

深部煤层力学参数反演和气体钻井井壁稳定性*

杨旭¹,石祥超^{1,2},孟英峰¹,李皋¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,西南石油大学,成都 610500; 2. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川大学,成都 610065)

摘 要:如何确定深部煤层的地质力学参数是气体钻井井壁稳定评价的关键。基于量化的地质强度指标 GSI 和 Hoek-Brown 强度准则分析了反演深部煤层地质力学参数的方法,结合 DB1 井氮气钻井,以弹塑性方法分析了侏罗系炭质泥岩和煤层的井壁稳定性。研究表明,塔里木盆地依奇克里克区块侏罗系煤 GSI 介于 45~55,变形模量约在 1 560~2 850 MPa 之间。井眼钻开后炭质泥岩和煤层井周存在塑性区,炭质泥岩层井周塑性区约为 1.37 倍井眼半径,煤层井周塑性区约为 2.07~2.59 倍井眼半径。塑性区应力松弛造成围压减小,导致节理岩体抵抗工程扰动的能力减弱。以工程允许塑性半径等于 1.5 倍井眼半径为临界稳定条件,井眼钻开后煤层会出现大面积坍塌失稳,不宜采用气体钻井;工程扰动造成炭质泥岩井眼扩径,扩径后井眼仍能保持稳定。

关键词: 气体钻井;煤层;井壁稳定;Hoek-Brown 准则;地质强度指标

中图分类号:TE21 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)02-0374-07

Estimation of Geomechanical Properties of Deep Coal Bed and Wellbore Stability Analysis for Gas Drilling

Yang Xu¹, Shi Xiangchao^{1,2}, Meng Yingfeng¹, Li Gao¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R. China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Hydraulic and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, P.R. China)

Abstract: How to assess the geomechanical properties of deep coal bed is a key issue for wellbore stability analysis of gas drilling. Geomechanical properties inversion method of deep coal bed is proposed in this work based on the quantitative geological strength index (GSI) and Hoek-Brown strength criterion. The strength and deformation parameters of Jurassic coal were estimated. Taking nitrogen drilling well DB1 in Yiqikelike region as an example, wellbore stabilities of Jurassic carbonaceous mudstone and coal bed were investigated with FLAC. Analysis indicates that GSI of coal bed at Yiqikelike region in Tarim Basin ranges from 45 to 55, and deformation modulus is from 1 560 MPa to 2 850 MPa. The results also reveal that carbonaceous mudstone and coal bed exhibit elastoplastic behavior during gas drilling. The plastic zone radius of carbonaceous mudstone is about 1.37 times of wellbore radius, while that of coal bed is 2.07 to 2.59 times of wellbore radius. Stress relaxation in the plastic zone is captured, thereby

* 收稿日期:2016-11-02(修改稿)
作者简介:杨旭(1988-),男,四川武胜人,工学硕士,主要从事气体钻井和井壁稳定方面的研究。
E-mail: yangxuzq@sina.com
通讯作者:石祥超(1981-),男,河北清河人,博士,讲师,从事石油工程岩石力学与欠平衡钻井方面的研究工作。
E-mail: sxcdream@163.com
基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLN1421);教育部博士点基金项目(20125121110001);四川省教育厅科技基金(14ZB0060)

leading to a decrease in confining stress, and reducing the anti-disturbance ability of jointed rock mass with respect to excavation. The plastic zone radius of carbonaceous mudstone that results from drilling is less than 1.5 times of wellbore radius, which shows a stable hole. While that of coal bed is far more than the plastic radius permitted by project, thus predicting borehole collapse, therefore gas drilling should not be used. Borehole enlargement of carbonaceous mudstone may be encountered as a result of engineering disturbance, and the borehole can remain stable during gas drilling.

