



独头巷道掘进压入式通风流场特征数值分析

罗周全, 张朝波, 鹿浩

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 独头巷道掘进过程中压入式通风流场是受空间限制的受限贴附射流, 其特征对巷道通风有着重要影响。以凡口铅锌矿为例, 建立了独头巷道受限贴附射流流场的标准 $k-\varepsilon$ 数学模型, 确定了模型的边界条件, 在采用 GAMBIT 划分网格的基础上, 运用计算流体动力学 (CFD) 软件 FLUENT 对受限贴附射流流场特征进行了数值模拟分析。结果表明, 独头巷道压入式通风流场具有 3 个主体区域, 即贴附射流区、冲击射流贴附区和回流区; 受限贴附射流起始段长度小于运用射流理论计算得到的理论值, 受限射流完全贴附后, 射流壁面轴心速度大于管道中心入口速度。研究揭示的流场特征可为改善独头巷道掘进通风效果提供理论依据。

关键词 独头巷道; 压入式通风; 受限贴附射流; 流场特征

中图分类号 TD721

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.007

Numerical Analysis of Characteristics of Confined Wall-attached Jet Flow in Heading Face Excavation

LUO Zhouquan, ZHANG Chaobo, LU Hao

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Abstract Research on excavation of rectangular heading face is conducted to understand the characteristics of air flow in the process of heading face excavation in underground metal mining with a forced ventilation system. The air flow field of forced ventilation in heading face excavation is a confined wall-attached jet flow limited by space, whose characteristics have great influence on ventilation of roadway. Problems such as dust and hazardous gases are tightly related to the characteristics of the jet flow. The jet flow in the excavation process of heading face working is a confined wall-attached jet flow, which is subject to limited space and makes it extremely difficult for the mine to effectively ventilate; the characteristics of jet flow are not fully consistent with those in the unlimited space. In order to improve the ventilation in heading face excavation of Fankou lead-zinc mine, a standard $k-\varepsilon$ mathematical model of confined wall-attached flow field in the heading face excavation process is established and the boundary conditions of the model are determined. GAMBIT is employed for mesh generation, and the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT is selected to simulate the air flow field. The results are as follows. Firstly, the flow field can be divided into 3 parts, that is, wall-attached jet area, impact jet area and backflow area; secondly, the initial length of the confined wall-attached jet is less than the value obtained by theoretic analysis; thirdly, the jet wall axial velocity is larger than that of the central inlet of the tube after the confined jet flow is fully attaching. The paper reveals the characteristics of the flow field, and is useful for the improvement of ventilation effect of confined wall-attached jet in heading face excavation.

Keywords heading face; forced ventilation; confined wall-attached jet; flow field characteristics

0 引言

由于独特的空间形态, 独头巷道通风是矿山持续安全生产中的难题^[1]。根据射流理论以及风筒在巷道中的位置, 独头

巷道内的空气射流属于有限空间的受限贴附射流。由于受空间制约, 独头巷道贴附射流的结构、特征均不同于一般受限贴附射流^[2], 适用于一般受限贴附射流的结论不能用于指导

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51274250)

作者简介: 罗周全, 教授, 研究方向为矿山灾害辨析及监控理论与技术, 电子信箱: lqz505@hotmail.com; 张朝波 (共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为矿山灾害辨析及监控理论与技术, 电子信箱: minyinyan@163.com

矿山的生产,因而有必要对独头巷道贴附射流的结构、特征进行研究。尽管国内对矿山通风做了大量的工作,然而在独头巷道射流通风方面的研究较少。王海桥^[1]、咎军^[4]等应用 PHOENICS 数值分析软件探讨了独头巷道受限贴附射流流场特征,在一定程度上揭示了独头巷道受限贴附射流流场规律。然而,在文献[3]中,独头巷道边界处的速度不为 0,这与流体动力学理论是相违背的,也不符合壁面无滑移的边界条件。文献[4]仅以一些特殊位置或特殊方向的速度为对象进行流场结构、特征的分析,不能完整地反映独头巷道贴附射流的全貌。

