

文章编号:1001-4888(2015)04-0469-08

降压开采模拟试验的水合物分解阵面演化过程^{*}

刘乐乐^{1,2,3}, 鲁晓兵³, 张旭辉³

(1. 天然气水合物重点实验室 国土资源部, 山东青岛 266071; 2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071;
3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 水合物分解阵面演化过程与开采安全性和产气效率密切相关, 是开采原位监测的重要组成部分。在玻璃砂样品中进行了甲烷水合物降压开采模拟试验, 探讨了水合物饱和度对渗流阵面和水合物分解阵面演化过程的影响, 结合已有理论模型, 分析了水合物分解阵面传播速度的关键影响因素。结果表明: 渗流阵面和水合物分解阵面的传播距离均与时间平方根呈近似线性关系, 传播速度均随水合物饱和度的增加而减小; 水合物分解阵面的传播速度随多孔介质的有效渗透率和降压幅度的增加而变快, 随孔隙率的增加而变慢, 粗砂质地层更有利于水合物降压分解阵面的传播。

关键词: 甲烷水合物; 降压法; 多孔介质; 水合物分解阵面

中图分类号: P744.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-178

0 引言

天然气水合物(简称水合物)是由天然气(主要是甲烷)和水在较高压力和较低温度条件下形成的类冰固体化合物^[1], 广泛分布于冻土地层和海洋、湖泊等深水地层中^[2], 具有储量大和能量密度高等特点^[3], 是21世纪最为重要的替代能源之一^[4]。目前提出的水合物开采方法主要包括加热法、降压法、注入抑制剂法、置换法、机械—热采法以及热吞吐等联合开采法^[5,6]。其中降压法通过降低地层孔隙压力至水合物相平衡压力之下, 从而使固态水合物分解产生甲烷气体, 该方法被认为是最为经济有效的开采方法^[7], 并已经运用于水合物开采现场试验^[8]。

水合物分解阵面的传播距离反映了含水合物沉积物力学性质削弱范围和水合物分解范围, 是水合物开采安全性评价和产气效率评估的关键参数之一^[9], 是水合物开采原位监测的重要组成部分^[10]。前人针对水合物分解阵面演化过程的研究仍以理论分析和数值模拟为主^[11~15], 而室内模拟试验仍比较少见。Yousif等^[11]采用电阻法获得了砂岩($\phi 3.8\text{cm} \times 15.2\text{cm}$)中降压法水合物分解阵面的位置随时间演化的数据, 但是并未对演化规律和影响因素进行分析。Li等^[16]同样采用电阻法获得了边长18cm的正方体石英砂沉积物中热吞吐法水合物分解阵面的位置随时间演化的数据, 指出分解阵面传播速度在前期数个热吞吐回合中比较快, 随后明显降低。松散沉积物中降压法水合物分解阵面演化试验研究尚未见报道, 且对其演化规律和影响因素仍不甚清楚。本文在松散沉积物中进行了甲烷水合物降压开采模拟试验, 通过合理分析孔隙压力演化过程探讨了水合物分解阵面的演化规律及其影响因素, 并将现有理论模型与试验结果进行了对比。

* 收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2015-03-16

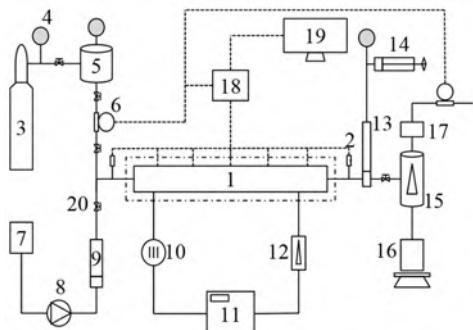
基金项目: 国家自然科学基金(编号: 11272314); 国家自然科学基金青年基金(编号: 11402131)

通讯作者: 刘乐乐(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事水合物开采涉及的力学问题研究。Email: liulele_leo@163.com

