

近距离煤层开采上覆采空区气体分布规律

邓湘陵,牛会永*,朱豪,李芳,安敬鱼

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了研究近距离煤层开采上覆采空区气体分布规律,确定上覆采空区自然发火危险区域,运用多孔介质渗流理论建立近距离煤层开采上覆采空区三维数学模型;对上覆及下覆采空区孔隙结构及孔隙率进行研究,利用 Fluent 软件对上覆采空区气体分布规律进行数值模拟.研究表明,上覆采空区在采煤工作面上部水平方向 30 m 范围内氧气浓度和瓦斯浓度超限,存在自然发火危险性.

关键词:近距离;上覆采空区;气体分布;数值模拟

中图分类号:TD823.81

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2016)04-0032-05

Gas distribution law in the goaf of upper slice under the condition of close distance coal seam mining

DENG Xiangling, NIU Huiyong, ZHU Hao, LI Fang, AN Jingyu

(School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the gas distribution law of the goaf of upper slice under the condition of close distance coal seam mining, and determine the spontaneous combustion dangerous area in the goaf of upper slice, a three-dimensional mathematic model of the goaf of upper slice under the condition of close distance coal seam mining is constructed, based on the theory of porous media seepage. To carry on the numerical simulation of the air gas distribution law of the goaf of upper slice, the pore structure and porosity in the upper and lower goafs are researched through the Fluent software. Research shows that the oxygen concentration and gas concentration are transfinite in the goaf of upper slice above the coal face in the upper horizontal direction within 30 m, and the risk of spontaneous combustion in the goaf of upper slice exists.

Key words: close distance; goaf of upper slice; gas distribution; Fluent numerical simulation

矿井火灾是煤矿开采过程中的重大灾害之一^[1].随着矿井的不断延伸,特别是近距离煤层开采带来了新的问题.近距离煤层开采上覆采空区遗煤自然发火属于二次氧化现象,发火时间短、过火区域大,自然发火严重、发火后难以确定火源位置,给防灭火带来了新的难题.近距离煤层开采上覆采空区遗煤自然火灾受很多因素的影响,其中的主要因素为采空区漏风、遗煤耗氧、瓦斯涌出和温度等.当前,有学者对近距离煤层开采进行了研究,肖旻等^[2]利用大型煤自然发火实验台,对煤自燃特性参数进行了实验测试;对近距离煤层工作面进行了现场观测;并对近距离煤层采空区漏风状况进行了数值模拟,数值模拟结论与现场观测对比符合现场实际.翟成等^[3]通过理论分析和数值模拟,将开采煤层和近距离煤层卸压储集、运移规律与采动覆岩移动、裂隙演化过程有机结合,研究了近距离煤层采动裂隙场和瓦斯流动场的时空耦合规律.李强等^[4]针对近距离煤层开采下分层时上覆采空区自然发火规律及防治进行了研究,并结合数值模拟对

上覆采空区遗煤自燃进行了预测预报.现阶段对近距离煤层开采上覆采空区研究参数的计算大多采用经验公式,存在一定误差;对近距离煤层开采上覆采空区气体分布规律研究的文献也甚少,且没有对上覆采空区的危险区域进行确定.本文运用 Fluent 对近距离煤层开采上覆采空区氧气及瓦斯浓度场进行了研究,确定了上覆采空区存在自燃危险性,并划定了火灾自燃危险区域,为预防近距离煤层开采时采空区火灾和发生火灾后火源位置的确定提供了依据.

1 采空区渗流场数学模型

1.1 采空区漏风方程

由于采空区松散煤岩体在时间和空间的分布不均匀,导致流场过于复杂^[5],故本文模拟只考虑均匀条件下的漏风强度.假设区域内的松散煤体各向同性,区域内的气体为不可压缩流体,在单位面积下松散煤体下的漏风方程:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中, x, y, z :坐标轴; Q :漏风强度(通过单位面积煤样的漏风量).

1.2 采空区渗流动量方程

由于松散煤体属于多孔介质,其空间通道极不规则,且孔隙极无规律,使得空气在松散煤体中的流动十分复杂.蒋曙光^[6]等很多人都对采空区煤岩膨胀系数进行了分析,并对气体流动规律进行了研究,计算过采空区不同区域的雷诺数.虽然采空区不同区域的渗流状态在发生着变化,但是由于大多数采空区渗流速率很低,所以认为采空区的渗流状态为层流,采空区气体的流动服从达西定律^[7],在三维空间下表示为

$$\begin{cases} Q_x = -\frac{K_x}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x}; \\ Q_y = -\frac{K_y}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial y}; \\ Q_z = -\frac{K_z}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial z}. \end{cases} \quad (2)$$

式中, P :漏风压力; K :多孔介质中渗透系数; ρ :氧气密度; g :重力加速度.

