

偏 W 工作面采空区氧气、甲烷气体组分的分布规律探究

丁宝成 王 洋*

(辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000)

摘 要:为了得到采空区内部气体组分的分布规律,基于气体浓度场数值模拟的理论基础,运用 CFD 仿真方法,对固定风量下段王矿偏 W 型工作面采空区内部浓度场的分布进行建模和仿真。然后,对比现场实测数据与仿真结果,发现二者在变化趋势上是一致的,验证了模型的合理性。在此基础上,对采空区内部气体组分的分布规律进行探究,获得 CH_4 和 O_2 的浓度分布规律,为作业环境中瓦斯与自然灾害的防治提供依据和指导。

关键词:偏 W 型工作面;模型校验;采空区;CFD 仿真;氧气;甲烷

中图分类号:TD728 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2015.06.009

Exploration on Law of Distribution of Oxygen and Methane in Goaf of Partial W-Type Working Face

DING Baocheng WANG Yang*

(College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract: In order to obtain the law of air distribution in the goaf, according to the theoretical basis of the numerical simulation, the CFD method is used to build numerical model and numerical simulation. By contrasting the data obtained from real measurement and numerical simulation, it presents the same tendency which turns out that the model is reasonable. On the basis of reasonable model, the law of air distribution in the goaf is further explored. The distribution law of air in the goaf plays a critical role in preventing distastering in the working place.

Key words: partial W-type working face; calibration of model; goaf; CFD simulation; Oxygen; Methane

1 引言

采空区是由冒落的矸石和遗煤堆积而成的多孔介质区域,其中布满的孔隙和裂隙为气体的运移提供了良好的通道。工作面的漏风流经这些通道时,因开采而遗留的煤炭会在一定的蓄热和供氧条件下发生自燃。另外,在一定供风量的条件下,工作面与采空区之间由于压差的作用造成气流交换,会将采空区中的瓦斯带入工作面,这往往造成工作面的瓦斯超限。目前人们常采用通风方式的变换来解决上述瓦斯超限引发的瓦斯事故和煤炭自燃问题。

偏 W 型工作面沿承了 W 型工作面的诸多优点,在防止工作面上隅角瓦斯超限和煤炭自燃的发生方面起到了一定的作用,并且较 W 型工作面有较强的地质条件适应性。学者们对偏 W 型工作面相继展开了研究,赵文华^[1]针对近距离煤层群瓦斯超限问题提出了偏 W 型通风方式,这对具备相似开采

条件的作业空间有一定的参考价值和指导意义;李英明等^[2]借助 fluent 软件,将偏 W 型通风系统和 U 型通风系统相比较,得出偏 W 型对防止瓦斯的超限更有优势,并进一步研究了高产高效工作面、轨道巷和回风巷之间适宜的煤柱尺寸;杨明东等^[3]利用 fluent 软件,比对了 U 型、U + L 型和偏 W 型通风系统,认为偏 W 型工作面与采空区之间压差小,有效减少了采空区瓦斯向工作面的涌出。

两源一汇的偏 W 型工作面的风流交换使得工作面与采空区的毗邻处风流变化剧烈,前述研究者针对偏 W 型工作面建立了六面体均匀化网格,但没有网格疏密的过渡网格^[4];建立的模型又缺少校验的基础步骤,这些都不利于计算精度的提高和可靠性结果的获取。

本文在前人研究的基础上,以段王矿偏 W 型工作面为例,用 CFD 仿真建立模型,按照风速梯度对所建模型的网格进行局部加密,根据工作面风量的实测数据和模拟所得结果来校验所建模型的适用性,进而更加准确地模拟采空区中气体组分的分布规律。

2015-04-09 收稿,2015-05-28 接受

* 通讯作者, E-mail: 18241055157@163.com

2 模型内气体流动的基本控制方程

气体的流动遵循一定的物理定律。这些物理定律通过基本控制方程来描述,可借助相应的边界条件和初始条件,在研究范围内求解出研究对象。采空区气体的运移主要遵循以下控制方程。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \nu) = S_m$$
 (1)

式中,ρ 代表密度;ν 代表速度;τ 代表时间;源 S_m 代表从分散次生相和任何其他用户自定义源加在连续相上的质量。

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g + S_i$$
 (2)

