

矿井地质

文章编号:1001-1986(2004)04-0010-04

远程卸压瓦斯抽放数值模拟

唐世斌¹,杨天鸿¹,徐涛¹,唐春安^{1,2},石必明³,余启香³ (1. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心,辽宁 沈阳 110006;2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室,北京 100080;3. 淮南工业学院资源管理系,安徽 淮南 232001)

摘要:利用新近开发的含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合作用的 F-RFPA^{2D} 数值模拟工具,模拟了潘一矿在下煤层开采过程中上覆岩层的移动、垮落的全过程,以及由于下煤层开采所诱发的上煤层(主采煤层)透气性演化过程,并对采动影响下煤层瓦斯抽放时瓦斯的流动运移规律进行了初步的数值模拟研究。模拟结果同现场工程实际比较吻合,表明利用 F-RFPA 来研究煤矿开采所诱发的煤层透气性演化和瓦斯运移等工程实际问题是可行的。

关键词:远程卸压;瓦斯抽采;F-RFPA^{2D} 系统;数值模拟

中图分类号:TD712.6 **文献标识码:**A

1 引言

为提高煤层瓦斯的抽放效果,增强煤层开采的安全性,国内外都做了大量的研究工作,姜集辉^[1]、董钢锋^[2]、蓝成仁^[3]、宋生印^[4]等分别运用在煤岩体中注入表面活性剂、高水压射流扩孔技术和穿层深孔爆破的方法来提高矿井瓦斯抽放率;卢平^[5]、姚金林^[6]、程远平^[7]等对卸压瓦斯抽放技术进行了试验研究;张吉林^[8]等针对阳泉矿区瓦斯抽放方式采取一定的措施进行了优选。Ren^[9]等用计算流体动力学的方法对钻孔瓦斯抽放进行了数值模拟研究。但是,这些方法并不是适用于所有的矿山。目前国内有煤层群开采的矿区,大多都青睐于开采保护煤

层来对被保护煤层进行卸压,以提高被保护煤层的透气性这一措施。俄罗斯、美国、德国、英国、波兰、乌克兰、澳大利亚等国都较广泛地采用了这一技术,在国内,铁法、淮南、重庆南桐、阳泉、淮南等矿区也都应用了这一技术,并取得了较好的效果。

基于以上认识,作者应用新近开发完成的含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合作用的 F-RFPA^{2D} 数值模拟工具,模拟了潘一矿下煤层开采过程中采场上覆岩层的变形、垮落过程,以及采动影响上下煤层的透气性演化情况,并对采动过程中煤层瓦斯的运移流动规律进行了初步的数值模拟研究,以期对煤层瓦斯抽放、煤与瓦斯突出等机理提供理论基础和科学依据。

收稿日期:2003-12-21

基金项目:国家自然科学基金重大项目(50134040),国家自然科学基金项目(50204003,50174013)

作者简介:唐世斌(1980—),男,重庆市梁平县人,中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室硕士研究生,主要从事岩石破裂失稳、岩体渗流力学的数值模拟及相关研究工作。

Environmental impact of heavy metal in coal mining spoils: An investigation on water near waste piles in Huainan gob area, Anhui Province, China

BAI Jian-feng¹, CUI Long-peng¹, HUANG Wei-hui², HU You-biao¹, TANG Xiu-yi, SHI Yong-hong¹

(1. Department of Resource & Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Department of Resource & Geology, University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper focuses the environmental impact of heavy metals in coal mining spoils in Xinzi No. 5 Coal Mine on fishing ground, Huainan mining area. The results indicate that the concentration of heavy metals in water samples, except for Zn, Cu in one sample, are less than national fishery - water quality standard of China. Nevertheless, Cd and Cu in coal mining spoils are much more than their background levels in Huabei shale and shale from the earth's crust (lithosphere), but Cr, Pb and Zn are present similar values comparing with these background levels. Therefore, discharge of heavy metal in weathering coal mining spoils did not yet cause the remarkable contamination of ground water in Huainan coal mining areas since there are relevant low content of heavy metals in coal mining spoils. In general, it is important to monitor the soil and sediment and biota around coal mining spoil piles, and to pay attention to long-term environmental impact of heavy metals.

