

冲洗液安全密度窗口的实验模拟及有限元分析

陈秀荣¹, 邵明利²

(1. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 内蒙古呼和浩特 010020; 2. 内蒙古煤矿设计研究院有限责任公司, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要:在钻探工程中,冲洗液的密度选择至关重要。密度过大有助于护壁和悬渣,但会增大钻进阻力;密度过小,则会降低其悬渣能力,并影响钻孔稳定性。在孔壁稳定性力学分析的基础上,自行建立试验模拟装置进行井壁稳定性模拟。与此同时,采用有限元方法来模拟钻孔稳定问题,得出合理的冲洗液安全密度窗口。对比结果表明,利用ANSYS有限元分析软件模拟来确定冲洗液安全密度窗口具有一定的可行性。利用有限元模拟分析既可以缩减前期冲洗液的试验费用,又能给钻探提供合理的冲洗液安全密度窗口,对优化冲洗液的密度具有现实的参考价值。

关键词:冲洗液;安全密度窗口;实验模拟;有限元分析

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)07-0034-04

Experimental Simulation and Finite Element Analysis on Safe Density Window of Flushing Fluid/CHEN Xiu-rong¹, SHAO Ming-li² (1. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Huhhot Inner Mongolia 010020, China; 2. Inner Mongolia Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Huhhot Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: Flushing fluid's density is very important in the drilling project. Large density is helpful for wall protection and dreg suspension but will increase drilling resistance at the same time; while too small density will reduce the capability of dreg suspension and influence the stability of wellbore. Based on the mechanical analysis on the borehole stability, simulation device was established to simulate the stability of borehole wall. Meanwhile, the stability of wellbore was also simulated by finite element method to obtain the reasonable safe density window of flushing fluid. Comparison results show certain feasibility of simulation using ANSYS finite element analysis software to determine the safe flushing fluid density window. Using finite element simulation analysis not only can reduce the cost of flushing fluid test in earlier stage, but also can provide the safe density window of flushing fluid, which has practical reference value to optimize the density of flushing fluid.

Key words: flushing fluid; safe density window; experimental simulation; finite element analysis

长久以来,孔壁稳定性问题一直是钻探工作中的主要难题。其中,冲洗液安全密度窗口又是其核心部分。随着科技的发展,有限元分析技术也逐渐被引入到钻探行业。然而,如何利用有限元软件确定冲洗液安全密度窗口以及实验室仿真模拟相关的研究尚少。本文利用自行设计的简单仪器进行实验模拟,并与ANSYS软件分析的结果进行对比,研究有限元分析在该问题应用的可行性。

1 孔壁稳定力学分析

在钻探施工前,地壳内的所有岩层都处在力学平衡和相对稳定状态。钻井形成后,改变了孔壁周围岩石的原始应力,进而发生应力集中。上部地层

压力迫使孔壁岩石向孔内移动,当岩石强度不够时,就会造成孔壁坍塌^[1]。

井孔壁岩石的失稳破坏是由于在外力作用下,应力状态发生变化超过了其强度极限所导致的。因此,分析孔壁的力学稳定性应该从地层压力入手,首先解出孔壁单元体的应力状态,再将该应力状态变换为与其唯一对应的主应力状态;然后,获取孔壁岩石的强度指标;最后,将主应力状态与强度指标比较,得出孔壁岩石是否发生失稳破坏^[2]。

1.1 地层压力分析

1.1.1 上覆地层造成的垂向压力

$$P_0 = \gamma h \quad (1)$$

式中: γ ——上覆各地层容重, kN/m^3 ; h ——各地层

收稿日期:2015-01-20; 修回日期:2015-04-20

作者简介:陈秀荣,女,汉族,1983年生,工程师,地质工程专业,硕士,从事工程地质及水文地质方面的工作,内蒙古呼和浩特市新城区呼伦贝尔南路9号,shaomingliasd@126.com。

深度, m。

1.1.2 垂向压力导致的侧向压力

$$P_v = \lambda P_0 = \frac{\mu}{1-\mu} P_0 \quad (2)$$

式中: λ ——侧压系数; μ ——各地层泊松比。

1.1.3 孔内静液柱压力

$$P_w = \gamma_w H \quad (3)$$

式中: γ_w ——孔内液体容重, kN/m^3 。

1.1.4 地层孔隙流体压力

地层孔隙流体压力是指充斥在地层孔隙中的流体的压力, 也称地层压力。当地下流体与地面大气连通, 则地层处于正常孔隙压力状态, 即等于流体的静液柱压力, 即:

$$P_f = \gamma H \quad (4)$$

式中: γ ——流体的容重, kN/m^3 ; H ——流体静液柱高度, m。

在某些特殊情况下, 也会遇到异常的地层孔隙压力, 如异常高压或异常低压。

1.2 孔壁单元体应力状态

根据弹性力学厚壁筒理论, 在地层垂向压力、侧向压力和孔内静液柱压力的作用下 (以垂直孔为例), 近孔壁地层中某点的应力状态可得:

