

永久冻土区天然气水合物 饱和度评价技术

郭星旺, 祝有海

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要: 在评价永久冻土区天然气水合物资源量时, 沉积层孔隙中水合物饱和度的确定至关重要。总结了冻土区水合物饱和度评价方法, 主要介绍了直接测试估算法、孔隙水地球化学估算法和地球物理测井估算法。在水合物饱和度估算过程中, 每种方法都存在缺陷。因此, 在对复杂的冻土沉积体系中水合物饱和度进行估算时, 应根据实际情况选用一种以上的方法相互验证, 以提高估算精度。

关键词: 天然气水合物; 饱和度评价; 孔隙水地球化学; 地球物理测井; 永久冻土区

中图分类号: PE132.2

文献标识码: A

天然气水合物是由水和烃类气体在一定的温压条件下形成的笼状固态物, 在自然界主要分布于海底沉积物和极地永久冻土带中。现有资料估计, 天然气水合物资源量巨大, 其蕴藏的碳含量是煤、石油和天然气碳含量总和的两倍^[1]。天然气水合物是一种重要的潜在资源^[2], 但其大量分解可能会导致海底滑坡等地质灾害发生^[3], 并将影响全球气候变化^[4]。因此, 世界各国尤其是各发达国家和能源短缺国家在能源、地质灾害和环境等领域对天然气水合物研究给予了高度重视^[5]。

与海底水合物相比, 冻土区水合物的调查、钻探和开发条件相对简单, 因此, 天然气水合物的调查、勘探和开发在陆上冻土区先行试验, 待技术成熟后才进一步推广到海底沉积物中^[6]。迄今为止, 俄罗斯、美国和加拿大先后在各国的环北极冻土区进行了水合物钻探和开发试验^[7-9], 取得很大进展。2008—2009 年, 我国在祁连山冻土区成功

钻获了天然气水合物实物样品, 是我国冻土区首次发现天然气水合物, 这一找矿突破具有重要的科学和经济意义^[5]。在估算冻土区天然气水合物资源量方面, 先假定天然气水合物在稳定带范围内横向和纵向上连续分布, 然后主要确定天然气水合物分布范围、含水合物储层厚度、沉积层的孔隙度以及孔隙中水合物的饱和度^[10]。显然, 沉积层孔隙中水合物的饱和度对于估算水合物资源量十分重要。目前国外在冻土区水合物饱和度估算方法上已进行过一些探索, 主要包括直接测试估算法、孔隙水地球化学估算法和地球物理测井估算法等, 笔者将对上述方法进行分析总结, 以期推动我国冻土区天然气水合物饱和度评价工作。

1 直接测试估算法

2001—2002 年间在加拿大马更些三角洲实施的 Mallik2002 水合物试生产井项目和 2007 年在美国阿拉斯加实施的 Mount Elbert 水合物地层试验孔项目均使用了直接测试法估算水合物饱和度和^[11, 12]。这种估算方法是通过直接测试样品中水合物分解释放的气体体积或质量来计算样品

收稿日期: 2011-03-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”(1212010818055)

作者简介: 郭星旺(1984—), 男, 在读硕士, 主要从事天然气水合物测井研究工作。E-mail: hblggxw@163.com

中水合物的量,再测试出样品的孔隙体积,来求得水合物饱和度。

直接测试估算法应用的前提是水合物分解后获得的气体均来自于水合物分解。按照 Handa^[11] 提出的理论,在浅表地质条件(温度低于 30℃和压力低于 30 MPa)下,饱和水中的甲烷气/水低于 0.05,而正常的水合物气/水为 160,相比之下,孔隙水中溶解的甲烷气体可以忽略。在估算过程中,用拉曼光谱和核磁共振测试相结合来确定水合物微观结构及水合指数(水合物中的水和气的摩尔比)^[13]。在获得水合物分解释放的气体体积或质量后,水合物饱和度便可确定。

根据这一原理,使用下面两种方法计算水合物饱和度(表 1):①钻探现场气体质量法;②实验室水合物真空分解体积法。通过以上方法直接计算得出的水合物饱和度准确性较好,在 Mallik5L-38 钻孔中水合物的饱和度在 0%~80% 之间变化,主要为 20%~50%,其计算误差为 ±10%^[11]。在 Mount Elbert 项目中只应用了方法①进行估算,其误差小于 3%^[12]。研究者认为在计算沉积物中水合物饱和度时,这种误差能够接受^[12]。

