

# Numerical Simulation of the Long Duct Exhaust and Short Duct Forced Ventilation Model Based on Software FLUENT

Conglu Wang<sup>1,2</sup>, Guomin Wu<sup>1</sup>, Gen Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Daye Non-Ferrous Metals Group Holdings Company Limited, Huangshi

<sup>2</sup>School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha

Email: wangconglu@csu.edu.cn

Received: Mar. 26<sup>th</sup>, 2013; revised: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2013; accepted: Apr. 12<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Conglu Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** With resources depletion, part of the old mine efforts to explore the new succeed resources at the peripheral or deeper place. These situations bring about the practical needs of forced ventilation technology of the long distance heading face. Based on the pre-processing software GAMBIT, three-dimensional computational model of the long duct exhaust and short duct forced was set up. By using the commercial CFD software FLUENT, airflow organization of long heading face under the long duct exhaust and short duct forced local ventilation model was simulated. According to this, the paper has elaborated the internal mechanism of the long duct exhaust and short duct forced local ventilation model, and has analyzed the ventilation effect of the classical ventilation parameters model. Studies have shown that: in local forced ventilation mode of the long duct exhaust and short duct forced, the scope of jet was significantly greater than that of exhaust; Duct location layout according to the classical effective parameters range of forced and exhaust is not conducive to the heading face air pollution rapid discharge; The value of speed at the center of laneway was fluctuated and dual-controlled by forced and exhaust; The air volume difference of forced and exhaust determines pollution air discharge time and air quality within the entire laneway. The purpose of this study is to provide theoretical basis and practical guidance to further parameter optimization study on local forced ventilation technology of the long distance heading face.

**Keywords:** Forced Ventilation Technology; Air Flow Organization; Numerical Simulation; Parameter Optimization

## 基于 FLUENT 的长抽短压强制通风技术数值模拟

王从陆<sup>1,2</sup>, 吴国珉<sup>1</sup>, 王根<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大冶有色控股集团有限公司, 黄石

<sup>2</sup>中南大学资源与安全工程学院, 长沙

Email: wangconglu@csu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 3 月 26 日; 修回日期: 2013 年 4 月 2 日; 录用日期: 2013 年 4 月 12 日

**摘要:** 矿山资源的枯竭, 促使老矿山努力在周边或深部探寻新的接替资源, 形成了对长掘进工作面局部强制通风技术的现实需求。本文使用前处理软件 GAMBIT 建立了长压短抽三维计算模型。本文采用计算流体力学的商业软件 FLUENT, 模拟了长掘进工作面长抽短压局部通风方式下的工作面风流组织, 阐述了长抽短压通风方式的内部机制, 分析了经典参数模型下的通风效果。研究表明: 在长抽短压的局部通风方式下, 射流作用域明显大于吸程作用域; 根据经典的有效射程和有效吸程参数布置的风筒位置, 不利于掘进工作面污风的快速排出; 巷道中心位置上的速度大小波动较大, 受入口射流和风流出口双重控制; 压风量和抽风量的差值决定了整个掘进巷道内的污风排出时间和空气质量。研究成果可以为长掘进工作面局部强制通风技术参数优化提供理论依据和实践指导。

**关键词：**强制通风；风流组织；数值模拟；参数优化

## 1. 引言

掘进通风由于没有形成一个完整的通风回路，不能采用矿井主要通风机的全风压通风，而通常采用局部通风机强制通风，其影响环节比较多，所以在井下存在的问题较多。历年的事故统计表明，掘进工作面是事故的多发区。因此，掘进工作面是矿井通风的薄弱环节。掘进工作面存在的问题主要体现在：掘进工作面风量不足，不能满足生产要求；局部通风机产生循环风；局部通风机无计划停风；巷道贯通后不能及时调整通风系统等<sup>[1-4]</sup>。

