

# 海域非成岩天然气水合物储层改造方法分析

王志刚<sup>1</sup>, 李小洋<sup>1</sup>, 张永彬<sup>2</sup>, 尹浩<sup>1</sup>, 胡晨<sup>1</sup>, 梁金强<sup>3</sup>, 黄伟<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 河北省煤田地质局新能源地质队, 河北邢台 054000;  
3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760)

**摘要:**天然气水合物是未来重要的战略开采资源, 受到了世界各国的广泛关注, 因此对海底天然气水合物进行大规模开采成为必然。目前, 海底天然气水合物开采还处于试采阶段, 到目前为止还未形成成熟的开采方式。本文从人们所担心的海域天然气水合物开采过程中因储层非成岩可能出现的海底水合物大规模气化、破坏海洋生态环境、产生海底地质灾害等问题出发, 对海域天然气水合物开采的安全性进行了分析。同时调研了当前世界各国海域天然气水合物试采现状, 指出了进行储层改造是海域天然气水合物未来进行大规模开采的必由之路。探讨了采用水力喷射微小井眼技术边钻进水平井边喷射改进发泡水泥浆以进行储层改造的可行性, 可为我国水合物商业化开采提供借鉴。

**关键词:**海域天然气水合物; 非成岩; 微小井眼; 水平井; 发泡水泥; 开采方式; 储层改造

**中图分类号:** TE132.2; P634   **文献标识码:** A   **文章编号:** 2096-9686(2021)06-0032-07

## Analysis of the stimulation methods for marine non-diagenetic natural gas hydrate reservoirs

WANG Zhigang<sup>1</sup>, LI Xiaoyang<sup>1</sup>, ZHANG Yongbin<sup>2</sup>, YIN Hao<sup>1</sup>, HU Chen<sup>1</sup>, LIANG Jinqiang<sup>3</sup>, HUANG Wei<sup>3</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, GAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. New Energy Geological Team of Heibei Coalfield Geological Bureau, Xingtai Hebei 054000, China;

3. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510760, China)

**Abstract:** Natural gas hydrate is an important strategic exploitation resource in the future, which has been widely concerned by all countries in the world. Therefore, large-scale exploitation of subsea natural gas hydrate is inevitable. At present, the exploitation of subsea natural gas hydrate is still in the trial production stage, and so far no mature mining method has been formed. Starting from the problems caused by non-diagenetic that people are worried about during the exploitation of marine natural gas hydrate, such as large-scale gasification of subsea hydrate, destruction of marine ecological environment and submarine geological disasters, this paper analyzes the safety of the exploitation of marine natural gas hydrate, investigates the present situation of the exploitation of marine natural gas hydrate in the world, points out that reservoir stimulation is the only way for large-scale exploitation of marine natural gas hydrate in the future, and explores the feasibility of reservoir stimulation with modifying foamed cement slurry by hydraulic jet while drilling horizontal wells with hydraulic jet micro hole technology, which lays a foundation for the commercial exploitation of gas hydrate in China.

**Key words:** marine natural gas hydrate; non-diagenetic; micro-borehole; horizontal well; foamed cement; mining method; reservoir stimulation

收稿日期: 2020-06-18; 修回日期: 2021-01-06   DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.06.005

基金项目: 战略性国际科技创新合作重点专项“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号: SQ2018YFE20424)

作者简介: 王志刚, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 油气井工程专业, 硕士, 从事水合物、页岩气、干热岩、石油等钻井技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, 1036821833@qq.com。

引用格式: 王志刚, 李小洋, 张永彬, 等. 海域非成岩天然气水合物储层改造方法分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 32-38.

WANG Zhigang, LI Xiaoyang, ZHANG Yongbin, et al. Analysis of the stimulation methods for marine non-diagenetic natural gas hydrate reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 32-38.

