

李承峰, 刘乐乐, 孙建业, 等. 基于数字岩心的含水合物石英砂微观渗流有限元分析[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 68-72.

# 基于数字岩心的含水合物石英砂 微观渗流有限元分析

李承峰<sup>1,2,3</sup>, 刘乐乐<sup>1,2</sup>, 孙建业<sup>1,2</sup>, 张永超<sup>1,2</sup>, 胡高伟<sup>1,2</sup>, 刘昌岭<sup>1,2\*</sup>

(1 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 3 中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛 266100)

**摘要:**利用 X 射线计算机断层扫描系统 (CT) 获得不同饱和度下含水合物石英砂内部气、水、水合物各相态分布特征, 通过有限元方法计算了不同水合物饱和度下石英砂液相渗透率变化, 并模拟了流体在孔隙内的流动情况, 获得了假定边界条件下孔隙流体的三维流速分布。研究表明, 随着水合物饱和度的降低, 渗透率逐渐增大, 其中当水合物饱和度从 56% 下降到 39% 时, 液相渗透率值增速最大; 水合物分解末期, 液相渗透率并未随着有效孔隙度的增大而快速升高, 通过 CT 扫描图像显示, 部分石英砂孔隙和喉道可见甲烷气泡滞留, 由于气体的贾敏效应在一定程度上阻碍了液体的流动, 从而导致液相渗透率增速降低。本研究建立了一种基于石英砂内部真实孔隙特征的液相渗透率和液体流速计算方法, 可为水合物开采过程中储层微观渗流演化机理研究提供参考。

**关键词:** 甲烷水合物; 数字岩心; 有限元; 液相渗透率; 流速

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.097

## 0 引言

随着海洋天然气水合物勘探开发的逐步深入, 水合物相变与渗流能力时空演化机理成为揭示水合物开采内在控制机制的关键科学问题。开采过程中水合物饱和度降低会引起储层孔隙结构和渗透性发生变化, 这关系到开采井产气效率、井筒稳定以及更大尺度上海底地层与环境安全等一系列问题<sup>[1-3]</sup>。与常规油气储层相比, 海底含水合物储层的孔隙结构更加复杂, 内部水合物含量与赋存形式的变化以及气-液-固三相相态之间的转化均影响到

孔隙内部流体的渗透能力。近年来, 渗流研究逐渐成为国内外水合物领域的热点课题<sup>[4]</sup>。

数字岩心作为多孔介质领域的一个分支学科, 得益于其精度高、无损、容易与多种物理实验耦合等优点, 近年来在石油和天然气行业得到了快速发展。迄今, 国内外研究团队提出了多种数字岩心建模方法, 林承焰等<sup>[5]</sup>将其总结归纳为 3 大类: 物理实验法、数值重建法和混合法。当前, 油气领域常用的建模思路有孔隙网络模拟(PNM)、格子玻尔兹曼模拟(LBM)等数值方法<sup>[6-7]</sup>, 或利用序列切片成像、X 射线计算机断层扫描(CT)和聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB-SEM)等物理方法<sup>[8-10]</sup>, 以及上述 2 种或多种建模方法的联合应用<sup>[11]</sup>。每种建模方法都有其优缺点, 得益于 CT 成像技术的快速发展, 以 CT 扫描二维或三维数据为基础的数字岩心建模已成为常规和非常规岩心物性分析和渗流研究的重要手段。

作为一类较为特殊的多孔介质, 含水合物储层类型多样, 内部孔隙结构非均质性强, 受水合物相

收稿日期: 2020-06-23

资助项目: 国家自然科学基金(41976205, 41876051, 41872136, 41772237);

国家重点研发计划(2018YFE0126400)

作者简介: 李承峰(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事天然气水合物微观探测实验研究工作。E-mail: chengfenglee@163.com

\* 通讯作者: 刘昌岭(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事天然气水合物模拟实验研究工作。E-mail: qdliuchangling@163.com

