

径向井降压开采天然气水合物实验研究

张潘潘¹, 张逸群¹, 王伟¹, 王天宇¹, 穆总结¹, 田守增^{1,2*}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 克拉玛依 834000

* 通信作者, tscsydx@163.com

收稿日期: 2021-08-03

国家重点研发计划项目课题子课题(2019YFC0312301-2)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41961144026)、国家自然科学基金青年基金(51804320)、国家自然科学基金重大项目课题(51991362)和国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(51827804)联合资助

摘要 天然气水合物是一种清洁高效的潜在替代能源, 开采效率低下严重制约着该资源的商业化利用。径向井技术是一种新提出的用于提高天然气水合物产能的手段。本文针对富气相环境下和富水相环境下的含水合物沉积物分别开展了直井和径向井降压开采实验研究, 评估了径向井技术开采天然气水合物的有效性。研究结果表明: 降压开采富气水合物试样时, 由于实验尺度较小且试样渗透率相对较高, 采用直井和径向井降压开采时压力传播规律相似, 产气行为几乎相同。降压开采富水水合物试样时: 降压开采结束时径向井累计产气量和累计产水量同直井相比分别提高 20.16% 和 38.98%; 径向井作为高导流能力通道可以增大水合物沉积物中的泄流面积, 促进压降向反应釜内部传播, 提高水合物分解速率; 此外, 径向井开采时反应釜内温降幅度更大, 这为水合物分解提供了更多显热, 进一步提高了水合物开采效率。

关键词 天然气水合物; 径向井; 降压开采; 实验研究; 神狐海域

Experimental study on natural gas hydrate extraction with radial well depressurization

ZHANG Panpan¹, ZHANG Yiqun¹, WANG Wei¹, WANG Tianyu¹, MU Zongjie¹, TIAN Shouceng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China

Abstract Natural gas hydrate is a potential alternative energy source for the future, and the low mining efficiency severely restricts its commercial utilization. The technology of radial wells is a newly proposed method for increasing the productivity of natural gas hydrates. To evaluate the effectiveness of this method, experimental studies were carried out to simulate the extraction of hydrate sediments in water-rich and gas-rich environments by vertical well depressurization and radial well depressurization. Results indicate that: for the extraction of gas-rich hydrate samples by depressurization, gas production behavior of vertical well and radial well is almost the same; for the small experimental scale and relatively high permeability of samples the pressure propagation patterns are similar when vertical wells and radial wells are applied. For the extraction of water-rich hydrate samples by depressurization: compared with that of vertical wells, the cumulative gas production and cumulative water production of radial wells at the end of the production cycle were increased by 20.16% and 38.98%, respectively; as a high conductivity channel, the radial well can increase the drainage area in the hydrate sediments and promote the propagation of pressure drop to the inside of

引用格式: 张潘潘, 张逸群, 王伟, 王天宇, 穆总结, 田守增. 径向井降压开采天然气水合物实验研究. 石油科学通报, 2022, 03: 382-393

ZHANG Panpan, ZHANG Yiqun, WANG Wei, WANG Tianyu, MU Zongjie, TIAN Shouceng. Experimental study on natural gas hydrate extraction with radial well depressurization. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 382-393. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.033

the reactor, and ultimately accelerating the decomposition rate of hydrate; besides, the temperature drop is more significant when the radial well is used, which provides more sensible heat for the decomposition of hydrates and further improves the efficiency of hydrate production.

Keywords natural gas hydrate; radial well; depressurization; experimental study; Shenhu area

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.033

0 前言

天然气水合物是由天然气和水结合形成的笼型水合物。微观尺度下, 气体分子被束缚在水分子通过氢键形成的笼状框架内, 并在低温高压环境下稳定存在^[1-2]。自然界中的天然气水合物一般赋存于水深 800 m 以上、海底以下 400 m 以浅的松软未固结沉积物中^[3]。评估认为全球天然气水合物资源碳储量约为所有常规化石能源总和的两倍^[4-5]。作为一种高效清洁的潜在替代能源, 该资源的开发利用对世界能源格局、气候变化及自然灾害防治等一系列问题都有重要影响, 因此受到世界众多国家, 学术机构及石油公司的广泛关注^[6-7]。

天然气水合物的开发主要通过破坏水合物相态平衡条件促使水合物发生分解实现。常见的水合物开采方法包括降压法、热激发法、注化学剂法^[8-11]。与其他方法相比, 降压法相对经济高效, 且技术难度低, 已多次应用于天然气水合物试采^[8, 12]。2020 年, 中国在南海神狐海域开展了第二轮天然气水合物试采。采用水平井降压方式开采水合物, 试采创造了“产气总量 86.14 万 m³, 日均产气量 2.87 万 m³” 2 项世界纪录^[3]。然而, 本次试采产量远未达到商业化开发海域水合物资源的最低要求, 开采效率低下依然是水合物资源开发利用的瓶颈所在^[13]。

水合物试采成本高且工程难度大, 当前提高水合物开采效率研究主要以室内实验和数值模拟为主。Chong 等^[14]通过实验研究了水平井对水合物降压开采的影响, 但由于反应釜容积仅为 0.98 L, 水平井筒对产气速率的影响十分有限, 且实验结果规律性不强。Wang 等^[15]开展了水平井降压—注热联合法开采水合物实验研究, 分析了布井方式对开发效果的影响。Feng 等^[16-17]采用数值模拟的方法研究了水力裂缝的增产效果, 研究发现水力裂缝可以短期提高水合物降压开采效率, 但在水合物开发中后期的作用相对有限。为进一步提高水合物资源开采效率, 降低开采成本, 李根生等^[18]提出了空化射流钻径向井开采天然气水合物的新思路。Zhang 等^[13]通过数值模拟对比了直

井和径向井降压开采水合物的产气特征, 发现径向井可以有效提高水合物开采效率, 同时降低生产气水比。前人围绕降压法和注热法开采水合物开展了大量研究, 但研究较少对比不同水合物赋存环境下井型结构对水合物开采的影响, 且径向井降压开采天然气水合物的数值模拟认识也有待进一步的实验验证。

基于此, 本文通过实验模拟了富气相环境下和富水相环境下的含水合物沉积物降压开采过程, 对比了直井与径向井的开采效果, 分析了开采过程中的温度压力变化。为减小水合物试样物性差异对结果的影响, 本文结合实验装置特点, 形成了一种物性可控的水合物试样高效合成方法。实验得到了径向井降压开采水合物的产气、产水与出砂特征, 评估了径向井在未来水合物试采中的潜在应用效果, 有助于促进径向井开采水合物技术的发展与完善, 早日实现水合物资源的商业化开发。

