

# 影响含天然气水合物地层井壁稳定的关键因素分析

宁伏龙 蒋国盛 张 凌 吴 翔 窦 斌 涂运中

(中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要:**由于钻井环境恶劣,加之天然气水合物的存在和分解,井壁失稳是含天然气水合物地层钻进时面临的主要难题之一。而影响井壁稳定的关键因素主要有含水合物地层的岩石物理和力学性质、水合物在沉积地层中的分解规律特性、钻井液的性能及其与水合物地层间的相互作用。天然气水合物分解是其中的核心因素,据此提出了防止井壁失稳的一些措施,同时认为利用试验和数值模拟对这些因素进行研究,并构建合适的井壁稳定分析数值模型和研制优质的低温防塌钻井液体系,将是解决含天然气水合物地层钻井井壁失稳的有效途径。

**关键词:**天然气水合物;钻井;井眼稳定

**中图分类号:**TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2008)03-0059-03

天然气水合物是由小“客体”分子( $<0.9\text{ nm}$ ),如  $\text{CH}_4$  等在一定温度(通常不到  $300\text{ K}$ )和适当压力(一般大于  $0.6\text{ MPa}$ )下接触到水分子而形成的白色似冰的笼型结晶化合物<sup>[1-3]</sup>。自然界中的天然气水合物广泛分布于大陆边缘和永久冻土带<sup>[4-5]</sup>,且蕴含量巨大。Klauda 和 Sandler<sup>[6]</sup>认为全球海域的天然气水合物里就储存有  $7.4 \times 10^{13}\text{ t}$  甲烷,是全世界常规天然气存量的 3 个数量级大,被誉为 21 世纪的可代替能源。而要对赋藏在地下一定深处的天然气水合物进行勘探和开发,钻井是必不可少的。

## 1 水合物钻井面临的井壁稳定问题

当前,天然气水合物勘探开发主要集中在美国 Alaska 北部斜坡、加拿大 Mackenzie 三角洲、墨西哥湾、日本南海海槽以及 IODP 计划中的 Blake 海脊和 Cascadia 海岭,中国也已在南海神狐海槽开钻水合物探井。由于天然气水合物只存在冻土地区和深水海域,钻井环境恶劣,加之水合物的存在,大大增加了钻井难度。钻井过程中井壁周围地层压力和温度的变化将不可避免地导致地层中的水合物发生分解,从而引发取样困难、井壁失稳和井涌甚至井喷等问题。由于含水合物地层岩石骨架属于未固结、弱固结或裂隙发育地层,当固态水合物起胶结或骨架支撑作用时,其分解时就会使井壁坍塌。而分解产生的水增加了井壁地层的含水量,气增加了孔隙压力,使颗粒间的联系减弱,导致井壁不稳;逸出的气体又影响了钻井液的密度和流变性,对井壁稳定愈发不利。因此,在含水合物地层钻进时,井眼稳定

问题是面临的主要难题之一<sup>[7-9]</sup>。

## 2 井壁稳定的关键影响因素

### 2.1 含水合物地层的岩石物理和力学性质

含水合物地层的岩石物理和力学性质是影响井壁稳定的首要因素。岩石物理性质主要包括水合物在沉积物中的分布模式、水合物饱和度和传热性能。不同学者提出了不同的水合物分布模式,其中一种是假设有两种模式:A 类胶结模式和 B 类胶结模式。A 类胶结模式假定水合物是孔隙流体的一部分;B 类胶结模式假定水合物是固体骨架的一部分,水合物的存在降低了孔隙度,改变了矿物组成的弹性模量<sup>[10]</sup>。Schlumberger 的 DCS 在对墨西哥湾海底水合物资源进行评估时,将水合物在沉积层中的分布模式划分为 6 类。显然不同的水合物分布模式对水合物地层的有效导热系数、比热、波速、渗透性、饱和度以及力学参数评估和计算有不同影响。地层

