

何家雄, 钟灿鸣, 姚永坚, 等. 南海北部天然气水合物勘查试采及研究进展与勘探前景[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 1-14.

南海北部天然气水合物勘查试采及 研究进展与勘探前景

何家雄¹, 钟灿鸣^{3*}, 姚永坚², 阎贫^{4,5}, 王彦林^{4,5}, 万志峰⁶, 关雎³, 张金峰⁶

(1 中国科学院大学, 北京 100049; 2 广州海洋地质调查局, 广州 510075; 3 广州能源检测研究院, 广州 511447; 4 中国科学院南海海洋研究所边缘海与大洋地质重点实验室, 广州 510301; 5 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 6 中山大学海洋学院, 广东珠海 519082)

摘要:20 世纪 90 年代中后期以来, 南海北部天然气水合物勘查取得了丰硕的勘探成果和里程碑式的重大突破与进展。迄今为止, 通过勘查评价已在南海北部圈定了两大天然气水合物成藏带及三大富集区, 先后勘探发现了 3 个超千亿立方米储量规模的天然气水合物矿藏。同时, 通过 2017 年和 2020 年 2 次探索性试采均获得了产气总量及日均产气量超世界新记录, 而且攻克了深水海底浅表层未成岩软地层水平井钻采核心技术, 实现了由“探索性试采向试验性试采”的重大跨越和突破。然而, 南海天然气水合物资源勘查试采这一庞大复杂的系统工程, 尚面临着诸多问题和挑战, 如天然气水合物成因成藏类型与气源供给及产出赋存特点、天然气水合物成藏机理及主控因素、勘查试采技术方法优化创新与商业化产能目标的实现, 以及天然气水合物可持续滚动勘探开发的战略选区及其资源/储量接替等, 因此, 南海天然气水合物资源勘查试采工程项目工作仍然非常艰巨且任重道远。

关键词:南海北部; 天然气水合物资源; 勘查评价方法; 钻探试采技术; 成藏系统; 勘探前景

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.127

0 引言

天然气水合物(俗称可燃冰)是国际公认的 21 世纪资源潜力巨大且能接替煤炭、石油等化石能源的环保新型高效非常规天然气资源。因此, 天然气水合物资源调查及勘查试采工程的开展实施, 愈来愈引起全球尤其是发达国家及能源短缺国家的高度重视与关注。我国天然气水合物资源调查及勘

查评价与研究起步较晚, 但进展较快, 尤其是近年来勘查与试采工作同步进行并取得了非常好的效果。在全面开展区域大规模天然气水合物资源勘查评价工作的同时, 先后成功实施了 2 次天然气水合物探索性试采工作(2017 年和 2020 年), 并获得了单位时间总产气量和日均产气量均超国际水平的重大突破和世界瞩目的重大成果, 极大地推动和加快了我国海域天然气水合物资源勘查试采工程项目的顺利实施与快速推进。

我国海域天然气水合物调查与勘查评价研究始于 1995 年, 主要经历了 1995—1998 年调研及预研究、1999—2001 年海洋地质调查评价及勘查研究、2002—2010 年勘查评价与综合研究, 以及 2011 年后的勘查评价与探索性及试验性试采等 4 个重要阶段。迄今为止, 中国地质调查局广州海洋地质调查局先后在南海北部陆坡深水区及周缘, 开展了大规模天然气水合物资源的战略性调查与综合评价

收稿日期: 2020-08-31

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0104); 广东省特支计划(2019BT02H594); 国家自然科学基金(U1901217, 91855101, 42076218)

作者简介: 何家雄(1956—), 男, 博士, 岗位教授, 主要从事海洋油气勘探与能源地质综合研究。E-mail: 1445935281@qq.com

* 通讯(共同第一)作者: 钟灿鸣(1962—), 男, 高级工程师, 院长, 主要从事能源检测与研究。E-mail: zcm_bzhy@gzq.gov.cn

预测及钻探试采工作,且在天然气水合物勘查试采过程中实施了大气、海水、海底及井下“四位一体”的环境监测评价,初步总结和建立了一套天然气水合物成藏系统理论与勘查评价关键技术和分析检测及室内实验模拟方法。同时,组织汇聚国内各方科技力量及创新人才,攻克了南海北部深海浅表层软地层未成岩沉积物储层(水合物)水平井钻采核心技术,自主研发了一套实现天然气水合物勘查开采产业化的关键技术装备体系,进而为海域天然气水合物勘查试采顺利实施,提供了强有力的技术支撑和保障。总之,通过20多年天然气水合物资源调查与勘查评价研究以及探索性试采工作,陆续完成了南海北部陆坡深水区西沙海槽、琼东南、神狐及东沙等调查海域的天然气水合物资源调查与勘查评价工作,并根据天然气水合物地质地球化学特点,尤其是地球物理特征等信息,结合其勘查钻探成果,以2000 m水深线为界在南海北部深水海域评价圈定了两大天然气水合物成藏富集带及三大富集区块,初步估算和预测南海深水区天然气水合物资源量达643~772/845亿t油当量^[1-9],其中南海北部深水区天然气水合物资源量可达380亿t油当量左右(虽不同专家预测资源量有所差异,但可以肯定其资源潜力大),水合物资源量是深水油气资源量的4倍多。同时,在2017和2020年先后2次对神狐区典型天然气水合物矿藏实施了探索性试采,并取得了产气总量及日均产气量超世界纪录和深海浅表层软地层未成岩沉积物储层水平井试采成功之重大突破和里程碑式进展。本文基于南海北部天然气水合物勘查试采及研究所取得的一系列重大成果及资料,以天然气水合物勘查试采进展与天然气水合物成藏系统理论及目前研究中尚存在问题为切入点,系统分析总结南海北部天然气水合物勘查试采成果,重点剖析勘查试采中的创新点及重大进展,同时分析天然气水合物资源潜力和勘探前景以及目前勘查评价研究中尚存在的一些问题,以期对天然气水合物勘查试采工程项目的顺利实施和快速推进等有所裨益。

1 天然气水合物勘查试采成果及进展

南海北部深水区天然气水合物资源勘查评价,自1999年首次在南海北部陆坡西部的西沙海槽开

展地球物理勘探及天然气水合物资源调查始,20多年来,自西向东先后重点对琼东南盆地南部乐东—陵水—松南区(简称琼东南调查区)、西沙海槽(西沙调查区)、珠江口盆地中南部白云凹陷神狐区(简称神狐调查区)及珠江口盆地东部区(简称东沙调查区)等四大区域,部署实施了主要针对天然气水合物资源勘探为目标的海洋地质调查与地球物理勘探及油气地质评价和综合分析研究等^[10-13]。尤其是通过自然资源部(原国土资源部)多个南海天然气水合物调查重大专项和国家“973”重大基础科研项目——“南海天然气水合物富集规律与开采基础研究”等项目的顺利实施,取得了一系列天然气水合物资源调查及地球物理勘探评价和天然气水合物成藏地质理论与水合物钻探试采技术方法等方面的重大创新性成果和突破性进展^[14-27],为我国天然气水合物资源勘探开发及商业化利用等奠定了非常好的技术基础和重要前提条件。以下重点对天然气水合物勘查与钻探试采成果及重大进展等进行具体分析总结。

1.1 天然气水合物勘查评价成果

南海北部天然气水合物资源区域海洋地质调查与勘查评价,均由中国地质调查局广州海洋地质调查局承担和主导,自1999年以来,先后在南海不同区域开展了系统的海洋地质地球物理调查及钻探取样工作,通过区域地质概查、重点普查及深入详查与钻探取样,累计投入勘探经费约47亿元,动用17艘调查船,累计75个航次,完成高分辨率多道地震16.70万km、多波束测量7.40万km、浅层剖面测量2.77万km、热流测量684个站位、地质取样4244个站位、钻天然气水合物探井及评价井80多口,进而获取了南海北部深水海量地质地球物理和地球化学调查数据及大量岩心样品^[11-12]。在区域海洋地质地球化学调查及地球物理勘查的基础上,发现并判识圈定天然气水合物分布面积达32750 km²,同时,还调查发现了与天然气水合物分布赋存具有密切成因联系的众多冷泉碳酸盐岩及冷泉渗漏系统^[12];在南海北部陆坡西部琼东南调查区及西沙调查区、陆坡中部神狐调查区及陆坡东部东沙调查区,通过调查及勘查发现了深层—浅层—表层具有指示天然气水合物存在的一系列地球物理与地质地球化学及异氧生物和沉积等异常标志

