

天然气水合物开采过程中出砂研究现状*

卢静生^{1,2,3,4,5}, 李栋梁^{1,2,3,4†}, 何勇^{1,2,3,4}, 梁德青^{1,2,3,4}, 熊友明⁵

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院广州天然气水合物研究中心, 广州 510640;
5. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要: 天然气水合物是一种未来潜在清洁能源, 在大陆永久冻土带和海洋环境中储量巨大。然而, 在天然气水合物开采过程中不可避免地出现砂砾随着流体进入井筒采出的现象, 制约天然气水合物的安全开采。本文介绍了各天然气水合物开采现场的出砂情况及危害, 总结了国内外水合物开采出砂的研究现状, 分析水合物出砂研究的难点及我国的挑战。分析结果表明, 天然气水合物开采出砂不仅与其自身分解特性有关, 还与其赋存储层的沉积物有关。对水合物出砂以及防砂提出了具体的研究思路及解决办法, 为未来天然气水合物安全开采提供参考和建议。

关键词: 天然气水合物开采; 出砂; 研究现状

中图分类号: TK01; P618.13; TE2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.05.011

Research Status of Sand Production during the Gas Hydrate Exploitation Process

LU Jing-sheng^{1,2,3,4,5}, LI Dong-liang^{1,2,3,4}, He Yong^{1,2,3,4},
LIANG De-qing^{1,2,3,4}, XIONG You-ming⁵

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. Guangzhou Center for Gas Hydrate Research, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

5. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Nature gas hydrate is a future potential clean energy which has huge reserve in the permafrost and marine environment. However, during the gas hydrate exploitation process, the sand gravel will flow into the wellbore following the fluid, namely sand production, which restricts the safety of hydrate exploitation. In this paper, the field sand production case and hazards encountered during natural gas hydrate exploitation was reviewed, the domestic and foreign research status of sand production in hydrate exploitation was summarized, and China's difficult and challenge of hydrate sand production research was analyzed. The results show that the sand production of hydrate exploitation is not only affected by its own decomposition characteristics, but also related to the reservoir sediments. For the shortcomings of hydrate research in sand production and sand control methods, the specific research ideas and solutions are mentioned. This would provide reference and suggestions for the safe exploitation of gas hydrates in the future.

Key words: gas hydrate exploitation; sand production; research status

0 前言

天然气水合物是一种由气体(或易挥发的液体)与水在一定温度和压力条件下形成的冰状固体, 俗称可燃冰, 广泛分布于冻土带地表以下 200~2100 m

和大陆边缘海底之下 0~1100 m 的沉积物中, 全球天然气水合物储量非常巨大, 估计水合物中天然气资源量为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 相当于 2×10^5 亿 t 油当量, 是全球常规燃料总碳量的 2 倍^[1], 被视为后石油时代的重要替代能源。我国在南海北部海域、青海省祁

* 收稿日期: 2017-07-07 修订日期: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474197, 5161101020); 国家海洋地质专项项目(GHZ2012006003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGZD-EW-301-3)

† 通信作者: 李栋梁, E-mail: lidl@ms.giec.ac.cn

连山冻土带、珠江口盆地东部海域等地发现较大储量的水合物矿藏,中国地质调查局在 2017 年 5 月在南海神狐海域进行了首次天然气水合物试开采,连续试气点火 60 天,累计产气 30.9 万 m^3 ,平均日产气 5151 m^3 ,甲烷含量最高达 99.5%^[2]。中国海洋石油公司在 2017 年 5 月在南海荔湾海域采用“固态流化开采技术”实现了对深水浅层非成岩天然气水合物的开采^[3]。

天然气水合物开发的钻井、完井及采气过程中,

含水合物地层的力学性质发生变化,可能导致井壁失稳、出砂、地层坍塌、海底滑坡甚至海啸等工程和地质灾害^[4],其中出砂是油气开采过程中储层砂粒随流体从储层中运移出来的现象。在天然气开发过程中,出砂问题可能尤为严重,因为天然气水合物埋藏浅,所处的沉积层通常未固结成岩且细粉砂含量较高^[5-8],加上降压开采时生产压差较大,目前已成为制约天然气水合物安全高效开采的一个重要问题。各项目开采出砂情况见表 1。

表 1 水合物开采方法与防砂技术^[2-24]

Table 1 Hydrate exploitation methods and sand control technologies

项目	储层特性	开采方法	是否防砂及效果
前苏联麦索雅哈(1967)	深度 700~800 m; 厚度 84 m; 砂岩	降压, 注化学剂	射孔完井; 弱固结水合物储层出砂
加拿大麦肯齐(2002, 2007-2008)	深度 800~1100 m; 厚度 110 m; 砂岩	2002 年, 注热	机械防砂; 有砂产出
		2007 年, 降压+注热	射孔完井、未防砂; 出砂造成 ESP 损坏
		2008 年, 降压	机械防砂; 泵入口加防砂网; 有砂产出
阿拉斯加北坡(2008, 2012)	厚度 40~130 m; 饱和度 75%; 砂岩	确定 4 个长期试采点 降压和二氧化碳置换	射孔砂筛防砂; 有砂产出
日本爱之海(2013)	水深 1000 m; 埋深 300 m; 砂岩	降压开采	砾石裸眼防砂筛防砂; 出砂造成 ESP 工作失效而被迫终止试采
日本南海海槽(2017)	厚度 50 m	降压开采	Geoform 防砂系统, 预先膨胀的 Geoform 防砂系统(失效)和下入井下才膨胀的 Geoform 防砂系统(有效)
中国南海神狐(2017)	水深 1266 m; 埋深 203~277 m; 粉砂泥质储层	地层流体抽取法	未成岩超细储层防砂; 防砂有效
中国南海荔湾(2017)	水深 1310 m; 埋深 117~196 m; 非成岩水合物储层	固态流化开采法	未防砂, 举升管道内砂和气、水、水合物分离



