

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^{*}

王秀娟 吴时国 徐 宁

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 中国科学院研究生院 北京 100039)
(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 为了准确估算沉积层天然气水合物和游离气饱和度, 必须确定沉积层水合物和游离气的分布模式。基于 Biot 三相介质波传播理论, 研究了水合物和游离气呈不同沉积类型时, 沉积层的泊松比、纵波速度、横波速度和反射振幅随饱和度的变化。结果表明, 综合分析含水合物和游离气沉积层的泊松比、纵波速度和 AVA 特征, 可以识别天然气水合物和游离气在沉积地层中的分布模式。与不含水合物沉积层相比, BSR 上纵波和横波速度比较高, 而泊松比略微偏低且出现 PP 波反射系数的 AVO 负异常表明沉积层含有水合物。BSR 下纵波速度和泊松比都比较低表明沉积层游离气呈均匀分布; 纵波速度低而泊松比不太低表明沉积层游离气呈块状分布。

关键词 天然气水合物, 游离气, 泊松比, AVA, 分布模式

中图分类号 P738

天然气水合物是一种类似于冰的固态化合物, 主要成分为水分子和甲烷气体 (Matsumoto *et al.* 2000 见封面)。通常分布于大陆边缘与冻土带, 在资源、环境和灾害方面具有不可忽视的作用 (Kvenvolden 1993)。沉积物岩石物理模型是利用振幅相对偏移距 (Amplitude versus offset) 或入射角 (AVA) 研究天然气水合物和游离气的基础。正确认识沉积层中水合物和游离气的沉积模式, 对估算水合物和游离气的饱和度进而估算其资源量具有重要作用。实验室的研究证实, 含水合物和游离气的地层横波速度增加 (Hyndman *et al.* 1992; Minshull *et al.* 1994), 所以纵波和横波速度的利用为海底沉积层中水合物和游离气研究提供了一些有用信息 (Carcione *et al.* 2000; Tinivella *et al.* 2000)。Ecker 等 (1998) 应用 AVO 研究水合物内部结构, 其中沉积层反射界面的速度应用双相介质理论中的低频速度, 不考虑固体相和流体相间的相互运动对速度的影响。速度是估算水合物和游离气饱和度的一个重要参数,

但要准确估算其饱和度需要确定水合物及游离气分布模式。沉积层含有水合物时, 水合物可能与岩石颗粒胶结, 也可能充填在孔隙空间, 影响水合物沉积层骨架的性质并降低地层的渗透率。由于上部水合物层的封闭作用, 下部流体很难继续向上运移, 沉积层局部地区很容易形成超压 (Tinivella 2002)。在超压地区, 游离气很可能为块状分布在沉积层中, 但是如果认为游离气在孔隙空间为均匀分布, 应用纵波速度反演得到的游离气饱和度将比沉积层的实际饱和度低。

本文中作者研究了含水合物和游离气沉积层的纵波速度、泊松比和反射系数的变化, 利用纵波速度和反射系数变化特征可以识别水合物的分布模式。同样, 利用纵波速度和泊松比的变化特征可以识别沉积层游离气的分布模式。

1 理论模型

1.1 孔隙介质中速度模型

Geertsema 等 (1961) 基于流体饱和多孔隙固体的 Biot (1956a) 方程, 给出纵波速度为:

* 中国科学院创新工程项目, KZCX3-SW-219号和国家自然科学基金项目, 40276022号。王秀娟, 博士生研究生, E-mail: qdwangxijuan@yahoo.com.cn

$$V_p = \left\{ \left[\left(\frac{1}{C_m} + \frac{4}{3}\mu \right) + \frac{\frac{\phi_{eff}}{k} \cdot \frac{\rho_m}{\theta} + \left(1 - \beta - 2 \cdot \frac{\phi_{eff}}{k} \right) \cdot (1 - \beta)}{(1 - \phi_{eff} - \beta) \cdot C_b + \phi_{eff} \cdot C_f} \right] \cdot \frac{1}{\rho_m \left(1 - \frac{\phi_{eff}}{k} \cdot \frac{\theta}{\rho_m} \right)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

但是, Geertsma 等 (1961) 没有给出横波速度, Biot (1956b) 给出了流体饱和多孔隙固体的横波速度为:

