

皇凡生,康毅力,游利军,等.排采降压诱发煤层剪切破坏机理与防控对策[J].煤炭学报,2017,42(7):1803-1810. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1184

Huang Fansheng, Kang Yili, You Lijun, et al. Mechanisms and control methods of depletion-induced shear failure of coalbed seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1803-1810. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1184

排采降压诱发煤层剪切破坏机理与防控对策

皇凡生,康毅力,游利军,李相臣,许成元

(西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

摘要:煤层压力衰减会导致煤岩体剪切破坏,诱发井壁失稳、套管损坏和出煤粉等井下复杂事故。为预防煤层破坏,以沁水盆地南部二叠系山西组3号煤层为研究对象,基于单轴应变模型分析了排采降压过程中的煤层应力路径及其破坏行为,明确了煤层破坏影响因素,并提出了控制井底流压和CO₂-ECBM相结合的防控技术对策。结果表明:煤层水平有效应力在排水阶段随孔隙压力的降低而线性增大,但在解吸阶段却随孔隙压力的降低而非线性减小,气体解吸能够加速煤层剪切破坏;煤层初始水平应力越小,垂向应力、初始孔隙压力、临界解吸压力越大,气体吸附效应越强,煤岩体弹性模量、泊松比越大,单轴抗压强度越低,则煤层临界破坏孔隙压力就越大;煤层破坏前转注CO₂既能有效避免煤层破坏,也可提高煤层气采收率,不失为CO₂-ECBM的良好作业时机。

关键词:煤层气;压力衰减;单轴应变;应力路径;剪切破坏;CO₂-ECBM

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)07-1803-08

Mechanisms and control methods of depletion-induced shear failure of coalbed seams

HUANG Fan-sheng, KANG Yi-li, YOU Li-jun, LI Xiang-chen, XU Cheng-yuan

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Pressure depletion can induce the shear failure of coalbed seams, consequently resulting in downhole accidents such as borehole instability, casing failure and fines production. In order to prevent the shear failure, the stress path and failure behavior of coalbed seams were analyzed based on the uniaxial strain model with No. 3 coal of Shanxi Formation in the Qinshui Basin, and then the influence factors of shear failure were determined. Finally, a method through controlling the bottom hole flow pressure (BHFP) and CO₂-ECBM was proposed to prevent the shear failure. The results show that the effective horizontal stress of coalbed seam linearly increases with the decrease of pore pressure at the dewatering phase, whereas it nonlinearly reduces at the desorption stage, indicating that the gas desorption can accelerate the shear failure of coalbed seams; the critical pore pressure when coal failure happens is positively associated with the vertical stress, initial pore pressure, critical desorption pressure, sorption-induced swelling, elastic modulus and Poisson's ratio, whereas it increases with the decrease of initial horizontal stress and uniaxial compressive strength; CO₂ injection before coal failure, as a well operation time of CO₂-ECBM, can not only prevent the shear failure, but also enhance the CBM recovery.

Key words: coalbed methane; pressure depletion; uniaxial strain; stress path; shear failure; CO₂-ECBM

收稿日期:2016-08-24 修回日期:2016-12-26 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674209);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05061003)

作者简介:皇凡生(1988—),男,河南商丘人,博士研究生。E-mail:hffs2008@vip.qq.com。通讯作者:康毅力(1964—),男,天津蓟县人,教授,博士生导师。E-mail:cwctkyl@163.com

我国煤炭资源丰富,约占全国化石能源储量的94%,且煤层中富含甲烷,又称瓦斯或煤层气,我国埋深2 000 m以浅的煤层气资源量约为 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$,与陆上常规天然气资源量相当^[1-2]。在煤矿开采过程中,煤层应力释放将导致地应力重新分布与调整,当煤层载荷超过煤岩体强度时,就会诱发岩爆、煤爆、冲击地压和煤与瓦斯突出等多种煤矿灾害^[3];在煤层气井排采过程中,煤层压力衰减也会导致煤岩体剪切破坏,诱发井壁失稳、套管损坏、出煤粉等井下复杂事故,严重影响煤层气的经济开采^[4]。因此,研究工程扰动条件下的煤层变形与破坏行为对于预防煤矿瓦斯事故和煤层气井井下复杂事故具有重要意义。

Zoback^[5], Goult^[6], Teufel^[7]等分析了常规储层压力衰减过程中的应力路径与破坏行为,研究表明常规储层水平有效应力随孔隙压力的降低而增加,剪切破坏能够提高裂缝密度,改善储层渗透性。但与常规储层岩石不同,煤岩具有双重孔隙结构特征,约95%的气体吸附在煤岩基块孔隙内表面,当“排水-降压”使煤层裂隙压力衰减至临界解吸压力以下时,吸附态甲烷开始解吸,并导致煤岩基块收缩变形^[8]。另外,煤岩胶结性差、易碎、易坍塌,煤岩破坏后还会诱发大量煤粉产生。Espinoza等^[9], Liu和Harpalani^[10]开展了气体解吸诱发煤岩变形与破坏行为研究,结果表明煤岩水平有效应力随气体的解吸而降低,煤岩破坏后渗透率严重下降,并伴有大量煤粉产出。但他们的研究均集中在岩芯尺度和气体解吸阶段,而关于矿场尺度下综合考虑排水降压和气体解吸影响的煤层应力路径与破坏行为研究还鲜有报道。因此,笔者以沁水盆地南部二叠系山西组3号煤层为研究对象,基于单轴应变模型分析了煤层气井排采降压过程中的煤层变形与破坏行为,明确了煤层破坏临界条件及其影响因素,并提出了预防煤层破坏的技术思路。

