

# 天然气水合物储层超声雾化防砂排水采气实验研究

罗强<sup>1</sup>, 刘志辉<sup>1</sup>, 宁伏龙<sup>\*1,2</sup>, 窦晓峰<sup>1</sup>, 刘志超<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 科技部地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**天然气水合物储层具浅埋藏、弱固结、低渗透、高泥质、非均质等特点, 钻采过程中易出现严重的出砂问题, 是制约天然气水合物安全高效开采的“瓶颈”之一。现有的天然气水合物储层防砂技术主要来源于常规油气开采中常用的防砂方法, 防砂精度控制和稳产增产矛盾突出。为此, 本文提出了一种天然气水合物储层超声雾化防砂排水采气方法, 配合挡砂介质在有效防住10 μm以上砂的同时, 将水雾化成5 μm左右的小水滴产出, 降低水的携砂能力并加速水气产出, 进而实现连续排水产气。基于该方法搭建了简易实验模拟评价装置, 进行了初步的模拟实验。实验结果表明该方法具有一定的可行性, 水气可以通过雾化片的锥孔不断产出。但是由于储层砂中还存在大量直径小于雾化片锥孔直径的泥质成分, 雾化装置还需针对泥质成分的存在做进一步优化, 否则泥质成分将堵塞在雾化片锥孔附近降低雾化片的振荡频率, 造成排水产气的中止。这些初步的工作可以为天然气水合物储层防砂增产提供新的思路。

**关键词:**天然气水合物; 储层防砂; 排水; 采气; 超声雾化

**中图分类号:** P634; TE3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 2096-9686(2022)03-0023-06

## Sand control and water drainage by ultrasonic atomization for gas recovery from hydrate reservoirs

LUO Qiang<sup>1</sup>, LIU Zhihui<sup>1</sup>, NING Fulong<sup>\*1,2</sup>, DOU Xiaofeng<sup>1</sup>, LIU Zhichao<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development,  
Ministry of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Hydrate reservoirs have the characteristics of weak consolidation, high clay content and low permeability, which is prone to lead to serious problems of wellbore and reservoir instability, low gas production and sand production during drilling and production. Sand production is a bottleneck which restricts the safe and efficient exploitation of hydrate. The existing sand control technology of NGH reservoir mainly comes from the sand control methods commonly used in conventional petroleum exploitation, and the contradiction between sand control precision and permeability enhancement is prominent. This paper proposes a gas recovery method with ultrasonic atomization for sand control and water drainage for hydrate reservoirs, which can effectively block sand greater than 10 microns, and produce water in the form of mist with small droplets of about 5 microns, so as to realize continuous production of water and gas. Preliminary simulation experiments were carried out based on an experimental simulation evaluation device. Results show that the method is feasible and water mist can be produced continuously through the cone holes of the

收稿日期: 2021-08-28; 修回日期: 2022-05-06    DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.03.003

**基金项目:** 国家重点研发计划项目“天然气水合物开采过程中井周储层动态响应行为与控制”(编号: 2018YFE0126400); 国家自然科学基金资助项目“流固耦合作用下南海典型水合物储层力学劣化规律与机理研究”(编号: 42006182); 广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目“南海泥质粉砂天然气水合物储层开采流固产出预测与控制技术研究”(编号: 粤自然资合[2020]047号)

**第一作者:** 罗强, 男, 汉族, 1988年生, 地质工程专业, 博士在读, 从事非常规能源研究, 湖北省武汉市鲁磨路388号, luoqiang2020@outlook.com。

**通信作者:** 宁伏龙, 男, 汉族, 1977年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 从事大洋钻探与天然气水合物勘探与开发研究工作, 湖北省武汉市鲁磨路388号, nflzx@cug.edu.cn。

**引用格式:** 罗强, 刘志辉, 宁伏龙, 等. 天然气水合物储层超声雾化防砂排水采气实验研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 23-28.

LUO Qiang, LIU Zhihui, NING Fulong, et al. Sand control and water drainage by ultrasonic atomization for gas recovery from hydrate reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 23-28.

atomizing plate. However, the atomization device needs to be further optimized due to the presence of mud contents; otherwise the mud contents will seriously affect atomization. The preliminary work can provide a new idea for sand control and gas recovery enhancement in hydrate reservoirs.

