

文章编号:0253-9993(2013)06-0930-06

采动煤岩体瓦斯渗透率分布规律与演化过程

薛东杰,周宏伟,唐咸力,赵宇峰

(中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘要:基于潘一矿煤田地质背景,以保护层开采为代表,开展相似模拟试验,通过 Matlab 软件实时捕获标记点位置并通过像素点演算其坐标,得到采场体积应变分布,可有效地反映采场膨胀-压缩变形分布。同时进一步开展全应力应变渗透试验,建立体积应变与渗透率的耦合关系方程,绘制采场的渗透率分布。研究发现随着工作面向前推进,体积膨胀变形与渗透率演化分布是一致的,上保护层渗透特性演化滞后于保护层,并且随着垮落区的形成与再压密,渗透率也逐渐减小,形成类蝌蚪状分布。

关键词:渗透率;保护层;相似模拟;体积膨胀

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A

Evolution of mining-induced enhancement and distribution of gas permeability in coal seam and surrounding rock

XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, TANG Xian-li, ZHAO Yu-feng

(State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the background geological information at Panyi Coal Mine, a physical simulation on protective seam mining was conducted in this study. The simulation obtained the volumetric strain distribution in the mining area through capturing the locations of the markers in real time and calculating the coordinates of pixels using Matlab software, which can effectively describe the distribution of expansion-compression in the mining area. Furthermore, a comprehensive stress-strain permeability test was carried out with the establishment of coupling equation between volumetric strain and permeability. The study shows that with the advance of working face, the distribution of both volumetric strain and permeability also demonstrates a consistent dynamic distribution process. However, the permeability evolution of upper protective coal seam lags behind that in the protective coal seam.

Key words: permeability; protective coal seam; physical simulation; volumetric expansion

长期以来,上覆煤岩体渗透率分布规律的研究一直是煤与瓦斯共采研究的核心内容,煤岩体的采动应力分布直接影响裂隙发育及导通,建立应力场与渗流场的耦合关系尤其重要^[1]。保护层开采作为煤炭资源安全开采的代表,是一种预先在首采保护层工作面形成的应力降低区和裂隙发育区内布置瓦斯抽采工程,待首采层卸压开采后抽采采空区卸压解吸瓦斯的工程技术方法,同时为低渗透煤层群煤与瓦斯共采提供了一个重要技术手段^[2]。保护层开采无论是工作

面前方、后方采空塌陷区,还是上覆岩层,甚至被保护层煤岩体裂隙发育及其瓦斯渗透率变化规律对于合理布置瓦斯抽钻孔、设计孔深及其评价被保护层卸压增透效果等都具有重要指导意义。由于现场大范围尺度监测采场卸压后裂隙发育及变形分布存在困难,目前室内相似模拟试验仍然作为重要平台用于研究煤层开采卸压后采场煤岩体应力、变形、裂隙发育及瓦斯渗透率分布特征。林柏泉等通过对远距离下保护层开采相似模拟研究,发现上覆煤岩裂隙卸压、失

收稿日期:2012-11-05 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201200)

作者简介:薛东杰(1986—),男,山东微山人,博士研究生。E-mail: xuedongjie@163.com

稳、起裂、张裂、裂隙萎缩、变小、吻合、封闭的动态演化规律^[3-4]。李晓红等指出改善煤层的渗透率可以利用自振荡射流产生的动力效应^[5]。尹光志等利用含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流试验装置,研究了瓦斯压力对原煤本征力学行为及渗透特性的影响^[6]。杨天鸿等基于流固耦合原理利用 RFPA 有限元软件建立了瓦斯渗流模型^[7]。高峰等基于损伤建立弹塑性损伤本构方程,指出煤层开采后,被保护煤层出现张拉损伤,煤岩体的渗透性急剧提高^[8]。戴广龙等利用分源法预测了谢桥矿 1242(1)保护层开采后工作面瓦斯涌出量,同时预测了上覆煤岩体采动裂隙发育分布特征^[9]。涂敏等利用数值仿真对远距离下保护层开采上覆煤岩体应力分布、被保护层卸压变形规律进行研究,指出被保护层产生膨胀变形使其透气性增大^[10]。王海峰等开展了近距离上保护层开采工作面的瓦斯涌出规律研究,对被保护层的卸压瓦斯抽采参数进行了优化^[11]。上述研究多从定性分析开采保护层后局部采场裂隙发育、分布情况及采场某一位置处渗透率变化规律,未从采场整体卸压后裂隙发育分布及渗透率分布演化角度给出定量描述。工作面向前推进过程中,周围煤岩体同时存在着增压区与卸压区,笔者尝试建立体积变形与渗透率之间的关系,从而给出采场渗透率演化分布的定量描述。

