

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.020

破碎硐室粉尘质量浓度分布的数值模拟及实验

陈举师, 蒋仲安, 王 明

(1. 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: 为了改善破碎硐室粉尘质量浓度超标的现状, 获取合理的通风除尘参数, 根据相似原理, 结合气固两相流的运动方程, 导出了模拟破碎硐室粉尘运动的相似准则数, 建立了破碎硐室相似模型, 运用 Fluent 软件对破碎硐室相似模型粉尘质量浓度分布进行数值模拟, 并与相似实验数据对比分析, 模拟结果与实验数据基本吻合. 研究表明: 捕捉壁面条件下粉尘质量浓度较之反弹壁面要低; 入口风速为 0.2~0.5 m/s 时, 粉尘质量浓度随风速的增大逐步降低. 安装抽风除尘系统后, 粉尘质量浓度基本保持在 2 mg/m³ 以内, 平均除尘率高达 90% 以上.

关键词: 破碎硐室; 相似准则; 气固两相流; 数值模拟; 粉尘质量浓度分布

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0115-07

Numerical simulation and experimental research on dust concentration distribution in crushing chamber

CHEN Jushi, JIANG Zhongan, WANG Ming

(1. 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 improve the situation of dust concentration exceeds in crushing chamber and obtain rational parameters for the design of dust removal by ventilation, due to the similarity theory and the motion equations of gas-solid two-phase flow, the similarity index was deduced and a similarity model device was designed for the specific situation in the crushing chamber. Furthermore, the dust concentration distribution of similarity model in crushing chamber was simulated by using software named Fluent. After the comparison with similar experimental data analysis, the result showed that the simulation result was consistent with the experimental data. Therefore, the results indicated that dust concentration in chamber under trap wall condition is lower than it under the reflect condition. When the wind velocity at entrance was in the range of 0.2 m/s to 0.5 m/s, dust concentration gradually reduced with the increasement of wind velocity. Finally, after the installation of downdraught dedusting system, the dust concentration was below 2 mg/m³, and the average removal rate reached 90%.

Keywords: crushing chamber; similarity criterion; gas-solid two-phase flow; numerical simulation; dust concentration distribution

破碎硐室在生产过程中, 大块矿石能被破碎机提供的外部能量冲击成小的碎块, 同时伴随着粉尘的产生. 在该工艺环节中, 粉尘主要来源于两个方面:

一是破碎机自身工作原理产生; 二是矿石高度落差及与输送设备水平相对速度产生和扬尘^[1-3]. 粉尘的危害性是多方面的, 最普通且最严重的是引发尘肺病, 会对井下工人身体健康造成了极大的威胁.

目前国内外在粉尘领域的研究成果主要集中在巷道型作业面, 硐室类作业面的研究成果较少. 国内外专家学者针对硐室类作业面粉尘运移规律及控制技术两个方面展开了研究, 在运移规律方

收稿日期: 2014-04-28.
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.
通信作者: 蒋仲安, jza1963@263.net.

面,主要采用理论分析、相似实验及数值模拟等方法对粉尘运动进行研究,得到硐室空间粉尘运移规律及质量浓度分布规律.在控制技术方面,国外主要采用了密闭抽风除尘、喷雾洒水除尘、高压静电除尘及超声雾化抑尘等措施来实现除尘目标.通过在破碎机下料口尘源处安装抽风除尘系统,并配合喷雾降尘装置的使用,将粉尘尽可能地就地沉降,并将继续悬浮在空气中的粉尘收集起来并净化^[4-7].国内主要采用安装抽风除尘系统的方式对粉尘予以控制.虽然这些措施能够在一定程度上降低粉尘质量浓度,但其应用效果远远达不到国家卫生标准的要求^[8-11].

因此,降低破碎硐室的粉尘质量浓度,对于我国铁矿企业来说已是迫在眉睫的问题.研究破碎硐室空间粉尘运移规律及质量浓度分布规律,掌握不同边界条件下粉尘质量浓度的变化情况,对于探索适用于破碎硐室的粉尘控制新工艺、新技术、新设备、新方法具有十分重大的意义.