**Key words:** hydrate; sand control; drainage; gas production; ultrasonic atomization

## 0 引言

天然气水合物是由小分子天然气和水在特定温度压力条件下形成的一种固体非化学计量的化合物<sup>[1-2]</sup>,天然气水合物具有分布范围广、清洁低碳、资源量大的特点,是一种潜在的战略能源<sup>[3-6]</sup>。21世纪初,在世界范围内开展了多次天然气水合物试采<sup>[7-8]</sup>,其中海域作为天然气水合物赋存最广泛的区域,先后有日本、中国开展了试采<sup>[9]</sup>。2017年在南海神狐海域实施了连续产气60 d的我国首次天然气水合物试采工程,采气30.9万 $\text{m}^3$ ,平均日产气5151 $\text{m}^3$ ,测试期间最高日产量达3.5万 $\text{m}^3$ <sup>[10]</sup>。同年11月,天然气水合物被列为我国第173个矿种。随后我国于2020年在该海域利用水平井技术进行了第二轮天然气水合物试采,连续产气30 d,总产气量86.14万 $\text{m}^3$ ,日均产气2.87万 $\text{m}^3$ ,是首次试采日均产气量的5.57倍,大大提高了日产气量和产气总量<sup>[11]</sup>。

然而,上述试采产气量离商业开采还有一段不小距离。究其原因,主要是相比于常规油气储层,天然气水合物储层具有浅埋藏、弱固结、低渗透、高泥质、非均质等特点<sup>[3,12-13]</sup>,易造成钻采过程中井壁和储层失稳、产量低、出砂等工程问题<sup>[9,13-15]</sup>。其中出砂是制约水合物安全高效开采的“瓶颈”之一<sup>[14,16]</sup>。现有的天然气水合物储层防砂措施主要来源于常规石油开采中常用的防砂方法<sup>[17]</sup>,例如砾石充填防砂、筛管防砂等。我国典型的水合物储层泥质含量高达25%以上,且以中值粒径达10~15 $\mu\text{m}$ 的泥质细粉砂为主<sup>[18]</sup>。由于砂粒较细,这就对防砂提出了极高的精度要求,而防砂精度提高之后会造成完井段渗透率严重降低。研究表明,在40 $\mu\text{m}$ 防砂精度下,防砂介质渗透率下降幅度高达90%,在20 $\mu\text{m}$ 防砂精度时防砂介质的堵塞渗透率不足0.12 D,流动性很差<sup>[18-20]</sup>。此外储层中水合物分解会产生水,1 $\text{m}^3$ 的天然气水合物分解会产生约0.8 $\text{m}^3$ 的水和最高168 $\text{m}^3$ 的天然气<sup>[21]</sup>。因此,随着开采进行,储层水含量会逐渐增加,如果水不能有效排出,会严重影响产气以及降压效果,并导致有效应力降低,加之水携砂

能力强,诱发大规模出砂。

目前针对水合物储层的防砂方法存在以下问题:(1)防砂精度不易确定,无法达到有效防砂的效果;(2)在防砂的同时制约了排水产气。基于上述问题,本文提出了一种水合物储层超声雾化防砂提产方法。配合挡砂介质在有效防住10 $\mu\text{m}$ 以上砂的同时,将水雾化成5 $\mu\text{m}$ 左右的小水滴产出,降低水携砂能力的同时增强排水降压效果,实现连续排水产气。基于该方法,搭建了实验模拟评价装置,并进行了初步的模拟实验。

