

南海北部陆坡浅水流评估及深水钻井防治措施

任韶然¹, 宫智武¹, 张亮¹, 李海奎², 韩波¹, 任建华³, 章杨⁴

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 渤海钻探第五钻井工程分公司, 河北河间 062450; 3. 中国石油化工股份有限公司华东油气分公司勘探开发研究院, 江苏南京 210011; 4. 大港油田采油工艺研究院, 天津 300280)

摘要:深水钻井中浅水流喷发会对钻井安全产生很大影响。基于浅水流形成条件和南海北部陆坡古地质环境,分析目标海域浅水流的潜在风险。根据水流喷出速率,量化浅水流危害等级,并建立能够模拟浅水流上喷或喷出的数值模拟模型,分析典型工况下浅水流层压力、规模、孔渗条件及钻速对其喷出过程的影响。结果表明:南海北部陆坡存在浅水流形成的古地质条件,但浅水流规模较小,压力系数较低,钻进中发生严重浅水流危害的概率较低;浅水流喷发具有“压力-水瞬间高速释放”的特征;采用低密度海水钻井液钻进,钻遇压力系数为1.15的浅水流层,钻井液停止循环后水流喷出速率和喷出量可达70 m³/h和60 m³;浅水流喷发主要受其压力和规模控制。针对目标海域浅水流特征及控制因素,提出了控制浅水流危害的措施。

关键词:深水钻井;浅水流;定量评估;数值模拟;灾害控制

中图分类号:TE 21 **文献标志码:**A

引用格式:任韶然,宫智武,张亮,等.南海北部陆坡浅水流评估及深水钻井防治措施[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):99-106.

REN Shaoran, GONG Zhiwu, ZHANG Liang, et al. Shallow water flow hazard assessment in the northern slope of the South China Sea and control measures during deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 99-106.

Shallow water flow hazard assessment in the northern slope of the South China Sea and control measures during deepwater drilling

REN Shaoran¹, GONG Zhiwu¹, ZHANG Liang¹, LI Haikui², HAN Bo¹, REN Jianhua³, ZHANG Yang⁴

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. The Fifth Drilling Company of Bohai Drilling Engineering Company Limited, Hejian 062450, China;

3. Research Institute of Exploration & Development, East China Company, SINOPEC, Nanjing 210011, China;

4. Oil Production Technology Institute, Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China)

Abstract: Shallow water flow (SWF) can greatly influence the safety of deepwater drilling. In this study, the occurrence and its potential risk of SWF on drilling safety in the northern slope of the South China Sea was analyzed based on SWF formation conditions and paleogeological characteristics. A numerical simulation model of SWF blowout was established, and the effects of the over-pressure, geologic parameters and the size of SWF formation, and penetration rate on water blowout were investigated. SWF hazards were then classified quantitatively according to water blowout rates. The results show that there are paleogeological conditions for the formation of SWF in the target area. However, the scale and pressure of SWF formations would be low so that there are low probabilities for serious SWF hazards to be confronted. SWF blowout is characterized with spontaneous release of water and pressure, and the water blowout rate and volume can be up to 70 m³/h and 60 m³ during drilling through a typical SWF formation with a formation pressure coefficient of 1.15 using sea water as drilling fluid. SWF

收稿日期:2016-10-19

基金项目:国家“973”计划(2015CB251201);中央高校基本科研业务费专项(15CX05036A)

作者简介:任韶然(1960-),男,泰山学者特聘教授,博士,博士生导师,研究方向为海洋油气开发新技术、CO₂地质埋存、注气提高采收率、水合物抑制和开采。E-mail:rensr@upc.edu.cn.

blowout is mainly controlled by its over-pressure and the size of the SWF formation.

Keywords: deepwater drilling; shallow water flow (SWF); quantitative evaluation; numerical simulation; hazard control