Key words: coal mining spoils; water; heavy metals; environmental impact; Huainan mining area

2 F-RFPA^{2D}流固耦合模型

F-RFPA^{2D}流固耦合模型包括,瓦斯渗流场方程、煤岩体固体变形场方程和因煤岩体损伤而引起透气系数变化的透气系数-应力耦合方程3部分。

2.1 煤岩体中瓦斯渗流场方程

根据质量守恒定律^[8],煤岩体中瓦斯气体渗流场方程为:

$$p \cdot \nabla^2 P = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 P 为煤层瓦斯压力 p 的平方, MPa^2 ; p 为贮气系数, $p = 4kA^{-1}P^{\frac{3}{4}}$, 其中 A 为煤层瓦斯含量系数, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{MPa}^{1/2})$; k 为透气系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

2.2 煤岩体的变形场方程

根据孔隙流体压力作用下有效应力原理^[11-13],以位移表示的考虑孔隙压力的煤岩体变形场方程为:

$$(\sigma + G) \cdot u_{j,j} + Gu_{j,j} + f_j + (\sigma - p)_i = 0, \quad (2)$$

式中 G 、 σ 为剪切模量和拉梅常数; f_j 为煤岩体的体积力, MPa ; σ 为孔隙压力(煤层瓦斯压力)系数, $0 < \sigma < 1$; u 为煤岩体的变形位移。

2.3 透气系数-应力耦合方程

考虑到煤岩体变形-瓦斯渗流的相互作用和影响可引起透气系数的变化,引入透气系数-应力耦合关系方程^[14]来反映煤岩体变形过程中透气系数的演化情况:

$$k = k_0 e^{-\alpha(\sigma - p)}, \quad (3)$$

式中 k_0 为初始透气系数; α 、 σ 分别为透气系数增大倍率、耦合系数,由试验确定。

3 数值模型

采用平面应变模型来模拟潘一煤矿采场围岩,在采动影响下的变形破坏特征,以及采动过程中煤层的透气性演化和煤层瓦斯运移规律。该矿采场上覆各岩层的部分力学参数如表1所示。由于 B_{11b} 煤层瓦斯突出几率较小,而 C_{13} 煤层在以前的采动过程中已经多次发生煤与瓦斯突出事故,所以数值模拟以如何提高 C_{13} 煤层的透气性为目的。目前,在有煤层群开采的矿区大多都青睐于利用“卸压增透”原理,通过开采保护煤层提高被保护煤层的透气性这一方法,而潘一矿的煤层群适合这种方法,所以本文采用开采保护层,增大被保护层透气性的方法,模拟开挖 B_{11b} 煤层,使得 C_{13} 煤层在采动作用下产生应力扰动,增大 C_{13} 煤层的透气性,并研究在采动作用下

表1 采场上覆各岩层的部分力学及渗流参数

序号	岩性	弹性模量 /GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比	摩擦角 / (°)	凝聚力 /MPa	层厚 /m
1	砂质泥岩	27.0	63	6	0.4	29	5.0	20.0
2	C_{13} 煤层	2	20	2	0.4	30	8	6.0
4	粉砂岩	31.1	60	6	0.27	30.5	9.4	6.0
6	粉砂岩	27.21	68	5	0.12	25.6	11.46	12.0
8	中粒砂岩	28.05	100.2	8	0.12	30.5	25.7	12.0
9	砂质泥岩	36.44	60	6	0.38	26.1	7.48	15.0
10	泥岩	27.58	86.5	4	0.21	20.9	10.68	4
11	细砂岩	19.18	48.72	5	0.40	24.4	9.0	12.0
12	砂质泥岩	57.4	30.61	3	0.26	37	4.8	6
13	B_{11b} 煤层	2	20	2	0.4	30	8	3
14	砂质泥岩	12.0	70	7	0.26	26	4.0	14



图1 潘一矿单孔抽放瓦斯力学与渗流数值模型围岩的运移规律等。

数值模型沿水平方向取 300 m,沿垂直方向取 110 m,上煤层(C_{13})厚度为 6 m,赋存深度为 500 m。下煤层(B_{11b})厚度为 3 m。岩层共有 10 层,划分为 110×300 个单元,考虑到一些层理弱面对较厚岩层的影响,对于厚岩层,在其中预设一些层理。开挖以 5 m 为一步,共开挖了 20 步,即 B_{11b} 煤层总共开挖了 100 m。每步的开挖时间间隔为 0.5 d,即整个开挖过程持续了 10 d。 C_{13} 煤层在原始应力状态下,其平均瓦斯透气系数为现场测得的值 $0.01135 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,且其煤层中的初始瓦斯压力为 5 MPa。 B_{11b} 煤层与 C_{13} 煤层的层间距为 67 m。其数值模型如图1所示,图中各岩层的灰度代表岩层弹性模量的大小,灰度越亮,则其值越大。瓦斯抽放小孔位于 C_{13} 煤层中部,如图1所示。

4 数值模拟结果及分析

4.1 采场覆岩变形破坏特征

图2是煤层开采过程中上覆岩层破断、垮落过程的数值模拟结果,由于篇幅有限,现仅将其中有代表性的弹性模量分布图和工作面推进过程中应力场的动态演化图的对比结果示于图中。其中图中灰度