1 相似模拟试验及采场变形、渗透率分布可视化研究

1.1 相似模拟试验

淮南矿业集团潘一矿共有可采煤层 13~18 层,总厚度约 30 m,为高瓦斯突出矿井^[12]。本次相似模拟选择 11-2 煤层 2171(1)工作面为模拟对象,煤层倾角 6°~9°,属近水平煤层,煤厚 1.5~2.2 m,平均 1.8 m,煤层结构简单,赋存稳定。地面标高+19~+23 m,工作面标高-729~-690 m,实行综合机械化采煤。预计 11-2 煤层瓦斯自然含量为 10~11 m³/t,煤层具有爆炸危险性,地温 33~34 ℃,地压明显。被保护层为 13-1 煤层,位于 11-2 煤层上部约 67 m 处。相似模拟试验如图 1 所示,地面标高取 22 m,工作面标高取-720 m,上覆岩层的总厚度为 742 m。工作面走向长 1 780 m,倾向长 206 m。根据开采设计,工作面实际每天进 6 刀,进尺 3.6 m。试验采用中国矿业大学(北京)的平面相似模型试验台,总长 4.2 m,由于高度方向限制,模拟总厚度 164.02 m,即模拟自煤层底板—煤层—顶板共 48 层,其中底板

8 m,煤层厚度 1.8 m,顶板厚度 156.02 m。

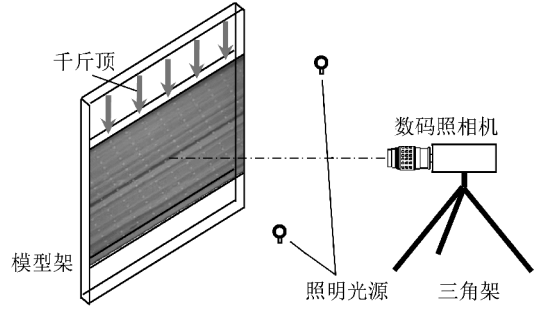


图 1 保护层开采相似模拟试验

Fig. 1 Physical simulation of the protective coal seam under mining

随着工作面向前推进,上覆岩层依次经历了直接顶初次垮落、基本顶大范围垮落、周期垮落与最终垮落。推进 20 m 时,出现直接顶初次垮落(图 2(a)),推进 35 m 时,基本顶初次垮落,推进 50 m 时,基本顶大范围垮落(图 2(b)),推进 55 m 时,开始出现周期性垮落,图 2(c)为工作面推进到 155 m 时出现的周期性垮落,最终工作面推进到 215 m(图 2(d))。试验前在模型表面固定间距处布置标记点,随着垮落变形逐渐向上传递,标记点位置也随之变化。在这个动态变化过程中,将高清数码摄像机固定位置,对每个开挖过程进行拍照,这样就得到了开挖过程的动态捕捉。由于相似模拟材料主要为细砂,多成黄色系,煤需要用墨加黑标识,另外图片中还含有一些杂色,包括裂隙背景等,而标记点为白色,最后选用 Matlab 软件进行处理,将图片进行二值化并反色处理,即可得到清晰的标记点。同一位置处截取图片,并均设定尺寸为:宽 998 像素,高 596 像素。标记点形状大多为中间含 1~2 个像素点,周围为一圈像素点包含,编程提取每个标记点像素的坐标,然后将其坐标平均化,即可得到每个标记点的坐标(X_i, Y_i)(式(1)),事实上由于单个像素的尺寸是惟一的,因此只需度量像素数量即可。

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \\ Y_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \end{cases} \quad (1)$$

