

基于 CFD 的新型风幕控尘装置的模拟研究及其应用^①

李雨成^{②***} 高军军^{③***} 赵 勉^{***} 林 超^{***} 扎史尼玛^{***}

(* 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院 阜新 123000)

(** 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室 阜新 123000)

摘 要 针对传统风幕控尘装置设备多、空间小、掘进机移动不便等诸多不足之处,对其进行了优化设计。为确保新型风幕控尘装置的实际应用效果,指导现场防尘系统设计,确定抽出式风机风筒安设位置,依据山西某矿掘进巷道工作面 1:1 建立了物理几何模型,并利用计算流体动力学(CFD)进行模拟。根据湍流模型特性及流体运动特点,选取拉格朗日法离散相模型对掘进巷道粉尘浓度分布进行了模拟分析并进行现场实践。结果显示,所选物理几何模型参数设置合理,拟合精度达到预测要求;加装新型风幕控尘装置前后,粉尘浓度下降对比明显;距底板 2.1 m 处安设抽出式风机风筒时,系统降尘效果显著。

关键词 数值模拟, 风幕控尘, 模型, 掘进巷道, 计算流体动力学(CFD)

0 引 言

随着高产高效矿井的大量建成,矿井掘进机械化程度不断增强,综掘面粉尘浓度也越来越高。综掘巷道因未形成有效通风系统,导致大量切割粉尘随风流携带飘移或折返,使粉尘浓度超标、工作环境恶化^[1-3],严重危害工人身心健康^[4]。大量粉尘还会加速机器和设备磨损、使空间能见度降低,影响工作面的正常生产。

用于综掘面粉尘防治的风幕控尘技术虽是近几年刚刚兴起^[5],但经实践证明,掘进面风幕控尘技术具有控降尘效果明显、容易实现等优点。国内学者对此方面的研究主要有:张小康等^[6]针对全岩巷掘进粉尘浓度高的难题,将掘进机外喷雾、空气幕封闭除尘和化学除尘技术相结合,形成了一套适用于全岩巷高效除尘技术;王海桥等人^[7]开展了综采工作面风幕粉尘隔离技术的研究,对采取气幕阻隔综采面可吸入性粉尘的方法和原理进行了理论分析和现场实践,提出对煤尘进行隔离分区,并推出了控制

区和污染区煤尘浓度比的计算方程式;郭胜均等人^[8]对空气幕控尘的理论进行了相关研究,给出了满足现场实际需求的气幕发生器的最合理的孔口直径、气幕风流方向和喷孔间距;李雨成^[9]开展了基于风幕技术的综掘面粉尘防治技术研究,对综掘面粉尘的产尘机理和风幕集尘原理进行分析和探讨,通过实验室及地面工业试验对风幕的形成条件和风速衰减规律进行了研究,得出了最佳条缝宽度范围和合理的初始风速范围;贾进彪^[10]针对综掘面除尘提出利用高压气幕实现阻隔掘进面产生的粉尘向司机处扩散;聂文等^[11]通过研究旋转风幕扰动风-尘流场变化,得到距综掘面 15 m 范围内的风流场,由紊乱转变为在掘进机司机前方形成的均匀压向掘进工作面的风幕;蒋仲安等人^[12]为解决综采面粉尘质量浓度较高的问题,对有附壁风筒的综掘工作面空气幕控尘特点进行了分析并建立了粉尘颗粒-气体两相流的数学模型。

国内外针对风幕控尘展开的研究相对较少,对综掘面风幕控尘机理的研究尚存在不足。原设计的

① 国家自然科学基金(51204089),辽宁省教育厅科研项目(L2014131)和辽宁省自然科学基金(201602355)资助项目。

② 男,1978 年生,博士,副教授;研究方向:矿井通风系统优化及粉尘防治;E-mail: lycntu@163.com

③ 通讯作者,E-mail: g0903030103@163.com

(收稿日期:2016-09-06)

风幕控降尘系统需要用压入式风机将空气压入风幕压风风筒,风流通过压风风筒才能送入到风幕射流装置,这样在掘进空间就多了一趟风筒及一台压入式风机,设备多、空间小、掘进机移动不便,技术需要改进。本文针对原有风幕控降尘装置带来的附加不利条件,在结合风幕控尘设计原则^[13,14]、综掘面粉尘分布规律^[15-17]和不影响掘进机空间移动与司机操作等^[18,19]前提条件下,设计出一种新型风幕控尘装置,并以山西某矿掘进巷道为原型,以现场实测和数值模拟为手段,将巷道风流简化为气固两相流^[20],对新型风幕控尘装置的应用效果进行了分析,并针对研究对象确定了抽出式风机风筒的具体配置参数,为风幕技术在综掘工作面的广泛应用提供了理论依据。本研究对提高综掘面的粉尘治理效果、改善作业面生产条件、抑制煤尘危害具有重要现实意义。