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{r^2} + \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{P_2 - P_1}{r^2} + \frac{a^2 P_1 - b^2 P_2}{b^2 - a^2} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \gamma h \quad (7)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 σ_z ——分别为近孔壁地层中一点的径向正应力、周向正应力和垂向正应力; P_1 、 P_2 ——分别为孔内静液柱压力和地层水平向压力; a 、 b ——分别为厚壁筒的内、外半径; r ——该点距孔中心的水平距离。

由于实际地层比孔径大得多 (即 $b \ll a$), 因此可由以上3个公式解得孔壁处 ($r = a$) 的应力状态为式(8)、(9)、(10)所示:

$$\sigma_r = -P_1 \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = P_1 - P_2 \quad (9)$$

$$\sigma_z = \gamma h \quad (10)$$

由于垂直孔的特殊性, 即单元体面上的切应力为零, 3个正应力也可以直接看作3个主应力。

1.3 孔壁岩石的强度

是指在标准测试条件下获得的岩石的通用强度

指标, 如单轴抗压强度、抗剪强度等。通常, 研究人员对钻取的岩心做单轴强度等室内试验可以精确得到这些强度指标。有时, 也可查找相关资料间接地得到它们的大概范围^[3]。

1.4 孔壁失稳破坏的判别

把上面得到的孔壁单元主应力和岩土强度指标代入到破坏判别式中即可得出孔壁是否失稳破坏。较常用的材料破坏判别准则之一是最大剪应力理论 (Tresca 理论)。式(11)中的 σ_1 和 σ_3 是孔壁单元体的最大和最小主应力; τ_{\max} 和 σ_b 是孔壁岩石的强度指标。代入具体数值后, 若不等式成立, 则孔壁失稳破坏, 反之孔壁稳定^[4]。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \tau_{\max} = \frac{\sigma_b}{2} \quad (11)$$

2 冲洗液安全密度窗口的确定

在钻探施工中, 应使用合理的冲洗液密度, 使孔内流体压力满足地层流体压力而不发生溢流、坍塌、缩径和漏失^[5]。冲洗液密度的上下限要根据某一地层的坍塌压力、破裂压力和地层孔隙压力来确定。安全冲洗液密度上限等于该段地层各深处破裂压力的最小值, 下限等于该段地层各深度坍塌压力和孔隙压力的最大值, 如式(12)所示:

$$\max\{p_b, p_p\} < p_i < \min\{p_i\} \quad (12)^{[6]}$$

由以上分析可知, 钻探施工必须保持孔内冲洗液密度介于安全冲洗液密度下限和安全冲洗液密度上限之间。这个冲洗液密度范围即安全冲洗液密度窗口^[7]。

3 实验模拟及有限元分析

该模拟试验的主要原理: 在半封闭容器内装入均匀介质材料, 然后取出中空的 PV 管形成模拟钻孔。然后向模拟钻孔加入冲洗液, 直至液面与模拟钻孔持平。利用加压装置向钻孔施加围压, 通过传感器来获取模拟井壁破坏的临界压力。在实验结束后, 根据 ANSYS 软件进行模拟, 得到冲洗液的安全密度范围。随后, 将其与模拟实验使用的冲洗液密度进行对比。如果二者相差很小, 说明用 ANSYS 软件模拟得出的冲洗液密度对工程实际具有一定的指导作用; 反之说明软件模拟不切合实际, 不具有指导意义。本实验有以下几个设定的边界条件:

(1) 假定材料是各向均匀介质;

(2) 假定围压是均匀施加的,且各向相同;

