



Analysis of the Production Characteristics of Heterogeneous Reservoirs Assisted by Shallow Gas by Depressurization Path

Zifei Wang, Kangji Shi, Peng Gao, Lei Yang*, Yongchen Song

Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China

Email address:

1042631403@qq.com (Zifei Wang), kangjishi@mail.dlut.edu.cn (Kangji Shi), 2213627767@qq.com (Peng Gao),

leiyang@dlut.edu.cn (Lei Yang), songyc@dlut.edu.cn (Yongchen Song)

*Corresponding author

To cite this article:

Zifei Wang, Kangji Shi, Peng Gao, Lei Yang, Yongchen Song. (2024). Analysis of the Production Characteristics of Heterogeneous Reservoirs Assisted by Shallow Gas by Depressurization Path. *Science Discovery*, 12(1), 14-19. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20241201.13>

Received: 10 March 2024; Accepted: 29 March 2024; Published: 12 April 2024

Abstract: The problems of low gas production rate and low gas production restrict the commercial production of natural gas hydrate. The combined production of hydrate reservoirs and underlying shallow gas reservoirs is expected to make up for this shortcoming. Most natural gas hydrates in the formation exhibit vertical heterogeneous distribution characteristics; There is still little research on the mechanism of its impact on the characteristics of co harvesting. This work focuses on the interaction between vertical heterogeneous hydrate reservoirs and shallow gas layers, and analyzes the mechanism of the impact of depressurization pathway on the characteristics of combined production. The results indicate that before the pressure in the shallow gas layer is equal to the pressure in the hydrate layer, the change in pressure reduction method cannot significantly affect the characteristics of pressure changes in the shallow gas layer; In addition, there is a significant hysteresis effect in the pressure evolution of shallow gas layers compared to hydrate layers. Not limited to this, the presence of shallow gas layers will also weaken the impact of pressure reduction paths on the gas production characteristics of combined production, which makes the gas production characteristics at this time more inclined towards the gas production characteristics under direct pressure reduction. In summary, in order to effectively increase the temperature of shallow gas and enhance hydrate decomposition, it is necessary to flexibly adjust the pressure reduction indicators of the pressure reduction path in different mining stages. The results can lay the foundation for clarifying the mechanism of interlayer interference in multiple gas source reservoirs.

Keywords: Gas Hydrate, Shallow Gas, Joint Production, Depressurization Pathway

降压路径对浅层气辅助下非均质储层开采特性分析

王梓非, 石康吉, 高鹏, 杨磊*, 宋永臣

大连理工大学能源与动力学院海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 大连, 中国

邮箱

1042631403@qq.com (王梓非), kangjishi@mail.dlut.edu.cn (石康吉), 2213627767@qq.com (高鹏), leiyang@dlut.edu.cn (杨磊), songyc@dlut.edu.cn (宋永臣)

摘要: 产气速率低和产气量少等问题制约着天然气水合物的商业化开采; 联合开采水合物藏和浅层浅层气藏有望弥补这一缺陷。地层中天然气水合物大多呈现垂向非均匀分布的特征; 其对联采特性的影响机制尚鲜有研究。本工作聚焦垂向非均质水合物储层与浅层气层的相互作用关系, 解析了降压路径对联采特性的影响机制。结果表明, 在浅层气层

压力与水合物层压力相等之前，降压方式的改变无法显著影响浅层气层压力的变化特性；此外，浅层气层的压力演化相比水合物层存在明显的迟滞效应。不限于此，浅层气层的存在还会弱化降压路径对联采产气特性的影响，这使得此时的产气特性更偏向于直接降压下的产气特性。综上所述，为了能够更为有效地提升浅层气温度并用于强化水合物分解，应当灵活调整不同开采阶段下降压路径的降压指标。成果可为理清多气源储层层间干扰影响机制奠定基础。

