

长压短抽式通风综掘工作面粉尘分布规律的数值模拟

杜翠凤¹⁾ 王 辉¹⁾ 蒋仲安¹⁾ 何宗礼²⁾ 胡国勇²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 平顶山天安煤业股份有限公司十一矿, 平顶山 467000

摘 要 以平煤集团十一矿综掘工作面为研究背景, 根据经验和实际情况, 确定了与掘进机相配套的长压短抽式通风除尘系统. 运用数值分析和现场测试相结合的方法, 对综掘工作面粉尘分布规律进行了研究. 基于 GAMBII 技术建立工作面的几何模型, 应用计算流体力学 FLUENT 软件对该工作面应用长压短抽式通风除尘系统前后的粉尘分布进行数值模拟. 数值模拟结果与现场粉尘质量浓度测试结果相近. 结果表明, 采用长压短抽式通风除尘系统除尘效率达 95% 以上, 可使综掘工作面的粉尘质量浓度接近或达到 $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$.

关键词 综掘工作面; 通风除尘系统; 粉尘分布; 数值模拟

分类号 TD714 R136.3

Numerical simulations of dust distribution in a fully mechanized excavation face with far-pressing-near-absorption ventilation

DU Cui-feng¹⁾, WANG Hui¹⁾, JIANG Zhong-an¹⁾, HE Zong-li¹⁾, HU Guo-yong²⁾

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

2) Mine 11, Pingdingshan Tianan Mining Co. Ltd., Pingdingshan 467000, China

ABSTRACT Based on experience and actual situation, a far-pressing-near-absorption (FPNA) ventilation system which matches with heading machines was determined with a fully mechanized excavation face in Mine 11 of Pingmei Group as the research background. Dust distributions in a fully mechanized excavation face were studied by numerical simulations and in situ measurements. A geometric model of the face was built with GAMBII technology, and dust distributions before and after applying the ventilation system were respectively simulated using computational fluid dynamics software FLUENT. The simulation results of dust mass concentration are in agreement with the in situ measurement data. It is shown that the dust collection efficiency is more than 95% with the use of the ventilation system and the dust mass concentrations in the excavation face meet with or come close to $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$.

KEY WORDS fully mechanized excavation face; ventilation dust removal system; dust distribution; numerical simulation

在煤矿的各个工作面中, 综掘工作面是产尘量最大的尘源之一. 现场数据表明, 在不采取任何除尘措施的情况下, 综掘工作面的粉尘质量浓度能达到 $0.002 \sim 0.003 \text{ kg m}^{-3}$ ^[1]; 而且独头的综掘巷道通风距离长, 粉尘不易排除. 职业病防治中心等机构对煤矿工人各工种尘肺病的患病率进行调查, 数据显示掘进工人的尘肺病患病率最高^[2-3]. 因此, 必须对掘进过程中产生的粉尘予以重视. 平煤集团十一矿丁 5-6-22121 综掘巷道的粉尘质量浓度高达 $0.001 \sim 0.002 \text{ kg m}^{-3}$, 亟待采取有效的除尘降尘措施.

1 长压短抽式通风除尘系统

粉尘治理要从尘源治理入手^[4]. 因此, 合理的通风除尘系统, 应能在粉尘颗粒扩散前有效地控制掘进机产生的粉尘, 并把含尘空气吸入除尘器中加以净化, 以提高除尘效率. 目前国内外主要有三种通风除尘系统: 长抽长压通风除尘系统、长抽短压通风除尘系统和长压短抽通风除尘系统. 根据平煤十一矿丁 5-6-22121 综掘巷道通风方式的特点, 选择长压短抽通风除尘系统——新鲜风流经压入式长风筒送入工作面, 工作面污风经抽出式通风除尘系统

净化, 被净化后的风流沿巷道排出。

本文设计的长压短抽式通风除尘系统中, 抽出式通风包括自激式水浴水膜除尘器、吸风风机、吸风罩及配套的刚性骨架风筒, 巷道内布置如图 1 所示。由于综掘巷道的断面积为 12.0 m^2 , 根据理论分析和

