

页岩储层微小井眼钻井坍塌压力计算方法

袁俊亮¹, 邓金根¹, 李大华², 程礼军², 闫伟¹, 胡连波¹, 林海¹

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 重庆市国土资源和房屋管理局, 重庆 400042

摘要 中国页岩储层钻探方面处于起步阶段, 钻井过程中复杂情况频发, 井壁坍塌问题严重。借鉴北美地区页岩气钻井经验, 对比中国四川盆地与北美 Haynesville 的页岩气水平井井身结构, 发现随井眼尺寸减小, 钻井复杂情况有所降低。研究过程中, 结合岩石强度的尺寸效应理论, 比较不同强度尺寸模型的优缺点, 优选 Vutukuri 模型分析微小井眼井壁围岩的强度变化规律, 并根据 McLamore 各向异性破坏准则确定岩石单轴抗压强度随主应力与层理面法向之间夹角的关系, 以此作为页岩储层强度准则; 根据定向井坍塌压力计算方法分析井周应力状态, 结合尺寸效应与强度准则, 分别得出标准井眼和微小井眼在层理性地层中的坍塌压力随井眼轨迹的变化规律, 同时探究了固定井眼方位下的坍塌压力随井斜角变化规律。对比不同井斜角下两者的差距, 结果表明, 不论直井或定向井, 采用微小井眼均能显著降低钻井坍塌压力, 降低幅度约为 10%, 研究结论揭示了小井眼减少钻井复杂的内在原因。

关键词 页岩气; 微小井眼; 坍塌压力; 尺寸效应

中图分类号 TE52

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.07.011

Calculation of Micro-hole Collapse Pressure in Gas Shale

YUAN Junliang¹, DENG Jingen¹, LI Dahua², CHENG Lijun², YAN Wei¹, HU Lianbo¹, LIN Hai¹

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, Beijing 102249, China
2. Chongqing Municipal Bureau of Land and Resources, Chongqing 400042, China

Abstract Drilling and exploitation of the gas shale is just in an initial stage in China. Drilling practice shows that drilling accidents are frequent, and major cause is wellbore instability. From the experience of the shale-gas drilling in North America, and the casing programs in Sichuan Basin and Haynesville, it is shown that the drilling accidents can be reduced by the decrease of the size of the borehole. Based on the size effect theory, the advantages and disadvantages of different size effect models are compared. The Vutukuri's model is chosen to analyze the micro-borehole surrounding rock strength and the McLamore's anisotropic failure prediction model is adopted to demonstrate the strength anisotropy of the shale. Based on the collapse pressure prediction model, the collapse pressure of a normal borehole and a micro-borehole in the bedding formations are calculated, respectively, furthermore, the trajectory sensitivity analysis is also conducted. The collapse pressure changes with the well declination are also considered. Comparing the difference between the two sides, it is shown that the micro-borehole can significantly reduce the collapse pressure by approximately 10%, therefore reduce the shale-gas drilling accidents.

Keywords shale-gas reservoir; micro-hole; collapse pressure; size effect

0 引言

随着全球能源需求的不断增加, 开发非常规油气已成为未来能源发展的大趋势^[1]。根据 2012 年美国能源信息署的预

测, 全球页岩气风险地质储量为 623 万亿 m³, 可采储量约为 163 万亿 m³[2]。近年来, 页岩气在北美地区得到成功的勘探开发^[3]。我国页岩气钻井情况整体时效偏低, 井塌成为阻碍钻井

收稿日期: 2012-11-14; 修回日期: 2013-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174219); 国家科技重大专项(2011ZX05009-005)

作者简介: 袁俊亮, 博士研究生, 研究方向为页岩气钻井技术, 电子邮箱: yuan6688699@163.com

顺利进行的最大障碍之一。目前新兴的微小井眼钻井技术对防止井壁坍塌十分有利^[9],准确计算微小井眼的坍塌压力有助于抑制页岩井段垮塌。

微小井眼钻井技术的概念是美国 LANL 国家实验室于 1994 年首先提出的。目前对于小井眼和微小井眼的概念还没有统一的定义。按照美国能源部(DOE)的解释,小井眼钻井是指使用井眼尺寸小于 120.7mm 的连续管进行的钻井技术^[5];根据刘硕琼^[6]的研究,井眼直径 $R \leq 171.78\text{mm}$ 的钻井为小井眼钻井,直径 $R \leq 60.3\text{mm}$ 的钻井为微小井眼钻井。

