

基于 SWOT 的中国南海可燃冰资源 商业开采前景浅析

陈 野¹ 赵笑寒¹ 姜志晨² 王佳惠³ 江 鑫⁴ 卞 琦¹ 刘 松¹

1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451;
2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300451;
3. 中国石油物资有限公司, 北京 100029;
4. 中国海洋石油有限上海分公司, 上海 200335

摘 要:“双碳”目标下,可燃冰作为清洁能源的商业开采对改善传统化石能源消费结构具有重要意义。将态势分析法应用到中国南海可燃冰资源商业开采前景研究中,通过建立强弱危机分析(Strengths,Weaknesses,Opportunities,Threats,SWOT)模型矩阵,分别讨论了可燃冰的优势、劣势、机遇和挑战。分析优势—机遇、劣势—机遇、优势—挑战、劣势—挑战情景下推进商业开采进程的发展方向和应对策略,提出了提高工艺装备专业化来促进可燃冰资源商业开采的建议,为相关领域规划提供参考依据。

关键词:南海;可燃冰;商业开采;前景;SWOT

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.06.004

SWOT analysis on the prospects for commercial exploitation of natural gas hydrates resource in the South China Sea

CHEN Ye¹, ZHAO Xiaohan¹, JIANG Zhichen², WANG Jiahui³, JIANG Xin⁴, BIAN Qi¹, LIU Song¹

1. Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Tianjin, 300451, China;
2. Engineering Technology Branch, CNOOC Energy Development Co. Ltd., Tianjin, 300451, China;
3. China Petroleum Materials Co. Ltd., Beijing, 100029, China;
4. CNOOC China Ltd., Shanghai Branch, Shanghai, 200335, China

Abstract: In the context of “dual carbon” goals, natural gas hydrate, as a clean energy source, holds significant importance in improving the energy consumption structure of traditional fossil fuels. This study applies the SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analysis method to establish the commercial exploitation prospects of natural gas hydrate resource in the South China Sea. By establishing a SWOT matrix, it discusses the strengths, weaknesses, opportunities and threats associated with offshore development of this unconventional fossil energy source. The matrix explores the development directions and management strategies under the conditions of strengths-opportunities, weaknesses-opportunities, strengths-threats, and weaknesses-threats to promote the commercial exploitation process. This study

收稿日期:2024-08-22

基金项目:海油石油工程股份有限公司科研项目“极地海底管道、立管设计与应用研究”(E-0824P101)

作者简介:陈 野(1991-),男,黑龙江大庆人,高级工程师,博士,主要从事天然气水合物、海管立管等海洋油气工程新能源及新兴工程领域研究工作。E-mail:upcchenye@163.com

recommends to “enhance the specialization of process equipment to promote the commercial exploitation of natural gas hydrate resources”, providing a reference for strategic planning in related sectors.

Keywords: South China Sea; Natural gas hydrate; Commercial exploitation; Prospect; SWOT

0 前言

可燃冰是一种由水分子在合适的特定条件下通过氢键连接形成笼格结构,进而捕获小分子气体形成的冰晶状络合物^[1]。研究表明,自然界中可燃冰分布范围广,约30%的陆域和70%的海域表层均存在满足可燃冰生成及赋存条件的区域;预测储量大,以当前工业能源消耗水平为标准,可燃冰资源能供人类使用约数百年乃至上千年;能量密度高,蕴藏在可燃冰中的有机碳含量约为传统化石能源中有机碳含量的2倍,标况下单位体积的可燃冰可释放出近百倍体积的可燃气体;环境污染小,考虑到可燃冰的高含碳氢量及微乎其微的含硫量,其燃烧产物以CO₂为主,SO₂、H₂S等硫化物极少,相对清洁^[2-4]。因此,可燃冰被视为一种具有潜力的新型非常规绿色能源,受到了全世界的关注。俄罗斯、美国、加拿大、德国、日本、韩国、印度等国,相继设立、推进可燃冰勘探和开发探索工程项目^[5-7]。中国也先后开展了多次试采作业,均取得较为理想的成绩^[8-10],2020年中国在南海海域开展的试采项目中,创造了“产气总量 $86.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ ”“日均产气量 $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ ”等多项世界记录,成为了海域可燃冰开发领域的先驱。

