

综采工作面粉尘运动规律的数值模拟

刘毅^{1,2)} 蒋仲安¹⁾ 蔡卫¹⁾ 周凤增³⁾ 郭达³⁾ 刘宝东³⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 国家安全生产监督管理总局信息研究院, 北京 100029

3) 开滦(集团)有限责任公司, 唐山 063018

摘要 运用气固两相流动理论, 建立粉尘运动的数学模型. 根据综采工作面的具体特点和实测数据, 采用计算流体力学的 FLUENT 软件, 对工作面的粉尘运动规律进行数值模拟. 模拟结果显示, 粉尘产生后多数随风流在煤壁一侧运动, 少数粉尘随机扩散. 综采工作面的除尘重点应该放在采煤机下风向 10 m 以内的煤壁一侧; 预湿煤壁对降低工作面粉尘浓度也有很大作用.

关键词 综采工作面; 粉尘; 运动规律; 气固两相流; 数值模拟

分类号 TD 714.2

随着采煤机械化水平的提高, 井下工作面的粉尘产量也越来越大. 采煤工作面、掘进工作面、锚喷支护以及转载运煤是煤矿生产中主要的产尘场所, 其中 60% 的粉尘来自采煤工作面. 在无防尘措施的情况下, 综采工作面的粉尘浓度可以达到 $2\ 500 \sim 3\ 000\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 即使采取除尘措施, 一些工作面的工作条件粉尘浓度也可达到 $1\ 000\ \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上, 大大超过国家有关卫生标准, 不仅严重的威胁着煤矿工人的安全和健康, 还有煤尘爆炸的危险^[1]. 采取有效措施, 降低综采工作面粉尘浓度对于煤矿来说已是迫在眉睫的问题. 要取得较好的防尘效果, 首先要对粉尘的运动规律有所了解. 本文提出粉尘运动的数学模型, 对工作面浓度分布进行了数值模拟, 其结果对现场的防尘工作有着理论上的指导意义.

1 粉尘运动的数学模型

离散相模型(discrete phase models)属于欧拉-拉格朗日型模型, 即用欧拉观点描述气相流场, 而用拉格朗日观点描述颗粒的运动. 在本文计算中, 连续相流场采用 Navier-Stokes 方程进行计算, 颗粒的轨迹跟踪则由离散相模型完成. 计算两相流时, 定义气体是连续相, 颗粒是离散相.

首先通过连续相计算获得流场的速度、湍流动能等信息, 然后再在拉格朗日坐标下对单个颗粒的轨迹积分, 考虑颗粒在连续相流场中受力和湍流扩

散等物理过程后, 最终可以得到单个颗粒的轨迹. 计算大量的颗粒轨迹就可以获得颗粒运动的统计规律, 从而得出离散相的浓度分布^[2-3].

1.1 气体流动的数学模型

通过一定的假设, 将工作面的气相流动简化为定常不可压的绝热流动, 则气相流动控制方程组采用三维稳态不可压 Navier-Stokes 方程, 湍流流动采用工程上应用最广的标准 $k-\epsilon$ 双方程模型, 方程组的具体形式如下^[4].

连续方程:

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

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{\epsilon 1} \epsilon}{k} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中,

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

式中, x_i, x_j 为 x, y, z 方向上坐标 ($i \neq j$); $m; u_i, u_j$ 为 x, y, z 方向上速度 ($i \neq j$), $m \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为气体密

收稿日期: 2006-01-04 修回日期: 2006-06-26

基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划 (No. XK100080432); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50174004)

作者简介: 刘毅(1980-), 男, 硕士研究生; 蒋仲安(1963-), 男, 教授, 博士生导师

度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; P 为湍流有效压力, Pa ; μ 为层流粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G_k 为剪切力变化产生湍动能变化率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$; k 为湍动能, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; ϵ 为湍动能耗散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$; $C_{\epsilon 1}$ 、 $C_{\epsilon 2}$ 、 C_p 、 σ_ϵ 、 σ_k 为 $k-\epsilon$ 模型中的常数, 分别取 1.44、1.92、0.09、1.3、1.0.