1 试验系统与试验步骤

1.1 试验系统

试验系统主要由供气供水部分、压力室、温度控制与围压加载部分、反压控制部分和数据测量采集部分组成(图1)。压力室内部结构及压力传感器和温度探头布置方式如图2所示。不锈钢材质压力室长100cm,内径9.1cm,最大受压30MPa。橡胶筒长87cm,内径3.8cm,厚0.8cm。样品长78cm,直径3.8cm。充满橡胶筒外环形空腔的长城牌FD-1多效防冻液一方面用于施加围压以模拟水合物地层应力,另一方面用于控制样品的温度。围压施加上限35MPa,温度控制范围-30~100℃。压力传感器(P1~P5)和温度探头(T1~T5)沿样品轴向等间距(13cm)布置于样品表面。压力传感器量程0~40MPa,精度±0.1MPa,温度探头为Pt100型,量程-30~100℃,精度±0.5℃。试验系统的其他参数参见文[17]。



1-压力室;2-压力传感器;3-高压气瓶;4-压力表;
5-气体缓冲罐;6-气体流量计;7-蒸馏水瓶;8-恒速注液泵;
9-中间容器;10-围压柱塞泵;11-制冷液体浴槽;12-测速计;
13-反压控制器;14-手动泵;15-气液分离器;16-电子天平;
17-干燥器;18-数据采集器;19-工控机

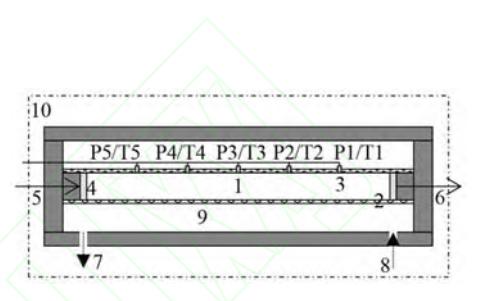
图1 天然气水合物合成与分解试验系统

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus for hydrate formation and dissociation

1.2 试验材料和步骤

玻璃砂的粒径可控且物理性质均匀,通常被用来模拟粗砂沉积物。采用秦皇岛三联玻璃珠有限公司生产的玻璃砂和北京氯禾玉公司生产的纯度为99.9%的甲烷气体进行试验,试验所用十二烷基硫酸钠(SDS)水溶液由实验室自制,质量浓度为0.4%。试验步骤为:

- (1) 将粒径范围250~420μm的玻璃砂分层装入橡皮筒并砸实,施加2MPa围压并降温至1℃,注入甲烷气体至1MPa并静置12h,检查试验系统气密性;
- (2) 放空甲烷气体,向样品内注入220ml的SDS水溶液(样品非饱和)并静置12h;
- (3) 施加6MPa围压,向样品内注入甲烷气体至4.5MPa,关闭进口阀门并静置12h合成水合物;
- (4) 步骤(3)被重复1~3次之后,再进行1次温度振荡,当温度和压力保持恒定12h之后,合成过程结束;
- (5) 完全打开出口阀门,进行水合物降压分解试验,测量并记录压力、温度、产气速度和累积产气量,当产气量持续2h不再增长之后停止记录数据;
- (6) 完全打开出口和进口阀门,向样品内恒速注入纯净水,测量压差以计算样品的绝对渗透率。



1-样品;2-橡皮筒;3-压力传感器和温度探头;
4-透水石;5-进口;6-出口;7-制冷/围压液进口;
8-制冷/围压液出口;9-制冷/围压液;10-保温材料

图2 压力室内部结构及压力

传感器和温度探头布置方式

Fig. 2 Details of the hydrate vessel and layouts of the pressure transducers and the temperature sensors

2 试验结果

注入不同体积的甲烷气体,进行3次不同初始饱和度的水合物降压开采模拟试验,试验基本参数如表1所示。其中,初始饱和度根据注气总量、注液总量、初始温度和初始压力等试验数据计算获得,具体方法参见文[17]。

表1 水合物降压开采模拟试验基本参数

Tab. 1 Parameters of the hydrate dissociation experiments

试验编号	No. 1	No. 2	No. 3
孔隙度(%)	31.9	31.4	31.2
绝对渗透率(mD)	560	260	205
注气总量(SL,标准升)	34.6	26.0	19.6
初始温度(℃)	1.2	1.3	1.1
初始压力(MPa)	2.9~3.2	3.2~3.3	3.1
初始饱和度 (%)	水合物	73.3	55.2
	SDS溶液	19.9	35.5
	甲烷气体	6.8	9.3
			11.7