2002年10月15日，温家宝同志在新中国地质工作50年暨中国地质学会成立80周年纪念大会上讲话指出：“随着我国经济持续快速增长，全国45种主要矿产中一半以上的资源储量消耗速度大于储量增长速度，特别是东、中部地区，过去耳熟能详的老矿山资源枯竭，成为一批危机矿山。在有市场需求和资源潜力的老矿山周边或深部，努力探寻新的接替资源，具有经济、社会双重效益，是当前一项相当紧迫的任务。”这一讲话使部分资源的枯竭矿山中的长掘进通风成为现实。因此，开展长掘进工作面局部强制通风技术成为部分矿山的现实需求。

对于长掘进工作面局部强制通风技术，以往研究的重点为通风除尘工艺研究、掘进通风用风机和风筒的改进、自动控制技术的应用等，历史研究难以准确提供各区域的速度场和压力场分布，也不能可视化流场。导致对掘进工作面局部强制通风各参数的作用机制全局理解的缺失。近年来，商用CFD软件已经相当成熟，用计算流体力学(CFD)的方法，对流动问题进行数值模拟计算已经成为研究流动问题的重要手段。实践表明，这种数值计算方法能够得出很准确的计算结果<sup>[5-16]</sup>。本文以长掘进工作面局部强制通风巷道内矿内大气湍流流动的三维流动体系作为模拟对象，通过适当简化，用计算流体力学软件(CFD)前处理软件gambit建立计算模型，用fluent对其速度、压力场进行模拟，从射流作用域、风筒位置参数和巷道内风流等方面探讨了长掘进工作面局部强制通风的机理及空间矢量特征。

通过对长掘进工作面长压短抽局部通风方式下

的工作面流场的模拟和分析，得到如下结论：

1) 长压短抽的局部通风方式下，射流作用域明显大于吸程作用域。两者的作用明显不同：射流用于冲散、扰动污风区；排风口用于把污风快速抽离掘进面。

2) 有效射程和有效吸程参数，不是风筒的布置参数。若采用有效射程计算压风筒出口位置，工作面可能形成涡流，不利于掘进工作面污风的快速排出。具体参数需要综合考虑风筒尺寸和出口风速，建议压风出口距离工作面5~6m为宜。

3) 巷道中心位置上的速度大小波动较大，受入口射流和风流出口双重控制，且入口射流的影响广度和深度相对较大。

4) 压风量和抽风量的差值决定了巷道内风流的流向，进而决定了整个掘进巷道内的污风排出时间和巷道内的空气质量。

## 2. 计算流体力学数值模拟方法

### 2.1. 主控制方程

长掘进工作面局部强制通风过程中，空气流动为湍流黏性流动，在其流速比较低，计算过程中可以忽略空气密度的变化和热量交换。在计算过程中假设：

1) 通风气流可视为不可压缩流体；2) 流动为稳态紊流，满足Boussinesq假设；3) 流体的紊流粘性具有各向同性<sup>[5]</sup>。

基本控制方程为Reynolds方程，包括连续性方程和动量方程，紊流模型采用k-ε双方程模型，具体方程如下：

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：

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

$\varepsilon$  方程:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} p - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中:  $D$  为微分符号;  $k$  为紊流动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为紊流动能耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u_i$ 、 $u_j$  为速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $x_i$ 、 $x_j$  为坐标分量;  $\nu$  为层流动力粘性系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $p$  为修正时均压力,  $\text{Pa}$ ;  $f_i$  为质量力,  $\text{m/s}^2$ ;  $\nu_t$  为紊流粘性系数,  $\nu_t = c_u k^2 / \varepsilon$ ,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\gamma$  为系数;  $G_k$  为平均速度梯度引起的紊动能产生项; 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。对于稳定状态下的主控方程, 只需把含  $Dt$  的项替换为 0。

## 2.2. 模型几何

为了强化长掘进工作面局部强制通风的效果, 研究采用长压短抽的通风方式。风筒布置位置根据有效射程和有效吸程确定。局部风机运转时, 在掘进工作面内诱导产生风流, 影响巷道内的气流组织, 因此, 根据掘进工作面通风的实际情况, 同时为了便于分析, 将掘进工作面简化为 X、Y、Z 的三维巷道空间, 取巷道断面为正方形, 具体尺寸为:  $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 40\text{ m}$ , 风管采用矿山常用的规格  $\Phi 600\text{ mm}$ , 对角悬挂。构建计算模型如图 1 和图 2。

