

文章编号:0253-9993(2011)12-2074-06

含瓦斯煤岩体采动致裂特性及其对卸压变形的影响

刘洪永,程远平,陈海栋,刘清泉,孔胜利

(中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心,江苏 徐州 221116)

摘 要:为了研究瓦斯压力对采动煤岩体卸压变形的影响,在FLAC平台上采用应变软化本构关系和“先加载后卸压”的方式,研究了不同瓦斯压力及围压条件下采动煤岩体的卸压致裂特性及其对卸压变形的影响。模拟结果表明:煤岩损伤破坏应力的峰值及所对应的轴向应变、应力峰后下降幅度随瓦斯压力的增加而减小,其力学特征由脆性逐渐向塑性过渡;瓦斯压力的增加使煤岩承载能力下降,并由于在有效应力空间中应力水平的提高而使拉伸破坏提前发生;随着瓦斯压力的升高,上覆煤岩采动煤岩卸压变形量、致裂破坏区不断增大,致裂特征更加明显,采动卸压范围、应力集中峰值及其距煤柱边界的距离也增大。因此,当煤层瓦斯压力较高时,瓦斯压力对采动煤岩体卸压变形的影响不能忽略。

关键词:含瓦斯煤岩体;采动卸压致裂;瓦斯压力;FLAC

中图分类号:TD712.61 **文献标志码:**A

Characteristics of depressurized fissure and its effect on deformation induced pressure relief of mining coal mass containing gas

LIU Hong-yong, CHENG Yuan-ping, CHEN Hai-dong, LIU Qing-quan, KONG Sheng-li

(National Engineering Research Center of Coal Gas Control, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The characteristics of fissure induced pressure-relief at different gas pressures and its effect on deformation induced press relief of mining coal mass containing gas were analyzed by using FLAC software. A strain-softening constitutive relation was used and the confining pressure was unloaded after the model reaching a static equilibrium state. The numerical results show that the peak stress and its corresponding axial strain of damage failure and the descend amplitude after peak stress decrease, with the rising gas pressure, and the mechanical characteristics become brittle from plastic. The supporting capacity of coal mass containing gas decreases with the rising gas pressure, and the tensile failure appeared ahead caused by increasing stress in effective stress space. The depressurized deformation and failure area induced pressure relief are larger with higher the gas pressures at the same confining pressure, and the characteristics of fissure induced pressure relief are more obvious, which caused the peak stress rising and its location away from the pillar longer. When the gas pressure reaches a certain value, the effect of gas pressures on the depressurized deformation of mining coal mass containing gas cannot be neglected.

Key words: coal mass containing gas; depressurized fissure induced pressure relief; gas pressure; FLAC

我国大多数煤层透气性较低,一般都在 $0.01 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 以下,属于难抽采煤层。为了高效地抽采煤层瓦斯,需大幅提高煤层的透气性,多年的科学研究和实践证明采动卸压瓦斯抽采技术是实现高瓦斯、

煤与瓦斯突出煤层安全开采最有效和最经济的区域性措施之一,尤以保护层开采技术为最^[1-3]。为此,2009年颁布实施的《防治煤与瓦斯突出规定》(下称《规定》)要求^[4]:煤与瓦斯突出煤层瓦斯治理必须坚

收稿日期:2011-08-20 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201204);国家自然科学基金面上资助项目(51074160);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010QNA03)