图 2 数值模拟的覆岩垮落弹性模量图及对应的应力场分布图

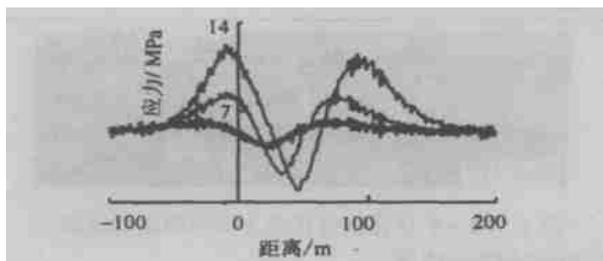


图 3 B_{11b}煤层开采引起 C₁₃煤层最大主应力的变化表示应力的灰度,灰度越亮,说明应力越大,灰度越暗,则说明应力越小。

由图 2 可以看出,随着工作面的向前推进,煤层上方的岩层不断垮落,最终形成一定的冒落带、裂隙带、弯曲下沉带。当推进到接近 100 m 时,煤层上方的冒落带高度大致为距下煤层 15 ~ 20 m 左右的高度,裂隙带的高度在 40 ~ 45 m 的范围,卸压煤层(C₁₃煤层)处在卸压开采的弯曲下沉带,这与现场实际有较好的一致性。模拟结果表明下煤层的开采不会对上煤层造成破坏,只会使上煤层发生整体下沉。由于 B_{11b}煤层的开采,就使得 C₁₃煤层产生一定的应力释放,从而使得其透气性系数产生变化。

图 3 为 B_{11b}煤层开采过程中 C₁₃煤层中支承压

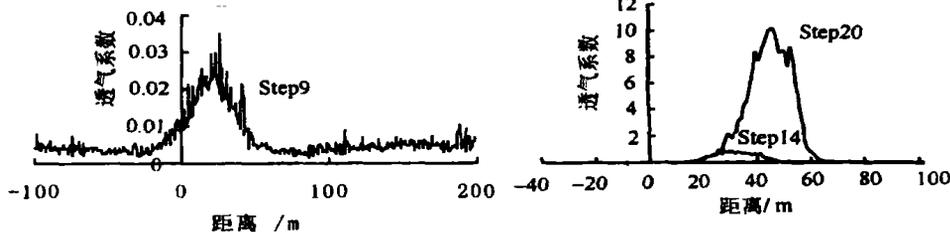


图 4 开挖引起被保护层(C₁₃)中透气性变化

力的变化曲线。B_{11b}煤层的开挖是从图中坐标原点处开始的,向右推进 100 m。从图 3 曲线可以发现,在 C₁₃煤层中形成了明显的应力降低区、应力升高区和原岩应力区 3 个横向区域。随着工作面的推进,煤层中应力降低区和应力升高区也随着向前动态地推进移动,而且煤层中应力降低区的应力降低程度和应力升高区的应力升高程度也随之更为明显。

4.2 采场支承压力对煤体透气性影响

采掘工程引起煤岩体中的应力重新分布,煤体支承压力和受力状态随工作面的推进而不断变化,并对煤体的透气性产生很大的影响。图 4 为 C₁₃煤层的透气性变化曲线。可以看出,在支承压力的作用下,工作面前方不同部位煤体的透气系数变化相当大。在 C₁₃煤层的应力降低区内,煤体的透气系数最高,其数值是初始值的数百甚至上千倍;煤层透气系数的变化梯度极不均匀,在煤层支承压力升高区范围内,透气系数的变化梯度最大;而在煤层中的原岩应力区,透气系数变化较小,基本上为一定值。由于煤层开采而引起煤体支承压力发生变化,同时煤体支承压力的变化又引起煤层透气性发生巨大的变

化,煤层透气性的上述变化特征必然对煤层中瓦斯的渗流运移产生重要的影响。

4.3 采动过程中煤层瓦斯运移规律

如上所述,保护煤层的开采(B_{11b})将引起被保护煤层(C_{13})透气性发生巨大的变化,从而导致煤层中的瓦斯压力发生变化。在卸压区内,由于其透气性系数的提高,使得瓦斯的流动更加顺畅,储存瓦斯较少,从而使得其瓦斯压力有一定的下降。图5为下煤层开采过程中上煤层(被保护煤层 C_{13})中的瓦斯压力变化曲线。图中仍然以开挖起始点作为坐标原点,开挖推进到100 m处。抽放孔位于图中横坐标为50 m处。

