

采空区瓦斯渗透影响的综放面瓦斯运移模拟研究

梁赛江, 王同旭, 王太茂, 杨英明

(山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:采用 UDEC 数值模拟软件, 结合实验数据, 分析了上层煤层采动对相邻煤层之间岩层的影响, 得出岩层裂隙发育规律; 依据岩层裂隙发育规律和现场监测数据, 利用 Fluent 软件建立模型, 分析工作面不同推进距离时的瓦斯渗透规律。模拟结果表明: 随着采煤工作面的推进, 综放面后方未冒落区底板受采动影响破坏深度趋于稳定值, 邻近煤层采空区瓦斯的渗透量逐渐增加, 对综放面瓦斯运移的影响相应变大。

关键词:采空区; 漏风量; 渗透率; 瓦斯运移; 数值模拟

中图分类号: X936

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2012)06-0015-05

Modeling and Research About Gas Transport Based on the Influence of High Gas in the Neighboring Coal Seam

LIANG Saijiang, WANG Tongxu, WANG Taimao, YANG Yingming

(College of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The numerical simulation software UDEC was used to analyze the upper coal mining rock between adjacent coal seams with the experiment data, and bed crack developed rules were obtained. Based on the rock fissures law and the field monitoring data and by using the software Fluent, the model was built to make an analysis of the gas penetration law of different face propulsion distances. The simulation results show that the depth of no caving zone back-plane affected by mining keeps stable with the coal face advancing; as neighboring goaf gas permeation amounts gradually increase, the effect on the gas migration of the fully mechanized caving face becomes larger.

Key words: mined-out area; amount of air leakage; permeability; gas migration; numerical simulation

煤层下方邻近煤层采完数年后, 其采空区中往往含有高浓度瓦斯^[1]; 同时, 受煤层采动的影响, 两煤层之间的岩层会出现裂隙。瓦斯流体原有的均衡状态被改变, 瓦斯从下层煤层通过中间岩层贯穿裂隙向上层采空区和工作面流动, 使采煤工作面瓦斯浓度增大, 对采煤工作面的安全推进构成威胁。王济凯^[2]、张英华^[3]等建立了采空区渗流数学模型, 揭示采空区漏风流速、压力分布规律; 李晓平等^[4]通过数值分析研究了岩层水侵识别不稳定渗流理论; 赵阳升^[5]、赵洪宝等^[6]通过对薄煤层开采时采空区内瓦斯运移进行模拟研究, 获得采空区瓦斯分布特性规律; 许满贵等^[7]利用 Fluent 数值模拟研究了采空区瓦斯运移规律, 优化了上隅角瓦斯治理的参数; 范宏伟^[8]采用 Fluent 软件对 U 型和 U+L 型通风方式下综放采空区瓦斯流动进行了数值模拟, 研究瓦斯流动分布规律。在综放面有距离较近的邻近煤层时, 其采空区瓦斯运移是否受邻近煤层瓦斯渗透的影响及影响程度, 在工程实践中是一个不可回避的问题。

本研究采用数值方法, 结合现场探测数据, 分析中间岩层裂隙受采动影响的变化规律, 着重研究邻近煤层高瓦斯渗透对上部煤层采空区瓦斯运移的影响及邻近煤层瓦斯涌出规律。总结邻近煤层瓦斯渗透对综放

收稿日期: 2012-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51004068); 长江学者和创新团队发展计划项目

作者简介: 梁赛江(1976—), 男, 浙江新昌人, 讲师, 博士, 主要从事矿山压力与控制研究。E-mail: ckwanggang@163.com

面瓦斯运移的影响规律,为工程实践中考虑邻近煤层瓦斯渗透因素提供了理论参考。

1 地应力对岩层渗透率的影响

在采煤工作面正常推进过程中,煤层底板岩层具有采前应力升高,采后应力降低及恢复 3 个阶段,并且这 3 个阶段随采煤工作面推进而重复出现^[1]。

煤矿井下采矿工作会使底板所受应力重新分布,使底板岩层的渗透性增高或者降低,表现为卸压区渗透性增高,应力集中带透气性降低。因而,采煤工作会使底板岩层渗透率发生变化,具体表现为下部采空区的瓦斯涌出量忽小忽大。文献[1]通过实验室的模拟实验,得到卸载过程中渗透率 κ 与有效应力 σ 之间的关系符合幂函数方程:

$$\kappa = \kappa_1 \sigma^{-C} \quad (1)$$

其中: κ —煤(岩)体渗透率, m^2 ; κ_1 —煤(岩)体初始渗透率,试验测定值为 0.733×10^{-22} , m^2 ; σ —有效应力, MPa; C —岩层孔隙压缩系数,无量纲。