海洋中蕴藏着丰富的油气资源,在石油需求量不断增加的当下得到了越来越广泛的关注^[1-3]。然而海洋钻井,尤其是深水钻井,也面临诸多挑战。其中,浅水流严重影响钻井进程与安全,已成为深水钻井最主要的5大危害之一^[4]。据报道,墨西哥湾、北海和挪威海等深水海域钻井过程中均遇到过较为严重的浅水流问题。尤其是墨西哥湾,66%的深水井都钻遇到了浅水流灾害,据统计,123口井中有24%无法修复,DeepStar集团认为浅水流是该区深水钻井中遭遇的最严重危害^[5]。浅水流是指覆存于水深800 m以上的深水区,海底泥线以下1000 m内地层中的高压水流砂体,大多为未固结的疏松砂岩体,常被低渗透盖层覆盖,压实作用较弱,孔隙度为38%~45%,渗透率也很高,水体和砂体易流动,其围压和有效应力分别为5~45 MPa和0~7 MPa^[4]。钻遇后砂体与水体在压差作用下涌入井眼,沿环空上涌,甚至造成严重的井涌井喷事故。浅水流涌入井筒后不断冲刷侵蚀井筒和地层,导致井眼变形扩大,破坏井壁稳定;浅水流喷出后也会使地层应力状态发生变化,破坏地层稳定,甚至引起严重的海底滑坡;水流与钻井液混合,将严重影响钻井液密度、黏度等性能。墨西哥湾GB515#1井钻井经验表明,某些条件下,浅水流上涌使地层应力状态发生变化,低应力下微小应变循环可能导致地层孔隙度降低,使孔隙压力更高,加重浅水流危害^[5]。深水钻井浅水流危害已得到了越来越广泛的重视。国内外学者已基于墨西哥湾、北海等深水海域的众多浅水流案例,描述了浅水流对深水钻井安全的影响,并从地球物理手段预测、动力压井以及固井作业优化等方面总结了现场控制浅水流危害的措施^[4-20]。对于新开发的中国南海海域,浅水流潜在风险尚不明确,且目前浅水流的研究主要集中于定性描述,缺乏定量评估,对其危害机制及主要影响因素也尚不明确。笔者针对南海深水目标海域地质环境,分析其浅水流潜在风险,并建立模型模拟钻井过程中浅水流上涌或喷出过程,对其影响与控制因素进行定量分析,为深入认识和控制南海目标海域浅水流危害提供基础。

1 南海北部陆坡浅水流形成条件分析及评估

深水海域浅水流的形成须3个主要条件^[21]:

①疏松未固结且具有较大孔隙度和渗透率的砂质沉积物,为水体提供聚集场所;②低渗透率且可形成有效封闭层的泥质沉积物,为水体提供盖层;③形成异常超压,在钻遇时水体和砂体由于压差的存在迅速喷出。浅水流层的形成通常与深水水道等的发育有关,南海北部陆坡深水盆地中早期广泛发育水道侵蚀作用,随着区域构造沉降和海平面变化的影响,浊积水道开始充填浊积砂体,这些巨厚的砂体后来被低渗透率泥岩或页岩地层所覆盖,随着埋深的增加,地层载荷也不断增加,层间孔隙流体不能有效排出,同时下伏地层中排除的流体不断积累,形成局部异常超压环境,即浅水流层。当该区域发生强烈的构造运动或人为的破坏作用时,其中的流体在超压作用下便可能沿断裂构造或套管向上移动,形成浅水流灾害^[21],如图1所示。该过程中最显著的特点是地层沉积速率较快,一般高于1 mm/a,水体来不及释放而形成异常高压。

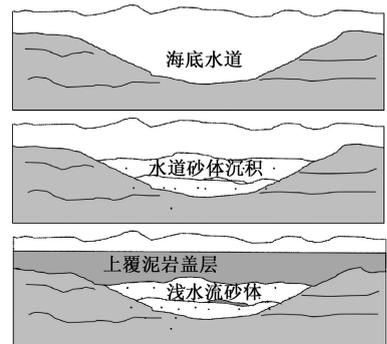


图1 浅水流形成过程

Fig. 1 Formation process of shallow water flow

孙运宝^[21]对南海目标海域的古地质条件的分析研究表明,南海北部古陆坡总体水动力条件较强,古珠江发育多期大型峡谷水道,向白云凹陷运移大量粗粒碎屑物,同时发育大型高孔高渗深水扇沉积,作为潜在的超压水体包裹体,为浅水流的形成提供了物质基础;该地区上新世以来的海相细粒沉积物具有良好的封闭作用,可为超压浅水流层提供良好的盖层。同时,该地区自中新世以来,沉积速率较高,特别是更新世,沉积速率为54~450 cm/a,具有形成浅水流的条件。此外,南海北部陆坡浅层存在大量天然气水合物,可分解产生大量的水,束缚在砂体中不易向外排放,可能产生超压水体。此外,壳牌公司在南海Gumusut-1F井钻井时曾钻遇浅层流,

属轻微超压,比静液压力高0.7 MPa,也证明了南海深水海域可能存在浅水流层^[6]。因此南海深水存在形成浅水流的古地质条件,但至今未见大型浅水流灾害的报道。可以推测,南海目标海域存在潜在的浅水流风险,但浅水流层规模较小,压力系数(<1.2)较低,钻进过程中发生严重的浅水流喷出危害的概率较低。

2 浅水流喷出数值模拟模型及量化分级

2.1 浅水流喷出数值模拟模型

2.1.1 模型假设

(1) 流砂为密度和黏度较大的流体组分。浅水流喷发过程中砂体可能随水运移。由于分析推测南海目标区域浅水流层规模较小、超压系数较低,浅水流喷发过程中砂体运移量较少,对水的流动的影响也相对较小。此时,砂体可以认为是可流动的密度和黏度较高的固体组分。

