

安全技术及工程

上保护层开采下伏煤岩力学特性及瓦斯抽采效果

石必明, 刘 健, 高明松

(安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 基于岩石破裂损伤理论和有限元计算方法, 模拟保护层开采过程, 下伏煤岩应力及变形特征, 得出了下伏煤岩应力随保护层开采变化规律及被保护层煤层变形呈现压缩、膨胀、膨胀减小到稳定的变化规律, 并在现场进行了工业性试验, 考察了保护层开采过程, 被保护层变形及煤层透气性变化, 理论分析与现场测定基本吻合, 依据研究结论, 优化了被保护层卸压瓦斯抽采设计, 通过被保护层卸压瓦斯抽采, 残余瓦斯含量降到了 $2.33 \text{ m}^3/\text{t}$, 残余瓦斯压力降为 0.35 MPa , 均低于煤层突出临界值; 被保护范围内煤层瓦斯抽采率达到 44.8% ; 被保护层的瓦斯含量得到有效降低, 消除了突出危险性, 确保了被保护层的安全开采。

关键词: 上保护层; 下伏煤岩; 煤岩变形; 瓦斯抽采; 数值模拟

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336 (2012) 01-0042-04

Underlying Coal and Rock Mechanics Features and Gas Drainage Effect of Upper Protective Seam Mining

SHI Bi-ming, LIU Jian, GAO Ming-song

(School of Energy and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Based on the rock fracture failure theory and the finite element calculation method, the protective seam mining process, underlying coal and rock stress and deformation features were simulated. With the protective seam mining variation law and the protected seam deformation, the underlying coal and rock stress would have a variation law from a compression, swelling, swelling reduced to stable. An industrial test was conducted at the mine site. The site investigation was made on the protective seam mining process, the protected seam deformation and the seam permeability variation. The theoretical analysis and the site measurement were basically the same. According to the study conclusion, the design on the pressure releasing and gas drainage of the protected seam was optimized. With the pressure releasing and gas drainage of the protected seam, the residual gas content was reduced to $2.33 \text{ m}^3/\text{t}$, the residual gas pressure was reduced to 0.35 MPa and the residual gas content and the residual gas pressure were all lower than the seam outburst critical value. The seam gas drainage rate within the protected scope was reached to 44.8% . The gas content of the protected seam was effectively reduced, the outburst danger was eliminated and the safety mining of the protected seam could be ensured.

Key words: up protective seam; underlying coal and rock; coal and rock deformation; gas drainage; numerical simulation

随着煤矿开采深度的增加, 煤与瓦斯突出成为制约矿井安全高效生产的主要因素, 是严重威胁煤矿安全生产的自然灾害之一, 为此前人进行了大量的研究, 提出了许多有效的防治措施, 对减少和预防煤与瓦斯突出做出了卓有成效的贡献, 其中保护

层开采技术是已被大量实践证明并用法规形式确立的防治煤矿突出危险的行之有效方法, 在国内外被广泛应用。保护层开采能使上下邻近突出危险煤层的应力状态和瓦斯动力状态发生改变, 使被保护层卸压, 释放煤层的弹性潜能, 增大煤层的透气性,

收稿日期: 2011-09-05; 责任编辑: 王晓珍

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50874005)

作者简介: 石必明 (1964—), 男, 安徽太湖人, 教授, 博士。Tel: 0554-6634253, E-mail: bimingshi@163.com

网络出版时间: 2012-01-12 15:35; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120112.1535.005.html>

引用格式: 石必明, 刘 健, 高明松. 上保护层开采下伏煤岩力学特性及瓦斯抽采效果 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (1): 42-45.

