齐大山露天采场粉尘浓度弥散特征与影响机制分析*

曹洋[1],赵玉琪[1],胡振涛[1],刘少迁[2],刘述栋[1],陆占国[1],吕蒙[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 114039;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:以齐大山露天采场为研究对象,通过实地勘查,在穿孔、爆破、采装、运输环节进行固定点位与车载移动连续监测,记录气象参数并拍摄粉尘运移过程。基于现场监测数据,对露天矿山生产过程中不同环节的粉尘弥散特征与影响机制进行分析。结果表明:$PM_{2.5}$与PM_{10}浓度存在显著的相关关系,三次项曲线模型的拟合优度最高,决定系数为0.945,对关系的解释能力最强;不同生产环节的产尘浓度平均值及扩散范围差异明显,爆破环节单次作业产尘浓度最高,达324.4 μg/m³,且粉尘扩散范围最广;穿孔、采装和运输环节的单次作业产尘浓度分别为59.8 μg/m³、88.2 μg/m³和61.8 μg/m³;此外,坑底区域的粉尘浓度显著高于闭合圈,其浓度均值约为闭合圈粉尘浓度均值的5倍。研究成果揭示了露天采场粉尘浓度的变化规律,可为粉尘防控提供理论支持。

关键词:露天采场;粉尘浓度;弥散特征;影响机制

中图分类号:TD714 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0141-09

Analysis of Dust Concentration Dispersion Characteristics and Influence Mechanism in Qidashan Open-Pit Stope

CAO Yang[1], *ZHAO Yuqi*[1], *HU Zhentao*[1], *LIU Shaoqian*[2], *LIU Shudong*[1], *LU Zhanguo*[1], *LYU Meng*[1], *ZHAO Yunqi*[2]

(1.Qidashan Branch of Ansteel Group Mining Corporation Limited, Anshan, Liaoning 114039, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Taking Qidashan open-pit stope as the research object, field investigations were carried out. Fixed-point and vehicle-mounted mobile continuous monitoring was conducted during the drilling, blasting, loading and transportation stages, with meteorological parameters recorded and the dust migration process photographed. Based on the field monitoring data, an analysis was conducted on the dust dispersion characteristics and influence mechanism in different stages during the production process of the open-pit mine. The results show that there is a significant correlation between $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations. The cubic polynomial curve model has the highest goodness of fit, with a coefficient of determination of 0.945, and exhibits the strongest explanatory power for this relationship. The average dust emission concentrations and diffusion ranges differ significantly among different production stages. The blasting stage has the highest dust emission concentration in a single operation, reaching 324.4 μg/m³, and its dust diffusion range is the widest. The dust emission concentrations of a single operation in the drilling, loading and transportation stages are 59.8 μg/m³, 88.2 μg/m³ and 61.8 μg/m³, respectively. In addition, the dust concentration in the pit bottom area is significantly higher than that at the bench crest, with its mean value being approximately five times that of the dust concentration at the bench crest. The research results reveal the variation laws of dust concentration in open-pit stopes and can provide theoretical support for dust prevention and control.

Key words: Open-pit stope, Dust concentration, Dispersion characteristic, Influence mechanism

0 引言

露天矿尘源多集中在爆破、排土等作业环节,同时各种大型采装、运输设备的运作也会产生大量粉尘[1-2]。露天矿尘源主要包括矿岩扬尘、道路扬尘、破碎岩石扬尘、装卸和倾倒转移矿岩扬尘、矿石堆风

* **收稿日期**:2025-01-10
基金项目:国家自然科学基金项目(52074061);辽宁省基本科研项目(JYTMS20230616);鞍钢集团矿业有限公司科研计划项目(2023-科A06)
作者简介:曹洋(1985—),男,吉林辉山人,高级工程师,主要从事采矿、爆破相关工作。E-mail:342448216@qq.com
通信作者:赵玉琪(1999—),女,辽宁本溪人,硕士,助理工程师,主要从事采矿等方面的研究工作。E-mail:zhaoyuqi4599@163.com

蚀扬尘、加工矿石扬尘等[3-4]。在各项生产环节中,爆破的产尘量最大,占总产尘量的90%以上。比较各生产环节的产尘贡献率,从大到小依次为爆破、运输、采装、穿孔[5]。SAIRANEN等[6]研究证实,爆破环节和运输环节均是露天矿的主要尘源。李大怀[7]认为露天矿非扰动区的产尘方式为风载产尘,推导出粉尘颗粒风力起动模型并研发了适用于哈尔乌素露天煤矿的黏结性抑尘剂。