(2) 砂水两相流动符合达西定律。

(3) 忽略毛管力的影响。

2.1.2 质量守恒方程

水相质量守恒方程为

$$\nabla \left[\frac{kK_{rw}\rho_w}{\mu_w} \nabla (p - \rho_w gz) \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_w S_w). \quad (1)$$

砂相质量守恒方程为

$$\nabla \left[\frac{kK_{rs}\rho_s}{\mu_s} \cdot \nabla (p - \rho_s gz) \right] = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi \rho_s S_s). \quad (2)$$

式中, k 为浅水流层绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{rw} 为水的相对渗透率; K_{rs} 为流砂的相对渗透率; ρ_w 为水密度, g/cm^3 ; ρ_s 为流砂密度, g/cm^3 ; μ_w 为水黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_s 为流砂黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p 为浅水流层压力, MPa ; g 为重力加速度系数; z 为相对高度, m ; t 为自钻遇浅水流层起记录的时间, s ; φ 为浅水流层孔隙度; S_w 为含水饱和度; S_s 为流砂饱和度。

2.1.3 考虑压缩系数的孔渗条件和水-砂密度

$$\varphi = \varphi_i (1 + C_s (p - p_i)), \quad (3)$$

$$k = k_i \left(\frac{\varphi}{\varphi_i} \right)^n, \quad (4)$$

$$\rho_w = \rho_{wi} (1 + C_w (p - p_i)), \quad (5)$$

$$\rho_s = \rho_{si} (1 + C_s (p - p_i)). \quad (6)$$

式中, φ_i 为浅水流层初始孔隙度; C_s 为砂的压缩系数, MPa^{-1} ; p_i 为浅水流层初始压力, MPa ; k_i 为浅水流层初始绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; n 为指数系数, $n = 3$; ρ_{wi} 为初始压力下水的密度, g/cm^3 ; C_w 为水的压缩系数, MPa^{-1} ; ρ_{si} 为初始压力下流砂的密度, g/cm^3 。

2.2 浅水流危害量化分级

BP公司首先基于流体上喷高度,对浅水危害进行了分级,如图2所示。

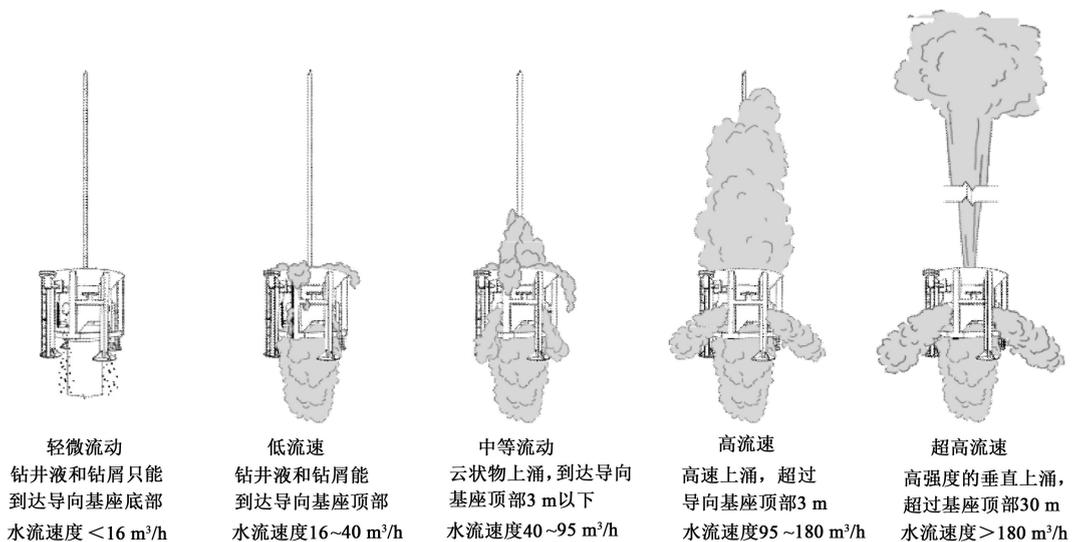


图2 浅水流危害分级

Fig. 2 Classification of shallow water flow hazards

结合高永海等^[22-23]建立的深水油气钻探井筒多相流动模型,将流体喷出速度与上喷高度对应,得到基于水流喷出速度的浅水流危害定量分级:轻微流动(<16 m^3/h)、低速流(16 ~ 40 m^3/h)、中等流动

(40 ~ 95 m^3/h)、高速流(95 ~ 180 m^3/h)以及超高速流(>180 m^3/h)。如果在钻井过程中遇到中等以上的浅水流危害,极有可能产生井涌井喷事故,将严重威胁钻井安全。

