

◀“973”深水钻井专题▶

doi:10.11911/syztjs.201504004

# 海底天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响

宫智武<sup>1</sup>, 张亮<sup>1</sup>, 程海清<sup>2</sup>, 刘延民<sup>1</sup>, 任韶然<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦 124010)

**摘要:**为分析天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响,根据海底天然气水合物特征,结合天然气水合物分解动力学和热力学条件,研究了不同钻井工况下天然气水合物分解产气规律,估算了天然气水合物分解后的产气量。结果表明,在钻进天然气水合物层过程中,天然气水合物分解产气速率和累计产气量逐渐增大;在天然气水合物饱和度一定的情况下,近井天然气水合物层内的天然气水合物完全分解产气量与井身轴向半径呈平方关系;随着钻井液与天然气水合物层温差增大,天然气水合物分解速率呈指数增长;浅水区钻遇天然气水合物层易导致其分解,随着水深增加或井筒压力增大,天然气水合物分解越来越困难。研究表明,钻穿天然气水合物层时,提高钻进速度可减少天然气水合物分解;钻井过程中应根据钻前预测结果调整钻井液温度和密度来控制天然气水合物分解,同时采取必要的井控措施,以保证在适当的天然气水合物分解产气条件下安全钻进。

**关键词:**天然气水合物 海洋钻井 井控 分解动力学

**中图分类号:**TE254   **文献标志码:**A   **文章编号:**1001-0890(2015)04-0019-06

## The Influence of Subsea Natural Gas Hydrate Dissociation on the Safety of Offshore Drilling

Gong Zhiwu<sup>1</sup>, Zhang Liang<sup>1</sup>, Cheng Haiqing<sup>2</sup>, Liu Yanmin<sup>1</sup>, Ren Shaoran<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010, China)

**Abstract:** When subsea natural gas hydrate (NGH) dissociation is encountered, offshore drilling safety is notably influenced. Gas production performances of NGH were analyzed and gas production after hydrate deposition was estimated under different drilling conditions according to the dynamics and thermodynamics of NGH dissociation. The calculations were based on the fundamental characteristics of subsea NGH, which provided the basis for evaluating quantitatively the influence of natural gas hydrate dissociation on the safety of offshore drilling. The results showed that as drilling proceeded through hydrate bearing zones, gas production rate and cumulative gas production of hydrate dissociation tends to rise, and that the gas production was in a squared exponential relationship with the NGH dissociation radius under certain NGH saturation. NGH dissociation rate rose exponentially with the increase of the temperature difference between drilling fluid and NGH sediment, and drilling through hydrate layers in shallow water tended to break it down and as water depth and wellbore pressure rised, NGH dissociation became more difficult. Increasing the drilling rate was preferable for reducing NGH dissociation when drilling through hydrate layers. It was demonstrated that NGH control during offshore drilling should focus on NGH prediction before drilling, and that drilling fluid density and temperature adjustment and essential well control measures should be taken to ensure drilling safety under the condition of certain gas hydrate decomposition.

**Key words:** natural gas hydrate; offshore drilling; well control; dissociation dynamics

随着全球石油需求量的不断增长,由于海洋蕴藏大量的石油得到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。然而,海洋钻井(尤其是深水区)也面临诸多挑战<sup>[4-6]</sup>。其中,天然气水合物分解会对钻井安全产生重大影响<sup>[7]</sup>。据统计,世界上70%的海洋钻井受到天然气水合物等地质灾害的影响,特别是水深超过610 m后,天然气水合物将成为海洋钻井的主要难题<sup>[8]</sup>。天然气水合物赋存于水深300 m以深的海底沉积层中,其稳定区温度为0~10 °C,压力为3 MPa以上<sup>[9]</sup>;天然气水合物层的孔隙度为33%~48%,饱和度集中于30%~60%

内<sup>[10]</sup>。天然气水合物在海底高压低温环境下保持稳定<sup>[9]</sup>,当钻遇天然气水合物层时,由于温度、压力

收稿日期:2015-04-21;改回日期:2015-06-24。

作者简介:宫智武(1991—),男,山东烟台人,2014年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,油气田开发专业在读硕士研究生,主要从事深水钻井浅层地质防控和天然气水合物开发方面的研究。