1 工程概况

山西某矿新增辅助运输巷,掘进期间作为运输巷道和进风巷道,服务年限约为 5 年,设计单巷长度为 885.09m,开挖断面为 5.4m × 4.0m,共 21.6m²,净断面为 5.2m × 3.8m,共 19.76m²,采用树脂加长锚固锚杆组合支护系统,并进行锚索补强。巷道掘进采用 S200MJ 掘进机割煤掘进,沿煤层底板掘进,机掘全断面,一次成巷,掘进巷道通风采用压入式通风,总供风量为 1200m³/min。粉尘由掘进工作面向整个巷道空间扩散,沿程上,在距掘进工作面 50m 范围内大颗粒粉尘快速沉降,粉尘浓度迅速下降;50m 后,巷道空间大部分是小颗粒粉尘,且随沿程增加,浓度下降缓慢;在巷道空间呼吸高度,呼吸性粉尘占总粉尘浓度的 82% ~ 89%,随沿程增加,呼吸性粉尘比例上下波动不大,基本不变。

依据山西某矿新增辅助运输掘进巷道实际情况建立物理模型,由于掘进工作面附近是作业强度密集区和巷道空间掘进产尘主要分布区,且本文主要考虑新型风幕控尘装置的效果,因此选取距掘进工作面 30m 距离范围进行计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟分析即可满足需要。

掘进巷道为矩形;连续相为巷道空间内空气(干温度 = 湿温度 = 14℃,压力 = 102.954kPa,密度为 1.242kg/m³,温度为 287K,粘性系数为 1.759 × 10⁻⁵ kg/(m · s));离散相为掘进过程产尘颗粒(密度为 1200kg/m³,质量流量为 0.0004kg/s,实测巷道内风速为 1.15m/s),风流从压风筒和风幕射流装置进入,从抽风筒和巷道后侧流出;压入式风筒风量为 1075m³/min,风速为 35.67m/s,风幕出射口风速为 12.04m/s。风筒及风幕射流出口风速、雷诺数、水力直径和湍流强度见表 1。

表 1 风筒及风幕射流出口风速、雷诺数 Re、水力直径和湍流强度

设备	风速 (m/s)	水力直径 (m)	雷诺数	湍流强度 (%)
风筒	35.67	0.8	2014878.45	2.61
风幕条缝	12.04	0.043	36555.33	4.30

2 新型风幕控尘系统

针对工程实际情况,设计了新型风幕控尘装置如图 1(a),与原系统(图 1(b))相比,新型风幕控尘系统去除风幕压风风机,改用柔性风筒替换原系统中的风幕压风风筒,并将巷道附壁风筒和射流箱相连,利用压风分流原理和直接利用局部通风机提供的动力使风幕控尘系统形成有效风幕。

为检验新型风幕控尘系统的可行性,根据李雨成博士论文所述形成风幕条件的风量及风速(控尘需要)要求,通过现场考察掘进巷道中的供风管路,依据气体状态方程式 $Pv/T = C$ 来检验柔性风筒末端风压是否符合射流要求,式中 P 为压力; v 为风速; T 为热力学温度; C 为常数,默认不变。掘进巷道压入式风筒吸风口压力为 108mmH₂O,结合表 1 数据,压入式风筒风速为 35.67m/s;理论风幕最低控尘风速为 5.48 m/s,通过计算可知风幕出口压力最高为 788.3mmH₂O,而经现场实际测试,柔性风筒内风压为 358.8mmH₂O,低于最高压力,因此供风管路可满足风幕供风要求,由此可移除通向风幕装置的压入式风机等相关设备,新型风幕控尘装置可有效减少原风幕系统带来的诸多不利因素。

