齐大山矿露天采场粉尘逸散规律数值模拟分析*

王峰[1],曹洋[1],胡振涛[1],李超[2],陆占国[1],赵玉琪[1],赵昀奇[2]

(1.鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司, 辽宁 鞍山市 114000;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对多因素影响下露天矿坑粉尘逸散机理尚不明确的问题,以齐大山露天矿为工程背景,采用数值模拟方法分析风速、风向、粉尘粒径及尘源位置等多因素对粉尘弥散率的影响,并对多尘源条件下粉尘的时空分布特征开展研究。基于现场气象数据构建齐大山采场三维流场模型,在不同工况下对粉尘弥散率进行模拟分析。结果表明,粉尘粒径是影响粉尘弥散率的首要因素,粒径越小,弥散率越高;其次为风速,对粒径大于30 μm的粉尘影响显著;尘源位置和风向对粉尘弥散率影响相对较小。此外,多尘源条件下,随持续产尘时间延长,粉尘在采场内积聚并沿风向逸散,停止产尘后,粉尘浓度逐渐降低,不同尘源点的粉尘逸散速度因位置差异存在显著不同。受地形和风流共同影响,$PM_{2.5}$浓度随采场深度增加呈"增加—减小—增加"的变化规律。基于研究成果,对齐大山露天采场生产防尘提出相关措施建议,重点关注粉尘源头控制、传播过程抑制及差异化精准防控。

关键词:粉尘逸散;露天采场;粉尘时空分布特征;多尘源;数值模拟
中图分类号:TD714 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0135-07

Numerical Simulation Analysis of Dust Dispersion Law in the Open-Pit Stope of Qidashan Mine

Wang Feng[1], *Cao Yang*[1], *Hu Zhentao*[1], *Li Chao*[2], *Lu Zhanguo*[1], *Zhao Yuqi*[1], *Zhao Yunqi*[2]
(1.Qidashan Branch, Angang Group Mining Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114000, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To address the issue that the dust dispersion mechanism in open-pit mines under the influence of multiple factors remains unclear, this study takes the Qidashan open-pit mine as the engineering background. A numerical simulation method was employed to analyze the effects of multiple factors, including wind speed, wind direction, dust particle size and dust source location, on the dust dispersivity. Furthermore, the spatiotemporal distribution characteristics of dust under multiple dust source conditions were investigated. A three-dimensional flow field model of the Qidashan stope was constructed based on on-site meteorological data. Simulation analyses of the dust dispersivity were conducted under various working conditions. The results indicate that dust particle size is the primary factor influencing the dust dispersivity; the smaller the particle size, the higher the dispersivity. Wind speed ranks second, exerting a significant effect on dust particles larger than 30 μm. In contrast, dust source location and wind direction have relatively minor effects on the dust dispersivity. Moreover, under multiple dust source conditions, dust accumulates within the stope and disperses along the wind direction as the duration of continuous dust production extends. After dust production ceases, the dust concentration gradually decreases. The dust dispersion velocities from different source points exhibit significant differences due to variations in their locations. Affected jointly by terrain and airflow, the $PM_{2.5}$ concentration exhibits a variation pattern of "increase-decrease-increase" as the stope depth increases. Based on the research findings, relevant measures and recommendations for dust prevention in production at the Qidashan open-pit stope are proposed, with a focus on dust source control, suppression of the transmission process, and differentiated precise prevention and control.

Key words: Dust diffusion, Open-pit stope, Spatiotemporal distribution characteristics of dust, Multiple dust sources, Numerical simulation

* **收稿日期**:2025-05-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074061);辽宁省基本科研资助项目(JYTMS20230616);鞍钢集团矿业有限公司科研计划项目(2023-科A06)
作者简介:王峰(1973—),男,辽宁鞍山人,硕士,高级工程师,主要从事采矿及选矿生产等相关工作。E-mail:zhaoyuqi4599@163.com
通信作者:曹洋(1985—),男,吉林辉山人,高级工程师,主要从事采矿、爆破等相关工作。E-mail:342448216@qq.com

0 引言

随着全球露天矿产量年均增长 8.3%(2020—2024 年)[1],粉尘污染已成为制约露天矿山可持续发展的核心挑战。露天矿坑粉尘逸散不仅污染周围环境,还会对作业人员健康构成巨大威胁。统计数据显示,我国职业性尘肺病患者中,52.7%的病例直接源于采矿作业[1-2]。因此,揭示露天矿坑粉尘逸散规律、阐明其逸散机理,进而制定针对性防尘措施迫在眉睫。