关键词：天然气水合物，浅层气，联合开采，降压路径

1.引言

天然气水合物是一种具有笼形结构的晶体化合物[1] 大多赋存于在高压低温的海洋沉积物中[2]；其拥有巨大的储气能力：1 m³的天然气水合物分解能够释放约0.8 m³的水和160-180 m³的天然气[3]，这使得开采天然气水合物成为备受关注的研究热点。开采水合物主要有5种方法：降压法[4, 5]、热激法[6, 7]、CO₂-CH₄置换法[8, 9]、注射抑制剂法[10, 11]以及组合法[12, 13]。降压法由于其成本低、易操作等优点，成为目前最有希望实现商业化应用的开采方法[14]；其已在加拿大Mallik地区[15]、美国阿拉斯加北坡[16]、日本南海海槽[17]以及中国南海神狐海域[18]等地的水合物试采实验中被成功应用。

尽管针对降压法的研究已经深刻剖析了水合物分解的影响机制，但单一开采水合物储层仍旧面临着产气速率低和产气量少的难题，这制约着水合物商业化开采的推进；新的开采方法因而需要引入以克服这一难题。地质勘探结果表明，赋存天然气水合物的储层往往具有多气源共生的特征；联合开采水合物层和下伏气被认为是有望实现水合物商业化开采的新方法[19]。研究人员通过在实验室制备水合物和浅层气层开展了井位对联采特性的影响研究，指明了联采相比单采更为优异的开采效率；布井在浅层气层对于加速储层产气的优势得到了证实[20]。此外，不同浅层气层水饱和度下联采特性的研究发现高水饱和度的浅层气层可以通过水的注入为水合物层提供更多的显热，从而加速水合物分解[21]。此外，Wei等人构建的联采模型特别考虑了非渗透中间夹层的存在，并研究双水平井的开采表现；其发现了双水平井在扩大压力影响区域的显著作用；联采因而获得了惊人的累计产气量。需要注意的是，非渗透的中间夹层结合浅层气层较高的渗透率使得联采过程中出现了巨大的层间压差，这将引发地层失稳，危害开采的安全进行[22]。前人针对水合物-浅层气联合开采的研究已经做了大量的工作，但大多数开采特性研究均是基于水合物在储层中均匀分布的假设所开展的，浅层气作用下非均质水合物储层开采特性的研究尚鲜有报道。

在这项工作中，含水合物非均质泥质储层通过控制水的空间分布加以制备。特别关注降压方案对非均质水合物储层生产效率的影响，解析其对联采特性的影响机制。

2.实验系统

此次实验采用两个有效容积为10.35 L的钢制高压反应釜作为水合物生成与分解的容器。两个反应釜温度均通

过空气浴进行调节，从而模拟海洋恒温环境。在两个反应釜顶部安装有12个温度传感器以及3个压力传感器，用于描述储层内部以及浅层气层的温度、压力变化。开采井位于水合物层上层，两个反应釜之间通过装有气体过滤器以及球阀的钢管连接。产气压力通过背压调节器进行控制。产出气体经过过滤、干燥后通过气体流量计进行流量测量。最终气体进入气体收集器收集。所有测量数据通过数据采集器进行收集（每30 s记录一次）。更多实验装置的细节以及参数描述可从赵等人研究中获得[23]。实验中所使用的样品来自于中国南海神狐海域中的天然海洋沉积物，粒径中值为4.78 μm [24]。

制备水合物沉积物时，两个反应釜分别制样。一个反应釜用于模拟孔隙度为50%的非均质储层。将不同比例的海洋土和冰粉充分混合后，分别制备出2份等体积的水饱和度为50%（上层）和10%（下层）的样品；制备10%水饱和的样品时，需将此样品中的海洋土和冰粉平均分为7.5份，充分搅拌后依次填入反应釜中，以保证水在样品中的均匀分布；制备50%水饱和的样品时也需要相同的操作；这也使得温度传感器的中间测点刚好位于两个储层的交界处，便于后续实验分析。另一个反应釜用于模拟孔隙度为60%的均质浅层气层，由于实验中，浅层气层的作用主要体现在为水合物层提供大量自由气以及推动两釜间的热量交换，而浅层气层内部的变化并不是此次实验的重点，因此，此次实验只对浅层气层的压力特性以及产气行为进行分析。值得注意的是，浅层气层中会含有一定量的水，这也不可避免的导致浅层气层中会有少量水合物的生成。