有利于被保护层瓦斯流动、解吸, 从而减少煤层瓦斯含量, 以降低煤层瓦斯内能, 达到预防煤与瓦斯突出的目的, 因此, 研究保护层开采过程中, 被保护层变形特性对现场保护层卸压瓦斯抽采方案的有效实施具有重要的理论和实际意义。众所周知, 煤层开采是一个连续动态过程, 在煤层开挖过程中岩层产生移动、变形和卸压, 同时使上下煤岩层产生大量的次生裂隙, 基于煤矿开采的复杂性, 要进行大量的现场测定很难掌握其变化规律, 本文以数值模拟为基础, 通过现场试验研究了上保护层开采过程中下伏煤岩应力变化规律及被保护层保护效果。

1 上保护层开采数值模拟分析

1.1 数值模拟本构关系

笔者采用弹性损伤力学的本构关系来描述岩石的细观力学性质, 从岩石的微观结构上讲, 一方面由于岩石内部存在大量节理、裂隙, 岩石为不连续介质; 另一方面因为岩石属于结晶材料, 故不是离散介质, 这就说明了岩石从构造本质上是一种非线性材料。岩石的非线性本质还表现在岩石的变形、演化以及其中裂隙和孔隙空间分布的复杂性和高度无序性等方面。在岩石破坏初始状态, 细观单元是弹性的, 其力学性质可以由弹性模量和泊松比来表达, 随着单元应力的增加, 当单元的应力状态或者应变状态满足给定的损伤阈值时, 单元开始损伤。在不同的应力组合条件下, 岩石的破坏表现出剪切和拉伸 2 种形式。考虑研究区域细观单元在压缩或剪应力作用下的损伤, 采用修正的摩尔库仑准则作为基元破坏判据, 其特点是可同时考虑拉伸或剪切破坏, 其表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \geq \sigma_c & (\sigma_3 \geq 0) \\ \sigma_3 \leq -\sigma_1 & (\sigma_3 < 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_c 为单轴抗压强度, MPa; σ_1 为单轴抗拉强度, MPa; φ 为内摩擦角, ($^\circ$); σ_1 、 σ_3 为最大和最小主应力, MPa。

单轴受拉的应力状态下, 当剪应力达到摩尔库仑损伤阈值时, 细观的损伤本构关系见式 (2)。

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \geq \varepsilon_{10}) \\ 1 - f_{tr} / (E_0 \varepsilon) & (\varepsilon_{10} > \varepsilon \geq \varepsilon_{1u}) \\ 1 & (\varepsilon < \varepsilon_{10}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: D 为损伤变量, 当 $D = 0$ 对应无损伤状态,

$D = 1$ 对应完全损伤状态, $0 < D < 1$ 对应不同的损伤程度; f_{tr} 为单元残余强度, MPa; ε 为单元拉伸应变; ε_{10} 为弹性极限所对应的拉伸应变; ε_{1u} 为极限拉伸应变; E_0 为初始弹性模量, MPa。

单轴压缩应力状态下, 当剪应力达到摩尔库仑损伤阈值时, 细观的损伤本构关系为

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_{c0}) \\ 1 - \lambda \varepsilon_{c0} / \varepsilon & (\varepsilon_{c0} \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_{c0} 为单元最大主应力达到其单轴抗压强度时对应的最大压主应变; λ 为单元残余强度系数。

1.2 模拟条件及煤岩力学参数

张集煤矿北一采区为煤层群组开采, 主采 8、6、4 煤层。上保护层 8 煤层平均厚度为 3.01 m, 为非突出煤层, 保护层 17258 工作面瓦斯涌出量 15~25 m³/min, 煤层顶底板大多数为泥岩、砂质泥岩。下伏被保护层工作面 (17256 和 17236 工作面) 开采 6 煤层, 平均厚 3.81 m, 部分含 1~2 层以炭质泥岩为主的夹矸, 为突出煤层, 与保护层工作面平均层间距 36 m, 6 煤层顶底板为泥岩、砂质泥岩, 北部少数底板为细砂岩、粉砂岩。

