

文章编号:1000-582X(2009)03-0319-05

巷道风流中瓦斯逆流现象的数值模拟

高建良, 罗 娣

(河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要:根据计算流体力学理论,研究巷道在不同风速、不同倾角下的瓦斯逆流现象;分析巷道风流中瓦斯逆流区的长度、浓度分布以及瓦斯层厚度的变化;得出倾斜巷道中瓦斯逆流的一般规律。结果表明:在下行通风风速较小的情况下,当瓦斯从顶板涌出时,巷道中将出现明显的瓦斯逆流现象;在发生瓦斯逆流时,风速越高,瓦斯逆流的区域越小,瓦斯层的厚度越薄、长度越短;下行通风有利于空气和瓦斯的混合,且倾角越大,瓦斯与空气混合的能力越强,顶板逆流瓦斯层的范围越小。

关键词:数值模拟;瓦斯分布;瓦斯逆流

中图分类号:TD712.54

文献标志码:A

Numerical simulation of backward flow of methane roof layer in an airway

GAO Jian-liang, LUO Di

(School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, P. R. China)

Abstract: We study methane backward flow in the laneways at various wind velocities and angles based on computational fluid dynamics theory; analyze the backward flow area length, the concentration distribution and the methane roof layer thickness. The results show that the methane roof layer would move against the airflow in a declensional ventilated airway if the downward air velocity is not large enough. The faster the airflow speed, the smaller the methane backward flow area becomes, and the methane roof layer becomes thicker and shorter. In a declensional ventilated airway, the methane/air mixing capacity increases with the increase of the inclination of the airway, and the thickness of methane roof layer decreases with the increase of the inclination of the airway.

Key words: numerical simulation; methane distribution; methane backward flow

矿井有瓦斯涌出的巷道中,瓦斯积聚是影响矿井采掘工作安全的重要问题。为了能够将有害物质排出,以减少对工作人员的伤害、防止瓦斯积聚、降低煤矿安全隐患,需要查清并排除高浓度区的瓦斯积聚。在一些瓦斯爆炸事故中,瓦斯爆炸的发生点

并不总是在最初的瓦斯涌出地点,而是在距涌出地点的一段距离内。这说明在瓦斯爆炸发生以前,已存在高浓度瓦斯在井下巷道内的运移^[1-3]。在倾斜巷道的上行风流中,瓦斯自然流动的方向和风流方向一致,但在下行风流中,瓦斯流动的方向和风流方

收稿日期:2008-10-31

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0618);河南省高校杰出人才创新工程资助项目(2004KYCX005);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教人司函[2003]14)

作者简介:高建良(1963-),男,河南理工大学教授,博士生导师,主要从事安全技术及工程、矿井通风、热环境控制理论与技术的研究,(Tel)0391-3987882;(E-mail)gao@hpu.edu.cn。

向正好相反,且由于高浓度瓦斯存在所产生体积力作用,引发瓦斯在巷道顶板附近沿巷道风流的反方向运动。即发生下行风流中瓦斯逆流现象^[4-6]。瓦斯逆流所造成的瓦斯积聚很容易被人们忽视而造成灾害。因此,掌握下行风流中瓦斯逆流与巷道倾角、风流速度的关系,以及风流中瓦斯分布的一般规律对有效防止瓦斯积聚、保障煤矿安全有重大的意义。

矿井中的风流流动多为紊流状态,其流动控制方程多是非线性的,且自变量多,计算域的几何形状和边界条件复杂,很难求得它的解析解。另外,在井下瓦斯积聚与分布规律的研究中,不少人通过实验来测定矿井内部的流场^[7-12],这种方法所得的实验结果真实可信,但实验往往会受到模型尺寸、测量精度等方面的限制,同时还可能遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等方面的困难。数值模拟为人们的研究提供了方便,在计算机上进行数值模拟就好像

在计算机上做了一次物理实验,它不受物理模型和实验模型的限制,省钱省时,有较多的灵活性,而且还能给出详细和完整的资料,很容易模拟特别尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。根据计算流体动力学理论,运用 Fluent 软件对倾斜巷道下行风流中瓦斯在顶板涌出后的瓦斯逆流和瓦斯分布情况进行数值模拟。