图 1 (a) 2013 年, 日本海洋天然气水合物开采每日产水出砂情况; (b) 2007 年, 加拿大陆域天然气水合物开采出砂情况图^[13]

Fig. 1 (a) The daily water and sand production situation during Japanese offshore hydrate test in 2013, (b) the sand production situation during Canada onshore hydrate test in 2007

麦索雅哈(Messoyakha)陆域水合物田从 1967 年开始生产,有明显的出砂现象,主要是由于较大的生产压差作用于弱固结的水合物储层所造成,因此其生产压差限定不高于 40 psia^[9-10]。麦肯齐

(Mackenzie)陆域天然气水合物试开采过程中,2002 年 Mallik 5L-38 项目采用机械防砂,项目分别应用热采法和降压法,虽然有砂产出,但是未造成很大破坏^[11-12];2007 年 Mallik 2L-38 采用套管射孔完井,

未采用防砂技术,在 30 h 的有效试采时间内,井筒沉砂量达 2 m^3 ,出砂导致电潜泵损坏(图 1b),因此认识到在水合物井开发过程中出砂问题是制约其高效开采的关键因素;为防止砂堵,2008 年 2 月下入防砂筛管,泵入口加防砂网,虽然有砂产出,但获得了比较稳定的产能^[11-14]。阿拉斯加北坡陆域天然气水合物试开采过程中,在 2008 年和 2012 年均产生砂,但未造成较大破坏^[15]。其中 2012 年采用二氧化碳置换水合物开采法,在射孔段还装有筛管防砂,但在高于原地甲烷水合物的分解压力生产阶段,Ignik Sikumi #1 井由于产水和产气速度变化较大,有极细颗粒砂子的间歇性产出,但未影响正常试采^[15]。日本南海海槽海域水合物开采项目(AT1-MC),采用垂直井砾石裸眼和防砂筛防砂,2013 年 3 月 12 日下入电泵开始降压试采,一天之内井底流压从 13.5 MPa 下降到 5 MPa,随后监测产气动态,连续稳定的产气过程持续了近 6 d。累产气 119500 m^3 (标准体积),累产水 1162 m^3 ,综合气水比为 100,产砂 30 m^3 。2013 年 3 月 18 日,井底压力迅速回升,产水量迅速增加,地层砂大量产出(图 1)。由于试采船不具备大量产出砂、液混合物的处理能力,井底压降也不足以使水合物进一步分解,且当日天气恶劣,为保证船及人员安全,试采作业被迫终止^[16-19]。2017 年 3 月日本第二次试采,两口生产井分别使用不同型号的 GeoFORM 防砂系统,一种是下入井底前就预先膨胀的 GeoFORM 防砂系统,另一种是到井底才膨胀的 GeoFORM 防砂系统。共产气约 23.5 万 m^3 ,其中第一口生产井 12 天总计产气约 3.5 万 m^3 ,第二口生产井 24 天总计产气约 20 万 m^3 ;第一口井有出砂情况,而第二口井未出砂^[20]。2017 年 5 月中国地质调查局在南海神狐海域采用“地层流体抽取法”进行了我国首次天然气水合物试采,采用自主研发的防砂技术,同时由于产水较少,未出现明显的出砂问题^[2]。2017 年 5 月中国海洋石油公司在南海荔湾海域采用“固态流化开采技术”对深水浅层非成岩天然气水合物进行了试采,该技术是将深水浅层非成岩天然气水合物矿体通过采矿车的机械破碎流化转移到密闭的气、液、固多相举升管道内,利用举升过程中海水温度升高、静水压力降低的自然规律使水合物逐步气化,变非成岩天然气水合物分解过程的不可控为可控,利用密度差实现部分砂回填(图 2),即将难以防住的

砂流化到举升管内进行举升分离回填,从而最大程度避免了出砂问题^[3,23]。虽然试开采过程中采用了不同的方法最大程度避免了出砂问题,但是由于试采时间普遍较短,产量也还没有达到商业化的规模,因此,目前的防砂技术能否适用于未来大规模的商业化开采还有待验证。

综上,在天然气水合物商业化开采前还需要进行出砂机理机制等问题进行研究,以便采用合适的防砂技术来避免停产带来的损失^[21]。本文归纳总结了水合物出砂问题及天然气水合物出砂实验及数值模拟研究的现状,提出存在的问题、不足及研究难点,为天然气水合物开采出砂问题研究提供资料及思路。

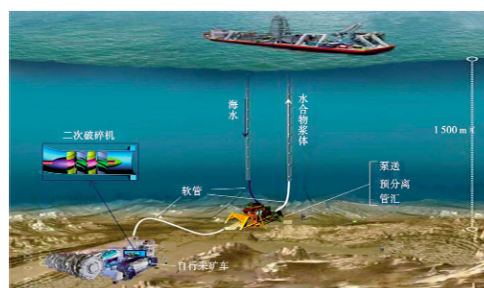


图 2 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化开采工程示意图^[3]

Fig. 2 Schematic diagram of solid fluidizations production for non-diagenetic natural gas hydrate in deep water

