

引用本文: 樊奇, 付强, 郭刚, 等. 海洋砂质水合物研究进展、勘探流程和难点挑战[J]. 石油实验地质, 2025, 47(2): 235-247. DOI: 10.11781/sysydz2025020235.

FAN Qi, FU Qiang, GUO Gang, et al. Research progress, exploration process, and challenges in marine sandy hydrates[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(2): 235-247. DOI: 10.11781/sysydz2025020235.

海洋砂质水合物研究进展、勘探流程和难点挑战

樊奇^{1,2}, 付强^{1,2}, 郭刚¹, 朱振宇¹, 庞维新^{1,2}, 李清平², 卓海腾³

1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028;
2. 海洋天然气水合物全国重点实验室, 北京 100028;
3. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082

摘要: 天然气水合物是海洋能源的重要开拓领域, 但南海泥质粉砂型水合物的技术和经济门槛高、开发潜力争议大。梳理了近 20 年中国、美国、日本在海域砂质水合物勘探中取得的重要进展和观点, 对 3 种主要水合物类型(泥质粉砂孔隙充填型、泥质粉砂裂隙充填型、砂质孔隙充填型)进行论述, 结合实例梳理了砂质水合物在岩心、测井、实验角度的特点, 介绍了“水合物成藏系统”的勘探评价步骤, 讨论了非成岩储层评价、温度—压力变化、地质力学、保压取心等难题挑战。结果表明, 砂质孔隙充填型水合物(可拓展至粉砂粒级)是目前唯一具备经济价值的水合物类型, 具有饱和度高(40%~90%)、电阻率高、地层强度高、石英含量偏高(56%~77%)、粒度中值偏高(约 56~87 μm)等特点, 多为白灰色、黑灰色分选均匀的粉砂状沉积, 有明显磨砂感, 发育孔洞构造。应当加强“水合物成藏系统”在砂质水合物勘探中的推广应用, 进一步攻关非成岩储层评价、温度—压力变化引起的相变、复杂的地质力学问题、保压取心技术等问题。重新审视水合物的资源价值, 以期为“两气合采”工作提供理论基础和科学参考。

关键词: 砂质水合物; 勘探评价; 资源潜力; 天然气水合物

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2025020235

Research progress, exploration process, and challenges in marine sandy hydrates

FAN Qi^{1,2}, FU Qiang^{1,2}, GUO Gang¹, ZHU Zhenyu¹, PANG Weixin^{1,2}, LI Qingping², ZHUO Haiteng³

1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;
2. State Key Laboratory of Gas Hydrate, Beijing 100028, China;
3. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China

Abstract: Natural gas hydrates are a key area of development in marine energy resources. However, the technical and economic barriers for muddy silt gas hydrate exploration in the South China Sea are high, and their resource potential remains controversial. This paper reviews the significant advancements achieved in China, the United States, and Japan over the past 20 years in the exploration of marine sandy hydrates. It discusses three primary hydrate types, i. e., muddy silt pore-filling, muddy silt fracture-filling, and sandy pore-filling hydrates, and summarizes the characteristics of sandy hydrates based on core samples, well logging, and laboratory findings. This paper presents the exploration and evaluation procedures for the “hydrate accumulation system” and discusses the challenges such as non-diagenetic reservoir evaluation, temperature–pressure variations, geomechanics, and pressure-preserved coring. Results reveal that sandy pore-filling hydrates (extendable to silt-sized particles) are currently the only hydrate type with economic value, characterized by high saturation (40% to 90%), high resistivity, strong formation strength, high quartz content (56% to 77%), and higher median particle size (approximately 56 to 87 μm). Those hydrates are typically well-sorted silty deposits in white–gray or black–gray, with a frosted texture and pore structure development. It is recommended to enhance the popularization and application of the “hydrate accumulation system” in the exploration of sandy hydrates and further address the issues in non-diagenetic

收稿日期 (Received): 2024-07-11; 修订日期 (Revised): 2025-01-03; 出版日期 (Published): 2025-03-28.

作者简介: 樊奇 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气和水合物资源勘探和评价。E-mail: xjufq@sina.com.

通信作者: 付强 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事海洋油气田开发相关科研和管理。E-mail: fuqiang@enooc.com.cn.

基金项目: 中国海油海洋天然气水合物全国重点实验室主任基金 (2024)、国家重点研发计划 (2021YFC280090302) 和国家自然科学基金企业联合项目 (U20B6005) 联合资助。

reservoir evaluation, phase transitions due to temperature-pressure changes, complex geomechanical problems, and pressure-preserved coring technology. In conclusion, a reassessment of hydrate resource value is needed to provide a theoretical and scientific basis for the co-production of natural gas and gas hydrates.

Key words: sand hydrate; exploration and evaluation; resource potential; natural gas hydrates

天然气水合物是海洋能源的新兴开拓方向,主要发现于 20 世纪 70~80 年代全球能源危机时期^[1-2]。20 世纪 90 年代,全球首个评估水合物海底模拟反射层(Bottom Simulating Reflector,BSR)和资源潜力的 ODP164 航次在加拿大温哥华岛开展,并在北大西洋西部布莱克海岭确认了水合物内部具备大量气体的储集能力(1:164)。各国争相占领这一高地,特别是美国和日本曾力推水合物以改变其能源结构,增强能源安全^[3-5]。但是,近年来页岩油气、风电、氢能的出现,使水合物研究持续放缓。那么,水合物的资源价值到底如何?目前勘探进展、认识和难点是什么?是需要梳理和思考的问题。

大量数据表明,海洋水合物在广阔的厚层富泥质沉积中常是弥散式、低聚集度的^[1-2],必须经过理论、技术、工程、装备等全面深度革新,才能从资源向能源转化^[6-15]。据国际应用系统分析研究所(IIASA)数据^[3-4],满足 6~7 \$/mmBtu 的开发成本下,水合物产业化的必要条件包括:一是单井日均产气量超过 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$;二是存在原地气资源量约 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的水合物富集带。然而,大陆边缘高品质砂质储层中的技术可采水合物评估中值超过 $122 \times 10^{12} \text{ m}^3$,只占全球水合物总原地资源量的 5%^[3]。

我国南海北部深水区水合物资源量约 380 亿吨油当量,主要分布于神狐南部、琼东南南部及东沙东北部海域,多发育泥质粉砂型水合物,其成藏模式与烃源供给、输导体系密切相关^[3-4,16-17]。2017 年和 2020 年,两轮国家层面水合物试采顺利完成,虽然我国实现了泥质粉砂型水合物的安全可控开采,但是 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的日产量仅相当于海域水合物商业开发门限(日产 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$)的 1/17,资源丰度(按 $0.6 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{km}^2$)仅相当于投产深水气田(按 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{km}^2$)的 1/20,距离高效清洁可利用能源的产业化目标任重道远^[3-4,6]。

笔者参与了两轮水合物国家重点研发计划和大量现场作业,系统梳理了中国、美国、日本在砂质水合物勘探中取得的重要进展,对 3 种主要水合物类型进行分析,结合琼东南实例介绍了砂质水合物在岩心、测井、实验角度的特点,综述了水合物勘探方法和评价步骤,并对非成岩储层评价、温度—压

力敏感性、复杂的地质力学、保压取心等难点进行了讨论,以期重新审视水合物的资源价值,聚焦砂质水合物和卡脖子问题开展下一步工作。

1 世界水合物研究进展

1.1 中国南海水合物 127 专项

2017 年和 2020 年,自然资源部分别成功实施了两轮国家层面水合物试采工程,其中神狐海域第二轮水合物试采实现产气总量 $86.14 \times 10^4 \text{ m}^3$,日均产气量 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$;试采产气量虽超过日本,但与商业化开发门限(日产 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$)相差 17.4 倍;中海油于 2017 年在荔湾气田自主完成全球首次水合物固态流化试采^[6],产气 101 m^3 ,与海域商业化开发门限相差 5 000 倍,产气量远不能支撑商业化开发。

按照规划,中国正在建设珠江口(中石油)、琼东南(中海油)2 个水合物勘查开发先导示范区。珠江口盆地主要为泥质粉砂孔隙型水合物,局部富有孔虫储层饱和度达 20%~40%,在白云峡谷第四条带 W11—W17 矿体富集发育,具有“双源叠置、混源供烃、超压+底辟+断裂立体输导幕式运聚”成藏模式。在 W11 井:测井解释细粒泥质水合物层厚度 70 多 m,饱和度平均值 40%,局部高达 53%^[16]。在 W17 井:水合物富集在 210~290 mbsf,其中 210~250 mbsf 电阻率和声速曲线明显增大,表明存在 I 型水合物;250~272 mbsf 通过保压岩心证实含有 II 型水合物,并具有 II 型水合物和下伏游离气互层现象。结合声波阻抗获得水合物横向分布特征,发现水合物空间分布与储层变化、流体运聚和深部热成因气有关。