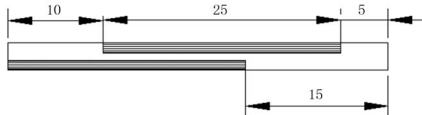


Figure 1. Longitudinal section of long duct forced and short duct exhaust three-dimensional model  
图 1. 长压短抽三维模型纵断面

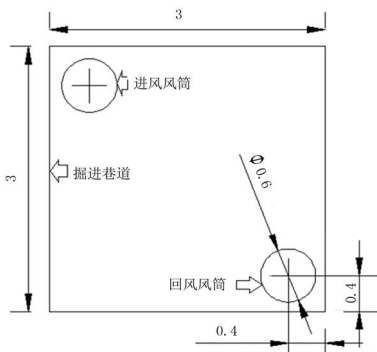


Figure 2. Cross-section of longitudinal section of long duct forced and short duct exhaust three-dimensional model  
图 2. 长压短抽三维模型横断面

## 2.3. 求解方法和边界条件

求解器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; 接口粘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。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  $10\text{ m/s}$  和  $-6\text{ m/s}$ , 入口风速均匀; 出口的类型为出流; 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; 采用紊流强度和水利直径指定紊流方法。

## 3. 模拟结果和讨论

### 3.1. 模拟结果

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 *fluent* 对掘进通风三维流场进行了数值计算, 得到对应的速度分布。为了更好的显示断面的速度和压力场, 采用剖面处理技术, 构建了 5 个特征平面和 1 条特征线: 平面 1(过两风筒中心); 平面 2(离掘进面 1 m); 平面 3(离掘进面 3 m); 平面 4(离掘进面 5 m); 平面 5(离掘进面 7 m); 特征线为巷道中心线。模拟结果见图 3, 图 4 和图 5。

### 3.2. 结果讨论

从掘进巷道的对角截面来看(图 3), 风流压入口处的速度较大。在压风射流的诱导下, 在周围形成诱导风流, 向掘进面扩散, 速度大小递减方, 其影响范围较大。在抽出的进风口, 形成较为集中的回风, 速度递增, 梯度较大, 其影响范围较小。此现象与有效射程和有效吸程的概念相吻合。靠近掘进面处形成涡流, 涡流强度与压入风流的速度大小密切相关。入口射流两侧形成低速区。掘进面的污风通过紊流扩散的方式从抽出式风管和巷道排出。从图 3 中还可以看出, 进口风流射流形态受到风流出口的影响, 流场中心区域发生了偏移, 不利于风流达到掘进面。

压入式通风有效射程的  $L_s = (4 \sim 5)\sqrt{S}$ , 本实例

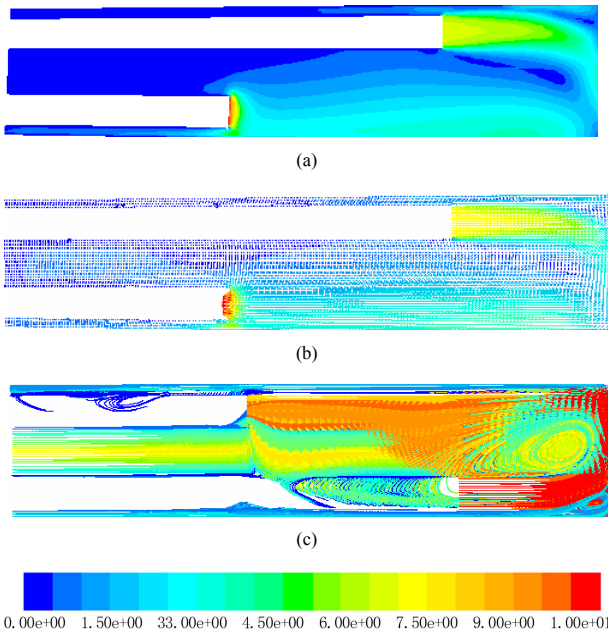


Figure 3. Air field of characteristic plane with the two duct center: (a) Velocity contour of characteristic plane; (b) Velocity vector of characteristic plane; (c) Flow line of characteristic plane  
图 3. 风筒中心特征平面流场分布: (a) 特征面上的速度等高线; (b) 特征面上的速度矢量; (c) 特征面上的流线