式中, j 为像素点数量编号; x_j, y_j 为 j 像素点的横、纵坐标; n 为单个标记点所含像素总数目。

图 3 为二值化后提取的标记点及局部放大示意图。因为模型为二维,忽略厚度影响,以相邻 4 个标记点围成的四边形为基本单元,设变形前 4 个点为

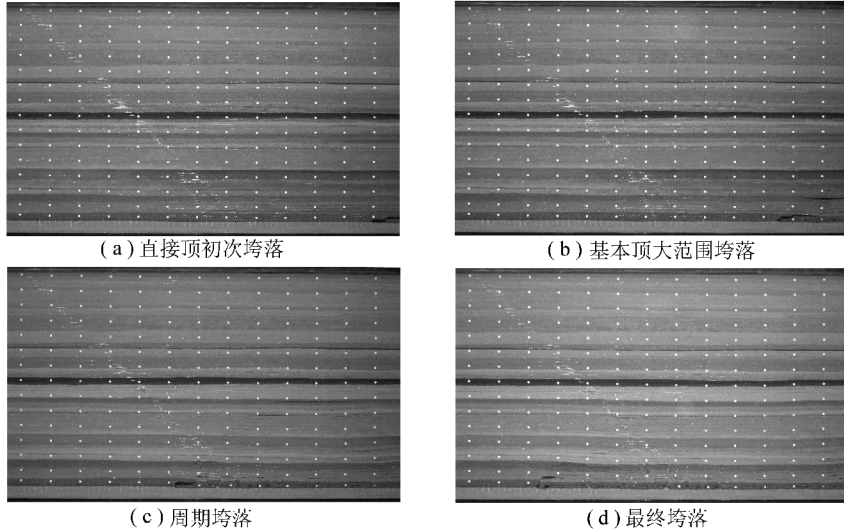


图 2 相似模拟试验过程

Fig. 2 Process of physical simulation experiment

O'_1, O'_2, O'_3 与 O'_4 , 变形后 4 个点为 O_1, O_2, O_3 与 O_4 , 为方便程序求解变形前后的四边形单元面积, 以变形后为例, 将其划分 2 个三角形: $\Delta O_1 O_2 O_4$ 与 $\Delta O_3 O_2 O_4$, 则体积应变为

$$\varepsilon_V = \frac{S' - S}{S} = \frac{S'_{124} + S'_{324} - S_{124} - S_{324}}{S_{124} + S_{324}} \quad (2)$$

式中, S' 为变形后的四边形面积, 由 S'_{124} 与 S'_{324} 组成; S 为变形前的四边形面积, 即尚未进行任何开挖的面积, 其值是始终固定的, 由 S_{124} 与 S_{324} 组成。

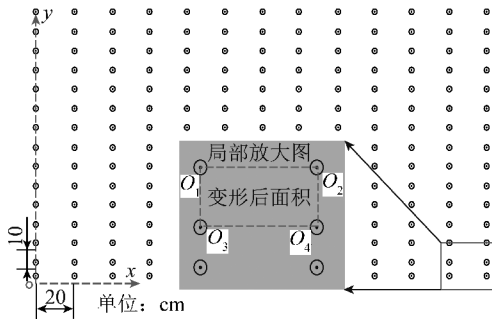


图 3 二值化后提取的标记点

Fig. 3 Marked points after binarization

1.2 体积应变-渗透率关系的建立

采动中煤体瓦斯渗透率的变化反映裂隙增透的效果, 而孔隙裂隙的演化联通直接影响渗透率, A. E. 薛定谔^[13]与林瑞杰^[14]基于理论模型指出了渗透率与孔隙度间的关系, 而试验中真实测得孔(裂)隙率的变化极其困难。笔者曾开展了不同瓦斯压力条件下的全应力-应变过程渗透率变化耦合试验, 发现渗透率的变化与体积应变的变化十分一致。基于此尝试利用体积变化来反映孔隙的变化, 建立体积应变渗透率关系方程。图 4 为一典型轴应变-渗透率关系曲线, 将体积应变绘

制其中, 可见渗透率相对于体积应变具有滞后性, 可能是试验测量数据延迟性导致。除初始体积压缩阶段, 整体趋势关系为随着体积膨胀的增加其渗透率逐渐增大。将试验数据利用多项式拟合, 得到体积应变(ε_V)-渗透率(k)关系方程(图 5(a))。

