

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.018

# 岩巷综掘工作面通风除尘系统的数值模拟

陈举师, 蒋仲安, 谭 聪

(教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室(北京科技大学), 100083 北京)

**摘要:** 为了解决岩巷综掘工作面粉尘质量浓度超标的问题, 对比分析已制定的通风除尘系统布置方案, 以薛村矿南翼皮带运输巷为背景, 依据气固两相流理论, 运用计算流体力学的离散相模型(DPM)对岩巷综掘工作面通风除尘系统进行数值模拟, 并与现场实测数据进行对比分析, 模拟结果与实测数据基本一致。研究表明: 粉尘颗粒自尘源产生后, 纵向随风流方向运动, 横向随机扩散; 掘进巷道内粉尘质量浓度沿程先急剧上升至最大值, 后逐步缓慢降低; 通风除尘系统布置方案中, 降尘效果按优劣排序为二者同时安装、安装附壁风筒、安装除尘器、压入式通风。根据现场实测数据, 以压入式通风条件为基准, 安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下平均除尘率分别为 49.4%、67.1% 及 86.2%。

**关键词:** 岩巷; 综掘工作面; 气固两相流; 通风除尘; 数值模拟

中图分类号: TD714.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)02-0098-06

## Numerical simulation of dust removal and ventilation system in the rock comprehensive tunneling face

CHEN Jushi, JIANG Zhongan, TAN Cong

(The Key Laboratory of Ministry of Education for High Efficiency Exploitation and Safety of Metal Mine(University of Science and Technology Beijing), 100083 Beijing, China)

**Abstract:** To solve the problem that the dust concentration exceeds on the rock comprehensive tunneling face, the dust fall plan is established according to comparative analysis for improving working environment. On the background of belt transport lane in the south of Xue village mine, the discrete phase model (DPM) for computational fluid mechanics is used for numerical simulation of dust movement rule on rock comprehensive tunneling face on the basis of the gas-solid two phase flow theory. In contrast to the field measured data, the simulation result almost conforms to the measured data. The study found that, after dust source generated, the dust moves with air flow direction on vertical, random diffuses along the merry tangential direction on transverse. The frictional dust concentration in roadway drivage rises sharply to maximum, then gradually slows down. In comprehensive dust fall scheme, the order of the dust fall effect, according to quality, is: both installation at the same time, installation of mural ram, installation convulsions shaker system, press in type ventilation. According to the measured data, taking the press condition ventilation as reference, the average removal rates of installing air duct, installing dust collector and installing the two at the same time are 49.4%, 67.1% and 86.2%, respectively.

**Keywords:** rock roadway; fully mechanized excavation face; gas-solid two phase flow; dust removal by ventilation; numerical simulation

收稿日期: 2014-11-24.

基金项目: 国家自然科学基金(51274024); 中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-14-039A1); 中国博士后科学基金(2014M560891).

作者简介: 陈举师(1987—), 男, 博士, 讲师;  
蒋仲安(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 蒋仲安, jza1963@263.net.

巷道掘进是煤矿开采的重要环节之一。近年来, 由于掘进设备机械化程度不断提高, 且日常生产任务逐步加剧, 粉尘污染的问题日益突出。煤矿粉尘的主要危害之一体现在尘肺病方面, 岩巷综掘工作面较之煤巷掘进, 其粉尘源一般含有较多的二氧化硅, 会对井下工人身体健康造成更大的

危害。目前多数煤矿的平巷掘进均采用压入式通风方式,从压风风筒导出的风流直接吹入掘进工作面,将采落物中的粉尘扬起,使这些粉尘随风流沿巷道移动,部分浮游粉尘进入新鲜风流中,造成了严重的粉尘污染<sup>[1-3]</sup>。