目前普遍使用的计算流体动力学软件有 FLUENT、PHOENICS、STAR-CD 和 CFX^[5,6],此外国外还广泛使用通风软件 VENTSIM 等。其中,FLUENT 主要用于矿山局部通风分析,也广泛应用于隧道、工业园区^[7-9]等场所的通风分析。目前矿山井巷通风分析方法有理论分析、数值模拟和实验研究,与实验研究相比,数值模拟具有用时少、成本低、能模拟理想及真实条件且结论丰富的特点^[10-11],因而在国内外得到了广泛应用。本文综合运用前处理软件 GAMBIT 和计算流体动力学软件 FLUENT,通过实例数值分析,研究独头巷道压入式有限空间受限贴附射流流场的结构及特征。

1 几何模型及网格划分

凡口铅锌矿独头巷道掘进过程为压入式通风,其风筒出口应与掘进迎头保持一定的安全距离。研究表明,该距离的下限值为 5m,上限值为巷道断面面积平方根的 4~5 倍^[12],采用笛卡尔坐标系。据此巷道的几何尺寸:宽(x)×高(y)×长(z)为 3m×3m×10m,建立风筒直径为 φ=600mm 的几何模型,如图 1 所示。模型计算域为风筒入口到独头巷道迎头(z=10m),对模型进行网格划分,网格单元为 Hex/Wedge(六面体/楔形体)混合单元,类型为 Cooper(扫描整个体积指定源面的网格节点类型),共划分 92940 个单元。

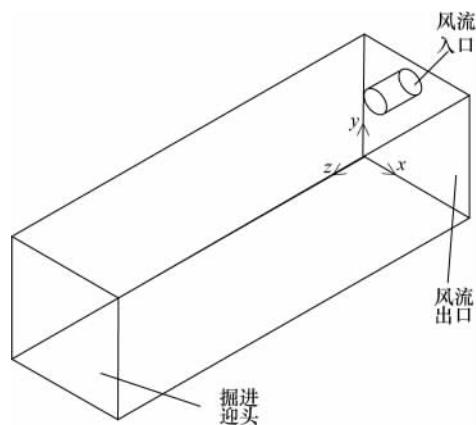


图 1 独头巷道三维模型
Fig. 1 3D model of heading face

2 主控制方程及模拟参数

在确定主控制方程前,根据独头巷道的实际情况,假设:
① 通风气流可视为不可压缩流体,忽略由流体黏性力做功所引起的耗散热,同时假定壁面绝热、等温通风;
② 流体的紊流黏性具有各向同性,紊流黏性系数作为标量处理;
③ 流动为稳态紊流,满足 Boussinesq(布辛奈斯克)假设,且为不可压缩气流流动问题,基本控制方程采用 Reynolds 方程(雷诺方程),紊流模型采用 k-ε 双方程模型;
④ 由于巷道内风流已设为不可压缩流动,故可忽略由流体的黏性力做功所引起的耗散热;
⑤ 壁面的风量不可渗透,气密性较好,在壁面处扩散量为 0^[13],据此确定其主控制方程^[14]。

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{du_i}{dt} = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

k 方程

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \epsilon \quad (3)$$

ε 方程

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} p - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中,k 为紊流动能,J;ε 为紊流动能耗散率,J/s;t 为时间,s;u_i 为速度分量,m/s;x_i 为坐标分量;ν 为层流动力黏性系数,Pa·s;p 为修正时均压力,Pa;F_i 为流体质量力,N;ν_i 为紊流黏性系数,Pa·s;G_k 为平均速度梯度引起的紊流动能产生项;经验常数 σ_k=1.0,σ_ε=1.33,C_{1ε}=1.44,C_{2ε}=1.92,C_μ=0.09。

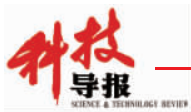
根据现场的实际情况,结合数学模型和 FLUENT 模拟方法,本文选用稳态的隐式隔离求解器,湍流模型为 k-ε 方程模型。以风筒出口为速度入口,速度为 12m/s,水力直径为 0.6m,湍流强度为 3.5%;以出口边界类型为出流。压力-速度耦合方式为 SIMPLEC(压力耦合方程组的半隐式连续方法),其他设置选项保持默认项。

3 计算结果与流场分析

根据图 1 所示的计算模型和边界条件,用 FLUENT 软件对独头巷道压入式受限贴附射流通风三维流场进行数值计算,共进行 132 次迭代计算,数值模拟计算收敛,得到独头巷道受限贴附射流典型截面的流场及速度分布如图 2~图 6 所示。按照射流理论,独头巷道走向方向的速度为贴附射流的特征速度。因此,图 2~图 6 中的流场及速度分布所涉及的速度皆为特征速度。