表 1 直接测试估算法步骤(据文献[11])

Table 1 Procedure of the direct calculation of gas hydrate resource(from reference[11])

步骤	钻探现场气体质量法	实验室水合物真空分解体积法
1	水合物样品表面被刮到露出新鲜面为止	选取保存在液氮中水合物岩心样品的中心部分作为测试样品
2	将刮好的水合物样品切割成薄片状或圆柱状等形状作为测试样品,并记录尺寸以便于计算其体积	将测试样品放入一个抽真空的固定容器中,通过测量容器中气体压力来确定水合物分解的气体体积
3	测试样品中水合物分解出的气体质量等于水合物分解前后的样品质量之差	测试样品中水合物的量由水合物分解释放的气体体积计算得到,假定水合指数为 6
4	测试样品中水合物的量是由水合物分解的气体质量和水合指数(取 6)确定	通过测试样品中水合物的量及其孔隙体积计算得出水合物饱和度
5	通过测试样品中水合物的量及其孔隙体积计算得出水合物饱和度	

注:测试样品孔隙体积由两种方法确定,一种是假定水合物分解后测试样品密度为 2.0 g/cm³和孔隙度为 30%,在测得其质量后求出测试样品孔隙体积;另一种是通过测量水合物分解后孔隙中完全充满水时的含水量来确定测试样品孔隙体积。

由于水合物在自然条件下易于分解,为了直接测量方法估算的水合物饱和度更加准确,应尽量保证在近似原位条件下保存和处理水合物样品。在采集过程中,水合物岩心不可避免地暴露在自然条件下,研究者^[11]认为在-30~-50℃的极地钻场,岩心从钻孔中采集所用时间小于 30 min 时,几乎不会对岩心中心部位水合物造成影响。

2 孔隙水地球化学估算法

2.1 孔隙水氯离子浓度法

在水合物形成时,其笼状结构排斥流体中的 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺ 和 K⁺ 等离子,造成剩余孔隙水的盐度增加^[14,15]。当水合物在一个开放的流体环境中形成时,周围孔隙水通过渗透作用而使剩余孔隙水盐度恢复正常;当把含水合物的岩心采集上来后,由于水合物分解释放的低盐度水稀释了孔隙水的盐度,而造成岩心孔隙水盐度降低^[16]。可以看出,孔隙水的淡化程度与孔隙中水合物的含量之间存在一定的对应关系,其中关键问题是确定原位孔隙水 Cl⁻ 背景浓度值^[17]。

目前,有两种方法确定原位孔隙水 Cl⁻ 背景浓度值:①用与水合物层互层的含水层中 Cl⁻ 浓度作为孔隙水 Cl⁻ 背景浓度值,如 Matsumoto 等在 Mallik5L-38 水合物钻孔中使用了这种方法确定孔隙水 Cl⁻ 背景浓度值,在 3 个水合物带上计算的水合物饱和度为 60%~85%,与核磁共振孔隙测井计算的饱和度一致性很好^[18];②通过一系列误差方程或相关积分用多种方法拟合 Cl⁻ 扩散后的背景浓度值^[19]。这种方法是基于开放系统中组成水合物晶体格子水排斥其中溶解的离子,导致剩余水中 Cl⁻ 浓度升高,这种局部变化随长时间离子扩散或流体对流而恢复正常,通过计算能够确定 Cl⁻ 背景浓度值。如 Torres 等在 Mount Elbert 项目中应用这种方法确定 Cl⁻ 浓度背景值,计算出的水合物饱和度高达 80%,与测井计算结果一致^[20]。

在确定原位孔隙水 Cl⁻ 背景浓度值之后运用下面的经验公式进行估算^[18,20]:

$$S_h = \frac{\beta(C_b - C_s)}{C_s + \beta(C_b - C_s)} \quad (1)$$

式中: C_b 为在取样时原位孔隙水氯离子背景浓度值;

C_s 为岩心样品中水合物分解后测得的氯离子浓度;