及显示^[28-33]。总之, 通过 20 多年区域海洋地质调查及地球物理勘探与油气地质分析研究, 综合判识圈定了南海北部天然气水合物主要成藏区带, 基本上摸清了南海北部天然气水合物资源分布特征, 初步评价预测了南海北部天然气水合物资源规模及潜力。与此同时, 通过天然气水合物成藏地质条件及成因机制与运聚分布规律及控制因素等的深入分析研究, 应用天然气水合物成藏系统理论, 遵循从烃源供给(源—汇)到天然气水合物运聚成藏(富集—成藏)的基本原则, 深入分析了天然气水合物形成的烃源供给系统、运聚输导系统、赋存产出方式及高压低温稳定带形成等关键要素的时空耦合配置关系^[34-40], 在此基础上, 重点对南海北部深水区有利天然气水合物成藏分布的富集区和区带区块等, 进行了预测评价, 并结合探井钻探成果, 进一步判识确定了两大水合物成藏富集带和 6 个水合物成藏远景区、19 个成藏区带和 25 个有利区块及 24 个钻探目标^[34-37], 初步预测南海北部天然气水合物远景资源规模达 380 亿 t 油当量。

1.2 天然气水合物钻探试采进展

在重点对南海北部天然气水合物资源调查及勘查评价(概查、普查及详查)的基础上, 围绕勘查评价确定的天然气水合物有利成藏区带的重点区块等钻探目标, 结合油气地质条件综合考量, 最终优选了最佳钻探目标及井位, 部署实施了天然气水合物钻探, 分别于 2007、2013、2015、2016、2017、2018 及 2019 年先后多次在南海北部陆坡神狐、东沙调查区及琼东南调查区钻获了不同类型的天然气水合物实物样品, 勘探成功率达 100%, 并通过天然气水合物成藏地质条件与区带区块天然气水合物资源潜力评价, 结合水合物钻探成果分析, 综合判识圈定和确定了 3 个超千亿立方米储量规模的天然气水合物藏, 获得了南海北部深水区天然气水合物勘查里程碑式的重大突破及进展, 同时, 在获得天然气水合物钻探成果的基础上, 分别于 2017 年和 2020 年实施了水合物探索性试采, 并取得了巨大成功和突破性进展。

1.2.1 天然气水合物钻探成果及进展

根据天然气水合物的海洋地质调查及地球物理勘探和油气地质评价结果, 2007 年 4—6 月, 广州海洋地质调查局优选了最有利天然气水合物成藏

区块及目标, 首次部署实施了南海北部陆坡天然气水合物钻探, 先后在珠江口盆地中南部白云凹陷神狐调查区最有利天然气水合物藏目标区的 3 个站位上钻获高甲烷含量的水合物实物样品(图 1)。天然气水合物甲烷含量超过 99.7%, 饱和度为 20%~48%, 天然气水合物层厚 20~40 m, 钻探结果表明该区天然气水合物藏具有甲烷含量高、饱和度较高、厚度大及成片均匀分布等特点。通过钻探初步圈定该区块天然气水合物分布面积约 22 km², 控制地质储量约 194 亿 m³(折算为天然气)。其后, 通过进一步的地球物理勘查与油气地质综合评价, 于 2013 年再次部署实施了天然气水合物钻探, 并在南海北部珠江口盆地东部东沙调查区(南海北部陆坡东区), 首次钻获高饱和度和能量密度高的块状天然气水合物, 且获得了超千亿立方米储量规模的天然气水合物藏。尚须强调指出, 2013 年 6—9 月, 在珠江口盆地东沙调查区天然气水合物藏目标区实施的 5 个站位的钻探工作, 不仅钻获了大量高纯度、高饱和度的天然气水合物实物样品, 而且还基本搞清了天然气水合物主要赋存于海底以下 220 m 以上的 2 套主要未成岩极细粒沉积物储层之中。该区水合物产出类型肉眼可辨, 以层状、块状、结核状及脉状等多种形式产出(图 2)。该天然气水合物藏未成岩储层岩心中天然气水合物含矿率平均为 45%~55%, 甲烷含量高达 99% 以上。通过地震追踪解释及钻探评价进一步圈定该区天然气水合物藏分布面积达 55 km², 控制水合物藏储量规模约 1000~1500 亿 m³^[29](折算为天然气), 相当于海上大型高丰度常规大天然气田储量规模。



图 1 南海北部神狐调查区天然气水合物实物样品^[37]
Fig.1 Natural gas hydrate samples from Shenhu survey area, northern South China Sea^[37]



图2 南海东北部东沙调查区不同赋存类型天然气水合物实物样品特征^[36]

Fig.2 Characteristics of gas hydrate samples of different occurrence in Dongsha survey area, northeastern South China Sea^[36]

2015年6—9月,通过进一步的地球物理勘查及地质评价与油气地质综合研究,在神狐海域主要天然气水合物藏目标区块又先后实施了19个站位的钻探,均发现天然气水合物,钻探成功率100%。在此基础上结合测井、钻探取心及三维地震资料的综合分析,最后圈定天然气水合物藏面积为128 km²,水合物层厚度20~100 m,水合物层含矿率20%~70%,且水合物层亦具有分布广、厚度大及饱和度较高等特点,最后通过综合分析及评价预测,获得水合物资源量超过1500亿m³(折算为天然气),亦相当于海上大型高丰度常规大天然气田规模。总之,2015年水合物勘查评价及钻探进一步证实了神狐调查区超千亿方储量规模天然气水合物藏的存在,进而为后期天然气水合物试采井位目标部署及优选等提供了重要依据和重要前提条件。另外,根据本次钻测井及水合物取心分析结果,进一步圈出了10个规模较大的水合物藏区块(图3),其中2个大型水合物藏区块的控制资源量高达400亿m³,进而为该海域天然气水合物钻探试采目标优选等提供了重要参考靶区。同时,在南海北部陆坡西部的琼东南调查区,2015年通过海洋地质调查及海马探测器探测发现了面积达618 km²的水合物分解产物——冷泉碳酸盐岩,并利用动力取样器获得了水合物实物样品^[12]。其后(2016—2019年)在琼东南调查区松南—宝岛区块亦部署实施了水合物钻探,本次不仅钻获了大量不同类型水合物实物样品,并通过地球物理进一步探测与油气地质评价和钻探工作,最终勘查发现一

个相当于大气田储量规模的大型水合物藏,进而为建立琼东南天然气水合物藏先导性开采试验区奠定了物质基础,取得了南海北部陆坡西部琼东南调查新区天然气水合物勘查的重大突破和发现。

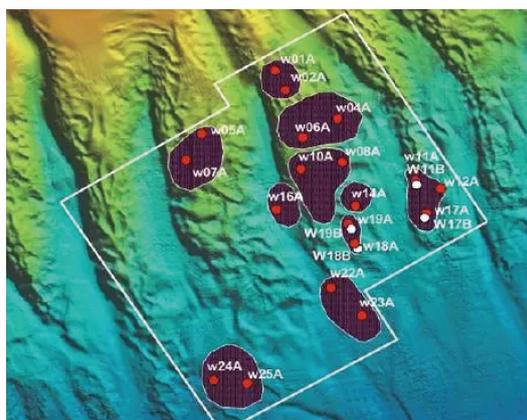


图3 南海北部神狐调查区主要区块天然气水合物矿藏平面分布特征^[21]

Fig.3 Plane distribution of natural gas hydrate deposits in main blocks of Shenhu investigation area, northern South China Sea^[21]