琼东南水合物在陵水 18、25、36 气田海域富集(图 1)^[18],发育多种类型水合物,以泥质粉砂裂隙型水合物为特点,近年勘探发现砂质孔隙型水合物。2019—2021 年,中海油在陵水 18 气田进行 X5、X6、X8 随钻测井和取心作业,证实气烟囱上覆海底扇充填砂质孔隙型水合物,同步开发了首套国产保压取心器和船载分析系统^[19]。钻井证实,水合物赋存在乐东组三段—四段海底扇(~1.9 Ma),稳定带深度 125~178 mbsf,压力区间 17~19 MPa,温度范围 6~23 °C;在 40~160 mbsf 赋存自由气,取心作业中气胀现象明显,水合物气源类型为混合

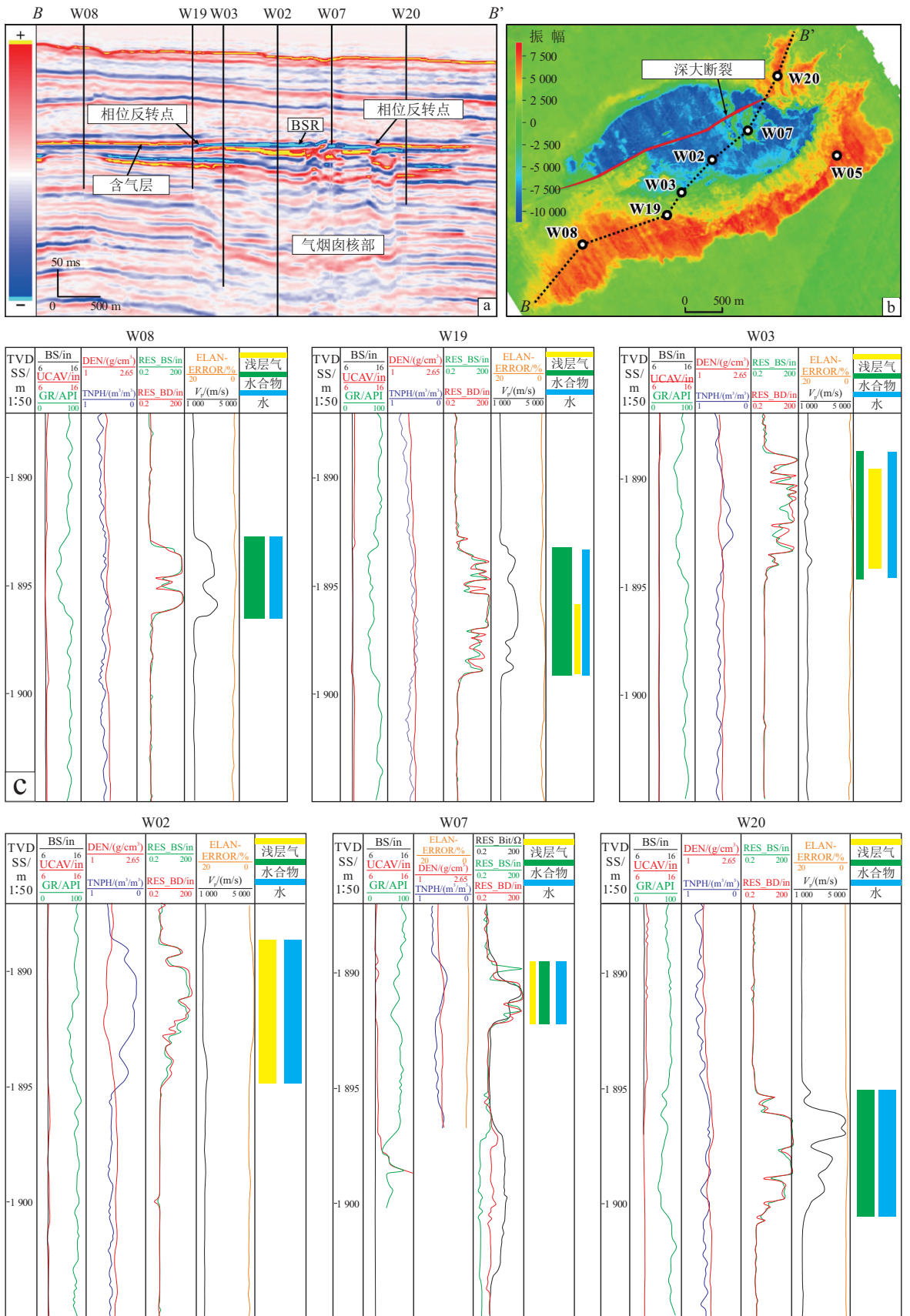


图 1 琼东南陵水 18 区 X8 矿体气烟囱上覆海底扇储层的水合物剖面 and 平面图

据参考文献 [18] 修改。

Fig.1 Profile and plan view of hydrates in submarine fan reservoirs overlying gas chimney of orebody X8 in district Lingshui 18, Qiongdongnan Basin

成因气和热成因气;X5 矿体主要发育泥质裂隙充填型水合物,粒度中值小于 30 μm ,X8 矿体主要发育砂质孔隙充填型水合物,粒度中值 60~87 μm ,含硅藻和有孔虫化石;水合物储层从原位到标况下相变明显,储层发生分解溃散并与流体耦合,证实矿体即为刚性骨架的一部分,琼东南水合物成藏模式可总结为“异地热成因气通过深大断裂运移,本地微生物气补充,气烟囱顶部聚集,两翼薄扇成藏,温压场和岩性控制富集”。在 2022—2023 年,该海域开展了 10 余口随钻测井和取心作业,均取得重要发现和认识^[6,16,19-20]:一是钻揭了一套优质砂质水合物并成功取心,预测饱和度 40%~90%,预测中值粒度 60~120 μm ,释气强烈、点火即燃、管壁低温冒汗;二是首次利用 WISION-3000 CPT 结合原位温压传感器证实变温压场对水合物赋存相态的影响,证实矿体“内气外冰”的特点。

1.2 美国冰火计划 JIP 和 UT-GOM 项目

美国是世界上最早和最系统开展甲烷水合物研究的国家,1998 年美国能源部(DOE)发布了甲烷水合物研发计划——冰火计划,并在 2000 年通过了国会 S330 和 HR1753 水合物法案。由 DOE 下设的国家能源技术实验室(NETL)组织落实,选址墨西哥湾和阿拉斯加开展钻探和试验工作,重点围绕如下领域开展研究^[21-23]:(1)水合物资源表征,重点是明确资源特性、数量、资源潜力、识别和表征过程中的储层描述技术;(2)水合物的开采技术,重点进行经济、安全开采技术研究和数值模拟;(3)水合物的环境效应,重点是通过观测数据,了解水合物在冻土区和深水区长期的安全性、海底稳定性和碳循环中的作用。

在 NETL 实验室组织下,美国在墨西哥湾开展了企业工业联合 JIP-2 项目。墨西哥湾是全球唯一发育 I、II、H 型三类水合物的地区,以 MC852/853 区块和 GC185 区块 Bush Hill 为典型海底裸漏型水合物,以构造控制的混合成因气体水合物含量最高(饱和度 20%~30%,最高 100%),具有良好的经济潜力。2009 年,雪佛龙公司对墨西哥湾泥质、砂质沉积水合物开展了一系列钻探和随钻测井,7 口井中有 6 口井证实了钻前的预期,其中 4 口井中的天然气水合物饱和度为 50%~80%,余下 2 口井的饱和度则较低。此次工作利用成藏系统理论描述了稳定带、识别了砂质水合物分布情况、证实了随钻测井的有效性,最早明确了砂质水合物的资源价值。2012 年,美国海洋能源管理局(BOEM)指出墨西哥湾高富集的砂质水合物藏天然气总量

为 $(8\sim 11)\times 10^{12}\text{ m}^3$ ^[1-2,21-23]。

2017 年 5 月,德州大学奥斯汀分校基于 JIP-2 项目指出的有利目标开展 UT-GOM2-1 航次,使用 HELIX 公司 Q4000 平台在 GC955 区块作业 2 口探井,利用保压取心和船载岩心分析技术,收获了高饱和度砂质水合物岩心,H002 井带压岩心收获率 34%,H005 井带压岩心收获率 72%,213 ft (70.3 m) 保压岩心运回德州大学保存,并用于后续研究^[21-23]。项目重点评估了地质系统中粗粒沉积物高饱和度水合物的成因和演化,同步评估地质灾害对工业生产的影响,也是目前全球砂质水合物研究的典范。

