

羌塘盆地天然气水合物钻探试验井 工程井壁稳定性分析

吴纪修, 张永勤, 梁健, 李宽, 李鑫淼, 王汉宝

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:基于三维快速拉格朗日有限差分法多孔介质流固耦合理论及弹塑性极限平衡理论, 根据羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程 QK-2 井实钻资料, 分析在渗流条件下井壁失稳机理, 并对失稳段井壁稳定性进行了数值模拟分析, 研究在不同钻井液密度下井径周围围岩应力分布和井眼坍塌或拉裂变形规律, 为羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程确定地层不坍塌(不缩径)、不压漏的钻井液安全密度窗口, 以便为钻井井身结构设计及合理钻井液密度的确定提供依据。

关键词:天然气水合物; 钻探; 井壁稳定性; 钻井液安全密度窗口; 羌塘盆地

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)06-0008-06

Analysis on Wall Stability of Gas Hydrate Drilling Test Well in Qiangtang Basin of Tibet/WU Ji-xiu, ZHANG Yong-qin, LIANG Jian, LI Kuan, LI Xin-miao, WANG Han-bao (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Based on three-dimensional fast Lagrangian finite difference method of fluid-solid coupling theory of porous medium and elasto-plastic limit equilibrium theory, according to the QK-2 well drilling data of gas hydrate drilling test well in Qiangtang basin, the analysis is made on the mechanism of borehole instability under the condition of seepage and the numerical simulation analysis is also made on the wall stability of instable section to learn stress distribution of surrounding rock around the well and deformation laws of borehole collapse or crack in different drilling fluid density. The safe density window of drilling fluid is determined for no formation collapse (diameter reducing) and no leakage for the gas hydrates drilling test well in Qiangtang basin, so as to provide the evidences for the determination of casing program design and reasonable drilling fluid density.

Key words: gas hydrate; drilling; well wall stability; drilling fluid density window; Qiangtang basin

0 引言

钻井过程中井壁失稳易造成井壁垮塌、缩径、漏失等井下复杂情况和事故, 严重影响了地下矿产资源勘探开发施工效率及成本。因此, 正确认识和有效评价地下围岩特性及环境, 探索井壁稳定机理并建立预测模型, 定量研究钻井过程中合理的钻井液安全密度窗口, 是实现优质、安全、高效和低成本钻井的关键。我国学者近年在井壁稳定性研究方面取得了一些成果, 2001年, 金衍和陈勉等^[1]在国内外首次提出了利用地震层速度预测坍塌压力与破裂压力的新理论, 并利用趋势面理论和神经网络理论分别建立了地震层速度单因素钻前预测模型和地震层速度智能钻前预测模型, 并成功应用于钻井液密度确定, 取得了显著的经济效益。2004年金衍等^[2]提

出了有效流体压力的新概念, 并建立了利用常规井壁稳定力学方法预测钻前井壁稳定的模型和利用非线性函数曲线拟合预测钻前井壁稳定模型, 提出了地应力测井数据反演、薄层地应力测试、以及根据工程情况简易确定钻井液安全密度窗口等新方法。梁利喜等^[3]基于极限平衡理论, 应用统一处理平衡方程与破坏准则, 分析了井筒周围的应力分布, 进而提出了井壁坍塌和破裂评价系数。张哲等^[4]应用数值方法研究了水平井径尺寸对井壁稳定性的影响并对钻井液柱压力进行了定量研究。陈朝伟等^[5]以岩石强度的尺寸效应经验公式为基础, 推导出坍塌压力和破裂压力与井眼直径的关系并给出坍塌和破裂时的临界钻井液密度。

本文分别采用传统计算方法和基于三维快速拉

收稿日期: 2014-01-26

基金项目: 中国地质调查局天然气水合物勘查与试采专项之“羌塘盆地天然气水合物资源勘查(钻探试验井工程)”(GZHL20110306)