1 煤层剪切破坏机理

1.1 孔弹性本构方程

为分析衰减煤层内的地应力随孔隙压力变化响应特征,需首先明确煤岩(有效)应力-应变本构关系。通常情况下,煤岩屈服/破坏前可将其看作均质、各向同性的线弹性体。常规的线弹性体本构方程用于分析排水阶段的煤层变形行为较为适用,但对于解吸阶段并不适用,因为气体解吸还会导致煤岩基块收缩变形,引发弹性体积应变。Shi和Durucan基于热弹性体本构方程,通过将气体吸附诱发的煤岩基块膨胀等效成热弹性体的热膨胀,推导了考虑气体吸附效应的煤岩(有效)应力-应变关系^[11]:

$$\Delta\sigma'_{ij} = 2G\Delta\varepsilon_{ij} + \lambda\Delta\varepsilon_v\delta_{ij} + K\Delta\varepsilon_s\delta_{ij} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_{ij} + \alpha\Delta p\delta_{ij} \quad (2)$$

其中, σ' 为有效应力; G 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; λ

为Lamé系数, $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$; K 为体积压缩模量,

$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ε 为线应

变; ε_v 为体积应变, $\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$; ε_s 为吸附诱发的体积应变; δ_{ij} 为Kronecker符号(当 $i=j$ 时, $\delta=0$;当 $i \neq j$ 时, $\delta=1$); σ 为总应力; α 为Biot系数,对于弱胶结岩石以及岩体内存在很多裂隙面时, $\alpha \approx 1$ ^[12]; p 为孔隙压力。需注意的是式(1)中压应力为正。

Day等研究表明气体吸附引发的体积应变可用类似于Langmuir等温吸附方程的模型来表示^[13],即

$$\varepsilon_s = \varepsilon_L \frac{p}{p_L + p} \quad (3)$$

式中, ε_L 和 p_L 均为Langmuir类型的基块收缩/膨胀参数。

1.2 煤层应力路径

分析储层地应力变化主要基于单轴应变、平面应变和平面应力3种模型,而单轴应变模型是目前最简单、最常用的一种模型^[14]。Segall和Fitzgerald指出,如果储层水平延展长度与储层厚度之比大于10:1,则可将储层的变形边界条件假设成单轴应变^[15]。通常情况下,煤层厚度为米级,而水平延展长度为千米级,且煤层上覆压力基本保持恒定。因此,也可将煤层的变形边界条件假设为单轴应变,即煤层“表征单元体”(REV)内孔隙压力变化时,其水平应变始终为0,且垂向主应力保持恒定,如图1所示。关于单轴应变模型的适用性,国外学者已进行了大量论证。对于常规储层而言,Zoback^[5], Goult^[6], Teufel^[7]等通过与矿场测试结果对比发现,基于单轴应变模型预测的储层应力路径是基本可靠的。Connell和Detourney通过流固耦合数值模拟的方法检验了单轴应变模型在煤层中的适用性,研究发现该模型对远井地带的预测结果与数值模拟结果相近,但在近井地带的适用性较差^[16]。考虑到近井地带完井方式的复杂性以及存在应力集中等问题,尽管单轴应变模型在该区适用性较差,但对于大部分煤层范围来讲是基本适用的。

煤层气井排采降压会在煤层中形成压降漏斗,且随排采的进行压降漏斗从井筒不断向煤层深部推进。为分析压降漏斗波及区煤层的水平应力变化情况,Shi和Durucan基于单轴应变模型,推导了气体解

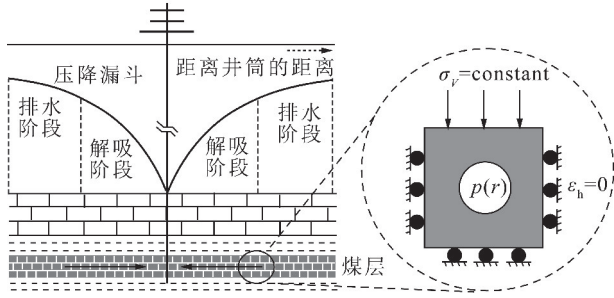


图1 煤岩储层单轴应变边界条件示意

Fig.1 Sketch of uniaxial strain boundary condition for CBM reservoirs

吸阶段煤层水平有效应力随孔隙压力的变化关系式,简称S&D模型,其详细推导过程如下^[11]:

由于剪切应力分量不受基块收缩效应的影响,则3个主应力方向的应力-应变关系为

$$\begin{cases} \Delta\sigma'_{xx} = \frac{E}{1+\nu}\Delta\varepsilon_{xx} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_v + \frac{E}{3(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_s \\ \Delta\sigma'_{yy} = \frac{E}{1+\nu}\Delta\varepsilon_{yy} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_v + \frac{E}{3(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_s \\ \Delta\sigma'_{zz} = \frac{E}{1+\nu}\Delta\varepsilon_{zz} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_v + \frac{E}{3(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_s \end{cases} \quad (4)$$

在单轴应变条件下,煤层变形边界条件满足水平应变为零且垂向应力保持恒定,即 $\Delta\varepsilon_{xx} = \Delta\varepsilon_{yy} = 0$, $\Delta\sigma'_{xx} = \Delta\sigma'_{yy}$, $\Delta\sigma'_{zz} = -\alpha\Delta p$ 。代入式(4)可知,水平有效应力增量为

$$\Delta\sigma'_{xx} = \Delta\sigma'_{yy} = -\frac{\alpha\nu}{1-\nu}\Delta p + \frac{E}{3(1-\nu)}\Delta\varepsilon_s \quad (5)$$

对垂向和水平有效应力增量进行积分可得煤层有效应力随孔隙压力的变化关系式为

$$\begin{aligned} \sigma'_1 - \sigma'_{10} &= \alpha(p_0 - p) \quad (6) \\ \sigma'_3 - \sigma'_{30} &= -\frac{\alpha\nu}{1-\nu}(p - p_0) + \frac{E}{3(1-\nu)} \times \\ &\quad \varepsilon_L \left(\frac{p}{p + P_L} - \frac{P_c}{p_c + P_L} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

其中,下角标“0”,“1”和“3”分别代表初始状态、垂直方向和水平方向。由式(7)可知,水平有效应力增量包含机械膨胀和解吸收缩两个控制项。但对于非饱和煤层气藏,式(7)应表达为

$$\sigma'_3 - \sigma'_{30} = -\frac{\alpha\nu}{1-\nu}(p - p_0), p_c < p \leq p_0$$

$$\begin{aligned} \sigma'_3 - \sigma'_{3c} &= -\frac{\alpha\nu}{1-\nu}(p - p_c) + \frac{E}{3(1-\nu)} \times \\ &\quad \varepsilon_L \left(\frac{p}{p + P_L} - \frac{P_c}{p_c + P_L} \right), p_f < p \leq p_c \quad (8) \end{aligned}$$

式中, p_c , p_f 分别为煤层临界解吸压力和临界破坏孔隙压力; σ'_{3c} 为孔隙压力为 p_c 时对应的水平有效应力。

Mitra 等^[17], Feng 等^[18] 通过室内实验研究发现式(7)对于低压段水平有效应力的预测结果严重偏高。Shi 和 Durucan 后来发现低压端气体大量解吸诱发煤岩岩石力学性质变化是导致 S&D 模型预测失准的主要原因,因为式(7)是在假定弹性模量 E 和泊松比 ν 恒定不变的基础上推导出来的,他们通过调整低压段的岩石力学参数实现了对实验数据的精确拟合^[19]。但需注意的是在岩芯尺度和矿场尺度条件下气体吸附效应对煤岩岩石力学性质的影响程度是不同的。Espinoza 等研究发现 CO_2 吸附对裂缝发育煤样的岩石力学性质几乎没有影响,他们认为结构特征才是影响煤岩岩石力学性质的主控因素^[20]。在矿场尺度条件下,煤层割理、裂隙、断层等弱结构面发育,尽管此时气体吸附效应对煤层岩体力学性质也有影响,但影响程度可近似忽略不计。因此, S&D 模型对于预测矿场尺度下的煤层水平有效应力变化是基本适用的。

1.3 煤岩破坏判据

当有效应力状态超过煤层额定载荷后,就会诱发煤层剪切破坏。目前, Mohr-Coulomb 破坏准则是岩石力学中最常用、最简单的一种破坏准则,其基于有效应力的表达式为

$$\sigma'_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma'_3 + 2C \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (9)$$

式中, φ 为煤层内摩擦角; C 为煤层黏聚力。联立上述各式,可求得煤层临界破坏孔隙压力 p_f 。

2 算例分析与讨论

沁水盆地煤层气资源丰富,是目前中国勘探程度最高、开发前景最好、商业化程度最高的地区。本文以沁水盆地南部二叠系山西组3号煤层为研究对象,分析煤层排采降压过程中的应力路径与破坏行为,其中上述模型参数的赋值均源于文献数据,见表1。孟召平等采用水力压裂测量地应力的方法获得了沁水盆地南部煤层压力 p_0 、垂向主应力 σ_1 和最小水平主应力 σ_3 随深度 D 的变化关系^[21-22],即

$$\begin{aligned} p_0 &= 0.012 \ 2D - 2.888 \ 6 \\ \sigma_1 &= 0.027D \\ \sigma_3 &= 0.023 \ 6D - 3.517 \ 7 \end{aligned} \quad (10)$$