2023 年 9 月,奥斯汀分校继续组织了 UT-GOM2-2 航次^[21-23],在墨西哥湾北部 WR313 区块依托 Q4000 平台,搭载英国 Geotek 公司保压岩心分析和转移系统(Pressure Core Analysis and Transfer System,PCATS)以及多参数岩心扫描系统(Multi Sensor Core Logger-IR,MSCL-IR),对 H002 和 H003 两口探井进行常规和保压取心作业(图 2)^[23],科学目标包括:(1)砂质水合物储层单元和泥质边界地层描述,重点关注 BLUE 和 ORANGE 两套砂质水合物层的饱和度、孔隙水含量、渗透率、岩矿和土工特性;(2)建立高分辨率地球化学和沉积剖面,帮助理解水合物系统,重点是储—盖层物性、有机质、微古生物等;(3)测量原位地层温度和压力剖面,要求使用与 PCTB-CS 的 BHA 组合相接的 T2P 探针和活塞取样 APCT 传感器两种方法;(4)建立溶解甲烷浓度和气体组分深度剖面等,进一步了解砂泥地层甲烷吸附差异、运聚过程和甲烷通量等。

1.3 日本 MH21-S 项目

日本作为最早设立国家水合物研发计划的国家,于 2001 年启动 MH21 计划,由日本经济产业省、石油工团牵头组织,开展资源量评价(日本金属和能源安全组织,JOGMEC)、生产方法和模拟(日本产业技术综合研究所,AIST)、环境影响评价(日本工程振兴协会,ENAA)三大方面的工作^[3-5]。此项工作运用概率统计法,估算含水合物沉积层的甲烷气体原地资源量约为 $1.1\times 10^{12}\text{ m}^3$,包括熊野盆地、第二沃美海丘和日本东海海域,以多套快速沉积的重力流砂体为特征。促成了日本南海海槽水合物富集区圈定和两轮水合物试采实施,并参与了美国、加拿大、印度水合物研发工作,积累了丰富的技术实力和国际合作经验。

2004 年,由 JODIES RESOLUTIONS 钻探船作业,完成 3 个区域、16 个站位、32 个钻孔的钻探作

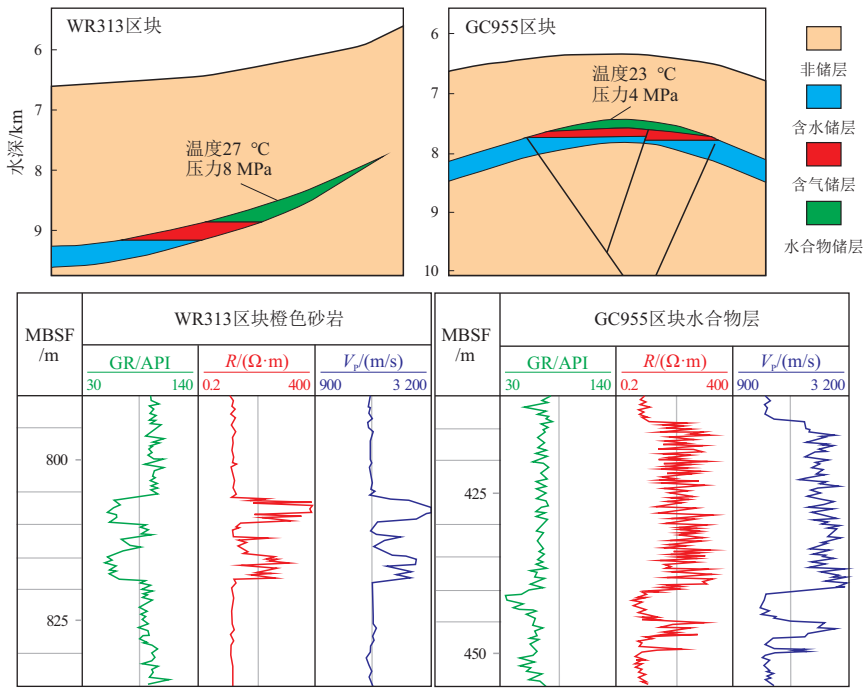


图 2 墨西哥湾 WR313 区块橙色砂岩和 GC955 区块水合物层对比
据参考文献[23]修改。

Fig.2 Comparison between orange sandstone in Walker Ridge Block 313 (WR 313) and hydrate layer in Green Canyon Block 955 (GC 955), Gulf of Mexico

业,对 16 个孔进行随钻测井、12 个孔进行常规和保压取心,证实了水合物和 BSR 具备关联性和一定的局限性,发现了砂质孔隙充填型、泥质孔隙充填型和泥质裂隙型三类水合物。根据稳定带、物性、盖层条件,选取第二沃美海丘北坡的 β 水合物富集带作为第一轮试采站位,水深 857~1 405 m,面积 12×10⁴ km²,目的层为中更新世—晚更新世形成的海底扇沉积体系中的浊积河道^[3-5]。

2012 年,由地球号 CHIKYU 钻探船实施了试采井准备工作,包括 1 口生产井(AT1-P)、2 口监测井(AT1-MC、AT1-MT1)和 1 口取心井(AT1-C),确定了一套厚 60~67 m 的浊积砂质薄互层地层,侧向连续性良好,运用 Hybrid PCS 保压技术在钻孔 AT1-C 回收 36.82 m(收获率 63%),此套取心数据帮助校正了水合物储层测井解释。这套浊积砂质薄互层包括 III 单元顶部泥质盖层、IV-1 单元上部水合物砂泥薄互层富集层、IV-2 单元中部泥质隔层和 IV-3 单元下部水合物砂泥薄互层富集层。

2013 年 3 月,日本启动第一轮海域水合物试采,累计 6 天产天然气 11.9×10⁴ m³,平均日产天然气约 2×10⁴ m³,因严重出砂被迫中断。此次试采总结中,日本特别关注了温度对水合物分解和出砂的影响以及压力降低控制不足两方面的问题。

2017 年 4 月^[1-5],日本针对第一轮试采的问题

启动第二轮水合物试采,继续由 CHIKYU 钻探船实施,目的层为 IV-1(20 m)、IV-2 和 IV-3 单元。在第一阶段(2017 年 5 月),第一口井在 12 天内生产了 4.1×10⁴ m³ 天然气,因出砂堵塞事故终止产气;在第二阶段(2017 年 6 月),第二口井在 24 天内生产了 22.3×10⁴ m³ 天然气。日本两轮试采都没有解决的问题是实际产气与预测结果存在差异,提示加强岩石物理和地质力学的相关研究,规划从试采到产业化之间至少需要 15 年的稳产示范建设期。

2021 年—2023 年 7 月,日本 MH21-S 计划(S 代表 sand)升级为针对砂质水合物的开发计划,历经三维地震调查(2021 年)、海底安全性调查、随钻测井前期调查、工程地质钻孔(2021 年—2022 年 10 月)和确认生产层段。2023 年 6 月—8 月,在志摩半岛海域利用“地球号”实施日本第三轮试采,作业 2 口生产井 SM2(水深 1 200 m)和 SM1(水深 1 400 m),试采目的为:(1)评价水合物富集带的非均质性和横向连续性,选定初始资源量达 100×10⁸ m³ 以上的试采候补站位;(2)通过简易试采,掌握水合物分解及产气特征,评价生产井能否达到单井日产 5×10⁴ m³。根据内部资料,此次试采受设备故障、钻遇非预期浅层气和防砂装置硬化堵塞等因素影响,中断作业 21 天,未实现预期目标(表 1)^[20]。日本计划在 2023—2027 财年实施民营企业牵头的