$$V_s = \left\{ \frac{\mu}{\rho_m \left[1 - \frac{\phi_{eff}}{k} \cdot \frac{\theta}{\rho_m} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中 ϕ 为地层孔隙度; $\phi_{eff} = (1 - c_h)$, ϕ 为有效孔隙度, $c_h = \phi_h / (\phi_h + \phi_w)$ 为水合物的浓度, ϕ_h 和 ϕ_w 分别为水合物和水的含量; $\rho_m = (1 - \phi_{eff}) \rho_b + \phi_{eff} \rho_f$ 为骨架密度, $\theta = S_w \cdot \rho_w + S_g \cdot \rho_g$ 为流体相的密度, $\rho = S_s \cdot \rho_s + S_h \cdot \rho_h$ 为固体相密度, ρ_b, ρ_g, ρ_w 和 ρ_s 分别为水合物、游离气、水和颗粒的密度, S_h, S_s, S_w 和 S_g 分别为天然气水合物、颗粒、水和游离气饱和度; $C_m = (1 - \phi_{eff}) \cdot C_b + \phi_{eff} \cdot C_p$ 为骨架可压缩率; $C_b = \frac{1}{2} (S_s \cdot C_s + S_h \cdot C_h) + \frac{1}{2} \left(\frac{S_s}{C_s} + \frac{S_h}{C_h} \right)^{-1}$ 为固体相的平均可压缩率; $C_f = \frac{1}{2} \cdot (S_w \cdot C_w + S_g \cdot C_g) + \frac{1}{2} \left(\frac{S_w}{C_w} + \frac{S_g}{C_g} \right)^{-1}$ 为流体的可压缩率, C_h, C_s, C_g, C_p 和 C_w 分别为水合物、颗粒、游离气、孔隙和水的可压缩率; $\beta = \frac{C_b}{C_m}$; μ 为骨架的剪切模量, k 为耦合因子。耦合因子 (k) 表示流体相与固体相之间的耦合程度, 可以从 1 到 ∞ 且为弹性波频率的函数 (Domenico 1977)。 k 取 ∞ 时表示固体相和流体相完全耦合, 不存在固体相和流体相之间的相互运动, 不存在能量耗散, 纵波速度与频率无关。 k 取 1 时即为无耦合, 固体相和流体相之间相互运动, 存在能量耗散。压力比较低时 k 接近 1, 随着压力的增加, k 趋于 2—3 之间 (Domenico 1977)。本文中计算纵横波速度及反射系数时, 取 $k = 2.3$ 。

方程 1 给出了纵波速度与固体相 (骨架和天然气水合物) 和流体相 (水和游离气) 之间的关系。这种理论可以应用于三种情况: 水饱和、孔隙中充满水和水合物及孔隙中充满水和游离气。

1.2 弹性模量模型

Ecker (2001) 在博士论文中提出天然气水合

物对沉积物弹性模量的影响有三种类型¹⁾: 模式 A 假定水合物是流体的一部分, 影响流体的可压缩率; 模式 B 假定水合物是固体骨架的一部分, 降低孔隙度略微影响骨架的弹性模量, 但不使骨架硬化; 模式 C 假定水合物胶结固体颗粒, 降低孔隙度且直接影响地层弹性模量。沉积层的游离气呈块状分布与均匀分布两种, 两种分布模式的纵波速度不同, 但是横波速度不受游离气分布类型的影响。

沉积层的游离气呈均匀分布时, 流体的可压缩率为:

$$C_f = S_w C_w + S_g C_g \quad (3)$$

游离气呈块状分布时, 流体的可压缩率为:

$$\frac{1}{C_f} = \frac{4}{3} \mu \left\{ \left[\frac{S_w}{1 + \frac{1}{\frac{4}{3} \mu C_w}} + \frac{S_g}{1 + \frac{1}{\frac{4}{3} \mu C_g}} \right]^{-1} - 1 \right\} \quad (4)$$

块状分布表示沉积层的水集中在完全饱和小片区域, 而游离气集中在没有水的小块区域 (Dvorkin et al, 1999)。临界孔隙度处的有效体积模量和剪切模量应用修改的 Hashin-Shtrikman-Hertz-Mindlin 理论来计算 (Dvorkin et al, 1996)。沉积层含有的水合物为模式 A 时, 流体可压缩率为:

$$C_f = S_w C_w + S_h C_h \quad (5)$$

其中 $S_h = 1 - S_w$

沉积层含有的水合物为模式 B 时, 水合物影响固体相的弹性模量并降低地层的孔隙度:

$$\phi_r = \phi S_w = \phi (1 - S_h) \quad (6)$$

根据 Hill 平均, 改变后的固体相弹性模量为:

$$K = \frac{1}{2} \left[f_h K_h + (1 - f_h) K_s \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{f_h}{K_h} + \frac{1 - f_h}{K_s} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{2} \left[f_h G_h + (1 - f_h) G_s \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{f_h}{G_h} + \frac{1 - f_h}{G_s} \right]^{-1} \quad (8)$$

1) Ecker C. Seismic characterization of methane hydrates structures. A Dissertation Submitted to Stanford University for the Degree of Doctor of Philosophy. 1—123
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

$$f_h = \frac{\phi(1 - S_w)}{1 - \phi S_w} \quad (9)$$

其中, K_s 和 G_s 分别为固体相的体积模量和剪切模量, K_h 和 G_h 分别为纯水合物的体积和剪切模量。

沉积层含有的水合物为模式 C 时, 一般用于固结较好的沉积地层, 且地层孔隙度低于 0.4 沉积层的弹性模量可以应用 Dvorkin 等 (1994) 提出的胶结理论来计算。

