

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.025

杨房沟水电站料场开挖爆破粉尘粒度分布特征*

晋良海^{1,2,3}, 吴志鹏¹, 陈述^{1,2,3}, 郑霞忠^{1,2,3}, 王玉龙⁴, 陈雁高⁵

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学安全生产标准化评审中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学(湖北)安环科技有限公司, 湖北 宜昌 443002; 4. 南水北调中线干线工程建设管理局河北分局, 河北 石家庄 050035; 5. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081)

摘要: 通过分析杨房沟水电站料场开挖爆破粉尘的粒度分布特征, 为改进爆破降尘工艺提供粉尘粒度学依据。在料场爆破区、工作平盘、出入沟、最终边帮等处采集粉尘样品, 采用激光粒度分布仪测试粉尘样品的分散度; 以粉尘粒度分布数据拟合分布函数, 表明爆破粉尘的粒度分布函数呈现对数正态分布特征; 与经典的罗森·拉姆勒(Rosin-Rammler)分布函数模型对比分析表明, 对数正态分布函数用于描述爆破粉尘的粒度分布更加准确。基于对数正态分布函数模型, 厘定爆破粉尘粒度分布参数, 分析TSP、PM₁₀、PM₅、PM_{2.5}及PM₁粉尘占全尘的比例, 定量表达爆破粉尘粒度分布特征。结果表明: 杨房沟水电站料场爆破粉尘具有显著的对数正态分布特征; 离爆破中心距离越远, 粒度分布范围越窄, 对人体有害粉尘占比越大; 建议采用爆破粉尘捕捉吸附技术、掺和湿润性抑尘剂的水雾喷洒等降尘措施。

关键词: 水利工程; 粉尘分散度; 假设检验; 对数正态分布; 降尘工艺

中图分类号: X964 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-1045-08

Particle Size Distribution Characteristics of Blasting Dust in Excavation Yard of Yangfanggou Hydropower Station

JIN Lianghai^{1,2,3}, WU Zhipeng¹, CHEN Shu^{1,2,3}, ZHENG Xiazhong^{1,2,3}, WANG Yulong⁴,
CHEN Yangao⁵

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Center of Standardization Evaluation for Production Safety, Yichang 443002, China; 3. Safe-environment Technology Co. Ltd., China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Branch of Construction and Administration Bureau of South-To-North Water Diversion Middle Route Project, Shijiazhuang 050035, China; 5. Sinohydro Bureau 7 Co. Ltd., Chengdu 610081, China)

Abstract: To improve the technology for reducing blast dust, the particle size distribution characteristics of blasting dust during the excavation of Yangfanggou Hydropower Station were studied by employing dust particle size theory. Dust samples were collected from the blasting area of the material yard, the working flat plate, the inlet, the outlet trenches, and the final pit slope. The dispersion of

* 收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878385)、水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2016KSD13)资助

作者简介: 晋良海(1973-), 男, 副教授, 博士。主要从事安全工效学、建设项目运筹管理研究。

Email: jinlianghai@ctgu.edu.cn

通讯作者: 吴志鹏(1994-), 男, 硕士。主要从事水利水电工程管理研究。Email: 2827649729@qq.com

the dust samples was tested using a laser particle size distribution analyzer. Then, the distribution function was fitted based on the dust particle size distribution data. It indicates that the particle size distribution function of the blasting dust exhibits lognormal distribution characteristics. A comparative analysis with the classical Rosin-Rammler distribution function model shows that the lognormal distribution function is more accurate in describing the particle size distribution of blasting dust. Particle size distribution parameters of the blasting dust were first determined based on the lognormal distribution model. Then, the proportions of TSP, PM10, PM5, PM2.5 and PM1 in total dust were analyzed. Finally, the particle size distribution characteristics of the blasting dust were quantitatively expressed. The conclusion shows that the blasting dust in the material yard of Yangfanggou Hydropower Station has significant lognormal distribution characteristics. The particle size distribution range decreases and the harmful proportion, which is unfavorable to the human body, increases with the distance to the blasting center. It is recommended that blasting dust capture adsorption technology and water mist mixed with moisturizing dust suppressant be used to reduce dust.