1 页岩气钻井井身结构

北美地区页岩气井的井身结构参数(表 1)显示,各开次的井眼尺寸均比常规开发井的尺寸小 1~2 个等级,例如一般油藏储层段井眼采用 215.9mm 钻头完钻,而 Haynesville 页岩的储层段采用 171.45mm 钻头^[7],可见小井眼钻井具有独到的优势,主要体现在节省管材和钻井液用量,有利于降低钻井复杂发生的概率,同时提高了固井安全性。

表 1 北美 Haynesville 页岩井身结构参数
Table 1 Casing program of Haynesville shale
in North America

井号	开次	钻头/mm	井深/m	套管/mm	下深/m
Haynesville	1	342.9	82.16	273.05	768
	2	273.05	883.78	193.675	3108
	3	171.45	3436	127	5151

在中国四川盆地已经完钻多口页岩气水平井,其中绝大多数仍然采用常规的“三开三完”井身结构,如彭页 HF-1 井、威 201-H1 井、昭通 YSH1-1 井,其井身结构参数如表 2 所示^[8-10]。

表 2 四川盆地部分页岩气水平井井身结构参数
Table 2 Casing program of shale gas horizontal wells in
Sichuan Basin

井号	开次	钻头/mm	井深/m	套管/mm	下深/m
彭页 HF-1	1	444.5	82.16	339.725	86.16
	2	311.15	883.78	244.475	889.78
	3	215.9	3436	177.8	3446.15
威 201-H1	1	444.5	47.79	339.725	47
	2	311.15	504	238.125	502.79
	3	215.9	2750	177.8	2823.48
昭通 YSH1-1	1	444.5	151	339.725	150
	2	311.15	1520	244.475	1522
	3	215.9	3252	177.8	3254

与北美钻井情况相比,中国页岩气钻井垮塌与井眼尺寸过大有关系。井眼尺寸对井壁稳定性的影响此前已有研究。1989 年, Haimson^[11]通过对 Alabama 石灰石进行实验,提出直

径小于 6cm 的井眼较稳定;2006 年,张哲等^[17]运用数值手段研究了煤岩地层水平井的尺寸效应,指出井眼尺寸减小对维持井壁稳定较为有利;2009 年,陈朝伟等^[4]在前人经验公式基础上,研究了考虑岩石尺寸效应的井壁稳定性,以上研究都是基于均质石灰岩或煤岩进行的,研究对象尺寸在 20~120cm 之间,远大于微小井眼井壁围岩的尺寸。

2 微小井眼井壁围岩强度

沉积岩由于成岩前后亿万年地质构造及风化作用,在内部形成孔隙、多重微裂缝和各种缺陷,岩石的力学特性受到巨大影响。体积较大的岩体由于包含较多的裂缝,因此较容易发生破坏;而体积较小的岩样所含裂缝较少,表现出的强度较高,即所谓的尺寸效应。

Jeager 和 Cook^[12]首次建立了岩石强度与岩样体积的经验关系式,结果表明,该方法在井壁围岩体积较大时岩体强度趋近于 0,明显与实际不符。刘宝琛院士^[13]总结了国内外石灰岩及煤岩等 7 类岩石强度尺寸效应的实验结果,整理回归出经验公式。该方法仅考虑了一维方向上岩样的尺寸,未考虑长度与直径的比值,假如岩芯长度 L 一定,而直径 D 变化,表现出的强度应该有所不同。杨圣奇等^[18]得出岩石强度尺寸效应的根源在于端部摩擦效应而不是材料的非均质性,并提出了大理石材料的尺寸效应理论模型。

Vutukuri^[14]通过研究立方体试件的抗压强度,建立了基本能够符合煤及大多数岩性的强度与尺寸关系:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} [0.778 + 0.222(L/D)^{-1}] \quad (1)$$

式中, L 为岩样长度, cm; D 为岩样直径, cm; σ_c 为任意尺寸的岩样强度, MPa; σ_{c0} 为 $L/D=1$ 时的岩样强度, MPa。Vutukuri 模型的尺寸效应如图 1 所示。