1.2.2 天然气水合物试采成果及进展

根据南海北部陆坡天然气水合物藏独特的地质特点,尤其是针对该区深水海底浅表层软地层粉砂质黏土及黏土质粉砂未成岩沉积物这种天然气水合物储层的特殊性,在试采工程技术上制定了详细的试采实施方案及应对措施。众所周知,深水海域天然气水合物尤其是未成岩极细粒储层天然气水合物试采属世界级难题,全球迄今仅日本近年来实施过海域天然气水合物试采项目,而且日本实施试采的南海海槽天然气水合物储层完全不同于南海北部这种特殊的浅表层未成岩软地层,其基本上属于成岩程度较好的块状砂岩储层类型水合物,故水合物钻探及开采难度均相对小得多。鉴此,中国地质调查局广州海洋地质调查局通过系统调研、深入研究与反复论证及实践,进而顺利实施和圆满地完成了南海北部深水海底浅表层这种特殊的未成岩黏土质粉砂沉积物储层类型水合物的探索性试采和试验性试采的复杂工程项目,取得了历史性的重大突破和里程碑式重大进展。

1.2.2.1 天然气水合物首次探索性试采成果

在前期南海北部天然气水合物勘查评价及典型水合物藏地质条件综合分析研究的基础上,针对神狐海域调查区深水海底浅表层天然气水合物藏

储层未成岩、松软易垮塌、易发生井漏,且钻探风险高、开采难度大的这种黏土质粉砂型沉积物储层的特殊性,中国地质调查局广州海洋地质调查局凝聚各方科技力量,组成和构建了由中国地质调查局牵头和引领,中石油、北京大学、中集集团等优势力量参与的水合物联合攻关试采科研团队,并通过深入研究、反复探索和不断实践,进而实现了天然气水合物开发开采理论与开采技术、工程及装备的自主创新,形成了天然气水合物试开采的六大技术体系 20 项关键技术^[41]。尤其是在天然气水合物开采的防砂技术上,取得了重大突破和进展,实现了“地层流体抽取”、未成岩软地层超细沉积物储层防砂和天然气水合物二次生成预防技术等 3 项重大技术创新,进而为南海北部天然气水合物首次探索性试采成功提供强有力的技术支撑和可靠保证。在此基础上,于 2017 年 3 月 28 日在优选的最佳神狐水合物矿藏上,部署实施钻探了第 1 口试采井,并于 5 月 10 日下午 14 时 52 分开始试采点火,成功地从水深 1266 m 海底以下 203~277 m 软地层未成岩黏土质粉砂型沉积物储层中开采出天然气水合物气。这是我国首次也是世界第一次成功在深水海底浅表层开采出开发难度最大的未成岩泥质粉砂型沉积物储层的天然气水合物。而且,本次试采创造了天然气水合物探索性试采“持续稳产 60 天,平均日产 5 000 m³,最高产量达 3.5 万 m³/d,累计采气量 30.9 万 m³”的世界纪录^[41]。尚须强调指出,与此同时,我国长期从事海洋常规油气勘探开发的单位——中国海洋石油总公司水合物试采团队,亦开展了该区天然气水合物探索性试采工作,并取得了一系列的初步试采成果与认识^[42-46]。此外,在此次天然气水合物钻探试采过程中,其海底安全评估和海洋生态环境监测结果表明,本次水合物钻探试采作业基本安全,深水海底浅表层地层稳定,海洋大气和海水中甲烷含量均无异常变化^[47-48]。总之,本次天然气水合物试采过程中,持续试采产气时间长且气流稳定,海洋环境及生态安全,海底地层稳固均未发生垮塌滑坡等影响地层稳定性和安全性等地质灾害现象。

1.2.2.2 天然气水合物第 2 次试验性试采成果

为了加快推进南海北部神狐海域天然气水合物勘查开采先导试验区建设,在分析总结第一次天然气水合物试采成功的基础上,针对如何提高水合

物开采的采收率及产能(产量)以及尽可能接近和达到开发生产和将来商业化利用的经济门槛等关键问题,中国地质调查局广州海洋地质调查局联合中国石油天然气集团、北京大学等国内外 70 余家单位近千名科研人员,通过两年多的深入研究探索与反复的艰苦攻关实践,终于在 2019 年 10 月正式启动了神狐海域第 2 轮天然气水合物试采生产作业。尤其是在无海域天然气水合物试采成功范例可借鉴及恶劣海况条件下,中国地质调查局广州海洋地质调查局水合物试采团队及现场指挥部全面精准落实各项试采安全防控措施及预案,有力保障和推进了水合物试采生产作业的顺利进行与实施。从 2020 年 2 月 17 日水合物试采点火成功开始至 3 月 17 日,基本保证了持续稳定产气 30 天,累计产气总量达 86.14 万 m³、日均产气量 2.87 万 m³。这是 2017 年首次水合物试采日产气量的 5.57 倍,创造了天然气水合物产气总量、日均产气量 2 项新的世界纪录^[49]。总之,南海北部天然气水合物第 2 轮试采取得了圆满成功并超额完成了试采目标任务,其不仅在产气总量与日均产气量 2 项指标上刷新了世界海域天然气水合物试采新记录,而且还攻克了深水海底浅表层软地层未成岩黏土质粉砂型沉积物这种特殊水合物储层的水平井钻采核心技术,有效地提高了天然气水合物采收率及日均产气量,实现了水合物从“探索性试采”向“试验性试采”的重大转变和历史性跨越,为生产性试采和商业化开采奠定了扎实的技术基础。同时,为了有效保护海洋生态环境,预测和防止水合物试采中可能对海洋环境及海洋生态造成的破坏作用,在此次水合物试采过程中继续开展了海洋环境生态系统的实时监测与评价工作,建立了颇具特色的海洋生态环境全天候实时保护监测系统,通过水合物试采过程中各个环节的全面系统地实时跟踪监测,进而为天然气水合物绿色开发的可行性及可靠性等提供了全面系统、精准可信的基础数据^[49]。以下重点对此次深水海底浅表层软地层未成岩沉积物储层水合物水平井钻采核心关键技术和水合物开采环保监测体系,以及从探索性试采到试验性试采推进产业化进程 3 个方面,进一步分析总结第 2 次水合物试采取得的重大成果及进展与重要意义及启示。

(1) 从垂直井到水平井试采提高采收率及产量
天然气水合物试采调研及研究表明,实施天然

气水合物产业化开采及商业化生产,一般可分为5个阶段:即理论与模拟试验、探索性试采、试验性试采、生产性试采及商业化开采阶段。南海北部神狐海域水合物矿藏首次成功试采,即完成了水合物的探索性试采工作,而第2轮水合物试采则实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的阶段性转变和重大跨越,迈出天然气水合物产业化进程中极其关键的一步^[49]。本轮试采攻克了天然气水合物水平井钻采的关键技术,有效地提高了水合物采收率及产气量,为生产性试采及商业开采等奠定了坚实的技术基础。同时,通过自主研发构建了一套实现天然气水合物勘查开采产业化的关键技术装备体系,大大提高了深海资源探测及其开发利用能力。众所周知,南海北部神狐海域天然气水合物首次探索性试采,采用的是通常的垂直井钻采开发技术,开采井筒(井眼)垂直切穿天然气水合物未成岩储层矿体,开发试采的水合物矿藏接触面积较小,通过井筒试采渗流产出面积非常有限,而第2轮水合物试采,由于采用了水平井钻采关键技术,开采井筒可侧向近水平顺水合物储层穿越高饱和度、高丰度水合物矿藏,其与水合物储层接触面积明显增大,能够有效增加水合物矿藏汇集至井筒的气体渗流聚集面积,进而大大提高水合物气的采收率及产气规模与产气量^[49]。然而,相对于天然气水合物垂直井试采技术,水平井试采对其技术工艺及技术装备的要求非常高难度亦大。迄今为止,在南海北部这种深海浅软地层未成岩黏土质粉砂型沉积物之特殊水合物储层中,实施水平井钻探试采尚无先例可查可鉴。很显然,南海北部这种深水海底浅层松软未固结成岩沉积物储层之天然气水合物矿藏,由于其埋藏浅(海底之下100~300 m),其钻探水平井与陆上成岩固结程度高的页岩水平井相比,往往面临着一系列世界级难题(如井口稳定、井壁稳固、防塌、造斜难度大等),为此,中国地质调查局广州海洋地质调查局组织国内钻采工程及油藏地质工程专家们,系统分析了第1轮探索性试采获取的647万组数据,总结和建立了“水合物成藏系统”与“三相控制水合物相态”理论,为第2轮水合物试采提供了全方位的理论支撑和技术支持。另外,还通过大量的室内模拟实验和陆地及海域21口井的123次试验和10余次的推演模拟及预测,细化了3000多项钻探试采施工环节^[49],实现了天然气水合物从垂