2.1 水合物合成阶段

注气之后,关闭进口阀门和出口阀门,甲烷水合物在封闭体系中合成。在水合物合成过程中,甲烷气体不断被消耗,孔隙压力逐渐降低。当孔隙压力降低至水合物相平衡压力或者孔隙水被完全消耗之后,甲烷气体将不会被继续消耗。试验中注入的220ml溶液全部合成水合物需要消耗约45.6SL甲烷气体^[1],而实际注入的甲烷气体总量最大值仅为34.6SL,溶液并未被全部消耗。因此,试验制备的样品孔隙中既有固相水合物,又有剩下的气相甲烷和液相孔隙水,样品的初始压力和初始温度满足水合物相平衡条件。水合物热力学促进剂SDS使孔隙流体产生气泡,增加了甲烷气体和孔隙流体的接触面积,能够加快水合物生成速率,但是不会改变水合物的相平衡条件。将样品的初始压力和初始温度点绘于水合物相图中(图3),其中,Sloan^[1]和Adisasmitoa^[18]测得的试验数据为纯水中甲烷水合物相平衡曲线,Uchida^[19]和Wonmo^[20]是在多孔介质中测得的相平衡数据。可以看出,样品的初始压力和初始温度正好满足水合物相平衡条件。因此,只要样品孔隙压力开始降低,该位置的水合物就会发生分解。

2.2 水合物分解阶段

水合物合成结束并稳定一段时间后,完全打开出口阀门,进行水合物降压分解试验。未合成水合物的甲烷气体在孔隙压力梯度作用下由出口阀门流出,沉积物孔隙压力逐渐降低。当沉积物孔隙压力降低至水合物相平衡压力时,固态水合物开始分解产生甲烷气体,水合物降压分解阵面开始传播。在渗透性良好的沉积物中,水合物分解产生的甲烷气体能够及时流出,沉积物孔隙压力将会继续降低;在渗透性较差的沉积物中,水合物分解产生的甲烷气体不能及时流出,沉积物孔隙压力将会出现波动。所有水合物完全分解之后,沉积物孔隙压力最终降低至出口压力并保持稳定。

图4给出了模拟试验No.1中样品孔隙压力随

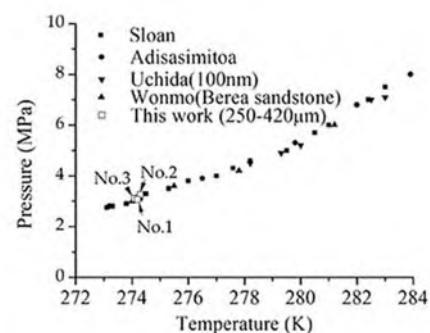


图3 甲烷水合物相平衡曲线和
样品初始温度压力条件^[24-27]

Fig. 3 The phase equilibrium data of
methane hydrate and the initial pressure
and temperature of experiments No. 1-No. 3

时间的演化曲线。可以看出,由压力传感器 P1~P5 测量的样品孔隙压力(简称孔隙压力 P1~P5)的初始值为 2.9~3.2 MPa。孔隙压力 P1 在 0.38h 开始减小,0.8h 左右降低至大气压;孔隙压力 P2 在 0.46h 开始减小,0.56h 左右降低至大气压;孔隙压力 P3 在 0.62h 开始减小,1.1h 左右降低至 0.2 MPa;孔隙压力 P4 在 0.77h 开始减小,1.45h 左右降低至 0.1 MPa;孔隙压力 P5 在 1.08h 开始减小,1.62h 左右降低至大气压。渗流阵面(孔隙压力降低区域与孔隙压力未降低区域交界面)从 P1 传播至 P5 所用时间为 0.7h。孔隙压力 P1~P5 在减小过程中均存在明显的波动现象。

