



张子煜, 潘豪杰, 刘鹏奇. 2026. 复杂赋存形态水合物储层纵波频散与衰减表征及其应用. 地球物理学进展, 41 (1): 0194-0205, doi:10. 6038/pg2026I10401.

ZHANG ZiYu, PAN HaoJie, LIU PengQi. 2026. Characterization of P-wave dispersion and attenuation of complex-morphology hydrate reservoirs and application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41 (1): 0194-0205, doi:10. 6038/pg2026I10401.

复杂赋存形态水合物储层纵波频散与衰减表征及其应用

Characterization of P-wave dispersion and attenuation of complex-morphology hydrate reservoirs and application

张子煜¹, 潘豪杰^{1*}, 刘鹏奇²

ZHANG ZiYu¹, PAN HaoJie^{1*}, LIU PengQi²

1. 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉 430100

2. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所, 三亚 572025

1. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 572025, China

摘要 地震波频散与衰减是水合物储层的重要物理属性,对准确识别与量化表征水合物储层具有重要意义.水合物饱和度与赋存模式的耦合影响通常会极大地改变地震波速度频散和衰减特征,然而现有的衰减表征理论大多基于单一或少数赋存形态水合物假设而建立,难以准确表征复杂赋存形态水合物储层.本文结合广义有效介质模型与双相介质理论,构建了同时考虑接触胶结、颗粒包裹、骨架支撑和孔隙充填等四种赋存模式水合物储层衰减理论模型.对比了不同赋存形态下基于 Biot 理论和 BISQ 理论模拟的纵波衰减特征, Biot 理论预测的衰减值要远低于 BISQ 模型预测结果.以基于 BISQ 理论的衰减模型为基础,建立了识别水合物赋存模式的纵波速度和衰减与水合物饱和度交会图版,发展了赋存形态约束的衰减岩石物理模版,并将其应用于大洋钻探计划 (ODP) 204 航次的 1247B 和 1250F 井数据.实际应用结果表明,所建的纵波速度和衰减与水合物饱和度交会图版准确识别了水合物赋存形态,且所建的衰减岩石物理图版与测井数据分布特征吻合较好.研究成果为利用地震波衰减属性识别和评价水合物储层提供了新的理论基础和技术手段,证明了衰减理论可以准确识别赋存形态与估算物性参数.

Abstract The dispersion and attenuation of seismic waves are critical physical properties of hydrate reservoirs, essential for the precise identification and quantitative characterization of hydrate reservoirs. The coupled effects of hydrate saturation and occurrence modes typically exert significant influences on seismic wave velocity dispersion and attenuation characteristics. However, most existing attenuation characterization theories are established based on assumptions of single or limited hydrate morphologies, making it challenging to accurately describe hydrate reservoirs with complex occurrence states. To address this, this study integrates the generalized effective medium model and two-phase media theory to develop an attenuation theoretical model for hydrate reservoirs that simultaneously considers four occurrence modes: contact-cementing, grain-coating, matrix-supporting, and pore-filling. A comparison of P-wave attenuation characteristics modeled using Biot theory (focusing on global fluid flow in porous media) and BISQ theory (Biot-Squirt theory, incorporating both global fluid flow and local squirt mechanisms) under different hydrate morphologies reveals that the attenuation predicted by Biot theory is significantly lower than that of the BISQ model. This discrepancy arises because the BISQ framework accounts for additional energy loss mechanisms, such as microscopic fluid squirt between hydrate-coated grains, which are critical in heterogeneous hydrate-bearing sediments. Based on the BISQ-derived attenuation model, a morphology-constrained attenuation rock physics template is developed, and a crossplot of P-wave velocity, attenuation, and hydrate saturation is constructed to identify hydrate occurrence modes. Furthermore, the developed morphology-constrained attenuation rock physics template is applied to logging data

收稿日期 2025-02-27; 修回日期 2025-09-23.

投稿网址 <http://www.progeophysics.cn>

基金项目 国家自然科学基金(42574186,42104121)资助.

第一作者简介 张子煜,男,2000 年生,硕士研究生,研究方向为天然气水合物岩石物理. E-mail: dthzzy@163.com

* 通讯作者 潘豪杰,男,1988 年生,副教授,主要从事非常规地球物理研究. E-mail: panhaojie88@163.com

关键词 天然气水合物;水合物赋存形态;岩石物理;
衰减属性;双相介质理论

中图分类号 P631
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026H0401
CSTR:32085.14.pg2026H0401

from Sites 1247B and 1250F of the Ocean Drilling Program (ODP) Expedition 204. Field results demonstrate that the constructed crossplot of P-wave velocity and attenuation versus hydrate saturation accurately identifies hydrate occurrence modes, and the attenuation rock physics template aligns well with the distribution characteristics of logging data. These research outcomes provide a new theoretical foundation and technical methodology for utilizing seismic attenuation attributes to identify and evaluate hydrate reservoirs, confirming the capability of attenuation theory to accurately diagnose occurrence states and estimate reservoir physical parameters.
Keywords Gas hydrate; Hydrate morphology; Rock physics; Attenuation property; Two-phase media theory

0 引言

天然气水合物是一种类冰状晶体化合物,存在于高压低温环境下,广泛分布在全球大陆边缘深海沉积物和陆域永久冻土层中 (Sloan and Koh, 2007),是未来最具潜力的替代能源. 另一方面,水合物在地层温压条件改变的情况下极易发生分解,成为诱发海底滑坡和加剧气候变化的重要因素 (刘圣彪等, 2021). 因此,准确识别与定量评价水合物储层是缓解环境灾害问题、认识水合物成藏机理以及指导水合物安全高效开采的重要前提.

受地层压力、地温梯度、气源供应、沉积环境和局部有孔虫发育等因素的影响,水合物在不同类型沉积物中呈现出赋存模式复杂多样、多种模式共存的特征 (王秀娟等, 2021; 潘豪杰等, 2022). 按照水合物与沉积物颗粒的接触关系,可以将其分为孔隙型和裂隙型 (Holland *et al.*, 2008). 其中,孔隙型水合物又可以细分为常见的四种微观分布模式,即接触胶结、颗粒包裹、孔隙充填和骨架支撑等 (Ecker *et al.*, 1998; Dai *et al.*, 2004). 这些复杂微观赋存形态与水合物饱和度之间的耦合影响会引起储层地震性质的非均匀变化,致使地震解释存在多解性和不确定性. 因此,针对不同水合物赋存形态建立岩石物理模型,深入了解水合物含量和分布对储层地震性质的影响,对提高水合物储层评价精度具有重要意义.

地震波衰减与频散是地震波的两个重要特征,研究其与岩石骨架、孔隙流体、不同赋存形态水合物之间的定量关系,有助于利用地震波衰减属性进行水合物储层识别与定量评价. 然而,基于大量实际观测资料的衰减提取结果显示,不同研究区域、不同测量频段、不同沉积物类型、不同富集程度水合物储层衰减特征存在显著差异 (Priest *et al.*, 2006; 张如伟等, 2016; 王吉亮和吴时国, 2016; Zhan and Matsushima, 2018; Liu P Q *et al.*, 2022). 此外,实验

测试结果表明,含甲烷水合物砂岩样品的衰减会随着水合物饱和度的增加,先迅速增加至峰值再快速降低 (Priest *et al.*, 2009),而含四氢呋喃水合物泥质沉积物的衰减会随着水合物含量增加而增强 (Liu *et al.*, 2020). 这些杂乱无序的衰减特征使得水合物储层地震波吸收衰减机制至今不明晰,导致难以利用地震波频散衰减属性识别和评价水合物储层. 因此,有必要从理论上探究水合物储层地震波频散与衰减与水合物含量和赋存特征的关联机理.