实验制备过程中的实验参数以及条件总结于表1。

表1 水合物的生成实验参数汇总。

Case	Initial temperature °C		Initial Pressure MPa	
	T _H	T _D	P _H	P _D
1	22.81	23.02	13.105	11.280
2	24.65	24.55	13.035	11.021
3	24.31	24.26	13.054	11.056
Case	Final temperature °C		Final Pressure MPa	
	T _H	T _D	P _H	P _D
1	2.97	3.01	9.204	9.560
2	3.65	3.24	9.0	9.275
3	3.68	3.31	9.146	9.335

3. 结果与讨论

表 2对生产参数以及部分实验结果做了总结。Case 1、2、3分别对应直接降压，循环降压、梯度降压。此次实验进一步针对水合物-浅层气联合开采进行研究，这对未来水合物商业化开采有一定的参考价值。

表2 水合物解离时的实验参数以及结果。

Case	1	2	3
depressurization rate/kPa	200	200	200
Production pressure/MPa	3	3	3
V _g /SL	746.8	710.3	728.1
t ₉₀ /min	121.6	814.6	158.5
T _{min} ^{upper} / °C	-3.43	-3.16	-2.79
T _{min} ^{junction} / °C	-4.03	-3.48	-3.29
T _{min} ^{under} / °C	-4.11	-3.49	-3.02

3.1. 温度特性分析

图1显示了在不同降压方式的作用下水合物层的温度变化趋势，图（a）中可以看出，在初始降温阶段，三种降压策略的降温速率基本一致，这说明降压策略对初始降温速率几乎无影响。直接降压中，温度曲线在降压阶段以恒定速率降温，当水合物层压力与生产压力相同时，储层温度开始上升，大约在100 min时，温度出现波动，这需要后续的压力进行分析。值得注意的是，由于循环降压

（Case 2）以及梯度降压（Case 3）中涉及到关井操作，因此储层的温度得到了回升，这也使得循环降压以及梯度降压的温度最低点都略高于直接降压。梯度降压到达中间压力时进行关井，可以发现其在A-B阶段中温度升高速率较慢；循环降压到达生产压力后进行关井，其温度回升幅度明显快于梯度降压，同时相比于直接降压，循环降压整体提高了开采储层时的平均温度。由于循环降压设定开井条件为到达一定压力条件下进行开采，浅层气的上涌加速了关井时储层内部压力的回升，因此在A-B阶段出现了多次关井和开井的情况，后续由于浅层气供气不足以及水合物的大量分解，其开井和关井间隔逐渐增长（B-C）。图（b）、（c）也有相似的规律，但三个Case在不同层所出现的温升以及降温幅度有着明显的差异。一方面这是由于各层水合物分解量不同从而导致温度降低幅度不同；另一方面由于各储层含水量不同，从而导致各层的比热容不同，因此储层的温度回升幅度不同。