依据工作面地质条件建立图 1 所示的数值计算模型。模型长 300 m、高 160 m, 其中开采层 8 煤层厚 3 m, 开采层上部顶板岩层厚 40 m, 下伏底板煤岩层总厚 117 m, 被保护层 6 煤层位于保护层 8 煤层下方 36 m, 4 煤层位于 6 煤层下方 30 m 处; 6 煤层厚 3.8 m, 4-2 煤层厚 1.5 m, 4-1 煤层厚 1.2 m, 夹矸厚 1.0 m, 主要煤岩层力学参数见表 1。

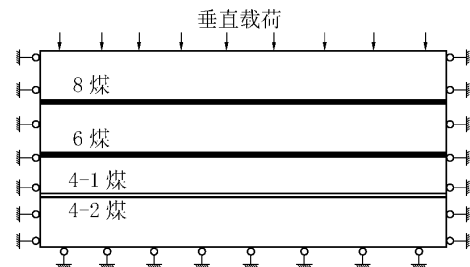


图 1 数值计算模型

1.3 数值模拟结果及分析

1.3.1 被保护层力学特性变化规律

为了研究保护层开采后下伏煤岩体的卸压规律, 将下伏煤岩体视为连续介质, 在底板岩层内任取一微元体, 根据半无限体在边界上承受法向分布载荷的情况进行计算, 模拟得出保护层开采后下伏煤岩体应力变化规律。

表 1 模拟的煤岩层力学参数

岩层	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
泥岩	2.50	8.8	4.3	32	30.0	10.0
砂岩	2.70	26.8	16.0	45	30.0	20.0
粉砂岩	2.60	10.8	10.0	38	32.0	12.0
砂质泥岩	2.60	6.7	6.0	40	27.0	20.0
细砂岩	2.80	21.1	13.5	42	20.0	15.0
8 煤	1.38	4.9	2.8	32	1.2	1.1
6 煤	1.38	4.8	2.8	32	1.3	1.1
4-2 煤	1.39	4.2	2.0	27	1.0	1.0
4-1 煤	1.39	4.2	2.0	27	1.0	1.0

在保护层采空区下部一定距离岩体范围内,应力低于原始应力,说明底板岩层垂直应力降低,煤岩层获得卸压;在工作面前方一定范围的底板内应力高于原始应力,出现应力集中状态。随着底板深度的增加,卸压程度越来越小。采空区底板卸压范围比煤壁前方应力集中范围大,在距工作面 15 ~ 20 m 应力集中达最大;在工作面推过 30 ~ 50 m 卸压程度达到最大,然后随着采空区冒落矸石的垮落,压实作用开始下降,在工作面推过 300 m 时卸压程度减小,随着距离的增加,应力减小,接近原岩应力。在工作面切眼前后存在着相反方向的剪切应力,因为煤层底板岩层在煤体边缘(工作面前后)受上升和下降弯曲产生的拉应力和升降错动产生的剪应力的作用,在未压实采空区中部也分布着剪切力,这是由于支承压力作用下周围煤体挤压底板中部发生底鼓变形作用而形成的。

1.3.2 被保护层煤层变形规律

煤层变形是考察保护层开采效果的关键,模拟了保护层开采过程中被保护层层厚的变化,图 2 为被保护层煤层变形量随保护层工作面至开切眼距离的变化关系。图中横坐标为工作面相对位置(被保护层与保护层的投影对应位置,横坐标中的 0 点指保护层开切眼位置),分析数值模拟结果如下。

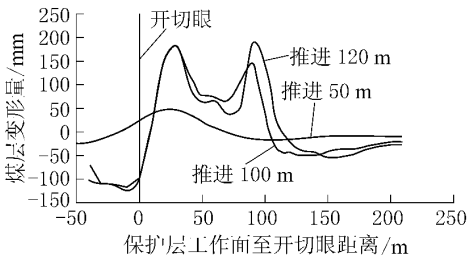


图 2 煤层变形量随工作面至开切眼距离的变化

1) 由图 2 可知,17258 工作面推进 50、100、120 m 时,6 煤层最大压缩变形率分别为 0.139%、0.131%、0.113%,最大膨胀变形率分别为 0.279%、0.354%、0.388%。