直井试采向水平井钻采技术的升级换代。试采科研团队系统总结和掌握了以水平井试采水合物为核心的32项关键技术,自主研发了12项核心技术装备^[49],其中控制井口稳定的装置,吸力锚打破了国外垄断,确保和助推了第2轮水合物试采目标任务的顺利实施与完成。这些核心技术装备不仅为推进天然气水合物产业化提供了有力保障,而且可在海洋资源开发、涉海工程建设等领域中广泛应用,也必将带动形成新的深海技术装备等一系列产业链,进而大大增强和强化我国“深海进入、深海探测、深海开发”能力。

第2轮天然气水合物试采成功,不仅表明我国在海域水合物试采方面占领了国际天然气水合物勘查试采的科技创新高地,而且在该领域取得的国际“领跑”优势地位亦有了明显提升和增强。同时,也进一步促进和加强了我国海域天然气水合物勘查试采科研团队的建设与完善。

(2) 从探索性试采到试验性试采推进产业化进程

前已论及,实现天然气水合物产业化开采及商业化生产,一般可分为理论研究及模拟试验、探索性试采、试验性试采、生产性试采及商业开采5个主要阶段。南海北部深水海域第2轮天然气水合物试采成功,虽然实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的阶段性跨越和重大转变,但这仅仅是迈出了天然气水合物产业化进程的关键一步,而后期的水合物生产性试采及商业化开采的目标任务则更加艰巨而任重道远。必须强调指出,2017年南海北部天然气水合物第1轮探索性试采,仅解决了“水合物能否安全及连续开采出来”,即解决了能否产出水合物气的问题。而第2轮试采则初步完成了试验性试采,基本回答了“如何提高天然气水合物气采收率及产气规模与产量”等问题^[49]。很显然,这仅仅是天然气水合物产业化进程的万里长征中迈出了第一步。南海北部天然气水合物资源量初步预测结果表明,其资源潜力巨大,具有广阔的勘探开发前景。目前通过海洋地质调查及勘查评价与钻探证实,在南海北部深水第1天然气水合物成藏富集带(<2000 m水深),已预测确定了三大富集区及其3个千亿 m^3 储量规模的大型天然气水合物藏。迄今这些天然气水合物藏分布区,正在积极推进和筹划水合物勘查开发的先导试验区建设,力争建成具有一定天然气储量规模及产能的水合物资

源勘查开发的示范基地, 天然气水合物产业化进程正在逐步推进。第 2 轮水合物试采成功, 尤其是其试采日产气量及采收率大幅提升, 均大大加快和推动了水合物开采的产业化进程。目前, 第 2 轮水合物试采工程项目总结与深化研究仍在进行中, 正在围绕如何加快推进水合物勘查开采产业化, 尤其是下一步实施生产性试采活动, 做好进一步的可行性试验及技术储备, 同时亦会全面系统地总结本次水合物试采获得的所有核心数据和关键技术成果, 为推进和加快第三轮水合物生产性试采项目做好技术准备和物质保障, 力争尽快开展和实施进一步的生产性试采工程项目, 进而加快推进水合物产业化开采和向商业化利用目标迈进的步伐。

(3) 天然气水合物试采环境实时监测评价

深水海域天然气水合物开采属于复杂庞大的系统工程, 能否保证其安全开采涉及到方方面面。曾有专家及学者对天然气水合物能否顺利实施安全开采提出过诸多疑虑和质疑, 指出深水海域水合物开采可能会破坏海底浅表层稳定的地质地层结构, 甚至会导致和引发海底地质滑坡及相关地质灾害? 尤其是开采过程中天然气水合物分解还可能会产生大量甲烷向海底和海水及大气中泄漏? 严重破坏影响海洋大气环境引起海洋生态变化? 对此中国地质调查局广州海洋地质调查局环境监测科研团队非常重视, 自 2017 年以来组织了多学科多专业科研攻关团队, 开展了全面系统地联合科技攻关和全天候的试采现场实时监测, 通过深入研究不断实践探索, 自主创新地构建了一套海洋环境风险监测及防控技术体系, 形成了比较完整的大气、水体、海底、井下地层“四位一体”的海洋环境生态监测评价系统, 并在天然气水合物试采过程中实时监测了其试采全部生产过程中不同环节的环境及生态变化情况^[47-48]。通过水合物试采区开采过程中的实时监测, 其结果表明, 南海北部天然气水合物试采过程中基本无甲烷泄漏, 亦未发生海底滑坡或海底地层稳固性遭破坏等一系列地质灾害。在 2 次的天然气水合物试采过程中, 广州海洋地质调查局环境监测科研团队, 主要从 2 方面做好了海洋环境保护及监测评价工作: ①形成了覆盖天然气水合物试采全过程的环境保护技术^[47], 包括压力调控、钻井安全及流动保障等技术, 且应用到水合物试采的各个生产环节, 确保了海底地层的稳定和海洋生态

环境安全。以压力调控技术为例, 其通过精确合理调节深海软地层未成岩黏土质粉砂型沉积物储层中压力参数, 进而可以提高水合物矿藏的采收率及产气量。很显然, 当地层压差大时, 有可能会引发地层不稳定, 造成对试采井筒安全风险。而当压差小了, 则采收率低影响产气总量及日产气量。②在水合物试采区构建了大气、海水、海底及井下地层一体化的海洋环境生态监测体系^[48]。在水合物试采井中部署存放了多组传感器, 在试采井周围及海洋水体和海水面亦部署了多种监测设备, 全天候实时监测水合物试采过程中产层温度压力、地层形变及甲烷含量等参数的变化, 实现了对水合物试采全过程中各项环境指标实时连续监测和及时预警。通过天然气水合物试采全过程不同环节的实时监测, 最终获得了一系列环境参数及数据, 为水合物安全开采提供了技术支撑和重要依据。总之, 南海北部天然气水合物试采过程中生态环境的实时监测结果表明, 该区天然气水合物实施开采过程中, 没有发生海底滑坡等地质灾害以及海洋生态环境的改变。因此, 可以预测和确定目前及将来海洋天然气水合物勘查试采及商业化开采等, 均不会对深水海底地层稳定性及海洋生态环境等产生严重破坏和影响。

2 天然气水合物勘查试采装备及实验研发进展

天然气水合物这种特殊冰状固体矿产的勘查试采及开发, 完全不同于常规油气田勘探开发, 属于世界级难题, 尤其是深水海域天然气水合物试采开发更无先例可鉴。天然气水合物勘查试采实践表明, 其勘查试采及开发的技术装备体系, 是最关键且直接决定和影响水合物勘查试采的技术手段和先决条件, 不然则为“无米之炊”。为此, 中国地质调查局广州海洋地质调查局凝聚国内各种先进技术力量, 组织多领域多专业多学科全方位的系统联合科技攻关, 通过艰苦卓绝的探索与不断反复实践, 自主研发了一系列天然气水合物勘查试采的关键技术设备, 构成了一套完整具有自主知识产权的水合物勘查试采技术装备系列^[49], 为确保南海北部天然气水合物勘查试采成功提供了强有力技术支撑和重要硬件条件, 同时也大幅度提升了水合物试

采开发技术装备的研发能力和技术水平。

首先,在天然气水合物勘查中探测取样设备的研发方面,自主研发了一批关键的勘查采样设备。如自主研发的“海马”号4500米作业级深海非载人遥控探测取样潜水器,其国产化率超过90%,亦填补了国内空白,进而为我国深水区天然气水合物勘查及深海矿产资源调查等增添了新的探测取样利器。另外,高分辨率小道距多道地震探测、海洋可控源电磁探测及保压取心钻具等关键核心技术装备及设备亦取得了突破和进展,且已在南海北部天然气水合物调查及勘查取样中逐步得到应用与发展^[11-14]。其典型实例是,2015年3—5月,广州海洋地质调查局使用自主研发的“海马”号深海非载人遥控探测潜水器,在琼东南盆地南部海域发现了大量活动“冷泉”标志(大面积冷泉碳酸盐岩及大量化能自养生物群),并利用大型重力活塞取样器取得了天然气水合物实物样品,进而在该区首次获得了天然气水合物调查的重大发现。其后,通过多次钻探进一步确证了天然气水合物矿藏的存在,进而取得了南海北部陆坡西部琼东南调查区天然气水合物勘探的重大突破,并最终综合评价圈定了南海北部第3个超千亿 m^3 储量规模的水合物藏。