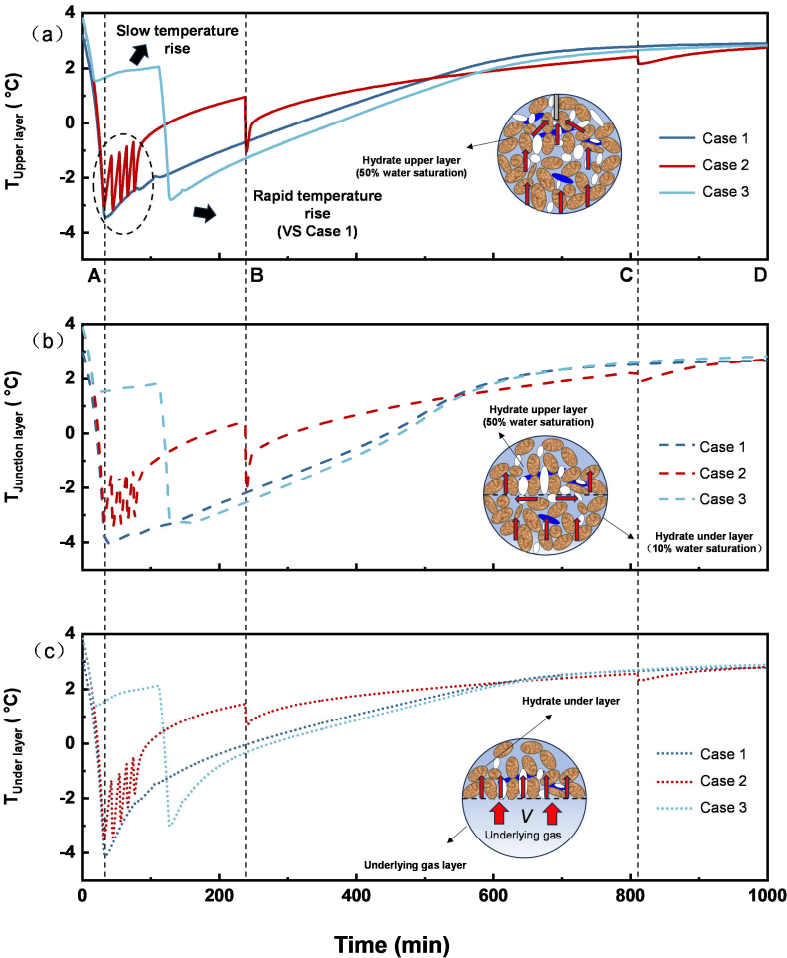


图1 图(a)-(c)分别表示case1、2和3的上、下以及交界处的温度变化趋势随时间变化趋势。

3.2. 压力特性分析

由图2可以看出，直接降压中水合物层的压力以恒定速率降至生产压力，浅层气层的压降相对于水合物层有一定的迟滞，浅层气层的压降趋呈现先加快后减弱的趋势，这主要与浅层气在水合物层中运移时的储层渗透率以及两个储层间的压差所导致。梯度降压、循环降压在前20

min的水合物层以及浅层气层的降压速率与直接降压的降压速率基本一致。梯度降压当到达6 MPa的设定压力时，水合物层的压力开始持平且后续略有升高，此时浅层气仍保持相同的速率向水合物层注入。当与水合物层压力基本持平时，浅层气注入速率逐渐降低；再次开井时，水合物层、浅层气层压力再次下降，同样浅层气压力的变化相比

水合物层仍存在迟滞效应。值得注意的是,循环降压在到达生产压力时的前4次关井操作,水合物层的压力快速增加,而浅层气层的压力变化与直接降压时的浅层气层的压力变化相同。第5、6次关井操作时,由于压力变化相对较缓,浅层气层压力有足够的时间降至与水合物层压力相同,此时开井操作将显著影响两层的压力变化。如上所述,不

论采用何种降压方式,在浅层气层压力未于水合物层压力相平时,浅层气仍会持续注入水合物层,此时降压方式的改变无法显著影响浅层气层压力的变化特性;当两层压力相同后,降压方式的改变会显著影响两层压力的变化,但浅层气压力的变化相比水合物层仍存在迟滞效应。

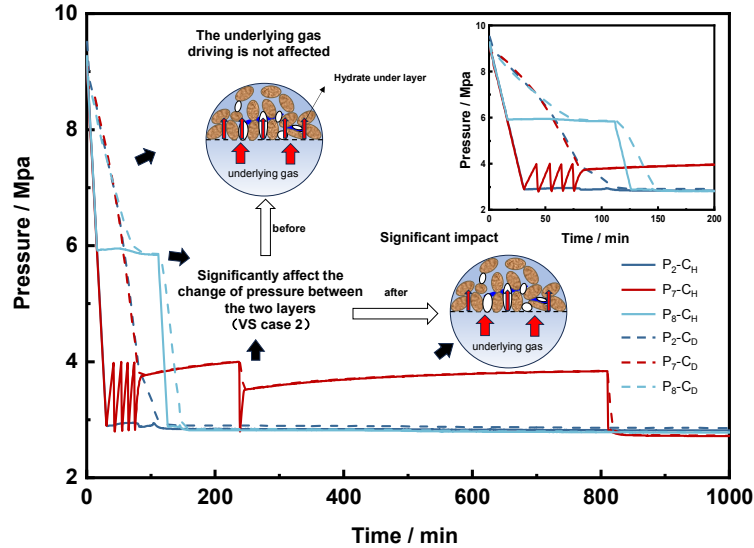


图2 Case1、2和3在生产过程中水合物层、浅层气层的压力随时间变化曲线图。插图为前200 min压力随时间变化曲线图。

3.3. 产气量、产气速率分析

图3反映了不同降压策略的产气量随时间的变化特征,本研究将总产气量的90%作为生产过程结束的时间(t_{90})。可以发现,从总产气量上看,三种降压策略所开采出的甲烷气体总量大致相同,具体的增长趋势将在后续产气速率上进行分析。从开采时间上看,梯度降压的 t_{90} 相对于直接降压的 t_{90} 增加了30.34%;循环降压的 t_{90} 相对直接降压的 t_{90} 增加了569.89%。直接降压由于无需开关井的操作,使得其开