图 5 给出了模拟试验 No. 2 中样品孔隙压力随时间的演化曲线。可以看出,孔隙压力 P1~P5 的初始值为 3.2~3.3 MPa。孔隙压力 P1 在 0.27h 开始减小,0.55h 左右降低至大气压;孔隙压力 P2 在 0.29h 开始减小,0.57h 左右降低至大气压;孔隙压力 P3 在 0.37h 开始减小,1.04h 左右降低至大气压;孔隙压力 P4 在 0.54h 开始减小,1.04h 左右降低至大气压;孔隙压力 P5 在 0.69h 开始减小,1.47h 左右降低至大气压。渗流阵面从 P1 传播至 P5 所用时间为 0.42h。孔隙压力 P1~P5 在减小过程中同样存在明显的波动现象。

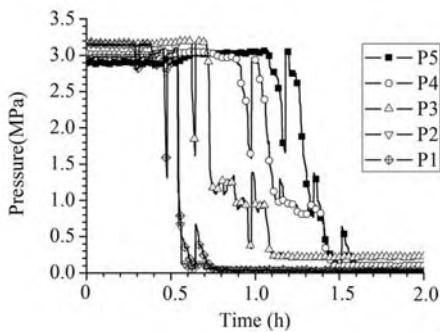


图 4 试验 No. 1 中样品孔隙压力
随时间演化曲线

Fig. 4 Time variation of the pore pressure during hydrate dissociation for experiment No. 1

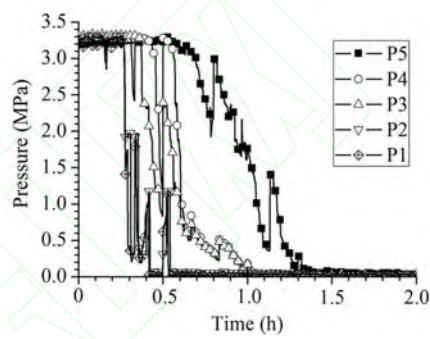


图 5 试验 No. 2 中样品孔隙压力
随时间演化曲线

Fig. 5 Time variation of the pore pressure during hydrate dissociation for experiment No. 2

图 6 给出了模拟试验 No. 3 中样品孔隙压力随时间的演化曲线。可以看出,孔隙压力 P1~P5 的初始值均为 3.1 MPa。孔隙压力 P1 在 0.08h 开始减小,0.23h 左右降低至大气压;孔隙压力 P2 在 0.09h 开始减小,0.85h 左右降低至大气压;孔隙压力 P3 在 0.12h 开始减小,0.85h 左右降低至大气压;孔隙压力 P4 在 0.2h 开始减小,0.85h 左右降低至大气压;孔隙压力 P5 在 0.29h 开始减小,1.2h 左右降低至大气压。渗流阵面从 P1 传播至 P5 所用时间为 0.21h。孔隙压力 P1~P5 在减小过程中也存在明显的波动现象。

对比图 4~6 可以看出,试验 No. 1~No. 3 中样品孔隙压力在减小过程中均表现出明显的波动性;水合物饱和度的初始值越大,样品孔隙压力 P1~P5 初始值的差别越明显,这是因为水合物饱和度的初始值越大,水合物越容易堵塞渗流通道而形成相对独立的孔隙,导致孔隙压力的差异越明显。

图 7 给出了样品中渗流阵面的传播距离随时间演化的试验数据,其中,位置零点定义为压力传感器 P1 所在位置(距出口 0.13m),而时间零点定义为渗流阵面传播至压力传感器 P1 的时刻。可以看出,渗流阵面的传播距离与时间的平方根呈近似的线性关系;在多孔介质(水合物饱和度为零)的绝对渗透率相差不大时,水合物饱和度的初始值越大,渗流阵面的传播速度越慢,渗流阵面由 P1 传播至 P5 所需要的时间越长。样品中水合物处于临界相平衡状态,渗流阵面的传播距离与水合物分解阵面的传播距离始终保持一致。因此,水合物分解阵面的传播距离与时间的平方根同样呈近似的线性关系,且其传播速度随水合物饱和度初始值的增加而减小。