露天矿在不同生产环节的产尘机理存在显著差异。学者们针对不同生产环节的露天矿粉尘来源开展了大量研究,总结出穿孔、爆破、采装、运输等生产工艺是造成露天采场空气污染的关键因素。具体而言,采场穿孔粉尘主要来源于原生粉尘和扰动粉尘两部分[8]。原生粉尘是由于钻头钻进过程中注入孔内挤压、破碎、振动矿岩和摩擦作用产生的粉尘,是穿孔产尘的主要来源;扰动粉尘是由于钻头高速注入孔内,形成的高压风将矿岩挤压破碎后的岩屑沿钻孔缝隙喷射出而产生的[9]。在爆破环节,粉尘随爆炸形成蘑菇云状态,受冲击动能作用与原有粉尘云相互作用并扩散至大气,扩散半径越大,粉尘扩散速率则越小[10]。郭舒鹏[11]研究发现,爆破环节的产尘机理是由于火烧区岩石力学强度低、裂隙发育程度高,导致岩石过度粉碎,同时,台阶上盘粉碎程度不够和过度粉碎的台阶坡面也是造成露天矿爆破扬尘严重的重要因素。汤万钧[12]认为装载环节的产尘是由于矿岩下落过程中重力势能转化为动能,在破碎、下落过程,矿岩散开和下落与矿岩和器械相互碰撞产尘;刘宇等[13]发现矿岩剥离铲斗后迅速掉落产生冲击动能,带动冲击气流与挤压散出的卡车物料发生摩擦、碰撞产尘。路面运输的粉尘是由于大吨位运输车运输时发生碾压、冲击、切削、摩擦路面引起碎石粉化,使矿岩表面细微颗粒物脱离产尘,其受车速、粉尘自身特性的影响[14-15]。陈曦等[16]发现自卸卡车运输过程中的空气紊动会导致粉尘受剪切气流和诱导气流双重作用的影响,与卡车发生反方向运动向后扩散。陈学栋[17]研究了露天煤矿胶带机的产尘是由于胶带机启动胶带时阻力发生瞬时改变,由静阻力突变为动阻力引起输送带回程面振动产尘。

缺乏统一的生产过程框架通常会导致分析结果难以直接进行对比和综合,本文在前人研究的基础上,整合了穿孔、爆破、采装、运输等生产工艺环节的产尘机理,结合现场监测数据分析了$PM_{2.5}$与PM_{10}浓度之间的变化关系,以及齐大山露天采场尘源附近的粉尘弥散与分布特征,为制定有效的露天矿粉尘防控措施提供了理论依据。

1 露天采场粉尘监测方案与气象数据采集

1.1 齐大山露天矿概况

齐大山铁矿位于鞍山市东北方向约12 km,行政区隶属于鞍山市千山区齐大山镇管辖。矿坑最长约3.5 km,最宽约1 km,北侧紧邻齐大山选矿厂,西南约1.3 km处为调军台选矿厂,东南为风水沟尾矿库,南侧约6 km为鞍钢集团鞍千矿业有限责任公司及其选矿厂。矿区地处北温带,属温带季风气候,四季分明。2023至2024年年平均温度为8.25 ℃。温度最高为7月、8月,最高气温为28 ℃;最低为1月份,最低气温为-16 ℃。矿区有明显的季节风,夏季多南风,冬季多西北风,历年来最多风向为西南风。矿山目前已进入深凹露天开采阶段,生产规模为1 700万t/a。

1.2 露天采场粉尘监测方案

固定式粉尘直径与浓度监测主要基于两种传感器技术:β射线监测和激光监测[18-19]。张鹏飞等[20]采用固定式监测方法,通过在监测点布置混有50%乙二醇和50%水的湿法收集缸,按月测定粉尘的降尘质量。熬忠晨[21]基于激光监测方法,采取3种不同的帧数,使用Optronis高速摄像仪拍摄不同距离和角度下的煤破碎站卸料口卡车卸料全过程,获得了粉尘弥散的大致范围和不同距离的粉尘弥散规律。

移动式监测能够实现动态实时监测,通常采用移动载体搭载粉尘监测系统,如无人机设备搭载粉尘监测系统或运输车搭载粉尘监测系统。刘鑫等[22]提出了一种利用多旋翼无人机搭载粉尘浓度监测仪的露天采场粉尘立体化监测方法,并成功将其应用于安家岭露天矿。鲁文岐等[23]将激光粉尘浓度监测仪固定于卡车车体,对运输过程中的粉尘粒径分布和浓度变化规律开展研究。

综合考虑到固定式和移动式监测技术特点,结合齐大山露天采场现场实际情况和监测点位数量,最终选用SDL307激光粉尘浓度监测仪进行固定点位采集和车载移动连续采集,监测露天矿粉尘浓度的变化。该设备基于激光检测原理,可实时监测$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度,持续续航达10 h,数据采集间隔

为 1 s。同时,配备使用 1 台集多项气象要素于一体的可移动式气象观测仪器(PLC-16026 气象站),对风向、风速、大气压、温度、湿度等 5 项气象要素进行准确监测。

本次现场监测共部署以下设备:1 台佳能 EOS 80D 单反相机,用于拍摄粉尘运移过程;3 台 PLC-16026 气象站,用于记录气象参数;10 台 SDL307 激光粉尘浓度监测仪,用于监测不同监测点位及沿道路的粉尘浓度变化情况;1 台冰河 C2 GPS,用于定位监测点;另设置 10 个地面标志点和 2 个卷尺,用于辅助定位与测量,完成此次现场监测。

通过对矿区地形地貌和主要尘源点进行实地勘察,结合齐大山露天矿现场实际情况,考虑布点可行性,最终确定齐大山露天采场现场监测点位,如图 1 所示(颜色标识见电子版)。图中,白色点位代表主要尘源点;橙色点位代表尘源点附近的 SDL307 激光粉尘浓度监测仪监测点位;黄色点位代表 SDL307 激光粉尘浓度监测仪监测的其他尘源点位,如破碎站、道路、剥岩等;蓝色点位代表固定监测点 PLC-16026 气象站监测点位;红色点位代表沿道路移动监测的粉尘浓度及气象参数监测点位。