作者简介: 吴纪修(1985-), 男(汉族), 山东聊城人, 中国地质科学院勘探技术研究所助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事勘探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道77号, Wujixiu2008@126.com。

格朗日有限差分法多孔介质流固耦合理论,抽取 QK-2 井 147 m 泥岩和砂岩互层坍塌处地质条件建立三维数值模型,分析在渗流条件和钻开扰动条件下井壁失稳机理,研究钻开扰动下井径围岩系统的应力及应变场变化规律和井眼坍塌或拉裂变形规律,为羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程确定地层不坍塌(不缩径)、不压漏的钻井液安全密度窗口,并为钻井井身结构设计提供依据。

1 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井 QK-2 井井壁失稳概述

井壁失稳是地层原始地应力状态、井筒液柱压力、地层岩石力学特性、钻井液性能以及工程施工等多种因素综合作用的结果。处于地层深处的岩石受上覆地层压力、水平方向地应力及地层孔隙压力的作用,在井眼钻开之前,地下岩层处于应力平衡状态,井眼钻开以后,井内钻井液柱压力取代了所钻岩层原有对井壁的支撑作用,破坏了地层的原有应力平衡,引起井眼周围应力重新分布,导致井壁不稳定。包括钻井过程中的井壁坍塌或缩径(由于岩石的剪切破坏或塑性流动)和地层破裂或压裂(由于岩石的拉伸破裂)2种基本类型。

根据 QK-2 井实钻资料显示,井壁失稳主要集中在三开(67.9~154.1 m)和四开(154.1~385.85 m)。地质资料显示 QK-2 井主要钻遇的地层为上三叠统土门格拉群,岩性主要以砂岩和泥岩为主。三开以后,钻遇多个小断层破碎带,地下水极其发育,断层揭开以后大量断层泥涌入井眼,导致井眼持续坍塌,致使多次糊钻和提钻困难。由于砂岩地层裂隙发育渗透率高,致使地层水大量涌入钻井液,使钻井液的滤失量不稳定,加入降失水剂后,泥浆性能只能维持几个小时。从所揭露地层情况来看,自 76.6 m 裂隙发育,砂岩多以垂向裂隙为主,泥岩多见水平向裂隙。当钻进到 147 m 出现泥质粉砂岩和煤屑薄层时,上部可塑性较强,遇水崩解、孔内掉块严重,所测泥浆进口粘度为 47 s,出口粘度为 39 s,含砂量明显增大,同时出现泵压急剧增加导致钻进中断。为了恢复正常钻进,在泥浆中加入重晶石粉使泥浆密度控制在 $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 后,控制涌水量,稳定泥浆性能,钻进逐渐恢复正常。225~385 m,岩层更加破碎,砂岩和泥砂岩互层,造成孔内多次坍塌,坍塌的掉块难以随钻井液返出,造成这一井段每次起下钻都有不同程度的卡阻现象。当钻进至 385 m 时,下入 $\varnothing 114 \text{ mm}$ 套管至 382 m,换径后继续钻

进。当钻遇断层泥时,由于泥浆的冲蚀,有时岩心采取率基本为零,重复钻进补心时,所取出的岩心多为经过多次研磨的掉块,而且随时有埋钻的风险。为了防止更严重的坍塌事故,最后决定选择速干水泥进行固井,但 24 h 后发现固井效果并不明显,继续钻进仍有塌孔现象,进而选用无泵循环法进行清孔和钻进,在钻进过程中又发生卡钻,卡钻后经过多次套铣等措施均无法解除卡钻。

分析三开和四开后的井壁失稳问题,初步发现砂岩和泥岩互层可能是导致井壁失稳的主要因素。在地应力作用下泥岩会发生蠕变,受钻井液和地下孔隙水压力作用而发生坍塌,导致砂岩失去支撑而塌落。此外,泥岩含有一定量的易水化粘土,这些粘土遇水后引起局部膨胀压力升高,导致局部应力集中也加剧了地层失稳。分析发现,地应力、孔隙水压力和泥岩互层是导致 QK-2 井井壁失稳的根本原因。地层被钻开后,钻井液未能迅速与地层中的地应力和孔隙水压力建立新的平衡从而使得高地应力急剧释放,导致高塑性泥岩蠕变变形向井眼内挤压缩径,脆性岩石在失去支撑后发生崩塌掉块而发生卡钻和埋钻。