岩石物理模型是连接微观物性参数与宏观弹性性质之间的桥梁. 为了解释野外观测资料和实验测试数据中水合物引起的衰减现象,国内外许多学者在弹性岩石物理建模基础上综合考虑不同吸收衰减机制,通过逐步耦合矿物组分、孔隙流体和水合物,构建了一系列水合物储层双相孔隙介质理论. 由于衰减机制、水合物赋存形态以及储层岩性的差异不同,所针对的衰减模型也有所不同. 针对黏土型水合物储层衰减,衰减模型研究较少, Liu T 等 (2022) 建立了一种衰减模型解释相关现象. 针对砂岩水合物储层的衰减模型,代表性的主要有以三相 Biot 理论为基础的 Leclaire 模型及其改进公式 (Leclaire *et al.*, 1994; Carcione and Tinivella, 2000; Guerin and Goldberg, 2005) 和以 Biot-Stoll 模型为基础的水合物等效颗粒模型 (Best *et al.*, 2013; Marín-Moreno *et al.*, 2017). 前者主要考虑了水合物颗粒与沉积物颗粒之间的胶结作用、摩擦作用和微裂隙引起的喷射流,难以合理解释地震频段的衰减现象,后者中 Best (Best *et al.*, 2013) 模拟了不同的水合物赋存形态模型,将不同的模型效果进行了叠加, Marín-Moreno 和 Zhan 等 (Marín-Moreno *et al.*, 2017; Zhan and Lu, 2023) 进一步改进了水合物等效颗粒模型,考虑了多种赋存形态水合物,引入不同孔隙之间的局部黏性流体流动、水合物中包裹体与孔隙之间的流动以及气泡阻尼等多种衰减机制,可以解释地震频段的

衰减现象但是横波衰减为 0(武存志等, 2022; 刘涛等, 2024). 此外, 基于 White 模型(White, 1975) 和 Biot-Rayleigh 模型及三孔隙模型(Wang *et al.*, 2021; Ba *et al.*, 2023) 也取得了一定的应用效果. 然而, 这些衰减模型简化了赋存形态假设, 大多针对单一或少数赋存形态水合物砂岩地层, 对水合物赋存形态考虑不够完善, 难以合理描述含复杂赋存形态水合物地层地震波衰减特征. 因此, 亟需构建复杂赋存形态水合物储层衰减模型, 为利用地震波衰减属性识别及定量评价水合物储层奠定理论基础.

本文尝试利用广义有效介质模型与双相介质 Biot/BISQ 理论, 构建复杂赋存形态水合物储层衰减模型, 对比分析基于 Biot 理论和 BISQ 模型模拟的不同赋存形态水合物储层衰减响应特征差异. 在此基础上, 发展联合纵波速度和衰减与水合物饱和度之间的交会图版识别水合物赋存形态的有效方法, 并进一步研发预测水合物储层物性参数的纵波阻抗和衰减岩石物理图版. 最后, 结合 ODP 204 航次实际测井数据进行应用测试, 以期为联合地震弹性和衰减属性识别与评价水合物储层提供研究思路与方法借鉴.

1 水合物衰减岩石物理模型

依据不同赋存形态的水合物影响岩石弹性模量的差异性, Pan 等(2020a, b) 提出了能同时考虑接触胶结、颗粒包裹、骨架支撑和孔隙充填等四种类型水合物(如图 1) 的广义有效介质模型. 在此基础上, 结合 Biot 理论或 BISQ 模型建立复杂赋存形态水合物储层衰减模型, 具体建模流程包括(如图 2): (1) 利用 VRH 平均模型计算岩石基质弹性模量; (2) 利用广义有效介质模型计算干岩石骨架弹性模量; (3) 利用 Wood 公式(Wood, 1941) 计算孔隙流体的体积模量; (4) 基于 Biot 理论和 BISQ 模型计算水合物储层纵波速度和衰减.

1.1 岩石基质弹性模量

假设岩石基质由石英、黏土和骨架支撑型水合物组成, 共同起到应力支撑作用. 在已知各矿物组分的体积分数和弹性模量时, 利用 Hill 平均(Hill, 1952) 可以计算得到岩石基质的体积模量和剪切模量:

$$K_{ma} = \frac{1}{2} \left[\frac{\phi_h K_h}{1 - \phi + \phi_h} + \frac{(1 - \phi)(1 - V_c) K_q}{1 - \phi + \phi_h} + \frac{(1 - \phi) V_c K_c}{1 - \phi + \phi_h} + \left[\frac{\phi_h}{(1 - \phi + \phi_h) K_h} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{(1 - \phi)(1 - V_c)}{(1 - \phi + \phi_h) K_q} + \frac{(1 - \phi) V_c}{(1 - \phi + \phi_h) K_c} \right]^{-1} \right], \quad (1)$$

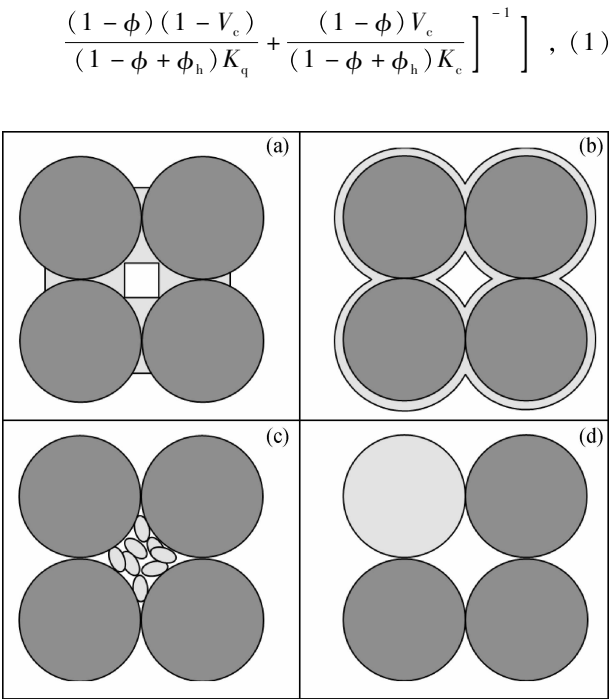


图 1 四种常见水合物微观赋存模式
(a) 接触胶结; (b) 颗粒包裹; (c) 孔隙充填; (d) 骨架支撑.
Fig. 1 Four common hydrate morphologies
(a) Contact-cementing; (b) Grain-coating; (c) Pore-filling; (d) Matrix-supporting.

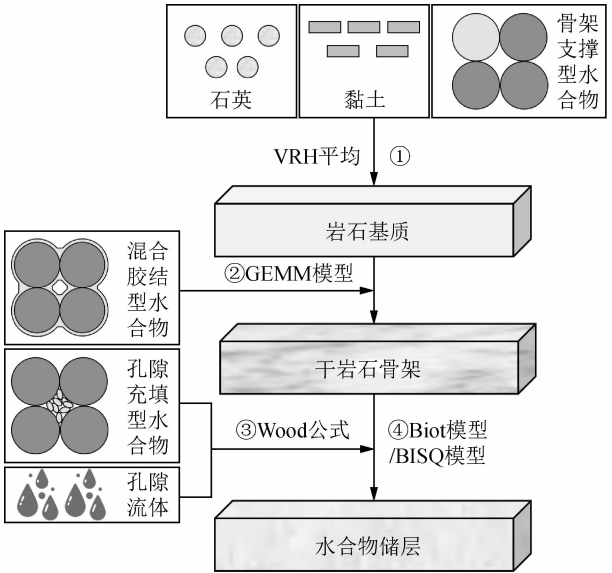


图 2 复杂赋存形态水合物储层衰减岩石物理建模流程
(改自潘豪杰等, 2022)

Fig. 2 Attenuation rock physics modeling of the complex-morphology hydrate reservoirs
(Adapted from Pan *et al.*, 2022)

$$G_{\text{ma}} = \frac{1}{2} \left[\frac{\phi_h G_h}{1 - \phi + \phi_h} + \frac{(1 - \phi)(1 - V_c) G_q}{1 - \phi + \phi_h} + \frac{(1 - \phi) V_c G_c}{1 - \phi + \phi_h} + \left[\frac{\phi_h}{(1 - \phi + \phi_h) G_h} + \frac{(1 - \phi)(1 - V_c)}{(1 - \phi + \phi_h) G_q} + \frac{(1 - \phi) V_c}{(1 - \phi + \phi_h) G_c} \right]^{-1} \right], \quad (2)$$

式中, K_h 、 K_q 、 K_c 和 G_h 、 G_q 、 G_c 分别是水合物、石英、黏土的体积模量和剪切模量, $\phi_h = \phi S_{\text{gh}} F_{\text{ms}}$ 是骨架支撑型水合物体积, F_{ms} 为骨架支撑型水合物体积比,

ϕ 、 V_c 、 S_{gh} 分别是孔隙度、泥质含量和水合物饱和度, K_{ma} 和 G_{ma} 是计算得到的岩石基质的体积模量和剪切模量. 由于骨架支撑型水合物作为基质的一部分, 此时孔隙度降低为 $\phi_i = \phi(1 - F_{\text{ms}} S_{\text{gh}})$.

