

深水钻井地质灾害浅层水流问题研究

叶 志¹ 樊洪海¹ 张国斌¹ 蒋世全² 许亮斌²

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京 昌平 102249;2. 中海油研究总院,北京 100027)

摘 要:浅层水流是一种严重的深水钻井地质灾害,会延长钻井作业的非生产时间,造成巨大的经济损失,甚至导致井和平台废弃。介绍了浅层水流的概念和 5 种形成机理,着重描述了异常压力砂体机理,从而加深了对浅层水流灾害的认识,为研究浅层水流灾害的识别预测方法以及处理方法奠定了基础。此外,还介绍了浅层水流的识别方法和浅层水流地层独特的岩石物理特征,阐述了浅层水流的地震预测方法和预测步骤。有效控制和处理浅层水流灾害对深水钻井安全至关重要,介绍了浅层水流灾害的处理流程和 3 种处理方法,并提出了研究浅层水流危害的方向。

关键词:深水钻井;浅层水流;地质灾害;预测;控制

中图分类号:TE28 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)06-0048-05

Investigation of Shallow Water Flow in Deepwater Drilling

Ye Zhi¹ Fan Honghai¹ Zhang Guobin¹ Jiang Shiquan² Xu Liangbin²

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Changping, Beijing, 102249, China; 2. CNOOC Research Center, Beijing, 100027, China)

Abstract: Shallow Water Flow (SWF) is a severe accident in deepwater drilling. Huge amount of time and money would be wasted when meeting SWF, and cause the abandonment of wells and platforms sometimes. This paper presents the concept of SWF and five formation mechanisms, and emphasizes on the mechanisms of over pressured sands to enhance the understanding of SWF accident, and lay the foundation for further research and the development of SWF identification methods and processing technologies. Moreover, this paper introduces the recognition methods of SWF, the special petrophysical characteristics of SWF zone, and the seismic prediction technology and procedures. The significance of effective SWF control and management in deepwater drilling, the processing procedures, three techniques and research direction are described.

Key words: deepwater drilling; shallow water flow; geologic hazard; prediction; control

1 概 述

由于深水地质环境的特殊性和复杂性,深水钻井面临着诸多挑战,浅层水流(shallow water flow, SWF)灾害就是其中之一。浅层水流是指在深水钻井中钻头钻过浅部地层时砂水流(水携带砂泥屑一起流动)通过井眼或地层裂缝的流动,剧烈时会喷出海底。浅层水流通常发生在泥线以下 1 000 m 之内且水深超过 400 m 的深水浅层区,是一种常见的深水浅层地质灾害。

浅层水流灾害已被公认为是深水钻井面临的最严重问题之一,它具有分布广泛、破坏性大、难以控制和解决的特点。目前在墨西哥湾、挪威海、里海、北海以及巴西深水等几乎所有深水油气区都曾出现

收稿日期:2009-11-11;**改回日期:**2010-10-10

基金项目:国家科技重大专项课题“深水油气田开发钻井工程配套技术”(编号:2008ZX05026-001)资助

作者简介:叶志(1985—),男,湖北黄冈人,2007 年毕业于长江大学机械工程专业,在读博士研究生,主要从事地层压力预测、钻井信息工程等方面的研究。

联系方式:(010)89733221, yezhi1985@126.com

过浅层水流灾害。据辉固地质服务公司(Fugro Geoservices, Inc)的调研报告,将近 70% 的深水钻井都遭遇过浅层水流灾害,并且每口井预防和解决浅层水流灾害的费用超过了 200 万美元。浅层水流灾害破坏性大,主要表现在以下几个方面:1)钻井时会造成井眼扩大、井壁坍塌,引起井控问题;2)固井时砂水流窜入水泥浆中造成固井质量不好,致使固井作业失败;3)砂水流冲蚀套管柱和地层,造成套管柱弯曲破裂;4)砂水流冲蚀浅部地层形成裂缝并使浅部地层强度降低,导致井口失稳;5)延长钻井作业的非生产时间,造成严重的经济损失;6)冲刷出的泥砂在井口附近堆积,严重时掩埋井口致使井报废。