$$k = -410461\varepsilon_V^2 - 71713\varepsilon_V + 602.59 \quad (3)$$

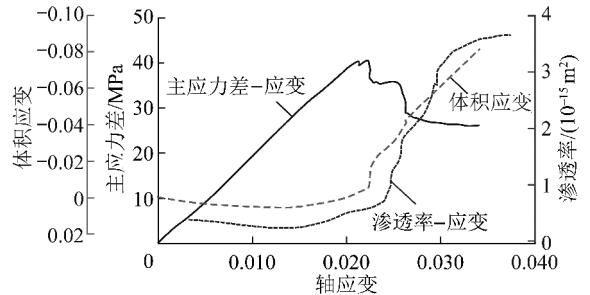


图 4 典型应变-渗透曲线

Fig. 4 Typical strain-permeability curves

由于式(3)为二项式拟合方程, 数学上存在极值点并存在上升下降段, 因此其成立范围是有限的, 同时试验室开展的全应力-应变过程中的渗透试验所用煤样有其尺寸与渗透率测量范围的限制, 如无法得到更大体积应变下的渗透关系, 假设超出最大膨胀体积应变后渗透率维持最大值, 因此结合试验情况给出理论体积应变-渗透率关系曲线(图 5(b)), 同时得到理论体积应变(ε_V)-渗透率(k)关系方程为

$$k = \begin{cases} 3735.59 & (\varepsilon_V < -0.087) \\ -410461\varepsilon_V^2 - 71713\varepsilon_V + 602.59 & (-0.087 \leq \varepsilon_V \leq 0.008) \\ 0 & (\varepsilon_V > 0.008) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 渗透率单位为 10^{-18}m^2 。

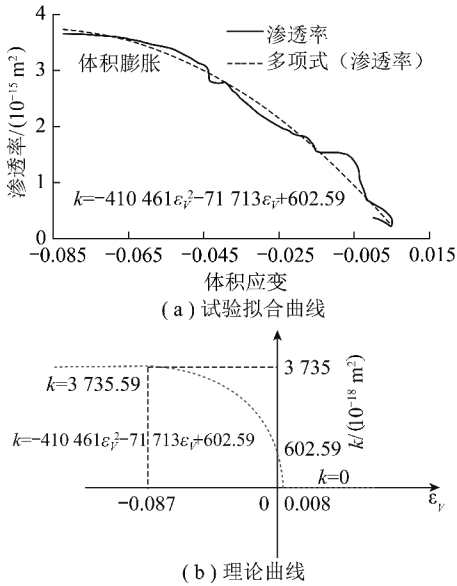


图5 体积应变渗透率关系曲线
Fig. 5 Relationship between volumetric strain and permeability

2 采场变形及渗透率分布特征

随着工作面的推进,巷道围岩应力分布重新调整,导致围岩体积膨胀变形向巷道挤压,塑性变形瞬时发生,围岩卸压破坏,其方式由延性向脆性转化,同时在体积膨胀区产生大量裂隙,而围压降低导致瓦斯解析加速,瓦斯浓度升高。因此通过观测煤岩体体积变化可以间接反映瓦斯增透特征。根据式(2),可得到采场体积应变演化分布图(图6)。当直接顶初次垮落时,由于试验布置标记点密度不足,导致其未能有效监控其体积变化(图6(a)),但从采场整体看,其对围岩影响较小,其变形主要集中于开挖导致的局部垮落。当工作面推进到50 m时(图6(b)),大范围的垮落导致采场裂隙增加,表现出更大范围的体积膨胀变形。在工作面临空区体积应变达到最大值-0.14。可以看出无论是工作面前方还是上覆煤层变形规律明显增强,其导通区逐渐增大,但数量级仍较小。照片处理时左下角出现异常,从变形看开挖尚未对这里产

