

不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率试验

孙可明¹ 翟 诚^{1,2} 辛利伟¹ 王婷婷¹

1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院 2. 辽宁工业大学土木建筑工程学院

摘 要 水合物沉积层的渗透率是影响天然气水合物开采效率的重要物性参数之一, 为了探讨在天然气水合物开发过程中有效体积应力和水合物饱和度变化对含水合物沉积层渗透率的影响规律, 选取天然粉砂土作为沉积物骨架, 进行了不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率试验。结果表明: ①当水合物饱和度恒定时, 水合物沉积物的渗透率与有效体积应力呈负指数曲线变化规律, 且曲线的斜率随着有效体积应力的增加由大变小; ②在一定的有效体积应力条件下, 水合物沉积物的渗透率随水合物饱和度亦呈指数递减规律变化; ③有效体积应力和水合物饱和度变化对水合物沉积物渗透率的影响表现为非独立性, 即随着前者的增大, 后者对水合物沉积物渗透率的影响减弱, 而随着后者的增加, 前者对水合物沉积物渗透率的影响也减小。由此提出了有效体积应力和水合物饱和度对水合物沉积物渗透率的影响机理, 即前者对渗透率的影响在于其对渗流通道的压缩作用, 而后者对渗透率的影响则在于水合物对渗流通道的堵塞作用。

关键词 天然气水合物 水合物沉积物 三轴加载 渗透率 有效体积应力 饱和度 压缩 堵塞

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.12.009

Triaxial loading permeability experiments on hydrate bearing sediments with different saturations

Sun Keming¹, Zhai Cheng^{1,2}, Xin Liwei¹ & Wang Tingting¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 12, pp.61-67, 12/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The permeability of a natural gas hydrate (NGH) bearing sedimentary reservoir is one of the important physical property parameters that affect the NGH exploitation efficiency. The influencing laws of effective volume stress and NGH saturation on the permeability of NGH bearing sedimentary layers in the process of NGH exploitation was studied through triaxial loading permeability experiments which were carried out on hydrate bearing sediments in different saturations with natural silty soil as the sediment skeleton. And the following test results were obtained. First, when the hydrate saturation is constant, the relationship between the permeability of NGH bearing sediments and the effective volume stress follows the change law of negative exponential curves, and the slope of the curve reduces with the increase of effective volume stress. Second, at a fixed effective volume stress, the relationship between the permeability of NGH bearing sediments and the NGH saturation follows the change law of exponential decline. And third, the effects of effective volume stress and NGH saturation on the permeability of NGH bearing sediments are not independent. That is to say, with the increase of effective volume stress (NGH saturation), the effect of NGH saturation (effective volume stress) on the permeability of NGH bearing sediments reduces. It is concluded that the effect of effective volume stress on the permeability is mainly presented as a compression effect on the seepage channels, and the effect of NGH saturation on the permeability is mainly embodied as an NGH blocking effect on the seepage channels.

Keywords: Natural gas hydrate; Hydrate bearing sediments; Triaxial loading; Permeability; Effective volume stress; Saturation; Compression; Blocking

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“超临界二氧化碳多脉冲气爆低渗透煤层抽采瓦斯增产机理研究”(编号: 51574137)、辽宁工业大学教师科研启动基金“注热开采甲烷水合物过程中水合物分解—渗流—储层变形热流固三场耦合机理及数值模拟研究”(编号: X201403)。

作者简介: 孙可明, 1968 年生, 教授, 博士生导师; 主要从事渗流理论及应用、多物理场耦合理论及应用等领域的研究工作。地址: (123000) 辽宁省阜新市中华路 47 号。ORCID: 0000-0003-1941-912X。E-mail: sskkmm11@163.com

通信作者: 翟诚, 1981 年生, 讲师, 博士研究生; 主要从事天然气水合物开采方面的研究工作。地址: (121001) 辽宁省锦州市古塔区士英街 169 号。ORCID: 0000-0002-2028-0498。E-mail: zhaichengzhaili@163.com