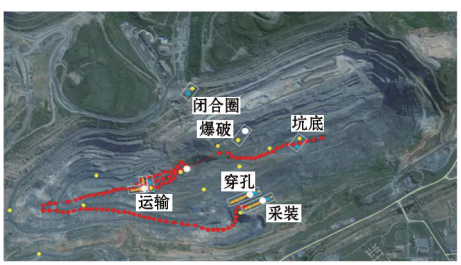


图 1 齐大山露天采场现场监测点位布置

Fig.1 Layout of on-site monitoring points in Qidashan open-pit mine

具体监测内容为拍摄尘源弥散全过程,以及定点监测尘源点附近的粉尘浓度与气象参数。在尘源后方 100 m 处架设 1 台佳能 EOS 80D 单反相机,并在尘源周围布置地面标志点,通过录像分析确定起尘集中区域及其特征,观测粉尘弥散过程,进而揭示粉尘颗粒的扩散规律。同时,在穿孔、采装、运输、爆破等环节的尘源点附近不同位置布置粉尘浓度监测仪,各尘源点附近设备分布及现场实况如图 2 所示。监测仪高度为 1.5 m,间距通过卷尺测量,并利用 GPS 记录各监测点位。通过该方法,系统探究不同尘源点周边位置的粉尘浓度变化情况。

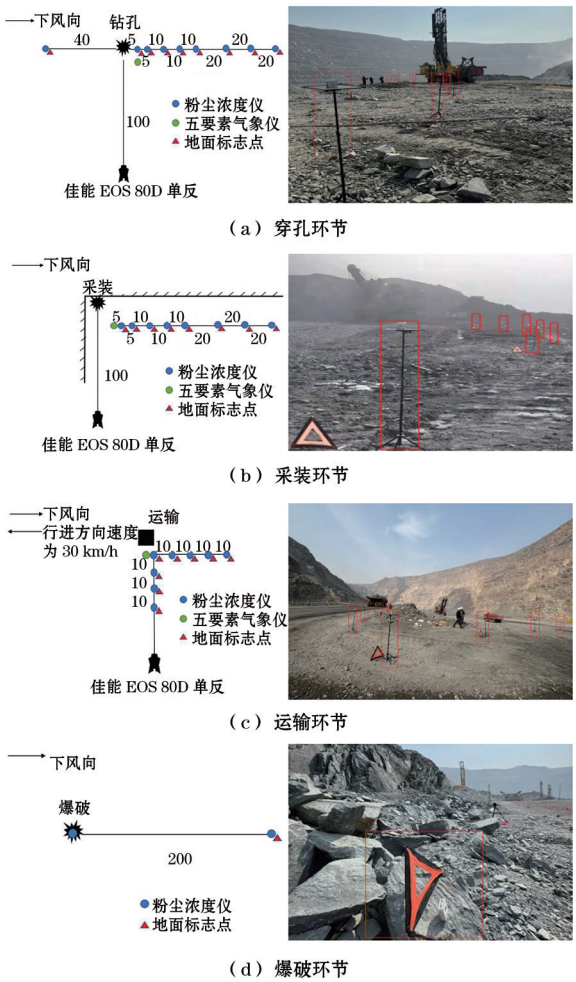


图 2 各尘源点附近设备分布及现场实况(单位:m)

Fig.2 Equipment distribution around dust source points and site conditions

2 不同粒径颗粒物浓度相关性及回归性分析

2.1 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度相关性分析

选取闭合圈处的长期固定监测点的粉尘浓度数据进行分析,该数据为连续性变量,其散点图如图 3 所示。可以看出,$PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度表现出明显的一致性变化趋势,初步判断二者存在正相关关系,因此,进一步对 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度进行相关性分析。

$PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的样本量均为 78。首先,通过柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(K-S)检验对 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度数据进行正态性检验,检验结果见表 1。其中,PM_{10} 浓度的显著性小于 0.05,不符合正态分布。通过斯皮尔曼(Spearman)相关系数对两组浓度数据进行相关性分析,分析结果见表 2。分析表明,齐大山露天采场监测到的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度数

据之间的斯皮尔曼相关系数为 0.951,具有显著相关性。

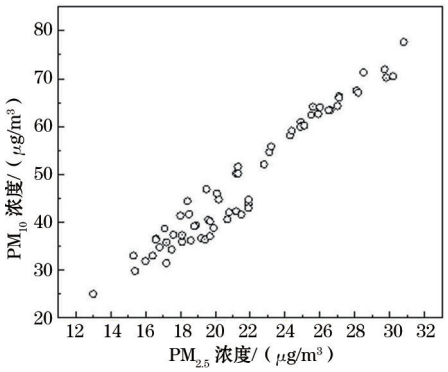


图 3 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度散点图

Fig.3 Scatter plot of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

表 1 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度正态性检验结果

Table 1 Results of normality test for $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

颗粒物	样本量	显著性
$PM_{2.5}$	78	0.011
PM_{10}	78	0.000

表 2 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度相关性检验结果

Table 2 Results of correlation test for $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

颗粒物	样本量	相关系数
$PM_{2.5}$	78	0.951**
PM_{10}	78	0.951**

注:** 表示相关性在 0.01 级别上显著(双尾)。

2.2 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度回归性分析

2.2.1 线性回归分析

以 $PM_{2.5}$ 浓度(Y_2)为自变量、PM_{10} 浓度(Y_1)为因变量进行线性回归分析,$PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的拟合直线如图 4 所示。线性回归系数检验结果见表 3。可以看出,线性拟合决定系数 R^2 为 0.941,表明 $PM_{2.5}$ 浓度比 PM_{10} 浓度线性拟合程度较好。在各系数检验结果中,回归显著性检验值低于 0.05,说明模型整体回归效果显著,即 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度之间存在显著的线性关系。