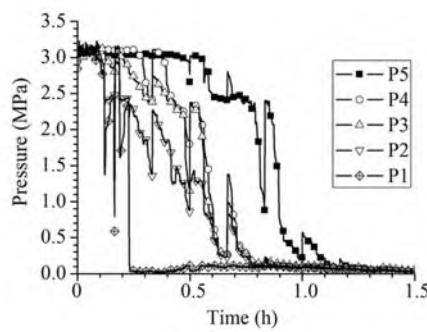


图 6 试验 No. 3 中样品孔隙压力随时间演化曲线

Fig. 6 Time variation of the pore pressure during hydrate dissociation for experiment No. 3

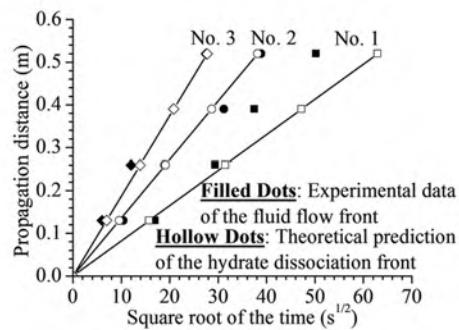


图 7 样品中渗流阵面传播距离和水合物分解阵面传播距离随时间的演化过程

Fig. 7 Time variations of the propagation distances of the fluid flow front and the hydrate dissociation front

3 讨论

在降压分解试验条件下进行了试验系统的标定检验,结果表明该试验系统在孔隙压力、温度和产气速率测量方面具有良好的适用性^[17]。因此,试验 No. 1~No. 3 中样品孔隙压力在减小过程中的波动现象不是由试验系统的测量误差或错误所引起的。进一步的验证试验表明,该孔隙压力的波动是由渗流过程中水合物分解相变所引起的^[17]。Yousif 等^[15]和 Lee 等^[21]在降压开采模拟试验中发现样品的上游压力(进口处压力)在降压过程中同样存在着明显的波动现象。前者指出该波动的原因是快速降压引起孔隙水结冰或者水合物二次生成堵塞渗流通道,导致压力升高,待冰融化或者二次水合物分解之后,压力逐渐降低;后者阐明该波动是气液两相饱和度变化引起的气液两相有效渗透率交替上升过程的间接反映,即单位体积水合物分解产生约 0.8 体积的孔隙水,液体较气体更容易流动,导致分解产生的气体不断聚集,压力升高,待气体聚集到足够体积之后,气体较液体更容易流动,压力开始降低。

水合物降压开采模拟试验过程涉及热传导、多相渗流、水合物分解相变和多孔介质变形 4 个相互影响的物理效应^[22],其特征时间估算如下(多相渗流物理效应包括气体渗流和孔隙水渗流 2 个特征时间):

热传导特征时间为:

$$t_c = \frac{\rho C d^2}{\lambda} \quad (1)$$

气体渗流特征时间为:

$$t_g = \frac{\mu_g L^2}{k_{rg} K \Delta P} \quad (2)$$

孔隙水渗流特征时间为:

$$t_w = \frac{\mu_w L^2}{k_{rw} K \Delta P} \quad (3)$$

水合物分解相变特征时间为:

$$t_d = \frac{\rho_H}{M_H k_d A_s \Delta P} \quad (4)$$

多孔介质变形特征时间为:

$$t_f = L \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (5)$$

其中, ρ 、 C 、 λ 、 E 和 K 分别为多孔介质的密度、比热、热传导系数、变形模量和有效的绝对渗透率; d 、 L 、 μ_g 、 μ_w 、 k_{rg} 、 k_{rw} 、 ΔP 、 M_H 、 k_d 和 A_s 分别为样品直径、样品长度、气体粘滞系数、孔隙水粘滞系数、气体相对

渗透率、孔隙水相对渗透率、压差、水合物摩尔质量、水合物分解动力学常数和分解比表面积。

计算结果如表2。可以看出：多相渗流效应的特征时间远大于热传导效应、水合物分解相变效应和多孔介质变形效应的特征时间，即与孔隙压力变化相比，多孔介质温度变化、水合物分解和多孔介质变形瞬间完成，水合物降压开采模拟试验过程由孔隙水渗流效应控制。