1 物理模型

为了研究井下巷道中瓦斯分布的一般规律,取井下一段贯通巷道,巷道总长度为 50 m,断面为梯形,上底宽 2.4 m,下底宽 3 m,高 2.4 m。采用木栅子支护,圆木直径 0.1 m(为研究方便,将巷道支护断面简化为边长为 0.1 m 的正方形),支护间距为 1 m,瓦斯源位于离巷道风流进口的 25~26 m 处的 2 个支架之间。物理模型如图 1。

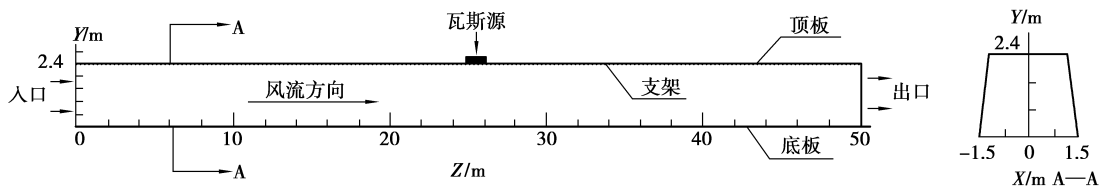


图 1 数值模拟的物理模型

2 巷道内风流流动的控制微分方程

矿井巷道中的空气流动多属紊流,其流动遵循流体流动的基本守恒定律,即遵循质量守恒定律和动量守恒定律。同时又由于巷道中的流动包括了瓦斯与空气的混合,因此,系统还要遵循组分守恒定律^[13-14]。各守恒定律建立控制方程如下。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w. \quad (4)$$

组分质量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_s \mathbf{u}) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s. \quad (5)$$

式(1)~(5)中: ρ 为流体的密度; t 为时间; \mathbf{u} 为速度矢量; u, v, w 分别为 \mathbf{u} 在 x, y, z 方向上的分量; μ 为流体的动力粘度; p 为流体微元体上的压力; S_u, S_v, S_w 为广义源项; c_s 为组分 s 的体积浓度; ρc_s 为组分的质量浓度; D_s 为组分的扩散系数; S_s 为组分生产率。

3 边界条件的设定

根据模拟的物理模型的边界条件,将巷道的一端作为风流的入口,另外一端作为风流的出口,巷道的壁面作为固定边界,瓦斯涌出处理为源项。则模拟的边界条件可描述如下。

入口边界:设定巷道的一端为入口,断面风速平均分布。

出口边界:设定巷道的另一端为出口,为完全发展的自由出流边界,即流动出口的流场是充分发展的,沿流动方向没有变化。

壁面条件:所有壁面上施加无滑移边界条件,即

$U_i = 0^{[15]}$ (U_i 是各方向上的速度分量);同时假定壁面绝热。

瓦斯源:把瓦斯涌出处理为源项,即认为瓦斯从靠近涌出地点近壁面第一层网格单元涌出,这些单元的源项 S_s 等于单位时间、单位体积内瓦斯的生成量。根据瓦斯涌出量的大小设置瓦斯源项,当涌出量为 Q 时, $S_s = \rho Q/Vt$ (ρ 是密度; V 是瓦斯涌出单元的体积; t 是时间)。

4 数值模拟结果与实验结果的对比

为了考察数值模拟的准确程度,将数值模拟结果与文献[6]中的实验结果进行对比。当巷道平均风速等于 5 m/s 时, $Z=20$ m 以后各断面轴线上的无量纲风速(各点风速与巷道断面平均风速之比)分布如图 2 所示。由图可见,数值模拟结果与实验结果非常接近。数值模拟能非常好地解算巷道风速。