2 QK-2 井基于孔隙线弹性理论钻井液密度的确定

根据孔隙线弹性理论,在地应力、孔隙压力和钻井液液柱压力联合作用下,井壁上的有效应力分布为^[5-8]:

$$\sigma_r' = p - \alpha p_p \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -p + (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - \alpha p_p \quad (2)$$

$$\sigma_z = v[\sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta)] - \alpha p_p \quad (3)$$

式中: σ_r' 、 σ_θ 和 σ_z ——分别为径向、环向和垂向的有效应力,MPa; σ_H 、 σ_h ——分别为水平最大和最小地应力,MPa; p_p ——地层孔隙压力,MPa; v ——岩石的泊松比,无量纲; θ ——研究点矢径与水平最大主应力之间的夹角,(°); α ——有效应力系数(Biot 系数),无量纲。

井壁坍塌是由于井内液柱压力较低,使井壁周围岩石所受的应力超过了岩石本身的强度和液柱的支撑力,从而产生剪切破坏造成的。这是其力学原因。对于井壁坍塌判断分析主要采用库伦-摩尔准则,根据库伦-摩尔准则的研究,岩石破坏时剪切面上的剪应力必须克服岩石的固有抗剪切强度(C)和作用在剪切面上的内聚力(f_c)。

$$\tau \geq C + f\sigma \quad (4)$$

若将 τ 和 σ 用 3 个主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 表示,则表示为:

$$\sigma_1 \geq \sigma_3 \cdot \frac{\sin\varphi - \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} + 2C \frac{\cos\varphi}{1 + \cos\varphi} \quad (5)$$

此时,剪切应力已经超过井壁保持稳定的应力状态,岩石发生剪切坍塌。当岩石孔隙中有孔隙压力(P_p)时,库伦-摩尔准则应用有效应力表示为:

$$(\sigma_1 - \alpha p_p) \geq (\sigma_3 - \alpha p_p) \frac{\sin\varphi - \cos\varphi}{1 + \sin\varphi} + 2C \frac{\cos\varphi}{1 + \cos\varphi} \quad (6)$$

式中: φ ——内摩擦角。

将井壁坍塌的有效应力分布公式带入库伦-摩尔准则强度准则式(5),便可得到保持井壁稳定所需的钻井液密度计算公式:

$$\rho_m = \frac{\eta(3\sigma_{H1} - \sigma_{H2}) - 2CK + \alpha p_p(K^2 - 1)}{(K^2 + \eta)H} \times 100 \quad (7)$$

式中: H ——井深, m; ρ_m ——钻井液密度, g/cm^3 ; η ——应力非线性修正系数; σ_{H1} 、 σ_{H2} ——分别为地层最大、最小水平地应力, MPa; K ——系数, $K = \cot[45^\circ - (\varphi/2)]$ 。

根据现场获得的测井数据确定地层的上覆岩层压力、两个水平方向主应力及地层孔隙压力,再确定杨氏弹性模型、泊松比、内聚力、内摩擦角等,通过上述(1)~(6)式计算出该井井壁稳定的钻井液密度约为 $1.2 g/cm^3$ 。

根据库伦-摩尔准则得出的上述理论公式计算简单可行,但是忽略了井壁在水压和渗流作用下的应力变化,钻井液密度设置低则造成井壁坍塌,如果钻井液密度太高会引起钻井液过度增稠,易引起漏失和钻速下降,对油气层损害加剧和钻井液成本增加等一系列问题。为此,在综合分析 QK-2 井井壁失稳及该井水文地质条件基础上进一步运用 FLAC3D 流固耦合理论,对 QK-2 井井壁失稳机理及钻井液安全密度窗口进行分析研究。