勘探表明,中国在南海神狐海域及祁连山、大兴安岭、青藏高原等冻土带均人工钻取到含可燃冰岩样,具有储量丰富、海陆并举的天然优势。突破钻采各环节所面临的技术瓶颈,实现可燃冰资源商业化开发,进一步促进天然气及其衍生矿产等相对清洁的能源替代煤矿、石油等高污染性化石能源进程,这既是中国优化能源结构、扩充储备来源、实现可持续发展的关键举措,同时也对“双碳”目标的顺利开展具有重要意义。

本研究借助态势分析法,通过研讨中国海域商业化开采可燃冰资源的优势、劣势、机遇和挑战,建立相应的强弱危机分析(Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats, SWOT)模型矩阵,预测了南海可燃冰商业化开采发展前景,浅析了抓紧机遇的发展方向和应对挑战的策略手段,为后续制定规划提供参考依据。

1 开发优势

1.1 中国拥有海陆并举天然优势

中国地域辽阔,满足低温、高压赋存环境的区域众多,迄今已在青藏高原、祁连山等中高纬度冻土带及南海荔湾、神狐等海域钻取到含可燃冰的岩样,是既有陆

域可燃冰资源又有海域可燃冰资源的少数几个国家之一。据估算,中国冻土区蕴藏的可燃冰资源总量高达 $3.8 \times 10^{13} \text{ m}^3$,海域可燃冰资源总量高达 $8.0 \times 10^{13} \text{ m}^3$,具有改变现有传统化石能源结构的潜力^[11-13],并有储量丰富、海陆并举等天然优势,对保障国家能源安全有重要意义。

1.2 海域开发处于阶段领先地位

相比苏联(1969年,麦索亚哈气田)、加拿大(2002年,麦肯齐三角洲)、美国(2012年,阿拉斯加北斜坡),中国(2011年,青海祁连山)开展的陆域可燃冰试采工程起步相对较晚,产量较少^[14];但在海域可燃冰试采领域,中国(2017年,南海)是目前唯二国家之一,起步时间与日本(2013年,渥美海丘)相近^[15],尤其是2020年南海神狐海域可燃冰试采工程标志着中国率先从探索性试采阶段迈入试验性试采阶段,走在了全球海域可燃冰资源开发与利用行列的最前沿^[16]。

1.3 校企联合具备统筹协作基础

中国对可燃冰的认识与研究起步较晚,但发展迅猛,短短几十年期间,就有近百家单位参与了相关课题及工程项目^[17-24],其中包括清华大学、北京大学、大连理工大学、华南理工大学、中国石油大学、中国地质大学、西南石油大学等知名高校,中国地质调查局(地学文献中心、青岛海洋地质研究所、广州海洋地质调查所)、中国科学院(广州能源研究所、寒区旱区环境与工程研究所)等科研院所,中国石油天然气集团有限公司、中国海洋石油集团有限公司等行业领军企业,以及为各环节研究与作业提供配套服务、装备的中小型企业事业单位。2017年和2020年,中国地质调查局、中国石油集团海洋工程有限公司、中国海洋石油集团有限公司与北京大学、中国石油大学、西南石油大学等联手,先后开展了3次海域可燃冰试采工程,均取得理想成绩。多年的紧密合作,为中国南海可燃冰资源开发与利用积累了丰富的技术经验和人才储备,奠定了良好的产业化基础。

2 开发劣势

2.1 复杂相变规律难以精准预测

与煤、石油、天然气等传统化石能源不同,可燃冰的化学性质不稳定,受外界环境(温度、压力为主)扰动后会发生气—液—固之间的相态转化,同时吸收或释放能量。一方面,海底沉积层内可燃冰由固相转化为气相和液相,不仅会改变多孔介质原始骨架结构,伴随的能量