现有研究表明,粉尘逸散受风速、粒径分布、作业方式等多因素耦合作用影响,但传统研究多聚焦单一环节或局部区域,缺乏全域时空尺度的系统性认知[3-4]。Lu 等[5]评估了矿用卡车行驶过程中的气流场、粉尘颗粒迁移与扬尘灾害,并发现粉尘迁移过程主要受车轮旋转模型的影响,车轮旋转导致矿用卡车传动轴处积尘,极易引发机械损坏;对于行人呼吸区,粉尘灾害随时间和垂直高度呈现先增后减,而随平面距离呈现线性减小趋势。国内学者针对粉尘逸散机理开展了大量研究,赵星光等[6-7]聚焦露天矿道路粉尘开展研究,发现风速是影响其逸散的主要因素,并明确了道路扬尘的动力来源。陈曦等[8]采用基于动网格技术及离散相模型的粒子跟踪技术耦合计算方法,模拟不同车速下自卸卡车周围气流与粉尘的分布特征,通过现场实测发现,路面黏附积尘是露天矿运输扬尘的发尘源,气流紊动逸散产生的剪切气流与诱导气流是粉尘飞扬的核心动因。张建华[9]通过现场实测与数值模拟的耦合方法,系统揭示了露天矿破碎站受料斗粉尘逸散的粒径随高度的分布规律,其研究首次建立受料斗粉尘逸散的粒径-空间关联性框架,明确 10～100 μm 颗粒是主要逸散组分(占比 73.2%),并构建了受料斗壁面附近的粉尘聚集数学模型。该研究建立了粒径-空间关系模型,为全域粉尘溯源研究提供了理论基准与方法支撑。宋子岭等[10]运用流体力学 k-ε 模型与气固两相流离散相模型,对露天煤矿火烧岩装车过程中粉尘运移轨迹开展数值模拟,研究发现,粉尘表面张力系数增大可促进粉尘颗粒聚合为大颗粒,更易沉降,进而减轻粉尘逸散。肖渊[11]采用数值模拟方法研究煤尘在旋风除尘设备中的运动规律,发现旋风除尘设备从下部到上部存在 1 个压力条带,且随入口气流速度的增大,“摆尾状”摆动更显著,呈现明显的 S 形曲线特征。

尽管上述研究取得显著进展,但仍存在三大局限:(1)已有文献多聚焦单一尘源(如破碎站或运输车辆),缺乏采场全域多源协同分析;(2)数值模拟研究未考虑气象、开采活动的时空异质性;(3)现有理论体系尚未建立粉尘逸散的“源-传-沉”全过程调控机制。为此,本研究以齐大山露天铁矿为研究对象,采用现场监测与数值模拟相结合的方法,研究多因素影响下采场全域粉尘逸散规律及多尘源粉尘时空分布特征,研究结果可为矿山制定针对性降尘措施提供理论依据。

1 齐大山露天采场模型建立与网格划分

齐大山露天矿 2023 年末开采现状如图 1 所示。矿山最低开采水平为-270 m,边坡最大高度为 114 m,闭合圈标高为 42 m,环形闭合坑深为 312 m;矿坑南北走向长 3.6 km,东西宽 1 km,为典型大型深凹露天矿。

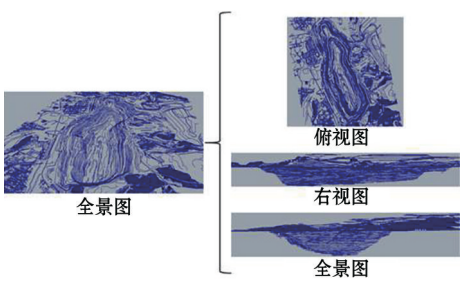


图 1 齐大山露天矿开采现状

Fig.1 Production status of Qidashan open-pit mine

建立齐大山露天采场三维模型,并对其进行布尔(Boolean)运算。以矿坑为底面,建立坑口标高为 150 m 的三维流场模型,采用 Meshing 软件对模型进行离散化网格划分。为保障运算结果的准确性,提高运算速率,仅对矿坑内部进行网格加密,离散化处理后的流场模型如图 2 所示。

