

南海神狐海域天然气水合物声波测井速度与饱和度关系分析

梁 劲¹, 王明君², 王宏斌¹, 陆敬安¹, 梁金强¹

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 利用南海北部神狐海域 A 站位的地震和测井资料综合分析神狐海域含天然气水合物沉积层的声波测井速度及水合物饱和度的分布特征和变化规律, 并对水合物饱和度的理论计算值和实测值进行对比分析, 同时对水合物稳定带的纵波速度特征与饱和度的关系进行了综合研究。结果表明: 神狐海域 A 站位的水合物层厚度约 20 m, 纵波速度在 1 873 ~ 2 226 m/s 之间, 水合物饱和度在 15.0% ~ 47.3% 之间变化, 水合物饱和度值相对较高; 受海底复杂地质因素的影响, 根据岩心孔隙水的氯离子淡化程度实测的水合物饱和度随声波速度的变化并不是单一的正比例关系, 而是随声波速度的升高而上下波动, 波动幅度在 10% ~ 20% 之间, 总体趋势上随声波速度的升高而升高, 并集中分布在理论曲线附近; 利用热弹性理论速度模型计算并校正后的水合物饱和度随声波速度的增加而有规律地增加, 水合物饱和度的理论计算值与实测数据比较吻合, 说明所建立的岩石物理模型正确, 模型参数选取合理。根据声波速度计算水合物饱和度这一方法可扩展到整个研究区域, 并为研究区的水合物资源量评价提供基础数据。

关键词: 天然气水合物; 声波测井速度; 饱和度; 南海神狐海域

中图分类号: P631.8 P744.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-8527(2009)02-0217-07

Relationship between the Sonic Logging Velocity and Saturation of Gas Hydrate in Shenhu Area, Northern Slope of South China Sea

LIANG Jin¹, WANG Ming-jun², WANG Hong-bin¹, LU Jing-an¹, LIANG Jin-qiang¹

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510760 China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract The distributing features and change of sonic logging velocity and gas hydrate saturation in gas hydrate-bearing sediments were summarized with seismic and well logging data, furthermore, a comparative study was conducted between the theoretical calculation and in-situ measurement of gas hydrate saturation in site A, Shenhu area, northern slope of South China Sea. The relationship between sonic velocity and gas hydrate saturation in gas hydrate stability zone has been analyzed, too. The analysis results show that (1) the thickness, sonic velocity, and gas hydrate saturation of gas hydrate-bearing zone are about 20 m, 1,873–2,226 m/s, 15.0%–47.3%, respectively. (2) the in-situ measurement of gas hydrate saturation which was derived from the field test of the chloride content in pore water is not direct proportion to sonic velocity for the influence of seabed geological factors, but fluctuates according to sonic velocity with the range of 10%–20%, and generally increases with increasing sonic velocity. (3) the calculated value of gas hydrate saturation from velocity model of heat elasticity theory regularly rises with increasing velocity. The fit relationship between the theoretical calculation and in-situ value of gas hydrate saturation indicates that the established rock physics model is correct, and the selected parameters of model are reasonable. This method can be extended to the total study area.

收稿日期: 2008-03-10; 改回日期: 2009-02-04; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219508)。

作者简介: 梁 劲, 男, 高级工程师, 1971年出生, 应用地球物理专业, 主要从事天然气水合物的调查与研究。

E-mail: liangjin1999@163.com

to provide valuable data for resource evaluation of gas hydrate

Key words gas hydrate; sonic logging velocity; saturation; Shenhu area; South China Sea

0 引言

天然气水合物是在低温、高压环境下,由水的冰晶格架及其间吸附的天然气分子组成的笼状结构化合物,广泛分布于海底和永久冻土带。据估计,全球天然气水合物中蕴涵的有机碳总量是已探明的所有煤、石油、天然气等化石类燃料中有机碳总量的两倍,因而是一种极有前途的21世纪乃至以后更长时期的潜在能源。水合物对温度、压力十分敏感,由温压变化引起的水合物分解可释放出大量的温室效应极强的甲烷气体,也会引起海底滑坡,从而破坏钻井平台和海底电缆等基础设施。因此,当今对赋存于海底的水合物研究已在能源、环境和灾害等领域引起了普遍关注。一般认为,海底天然气水合物的储量主要取决于水合物的分布面积、水合物稳定带的厚度、沉积层的孔隙度及水合物的饱和度(或充填率)等,所以水合物在沉积物孔隙中的饱和度对其储量的估计具有重要的意义^[1-2]。