Keywords: hydraulic engineering; dust dispersion; hypothetical test; lognormal distribution; dust reduction process

引 言

杨房沟水电站是国家“西电东送”战略的重要工程之一,位于雅砻江干流中游,施工场地处于干热河谷区(金沙江、雅鲁藏布江等大型水电开发集中流域也属于干热河谷区)。料场爆破产生的大量粉尘会随干热气流运移扩散,严重影响施工场内及周围居民的生产生活。高浓度爆破粉尘不仅会使施工场地能见度下降,加剧施工机械磨损,且长时间与人体接触极易诱发尘肺病,危害现场作业人员及附近居民身体健康^[1]。通过研究粉尘粒度分布特征,为爆破降尘工艺改进及抑尘措施制定提供粉尘粒度学依据,对于改善施工场内及周围居民的生产生活环境具有重要意义。

近年来,与粉尘粒度分布相关研究已经成为热点:在测量分析粒度分布方面,菅洁等^[2]利用粉尘采样器检测井下工作面的粉尘质量浓度,通过激光粒度分布仪对粉尘粒度进行分析,探究了不同工作面间粉尘质量浓度分布及粒度分布的不同点;通过设计粉尘分散室,I.E.Perera等^[3]以定量实验的方法测量粉尘分散性对粒度分布的影响;Z.Liu等^[4]在20 L球形容器中进行煤尘爆炸试验,通过收集爆破后粉尘样品,对比分析爆炸前后粉尘粒度分布的异同;在粒度分布的数学表达方面。Y. Wang等^[5]在欧拉-欧拉法的基础上构建动力学模型研究煤尘运动特

征及分布的时空变化,根据获得的规律,针对掘进工作面采用不同通风方式进行防尘选择;基于欧拉-拉格朗日法,F.Geng等^[6]发现通风系统中,粉尘的分布表现出极端的非均匀性,在采矿工作面附近存在明显更高的浓度。晋良海等^[7]利用分形几何理论建立分形分布函数模型,以Rosin-Rammler分布函数为基准函数,通过对比探究了露天梯段料场不同区域的粉尘粒度分布规律;C.Murillo等^[8]以流体力学模型为工具来表征爆破粉尘粒度分布的主要影响参数,并利用实验数据准确描述了粒度分布的变化;K.N.Ramakrishnan^[9]从数学角度讨论Rosin-Rammler方程在描述粉尘粒度分布中的不充分性,在实验基础上建立了修正方程并加以验证。

上述研究成果丰富了粉尘粒度测量理论,构建了数学分布函数模型,但目前依然缺少类似杨房沟水电站干热河谷石料开挖爆破粉尘粒度分布相关研究。鉴于此,以杨房沟水电站石料场爆破粉尘为研究对象,采集爆破粉尘样品,采用数理方法整合粉尘粒度分布数据,绘制散点图并作线性拟合;以实测数据检验粉尘粒度分布函数,并与经典Rosin-Rammler粉尘粒度分布函数的拟合程度进行对比;厘定爆破粉尘粒度分布特征,分析粒度分布规律,为改进爆破降尘工艺和制定防尘降尘措施提供理论支撑,研究成果可推广应用至干热河谷区工程项目的降尘、抑尘。

1 样本采集与实验数据处理

1.1 样本采集

杨房沟水电站金波石料场位于干热河谷,多年平均降水量722 mm,多年平均风速0.8 m/s。降水较少蒸发量大,气候炎热干燥,爆破后易产生粉尘且长时间悬浮于空中不易沉降,严重影响施工区及附近的生产生活。

金波料场基岩岩性为花岗闪长岩,其成分中 SiO_2 含量在56%左右,岩石含水率约为43%。石料场开挖采用深孔梯段爆破,此爆破法在露天开挖中因爆破效率高被广泛运用。爆破预裂孔、缓冲孔及主爆孔的孔径皆为90 mm,孔深11.1 m。本研究在杨房沟水电站石料场爆破区、工作边帮、出入沟、最终边帮处采样,采样点距爆破中心点的距离分别为20、100、200、350 m。爆破中心及各采样点的位置如图1所示。

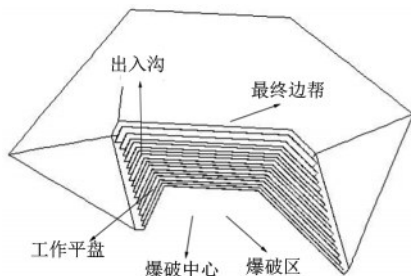


图1 采样点位置

Fig. 1 Location of sampling points

采样时风速为1.29 m/s,气温23℃,相对湿度68%。爆破前于4个采样点水平地面处各放置一直径为8 cm的采样盘,爆破后0.5~1.0 h完成采样。随后用孔径为1 250 μm 的工业分选筛将碎石块滤出,留取各采样点粒径 $\leq 1\ 250\ \mu\text{m}$ 的筛下剩余样品作为总样品,如图2所示。

