

基于分形孔隙模型的含天然气水合物沉积物 电阻率数值模拟

陈玉凤¹ 吴能友² 梁德青³ 胡榕华¹

1. 梧州学院化学工程与资源再利用学院 2. 自然资源部天然气水合物重点实验室 3. 中国科学院天然气水合物重点实验室

摘 要 电阻率法是确定天然气水合物（以下简称水合物）饱和度的重要方法，通过数值模拟可以有效研究含水合物沉积物的电阻率特性，但过去构建的孔隙模型由于约束条件较少，而与实际的孔隙结构存在着较大的差异。为此，基于自然界沉积物具有自相似特征，选定地毯总边长为 3 和颗粒边长为 1 的谢尔宾斯基地毯作为沉积物的分形孔隙模型，根据等效电阻网络模式建立了含水合物沉积物的电导模型，并利用上述模型分析了孔隙度、孔隙水电导率、沉积物骨架电导率等因素对含水合物沉积物电阻率与水合物饱和度关系的影响。研究结果表明：①含水合物沉积物的电阻率可以表示为孔隙度、面积比、微观结构尺寸、孔隙水电导率、沉积物骨架电导率及经验参数的函数；②孔隙水电导率和孔隙度的减小都会导致沉积物电阻率的增大；③含水合物沉积物的电阻率随水合物饱和度的增大而增大；④在高水合物饱和度范围内，含水合物沉积物的电阻率随沉积物颗粒骨架电导率的增大而明显减小。结论认为：在一定的水合物饱和度范围内，该分形孔隙模型计算结果与实验数据和测井数据都能较好地吻合，准确度较高。

关键词 天然气水合物 沉积物 电阻率 分形模型 电导模型 水合物饱和度 电阻率增大指数 孔隙度

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.11.017

Numerical simulation on the resistivity of hydrate-bearing sediment based on the fractal pore model

Chen Yufeng¹, Wu Nengyou², Liang Deqing³ & Hu Ronghua¹

(1. School of Chemical Engineering and Resource Recycling, Wuzhou University, Wuzhou, Guangxi 543002, China; 2. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Key Laboratory of Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 11, pp.128-134, 11/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Resistivity method is an important method to determine the saturation of natural gas hydrate (hereinafter “hydrate” for short), and numerical simulation is effective to research the resistivity characteristics of hydrate bearing sediments. The pore models established in the past cannot reflect the actual pore structure because there are fewer constraint conditions. Based on the self-similar characteristic of natural sediments, we selected the Sierpinski Carpet with its total side length of 3 and particle's side length of 1 as the fractal pore model of sediment, and according to the equivalent resistance network, we established an electrical conductivity model of hydrate bearing sediments. In this paper, the effects of porosity, interstitial water conductivity and sediment skeleton conductivity on the relationship between the resistivity of hydrate-bearing sediment and the hydrate saturation were analyzed using this model. And following research results were obtained. First, the resistivity of hydrate-bearing sediment can be expressed as the function of porosity, area ratio, microstructure size, interstitial water conductivity, sediment skeleton conductivity and empiric parameter. Second, sediment resistivity increases with the decrease of interstitial water conductivity and porosity. Third, the resistivity of hydrate-bearing sediment increases with the increase of hydrate saturation. Fourth, when the hydrate saturation is high, the resistivity of hydrate-bearing sediment decreases significantly with the increase of sediment skeleton conductivity. In conclusion, when the hydrate saturation is in a certain range, the calculation result of this fractal pore model is in line with the experimental data and logging data with a higher accuracy.

Keywords: Gas hydrate; Sediment; Resistivity; Fractal model; Electrical conductivity model; Hydrate saturation; Resistivity increasing index; Porosity

基金项目：国家自然科学基金项目“南海北部神狐海域甲烷水合物动力学成藏的时空演化机制”（编号：41374149）、广西壮族自治区自然科学基金项目“含孔隙型水合物沉积物电学特性研究”（编号：2015GXNSFBA139242）。

作者简介：陈玉凤，女，1985年生，讲师，博士；主要从事天然气水合物基础物性方面的研究工作。地址：（543002）广西壮族自治区梧州市富民三路82号。ORCID: 0000-0002-5639-6097。E-mail: chenylfw@126.com

通信作者：梁德青，1970年生，研究员，博士生导师；从事天然气水合物基础物性与应用技术方面的研究工作。地址：（510640）广东省广州市天河区能源路2号。E-mail: liangdq@ms.giec.ac.cn

0 引言

海底天然气水合物(以下简称水合物)是一种重要的非常规能源,其广泛分布于水深范围为 300 ~ 1 100 m 的大陆架边缘海底的沉积物中^[1-2]。电阻率异常法是水合物勘探的一种有效手段,也是估算水合物饱和度的常用方法^[3-5]。目前,很多研究者通过实验研究了含水合物沉积物或水合物的电阻率特性^[6-9],影响含水合物沉积物电阻率的因素包括沉积物孔隙度、孔隙水盐度、温度、水合物饱和度以及水合物在沉积物孔隙的分布方式等^[10]。

