

2017年天然气水合物研发热点回眸

魏伟¹, 张金华¹, 于荣泽¹, 林斌斌², 陈龙桥², 彭涌¹, 肖红平¹

1. 中国石油勘探开发研究院新能源研究所, 廊坊 065007

2. 中国石油集团海洋工程有限公司钻井事业部, 天津 300280

摘要 2017年, 天然气水合物研发领域散发出强劲活力, 发生了一系列重大事件。本文回顾了2017年日本南海海槽天然气水合物试采、中国神狐海域天然气水合物试采、中国荔湾海域天然气水合物试采、天然气水合物作为新矿种等重大事件和进展, 盘点了天然气水合物油气系统在中国南海神狐海域等主要地区的应用与研究、动力学抑制剂、开采方法、沉积物稳定性、环境效应等研究热点, 部分展示了中国在天然气水合物领域作出的贡献, 并进一步分析了天然气水合物未来研究热点。

关键词 天然气水合物; 神狐海域; 试采; 开采方法; 新矿种

天然气水合物是一种非常规天然气资源, 以固态形式赋存于深海沉积物中和永久冻土地区, 资源量巨大, 且99%存在于海洋中, 海洋沉积物中赋存的天然气水合物也已成为勘探开采研究的重点^[1]。2017年, 国际天然气水合物领域见证了一系列研究热点和重要事件。本文对2017年天然气水合物成藏研究、开采方法、安全与环境效应、勘探与试采等领域取得的代表性成果作一简要盘点。

1 研究热点

1.1 围绕墨西哥湾、日本南海海槽、中国南海北部、日本海郁龙盆地、印度大陆边缘等区域开展天然气水合物油气系统等成藏与富集规律研究

近年来, 天然气水合物勘探区域主要集中在墨西哥

湾、韩国郁龙盆地、印度孟加拉湾、日本南海海槽、中国南海北部等海域(图1), 取得了积极进展, 2017年6月25—30日, 在美国科罗拉多州丹佛市召开的第九届



图1 当前天然气水合物勘探热点区域示意

Fig. 1 The current hotspots areas of natural gas hydrate exploration

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-01-03

基金项目: 中国石油油气勘探科技项目(2016B-4901); 中国石油-中国科学院科技合作项目(2015A-4813)

作者简介: 魏伟, 高级工程师, 研究方向为天然气水合物等非常规能源, 电子信箱: weile@petrochina.com.cn; 张金华(通信作者), 工程师, 研究方向为天然气水合物等非常规能源, 电子信箱: zhangjh69@petrochina.com.cn

引用格式: 魏伟, 张金华, 于荣泽, 等. 2017年天然气水合物研发热点回眸[J]. 科技导报, 2018, 36(1): 83-90; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.01.009

国际天然气水合物大会(ICGH9)针对这些区域分别设立了天然气水合物专题进行研讨。系统论成为天然气水合物成藏研究的趋势,天然气水合物油气系统的概念已逐步被接受,并运用到区域的天然气水合物成藏研究中。普遍认为赋存于富砂/粉砂沉积物中的高饱和度孔隙充填型天然气水合物是当前有利的开发目标。

天然气水合物的分布规律与特定的海洋地质特征之间存在着极其密切的关系。区域构造地质条件是天然气水合物成藏重要影响因素之一,同时成藏与富集规律研究离不开勘查及钻探等工作。依托钻探岩心、测井等资料,主要围绕天然气水合物成藏特征、成藏演化、储层及分布特征、沉积物特征、气源类型及运移机制、资源量预测、站位选择等进行探讨^[12-17]。研究认为天然气水合物的形成和分布受气源、沉积、岩性、温压和构造等条件影响,天然气水合物在地层中的赋存形态主要包括块状形、脉状形、分散形等(图2(a))。充足的气源供给、良好的运聚输导系统和高压低温稳定带三大要素的时空耦合配置发挥着关键性作用。研究显示微生物成因气是各区域天然气水合物中甲烷气体的主要来源。海洋泥岩和薄砂层间存在着甲烷从无砂体的裂缝型泥岩中运移到局部形成天然气水合物、甲烷从裂缝发育的泥岩到薄砂体的短距离运移、甲烷从深部气源到分散的含天然气水合物砂体中的长距离运移等多种气体运移机制。当海洋泥岩中赋存砂体且发育裂缝时,天然气水合物优先在砂体中形成和发育。