1.2 离散相的数学模型

离散相模型通过积分拉格朗日坐标下颗粒作用力的微分方程来求解颗粒的轨道, 颗粒相的作用力平衡方程为^[5-7]:

$$m_p \frac{d u_p}{dt} = \sum F = F_d + F_g + F_f + F_x \quad (7)$$

式中, m_p 为颗粒质量, mg ; u_p 为颗粒运动速度; $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\sum F$ 为颗粒所受合力, N ; F_d 为颗粒所受阻力, N ; F_g 为颗粒所受重力, N ; F_f 为颗粒所受浮力, N ; F_x 为颗粒所受其他作用力, N ; 包括附加质量力、Magnus 升力、热泳力、Saffman 升力、布朗力等, 文中忽略不计.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d C_\varphi A_p \rho (u - u_p) |u - u_p| \quad (8)$$

式中, C_d 为阻力系数; C_φ 为动力形状系数, 根据分散度实验数据, 此处取 1; A_p 为颗粒的迎风面面积, m^2 ;

阻力系数 C_d 与颗粒的雷诺数有关:

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (9)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (10)$$

式中, Re_p 为雷诺数, 量纲为 1; a_1 、 a_2 、 a_3 对于球形颗粒, 在一定的雷诺数范围内为常数; d_p 为颗粒直径, m .

除了受到阻力、重力和浮力外, 颗粒在湍流中运动, 其轨迹还要受湍流作用的影响, 湍流与颗粒之间的相互作用可以用随机轨道模型进行计算, 该模型根据 Reynolds 平均法, 将气流的时速度 u 写成平均量 \bar{u} 与脉动量 $u'(t)$ 之和.

$$u = \bar{u} + u'(t) \quad (11)$$

假定颗粒与湍流之间的相互干扰过程等价于颗粒与一系列小旋涡的干扰过程, 并且在每个小旋涡上速度的脉动分量满足高斯分布, 计算颗粒轨迹所用的 $u'(t)$ 在每个小旋涡上为一个常数, 即 $u'(t)$ 为小旋涡脉动速度一个样本, 假定其满足高斯概率分布:

$$u'(t) = \zeta \sqrt{u'^2} \quad (12)$$

式中, ζ 为服从正态分布的随机数; $\sqrt{u'^2}$ 为脉动速度的均方根, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

对于 $k-\epsilon$ 模型, 假设当地湍流各项同性有:

$$\sqrt{u_i'^2} = \sqrt{u_j'^2} = \sqrt{u_k'^2} = \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (13)$$

这样通过将瞬时速度在分段时间内积分就可以计算湍流对颗粒扩散的随机性影响.

颗粒轨迹方程是在离散的时间步长上逐步进行积分运算求解的. x 方向上颗粒的运动轨道通过下式可以得到:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (14)$$

沿不同坐标进行积分, 就可得到颗粒在三维空间内的运动轨迹.

以上就是计算单个颗粒运动轨迹的计算模型, 通过此方法计算足够多的代表性颗粒轨迹, 就可以得出颗粒的运动规律以及在连续相中的分布情况.

2 粉尘粒径分析

在开滦集团唐山矿 T₂194 工作面采煤机割煤时沿程取五个样品^[8], 通过 SEISHIN LMS-30 型激光衍射散射式粒度分布测定仪测得粉尘的粒径分布: 在工作面中漂浮不易沉降的粉尘平均粒径 8~12 μm , 最大粒径约为 100 μm , 详细粉尘粒径分布如图 1 所示.

