

文章编号:0253-9993(2011)12-1979-06

保护层开采过程中煤岩损伤与瓦斯渗透性的变化研究

高峰^{1,2},许爱斌¹,周福宝³

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 安全学院,江苏 徐州 221116)

摘要:针对煤岩体损伤破坏特征,定义了煤岩体结构损伤变量,建立了相应的弹塑性损伤本构方程,并完成了有限元源程序的二次开发,利用此程序对乌兰煤矿双保护层开采实例进行了计算分析,给出了被保护层损伤程度和渗透性系数的变化规律,计算结果表明:7、8号煤层开采后,被保护2、3号煤层出现张拉损伤,煤层应力显著释放,煤岩体的渗透性急剧提高,有利于瓦斯运移和煤层瓦斯抽采,这与工程实际相吻合。

关键词:保护层开采;损伤;煤;瓦斯;渗透性

中图分类号:TD712.61 **文献标志码:**A

Research on the coal and rock damage and gas permeability in the protective seams mining

GAO Feng^{1,2}, XU Ai-bin¹, ZHOU Fu-bao³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to the damage characteristics of coal and rock, the damage variable of coal and rock structures was defined, the corresponding elastoplastic damage constitutive equation was established, and the secondary development of the finite element program was completed. The example of Wulan coal mine with double protective seam mining was calculated and analyzed by this new program, and the change laws of damage degree and permeability coefficient in protected coal seams were given. The results show that the tension damage appear in protected coal seams 2 and 3, the stress of coal seams are released clearly, and the permeability of coal seams quickly increases after the protective seams 7 and 8 mined. These results are beneficial for gas migration and extraction in coal seams, which is consistent with engineering practice.

Key words: protective seams mining; damage; coal; gas; permeability

瓦斯不仅可以造成煤矿重大灾害(如瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出等),而且是一种对环境有害气体,可引起很强的温室效应^[1-2]。但是,瓦斯更是一种不可再生的、高效的清洁能源,我国瓦斯总量巨大,与天然气总量相当,且随着采深的增加,很多煤矿的瓦斯含量也显著增大,因此实现煤与瓦斯共采,是实现我国煤炭资源高效开采、绿色开采以及保障我国能源安

全的重要途径。

煤与瓦斯共采实际上是通过采动卸压或人工措施使煤岩体产生裂隙,从而使赋存在煤层中的瓦斯得以充分解吸释放,并在一定区域内富集,然后对瓦斯进行抽采,再开采煤炭,以确保煤矿安全生产。但是,由于我国煤层赋存条件复杂,具有高瓦斯、低渗透、强吸附的显著特征,目前进行煤与瓦斯共采主要还是凭

经验,一些基础性问题如采动应力场、煤岩体裂隙场及瓦斯渗透性之间的关系尚不清楚,没有进行系统地研究,未能形成有效的煤与瓦斯共采基础理论体系。

实践^[3-4]表明,在一定条件下开采保护层可有效地实现煤与瓦斯共采。保护层的开采将引起上覆煤岩层垮落、破裂、弯曲下沉或者下伏煤岩层的破裂、上臃,使得煤岩体的原有裂隙张开,同时产生大量新的裂隙,导致煤层透气性显著增大,使煤层瓦斯得到高效、持续抽采^[5-6]。但是由于缺乏理论指导,对于保护层开采后煤层透气性大小、分布及演化,人们无法给出科学定量的计算,无法进行有效的评估。

由于煤岩体裂隙是影响煤层透气性的最直接因素,本文从保护层开采过程中煤岩体损伤、破断角度入手,定义了煤岩体的损伤变量,建立弹塑性损伤本构方程,并完成了对有限元源程序的二次开发。以内蒙古乌兰煤矿为例,计算分析了双保护层开采过程中采场围岩损伤场和应力场的分布及演化规律,给出了被保护层透气性系数变化规律,为开展煤与瓦斯共采的定量研究进行了有益的尝试。