由于采空区煤岩破碎形态和颗粒^[8]十分复杂且及其不规则,在本文不进行具体分析,取: $K_x = K_y = K_z$.根据式(1)和公式(2)可以得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_x}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_y}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_z}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0. \quad (3)$$

1.3 采空区氧气质量平衡方程

在松散煤岩中氧气的运移过程主要是扩散渗流运动^[7].松散煤体中氧气的质量平衡方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{Q}_x \frac{\partial c}{\partial x} + \bar{Q}_y \frac{\partial c}{\partial y} + \bar{Q}_z \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v(T_c). \quad (4)$$

式中, D :氧气在煤体中的扩散系数, $D = 2.88 \times 10^{-5}$; $v(T_c)$:煤在氧气浓度为 c 时的耗氧速度.本文不考虑煤体耗氧速率,设置 $v(T_c) = 0$.

2 物理模型的建立

2.1 物理模型

近距离煤层开采上覆采空区几何模型,其内部结构主要由进风巷、回风巷、工作面(支架区)、下覆采空区、上覆采空区构成.模型中进风巷和回风巷长 50 m,宽 5 m,高 3 m;工作面(支架区)长 10 m,宽 160 m,高 5 m;下覆采空区长 150 m,宽 160 m,高 15 m;上覆采空区为长 210 m,宽 160 m,高 5 m 的长方体.风流从进风巷进入,途经工作面、上覆采空区、上覆采空区后再由回风巷流出,如图 1.

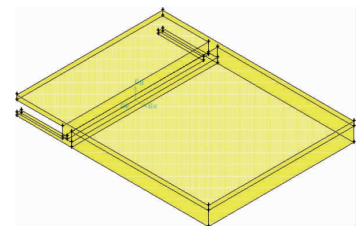


图 1 物理模型图

2.2 模型边界条件设定

近距离煤层开采上覆采空区模型进风巷入口边界条件设置为速度入口 (Velocity-inlet) 平均风速 2 m/s; 回风巷出口边界条件设置为自由出流 (Out-flow); 上覆及下覆采空区远端各个面质量流率 (Mass flow rate) 浓度设置为 25%、瓦斯流率设置为 0.03 kg/s; 工作面与下覆采空区以及上下覆采空区之间的裂隙区交界面设置为内部交界面 (Interior); 上下覆采空区之间的裂隙区与上覆采空区之间的交界面设置为连贯接口 (Interface); 其他界面设置为墙面 (wall); 采空区耗氧量设为 0.

2.3 模型孔隙率及渗透率确定

近距离煤层开采下覆采空区属于已开采稳定区域. 为简化计算, 本文认为下覆采空区为是均匀介质, 服从膨胀系数经验公式计算:

$$k_{p1} = \frac{\sum h - \Delta h + m_1 + m_2 c}{\sum h + m_2(1 - c)} \cdot P \quad (5)$$

式中, h : 直接顶厚度; Δh : 离层高度; m_1 : 采高; m_2 : 顶煤厚度; c : 顶煤采出率.

根据某矿^[9]的地质资料:

$$k_{p1} = \frac{7.2 - 0.95 + 3 + 6.27 \times 0.79}{7.2 + 6.27 \times 0.21} = 1.67.$$

根据采空区多孔介质孔隙率^[10]与破碎膨胀系数的关系得出:

$$n_1 = 1 - \frac{1}{k_p} = 1 - \frac{1}{1.67} \approx 0.4.$$

由于采空区为多孔介质, 须确定采空区渗透率. 采空区的渗透率与多孔介质的孔隙率有关, 可以依据 Blake-Kozeny^[7]公式进行计算:

$$k = \frac{D_p^2 n^3}{150(1 - n)^2} \quad (6)$$

式中, k : 渗透率; D_p : 为平均粒子直径; n : 为多孔介质孔隙率. 取 $D_p = 1.15 \times 10^{-4}$ m 则采空区均匀分布隙率为 4.7×10^{-7} m².

近距离煤层开采上覆采空区与工作面之间由于放顶产生裂隙区, 上覆采空区由于二次塌陷产生新的裂隙. 裂隙的存在对煤岩体的渗透系数有很大的影响, 岩体是裂隙与孔隙共存的双重介质, 因本文只讨论气体分布规律, 遂将裂隙区与上覆采空区认为是均匀介质, 各向同性.