## 0 引言

天然气水合物是由天然气和水在高压低温环境下形成的类似冰状的结晶物,因外观看起来像冰,遇火即可燃烧,所以天然气水合物又被称为“可燃冰”<sup>[1-2]</sup>。天然气水合物主要埋藏在大陆永久冻土区和海洋深水区等区域(见图1),是一种清洁、高效能源。已探明的天然气水合物储量是全球石化燃料资源储量的2倍(见图2),能够满足人类未来对能源的迫切需求,因此受到了国际社会的广泛关注,在水合物开采技术研究上投入了大量的资金和精力。我国也十分重视天然气水合物的开采工作,并在2017年将天然气水合物列为新的矿种<sup>[3]</sup>。目前,天然气水合物还处于勘探、试采和小规模开采阶段,尚未形成成熟的开采方法,且人们就开采过程中对环境的影响及安全性有一定的担忧。为此,笔者对天然气水合物开采过程中环境安全性问题进行了分析,并对天然气水合物储层改造方法进行了探讨。

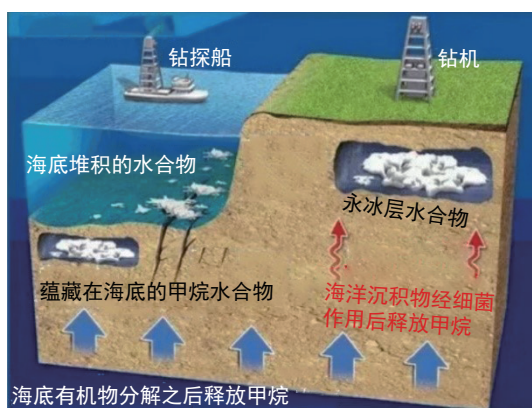


图1 天然气水合物分布示意

Fig.1 Gas hydrate distribution

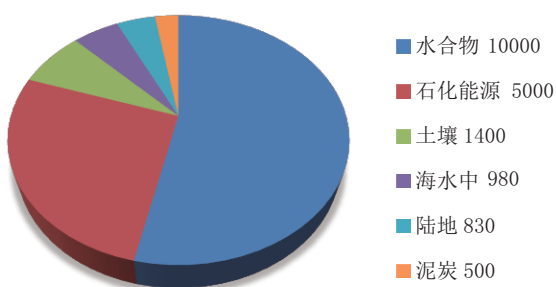


图2 地球碳元素分布

Fig.2 Distribution of carbon in the earth

## 1 天然气水合物开采安全性分析

天然气水合物开采主要有2种思路,一种是

水合物在地下分解成水和天然气,再将天然气采出<sup>[4-8]</sup>;另一种是以固态混合物的形式将水合物采出<sup>[9-11]</sup>。天然气水合物无盖层且储层大多不成岩,因此在开采方式上与常规天然气有很大的不同,将天然气水合物在地下分解成水和天然气后采出是最可行的一种思路,但是无盖层且储层大多不成岩使得许多学者担忧水合物开采可能诱发多种环境和地质问题。

### 1.1 天然气水合物开采可能存在的问题

#### 1.1.1 海底水合物的大规模气化

有些学者认为海底天然气水合物开采过程中,由于无盖层存在,随着围压的减轻水合物会发生不可控的大面积分解<sup>[12]</sup>。大量的甲烷气体进入海水当中,使海水密度降低,到那时在水合物气化区域现有船只将无法航行,凡是经过气化区域的船只都将会沉入海底;大量甲烷气体进入大气当中会产生严重的温室效应,这种温室效应是二氧化碳的20倍,会对现有的大气环境产生恶劣的影响,加快全球变暖的步伐,给人类居住和生活环境产生不可估量的破坏。同时甲烷属于易燃易爆气体,大面积气化进入海水和空气中后,容易发生“海水燃烧”和“空气爆炸”等问题,给钻井设备和航天飞行器等产生严重的安全影响。

#### 1.1.2 破坏海洋生态环境

海域天然气水合物在钻井和开采的过程中,分解后的天然气会泄露到海水当中,消耗水中的大量氧气并生成二氧化碳,水中氧气的减少会导致海洋生物的大量灭绝。因此部分专家认为海域天然气水合物在开采的过程中必然会影响到海洋生态的平衡,造成大量海洋生物的灭绝<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.1.3 产生海底地质灾害