表 1 日本三次水合物试采结果对比

据参考文献[20]修改。

Table 1 Comparison of results from three hydrate production tests in Japan

要点	第一次	第二次	第三次、短期	第三次相较于前两次的差异
实施年份/区域	2013 年/南海海槽	2017 年/南海海槽	2023 年/志摩半岛	
生产井数量/水深	1 口/约 1 000 m	2 口/约 1 000 m	2 口/约 1 200 m(SM2 井)和 1 400 m(SM1 井)	深度更大
计划天数/日均产气量/日均产水量	2 周/ $10 \times 10^4 \text{ m}^3/500 \text{ m}^3$	1 个月/ $10 \times 10^4 \text{ m}^3/500 \text{ m}^3$	5 天/ $5 \times 10^4 \text{ m}^3/250 \text{ m}^3$	以确认产气和获取数据为目的
实际日均产气量/日均产水量	约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/150 \sim 200 \text{ m}^3$	$3\ 000 \sim 15\ 000 \text{ m}^3/100 \sim 500 \text{ m}^3$	失败	
降压方式/泵类型/安装位置	间接降压/电潜泵/井内	间接降压/电潜泵/井内	直接降压/电潜泵/切断装置上	简化(水合物二次生成)
生产管线/气水分离	2 条(气/水分离)/井内	2 条(气/水分离)/井内	1 条(气/水共用)/船上	
防止水合物二次生成	加热装置	抑制剂注入(乙二醇)	抑制剂连续注入(动力学水合物抑制剂)	适度、设备紧凑
切断装置	防喷器+水下测试树(300 t)	修井立管(80 t)	海底断开/中断系统(40 t)	轻量化、简化、省时(夹持器开关困难)
立管	21 吋钻井立管	9.5/8 吋套管	9.5/8 吋和 3.1/2 吋双钻杆	同上
防砂对策装置	裸眼砾石充填	已活化的 Geofom/未活化的 Geofom	未活化的 Geofom 防砂筛管	(硬化/堵塞)
传感器位置	井内/电潜泵	井内/切断装置/电潜泵	筛管外侧/井内/切断装置/电潜泵	可测量井内外压差

产业化项目,重点进行长期稳产技术和环境监测方案研究^[3-5]。

从上述经验看,海域水合物资源虽然总量巨大,但非均质性强、资源丰度低、单井产能低、采收难度大、投入成本高,并可能引发一系列连锁灾害。美、日长期聚焦砂质水合物开展工作,中国虽然已获发现,但砂体规模有限。因此,明确水合物的资源类型和勘探潜力,聚焦具有经济价值和科学价值的规模砂质水合物,是当前和今后的重点工作。

2 砂质水合物的资源特点

2.1 通行的水合物资源分类

从美国、日本、印度等地水合物研究来看,南海发现的 3 种水合物类型也是全球水合物最主要的 3 种类型^[1-2,6,16-17],图 3 展示了主要发现的水合物形态、储层类型和饱和度的关系,尽管还有其他可能类型,但都可以归属到这 3 种主要类型中。虽然这 3 种主要水合物赋存类型都能代表原位天然气资源,但在现有经济和采收技术评价方面却千差万别,只有砂质孔隙充填型水合物具备产业化条件。

第一种(A 类型)是高固有渗透率(绝对渗透率)的孔隙充填型水合物,通常储层质量较好(富砂、富粉砂、黏土沉积少量),主要形成高饱和度孔隙充填型水合物,为最具潜力目标^[1-2,6,16-17]。尽管越来越多人用砂质水合物(Gas Hydrate-Bearing

Sands)代称,但这类勘探目标包括任何一种具备高渗透率的储层。足够的储层质量可以拓展至粉砂粒级沉积,如分选好的(如阿拉斯加埃尔伯特山 Mt. Elbert),或有特殊岩矿、沉积特征的(如墨西哥湾 Alaminos Canyon 818 区块)。现有日本南海海槽和墨西哥湾记录的,已知和推测的优质水合物储层饱和度多超过 50%,最高达 90%。测井和地层测试数据表明,剩余孔隙空间通常被一定的束缚水(含量受控于储层质量)和少量的自由水(约 5%~10%)充填,使自由气并不常见。正是自由水与地层高渗透率良好匹配,使野外条件下水合物储层对降压和数模研究表现出良好反馈。

第二种(B 类型)是低固有渗透率的裂隙充填型水合物,这类水合物在气体供给充足的条件下,可以小规模充注,直至形成不同形状的水合物。墨西哥湾、印度、韩国东海的取心航次都已证实此类水合物是通过气体交替颗粒的过程赋存为脉状、核状水合物,并非当前的潜力目标^[1-2,6,16-17]。这些矿体多见于较大的、宽高比相当的圆柱形气烟囱矿藏,活动性流体向上部的孤立地层运聚,下伏气烟囱常以振幅空白带和高声波速度为特征,被解释为浅层气。气烟囱区水合物饱和度约 10%~40%,中心区水合物饱和度可超过 60%,但连续性有限(矿体多分割孤立)。此类水合物在东沙峡谷、白云峡谷、琼东南盆地较为发育,但从目前取心结果分析,

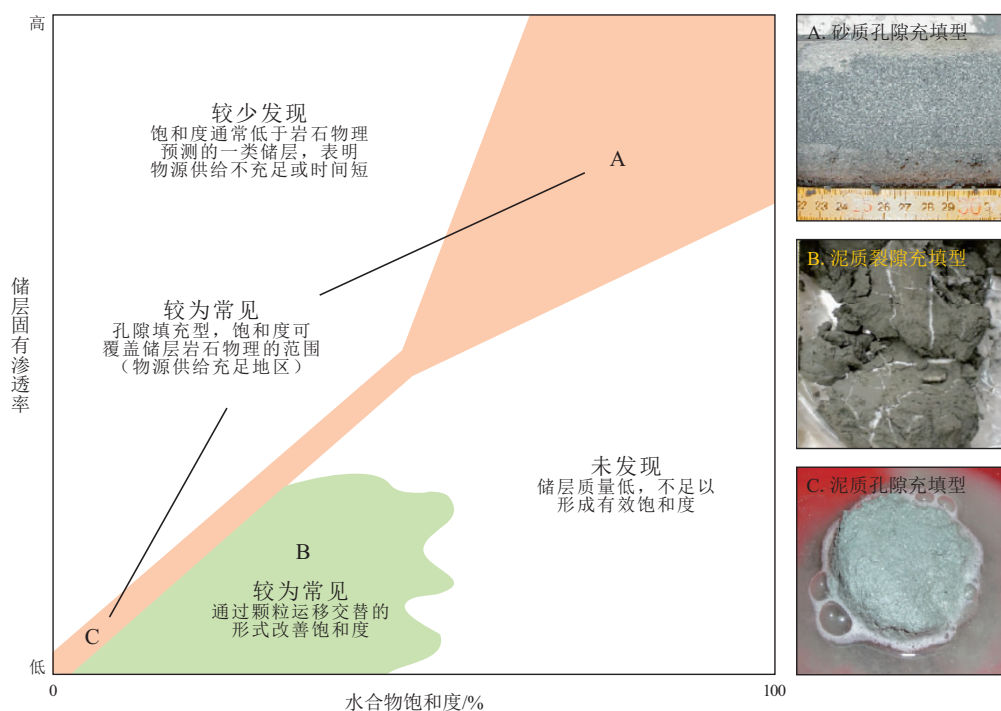


图3 全球已发现的3类典型水合物

据参考文献[1]修改。

Fig.3 Three typical types of hydrates found globally

裂隙型水合物主要在强活动的流体通道赋存, 横向连续性差(河道—天然堤沉积体系)导致预测难度大, 虽作为能源资源的技术潜力可行, 但现阶段无法规模开发。

第三种(C类型)是低固有渗透率的孔隙填充型水合物, 储层质量较差(富泥质、富黏土, 粒度中值小于 $10\ \mu\text{m}$), 这种水合物饱和度非常低, 非潜力目标^[1-2, 6, 16-17]。深海浅层沉积的主要优势是高孔隙度、低渗透率、富黏土泥质沉积。因此, 全球很大比例原位水合物资源都赋存在此类沉积地层中, 尤其是气体丰富的低质量储层, 水合物将以交替颗粒的方式增加饱和度, 非黏土组分(生物碎屑、石英粉砂)有利于增加水合物饱和度, 并在一定程度上改变储层结构, 但低饱和度(小于 10%)和富黏土沉积的本质特点没有改变。墨西哥湾、东沙、西沙、神狐、琼东南均发现了这类水合物, 虽然数量巨大, 但饱和度仅 3%~5%, 资源丰度太低。对这类储层的产气模拟表明, 依靠现有井筒采收技术将非常困难。

2.2 琼东南砂质水合物的岩心观察情况

2021—2023年, 琼东南盆地陵水 18、陵水 36 等海域砂质孔隙型水合物、富有孔虫的粉砂质水合物勘探均取得测井和取心验证。由于南海砂质水合物尚未统一识别标准, 仅以实例介绍其特点(图 4)。