3 QK-2 井钻井液安全密度窗口确定的数值模拟研究

3.1 计算模型的建立

选取三开井段 141.00 ~ 157.00 m 井段作为研究对象。该段上部 141.00 ~ 153.00 m 为深灰色泥质粉砂岩,厚度为 12 m,岩心风化严重,局部含泥量较高;153.00 ~ 157.00 m 为深灰色粉砂质泥岩,厚

度为 4 m,可塑性强,夹杂砾石,局部可见煤屑,遇水崩解。由于井眼几何形状和边界条件的对称性,但非轴对称分布,可以只考虑井眼计算模型的 1/4 部分进行计算。图 1 为理论计算模型,图 2 为计算模型网格划分及概化模型。

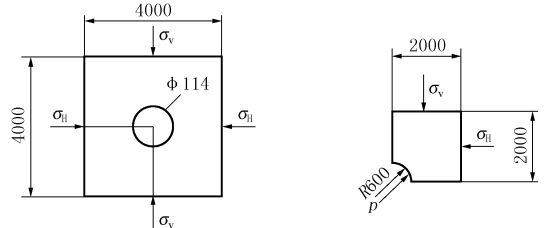
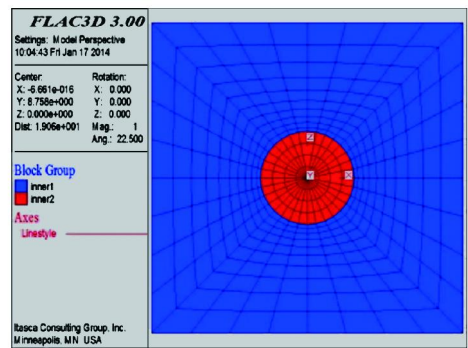
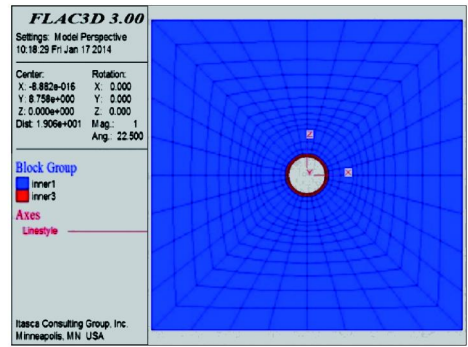


图 1 理论计算模型



井筒钻开前



井筒钻开后

图 2 井筒钻开前和钻开后计算模型网格划分

根据该区已有钻井资料和 QK-2 井单井综合评价和测井资料数据,结合 QK-2 井节理裂隙较发育及相关文献对比折减选取 141.00 ~ 157.00 m 井段深灰色泥质粉砂岩及 153.00 ~ 157.00 m 深灰色粉砂质泥岩物理力学参数(见表 1)和流体力学参数(见表 2)。

表 1 深灰色泥质粉砂岩和深灰色粉砂质泥岩物理力学参数

参数名称	密度(干) /($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松 比	粘聚力 /MPa	内摩擦 角/($^\circ$)	抗拉强度 (干)/MPa
泥质砂岩	2000	10761	0.194	3.220	25	3.55
粉砂质泥岩	1500	14269	0.194	2.868	25	2.99

表 2 模型流体力学参数

参数名称	渗透系数/[$m^2 \cdot (Pa \cdot s)^{-1}$]	孔隙率
泥质砂岩	2.5×10^{-9}	0.4
粉砂质泥岩	1.0×10^{-8}	0.6