**收稿日期:**2007-11-27;**改回日期:**2008-02-28

**基金项目:**国家自然科学基金项目“钻井液侵入含天然气水合物地层的动力学特性及其耦合数值模拟研究”(编号:50704028)、新世纪优秀人才支持计划“海底天然气水合物井壁稳定性的理论和实验研究”(编号:NCET-05-0663)和中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划“天然气水合物地层钻井用水基钻井液性能实验研究”(编号:CUGQNL0623)联合资助

**作者简介:**宁伏龙(1977—),男,湖北钟祥人,2000年毕业于中国地质大学(武汉)勘查技术与工程专业,2005年获博士学位,讲师,现从事天然气水合物的勘探开发及油气钻井开发方面的研究工作。

**联系电话:**(027)65198002

中水合物饱和度变化很大,但总的来说不高,一般不超过 50%,其大小与地层的力学性质息息相关。

Winters 等人<sup>[10-12]</sup>用水合物及其沉积物测试装置(GHASTLI)对 Mackenzie 三角洲 Mallik2L-38 水合物钻井取出的水合物砂岩样品进行了声学和三轴强度测试。从测试结果看,水合物的存在会提高沉积层的强度,其强度是水合物分解后地层强度的 3~9 倍<sup>[12]</sup>。佐治亚理工学院在实验室内通过三轴试验测试了砂子、粘土和石英粉三种多孔介质在水合物存在下的体积弹性模量、压缩模量、杨氏模量、泊松比和剪切刚度等各项力学性能指标,并根据莫尔-库伦(Mohr-Coulomb)破坏准则探讨了水合物饱和度和为 50%的石英粉和不含水合物的石英粉在内聚力和摩擦角上的不同。研究发现,含水合物沉积物有点类似于膨胀土。从莫尔-库伦曲线上来看,含水合物的介质比只含水时抵抗破坏的能力要强。原因是水合物在介质中起胶结作用,它的存在增强了多孔介质的内聚力和摩擦角,而水的存在显然削弱了介质颗粒间的内聚力和摩擦角。

从上述力学性质测试结果可推断,在水合物地层钻井时,如果水合物大量分解,将会降低井壁围岩力学强度,使地层抵抗破坏的能力下降,因而很容易引发井壁失稳垮塌<sup>[14]</sup>。可见在对水合物地层井壁进行稳定性分析时,水合物分解将是一个不容忽视的关键因素。

## 2.2 水合物在井周地层中的分解特性

冻土和海洋深水水合物赋存地层钻井过程中所遇到的井壁失稳问题归根结底是天然气水合物的分解。井眼打开以后,由于井内压力变化以及钻井液和水合物地层的热交换将导致井壁附近水合物不可避免地发生分解。水合物分解将主要从两个方面影响井壁围岩的稳定性,其一是前面所述的地层本身力学强度会降低;其二是水合物分解增加了孔隙中的水和气。由于分解是在一个受限的孔隙空间内进行,因此水和气的增加会相应增加孔隙压力,从而影响井周围岩应力场的分布<sup>[7,14]</sup>。增加程度取决于沉积层的渗透系数和增温速度,当地层渗透性很差而水合物受热又很快时,分解产生的气体和水不能及时流走,会导致孔隙压力急剧增大<sup>[15]</sup>。因此,多孔沉积地层中的水合物分解特性及其流体运移规律是研究掌握水合物分解对井壁稳定影响的关键。Yousif 等<sup>[16]</sup>通过研究气-水-水合物三相的动量、质量传递规律,认为多孔介质中气体水合物的分解是一个受质量传递控制的过程。Masuda 等<sup>[17]</sup>提出一个数学模型来预测多孔介质中水合物分解时生成的

气体和水的流动。Kirby 等人用扫描电镜(SEM)仔细研究了甲烷水合物和石英砂子在分层和混合情况下的减压分解情况,发现分解速率与温度、压力、水合物结构类型及多孔介质特性等有关,在气体和水流动自由情况下,孔隙骨架或粒子有利于水合物分解。总的来说水合物分解速度和范围受温度压力改变程度、沉积地层的渗透性、水合物组成和结构、水合物及其周围地层物理性质等因素影响,它是一种比融化和升华更为复杂的过程。