在天然气水合物试采技术装备方面,通过不断探索实践和艰难地研究攻关,自主研发了一套实现天然气水合物勘查开采产业化的关键技术装备体系,进而大大提高了深海资源探测与开发能力,尤其是水合物钻探试采的能力。中国地质调查局广州海洋地质调查局试采科研团队经过两年多的艰难攻关与集中突破,在水合物试采的多个方面均取得了突破性的重大进展,攻克了未成岩浅软地层极细粒沉积物储层这种特殊水合物藏的水平井钻采技术以及以此为核心的32项关键技术,且自主研发了12项核心技术装备,其中控制浅表层软地层井口稳定装置——吸力锚打破了国外垄断^[49],进而确保了第2轮水合物试采目标任务的顺利实施与完成。很显然,这些试采技术装备在深海资源开发及深海工程等领域均具有广阔应用前景,亦必然会带动形成新的深海技术装备的产业链,进而大大增强和提升我国“深海进入、深海探测及深海开发”的技术手段和开发能力。

在天然气水合物室内分析测试与实验技术方面,亦达到国际一流水平。迄今为止,中国地质调

查局青岛海洋地质研究所已建成世界级水平功能齐全的标准化天然气水合物分析检测与实验的重点实验室,拥有170 m^2 的水合物低温物性实验室(最低温度 $-50\text{ }^\circ\text{C}$),配备有显微激光拉曼光谱、固体核磁共振等大型分析测试仪器,自主研发了8套天然气水合物模拟实验装置,开发了多种天然气水合物实验分析检测技术^[50-52],近期正在开展水合物浅软地层未成岩沉积物储层储集物性参数的精细分析检测等方面的实验与攻关研究。总之,在天然气水合物分析测试与实验技术方面,我国目前已构成了一个完整的测试分析与实验的技术体系,可以开展天然气水合物地球物理、地球化学及微观动力学等多方面的分析实验研究,且其测试分析与实验模拟研究技术均保持在国际一流水平之上。

3 天然气水合物成藏地质研究进展

根据南海北部天然气水合物地质调查及勘查评价与钻探试采实践,结合区域油气地质条件及水合物成藏主控因素的分析研究,广州海洋地质调查局天然气水合物工程技术中心首次提出了南海北部天然气水合物区域分布存在2个主要富集成藏带^[21, 34-37],即以2000m水深为界,将水深 $<2000\text{ m}$ 的天然气水合物分布区划分为第1个水合物成藏富集带,其构造地质地理位置主要属于外陆坡深水—超深水大型沉积盆地展布区(如珠江口盆地南部及琼东南盆地南部),该区新生代沉积充填厚,生烃凹陷展布规模大,古近系+新近系烃源岩发育。赋存于深水海底浅表层天然气水合物藏的烃源供给,不仅有大量浅层生物气供给,而且局部区域尚有通过泥底辟及气烟囱和伴生断层裂隙或其它运聚通道疏导输入的深部热解气,故构成了以生物气为主混有深部热解气的混合气源供给特点,形成以生物气为主的扩散型或渗漏型以及两者的混合(复合)类型的水合物成因类型,如神狐区水合物藏和东沙区水合物藏即是其典型实例。对于水深 $>2000\text{ m}$ 的第2个天然气水合物成藏富集带,则主要处在超深水区新生代中小型沉积盆地分布区或古斜坡区(深部地壳结构属洋陆过渡带),故其新生代沉积充填规模相对较小(如双峰盆地和笔架盆地),古近系+新近系烃源岩不甚发育,天然气水合物烃源供给仍然主要为大量生物气,亦有少量深部热解气混入,

往往构成以生物气为主的混合气源或(局部区域)以热解气为主的混合气源,亦可形成扩散型或渗漏型水合物成因类型。目前第 2 水合物成藏富集带尚未勘查评价与钻探,但根据天然气水合物成藏地质条件推测,其水合物成因类型相对单一,资源潜力及勘探前景可能有别于第 1 水合物成藏富集带,有望在以后的勘探中获得重大突破与进展。

在天然气水合物勘查评价及钻探试采实践与水合物成藏地质条件深入分析研究的基础上,近年来很多专家均先后提出了南海北部天然气水合物成藏系统理论^[16-20, 36-39](类似常规油气含油气系统理论,即烃源供给系统、运聚输导系统及富集成藏系统的构成与相互时空耦合配置所形成的综合成藏体系),根据该理论及其勘探实践,主要重点分析了天然气水合物从气源形成(烃源岩及供给体系)、到汇聚(流体运聚输导通道类型及畅通性)再到富集成藏(高压低温稳定带及储集条件)三大系统的时空耦合配置关系及其主控因素。在此基础上,进一步分析阐明了南海北部天然气水合物成藏富集规律,总结建立了一套天然气水合物勘查评价及钻探目标预测优选的技术方法及勘探程序与盆地模拟分析的技术评价体系,并在 2013 年后的天然气水合物勘查评价及钻探试采靶区和最佳目标优选评价中,获得了很好验证和钻探试采实践的检验,进而极大地提高了天然气水合物钻探试采成功率,亦大大降低了天然气水合物勘探风险和钻探试采成本。

4 天然气水合物资源潜力及勘探前景

天然气水合物资源规模及潜力是勘查开发及综合利用的物质基础和基本前提条件,亦是摸清“资源家底”制定部署天然气水合物勘探开发计划及长远开发规划,构建上下游产业链促进经济社会发展和经济高效、合理开发利用能源资源,提高社会效益的基础和前提条件,因此,搞清南海北部天然气水合物资源规模及潜力大小至关重要。南海北部天然气水合物资源潜力评价与预测,根据广州海洋地质调查局多年来的海洋地质调查与油气地质综合评价成果,结合区域油气地质条件的深入分析与认识,尤其是参考借鉴中海油近年来在该区取得的深水油气勘探成果及资源评价预测结果,可以较客观全面地对南海北部浅表层天然气水合

物资源潜力及勘探前景进行初步预测与综合分析评价。

近年来,广州海洋地质调查局根据中国地质调查局下达的南海天然气水合物资源评价项目,通过深入分析目前已取得的南海北部天然气水合物勘查评价成果及钻探结果,结合该区油气地质条件以及中海油深水油气勘探成果和油气资源评价预测结果,借鉴常规油气资源通用的评价预测方法,首次在南海北部深水海域分区带区块对天然气水合物资源规模及资源潜力进行了综合评价预测。首先根据南海北部两大水合物成藏富集带的三大富集区不同区块天然气水合物藏分布特征,重点对其不同区块水合物展布规模进行了分析刻画与综合圈定(确定展布面积、分布厚度)。在此基础上,依据水合物勘查钻探结果,确定了一系列水合物资源评价的重要参数(水合物藏分布面积、水合物藏不同层分布厚度、储层储集物性参数、含水合物饱和度及分解系数等),借鉴常规油气资源容积法的储量计算公式,据此计算而最终获得不同区块不同层段水合物矿藏的资源量数据,在此基础上再将不同调查区所有区块水合物矿藏的资源量累加汇总,进而获得南海北部天然气水合物资源的总资源量。通过上述初步地分析计算,最终获得南海海域天然气水合物总资源量达 744 亿 t 油当量(该结果与早期估算的资源量^[1-9]基本相当),其中南海北部天然气水合物资源量可能在 380 亿 t 油当量左右,大致相当于南海天然气水合物总资源量的一半,其是南海北部深水油气资源量(90 亿 t 油当量)的 4 倍多。虽然该水合物资源评价预测结果,限于目前的勘查研究程度尚比较粗略,但可以肯定的是,该区天然气水合物资源规模及潜力仍然比其深水油气资源潜力要大得多。总之,南海北部天然气水合物资源潜力大,且烃源物质基础雄厚(古近系+新近系烃源岩沉积充填规模大),具有广阔的勘探开发前景。尚须强调指出的是,目前勘查发现的天然气水合物藏一般均位于其下伏深部油气田分布区及周缘所在位置,且具有一定的成因联系,在剖面上往往构成了深部常规油气与上覆浅层气(热解气/生物气)及深水海底浅表层天然气水合物相互叠置复式聚集的特殊成藏组合类型^[34-40]。因此,将来深水海底浅表层天然气水合物资源勘查及开发利用,均完全可与深部常规油气及中浅层油气进行联合勘探开