1 相似模型的建立

破碎硐室粉尘质量浓度分布的相似实验主要研究粉尘在气体中的运动规律以及分布情况,因此相似准则数的导出要同时考虑气体和粉尘.由于气流是推动粉尘运动的基本动力之一,因此,应使用气体的运动方程和粉尘的运动方程来描述气固两相流动过程的全部物理现象^[12].

1.1 相似准则数的导出

根据气固两相流的运动方程,其中有量纲的物理量有 $\rho_g, \rho_p, U_g, U_p, \mu_g, d_p, g, l, t, P$ 共 10 个,分别表示气体密度(kg/m^3),粉尘颗粒密度(kg/m^3),气体速度(m/s),粉尘颗粒速度(m/s),气体动力粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}$),粉尘颗粒直径(m),重力加速度(m/s^2),长度(m),时间(s)及气压(Pa).

通过量纲分析,可以导出斯托克斯准则数 $\left(Stk = \frac{d_p^2 \rho_p |U_g - U_p|}{\mu_g} \right)$ 、均时性准则数 $\left(Ho = \frac{U_g t}{l} \right)$ 、弗劳德准则数 $\left(Fr = \frac{U_g}{\sqrt{gl}} \right)$ 、雷诺准则数 $\left(Re = \frac{l \rho_g U_g}{\mu_g} \right)$ 、密度准则数 $\left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)$ 、运动准则数 $\left(\frac{U_p}{U_g} \right)$ 及欧拉准则数 $\left(Eu = \frac{P}{\rho_g U_g^2} \right)$ 等 7 个相似准则数.其中,欧拉准则数 Eu 是非定型相似准则数,予以排除.

根据流动的单值条件,包括几何条件、物理条

件(ρ_g, μ_g, g)、气流进出口速度分布等,可导出几何相似准则数 $\left(\delta_l = \frac{D}{l} \right)$ 、颗粒雷诺准则数 $\left(Re_p = \frac{d_p \rho_g |U_g - U_p|}{\mu_g} \right)$ 和界面的相对粗糙度 $\left(\frac{\Delta}{D} \right)$.其中 D, Δ 分别表示水力直径(m)及界面粗糙度.

因此,本次实验中可导出的独立相似准则数

共有 9 个: $Stk, Ho, Fr, Re, \frac{\rho_p}{\rho_g}, \frac{U_p}{U_g}, \delta_l, Re_p$ 和 $\frac{\Delta}{D}$.

1.2 相似准则数的简化

在进行相似模型实验设计时,由于受到比例尺制约关系的限制,要想使实验模型与原型之间各个相似准则数均相等是比较困难的,但在保证足够准确度的情况下,运用近似模型法来进行相似模型实验设计,以保持局部相似或近似是完全可以实现的.根据破碎硐室粉尘运动的实际特点,可将 9 个相似准则数简化为 Stk, δ_l, Re_p 和 $\frac{\Delta}{D}$ 等 4 个进行相似模型设计.

1.3 破碎硐室相似模型的建立

遵循相似原理,根据推导并简化后的相似准则数,以西石门铁矿 27#破碎硐室为原型,并对北京科技大学土木楼 D09 破碎实验室进行相应的改造,将其作为本次实验所需的相似模型.由于西石门铁矿 27#破碎硐室的长约 21 m、宽约 14 m、高约 8 m,而 D09 破碎实验室的长度约为 10 m、宽约 7 m、高约 4 m,则基本可以确定破碎硐室几何相似比 $C = l : l' = 2 : 1$.

D09 破碎实验室共有两道门,分别位于实验室左右两侧,如图 1 所示.实验室左前方安装有 1 台 XPC-60×100 型颞式破碎机,其外形尺寸为 1.24 m×0.65 m×1.1 m,下料口中心距前方壁面及左侧壁面分别为 1.7、2.4 m;在破碎机的右后方安装有 LZY-10 型振动袋式除尘器 1 台,用来除去破碎过程中产生的粉尘,除尘器处理风量为 1 600 m^3/h ,其外形尺寸为 1.5 m×1 m×2.5 m.

2 数值模拟结果及分析

根据破碎硐室相似模型装置的结构尺寸及相关参数的选取,运用 GAMBIT 2.0 建立破碎硐室相似模型装置的三维几何模型并进行网格划分.根据相似模型实验装置的实际情况,结合多相流动和计算流体力学的数值方法,运用 FLUENT 6.3 对相似模型空间粉尘运移规律及质量浓度分布特征进行

求解,并与相似实验结果进行对比分析,以验证模拟结果的准确性及模拟方法的可行性^[13-19].