联系方式:18765921351,s14020263@s.upc.edu.cn。

通信作者:张亮,15053259740,zhangliangkb@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深水钻井浅层地质灾害形成机理及预测方法”(编号:2015CB251201)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“海底天然气水合物富集成藏机理及数值模拟研究”(编号:15CX05036A)联合资助。

条件发生变化,天然气水合物开始分解产气,从而对钻井安全产生影响。

吴华等<sup>[11]</sup>根据温度压力条件分析了钻遇天然气水合物层的可能性,并描述了天然气水合物分解对海洋钻井的影响。徐加放等<sup>[12]</sup>通过试验研究了钻井液添加剂对天然气水合物分解的抑制作用。李令东等<sup>[13]</sup>运用数值模拟对海洋钻井天然气水合物层的井壁稳定性进行了研究。孙运宝、卢蕾、唐海雄和白玉湖等<sup>[14~18]</sup>论述了天然气水合物分解的危害,并采用属性分析及速度场等方法对天然气水合物危害进行识别和预测。总体上看,目前的研究主要集中于天然气水合物分解对海洋钻井影响及防治方法的定性描述,定量研究较少。国外相关研究主要集中于浅层气、浅层流危害和防治方法的研究,对天然气水合物分解的研究很少。因此,笔者基于海底天然气水合物层特征,结合天然气水合物分解动力学和热力学条件,定量研究不同工况下天然气水合物分解规律及其对钻井安全的影响,并提出相关防治措施。

## 1 天然气水合物分解模型的建立

天然气水合物分解受温度和压力的影响,需要结合动力学和热力学条件建立分解模型,研究其在不同钻井工况下的分解产气规律,为定量分析其对钻井安全的影响提供基础。

### 1.1 天然气水合物分解动力学模型

天然气水合物分解产气速率与压差的关系<sup>[19]</sup>可以表示为:

$$\frac{dn_H}{dt} = \frac{kA_{HS}}{\rho_w \rho_H} \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right) (\phi S_w \rho_w) (\phi S_H \rho_H) (p_{eq} - p) \quad (1)$$

式中: $\frac{dn_H}{dt}$ 为天然气水合物分解产气速率, mol/s;  $n_H$ 为  $t$  时刻单位体积天然气水合物物质的量, mol;  $k$ 为天然气水合物分解速率常数, mol/(m<sup>2</sup> · s · Pa);  $t$ 为分解时间, s;  $A_{HS}$ 为单个天然气水合物球形颗粒表面积, m<sup>2</sup>;  $\rho_w$ 为水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta E$ 为天然气水合物分解的活化能, J/mol;  $R$ 为理想气体常数, 8.314 J/(mol · K);  $T$ 为钻井条件下天然气水合物层温度, K;  $\rho_H$ 为天然气水合物的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $S_w$ 为地层水的饱和度;  $S_H$ 为天然气水合物的饱和度;  $\phi$ 为天然气水合物层的孔隙度;  $p_{eq}$ 为给定温度下天然

气水合物的平衡压力, Pa;  $p$ 为钻进天然气水合物层时的钻井液压力, Pa。

### 1.2 天然气水合物分解热力学模型

天然气水合物分解产气速率与温差(流体温度与天然气水合物界面温度之差)的关系<sup>[20]</sup>可表示为:

$$\frac{dn_H}{dt} = 1.8 \times 10^{-3} S_H A \Delta T^{2.05} \quad (2)$$

式中:  $A$ 为天然气水合物地层总表面积, m<sup>2</sup>;  $\Delta T$ 为钻井液温度与天然气水合物层的温度差, K。

## 2 天然气水合物分解对海洋钻井安全的影响

海洋钻井过程中钻遇天然气水合物层时,由于温度和压力发生改变,天然气水合物平衡状态被破坏而分解产气,产生的气体进入钻杆与井壁之间的环空(见图 1)。天然气水合物含气量巨大,1 单位体积天然气水合物分解将产生 150~180 单位体积的气体<sup>[21]</sup>,从而在井底产生异常超静水高压;而且由于气体密度低、流度大,产生的气体在高压作用下通过环空向上运移,如果压差足够大,就会发生井涌、井喷等井下故障。天然气水合物分解后若不及时处理,钻井液因与产生的气体混合而密度降低,环空液柱压力会降低而不能平衡天然气水合物层压力,加快天然气水合物分解产气速率,严重威胁钻井安全。