β 为对水合物分解带来的密度变化进行定量化的无量纲常数, 根据已知的晶胞体积 ($V_{\text{cell}} = 1.728 \times 10^{-21}$) 和水合物晶体中的水分子数 $n_w = 46$, 计算得出 β 为 $1.257^{[21]}$ 。

与海底沉积物中孔隙水盐度相比, 陆地永久冻土区孔隙水盐度普遍较低, 一般为 $2.5\% \sim 7\%^{[20]}$, 这就给确定原位孔隙水 Cl^- 背景浓度和估算冻土区水合物饱和度增加了难度。在实际应用中, 由于钻井泥浆对孔隙水的污染使采集孔隙水难度增加。在国外研究中采用油基泥浆以减少对孔隙水离子浓度影响, 同时, 采用大口径钻探并取岩心中间部位的孔隙水进行研究, 进而最大程度降低钻井泥浆对孔隙水的污染。

2.2 孔隙水同位素法

同位素分馏造成水合物笼状结构中的水富集 $^{18}\text{O}^{[14, 15]}$ 。据相关数据显示水合物晶体中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比周围孔隙水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值高出 $3.1\%^{[16]}$ 。当岩心样品中的水合物分解后孔隙水的 $\delta^{18}\text{O}$ 增加, 因此, 在确定 $\delta^{18}\text{O}$ 的基线后, 可以利用增加的 $\delta^{18}\text{O}$ 值来估算水合物饱和度。其经验公式如下:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}} = M \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{hydrate}} + (1 - M) \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{base}} \quad (2)$$

式中: $\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}}$ 为使用 K^+ 浓度修正的孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 值;

$\delta^{18}\text{O}_{\text{base}}$ 为孔隙水中 $\delta^{18}\text{O}$ 基线值;

$\delta^{18}\text{O}_{\text{hydrate}}$ 应用下面经验公式计算^[22]:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{hydrate}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{base}} + 3.1 \quad (3)$$

应用方程 (2) (3), 得出水合物和水的比值 (M) 为:

$$M = \frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{corr}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{base}}}{3.1} \quad (4)$$

水合物化学计量式的一种模型为 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$, 1mol , 这种类型水合物包含 103.5 g 水, 它的密度为 $0.91\text{ g/cm}^{3[23]}$ 。经计算可得出—单位体积的水能生成 1.27 单位体积的这种类型

水合物, 因此, 水合物饱和度的估算公式如下:

$$S_h = \frac{1.27M}{1 + 0.27M} \times 100\% \quad (5)$$

在加拿大马更些三角洲 *Mallik 5L-38* 钻孔中应用这种方法计算的水合物饱和度值高达 90% , 与测井方法计算的水合物饱和度相比明显偏高, 其原因是 $\delta^{18}\text{O}$ 基线计算过低^[16]。 $\delta^{18}\text{O}$ 基线是由非水合物层的孔隙水测试所得, 并假定水合物的生成和分解对所分析的孔隙水没有影响。为了防止泥浆冻结, 在泥浆中添加含有 K^+ 的防冻剂使孔隙水受到污染, 同时, 孔隙水中 K^+ 浓度能够估算泥浆对孔隙水的污染程度。因此, 准确使用 K^+ 浓度修正孔隙水 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 对于应用孔隙水同位素法估算水合物饱和度十分关键。

3 地球物理测井估算法

3.1 核磁共振与密度法

本方法是由核磁共振测井与密度测井相结合, 应用核磁共振孔隙度公式与体积密度公式计算水合物饱和度。核磁共振孔隙度测量的是孔隙中水(束缚水、毛细水和自由水)所占的体积, 其公式如下所示^[24]:

$$\Phi_{\text{NMR}} = \Phi(1 - C_h) \quad (6)$$

结合水合物层的体积密度公式^[25]:

$$\rho_b = \rho_{\text{ma}}(1 - \Phi) + \rho_w\Phi(1 - C_h) + \rho_h\Phi C_h \quad (7)$$

得出:

$$\Phi = \frac{\Phi_b + \lambda_b \Phi_{\text{NMR}}}{1 + \lambda_b} \quad (8)$$

$$C_h = \frac{\Phi - \Phi_{\text{NMR}}}{\Phi} \quad (9)$$

式中: Φ_{NMR} 为核磁共振测量的孔隙度;

