

## 石棉筛分车间粉尘质量浓度分布规律的数值模拟\*

蒋仲安<sup>1†</sup>, 邓权龙<sup>1</sup>, 时训先<sup>2</sup>, 陈举师<sup>1</sup>

(1.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083;

2.中国安全生产科学研究院 工业安全研究所,北京 100012)

**摘要:**为了掌握石棉选矿厂筛分车间内部粉尘随时间和空间运移的规律,获取通风除尘优化的参数,以茫崖石棉矿第一选矿厂筛分车间为研究背景,依据气固两相流理论,采用计算流体力学的离散相(DPM)模型对筛分车间粉尘浓度分布规律数值模拟,并与现场粉尘浓度实测数据比较分析,模拟结果和实测数据相吻合.研究表明:筛分设备附近粉尘浓度较高,以筛分设备为中心随着距离增加粉尘浓度降低;捕集边界下粉尘浓度比反弹边界较低,粉尘捕集效果更好;筛分车间进风风速控制在 0.6 m/s 左右时,粉尘沉降效果较好;安装抽风集尘罩后,主抽风管风速为 14 m/s 时,平均控尘效率达到 90%,石棉纤维浓度控制在 2.52 f/mL 以下.

**关键词:**石棉筛分车间;粉尘浓度;运移规律;离散相;数值模拟

**中图分类号:**X964

**文献标志码:**A

## Numerical Simulation of Dust Mass Concentration Distribution in Screening Workshop of Asbestos Concentrator

JIANG Zhongan<sup>1†</sup>, DENG Quanlong<sup>1</sup>, SHI Xunxian<sup>2</sup>, CHEN Jushi<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2.Institute of Industrial Safety, China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to master the regularities of dust movement with time and space in the screening workshop of asbestos concentrator and obtain the optimized parameters of dust removal by ventilation, screening workshop of No. 1 concentrator in Mangya Asbestos Mine was considered as the research background. Based on the theory of gas-solid two-phase flow, the discrete phase model (DPM) of computational fluid mechanics was used to simulate the dust concentration in screening workshop. By comparing with field measurement of dust concentration distribution, simulation results are essentially coincident with the measured data. The results indicate that the dust concentration near the screening equipment is higher, and the value decreases as the distance from the screening equipment increases. The dust concentration is lower under trap wall condition than the reflect, and the dust trapping effect is better. The dust settling effect is better when the inlet wind speed is about 0.6 m/s. When the exhaust dust cover is installed and the wind speed of main exhaust pipes is maintained at 14 m/s, the average dust-removal efficiency can reach 90%.

\* 收稿日期:2017-02-07

**基金项目:**国家科技支撑计划资助项目(2015BAK40B02), National Science and Technology Support Program(2015BAK40B02);国家自然科学基金资助项目(51574016), National Natural Science Foundation of China(51574016);北京市自然科学基金青年科学基金资助项目(8164010), the Young Scientists Fund of the Beijing Municipal Natural Science Foundation(8164010);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-BD-17-007A), Fundamental Research Funds for the Central Universities(FRF-BD-17-007A)

**作者简介:**蒋仲安(1963-),男,浙江诸暨人,北京科技大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: jza1963@263.net

and the asbestos fiber concentration can be controlled below 2.52 f/mL.

**Key words:** asbestos screening workshop; dust concentration; migration regularity; discrete phase; numerical simulation