电导模型是通过假设沉积物的孔隙模型,研究多孔介质中孔隙介质导电的微观机理,定量阐明沉积物电阻率与孔隙结构及流体性质、流体分布状态的关系,解决宏观的电阻率测井、岩心实验或室内实验无法准确研究岩心微观孔隙结构、组分等因素对沉积物电阻率具体影响的问题^[11]。常见的孔隙模型包括颗粒状模型、毛细管模型、网络模型、格子气自动机模型等。这些模型虽然在岩石物理研究中发挥了一定的作用,但由于对岩石的孔隙结构做了过多的简化处理,不能反映孔隙结构粗糙曲折、剧烈多变的特点,难以考察复杂的微观孔隙结构对其内部导电和流体流动性的影响^[12]。对于含水合物沉积物,可借鉴土壤电导模型或含油气沉积物电导模型来模拟含水合物沉积物的孔隙微观结构,确定孔隙介质导电特性与流体饱和度的关系,为含水合物储层饱和度估算提供合适的电导模型。所选用的孔隙模型除了应与沉积物实际孔隙结构较相近,也要考虑到水合物的性质以及水合物在多孔介质的分布方式对沉积物导电的影响。Spangenberg^[13]利用均匀颗粒堆积作为孔隙模型,建立了不同分布模式下含水合物沉积物体系的电导模型,指出水合物饱和度指数与颗粒大小、饱和度、粒径分布、孔隙度及胶结指数有关,而不是常数 1.938 6,但该研究所使用的均匀颗粒堆积模式与实际多孔介质的复杂孔隙结构有很大的差别,其饱和度模型在实际适用范围有较大局限性。马龙^[14]基于数字岩心技术构建反映岩石微观结构的孔隙模型推导了电导模型,研究了含水合物岩心的电阻率与孔隙度、饱和度的关系,由于该研究利用 X 射线 CT 扫描岩心得到图像,构建的数字岩心结构固定,难以模拟其他微观因素对岩石物理性的影响,这样构建的孔隙介质模型是纯理论上的岩石物理模型,在约束条件较少的情况下可能与实际岩石的孔隙结构存在较大差异^[14]。

许多研究者证实了自然界沉积物多孔介质的孔

隙结构在一定尺度范围内具有自相似特征^[15-17]。分形孔隙模型能很好地准确表征沉积物多孔介质孔隙的复杂结构特征。分形理论广泛应用于土壤、材料等方面。近年来国内外一些学者利用分形孔隙模型研究多孔介质材料的导热系数,多项研究表明该方法是行之有效的^[18-24]。笔者基于分形孔隙模型,建立含水合物沉积物的电导模型,并把模型计算结果与实验数据及测井数据进行了对比,分析了孔隙度、孔隙水电导率、沉积物骨架的电导率等因素对含水合物沉积物电阻率与饱和度关系的影响,以期为天然气水合物的资源评估提供理论支持。

1 模型的建立

1.1 分形孔隙模型的建立

自然界的沉积物具有自相似特征,因此可通过构造某些分形结构(如谢尔宾斯基地毯)模拟多孔介质孔隙和固体颗粒的空间构形^[16,18]。

谢尔宾斯基地毯的孔隙度(φ)计算公式为:

$$\varphi = \left(\frac{l^2 - c^2}{l^2} \right)^{n+1} \quad (1)$$

式中 l 表示谢尔宾斯基地毯的总边长; c 表示谢尔宾斯基地毯的颗粒边长; n 表示谢尔宾斯基地毯的阶数。通过改变边长 l 或 c , 可以构造具有不同分形维数、不同孔隙度的分形多孔介质。当 l 和 c 不发生变化时,孔隙度将随阶数 n 的改变而改变。因此,通过调整 l 、 c 和 n 来模拟具有不同孔隙度的实际多孔介质。

沉积物多孔介质是由大小不同的颗粒逐渐堆积而成的,这与分形的构造过程相似。拟选定边长 $l = 3$ 和颗粒边长 $c = 1$ 的谢尔宾斯基地毯作为沉积物的孔隙模型(图 1)。当分辨率较低时,只能发现最大粒径的颗粒,其他面积暂时是孔隙,随着分辨率的增大,小一级的颗粒不断被发现,实际孔隙面积不断减小,粒径大小各异的多孔介质颗粒不断填充孔隙空间^[25]。用 l ($l = 3$) 表示观测总范围,即地毯的总边长; c ($c = 1$) 为观测尺度,即颗粒粒径(颗粒边长),当用 l 的观测尺度去观测时,只能发现粒径大于或等于 c 的颗粒^[26-27]。