态、含量以及赋存形态等影响显著,如何发挥数字岩心的优势,构建适用于含水合物介质的渗透率和流速计算方法,是认识其内部微观渗流机理的前提。有研究者将孔隙网络模型与 CT 三维数字图像结合起来研究水合物沉积层渗流特性,建立了适用于天然气水合物渗流特性模拟研究的孔隙网络模型<sup>[12-13]</sup>。根据沉积物中水合物分解过程中流体运移和孔隙介质的特点,喻西崇等<sup>[14]</sup>将格子玻尔兹曼方法应用于含水合物介质多相渗流规律研究。Chen 等<sup>[15]</sup>利用 CT 扫描图像获取时间与空间上孔隙尺度水合物分布形态,结合 LBM 方法计算气相渗透率,获取水合物饱和度与渗透率之间的规律关系。Li 等<sup>[16]</sup>利用 CT 数字岩心提取了含水合物介质内部三维孔隙,并对其孔隙体积、最大孔径及表面积等特征参数进行了定量描述,结合 Darcy 定律和 Navier-Stokes 方程计算了水合物生长过程渗透率变化规律,与 Kozeny-Carman 模型计算结果吻合较好。此外,分形几何方法也是一种描述渗透特性的有效手段,刘乐乐等<sup>[17-19]</sup>从含水合物沉积物有效孔隙的分形特征出发,阐述了水合物含量及其赋存状态对沉积物有效孔隙分形参数的影响规律,提出了含水合物沉积物渗透率分形理论模型。

笔者在含水合物石英砂三维 CT 数字图像的基础上,建立了适用于 COMSOL 有限元分析的网格化模型,获取了水合物分解过程孔隙结构的变化规律,并对该过程中孔隙内部液相渗流情况与流速进行了计算和仿真,为进一步认识孔隙尺度下含水合物介质微观渗流动态演化机理提供有利的依据。

## 1 实验与建模

### 1.1 水合物分解过程 CT 探测实验

研究采用的 CT 仪器为 GE 公司生产的 Phoenix | V tome | X 型微焦点扫描仪,电子束加速电压最高可至 240 KV,阳极为钨靶,16 位平板探测器,尺寸为 1 000×1 000 像素。实验用加速电压和射线管电流分别为 190 KV 和 100 μA,曝光时间 333 ms,体元大小(空间分辨率)为 18.81×18.81×18.81 μm<sup>3</sup>。

实验采用的多孔介质为 500~700 μm 粒径的石英砂,生成水合物所需的气体为高纯甲烷气体、液体为去离子水。上述实验材料保存在铝制耐高

压反应釜中,底部通过半导体制冷片进行温度控制,实验装置的详细介绍可参考论文<sup>[20]</sup>。实验初始气体压强为 6.2 MPa,反应釜内温度恒定于 2.0 °C,经 160 h,反应釜内压强恒定于 5.8 MPa,由此确定水合物达到饱和度最大值。本研究采用降压方式控制水合物的分解,通过 CT 扫描记录水合物分解过程中石英砂内气-水-水合物相态变化及各组分空间分布(图 1)。

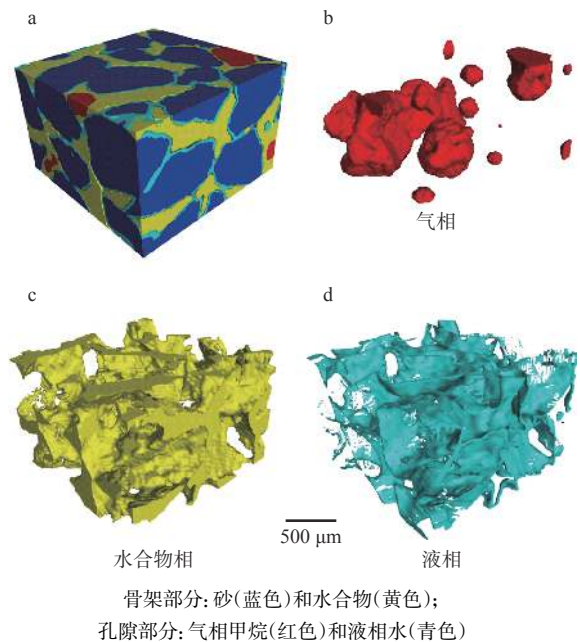


图 1 CT 重建的三维数字岩心

Fig.1 3-D digital core reconstructed by CT

### 1.2 含水合物石英砂有限元模型建立

渗流模拟是以含水合物石英砂孔隙结构和流体流速表征为前提的,CT 扫描获取的三维灰度数字图像提供了较为真实的介质内部各组分空间分布信息。基于 CT 数字图像建立有限元模型,研究介质内部有效孔隙和连通性随水合物饱和度的变化规律,采用求解不可压缩的 Navier-Stokes 方程建立液相渗透率及流速的计算模型。具体流程为:

(1)CT 二维投影序列重建,获得三维数据体,从中截取感兴趣区域(ROI),尺寸大小为 150 像素×150 像素×100 像素,并对其进行降噪、平滑等数字图像处理;

(2)根据灰度分布对 ROI 数据体进行阈值分割,识别气、水合物、水、砂各自的灰度区间,表征各分组的三维分布;