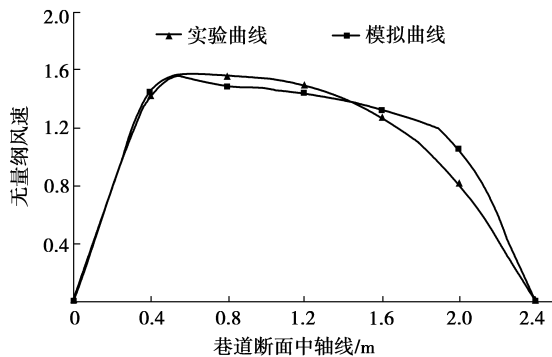


图 2 无量纲风速分布模拟结果与实验结果对比

当瓦斯涌出量等于 $2.62 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,距离涌出源不同位置处巷道断面 ($Z=29$ m、 $Z=35$ m、 $Z=41$ m) 上顶板以下 0.24 m 处的瓦斯浓度与巷道平均风速的关系如图 3 所示。图中实线为模型实验结果,虚线是模拟解算结果。由图可见,瓦斯浓度分布的数值模拟结果与模型实验结果非常接近。可以用文中的数值模拟方法来解算瓦斯与风流的混合。

5 风流速度和巷道倾角对顶板瓦斯层的影响

根据上面所述的物理模型、控制方程以及边界条件,运用 Fluent 软件对井下倾斜巷道进行数值模拟。模拟的内容分 2 部分:1)在相同角度 (30°),不同风速 (0.8、1.0、1.6 m/s) 下巷道风流中瓦斯浓度

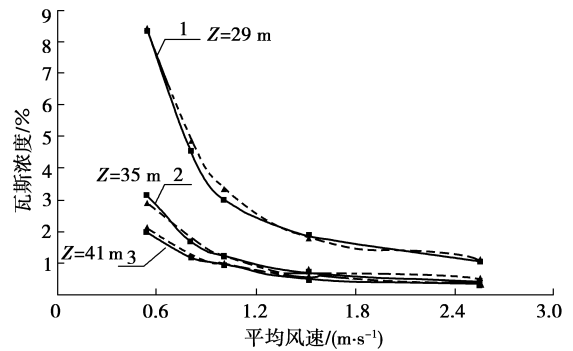


图 3 瓦斯浓度分布模拟结果与实验结果对比

的分布;2)相同风速 (1.0 m/s),不同倾角 (12° 、 30°) 下巷道风流中瓦斯浓度的分布。下面对上述 1) 种情况下巷道风流中的瓦斯分布进行数值模拟。

5.1 风流速度对瓦斯层的影响

当巷道倾角为 30° 、瓦斯涌出量为 $0.02592 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,不同风速时下行风流中的瓦斯浓度分布如图 2 所示。

由图 4 得出这样的结论:

1)在瓦斯从顶板涌出的倾斜巷道中,风速较小的情况下,巷道中将出现明显的瓦斯逆流现象。

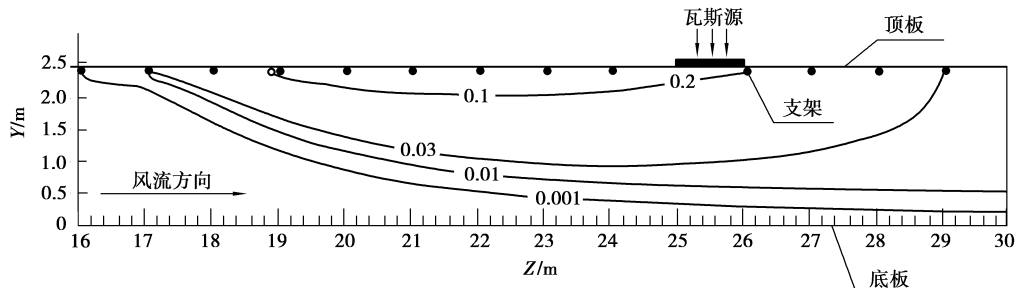
2)在图 4(a)中,可以看出当风速为 0.8 m/s、瓦斯涌出量为 $0.02592 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,瓦斯逆流的长度基本达到了 8 m。在图 4(b)中,当风速为 1.0 m/s 时,瓦斯逆流的长度大约只有 4 m。这说明了当瓦斯涌出量不变,风速逐渐增大时,瓦斯逆流的长度将随风速的增大而逐渐减小。当风速增大到一定程度的时候,井下巷道中的瓦斯逆流现象将消失。