Φ 为总孔隙度;

Φ_b 为在骨架和水两相系统中的传统密度孔隙度;

ρ_{ma} 、 ρ_w 和 ρ_h 分别为岩石骨架、水和水合物的密度;

C_h 为孔隙中水合物的饱和度。

其中:

$$\lambda_b = \frac{\rho_w - \rho_h}{\rho_{\text{ma}} - \rho_w} \text{ 和 } \Phi_b = \frac{\rho_{\text{ma}} - \rho_b}{\rho_{\text{ma}} - \rho_w}$$

在 Mount Elbert 项目中应用这种方法估算

水合物饱和度, 研究者认为结果较为准确, 并可以校正其他方法估算得出的水合物饱和度^[24]。

3.2 电阻率法

含有天然气水合物的地层相对于含饱和水地层而言具有较高的电阻率, 这就为利用电阻率测井来确定天然气水合物饱和度提供了可能^[26]。含天然气水合物地层的高电阻率主要是由于天然气水合物本身有很高的电阻率, 并且还与水合物的生成造成孔隙流体空间减少有关^[27]。因此, 可以利用水合物存在所引起的地层电阻率升高来确定地层中水合物的含量。目前在国外各个冻土区水合物研究中几乎都使用了电阻率测井数据来计算水合物饱和度^[24, 26, 28]。

在利用电阻率计算水合物饱和度的过程中, 假定含水合物地层的孔隙中只含有水合物和水, 先应用 Archie 公式^[29] 计算出孔隙中水的饱和度 S_w , 然后计算水合物饱和度 $S_h = 1 - S_w$ 。

Archie 公式是纯砂岩孔隙度、含水饱和度和电阻率之间的经验表达式, 适用于纯砂岩储集层孔隙空间被流体所充填的两相模型。一般来说 Archie 公式有两种形式, 第 1 种为标准 Archie 公式, 即

$$S_w = \left(\frac{aR_w}{\Phi^n R_t} \right)^{1/n} \quad (10)$$

式中: R_t 为深探测电阻率测井值;

Φ 为地层孔隙度;

R_w 为原位地层孔隙水电阻率;

a 、 m 、 n 总称为 Archie 常数, 其中 a 为比例系数;

m 为孔隙结构指数;

n 为饱和度指数, 一般应用 Pearson 等在研究与冻土有关的水合物时得出的值 $n = 1.9386$ ^[28]。

使用 Serra 于 1984 年提出的应用密度测井得出的孔隙度和电阻率测井值做交会图拟合求出 a 和 m 。其计算公式为^[30, 31]:

$$\log(R_0/R_w) = -m \lg \Phi + \lg a \quad (11)$$

式中: R_0 为饱和水地层电阻率;

R_w 为地层孔隙水温度和盐度的函数; 可由 Arp 公式^[31] 确定, 其公式如下:

$$R_w = \frac{R_{w1}(T_1 + 7)}{(T + 7)} \quad (12)$$

式中: T_1 、 T 均为华氏温度。 T_1 为实验时温度, T 为含水合物地层温度, 在 Mallik3L-38 钻孔中使用分布式温度传感系统测试含水合物地层温度^[28]。 R_{w1} 为 T_1 华氏度时孔隙水电阻率, 为了消除水合物形成对孔隙水盐度影响, 应采集水合物层上下饱和水地层的孔隙水进行测试。

在 Mallik5L-38 钻孔中, 通过测井识别的水合物储层大概在地下 891 ~ 1109 m 之间。Collett 等人运用电阻率测井数据对该水合物层进行饱和度计算, 计算过程中 a 、 m 、 n 分别取值 0.62、2.15、1.9386, 计算得到的水合物饱和度较高, 其峰值可达到 90%^[28]。在 Mount Elbert 钻孔中, Lee 等对 a 、 m 值进行泥质含量校正, 视泥质含量多少而分别选用 $a = 1.7$, $m = 1$ 和 $a_c = 1$, $m_c = 1.6$, n 均为 1.9386, 应用测井得到的电阻率数据进行水合物饱和度计算, 计算结果与核磁共振测井计算的水合物饱和度较为一致, 其值在 50% 左右, 最大值可达到 75%^[24]。

