

文章编号:0253-9993(2013)01-0085-06

基于 Hoek-Brown 准则的深部煤层钻井坍塌压力弹塑性分析

张立松¹, 闫相祯¹, 杨秀娟¹, 田中兰², 杨恒林²

(1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油集团 钻井工程技术研究院, 北京 100097)

摘要:利用三轴压缩实验确定了沁水盆地平定区块深部煤岩在高围压条件下的弹塑性特征。以 Hoek-Brown 准则为极限平衡条件,提出了基于工程允许塑性区半径的深部煤层井眼坍塌压力弹塑性计算方法,得到控制深部煤层井壁坍塌的主要参数:煤岩地质强度指标 GSI 值、非均匀地应力系数及工程允许塑性区半径。以平定区块 PD-095 井为例,分析了深部煤层坍塌压力弹塑性结果与弹性结果的差别,讨论了坍塌压力弹塑性结果随影响因素的变化规律。结果表明,当工程允许塑性区半径为井眼半径的 1.5 倍时,PD-095 井坍塌压力弹塑性结果较 Hoek-Brown 准则、Mohr-Coulomb 准则弹性结果分别降低 6.52%, 4.66%;随着工程允许塑性区半径的增大、地应力非均匀性的降低,井眼坍塌压力下降;坍塌压力与地质强度指标 GSI 值呈负乘幂函数关系。

关键词:Hoek-Brown 准则;深部煤层;坍塌压力;弹塑性;塑性区半径

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A

Elasto-plastic analysis of collapse pressure for deep coal seam drilling based on Hoek-Brown criterion

ZHANG Li-song¹, YAN Xiang-zhen¹, YANG Xiu-juan¹, TIAN Zhong-lan², YANG Heng-lin²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. Institute of Drilling and Technology, China Petroleum Group, Beijing 100097, China)

Abstract: Elasto-plastic characteristics of deep coal seam at Pingding region in Qinshui Basin was determined under the effect of high confining pressure using triaxial compression test. Taking Hoek-Brown criterion as the limit equilibrium condition, elasto-plastic calculation method of collapse pressure for deep coal seam was derived based on plastic zone radius, and influence factors which control wellbore collapse were obtained, including Geologic Strength Index (GSI), non-uniform stress coefficient and engineering allowable plastic zone radius. Taking CBM well PD-095 in Pingding region as an example, the elasto-plastic results of collapse pressure were compared with elastic results, and the relationship between collapse pressure and influence factors was analyzed. The results show that the elasto-plastic results of collapse pressure decrease 6.52%, 4.66% than the elastic results of Hoek-Brown criterion and Mohr-Coulomb criterion when the plastic zone radius is 1.5 times of wellbore radius; the elasto-plastic results of collapse pressure decrease with the increment of plastic zone radius and the descendent of the stress non-uniform; minus power function relationship between the collapse pressure and the GSI value is presented.

Key words: Hoek-Brown criterion; deep coal seam; collapse pressure; elasto-plastic analysis; plastic zone radius

我国超千米深部煤层气地质资源量,占全国煤层气资源地质总量的 61.2%。2011 年 7 月,我国首个

超千米煤层气开采项目——辽宁省昌图县古榆树镇煤层气勘查开发项目开钻,标志着我国对深部煤层气

收稿日期:2011-12-22 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226706);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05036-001);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11CX04050A)