3)当瓦斯涌出量不变时,随着风速的增大,高瓦斯浓度区的瓦斯层厚度将逐渐的变薄、变短。从 3%、10% 的等瓦斯浓度线上可以明显看出来。

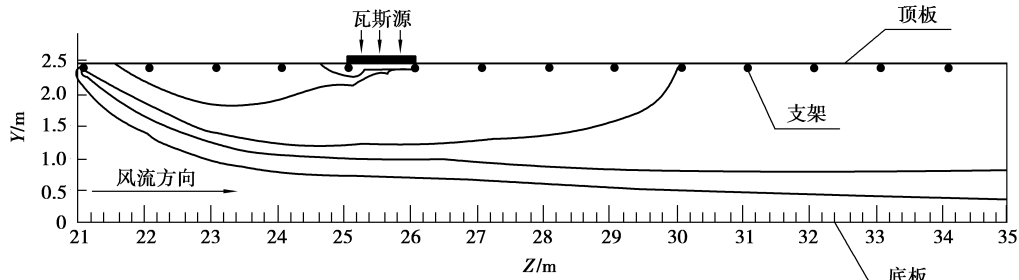
5.2 巷道倾角对瓦斯层的影响

当风速为 1.0 m/s、瓦斯涌出量为 $0.02592 \text{ m}^3/\text{s}$ 、巷道倾角为 12° 时,下行风流中的瓦斯浓度分布如图 5 所示。

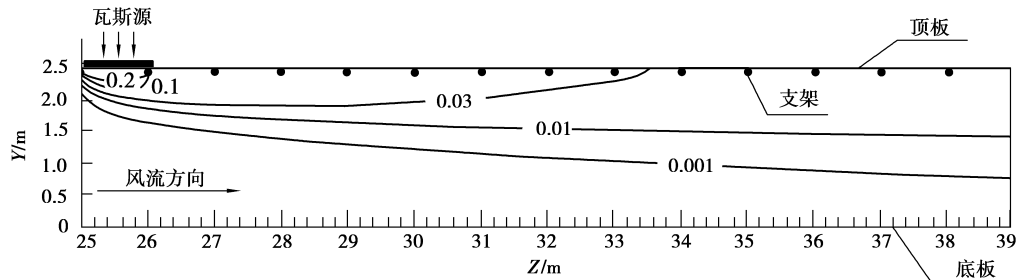
与图 4(b)进行对比可以看出,当风速和瓦斯涌出量相同时,巷道倾角为 12° 的顶板瓦斯逆流的长度为 6 m 左右,巷道倾角为 30° 的瓦斯逆流长度为 4 m 左右。同时我们还可以看出巷道倾角为 12° 时,高浓度瓦斯区域的范围比倾角为 30° 时大。这主要是由于下行通风时,角度越大,瓦斯与空气混合的能力越强。所以,下行通风时巷道倾角越大,顶板瓦斯积聚形成瓦斯层的可能性越小。



(a)巷道平均风速为0.8 m/s 巷道倾角为30°



(b)巷道平均风速为1.0 m/s 巷道倾角为30°



(c)巷道平均风速为1.6 m/s 巷道倾角为30°

图 4 下行通风时不同风速条件下的巷道瓦斯浓度分布

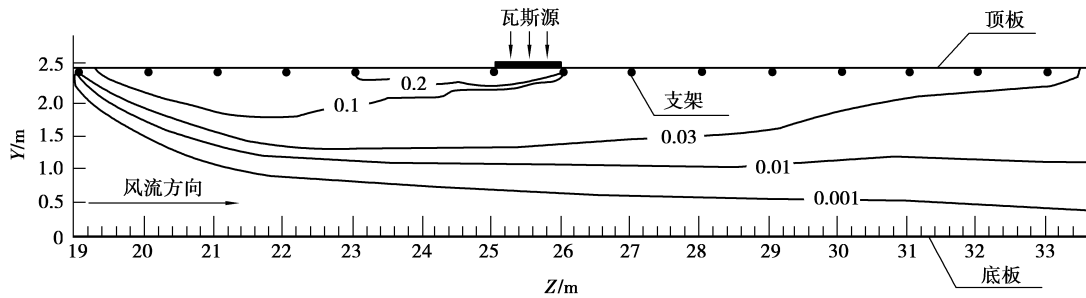


图 5 风速为 1.0 m/s 巷道倾角为 12° 时下行风流中的瓦斯浓度分布

6 结 论

通过以上的数值模拟得出以下结论:

1)在瓦斯从顶板涌出的倾斜巷道中,风速较小情况下,巷道中将出现明显的瓦斯逆流现象。相同角度下,随着风速的增大,瓦斯逆流区的长度逐渐变短,高瓦斯浓度层的厚度也在逐渐的变小、变薄。当风速增大到一定程度时,瓦斯逆流现象将消失。

2)下行通风时,巷道倾角越大,瓦斯与空气的混合能力越强,瓦斯逆流区的长度越短,高浓度瓦斯积聚的范围越小。

参考文献:

- [1] 王恩元,梁栋,柏发松. 巷道瓦斯运移机理及运移过程的研究[J]. 山西矿业学院学报,1996,14(2):130-135.
WANG EN-YUAN, LIANG DONG, BO FA-SHONG. Study on the mechanism and process of the methane movement in the tunnel[J]. Journal of Shanxi Mining Institute, 1996,14(2):130-135.
- [2] 梁栋,吴强. 低雷诺数风流中瓦斯上浮机理及其实验研究[J]. 黑龙江科技学院学报,2001,11(3):10-12.
LIANG DONG, WU QIANG. The mechanism and test research of methane buoyant in the airflow of low reynolds number[J]. Journal of Hei Longjiang Institute of Science & Technology,2001, 11(3):10-12.
- [3] 梁栋,周西化. 回采工作面瓦斯运移规律的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报,1999,18(4):337-341.
LIANG DONG, ZHOU XI-HUA. Numerical simulation on gas movement law in working face[J]. Journal of Liaoning Technical University,1994,18(4):337-341.
- [4] 梁栋,王继仁,王树刚,等. 巷道风流中瓦斯逆流机理及其实验研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):476-479.
LIANG DONG, WANG JI-REN, WANG SHU-GANG, et al. The mechanism and test research of gas adverse current in roadway air flow[J]. Journal of China Coal Society,1998,23(5):476-479.
- [5] 梁栋. 通风过程瓦斯运移规律和数值模[M]. 北京:煤炭工业出版社,1999.
- [6] 高建良. 回采工作面下行通风时沼气涌出和分布规律的研究[D]. 焦作:焦作工学院采矿系,1985.
- [7] UCHINO K, INOUE M. Auxiliary ventilation at heading faces by a fan [C]// Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, May 17-22, 1997, V Rava. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 1997: 493-496.
- [8] JONES A D, POKRYSZKA Z, LOWRIE S, et al. A physical scale model of flows in the waste of a retreat longwall coalface [C] // Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, May 17-22, 1997, V Rava. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 1997: 496-502.
- [9] NAKAYAMA S. Simulation of methane gas distribution by computational fluid dynamics [C] // Proceeding in Mining Science and Technology, August 29-31, 1999, Beijing, China. [S. l.]: Taylor & Francis, 1999: 563-580.
- [10] GAO J L, UCHINO K, INOUE M. Simulation of thermal environment conditions in heading face with forcing auxiliary ventilation[J]. Shigen-to-Sozaiv, 2002,118(1): 9-15.
- [11] NAKAYAMA S. Simulations of methane gas distribution at a heading face[J]. Shigen-to-Sozaiv, 1998,114(4): 229-235.
- [12] TOMITA S. Full-scale model experiment on the airflow at a driving face with forcing auxiliary ventilation [D]. Fukuoka: Kyushu University, 1995.
- [13] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [14] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [15] 王海桥,刘荣华,陈世强. 独头巷道受限贴附射流流场特征模拟实验研究[J]. 中国工程科学,2004,6(8): 45-49.
WANG HAI-QIAO, LIU RONG-HUA, CHEN SHI-QIANG. Simulation on flow field characteristic of restricted wall-attached jet in heading face [J]. Engineering Science,2004,6(8):45-49.

(编辑 赵 静)