第 2 种为修正的 Archie 公式^[32], 即:

$$S_w = (R_0/R_t)^{1/n} \quad (13)$$

这种方法假定完全饱和含水地层深探测电阻率 R_0 为基线, 水合物层的电阻率升高是由水合物的存在引起。因此, 通过水合物层的深探测电阻率 R_t 与 R_0 之间的关系, 求得水合物层含水饱和度, 进而求得水合物饱和度。

在 Mallik5L-38 钻孔中, R_0 为应用三阶多项式拟合的关于深度的函数, 拟合过程中所需的数据来自于非水合物层段。应用修正的 Archie 公式计算的该钻孔中水合物饱和度达到 80%^[32]。

3.3 声波速度法

含水合物地层表现出高的纵波和横波速度^[33, 34], 基于这一现象, 很多研究试图应用地震和测井获得的声波速度来估算水合物饱和度^[35-40]。根据水合物在沉积层中不同的存在模式, 提出很多计算水合物饱和度的波速理论和方程, 主要有两类^[41]: 第 1 类为经验公式(时间平均方程、伍德方程、李权重方程), 第 2 类为理论模型(BGTL 理论、等效介质理论、 $K-T$ 方程)。经验公式计算简单, 在对储层岩性研究较少时也能够使用, 但推理不够严密; 而理论模型理论严谨, 但所需的很多参数在实验条件下很难获得。下面将

介绍在加拿大马更些三角洲 Mallik 5L-38 钻孔用于估算水合物饱和度的 BGT L 理论^[42, 43], 即 Lee 修正的 Biot-Gassmann 理论: 基于 $V_s = V_p G \alpha (1 - \Phi)^n$, Lee 建立了下面的剪切模量(μ):

$$\mu = \frac{\mu_{ma} K_{ma} (1 - \beta) G^2 + \mu_{ma} \beta^2 M G^2 (1 - \Phi)^{2n}}{K_{ma} + 4 \mu_{ma} [1 - G^2 (1 - \Phi)^2] / 3} \quad (14)$$

式中: V_p 为 P 波速度;

V_s 为 S 波速度;

α 为岩石骨架物质的 V_s/V_p 值;

n 为不同压力和胶结程度的参数;

Φ 为孔隙度;

G 为与岩石骨架物质有关的一种参数, 这里:

$\frac{1}{M} = \frac{(\beta - \Phi)}{k_{ma}} + \frac{\Phi}{k_{fl}}$, 其中, k_{ma} , μ_{ma} , k_{fl} 和 β 分别为岩石骨架的体积模量、岩石骨架的剪切模量、孔隙流体的体积模量和 Biot 系数。

对于沉积物的体积模量, 在 Biot-Gassmann 理论^[44, 45] 中给出: $k = k_{ma} (1 - \beta) + \beta^2 M$

饱和水沉积物的弹性波速度可以根据弹性模量计算得出:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\rho}} \text{ 和 } V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

式中: ρ 为地层的密度 $\rho = (1 - \Phi) \rho_{ma} + \Phi \rho_{fl}$;

ρ_{ma} 和 ρ_{fl} 分别为岩石骨架密度和孔隙流体密度。

对于柔软岩石和未固结的沉积物来说, Biot 系数为 $\beta = \frac{-68.7421}{1 + e^{(\Phi - 0.40635)/0.09425}} + 0.98469$; 对于坚硬岩石和固结的沉积物来说, 应用由 Raymer 等提出的方程计算 Biot 系数: $\beta = 1 - (1 - \Phi)^{3.8}$ 。在实际应用中发现, 上述 Biot 系数取值方法不适用于一些比较特殊的材质, 这种情况下应根据实际情况取值^[46]。

Lee 提出用超声波频率测量速度时, 按如下公式计算参数 n 。

$$n = \frac{[10^{(0.426 - 0.235 \lg p)}]}{m} = \frac{[10^{(0.426 - 0.235 \lg p)}]}{1.0 + 4.95289e^{521.2 \Phi \lg p}} \quad (15)$$