与物质变化也会增强孔隙内非均性,削弱骨架强度,从而引发地层塌陷、海底滑坡等地质灾害;另一方面,可燃冰在井筒和管道内的分解与二次生成会明显扰动温压场,改变内部流型和流动通道的尺寸,从而引发井涌井喷、管道堵塞等工程事故^[25]。

目前,常见的单组分气体及双组分、三组分甚至更多指定组分气体,在特定溶液中的相平衡条件已通过搜索法、观察法等手段测量获取,但自然界沉积层更为复杂、多样,沉积层内可燃冰相平衡条件不仅受气体组分、溶液组分、离子浓度比、pH 值等因素共同作用,还受多孔介质孔喉形状、颗粒尺寸等沉积层基质特性影响^[26]。因此,开采海域可燃冰时井筒、地层内相变规律难以预测,既拖后产能,又增添安全隐患。

2.2 富集地层位于深水浅埋环境

结合海域水温梯度、地温梯度、水深压力与可燃冰相平衡条件可大致推测出,中国南海可燃冰资源主要富集在深水区下埋深较浅的位置。勘探表明,浅表层富集区大多由泥质粉砂细粉砂构成,呈疏松、低渗、弱成岩特征。开采海域可燃冰资源时,深水作业面临更严峻的风浪、更复杂的内波流和更强劲的冲击,以及腐蚀效应的影响,而松散的海床浅表层对开采工艺的优选以及钻柱、井口等水下工具的安装与稳固也提出了更大的挑战^[27]。

此外,浅表层富集区泥质粉砂细粉砂还可能随可燃冰分解产物一并进入井筒,出砂严重时堆积在井壁、管道尾端等部位,影响正常生产。2007 年加拿大冻土带可燃冰试采工程中,发生了井底沉砂、电潜泵损坏;2013 年日本首次海域可燃冰试采工程在试采第 6 天因出砂严重而被迫终止^[28-30]。

2.3 低效产能难以实现商业价值

深水开采可燃冰资源所需的前期投入更高,仅搭载的钻采船或平台造价就高达数十亿元,而部分技术指标实际已超过生产需要。如中国南海首次可燃冰试采工程中应用的“蓝鲸 1 号”钻井平台最大作业水深和最大钻井深度可高达 3 600 m 和 15 000 m,远超南海靶区可燃冰富集水深和埋深。而在已有试采案例中,尽管海域可燃冰试采所达到的最高日均产气量(28 700 m³/d)远高于陆域,但距离商业化试采门槛值仍相差 1~3 个数量级,尚不能产生经济收益^[31]。

3 发展机遇

3.1 针对性技术与手段日趋成熟

根据可燃冰的埋藏特点和相变特性,陆续提出了多种开采方法,包括常规的降压法、热激法、化学剂注入法等,非常规的 CO₂ 置换法、固态流化法等,以及更新颖的

地热循环法、电磁分解法等^[32-36]。这些方法或以原位分解后再收集作为开采原理,或以原位收集后再分解作为开采原理,在经济性、便捷性、能效性、环保性、安全性等方面各有利弊。结合各单一方法的特点,提出兼容多种技术优势的联合方法,也是提升产能、保障安全的有效途径之一^[37-40]。日趋成熟的开采手段和不断创新的技术理念,为紧贴目标靶区地貌情况优选最合适的开发方案创造了可能。

3.2 国家各单位给予高度重视

近年来,中国对可燃冰开采与利用极为重视,于 2017 年将可燃冰正式列为第 173 类矿种^[41],并在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划》与《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中指出,要将“推进天然气可燃冰资源勘查与商业化试采”作为国家能源发展重大工程。在科研方面,中华人民共和国科学技术部、发展和改革委员会、国家自然科学基金委员会等部委机构先后资助了数百项国家重点研发计划、国家科技重大专项、国家自然科学基金等可燃冰开发与利用相关项目。在工程方面,中国石油天然气集团有限公司、中国海洋石油集团有限公司等多家国有企业先后投入大量的人力、物力,成立专门的部门、项目组甚至自建或合建相关实验室,组织开展工艺方案设计与试采工程实施。除此之外,“十四五”期间广东、海南等沿海省份也纷纷将可燃冰的相关技术研发列为科技创新规划目标^[42]。