0 引言

在天然气水合物（以下简称水合物）的开采过程中，水合物沉积层的渗透率直接影响水合物相变分解产生的水、气在储层孔隙空间的渗流，水、气的渗流过程使储层的温度和孔隙压力发生变化，从而影响水合物的分解效果，最终影响其开采效率^[1-3]。与此同时，水合物分解后的沉积层力学强度降低，应力敏感性增强，在抽采水合物分解产生的天然气时必然会引起地层有效应力发生变化，从而导致水合物沉积层渗透率的变化。因此，水合物沉积层的渗透率受水合物饱和度和地层有效应力共同变化的影响。研究这一规律，揭示二者对水合物沉积层渗透率的影响机理对于提高水合物分解产生的甲烷气体的抽采效率具有重要的理论和工程意义。

由于获取原状的水合物沉积物试样和开展原位试验在技术水平、试验成本等方面的局限性，目前有关含水合物沉积层渗透率方面的研究主要集中于室内实验。Tohidi等^[4]研究了二氧化碳、四氢呋喃以及甲烷水合物在有机玻璃模拟的沉积层孔隙中的合成过程和存在的状态；Seol和Kneafsey等^[5-6]基于CT扫描技术研究了水合物饱和度及其赋存形式对水合物沉积物渗透率的影响；Kerkar等^[7]采用CT观察发现，四氢呋喃水合物优先在多孔介质的孔隙中心合成；Kumar等^[8]测量了含不同饱和度二氧化碳水合物的玻璃珠沉积层的绝对渗透率；Minagawa等^[9]测得了3种不同粒径尺寸的玻璃珠沉积层含甲烷水合物时的渗透率；宋永臣等^[10-11]采用2种不同粒径的玻璃砂作为沉积层，研究了不同饱和度甲烷水合物条件下水合物沉积层的渗透率变化规律；翟诚等^[12]以天然粉砂土作为沉积层骨架，得到了天然砂土沉积层的渗透率随不同饱和度甲烷水合物的变化关系曲线。

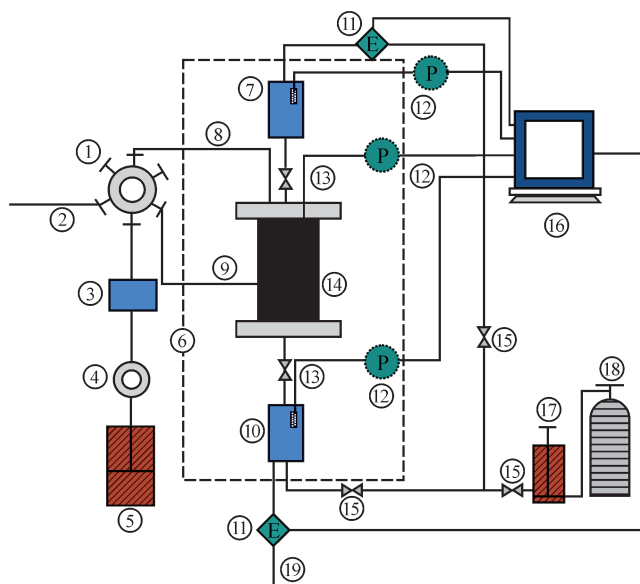
但上述研究均没有考虑水合物饱和度和有效应力同时变化对水合物沉积层渗透率的影响^[4-12]，而目前关于此方面的研究还不多见。鉴于此，笔者选用天然粉砂土作为沉积物骨架，采用自主设计的水合物沉积物合成及渗透率测试一体化装置，进行不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率试验，并根据试验所得规律初步提出了有效体积应力和水合物饱和度对水合物沉积物渗透率的影响机理。

1 三轴加载渗透率试验

1.1 试验装置、水合物沉积物制备和试验步骤

根据试验要求自主设计了具有高压、低温功能

且可对试样加载的水合物沉积物合成及渗透率测试一体化装置（图1），该装置的优点在于可在同一压力室内依次完成水合物沉积物合成试验与三轴加载渗透率试验，很好地避免了两次试验需要拆卸试样而带来的水合物分解问题。装置的核心设备是三轴渗透仪，其结构如图2所示。试验装置中的电磁阀可以使三轴渗透仪两端的“进气压力釜”和“出气压力釜”的压力值始终恒定，从而保证试验中的渗流过程为稳定渗流。