陵水 18 区某矿体面积 $5\ \text{km}^2$, 厚度 6~8 m, 是一套海底扇沉积: (1) 测井解释砂质水合物饱和度较高, 约 40%~90% (泥质或泥质粉砂水合物饱和度多在 15% 以下); (2) 岩心观察砂质水合物新鲜面多呈白灰色、黑灰色粉砂状沉积(泥质水合物岩心颜色深黑), 分选均匀、粒度一致, 手触有明显的磨砂感(泥质水合物多为滑腻感), 肉眼难见白色水合物矿体, 气体采集和点火实验可正常开展, 并证实为 99.9% 高纯度甲烷; (3) 砂质水合物从原位条件到标况下分解更缓慢, 岩心从井下提至甲板面(2 h 后)依旧保持冰凉(低于 $3\ ^\circ\text{C}$), 新鲜面温度低至 $-3.9\ ^\circ\text{C}$, 见甲烷分解引起的孔洞构造(泥质水合物支撑太有限、没有孔洞构造、多呈糊状), 与未分解水合物形成对比; (4) 砂质水合物更固结、强度更高, 用取样刀很难直接插入或破碎, 多形成不规则划痕(泥质水合物可直接分块破碎); (5) 砂质水合物饱和度高于泥质水合物, 因此在电阻率上呈现高阻或连续峰值, 与上下围岩曲线截然不同; (6) 砂质水合物石英含量偏高, 约 56%~77% (泥质水合物石英含量实测低于 25%), 粒度中值偏高, 约 56~87 μm , 且 D_{50} 分布集中(泥质水合物和泥质粉砂水合物实测低于 30 μm); (7) 砂质水合物在镜下可见有孔虫、硅藻等微古生物, 具备良好的富集条件(泥质或泥质粉砂水合物多见黏土矿物)。因

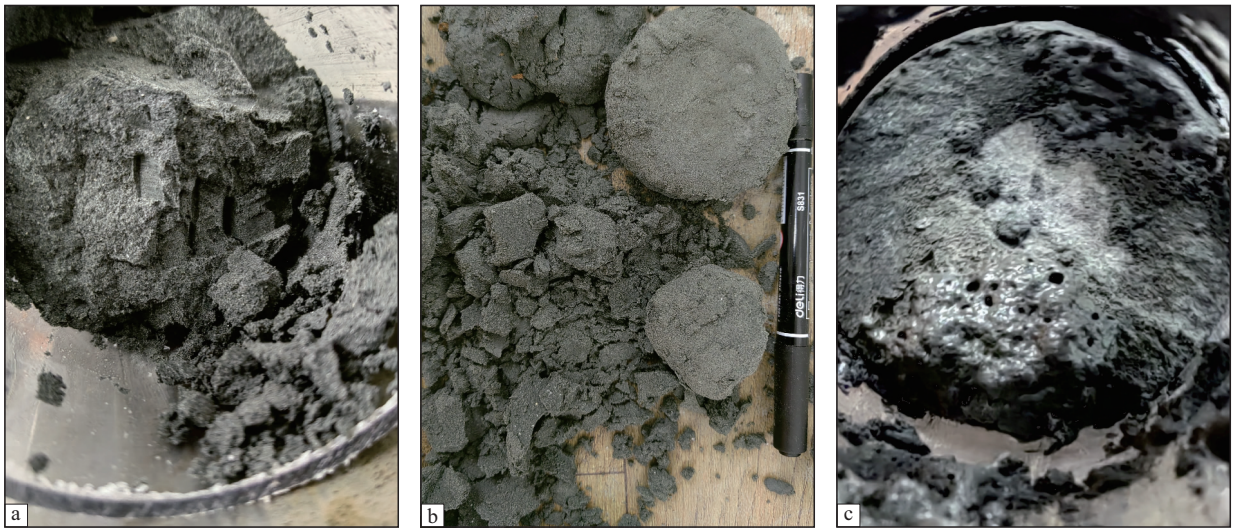


图 4 琼东南海域典型砂质水合物岩心照片

a. 砂质水合物取样刮痕; b. 砂质水合物新鲜面特征; c. 砂质水合物分解的孔洞特征。岩心直径约 70 mm。

Fig.4 Core photos of typical sandy hydrates from sea area in Qiongdongnan Basin

此,在实际工作中可从岩心观察、测井、实验测试角度识别砂质水合物。

3 砂质水合物的勘探和评价流程

参考国外水合物研究案例,“水合物成藏系统”研究是最需要加强的工作^[24-25],温度、压力等基础条件对水合物成藏影响较大^[19-20]。为此,规划了一个一般性的勘探步骤^[1-2,21-23],这样一套方法将勘探价值指向了砂质或粉砂质水合物,即最具经济价值的^[1-2]。

3.1 圈定水合物稳定带的范围

海域水合物潜力评估(或者钻井和取心前)的第一步,就是参考所有地震和钻井资料,明确天然气水合物稳定带(Gas Hydrate Stability Zone, GHSZ)的范围^[1-2,21-23]。对于似海底反射 BSR 的识别,其深度与水深、地温梯度、含气极性反转等计算的稳定带底界一致。连续 BSR 通常以图 5 中的离散反射相为特征^[1]。在图 5 和图 6 中,这种特征不是连续、一致的反射,而是包括多种地震相变化的一个层。在一些热成因烃类上升区,这种地层被认为是 I 型水合物的底界(BS_IGHS),指示这一层之下 II 型水合物也有资源潜力。有时双 BSR、多 BSR 可能与古底界 BS_IGHS、或者 II 型水合物底界有关。对于 BSR 不清晰的地区,可以靠水深、底水温度、海底压力、地温梯度、气体和水体化学等数据估算。在缺少可分辨 BSR 的地区评估稳定带,还可以通过圈定这个地区广泛出现的浅层气范围估算。

3.2 在稳定带内识别和解释水合物勘探目标

地震解释虽然具备多解性,但水合物聚集引起

的地震特征通常具有良好的识别标志^[1-2,21-23]。从全球钻探结果来看,渗透性地层高饱和度水合物最明显的地震响应就是异常高振幅反射,此类反射与海底极性特征类似。如图 6 所示,在稳定带内的目标层系具有强且连续的反射相^[1]。以日本海槽为例,这些不连续、叠瓦状特征表明目的层较为复杂。高振幅具备勘探价值的理论基础是高阻抗只能形成于较高饱和度的水合物。同时,浅层含水砂质沉

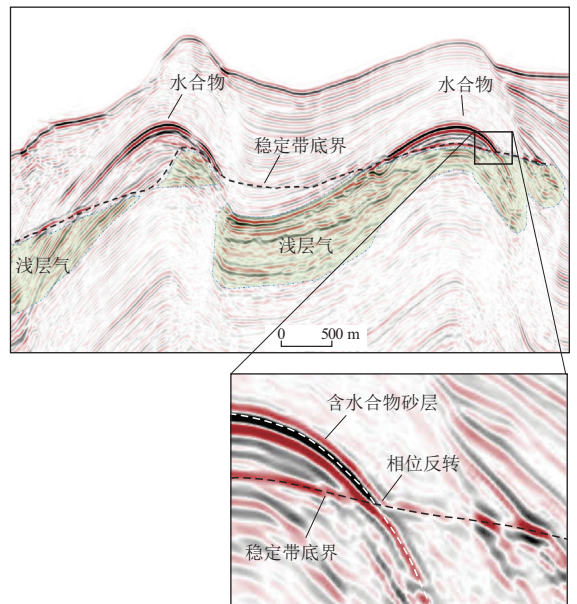


图 5 深水区高饱和度水合物目标探测案例:超出稳定带并变化的似海底强振幅反射
据参考文献[1]修改。

Fig.5 Case study of high-saturation hydrate target in deep water: strong bottom simulating reflectors (BSR) extending beyond stability zone with varying amplitudes

