

巷道火区封闭气体运移数值模拟分析

乔晨露, 牛会永, 安敬鱼

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:首先提出了对火区进行封闭并注入惰性气体的常用的矿井火灾综合救灾方法,然后运用 Gambit 建立了发生火灾巷道的三维物理模型,通过运用 fluent 软件对巷道封闭火区内气体进行三维数值模拟,得到了火区封闭 30 s 时(即进行注惰行为时)火区内温度场和组分(CH_4 , O_2)浓度场的分布情况.最后,根据模拟结果,分析了火区内气体的运移规律,并通过分析得到了封闭 30 s 后火区内发生瓦斯爆炸的可能性,为封闭后注入惰性气体等后续救灾行为的研究提供了准备.

关键词:火区封闭;数值模拟;温度场;浓度场

中图分类号:TD753.7

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2014)02-0033-04

Numerical simulation analysis of gas migration in closed fire zone of roadway

QIAO Chenlu, NIU Huiyong, AN Jingyu

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

Abstract: First, this paper presents the commonly used integrated method to prevent the mine fire disaster, i. e. close the fire zone and inject inert gas. Then it establishes a three-dimensional physical model of the fire roadway by using Gambit. Through the three-dimensional numerical simulations of gas in fire zone by using fluent software, it gets the distribution of the temperature and component(CH_4 , O_2) concentration fields in the fire zone after closing the fire zone for 30 s (when injecting inert gas). Finally, according to the simulation results, it analyzes the migration law of the gas in the fire zone, and gets the possibility of a gas explosion in the fire zone closed for 30 s, providing preparations for study of the subsequent behavior to prevent the disaster in the closed fire zone such as injecting inert gas.

Key words: closed fire zone; numerical simulation; temperature field; concentration field

我国现阶段的能源消费主要为煤炭^[1],由此煤炭生产规模也随之迅速扩大.矿井火灾是煤矿五大灾害之一^[2],因此矿井火灾防治非常必要.矿井巷道内发生火灾时,由于救灾措施的失败或由于火势迅猛而来不及采取直接的灭火措施,使火灾发生超过 1~2 h 仍未扑灭火源时,就需要及时对火区进行封闭^[3],防止火势扩大.对火区进行封闭并向火区内注入惰性气体是矿井火灾的一种综合救灾方法^[4],但在实施这些救灾措施的时候,往往存在

诱发瓦斯爆炸的危险性.这是因为救灾过程中火区内温度场、瓦斯浓度和氧气浓度分布等受到上述救灾措施的干扰,甚至造成风流逆转及紊乱,致使受灾范围扩大,发生瓦斯爆炸的危险性也大大增加,严重威胁井下工作人员的生命安全^[5].因此研究火区封闭后火区内气体运移规律非常有必要.假设火区封闭 30 s 后进行注惰,本文对巷道火区两端同时封闭完成后 30 s 火区内气体的分布进行数值模拟.

1 数值模拟过程

1.1 物理模型的建立

本文选取的模拟发生火灾巷道为倾斜巷道. 本文模拟的巷道横截面为正方形, 巷道坡度为 10° , 巷道高 3 m, 宽 3 m, 长度为 50 m. 火源位置设置在巷道底板正中间, 简化为一个边长为 0.5 m 的立方体. 巷道的纵、横截面结构分别如图 1 和图 2 所示. 运用 Gambit 创建的巷道三维物理模型图如图 3 所示.

