

海底天然气水合物地层钻井潜在风险及控制措施*

何勇, 唐翠萍, 梁德青[†]

(中国科学院广州能源研究所, 中国科学院天然气水合物重点实验室, 广州 510640)

摘要: 天然气水合物是一种清洁高效能源, 广泛分布于大陆永久冻土带和海洋环境中, 其中海洋环境又以海洋大陆斜坡和深海盆地为主。对海底天然气水合物地层进行钻井是研究海底天然气水合物及获得海底地层油气资源最直接的手段之一, 但海底天然气水合物地层地质环境复杂, 钻井面临诸多风险。本文通过综合分析海底天然气水合物地层的储层特性, 探讨了海底地层中天然气水合物分解与再形成对钻井工程的影响、可能诱发的地质灾害及环境效应, 并提出了相应的应对措施, 以期为我国海底天然气水合物地层钻井提供参考。

关键词: 天然气水合物; 钻井; 风险; 控制

中图分类号: TK01; P744.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.01.007

The Potential Risks of Drilling in Marine Gas Hydrate Bearing Sediments and the Corresponding Strategies

HE Yong, TANG Cui-ping, LIANG De-qing

(CAS Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Natural gas hydrate is a clean and efficient energy source which is widely distributed in marine continental slope and deep sea basin. Though drilling is one of the most efficient way for gas hydrate research and getting resources, the complex geological environment in marine gas hydrate bearing sediments leads to drilling faces many risks. The characteristics of marine gas hydrate bearing sediments were analyzed. The influences to the drilling engineering, the potential geological hazards, and environmental effects caused by natural gas hydrate decomposition and formation were summarized in this paper. The corresponding countermeasures are put forward. It could be as a reference for drilling in marine gas hydrate bearing sediments.

Key words: natural gas hydrate; drilling; risk; control

0 前言

天然气水合物因其储量巨大、分布范围广、能量密度高且燃烧产物洁净而被公认为 21 世纪的重要后续能源, 其研究已成为当今能源科学研究的热点之一^[1]。自然界中, 天然气水合物主要分布于陆地永久冻土带与海底的大陆边缘地区, 全球约有 90% 的海洋水域为天然气水合物赋存的潜在场所^[2]。钻井是研究并获取海底水合物最直接的手段之一, 然而对海底水合物地层进行钻井时可能会带来一系列包括钻井工程灾害、海洋地质灾害及环境灾害等在内的诸多问题^[3-4]。究其原因, 主要是由于在对海

底天然气水合物地层进行钻井时, 钻井过程极易引发海底地层温度和压力发生变化而导致水合物分解, 从而影响钻井安全; 另外, 天然气水合物的大量分解将导致海底地质滑坡, 并且水合物分解释放大量甲烷气体, 其温室效应极强, 释放到大气圈将会破坏全球环境^[5-6]。

1 海底天然气水合物地层赋存特性

天然气水合物在自然界中能够稳定存在, 主要取决于温度、压力、气体组分、饱和度和孔隙水组成, 其结晶和生长速度还取决于沉积物颗粒大小、形状和组成。控制天然气水合物形成和赋存的元素

* 收稿日期: 2015-11-09 修订日期: 2015-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(41406103); 国家海洋地质专项项目(GHZ2012006003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGZD-EW-301)

[†] 通信作者: 梁德青, E-mail: liangdq@ms.giec.ac.cn

受到海洋中一系列构造和沉积作用的影响，在不同的时间尺度上导致多种可能的动力学反应^[7]。这些因素使得水合物出现在陆地永久冻土带和大陆斜坡、边缘海和内陆海等深水环境中的几率较高。

冻土带天然气水合物在较低的温度和压力下形成，由于受地温梯度的影响，其蕴藏深度一般较浅。相对于冻土带，大陆边缘的深水有机碳供应量充足，并且具有较高的沉积速率，目前所发现的水合物绝大多数都集中在这类地区，从整体上来说，海底天然气水合物占有天然产出水合物的绝大多数。从这个角度上来看，对海底天然气水合物进行钻井研究更具有价值。