作者简介:张立松(1982—),男,山东临朐人,讲师,博士。E-mail:lisongzhang1982@163.com

开发的开始。深部煤层气开发方针的确定,将对我国深部煤层钻井井壁坍塌压力预测提出新的技术难点。

目前,关于地层坍塌压力预测大都采用 Mohr-Coulomb 准则弹性模型,即认为井壁一旦出现剪切破坏,就发生坍塌。此种方法固然安全,但计算结果偏大,相对保守。部分学者认识到这个问题,采用弹塑性力学研究井壁坍塌问题。他们认为,在一定密度的泥浆作用下,井眼围岩处于弹塑性状态,在近井壁处产生塑性区,在远场存在弹性区。只有当塑性区受到外力扰动作用时,井壁才出现垮塌现象。相关研究取得了一定的成果,如 Hawkes 等^[1]认为塑性区平均半径不超过 1.5 倍井眼半径时,井眼也能保持稳定。Aadnby 等^[2]提出了井壁稳定性的弹塑性破裂压力预测模型。程远方等^[3]基于 Mohr-Coulomb 准则建立了坍塌压力弹塑性模型,但该模型仅适用均匀地应力作用的情况。邓金根等^[4]基于 Mohr-Coulomb 准则提出了软泥岩井眼弹塑性变形的拉格朗日元法计算方法;陈勉等^[5]采用弹塑性有限元方法分析了大位移井的井壁稳定性。唐立强等^[6]采用有限元方法对岩盐层和塑性泥岩层的井眼缩径现象进行弹塑性分析。现有的坍塌压力弹塑性求解主要采用有限元理论,缺少相应的解析方法。相对于砂岩,深部煤层自身质量更差、地质构造更加复杂,在受到非均匀高地应力作用时,产生塑性区的可能性更大,但现阶段针对深部煤层坍塌压力的弹塑性研究报道较少。考虑到利用弹塑性方法求解坍塌压力^[7-9]并设计钻井液密度较弹性模型方法有所降低,因而该方法更有利于低孔、低渗煤层气储层的保护。综合上述分析,开展深部煤层坍塌压力的弹塑性研究具有重要工程意义。

Hoek-Brown 准则^[10-11]除适用于结构完整各项同性的均质岩石外,还适用于裂缝性岩体及各向异性的非均质岩体。考虑到深部煤层存在裂隙及非连续体的特点,采用 Hoek-Brown 准则作为分析深部煤层坍塌压力弹塑性解析的极限平衡条件较 Mohr-Coulomb 准则^[12-16]更加合理。鉴于此,笔者引入 Hoek-Brown 准则,推导了深部煤层井眼存在塑性区的坍塌压力弹塑性解析公式,并与 Hoek-Brown 准则、Mohr-Coulomb 准则的弹性结果进行比较。

1 深部煤层弹塑性特征的常规三轴实验分析

从沁水盆地平定区块深部煤层(埋深 1 076 m)获取大块完整煤岩,分别沿着垂直(编号 V)、平行(编号 H)层理方向钻取直径 50 mm、高度 100 mm 岩芯进行三轴压缩实验。表 1 为煤岩样在不同围压下的力学参数测试结果。

表 1 煤岩试件在不同围压下的力学参数实测结果

Table 1 Test results of coal samples under different confining pressure

岩芯编号	围压/ MPa	破坏强 度/MPa	弹性模 量/MPa	泊松比
PD-5-H-1	0	32.50	2 655.50	0.29
PD-6-H-1	0	32.05	2 703.74	0.32
PD-4-H-3	3	48.69	3 994.23	0.34
PD-4-V-5	3	41.25	3 755.23	0.37
PD-4-H-4	6	53.95	4 449.33	0.35
PD-4-V-8	6	60.74	4 394.42	0.37
PD-4-H-2	9	64.82	4 707.03	0.36
PD-4-V-4	9	63.37	4 719.87	0.37
PD-4-H-5	12	70.10	5 265.92	0.36
PD-4-V-1	12	75.44	5 324.36	0.38
PD-6-H-3	15	80.19	5 512.19	0.36
PD-4-V-9	15	85.52	5 498.45	0.38
PD-5-H-3	20	96.79	5 829.34	0.35
PD-5-V-4	20	89.77	5 924.70	0.36

图 1 给出了实验过程中煤岩所受主应力差值与轴向应变的关系曲线。

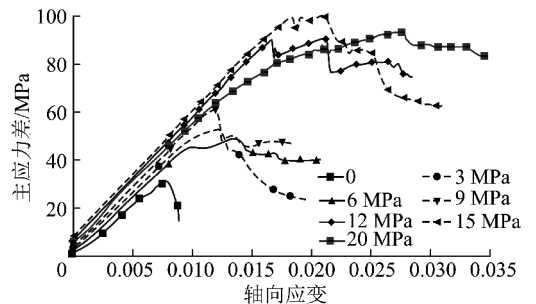


图 1 煤岩样不同围压条件下的主应力差-应变曲线

Fig. 1 Principal stress difference-stain curves of coal samples under different confining pressure