在资源评价方面,充分利用区域内常规油气测录井等勘探资料,结合天然气水合物勘探的三维叠前地震资料、录井资料和岩心数据,建立数学模型等,开展储层刻画、天然气水合物资源赋存情况分析、天然气水合物饱和度预测以及小范围内更为精细的天然气水合物资源量计算。在区域选择方面,基于地震资料,进行泥火山和气烟囱等流体运移通道、似海底反射(bottom simulation reflector, BSR)和高阻抗等天然气水合物赋存指示标志的识别辨析,积极探索基于均方根振幅和瞬时频率等振幅属性、波阻抗反演等多属性联合评价方法,开展天然气水合物甜点区选择研究。

针对墨西哥湾,2017年5月,美国开展了UT-GOM²-1航次的天然气水合物钻探,该航次主要由德克萨斯大学(UT)奥斯汀分校主导,美国地质调查局(USGS)、俄勒冈大学、哥伦比亚大学等机构参与。针对墨西哥湾北部GC955区块富砂质储层中的天然气水合

物,开展保压取芯设备的测试,并采集足够多的样品从而保障在实验室开展深水砂质储层中的天然气水合物的性质和赋存情况等相关科学问题的研究。该航次共钻探了两口井(GC955H-002和GC955H-005),钻井位于2009年墨西哥湾天然气水合物联合工业计划第二航次(JIP Leg II)的GC955-H井附近,水深约2000 m,钻获了极低扰动的总长超过30 m的保压岩心样品^[18-19]。

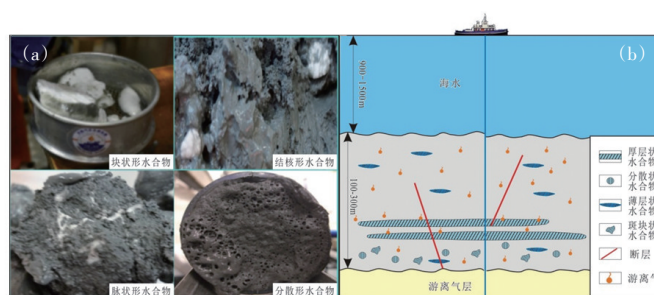


图2 天然气水合物主要赋存形态及神狐海域天然气水合物成藏序列(修改自文献[2])

Fig. 2 Morphologies of natural gas hydrate insamples and accumulation sequence of gas hydrate in Shenhu area, South China Sea

中国南海北部天然气水合物成藏研究尤为突出,《地学前缘》2017年第4期刊登了“南海天然气水合物研究进展”主题专辑。相关研究表明,神狐地区主要存在厚层状、分散状、斑块状、断层附近和薄层状天然气水合物(图2(b)),储集层以黏土质粉砂细粒沉积物为主,较弱的沉积压实作用及有孔虫化石的沉积使储集层具有较高的孔渗性,增大了高饱和度天然气水合物形成和赋存的空间。扩散、渗漏驱动的二元成藏动力学过程综合作用致使南海北部形成了上下多层的复式天然气水合物矿藏,深部热解气通过断层运移至天然气水合物稳定带形成构造渗漏型天然气水合物,浅层生物气横向运移形成薄层状扩散型天然气水合物。2017年,中国新一代远洋综合科考船“科学”号在执行中国科学院战略性先导科技专项中,通过“发现”号无人潜水器携带的深海激光拉曼光谱探针,科考团队在中国南海约1100 m的深海海底,探测到2个站点存在裸露于海底的天然气水合物(图3^[20]),1个站点分布在冷泉化能极端生物群落中,动态合成并分解的天然气水合物可以为深海冷泉化能极端生命提供甲烷和硫化氢等能量源;另一个天然气水合物站点位于一个活动冷泉喷口的内壁。这是在中国南海海域首次发现裸露海底

的天然水合物^[20]。现场探测数据显示,快速生成的天然气水合物并非单一笼型结构,其内部存在大量的甲烷、硫化氢等自由气体,这也是国际上首次使用原位拉曼光谱数据证实这一科学结论。