天然气水合物属于沉积矿产，受压力与地温梯度的影响，海底天然气水合物主要赋存于海底浅表层的新生代地层中，该地层中沉积物主要来源于沉积速率大、富含有机质的新生代陆源沉积^[2]。水合物藏上部缺乏压实作用，地层的力学强度较低，地层中的水合物在介质中起胶结作用，水合物的存在会显著提高沉积层的力学强度，若水合物大量分解，将会降低井壁围岩的稳定性，地层抗破坏能力将下降，导致井壁失稳垮塌^[8]。

2 海底天然气水合物地层钻井潜在的风险

海底天然气水合物一般赋存于水深超过 500 m 的深水区，相对于传统的海洋油气钻井，其水深大，海底环境恶劣（高压、低温）。在钻井过程中，海底水合物层受钻井过程的扰动，钻井液在温差和压差驱动下不可避免地侵入地层发生传热传质作用，导致地层中水合物分解，由于钻井处于高压低温环境中，分解产生的气体及下层游离气将会在钻井液中形成水合物从而引发钻井安全事故；地层中水合物大面积快速分解将会诱发海底地质滑坡，而甲烷作为一种效应极强的温室气体，水合物分解产生的大量甲烷进入大气将会对大气的热辐射性能造成重大改变，进而影响全球气候^[5,9]。

2.1 地层中水合物对钻井工程的影响

对海底天然气水合物地层钻井时，钻具对海底地层进行破坏导致储层井壁和井底附近地层应力释放，海底地层压力降低；在钻进过程中，摩擦产生大量的热并且钻井液与地层间的热交换将引起水合物层的温度升高；海底水合物层对温度、压力条件

极为敏感，当地层温度升高、压力降低时将导致地层中的水合物发生分解，并且钻井液中的无机盐和有机醇类水合物热力学抑制剂也会促进地层中水合物的分解。

海底天然气水合物层具有较高的静水压力和较低的环境温度，水合物地层中分解的大量气体涌入钻井管线后，使钻井管线内压力急剧升高，钻井液与温度较低的外界地层进行热交换导致自身温度下降，从而在钻井管线内重新生成水合物；当钻至水合物层之下的游离气层时，其压力可能更高，规模可能更大，当大量游离气涌进钻井管线时，也会导致管线中水合物生成^[11]。

如图 1 所示，海底水合物层钻井管线内形成水合物后，将会造成钻井管线堵塞，严重影响正常的钻井工作。钻井过程中所形成的水合物对钻井所产生的影响具体表现有：①水合物的形成将会导致节流管线、压井管线堵塞，使循环作业无法进行；②水合物堵塞防喷器或防喷器以下的空间将导致无法检测防喷器下的压力；③水合物的形成将会使钻具无法移动；④水合物的形成将会使防喷器无法完全打开或关闭；⑤所生成的水合物在管线中循环时，由于温度和压力发生变化，极易分解产生大量的气体使管线内压力升高影响井控工作，甚至导致井喷；⑥管线内水合物的分解容易引起气侵，气体进入井筒后形成超高压会导致井漏、井喷及套管损坏等事故；⑦水合物的分解也会使得沉积物倒塌，造成井壁失稳^[12-14]。