本文所研究煤岩层特征与文献[1]所采用的岩样性质基本一致,因此,可以借鉴式(1)进行岩层渗透率的预测。首先运用 UDEC(universal distinct element code)软件模拟工作面开采过程中底板应力分布,然后将卸载区的应力值代入式(1)计算出卸载区底板岩层渗透率。

2 岩层渗透率求解模型

根据现场实例建立 UDEC 模型,模型高 \times 宽 = 300 m \times 300 m,下部邻近煤层采厚 5 m,开采方式为采 13 m 留 5 m 煤柱的小条带式开采;上下煤层间距为 26 m;上部煤层采厚 3 m,采用长壁开采。

首先,对下部煤层进行条带开采,然后,对上层煤层采煤工作面从切眼推进 20 m 和 200 m 两种情况进行模拟,得出开采后上下煤层间岩层应力分布规律(图 1)。工程实践中,综放面推进 20 m 时,顶板未发生垮落现象,此阶段为模拟初采阶段;采煤面推进至 200 m 时,综放面支架后方 10 m 内未垮落,10 m 外发生垮落现象,在模拟中垮落带以弱化材料充填,将综放面后方 10 m 范围以外由底板向上 10 m 范围划分为一个单元,并降低该单元岩性,使其岩性低于相邻区域岩层岩性。

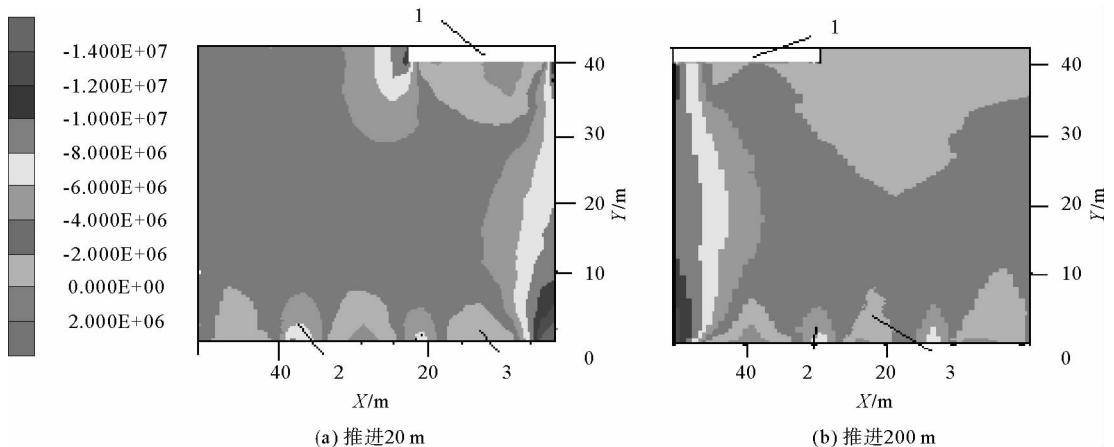


图 1 上下煤层间岩层应力云图

Fig. 1 Stress nephogram between two adjacent coal seam strata

由图 1 可见,上下煤层间的岩层应力原始值为 4.0 MPa,下部煤层条带开采及上部煤层长壁开采后,采空区内,下部煤层顶板大约 6.0 m 范围应力降低为 2.0 MPa,初采阶段上部煤层底板 5.0 m 范围应力降低为 2.0 MPa,3.0 m 范围应力甚至出现正值(拉应力);正常开采阶段,上部煤层底板 5.0 m 范围(局部地段的底板 15 m 范围)应力降低为 2.0 MPa。上述卸载区破坏范围与现场实测破坏范围基本一致,说明上述模拟过程是正确的。

将上述应力值分别代入式(1),求得有效应力值为4.0 MPa岩层的渗透率为 $0.47 \times 10^{-23} \text{ m}^2$,有效应力值为2.0 MPa的岩层的渗透率为 $1.86 \times 10^{-23} \text{ m}^2$ 。

