

深水海底天然气水合物浅覆盖层 钻井井壁稳定预测研究

吴纪修¹, 张永勤¹, 薛倩冰¹, 刘秀美¹, 林振洲², 尹浩¹, 李小洋¹, 王志刚¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:以南海北部神狐海域天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定为背景,对深水浅覆盖层钻井井壁稳定预测模型,南海沉积物物理、力学参数,以及神狐海域天然气水合物储集地层井壁稳定的研究现状进行分析和总结,探讨深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定预测的难点和拟解决的方法,为深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定预测提供支持。

关键字:深水浅覆盖层;天然气水合物;钻井;井壁稳定;神狐海域

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)10-0170-06

Research on Borehole Wall Stability Prediction in Deep-water Shallow Layer Gas Hydrate Drilling/WU Ji-xiu¹, ZHANG Yong-qin¹, XUE Qian-bing¹, LIU Xiu-mei¹, LIN Zhen-zhou², YIN Hao¹, LI Xiao-yang¹, WANG Zhi-gang¹ (1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Based on the borehole wall stability of shallow cover layer drilling for natural gas hydrate in northeast of the South China Sea, borehole wall stability prediction model for shallow cover layer of deep water drilling, the physical and mechanical parameters of sediments from the South China Sea and the research status of borehole wall stability of natural gas hydrate reservoir formation are analyzed and summarized. The difficulties of borehole wall stability prediction and the solutions are discussed, which provides the support to borehole wall stability prediction for marine gas hydrate bearing sediments drilling in shallow cover layer of deep water.

Key words: deep-water shallow layer; natural gas hydrates; drilling; borehole wall stability; Shenhu area

0 引言

深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定研究,包括深水海底浅覆盖层及天然气水合物储集地层的井壁稳定2个方面。受自然条件限制,海洋环境中天然气水合物赋存于水深>300 m的区域,深水钻井是指作业水深>500 m的海洋钻井作业。根据南海神狐水合物钻探区A站位的海底水深约1232 m,钻获水合物的地层在海底191~225 m,SH2井水合物地层在海底201~209 m,SH3井在224.5~221 m,SH7井在180~198.0 m。因此,海底天然气水合物上覆岩层属于海底浅覆盖层。海底密度低,沉积速率快,浅部沉积物经历的构造运动少,大多处于饱和或半饱和的未成岩阶段,一般是淤泥、粘

土、粉砂及砂泥混层,并以粘性土和砂性土为主。

2007年钻探发现神狐海域水合物富集区,气体来源为甲烷占99.4%以上,水合物厚度10~40 m,水合物饱和度最大为84%,储集层特征为富含孔虫粉砂或粘土粉砂。钻井控制水合物面积约为23 km²,气体储量约为1.94×10¹⁰ m³。2013年钻探发现东沙海域水合物富集区,获取了大量的层状、块状、结核状、脉状及分散状等多种类型天然气水合物实物样品,钻探控制矿藏面积55 km²,天然气储量超过1.0×10¹¹ m³。水合物类型多、储量大、成藏条件复杂。2015年钻探发现神狐海域高饱和度粉砂水合物储集区,钻探发现水合物成功率100%,钻探证实资源潜力巨大,水合物矿体厚度大、储量大,呈

收稿日期:2016-04-05

基金项目:中国地质调查局国家海洋地质专项项目“青南藏北冻土区天然气水合物资源勘查”(编号:GZH201400301);中国地质调查局外协项目“海域天然气水合物钻探取心及分析处理技术”(编号:GZH201500602-01)

作者简介:吴纪修,男,汉族,1984年生,工程师,硕士,地质工程专业,从事钻井工艺技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号,Wujixiu2008@126.com。

高孔隙度、高饱和度特征,并首次发现 II 型水合物。根据天然气水合物钻井的实钻资料,由于海底天然气水合物勘探工艺体系的不完善,钻进中经常发生井壁失稳的现象。并且,井壁稳定控制理论不成熟,钻前地层压力预测更是少之又少。深水浅覆盖层钻井的井壁失稳,以及天然气水合物储集地层钻井井壁的失稳,不但对目前的天然气水合物的勘探阶段带来诸多不利,更会影响未来的开采。因此,有必要建立行之有效的深水海底天然气水合物浅覆盖层的地层压力预测模型,完善井壁稳定控制理论,为天然气水合物钻采提供理论支持。

