

深水钻井安全的地质风险评价技术研究

The research of geohazards estimation technique on deep water wells

吴时国^{1,2}, 赵汗青^{2,3}, 伍向阳⁴, 宋海斌⁴, 董冬冬^{2,3}

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)04-0077-04

大陆坡和深海盆地海底是不稳定的,如海底滑坡、涌流、地震、断裂活动、浅层高压气囊等,对海洋油气勘探与开发所造成的灾害屡见不鲜。对于深海工程而言,开展潜在地质灾害因素及其危害性调查,科学地评价海洋开发的地质环境极为重要,它将直接为海洋开发部署与海底工程设施规划提供科学依据,关系到钻井、采油平台和海底管线等重大设施的安全问题,必须引起高度的重视^[1-2]。关于水合物和浅层气的研究,国内外已有大量的工作^[1-7]。浅水流(Shallow water flow)在深水油气勘探中广泛出现,尤其是墨西哥湾深水钻井中,开展了初步研究。由于国内还没有进行真正意义的深水勘探,所以也没有遇见浅水流这类问题,在这方面研究是一个空白。作者从天然气水合物、浅层气、浅水流 3 个方面论述了它们对深水钻井安全的重要影响,着重阐述了它们造成海底地质灾害的过程和机理,对我国南海将要面临的深水钻井安全的地质风险问题进行了初步的评价。

1 天然气水合物

天然气水合物(Natural gas hydrate)是一种由天然气和水形成的类似冰状的固体物质,主要赋存于低温高压背景下的海底沉积物和陆地永久冻土地带^[3]。自从上个世纪 70 年代在海底发现天然气水合物,并采集到实物样品以来,社会对它的关注程度便日益提高^[4]。一方面,天然气水合物以其巨大的储量,可能是未来重要的能源;另一方面,它在海底灾害环境和全球气候变化研究中的重要性同样也不能被忽视。对深水钻井安全的主要威胁体现在:天然气水合物分解导致的海底滑坡和海水密度的降低有可能

会使石油平台或钻探船倾覆,以致沉没,水合物分解所产生的气体和水合物稳定带底界下赋存的饱和气体的逸出有可能导致火灾或者钻井失败。

天然气水合物往往分布在大陆坡和深水盆地浅层沉积物中,受温压条件的变化其赋存状态容易发生变化,活动构造作用、海平面下降和海底工程等因素都能导致天然气水合物稳定带整个或部分地自然消失。当海平面下降发生时,海底沉积物中天然气水合物的稳定带底界(GHSZ)将变得不稳定并开始分解,这使 GHSZ 发生变化。在 GHSZ 分解带之下,异常的水和气富集,如果有一个较厚的天然气水合物的圈闭层存在于分解带之上,那么由于天然气水合物释放的水和气体的体积比天然气水合物本身所占据的空间大,压力将上升到异常超静水压力。由于这个增加的异常高,低密度的泥和气体可能将穿透水合物层,它甚至喷出地表(图 1a)。同时,被液化的分解带能形成一个向下的滑动面,沿此滑动面大块含天然气水合物胶结的沉积物楔状体会向下滑动形成大规模的海底滑坡(图 1b)。海平面的变化会使这些事件不断重复,因此能在斜坡下部形成一个厚的、混乱的沉积物滑坡体^[4]。

收稿日期:2005-06-21;修回日期:2005-07-20

基金项目:国家 863 计划项目(2006AA09Z349);中国科学院创新重要方向性项目(KZCX2-YW-219, KZCX3-SW-223);

作者简介:吴时国(1963-),男,湖北襄樊人,研究员,博士,主要从事海底构造、天然气水合物与地球物理研究,电话:0532-82898543, E-mail:swu@ms.qdio.ac.cn