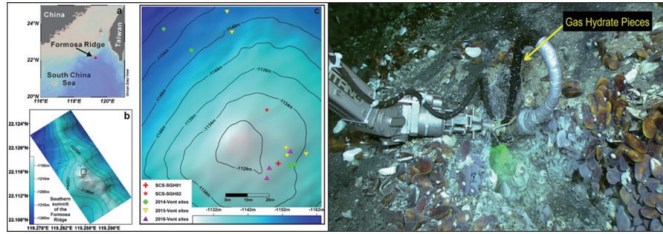


图3 中国南海海域首次发现裸露在海底的天然水合物
Fig. 3 Observed and found of the gas hydrates exposed on the seafloor for the first time in South China Sea

1.2 天然气水合物基础研究方兴未艾,开发方法和技术处于积极探索中,并取得重要进展

天然气水合物基础物性参数研究主要基于室内人工合成的天然气水合物沉积物,随着对天然气水合物研究的深入与分析测试技术的发展,许多先进的检测方法、分析技术和大型仪器被用于天然气水合物的分析与鉴定中,通过运用晶体学、谱学、形态学、地球化学及热学等分析技术,对天然气水合物的本征特性进行系统研究^[21]。通过实验室模拟实验,利用天然气水合物储层高电阻率特点,研究沉积物中天然气水合物生成与分解过程中电阻率的变化规律,了解天然气水合物沉积物电学特性与饱和度之间的关系;利用可以反映岩性、天然气水合物分布及含量等信息的声学特性,开展天然气水合物声学性质及天然气水合物饱和度、温度、压力、频率等因素对天然气水合物沉积物纵横波速度与幅度等声学参数的影响规律研究,获取不同的岩性特征和天然气水合物分布信息,从而指导天然气水合物勘探及资源评价。

天然气水合物动力学抑制剂的研发对天然气(尤其是深海天然气)/天然气水合物开采、天然气集输等具有重要意义,是当前研究的热点^[22-23]。动力学天然气水合物抑制剂(kinetic hydrate inhibitors, KHIs)通常是低剂量的水溶性高分子,可扰乱水分子和客体分子之间的有序状态,延缓或阻止天然气水合物临界晶核的形成,降低成核速率,而不改变热力学条件。随着动力学天然气水合物抑制剂研发的不断深入,为了评价抑制剂的性能和对抑制剂的选择,实验室通常模拟天然气

水合物生成环境,采用多种检测手段与分析技术对天然气水合物的结构、形成与分解等问题进行研究。

天然气水合物特别是海洋天然气水合物的安全、高效开发是当前世界的前沿创新技术领域,海洋天然气水合物有效经济开采面临的资源评价、开采技术方法、储层地质参数和工程地质风险等方面的科学挑战。要实现海洋天然气水合物的有效经济开采,资源评价是基础,开采技术方法是关键^[1]。目前天然气水合物开采方法主要热激法、降压法和化学试剂法等,普遍认为,降压法开采天然气水合物是目前技术较为成熟、环境相对友好的一种试采方法。中国、日本也通过降压法成功实施了海洋天然气水合物试采,证实了简单的降压开采是可行的,但产气速率较低。模拟分析显示,天然气水合物分解和产气速率取决于天然气水合物储层的地球物理属性、储层的传热和传质作用、地层间的相对渗透率、降压幅度及模型的环境,特别是渗透率和可用于分解天然气水合物的热量起着非常重要的作用^[24-25]。同时,积极探索固态流化法、地下转化工艺技术(in-situ conversion process, ICP)、蒸汽辅助重力驱油技术(steam assisted gravity drainage, SAGD)、降压法结合加热法等天然气水合物开采中的应用及模拟研究^[26-28]。针对海洋非成岩天然气水合物的物理特征、成藏特点,依据天然气水合物固态流化开采法的工艺流程,在西南石油大学建立了海洋天然气水合物固态流化开采实验室,天然气水合物固态流化开采主要思路是采用机械破碎而后进行管输,利用天然气水合物自动解析、举升,顺势开发,变不可控为可控,最终实现安全、绿色钻采,该技术在2017年5月中国南海荔湾天然气水合物试采中得到了应用和实践。