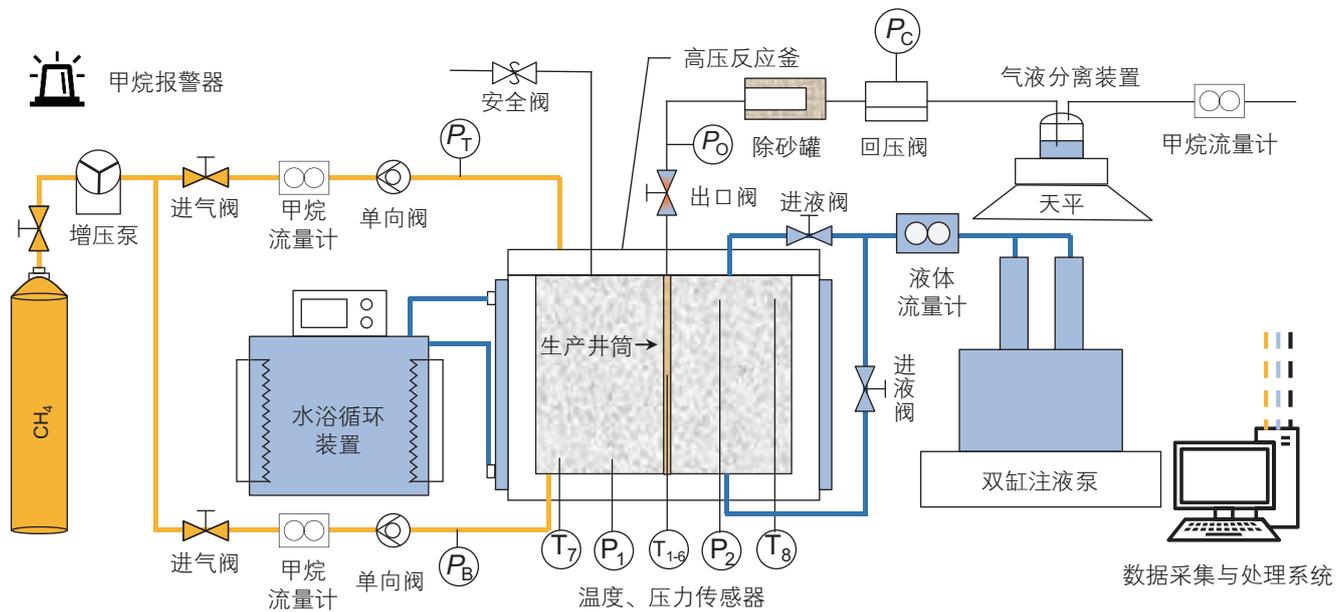
1 实验装置与方法

1.1 水合物开采实验装置

图 1 和图 2 所示分别为水合物合成与开采实验装置示意图与实物图。该实验装置主要由高压反应釜、气体增压系统、水浴循环系统、注液系统、开采计量系统、数据采集与处理系统组成。

高压反应釜材质为 304 不锈钢, 内径和高均为 20 cm, 壁厚 1.9 cm, 容积约为 6.28 L, 耐压 20 MPa。为监测水合物合成与分解过程中的温度压力变化, 反应釜内部围绕生产井分散布置了 2 个压力传感器(P₁, P₂)和 8 个温度传感器(T₁~T₈), 传感器分布如图 3 所示。将传感器与生产井筒中心的水平距离记为 r , 单位 cm; 传感器高度记为 h , 单位 cm, 并采用 (r, h) 表示传感器的相对位置: P₁(4, 2), P₂(4, 18), T₁(9, 9), T₂(5.5, 9), T₃(2.5, 9), T₄(2.5, 9), T₅(5.5, 9), T₆(9, 9), T₇(7.75, 2), T₈(7.75, 18)。

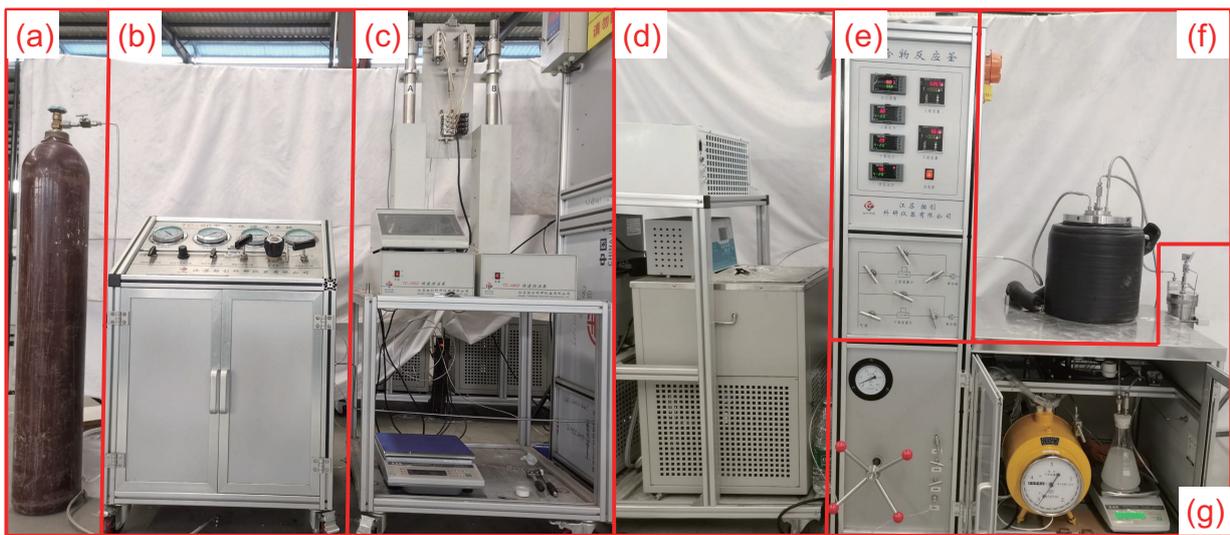
气体增压系统主要用于向反应釜内注入甲烷气体, 提高反应釜内压力, 促使水合物生成。注入的甲烷量



P_T —上部压力; P_B —下部压力; P_O —出口压力; P_C —回压压力; P_{1-2} —压力传感器; T_{1-8} —温度传感器;

图1 水合物合成与开采装置示意图

Fig. 1 Schematic of the hydrate synthesis and mining system



(a) 气瓶 (b) 增压泵 (c) 双缸注液泵 (d) 水浴循环装置 (e) 控制面板 (f) 高压反应釜 (g) 计量装置

图2 水合物合成和开采系统实物图

Fig. 2 Real shots of the hydrate synthesis and mining system

可通过甲烷流量计得到,也可由气体状态方程计算得到。水浴循环系统用于调节反应釜内温度,使用乙二醇作为循环液,温度调节范围 $-10\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。注液系统主要由双缸注液泵和液体流量计组成,最大注液压力为 70 MPa ,流量计精度为 $\pm 0.01\text{ ml}$,用于向反应釜内注水。开采计量系统主要包括除砂罐、回压阀、气液分离装置和甲烷流量计。调节回压阀可以将生产井筒内压力降低到水合物相平衡压力之下,模拟水合物降压开采。降压开采过程中,砂、水、甲烷通过生产

井筒产出。除砂罐采用砾石充填和防砂筛网结合的方式收集产出的砂。产出的水和甲烷通过气液分离装置分离后,分别采用天平和甲烷流量计进行计量。数据采集与处理系统主要用于采集和处理实验中产生的温度、压力、流量等数据。

1.2 水合物试样合成与表征

为对比直井、径向井降压开采水合物的开发效果,需要合成物性相似的水合物试样。本实验参考南海神

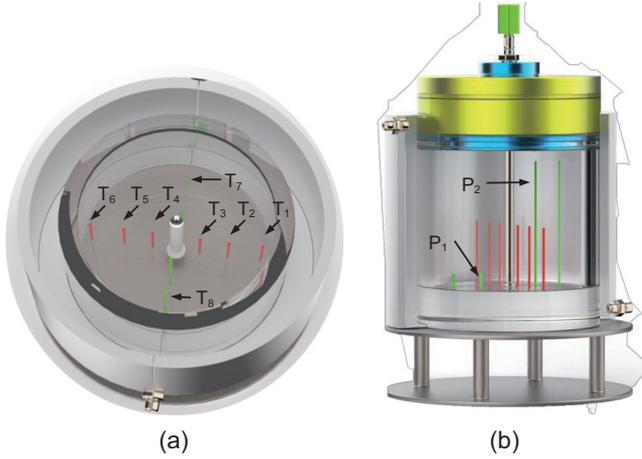


图3 反应釜内部传感器分布,(a)俯视图,(b)侧视图
Fig. 3 (a) Top view and (b) side view of the distribution of sensors.