3 南海目标海域浅水流危害定量评估

3.1 南海典型浅水流地质模型

根据南海浅水流规模较小、压力系数较低的特点,建立目标海域典型浅水流概念地质模型,其基本参数:水深 1 800 m,浅水流层位置为泥线下 600 ~ 700 m,渗透率 $3 \mu\text{m}^2$,流砂饱和度 0.10,水密度 1.035 g/cm^3 ,浅水流层规模 $400 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,孔隙度 0.40,水饱和度 0.90,地层平均压力 28 MPa (压力系数 1.15),水压缩系数 $4.557 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$,砂体密度 2.600 g/cm^3 。

该浅水流层位置处静水压力约为 25 MPa,对于压力为 28 MPa (压力系数为 1.15) 的浅水流层,钻井液循环状态下,气井有效井底压力高于静液柱压力 (25 MPa) $3.0 \sim 5.0 \text{ MPa}$,即钻进过程中有效井底压力与浅水流层压力基本平衡,钻进过程中不会发生浅水流上喷灾害。这也可以在一定程度上解释南海深水钻井钻进过程中至今未见严重浅水流危害的报道。然而,钻井液停止循环后,由于钻井液静柱压力低于地层压力,将发生浅水流喷出事件。当浅水流层压力超过 28 MPa,即压力系数超过 1.15 时,钻进过程中即可能发生浅水流上喷危害。

3.2 钻井液停止循环后水流喷出动态

运用浅水流上喷或喷出模型模拟钻遇典型浅水流层,钻井液停止循环后水流喷出动态,包括喷出速率、喷出量和地层压力变化,如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在压力系数为 1.15 的条件下,钻井液停止循环后,由于地层压力高于井底压力,浅水流迅速涌向井筒,水流喷出速率迅速升高。在 0.5 h 时,水流喷出速率达到峰值 $70 \text{ m}^3/\text{h}$,达到“中等流动”,同时该过程中地层压力快速释放衰减,之后水流喷出速率迅速降低。在 2.5 h 时,累积喷出量达到 60 m^3 ,如果未采取有效措施,可能造成比较严重的井涌事故。可以看出,浅水流喷发具有“压力-水瞬间高速释放”的特征。喷出后地层压力迅速降低。

3.3 浅水流喷出影响因素

当浅水流层压力超过 28 MPa,即压力系数超过 1.15 时,地层压力将高于井底有效压力,钻进过程中即可能发生浅水流危害。钻井过程中浅水流喷出受多种因素影响,以下研究浅水流层压力系数、规模、孔渗条件以及钻进速度对钻穿浅水流层过程中水流喷出的影响,为进一步评估浅水流危害提供依据,如图 4 所示。

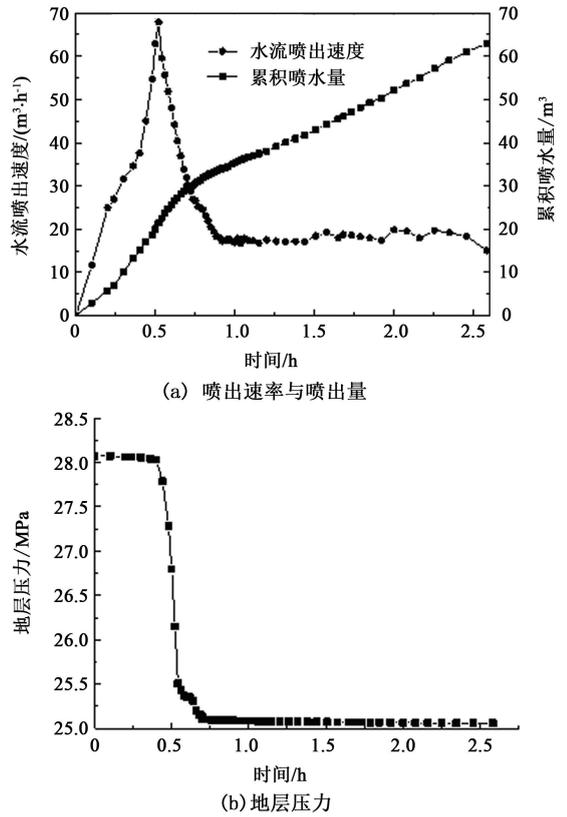


图 3 钻井液停止循环后浅水流喷出过程中喷出速率、喷出量和地层压力的变化

Fig. 3 Variation of water blowout rate, cumulative water blowout and formation pressure with time after circulation stop