1.2 干岩石骨架弹性模量

考虑接触胶结和颗粒包裹型水合物对于干岩石骨架的影响, 本文利用广义有效介质模型 (Pan *et al.*, 2020a, b) 来计算干岩石骨架弹性模量, 具体公式为:

$$K_{\text{dry}} = \begin{cases} \left[\frac{\phi_i/\phi_c}{K_{\text{mct}} + \frac{4}{3}G_{\text{mct}}} + \frac{1 - \phi_i/\phi_c}{K_{\text{ma}} + \frac{4}{3}G_{\text{mct}}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{\text{mct}}, & \phi_i < \phi_c, \\ \left[\frac{(1 - \phi_i)/(1 - \phi_c)}{K_{\text{mct}} + \frac{4}{3}G_{\text{mct}}} + \frac{(\phi_i - \phi_c)/(1 - \phi_c)}{\frac{4}{3}G_{\text{mct}}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{\text{mct}}, & \phi_i \geq \phi_c, \end{cases} \quad (3)$$

$$G_{\text{dry}} = \begin{cases} \left[\frac{\phi_i/\phi_c}{G_{\text{mct}} + Z} + \frac{1 - \phi_i/\phi_c}{G_{\text{ma}} + Z} \right]^{-1} - Z, & \phi_i < \phi_c, \\ \left[\frac{(1 - \phi_i)/(1 - \phi_c)}{G_{\text{mct}} + Z} + \frac{(\phi_i - \phi_c)/(1 - \phi_c)}{Z} \right]^{-1} - Z, & \phi_i \geq \phi_c, \end{cases} \quad (4)$$

式中, ϕ_c 为临界孔隙度, $Z = G_{\text{mct}}/6((9K_{\text{mct}} + 8G_{\text{mct}})/(K_{\text{mct}} + 2G_{\text{mct}}))$, K_{dry} 和 G_{dry} 为干岩石骨架的体积模量和剪切模量, K_{mct} 和 G_{mct} 为基于改进胶结模型计算的临界孔隙度 ϕ_c 时的体积模量和剪切模量, 表达式为:

$$K_{\text{mct}} = \frac{n(1 - \phi_c)\alpha_1 K_{\text{ma}}}{3\pi(1 - \nu_{\text{ma}})(1 + f(A_N))}, \quad (5)$$

$$G_{\text{mct}} = \frac{n(1 - \phi_c)\alpha_1 G_{\text{ma}}}{5\pi} \left[\frac{1}{(1 - \nu_{\text{ma}})(1 + f(A_N))} + \frac{3\tau}{2 - \nu_{\text{ma}}} \left(\frac{1 + \nu_{\text{ma}}/(2 - \nu_{\text{ma}})g(A_T)}{1 + f(A_T)} \right) \right], \quad (6)$$

式中, n 为配位数; α_1 为与压力相关的接触胶结半径,

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha_0^2 + \left[\frac{[2n(1 - W_c) + 16W_c]\phi_c S_{\text{hc}}}{(3n(1 - \phi_c))} \right]^{\frac{2 - W_c}{2}}},$$

$\alpha_0 = [3\pi(1 - \nu_{\text{ma}})P/(2n(1 - \phi_c)G_{\text{ma}})]^{\frac{1}{3}}$, 其中 $\nu_{\text{ma}} = (3K_{\text{ma}} - 2G_{\text{ma}})/(6K_{\text{ma}} + 2G_{\text{ma}})$ 为固体基质泊松比, P 为有效压力, W_c 为权重胶结系数, W_c 为 0 时为颗粒包裹型水合物, 为 1 时为接触胶结型水合物, $S_{\text{hc}} = S_{\text{gh}} F_{\text{hc}}$ 为混合胶结型水合物体积; τ 为滑动摩擦系数; $f(A_N)$ 、 $f(A_T)$ 、 $g(A_T)$ 为校正函数, 计算公式为:

$$f(A_N) = 0.3092A_N^{0.9098} \frac{0.1036A_N^{0.4139} + 1}{A_N^{0.4139} + 1}, \quad (7)$$

$$f(A_T) = 0.3092A_T^{0.9098} \frac{0.1036A_T^{0.4139} + 1}{A_T^{0.4139} + 1}, \quad (8)$$

$$g(A_T) = \frac{-0.428A_T}{1 + 1.336A_T^{1.222} + 4.031A_N^{0.523}}, \quad (9)$$

式中, $\beta = \sqrt{\left[\frac{[2n(1 - W_c) + 16W_c]\phi_c S_{\text{hc}}}{[3n(1 - \phi_c)]} \right]^{\frac{2 - W_c}{2}}}$ 为归一化的接触胶结半径, $A_N = M_h(1 - \nu_{\text{ma}})/(\pi G_{\text{ma}})$, $M_h = 2K_h(1 - \nu_h)/(2 - \nu_h)$, $\nu_h = (3K_h - 2G_h)/(6K_h + 2G_h)$, $A_T = G_h/(\pi G_{\text{ma}})$, $A_N = \beta/A_N$, $A_T = \beta/[A_T(1 - \nu_{\text{ma}}/2)]$. 孔隙度进一步降低为 $\phi_e = \phi(1 - S_{\text{gh}}(F_{\text{hc}} + F_{\text{ms}}))$.

1.3 孔隙流体体积模量

将孔隙充填型水合物充当孔隙流体的一部分, 可以利用 Wood 公式计算由水和孔隙充填型水合物组成孔隙流体的体积模量, 表达式为:

$$K_f = (F_{\text{sw}}/K_w + (1 - F_{\text{sw}})/K_h)^{-1}, \quad (10)$$

式中, 归一化后的含水饱和度为 $F_{\text{sw}} = S_w/(1 - S_{\text{gh}} + S_{\text{gh}}F_{\text{pf}})$, 其中含水饱和度为 $S_w = 1 - S_{\text{gh}}$, F_{pf} 为孔隙充填型水合物体积比.

1.4 水合物储层纵波速度与衰减

假设饱和流体的多孔介质是由均匀的岩石骨架和孔隙组成, 孔隙之间相互连通且其内部充填可相对于岩石骨架流动的黏性流体, Biot (1956) 考虑孔隙流体和岩石骨架之间的黏性摩擦和惯性耦合作用推导了多孔双相介质弹性波传播理论. 以平面简谐波入射为假设条件, 可以推导出 Biot 理论的纵波方程:

$$\begin{vmatrix} H/V_p^2 - \rho & \rho_f - C_1/V_p^2 \\ C_1/V_p^2 - \rho_f & q - M/V_p^2 \end{vmatrix} = 0.$$

(11)

令式(11)行列式为0,可以求解纵波速度的计算式为:

$$\frac{1}{V_p^2} = \frac{-(Hq + M\rho - 2C_1\rho_f) + \sqrt{(Hq + M\rho - 2C_1\rho_f)^2 - 4(C_1^2 - MH)(\rho^2 - \rho q)}}{2(C_1^2 - MH)},$$

(12)

其中,纵波速度 V_p 的实部和虚部分别代表相应的速度和衰减; ρ 为地层密度,其他中间变量为:

$$H = K_{\text{dry}} + \frac{4}{3}G_{\text{dry}} + \frac{(K_{\text{ma}} - K_{\text{dry}})^2}{D - K_{\text{dry}}},$$

(13)

$$C_1 = \frac{(K_{\text{ma}} - K_{\text{dry}})K_{\text{ma}}}{D - K_{\text{dry}}},$$

(14)

$$M = \frac{K_{\text{ma}}^2}{D - K_{\text{dry}}},$$

(15)

$$D = K_{\text{ma}}[1 + \phi_e(K_{\text{ma}}/K_f - 1)],$$

(16)

$$q = \frac{\alpha\rho_f}{\phi_e} - \frac{i\eta F(\zeta)}{\omega\kappa},$$

(17)

$$F(\zeta) = \frac{1}{4} \frac{\zeta T(\zeta)}{1 + 2iT(\zeta)/\zeta},$$

(18)

$$T(\zeta) = \frac{ber'(\zeta) + iber'(\zeta)}{ber(\zeta) + iber(\zeta)} = \frac{e^{i3\pi/4}J_1(\zeta e^{-i\pi/4})}{J_0(\zeta e^{-i\pi/4})},$$

(19)

$$\zeta = \left(\frac{\omega a^2 \rho_f}{\eta}\right)^{0.5},$$

(20)

其中, $\alpha = 1 - r(1 - 1/\phi_e)$ 为曲率,是与流体或固体结构无关的几何因素,也称构造因子(Berryman, 1981); r 为曲率中间量,对于椭圆体取值从0到1,本文 r 取0.5; $\omega = 2\pi f$ 为平面波角频率, f 为频率; $\kappa = (d^2/36k)[\phi_e^3/(1 - \phi_e)^2]$ 为岩石绝对渗透率(Hovem and Ingram, 1979), d 为颗粒直径, k 为与孔隙形状和曲率相关的参数,对于球形颗粒一般 $k \approx 5$; $F(\zeta)$ 为黏滞动力算子; J_0 和 J_1 分别是0阶和1阶的贝塞尔(Bessel)函数; $\eta = \eta_w(F_{\text{sw}})^{-2.55}$ 为流体黏度(Balakin *et al.*, 2010), η_w 为水的黏度.