1 深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定分析的难点

(1) 深水浅覆地层沉降速率快、压实时间短,为半成岩或未成岩的饱和状态粘土或砂土、抗拉抗剪强度低,坍塌压力及破裂压力窗口狭窄。

(2) 建立反映深水浅覆盖层井周围应力状态的计算模型困难,由于海底泥面以下一定距离缺少相应的测井资料以及原位岩心采取困难,会影响模型力学计算参数的准确性。

(3) 海底天然气水合物钻井大部分在深水新区块探井海底地质构造情况不明确,受粘土固结控制理论的海底孔隙水压力系数随深度变化不明确。

(4) 海底天然气水合物储集地层,受井眼钻开后天然气水合物分解的影响,其物理力学参数计算方法、井壁稳定计算模型的研究处于起步阶段,水合物饱和度与声波波速的计算关系还不明确。

2 深水浅覆盖层井壁稳定预测模型特点及现状分析

近年来国外研究人员在深水压力预测方面开展了一些研究, Lee 等^[1]对比了浅水区、中等深度区和深海区钻井破裂压力之间的差异,结论显示在深水区,地层破裂压力和上覆压力较接近于孔隙压力。 Aadnoy^[2]通过收集世界范围内海上浅水至深水(水深 135 ~ 2071 m)地层破裂压力数据,得出破裂压力直接取决于上覆岩层压力,并给出了疏松地层破裂压力与上覆岩层重力和地层压力的经验模型。 R. Chhajlani 等^[3]利用线弹性本构模型和 Mohr - Coulomb 强度准则对墨西哥湾深水 Medusa 油田的井壁稳定性及钻井液密度窗口进行了分析。

Rocha^[4]对目前 3 种破裂压力梯度预测方法做了总结,结论表明岩石力学法、经验系数法以及区域地质经验模型法各有优劣,需根据现场实际情况综合利用。

国内外有关于深水浅覆盖层井壁稳定预测模型的建立基本可以分为以弹性变形控制理论为基础、以弹塑性变形控制理论为基础、以饱和土固结控制理论为基础的 3 类。 Rocha^[5]基于泥页岩压实理论提出拟上覆岩层压力等于地层破裂压力的模型,通过拟合 LOT 数据求取地表孔隙度与孔隙度的折减系数,进而求取拟上覆岩层压力。 Wojtanoeicz 等^[6]采用能反映深水浅层力学特性的弹塑性模型,从理论及数值模拟 2 方面对浅覆盖层井壁破裂形式进行了研究,得出浅覆盖层井壁失稳不存在垂直裂缝,水平裂缝是造成井漏的主要原因。 E. Kaarstad 等^[7]基于挪威的深水钻井实践对其早期提出的弹塑性模型加以改进,提出了用于预测不同海水深度下地层破裂压力的广义破裂模型:

$$P_i = 3\sigma_h - \sigma_H P_p + P_y$$

式中: P_i ——地层破裂压力; σ_h 、 σ_H ——分别为地层的最小、最大水平地应力; P_p ——地层孔隙压力; P_y ——塑性附加应力。

2012 年,蔚宝华等^[8]分别对深水浅覆盖层和深水深层的井壁稳定进行研究,得出了计算安全钻井液密度窗口的分段模型,并指出深水浅覆盖层的破裂压力:

$$P_i = \sigma_v$$

式中: P_i ——地层破裂压力; σ_v ——上覆岩层压力。

2012 年,蔚宝华等^[9]在前期研究的基础上,基于 AKPO 油田的构造特征对 E. kaarstad 模型进行简化,得出深水浅层的塑性附加应力 P_y 与上覆岩层压力具有相关性。给出的破裂压力计算公式:

$$P_i = \text{const} \times \sigma_v$$

式中, const 为与区域地质特征有关的常数,但是该简化模型属于经验模型,在对相关系数的获取上并没有给出具体的参考值。

2012 年,谭强等^[10]针对深水浅覆盖地层的特殊性,建立了塑性区半径评价法用于浅部地层坍塌压力计算,认为深水钻井中漏失压力等于水平最小主应力,并将漏失压力作为允许使用钻井液密度的上限。2015 年,孙清华等^[11]将土力学中的“超孔隙压力”理论结合水力压裂的弹塑性理论,分析了深

