

复杂条件下综采采空区自燃“三带”划分数值模拟

朱云辉¹, 唐明云², 夏仕伯³

1. 淮南职业技术学院通风安全系, 安徽淮南 232001
2. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽淮南 232001
3. 淮南矿业(集团)有限责任公司安全开采总院, 安徽淮南 232001

摘要 受复杂地质条件影响, 用埋管取样分析方法划分采空区“三带”有诸多限制, 采用数值模拟方法成为分析采空区“三带”的主要手段。本文利用 Fluent 流体力学模拟软件, 对淮南矿业集团潘北 1121(3)综采工作面采空区进行流场模拟, 并根据采空区内漏风风速划分指标确定了“三带”的位置及范围。结果表明, 氧化带的宽度在 40.0m 左右, 以此推论工作面采空区内部自然发火的可能性较小。最后, 改变工作面的供风量, 得出不同供风量对采空区“三带”位置和范围的影响。模拟结果显示, 工作面的供风量越大, 采空区“氧化带”位置越向采空区深部延伸, 且“氧化带”的范围越大。

关键词 复杂条件; 采空区; 自燃发火; “三带”划分

中图分类号 TD752

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.12.010

Numerical Simulation of Distribution of Spontaneous Combustion "Three-Zone" Division in Fully Mechanized Goaf Under Complicated Situation

ZHU Yunhui¹, TANG Mingyun², XIA Shibo³

1. Department of Ventilation and Safety, Huainan Vocational and Technical College, Huainan 232001, Anhui Province, China
2. College of Energy & Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui Province, China
3. Institute of Safe Working, Huainan Mining Group, Huainan 232001, Anhui Province, China

Abstract Under the influence of the complicated geological conditions, the method of sampling analysis by pipe for dividing "three-zone" in the goaf has many limitations. Utilizing the method of numerical simulation to analyze "three-zone" in the goaf becomes the main means. The fluid mechanics calculation software, Fluent is applied to simulate the air leakage flow field status in the goaf of 1121(3) working face of Panbei Mine, Huainan Mining Group, and then the "three-zone" of goaf location and area are obtained according to the air leakage flow field simulation result. The results show that the width of "oxidation-zone" is about 40 meters. Considering the coal spontaneous combustion stage is three to six months, it is impossible that the residual coal in the goaf is spontaneously combusted during a working face mining process. At last, the different air leakage flow field status in the goaf is obtained under the condition of different ventilation quantity. It is found that the more ventilation quantity is provided, farther away from the working face the location of "oxidation-zone" is and the wider extent of "oxidation-zone" is.

Keywords complicated conditions; goaf; spontaneous combustion; "three-zone" dividing

0 引言

采空区自燃“三带”主要指散热带、氧化带和窒息带^[1]。采空区自燃“三带”划分是矿井防灭火基础工作的重要内容之

一, 只有较准确地掌握采空区“三带”的分布及范围, 才能在制定各种防灭火措施时做到有的放矢, 因此, 采空区自燃“三带”划分对预防采空区遗煤自燃非常重要^[2-3]。工作面正常生

收稿日期: 2010-11-19; 修回日期: 2011-03-28

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (HNKY-JT-JS-(2009)11)

作者简介: 朱云辉, 副教授, 研究方向为矿井通风与安全, 电子信箱: zyh6611@163.com

产时,采空区自燃“三带”是客观存在的,而且处于一个动态的稳定状态^[6]。受综采机械化程度提高,复杂地质条件影响探测手段和方法局限,采用现场埋管试验定量准确划分采空区自燃“三带”具有一定困难。考虑淮南矿业集团潘北 1121(3)工作面的推进速度快,采空区浮煤没有足够的氧化时间,氧气浓度随工作面的推进,变化并不明显,本文采用流体力学模拟软件 Fluent 对 1121(3)工作面采空区进行流场模拟,并根据采空区内漏风风速划分指标确定 1121(3)工作面采空区“三带”的位置及范围,最后改变工作面的供风量,得到工作面不同供风条件下的采空区“三带”位置及范围^[7]。

1 1121(3)工作面概况

1121(3)工作面位于东一采区 13-1 煤层第二块段,煤层呈块状及粉末状,煤层产状变化较大,煤层倾向 40° 左右,倾角 $13^{\circ}\text{--}42^{\circ}$,煤厚 3.0—6.0m,平均煤厚 4.4m。工作面平均长 130m,宽 5.25—6.05m,高 3.2—4.0m。工作面顶、底板岩性如表 1 所示。