Keywords: gas drilling; coal bed; wellbore stability; Hoek-Brown criterion; geological strength index(GSI)

0 引言

气体钻井在深部地层提速和致密砂岩储层保护领域具有显著优势。由于地质认识的局限性和不确定性,塔里盆地依奇克里克区块 DB1 井和 DB101 井在实施氮气钻井时突然钻遇侏罗系煤层和炭质泥岩层时遇阻卡钻现象突出,严重制约氮气钻井的进一步实施。

煤中割理、裂隙发育,强度低、脆性大,非连续性明显,在钻井过程中极易破碎坍塌^[1]。目前,国内外学者主要采用 Hoek-Brown 准则近似描述煤力学性质的非线性。Gentzis 等^[2]指出煤的强度参数具有尺寸效应且与围压有关。Desiman 等^[3-4]研究指出这种尺寸效应和围压效应与煤的节理损伤有关,认为在钻井过程中煤层近井壁存在一个塑性屈服区,井壁可能随钻井的进行而坍塌。Hawkes 等^[5]认为塑性屈服区小于 1.5 倍井眼半径时井眼能够保持稳定。在此基础上,张立松等^[6]采用 Hoek-Brown 准则,提出了基于工程允许塑性区的深部煤层坍塌压力计算方法。这些研究多集中于泥浆钻井条件下的煤层井壁稳定性,由于深部煤层地质力学参数原位测试困难且费用高,同时,室内岩石实验受煤层结构效应和尺寸效应的影响,测试结果离散性强,与实际相差甚远^[7]。为此,引入量化的地质强度指标 GSI 和 Hoek-Brown 强度准则,基于室内实验反演了该区侏罗系煤的强度和变形参数。在此基础上,考虑到深部煤层受高地应力作用,同时,气体钻井井眼支撑作用弱,井周产生塑性区的可能性大,结合 DB1 井氮气钻井实例,采用弹塑性方法分析了侏罗系炭质泥岩和煤的井壁稳定性。

1 煤岩体力学性质描述

1.1 GSI 岩体量化分级

煤中发育有近似垂直的面割理和端割理,端割

理发育在面割理之间,割理通常与层理正交或陡角相交,把煤岩体切割成一个个不连续的斜方体小块,破坏了煤岩体的完整性,使其易破碎坍塌,同时,造成其力学行为表现出非线性^[4]。Hoek-Brown 强度准则是在 Griffith 脆性断裂理论的基础上,基于岩石室内三轴实验和岩体现场试验提出的非线性准则。该准则不仅适用于结构完整的均质岩体,而且适用于破碎岩体和各向异性的非均质岩体^[8]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_{RM} \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s_{RM} \right) a_{RM} \quad (1)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为岩体破坏时的最大和最小主应力; σ_{ci} 为完整岩体的单轴抗压强度; m_{RM} 为岩体的软硬程度; s_{RM} 为岩体破碎程度; a_{RM} 为岩体特性系数。

岩体的 Hoek-Brown 参数通过 GSI 和扰动系数 D 计算:

$$m_{RM} = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

$$s_{RM} = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3)$$

$$a_{RM} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

完整岩体的单轴抗压强度 σ_{ci} 和软硬程度 m_i 可由岩样的三轴实验得到,但由于煤中节理裂隙发育,节理间距与实验岩样的尺寸通常具有相同的数量级,因此难以通过室内实验直接得到完整煤岩体的 σ_{ci} 和 m_i ^[3]。Deisman 等^[4]提出了一种基于实验煤岩样反演完整煤岩体 Hoek-Brown 参数的方法,即首先确定实验煤岩样的 GSI 值,以拟合得到 σ_{ci} 、 m_{RM} 、 s_{RM} 和 a_{RM} ,然后反算得到完整煤岩体的 Hoek-Brown 参数。

GSI 岩体分级系统根据岩体结构特征和结构面条件描述确定不同地质条件下的岩体强度。为了减少对经验的依赖并提高 GSI 取值的精确性,

Cai 等^[9]提出通过岩体体积节理数(块体尺寸)和结构面条件因子实现节理岩体结构量化描述:

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3}$$

(5)

式中: V_b 为块体尺寸; s_i 为第 i 组节理的平均间距; γ_i 为节理组夹角。

煤岩体的强度特性与节理连通性密切相关,节理连通系数为^[8]:

$$p_i = \begin{cases} \frac{\bar{l}_i}{L} < L \\ 1 & \bar{l}_i \geq L \end{cases}$$

(6)

式中: p_i 为节理连通系数; \bar{l}_i 为第 i 组节理的累积节理长度; L 为量测区域特征长度。

因此,等效节理间距就表示为:

$$s'_i = \frac{s_i}{\sqrt[3]{p_i}}$$

(7)