发与综合利用,这样可大大降低深水油气田及天然气水合物藏开发开采的经济门槛和深海昂贵的勘探开发成本费用。总之,对于海上这种剖面上相互叠置复式聚集的不同类型能源资源,如果能够采取联合勘探开发及综合利用,则完全可以大幅度提高油气(含水合物)勘探开发的经济效益,而大大降低油气及水合物勘探开发利用的经济门槛。

5 天然气水合物勘查研究中存在的问题

通过20多年来天然气水合物勘查评价研究及勘探实践,在南海北部天然气水合物成藏地质条件及分布规律与控制因素等方面已取得了一些重要成果与认识^[34-40],基本上解决了南海北部天然气水合物勘查评价中有关天然气水合物地质地球物理综合判识、水合物藏区域展布及主控因素与水合物成藏机制三大关键核心问题。然而,由于南海北部不同区域油气地质条件比较复杂,烃(气)源构成及油气成因具有多阶多期多源混合(复合)的构成特点,加之天然气水合物烃(气)源供给及运聚通道系统复杂与水合物产出赋存型式多样,且水合物藏本身既有固体矿藏的特点亦有流体矿藏的特征,因此,南海北部天然气水合物成藏地质条件与固体矿藏和常规油气藏以及世界其它地区相比具有一些特殊性,故天然气水合物成因成藏机制及运聚成藏系统颇具特色。而这种特殊性及其复杂性不仅给该区天然气水合物勘查评价研究及钻探部署等增加了勘探风险与难度,亦给天然气水合物成矿成藏理论带来了一些新问题及挑战。以下重点针对南海北部水合物勘查评价及地质研究中存在的问题或疑点/难点等进行初步分析总结与探讨。

(1) 天然气水合物运聚成藏主要烃源岩及烃(气)源供给系统尚不清楚

南海北部天然气水合物勘探活动及勘查评价研究虽然已走过了20多年的历程,且在天然气水合物勘查及钻探试采过程中取得了举世瞩目的重大突破与进展,但其油气地质基础研究仍然非常薄弱,尤其是天然气水合物运聚成藏过程中主要烃源岩及烃源供给系统的判识确定等关键核心问题,迄今为止尚未开展深入系统地全面研究,故水合物成藏系统中的主要烃源岩及烃源供给子系统,长期以来均未完全搞清楚(如生物气源及气源岩来自何处

即哪个层位哪一套有机质丰富的生物气源岩,其展布规模多大?热解气源及气源岩来自哪里即哪个层位层段何种类型成熟烃源岩,其展布规模如何?水合物气源通过何种运聚通道输导、其畅通性如何?等等)。因此,在天然气水合物勘查评价及钻探目标优选过程中,其水合物藏形成的关键要素——烃源岩及烃源供给系统分析评价等均属大致推测和描述,并无可靠依据和实际地质资料佐证。

根据从烃源供给到圈闭中运聚成藏的含油气(水合物)系统理论,无论常规油气运聚成藏,还是天然气水合物运聚成藏,实际上均是一个从烃源供给到运聚输导再到汇聚富集成藏的复杂运聚动态平衡过程,且均主要由成烃—运聚—成藏三大板块构成了一个完整的成藏体系(系统)而存在。同时,天然气水合物成藏板块系统主要由水合物赋存的高压低温稳定带(含储层)所构成,而不是常规油气藏的含油气圈闭及其聚集系统。很显然,天然气水合物藏与常规油气藏形成一样,倘若没有烃源供给及输导汇聚作用与富集保存场所等的相互时空耦合配置,难以在深水海底浅表层的高压低温稳定带(相当于常规油气藏的圈闭)形成天然气水合物藏。因此天然气水合物藏的烃源供给系统及有机质丰富的烃源岩,对于天然气水合物藏形成及勘查部署评价与资源规模及资源潜力分析预测等均至关重要。鉴此,笔者认为应参考借鉴常规油气勘探中烃源岩分析评价技术及研究方法,首先要深入分析研究和综合判识确定主要烃源岩,分析追踪与综合判识天然气水合物藏的主要气源。具体研究应包括以下3方面:①主要烃源岩判识确定(有机质丰度、类型及成熟度);②主要烃源岩生烃潜力评价(生烃潜力及产气率);③气源综合追踪对比(水合物分解气与烃源岩成烃生气对比)等。应根据南海北部深水油气勘探及油气地质研究成果,以钻探所获油气及岩石样品地球化学分析资料为基础,结合不同类型天然气水合物藏的气体地球化学特征,尤其是气体(甲烷及乙烷)稳定碳氢同位素分析检测结果,综合判识确定天然气水合物气源岩成因类型及特征。同时,要依据该区不同层位烃源岩热模拟生烃实验与生物气模拟实验结果,结合盆地构造沉积充填演化特点及展布特征,综合评价热解气气源岩和生物气气源岩的生烃潜力,为气源对比追踪提供基础数据及可靠依据。

总之, 在深入分析水合物分布区油气地质条件的基础上, 根据天然气水合物高压低温稳定带的成藏地质条件, 尤其是烃源供给运聚系统类型及水合物主要分布赋存方式等, 综合判识确定不同类型水合物藏的主要烃源岩及其具体评价标准和依据。其次, 应深入研究重点分析刻画天然气水合物气源供给输导及运聚系统的构成特征与主要成因类型等。具体研究内容应包括以下 3 点: ①水合物气源输导运聚系统精细刻画与判识确定; ②水合物气源输导运聚系统主要成因类型及其展布特征; ③不同类型水合物气源输导运聚系统的有效性 & 畅通性与运聚输导效率研究。

(2) 气源供给及运聚输导系统与水合物稳定带时空耦合配置缺乏深入研究

天然气水合物藏的气源(烃源)供给系统与其富集成藏场所(即高压低温稳定带)的时空耦合配置关系, 犹如常规油气藏的烃源供给系统与其含油气圈闭及成藏聚集系统的时空配置关系一样, 对于其运聚成藏至关重要。然而目前对于这种天然气水合物运聚成藏的配置关系的研究非常薄弱, 基本上属于空白。因此, 在天然气水合物勘查评价及地质研究与具体钻探目标的勘探部署过程中, 对于以上研究应给予高度重视, 尤其是要结合水合物勘查评价区具体的油气地质条件及勘探成果, 开展气源供给及运聚系统与水合物高压低温稳定带时空耦合配置关系的深入分析研究。具体应包括以下 2 方面: ①根据烃源条件及构造沉积演化特征, 分析气源及运聚输导系统形成时期及展布规律; ②天然气水合物高压低温稳定带形成时间及与气源运聚输导系统的时空耦合配置关系。

(3) 未成岩黏土质粉砂型储层水合物储集机理尚未搞清

南海北部天然气水合物藏主要赋存于 800~3800 m 深水海底浅表层软地层未成岩极细粒沉积物中, 而其天然气水合物高压低温稳定带之未成岩黏土质粉砂型沉积物储层的储集物性特征及储集机理, 目前尚不甚清楚, 尤其是对于南海北部这种特殊水合物储层的储集物性分析测试及研究则更为薄弱, 或缺乏深入研究与分析实验工作。从储层岩石学及矿物学的角度看, 含水合物的未成岩黏土质粉砂型沉积物储层与相邻不含水合物未成岩黏土质粉砂型沉积物并无差异, 而水合物为什么能够

赋存聚集在其中的储集机理及控制因素, 目前均无法解释或说清楚。因此, 对于这种未成岩黏土质粉砂型沉积物储层类型的水合物储集物性参数及赋存储集机理等, 迄今为止仅仅做过一些探索性检测及实验分析或定性描述与推测, 而水合物储层物性参数均通过测井信息计算获得, 但其可靠性及可信度存疑。鉴此, 对于这种特殊的未成岩极细粒沉积物类型水合物储层储集物性及储集机理的研究, 应是水合物富集成藏机理研究中的重中之重, 因此应该加大实验检测与研究的力度, 采用国内外先进的分析实验技术方法及手段(如 CT 或核磁共振等), 反复实验和不断实践探索, 尽可能地能够获取最可靠的水合物储层的储集物性参数。在此基础上, 重点针对这种未成岩沉积物储层类型水合物的储集物性及储集机理, 开展深入系统地分析研究。建议具体应聚焦以下 2 点: ①水合物稳定带未成岩黏土质粉砂型/粉砂质黏土型沉积物储层这种特殊岩性的储集物性参数的精准分析检测与实验; ②水合物稳定带未成岩黏土质粉砂型/粉砂质黏土型沉积物储层类型水合物的储集机理及赋存富集类型特点。