注：①六通阀和压力表；②排水管线；③稳压器；④调压阀；⑤手动水压泵；⑥低温水箱；⑦进气压力釜；⑧轴压；⑨围压；⑩出气压力釜；⑪电磁阀；⑫压力变送器；⑬球阀；⑭三轴渗透仪；⑮针阀；⑯计算机；⑰气体压力泵；⑱甲烷气瓶；⑲排气管线

图1 试验装置图

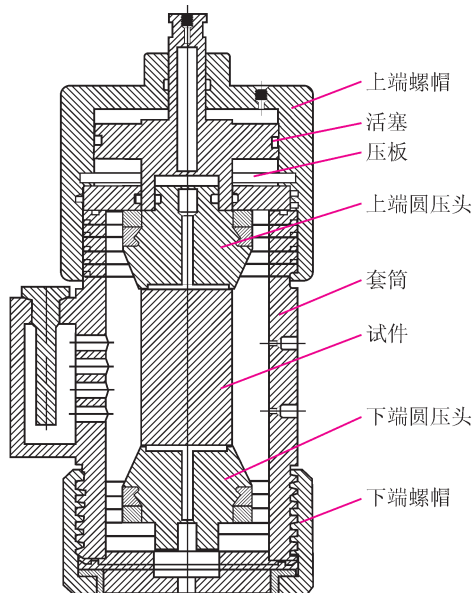


图2 三轴渗透仪的结构图

为便于对比分析, 试验中使用的 4 组沉积物骨架由同一组砂土材料重复制作加工而成, 在忽略微观孔隙结构差异对其渗透率的影响时, 可近似地认为 4 组砂土骨架在不加水前具有基本相同的孔隙度和渗透率。砂土沉积物骨架的制作过程: ①将粉砂岩粉碎筛选后, 采用比重瓶法测得粉砂岩和黏土的比重; ②按照设计的孔隙度和干密度值, 计算所需要的砂土质量; ③将粒径大小介于 1~2 mm 的粉砂岩与黏土按 4:1 的体积比混合并与不同质量的去离子水搅拌均匀后, 逐层压入直径为 50 mm、高为 100 mm 的不锈钢圆筒模具中; ④把装有砂土试样的模具放进 -5 °C 的冰柜中进行冷冻, 24 h 后取出, 用橡胶管将脱模后处于冰冻状态的砂土沉积物骨架封装好 (图 3)。砂土沉积物骨架的干密度为 1.5 g/cm³, 相对密度为 2.66, 试验所用甲烷气体纯度为 99.99%。



图 3 封装的砂土沉积物骨架图

水合物沉积物合成及三轴加载渗透率试验步骤如下: ①在三轴渗透仪中安装好砂土沉积物骨架后, 用输气管线和阀门连接好相关试验仪器和设备, 检查装置不漏气后, 打开真空泵对整套装置抽真空; ②利用手动水压泵施加轴压、围压至设定值, 使用气体压力泵通过进气压力釜向砂土试样孔隙中注入甲烷气体, 施加孔隙压力至预先设定的参考值, 静止放置 24 h, 使甲烷气体尽量均匀分布并溶解于砂土试样的孔隙水中; ③开启低温水箱将反应环境温度降至 1 °C (防止试样孔隙中的水出现结冰现象), 当孔隙压力有较大程度的下降并经过一段时间保持不变后, 分多次继续向三轴渗透仪中注入甲烷气体补充孔隙压力, 直到最终补压后的孔隙压力值保持恒定不变时, 则水合物沉积物合成结束; ④启动气体压力泵将加压后的甲烷气体注入到出气压力釜中, 预冷 1 h 后开

启电磁阀, 将出气压力釜和进气压力釜内的气体压力值分别设为 3.5 MPa 和 4.5 MPa; ⑤调节轴压、围压至设定的参考值, 当出气压力釜排气速度稳定后, 测算平均流速 Q_{out} (测量 3 次取算术平均值) 并记录; ⑥按照试验方案改变轴压、围压, 以获得各级有效应力状态, 并测定和记录对应状态下的 Q_{out} ; ⑦重复以上步骤即可完成不同饱和度水合物沉积物的三轴加载渗透率测试。