狐海域水合物储层岩心的粒度分析数据^[19], 选用粒径范围为0.038~1 mm的石英砂制样。图4所示为用于合成水合物试样的砂粒粒径组成及南海水合物沉积物粒度分布图。

首先将石英砂与蒸馏水混合均匀得到湿砂, 并将其转移至反应釜中。通过石英砂和蒸馏水用量确定试样孔隙度 ϕ 与初始含水饱和度 S_{wi} , 计算方法如下:

$$\phi = 1 - \frac{m_s}{\rho_s \cdot V} \quad (1)$$

$$S_{wi} = \frac{m_w}{\rho_w \cdot V \cdot \phi} \quad (2)$$

式中: V 是反应釜容积, L; m_s 为用于制备湿砂的石英砂质量, g, ρ_s 为石英砂密度, 2650 g/L。 m_w 和 ρ_w 分别为用于制备湿砂的蒸馏水质量, g和密度, 1000 g/L。

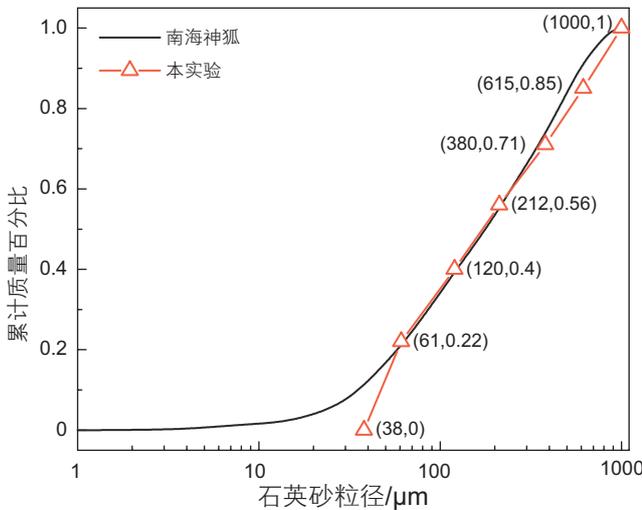


图4 用于水合物试样合成的砂粒粒径组成
Fig. 4 Grain size composition used to synthesize hydrate samples

启动水浴循环将反应釜内温度调节至20 °C左右。通过增压泵向反应釜中注入甲烷, 增大反应釜内压力至11 MPa左右。该温度压力条件下水合物无法合成, 因此注入反应釜中的甲烷量可以通过方程(3-8)得到:

$$S_{gi} + S_{wi} = 1 \quad (3)$$

$$P \cdot (V \phi S_{gi}) = Z n_m^g RT \quad (4)$$

$$n_{wi} = V \phi S_{wi} C_w \quad (5)$$

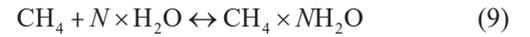
$$n_m^w = n_{wi} \cdot f(T, P) \quad (6)$$

$$n_{mi} = n_m^g + n_m^w \quad (7)$$

$$f(T, P) = \frac{P}{-0.587T^2 + 404.30T - 64471.05} \quad (8)$$

式中: S_{gi} 为初始气相饱和度; P 为反应釜内压力, Pa; T 为反应釜内温度, K; R 为通用气体常数, 8.314 J/(mol·K); Z 为甲烷的压缩因子, 通过BWRS方程计算得到^[20-21], 无因次。 n_m^g 为以气相存在的甲烷量, mol; n_m^w 为溶解在水中的甲烷量, mol; C_w 为水的密度, mol/m³; n_{wi} 和 n_{mi} 分别为反应釜中甲烷和水的量, mol; $f(T, P)$ 为甲烷在蒸馏水中的溶解度方程, 其为温度压力的函数, 由实验数据拟合得到^[22], molCH₄/molH₂O。

将水浴循环温度设置为3 °C, 降低反应釜内温度。当水合物生成时, 反应釜内压力将出现明显下降, 同时温度也会出现一定升高。反应方程式如下:



式中: N 为甲烷水合物水合数, 约为6。

通过温度压力变化实时反演试样制备过程中水合物饱和度变化是物性控制的关键。假设 t 时刻水向水合物的转化率为 x 。 x 为0时, 水合物未生成; x 为1时, 湿砂中的水完全转化为了水合物。 t 时刻, 液相、气相、水合物相饱和度(S_w , S_g , S_h)满足方程(10-13):

$$S_w = S_{wi} (1 - x) \quad (10)$$

$$V \phi S_h C_h = \frac{n_{wi} x}{N} \quad (11)$$

$$P \cdot (V \phi S_g) = Z n_m^g RT \quad (12)$$

$$n_m^g = n_{mi} - \frac{n_{wi} x}{N} - n_{wi} \cdot (1 - x) \cdot f(T, P) \quad (13)$$

式中: C_h 为水合物的密度, mol/m³。

将方程(5)代入方程(11), 方程(13)代入方程(12), 整理后得到方程(14):

$$\begin{Bmatrix} 0 & 1 & 0 & S_{wi} \\ 0 & 0 & N C_h & -S_{wi} C_w \\ \frac{PV \phi}{ZRT} & 0 & 0 & c_1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} S_g \\ S_w \\ S_h \\ x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{wi} \\ 0 \\ c_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

方程(14)中

$$c_1 = n_{wi} \left[\frac{1}{N} - f(T, P) \right] \quad (15)$$

$$c_2 = n_{wi} f(T, P) - n_{mi} \quad (16)$$

求解矩阵方程(14),可以得到反应过程中任意时刻的气相、液相和水合物相饱和度。当湿砂中的水完全转化为水合物时,可以得到富气水合物试样。合成富气水合物试样后,通过双缸注液泵向反应釜中注入蒸馏水,二次生成水合物消耗反应釜中的剩余甲烷,最终可得到富水水合物试样。注水量可通过流量计得到,因此富水水合物试样合成过程中的相饱和度变化也可通过相同方式计算得到。由于水合物的合成效率难以达到100%,实验中富气水合物试样孔隙中流体以甲烷为主,但含有少量水。同理,富水水合物试样孔隙中流体以水为主,但含有少量甲烷。

1.3 降压开采实验设计

与直井相比,更长的生产段是径向井开采水合物的主要优势之一。数值模拟研究表明,采用径向井开采天然气水合物时,产能受分支数量、分支长度、分支夹角等参数共同影响。受高压反应釜尺度限制,实验中难以体现径向井分支结构对开采的影响。因此,本文对径向井结构做了简化,以充分利用有限的反应釜空间,对比分析直井和径向井降压开采水合物沉积物的差异。实验中分别用长度为1 cm和20 cm的生产井筒模拟直井和径向井降压开采。图5所示为简化后的直井和径向井降压开采水合物实验示意图。该简化下,重力对流动的影响与实际生产中的重力作用存在一定差异。由于反应釜尺度较小,实验中反应釜内部空间仅相当于实际开采中生产井井周的极小区域,该区域压力梯度产生的影响远大于重力,因此认为简化产生的误差相对较小。图6所示为实验中

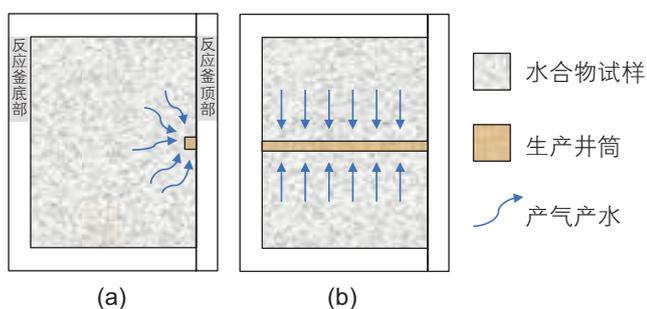


图5 (a)直井和(b)径向井降压开采水合物示意图(反应釜右旋90°)