由图 1 可知,在三轴压缩实验过程中,沁水盆地平定区块煤岩表现出明显的低围压弹脆性破坏,高围压弹塑性破坏特征,这表明深部煤层井眼坍塌前井壁周围部分围岩产生了塑性区。因此,在预测深部煤层井眼坍塌压力时,应考虑井壁周围塑性区对坍塌压力的影响。

2 Hoek-Brown 破坏准则及深部煤层参数确定

Hoek-Brown 准则^[10-11]除适用于结构完整各项同性的均质岩石外,还适用于破碎岩体及各向异性的非均质岩体等。其表达式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, σ_1, σ_3 为岩石破坏时的最大、最小主应力; σ_{ci} 为完整岩块的单轴抗压强度; m_b 为岩体常数, 与完整岩石的 m_i 有关; s, α 为岩体特性系数。

Hoek-Brown 参数可表述为地质强度指标 $GSI^{[17-19]}$ 的函数, 其形式为

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

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

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

式中, D 为岩体弱化因子, 取值为 0 ~ 1。

利用 Hoek-Brown 准则分析深部煤层坍塌压力, 需确定煤岩的 3 个参数: σ_{ci}, m_i, GSI 。在利用三轴实验获得多组实验结果后, 可以通过式 (6) ~ (8) 确定 σ_{ci} 和 m_i 。

$$\sigma_{ci}^2 = \frac{\sum y}{n} - \frac{\left[\frac{\sum xy - (\sum x \sum y)/n}{\sum x^2 - (\sum x)^2/n} \right] \sum x}{n} \quad (6)$$

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[\frac{\sum xy - (\sum x \sum y)/n}{\sum x^2 - (\sum x)^2/n} \right] \quad (7)$$

$$r^2 = \frac{\left[\sum xy - (\sum x \sum y)/n \right]^2}{\left[\sum x^2 - (\sum x)^2/n \right] \left[\sum y^2 - (\sum y)^2/n \right]} \quad (8)$$

由式 (6) ~ (8) 计算得到沁水盆地平定区块深部煤岩 $\sigma_{ci} = 18.68 \text{ MPa}$, $m_i = 17.36$ 。根据 5 位现场专家对煤岩芯结构进行扫描电镜观察, 一致认为该区块煤岩地质强度指标 $GSI = 45$ 。

3 基于 Hoek-Brown 准则的深部煤层井眼坍塌压力弹塑性求解

3.1 塑性区 ($R_0 \leq r \leq R$) 应力场分析

深部煤层受到非均匀高地应力作用, 井壁围岩部分区域率先进入塑性阶段, 使得井眼塑性区边界不是圆形。图 2 中 R_0 为煤层井眼半径; R 为工程允许塑性区半径; r 为塑性区内某点的极坐标半径, 且 $R_0 \leq r \leq R$; P_i 为钻井液液柱压力; P_p 为地层压力; σ_R 为弹、塑性交界面上的径向应力; α' 为有效应力系数; 弹、塑性交界处的边界条件为 $\sigma_r|_{r=R} = \sigma_R - \alpha'P_p$; 井壁围岩处的边界条件为 $\sigma_r|_{r=R_0} = P_i - \alpha'P_p$ 。

以 Hoek-Brown 准则作为深部煤层井壁围岩应力极限平衡条件:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (9)$$

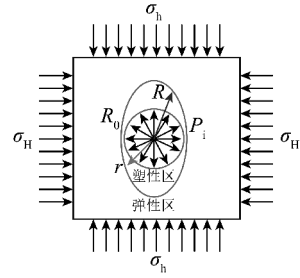


图 2 煤层井眼受力分析

Fig. 2 Stress analysis of coal seam wellbore

式中, σ_r 和 σ_θ 分别为径向应力和环向应力。

深部煤层井壁围岩满足轴对称平面应变问题的平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0 \quad (10)$$