3 Gambit 建模与 Fluent 数值模拟

3.1 Gambit 建模

根据相邻煤层岩层结构(图 2),对煤层工作面推进距离 20 m,200 m 两种情况分别建立 Gambit 数值计算模型(图 3(a),(b)),依据上下煤层间岩层渗透率变化规律,将其分为上、中、下三层。在综放面正常推进阶段,根据垮落矸石压实程度的不同,将上部煤层采空区分为“三带”:自然堆积区、载荷影响区、压实稳定区,相关参数见表 1 和表 2。

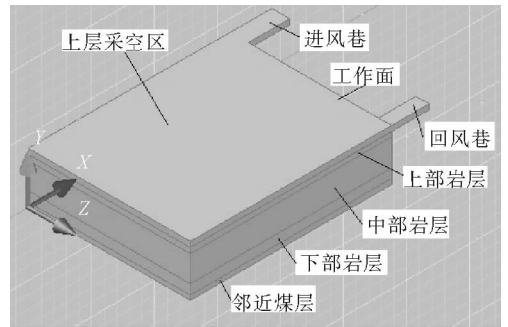


图 2 相邻煤层岩层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of adjacent coal seams and rock

表 1 工作面推进 20 m 时模型参数表

Tab. 1 Parameters of the face advance 20 m

项目	长/m	宽/m	高/m	备注
采场	80	4	3	
自然堆积区	80	20	3	孔隙率:0.375;瓦斯涌出量 ^[2] : $2.21 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
中间岩层上层	80	20	5	渗透率: $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
中间岩层中层	80	20	15	渗透率: $0.47 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
中间岩层下层	80	20	6	渗透率: $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
进风巷	20	4	3	通风量 ^[4] : $720 \text{ m}^3/\text{min}$

表 2 工作面推进 200 m 时模型参数表

Tab. 2 Parameters of the face advance 200 m

项目	长/m	宽/m	高/m	备注
采场	80	4	3	
自然堆积区	80	10	3	孔隙率:0.375;瓦斯涌出量 ^[2] : $2.21 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
载荷影响区	80	40	3	孔隙率:0.286;瓦斯涌出量 ^[2] : $7.72 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
压实稳定区	80	150	3	孔隙率:0.167;瓦斯涌出量 ^[2] : $2.48 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
进风巷	20	4	3	通风量: $720 \text{ m}^3/\text{min}$
中间岩层上层	80	200	5	渗透率: $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
中间岩层中层	80	200	15	渗透率: $0.47 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
中间岩层下层	80	200	6	渗透率: $1.86 \times 10^{-25} \text{ m}^2$

3.2 Fluent 数值模拟

将 Gambit 软件建立的数值计算模型(图 3)导入 Fluent 模拟软件中并进行求解。模拟采用 $k-e$ 湍流模型。该模型是一种可处理气体流动的湍流状态的流动模型^[6],该湍流模型用于求解处于模型湍流核心区的流动,取 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$ ^[8]。对于模型近壁区的流动,采用标准壁面函数进行描述^[9],对标准 $k-e$ 模型加以补充,以解决瓦斯在整个模型中的运移流动问题。

模型中,进风顺槽的横截面边界设置为速度进口 (Velocity inlet = 1.0 m/s),由于回采工作面通风方式为抽出式通风,因此回风顺槽横截面边界设置为自由流出口 (outflow)^[9]。工作面与采空区的交界面设置为内部边界 (interior);上下煤层之间的岩层及上部煤层采空区设置为多孔介质区 (porous media);上层采空区

与底板岩层的边界设置为内部边界(interior),下部煤层采空区设置为源项,其瓦斯浓度为 70%。经现场探测得邻近煤层之间压差为 50 Pa,因此将邻近煤层顶板面设置为压力进口,其余模型面均设置为壁面(wall)。