二叠系山西组3号煤层埋深在334.9~1122.3 m,平均为590.85 m^[21]。通过式(10)计算可得埋深为590.85处的煤层压力、垂向主应力和最小水平主应力分别为4.32, 15.95和10.43 MPa。该煤层临界解吸压力介于0.79~7.74 MPa,平均为2.09 MPa^[23]。分析煤层变形与破坏行为,需基于矿场尺度的煤岩体力学参数进行模型运算。Wang等通过对微型先导性试验数据进行历史拟合获得了3号煤层的弹性模量、泊松比和基块收缩/膨胀参数,见表1^[24]。目前,尚没有较好的手段获取矿场尺度黏聚力、内摩擦角,主要通过对岩芯尺度强度参数进行经验校正获得。尽管Hoek-Brown提出了地质强度因子(GSI)评分系统,但该方法仍然经验性较强,目前尚没有普遍被认可的GSI量化方法,且确定GSI值需体积节理数和结构面表面特征等参数,而这些参数在煤层中是很难获得的^[25]。冯晴等模拟原地条件开展了沁水盆地南部煤岩三轴压缩力学实验,测得煤岩抗压强度为5.0~50.0 MPa,平均为13.0 MPa;内摩擦角为28.0°~35.0°,平均为32.0°;黏聚力为2.0~4.0 MPa,平均为3.0 MPa^[26]。Zipf等^[27]认为矿场尺度的煤岩强度是岩芯尺度的0.56倍;Wang等^[28],Gentz^[29]均将矿场尺度与岩芯尺度的煤岩强度之比设定为0.5。因此,笔者将矿场尺度的煤岩体黏聚力取值为1.5 MPa,内摩擦角保持为32°。Zhao等指出对于裂隙发育的煤岩,Biot系数可近似取值为1^[30]。在矿场尺度条件下,煤层割理、裂隙和断层发育,故此时假设“ $\alpha \approx 1$ ”是基本合理的。

表1 模型各参数的赋值结果

Table 1 Base case parameter considered in this model

参数	赋值	数据来源
初始煤层压力 p_0	4.32 MPa	
恒定垂向应力 σ_1	15.95 MPa	孟召平等 ^[21]
初始水平应力 σ_{30}	10.43 MPa	
临界解吸压力 p_c	2.09 MPa	Liu等 ^[23]
弹性模量 E	3 500 MPa	
泊松比 ν	0.35	
Langmuir 压力 p_L	4.14 MPa	Wang等 ^[24]
Langmuir 体积应变 ε_L	0.006 5	
黏聚力 C	1.5 MPa	冯晴等 ^[26]
内摩擦角 φ	32.0°	
Biot 系数 α	1.0	Zhao等 ^[30]

将表1数据代入式(6)和式(8)可得排采降压过程中煤层内的有效应力随孔隙压力变化关系,如图2所示。煤层垂向有效应力在整个排采过程中均随孔隙压力的降低而线性增大;煤层水平有效应力在排水

阶段也随孔隙压力的降低而线性增大,但在解吸阶段却随孔隙压力的降低而非线性减小,主要是因为排水降压导致煤层水平方向发生机械膨胀,为维持水平应变为零,水平有效应力必须增大,但在解吸阶段煤岩基块收缩效应开始占主导作用,且基块收缩效应随孔隙压力的降低逐渐增强,为保持水平应变为零,水平有效应力必须加速减小。图3为煤层应力状态随孔隙压力演化的莫尔圆分析示意。在排水阶段,由于煤层垂向有效应力和水平有效应力均线性增大,且垂向有效应力的增大速率大于水平有效应力,此时莫尔圆直径不断扩大,圆心位置逐渐向右侧移动;在解吸阶段,由于煤层垂向有效应力增大而水平有效应力减小,此时莫尔圆直径虽然也不断扩大,但圆心位置却逐渐向左侧移动,且莫尔圆的增长和移动速率随孔隙压力的降低变得越快。由此可知,与排水阶段不同,气体解吸能够促进莫尔圆与煤层破坏包络线的交汇,进而加速煤层剪切破坏。基于矿场尺度的Mohr-Coulomb破坏准则分析可知,煤层临界破坏孔隙压力为0.73 MPa,当矿场尺度煤岩体强度与岩心尺度煤岩强度之比取更大值时,临界破坏孔隙压力会更大。

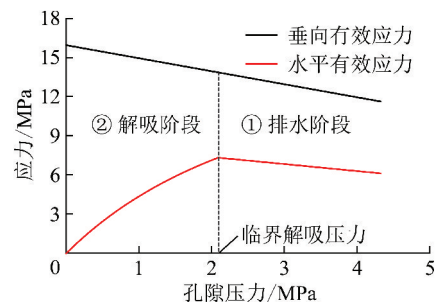


图2 衰减煤层内的有效应力随孔隙压力变化关系曲线

Fig. 2 Profiles of the effective stresses versus pore pressure for the depleting coalbed

