



您现在的位置: 首页 > 新闻动态 > 学术前沿

新闻动态

- 图片新闻
- 头条新闻
- 通知公告
- 学术活动
- 综合新闻
- 科研动态
- 研究亮点
- 学术前沿

【前沿论坛】许天福：海洋天然气水合物优化开采及储层力学稳定性评价

2019-10-12 | 【大 中 小】【打印】【关闭】

报告人：许天福 | 整理：刘丽楠（页岩气室）

一、天然气水合物资源潜力及开采前景

天然气水合物，也称“可燃冰”，是在低温高压条件下，由甲烷和水结合而成的似冰状化合物，主要分布在海洋大陆架边缘和陆地冻土区。1778年，英国化学家在实验室合成了二氧化硫的水合物；1811年，Davey合成了含氢气的水合物；1934年美国科学家首次在输气管道中发现天然气水合物，它堵塞了管道，影响天然气输送；直到20世纪80年代，水合物被视作能源以来，水合物调查研究才得以快速发展，美、日、俄、加、英、德等国以及欧盟均投入巨资进行水合物调查研究，印度、韩国等也奋起直追。全球在浅海沉积区和陆域冻土区均已获取水合物实物样品，国际深海钻探包括DSDP、ODP、IODP和ICDP等。全球已获取水合物实物样品和推测存在水合物的区域分布如图1所示。通过研究样品发现，自然界中的天然气水合物可以分为块状水合物、分散状水合物、结核状水合物和脉状水合物（图2）。天然气水合物资源金字塔模型定性揭示了各种类型水合物储层的资源潜力和开采难度之间的关系，并在一定程度上为今后水合物试采靶区的选择指明了方向。

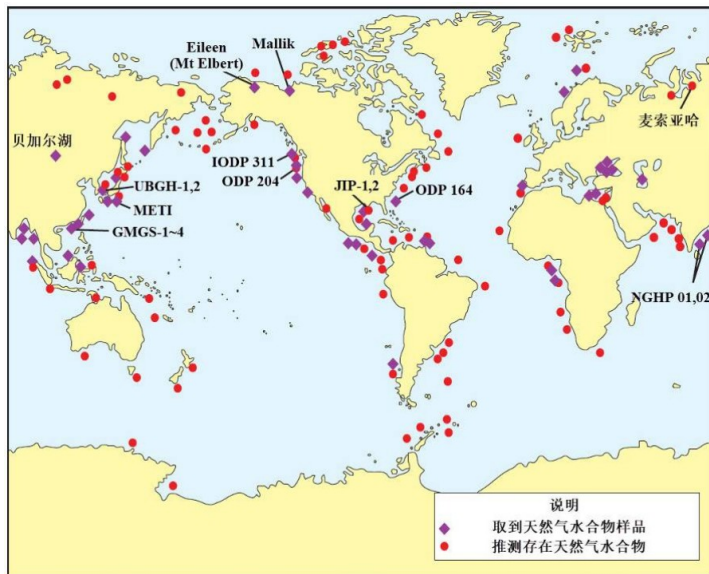


图1 全球已获取水合物实物样品和推测存在水合物的区域分布图

块状水合物



分散状水合物



结核状水合物



脉状水合物



图2 天然气水合物样品

天然气水合物的储量巨大，初步预测碳含量是煤、石油、天然气等常规化石能源的2倍，将改变现有的能源市场。我国海域陆域均有天然气水合物发育，初步评价我国海域水合物资源量约为800亿吨当量。通过GMGS1-GMGS3航次调查，在南海圈定了6个成矿远景区、25个有利区块和24个钻探目标区。通过钻探调查，锁定两个超千万方水合物矿藏。