作者简介:刘洪永(1982—),男,山东潍坊人,讲师,博士。Tel:0516-83885948, E-mail: Lhyeven@163.com

持区域防突措施先行、局部防突措施补充的原则,煤与瓦斯突出煤层进行采掘活动前必须采取以开采保护层优先的区域综合防突措施。

采动卸压瓦斯抽采技术是通过采动卸压或人工措施产生煤岩体破断,使其中的瓦斯得以充分释放,并在一定范围富集,然后利用机械方式抽取富集区的瓦斯。但由于我国煤层赋存条件普遍复杂多变,采动卸压效果的差异较大,瓦斯治理工程方法也迥然不同。瓦斯治理工程应根据采动卸压效果,即卸压作用是否充分,瓦斯抽采措施能否保证卸压瓦斯抽采效果达到《煤矿瓦斯抽采基本指标》^[5](下称《指标》)的要求。相关研究发现,被保护煤层膨胀变形量可作为衡量保护层保护效果的指标,但保护层的采动卸压作用与保护层开采厚度、顶板管理方法、回采工作面长度和开采深度等因素有关^[3,6]。但目前大多数的研究仅考虑地应力的作用,忽略了煤层瓦斯压力的作用。当瓦斯压力较高时,原始煤岩的有效应力远小于总应力,且瓦斯压力的升高使煤岩力学强度下降,因而瓦斯压力对采动煤岩的力学响应有直接影响^[7]。忽略瓦斯压力的模拟结果不能真实反应含瓦斯煤岩体受到的卸压致裂作用,给采动卸压瓦斯抽采技术的应用带来不便,尤其对卸压瓦斯治理工程位置的选择及瓦斯抽采钻孔参数的设置影响较大,严重影响卸压瓦斯抽采的有效性、安全性和经济性,制约了采动卸压瓦斯抽采技术的推广应用。

梁冰^[7]、赵阳升^[8]、何学秋^[9]、许江和鲜学福^[10]等以实验室试验为手段研究了瓦斯压力对煤岩力学强度、力学响应的影响及损伤作用。王学滨、潘一山等^[11]利用剪切应变梯度塑性理论,解析得出了考虑围压和孔隙压力的岩石试件应力与应变的关系。尹光志和王登科等^[12]建立了能反映含瓦斯煤岩在各种应力条件下力学行为的弹塑性损伤耦合本构模型,用于描述含瓦斯煤岩各种不同载荷条件下的力学特性和行为。王学滨^[13]模拟了孔隙压力对岩样破坏过程、全部变形及前兆的影响。

上述研究结果大多在实验室以小尺度的煤岩样为研究对象,研究了加载条件下含瓦斯煤岩体的应力-应变关系、瓦斯压力对煤岩力学强度、响应特征及破坏过程,但研究尺度较小且瓦斯压力较低,与卸载条件下采动煤岩体的大尺度、较高瓦斯压力等特征有较大差别。对于平面应变条件下瓦斯压力对大尺度采动岩体卸压致裂特征及变形的影响研究尚未开展。

因此,本文以阳泉矿区新景矿为地质背景,在 FLAC 平台上采用应变软化本构关系和“先加载后卸

压”的方式,研究不同瓦斯压力及围压条件下采动煤岩体的卸压致裂特性。

1 含瓦斯煤岩采动卸压致裂研究方法

拉格朗日元法 (FLAC) 采用了混合离散法、动态松弛法和显式差分法,在处理应变软化问题不会遇到负刚度(控制方程刚度矩阵负定)问题,具有一定的优越性,在采动煤岩体破裂分析中的应用比较广泛^[14-15]。

在 FLAC 中,瓦斯压力的作用是通过有效应力定律描述的,瓦斯压力在压缩条件下取正值。有效应力 σ' (压为负)与总应力 σ_0 及瓦斯压力 p 之间的关系为

$$\sigma' = \sigma_0 + \alpha p \quad (1)$$

式中, σ' 为有效应力,MPa; σ_0 为总应力,MPa; p 为瓦斯压力,MPa; α 为气体有效应力系数。

假定煤岩的力学行为服从应变软化本构关系。在弹性阶段,煤岩的本构关系取为各向同性线弹性模型,峰值强度后煤岩的本构模型为莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型。峰后内摩擦角及内聚力与塑性剪切应变的关系先降低(应变软化),然后分别达到残余内摩擦角及残余内聚力。

1.1 计算模型

计算模型的尺寸采用标准圆柱体形试样,采用半径 25 mm、高 100 mm 的圆柱体 (Cylinder) 单元,划分为 8 000 个单元。试样底面为竖向位移约束,试样四周采用应力边界条件,试样顶端进行垂向加载,这对应于上端面与试验机压头之间存在较大摩擦力的情形。

计算采用应变-软化模型,在弹性阶段,岩石的本构关系为线弹性,峰值强度后岩石的本构模型取为莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型。模型的物理力学参数详见表 1,初始(塑性应变为 0 时)黏聚力为 2.0 MPa,初始摩擦角为 41°,煤岩的黏聚力、内摩擦角与塑性应变的关系如图 1 所示,在黏聚力及摩擦角降低的过程中,其斜率保持不变,黏聚力软化斜率 $C_k = 0.573 3$,摩擦角软化斜率 $F_k = 2.00 \times 10^4$ 。