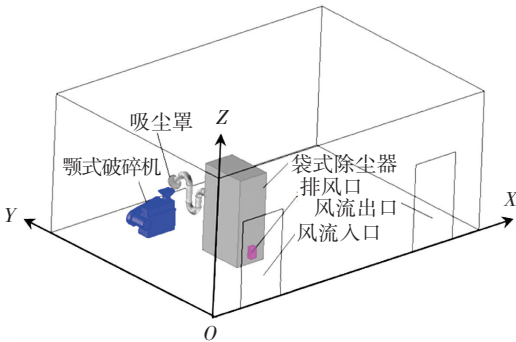


图 1 破碎硐室相似实验模型装置示意

2.1 风流流场分布

当硐室模型入口风速为 0.4 m/s 时,计算得出硐室模型空间风流流场分布速度矢量图及渲染图分别如图 2、3 所示,从图中可以看出:1) 风流自入口进入硐室后,沿原风流方向继续向前流动,流动至硐室前端壁面后,受壁面的阻碍作用转向右方继续流动,流动至右侧壁面的风流由于右侧壁面的阻碍作用又转向后方流动,最终由硐室出口排出.2) 风流流动过程中是以一个沿程覆盖范围逐渐扩大的趋势流动,且风速沿程逐步衰减,根据风流流动过程中所呈现出的不同状态,将硐室内风流流场划分为 3 个区域,即射流区、回流区及涡流区.3) 由于风流流动过程中的附壁效应,扩散至硐室中央风量较少,导致硐室中央风流循环效果较差,并在中央区域形成一个风流漩涡.随着风流的附壁流动,风流漩涡的边界呈现出向内收缩的趋势.4) 风流向前流动阶段,风速整体保持在 0.3~0.4 m/s;向右流动阶段,风速整体保持在 0.2~0.3 m/s;向后流动阶段保持在 0~0.2 m/s;在硐室出口处,由于风流在该区域内大量汇集,风速骤然增至 0.4 m/s 以上.

2.2 粉尘质量浓度空间分布

为了能直观地了解粉尘颗粒在破碎硐室相似模型内的运动轨迹,在满足人体肉眼观察及计算机计算能力的前提下,在离散相模型中,令破碎机下料口处随机产生 170 个粉尘颗粒,并运用随机轨道模型跟踪其运动轨迹,得破碎硐室相似模型装置粉尘运动规律如图 4 所示.通过大批量地跟踪粉尘颗粒运动轨迹并对其进行统计分析,得破碎硐室相似模型装置粉尘质量浓度空间分布如图 5、6 所示.图 6 中取 $z = 1$ m(距地面 1 m)平面与 $y = 5.3$ m(破碎机下料口中心)断面垂直相交.从图 4~6 中可以看出:1) 粉尘颗粒自尘源处产生后,随风流方向在模型空间内扩散,横向随机脉动,在运动过程中与

硐室壁面或设备表面接触时,终止其运动轨迹.2) 粉尘质量浓度在破碎机下料口附近区域达到最大值,并以该区域为中心径向逐步降低.在竖直方向上,粉尘质量浓度以粉尘颗粒最终上升到的最高平面为中心向上下方向逐步降低.在水平方向上,粉尘质量浓度在破碎机下料口附近区域较高,而硐室内涡流区域内粉尘质量浓度则较低.3) 随着风流在模型空间内流动,由于硐室壁面的阻挡及碰撞等效应,粉尘质量浓度有所降低,但降幅较小.靠近壁面区域内粉尘质量浓度基本保持在 25 mg/m³ 以上,而涡流内粉尘质量浓度基本维持在 10 mg/m³ 以下.