实践经验^[5-9], 压入式通风风筒出口到机掘工作面的距离取 14 m ; 吸风罩距综掘工作面的距离取 5 m ; 置于掘进机司机前方。压入式风筒直径为 0.8 m ; 出风量为 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; 吸风罩的大小为 $800 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$; 抽风量为 $105 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

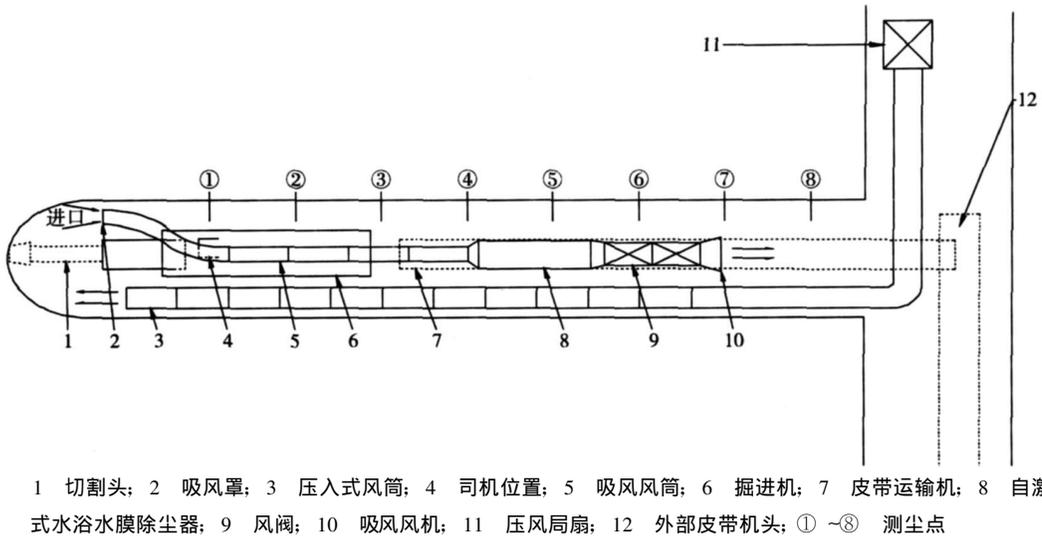


图 1 通风除尘系统布置图

Fig 1 Layout of the ventilation and dust removal system

2 数值模拟方法及边界条件的设定

2.1 数值模拟方法

研究粉尘在气流中的运动属于气固两相流的范畴。传统的研究方法包括理论研究和实验研究, 但由于受适用条件限制, 两者均无法对更基本的多相流运动规律 (如各相流体的运动速度分布) 进行深入研究^[10]。20 世纪 80 年代以来, 数值模拟方法通过建立与实际情况类似的几何模型, 并结合初始及边界条件, 利用数值计算模型及方法, 模拟再现真实过程各种场的分布, 取得很好的效果, 从而逐步得到了广泛应用^[11-12]。

目前对气固两相流的模拟方法包括两种, 即欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法。欧拉-欧拉方法即同在欧拉坐标系下, 把颗粒相作为拟流体, 认为颗粒相与气体是共同存在且相互渗透的连续介质进行研究。其优点是全面考虑了颗粒相的输运特性, 用统一的方法处理颗粒相及流体相, 能进行大规模工程问题计算; 但其颗粒连续性假设本质上削弱了模拟气固两相流中非均匀结构的真实性, 计算中无法体现颗粒大小、密度等物理性质的区别, 模拟结果无法揭示颗粒的复杂变化经历, 而颗粒相随时间的经历又通常是研究两相流的重点及目的所在。欧