该试验的特点在于: 考虑到砂土的毛细管作用并不显著^[13], 试验中采取多次补压的方式, 在不同初始含水率砂土试样中通入过量甲烷气体来获得不同饱和度水合物, 忽略试样孔隙中剩余的极少量水对渗透率的影响。试验装置和设计方案提供了试验过程中甲烷水合物稳定存在所需要的温度和孔隙压力, 并在孔隙压力恒为 4 MPa 的条件下, 通过施加不同的轴压、围压组合以获取三轴加载条件下的各级有效应力状态。在加载过程中, 要注意保证围压始终大于孔隙压, 防止由于孔隙压力超过围压引起试样发生膨胀变形破坏。试验完成后, 通过称量试验前、后的样品质量变化计算出水合物的饱和度。

1.2 渗透率的计算

等温条件下, 认为 CH₄ 气体在水合物沉积物试样微段内的渗流符合 Darcy 定律, 即

$$Q = -\frac{KA}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

式中 Q 表示试样横截面的体积流量, m³/s; K 表示试样渗透率, m²; A 表示试样横截面积, m²; μ 表示气体的黏滞系数, Pa·s; $\frac{dp}{dx}$ 表示试样 dx 微段内流体的压力梯度, Pa/m。

根据本文参考文献 [14-15], 将式 (1) 积分后, 得到计算渗透率的公式为:

$$K = \frac{2p_{out}Q_{out}\mu L}{(p_{in}^2 - p_{out}^2) \cdot A} \quad (2)$$

式中 Q_{out} 表示出口气体流速, m³/s; L 表示试样长度, m; p_{in} 表示进气压力釜的压力值, Pa; p_{out} 表示出气压力釜的压力值, Pa。

2 水合物沉积物渗透率的影响机理

2.1 有效体积应力对渗透率的影响

基于 Terzaghi 有效应力原理, 水合物沉积物试样所受有效应力可用数学张量表示为:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (3)$$

式中 σ'_{ij} 表示水合物沉积物所受有效应力, MPa; σ_{ij} 表示水合物沉积物所受总应力, MPa; p 表示水合物沉积物所受孔隙压力, MPa; α 表示孔隙压力系数, 且 $0 \leq \alpha \leq 1$, 这里为计算简便将 α 取值 1/3; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

为了能够更加真实的反映地层有效应力状态变化对水合物沉积层渗透率的影响, 试验中设计试样的加载条件为 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ 。在这样的载荷作用下, 试样内部会产生分别引起孔隙体积变化的应力球张量和孔隙几何形状变化的应力偏张量。由于孔隙体积变化是引起孔隙介质渗透率变化的主要因素, 因此笔者只讨论加载后“有效体积应力”变化引起的孔隙体积改变对水合物沉积物渗透率影响的敏感性。根据公式 (3), 可得有效体积应力的计算表达式为:

$$\sigma'_v = (\sigma_1 + 2\sigma_3) - p \quad (4)$$

式中 σ'_v 表示有效体积应力, MPa; σ_1 表示轴压, MPa; σ_3 表示围压, MPa; p 表示孔隙压力, $p = \frac{p_{in} + p_{out}}{2}$, MPa, 在本试验中近似为 4 MPa。

这里需要注意的是, 在调节轴压、围压使有效体积应力达到预先设定的参考值后, 保持压力恒定 0.5 h, 待试样的变形已经达到稳定状态后再进行出口气体流速的测试, 将测得的 Q_{out} 代入公式 (2) 中, 即可得到三轴加载条件下, 不同饱和度水合物沉积物在各级有效体积应力状态下的渗透率。试验参数和渗透率数据如表 1 所示。

将表 1 的试验数据进行非线性拟合, 可以得到 4 种不同饱和度下, 水合物沉积物的渗透率随有效体积应力变化的关系曲线 (图 4)。不同饱和度下拟合关系式则可以表示成下列负指数的形式:

$$K = Ae^{-B\sigma'_v} \quad (5)$$

式中 K 表示水合物沉积物的渗透率, mD; A 、 B 表示拟合常数, $A > 0$, $B > 0$; 不同饱和度下的拟合常数及相关系数如表 2 所示。

从图 4 可以看出: 当水合物饱和度恒定不变时, 水合物沉积物的渗透率随有效体积应力呈负指数规律变化, 即有效体积应力越大, 水合物沉积物的渗透率越小, 但减小的趋势逐渐变缓, 不同饱和度水合物沉积物之间的渗透率差值越来越小, 饱和度对水合物沉积物渗透率的影响减弱。出现以上现象的原因为: 在加载初期即有效体积应力增大的初始阶段, 水合物沉积物的压缩性较强, 其固体骨架受有效体积应力作用后, 试样内部孔隙被压缩, 造成孔隙流体渗流