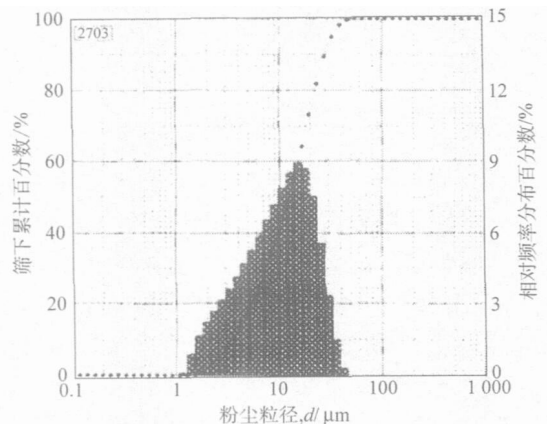


图 1 唐山矿 T₂194 综采工作面粉尘粒径分析图

Fig. 1 Particle size distribution of dust in T₂194 coal face of Tangshan Coal Mine

多数生产过程中粉碎产生的粉尘符合 Rosin-Rammler 分布, 通过最小二乘法回归分析和显著性检验发现, 工作面割煤产生也较好地遵从 Rosin-

Rammler 分布^[9], 分布率为:

$$R(d) = 100 \exp(-0.00619 d^{2.15}) \quad (15)$$

3 数值模拟结果

本文使用 GAMBIT 建模并划分计算网格, 用 CFD 软件 FLUENT 6.1 作为解算器, 根据唐山矿的 T₂194 综采工作面特点和相关数据测定, 进出口边界类型分别设为 velocity inlet 和 outflow, 具体参数设置按照现场实测数据设定^[10-11].

按照以上模型及参数设定后, 由 FLUENT 解算, 分别在前后滚筒处产生 10 个粒子, 得到顺风割煤和逆风割煤时粉尘运动轨迹如图 2 和图 3 所示.

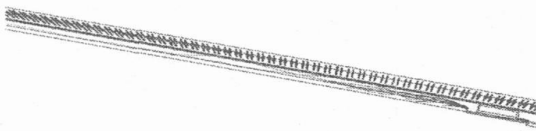


图 2 顺风割煤粉尘颗粒运动轨迹图

Fig. 2 Movement tracks of dust in downwind coal cutting

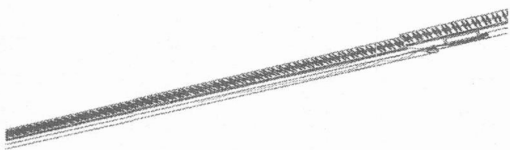


图 3 逆风割煤粉尘颗粒运动轨迹图

Fig. 3 Movement tracks of dust in upwind coal cutting

由图 2 和图 3 的模拟结果, 可以得出:

(1) 粉尘由割煤处产生, 在割煤风流扰动的作用下, 采煤机下风向 10 m 以内粉尘都比较集中, 浓度较大. 随后由于粉尘的横向随机运动, 部分粉尘逐渐扩散到人行道一侧, 煤壁一侧粉尘浓度很快降低. 因此应当在采煤机附近就采取除尘措施, 有效捕集大部分粉尘.

(2) 由于工作面的风流影响, 粉尘不能全部扩散到人行道一侧, 较多的粉尘仍然是沿着煤壁附近的机道一侧运动, 随着粉尘在湍流中不断运动、扩散、沉降, 其中大部分粉尘落到煤壁和地面从而被捕

获. 如果能在割煤前预湿煤壁把扩散到煤壁的粉尘捕获, 将对工作面的除尘有很大的帮助.

(3) 无论顺风割煤还是逆风割煤, 下滚筒产生的粉尘的运动轨迹都出现变化: 顺风割煤时大部分粉尘从煤壁与采煤机间空隙通过而被煤壁捕获, 小部分能从间隙中穿过或扩散到采煤机外侧进入风流中; 逆风割煤时下滚筒产生粉尘由于受到连续相流场变化的影响, 部分粉尘进入旋流区, 向煤壁运动而被捕集, 部分颗粒沿下风向运动并向各方向扩散.

