Nature gas hydrate deposits in many places including slope areas of continent and islands, sea floor and deep lakes. Study of the waves propagation changes based on the theory of double phase porous media is of significance both in theoretical and practical aspects. While phase change of natural gas hydrate takes place in the rock, with the increase of porosity, speeds of longitudinal and shear waves are reduced, and the decay increased. These indicate the general agreement between the experimental and theory results, and form a good foundation for further experiments.

Key words: rock; natural gas hydrate; ultrasound; velocity; amplitude

1 引 言

天然气水合物(Natural Gas Hydrate)又称可燃冰,是在一定的温度、压力、气体饱和度等条件下由水和天然气组成类冰的、非化学计量的笼形包合物(Clatrate)。天然气水合物既是未来新的、也是危险的能源。有关天然气水合物的开发利用需要非常小心谨慎。在考虑其资源价值的同时,必须充分注意到有关的开发利用可能给人类带来的严重环境灾难。如果天然气水合物的开采不当,将会加剧全球

气候变暖趋势,这种作用最终将使全球气候变得不稳定,从而造成环境灾害,严重危及人类自身的生存。在天然气水合物开发利用的设计和实施阶段,必须有足够的防范意识和技术措施,防止或尽可能减少天然气水合物开发利用造成的环境影响^[1]。

常用的检测天然气水合物的生成和分解的方法有光学、声学和电学等^{[2][3]}。天然气水合物在纯水中的生成和分解可以利用光通率的变化来进行判断,在一定的压力下降低温度,水合物大量生成时光通率会突然降低,此后慢慢升温,水合物分解时光通率又突然上升。但是为了模拟海洋天然气水合物,需采用水、砂、甲烷等混合物,因其不透明性,采用光通率检测方法就无能为力了。基于双相多孔介质理论,考

虑在不同介质中声学参数的变化, 可以采用超声的方法进行检测。本文就是利用青岛海洋地质研究所的天然水合物地球物理模拟实验监测系统, 以及同济大学声学所研制的高精度天然气水合物超声检测装置, 进行了模拟岩芯中天然气水合物超声检测实验, 并取得了一定的效果。

2 实验原理

双相多孔介质模型与经典的弹性、黏弹性介质模型比较, 更能逼真地描述含天然气水合物岩芯的情况, 其波动方程组也包含了丰富的物理信息。根据实测的声学参数(如声速、衰减、频率)来反演岩芯物性信息(如孔隙度、弹性模量、水合物饱和度)具有直接的应用价值, 因此双相多孔介质波动分析就显得十分重要。而 Biot 的“含饱和流体多孔弹性固体中的波传播理论”是这一领域内的经典之作^{[4][5]}, 基于 Biot 理论, 对双相多孔介质进行波动分析后找出声学参数与沉积物物性参数之间的变化规律, 为天然气水合物超声检测实验提供有力的理论依据。

根据 Biot 理论推导出的声速和衰减的表达式上可以看出, 它们是四个弹性参数、固相和液相密度、孔隙度以及频率的函数。而其中四个弹性参数及固相、液相密度又与孔隙度有关^[6], 因此对于给定频率的情况下, 声速和衰减就是孔隙度的函数。岩芯中天然气水合物发生的相变过程可以看作是孔隙度发生改变的过程, 此时声速和衰减也必将随着一起变化, 根据实验选取适当的参数, 采用数值方法可以得到声速随着孔隙度的增大而减小; 衰减随着孔隙度的增大而增大的变化规律。

3 实验仪器和设备

3.1 天然气水合物模拟实验装置

天然气水合物岩芯实验测试系统主要包括高压冷却系统、TDR(Time-Domain Reflectometer)检测系统和超声检测系统。仪器设备由华东理工大学设计完成, 其外形结构如图 1 所示:

3.2 超声检测系统

由同济大学声学研究所开发的高精度天然气水合物超声检测仪是针对岩样天然气水合物模拟实验而设计的。其特点是: 采用 Tektronix Technology 公



图 1 仪器外形图

Fig.1 Figation of apparatus



图 2 换能器

Fig.2 Transducer

司的高速 A/D 数据采集卡, 声时测量精度为 0.01 μ s, 波幅测量精度达 14bit, 可以同时测量岩样纵波和横波的声速, 并且测量过程声学参数(声时、幅度和频率)可以提高自动判读及记录储存等速度。超声换能器(图 2)为横波换能器, 可以同时测量岩样纵波和横波的声速, 频率范围在 500kHz 左右。仪器工作原理如图 3 所示:

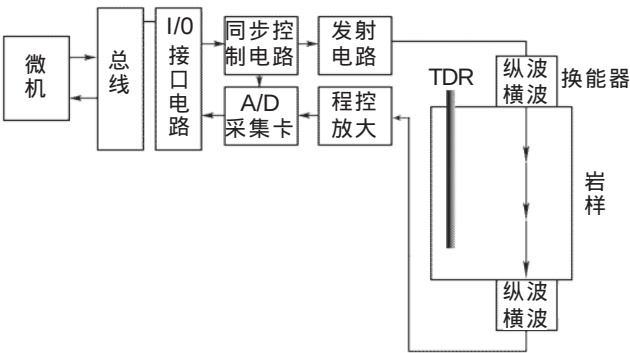


图 3 仪器原理图

Fig.3 Instrument principle chart

4 实验结果

由于实验条件的限制,文中做的水合物在岩芯中生成的模拟实验研究,选用一定粒径的沙子,并用水饱和,然后放入高压反应釜内,采用水域降温,当温度降至冰点附近,沙子孔隙间的饱和水开始结冰,此时可看作岩芯中孔隙度降低、水合物开始生成过程,记录超声波形的变化,就可以初步判断水合物生成时声学参数的变化规律。

4.1 典型超声波形图

温度: -2.12℃, 纵波声速: 4550m/s, 纵波幅度: 17.4mV, 横波声速: 2444m/s, 横波幅度: 650mV

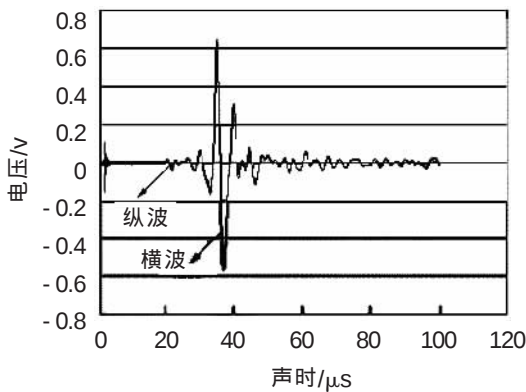


图 4 波形图
Fig.4 Wave spectrum

4.2 天然气水合物超声参数综合分析

在实验中每隔相同时间进行波形采集,假设孔隙度随时间均匀变化,那么在一定时间内孔隙度由0.5变化到0(实验所选模型的孔隙度约为0.5),则根据这段时间内所测得的声学参数就可以和孔隙度建立一定的关系,如图5~8所示:

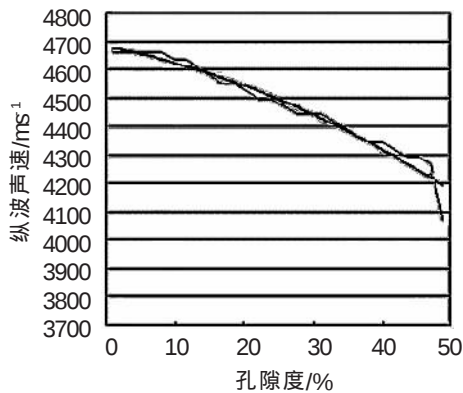


图 5 纵波声速与孔隙度关系曲线
Fig.5 Relationship of longitudinal wave velocity and porosity

回归方程和相关系数为: $y = -0.3434x^2 - 8.0321x + 4685.4$, $R^2 = 0.9567$

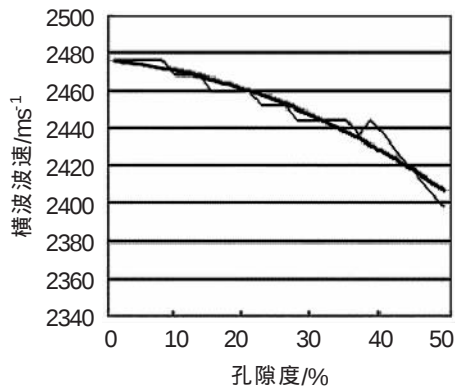


图 6 横波声速与孔隙度关系曲线
Fig.6 Relationship of transverse wave velocity and porosity

回归方程和相关系数为: $y = -0.0707x^2 - 0.5004x + 2476$, $R^2 = 0.9504$

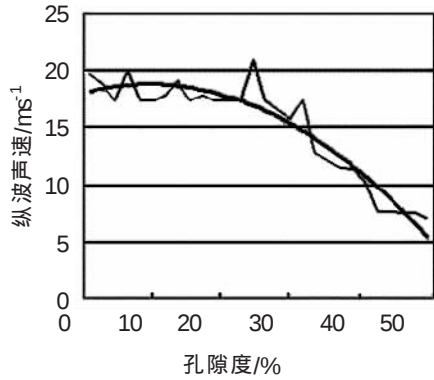


图 7 纵波幅度与孔隙度关系曲线
Fig.7 Relationship of longitudinal wave amplitude and porosity

回归方程和相关系数为: $y = -0.0269x^2 + 0.306x + 17.912$, $R^2 = 0.9058$

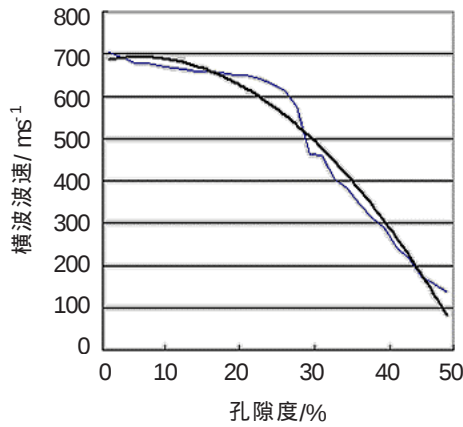


图 8 横波幅度与孔隙度关系曲线
Fig.8 Relationship of transverse wave amplitude and porosity

回归方程和相关系数为: $y = -1.0103x^2 + 6.884x + 680.39$, $R^2 = 0.9767$

从图中看出,纵波和横波速度随着孔隙度的增大而减小;衰减随着孔隙度的增大而增大,这些结果表明了实验结果与理论上是十分吻合的。

5 结 语

在模拟岩芯中天然气水合物发生相变过程中,纵波和横波速度及衰减的变化规律与理论结果基本吻合,为进一步的实验工作打下了良好的基础。在此基础上还要继续完善天然气水合物超声检测实验装置,优化软件设计,为建立声学参数与水合物饱和度之间的函数关系进一步探讨。

参 考 文 献

[1] 周怀阳, 彭小彤, 叶瑛. 天然气水合物[M]. 海洋出版

社. 2000, 4.
[2] Tatsuo Naekawa. Equilibrium conditions of gas hydrate from mixtures of methane and ethane and sediment[J]. Bull. Geol. Surv. Japan, 1998. 49(10), 501-507.
[3] Buffett B A, Zatsepina O Y. Formation of gas hydrate from dissolved gas in natural porous media[J].Marine Geology 2000. 164: 69-77.
[4] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26: 182-185.
[5] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, part I: low frequency range [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1956, 28: 168-178.
[6] Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation[J]. J. App. Mech., 1957, 24: 594-601.