表 1 试验参数和渗透率数据表

饱和度	轴压 /MPa	围压 /MPa	孔隙压力 /MPa	有效体积应力 /MPa	渗透率 /mD
5.67%	1.0	4.3		5.6	6.362
	1.2	4.6		6.4	3.859
	1.4	4.9	4	7.2	2.557
	1.6	5.2		8.0	1.882
	1.8	5.5		8.8	1.425
13.48%	1.0	4.3		5.6	3.943
	1.2	4.6		6.4	2.236
	1.4	4.9	4	7.2	1.387
	1.6	5.2		8.0	0.847
	1.8	5.5		8.8	0.635
18.34%	1.0	4.3		5.6	2.893
	1.2	4.6		6.4	1.687
	1.4	4.9	4	7.2	0.915
	1.6	5.2		8.0	0.619
	1.8	5.5		8.8	0.469
28.23%	1.0	4.3		5.6	1.827
	1.2	4.6		6.4	0.872
	1.4	4.9	4	7.2	0.475
	1.6	5.2		8.0	0.345
	1.8	5.5		8.8	0.234

表 2 拟合常数及相关系数表

饱和度	拟合常数		相关系数
	A	B	
5.67%	78.636	0.463 8	0.984 3
13.48%	93.442	0.577 9	0.989 0
18.34%	68.785	0.580 5	0.979 4
28.23%	53.366	0.630 1	0.970 3

通道尺寸的减小甚至某些小孔隙通道的闭合 (图 5), 水合物沉积物渗透率降低的幅度也就较大。在加载后期即随着有效体积应力的继续增大, 水合物沉积物固体骨架的压实程度越来越大, 剩余可以压缩的孔隙空间越来越少, 渗透率减小的幅度也就越来越小, 因此曲线的变化变得比较平直。可以预测, 当有效体积应力达到一定值后, 即使有效体积应力继续增加, 渗透率也将基本不再发生变化, 而是趋于某一定值。图 6 是渗流试验后的水合物沉积物试样。

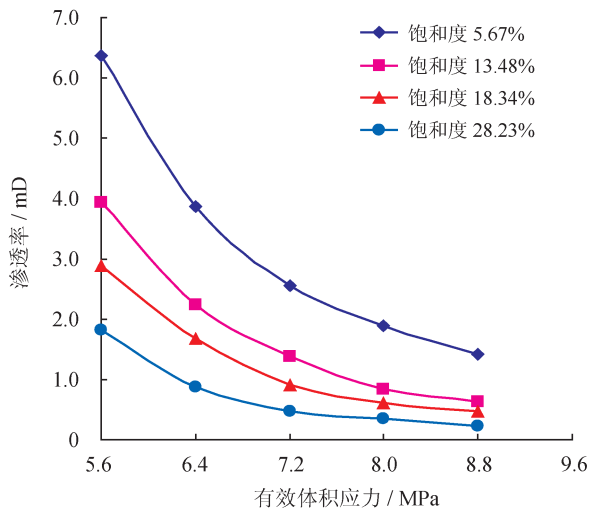


图 4 有效体积应力对不同饱和度水合物沉积物渗透率影响的关系图

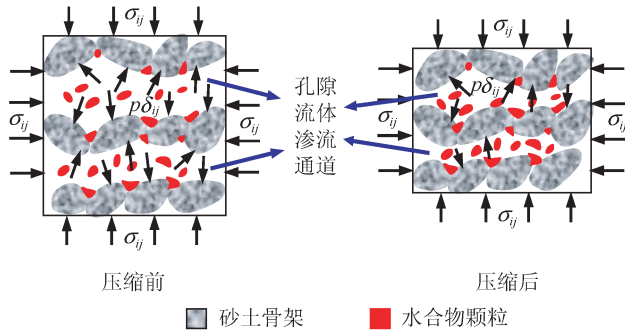


图 5 有效体积应力压缩渗流通道示意图



图 6 渗流试验后的水合物沉积物试样图

2.2 水合物饱和度对渗透率的影响

在水合物沉积物的合成试验中，采用过量甲烷气体与一定量的水反应生成水合物，不考虑砂土沉积物孔隙中剩余的极少量水的影响，则合成后的水合物沉积物可以看作由砂土颗粒、固体水合物和孔隙空间 3 部分组成。假设加载过程中砂土颗粒和水合物不可压缩且水合物不发生分解，由多孔介质变形理论