石棉因其具有独特的耐腐蚀性、隔热性和强抗拉性等优良特性,广泛应用于航天、船舶、消防、特殊制造等领域<sup>[1-2]</sup>.国内石棉矿产资源丰富,工业使用量较大,2014年使用量达到50万吨.近几年欧美、德国、日本等国家禁止生产含石棉成分的产品;国内采取全面禁止使用青石棉,安全使用温石棉的方针<sup>[3]</sup>.石棉在开采、选矿、加工等过程容易产生粉尘,污染新鲜空气,威胁作业人员的健康,特别是粉尘含有微细纤维,人体器官组织吸入后易附着和沉降,导致石棉肺、肺癌、间皮瘤等疾病<sup>[4-6]</sup>.筛分作业作为选矿工艺中重要的工序,主要采用振动筛分设备,通过网筛不停的振动,分离粒径大于网筛孔径的块石,由于网筛循环的震荡,致使矿石表面的粉尘扬起,扩散到车间污染空气.目前,国内外对粉尘控制研究主要采用理论分析、相似实验、数值模拟等方法研究粉尘浓度分布规律.国内学者的研究主要集中在矿山作业面<sup>[7-8]</sup>,在石棉筛分车间粉尘方面的研究较少.国外学者在工业粉尘控制做了一定的研究,例如 Silvester 等<sup>[9]</sup>针对压碎破碎设备车间粉尘控制,通过计算流体动力学软件预测车间粉尘分布;Constance<sup>[10]</sup>分别对稀释通风和局部通风两种控尘措施的优缺点进行概述.本文针对石棉筛分车间建立几何模型,通过数值模拟车间不同条件下粉尘的运移规律,结合现场实测数据,获得筛分车间最优通风控尘参数,指导现场控尘改造,对于保障作业人员身体健康有重要意义.

## 1 数学模型与控制方程

### 1.1 数学模型

粉尘粒子在空气运移的理论基础是气固两相流理论,目前,在数值计算方面主要分两种方法:欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法.其中,欧拉-拉格朗日方法是运用欧拉法、拉格朗日法分别处理背景、离散流体,将气体作为背景流体,粉尘粒子视为离散流体,离散相模型(DPM)的理论基础就是基于该方法.本文运用离散相模型研究石棉选厂筛分车间粉尘运动规律,将车间内部空气视为背景流体,采用欧拉法进行研究;将尘颗粒作为离散流体,采

用拉格朗日法研究粉尘粒子运移线路,最终得出粉尘在车间空气中的浓度分布.

### 1.2 控制方程

假定流体为不可压缩的牛顿流体,忽略体积力,则连续相的运动方程选用三维不可压缩 Navier-Stokes 方程:

连续方程:

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

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g - F_i \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为气体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\tau_{ij}$ 为应力张量;  $p$ 为流体相压力,Pa;  $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $x_i, x_j$ 分别为  $x, y$  方向上的坐标,m;  $u_i, u_j$ 分别为流体在  $x, y$  方向上的速度(m/s);  $F_i$ 为控制体平均的颗粒流体阻力,N.

$k-\epsilon$  湍流动能方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &G_k - \rho \epsilon + S_k \quad (3) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\frac{\epsilon}{k} C_{1\epsilon} G_k - \frac{\epsilon^2}{k} C_{2\epsilon} \rho + S_\epsilon \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ;  $G_k$ 为湍动能  $k$  的产生项; $k$ 为湍动能,J;  $\epsilon$ 为湍动能耗散率,m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;  $S_\epsilon$ 为湍动能耗散率源项; $S_k$ 为湍动能源项; $\mu, \mu_t$ 分别为层流和湍流粘性系数,Pa·s;  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_\mu, \sigma_\epsilon, \sigma_k$ 为常数,分别取1.44,1.92,0.09,1.3,1.0.

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迹,在求解过程中,只考虑阻力和重力及颗粒相的作用力<sup>[11-13]</sup>.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_C \quad (5)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量阻力; $F_C$ 为颗粒与颗粒(边界)碰撞力; $F_D$ 可根据式(4)计算:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

式中: $u$  为流体相速度; $u_p$  为颗粒速度; $d_p$  为颗粒直径; $\mu$  为流体动力粘度; $\rho$  为流体密度; $\rho_p$  为颗粒密度; $Re$  为颗粒相对雷诺数,  $Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}$ ;  $C_D$  为曳力系数,  $C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}$ ,  $a_1, a_2, a_3$  为常数.

## 2 几何建模与参数设置

### 2.1 几何模型与网格划分

石棉选厂筛分车间主要有供料皮带间、筛分设备间、物料分类收集间 3 部分,几何模型图如图 1 所示.设备间长 12 m、宽 9 m、高 4 m;车间安装 2 台筛分机,筛分机尺寸为长 4 m、宽 1 m、高 1.2 m;开有两扇门,高 3 m、宽 2 m;给料管段断面为 0.8 m × 0.6 m.集尘罩整体形状为规则的六面体,大罩口断面 1.0 m × 0.6 m,集尘罩小口直接与抽风通连接.采用 Gambit 软件划分模型网格,详见图 2.