1 天然气水合物出砂实验研究现状

BOSWELL 等^[25]提出的“水合物资源金字塔”(the Gas Hydrates Resource Pyramid)模型(图 3)^[25],将水合物资源的储量规模和开采难度进行分类,从较小资源量和最具有资源潜力的塔顶到储量巨大而开采潜力最差的塔底,依次分为极地砂质储集体中水合物、海域砂质储集体中水合物、高渗透非砂质储集体、流体盆口附近块状结核状壳型水合物和非渗透泥质储集体中水合物^[6]。其中极地砂质和非渗透泥质储集体中水合物开采作业十分困难;而高渗透非砂质储集体未发现高储量水合物藏,因此海域砂质水合物和流体盆口附近的块状结核状壳型水合物是首选。而日本 2013 年和 2017 年的海域水合物试采都受制于出砂问题,但由于水合物出砂现场试验成本高、周期长等问题,实验室条件下模拟水合物出砂过程是获取水合物出砂数据和研究水合物出砂的主要手段。

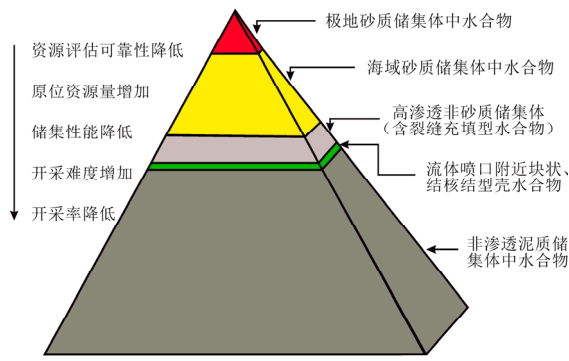


图 3 水合物资源金字塔^[6]
Fig. 3 The gas hydrate resource pyramid

OYAMA 等^[24]在体积为 500 mL 的岩心驱替出砂装置(图 4)上开展的水合物降压过程的出砂实验分析研究,发现出砂发生在水合物不稳定的降压过程中,出砂的驱动力并不是水合物分解的气流,而是穿过孔隙的水流,且水流速度是出砂强度的主要影响因素。QIU 等^[16]在 2011 年结合该室内出砂实验数据^[24]、天然气水合物三轴力学实验数据^[26]和现场先导试验结果,为 2013 年日本海洋天然气水合物试采设计了裸眼砾石充填完井和防砂筛结合的防砂方式,但试采第 6 天出现了大量未预期的出砂经井筒进入地面设备导致生产泵失效而被迫终止试采(图 1)^[19]。

JUNG 等^[27]在体积为 72 L 的海底模拟(SPS)装置(图 5)上研究了微细颗粒对水合物开采的影响,发现细粉砂颗粒运移和堵塞主要受相对几何约束的影响,即细粉砂颗粒大小与孔隙喉道尺寸有关,明确提出即使较低的细粉砂含量,也不能忽视其在水合物开采的影响。

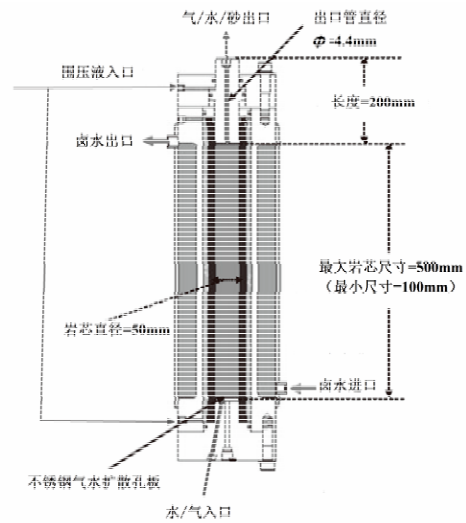


图 4 日本岩心驱替出砂装置设置图^[24]
Fig. 4 Japan's drilling core displacement experimental setup diagrams

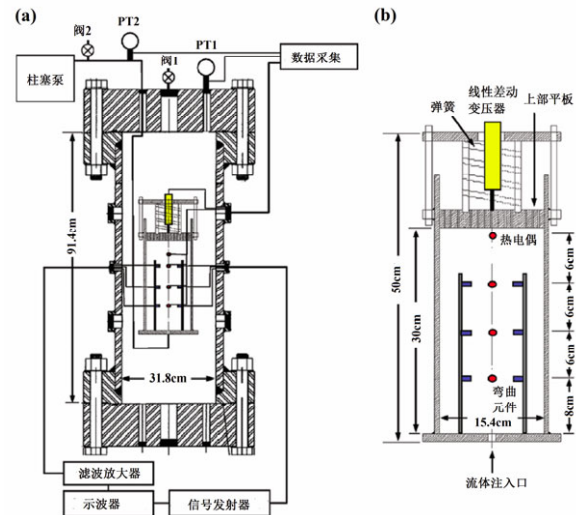


图 5 美国水合物出砂 SPS 装置^[27]
Fig. 5 America's gas hydrate sand production SPS facility