1.2 数据预处理及分布性态估计

采用BT-9300Z型激光粒度分布仪对样品进行分析,该仪器粒度测量范围为0.1~1 250 μm ,重复性误差0.5%,准确性误差0.5%。取10 g样品粉尘加入激光粒度仪循环池中,经自动进水、光路校准、测试后得到样品粉尘的粒级频率图及累积频率图。测得爆破区、工作平盘、出入沟及最终边帮4处粒级频率图及累积频率图如图3所示。

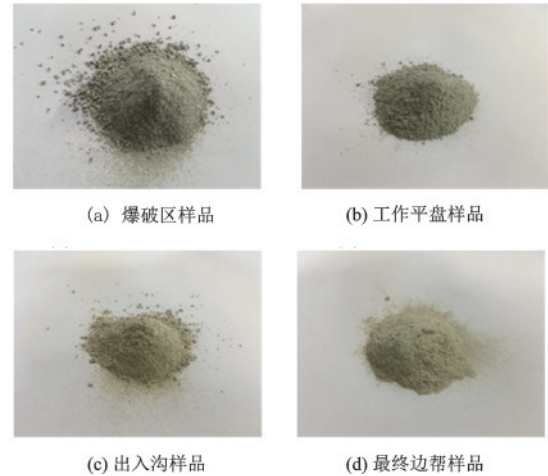


图2 爆破粉尘试样

Fig. 2 Blasting dust sample

从图3可以看出,4个采样点的粒度频率峰值所在粒径区间存在显著不同。爆破区采样点的粒度频率峰值对应粒径大于100 μm ,工作平盘、出入沟及最终边帮采样点的粒度频率峰值对应粒径小于100 μm 。

常用描述粉尘粒度分布规律的数学函数有4种:正态分布、对数正态分布、Rosin-Rammler分布与GGs分布。杨房沟水电站料场爆破粉尘粒级频率曲线呈现为右偏态分布,具有明显对数正态分布特征(图3),初定其粒度分布函数为对数正态分布。

以累积筛下百分数为横坐标,粉尘粒径为纵坐标,在对数正态坐标系中绘制散点图,结果如图4所示。

由图4知,粒度分布点位于对数正态坐标系拟合直线附近,线性相关系数 R^2 分别为:0.965、0.986、0.990和0.981。线性相关程度高,说明杨房沟爆破粉尘分布非常接近对数正态分布。

1.3 拟合值对比

Rosin-Rammler分布函数在描述粉尘粒径分布中被普遍采用^[10],特别是对于粉碎、爆破方法制备的粉体,显著性地符合Rosin-Rammler分布,故采用Rosin-Rammler分布与对数正态分布进行对比分析。

取图3中各采样点数据作关于Rosin-Rammler分布函数的线性拟合,将对数正态分布模型与Rosin-Rammler分布模型各自表示粉尘拟合程度的相关系数 R^2 对比,结果见表1。