采 t_{90} 最短。循环降压由于开关井次数较多, t_{90} 相对较长。从浅层的产气量上看,在75 min之前,三种降压策略的浅层气产出趋势基本相同。结合上面压力特性分析,可以发现,浅层气层压力未于水合物层压力相平时,循环降压、梯度降压的浅层气的产出与直接降压的浅层气的产出一致。这也能够说明浅层气层的存在会弱化降压方式对于整体的产气特性的影响。使得产气特性更偏向于直接降压。

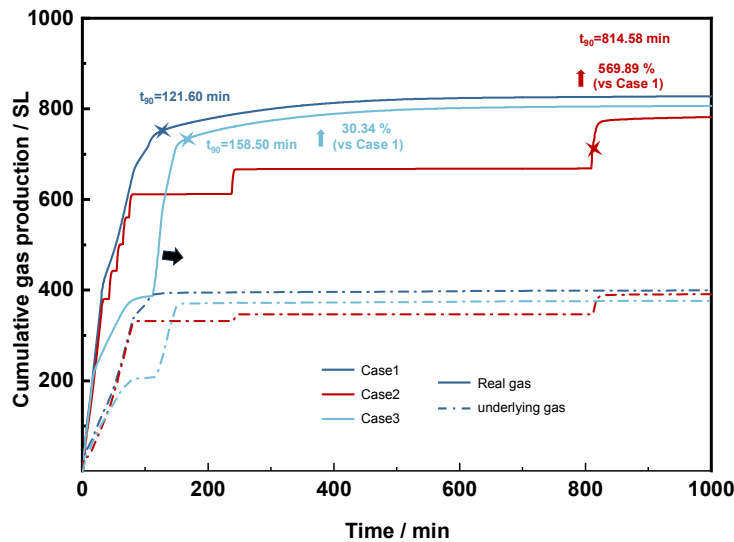


图3 case1、2和3在生产过程中的浅层气累计产气量以及总产气量随时间的变化。

图4为不同降压策略条件下的瞬时产气速率变化图，可以发现，直接降压在前50 min有着较高的产气速率。随着降压的开始，水合物层井口周围的自由气得到了较大的驱动力从而大量涌出，因此在开采初期出现了产气速率的峰值。随后产气速率逐渐降低。随着自由气的产出，水合物开始分解（约14min），产气速率缓慢升高，在30min后，由于水合物层自由气的基本完全产出，产气速率快速降低。循环降压与梯度降压在前50 min有着相似的产气速率特性，后续由于关井操作的不同，产气速率特性也因此不同。

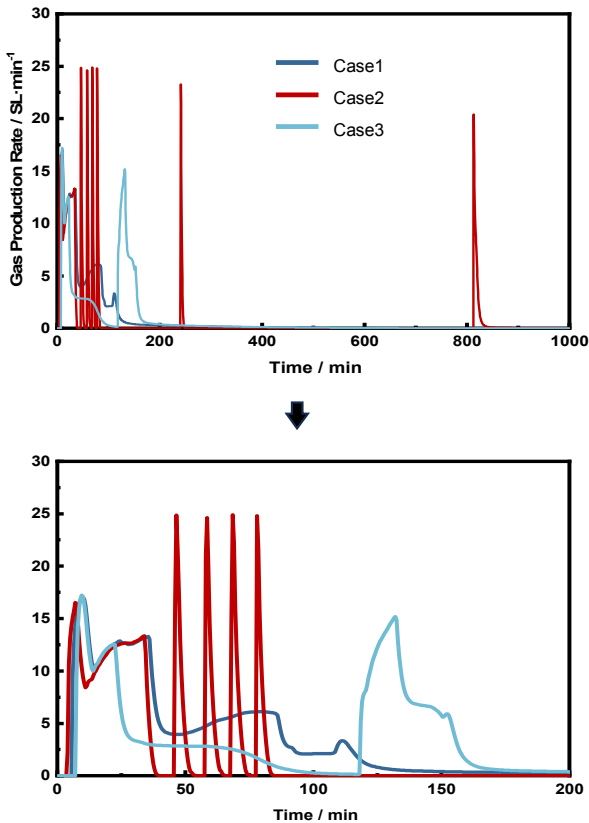


图4 case1、2和3生产过程中瞬时产气速率变化曲线图

4. 结论

在这项工作中，两份体积相同但水饱和度分别为50%、10%的海洋土用于制备非均质储层。开展了浅层气作用下非均质水合物储层开采特性的分析研究，并进一步解析了降压方式对联采特性的机制影响。主要结论如下：