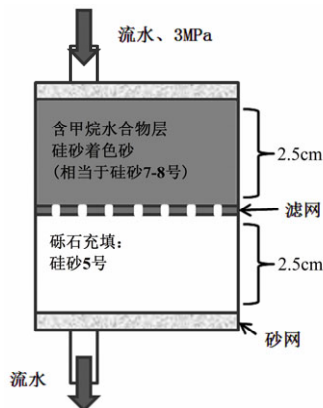
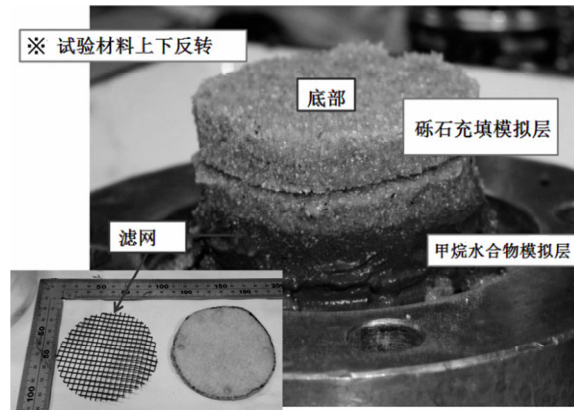


图 6 日本水合物出砂机理实验装置^[13,24]
Fig. 6 Japan's gas hydrate sand production mechanism experiment facility



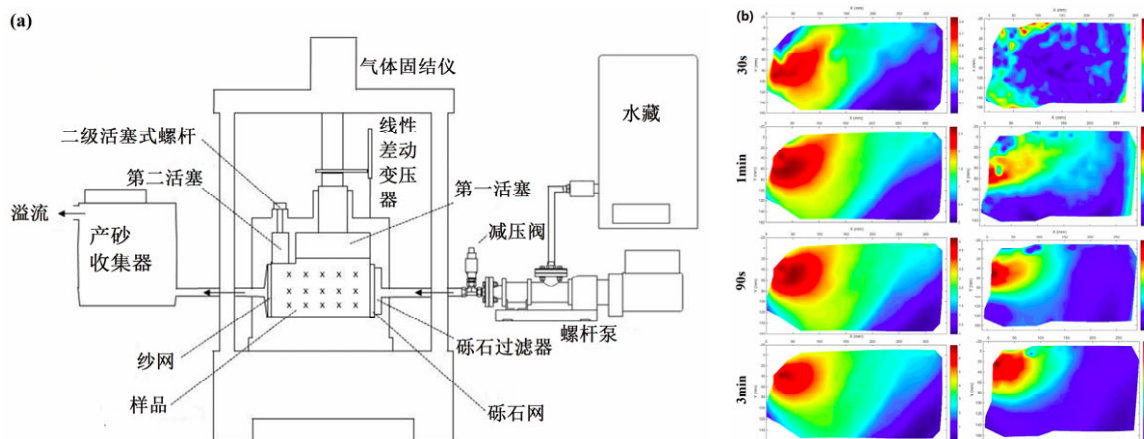


图 7 (a) 英国水合物出砂实验装置;(b) 松散砂(右)和密实砂(左)测试 30 s、1 min、90 s 和 3 min 运动轮廓图^[29]

Fig. 7 (a) British's gas hydrate sand production experiment facility; (b) loose (right) and dense (left) test particle image velocimetry sand movement resultant contours for 30 s, 1 min, 90 s and 3 min

SUZUKI 等^[28]根据日本 2013 年第一次水合物试采的出砂粒径开展了一维柱体透水试验(图 6), 选取 450 μm 的充填砾石和试采出砂平均粒径开展实验, 观测平均粒径不同的两层之间细粒组分的运移情况, 未发现大规模出砂, 但是流量增加后观察到有细砂侵入, 与实际开采结果的大量出砂不符。

MURPHY 等^[29]基于日本 2013 年第一次试采数据, 搭建了水合物出砂测试装置(图 7a), 并结合岩土力学的临界模型, 主要考虑松散砂和密实砂两种临界条件的出砂问题, 发现出砂的肇始机理与沉积物的孔隙度和围压有关;松散砂在均匀流作用下, 会整体移动, 但砂的结构稳定;而密实砂更多为局部出砂并形成较大空洞(图 7b);推测日本 2013 年水合物试采储层细砂为松散砂, 其出砂表现为砂结构稳定的整体出砂, 而非局部出砂。

LEE 等^[30]基于日本 2013 年海洋水合物降压开采数据, 进行了常规商业防砂网实验室评价(图 8), 常规商业防砂网能够有效的进行防砂, 总出砂量仅占实验总砂量的 0.012%。因此, 天然气水合物开采防砂还是有希望被解决的。

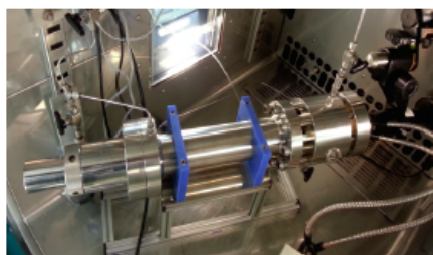


图 8 韩国水合物防砂实验装置^[30]

Fig. 8 Korea's gas hydrate sand control experiment facility

综上所述, 由实验可以得到天然气水合物出砂的主要影响因素为: 水合物储层的细微砂颗粒是出砂的来源, 孔隙吼道尺寸与细粉砂颗粒大小是颗粒运移和堵塞的关键因素, 而孔隙水流速度是出砂的主要推动力, 松散砂在均匀流作用下的整体运移是大规模出砂的原因之一。

2 天然气水合物出砂数值研究现状

天然气水合物出砂实验过程中, 存在合成含水合物沉积物均一性差、出砂内部过程不易观测和时空演化过程不易监测等影响因素, 因此通过温度-水流-应力-化学耦合过程 (THMC) 数值模拟研究能够模拟水合物实验室出砂过程, 将水合物储层的温度场、流场、应力场等耦合在一起分析出砂机理, 同时也能够有效的将实验室时空尺度的出砂实验扩展到现场的时空尺度, 有助于指导现场开采。因此, 国内外一些学者已经开展了天然气水合物出砂数值模拟研究。