(3) 假定钻孔只发生径向变形。

3.1 实验仪器简介

本次自行设计的模拟实验仪器结构如图1所示。仪器主体直径150 mm,高度是250 mm。外壁采用透明的有机玻璃,底座用金属。紧贴内壁放有一个用硅橡胶做的气囊,中心有一个直径为50 mm的塑料管,长300 mm。塑料管下部有很多小孔,以便冲洗液能渗入到砂土层中。石油工业实验一般使用直径为1 in(25.4 mm),内孔直径1/3 in(8.47 mm)的比例进行测试。而本实验使用的尺寸有所放大,主要考虑以下几点:(1)体积较大更具有代表性;(2)中心孔的轻微偏移对结果的影响更少;(3)50 mm直径的孔更接近现场实际的钻孔。但是,实验还是保留了1:3的内外径之比。以往的实验表明:空心圆柱的内外径之比大于1:3时会发生井壁坍塌;而比例小于1:3时不发生坍塌^[8]。所以,这里采取了临界值。

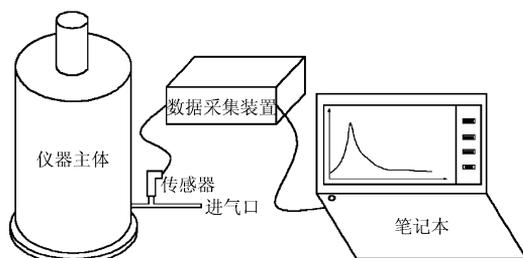


图1 模拟仪器结构简图

试样的制作就是把均质材料(砂石、粘土等)放到内外孔之间,堆积密实。然后缓慢向内管注入冲洗液至孔壁顶面,待冲洗液液面不再下降时将内管轻轻拔出,这样就形成了一个试样。围压施加方法就是用氮气瓶或打气筒给气囊充气加压,如图2所示。

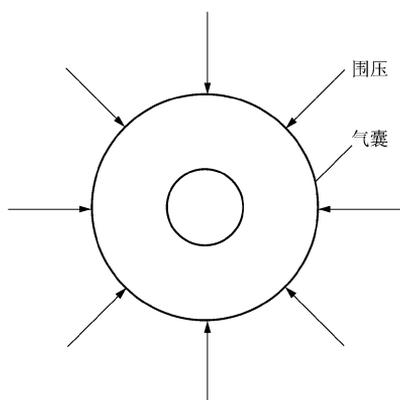


图2 加压示意图

在实验过程中,利用笔记本电脑与数据采集装置来控制 and 记录围压。当围压达到一个临界值时,试样总会发生孔壁坍塌。由于试样坍塌瞬间时的围压不容易控制,所以坍塌后继续加压。这样采集的压力数据曲线就会发生显而易见的突降。于是,把这个临界点的压力记作临界围压。

3.2 模拟实验记录

该实验采用的冲洗液密度为 1.32 g/cm^3 。试样材料按照中砂组分进行配制。

图3就是实验记录的数据,可以看出,峰值10.93 kPa就是孔壁发生破坏的临界围压。另外,试样破坏前与破坏后的情况见图4。

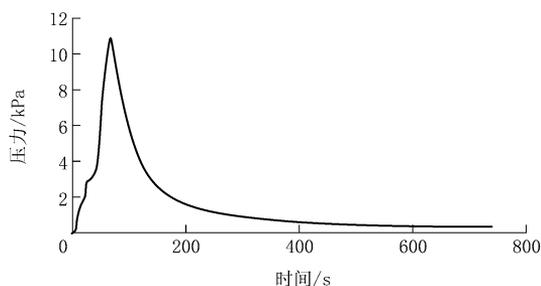


图3 实验数据曲线

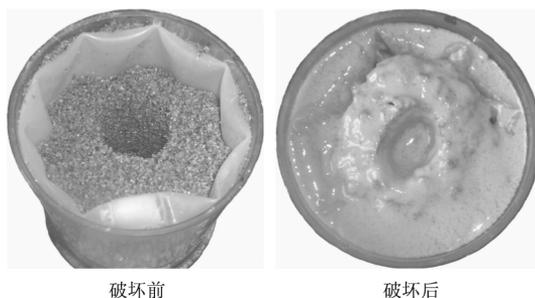


图4 实验效果图

3.3 用ANSYS软件进行有限元分析

应用ANSYS软件对该实验情况进行模拟。参照《工程地质手册》中的经验数据,本次实验的力学参数取值如下:粘聚力 c 取2 kPa,内摩擦角取 38° ,弹性模量 E 取40 MPa,泊松比取0.25^[9]。有限元分析网络划分如图5所示。

由图6、图7可以看出,冲洗液密度在 1.30 g/cm^3 时孔壁发生了极其微小的应变;而冲洗液密度为 1.35 g/cm^3 时孔壁没有发生塑性变形,处于稳定状态。将上述图5微小的应变忽略,就可以认为该孔壁稳定的临界冲洗液密度在 $1.30 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 之间。