对此国内外专家学者进行了大量研究,一般通过使用长压短抽混合式通风方式予以解决。长压短抽混合式通风方式就是在巷道中铺一趟较短的抽出式风筒,使之与除尘器配合。再沿掘进工作面铺一趟较长的压入式风筒,并在风筒前端使用附壁风筒技术,使压风经附壁风筒的缝隙与工作面前壁构成一定的夹角进入工作面。根据国内外实践,采用附壁风筒后,其附壁效应使压入风流在工作面附近形成一道气幕,能阻止工作面含尘气流向外扩散,取得了较好的除尘效果。目前国内外专家学者对综掘工作面长压短抽混合式通风除尘系统的现场布置方式的研究比较多,主要采用了理论分析、相似实验及现场试验等研究手段,而对于综掘工作面混合式通风除尘系统条件下粉尘质量浓度分布规律的研究较少,主要采用现场试验的手段对综掘工作面的粉尘质量浓度分布进行粗略的测定,对使用混合式通风除尘系统时综掘工作面的风流流场分布及粉尘质量浓度分布规律缺少比较全面的认识,导致对混合式通风除尘系统的应用效果也缺少较为直观的判断<sup>[4-6]</sup>。本文通过对岩巷掘进过程中采用压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘风机及同时安装附壁风筒及除尘风机4种粉尘控制方案时的风流流场分布及粉尘质量浓度分布进行数值模拟研究,对比分析各种粉尘控制方案条件下的降尘效果,最终确定出降尘效果最优的粉尘控制方案,以指导现场实施。

## 1 数学模型的选定

物质具有气态、液态和固态三相,自然界和工程应用中通常会遇到多相流动问题,但是多相流系统中相的概念具有更为广泛的意义。在多相流动中,“相”可定义为具有相同类别的物质,该类物质在所处的流动中具有特定的惯性响应并与流场相互作用。多相流动模式一般可以分为4类:气液两相流或液液两相流、气固两相流、液固两相流以及三相流。目前应用较多的离散相模型,本质上属于气固两相流。处理多相流有两种数值计算的方法:欧拉-拉格朗日法和欧拉-欧拉法。在 Fluent 中的拉格朗日离散相模型遵循欧拉-拉格朗日法。在离散相模型中,流体相被处理为连续相,直接求解 Navier-Stokes 方程,而离散相是通过计算流场

中大量的粒子、气泡或液滴的运动得到的。离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。该模型的一个基本假设:作为离散的第二相的体积比率应很低,对于体积率小于 10% 的气泡、液滴和粒子负载流动,可以采用离散相模型。

## 2 几何模型的建立及参数设定

### 2.1 现场概况

南翼皮带运输巷位于薛村矿井田南部,其施工目的是为了解决南翼地区正常生产时的煤岩运输问题,服务年限为 9 a。巷道直接顶板为黑灰色粉砂岩,平均厚度为 7 m。老顶为石灰岩,灰色,平均厚 0.3 m 左右。直接底板为灰褐色粉砂岩,平均厚度 2.8 m。巷道断面呈半圆拱形,采用  $U_{36}$  钢支护,规格为 4 450 mm×3 200 mm。掘进过程中采用 EBZ-315 型综掘机截割并自行装煤(岩),后跟溜子、皮带接力运输的施工方式。

南翼皮带运输巷在掘进过程中采取压入式通风,目前配置 FBDNo.6 型局部通风机,功率为 2×15 kW,供风距离约为 400 m,局扇出风口处供风量为 367 m<sup>3</sup>/min。风筒采用阻燃抗静电的风筒布制作,直径为 600 mm,悬挂在巷道右帮,悬挂高度 1.9 m,风筒出口距工作面迎头 4 m。

为了解决目前南翼皮带运输巷在掘进过程中粉尘质量浓度严重超标的问题,根据防尘专家的建议,初步制定了 4 种降尘方案:压入式通风(目前使用)、安装附壁风筒、安装除尘器以及同时安装附壁风筒及除尘器。根据设计要求,除尘器处理风量需达到 269 m<sup>3</sup>/min,附壁风筒狭缝喷口处风速达到 23 m/s,出风量约为 275 m<sup>3</sup>/min,风筒前端锥形出风口风速达到 21 m/s,出风量约为 92 m<sup>3</sup>/min。