COLLET 等^[4,31-32]利用 TOUGH+HYDRATE+FLAC3D 对水合物储层的模拟中, 发现水合物储层在降压开采过程中, 其剪切破坏会促进地层沉降(图 9), 存在较大的出砂风险。UCHIDA 等^[33-35]建立了水合物地层的热-水力-力学出砂理论模型 (THMC), 对 2013 年日本水合物试采程中砂的运移过程及发生位置进行分析, 认为水合物储层应力分布不均会导致储层的剪切变形(图 10)^[36], 即低饱和度和水合物储层应力分布不均导致高水合物饱和度储层的剪切变形。宁伏龙等^[37]采用 TOUGH+HYDRATE 模型建立了水合物降压开采过程, 并将温度、压力

和物质量等参数导入 FLAC3D 计算应力等参数，再将应力等参数导入 PFC3D 的出砂模型，结果表明井底压差增大，会导致海底沉降增加，出砂量也相应增加，但是并不影响短期正常试采，对于长期试采

作业，需要平衡产能、储层稳定和出砂的关系。对于南海水合物低渗水合物储层，在高井底压差下，出砂大部分是地层挤压剪切破坏出砂，气体和水运移带出的砂占比较少。

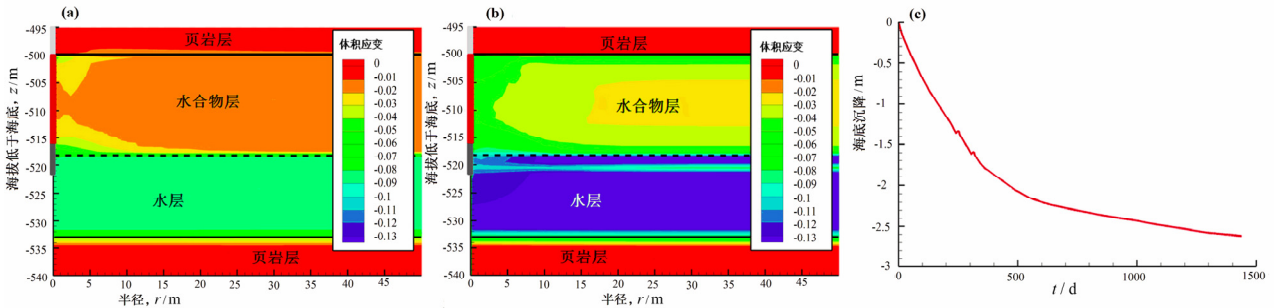


图 9 开采导致的力学变形：(a) 开采 6 个月 (180 d) 后，(b) 4 年后 (1460 d) 和 (c) 海底沉降图^[38]
 Fig. 9 Production-induced mechanical deformations: volumetric strain after (a) 6 months (180 d), and (b) 4 years (1460 d) of production and (c) evolution of seafloor subsidence

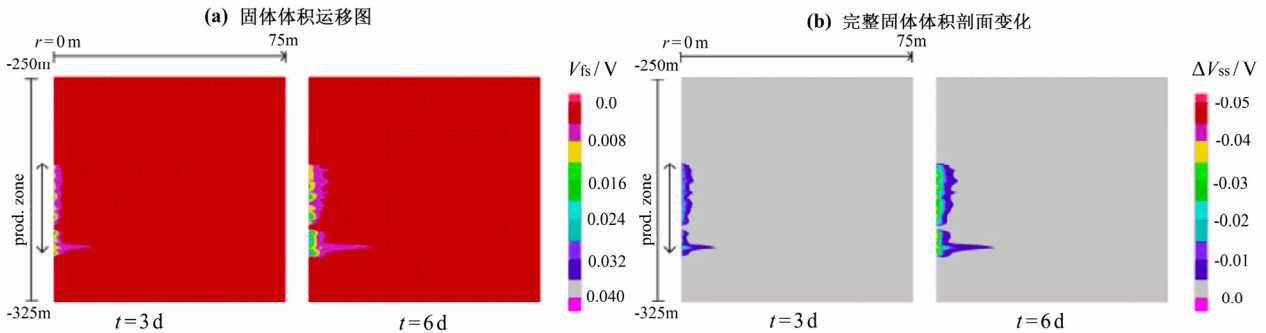


图 10 日本水合物试采过程中沉积物中砂的运移^[36]
 Fig. 10 Sand migration of the sediments during Japan hydrate production

综上所述，由模拟可以得到天然气水合物出砂的主要影响因素为：水合物饱和度分布不均导致储层的剪切变形，进一步会导致水合物储层沉降和出砂；对于低渗储层，高生产压差是导致的井底剪切破坏是出砂主要原因，而气水运移的影响较小。

3 天然气水合物出砂研究难点

从目前的研究来看，根据水合物赋存在沉积物中表现为骨架砂泥及骨架水合物胶结在一起，游离水合物、游离泥砂等游离于骨架砂泥或骨架水合物之间，前两者皆有^[5-6,39]。

结合实验数据、数值模拟结果和生产实际，导致水合物开采过程中的出砂原因可能有：对于骨架砂泥及骨架水合物胶结的储层，骨架水合物分解会导致地层失去支撑或者联结，游离出的砂泥在流体带动和上层压力作用下产出地层，甚至导致储层沉降或坍塌而出砂；对于游离水合物、游离泥砂