通过研究发现海域天然气水合物在储层当中处于力学平衡状态,它的存在增强了储集层的机械强度。在进行天然气水合物开采的过程中,水合物将分解成游离气和自由水,这会打破储层原有的力学平衡状态,储集层的机械强度将严重降低,很容易引起海底地层坍塌和海底山体滑坡等地质灾害<sup>[15-16]</sup>。此外,水合物分解之后产生的气体会造成地层孔隙压力急剧增大,进而降低有效应力,使得水合物沉积地层受力大大减弱,不能够承受原地层的地应力,这也非常容易引起海底滑坡等地质灾害。

## 1.2 天然气水合物开采的可控性和安全性分析

### 1.2.1 大规模气化问题

水合物的分解是膨胀吸热的一个过程,水合物分解以后会在开采井周围形成低温区域,并且开采时间越久低温区域越大(见图3),如果没有外部的热量供给,单纯依靠地层提供热量则分解速度只会越来越慢,直至不分解,并且天然气水合物是以“冰雪”状态存在的,“冰雪”是不会突然出现大规模气化的,只会随着周围的环境发生缓慢的变化,所以海域天然气水合物开采是可控的。

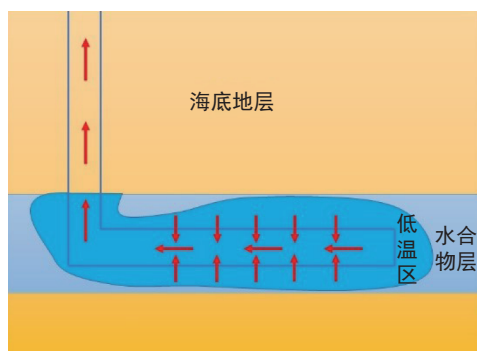


图3 水合物分解后在井筒周围形成的低温区示意

Fig.3 Low temperature zone formed around the wellbore after hydrate decomposition

### 1.2.2 海洋生态影响问题

天然气水合物钻井完成、形成井筒之后,井筒内的压力要低于原始地层压力,在这种压力条件下,进入海水中的天然气与开采之前相比只会减少而不会增多(见图4)。

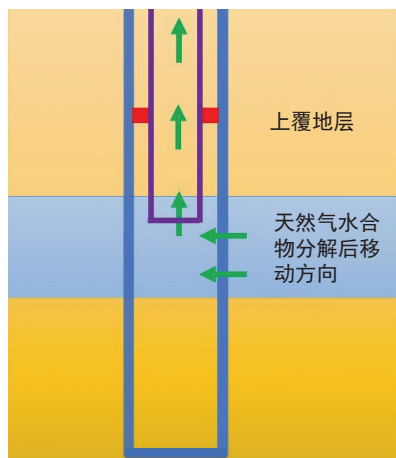


图4 水合物分解后天然气移动方向示意

Fig.4 Natural gas movement direction after hydrate decomposition

根据地质调查显示,海底当中有冷泉存在(见图5),而冷泉周围存在有生物群落,这表明部分天然气的存在对于海底生物群落的存在是有利的,所以即使有部分天然气泄漏到海水当中也不会对海洋生态环境产生太大的影响,并且天然气等有机物的存在还为许多物种提供了食物<sup>[17]</sup>。

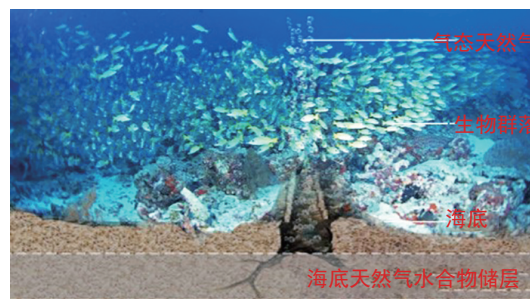


图5 海底冷泉示意

Fig.5 Subsea cold springs

### 1.2.3 海底地质灾害问题

海底水合物的开采必然会打破原有地层的力学平衡,并且在非固结地层中水合物还担有承压的作用,水合物分解后储层承压能力也会降低,因此人们所担忧的在开采海底水合物过程中会引起地层塌陷和海底滑坡(参见图6)等灾害是可能出现的,所以怎样避免该类地质灾害问题是当前应该研究的重点,为此本文提出了边钻进边注发泡水泥浆的方式来发挥支撑地层的作用,从而避免产生地层塌陷和海底滑坡等地质灾害。