在 FLAC3D 计算中需要输入剪切模量和体积模量,可分别用以下公式进行计算:

$$G = E/[2(1 + \nu)]$$

$$K = E/[3(1 - 2\nu)]$$

式中: G ——剪切模量, MPa; E ——弹性模量, MPa; ν ——泊松比。

3.2 本构关系

假设深灰色泥质砂岩和深灰色粉砂质泥岩各向同性,同样选择弹塑性本构模型。在数值模拟研究中,假设井眼各层地层分别为各向同性、均质,且在水平地应力作用下,问题得到简化,并在井眼钻开的瞬时,考虑井眼周围的弹塑性变形和钻井液液柱压力。

4 计算结果分析

4.1 井眼周围地应力及位移分布

井眼周围初始地应力分布云图见图 3,井筒钻开后井眼周围应力及位移分布云图见图 4~6。

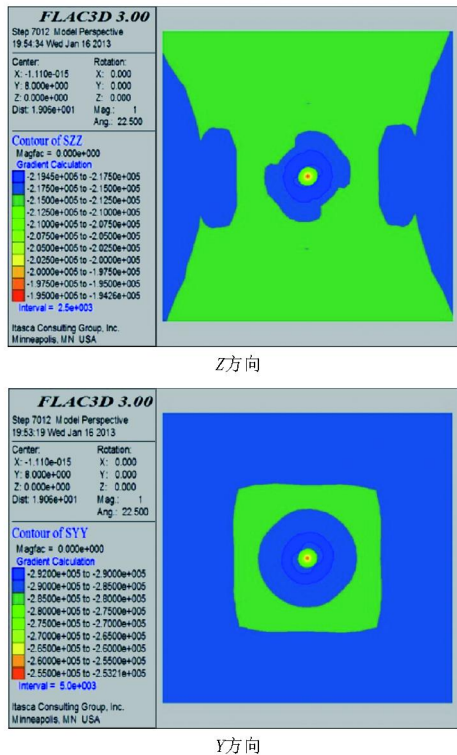


图 3 井眼钻开前井周 Z 方向和 Y 方向初始地应力分布云图

当钻井液密度为 1.0 g/cm^3 时(即为清水钻井),通过上述云图分析,井眼钻开后最大主应力向井筒

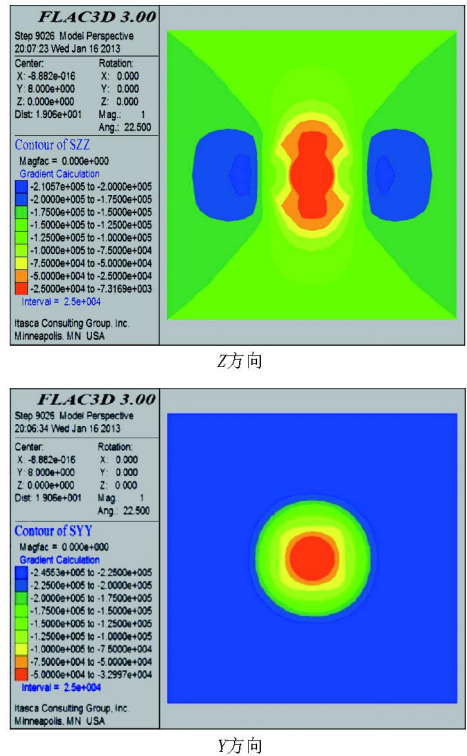


图 4 井眼钻开后井周 Z 方向和 Y 方向应力分布云图

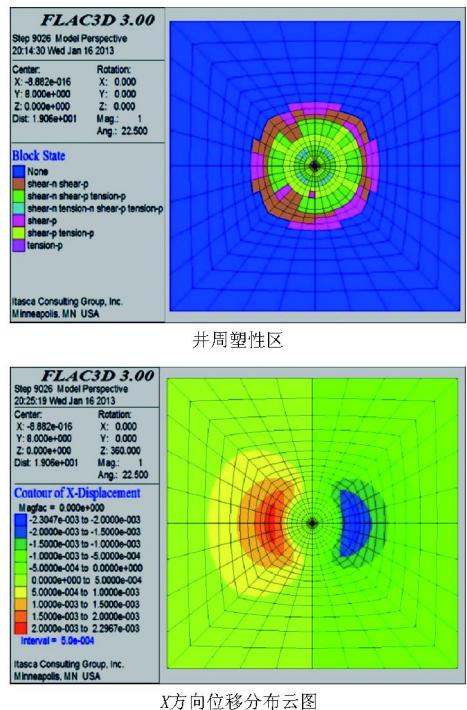


图 5 井眼钻开后井周塑性区和 X 方向位移分布云图

周壁发展,在井筒周壁达到最大,且与井眼周围最小主应力大概成 45° 夹角。在地下水渗流及钻井液的作用下岩石强度变低,渗流引起的孔隙压力的变化使得岩石骨架有效应力降低,并且随着钻井的进一步深入井筒周围塑性区达到最大,沿井筒周围