水浅部地层的破裂机理和破裂压力的理论公式。但是该模型的建立是基于海底饱和粘土不排水抗拉强度,钻井液泥皮完全封闭孔隙水的基础上建立起来的。该模型计算结果显示,深水浅层井壁破裂不但存在水平裂缝也存在垂向裂缝。基于上覆岩层压力为基础的井壁破裂压力预测模型,一般由上覆岩层压力求取最小水平应力,且二者成正比关系,并建立应力比与埋深的经验关系进而计算孔隙压力 Eaton 模型、Stephen 模型、Anderson 模型等均可归为此类^[12]。将“超孔隙压力”理论引入海底浅覆盖层地层压力计算的研究,为深水海底浅覆盖层地层钻井井壁稳定预测,提供了新的思路和方法,但是在沉积物的物理参数,模型边界条件、孔隙度与孔隙压力之间的关系需要做进一步的探讨。

3 我国南海沉积物物理力学参数研究现状及分析

地层压力的有效预测对井壁稳定的研究至关重要,预测地层压力的手段有多种,如应用地震资料、测井资料等,均属于对地层压力进行反演。经常用到的测井资料,有密度、电阻率及声波测井,在深水深层钻井密度测井用于求得上覆岩层压力,对于深水浅覆盖层由于缺少浅部密度测井资料,从而需要通过密度测井曲线的拟合来求取,电阻率及声波测井则用于求得目的层的孔隙度和孔隙压力。根据测井资料来确定地层孔隙压力的实质是通过泥岩或页岩被压实等因素造成地层中流体排驱不畅而引起的孔隙度变化,从而通过有效应力的概念来研究流体压力和地层压力^[13]。

有效应力的概念最早由特查希(Terzaghi)在研究土力学时提出,即土的抗剪强度只取决于有效应力:

$$\sigma' = \sigma - P_0$$

式中: σ' ——有效应力; σ ——正应力; P_0 ——孔隙压力。

毕奥特(Biot)在美国学者汉丁对满足有效应力原理条件的研究基础上提出了新的有效应力定律即:

$$\sigma' = \sigma - aP_0$$

式中: a ——有效应力系数; $n \leq a < 1$; n ——地层的孔隙度;对于海底多孔介质的浅覆盖层,孔隙度 n (Porosity) 是一项重要参数,孔隙度是进行地层孔隙压力预测的基础数据,不同时代的许多学者研究得

出其与声波速度关系明显。

Hamilton 和 Bachman 及 Anderson 通过研究世界大洋海底沉积物颗粒度和孔隙度等对纵波波速的影响,计算公式^[14]:

$$\text{Hamilton: } V_p = 2455.9 - 21.716 \times 10^2 n + 0.126 \times 10^4 n^2 \text{ (大陆架、大陆坡)}$$

$$\text{Bachman: } V_p = 2540 - 24.53 \times 10^2 n + 0.146 \times 10^4 n^2 \text{ (大陆架、大陆坡)}$$

$$\text{Anderson: } V_p = 2506 - 27.58 \times 10^2 n + 0.186 \times 10^4 n^2 \text{ (大陆架)}$$

式中: V_p ——纵波波速; n ——孔隙度。

1998年,唐永禄^[15]给出大陆架海底沉积层中压缩波依赖于沉积物孔隙度的一个新的经验公式:

$$V_p = 942 + C_0 - 25.02 \times 10^2 n + 0.156 \times 10^4 n^2 \text{ (南海北部大陆架)}$$

2005年,卢博等^[16]通过对中国东南近海海底沉积物声学物理参数的平面分布规律,的回归分析建立了经验公式:

$$V_p = 2369.07 - 25.53 \times 10^2 n + 0.185 \times 10^4 n^2 \text{ (中国东南沿海近海)}。$$