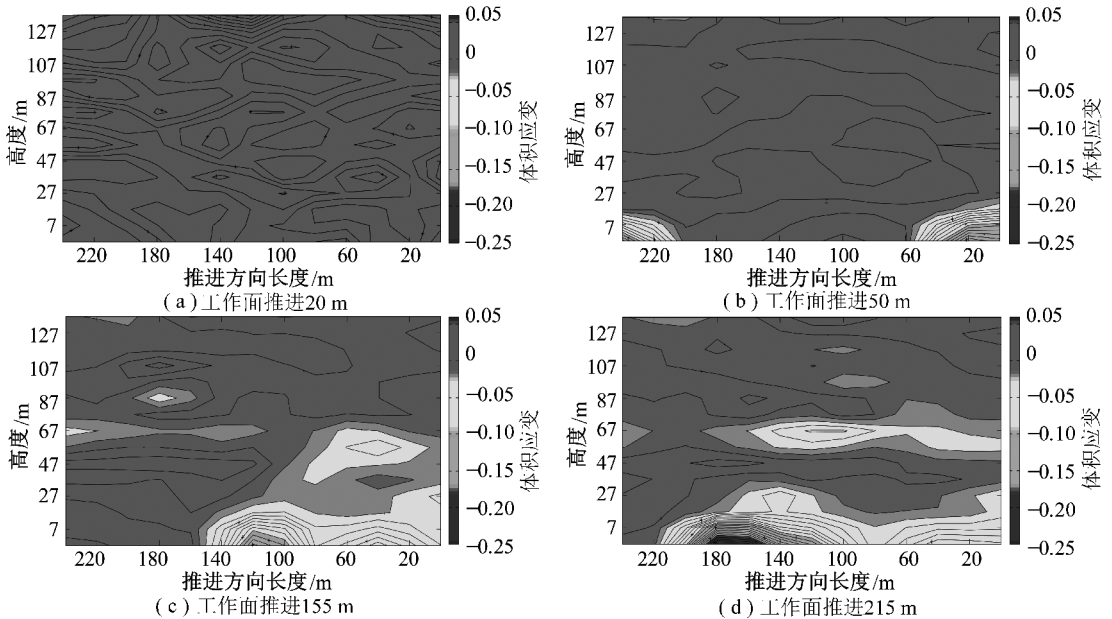


图6 采场体积应变分布
Fig. 6 Volumetric strain distribution of mining field

生扰动,因此可以忽略。当工作面推进到155 m时(图6(c)),临空区围岩的扰动仍最大。在垮落区由于上覆岩层将其重新压实,其体积减小,瓦斯通道闭合减少,另一方面上覆岩层压力得到释放,同时裂隙发育向上拓展,膨胀区域拓展到被保护层(67 m),工作面后方形成大面积的体积膨胀区,而工作面前方上覆岩层仅被保护层区域体积开始膨胀,但程度小于垮落区上覆岩层。当工作面推进到215 m时,上覆煤层卸压增透明显,尤其是在被保护层区域形成贯通整

个区域的体积膨胀带,而在采空区,形成一个类蝌蚪状的体积膨胀区,在临空区附近最大。垮落区逐渐被压实,瓦斯通道逐渐闭合,渗透率有减小趋势。而在被保护层区域同样存在类似现象,其滞后于工作面开采,可见上覆岩层移动需要经历一个时间与空间过程,因此抽采被保护层瓦斯时钻孔应该在斜向后上方布孔,更有利于抽取瓦斯。