拉-拉格朗日方法是把气体相作为连续介质, 在欧拉坐标系下考察其运动, 把颗粒相作为离散相, 在拉格朗日坐标系下研究其运动的方法, 可以跟踪颗粒在流场中随时间的运动经历, 模型假设少, 能更直接地揭示颗粒相的运动规律^[13]。

计算流体力学软件 (computational fluid dynamics, CFD) 是近年来发展起来的流体力学模拟软件, 目前主流的 CFD 商业软件包括 FIDAP、FLUENT、HOENICS 和 STAR-CD 等, 其中, FLUENT 软件基于有限元体积法, 主要模拟和分析在复杂几何区域内的流体流动与热交换, 可完成多种参考系下流场模拟、定常与非定常流动分析、不可压缩流和可压缩流的计算、多相流分析等^[14]。

本文采用欧拉-拉格朗日方法, 借助计算流体力学软件 FLUENT, 运用 SIMPLE 算法计算连续相流场, 利用 $k-\epsilon$ 模型模拟三维湍流, 得到速度场等信息; 创建离散相喷射源, 在拉格朗日坐标系下对离散相的各个颗粒进行轨道积分, 颗粒质量浓度分布假设服从高斯分布; 用 PLOT 或 DISPLAY 图形界面跟踪离散相, 得出离散相的流场分布及质量浓度分布。

2.2 几何模型建立

GAMB II 是面向 CFD 分析的高质量的前处理器, 其主要功能包括几何建模和网格生成。本文根

据平煤十一矿丁 5-6-22121 综掘巷道的实际情况, 对其内部几何条件进行合理简化后, 使用 GAMBIT II 建立综掘巷道的几何模型, 并划分计算网格, 如图 2 所示. 其中, 将综掘工作面巷道的横断面模拟成上底 2.54 m 下底 2.93 m 高 4.4 m 的直角梯形; 压入式风筒直径为 0.8 m, 出口口距工作面 14 m; 抽出式风筒直径为 0.4 m, 吸风口距工作面 5 m, 距地面 2 m

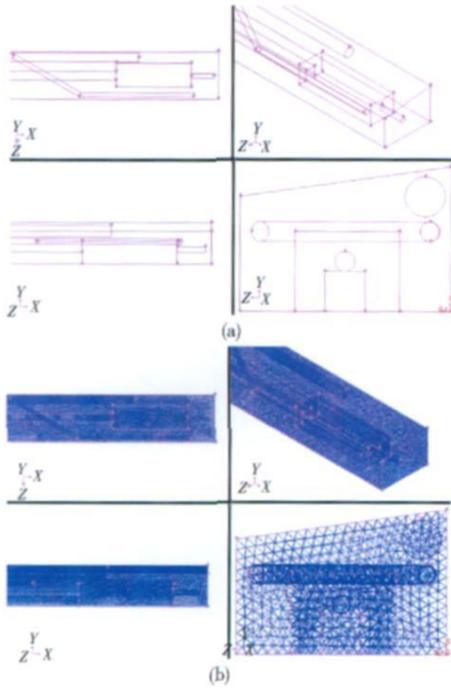


图 2 综掘巷道的几何模型 (a) 及网格划分 (b)

Fig 2 Geometric model (a) and meshing (b) of the fully mechanized excavation roadway

2.3 边界条件的设定

在 GAMBIT II 中初步设置该几何模型的边界条件后, 将该模型导入 FLUENT 进一步设置求解类型、湍流模型、离散相模型、喷射源参数及边界条件等, 如表 1~4 所示. 其中, 由于气固两相流是不可压缩的, 采用非耦合隐式求解法; 为了准确描述流场特性及粉尘颗粒的运动轨迹, 采用离散相模型 (discrete phase model) 在拉格朗日坐标下模拟流场中的粉尘颗粒, 采用 $k-\epsilon$ 湍流模型求解混合相的动量方程、第 2 相的体积分方程以及相对速度的代数表示. 离散方法采用有限体积法 (finite volume method), 在考虑湍流对离散相轨迹的影响时主要考虑颗粒运动的随机性, 选择随机轨迹模型.