2007年,邹大鹏等^[17]对 Hamilton, Anderson, 卢博等所得出的关于声速和孔隙度的关系的经验公式进行误差分析和数据验证,得出了反演公式的基本误差限,为反演的准确性提供了定性的依据。罗忠辉等^[18]根据岩土力学原理,得出了基于 Matlab 编程计算的沉积物弹性参数计算公式,并对 Hamilton 计算方法进行了对比分析,结果显示用纵波与横波直接计算的参数准确度较高。2013年,卢良鑫等^[19]运用体积模量法,由海底表层孔隙度根据海底沉积物的压实性依次递推,递推公式:

$$n_{n+1} = 1 - \frac{1 - n_n}{1 - \frac{\rho_n (gd_h)}{K(n_n)}}$$

式中: n ——孔隙度; ρ ——地层密度; K ——体积模量; g ——重力加速度。

得出南海北部陆坡区海底未成岩地层深度在 0 ~ 250 m 范围内的地层孔隙度均位于临界孔隙度之上。

1991年,唐永禄^[20]对南海三个海区,海底平均取样深度 213 m 的沉积物进行物理特征测定和对比分析,包括密度、孔隙度、孔隙比、含水量和平均颗粒度等指标。并对 Anderson 给出的密度与孔隙度的

经验关系式进行验证, $\rho = 2.68 - 0.0166n$ 。指出 Anderson 关于深度 < 1500 m 海底的声速 - 孔隙度的经验公式对于我国南海较为适用。1994 年, 卢博等^[21]报道了南海北部大陆架及大陆坡的研究海区的沉积物物理参数及力学指标, 并绘制了应力及应变曲线。2004 年, 卢博^[22]对南海南部海域浅层沉积物应用 Hamilton 公式以声波波速为基础计算了沉积物的弹性参数。包括体积弹性模量、压缩系数、剪切模量、泊松比及弹性模量。

2014 年, 李光耀^[23]依托荔湾 3-1 气田开发对南海北部陆坡 500 ~ 1500 m 水深的海底地表沉积物进行工程特性分析, 得到强度随土样深度增大而增加的关系式:

$$y = 4.7133X^{0.1928} \quad R^2 = 0.9132 \quad (X \leq 4 \text{ m})$$

所计算的参数为在南海北部陆坡区开展其他工程的前期设计提供了地质依据。2015 年, 陈聪等^[24]运用土力学中的三轴试验方法, 对南海深海海底沉积物进行力学性能研究。通过分析, 得到海底沉积物样品的破坏点应力值在含水量 40% ~ 45% 以及在孔隙度 50% ~ 55% 分别取得最大值。通过对比表明试验的海底沉积物样品的力学性能与陆地的半脆性粘土相近。

针对南海天然气水合物钻井, 数量少、钻遇层位为粘土或砂土, 泥面以下一定距离缺少密度测井资料, 高精度声波测井及地层速度难以获取的实际情况, 应当构建合理的海底上覆岩层压力及孔隙压力计算模型。

4 神狐海域天然气水合物储集地层井壁稳定研究现状

随着南海神狐海域天然气水合物勘探工作的不断开展, 我国学者近几年在天然气水合物储集层力学参数的确定及模型优先方面进行了有益的探索, 但是相关研究还处于起步阶段, 天然气水合物储集地层压力预测以及由水合物分解引起的井壁失稳问题的理论成果并没有形成体系, 在实际钻井工程中尚缺少理论指导。研究结果具有很大的不确定性, 井壁不稳定问题难以彻底解决。

2008 年, 宁伏龙等^[25]建立了伴随有水合物分解的钻井液入侵的渗流模型, 并在此基础上考虑温度影响, 对井壁稳定计算模型进行了初步求解。2009 年, 田辉^[26]基于质量、动量、能量守恒原理及传