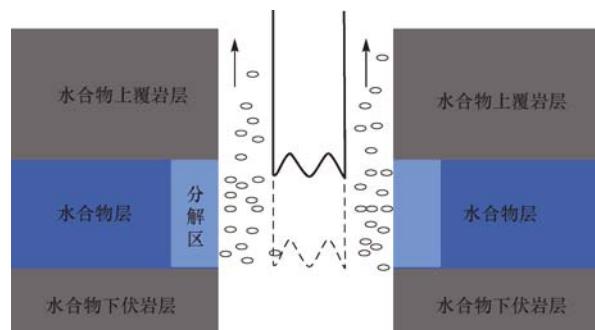


图 1 海洋钻井钻遇天然气水合物层分解产气示意

Fig. 1 Schematic diagram of natural gas hydrate dissociation in offshore drilling

### 2.1 天然气水合物层不同分解半径下的产气量

假设天然气水合物层厚 100 m, 岩层孔隙度为 0.4, 天然气水合物的饱和度分别为 0.3, 0.4 和 0.6, 钻遇天然气水合物层时, 近井天然气水合物完全分解时产气量随井身轴线半径的变化如图 2 所示。

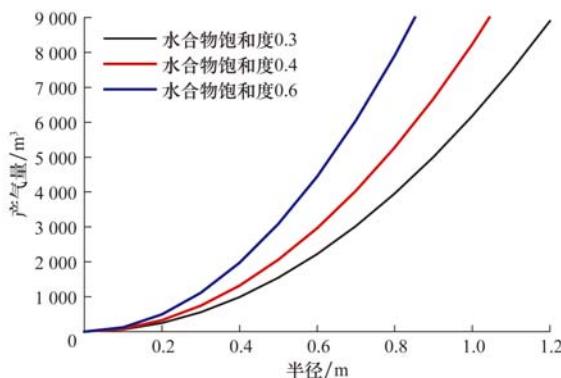


图2 近井天然气水合物层天然气水合物完全分解产气量估算

Fig. 2 Gas content estimation of natural gas hydrate bearing sediment near-wellbore

从图2可以看出,在天然气水合物饱和度一定的情况下,随着近井天然气水合物层分解范围的增加,产气量呈指数增长。若地层内天然气水合物饱和度为0.6,半径0.5 m内的天然气水合物完全分解时将产生3 200 m<sup>3</sup>气体。这些气体在井底将产生很大的压力,造成井涌甚至井喷,危及钻井安全。

## 2.2 钻穿天然气水合物层过程中天然气水合物分解产气特征

假设钻遇厚90 m的天然气水合物层,天然气水合物的饱和度为0.6,在0.5 MPa压差下以30 m/h的速度钻进,钻井过程中天然气水合物分解产气速率和累计产气量随钻井时间的变化情况如图3所示。

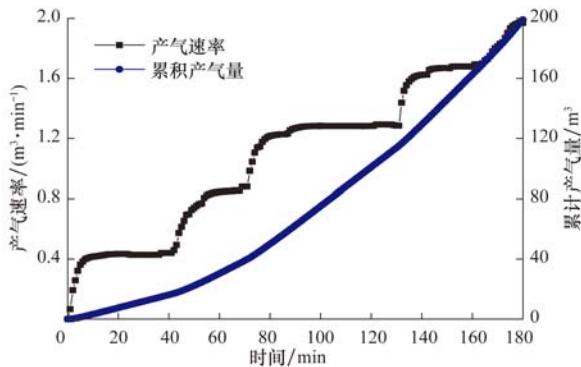


图3 钻井过程中天然气水合物分解产气随钻井时间的变化

Fig. 3 Gas production variation of natural gas hydrate dissociation with the drilling time changes when drilling through hydrate bearing zones

从图3可以看出,随着钻井的进行,天然气水合物层逐渐被打开,在压差作用下天然气水合物分解产气,产气速率和累计产气量逐渐增大。在完全钻穿天然气水合物层时,天然气水合物分解产气速率达到最大(2.0 m<sup>3</sup>/min),累计产气量达200 m<sup>3</sup>。