表 1 本构模型的物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameters of the numerical model

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量 E/GPa	泊松 比 μ	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa
2 400	1.63	0.21	41	2.0	1.41

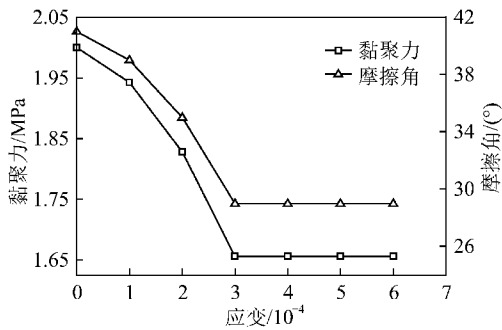


图1 摩擦角、黏聚力与塑性应变的关系

Fig. 1 Relations among cohesion, friction angle and plastic strain

1.2 计算步骤

(1) 建立未开挖的模型, 给定本构关系、边界条件及加载条件(模型四周的围压及内部的瓦斯压力), 进行数值计算(FLAC 无论对静力问题求解还是对动力问题求解, 均是基于运动方程求解, 阻尼由FLAC 自动施加), 直到模型最大失衡力小于 1.5×10^{-3} N。

(2) 使用 Fish 函数在模型顶部分级施加荷载, 每级为 100 kPa, 由于加载而引起了最大失衡力, 模型将不再处于静力平衡状态。

(3) 对加载后的模型进行计算(FLAC 自动施加阻尼), 直至一个新的平衡或塑性流动状态。

2 含瓦斯煤岩采动卸压致裂特性分析

计算完成了不同围压、不同瓦斯压力下圆柱试样的压缩试验, 得到了围压为 1.0 MPa, 瓦斯压力为 0、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 MPa 的损伤变形情况。为了对比不同围压对煤岩损伤变形的影响, 开展了围压为 2.0 MPa, 瓦斯压力为 1.2 和 1.4 MPa 下圆柱试样的压缩试验。

2.1 固定围压下瓦斯压力对煤岩破坏过程的影响

围压为 1.0 MPa, 不同瓦斯压力下试件底端面中心位置的轴向应变-应力关系如图 2 所示。

由图 2 可以发现, 损伤破坏应力的峰值及所对应的轴向应变、脆性随着瓦斯压力的增加而降低, 且随着瓦斯压力的增高, 峰值下降幅度逐渐减小, 岩石的力学特征由脆性逐渐向塑性过渡。瓦斯压力为零时, 峰值应力为 6.92 MPa, 峰值应变为 0.394, 损伤破坏后的应力跌落至 5.44 MPa, 下降幅度达到 21.4%; 当瓦斯压力为 1.4 MPa 时, 峰值应力为 3.17 MPa, 峰值应变为 0.160, 损伤破坏后的应力跌落至 3.15 MPa, 下降幅度达到 0.63%。试样破坏后, 由于加载增量较大, 产生了少量塑性应变。这一结果与相关的研究结论^[16]有着相同的规律, 与实验室的三轴压缩结果

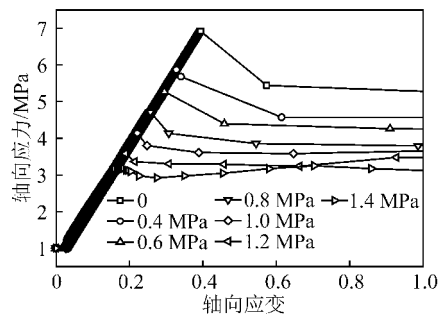


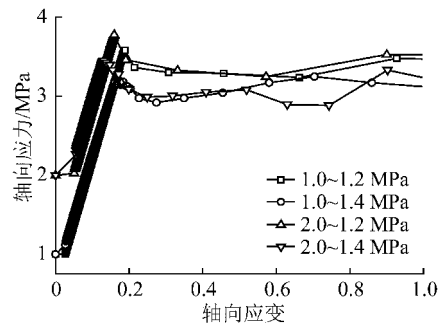
图2 围压为 1.0 MPa 时, 不同瓦斯压力下轴向应力-应变关系

Fig. 2 Relationships between axial stress and axial strain of testing specimen at different gas pressures under 1.0 MPa confining pressure