1 弹塑性损伤本构方程

1.1 损伤演化方程

为了描述煤岩体内损伤的动态演化过程,定义与应变相关的损伤变量,其在单向应力状态下的表达式^[7]为

$$\omega = \begin{cases} 0 & (0 < \varepsilon \leq \varepsilon_f) \\ \frac{\varepsilon_u(\varepsilon - \varepsilon_f)}{\varepsilon(\varepsilon_u - \varepsilon_f)} & (\varepsilon_f < \varepsilon < \varepsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 为损伤变量; ε_f 为单向应力状态下岩石介质的损伤演化门槛值应变; ε_u 为极限应变。

对于三向应力状态^[8],设其3个主应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ,则其等效总应变可表示为 $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}$ 。等效拉应变为 $\varepsilon_t = \sqrt{\sum_i \varepsilon_i^2}$ ($\varepsilon_i > 0$),等效压应变为 $\varepsilon_c = \sqrt{\sum_j \varepsilon_j^2}$ ($\varepsilon_j < 0$)。则三维物体的总损伤为

$$\omega = \alpha_t \omega_t + \alpha_c \omega_c \quad (2)$$

式中, ω_t 、 ω_c 分别由 ε_t 、 ε_c 按式(1)确定; $\alpha_t = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon}\right)^2$,

$$\alpha_c = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon}\right)^2。$$

1.2 损伤本构方程

假设岩体损伤主要由偏应力引起^[9],则其损伤

本构方程为

$$\sigma_{ij} = (1 - \omega) E_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e + \frac{\omega}{3} \delta_{ij} E_{ppkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (3)$$

式中, E_{ijkl} 为煤岩材料参数; ε_{kl}^e 为弹性应变。

写成张量型通式,即

$$\sigma_{ij} = \tilde{D}_{ijkl} \varepsilon_{kl}^e \quad (4)$$

式中, \tilde{D}_{ijkl} 与基体弹性常数 E_{ijkl} 及损伤变量 ω 有关。

对式(4)应力进行微分得

$$d\sigma_{ij} = \tilde{D}_{ijkl} d\varepsilon_{kl}^e + \varepsilon_{kl}^e \frac{\partial \tilde{D}_{ijkl}}{\partial \omega} d\omega \quad (5)$$

材料进入塑性阶段以后,其应力应变关系不能像胡克定律建立全量关系,只能建立应力应变增量间的关系。因此对于微小的应力增量 $d\sigma_{ij}$,假设引起的全应变由弹性应变增量 $d\varepsilon_{kl}^e$ 和塑性应变增量 $d\varepsilon_{kl}^p$ 两部分组成,即

$$d\varepsilon_{kl} = d\varepsilon_{kl}^e + d\varepsilon_{kl}^p \quad (6)$$

对于塑性应变增量 $d\varepsilon_{kl}^p$,它不仅与应力增量有关,还受应力状态、应力路线和应力历史的影响。它与塑性势函数 Q 的关系为

$$d\varepsilon_{kl}^p = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{kl}} \quad (7)$$

其中, $d\lambda$ 为塑性乘子。因此,

$$d\varepsilon_{kl}^e = d\varepsilon_{kl} - d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{kl}} \quad (8)$$

将式(8)带入应力微分方程式(5)中,可得增量形式的弹塑性损伤本构方程

$$d\sigma_{ij} = \tilde{D}_{ijkl} \left(d\varepsilon_{kl} - d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{kl}} \right) + \varepsilon_{kl}^e \frac{\partial \tilde{D}_{ijkl}}{\partial \omega} d\omega \quad (9)$$

利用上述弹塑性损伤本构方程重新构造有限元方程,并实现程序化。

2 工程应用

2.1 模型概况

乌兰煤矿是煤与瓦斯突出较为严重的矿井之一,其井田呈单斜构造、南北走向,走向长5.3 km,倾斜宽3.04 km。井田内有可采及局部可采煤层17层,主采煤层为2、3、7、8煤层。其中,2、8煤层为突出煤层,3、7煤层为非突出煤层。在此情况下,对2、3煤层进行下保护层开采。根据我国《煤矿安全规程》规定:“应优先选择无突出危险煤层作为保护层”。所以首选7煤层作为开采保护层,这样它既是2、3煤层的远距离下保护层,又是8煤层的上保护层,然后开