Dvorkin 和 Nur(1993)考虑宏观 Biot 流与微观喷射流机制,提出了联合的 Biot 射流(BISQ)模型.在完全饱和条件下,BISQ 给出了纵波速度与衰减的表达式:

$$V_p = \frac{1}{\text{Re}(\sqrt{Y})},$$

(21)

$$Q_p^{-1} = \frac{2\text{Im}(\sqrt{Y})}{\text{Re}(\sqrt{Y})},$$

(22)

$$Y = -\frac{B}{2A} + \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{A}{C}},$$

(23)

$$A = \frac{\phi_e F_{\text{sq}} M}{\rho_2^2},$$

(24)

$$B = \frac{F_{\text{sq}}\left(2a - \phi_e - \phi_e \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) - \left(M + \frac{F_{\text{sq}} a^2}{\phi_e}\right)\left(1 + \frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega_c}{\omega}\right)}{\rho_2},$$

(25)

$$C = \frac{\rho_1}{\rho_2} + \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right)\left(\frac{\rho_a}{\rho_2} + \frac{i\omega_c}{\omega}\right),$$

(26)

$$F_{\text{sq}} = F\left[1 - \frac{2J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R)}\right],$$

(27)

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_f \omega_2}{F} \left(\frac{\phi_e + \frac{\rho_a}{\rho_f}}{\phi_e} + i \frac{\omega_c}{\omega}\right)},$$

(28)

$$F = \left(\frac{1}{K_f} + \frac{a - \phi_e}{\phi_e K_{\text{ma}}}\right)^{-1},$$

(29)

其中, $\text{Re}()$ 和 $\text{Im}()$ 分别是数值的实部和虚部; $M = K_{\text{dry}} + 4G_{\text{dry}}/3$ 为干岩石纵波模量; $\rho_a = (1 - \alpha)\phi_e\rho_f$ 为固流耦合密度, $\rho_1 = (1 - \phi_e)\rho_{\text{ma}}$, $\rho_2 = \phi_e\rho_f$; $a = 1 - K_{\text{dry}}/K_{\text{ma}}$ 为双相介质系数; $\omega_c = \eta\phi_e/(\kappa\rho_f)$ 为 Biot 特征角频率; R 为特征喷射流长度.

2 数值模拟

采用上述岩石物理建模方法进行频率、水合物饱和度和赋存形态对地震波速度和衰减的数值模拟响应分析,假设水合物储层矿物组分由60%石英和40%黏土构成,孔隙度为0.5,水合物饱和度0.5,水和水合物均匀分布在孔隙空间中,其他模拟过程中使用的参数见表1(Ecker *et al.*, 2000; Best *et al.*, 2013; Liu T, 2022).

表 1 数值模拟中使用的输入参数

模型参数	符号	数值	单位
石英体积模量	K_q	3.6×10^{10}	Pa
石英剪切模量	G_q	4.5×10^{10}	Pa
黏土体积模量	K_c	2.09×10^{10}	Pa
黏土剪切模量	G_c	6.85×10^9	Pa

续表 1
Continued Table 1

模型参数	符号	数值	单位
水合物体积模量	K_h	6.41×10^9	Pa
水合物剪切模量	G_h	2.54×10^9	Pa
水体积模量	K_w	2.29×10^9	Pa
石英密度	ρ_q	2650	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
黏土密度	ρ_c	2580	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
水合物密度	ρ_h	910	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
水密度	ρ_w	1040	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
水黏度	η_w	0.001	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
临界孔隙度	ϕ_c	0.38	—
有效压力	P	6×10^6	Pa
配位数	n	9	—
颗粒直径	d	2×10^{-5}	m
滑动摩擦系数	τ	0.6	—
特征喷射流长度	R	0.001	m

图 3 为基于 Biot 和 BISQ 理论计算的不同赋存形态水合物储层纵波速度频散与衰减特征. 从图 3a 和图 3b 中观察到, 基于 Biot 理论模拟的胶结型水合物储层频散与衰减特征没有明显变化, 并且频散程度与衰减强度远低于非胶结型水合物地层. 如图 3c 和图 3d 所示, 基于 BISQ 模型计算的孔隙充填和骨架支撑型水合物储层频散程度与衰减强度也同样地高于接触胶结和颗粒包裹型水合物储层. 尽管基于 Biot 理论与 BISQ 理论模拟的速度频散与衰减特征变化规律比较相似, 但是前者的频散程度和衰减强度明显小于后者. 这是因为 BISQ 理论不仅考虑了宏观 Biot 流也考虑了微观喷射流机制.

3 实际数据应用

本文选取卡斯卡迪陆缘增生楔水合物脊南部的 ODP204 航次 1247B 和 1250F 两口电缆测井数据进行应用测试. 地震剖面上出现连续似海底反射层

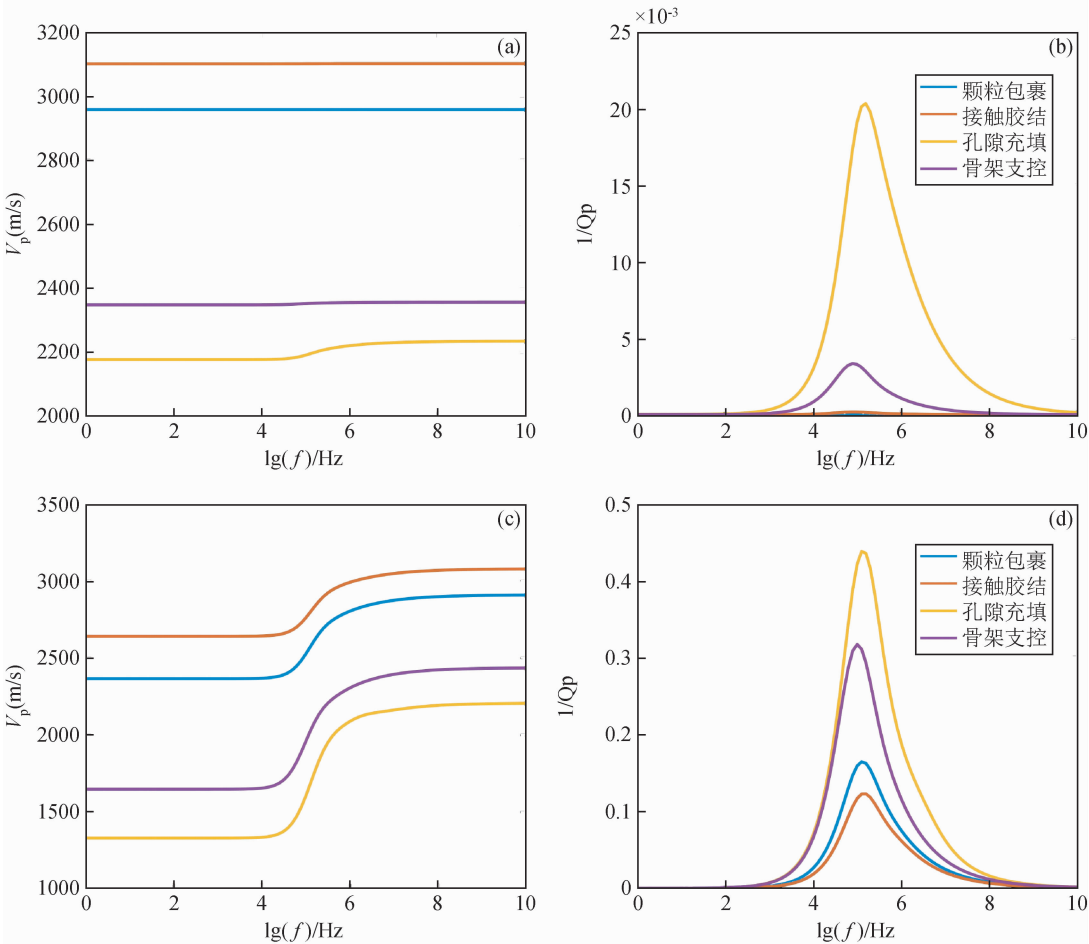


图 3 基于 Biot 理论(a, b)和 BISQ 理论(c, d)不同赋存形态水合物频散衰减响应特征
Fig. 3 Velocity dispersion and attenuation of host sediments with different morphologies of hydrates
based on Biot model (a, b) and BISQ theory (c, d)