从表1可知,对于杨房沟水电站石料场,对数正态分布函数的数据拟合效果显著优于Rosin-Rammler函数,因此可以采用对数正态分布函数描述杨

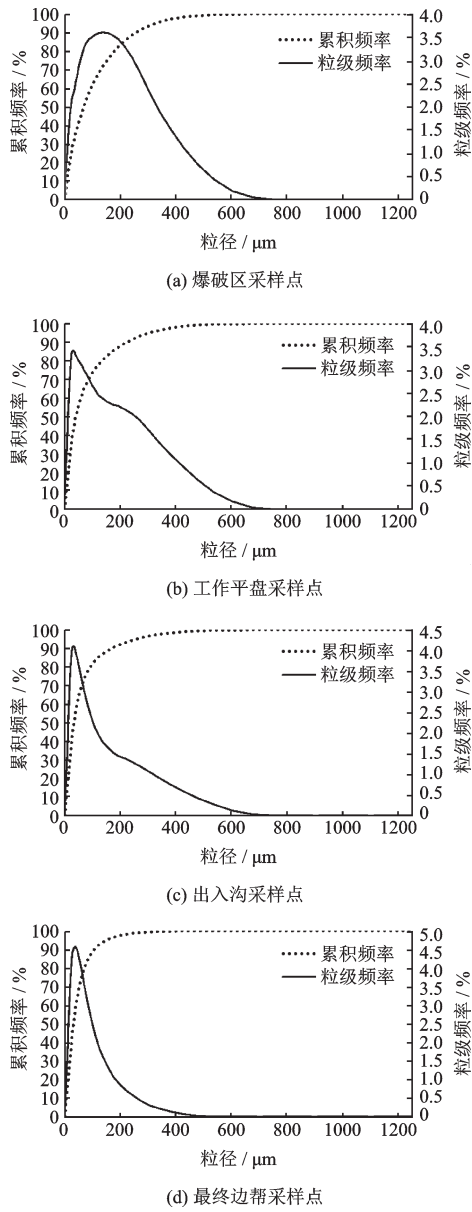


图3 不同采点粒度分布

Fig.3 Dust particle size distribution at different sampling points

房沟料场爆破粉尘粒度分布。为从数理逻辑上检验杨房沟料场爆破粉尘粒度分布属于对数正态分布,下面将采用 χ^2 拟合优度检验法进行假设检验。

1.4 粉尘粒度分布的对数正态性检验

χ^2 拟合优度检验法依据总体分布状况,计算出分类变量中各类别的期望频数,与分布的观察频数进行对比,判断期望频数与观察频数是否有显著差异,从而达到从分类变量进行分析的目的。利用 χ^2 拟合优度检验法对杨房沟水电站料场爆破粉尘样本数据进行检验,原假设为:

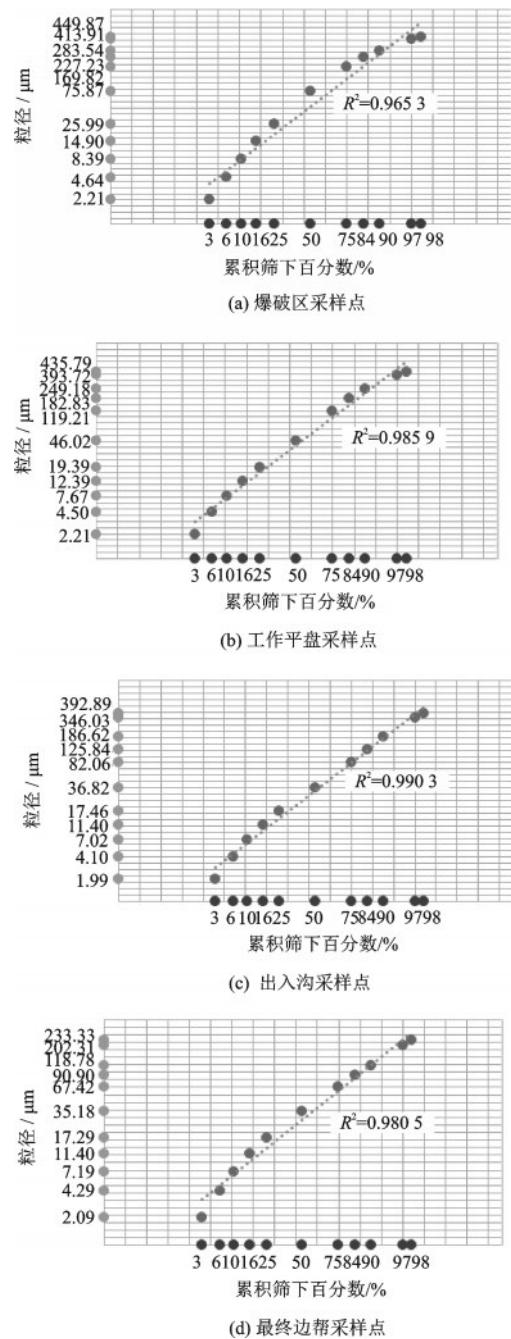


图4 不同采样点的对数正态分布

Fig.4 Lognormal distribution at different sampling points

表1 两种数学模型拟合值比较

Table 1 Comparison of fitting values by two mathematical models

采样点	Rosin-Rammler 分布	对数正态分布
爆破区	0.907	0.965
工作平盘	0.934	0.986
出入沟	0.935	0.990
最终边帮	0.896	0.981