1.3 沉积层的矿物组分及物性参数的计算

建立精确的水合物、游离气和水饱和的沉积层模型需要对矿物学研究。通过区域地质解释、钻井或测井资料可以获得沉积层矿物组分及物性参数。主要矿物、水合物和甲烷气的弹性模量和物性参数见表 1。根据这些参数计算含水合物及游离气沉积层的速度和泊松比(ν)与饱和度关系(图 1a, b, c, d 和图 2a, b)。水合物沉积模式为模式 A 和模式 B 时, 假定地层孔隙度 ϕ 为 0.45,

图 1 给出了纵波速度和横波速度随水合物饱和度变化。当耦合因子 k 为 2.3 时, 即固体相与流体相之间存在耗散, 两种沉积模式中, 纵波速度随水合物饱和度的增加而增大, 模式 A 的纵波速度比模式 B 的纵波速度大(图 1a)。当耦合因子 k 为 ∞ , 即固体相与流体相之间无耗散, 纵波速度随饱和度增加而增加, 模式 B 纵波速度比模式 A 纵波速度大(图 1b)。两种模式中, 含水合物沉积层的泊松比都随饱和度增加而增大, 模式 B 的泊松比比模式 A 的泊松比较大。两种沉积模式中, 当 k 取 2.3 时, 考虑固体相和流体相之间相互运动引起耗散的泊松比(图 1c)比 k 取 ∞ 不考虑耗散的泊松比(图 1d)大。

水合物沉积模式为模式 C 时, 假定沉积层的孔隙度为 0.3, 图 2 给出了纵横波速度与泊松比随饱和度变化。图 2a 为沉积层中含有水合物时,

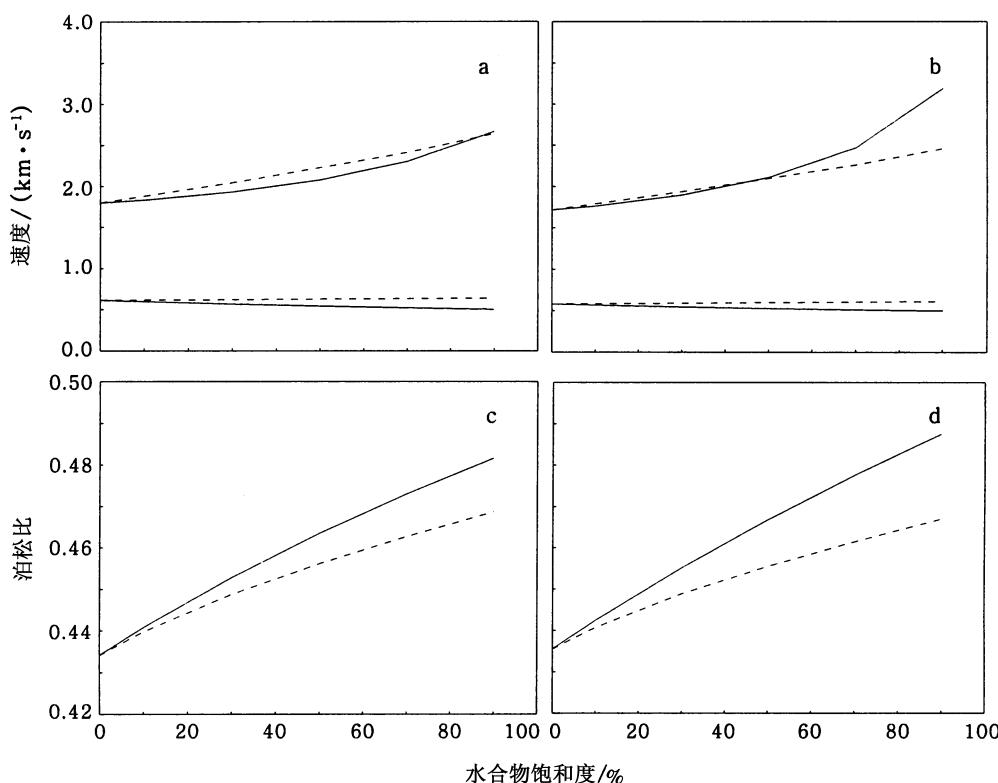


图 1 k 取 2.3 存在耗散 (a) 和 k 取 ∞ 无耗散 (b) 时, 纵波 (上方线) 和横波 (下方线) 速度与饱和度关系; k 取 2.3 存在耗散 (c) 和 k 取 ∞ 无耗散 (d) 时, 泊松比与饱和度关系实线为模式 B 虚线为模式 A

Fig. 1 Relationship between compressional-wave (up line) / shear velocity (low line) and the saturation [(a) with dissipation $k \approx 2.3$; (b) without dissipation $k \sim \infty$]; and between Poisson's ratio and the saturation [(c) with dissipation $k \approx 2.3$, (d) and without dissipation $k \sim \infty$] in

Model B (solid line), and Model A (dashed line)