### 2.2 几何模型的建立

本文主要对薛村矿南翼皮带运输巷掘进工作面通风除尘系统进行模拟分析。由于工作面上有掘进机、皮带、风筒等各种设备,且随着防尘工作的开展,工作面内还会增加附壁风筒、除尘器等设备,粉尘内部扩散空间形状较为复杂,无法作出准确的几何模型。因此,文中对工作面粉尘扩散计算域进行以下适当的简化:1)将工作面巷道断面视为标准半圆拱。2)掘进机机身视为规则的长方体,掘进机摇臂、掘进头、左右铲板等部件均按照标准几何体进行表示。3)压入式风筒、抽风风筒及除尘器等视为规则的圆柱体;吸风口按照标准楔形体近似处理;不考虑巷道左帮风管、水管等对风流的影响。4)皮带、支架等设备均按照平面边界处理。

基于上述简化过程,将掘进巷道的横断面模拟成底为 4.4 m,高为 3.2 m 的标准半圆拱形,考虑要模拟加入附壁风筒及除尘器后对巷道风流及粉尘运动规律的影响,取巷道长为 100 m,其中压入式风筒出风口距迎头 4 m,附壁风筒前端距迎头 8 m,除尘器出风口距迎头 15 m.

运用 Gambit 建立掘进工作面的几何模型,并进行计算网格划分.网格划分过程中,以网格数为自变量,以不同网格数下模拟结果中司机所在处呼吸带高度粉尘质量浓度作为因变量,对比分析司机所在处粉尘质量浓度随网格数的变化规律,以验证网格独立性.采用三维的 Tet/Hybrid 网格单元、TGrid 网格类型分块对模型进行网格划分,网格基本尺寸为 0.3 m,网格总数为 473 004 个,岩巷综掘工作面三维几何模型及网格划分见图 1.

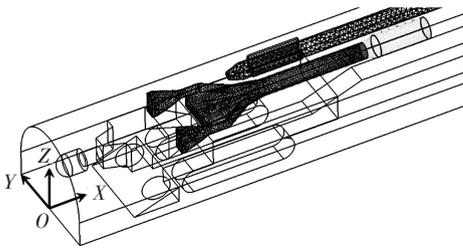


图 1 岩巷综掘工作面三维几何模型

### 2.3 参数设定及求解

根据薛村矿南翼皮带运输巷的具体情况及相关实测数据,结合数学模型和 FLUENT 的数值模拟方法,对边界条件及相关参数进行设置,采用离散相模型(DPM)对岩巷综掘工作面通风除尘系统的除尘效果进行模拟.首先通过计算连续相获得风流流场的速度、湍流动能等基本信息,再在拉格朗日坐标下采用随机轨道模型对单个粉尘颗粒进行轨道积分,得到单个颗粒的运动轨迹.通过大批量地跟踪粉尘颗粒轨道就可以统计出粉尘质量浓度分布情况,最终求解出岩巷综掘工作面通风除尘系统的除尘效果<sup>[7-15]</sup>.

## 3 数值模拟结果及分析

### 3.1 风流流动规律及分析

为了研究岩巷综掘工作面在压入式通风条件下,以及安装附壁风筒、抽风除尘系统后风流流动情况的变化,针对不同现场条件,通过查看矢量图,得出掘进工作面风流速度矢量  $v$  分布如图 2 所示.图中 4 种状态依次分别为压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器以及二者同时安装情况下掘进工作面风流速度矢量分布.

从图 2 可以看出:1)压入式通风条件下,风

流自巷道右帮风筒出风口高速喷射而出,在前方迎头的阻碍下转向巷道左帮,并以较大的速度向巷道后方区域扩散,风流主要集中在左侧人行道区域,风流速度场分布极为不均.2)加入附壁风筒后,其前端的锥形出风口流出的少量风流,与压入式风筒前端射流作用相似,能在迎头附近区域形成逆时针旋转的涡流;附壁风筒狭缝流出的大量风流在巷道断面的影响下,在掘进机司机前方区域内形成一道逆时针旋转的风墙,风流速度场分布比较均匀.3)安装除尘器后,系统前端 3 个吸风口在除尘器负压的作用下,将迎头附近高速旋转的风流汇集,并通过除尘器排出,在除尘器后方形成二次高速射流,巷道内风流速度场分布较为紊乱.4)同时安装附壁风筒及除尘器,巷道内风流流场兼有二者独立作用时的优缺点,掘进机司机前方区域流场分布比较均匀,后方区域由于除尘器出风口的二次高速射流作用,流场分布较为紊乱.