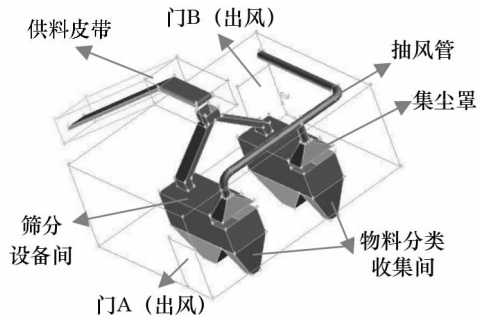


图 1 筛分车间几何模型图

Fig.1 The geometrical model of screening workshop

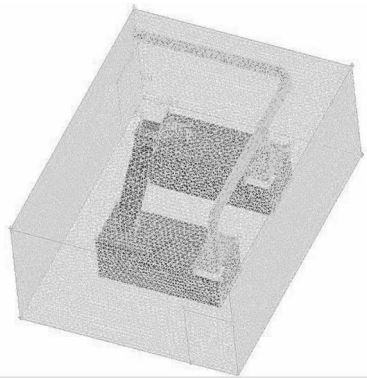


图 2 筛分车间网格划分

Fig. 2 The meshing of screening workshop

### 2.2 计算模型参数设置

根据茫崖石棉矿第一选厂筛分车间的具体情况和相关实测数据,结合 CFD 相关理论,对 FLUENT 数值模拟进行参数设定<sup>[14-16]</sup>,详见表 1.

表 1 计算模型参数设定表

Tab.1 The calculation model parameters

边界条件	参数设定	边界条件	参数设定
求解器	分离求解器	喷射源类型	面喷射
湍流模型	$k-\epsilon$ 双方程模型	质量流率	0.000 2 kg/s
能量方程	关闭	材质	石棉矿石
入口边界类型	速度入口	密度	2 000 kg/m <sup>3</sup>
入口速度	0.25 m/s	粒径分布	R-R
出口边界类型	自由出流	粒径范围	10 <sup>-6</sup> ~10 <sup>-4</sup> m
水力直径	2.4 m	分布指数	1.82
湍流强度	3.32%	离散相边界	捕捉/反弹
离散相模型	打开	湍流扩散模型	随机轨道模型
计算频率	10	收敛标准	10 <sup>-3</sup>
阻力特征	球形颗粒	压力-速度耦合	SIMPLEC 算法

## 3 数值模拟结果与对比分析

### 3.1 风流流场分析

设置车间进风口风速为 0.25 m/s,通过对车间风流流场进行数值模拟,得到风流场速度矢量图和风流速度云图,如图 3,图 4 所示.从图中看出:①风流进入车间先沿着风流初始方向向前运动,随后前方受到车间壁面边界的阻挡后,风向几乎发生 90° 变化流向车间出口.②风流流场影响区域呈现不断扩大的趋势,流场风速则是呈现减小的趋势,风流受附壁效应的影响,流向车间中央风流较少,形成涡流区,风流交换周期较长.③根据风流状态不同分为:射流区、涡流区、回流区、出口区,射流区和出口区风速在 0.20~0.25 m/s,回流区风速保持在 0.10~0.20 m/s,涡流区风速范围 0~0.10 m/s.