由于煤岩体被面割理、端割理和层理近似正交切割,因此,将式(5)简化为:

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sqrt[3]{p_1 p_2 p_3}}$$

(8)

GSI 围岩分级系统通过结构面条件因子定义节理面的粗糙度、湿度和充填情况^[10]:

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_A}$$

(9)

式中: J_c 为结构面条件因子; J_w 为大比例尺波形系数(1~10 m 范围); J_s 为小比例尺光滑系数(1~20 cm 范围); J_A 为节理面蚀变系数。

根据大比例尺波形系数、小比例尺光滑系数和节理面蚀变系数的相应描述查表^[9-10]估计得到 J_w 、 J_s 和 J_A ,然后按式(9)计算结构面条件因子,在此基础上结合岩体体积节理数(块体体积)或节理等效间距由图 1 确定煤岩体的 GSI 值。

1.2 岩体变形模量估计

煤岩体的变形模量与完整煤岩体的变形模量、裂隙间距和裂隙刚度有关,表现出围压效应和尺寸效应。Hoek 等^[7]定义了基于扰动系数 D 和 GSI 的节理岩体变形模量衰减比:

$$E_{RR} = \frac{E_{RM}}{E_i} = 0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp[(60 + 15D - GSI)/11]}$$

(10)

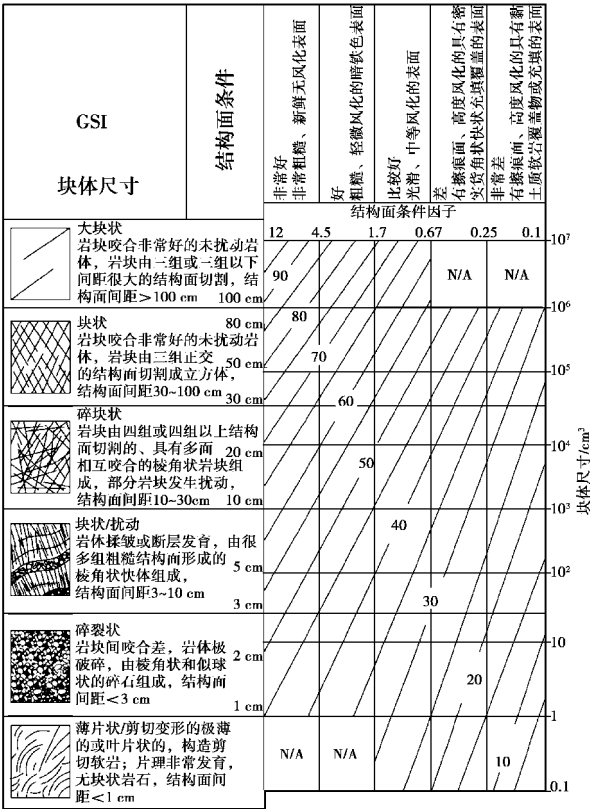


图 1 量化的 GSI 围岩分级系统^[9]

Fig.1 Quantitative GSI rock mass classification system^[9]
式中: E_{RR} 为变形模量衰减比; E_{RM} 为岩体变形模量; E_i 为完整岩体的变形模量。

式(10)中 D 采用以下公式计算^[3-4]:

$$D = \exp(-h\sigma_3)$$

(11)

式中: h 为节理抗扰动系数。

式(11)表示煤岩体变形模量的围压效应或应力松弛对煤岩体变形模量的影响。围压为 0 时扰动系数 D 为 1,当围压增加时,煤的变形模量逐渐增加,围压增大到一定程度时,煤的结构面力学效应消失,其变形模量趋于稳定(D 为 0)。通过拟合实验煤岩样的变形模量与围压的关系得到节理抗扰动系数 h 和完整煤岩体的变形模量 E_i ,然后结合煤岩体的地质强度指标 GSI 求解煤岩体的变形模量。

