

沿空留巷采空区氧化带分布特征与关键参数分析

文虎^{1,2}, 于志金^{1,2}, 翟小伟^{1,2}, 王凯^{1,2}

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为预防沿空留巷采空区内的煤自燃, 研究了渗流规律、氧化带分布及影响氧化带范围的关键参数, 建立了煤自燃多物理场耦合的动态模型, 以典型工作面为例, 分析了沿空留巷采空区内煤岩体冒落的分布特征, 提出了对应的空隙率分布模型, 并将解算结果与现场实测进行对比, 计算结果表明: 充填墙体厚度在1~4 m时, 厚度对氧化带范围影响较小, 而墙体的渗透率对氧化带影响显著, 渗透率由 10^{-12} m^2 变化至 10^{-9} m^2 , 氧化带最宽范围由60 m变化至105 m, 面积逐渐增大; 邻近采空区渗透率大于 10^{-8} m^2 时, 靠近相邻采空区一侧氧化带范围显著增大; 因此, 对进、回风巷的充填墙体进行堵漏和加固是缩小采空区内煤自燃危险区域的有效措施。

关键词: 沿空留巷; 氧化带; 渗透率; 充填墙体; 堵漏

中图分类号: TD75 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)01-0138-06

Analysis on distribution features and key parameters of oxidation zone in goaf of gob-side entry retaining

Wen Hu^{1,2}, Yu Zhijin^{1,2}, Zhai Xiaowei^{1,2}, Wang Kai^{1,2}

(1. School of Energy Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. MOE Key Lab of Mining and Disaster Prevention and Control in West China Mine, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to prevent and control coal spontaneous combustion in goaf of gob-side entry retaining, the seepage law, oxidation zone distribution and key parameters affecting to oxidation zone scope were studied. A multi-physic field coupling dynamic model of coal spontaneous combustion was established. Taking typical coal mining face as example, the paper analyzed caving distribution features of coal and rock in goaf of gob-side entry retaining and put forward relevant pore rate distribution model. A comparison between the solution results and site measurements was conducted. The calculation results showed when that the thickness of stowing wall ranged from 1~4 m, the thickness would have less influence to oxidation zone scope, but the permeability of wall would have obvious influence to oxidation zone scope. The permeability varied from 10^{-12} m^2 to 10^{-9} m^2 . The max wide scope of oxidation zone varied from 60 m to 105 m and the area would be steadily increased. When the permeability of neighboring goaf was higher than 10^{-8} m^2 , the oxidation zone scope of one side near the neighboring goaf would be increased obviously. Therefore, the leakage sealing and reinforcement of stowing walls in intake airway and return airway would be effective measures to reduce the danger area of coal spontaneous combustion in goaf.

Key words: gob-side entry retaining; oxidation zone; permeability; stowing wall; leakage sealing

0 引 言

沿空留巷技术的推广使用符合绿色矿井的开采理念, 对提高矿井经济效益、减少上隅角瓦斯集聚具有显著的效果^[1]。但充填墙体贯穿了整个采掘过

程, 在反复的压力冲击下, 易发生变形^[2-3], 加之采用“Y”型通风方式, 这些因素综合作用增加了采空区中的漏风量^[4]。同时, 采空区顶板冒落后与相邻采空区连成一体使得采空区内渗流规律趋于复杂, 这些因素对采空区内氧化带范围的分布产生了动态

收稿日期: 2015-10-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.01.023

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134019, 51404195); 陕西省重点科技创新团队计划资助项目(2012KCT-09)

作者简介: 文虎(1972—), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士。通信作者: 于志金, Tel: 18646980010, E-mail: yuzhijin0927@126.com

引用格式: 文虎, 于志金, 翟小伟, 等. 沿空留巷采空区氧化带分布特征与关键参数分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 138-143.

Wen Hu, Yu Zhijin, Zhai Xiaowei, et al. Analysis on distribution features and key parameters of oxidation zone in goaf of gob-side entry retaining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 138-143.