## 1 实验方法及材料

搭建的实验模拟装置主要由快拆透明反应釜、雾化装置、水气收集釜、压力传感器、可燃气体检测仪组成,见图1。其中雾化装置由雾化片和电源电路组成,本次初步实验选用了普通加湿器雾化片单元,谐振频率约为113 kHz,见图2。雾化片用环氧树脂胶固定在快拆透明反应釜下部的出口。甲烷水合物分解产生的水气可通过挡砂介质(用滤纸模拟,为103慢速定量滤纸,最大孔径10~15 $\mu\text{m}$ ,见图3a)和雾化片锥孔后通往水气收集釜。2个压力传感器分别检测甲烷水合物分解和产出的气体压力。可燃气体检测仪用来检测出口处是否有甲烷气体产出。

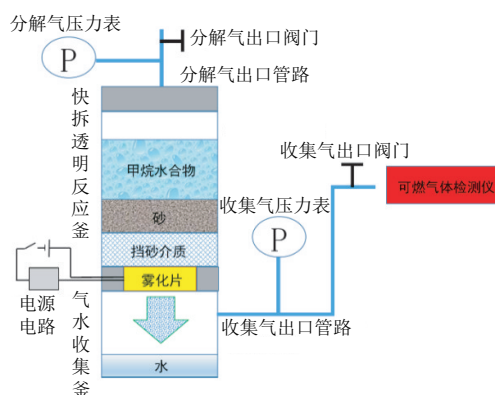


图1 水合物储层超声雾化防砂评价装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the ultrasonic atomization sand control evaluation device

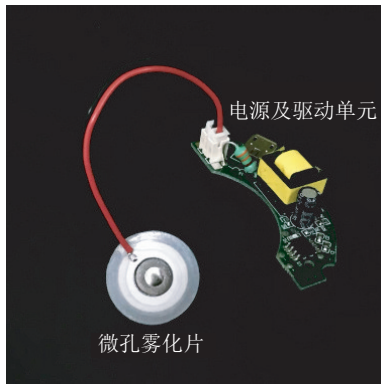


图 2 雾化片及电源电路示意

Fig.2 Atomization unit and power supply circuit

其中在挡砂介质上部铺垫一层约 5 mm 厚度的砂粒(见图 3b),然后快速转移预先形成好的甲烷水合物样品(实验中使用的甲烷水合物由另一个实验装置在压力约 6 MPa 和温度约 3 °C 条件下形成,详情可以参考水合物生成实验装置介绍<sup>[22-23]</sup>)放置在快拆透明反应釜中砂粒上部(见图 3c),用来模拟含甲烷水合物沉积物的分解和水气在储层砂中的单向渗流过程。砂粒选用南海神狐海域地层样品,中值粒径在 10 μm。盖上反应釜盖体,由于上下夹持和密封圈作用,快拆反应釜的气密性将得到保证。此外由于环境温度高于相平衡温度,甲烷水合物样品将在反应釜内分解(见图 3d)。