一致^[7]。

2.2 不同围压下瓦斯压力对煤岩破坏过程的影响

瓦斯压力为 1.2 和 1.4 MPa 时, 围压为 1.0 和 2.0 MPa 下试件底端面中心位置的轴向应变-应力关系如图 3 所示。

图3 瓦斯压力不变, 在不同围压下的轴向应力-应变关系
Fig. 3 Relationships between axial stress and axial strain at different confining pressures under the same gas pressures

从图 3 可以看出, 岩样的应力峰值、脆性随着围压的增加而升高, 轴向应变峰值则随着围压的增加而降低。瓦斯压力为 1.2 MPa 时, 当围压由 1.0 MPa 增加到 2.0 MPa 时, 应力峰值由 3.58 MPa 升高至 3.78 MPa, 与此所对应的轴向应变由 0.187 降为 0.159, 损伤破坏后的应力跌落则基本一致, 分别为 3.36 和 3.46 MPa。瓦斯压力为 1.4 MPa 时, 当围压由 1.0 MPa 增加到 2.0 MPa 时, 应力峰值由 3.18 MPa 升高至 3.45 MPa, 与此所对应的轴向应变由 0.182 降为 0.131, 损伤破坏后的应力跌落也基本一致, 分别为 2.92 和 2.99 MPa。这是由于围压的增加, 岩样的弹性模型增加, 这与实验室的三轴试验结果一致^[7]。

2.3 瓦斯压力对煤岩体卸压致裂的影响

在 FLAC 中, 塑性区包括剪切屈服塑性区和拉伸屈服塑性区。图 4 给出了围压为 2.0 MPa、瓦斯压力

为 0 和 1.4 MPa 时塑性区的分布。

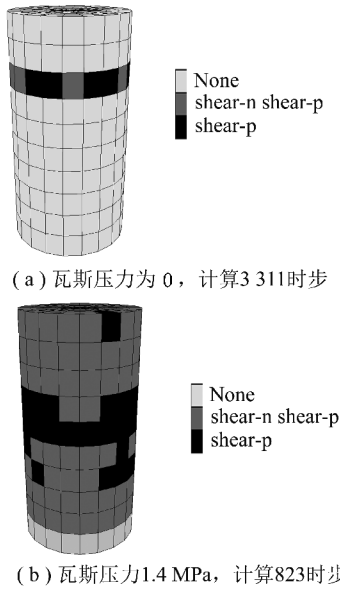


图 4 不同瓦斯压力和时步下,试件的致裂破坏单元分布情况
Fig. 4 Distributions of yielded elements at different gas pressure and timesteps

当围压恒定,瓦斯压力为零时,无损岩石试件在压缩试验中只发生压剪破坏,如图 4(a)所示;当瓦斯压力由 0 增加至 1.4 MPa 后,试件不但由于部分单元的损伤,承载能力下降使其邻近单元应力集中并有拉应力产生,出现了拉伸破坏。因此,瓦斯压力的升高使煤岩承载能力下降,而且由于有效应力空间中应力水平的提高而使拉伸破坏提前发生。

而实际上,对于含瓦斯节理裂纹的岩石在瓦斯压力的作用下,节理裂纹端部产生拉应力集中,按照格里菲斯强度理论,应该出现拉伸破坏。因此,上述计算结果与格里菲斯强度理论相符,且与相关计算结果相符^[17]。

3 上覆煤岩采动卸压致裂与变形研究

3.1 研究背景

阳泉矿区煤与瓦斯突出危险严重,尤以 3 号煤层为最。在新景煤矿井田内,下距 3 号煤层平均为 125 m 处有厚度为 6.14 m 的 15 号煤层,该煤层无煤与瓦斯突出危险,可作为 3 号煤层的下保护层。根据《规定》^[4]的要求,保护层和被保护层之间的最大有效垂距不能大于 100 m。而新景煤矿 15 号煤与 3 号煤平均层间距达到了 125 m,远大于《规定》的要求,保护层开采的效果难以保证。因此,若将 15 号煤层作为下保护层,需对保护层开采可行性和被保护层 3 号煤层卸压瓦斯抽采的效果进行评价。计算模型根据新景煤矿地质条件而建立。计算模型的几何特征、单元划分及边界条件如图 5 所示。计算范围取长宽各为 500 m,高为 210 m,开采长度 300 m。模型下边界垂直位移固定,左右两侧水平位移固定,上边界为应力边界,其垂向均匀载荷根据上覆岩层质量确定。数值计算在大变形模式下进行。模型中 15 号煤层埋深为 380 m,模拟区域煤系地层的物理力学参数详见表 2。