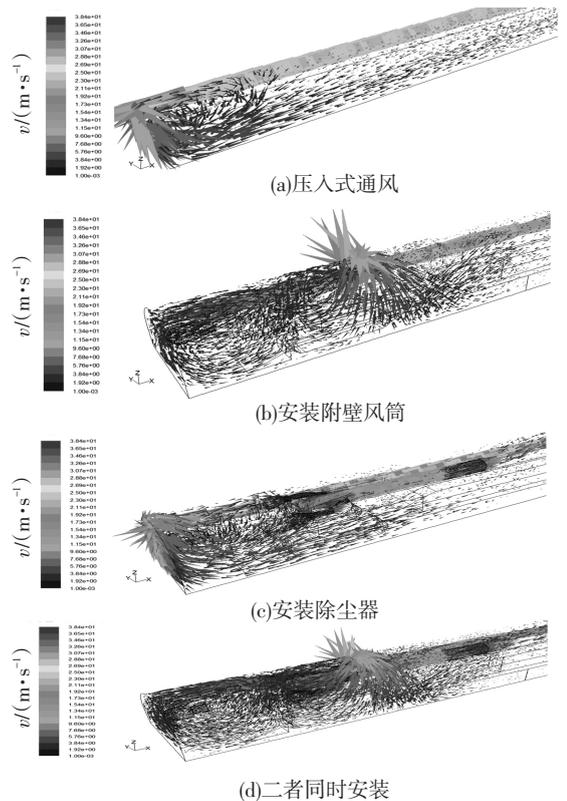


图 2 岩巷综掘工作面风流速度矢量分布

### 3.2 粉尘运动规律及分析

为了能直观地了解粉尘颗粒在岩巷综掘工作面的运动轨迹,在满足人体肉眼观察及计算机计算能力的前提下,在掘进机截割头,左右铲板位置处设置尘源,分别随机产生 150、50 及 50 个粉尘颗粒,并跟踪其运动轨迹,分别得出 4 种条件下岩巷综掘工作面粉尘颗粒停留时间  $t$  的规律见图 3.

从图 3 可以看出:1)粉尘颗粒自各尘源位置

产生后,纵向随风流方向运动,横向随机扩散,扩散过程中受到巷道壁面及设备表面的阻挡及捕捉作用,终止其运动轨迹.2)压入式通风条件下,粉尘颗粒在巷道左帮夹角处大量聚集,轨迹线路比较单一;安装附壁风筒条件下,粉尘颗粒最大限度地均匀分布在司机前方区域内,轨迹路线较为分散;安装除尘器条件下,粉尘颗粒在吸风口位置处大量汇聚,司机后方区域粉尘颗粒较少;二者同时安装时,司机前方区域粉尘颗粒分布比较均匀,且司机后方颗粒极少.3)压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下,尘源处产生的250个粉尘颗粒中,被捕捉数目分别为176、238、202、250个,其对应的最长停留时间分别为179、44、161、27 s.