1.3 天然气水合物资源与安全、气候环境效应等研究受到广泛关注

含天然气水合物沉积物的温度-压力机制及其对沉积物稳定性的作用等是当前天然气水合物研究的热点之一。当天然气水合物分解时,天然气水合物对沉积物储层的填充和胶结作用降低,沉积物层的有效应力和孔隙压力等发生改变,容易引发地层变形、滑动、生产平台坍塌等,导致自然类和工业类的地质灾害,将严重制约天然气水合物的安全开发^[29]。已有研究表明海床的稳定性与海洋沉积物的刚度、剪切强度参数(黏聚力和摩擦角)及沉降参数等力学与变形特征直接相关。天然气水合物硬度、强度、应力与应变及压缩系数

等力学性能指标及天然气水合物类型与饱和度、温度、压力与应变等因素对天然气水合物沉积物的力学性质影响规律研究对指导天然气水合物开采具有重要意义。天然气水合物沉积物岩土力学特性、稳定性分析及本构模型等是天然气水合物开发地质安全评价的重点,而三轴力学试验是获取天然气水合物沉积物力学参数最直接有效的手段之一^[30-32],通常针对甲烷、二氧化碳和四氢呋喃等不同类型的天然气水合物沉积物,以砂土为骨架,分析天然气水合物沉积物的力学参数等特性。

天然气水合物的资源和环境效应是目前天然气水合物研究的热点问题之一,而关于环境不稳定导致甲烷释放的变化的相关研究在未来将继续是一个重大的科学目标^[33]。据估算天然气水合物中甲烷总含量约为大气中甲烷量的3000倍,作为大气中甲烷的一种重要来源,天然气水合物在控制全球长期气候变化方面起着重要的作用。科学界认为在地质历史时期,极地表面温度的升高,海底底层水温的升高或者海平面下降引起的压力变化及快速沉积作用等都可以改变海洋沉积物的温度和压力,导致海底天然气水合物的失稳分解释放出甲烷,从而造成全球气候变化。另一方面,全球气候变化反过来又将影响甲烷海底逸出速率,加剧气候变化的波动性。天然气水合物分解对全球气候变化的影响,尤其海底天然气水合物对全球变化的影响的合理评价还待于大量的观测与研究^[17]。此外,对于天然气水合物生物效应的研究主要集中在冷泉生态群落的结构、多样性与分布、运转机制与控制因素、以及冷泉生态群落对于天然气水合物失稳造成甲烷释放的响应等方面。

2017年11月26日,以“蠕变中的天然气水合物滑动和希库兰吉随钻测井”为主旨的IODP 372航次在澳大利亚弗里曼特尔维多利亚港口起航。IODP 372航次时间安排为2017年11月26日至2018年1月4日,该航次的2个主要目标为:1) 调查天然气水合物和 underwater 滑坡的关系;2) 沿着希库兰吉俯冲带界面,刻画与再发的浅部缓慢滑动事件有关联的沉积物和断层区域结构和物理属性^[34]。新西兰东部的希库兰吉大陆边缘为两个研究主题提供了独特的研究靶体。在希库兰吉大陆边缘的Tuaheni滑坡复合体显示出了活动的蠕变变形的特征证据,并且更为值得关注的是,蠕变中的近陆边缘与海底的天然气水合物稳定带底部的尖灭相一致。

2 重大事件

2.1 日本实施第二次海洋天然气水合物试采

针对2013年第1次海洋天然气水合物试采遇到的出砂、井下气水分离、长期稳定生产等技术问题,制定了相关研究方案 and 对策,以期在实际场地验证解决方案的有效性,并通过验证工作获取更长期试采和未来产业化所需的储层响应数据,为此,第2次试采站位选择等方面与第1次试采相同,并在作业平台选择方面也利用“地球号”实施现场钻探和产气试验作业。

2017年4月7日,“地球号”从清水港出发驶往第二渥美海丘开始进行第2次海域试采的准备工作,5月4日开始从水深1000 m的海底部350 m的含天然气水合物储层中产气,5月15日,由于大量地层砂进入第1口生产井内,决定临时中断产气试验,为期12天的产气试验累计产气量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。6月6日完成第2口生产井的切换作业,并进行了为期24天的产气实验,累计产气约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产量超过 8000 m^3 。针对防砂采取的措施,采用了利用形状记忆聚合物(SMP)的膨胀封堵井壁与地层间环形空间的GeoFORM防砂系统。试采结果表明,在第2次试采中,两口生产井中的第1口遇到了出砂问题,第2口井没有遇到该问题,其原因可能是第1口井所采用的预先膨胀的GeoFORM防砂系统未能有效地封堵井壁与地层间的环形空间,而第2口井的封堵效果良好则可能是因为采用了在井下膨胀的GeoFORM防砂系统^[1,35-36]。

