中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

第32卷第4期 煤 炭 学 报 Vol. 32 No. 4
2007年 4月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Apr. 2007

文章编号:0253-9993(2007)04-0386-05

煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟

王晓珍[1], 蒋仲安[1], 王善文[1], 刘 毅[2]

(1. 北京科技大学 教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室, 北京 100083; 2. 国家安全生产监督管理总局 信息研究院, 北京 100029)

摘 要: 为了掌握粉尘的分布规律, 根据气固两相流理论, 针对矿井掘进工作面的特点, 采用计算流体力学的离散相模型(DPM)对压入式通风掘进巷道中粉尘浓度进行了数值模拟. 由此总结出压入式通风掘进巷道中全尘和呼吸性粉尘浓度都是在工作面附近区域较大, 然后沿程逐渐减小, 并比较发现, 抽出式通风的除尘效果要好于压入式通风.

关键词: 压入式通风; 粉尘浓度; 数值模拟; 气固两相流; 离散相模型; 掘进工作面

中图分类号: TD714.3 **文献标识码:** A

Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration during the ventilation process of coal roadway driving

WANG Xiao-zhen[1], JIANG Zhong-an[1], WANG Shan-wen[1], LIU Yi[2]

(1. *The Key Laboratory of Ministry of Education for High Efficiency Exploitation and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*; 2. *National Institute for Occupational Safety, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: For gripping the distribution regularities of the dust, based on the theory of two-phase flow of gas and solid, and the characteristics of coal mine driving working face, using the discrete phase models of computational fluid mechanics to simulate the dust concentration during the ventilation process of coal roadway driving with forced ventilation. Summarize that in the coal roadway driving with forced ventilation, both of the concentration of whole dust and respirable dust are more in the area close with the working face, then the concentration will decrease as it moves to the exit of the roadway; by comparing, find that exhaust ventilation is better than forced ventilation in dust removal.

Key words: forced ventilation; dust concentration; numerical simulation; two-phase flow of gas and solid; discrete phase models; driving working face

井下煤矿粉尘有引发尘肺病、煤尘爆炸、自燃和损坏设备、降低现场可见度等诸多危害[1~3]. 掘进巷道是井下产生粉尘的主要场所之一. 因此, 研究巷道掘进通风过程中粉尘的分布规律对治理煤矿粉尘、减少粉尘危害具有重要的意义. 本文根据掘进巷道和粉尘的一般情况, 采用离散相模型对压入式通风掘进巷道进行模拟, 用GAMBIT建立掘进巷道的几何模型并划分计算网格, 用FLUENT对巷道掘进通风过程中粉尘分布规律进行解算, 并从模拟结果中总结出压入式通风巷道掘进通风过程中粉尘浓度分布的规律.

收稿日期: 2006-08-29 **责任编辑:** 毕永华
基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目(XK100080432)
作者简介: 王晓珍(1982-), 女, 黑龙江木兰人, 硕士研究生. E-mail: wxzw010@126.com

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

1　离散相模型简介

离散相模型（DPM）属于欧拉－拉格朗日模型，即用欧拉观点描述气相流场，用拉格朗日观点描述颗粒的运动. 离散相模型要求球形颗粒（掘进巷道中的粉尘颗粒）构成的第二相分布在连续相（气体）中[4]. 离散相问题的设定、求解过程：

（1）求解连续相流场，连续相流场的计算采用 SIMPLEC 算法，三维湍流的数值模拟采用 Reynolds 中的标准 $k-\varepsilon$ 模型，得到速度场等信息.

（2）创建离散相喷射源（射流源），如确定射流源的位置、尺寸、颗粒粒径的大小和初速度等，喷射源的类型设为颗粒群.

（3）求解耦合流动，在拉格朗日坐标下对颗粒群中的各个颗粒进行轨道积分，随机轨道模型或颗粒群模型可考虑颗粒湍流扩散的影响. 在随机轨道模型中，通过应用随机方法来考虑瞬时湍流速度对颗粒轨道的影响. 而颗粒群模型则是通过跟踪颗粒群的运动轨迹来模拟出粉尘运动的一个“平均”轨道. 颗粒群中的颗粒浓度分布假设服从高斯概率分布函数（PDF）.