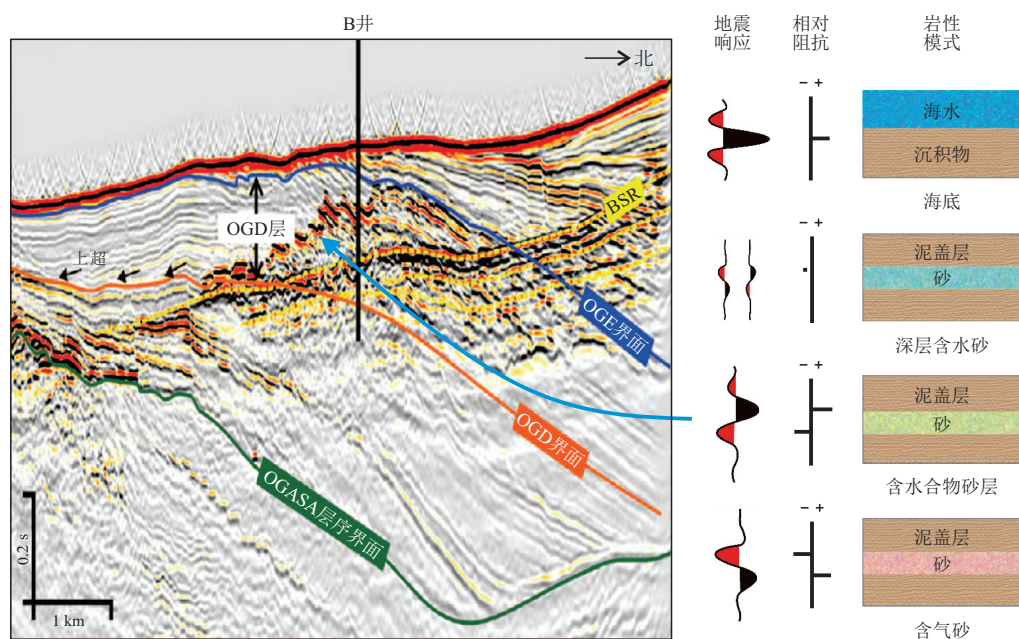


图6 日本南海海槽水合物厚层富砂质水合物勘探案例
据参考文献[1]修改。

Fig.6 Exploration case of thick sandy hydrates in Nankai Trough, Japan

积也可能形成中等或高振幅。此外,水合物预测顶界、稳定带底界、预测底界面三者之间层速度的提高也可以证实水合物成藏,这在日本海槽有发现。当然,在图6中,水合物形成于厚层所夹的薄地层内,此类速度异常更难识别(分辨率受限)。

3.3 通过储层精细描述提高勘探精度

异常高、中等振幅与富砂水合物并非紧密关联,此类响应只反映一套阻抗变化强烈的地层,如水岩界面、不整合面和异常低孔隙度—高密度地层(如碳酸盐岩)^[1-2,21-23]。因此,需要编制目标层的振幅分布图,明确真实孔隙流体引起目标层振幅的变化,降低工程失利概率。

由于追踪层在稳定带底界(Base of Gas Hydrate Stability, BGHS)之下,因此在沿层切片上可以看到反映地层结构(如构造高、反转断层等)的振幅或者多变的振幅分布。实例表明,稳定带底界下的勘探目标振幅会发生极性反转(图7)^[1]。尽管极性反转在自由气少的地方鲜见,但是含水合物砂质沉积到含水砂质沉积的变化会有明显的振幅减弱(储层含水时地震相以正向阻抗)。相反,如果振幅分布广泛、连续不变,即使稳定带之外也无明显变化,此类振幅没有勘探价值。

勘探潜力与沉积储层的紧密关联程度,可以从井资料、地震相、深水砂质沉积(曲状河道和叶状扇体)对应的振幅分布获得。例如,在厚度一致的地层单元内出现走向一致、振幅变化很小的反射

相,这种剖面通常指示了不具有勘探价值的细粒沉积。相反,横向厚度变化较大的地区,包括可能的剥蚀和充填、清晰的垂向加积、难识别的层间杂乱反射,都指示了具有潜力的砂质沉积。此外,对于富砂储层的寻找可通过大尺度的地质演化评价和盆地恢复进行,包括构造特征识别、沉积层序及其对应的粗粒—细粒沉积体系演化。

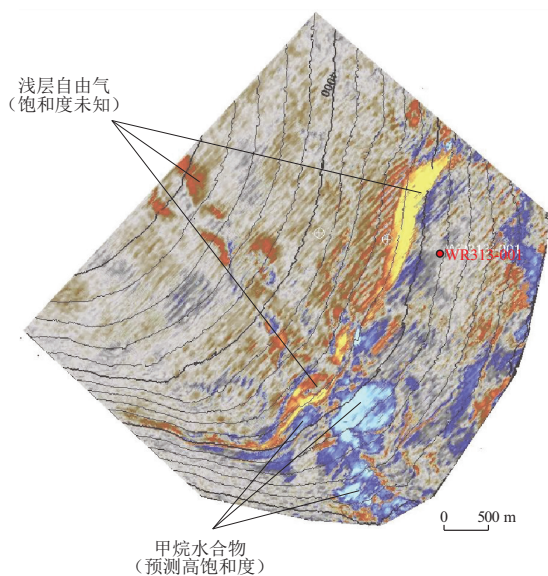


图7 墨西哥湾 WR313 区块水合物目标层振幅分析和极性反转
据参考文献[1]修改。

Fig.7 Amplitude analysis and polarity reversal of hydrate target layer in Walker Ridge Block 313 (WR313), Gulf of Mexico

3.4 通过气源和运移研究提高勘探收益

上述评估对砂质水合物的成藏提供了有效证据。尽管本地微生物气优先向富砂质储层充注,但需明确哪一套主力源岩参与了充注过程,并在砂质单元中达到高聚集度,尤其是对于优质(厚)且具有资源潜力的气源岩^[1-2,21-23]。与常规气藏类似,热成因气从深部到稳定带的运移需要较长距离,已发现的大量水合物都聚集在通道附近。因此,支持气体向稳定带运聚的证据很有价值,例如气烟囱或者稳定带下部的负极性振幅异常。海底渗漏异常(冷泉)也是线索,但和水合物相关性有限。此外,气体生成、运移的评估可以从地质过程建模、属性分析进行。

3.5 资源评估

将三维地震数据与饱和度相关的岩石物理模型相结合,所生成的图件可用于评估钻前目标的原位含气量^[1-2,21-23]。与体积法有所不同,岩石物理方法的计算过程简单直接,使水合物 1:164 的体积比可不考虑埋深、温度和压力转换等。孔隙度、有效有机质、储层类型和饱和度、变地温梯度是修正资源量结果的主要因素。尽管现有生产数据较少,模型仍处于初级阶段,但可以借助数模工具开展相关工作。目前,可采资源量计算还存在很多问题。

4 砂质水合物勘探的难点和挑战

从国内外水合物钻采工程实施和实验室模拟结果看,水合物的开发利用还有很多系统性问题没有解决,其中最大挑战是砂质水合物的勘探评价和开采问题^[6,17,25-26]。尽管目前南海北部已获得发现,但如何准确评价、有效开发将是困扰产业化的长期难题。

4.1 非成岩储层评价的难题

南海北部陆源物质供给有限、且陆架宽缓,深水浅层缺少有利沉积条件,规模砂体发育条件苛

刻,客观决定了珠江口和琼东南盆地深水浅层勘探难度大。主要包括三个部分:一是非成岩储层的描述和预测能力需要提高,水合物是岩石刚性骨架的一部分,非成岩储层的岩心描述方法、储层预测技术和饱和度评价方法未取得统一认识;二是深水沉积体类型、演化过程及沉积动力研究少(包括海底峡谷沉积充填样式、控制因素与演化,底流沉积体系、沉积模式与大洋环流重建),对第四系是否发育大型下切谷—河道体系以及浅层砂体的搬运和卸载能力摸排有限;三是气源、运聚、富集规律及主控因素研究缺乏,水合物的赋存更受控于运移通道、岩性、温度和封盖条件等,对气源贡献和多次运移的定量认识较少。相关工作需要借助保压岩心进行,在 4.4 节中单独介绍。

实验证实^[21-22,25],粒度是影响饱和度的主要参数,粗粒水合物饱和度更高,例如 UT-GOM2 航次保压岩心发现,黏土质粉砂型水合物饱和度为 2%~30%,砂质粉砂型水合物饱和度达 79%~93%。但在砂的粒度范围内,黏土含量增加会抑制饱和度,例如 NGHP-02-09 航次保压取心中,R2 样品饱和度 97%(黏土含量 0.3%,粒度中值 1 112.9 μm) 好于 R3 样品饱和度 41%(黏土含量 4.7%,粒度中值 1 695.2 μm),尽管 R3 粒度更大,但 4.4% 含量的黏土就抑制了 56% 的饱和度变化。