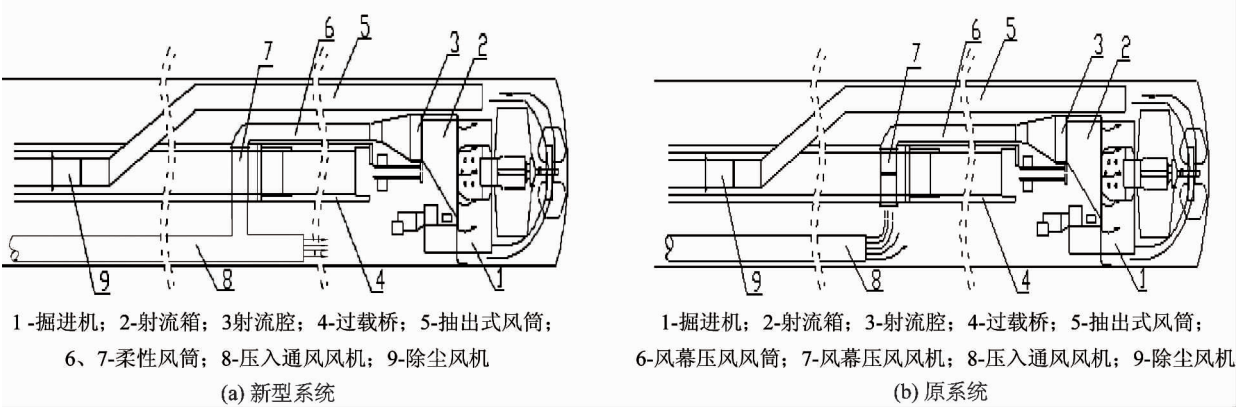


图 1 风幕控尘装置示意图

3 数值模拟

模拟采用有限元分析软件 ANSYS Fluent 14.0 进行数值模拟,软件操作界面如图 2 所示。

3.1 建立物理模型

依据现场综掘工作面实际情况并对模型进行合理简化,通过 CFD 前置软件 Gambit 建立巷道几何模型并划分网格。

3.2 设定边界条件

(1)边界条件设定

将模型在 Gambit 中进行初步设置,并将生成网

格文件导入到 FLUENT 14.0 中,对所设置模型进一步设置,已满足现场实际条件。设置参数见表 2。

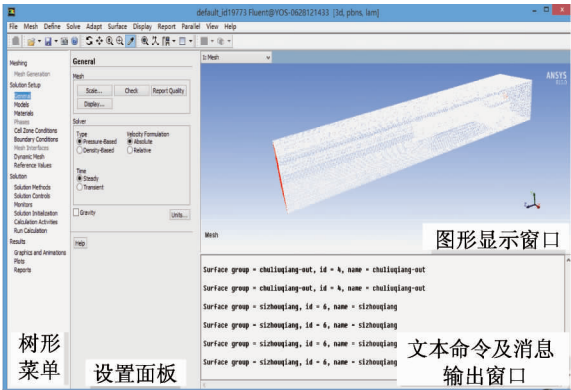


图 2 软件操作界面

表 2 模拟参数设定

总项	分项	参数
跟踪参数	Max Number of Steps	7200
	X-Velocity(m/s)	0
	Y-Velocity(m/s)	0
	Z-Velocity(m/s)	1. 15
	Diameter Distribution	Rosin-Rammler
离散相	Min. Diameter(m)	5e-07
	Max. Diameter(m)	21e-06
	Mean Diameter(m)	1. 5e-06
	Total Flow Rate(kg/s)	0. 0004
	Density(kg/m ³)	1200
连续相	Density(kg/m ³)	1. 242
	Viscosity(Pa · s)	1. 759e-05
	Reference Temperature(K)	287
	Velocity Magnitude(m/s)	8. 79
条缝射流出口边界条件	Turbulent Intensity(%)	7. 94
	Hydraulic Diameter(m)	0. 043

(续表 2)

	Velocity Magnitude(m/s)	35.67
压入式风筒出口边界条件	Turbulent Intensity(%)	2.61
	Hydraulic Diameter(m)	0.8

3.3 模拟精度及结果分析

3.3.1 模拟精度及分析

为检验所设模型参数是否能达到模拟精度,准备工作如下:

(1)选取距掘进工作面 120 m 巷道长度,依据《工作场所空气中粉尘测定》方法对巷道空间粉尘浓度进行测试;

(2)在 CFD 模型中对巷道模型进行气固两相流基本参数设置,并进行迭代(经过 200 步左右计算,达到给定的收敛标准);

(3)模拟浓度与实测浓度进行对比分析。

图 3 为呼吸带高度处(距地面 1.5 m)实测总粉尘浓度与模拟值对照图,结果显示实际测量粉尘浓度与模拟值大体相同,趋势一致,但存在偏差,主要是由于测试时间与掘进机工作的相对时间不确定,且数值模拟适当简化了现场实际条件,但可以看出模拟值与实验值基本一致,应用给定参数对掘进巷道粉尘浓度进行模拟研究精度可靠。

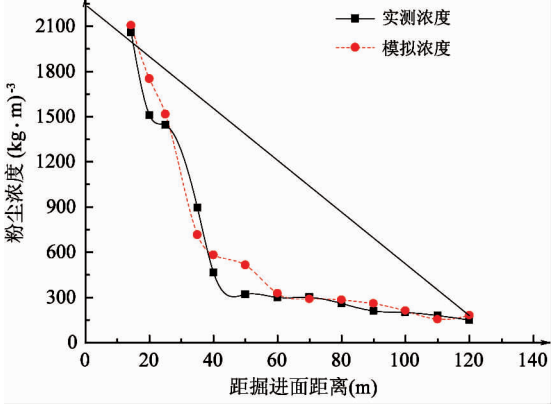


图 3 粉尘浓度数值模拟精度对比

3.3.2 掘进巷道粉尘浓度模拟分析

本文依据现场实际情况,以期达到良好降尘效果对比,分别对掘进巷道是否添加新型风幕控尘装置条件下的巷道粉尘浓度分布进行模拟分析, z 为距掘进面距离, y 为巷道垂线方向, z 与 x 、 y 均垂直。