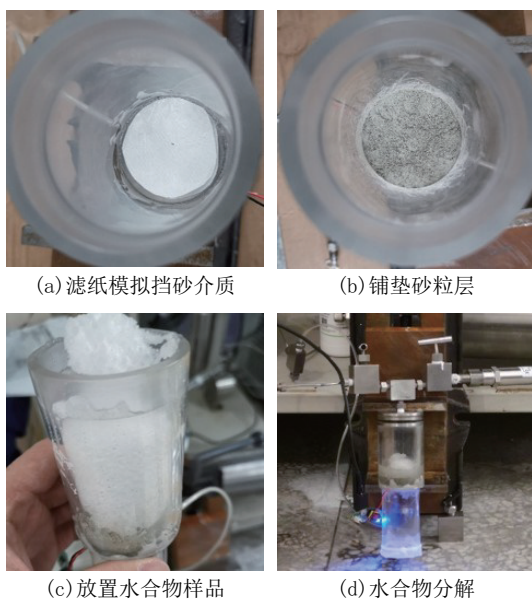


图 3 实验流程

Fig.3 Experimental flow chart

## 2 实验结果

### 2.1 甲烷水合物分解

当快拆反应釜内并未放置挡砂介质和砂粒样品时,甲烷水合物样品分解,将存在分解水,甲烷气和未分解水合物固体三相。当雾化装置未开启时,无水气从雾化片锥孔产出。这是由于分解水在雾化片的锥孔处形成了流动阻力,气体无法穿过水从锥孔排出。并且此时甲烷水合物分解产生的气体压力较小,这部分压差无法有效驱替出水。当雾化装置开启后,雾化片底部出现明显的气流产出(图 4)。通过可燃气体检测仪对气流进行检测,发现含有甲烷气体成分。由于气体穿过分解水到达锥孔产出的阻力较大,因此我们推测,甲烷水合物分解时,有一部分甲烷气会以较小气泡形式分散在分解水中,和雾化的小水滴一起从锥孔产出。有学者通过分子模拟的研究指出,甲烷水合物加热分解时,释放的甲烷分子有一部分会以纳米气泡的形式在水相存在<sup>[24]</sup>。因此我们认为,雾化片产出的水气中的甲烷气体成分,很大的可能是来自这些水相中的纳米甲烷气泡。快拆反应釜上部的气体压力则来自分解气中逃逸到釜中空气中的部分。



图 4 甲烷水合物雾化排水产气实验

Fig.4 Experiment of methane hydrate atomization for water drainage and gas recovery

### 2.2 甲烷水合物与沉积物共存分解

在甲烷水合物分解实验的基础上,我们将砂粒敷设在挡砂介质上部,然后再在砂粒层的上部快速放置形成好的甲烷水合物。甲烷水合物由于处于室温,温度升高分解形成的分解水渗流到砂粒层,再到

达挡砂介质下部雾化片中的锥孔中。此时快拆反应釜内,除了分解水、气、未分解甲烷水合物外,还有砂粒(图5)。分解水会迅速将砂粒层润湿,此时在产出通道有流体和固体混合在一起,比上节中纯甲烷水合物分解实验中的流体更加复杂。此时开启雾化装置,看不到明显的雾气产出,但开启收集气出口阀门会有微弱的压力释放,而且通过可燃气体检测仪也检测到甲烷气成分。通过收集气压力表可以发现,在初期表现出明显的峰值(图6),在1 h后压力值趋于稳定。实验结束后,发现雾化片上有少量泥砂痕迹,这可能是由于比雾化片锥孔直径更细的泥质成分,通过锥孔后导致的。而且这些泥质成分堵塞在了雾化片锥孔附近,降低了雾化片的振荡频率,影响了分解水的雾化,进而导致雾化产气速率较慢。

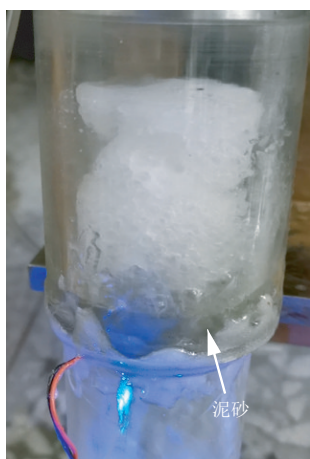


图5 甲烷水合物雾化防砂排水产气实验

Fig.5 Experiment of methane hydrate atomization for sand control, and water drainage and gas recovery

### 3 结果讨论

#### 3.1 水合物储层雾化防砂排水产气微观机理

上述测试初步表明,超声雾化在水合物储层的防砂排水采气应用中具有一定可行性。其防砂的主要原理是通过挡砂介质在精细防砂的同时,通过雾化片的高频振动,对水产生振动、变形、泵效、渐缩/渐扩运动,形成单独的小水滴产出<sup>[25]</sup>。该过程分解水对砂粒的拖拽得到有效抑制,储层砂并未产生移动,出砂得到防止。其产气的主要原理是,一方面产出的分解水中,包含甲烷水合物分解产生的纳米气泡,分解和雾化同时进行,这些纳米气泡会源源不断