的骨架砂或骨架水合物储层，水合物开采过程中产生的水会增大地层的含水率，可能降低地层粘聚力和力学强度，进而促进地层出砂；水合物快速分解出大量气体，在井筒降压抽采以及较低的地层渗透率下，会导致局部压差过大，增大的上覆应力差产生的剪切破坏可能会导致骨架砂或骨架水合物的破裂坍塌；增大的径向压差增加了对骨架砂和游离砂的推动力，导致拉伸破坏造成出砂。水合物分布不均开采过程中诱发的储层变形也有可能促进出砂。由于水合物储层以海底浅表层为主，因此松散砂整体运移出砂的情况应该被考虑^[29]。

从上面的分析发现，天然气水合物开采过程的出砂问题研究取得了一定的进展，但是还不能完全适应未来的大规模商业开采，目前还存在以下几个难点：

- (1) 水合物特殊的高压低温条件导致实验研究困难重重

相较于常规油气出砂研究,水合物出砂研究需要结合水合物特性;从已经开展的水合物出砂实验研究,水合物沉积物中的骨架水合物分解导致的储层力学强度变化是常规油气中所没有的;水合物分解的温度和压力变化比常规油气复杂,低温高压下的颗粒运移及储层骨架变化研究较少。实验中,合成含水合物沉积物样品的均一性把控较难,游离泥砂、游离水合物以及骨架砂和骨架水合物的合成可控性难度较大,降压分解过程中,结合井筒影响因素的出砂研究较少。

(2) 水合物储层出砂模拟及预测模型更为复杂

对于出砂模型,水合物分解的相态变化是常规油气中所没有的,即固态的水合物分解为气态甲烷和液态的水。固体水合物分解为液态水和气态甲烷,地层中的应力、应变、流体物料都发生巨大变化,该变化对于出砂的影响,在现有的出砂模型中未有有效的实验验证和理论支撑。与现场尺度的水合物出砂预测及历史拟合性较差,如何有效的优化模型是亟待解决的问题。

(3) 现场常规出砂判断方法及预警对水合物储层适用性

出砂判断能够对出砂情况进行预警,做好及时排砂处理和防砂时机,能够降低出砂带来的损害,提高产能。目前常用的砂拱分析方法^[40],对于水合物开采过程是否适用?水合物作为固体物质对砂拱形成和破碎的作用还要进一步探讨。常规油气现场出砂的判断方法对于水合物地层是否适用性?常用的现场观测法(岩心观察、DST测试和临井状态)和经验法(声波时差法、G/cb法和组合模量法)都没有水合物模块的开发和应用。

4 我国天然气水合物开采出砂问题研究面临的挑战

我国目前发现的海洋水合物储层主要为粘土质粉砂储层,其平均粒径 $20 \sim 60 \mu\text{m}$ ^[3,5,41-42],远远小于日本2013年水合物试采充填的砾石尺寸(平均粒径为 $450 \mu\text{m}$)及其试采的出砂粒径($120 \mu\text{m}$ 左右)^[28];同时我国海洋水合物储层主要在海底浅表地层^[8],为三浅地层灾害多发区。因此我国水合物储层的沉积物颗粒更细,该细颗粒在开采过程中运移更加容易;海底浅表地层稳定性差,水合物分解后,其地层强度可能会下降更为明显而导致出砂。

结合目前已知的海域水合物储层粒度来看,都是我国常规油气防砂方法的极限^[43-48],对于粘土质粉砂储层尽管有适度出砂理论:在产能和砂处理量允许的情况下,将防砂要求由3%产砂量适度扩大到8%产砂量,对 $40 \mu\text{m}$ 以下的砂不防。但是我国水合物储层为高含粘土质粉砂的储层,其适度出砂产量可能会很大。从日本2017年第二次试采的报道来看^[49]:贝克休斯公司的GeoFORM防砂系统被开发应用于细颗粒储层防砂,其防砂精度为 $40 \mu\text{m}$,而我国水合物储层小于 $40 \mu\text{m}$ 的粒度数量大于80%^[3]。值得庆幸的是,2017年我国的“流体抽采法”的水合物试采,采用自主研发的防砂技术,没有出现严重的出砂情况;但值得注意的是,影响出砂的重要因素之一产水量也极少,可能不足以驱动大规模出砂,然而未来随着气体产量达到 $10 \text{万 m}^3/\text{d}$ 的工业产气量,其产水量增加、流体流速增大和生产压差增大都有可能增加出砂风险,同时长期试采的防砂有效性有待验证。另一方面,2017年我国的“固态流化法”的水合物试采,虽然采用水合物、水、砂泥和气一起抽取到举升管分离的技术,避免了井筒出砂的问题,但是其也存在未来产气量达到工业产气量后,举升管对于气、水、砂泥和水合物分离能力的考验,以及长期试采的分离效果。李彦龙等^[11]总结水合物开采过程中动态相变条件下影响地层出砂因素的基础上,探讨了目前常规油气井出砂预测技术及防砂技术、稠油出砂冷采技术、适度防砂技术对水合物井出砂治理的启示及需要解决的关键问题,对我国水合物出砂预测技术及防砂技术有一定启发。但是,天然气水合物商业开采是一个系统工程,目前试采工程采用的水合物开采方法及防砂方法能否直接用于商业开采还需要进一步研究和验证。