可推导得到试样压缩变形后的水合物饱和度为：

$$S_h = \frac{V_h}{V_p - \Delta V_p} = \frac{V_h}{(1 - \varepsilon_v)V_b - V_s - V_h} = \frac{S_{h0}}{1 - \varepsilon_v} \quad (6)$$

式中 S_h 表示试样压缩变形后的水合物饱和度； V_h 表示水合物体积， m^3 ； V_p 表示孔隙体积， m^3 ； ΔV_p 表示孔隙体积的变化量， m^3 ； ε_v 表示水合物沉积物的体积应变； V_b 表示水合物沉积物的体积， m^3 ； V_s 表示砂土颗粒体积， m^3 ； S_{h0} 表示初始水合物饱和度。

由小变形假设可知，公式 (6) 中的体积应变 ε_v 远小于 1，因此水合物沉积物孔隙压缩变形对水合物饱和度的影响可以忽略不计，试样压缩变形前后水合物饱和度基本相等，即由式 (6) 可进一步整理得到：

$$S_h \approx S_{h0} \quad (7)$$

由表 1 的数据拟合得到各级有效体积应力作用（加载条件）下，水合物沉积物的渗透率随水合物饱和度变化的关系曲线（图 7）。二者之间亦满足下列负指数形式：

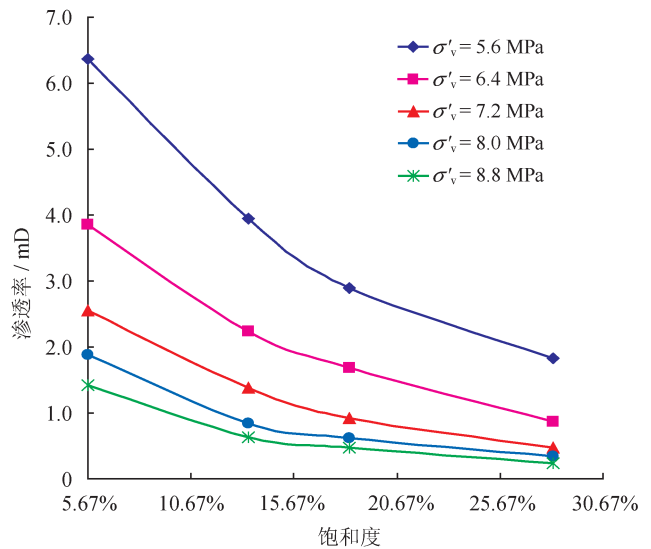


图 7 各级有效体积应力作用下水合物沉积物渗透率随饱和度的变化关系曲线图

$$K = Ce^{-DS_h} \quad (8)$$

式中 K 表示水合物沉积物的渗透率， mD ； C 、 D 表示拟合常数， $C > 0$ ， $D > 0$ ；拟合常数及相关系数如表 3 所示。

从图 7 可以看出：当有效体积应力保持恒定不变时，水合物沉积物的渗透率与水合物饱和度之间亦呈指数递减规律变化，即渗透率曲线的斜率随着饱和度的增大逐渐变小，不同有效体积应力作用下水合物沉积物的渗透率差值越来越小。这可以解释为：当砂土沉积物的孔隙被生成的固体水合物填充后，水合物的含量越多，其与周围砂土颗粒胶结的程度越

表3 拟合常数及相关系数表

有效体积应力 /MPa	拟合常数		相关系数
	C	D	
5.6	8.434 0	5.540 6	0.993 6
6.4	5.540 4	6.554 3	0.999 3
7.2	3.813 5	7.487 8	0.997 0
8.0	2.579 0	7.407 2	0.976 6
8.8	2.047 6	7.879 2	0.986 5