广州海洋地质调查局于2007年4-6月在南海神狐海域进行了天然气水合物钻探取样工作,其中在3个站位取得了天然气水合物实物样品。本研究通过对神狐海域声波测井速度与现场测试的水合物饱和度关系的详细分析,结合声波测井速度特征和热弹性理论推导的纵波速度理论模型,对声波测井速度与水合物饱和度的关系进行分析和探讨。

1 研究区地质概况

神狐海域位于南海北部陆缘陆坡区的中段,是欧亚板块、太平洋板块和印度-澳大利亚板块交汇处的一部分,经历了由板内裂陷演变为边缘拗陷的过程。研究区基底构造复杂,断裂发育,新构造作用活跃,由于受到北东、北东东、东西、北西方向断裂的控制,南海北部陆坡海底地形呈阶梯状逐级下降,在陆坡上发育有深海槽、海底高原、陆坡台地、冲刷槽沟、海底陡崖、海底陡坡和海谷海丘等各种特殊构造地貌或地质体。研究区内张性断层和褶皱构造发育,为下部天然气向浅部地层运移开辟了有利通道,促使气体向上

运移到水合物稳定带之上,而褶皱构造更易于对天然气的捕获,进而形成水合物矿藏。区内还发育一系列可能与天然气水合物有关的特殊构造体,如滑塌体、泥底辟、增生楔等,是天然气水合物发育的有利区域^[3-10]。研究区水深在800~2 000 m之间,东西横跨约20 km,南北纵跨25 km,水深线走向大体与海岸线平行。海底的地形比较复杂,坡度变化大,上陆坡陡,下陆坡缓。晚中新世以来深水重力流相当发育,沉积速率为40~120 cm/ka,高的沉积速率导致发育有巨厚的中、新生代快速沉积物,厚达几千米,有的甚至超过万米,并在沉积物中积累大量的有机质,为细菌将其降解成甲烷气提供物源。经过近几年来的调查,区内已发现多处BSR发育区^[7-8],并在2007年4-6月实施的钻探中取得天然气水合物实物样品。

2 天然气水合物饱和度的理论计算

天然气水合物饱和度的估算可以利用一些参数进行反演计算来获得,反演方法有多种分类方法,根据反演的目标不同可分为属性参数反演法、岩性参数反演法、储层参数反演法3类。根据反演方法的不同,可分为迭代正演模拟法、线性反演法与非线性反演法。在本文中主要应用迭代正演模拟法反演水合物饱和度。其基本思想是:假定模型的孔隙度、密度、初始饱和度及一些物性参数已知,根据给定模型计算初始饱和度下的声波速度,与实际反演或测井得到的声波速度比较,通过不断修改模型饱和度参数,使理论计算的速度值和实际反演值或测井得到的记录最佳匹配,反复修正模型来达到反演饱和度参数的目的。常用的声波速度估计天然气水合物饱和度理论包括两种:一是根据双相介质理论推导出纵波速度公式来估计天然气水合物含量和游离气的饱和度^[12-13];二是根据热弹性理论推导出的纵波速度公式估计天然气水合物含量和游离气的饱和度^[14]。本文采用热弹性理论推导的纵波速度公式:

$$v_p = \left\{ \left[\left(K + \frac{4}{3} \mu \right) + \frac{9 \cdot K^2 \cdot \alpha^2 \cdot T_0}{\rho_m \cdot C_e} \right] \cdot \frac{1}{\rho_h} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中: v_p , 纵波速度; K , 有效体积模量; μ , 剪切模量; α , 热膨胀系数; T_0 , 初始温度, 开尔文温

度; C_w , 比热系数; ρ_m , 沉积层有效密度。

假定地层为均匀的多孔隙岩石且孔隙被流体饱和, 孔隙中填充天然气水合物和水, 沉积在孔隙空间的天然气水合物包裹着岩石颗粒, 类似于成岩胶结物, 影响固体岩石的体积模量, 为接触胶结型水合物^[15]。相邻颗粒间普遍存在机械相互作用, 同初始的岩石 (因为初期为软胶结) 相比, 天然气水合物沉积处声波速度高, 若沉淀于颗粒接触处, 则小颗粒物质的硬度较高^[16]。