采 8 煤层,这样它又可作为 2、3 煤层的下保护层,对其进行二次保护。

根据该矿的地质条件和研究重点,建立三维有限元模型,其数值模型尺寸为:煤层倾向长度 350 m,走向长度 200 m,垂直方向长度 300 m,煤层倾角 20°。根据保护开采方案,保护层工作面宽 200 m,在工作面两端各留 75 m 的煤柱,数值模型如图 1 所示。煤层开采前,由上覆岩层自重形成初始应力场。利用弹塑性损伤程序进行数值计算时,采用 Drucker-Prager 屈服准则。各岩层的力学参数见表 1。

2.2 计算结果分析

2.2.1 损伤场的分布及演化特征

利用开发的弹塑性损伤有限元程序对上述模型进行计算,图 2(a) 给出了 7 保护层开采后,在 $y = 100$ m 剖面上被保护层倾向损伤场的分布特征。当 7 煤层开采完成后,进一步对 8 煤层进行开采,图 2(b) 给出了同一剖面上损伤场的分布。

7 保护层开采后,造成覆岩大面积暴露,顶板因承受上覆岩层重力而出现弯曲下沉,顶板出现拉伸破坏裂隙。从图 2(a) 中看到在采空区上方出现较大损

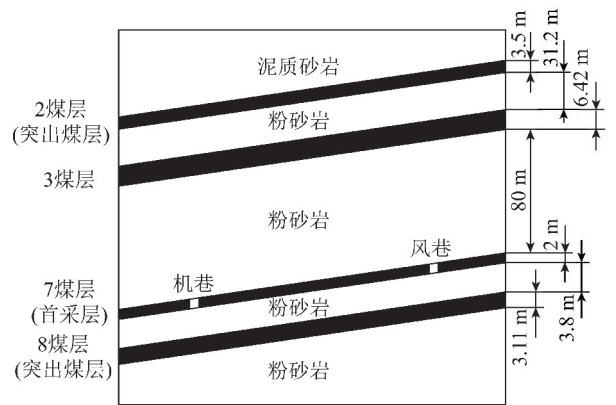


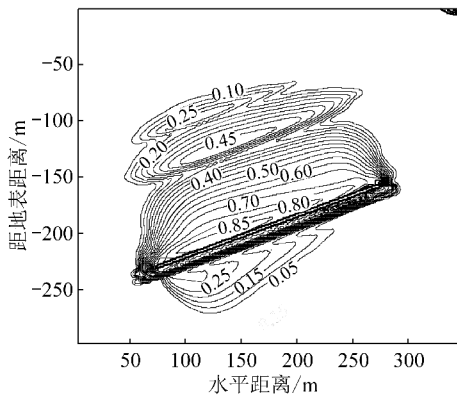
图 1 数值模型

Fig. 1 The numerical model

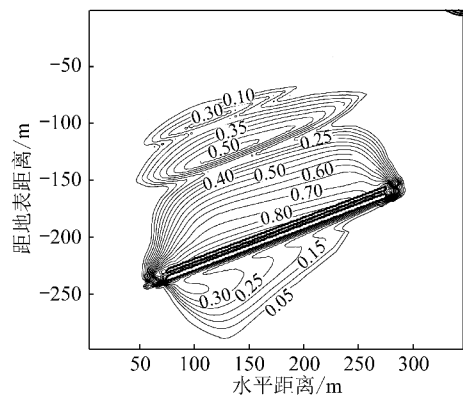
表 1 各岩层主要力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock strata

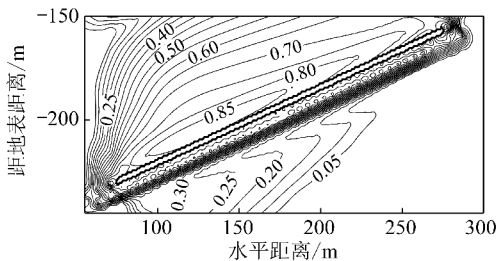
岩层	弹性模量/GPa	泊松比	容重/ $(N \cdot m^{-3})$	内摩擦角/ $(^\circ)$	内聚力/MPa
粉砂岩	8.61	0.23	24 540	37	2.0
煤层	4.47	0.18	14 650	32	1.5
砂质泥岩	5.04	0.26	22 710	32	1.6