2 煤岩体力学参数反演

参考孙明波等^[11-13]结合 YX1 井、YS4 井侏罗系煤岩掉块和依奇克里克区块煤矿对侏罗系煤的研究,估计煤的结构面条件因子为 4,面割理间距 6 ± 2 mm(连通系数 0.06~0.12);端割理间距 20 ± 4

mm(连通系数 0.02~0.05)。DB1 井测井资料和录井资料解释表明卡钻井段煤层厚度约为 0.35~1 m。因此,由式(8)计算煤岩块体尺寸介于 125~1 800 cm³,从而由图 1 估计依奇克里克区块侏罗系煤 GSI 在 45~55 之间。

依奇克里克区块侏罗系煤岩样制备时取心困难,部分煤岩样需采用胶进行必要修复^[13],基于实验煤岩样描述,估计其 GSI 为 85。根据孙明波等^[11]测试的煤岩样抗压强度与围压的关系,拟合了 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度参数,如图 2 所示,可知随着围压的增加,煤岩样抗压强度呈非线性增加趋势。

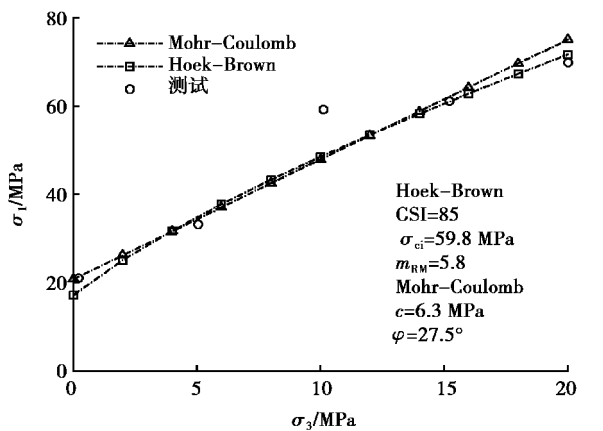


图2 煤岩样拟合的 Hoek-Brown 参数

Fig.2 Fitted Hoek-Brown parameters for coal sample

求得实验煤岩样的 m_{RM} 后,令完整煤岩体的 GSI=100,由式(2)得到侏罗系完整煤岩体的 m_i 为 16.64。根据式(10)和式(11)作煤岩样变形模量和扰动系数与围压的关系,如图 3 所示,从而得到侏罗系完整煤岩体的变形模量为 6 970 MPa。前面估计研究区侏罗系煤岩体的 GSI 介于 45~55,则由式(10)得到煤岩体的变形模量介于 1 560~2 850 MPa。

3 气体钻井井壁稳定评价

井壁稳定线弹性方法认为井周围岩一旦出现剪切破坏就坍塌失稳,而工程实践表明岩石破坏后仍具有一定的承载能力^[14]。由于气体钻井井底压力低,井眼钻开后井壁围岩不可避免会出现塑性区,塑性区能够承受一定的应力并不会立即坍塌,当塑性区受到工程扰动时井眼开始扩径,并形成新的塑性区。如果塑性区较小,井壁围岩扩径垮塌范围有限,井眼能够保持稳定,当塑性区较大时,垮塌

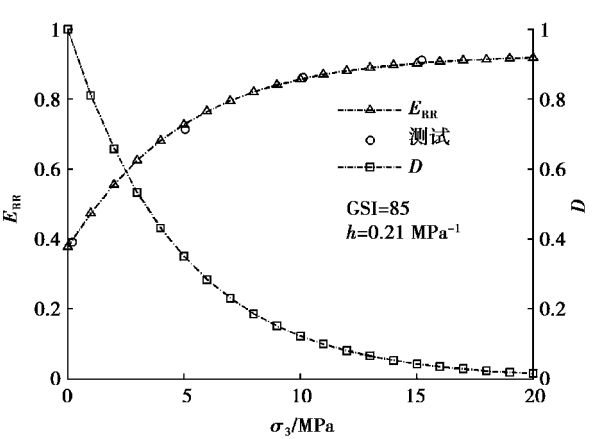


图3 变形模量衰减比和扰动系数与围压的关系
Fig.3 Relationships between deformation modulus, disturbance parameter and confining stress

物多容易堵死钻头和环空。考虑到煤岩体结构面力学效应明显,低围压条件下表现为结构面控制的弹脆性破坏,而高围压条件下表现为块体控制的弹塑性破坏^[6],为了更好地发挥岩体的强度潜力,这里采用弹塑性方法分析气体钻井的井壁稳定性。