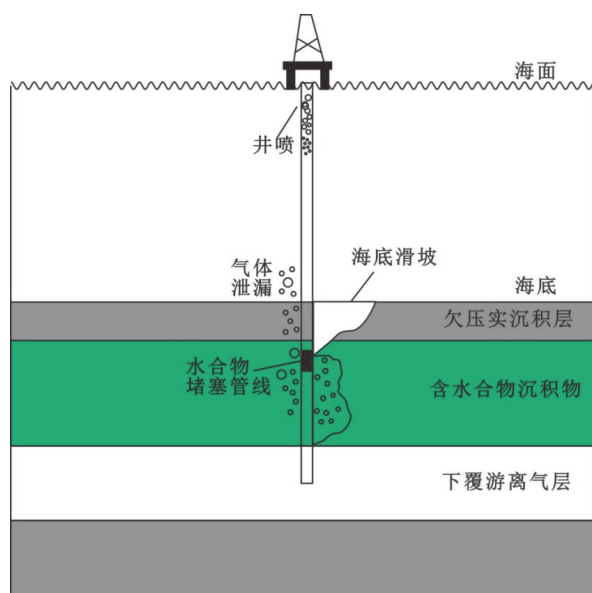


图 1 水合物地层钻井潜在的风险（据刘力^[10]，修改）

Fig. 1 Potential risks of drilling in marine gas hydrate bearing sediments

海底天然气水合物地层钻井中,天然气水合物的形成对钻井液性能也有显著影响。当水合物形成所需的大量气体进入到钻井液中时,钻井液与大量的气体一起循环,将导致钻井液密度降低,钻井压力增加;天然气水合物形成将消耗钻井液中大量的水,导致钻井液失水而使其流变性发生改变,而且在钻井液中会出现固相沉析,从而使钻井过程中仅有少量钻井液流动而无法满足钻井需求^[11]。另外,当钻井液中形成天然气水合物后,钻井液密度增加,影响钻进速度。同时,天然气水合物的形成是一个放热反应,水合物形成时会向钻井液中释放大量的热量,钻井液的温度就会受到明显影响,温度改变从而使钻井液的性能也发生改变。由于钻井过程的扰动及钻井过程中温度和压力条件的变化,钻井液中所形成的天然气水合物也可能发生分解,当水合物开始分解时(水合物的分解是吸热反应),钻井液的温度也会降低,钻井液的性能随温度将发生一系列变化。在低温条件下,钻井液基本流变特性表现为表观粘度、塑性粘度、屈服值和静切力均增大,钻井液有向凝析方向转化的趋势,而且井底和井口钻井液密度的不均衡性,极易使钻井液中的固相颗粒沉积,从而影响钻井液的性能^[15-16]。

2.2 钻井所诱发的地质灾害

从海底天然气水合物的相平衡图(图2)可以看出,海底天然气水合物主要发育在合适温度和压力条件下的稳定带中,该区域内的温度和压力处于水合物形成和稳定存在的热力学范围内。对海底天然气水合物地层进行钻井时,钻井过程引起的地层压力下降和温度上升都将导致水合物分解,水合物

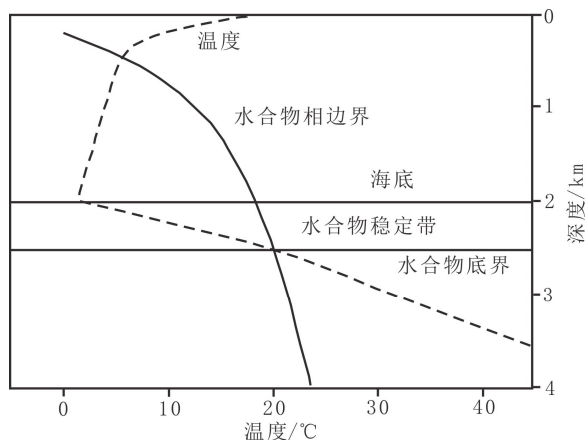


图2 海底天然气水合物的相图(据Max^[18],修改)
Fig. 2 Phase diagram for natural gas hydrate in seafloor

分解产生大量的气体和少量的水,使得处于准胶结稳定态的水合物与海底地层失稳,释放出的气体和水为沉积层的大规模移动创造了条件。若分解产生的气体在沉积层孔隙内不能迅速消散,那么将导致孔隙内产生很大的超静孔隙压力,使得骨架的有效应力减小,沉积层的承载能力降低,引发海底滑坡、塌陷,甚至海啸等自然灾害,对海底电缆、通讯光缆、钻井平台等造成威胁或破坏^[17]。

2.3 环境效应

天然气水合物的主要成分甲烷是一种温室效应极强的气体,呈辐射状活动,其温室效应是二氧化碳的21倍^[4]。海底水合物层进行钻井时影响了水合物层的稳定性,释放出大量甲烷,并最终进入大气圈,使大气中的甲烷浓度随海底天然气水合物的分解而增加,对全球大气组分变化造成巨大冲击,影响到全球气候变化走势。