根据煤矿生产特点, 粉尘源的位置可以归为三类: 位于巷道断面中央; 位于巷道一侧; 位于巷道一侧且发尘面积很小, 但是尘源的发尘面积大于巷道断面面积的 $1/2^{[15]}$. 本文在数值模拟中将喷射源定

义为位于综掘工作面回风侧一处的组喷射源, 粉尘颗粒流数量设为 20 个, 粒径分布符合 Rosin-Rammeler 分布.

表 1 计算模型设定

Table 1 Defining the calculation model

计算模型	模型设定
求解器	非耦合求解法
湍流模型	$k-\epsilon$
能量方程	关闭
离散相模型	打开

表 2 离散相模型设定

Table 2 Defining the discrete phase model

离散相模型	模型设定
相间耦合频率 / 步 ¹	5
计算步数 / 步	20000
时间步长 / s	0.01
阻力特征	球形颗粒

表 3 喷射源参数设定

Table 3 Defining injection parameters

喷射源参数	参数设定
喷射源类型	组喷射
颗粒流数量	20
材质	高挥发性煤
粒径分布	Rosin-Rammeler 分布
最小颗粒直径 / m	1.85×10^{-6}
最大颗粒直径 / m	100×10^{-6}
分布指数	1.93
初始速度 / (m s ⁻¹)	0
质量速率 / (kg s ⁻¹)	全尘 0.006

表 4 边界条件设定

Table 4 Defining boundary conditions

边界条件	参数设定
入口边界类型	速度入口
入口速度 / (m s ⁻¹)	10
水力直径 / m	0.8
相对湍流强度 / %	5.1
出口边界类型	出流
煤壁处离散相条件	捕获
煤壁处剪切条件	无滑移
湍流扩散类型	随机轨迹模型

湍流强度为 $I = u'/\bar{u} = 0.16 (Re)^{-1/8}$. 其中, I 为湍流强度; u' 、 \bar{u} 分别为湍流脉动速度与平均速

度, m^{-1} ; Re 为按水力直径计算的雷诺数.

3 数值模拟结果及分析

各条件设置完毕后进行迭代计算, 数值模拟结果以 PLOT或 DISPLAY图像表示, 并与相同条件下应用压入式通风的模拟结果进行比较分析.

3.1 粉尘扩散模拟及结果分析

压入式通风粉尘扩散模拟结果如图 3(a)所示. 综掘工作面处由于离尘源较近, 粉尘大量集中; 由于风流在工作面附近会产生涡旋, 不利于粉尘沉降; 随着距离不断增大, 扩散作用占据主导作用, 粉尘逐渐扩散到整个断面.

长压短抽式通风粉尘扩散模拟结果如图 3(b)所示. 吸风风流破坏了综掘工作面附近的涡旋作用, 粉尘扩散较为完全; 由于强大的吸风作用, 吸风风筒口位置的粉尘较为集中, 而部分未被吸入风筒的粉尘则贴附于吸风风筒运动.

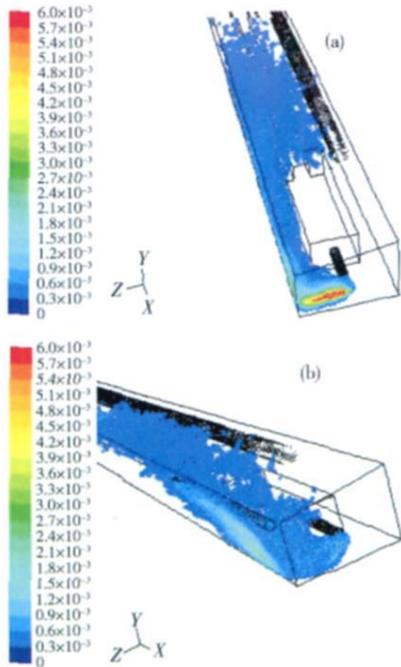


图 3 粉尘扩散模拟结果 (单位: $kg \cdot m^{-3}$). (a) 压入式通风; (b) 长压短抽式通风

Fig 3 Simulation results of dust diffusion (unit $kg \cdot m^{-3}$); (a) air pressing ventilation; (b) far pressing near absorption ventilation