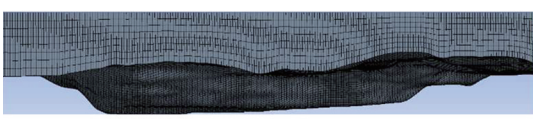


图 2 齐大山露天采场三维流场网格划分

Fig.2 3D flow field mesh division of Qidashan open-pit stope

2 多影响因素下的粉尘弥散率规律研究

采用数值模拟方法研究多因素对粉尘弥散率的

影响规律。根据现场监测数据统计,风向以西北风为主,风速范围约为0～7 m/s。本次模拟选取大气流场的初始风速分别为1 m/s、3 m/s、5 m/s和7 m/s,风向为西北风,采用标准k-ε黏性模型[12],入口边界条件设为速度入口(Velocity-inlet)[13],出口边界条件设为压力出口(Pressure-outlet)[14],风速设计选择“大小和方向”(Magnitude and direction)[15],通过统计模拟结果中逃逸数(逃逸数指粉尘弥散至坑外的数量)与捕捉数(捕捉数指粉尘从喷射源开始运动,至碰撞壁面后运动终止的数量)计算粉尘的弥散率(逃逸数与捕捉数之比)。

设置4个监测点作为尘源点,位置如图3所示,监测点与采场底部的高差排序为:监测点4>监测点3>监测点2>监测点1。

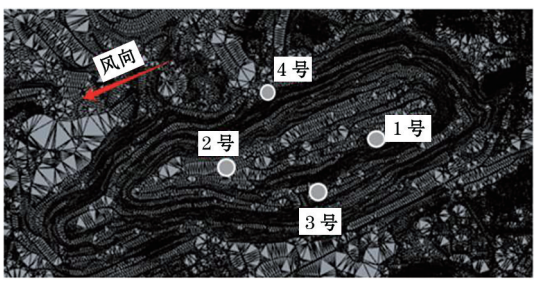


图3 齐大山露天采场监测点位置

Fig.3 Location of monitoring points in Qidashan open-pit stope

2.1 不同风速、粒径及尘源位置下的粉尘弥散率

由于模拟风速为流场初始速度,分析现场数据发现:闭合圈风向以西北风为主,风速集中在0.3～5.4 m/s,风级频率从高到低依次为1.6～3.3 m/s(2级别频率为50.71%)、0.3～1.5 m/s(1级别频率为24.46%)、3.4～5.4 m/s(3级别频率为18.64%),5.5～7.9 m/s(4级别频率为0.89%)。因此,选定风向为西北风,模拟风速分别为1 m/s、3 m/s、5 m/s、7 m/s,粒径分别为2.5μm、10 μm、30 μm、40 μm、60 μm下不同尘源位置的粉尘弥散率,共80种工况,结果见表1。

由表1可知,4个监测点处的弥散率呈现相同的变化规律:粉尘粒径越小、风速越大、监测点越远离地表,弥散率越高。另外,粒径越小,弥散率随风速增加的增幅越小,风速变化对粒径大于30 μm的粉尘弥散率影响显著。

表1 不同风速、粒径及尘源位置下的粉尘弥散率

Table 1 Dust dispersivity under different wind speeds, particle sizes and dust source locations

风速/(m/s)	粉尘粒径/μm	弥散率/%			
		1号监测点	2号监测点	3号监测点	4号监测点
1	2.5	97.6	99.2	87.6	89.0
	10	93.6	97.8	75.8	76.2
	30	6.8	17.6	0.0	0.2
	40	0.0	0.0	0.0	0.0
	60	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.5	98.6	98.6	89.8	89.2
	10	98.2	98.2	87.4	87.4
	30	64.2	91.8	34.8	35.0
	40	11.0	68.6	3.2	4.6
	60	0.0	1.6	0.0	0.0
5	2.5	98.4	99.2	89.8	91.2
	10	98.2	99.2	87.8	89.6
	30	92.0	96.4	78.6	65.8
	40	52.0	90.4	35.0	34.2
	60	0.0	51.0	0.4	0.2
7	2.5	98.4	99.2	90.6	91.6
	10	98.0	99.0	89.4	91.2
	30	92.0	96.4	78.6	77.6
	40	73.4	95.2	56.4	55.6
	60	5.2	78.2	6.0	9.0