式中: p 为地层压力, MPa;

m 为岩石固结程度对速度的影响作用, 实际偏微分很难求得, 一般在方程(15) 中 m 为经验值。对于固结的沉积岩来说 m 值为 4 ~ 6, 而对于未固结的沉积物来说 m 值为 1 ~ 2。

基于水合物充填在沉积层孔隙中, Lee 修正的 Biot-Gassmann 理论认为孔隙中水合物模量影响着参数 G 和岩石骨架模量。岩石骨架模量可由骨架各成分模量应用 Hill 平均方法确定^[37, 47], 然而, 水合物对参数 G 的影响很难估算, 主要是因为在水合物数量和波速之间的关系很难通过实验标定。为了使 P 波和 S 波计算出的水合物饱和度一致, 应用下面含有 G 的方程估算水合物饱和度:

$$G = 0.9552 + 0.0448e^{-C_v/0.06714} - 0.18C_h \quad (16)$$

式中: C_v 为沉积物中泥质含量;

C_h 为孔隙中水合物的饱和度。

在 Mallik 5L-38 钻孔中, Lee 等应用修改的 Biot-Gassmann 理论对水合物饱和度用纵波数据进行估算。估算过程中, 参数分别取值为 $m = 1.35$, $p = 1.386d/145$ (d 为深度), $C_v = 30\%$, 估算结果与核磁共振估算的结果相比, 在水合物饱和度小于 40% 时, 应用核磁共振估算的水合物饱和度要比应用 P 波估算的值高, 但对于饱和度小于 40% 的情况相反^[43]。在纯净砂岩层段, 声波速度估算的水合物饱和度高达 80% ~ 90%。

4 讨论和结论

在国外冻土区水合物饱和度估算方面, 主要应用直接测试估算法、孔隙水地球化学估算法和地球物理测井估算法等 3 大类方法进行估算。本文对上述各类方法的原理及现实应用中的一些实例分别进行了阐述, 同时得出如下结论:

(1) 在直接测试估算法中, 由于水合物在自然条件下不能稳定存在, 给这种方法带来很大麻烦。尽管有极地钻场的低温环境以及采取液氮储存的措施, 但在钻探和切割时也会造成水合物分解, 给确定水合物体积带来了不可避免的误差。在孔隙体积的计算中, 测量仪器的误差和测量过程产生的误差导致孔隙体积计算的不准确性增大。这种方法的优点在于理论相对简单, 适合在对水合物储层没有深入研究的情况下进行水合物饱和度估算。

(2) 使用孔隙水地球化学估算法时, 无论是氯离子估算法还是同位素估算法, 其前提都是确定氯离子和同位素基线, 一般都采用非水合物层的孔隙水值为基线值或应用公式拟合基线值, 这使

计算结果不可避免地出现误差。

(3) 地球物理测井估算法中的各种方法在应用过程中都有一定的适用条件并且存在优点和缺点, 具体总结如下: 应用核磁共振和密度法估算水合物饱和度不受模型和参数影响, 其计算的准确度取决于核磁共振和密度测井的精度。因此, 在原位计算水合物饱和度的方法中, 使用核磁共振和密度测井方法计算的结果较为准确, 但应排除井径变化对密度测井的影响; 在电阻率法中, Archie 公式一般应用于油气资源评价中, 适合于纯砂岩孔隙中充满油、气、水的经验表达式, 而水合物储层的孔隙中存在孔隙流体和固态的水合物, 这就导致在水合物饱和度评价中遇到一些问题。此外, 沉积物中的泥质含量对 Archie 常数有很大影响, 在应用前应该剔除泥质含量的影响。因此, 如何基于水合物储层建立与之适合的导电模型是亟待解决的问题; 声波速度估算水合物饱和度时, 针对水合物储层波速增高的现象, 提出了多种估算水合物饱和度的波速公式和理论。在这些公式和理论中, 经验公式计算简单但逻辑推理不够严密, 而理论模型虽然推理严谨但是部分参数在试验测试中难以直接得到。这些都对水合物饱和度的估算造成了很大偏差。因此, 根据水合物储层的声学特征及岩石物理学性质, 建立适合实际分析的水合物储层波速模型是今后研究重点。

估算水合物饱和度对评价水合物资源潜力及以后开采模式的建立至关重要。上述 3 类方法的估算过程大都采用了一定的简化处理, 使其与真实情况存在一定差异。因此, 在实际工作过程中应选取合适的估算方法, 并在深入研究工作区水合物储层的基础上对所选方法进行修正, 建立针对研究区的水合物饱和度估算方法。同时, 尽量选用多种估算方法, 得出的结果互相验证, 提高估算的准确程度, 为水合物资源潜力评估及开采提供可靠依据。

参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. Methane hydrate a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J] Chemical Geology, 1988, 71: 41-51.
- [2] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002, 86: 1 971-1 992.