由图5中曲线可明显发现,采场上方的瓦斯抽放孔附近的煤层瓦斯压力降低较快,在瓦斯抽放10 d(即开挖的第10步)后,瓦斯抽放孔周围的瓦斯压力由抽放前的5 MPa下降到约2.2 MPa,而且瓦斯压力降低的范围也不断扩大。这主要是由于采动影响而导致采空区上方煤层处于卸压带(应力降低区),煤体内裂隙发育,煤体强度降低,煤层的透气性急剧增高,加速了煤层中瓦斯的流动,导致瓦斯抽放孔周围瓦斯压力降低较快,此即“卸压增流效应”。而在煤层的应力升高区,煤岩体中的孔隙裂隙受挤压而封闭、收缩,使得煤体的透气性降低,瓦斯流量减少;在应力稳定区(原岩应力区),煤岩体由于尚未受到采动影响,承受着正常的原岩应力,瓦斯流动基本不受影响。

5 结语

运用新近开发完成的煤岩破裂过程 F-RFPA^{2D} 固气耦合数值工具模拟了煤层开采过程中采场围岩垮落的全过程,再现了覆岩离层移动的“三带”(冒落带、裂隙带和弯曲下沉带)和采场工作面支承压分布的“三区”(应力降低区、应力升高区和原岩应力区)。同时,数值模拟结果表明因煤层卸压开采而引起被保护煤层透气性急剧增高、瓦斯抽放孔周围的瓦斯压力急剧降低的“卸压增流效应”,可以广泛地应用于邻近煤层和本煤层的瓦斯抽放,以及煤与瓦

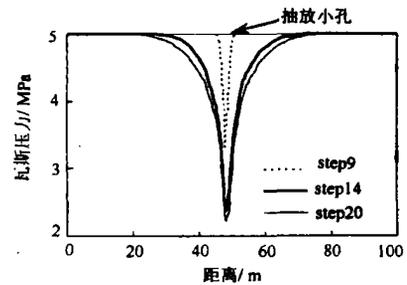


图5 开挖引起被保护层(C_{13})中瓦斯压力变化规律
斯突出的预防措施中。同时通过对煤层瓦斯抽放过程中煤层透气性演化及煤层瓦斯压力变化规律的数值研究,对于我们进一步深入理解煤矿瓦斯抽放、煤与瓦斯突出机理等并采取相应的预防和控制措施等具有重要的理论和实践意义。

参考文献

- [1] 姜集辉. 低透气性煤层提高瓦斯抽放率的新途径[J]. 煤, 2000, 9(2): 9-12.
- [2] 董钢锋, 林府进. 高压水射流扩孔提高穿层钻孔预抽效果的试验[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(3): 17-19.
- [3] 蓝成仁. 穿层深孔爆破提高瓦斯抽放量[J]. 煤矿安全, 2003, 34(8): 14-16.
- [4] 宋生印, 韩宝山. 新集煤层气开发试验井水力压裂增产改造[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(1): 27-31.
- [5] 卢平, 刘泽功, 沈兆武. 采动覆岩卸压采空区瓦斯抽放的试验研究[J]. 天然气工业, 2003, 23(1): 118-120.
- [6] 姚金林. 综放面顶板覆岩走向长钻孔卸压抽放瓦斯研究[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(6): 14-17.
- [7] 程远平, 俞启香, 袁亮. 上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(4): 483-486.
- [8] 张吉林, 卫东等. 阳泉矿区瓦斯抽放方式及优选原则. 煤田地质与勘探, 2001, 29(4): 17-19.
- [9] Ren T X, Edwards J S, Reddish D J. Simulation of methane drainage boreholes using computational fluid dynamics[J]. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP. 1999, 397: 319-326.
- [10] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存及流动规律[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [11] 赵阳升, 胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 26-31.
- [12] Zhao Y S, Hu Y Q, Wei J P, Yang D. The experimental approach to effective stress law of coal mass by effect of methane[J]. Transport in Porous Media, 2003, 53: 235-244.
- [13] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 方恩才. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(6): 686-693.
- [14] 杨天鸿. 岩石破裂过程渗透性质及其与应力耦合作用研究[D]. 沈阳: 东北大学博士论文, 2001.

Numerical modeling of gas extraction by relief pressure from a long - distance

TANG Shi-bin¹, YANG Tian-hong¹, XU Tao¹, TANG Chun-an^{1,2}, SHI Bi-ming³, YU Qi-xiang³

(1. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110006 China;

2. LNM, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080 China;

3. Huainan Institute of Technology, Huainan 232001 China)

Abstract: The coal seam movement of Panyi coal mine, as well as its collapse process, gas permeability evolution induced by excavation of the underplayed coal seam are simulated, using newly developed F-RFPA2D code, which can simulate the strata fracturing, caving process, and gas permeability evolution induced by excavation of the underplayed coal seam. This research reveals the movement regular of the gas drainage. The results are well tallied with the field data, being practical and reliable to analyze the engineering problems such as gas permeability evolution and gas delivery induced by mining.

Key words: pressure relief from a long distance; gas extraction; F-RFPA code; numerical modeling