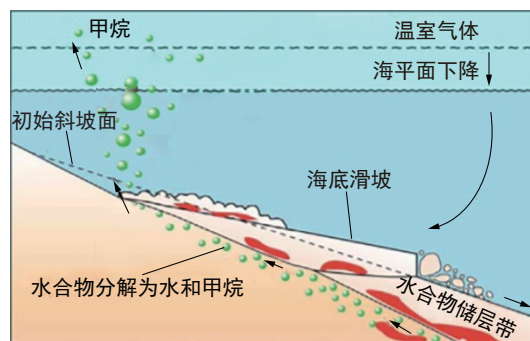


图6 水合物分解造成的海底滑坡示意

Fig.6 Seabed landslide caused by hydrate decomposition

## 2 国内外海域天然气水合物试采现状分析

### 2.1 国外海域天然气水合物试采现状

世界各国都十分重视天然气水合物资源的勘查

和试采工作。美国从2000年开始就制定了水合物开发研发计划,在随后几年投入巨资进行水合物开发研究,并计划在墨西哥湾进行多站位的钻探和取心工作,与印度保持长期合作参与印度近海水合物的试采工作<sup>[18]</sup>。日本是最积极进行海域天然气水合物试采工作的国家,在2013年3月首次在南海海槽进行了海域水合物的试采,采用降压法连续产气6 d,产气量为11.9万 $\text{m}^3$ ,后因地层出砂严重不得不终止;在2017年5月开始了第二次海域天然气水合物试采,仍然采用降压法开采,首次产气12 d,产气量为3.5万 $\text{m}^3$ ,出现出砂故障后暂时中断,随后进行了生产井的切换并继续进行试采,在计划时间之内,2次的产气量仅为23.5万 $\text{m}^3$ ,与第一次试采相比在产气量上没有太显著的提高<sup>[19-21]</sup>。韩国原定于在2015年进行海域水合物试采,但由于某种缘故将试采计划进行了推迟,到目前为止还没有实行<sup>[18]</sup>。

## 2.2 我国海域天然气水合物试采现状

我国对天然气水合物资源勘查起步较晚,从2011年开始正式启动了天然气水合物资源勘查和试采工作。并与2017年5月,在我国南海神狐海域获得了天然气水合物试采的成功。本次试采采用的是直井降压开采方式,连续产气60 d,产气量30.9万 $\text{m}^3$ ,最高日产量3.5万 $\text{m}^3$ ,取得了持续产气时间长、产气量大、气流稳定和无环境安全问题等重大成果<sup>[18]</sup>。本次试采获得了从水深1200多米,海底之下200多米的泥质粉砂型储层中开采天然气水合物的成功,为以后的科学研究积累了大量的数据资料,打下了坚实的技术基础。2019年10月我国正式启动第二轮海上试采工作,并于2020年3月获得试采成功,此次试采取得了一系列的突破,是世界上首次采用水平井试采的国家,月产气量达到了86.14万 $\text{m}^3$ ,为日后的商业化开采奠定了基础。

## 3 海域非成岩天然气水合物储层改造方法

根据上述分析海域天然气水合物试采可能出现海底地质灾害风险,且日本2次海域水合物试采工作被迫终止都是因为地层出砂严重所致,而水平井钻井面临着井筒难以形成且地层容易塌陷的问题,为了应对这些问题对水合物储层进行改造成为了必由之路,不过到目前为止国内外还没有相关内容的研究,还未提出一种切实可行的储层改造方法。

### 3.1 常规油气储层改造方法

常规油气储层改造方式主要有3种,分别是酸化、酸化压裂和水力压裂<sup>[22-23]</sup>。酸化酸液的注入方式有2种,一种是将酸液注入到已经完钻井筒的预定位置,使酸液一直处于静止状态,通过酸液的酸性来腐蚀溶解结垢物或射孔井眼内的堵塞物,另一种注入方式是将酸液进行正反循环不断的流动,通过酸液的循环冲刷和腐蚀来改造储层,酸化不需要加压或者加压很小,对于储层改造能力有限,主要作用于井筒附近对于地层的渗流能力不能改变,大多用来解堵,不压破地层;酸化压裂的注入压力要高于地层压力,在高压力的作用下压破地层,形成裂缝,注入的酸液使裂缝延伸以达到增产的目的;水力压裂是将携砂混合液高压泵入到地层当中压破地层,形成裂缝,支撑剂充填到裂缝中支撑裂缝,防止裂缝闭合,为油气开采提供流通通道。