表 1 工作面顶和底板岩性

Table 1 Rock characteristic in working face roof and bottom

顶底板名称	岩石种类	备注
老顶	细砂岩	厚度为 0—7.2/5.6m, 灰白色、细粒为主
直接顶	泥岩	
伪顶	炭质泥岩	厚度为 0—0.4/0.2m, 灰黑色, 主要为炭质泥岩
直接底	泥岩	
老底	细砂岩、中细砂岩	厚度为 10.0—18.0/16.5m, 浅灰—灰白色, 坚硬

工作面采用后退走向长壁式回采,一次采全高,平均推进速度为 3.1m/d。工作面实际供风量为 1800m³/min。该煤层具有自然发火性,自然发火期 3—6 月。

2 模型建立

2.1 物理模型

根据潘北矿 1121(3)工作面现场实际提供的相关资料,为了使模拟的结果能够更准确反映工作面及采空区的实际流场分布情况,将进、回风巷,工作面和采空区结合起来一起作为采场整体进行数值模拟。在对“三带”模拟结果影响不大的前提下,进行模型简化。进、回风巷的长度均取 20m,采空区走向取 150m,其他模型尺寸完全和现场实际一致。根据潘北矿 1121(3)工作面采空区实际情况,建立复杂的采场三维物理模型,如图 1 所示。

2.2 数学模型

根据质量守恒和动量方程,简化得到数学模型如下:

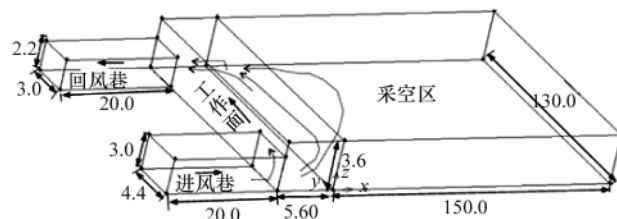


图 1 采场物理模型示意图(单位:m)

Fig. 1 Physical model schematic diagram of excavation(unit: m)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{R_1 \cdot s \cdot u}{l} + \frac{R_2 \cdot s^2 \cdot u^2}{l} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial v} = \frac{R_1 \cdot s \cdot v}{l} + \frac{R_2 \cdot s^2 \cdot v^2}{l} \quad (3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{R_1 \cdot s \cdot w}{l} + \frac{R_2 \cdot s^2 \cdot w^2}{l} \quad (4)$$

其中, p 为静压, Pa; u, v, w 分别为单元体在 x, y, z 方向上的平均流速, m/s; R_1 为层流风阻, Pa · s/m³; R_2 为紊流风阻, Pa · s²/m⁶; l 为采空区滤流分支的长度, m; s 为采空区滤流分支的截面积, m²。

3 采空区“三带”数值模拟

3.1 模拟条件

(1) 工作面的推进速度取 3.1m/d;工作面供风量为 $Q_{\text{工作面}}=1800\text{m}^3/\text{min}$ 。

(2) 采空区漏风阻力系数计算。

采空区漏风阻力系数分布对与采空区的漏风具有直接的联系,它是数值模拟采空区流场分布的关键参数^[8-9]。根据采场实际情况,一般采空区中部较上、下巷附近的孔隙率小,风阻大。综合考虑采空区沿走向与倾向冒落岩石压实程度的变化,则采空区漏风风阻的计算公式为^[1,9]

$$R_1 = ax^c \frac{l}{s \cdot k(\gamma)} \quad (5)$$

$$R_2 = bx^{0.5c} \frac{l}{s^2 \cdot k(\gamma)} \quad (6)$$

其中, a, b 为经验系数, 取决于顶板冒落岩石性质, 其值如表 2 所示; c 为冒落岩石的压实系数。

表 2 不同岩性冒落岩石的 a 、 b 值

Table 2 Coefficients of a, b of falling rock with different rock characteristic

冒落岩石种类	<i>a</i>	<i>b</i>
松软黏土岩, 页岩	0.6—1.0	101
中硬黏土页岩	0.2—0.5	71—100
硬黏土页岩, 砂岩	0.06—0.15	51—70
砂岩, 石灰岩	0.03—0.0	35—50