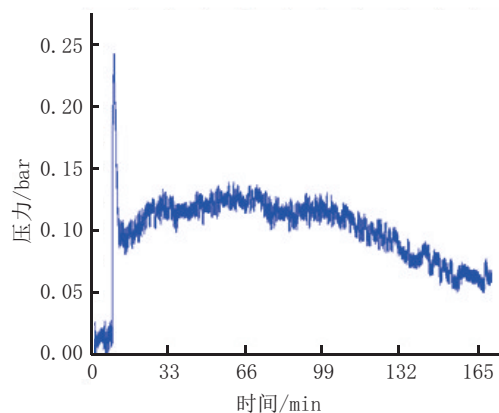


图6 收集气压力

Fig.6 Pressure of the collected gas

地从雾化片锥孔被产出,另一方面,随着分解水的不断产出,储层孔隙中的分解水减少,压差增大,气体流动驱动力增大而阻力持续减小,进而形成优势气体产出通道。其机理如图7所示。

#### 3.2 产气速度差异的原因

通过甲烷水合物及组合沉积物的雾化实验对比,可以发现,纯甲烷水合物的雾化排水产气速度明显高于后者。这是由于一部分较细的泥质成分穿过挡砂介质后到达锥孔附近形成堵塞造成的。图8为雾化片的锥孔微观图,锥孔背面的孔径较大(图8a),约为80~150  $\mu\text{m}$ ,泥质成分到达正面前,容易在孔区域堆积,这些泥质成分在锥孔附近的堵塞降低了雾化片的工作频率,进而影响了分解水雾化成水滴从雾化片正面的小孔(图8b)排出。对此,可以采用多层结构的挡砂介质,将泥质成分在挡砂介质处进行阻挡。此外,也可以对雾化片的结构进行改善,比如增大锥孔直径,让这部分泥质成分从锥孔和水气一起产出。

### 4 结论

本文提出了一种水合物储层超声雾化防砂排水采气方法,并基于提出的方法搭建了简易模拟实验装置。实验结果表明,超声雾化对于水合物储层防砂排水采气具有一定的可行性。通过实验发现水合物分解水中溶解有甲烷气体,可以随着雾化形成的小水滴一起产出。后续通过改善挡砂介质和雾化片结构,增大振荡频率会对含水合物沉积物的雾化排水产气以及潜在的泥砂解堵产生有利的效果。