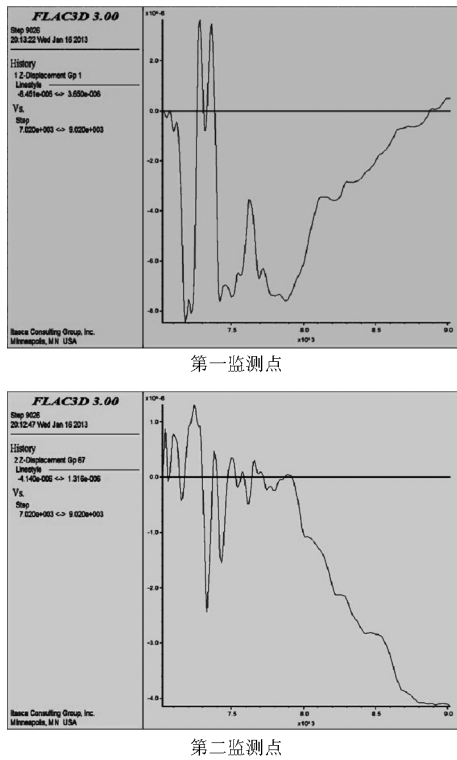


图6 第一和第二监测点位移变化监测图

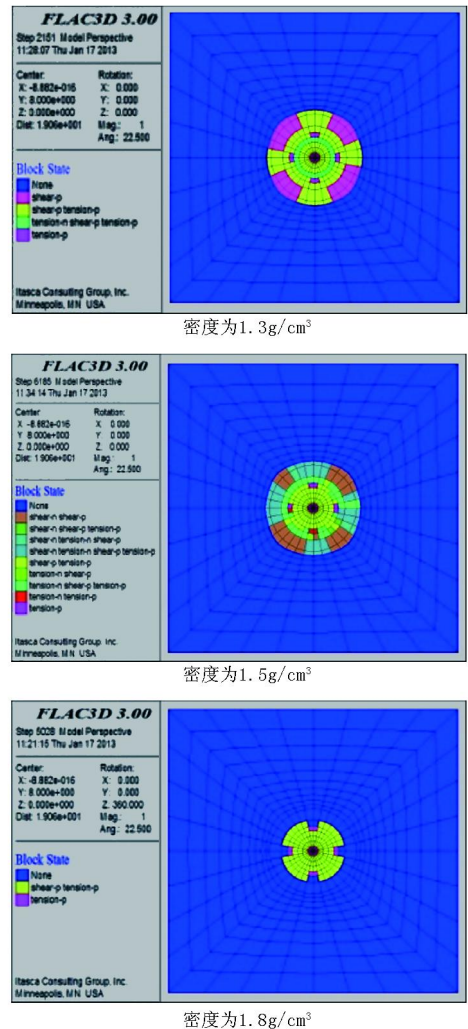
X 方向位移逐渐加大缩径严重直至垮塌。

4.2 钻井液密度对井眼变形的影响

当增加钻井液密度时,在一定程度上增加了井眼内液柱支撑力,且随着钻井液含水量的减少进一步减小钻井液对井周岩层的水化作用,从而提高井眼周围岩石的有效应力,塑性破坏区域变小,井周岩层向井内位移逐渐减低。如图7所示,当钻井液密度增加到大约 1.3 g/cm^3 时,上部泥质砂岩塑性区域明显减少,但根据位移监测1点(泥质砂岩与上部岩层交界处监测点)仍然有向井内发展的位移;当钻井液密度增加到 1.5 g/cm^3 时,泥质砂岩塑性区域基本消失,砂质泥岩仍有少量塑性变形区域,位移监测点2(泥质砂岩与砂质泥岩交界处)仍然有向井内发展的趋势;当钻井液密度增大到 1.8 g/cm^3 时,无论是砂质泥岩还是泥质砂岩,都未发生向井内的变形和位移,以及向井眼外的位移而发生拉伸破坏。此外,在一定的钻井液密度条件下,砂岩和泥岩交界处的位移变化比较激烈,缩径坍塌严重,造成每次提下钻遇阻。考虑到地下水渗流、岩石的各项异性和钻井因素的影响,QK-2井141.00~157.00 m井段钻井液安全密度窗口的下限应在 1.3 g/cm^3 左右。

5 基于钻井液密度控制的井壁稳定性思考

影响孔壁稳定性的因素很多,岩石的力学性质

图7 钻井液密度为 1.3 、 1.5 、 1.8 g/cm^3 时井周塑性区分布图

固然起着决定性的作用,但是在施工实践中,合理选择地层需要的优质泥浆,并在钻进过程中及时调整钻井液密度是保持井壁稳定不可忽视的关键因素之一。钻进过程中常遇到节理、断层、裂隙比较发育的复杂地层,发生涌水、掉块、坍塌等井下复杂情况,应在保持泥浆低失水量,提高泥浆护壁性能的条件下分别采用低固相泥浆或密度较大的泥浆。