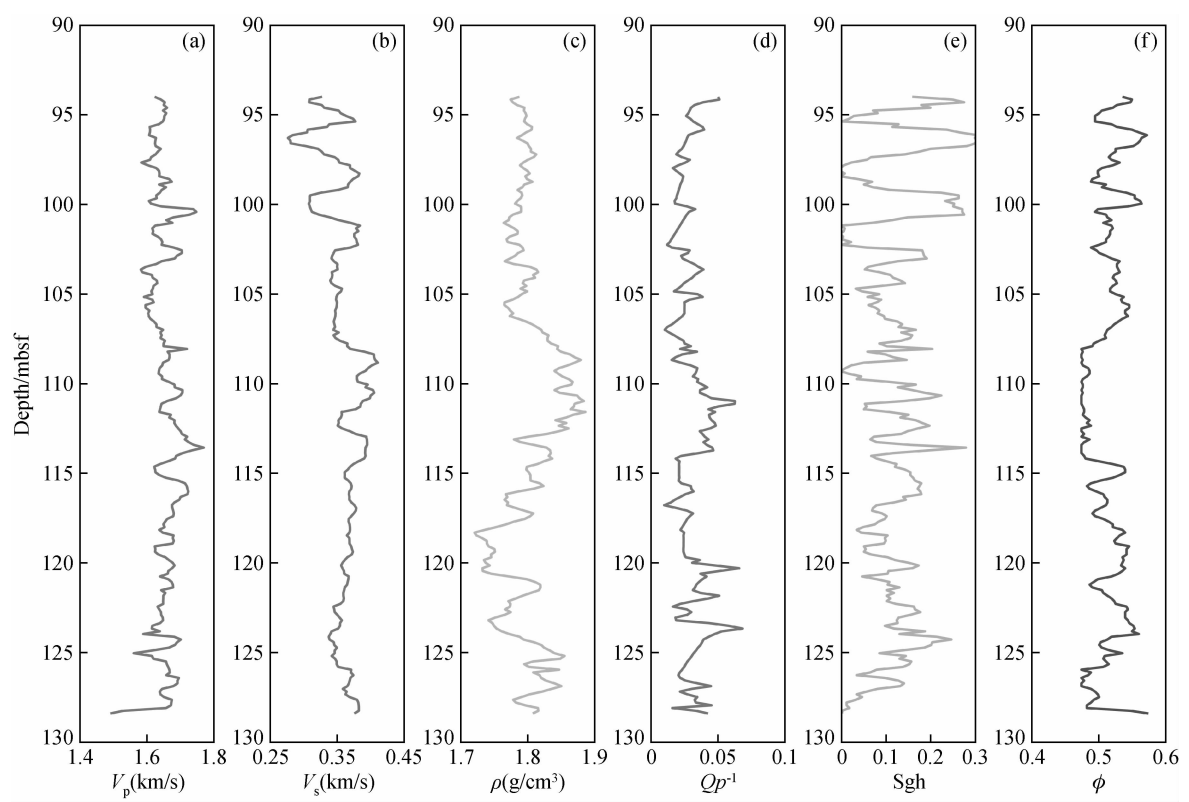


图 4 ODP 204 航次 1247B 井位的测井数据及解释结果

Fig. 4 Well-log data and interpretation results from site 1247B during ODP Leg 204

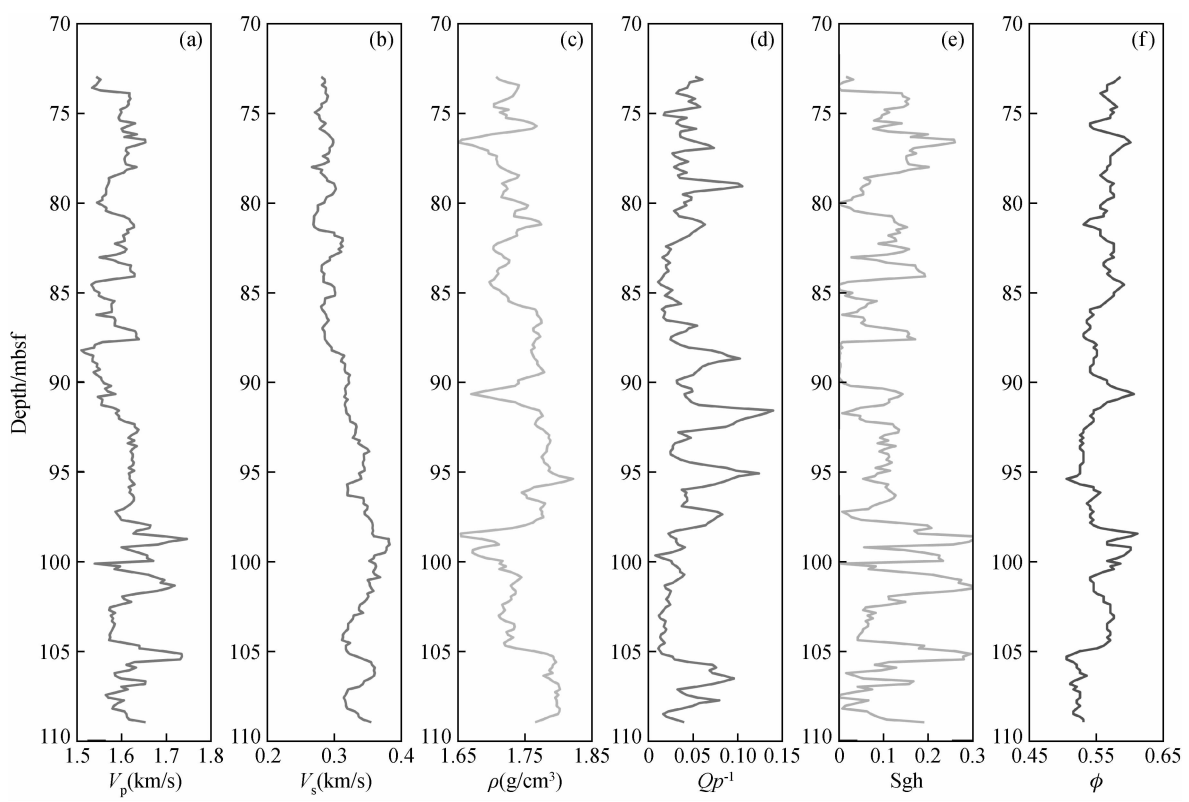


图 5 ODP 204 航次 1250F 井位的测井数据及解释结果

Fig. 5 Well-log data and interpretation results from site 1250F during the ODP Leg 204