3 海底天然气水合物地层钻井风险控制措施

通过上述分析,海底天然气水合物地层钻井所面临的风险主要来源于地层中的水合物大量快速分解以及钻井过程在井筒中所形成的水合物,因此,在水合物地层钻井时必须防止地层中的水合物大量分解,同时也要防止进入井筒中的天然气在钻井管线中形成水合物。目前,国内外对水合物地层进行钻井时,根据钻井过程是否允许水合物的大量分解将水合物地层钻井方法分为分解抑制法和分解容许法两大类。分解抑制法主要是通过控制井筒内温度、压力并采用合适的水合物抑制剂使地层中的水合物处于相平衡状态,不发生分解或只有少量分解;分解容许法主要是采用适当的方法诱发地层中的水合物分解,但分解是被控制的。现普遍认为采用分解抑制法比较妥当,以下将详述水合物地层钻探时采用的若干分解抑制法^[19]。

3.1 采用良好的钻井方案

在海底水合物地层进行钻井时,为防止海底地层中的天然气水合物大量分解及进入钻井管线中的游离气形成水合物,可设计良好的钻井方案来达到此目的。

天然气水合物的稳定性受温度和压力的严格控制,在海底天然气水合物地层进行钻井时,可通过

设计良好的钻井方案来控制钻井过程中的温度和压力。对钻井过程的温度的控制可通过控制钻井液温度来实现，但在海洋深水钻井中，钻井管线复杂，循环过程中钻井液使用量巨大，并且还需要考虑地层的破坏压力和钻井液的流动特性等问题。因此通过单一控制钻井回路中钻井液的温度来防止水合物的分解/形成的运行成本很高，经济效益较差，不适用于长时间钻井。对钻井过程中压力的控制可通过调节钻井液的密度来实现，然而，根据地层及钻井条件，尤其是海底天然气水合物地层条件复杂，钻井液密度需要控制在一定范围内，为控制钻井管线中的压力所需的钻井液密度并不一定满足钻井地层需求，所以靠调节钻井液密度来控制钻井过程中的压力仍具有一定的局限性。地层中的水合物只有当相平衡状态被破坏以后才能分解，而井筒中的游离气需要达到相平衡状态才能形成水合物，因此在海洋天然气水合物地层钻井时，根据实际地层特征，对钻井过程中的温度和压力实行联合控制，在满足经济效益的同时保证地层中的水合物不会大量分解并且钻井管线中也不会形成水合物。

近年来，随着钻井设备制造技术的发展，在设计海洋深水钻井方案时，常采用气液分离装置对钻井管线中的气相和液相进行分离来防止天然气水合物的形成。2013 年日本在其南海海槽进行全球首例海洋水合物试开采，在确定钻井方案时，通过在钻井管线中安装气体分离器和电子深潜泵对管线中的气液相进行分离以防止水合物的形成（图 3）。SAKURAI 等对试开采过程中气液相分离后钻井管线中水合物形成的可能性进行了实验模拟，实验结果表明，通过气液分离装置对管线中的气相和液相进行分离后，水合物开始形成时会有少量附着于管壁，随着管线中液相的流动，所形成的水合物由于受到扰动，部分会发生分解，部分以很小的颗粒分散于液相中，液相中水合物量极少不足以堵塞管线，并且对管线中温度和压力监测显示，管线中少量水合物的形成和分解对压力和温度的影响较小。在随后的试开采中，在钻井管线中安装气体分离器和电子深潜泵对管线中的气相和液相进行分离，实际试开采中未发生天然气水合物堵塞管道事故。实验室模拟及实际应用证明，在钻井管线中设计气液分离装置能够有效地防止管线中水合物的形成^[20-21]。