影响。现场测试受制于采空区的破坏性和测点布置,难以全面反应采空区内动态变化的真实状态。文献[5-8]通过数值模拟的方法研究了采空区内遗煤的自燃特征,但缺少依据沿空留巷采空区冒落特点对渗流参数进行细化选定。文献[9]提出了堵漏是有效的采空区防治煤自燃措施,但并未给出定量的判断依据。针对上述问题,笔者依据氧浓度划分采空区“三带”的方法,利用数值模拟方法求解了变化参数条件下采空区中氧化带的分布特征,采用控制变量的方法,定量分析了影响后退式沿空留巷采空区内氧化带范围的关键参数,为防治措施的有效实施提供了科学依据。

1 采空区煤体自燃耦合模型

煤体氧化放热的性能是其发生自燃的本质原因^[10],为研究煤自燃的过程,许多研究者建立了相关的数值模型^[4-8,11-12]。一般来讲,煤自燃主要包含热、流及反应过程(忽略水分、煤岩体形变和瓦斯组分的干扰),涉及控制方程和求解参数的双重耦合。

目前的研究多将采空区内的煤岩体视为多孔介质^[13],由于原始煤岩体冒落后,采空区内部空隙尺度较大,气体的渗流体现强烈的非达西特性^[14],通常采用描述过渡区域渗流状态的非达西方程表示。笔者基于连续性方程、动量方程和能量方程建立了煤自燃多物理场耦合数值模型。

1) 渗流方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla \cdot u + (\nabla \cdot u)^T) - \frac{2\mu}{3\varepsilon} (\nabla \cdot u)I \right] - \left(\frac{\mu}{\kappa} + \beta|u| + \frac{Q}{\varepsilon^2} \right) u + \rho g \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

2) 氧浓度方程:

$$\frac{\varepsilon \partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\varepsilon D_0 \nabla \cdot c) + u \nabla \cdot c = r(1 - \varepsilon)$$

3) 温度方程:

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla \cdot T = \nabla \cdot (K_{eq} \nabla \cdot T) + r(1 - \varepsilon) \Delta H$$

$$(\rho C_p)_{eq} = \theta_p \rho_s C_s + (1 - \theta_p) \rho C_p; K_{eq} = \theta_p K_s + (1 - \theta_p) K_p$$

式中: ε 为采空区内松散煤体的空隙率; ρ 为空气的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ∇ 为哈密顿算子; u 为渗流速度, m/s ; p 为空气压力静压、动压之和, Pa ; I 为单位矢量; μ 为空气的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; κ 为渗透率, m^2 ;

β 为 Forchheimer 系数; Q 为气体源相, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; T 为物理场温度, K ; T_0 为初始温度, K ; c 为氧气物质的量浓度, mol/m^3 ; D_0 为氧气在松散煤体内的扩散系数, m^2/s ; r 为遗煤的耗氧速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; C_p 为流体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; K_{eq} 为等效导热系数, 下标 eq 代表对应等效变量; ΔH 为单位煤反应产生的热量, J/mol ; θ_p 为固体材料的体积分率; C_s 为固体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_s 为固体材料的密度, kg/m^3 ; K_p 为流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; K_s 为固体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2 工作面概况与实测

2.1 工作面概况

金凤煤矿 011805 工作面(图 1)走向长 3 046 m, 倾斜长 290 m, 进、回风巷宽为 5.2 m, 平均煤层厚度为 4 m, 倾角为 2° , 为易自燃煤层。工作面沿煤层顶板留底煤开采, 采空区内遗煤分布不均, 采用全部垮落法管理顶板。011805 进风巷采用沿空留巷作为下区段工作面的回风巷, 巷道采用柔模泵注混凝土墙进行支护, 即在原巷道内沿走向浇筑 1 m 厚的混凝土墙, 巷道顶部采用锚杆加固。沿空巷道内设有风筒, 风筒直径 800 mm, 沿进风巷上帮敷设至沿空留巷内, 距掘进工作面 12 m 处。工作面配风量为 $807 \text{ m}^3/\text{min}$, 风筒送风量 $205 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

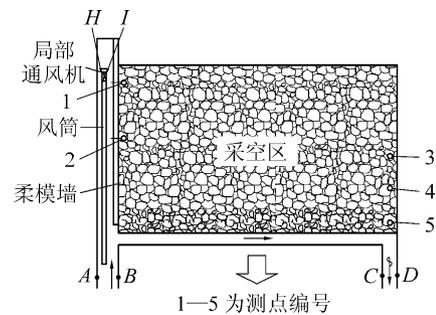


图1 工作面几何模型和采空区测点布置
Fig. 1 Geometric model of working face and layout of measuring points in goaf