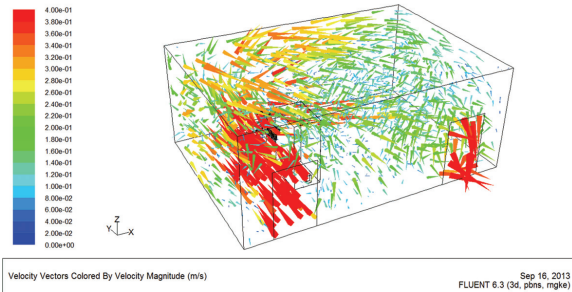


图 2 硐室模型空间风流流场分布速度矢量图

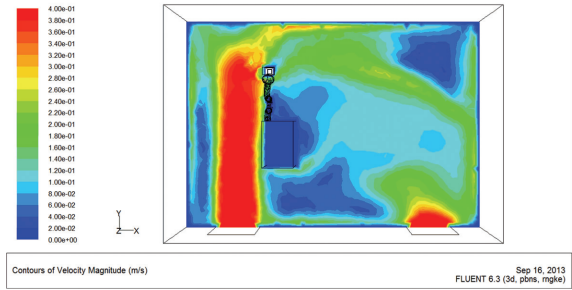


图 3 硐室模型空间风流流场分布渲染图

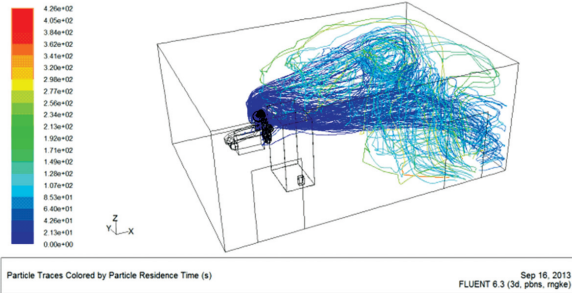


图 4 破碎硐室相似模型装置粉尘运动规律

2.3 不同壁面条件下粉尘质量浓度分布

为了研究壁面条件对模型空间粉尘质量浓度分布的影响,在壁面参数中进行设置,对反弹壁面条件及捕捉壁面条件下粉尘质量浓度分布进行模拟,图 6 为捕捉壁面条件下粉尘质量浓度分布,图 7 为破碎模型在反弹壁面条件下的粉尘质量浓度分布情况,从图 6、7 中可以看出:反弹壁面条件下

模型空间内粉尘质量浓度整体分布规律与捕捉壁面条件基本吻合,其数值较之捕捉壁面条件要大。由此可见,捕捉壁面条件下硐室壁面对粉尘颗粒的捕捉及拦截作用十分明显,在日常防尘工作中,应该加强壁面洒水等措施,保持硐室壁面处于湿润状态,以增加粉尘颗粒被壁面捕捉的概率。