有效热膨胀系数和有效比热系数定义为:

$$\alpha = (1 - \phi_{\text{eff}}) \alpha_s + \phi_{\text{eff}} (S_w \alpha_w + S_g \alpha_g) \tag{2}$$

$$C_e = (1 - \phi_{\text{eff}}) C_{es} + \phi_{\text{eff}} (S_w C_{ew} + S_g C_{eg}) \tag{3}$$

其中: ϕ_{eff} , 有效孔隙度; α_s , 颗粒的热膨胀系数; α_w , 水的热膨胀系数; α_g , 游离气的热膨胀系数; S_w , 水的饱和度; S_g , 游离气的饱和度; C_{es} , 颗粒的比热; C_{ew} , 水的比热; C_{eg} , 游离气的比热。

体积模量 K 采用 Gassmann 导出的计算公式^[17]:

$$K = \frac{K_b (K_m + R)}{K_b + R} \tag{4}$$

其中: K_b , 岩石基质固有的体积模量; K_m , 干燥岩石骨架体积模量; R , 泥质含量。

假定流体相的压缩率 C_f 和固体相的压缩率 C_b 分别为:

$$C_b = \frac{1}{2} (S_s \cdot C_s + S_h \cdot C_h) + \frac{1}{2} \left[\frac{S_s}{C_s} + \frac{S_h}{C_h} \right]^{-1} \tag{5}$$

$$C_f = \frac{1}{2} (S_w \cdot C_w + S_g \cdot C_g) + \frac{1}{2} \left[\frac{S_w}{C_w} + \frac{S_g}{C_g} \right]^{-1} \tag{6}$$

其中: S_s , 颗粒的饱和度; S_h , 水合物的饱和度; C_s , 颗粒的可压缩率; C_h , 水合物的可压缩率; S_w , 水的饱和度; S_g , 游离气的饱和度; C_w , 水的压缩率; C_g , 游离气的压缩率。体积模量和压缩率之间满足关系式: $K = 1/C$ 。

考虑到在天然气水合物饱和度较高时, 水合物和固体基质胶结情况的影响, 采用渗滤模型^[18], 即从连续状态 (完全胶结) 到不连续状态 (无胶结) 的转变体系。基质的剪切模量定义为:

$$\mu_{\text{sn}} = [\mu_{\text{snKT}} - \mu_{\text{sn0}}] \cdot [\phi_h / (1 - \phi_s)]^{3.8} + \mu_{\text{sn0}} \tag{7}$$

其中: μ_{snKT} , 固体骨架剪切模量 (完全胶结); μ_{sn0} , 固体骨架剪切模量 (无胶结); ϕ_h , 水合物的含量; ϕ_s , 颗粒的含量。

对于流体相密度 ρ_f 和固体相密度 ρ_s , 则分别采用:

$$\rho_f = S_w \cdot \rho_w + S_g \cdot \rho_g \tag{8}$$

$$\rho_b = S_s \cdot \rho_s + S_h \cdot \rho_h \tag{9}$$

其中: ρ_w , 水的密度; ρ_g , 游离气的密度; ρ_s , 颗粒的密度; ρ_h , 水合物的密度。

与固体骨架颗粒接触型胶结的天然气水合物, 包裹或沉积在岩石颗粒相中, 使骨架的孔隙空间变小, 这种情况下用有效孔隙度 (ϕ_{eff}) 表示。孔隙中充填流体时, 并不影响骨架孔隙的变化, 孔隙度保持不变。有效孔隙度定义为:

$$\phi_{\text{eff}} = (1 - c_h) \cdot \phi \tag{10}$$

其中: c_h , 天然气水合物的浓度; ϕ , 岩石骨架的孔隙度。那么, 充填水合物或流体的沉积层的有效密度 ρ_m 可以表示为:

$$\rho_m = (1 - \phi_{\text{eff}}) \cdot \rho_b + \phi_{\text{eff}} \cdot \rho_f \tag{11}$$

