

## ◀ 钻井与完井 ▶

## 考虑岩石尺寸效应的井壁稳定性分析

陈朝伟 周英操 申瑞臣 赵 庆 刘玉石 柳丙善

(中国石油 钻井工程技术研究院,北京 100195)

**摘要:**从岩石强度的尺寸效应出发,初步探讨了小井眼和微小井眼的井壁稳定性特点。一般情况下,当井眼尺寸减小时,坍塌压力随之降低,破裂压力随之增加。实例分析表明,小井眼钻井的地层坍塌压力所对应的钻井液密度比常规井眼钻井低1%~9%;破裂压力所对应的钻井液密度比常规井眼钻井高1%~7%。微小井眼钻井的上述两个密度比常规井眼钻井分别低9%和高7%以上。换言之,小井眼和微小井眼钻井的安全密度窗口范围增大。

**关键词:**尺寸效应;井眼稳定;岩石强度;小眼井

**中图分类号:**TE28    **文献标识码:**A    **文章编号:**1001-0890(2009)03-0038-04

由于小井眼(直径 $D \leq 17.78 \text{ cm}$ )和微小井眼( $D \leq 6.03 \text{ cm}$ )钻井技术能显著降低钻井成本和减小环境污染,越来越受到石油工程界的重视<sup>[1-2]</sup>。井眼尺寸减小是上述两项技术的最基本特征。在石油工程中普遍应用孔隙弹性力学和强度准则预测地层坍塌压力和破裂压力<sup>[3]</sup>,而岩石强度存在尺寸效应<sup>[4]</sup>。因此,井眼尺寸减小会影响坍塌压力和破裂压力的大小,并最终影响钻井液密度的设计。

目前,由于岩石尺寸效应缺乏严密的理论基础,因此,井壁稳定性的尺寸效应研究还仅仅局限在实验和数值方法上。Haimson 和 Herrick<sup>[5]</sup>较早地研究了岩石尺寸效应对井壁稳定性的影响,通过对Alabama 石灰石进行试验,指出直径小于6 cm 的井眼具有非常稳定的倾向。张哲等<sup>[6]</sup>应用数值方法研究了煤层水平井的尺寸效应,指出井眼尺寸对井壁稳定有显著影响,井眼直径减小,对维持井壁稳定的钻井液液柱压力要求降低。

笔者以岩石强度的尺寸效应经验公式为基础,推导出了坍塌压力和破裂压力与井眼直径的关系式,并通过具体实例分析了井眼尺寸对井壁稳定的影响。

## 1 岩石强度的尺寸效应

由于生成条件及生成后地质构造的作用,岩石内部形成各种孔隙、微裂隙及肉眼可见的各种缺陷,它们直接影响着岩石的力学性质。一个较大的岩样

包含较多的裂隙和缺陷,而一个较小的岩样,仅包含很少的(甚至不包含)裂隙或缺陷。因此,岩样大小不同,其力学性质往往不同,即所谓尺寸效应。

刘宝琛对国内外岩石抗压强度尺寸效应的试验结果进行了整理,总结归纳出一套经验公式<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_c = \sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m) \exp(-\beta_c D) \quad (1)$$

式中,  $\sigma_c$  为岩样强度, MPa;  $\sigma_m$  为岩体强度, MPa;  $\sigma_0$  为原岩(岩石材料)强度, MPa;  $\beta_c$  为强度衰减系数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $D$  为岩样直径, cm。

当  $D \rightarrow \infty$  时, 岩样强度  $\sigma_c$  趋近于岩体强度  $\sigma_m$ ; 当  $D \rightarrow 0$  时, 即岩样很小时, 可以认为其中不包含任何天然缺陷, 则此时的岩样强度趋近于原岩(岩石材料)强度  $\sigma_0$ 。由式(1)可知, 岩样单轴强度和岩样尺寸具有指数式关系, 当岩样直径递增时, 强度随之单调递减。