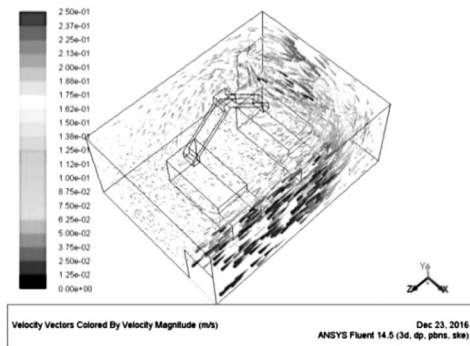


图 3 筛分车间风流场速度矢量分布图

Fig. 3 The distribution of velocity vector in screening workshop

### 3.2 粉尘运动规律

为直观观察粉尘粒子在筛分车间内的运动轨迹,在离散相模型设置筛分机物料出口处随机产生

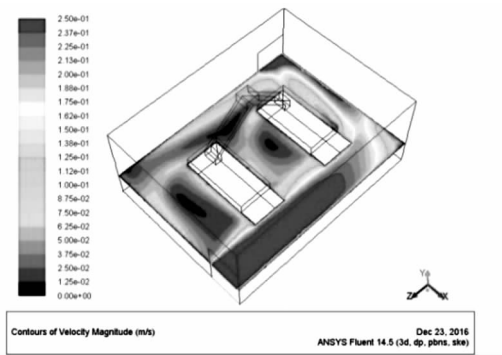


图4 筛分车间风流速度云图

Fig. 4 The speed cloud in screening workshop

120个粉尘粒子,运用随机游走模型(DRW)追踪粒子运动轨迹,得到图5.图6,图7分别为车间粉尘质量浓度空间分布图和分布云图.从图5~图7得出:  
 ①粉尘从尘源产生后随风流运动方向进行逸散,粉尘受到壁面边界阻挡和碰撞后停止运动.  
 ②在筛分设备物料出口产生的粉尘浓度达到最大值,随着距离该区域距离增大粉尘浓度呈降低趋势.  
 ③粉尘受车间壁面边界阻挡和碰撞等效应,同时部分粉尘随风流排出,在不同程度上起到降低粉尘的作用,但车间内粉尘浓度依然较大,平均浓度约  $65 \text{ mg/m}^3$ ,

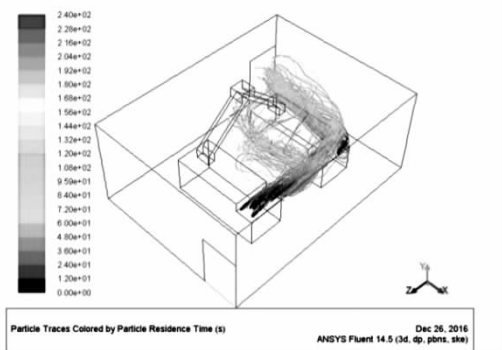


图5 粉尘颗粒运动轨迹图

Fig. 5 The particle trajectory of dust particles

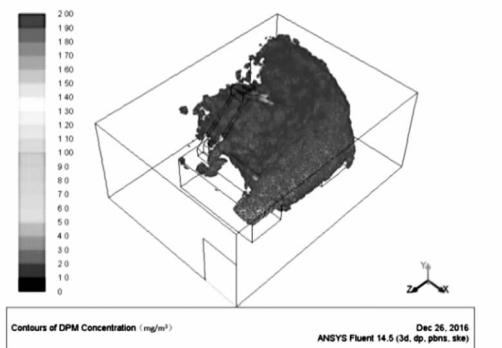


图6 筛分车间粉尘浓度空间分布图

Fig. 6 The dust concentration distribution in screening workshop

筛分设备物料出口浓度高达  $186.5 \text{ mg/m}^3$ ,中央漩涡区浓度低于  $28 \text{ mg/m}^3$ 且粉尘停留时间较长,排尘与沉降效果差.

### 3.3 不同边界条件粉尘浓度

为比较不同边界条件筛分车间粉尘运动和浓度分布规律的差异性,分别模拟了边界条件设置为捕集和反弹两种情况,图7,图8分别为筛分车间边界设置为捕集条件、反弹条件粉尘浓度分布云图.经对比模拟结果发现:在粉尘浓度分布特征上两者基本一致,在数值上反弹边界情况较大,由此可见,在筛分车间日常作业过程中,现有工艺允许条件下,采取适当地润湿墙面、地板的措施,加强对壁面的捕集效率,有助于减轻筛分车间粉尘污染.