根据上述天然气水合物饱和度的估算原理, 建立声波速度与孔隙度、饱和度的岩石物理模型, 模型参数包括沉积物中岩石矿物组分、海水、游离气和天然气水合物的物性参数。把根据假定模型的初始饱和度、通过热弹性理论计算出的含水合物地层的声波速度作为理论值, 根据迭代正演模拟法, 通过不断修正模型参数, 使理论值和实际值最佳匹配, 多次迭代, 即可计算出天然气水合物的饱和度^[19-22]。

3 研究区天然气水合物声波测井速度和饱和度的特征

3.1 天然气水合物声波测井速度特征

用测井技术来确定海洋沉积物中气体水合物与其下伏地层游离气的联系已被证明是非常有效的方法。测井技术能揭示实验室样品难以测量到的气体水合物的原位性质, 声波速度测井在确定地震信号与气体水合物及游离气关系的作用尤其明显。如果在气体水合物层下存在游离气层, 会导致声波速度的减小或出现强反射。神狐海域中部海区在 2007 年钻探水合物的几个先导孔中, 有部分钻孔的声波测井曲线呈现明显的高速、速度倒转等天然气水合物存在的特征。根据这些速度异常特征, 结合其他地球物理和地质资料, 先后在 3 个站位成功地钻获了天然气水合物实物样品, 下文利用其中的一个站位 (A 站位) 的声波测井资料, 结合地震反射剖面, 来分析水合物层的声波测井速度特征。

A 站位位于神狐海区中部, 水深 1 232 m, 最大井深 248 m。图 1 为该站位的声波测井曲线, 这

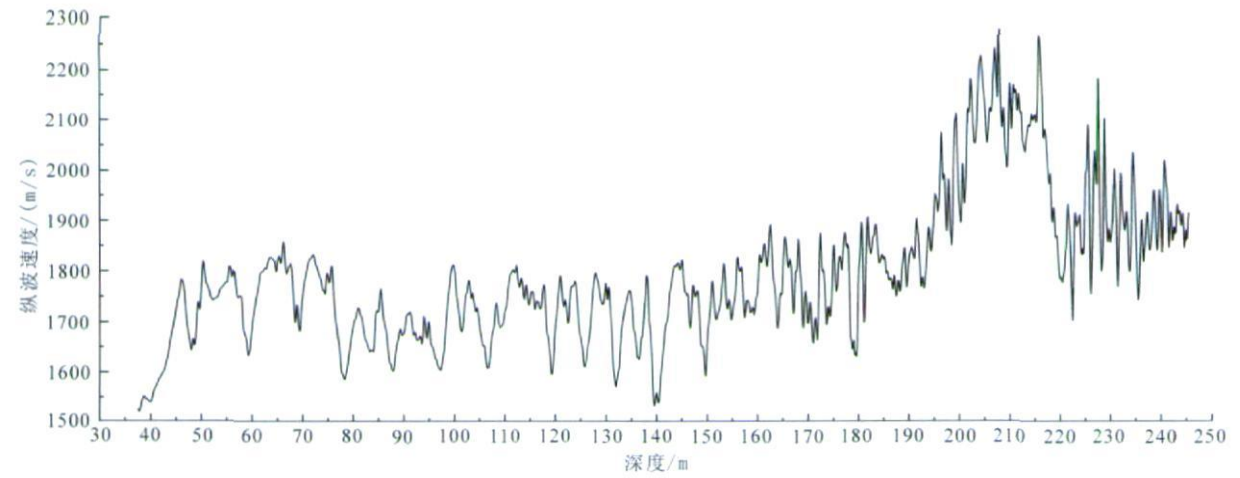


图1 南海神狐海域 A 站位声波测井速度曲线
Fig.1 Sonic logging velocity data of site A in Shenhu area, South China Sea