1. 降压路径会显著改变水合物层以及浅层气的温度变化，由于浅层气的上移，循环降压的多次降压使得两储层间换热时间延长，同时驱动力也得到了保证，水合物储层温度回温较为明显，而梯度降压由于两层压差的逐渐缩小，使得水合物层温升不明显。
2. 浅层气层压力与水合物层压力相等之前，降压方式的改变无法显著影响浅层气层压力的变化特性；当两层压力相同后，降压方式的改变会显著影响

两层压力的变化，此外，浅层气层的压力演化相比水合物层存在明显的迟滞效应。

3. 浅层气层的存在还会弱化降压路径对联采产气特性的影响，这使得此时的产气特性更偏向于直接降压下的产气特性。
4. 此次实验成果可为理清水合物层、浅层气层的联采层间干扰影响机制奠定基础。但目前缺乏对水合物储层中的精细刻画以及不同开采条件下的水合物层以及浅层气层特性研究。未来的研究方向应主要聚焦于：1、水合物储层目标区的精细刻画。2、不同生产因素对各储层中温度场、压力场的变化规律以及产气特征的影响。这有助于分析多气合采层间相互影响特性，为实际的开采提供参考。

ORCID

0000-0003-1885-1789 (Lei Yang)

致谢

本研究得到国家自然科学基金（批准号：52176002，U19B2005）、国家重点研发计划（批准号：2021YFC2800902）、辽宁省自然科学基金（批准号：2022-MS-149）、中央高校基本科研业务费（批准号：DUT22QN239）和中国科协青年精英科学家资助计划（批准号：YESS20200088）的资助。

参考文献

- [1] Liang R, Xu H, Shen Y, et al. Nucleation and dissociation of methane clathrate embryo at the gas–water interface [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 116(47), 23410–23415(2019). doi:10.1073/pnas.1912592116
- [2] Song Y, Yang L, Zhao J, et al. The status of natural gas hydrate research in China: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31, 778–791(2014). doi: 10.1016/j.rser.2013.12.025
- [3] Drobyshev A, Aldiyarov A, Kurnosov V, et al. Physical modeling of the formation of clathrate hydrates of methane [J]. *Low Temperature Physics*. 41 (6), 429–434(2015). doi: 10.1063/1.4922092
- [4] Guan D, Qu A, Gao P, et al. Improved temperature distribution upon varying gas producing channel in gas hydrate reservoir: Insights from the Joule-Thomson effect [J]. *Applied Energy*. 348, 121542(2023). doi:10.1016/j.apenergy.2023.121542
- [5] Yang L, Shi K, Qu A, et al. The locally varying thermodynamic driving force dominates the gas production efficiency from natural gas hydrate-bearing marine sediments [J]. *Energy*. 276, 127545(2023). doi:10.1016/j.energy.2023.127545