以 DB1 井氮气钻井为例,该井采用 165.1 mm 牙轮钻头从井深 5 027 m 开始实时氮气钻井。随钻岩性分析表明 5 219~5 235 m 井段岩性主要为炭质泥岩和煤,在该井段多次出现阻卡现象,同时,解卡后环空返出大量煤粉。钻至井深 5 235.65 m 时,突然出现扭矩异常,立即上提钻具出现阻卡,采取措施后仍未解卡,后替入泥浆结束氮气钻井。这里假设岩体各向同性,考虑对称性取直井 1/4 井眼分析,FLAC 网格如图 4 所示,模型下边界和左边界施加轴棍支撑边界,模型上边界和右边界施加水平应力边界。地应力数据参考文献^[15],水平最大地应力(102.4 MPa)沿 x 轴负方向,水平最小地应力(95.6 MPa)沿 y 轴负方向,井底压力 3 MPa。首先按线弹性方法生成初始应力场,然后实施井眼开挖,以 Hoek-Brown 准则为屈服条件计算塑性破坏区。根据氮气钻井施工 D 取 0.45,由式(2)~(4)计算 m_{RM} 、 s_{RM} 和 a_{RM} 。这里通过拟合得到 H-B 准则表示的炭质泥岩强度参数,如图 5 所示。计算参数如表 1。

表1 模型计算参数

Table 1 Property parameters of simulation model					
岩性	GSI	σ_{ci} /MPa	m_i	E_{RM} /MPa	ν
侏罗系煤	48	59.8	16.64	1890	0.28
炭质泥岩	85	67.72	15.4	8700	0.25

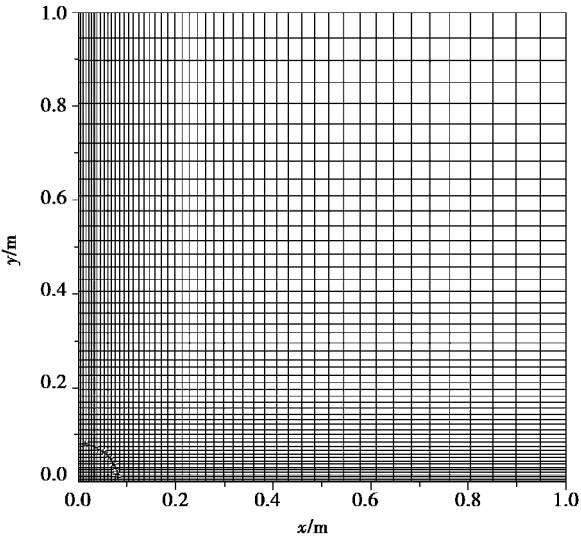


图 4 计算网格

Fig. 4 Computational grid

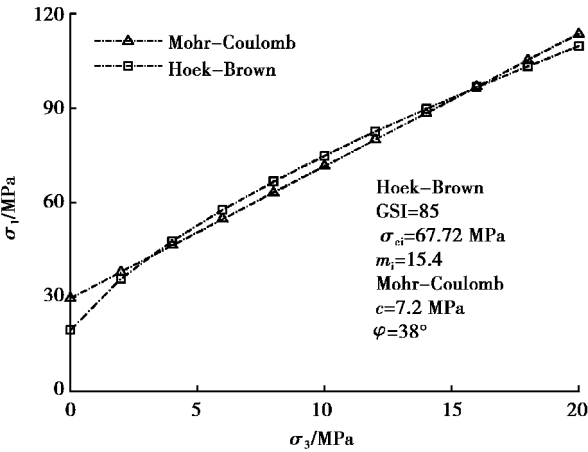


图 5 炭质泥岩拟合的 Hoek-Brown 参数

Fig.5 Fitted Hoek-Brown parameters for carbonaceous mudstone sample

弹塑性方法计算的井周破坏区如图 6 和图 7 所示,炭质泥岩井周破坏区约为 $1.37r_w$,而煤层井周破坏区介于 $2.07r_w \sim 2.59r_w$ 。以塑性区破坏半径等于 $1.5r_w$ 为临界失稳条件,可知钻至炭质泥岩层时存在一定的井眼扩径伴有阻卡现象,但井眼能够保持稳定,而钻至煤层时则会出现井壁围岩大面积坍塌。