## 2 坍塌压力的尺寸效应

地层深处的直井围岩, 其纵向变形受到限制, 如不考虑地应力沿纵深的变化(这种变化与应力相比是个小量), 可简化为平面应变问题。采用岩石力学

收稿日期:2008-11-26;改回日期:2009-03-10

作者简介:陈朝伟(1979—),男,辽宁葫芦岛人,2001年毕业于湖南大学工程力学专业,2007年获北京大学固体地球物理学专业博士学位,现为中国石油集团钻井工程技术研究院博士后,从事微小井眼钻井技术和钻井岩石力学的研究。

联系电话:(010)52781742

常用的压应力为正、拉应力为负的符号约定,井壁围岩的受力模型如图 1 所示。

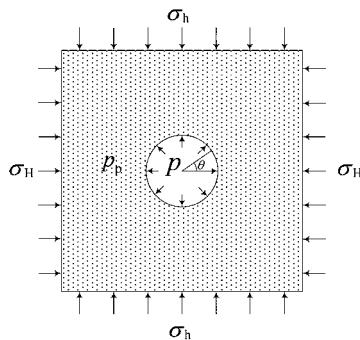


图 1 井壁围岩受力模型

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<sup>[3]</sup>:

$$\sigma'_r = p - \alpha p_p \quad (2)$$

$$\sigma'_\theta = -p + (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H + \sigma_h) \cos 2\theta - \alpha p_p \quad (3)$$

$$\sigma'_z = \nu [(\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H + \sigma_h) \cos 2\theta] - \alpha p_p \quad (4)$$

式中,  $\sigma'_r$ 、 $\sigma'_\theta$  和  $\sigma'_z$  分别为径向、环向和垂向的有效应力, MPa;  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  分别为水平最大和最小地应力, MPa;  $p_p$  为地层孔隙压力, MPa;  $p$  为钻井液液柱压力, MPa;  $\nu$  为岩石的泊松比, 无量纲;  $\theta$  为研究点矢径与水平最大主应力之间的夹角, (°);  $\alpha$  为有效应力系数(Biot 系数), 无量纲。

石油工程界普遍认为,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强度,从而产生剪切破坏所造成的。这是其力学原因。井壁围岩的应力状态通常由式(2)~(4)给出,而脆性地层的强度准则通常采用 Coulomb 准则,用主应力(有效应力)表示为<sup>[4]</sup>:

$$f = \sigma'_1 - n\sigma'_3 - \sigma_c = 0 \quad (5)$$

式中,  $n$  为岩石单轴抗压和抗拉的强度比,  $n = \sigma_t / \sigma_c$ , 无量纲;  $\sigma_c$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $\sigma_t$  为岩石单轴抗拉强度, MPa;  $\sigma'_1$  为最大主应力, MPa;  $\sigma'_3$  为最小主应力, MPa。

一般情况下,井壁易发生沿周向(在  $r\theta$  平面内)的剪切破坏,这时应力分量  $\sigma'_r$  是最小主应力  $\sigma'_3$ , 而应力分量  $\sigma'_\theta$  是最大主应力  $\sigma'_1$ 。将式(2)和(3)代入式(5),得  $\theta$  的函数:

$$f(\theta) = -(n+1)p + (\sigma_H + \sigma_h) - \sigma_c - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta + (n-1)\alpha p_p = 0 \quad (6)$$

在  $\theta = \pi/2$  处,函数  $f(\theta)$  取得最大值,即在最小主压应力方向,  $f(\theta)$  首先达到零值,易发生破坏。由  $f(\pi/2) = 0$ , 得临界钻井液液柱压力(坍塌压力)为:

$$\rho_m = \frac{1}{(n+1)} [3\sigma_H - \sigma_h + (n-1)\alpha p_p - \sigma_c] \quad (7)$$