纵横波速度随饱和度增加而增大;沉积层含有少量水合物时,纵横波速度迅速增加。水合物饱和度比较低时,存在耗散纵波速度大于无耗散时纵波速度;水合物饱和度比较高时,存在耗散纵波速度小于无耗散时纵波速度,存在耗散横波速度略大于无耗散横波速度。水合物沉积模式为模式C时,泊松比随饱和度的变化较为复杂(图2b)。水合物饱和度比较低时,两种耗散情况下的泊松比都随饱和度增加迅速降低;随着水合物饱和度的增加,泊松比略微增加,但是高水合物饱和度的泊松比仍比低饱和度的泊松比低,而且无耗散时的泊松比大于存在耗散时的泊松比。

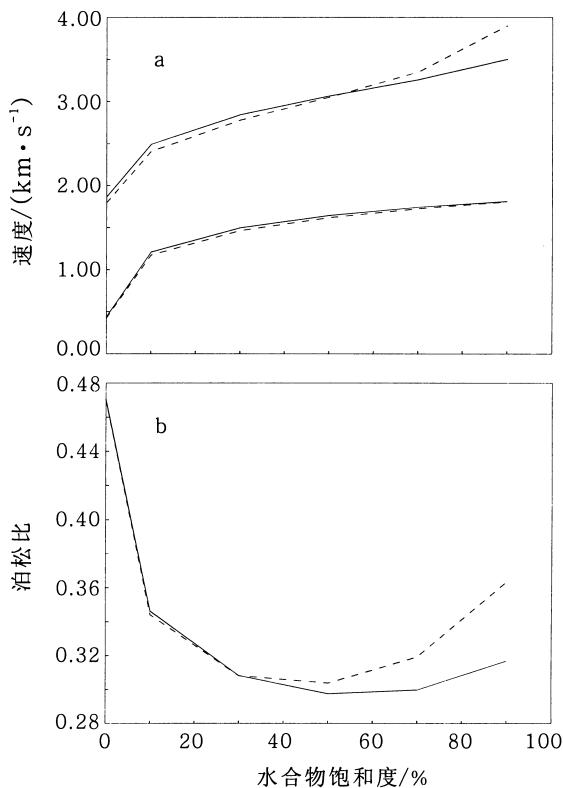


图 2 模式 C 中, k 取 2.3 存在耗散 (实线) 和 k 取 ∞ 无耗散 (虚线) 纵波 (上方线) 和横波 (下方线) 速度 (a) 及泊松比 (b) 与水合物饱和度关系

Fig 2 In Model C, with dissipation, $k \approx 2.3$ (solid line) and without dissipation (dashed line), the relation of compressional-wave (up line) or shear velocity (low line) (a) and Poisson's ratio (b) versus gas hydrate saturation.

当沉积层含有游离气时,考虑固体相与流体相之间的能量耗散,假定地层孔隙度为 0.45,图 3 给出了不同游离气块状和均匀分布时纵波速度

和泊松比随饱和度变化。横波速度不受流体分布类型的影响。沉积层游离气呈均匀分布且饱和度比较低时,纵波速度迅速降低;游离气饱和度达到一定值时,随饱和度增加纵波速度变化不大;沉积层游离气呈块状分布时,纵波速度随饱和度增加单调降低;相同游离气饱和度下,游离气呈块状分布时纵波速度高于呈均匀分布时的纵波速度(图 3a)。两种游离气分布类型时,泊松比都随饱和度的增加而降低。沉积层游离气呈块状分布时的泊松比大于游离气呈均匀分布时的泊松比(图 3b)。通过分析含游离气沉积层的纵波速度和泊松比,可以识别游离气分布类型。似海底反射(Bottom Simulating Reflector)下沉积层速度较低且泊松比也很低,可以断定孔隙中游离气呈均匀分布;BSR 下沉积层的纵波速度比较低,但泊松比不太低,可以断定孔隙中游离气呈块状分布。研究不同模式的纵横波速度及泊松比与水合物和游离气饱和度之间的关系,有利于将来应用速度及泊松比参数研究水合物和游离气含量。

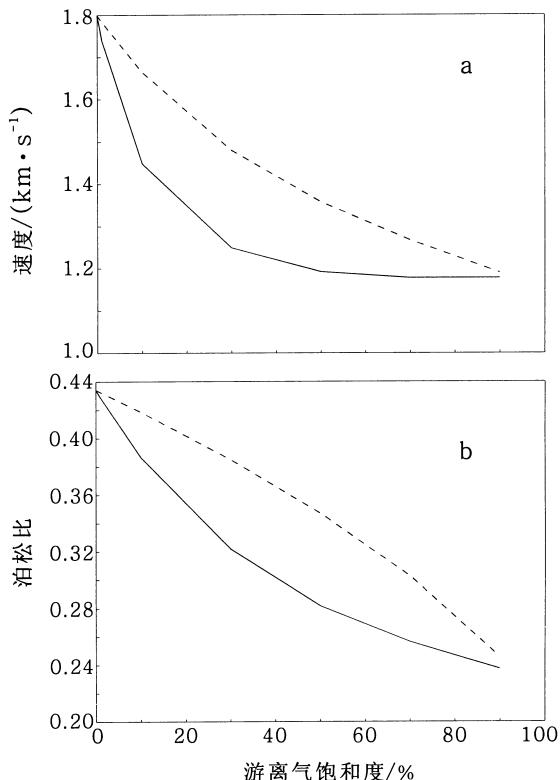


图 3 纵波速度 (a) 和泊松比 (b) 随游离气饱和度变化 (实线为均匀分布; 虚线为块状分布)