好,水合物沉积物的强度和弹性模量越大,试样抵抗外载荷和变形的能力越强,有效体积应力对试样孔隙的压缩作用的效果越弱。但随着砂土试样孔隙空间被越来越多的水合物颗粒所占据,水合物沉积物的有效孔隙度降低,渗流通道允许孔隙流体通过的有效面积变小,甚至一些小尺寸的渗流通道被固体水合物颗粒完全堵塞(图8),最终引起渗透率的减小。而且在加载过程中,试样孔隙中的固体水合物颗粒发生运移也会引起渗透率下降,水合物的含量越多,试样变形达到稳定状态后颗粒沉积堵塞的概率越大,渗流通道越容易被堵。试验完成后,快速切开水合物沉积物试样,获得其内部剖面局部放大图,可以看到在砂土沉积物的孔隙中分布着像冰晶颗粒一样的固体水合物(图9)。

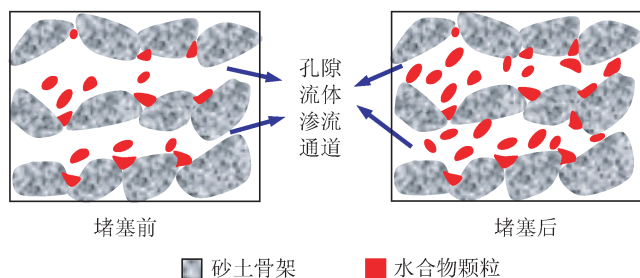


图8 水合物颗粒堵塞渗流通道示意图

3 结论

1) 在水合物饱和度恒定的条件下,水合物沉积物的渗透率随有效体积应力呈负指数规律变化,且曲线的斜率随有效体积应力的增加由大变小,不同饱和度水合物沉积物之间的渗透率差值越来越小。

2) 在一定的有效体积应力条件下,水合物沉积物的渗透率随水合物饱和度亦呈指数递减规律变化,随着饱和度的增大,不同有效体积应力作用下水合物沉积物渗透率之间的差值越来越小。

3) 有效体积应力和水合物饱和度变化对水合物



图9 水合物沉积物内部剖面局部放大图

沉积物渗透率的影响表现为非独立性,即随着有效体积应力增大,水合物饱和度变化对水合物沉积物渗透率的影响减弱,而随着水合物饱和度增加,有效体积应力变化对水合物沉积物渗透率的影响减小。

4) 初步提出了有效体积应力和水合物饱和度对水合物沉积物渗透率的影响机理,即有效体积应力对水合物沉积物渗透率的影响在于其对孔隙流体渗流通道的压缩作用,而水合物饱和度对水合物沉积物渗透率的影响则是水合物对孔隙流体渗流通道的堵塞作用。

参 考 文 献

- [1] 刘乐乐,张旭辉,鲁晓兵.天然气水合物地层渗透率研究进展[J].地球科学进展,2012,27(7):733-746.
Liu Lele, Zhang Xuhui & Lu Xiaobing. Review on the permeability of hydrate-bearing sediments[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(7): 733-746.
- [2] 吴能友,黄丽,苏正,杨胜雄,王宏斌,梁金强,等.海洋天然气水合物开采潜力地质评价指标研究:理论与方法[J].天然气工业,2013,33(7):11-17.
Wu Nengyou, Huang Li, Su Zheng, Yang Shengxiong, Wang Hongbin, Liang Jinqiang, et al. A study of geological evaluation indicators for the exploitation potential of marine natural gas hydrates: Theory and methodology[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(7): 11-17.
- [3] 思娜,安雷,邓辉,孙键,光新军.天然气水合物开采技术研究进展及思考[J].中国石油勘探,2016,21(5):52-61.
Si Na, An Lei, Deng Hui, Sun Jian & Guang Xinjun. Discussion on natural gas hydrate production technologies[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(5): 52-61.
- [4] Tohidi B, Anderson R, Ben Clennell M, Burgass RW & Biderkab AB. Visual observation of gas-hydrate formation and dissociation in synthetic porous media by means of glass micromodels[J]. Ge-