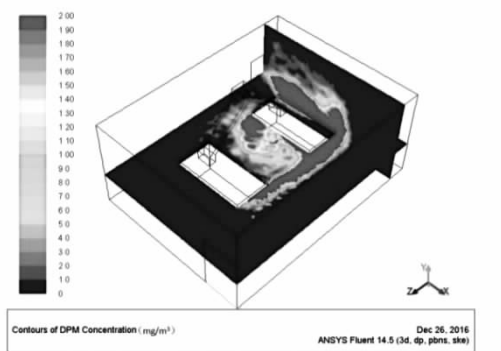


图7 筛分车间粉尘浓度分布云图

Fig. 7 The dust concentration cloud in screening workshop

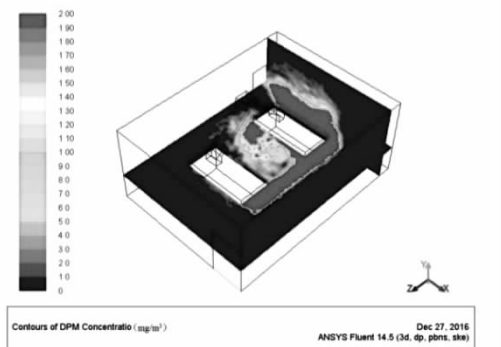


图8 边界设置反弹时粉尘浓度云图

Fig. 8 The dust concentration cloud under reflect wall condition

### 3.4 不同车间进风风速粉尘浓度

研究筛分车间不同进风风速条件粉尘浓度空间分布情况,选取了车间进风风速为  $0.20 \text{ m/s}$ ,  $0.40 \text{ m/s}$ ,  $0.60 \text{ m/s}$ ,  $0.80 \text{ m/s}$  4种情况下,换算成进风风量分别对应为  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,分别进行模拟,模拟结果详见图9.为了量化不同进风风速排尘效果,对车间内人体呼吸带高度

( $H=1.5\text{ m}$ )平面粉尘浓度取平均值,进风风速为 0.20 m/s, 0.40 m/s, 0.60 m/s, 0.80 m/s 4 种情况下对应的呼吸带高度粉尘浓度平均值分别为  $97.58\text{ mg/m}^3$ ,  $82.42\text{ mg/m}^3$ ,  $70.87\text{ mg/m}^3$ ,  $67.21\text{ mg/m}^3$ . 从模拟结果看出:当进风风速在 0.20~0.80 m/s 区间,筛分车间排尘效果随着风速变大而增强;当进风风速从 0.60 m/s 增加到 0.80 m/s 时,排尘效果增幅较小.考虑到当风速较大时,风流流动容易扬起车间地面积尘,产生二次扬尘;当风速较小时,车间内部排尘效果不好.因此,综合考虑,建议筛分车间进风风速控制在 0.6 m/s 左右.

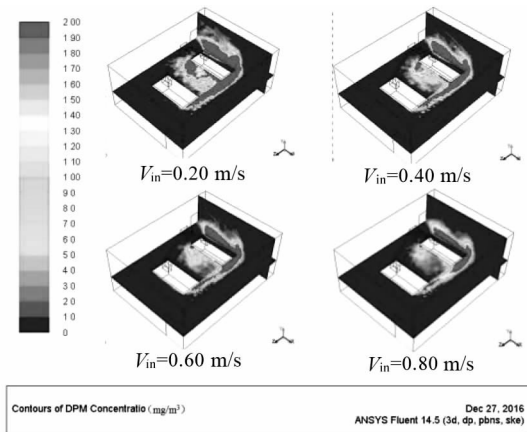


图 9 不同进风风速下粉尘浓度分布云图  
Fig. 9 The dust concentration cloud at different inlet wind speeds

### 3.5 安装抽风集尘罩粉尘浓度分布

为改善车间作业环境,在两台筛分设备的物料出口处安装集尘罩,用直径为 400 mm 的风管与集尘罩连通,模拟主抽风管风速为 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s 4 种情况车间粉尘浓度分布,车间进风风速为 0.6 m/s,控尘效果如图 10 所示.对比分析得出:安装抽风集尘罩后,大部分粉尘经集尘罩和抽风管排出,车间内部粉尘浓度下降明显,粉尘污染得到良好的控制.随着主抽风管风速增加,控尘效果先显著增强,后趋于稳定,当抽风风速达到 14 m/s 时,抽风集尘罩基本能控制筛分设备物料出口处粉尘的外逸,控尘效果较好,当增加抽风风速至 16 m/s 时,控尘效果趋于稳定.综合筛分车间控尘效果和风机耗能等因素,最终确定抽风集成罩主抽风管适宜风速为 14 m/s.