计算结果还发现,钻速提高50%,钻穿天然气水合物层时天然气水合物分解产气速率将降低40%,累计产气量将降低50%。因此,在技术安全可行范围内适当提高钻速,有利于控制深水钻井中天然气水合物的分解。

## 2.3 不同温差下天然气水合物分解产气速率

假设钻井过程中钻遇厚90 m的天然气水合物层,由于天然气水合物埋深一般较浅,因此此时还未下导管和套管。根据海上钻井井身结构要求,为了下Φ762.0 mm导管,首先需要钻出Φ14.4 mm的井眼。由此计算天然气水合物分解产气速率与温差(钻井液温度与天然气水合物层的温度差)之间的关系,结果如图4所示。

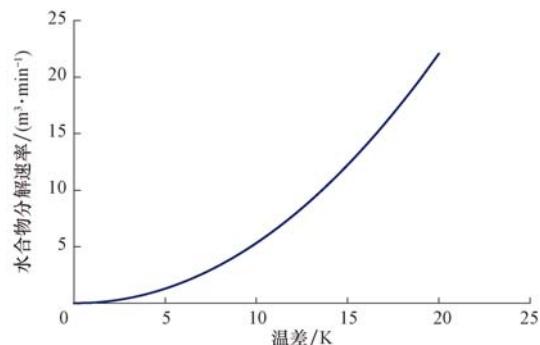


图4 天然气水合物分解产气速率与温差的关系

Fig. 4 Relations of natural gas hydrate dissociation rate with temperature difference

从图4可以看出,随着温差增大,天然气水合物分解产气速率呈指数增长;在温差达到10 K时,天然气水合物分解速率达到5.0 m<sup>3</sup>/min,将会对海洋钻井安全产生重大影响。

## 2.4 不同工况下天然气水合物分解产气分析

根据天然气水合物平衡相图(见图5),分析不同工况下天然气水合物分解产气情况。

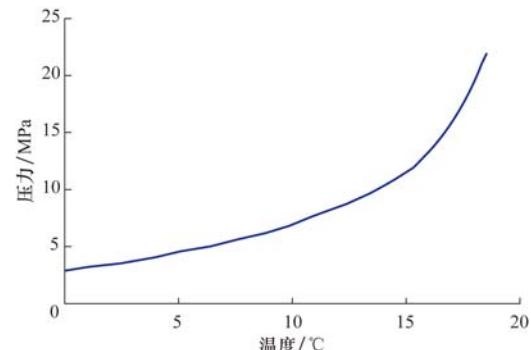


图5 天然气水合物平衡相图

Fig. 5 Equilibrium phase diagram of natural gas hydrate

在水深超过 3 000 m 的海域钻井时,海底压力将达到 30 MPa 以上,该条件下钻井液温度需达到 25 ℃以上天然气水合物才能分解。而在实际钻井条件下,天然气水合物层钻井液的温度很难达到 25 ℃。因此,超深水钻井过程中天然气水合物通常会保持稳定状态。

在水深 1 500 m 的海域钻井时,海底压力将达到 15 MPa 以上,在该压力下天然气水合物平衡温度为 17 ℃,若用海底海水钻进,其温度低于天然气水合物平衡温度,天然气水合物将保持稳定;若用海面海水配制的钻井液钻进,钻井液温度将高于天然气水合物平衡温度,天然气水合物将分解产气,危及钻井安全。

在水深 500 m 以下的海域钻井时,海底压力约为 5 MPa,对应天然气水合物平衡温度为 5 ℃,此时钻井液温度高于天然气水合物平衡温度,导致天然气水合物分解产气。

因此,在浅水区钻遇天然气水合物层时天然气水合物最易分解,随着水深增加,海底压力逐渐增大,对应的天然气水合物平衡温度逐渐升高,天然气水合物分解越来越困难。因此,钻井过程中尤其要注意浅水区天然气水合物的防治问题。