2) 随着保护层采煤工作面向前推进,被保护层变形呈现压缩、膨胀、膨胀减小到稳定的变化规律,从图 3 被保护层中保护层开切眼前方 20 ~ 30 m,工作面煤壁后方 10 ~ 20 m 上方煤体膨胀变形最大,采空区中部煤体膨胀变形较小,说明远距离保护层开采后位于弯曲下沉带内的被保护层中存在稳定的煤层变形增大区,该区域煤体裂隙发育,有利于瓦斯运移和煤层瓦斯卸压抽放。

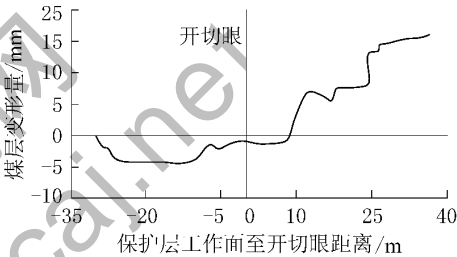


图 3 被保护层 6 煤层变形量曲线

2 上保护层开采现场试验对比分析

利用上述数值模拟结论在现场进行了上保护层开采试验,在保护层开采过程中分别对被保护层 6 煤的变形量和煤层透气性进行了考察,并布置了卸压瓦斯抽采钻孔,进行瓦斯抽采。

1) 煤层相对变形量考察及分析。当工作面推至考察孔前后 80 m 时,每 1 ~ 3 d 测定 1 次;当推过 80 m 时,每 3 ~ 10 d 测定 1 次,并准确记录每次测定值与钻孔到 17238 (该工作面为保护层工作面,位于图 1 中的 8 煤层)采煤工作面煤壁的距离。计算出煤层顶底板的相对变形,绘制变形曲线,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在 6 煤层开采期间,当工作面距变形考察钻孔约 30 m 时,6 煤层开始发生压缩变形,说明考察钻孔受到了支撑应力(集中应力)影响,最大压缩变形量为 4.41 mm;最大压缩变形率为 0.11%。当工作面推过钻孔约 7 m 时,6 煤层开始转变为膨胀变形,说明被保护层获得了卸压效果,在工作面推过钻孔约 36 m 处,6 煤层获得最大膨胀变形,最大膨胀变形量为 16 mm,最大相对膨胀变形率为 0.4%。

2) 被保护煤层透气性变化。分别在被保护层

17256 和 17236 工作面底抽巷选定测点对 6 煤原始透气性系数和卸压后的透气性系数进行测定。得出卸压后 6 煤透气性系数达 $35.44 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, 6 煤原始透气性系数按 $0.054 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 计算, 透气性增大近 660 倍。

3 被保护层瓦斯抽采效果分析

为考察底抽巷钻场抽采量随工作面推进的变化关系, 选择 15 号钻场考察, 钻场瓦斯抽采量随钻场与保护层工作面距离变化关系如图 4 所示。工作面距钻场 6.3 m 时, 抽采量开始增加, 推过钻场后, 抽采量迅速上升; 当工作面推过钻场 20 ~ 40 m 时, 钻场瓦斯抽采纯量上升到最大, 表明此时钻场开始进入充分卸压区, 然后随着工作面的继续推进, 钻场抽采量开始下降; 工作面推过 100 ~ 120 m, 钻场瓦斯抽采量下降到 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 以下, 并较长一段时间内稳定在一定的数值范围, 表明采空区开始压实, 煤层膨胀变形量变小; 当 17238 工作面推过 15 号钻场 264.6 m 时, 抽采纯量下降到 $0.20 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右, 抽采混合浓度 30.6%, 日抽采量 274 m^3 。钻场瓦斯抽采量的变化规律与测定的 6 煤变形量变化规律一致, 即当煤层膨胀变形量达最大时瓦斯抽采量也达最大。

