

doi:10.13301/j.cnki.ct.2014.08.089

基于 FLUENT 动网格的采空区氧气浓度场的数值模拟 *

李可可¹, 张继健², 宋兆国¹, 刘 春²

(1. 济宁矿业集团 霄云煤矿, 山东 金乡 272213; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为研究工作面回采条件下采空区氧气浓度场分布规律, 建立了采空区 3D 几何模型及遗煤耗氧升温的控制方程组, 利用 FLUENT 软件的动网格功能实现工作面回采, 通过数值模拟手段进行研究。结果表明: 按氧浓度划分采空区自燃“三带”时, 自燃带随着工作面回采向前移动; 回采速度一定时, 自燃带宽度随时间变化很小, 可近似认为保持不变, 且进风巷侧自燃带宽度最大, 倾向中央及回风巷侧自燃带宽度相差不大, 自燃带近似呈“L”型。

关键词: 工作面回采; 自燃带; FLUENT 动网格; 二次开发

中图分类号: TD75 文献标志码: A 文章编号: 1008-8725(2014)08-0226-03

Numerical Simulation of Oxygen Concentration Distribution in Gob Area Based on Dynamic Mesh of FLUENT

LI Ke-ke¹, ZHANG Ji-jian², SONG Zhao-guo¹, LIU Chun²

(1. Xiaoyun Coal Mine, Jining Mining Group, Jinxiang 272213, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To study the characteristic of oxygen concentration distribution in the gob in the condition of working face advance, the 3D geometric model of gob and governing equations of coal spontaneous combustion were established. The face advance was implemented by dynamic mesh function of FLUENT software. The results show that the spontaneous combustion “three zone” divided by oxygen concentration moves forward with face advance. The width of spontaneous combustion zone has little shrinkage with unchanged advance speed, which can be ignored. Additionally, the spontaneous combustion zone has the biggest width near the intake airway, while has the similar width near the central tendency and the return airway. The spontaneous combustion zone has an appropriate “L” shape.

Key words: working face advance; spontaneous combustion zone; dynamic mesh of FLUENT; second development

* 江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX120970)

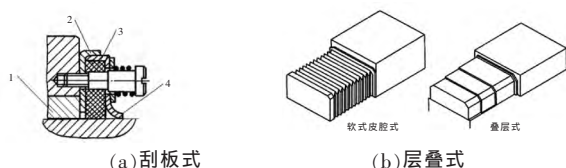


图3 导轨防尘机构示意图

1. 镶条 2. 挡块 3. 毛毡 4. 金属弹性刮板

如图3(a)所示,刮板式防护机构采用滑块端部密封防尘,弹性刮板刮尘的局部防除尘原理,结构简单,占用空间小,安装和更换方便,除尘力度可调。从煤矿用坑道钻机矩形滑动导轨的使用工况和经济性等方面考虑,导轨的防护方式宜采用刮板式。

4 煤矿用坑道钻机矩形导轨润滑方式的探讨

矿用坑道钻机滑块导轨机构的润滑方式多采用人工定期加注或涂抹脂润滑剂润滑的方式。由于煤矿井下钻孔施工过程中孔口矿尘/粉粒涌出量大,矿尘弥漫并伴有煤矸石颗粒飞溅,涂覆在矩形导轨表面的润滑脂很容易粘附大量硬质颗粒而加剧导轨面或镶条的磨损。石墨润滑是将石墨涂覆在摩擦界面上形成固体润滑膜的一种固体润滑技术,能够在滑动摩擦或滚动摩擦的两对偶材料表面形成转移膜,防止摩擦表面直接接触,使摩擦发生在润滑剂内部,可以显著减小摩擦系数,降低材料磨损,特别适合在高负荷运转、低速重载、受力复杂等特殊工况,以及在高粉尘、潮湿等恶劣环境中运行的设备或部件的局部润滑需求。含极少量岩粉的煤粉成分与混有一定杂质的石墨相近,可以作为固体润滑

0 前言

剂使用。鉴于煤矿用坑道钻机滑动导轨所处的特殊工作环境,导轨的润滑方式宜采用固体润滑方式,也就是在钻机进场前和钻孔施工过程中不在导轨表面涂覆任何形式的润滑剂,仅依靠刮板式防尘机构刮剥下来的粘附和散落在导轨面上的煤矸尘即可实现对导轨的“自润滑”。