此外,天然气水合物分解后,地层应力状态发生变化,地层失去支撑,导致地层不均匀坍塌沉降,甚至造成大规模的海底滑坡,破坏井壁稳定和海底设备,严重时会导致钻井平台失稳坍塌。孙运宝<sup>[14]</sup>建立了海底天然气水合物地层稳定性模型,研究了天然气水合物分解导致地层孔隙压力的变化情况,并分析了天然气水合物分解对海底稳定性的影响。分析结果表明,随着天然气水合物分解量的增大,海底地层稳定性逐渐降低,导致海底地层失稳;当天然气水合物分解量很大时,天然气水合物支撑体系迅速瓦解,游离气导致孔隙压力迅速增大,形成显著的应力积累,迅速达到上覆岩石的破裂强度,导致海底地层失稳,破坏井壁稳定和钻井设备。同时,天然气水合物分解产生的气体和水在向上运移过程中过度冲刷井眼,造成井眼变形,对固井质量产生影响,也会压扁套管,使井口装置失去承载能力,从而影响井控。

天然气水合物分解也会影响钻井液性能。钻遇天然气水合物层天然气水合物分解后,大量气体侵入钻井液,使钻井液密度降低,从而影响井眼内的压力平衡。若井筒内压力温度条件合适,气体可能再次形成天然气水合物,堵塞管道,并使钻井液密度增

大。天然气水合物的分解和形成过程中会吸收和放出大量热量,造成钻井液温度不断变化,导致钻井液性能(黏度、密度和切力等)发生变化<sup>[18]</sup>,影响钻井安全。

### 3 天然气水合物分解预防及控制措施

海底天然气水合物分解将对钻井安全产生重大危害,必须采取有效措施,减小其对钻井安全的影响。

#### 3.1 天然气水合物钻前识别

钻井过程中要控制天然气水合物分解危害,最有效的手段是钻前识别,布井时避开天然气水合物潜在区域。天然气水合物层具有独特的地球物理特征,为海底天然气水合物层的钻前识别提供了依据。天然气水合物沉积层一般未固结,表现出孔隙度大、反射空白和地层渗透率降低(固体天然气水合物)等特征;也可利用天然气水合物纵波波阻抗、横波波阻抗、纵横波速度比和泊松比等特征参数识别海底天然气水合物层。

#### 3.2 控制天然气水合物分解

如果钻井过程中钻遇天然气水合物层,首先应采取措施控制天然气水合物的分解。最常用的方法是适当增大钻井液密度,保持钻井过程中天然气水合物层高压环境,控制天然气水合物分解。以上研究表明,井眼周围天然气水合物分解产气速率和产气量随钻井液温度升高、施工作业时间增长而增大。因此,钻井过程中为控制天然气水合物分解,保持井壁稳定,应选择造壁性好的低温钻井液,适当增大液柱压力,并提高作业效率,缩短施工时间。

此外,周文军<sup>[23]</sup>建立了深水钻井钻遇天然气水合物层井筒多相流动模型,根据天然气水合物的分解特征,提出钻井过程中采用压力控制法、温度/压力控制法和化学稳定法等方法抑制天然气水合物分解。徐加放等<sup>[12]</sup>进行了钻井液添加剂抑制天然气水合物分解的试验,发现采用动力学和热力学抑制剂复配的钻井液,可以适当延缓天然气水合物的分解时间,降低由于天然气水合物分解造成井喷的概率。

#### 3.3 天然气水合物分解后的井控

钻井过程中一旦天然气水合物大量分解,必须

采取井控措施,减小其危害。徐鹏等<sup>[24-25]</sup>提出采用动力压井方法处理钻井中的浅层气(包括天然气水合物分解),并建立模型计算了压井排量。结果表明,动力压井初期,由于气体膨胀,动力压井排量会有所增大;当气体逐渐排出井筒后,排量会有所下降,直至最后趋于稳定。在实际动力压井过程中,为保证井壁稳定,应不断调整压井排量。建议在钻井初期使用大直径钻具,从而缩小环空横截面积,保证动力压井作业顺利实施。M. Bogaerts 等<sup>[26]</sup>研究了控制海洋钻井过程中浅层流(包括天然气水合物分解)危害的固井技术,指出对浅层流的早期识别将为优化固井作业提供时间,从而降低浅层流危害。研究表明,套管扶正、有效清洗钻井液以及水泥浆选择等3个因素决定了浅层流区域(包括天然气水合物分解)固井作业成功与否。如果有浅层流(包括天然气水合物分解)存在,表层套管必须适当扶正,以保证表层套管周围流体的正常流动,并且选用性能更优、密度合适的泡沫水泥浆或颗粒优化水泥浆。Todd B Ellis 等<sup>[27]</sup>指出,用常规方法无法抑制浅层流(包括天然气水合物分解),必须优化固井设计。Todd B Ellis 等还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,研发了一种新型水泥浆,取得了良好的应用效果。张辉等<sup>[28]</sup>提出采取使用海底分流器、化学钻井液和利用导管穿过天然气水合物层等措施,抑制天然气水合物分解。