Fig 3 The changes of compressional-wave velocity (a) and Poisson's ratio (b) calculated in patchy-saturation model (broken line) and in uniform-saturation model

(solid line) versus the free gas saturation

表 1 沉积物弹性模量和物性参数 (Solan 1990)

Tab 1 Elastic modulus and physical parameters of marine sediment (after Solan, 1990)

物 质	K (GPa)	G (GPa)	ρ (kg/m^3)
方解石	76.8	32.00	2710
粘 土	20.9	6.85	2580
石 英	36.0	45.00	2650
纯水合物	5.6	2.40	767
海 水	2.6	0.00	1036
甲烷气	0.1	0.00	250
60% 粘土 + 5% 石英 + 35% 方解石	35.0	13.80	2630

2 AVA 特征

AVA 是利用振幅信息研究 BSR 的形成原因和特性¹⁾。沉积层含有水合物或游离气时, 不同分布模式的 AVA 曲线不同。P 波反射系数随入射角和偏移距的变化, 是进行 AVA 和 AVO 分析的基础, 可以作为碳氢化合物的直接指示物 (Ostrander 1984)。计算和分析理论 AVA 曲线, 对研究沉积层水合物和游离气分布类型和 BSR 成因具有重要作用。

2.1 线性 Zoepritz 方程

Zoepritz(1919)给出了反射和透射系数与入射角和弹性介质特性(密度、纵波速度和横波速度)之间的关系。由于 Zoepritz 方程比较复杂, 不能直接解出反射振幅与有关参数的明确函数。Akai 和 Richards 假定反射层两边介质的弹性性质变化很小, 给出了 Zoepritz 方程的近似表达式:

$$R_{PP}(\theta) = \frac{1}{2\cos^2(\theta)} I_p - 4\gamma^2 \sin^2(\theta) I_s + (2\gamma^2 - \sin^2(\theta) - 0.5 \tan^2(\theta)) D \quad (10)$$

这里 $I_p = \left[\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right]$; $I_s = \left[\frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right]$;
 $D = \frac{\Delta \rho}{\rho}$

$$\Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}; \quad \Delta V_s = V_{s2} - V_{s1};$$

$$\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$$

$$V_p = (V_{p2} + V_{p1})/2 \quad V_s = (V_{s2} + V_{s1})/2$$

$$\rho = (\rho_2 + \rho_1)/2$$

$$\gamma = V_s / V_p; \quad \theta = (\theta_2 + \theta_1)/2$$

其中 1 代表上层介质, 2 代表下层介质; θ_1 为入射角, θ_2 按 Snell 定律计算的透射角; V_{p1} 、 V_{s1} 、 ρ_1 分别为上层介质的纵波速度、横波速度和密度; V_{p2} 、 V_{s2} 、 ρ_2 分别为下层介质的纵波速度、横波速度和密度; V_p 、 V_s 、 ρ 分别为上下层介质的平均纵波速度、横波速度、密度和入射角; ΔV_p 、 ΔV_s 、 $\Delta \rho$ 分别为上下层介质的纵波速度、横波速度和密度差; $R_{PP}(\theta)$ 不是以 θ 入射的反射振幅, 而是以 θ_1 入射的反射振幅。

2.2 不同水合物模式的 AVA 曲线

沉积层含有水合物时纵波速度增加, 含有游离气时纵波速度降低。当沉积层上层充填水合物、下层充填水或游离气时, 上下界面出现波阻抗差, 沉积层中游离气含量一般比较低。假定沉积层中游离气呈均匀分布状态, 基于方程(1)、(2)和(10), 作者分别计算了水合物沉积模式为模式 A、B 和 C 时反射系数(R_{PP})随入射角变化。假定上层沉积层中含有水合物、下层沉积层充满水时, 在相同入射角时反射系数绝对值随着饱和度增加而增大; 相同饱和度时中等入射角($0 < \theta < 30^\circ$)的反射系数随入射角变化不大, 入射角比较大(大于临界角)。由于存在广角反射, 反射系数随入射角增大变化较大(图 4a 图 5a 和图 6a)。假定上层沉积层水合物饱和度为 20%, 下层沉积层充填不同的游离气, 并且游离气呈均匀分布状态, 图 4b 图 5b 和图 6b 给出了不同饱和度时反射系数随入射角变化。下层沉积层含有游离气的反射系数明显大于下层沉积层饱和水的反射系数, 但两种变化特征基本一致。在相同水合物饱和度和相同入射角时, 模式 C 反射系数最大, 模式 A 次之, 模式 B 最小。沿 BSR 提取实际振幅响应并与理论反射系数相比, 结合速度、泊松比等属性参数, 可以确定沉积层水合物和游离气分布类型。如果实际反射系数低于参考反射系数, 下层沉积层含有游离气。低于临界角时, 实际反射系数随入射角变化较大, 水合物沉积模式为模式 C。