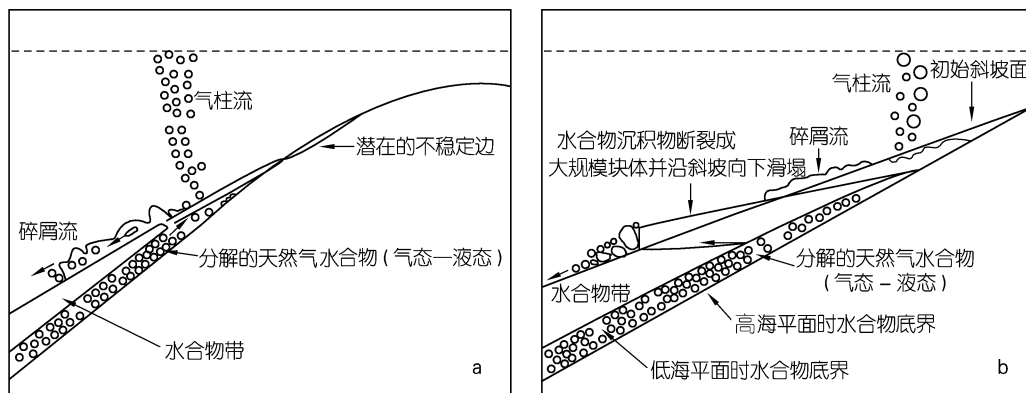


图1 海底天然气水合物分解诱发海底滑坡示意图^[4]

a: 水合物分解与海底滑坡; b: 海平面变化引起的水合物分解诱发的巨大海底滑坡

地质构造作用和沉积作用也造成大陆斜坡上的连续沉积和沉积物中天然气水合物的分解。任何已形成的天然气水合物都将在连续沉积的情况下被埋藏得更深,由于地温梯度和连续沉积,天然气水合物最终将被埋藏到某一深度,那里的温度将不再使天然气水合物稳定,于是底层的天然气水合物将融化,气和水的流动性将恢复。这种情况下也会出现与海平面下降导致的同样的不稳定条件,如固态天然气水合物沉积物层之下出现低密度富含水和气的泥流。外界的扰动如地震、或正在此层位进行的钻探工作等将触发泥流和沉积物的移动,即发生底辟和滑坡^[4]。这时将会对在其上部的石油平台和钻探船构成巨大威胁。同时,水合物的大量分解使得大量甲烷溶于海水中,使海水的密度降低,致使钻探船和石油平台因为浮力的减小而沉没^[5]。

中国南海地处欧亚板块、澳大利亚板块和太平洋板块的交汇部位,是西太平洋最大的边缘海(约350万km²),也是西太平洋天然气水合物成矿带的重要组成部分,具有良好的区域成矿背景。南海的陆缘性质各异、地貌类型多样、陆坡区宽阔、沉积物巨厚、有机质丰富,并有适宜的温压条件,具备良好的天然气水合物成矿条件^[6]。近年来,在该区发现了丰富的天然气水合物^[7~9],同时南海又是我国深水油气的重要勘探靶区,天然气水合物、石油和天然气往往“三位一体”,共同存在。因此,发展沉积物中天然气水合物的快速评价技术,防治由天然气水合物引发的海洋地质灾害,对深水钻井安全具有重要的意义。

2 浅层气

浅层气(Shallow gas)通常指海床底下1000m

之内聚积的气体,有时它以含气沉积物(浅层气藏)存在,有时它以超常压状态(浅层气囊)出现,有时候它直接向海底喷逸。有的文献称之为载气沉积,是深海油气开发中一种危险的灾害地质类型。它们尚未形成矿床,但却具有高压性质,会引起火灾甚至导致整个平台烧毁。地层含气还会降低沉积物的剪切强度,影响钻井工程^[10]。