冒落岩石的压实系数与工作面推进速度 v_f (m/d) 有关, 即

$$c=1.0e^{0.1(5-v_f)} \quad (7)$$

其中, x 为采空区内距工作面距离, m; v_f 为工作面推进速度, m/d。

令 $k(y)$ 在倾斜方向上的冒落压实系数为

$$k(y)=\frac{H_1}{H_2}+\left(1-\frac{H_1}{H_2}\right)\sin\left(\frac{\pi}{l_y}y\right) \quad (8)$$

其中, H_1 为采空区中部覆岩的下沉量, m; H_2 为上、下边界覆岩的下沉量, m; l_y 为采空区倾向长, m。

采空区走向长为 150m, 工作面长度为 130m, 工作面的推进速度取 3.1m/d; 根据实际顶板岩性, $a=0.04$, $b=40$; 根据矿井实际条件, $H_1/H_2 \approx 1.30$, 则

$$R_1=0.04 \cdot x^{1.209} \cdot \frac{l}{s} \cdot \frac{1}{1.3-0.3 \cdot \sin\left(y \cdot \frac{\pi}{130}\right)} \quad (9)$$

$$R_2=40 \cdot x^{0.6} \cdot \frac{l}{s^2} \cdot \frac{1}{1.3-0.3 \cdot \sin\left(y \cdot \frac{\pi}{130}\right)} \quad (10)$$

(3) 模拟基本假设: ① 采空区内遗煤、冒落岩石与空气等混合物视为各向同性的均匀一致的多孔介质; ② 进、回风巷在同一水平, 不考虑位能的影响; ③ 黏性阻力系数和内部阻力系数在 z 方向不发生变化。

3.2 模拟结果和分析

根据模拟计算结果, 得到采场在 $z=1.0$ m 和 $z=2.0$ m 处切面的流场立体等值线图, 如图 2 所示, 并得到 $z=1.0$ m 处切面的

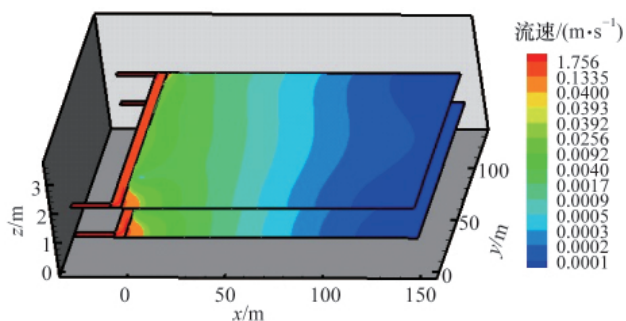


图 2 $z=1.0, 2.0$ m 处流场三维等值线

Fig. 2 Contours of three dimension flow field at $z=1.0$ m and $z=2.0$ m

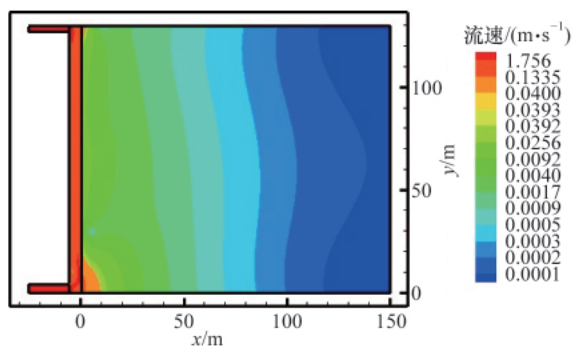


图 3 $z=1.0$ m 处二维流场等值线

Fig. 3 Contours of two dimension flow field at $z=1.0$ m

的二维流场等值线图, 如图 3 所示。以滤流速度 0.1m/min 和 0.24m/min 为“三带”分界线, 得到在 $z=1.0$ m 和 $z=2.0$ m 处切面的“三带”立体图, 如图 4 所示, 并得到 $z=1.0$ m 处切面的二维“三带”位置和分布, 如图 5 所示。