- ology, 2001, 29(9): 867-870.
- [5] Seol Y & Kneafsey TJ. Methane hydrate induced permeability modification for multiphase flow in unsaturated porous media[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116(B8): B08102.
- [6] Kneafsey TJ, Seol Y, Gupta A & Tomutsa L. Permeability of laboratory-formed methane-hydrate-bearing sand: Measurements and observations using X-ray computed tomography[J]. SPE Journal, 2011, 16(1): 78-94.
- [7] Kerkar P, Jones KW, Kleinberg R, Lindquist WB, Tomov S, Huan Feng, et al. Direct observations of three dimensional growth of hydrates hosted in porous media[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(2): 024102.
- [8] Kumar A, Maini B, Bishnoi PR, Clarke M, Zatsepina O & Srinivasan S. Experimental determination of permeability in the presence of hydrates and its effect on the dissociation characteristics of gas hydrates in porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(1-2): 114-122.
- [9] Minagawa H, Sakamoto Y, Komai T, Narita H, Mizutani K, Ohga K, et al. Relation between pore-size distribution and permeability of sediment[C]//The 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, 21-26 June 2009, Osaka, Japan. Osaka: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2009.
- [10] 宋永臣, 黄兴, 刘瑜, 杨明军. 含甲烷水合物多孔介质渗透性的实验研究 [J]. 热科学与技术, 2010, 9(1): 51-57.
Song Yongchen, Huang Xing, Liu Yu & Yang Mingjun. Experimental study of permeability of porous medium containing methane hydrate[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(1): 51-57.
- [11] 刘瑜, 陈伟, 宋永臣, 杨明军, 李清平, 喻西崇. 含甲烷水合物沉积层渗透率特性实验与理论研究 [J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(6): 793-797.
Liu Yu, Chen Wei, Song Yongchen, Yang Mingjun, Li Qingping & Yu Xichong. Experimental and theoretical study of permeability character of sediments containing methane hydrates[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(6): 793-797.
- [12] 翟诚, 孙可明, 辛利伟, 田森. 含甲烷水合物砂土沉积层渗透性试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(8): 78-82.
Zhai Cheng, Sun Keming, Xin Liwei & Tian Sen. Experimental study of permeability of sand soil bearing sediments containing methane hydrates[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(8): 78-82.
- [13] 魏厚振, 颜荣涛, 陈盼, 田慧会, 吴二林, 韦昌富. 不同水合物含量含二氧化碳水合物砂三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 198-203.
Wei Houzhen, Yan Rongtao, Chen Pan, Tian Huihui, Wu Erlin & Wei Changfu. Deformation and failure behavior of carbon dioxide hydrate-bearing sands with different hydrate contents under triaxial shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 198-203.
- [14] 孙可明, 任硕, 张树翠, 陈治宇, 吴迪, 岳立新, 等. 超临界 CO₂ 在低渗透煤层中渗流规律的实验研究 [J]. 实验力学, 2013, 28(1): 117-120.
Sun Keming, Ren Shuo, Zhang Shucui, Chen Zhiyu, Wu Di, Yue Lixin, et al. Experimental study of supercritical carbon dioxide seepage flow in low permeability coal seam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(1): 117-120.
- [15] 孙可明, 吴迪, 粟爱国, 陈治宇, 任硕, 岳立新, 等. 超临界 CO₂ 作用下煤体渗透性与孔隙压力—有效体积应力—温度耦合规律试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3760-3767.
Sun Keming, Wu Di, Su Aiguo, Chen Zhiyu, Ren Shuo, Yue Lixin, et al. Coupling experimental study of coal permeability with pore pressure—effective volume stress—temperature under supercritical carbon dioxide action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3760-3767.

(修改回稿日期 2017-11-01 编辑 罗冬梅)

中石油长城钻探工程公司连续管钻井技术获突破

2017 年 12 月 1 日, 中国石油辽河油田公司前 22-17C 井已进入投产前的准备阶段。前不久, 该井采用由中国石油长城钻探工程公司(以下简称长城钻探)自主研发的连续管等专用工具, 实现单井进尺 707 m, 平均机械钻速 5.54 m/h。

这口井完成了国内最长单井连续管钻井进尺, 实现了连续管钻井轨迹精确控制和小靶心距入靶, 技术水平达到国际先进、国内领先。长城钻探已基本形成了连续管开窗、连续管定向、连续管钻进参数优选和钻井液体系研发等一系列连续管侧钻工艺技术。

(天工 摘自中国石油网)