(3) 基于上述灰度阈值, 利用 Simpleware 软件对 ROI 数据体进行网格化处理, 其中不同组分接触界面部分进行网格加密处理以提升模拟结果的准确性, 图 2 展示了水合物饱和度分别为 56%、39%、25% 和 4% 的网格化数据体;

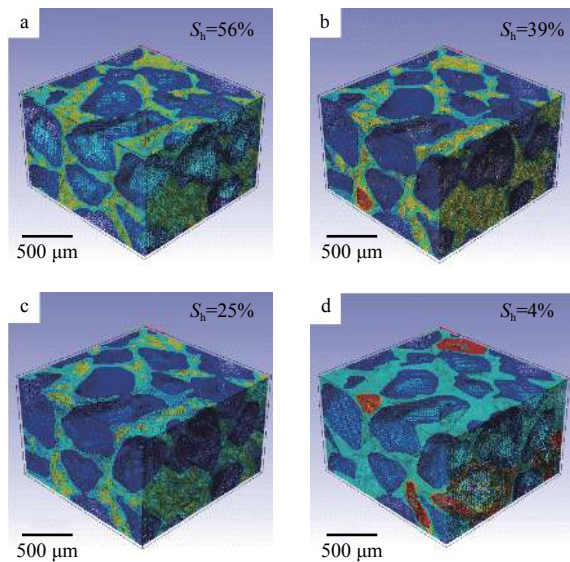


图 2 不同水合物饱和度条件下的网格化数据

Fig.2 Grid data of different hydrate saturation

(4) 将上述网格化的 ROI 数据体导入到 COMSOL 有限元分析软件, 设置流体密度、黏度、入口端和出口端压力等参数, 选用广义最小残量算法 (GMERS) 求解器来完成孔隙空间微流动过程模拟, 获得液相渗透率和流速。

研究针对含水合物石英砂的有限元模型进行单一方向渗流模拟实验, 忽略流体与介质之间的化学作用。鉴于水合物分解产生的甲烷气体主要以亚微米气泡形式逃逸至模型区间外, 只有局部孔隙连通性较低的孔喉处会出现孤立的甲烷气泡聚集并滞留 (图 1b 所示), 受 CT 扫描图像分辨率所限, 只能观测到静态且体积较大的气泡, 因此笔者在建模时只考虑了液体相的流动, 气体相渗透率不在本研究范畴。

以纯水为流动介质, 密度  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ , 黏度  $\mu=0.001 \text{ pa}\cdot\text{s}$ , 计算了上述 4 种水合物饱和度 (56%、39%、25% 和 4%) 条件下沿 Z 轴方向的液相渗透率。有效孔隙度则利用统计气和水所在灰度区间体元数量的方法并结合 Avizo 剥除孤立孔隙模块计算获得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 液相渗透率随水合物饱和度变化规律

图 3 为水合物分解过程中有效孔隙度和液相渗透率随水合物饱和度变化曲线。结果表明: 随着水合物逐渐分解, 介质内部有效孔隙度和液相渗透率逐渐增大; 在水合物饱和度由 56% 逐渐降低至 25% 的过程中, 二者变化趋势基本一致; 而到水合物分解末期, 有效孔隙度增速明显提高, 而液相渗透率的增速与分解前期基本保持持平。这是由于在该实验条件下, 水合物分解产生的部分甲烷气体以孤立气泡的方式滞留在狭窄孔隙或吼道处, 在一定程度上阻碍了液体的流动, 因此, 虽然水合物分解后期石英砂有效孔隙度迅速提高, 但液相渗透率的增速却并未与之成正比。

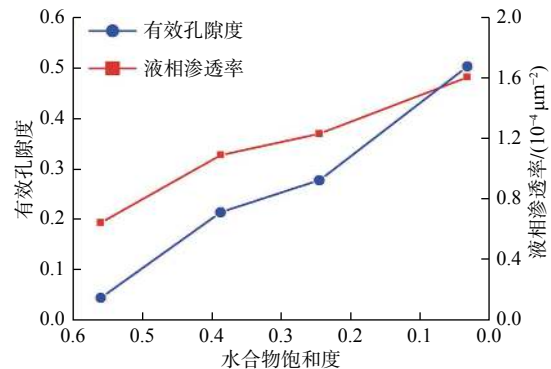


图 3 有效孔隙度和液相渗透率随水合物饱和度变化曲线

Fig.3 Variation curves of effective porosity and liquid phase permeability with hydrate saturation