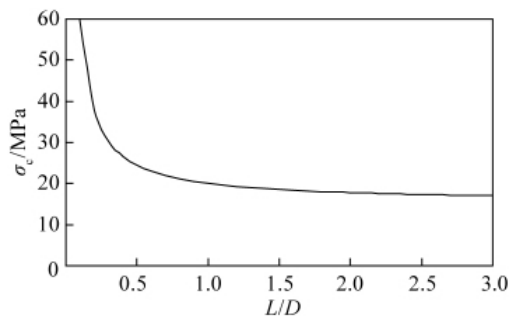


图 1 岩石抗压强度尺寸效应

Fig. 1 Size effect for compression strength of rock

假设微小井眼尺寸 $R'=60.3\text{mm}$, 与标准 215.9mm 井眼相比,岩石的抗压强度应根据式(1)进行校正, $R'/R=0.28$,代入式(1)后微小井眼围岩强度约为标准井眼围岩强度的 1.5 倍。对于微小井眼井壁稳定性,陈朝伟等^[4]曾针对均质各向同性地层进行研究,但页岩具有层理性,其单轴抗压强度是主应力 σ_1 方向与层理面法向之间夹角 β 的函数, β 为 45° 左右时,页岩容易沿层理面剪切滑移,此时强度最低。在垂直于层

理面和平行于层理面的情况下页岩强度最高。页岩强度随夹角 β 的变化规律如图 2 所示。

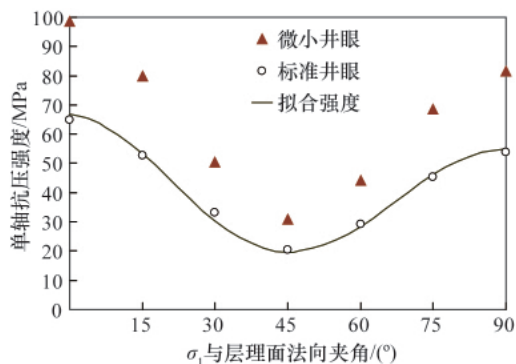


图 2 页岩强度随 β 的变化规律

Fig. 2 Compression strength vs the angle between σ_1 and the bedding plane normal

3 坍塌压力计算方法

研究定向井井壁稳定性问题一般从井周应力状态出发。结合页岩强度准则,当应力状态超过强度包络线时,认为井壁处于坍塌的临界状态,此时的泥浆密度为坍塌压力当量泥浆密度^[15]。井眼钻开后围岩的应力平衡方程为

$$\sigma_{ij} + f_i = 0 \quad (2)$$

式中, σ_{ij} 为围岩所受应力分量,根据 Biot 有效应力理论^[16],围岩所受到的有效应力分量为 $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P_p \delta_{ij}$; f_i 为围岩所受体积力; P_p 为孔隙压力; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; α 为有效应力系数。

井眼钻开前,井壁围岩在原始地应力作用下保持平衡,相应的初始应力状态为

$$\sigma = M \begin{bmatrix} \sigma_H & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_V \end{bmatrix} M^T \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos\nu\cos\omega & \cos\nu\sin\omega & -\sin\omega \\ -\sin\omega & \cos\omega & 0 \\ \sin\nu\cos\omega & \sin\nu\sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, σ 为坐标转换后的地应力分量; σ_H 、 σ_h 、 σ_V 分别为水平最大、水平最小和上覆岩层地应力,MPa; M 为地应力坐标系与井眼坐标系之间的转换矩阵,是井斜角 ν 、方位角与水平最大地应力方位之间夹角 ω 的函数。