3.2 粉尘质量浓度分布模拟及结果分析

压入式通风粉尘质量浓度分布模拟结果如图 4(a)所示. 综掘工作面进风侧的粉尘质量浓度较低, 回风侧尘源位置及附近的粉尘质量浓度最大, 然后沿回风方向粉尘质量浓度逐渐减小, 在达到一定距离后, 综掘巷道的粉尘质量浓度趋于稳定, 不再发生明显变化.

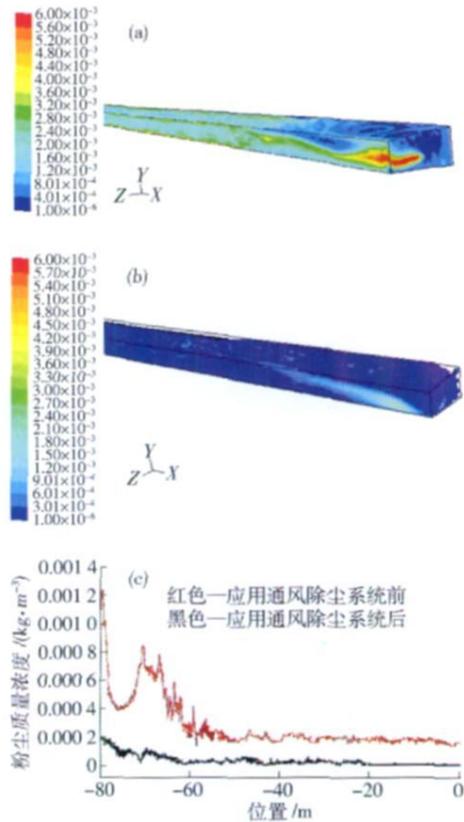


图 4 粉尘质量浓度分布模拟结果 (单位: $kg \cdot m^{-3}$). (a) 压入式通风; (b) 长压短抽式通风; (c) 综掘工作面回风侧高 1.5 m 粉尘质量浓度曲线

Fig 4 Simulation results of dust mass concentration (unit $kg \cdot m^{-3}$); (a) air pressing ventilation; (b) far pressing near absorption ventilation; (c) dust mass concentrations at 1.5 m high in the return air side of the fully mechanized excavation face

长压短抽式通风粉尘质量浓度分布模拟结果如图 4(b)所示. 整个综掘巷道的粉尘质量浓度普遍偏低, 并无显著高质量浓度区域; 由于受吸风风流的影响, 粉尘聚拢在吸风风筒口周围, 导致质量浓度相对较大, 但在运动一定距离后即发生沉降, 质量浓度逐渐降低并趋于稳定.

综掘工作面回风侧高 1.5 m 粉尘质量浓度分布曲线如图 4(c)所示. 从图中可以看出: 对于压入式通风 (即图中红色曲线所示), 回风侧高 1.5 m 的粉尘质量浓度初始值很大, 达到了 $1.25 \times 10^{-3} kg \cdot m^{-3}$, 在急剧下降至 $4.0 \times 10^{-4} kg \cdot m^{-3}$ 后又迅速升高至 $9.0 \times 10^{-4} kg \cdot m^{-3}$ 以上, 随后逐渐下降至 $2.0 \times 10^{-4} kg \cdot m^{-3}$ 左右 (距工作面 20 m 处), 并趋于稳定; 对于长压短抽式通风 (即图中黑色曲线所示), 回风侧高 1.5 m 的粉尘质量浓度初始值降低到 $1.8 \times 10^{-4} kg \cdot m^{-3}$, 随后下降至 $8.0 \times 10^{-5} kg \cdot m^{-3}$ (距工作面 5 m 处), 其后缓慢下降至 $2.0 \times 10^{-5} kg \cdot m^{-3}$