联立式 (9), (10) 可求得深部煤层井眼塑性区应力场, 其表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left\{ \left[\left(m_b \frac{\sigma_R - \alpha'P_p}{\sigma_{ci}} + s \right)^{1-\alpha} + m_b(1-\alpha) \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - s \right\} \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left\{ \left[\left(m_b \frac{\sigma_R - \alpha'P_p}{\sigma_{ci}} + s \right)^{1-\alpha} + m_b(1-\alpha) \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} - s \right\} + \sigma_{ci} \left[\left(m_b \frac{\sigma_R - \alpha'P_p}{\sigma_{ci}} + s \right)^{1-\alpha} + m_b(1-\alpha) \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

3.2 弹性区 ($R \leq r \leq +\infty$) 应力场分析

在煤层井眼弹性区范围内, 其应力场分布可表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^2}{r^4} \right) \cos 2\theta + \sigma_R \frac{R^2}{r^2} - \alpha'P_p \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \times \left(1 + \frac{3R^2}{r^4} \right) \cos 2\theta - \sigma_R \frac{R^2}{r^2} - \alpha'P_p \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中, σ_H, σ_h 分别为最大、最小主应力。

3.3 深部煤层坍塌压力的 Hoek-Brown 准则弹塑性求解

在弹性区与塑性区的交界面上, σ_r 和 σ_θ 既应符合

合弹性应力状态式(12),也应符合塑性应力状态式(11),即 $(\sigma_r + \sigma_\theta)_T|_{r=R} = (\sigma_r + \sigma_\theta)_S|_{r=R}$ 。此时

$$2(\sigma_R - \alpha'P_p) + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_R}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha = 3\sigma_H - \sigma_h - 2\alpha'P_p \quad (13)$$

定义 λ 为非均匀地应力系数,表征 σ_h 与 σ_H 的比值。 λ 值越小,非均匀性越强。

$$\sigma_h = \lambda\sigma_H, 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (14)$$

$$2(\sigma_R - \alpha'P_p) + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_R}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha = (3 - \lambda)\sigma_H - 2\alpha'P_p \quad (15)$$

由式(15)可知, σ_R 除与 λ 有关,还和深部煤岩地质强度指标 GSI 值有关。若令:

$$f(\sigma_R) = 2\sigma_R - (3 - \lambda)\sigma_H + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_R}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (16)$$

设 σ_R 初值 $(\sigma_R)_0 = \frac{(3 - \lambda)\sigma_H}{2}$,则

$$(\sigma_R)_k = (\sigma_R)_{k-1} - \frac{f((\sigma_R)_{k-1})}{f'((\sigma_R)_{k-1})} = (\sigma_R)_{k-1} - \frac{2(\sigma_R)_{k-1} - (3 - \lambda)\sigma_H + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{(\sigma_R)_{k-1}}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha}{2 + \alpha m_b \left(m_b \frac{(\sigma_R)_{k-1}}{\sigma_{ci}} + s \right)^{\alpha-1}} \quad (17)$$

由式(11)第1式得到弹、塑性交界面上的径向应力 $\sigma_r|_{r=R} = \sigma_R - \alpha'P_p$,即

$$\sigma_R - \alpha'P_p = \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left\{ \left[\left(m_b \frac{P_i - \alpha'P_p}{\sigma_{ci}} + s \right)^{1-\alpha} + m_b(1 - \alpha) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{1-\alpha} - s \right\} \quad (18)$$

由式(18)解得 P_i 为

$$P_i = \frac{\sigma_{ci}}{m_b} \left\{ \left[\left(m_b \frac{(\sigma_R - \alpha'P_p)}{\sigma_{ci}} + s \right)^{1-\alpha} + m_b(1 - \alpha) \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) \right]^{1-\alpha} - s \right\} + \alpha'P_p \quad (19)$$