5 结论与建议

随着各国天然气水合物成功试采,一部分防砂技术得到了验证,取得了宝贵的经验,但是,天然气水合物商业开采是一个系统工程,目前试采工程采用的水合物开采方法及防砂方法能否直接用于商业开采还需要进一步研究和验证。同时,我国目前发现的海洋水合物储层多为粘土质粉砂储层^[3,5-8],相较于日本水合物的中粗砂储层,出砂问题更为复杂,目前天然气水合物出砂实验研究没有系统的揭

示水合物出砂规律和机制；在水合物出砂的模拟及预测上，水合物的流固耦合模拟存在物质的气液固三相转化，骨架水合物的分解过程中对储层稳定性的影响以及细颗粒在低温高压情况下的运移规律。水合物分解的相态变化是目前建立对储层出砂模拟和进行井壁防砂模拟的关键。在商业化开采之前，水合物出砂的判断方法、早期预警和防砂的技术措施也需要进一步完善和开发。

出砂是水合物商业化开采过程中不可避免的问题，因此，在借鉴他国的相关技术与经验的同时，结合我国水合物储层的实际特征，开展针对性的实验研究和数值模拟，不仅能够加快我国天然气水合物试开采及商业开发进度，同时也能为深海油气等出砂研究提供参考。

参考文献：

- [1] SLOAN JR E D, KOH C. Clathrate hydrates of natural gases[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [2] 中国地质调查局成果快讯. 海域天然气水合物试采取得圆满成功[EB/OL]. <http://www.cgs.gov.cn/xxfw/cbkw/bk/zgdz/>.
- [3] 周守为, 陈伟, 李清平, 等. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展[J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 1-8. DOI: 10.11935/j.issn.1673-1506.2017.04.001.
- [4] COLLETT T, BAHK J J, BAKER R, et al. Methane hydrates in nature—current knowledge and challenges[J]. Journal of chemical & engineering data, 2015, 60(2): 319-329. DOI: 10.1021/je500604h.
- [5] 张辉, 卢海龙, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域沉积物颗粒对天然气水合物聚集的主要影响[J]. 科学通报, 2016, 61(3): 388-397.
- [6] 乔少华, 苏明, 杨睿, 等. 海域天然气水合物钻探研究进展及启示: 储集层特征[J]. 新能源进展, 2015, 3(5): 357-366. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.05.007.
- [7] 苏明, 匡增桂, 乔少华, 等. 海域天然气水合物钻探研究进展及启示(I): 站位选择[J]. 新能源进展, 2015, 3(2): 116-130. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.02.007.
- [8] 孙宝江, 张振楠. 南海深水钻并完井主要挑战与对策[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 1-7. DOI: 10.11911/syztjs.201504001.
- [9] GROVER T, HOLDITCH S A, MORIDIS G, et al. Analysis of reservoir performance of Messoyakha Gas hydrate Field[R]. ISOPE-I-08-399. Vancouver, Canada: International Offshore and Polar Engineering, 2008.
- [10] GROVER T. Natural gas hydrates—issues for gas production and geomechanical stability[D]. Texas, USA, Texas A&M University, 2008.
- [11] 李彦龙, 刘乐乐, 刘昌岭, 等. 天然气水合物开采过程中的出砂与防砂问题[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(7): 36-43. DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.07005.
- [12] HABERER R M, MANGELSDORF K, WILKES H, et al. Occurrence and palaeoenvironmental significance of aromatic hydrocarbon biomarkers in Oligocene sediments from the Mallik 5L-38 gas hydrate production research well (Canada)[J]. Organic geochemistry, 2006, 37(5): 519-538. DOI: 10.1016/j.orggeochem.2006.01.004.
- [13] Japan Oil, Gas and Metals National Corporation. Petroleum development recent situation: sediment phenomena mechanism and countermeasures/ how to prevent sediment disorder[EB/OL]. http://www.jogmec.go.jp/library/recommend_library_10_000047.html.
- [14] YAMAMOTO K, DALLIMORE S R. Aurora-JOGMEC-NRCan Mallik 2006-2008 gas hydrate research project progress[R]. Fire in the Ice, Methane Hydrate Newsletter. [S.l.]: National Energy Technology Laboratory, 2008.
- [15] 张炜. 天然气水合物开采方法的应用——以 Ignik Sikumi 天然气水合物现场试验工程为例[J]. 中外能源, 2013, 18(2): 33-38.
- [16] QIU K B, YAMAMOTO K, BIRCHWOOD R, et al. Well-integrity evaluation for methane-hydrate production in the Deepwater Nankai trough[J]. SPE drilling & completion, 2015, 30(1): 52-67.
- [17] TERA O Y, DUNCAN M W, HAY B, et al. Deepwater methane hydrate gravel packing completion results and challenges[R]. OTC-25330-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [18] CHEE S, LEOKPRASIRTKUL T, KANNO T, et al. A deepwater sandface monitoring system for offshore gas hydrate[R]. OTC-25328-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [19] YAMAMOTO K, TERA O Y, FUJII T, et al. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the eastern Nankai Trough[R]. OTC-25243-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [20] 张炜, 邵明娟, 田黔宁. 日本即将实施第二次近海甲烷水合物试采[EB/OL]. (2017-04-17). http://www.mlr.gov.cn/xwdt/kyxw/201704/t20170417_1498752.htm.
- [21] MATSUZAWA M, TERA O Y, HAY B, et al. A completion system application for the world's first marine hydrate production test[R]. OTC-25310-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [22] 张卫东, 王瑞和, 任韶然, 等. 由麦索雅哈水合物气田的开发谈水合物的开采[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(4): 94-96. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0890.2007.04.029.
- [23] 付强, 周守为, 李清平. 天然气水合物资源勘探与试采技术研究现状与发展战略[J]. 中国工程科学, 2015, 17(9): 123-132. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2015.09.020.
- [24] OYAMA H, NAGAO J, SUZUKI K, et al. Experimental analysis of sand production from methane hydrate bearing sediments applying depressurization method[J]. Journal of MMIJ, 2010, 126(8/9): 497-502. DOI: 10.2473/journalofmmij.126.497.
- [25] BOSWELL R, COLLETT T S. The gas hydrates resource pyramid[J]. Fire in the ice, 2006, 6(3): 5-7.
- [26] MIYAZAKI K, MASUI A, SAKAMOTO Y, et al. Triaxial compressive properties of artificial methane-hydrate-bearing sediment[J]. Journal of geophysical research: solid earth, 2011, 116(B6): B06102. DOI: 10.1029/2010JB008049.