最后，用 PLOT 或 DISPLAY 图形界面来跟踪离散相，从而得出离散相的流场分布以及浓度分布.

2　几何模型的建立及边界条件的设定

2.1　几何模型的建立

根据一般情况，将掘进巷道的横断面模拟成宽 4 m、高 3 m 的矩形，风筒的直径为 0.6 m，压入式通风巷道的风筒悬挂在靠近一侧煤壁处，风筒的轴线距离底板 1.8 m，风筒出风口到掘进工作面的距离为 7 m. 用 GAMBIT 建立掘进巷道的几何模型，并划分计算网格，如图 1 所示.

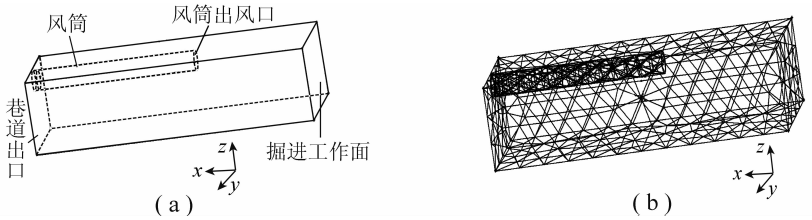

图 1　掘进巷道的几何模型及其网格划分

Fig. 1　Geometric model and grid plotting of coal roadway driving

（a）掘进巷道的几何模型；（b）划分网格后的掘进巷道

2.2　边界条件的设定

将用 GAMBIT 完成的几何模型导入到 FLUENT 中，设置边界条件：巷道内的风量为 3 m^3/s；巷道出口风速为 0.4 m/s；风筒出风口风速为17 m/s；水力直径为 3.4 m；湍流强度为 3.2%.

水力直径为

$$d_H = 4A/S,$$

式中，d_H 为水力直径，m；A 为过流断面面积，m^2；S 为流体与固体基础周长，m.

湍流强度为

$$I = u'/\bar{u} = 0.16(Re_H)^{-1/8},$$

式中，I 为湍流强度；u'，$\bar{u}$ 分别为湍流脉动速度与平均速度，m/s；Re_H 为按水力直径计算的 Reynolds 数.

根据掘进巷道的一般情况，将整个掘进工作面设为一个面粉尘源，即粉尘源是一个宽为 4 m、高为 3 m 的平面，对粉尘源的参数进行设置见表 1. 通常情况下矿井中的呼吸性粉尘占全尘的 80%[5]. 其中，质量流率 $= cvA$，c 为尘源处粉尘浓度，kg/m^3；v 为巷道内的风速，m/s；A 为巷道断面积，m^2.

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

表 1 粉尘源参数设置

Table 1 Dust fountainhead parameter enactment

颗粒源	参数设定
粒径分布	Rosin – Rammler
最小粒径/m	全尘 1.0×10^{-6} 呼吸性粉尘 1.0×10^{-6}
最大粒径/m	全尘 1×10^{-4} 呼吸性粉尘 7.07×10^{-6}
初始速度/m·s^{-1}	0
掘进工作面平均粉尘浓度/kg·m^{-3}	全尘 3×10^{-3} 呼吸性粉尘 2.4×10^{-3}
质量流率/kg·s^{-1}	全尘 1.4×10^{-2} 呼吸性粉尘 1.2×10^{-2}

注：由于用 FLUENT 6.1 解算得到的粉尘浓度单位为 kg/m^3，所以本文中粉尘浓度的单位统一使用 kg/m^3.

3 模拟结果及分析

3.1 粉尘浓度沿程分布的模拟

用 FLUENT 6.1 解算，压入式通风掘进巷道全尘和呼吸性粉尘浓度沿程变化如图 2 所示.