此时求得的 P_i 为保证深部煤层井眼不发生坍塌的最小钻井液液柱压力,即坍塌压力 P_{ci} 。当不考虑煤层井眼塑性区时, $P_{ci} = \sigma_R$,将其代入式(16)即可直接求得坍塌压力。

4 算例分析

以沁水盆地平定区块 PD-095 井为例分析深部煤层井眼坍塌压力。基本参数如前文所述,GSI=45,

$\sigma_{ci} = 18.68 \text{ MPa}$, $m_i = 17.36$, $D = 0.6$;将上述参数代入式(2)~(4),可求得参数 m_b, s, α ;其余参数: $\alpha' = 0.85$; $R_0 = 150 \text{ mm}$;煤层埋深 1 072 ~ 1 078 m; σ_H, σ_h 及 P_p 由测井资料确定。

4.1 坍塌压力的弹塑性计算结果

图3给出了 $R = 1.5R_0$ 时的弹塑性方法、Hoek-Brown 准则及 Mohr-Coulomb 准则弹性方法的深部煤层段坍塌压力结果。

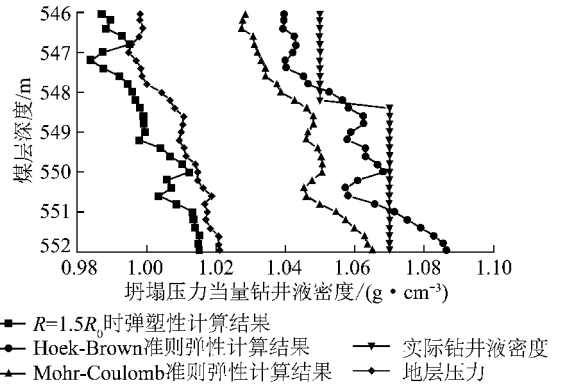


图3 不同方法的PD-095井煤层段坍塌压力计算结果

Fig. 3 Coal seam collapse pressure results of PD-095 well using different methods

由图3可知,PD-095井深部煤层坍塌压力的弹塑性结果小于Hoek-Brown准则弹性结果,同时也小于Mohr-Coulomb准则弹性结果。由于考虑了井眼周围塑性区的存在,使得煤层深度1 078 m, $R = 1.5R_0$ 时的坍塌压力弹塑性结果分别较Hoek-Brown准则、Mohr-Coulomb弹性结果降低6.52%, 4.66%。

PD-095井1 077 ~ 1 078 m煤层段实际选用钻井液密度为 1.07 g/cm^3 ,小于Hoek-Brown准则的坍塌压力弹性结果,但该段煤层并未出现坍塌现象,仅发生井眼扩大。这表明PD-095井在钻进煤层过程中产生了井眼塑性区,使得钻井液密度小于坍塌压力时仍能保证井壁不坍塌。同时,井眼扩大现象应为塑性区受到外力作用的结果。

4.2 影响因素分析

图4,5给出了煤层深度1 076 m时的坍塌压力弹塑性结果与工程允许塑性区半径 R 、非均匀地应力系数 λ 及煤岩GSI值的变化关系。

从图4,5可以看出,随着工程允许塑性区半径的增大、地应力非均匀性的减小(λ 增大),深部煤层坍塌压力计算结果均降低。图4结果表明,当GSI=15时,工程允许塑性区半径 $R = 1.5R_0$ 的弹塑性结果较弹性结果降低16.74%;当GSI值增大到65时,仅降低1.15%。图5结果表明,当GSI=15时, $\lambda = 0.5$ 的弹塑性结果较弹性结果降低19.67%,当GSI值增大

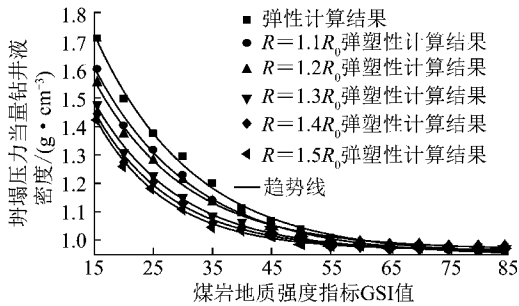


图 4 不同工程允许塑性区半径的坍塌压力弹塑性结果与 GSI 值的关系

Fig. 4 Relation between collapse pressure and GSI value under the condition of allowable plastic zone radius