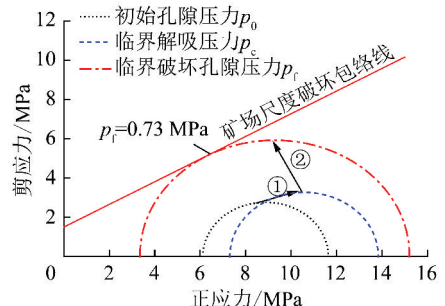


图3 煤层应力状态随孔隙压力演化的莫尔圆分析示意

Fig. 3 Mohr circle diagrams for the state of stress evolution of coalbed with pressure depletion

衰减煤层内的应力路径也可通过水平应力 σ_3 随孔隙压力 p 的变化来表示,如图4所示。图4中的煤层破坏包络线可由式(9)变形求得

$$\sigma_3 = \frac{2\alpha \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} p + \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_1 - 2C \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \sigma_3}{\Delta p} = \begin{cases} \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}, p_c < p \leq p_0 \\ \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} + \frac{E}{3(1 - \nu)} \frac{\Delta \varepsilon_s}{\Delta p}, p_t < p \leq p_c \end{cases} \quad (12)$$

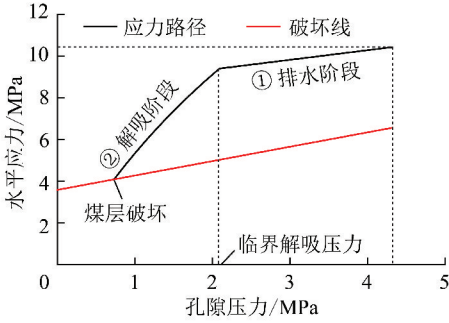


图 4 衰减煤层内的水平应力随孔隙压力变化关系曲线

Fig. 4 Profiles of the horizontal stresses versus pore pressure for the depleting coalbed

将表 1 数据代入式(11)可知,煤层破坏包络线的斜率为 0.69。另外,由式(8)推导可得,煤层水平应力变化 $\Delta \sigma_3$ 与孔隙压力变化 Δp 之比为

在排水阶段,水平应力随孔隙压力的降低而线性减小,且 $\Delta \sigma_3 / \Delta p = 0.46 < 0.69$,此时煤层应力状态逐渐远离破坏包络线;但在解吸阶段,水平应力随孔隙压力的降低而非线性减小,且 $\Delta \sigma_3 / \Delta p > 1$,此时煤层应力状态加速向破坏包络线靠近,并在孔隙压力衰减至 0.73 MPa 发生剪切破坏。由式(11)和式(12)还可知,煤层应力路径和破坏行为主要受初始应力状态、临界解吸压力、吸附膨胀效应与煤岩体力学性质等因素的影响。如图 5 所示,煤层初始水平应力越小,垂向应力、初始孔隙压力、临界解吸压力越大,吸附膨胀效应越强,煤岩体弹性模量、泊松比越大,单轴抗压强度越低,则煤层临界破坏孔隙压力就越大。

