

文章编号: 0253-9993(2007)08-0838-04

基于移动参考框架的矿内运输工具活塞风数值模拟

王从陆^{1,2}, 吴超²

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 提出了采用基于移动参考框架的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对矿内运输巷道内的气流组织进行数值模拟. 通过计算流体力学 (CFD) 应用软件 Gambit 和 Fluent 等, 模拟矿内运输工具运动方向与风流方向一致情况下的巷道内空气流场的空间矢量分布情况. 数值模拟结果表明: 巷道内风流组织形式复杂, 各个区域流速差别较大, 与各参数选择有密切关系.

关键词: 矿井通风; 活塞风; 数值模拟; 稳定性

中图分类号: TD721 **文献标识码:** A

Numerical simulation of piston wind due to mine conveyance based on motion reference frame

WANG Cong-lu^{1,2}, WU Chao²

(1. College of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The numerical simulation of air current organization in transport laneway by $k-\varepsilon$ turbulence model based on the motion reference frame was proposed. The spatial vector distributed situation of laneway air flow field, when the movement direction of air current and mine conveyance was consistent, was simulated by Computational Fluid Dynamics (CFD) application software such as Gambit and Fluent. The numerical simulation results show that the form of air current organization is complex; the air current speed difference of each region is big; the concrete form of vector distributed has the close relation with various parameters choice.

Key words: mine ventilation; piston wind; numerical simulation; stability

随着开采深度的增加, 通风线路的增长, 对矿井通风系统的稳定性提出了更高的要求^[1]. 同时, 随着矿山机械化程度和矿井生产能力的提高, 设备段面增大, 运行速度提升, 使矿井活塞风问题变得突出. 在公路、铁路隧道, 地铁空调等工程中对活塞风的研究较多, 而在矿井通风领域中研究不很深入^[2~4]. 基于数学模型矿井活塞风研究可以描述各参量之间的关系, 但无法准确地提供各区域的速度、压力等场的分布, 也不能可视化流场. 然而, 矿井活塞风的压力场、速度场分布情况对于研究矿井活塞风形成原因、作用机制有着极为重要的意义. 在矿井通风方面, 有关学者做了大量有益的尝试, 取得了不少成果^[5~9]. 鉴于此, 可以采用数值计算, 确定各种不同条件下的活塞风大小, 为全面研究矿井通风系统稳定性创造条件. 因此本文选定运输工具运动时运输巷道内矿内大气湍流流动这样一个复杂的三维流动体系作为模拟对象, 通过适当简化, 用计算流体力学 (CFD) 前处理软件 Gambit 建立计算模型, 用 Fluent6.2.16 对其速

收稿日期: 2006-09-29 责任编辑: 毕永华

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目 (06C312)

作者简介: 王从陆 (1972-), 男, 江西万年人, 讲师. Tel: 0733-8290181-8019, E-mail: clu_wang@yahoo.com.cn

度场进行模拟，探讨矿内运输工具运动所形成活塞风的机理及空间特征。

1 主控制方程

在确定主控制方程前，根据巷道运输工具产生的活塞风的实际情况，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 ν_t 作为标量处理；③ 流动为稳态紊流，满足 Boussinesq 假设。考虑是不可压缩气流流动问题，基本控制方程为 Reynolds 方程，省略各变量的时间平均项标志 “-”，紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型，即

连续方程

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

动量方程

$$\frac{du_i}{dt} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\gamma \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right), \quad (2)$$

k 方程

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

ε 方程

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

式中， u_i ， u_j 为速度分量，m/s； x_i ， x_j 为坐标分量； t 为时间，s； f_i 为质量力，m/s²； γ 为系数； k 为紊流动能，m²/s²； ν 为层流动力黏性系数，Pa·s； ν_t 为紊流黏性系数， $\nu_t = c_u k^2 / \varepsilon$ ，Pa·s； G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项， $G_k = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$ ； ε 为紊流动能耗散率，m²/s³； p_k 为修正时均压力，Pa；方程中的其它经验常数 $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.33$ ， $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $c_u = 0.09$ 。对于雷诺应力项 $-\overline{u_i u_j}$ 的封闭问题，采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型来处理。对于稳定状态下的活塞风运动的主控方程，只需把含 dt 的项替换为 0。

2 模型几何及边界条件

2.1 模型几何

运输车辆 在巷道中运动时，在巷道内产生风流，影响巷道内的气流组织，因此，根据巷道活塞风的实际情况，同时为了便于分析，将运输巷道简化为 X ， Y ， Z 的三维巷道空间，取巷道断面为正方形，具体尺寸为 50 m × 3 m × 3 m；运输工具尺寸为 7.95 m × 1.9 m × 2.5 m。在前处理器 Gambit 中构建物理模型，并划分网格。网格划分方案的元素为六面体，类型为 MAP。模型计算域为巷道内气流空间，如图 1 所示。