分析不同模式的反射系数曲线, 有利于将来应用正演模拟来进行 AVO 研究。研究不同模式的反射系数随入射角的变化, 有利于将来应用叠前资料的 AVO 信息进行水合物和游离气饱和度研究。

1) Ecker C. Seismic characterization of methane hydrates structures. A Dissertation Submitted to Stanford University for the Degree of Doctor of Philosophy. 1—123

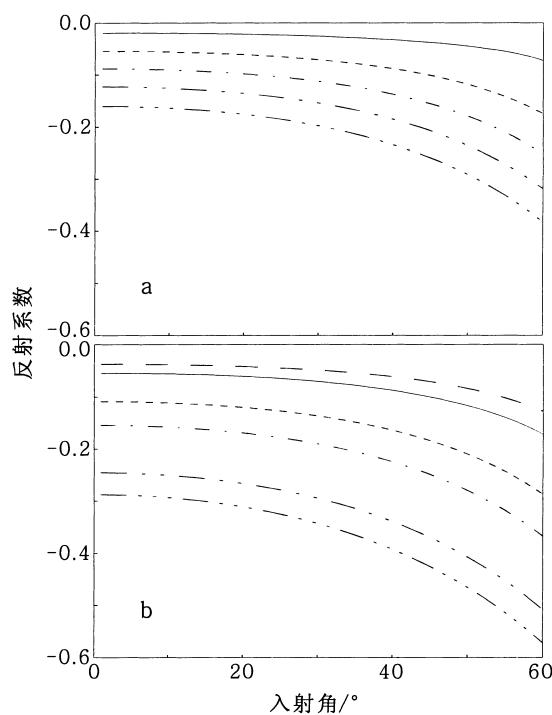


图 4 模式 A 中, 纵波反射系数随入射角的变化

a. 上层含有不同水合物饱和度, 自上而下饱和度分别为: 实线 10%, 虚线 30%, 单点虚线 50%, 两点虚线 70%, 三点虚线 90%; BSR 下沉积层充满水。b. 上层水合物饱和度为 20%, 下层含有不同游离气饱和度, 自上而下分别为: 宽虚线 0%, 实线 1%, 细虚线 5%, 单点虚线 10%, 两点虚线 30%, 三点虚线 50%

Fig 4 In model A, changes in reflection coefficient of compressional-wave velocity versus the incidence angle
 a. Gas hydrate-bearing sediment in upper layer. From top to bottom, gas hydrate saturation changes from 10% (solid line) to 30% (broken line), 50% (one-dotted broken line), 70% (two-dotted broken line), 90% (three-dotted broken line). Water saturated in underlying layer. b. Gas hydrate saturation 20% in upper layer, free gas-bearing sediment in underlying layer. From top to bottom, free gas saturation changes from 0% (bold broken line) to 1% (solid line), 5% (thin dotted line), 10% (one-dotted broken line), 30% (two-dotted broken line), 50% (three-dotted broken line)

3 结论

由 P 波速度和泊松比的分析可知, 沉积层含水合物时泊松比较高, 不同水合物分布模式的泊松比变化不大; 沉积层含游离气时泊松比较低, 不同游离气分布类型, 泊松比存在较大差异, 这

可以被用来识别沉积层游离气的分布类型。不同水合物沉积模式的理论反射系数曲线形态相似, 但是当入射角比较大时, 反射系数仍存在较大差异。分析不同岩性组合的 AVO 特性, 有助于充分应用叠前信息识别水合物和游离气。

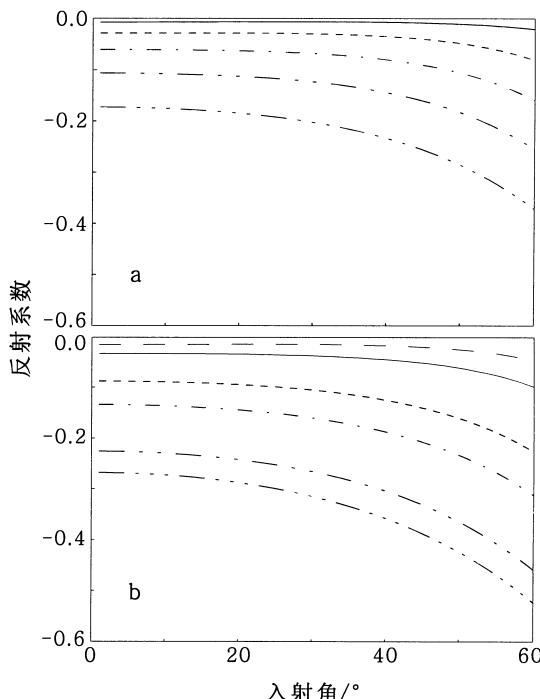


图 5 模式 B 中纵波反射系数随入射角变化关系

a. 上层含有不同水合物饱和度, 自上而下饱和度分别为: 实线 10%, 虚线 30%, 单点虚线 50%, 两点虚线 70%, 三点虚线 90%; BSR 下沉积层充满水。b. 上层水合物饱和度为 20%, 下层含有不同游离气饱和度自上而下分别为: 宽虚线 0%, 实线 1%, 细虚线 5%, 单点虚线 10%, 两点虚线 30%, 三点虚线 50%