3.3 清洁属性符合能源转型需求

随着工业的发展和技术的进步,能源消费结构比重逐渐由早期的煤炭向油气再向清洁能源优化。仅 2020 年中国煤炭消费比重下降至 57.5% 左右,天然气、水、核、风、光、电等清洁能源的消费比重则稳步提升到 24.4%。“双碳”目标下,中国能源转型需求更加迫切,亟需潜在利用量可观、技术稳定性可靠的新兴能源来替代更多的传统化石能源。作为富含天然气的矿产资源,可燃冰的商业化开发既是中国保障能源安全的关键,也是可持续发展时代节能降碳、绿色环保的需要。

4 面临挑战

4.1 “赶超者”到“先驱者”的角色转变

2020 年中国在南海神狐海域的可燃冰试采作业中,自主研发了包括 32 项关键技术与 12 项核心装备在内的工程体系,标志着中国已赶超开展过海域可燃冰试采工程的国家——日本。同时也意味着在进一步推进海域可燃冰商业化开采道路上,将没有现成的成功案例借鉴。包括地质条件—开采手段—工艺方案匹配性在内的所有已知或未知的困难与挑战,都需要中国自己摸着

石头过河,在更多的探索中归纳出一套前进路线。由“赶超者”到“先驱者”的角色转变,对中国而言既是机遇,也是挑战。

4.2 诸多先进技术亟需自主攻关

尽管世界各国已借助各种手段开展了多次试采工程并取得阶段性成功,但要可将可燃冰资源商业化开采,还有诸多领域相对空白,技术细节亟需攻克。尤其在设计、完善海域可燃冰开发方案中,中国仍面临着部分技术如双梯度钻井、大位移定向井、高效排水采气等被垄断国家“卡脖子”的困境^[43],另一部分技术如固态流化法、精细调控相变等,亟需自主升级的挑战^[44]。

以中国创新提出的固态流化法为例:相比降压法、热激法等传统开发手段,固态流化法能够实现可燃冰相变精准调控,达到“先采集后分解”的目的,针对胶结性较差的未成岩可燃冰沉积层具有较高的适用性,并于2017年在中国南海成功海试。但在解决可燃冰无序相变引发的地质灾害、井涌井喷、管道堵塞等问题的同时,也提出了新的技术挑战,如:虽然固态流化法在概念阶段划分成了机械挖掘、水射流破碎等宏观类别,但在细分领域研究有限,缺乏更细致、全面的设计理念和技术方案;多相分离要求严格,根据固态流化法原理可知,开采过程中气—液—可燃冰—泥砂的分离和后处理要求更高,所需工艺也更复杂^[45]。

4.3 既要降本增效也要安全环保

除了上述成本过高、产能低效、安全隐患多等挑战外,海域可燃冰资源开发与利用过程中,不恰当的设计或操作还可能导致产物中的甲烷等气体从地层或管道中逃逸进入海水或大气中,引发海水酸化、水产死亡甚至温室效应等生态灾害。因此,在降本增效的同时,还要注意安全环保问题。实时掌握生产过程中地层与管道内各类参数的变化,监测风险事故的预兆,能够在一定程度上避免意外情况的发生。中国自主研发的四位一体环境监测体系在2020年南海神狐海域可燃冰试采工程中取得了理想的效果,能够在开采过程中实时监测可燃冰储层温压、海底沉积物孔压参数、海底甲烷泄漏及海底地层稳定性(沉降、滑坡)、全剖面海水环境、试采平台及周边区域水气甲烷交换通量等情况,但在监测精度、维度、灵活度等方面仍可进一步完善^[46]。

5 SWOT 矩阵浅析

基于上述分析可知,中国可燃冰矿产资源具有得天独厚、海陆并举的天然优势,且在海域试采进程中起步较早,处于世界领先地位。考虑到已有海域试采案例的最高日均产气量更接近商业化开采门槛值,推断出南海深水区将是中国短期内可燃冰开采的主战场。