由式(4),根据体积应变分布演算出渗透率分布,如图7所示。初始开采时,卸压区间较小,整体变

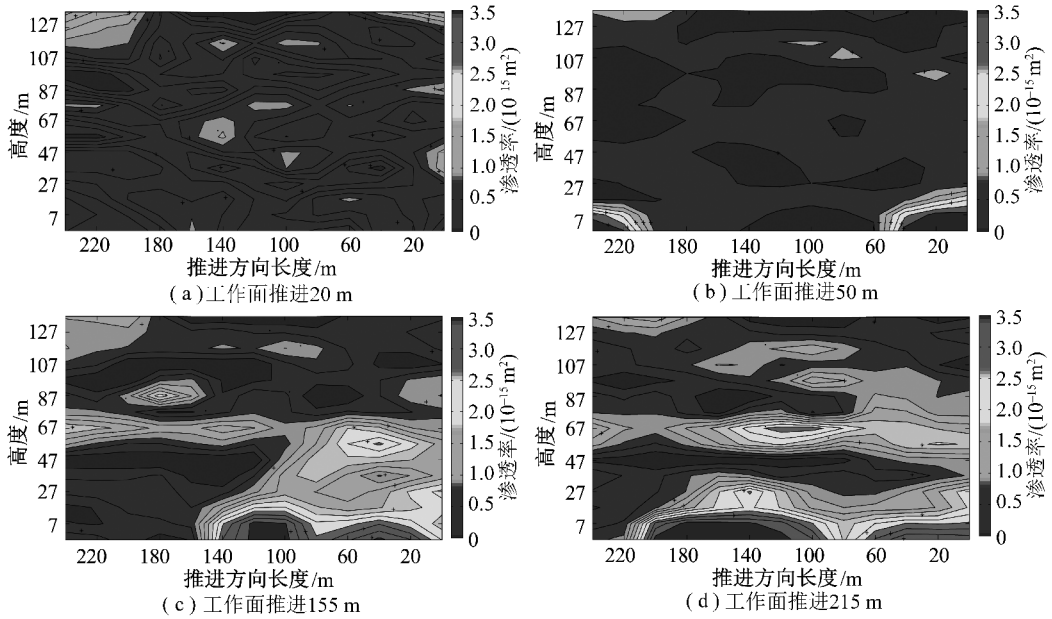


图 7 采场瓦斯渗透率分布

Fig. 7 Permeability distribution of coal mining field

形不大,采场整体渗透率变化不大,事实上在开采区域存在有限的渗透率增大区域,蝌蚪头部开始形成(图 7(a))。工作面推进到 50 m 时,中心区域渗透率增长到最大值,向周边区域逐渐减小过渡到初始渗透值,工作面前方 58 m,上方区域 25 m,渗透率都有明显增大(图 7(b))。当工作面推进到 155 m 时,对应体积应变分布,蝌蚪状分布开始形成,垮落区上方对被保护层渗透率开始增大,而且被保护层前方区域也有明显增大趋势(图 7(c))。当工作面推进到 215 m 时,被保护层出现较完整的渗透率蝌蚪状分布,其滞后于采空区,同样垮落区逐渐被压实,渗透率开始减小(图 7(d))。

图 8 分别为保护层与被保护层体积变形、渗透率分布与工作面推进长度关系曲线。当工作面推进 155 m 时,前方渗透率先减小然后恢复到初始渗透率水平,因为卸压区煤体破裂产生大量裂隙,瓦斯充分解析,但在支撑压力峰值点附近瓦斯通道被压力重新压实;垮落区同样存在支撑压力峰值区域,渗透率先减小后增大,由于裂隙较大,其渗透率明显高于工作面前方,可见工作面临空区应保持通风降低瓦斯浓度。此时被保护层得到有效卸压,相比初始渗透率增大了 1~4 倍,在工作面后方同样存在渗透率峰值区间,但滞后于保护层约 50 m。工作面前方被保护层渗透率要大于保护层区域,可见卸压扩散向上有漏斗效应,越往上范围越大,这与实际沉降趋势也是相符的。当工作面推进到 215 m 时,渗透率增长范围继续扩大,由于整个模型基本采空,垮落区渗透率变化不大,但被保护层渗透率相比 155 m 时有较大增高,并

且峰值区间也向前移动了 50 m。综上,开采保护层可以有效地释放上部岩层压力,造成其体积膨胀与渗透率增高,而被保护层与周围岩体刚度上差异明显,进一步加剧了其变形,可见基于相似模拟可视化方法与煤气耦合渗透试验建立被保护层卸压增透效果评价模型具有可行性与合理性。

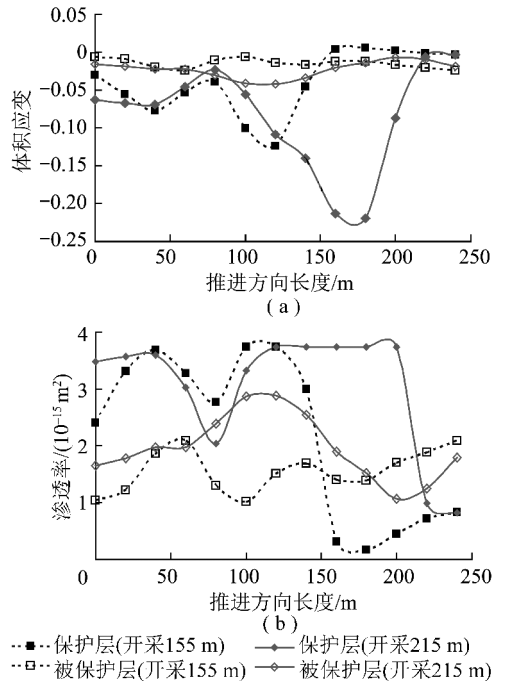


图 8 体积变形和渗透率与工作面推进长度关系

Fig. 8 Relationship among volumetric deformation, permeability distribution, and advancing distance

3 结论与讨论

(1) 孔隙的收缩扩展及联通直接反映着渗透率的变化,也直接影响煤岩体的体积变形。孔(裂)系的定量描述及实时测量存在困难,由此基于室内三轴试验建立体积应变(ε_V)-渗透率(k)关系方程:

$$k = \begin{cases} 3\ 735.59 & (\varepsilon_V < -0.087) \\ -410\ 461\varepsilon_V^2 - 71\ 713\varepsilon_V + 602.59 & (-0.087 \leq \varepsilon_V \leq 0.008) \\ 0 & (\varepsilon_V > 0.008) \end{cases}$$