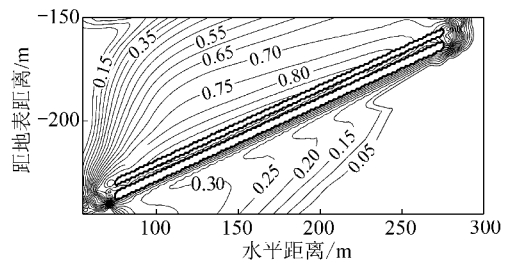
(a) 7保护层开采后损伤场分布



(b) 8保护层开采后损伤场分布



(c) 7保护层开采后局部煤体损伤场分布



(d) 8保护层开采后局部煤体损伤场分布

图 2 倾向剖面损伤场的动态演化特征

Fig. 2 Dynamic evolution of damages along dipping direction

伤,损伤度最大值达到 0.85,岩体已发生破断。采空区下部岩层由于保护层的开采会向采空区膨胀,产生大量裂隙,从而导致在采空区下方煤岩体中也出现较大损伤,最大值达到 0.25。另外,在 2、3 煤层局部区

域也出现了较大的损伤,损伤度分别达到 0.25、0.45,表明在这些区域形成的采动裂隙发育,煤岩体的透气性远远大于原始煤岩体的透气性,有利于瓦斯运移和煤层瓦斯卸压抽放;图 2(b) 为 8 保护层开采

后围岩的损伤分布特征,从图中可以看到8保护层开采后,由于煤岩体中新的裂隙不断产生以及原有裂缝的张开扩大,围岩的损伤度进一步增大,采空区上方损伤度增大到0.90,在2、3煤层的损伤度增大到0.30和0.50,煤岩体的透气性进一步增强,更加有利于瓦斯运移和抽采。

2.2.2 采动应力场的分布特征

图3给出7、8保护层开采后,在 $y = 100\text{ m}$ 剖面上采场围岩垂直应力分布。

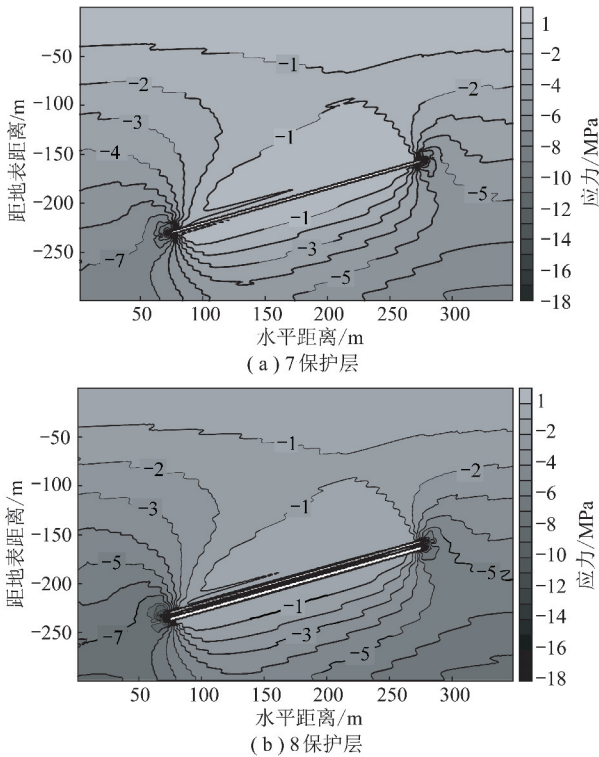


图3 倾向剖面垂直应力分布特征

Fig. 3 Vertical stress distribution along dipping direction

从图3(a)中可以看到,7保护层的开采破坏了原岩应力场的平衡,引起应力场的重新分布。在采空区两侧巷道附近产生了应力集中,其中左侧机巷附近最大应力达到 8.53 MPa ,在右侧风巷附近最大应力达到 7.03 MPa 。而采空区内顶、底板处应力明显比周围煤岩体所受的应力小,表明这些区域已经充分卸压,弹性能得到释放,出现底臃和拉张裂隙,透气系数得到提高,煤层瓦斯压力降低迅速,对应的瓦斯流量大幅度提升。