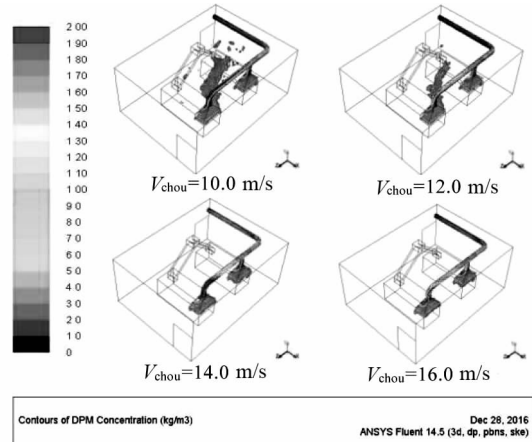


图 10 不同抽风风速筛分车间控尘效果图  
Fig. 10 The dust removal effect at different extraction wind speeds

## 4 实测结果与模拟结果对比分析

依据 GBZ/T192.1—2007, GBZ/T192.5—2007 以及相关文献<sup>[17-18]</sup>,结合筛分车间空间结构和产生尘源位置情况,对车间内呼吸带高度布置 10 个测点,测点布置如图 11 所示.现场采用 IFC-2 防爆型粉尘采样仪,选用过氯乙烯纤维滤膜(孔径  $0.8\ \mu\text{m}$ )分别对集尘罩安装前后粉尘进行采样.实验室使用 BK5000 相差显微镜对样本石棉纤维浓度进行测定,数据结果如表 2 所示,采样滤膜处理后在显微镜下观察石棉纤维形态,如图 12 所示.运用滤膜称重法对样本进行粉尘浓度测定,每个测点采用 3 次以上重复操作取平均值,并将实测数据与模拟结果进行对比,对集尘罩安装前后的控尘效率进行计算,如图 13 所示.

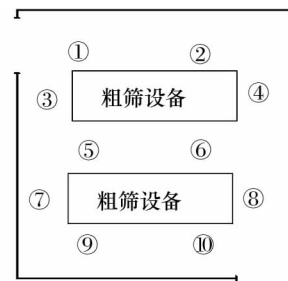


图 11 粉尘测点布置图  
Fig. 11 The layout of dust measuring points

表2 筛分车间各个测点石棉纤维浓度

Tab.2 The concentration of asbestos fiber in screening workshop

测定数据	测点编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
集尘罩安装前 石棉纤维浓度/(f·mL <sup>-1</sup> )	23.21	20.83	14.16	12.44	17.60	19.82	6.22	9.86	4.11	3.26
集尘罩安装后 石棉纤维浓度/(f·mL <sup>-1</sup> )	2.52	2.34	1.55	1.42	1.86	2.10	0.96	1.11	0.64	0.58

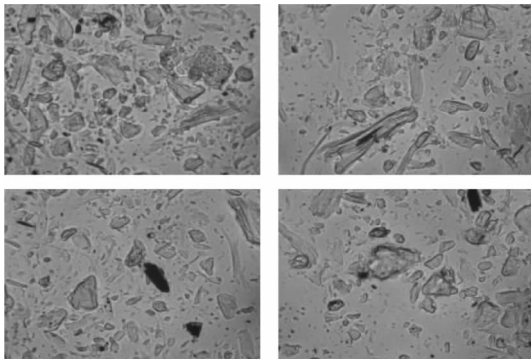


图12 采样滤膜石棉纤维在显微镜下放大视野图

Fig.12 The pictures of asbestos fibers on the sampling membrane under microscope

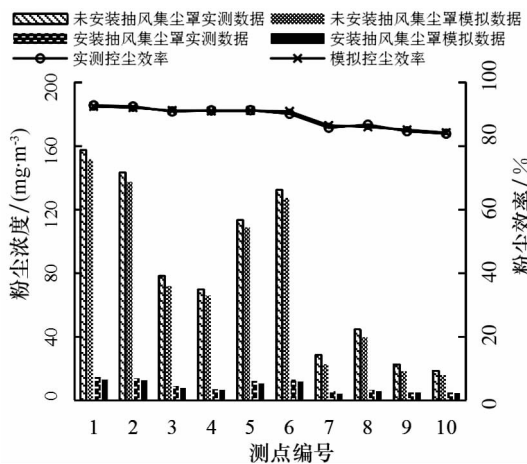


图13 抽风集尘罩安装前后粉尘浓度实测与模拟数据

Fig.13 The measured and simulated data of dust concentration before and after installation of collector