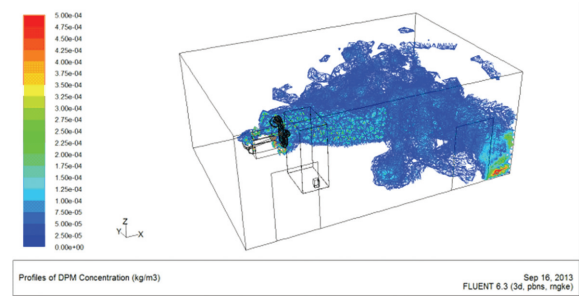


图 5 破碎硐室相似模型装置粉尘质量浓度分布

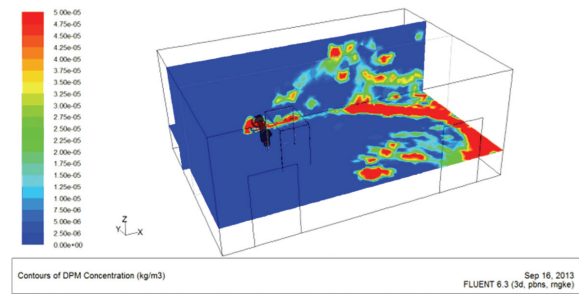


图 6 破碎硐室相似模型装置粉尘质量浓度分布渲染图

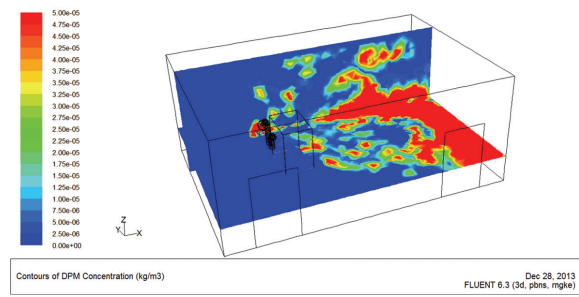


图 7 反弹壁面条件下粉尘质量浓度分布

2.4 不同风速条件下粉尘质量浓度分布

保持所有参数设置不变,改变硐室模型入口风速的大小,并对计算结果进行对比分析,得不同风速条件下粉尘质量浓度空间分布如图 8 所示。图中由左至右、由上到下所示分别为入口风速 0.2、0.3、0.4、0.5 m/s 条件下粉尘质量浓度分布,从图中可以看出:1) 在入口风速为 0.2 ~ 0.5 m/s 时,风速越大,硐室右部空间内粉尘质量浓度越低,高质量浓度区域面积越小。这是由于入口风速越大,进入硐室的新鲜风量就越大,风流对粉尘的稀释能力越强。同时由于风流附壁流动的范围增大,漩涡范围缩小,悬浮在空气中的粉尘被

风流携带并排出的概率增加,排尘范围扩大,高质量浓度区域面积缩小。2) 随着入口风速的增大,粉尘质量浓度达到最大值的位置距尘源处越远,当风速为 0.2~0.5 m/s 时,粉尘质量浓度分别在破碎机下风处 3、4、5、6 m 处达到最大值,且基本保持在 25 mg/m³ 以上、25 mg/m³ 左右、20~25 mg/m³、及 18~22 mg/m³。

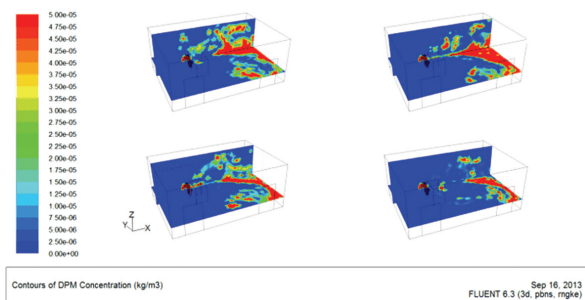


图 8 不同风速条件下粉尘质量浓度分布

2.5 安装抽风除尘系统后粉尘质量浓度分布

在破碎机下料口侧上方安装吸尘罩,并安装振动袋式除尘器进行尘源处理,通过模拟得出相似模型内尘源处安装抽风除尘系统后粉尘质量浓度分布如图 9 所示,从图中可以看出:尘源处安装抽风除尘系统后,模型空间内粉尘质量浓度大幅度降低,绝大部分粉尘颗粒在负压风机的抽吸作用下被吸尘罩收集,并经抽风管道送至除尘器内进行净化。除破碎机下料口附近区域外,模型空间粉尘质量浓度基本下降至 2 mg/m³ 以内,平均除尘率高达 90% 以上。

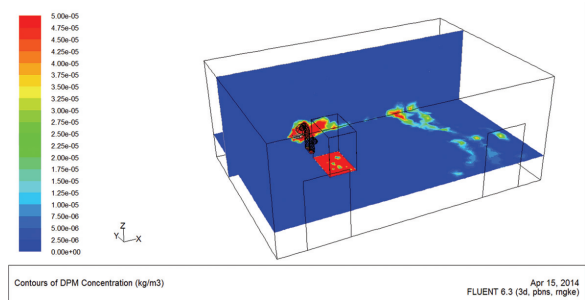


图 9 安装抽风除尘系统后粉尘质量浓度分布

3 相似实验结果及分析

3.1 实验参数测点布置

在破碎硐室相似模型空间内布置风速测点及粉尘质量浓度测点,对风流流场分布及粉尘质量浓度分布进行测定。

风速测点布置。根据硐室模型的尺寸,结合风流流场的理论基础,以 1 m 为标准间距在各个方向上均匀布置测点,在硐室走向内共选取了 9 个

待测断面,每个断面内各布置 6×3 个风速测点对风速进行测定.各风速测点的具体布置如图 10 所示.在实际测定过程中,若测点位置被设备或其余杂物所占据,可适当回避,如难以避开,则放弃该测点的测定.