### 3.2 海域天然气水合物储层改造的难点

常规油气储层的改造都是在井筒已经形成的前提下开展的,我国南海水域天然气水合物赋存在沉积层当中,地层属于泥质粉砂型储层,未固结成岩。根据水合物储层的地质条件以及井下钻井设备,在海底水合物储层进行水平井钻进时存在很大的困难。同时无论是酸化、酸化压裂还是水力压裂都无法在未固结的水合物储层中发挥储层改造和支撑地层的作用。

### 3.3 海域天然气水合物储层改造方法探讨

在对海域天然气水合物储层进行改造时必须解决上述2个问题:第一是水平井钻进困难问题;第二是水合物储层改造问题。本文依据现有钻井设备和技术条件提出一种水合物储层改造解决方案。

#### 3.3.1 水平井钻进问题的解决策略

常规的水平钻进分3步走,第一步完成直井段钻进工作;第二步在稳定地层选择造斜点,通过定向工具进行造斜钻进,直至进入储层的设计靶点为止;第三步是水平段钻进,只需按照设计的井眼轨迹完成水平方向的钻进即可。在钻井过程中采用的造斜工具主要包含了螺杆或者涡轮钻具、随钻测量系统以及钻头等。通过实时井眼轨迹监测,调整造斜工具面来完成造斜工作。但是在海域天然气水合物钻探中,由于地层松软对调整造斜工具面提供必要的支撑力有限,所以采用常规的水平井钻井方式完成海域水平井的钻进工作存在一定的困难<sup>[24]</sup>。

水力喷射微小井眼径向水平井钻井技术的基础是连续油管钻井技术,已经在油气田开采中得到了成功的应用,特别是在未固结地层的应用效果良好。主要包含的设备有连续油管系统、转向器和开窗设备、储能装置、高压泵组、柔性管、多孔射流钻头等<sup>[25-31]</sup>。

可将水力喷射微小井眼钻井技术应用到海域水合物钻探中,在钻井过程中,第一步完成直井钻进,并下入套管固井;第二步利用井下转向器、套管开窗设备和连续油管完成直井套管的开窗;第三步利用连续油管水力喷射系统进行水力喷射钻进。采用水力喷射微小井眼钻井技术进行水平井钻进,不需要使用造斜工具,可在直井套管内直接实现从轴向到径向的钻进。在水平段钻进时,多孔射流钻头反向喷嘴喷出的液体产生的作用力为整个钻进系统提供前进的动力。为了保证多孔射流钻头和连续油管沿着预定的轨迹钻进,采取了2种方式来进行方向和速度的控制,一种是多孔射流钻头上下喷嘴均匀配置,如果钻头在井眼中处于中间位置则上下作用力自平衡,如果多孔射流钻头靠近井底则反作用力增大,会将钻头推向中心位置继续维持平衡;另一种是在钻头尾部位置处接上缆绳,另一头缠绕在钻井平台的缆绳绞车上,通过缆绳来控制 and 监测钻进速度和位置。采用微小井眼水力喷射钻井技术不仅可以实现水平井钻进,同时还可以达到节约钻井成本的目的。

### 3.3.2 水合物储层改造问题的解决策略

常规油气储层的改造都是在井筒已经形成的前提下开展的,但是在海域水合物储层改造中却并不适用,因此必须转变思路,依据海域非成岩水合物储层的特点,提出一种边钻进水平段边进行储层改造的解决思路。