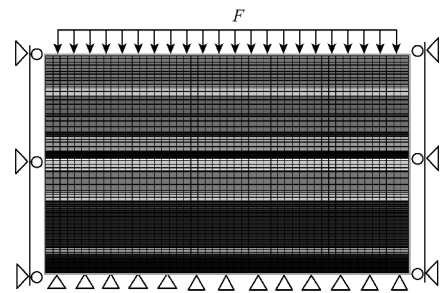


图 5 模型的几何特征及边界条件
Fig. 5 Geometry features and boundary conditions of model

表 2 模拟区域煤系地层岩性参数

Table 2 Physical mechanics parameters of the coal and rock seams in the model

编号	岩性	厚度/ m	累厚/ m	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	抗拉强度 T/MPa	残余摩擦 角 $\varphi_r/(^\circ)$	残余黏聚 力 c_r /MPa	黏聚力软化 斜率 C_k	摩擦角软化 斜率 F_k
1	中粒砂岩	27.0	210.3	27.40	18.80	38	6.40	4.17	33	2.50	0.573	2.0×10^4
2	泥岩	3.4	183.3	1.80	0.929	30	2.67	2.50	24	1.13	0.426	1.5×10^4
3	砂质泥岩	7.8	179.9	2.03	1.04	33	3.20	3.34	27	1.00	0.573	2.0×10^4
4	煤层	2.6	155.5	2.58	1.19	26	1.23	1.28	22	0.62	0.426	1.5×10^4
5	石灰岩	3.2	66.7	10.50	6.91	37	4.70	6.83	31	1.12	0.573	2.0×10^4

利用编写的 FISH 函数开采煤层,即将模型中保护层开采范围的单元逐步删除。煤层开采后,模型仍然受到围压及瓦斯压力作用,将不再处于静力平衡状态。对开挖后的模型进行计算,直至不平衡力达到设

定值。

为了研究瓦斯压力对采动煤岩体卸压致裂、变形的影响,计算模型采用 3 个方案,方案 1~3 的瓦斯压力分别为 0、1.0 和 1.7 MPa。

3.2 瓦斯压力对采动煤岩卸压效果的影响

经过运算得到了方案1~3的计算结果。由于篇幅限制,仅将保护层工作面推进至200 m时,被保护层3号煤层的底板的应力和煤层的相对变形情况列出,如图6和图7所示。

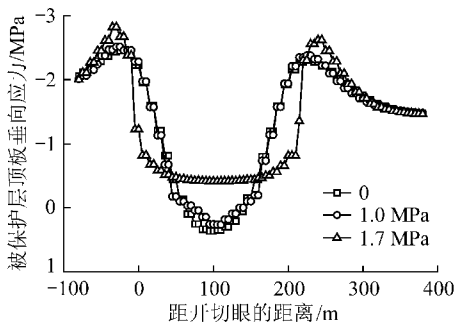


图6 被保护层3号煤层底板应力分布曲线

Fig. 6 Curves of vertical stress on No. 3 coal seam floor at different gas pressure

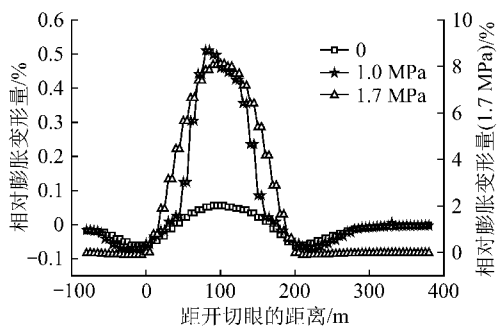


图7 被保护层3号煤层相对变形曲线

Fig. 7 Isoclines distribution of vertical display and protected areas of the overburden

根据2.1节的分析知,煤岩损伤破坏应力的峰值及所对应的轴向应变随着瓦斯压力的增加而降低,岩石的力学特征由脆性逐渐向塑性过渡。这在保护层开采中上部被保护层的应力分布上体现为:在工作面推进距离一定时,上覆煤岩体的采动卸压范围、应力集中峰值及其在煤柱内的位置均随着瓦斯压力的升高而增大,如图6所示。与此对应,被保护层3号煤层的膨胀变形的范围、变形量也随着瓦斯压力的升高而增大,并由此造成煤柱更大的压缩变形,如图7所示。