1.2 电导模型的建立

根据双弥散多孔介质模型,沉积物颗粒是由随机分布不相接触的颗粒和具有自相似分布相互接触的颗粒组成,后者是颗粒之间存在接触电阻^[15]。

用谢尔宾斯基地毯模拟具有自相似分布的接触颗

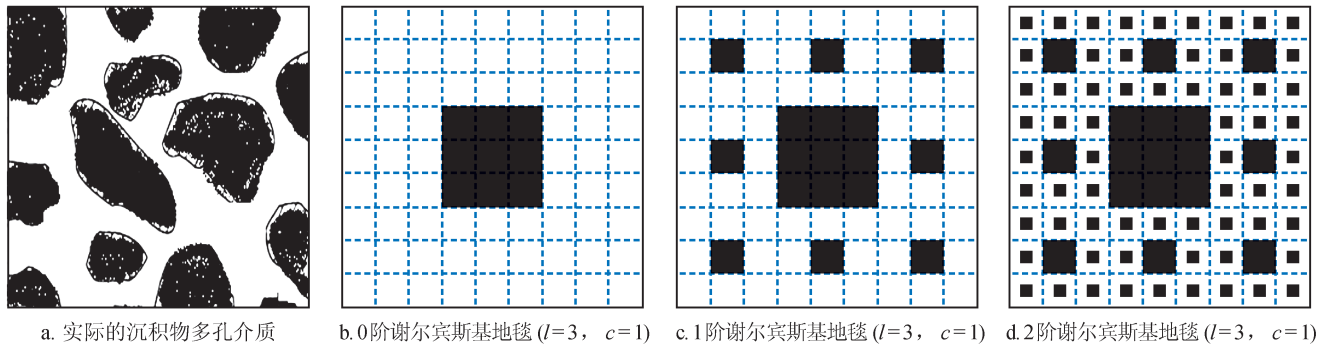


图 1 分形孔隙模型图

注：图中黑色的部分代表沉积物多孔介质的颗粒骨架，白色的部分代表孔隙

粒，假设含水合物沉积物是由沉积物颗粒骨架、天然气水合物、孔隙水 3 个部分组成。根据等效电阻网络，建立含天然气水合物沉积物的电导模型（图 2）。图 2 中的黑色部分代表沉积物多孔介质骨架（颗粒），其电导率为 σ_s ；灰色部分代表孔隙水，其电导率为 σ_w ；白色部分代表固态的天然水合物，其电导率为 σ_g 。孔隙水饱和度（ S_w ）为两个部分：环绕颗粒周围的水饱和度（ S_{wsp} ）和颗粒之间存在的接触电阻的水饱和度（ S_{wb} ）。

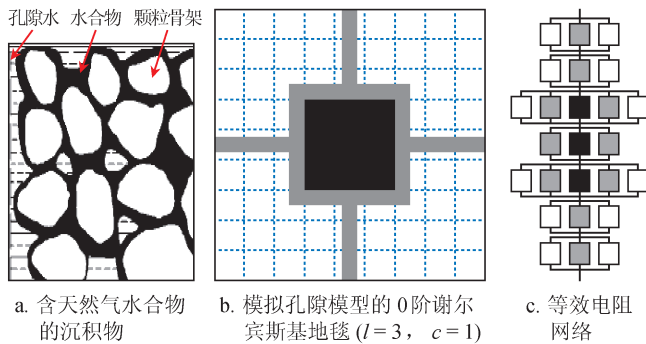


图 2 含天然气水合物沉积物的分形孔隙模型和电阻网络图

根据含水饱和度的定义：

$$S_w = 1 - S_h = S_{wsp} + S_{wb} = hS_w + S_{wb} \quad (2)$$

式中 S_w 表示含水饱和度； S_h 表示水合物饱和度； h 表示经验常数。 $h = S_{wsp}/S_w$ ， $0 \leq h \leq 1$ ，当 $h = 1$ ，所有的水围绕在颗粒周围，即所有的颗粒都处于非接触状态；当 $h = 0$ 时，所有的颗粒都处于接触状态；对于含天然气水合物沉积物， h 经验取值范围为 $0.4 \sim 0.9$ [28]。

根据电阻并串联的性质，沉积物多孔介质的总有效电导率（ σ_{et}^+ ）等于非接触颗粒的有效电导率（ σ_{nt}^+ ）和自相似分布颗粒的有效电导率（ σ_{sc}^+ ）并联，即

$$\sigma_{et}^+ = \frac{\sigma_{et}}{\sigma_w} = \frac{A_{nt}}{A} \sigma_{nt}^+ + \left(1 - \frac{A_{nt}}{A}\right) \sigma_{sc}^{+(n)} \quad (3)$$

式中 σ_{et} 表示沉积物多孔介质的总电导率； σ_w 表示

孔隙水的电导率； A_{nt}/A 表示不相接触的颗粒占全部颗粒的体积分数； $(1 - A_{nt}/A)$ 表示自相似分布相互接触颗粒占全部颗粒的体积分数， $0 < A_{nt}/A < 1$ ， $A_{nt}/A \approx \varphi$ [20]； σ_{nt}^+ 是非接触颗粒的等效电导率； $\sigma_{sc}^{+(n)}$ 是接触颗粒的 n 阶等效电导率。其中上标 n （ $n = 0, 1, 2, \dots$ ， n ）代表谢尔宾斯基地毯的阶数。