天然气水合物资源量巨大，但受不同矿藏和储存形式的限制，开采具有很多挑战。全球诸多国家都进行天然气水合物的试验性开采，主要包括加拿大的冻土区、美国的阿拉斯加、墨西哥湾、日本、印度和中国等。天然气水合物原位开采的思路是原位打破相平衡使其发生分解，从而回收可流动甲烷气体，主要方法包括降压法、加热法、抑制剂和置换等方法，其中降压法是目前的主流方法，例如日本Nankai海槽的天然气水合物降压开采，降压开采持续时间6天，日均产气率20000ST m³，日均产水率200m³，累计产气量为120000ST m³，因地层出砂而停产。

我国天然气水合物主要分布在南海，水合物下伏地层分布有天然气，GMGS(2007)航次成功取得天然气水合物样品。中国南海的天然气水合物开采是目前时间最长的一次开采。南海神狐海域为主要开采试验区，持续60天，最高日产量35000STm³，累计产气量为300000STm³地质条件主要为泥质粉砂，进行流体开采。中国神狐海域2017年试采“四维一体”环境综合监测系统，持续产气时间最长，累计产气量最大，气流稳定，环境安全(图3, 图4)。

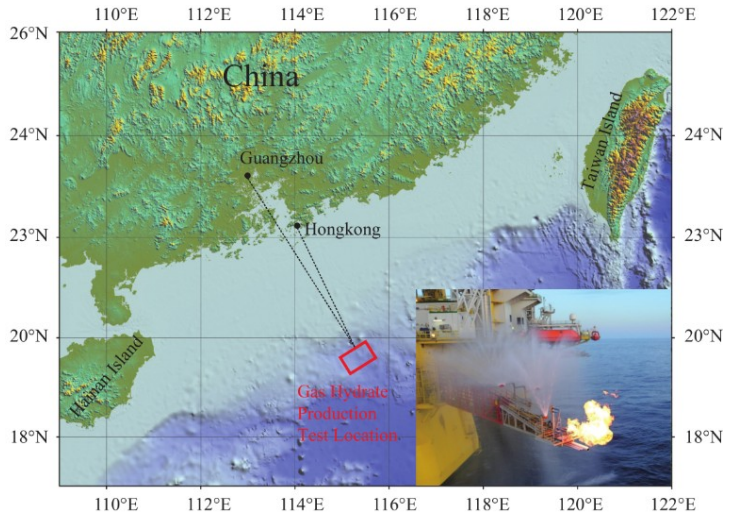


图3 中国南海神狐海域2017年水合物试采区域位置

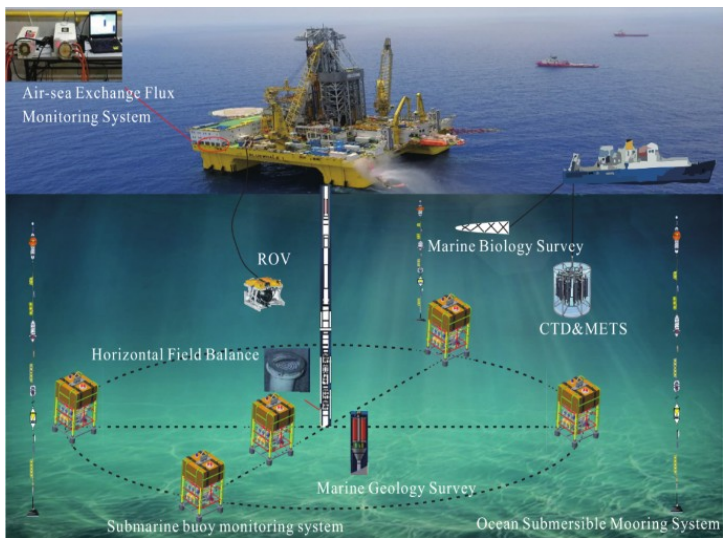


图4 中国南海神狐海域2017年试采“四维一体”环境综合监测系统

中国祁连山地区分布有陆域水合物，但资源分布有限，只分布在裂隙中，最高日产量约136STm³。祁连山冻土区2011年(图5)用单直径降压联合注热法进行水合物试采，降压开采阶段持续84小时，累计产气量为82STm³，降压和注热开采阶段持续9天，累计产气101小时，累计产气量为95STm³。2016年(图6)进行“山字型”水平对接井水合物试采，SK-0井为排水降压主井，累计产气量23天，最高日产气量136.6 ST m³，累计产气量为1078.4STm³。