浅层水流灾害难以控制和处理,目前还没有成熟的解决办法。现阶段主要采取钻前预测避开浅层水流区域和用管柱封隔浅层水流区域的方法,而且被封隔住的浅层水流区域在一段时间后由于封隔不牢固或管柱弯曲破裂可能再次爆发浅层水流灾害^[1-5]。为此,笔者在分析浅层水流形成机理基础上,对浅层水流的识别和预测进行了研究,并提出了处理浅层水流的方法。

2 浅层水流的形成机理

认识和研究浅层水流的形成机理对预防和解决浅层水流灾害有十分重要的意义,目前有 5 种机理被认为是导致浅层水流灾害的原因:1)异常压力砂体;2)次生裂缝;3)次生压力储存;4)固井窜槽造成的异常压力传递;5)水合物分解。

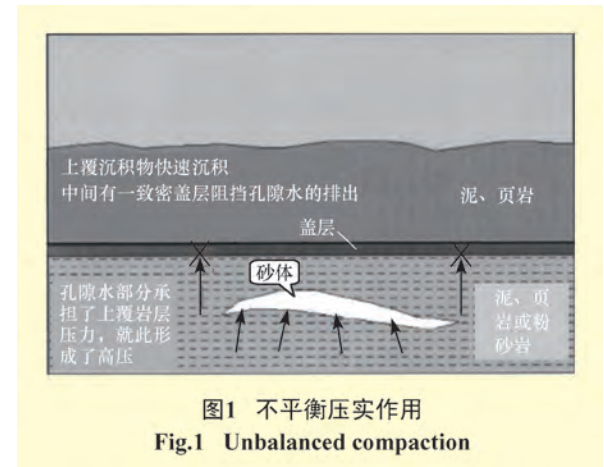
2.1 异常压力砂体

在下隔水管和安装防喷器(BOP)之前,钻头钻遇浅部异常高压的砂体,在高孔隙压力的驱动下砂、水一起流动形成砂水流。异常压力砂体机理是导致浅层水流灾害的最普遍的原因,而且与其有关的浅层水流的破坏性也最强。

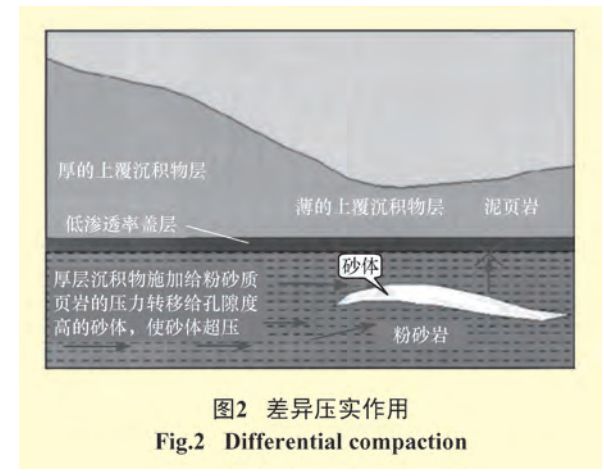
浅层砂体具有疏松未胶结,孔隙度、渗透率和压力高的特点,砂体周围被渗透率低的盖层(泥岩、页岩)覆盖。浅层砂体的异常高压一般有两种来源:不平衡压实作用和差异压实作用。

不平衡压实作用 由于沉积物沉积速度过快致使下部多孔介质(砂体)中的孔隙水来不及排出,孔隙水就承担了部分上覆岩层压力致使孔隙压力大于静液压力,从而形成异常高压。不平衡压实作用如图 1 所示。图 1 中最上面是沉积速度快的

表层沉积物,中间致密的盖层阻挡了下部多孔介质(砂体)中孔隙水的排出。上部沉积速度越快,砂体中的压力就越高。在墨西哥深水湾浅层水流灾害最为严重的 Mississippi Canyon 区块的沉积速率一般都大于 1 mm/a。