σ_{nt}^+ 的计算式为：

$$\sigma_{nt}^+ = \frac{\sigma_{nt}}{\sigma_g} = \left[1 - m - p + \frac{p}{(m+p)\beta_{wg} + 1 - m - p} + \frac{m}{m\beta_{sg} + p\beta_{wg} + 1 - m - p} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中 σ_{nt} 表示非接触颗粒的电导率； $m = \sqrt{1 - \varphi}$ ； $p = \sqrt{1 + \varphi(S_w - 1)} - \sqrt{1 - \varphi}$ ； $\beta_{wg} = \beta_{wg}^{(0)} = \frac{\sigma_w}{\sigma_g}$ ； $\beta_{sg} = \beta_{sg}^{(0)} = \frac{\sigma_s}{\sigma_g}$ 。

$\sigma_{sc}^{+(n)}$ 的计算式为：

$$\sigma_{sc}^{+(n)} = \frac{\sigma_{sc}^{(n)}}{\sigma_g} = \left[\frac{1 - \frac{c}{l} - r^{+(n)}}{t^{+(n)}\beta_{wg}^{(n)} + 1 - t^{+(n)}} + \frac{r^{+(n)}}{1 - \frac{c}{l} - r^{+(n)} + \left(\frac{c}{l} + r^{+(n)}\right)\beta_{wg}^{(n)}} + \frac{\frac{c}{l} - t^{+(n)}}{1 - \frac{c}{l} - r^{+(n)} + r^{+(n)}\beta_{wg}^{(n)} + \frac{c}{l}\beta_{sg}^{(n)}} + \frac{t^{+(n)}}{\left(1 - \frac{c}{l}\right)\beta_{wg}^{(n)} + \frac{c}{l}\beta_{sg}^{(n)}} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中 $\sigma_{sc}^{(n)}$ 表示接触颗粒的 n 阶电导率； σ_g 表示水合物的电导率，s/m； $\beta_{wg}^{(n)} = \frac{\beta_{wg}^{(0)}}{\sigma^{+(n-1)}}$ ； $\beta_{sg}^{(n)} = \frac{\beta_{sg}^{(0)}}{\sigma^{+(n-1)}}$ ； $r^{+(n)}$ 表示围绕在颗粒周围水的厚度； $t^{+(n)}$ 表示围绕在颗粒接触电阻周围水的厚度 [20]。

$$\sigma_{sc}^{+(0)} = \frac{\sigma_{sc}^{(0)}}{\sigma_g} = \left[\frac{1 - \frac{c}{l} - r^{+(0)}}{t^{+(0)}\beta_{wg} + 1 - t^{+(0)}} + \frac{r^{+(0)}}{1 - \frac{c}{l} - r^{+(0)} + \left(\frac{c}{l} + r^{+(0)}\right)\beta_{wg}} + \frac{\frac{c}{l} - t^{+(0)}}{1 - \frac{c}{l} - r^{+(0)} + r^{+(0)}\beta_{wg} + \frac{c}{l}\beta_{sg}} + \frac{t^{+(0)}}{\left(1 - \frac{c}{l}\right)\beta_{wg} + \frac{c}{l}\beta_{sg}} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$r^{+(n)} = \sqrt{\frac{S_{wsp}}{l^2 \left[\left(\frac{l^2}{l^2 - c^2} \right)^{n+1} - 1 \right]} + \left(\frac{c}{l} \right)^2} - \frac{c}{l} \quad (7)$$

$$t^{+(n)} = \frac{S_{wb}}{2 \left(1 - \frac{c}{l} - r^{+(n)} \right) \frac{l^2}{c^2} \left[\left(\frac{l^2}{l^2 - c^2} \right)^{n+1} - 1 \right]} \quad (8)$$

公式(3)是用严格自相似分形几何结构体(谢尔宾基地毯)模拟自相似分布的颗粒,对于实际多孔介质,需要引入经验参数*i*对颗粒无序分布的程度进行修改,实际多孔介质的总有效电导率为:

$$\sigma_{et}^+ = i \left[\frac{A_{nt}}{A} \sigma_{nt}^+ + \left(1 - \frac{A_{nt}}{A} \right) \sigma_{sc}^{+(n)} \right] \quad (9)$$

式中经验参数*i*表示实际多孔介质的无序程度,取值范围为 1.0 ~ 2.0^[29]。

则含水合物沉积物的电阻率(ρ_t)为:

$$\rho_t = \frac{1}{\sigma_{et}^+ \sigma_w} \quad (10)$$

则含水合物沉积物的电阻率增大指数(*I*)为:

$$I = \frac{\rho_t}{\rho_o} = \frac{\sigma_{et}^+ \sigma_w}{\sigma_{eo}^+ \sigma_g} \quad (11)$$