Fig. 5 Schematic of hydrate extraction with (a) vertical well and (b) radial well

加工的直井井筒和径向井井筒试件,其中井筒外径14 mm,内径为6 mm,井壁孔眼直径3 mm,孔眼相位角120°。

天然气水合物的赋存环境是多样的,本文主要针对富气相环境下和富水相环境下的水合物沉积物降压开采进行实验研究。共开展4组实验,实验中水合物试样合成关键参数与实验设计如表1和表2所示。降压开采时,调节回压阀使回压压力大于反应釜内压力,然后打出口阀,再调节回压阀将出口压力缓慢降低至3 MPa左右进行降压开采。降压开采时间为300 min,水浴循环温度设置为3 °C。降压开采过程中实时监测产气、产水、温度和压力变化,数据采集时间间隔为10 s。

2 实验结果分析

2.1 水合物试样合成

以富气水合物试样的制备为例,分析了水合物的



图6 直井井筒、径向井筒设计

Fig. 6 Wellbore design of vertical well and radial well

表1 水合物试样合成关键参数

Table 1 Key parameters of hydrate sample synthesis

| 参数 | 1#实验 | 2#实验 | 3#实验 | 4#实验 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| 用砂量/g | 9505 | 9645 | 10 088 | 9695 |
| 用水量/g | 790 | 801 | 900 | 960 |
| 初始压力/MPa | 11.06 | 10.97 | 11.24 | 11.08 |
| 初始温度/°C | 19.82 | 20.30 | 19.06 | 21.83 |
| 注入甲烷总量/L | 257.16 | 245.05 | 218.38 | 222.48 |
| 水合物一次合成结束时压力/MPa | 4.88 | 4.55 | 4.20 | 4.00 |
| 水合物一次合成结束时温度/°C | 4.91 | 4.99 | 4.87 | 4.78 |
| 水合物一次合成结束后注水量/L | 0 | 0 | 1.29 | 1.32 |
| 水合物二次合成结束时压力/MPa | \ | \ | 9.76 | 8.24 |
| 水合物二次合成结束时温度/°C | \ | \ | 4.84 | 5.45 |

表 2 水合物开采实验设计

Table 2 Experimental design of hydrate extraction

| 实验序号 | 生产井类型 | 试样类型 | 孔隙度 | S_h | S_g | S_w |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1# | 直井 | 气饱和 | 0.429 | 0.323 | 0.640 | 0.037 |
| 2# | 径向井 | 气饱和 | 0.420 | 0.328 | 0.628 | 0.044 |
| 3# | 直井 | 水饱和 | 0.394 | 0.461 | 0.020 | 0.520 |
| 4# | 径向井 | 水饱和 | 0.417 | 0.436 | 0.039 | 0.525 |

生成特征。实验准备阶段，首先将所有阀门关闭，之后将石英砂与水在反应釜外混合均匀，再将得到的湿砂铺置在反应釜内并夯实。实验开始阶段，打开进气阀，向反应釜内注入甲烷。反应釜内压力升至 11 MPa 时关闭进气阀，停止注气。此时，反应釜内温度约为 20 °C，压力约为 11 MPa。如图 7 所示，该状态下甲烷水合物无法生成，因此可以通过合成开始前反应釜内的压力变化，检查反应釜密封性。若压力基本保持稳定，则将循环温度设置为 3 °C，促使水合物生成。当反应釜内水合物的生成基本停止，反应釜内温度和压力保持相对稳定，水合物试样制备环节结束。图 8 所示为 1# 实验和 2# 实验水合物生成过程中的温度压力变化。初始阶段，反应釜内温度快速下降，同时由于温度下降，反应釜内压力也出现了一定降低。第 46 min 时，测温点 1 温度出现了明显的升高，同时压力急剧下降，表明该测温点附近水合物开始合成。随后，观察到测温点 2 温度下降速度减慢。测温点 1 更靠近反应釜壁面，温度下降快于测温点 2，因此认为测温点 1 处的水合物生成早于测温点 2 处。1# 实验和 2# 实验的温度压力变化具有较好的相似性，表明水合

物试样制备具有较好的可重复性。

为定量判断水合物合成情况，采用上文介绍的物性表征方法，分析了水合物合成过程中各相饱和度变化。如图 9 所示，初始时刻，水合物饱和度为 0，孔隙被水和甲烷饱和。第 46 min 时，水和甲烷的饱和度下降，水合物开始生成。水合物的生成主要发生在前 500 min，之后水合物饱和度变化较小。水合物的生成会消耗反应釜内甲烷和水，导致压力快速下降，水合

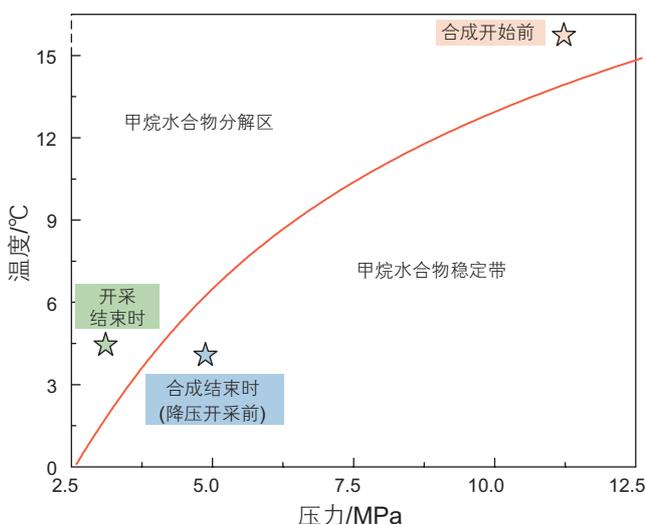


图 7 甲烷水合物相平衡曲线

Fig. 7 Phase equilibrium curve of methane hydrate

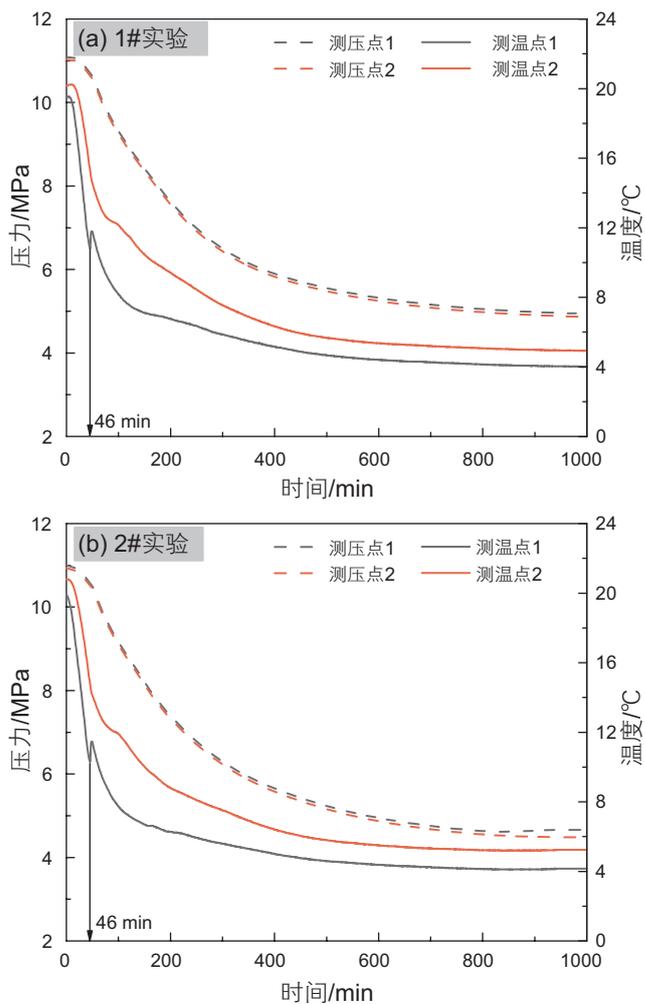


图 8 (a)1# 实验和 (b)2# 实验试样制备过程中温度压力变化

Fig. 8 Temperature and pressure changes during sample preparation of experiment (a)1# and (b)2#