差异压实作用 上覆沉积物的厚度不一样,厚层沉积物施加给下部地层的上覆压力高于薄层沉积物,高上覆压力转移给孔隙度高的砂体,砂体受差异压实作用而产生高压。差异压实作用如图 2 所示。图 2 中砂体被渗透率低的粉砂质页岩包裹住,中间有致密盖层覆盖,而在盖层之上是厚度不一的沉积物层。厚层沉积物施加给粉砂质页岩的压力转移给孔隙度高的砂体,致使砂体压力升高。这种由差异压实作用产生的压力可以转移到几十英里外的砂体中,在墨西哥湾就钻遇过由差异压实作用形成的高压砂体^[3-5]。



2.2 次生裂缝

次生裂缝机理是指在套管鞋处由于井筒压力大于地层压力致使地层被压裂并形成裂缝,井筒内的钻井液携带着岩屑和地层中的砂泥屑形成的砂水流

通过地层裂缝上返至海底。这些裂缝一般在导管或表层套管段的套管鞋处开启并延伸。造成井筒压力过大的原因可能是井筒摩擦力、关井、岩屑的悬重以及钻井液密度过大等^[3]。

2.3 次生压力储存

次生压力储存机理是指由钻井液液柱产生的压力转移到渗透率大的浅部疏松砂泥岩或粉砂岩地层并且储存下来,致使地层压力升高。次生压力储存的形成有两个条件:一是浅部渗透层有足够大的孔隙度和渗透率能使钻井液液柱压力渗进地层;二是渗透层周围有足够好的封闭层能使渗进地层的压力储存下来^[3]。

该机理一般发生在正在钻井或下套管作业的表层套管段地层,此时导管已经安装但未安装防喷器(BOP)和隔水管。当停止循环时由于次生压力储存使渗透层的压力高于井筒压力,地层流体流进井筒并经井眼上返至井口。经水下遥控潜水器(ROV)观察该机理引发的浅层水流在初期非常明显,井口处有剧烈砂水流涌出。随时间推移由于渗透层压力逐渐释放衰竭,浅层水流会由剧烈的涌状流变成轻微的雾状流。

2.4 固井窜槽造成的异常压力传递

导管和表层套管段的固井质量不好也是导致浅层水流灾害的原因之一,高压地层流体通过水泥槽流回井眼并驱使砂水流动。由于窜槽和管柱不居中等原因致使固井质量不好,水泥环没有很好地封隔住地层并且在水泥环中留有水泥槽。地层压力通过水泥槽传递并携带砂水一起流动,砂水流通过水泥槽或压裂套管鞋形成的通道流回井眼并上返出海底。如果遇到盖层或套管柱阻碍不能流回井眼,砂水流就会压裂井眼周围破裂压力较低的地层并通过裂缝流动,裂缝会不断扩展最终延伸至海底^[3]。

2.5 水合物分解

水合物分解机理目前只是一种假设,尚没有确凿的证据。水合物分解机理之所以被认为与浅层水流有关主要有3个原因:1)天然气水合物层出现的位置与浅层水流灾害出现的位置相当;2)浅层水流产生的水几乎全是淡水,一般来说海洋沉积盆地的孔隙流体应该近似于或大于海水密度的卤水,浅层水流灾害中出现的大量淡水刚好与水合物分解时产生的大量淡水相符合,同时水合物分解时的突然膨

胀会削弱砂体的结构,更易形成浅层水流;3)当环境温度升高和压力下降时水合物会分解,钻井过程中的水合物分解一般与钻井液循环后温度升高有关,而钻井液温度升高主要是因为钻头钻过水合物层后经过深部高温地层循环。因此水合物分解会有一个时间滞后,这刚好与浅层水流灾害发生时钻头已经钻过浅层水流地层而不是刚好钻遇浅层水流地层的时间滞后相符合^[4]。

次生裂缝、次生压力储存以及固井窜槽造成的异常压力传递都是属于人为引起的次生机理,而异常压力砂体和水合物分解则是属于原生机理。一般来说,次生机理引起的浅层水流对井的威胁很小,不会造成很大损失,在下入表层套管固井后浅层水流基本就会消失。而原生机理引起的浅层水流破坏性很大,一般随时间推移会愈发严重,如果不加以控制将造成经济损失并影响钻井安全。由异常压力砂体机理引起的浅层水流灾害的普遍性和巨大破坏性已经被证实,在水合物机理尚不明确的情况下,异常压力砂体机理是研究的重点^[4]。