(1)未加风幕控尘设备

在未加风幕控尘装置情况下,依据上文所建立的几何模型及所设边界条件,模拟得到粉尘颗粒迹线图(如图 4)和 z 为 5m、10m、15m、20m、25m、30m, y 为 1.5m, x 为 2.6m(掘进巷道中间位置)处浓度分布的切片云图(如图 5)。

由图 4 和图 5 可以看出由于压入式风筒的作用,新鲜风流将风筒前部的粉尘吹散、稀释,故在风筒侧粉尘浓度较低,而另一侧粉尘会在掘进机前方形成小涡旋,不利于通风排尘;同时在压入式风筒出风口和工作面之间出现大涡旋,气流运动剧烈,采掘后粉尘聚集于此并剧烈运动;掘进机司机处高浓度粉尘运动混乱,严重危害掘进工人身体健康。由于巷道壁与掘进机之间形成了窄缝,大量粉尘颗粒通过这个窄缝向整个巷道空间扩散,模拟显示,风流经过此时,窄缝处压力会由 102.954kPa 下降至 7.5kPa,风速达到 13.89m/s。风速变大,压强降低,形成低压区,随后会有更多粉尘颗粒被压入此处。当粉尘颗粒通过低压区后会由巷道中部分别向上和向下逐渐运移。

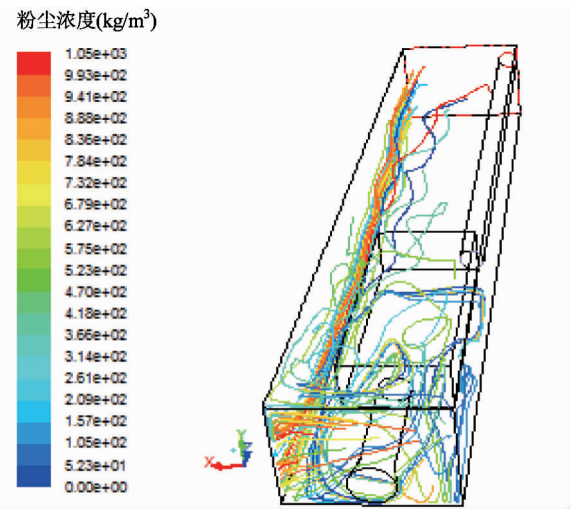


图 4 无风幕装置时粉尘的迹线图

(2)添加新型风幕控尘装置

在加装新型风幕控尘装置情况下,所设边界条

件与未加风幕装置时相同,根据现场掘进设备实际布置条件及环境限制,只可将抽出式风机风筒出口中心位置分别设置在距底板 2.1m 和 3.0m 处,模拟

得到粉尘颗粒迹线图(图 6)和 $z = 5\text{m}$ 、 10m 、 15m 、 20m 、 25m 、 30m , $y = 1.5\text{m}$ 处粉尘浓度分布的切片云图(图 7)。