浅层气作为灾害地质因素对海洋工程的危害性体现在以下几个方面:第一,含气沉积抗剪强度和承载能力比相应的沉积物要低。一般说来,气体增加导致孔压增大,同时抗剪强度减小,从而易引起灾害事件的发生;第二,导致地层承载力的不均匀。不论是浅层沼泽气还是深部石油天然气,其不均匀分布引起含气区内部本身的承载力不同,与周边未发育浅层气区的地层承载力亦不同,造成海洋工程尤其钻井平台桩腿的不均匀沉降,使平台倾斜甚至翻倒,其后果将不堪设想;第三,气体释放的破坏作用。当钻入载气沉积或由于载重过大引起沉积层崩裂时,会引起气体的突然释放,从而对管道和平台产生破坏作用,特别是高压浅层气释放时甚至可以引起燃烧,造成生命及财产损失^[11~14]。1975年墨西哥湾的一座钻井平台当钻至海床下300m浅层高压气囊时,气体喷发引起火灾,平台和一批仪器设备全毁于一。北部湾的湾3井,钻遇浅层高压气囊,猛烈喷气,因措施得当避免了一场骇人事故。

中国浅层气主要分布于陆架海区,尤以南海最为典型,如北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地、万安盆地、珠江口盆地、台西南盆地,以及油气高集区广大海区。这些区域都是中国深水油气勘探和开发的远景区,只有做好浅层气的详细调查工作,积极有效地采用和改善浅层气对深水钻井安全的地质风险评价

技术,才能使中国深水油气勘探开发安全有序的进行。

3 浅水流

浅水流(Shallow water flow)出现在深水(水下400~2500 m)超压、未固结砂层中,是深水油气开发中常遇到的地质灾害问题。深水钻井在沉积层顶部钻遇细粒沉积砂层,沉积砂层压力非常高,以至于在井孔内产生强烈的砂水流,从而导致钻井的巨大损失。这一现象通常发生在海底下较浅(泥线下250~1200 m)的深度范围内,因此这种高压砂层现象叫做“浅水流”。浅水流易发生在砂体疏松未固结,具有较大的孔隙度和渗透率,由低渗透的泥或泥页岩覆盖,产状有一定的倾斜,规模上有一定的体积,足以产生大量的砂水流且沉积速率 $>1\text{ mm/a}$ 的地质环境中^[15]。

浅水流在1985年才首次被报道。根据Fugro Geoservice公司早些年的研究报告,大约有70%的深水井曾经遇到过浅水流问题。墨西哥湾132口深水井统计表明,只有26口井没有浅水流问题(占总数的21%),87口井(占总数的71%)要克服浅水流诱发问题达到工程目的,1井(占总数的1%)通过克服浅水流问题部分达到工程目的,30井由于浅水流问题未能完成。1998年截至,已经投入了3060万美元用于防止浅水流问题,1.37亿美元用于修复浅水流问题影响。64%工作量花在浅水流问题中。据报道,在南里海、挪威海和北海也都发现了浅水流问题^[15]。

浅水流形成的必要条件是海底必须存在浅水流砂体——深水中非粘性、未固结的、且被低渗透率的泥或泥页岩封闭,在外界条件的持续作用下所产生的异常超压的饱和性砂体。浅水流钻井问题从根本上是因为浅水流砂层的孔隙水压力比正常静水压力大。低渗透率的泥或泥页岩上部高速沉积了松散的未固结沉积物,造成了载荷的快速增加。如果分散的砂体被包裹在低渗透率的泥或泥页岩的内部,在不断加大的载荷作用下,砂体就需要往外排出水分。但是周围被低渗透率的页岩或泥岩包围,砂体的排水受阻造成了孔隙压的增大,同时降低了颗粒之间的有效压力,沉积颗粒接近悬浮状态,即液化。如果此时钻孔钻入浅水流砂层,砂水流就会在巨大压力的作用下,流入钻孔并直达井口,同时水不断地侵蚀井壁,此时就在井底形成了在浅水流砂层中展布的空穴,导致整个钻井的坍塌。由于深水钻井花费昂贵,所以代价巨大,同时又存在重大的安全隐患。砂土液化可使砂土层丧失承载能力,底床面下沉,导致海底构筑物倒塌。因此浅水流是海岸工程建设和深水钻井中