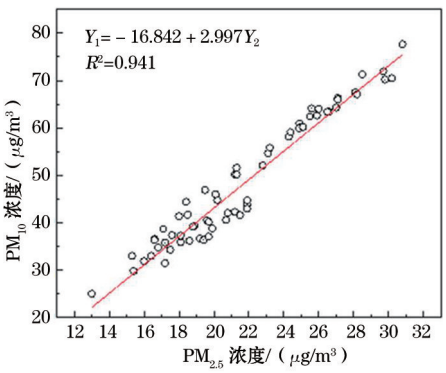


图 4 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度线性拟合结果

Fig.4 Linear fitting results of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

2.2.2 曲线回归分析

上述线性回归分析中,决定系数 R^2 为 0.941,表明模型线性回归显著性较好。为进一步提升拟合效果,寻求更高的决定系数,本研究进一步开展曲线回归分析,曲线回归模型拟合结果见表 4。

表 3 线性回归系数检验结果

Table 3 Test results of linear regression coefficients

模型项	非标准化系数		标准化系数 β	t 值	显著性(P 值)	共线性统计资料	
	B	标准误				容许度	方差膨胀因子(VIF)
常量	−16.840	1.871	—	−9.003	0.0	1.00	1.00
$PM_{2.5}$ 浓度	2.997	0.086	0.97	34.663	0.0	1.00	1.00

表 4 曲线回归模型拟合结果

Table 4 Fitting results of curvilinear regression models

模型	R^2	F 值	df_1	df_2	P 值	常量	拟合参数		
							b_1	b_2	b_3
线性	0.941	1 201.523	1	76	0.000	−16.842	2.997	—	—
对数	0.912	791.295	1	76	0.000	−144.477	62.997	—	—
倒数	0.856	452.108	1	76	0.000	107.656	−1 243.363	—	—
二次项	0.945	640.245	2	75	0.000	3.162	1.118	0.042	—
三次项	0.945	650.358	2	75	0.000	9.831	0.000	0.102	−0.001
复合	0.934	1 079.647	1	76	0.000	11.969	1.064	—	—
幂次	0.934	1 074.154	1	76	0.000	0.788	1.333	—	—
S 型	0.906	730.021	1	76	0.000	5.118	−26.744	—	—
增长型	0.934	1 079.647	1	76	0.000	2.482	0.062	—	—
指数型	0.934	1 079.647	1	76	0.000	11.969	0.062	—	—
Logistic 型	0.934	1 079.647	1	76	0.000	0.084	0.939	—	—

决定系数 R^2 越接近 1,表明模型拟合程度越好;F 值越大,代表模型整体越显著。由表 4 可知,二次项与三次项曲线模型决定系数均为 0.945,是所比较模型中的最大值,其拟合优度优于线性回归模型($R^2=0.941$);三次项模型的 F 值高于二次项模型,说明三次项曲线模型中 $PM_{2.5}$ 浓度比 PM_{10} 浓度的解释能力更强。因此,本研究最终选择三次项曲线模型进行深入分析,曲线回归系数检验结果见表 5,拟合曲线如图 5 所示。

表 5 曲线回归系数检验结果

Table 5 Test results of curvilinear regression coefficients

模型项	非标准化系数		标准化系数 β	t 值	显著性(P 值)
	B	标准误			
$PM_{2.5}$ 浓度	0.102	0.019	1.462	−5.235	0.000
$PM_{2.5}$ 浓度^2	−0.001	0.001	−0.493	−1.766	0.081
常量	9.831	3.177	—	3.095	0.003

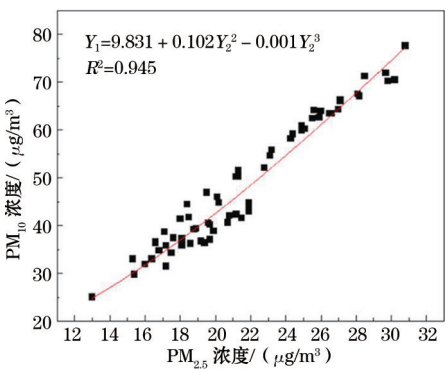


图 5 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度拟合曲线

Fig.5 Fitted curve for $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

3 生产工艺环节尘源附近粉尘弥散与分布特征

分别在穿孔作业、采装作业、运输作业的下风向直线距离 0 m、5 m、10 m、20 m、30 m、40 m、60 m、80 m、100 m 处监测 100 s 内粉尘浓度的变化。

3.1 穿孔作业下粉尘弥散与分布特征

在温度为 22.2 ℃、相对湿度为 28.9%、大气压为 103.46 kPa、风速为 1.5 m/s 的气象条件下,穿孔作业下 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,距穿孔环节下风向 80 m 范围内的粉尘浓度变化规律基本一致,表现为浓度迅速升高、逐渐下降并趋于稳定。下风向 100 m 处粉尘浓度变化与 80 m 范围内明显不同,粉尘浓度没有随穿孔作业发生波动,表明在距离穿孔作业 80 m 外,粉尘不再沿下风向继续扩散。同时,穿孔作业下风向 20 m 处,粉尘浓度约在 10 s 时达到最大值,下风向 80 m 处,粉尘浓度约在 20 s 处达到最大值,说明粉尘在风力作用下逐渐向下风向扩散,且粉尘浓度峰值随下风向距离增加而呈降低趋势。