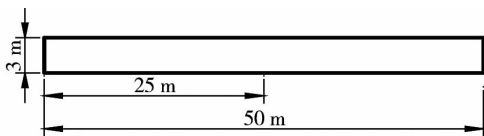


图 1 巷道纵截面结构图

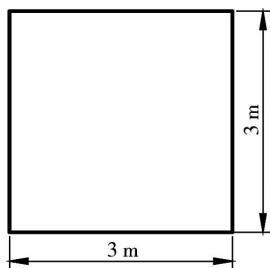


图 2 巷道横截面结构图

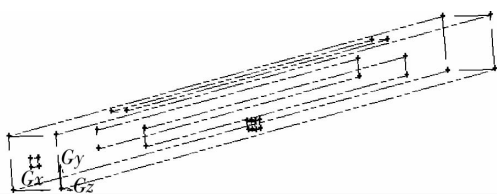


图 3 巷道三维物理模型结构图

如图 3 中, 假设 XZ 平面与水平面平行, 巷道与 XZ 平面夹角为 10° . 图中假设巷道封闭前通风方向为由右向左, 通风速度为 4 m/s. 由于巷道顶板部分和两端煤壁内有瓦斯涌出, 假设瓦斯涌出段长 30 m, 宽 1 m, 恒定涌出速率为 0.000 02 m/s, 涌出段分别设在模拟巷道顶板和两端煤壁正中间. 火源简化为释放一定温度高温烟流 ($1\ 300\ ^\circ\text{C}$) 的热源^[6]. 为了简化模拟, 火源燃料设为 CO, 燃料的入口速度为 0.18 m/s, 相当于火源功率为 2.83 MW.

1.2 火灾流场模型的设定

矿井火灾过程非常复杂, 巷道内会发生复杂的物理化学变化, 同时火灾过程中伴随着大量高温烟

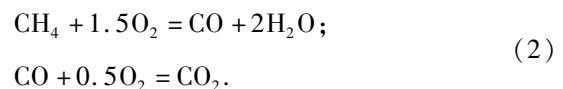
流的产生、高温烟流还与巷道壁间存在换热等, 因此进行完整的火灾数值模拟非常困难. 本文对进行模拟的巷道复杂条件进行了如下的简化和假设^[7]:

- 1) 火区封闭前巷道内的风流流动稳定;
- 2) 火灾燃烧过程中释放出的高温烟流不与其他物质发生反应;
- 3) 火区气体视为多组分理想气体^[8];
- 4) 巷道壁面采用无滑移的边界条件, 且巷道壁绝热^[9], 与风流和高温烟流不存在换热.

火灾火源燃料设为 CO, 将火灾发生的复杂化学反应过程简化为 CO 的燃烧反应:



逸入火区的瓦斯在适当条件下也会燃烧, 不考虑详细的多步反应机理, 将 CH_4 的燃烧简化为以下的 2 步简单化学反应^[10]:



由上述假设可知, 火源以一定的速度释放一定高温的 CO_2 , 且以一定速度消耗封闭火区内的氧气. 因此巷道封闭火区内主要组分包括 CH_4 , O_2 , CO , CO_2 , N_2 , H_2O 等. 因此对火区的计算模型可视为甲烷—空气混合的燃烧模型.

1.3 边界条件和初始条件的确定

模拟过程分为封闭前火灾的燃烧和两端封闭后火灾的燃烧 2 个部分.

- 1) 首先对火区两端封闭前火灾在正常通风条件下的燃烧进行模拟, 模拟燃烧 2 h 后的模拟结果即为模拟两端封闭后火灾燃烧的初始条件.

此模拟的边界条件: 巷道顶板和煤壁两端的一部分设为 CH_4 的速度入口 (VELOCITY_INLET), 速度大小为 0.000 02 m/s; 巷道右端为空气速度入口, 速度大小为 4 m/s; 巷道左端为出流口, 类型为 OUTFLOW; 火源 5 个面为 CO 速度入口, 速度大小为 0.18 m/s, CO 温度为 1 573 K. 巷道顶板、两端煤壁和巷道底板的其余部分边界类型设为 WALL, 壁面恒温且与烟流不存在热交换.

初始条件为火灾发生前巷道内的温度和各气体的浓度. 初始温度设定为常温 300 K; 各种气体的初始浓度设为常温时空气中各气体的浓度.

2) 封闭后的火灾模拟的初始条件即为上述模拟的模拟结果. 巷道两端封闭后, 只需对计算模型的 2 个边界条件进行改变. 由于右端封闭墙的建立, 巷道内不存在了正常通风, 但由于封闭墙的不严密还会存在漏风, 于是将右端空气的速度入口大小由 4 m/s 变为 0.05 m/s. 同时由于左端封闭墙的存在, 将左端的出流口变为 0.25 m² 的正方形小出流口.

2 模拟结果及分析

根据火区进、回风侧建立封闭墙的先后, 火区封闭顺序有 3 种^[11]: “先进后回”、“先回后进”和“进回同时”. 对于封闭顺序的选择, 我国《救护条例》^[12] 中规定, 首先应选择对进、回风两侧同时封闭的封闭顺序. 假设火灾发生 2 h 后对火区两端进行同时封闭 (忽略建立封闭墙所需的时间), 封闭 30 s 后向火区内注入惰性气体. 封闭前对火灾模拟 2 h, 然后改变边界条件对封闭后的火灾进行模拟 30 s, 得出巷道两端同时封闭 30 s 时 (即进行注惰时) 火区温度场和气体浓度场的分布情况.