式中 ρ_o 表示水饱和沉积物的电阻率。

在电导模型中,含水合物沉积物的电阻率(ρ_t)可表示为孔隙度(ϕ ,由*l*、*c*和*n*确定)、水合物饱和度(S_h)、各部分介质(沉积物骨架、孔隙水和天然气水合物)的电导率、经验常数(*i*,与沉积物随机、无序的结构有关)和*h*(与颗粒的接触状态有关)、以及孔隙微结构尺寸(*l*和*c*)的函数。对于盐水—水合物—多孔介质骨架体系,根据 GMGS1 的测井数据,确定 σ_w 的范围为 5.00 ~ 2.85 s/m(由盐度和温度确定)^[30];多孔介质骨架主要成分为石英砂时,其电导率(σ_s)的取值范围为 $10^{-8} \sim 10^{-16}$ s/m,对于含有黏土的多孔介质骨架,其 σ_s 的取值范围为 $5 \times 10^{-2} \sim 2$ s/m;天然气水合物的电导率(σ_g)为

10^{-6} s/m;在计算中,选取经验参数*i*、*h*,可以获得含水合物沉积物电阻率与饱和度的关系^[28-29]。

2 结果与讨论

2.1 含水合物海砂沉积物电阻率数值模拟

图 3 给出了 ρ_t 的模拟数值与实验数据的比较。实验采用的海砂样品来自南海神狐海域的浅层,其主要成分为二氧化硅,不含黏土矿物,粒径介于 60 ~ 100 目(0.154 ~ 0.28 mm)。有关含水合物海砂沉积物的电阻率的实验测量方法见本文参考文献[8]。在计算中,选取参数 $\sigma_s = 10^{-14}$ s/m, $\sigma_w = 3.3$ s/m, $l = 3$, $c = 1$, $\phi = 0.39$, $A_{nt}/A = 0.33$, $i = 1.83$, $h = 0.75$ 。从图 3 可以看出,在水合物饱和度 0 ~ 0.6 的范围内,该模型的模拟结果与实验数据值吻合较好。

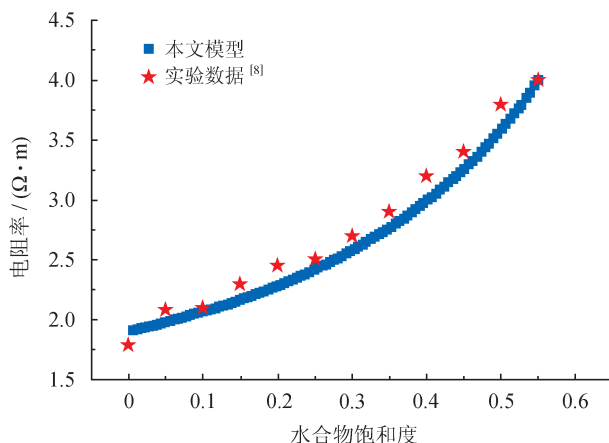


图 3 含水合物海砂沉积物电阻率的数值模拟结果与实验数据^[8]的比较图

2.2 含水合物岩心电阻率数值模拟

图 4 给出了含水合物岩心电阻率(ρ_t)的模拟数值与电阻率测井数据的比较,岩心沉积物样品主要由未固结的(含)钙质生物的黏土质粉砂和(含)钙质生物粉砂组成^[30]。有关南海神狐海域 SH7B 站含水合物岩心电阻率测井曲线和水合物饱和度值见本文参考文献[30]。计算中选取参数 $\sigma_s = 0.1$ s/m, $\sigma_w = 4.3$ s/m, $l = 3$, $c = 1$, $n = 7$, $\phi = 0.44$, $A_{nt}/A = 0.44$, $i = 1.52$, $h = 0.3$ 。从图 4 可以看出,SH7B 站含水合物层段的电阻率测井数据范围为 1.75 ~ 3.00 $\Omega \cdot m$,水合物饱和度范围为 0 ~ 43%。总体上,本模型模拟数值与实地测井数值一致,这也验证了本模型的有效性。

2.3 电阻率增大指数与水合物饱和度关系的模拟

图 5 给出了本模型全饱和度范围内双对数坐标

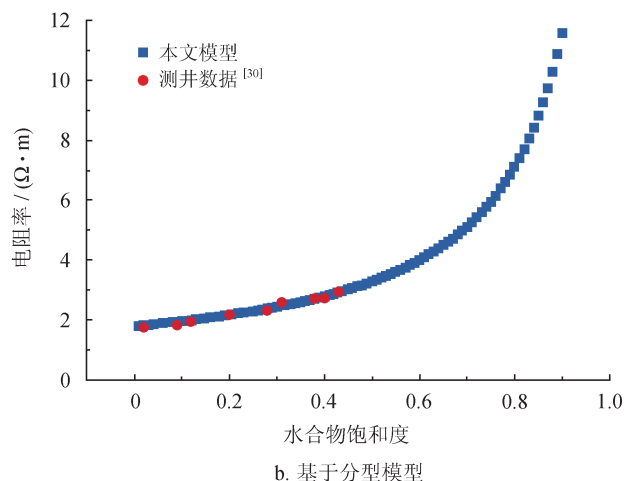
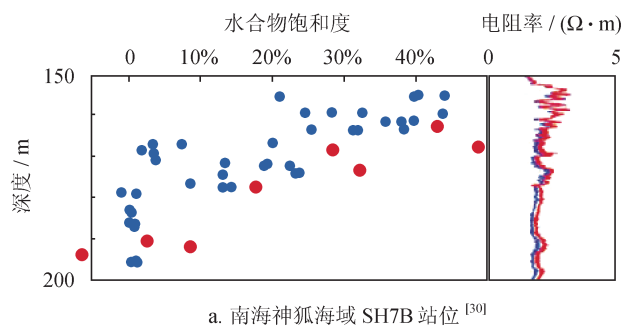