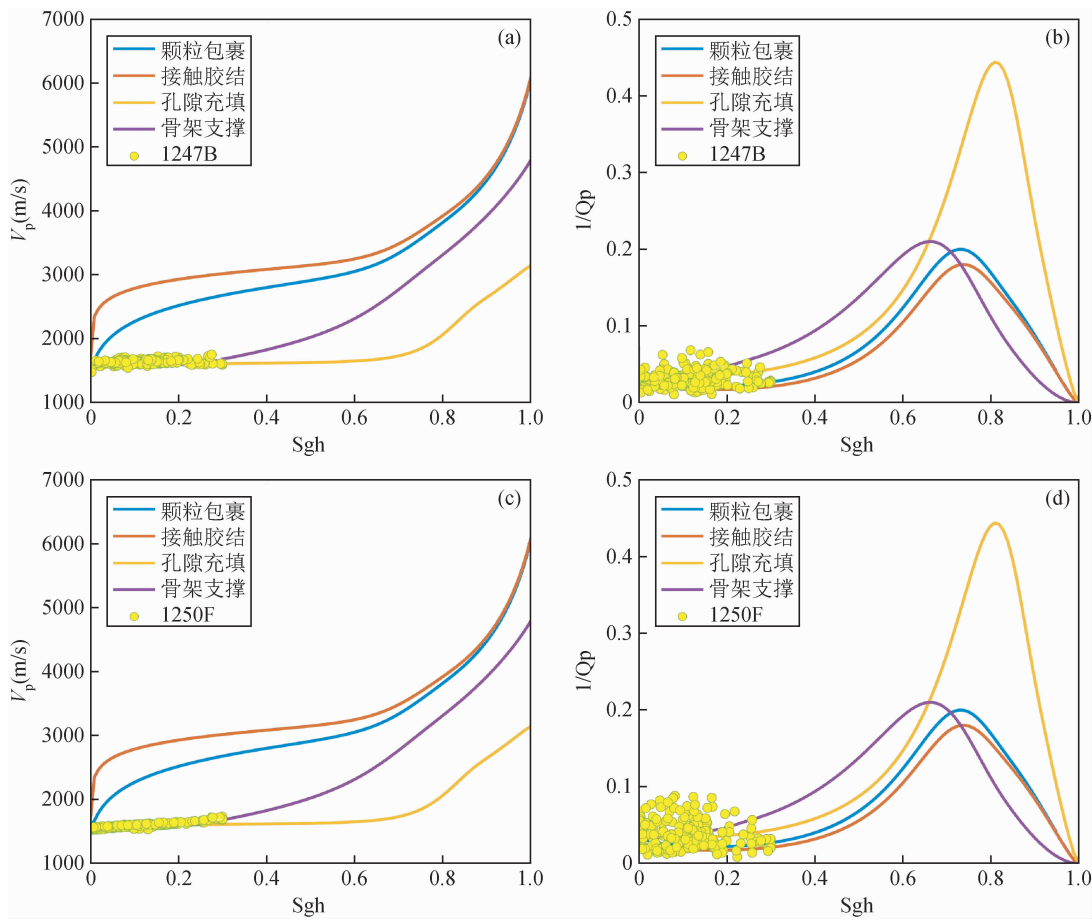


图6 不同赋存形态水合物储层速度频散和衰减随水合物饱和度的变化关系
(a) 1247B井纵波速度; (b) 1247B井纵波衰减; (c) 1250F井纵波速度; (d) 1250F井纵波衰减.

Fig. 6 The P-wave velocity and attenuation as a function of hydrate saturation
(a) 1247B P-wave velocity; (b) 1247B P-wave attenuation; (c) 1250F P-wave velocity; (d) 1250F P-wave attenuation.

(BSR),证实了天然气水合物的存在. 取样岩心分析显示,水合物赋存类型多样,是典型的中等-低饱和度水合物储层. 井径曲线显示了测井数据质量较好,可以用于水合物储层识别与评价. 此外,自然伽马和密度测井数据分别用于计算随深度变化的泥质含量与孔隙度. 同时,利用快速查看 Archie 公式可以将环形电阻率转化为水合物饱和度. 需要说明的是,所用的声波衰减数据源自于 Ji 等(2021)基于 CREWES 软件包中质心频率偏移法处理后的结果. 考虑到 1247B 和 1250F 井的水合物稳定带底界面深度分别为 130 m 和 110 m,因而选取 1247B 井的 90 ~ 130 m 层段(如图 4)和 1250F 井的 70 ~ 110 m(如图 5)作为本研究的目的层.

考虑到 Biot 理论计算的衰减值远低于声波波形提取的衰减结果,因此采用基于 BISQ 理论的衰减模型计算纵波速度和衰减. 图 6 展示了四种赋存形态

水合物地层纵波速度与衰减随水合物饱和度的变化特征. 不难看出,不同赋存形态水合物储层纵波速度均随水合物饱和度的增加而增加,而纵波衰减随水合物饱和度先缓慢地增加,达到峰值后,快速减小. 值得注意的是,孔隙充填型水合物的衰减特征相比于其他三种赋存形态水合物地层更加显著,这表明微观尺度波致流效应比黏性流体与固体骨架之间的相互作用对地震波衰减影响更大.

图 6a 和图 6b 分别对比了模型预测的纵波速度与衰减和 1247B 井数据. 从图中可以看出,投影数据点分布与孔隙充填型和骨架支撑型水合物模型曲线吻合较好,与 1247B 井不同,1250F 井的衰减数据(图 6d)分布相对比较分散,纵波速度更多是与骨架支撑型水合物模型曲线吻合较好(图 6c),但同样由于这两种赋存形态下速度变化趋势接近无法进一步确定.

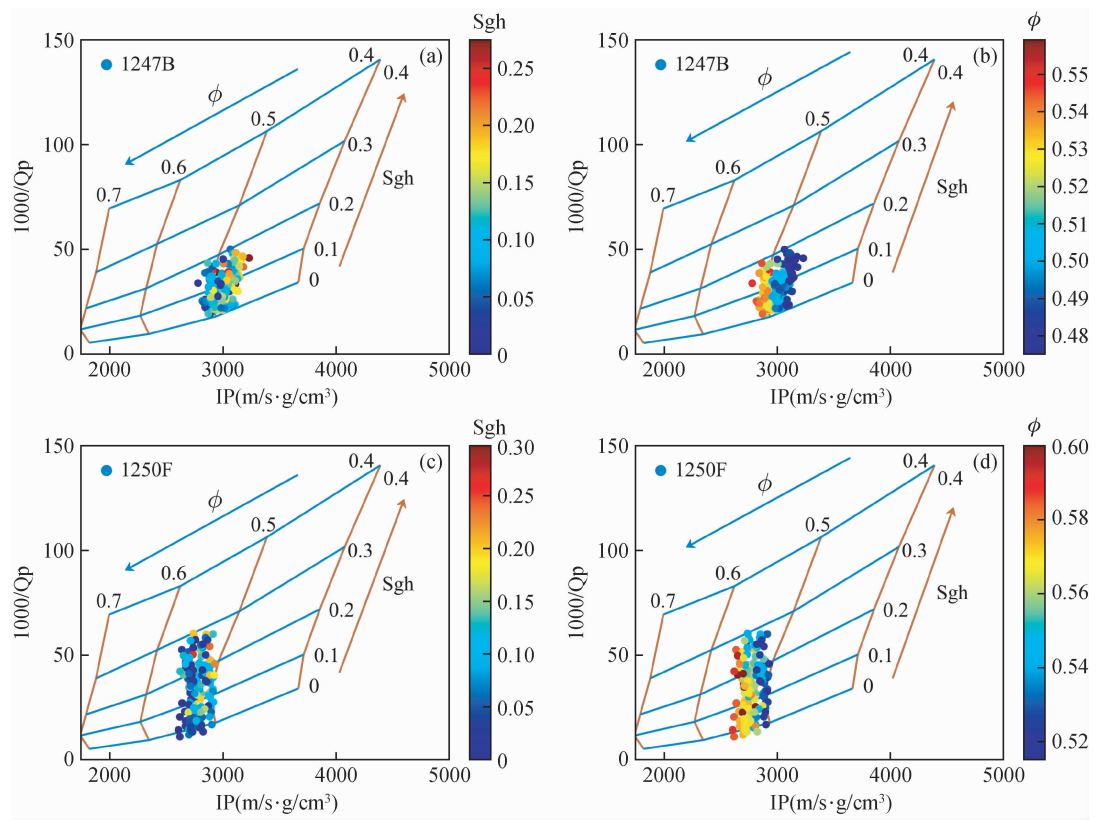


图7 骨架支撑型水合物储层衰减岩石物理模版
(a) 1247B 水合物饱和度;(b) 1247B 孔隙度;(c) 1250F 水合物饱和度;(d) 1250F 孔隙度.
Fig. 7 Attenuation template for matrix-supporting hydrate reservoirs
(a) 1247B hydrate saturation; (b) 1247B porosity; (c) 1250F hydrate saturation; (d) 1250F porosity.