5 结语

煤矿用坑道钻机在运行过程中的滑块导轨机构性能和防护润滑措施的好坏直接影响钻机运行的平稳性、承载能力和使用寿命。“L”形滑块加压板型式的矩形导轨能够解决“J”形滑块导向面磨损严重以及由此带来的滑块成组更换互换性差的问题。刮板式导轨防护机构采用端部毛毡密封防尘,弹性刮板刮尘的局部防除尘原理,非常适合煤矿用坑道钻机滑动导轨的防护需求。进入导轨摩擦副中的细微煤矸粉颗粒本身可以起着充当固体润滑介质的作用,因此,依靠工作环境中粘附和散落在导轨面上的煤矸尘即可实现对导轨副的“自润滑”。

参考文献:

- [1] 张鲁侠,薛军. 动力头式钻机导轨设计[J]. 中国矿业,2005,11(3): 83-86.
- [2] 吕冰. ZY-1200 型全液压坑道钻机给进机构的设计[J]. 矿业安全与环保,2008,35(5):31-33.
- [3] 于彦江,李波,吴来杰,等. JD15 型全液压钻机给进机构的方案设计[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2007(8):37-39.

作者简介: 张磊(1987-),山东临沂人,中煤科工集团重庆研究院钻探研究分院中试工艺部,助理工程师,硕士研究生,主要从事煤矿机械的研发设计、结构优化及工艺等工作,电子信箱:zlcuiping@126.com.

责任编辑:李富文 收稿日期:2014-06-16

综放工作面开采煤层厚度大,由于开采工艺及煤层地质条件的影响,采空区遗煤较多,且回采速度通常较慢,如果开采易自燃煤层,更加容易导致采空区遗煤自燃。目前,不少学者对采空区遗煤自燃规律进行了大量研究。就数值模拟而言,针对采空区遗煤自燃的研究主要集中在通过采空区漏风风速分布规律和考虑遗煤氧化耗氧两方面来确定采空区自燃“三带”,但上述研究对象多为静止的采空区,没有考虑回采条件下采空区逐渐伸长的实际情况。因此,为考虑工作面开采的影响,利用 FLUENT 软件的特色功能—动网格技术实现工作面推进,研究回采条件下采空区遗煤耗氧导致的氧气浓度场变化规律。

1 采空区遗煤自燃的模拟方法

1.1 采空区几何模型的建立

模拟工作面为某矿 12200 工作面,该工作面倾向长 186 m,主采 2-3 煤层,属易自燃煤层,煤厚 12.2~18.3 m,平均厚度 14.87 m,煤层倾角 8~12°,采用综采放顶煤采煤法。因此采空区几何模型倾向长取 186 m,走向长取 250 m,高度取 40 m,忽略煤层倾角的影响。巷道宽 4 m、高 3 m,工作面宽 5 m、高 3 m。采空区整体几何模型及网格划分如图 1 所示。

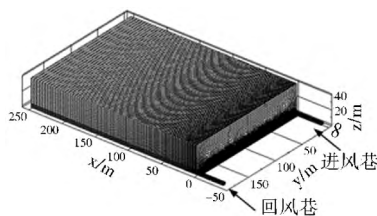


图 1 采空区几何模型及网格划分

1.2 流场控制方程

将采空区视作各向同性非均匀多孔介质,流态为层流,气体组分简化为 O_2 和 N_2 。模拟求解以下控制方程:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中 ρ ——混合气体密度;
 ε ——采空区孔隙率;
 \mathbf{u} ——气体渗流速度;
 S_m ——采空区遗煤耗氧源项。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla p + \tau + \rho\mathbf{g}_n + \frac{\mu}{\alpha}\mathbf{u} \quad (2)$$

式中 p ——气体静压;
 τ ——黏性应力张量;
 $\rho\mathbf{g}_n$ ——重力体积力;
 α ——多孔介质渗透率;
 μ ——气体动力黏度。

(3) 组分连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_i) + \nabla(\rho\mathbf{u}c_i) = -\nabla\mathbf{J}_i + Q_i \quad (3)$$

式中 c_i ——气体组分 i 的质量分数;
 \mathbf{J}_i ——组分 i 的扩散通量;
 Q_i ——组分 i 增减源项。

(4) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}\{\varepsilon\rho_f C_{pf} + (1-\varepsilon)\rho_s C_{ps}\}T + \nabla(\rho_f C_{pf}\mathbf{u}T) = \nabla\{\varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s\}\nabla T - \sum_i h_i \mathbf{J}_i + S_f \quad (4)$$

式中 ρ_f, ρ_s ——气体和固体介质的密度;
 C_{pf}, C_{ps} ——气体和固体介质的比热;
 k_f, k_s ——气体和固体介质的导热系数;
 T ——热力学温度;
 h_i ——组分 i 的焓;
 S_f ——遗煤耗氧放热源项。