物生成的驱动力减弱,因此水合物的生成速率随水合物饱和度增大而减小。当水合物饱和度不再增加时,水合物试样制备结束。如图8和图9所示,反演得到的水合物饱和度变化曲线和温度压力变化曲线具有较好的一致性,且最终得到了物性相近的水合物试样,表明本文提出的水合物试样合成与物性表征方法高效准确。由于水合物的生成具有一定的随机性,3#实验和4#实验水合物合成的诱导时间分别为56 min和76 min。图10和图11所示分别为3#实验、4#实验水合物生成过程中温度压力变化和反演得到的相饱和度变化曲线。

2.2 富气水合物试样降压开采

2.2.1 温度压力变化

受实验仪器限制,出口压力的控制主要通过手动调节回压阀实现,因此实验中出口压力在2.9~3.2 MPa范围内波动。图12所示为直井和径向井降压开采富气水合物试样(1#和2#实验)过程中压力变化。直井开采时,初始时刻由于出口阀打开,出口压力迅速增大,同时反应釜内测压点1和测压点2压力出现小幅下降;之后,出口压力被缓慢调节至3 MPa左右,反应釜内压力随出口压力同步下降,压力传播几乎瞬间完成。径向井降压开采时:测压点1压力下降出现了短暂滞后(图12b),但持续时间较短。对于整个开采周期,直井和径向井降压开采过程中的压降传播没有明显差异。

直井和径向井降压开采过程中温度变化规律相

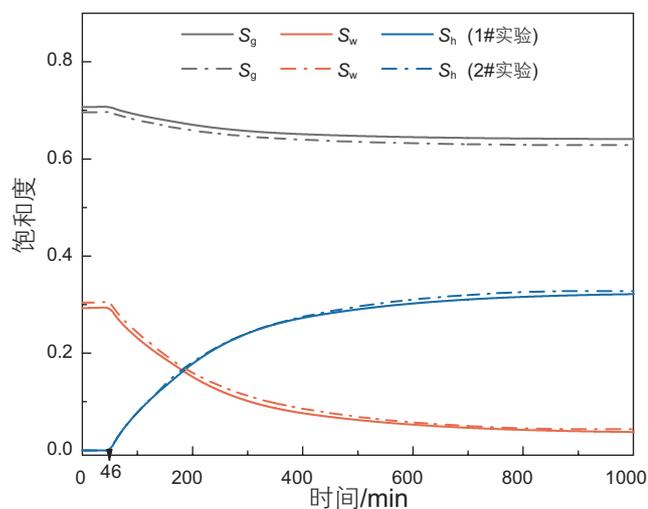


图9 1#和2#实验试样制备过程中相饱和度变化
Fig. 9 Phase saturation changes during sample preparation of experiment 1# and 2#

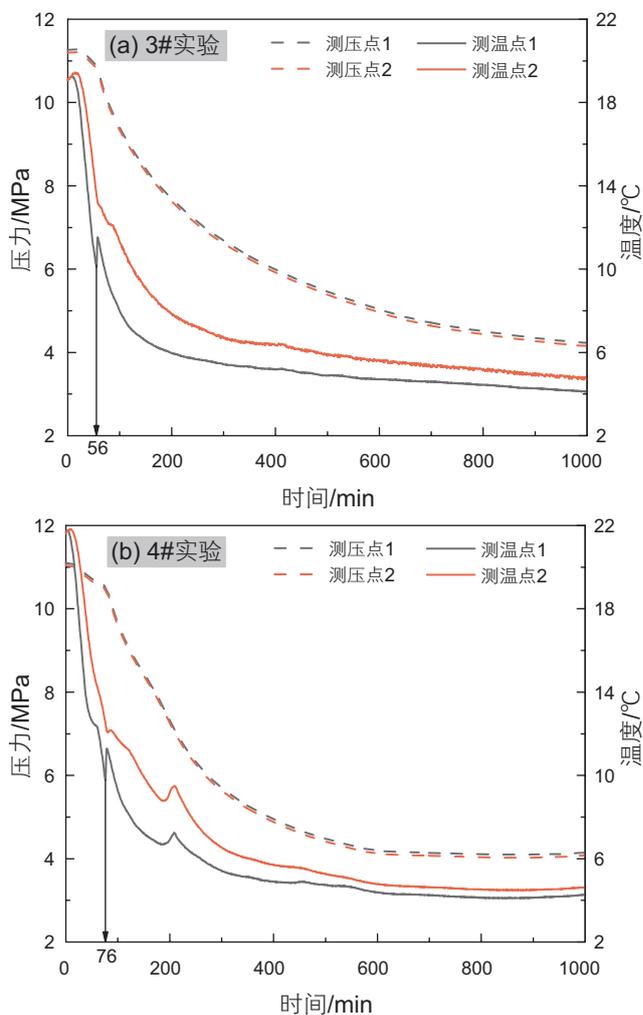


图10 (a)3#实验和(b)4#实验试样制备过程中温度压力变化
Fig. 10 Temperature and pressure changes during sample preparation of experiment (a)3# and (b)4#

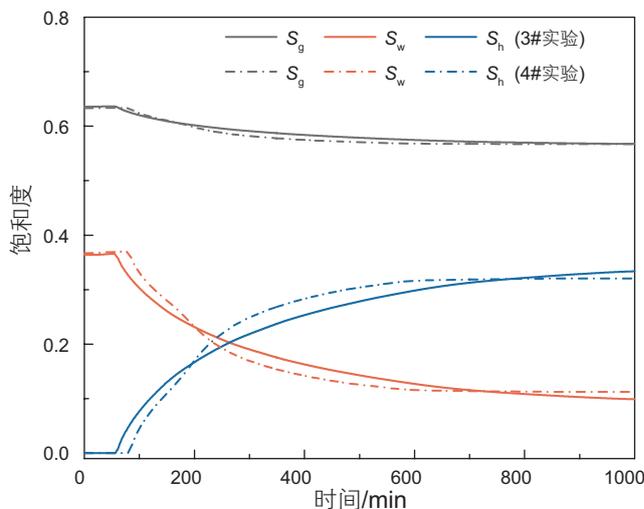


图11 3#和4#实验试样制备过程中相饱和度变化
Fig. 11 Phase saturation changes during sample preparation of experiment 3# and 4#