当8保护层开采后(图3(b)),采空区两侧巷道附近应力集中进一步增强,其中左侧机巷附近最大应力达到 18.05 MPa ,在右侧风巷附近最大应力达到 13.89 MPa ,应注意支护与防突。采空区顶、底板岩层的卸压程度进一步增强,煤岩体的渗透率进一步增大。

为了更好地研究保护层开采时被保护层的应力变化规律,分别在2煤层和3煤层顶板位置沿倾向布置两条观测线,然后提取观测线上各点的垂直应力值绘制如图4所示的应力变化曲线。

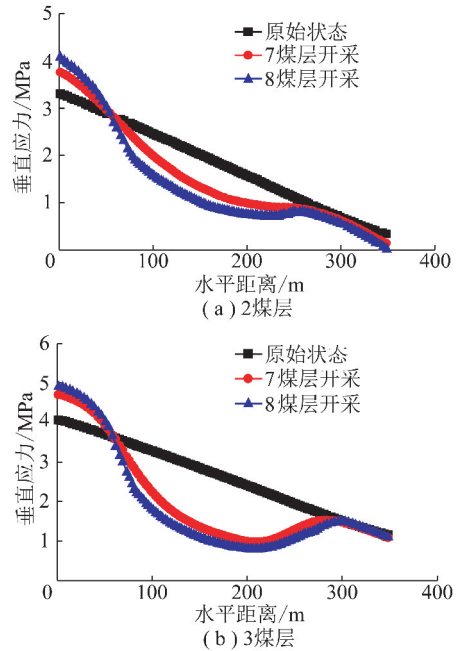


图4 7、8保护层开采后2、3煤层垂直应力曲线

Fig. 4 Vertical stress curves of the coal seams 2 and 3 after the excavation of the protective coal seams 7 and 8

从图4可以看到,当7煤层开采后,在左侧煤柱上方被保护层出现了不同程度的应力集中,右侧煤柱上方的被保护层的应力水平与原岩应力相差很小。而在采空区上方的被保护层则出现了不同程度的卸压,3煤层的垂直应力大幅降低,为原岩应力的 $0.4 \sim 0.8$ 倍,卸压效果显著,而2煤层的垂直应力为原岩应力的 $0.6 \sim 0.8$ 倍,卸压相对较弱。最大卸压点均出现在采空区中部靠倾斜上方,也就是距左边界 200 m 左右的位置。当8煤层开采后,3煤层所处区域的垂直应力进一步降低,为7煤层开采后的 0.75 倍,卸压程度进一步提高,2煤层垂直应力是开采7煤层后的 0.8 倍左右,最小值达到 0.9 MPa 。由于卸压导致了煤层的膨胀变形,增加了其透气性,从而有利于瓦斯的抽采。

3 被保护层渗透性分析

煤岩体是一种多孔介质,在一定压力梯度下,流体可以在煤岩体内流动。煤岩体透气性表征煤岩体对瓦斯流动的阻力,反映了瓦斯沿煤岩体流动的难易程度。当煤岩体细观单元的应力状态或者应变状态满足某个给定的损伤阈值时,单元开始损伤。由实验

可知^[10-15],煤岩体损伤破裂后将引起试件的透气系数急剧增大,透气系数的增大倍数可由 ξ 来定义, ξ 的大小由实验给出,单元透气系数描述为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & (\omega = 0) \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)} & (\omega > 0) \end{cases} \quad (10)$$

处于拉伸下的煤岩细观单元的透气系数-损伤耦合方程服从类似的规律。对应单元透气系数描述为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & (\omega = 0) \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)} & (0 < \omega < 1) \\ \xi' \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - p)} & (\omega = 1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, ξ 、 ξ' 、 α 、 β 分别为单元损伤情况下的透气性突

跳系数、单元完全破坏情况下透气性突跳系数、孔隙压力系数和应力对孔隙压力的影响系数(或耦合系数); λ_0 为初始渗透系数; p 为孔隙压力。

为了更好地研究保护层开采过程中被保护层的透气性系数变化规律,这里同样在 2 煤层和 3 煤层顶板位置沿倾向布置两条观测线,然后利用前面损伤、应力的计算结果求得观测线上各点的透气性系数,公式中用到的相关参数见表 2。对于透气性突跳系数 ξ 的取值,按照文献[16]的建议,当单元无损伤时 $\xi=1$;当单元出现损伤时 $\xi=5$ 。然后绘制如图 5 所示的透气性系数变化曲线。