2.2 不同风向、粒径及尘源位置下的粉尘弥散率

为使模拟结果能为工程现场在不同气象条件下制定针对性粉尘控制措施提供理论参考,在风速为3 m/s的条件下,模拟西北风、东南风、西南风、东北风4种风向下不同粒径、不同尘源位置的粉尘逸散情况,共计80种工况,结果如图4所示。由图4可以看出,在4种风向下,粉尘弥散率均随粒径增大而降低,其中:西北风对粒径小于30 μm的粉尘影响显著,且对粒径大于30 μm的粉尘影响程度强于西南风和东北风;西南风对粒径小于10 μm的粉尘影响显著,几乎使其全部逸散出采场,而对粒径大于30 μm的粉尘,随粒径增大影响程度逐渐减弱,无法使粒径为60 μm的粉尘发生逸散,且对3号监测点各粒径粉尘的影响程度大于其他尘源点;东南风对3号监测点各粒径粉尘的影响最弱,推测与地形因素相关;东北风对粒径大于40 μm的粉尘无影响,对粒径小于10 μm的粉尘影响显著,使其全部逸散至采场外。

为明确4种因素对粉尘弥散率的影响程度,统计各因素变化下的弥散率均值,结果如图5所示。当粉尘粒径从2.5 μm增加至60 μm时,弥散率均值最大变化量为90.8个百分点;当风速由1 m/s增加至7 m/s时,弥散率均值最大变化量为36.9个百分点;当尘源位置变化时,弥散率均值最大变化量为

20.9 个百分点;当风向变化时,弥散率均值最大变化量为 8 个百分点。由此确定影响粉尘弥散率的 4 个因素按显著程度从高到低依次为:粒径、风速、尘源位置、风向。

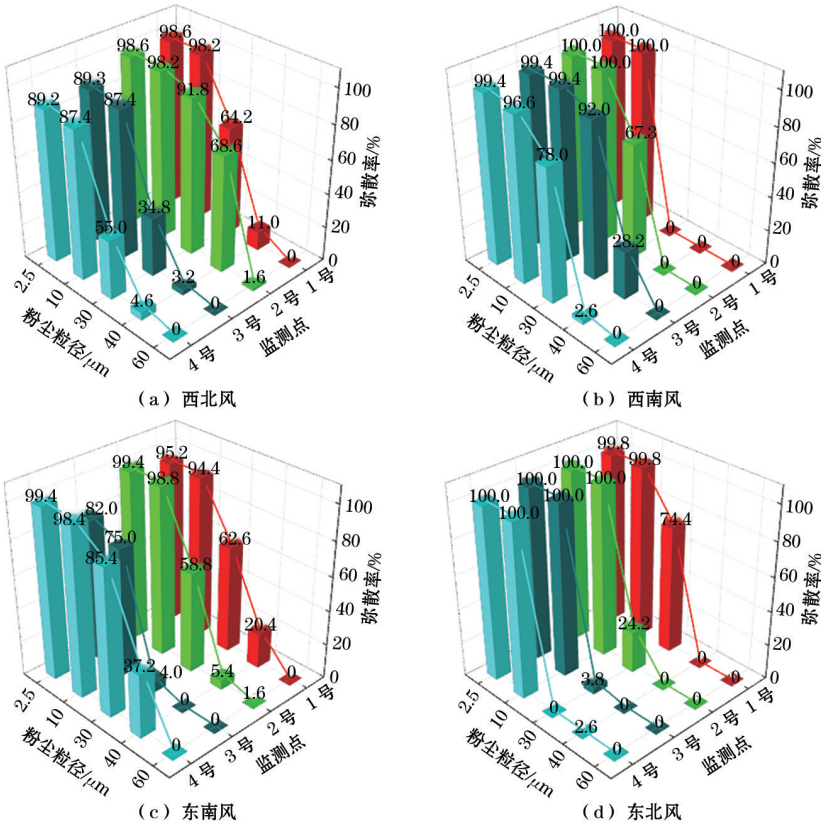


图 4 不同风向、粒径及尘源位置下的粉尘弥散率

Fig.4 Dust dispersivity under different wind directions, particle sizes and dust source locations