3 浅层水流的识别和预测

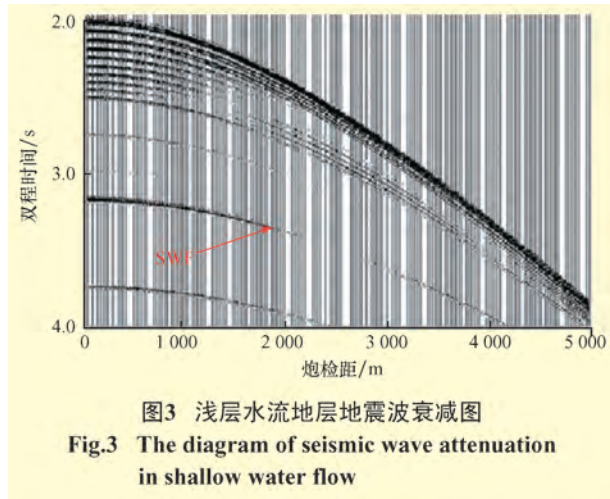
3.1 浅层水流的识别

浅层水流灾害发生时会有一些特定的规律和表面现象,浅层水流的识别是指根据这些规律和现象来判断浅层水流灾害是否会发生。通常有以下一些识别标志:1)发生的位置是否合适(是否满足“深水浅层”的特点);2)是否发生在新生代快速沉积区(沉积速度在1 mm/a以上);3)经水下遥控潜水器ROV观察,井口或附近海床表面是否有砂水流喷出或流动的现象;4)经ROV观察井口附近的地面是否出现土坑、火山状的土堆以及裂缝。通过上述标志可以初步判断浅层水流的发生,再结合岩石物理特征就可以精确确定浅层水流发生的层位、机理以及地层压力等相关信息,为控制 and 处理浅层水流灾害奠定基础。

3.2 浅层水流地层的岩石物理特征

浅层水流灾害通常发生在疏松和孔隙度、渗透率、压力高的砂层,因此砂体表现出低有效应力、低体密度、低纵波速度(v_p)和低横波速度(v_s)的特点。浅层水流地层疏松、多孔且饱含孔隙流体,岩石颗粒之间不胶结,处于一种近似于悬浮的状态。随着有

效应力的减小,岩石颗粒之间的内聚力也减小,地层就呈现出更像流体的性质。由于流体具有抗压不抗剪性,剪切波比压缩波衰减得更快。随着有效应力的降低, v_p 和 v_s 都会随之变小,并且当有效应力降低到一定程度时 v_s 减小的幅度更大,进而 v_p/v_s 和泊松比就会突然增大。另外浅层水流地层的地震波衰减也很大,尤其是横波衰减更为明显。双程时间与炮检距的关系曲线如图 3 所示。从图 3 中可以清楚看到,浅层水流地层的地震波衰减比邻层快。浅层水流地层的独特岩石物理特征(体密度低、 v_p 和 v_s 小、 v_p/v_s 大、泊松比高以及地震波衰减快)为预测和识别提供了可靠的依据^[5-8]。



3.3 浅层水流的预测

在钻前并且没有邻井资料时,利用地震资料预测浅层水流是唯一可行的方法。考虑到多分量地震技术的经济成本以及浅层的适应性问题,常规三维地震(3D)资料叠前反演已被证明是一种好的浅层水流预测方法。这种基于 AVO(振幅随炮检距的变化)原理的叠前反演技术能准确描述地层的 v_p 、 v_s 、体密度等物理特性,利用浅层水流地层与邻层之间的物理特性差异可以准确识别浅层水流。图 4 为叠前地震反演结果 v_p 、 v_s 、密度和泊松比对比图,通过 v_p 、 v_s 、密度和泊松比与邻层的对比分析可以精确确定浅层水流地层。图 5 则是根据 v_p/v_s 与邻层对比突然增大来确定浅层水流地层。