(4) 天然气水合物产出类型与气源供给及成因关系尚待深入研究

虽然南海北部天然气水合物勘查评价及钻探试采均取得了重大突破, 且对于天然气水合物成藏系统理论的认识与研究亦获得了一些重要进展^[16-21, 36, 39], 但对于天然气水合物产出赋存类型及成因与气源构成及供给关系等研究目前尚存在一些问题。尤其是在南海北部天然气水合物勘查评价及钻测井过程中, 笔者发现扩散型、渗漏型及混合(复合)型 3 种产出赋存类型的天然气水合物成因及其气源构成(供给)等, 均具有某些特殊性和复杂性, 并非以往人们所认识的那样, 气源成因及构成(供给)与水合物产出类型完全一致或吻合^[53-56], 即天然气水合物产出类型及赋存特征一般均与其气源成因及其构成特点基本一致(即扩散型以邻近的生物气源供给为主, 运聚方式属分子扩散型, 缺少断层裂隙运聚通道系统; 渗漏型以深部远源的热解气源供给为主, 运聚方式属强烈渗漏充注型, 断层裂隙、泥底辟及气烟囱等运聚系统发育; 混合型则以生物气与热解气构成的混合气源供给为主, 运聚方式及运聚系统兼有前两者的特点)。典型实例如珠江口盆地东沙调查区天然气水合物藏, 其气源构成及供给

均以大量的生物气充注为主(甲烷高达99%以上,甲烷碳同位素 $<-60\text{‰}$),但天然气水合物产出类型及赋存方式,既有扩散型亦有渗漏型和混合型,且在剖面上构成了交互出现复式聚集的特点;再如珠江口盆地中南部白云凹陷神狐区天然气水合物藏,其气源构成及供给亦以生物气充注为主(甲烷高达99%以上,甲烷碳同位素 $<-55\text{‰}$),但天然气水合物产出类型除大部分为扩散型外,局部区域亦有少量以渗漏型赋存方式产出的水合物。另外,琼东南盆地松南-宝岛区天然气水合物藏亦具有类似特点,以生物气及亚生物气为主,混有大量热解气(甲烷为90%, C_2+ 为10%;甲烷碳同位素 $<-50\text{‰}$)。诸如此类实例全球范围内亦有不少(郁陵盆地、布莱克海脊等地区)。总之,这种天然气水合物赋存产出类型与其气源供给及成因和构成特点明显不符的特殊性及地质客观实际,均充分表明了天然气水合物产出类型及赋存方式与其气源构成(供给)及其成因,并不存在直接的成因联系和耦合匹配关系。鉴此,建议应深入开展天然气水合物产出类型与气源供给及构成特点、运聚通道系统等相关性的分析研究,尤其要将天然气水合物藏的气源供给与运聚系统及富集成藏的场所(水合物高压低温稳定带)三者作为一个完整的水合物成藏系统,在时空尺度上开展深入系统地全面研究,综合剖析不同类型天然气水合物的主要成藏地质条件及控制因素与相互作用及时空耦合配置关系等,在此基础上总结完善和建立南海北部扩散型、渗漏型及混合/复合型天然气水合物成藏系统的成因机制与分布模式,深入剖析其控制影响因素。

(5) 南海北部中生界水合物资源尚待探索与勘查评价

迄今为止,南海北部深水区天然气水合物勘查评价及钻探均主要集中在新生代沉积盆地,而中生代沉积盆地尚未开展天然气水合物资源调查与勘查评价等研究工作。众所周知,南海北、南陆缘均残留了较大范围一定厚度的中生界沉积,如南海北部珠江口盆地东部潮汕拗陷和南海东南部礼乐地块等区域,其残留中生界厚度最大超过5 km^[57-59]。尽管中生代沉积大部分地区多经历了一定程度的岩浆和张裂活动破坏,但钻探结果表明亦有部分区域具有生烃条件,如珠江口盆地潮汕拗陷北部LF35-1-1井钻遇的海相侏罗系中多层段暗色泥岩已达到

中等烃源岩有机质丰度标准(有机碳含量1.00%~1.48%),表明具有一定的生烃潜力;再如南海东南部礼乐滩盆地,该盆地钻探的Sampaguita-3A井在古新统砂岩段测试获高达3.6 MMscf的天然气日产量,判识其气源来自下伏中生界,亦证实中生界具有生烃潜力^[60]。而且,近年来珠江口盆地东沙海区的海山调查中,发现了许多海山多为新近纪晚期活动形成的泥火山^[61]。另外,南海东南部礼乐滩西南海区亦见有大量麻坑^[62]。这些迹象均表明和预示南海中生界沉积分布区可能具有生烃条件,能够为油气及水合物等矿藏形成提供烃源供给,促使其富集成藏。因此,可以推测和判定南海中生界沉积具备烃源供给条件,建议对南海北部中生界沉积盆地尽快开展天然气水合物资源调查与勘查评价,拓宽天然气水合物勘探领域和勘探范围,争取早日获得中生界天然气水合物资源勘探的重大突破,不断开创南海北部天然气水合物勘探的新局面。

6 结语

通过深入分析南海北部天然气水合物勘查试采成果,全面总结其勘查试采与研究中的创新点及重大进展,进一步阐明了南海北部天然气水合物藏分带分块的运聚富集特征,同时分析探讨了南海北部天然气水合物资源潜力及勘探前景与成藏地质研究中存在的问题,以及需要进一步深入研究与重点攻关的建议及解决方法。必须强调指出,目前在水合物试采工程及试采技术方法与水合物产能目标上,尚面临着水合物气产量较低、采收率不高,离经济开采门槛还有相当大的距离等关键生产问题。笔者坚信通过广大科研者及海洋油气地质专家们不断的潜心研究与脚踏实地的工作,一定能够不断取得南海北部天然气水合物勘查试采工程项目的突破和新进展,进而为保障国家能源安全,适应经济社会发展以及满足人们物质文化生活之重大需求,提供优质能源资源。

参考文献:

- [1] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 11-18.
- [2] 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 20-28.
- [3] 姚伯初, 杨木壮, 吴时国, 等. 中国海域的天然气水合物[J]. 现