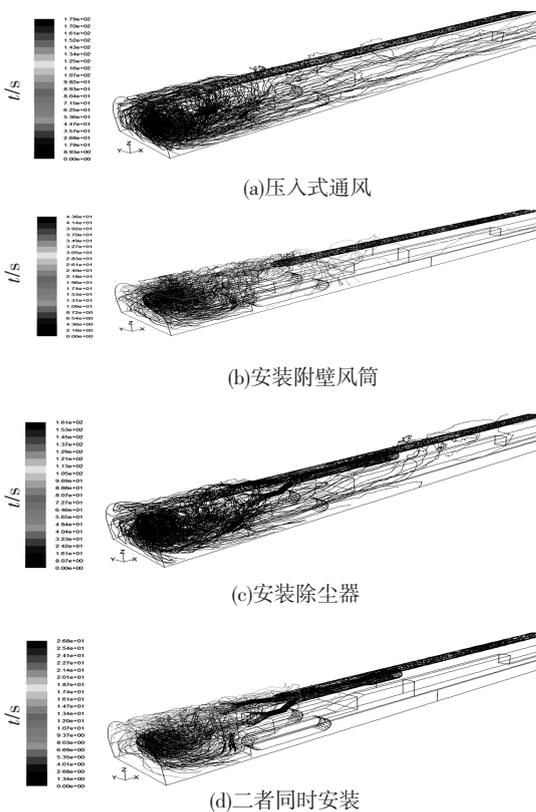


图3 岩巷综掘工作面粉尘颗粒停留时间分布

### 3.3 粉尘质量浓度分布及分析

根据现场掘进工作面各尘源产尘量及产尘强度的结果,为掘进机3个主要尘源赋予相应的质量流率及初始速度等参数,得出岩巷综掘工作面在4种条件下粉尘质量浓度 $\rho$ 分布如图4所示.

从图4可以看出:1)从粉尘分布情况来看,压入式通风时粉尘分布范围最广,几乎遍布整个巷道空间,且数值较大;同时安装附壁风筒及除尘器时粉尘分布范围最小,距迎头15 m之外范围内,几乎没有粉尘存在;单独安装附壁风筒或除尘器时粉尘分布范围介于两者之间,且安装附壁风

筒时分布范围较小.2)在附壁风筒逆时针旋转风墙的作用下,大量粉尘颗粒被阻隔在司机前方区域内无法逸出,司机位置及其后方区域粉尘颗粒较少,粉尘质量浓度较低;安装除尘器后,司机前方区域含尘气流在吸风口前汇聚,并经除尘器净化后排至巷道后方,其降尘效果取决于吸风口的吸风覆盖范围.3)司机位置处(距迎头约为8 m)及其后方区域粉尘质量浓度值的大小,是判断降尘效果优劣的重要指标,由图4可知,距迎头8 m外巷道区域内,各条件下粉尘质量浓度值分别保持在400、100、300、20  $\text{mg}/\text{m}^3$ 以内,可见同时安装附壁风筒及除尘风机时降尘效果最好.

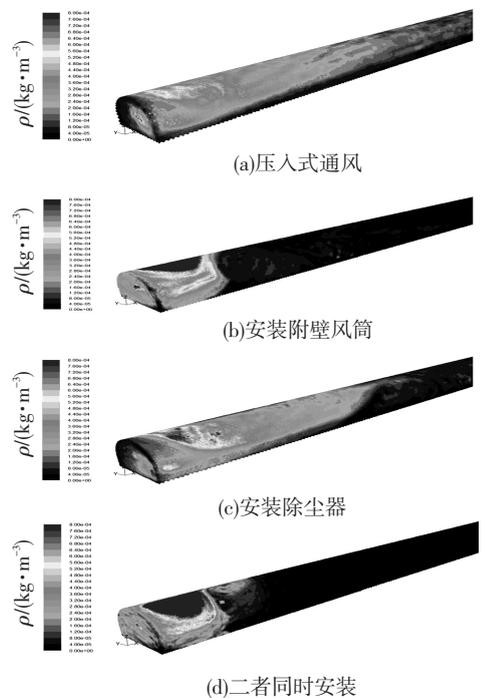


图4 岩巷综掘工作面粉尘质量浓度分布

### 3.4 粉尘质量浓度沿程变化及分析

为研究掘进工作面粉尘质量浓度沿程变化情况,以压入式通风条件为代表,沿巷道走向分别截取不同的线段进行对比分析.图5为掘进巷道内不同断面呼吸带高度( $H = 1.5 \text{ m}$ )粉尘质量浓度沿程变化图,其中 $y = -1.7, 0, 1.4 \text{ m}$ 分别表示掘进巷道左侧人行道、皮带机道及右侧人行道.图6为掘进巷道内左侧人行道在不同高度下粉尘质量浓度沿程变化.图7为压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下左侧人行道呼吸带高度粉尘质量浓度的沿程变化.