- [3] Dillon W P, Lee M W, Fehllhaber K, et al. Gas hydrates on the Atlantic Continental Margin of the United States Controls on concentration[C]//Howell D G. The Future of Energy Gases. United States Geological Survey Professional Paper, 1993, 1570: 313-330.
- [4] Paull C K, Ussler W, Dillon W P. Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrates? [J] Geophysical Research Letters, 1991, 18: 432-434.
- [5] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1 762-1 771.
- [6] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 7-16.
- [7] Makogon Y F. Natural gas hydrates A promising source of energy [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, 2(1): 49-59.
- [8] Takahashi H, Fercho E, Dallimore, et al. Drilling and operations overview of the Mallik 2002 Production Research Well Program[C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada Bulletin, 2005, 585: 14p.
- [9] Hunter R B, Collett T S, Boswell R, et al. BPXA-US-DOE-USGS Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope: overview of scientific and technical program [J]. Marine and Petroleum Geology Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2): 295-310.
- [10] 卢振权, 祝有海, 张永勤, 等. 青海祁连山冻土区天然气水合物资源量的估算方法——以钻探区为例[J]. 地质通报, 2010, 29(9): 1 310-1 318.
- [11] Lu H, Dutrisac R, Ripmeester J, et al. Measurements of gas hydrate saturation in sediment cores recovered from the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well[C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, 585: 8p.
- [12] Lu H, Thomas D L, Igor L M, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from BPXA-DOE-USGS Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(2): 411-418.
- [13] Ripmeester J A, Lu H, Moudrakovski I L, et al. Structure and composition of gas hydrate in sediment recovered from the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well, determined by X-ray diffraction and Raman and solid state nuclear magnetic resonance spectroscopy[C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research

- Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, 585: 6p.
- [14] Hesse R, Harrison W E. Gas hydrates (clathrates) causing pore water freshening and oxygen isotope fractionation in deep water sedimentary sections of terrigenous continental margins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 55: 453-462.
- [15] Hesse R, Frapre S K, Egeberg P K, et al. Stable isotope studies (Cl, O and H) of interstitial waters from site 997, Blake Ridge gas hydrate field, west Atlantic [C]//Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Ocean Drilling Program, College Station, Texas*, 1964: 129-137.
- [16] Tomaru H, Matsumoto R, Chen Y F, et al. Evolution of a gas hydrate system as recorded by oxygen and hydrogen isotopes of the interstitial waters of the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada*, 2005, 585: 12.
- [17] 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(12): 111-116.
- [18] Matsumoto R, Tomaru H, Chen Y F, et al. Geochemistry of the interstitial waters of the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada*, 2005, 585: 14.
- [19] Ussler W, Paull C K. Ion exclusion associated with marine gas hydrate deposits [C]//Paull C K, Dillon W P. *Eds. Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection. Geophysical Monographs. American Geophysical Union*, 2001, 124: 41-51.
- [20] Torres M E, Collett T S, Rose K K, et al. Pore fluid geochemistry from the Mount Elbert gas hydrate stratigraphic test well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 332-342.
- [21] Malinverno A, Kastner M, Torres M E, et al. Gas hydrate occurrence from pore water chlorinity and downhole logs in a transect across the northern Cascadia margin (IODP Exp 311) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B08103.
- [22] Matsumoto R, Borowski W S. Gas hydrate estimates from newly determined oxygen isotopic fractionation and ^{18}O anomalies of the interstitial waters: leg 164, Blake Ridge [C]//Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. Ocean Drilling Program, College Station, Texas*, 2000, 164: 59-66.
- [23] Makogon Y F. *Hydrates of Hydrocarbons* [M]. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Co, 1997: 482.
- [24] Lee M W, Collett T S. In-situ gas hydrate saturation estimated from various well logs at the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 439-449.
- [25] Pearson C F, Halleck P M, McGuire P L, et al. Natural gas hydrate deposit: a review of in situ properties [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1983, 87: 4180-4185.
- [26] 王祝文, 李海波, 刘菁华. 天然气水合物的测井识别和评价 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 97-102.
- [27] 高兴军, 于兴河, 李胜利, 等. 地球物理测井在天然气水合物勘探中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 305-311.
- [28] Collett T S, Lee M W. Electrical resistivity well log analysis of gas hydrate saturations in the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R, Collett T S. *Eds. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada*, 2005, 585: 8p.
- [29] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1942, 1: 55-62.
- [30] Serra O. Fundamentals of well log interpretation part 1: The acquisition of logging data [M]//*Development of Petroleum Science*, 1984, (15A): 423.
- [31] Arp J J. The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions [J]. *Petroleum Transaction*, 1953, 198: 327-330.
- [32] Guerin G, Goldberg D, Collett T S. Sonic attenuation in the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well [C]//Dallimore S R and Collett T S. *Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada*, 2005, 585: 9.
- [33] Stoll R D. Effect of gas hydrates in sediments [C]//Kaplan I R. *Nature of Gases in Marine Sediments*. New York: Plenum Press, 1974: 235-248.
- [34] Tucholke B E, Bryan G M, Ewing J I. Gas hydrate horizons detected in seismic profile data from the western North Atlantic [J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1977, 61: 698-707.
- [35] Miller J J, Lee M W, Huene R. An analysis of a seismic reflection from the base of a gas hydrate zone offshore Peru [J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1991, 75: 910-924.
- [36] Wood W T, Stoffa P L, Shipley T H. Quantitative detection of methane hydrate through high resolution seismic