以识别的水合物赋存形态为约束,利用所建的衰减模型建立基于纵波阻抗和纵波衰减的岩石物理图版,结合测井数据对所建的岩石物理图版有效性进行验证,可为储层参数预测提供针对性指导.图7为建立的骨架支撑型水合物储层纵波阻抗和衰减的岩石物理图版.从图中可以看出,纵波阻抗和纵波衰减均随着孔隙度的增加而减小,而随水合物饱和度的变化关系比较复杂.在地层孔隙度低于40%时,纵波阻抗与衰减随着水合物饱和度增加而增加;反之,当地层孔隙度高于50%时,纵波阻抗与衰减随着水合物饱和度先减小再增加.这主要是因为水合物饱和度和孔隙度对纵波阻抗和衰减施加反作用导致的.对比所建的纵波衰减和纵波阻抗图版与实际测井数据可以发现,1247B井的水合物饱和度和孔隙度预测偏低,而1250F井的测量数据点分布与岩石物理图版吻合较好,孔隙度范围与图版吻合较好,而水合物饱和度范围与图版存在一定差异.这些差异可能与矿物组分多样、不合理的岩石物理模型参

数选择以及测井数据误差等有关.

图8为建立的孔隙充填型水合物储层纵波阻抗和衰减的岩石物理图版.从图中可以看出,纵波衰减随着水合物饱和度增加而快速增加,随着孔隙度增加而减小.特别地,中等饱和度水合物储层纵波衰减随孔隙度的增加下降更为显著.这表明,当水合物充当孔隙流体一部分时,微观尺度波致流引起的衰减强度更大.同样地,孔隙度的增加削弱了地层刚度,降低了衰减强度.与纵波衰减不同,纵波阻抗随水合物饱和度的增加几乎没有变化,而随着孔隙度的增加而减小.这是合理的,因为水合物和水的密度比较接近,且中等-低孔隙充填型水合物饱和度对纵波速度的变化影响不大,使得对孔隙充填型水合物储层纵波阻抗对水合物饱和度的变化不敏感.对比1247B及1250F井数据分布与岩石物理图版可以发现,相比于1250F井,1247B井的散点数据分布特征与孔隙充填型岩石物理图版吻合较好,合理地解释了水合物饱和度和孔隙度.

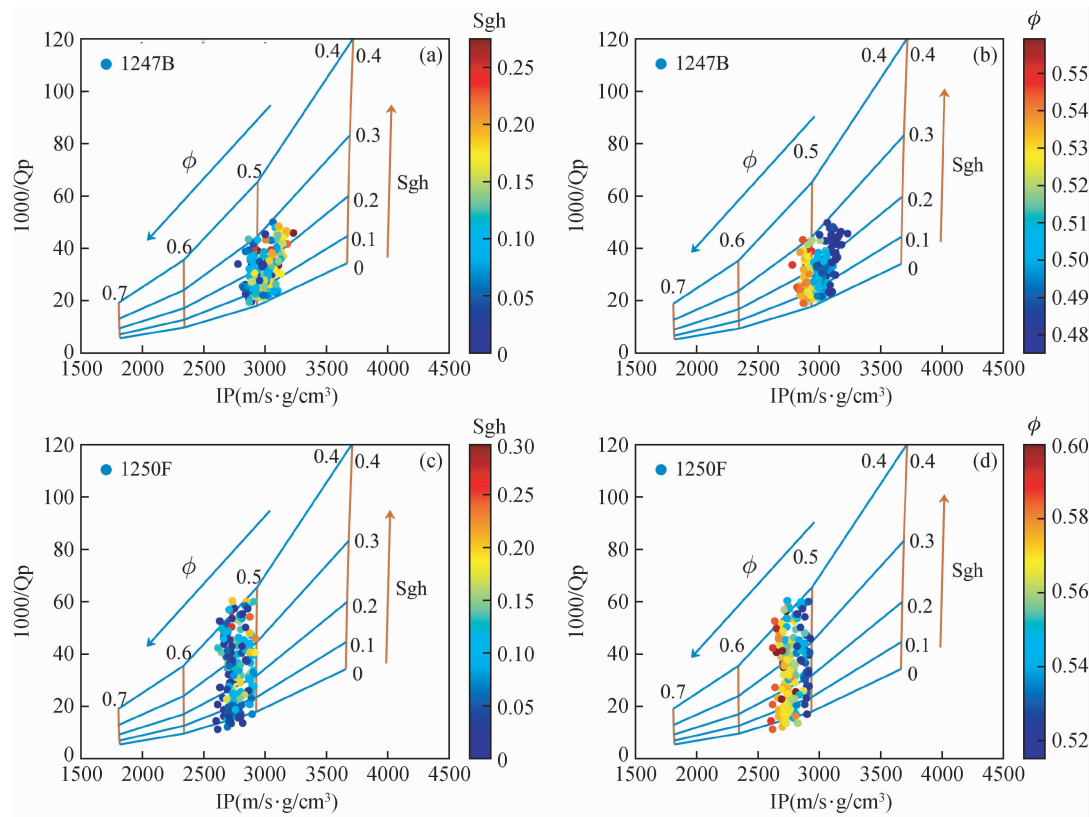


图 8 孔隙充填型水合物储层衰减岩石物理模版
(a) 1247B 水合物饱和度;(b) 1247B 孔隙度;(c) 1250F 水合物饱和度;(d) 1250F 孔隙度.
Fig. 8 Attenuation template for pore-filling hydrate reservoirs
(a) 1247B hydrate saturation; (b) 1247B porosity; (c) 1250F hydrate saturation; (d) 1250F porosity.

4 结 论

针对不同赋存形态水合物储层开展衰减表征理论研究,有助于厘清水合物储层地震波频散与衰减机理,为利用地震衰减属性识别水合物储层奠定基础.为此,本文结合广义有效介质模型与双相介质理论,构建了复杂赋存形态水合物储层衰减模型,探究了不同赋存形态地震波频散与衰减响应特征,提出了用于识别水合物赋存形态的纵波速度和衰减与水合物饱和度交会图,并进一步研发了预测物性参数的纵波衰减与纵波阻抗岩石物理图版,将其成功应用于 ODP204 航次 1247B 和 1250F 井数据.得到以下几点认识与不足:

(1)尽管基于 Biot 理论和 BISQ 理论计算的不同赋存形态水合物储层地震波频散与衰减特征呈现一定相似性,但是前者的纵波频散程度与衰减强度均小于后者,这是因为后者除了考虑了宏观尺度黏性流体与固体颗粒之间的相互作用外,还引入了微观尺度喷射流机制.

(2)通过构建不同赋存形态水合物储层纵波速度和衰减与水合物饱和度之间的变化关系,可以为水合物微观赋存形态识别提供有力依据.以识别的主导赋存形态为约束,构建纵波衰减与纵波阻抗岩石物理图版,可以有效估算水合物饱和度和孔隙度,为联合地震弹性和衰减属性评价水合物储层提供新的研究思路.