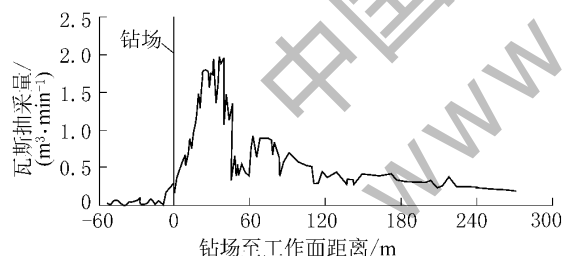


图 4 钻场瓦斯抽采量与其至保护层工作面距离关系

4 结 论

1) 保护层开采对被保护层产生较大影响, 随着保护层开采, 被保护层的主应力大幅降低, 被保护层在一定范围内发生膨胀变形, 但随着保护层推进距离不断增加, 被保护层的最大主应力逐渐恢复, 煤层的膨胀变形逐渐减小, 达到一定值后趋于稳定, 呈现压缩、膨胀、膨胀减小到稳定的变化规律, 该区域煤体裂隙发育, 煤层透气性大幅增加, 有利于瓦斯运移和煤层瓦斯卸压抽放。

2) 在现场进行了上保护层开采工业性试验, 获得了被保护层的变形特征和透气性变化规律, 煤

层透气性增加约 660 倍, 实测得到 17236 底抽巷区域范围内 6 煤层卸压煤层瓦斯抽采半径达到 20 m, 说明被保护层获得了很好的卸压效果。

3) 利用上述研究结论, 通过被保护层卸压瓦斯抽采, 残余瓦斯含量降到了 $2.33 \text{ m}^3/\text{t}$, 残余瓦斯压力降为 0.35 MPa, 均低于煤层突出临界值; 被保护范围内煤层瓦斯抽采率达到 44.8%; 被保护层的瓦斯含量得到有效降低, 消除了突出危险性, 确保了被保护层的安全开采。

参考文献:

- [1] 石必明. 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): 18-23.
- [2] 程远平, 俞启香. 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.
- [3] 刘红元, 刘建新, 唐春安. 采动影响下伏岩垮落过程的数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (2): 201-204.
- [4] 程远平, 俞启香. 煤层群煤与瓦斯安全高效共采体系及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32 (5): 471-475.
- [5] 刘三钧, 林柏泉, 高杰, 等. 远距离下保护层开采上覆煤岩裂隙变形相似模拟 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28 (1): 51-55.
- [6] 黄旭超. 祁东煤矿远距离上保护层开采保护效果分析 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (10): 59-61.
- [7] 胡国忠, 王宏图, 范晓刚. 邻近层瓦斯越流规律及其卸压保护范围 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (10): 1644-1659.

(上接第 29 页)

参考文献:

- [1] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [2] 吴基文. 工作面推进方向对含断层底板采动效应的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (9): 119-121.
- [3] 李学华, 姚强岭, 张农, 等. 高水平应力跨采巷道围岩稳定性模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25 (4): 420-425.
- [4] 张农, 高明仕. 煤巷高强预应力锚杆支护技术与应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (5): 524-527.
- [5] 刘文朝. 采动影响下破碎围岩巷道注浆加固支护技术 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (6): 17-20.
- [6] 韩立军, 李仲辉, 王秀玲. U 型钢与喷网支护壁后充填注浆加固 [J]. 山东科技大学学报, 2002, 21 (1): 65-68.
- [7] 谢文兵, 荆升国, 王涛, 等. U 型钢支架结构稳定性及其控制技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (2): 3743-3748.
- [8] 荆升国. 高应力破碎软岩巷道棚-索协同支护围岩控制机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.