## 4 结 论

- 1) 海底天然气水合物分解后的产气量随着分解半径和温差增大呈指数增长,随着钻井速度降低而急剧增大;而随水深和井筒压力增大,天然气水合物分解越来越困难。
- 2) 根据海底天然气水合物层特征和天然气水合物分解模型,定量分析了不同钻井条件下天然气水合物分解产气特征。与现有定性分析方法相比,定量分析可以为评估天然气水合物分解对钻井安全的影响提供更加可靠的依据。
- 3) 建议进一步优化模型,提出综合考虑动力学和热力学的天然气水合物分解模型;定量研究采取相应措施后天然气水合物的分解产气特征,以优化措施参数。
- 4) 建议根据钻井区实际条件,从钻前识别避开天然气水合物层布井、调整钻井液的温度和密度并

提高作业效率控制天然气水合物分解和采取优化的井控措施等方面入手,降低由于天然气水合物分解而导致的危害。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 孙宝江,曹式敬,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] 王松,宋明全,刘二平.国外深水钻井液技术进展[J].石油钻探技术,2009,37(3):8-12.  
Wang Song, Song Mingquan, Liu Erping. Development of foreign deepwater drilling fluid [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 8-12.
- [3] 杨进,曹式敬.深水石油钻井技术现状及发展趋势[J].石油钻采工艺,2008,30(2):10-13.  
Yang Jin, Cao Shijing. Current situation and developing trend of petroleum drilling technologies in deepwater[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 10-13.
- [4] 王友华,王文海,蒋兴迅.南海深水钻井作业面临的挑战和对策[J].石油钻探技术,2009,39(2):50-55.  
Wang Youhua, Wang Wenhai, Jiang Xingxun. South China Sea deepwater drilling challenges and solutions [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 39(2): 50-55.
- [5] 路保平,李国华.西非深水钻井完井关键技术[J].石油钻探技术,2013,41(3):1-6.  
Lu Baoping, Li Guohua. Key technologies for deepwater drilling & completion in West Africa[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 1-6.
- [6] 孙宝江.北极深水钻井关键装备及发展展望[J].石油钻探技术,2013,41(3):7-12.  
Sun Baojiang. Progress and prospect of key equipments for Arctic deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 7-12.
- [7] 吴时国,赵汗青,伍向阳,等.深水钻井安全的地质风险评价技术研究[J].海洋科学,2007,31(4):8-14.  
Wu Shiguo, Zhao Hanqing, Wu Xiangyang, et al. The research of geohazards estimation technique on deepwater wells[J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 8-14.
- [8] 吴时国,谢杨冰,秦芹,等.深水油气浅层钻井的三浅地质灾害[J].探矿工程,岩土钻掘工程,2014,41(9):38-42.  
Wu Shiguo, Xie Yangbing, Qin Qin, et al. Shallow drilling geological disasters of oil and gas in deepwater[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2014, 41(9): 38-42.
- [9] 方银霞,黎明碧,金翔龙,等.海底天然气水合物稳定带的特征分析[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):103-106.  
Fang Yinxia, Li Mingbi, Jin Xianglong, et al. Character analysis of the marine gas hydrate stability zone [J]. Marine Geology &