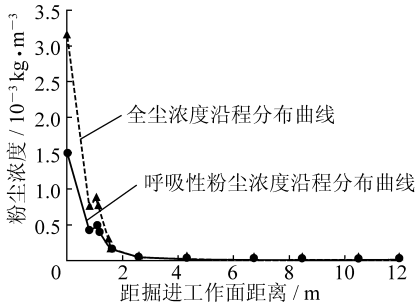

图 2 全尘和呼吸性粉尘浓度沿程变化曲线

Fig. 2 The concentration change curves of whole dust and respirable dust

由图 2 可见，压入式通风掘进巷道全尘和呼吸性粉尘浓度沿程变化的趋势基本相同，即都从工作面开始粉尘浓度快速下降到 2.5×10^{-4} kg/m^3 以内，而后粉尘浓度逐渐减小. (1) 掘进工作面处全尘浓度最大，约为 3.15×10^{-3} kg/m^3；从掘进工作面到距掘进工作面 1.5 m 处是粉尘浓度快速降低阶段，在此阶段大量粉尘不断沉降和被捕集，粉尘浓度降到约为 2.00×10^{-4} kg/m^3；从距掘进工作面 1.5 m 处到巷道出口粉尘浓度逐渐减小，此时大量的大颗粒粉尘已沉降或被捕集，剩余小颗粒粉尘逐渐随风流排出巷道. (2) 掘进工作面处呼吸性粉尘浓度最大，约为 1.5×10^{-3} kg/m^3；从掘进工作面到距掘进工作面 1.5 m 处是呼吸性粉尘浓度快速降低阶段，在距工作面 1.5 m 处呼吸性粉尘浓度与全尘浓度相差不大，约为 2.0×10^{-4} kg/m^3，说明此时大颗粒粉尘已基本沉降完，弥散于巷道的粉尘以呼吸性粉尘为主；从距掘进工作面 1.5 m 处到巷道出口呼吸性粉尘浓度逐渐减小.

3.2 全尘浓度分布的三维模拟

用 FLUENT 进行解算，压入式通风掘进巷道的全尘浓度分布如图 3 所示. 由图 3(a)可以看出，掘进工作面处全尘浓度最大，全尘在风流作用下沿巷道全断面不断地排出、沉降和被捕集，因此粉尘浓度沿程不断减小；未排出、沉降或被捕集的颗粒在随风流运动的同时随机扩散，弥散到整个巷道. 由图 3(b)可见，靠近风筒一侧的粉尘浓度较大，并向远离风筒一侧逐渐减小. 由图 3(c)可见，距离掘进工作面越远，全尘的浓度越小. 由图 3 (d) 可见，在掘进工作面附近区域，距离巷道底板越近，因重力作用将要沉降的大颗粒粉尘越多，因此粉尘浓度越大；而远离掘进工作面的地方，粉尘浓度随高度的变化并不明显.

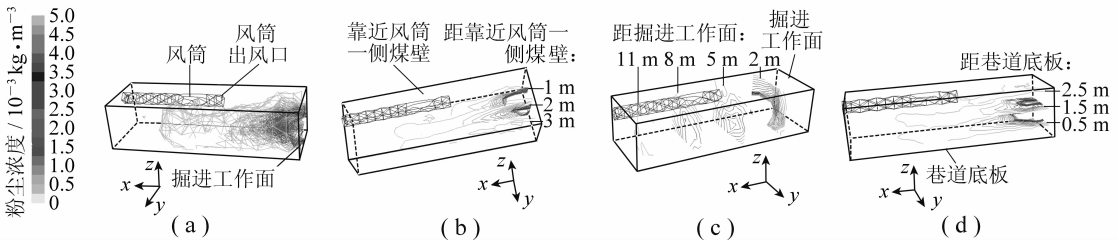

图 3 压入式通风掘进巷道全尘浓度分布

Fig. 3 Three – dimensional diagram of whole dust concentration distribution in coal roadway driving with forced ventilation

(a) 全尘浓度分布；(b) 距靠近风筒一侧煤壁分别为 1，2，3 m 的纵截面处全尘浓度分布；(c) 距掘进工作面分别为 2，5，8，11 m 的横截面处全尘浓度对比；(d) 距巷道底板分别为 0.5，1.5，2.5 m 的水平截面处全尘浓度对比

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

3.3　呼吸性粉尘浓度分布的三维模拟

用 FLUENT 进行解算，压入式通风掘进巷道的呼吸性粉尘浓度分布如图 4 所示.