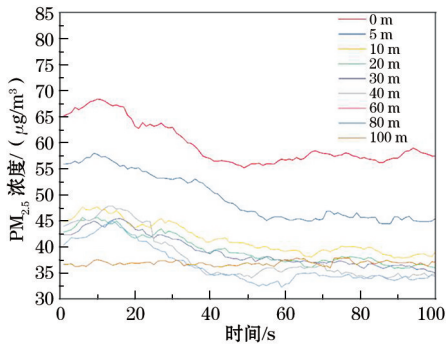


图 6 穿孔作业下沿下风向 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线

Fig.6 Variation curves of $PM_{2.5}$ concentration with time along the downwind during drilling operation

对粉尘浓度随距离的变化特征进行分析,穿孔作业 100 s 时的粉尘浓度随距离变化曲线如图 7 所示。可以看出,穿孔环节 $PM_{2.5}$ 浓度在工作点处达到最大值,约为 60 $\mu g/m^3$;之后沿粉尘下风向粉尘浓度迅速下降,且下降速率随距离增大而逐渐减小,在下风向 60 m 后粉尘浓度基本稳定在 36 $\mu g/m^3$。

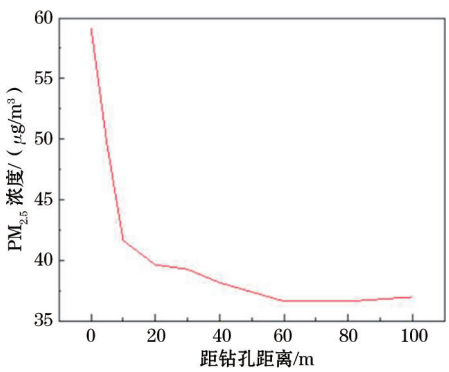


图 7 穿孔作业下沿下风向不同距离 $PM_{2.5}$ 浓度变化曲线

Fig.7 Variation curve of $PM_{2.5}$ concentration at different distances along the downwind during drilling operation

3.2 采装作业下粉尘弥散与分布特征

在温度为 24.7 ℃、相对湿度为 26.7%、大气压为 103.45 kPa、风速为 2.3 m/s 的气象条件下,采装作业下 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,距采装作业下风向 100 m 范围内的粉尘浓度变化规律基本一致,表现为粉尘浓度连续性波动升高后波动降落,停止作业后下降至稳定水平。

采装作业的前 80 s,铲斗剥离矿岩松散体,矿岩堆体表面产生小范围滑塌,致使下风向 20 m 范围内粉尘浓度升高。80 s 后,铲斗的提升与运移会以一定速度带动矿岩表面细微颗粒物随气流扩散至空气中,在随后的卸料过程中,矿岩因能量转化、压缩空气和颗粒碰撞等进一步产尘,使粉尘浓度在 100 s 处又升高到极值。随着提升、运移与卸料作业的重复进行,粉尘逐渐累积,浓度持续攀升,下风向 20 m 范围内约在 170 s 达到极值,30～100 m 范围内约在 190 s 达到极值。

对粉尘浓度随距离的变化特征进行分析,采装作业 300 s 时的粉尘浓度随距离的变化曲线如图 9 所示。可以看出,采装作业 $PM_{2.5}$ 浓度在 5 m 范围内达到最大值,约为 90 $\mu g/m^3$;粉尘浓度在下风向 30 m 范围内和 60～100 m 迅速下降,在下风向 30～60 m 范围内平缓下降。在下风向 100 m 处,$PM_{2.5}$ 浓度最小,约为 45 $\mu g/m^3$,但仍高于当日采场同一位置在非作业状态下的平均粉尘浓度。这表明在采装环节下风向 100 m 外,粉尘仍持续向下风向扩散。

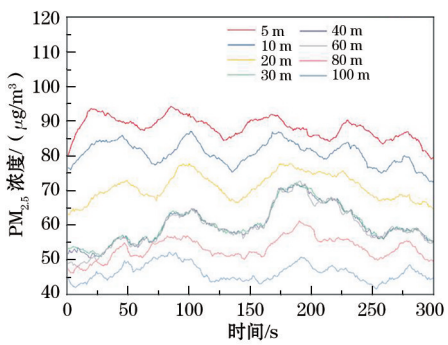


图 8 采装作业下沿下风向 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线

Fig.8 Variation curves of $PM_{2.5}$ concentration with time along the downwind during loading operation

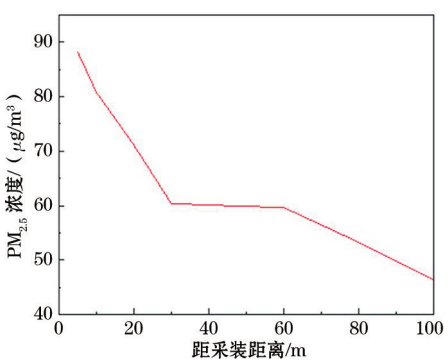


图 9 采装作业下沿下风向不同距离 $PM_{2.5}$ 浓度变化曲线

Fig.9 Variation curve of $PM_{2.5}$ concentration at different distances along the downwind during loading operation

3.3 运输作业下粉尘弥散与分布特征

运输作业下沿风向方向和垂直于风向不同距离处 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线如图 10、图 11 所示。可以看出,沿风向和垂直风向不同距离处 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化趋势均表现为先依次升高、随后在稳定范围内波动、最后依次下降并趋于平稳的趋势,表明粉尘受风向和距离的影响,具有明显的滞后性。