3.4 结果分析

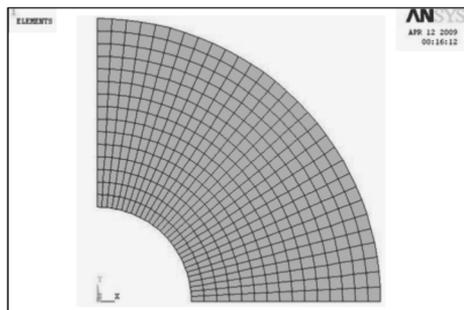
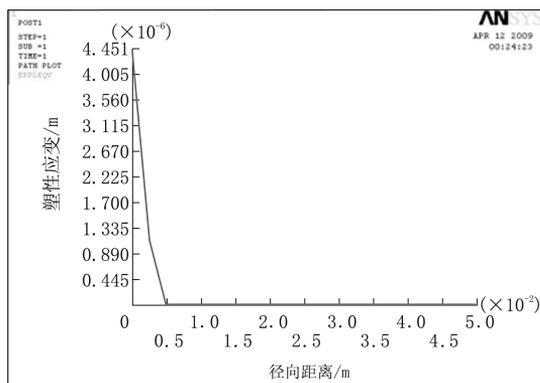
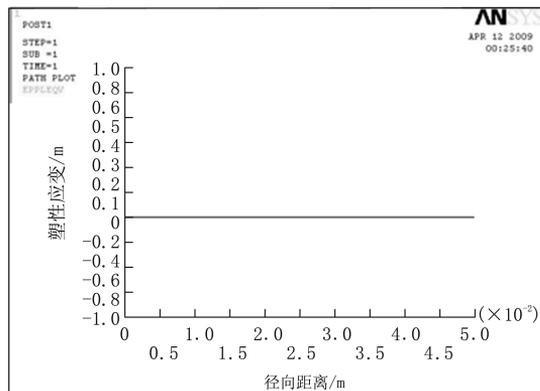


图 5 有限元分析网格化分图

图 6 冲洗液密度为 1.30 g/cm^3 时的井壁塑性应变随径向距离的变化图 7 冲洗液密度为 1.35 g/cm^3 时的井壁塑性应变随径向距离的变化

本次模拟实验使用的冲洗液密度为 1.32 g/cm^3 , 处于 $1.30 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 这个范围内。由此可

以看出:应用 ANSYS 软件模拟的结果与模拟实验的结论基本吻合。

4 结论

通过以上实验模拟与 ANSYS 软件分析结果的对比可得出以下结论。

(1) 通过理论分析自行建立试验模拟装置, 对优化冲洗液密度具有现实的参考价值。本文涉及的测试装置是作者自行设计组装的, 构造比较简单。期望在不久的将来, 钻探行业内能形成一种规范的实验装置来模拟钻井稳定性问题。

(2) 应用 ANSYS 软件进行仿真模拟, 可以为钻探工作提供合理的冲洗液安全密度窗口。在模拟结果的基础上, 可以节省冲洗液的实验费用和时间。合理应用该项技术, 将对钻探施工具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 屈平, 申瑞臣. 煤层气钻井井壁稳定机理及冲洗液密度窗口的确定[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 64-68.
- [2] 刘加杰, 康毅力, 王业众. 扩展冲洗液安全密度窗口理论与技术进展[J]. 冲洗液与完井液, 2007, 24(4): 69-73.
- [3] 谭强, 蔚宝华, 邓金银, 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, 34(10): 98-100.
- [4] 曾祥熹, 陈志超. 钻孔护壁堵漏原理[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 45-48.
- [5] 陈森, 梁大川, 李磊. 深井超深井冲洗液密度窗口研究进展[J]. 天然气工程(钻井工程), 2008, 28(1): 85-87.
- [6] 任文希, 李泉, 孟英峰, 等. 破碎性煤层段冲洗液安全密度窗口的确定与应用[J]. 科学技术与工程(矿冶工程), 2014, 14(10): 175-178.
- [7] 闫传梁, 谢玉洪, 邓金银, 等. 安全冲洗液密度上限的确定方法[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 80-85.
- [8] R. T. Ewy, P. Ray. Openhole Stability and Sanding Predictions by 3D Extrapolation from Hole Collapse Tests[C]. Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999: 1-11.
- [9] 编委会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992: 160-161.