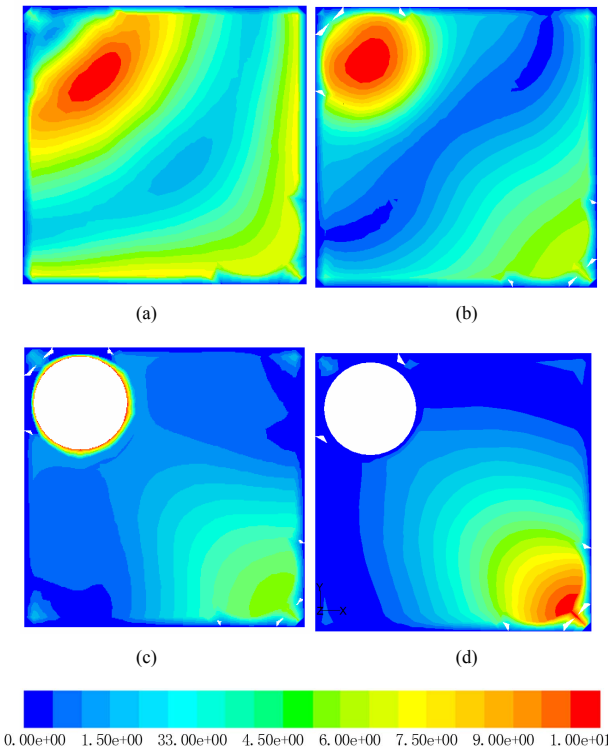


Figure 4. Velocity contour of characteristic plane: (a) 1 m away from the excavation face; (b) 3 m away from the excavation face; (c) 5 m away from the excavation face; (d) 7 m away from the excavation face  
图 4. 特征平面速度等高线: (a) 离掘进面 1 m; (b) 离掘进面 3 m; (c) 离掘进面 5 m; (d) 离掘进面 7 m

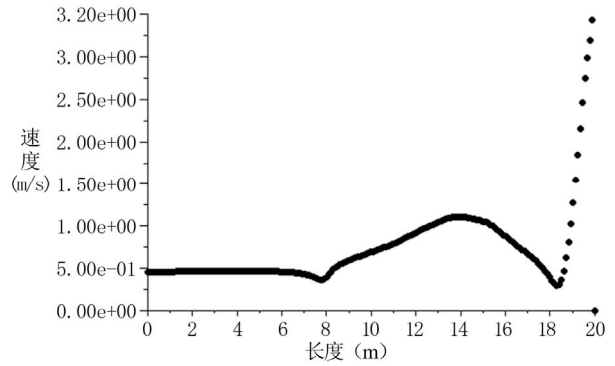


Figure 5. Velocity at laneway center  
图 5. 巷道中心速度

中的巷道断面面积为  $9 \text{ m}^2$ ，有效射程为 12~15 m，如果压风筒出口离工作面 15 m，会在作业面壁面附近产生涡流，不利于粉尘和有害气体的排出。因此，有效射程的概念并不是布置风筒出口位置的有效参数，而是给出了一个大体的范围。具体参数需要综合考虑风筒尺寸和出口风速，建议压风出口距离工作面 5~6 m 为宜。

从垂直于巷道轴线的平面来看(图 4): 离掘进面 1 m 处(图 4(a))，由于受到掘进面壁面的影响，风流速度和变化梯度较小，入口风流的射流效果基本消失，流动相对平稳；在离掘进面 3 m 处(图 4(b))，掘进面壁面的影响减小，风流速度趋大，速度梯度明显增大，流动相对平稳；在抽出式风流的入口处(图 4(c))，其周边的风流流速较大，压风侧射流发展充分，并在诱导风流的作用下风流扰动区域变大。在压风口和出风口之间(图 4(d))，由于有效吸程尺度小于有效射程，整个区域流场形态受压风作用控制，射流和诱导风流是该区域的主导流场。