(3)所建的衰减模型引入了宏观尺度流体与固体之间的相互作用和微观尺度喷射流效应,未考虑中观尺度局部流体流动特征.为了简化模型的假设条件,本文忽略了实际地层中裂隙充填型水合物诱导的各向异性.因此,在未来研究中通过引入多种吸收衰减机制构建含孔隙型和裂隙型水合物储层衰减模型,提高水合物储层衰减表征精度,为利用多尺度地球物理数据评价水合物储层奠定基础.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Ba J, Guo F L, Carcione J M, *et al.* 2023. P-wave anelasticity in hydrate-bearing sediments based on a triple-porosity model. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1097550, doi: 10.3389/feart.2022.1097550.
- Balakin B V, Hoffmann A C, Kosinski P, *et al.* 2010. Turbulent flow of hydrates in a pipeline of complex configuration. *Chemical Engineering Science*, 65(17): 5007-5017, doi: 10.1016/j.ces.2010.06.005.
- Berryman J G. 1981. Elastic wave propagation in fluid-saturated porous media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 69(2): 416-424, doi: 10.1121/1.385457.
- Best A I, Priest J A, Clayton C R I, *et al.* 2013. The effect of methane hydrate morphology and water saturation on seismic wave attenuation in sand under shallow sub-seafloor conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 368: 78-87, doi: 10.1016/j.epsl.2013.02.033.
- Biot M A. 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28(2): 179-191, doi: 10.1121/1.1908241.
- Carcione J M, Tinivella U. 2000. Bottom-simulating reflectors: Seismic velocities and AVO effects. *Geophysics*, 65(1): 54-67, doi: 10.1190/1.1444725.
- Dai J C, Xu H B, Snyder F, *et al.* 2004. Detection and estimation of gas hydrates using rock physics and seismic inversion: Examples from the northern deepwater Gulf of Mexico. *The Leading Edge*, 23(1): 60-66, doi: 10.1190/1.1645456.
- Dvorkin J, Nur A. 1993. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms. *Geophysics*, 58(4): 524-533, doi: 10.1190/1.1443435.
- Ecker C, Dvorkin J, Nur A. 1998. Sediments with gas hydrates: Internal structure from seismic AVO. *Geophysics*, 63(5): 1659-1669, doi: 10.1190/1.1444462.
- Ecker C, Dvorkin J, Nur A M. 2000. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data. *Geophysics*, 65(2): 565-573, doi: 10.1190/1.1444752.
- Guerin G, Goldberg D. 2005. Modeling of acoustic wave dissipation in gas hydrate-bearing sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(7): Q07010, doi: 10.1029/2005GC000918.
- Hill R. 1952. The elastic behaviour of a crystalline aggregate. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 65(5): 349-354, doi: 10.1088/0370-1298/65/5/307.
- Holland M, Schultheiss P, Roberts J, *et al.* 2008. Observed gas hydrate morphologies in marine sediments. // *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008)*. Vancouver, British Columbia, Canada, doi: 10.14288/1.0041062.
- Hovem J M, Ingram G D. 1979. Viscous attenuation of sound in saturated sand. *J. Acoust. Soc. Am.*, 66(6): 1807-1812, doi: 10.1121/1.383653.
- Ji A S, Zhu T Y, Marín-Moreno H, *et al.* 2021. How gas-hydrate saturation and morphology control seismic attenuation: A case study from the south Hydrate Ridge. *Interpretation*, 9(2): SD27-SD39, doi: 10.1190/int-2020-0137.1.
- Leclaire P, Cohen-Ténoudji F, Aguirre-Puente J. 1994. Extension of Biot's theory of wave propagation to frozen porous media. *J. Acoust. Soc. Am.*, 96(6): 3753-3768, doi: 10.1121/1.411336.
- Liu P Q, Huang H D, Mao S, *et al.* 2022. Research on the characteristics of dispersion and attenuation in hydrate-bearing formations based on Biot's theory. *Journal of Seismic Exploration*, 31(5): 451-477.
- Liu S B, Han T C, Fu L Y. 2021. Distribution of gas hydrate in fractured reservoirs: Insights from anisotropic seismic measurements. *Science China Earth Sciences*, 64(5): 744-752, doi: 10.1007/s11430-020-9725-0.
- Liu T, Liu X W, Zhu T Y. 2020. Joint analysis of P-wave velocity and resistivity for morphology identification and quantification of gas hydrate. *Marine and Petroleum Geology*, 112: 104036, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.104036.
- Liu T, Bao X Y, Guo J X. 2022. Modeling of seismic attenuation in fracture-filling gas hydrate-bearing sediments and its application to field observations in the Krishna-Godavari Offshore Basin, India. *Marine and Petroleum Geology*, 141: 105698, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2022.105698.
- Liu T, Bao X Y, Zhu X Y, *et al.* 2024. Review of rock-physics studies on natural gas hydrate-bearing sediment attenuation. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics (in Chinese)*, 55(3): 369-380, doi: 10.19975/j.dqyx.2023-028.
- Marín-Moreno H, Sahoo S K, Best A I. 2017. Theoretical modeling insights into elastic wave attenuation mechanisms in marine sediments with pore-filling methane hydrate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3): 1835-1847, doi: 10.1002/2016JB013577.
- Pan H J, Li H B, Chen J Y, *et al.* 2020a. Quantification of gas hydrate saturation and morphology based on a generalized effective medium model. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104166, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.104166.
- Pan H J, Li H B, Chen J Y, *et al.* 2020b. A unified contact cementation theory for gas hydrate morphology detection and saturation estimation from elastic-wave velocities. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104146, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.104146.
- Pan H J, Li Y G, Wei C, *et al.* 2022. Seismic rock-physics modeling of the complex-morphology hydrate reservoirs and applications. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 65(12): 4858-4873, doi: 10.6038/cjg2022Q0185.
- Priest J A, Best A I, Clayton C R I. 2006. Attenuation of seismic waves in methane gas hydrate-bearing sand. *Geophys. J. Int.*, 164(1): 149-159, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02831.x.
- Priest J A, Rees E V L, Clayton C R I. 2009. Influence of gas hydrate morphology on the seismic velocities of sands. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 114(B11): B11205, doi: 10.1029/2009JB006284.
- Sloan E D Jr, Koh C A. 2007. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, doi: 10.1201/9781420008494.
- Wang J L, Wu S G. 2016. The characteristics of sonic wave attenuations of gas hydrate reservoirs at Well GC955H, Gulf of Mexico. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 59(4): 1535-1542, doi: 10.6038/cjg20160433.
- Wang W, Ba J, Carcione J M, *et al.* 2021. Wave properties of gas-hydrate bearing sediments based on poroelasticity. *Frontiers in Earth Science*, 9: 640424, doi: 10.3389/feart.2021.640424.
- Wang X J, Jin J P, Guo Y Q, *et al.* 2021. The characteristics of gas hydrate accumulation and quantitative estimation in the North Slope of South China Sea. *Earth Science (in Chinese)*, 46(3): 1038-1057, doi: 10.3799/dqkx.2020.321.
- White J E. 1975. Computed seismic speeds and attenuation in rocks with partial gas saturation. *Geophysics*, 40(2): 224-232, doi: 10.1190/1.1440520.
- Wood A B. 1941. *A Textbook of Sound*. London: G. Bell and Sons Ltd., 194.
- Wu C Z, Zhang F, Li X Y. 2022. Research progress of absorption and attenuation mechanism and petrophysical theory for gas hydrate reservoir. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 57(4): 992-1008.
- Zhan L S, Matsushima J. 2018. Frequency-dependent P-wave attenuation in hydrate-bearing sediments: a rock physics study at Nankai Trough, Japan. *Geophys. J. Int.*, 214(3): 1961-1985, doi: 10.1093/gji/ggy229.
- Zhan L S, Lu H L. 2023. Introducing realistic distributions of gas bubble size and inclusion aspect ratio to model the coexistence of gas hydrate and free gas. *Journal of Applied Geophysics*, 213: 105023, doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.105023.
- Zhang R W, Li H Q, Wen P F, *et al.* 2016. The velocity dispersion and attenuation of marine hydrate-bearing sediments. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 59(9): 3417-3427, doi: 10.6038/cjg20160924.

附中文参考文献

刘圣彪, 韩同城, 符力耘. 2021. 含裂隙储层中的天然气水合物分布: 来自地震各向异性测量的启示. 中国科学: 地球科学, 51(5): 725-733, doi: 10.1360/n072020-0281.

刘涛, 包雪阳, 朱翔宇, 等. 2024. 含天然气水合物储层衰减岩石物理研究进展. 地球与行星物理论评(中英文), 55(3): 369-380, doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-028.

潘豪杰, 李勇根, 魏超, 等. 2022. 复杂赋存形态水合物储层地震岩石物理建模与应用. 地球物理学报, 65(12): 4858-4873, doi: 10.6038/cjg2022Q0185.

王吉亮, 吴时国. 2016. 墨西哥湾 GC955H 井天然气水合物储层声波衰减特征. 地球物理学报, 59(4): 1535-1542, doi: 10.6038/cjg20160433.

王秀娟, 靳佳澎, 郭依群, 等. 2021. 南海北部天然气水合物富集特征及定量评价. 地球科学, 46(3): 1038-1057, doi: 10.3799/dqkx.2020.321.

武存志, 张峰, 李向阳. 2022. 天然气水合物储层吸收衰减机制及岩石物理理论研究进展. 石油地球物理勘探, 57(4): 992-1008.

张如伟, 李洪奇, 文鹏飞, 等. 2016. 海洋含水合物沉积层的速度频散与衰减特征分析. 地球物理学报, 59(9): 3417-3427, doi: 10.6038/cjg20160924.