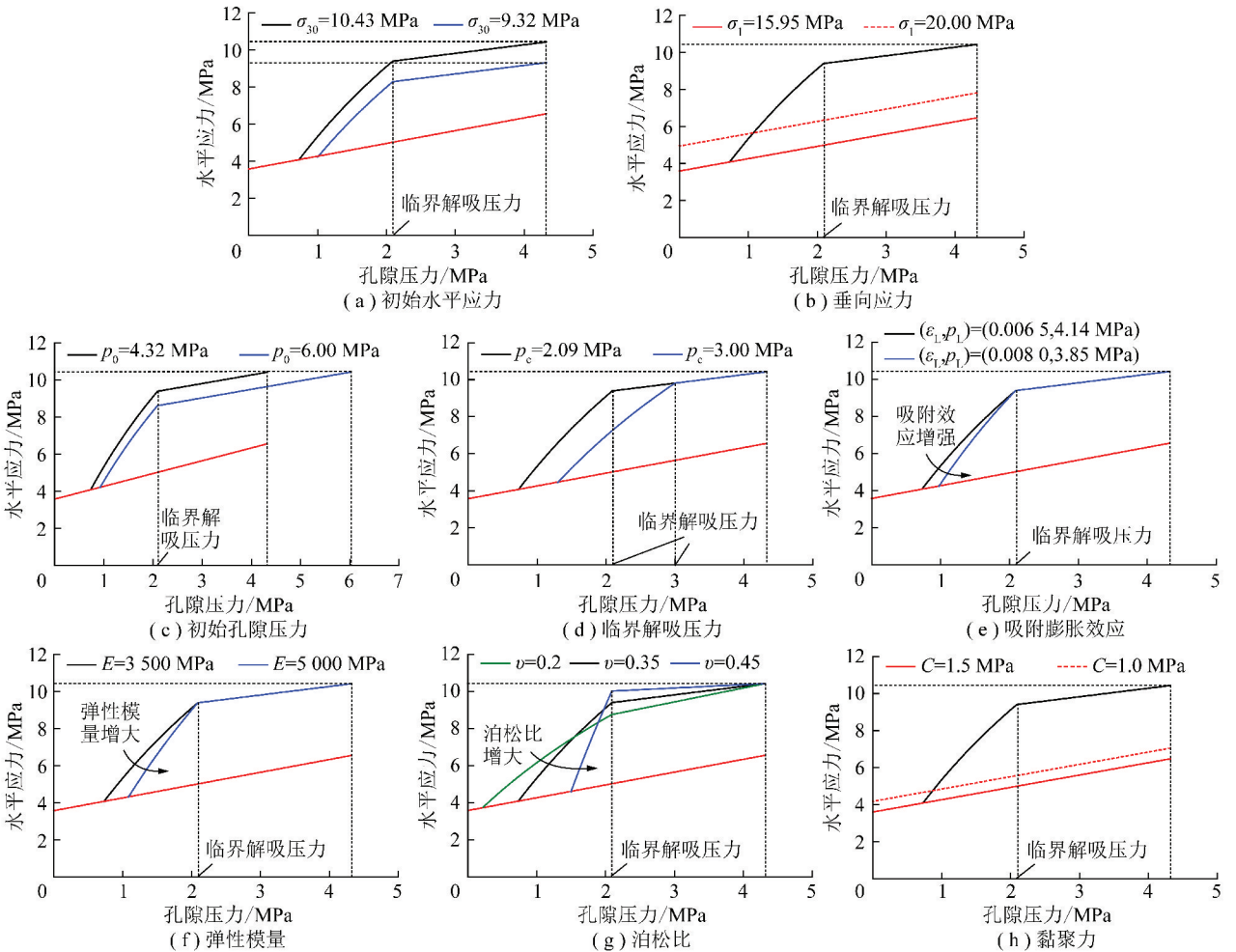


图 5 煤层变形与破坏行为影响因素分析示意

Fig. 5 Sketches for analyzing the impact factors of coalbed deformation and failure

3 煤层破坏防控对策

煤层剪切破坏后会在储层内形成更为复杂的裂缝网络,减小煤岩基块尺寸,增加裂缝表面积,进而大幅度提高煤层气的解吸-扩散速率。Espinoza 等基于数值模拟研究发现煤岩剪切破坏后气体解吸-扩散速率比破坏前提高了近两个数量级^[31]。但煤岩是一种抗压强度低、胶结性差、易碎、易坍塌的脆弱介质,煤岩破坏后会形成一定宽度的剪切破碎带,导致大量的煤粉产生,当煤粉随流体运移并堵塞产气通道时,将会对煤岩渗透率造成严重损害^[32]。Viete 和 Ranjith 通过分析三轴压缩实验过程中煤样渗透率的变化发现,当煤样达到剪切破坏强度后,煤样渗透率表现出先急剧增加后急剧降低的趋势,他们认为煤样渗透率的急剧降低与煤粉的形成-运移-堵塞过程有关^[33]。由于煤层气“解吸-扩散-渗流”3个环节紧密相连,相互影响,相互制约,煤层渗透率的降低进而会抑制煤岩基块内吸附态煤层气的解吸和扩散,并最终影响煤层气井的单井产能^[34]。图6为美国圣胡安盆地弗鲁特兰煤岩气藏001井的生产曲线,该井在井底压力衰减至300~500 psi(2.0~3.4 MPa)时,产气量急剧降低,分析发现此时煤层发生破坏,并伴有大量的煤粉产出,而且该井在经过数次修井作业后产能也未能恢复至初始水平,甚至未见任何成效^[35]。由此可见,在煤层气井实际生产过程中,应尽量避免煤层破坏,以防止煤粉的大量产生而损害煤层渗透率和破坏井下生产设备。

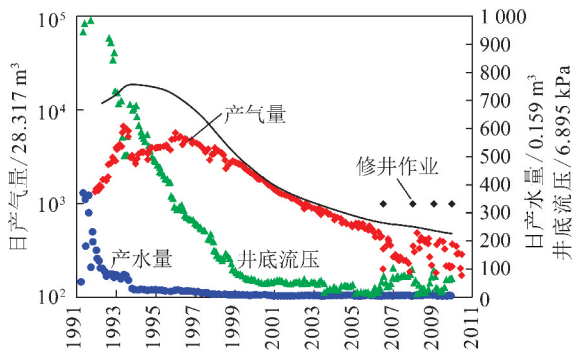


图6 弗鲁特兰煤岩气藏001井实际生产曲线^[35]

Fig. 6 Actual production curves of Well 001 in Fruitland coalbed reservoir^[35]

为了预防解吸诱发煤层剪切破坏,在煤层气井排采过程中需将井底流压维持在煤层临界破坏压力之上。如果按照这种方式继续进行开采,待煤层达到经济极限产量之后,煤层中会有部分的剩余储量尚未被动用。因此,为了在不破坏煤层条件下开采剩余储量,本文提出了适时转注CO₂强化开采煤层气(CO₂-