2.1 温度场分布情况

火区封闭后 30 s 时, 巷道模型的温度场分布情况如图 4, 巷道中心纵截面 ($x = 1.5$ m) 上温度场的分布情况如图 5 所示.

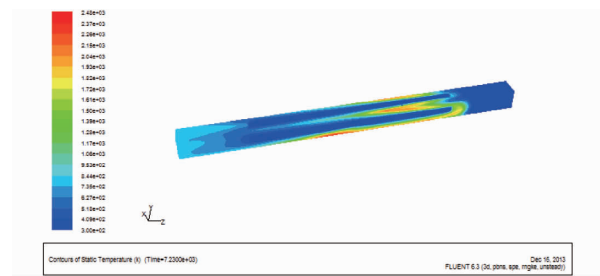


图 4 火区内温度场分布云图巷道

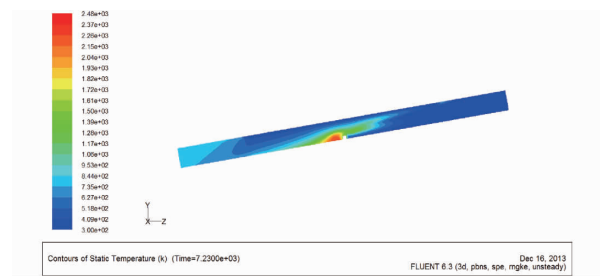


图 5 巷道中心纵截面温度分布云图

从图中可看出, 由于火灾燃烧不断释放热量,

火源附近区域的温度最高, 尤其是火源左端附近可达 2 041 K; 左端密闭墙附近区域温度次之 (735 ~ 845 K), 这是漏风作用使巷道内高温烟流向左运移的结果; 右侧密闭墙附近区域温度最低 (409 K 以下), 这是由于新鲜空气的漏入对其附近的烟流存在冷却作用; 巷道其余区域由于高温烟流的充斥, 温度也较高 (517 ~ 735 K).

2.2 组分浓度分布情况

2.2.1 CH₄ 体积浓度分布情况

火区封闭完成 30 s 时整个封闭巷道内和巷道中心纵截面 ($x = 1.5$ m) 上的 CH₄ 的浓度分布云图分别如图 6 和图 7 所示.

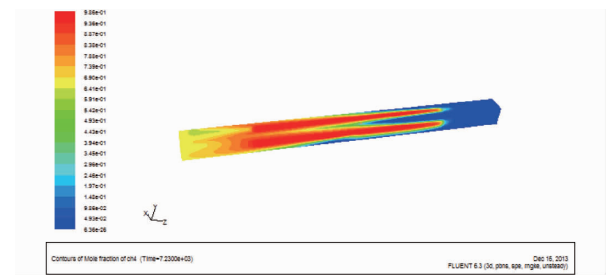


图 6 火区内 CH₄ 体积浓度分布云图

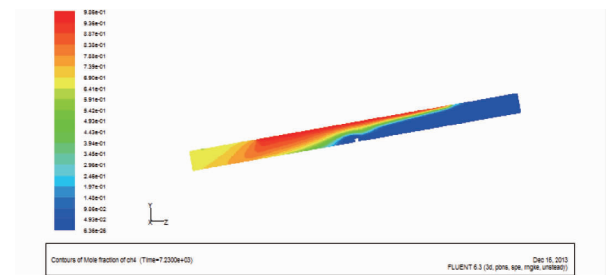
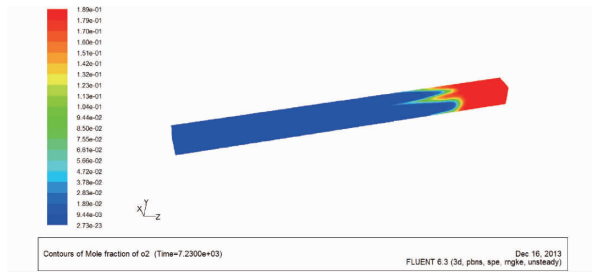
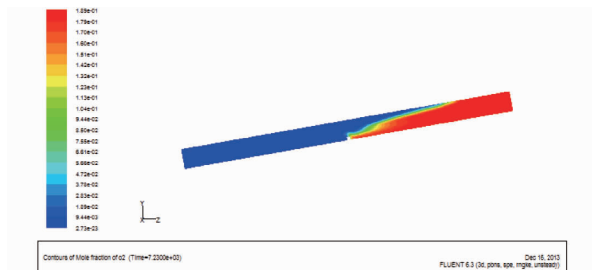