从图5~7可以看出:1)在呼吸带高度上,粉尘质量浓度均按照先急剧上升至最大值,后逐步缓慢下降的趋势变化;在巷道前50 m内,左侧人行道粉尘质量浓度较高,右侧人行道较低;在后

50 m 内,随着粉尘颗粒的扩散趋于稳定,且人行道内粉尘颗粒被巷道壁面大量捕捉,人行道粉尘质量浓度均低于皮带机道.2)在不同高度上,粉尘质量浓度变化规律与不同断面变化规律相似,均为先急剧上升至一个最大值,后缓慢下降.整体来看, $z = 1.5\text{ m}$  高度粉尘质量浓度最大,以此高度为中心,沿上下两侧逐步降低,因此呼吸带高度粉尘的控制是防尘工作的重中之重.3)不同现场条件下,粉尘质量浓度沿程变化趋势均与压入式通风条件保持一致.整体来看,降尘效果按优劣进行排序为二者同时安装、安装附壁风筒、安装除尘器、压入式通风,在除尘器出口后方区域内,粉尘质量浓度分别保持在 5、45、75、175  $\text{mg}/\text{m}^3$  以内.

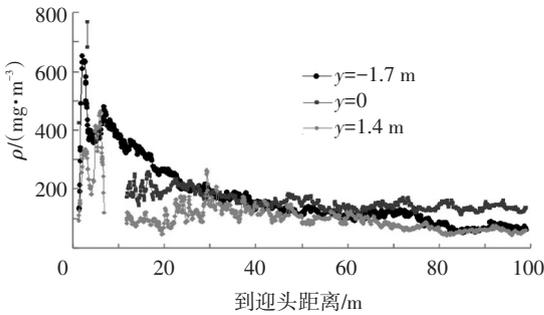


图 5 不同断面粉尘质量浓度沿程变化

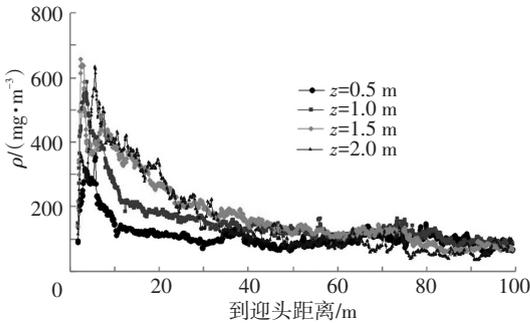


图 6 不同高度粉尘质量浓度沿程变化

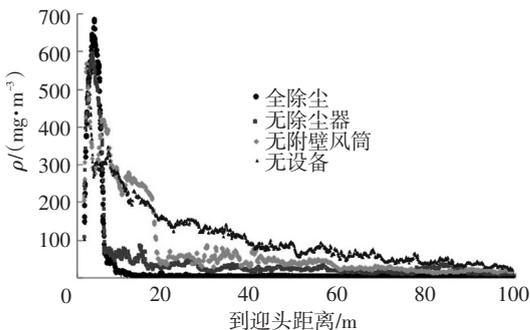


图 7 不同现场条件下粉尘质量浓度沿程变化

## 4 现场实测数据及分析

### 4.1 现场测量条件

本次现场测定是在薛村矿南翼皮带运输巷掘进工作面进行的.为了对比不同现场条件下岩巷掘进工作面的粉尘质量浓度分布情况,分别对压

入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下粉尘质量浓度进行测定.粉尘质量浓度测定期间,压入式风筒出口实测风量为  $367\text{ m}^3/\text{min}$ ;使用附壁风筒后,其前端锥形出风口实测风量为  $88\text{ m}^3/\text{min}$ ,侧面狭缝喷口处实测风量为  $279\text{ m}^3/\text{min}$ ;使用除尘风机时,其脱水器后方出口处实测风量为  $264\text{ m}^3/\text{min}$ .

