

文章编号:0253-9993(2010)01-0080-05

封闭火区注惰下瓦斯气体分布规律的探讨

段玉龙¹,周心权¹,丁晓蕾¹,龚武¹,陈琛¹,任艳丽²

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 河南安阳钢铁集团有限责任公司信息化指挥部,河南安阳 455004)

摘要:为研究煤矿封闭火区注入惰气抑制火灾情形下火区瓦斯气体分布规律,利用 CFD 流体软件 Fluent 建立数学模型并进行数值模拟;在试验巷道中进行了不同流量惰气注入试验,建立了相关的数学模型并对 N₂ 和 CO₂ 不同情形的安全、有效的注入速度进行了计算。结果表明,注惰速度对火区瓦斯分布影响较大,是诱发注惰过程中次生瓦斯事故的主要因素之一;注惰速度较小时,惰气和瓦斯混合缓慢,封闭火区巷道前方易形成危险性瓦斯气体层;注惰速度较大时,惰气和瓦斯迅速混合而起到稀释和惰化作用,紊流作用明显,整个巷道内瓦斯浓度均处于安全范围内。

关键词:封闭火区;惰气;瓦斯;分布

中图分类号:TD753 **文献标志码:**A

The methane distribution law of closed fire zone when pumping inert gas

DUAN Yu-long¹, ZHOU Xin-quan¹, DING Xiao-lei¹, GONG Wu¹, CHEN Chen¹, REN Yan-li²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Information Command Center, Anyang Iron & Steel Group Co., Ltd., Anyang 455004, China)

Abstract: The distribution law of methane when pumping inert gas to closed fire zone were studied through numerical simulation, experiments and relating analysis. Using CFD software Fluent to do numerical simulation, simulated experiments were carried out in an experimental laneway, and the minimum safety and effective pumping velocities of nitrogen and carbon dioxide were calculated based on one math model. Pumping velocity has great effect on methane distribution, it's also one of the main factors to cause methane accident such as fire or explosion. Inert gas and methane blend slowly when pumping velocity is small, there is a dangerous high concentration methane layer which is possible to cause fire or explosion accident in the front of laneway; Inert gas can blend quickly with methane when pumping velocity is large, and the effect of dilution and inerting is observably. The methane concentration of the whole laneway is safe.

Key words: closed fire zone; inert gas; methane; distribution

对于高瓦斯和低瓦斯矿井,一旦发生火灾,都存在发生瓦斯事故的可能^[1-2]。常见救灾方法是进行火区封闭和向火区进行注惰。封闭火区过程中,供风量的急剧减少,将造成火区大气中瓦斯浓度增加,由于瓦斯气体的密度与火区环境气体相差较大,易成层积聚成为可燃气体层,若氧气浓度在 12% 以上且瓦斯浓度处于爆炸极限之间,就存在爆炸危险性^[3-4]。

实际火区封闭注惰灭火、抑爆过程中,一般只能在火区密闭处通过取气孔抽取气样来分析和估计火区状态及气体浓度变化情况,而对充注惰气过程中火区内部状态和瓦斯气体浓度变化情况并不清楚,注入的惰气可能引起火区内气流流向变化,可能推动可燃气体层至火源或高温热源,引发火灾或爆炸。因此,开展煤矿井下注惰条件下封闭火区的瓦斯气体层分布规

收稿日期:2009-04-02 责任编辑:毕永华

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAK03B05);国家自然科学基金资助项目(50534090);煤炭资源与安全开采国家重点实验室 2008 自主课题(SKLCRSM08B12)

作者简介:段玉龙(1982-),男,重庆垫江人,博士研究生。E-mail: dylnhz@126.com

律对预防注惰引发次生瓦斯事故(火灾、爆炸)具有重要意义。

1 注惰气流数学模型

1.1 方程组的确立

向矿井火区充注惰气,注惰射流受到火区气体流动状态、火灾生成气体、障碍物和巷道涌出瓦斯等的影响,在封闭火区内的流动过程非常复杂。根据气体扩散运移机理,火区内气体流动主要以惰气的紊流流动、瓦斯空气随惰气的对流-扩散运移和分子扩散过程为主^[5]。为了简化研究注惰气体流动过程,假设:

- ① 忽略火区内火源的燃烧过程和火灾生成的各种气体;
- ② 流动的惰气及火区气体作为连续介质处理,视为不可压缩流体;
- ③ 火区内各种气体的扩散系数相同;
- ④ 忽略火区内涌出瓦斯对气体密度的影响;
- ⑤ 菲克定律和博申尼克假定有效;
- ⑥ 忽略注惰射流与火区气体的温度差别。

在以上假设的基础上,分别确定了连续性方程,动量方程和组分方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] + \overline{g_i} - \overline{f_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j c_s)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial \rho c_s}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j c'_s} \right) + \overline{S_s} \quad (3)$$

式中, ρ 为惰气密度; t 为时间; u_i, u_j 分别为*i*和*j*方向的速度; x_i, x_j 为方向坐标; $i, j = 1, 2, 3$; μ 为动力黏性, Pa·s; p 为巷道内气压; δ_{ij} 为单位张量; g_i 为*i*方向的体积力; f_i 为*i*方向的阻力; c_s 为组分*s*的体积浓度; D_s 为黏性矢量; S_s 为源项,为组分*s*的产生率。

模拟过程中涉及到了雷诺应力,对雷诺应力的处理模型有两种:雷诺应力模型和 $k - \varepsilon$ 双方程模型。这里采用工程上应用较广的 $k - \varepsilon$ 模型。湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ε 遵守下列方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_B - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_K - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中, G_B, G_K 为湍流生成项; μ_t 为湍流黏性, $\mu_t = \rho \times C_\mu (k^2/\varepsilon)$, $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 为常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} =$

1.92 ^[6]; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtal 数。

1.2 定解条件

1.2.1 初始条件

为了模拟火区巷道内注惰射流对瓦斯浓度分布的影响规律,取瓦斯涌出一段时间后的流场模拟结果作为瓦斯巷道非稳态流动状态下充注惰气的初始条件。假定初始时刻($t=0$)巷道内各处压力 p 为 p_0 , 轴向风速 u 为平均风速 u_a (取为 30 m/min), 垂向速度 $v=0$, 横向速度 $w=0$, 温度 $T=T_a$ (风温), 各种气体的气体分数与空气组分相同。

1.2.2 边界条件

(1) 进口条件。进口条件包括通道进口速度 (u, v, w)、温度 T_{in} 、流量 F_{in} 、混合分数 f_{in} 、紊流动能 k_{in} 、动能耗散率 ε_{in} 等。惰气流的进口风速、温度、流量和浓度通过查阅相关设备手册和实际使用情况确定,火区内瓦斯涌出量可由火灾发生前的实测数据确定。紊流动能 k_{in} 和动能耗散率 ε_{in} 可用式(6)近似计算,即

$$k = 0.5(u_{av} I)^2, \varepsilon = C_\mu^{3/4} (k^{3/2}/l) \quad (6)$$

式中, u_{av} 为入口断面上的平均速度, m/s; I 为湍流强度,对完全发展的湍流, I 可以估算为 $I \equiv u'/u_{av} \approx 0.16(Re)^{-1/8}$; l 为湍流尺度, $l = 0.07L$, L 为通道断面水力直径, m; C_μ 为湍流模型中指定的经验常数(近似为 0.09)。

(2) 壁面边界条件。火区巷道的固体壁面采用无滑移边界条件。对于断面两个方向上的速度 v 和 w 区分是动量方程还是连续性方程,连续性方程中仍然采用无滑移边界条件,对垂直于壁面方向的 v 或 w 动量方程采用法向一阶导数为零的条件。巷道壁面温度等于围岩冷却带温度 T_{rock} 。假设巷道壁面上各种气体不可渗透,对于湍流动能 k_{in} 和组分气体方程 C_s , 采用在壁面处扩散通量为 0 的边界条件,即

$$(\partial \varphi / \partial n)_{wall} = 0 \quad (\varphi \text{ 分别取 } k, C_s) \quad (7)$$

(3) 出口条件。在火源通道出口边界,使用充分发展条件。出口为压力出口,出口处的压力初始值由实验参数或实测数据确定,随着计算的进行,出口压力根据其临近最内侧网格平均压力确定。

2 计算结果分析

根据火区气体扩散运移机理,气体流动主要以惰气的紊流流动、瓦斯随惰气的对流-扩散运移和分子扩散过程为主。方程(1)~(7)构成了描述火区巷道内环境气体、惰气、瓦斯气体等在火区巷道内流动和相互作用的瞬时守恒方程组。结合这些方程,利