2.2 中国神狐海域天然气水合物试采创造了产气时间和累产气量的世界纪录

2017年5—7月,中国地质调查局在南海神狐海域采用流体抽取法成功实施天然气水合物试采(图4),从水深1266 m海底以下203~277 m的粉砂质黏土、黏土质粉砂储层中开采出天然气,2017年5月10日至7月9日连续稳定试采60天,累计产气 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,平均日产 5151 m^3 ,甲烷含量最高达99.5%,最高初产 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,取得持续产气时间最长、产气总量最大、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果,创造了产气时间和产气总量的两项世界纪录。这是国际上首次针对细粒沉积物储层实现试采,具有重大的科学和能源意义。2017年5月18日,中共中央、国务院对海域天然气水合物试采成功发来贺电指出,“经过近20年不懈努力,我国取得了天然气水合物勘查开发理论、技术、工程、装

备的自主创新,实现了历史性突破。”“海域天然气水合物试采成功只是万里长征迈出的关键一步,后续任务依然艰巨繁重。”^[11]



图4 南海神狐海域天然气水合物成功试采

(图片来源:国土资源部)

Fig. 4 Successfully production trial test of natural gas hydrate in Shenhu area, South China Sea

执行本次试采技术服务的钻井平台“蓝鲸I号”是目前全球作业水深、钻井深度最深的半潜式钻井平台,适用于全球深海作业。通过试验探索和科学研究,取得了一些新的成果和认识:1) 防砂技术先进,方法可靠,持续有效发挥作用,保障产气通道状态良好;2) 在举升方式等多方面实现创新,提高产量效果显著;3) 调控产能平稳有效,气流稳定,持续时间已达到生产性试开采要求,为产业化发展奠定了坚实的基础;4) 海水及周边大气等甲烷浓度无异常,环境无污染;5) 井壁和地层稳定,未发生地质灾害,实现了安全可持续生产;6) 试采理论、技术、工程和装备领跑优势不断扩大。

2.3 中国首次成功实施海洋浅层非成岩天然气水合物固态流化试采

针对深水浅层几米到上百米、非成岩全新的开采模式,提出了固态流化开采新方法,并以南海北部海洋天然气水合物储集区为试采目标区,研究制定了海洋天然气水合物目标勘探、钻探取样和固态流化试采一体化实施方案。2017年5月25日,在南海北部荔湾3站位依托“海洋石油708”深水工程勘察船,利用完全自主研制技术、工艺和装备在水深1310 m、天然气水合物矿体埋深117~196 m处,全球首次成功实施海洋浅层非成岩天然气水合物固态流化试采作业,在海洋浅层天然气水合物的安全、绿色试采方面进行了创新性的探索,流化期间原设计将获得分解气100 m³,实际获得气体81 m³,气体中甲烷含量高达99.8%^[37]。

此次固态流化试采针对深水浅层、具有一定埋深弱胶结天然气水合物层位展开,自主研发的无隔水管钻完井技术、连续油管举升技术、高效气液固分离技术

以及深水工作船钻完井作业技术是技术体系的主要创新点,显示着中国天然气水合物勘探开发关键技术已取得历史性突破。

2.4 天然气水合物成为中国第173个矿种

2017年11月3日,国务院正式批准将天然气水合物列为新矿种,成为中国第173个矿种^[38]。矿种发现单位为中国地质调查局,发现时间及产地分别为:中国海域天然气水合物首次发现时间为2007年6月,产地为南海神狐海域,地理坐标为115°20′3.45″E,19°55′42.66″N;中国陆域天然气水合物首次发现时间为2008年11月,产地为青海祁连山,地理坐标为99°10′15.6″E,38°5′35.46″N。

确立天然气水合物新矿种的重要意义:一是有利于保障国家能源资源安全;二是有利于优化能源生产和消费格局;三是有利于放开天然气水合物矿业权市场;四是有利于促进天然气水合物勘查开采科技创新;五是有利于带动相关产业发展。