## 2.3 钻井液性能

含水合物地层往往是具有渗透性的多孔介质体,钻井过程中钻井液不可避免地会与它发生能量和物质交换。首先当钻井液温度高于地层原始温度时,井周水合物会受热分解,温差越大,分解越快,对孔隙压力的影响越大;其次是钻井液密度,密度越大,井底压力越大,当井底压力高于地层压力时,钻井液会经过滤饼进入井周地层,影响孔隙流体流动和水合物稳定;反之,则井底压力越低,当其低于地层压力时,则不利于井壁力学平衡。而且水合物还会在减压下分解,更不利于井壁稳定和井内安全。因此,采取近平衡或过平衡压力钻井是水合物钻井较为可取的方式。在这种条件下,当钻井液温度高于地层原始温度时,钻井液和井周水合物地层之间的作用就表现为压差下钻井液侵入和温差下热传导导致的水合物分解。由于海洋深水环境下对钻井液降温相当困难,因此实际钻井液温度往往高于地层,因此在计算水合物地层井壁围岩应力场和分析井壁稳定性时,需要重点分析这种相互作用对井壁应力场的影响规律,因为钻井液温度和密度决定了地层中水合物分解和流体流动的快慢,而它们又决定了地层孔隙水压力变化的程度,从而影响了井周围岩应力的分布。

此外,对钻井液性能目前研究比较多的是其水合物抑制性,及研制各种热力学和动力学抑制剂。而天然气水合物地层钻井特性决定了钻井液流变性、护壁性和地温稳定性等对井壁稳定起协同作用的性能参数,也是钻井液体系设计时需要重点关注的因素<sup>[18]</sup>。

## 3 防止井壁失稳的一些措施

水合物的存在及其分解归根结底是影响井壁稳定的核心因素。因此,在钻井过程中要防止水合物大量分解以维持安全可控钻井。可采取以下措施:

1)尽可能地降低钻井液的温度,维持循环温度

接近水合物相平衡温度。

2)增加钻井液的密度以提高其静水压力,但是在海洋区域由于海底沉积地层易压裂,密度不应增加太大,需适当控制钻井液的当量循环密度(ECD),保持在安全钻井液密度窗口的上限区域为佳。最好是利用LWD及井口压力监测动态调节环空压力剖面,实现控制压力钻井(MPD)。

3)使用化学方法稳定水合物,在钻井液中加入抑制水合物分解的化学试剂<sup>[3]</sup>。如像Alaska水合物钻井中那样,在钻井过程中加入表面活性蛋白、卵磷脂和聚乙烯吡咯烷酮(PVP)等。