由于不考虑煤岩体力学性质各向异性,因此,最小水平地应力方向(y 轴)破坏最严重,这里分析 y 轴方向的周向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r ,如图 8 和图 9 所示。弹塑性分析表明,井眼钻开后近井壁塑性区应力松弛,周向应力和径向应力减小,井壁面附近周向应力减小十分明显且其最大值在井壁附

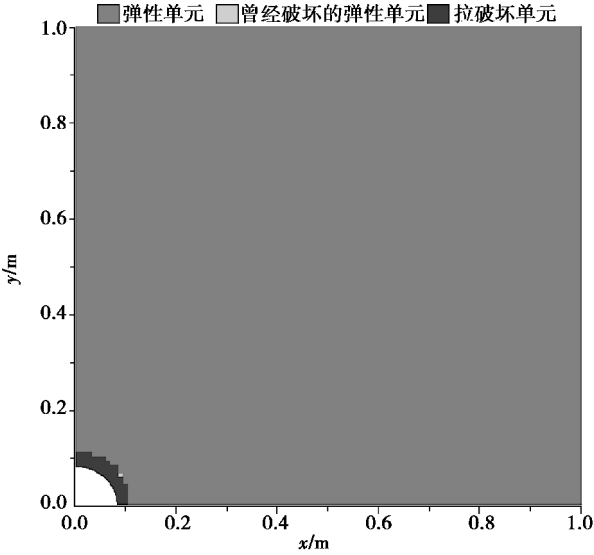


图 6 炭质泥岩破坏区

Fig. 6 Failure area of carbonaceous mudstone

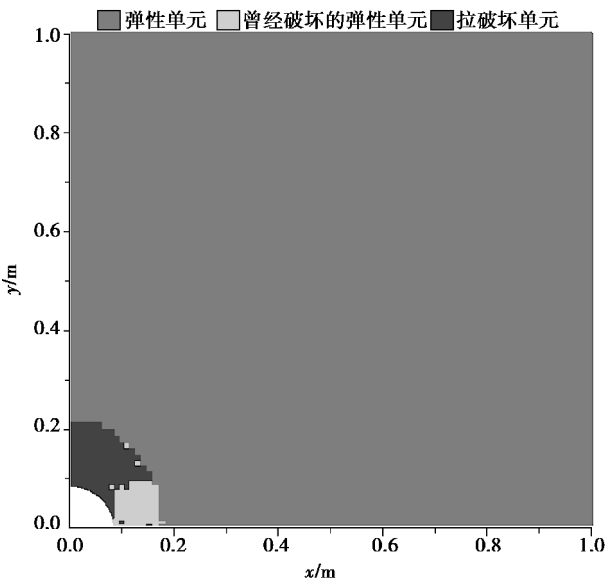


图 7 煤层破坏区

Fig. 7 Failure area of coal seam

近地层。煤层井周破坏区远大于炭质泥岩层井周破坏区,其井周应力松弛程度也远大于炭质泥岩层。

根据式(11)作炭质泥岩和煤层在 y 轴方向的扰动系数,如图 10 所示。炭质泥岩在 y 轴方向的扰动区约为 $1.25r_w$,煤层在 y 轴方向的扰动区约为 $1.46r_w$ 。井周应力松弛造成围压减小,节理岩体破坏的结构面效应增强,井周塑性区围岩抵抗工程扰动的能力减弱。由于煤层和炭质泥岩互层,煤层扩径坍塌造成上部炭质泥岩层失去支撑,易引发上部

塑性区的炭质泥岩大量坍塌,造成恶性卡钻事故。

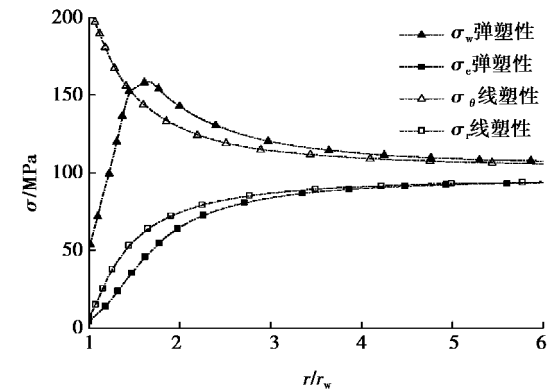


图 8 炭质泥岩 y 轴方向的应力分布
Fig. 8 Stress distribution along y -axis for carbonaceous mudstone