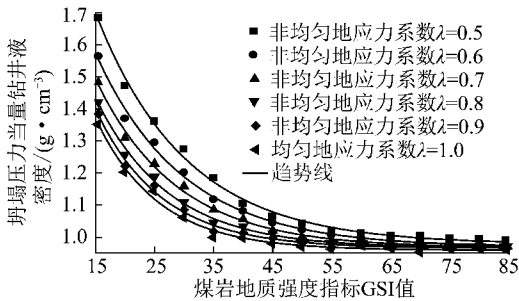


图 5 不同非均匀地应力系数的坍塌压力弹塑性结果与 GSI 值的关系

Fig. 5 Relation between collapse pressure and GSI value under the condition of non-uniform stress coefficient

到 65 时,仅降低 3.81%。以上两点表明,当深部煤岩地质强度指标 GSI 值较高时,出现塑性区的可能性较低,相当于在一定程度上降低了塑性区半径,因而使得弹性结果与弹塑性结果更为接近。当工程允许塑性区半径、非均匀地应力系数一定时,坍塌压力与煤岩地质强度指标 GSI 值均呈负乘幂函数关系,且曲线族在煤岩 GSI 值较高的尾部近似收敛于一点。理论上认为,当深部煤岩质量较好时,坍塌压力的弹塑性结果与弹性结果较为接近;当煤岩质量较差时,两者结果相差较大。该方法可以进一步提高煤层质量较差的坍塌压力预测精度。

5 结 论

(1) 考虑深部煤层井眼存在的工程允许塑性区,采用 Hoek-Brown 准则作为极限平衡条件,推导了深部煤层井眼坍塌压力的弹塑性解析公式。

(2) 计算结果表明,当塑性区半径为 1.5 倍井眼半径时,PD-095 井深部煤层井眼坍塌压力弹塑性结果较 Hoek-Brown 准则、Mohr-Coulomb 准则弹性结果分别降低 6.52%、4.66%。

(3) 随着工程允许塑性区半径的增大、地应力非均匀程度的降低,井眼坍塌压力均呈现降低趋势;深

部煤层坍塌压力弹塑性结果与煤岩地质强度指标 GSI 值呈负乘幂函数关系。

(4) 煤岩质量等级越高,井眼周围出现塑性区的可能性越小。因而,当深部煤岩地质强度指标 GSI 值较高时,坍塌压力的弹塑性结果与弹性结果较为接近;反之,两者结果相差较大。

参考文献:

- [1] Hawkes C, McLellan P J. Borehole stability analysis for underbalanced drilling [J]. Canadian Journal of Petroleum Technology, 2001, 40(5): 31-38.
- [2] Aadnby B S, Belayneh M. Elasto-plastic fracturing model for wellbore stability using non-penetrating fluids [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(2): 179-192.
- [3] 丰全会,程远方,张建国. 井壁稳定的弹塑性模型及其应用 [J]. 石油钻探技术, 2000, 28(4): 9-11. Feng Quanhui, Cheng Yuanfang, Zhang Jianguo. Elastic & plastic model for borehole stability and its application [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(4): 9-11.
- [4] 邓金根,刘书杰,石得勤,等. 软泥岩井眼弹塑性变形的拉格朗日元法计算 [J]. 地质力学学报, 1999, 5(1): 33-36. Deng Jingen, Liu Shujie, Shi Deqin, et al. Calculation of elasto-plastic deseam of wellbore in soft mudstone using lagrangian method [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(1): 33-36.
- [5] 李军,陈勉,金衍,等. 大位移井井壁稳定三维弹塑性有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2385-2389. Li Jun, Chen Mian, Jin Yan, et al. Three-dimensional elasto-plastic FEM analysis on borehole stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2385-2389.
- [6] 杨勇,吴国辉,唐立强,等. 井壁稳定性的弹塑性有限变形理论分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(11): 1460-1463. Yang Yong, Wu Guohui, Tang Liqiang, et al. Analysis of wellbore stability by the elasto-plastic finite deseam theory [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(11): 1460-1463.
- [7] 孙学增,赵黎安,张文,等. 求解井眼围岩塑性区应力状态与变形的一种方法 [J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(1): 21-24. Sun Xuezheng, Zhao Li'an, Zhang Wen, et al. A method for solving the plastic stress state and distortion of borehole rock [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1): 21-24.
- [8] 胡小荣,周洪华,胡昌斌. 双剪统一强度准则改进及其在岩土工程中的应用 [J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 99-102. Hu Xiaorong, Zhou Honghua, Hu Changbin. Improvement of double shear criterion and its applications to geotechnical engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 99-102.
- [9] 王继秀,赵均海,王乐健,等. 基于统一强度理论的井筒围岩应力分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(3): 105-109. Wang Jixiu, Zhao Junhai, Wang Lejian, et al. Stress analysis of wellbore rock based on unified strength theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 26(3): 105-109.
- [10] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. International Journal of Rock Mechanics & Geomechanics Abstracts, 1997, 34(8): 1164-1186.