图 7 巷道中心纵截面 CH₄ 体积浓度分布云图

由图 6 和图 7 中可看出, 由于瓦斯的不断涌出, 涌出口附近区域和巷道左半部分中间区域的瓦斯浓度最高 (可达 96%), 左侧封闭墙附近区域的瓦斯浓度次之 (64% ~ 69%), 这是由于左侧有一定瓦斯出流的作用; 由于瓦斯随风流向左侧流动, 巷道左端低处和右侧高处一部分区域瓦斯浓度为 5% ~ 24%, 具有爆炸危险性; 由于右侧密闭墙新鲜风流的不漏入, 右侧瓦斯浓度很低 (4.8% 以下).

2.2.2 O₂ 体积浓度分布情况

火区封闭完成 10 s 时整个封闭巷道内和巷道中心纵截面 ($x = 1.5$ m) 上的 O₂ 的浓度分布云图分别如图 8 和图 9 所示.

图8 火区内 O₂ 体积浓度分布图图9 巷道中心纵截面 O₂ 体积浓度分布图

由图8和图9中可看出,由于火灾燃烧过程中氧气的大量消耗,巷道左半侧区域内氧气浓度很低(0.9%以下);右侧封闭墙附近的氧气浓度最高(17%~19%),这是由于右端新鲜风流的不漏入;火源右侧附近具有一定浓度的氧气,且分布不均匀(7%~18%),这是火源燃烧不断消耗氧气和右端漏风口不断流入新鲜风流共同作用的结果。

3 结论

1)火源附近一部分区域满足瓦斯爆炸的温度条件(923 K以上);符合爆炸瓦斯浓度条件(5%~16%)的区域为火源左端低处和右端高处一部分区域;右侧密闭墙附近区域和火源附近右端一部分区域符合瓦斯爆炸氧气浓度条件(12%以上)。火源右端上方附近靠近火源的位置存在瓦斯爆炸的可能性。

2)注惰口应设在左侧密闭墙上,使惰性气体流动方向与火区漏风方向相反,随着惰性气体(如 N₂, 300 K)的注入使巷道内温度逐渐降低,氧气浓

度也逐渐降低,直至无法满足燃烧的条件而使火灾熄灭。

3)火灾过程非常复杂,本文模拟的结果有一定误差。以后的研究和模拟要不断减少假设,并通过对计算方法的改进使模拟结果越来越接近真实。

参考文献:

- [1] 周心权,吴兵. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996.
- [2] 余明高,贾海林,胡祖祥. 矿井火灾防治[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [3] 何敏. 煤矿井下封闭火区的燃烧状态与气体分析研究[D]. 北京:中国矿业大学,2013.
- [4] 张九零. 注惰对封闭火区气体运移规律的影响研究[D]. 北京:中国矿业大学,2009.
- [5] 程为民,姚玉静,吴立荣,等. 基于 Fluent 的矿井火灾时期温度及浓度分布数值模拟[J]. 煤炭安全,2012,43(2):20-24.
- [6] 李玉福. 矿井火灾过程中烟流参数变化规律数值模拟研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2011.
- [7] 戚宜欣. 矿井火灾烟流温度场及浓度场的数值模拟[J]. 西安矿业学院学报,1994(1):26-33.
- [8] 焦宇,段玉龙,周心权,等. 煤矿火区密闭过程自燃诱发瓦斯爆炸的规律研究[J]. 煤炭学报,2012,37(5):850-855.
- [9] 朱迎春,周心权,王海燕,等. 封闭火区注惰气引发瓦斯爆炸的数值模拟[J]. 矿业安全与环保,2009,36(3):2-3,6-7.
- [10] 苏福鹏. 环境因素对火区气体运移的作用规律及致灾机理研究[D]. 北京:中国矿业大学,2011.
- [11] 康守海,赵哲,马忠立,等. 关于封闭顺序的探讨[J]. 煤矿安全,2007,38(11):72-74.
- [12] 刘建民. 试论火区封闭顺序[J]. 煤矿安全,1984,15(6):31-37.