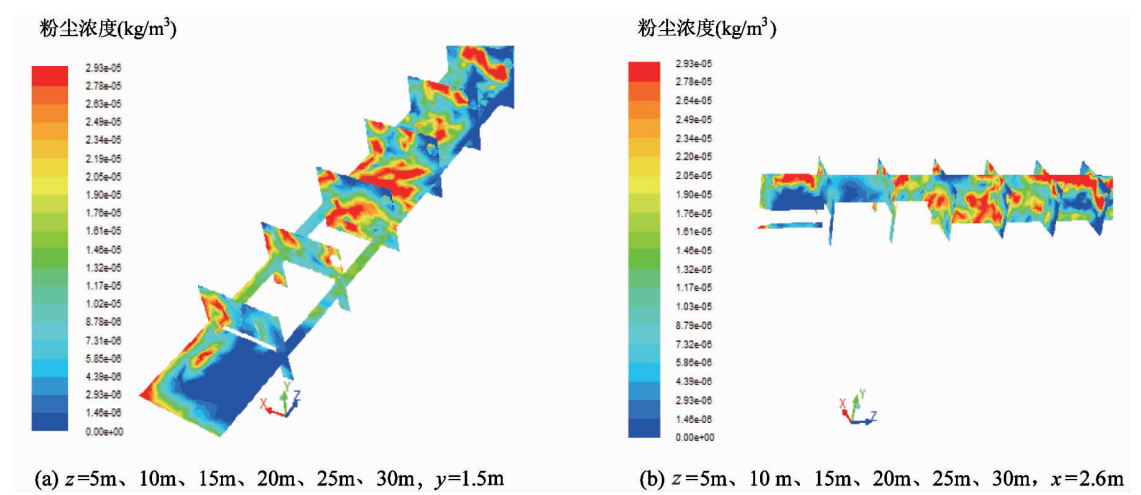


图 5 无风幕装置时的粉尘浓度云图

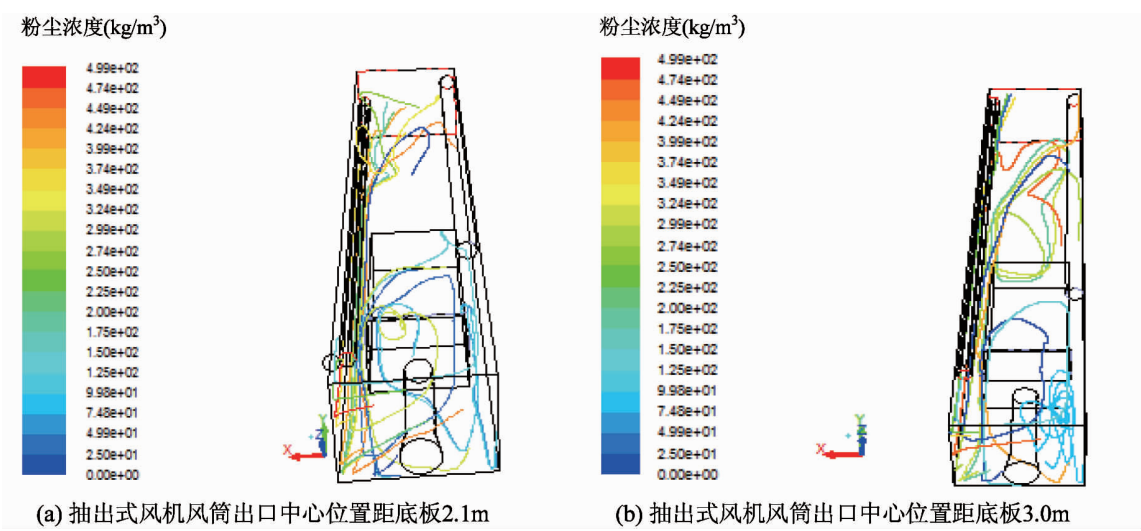
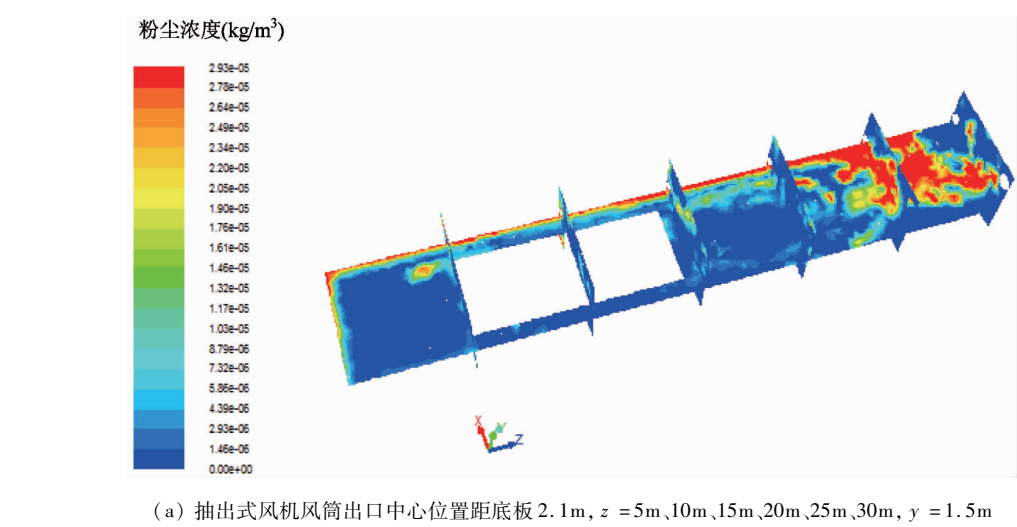
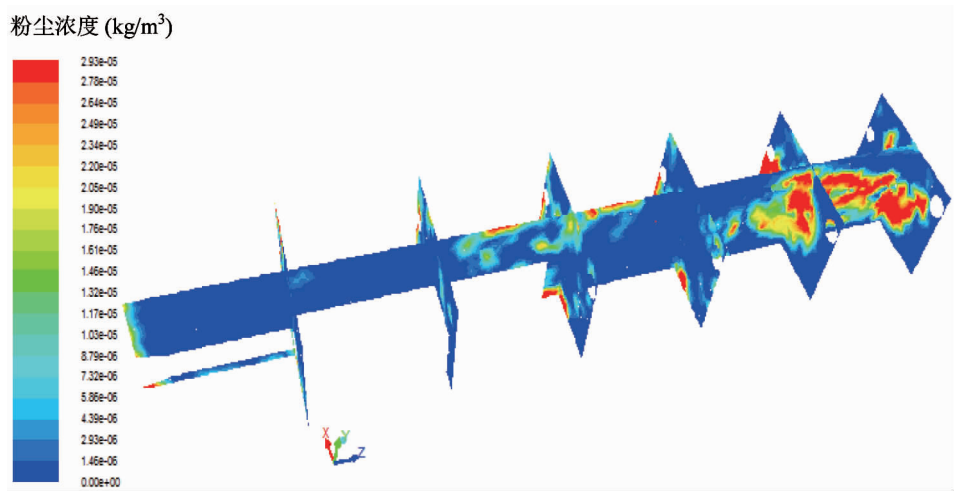
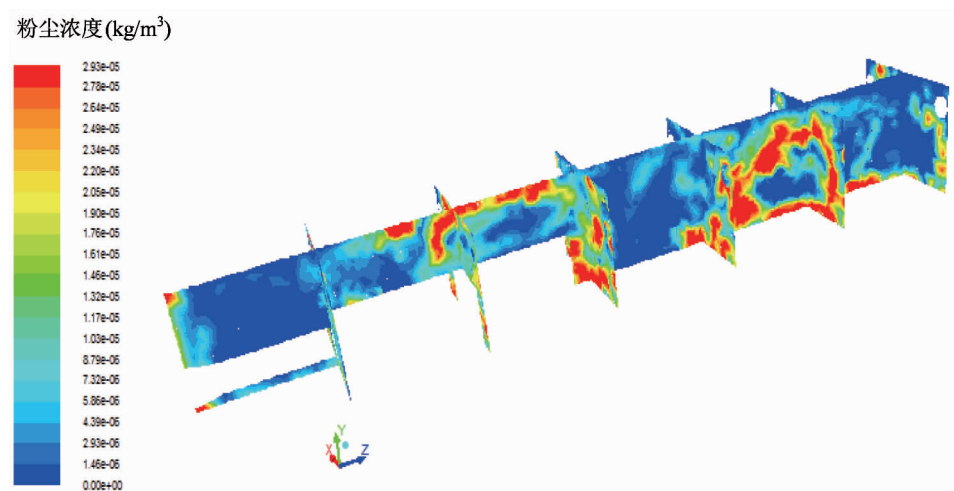