4 结论

通过对粉尘的运动规律分析, 工作面防尘的重点应该放在采煤机下风向 10 m 以内靠近煤壁的一侧, 即在粉尘刚刚产生未充分扩散之前采取措施进行除尘. 同时, 割煤前充分预湿煤壁, 捕获运动扩散到煤壁的粉尘, 也可以有效降低工作面的粉尘浓度.

参 考 文 献

- [1] 刘过兵, 王进学. 综放工作面综合防尘技术研究. 华北矿业高等专科学校学报, 1999, 1(1): 14
- [2] van Wachem B G M, Almsstedt A E. Methods for multiphase computational fluid dynamics. Chem Eng J, 2003, 96(1/3): 81
- [3] Baxter L L, Smith P J. Turbulent dispersion of particles: the STP model. Energy Fuels, 1993(7): 852
- [4] 岑可法, 樊建人. 工程气固多项流动的理论及计算. 杭州: 浙江大学出版社, 1990: 448
- [5] 徐文亮. 干熄焦挡板除尘器除尘性能的数值模拟[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2005: 31
- [6] 周华. 气分离器内气液两相流的数值模拟[学位论文]. 上海: 上海大学, 2005: 24
- [7] Jain S. Three-dimensional simulation of turbulent particle dispersion [Dissertation]. Utah: University of Utah, 1995: 15
- [8] 潘大勇. 掘进巷道中粉尘分布规律的实验室研究和计算机模拟[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2000: 19
- [9] 蒋仲安. 湿式除尘机理的研究与应用[学位论文]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1994: 79
- [10] 王福军. 计算流体力学分析. 北京: 清华大学出版社, 2004: 196
- [11] 韩占忠, 王敬, 兰小平. Fluent 流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 229

(下转第 362 页)

- [8] Ekevid T, Li Martin X D, Wiberg N E. Adaptive FEA of wave propagation induced by high-speed trains. *Comput Struct*. 2001, 79(12): 2693
- [9] Lu S. Computer simulation and field measurement of dynamic pavement loading. *Math Comput Simul*. 2001, 56(3): 297
- [10] FLAC2D User's Guide. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc. 2001

Numerical simulation of pavement quality affecting the stability of a retaining wall

JIN Aibing, SUN Jinhai, WANG Jin'an

The Key Laboratory for Metal Mine Efficient Exploitation & Safety of Chinese Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT According to a reinforced earth retaining wall failure instance of No. 104 National Road in Shandong Province of China, the effect of pavement quality on the stability of a retaining wall under automobile loading was analyzed by numerical simulation method on the basis of analyzing the interaction mechanism between pavement and retaining wall. The result shows that pavement strength can sensitively affect the whole stability and part deformation of the reinforced earth retaining wall. The lower the retaining wall, the more sensitive the effect is.

KEY WORDS highway engineering; reinforced earth retaining wall; pavement structure layer; stability; numerical simulation

(上接第 353 页)

Numerical simulation of the dust movement rule in fully-mechanized coal faces

LIU Yi^{1,2)}, JIANG Zhong'an¹⁾, CAI Wei¹⁾, ZHOU Fengzeng³⁾, GUO Da³⁾, LIU Baodong³⁾

1) Civil & Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) National Institute for Occupational Safety, Beijing 100029, China

3) Kailuan (Group) Co. Ltd., Tangshan 063018, China

ABSTRACT A mathematical model of dust movement was derived from the gas-solid two-phase flow theory. According to characteristics of the fully-mechanized coal face in mines and related survey data, numerical simulation of the dust movement rule was made with CFD software FLUENT. The result shows that most of dust moves with wind, and little of dust disperses at random. Dust control in the work face should focus on the place within 10 m under the coal mining machine near the coal wall, and wetting the coal face before coal cutting is also important for dedusting.

KEY WORDS fully-mechanized coal face; dust; movement rule; gas-solid two-phase flow; numerical simulation