2.2 采空区内“三带”的现场测试

为掌握沿空留巷采空区内氧化带的分布并对数值计算的结果进行验证,对典型工作面进行布点观测(图 1),并采用氧浓度法划分采空区内自燃“三带”。在沿空侧布置 2 个测点,两测点相距 80 m,在充填墙距地面 0.5 m 处施工钻孔,钻孔内放置直径 80 mm、长 2 m 的钢管,钢管内设有用于抽取气体的直径 8 mm 的束管,随着工作面的前移,2 个测点动

态测试沿空侧采空区内氧气浓度的变化。回风侧采空区内布置3个测点,测点距底板1.5 m,测点间距50 m,并铺设保护钢管,钢管内有取气束管,束管端头采用过滤式探头,同时在端头外装有钢质保护罩,防止挤压,整个管路尽量贴近壁面。各测点利用便携式抽气泵,人工采样、色谱分析,待氧气体积分数下降到4%时结束该点测试。

3 参数选定与求解

基于自然过程多物理场耦合规律建立的双重耦合模型,在解算前需确定模型中的重要参数: D 为 $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, μ 为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, T_0 为300 K, ρ 为 $1.213 \text{ kg}/\text{m}^3$, κ_1 为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, κ_2 为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2$,墙体空隙率 ε_1 为0.1,采空区空隙率 ε_2 为0.2, K_p 为 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, K_s 为 $0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, C_s 为 $1530 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, C_p 为 $2276 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, r 为 $4 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, ΔH 为 $150 \text{ J}/\text{mol}$ 。模型边界

条件见表1。采空区内漏风速率是影响遗煤氧化升温过程的重要因素,而空隙率是影响采空区内渗流规律的重要参数。文献[15-17]通过对岩体冒落压实时空演化规律的研究,认为由于悬臂梁结构的存在,采空区内的空隙率近似呈“O”型分布^[18]。但笔者经过现场测试发现,由于沿空留巷采区内通常布置多个工作面,相邻工作面仅间隔薄充填墙体,采空区煤岩体冒落后,极易形成多采空区连成一体,造成采空区内漏风规律复杂。基于上述分析,为了掌握采空区内真实的渗流规律,笔者通过对经验公式^[19]的修正,提出了适用于描述沿空留巷采空区内空隙率随位置变化的连续分布模型:采空区内渗透率 κ 与空隙率满足 Blake-Kozeny^[20]关系式:

$$\kappa = \frac{\varepsilon^3 d_p}{150(1-\varepsilon)^2}$$

式中 d_p 为平均粒度,μm。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

物理场	渗流场	氧浓度场	温度场
初始值	$p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$, $\mu = 0$	$c_0 = 0$	$T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
边界条件	AB 入口 $u = 1 \text{ m/s}$ CD 出口 $\mu(\nabla \cdot u) \cdot n = 0$ HI 入口 $u = 0.7 \text{ m/s}$ 其他 无流动	流入 $c = 9.375 \text{ mol}/\text{m}^3$ 流出 $-nD_0 \nabla \cdot c = 0$ 流入 $c = 9.375 \text{ mol}/\text{m}^3$ 无通量	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $-n(-K_{eq} \nabla \cdot T) = 0$ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ $-n(-K_{eq} \nabla \cdot T) = 0$

注: p_0 为初始压力; c_0 为初始浓度; n 为法向分量,取0。

描述采空区内煤自燃的数值模型是一组的复杂非线性偏微分方程组,为了准确得出计算的结果并体现模型和参数的双重耦合过程,选用Comsol软件进行了数值求解,通过建模、网格剖分、求解器求解计算相关物理变量。

4 数值计算与结果分析

4.1 模拟结果验证

通过模型解算,得到了沿空留巷采空区内流场和氧气浓度的分布,为了验证模型的准确性,将测试数据和模型中对应位置的氧气浓度进行对比,分别取采空区内沿空侧充填墙旁1 m与回风侧壁面1 m处的模拟数据,对比结果如图2、图3所示。

采空区进、回风两侧的模拟数据和检测数据吻合度较好,验证了模型的正确性,这里需要指出的是由于混凝土墙施工的原因,在沿空侧近工作面5 m范围内并没及时构筑充填墙体,造成了这段区域漏