图 4 含水合物岩心电阻率的数值模拟结果与电阻率测井数据 [30] 的比较图

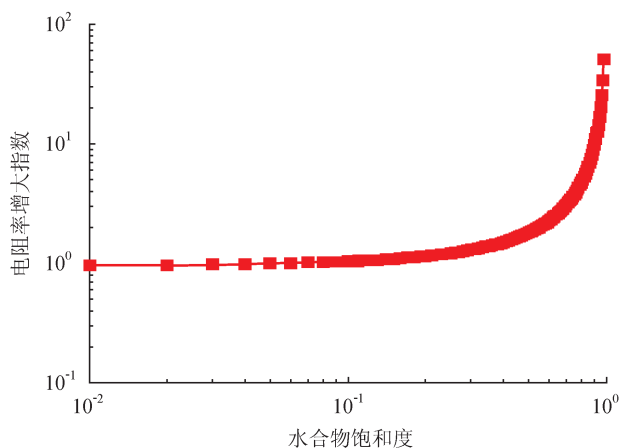


图 5 2.8 °C 下含水合物海砂电阻率增大指数与水合物饱和度的模拟关系图

系下含水合物海砂电阻率增大指数 (I) 与水合物饱和度 (S_h) 关系曲线。在计算中, 选取模型参数 $\sigma_s = 10^{-14}$ s/m, $\sigma_w = 3.3$ s/m, $l = 3$, $c = 1$, $\phi = 0.39$, $A_m/A = 0.39$, $i = 1.83$, $h = 0.75$ 。其中, 模型采用的孔隙度由实验测量海砂样品得到, $A_m/A \approx \phi^{[20]}$, h 的取值见本文参考文献 [28], i 的取值见本文参考文献 [29], 下同。

从图 5 看出, I 随着 S_h 的增大而增大; 当 S_h 较

高 (大于 50%) 时, I (沉积物的电阻率) 急剧增大。

2.4 孔隙度、孔隙水电导率和沉积物骨架电导率对含水合物沉积物电阻率的影响

采用单因素分析法研究了孔隙度 (ϕ)、孔隙水电导率 (σ_w) 和沉积物骨架电导率 (σ_s) 对含水合物沉积物电阻率 (ρ_t) 的影响, 如图 6 所示, 其中 ϕ 、 σ_w 、 σ_s 值均来自于测井数据 [30], 其余模型参数取值如表 1 所示。

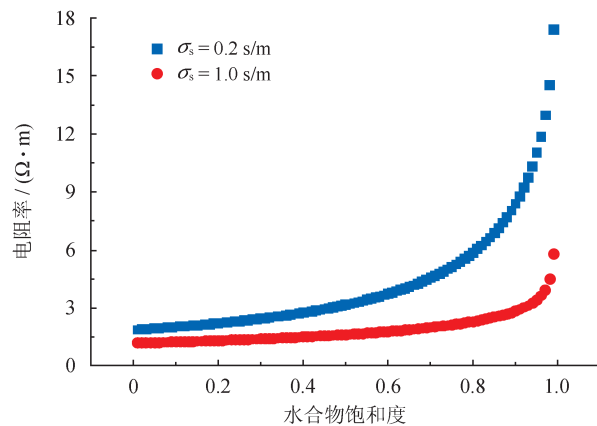
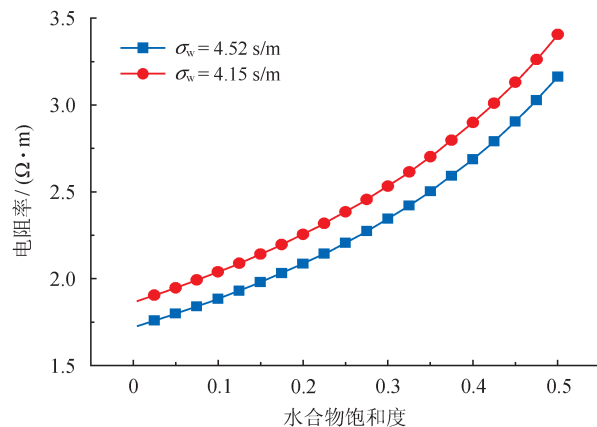
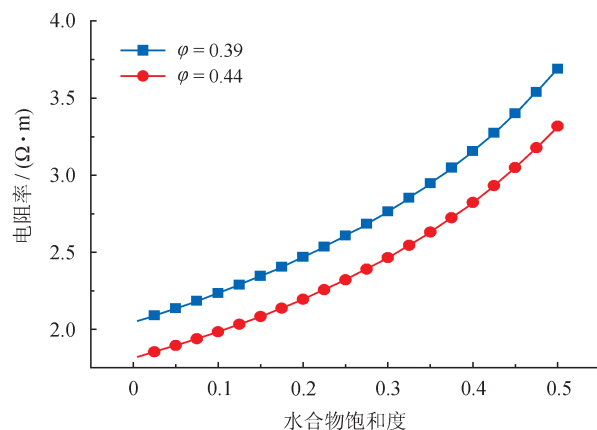