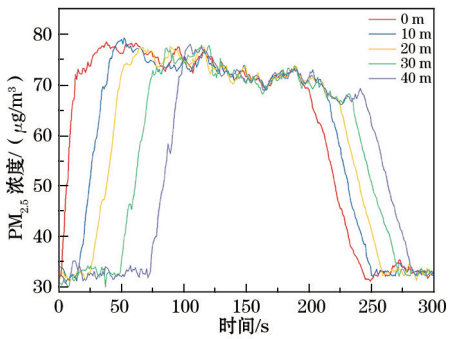


图 10 运输作业下沿下风向 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线

Fig.10 Variation curves of $PM_{2.5}$ concentration with time along the downwind during transportation operation

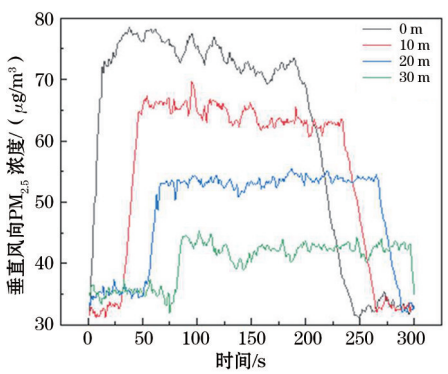


图 11 运输作业下垂直下风向 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化曲线

Fig.11 Variation curves of $PM_{2.5}$ concentration with time in vertical crosswind during transportation operation

在温度为 22.2 ℃、相对湿度为 36.3%、大气压为 104.54 kPa、风速为 1.7 m/s 的气象条件下,沿下风向每间隔 10 m,粉尘浓度变化的滞后时间约为 15 s。这是由于运输车辆依次经过下风向各监测点,粉尘浓度依次升高,下风向不同距离处 $PM_{2.5}$ 浓度均在 75 $\mu g/m^3$ 上下波动。当车辆优先驶离第一个监测点后,该点在 200 s 时粉尘浓度开始降低,约 50 s 后达到稳定值。同一时段内,垂直于下风向不同距离的粉尘浓度升至稳定范围后持续波动约 200 s,且粉尘浓度随距离增大而降低。在垂直于下风向 30 m 处,粉尘浓度波动范围为 38～45 $\mu g/m^3$,仍高于

当日道路无作业时的平均粉尘浓度。这表明运输环节在垂直下风向 30 m 外,粉尘仍持续向外扩散。

受齐大山采场现场条件限制,无法在爆破区域附近布设监测点,因此在爆破区域下风向 200 m 处布置一台 SDL307 粉尘浓度监测仪,记录爆破前后 60 min 粉尘浓度随时间的变化情况,如图 12 所示。

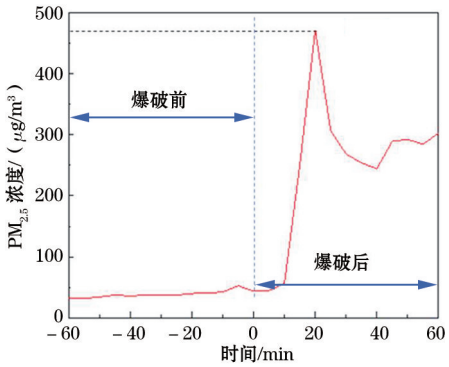


图 12 爆破前后 $PM_{2.5}$ 浓度随时间变化曲线

Fig.12 Variation curve of $PM_{2.5}$ concentration with time before and after blasting

从图 12 可以看出,爆破作业的瞬时产尘量远高于其他生产环节,$PM_{2.5}$ 峰值浓度高达 471.9 μg/m³。爆破前,粉尘浓度处于稳定状态,$PM_{2.5}$ 浓度约为 30～40 μg/m³。由于固定式监测点位于爆破点下风向 200 m 处,爆破瞬间粉尘浓度不会立刻增加,约在 5 min 后才受风流作用抵达,导致粉尘浓度上升,并于爆破 20 min 左右达到峰值。峰值过后粉尘浓度逐渐下降,但在 60 min 内仍高于爆破前水平。这表明爆破产生的高浓度粉尘难以快速扩散。

综上所述,对比各生产环节单次作业的产尘浓度平均值,从大到小依次为:爆破(324.4 μg/m³)、采装(88.2 μg/m³)、运输(61.8 μg/m³)、穿孔(59.8 μg/m³);对比各生产环节单次作业的粉尘扩散范围,从大到小依次为:爆破(沿下风向>200 m),采装(沿下风向>100 m),穿孔(沿下风向>80 m),运输(垂直下风向>40 m)。

4 露天采场粉尘弥散与影响机制分析

统计所有固定监测点数据,见表 6。可以看出,坑底的粉尘浓度远高于闭合圈处的粉尘浓度,其均值约为闭合圈粉尘浓度的 5 倍。根据数据波动情况,波动程度由高到低依次为坑底 PM_{10} 浓度、坑底 $PM_{2.5}$ 浓度、闭合圈 PM_{10} 浓度、闭合圈 $PM_{2.5}$ 浓度。

表 6 固定监测点粉尘浓度统计

Table 6 Statistics of dust concentration at fixed monitoring points

监测点位置	颗粒物	粉尘浓度/(μg/m³)			
		最大值	最小值	平均值	标准差
坑底	$PM_{2.5}$	208.6	51.3	112.2	40.1
	PM_{10}	529.2	132.7	231.6	78.5
闭合圈	$PM_{2.5}$	30.8	13.0	21.2	4.2
	PM_{10}	77.6	25.0	46.8	13.0