4.2 温度、压力变化的问题

传质传热作用普遍存在于地质流体活动中^[6,19]。琼东南 W8-18 井(核部地温梯度 11.3 $^{\circ}\text{C}/\text{hm}$,边部地温梯度 6.5 $^{\circ}\text{C}/\text{hm}$) 多次钻探表明,气烟囱、泥底辟中的流体活动改变了浅层温度场,造成水合物在高温区(渗漏通道中心)分解并转换为自由气,而在低温区(通道边缘)赋存,这与墨西哥湾、黑海等研究认识一致。评估变温压场需要进口原位传感器(图 8)^[23],使用成本高,尚未得到推广,但重

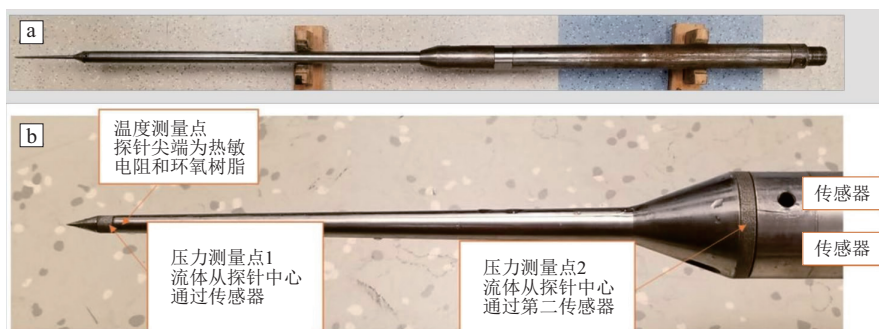


图 8 墨西哥湾使用的 T2P 温度压力探针(全长 8 ft)

据参考文献[23]修改。

Fig.8 T2P temperature-pressure probe for hydrate exploration in Gulf of Mexico (8 ft in length)

要性和必要性日益凸显。

从工程实施来看,温度、压力的实时监测也很重要。水合物分解易产生大量自由气,孔隙压力增加,胶结强度降低,使得地层失稳,易引发地层滑坡和塌陷。2010年4月深海地平线钻井平台爆炸就是水合物分解的甲烷喷发引起的。水合物发挥了胶结或骨架支撑的作用,当井眼打开后,水合物分解就会使井壁失稳,严重情形下导致井壁垮塌,影响立柱甚至整个平台的安全。一旦水合物分解,水、气的释放将导致沉积物体积巨大膨胀,例如在1 000 m水深水合物完全分解,体积膨胀100%,这是温度—压力变化引起的问题。

4.3 地质力学与岩土工程

开发生产技术的一个关键问题是,非均质性是沉积过程中岩性变化的结果,力学过程使其进一步复杂化,对含水合物的沉积物的地质力学认识有限。原位条件下水合物承担了储层骨架功能,在合成和分解过程中的力学行为更为复杂,这是限制商业化开采的主要难点。这一问题在公认最成功的日本南海海槽和美国阿拉斯加试采试验中非常突出,这两个地区的试采均因沉积物流动和出砂不受控制而受到严重破坏。目前,此类岩土调查所需的标准和技术体系尚未建成。水合物沉积物力学特性(刚度、强度、剪胀性)已经成为过去数十年的研究主题,水合物的存在不仅改变了刚度、屈服度和塑性流动特性,而且由于其分解效应,会使情况愈加复杂。人造水合物样品具有成分特性明确且可重复的优点,但天然沉积物的形成模式、分布和原位应力存在不确定性和不可模拟性。

4.4 保压取心和分析技术

保压取心是直接测量原地饱和度、获取原位参数的唯一方法。由于持久保持近原位条件的难度极大且成本高昂,使得储层研究受限,这也是一项卡脖子技术。保压取心基于波义耳定律设计,通过保压腔充注液氮的方式模拟低温条件,包括旋转式、活塞式和锤击式3种方法,取心过程面临的最

大挑战是压力和温度的轻微变化可能导致水合物分解,破坏样品完整性。目前,美国能源部制造的FPC、PCS、Hybrid-PCS取心器稳定性和工作效率最好(收获率达60%),并与PCATS系统良好兼容,2023年阿拉斯加使用的保压取心率达89%。国内尚处于研发阶段,中国地质调查局北京探矿工程研究所、胜利油田钻井工艺研究院研发的保压取心器,在稳定性、收获率(约15%)、BHA和PCATS适配性上还存在较多问题,有很大提升空间。

PCATS系统(图9)覆盖了保压岩心的获取、密闭、分析、切割、分装、移动、测试等流程,可以将现场分析、钻探和测井数据、室内数据关联对比研究,具备近原位、自动化、无损等优势,可以开展沉积学(X-CT、SEM)、地球化学(气体组分、孔隙水氯离子)、饱和度、岩石物理(电阻率、声波速度、伽马密度)等参数分析^[21,23,26]。当收获岩心后,对水合物层进行无损监测,在带压条件下对重点岩心分段切割并转移,使用加压液氮保压桶和安全防震的运输箱转运(10 MPa, 4 °C),使样品始终保持在稳定域内,待靠岸后运至实验室。实验室可开展较为系统的降压排气饱和度测试(最准确的饱和度计算方法)、低温CT、原位孔隙度、原位NMR测试(表2)^[20]。目前,PCATS系统在神狐、墨西哥湾、日本、印度水合物钻探中已得到良好应用。国内同类产品还在研发期,在专业集成、仪器操作、工业成图等环节差距至少15年。

5 结论

(1)从气源、储层、运聚、资源价值角度对3种海域水合物类型(泥质粉砂孔隙充填型水合物、泥质粉砂裂隙充填型水合物、砂质孔隙充填型水合物)进行探讨,认为砂质孔隙充填型水合物(可以拓展至粉砂粒级沉积)是目前唯一具备经济价值的水合物类型。

(2)结合琼东南实例分析,砂质水合物可从岩心、测井、实验角度识别。其具有饱和度高(40%~

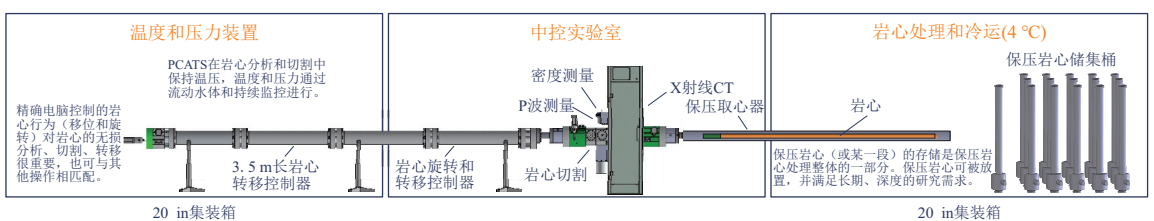


图9 英国 Geotek 公司保压岩心分析和转移系统(PCATS)

据参考文献[23]修改。

表 2 水合物岩心分析标准包

据参考文献[20]修改。

Table 2 Standard kit for hydrate core analysis

序号	岩心分析项目	分析参数	目的
1	力学测试样品	不排水抗剪强度、密度、压实度等	地层力学特性
2	弹性应变恢复 ASR	三维原位应力	力学研究和储层评估
3	旋转磁力仪	磁倾角	力学研究和储层评估
4	贯入试验	贯入强度	力学研究和储层评估
5	十字板剪切测试	剪切强度	力学研究和储层评估
6	孔隙气	气相色谱	作业风险、地质评估、水合物系统
7	顶空气	气相色谱	地质评估、水合物系统
8	孔隙水	离子色谱、盐分浓度	储层评估、水合物系统
9	X 射线 CT	CT 图像	图像分析、地质评估
10	MSCL-W、MSCL-I、MSCL-C	伽马、体积密度、磁化率	储层评估、水合物系统
11	岩心录像 VCD	岩相、地质构造等	储层评估、水合物系统
12	岩矿 XRD	X 射线衍射	储层评估、水合物系统
13	粒度分布 PSD	粒度测量	储层评估
14	体积密度	体积密度	储层评估
15	颗粒密度	颗粒密度	储层评估
16	导热率	导热率	储层评估
17	微古化石	地质年代	地质评估、水合物系统

90%)、电阻率高、地层强度高、石英含量偏高(56%~77%)、粒度中值偏高(约 56~87 μm)等特点,多为白灰色、黑灰色、分选均匀的粉砂状沉积,有明显的磨砂感,发育孔洞构造,镜下可见有孔虫、硅藻等微古生物。

(3)“水合物成藏系统”对打开砂质水合物勘探局面有益,综述了这样一个勘探评价流程:圈定水合物稳定带的范围;在稳定带内识别和解释水合物勘探目标;通过储层精细描述提高勘探精度;通过气源和运移研究提高勘探收益;最后进行资源评估。

(4)砂质水合物勘探开发难点包括:非成岩储层如何评价、温度—压力变化引起的相变、复杂的地质力学与岩土工程问题以及保压取心和分析技术等,应加强解卡攻关。

致谢:向参与海洋石油 708 船、奋进号(981 平台)水合物作业的同事、同仁致谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

作者樊奇是本刊青年编委会成员,未参与本文的同行评审或决策。Author FAN Qi is a Young Editorial Board Member of this journal, and he did not take part in peer review or decision making of this article.