用 CFD 模拟软件 Fluent 进行了相应的模拟求解。图 1 是在不同的入射流量惰气经过 10 min 注惰时间后注惰巷道中瓦斯在巷道中的浓度分布。

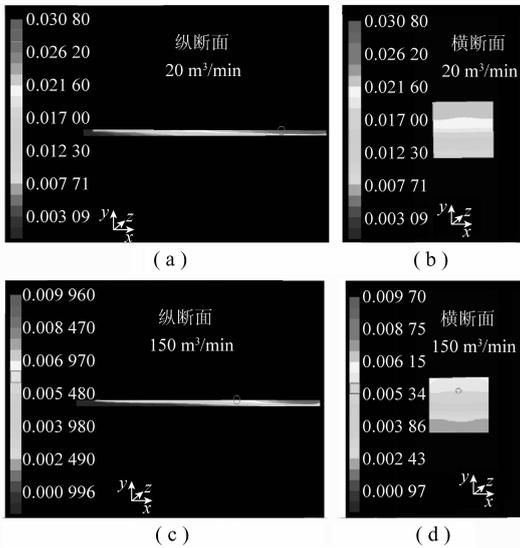


图 1 注惰 10 min 巷道纵断面和横断面瓦斯浓度分布

Fig. 1 The gas concentration distribution in laneway after pumping inert gas 10 min

由图 1 可知,氮气流量较小时 ($20 \text{ m}^3/\text{min}$) 的高瓦斯气体分布区域比氮气流量较高 ($150 \text{ m}^3/\text{min}$) 时的大,两种情形下的瓦斯浓度均是从充注惰气的入口到巷道前方从低到高逐渐变化。由图 1 (b)、(d) 可

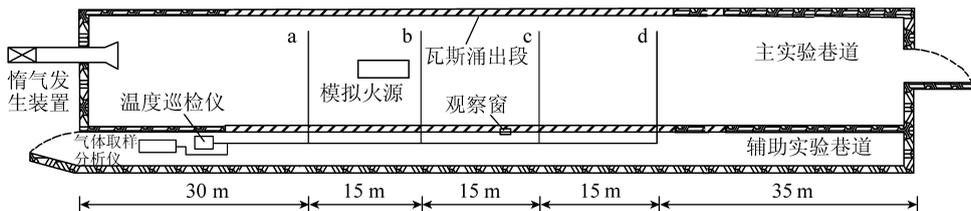


图 2 巷道注惰模拟实验系统

Fig. 2 The experiment system on pumping inert gas into laneway

图 3 分别是实验巷道在经过了 10 min 的不同流量 ($20, 150 \text{ m}^3/\text{min}$) 注惰后所测得的各断面瓦斯浓度区域分布,图中 a、b、c、d 是 4 个浓度测试面。

图 3 (a) 说明,当注入流量较小时 ($20 \text{ m}^3/\text{min}$),惰流推动瓦斯气体缓慢向前移动,导致在巷道前方上部存在浓度大于 2% 的高瓦斯气体层,瓦斯浓度梯度从顶部 2.70% ~ 2.90% 逐步递减到底部 0.50% ~ 0.60% 的浓度范围,从而巷道前方瓦斯层存在可燃性;图 3 (b) 说明,当注入的惰流流量较大时 ($150 \text{ m}^3/\text{min}$),高速惰流能够快速以紊流状态进入火区,起到稀释和惰化作用,使得整个巷道内不存在浓度高于 1% 的瓦斯区域,瓦斯浓度梯度从 0.60% ~ 0.70% 逐

知,当氮气流量不大时 ($20 \text{ m}^3/\text{min}$),巷道内所取断面从上往下瓦斯浓度从 2.310% ~ 0.771% 不等,其中在巷道顶部有一个浓度在 2.310% ~ 3.080% 的约占巷道断面 2/7 厚的瓦斯层,一定的加热条件下存在引燃瓦斯的可能,无爆炸危险^[7];当氮气流量较大时 ($150 \text{ m}^3/\text{min}$),瓦斯与氮气的对流扩散运移强度增大,巷道内所取断面从上往下瓦斯浓度从 0.675% ~ 0.194% 不等,瓦斯燃烧和爆炸均不会发生。