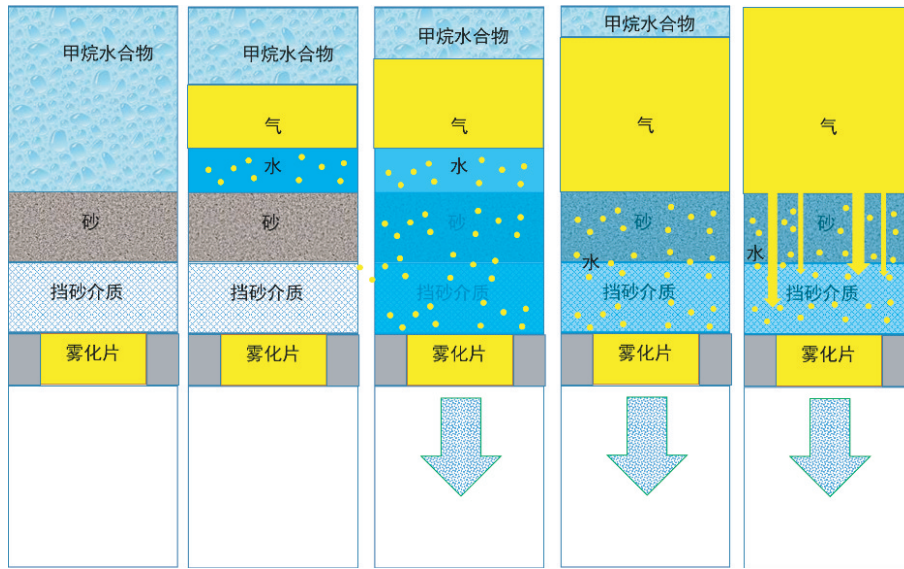
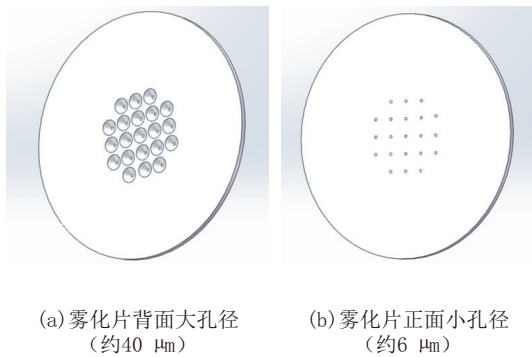


图7 雾化防砂排水产气机理

Fig.7 Mechanism of sand control, and water drainage and gas recovery by atomization



(a)雾化片背面大孔径 (约40 μm) (b)雾化片正面小孔径 (约6 μm)

图8 雾化片锥孔微观示意

(根据朱庭旺等重绘)<sup>[26]</sup>

Fig.8 Micro view of the conical holes in the atomizing plate

参考文献 (References):

[1] Sloan E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. Nature (London), 2003,426(6964):353-359.  
 [2] Koh C A, Sloan E D, Sum A K, et al. Fundamentals and applications of gas hydrates[J]. Annu Rev Chem Biomol Eng, 2011, 2:237-257.  
 [3] 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(2):182-203.  
 NING Fulong, DOU Xiaofeng, SUN Jiabin, et al. Progress in numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(2):182-203.  
 [4] 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, 2014, 31:778-791.  
 [5] Li X-S, Xu C-G, Zhang Y, et al. Investigation into gas produc-

tion from natural gas hydrate: A review [J]. Applied Energy, 2016, 172:286-322.  
 [6] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges [J]. Applied Energy, 2016, 162:1633-1652.  
 [7] Collett T, Bahk J-J, Baker R, et al. Methane hydrates in nature-current knowledge and challenges [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2014, 60(2):319-329.  
 [8] Boswell R, Collett T S. Current perspectives on gas hydrate resources [J]. Energy Environ Sci, 2011, 4(4):1206-1215.  
 [9] 李文龙, 高德利, 杨进, 等. 海域含天然气水合物地层钻完井面临的挑战及展望 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6):681-689.  
 LI Wenlong, GAO Deli, YANG Jin, et al. Challenges and prospect of the drilling and completion technologies used for the natural gas hydrate reservoirs in sea areas [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6):681-689.  
 [10] 李彦龙. 我国海域天然气水合物试开采圆满完成并取得历史性突破 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5):34-34.  
 LI Yanlong. The trial exploitation of natural gas hydrate has been successfully completed and a historic breakthrough has been made [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5):34-34.  
 [11] 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 Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, 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.  
 [12] 李彦龙, 刘昌岭, 廖华林, 等. 泥质粉砂沉积物-天然气水合物混合体系的力学特性 [J]. 天然气工业, 2020, 40(8):126-135.  
 LI Yanlong, LIU Changling, LIAO Hualin, et al. Mechanical