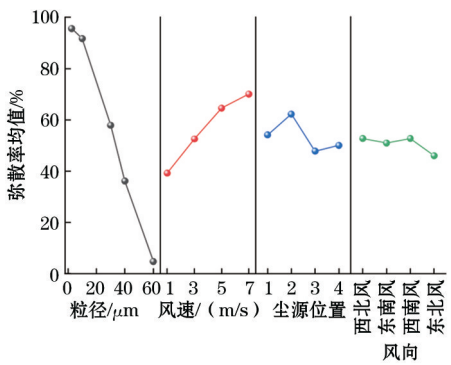


图 5 不同因素变化情况下弥散率均值

Fig.5 The mean value of dispersivity under different factors

3 多尘源粉尘时空分布特征

通过对齐大山露天采场单尘源开展系统研究,明确了单尘源条件下粉尘的"产生-逸散-降落"全过程弥散路径,以及不同风速、风向、粒径、尘源位置条件下的粉尘弥散率变化规律。为进一步研究齐大山露天采场多尘源在风流作用下的粉尘时空分布特征,本次模拟的模型及流场风向设置如图 6 所示。模拟采场尘源同时起尘后,不同时间下的粉尘弥散过程。与单尘源粉尘弥散路径和弥散率模拟不同,露天采场多尘源粉尘时空分布模拟为瞬态过程,因此,利用 Fluent 软件的离散相模型(DPM)[16]进行模拟。模拟设置如下:开启与连续相的交互,且每次流迭代更新 DPM 源,DPM 迭代间隔设为 20 步;跟踪参数设最大步数,为 50 000 步,湍流逸散中随机跟踪参数选取离散相轨迹模型;喷射源保持不变,粉尘喷射数量为 500 个,持续喷射时间为 1 h;边界条件不变,颗粒处理采用非定常颗粒跟踪及流动时间步跟踪方式,总研究时间 3 h。

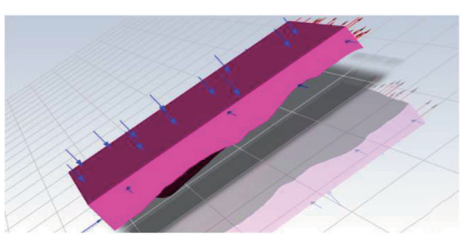


图 6 模型与风向设置

Fig.6 Model and wind direction setting

模拟齐大山露天采场4个监测点持续作业及停止产尘后的粉尘弥散过程，并选取不同时间节点的持续产尘粉尘弥散情况进行分析，结果如图7所示。尘源持续产尘时，粉尘在尘源周围不断积聚，从600 s起，粉尘沿风流方向发生大范围逸散，随着产尘时间持续增加，粉尘逸散出采场外后进一步逸散，对采场周边形成大面积污染。由于各尘源点与采场底部的高差不同且风向存在差异，4号尘源点的粉尘最先逸散出采场，逸出后粉尘流分为两股并沿风流方向进一步逸散；3号尘源点粉尘的逸散模式与4号尘源点相似，但粉尘逸出采场后并未分流；2号尘源点紧邻采场西北端，在西北风的作用下，该点产生的粉尘向采场西北方向逸散最快，但沿垂直于风流方向逸散的幅度小于其他3个尘源点；1号尘源点靠近采场东南端，持续产尘3 600 s时，其产生的粉尘仍积聚在采场内部靠近4号尘源点的区域。

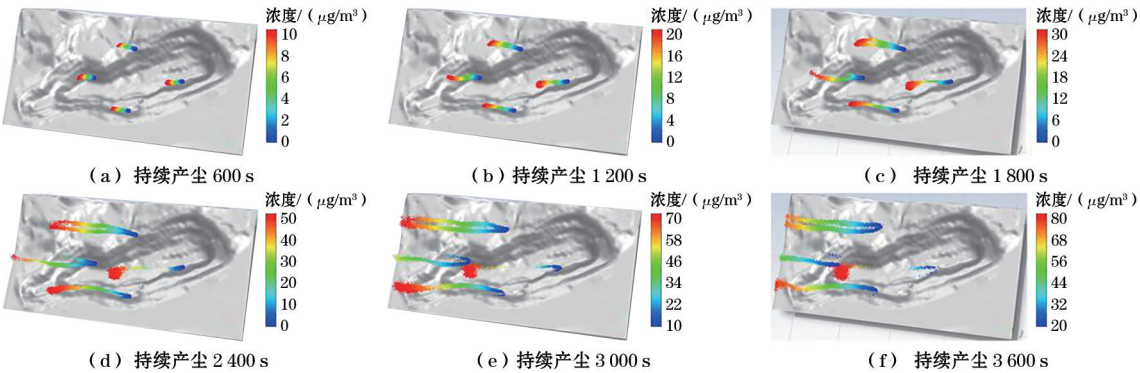


图7　监测点持续作业时粉尘浓度随时间的变化

Fig.7　Dust concentration variation with time during continuous operation of monitoring points