3 火区巷道注惰实验

实验系统如图 2 所示,实验巷道分主实验巷道和辅助实验巷道。辅助实验巷道主要为了放置各种测试仪器仪表进程观测和记录所用。主实验巷道长 110 m,断面面积 5.23 m^2 ,中间段内部布置瓦斯释放点和模拟火源,两端砌带小门和圆孔的密闭墙,惰气发生装置产生的惰气 (N_2 和 CO_2 混合气体) 通过巷道入口密闭墙上圆孔注入,试验巷道内设置 a、b、c、d 四个测试断面,用于温度测试和取样。进行了两组不同注惰速度的试验,分别考察不同注惰量下惰气对瓦斯运移作用的影响以及惰化效果^[8]。实验方案 1、2 的条件:模拟瓦斯涌出量均为 $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$;巷道平均风速均为 $30 \text{ m}/\text{min}$;注惰流量分别为 $20, 150 \text{ m}^3/\text{min}$;注惰持续时间均为 10 min;注惰时机分别为瓦斯均匀释放,3 min 后开始。

步递减到 0.32% ~ 0.35%,没有瓦斯灾害发生的可能。

对比图 1 和图 3 可知,模拟计算值和实验测定值从数值上和分布区域上都都很相似。对于 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 惰流而言,模拟计算值从 0.31% ~ 3.08%,相应的实验测定值从 0.50% ~ 2.90%,模拟值比实验值范围大误差很小,从纵侧面的角度观察发现其分布区域也同样相近;对于 $150 \text{ m}^3/\text{min}$ 惰流而言,模拟计算值从 0.15% ~ 1.00%,相应的实验测定值从 0.32% ~ 0.70%,模拟值比实验测定值范围大,误差较小,纵、横侧面观察得出区域分布均相近。总体而言,模拟计算值和实验测定值较为相近。

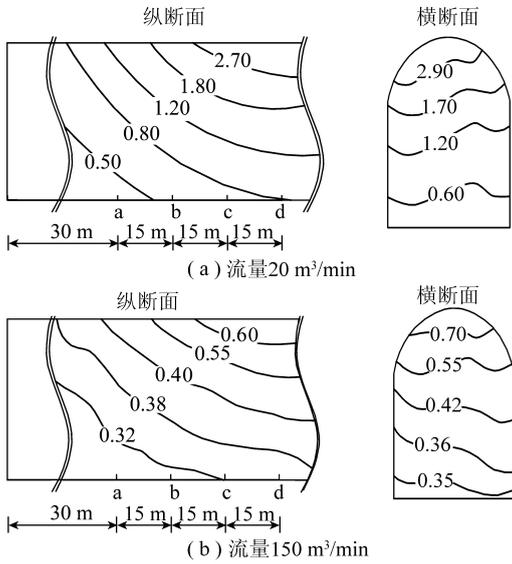


图 3 试验巷道纵断面和横断面瓦斯浓度 (%) 分布
Fig. 3 Methane concentration in experimental laneway

4 注惰速度对火区瓦斯气体分布的影响

从数值模拟和模拟实验的结论可看出,在环境条件相同的情形下,注惰速度的不同所导致的结果差别很大。为此,可认为注惰速度是导致注惰过程中是否发生次生瓦斯事故的关键因素,下面将对 N_2 和 CO_2 两种矿井常用惰气的最小安全注入速度进行探讨。

通过数值模拟和模拟实验可得知,注惰速度的不同对造成封闭火区发生次生瓦斯事故有很重要的影响。火区封闭前的风流流动一般呈紊流状态。当注入惰气时,仍需保持足够的通风,以防火区内形成危险性瓦斯气体层,直到封闭的火区内已充以浓度足够高的惰气为止,因此,往往通风与注惰同时进行。为了防止密度较大惰气上部的空气层或密度较小惰气下部的空气层所含氧气支持火区燃烧,为了防止封闭火区内惰气仅处于部分充填状态,应保证空气与惰气的迅速混合。要确定最小安全有效的注惰速度,必须要知道什么样的注入速度能使瓦斯气体层消失。这就涉及到反抗较轻气体上浮力所做功与紊流流动气体动能等。已有研究表明,反抗较轻气体上浮力所做功与紊流流动气体动能之比可作为衡量紊流作用消失概率的标准^[9],表示为

$$N_{Ri} = [- (g/\rho) (\partial\rho/\partial Y)] / (\partial v/\partial Y)^2 \quad (8)$$