表 2 煤层瓦斯相关参数

Table 2 Parameters of gas in coal seams

煤层	瓦斯含量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	瓦斯抽 采率/%	瓦斯压力 p/MPa	透气性系数 λ_0 / ($\text{m}^2 \cdot (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})^{-1}$)	孔隙压力 系数 α	耦合系 数 β
2 煤层	10.60		1.1	0.01	0.9	2.5
3 煤层	9.81	10.17	1.3	0.01	0.9	2.1

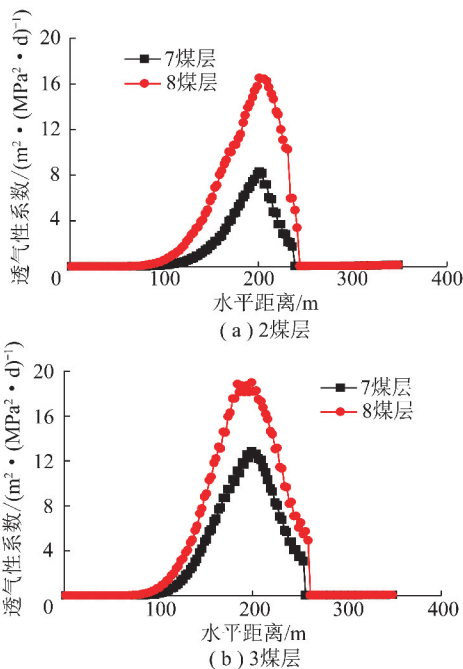


图 5 2 煤层和 3 煤层渗透性系数变化曲线

Fig. 5 The change curves of gas permeability in coal seams 2 and 3

图 5 分别为 7、8 保护层开采过程中被卸压煤层的渗透性系数变化曲线。由图 5 可见,由于保护层的开采,导致采场覆岩的移动、垮落,从而诱使被保护层出现了损伤区和卸压区,致使采动影响范围内被卸压煤层的渗透性系数增加明显。

图 5(a)为 2 煤层渗透性系数的变化曲线,当 7

煤层开采后,2 煤层的渗透性系数从最初的 $0.01 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 增大到 $8.32 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,为保护层开采前的 832 倍;当 8 煤层开采后,2 煤层的渗透性系数增大到 $16.51 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,为保护层开采前的 1 651 倍,最大值位于风巷内侧 75 m 左右的区域。

图 5(b)为 3 煤层渗透性系数的变化曲线,当 7 煤层开采后,3 煤层的渗透性系数增加到初始的 1 254 倍,最大值为 $12.54 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$;当 8 煤层开采后,3 煤层的渗透性系数增大到 $18.96 \text{ m}^2 / (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,为保护层开采前的 1 896 倍,最大值同样位于风巷内侧 75 m 左右的区域。

从图 5 可以看到,保护层的卸压开采,能够显著降低远程卸压煤层中的瓦斯压力,增加被卸压煤层的渗透性,因而,通过钻孔或钻井抽采被卸压煤层内的瓦斯是切实可行的,从而可有效地实现煤与瓦斯共采。

4 工程实践

现场工程实践考察证实,7、8 保护层开采后,2、3 煤层的应力得到大幅度降低,并产生较大的损伤场,使得煤层透气性系数显著提高。2 煤层瓦斯含量由原始的 $10.6 \text{ m}^3 / \text{t}$ 降到卸压后的 $3.63 \text{ m}^3 / \text{t}$,瓦斯抽采率达到 65.8%,煤层瓦斯压力由卸压前 1.1 MPa 降到 0.23 MPa,小于规定的 0.74 MPa;3 煤层瓦斯含量由原始的 $9.81 \text{ m}^3 / \text{t}$ 降到卸压后的 $3.14 \text{ m}^3 / \text{t}$,瓦斯抽采率达到 68%,煤层瓦斯压力由原始的 1.3 MPa 降