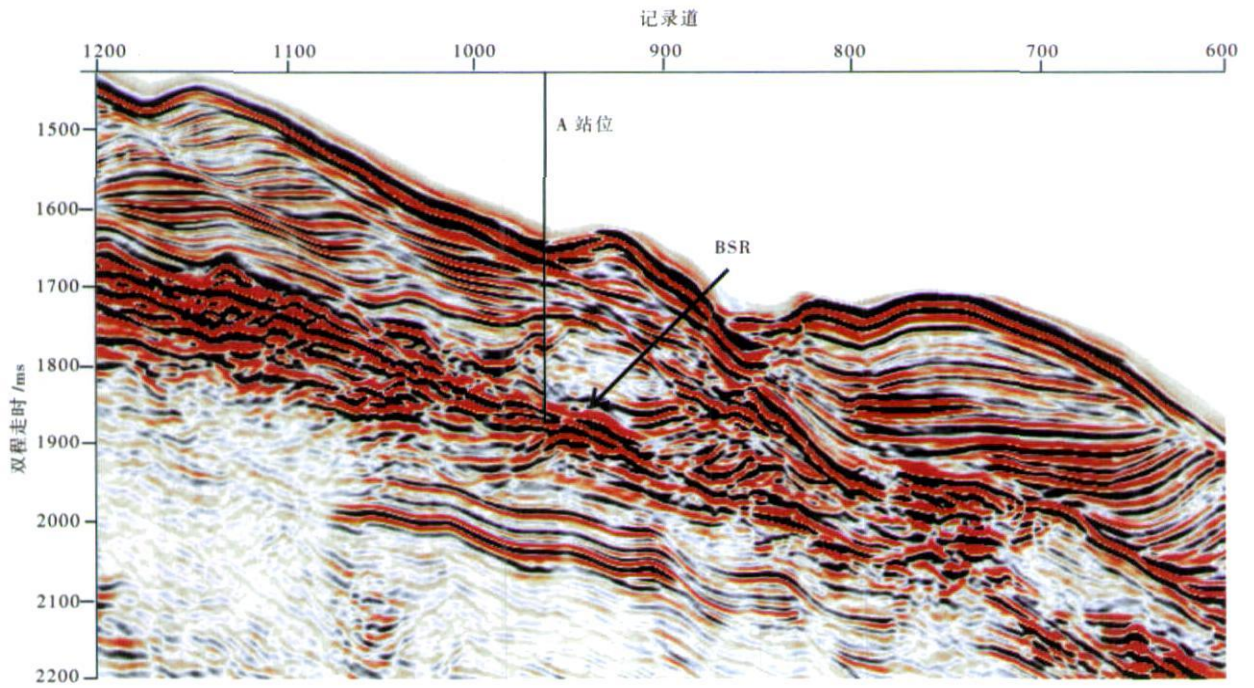


图2 通过神狐海域 A 站位的地震反射剖面
Fig.2 Seismic reflection profile passing through site A in Shenhu area, South China Sea

是一条典型的含天然气水合物的速度异常曲线，声波测井的深度范围为 40~248 m，声波速度主要在 1 600~2 250 m/s 的范围内变化。按曲线的变化特征可分为 4 段：(1) 40~195 m 段，声波速度缓慢增大，范围在 1 600~1 900 m/s 之间，是普通的沉积物特征。(2) 195~215 m 段，声波速度随深度增加而起伏，且表现为递增快，递减快，整段呈典型三段式异常特征，即两头大中间小；在 195~215 m 段声波速度明显增高，该深度范围内声波速度平均值为 2 105 m/s。在该段成功采集到水合物样品，水合物层厚度约 20 m，实测水合物饱和度最高为 47.3%。(3) 215~220 m 段，声波速度快速下降到 1 750 m/s，是水合物之下存在游离气层的缘故。(4) 220~248 m 段，声波速度缓慢增加，为普通的沉积物特征。在通过 A 站位的地震剖面上，BSR 特征明显，BSR 之上为眼球状结构，BSR 位置距海底 239 ms(图 2)，根据时深转换关系，对应的深度约为 210 m，即水合物层的测井深度与地震解释的 BSR 深度位置相差不大。

3.2 天然气水合物饱和度理论数据和现场测试结果对比

由于海底地层存在许多不确定的因素，利用声波速度求取的水合物饱和度一般都需要进行校正。天然气水合物一般分布于海底以下未固结的沉积物中，地层岩性主要为粉砂质泥岩。在利用声波速度求天然气水合物饱和度时，应首先考虑对声波速度进行压实校正。在未压实的松软地层中，声波速度降低，而在孔隙度较大且孔隙被流体或气体填充的压实地层中，声波速度同样降低，因此只有正确地校正地层的压实效应才能求准地层的孔隙度和饱和度参数^[23-25]。