ECBM)的技术思路。该开采方式具备以下两个技术优点:①注入的CO₂能够通过竞争吸附置换煤岩基块中的剩余CH₄,从而实现提高煤层气采收率的目的;②注入的CO₂能够补充地层能量,且CO₂吸附膨胀效应大于CH₄,注入CO₂后能促使煤层应力状态尽快远离破坏包络线,从而达到预防煤层破坏的目的,如图7所示。

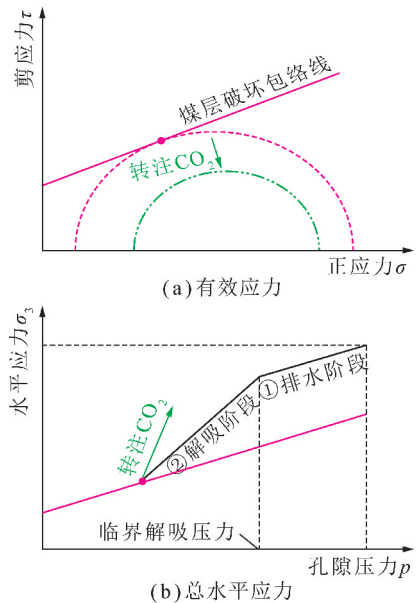


图7 转注CO₂预防煤层剪切破坏机理示意

Fig. 7 Mechanisms for preventing coalbed failure by CO₂-injection

目前,CO₂-ECBM已成为开发煤层气的关键技术,但关于CO₂的注入时机尚没有明确定论。中国煤层一般渗透率较低,早期注入CO₂十分困难,而且CO₂竞争吸附后还会诱发煤岩基块膨胀,导致煤层渗透率的进一步降低。因此,CO₂注入时机不宜过早,应当在煤层充分发挥弹性自调节正效应(即气体解吸导致煤岩基块收缩,提高煤层渗透率)后再开展CO₂-ECBM作业。笔者认为可将解吸诱发煤层剪切破坏前看作转注CO₂的良好时机,因为此时煤层渗透率已得到充分改善,以弗鲁特兰煤岩气藏为例,该区煤层在达到临界破坏孔隙压力时渗透率提高了10~100倍^[36]。在这种情况下,煤层中CO₂注入能力得到了显著提高,更有利于开展CO₂-ECBM作业,从而实现预防煤层剪切破坏和提高煤层气采收率的双重目的。

4 结 论

(1)单轴应变条件下,煤层水平有效应力在排水阶段随孔隙压力的降低而线性增大,但在解吸阶段却随孔隙压力的降低而非线性减小,气体解吸导致莫尔

圆加速膨胀并向左侧移动,从而促进煤层破坏。

(2)煤层初始水平应力越小,垂向应力、初始孔隙压力和临界解吸压力越大,气体吸附效应越强,煤层弹性模量、泊松比越大,单轴抗压强度越低,则煤层临界破坏孔隙压力就越大。

(3)提出了控制井底流压和 CO_2 -ECBM 相结合的预防煤层破坏技术思路,煤层破坏前转注 CO_2 不仅能够避免煤层剪切破坏,维持煤层渗透率,而且可以通过竞争吸附而大幅度提高煤层气采收率。

(4)考虑到近井地带完井方式的复杂性以及存在应力集中等问题,单轴应变模型在该区的适用性尚有待考证,但对于大部分煤层范围来讲,基于单轴应变模型分析煤层变形与破坏行为是基本适用的。

参考文献 (References):