国务院批准将天然气水合物列为新矿种,确立了其法律地位,将极大地促使中国天然气水合物勘探开发工作进入新的发展阶段。

3 未来热点

安全经济高效开采天然气水合物是开展天然气水合物研究的终极目标之一。天然气水合物从资源到储量,并最终实现商业化开采是一个漫长的过程,还面临着理论、技术、环境风险等难题。美国、加拿大、德国以及中国周边的日本、印度、韩国等国家都制定了天然气水合物长期研究计划。通过总结研究热点和重大事件基础上,可以推断,未来研究热点之一将围绕天然气勘探开发基础理论和技术开展攻关,基于墨西哥湾、日本南海海槽、中国南海北部、韩国郁龙盆地、印度大陆边缘等地区详实的勘探资料,深入开展富集有利区优选、提高单井产气量、深水浅层钻完井技术等关键理论和技术瓶颈的攻关,核心科学问题包括甜点区选择、增产机制与方法、开采机制与方法、流动安全保障机制、防砂机制和方法、开发过程中固-气-液多相渗流规律、储层变形规律及失稳机制、原位生物生态环境影响、灾害评估与风险预警等。

从天然气水合物成藏动力学角度,充分发挥油气勘探的优势,吸收常规天然气勘探中的经验,重视从源

到汇的整体性分析,对天然气水合物资源进行综合评价。目前世界上所发现的天然气水合物大多数为微生物成因气,但是富生烃凹陷深部优异的生排烃潜力能够提供较为充足的热成因气这一事实仍然不能忽视。热成因气天然气水合物的规模如何、深部热成因气在浅部天然气水合物形成和聚集过程中发挥了怎样的作用也还需要进一步探讨研究。

从天然气水合物基础和微观研究角度,核心科学问题包括天然气水合物分子动态聚散的微观过程、气-水-沉积物-天然气水合物相互作用的热力学及动力学过程、物性响应特征与物性参数定量关系、微观尺度监测水合物生成与分解对沉积物物性特征的影响等方面。此外,基于天然气水合物的应用技术将是未来另一个研究热点,如天然气储运、海水淡化、二氧化碳存储等应用技术等,核心科学问题包括天然气水合物储气密度和生成速度、天然气水合物生成装置与储运条件等方面。

参考文献 (References)

- [1] 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.
Wu Nengyou, Huang Li, Hu Gaowei, et al. Geological controlling factors and scientific challenges for offshore gas hydrate exploitation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 1-11.
- [2] 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.
Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, et al. New understanding on the characteristics and controlling factors of gas hydrate reservoirs in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontier, 2017, 24(4): 1-14.
- [3] 刘昌岭, 孟庆国, 李承峰, 等. 南海北部陆坡天然气水合物及其赋存沉积物特征[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 41-50.
Liu Changling, Meng Qingguo, Li Chengfeng, et al. Characterization of natural gas hydrate and its deposits recovered from the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontier, 2017, 24(4): 41-50.
- [4] 张光学, 陈芳, 沙志彬, 等. 南海东北部天然气水合物成藏演化地质过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 15-23.
Zhang Guangxue, Chen Fang, Sha Zhibin, et al. The geological evolution process of natural gas hydrate reservoirs in the northeastern South China Sea [J]. Earth Science Frontier, 2017, 24(4): 15-23.
- [5] 郭依群, 杨胜雄, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物分布特征[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 24-31.
Guo Yiqun, Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, et al. Characteristics of high gas hydrate distribution in the Shenhu area on the northern slope of the South China Sea[J]. Earth Science Frontier, 2017, 24(4): 24-31.
- [6] 戴金星, 倪云燕, 黄土鹏, 等. 中国天然气水合物气的成因类型[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(6): 837-848.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, et al. Genetic types of gas hydrates in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 837-848.
- [7] 张伟, 梁金强, 陆敬安, 等. 中国南海北部神狐海域高饱和度天然气水合物成藏特征及机制[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 1-11.
Zhang Wei, Liang Jinqiang, Lu Jing'an, et al. Accumulation mechanisms of high saturation natural gas hydrate in Shenhu Area, northern South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 1-11.
- [8] 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.
Su Pibo, He Jiaxiong, Liang Jinqiang, et al. Natural gas hydrate migration and accumulation system and its controlling factors on northern deep water slope of the South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(7): 1-10.
- [9] 龚建明, 廖晶, 何拥军, 等. 日本海天然气水合物气源成因及主控因素探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 102-108.
Gong Jianming, Liao Jing, He Yongjun, et al. Discussion on gas origins and main controlling factors for gas hydrates in the Sea of Japan[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(5): 102-108.
- [10] Hillman J I T, Cook A E, Daigle H, et al. Gas hydrate reservoirs and gas migration mechanisms in the Terrebonne Basin, Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 1357-1373.
- [11] Majumdar U, Cook A E, Scharenberg M, et al. Semi-quantitative gas hydrate assessment from petroleum industry well logs in the northern Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 85: 233-241.
- [12] Haines S S, Hart P E, Collett T S, et al. High-resolution seismic characterization of the gas and gas hydrate system at Green Canyon 955, Gulf of Mexico, USA[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 82: 220-237.
- [13] Jana S, Ojha M, Sain K, et al. An approach to estimate gas hydrate saturation from 3-D heterogeneous resistivity model:

- A study from Krishna-Godavari basin, Eastern Indian offshore [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 99-107.
- [14] Lorenson T D, Collett T S. National Gas Hydrate Program Expedition 01 offshore India; gas hydrate systems as revealed by hydrocarbon gas geochemistry[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, in press.
- [15] Yoneda J, Masui A, Konno Y, et al. Pressure-core-based reservoir characterization for geomechanics: Insights from gas hydrate drilling during 2012-2013 at the eastern Nankai Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 86: 1-16.
- [16] Zhang Z J, Wright C S. Quantitative interpretations and assessments of a fractured gas hydrate reservoir using three-dimensional seismic and LWD data in Kutei basin, East Kalimantan, offshore Indonesia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 84: 257-273.
- [17] 王力峰, 付少英, 梁金强, 等. 全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 439-448.
Wang Lifeng, Fu Shaoying, Liang Jinqiang, et al. A review on gas hydrate developments propped by worldwide national projects[J]. *Geology in China*, 44(3): 439-448
- [18] Flemings P B, Boswell R, Collett T S, et al. GOM2: Prospecting, drilling, and sampling coarse-grained hydrate reservoirs in the deepwater Gulf of Mexico[C]//Proceeding of ICGH-9. Denver, Colorado: ICGH, 2017.
- [19] The UT-GOM2-1 Science Team. GOM2 expedition-1 successfully samples gas hydrate reservoirs in the deepwater Gulf of Mexico [J]. *Fire in the Ice*, 2017, 17(2): 1-4.
- [20] Zhang X, Du Z F, Luan Z D, et al. In situ raman detection of gas hydrates exposed on the seafloor of the south China Sea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(10): 3700-3713.
- [21] 董怀民, 孙建孟. 天然气水合物岩石物理实验进展[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(8): 1671-1815.
Dong Huaimin, Sun Jianmeng. Advances in petrophysical experiment of natural gas hydrate[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(8): 1671-1815.
- [22] 王庆毓, 马尚, 李鹏飞, 等. 天然气水合物动力学抑制剂的评价方法[J]. *天然气化工(C1化学与化工)*, 2017, 42(5): 126-130.
Wang Qingyu, Ma Shang, Li Pengfei, et al. Evaluation methods of natural gas hydrate kinetic inhibitors[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2017, 42(5): 126-130.
- [23] 张书勤, 胡耀强, 杨博, 等. 天然气集输中水合物控制研究进展[J]. *应用化工*, 2017, 46(11): 2247-2251.
Zhang Shuqin, Hu Yaoqiang, Yang Bo, et al. Research advances of controlling hydrate in natural gas gathering pipeline[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(11): 2247-2251.
- [24] Janicki G, Schluter S, Henning T, et al. Numerical simulation of gas hydrate exploitation from subseareservoirs in the Black Sea[J]. *Energy Procedia*, 2017, 125: 467-476.
- [25] Terzariol M, Goldsztein G, Santamarina J C. Maximum recoverable gas from hydrate bearing sediments by depressurization [J]. *Energy*, 2017, 141: 1622-1628.
- [26] 杨远, 肖传桃, 李永臣, 等. 基于 ICP 技术的天然气水合物开采方案[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(5): 111-118.
Yang Yuan, Xiao Chuantao, Li Yongchen, et al. Exploitation of natural gas hydrate based on ICP technology[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(5): 111-118.
- [27] 王志刚, 张永勤, 梁健, 等. SAGD 技术应用于陆域冻土天然气水合物开采中的理论研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(5): 14-18.
Wang Zhigang, Zhang Yongqin, Liang Jian, et al. Theoretical study on the application of SAGD technology in exploitation of natural gas hydrate in land permafrost region[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(5): 14-18.
- [28] 赵金洲, 周守为, 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.
Zhao Jinzhou, Zhou Shouwei, Zhang Liehui, et al. The first global physical simulation experimental systems for the exploitation of marine natural gas hydrates through solid fluidization [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 15-22.
- [29] 张金华, 魏伟, 肖红平, 等. 含水合物沉积物合成方法及其对热、力学性质影响的研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(26): 146-155.
Zhang Jinhua, Wei Wei, Xiao Hongping, et al. Progress on laboratory synthetic methods, thermal and strength properties of gas hydrate bearing sediments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(26): 146-155.
- [30] 颜荣涛, 李扬, 杨德欢, 等. 含水合物砂土力学特性及本构模型[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(4): 923-930.
Yan Rongtao, Li Yang, Yang Dehuan, et al. Mechanical properties and constitutive model for hydrate-bearing sand[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(4): 923-930.
- [31] 李彦龙, 刘昌岭, 刘乐乐, 等. 含甲烷水合物松散沉积物的力学特性[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(3): 105-113.
Li Yanlong, Liu Changling, Liu Lele, et al. Mechanical properties of methane hydrate-bearing unconsolidated sediments [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(3): 105-113.
- [32] 鲁晓兵, 张旭辉, 石要红, 等. 黏土水合物沉积物力学特性及应力应变关系[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017,