如果用  $H$  表示井深,由式(7)得:

$$\rho_m = \frac{1}{(n+1)gH} [3\sigma_H - \sigma_h + (n-1)\alpha p_p - \sigma_c] \quad (8)$$

式中,  $\rho_m$  为临界钻井液密度, kg/L;  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>。

一般认为,弹性模量随围压增大而增大,因此,需要对式(8)进行修正,修正结果如下<sup>[3]</sup>:

$$\rho_m = \frac{1}{(n+\eta)gH} [\eta(3\sigma_H - \sigma_h) + (n-1)\alpha p_p - \sigma_c] \quad (9)$$

式中,  $\eta$  为修正系数,一般取  $\eta = 0.95$ 。

式(9)与文献[3]中式(3-20)本质是相同的,只是文献[3]采用了内聚力和摩擦角两个参数,而式(9)采用了单轴压缩强度和应力比两个参数,这样更改的目的是方便下面的应用。

在式(9)中,  $\sigma_c$  为井壁处的岩石强度,在岩石介质均匀且无裂缝或缺陷的条件下,岩样的强度和岩样的尺寸无关,普遍的做法是将井壁处岩石的强度取为岩心的强度。若考虑岩石的尺寸效应,井壁处的岩石强度是与井眼直径相关的,因为式(1)满足连续性条件,因此,井壁处的岩石强度即为相应井眼直径的岩样的强度。将式(1)代入式(9)得:

$$\rho_m = \frac{1}{(n+\eta)gH} [\eta(3\sigma_H - \sigma_h) + (n-1)\alpha p_p] - \frac{\sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m) \exp(-\beta_c D)}{(n+\eta)gH} \quad (10)$$

式(10)即为临界钻井液密度和井眼直径的关系式。

当井眼直径减小时,临界钻井液密度降低,反之则增大。需要说明的是,这里假设  $n$  不具有尺寸效应,或者说抗拉强度和抗压强度具有相同的尺寸效应。

以山西沁水盆地的煤层为例,井深  $H = 500$  m, 水平最大地应力  $\sigma_H = 14.7$  MPa, 最小地应力  $\sigma_h = 8.7$  MPa, 地层压力  $p_p = 4.6$  MPa,  $\alpha$  取为 1, 煤的强度尺寸效应参数  $\sigma_m = 4.679$ ,  $\sigma_0 = 38.942$ ,  $\beta_c = 0.075$ <sup>[7]</sup>, 抗压抗拉强度比  $n = 32.8$ <sup>[8]</sup>。利用式(10)做出了临界钻井液密度随井眼尺寸的关系曲线,如图 2 所示。由图 2 可见,小井眼钻井时,临界钻井液密度降低 1%~9%;微小井眼钻井时,临界钻井液密度降低 9% 以上。

### 3 破裂压力的尺寸效应

在多数情况下,地层破裂压力所产生的裂缝是

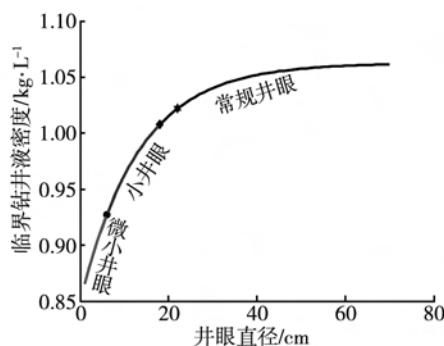


图2 临界钻井液密度和井眼直径的关系曲线

垂直的,引起井壁破坏的主要原因是井壁上有效环向应力由压缩变成拉伸,并超过地层的抗拉强度。井壁上有效环向应力由式(3)给出,在 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi$ 时,由式(3)所确定的 $\sigma'_\theta$ 取得最小值,即在最大地应力方向地层首先发生破裂,将 $\theta=0$ 代入式(3)得:

$$\sigma'_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H - p - \alpha p_p \quad (11)$$