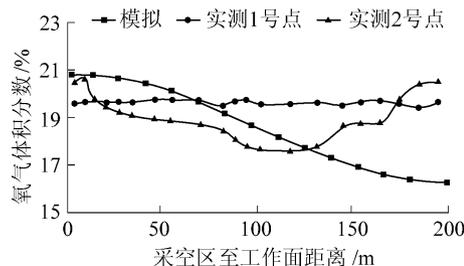


图2 沿空侧氧气浓度对比

Fig. 2 Comparison of oxygen concentration in the side of goaf

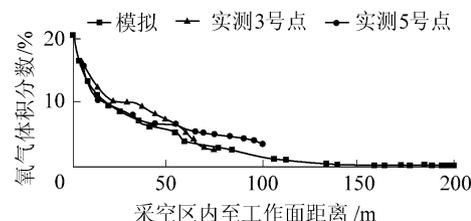


图3 回风侧氧气浓度对比

Fig. 3 Comparison of oxygen concentration in the side of return air. 流量大并由于沿空侧空隙较大,故实测氧气浓度高

于模拟值。在回风侧由于相邻采空区压实程度对漏风规律会产生较大的影响,在模型中设定相邻采空区的渗透率为定值,所以会造成一定误差。

4.2 结果分析与讨论

工作面进风和沿空巷风筒共同送风,混合风流在进风隅角汇合并流向工作面,使得此处漏风压力较大(图4);与上区段采空区间的充填墙体随顶板冒落压垮,多个采空区连成一体,部分漏风进入上区段采空区;采空区内的氧化带分布受漏风压力的影响,大致呈“L”型分布在采空区中。为

研究影响此类两进一回“Y”型通风工作面采空区氧化带范围的关键参数,并为采空区煤自燃防治工作提供科学的指导,分别在模型中改变充填墙体厚度、墙体渗透率、上区段采空区渗透率来研究氧化带的变化规律。

1) 上区段采空区渗透率。墙体厚度为 1 m,渗透率为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,多孔介质的渗透率是表征渗流特性的重要参数,分别设置上区段采空区渗透率为 1×10^{-6} 、 1×10^{-7} 、 1×10^{-8} 、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 得到采空区中氧气浓度的分布,如图4所示。

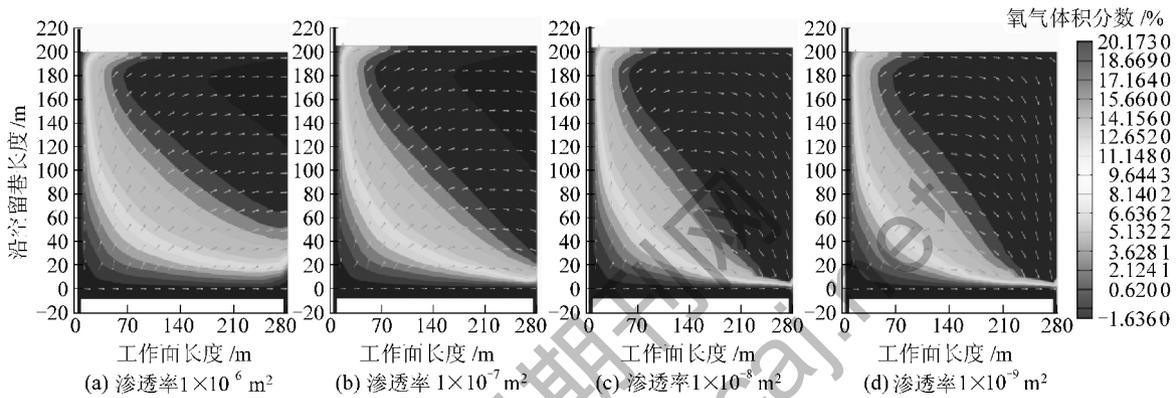


图4 上区段采空区不同渗透率下采空区中氧气浓度的分布

Fig. 4 Oxygen concentration distribution in goaf under different permeability of upper gob

由图4可知,采空区中氧气浓度的分布,特别是回风一侧的氧化带范围受相邻采空区渗透率影响明显,上区段采空区渗透率越大,氧化带面积越大;但当相邻采空区渗透率下降至 $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2$,继续减小渗透率对采空区氧化带范围影响不大。故在回采过程中对两采空区间的墙体进行堵漏加固能够有效缩小氧化带范围。