由图 4 可以看出:浅水流层压力越高,喷水量越大。在压力系数达到 1.5 的条件下,浅水流喷出速率峰值可达 $200 \text{ m}^3/\text{h}$,达到“超高速流动”,钻穿浅水流层时喷水量可达 120 m^3 ,将引起严重的井涌事故。压力系数对浅水流喷出影响非常大,压力系数升高 10% 会使喷水量增加近 200%;浅水流层厚度越大,水体储量越大,喷水量越高。浅水流层厚度增加 10%,会使水流喷出速度峰值提高 15%,喷水量升高 30%;喷水量随着孔隙度和渗透率的增加而升高,但其影响相对较小,浅水流层孔渗升高 10%,水流喷出速度峰值升高 10%,喷水量升高 15%;针对南海典型浅水流层,提高钻进速度会使水流喷出速度峰值有一定程度的提前,这是因为提高钻进速度,一定时间内会钻开更厚的浅水流层,使水流喷出速度峰值提前,同时一定范围内提高钻速也可能使水流喷出速度峰值有一定程度的提高,这是由于提高钻速后钻穿浅水流层所用时间减少,水流喷出速度达到峰值之前钻开的层位水体释放相对较少,使水流喷出速度达到峰值时地层中存在更多的水体,峰

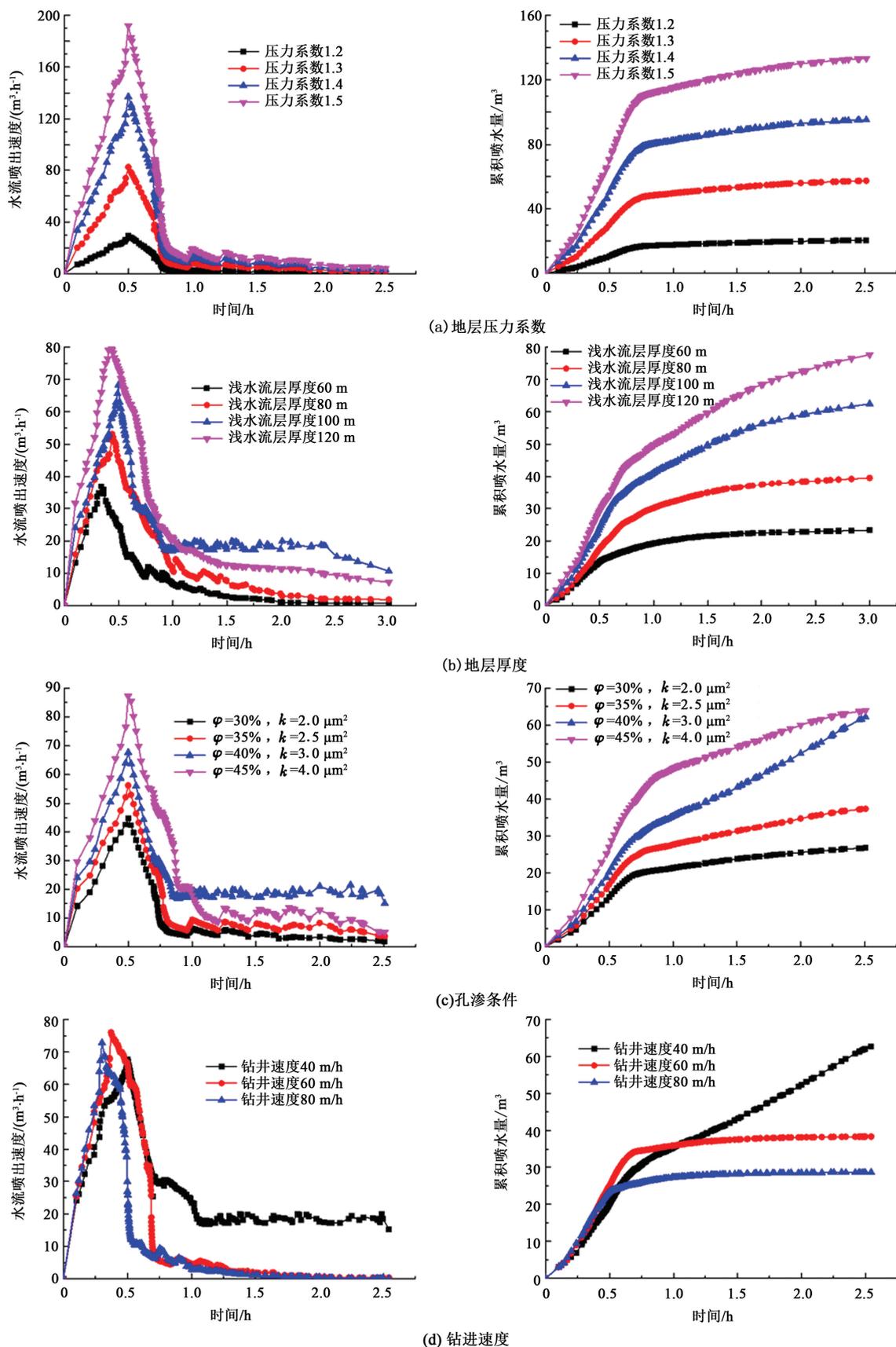


图 4 储层及钻进参数对浅水流喷出的影响

Fig. 4 Effect of reservoir and drilling parameters on water blowout

值相对更高。但是,水流喷出速度峰值持续时间非常短,这一时间内水流喷出量对钻穿浅水流层的整个过程中水流喷出量的影响相对较小,而提高钻速后钻穿浅水流层时水流喷出量显著降低,将钻速从40 m/h 提高至80 m/h,喷水量从60 m³ 降至25 m³。提高钻进速度有利于控制深水钻井中浅水流的喷发。浅水流喷发主要受地层压力系数和规模控制,钻进速度的影响相对较小,但提高钻速是控制浅水流危害的有效措施之一。

4 南海浅水流危害控制措施

虽然南海目标海域浅水流层规模和压力较小,形成严重危害的概率较低,但一旦钻遇,也将对钻井安全产生一定影响。同时作为新开发的海域,由于海域环境和地质条件的复杂性和未知性,浅水流层预测存在较高的不确定性。针对南海深水钻井浅水流危害的控制措施,主要包括井控和工作液优化设计。

4.1 井控措施

4.1.1 井流控制及压井方法