- [11] 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.
- [12] 李敬元, 李子丰. 渗流作用下井筒周围岩石内弹塑性应力分布规律及井壁稳定条件[J]. 工程力学, 1997, 14(1): 131-137.
Li Jingyuan, Li Zifeng. Rock elastic-plastic stresses around a wellbore and wellbore stability under permeation osmosis [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(1): 131-137.
- [13] 陈 新, 杨 强, 何满潮, 等. 考虑深部岩体各向异性强度的井壁稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2882-2888.
Chen Xin, Yang Qiang, He Manchao, et al. Stability analysis of wellbore based on anisotropic strength criterion for deep jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2882-2888.
- [14] 刘玉石. 地层坍塌压力及井壁稳定对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2421-2423.
Liu Yushi. Collapse pressure and precautions for stability of wellbore wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2421-2423.
- [15] 张常光, 张庆贺, 赵均海. 考虑应变软化及剪胀的井壁稳定统一解[J]. 煤炭学报, 2009, 34(5): 634-638.
Zhang Changguang, Zhang Qinghe, Zhao Junhai. Unified solutions of wellbore stability considering strain softening and shear dilation [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 634-638.
- [16] 马德新. 双向水平应力不等条件下泥浆密度的确定[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(3): 45-48.
Ma Dexin. Defining mud density under conditions of unequal horizontal stresses [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20(3): 45-48.
- [17] Hoek E, Marinos P, Benissi M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses; the case of the Athens Schist Seam [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1998, 57(2): 151-160.
- [18] Marinos P, Hoek E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation [M]. Australia: Technomic Publishing Corporation, 2000: 1422-1442.
- [19] Marinos V, Marinos P, Hoek E. Geological strength index: applications and limitations [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 64(1): 55-65.

欢迎订阅 2013 年《煤炭学报》杂志

《煤炭学报》是由中国煤炭学会主办、面向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值, 被 Ei、IEA Coal Abstract CD-Room、中国科学引文数据库、PЖ、科学技术文摘速报、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖, 获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖, 获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖, 获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获由中华人民共和国新闻出版总署颁发的“首届国家期刊奖”。2001 年入选“中国期刊方阵”, 并被评为“双奖期刊”。2008 年获“中国精品科技期刊”称号。2009 年获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。2004, 2007, 2010, 2011, 2012 年 5 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。2006 年至 2012 年获中国科协精品科技期刊工程项目资助。

《煤炭学报》受到广大作者、读者的爱护和支持, 也受到各级部门的重视, 在学术水平上具有较高的地位, 很多单位都将在《煤炭学报》发表的文章作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊, 176 页, 每册订价 58 元, 全年总订价 696 元。欲订阅者可直接向本编辑部索取订单, 编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码: 100013

联系电话: (010)84262930-806 联系人: 王婉洁

E-mail: mtxbwwj@tom.com, mtxb@vip.163.com