Fig 5 In model B, changes in reflection coefficient of compressional-wave velocity versus the angle
 a. Gas hydrate-bearing sediment in upper layer. From top to bottom, gas hydrate saturation changes from 10% (solid line) to 30% (broken line), 50% (one-dotted broken line), 70% (two-dotted broken line), 90% (three-dotted broken line). Water saturated in underlying layer. b. Gas hydrate saturation at 20% in upper layer, free gas-bearing sediment in underlying layer. From top to bottom, free gas saturation changes from 0% (wide broken line) to 1% (solid line), 5% (fine broken line), 10% (one-dotted broken line), 30% (two-dotted broken line), 50% (three-dotted broken line)

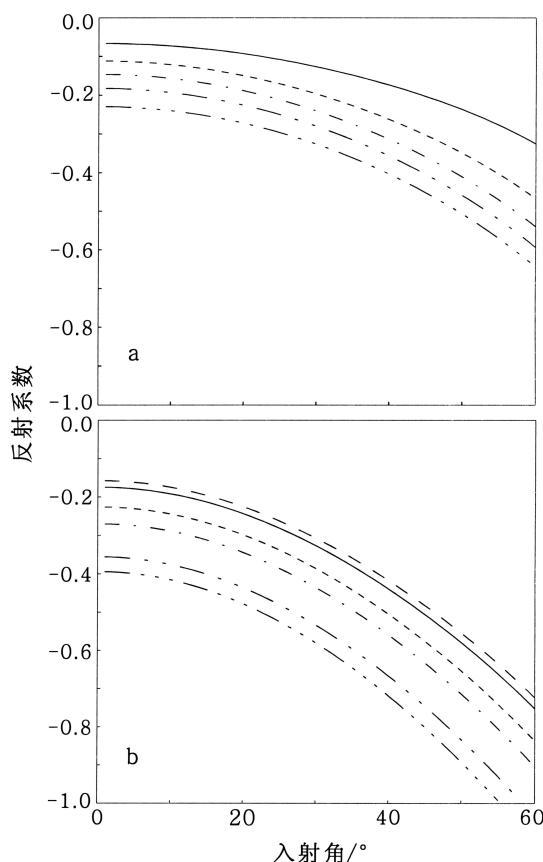


图 6 模式 C 中, 纵波反射系数随入射角变化关系
a 上层含有不同水合物饱和度, 自上而下饱和度分别为: 实线 10%, 虚线 30%, 单点虚线 50%, 两点虚线 70%, 三点虚线 90%; BSR 下沉积层充满水。b 上层水合物饱和度为 20%, 下层含有不同游离气饱和度, 自上而下分别为: 宽虚线 0%, 实线 1%, 细虚线 5%, 单点虚线 10%, 两点虚线 30%, 三点虚线 50%

Fig. 6 In model C, changes in reflection coefficient of compressional wave velocity versus the incidence angle a Gas hydrate-bearing sediment in upper layer from top to bottom, gas hydrate saturation changes from 10% (solid line) to 30% (broken line), 50% (one-dotted broken line), 70% (two-dotted broken line), 90% (three-dotted broken line). Water-saturated in underlying layer. b Gas hydrate saturation at 20% in upper layer, free gas-bearing sediment in underlying layer from top to bottom, free gas saturation changes from 0% (wide broken line) to 1% (solid line), 5% (fine broken line), 10% (one-dotted broken line), 30% (two-dotted broken line), 50% (three-dotted broken line)

(1) BSR 上纵波和横波速度较高, 但泊松比较低, 且出现 PP 反射系数负异常, 表明沉积层含有水合物, 且水合物沉积模式为模式 C。

(2) BSR 上纵波速度略微增加, 但泊松比较高, 且 PP 反射系数出现低负异常, 表明沉积层中含有水合物, 且水合物沉积模式为模式 B。

(3) BSR 下纵波速度和泊松比较低, 表明沉积层中含有游离气, 且游离气呈均匀分布; BSR 下纵波速度低但泊松比不太低, 表明沉积地层中含有游离气且游离气呈块状分布。

(4) 沉积层游离气的块状分布, 可能导致地层出现超压现象, 在钻探中应该慎重对待超压现象, 否则很容易出现井喷。

(5) 分析 BSR 上下的速度、泊松比和 AVA 的趋势, 可以识别出海底沉积层的主要物质特性 (BSR 上水合物胶结情况, BSR 下有无游离气及分布类型等)。确定水合物或游离气的分布类型之后, 通过对比实际速度与理论速度估算饱和度, 精度较高。这种方法也适用于无 BSR 游离气区。