热学理论, 建立了钻井过程中压力和温度分布的数学模型, 在 Roadifer 模型的基础上建立了地层水合物分解一维数学模型。2012 年, 李令东等^[27]在考虑钻井液与地层热交换和水合物分解的基础上, 建立了水合物地层井壁稳定流固耦合数学模型, 并开发了有限元程序, 实例分析了钻井液压力和温度、地层水合物饱和度及施工作业时间等因素对水合物地层井壁稳定的影响。同年, 李令东等^[28]建立了温度影响天然气水合物地层井壁稳定的数学模型, 并进行有限元求解。

准确测量水合物的饱和度对含水合物沉积物物理力学性质的研究是至关重要的。已有室内试验和现场测试都表明声波速度和水合物饱和度有相关性。2009 年, 梁劲等^[29]基于 2007 年南海神狐海域天然气水合物 SH2、SH3、SH7 井的声波测井速度与现场测试的水合物饱和度关系进行了详细的分析, 并结合声波测井特征及热弹性理论推导出了饱和度与纵波波速的理论模型和计算公式。在理论模型推导中采用正演模拟法反演水合物饱和度:

$$V_p = 1800.7S - 2348.9S + 1715.5S + 405.17S + 1847$$

式中: S ——天然气水合物的饱和度。

公式推导中采用的主要公式为热弹性理论纵波速度公式:

$$V_p = \left\{ \left[\left(k + \frac{4}{3}\mu \right) + \frac{9K^2 \alpha^2 T_0}{\rho_m C_0} \right] \times \frac{1}{\rho_m} \right\}^{1/2}$$

式中: K ——体积模量; μ ——剪切模量; α ——热膨胀系数; T_0 ——初始温度, C_0 ——比热系数; ρ_m ——沉积层有效密度。有效密度定义为:

$$\rho_m = (1 - n_f) \rho_b + n_f \rho_s$$

式中: n_f ——有效孔隙度; ρ_b ——沉积层液体相密度; ρ_s ——沉积层固体相密度。

2010 年, 李刚等^[30]利用多相多组分沉积物渗流模拟计算软件 Tough + Hydrate 模拟软件, 基于 SH2、SH3、SH7 的钻探及测井数据, 分析降压开采和注热开采中水合物饱和度的空间分布规律, 并给出了水合物分解中的气、液分布规律。2013 年, 王秀娟等^[31]利用 Archie 阿尔奇公式, 基于原位温度、盐度、密度、孔隙度和电阻率, 利用交会分析确定了 SH3 井的阿尔奇常数为 $\alpha = 1.1$, $m = 2.3$ 在深度 190 ~ 200 m 水合物饱和度平均值为 10%, 局部地层饱和度为 26.8%。Archie 阿尔奇公式:

$$R_0 = \frac{\alpha R_w}{\varphi m}$$

式中: R_w ——计算的地层共生水电阻率; α 、 m ——阿尔奇常数(经验常数); φ ——地层孔隙度; R_0 ——计算的饱和水地层电阻率。

利用电阻率估算的水合物饱和度的方程为:

$$S_h = 1 - S_w = 1 - \left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{1/n}$$

式中: S_h ——水合物饱和度; R_t ——测量的电阻率; n ——饱和度指数,一般趋于2。

2013年,宁伏龙等^[32]基于常规油气储层利用测井数据估算地层力学参数的方法,得到饱和度与各力学参数的计算公式,估算海洋区水合物储集层力学参数,但是杨氏模量和体积模量计算结果相差较大。体积模量与水合物饱和度的关系式:

$$K = \rho(19S^4 + 21S^3 + 3951S^2 + 2186S + 3185)$$

式中: K ——体积模量; ρ ——地层密度。

2014年,林霖等^[33]应用针对水合物地层的TPEM和STPBE岩石物理模型,估算神狐海域水合物钻探区SH2井的天然气水合物饱和度。TPEM模型预测的饱和度平均值为35.4%,与现场孔隙水测试分析的结果更为一致。