其中,渗透率单位为 10^{-18}m^2 。结论是基于实验室小尺度条件下建立保护层开采对被保护层变化的影响关系,从相对数量级上看增透效果可以作为煤矿评价保护层增透效果的一个方法,下一步将结合现场试验及更大尺寸试验综合分析研究体积膨胀及渗透率增长分布规律。总体上基于相似模拟可视化方法与煤气耦合渗透试验建立保护层卸压增透效果评价模型具有可行性与合理性。

(2) 工作面前方被保护层渗透率要大于保护层区域,可见卸压扩散向上有个漏斗效应,越往上范围越大。后方随垮落区的形成与再压密,其渗透率也逐渐减小,形成类似蝌蚪状分布。

(3) 随着工作面推进,体积膨胀与渗透率演化分布是一致的,针对潘一矿被保护层渗透要滞后于保护层约 50 m,因此斜向后方密集布置钻孔更有利于瓦斯抽采。

感谢四川大学谢和平院士的学术指导。

参考文献:

- [1] 谢和平,周宏伟,刘建峰,等.不同开采条件下采动力学行为研究[J].煤炭学报,2011,36(7):1067-1074.
Xie Heping, Zhou Hongwei, Liu Jianfeng, et al. Mining induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [2] 袁亮.卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J].煤炭学报,2009,34(1):1-8.
Yuan Liang. Theory of pressure relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 1-8.
- [3] 林柏泉,孟凡伟,张海宾.基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J].煤炭学报,2011,36(1):75-79.
Lin Baiquan, Meng Fanwei, Zhang Haibin. Regional gas control based on drilling-slotting-extracting integration technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 75-79.
- [4] 刘三钧,林柏泉,高杰.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):51-60.
Liu Sanjun, Lin Baiquan, Gao Jie. Similar simulation of fracture deformation in overlying coal and rock in far-distance-lower-protective-layer mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 51-60.
- [5] 李晓红,卢义玉,向文英.水射流理论及在矿业工程中的应用[M].重庆:重庆大学出版社,2007.
- [6] 尹光志,李铭辉,李文璞,等.瓦斯压力对卸荷原煤力学及渗透特性的影响[J].煤炭学报,2012,37(9):1499-1504.
Yin Guangzhi, Li Minghui, Li Wenpu, et al. Influence of gas pressure on mechanical and seepage characteristics of coal under unloading condition[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1499-1504.
- [7] 杨天鸿,徐涛,刘建新,等.应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2900-2905.
Yang Tianhong, Xu Tao, Liu Jianxin, et al. Coupling modal of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2900-2905.
- [8] 高峰,许爱斌,周福宝.保护层开采过程中煤岩损伤与瓦斯渗透性的变化研究[J].煤炭学报,2011,36(12):1979-1984.
Gao Feng, Xu Aibin, Zhou Fubao. Research on the coal and rock damage and gas permeability in the protective seams mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1979-1984.
- [9] 戴广龙,汪有清,张纯如.保护层开采工作面瓦斯涌出量预测[J].煤炭学报,2007,32(4):382-385.
Dai Guanglong, Wang Youqing, Zhang Chunru. Forecast of the gas effused from the face in protective seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 382-385.
- [10] 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):418-426.
Tu Min, Huang Naibin, Liu Baoan. Research on pressure-relief effect of overlying coal rock body using far distance lower protective seam exploitation method[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(4): 418-426.
- [11] 王海锋,程远平,吴冬梅.近距离上保护层开采工作面瓦斯涌出及瓦斯抽采参数优化[J].煤炭学报,2010,35(4):590-594.
Wang Haifeng, Cheng Yuanping, Wu Dongmei. Gas emission and parameter optimization of gas extraction in mining face of short distance protective seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 590-594.
- [12] 王志国.深部开采上覆岩层中采动裂隙网络演化规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
Wang Zhiguo. Research on the evolution law of mining induced crack network in overburden rock strata of deep mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2010.
- [13] A. E. 薛定谔.多孔介质中的渗流物理[M].王鸿勋,张朝琛,孙书琛,译.北京:石油工业出版社,1982:141-173.
- [14] 林瑞态.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版社,1995:39-47.
Lin Ruitai. Introduction to heat and mass through porous media[M]. Beijing: Science Press, 1995: 39-47.