3.1 流场分区

射流轴心所在平面流速等值线如图 2 所示。图 2 表明独头巷道贴附射流通风流场的分区。由于独头巷道迎头的阻碍,贴附射流到达迎头后方向逆转。按照相对于掘进迎头的



速度大小和方向,流场除了射流体外,还可分为贴附射流区、冲击射流贴附区和回流区。贴附射流区、冲击射流贴附区统称为射流区。图2还表明射流和回流的关系,速度为正值点表示射流体,速度为负值的点表示回流,速度为0的点即为射流与回流的边界。由模拟结果可知,由于受到空间限制,射流得不到充分发展,射流断面也不能自由扩展,使得独头巷道射流最大截面仅占独头巷道断面的40%左右,可见回流区区域大于贴附射流区。

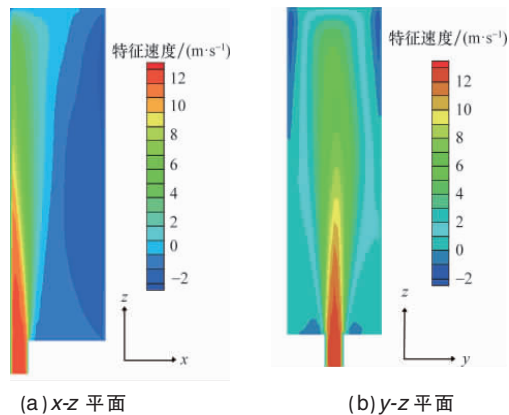


图2 射流中心所在 $x-z$ 平面及 $y-z$ 平面速度场等值线
Fig. 2 Contours of velocity fields in $x-z$ plane and $y-z$ plane of jet center

受限贴附射流沿特定方向的流速分布如图3所示。图3(a)中的黑红两条曲线分别是在出风口轴线和距壁面0.1m处

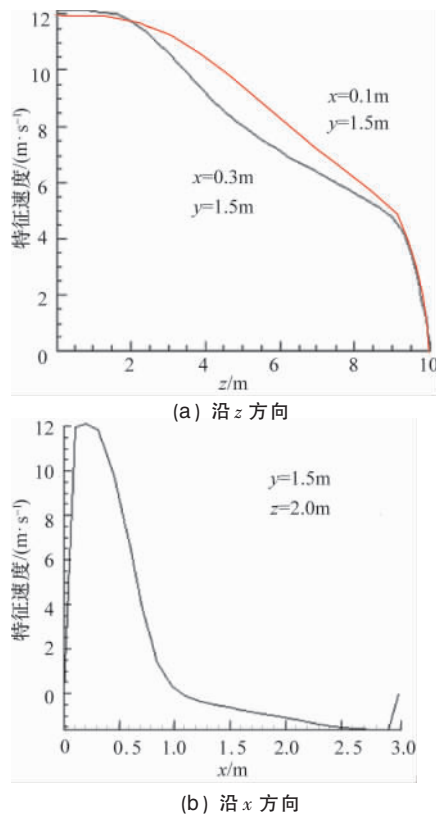


图3 受限贴附射流沿特定方向流速分布
Fig. 3 Velocity distribution of particular direction in wall-attached jet

的流速变化。射流体轴心保持出口速度恒定的一段称为起始段,从图3(a)可以看出,射流起始段长度为2m。射流形成贴附前,射流体轴心在出风口中心;起始段之后,射流体轴心开始转向壁面,形成贴附射流。在图3(a)中特征速度变化曲线有明显的2个拐点,第1个拐点是起始段射流轴心转移到壁面的标志点;第2个拐点是贴附射流逐渐消失并开始形成冲击贴附射流的标志点。

由图3(b)可知,在 $y=1.5m, z=2.0m$ 平面,出风口轴心处 ($x=0.3m$) 速度并非最大,最大速度出现在 $x=0.2m$ 处,该处为贴附射流壁面轴心,表明平面主体段以后,贴附射流壁面轴心速度大于出风口轴心特征速度。