- 47(10): 9-13.
- Lu Xiaobing, Zhang Xuhui, Shi Yaohong, et al. Mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay and stress-strain relation[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 47(10): 9-13.
- [33] 陈芳, 周洋, 吴聪, 等. 珠江口盆地东部陆坡末次冰期天然气水合物-冷泉活动的记录与时间[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 66-77.
- Chen Fang, Zhou Yang, Wu Cong, et al. Records and timing of gas hydrate and cold seep activity during the Last Glacial Period from the east of Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 66-77.
- [34] Creeping gas hydrate slides and hikurangi LWD-international ocean discovery program expedition 372[EB/OL]. [2017-12-20]. http://iodp.tamu.edu/scienceops/expeditions/hikurangi_gas_hydrate_slides.html.
- [35] 张伟, 白凤龙, 邵明娟, 等. 日本海域天然气水合物试采进展及其对我国的启示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 27-33.
- Zhang Wei, Bai Fenglong, Shao Mingjuan, et al. Progress of offshore natural gas hydrate production tests in Japan and implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 27-33.
- [36] 张伟, 邵明娟, 田黔宁. 日本海域天然气水合物开发技术进展[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(5): 98-102.
- Zhang Wei, Shao Mingjuan, Tian Qianing. Technical progress of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 98-102.
- [37] 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.
- Zhou Shouwei, Chen Wei, Li Qingping, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(4): 1-8.
- [38] 吴昊. 天然气水合物成为我国第173个矿种[N]. *中国矿业报*, 2017-11-16.
- Wu Hao. Natural gas hydrate becomes the 173rd newly found mineral in China[N]. *China Mining News*, 2017-11-16.

Review on natural gas hydrate in 2017

WEI Wei¹, ZHANG Jinhua¹, YU Rongze¹, LIN Binbin², CHEN Longqiao², PENG Yong¹, XIAO Hongping¹

1. Department of Alternative Energy, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang 065007, China
2. Drilling Department of Offshore Engineering Company Limited of CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract In 2017 the world witnessed a number of important events in the area of natural gas hydrate. This paper reviews some of them, including natural gas hydrate production trial test of Nankai Trough in Japan, natural gas hydrate production trial tests of Shenhu area and Liwan area in South China Sea, approval of natural gas hydrate as a newly found mineral, and other important events. Also reviewed are some research hotspots such as the application and research of natural gas hydrate petroleum system in Shenhu area in South China Sea, hydrate kinetic inhibitor, exploitation method, sediment stability, environmental effect and other research topics. It is noted that Chinese researchers and engineers have made some prominent contributions in this area. Future research focus of natural gas hydrate is analyzed as well.

Keywords natural gas hydrates; Shenhu area; production trial test; exploitation method; a newly found mineral ●



(责任编辑 刘志远)