另外,在某些钻孔中有时会出现对泥浆性能要求相互矛盾的情况,如漏失层要求泥浆相对密度较低以减小泥浆液柱压力引起的漏失,坍塌层和缩径层则要求泥浆相对密度较高,以达到平衡高地应力和减小向井径内应变的目的。在这种情况下应抓住问题的关键,先解决漏失问题,再采用相对密度较高、失水量较低的泥浆解决坍塌及缩径。为了顺利钻穿复杂地层,应当在钻前对地层复杂情况进行认真调查研究的基础之上,准确预测地层压力以调整钻井液密度。并在钻进过程中加强对泵压、转速、钻头磨损、地下水

位变化和取出的岩心结构等进行观察和综合分析,及时判断井内复杂情况的变化,采取相应的技术措施进行处理^[9-13]。

6 结论

(1) 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井 QK-2 井井壁失稳主要发生在泥质砂岩和砂质泥岩层。由于泥质砂岩和砂质泥岩的抗压及抗拉强度均较低,且遇水容易发生软化,所以易发生剪切破坏和坍塌。QK-2 井多为泥质砂岩和砂质泥岩互层,二者互为影响,进一步加剧了井眼的缩径,增加了起下钻具的卡阻,给该井继续钻进带来了较大的困难和风险。

(2) 在泥质砂岩和砂质泥岩互层段,随着钻井液密度的增加,井周围岩的剪切破坏区域变小,向井内的位移也逐渐变小,钻井液密度增加到一定程度时,井周围岩剪切破坏消失,如果再增加钻井液密度,则在一定程度上发生拉伸破坏,井周围岩位移向外发展,从而发生钻井液漏失。

(3) 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井 QK-2 井中,141.00~157.00 m 井段钻井液密度应在 1.3~1.8 g/cm³ 之间。当从泥质砂岩进入砂质泥岩时,应稍微提高钻井液密度,考虑该井井壁失稳严重,并在 385 m 处被迫选用无泵法进行钻进的情况,应在 385 m 解除卡钻后再下入一层技术套管。