地层发生破裂的条件是:

$$\sigma'_\theta = 3\sigma_h - \sigma_H - p - \alpha p_p = -\sigma_t \quad (12)$$

由式(12)整理可得破裂压力为:

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H - \alpha p_p + \sigma_t \quad (13)$$

由式(1)、(13)及关系式 $n = \sigma_c / \sigma_t$ 可得:

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H - \alpha p_p + \frac{\sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m) \exp(-\beta_c D)}{n} \quad (14)$$

式(14)给出了破裂压力与井眼直径的关系。

用 $H$ 表示井深, $g$ 表示重力加速度,式(14)又可写为:

$$\rho_f = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - \alpha p_p + \sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m) \exp(-\beta_c D)}{ngH} \quad (15)$$

式(15)给出了破裂压力当量密度和井眼直径的关系。

由式(15)可知,当井眼直径减小时,破裂压力所对应的钻井液密度增大;反之,则减小。

取与坍塌压力实例计算相同的数据,利用式(15)可得破裂压力当量密度随井眼尺寸的关系曲线,见图3。由图3可见,小井眼钻井时,破裂压力当量密度增加1%~7%。微小井眼钻井时,将增加7%以上。综合起来,如果以坍塌压力和破裂压力作为钻井液密度设计的窗口,那么采用小井眼或微小井眼钻井时,安全窗口的范围比常规井眼钻井的要大。

## 4 结论与认识

1)在岩石强度尺寸效应经验公式的基础上,初步探讨了小井眼和微小井眼井壁稳定的特点:一般

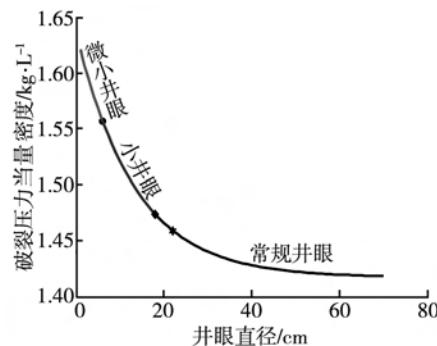


图3 破裂压力当量密度和井眼直径的关系曲线

情况下,当井眼尺寸减小时,坍塌压力减小,破裂压力增大。

2)实例分析表明,小井眼钻井的坍塌压力所对应的钻井液密度比常规井眼钻井低1%~9%;破裂压力所对应的钻井液密度比常规井眼钻井高1%~7%。微小井眼钻井的上述两个密度比常规井眼钻井分别低9%和高7%以上。换言之,小井眼和微小井眼钻井的安全密度窗口范围更大。

3)岩体通常处于三向应力状态下,因而探讨三向应力状态下岩石强度的尺寸效应才更有实际意义,但目前关于围压作用下岩石尺寸效应的试验研究甚少。坍塌压力一般要考虑钻井液的作用,特别是泥页岩的水化作用,目前水化作用受井径影响的研究还很少。此外,除了岩石强度,其他的力学参数包括弹性模量、泊松比等都具有尺寸效应,现有资料也很少。因此,需要开展多方面的研究工作。

## 参 考 文 献

- [1] 刘硕琼,谭平,张汉林,等. 小井眼钻井技术[M]. 北京:石油工业出版社,2005.
- [2] Albright J, Dreesen D, Anderson D, et al. Road map for a 5000-ft microborehole [EB/OL]. [2008-11-25]. <http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/microhole/microholeroadmap.pdf>.
- [3] 邓金根,张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998:18-22.
- [4] Goodman R E. Introduction to rock mechanics[M]. 2nd ed. New York:John Wiley & Sons Inc,1985.
- [5] Haimson B C, Herrick C G. Borehole breakouts and in-situ stress: proceedings of the 12th annual energy-sources technology conference and exhibition, Houston, January 22-25, 1989 [C].
- [6] 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.
- [7] 刘宝琛,张家生,杜奇中,等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(6):611-614.
- [8] 盖召平,苏永华. 沉积岩体力学理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006.