H_0 : 总体分布频度服从对数正态分布。

将总体粒径 d 的取值范围分为 8 个区间, 分别计算他们的频数, 取样本数 $n=10\ 000$, 得到结果见表 2。

表 2 各粒径区间统计数据

Table 2 Statistical data in each interval

粒径区间/ μm	频数 f_i	理论频数 np_i
0~100	7 087	7 016
100~200	1 491	1 500
200~300	745	750
300~400	396	397
400~500	185	190
500~600	72	70
600~700	21	24
700~800	3	3

当显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件时:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} = 1.372, \chi_{0.95}^2(7) = 2.167$$

$\chi^2 < \chi_{0.95}^2(7)$, 故爆破粉尘在可接受区间内, 服从对数正态分布。

2 爆破粉尘粒度分布的对数正态函数厘定

粉尘分散度是指各粒级粉尘占粉尘总体的百分比, 可用分布函数表示。由上述假设检验可知, 杨房沟水电站石料场爆破粉尘服从对数正态分布。因此, 选取对数正态分布描述杨房沟水电站料场爆破粉尘的粒度分布特征, 确定适合描述杨房沟水电站石料场爆破粉尘的分布函数及其特征参数值。

对数正态分布频度模型及粒度模型如下:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(d/\bar{d})}{\sqrt{2} \ln \sigma} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

$$F(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \int_{\ln d_{\min}}^{\ln d} \exp \left\{ - \left[\frac{\ln(d/\bar{d})}{\sqrt{2} \ln \sigma} \right]^2 \right\} d(\ln d) \quad (2)$$

式中, σ 为几何标准偏差; \bar{d} 为粉尘粒径的算术平均直径, μm ; $F(d)$ 为粉尘粒径小于等于 d 的粉尘粒子所占的百分数, 简称筛下累积百分数; d 为粉尘粒径, μm 。

通过高斯拟合原理, 将对数正态分布频度模型

变形求得不同采样点分布函数的相关参数 σ, \bar{d} 的值。

$$\ln \alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma}, S = 2 \ln^2 \sigma, \text{将式(1)两边取对}$$

数, 化为:

$$\ln f(d_i) = \ln \alpha - \frac{(\ln d_i - \ln \bar{d})^2}{S} = \left(\ln \alpha - \frac{\ln^2 \bar{d}}{S} \right) + \frac{2 \ln d_i \ln \bar{d}}{S} - \frac{\ln^2 d_i}{S} \quad (3)$$

$$\ln f(d_i) = z_i, \ln \alpha - \frac{\ln^2 \bar{d}}{S} = b_0, \frac{2 \ln \bar{d}}{S} = b_1, -\frac{1}{S} = b_2 \quad (4)$$

考虑全体样本数据, 则式(3)以矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \ln d_1 & \ln^2 d_1 \\ 1 & \ln d_2 & \ln^2 d_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \ln d_n & \ln^2 d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

简记为:

$$Z = XB \quad (6)$$

根据最小二乘原理, 构成的矩阵 B 的广义最小二乘解为:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Z \quad (7)$$

再根据式(4)求出 $\alpha, \ln \bar{d}$ 及 S , 得到 σ, \bar{d} 的值, 从而厘定爆破粉尘粒度分布的对数正态函数。

3 结果分析

3.1 对数正态分布参数

利用图 2 中数据, 通过高斯拟合求得不同采样点分布函数的相关参数 σ, \bar{d} , 结果见表 3。

表 3 不同采点的对数正态分布相关参数

Table 3 Correlation parameters of lognormal distribution function at different sampling points

采点	σ	\bar{d}
爆破区	2.569	3.522
工作平盘	2.443	3.234
出入沟	2.068	2.735
最终边帮	1.211	1.679

由表 3 可知, 分布参数 σ 与 \bar{d} 都与采样点至爆破中心的距离呈负相关关系。随着距离的增加, σ 减小说明粉尘粒径范围变窄, 粒径分布越集中, \bar{d} 减小

说明细颗粒粉尘含量增加。这也说明离爆破区越远处对人体有危害的爆破粉尘细颗粒含量越高。

3.2 料场爆破粉尘分散度分析

通过对比两种函数模型可知,对于杨房沟金波石料场爆破粉尘,对数正态分布函数拟合效果优于Rosin-Rammler分布函数。将表3中相关参数代入式(2),得到相应累积分布函数,通过计算得到各采样点的粉尘粒度累积频率,结果见表4与图5。

表4 不同采样点粉尘粒度频率累积分布

Table 4 Accumulated frequency distribution of dust particles at different sampling points