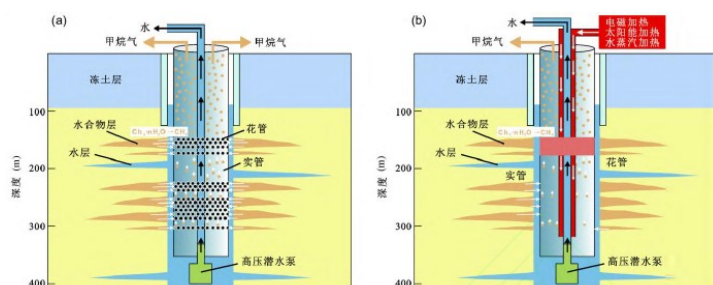


图5 祁连山冻土区2011年单直径降压联合注热水水合物试采原理示意图

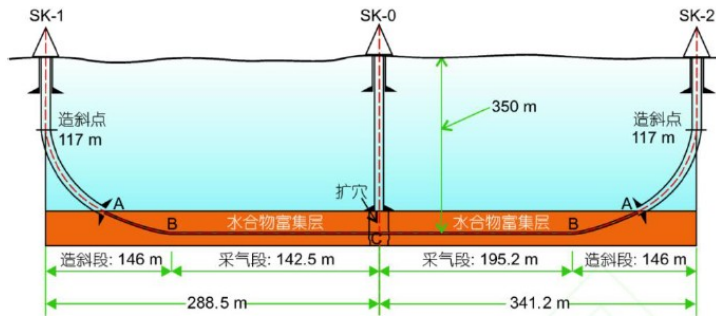


图6 祁连山冻土区2016年“山字型”水平对接井水合物试采原理示意图

天然气水合物的开采涉及到钻采工程技术、产能潜力评价、开采方案设计、环境影响效应和地质灾害风险等诸多问题，研究的前提是多相渗流理论，研究的关键是对地质力学特性的研究。其中，钻采工程技术包括钻井完井技术、储层改造技术、人工举升技术、管道流动保障、降压联合注热技术；产能潜力评价包括开采潜力分析、长期产能预测；生产井设计、监测井设计、射孔位置设计、降压方案设计；环境影响效应包括海洋生态环境、大气环境影响；地质灾害风险包括海底滑坡、地层沉降变形和地层产砂堵塞。

水合物的孔隙度的动态变化会导致渗透率的动态变化，是一个复杂的动态系统，产能预测具有诸多挑战。可以通过机理分析、数学表达、模拟技术和现场应用对天然气水合物的多相渗流进行研究和验证。开采理论包括开采过程储层多相渗流机理和开采过程地层力学行为机理。水合物开采数值模拟技术包括水-热(TH)耦合模拟、水-热-力(THM)耦合模拟、水-热-化学(THC)耦合模拟、井筒-储层耦合模拟和大型并行计算方法。数值模拟参数根据室内渗流试验、压差试验、岩石力学实验和场地试验获取。最后，将理论基础和数值模拟的研究应用日本NanKai海槽和中国南海神狐海域。

天然气水合物开采涉及到井储层改造、壁稳定性问题、海底面沉降和海底滑坡等多方面的地质力学问题。

二、天然气水合物多相渗流基础理论及水合物开采地质力学行为

1. 天然气水合物多相渗流基础理论

天然气水合物系统包括液相、冰相、气相和水合物相。水合物分解涉及到孔渗条件和渗流场。孔渗条件包括孔隙度（有效应力增加、热膨胀特性）、绝对渗透率（颗粒表面、孔隙中心、胶结于孔喉、大颗粒）、相对渗透率（相饱和度）和毛细压力（临界液体饱和度、毛细负压）。渗流场包括温度场、压力场和应力场。