不同产尘时间下最大粉尘浓度统计结果见图8。

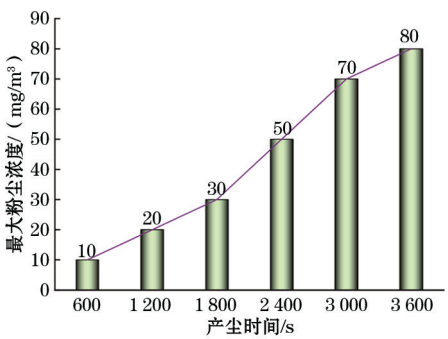
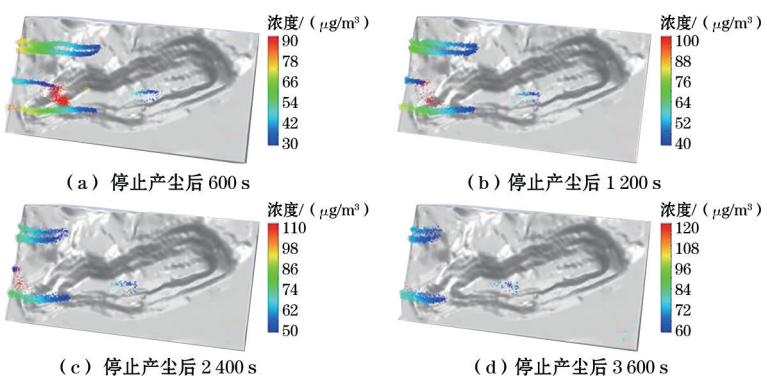


图8　不同产尘时间下最大粉尘浓度统计结果

Fig.8　Statistical results of maximum dust concentration under different dust production time

由图8可以看出，最大粉尘浓度随产尘持续时间延长而升高，其中600～1 800 s和3 000～3 600 s范围内最大粉尘浓度每600 s升高10 μg/m³，1 800～3 000 s区间每600 s升高20 μg/m³；结合图7可知，随着产尘持续时间延长，已产生的粉尘进入弥散阶段，时间越长，粉尘浓度最高区域越靠近采场边缘；产尘3 600 s后，1号尘源点产生的粉尘在临近采场西北端形成粉尘浓度达80 μg/m³的粉尘积聚点，且随着弥散时间延长，该积聚点的粉尘会被西北风带出采场，与其他3个尘源点的粉尘共同在采场西北侧形成一个高浓度粉尘区。

为模拟采场内非开采期间粉尘弥散情况，开展停止产尘后不同时长的粉尘弥散过程模拟，模拟结果如图9所示。



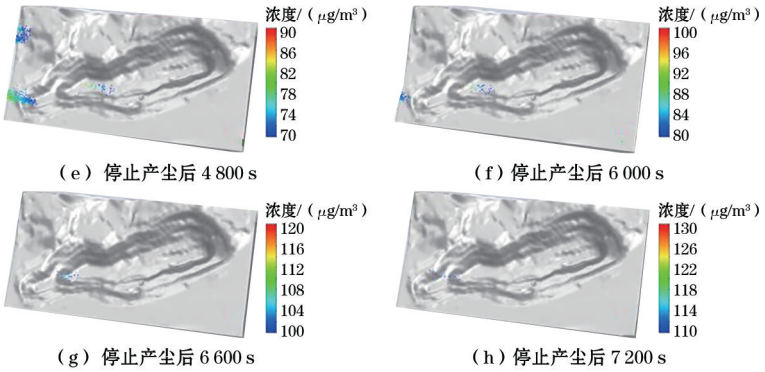


图 9 监测点停止产尘后粉尘浓度随时间的变化

Fig.9 Dust concentration variation with time after stopping producing dust of monitoring points

停止产尘 1 200 s 内,采场最大粉尘浓度达 100 μg/m³,随停止产尘时间延长,采场整体粉尘浓度呈下降趋势,1 200 s 后粉尘浓度骤减,6 600 s 时,4 个尘源点的粉尘几乎已经全部逸散出采场。停止产尘后,2 号尘源点的粉尘最先逸散出采场,3 号、4 号尘源点的粉尘紧随其后,1 号尘源点的粉尘最后逸散,这是由于 2 号尘源点临近采场西北端,3 号、4 号尘源点位于采场中部,1 号尘源点临近采场东南端,尘源位置差异导致各点粉尘在风流作用下弥散出采场的时间不同。