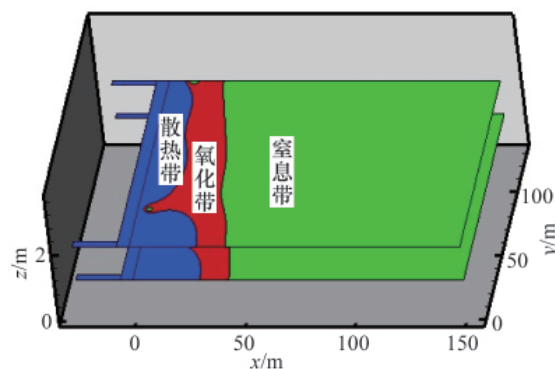


图 4 $z=1.0, 2.0$ m 处三维三带分布

Fig. 4 Three-zone distribution of three dimension at $z=1.0$ m and $z=2.0$ m

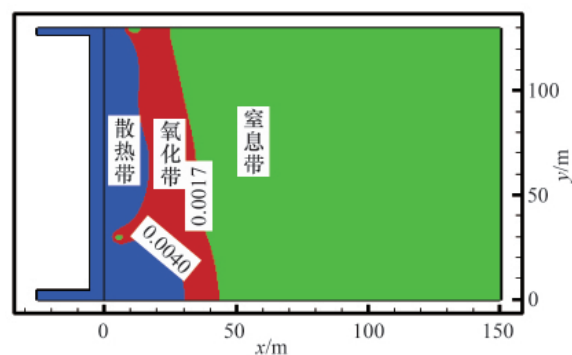


图 5 $z=1.0$ m 处二维三带分布

Fig. 5 Three-zone distribution of two dimension at $z=1.0$ m

从图 2 可以看出, $z=1.0$ m 和 $z=2.0$ m 两个切面的流场等值线分布基本一致。这主要是因为, 在 z 方向上的黏性阻力系数和内部阻力系数不发生变化。工作面风速明显大于采空区滤流速度 (图 3)。随着采空区的走向, 滤流速度下降较快, 这是由于随着采空区的被压实, 阻力系数逐渐增大的缘故。

由图 4、图 5 可知, 在采空区下侧, 氧化带距工作面更近, 这主要是因为风流经机巷流向工作面时, 风流方向发生改变, 导致工作面下隅角附近出现低压区, 这类类似于常见的旋涡, 使得采空区内的风流发生分流, 一部分风量又回到工作面内, 从而在采空区内形成了低速区, 由于采空区三带划分是根据流速进行的, 出现了下隅角附近氧化带渗入散热带的现象。在这种采场条件下, 氧化带的最大宽度为 40.0m 左右 (图 5), 且在采空区倾向不同的位置, 氧化带的位置和宽度不一样, 进风侧宽度最小, 倾向距进风巷外帮 30m 左右氧化带宽度最大。

根据推进速度为 3.1m/d, 氧化带存在的最长时间为

12.9d。由经验可得采空区自然发火期为3—6月,因此,采空区内部自然发火的可能性较小。

4 供风量对采空区“三带”的影响

为了考查工作面供风量对采空区“三带”位置和范围的影响^[1],在原采场条件不变的基础上,除现场实际的供风量 $Q_2=1800\text{m}^3/\text{min}$ 外,再拟用工作面供风量 $Q_1=1200\text{m}^3/\text{min}$ 和工作面供风量为 $Q_3=2400\text{m}^3/\text{min}$ 两种方案模拟。 $z=1.0\text{m}$ 处的模拟结果分别如图6、图7所示。

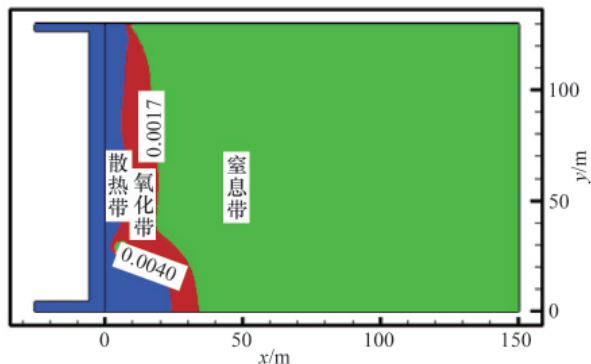


图6 $Q_1=1200\text{m}^3/\text{min}$ 三带分布

Fig.6 Three-zone distribution when ventilating quantity is $1200\text{m}^3/\text{min}$