钻井中一旦钻遇浅水流,应立即调整钻井液密度,采取常规压井措施控制浅水流流动,然后下入套管进行固井,以保证钻井顺利进行。平台上应储备足够量的重钻井液,采用搅拌器或涡旋混合系统将重钻井液和海水混合,以便随时调整钻井液密度,控制浅水流进入井筒的速度。如果浅水流层压力较高,可注入2倍于井筒体积的压井液进行压井,结合环空摩阻作用控制井底压力,防止井涌并控制井漏与井壁坍塌。压井时须考虑低温对流变性的影响,根据井筒温度、钻井液流变参数计算环空不同部分的循环压力损失,以确定较为精确的当量循环密度^[24],保证在不压裂地层的情况下达到控制浅水流的目的。根据循环密度实时调整海水和重钻井液相对排量,控制环空液柱压力,达到控制浅水流的目的。

4.1.2 化学和机械封堵方法

对于中等流动的浅水流,可在低于地层破裂压力下注入化学胶结剂封隔浅水流层,然后下套管固井。固井时井筒内流体密度必须适当,保证浅水流不会涌入井筒,顶替液须具有低漏失性以减小泥饼厚度,同时加入高固结性能物质使固井液与地层高效固结。在墨西哥湾钻井作业中,采用了聚合物钻井液封堵浅水流层,降低其渗透性。利用由交联剂和聚合物组成的胶结物质有效地封堵了浅水流层,

降低了地层渗透率,达到了固结地层的目的。施工过程中可通过调节注入流体组成、温度和交联剂用量控制胶结时间^[25]。

对于轻微流动和低速流,采用泡沫水泥浆是控制其危害的有效方法。泡沫水泥浆在低温下具有较高的压缩性和延展性、很好的隔热性能和强度。在墨西哥湾 Titan 地区作业中,采用快速稠化的氢化泡沫水泥浆成功封堵了浅水流层^[12]。在注水泥过程中以恒定速度加氢并严格控制加氢量,使不同深度保持不同压力,以平衡地层压力并且不压裂地层。在墨西哥湾 Magnolia 油田的作业中,在固井前注入泡沫化段塞清洗井眼,然后注入低滤失的快速稠化的水泥浆,并加入稠化颗粒减小突进,成功控制了浅水流危害^[14]。

4.2 工作液优化设计

钻井液、固井液和压井液等工作液的性能是成功控制浅水流危害的关键,须根据实际情况对其进行优化设计。

4.2.1 钻井液体系

海洋平台上储备的高密度钻井液须保证被稀释后能保持性能稳定。经验表明,CaCl₂ 钻井液是很好的浅水流层控制液,使用时应在 CaCl₂ 钻井液中加入纤维提高其悬浮能力,也可以加入玉米淀粉和小颗粒的 CaCO₃ 粉控制滤失,封堵高渗砂层,该方法在墨西哥湾 Mars 盆地取得了良好的控制浅水流危害的效果^[13]。推荐的钻井液配方还包括加入重晶石、石灰石及微粉等加重剂提高钻井液密度以控制孔隙压力,加入液体羟乙基纤维素(HEC)抑制脱水收缩作用,提高钻井液黏度以提高清洗能力,保证后续固井质量。