图 6 孔隙度、孔隙水电导率和沉积物骨架电导率对含水合物沉积物电阻率的影响图

表 1 含水合物沉积物电阻率的电导模型参数表

参数	φ	A_m/A	$\sigma_s/(s \cdot m^{-1})$	$\sigma_w/(s \cdot m^{-1})$	n	l	c	i	h
a	0.39	0.39	0.1	4.27	8				
	0.44	0.44		4.52	7				
b	0.39	0.39	0.1	4.15	8	3	1	1.52	0.3
c	0.39	0.39	0.2	4.27	8				
			1.0						

从图 6-a 中可以看出,在水合物饱和度小于 50% 时, ρ_t 随着 φ 的减小而增大;在图 6-b 中,当 σ_w 减小时, ρ_t 增大;在图 6-c 中, σ_s 对 ρ_t 的影响较大,在高水合物饱和度范围内, ρ_t 随 σ_s 的增大而明显减小。这是由于沉积物的黏土含量越高,沉积物颗粒骨架的电导率越大。因此,对于含有黏土的沉积物,含水合物的沉积物受黏土附加导电性的影响较大。

3 结论

1) 基于自然界中沉积物多孔介质具有统计自相似的特征及等效电阻网络模式,选取地毯总边长 $l = 3$,颗粒粒径 $c = 1$ 的谢尔宾斯基地毯为分形孔隙模型,建立了含天然气水合物沉积物的电导模型。

2) 所建立的模型,含天然气水合物沉积物的电阻率可以表示为孔隙度(与阶数 n 有关)、面积比、微观结构尺寸、孔隙水电导率(由盐度和温度确定)、沉积物骨架电导率(由黏土含量确定)和经验参数的函数。在一定的范围内,该模型的模拟结果与实验数据和测井数据都能较好地吻合。

3) 在验证该模型有效性的基础上,利用模型推广了较宽水合物饱和度范围内的沉积物电阻率增大指数(I)与水合物饱和度(S_h)的关系:随着孔隙度(φ)的减小,沉积物的电阻率增大;而沉积物的电阻率随着孔隙水电导率的减小而增大;在高水合物饱和度范围内,沉积物的电阻率随着沉积物颗粒骨架电导率的增大而明显减小。

参 考 文 献

[1] 梁金强,张光学,陆敬安,苏丕波,沙志彬,龚跃华,等. 南海东北部陆坡天然气水合物富集特征及成因模式[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 157-162.
Liang Jinqiang, Zhang Guangxue, Lu Jing'an, Su Pibo, Sha Zhibin, Gong Yuehua, et al. Accumulation characteristics and genetic

models of natural gas hydrate reservoirs in the NE slope of the South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 157-162.
[2] 李刚,李超,李小森,魏纳. 石英砂中甲烷水合物渗透率实验与模型验证[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 53-60.
Li Gang, Li Chao, Li Xiaosen & Wei Na. The permeability experiment on the methane hydrate in quartz sands and its model verification[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12): 53-60.
[3] Collett TS, Ladd J. Detection of gas hydrate with downhole logs and assessment of gas hydrate concentrations (saturations) and gas volumes on the Blake Ridge with electrical resistivity log data[C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results, 2000, 164: 179-191.
[4] Hyndman RD, Yuan T & Moran K. The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 172(1/2): 167-177.
[5] Marc-André P. Chen, Riedel M, Spence GD & Hyndman ARD. Data report: A downhole electrical resistivity study of Northern Cascadia marine gas hydrate[M]//Riedel M, Collett TS, Malone MJ, et al. Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Washington, DC: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2008, 311: 1-27. DOI: 10. 2204/iodp.proc. 311. 203. 2008.
[6] Spangenberg E & Kulenkampff J. Influence of methane hydrate content on electrical sediment properties[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24): 194-199.
[7] 李小森,冯景春,李刚,王屹. 电阻率在天然气水合物三维生成及开采过程中的变化特性模拟实验[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 18-23.
Li Xiaosen, Feng Jingchun, Li Gang & Wang Yi. An experimental study of resistivity variation in the 3D simulation of methane hydrate generation and production[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 18-23.
[8] 陈玉凤,李栋梁,梁德青,周雪冰,吴能友. 南海沉积物天然气水合物饱和度与电阻率的关系[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 507-512.
Chen Yufeng, Li Dongliang, Liang Deqing, Zhou Xuebing & Wu Nengyou. Relationship between gas hydrate saturation and resistivity in sediments of the South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 507-512.