对齐大山露天采场闭合圈和坑底的粉尘浓度进行监测,记录从上午 9 时至下午 16 时 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度变化,每 5 min 记录 1 组数据,共采集 81 组数据。采场颗粒物浓度随时间的变化情况如图 13 所示。

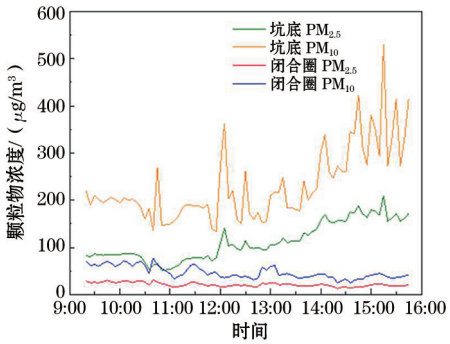


图 13 固定监测点粉尘浓度随时间变化曲线

Fig.13 Temporal variation curves of dust concentration at fixed monitoring points

从图 13 可以看出,露天采场在 10:45 出现了一次粉尘浓度突增,与现场爆破作业时间吻合;自 12:00 起,粉尘浓度大幅上升,主要原因是大型设备集中作业,多个爆堆同时铲装;随后各种设备在不同时间段间歇性停歇,致使粉尘浓度以波动状态整体升高,坑底区域较闭合圈处粉尘污染严重。

日出后至 8:00 前,矿山作业量较小,仅在西南区进行局部的剥岩工作,且风速较低,但坑内仍存在粉尘聚集难以扩散的情况(见图 14)。该时段内,坑底 $PM_{2.5}$ 浓度稳定在 50～90 μg/m³,坑底 PM_{10} 浓度稳定在 130～270 μg/m³,闭合圈 $PM_{2.5}$ 浓度稳定在 15～30 μg/m³,闭合圈 PM_{10} 浓度稳定在 30～80 μg/m³。粉尘浓度仍维持在较高水平,能见度较低。这是由于日出后,露天矿坑周围受太阳照射的影响,升温较快,温度高于被边帮遮挡的矿坑。当地面存在风流时,地表上方的热空气平流矿坑上空,与下方冷空气接触形成逆温层。该逆温层抑制了向上的湍流扩散,导致坑内粉尘聚集难以消散。



图 14 齐大山露天采场上午粉尘污染情况

Fig.14 Dust pollution condition in Qidashan open-pit mine in the morning

随着太阳逐渐升高,阳光直射采场内部,坑底温度与闭合圈之间的温差逐渐减小,笼罩在矿坑上方的逆温层消散,导致粉尘开始向坑外逃逸,扩散能力不断增大。在此时段内(8:00～12:00),坑内粉尘浓度呈下降趋势;闭合圈 $PM_{2.5}$ 浓度稳定在 15～25 $\mu g/m^3$,闭合圈 PM_{10} 浓度稳定在 30～45 $\mu g/m^3$。12:00 以后,采矿作业强度和频率远多于上午,即使逆温现象已消失,坑内粉尘仍发生积聚,使得坑内粉尘浓度波动上升。坑底 $PM_{2.5}$ 浓度最高达到 208.6 $\mu g/m^3$,PM_{10} 浓度最高达到 529.2 $\mu g/m^3$。日落后直至第二天日出前,夜间温度不断降低,地表和矿坑边帮冷空气沿边帮向坑底不断聚集,形成具有一定厚度的逆温层。坑内粉尘浓度随逆温层厚度发生变化,具体表现为:逆温层越厚,坑内粉尘浓度越高。

5 结论

本次现场监测围绕矿山生产中的穿孔、爆破、采装、运输环节展开,共设置 26 个监测点,累计采集 777 组数据。基于现场监测数据,系统分析了 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度的相关关系、以及齐大山露天采场尘源附近的粉尘弥散与分布特征。得到以下主要研究结论。

(1) $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度之间存在显著的相关关系。其中,二次项与三次项曲线模型的决定系数 R^2 均为 0.945,高于线性回归模型($R^2=0.941$);且三次项曲线模型的 F 值高于二次项曲线模型,表明三次项曲线模型中 $PM_{2.5}$ 浓度比 PM_{10} 浓度的解释能力更强。

(2) 对比不同生产环节,单次作业的产尘浓度平均值由高至低依次为:爆破(324.4 $\mu g/m^3$)、采装(88.2 $\mu g/m^3$)、运输(61.8 $\mu g/m^3$)、穿孔(59.8 $\mu g/m^3$);对比各生产环节单次作业的粉尘扩散范围,从大到小依次为:爆破(沿下风向>200 m),采装(沿下风向>100 m),穿孔(沿下风向>80 m),运输(垂直下风向>40 m)。

(3) 坑底粉尘浓度远高于闭合圈处的粉尘浓度,其浓度均值约为闭合圈粉尘浓度均值的 5 倍,表明坑底是粉尘污染的主要区域。受气象因素影响,粉尘浓度的波动程度从强至弱依次为坑底 PM_{10} 浓度、坑底 $PM_{2.5}$ 浓度、闭合圈 PM_{10} 浓度、闭合圈 $PM_{2.5}$ 浓度。

参考文献(References):

[1] 吕文伟,张禹,杨洋,等.露天煤矿粉尘运移规律及降尘方式研究[J].露天采矿技术,2022,37(6):14-17.
LYU Wenwei, ZHANG Yu, YANG Yang, et al. Study on dust migration law and dedusting method in open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology,2022,37(6):14-17.