2.2 求解方法

采用隐式分离三维稳定流求解器，速度采用绝对速度，采用基于体积单元的梯度选项；用 Simplec 算法求解流速和压力耦合；采用压力梯度效益加强墙面处理方式；用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型封闭时均方程；接口黏度系数与密度取相邻节点的算术平均值；压力场采用标准离散方式，其它的采用二阶迎风格式离散。

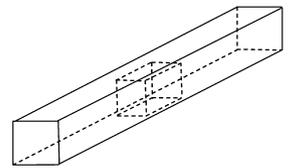


图 1 巷道活塞风三维模型
Fig. 1 Three-dimensional model of piston wind at laneway

2.3 边界条件

风流入口作为模型边界入口, 风流出口作为模型边界出口, 巷道壁面为固定边界. 设入口风流的速度为 3 m/s , 入口风速均匀; 出口的类型为 Outflow; 巷道壁面上施加无滑动边界条件, 壁面以绝热对待, 垂直于壁面的压力梯度为 0; 流体区域的运动类型为移动参考框架, 平移速度为 8 m/s . 采用紊流强度和水利直径指定紊流方法.

3 结果与讨论

根据图 1 所示的计算模型和以上的边界条件和求解方法, 采用计算流体力学前处理软件 Gambit 和计算软件 Fluent6. 2. 16 对井下运输巷道内活塞风三维流场进行了数值计算, 得到巷道运输工具以 8 m/s 的速度运行时产生的活塞风的流场及速度分布. 为了便于进一步了解巷道内各区域的风流组织, 在巷道空间划分了多个特征平面: 平行巷道两帮的平面 (YZ 面) 上含 4 个平面, $X=0, 0.5, 1.0, 1.3 \text{ m}$; 平行巷道底板的平面 (XZ 面) 上含 5 个平面, $Y=0, \pm 0.5, \pm 1.3 \text{ m}$; 巷道横截面 (XY 面) 上含 5 个平面, $Z=0, \pm 4.0, \pm 10 \text{ m}$ (+10 m 截面上的风流速度等高线没有明显的扰动特征, 不予给出). 采用剖面技术处理得到不同区域的速度矢量场, 如图 2 所示.

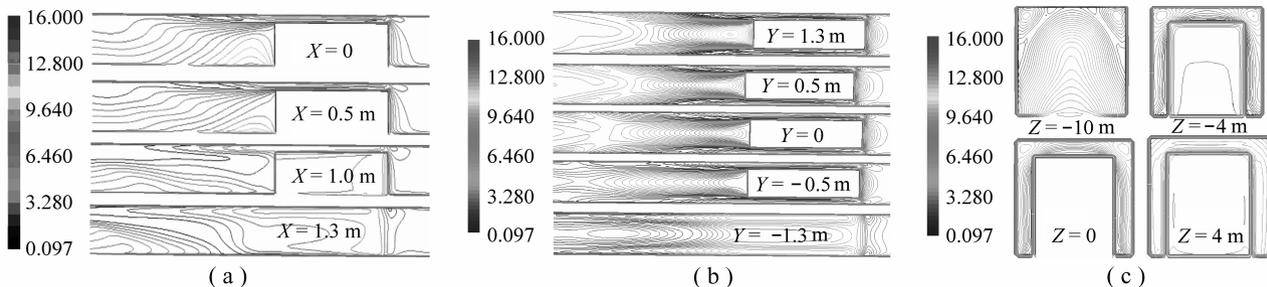


图 2 垂直于 X, Y, Z 轴的典型截面速度等高线 (单位: m/s)

Fig. 2 Velocity contour of typical section uprightness to X, Y, Z direction (unit: m/s)

从 YZ 平面来看 (图 2 (a)), 在风流的入口段, 风流流场较为复杂, 在距运输工具较远的区域, 风流分布变得不规则, 并随距离的变小有一个风速增大的区域. 在运输车辆的正前方, 不存在风流速度为 0 的区域. 在车辆与巷道之间的环型空间, 风流的速度没有急剧增大, 相反存在一个速度降低的区域. 在车辆的前上角部位存在闭合的速度等高线. 运输工具的前方有较大的风流存在, 其大小与列车运行的速度有关, 但作用范围不大, 并快速降低. 在运输工具前方 2 m 左右的区域, 风流变得比较平稳.