粉尘质量浓度测点布置.根据模型空间的大小及风流流场的分布情况,以及对粉尘运移规律的基本认识,对硐室模型实验需测定的粉尘质量浓度布置测点如图 11 所示.图 11 中,以破碎机下料口尘源处为中心往四周发散式布置测点,共布置了 3 条测点线,其中各测点线负方向按照 0.5 m 的间距布置测点,正方向按照 1 m 的间距布置测点.

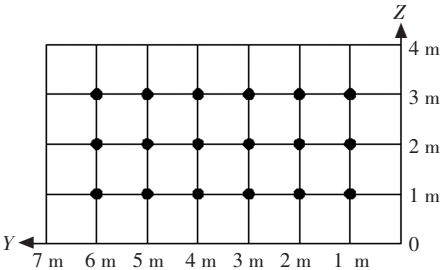


图 10 风速测点布置示意图

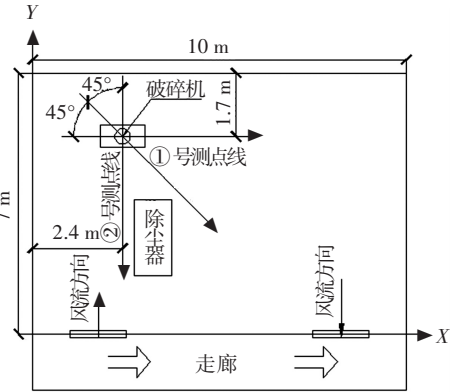


图 11 粉尘质量浓度测点布置示意图

3.2 风流流场分布

硐室模型内正常情况下主要依靠自然通风,在走廊内由左至右贯穿风流的影响下,新鲜风流由硐室左侧门进入,冲刷硐室后由右侧门排出.图 12~14 为入口风速在 0.4 m/s 条件下距地面分别为 $1, 2, 3\text{ m}$ 高度平面内风流流场分布.从图中可以看出:1) 风速在 $x = 2.25\text{ m}$ 处(左侧门中心断面)出现一个峰值,且峰值两侧风速梯度较大.随着 y 的增加,峰值逐渐减小,在距地高度 z 为 $1, 2\text{ m}$ 两个平面内,风速峰值分别由 0.45 m/s 下降至 0.3 m/s 左右.2) 在 $y = 5\text{ m}$ 以外区域,风速随着 x 的增加逐渐减小,在该区域内,中心风速由

0.3 m/s 下降至 0.1 m/s 左右,流场分布趋于均匀化.3) 在 $y = 5\text{ m}$ 以内区域,风速随着 x 的增加逐渐增大,在该区域风速由 0.05 m/s 增大至 0.2 m/s 左右,这是由于风流流动过程中的附壁效应及射流卷吸作用在该区域内形成漩涡所致.4) 在 $x = 7.75\text{ m}$ 处,风速呈现出另一个峰值,该峰值较之 $x = 2.25\text{ m}$ 处峰值略小,峰值两侧速度梯度也较小,说明该区域内风流分布较为均匀.随着 y 的减小,峰值逐渐增大,由 0.05 m/s 增加至 0.3 m/s 左右.