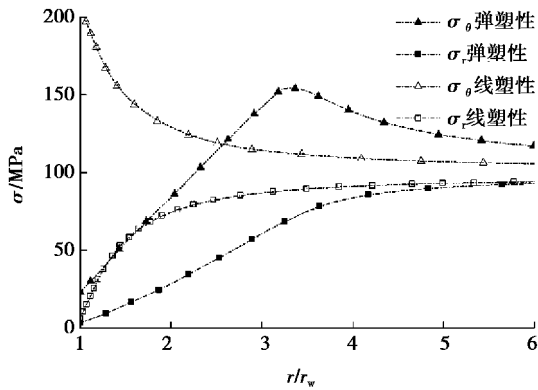


图 9 煤层 y 轴方向的应力分布
Fig. 9 Stress distribution along y -axis for coal bed

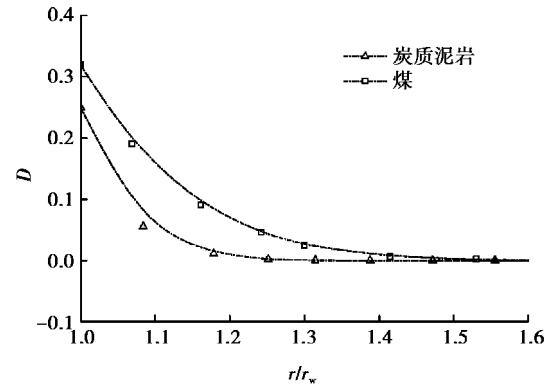


图 10 y 轴方向的扰动系数
Fig. 10 Disturbance parameter distribution along y -axis

井眼扩径后井周塑性区重新分布,炭质泥岩层井眼扩径前是稳定的,假设扰动区围岩全部扩径坍塌,炭质泥岩按圆形井眼扩径率 25% 计算,则扩径后的井眼半径约为 0.1 m。扩径后的井周破坏区如

图 11 所示,可知最大破坏区约为 0.134 m,约为扩径后井眼半径的 1.34 倍,说明炭质泥岩层扩径后井眼是稳定的。

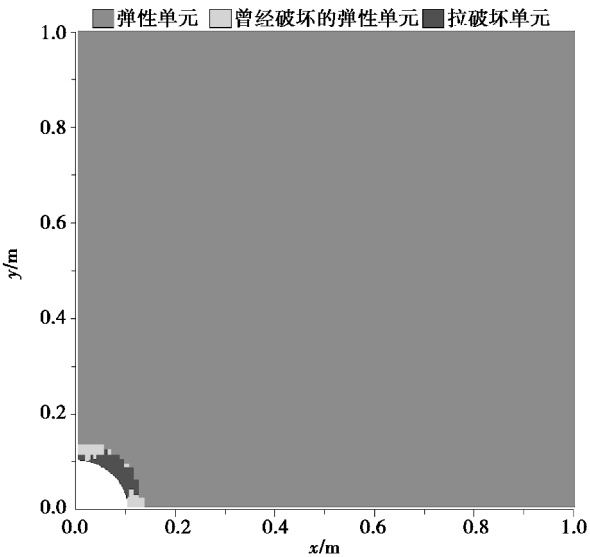


图 11 炭质泥岩层扩径后的破坏区
Fig. 11 Failure area of carbonaceous mudstone after hole enlargement

4 结论

- (1) 基于量化的 GSI 岩体分级系统和 Hoek-Brown 强度准则反演煤岩体的力学参数,综合考虑了节理岩体结构、煤岩块体强度和应力状态等多种因素对岩体强度和变形参数的影响,具有方便、准确和操作性强等优点。
- (2) 基于块体尺寸和结构面条件因子评价了依奇克里克区块侏罗系煤的地质力学参数,表明煤的地质强度指标 GSI 介于 45~55,裂隙发育,强度低,易坍塌破碎。在此基础上,结合室内实验反演了侏罗系煤岩体的强度和变形参数。
- (3) 以塑性破坏区等于 1.5 倍井眼半径为临界稳定条件,DB1 井氮气钻井揭开炭质泥岩层后井眼能够保持稳定;煤层塑性破坏区远大于工程允许塑性区,井眼失稳严重。煤层的扩径坍塌易引发上部炭质泥岩层扩径坍塌,不宜采用气体钻井。