- Quaternary Geology, 2001, 21(1): 103–106.
- [10] Tatsushi Kawasaki, Tetsuya Fujii, Masaru Nakamizu, et al. Experimental studies of the saturation level of methane hydrate in the Eastern Nankai trough sediments: proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia, Canada, July 6–10, 2008 [C].
- [11] 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.
- Wu Hua, Zou Deyong, Yu Shouping. Gas hydrate formation and its influence on offshore drilling operations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 91–93.
- [12] 徐加放, 邱正松, 盛杰, 等. 防止深水钻井地层天然气水合物分解的实验研究 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(3): 99–104.
- Xu Jiafang, Qiu Zhengsong, Sheng Jie, et al. Experimental research on prevention of hydrate decomposition in deepwater drilling formation [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(3): 99–104.
- [13] 李令东, 程远方, 周建良, 等. 深水钻井天然气水合物地层井壁稳定流固耦合数值模拟 [J]. 中国海上油气, 2012, 24(5): 40–46.
- Li Lingdong, Cheng Yuanfang, Zhou Jianliang, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation on wellbore stability in gas-hydrate-bearing sediments during deepwater drilling [J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(5): 40–46.
- [14] 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 geo-hazard in the northern of South Sea [D]. Qingdao: Chinese Academy of Science, Institute of Oceanology, 2011.
- [15] 卢蕾. 海洋深水钻井浅层地质灾害预测与安全作业评估 [D]. 荆州: 长江大学地球物理与石油资源学院, 2014.
- Lu Lei. Shallow geological disaster prediction and evaluation of safety operation in the marine of deepwater drilling [D]. Jingzhou: Yangtze University, School of Geophysica & Oil Resources, 2014.
- [16] 唐海雄, 韦红术, 易远元, 等. 应用速度场技术预测深水钻井中的浅层地质灾害 [J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 95–99.
- Tang Haixiong, Wei Hongshu, Yi Yuanyuan, et al. Application of seismic wave velocity field to predict the geological disasters in shallow strata during deep sea drilling [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 95–99.
- [17] 白玉湖, 李清平, 周建良, 等. 天然气水合物对深水钻采的潜在风险及对应性措施 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 17–21.
- Bai Yuhu, Li Qingping, Zhou Jianliang, et al. The potential risk of gas hydrate to deepwater drilling and production and the corresponding strategy [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 17–21.
- [18] 白玉湖, 李清平. 天然气水合物取样技术及装置进展 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 116–123.
- Bai Yuhu, Li Qingping. Progress on natural gas hydrate sampling techniques and tools [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(6): 116–123.
- [19] 程海清. 天然气水合物开采的流动模拟 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2008.
- Cheng Haiqing. Reservoir simulation of gas production from natural gas hydrate sediments [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), School of Petroleum Engineering, 2008.
- [20] Kamath V A, Holder G D. Dissociation heat transfer characteristic of methane hydrate [J]. AIChE Journal, 1987, 33(2): 347–350.
- [21] Rossi F, Filippone M, Castellani B. Investigation on a novel reactor for gas hydrates production [J]. Applied Energy, 2012, 99(6): 167–172.
- [22] 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.
- Hu Youlin, Liu Heng. Effects of natural gas hydrate on deepwater drilling fluid and control measures [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(11): 68–70.
- [23] 周文军. 天然气水合物钻探的井控工艺和参数计算 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2008.
- Zhou Wenjun. Study on well control technology and hydraulic parameters calculation of the gas hydrate drilling [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), School of Petroleum Engineering, 2008.
- [24] 徐鹏, 孙宝江, 董玉杰, 等. 用于处理深水浅层气的动力压井方法研究 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 11–15.
- Xu Peng, Sun Baojiang, Dong Yujie, et al. Dynamic well kill method for shallow gas pockets in deep water [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 11–15.
- [25] 徐鹏, 孙宝江, 张晶, 等. 深水钻井浅层气动力压井排量计算 [J]. 中国海上油气, 2010, 22(1): 46–48.
- Xu Peng, Sun Baojiang, Zhang Jing, et al. The calculation on the delivery rate of mud in dynamic well kill for shallow gas pockets in deepwater [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(1): 46–48.
- [26] Bogaerts M, De Brujin G G, Khalilova Polina R, et al. Identifying and mitigating the risks of shallow flow in deepwater cementing operations [R]. SPE 155733, 2012.
- [27] Todd B Ellis, Edgar Paul R Acorda. Mitigation of deepwater shallow hazards with simplified cement system: South China Sea case study [R]. IPTC 16592, 2013.
- [28] 张辉, 高德利, 刘涛, 等. 深水钻井中浅层水流的预防与控制方法 [J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(1): 19–22.
- Zhang Hui, Gao Deli, Liu Tao, et al. Prevention and control methods for shallow water flow in deepwater drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 19–22.

[编辑 滕春鸣]