(4) 在冻土天然气水合物钻井过程中,泥浆性能对钻井效果及井壁稳定非常重要,因此,施工过程

中应及时观测和调整泥浆性能,以便减少井壁失稳和获得较好的钻井效果。

参考文献:

- [1] 金衍,陈勉. 钻前井壁稳定预测方法的研究[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 96-99.
- [2] 金衍,陈勉. 利用地震记录钻前预测井壁稳定研究[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 36-40.
- [3] 梁利喜,许强,刘向军. 基于极限平衡理论定量评价井壁稳定性[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(2): 15-17.
- [4] 张哲,唐春安,李连崇,等. 煤层气开采过程井壁稳定性的数值试验研究[J]. 中国矿业, 2006, 15(9): 55-58.
- [5] 陈朝伟,周英操,申瑞臣,等. 考虑岩石尺寸效应的井壁稳定性分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 38-41.
- [6] 王炳印,邓金根,周建良,等. 疏松砂岩储层水平井眼缩径变形规律数值模拟研究[J]. 天然气工业, 2006, 12(5): 55-57.
- [7] 金衍,陈勉,吴超. 探井二开以下地层井壁稳定性钻前预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 742-745.
- [8] 蒋祖军,张杰,孟英峰,等. 气体钻井井壁稳定性评价方法分析[J]. 天然气工业, 2007, (6): 68-70.
- [9] 张永勤,祝有海. 祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1904-1909.
- [10] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(2): 15-17.
- [11] 于磊,赵大军,孙友宏,等. 漠河冻土地区天然气水合物钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 13-16.
- [12] 许俊良,任红. 天然气水合物钻探取样技术现状与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(11): 4-9.
- [13] 赵宝军,马秀春. 东北某盆地天然气水合物钻探施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(8): 22-25.

河北将继续加大地质勘查力度

《中国矿业报》消息(2014-6-19) 日前,在石家庄市举行的国土资源部河北省政府合作协议签字仪式暨马城铁矿勘查成果发布会上,河北省副省长孙瑞彬要求,各有关部门和地勘单位要围绕全省经济社会发展需求,以铁、煤等重要矿种为重点,加大地质勘查力度,力求取得更大突破。

孙瑞彬说,地质工作是经济社会发展的先行性、基础性工作。近年来,省内及驻冀地勘单位紧紧围绕中心、服务大局,不断加大地质勘查力度,取得了一批重大找矿成果,为全省经济社会发展做出了重要贡献。特别是马城铁矿 10 亿 t 储量的探明,是河北省地质找矿工作的又一重大突破,不仅可以补充河北省铁矿开发后备资源,缓解铁矿石供应紧张局面,而且对我国国际铁矿石价格谈判也将产生积极影响。日前,河北省政府已做出决定,对马城铁矿勘查单位中国冶金地质总局第一地质勘查院给予表彰和奖励。

河北是矿产资源大省,也是资源消费大省。河北省历史形成的产业结构,对矿产资源的依赖程度较高。特别是随着

经济社会的快速发展,资源能源相对短缺已成为制约发展的重要瓶颈。目前河北省铁矿石自给率虽高于全国平均水平,但年进口铁矿石仍需 1 亿 t 左右;去年全省原煤消耗量达 2 亿 t 以上,省内自产不足 8000 万 t,原煤缺口约 1.4 亿 t。因此,加强地质找矿工作显得尤为重要而紧迫。

当前,河北省正处于经济社会发展的关键时期。无论是保障经济平稳较快发展,还是加快发展方式转变,都离不开强有力的资源保障和支撑。日前国土资源部与河北省签署合作协议,共同推进地质找矿工作,对于提高矿产资源保障能力、促进经济社会又好又快发展具有十分重要的意义。河北省政府将创造一切有利条件,积极组织推进,加强统筹协调,充分调动各方面积极性,不折不扣地履行合作协议。各有关部门和地勘单位要围绕全省经济社会发展需求,以铁、煤等重要矿种为重点,加大地质勘查力度,力求取得更大突破。