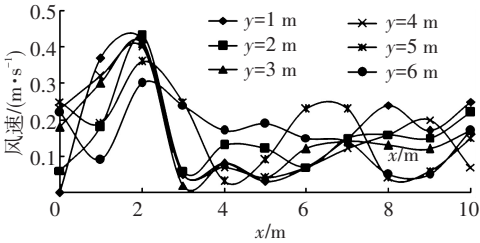


图 12 距地面 1 m 高度平面内风流流场分布

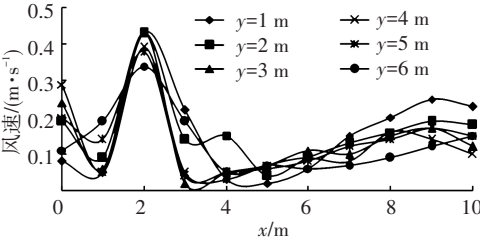


图 13 距地面 2 m 高度平面内风流流场分布

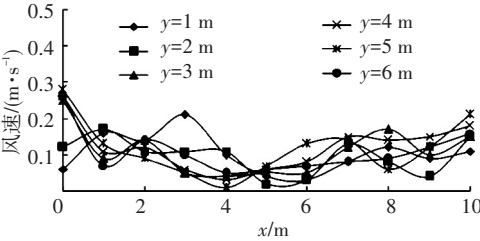


图 14 距地面 3 m 高度平面内风流流场分布

3.3 粉尘质量浓度空间分布

为了研究硐室模型空间内粉尘质量浓度分布规律,根据粉尘质量浓度测点布置图,分别对①号、②号及③号测点线上距地面高度为 $1, 2, 3\text{ m}$ 平面内粉尘质量浓度进行测定,得粉尘质量浓度空间分布如图 15~17 所示,图中坐标原点为破碎机下料口中心位置,坐标轴正方向为测点布置图中带箭头的方向.从图中可以看出:1) 在①号测点线上,粉尘质量浓度沿程先逐步升高,达到最大值后缓慢降低.距地高度越高,粉尘质量浓度达到最大值的位置距破碎机越远.在距地高度为 $1, 2, 3\text{ m}$ 时,粉尘质量浓度分别在距下料口中心约 $1, 3, 5\text{ m}$ 处达到最大值分别为 $60.5, 44,$

7.5 mg/m³.2)在②号测点线上,粉尘质量浓度沿程出现了两个峰值,峰值分别位于下料口中心及其后方约5 m处.在距地高度1 m平面内,两个峰值依次为41、31 mg/m³;而距地高度2 m及3 m平面内,第1个峰值并不明显,第2个峰值分别为25、2.5 mg/m³.3)在③号测点线上,粉尘质量浓度沿程先急剧上升,在下料口中心处达到最大值后迅速降低,并在距下料口中心1 m以外的区域内保持在一个较低的水平.在距地高度1 m的平面内,粉尘质量浓度除了最大值达到41 mg/m³外,距尘源1 m外的区域粉尘质量浓度均保持在10 mg/m³以内;在距地2 m及3 m高度平面内,粉尘质量浓度沿程均保持在1 mg/m³以内.

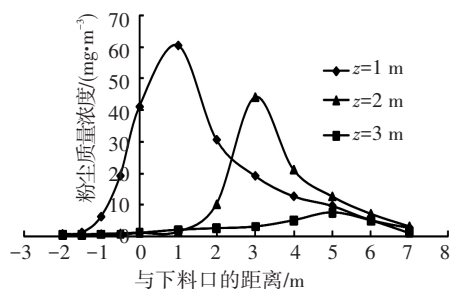


图15 ①号测点线不同高度粉尘质量浓度分布

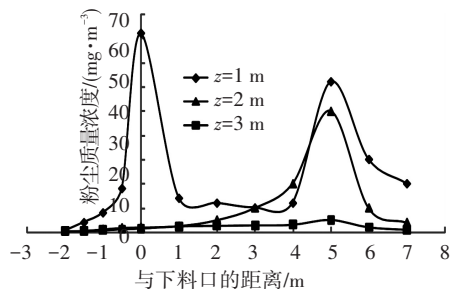


图16 ②号测点线不同高度粉尘质量浓度分布

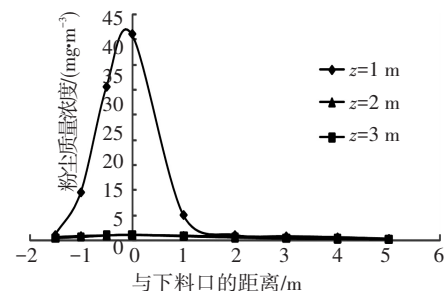


图17 ③号测点线不同高度粉尘质量浓度分布

4 模拟结果的验证

通过对破碎硐室相似模型内风流流场分布及粉尘质量浓度分布进行数值模拟可以发现,相似模型内风流流场分布规律及粉尘质量浓度分布规律与实验结果基本吻合.为了进一步验证模拟结

果的准确性,在数值模拟与相似实验过程中所有参数及边界条件设置均一致的前提下,取距前端壁面1 m断面与距地高度1 m平面交线上的风速作为比较对象,对模拟风流流场及实验风流流场进行对比分析如图18所示.取相似实验中所使用的①号测点线距地高度为1 m时粉尘质量浓度分布作为比较对象,对模拟粉尘质量浓度分布及实验粉尘质量浓度分布进行对比分析如图19所示.