从巷道中心线上速度分布情况来看(图 5)，该线上的速度大小波动较大，受入口射流和风流出口控制。在远离速度入口处的区域，速度较小。在入口射流附近，由于受到射流的诱导，巷道中心区域流场受到影响，并随射流发展逐渐增大。由于射流同原有区域存在一个区域分界面，导致巷道中心线上的速度变小，局部地方趋于 0。由于抽出风流在射流的吸引作用，导致入口射流中心发生偏移，通过巷道中心，因此，出现一个速度急剧变化的区域，其最大值就是在该处的射流中心的速度值。在接近掘进面处，射流作用消失。该流域是射流形成的诱导风流主导的区域，以涡流的形式存在。掘进面的粉尘以紊流扩散和紊流变形

的方式排除工作面。

#### 4. 结论

通过对长掘进工作面长压短抽局部通风方式下的工作面流场的模拟和分析,得到如下结论:

1) 长压短抽的局部通风方式下,射流作用域明显大于吸程作用域。两者的作用明显不同:射流用于冲散、扰动污风区;排风口用于把污风快速抽离掘进面。

2) 有效射程和有效吸程参数,不是风筒的布置参数。若采用有效射程计算压风筒出口位置,工作面可能形成涡流,不利于掘进工作面污风的快速排出。具体参数需要综合考虑风筒尺寸和出口风速。

3) 巷道中心位置上的速度大小波动较大,受入口射流和风流出口双重控制,且入口射流的影响广度和深度相对较大。

4) 压风量和抽风量的差值决定了巷道内风流的流向,进而决定了整个掘进巷道内的污风排出时间和巷道内的空气质量。

#### 参考文献 (References)

- [1] 程卫民, 聂文, 姚玉静. 综掘工作面旋流气幕抽吸控尘流场的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1342-1348.
- [2] 张红婴, 林和荣. 长距离独头掘进巷道通风技术应用研究进展[J]. 江西有色金属, 2008, 22(4): 8-10.
- [3] 周刚, 程卫民, 陈连军. 综放工作面粉尘浓度空间分布规律的数值模拟及其应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2094-2099.
- [4] 高建良, 郭飞鹏, 张学博. 工作面通风方式对采空区风流流场和瓦斯运移的影响[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(5): 168-171.
- [5] 王从陆, 吴超. 基于移动参考框架的矿内运输工具活塞风数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 839-841.
- [6] 黄亚东, 吴珂, 黄志义等. 长隧道火灾烟气运动三维数值模拟[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(9): 777-780.
- [7] 彭锦志, 徐志胜, 倪天晓等. 公路隧道集中排烟系统流速分布规律数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(4): 415-422.
- [8] 赵建会, 李磊. 非对称翅片管换热器最佳管中心位置的数值分析[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(4): 403-407.
- [9] 张建卓, 高猛, 祝天姿等. 矿用轴流通风机 NACA 翼型仿真试验[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1222-1226.
- [10] 胡文斌, 刘丽娜. 半地下变电站室内通风与气流组织分析[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2011, 11(5): 168-171.
- [11] 王松岭, 孙哲, 吴正人等. 基于流固耦合的离心通风机叶轮强度研究[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(4): 81-85.
- [12] W. Marcum, B. Woods and B. Ackson. Numerical flow benchmark model of advanced test reactor fuel element using FLUENT. Transactions of the American Nuclear Society, 2009, 100(8): 683-686.
- [13] J. Y. Chen, X. Q. Fan and Z. Liu. Fluent based numerical analysis of eliminating ultra-limit gas in upper corner by using rotary jet fan advanced materials research. Advanced Manufacturing Systems, 2011, 201(3): 2212-2215.
- [14] O. S. Asfour, M. B. Gadi. Using CFD to investigate ventilation characteristics of vaults as wind-inducing devices in buildings. Applied Energy, 2008, 85(12): 1126-1140.
- [15] K. S. Nikas, N. Nikolopoulos and A. Nikolopoulos. Numerical study of a naturally cross-ventilated building. Energy and Buildings, 2010, 42(4): 422-434.
- [16] F. Patania, A. Gagliano, F. Nocera, et al. Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades. Energy and Buildings, 2010, 42(7): 1148-1155.