### 4.2 粉尘质量浓度测量方法

采用滤膜质量浓度法对薛村矿南翼皮带运输巷掘进工作面的粉尘质量浓度进行测定.测量仪器采用薛村矿提供的 AKFC-92A 防爆型粉尘采样器,其原理是含有粉尘的空气经气泵吸入,通过滤膜,空气中的粉尘被已知质量的滤膜采集,从而由滤膜的增量和采气量计算出空气中总粉尘的质量浓度,即

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{Qt} \times 1000. \quad (1)$$

式中: $\rho$  为空气中的粉尘质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $m_1$ ,  $m_2$  分别为采样前后的滤膜质量,  $\text{mg}$ ;  $Q$  为采样流量,  $\text{L}/\text{min}$ ;  $t$  为采样时间,  $\text{min}$ .

### 4.3 粉尘质量浓度测点布置

根据文献[16],在南翼皮带运输巷左侧人行道 ( $y = -1.7\text{ m}$ ) 呼吸带高度 ( $H = 1.5\text{ m}$ ) 平面沿程布置 14 个测点,各测点距离迎头的长度分别为 0、2、4、6、8、11、15、20、30、40、50、60、80、100 m.现场粉尘质量浓度测点布置见图 8.

### 4.4 现场测量结果及分析

根据确定的采样方法,结合相应的测点布置,分别对压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下南翼皮带运输巷内粉尘质量浓度进行现场测定,每种条件下每个测点均进行至少 3 次的测点测定,并取平均值,整理后得不同现场条件下粉尘质量浓度分布如图 9 所示.

从图 9 可以看出:1)4 种现场条件下掘进工作面内粉尘质量浓度沿程分布规律基本保持一致,沿程均呈现出先急剧上升至最大值,后逐步缓慢下降的变化趋势.2)在距迎头 20 m 外区域,压入式通风、安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下粉尘质量浓度分别为  $52 \sim 220$ 、 $20 \sim 100$ 、 $16.5 \sim 65.5$ 、 $7 \sim 10.5\text{ mg}/\text{m}^3$ .3)与压入式通风条件下粉尘质量浓度相比,其他 3 种现场条件下粉尘质量浓度均有一定程度的降低,安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下平均除尘率分别为 49.4%、67.1%及 86.2%.4)将现场实测数据与数值模拟结果进行对比分析发现,模拟结果与实测数据基本吻合,粉尘质量浓度变化规律