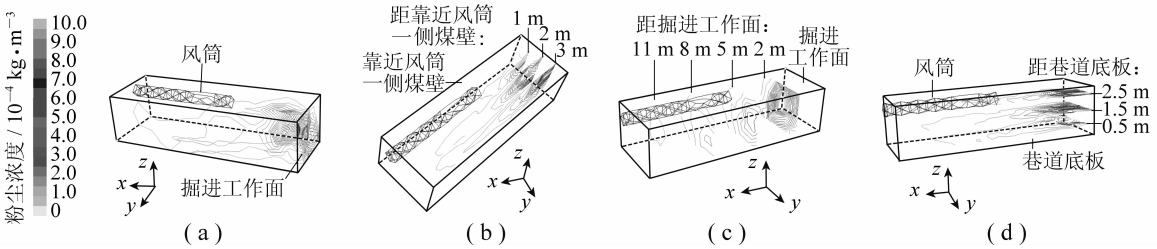

图 4　压入式掘进巷道呼吸性粉尘浓度分布

Fig. 4　Three-dimensional diagram of respirable dust concentration distribution in coal roadway driving with forced ventilation

（a）呼吸性粉尘浓度分布；（b）距靠近风筒一侧煤壁分别为 1，2，3 m 的纵截面处呼吸性粉尘浓度分布对比；（c）距掘进工作面分别为 2，5，8，11 m 的横截面处呼吸性粉尘浓度对比；（d）距巷道底板分别为 0.5，1.5，2.5 m 的水平截面处呼吸性粉尘浓度对比

由图 4（a）可见，远离风筒一侧的侧壁和工作面相交处的上部呼吸性粉尘浓度最大；呼吸性粉尘在风流作用下沿巷道全断面不断地排出和被捕集，因此呼吸性粉尘沿程浓度不断减小；未被捕集或排出的颗粒在随风流运动的同时随机扩散，因此巷道内的呼吸性粉尘浓度分布趋于稳定. 由图 4（b）可见，靠近风筒一侧的呼吸性粉尘浓度较小，并向远离风筒一侧逐渐增大. 由图 4（c）可见，距离掘进工作面越远，呼吸性粉尘的浓度越小. 由图 4（d）可见，掘进工作面附近区域，顶部呼吸性粉尘浓度较大，距离巷道底板越近呼吸性粉尘浓度越小；而远离掘进工作面的地方，呼吸性粉尘浓度随高度变化并不明显.

3.4　压入式和抽出式通风掘进巷道粉尘浓度分布规律的比较

由图 5 可见，在两种通风方式的巷道内，全尘和呼吸性粉尘浓度沿程变化规律相同，即粉尘浓度都是先快速下降，再沿程缓慢下降. 但是压入式通风掘进巷道中的全尘和呼吸性粉尘浓度沿程分别高于抽出式通风掘进巷道内的全尘和呼吸性粉尘浓度.

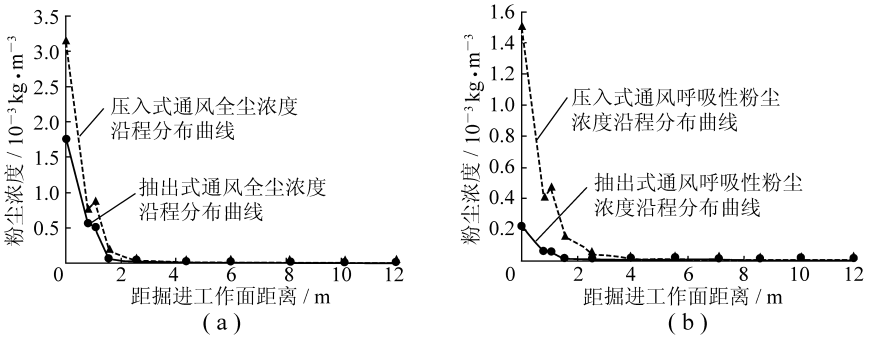

图 5　两种通风方式全尘浓度和呼吸性粉尘浓度分布的比较

Fig. 5　Comparison of whole dust concentration distribution and respirable dust concentration distribution of the two methods of ventilation

4　结　　论

（1）在压入式通风掘进巷道中，全尘和呼吸性粉尘浓度的沿程变化趋势相同，但分布规律不同. 因此，应分情况、分区域制定不同的防尘措施，如在呼吸性粉尘浓度较多的区域进行湿式降尘等.