其中, N_{Ri} 称为渥卡特逊数;分母表示体积 V 的紊流流团动能 $0.5\rho V l^2 (dv/dY)^2$, 分子表示使较重流体中紊流流团升至较轻流体层所应做的功 $0.5gV l^2 (d\rho/dY)$ 。对于式(8), 如果取 $\Delta\rho/\delta = -\partial\rho/\partial Y, v/\delta = -\partial v/\partial Y, \delta = -q/(vW)$, 并代入式(8), 则有

$$N_{Ri} = g(\Delta\rho/\rho) [q/(Wv^3)] \quad (9)$$

如果考虑巷道的倾角 α , 则根据式(9)可导出

$$N_{Ri} = g(\Delta\rho/\rho) [q/(Wv^3)] \cos \alpha \quad (10)$$

根据相关作者对紊流混合作用的影响的研究^[10], 当 $N_{Ri} > 0.83$ 时, 可以忽略紊流混合作用的影响。注惰过程中如果要达到较好的效果, 则要求紊流作用的存在, 所以本文取 $N_{Ri} \leq 0.83$ 。变换式(10), 则可得到注入惰流速度判断式为

$$v_d > [g\Delta\rho q \cos \alpha / (0.83\rho W)]^{1/3} \quad (11)$$

将密度差 $\Delta\rho = |\rho_{ig} - \rho_a|, \rho = \rho_{ig}, g = 9.8 \times 3600 \text{ m/min}^2$ 代入式(11), 得到

$$v_d > 11.2 (q \cos \alpha / W)^{1/3} \quad (\text{注入 } N_2) \quad (12)$$

$$v_d > 28.1 (q \cos \alpha / W)^{1/3} \quad (\text{注入 } CO_2) \quad (13)$$

式中, l 为流团垂直方向上移动的距离, m ; v_d 为惰流速度, m/min ; ρ_a 为空气密度; Y 为垂直方向长度, m ; α 为巷道倾角; q 为进入火区的风量, m^3/min ; ρ_{ig} 为惰气密度; δ 为气体层厚度; W 为巷道宽度, m 。

如果用式(12)、(13)去检测实验结论可得出, 实验巷道由于所产生的是 N_2 、 CO_2 混合惰气, 所以其取值应当在纯 N_2 和纯 CO_2 的注惰速度之间。计算可知

$$v_{N_2} = 11.2 (30.1/2.3)^{1/3} = 26.36 \text{ m/min}$$

$$v_{CO_2} = 28.1 (30.1/2.3)^{1/3} = 66.15 \text{ m/min}$$

由于实验中采用的是 N_2 、 CO_2 混合气体, 故模拟实验中的注惰速度 v_d 应当满足 $v_{N_2} < v_d < v_{CO_2}$, 才能保证在一定的时间内迅速安全的惰化火区环境。如果惰气注入速度过大则会浪费资源; 过小则达不到惰化效果, 甚至可能会引发瓦斯燃烧甚至爆炸。经计算, 试验中的第 1 组注入速度为 3.82 m/min , 第 2 组为 28.7 m/min , 可知第 1 组的注入速度在下界 v_{N_2} 以下, 第 2 组的注入速度在 v_{N_2} 和 v_{CO_2} 之间。所以, 第 1 组的注惰速度达不到计算要求, 从测试结果也可看出, 火区中有浓度达 2.9% 的可燃性瓦斯气体层; 第 2 组的注惰速度则较为合适, 从实验测试结果也看出火区中瓦斯浓度很低。

对于式(12)、(13), 分别计算了在额定巷道宽度 3 m 、不同倾角和不同的火区进风量条件下, 能够最快使惰气和瓦斯气体均匀混合且不引发次生事故的最小安全、有效的 N_2 和 CO_2 注惰速度, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 巷道角度对最小临界注惰流量所造成的差别不大。对于 N_2 而言, 当火区风量从 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ 变化到 $70 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 相应的最小注氮速度从 13 m/min 逐渐升高到 28 m/min 附近; 对于 CO_2 而言, 当火区风量从 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ 变化到 $70 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 相应的最小注氮速度从 33 m/min 逐渐升高到 79 m/min