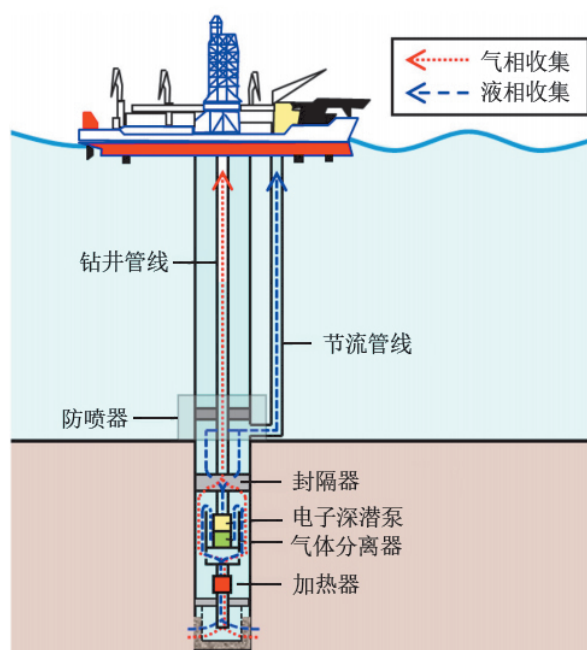


图 3 日本水合物开采系统示意图(据 SAKURAI 等^[21], 修改)
Fig. 3 The diagram of hydrate production test system in Japan

3.2 采用油基钻井液

油基钻井液是一类完全以非（弱）极性油品作为连续相的钻井液，油基钻井液中自由水含量较少，其形成水合物的几率较小。广义的油基钻井液包括老式柴油基钻井液、低毒矿物油基钻井液和合成油基钻井液。由于油基钻井液具有很强的泥页岩抑制性，能够有效维持井壁稳定，钻进过程中复杂情况很少发生，其使用过程中维护非常简单，体系稳定性好，曾在油气开发中广泛使用。

20 世纪 80 年代以来，基于对油气开采成本和环境保护的考虑，曾广泛应用于油气田开采的老式柴油基钻井液逐渐被低毒矿物油基钻井液和合成基钻井液所取代。矿物油基钻井液是反相乳化钻井液与局部注射液，由特别石蜡基油相、多种乳化剂、分散剂等各种钻井液处理剂配制而成，矿物油基钻井液的毒性主要由其中所加入的乳化剂和分散剂所决定，为保证矿物油基钻井液的低毒性，常使用的乳化剂和分散剂有氨基脂肪酸、妥尔油脂肪酸和改性咪唑因等。合成基钻井液是以人工合成或改性的有机物为连续相，盐水为分散相，在加入各种钻井液处理剂组成，使用的合成基液有醋类、醚类、聚 α -烯烃、醛酸醇等^[22-25]。

低毒矿物油基钻井液和合成基钻井液除具有普通油基钻井液的各项优点外，两者都具有较好的环

境接受性,适用范围更广泛,但在环境极敏感海域,低毒矿物油基钻井液的使用也受到一定的限制。相对于低毒矿物油基钻井液,合成基钻井液更易于生物降解,对环境无污染,钻井污水、钻屑和废弃钻井液均可向海洋排放;其闪点比矿物油基钻井液高,凝固点要低。

鉴于低毒矿物油基钻井液和合成基钻井液的以上优点,在海底天然气水合物地层进行钻井时,海底地层条件复杂,并且具有较高的压力和较低的温度,为保证井壁稳定、保护水合物地层及防止钻井管线中形成水合物,在钻井过程中为保证钻井安全,可采用低毒矿物油基钻井液或合成基钻井液。

3.3 采用具有水合物抑制性的水基钻井液

水基钻井液是一种以水为分散介质,以粘土、加重剂及各种化学处理剂为分散相的溶胶悬浮体混合体系。水基钻井液具有成本低、配制处理维护简单,处理剂来源广、可供选择的类型多、性能容易控制等优点,并具有较好的保护油气层效果,因此其在国内外油气田作业中被广泛应用。在选用水基钻井液对水合物地层进行钻井时,为防止钻井管线中形成水合物,目前在实际操作中最常用的方法是向钻井液中加入水合物抑制剂,抑制水合物的形成与聚集。根据其对水合物的抑制机理可分为热力学抑制剂、动力学抑制剂和防聚剂^[26]。

在实际生产中为了有效抑制水合物的形成,向钻井液中加入足量的热力学抑制剂(如盐类、醇类),使水合物的生成温度低于管线温度或生成压力高于管线操作压力,从而防止管线中水合物的生成^[27]。通过加入热力学抑制剂来抑制钻井管线中水合物的形成已在生产中得到广泛使用,但热力学抑制剂的加入要求浓度较高,使用量一般较大,成本较高。此外,当盐浓度较高时,对钻井液的维护及钻井液成分的调控就显得十分困难,并且高浓度盐类的加入加快了钻井设备的腐蚀,单独通过向钻井液中加入盐类来控制钻井管线中水合物的形成受到一定的限制。醇类的添加会影响天然气水合物晶体的形态及结晶凝聚特征,对于低级醇类,甲醇具有毒性,其应用面临着环境保护问题,乙二醇高昂的成本也限制了其使用。