3.2 射流贴附过程

图4为距射流出口不同距离 ($z=0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 9.0m$) 的 $x-y$ 平面的流速等值线,它表明贴附射流形成的过程。起初射流并没有形成贴附,经过一段距离后,逐步形成射流体镜像。在沿巷道走向 $z=2.0m$ 时,射流体开始贴附,贴附半径逐渐变大,贴附圆心逐渐靠近壁面,且圆心在垂直空间内有往上移动的趋势。在 $z=6.0m$ 时,半圆形贴附射流完全形成,此后圆形贴附逐渐变成椭圆形贴附,且由于动能不足以支持射流而贴附形状越来越不规则,射流体开始析出空气,射流体继续发展,并冲击迎头。在 $z=9.0m$ 时形成冲击贴附射流,之后射流体逐渐消失,形成回流。

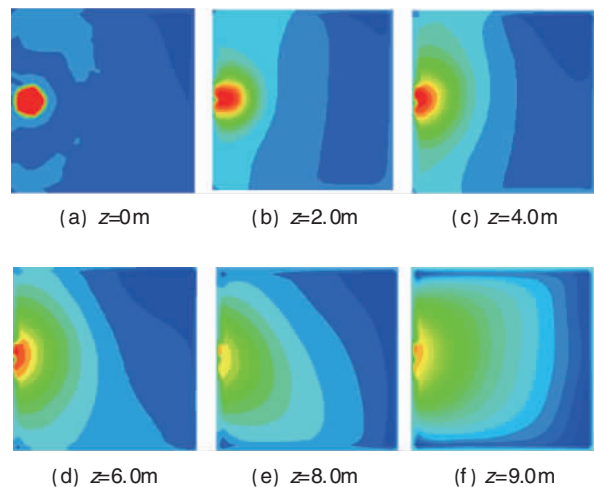


图4 距射流出口不同距离的 $x-y$ 平面特征流速等值线
Fig. 4 Contours of characteristic velocity in $x-y$ plane along the jet outlet

3.3 射流起始段

根据射流理论研究^[9],贴附自由射流起始段长度为 $L=0.471\phi/\alpha=0.471\times 0.6/0.08=3.53m$,其中, α 为射流结构参数,圆形射流取 0.08; ϕ 为风筒出口直径。从图3可以看出,受限贴附射流起始段只有2m左右,这是因为射流空间受限及回流的影响,抑制射流的发展。为研究风筒至独头巷道迎头的距离 l 及巷道断面边长 d 对射流起始段长度的影响,分别选取风筒至掘进迎头不同距离以及不同巷道断面边长进行分析,结果如图5、图6所示。图5表明,在 $l=8\sim 12m$,风筒至掘进迎

头的距离对射流体起始段长度的影响有限。图 6 表明,在 $d=2.8\sim 3.6\text{m}$, 随着巷道断面面积增大,射流起始段长度有所波动,但均为 2m 左右。因此,在矿山工作环境下,射流起始段长度约为 2m 。