- [27] JUNG J W, JANG J, SANTAMARINA J C, et al. Gas production from hydrate-bearing sediments: the role of fine particles[J]. *Energy & fuels*, 2012, 26(1): 480-487. DOI: 10.1021/ef101651b.
- [28] SUZUKI S, KUWANO R. Evaluation on stability of sand control in mining methane hydrate[J]. *Production research*, 2016, 68(4): 311-314.
- [29] MURPHY A, SOGA K, YAMAMOTO K. A laboratory investigation of sand production simulating the 2013 Daini- Atsumi Knoll gas hydrate production trial using a high pressure plane strain testing apparatus[C]//*Proceedings of the 9th International Conferences on Gas Hydrate*. Denver, Colorado, USA: ICGH9, 2017.
- [30] LEE J, AHN T, LEE J Y, et al. Laboratory test to evaluate the performance of sand control screens during hydrate dissociation process by depressurization[R]. ISOPE-M-13-035. Szczecin, Poland: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
- [31] MORIDIS G, COLLETT T S, POOLADI-DARVISH M, et al. Challenges, uncertainties, and issues facing gas production from gas-hydrate deposits[J]. *SPE reservoir evaluation & engineering*, 2011, 14(1): 76-112. DOI: 10.2118/131792-PA.
- [32] RUTQVIST J, MORIDIS G J. Numerical studies on the geomechanical stability of hydrate-bearing sediments[J]. *SPE journal*, 2009, 14(2): 267-282. DOI: 10.2118/126129-PA.
- [33] KLAR A, UCHIDA S, CHARAS Z, et al. Thermo-hydro-mechanical sand production model in hydrate-bearing sediments[C]//*Proceedings of the International EAGE Workshop on Geomechanics and Energy*. Lausanne: EAGE, 2013.
- [34] ZHOU M L, SOGA K, XU E M, et al. Numerical study on eastern Nankai trough gas hydrate production test[R]. OTC-25169-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [35] XU E M, SOGA K, ZHOU M L, et al. Numerical analysis of wellbore behaviour during methane gas recovery from hydrate bearing sediments[R]. OTC-25208-MS. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 2014.
- [36] UCHIDA S, KLAR A, YAMAMOTO K. Sand production modeling of the 2013 Nankai offshore gas production test[C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics*. Kiel, Germany: [s.n.], 2016.
- [37] NING F, SUN J, LIU Z, et al. Prediction of sand production in gas recovery from the Shenhu hydrate reservoir by depressurization[C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Gas Hydrate*. Denver, Colorado, USA: ICGH9, 2017.
- [38] RUTQVIST J, MORIDIS G J, GROVER T, et al. Coupled multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from oceanic hydrate-bearing sediments[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2012, 92-93: 65-81. DOI: 10.1016/j.petrol.2012.06.004.
- [39] 苏明, 乔少华, 魏伟, 等. 墨西哥湾天然气水合物油气系统[J]. *新能源进展*, 2013, 1(2): 179-186. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2013.02.010.
- [40] 周守为, 孙福街. 疏松砂岩油藏出砂管理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [41] 沙志彬, 梁金强, 苏丕波, 等. 珠江口盆地东部海域天然气水合物钻探结果及其成藏要素研究[J]. *地学前缘*, 2015, 22(6): 125-135. DOI: 10.13745/j.esf.2015.06.009.
- [42] 卜庆涛, 胡高伟, 业渝光, 等. 天然气水合物成藏体系研究进展[J]. *新能源进展*, 2015, 3(6): 435-443. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.06.005.
- [43] 王星. 海上油田高级优质筛管适度出砂防砂设计准则研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [44] 王利华, 楼一珊, 邓金根, 等. 深水浅层气田防砂方式优选及防砂参数优化[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(1): 98-102. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0890.2013.01.019.
- [45] 邓金根, 李萍, 周建良, 等. 中国海上疏松砂岩适度出砂井防砂方式优选[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 676-680. DOI: 10.7623/syxb201204020.
- [46] 邓金根, 郑勋, 闫新江, 等. 深水气田防砂方案优选试验研究[J]. *断块油气田*, 2012, 19(3): 382-385.
- [47] 赵彩庭, 邓金根, 王利华. 砂岩气藏出砂临界压差预测方法[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2011, 8(6): 44-46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1409.2011.06.014.
- [48] 王利华, 邓金根, 周建良, 等. 弱固结砂岩气藏出砂物理模拟实验[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 1007-1011.

作者简介:

卢静生(1988-),男,博士,助理研究员,主要从事天然气水合物及海洋油气工程研究。

李栋梁(1976-),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事天然气水合物研究。