从图18、19中可以看出,在进行比较的基准线上,风速及粉尘质量浓度的模拟结果与实验数据基本吻合,分布及变化规律基本保持一致.但相比较之下两者数值上还是略微有所偏差,这是由于在实验数据测定、几何模型建立及参数设置过程中均会存在一定误差所造成的.通过对比分析,说明采用Fluent软件的离散相模型对破碎硐室相似模型粉尘运动进行模拟具有可行性,模拟结果可信.

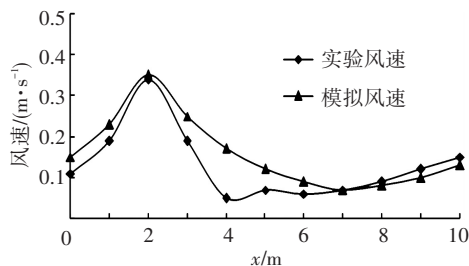


图18 实验风速与模拟风速对比分析

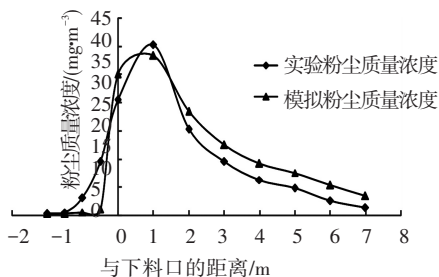


图19 实验粉尘质量浓度与模拟粉尘质量浓度对比

5 结论

1)模拟结果与实验数据在规律及数值上均具有较好的一致性,说明运用离散相模型对破碎硐室相似模型粉尘质量浓度分布进行模拟是可行的,模拟结果可信.

2)粉尘颗粒自尘源处产生后,随风流方向在模型空间内扩散,横向随机脉动;粉尘质量浓度在破碎机下料口附近区域内达到最大值,并以该区域为中心径向逐步降低.

3)捕捉壁面条件下粉尘质量浓度较之反弹壁面要低;在入口风速为0.2~0.5 m/s时,硐室

模型空间内粉尘质量浓度随风速的增大逐步降低.

4) 安装抽风除尘系统后,除破碎机下料口附近区域外,模型空间粉尘质量浓度基本下降至 2 mg/m^3 以下,平均除尘率高达 90% 以上.

参考文献

[1] 李锋,撒占友,王勇,等.基于 Fluent 的扁平硐室采场粉尘浓度分布及运移规律研究[J].矿业研究与开发,2010,30(5):77-80.

[2] 王晖,王海宁.安徽某铜矿井下破碎站粉尘污染治理[J].资源环境与工程,2006,20(4):418-420.

[3] 曹玉龙,丁伯坝,李刚,等.矿山选厂破碎筛分的粉尘控制方法研究[J].现代矿业,2011(10):97-99.

[4] SILVESTER S A, LOWNDES I S, KINGMAN S W, et al. Improved dust capture methods for crushing plant [J]. Applied Mathematical Modelling, 2007,31:311-331.

[5] SILVESTER S A. The integration of CFD & VR to assist auxiliary ventilation practice [D]. Nottingham UK: University of Nottingham, 2002.

[6] POSNER J D, BUCHANAN D, DUNN-RANKIN D. Measurement and prediction of indoor air flow in a model room[J]. Energy Build,2003,35:515-526.

[7] LUI Z, WYPYCH P, COOPER P. Dust generation and air entrainment in bulk materials handling-a review[J]. Powder Hand Process, 1999,11:421-425.

[8] 王保强.分级破碎技术在破碎点除尘中的应用[J].选煤技术,2008(6):31-33.

[9] 刘银报.页岩炼油厂破碎车间除尘系统设计[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011.

[10] 魏建海.大红山铁矿地下破碎站设计中若干问题的处理[J].有色金属设计,2009,36(3):29-32.

[11] 辛丕存.1200T 自行式破碎站平衡梁强度有限元分析[D].长春:吉林大学,2011.

[12] 孙岩.平朔安家岭选煤厂破碎站粉尘逸散机理与控制技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.

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

[14] 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.

[15] 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.

[16] 陈菲.破碎机下导料槽粉尘数值模拟及治理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.

[17] 陈举师,王毅,蒋仲安.采场爆破烟尘浓度分布及扩散规律的数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(增1):147-152.

[18] 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.

[19] 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.

(编辑 魏希柱)