(距工作面 20 m 处), 并最终稳定在 $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ 左右, 除尘效率可达到 95%。

4 现场实验结果及分析

依照图 1 将通风除尘系统布置在丁 5-6-22121 综掘巷道中, 测尘点如图 1 中①~⑧所示, 其中①点距工作面 15 m, 其后各点按间距 5 m 布置。采用滤膜采样器对综掘工作面应用长抽短压通风除尘系统前后的粉尘质量浓度进行测量。每个测尘点均进行不少于三次的的数据测定, 并取平均值, 整理后得到如图 5 所示的曲线。

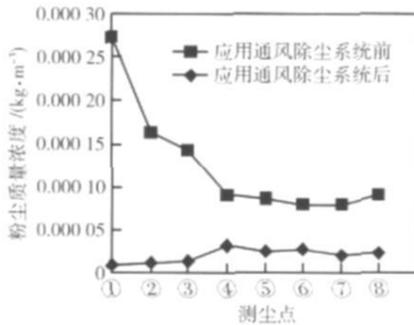


图 5 应用通风除尘系统前后的粉尘质量浓度曲线

Fig 5 Dust mass concentration before and after applying the far pressing near absorption ventilation system

计算各测点的除尘效率, 数据如表 5 所示。从表 5 中可知: ①点位于掘进司机处, 除尘效率可以达到 97%, 而其他各测点的除尘效率均稳定在 85% 以上。

表 5 使用除尘装置后各测点的除尘效率

Table 5 Dust removal rates after applying the dust removal device

测点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
除尘效率 / %	97.0	93.5	89.4	85.0	85.5	87.3	88.7	93.1

将此结果与数值模拟结果比较, 可以发现数值模拟结果 (即图 4) 中距工作面 15 m 后的粉尘质量浓度分布曲线基本符合现场实际情况, 两者呈现相似规律性。

5 结论

(1) 长压短抽式通风与压入式通风相比, 综掘巷道的粉尘扩散更为完全, 粉尘质量浓度普遍较低, 除尘效果更好。

(2) 压入式通风时, 综掘工作面的初始粉尘质量浓度和稳定后的粉尘质量浓度都很大, 并且变化剧烈; 应用长压短抽式通风后, 综掘工作面的粉尘质量浓度大大降低, 除尘效率达 95% 以上, 并且稳定

后的粉尘质量浓度接近或达到《煤矿安全规程》规定的 $1.0 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ 标准。

(3) 长压短抽式通风通过吸风风流将粉尘抽走, 有效地破坏粉尘在综掘工作面的富集, 能极大地改善工人的工作环境, 但引起的粉尘贴附吸风风筒运动也值得重视。

(4) 长压短抽式通风粉尘质量浓度分布的数值模拟结果与现场实际情况基本一致, 可见数值模拟方法具有一定的可靠性; 而且与传统研究方法相比, 其具有成本低、风险小、速度快和流场可视化等优点, 因此可将数值模拟方法得到的结论作为粉尘控制研究的参考。