在工作面推进200 m时,当瓦斯压力为0时,被保护层的卸压范围为160 m,卸压最充分处应力由压应力变为拉应力,值为0.364 MPa,对应的膨胀变形为0.13%;两侧煤柱内的应力集中峰值为-2.45 MPa,应力集中系数为1.63,最大压缩相对变形量为-0.14%(距煤柱边缘20 m)。当瓦斯压力增加至1.7 MPa时,被保护层的卸压范围增大至220 m,卸压最充分处的压应力降至-0.417 MPa,仅为原始

应力的27.8%,对应的相对膨胀变形量达到了8.12%;两侧煤柱内的应力集中峰值为-2.62 MPa,应力集中系数为1.75,距煤柱边缘45 m,最大压缩相对变形量为-0.10%。而当瓦斯压力为1.0 MPa时,上述各值与瓦斯压力为0时的结果在同一数量级。

上述现象说明,随着瓦斯压力的升高,采动煤岩卸压变形量、致裂破坏区不断增大,且致裂特征也更加明显;同时,工作面两侧煤柱内采动应力集中峰值更高,峰值区在煤柱内的位置距煤柱边缘更大。因此,若不考虑瓦斯压力,采动卸压效果、煤柱内的应力集中将会被低估,这给卸压瓦斯治理工程的设计和被保护层的安全开采带来隐患。尤其当煤层瓦斯压力较高时,瓦斯压力对采动煤岩体卸压效果的影响更是不能忽略。前期的研究也发现,不考虑瓦斯压力的作用时,物理相似模拟和数值计算的结果均小于实际结果^[15]。

而根据瓦斯压力为1.7 MPa时的应力场和位移场分析发现,导水裂隙带的高度(即垮落带和裂隙带高度之和)超过了135 m,由此可以断定阳泉矿区3号煤层处于15号煤层的裂隙带上边缘,采动裂隙较为发育,卸压效果良好,透气性显著增加,卸压瓦斯抽采可取得良好效果。

现场工程实践考察证实^[18],新景煤矿15号煤层开采后,上保护层3号煤层的卸压瓦斯抽采取得了良好效果。在82 d的抽采期内,共抽采瓦斯1 655 072 m³,卸压瓦斯综合抽采率达到了70.1%,3号煤层瓦斯含量由18.17 m³/t降至5.40 m³/t,完全消除煤与瓦斯突出危险。

4 结 论

(1) 围压一定时,煤岩损伤破坏应力的峰值及所对应的轴向应变、脆性随着瓦斯压力的增加而降低,且随着瓦斯压力的增高,应力峰后下降幅度逐渐减小,岩石的力学特征由脆性逐渐向塑性过渡。瓦斯压力一定时,岩样的应力峰值、脆性随着围压的增加而升高,轴向应变峰值则随着围压的增加而降低。

(2) 当围压恒定,瓦斯压力为零时,无损岩石试件在压缩试验中只发生压剪破坏;当瓦斯压力由0增加至1.4 MPa后,试件不但由于部分单元的损伤,承载能力下降使其邻近单元应力集中并有拉应力产生,出现了拉伸破坏,而且由于在有效应力空间中应力水平的提高而使拉伸破坏提前发生。

(3) 以阳泉新景煤矿保护层开采为背景的数值模拟研究发现,在工作面推进距离一定时,上覆煤岩体的采动卸压范围、应力集中峰值及在煤柱内的位置

均随着瓦斯压力的升高而增大。随着瓦斯压力的升高,采动煤岩卸压变形量、致裂破坏区不断增大,且致裂特征也更加明显;同时,工作面两侧煤柱内采动应力集中峰值更高,峰值区在煤柱内的位置距煤柱边缘更大。当煤层瓦斯压力较高时,瓦斯压力对采动煤岩体卸压变形的影响不能忽略。

(4) 模拟结果表明,阳泉新景矿被保护层3号煤层处于15号煤层的裂隙带上边缘,采动裂隙较为发育,卸压效果良好,透气性显著增加,卸压瓦斯抽采可取得良好效果。上述评价结果得到了现场实践的验证。

参考文献:

- [1] 程远平,俞启香,袁亮. 上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽放技术研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):483-486.
Cheng Yuanping, Yu Qixiang, Yuan Liang. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam[J]. Journal of Liaoning Technical University,2003,22(4):483-486.
- [2] 程远平,俞启香,袁亮,等. 煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):132-136.
Cheng Yuanping, Yu Qixiang, Yuan Liang, et al. Experimental research of safe and high efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2004,33(2):132-136.
- [3] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
- [4] 国家安全生产监督管理总局. 防治煤与瓦斯突出规定[S]. 北京:煤炭工业出版社,2009.
- [5] 国家煤矿安全监察局. 煤矿瓦斯抽采基本指标(AQ1026-2006)[S]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [6] 刘洪永,程远平,赵长春,等. 保护层的分类及判定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(4):468-474.
Liu Hongyong, Cheng Yuanping, Zhao Changchun, et al. Classification and judgment method of the protective layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(4):468-474.
- [7] 梁冰,章梦涛,潘一山,等. 瓦斯对煤的力学性质及力学响应影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,1995,17(5):12-18.
Liang Bing, Zhang Mengtao, Pan Yishan, et al. The experimental research on the effect of gas on mechanical properties and mechanical response of coal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1995,17(5):12-18.
- [8] 靳钟铭,赵阳升,贺军,等. 含瓦斯煤层力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(3):271-180.
Jin Zhongming, Zhao Yangsheng, He Jun, et al. An experimental study on the mechanical properties of gas-bearing coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1991,10(3):271-180.
- [9] 何学秋,王恩元,林海燕. 孔隙气体对煤体变形及蚀损机理[J]. 中国矿业大学学报,1996,25(3):6-11.
He Xueqiu, Wang Enyuan, Lin Haiyan. Coal deformation and fracture mechanism under pore gas action[J]. Journal of China University of Mining and Technology,1996,25(3):6-11.
- [10] 许江,鲜学福,杜云贵,等. 含瓦斯煤的力学特性的实验分析[J]. 重庆大学学报,1993,16(5):42-47.
Xu Jiang, Xian Xuefu, Du Yungui, et al. An experimental study on the mechanical property of the gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University,1993,16(5):42-47.
- [11] 王学滨,潘一山. 考虑围压及孔隙压力的岩石试件应力与应变关系解析[J]. 地质力学学报,2001,7(3):265-270.
Wang Xuebin, Pan Yishan. Theoretical analysis of relationship between stress and strain in consideration of confining pressure and pore pressure of rock sample[J]. Journal of Geomechanics,2001,7(3):265-270.
- [12] 尹光志,王登科. 含瓦斯煤岩耦合弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(5):993-999.
Yin Guangzhi, Wang Dengke. A coupled elastoplastic damage model for gas-saturated coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):993-999.
- [13] 王学滨,赵福成,潘一山. 孔隙压力对含随机缺陷岩石破坏过程及全部变形特征的影响[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(1):1-8.
Wang Xuebin, Zhao Fucheng, Pan Yishan. Failure processes and overall deformational characteristics of rock specimen with random imperfections at different pore pressures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2009,29(1):1-8.
- [14] 蓝航,姚建国,张华兴,等. 基于FLAC3D的节理岩体采动损伤本构模型的开发及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(3):572-579.
Lan Hang, Yao Jianguo, Zhang Huaxing, et al. Development and application of constitutive model of jointed rock mass damage due to mining based on FLAC3D[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(3):572-579.
- [15] 刘洪永,程远平,赵长春,等. 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):358-365.
Liu Hongyong, Cheng Yuanping, Zhao Changchun, et al. Constitutive model for elasto-brittle-plastic damage of coal rock mass due to mining and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(2):358-365.
- [16] Wang X B. Effects of pore pressure on failure process and axially deformational characteristic for rock specimen with random material imperfections[A]. Proceedings of the 12th International Symposium on Water Rock Interaction[C]. London: Taylor & Francis Group, 2007:1 421-1 425.
- [17] 王学滨,王玮,潘一山. 孔隙压力条件下圆形巷道围岩的应变局部化数值模拟[J]. 煤炭学报,2010,35(5):723-728.
Wang Xuebin, Wang Wei, Pan Yishan. Numerical simulation of the strain localization of the surrounding rock of a circular tunnel at different pore pressures[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(5):723-728.
- [18] 刘洪永. 远程采动煤岩体变形与卸压瓦斯流动气固耦合动力学模型及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.