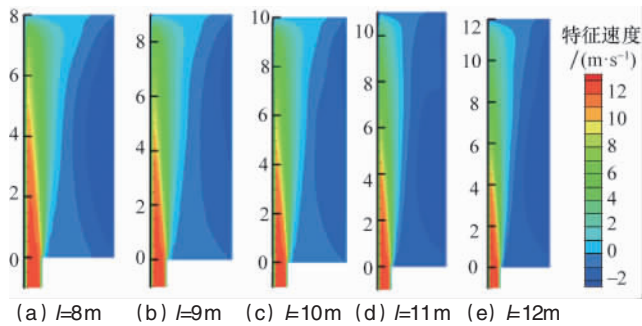


图 5 不同距离下的射流起始段长度

Fig. 5 Initial lengths of jet flow under different distances to the heading face

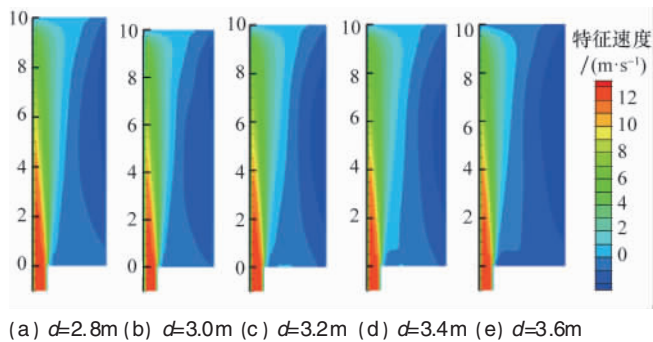


图 6 不同截面边长下的射流起始段长度

Fig. 6 Initial lengths of jet flow under different edge lengths

4 结论

独头巷道压入式贴附射流通风流场除射流体外可分为贴附射流区、冲击射流贴附区和回流区。受限贴附射流起始段长度为 2.0m , 起始段之后射流体开始形成贴附射流, $z=6.0\text{m}$ 时半圆形贴附射流完全形成, 此后圆形贴附逐渐变成椭圆形贴附, 射流体开始析出空气继续发展, 并冲击迎头; $z=9.0\text{m}$ 时形成冲击贴附射流, 此后射流体逐渐消失, 形成回流。

本文研究是建立在矩形截面这种三维空间完全轴对称的前提下, 对于三星拱、梯形截面这类不完全对称的独头巷道尚未研究。因此, 下一步的工作是三星拱、梯形独头巷道掘进压入式通风流场特征数值分析, 以获得能够符合一般地下金属矿山的结论。

参考文献 (References)

[1] 胡汉华. 金属矿矿井热害控制技术[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
Hu Hanhua. Research of heat damage control in metal mining [D].

Changsha: Central South University, 2007.
[2] 王海桥, 施式亮, 刘荣华, 等. 压入式受限贴附射流流场特征及参数计算[J]. 黑龙江科技学院学报, 2001, 11(4): 4-7.
Wang Haiqiao, Shi Shiliang, Liu Ronghua, et al. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2001, 11(4): 4-7.
[3] 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, 63.
Wang Haiqiao, Liu Ronghua, Chen Shiqiang. Engineering Sciences, 2004, 6(8): 45-49, 63.
[4] 管军, 刘祖德, 赵云胜. 独头巷道受限贴附射流特征参数对流场的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(3): 24-28.
Zan Jun, Liu Zude, Zhao Yunsheng. China Safety Science Journal, 2010, 20(3): 24-28.
[5] Jain S, Kumar S, Kumar S, et al. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 160-170.
[6] Qi R F, Ng D, Comnier B R, et al. Numerical simulations of LNG vapor dispersion in brayton fire training field tests with ANSYS CFX[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1-3): 51-61.
[7] Galdo Vega M, Argüelles Díaz K M, Fernández Oro J M, et al. Numerical 3D simulation of a longitudinal ventilation system: Memorial tunnel case [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23 (5): 539-551.
[8] Wang F, Wang M N, Wang Q Y. Numerical study of effects of deflected angles of jet fans on the normal ventilation in a curved tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31(9): 80-85.
[9] Lin Z, Tian L, Yao T, et al. Experimental and numerical study of room airflow under stratum ventilation[J]. Building and Environment, 2011, 46(1): 235-244.
[10] 楼书含. 基于 Fluent 的体育馆建筑火灾烟气流动与控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Lou Shuhan. Study of fire smoke flow and control in gymnasium based on Fluent[D]. Changsha: Central South University, 2011.
[11] 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, 2004.
Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. FLUENT: Fluid engineering simulation calculation: example and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
[12] 王海桥, 施式亮, 刘荣华, 等. 独头巷道贴壁射流通风流场数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 425-428.
Wang Haiqiao, Shi Shiliang, Liu Ronghua, et al. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 425-428.
[13] 赵成龙, 陈喜山. 基于 Fluent 的独头巷道通风降温的数值模拟研究 [J]. 现代矿业, 2011, 2(2): 33-36.
Zhao Chenglong, Chen Xishan. Modern Mining, 2011, 2(2): 33-36.
[14] 庞付兰, 陈玉平, 王伟. 基于 Fluent 模拟的独头巷道通风流场分析[J]. 科技成果管理与研究, 2010, (8): 78-79, 82.
Pang Fulan, Chen Yuping, Wang Wei. Management and Research on Scientific and Technological Achievements, 2010, 8(8): 78-79, 82.
[15] 周谟仁. 流体力学泵与风机[M]. 第 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
Zhou Moren. Fluid mechanical pumps and fans [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.

(责任编辑 韩星明)