4.2.2 胶结体系

原位聚合单体体系和水分散性树脂体系具有均匀注入胶结地层、耐压注入深部地层、足够的强度和黏滞性保持地层的有效封堵以及低温下注入速度和时间可控等特点,可用于胶结浅水流层^[16]。原位聚合单体体系在注入过程中黏度很低并能快速原位聚合成高强度水凝胶,现广泛应用的是丙烯酸酯单体溶液,并可在其中加入活化剂使其在深水井低温下发挥作用。用于控制浅水流的树脂体系为脂肪环氧树脂,可加入活化剂使其在低温下以预设的时间和速度注入,测试表明脂肪环氧树脂能使砂岩的强度增加2倍以上。同时,胶结剂须与基液黏度相近,以调节流体注入时间防止压裂地层,并应适当提高胶结物的密度,减少胶结物体系中固相含量以降低

其黏度,使其以适当的时间和注入压力注入地层中。

4.2.3 固井水泥浆体系

控制浅水流危害的水泥浆性能标准包括:流体滤失量低于 $100 \text{ cm}^3/\text{h}$,无自由水,临界凝胶时间低于 30 min ^[19]。其设计须综合考虑水泥凝结时间、低温环境、地层低破裂压力梯度以及高速钻进导致的井眼扩大等因素。水泥浆中可加入空心玻璃球或高强度陶粒球适当调节其密度以控制压力。同时为使水泥浆在低温下具有更高性能,可加入深水低温缓凝剂、防窜增强剂和固井用减轻剂等,加快其在深水低温环境下胶凝强度发展速度,缩短其稠化过渡时间,防止浅层流体的窜流。在墨西哥湾深水钻井过程中,使用了新型轻质泡沫水泥浆体系,在硅酸盐水泥中加入起泡剂等液体添加剂, $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 下稠化时间 $3 \sim 5 \text{ h}$, $7 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 24 h 后压缩强度超过 4 MPa ,可以有效控制浅水流危害^[18]。在缅甸海域浅水流区作业过程中,选取常规 G 型水泥设计高密度水泥浆领浆,并加入纤维热固性树脂控制滤失,结果显示水泥浆返排良好,固井后未出现浅水流危害^[19]。在北海 Frame East 地区,应用了由 C 型水泥、消泡剂、分散剂、滤失添加剂、硅粉和缓凝剂组成的水泥浆体系,并基于钻井参数和水力模拟,得到水泥浆最优密度为 1.65 g/cm^3 。该体系稠度 40 Bc 时注入时间 4 h ,试验测试和现场应用都取得了良好的控制浅水流危害的效果^[20]。此外,为减少对环境的伤害,可在磺化铝酸钙盐和 G 型水泥中加入可生物降解分散剂、滤失控制剂和催化剂等环境友好型添加剂。

综上所述,对于南海这一新开发海域来说,由于地质资料和相关经验的匮乏,浅水流层预测难度较大,不可靠性增加,须采用严格的井控方法控制钻遇的浅水流危害,包括压井与井流控制、堵和封的结合。同时,须根据实际情况优化钻井、固井和压井等工作液配方与注入工艺,提高浅水流控制效果,并针对不同危害等级的浅水流,选取相应的工作液和井控措施。

5 结 论

(1) 中国南海北部陆坡存在形成浅水流的古地质条件,但浅水流超压系数较低,规模较小,钻进过程中发生严重的浅水流危害的概率较低。

(2) 建立的深水钻井中浅水流上喷或喷出数值模拟模型,可以定量计算不同钻井工况下浅水流喷出速率和喷出量。典型工况下,采用低密度海水钻井液钻进,压力系数 (<1.15) 较低的浅水流在钻井

液正常循环时不会发生上涌,但在钻井液停止循环后有可能侵入井筒;压力系数高于 1.15 的浅水流在钻进过程中可发生流体上涌。

(3) 浅水流喷发具有“压力-水体瞬间高速释放”的特点,该过程主要受浅水流层压力和规模控制。针对南海典型浅水流层,提高钻进速度有利于控制水流喷出量,是深水钻井中控制浅水流危害的有效措施之一。鉴于南海目标海域浅水流规模较小、压力较低以及预测不可靠性大的特征,应主要从井流控制和压井、化学和机械封堵以及工作液设计优化 3 个方面控制浅水流危害。

参考文献:

- [1] 孙宝江,曹试敬,李昊,等. 深水钻井技术装备现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术,2011,39(5):8-15.
SUN Baojiang, CAO Shijing, LI Hao, et al. Status and development trend of deepwater drilling technology and equipment[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5):8-15.
- [2] YUAN B, MOGHANLOO R G, PATTAMASINGH P. Analytical model of nano fluid injection to improve the performance of low salinity water flooding in deepwater reservoirs[R]. OTC 26363-MS, 2015.
- [3] ZHANG L, REN S R, ZHANG Y, et al. CO_2 storage in saline aquifers: design of a demonstration project to dispose CO_2 associated with natural gas fields in South China Sea [R]. SPE 133975, 2010.
- [4] HUFFMAN A R, CASTAGNA J P. Shallow water flow prediction from seismic analysis of multicomponent seismic data[R]. OTC 11974, 2000.
- [5] ADRIENNE U R, CHARLES L W. Shallow water flow geopressure arising from confined subsurface slumps[R]. SPE 90980, 2004.
- [6] 卢蕾. 海洋深水钻井浅层地质灾害预测与安全作业评估[D]. 武汉:长江大学,2014.
LU Lei. Shallow geological disaster prediction and evaluation of safety operation in the marine of deep water drilling [D]. Wuhan: Yangtze University, 2014.
- [7] OSTERMEIER R M, PELLETIEH J H, WINKER C D, et al. Dealing with shallow water flow in the deepwater gulf of Mexico[J]. Geophysics, 2006, 21(7):660-668.
- [8] ROLLER P R, DRURY R. Using conventional and unique methods to drill a technically demanding shallow flow zone[R]. SPE/IADC 67773, 2001.
- [9] CAMERON C. Controlling shallow water flows in deep water: offshore mediterranean conference and exhibition, Ravenna, Italy, 2005 [C]. Ravenna: Offshore Mediter-

- ranean Conference, 2005.
- [10] 吴时国,孙运宝,王秀娟,等. 南海北部深水盆地浅水流的地球物理特性及识别[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7):1681-1690.
WU Shiguo, SUN Yunbao, WANG Xiujuan, et al. Geophysical signature and detection of shallow water flow in deepwater basin of the northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7):1681-1690.
- [11] 董冬冬,赵汗青,吴时国,等. 深水钻井中浅水流灾害问题及其地球物理识别技术[J]. 海洋通报, 2007, 26(1):114-120.
DONG Dongdong, ZHAO Hanqing, WU Shiguo, et al. SWF problem in deepwater drilling and its geophysical detection techniques[J]. Journal of Marine Science Bulletin, 2007, 26(1):114-120.
- [12] PAUL C S, MIKE W W. Shallow water flow planning and operations: Titan #1 exploration well, deepwater Gulf of Mexico[R]. SPE/IADC 52781, 1999.
- [13] BOGAERTS M, DEBRUIJIN G G, MORETTI F, et al. Identifying and mitigating the risks of shallow flow in deepwater cementing operations [R]. SPE 155733, 2012.
- [14] LUKE F E, STEPHEN C A, ROGER N W, et al. Deepwater batchset operations through the Magnolia shallow water flow sand[R]. SPE/IADC 92289, 2005.
- [15] TURNER K M, MORALES L J. Riserless drilling with CaCl₂ mud prevents shallow water flows [R]. IADC/SPE 59172, 2000.
- [16] LARRY E, RON S, RONNIE F, et al. New chemical systems and placement methods to stabilize and seal deepwater shallow-water flow zones [R]. OTC 11976, 2000.
- [17] DOHERTY D. Implementation of foam cementing for shallow water flow mitigation in the Caspian Sea: offshore mediterranean conference and exhibition, Ravenna, Italy, 2007[C]. Ravenna: Offshore Mediterranean Conference, 2007.
- [18] RONNIE F, REDDY B R, GRIFFITH J, et al. Next-generation cementing systems to control shallow water flow[R]. OTC 11977, 2000.
- [19] PRASERTAMPORN P, MAHESHWARI M, OLUTIMEHIN K, et al. Successful utilization of conventional cement system to mitigate shallow water flow risk in deepwater block M11, Myanmar [R]. IADC/SPE 170381, 2014.
- [20] PEDERSEN R, QIAN T, HAUGLAND T, et al. A successful field experience: shallow water flow-how to avoid the need for an additional casing string[R]. IADC/SPE 112716, 2008.
- [21] 孙运宝. 南海北部陆坡深水区地质灾害机理与钻前预测[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2011.
SUN Yunbao. The mechanism and prediction of deepwater geohazard in the northern of South Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2011.
- [22] 高永海. 深水油气钻探井筒多相流动与井控的研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2007.
GAO Yonghai. Study on multi-phase flow in wellbore and well control in deep water drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007.
- [23] 高永海,孙宝江,赵欣欣,等. 深水钻井井涌动态模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6):66-70.
GAO Yonghai, SUN Baojiang, ZHAO Xinxin, et al. Dynamic simulation of kicks in deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(6):66-70.
- [24] JIANG X L, LEI Z M, MENG Q B, et al. Evaluation of equivalent circulating density in deep water dynamic kill drilling[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 121:3048-3052.
- [25] NATIONS J F, MEDLEY G H. Deep star's evaluation of shallow water flow problems in the Gulf of Mexico[R]. OTC 8525, 1997.

(编辑 李志芬)