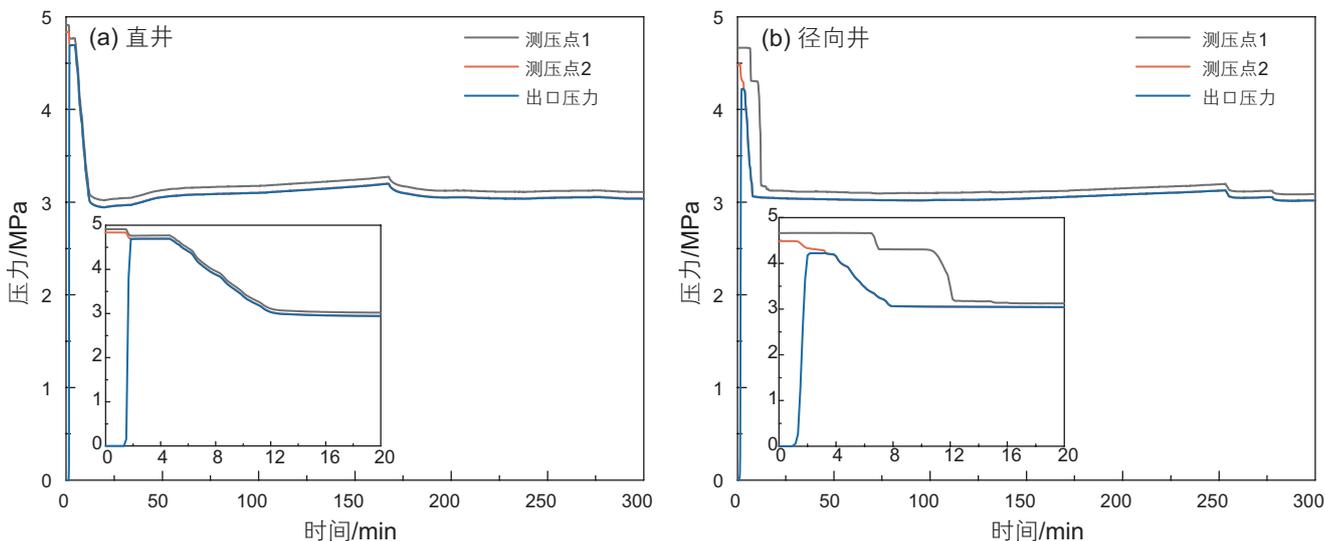


图 12 水合物开采过程中压力变化
Fig. 12 Pressure changes during hydrate extraction

似，因此本文以径向井降压开采水合物为例，讨论了水合物开采过程中反应釜内温度变化。如图 13 所示，降压开采的初始阶段反应釜内各点温度急剧下降，这主要是由水合物分解吸热和压力下降导致的焦耳—汤姆森效应引起。当温度下降至 2 °C 左右时，反应釜内温度在一段时间内保持相对稳定，该阶段外界热量流入(主要通过水浴循环)与水合物分解吸热达到相对平衡。之后，随着水合物分解速度减慢，反应釜内各点温度逐渐回升。由于测温点 7 位于反应釜底部，受环境温度(约为 25 °C)影响较大，因此测温点 7 温度明显高于其他测温点，且温度回升更快。

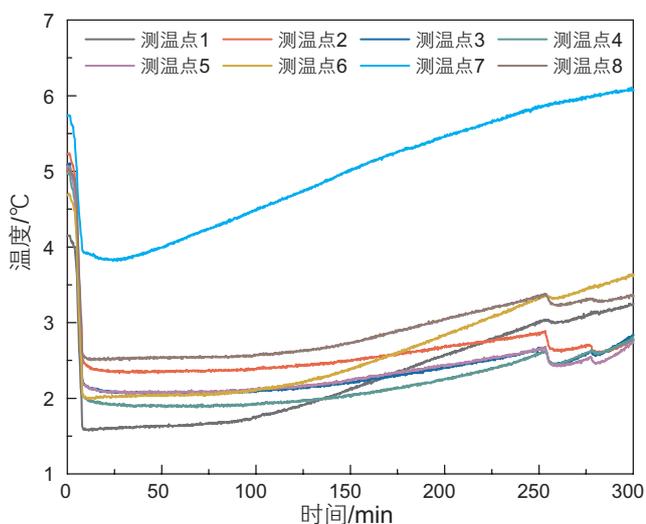


图 13 径向井开采水合物过程中温度变化
Fig. 13 Temperature changes during hydrate extraction by radial well

2.2.2 产量分析

富气水合物试样由于含水饱和度低于束缚水饱和度和^[17]，降压开采过程中产水量为 0。图 14 所示为直井和径向井降压开采水合物累计产气量与采收率变化，其中采收率为累计产气量与开采前反应釜内甲烷总储量之比。由图 14a 可见：降压开采初期，压力下降使大量自由气产出，产气速率较高，累计产气量增加较快；之后，产气速率迅速下降，累计产气量的增长减缓。降压开采 15 min 后反应釜内的压力保持相对稳定，因此该阶段产气主要来自水合物分解。在出口压力下降到水合物相平衡压力前，水合物未分解，产气均为自由气。因此认为降压开采过程中的产气可分为 3 个阶段，先后为自由气产出阶段，混合气体产出阶段(过渡阶段)，水合物分解产气阶段。

图 14b 所示为直井和径向井降压开采水合物试样时采收率变化。两组实验中反应釜内的甲烷总储量十分接近，因此采收率变化和累计产气量变化规律基本一致。降压开采结束时，直井和径向井降压开采的采收率分别为 63.8% 和 61.2%。与直井相比，径向井降压开采的主要优势在于压降传播速度更快，范围更广。然而，由于实验尺度较小，且富气水合物试样具有较高的气相相对渗透率，径向井促进压降传播的特点难以体现，导致实验中采用直井和径向井降压开采的产量差异较小。考虑到水合物试样制备及开采过程中影响产量的因素较多，开展对照实验难度大，1#实验和 2#实验最终产气量之间的微小差异很可能来源于实验误差。

2.3 富水水合物试样降压开采

2.3.1 温度压力变化

图 15 所示为直井和径向井降压开采富水水合物试样(3#和4#实验)过程中压力变化。直井开采的初始阶段,测压点1和测压点2压力下降明显滞后于出口压力下降。当出口压力稳定在3 MPa左右时,测压点1和测压点2平均压力高于出口压力约为0.4 MPa,表明近井区域渗流阻力较大。径向井开采的早期阶段,测压点2压力下降出现了滞后,但持续时间较短。开采约20 min后,测压点1和测压点2压力与井口压力趋于一致,反应釜内降压可以忽略。径

向井更长的生产段为砂粒运移提供了高导流能力通道,导致防砂罐出现一定堵塞,出口压力下降速度较慢,因此在第45~60 min进行了关井清砂作业。关井结束后,测压点1,测压点2、出口压力同步下降到3 MPa左右。

图 16 所示为直井和径向井降压开采富水水合物试样过程中反应釜内平均温度变化。平均温度由反应釜内8个温度传感器读数取平均值得到。不同于富气水合物试样降压开采,富水水合物试样的气饱和度极低,气体节流膨胀效应对温度的影响较小,因此降压开采初始阶段反应釜内平均温度并未发生明显变化。约22 min时,压力下降到水合物相平衡

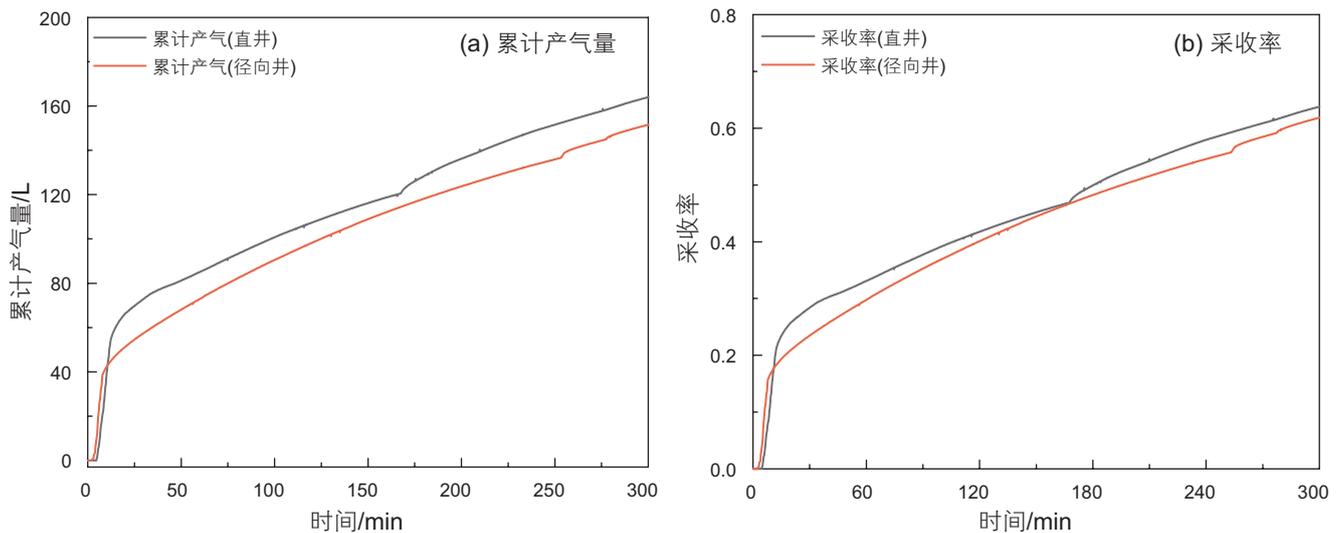


图 14 水合物开采过程中累计产气量与采收率变化

Fig. 14 Changes in cumulative gas production and recovery factor during hydrate extraction