4 数值模拟结果及分析

图 4 和图 5 显示了综放面不同推进距离下采空区的瓦斯涌出状况。

当综放面从切眼向前推进 20 m 时,由图 4(a)看出,当不考虑底板瓦斯涌出时,回风巷中瓦斯浓度趋近于 0。根据现场观测,综放面推进至 20 m 处时,采空区顶板比较完整而未发生冒落现象,瓦斯析出量少且进风巷通风量较大,基本不存在瓦斯运移现象。因此模拟测得回风巷瓦斯浓度基本符合现场探测结果。当考虑下部煤层采空区瓦斯向上渗透时(图 4(b)),回风巷中瓦斯浓度为 0.15%。根据数值模拟计算,回风巷中瓦斯涌出增加量即为邻近煤层瓦斯涌出量,此时模拟测得回风巷风速达到 1.5 m/s,求得邻近煤层瓦斯涌出量为 1.62 m³/min。经现场探测,综放面推进 20 m 时回风巷中风速保持在 1.3~1.8 m/s,瞬时瓦斯浓度为 0.18%,与本研究模拟结果基本一致。

当综放面推进 200 m 时,综放面采空区顶板发生大面积冒落现象,释放出大量的瓦斯。此时,采空区中瓦斯来源有煤壁、工作面、底板和矸石。且矸石涌出瓦斯为采空区瓦斯主要来源。由图 5 可知:自然堆积区内瓦斯浓度低于 0.4%,回风巷中局部瓦斯浓度达 0.2%,这是由于自然堆积区内孔隙率较大,漏风量也较大,所以自然堆积区域内的瓦斯稀释程度较大,瓦斯浓度较低。计算求得该种情况下回风巷瓦斯涌出量为 3.37 m³/s。考虑了底板瓦斯涌出量之后,综放面采场瓦斯浓度明显升高,局部瓦斯浓度达到 0.35%。模拟结果表明,回风巷中局部风速达

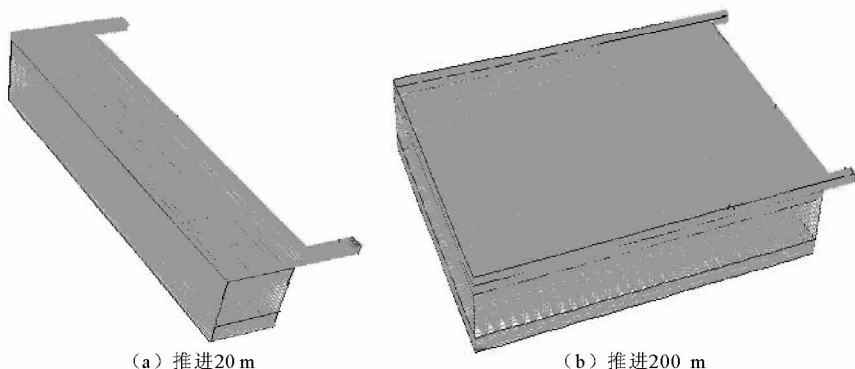


图 3 Gambit 数值模拟计算模型图

Fig. 3 Pictures of numerical calculation model of Gambit

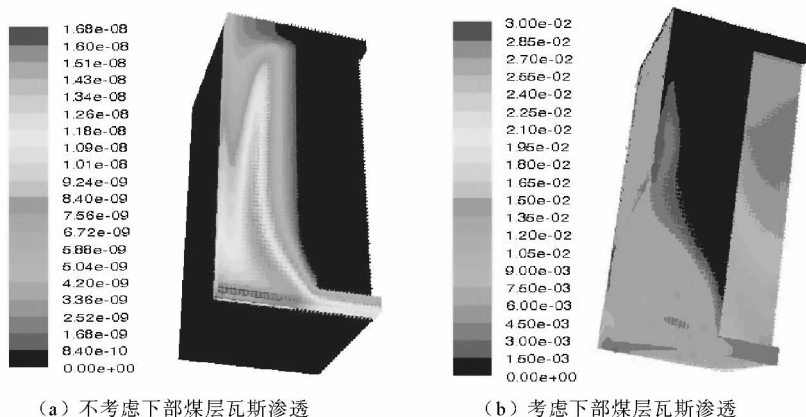


图 4 工作面推进距离 20 m 时采空区瓦斯浓度分布模拟图

Fig. 4 Mimic diagram of gas concentration distributions in goaf of face advance 20 m