2) 墙体渗透率。设置混凝土充填墙体厚度 1 m,相邻采空区渗透率 10^{-8} m^2 ,分别设定墙体渗透率为 1×10^{-12} 、 1×10^{-11} 、 1×10^{-10} 、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,观察采空区氧气浓度的分布,如图5所示。

由图5可见,随混凝土墙体的渗透率增大,采空

区氧化带范围迅速变化,氧化带最宽的范围由渗透率为 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 时的 60 m 变为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 时的 105 m,面积逐渐增大。说明墙体渗透率的增大直接导致漏风加剧,氧气加速扩散,使得氧化带范围变大,因此沿空侧墙体空气的隔风性能是影响采空区漏风量的重要因素。为了缩减煤自燃危险区域,提高防灭火效率,加强充填墙体维护和堵漏,是十分有效的沿空留巷工作面煤自燃防治手段。

3) 墙体厚度。保持其他参数不变,分别将墙体厚度设定为 4、8 m,得到采空区中氧化带的分布,如图6所示。

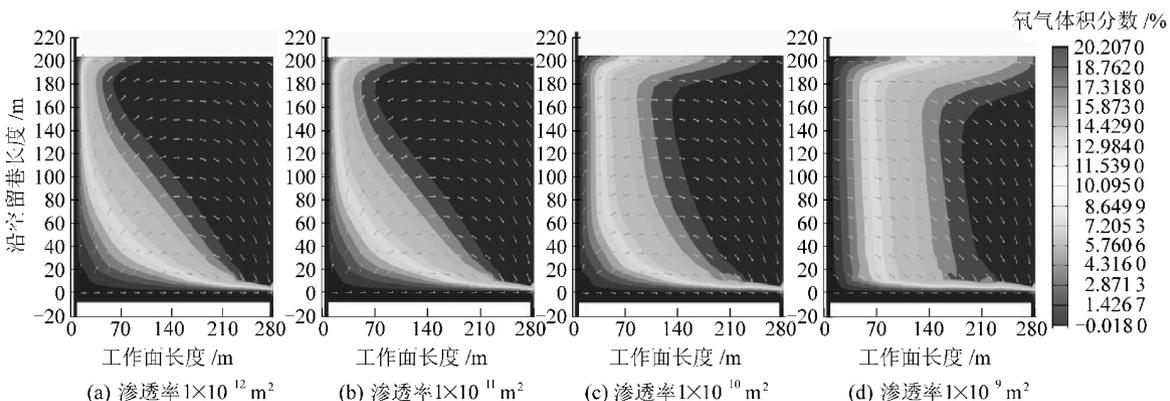


图5 不同墙体渗透率下采空区中氧气浓度的分布

Fig. 5 Oxygen concentration distribution in goaf under different permeability of wall

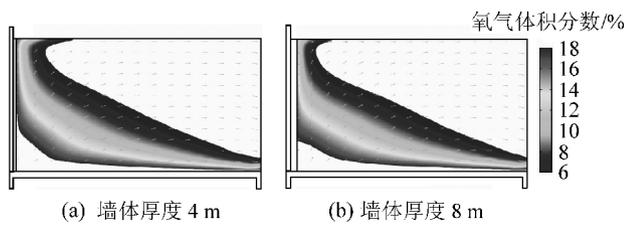


图6 不同墙体厚度下采空区氧化带分布

Fig. 6 Oxidation zone distribution in goaf with different thickness of wall

由图6可知,在渗透率不变的条件下墙体厚度为1~4 m时,厚度对氧化带范围影响较小,当厚度超过8 m时,在相同渗透率下,随厚度增加,压力梯度下降明显导致沿空侧氧化带面积减小,因此在一定范围内增加充填墙体的厚度并不能有效控制漏风,缩小氧化带范围。

5 结 论

1) 通过与现场测试数据对比,验证了所建立沿空留巷采空区煤自燃数值模型的有效性;利用该模型能够对煤自燃危险区域进行动态预测。

2) 由于沿空侧漏风和多采空区连通,沿空留巷采空区内的氧化带大致呈“L”型分布在采空区中;上区段采空区渗透率对回风侧氧化带面积影响较大。

3) 当充填墙体厚度小于4 m时,墙体的厚度对氧化带范围影响并不明显,但充填墙体渗透率增大,对氧化带范围作用显著,氧化带最宽的范围由渗透率 $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 时的60 m变为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 时的105 m;为此提出了对进、回风巷的填充墙体进行堵漏和维护加固是减小采空区内氧化带面积的有效措施。