（2）从粉尘浓度变化的情况来看，抽出式通风比压入式通风的排尘效果好.

（3）对全尘浓度分布的数值模拟结果与文献［6］的试验结论和文献［5］的经验规律基本一致；对

中国煤炭行业知识服务平台www.chinacaj.net

呼吸性粉尘浓度分布的数值模拟结果与文献［7］的研究规律基本吻合，可见数值模拟具有一定可靠性；而且用这种方法来得到粉尘的运动规律与现场实测、试验研究相比，具有投入少、风险小，得到规律的时间短等优点，因此数值模拟方法可作为现场实测和试验研究的补充，用这种方法得到的粉尘运动规律可供粉尘治理参考.

参考文献：

［1］ 向光全. 粉尘的危害与防治措施［J］. 水利电力劳动保护，1996（3）：15～16.
［2］ 梁 彤. 综采工作面喷雾除尘技术研究［D］. 太原：太原理工大学，2003.
［3］ 秦文贵. 放顶煤综采工作面主要防尘措施的实施与管理［J］. 煤矿安全，1994（4）：38～40.
［4］ 刘 毅，蒋仲安，蔡 卫，等. 综采工作面粉尘浓度分布的现场实测与数值模拟研究［J］. 煤炭科学技术，2006，34（4）：80～82.
［5］ 吴中立. 矿井通风与安全［M］. 徐州：中国矿业大学出版社，1989.
［6］ 蒋仲安，金龙哲，袁绪忠，等. 掘进巷道中粉尘分布规律的实验研究[J]. 煤炭科学技术，2001，29(3)：43～45.
［7］ 刘荣华，王海桥，施式亮，等. 压入式通风掘进工作面粉尘分布规律研究［J］. 煤炭学报，2002，27（3）：233～236.

书 评

由王广成博士、闫旭骞博士合著的《矿区生态健康评价理论及其实证研究》，是作者所承担的国家自然科学基金项目“矿区生态系统健康评价理论及其实证研究”（批准号：7017034）的研究成果，已于2006 年 3 月由经济科学出版社出版. 该书以矿区这一典型的经济社区为研究对象，以矿区可持续发展为目标，提出了以矿区复合生态系统理论和矿区生态承载力理论为基础，以矿区生态系统健康现状评价、趋势评价、稳定性评价的综合评价为主要内容的矿区生态系统健康评价理论与方法体系. 将生态系统健康理论与矿区可持续发展研究相结合，有望为实施有效的矿区生态环境管理提供一条有效的途径. 该书具有以下特色：

（1）将矿区生产的特点与复合生态系统理论相结合，提出了矿区复合生态系统的概念，系统地分析了矿区复合生态系统内涵、组成结构、功能特征，矿产资源开发对矿区生态系统的胁迫，矿区人类系统与矿区自然系统的相互作用及矿区生态系统的反馈调节机制.

（2）以矿区生态承载力概念为基础，分析了故区生态承载力各个层次的内涵及其影响因素.

（3）研究了矿区生态系统健康的相关理论，构建了矿区生态系统健康评价指标体系.

（4）应用所建的模型和提出的评价方法，对胶东某矿区的生态承载力和生态系统健康情况进行了评价，使评价的理论和方法得到了检验.

该书在注重理论体系探讨的同时，又研究了模型与方法的应用，坚持理论研究和实证分析相结合，定性研究和定量分析相结合，具有一定的适用性和可操作性，既对矿区生态系统健康评价的理论问题作了系统深入的研究，又为矿区实施有效的生态系统健康管理提出了建议措施. 虽然其中有些观点还有待完善，但作者所做的努力探索和大胆尝试是非常可贵的. 本书可作为矿业企业管理、资源环境与城乡规划管理、生态学、环境科学、矿业经济等相关学科领域的大学本科高年级学生、研究生的学习参考书，也可供有关研究人员、工程技术人员、矿业企业管理者及公务员学习和借鉴之用.

北京科技大学 教授、博士生导师 李仲学