式中,u_j 为 j 方向上的速度分量(j 为空间 x、y、z 三个坐标方向),m/s;p 为气流微元上的压强,Pa;g = 9.81 m/s² 为重力加速度;τ_{ij} 为粘性应力的分量,i 和 j 均为 x、y、z 三个坐标方向;S_i 为 i 方向上气体在采空区多孔介质运移过程中附加的动量损失源项。

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij}$$
 (3)

式中,u_i 为第 i 方向上的速度分量(i 为空间 x、y、z 三个坐标方向),δ_{ij} 为 0(i≠j) 或 1(i=j)。

3) 组分输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{\nu} Y_i) = - \nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$
 (4)

式中,R_i 为组分 i 的化学反应速率;S_i 为系统中加载的离散相或用户自定义源项的组分 i 的生成率;Y_i 为组分 i 的质量分数。

3 渗透率的设定

采空区为多孔介质区域,需要对渗透率^[5]进行设定。采空区的渗透率可以根据 Blake-Kozeny^[6]公式计算。

$$\alpha = \frac{D_p^2 n^3}{150(1 - n)^2}$$
 (5)

式中,D_p 是平均调和粒子直径,m;n 为多孔介质孔隙率, $n = 1 - \frac{1}{K_p}$ 。

采空区的冒落压实符合“O”型圈理论,按“O”型圈^[7]分布的碎胀系数的分布函数为

$$K_p(x,y) = K_{p,min} + (K_{p,max} - K_{p,min}) e^{-a_1 d_1 (1 - e^{-\xi a_0 d_0})}, (\xi < 1)$$
 (6)

式中,K_{p,max} 为初始冒落碎胀系数;K_{p,min} 为冒落岩石压实时碎胀系数;a₀、a₁ 分别为距离固壁和工作面的衰减率,m⁻¹;d₀、d₁ 分别为二维平面中点(x,y)与固壁和工作面 l 边界的距离,m;ξ 是控制模型分布形态的调整系数,可通过试算来确定,直到符合实际的条件或要求。

4 模型的建立与边界条件的设定

4.1 工作面概况和物理模型的构建

段王煤矿 151406 工作面实行综合机械化采煤,沿煤层顶板一次采全高,放顶煤方法管理顶板,后退式采煤。采取两进一回的通风方式,皮带巷、轨道巷和回风巷与工作面相连,回风巷居中相距轨道巷为 30 m 的距离,皮带巷供风量为 1968 m³/min,轨道供风量为 984 m³/min。瓦斯涌出量为 36.9 m³/min。

建立的采空区模型如图 1 所示,参数见表 1。

表 1 构建物理模型的参数

名称	参数
采空区流场尺寸	走向长 200 m,倾向长 160 m,高度 40 m
皮带巷、轨道巷和回风巷道	宽 4 m,高 4m,长 20 m
工作面断面	宽 5 m,高 4 m,长 160 m
配风量	皮带巷 2000 m ³ /min,轨道巷 1000 m ³ /min

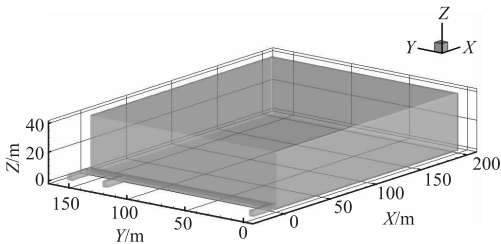


图 1 工作面采空区物理计算模型

4.2 网格的划分与加密

本文将皮带巷、轨道巷巷、工作面 and 采空区划分为规则的六面体结构性网格,皮带巷、轨道巷、回风巷和工作面取步长为 0.6,采空区部分取步长为 1.2。为了提高求解的精度,针对所研究的问题,在风速梯度较大的地方,可以采用 fluent 自带的网格自适应功能对近工作面的地方进行网格的加密^[8]和网格的优化^[9]。对速度梯度大的区域进行网格加密后,可以更好地模拟采空区的流场情况,更真实地模拟氧气与甲烷的分布规律。图 2 和图 3 分别为距离采空区底板 1m 处平面加密前后的网格。