建立SWOT矩阵,分别讨论优势—机遇、劣势—机遇、优势—挑战、劣势—挑战情景下推进商业开采进程的发展方向和应对策略矩阵,见图1。

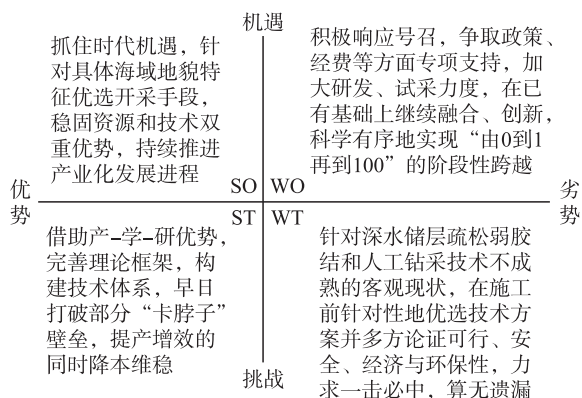


图1 商业开采进程的发展方向和应对策略矩阵分析图

Fig. 1 SWOT analysis of the development directions and management strategies of commercial exploitation process

6 结论

1) 全球可燃冰资源开发与利用仍处于探索期,距离大规模商业化推广还有一定距离。其潜力巨大的蓝海市场,既是策略—技术—工程多层次的挑战,也是改善传统能源结构的机遇,对中国角逐国际清洁能源舞台具有重要意义。

2) 中国海域与冻土带均埋藏着丰富的可燃冰资源,具有得天独厚的优势,且在海域试采领域起步较早,阶段领先。结合潜在资源量和日均产气量等因素可知,中国南海深水区将是短期内可燃冰试采乃至商采主战场。

3) 在“双碳”目标、能源转型等背景以及国家的大力支持下,众多科研院所、高校与企业积极响应号召,长期投入到基础理论、工程应用等相关研发、设计、制造及施工作业中,形成了兼具天时、地利、人和的有利局面,极大提高了中国南海可燃冰资源产业化成功的可能性。

4) 可燃冰开采所面临的产能低、风险高等主要难题,本质上是由机理规律未成体系、配套方案针对性弱导致的。一方面,可以借助“产—学—研”优势有针对性地构建、完善理论框架和技术体系;另一方面,可以通过研发专业的工艺技术和生产装备,制定特殊的开采方案和操作规范来提高开采方案与实际工况的匹配性。为了产业化而提高专业化,是促进中国南海可燃冰资源开采与利用事业的有力手段。

参考文献:

[1] 樊桂卿,郭天民. 笼型水合物研究进展[J]. 化工进展,1999

- (1):5-7.
- FAN Shuanshi, GUO Tianmin. Progress in study of clathrate hydrates [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 1999 (1): 5-7.
- [2] MILKOV A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology, 2000, 167 (1-2): 29-42.
- [3] 孙志高. 地下气体水合物潜在的天然气资源[J]. 中国能源, 2000(12): 30-32.
- SUN Zhigao. Potential natural gas resources of underground gas hydrate [J]. Energy of China, 2000 (12): 30-32.
- [4] TONNET N, HERRI J M. Methane hydrates bearing synthetic sediments—Experimental and numerical approaches of the dissociation [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (19): 4089-4100.
- [5] 江怀友, 乔卫杰, 钟太贤, 等. 世界天然气水合物资源勘探开发现状与展望[J]. 中外能源, 2008, 13(6): 19-25.
- JIANG Huaiyou, QIAO Weijie, ZHONG Taixian, et al. Status and forecast of world's natural gas hydrate exploration & development [J]. Sino-Global Energy, 2008, 13 (6): 19-25.
- [6] 张 炜, 吴西顺, 王淑玲, 等. 美国天然气水合物研发进展及对中国的启示[J]. 矿床地质, 2014(增刊1): 877-878.
- ZHANG Wei, WU Xishun, WANG Shuling, et al. Progress on research on the development of natural gas hydrates in the United States and its application to China [J]. Mineral Deposits, 2014 (Suppl 1): 877-878.
- [7] 龙学渊, 袁宗明, 倪 杰. 国外天然气水合物研究进展及我国的对策建议[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29 (3): 170-177.
- LONG Xueyuan, YUAN Zongming, NI Jie. Advances in overseas gas hydrate research and suggestions to China's government [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29 (3): 170-177.
- [8] 张永勤, 祝有海. 祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用[J]. 地质通报, 2011, 31(12): 1904-1909.
- ZHANG Yongqin, ZHU Youhai. Research and application of the natural gas hydrate drilling technique in Qilian Mountain permafrost [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 31 (12): 1904-1909.
- [9] 徐 行, 罗贤虎, 彭 登, 等. 中国首次试采天然气水合物成功[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 620-621.
- XU Xing, LUO Xianhu, PENG Deng, et al. First successful trial collection of natural gas hydrate in China [J]. Geology in China, 2017, 44 (3): 620-621.
- [10] 马宝金, 樊明武, 王鄂川. 海域天然气水合物产业与技术发展及对策建议[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(3): 60-66.
- MA Baojin, FAN Mingwu, WANG E'chuan. Suggestions on offshore natural gas hydrates industrial and technological development and strategies [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39 (3): 60-66.
- [11] 关进安, 樊栓狮, 梁德青, 等. 自然界天然气水合物勘探开发概述[J]. 新能源进展, 2019, 7(6): 522-531.
- GUAN Jin'an, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, et al. An overview on gas hydrate exploration and exploitation in natural fields [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7 (6): 522-531.
- [12] 魏 伟, 张金华, 魏兴华, 等. 我国南海天然气水合物资源潜力分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2646-2655.
- WEI Wei, ZHANG Jinhua, WEI Xinghua, et al. Resource potential analysis of natural gas hydrate in South China Sea [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27 (6): 2646-2655.
- [13] 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(中国地质大学学报), 2006, 31(2): 245-249.
- GE Qian, WANG Jiasheng, XIANG Hua, et al. Computation of thickness of gas hydrate stability zone and potential volume of gas hydrate in South China Sea [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31 (2): 245-249.
- [14] 吕丽新, 陈永进, 张 硕, 等. 冻土区天然气水合物基本特征及国内研究现状[J]. 资源与产业, 2012(5): 69-75.
- LYU Lixin, CHEN Yongjin, ZHANG Shuo, et al. Characteristics and research advances of natural gas hydrate in permafrost [J]. Resources & Industries, 2012 (5): 69-75.
- [15] 陈志豪, 吴能友. 国际多年冻土区天然气水合物勘探开发现状与启示[J]. 海洋地质动态, 2010(11): 36-44.
- CHEN Zhihao, WU Nengyou. The current status of permafrost gas hydrate exploration and exploitation in the world and its implications [J]. Marine Geology Letters, 2010 (11): 36-44.
- [16] 陈建东, 孟 浩. 主要国家海洋天然气水合物研发现状及我国对策[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35 (4): 560-564.
- CHEN Jiandong, MENG Hao. Marine gas hydrate research and development status of main countries and countermeasures of our country [J]. World Sci-Tech R & D, 2013, 35 (4): 560-564.
- [17] 陈 强, 胡高伟, 李彦龙, 等. 海域天然气水合物资源开采新技术展望[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 44-55.
- CHEN Qiang, HU Gaowei, LI Yanlong, et al. A prospect review of new technology for development of marine gas hydrate resources [J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36 (9): 44-55.
- [18] 左 林, 由长福. 天然气水合物固定井压开采过程数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(11): 1957-1961.