图 6 加装新型风幕控尘装置时的粉尘迹线图

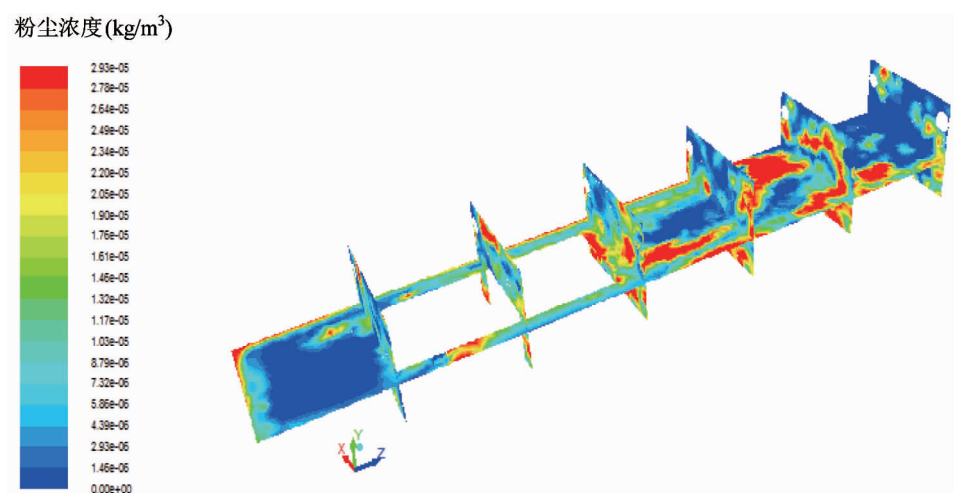




(b) 抽出式风机风筒出口中心位置距底板 2.1m, $z = 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}, 25\text{m}, 30\text{m}$, $x = 2.6\text{m}$



(c) 抽出式风机风筒出口中心位置距底板 3m, $z = 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}, 25\text{m}, 30\text{m}$, $y = 1.5\text{m}$



(d) 抽出式风机风筒出口中心位置距底板 3m, $z = 5\text{m}, 10\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}, 25\text{m}, 30\text{m}$, $x = 2.6\text{m}$