采点	单位: μm				
	1	2.5	5	10	100
爆破区	2.41	4.35	6.81	10.65	47.13
工作平盘	2.68	4.84	7.59	11.89	52.64
出入沟	2.84	5.21	8.25	13.06	60.11
最终边帮	2.28	4.59	7.79	13.22	76.61

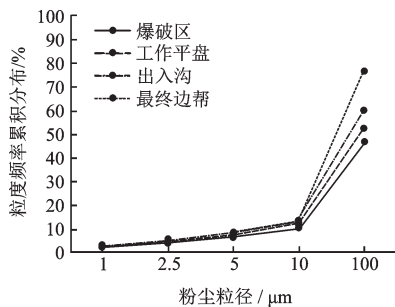


图5 不同采样点粉尘粒度频率累积分布

Fig.5 Accumulated frequency distribution of dust particles at different sampling points

3.3 问题分析及措施

料场爆破产生的空气冲击波会将细颗粒粉尘运移至距离爆破中心更远处。由表4可知,距离爆破中心越远的采样点,TSP含量越高,PM10及PM5的占比越大。料场为露天开采环境,若风速大则易引发二次扬尘。由于距爆破中心更远处对人体有害粉尘含量更高,且粉尘颗粒相比至爆破中心近点更细,这对于工作环境能见度也有一定的影响。所以料场边缘开采地区的工作环境会更加恶劣,作业人员应做好个人防护措施。

爆破扬尘主要来自三个方面:炮孔喷射出的粉尘、台阶面的积尘以及临空面的积尘。此外,杨房沟水电站石料场位于干热河谷地区,降水少蒸发量

表5 不同颗粒粒径间力的作用

Table 5 The role of force between different particles

尘粒粒径/ μm	静电力/ dyn	范德华力/ dyn	液桥力/ dyn	重力/ dyn
0.1	6×10^{-10}	4×10^{-7}	1.7×10^{-3}	5×10^{-30}
1	6×10^{-8}	4×10^{-6}	1.7×10^{-2}	5×10^{-10}
10	6×10^{-6}	4×10^{-5}	1.7×10^{-1}	5×10^{-7}
100	6×10^{-4}	4×10^{-4}	1.7×10^0	5×10^{-4}

大,气候干燥,爆破后极易形成积尘。基于此,针对石料场不同区域粉尘粒度分布特点,提出以下降尘措施及建议:①爆破区及工作平盘区域占比较大的粉尘多为PM2.5、PM5及PM10粉尘,且为工作人员作业区。粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的粉尘属于毒性难溶性粉尘,易黏附于人体呼吸道黏膜上,粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的粉尘则属于呼吸性粉尘。对于此类粉尘,采用爆破粉尘捕捉吸附技术^[11],利用含添加剂的水雾提高细微粉尘的捕获率。表5是在一定假设条件下,对尘粒间4种粒径尘粒静电力、范德华力、液桥力与其自身重力的量级分析结果;在湿润情况下,液桥力对粉尘的影响远大于其他3种力。料场基岩中 SiO_2 含量在56%左右,且石英粉尘为亲水性粉尘,与液体接触后易相互附着而沉降。采用爆破粉尘捕捉吸附技术可以有效降低PM2.5、PM5与PM10粉尘中 SiO_2 粉尘的含量,且爆破水雾抛洒速度快,抛撒半径大,控制范围广,雾滴与粉尘的接触面积增大,降尘效率高。②对经常有车辆及工作人员进出的出入沟区域,粉尘中占比较大的多为PM10及PM100粉尘,PM10为可吸入颗粒物,对人体呼吸系统危害极大,现场作业人员应佩戴与工作面粉尘颗粒特征相匹配的口罩,以减少工作时的有害粉尘吸入量。此区域台阶及路面位置极易积灰,应配备洒水车及清扫车,喷洒湿润硅尘能力高的抑尘剂,如:配方为质量分数0.1%SDS与质量分数0.05%NaAc的复合湿润剂^[12],配方为质量分数0.1%T-1与质量分数0.9% CaCl_2 的复合润湿抑尘剂等^[13],并及时地对作业现场进行清扫,防止因车辆出入料场而引起的二次扬尘。③对于距爆破中心较远的最终边帮区域,各类粉尘含量均为最高,其中空气环境中占比较大的为粒径小于 $100 \mu\text{m}$ 的悬浮尘粒,建议使用高压喷雾系统并选用合适的喷嘴型号及喷雾压力,形成粒径与工作面粉尘特征相匹配的喷雾^[14];应用喷射式泡沫发生器制备泡沫降尘^[15];在喷雾中加入表面活性剂^[16],以达到快速、高效抑尘的效果。