1.3 采空区孔隙率、渗透率的确定

采空区上覆岩层垮落后杂乱堆积,碎胀系数 K_p 是表征煤岩块堆积与压实状况的重要参数。据已有研究,采空区走向上碎胀系数

$$K_p(x) = K_p' + (K_p^0 - K_p')e^{-ax} \quad (5)$$

式中 K_p^0 ——初始碎胀系数,取 $K_p^0 = 1.6$;
 K_p' ——压实碎胀系数,取 $K_p' = 1.13$;
 a ——衰减系数,取 $a = 0.015 \text{ m}^{-1}$;
 x ——与工作面距离, m。

采空区孔隙率 ε 与碎胀系数 K_p 具有如下关系

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{K_p} \quad (6)$$

采空区渗透率 α 根据 Blake-Kozeny 公式计算

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (7)$$

式中 D_p ——冒落带煤岩块平均直径。

计算得到孔隙率大小 0.12~0.38, 渗透率大小 $3.24 \times 10^{-6} \sim 5.23 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。利用 FLUENT 的二次开发工具 UDF 编写采空区孔隙率、渗透率的函数供计算使用。

1.4 遗煤自燃参数的确定

模拟考虑采空区遗煤不均匀分布,由于进回风巷顶板遗煤及上下端头通常不放煤,导致采空区进回风巷侧遗煤比中部多。因此,根据工作面回采率,进回风巷侧遗煤高度最大取 6 m,中部遗煤厚度取 1 m,遗煤分布如图 2 所示。

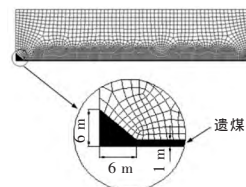


图 2 采空区遗煤分布

漏入采空区的空气与遗煤接触,导致遗煤氧化升温,遗煤耗氧速率可以根据 Arrhenius 公式计算

$$r = A C_{O_2}^n \exp(-E/RT) \quad (8)$$

式中 A ——指前因子, $A=31\ 400\ s^{-1}$;
 E ——反应活化能, $E=52\ kJ/mol$;
 R ——普适气体常数, $kJ/(mol \cdot K)$;
 T ——温度, K ;
 C_{O_2} ——氧气浓度, $kmol/m^3$;
 n ——指数, 煤低温氧化时通常取 $n=0.5 \sim 1.0$, 本次模拟 $n=1$;

指前因子 A 和反应活化能 E 可根据煤低温氧化实验获得。

每消耗 $1\ mol\ O_2$ 释放热量通常为 $220 \sim 380\ kJ$, 本次模拟取 $300\ kJ$, 利用二次开发工具 UDF 编写遗煤耗氧及放热源项。

1.5 其他参数及模拟过程

该工作面推进速度较慢, 假设工作面匀速推进, 取 $1.6\ d/m$ 。利用 FLUENT 软件的动网格功能实现工作面推进, 即每推进 $1\ m$ 进行 1 次网格分层, 但采空区碎胀系数的大小与距工作面的距离仍满足式(5)的关系。

工作面风量取 $1\ 500\ m^3/min$, 巷道进口雷诺数约为 4.9×10^5 , 即工作面及巷道空间流态为湍流, 采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁采用标准的壁面函数法。采空区遗煤比热取 $1\ 003\ J/(kg \cdot K)$, 导热系数取 $0.2\ J/(kg \cdot K)$, 矸石比热取 $950\ J/(kg \cdot K)$, 导热系数取 $2\ J/(kg \cdot K)$ 。边界条件取速度入口, 压力出口, 采空区初始温度及进风温度取 $300\ K$, 壁面视为绝热壁面。模拟采取非稳态, 控制方程求解中压力速度耦合采用 PISO 算法。

2 模拟结果及分析

(1) 采空区氧气浓度分布

采空区距底板 $0.5\ m$ 平面上氧气体积浓度等值线随时间变化如图 3 所示(以进风巷、工作面与采空区交界点为坐标原点, 坐标随工作面推进而移动)。

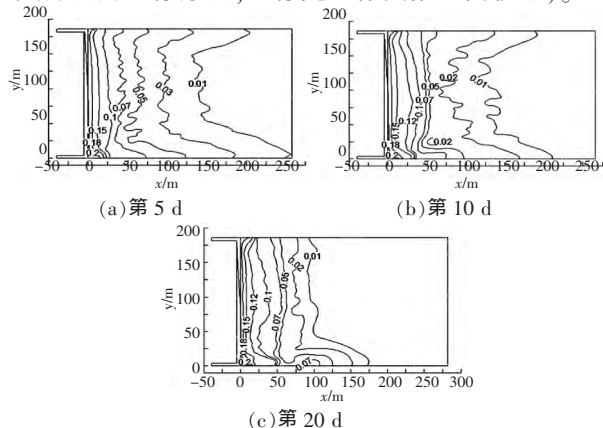


图3 采空区氧气浓度分布等值线(“1”代表氧气浓度“100%”)