参考文献 (References)

[1] 陈勉,赵海峰,金衍,等. 非连续介质力学模型预测煤层井眼稳定性[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 145-150. (Chen Mian, Zhao Haifeng, Jin Yan, et al. A

- discontinuous medium mechanical model for the sidewall stability prediction of coal beds [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(1): 145-150. (in Chinese))
- [2] Gentzis T, Deisman N, Chalaturnyk R J. A method to predict geomechanical properties and model well stability in horizontal boreholes [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(2): 149-160.
- [3] Deisman N, Mas Ivars D, Darcel C, et al. Empirical and numerical approaches for geomechanical characterization of coal seam reservoirs[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3): 204-212.
- [4] Deisman N, Khajeh M, Chalaturnyk R J. Using geological strength index (GSI) to model uncertainty in rock mass properties of coal for CBM/ECBM reservoir geomechanics [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 112(1): 76-86.
- [5] Hawkes C, Mclellan P. Borehole stability analysis for underbalanced drilling [J]. *Canadian Journal of Petroleum Technology*, 2001, 40(5): 31-38.
- [6] 张立松, 闫相祯, 杨秀娟, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的深部煤层钻井坍塌压力弹塑性分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 85-90. (Zhang Lisong, Yan Xiangzhen, Yang Xiujuan, et al. Elasto-plastic analysis of collapse pressure for deep coal seam drilling based on Hoek-Brown criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 85-90. (in Chinese))
- [7] Hoek E, Diederichs M S. Empirical estimation of rock mass modulus [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(2): 203-215.
- [8] Hoek E, Carranza-Torres C, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition[A]//Proc. NARMS-TAC Conference[C]. Toronto: University of Toronto, 2002: 267-273.
- [9] Cai M, Kaiser P K, Uno H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(1): 3-19.
- [10] 胡盛明, 胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 861-866. (Hu Shengming, Hu Xiuwen. Estimation of rock mass parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown criterion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 861-866. (in Chinese))
- [11] 孙明波, 樊泽霞, 王书琪, 等. 塔里木盆地煤层坍塌机理研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(2): 49-51. (Sun Mingbo, Fan Zexia, Wang Shuqi, et al. Synthetic sloughing mechanism of coal beds in Tarim basin[J]. *Journal of the University of Petroleum (Science & Technology Edition)*, 2004, 28(2): 49-51. (in Chinese))
- [12] 吕开河, 孙明波, 邱正松. 塔里木盆地依奇克里克区块煤层钻井技术研究[J]. *石油学报*, 2006, 27(5): 108-111. (Lü Kaihe, Sun Mingbo, Qiu Zhengsong. Drilling techniques for coal bed in Yiqikelike area of Tarim basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(5): 108-111. (in Chinese))
- [13] 张建国, 程远方, 孙明波. 塔里木煤层坍塌力学机理的实验研究[J]. *石油钻探技术*, 2000, 28(3): 21-23. (Zhang Jianguo, Cheng Yuanfang, Sun Mingbo. Experimental study on sloughing mechanism of coal beds in Tarim oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2000, 28(3): 21-23. (in Chinese))
- [14] 聂臻, 夏柏如, 邹灵战, 等. 气体钻井井壁稳定性模型的建立[J]. *天然气工业*, 2011, 31(6): 71-76. (Nie Zhen, Xia Bairu, Zhou Lingzhan, et al. Modeling of wellbore stability for gas drilling [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(6): 71-76. (in Chinese))
- [15] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南-吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(4): 592-602. (Ju Wei, Hou Guiting, Huang Shaoying, et al. Structural fracture distribution and prediction of the lower Jurassic ahe formation sandstone in the yinan-tuzi area, kuqa depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(4): 592-602. (in Chinese))