结合其他零散监测点的实际粉尘浓度数据,绘制 $PM_{2.5}$ 浓度随采场高程的分布曲线,结果如图 10 所示。

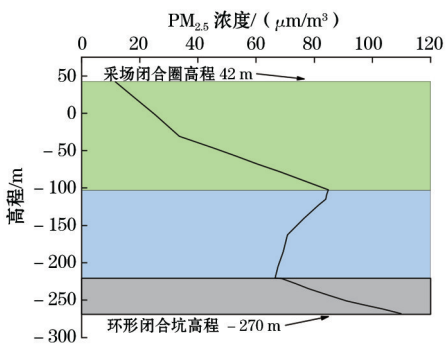


图 10 $PM_{2.5}$ 浓度随采场深度的变化

Fig.10 Variation of $PM_{2.5}$ concentration with stope depth

由图 10 可知,环形闭合坑污染最为严重,$PM_{2.5}$ 浓度超 100 μg/m³;在采场闭合圈以下至 −102 m 区间,$PM_{2.5}$ 浓度随采场深度增加升至 84 μg/m³;−102 m 至 −220 m 区间,推测受生产强度下降等因素影响,$PM_{2.5}$ 浓度下降至 65 μg/m³;−220 m 至环形闭合区间,由于深度大、受风流影响小,部分粉尘向采场底部沉降,导致 $PM_{2.5}$ 浓度从 65 μg/m³ 升至 109 μg/m³。

4 结论和防尘措施建议

4.1 结论

(1) 影响粉尘弥散率的 4 个因素按显著程度从高到低依次为:粉尘粒径、风速、尘源位置、风向。粉尘粒径越大,风速越高,监测点越远离地表,弥散率越大。风向对粉尘的弥散路径和逸散程度影响显著,西北风对采场粉尘的影响最大,可显著促进小粒径粉尘弥散。

(2) 多尘源持续产尘情况下,粉尘在采场底部积聚并沿风向逸散,且随着弥散时间延长,粉尘在采场西北侧会形成一个高浓度粉尘区。停止产尘后,粉尘浓度随时间呈逐渐降低的趋势,不同尘源位置的粉尘逸散出采场所需时间存在差异,靠近西北端的尘源粉尘逸散最快。

(3) $PM_{2.5}$ 浓度随采场高程的增加呈先增加后降低又增加的变化趋势,由于深度大、受风流影响小,粉尘向采场底部沉降,导致环形闭合坑污染最为严重,粉尘浓度最大为 109 μg/m³。

4.2 系统性防尘措施建议

基于齐大山矿露天采场粉尘逸散规律的数值模拟研究,为有效降低粉尘污染,提出以下系统性防尘措施建议,重点关注粉尘源头控制、传播过程抑制及差异化精准防控,核心原则为“源头控制、过程抑制、精准防控”。

第一,严格控制小粒径粉尘产生。针对“粒径越小,弥散率越高”的核心规律,生产过程应重点管控钻爆、破碎、筛分等产生粒径小于 10 μm 粉尘的环节。强制采用湿式作业和化学抑尘剂,并确保设备密闭及配备高效收尘系统,从源头最大程度减少细小粉尘生成量。

第二,实施风速差异化的过程管控策略。在高风速(5～7 m/s)条件下,重点拦截和沉降易弥散粉尘(粒径大于 30 μm 的大颗粒粉尘),增加喷洒水量、水压并加强运输管控(控制车速、盖严)。在低风速(1～3 m/s)条件下,着力防止粒径小于 10 μm 的粉尘持续悬浮逸散,需提高喷雾精细度,尤其在边界和下风向区域保障有效覆盖,并可设置挡风抑尘网降低粉尘扩散速率。

第三,针对西北风进行空间布防。强化上风向(西北边界)的物理阻隔,优先设置或加高加密挡风抑尘网;在下风向(东南边界)部署移动雾炮或喷雾水幕墙拦截逸散粉尘。同时,优化尘源位置,高尘作业点尽量远离西北边缘并靠近便于拦截的下风区域;对"逸散最快"的西北端尘源点实施最高等级防护,并根据西北风预报调整该区域作业计划。

参考文献(References):

[1] 王运敏,李刚,刘建国,等.我国非煤矿山职业健康防控技术研究现状、挑战及展望[J].金属矿山,2024(9):1-12.
Wang Yunmin, Li Gang, Liu Jianguo, et al. Current status, challenges and prospects of occupational health control technology in China's non-coal mines[J]. Metal Mine,2024(9):1-12.

[2] 才庆祥,陈彦龙.中国露天煤矿 70 年成就回顾及高质量发展架构体系[J].煤炭学报,2024,49(1):235-260.
Cai Qingxiang, Chen Yanlong. Review of 70 years' achievements and high-quality development architecture system of surface coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(1):235-260.