5 结语

近年来有关深水海底浅覆盖层井壁稳定以及天然气水合物储集地层的研究在失稳机理、控制方法、影响因素和研究方法等方面所取得的进展,深化了钻井井壁围岩地质特征、力学特性和工程性质的认识。但关于深水海底天然气水合物储集地层井壁稳定性的研究尚处于起步阶段,传统的理论模型不足以全面反映深水海底水合物地层钻井过程中井壁稳定问题复杂的物理化学过程。另外,国内外对深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井问题的研究,大多只针对于天然气水合物储集地层失稳与天然气水合物分解进行定性研究,相关理论模型与数值计算方法以特定的地层压力假设为基础进行研究,忽略了深水海底地层压力参数随钻井深度动态变化等因素。

基于以上对国内外关于深水浅覆盖层钻井井壁稳定预测模型、我国南海深水浅覆盖层物理力学参数、以及南海神狐海域天然气水合物储集地层井壁稳定的研究现状,为实现我国南海海域天然气水合

物浅覆盖层钻井井壁稳定性预测需要在以下几个方面进行研究:

(1)以饱和土固结控制理论和Biot有效应力原理为基础,建立符合深水浅覆盖地层压力预测的上覆岩层压力、孔隙压力、破裂压力及坍塌压力计算模型。

(2)以测井资料分析结合相应计算方法估算深水浅覆盖层的密度、孔隙度、弹性模量、泊松比、内摩擦角、粘聚力等力学参数。

(3)以天然气水合物分解引起的地层物理力学性质变化为基础,天然气水合物储集地层饱和度变化研究为手段,考虑钻井液渗流作用建立天然气水合物储集地层井壁稳定预测模型。由于天然气水合物特殊的储集特征,需要对孔隙充填型砂质储集层和非孔隙充填型泥质储集层进行单独研究。

(4)建立深水浅覆盖层及天然气水合物储集地层井壁失稳关联模型。以有限元生成平台为手段通过有限元法对关联模型进行数值求解。深入分析天然气水合物储集地层钻井过程中,地层压力、钻井液渗流对天然气水合物分解的影响规律,探究井眼打开、地层压力释放后,天然气水合物分解后随井眼内孔隙压力增加、渗流速度加快和岩石骨架减弱对井壁稳定坍塌压力和破裂压力窗口变化的影响。实现天然气水合物分解前后地层稳定状态的判断,并对井壁失稳过程进行仿真,找到影响井壁失稳的主控因素。

(5)深水浅覆盖层及海底水合物储集地层比常规油气地层更为复杂,在钻井、完井、测井及储层评价方面需要进行大量的研究工作,包括具有储层保护能力的水合物钻井液体系、高精度电磁波测井技术、随钻电阻率成像技术以及低水热、早强高效水泥浆体系,多尺度、多相流、热藕和等储层评价理论体系的建立。

参考文献:

- [1] Lee S, Reilly J., Lowe R. et al. Accurate Pore Pressure and Fracture Pressure Predictions Using Seismic Velocities—An Aid to Deep Water Exploration and Drilling Design [J]. World Oil, 1998, (S1):68-70.
- [2] B. S. Aadnoy. Geomechanical Analysis for Deep - Water Drilling [R]. IADC/SPE 39339, 1998.
- [3] R. Chhajlani Richin, Zheng Ziqiong. Utilization of geomechanics for Medusa field development, deepwater gulf of Mexico [R]. SPE 77779, 2002.