[审稿 鄢捷年]

# Wellbore Stability Analysis Considering Rock Size Effects

Chen Zhaowei Zhou Yingcao Shen Ruichen Zhao Qing Liu Yushi Liu Bingshan

(Drilling Engineering & Technology Research Institute, CNPC, Beijing, 100195, China)

**Abstract:** Wellbore stability of slim and micro holes was discussed preliminarily in terms of rock size effects. In general, the collapse pressure decreases and the fracture pressure increases with the decrease of wellbore size. The analysis shows that the drilling fluid density corresponding to collapse pressure for slim borehole is 1% to 9% less than that of conventional drilling, and the equivalent fracture pressure density is 1% to 7% larger than that of conventional drilling. For micro-borehole drilling, it is 9% less and 7% higher than that of conventional drilling in collapse pressure and fracture pressure. In other words, safe mud density window for slim borehole and micro-borehole drilling is broadened.

**Key words:** size effect; hole stabilization; rock strength; slim hole

## 欢迎订阅 2009 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,经国家科委批准,1979 年在全国发行,1988 年对国内外公开发行。她是我国石油天然气钻井方面历史悠久的综合技术性刊物,深得国内外读者的厚爱和钻井工程界的好评。她是中文核心期刊和历年全国科技论文统计源刊,被《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录,被美国《石油文摘》等数据库大量录用,同时进入国际最大联机检索系统 DIALOG、国际第二大联机检索系统 ORBIT 以及 Ulrich 国际期刊指南数据库。1996 年加入《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统,1999 年加入 ChinaInfo 网络信息资源系统《电子期刊》,从而为中文钻井论文进入世界信息高速公路架起一座桥梁。2001 年入选《中国核心期刊(遴选)数据库》,成为评价国内期刊技术、学术水平的主要刊源之一。

本刊选题注重指导性、先进性和适用性,坚持理论与实践相结合,以多刊快刊应用性文章为特色。主要报道国内石油钻探工程(包括钻井、钻井液、固井、完井、开采等专业)以及钻探机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油钻探技术发展的水平和动向。栏目包括:教授专家专栏、钻井与完井、固井与泥浆、工具与设备、试井与开采、管理与发展、动态与信息。适合于石油、海洋、地矿行业广大钻井工程技术人员、高等院校师生和经营管理者阅读。

本刊自 1993 年开办彩色广告以来,成效显著,已成为石油、海洋、地矿、机电、化工、轻工、冶金、煤炭、军工、建材、信息等行业科技人员联系的纽带、科研人员交流信息的园地和高校师生了解现场的益友。本刊广告刊出及时,收费合理,采用彩色桌面系统制作高精度彩页与插页。欢迎随时联系广告业务。

本刊逢单月末出版。2009 年每期定价 12 元,全年 6 期共 72 元。自办发行,邮汇与电汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅。订阅办法:

1. 银行汇款请寄:山东省德州市建行交通支行,账号 37001842901050002128,户名“中国石油化工股份有限公司德州石油钻井研究所”,并注明“期刊”字样。

2. 邮局汇款请寄:山东省德州市东风东路 35 号石油钻井研究所编辑部(邮编 253005,电话:0534-2670163,2670121,E-mail:syzt@vip.163.com,传真:0534-2622468,<http://syzt.chinajournal.net.cn>)。

《石油钻探技术》编辑部

## 本刊入编多种全文数据库系统致作者

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》全文数据库系统、《ChinaInfo 网络信息资源系统电子期刊》及《中国石油文摘》全文数据库。作者稿件一经录用,将同时被上述文献信息系统全文收录,如作者不同意收录,请在向本刊投稿时提出声明,否则视为同意收录。本刊按国家规定计付稿酬,所付稿酬包含刊物内容入盘上网服务报酬(不再另付)。

《石油钻探技术》编辑部