如图12为石棉纤维在显微镜下放大的视野图,石棉纤维的形态呈现细条针丝状,而岩尘颗粒为细小颗粒状,石棉粉尘中还有微细纤维,人体吸入体内后,容易附着于器官组织引起病变.由表2,图13可以看出:①筛分车间安装集尘罩前后模拟结果和实测数据基本吻合,说明几何建模和离散相模型(DPM)等相关的设置均合理,数值模拟结果具有一定的可靠性.②经过对比集尘罩安装前后的各测点粉尘浓度数据,发现安装集尘罩后,粉尘通过风管抽走,筛分车间内部粉尘急剧下降,各测点的平均控尘效率达到90%.③集尘罩安装后,筛分车间粉尘浓度降低的同时,粉尘中石棉纤维浓度也得到了

良好的控制,1号测点石棉纤维浓度由原来最高的23.21 f/mL下降至2.52 f/mL.图14为抽风集尘罩安装前后筛分车间的现场照片.



(a)安装前

(b)安装后

图14 抽风集尘罩安装前后车间作业时现场照片  
Fig.14 The workshop photos before and after the installation of the exhaust dust collector

## 5 结论与建议

通过对茫崖石棉矿第一选矿厂筛分车间粉尘浓度分布进行数值模拟,并与现场实测粉尘浓度比较分析,得到如下结论与建议:

1)两台筛分设备附近粉尘浓度较大,并以筛分设备为中心随着距离增大粉尘浓度呈现降低的趋势.建议对筛分设备采取防尘降尘措施,从尘源位置遏止粉尘逸散.

2)与反弹边界相比,捕集边界下车间内粉尘浓度更低,捕集粉尘颗粒效果更好.在工艺允许前提下,适当采取地湿润车间墙壁、地面、顶板等措施.

3)根据车间进风口和出风口的现有布局情况,通过数值模拟得出:当车间进风风速控制在0.6 m/s左右时,能够较好地排尘车间粉尘.建议将筛分车间进风风速设为0.6 m/s左右.

4)在两台筛分设备物料出口处安装负压抽风集尘罩后,各测点的平均控尘效率达到90%,车间石棉纤维浓度控制在2.52 f/mL以下,主抽风管风速建议控制在14 m/s时为宜.

抽风控尘研究的内容还有很多,其中集尘罩的尺寸、形状、布置方式等均可做进一步深入的研究.

## 参考文献

- [1] 王瑜.我国石棉开采和加工企业粉尘危害研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):144-147.