- properties of the mixed system of clayey-silt sediments and natural gas hydrates [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 126-135.
- [13] 宁伏龙,方翔宇,李彦龙,等.天然气水合物开采储层出砂研究进展与思考[J].地质科技通报,2020,39(1):137-148.  
NING Fulong, FANG Xiangyu, LI Yanlong, et al. Research status and perspective on wellbore sand production from hydrate reservoirs[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1):137-148.
- [14] Ning F, Yu Y, Kjelstrup S, et al. Mechanical properties of clathrate hydrates: Status and perspectives[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(5):6779-6795.
- [15] 韦昌富,颜荣涛,田慧会,等.天然气水合物开采的土力学问题:现状与挑战[J].天然气工业,2020,40(8):116-132.  
WEI Changfu, YAN Rongtao, TIAN Huihui, et al. Geotechnical problems in exploitation of natural gas hydrate: Status and challenges[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8):116-132.
- [16] 窦晓峰,宁伏龙,李彦龙,等.基于连续-离散介质耦合的水合物储层出砂数值模拟[J].石油学报,2020,41(5):121-134.  
DOU Xiaofeng, NING Fulong, LI Yanlong, et al. Continuum-discrete coupling method for numerical simulation of sand production from hydrate reservoirs: A lab-scale case study[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(5):121-134.
- [17] Li Y, Wu N, Ning F, et al. Hydrate-induced clogging of sand-control screen and its implication on hydrate production operation[J]. *Energy*, 2020, 206:118030-118040.
- [18] 董长银,钟奕昕,武延鑫,等.水合物储层高泥质细粉砂筛管挡砂机制及控砂可行性评价试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):84-92.  
DONG Changyin, ZHONG Yixin, WU Yanxin, et al. Experimental study on sand retention mechanisms and feasibility evaluation of sand control for gas hydrate reservoirs with highly clayey fine sands[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(6):79-87.
- [19] 董长银,周玉刚,陈强,等.流体黏速物性对砾石层堵塞影响机制及充填防砂井工作制度优化实验[J].石油勘探与开发,2019,46(6):1178-1186.  
DONG Changyin, ZHOU Yugang, CHEN Qiang, et al. Effects of fluid flow rate and viscosity on gravel-pack plugging and the optimization of sand-control wells production[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6):1178-1186.
- [20] 董长银,闫切海,李彦龙,等.天然气水合物储层颗粒级尺度微观出砂数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(6):77-87.  
DONG Changyin, YAN Qiehai, LI Yanlong, et al. Numerical simulation of sand production based on a grain scale microscopic model for natural gas hydrate reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019, 43(6):77-87.
- [21] Sloan E D. Introductory overview: Hydrate knowledge development [J]. *American Mineralogist*, 2004, 89(8-9): 1155-1161.
- [22] 王韧,宁伏龙,刘天乐,等.游离甲烷气在井筒内形成水合物的动态模拟[J].石油学报,2017,38(8):963-972.  
WANG Ren, NING Fulong, LIU Tianle, et al. Dynamic simulation of hydrate formed from free methane gas in borehole[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(8):963-972.
- [23] Wang R, Liu T, Ning F, et al. Effect of hydrophilic silica nanoparticles on hydrate formation: Insight from the experimental study[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2019, 30:90-100.
- [24] Fang B, Ning F, Ou W, et al. The dynamic behavior of gas hydrate dissociation by heating in tight sandy reservoirs: A molecular dynamics simulation study [J]. *Fuel*, 2019, 258: 116106.1-116106.9.
- [25] 蔡玉飞.振动微锥孔式雾化器原理及冷却应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2015:14-15.  
CAI Yufei. The principle and cooling application of the atomizer with vibrating micro tapered apertures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015:14-15.
- [26] 朱庭旺,任晓明,庄文健,等.微网雾化器的电路设计与试验[J].上海电机学院学报,2020,23(6):340-345.  
ZHU Tingwang, REN Xiaoming, ZHUANG Wenjian, et al. Circuit design and test of micro-mesh atomizer[J]. *Journal of Shanghai Dianji University*, 2020, 23(6):340-345.

(编辑 李艺)