[2] BAGNOLD R A. Thephysics of blown sand and desert dunes [M]. Dordrecht: Springer Dordrecht,2012.

[3] 福法纳.SMD 露天矿粉尘排放对环境的影响与减排技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
FOFANA Mohamed Lamine. Research on theimpact of SMD open pit mine dust discharge on the environment and emission reduction technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2021.

[4] 陆国荣,蔡锦勇,唐子沛,等.白银深凹露天矿气象变化特征及其对粉尘污染的影响[J].金属矿山,1986(10):4-8.
LU Guorong, CAI Jinyong, TANG Zipei, et al. Meteorological variation characteristics of Baiyin deep depression open-pit mine and its impact on dust pollution [J]. Metal Mine,1986(10):4-8.

[5] 杜翠凤,陈胜.露天矿粉尘源强分析及贡献率实验研究[J].工业安全与环保,2014,40(10):76-79.
DU Cuifeng, CHEN Sheng. Analysis on dust resource intension for open pit mines and experimental study on the contribution rate[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2014,40(10):76-79.

[6] SAIRANEN M, RINNE M, SELINEN O. A review of dust emission dispersions in rock aggregate and natural stone quarries[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment,2018,32(3):196-220.

[7] 李大怀.露天矿非扰动区粉尘起尘机理及防治策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
LI Dahuai. On the law of producing dust and control dust technology in dry drilling coal roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.

[8] 张慧.煤巷干式钻孔产尘机理与控尘技术研究[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
ZHANG Hui. Research on the dust generation mechanism and dust control technology of dry drilling in coal roadways [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology,2017.

[9] 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 Zhong'an. Numerical simulation of dust distribution and influencing factors in slope drilling[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(6):685-692.

[10] 胡承欢,夏毅敏,卜英勇,等.独头巷道爆破粉尘运动规律的仿真分析[J].计算机仿真,2015,32(8):235-238.
HU Chenghuan, XIA Yimin, BU Yingyong, et al. Numerical simulation of blasting dust movement rule in blind tunnel[J]. Computer Simulation, 2015, 32(8):235-238.

[11] 郭舒鹏.大南湖二号露天矿爆破扬尘机理及控制技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2021.
GUO Shupeng. Study on mechanism and control technology of blasting dustin Dananhu No.2 open-pit mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.

[12] 汤万钧.露天矿剥离工作面粉尘分布与运移规律模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
TANG Wanjun. Study on the simulation of distribution and transport of dust on stripping working face in surface mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[13] 刘宇,丁小华,陆翔,等.哈尔乌素露天煤矿采装环节起尘特征及其降尘方式研究[J].煤炭工程,2020,52(增刊2):28-32.
LIU Yu, DING Xiaohua, LU Xiang, et al. Dusting characteristics and dust reduction methods in mining and loading links in Haerwusu open pit coal mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(Suppl.2): 28-32.

[14] 田冬梅,蒋仲安,姚建,等.基于正交试验与回归统计方法的露天矿运输扬尘影响因素分析[J].北京科技大学学报,2009,31(8):957-963.
TIAN Dongmei, JIANG Zhong'an, YAO Jian, et al. Influencing factors analysis of dust mass concentration by transportation in open-pit mines based on orthogonal experiment and multiple regression statistics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 957-963.

[15] 汤万钧.露天煤矿粉尘分布和运移机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
TANG Wanjun. Study on dust distribution and diffusion mechanism in open pit coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.

[16] 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.

[17] 陈学栋.露天煤矿胶带机运煤过程产尘机理及抑尘技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2020.
CHEN Xuedong. Study on dust production mechanism and dust suppression technology of belt conveyor in open-pit coal mine[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.

[18] 王雅宁.基于随机森林-马尔科夫模型的露天矿粉尘浓度预测研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
WANG Yaning. Research ondust concentration prediction of open-pit mine based on random forest-Markov model[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[19] 张易容.基于循环神经网络的哈尔乌素露天煤矿粉尘浓度预测[D].徐州:中国矿业大学,2020.
ZHANG Yirong. Predictionof dust concentration in Haerwusu open-pit coal mine based onrecurrent neural network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[20] 张鹏飞,包安明,古丽·加帕尔,等.新疆准东露天煤矿开采区降尘量时空特征及影响因素[J].水土保持通报,2015,35(2):1-5.
ZHANG Pengfei, BAO Anming, GULI·Jiapaer, et al. Temporal and spatial characteristics of dust flux and influence factors in open-pit coalmine in east Junggar Basin in Xinjiang area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2):1-5.

[21] 敖忠晨.煤破碎站卸料口粉尘运移规律及降尘方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
AO Zhongchen. Study on dust movement law and dust reduction method at the discharge port of coal crushing station[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[22] 刘鑫,张瑞新,孙健东,等.基于无人机的露天矿粉尘立体化监测方法[J].煤炭工程,2021,53(12):140-144.
LIU Xin, ZHANG Ruixin, SUN Jiandong, et al. Three-dimensional monitoring of open-pit mine dust based on unmanned aerial vehicle[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12):140-144.

[23] 鲁文岐,周伟,丁小华,等.露天矿卡车运输起尘时 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 变化规律研究[J].中国煤炭,2019,45(11):89-93.
LU Wenqi, ZHOU Wei, DING Xiaohua, et al. Change law of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in open-pit coal mine truck transportation[J]. China Coal, 2019, 45(11):89-93.