(1) 水合物地层孔隙度演化：水合物分解过程会产生自由气体造成孔压变化，伴随的吸热反映会产生温度变化。通过水合物分解和有效应力变化综合反映水合物储层开采过程中，相态变化、岩石骨架变形和储层应力状态变化及对孔隙度的影响。

(2) 水合物地层渗透率演化：水合物相、冰相演化对多孔渗流通道有改造，采用含水合物沉积物多孔基质平行毛管渗流模型进行研究。

(3) 水合物地层多相流-相对渗流

(4) 水合物地层多相流-毛细压力

(5) 水合物地层有效多相渗流参数获取：室内岩心试验→场地渗流试验→实验数据获取→数值试验→模型选择→多相渗流参数校正。

2. 水合物开采地质力学行为

水合物分解包括力学场参数演化（剪切模量、体积模量、泊松比和弹性模量）、应力应变关系（弹性本构模型、弹塑性本构模型）、沉降变形机制（岩土体压密、剪切破坏）、储层产砂机理（颗粒脱离骨架、颗粒迁移过程）。

(1) 含水合物地层力学特征影响因素包括水合物饱和度、水合物赋存模式、地层围压、地层温度和加载速率等。

(2) 水合物地层会引发海底面塌陷、斜坡失稳、大规模气体泄漏和井壁失稳破坏等地质灾害。

(3) 水合物开采受到海平面升降、全球温度升高、地震、海啸、海底基础设施、钻井扰动和海洋资源开采等多方面的天然/工业活动诱发因素。

(4) 水合物开采地层井壁稳定性问题。

水合物分解井周有效应力变化、力学性质减弱、剪应力增强、套管破坏变形。

(5) 水合物开采诱发海底面沉降、滑坡问题：水合物分解诱发海底滑坡、造成大规模甲烷气体泄漏，并进一步诱发海啸。

三、天然气水合物数值模拟技术开发及应用

数值模拟分析过程涉及采用传热-流动过程全耦合数学模型 (TOUGH+Hydrate)，岩土力学过程数学模型 (3D Biot)，井筒应力状态计算、含水合物沉积层力学性质刻画、岩体破坏准则和时空数值离散等多方面的分析计算。

其中，(1) 传热-流动过程全耦合数学模型包括质量能量守恒控制方程、质量积累项、质量流动项，相组成包括液相、气相、水合物相和冰相，组分包括水、甲烷、水合物、盐和热；(2) 岩土力学过程数学模型包括应力平衡控制

方程、几何方程、本构方程；(3) 井筒应力状态计算分析了径向应力、切向应力和垂向应力；(4) 含水合物沉积层力学性质刻画考虑了含水合物沉积层的粘弹性、弹性模量、内聚力、泊松比和内摩擦角。