表 1 为利用热弹性理论的速度模型计算并校正的天然气水合物饱和度数据，理论计算的天然气水合物饱和度数据是一种理想的饱和度值，在理论计算的水合物饱和度和纵波速度关系图(图 3)中可以看出，饱和度随纵波速度的增加而有规律地增加，其变化规律满足公式：

$$v_p = 1800.7S_h^4 - 2348.9S_h^3 + 1715.5S_h^2 + 405.17S_h + 1847$$

(12)

式中： v_p 为纵波速度； S_h 为水合物饱和度。

表 1 理论计算的水合物饱和度

Table 1 Hydrate saturation of theoretical calculation

纵波速度 /(m/s)	水合物饱 和度 %	纵波速度 /(m/s)	水合物饱 和度 %
1 902	10	2 435	60
1 982	20	2 599	70
2 074	30	2 802	80
2 178	40	3 071	90
2 297	50		

含水合物的沉积物中孔隙水的淡化程度与水合物饱和度之间存在着某种相关性^[9-11]，其中氯离子浓度自上而下减小，这是岩心中水合物分解所释放的低盐度水淡化所造成的，所以现场实测一般是利用岩心孔隙水氯离子淡化程度来计算水合物的饱和度。

利用岩心孔隙水氯离子淡化程度计算水合物的饱和度，首先需要建立水合物分解前的原位孔隙水氯离子浓度剖面，从而制约由水合物分解所造成的稀释程度。假定岩心孔隙水氯离子剖面上小于原位孔隙水氯离子剖面的部分都代表了水合物分解的影响，则可以用如下经验公式进行水合物饱和度的估算^[26-28]：

$$S_h = 1/\rho_h (1 - \rho(C_{lw}) / \rho(C_{lw}^0))$$

(13)

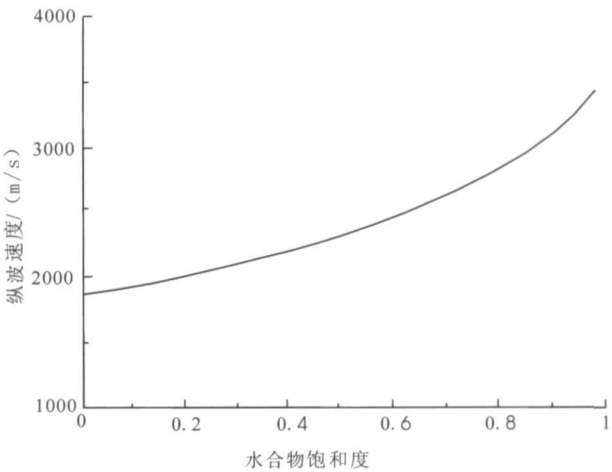


图 3 理论计算的水合物饱和度随纵波速度的变化曲线

Fig 3 Relationship between hydrate saturation of theoretical calculation and P-wave velocity

式中： S_h ，天然气水合物饱和度； ρ_h ，纯天然气水合物密度，取 0.9 g/cm^3 ； $\rho(C_{lw})$ ，实测的岩心孔隙水中氯离子浓度； $\rho(C_{lw}^0)$ ，原位孔隙水中氯离子的浓度，主要采用水取样温度探针测量获得。

图 4 为根据神狐海区 A 站位现场测试的水合物饱和度数据而绘制的水合物饱和度随声波速度变化的散点图。现场测试的水合物饱和度数据，是真实可靠的实测数据，虽然受复杂的地质因素影响较大，水合物饱和度与声波速度的对应并不严整，但总体趋势上与理论计算值接近。