- [1] 谢和平,钱鸣高,彭苏萍,等.煤炭科学产能及发展战略初探[J].中国工程科学,2011,13(6):44-50.
Xie Heping, Qian Minggao, Peng Suping, et al. Sustainable capacity of coal mining and its strategic plan [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(6):44-50.
- [2] 宋晓丹,孔令峰,洪保民,等.我国煤层气产业发展政策现状分析与发展建议[J].天然气工业,2013,33(2):1-6.
Song Xiaodan, Kong Lingfeng, Hong Baomin, et al. The status quo of policies and the proposals for the development of coalbed methane gas industry in China [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2):1-6.
- [3] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in Chian [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205-213.
- [4] 陈振宏,王一兵,孙平,等.煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J].煤炭学报,2009,34(2):229-232.
Chen Zhenhong, Wang Yibing, Sun Ping, et al. Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2):229-232.
- [5] Zoback M D. Reservoir geomechanics [M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [6] Goultly N R. Reservoir stress path during depletion of Norwegian chalk oilfields [J]. Petroleum Geoscience, 2003, 9:233-241.
- [7] Teufel L W, Rhett D W, Farrell H E. Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk Field, North Sea [A]. The 32nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS) [C]. American Rock Mechanics Association, 1991.
- [8] Gray I. Reservoir engineering in coal seams: Part1. The physical process of gas storage and movement in coal seams [J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2:28-34.
- [9] Espinoza D N, Pereira J M, Vandamme M, et al. Stress path of coal seams during depletion: The effect of desorption on coal failure [A]. 49th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium [C]. American Rock Mechanics Association, 2015.
- [10] Liu S, Harpalani S. Evaluation of in situ stress changes with gas depletion of coalbed methane reservoirs [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119:6263-6276.
- [11] Shi J Q, Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: A new interpretation of the reservoir response to primary recovery [J]. Transport in Porous Media, 2004, 56:1-16.
- [12] 陈颀,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学 [M].合肥:中国科学技术大学出版社,2008.
- [13] Day S, Fry R, Sakurovs R. Swelling of moist coal in carbon dioxide and methane [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86:197-203.
- [14] Cui X, Bustin M R, Chikatararla L. Adsorption-induced coal swelling and stress: Implications for methane production and acid gas sequestration into coal seams [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B10):B10202.
- [15] Segall P, Fitzgerald S D. A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs [J]. Tectonophysics, 1998, 289:117-128.
- [16] Connell L D, Detournay C. Coupled flow and geomechanical processes during enhanced coal seam methane recovery through CO_2 sequestration [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77:222-233.
- [17] Mitra A, Harpalani S, Liu S. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with continued methane production: Part2-Modeling results [J]. Fuel, 2012, 94:117-124.
- [18] Feng R, Harpalani S, Pandey R. Laboratory measurement of stress-dependent coal permeability using pulse-decay technique and flow modeling with gas depletion [J]. Fuel, 2016, 177:76-86.
- [19] Shi J, Durucan S. Modelling laboratory horizontal stress and coal permeability data using S & D permeability model [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 131:172-176.
- [20] Espinoza D N, Pereira J M, Vandamme M, et al. Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 137:142-151.
- [21] 孟召平,田永东,李国富.沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义 [J].煤炭学报,2010,35(6):975-981.
Meng Zhaoping, Tian Yongdong, Li Guofu. Characteristics of in-situ stress field in Southern Qinshui Basin and its research significance [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6):975-981.
- [22] Meng Z, Zhang J, Wang R. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48:122-131.
- [23] Liu H, Sang S, Formolo M, et al. Production characteristics and drainage optimization of coalbed methane wells: A case study from low-permeability anthracite hosted reservoirs in Southern Qinshui Basin, China [J]. Energy for Sustainable Development, 2013, 17:412-423.
- [24] Wang S, Law D, Deng X, et al. Enhanced coalbed methane and

- CO₂ storage in anthracitic coal-Micro-pilot test at South Qinshui, Shanxi, China [J]. *International Journal of Greenhouse Control*, 2007, 1(2): 215-222.
- [25] Lu M, Connell L. Coal failure during primary and enhanced coalbed methane production—Theory and approximate analyses [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154-155: 275-285.
- [26] 冯晴, 吴财芳, 雷波. 沁水盆地煤岩力学特征及其压裂裂缝的控制 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(3): 100-103.
Feng Qing, Wu Caifang, Lei Bo. Coal/rock mechanics features of Qinshui Basin and fracturing crack control [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(3): 100-103.
- [27] Zipf R K. Failure mechanics of multiple seam mining interactions [A]. *Proceedings of the 24th International Conference on Ground Control in Mining* [C]. Morgantown: West Virginia University, 2005.
- [28] Wang S, Elsworth D, Liu J. Permeability evolution during progressive deformation of intact coal and implications for instability in underground coal seams [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 58: 34-45.
- [29] Gentzis T. Stability analysis of a horizontal coalbed methane well in the Rocky Mountain Front Ranges of southeast British Columbia, Canada [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 77: 328-337.
- [30] Zhao Y, Hu Y, Wei J, et al. The experimental approach to effective stress law of coal mass by effect of methane [J]. *Transport in Porous Media*, 2003, 53: 235-244.
- [31] Espinoza D N, Shovkun I, Makni O, et al. Natural and induced fractures in coal cores imaged through X-ray computed microtomography-impact on desorption time [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154-155: 165-175.
- [32] 王云飞, 黄正均, 崔芳. 煤岩破坏过程中细观力学损伤演化机制 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(12): 2390-2396.
Wang Yunfei, Huang Zhengjun, Cui Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(12): 2390-2396.
- [33] Viete D R, Ranjith P G. The effect of CO₂ on the geomechanical and permeability behavior of brown coal: Implications for coal seam CO₂ sequestration [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66: 204-216.
- [34] 高波, 康毅力, 史斌, 等. 压裂液对煤岩气藏渗流性能的影响 [J]. *天然气工业*, 2015, 35(9): 64-69.
Gao Bo, Kang Yili, Shi Bin, et al. Effect of fracturing fluid on the seepage properties of coalbed gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(9): 64-69.
- [35] Okotie V U, Moore R L. Well-production challenges and solutions in a mature, very-low-pressure coalbed-methane reservoir [J]. *Spe Production & Operation*, 2011, 26(2): 149-161.
- [36] Moore R L, Palmer I. History matching and permeability increase of mature coalbed methane wells in San Juan Basin [J]. *SPE* 146931, 2011.