- 代地质, 2008, 22(3): 333-341.
- [4] 姚伯初. 南海天然气水合物的形成和分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 81-90.
- [5] 张光学, 黄永祥, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(1): 75-81.
- [6] 王淑红, 宋海斌, 颜文, 等. 南海南部天然气水合物稳定带厚度及资源量估算[J]. 天然气工业, 2005, 25(8): 24-27.
- [7] 王淑红, 宋海斌, 颜文, 等. 全球与区域天然气水合物中天然气资源量估算[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(4): 1145-1154.
- [8] 梁金强, 吴能友, 杨木壮, 等. 天然气水合物资源量估算方法及应用[J]. 地质通报, 2006, 25(9/10): 1205-1210.
- [9] 葛倩, 王家生, 向华, 等. 南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算[J]. 地球科学, 2006, 31(2): 245-249.
- [10] 秦绪文, 石显耀, 杨胜雄, 等. 世界海洋地质调查发展历程与启示[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(1): 1-6.
- [11] 张光学. 2014, 海洋天然气水合物地震联合探测[M]. 北京: 地质出版社.
- [12] 杨胜雄, 梁金强, 刘昌岭, 等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展[J]. 中国地质调查, 2017, 4(2): 1-8.
- [13] 杨胜雄, 陈邦彦, 刘保华, 等. 海域资源与环境立体探测技术发展方向与对策[J]. 中国地质, 2001, 28(10): 10-15.
- [14] 杨胜雄. 2013. 南海天然气水合物富集规律与开采基础研究专集[M]. 北京: 地质出版社, 1-437.
- [15] 杨胜雄, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 1-14.
- [16] 吴能友, 张海敏, 杨胜雄, 等. 南海神狐海域天然气水合物成藏系统初探[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 1-7.
- [17] 卢振全, 吴能友, 陈建文, 等. 试论天然气水合物成藏系统[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 363-375.
- [18] 张光学, 梁金强, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物成藏特征[J]. 天然气工业, 2014, 34(11): 1-10.
- [19] 张光学, 陈芳, 沙志斌, 等. 南海东北部天然气水合物成藏演化地质过程[J]. 2017, 24(4): 15-23.
- [20] 吴能友, 杨胜雄, 王宏斌, 等. 南海北部陆坡神狐海域天然气水合物成藏的流体运移体系[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1641-1650.
- [21] 梁金强, 王宏斌, 苏新, 等. 南海北部陆坡天然气水合物成藏条件及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 128-135.
- [22] 叶建良, 殷琨, 蒋国盛, 等. 天然气水合物钻井的关键技术与对策[J]. 探矿工程, 2003(5): 45-48.
- [23] YE J L, WEI J G, LIANG J Q, et al. Complex gas hydrate system in a gas chimney, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 104: 29-39.
- [24] 吴能友, 黄丽, 苏正, 等. 海洋天然气水合物开采潜力地质评价指标研究: 理论与方法[J]. 天然气工业, 2013, 33(7): 11-17.
- [25] 吴能友, 黄丽, 胡高伟, 等. 海域天然气水合物开采的地质控制因素和科学挑战[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 1-11.
- [26] 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.
- [27] 刘昌岭, 李彦龙, 孙建业, 等. 天然气水合物钻采一体化模拟实验系统及降压法开采初步实验[J]. 新能源, 2019, 39(6): 165-172.
- [28] 沙志斌, 王宏斌, 杨木壮, 等. 天然气水合物成矿带的识别技术研究[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 438-446.
- [29] 沙志斌, 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.
- [30] 冯俊熙, 杨胜雄, 孙晓明, 等. 琼东南盆地甲烷微渗漏活动地球化学示踪研究[J]. 西南石油大学学报, 2018, 40(3): 63-75.
- [31] 王宏斌, 张光学, 梁劲, 等. 南海北部陆坡构造折带中天然气水合物[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 283-293.
- [32] 杨木壮, 沙志斌, 梁金强, 等. 南海东北部陆坡区天然气水合物成矿作用[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 340-348.
- [33] 于兴河, 王建忠, 梁金强, 等. 南海北部陆坡天然气水合物沉积成藏特征[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 253-264.
- [34] 梁金强, 张光学, 陆敬安, 等. 南海东北部陆坡天然气水合物富集特征及成因模式[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 157-162.
- [35] 梁金强, 付少英, 陈芳, 等. 南海东北部陆坡海底甲烷渗漏及水合物成藏特征[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 761-770.
- [36] 苏丕波, 何家雄, 梁金强, 等. 南海北部陆坡深水区天然气水合物成藏系统及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(7): 1-10.
- [37] 苏丕波, 梁金强, 付少英, 等. 南海北部天然气水合物成藏地质条件及成因模式探讨[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 415-427.
- [38] 苏丕波, 梁金强, 沙志斌, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物成藏动力学模拟[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 226-233.
- [39] 何家雄, 卢振权, 苏丕波, 等. 南海北部天然气水合物气源系统与成藏模式[J]. 西南石油大学学报, 2016, 38(6): 8-24.
- [40] 何家雄, 卢振权, 张伟, 等. 南海北部珠江口盆地深水区天然气水合物成因类型及成矿成藏模式[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 1024-1034.
- [41] LI J F, YE J L, QIN X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. China Geology, 2018, 1: 5-16.
- [42] 周守为, 陈伟, 李清平. 深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 1-7.
- [43] 周守卫, 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.
- [44] 周守为, 李清平, 陈伟, 等. 天然气水合物开采三维实验模拟技术研究[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 1-9.
- [45] 赵金洲, 李海涛, 张烈辉, 等. 海洋天然气水合物固态流化开采大型物理模拟实验[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 76-83.
- [46] 赵金洲, 周守卫, 张烈辉, 等. 世界首个海洋天然气水合物固态流化开采大型物理模拟实验系统[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 15-22.
- [47] 梁前勇, 赵静, 夏真, 等. 南海北部陆坡天然气水合物区海水甲烷浓度分布特征及其影响因素[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 89-101.
- [48] YE J L, QIN X W, QIU H J, et al. Preliminary results of environmental monitoring of the natural gas hydrate production test in

- the South China Sea[J]. *China Geology*, 2018, 2: 202-209.
- [49] 叶建良, 秦叙文, 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.
- [50] 刘昌岭, 业渝光. 海洋天然气水合物实验分析技术[J]. *海洋地质前沿*, 2008, 24(11): 13-34.
- [51] 刘昌岭. 打造国际一流实验平台推动我国水合物科研水平提升[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 38-58.
- [52] 刘昌岭, 李彦龙, 孙建业, 等. 天然气水合物试采: 从实验模拟到场地实施[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 12-26.
- [53] 樊栓狮, 刘峰, 陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(5): 524-530.
- [54] 樊栓狮, 关进安, 梁德青, 等. 天然气水合物动态成藏理论[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(6): 819-826.
- [55] 陈多福, 冯东, CATHLES L M. 海底天然气渗漏系统水合物成藏动力学及资源评价方法[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(2): 278-284.
- [56] 陈多福, 苏正, 冯东, 等. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 38-46.
- [57] 郝沪军, 施和生, 张向涛, 等. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件: 基于LF35-1-1探索井钻探结果的讨论[J]. *中国海上油气*, 2009, 21(3): 151-156.
- [58] YAN P, WANG L L, WANG Y L. Late Mesozoic compressional folds in Dongsha Waters, the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 2014, 615/616: 213-223.
- [59] TAYLOR B, HAYES D E. Origin and history of the South China Sea basin. In D. E. Hayes[C]//The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Washington DC, American Geophysical Union, 1983:23-56.
- [60] YAN P, WANG Y L, LIU J, et al. Discovery of the southwest Dongsha Island mud volcanoes amid the northern margin of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 858-870.
- [61] 王潇, 阎贫, 于俊辉, 等. 东沙岛西南泥火山区的地震烃类检测[J]. *地球科学*. DOI: 10.3799/dqkx.2020.069
- [62] 张田升, 吴自银, 赵获能, 等. 南海礼乐盆地海底麻坑地貌及成因分析[J]. *海洋学报*, 2019, 41(3): 106-120.

THE EXPLORATION AND PRODUCTION TEST OF GAS HYDRATE AND ITS RESEARCH PROGRESS AND EXPLORATION PROSPECT IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA

HE Jiaxiong¹, ZHONG Canming^{3*}, YAO Yongjian², YAN Pin^{4,5}, WANG Yanlin^{4,5},
WAN Zhifeng⁶, GUAN Ju³, ZHANG Jinfeng⁶

(1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 3 Guangzhou Institute of Energy Testing, Guangzhou 511447, China; 4 CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China; 5 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 5111458, China; 6 School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract: Since the middle and late 1990s, the gas hydrate exploration in the northern South China Sea has gained great achievements and milestone breakthroughs. So far, two large gas hydrate genetic belts and three enriched regions have been identified through exploration and evaluation, and three gas hydrate deposits with more than 100 billion cubic meters of reserves confirmed. At the same time, through the two exploratory production tests in 2017 and 2020, the world records for total and daily gas production were surpassed, and the core technology of deep-water seafloor horizontal well drilling in shallow unconsolidated sediments succeeded, and a great leap from "exploratory production test" to "experimental production test" realized. However, the exploration and production test of gas hydrate resources in the South China Sea, a huge systematic project, still faces problems and challenges, such as the genetic type of gas hydrate, the characteristics of gas supply and production, the main control factors for genesis and accumulation of gas hydrate, the optimization and innovation of exploration and production test technology, the realization of commercial capacity, the selection of strategic regions for sustainable exploration and development of gas hydrate and the succession of resources and reserves. In conclusion, further efforts are required for the exploration and production test of gas hydrate in the South China Sea.

Key words: northern South China Sea; gas hydrate resources; methods of exploration and evaluation; technology of drilling and production; reservoir forming system; prospect of exploration