- WANG Yu. Study on dust hazard of asbestos mining and processing enterprises in China[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(4): 144—147. (In Chinese)
- [2] 王勇毅, 姜亢, 郭建中, 等. 石棉相关产品生产过程粉尘危害与控制对策[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(12): 156—160  
WANG Yongyi, JIANG Kang, GUO Jiangzhong, *et al.* Dust hazards and control countermeasures in the process of asbestos-related production[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(12): 156—160. (In Chinese)
- [3] 樊晶光. 石棉粉尘控制现状分析[J]. *劳动保护*, 2005(1): 26—27.  
FAN Jingguang. The analysis of asbestos dust control[J]. *Labour Protection*, 2005(1): 26—27. (In Chinese)
- [4] 陈照亮, 杨俊杰, 金春姬. 我国石棉的安全性分析及对策研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2007, 3(2): 36—42.  
CHEN Zhaoliang, YANG Junjie, JIN Chunji. Safety analysis and countermeasures of asbestos[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2007, 3(2): 36—42. (In Chinese)
- [5] 陈志霞, 陈水平, 张林忠, 等. 某石棉矿接尘工人恶性肿瘤 10 年回顾性调查[J]. *中国职业医学*, 2008, 35(5): 391—393.  
CHEN Zhixia, CHEN Shuiping, ZHANG Linzhong, *et al.* Ten-year retrospective study on malignant tumor in workers exposed to asbestos dust in an asbestos mine[J]. *China Occupational Medicine*, 2008, 35(5): 391—393. (In Chinese)
- [6] 甘四洋, 董发勤, 曾娅莉, 等. 温石棉、纳米 SiO<sub>2</sub>、硅灰石及人造纤维粉尘的细胞毒性研究[J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(4): 13—16.  
GAN Siyang, DONG Faqin, ZENG Yali, *et al.* Research on toxicity of chrysotile, nana-silica, wollastonite and 3 kinds of artificial mineral fibers[J]. *Journal of Safety Science and Environment*, 2009, 9(4): 13—16. (In Chinese)
- [7] 谭聪, 蒋仲安, 王明, 等. 综放工作面多尘源粉尘扩散规律的相似实验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 122—127.  
TAN Cong, JIANG Zhongan, WANG Ming, *et al.* Similarity experiment on multi-source dust diffusion law in fully mechanized caving face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 122—127. (In Chinese)
- [8] 周刚, 程卫民, 陈连军, 等. 综放工作面粉尘浓度空间分布规律的数值模拟及其应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(12): 2094—2099.  
ZHOU Gang, CHENG Weimin, CHEN Lianjun, *et al.* Numerical simulation and its application of dust concentration spatial distribution regularities in fully-mechanized caving face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2094—2099. (In Chinese)
- [9] SILVESTER S A, LOWNDES I S, KINGMAN S W, *et al.* Improved ventilation and dust capture in underground crushing plants[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, 31(2): 311—331.
- [10] CONSTANCE J A. Ways to control airborne contaminants in your plant [J]. *Powder and Bulk Engineering*, 2004, 18(5): 118—119.
- [11] 黄优, 桂祥友, 梦絮屹, 等. 筛分车间粉尘颗粒在气流中的受力分析及其运动轨迹的研究[J]. *煤炭工程*, 2008(8): 88—90.  
HUANG You, GUI Xiangyou, MENG Xuyi, *et al.* Research on stressed analysis and moving trace on dust particles in air flow of screening shop[J]. *Coal Engineering*, 2008(8): 88—90. (In Chinese)
- [12] 荆俊山, 张仁健, 傅刚. 风速对生产车间纳米粉尘浓度影响的模拟[J]. *中国分体技术*, 2009, 15(2): 88—90.  
JING Junshan, ZHANG Renjian, FU Gang. Numerical simulation of nano-sized particles dispersion inside production workshop under different wind speed[J]. *China Powder Science and Technology*, 2009, 15(2): 88—90. (In Chinese)
- [13] 陈举师, 姜兰, 蒋仲安. 边坡钻孔作业中粉尘分布及其影响因素的数值模拟[J]. *工程科学学报*, 2015, 37(6): 685—692.  
CHEN Jushi, JIANG Lan, JIANG Zhongan. Numerical simulation of dust distribution and influencing factors in slope drilling [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(6): 685—692. (In Chinese)
- [14] 马云东, 罗根华, 郭昭华. 转载点粉尘颗粒扩散运动的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(2): 16—18.  
MA Yundong, LUO Genhua, GUO Zhaohua. Numerical simulation on application of diffuse regulation with powre dust in transshipping site [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(2): 16—18. (In Chinese)
- [15] 谭聪, 蒋仲安, 陈举师, 等. 综采割煤粉尘运移影响因素的数值模拟[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(6): 716—721.  
TAN Cong, JIANG Zhongan, CHEN Jushi, *et al.* Numerical simulation of influencing factors on dust movement during coal cutting at fully mechanized working faces[J]. *Journal of University of Science and Technology Bengjing*, 2014, 36(6): 716—721. (In Chinese)
- [16] 陈举师, 蒋仲安, 王明. 胶带输送巷道粉尘浓度分布的数值模拟及实验研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2015, 42(6): 127—134.  
CHEN Jushi, JIANG Zhongan, WANG Ming. Numerical simulation and experimental research on dust concentration distribution in belt conveyer roadway [J]. *Journal of Hunan University : Natural Sciences*, 2015, 42(6): 127—134. (In Chinese)
- [17] GBZ/192.1—2007 工业场所空气中粉尘测定(第 1 部分): 总粉尘浓度[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 1—8.  
GBZ/192.1—2007 Method for determination of dustin the air of workplace Part 1: Total dust concentration[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010: 1—8. (In Chinese)
- [18] GBZ/192.5—2007 工业场所空气中粉尘测定(第 5 部分): 石棉纤维浓度[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010: 26—35.  
GBZ/192.5—2007 Method for determination of dustin the air of workplace Part 5: Asbestos fiber concentration[S]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010: 26—35. (In Chinese)