发泡水泥是通过发泡机的发泡系统将发泡剂用机械方式充分发泡,并将泡沫与水泥浆均匀混合在一起,用于现场施工浇筑或模具成型。最常被用来制作保温材料。采用硅酸盐水泥、特种水泥、憎水剂、减水剂、发泡剂、纤维、粉煤、调凝剂配置而成的泡沫水泥浆,在固结以后可以形成蜂窝状结构物质,该物质不仅耐压性强而且孔隙性良好<sup>[32-35]</sup>。以发泡水泥为基础,对其配方进行调整,增加粗骨颗粒物质,增加固结之后蜂窝状物质的孔隙度和渗透性,在进行海域水合物水平井钻井过程中将这种改进后的

发泡水泥浆体系注入到储层当中,正好发挥支撑孔壁和改善地层渗透性两方面的作用。但在注入方式上不再采用传统的注入方式,而是在采用水力喷射微小井眼钻进水平井时作为喷射液注入,边钻进边喷射到地层当中,且连续油管在钻井完成后不再提出孔内,射孔完成后作为生产套管使用。由于水合物降压分解相对较缓慢,且连续油管可以发挥承压的作用,所以作为喷射液喷射到地层中的改进配方的发泡水泥浆在钻进过程中并不固结,而是在钻进完成后开始固结,固结以后形成蜂窝状物质(见图7),提高了水合物储层的渗透率,为分解后的天然气提供了流通通道。且由于蜂窝状物质的存在,出砂问题也会得到很好的缓解。最重要的一点是水合物分解前所需要承担的支撑力由蜂窝状物质来承担,避免了地层坍塌和海底地质滑坡等地质灾害的发生。采用水力喷射改进发泡水泥浆的方式进行海域水合物储层改造理论上是可行的,不过仍待继续进一步的研究。

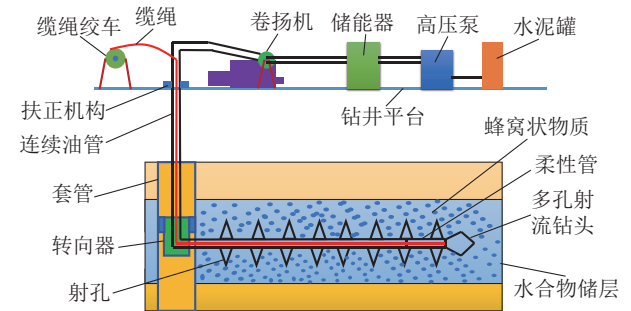


图7 水力喷射发泡水泥在海域水合物钻探中的应用示意

Fig.7 Application of hydraulic jet foamed cement in marine hydrate drilling

## 4 结论

天然气水合物是一种储量丰富、清洁、高效的绿色能源,对于解决未来世界的能源需求具有重要的意义。在海底水合物开采过程中最有可能出现地层坍塌和海底滑坡等地质灾害,日本2次海域水合物试采都出现了严重的出砂问题,我国虽然获得了海域试采的初步成功,但是水平井钻井困难,且地层容易出现塌陷的问题依然存在,所以对海域水合物储层进行改造成为必由之路。通过水力喷射微小井眼径向水平井钻井技术可以有效解决水平井的钻进困难问题,采用喷射改进发泡水泥浆在水合物储层形