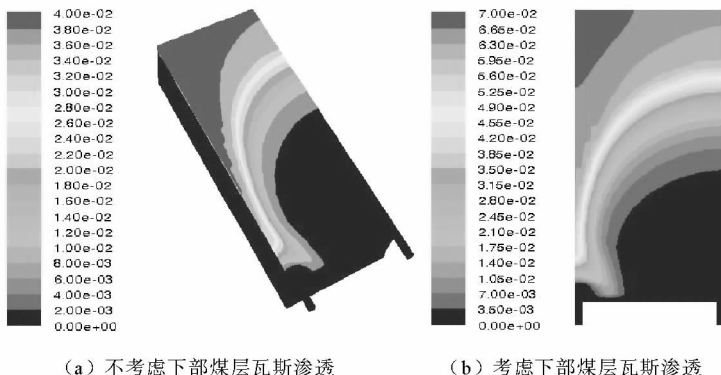


图 5 工作面推进 200 m 时采空区瓦斯浓度分布模拟图

Fig. 5 Mimic diagram of gas concentration distributions in goaf of face advance 200 m

1.9 m/s,求得此时的邻近煤层瓦斯涌出量为 $4.79 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程实践中,综放面推进至200 m处时,利用相关仪器对回风巷中的瓦斯浓度和瞬时风速进行了数据监测,测得局部瓦斯浓度为 $0.30\% \sim 0.40\%$,局部最大风速达到 1.7 m/s,本研究模拟结果与现场实测数据基本吻合,验证了本次数值模拟结果的正确性。

5 结论

1)利用 UDEC 软件分析了煤层综放面后方底板岩层采动裂隙演化规律,指出综放面后方 20 m 范围内未冒落区底板岩层为受采动影响程度最大区域,存在横向和纵向裂隙发育。

2)利用三维 Fluent 模型,分析了邻近煤层瓦斯渗透影响下的综放面采空区瓦斯运移分布特征,并以 Fluent 可视化形式确定综放面不同推进距离下回风巷瓦斯浓度分布范围,指出在类似工程实践中,随着综放面的不断推进,邻近煤层瓦斯渗透量增加,其对综放面瓦斯运移的影响不可忽视。

参考文献:

- [1]周迎新.多煤层开采中的交互作用及其原理[J].矿山压力与顶板管理,2010,26(4):49-53.
ZHOU Yingxin. Interaction and its principle in multi-seam mining[J]. Ground Pressure and Strata Management,2010,26(4):49-53.
- [2]王济凯,鲍学彬.采空区漏风流场的 Fluent 数值模拟[J].山东煤炭科技,2009,16(3):86-87.
WANG Jikai,BAO Xuebin. The Fluent numerical simulation about goaf leakage merry course[J]. Shandong Coal Science and Technology,2009,16(3):86-87.
- [3]张英华,黄志安,丁厚成,等.倾向高抽巷抽放瓦斯数值模拟研究[C]//国际安全科学与技术学术研讨会论文集.沈阳:东北大学出版社,2008:653-657.
- [4]李晓平,张烈辉,李允.不稳定渗流理论在水驱气藏水侵识别中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(3):364-371.
LI Xiaoping,ZHANG Liehui,LI Yun. Polication of unstable percolation theory in water-drive gas reservoir water invasion identified[J]. Application of Basic Science and Engineering,2009,17(3):364-371.
- [5]赵阳升,冯增朝,文再明.煤体瓦斯愈渗机理与研究方法[J].煤炭学报,2004,29(3):293-297.
ZHAO Yangsheng,FENG Zengchao,Wen Zaiming. The percolation mechanism and research method of methane in coal mass [J]. Journal of China Coal Society,2004,29(3):293-297.
- [6]赵洪宝,潘卫东,汪昕.开采薄煤层采空区瓦斯分布规律数值模拟研究[J].煤炭学报,2011,36(增2):440-443.
ZHAO Hongbao,PAN Weidong,Wang Xin. Simulation and research about the thin seam goaf gas distribution law[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(s2):440-443.
- [7]许满贵,林海飞,潘宏宇.综采采空区瓦斯运移规律及抽采研究[J].湖南科技大学报,2010,15(6):6-9.
XU Mangui,LIN Haifei.PAN Hongyu. Mechanized mining goaf gas migration law and drainage[J]. Newspaper of Hunan University of Science and Technology,2010,15(6):6-9.
- [8]范宏伟.综放采空区瓦斯流动规律数值模拟研究[J].山西煤炭,2011,11(25):57-59.
FAN Hongwei. Numerical simulation of mechanized caving goaf gas flow patterns[J]. Shanxi Coal,2011,11(25):57-59.
- [9]王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007:34-45.