[3] 刘志华,刘树栋,石践,等.露天煤矿道路双侧管路喷雾降尘数值模拟研究[J].环境保护与循环经济,2024,44(3):19-24.
Liu Zhihua, Liu Shudong, Shi Jian, et al. Numerical simulation of spray and dust reduction in bilateral pipelines of open-pit coal mine roads[J].Environmental Protection and Circular Economy,2024,44(3):19-24.

[4] 刘敬玉,刘志华,石践,等.北露天煤矿卡车路面运输粉尘运移规律模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):139-146.
Liu Jingyu, Liu Zhihua, Shi Jian, et al. Simulation study on dust migration law of truck road transport in north open-pit coal mine[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(8):139-146.

[5] Lu Xinxiao, Zhang Hui, Xiao Jinxiang, et al. Research analysis on the airflow-particle migration and dust disaster impact scope by the moving mining truck in the open-pit mine[J]. Process safety and environmental protection,2024, 184:1442-1458.

[6] 赵星光.铜录山矿运输道路粉尘抑尘控制研究[D].南宁:广西大学,2005.
Zhao Xingguang. The study of suppressing thick road dust in Tonglushan mine[D]. Nanning: Guangxi University,2005.

[7] 赵星光,谭卓英.露天矿山运输路面扬尘影响因素及机理分析[J].有色金属(矿山部分),2005(3):43-45+48.
Zhao Xingguang, Tan Zhuoying. Analysis of influencing factors and mechanism of road dust in open-pit mine transportation[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2005(3):43-45+48.

[8] 陈曦,葛少成,邓存宝,等.露天矿自卸卡车车速对粉尘扩散的影响研究[J].中国安全科学学报,2017,27(4):151-156.
Chen Xi, Ge Shaocheng, Deng Cunbao, et al. Study on influence of self-discharging truck speed on dust spreading in open-pit[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(4): 151-156.

[9] 张建华.露天煤矿破碎站受料斗粉尘扩散规律[J].洁净煤技术,2024,30(增刊 1):370-375.
Zhang Jianhua. Dust diffusion law of receiving hopper in crushing station of open-pit coal mine[J]. Clean Coal Technology,2024,30(Suppl.1):370-375.

[10] 宋子岭,郭舒鹏,回晶,等.露天煤矿火烧岩采装工作面粉尘逸散规律及抑尘技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(5):401-408.
Song Ziling, Guo Shupeng, Hui Jing, et al. Dust emission law and dust suppression technology of working face in burnt rocks of open-pit coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2021,40(5):401-408.

[11] 肖渊.大柳塔三盘区露天矿煤尘旋风除尘特性的数值模拟研究[J].科技创新与应用,2024,14(27):70-73.
Xiao Yuan. Numerical simulation study on cyclone dust removal characteristics of coal dust in No.3 panel Daliuta open-pit mine[J]. Technology Innovation and Application, 2024,14(27):70-73.

[12] Huang Zhian, Huang Yang, Yang Zhijun, et al. Numerical simulation of the dust production and transportation law of an intermediate mine heap[J]. ACS Omega,2021,6(2):1623-1635.

[13] 王桂林.基于 FLUENT 数值模拟的露天煤矿坑底粉尘浓度分布特征[J].煤炭工程,2020,52(增刊 2):80-84.
Wang Guilin. Distribution of dust concentration at the bottom of open-pit coal mine based on FLUENT simulation [J]. Coal Engineering,2020,52(Suppl.2):80-84.

[14] 何宁,郑亮亮.综采工作面粉尘运移规律的数值模拟研究[J].龙岩学院学报,2020,28(5):80-84.
He Ning, Zheng Liangliang. Numerical simulation study of dust movement law on comprehensive mining working face [J]. Journal of Longyan University,2020,28(5):80-84.

[15] Wu Tong, Zhuo Yang, Wang Aiai, et al. A study on movement characteristics and distribution law of dust particles in open-pit coal mine[J]. Scientific Reports,2021,11:14703.

[16] 张周爱,周伟,于海旭,等.露天煤矿半封闭煤棚通风降尘数值模拟研究[J].煤炭工程,2020,52(增刊 2):96-100.
Zhang Zhouai, Zhou Wei, Yu Haixu, et al. Numerical simulation on ventilation and dust reduction of semi-closed coal shed[J]. Coal Engineering,2020,52(Suppl.2):96-100.