表2 水合物降压开采模拟试验过程的4个物理效应特征时间估算

Tab. 2 Estimations of the characteristic times of physical processes included in experiments

物理效应	特征时间(s)		
	No. 1	No. 2	No. 3
热传导	2.59×10^2	2.68×10^2	2.79×10^2
气体渗流	2.21×10^3	1.45×10^3	1.06×10^3
孔隙水渗流	8.35×10^4	1.89×10^4	1.42×10^4
水合物分解相变	85.6	75.5	58.6
多孔介质变形	3.47×10^{-2}	3.47×10^{-2}	3.47×10^{-2}

注：参数来源于文献[23—25]。

Hong等^[12]提出了孔隙水渗流效应控制条件下的水合物分解阵面传播距离与时间的理论模型，即

$$X(t) = \sqrt{\frac{2k_{rw}K\rho_w\Delta P}{\mu_w(1-F_{Hg})\phi\rho_H}}t^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中， F_{Hg} 表示甲烷水合物中甲烷所占比例(0.129)。由该模型预测的水合物分解阵面的传播距离如图7所示。可以看出，理论预测的水合物分解阵面传播距离与模拟试验的水合物分解阵面传播距离在试验No. 2和No. 3中符合良好，而在试验No. 1后期存在一定差别，这可能是由样品中水合物分布的非均匀性所引起的。由模型可以看出，水合物分解阵面的传播速度随有效的绝对渗透率、相对渗透率和降压幅度的增大而增加，随孔隙率的增大而减小。因此，采用降压法开采水合物时，在由粉砂或粉砂质粘土组成的含水合物地层中，渗透性较差且孔隙率较高，水合物分解阵面传播速度较慢；而在由粗砂或砂岩组成的含水合物地层中，渗透性较好且孔隙率较低，水合物分解阵面传播速度较快。

4 结论

本文进行了不同水合物饱和度条件下的降压开采模拟试验，得出如下结论：

- (1) 水合物降压开采模拟试验过程由孔隙水渗流效应控制，水合物分解阵面传播距离与时间平方根呈线性关系，且其传播速度随多孔介质的有效渗透率和降压幅度的增加而变快，随孔隙率的增加而变慢，粗砂质地层更有利于水合物降压分解阵面的传播；
- (2) 水合物分解导致孔隙压力表现出明显的波动性，渗流阵面传播距离与时间平方根呈近似的线性关系，且其传播速度随水合物饱和度的增加而减小。

参考文献：

- [1] Sloan E D. Clathrate hydrates of natural gases[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [2] Kvenvolden K A. Gas hydrates—geological perspective and global change [J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(2): 173—187.
- [3] Gornitz V, Fung I. Potential distribution of methane hydrates in the world's oceans [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 335—347.
- [4] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment [J]. Energy & Fuels, 2005, 19(2): 459—470.
- [5] 张旭辉, 鲁晓兵, 刘乐乐. 天然气水合物开采方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 858—869
(ZHANG Xuhui, LU Xiaobing, LIU Lele. Advances in natural gas hydrate recovery methods [J]. Progress in