预测浅层水流的流程大体可以分为 5 步:1)收集高品质的叠前地震资料,对地震资料进行校正、保幅、去噪处理以提高其分辨率;2)对地震资料进行地层学解释初步圈定可能发生浅层水流灾害的区域;3)对圈定区域的地震资料进行 AVO 分析,标示出浅层水流地层;4)在圈定区域内进行基于遗传算法

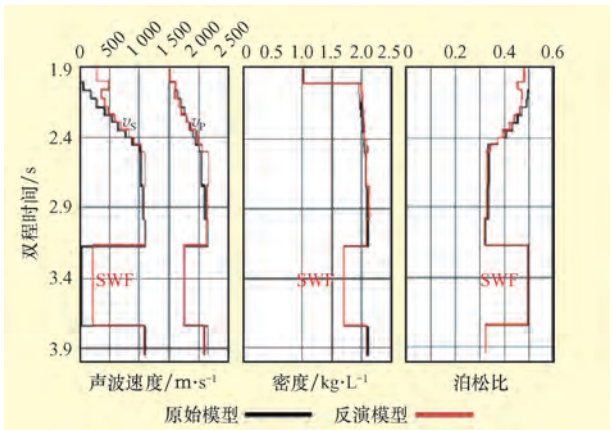


图4 叠前地震反演结果(速度、密度和泊松比)及浅层水流区域识别
Fig.4 The results of prestack inversion (Velocity、Density and Poisson ratio) and the identification graph of SWF zone

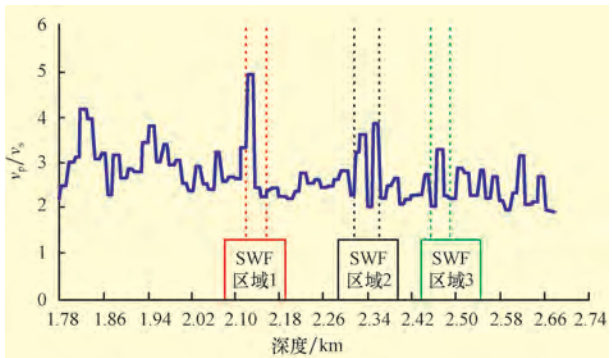


图5 叠前地震反演结果(v_p/v_s 值)及SWF区域识别
Fig.5 The results of prestack inversion(v_p/v_s) and the identification graph of SWF zone

(GA)的叠前地震反演,得到高精度的 v_p 、 v_s 、体密度,通过与邻层岩石物理特性的对比确定浅层水流地层;5)利用叠前反演的 v_p 预测浅层水流区域的地层压力,为浅层水流区域的钻井设计服务^[5]。

4 浅层水流灾害的处理方法

目前还没有完全避免和控制浅层水流灾害的方法,主要是以预防和减弱浅层水流灾害对深水钻井的影响为主。钻前通过地球物理方法识别和预测浅层水流,钻井时尽力避开浅层水流区域。因生产需要或浅层水流区域较大而无法避开时,就需要准确预测地层孔隙压力和破裂压力、设计合理的钻井液体系和套管层次并采用隔水管钻井以应对可能出现的浅层水流灾害。结合浅层水流发生的特点和浅层岩石物理特性,可以采用安装非常规导管、渗透率减损、优化固井水泥浆设计等三种方法来削弱浅层水流的破坏性^[9-12]。

4.1 安装非常规导管

安装非常规导管是指将高强度的导管下到浅层水流发生的层位并用水泥凝固井,起到封隔浅层水流区域的作用。安装非常规导管与常规导管最主要的区别在于导管下入深度的不同(常规导管下入深度在120~150 m,而非常规导管的下入深度可能要超过500 m)。浅水区导管一般是通过锤入法由液压锤打桩下入,而深水区的导管则是采用钻入法安装。浅层水流多发生在深水区并且非常规导管的下入深度要远大于常规导管,因此需要采用钻入法安装导管。钻入法安装导管的关键是利用导管接头将导管和钻杆连接在一起,这样导管安装也就和钻头钻进同时进行。钻入法主要是采用井下动力钻具驱动方式或水力喷射方式将导管下到指定层位。安装非常规导管是目前处理浅层水流灾害最有效的方法,在墨西哥湾已有成功的实际操作经验^[12]。