近距离煤层开采下覆采空区渗透率取 4.7×10^{-7} m², 孔隙率取 0.4. 近距离煤层开采上覆采空区与工作面之间由于放顶产生的裂隙区渗透率取 5×10^{-6} m², 孔隙率取 0.6.

3 数值模拟及结果分析

近距离煤层开采上覆采空区氧气浓度场分布情况如图 2, 图 2(a)~图 2(c) 分别为距离工作面 10, 30, 70 m 的横截面. 从图 2 中可以看出上覆采空区氧气浓度随着与交界面距离的增加而逐渐减小, 氧气扩散范围也逐渐减小. 下覆采空区氧气浓度比上覆采空区浓度高且扩散距离远. 随着距离下覆采空区底板的增加氧气浓度逐渐降低, 在上覆采空区顶板附近氧气浓度小于 2%. 上覆采空区距离工作面 30 m 以内大部分区域氧气浓度在 5%~10%, 靠近顶板部分区域氧气浓度小于 5%. 根据采空区三带划分氧气浓度 5%~18% 的区域为自然带, 上覆采空区距离工作面 30 m 以内, 具有自然发火危险性, 由于上覆采空区煤的氧化属于二次氧化, 发火时间短, 增加了自然发火的危险性; 超过 30 m 上覆采空区的氧气浓度小于 5%, 不具有自然发火危险性^[11]. 上覆采空区与下覆采空区底板距离越短, 氧气浓度越高, 靠近下覆采空区危险区域越大. 上覆采空区顶板靠近处氧气浓度小于 5%, 不具有自然发火危险性. 由于瓦斯密度比空气小, 故瓦斯在上覆采空区富集.

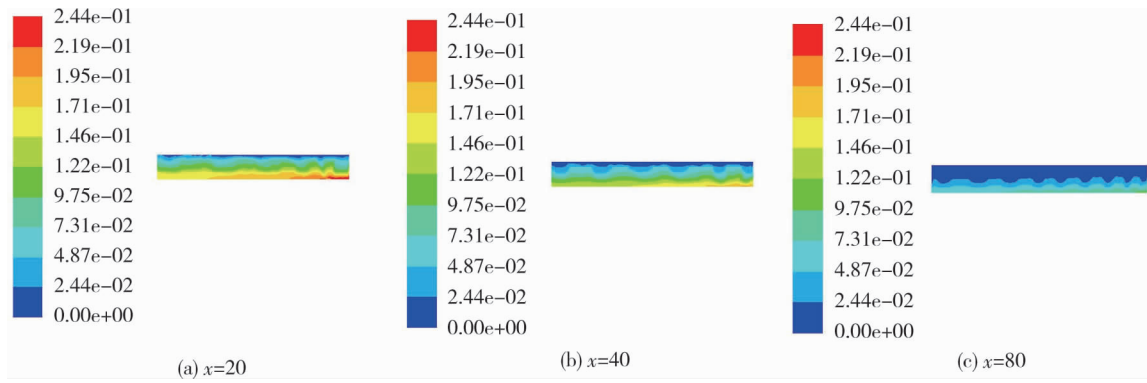


图 2 横向截面 O₂浓度分布图

近距离煤层开采上覆采空区氧气浓度及瓦斯分布云图,如图 3 和图 4.图 3a 和图 3b 分别为上覆采空区水平截面($y=17.5\text{ m}$)瓦斯浓度分布云图和氧气浓度分布云图,图 4 为纵向剖面氧气浓度分布云图.近距离煤层开采上覆采空区的氧气主要在工作面上部,成带状分布.氧气在工作面上部及两侧各 30 m 范围内,大部分区域氧气浓度在 5%~10%之间,具有自然发火危险性;瓦斯浓度在上覆采空区 x 轴方向上两端较高,在工作面上部的浓度较低,但浓度均大于 5%.在近距离煤层开采时由于工作面放顶卸压,覆岩发生周期性断裂而形成多孔介质和裂隙共存的双重介质区^[5].由于双重介质区存在裂隙,裂隙漏风风流中的氧气浓度具有不稳定性,氧气浓度局部有可能大于 12%,所以工作面上部爆炸危险性^[12].同样由于裂隙的存在,双重介质区的渗透系数急剧减小,渗流加强,最终形成了氧气在上覆采空区的分布情况.因靠近进风口侧不断有新鲜空气渗流进来,故靠近工作面的氧气浓度较高.