参 考 文 献

- [1] Sun M B, Dong Y X. Study and application of dust proof technology during modernized mine cutting. Saf Coal Mines, 2004, 35 (1): 18
(孙明波, 董曰喜. 现代化矿井采掘防尘技术的研究与应用. 煤矿安全, 2004 35 (1): 18)
- [2] Sun B K. An epidemiological survey of pneumoconiosis during coal workers. Occup Health, 2007, 23 (6): 410
(孙丙坤. 某矿区煤矿尘肺流行病学调查. 职业与健康, 2007, 23 (6): 410)
- [3] Liao Y K, Zou X M, Lin L X, et al. Supervision on the physical condition of 248 coal miners with pneumoconiosis in Meizhou City. Occup Health, 2005, 21 (1): 1
(廖云开, 邹兴梅, 林立新, 等. 梅州市 248 名煤尘肺工人人体质监护结果分析. 职业与健康, 2005 21 (1): 1)
- [4] Yang S L. Numerical simulation of 3-dimensional dust distribution on long wall coal faces. China Saf Sci J, 2001, 11 (4): 61
(杨胜来. 综采工作面粉尘运移和粉尘浓度三维分布的数值模拟研究. 中国安全科学学报, 2001, 11 (4): 61)
- [5] Jiang Z A. Wet Dust Technology and its Applications. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999
(蒋仲安. 湿式除尘技术及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1999)
- [6] Li Z B, Zhu C Y, Liu R Z, et al. Design and research about wetting dustproof system in driving face. Coal, 2007, 16 (1): 15
(李志斌, 朱长义, 刘仁智, 等. 掘进工作面湿式除尘系统设计研究. 煤, 2007, 16 (1): 15)
- [7] Niu B L, Chen Y X, Qiu H J, et al. Experimental study of dust removal technology with combined ventilation in heading face in Gushu Yuan Mine. Min Saf Environ Prot, 2006, 33 (6): 41
(牛保炉, 陈颖兴, 邱海江, 等. 古书院矿掘进工作面混合式通风除尘技术的实验研究. 矿业安全与环保, 2006 33 (6): 41)
- [8] Xing D X. Probing into location of rational exhausting and forced duct mouth in combined ventilation. Min Saf Environ Prot, 2005, 32 (4): 25
(幸大学. 掘进混合式通风合理抽压风筒口位置的探讨. 矿业安全与环保, 2005 32 (4): 25)

- [9] Gu M Y. Dust catching with wall attaching chimneys and wet dust catchers in tunnels of comprehensive tunneling. Shanxi Sci Technol 2008(3): 128
(谷明彦. 综掘巷道湿式除尘器配合附壁风筒除尘的实践. 山西科技, 2008(3): 128)
- [10] Zhang Z, Xie Z L. Fluid-solid two-phase flow numerical simulation. J Chem Ind Eng China 2001, 52(1): 1
(张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟. 化工学报, 2001, 52(1): 1)
- [11] Wang X Z, Jiang Z A, Wang S W, et al. Numerical simulation of distribution regularities of dust concentration during the coal drift driving. J China Coal Soc 2007, 32(4): 386
(王晓珍, 蒋仲安, 王善文, 等. 煤巷掘进过程中粉尘浓度分布规律的数值模拟. 煤炭学报, 2007, 32(4): 386)
- [12] Liu Y, Jiang Z A, Cai W, et al. Experimental study on dust distribution regularity of fully mechanized mining face. J Univ Sci Technol Beijing 2007, 29(4): 351
(刘毅, 蒋仲安, 蔡卫, 等. 综采工作面粉尘运动规律的数值模拟. 北京科技大学学报, 2007, 29(4): 351)
- [13] Liu X J, Shi L, Xu X C. Activities of dense particle gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach. Chin J Comput Mech 2007, 24(2): 166
(刘向军, 石磊, 徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状. 计算力学学报, 2007, 24(2): 166)
- [14] Zhang M X, Chen H Y, Yan C P, et al. Application of FLUENT code in dust collection field. J Jinan Univ Sci Technol 2006, 20(2): 160
(张明星, 陈海焱, 颜翠平, 等. FLUENT 软件在除尘领域中的应用. 济南大学学报: 自然科学版, 2006, 20(2): 160)
- [15] Xu J D, Zhou X Q. The experimental study on dust transport and concentration distribution in airways with dust source. J Xiangtan Min Inst 1999, 14(2): 1
(徐景德, 周心权. 有源巷道中粉尘运移与浓度分布规律的实验研究. 湘潭矿业学院学报, 1999, 14(2): 1)