- velocity analysis [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 13 655-13 671.
- [37] Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T, et al. Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling [J]. Science, 1996, 273: 1 849-1 843.
- [38] Yuan T, Spence G D, Hyndman R D, et al. Seismic velocity increase and deep-sea gas hydrate concentration above a bottom simulating reflector on the northern Cascadia continental slope [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 13 655-13 671.
- [39] Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A, et al. Elastic wave velocity in marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26: 2 021-2 024.
- [40] Lee M W, Collett T S. Amount of gas hydrate estimated from compressional and shear wave velocities at the JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well [C]//Dallimore S R, Uchida T, Collett T S. Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate Research Well. Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada, Geological Survey of Canada, 1999, 544: 313-322.
- [41] 业渝光, 张 剑, 胡高伟, 等. 天然气水合物饱和度与声学参数响应关系的实验研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (4): 1 156-1 164.
- [42] Lee M W. Biot-Gassmann theory for velocities of gas hydrate bearing sediments [J]. Geophysics, 2002, 67: 1 711-1 719.
- [43] Lee M W, Collett T S. Assessments of gas hydrate concentrations estimated from sonic logs in the JAPEx/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate research production well [C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, 2005, 585: 10.
- [44] Biot M A. General theory of three dimensional consolidation [J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12: 155-164.
- [45] Gassmann F. Elasticity of porous media [J]. Vierteljahrsschr der Naturforschenden Gesellschaft, 1951, 96: 1-23.
- [46] 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]. Geophys Res, 2010, 115 (B2), B02102, doi: 10. 1029/2008JB006160.
- [47] 孙春岩, 章明昱, 牛斌华, 等. 天然气水合物微观模式及其速度参数估算方法研究 [J]. 地学前缘, 2003, 10: 191-198.

SATURATION EVALUATION OF GAS HYDRATE IN PERMAFROST SEDIMENTS

GUO Xingwang, ZH U Youhai

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

Abstract: Accurate calculation of gas hydrate saturation in permafrost sediments is critical to gas hydrate resource assessment. Methods of evaluating gas hydrate saturation mentioned in literatures were summarized in this paper, such as the methods of direct measurement, pore water geochemistry evaluation and well-log evaluation. Each method, in fact, is not accurate enough, so it is recommended that no less than two methods be selected for mutual authentication so as to improve precision.

Key words: gas hydrate; saturation evaluation; pore water geochemistry; well-log; permafrost