成蜂窝状物质可以达到改造水合物储层的目的,从而尽早实现海域天然气水合物开采的成功。

### 参考文献(References):

- [1] 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):15-18.  
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):15-18.
- [2] 史斗,郑军卫.世界天然气水合物研究开发现状和前景[J].地球科学进展,1999,14(4):330-339.  
SHI Dou, ZHENG Junwei. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4):330-339.
- [3] 佟乐,杨双春,王璐,等.天然气水合物研究现状和前景分析[J].辽宁石油化工大学学报,2017,37(2):17-21.  
TONG Le, YANG Shuangchun, WANG Lu, et al. Research state and prospective of natural gas hydrates[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2017, 37(2):17-21.
- [4] 周怀阳,彭晓彤,叶瑛.天然气水合物勘探开发技术研究进展[J].地质与勘探,2002,38(1):70-73.  
ZHOU Huaiyang, PENG Xiaotong, YE Ying. Development in technology of prospecting and exploitation for gas hydrates[J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(1):70-73.
- [5] 付强,周守为,李清平.天然气水合物资源勘探与试采技术研究现状与发展战略[J].中国工程科学,2015,17(9):123-132.  
FU Qiang, ZHOU Shouwei, LI Qingping. Natural gas hydrate exploration and production technology research status and development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(9):123-132.
- [6] 吴传芝,赵克斌,孙长青,等.天然气水合物开采技术研究进展[J].地质科技情报,2016,35(6):243-250.  
WU Chuanzhi, ZHAO Kebin, SUN Changqing, et al. Research advances of the production techniques for gas hydrate[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2016, 35(6):243-250.
- [7] 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):63-67.  
ZHANG Yang, LI Guangxue, LIU Fang. Current status of mining technology for natural gas hydrate[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(4):63-67.
- [8] 张旭辉,鲁晓兵,李鹏.天然气水合物开采方法的研究综述[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(3):1-21.  
ZHANG Xuhui, LU Xiaobing, LI Peng. A comprehensive review in natural gas hydrate recovery methods[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(3):1-21.
- [9] 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.  
ZHOU Shouwei, CHEN Wei, LI Qingping. The green solid fluidization development principle of natural gas hydrate stored in shallow layers of deep water[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5):1-7.
- [10] 周守为,赵金洲,李清平,等.全球首次海洋天然气水合物固态流化试采工程参数优化设计[J].天然气工业,2017,37(9):1-13.  
ZHOU Shouwei, ZHAO Jinzhou, LI Qingping, et al. Optimal design of the engineering parameters for the first global trial production of marine natural gas hydrates through solid fluidization[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9):1-13.
- [11] 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.  
ZHAO Jinzhou, LI Haitao, ZHANG Liehui, et al. Large-scale physical simulation experiment of solid fluidization exploitation of marine gas hydrate[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10):76-83.
- [12] 贾怀东,郑瑞锋.可燃冰开发或引发环境灾难[J].生态经济,2012,28(12):14-17.  
JIA Huaidong, ZHENG Ruifeng. The development of combustible ice could lead to environmental disaster[J]. Ecological Economy, 2012, 28(12):14-17.
- [13] 吴传芝,赵克斌,孙长青,等.天然气水合物开采研究现状[J].地质科技情报,2008,27(1):47-52.  
WU Chuanzhi, ZHAO Kebin, SUN Changqing, et al. Current research in natural gas hydrate production[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(1):47-52.
- [14] 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.
- [15] 朱超祁,张民生,刘晓磊,等.海底天然气水合物开采导致的地质灾害及其监测技术[J].灾害学,2017,32(3):51-56.  
ZHU Chaoqi, ZHANG Minsheng, LIU Xiaolei, et al. Gas hydrates: production, geohazards and monitoring[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3):51-56.
- [16] 宫智武,张亮,程海清,等.海底天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响[J].石油钻探技术,2015,43(4):19-24.  
GONG Zhiwu, ZHANG Liang, CHENG Haiqing, et al. The influence of subsea natural gas hydrate dissociation on the safety of offshore drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4):19-24.
- [17] 李子丰,韩杰.海底天然气水合物开采的环境安全性探讨[J].石油钻探技术,2019,47(3):127-132.  
LI Zifeng, HAN Jie. Discussion of environmental safety factors in subsea natural gas hydrate exploitation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3):127-132.