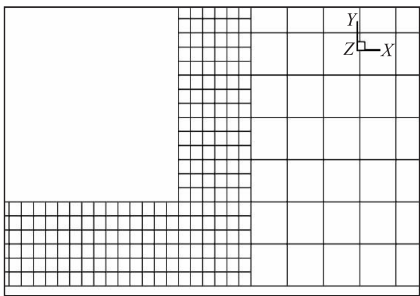


图2 Z₁面加密前的网格图

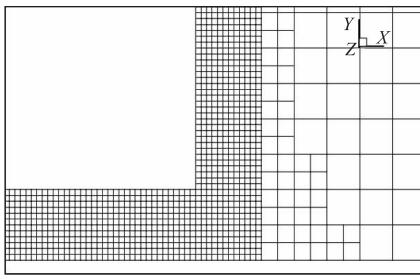


图3 Z₁面加密后的网格图

4.3 模拟边界条件设置

通过获得的现场实测数据,对模型进行参数条件的设定。皮带巷和轨道巷入口处设置为速度入口-velocity inlet;回风巷的出口处设置为自由出口-outflow;皮带巷、轨道巷、回风巷及工作面设置为流体-fluid 类型;皮带巷、轨道巷、回风巷与工作面的接触面设置为 interior,工作面的与采空区的接触面设置为-interior;采空区定义为多孔介质-porous 类型,多孔介质区域的渗透率通过式(5)和(6),编入 udf 加载到 fluent 中进行参数的解算。

5 通过监测数据与仿真结果的对比较准模型

为了提高 CFD 仿真的有效性和合理性,得到理想的模拟效果,通过获取现场的实测数据,与所建模型导出的数据量进行比对,来校验所建立的模型。采空区内部环境复杂,内部实测数据的获取比较困难。在研究由三条巷道、工作面 and 采空区组成的整体时,通过获取工作面的风速和工作面两端的压差的实测数据亦可得到理想的效果,且简单易行。从图 4 可以看出,工作面风速的实测数据与模拟数据的值比较吻合,变化趋势是比较一致的^[10]。忽略测量过程中的各种影响因素,在趋势上一致,由此可认为模型的建立是合理的。

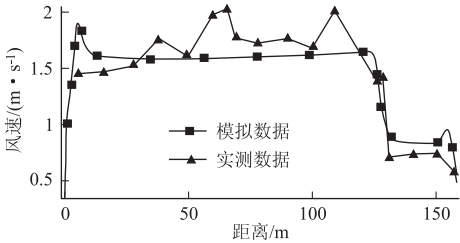


图4 工作面实测与模拟风速对比图

6 采空区中气体组分分布规律的仿真结果分析

6.1 CH₄ 分布规律

由于偏 W 型工作面两进一回的通风方式,工作面与采空区之间的压差变小,瓦斯涌出量相应减小。由图 5 三维空间立体图可以看出,毗邻工作面的采空区近端瓦斯浓度低,采空区深部瓦斯逐步升高。工作面两端进风起到了稀释瓦斯的作用,回风巷汇聚处,由于风流的流回带出瓦斯,使得瓦斯浓度再次升高。由图 6 z = 1 m 平面可以看出,采空区深部受到工作面的漏风影响小,瓦斯积聚在采空区深部回风侧。如图 7 所示,由于瓦斯的升浮作用,采空区冒落带顶部和裂隙带内积聚了大量的瓦斯。这为高瓦斯工作面抽采瓦斯的层位选择提供了参考依据^[11]。