水合物动力学抑制剂,相对于传统的热力学抑制剂,其特点是不改变体系生成水合物的热力学条件,而是大幅度降低水合物的生成速度,确保在钻井过程中不发生堵塞现象。动力学抑制剂能够使水

合物晶粒生长缓慢甚至停止,推迟水合物成核和生长的时间,防止水合物晶粒聚集长大。在水合物成核和生长初期,动力学抑制剂吸附在水合物晶粒表面,通过氢键使活性剂的环状结构与水合物晶体相结合,从而防止和延缓水合物晶体的生长^[1,16]。

动力学抑制剂用于油气勘探现场试验已接近20来年。从应用现状来看,动力学抑制剂具有抑制效果好、用量少、经济成本低等优点,应用前景更广泛。Acro于1995年在北海南部气田测试了Gaffix VC-713的应用情况,BP于1995-1996年间采用基于TBAB和VCap聚合物的混合物在另一个北海南部气田进行了六次现场试验,以上两例在处理过冷度为8℃~10℃下均获得成功^[1]。2001年FU等人在石油工程学会会议上介绍了乙烯基己内酰胺和乙烯基甲基乙酰胺共聚物在陆地和海上的油气田的成功使用情况^[28]。2006年KELLAND对动力学抑制剂的研究和应用进行了总结,特别介绍了全球各大石油公司(ExxonMobile、Shell及IFP等)动力学抑制剂的研究情况^[29]。

防聚剂(AA)是一些聚合物或表面活性剂,实际使用中的效果理论上并不取决于过冷度的大小,它并不是抑制水合物的生成,而是使水合物颗粒悬浮在油相中处于分散状态。防聚剂一般加入浓度低,但却能有效的防止水合物晶粒的聚结,使水合物晶体在钻井管线中输送而不堵塞管线。

相对于动力学抑制剂,防聚剂的应用较晚,其效率受到盐、聚合物和水等组分的影响。防聚剂主要有烷基芳香族盐类、烷基聚苷类化合物、四元铵类化合物、聚醚聚胺类化合物及含有酰亚胺基的非离子两性化合物等。防聚剂分散性能有限,仅在油水相共存时才可使用。它的加入可使油水相乳化,使水分散成小水滴,防止水合物的形成,其作用效果与油相组成含水量有关,即防聚剂与油气体系中水合物的抑制具有选择性^[12,30]。

4 结 论

在对海底天然气水合物地层进行钻井时,由于受钻进过程的扰动,地层中水合物失稳大量分解从而诱发工程地质灾害,并且钻井管道内具有水合物生成的温度和压力条件,分解气大量涌入钻井管道将导致水合物形成也会对钻井工程造成危害,因此在水合物地层进行钻井时,既要防止地层中的水合物大量分解,又要防止钻井过程中水合物的形成。

目前除美国和日本分别在墨西哥湾和南海海槽水合物地层进行钻井试验过, 未见其他海域天然气水合物地层钻井相关报道。海底天然气水合物地层钻井涉及到制造装备、海洋工程、地质灾害等学科的前沿技术, 未来我国对水合物地层进行钻井时, 可借鉴美国和日本的相关技术与经验, 充分了解地层资料, 综合多种方法, 采用良好的钻井方案, 控制钻井过程的温度和压力, 实施良好的井控措施, 并选用符合地层特性且具有水合物抑制性的钻井液, 使海底水合物地层钻井安全、高效、可控。

参考文献:

- [1] 陈光进, 孙长宇, 马庆兰. 气体水合物科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 涂运中. 海洋天然气水合物地层钻井的钻井液研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- [3] KVENVOLDEN K A, LORENSON T D. Global occurrences of gas hydrate[C]//Proceedings of the 11th international offshore and polar engineering conference. Stavanger: USGS, 2001: 462-467.
- [4] KVENVOLDEN K A. Gas Hydrates-Geological Perspective and Global Change[J]. Reviews of geophysics, 1993, 31(2): 173-187. DOI: 10.1029/93RG00268.
- [5] 甘华阳, 王家生. 天然气水合物潜在的灾害和环境效应[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 5-8. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2004.04.002.
- [6] 王淑红, 宋海斌, 颜文. 天然气水合物的环境效应[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 160-165. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2802.2004.02.014.
- [7] 吴能友, 梁金强, 王宏斌, 等. 海洋天然气水合物成藏系统研究进展[J]. 现代地质, 2008, 22(3): 356-362. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8527.2008.03.003.
- [8] WINTERS W J, WAITE W F, MASON D H, et al. Methane gas hydrate effect on sediment acoustic and strength properties[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2007, 56(1/3): 127-135. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.02.003.
- [9] 宁伏龙. 天然气水合物地层井壁稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005.
- [10] 刘力. 钻井液侵入含天然气水合物地层特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [11] 张凌. 天然气水合物赋存地层钻井液试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006.
- [12] 岳前升, 胡友林. 深水钻井液与完井液[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2012.
- [13] 吴华, 邹德永, 于守平. 海域天然气水合物的形成及其对钻井工程的影响[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0890.2007.03.028.
- [14] 胡友林, 刘恒. 天然气水合物对深水钻井液的影响及防治[J]. 天然气工业, 2008, 28(11): 68-70. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2008.11.019.
- [15] 孙涛, 陈礼仪, 邱存家, 等. 天然气水合物勘探低温钻井液体体系与性能研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(2): 61-63. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2004.02.018.
- [16] 吴华. 深水钻井中天然气水合物预测的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
- [17] 张旭辉, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 天然气水合物快速加热分解导致地层破坏的实验[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 157-164. DOI: 10.3724/SP.J.1140.2001.01157.
- [18] MAX M D. Gas hydrate and acoustically laminated sediments: potential environmental cause of anomalously low acoustic bottom loss in deep-ocean sediments[R]. Washington, DC: Naval Research Lab, 1990.
- [19] 邱存家, 陈礼仪, 朱宗培. 天然气水合物钻探中钻井液的使用[J]. 探矿工程, 2002, 36(4): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7428.2002.04.016.
- [20] YAMAMOTO K, TERA O Y, FUJII T, et al. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough[Z]. Houston, Texas, USA: Offshore Technology Conference, 2014.
- [21] SAKURAI S, NAKATSUKA Y, EDWARDS T J, et al. An experimental study for flow assurance of the methane hydrate production test system[Z]. Houston, Texas, USA: Offshore Technology Conference, 2014.
- [22] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 533-537.
- [23] 曾仁侠. 新钻井液技术——矿物油泥浆[J]. 西部探矿工程, 1995, 7(1): 74-78.
- [24] 徐安, 岳前升. 油基钻井液及其处理剂研究进展综述[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(8): 77-79.
- [25] 林永学, 王显光. 中国石化页岩气油基钻井液技术发展 with 思考[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 7-13. DOI: 10.3969/j.issn.10010890.2014.04.002
- [26] 白小东, 黄进军, 侯勤立. 深水钻井液中天然气水合物的成因分析及其防治措施[J]. 精细石油化工进展, 2004, 5(4): 52-54, 58. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8348.2004.04.015.
- [27] 董立山. 天然气水合物抑制剂实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- [28] FU S B, CENEGY L M, NEFF C S. A summary of successful field applications of a kinetic hydrate inhibitor[Z]. Houston, Texas, USA: the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2001.
- [29] KELLAND M A. History of the Development of Low Dosage Hydrate Inhibitors[J]. Energy & fuels, 2006, 20(3): 825-847. DOI: 10.1021/ef050427x.
- [30] 吴德娟, 胡玉峰, 杨继涛. 天然气水合物新型抑制剂的研究进展[J]. 天然气工业, 2000, 20(6): 95-98. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0976.2000.06.027.

作者简介:

何 勇 (1984-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事天然气水合物研究。

梁德青 (1970-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事天然气水合物研究。