- [18] 王淑玲, 孙张涛. 全球天然气水合物勘查试采研究现状及发展趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(7): 24-31.  
WANG Shuling, SUN Zhangtao. Current status and future trends of exploration and pilot production of gas hydrate in the world[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(7): 24-31.
- [19] SAEKU T, FUJII T, INAMORI T, et al. Extraction of methane hydrate concentrated zone for resource assessment in the eastern Nankai Trough, Japan[C]//Offshore Technology Conference. Texas USA: 2008.
- [20] YAMAMOTO K, FUJII T, INAMORI T T, et al. Operational overview of the first offshore production test of methane in the Eastern Nankai Trough, Japan[C]//Offshore Technology Conference. Texas, USA: 2008.
- [21] 张炜, 邵明娟, 王铭晗, 等. 全球首次近海甲烷水合物试采: 从选址到实施[J]. 中国矿业, 2017, 26(2): 143-151.  
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, WANG Minghan, et al. First offshore methane hydrate production test in the world: from site selection to implementation[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 143-151.
- [22] 穆海林, 刘兴浩, 刘江浩, 等. 非常规储层体积压裂技术在致密砂岩储层改造中的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(2): 56-63.  
MU Hailin, LIU Xinghao, LIU Jianghao, et al. Application of volume fracturing to reconstruction of tight sandstone reservoir [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2014, 37(2): 56-63.
- [23] 雷群, 管保山, 才博, 等. 储集层改造技术进展及发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 1-8.  
LEI Qun, GUAN Baoshan, CAI Bo, et al. Technological process and prospects of reservoir stimulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 1-8.
- [24] 王志刚, 胡志兴, 李小洋, 等. 水力喷射微小井眼技术应用于海洋水合物钻探的可行性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2): 30-35.  
WANG Zhigang, HU Zhixing, LI Xiaoyang, et al. Feasibility study of hydraulic jet micro-borehole technology to marine hydrate drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2): 30-35.
- [25] 李慧, 黄本生, 刘清友. 微小井眼钻井技术及应用前景[J]. 钻采工艺, 2008, 31(2): 42-45.  
LI Hui, HUANG Bensheng, LIU Qingyou. Micro-borehole drilling technology and its application prospect [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(2): 42-45.
- [26] 崔龙连, 汪海阁, 葛云华, 等. 新型径向钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 29-33.  
CUI Longlian, WANG Haige, GE Yunhua, et al. New radial drilling technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6): 29-33.
- [27] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 微小井眼钻井技术概况、应用前景和关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 5-9.  
CHEN Chaowei, ZHOU Yingcao, SHEN Ruichen, et al. Overview, application prospects and critical technologies of micro hole drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 5-9.
- [28] 许朝辉, 高德利. 微小井眼连续油管的侧钻开窗[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(1): 82-83.  
XU Chaohui, GAO Deli. Side drilling window of coiled tubing in micro-borehole [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(1): 82-83.
- [29] 迟焕鹏, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射径向水平井技术研究现状及分析[J]. 钻采工艺, 2013, 36(4): 119-124.  
CHI Huanpeng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research status and analysis of radial horizontal well technology with hydraulic jet [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(4): 119-124.
- [30] 黄中伟, 李根生, 唐志军, 等. 水力喷射侧钻径向微小井眼技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 37-41.  
HUANG Zhongwei, LI Gensheng, TANG Zhijun, et al. Technology of hydra-jet sidetracking of horizontal micro-radial laterals [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4): 37-41.
- [31] 杨东, 高庆云, 朱英洁, 等. 油气井径向水力喷射钻孔工艺技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(1): 67-69.  
YANG Dong, GAO Qingyun, ZHU Yingjie, et al. Research and application of radial hydraulic jet drilling technology in oil and gas wells [J]. Well Testing, 2017, 26(1): 67-69.
- [32] 李启金, 李国忠, 杜传伟. 改性聚丙烯纤维对发泡水泥性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(30): 14-20.  
LI Qijin, LI Guozhong, DU Chuanwei. Effects of modified polypropylene fibers on properties of foamed cement [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(30): 14-20.
- [33] 马一平, 王洋, 李奎, 等. 超轻发泡水泥保温材料的制备及力学性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 424-430.  
MA Yiping, WANG Yang, LI Kui, et al. Preparation and mechanical properties of ultra-light foamed cement insulation materials [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 424-430.
- [34] 张磊蕾, 王武祥, 廖礼平, 等. 发泡水泥孔结构的影响因素研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(9): 1-5.  
ZHANG Leilei, WANG Wuxiang, LIAO Liping, et al. Effecting factors research on pore structure of foamed cement [J]. China Concrete and Cement Products, 2013(9): 1-5.
- [35] 张磊蕾, 丁苏金, 王武祥, 等. 发泡水泥孔结构控制技术研究[J]. 新型建筑材料, 2015(1): 43-47.  
ZHANG Leilei, DING Sujin, WANG Wuxiang, et al. Research on control technology of pore structure of foam cement [J]. New Building Materials, 2015(1): 43-47.

(编辑 荐华)