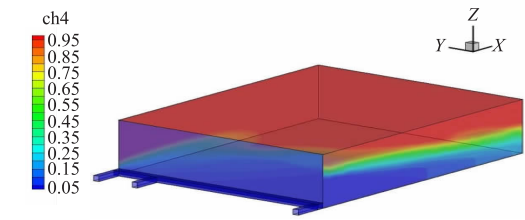


图5 采空区瓦斯三维空间浓度分布

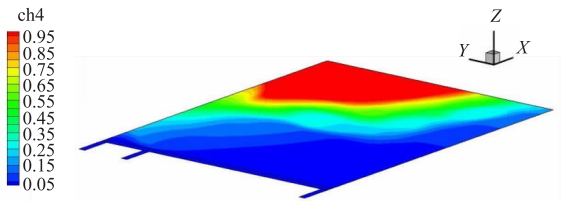


图6 z = 1 m 平面 CH₄ 浓度分布图

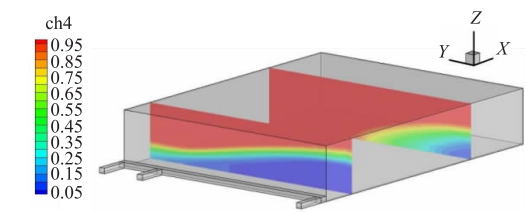


图7 不同切面 CH₄ 浓度分布图

6.2 氧气分布规律

工作面与采空区相邻处由于堆积的煤岩体孔隙率^[12]较大,皮带巷和轨道巷持续不断的供风,使得漏入采空区的风量较大,由图 8 可以看出采空区的近端氧浓度很大,采空区深部由于冒落的煤岩体基本被压实,漏风影响较小,氧浓度偏低。由图 9 可以看出,氧化带的宽度较大,这受遗煤耗氧的强度影响较大。从图 10 可以看出,沿着 Z 轴正方向氧浓度由高到低变化,瓦斯与氧气处在动态平衡当中,高处集聚的瓦斯使得氧气的含量很小。

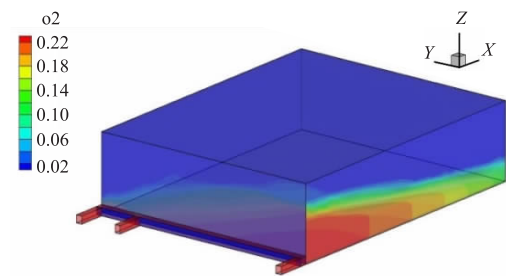


图 8 采空区氧气三维空间浓度分布

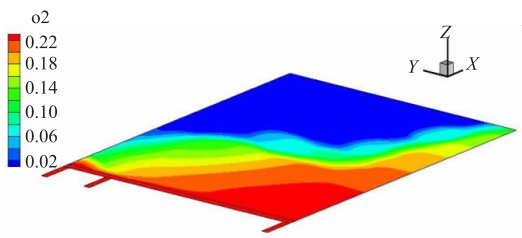


图 9 z = 1 m 平面氧气浓度分布图

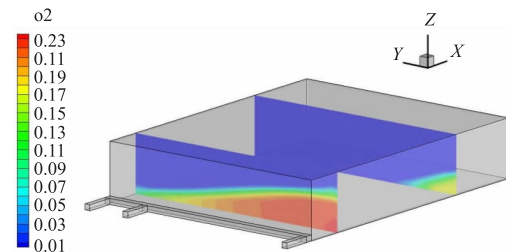


图 10 不同切面氧气浓度分布图

7 结束语

本文利用 CFD 仿真软件,基于“O 型圈”理论获得碎胀系数分布,进而模拟采空区的内部情况,以达到作业环境的高仿真;对物理模型风速梯度大的区域进行局部的网格加密来提高计算精度。多因素的组合可使工作面风速实测与仿真结果吻合较好。在此基础上获得了 CH₄ 和 O₂ 的分布规律,可为瓦斯抽采的层位选择和采空区注氮位置提供依据。

参考文献

[1] 赵文华. 近距离煤层群工作面的偏 W 型通风方式及其应用[J]. 矿业安全与环保,2007,34(2):44-45.

[2] 李英明,徐继成,张瀚,等. 综放开采偏 W 型通风系统及工作面参数优化研究[J]. 采矿与安全工程学报,2014,31(3):483-488.

[3] 杨明东,李英明,张瀚. 偏 W 型通风系统瓦斯浓度场数值模拟研究[J]. 安全与环境学报,2013,13(6):186-190.

[4] 李宗翔,夏春林,纪传仁. 任意采空区边界信息处理与有限元网格生成[J]. 辽宁工程技术大学学报,2004,23(3):289-292.

[5] 高建良,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.

[6] 汪东生. 近距离每层群保护层开采瓦斯立体抽采防突机理与实验研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2010:128-129.

[7] 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):20-23.

[8] 韩占忠,王敬,兰小平. 流体工程仿真计算与实例[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:1-65.

[9] 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,2007:1-12.

[10] 黄洪涛,高运川,裴季冰,等. 室内空气环境 VOCs 浓度场的 CFD 仿真分析[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),2008,37(3):313-320.

[11] 胡千庭,梁运培,刘见中. 采空区瓦斯流动规律的 CFD 模拟[J]. 煤炭学报,2007,32(7):719-723.

[12] 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.