- ZUO Lin, YOU Changfu. Numerical simulation of natural gas hydrate production from a well at constant pressure [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48 (11): 1957-1961.
- [19] 苏晓江. 青岛海洋地质研究所与北京大学工学院共建天然气水合物重点实验室[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3): 122.
- SU Xiaojiang. Qingdao Institute of Marine Geology and Peking University College of Engineering jointly established the key laboratory of natural gas hydrate [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35 (3): 122.
- [20] 樊栓狮, 刘 锋, 陈多福. 海洋天然气水合物的形成机理探讨[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(5): 524-530.
- FAN Shuanshi, LIU Feng, CHEN Duofu. The research of the origin mechanism of marine gas hydrate [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15 (5): 524-530.
- [21] 刘 瑜, 赵佳飞, 郭长松, 等. I型和II型结构气体水合物的记忆效应[J]. 物理化学学报, 2011, 27(6): 1305-1311.
- LIU Yu, ZHAO Jiafei, GUO Changsong, et al. Memory effects of Structure I and II gas hydrates [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2011, 27 (6): 1305-1311.
- [22] 陈立涛, 孙宝江, 张宁涛, 等. 石英砂中甲烷水合物的溶解开采实验研究[J]. 化工学报, 2021, 72(8): 4336-4345.
- CHEN Litao, SUN Baojiang, ZHANG Ningtao, et al. Experimental study on the extraction of methane hydrate in silica sand by dissolving [J]. CIESC Journal, 2021, 72 (8): 4336-4345.
- [23] 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.
- [24] 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(5): 5-15.
- 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 (5): 5-15.
- [25] 王 浩, 王继平. 天然气水合物开发可能导致的风险[J]. 当代化工, 2017, 46(3): 485-488.
- WANG Hao, WANG Jiping. Possible risks in development of natural gas hydrate [J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46 (3): 485-488.
- [26] 李鹏飞, 雷新华, 徐 浩, 等. 天然气水合物相平衡影响因素研究[J]. 天然气化工: C1化学与化工, 2012, 37(6): 12-17.
- LI Pengfei, LEI Xinhua, XU Hao, et al. A review on researches on factors affecting gas hydrate phase equilibrium [J]. Natural Gas Chemical Industry: C1 Chemistry and Chemical Engineering, 2012, 37 (6): 12-17.
- [27] 朱 渊, 陈国明, 张若昕. 钻井液温度影响下天然气水合物井壁稳定性安全评估[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2131-2135.
- ZHU Yuan, CHEN Guoming, ZHANG Ruoxin. Safety evaluation on the wellbore stability of gas hydrate due to the temperature of drilling fluid [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (6): 2131-2135.
- [28] 卢静生, 李栋梁, 何 勇, 等. 天然气水合物开采过程中出砂研究现状[J]. 新能源进展, 2017, 5(5): 394-402.
- LU Jingsheng, LI Dongliang, HE Yong, et al. Research status of sand production during the gas hydrate exploitation process [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2017, 5 (5): 394-402.
- [29] 宁伏龙, 方翔宇, 李彦龙, 等. 天然气水合物开采储层出砂研究进展与思考[J]. 地质科技通报, 2020(1): 137-148.
- NING Fulong, FANG Xiangyu, LI Yanlong, et al. Research status and perspective on wellbore sand production from hydrate reservoirs [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020 (1): 137-148.
- [30] 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.
- LI Yanlong, LIU Lele, LIU Changling, et al. Sanding prediction and sand-control technology in hydrate exploitation: A review and discussion [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32 (7): 36-43.
- [31] 吴能友, 李彦龙, 万义钊, 等. 海域天然气水合物开采增产理论与技术体系展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(8): 100-115.
- WU Nengyou, LI Yanlong, WAN Yizhao, et al. Prospect of marine natural gas hydrate stimulation theory and technology system [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (8): 100-115.
- [32] 李淑霞, 陈月明, 杜庆军. 天然气水合物开采方法及数值模拟研究评述[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 146-150.
- LI Shuxia, CHEN Yueying, DU Qingjun. Commentary of production method and numerical simulation of natural gas hydrates [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30 (3): 146-150.
- [33] 梁海峰, 宋永臣. 降压法开采天然气水合物研究进展[J]. 天然气勘探与开发, 2008, 31(2): 49-52.
- LIANG Haifeng, SONG Yongchen. Apply depressurizing method to gas-hydrate exploitation [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2008, 31 (2): 49-52.
- [34] 韩 笑, 刘 姝, 万青翠, 等. 热激法开采天然气水合物研