在线性小变形情况下,岩石应变-位移关系的几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5)$$

式中, ε_{ij} 为井周岩石应变分量; $u_{i,j}$ 和 $u_{j,i}$ 均为位移分量。

描述页岩的应力-应变本构方程是在层理面局部坐标系下定义的,需要转换到井眼坐标系下,转换关系为

$$F = qF = q^T \quad (6)$$

井眼坐标系下,页岩的本构方程为

$$\sigma'_{ij} = F \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

式中, F 为井眼坐标系下的弹性矩阵, F_{\equiv} 为层理面局部坐标系下的弹性矩阵, q 为变换矩阵。

式(1)~式(7)共同构成了定向井井周应力状态的计算模型,结合井壁围岩强度准则,当应力状态超过强度包络线时,井壁处于坍塌的临界状态。

取地应力参数如下:上覆岩层压力为 2.05g/cm^3 ,水平最大地应力为 1.9g/cm^3 ,方位为北偏东 150° (N150°E),水平最小地应力为 1.8g/cm^3 ,地层埋深 3000m。则页岩地层中,标准井眼与微小井眼两种情况下的坍塌压力随井斜角、方位角变化规律如图 3 和图 4 所示,沿水平最小地应力方向北偏东 60° (N60°E)钻进的定向井,坍塌压力变化规律如图 5 所示。

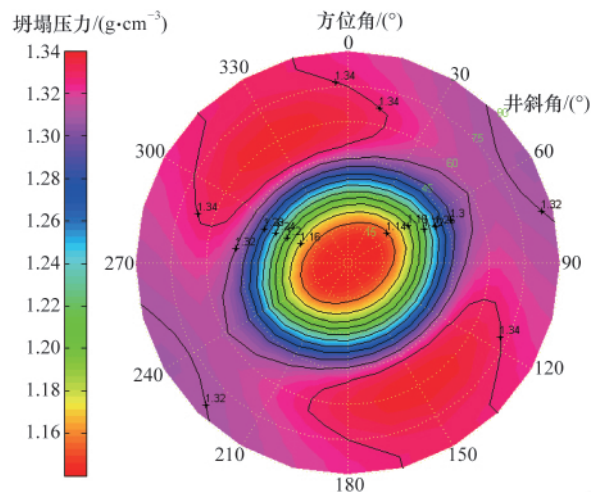


图 3 常规井眼坍塌压力随井斜角-方位角变化规律

Fig. 3 Trajectory sensitivity analysis for collapse pressure in conventional borehole

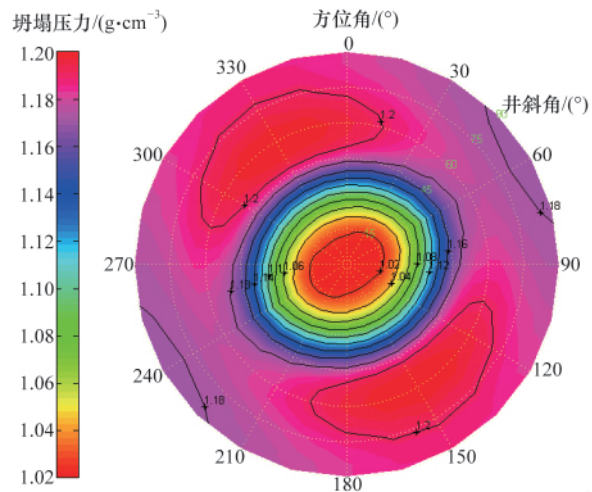


图 4 微小井眼坍塌压力随井斜角-方位角变化规律

Fig. 4 Trajectory sensitivity analysis for collapse pressure in micro-borehole

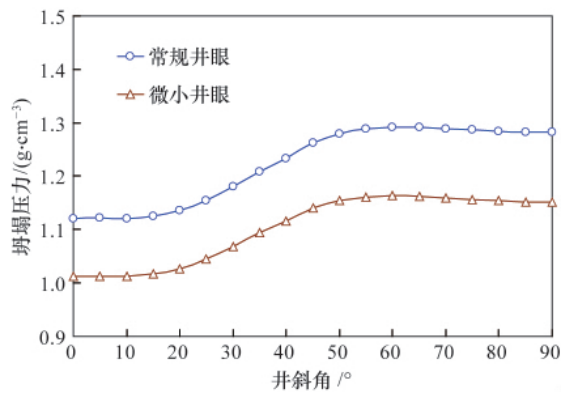


图5 不同井斜角下微小井眼与常规井眼坍塌压力(N60°E)

Fig. 5 Collapse pressures of conventional and micro-boreholes (N60°E)

图3与图4表明,在页岩地层钻进定向井,坍塌压力随井眼轨迹的敏感性较高。当井斜角大于45°时,坍塌压力将大幅上升,沿不同方位钻进的定向井上升幅度不同,沿水平最大地应力方位钻进时上升幅度最高。图5表明,井眼尺寸对坍塌压力也有较大影响,不论是直井还是水平井,微小井眼的坍塌压力都明显小于常规井眼。