基本保持一致。但整体比较之下,模拟结果与实测数据仍然存在一定偏差,这是由于在现场实测、模型建立及参数设定过程中均出现一定误差所引起

的。通过对比分析,验证了模拟结果的准确性,说明运用离散相模型对岩巷综掘工作面通风除尘系统进行模拟是合适的,模拟结果可信。

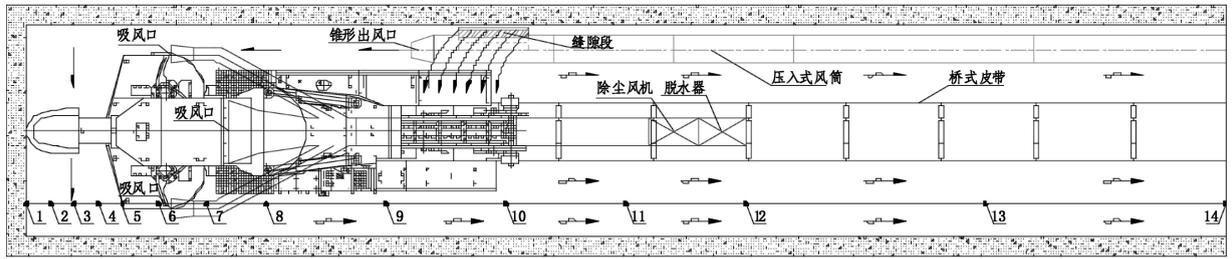


图8 粉尘质量浓度测点布置

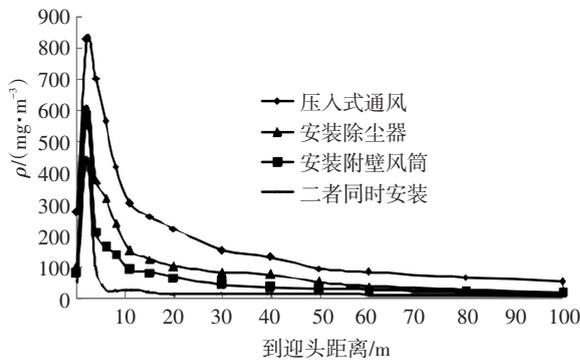


图9 不同现场条件下粉尘质量浓度

## 5 结论

1)通过对南翼皮带运输巷掘进工作面通风除尘系统的数值模拟以及现场应用研究可知,运用离散相模型对岩巷综掘工作面通风除尘系统进行模拟是可行的,模拟结果与实测数据具有较好的一致性。

2)粉尘颗粒自尘源产生后,纵向随风流方向运动,横向随机扩散。扩散过程中受到巷道壁面及设备表面的阻挡及捕捉作用,终止其运动轨迹。

3)粉尘质量浓度在掘进巷道内沿程先急剧上升至最大值,后逐步缓慢下降。在不同断面内,前50 m左侧人行道粉尘质量浓度最高,后50 m皮带机道最高。在不同高度上,粉尘质量浓度以呼吸带为中心沿上下两侧逐步降低。

4)根据现场实测数据可知,以压入式通风条件为基准,安装附壁风筒、安装除尘器及二者同时安装条件下平均除尘率分别为49.4%、67.1%及86.2%。针对4种降尘方案,降尘效果按优劣排序:二者同时安装、安装附壁风筒、安装除尘器、压入式通风。

## 参考文献

[1] 姚玉静,程卫民,聂文,等.综掘工作面粉尘浓度分布的数值模拟[J].矿业安全与环保,2011,38(3):21-24.  
[2] 秦跃平,张苗苗,崔丽洁,等.综掘工作面粉尘运移的

数值模拟及压风分流降尘方式研究[J].北京科技大学学报,2011,33(7):790-794.

[3] 施春红,欧盛南,金龙哲.矿井粉尘运移规律性的试验研究[J].北京科技大学学报,2007,29(2):1-5.

[4] 杜翠凤,王辉,蒋仲安,等.长压短抽式通风综掘工作面粉尘分布规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2010,32(8):957-962.

[5] 王晓珍,蒋仲安,王善文,等.煤巷掘进过程中粉尘浓度分布的数值模拟[J].煤炭学报,2007,32(4):386-390.

[6] 王辉,蒋仲安,杜翠凤,等.综掘巷道粉尘体积分数分布的现场实测与数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(3):345-348.

[7] 张大明.输煤巷道煤尘运移规律及治理技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2010.

[8] 张大明,马云东.巷道内粉尘二次飞扬规律的数值模拟研究[J].能源环境保护,2010,24(2):10-12.

[9] 蒋仲安,陈举师,王晶晶,等.胶带输送巷道粉尘运动规律的数值模拟[J].煤炭学报,2012,37(4):659-663.

[10] 陈举师,蒋仲安,杨斌,等.破碎硐室粉尘浓度空间分布规律的数值模拟[J].煤炭学报,2012,37(11):1865-1870.

[11] 蒋仲安,陈举师,牛伟,等.皮带运输巷道粉尘质量浓度分布规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2012,34(9):977-981.

[12] 刘毅,蒋仲安,蔡卫,等.综采工作面粉尘运动规律的数值模拟[J].北京科技大学学报,2007,29(4):351-353.

[13] 牛伟,蒋仲安,刘毅.综采工作面粉尘运动规律数值模拟及应用[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2010,29(3):357-360.

[14] 牛伟,蒋仲安,王晓珍,等.综放工作面粉尘浓度分布规律的数值模拟[J].中国矿业,2008,17(12):77-80.

[15] NIU W,JIANG Z A,TIAN D M.Numerical simulation of the factors influencing dust in drilling tunnels: its application[J].Mining Science and Technology:China,2011,21(1):11-15.

[16] GBZ/T 192.4—2007.工作场所空气中粉尘测定 第1部分:总粉尘浓度[S].北京:中华人民共和国卫生部,2007.

(编辑 魏希柱)