4 结 论

(1)杨房沟水电站石料场爆破粉尘分布符合对数正态分布特征。靠近爆破中心的采样点粉尘中位径D50更大,粒径细小的粉尘易随空气冲击波飘散至更远处。至爆破中心距离增大,粒度分布范围减小,对人体有害粉尘含量升高。

(2)对数正态分布特征参数 σ 与 \bar{d} 都与采样点至爆破中心距离呈负相关,参数 σ 为1.211~2.569,参数 \bar{d} 为1.679~3.522。可根据至爆破中心距离不同,利用 σ 、 \bar{d} 计算预测爆破粉尘分散度,分析有害粉尘含量并提出降尘措施。

(3)爆破粉尘的粒度分布规律受多方面因素影响,除分布函数特征参数影响以外,基岩岩性、粉尘外形以及粉尘含水率等因素也影响着颗粒的粒径分布,今后还需做进一步的探索。

参考文献:

- [1] 李小冬, 苏舒, 黄天健, 等. 施工粉尘健康损害量化评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(1): 50-55.
Li X D, Su Sh, Huang T J, et al. Health damage assessment model for construction dust [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(1): 50-55. (in Chinese)
- [2] 菅洁, 谢建林, 郭勇义, 等. 煤矿井下粉尘浓度与粉尘粒度测定分析[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(4): 592-597.
Jian J, Xie J L, Guo Y Y, et al. Analysis of coal mine dust concentration and particle size [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(4): 592-597. (in Chinese)
- [3] Perera I E, Sapko M J, Harris M L, et al. Design and development of a dust dispersion chamber to quantify the dispersibility of rock dust [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 39: 7-16.
- [4] Liu Z, Lin S, Zhang S, et al. Observations of microscopic characteristics of post-explosion coal dust samples [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 378-384.
- [5] Wang Y, Luo G, Geng F, et al. Numerical study on dust movement and dust distribution for hybrid ventilation system in a laneway of coal mine [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 146-157.
- [6] Geng F, Luo G, Wang Y, et al. Dust dispersion in a coal roadway driven by a hybrid ventilation system: a numerical study [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 113: 388-400.
- [7] 晋良海, 罗汉, 郑霞忠, 等. 露天梯段爆破粉尘体积分散度的分形表达[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8): 139-144.
Jin L H, Luo H, Zheng X Zh, et al. Fractal expression of dust volume dispersion in bench blasting in open air [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(8): 139-144. (in Chinese)
- [8] Murillo C, Dufaud O, Bardin-Monnier N, et al. Dust explosions: CFD modeling as a tool to characterize the relevant parameters of the dust dispersion [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 104: 103-116.
- [9] Ramakrishnan K N. Modified Rosin Rammler equation for describing particle size distribution of milled powders [J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19(21): 1903-1906.
- [10] 刘建, 姚海飞, 金龙哲, 等. 基于罗森-拉姆勒分布函数的粉尘分散度分析[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(9): 1101-1106.
Liu J, Yao H F, Jin L Zh, et al. Dust dispersion analysis based on the Rosin-Rammler distribution function [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(9): 1101-1106. (in Chinese)
- [11] 聂文, 刘阳昊, 马骁, 等. 风流扰动支架架间高压喷雾降尘雾滴粒度实验[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 670-676.
Nie W, Liu Y H, Ma X, et al. Experiment on the size of airflow disturbing dust removal droplet produced by high pressure spray between supports [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4): 670-676. (in Chinese)
- [12] Li J, Zhou F, Liu H. The selection and application of a compound wetting agent to the coal seam water infusion for dust control [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2016, 36(4): 192-206.
- [13] Zhou L, Yang S, Hu B, et al. Evaluating the performance of a composite wetting dust suppressant on lignite dust [J]. Powder Technology, 2018, 339: 882-893.
- [14] 王鹏飞, 刘荣华, 汤梦, 等. 煤矿井下高压喷雾雾化特性及其降尘效果实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 2124-2130.
Wang P F, Liu R H, Tang M, et al. Experimental study on atomization characteristics and suppression effi-