4 结论

(1) 北美地区的页岩气钻井经验表明,井眼尺寸越小越有利于维持井壁稳定,微小井眼钻井对减少页岩气钻井过程中的井下复杂情况具有较大意义。

(2) 在层理性地层钻定向井,坍塌压力随井眼轨迹的变化较为敏感。当井斜角超过45°后,坍塌压力大幅上升;沿不同方位钻井,敏感性有所不同。

(3) 与常规井眼相比,微小井眼钻井的坍塌压力显著降低,降低幅度约为10%,随着井斜角的增加,坍塌压力降低幅度基本不变。

参考文献 (References)

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [2] EIA. Shale gas in the United States: recent developments and outlook [EB/OL]. Washington, DC: US Energy Information Administration, 2011 [2011-04-08]. <http://www.eia.gov/reports>.
- [3] 杨振恒,李志明,王果寿,等.北美典型页岩气藏岩石学特征、沉积环境和沉积模式及启示[J].地质科技情报,2010,29(6):44-47.
Yang Zhenheng, Li Zhiguo, Wang Gguoshou, et al. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6): 44-47.
- [4] 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.
Chen Zhaowei, Zhou Yingcao, Shen Ruichen, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 38-41.
- [5] DOE. DOE to support "Small Footprint" technologies for oil and gas fields[EB/OL]. Washington, DC: US Department of Energy, 2004 [2004-04-12]. <http://www.fossil.energy.gov>.
- [6] 刘碩京,谭平,张汉林,等.小井眼钻井技术[M].北京:石油工业出版社,2005.
Liu Shuoqiong, Tan Ping, Zhang Hanlin, et al. Micro-drilling techniques [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [7] 唐代绪,赵金海,王华,等.美国Barnett页岩气开发中应用的钻井工程技术分析与启示[J].中外能源,2011,16(4):47-52.
Tang Ddaixu, Zhao Jinhai, Wang Hua, et al. Sino-Global Energy, 2011, 16(4): 47-52.
- [8] 王金磊,黑国兴,赵洪学.昭通YSH1-1页岩气水平井钻井完井技术[J].石油钻探技术,2012,40(4):23-27.
Wang Jinlei, Hei Guoxing, Zhao Hongxue. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 23-27.
- [9] 姜政华,童胜宝,丁锦鹤,彭页 HF-1 页岩气水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2012,40(4):28-31.
Jiang Zhenghua, Tong Shengbao, Ding Jinhe. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 28-31.
- [10] 王华平,张铎,张德军,等.威远构造页岩气钻井技术探讨[J].钻采工艺,2012,35(2):9-11.
Wang Huaping, Zhang Duo, Zhang Dejun, et al. Drilling & Production Technology, 2012, 35(2): 9-11.
- [11] Haimson B C, Herrick C G. Borehole breakouts and in-situ stress: Proceedings of the 12th annual energy-sources technology conference and exhibition[C]. Houston, TX: Elsevier Press, 1989.
- [12] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1981: 243-246.
- [13] 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.
Liu Baochen, Zhang Jiasheng, Du Qizhong, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.
- [14] Vutukuri V S, Lama R D, Saluja S S. Hand book on mechanical properties of rocks[M]. Zurich, Switzerland: Translation Technology Publications, 1974: 20-26.
- [15] 邱康,陈勉,金衍.基于统计损伤的井壁坍塌压力模型[J].岩土力学,2011,32(7):2029-2033.
Qiu Kang, Chen Mian, Jin Yan. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2029-2033.
- [16] Fjær E, Holt R M, Horsrud P, et al. Petroleum related rock mechanics [M]. 2nd ed. The Amsterdam, Netherlands: Elsevier Press, 2008: 30-33.
- [17] 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.
Zhang Zhe, Tang Chun'an, Li Lianchong. China Mining Magazine, 2006, 15(9): 55-58.
- [18] 杨圣奇,苏承东,徐卫亚.岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J].工程力学,2005,22(4):112-117.
Yang Shengqi, Su Chengdong, Xu Weiya. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112-117.

(责任编辑 张玉肖,王媛媛)