

巷道内粉尘二次飞扬规律的数值模拟研究

张大明¹, 马云东²

(1. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁阜新 123000;

2. 大连交通大学, 辽宁大连 116028)

摘要: 针对巷道中沉积粉尘二次飞扬的现象, 利用数值模拟的方法对粉尘二次飞扬进行了研究, 分析了巷道内粉尘二次飞扬的极限风速与扬尘粒径之间的关系, 从而为矿井通风除尘提供一定参考依据, 给矿井工人创造良好的工作环境。

关键词: 沉积粉尘; 二次飞扬; 数学模型; 离散相模型; 数值模拟

中图分类号: X773

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2010)02-0010-03

STUDY ON THE SECONDARY FLYING OF DUST WITHIN NUMERICAL SIMULATION IN ROADWAY

ZHANG Da-ming¹, MA Yun-dong²

(1. College of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: In view of the phenomenon of the secondary flying for deposit dust in the roadway. The author applies numerical simulation method to study secondary flying for dust, which analyses the relationship between the limit wind speed and the dust particle size in the state of secondary flying of dust. The research provides a reference for dedusting, so as to create a good working environment for miners.

Keywords: deposit dust; secondary flying; mathematical models; dispersed phase models; numerical simulation.

0 引言

在矿井巷道中, 由于在煤炭运输过程中以及顶板掉渣和浮游粉尘的沉降, 会导致巷道的底板和周边都沉积了一定量的粉尘。当风速过大时, 沉积的粉尘可能被重新扬起, 随风漂移, 增加了空气中粉尘的浓度。粉尘不仅会引发工人的尘肺病, 而且会造成煤尘爆炸、损坏设备、降低能见度等许多危害。因此, 研究巷道中粉尘二次飞扬的规律对治

理粉尘、减少粉尘危害具有重要的意义。

本文选择一段矩形巷道做为研究对象, 采用离散型模型对巷道中沉积煤尘进行模拟, 用GAMBIT软件建立其几何模型并划分计算网格, 用国际上比较先进的FLUENT软件对巷道粉尘二次飞扬规律进行解算, 并从模拟结果中总结巷道内粉尘二次飞扬的规律。

1 气流场数学模型的建立

对于所有的流动, 都需要解质量守恒方程和动量守恒方程。对于包括热传或可压性的流动, 需要解能量守恒的附加方程^[1]。

1.1 简化假设

收稿日期: 2009-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50674052)

第一作者简介: 张大明(1979-), 男, 辽宁沈阳人, 讲师, 博士研究生。主要从事煤矿灾害控制等领域的研究工作, 0418-3350470

在建立流体相的数学模型时,对气体流动做如下的假设:

(1)在井下正常工作状态下,假设一些风门开关、机械设备运行、人员走动等情况不对风流造成影响,只研究风流稳定流过时的状态,因此假定风流流动是稳态。

(2)尽管气体的可压缩性与液体相比大得多,在研究气体时,应该考虑温度与压强对气体的体积和密度的影响,但当压强变化不大时,通常可忽略可压缩性的影响,按不可压流体来处理,其结果也是足够精确的^[5]。同时,由于流动时间很短,温度的影响可以忽略。所以,为了简化计算,假设流体为不可压缩流体。

(3)由于气体重力引起的风流速度变化与流场中的风流速度值相比是很小的,因此假设重力的影响可以忽略。

1.2 质量守恒方程

任何流动问题都必须满足质量守恒定律。该定律可表述为:单位时间内流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。按照这一定律,可以得出质量守恒方程(mass conservation equation):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 是密度, t 是时间, u 是速度矢量, u 、 v 和 w 是速度矢量 u 在 x 、 y 和 z 方向的分量。

1.3 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为:微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。该定律实际上是牛顿第二定律。按照这一定律,可导出 X 、 Y 和 Z 三个方向的动量守恒方程^[6](momentum conservation equations)。

引入矢量符号

$div(a) = \partial a_x / \partial x + \partial a_y / \partial y + \partial a_z / \partial z$,则:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + div(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + div(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + div(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

式中, p 是流体微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{yy} 和 τ_{zz}

等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 t 的分量; F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的体积力,若体积力只有重力,且 z 轴竖直向上,则 $F_x = 0$, $F_y = 0$, $F_z = -\rho g$ 。

2 颗粒相的数学模型

目前,用于研究多相流的方法有欧拉-拉格朗日法和欧拉-欧拉法。本文采用的是欧拉-拉格朗日法。

2.1 颗粒相简化假设

在计算流场内颗粒运动时做如下假设^[2]:

(1)流场中的所有颗粒均视为球体,并有相同的密度;

(2)颗粒的密度远大于流体的密度;

(3)计算颗粒相为稀相,因此忽略颗粒与颗粒之间的碰撞,但考虑颗粒与壁面的碰撞。

(4)巷道内流场边界和流体内部无强大热源,空气温度变化不大,可忽略热交换,看作定常等温场。

2.2 模型的边界条件

当建立求解流体和颗粒流动特性微分方程后,要进行计算从而得到方程确定的解,还必须设定求解的边界条件。

(1)连续相边界条件:FLUENT软件提供了十余种进、出口边界条件,包括速度入口、压力入口、质量入口、压力出口、壁面等。本文给定了巷道的进口为速度口(velocity-inlet)边界条件,出口为出流(outflow)边界条件^[3]。