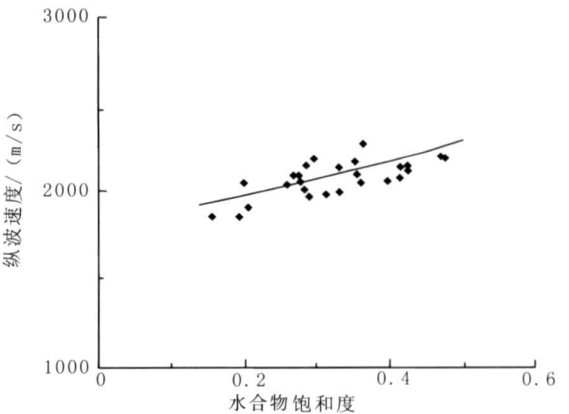


图 4 南海神狐海区 A 站位现场测试的水合物饱和度随声波速度变化散点图

Fig 4 Hydrate saturation from field test vs that from sonic velocity at site A in Shenhu area South China Sea

4 结果讨论

海底沉积层的地质因素相当复杂，通过热弹

性理论计算的水合物饱和度，是假设海底沉积物均匀变化的计算结果，忽略了海底复杂地质因素带来的影响，大大地简化了复杂的计算程序，是一种简单的计算结果，不可避免地存在一定的误差。利用岩心孔隙水氯离子淡化程度进行现场测试的水合物饱和度，虽然只是某一井口在垂向上的饱和度数据，但可以扩展到整个研究区域，并且体现了各种复杂的影响因素，是沉积层水合物饱和度的真实体现。

对比分析理论计算的水合物饱和度与现场测试的水合物饱和度数据，可以验证水合物饱和度的准确度和误差程度。图 5 为神狐海区 A 站位现场测试和理论计算的水合物饱和度随声波速度变化的关系图，从图中可以看出，神狐海区 A 站位的水合物饱和度值一般在 15.0% ~ 47.3% 之间，受海底复杂地质因素的影响，水合物饱和度随声波速度的变化并不是单一的正比例关系，而是随声波速度的升高而上下波动，波动幅度在 10% ~ 20% 之间，但总体趋势上是随声波速度的升高而升高，并集中分布在理论曲线附近，这说明计算声波速度与孔隙度、饱和度的理论岩石物理模型正确，模型参数选取合理，理论值和实测值的匹配达到最佳效果。

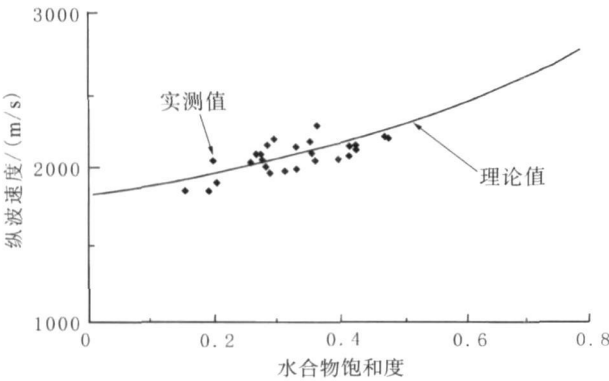


图 5 南海神狐海区 A 站位现场测试和理论计算的水合物饱和度对比

Fig 5 Relationship between hydrate saturation of field test and theoretical calculation at site A in Shenhu area South China Sea

5 结 论

通过对南海神狐海域 A 站位现场测试的水合物饱和度数据、声波测井速度以及理论计算的水合物饱和度的对比分析，总结出神狐海区水合物饱和度随声波速度的变化规律，并得出以下结论：

(1) A 站位水合物层厚度约 20 m，声波速度在 1 873~ 2 226 m/s 之间变化，水合物饱和度在 15% ~ 47.3% 之间变化，饱和度值相对较高。

(2) 利用热弹性理论推导的速度模型计算并校正的水合物饱和度值，简化了复杂地质因素带来的影响，水合物饱和度随声波速度的增加有规律地增加。

(3) 受海底复杂地质因素的影响，实测的水合物饱和度随声波速度的变化并不是单一的正比例关系，而是随声波速度的升高而上下波动，波动幅度在 10% ~ 20% 之间，总体趋势上随声波速度的升高而升高，并集中分布在理论曲线附近。

(4) 水合物饱和度理论曲线与实测数据比较吻合，说明所建立的岩石物理模型正确，模型参数选取合理，根据声波速度计算水合物饱和度这一方法可扩展到整个研究区域，并为研究区的水合物资源量计算提供基础数据。

参考文献:

[1] 梁劲, 王宏斌, 龚跃华, 等. 西沙海槽 BSR 发育区热流值计算及其特征分析 [J]. 南海地质研究, 2004 16(1): 105 - 114

[2] 王宏斌, 梁劲, 龚跃华, 等. 基于天然气水合物地震数据计算南海北部陆坡海底热流 [J]. 现代地质, 2005 19(1): 67- 73

[3] 梁劲, 王宏斌, 郭依群. 南海北部陆坡天然气水合物的地震速度研究 [J]. 现代地质, 2006 20(1): 123- 129

[4] 姚伯初, 杨木壮, 吴时国, 等. 中国海域的天然气水合物资源 [J]. 现代地质, 2008 22(3): 333- 341.

[5] 苏新, 陈芳, 于兴河, 等. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探 [J]. 现代地质, 2005 19(1): 1- 13

[6] 王宏斌, 黄永样, 梁劲, 等. 南海北部陆坡坳陷断裂带中水合物赋存的温压场环境 [J]. 现代地质, 2006 20(1): 103- 108.

[7] 刘学伟, 李敏锋, 张聿文, 等. 天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例 [J]. 现代地质, 2005 19(1): 23- 38.

[8] 宋海斌, 吴时国, 江为为. 南海东北部 973 剖面 BSR 及其热流特征 [J]. 地球物理学报, 2007 50(5): 1508 - 1517

[9] 祝有海, 饶竹, 刘坚, 等. 南海西沙海槽 S14 站位的地球化学异常特征及其意义 [J]. 现代地质, 2005 19(1): 39 - 44

[10] 邓希光, 付少英, 黄永样, 等. 南海北部东沙群岛 HD196 站位地球化学特征及其对水合物的指示 [J]. 现代地质, 2006 20(1): 92- 102

[11] 蒋少涌, 杨涛, 薛紫晨, 等. 南海北部海区海底沉积物中孔

隙水的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义 [J]. 现代地质, 2005, 19(1): 45–54

[12] Domenico S N. Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir [J]. Geophysics 1976 41: 882–894

[13] Domenico S N. Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs [J]. Geophysics 1977 42: 339–368

[14] 郭自强. 固体中的波 [M]. 北京: 地震出版社, 1982

[15] Ecker C, Dvorkin J, Nur A. Sediments with gas hydrates: Interfacial structure from seismic AVO [J]. Geophysics 1998, 63(5): 1659–1669.

[16] Dvorkin J, Nur A, Yin H. Effective properties of cemented granular material [J]. Mechanics of Materials 1994, 18: 351–366

[17] Gassmann F. Über die Elastizität poröser Medien [J]. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 1952 96: 1–21.

[18] 王秀娟, 刘学伟, 吴时国. 基于热弹性理论的水合物和游离气饱和度估算 [J]. 石油物探, 2005 44(6): 546–550

[19] 宋海斌. 天然气水合物的地球物理研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003.

[20] 王秀娟, 吴时国, 郭旋, 等. 南海陆坡天然气水合物饱和度估计 [J]. 海洋地质和第四纪地质, 2005, 25(3): 89–95

[21] 王秀娟, 吴时国, 徐宁. 地震属性参数在识别天然气水合物和游离气分布模式中的应用 [J]. 海洋与湖沼, 2006 37(3): 271–279.

[22] 王秀娟, 吴时国, 刘学伟. 天然气水合物和游离气估算的影响因素 [J]. 地球物理学报, 2006 49(2): 505–511

[23] 梁劲, 王宏斌, 赵志超. 射线追踪法在南海天然气水合物速度分析中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2007 29(6): 486–491.

[24] 梁劲, 王宏斌, 梁金强. Jason 反演技术在天然气水合物速度分析中的应用 [J]. 南海地质研究, 2006 18(1): 114–120

[25] 李正文, 赵志超. 地震勘探资料解释 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.

[26] 甘华阳, 王家生, 陈建文, 等. 海底天然气水合物的饱和度预测技术 [J]. 海相油气地质, 2004 9(1): 111–115.

[27] 张光学, 黄永样, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003

[28] 王祝文, 李舟波, 刘菁华. 天然气水合物的测井识别和评价 [J]. 海洋地质和第四纪地质, 2003, 23(2): 97–102