4)钻进前先下入套管,当钻遇含水合物地层时适当提高钻速,以快速通过该层,减少钻井液和地层接触时间。同时清洁井眼和起下钻时避免抽吸和冲击。

## 4 结束语

分析、预测和维持含天然气水合物地层的井壁稳定,就需要掌握三个关键因素的影响规律。由于在海洋或冻土带钻井成本高,贸然钻进势必会带来很大风险。因此,利用试验和数值模拟的方式对这些因素进行研究,并构建合适的井壁稳定分析数值模型和研制优质的低温防塌钻井液体系就成为解决含水合物地层井壁失稳的有效途径。钻井液是防止水合物大量分解的主要手段。因此,一个可取的思路是:通过室内试验掌握天然气水合物及其地层物理力学性质,运用耦合理论,构建一个完整的能反映钻井液侵入以及水合物分解的热-流-力耦合井壁稳定数值分析模型,从而优化设计钻井液体系参数,包括温度、密度、流变性和低剂量水合物抑制剂(LDHI)加量等。具有协同防塌效果的钻井液处理剂和水合物分解抑制剂优化选择应是今后钻井液室内试验研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Sloan E D. Clathrate hydrate measurements: microscopic, mesoscopic, and macroscopic[J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2003, 35(1): 41-53.
- [2] 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]. 石油勘探技术, 2007, 35(3): 91-93.
- [3] 白小东,黄进军,王川,等. 新型水合物抑制剂 HBH 的评价研究[J]. 石油勘探技术, 2007, 35(2): 36-38.
- [4] 刘华,李相方,隋秀香,等. 天然气水合物勘探技术研究现状[J]. 石油勘探技术, 2006, 34(5): 87-90.
- [5] Kvenvolden K A. Gas hydrate-geological perspective and global change[J]. Review of Geophysics, 1993, 31(2): 173-187.
- [6] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment [J]. Energy & Fuels, 2005, 19(2): 459-470.
- [7] 宁伏龙. 天然气水合物地层井壁稳定性研究[D]. 湖北武汉: 中国地质大学(武汉)工程学院, 2005.
- [8] 蒋国盛,宁伏龙,黎忠文,等. 钻进过程中天然气水合物的分解抑制和诱发分解[J]. 地质与勘探, 2001, 37(6): 86-87.
- [9] Tan C P, Freij-Ayoub R, Clennell M B, et al. Managing wellbore instability risk in gas-hydrate-bearing sediments [R]. SPE92960, 2005.
- [10] Ecker C, Dvorkin J, Aura M. Estimating the amount of gas hydrate and free gas from marine seismic data[J]. Geophysics, 2000, 65(2): 565-573.
- [11] Winters W J, Dallimore S R, Collett T S, et al. Physical properties of sediments from the JAPEX/JNOC/GSC Mallik2L-38 gas hydrate research well[J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1999, 544(a): 95-100.
- [12] Winters W J, Pecher I A, Booth J S, et al. Properties of samples containing natural gas hydrate from the JAPEX/JNOC/GSC Mallik2L-38 gas hydrate research well, determined using Gas Hydrate and Sediment Test Laboratory Instrument (GHASTLI)[J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 1999, 544(b): 241-250.
- [13] Winters W J, Pecher I A, Waite W F, et al. Physical properties and rock physics models of sediment containing natural and laboratory-formed methane gas hydrate[J]. American Mineralogist, 2004, 89(8-9): 1221-1227.
- [14] Freij-Ayoub R, Tan C P, Clennell M B, et al. A wellbore stability model for hydrate bearing sediments[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 57(1-2): 209-220.
- [15] WenYue Xu. Modeling dynamic marine gas hydrate systems [J]. American Mineralogist, 2004, 89(8-9): 1271-1279.
- [16] Yousif M H, Sloan E D. Experimental and Theoretical Investigation of Methane-Gas-Hydrate Dissociation in Porous Media[J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(4): 452-458.
- [17] Masuda Y, Fujinaga Y, Naganawa S, et al. Modeling and experimental studies on dissociation of methane gas hydrates in Berea sandstone cores: Proceedings of the 3rd International Conference on Gas Hydrates, Salt Lake City, July 18-22, 1999 [C].
- [18] 宁伏龙,吴翔,张凌,等. 天然气水合物地层钻井时水基钻井液性能实验研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 52-55.

[审稿 鄢捷年]

# Analysis of Key Factors Affecting Wellbore Stability in Gas Hydrate Formations

Ning Fulong Jiang Guosheng Zhang Ling Wu Xiang Dou Bin Tu Yunzhong

(School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074, China)

**Abstract:** Wellbore collapse is one of the main challenges for drilling gas hydrate formation due to poor drilling conditions and hydrate dissociation. The main factors impacting wellbore stability include rock properties, mechanical properties, characteristics of hydrate dissociation in porous sediments and drilling fluids, the properties of drilling fluid and the interaction between drilling fluid and hydrate in the formation. The dissociation of gas hydrates is the core for wellbore stability. Therefore, some measures were proposed to prevent gas hydrates from decomposing. The experimental and numerical experiments to investigate the factors, the numerical model fit for wellbore stability analysis, and the development of the drilling fluid fit for low temperature are the effective methods to solve the wellbore collapse in gas hydrate formation.

**Key words:** gas hydrates; drilling; hole stabilization