- [6] Hao Y, Li X, Li S, et al. Heat conduction and thermal convection on thermal front movement during natural gas hydrate thermal stimulation exploitation [J]. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*. 73, 40(2018). doi:10.2516/ogst/2018046
- [7] Zhong X, Pan D, Zhai L, et al. Evaluation of the gas production enhancement effect of hydraulic fracturing on combining depressurization with thermal stimulation from challenging ocean hydrate reservoirs [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 83, 103621(2020). doi:10.1016/j.jngse.2020.103621
- [8] Wang T, Zhang L, Sun L, et al. Methane recovery and carbon dioxide storage from gas hydrates in fine marine sediments by using CH₄/CO₂ replacement [J]. *Chemical Engineering Journal*. 425, 131562(2021). doi:10.1016/j.ccej.2021.131562
- [9] Wang T, Sun L, Fan Z, et al. Promoting CH₄/CO₂ replacement from hydrate with warm brine injection for synergistic energy harvest and carbon sequestration [J]. *Chemical Engineering Journal*. 457, 141129(2023). doi:10.1016/j.ccej.2022.141129
- [10] Li G, Wu D, Li X, et al. Experimental Investigation into the Production Behavior of Methane Hydrate under Methanol Injection in Quartz Sand [J]. *Energy & Fuels*. 31(5), 5411-5418(2017). doi:10.1021/acs.energyfuels.7b00464
- [11] Wang Y, Fan S, Lang X. Reviews of gas hydrate inhibitors in gas-dominant pipelines and application of kinetic hydrate inhibitors in China [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 27(9), 2118-2132(2019). doi:10.1016/j.cjche.2019.02.023
- [12] Wan Q, Si H, Li B, et al. Heat transfer analysis of methane hydrate dissociation by depressurization and thermal stimulation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 127, 206-217(2018). doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.016
- [13] Guo X, Xu L, Wang B, et al. Optimized gas and water production from water-saturated hydrate-bearing sediment through step-wise depressurization combined with thermal stimulation [J]. *Applied Energy*. 276, 115438(2020). doi:10.1016/j.apenergy.2020.115438
- [14] Shi K, Wei R, Guo X, et al. Enhancing Gas Production from Hydrate-Bearing Reservoirs through Depressurization-Based Approaches: Knowledge from Laboratory Experiments [J]. *Energy & Fuels*. 35(8), 6344-6358(2021). doi:10.1021/acs.energyfuels.0c04075
- [15] Lei H, Yang Z, Xia Y, et al. Prospects of gas production from the vertically heterogeneous hydrate reservoirs through depressurization in the Mallik site of Canada [J]. *Energy Reports*. 8, 2273-2287(2022). doi:10.1016/j.egyr.2022.01.170
- [16] Myshakin E M, Ajayi T, Anderson B J, et al. Numerical simulations of depressurization-induced gas production from gas hydrates using 3-D heterogeneous models of L-Pad, Prudhoe Bay Unit, North Slope Alaska [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 35, 1336-1352(2016). doi:10.1016/j.jngse.2016.09.070
- [17] Tamaki M, Fujii T, Suzuki K. Characterization and Prediction of the Gas Hydrate Reservoir at the Second Offshore Gas Production Test Site in the Eastern Nankai Trough, Japan [J]. *Energies*. 10(10), 1678(2017). doi:10.3390/en10101678
- [18] Chen L, Feng Y, Okajima J, et al. Production behavior and numerical analysis for 2017 methane hydrate extraction test of Shenhu, South China Sea [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 53, 55-66(2018). doi:10.1016/j.jngse.2018.02.029
- [19] Ren J, Cheng C, Xiong P, et al. Sand-rich gas hydrate and shallow gas systems in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 215, 110630(2022). doi:10.1016/j.petrol.2022.110630
- [20] Li R, Cao B, Chen H, et al. Experimental study on the dual-gas co-production from hydrate deposit and its underlying gas reservoir [J]. *Energy*. 258, 124847(2022). doi:10.1016/j.energy.2022.124847
- [21] Qu A, Guan D, Jiang Z, et al. Sensible heat aided gas production from gas hydrate with an underlying water-rich shallow gas layer [J]. *Energy*. 284, 129273(2023). doi:10.1016/j.energy.2023.129273
- [22] Wei R, Xia Y, Wang Z, et al. Long-term numerical simulation of a joint production of gas hydrate and underlying shallow gas through dual horizontal wells in the South China Sea [J]. *Applied Energy*. 320, 119235(2022). doi:10.1016/j.apenergy.2022.119235
- [23] Zhao J, Liu Y, Guo X, et al. Gas production behavior from hydrate-bearing fine natural sediments through optimized step-wise depressurization [J]. *Applied Energy*. 260, 114275(2020). doi:10.1016/j.apenergy.2019.114275
- [24] Shi K, Wang Z, Jia Y, et al. Effects of the vertical heterogeneity on the gas production behavior from hydrate reservoirs simulated by the fine sediments from the South China Sea [J]. *Energy*. 255, 124525(2022). doi:10.1016/j.energy.2022.124525