参 考 文 献

- Biot M A, 1956a Theory of propagation of elastic wave in a fluid-saturated porous solid I Low-frequency range J Acoust Soc Am, 28(2): 168—178
- Biot M A, 1956b Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid II. Higher-frequency range J Acoust Soc Am, 28(2): 179—191
- Carcione J M, Tinivella U, 2000 Bottom-simulating reflectors seismic velocities and AVO effects Geophysics 65 54—67
- Domenico S N, 1977 Elastic properties of unconsolidated porous sand reservoirs Geophysics 42 1339—1368
- Dvorkin J Moos D, Packwood J L et al, 1999 Identifying patchy saturation from well logs Geophysics 64(6): 1756—1759
- Dvorkin J Nur A, Yin H, 1994 Effective properties of cemented granular material Mechanics of Materials 18(4): 351—366
- Dvorkin J Nur A, 1996 Elasticity of high-porosity sandstones theory for two North Sea Datasets Geophysics 61: 1363—1370
- Ecker C, Dvorkin J, Nur A, 1998 Sediments with gas hydrate internal structure from seismic AVO. Geophysics 63 1659—1669
- Geertsma J, Snit D C, 1961 Some aspects of elastic wave propagation in fluid-saturated porous solids Geophysics 26 169—181
- Hyndman R, Spence G, 1992 A seismic study of methane hydrates marine bottom simulating reflectors J Geophys Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- Res, 97: 6683—6698
- Kvenvolden K A, 1993. Gas hydrate-geological perspective and global change. Rev Geophys, 31(2): 173—187
- Matsumoto R, Uchida T, Waseda A et al, 2000. Occurrence, structure and composition of natural gas hydrate recovered from the Blake Ridge, Northwest Atlantic. Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J et al ed. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 164: 13—28
- Minshull A, Singh S C, Westbrook G K, 1994. Seismic velocity structure at a gas hydrate reflector offshore western Columbia from full waveform inversion. J Geophys Res, 99: 4715—4734
- Ostrander W J, 1984. Plane-wave reflection coefficients for gas sand at normal angles of incidence. Geophysics, 49: 1637—1649
- Sloan E D, 1990. Clathrate hydrates of natural gas. New York: Marcel Dekker Inc, 1—641
- Trovelli U, Accaino F, 2000. Compression-wave velocity structure and Poisson's ratio in marine sediments with gas hydrate and free gas by inversion of reflection of reflected and refracted seismic data (South Shetland Islands, Antarctica). Marine Geol, 164: 13—27
- Trovelli U, 2002. The seismic response to overpressure versus gas hydrate and free gas concentration. J Seism Exp, 11: 283—305
- Zoeppritz K, 1919. Erdbebenwellen VIII b Über Reflexionen und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen. Göttinger Nachrichten, 1: 66—84

DETERMINING THE DISTRIBUTION MODEL OF HYDRATE AND FREE GAS OCCURRENCE IN SEDIMENT WITH SEISMIC ATTRIBUTE PARAMETERS

WANG Xiu-Juan, WU Shuguo, XU Ning

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039)

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract Gas hydrates is a major energy resource potential of economic values that currently under the exploitation. Saturation is a key parameter for locating gas hydrate and free gas in marine sediment. To quantify the real saturation, the distribution model must be determined. The estimated saturations could be inconsistent if different distribution models are applied. Based on Biot's theory of three-phased medium, the authors calculated some physical parameters such as Poisson ratio, compressional-wave velocity and shear velocity versus the saturation. Moreover, compressional-wave velocity and Poisson ratio are calculated with distributions of free gas in uniform-saturation and patchy-saturation models respectively. PP-reflection coefficients versus incidence angles are also calculated with different hydrate and gas saturations based on Zoeppritz equations.

Compressional-wave velocity and Poisson ratio increase when gas hydrate exists in sediment. However, PP-reflection coefficients of different distribution model also differ from each other. The decrease in velocity and Poisson ratio is more distinct when free gas exists in patchy-saturation model. Compressional-wave velocity in uniform-saturation model at low free gas saturation decreases rapidly, while the decrease is small with the increase of free gas saturation (about 30% in the pore space). But the Poisson ratio in patchy-saturation model is higher than that of uniform-saturation model at the same free gas saturation.

Having analyzed the physical parameters comprehensively, we determined the distribution patterns of gas hydrate and free gas in marine sediment. Generally, in contrast with nearby unhydrated sediment, gas hydrate shows higher compressional-wave and shear velocity but slightly lower Poisson's ratio above BSR that associated with a negative AVO anomaly for PP-reflection coefficients, indicating the existence of gas hydrate in the sediments. Low compressional-wave velocity and Poisson's ratio below BSR indicates that free gas is distributed uniformly in pore space. On the other hand, low compressional-wave velocity and intermediate Poisson's rate below BSR is the sign of patchy distribution of free gas.

Key words Gas hydrate, Free gas, Poisson ratio, AVO, Distribution model