- 究进展[J]. 油气储运, 2019, 38(8): 849-855.
- HAN Xiao, LIU Shu, WAN Qingcui, et al. Research progress on the exploitation of natural gas hydrate by thermal stimulation method [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38 (8): 849-855.
- [35] 毕 曼, 贾增强, 吴红钦, 等. 天然气水合物抑制剂研究与应用进展[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 75-78.
- BI Man, JIA Zengqiang, WU Hongqin, et al. Update progress in research and application of natural gas hydrate inhibitor [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (12): 75-78.
- [36] CHEN Ye, GAO Yonghai, ZHAO Yipeng, et al. Experimental investigation of different factors influencing the replacement efficiency of CO₂ for methane hydrate [J]. Applied Energy, 2018, 228: 309-316.
- [37] 张 洋, 李广雪, 刘 芳. 天然气水合物开采技术现状[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 63-68.
- ZHANG Yang, LI Guangxue, LIU Fang. Current status of mining technology for natural gas hydrate [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32 (4): 63-68.
- [38] 张旭辉, 鲁晓兵, 刘乐乐. 天然气水合物开采方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2014(2): 858-869.
- ZHANG Xuhui, LU Xiaobing, LIU Lele. Advances in natural gas hydrate recovery methods [J]. Progress in Geophysics, 2014 (2): 858-869.
- [39] 孙致学, 朱旭晨, 刘 垒, 等. 联合深层地热甲烷水合物开采方法及可行性评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 146-156.
- SUN Zhixue, ZHU Xuchen, LIU Lei, et al. Feasibility study on joint exploitation of methane hydrate with deep geothermal energy [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39 (2): 146-156.
- [40] 汤晓勇, 陈俊文, 郭艳林, 等. 可燃冰开发及试采技术发展现状综述[J]. 天然气与石油, 2020, 38(1): 7-15.
- TANG Xiaoyong, CHEN Junwen, GUO Yanlin, et al. Development status of combustible ice mining and test production technologies [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (1): 7-15.
- [41] 王大锐. 我国天然气水合物开发前景一片光明——访中国科学院院士戴金星先生[J]. 石油知识, 2018(2): 6-7.
- WANG Darui. The prospect of natural gas hydrate development in China is bright—Interview with Mr. Dai Jinxing, academician of Chinese Academy of Sciences [J]. Petroleum Knowledge, 2018 (2): 6-7.
- [42] 刘 芳, 原 峰, 权 威. 浅谈广东省天然气水合物产业发展现状[J]. 当代经济, 2020(9): 76-78.
- LIU Fang, YUAN Feng, QUAN Wei. Brief discussion on the development status of gas hydrate industry in Guangdong Province [J]. Contemporary Economics, 2020 (9): 76-78.
- [43] 陈国明, 殷志明, 许亮斌, 等. 深水双梯度钻井技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 246-251.
- CHEN Guoming, YIN Zhiming, XU Liangbin, et al. Review of deepwater dual gradient drilling technology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (2): 246-251.
- [44] 付 强, 王国荣, 周守为, 等. 海洋天然气水合物开采技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 32-39.
- FU Qiang, WANG Guorong, ZHOU Shouwei, et al. Development of marine natural gas hydrate mining technology and equipment [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22 (6): 32-39.
- [45] 欧阳勇, 张 更, 黄洪林, 等. 天然气水合物固态流化开采井筒多相流动模型[J]. 石油机械, 2024, 52(7): 1-9.
- OUYANG Yong, ZHANG Geng, HUANG Honglin, et al. A model for multiphase flow in wellbore during solid fluidization exploitation of natural gas hydrate [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (7): 1-9.
- [46] 叶建良, 秦绪文, 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.
- YE Jianliang, QIN Xuwen, XIE Wenwei, et al. Main progress of the second gas hydrate trial production in the South China Sea [J]. Geology in China, 2020, 47 (3): 557-568.