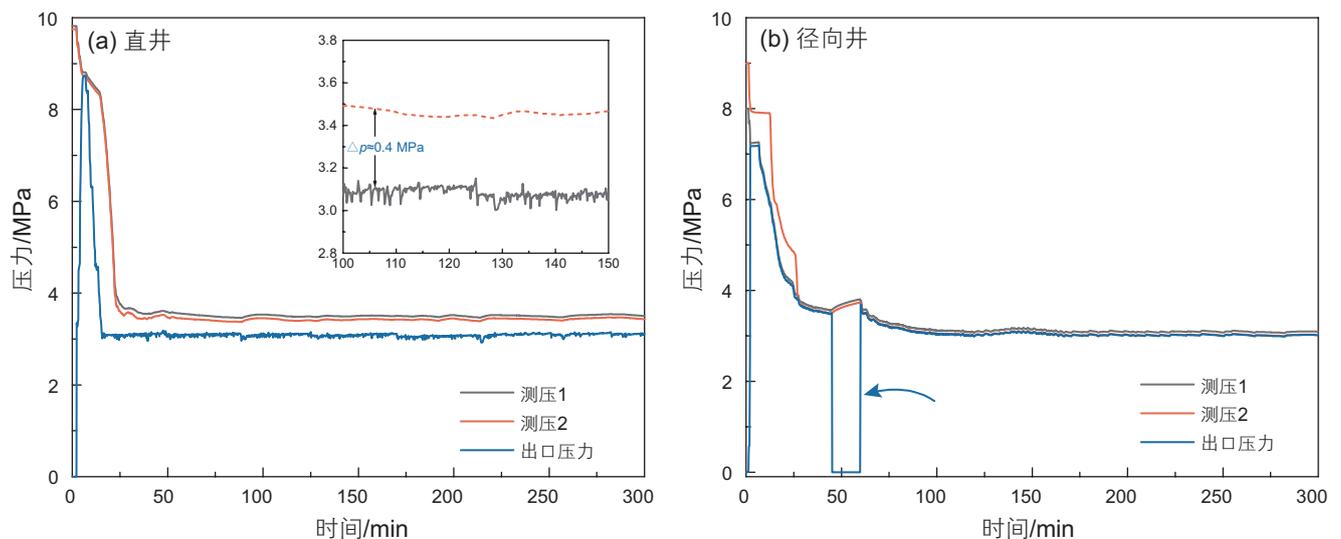


图 15 水合物开采过程中压力变化

Fig. 15 Pressure changes during hydrate extraction

压力，水合物开始分解，反应釜内温度快速下降。径向井开采时反应釜内压力更低，对应的水合物相平衡温度也更低，因此径向井开采时反应釜内温度下降幅度更大。由图 16 可见：径向井开采时平均温度从约 5.5 °C 下降到约 3.1 °C，最大温差约为 2.4 °C；直井开采时平均温度从约 5.1 °C 下降到约 3.8 °C，最大温差约为 1.3 °C。因此，同直井开采相比，径向井开采时反应釜内有更多的显热可用于水合物分解。

2.3.2 产量分析

图 17(a)所示为水合物试样开采过程中累计产气量、产水量变化。如图 17(a)所示：降压开采 300 min 时，直井降压开采累计产气 120.91 L，累计产水

292.13 mL；径向井降压开采累计产气 145.28 L，累计产水 403.08 mL。径向井降压开采累计产气量与产水量明显高于直井降压开采。图 17(b)所示为水合物开采过程中甲烷采收率变化，由图可见：采用直井时甲烷最终采收率为 55.37%，采用径向井时甲烷最终采收率为 65.30%，因此径向井可以有效提高富水相环境下含水合物沉积物降压开采效率。

对于富水水合物试样，气相相对渗透率较低。直井降压开采时泄流区域较小，生产井井筒附近渗流阻力较大，导致压降无法有效传播到反应釜内部，不利于水合物分解。径向井降压开采时，更长的生产井筒为甲烷和水的产出提供了高导流能力通道，促进了压降向反应釜内部传播，有利于提高水合物开采效率。在相关数值模拟研究中，径向井在提高天然气水合物开采效率的同时也存在产水量显著增加的问题，这与本文实验的认识基本一致。由于实验研究在空间尺度、时间尺度、以及边界条件上局限性较强，定量对比实验结果与数值模拟结果仍存在较大难度。

我国南海天然气水合物多赋存于富水相环境下的含水合物沉积物中^[3]，与本文所合成的富水水合物试样具有一定相似性。此外，与本文通过实验合成的富水水合物试样相比，南海天然气水合物沉积物含有颗粒更细的泥质粉砂，储层存在压实作用且渗透率更低(平均小于 10 mD)^[17]，采用径向井开采南海天然气水合物储层预期将取得更明显的增产效果。需要注意的是，实验中径向井降压开采水合物也存在产水较多，泄流区域较大导致出砂严重等问题，因此仍需针对控水防砂等问题开展进一步研究。