参考文献:

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-347.
Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 343-347.
- [2] 张镇林,范明建.强烈动压影响下的沿空留巷巷道加固技术[J].煤炭科学技术,2010,38(6):14-17.
Zhang Zhen, Lin Jian, Fan Mingjian. Reinforcement technology of gateway retained a long goaf under influences of serious dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 38(6): 14-17.
- [3] 张农,韩昌良,阚甲广,等.沿空留巷围岩控制理论与实践[J].煤炭学报,2014,39(8):1635-1641.
Zhang Nong, Han Changliang, Kan Jiaguang. Theory and practice of surrounding rock control for pillarless gob-side entry retaining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1635-1641.
- [4] 张玖润,杨胜强,程健维,等.一面四巷高位瓦斯抽采及浮煤自燃耦合研究[J].中国矿业大学学报,2011,42(4):513-518.
Zhang Meirun, Yang Shengqiang, Cheng Jianwei et al. Research on numerical simulation for spontaneous combustion zone in gob area [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 42(4): 513-518.
- [5] 杨明,冯普金,高建良.一进两回Y型通风采空区气体分布数值模拟[J].煤炭科学技术,2012,40(9):36-38,41.
Yang Ming, Feng Pujin, Gao Jianliang. Numerical simulation on air distribution in mining goaf with one intake and two air returning Y type ventilation [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(9): 36-38, 41.
- [6] 朱红青,刘鹏飞,刘星魁,等.沿空巷破碎煤体自燃耗氧及升温特征数值模拟[J].煤炭科学技术,2011,39(11):63-66.
Zhu Hongqing, Liu Pengfei, Liu Xingkui et al. Numerical simulation on oxygen consumption and temperature rising of broken coal spontaneous combustion in gateway retained along goaf [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 63-66.
- [7] 宋泽阳,郭良,齐文宇,等.多场耦合下煤堆自燃过程及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2012,40(8):59-62.
Song Zeyang, Guo Liang, Qi Wenyu et al. Analysis on coal pile spontaneous combustion process and influence factors under multi field coupling [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 59-62.
- [8] 刘伟,秦跃平,郝永江,等.“Y”型通风下采空区自然发火数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(7):874-879.
Liu Wei, Qin Yueping, Hao Yongjiang et al. Numerical simulation on spontaneous combustion of goaf under “Y” type ventilation [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2013, 32(7): 874-879.
- [9] 贾宝山,尹彬,皮子坤,等.沿空留巷开采中堵漏的必要性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(3):69-73.
Jia Baoshan, Yin Bin, Pi Zikun et al. Study on necessity to apply the plugging in mining of gob-side entry retaining [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(3): 69-73.
- [10] 文虎,徐精彩,李莉,等.煤自燃的热量积聚过程及影响因素分析[J].煤炭学报,2003,28(4):370-375.
Wen Hu, Xu Jingcai, Li Li et al. Analysis of coal self-ignite heat accumulating process and its effect factor [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 370-375.
- [11] 周延,孟倩,李骏,等.采空区自燃带数值模拟方法研究[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):963-969.
Zhou Yan, Meng Qian, Li Jun et al. Research on numerical simulation for spontaneous combustion zone in gob area [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(6): 963-969.
- [12] Karl Heinz Wolf, Hans Bruining. Modelling the interaction be-