(2)离散相边界条件:在FLUENT中,对于离散相而言,其边界条件的设定有三种不同情况:“reflect”、“escape”和“trap”边界条件。本文给定了巷道的壁面为“reflect”边界条件并设定弹性恢复系数,出口设为“escape”边界条件。

3 巷道内粉尘飞扬的数值求解特征

对于巷道内粉尘飞扬的数值模拟,本文所采用的求解特征设置如下:

(1)使用3D分离式求解器,流动按稳态问题处理。

(2)不考虑热交换,即屏蔽能量方程。

(3)使用standard湍流模型。

(4)压力-速度耦合方式采用SIMPLE解法,使用默认的欠松弛因子。

(5)边界条件:连续相使用速度进口和出流条件;离散相使用 reflect 和 escape。

(6)各控制方程的离散格式均用二阶迎风格式。

(7)启动所有求解变量的参差监视功能,收敛判据均为 0.0001。

(8)后处理环节显示压力等值线、速度矢量图、颗粒轨迹图、湍流强度图等。

4 输煤系统粉尘运移物理模型

采用矩形巷道模型,基本数据为:巷道长度 50 m,宽度 3.5 m,高度 3 m,流体连续相为空气,其密度为 1.225 kg/m^3 ,温度为 300 K,粘性系数为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,离散相为煤粉,密度为 1000 kg/m^3 ,质量流速 $1 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$ 。风流从巷道左侧入口进入,从右侧出口流出。模型如图 1 所示,网格划分后如图 2 所示。

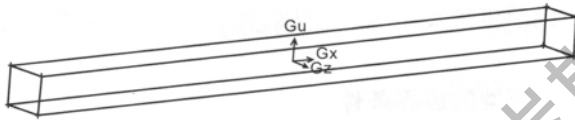


图1 巷道模型

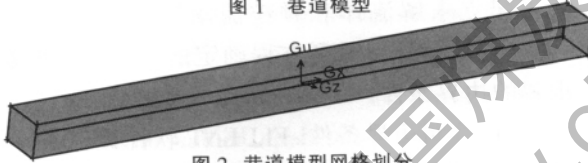


图2 巷道模型网格划分

巷道内的风流速度由井下实际需要风量确定,根据《煤矿安全规程》规定,在巷道内风速限制在 $0.25 \sim 8.0 \text{ m/s}$ 范围内。所以本文选取了其中 3 个有代表性的风流速度做为考察对象,分别为 1.5 m/s 、 3.0 m/s 、 6.0 m/s 。其雷诺数与湍流强度分别由式(5)和(6)确定^[4]:

$$\text{雷诺数: } Re = \frac{\rho U D_H}{\mu} \quad (5)$$

式中: D_H -- 巷道的水力直径;

ρ -- 空气的密度;

u -- 风流的速度;

μ -- 风流的粘性系数。

其中:

$$D_H = 4 \times \frac{\text{流通面积}}{\text{润湿周长}}$$

湍流强度可以用下面的经验公式计算

$$I = u' / \bar{u} = 0.16(Re)^{-1/8} \quad (6)$$

在各种风速条件下,风流的雷诺数与湍流强度的计算值见表 1。

表 1 各气流速度下的质量流量、雷诺数与湍流强度

气流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	雷诺数	湍流强度 / %
1.5	331682.408	3.27
3.0	663364.816	2.995
6.0	1326729.63	2.75

1.5、3.0、6.0 m/s 风速下不同粒级粉尘粒子模拟(跟踪轨迹图)略。

5 结论

(1)在 1.5 m/s 的风速下,铺设在巷道底板上粒径小于 $50 \mu\text{m}$ 的粉尘粒子被风流吹扬起来,而粒径为 $75 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 的粒子只有少量被风流吹扬起来,说明个别粒子受到粒子之间的撞击力而飞扬起来。

(2)在 3.0 m/s 的风速下,小于 $50 \mu\text{m}$ 的粉尘粒子被风流吹扬起来,而粒径为 $75 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 的粒子只有少量被风流吹扬起来,当粒径达到 $115 \mu\text{m}$ 时,粉尘粒子没有飞扬起来,说明当粒径增大时,风流提供给粒子与粒子之间的撞击力不足以克服自身的重力而不能飞扬起来。

(3)在 6.0 m/s 的风速下,小于 $75 \mu\text{m}$ 的粉尘粒子被风流吹扬起来,而粒径为 $100 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$ 的粒子只有少量被风流吹扬起来,说明当风速足够大时,风流除了提供给粒子的悬浮力外,还受到粒子之间的撞击力,合力足以克服自身的重力而飞扬起来。

(4)当风速足够大时,巷道内沉积的粉尘粒子会飞扬起来,污染整个空间,因此及时清扫巷道墙壁是防止沉积粉尘二次飞扬的重要工作。

参考文献:

- [1] 贾惠艳. 皮带输煤系统转载点粉尘析出逸散规律及数值模拟研究[D]. 辽宁工程技术大学博士论文, 2007.06.
- [2] 李立. 撞击流吸器流动特性的三维数值模拟研究[D]. 长沙理工大学工程硕士论文, 2008.03.
- [3] 王晓珍, 蒋仲安等. 煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2007.04.
- [4] Dawes, J.G. and Slack, A. Deposition of Airborne Dust In A Wind Tunnel [D], SARE Research Report, NO.105, 1954.
- [5] Bhaskar R. and Ramani, R.V., Behavior of Dust Clouds In Mine Airways[J], SME Transactons, Vol.280, 1986.
- [6] 于勇 主编. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京理工大学出版社, 2008.09.