作者贡献/Authors' Contributions

樊奇、付强、郭刚、朱振宇、庞维新、李清平、卓海腾参与调研;樊奇参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。FAN Qi, FU Qiang, GUO Gang, ZHU Zhenyu, PANG Weixin, LI Qingping and ZHUO Haiteng participated in the research. The manuscript was drafted and revised by FAN Qi. All authors have read the final version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] BOSWELL R, SHIPP C, REICHEL T, et al. Prospecting for marine gas hydrate resources [J]. Interpretation, 2016, 4(1): SA13-SA24.
- [2] COLLETT T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1971-1992.
- [3] 邵明娟, 王鹏飞, 张炜. 日本在天然气水合物产业化进程中面临的能源、法律和政策挑战及对未来工作的部署 [M]. 北京: 中国地质调查局地质文献中心, 2021. SHAO Mingjuan, WANG Pengfei, ZHANG Wei. Energy, legal and policy challenges in the industrialization of gas hydrates in Japan and deployment of future work [M]. Beijing: Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, 2021.
- [4] 张炜, 邵明娟, 田黔宁, 等. 日本海域天然气水合物研发进展及启示 [M]. 北京: 地质出版社, 2018. ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, TIAN Qianning, et al. Research and development of gas hydrates in waters off Japan and its implications [M]. Beijing: Geology Press, 2018.
- [5] FUJII T, NAMIKAWA T, NAKAMIZU M, et al. Modes of occurrence and accumulation mechanism of methane hydrate: result of meti exploratory test wells “Tokai-Oki to Kumano-Nada” [C]// Proceedings 5th International Conference on Gas Hydrates. Trondheim: [s.n.], 2005: 3041.
- [6] 周守为, 李清平, 朱军龙, 等. 中国南海天然气水合物开发面临的挑战与思考 [J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 152-163. ZHOU Shouwei, LI Qingping, ZHU Junlong, et al. Challenges and considerations for the development of natural gas hydrates in South China Sea [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 152-163.
- [7] 宋德坤, 刘乐乐, 王栋. 南海北部天然气水合物赋存区沉积物渗透性敏感规律试验研究 [J]. 地学前沿, 2024, 31(6): 405-414.

- SONG Dekun, LIU Lele, WANG Dong. Experimental study on the sensitivity of hydraulic permeability of fine-grained sediments sampled from a gas hydrate distribution area in the northern South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(6): 405-414.
- [8] 李小洋, 张欣, 田英英, 等. 海洋天然气水合物开采增产新技术可行性研究[J]. *钻采工艺*, 2023, 46(5): 87-92.
- LI Xiaoyang, ZHANG Xin, TIAN Yingying, et al. The feasibility study on new technology of marine gas hydrate production enhancement [J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(5): 87-92.
- [9] 黄鑫, 寇鉴, 毛良杰, 等. 天然气水合物开采立管力学特性研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(4): 143-154.
- HUANG Xin, KOU Jian, MAO Liangjie, et al. Mechanical characteristics of natural gas hydrate production riser[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(4): 143-154.
- [10] 王磊. 井液侵入水合物储层井壁力学稳定性分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(2): 87-96.
- WANG Lei. Wellbore stability analysis of drilling fluid invading hydrate reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(2): 87-96.
- [11] 叶瑞杰, 蒋宇静, 张瑞琪, 等. 层间非均质含天然气水合物沉积物力学性质数值模拟研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(2): 22-29.
- YE Ruijie, JIANG Yujing, ZHANG Ruiqi, et al. Numerical simulation study on mechanical properties of interlayer heterogeneous natural gas hydrate sediments[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024, 43(2): 22-29.
- [12] 王祥阜, 邱月, 梁伟, 等. 损伤效应下天然气水合物产气规律模拟研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 70-77.
- WANG Xiangfu, QIU Yue, LIANG Wei, et al. Simulation study on gas production law of natural gas hydrate under damage effect[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(4): 70-77.
- [13] JANG J B, WAITE W F, STERN L A. Gas hydrate petroleum systems: what constitute the 'seal'? [J] *Interpretation*, 2020, 8(2): T231-T248.
- [14] FANG Xiangyu, YANG Dianheng, NING Fulong, et al. Experimental study on sand production and coupling response of silty hydrate reservoir with different contents of fine clay during depressurization[J]. *Petroleum*, 2023, 9(1): 72-82.
- [15] LIU Tianbao, SHI Weiguang, XU Chenlu, et al. Synthesis of mixed methane-ethylene hydrate with ice powder[J]. *Unconventional Resources*, 2023, 3: 1-6.
- [16] 陈奎, 王雯娟, 徐万兴, 等. 琼东南盆地中央峡谷“深海一号”大气田周缘成藏条件与滚动勘探成效[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 994-1006.
- CHEN Kui, WANG Wenjuan, XU Wanxing, et al. Accumulation conditions and rolling exploration results in the periphery of “Deep Sea No.1” giant gas field in central canyon of Qiongdongnan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(5): 994-1006.
- [17] 康冬菊, 刘俊东, 李海燕, 等. 南海神狐海域天然气水合物储层参数定量评价方法[J]. *现代地质*, 2024, 38(2): 385-397.
- KANG Dongju, LIU Jundong, LI Haiyan, et al. A quantitative evaluation method for the natural gas hydrate reservoir parameters in the Shenhu area, South China Sea[J]. *Geoscience*, 2024, 38(2): 385-397.
- [18] KUANG Zengui, COOK A, REN Jinfeng, et al. A flat-lying transitional free gas to gas hydrate system in a sand layer in the Qiongdongnan Basin of the South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50: e2023GL105744.
- [19] FLEMINGS P B. Quarterly research performance progress report deepwater methane hydrate characterization and scientific assessment[R]. Austin: U.S. Department of Energy, 2019.
- [20] 樊奇, 朱振宇, 庞维新, 等. 琼东南盆地水合物富集区储层特征及勘探启示[J]. *地球科学*, 2024, 49(4): 1421-1430.
- FAN Qi, ZHU Zhenyu, PANG Weixin, et al. Reservoir characteristics and exploration implications of gas hydrate enrichment area, Qiongdongnan Basin[J]. *Earth Science*, 2024, 49(4): 1421-1430.
- [21] 何家雄, 宁子杰, 赵斌, 等. 南海天然气水合物资源勘查战略接替区初步分析与预测[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1549-1568.
- HE Jiaxiong, NING Zijie, ZHAO Bin, et al. Preliminary analysis and prediction of strategic replacement area for gas hydrate exploration in South China Sea[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1549-1568.
- [22] FLEMINGS P B, PHILLIPS S C, BOSWELL R, et al. Pressure coring a Gulf of Mexico deep-water turbidite gas hydrate reservoir: initial results from the University of Texas-Gulf of Mexico 2-1 (UT-GOM2-1) hydrate pressure coring expedition [J]. *AAPG Bulletin*, 2020, 104(9): 1847-1876.
- [23] Peter Flemings & the GOM2 Team. Deepwater methane hydrate characterization and scientific assessment [R]. U.S. Department of Energy, 2023.
- [24] 国际地学动态(清洁低碳地质能源)[M]. 北京: 中国地质调查局地学文献中心, 2024.
- International geodynamics (clean and low-carbon geoenergy)[M]. Beijing: Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, 2024.
- [25] 宁伏龙, 王秀娟, 杨胜雄, 等. 海洋天然气水合物成藏需要圈闭吗? [J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3876-3879.
- NING Fulong, WANG Xiujian, YANG Shengxiong, et al. Does marine gas hydrate accumulation need traps? [J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3876-3879.
- [26] 徐旭辉, 周卓明, 宋振响, 等. 油气资源评价方法关键参数研究和资源分布特征: 以中国石化探区“十三五”资源评价为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 832-843.
- XU Xuhui, ZHOU Zhuoming, SONG Zhenxiang, et al. Methods and key parameters for oil and gas resource assessment and distribution characteristics of oil and gas resource: a case study of resource assessment of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan period [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(5): 832-843.