由图 3 及模拟过程知, 采空区走向长度随工作面推进天数的增加不断伸长, 第 5 d 工作面推进 $8\ m$, 第 10 d 工作面推进 $16\ m$, 第 20 d 工作面推进 $32\ m$; 采空区进风巷侧氧浓度大于走向中部及回风巷侧,

且采空区深部低氧浓度($<1\%$)范围逐渐扩大, 说明氧气被逐渐消耗; 距工作面较近的区域由于漏风影响, 氧气浓度变化不大。

(2) 采空区自燃带分布

按氧气浓度低于 5% 为窒息带, $5\% \sim 15\%$ 为自燃带, 高于 15% 为不自燃带的原则划分采空区遗煤自燃“三带”, 则采空区距底板 $0.5\ m$ 平面上自燃带分布随时间变化如图 4 所示。

由图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 可看出进风巷侧自燃带宽度最大, 平均约 $100\ m$; 倾向中部及回风巷侧自燃带宽度相差不大, 平均约 $50\ m$; 在工作面连续推进的情况下, 自燃带不断向工作面方向移动, 且采空区自燃带宽度随时间的变化很小, 基本可认为采空区自燃带宽度随工作面回采保持不变, 自燃带近似具有“L”形状。

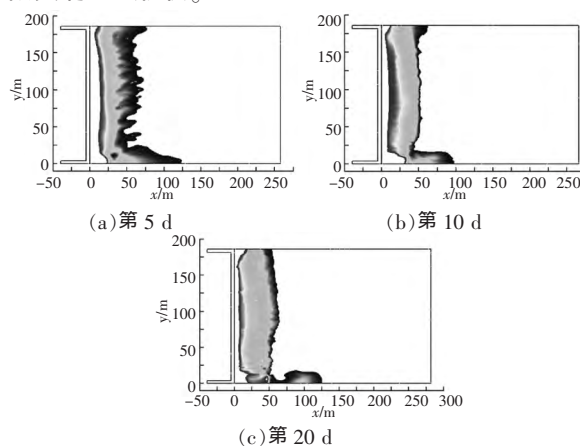


图4 采空区自燃带分布

3 结语

(1) 利用 FLUENT 软件的二次开发工具 UDF 建立了采空区遗煤耗氧升温的控制方程组, 考虑了采空区遗煤的分布特点, 通过动网格功能实现工作面推进, 得到的回采条件下采空区氧气浓度场分布更接近实际;

(2) 工作面回采条件下, 原来的不自燃带逐渐进入自燃带, 原来的自燃带逐渐进入窒息带, 因此采空区深部低氧浓度范围即窒息带逐渐扩大;

(3) 采空区自燃带随工作面推进不断前移, 但宽度基本保持不变; 进风侧宽度最大, 中部及回风巷侧宽度相差不大, 自燃带近似呈“L”型。

参考文献:

- [1] 邵昊, 蒋曙光, 王兰云, 等. 尾巷对采空区煤自燃影响的数值模拟研究[J]. 采矿与工程学报, 2011, 28(1): 45-50.
- [2] 裴晓东. 873 综放面采空区自然发火“三带”的划分及模拟分析[J]. 煤炭技术, 2010, 29(7): 74-77.
- [3] 杨焱. 孤岛综放面采空区“三带”数值模拟与实测研究[J]. 煤炭技术, 2009, 28(10): 41-43.
- [4] 李宗翔, 贾进章, 李庆刚. 动态推进工作面采空区自燃规律的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 84-87.
- [5] 朱建芳, 蔡卫, 秦跃平. 基于移动坐标的采空区自然发火模型研究[J]. 煤炭学报, 2009(8): 1 095-1 099.
- [6] 李宗翔. 高瓦斯易自燃采空区瓦斯与自燃耦合研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- [7] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011.
- [8] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.

作者简介: 李可可(1986—), 山东金乡人, 大学本科学历, 现任济宁矿业集团霄云煤矿开拓工区技术员, 电子信箱: yq_lanxi@163.com; 通讯作者: 张继健.

责任编辑: 李富文 收稿日期: 2014-06-16