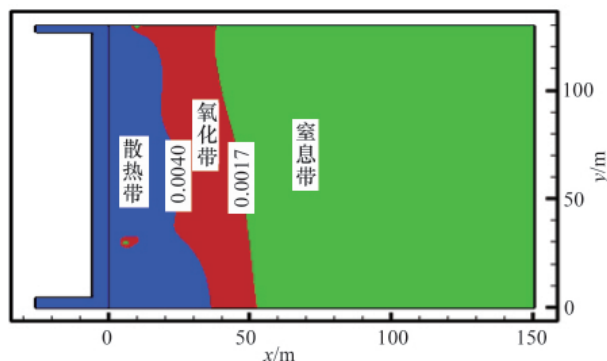


图7 $Q_3=2400\text{m}^3/\text{min}$ 三带分布

Fig.7 Three-zone distribution when ventilating quantity is $2400\text{m}^3/\text{min}$

由图5—图7可知,工作面供风量不同,采空区内流场分布不同,从而导致采空区“三带”的位置和范围也不同。随着工作面供风量的加大,采空区“三带”位置向采空区深部延伸,且“三带”的范围越大。此外,在 $Q_3=2400\text{m}^3/\text{min}$ 条件下,还出现了三带不连续现象,这也是由于工作面下隅角附近出现低压区,从而在采空区内离下隅角不远处形成了低速区所致。由此说明,采空区“三带”的位置和范围与工作面的供风量有直接关系。

5 结论

(1) 采空区内的漏风阻力系数综合考虑了工作面的推进

速度,顶板岩性,采空区中部及上、下边界下沉量不同等因素,更符合采空区内实际漏风阻力系数分布。

(2) 推进速度为 $3.1\text{m}/\text{d}$ 时,氧化带存在的最长时间为12.9d,由经验可知采空区自然发火期为3—6月,因此采空区内部自然发火的可能性较小。

(3) 采空区“三带”的位置和范围与工作面的供风量有直接关系。工作面供风量越大,采空区“氧化带”位置越向采空区深部延伸,且“氧化带”的范围越大。

(4) 在工作面不同的供风量条件下,采空区内可能会出现“三带”不连续现象。

参考文献 (References)

- [1] 张国枢,戴广龙.煤炭自燃理论与防治实践[M].北京:煤炭工业出版社,2002.
Zhang Guoshu, Dai Guanglong. Theory and control practice of coal spontaneous combustion [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002.
- [2] 杨宏民,牛广珂,李化金.采空区自然“三带”划分指标的探讨[J].煤矿安全,1998,26(5): 26—28.
Yang Hongmin, Niu Guangke, Li Huajin. Safety in Coal Mines, 1998, 26 (5): 26—28.
- [3] 黄金,杨胜强,褚延湘,等.采空区自燃三带漏风流场的数值模拟[J].煤炭科学技术,2009,37(6): 60—63.
Huang Jin, Yang Shengqiang, Chu Tingxiang, et al. Coal Science and Technology, 2009, 37(6): 60—63.
- [4] 余明高,常绪华,贾海林,等.基于Matlab采空区自燃“三带”的分析[J].煤炭学报,2010,35(4): 600—604.
Yu Minggao, Chang Xuhua, Jia Hailin, et al. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 600—604.
- [5] 张人伟,贺晓刚,孙勇,等.朱仙庄矿综放面采空区“三带”范围的确定及应用[J].采矿与安全工程学报,2008,25(3): 332—336.
Zhang Renwei, He Xiaogang, Sun yong, et al. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 332—336.
- [6] 文虎.综放工作面采空区煤自燃过程的动态数值模拟[J].煤炭学报,2002,27(1): 54—58.
Wen Hu. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 54—58.
- [7] 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
Wang Fujun. Computational fluid dynamics—CFD software principle and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [8] 高建亮,王海生.采空区渗透率分布对流场的影响[J].中国安全科学学报,2010,20(3): 81—85.
Gao Jianliang, Wang Haisheng. China Safety Science Journal, 2010, 20 (3): 81—85.
- [9] 梁运涛,张腾飞,王树刚,等.采空区孔隙率非均质模型及其流场分布模拟[J].煤炭学报,2009,34(9): 1203—1207.
Liang Yuntao, Zhang Tengfei, Wang Shugang, et al. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1203—1207.

(责任编辑 代丽)