到卸压后的 0.2 MPa, 同样小于规定的 0.74 MPa, 有效消除了煤与瓦斯突出的危险。可以看出此工程实际结果与数值计算结果相一致, 验证了本文所采取的理论和方法的有效性。

5 结 论

(1) 根据煤岩体损伤特性, 运用弹塑性损伤理论进行了有限元程序开发, 由此可计算采动影响下煤岩体中损伤分布和演化规律。

(2) 计算分析了乌兰煤矿双保护层开采条件下被保护煤层的损伤场和应力场的分布及演化。计算结果表明: 7 煤层首采后, 8 煤层出现膨胀裂隙, 损伤值最大达 0.25, 2、3 煤层出现张拉裂隙, 损伤值达 0.25~0.45, 而垂直应力下降约 35%, 这表明这些区域已有效卸压, 煤层渗透性显著增大; 随着 8 保护层开采后, 2、3 煤层损伤度进一步增大, 最大值达 0.4~0.5, 而垂直应力下降近 60%, 煤岩体的渗透性急剧提高, 有利于瓦斯运移和煤层瓦斯抽采。

参考文献:

- [1] 石必明, 俞启香, 周世宁. 保护层开采远距离煤岩破裂变形数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 259-263.
Shi Biming, Yu Qixiang, Zhou Shining. Numerical simulation of far-distance rock strata failure and deformation caused by mining protecting stratum[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 259-263.
- [2] 石必明, 刘泽功. 保护层开采上覆煤层变形特性数值模拟[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 17-22.
Shi Biming, Liu Zegong. Numerical simulation of the upper coal and rock deformation characteristic caused by mining protecting stratum[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 17-22.
- [3] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 95-97.
- [4] 林柏泉, 崔恒信. 矿井瓦斯防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998: 60-63.
- [5] 张拥军, 于广明, 路世豹, 等. 近距离上保护层开采瓦斯运移规律数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 398-404.
Zhang Yongjun, Yu Guangming, Lu Shibao, et al. Numerical analysis of gas flow law with short distance upper protective layer gas extraction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 398-404.
- [6] 涂敏, 黄乃斌, 刘宝安. 远距离下保护层开采上覆煤岩体卸压效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 419-426.
Tu Min, Huang Naibin, Liu Bao'an. Research on pressure relief effect of overlying coal rock body using far distance lower protective seam exploitation method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 419-426.
- [7] 钱济成, 周建方. 混凝土的两种损伤模型及其应用[J]. 河海大学学报, 1989, 17(3): 40-47.
Qian Jicheng, Zhou Jianfang. Two concrete damage model and their application[J]. Journal of Hohai University, 1989, 17(3): 40-47.
- [8] Mazars J. Mechanical damage and fracture of concrete structure[A]. 5th Int. Conf. on Fracture[C]. Cannes, 1980: 1 499-1 506.
- [9] 吴刚, 孙钧, 吴中如. 复杂应力状态下完整岩体卸荷破坏的损伤力学分析[J]. 河海大学学报, 1997, 23(3): 44-49.
Wu Gang, Sun Jun, Wu Zhongru. Damage mechanical analysis of unloading failure of intact rock mass under complex stress state[J]. Journal of Hohai University, 1997, 23(3): 44-49.
- [10] Paterson S. Experimental deformation of rocks: the brittle field[M]. Berlin: Springer, 1978.
- [11] Zhang Jincai, Bai Mao, Roegiers J C, et al. Experimental determination of stress-permeability relationship[A]. Proc. of Pacific Rock 2000[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000: 817-822.
- [12] 韩宝平, 冯启言, 于礼山, 等. 全应力应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 127-128.
Han Baoping, Feng Qiyang, Yu Lishan, et al. Study on the permeability of carbonate during full periods of stress-strain[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(2): 127-128.
- [13] 李树刚, 徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68-70.
Li Shugang, Xu Jingcai. Experimental study on permeability of soft coal sample with electro-hydraulic servocontrolled testing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 68-70.
- [14] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力应变过程渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153-156.
Jiang Zhenquan, Ji Liangjun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 153-156.
- [15] 杨天鸿. 岩石破裂过程渗透特性及其与应力耦合作用的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2001.
- [16] 杨天鸿, 唐春安, 徐涛, 等. 岩石破裂过程的渗流特性: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.