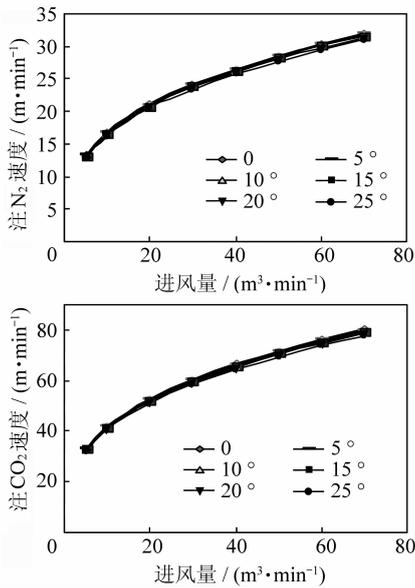


图4 N₂、CO₂的最小安全、有效注入速度

Fig. 4 Min. safety and effective pumping velocity of N₂, CO₂

附近。结合图4的数据和层流、紊流的判别条件 $v_0 d / \nu = 2320$ 可知(d 为巷道断面当量直径; ν 为流体的运动黏性系数),只有在火区风量较小时($5 \text{ m}^3/\text{min}$),N₂的注入状态为层流,其余的N₂注入状态 and 所有的CO₂注入状态均为紊流。总体来说,CO₂的注入速度要比氮气的大,这主要是由于CO₂的比重比N₂的大,相对更容易下沉,要想达到防止可燃气体成层的效果就必须加大注入速度的缘故。图4中的最小注惰速度可为注惰过程中不诱发次生瓦斯事故提供一定的参考。图4中不能体现的情形根据式(12)、(13)计算。

5 结 论

(1)通过数值模拟得到,当注惰流量为 $20 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,巷道前方上部存在浓度达3%的瓦斯气体层,瓦斯浓度从注惰口到巷道前方逐渐升高,一定热源条件下存在火灾危险;注惰流量为 $150 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,整个封闭火区巷道瓦斯浓度均小于1%,没有发生瓦斯事故的可能。

(2)模拟实验和数值模拟的结果很相近,二者的结果无论是从数值方面还是从气体的区域分布方面差距都较小,结论一致。

(3)通过数值模拟和模拟实验的结论进行分析,得出在特定的环境下,注惰速度是决定注惰过程中是

否会导致次生瓦斯事故的关键因素之一。

(4)建立了最小注惰速度公式,对不同条件下的N₂和CO₂的最小安全注入速度进行了计算,得出注惰速度随封闭火区的风量增大而增大,且几乎均呈紊流状态。

参考文献:

- [1] 王健,杜贤流. 煤矿瓦斯爆炸原因分析与防治对策[J]. 煤炭工程, 2006(9):48-49.
Wang Jian, Du Xianliu. Reason analysis and prevention of mine gas explosions[J]. Coal Engineering, 2006(9):48-49.
- [2] 李华伟,唐佳. 低瓦斯矿井瓦斯爆炸事故剖析与应对措施[J]. 矿业安全与环保, 2006(4):62-63.
Li Huawei, Tang Jia. Analysis and prevention to explosions in low-gas mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006(4):62-63.
- [3] 吴强,梁栋. CFD技术在通风工程中的运用[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2001.
Wu Qiang, Liang Dong. The use of CFD technology in ventilation engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.
- [4] 王省身,张国枢. 矿井火灾防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1990.
Wang Xingshen, Zhang Guoshu. Prevention and control of mine fire[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.
- [5] 李宗翔,李海洋,贾进章. Y形通风采空区注氮防灭火的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5):593-597.
Li Zongxiang, Li Haiyang, Jia Jinzhang. Numerical simulation of preventing spontaneous combustion by nitrogen injection in goaf of Y-type ventilation face[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5):593-597.
- [6] Woodburn P J, Britter R E. CFD simulations of a tunnel fire; Part I[J]. Fire Safety, 1996, 26:35-62.
- [7] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2005.
Yu Bufan. User manual of preventing mine methane accidents[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [8] 邱雁. 充注惰气抑制火区瓦斯爆炸的作用机理[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2000.
Qiu Yan. The mechanism of pumping inert gas to suppression gas explosion in fire zone[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2000.
- [9] 周心权. 矿井火灾救灾理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1996.
- [10] Ellison T H. Turbulent entrainment in stratified flow[J]. Fluid Mechanics, 1959:423-448.