图 7 加装新型风幕控尘装置时粉尘浓度云图

由图 6 和图 7 可以看出在距底板 2.1m 和 3m 处,由于抽出式风筒的抽吸作用,工作面前部粉尘浓度有明显降低,抽出式风筒一侧形成的涡旋变小,抑制粉尘扩散能力降低,大量粉尘向抽出式风筒移动,风筒带走大量粉尘颗粒,便于粉尘有效排除。根据粉尘颗粒运动轨迹,大部分粉尘通过抽出式风筒随风流向巷道外部运动,小部分粉尘经风幕射流后折返回到掘进巷道空间,距巷道底板 2.1m 时,突破风幕射流网流量达到 $62.4\text{mg}/\text{m}^3$,掘进机司机前方粉尘浓度达到 $1.04\text{mg}/\text{m}^3$;距巷道底板3.0m时,突破风幕射流网流量达到 $137.5\text{mg}/\text{m}^3$,掘进机司机前方粉尘浓度达到 $2.3\text{mg}/\text{m}^3$,此时粉尘浓度仍超出标准值,故应采取喷雾降尘等措施配合降低巷道粉尘浓度。由图 7 可以看出,在 $y = 1.5\text{m}$ 高度掘进机处,图 7(a)中粉尘主要沿抽出式风筒运动,图 7(c)中粉尘运动剧烈,向巷道空间逸散量加大,图 7(a)中掘进机司机处粉尘浓度要明显低于 $y = 3.0\text{m}$ 处;在 $x = 2.6\text{m}$ 处,图 7(b)中粉尘主要集中于距掘进面 20m ~ 30m 范围内,而图 7(d)中粉尘主要分布于距掘进面 5m 外的巷道空间中,粉尘分布范围广、浓度大。综合图 7(a)、(b)、(c)、(d)说明新型风幕控尘装置在距底板2.1m处控尘效果要优于距底板3.0m处。

控制柔性风筒上的压力表,柔性风筒内压力为 350Pa,当风幕控尘与粉尘扩散达到平衡时,风筒及风幕射流出口风速、雷诺数、水力直径和湍流强度见表 3。

表 3 系统平衡时风筒及风幕射流出口风速、雷诺数 Re、水力直径和湍流强度				
设备	风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水力直径 (m)	雷诺数	湍流强度 (%)
风筒	36.02	0.8	1638203.52	2.68
风幕条缝	11.00	0.043	33397.73	4.35

为进一步分析新型风幕控尘装置的位置有效性,对抽出式风机风筒距底板2.1m和 3m 时的巷道空间粉尘浓度进行测试对比,如图 8 所示。通过图 8可以看出当抽出式风机风筒距底板2.1m时,巷道沿程各点粉尘浓度普遍要低于距底板3.0m时,利

于工人身体健康;在距掘进面 8m 处出现反差,是由于工人作业,激起小范围涡旋,造成 2 次扬尘所致。在掘进机前方距掘进面4.5m范围内,抽出式风机风筒距底板2.1m和3.0m时两种情况对比明显,距底板 2.1m时,巷道粉尘浓度明显低于3.0m时的浓度,利于掘进作业及人员安全。因此优选抽出式风机风筒距底板 2.1m 时的风幕控尘装置方案。

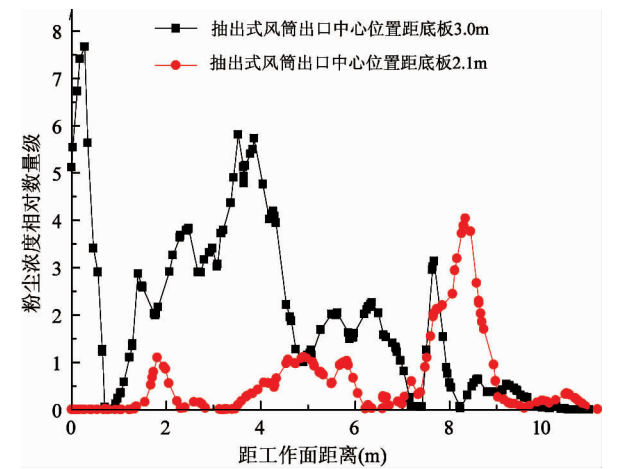


图 8 粉尘浓度相对数量级对比

4 结 论

(1)通过对比分析模拟粉尘浓度与现场实测粉尘浓度可知,两者粉尘浓度运移规律基本一致,模拟精度符合要求,证实所设模型参数与数值模拟研究方法的可靠性。

(2)新型风幕控尘装置能形成有效射流,射流出口风速能达到有效控降尘风速,风量合理。通过对比分析加装新型风幕控尘装置前后巷道的粉尘浓度分布可知,距掘进工作面 30m 范围内,采取新型风幕控尘装置时,巷道降尘效果明显,建议矿方及时加装新型风幕控尘装置,改善巷道工作条件,保证良好掘进工作环境及矿工的身体健康。