### 2.2 孔隙内部液体流速仿真

除渗透率参数之外, 孔隙内部液体流动的方向和速率也是描述含水合物介质微观渗流的重要参考。水合物分解过程中孔隙中液体的流动是一个连续不间断的微观过程, 由于 CT 实验无法实时扫描成像, 只能在不同的饱和度状态下断续扫描, 借助仿真手段获得不同分解时刻孔隙内部液体流速分布, 并以颜色和流线密度的方式反应流速大小。

图 4 表征了水合物分解过程沿介质 Z 轴方向液体流速分布情况, 为便于显示三维体内部流速信息, 采用了五层平行切片代表三维整体, 对作为骨架的砂和水合物进行了透明化处理, 利用不同颜色



对流速大小进行区分,其中红色区域的流速最高,蓝色区域的流速最低。对比图 4a—4d 发现,在水合物高饱和度条件下,大部分孔隙空间被水合物占据,剩余孔隙孔径均较小,流速保持在较低的水平,相对比较均匀;随着水合物饱和度逐渐降低,局部孔隙空间变大,其中部分孔隙流速相对增速较快。图 5 为水合物分解末期(饱和度为 4%)流线仿真图像,流线越密集表明该处流速越大。基于实际 CT 图像开展的流速仿真为认识含水合物介质内部微观渗流提供了更加准确、直观的途径。

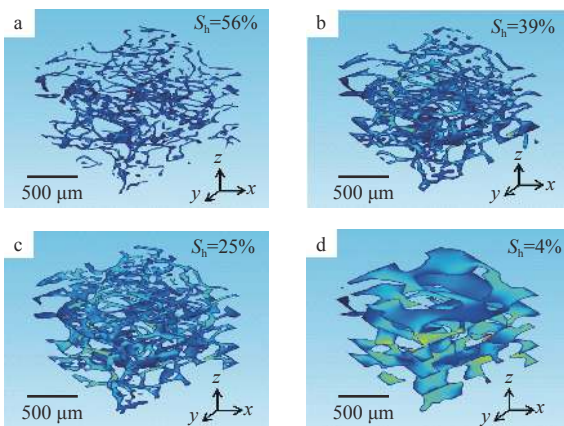


图 4 不同饱和度条件下孔隙内部流速三维分布  
Fig.4 3-D distribution of fluid velocity at different saturation conditions

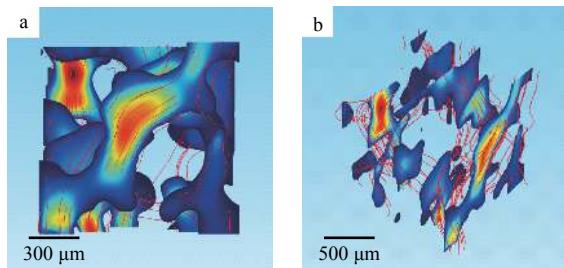


图 5 孔隙及喉道处流线密度仿真  
(以水合物饱和度 4% 为例)

Fig.5 Simulation of streamline density at pores and throats  
(taking hydrate saturation 4% as an example)

### 3 结论

本文结合了 CT 成像技术和有限元分析方法,开展了甲烷水合物分解模拟实验,从孔隙尺度对含水合物石英砂的液相渗透率参数以及孔隙液体流速变化进行了分析与探讨,主要得出以下认识:

(1)水合物分解前期有效孔隙度和液相渗透率呈现正相关,而分解后期由于分解产生大量甲烷气

体,其中部分以气泡的形态存留在孔隙和喉道,一定程度上阻碍了样品液相渗透率的提升。

(2)水合物分解过程中,随着水合物饱和度的降低,孔隙内液体流速由整体低流速且相对均匀逐渐表现为局部高流速且整体非均匀的分布特征。

(3)基于实际 CT 图像开展的渗透率和流速仿真为认识含水合物介质内部微观渗机理流提供了更加准确、直观的途径,目前模型仿真还仅限于液体相流体,并未考虑孔隙中的气相运移速率,同时也未考虑水合物分解过程中热量变化,这些问题需要在后续的研究中重点关注。