- tween underground coal fires and their roof rocks [J]. *Fuel*, 2007, 86: 2761 – 2777.
- [13] Taraba B, Michalec B. Effect of long – wall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area – CFD modelling [J]. *Fuel* 2011, 90: 2790 – 2797.
- [14] 秦跃平, 刘 伟, 杨小彬, 等. 基于非达西渗流的采空区自然发火数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1177 – 1184.
Qin Yueping, Liu Wei, Yang Xiaobin, *et al.* Numerical simulation of impact of non – darcy seepage on spontaneous combustion in goaf [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1177 – 1184.
- [15] 鹿存荣, 杨胜强, 郭晓宇, 等. 采空区渗流特性分析及其流场数值模拟预测 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(9): 55 – 59.
Lu Cunrong, Yang Shengqiang, Guo Xiaoyu, *et al.* Analysis on seepage features in goaf and numerical simulation prediction of flow field [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(9): 55 – 59.
- [16] 谢 军, 薛 生. 综放采空区空间自燃三带划分指标及方法研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(1): 65 – 68.
Xie Jun, Xue Sheng. Study on division index and method of three spontaneous combustion zones in goaf of fully mechanized top coal caving mining face [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(1): 65 – 68.
- [17] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究 [J]. *煤炭学报*, 1998, 23(5): 465 – 469.
Qian Minggao, Xu Jialin. Study on the O shape circledistribution characteristics of mining – induced fractures in the overlying strata [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(5): 465 – 469.
- [18] 李宗翔, 衣 刚, 武建国, 等. 基于“O”型冒落及耗氧非均匀采空区自燃分布特征 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 484 – 490.
Li Zongxiang, Yi Gang, Wu Jianguo, *et al.* Study on spontaneous combustion distribution of goaf based on the “O” type risked falling and non – uniform oxygen [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 484 – 490.
- [19] 王月红, 温佳丽, 秦跃平, 等. 采空区多参数气 – 固耦合渗流模拟 [J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2012, 31(5): 760 – 765.
Wang Yuehong, Wen Jiali, Qin Yueping, *et al.* Numerical simulation of multi – parameters coupling seepage in goaf based on fluid – solid theory [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2012, 31(5): 760 – 765.
- [20] Yuan L, Smith A C. Numerical study on effects of coal properties on spontaneous heating in long – wall gob areas [J]. *Fuel*, 2008, 87: 3409 – 3419.
- ~~~~~
- (上接第 113 页)
- [8] 宋颜金, 程国强, 郭惟嘉. 采动覆岩裂隙分布及其孔隙率特征 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 533 – 536.
Song Yanjin, Cheng Guoqiang, Guo Weijia. Study of distribution of overlying strata fissures and its porosity characteristics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 533 – 536.
- [9] 李树刚, 钱鸣高, 石平五. 综放开采覆岩离层裂隙变化及空隙渗流特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(5): 604 – 607.
Li Shugang, Qian Minggao, Shi Pingwu. Study on bed – separated fissures of overlying stratum and interstice permeability in fully – mechanized top coal caving [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 604 – 607.
- [10] 檀双英, 康永华, 刘治国, 等. 祁东煤矿综采覆岩破坏特征 [J]. *煤炭科学技术*, 2006, 34(9): 1 – 4
Tan Shuangying, Kang Yonghua, Liu Zhiguo, *et al.* Features of overburden rock fracture in fully – mechanized mining of Qidong coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(9): 1 – 4.
- [11] 潘一山, 贾宝新, 王 帅, 等. 矿震震波传播规律的三维模型及其应用 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(11): 1810 – 1814.
Pan Yishan, Jia Baoxin, Wang Shuai, *et al.* Three – dimension of model and its application mine seismic wave propagation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11): 1810 – 1814.
- [12] Alber M, Fritschen R, Bischoff M, *et al.* Rock mechanical investigations of seismic events in a deep longwall coal mine [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 46(2): 408 – 420.
- [13] 孔令海, 齐庆新, 姜福兴, 等. 长壁工作面采空区见方形成异常来压的微震监测研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(S2): 3889 – 3896.
Kong Linghai, Qi Qingxin, Jiang Fuxing, *et al.* Abnormal strata stress resulted from goaf square of longwall face based on microseism monitoring [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S2): 3889 – 3896.
- [14] 姜福兴, 孔令海, 刘春刚. 特厚煤层综放采场瓦斯运移规律 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 407 – 411.
Jiang Fuxing, Kong Linghai, Liu Chungang. Gas emission laws of fully – mechanized sublevel caving mining in extra – thick coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 407 – 411.
- [15] 杨永杰, 陈绍杰, 张兴民, 等. 煤矿采场覆岩破坏的微地震监测预报研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1407 – 1410.
Yang Yongjie, Chen Shaojie, Zhang Xingmin, *et al.* Forecasting study on fracturing of overburden strata of coal face by microseism monitoring technology [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1407 – 1410.
- [16] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 基于岩层移动的“煤与煤层气共采”技术研究 [J]. *煤炭学报*, 2004, 29(2): 129 – 132.
Xu Jialin, Qian Minggao, Jin Hongwei. Study on “coal and coal – bed methane simultaneous extraction” technique on the basis of strata movement [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(2): 129 – 132.