4.2 渗透率减损

渗透率减损是指将一种聚合密封剂泵入浅层水流地层,以此来减小对地层渗透率的损害,胶结岩石颗粒并且固结压实地层,这样可以达到减少钻井液漏失以及控制浅层水流的目的。

渗透率减损的操作方法是钻头钻至浅层水流地层上方的某一点,然后通过钻头水眼泵入凝胶状的密封剂。一段时间后,密封剂受化学性质、温度及激活剂的影响开始胶结凝固。渗透率减损不但可以减小对地层渗透率的损害以及减少地层水进入井眼的量,还可以胶结岩石颗粒并增加地层的结构整体性,因此能够有效防止浅层水流灾害^[9-10]。

4.3 优化固井水泥浆设计

优化固井水泥浆设计是指设计一种能够快速凝固并且水泥石强度较高的水泥浆体系来隔离和封固浅层水流地层。水泥浆凝结时间短可以避免和控制浅层水流窜槽;水泥石强度高则可以阻挡浅层水流的冲蚀,从而有效保护套管柱。异常压力机理下的浅层水流灾害随时间推移会越来越严重(井眼扩大使砂体与井眼接触面积增大),因此设计一种好的水泥浆体系对控制浅层水流灾害至关重要^[11]。

5 结论与建议

1) 浅层水流灾害分布广泛、破坏性大且难以控

制和解决,深入了解浅层水流的特征、形成机理及相关概念,对浅层水流灾害的识别、预测和处理至关重要,同时也为进一步研究提供了理论基础。

2) 基于AVO技术的地震预测方法为浅层水流预测提供了丰富的岩石物理信息,但其精度和可靠性还需要进一步验证。目前对于浅层水流灾害的处理还没有很好的办法,文中提到的3种处理方法还需要通过实践来加以补充和完善。

3) 建议就浅层水流灾害开展研究,研究的方向应包括浅层水流地层特性、浅层水流流动模拟分析、浅层水流识别预测方法、深水地层压力预测技术以及浅层水流灾害处理方法。

参 考 文 献

- [1] Alberty M W. Shallow water flows: a problem solved or a problem emerging[R]. OTC 11971, 2000.
- [2] Ostermeier R M, Pelletier J H, Winker C D, et al. Dealing with shallow-water flow in the deepwater Gulf of Mexico[J]. The Leading Edge, 2002, 21(7): 660-668.
- [3] Alberty M W, Haffle M E, Mingle J C, et al. Mechanisms of shallow water flows and drilling practices for intervention[R]. SPE 56868, 1999.
- [4] Hardage B A, Remington R, Roberts H H. Gas hydrate-a source of shallow water flow? [J]. The Leading Edge, 2006, 25(5): 634-635.
- [5] 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, 21(7): 675-680.
- [6] Huffman A R, Castagna J P. The petrophysical basis for shallow-water flow prediction using multicomponent seismic data [J]. The Leading Edge, 2001, 20(9): 1030-1035.
- [7] Huffman A R, Castagna J P. Shallow water flow prediction from seismic analysis of multicomponent seismic data[R]. OTC 11974, 2000.
- [8] Moreno C, Castagna J, Huffman A, et al. The v_p/v_s inversion procedure: a methodology for shallow water flow (SWF) prediction from seismic analysis of multicomponent data[R]. OTC 15248, 2003.
- [9] Joe F, Medley G H Jr. Deepstar's evaluation of shallow water flow problems in the Gulf of Mexico[R]. OTC 8525, 1997.
- [10] Gawish A. New clear fluid for drilling and cementing shallow water flows zones[J]. Journal of Petroleum and Mining Engineer, 2005, 8(1): 81-95.
- [11] Whitfill D L, Heathman J, Faul R R, et al. Fluids for drilling and cementing shallow water flows[J]. SPE 62957, 2000.
- [12] Jonggeun C, Juvkam-Wold, Hans C. Unconventional method of conductor installation to solve shallow water flow problems [J]. SPE 38625, 1997.