#### 参考文献:

- [1] Nimblett J, Ruppel C. Permeability evolution during the formation of gas hydrates in marine sediments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B9): 2420.
- [2] Priest J A, Druce M, Roberts J, et al. PCATS Triaxial: A new geotechnical apparatus for characterizing pressure cores from the Nankai Trough, Japan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 460-470.
- [3] 李彦龙,刘乐乐,刘昌岭,等.天然气水合物开采过程中的出砂与防砂问题[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(7): 36-43.
- [4] 蔡建超,夏宇轩,徐 赛,等.含水合物沉积物多相渗流特性研究进展[J]. *力学学报*, 2020, 52(1): 208-223.
- [5] 林承焰,吴玉其,任丽华,等.数字岩心建模方法研究现状及展望[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(2): 679-689.
- [6] Dai S, Seol Y. Water permeability in hydrate-bearing sediments: A pore-scale study[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(12): 4176-4184.
- [7] 张思勤,汪志明,洪 凯,等.基于格子Boltzmann方法的3D数字岩心渗流特征分析[J]. *测井技术*, 2016, 40(1): 12-22.
- [8] 闫国亮,孙建孟,刘学锋,等.储层岩石微观孔隙结构特征及其对渗透率影响[J]. *测井技术*, 2014, 38(1): 28-32.
- [9] 王平全,陶 鹏,刘建议,等.基于数字岩心的低渗透率储层微观渗流和电传导数值模拟[J]. *测井技术*, 2017, 41(4): 389-393.
- [10] 曹廷宽,刘成川,曾 焱,等.基于CT扫描的低渗砂岩分形特征及孔渗参数预测[J]. *断块油气田*, 2017, 24(5): 657-661.
- [11] 姜黎明,刘宁静,孙建孟,等.利用CT图像与压汞核磁共振构建高精度三维数字岩心[J]. *测井技术*, 2016, 40(4): 404-407.
- [12] Wang J Q, Zhao J F, Yang M J, et al. Permeability of laboratory-formed porous media containing methane hydrate: Observations using X-ray computed tomography and simulations with pore network models[J]. *Fuel*, 2015, 145: 170-179.
- [13] Wang D G, Wang C C, Li C F, et al. Effect of gas hydrate formation and decomposition on flow properties of fine-grained quartz sand sediments using X-ray CT based pore network model simulation[J]. *Fuel*, 2018, 226: 516-526.

- [14] 喻西崇, 刘 瑜, 宋永臣, 等. 基于LBM方法的天然气水合物沉积物中多相流动规律研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 99-103.
- [15] Chen X Y, Verma R, Espinoza D N, et al. Pore-scale determination of gas relative permeability in hydrate-bearing sediments using X-ray computed micro-tomography and lattice Boltzmann method[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(1): 600-608.
- [16] Li C F, Liu C L, Hu G W, et al. Investigation on the multi-parameter of hydrate-bearing sands using nano-focus X-ray computed tomography[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(3): 2286-2296.
- [17] 刘乐乐, 张 准, 宁伏龙, 等. 含水合物沉积物渗透率分形模型[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 034614.
- [18] Zhang Z, Li C F, Ning F L, et al. Pore fractal characteristics of hydrate - bearing sands and implications to the saturated water permeability[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125: e2019JB018721.
- [19] Liu L L, Zhang Z, Li C F, et al. Hydrate growth in quartzitic sands and implication of pore fractal characteristics to hydraulic, mechanical, and electrical properties of hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 75: 103-109.
- [20] 李承峰, 胡高伟, 业渝光, 等. X射线计算机断层扫描测定沉积物中水合物微观分布[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 551-557.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MICRO-SEEPAGE IN HYDRATE-BEARING QUARTZ SANDS BASED ON DIGITAL CORES

LI Chengfeng<sup>1,2,3</sup>, LIU Lele<sup>1,2</sup>, SUN Jianye<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongchao<sup>1,2</sup>, HU Gaowei<sup>1,2</sup>, LIU Changling<sup>1,2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3 College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** In this study, the distribution characteristics of gas, water and hydrate in hydrate-bearing quartz sands under different saturation are acquired by X-ray computed tomography (CT). The change of liquid phase permeability is calculated using the finite element method. The flow of fluid in the pores is simulated and the three-dimensional velocity distribution of the pore fluid under the assumed boundary conditions is obtained. The results show that the liquid phase permeability in quartz sand increases gradually with the decrease of hydrate saturation. When the hydrate saturation decreases from 56% to 39%, the liquid phase permeability value of quartz sand increases to the maximum. At the end of hydrate decomposition, the permeability does not increase rapidly with the increase in effective porosity. The CT scan image shows that some methane bubbles are trapped in quartz sand pores and throat. Due to the Jamin effect, the flow of liquid is hindered to a certain extent, which leads to the decrease of liquid phase permeability growth rate. In this study, a calculation method of liquid phase permeability and liquid velocity based on the real pore characteristics of the hydrate-bearing quartz sand is established, which can provide a reference for the study of the evolution mechanism of micro seepage in the process of hydrate exploitation.

**Key words:** methane hydrate; digital core; finite element; liquid phase permeability; velocity