不可忽视的致灾因子^[15-17]。

目前国内还没有因浅水流引起深水钻井事故的报道,也不具备成熟快速的浅水流对深水钻井安全影响的地质评价技术,这是由我国深水勘探开发刚刚开始的现状所决定的。但是随着深水勘探开发的不断深入,在中国南海广大的深海海域,发育大量的浊流和等深流沉积^[18,19],一定会遇到这一情况。我们必须做到未雨绸缪,积极开展浅水流对深水钻井安全影响的评价技术的研究,为将来深水钻井在这方面可能遇到的地质安全问题做好理论和技術上的准备。

4 深水钻井安全的地质风险评价技术

世界各国海洋开发经验表明,海洋地质灾害调查对于海洋开发规则的制定具有不可或缺的重要作用。潜在地质灾害因素不查明,则可能给深海海洋工程造成意想不到的巨大损失^[2]。对于深水钻井安全的地质风险评价工作,必须合理规划有步骤地进行,同时采取一定的快速评价技术,进行相应预测。主要有:

(1)查明形成各种灾害的地质作用过程、灾害规模和形成机理。(2)建立完善的海底灾害观测系统,实时监测关键海域(如深水油气勘探开发区域)的海洋地质灾害情况。(3)天然气水合物识别与快速评价地球物理技术。作为固态分布于岩石空隙和裂隙之间的天然气水合物,因其“胶结”作用而使岩石变得致密。因此在水平和垂直地震剖面上、测井曲线上、钻井取心以及旁侧声纳上都有反应,我们可以运用这些技术对天然气水合物加以识别。在这些技术中,地震剖面技术无疑是最快速有效的地球物理评价技术:地震剖面上的BSR是目前识别天然气水合物最好的方法,在水平剖面上BSR一般呈现出高振幅、负极性、平行于海底并与海底沉积层相交的特征,易识别,已证实BSR代表天然气水合物稳定带基底;含天然气水合物层由于沉积物空隙被天然气水合物充填胶结,使地层变得“均匀”,波阻抗减小,在地震剖面上形成弱振幅——振幅空白带,这也是天然气水合物快速识别标志之一;天然气水合物层速度明显大于上覆和下伏地层层速度,层速度变化趋势呈典型的三段式,即上、下速度都小,中间速度大——异常速度带。如果在深水钻井区域的斜坡地带出现上述地球物理特征,就应该更加注意,防止出现由天然气水合物引发的深水钻井地质灾害。(4)浅层气的识别与快速评价地球物理技术。如利用旁侧声纳图像、浅层剖面仪图像、高分辨率浅层模拟地震(如声脉冲发射器、轰鸣器系统)剖面技术、多道数字地震剖面技术等。(5)浅水流地球物理初步评价技术。对于浅水流的评价主要是利用浅水流砂体的物性和形成特征,钻前可以对

易液化砂体存在性进行评估。这些方法包括测井、地质模型、反射地震、反演等地球物理方法。快速的沉积(大于 1 mm/a)环境可作为评估易液化砂体形成依据。另外具有形成浅水流倾向砂层由于其埋深浅(松散、高孔隙度)、孔隙压力高(接近为上覆地层静岩压力)所导致的特有岩石物理性质(如极高的泊松比),是可能被地震勘探的方法(物性分析、压力分析)所检测的^[17,20~23]。

5 展望

我国深海油气开发才刚刚兴起,随着深海油气勘探开发的不断深入,可以预见,国际上遇到的深水钻井的地质安全问题,我们也同样会遇到,未来的任务是艰巨的,只有吸取前人在深水钻井方面的教训,积极总结克服深水钻井困难的经验,才能确保中国深水油气开发的顺利进行。

参考文献:

- [1] 刘守全,莫杰. 海洋地质灾害研究的几个基本问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 35-40.
- [2] 陈俊仁,詹文欢,周萃英. 发展海洋产业与开展海洋地质灾害调查[J]. 南海研究与开发, 1998, 3-4: 16-20.
- [3] Kvenvolden K A, Lorensen T D. The global occurrence of natural gas hydrate [A]. Kvenvolden K A. Natural Gas Hydrate: Occurrence, Distribution and Detection [C]. Washington D C: American Geophysical Union, 2001. 3-18.
- [4] 甘华阳,王家生,胡高韦. 海洋沉积物中的天然气水合物与海底滑坡[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(2): 177-181.
- [5] 张金川,张杰. 天然气水合物的资源与环境意义[J]. 中国能源, 2001, 11: 28-30.
- [6] 祝有海,吴必豪,卢振权. 中国近海天然气水合物找矿前景[J]. 矿床地质, 2001, 20(1): 174-180.
- [7] Wu S, Zhang G, Huang Y, et al. Gas hydrate Occurrence in the northern South China Sea[J]. **Marine & Petroleum Geology**, 2004, 22: 403-412.
- [8] 张光学,陈邦彦. 南海甲烷水合物资源研究与找矿前景[J]. 海洋地质, 2000, 3: 1-9.
- [9] 祝有海,张光学,卢振权,等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 6-10.
- [10] 鲍才旺,姜玉坤. 中国近海海底潜在地质灾害类型及其特征[J]. 热带海洋, 1999, 18(3): 25-31.
- [11] Ligtenberg H, Connelly D. Chimney detection and interpretation, revealing sealing quality of faults, geohazards, charge and leakage from reservoirs [J]. **Journal of Geochemical Exploration**, 2003, 78-79: 385-387.
- [12] Holmes R, Finlayson K, Griffiths M A, et al. Regional shallow gas distribution study[R]. Keyworth: British Geological Survey, 1996.
- [13] Long D. Geological characteristics and geohazards of the Hebridean and west Shetland continental shelf and slope[R]. Keyworth: British Geological Survey, 1993.
- [14] Long D. The Western Frontiers Association-Evaluation seabed conditions west of the UK[J]. **Continental Shelf Research**, 2001, 21: 811-824.
- [15] Lu Shaoming. Seismic characteristic of two deep-water drilling hazards: shallow-water flow sands and gas hydrate [D]. Dallas: the University of Texas, 2003.
- [16] Huffman A R, Castagna J P. The petrophysical basis for shallow-water flow prediction using multicomponent seismic data [J]. **The Leading Edge**, 2001, 23(9): 1032-1036.
- [17] Dutta N, Mukerji T, Prasad M, et al. Seismic detection and estimation of overpressures Part II: Field Applications [A]. CSEG. CSEG recorder [C] U S: CSEG, 2002. 58-73.
- [18] Wu S, Wong H K, Lütmann T. Gravity-driven sedimentation on the northwest continental slope in South China Sea: results from high-resolution seismic data and piston cores[J]. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, 1999, 17(2): 155-169.
- [19] 杨木壮,吴能友,吴时国,等. 南海北部特殊地质环境与 BSR 分布[A]. 李家彪. 中国边缘海盆地演化与资源效应[C]. 北京:海洋出版社, 2004. 176-181.
- [20] Mallick S, Dutta N C. Shallow water flow prediction using prestack waveform inversion of conventional 3D seismic data and rock modeling [J]. **The Leading Edge**, 2002, 22(7): 675-680.
- [21] Dutta N C. Deepwater geohazard prediction using prestack inversion of large offset P-wave data and rock model[J]. **The Leading Edge**, 2002, 22(2): 193-198.
- [22] Mukerji T, Prasad M, Dvorkin J. Seismic detection and estimation of overpressures Part I: The rock physics basis[A]. CSEG. CSEG recorder[C]. U S: CSEG, 2002. 36-57.
- [23] Hamilton E L. Elastic properties of marine sediments [J]. **J Geophys Res**, 1971, 76: 579-604.

(本文编辑:刘珊珊)