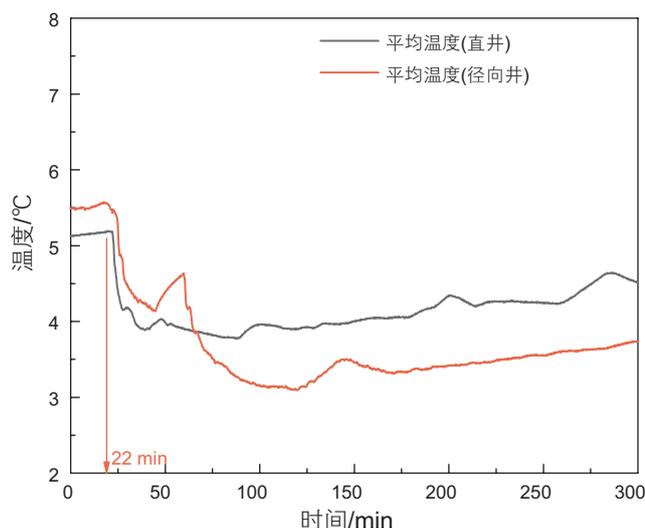


图 16 水合物开采过程中温度变化
Fig. 16 Temperature changes during hydrate extraction

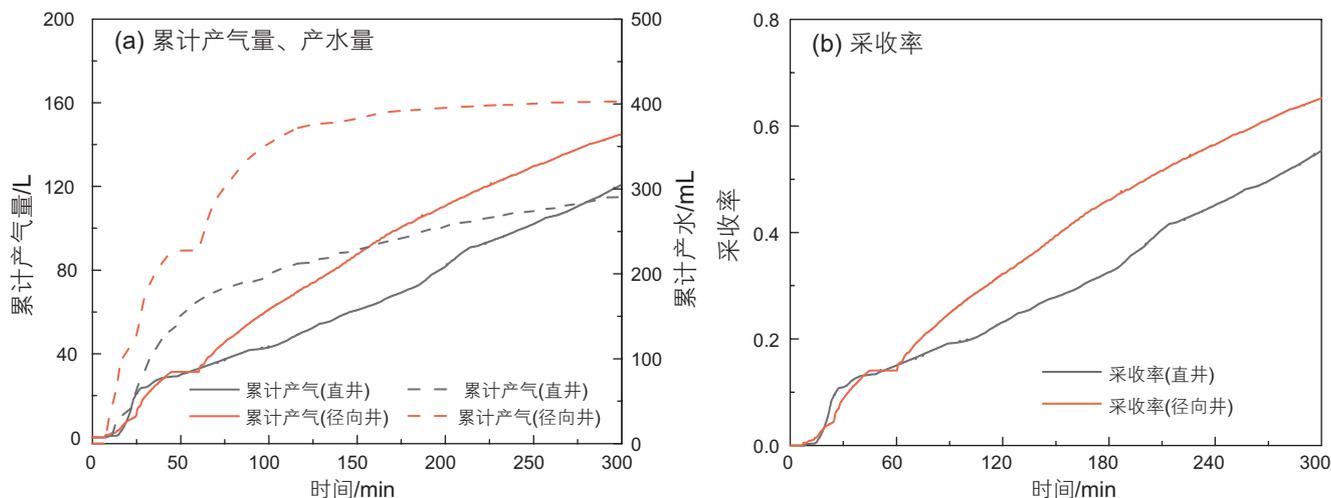


图 17 水合物开采过程中累计产气量、产水量与采收率变化
Fig. 17 Changes in cumulative gas production, cumulative water production and recovery factor during hydrate extraction

3 结论

1) 本文设计的实验装置及水合物试样合成与表征方法可实现富气水合物试样和富水水合物试样的高效合成,且能通过温度压力变化实时反演孔隙中流体与水合物饱和度,实现水合物试样物性控制。

2) 降压开采富气水合物试样时,产气主要分为3个阶段:自由气产出阶段,混合气体产出阶段,水合

物分解产气阶段。由于实验尺度较小且试样渗透率相对较高,降压开采时压降很快传播到整个反应釜空间,直井开采和径向井开采的产气量没有明显差异。

3) 降压开采富水水合物试样时,同直井相比,径向井提供的高导流能力通道促进了压降向反应釜内部传播,反应釜内可用于水合物分解的显热更多,因此采用径向井降压开采产气效率更高。由于径向井降压开采时泄流区域更大,采用径向井开采的实验存在产水量大,出砂严重等问题。

参考文献

- [1] SLOAN E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. *Nature*, 2003, 426: 353–359.
- [2] 宁伏龙, 窦晓峰, 孙嘉鑫, 等. 水合物开采储层出砂数值模拟研究进展[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(02): 182–203. [NING F L, DOU X F, SUN J X, et al. Progress in numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(02): 182–203.]
- [3] 叶建良, 秦绪文, 谢文卫, 等. 中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J]. *中国地质*, 2020, 47(3): 557–568. [YE J, QIIN X, XIE W, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea[J]. *Geology in China*, 2020, 47(3): 557–568].
- [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(01): 208–223. [CAI J C, XIA Y X, XU S, et al. Advances in multiphase seepage characteristics of natural gas hydrate sediments[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(01): 208–223.]
- [5] 黄翔, 刘芳, 巨鑫. 水合物开采对深水锚板基础承载性能影响的THMC数值模拟研究[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(02): 229–238. [HUANG X, LIU F, JU X. Impact of oceanic hydrate production on the uplift bearing capacity of a nearby plate anchor: THMC coupled simulation[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(02): 229–238.]
- [6] JIN G, LEI H, XU T, et al. Simulated geomechanical responses to marine methane hydrate recovery using horizontal wells in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 92: 424–436.
- [7] CUI J, SUN Z, WANG X, et al. Fundamental mechanisms and phenomena of clathrate hydrate nucleation[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(9): 2014–2025.
- [8] YANG M, FU Z, ZHAO Y, et al. Effect of depressurization pressure on methane recovery from hydrate-gas-water bearing sediments[J]. *Fuel*, 2016, 166: 419–426.
- [9] TUPSAKHARE SS, KATTEKOLA S, CASTALDI M J. An application of the results from the large-scale thermal stimulation method of methane hydrate dissociation to the field tests[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(15): 4588–4599.
- [10] LEE Y, SEO Y J, AHN T, et al. CH₄-Flue gas replacement occurring in sH hydrates and its significance for CH₄ recovery and CO₂ sequestration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 50–58.
- [11] YUAN Q, SUN C Y, WANG X H, et al. Experimental study of gas production from hydrate dissociation with continuous injection mode using a three-dimensional quiescent reactor[J]. *Fuel*, 2013, 106: 417–424.
- [12] TERZARIOL M, GOLDSZTEIN G, SANTAMARINA JC. Maximum recoverable gas from hydrate bearing sediments by depressurization[J]. *Energy*, 2017, 141: 1622–1628.
- [13] ZHANG P P, TIAN S C, ZHANG Y Q, et al. Numerical simulation of gas recovery from natural gas hydrate using multi-branch wells: A three-dimensional model[J]. *Energy*, 2021, 220: 119549.
- [14] CHONG Z R, ZHAO J, CHAN J H R, et al. Effect of horizontal wellbore on the production behavior from marine hydrate bearing sediment[J]. *Applied Energy*, 2018, 214: 117–130.
- [15] WANG Y, FENG J C, LI X S, et al. Influence of well pattern on gas recovery from methane hydrate reservoir by large scale experimental investigation[J]. *Energy*, 2018, 152: 34–45.
- [16] FENG, Y C, CHEN L, SUZUKI A, et al. Enhancement of gas production from methane hydrate reservoirs by the combination of hydraulic fracturing and depressurization method[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 184: 194–204.
- [17] SUN J, NING F, LIU T, et al. Gas production from a silty hydrate reservoir in the South China Sea using hydraulic fracturing: A numerical simulation[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(4): 1106–1122.

- [18] 李根生, 田守增, 张逸群. 空化射流钻径向井开采天然气水合物关键技术研究进展[J]. 石油科学通报, 2020, 5(03): 349-365. [LI G S, TIAN S C, ZHANG Y Q. Research progress on key technologies of natural gas hydrate exploitation by cavitation jet drilling of radial wells[J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(03): 349-365.]
- [19] LIU, C L, YE Y G, MENG Q G, et al. The Characteristics of Gas Hydrates Recovered from Shenhu Area in the South China Sea[J]. Marine Geology, 2012, 307-310: 22-27.
- [20] MCFEE D G, MUELLER K H, LIELMEZS J. Comparison of Benedict—Webb—Rubin, Starling and Lee—Kesler equations of state for use in P—V—T calculations[J]. Thermochemica Acta, 1982, 54(1): 9-25.
- [21] 苑伟民, 孙啸, 贺三等. BWRS 方程中参数单位制的讨论[J]. 长江大学学报 A(自然科学版), 2008, (03): 196-197+207. [YUAN W M, SUN X, HE S, et al. Discussion on the parameter unit system in the BWRS equation[J]. Journal of Yangtze University A (Natural Science Edition), 2008, (03): 196-197+207]
- [22] LEKVAM K, BISHNOI P R. Dissolution of methane in water at low temperatures and intermediate pressures[J]. Fluid Phase Equilibria, 1997, 131(1): 297-309.

(责任编辑 李俊键 编辑 马桂霞)