- Geophysics, 2014, 29(2): 858—869 (in Chinese))
- [6] 王屹, 李小森. 天然气水合物开采技术研究进展[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 69—79 (WANG Yi, LI Xiaosen. Research progress of natural gas hydrate production technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013, 1(1): 69—79 (in Chinese))
- [7] Wang Y, Li X S, Xu W Y, et al. Experimental investigation into factors influencing methane hydrate formation and a novel method for hydrate formation in porous media [J]. Energy & Fuel, 2013, 27(7): 3751—3757.
- [8] Primiero P, Dreuillault V, Sugiyama H, et al. Acoustic monitoring of methane hydrate production: system development, deployment and modeling/measurement evaluation [C]. In: the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
- [9] Ikegami T, Morikami Y, Fujii K, et al. Streaming potential measurement for hydrate dissociation monitoring [C]. In: the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
- [10] Anderson B I, Collett T S, Lewis R E, et al. Using open hole and cased-hole resistivity logs to monitor gas hydrate dissociation during a thermal test in the Mallik 5L-38 research well, Mackenzie Delta, Canada [J]. Petrophysics, 2008, 49(3): 285—294.
- [11] Yousif M H, Abass H H, Selim M S, et al. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 8: 69—76.
- [12] Hong H, Pooladi D M, Bishnoi P R. Analytical modeling of gas production from hydrates in porous media [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2003, 42(11): 45—56.
- [13] Selim M S, Sloan E D. Heat and mass transfer during the dissociation of hydrates in porous media [J]. AIChE Journal, 1989, 35(6): 1049—1052.
- [14] Tsyplkin G G. Mathematical models of gas hydrates dissociation in porous media [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2000, 912: 428—436.
- [15] Ji C, Ahmadi G, Smith D H. Natural gas production from hydrate decomposition by depressurization [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(20): 5801—5814.
- [16] Li Xiaosen, Wang Yi, Duan Liping, et al. Experimental investigation into methane hydrate production during three-dimensional thermal huff and puff [J]. Applied Energy, 2012, 94: 48—57.
- [17] 刘乐乐, 鲁晓兵, 张旭辉. 砂土沉积物中甲烷水合物降压分解渗流阵面实验[J]. 天然气工业, 2013, 33(11): 130—136 (LIU Lele, LU Xiaobing, ZHANG Xuhui. An experimental study of seepage front due to methane hydrate dissociation by depressurization in sandy sediments [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(11): 130—136 (in Chinese))
- [18] Sanggono Adisasmoro, Robert J Frank III, E Dendy Sloan Jr. Hydrates of carbon dioxide and methane mixtures [J]. Journal of Chemical & Engineering data, 1991, 36(1): 68—71.
- [19] Uchida T, Ebinuma T, Takeya S, et al. Effects of pore sizes on dissociation temperatures and pressures of methane, carbon dioxide, and propane hydrates in porous media [J]. J. Phys. Chem. B, 2002, 106 (4): 820—826.
- [20] Wonmo S, Hoseob L, Sunjoon K. Experimental investigation of production behaviors of methane hydrate saturated in porous rock [J]. Energy Sources, 2003, 25: 845—856.
- [21] Lee J, Park S, Sung W. An experimental study on the productivity of dissociated gas from gas hydrates by depressurization scheme [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2510—2515.
- [22] 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 Sciences, 2012, 27(7): 733—746 (in Chinese))
- [23] Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments [J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(4): RG4003.
- [24] Sun X, Nanchary N, Mohanty K K. 1-D modeling of hydrate depressurization in porous media [J]. Transport in Porous Media, 2005, 58(3): 315—338.
- [25] Su Z, He Y, Wu N Y, et al. Evaluation on gas production potential from laminar hydrate deposits in Shenhua Area of South China Sea through depressurization using vertical wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86-87: 87—98.

On the Hydrate Dissociation front Evolution in Simulation Experiment of Depressurization Mining

LIU Le-le^{1,2,3}, LU Xiao-bing³, ZHANG Xu-hui³

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Hydrate dissociation front evolution is closely related to mining safety and gas production efficiency, is the important part of mining in-situ monitoring. Simulation experiment of methane hydrate depressurization mining was conducted for glass sand sediment samples. The influence of hydrate saturation on the seepage front and hydrate dissociation front evolution was explored. Combining with existing theoretical model, key factors to hydrate dissociation front propagation velocity was analyzed. Experimental results show that the propagation distance of seepage front and hydrate dissociation front is approximately linearly associated with square root of time, respectively. Both front propagation velocities decrease with the increase of hydrate saturation. The propagation velocity of hydrate dissociation front increases with the increase of porous media effective permeability and depressurization amplitude and decreases with the increase of porosity. Texture of coarse sand layer is more conducive to the propagation of hydrate depressurization dissociation front.

Keywords: methane hydrate; depressurization; porous media; hydrate dissociation front