- [4] L. A. Rocha. Frature Pressure Gradient in Deepwater [J]. IADC/SPE 88011, 2004.
- [5] L. A. Rocha, A. T. Bourgoyne. A New Simple Method to Estimate Frature Pressure Gradient [R]. SPE Drilling & Completion, 1996.
- [6] Wojtanowicz Andrew K, Bourgoyne Adam T, Zhou Desheng, et al. Strength and fracture gradients for shallow marine sediments [R]. Louisiana State University, 2000.
- [7] E. Kaarstad, B. S. Aadnoy. Fracture Model for General off shore Applications [J]. SPE 101178, 2006.
- [8] 蔚宝华, 闫传梁, 邓金根, 等. 深水钻井井壁稳定性评估技术及其应用 [J]. 石油钻采工艺, 2011, (6): 1-4.
- [9] 蔚宝华, 闫传梁, 邓金根, 等. 深水钻井安全钻井液密度窗口计算模型的建立与应用——以西非 AKPO 深水油田为例 [J]. 中国海上油气, 2012, (2): 58-60.
- [10] 谭强, 蔚宝华, 邓金根, 等. 深水油气田钻井安全密度窗口计算方法 [J]. 石油天然气学报, 2012, (10): 98-100, 104, 170.
- [11] 孙清华, 邓金根, 闫传梁, 等. 深水浅层破裂压力计算方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, (4): 1402-1408.
- [12] 田波, 周建良, 刘正礼, 等. 南海深水探井破裂压力计算模型研究 [J]. 化学工程与装备, 2014, (11): 40-43.
- [13] 张小莉, 程玉群. 地层压力分析的有效途径 [J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1999, (6): 28-30.
- [14] 龙建军, 李赶先, 邹大鹏. 海底沉积物纵波波速与物理-力学性质的理论关系和比较 [J]. 海洋学报(中文版), 2014, (7): 111-117.
- [15] 唐永禄. 海底沉积物孔隙度与声速的关系 [J]. 海洋学报(中文版), 1998, (6): 39-43.
- [16] 卢博, 李赶先, 张福生, 等. 南海南部海域海底沉积物弹性性质及其分布 [J]. 热带海洋学报, 2005, (3): 47-54.
- [17] 邹大鹏, 吴百海, 卢博. 海底沉积物孔隙度计算方法与声速反演的误差分析研究 [J]. 热带海洋学报, 2007, (4): 32-36.
- [18] 罗忠辉, 卢博. 海底沉积物弹性参数计算方法及误差分析 [J]. 海洋技术, 2008, 15(3): 35-38.
- [19] 卢良鑫, 雷雄, 刘学伟. 中国南海北部陆坡孔隙度的求取 [J]. 地球物理学报, 2013, (2): 601-607.
- [20] 唐永禄. 南海三海区海底沉积物物理性质及声学特性 [J]. 海洋技术, 1991, (1): 81-91.
- [21] 卢博, 梁元博. 中国东南沿海海洋沉积物物理参数与声速的统计相关 [J]. 中国科学(B辑化学生命科学地学), 1994, (5): 556-560.
- [22] 卢博, 李赶先, 黄韶健, 等. 南海北部大陆架海底沉积物物理性质研究 [J]. 海洋工程, 2004, (3): 48-55.
- [23] 李光耀. 南海北部陆坡区海底表层沉积物特性浅析 [J]. 油田、矿山、电力设备管理与技术, 2014, 13(193): 148-150.
- [24] 陈聪, 龙建军, 李赶先. 南海深海海底沉积物力学性质试验研究 [J]. 海洋工程, 2015, (4): 108-114.
- [25] 宁伏龙, 蒋国胜, 张凌, 等. 影响含天然气水合物地层井壁稳定的关键因素分析 [J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 59-61.
- [26] 田辉. 水合物钻井过程中稳定性的理论研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- [27] 李令东, 程远方, 周建良, 等. 深水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): 40-49.
- [28] 李令东, 程远方, 梅伟, 等. 温度影响天然气水合物井壁稳定的有限元模拟 [J]. 天然气工业, 2012, 32(8): 74-77.
- [29] 梁劲, 王明君, 王宏斌, 等. 南海神狐海域天然气水合物声波测井速度与饱和度关系分析 [J]. 现代地质, 2009, (2): 217-223.
- [30] 李刚, 李小森, 陈琦, 等. 南海神狐海域天然气水合物开采数值模拟 [J]. 化学学报, 2010, (11): 1083-1092.
- [31] 王秀娟, 吴时国, 王吉亮, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物分解的测井异常 [J]. 地球物理学报, 2013, (8): 2799-2807.
- [32] 宁伏龙, 吴能友, 李实, 等. 基于常规测井方法估算原位水合物储集层力学参数 [J]. 石油勘探与开发, 2013, (4): 507-512.
- [33] 林霖, 梁劲, 郭依群, 等. 利用声波速度测井估算海域天然气水合物饱和度 [J]. 测井技术, 2014, (2): 234-238.