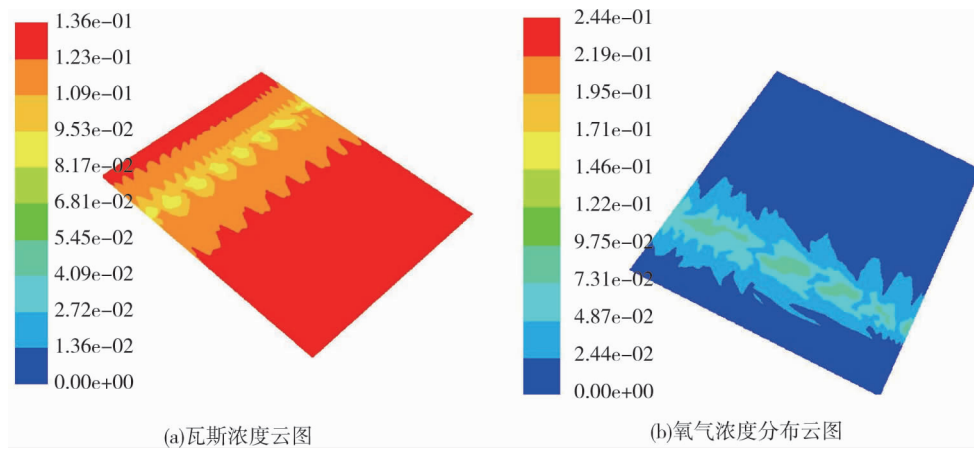


图 3 上覆采空区水平截面($y=17.5\text{ m}$)气体浓度分布图

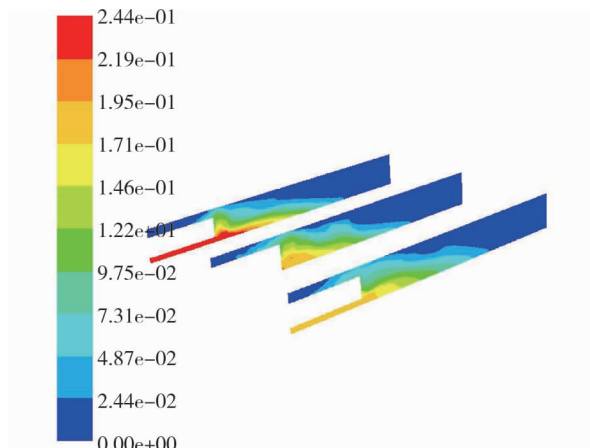


图 4 沿采空区方向纵向剖面 O₂浓度分布图

4 结论

1) 近距离煤层开采上覆采空区离工作面很近,受下层煤层开采采动影响很大.在运用流体力学、渗流学理论研究的基础上,对上覆采空区漏风状态、孔隙率、渗透系数进行计算并确定数值.

2) 截面靠近进风口侧的氧气浓度较高,出风口侧氧气浓度明显较低;上覆采空区顶板瓦斯浓度较高,存在瓦斯富集现象.在距离工作面小于 30 m 的上覆采空区内氧气浓度为 5%~10%,整个上覆采空区瓦斯浓度大于 5%,所以距离工作面小于 30 m 的上覆采空区具有自热发火危险性.由于裂隙存在漏风不稳定可能存在氧气浓度大于 12%,所以具有爆炸危险性.

参考文献:

- [1] 牛会永,周心权.综放面采空区自然发火特点及环境分析[J].煤矿安全,2008(8):12-15.
- [2] 肖旸.近距离煤层采空区自然发火预测模型[D].西安:西安科技大学,2005.
- [3] 翟成.近距离煤层群采动裂隙场与瓦斯流动场耦合规律及防治技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [4] 李强.近距离易自燃煤层群开采上层采空区气体分布规律研究[D].太原:太原理工大学,2014.
- [5] 章梦涛.煤岩流体力学[M].北京:科学出版社,1995.
- [6] 蒋曙光,张人伟.综放采场流场数学模型及数值计算[J].煤炭学报,1998(3):36-39.
- [7] 孟祥军,程卫民.深井近距离煤层开采易燃厚煤层二次氧化自然发火的预控技术[M].北京:煤炭工业出版社,2010.
- [8] 刘广,荣冠,彭俊,等.矿物颗粒形状的岩石力学特性效应分析[J].岩土工程学报,2013(3):540-550.
- [9] 谢军.综放采空区自然发火理论及防治技术[M].北京:煤炭工业出版社,2012.
- [10] 段品佳,王芝银.煤岩孔隙率与渗透率变化规律试验研究[J].地下空间与工程学报,2013(6):1283-1288.
- [11] 徐精彩,文虎.综放面采空区遗煤自燃危险区域判定方法的研究[J].中国科学技术大学学报,2002,32(6):672-677.
- [12] 张辛亥,徐精彩,郭兴明,等.矿井发火区封闭后的瓦斯爆炸危险性分析[J].煤矿安全,2000(1):37-39.