经验证，程序的数值解与解析解吻合度很高，将研究结果应用到了日本Nankai海槽(图7)和中国南海富泥质储层水平井优化开采(图8)。

□ 场地概况-日本Nankai海槽

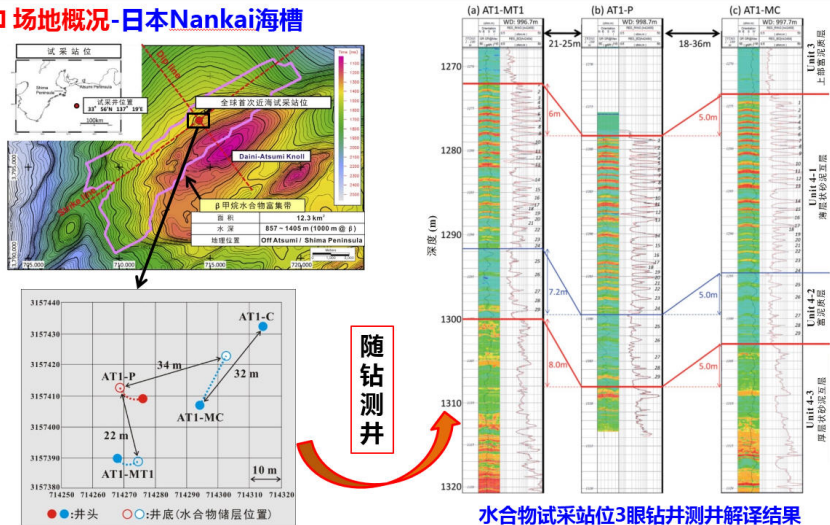


图7 日本Nankai海槽应用

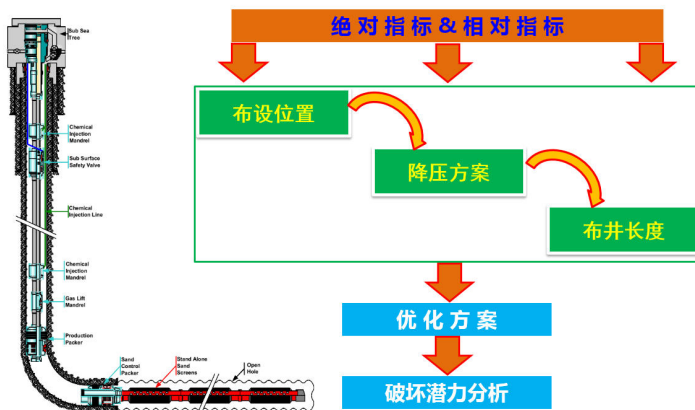


图8 中国南海富泥质储层应用

通过数值模拟技术，研究了地层的沉降特征发现：海底面形成漏斗状沉降区域，降压开采1年最大沉降量0.28m，射孔段下伏地层出现微小隆升现象。降压初期为快速沉降阶段，前67天海底面沉降量占1年开采累计沉降量的50%。降压初期是预防破坏的关键时期，试采期间应采用逐步缓慢降压方案。

- (1) 温度场时空演化对比结果表明由于局部低渗透质层阻水作用，富水合层形成有效降压。
- (2) 压力场时空演化结果表明受泥质层限制，砂质层内形成有效降压。
- (3) 传热作用对比表明泥质层具有有效的传热作用，相对于单一厚层水合物藏，成层非均质水合物储层更有利于降压开采。
- (4) 井周地层应力状态及破坏潜力分析，井筒降压引起地层有效应力快速增加、井周地层应力集中并迅速出现剪切应力、应力路径显示井周地层破坏潜力增加
- (5) 水平井降压地层沉降特征：水平井群降压开采，后期海底面显示整体下沉趋势。水平井下部地层出现局部隆升，局部不规则变形应注意套管稳定。

紧密围绕水合物开采特征，开发耦合岩土力学分析模块的数值模拟程序HydrateBiot，为我国海洋水合物开采产能评价和地层力学稳定性分析提供改进的工具和方法。

基于现场水合物试采过程模拟，发现成层非均质水合物储层相对于单一厚层水合物储层更有利于降压开采，为今后我国海洋水合物试采靶区选择和射孔方案设计提供了理论基础，

首次对南海泥质粉砂型水合物储层进行系统的水平井降压开采方案优化与产能评价，基于井周剪应力分析，揭示水平开采地层优势出砂位置，提出固结井周地层骨架和预防地层出砂的工程措施。

四、前景展望

在报告的最后，许教授总结了水合物开采的数值模拟研究可以用于储层非均质性刻画、储层参数反演识别、三维地质模型构建、生产设计、监测井布井方案设计、射孔位置、长度设计、水平井开采潜力评价和水合物开采相关地质力学行为预测等多方面，并指出在并行井筒-储层热流固耦合数值模拟程序开发、水合物开采地层出砂-井筒防

砂分析方面具有很好的前景，积极探索不同的水合物增产机制与增产方法，为实现水合物的安全高效开采奠定基础。

相关新闻

- 吉林大学许天福院长来所交流并作学术报告 [2019-07-12]



地址：北京市朝阳区北土城西路19号 邮编：100029 电话：010-82998001 传真：010-62010846
版权所有© 2009-2019 中国科学院地质与地球物理研究所 京ICP备05029136号 京公网安备110402500032号