- [9] 金学彬, 陈强, 邢兰昌, 刘昌岭, 郑金吾. 多孔介质中甲烷水合物聚散过程的交流阻抗谱响应特征 [J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 120-127.
- Jin Xuebin, Chen Qiang, Xing Lanchang, Liu Changling & Zheng Jinwu. Response characteristics of AC impedance spectroscopy during the formation and dissociation of methane hydrate in porous media[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(3): 120-127.
- [10] Gabitto JF & Tsouris C. Physical properties of gas hydrates: A review[J]. Journal of Thermodynamics, 2010(7): 1-12.
- [11] 岳文正. 孔隙介质导电特性与流体饱和度 2D 格子气自动机研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2003.
- Yue Wenzheng. Electrical transport properties of fluid saturated porous media by 2D lattice gas automation [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2003.
- [12] 陶果, 岳文正, 谢然红, 朱益华. 岩石物理的理论模拟和数值实验新方法 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 4-11.
- Tao Guo, Yue Wenzheng, Xie Ranhong & Zhu Yihua. A new method for theoretical modeling and numerical experiments on petrophysical studies[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 4-11.
- [13] Spangenberg E. Modeling of the influence of gas hydrate content on the electrical properties of porous sediments[J]. Journal of Geophysical Research—Solid Earth, 2001, 106(B4): 6535-6548.
- [14] 马龙. 天然气水合物储层饱和度参数数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Ma Long. Numerical simulation of saturation parameters in gas hydrate-bearing reservoirs[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [15] Tyler SW & Wheatcraft SW. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 362-369.
- [16] Adler PM & Thovert JF. Fractal porous media[J]. Transport Porous Media, 1993, 13(1): 41-78.
- [17] Dathe A & Thullner M. The relationship between fractal properties of solid matrix and pore space in porous media[J]. Geoderma, 2005, 129(3): 279-290.
- [18] Thovert JF, Wary F & Adler PM. Thermal conductivity of random media and regular fractals[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(8): 3872-3883.
- [19] 陈永平, 施明恒. 基于分形理论的多孔介质导热系数研究 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20(5): 608-612.
- Chen Yongping & Shi Mingheng. Determination of effective thermal conductivity for porous media using fractal techniques[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(5): 608-612.
- [20] Yu Boming & Cheng P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(14): 2983-2993.
- [21] Chen Yongping, Shen Chaoqun, Lu Pengfei & Huang Yongping. Role of pore structure on liquid flow behaviors in porous media characterized by fractal geometry[J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2015, 87: 75-80.
- [22] 杨晚生, 石海娟, 王璋元, 赵旭东. 太阳能固体吸附材料等效导热系数的分形模型 [J]. 新型建筑材料, 2014, 41(6): 64-68.
- Yang Wansheng, Shi Haijuan, Wang Zhangyuan & Zhao Xudong. Fractal model of equivalent thermal conductivity of the solar energy solid adsorption materials[J]. New Building Materials, 2014, 41(6): 64-68.
- [23] 阚安康, 张婷婷, 曹丹. 基于分形理论的纳米颗粒多孔介质真空导热特性 [J]. 化工学报, 2013, 64(11): 4008-4014.
- Kan Ankang, Zhang Tingting & Cao Dan. Vacuum thermal conduction characteristic of nano-granule porous medium using fractal theory[J]. CIESC Journal, 2013, 64(11): 4008-4014.
- [24] 史玉凤, 刘红, 孙文策. 多孔介质有效导热系数的实验与模拟 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2011, 43(3): 198-203.
- Shi Yufeng, Liu Hong & Sun Wence. Experiment and numerical simulation of effective thermal conductivity of porous media[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(3): 198-203.
- [25] 陶高粱. 岩土多孔介质孔隙结构的分形研究及其应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Tao Gaoliang. Fractal approach on pore structure of rock and soil porous media and its applications[D]. Wuhan: Wuhan university of Technology, 2010.
- [26] 李珂. 基于分形理论的计算机图案设计研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- Li Ke. Computer graphics design based on fractal theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [27] 孙博文. 分形算法与程序设计——Visual Basic 实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Sun Bowen. Fractal algorithms and programming: Realized by Visual Basic[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [28] Li Dongliang, Du Jianwei, He Song, Liang Deqing, Zhao Xiangyong & Yang Xiangyang. Measurement and modeling of the effective thermal conductivity for porous methane hydrate samples[J]. Science China Chemistry, 2012, 55(3): 373-379.
- [29] 李栋梁. 水合物生成条件、声速和导热性质研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- Li Dongliang. Research on the formation conditions, acoustic velocity and thermal conductivity for gas hydrate[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [30] Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Lee M, Guo Yiqun, Yang Shengxiong & Liang Jinqiang. Gas hydrate saturation from acoustic impedance and resistivity logs in the Shenhu area, South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2011, 28(9): 1625-1633.

(修改回稿日期 2018-09-29 编辑 罗冬梅)