在垂直于 Y 轴的截面上 (图 2 (b)), 速度变化趋势更加明显, 由于对称性没有破坏, 各种漩涡发展充分.

在垂直于 Z 轴的截面上 (图 2 (c)), 显示了在运输工具前、后形成的高速区, 这就是由于运输工具运动产生额外的速度流场, 并且运输工具后方的速度明显大于前方的速度. 在运输工具附近的空间中, 接近巷道底板的风流速度大于巷道顶板的风流速度, 并在这个方向上递减. 可见, 运输工具的活塞风主要来源于运输工具后方的诱导风流.

4 结 论

(1) 运输工具运动时, 其前、后方都有一个风流高速区域, 其中后方尺度远远大于前方, 风速是由于运输工具运动而诱导的, 大小与运输工具运行速度、环状空间的大小有关. 对运输工具静止时的模拟结果表明, 高速区域出现在环状空间内, 仅与环状空间的大小有关.

(2) 通过对区域内静压分析可以看出, 运输车辆前方存在一个正压区域, 正压的大小和组织形式与位置有密切关系, 在 X 轴方向上是对称的, 在 Y 轴方向上对称性破坏. 运输车辆后方存在一个负压区域,

运输工具宽度范围内与巷道两帮附近存在明显的区别, 并随位置变化而变化。

(3) 运输巷道轴线方向上: 在运输工具后方, 风流速度在3个方向上都有较大波动。在Z方向上远离运输工具的区域波动小, 而在X, Y方向上, 靠近运输工具的区域变化大, 并在运输工具附近取大值。在运输工具前方, 除运输工具前沿附近区域外, 其它区域速度变化较小, 相对稳定。

参考文献:

- [1] 刘同有. 国际采矿技术发展的趋势 [J]. 中国矿山工程, 2005, 34 (1): 35 ~ 40.
- [2] 蔡波, 李辉亮, 廖光焯. 地铁火灾中强制通风烟控系统作用的模拟 [J]. 中国工程科学, 2005, 7 (8): 80 ~ 83.
- [3] Hargreaves D M, Lowndes I S. The computation modeling of the ventilation flows within in a rapid development driveage [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21 (2): 150 ~ 160.
- [4] 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.
- [5] 高建良, 魏平儒. 掘进巷道风流热环境的数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (2): 201 ~ 205.
- [6] 卢平, 丛北华, 廖光焯, 等. 纵向通风水平隧道火灾烟气流动特性研究 [J]. 中国工程科学, 2004, 6 (10): 59 ~ 64.
- [7] 王海桥, 施式亮, 刘荣华, 等. 独头巷道附壁射流通风流场数值模拟研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (4): 425 ~ 428.
- [8] Jack L B, Cheng C, Lu W H. Numerical simulation of pressure and airflow response of building drainage ventilation systems [J]. Building Service Engineering, 2006, 27 (2): 141 ~ 152.
- [9] Duckworth I J, Lowndes I S. Modelling of auxiliary ventilation systems [J]. Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A), 2003, 112 (2): 105 ~ 113.

书 评

由陈鹏著《中国煤炭性质、分类和利用(第二版)》荣获2004年中国石油和化学工业协会科技进步二等奖, 是一本从煤炭性质入手, 以煤炭分类为主线, 阐述煤炭利用过程中如何选择和开发洁净、有效利用途径的专著, 为读者在中国煤炭资源、性质及分类到有效和洁净利用工程之间架起一座桥梁。重点论述了中国煤炭资源的特性、煤岩组成及其特点、煤质分析、煤的分类和评价方法, 并针对不同种类煤的特性, 分析了煤对各种转化利用的适应性, 阐明了煤性质与分类对焦化、燃烧、气化、液化及对环境影响的指导作用, 进而论述了煤分类学在煤利用工程中的应用。在第一版的基础上, 各个章节都增加了新的内容和国家在煤炭行业及洁净煤技术进展方面的一些重要信息: 如最近公布的国内13个大型煤炭基地; 一些石油替代能源核心技术和洁净煤关键技术的突破情况; 最新的国际煤分类标准ISO 11760和我国创建的煤质国家标准“烟煤黏结指数测定方法”升格为国际标准ISO 15585等。附录中还新增了ISO 15585: 2006硬煤-黏结指数测定方法(第一版)的中译本。本书可供从事煤田地质勘探、煤炭生产及煤炭利用(如冶金、电力、化工、建材、环保)的技术人员以及物资和外贸等方面的科技人员、管理干部和有关高等院校师生阅读参考。