(3)新型风幕控尘装置较原系统具有所用设备少、占用空间小等优点,可解决原风幕控尘装置占用空间大、掘进机移动不便等为题,同时降尘效果明显,能较大促进掘进作业效率。

(4)模拟对比分析抽出式风机风筒安设位置,距底板2.1m时巷道空间粉尘浓度要比3.0m时相对

数量级低,说明此时巷道空间粉尘浓度相对3.0m时粉尘浓度要低,同时为矿方应用新型风幕控尘装置提出了抽出式风机风筒的合理安装位置。

参考文献

[1] 国家安全生产监督管理局. 煤矿安全规程. 北京: 煤炭工业出版社, 2007. 160-161

[2] 李艳强. 综掘工作面分风降尘理论及应用研究: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学资源与安全工程学院, 2010. 15-24

[3] 惠功领, 韩留生. 平煤十二矿突出矿井综合防尘技术. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 45-47

[4] 2013 年全国职业病报告情况. 社区医学杂志, 2014, 12(13): 59

[5] 刘杰, 杨胜强, 郭记伟等. 矿用空气幕研究现状及展望. 煤矿安全, 2013, 2: 204-206

[6] 张小康, 周刚. 全岩巷综掘工作面高校综合除尘技术. 煤炭科学技术, 2013, 8: 81-83

[7] 王海桥, 施式亮, 刘荣华等. 综采工作面司机处粉尘隔离技术的研究及实践. 煤炭学报, 2000, 2: 176-180

[8] 郭胜均, 张设计, 吴百剑等. 气幕发生器的试验研究. 矿业安全与环保, 2006, 6: 22-23 + 96

[9] 李雨成. 基于风幕技术的综掘面粉尘防治研究: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 2010. 33-60

[10] 贾进彪. 综掘工作面高压气幕隔尘技术的研究: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学矿业与安全工程

学院, 2011. 23-38

[11] 聂文, 程卫民, 陈连军等. 旋流风幕扰动硬岩综掘面风-尘流场数值模拟. 中国安全科学学报, 2014, 3: 120-125

[12] 蒋仲安, 张中意, 谭聪等. 基于数值模拟的综采工作面通风除尘风速优化. 煤炭科学技术, 2014, 10: 75-78

[13] 程卫民, 刘向升, 阮国强等. 煤巷锚掘快速施工的封闭控尘理论与技术工艺. 煤炭学报, 2009, 34(2): 203-207

[14] 周刚, 程卫民, 王刚等. 综掘工作面封闭式除尘工艺的研制与应用. 煤矿安全, 2009, 40(3): 22-24

[15] 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. 煤炭科学技术, 2001, 3: 43-45

[16] 陈松. 机掘工作面控除尘下流场特征与粉尘分布规律的数值模拟. 矿业安全与环保, 2015, 2: 24-27

[17] 丁厚成, 杨帆, 张义坤. 综掘工作面粉尘运移规律及控制技术研究. 安全与环境工程, 2015, 4: 82-87

[18] 李雨成, 刘剑. 基于气固两相流的风幕控尘数值模拟. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 765-769

[19] Ma H, Li Y C, Liu J. Development of dust collection and removal technology of comprehensive mechanized excavation face. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2008, 4: 567-570

[20] 杨胜来. 采煤工作面粉尘颗粒运动的动力学模型的探讨. 山西矿业学院学报, 1994, 12(3): 250-251

CFD based simulation research on a new wind curtain dust control device and its application

Li Yucheng* ** , Gao Junjun* ** , Zhao Mian* ** , Lin Chao* ** , Zhashi Nima* **

(* College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

(** Key Laboratory of Mine Thermal Hazard and Control of Education Ministry, Fuxin 123000)

Abstract

The design of a traditional wind curtain dust control device was optimized to overcome its short comings of more equipment, little space, inconvenience in tunnel boring machine’s move, etc. In order to ensure the wind curtain dust control device’s dust removal effect in practical application, guide the dust control system’s design on the spot, and determine the draw-out fan’s setting position, a physical and geometrical model was set up according to the roadway head of a Shanxi mine with the proportion of 1:1, and the simulation was conducted by using the computational fluid dynamics (CFD). According to the characteristics of the turbulence model and fluid motion, a Lagrange Discrete Phase Model was selected to simulate and analyze the driving airway dust concentration, and the site practice was conducted. The simulation results showed that the parameters of the physical and geometrical model were selected reasonably, and the fitting precision met the prediction requirement; and the dust concentration decreased obviously after the installation of the new wind curtain dust control device, with the obvious dust-reducing effect if the extraction fans duct was installed at 2.1m from the botton.

Key words: numerical simulation, wind curtain dust control, model, driving airway, computational fluid dynamics (CFD)