

“矿山粉尘危害工程防护和高效个体呼吸防护关键技术与装备”专刊

煤矿综掘工作面长压短抽除尘性能与尘源移动路径关系

江丙友^{1,2,3}, 王一凡^{1,2,3}, 林汉毅^{1,2,3}, 王浩宇^{1,2,3}, 赵洋^{1,2,3}

(1. 安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 工业粉尘防控与职业安全健康教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:长压短抽通风除尘是净化煤矿综掘工作面掘进区域高质量浓度粉尘的有效方法之一,特别是压抽配合产生的局部流场有利于对呼吸性粉尘的除降,而产生源位置的动态变化对该方式除尘性能的影响不甚明晰。通过考虑产生源位置沿横、纵2种方向的运动路径及往复次数,基于长压短抽试验平台设计了4种尘源移动路径,结合对长压短抽通风系统参数的调控,测试分析尘源在不同运动工况下对空间粉尘质量浓度、粉尘粒径质量浓度和粒径分布的影响。结果表明:在相同的通风参数下,横向路径对司机和行人呼吸带位置造成的粉尘质量浓度均低于纵向;而在横向路径中,当压风筒位于靠近抽风筒一侧且压风口位于司机前方约1 m区域时,司机与行人呼吸带位置的PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀粉尘粒径质量浓度最低,通风除尘效果最好。空间粉尘扩散表现为:粒径小于2.5 μm的颗粒极易跟随抽风流场被抽尘口收集净化,而粒径大于10 μm的颗粒则会从产生源和抽尘区域逃逸到司机及其后方区域,并以自然沉降为主。基于前期试验所得最优尘源移动路径与通风参数,在陕北某煤矿2304综掘工作面开展现场试验。结果表明:横向路径下司机位置和行人呼吸带位置的总粉尘质量浓度分别降低至85.6 mg/m³和21.9 mg/m³,降尘率最高达到76.9%;呼吸性粉尘质量浓度分别降低至15.3 mg/m³和10.5 mg/m³,降尘率最高达到85.2%,除尘性能明显提升。

关键词:长压短抽;综掘工作面;尘源位置;粉尘质量浓度;粒径分布

中图分类号:TD714 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)07-2973-13

Relationship between long pressure short extraction dust removal performance and dust source movement path in comprehensive heading face of coal mines

JIANG Bingyou^{1,2,3}, WANG Yifan^{1,2,3}, LIN Hanyi^{1,2,3}, WANG Haoyu^{1,2,3}, ZHAO Yang^{1,2,3}

(1. Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Industrial Dust Prevention and Control & Occupational Safety and Health, Ministry of Education, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Long pressure short extraction ventilation and dust removal method is one of the effective methods for removing high mass concentration dust in the excavation area of coal mine comprehensive heading face. Especially, the local flow field generated by the combination of pressure and suction is conducive to the removal and reduction of respiratory

收稿日期:2023-10-17 修回日期:2024-03-04 责任编辑:王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.BY23.1309

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC2503201, 2022YFC2503202);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金资助项目(EC2021001)

作者简介:江丙友(1987—),男,安徽利辛人,教授,博士。E-mail: cumtjiangby@163.com

通讯作者:王一凡(1996—),男,安徽合肥人,博士研究生。E-mail: yifanwang0202@163.com

引用格式:江丙友,王一凡,林汉毅,等.煤矿综掘工作面长压短抽除尘性能与尘源移动路径关系[J].煤炭学报,2024,49(7): 2973-2985.

JIANG Bingyou, WANG Yifan, LIN Hanyi, et al. Relationship between long pressure short extraction dust removal performance and dust source movement path in comprehensive heading face of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 2973-2985.



移动阅读

dust. However, the dynamic changes in the location of dust production sources have an unclear impact on the dust removal performance of this method. By considering the movement paths and reciprocating times of the dust source location in both horizontal and vertical directions, four dust source movement paths were designed based on the long pressure short extraction test platform. Combined with the regulation of the parameters of the long pressure short extraction ventilation system, the impact of the dust source on the spatial dust mass concentration, particle size mass concentration, and particle size distribution under different movement conditions was tested and analyzed. The results show that under the same ventilation parameters, the dust mass concentration caused by the horizontal path on the respiratory belt positions of drivers and pedestrians is lower than that caused by the vertical path. In the horizontal path, when the pressure air duct is located on the side near the exhaust duct and the pressure air outlet is located in an area about 1 m in front of the driver, the particle size mass concentrations of PM_{1} , $PM_{2.5}$ and PM_{10} at the breathing zone between the driver and pedestrian are the lowest, and the ventilation and dust removal effect is the best. The diffusion of spatial dust is manifested as: particles with a particle size less than 2.5 μm are easily collected and removed by the exhaust flow field at the exhaust port, while the particles with a particle size greater than 10 μm will escape from the dust generation source and exhaust area to the driver and the area behind them, and mainly settle naturally. Based on the optimal dust source movement path and ventilation parameters obtained from preliminary experiments, on-site experiments were conducted on the 2304 fully mechanized heading face of a coal mine in northern Shaanxi. The results show that the total dust mass concentration at the driver's position and pedestrian breathing zone position under the lateral path decreased to 85.6 mg/m^3 and 21.9 mg/m^3 , respectively, with the highest dust reduction rate reaching 76.9%. The mass concentration of respirable dust decreased to 15.3 mg/m^3 and 10.5 mg/m^3 respectively, with a maximum dust reduction rate of 85.2% and the dust removal performance was significantly improved.

Key words: long pressure short extraction; fully mechanized driving face; dust source location; dust mass concentration; particle size distribution

中国煤炭产量和消费位居世界第一,煤炭能源在中国经济发展中起到了关键性作用^[1-2]。随着机械化和智能化技术的发展,煤炭的勘探效率大幅提高^[3-4]。然而,在煤矿开采过程中产生的高质量浓度粉尘颗粒对煤矿生产安全和煤矿员工的职业健康构成了严重威胁^[5-6]。一方面,随着煤尘质量浓度的增加,粉尘爆炸压力和爆炸指数也会直线上升。据现有统计,中国532个主要煤矿中有87.32%存在煤尘爆炸风险^[7]。另一方面,高质量浓度粉尘是煤矿工人肺部、心血管和脑疾病的直接诱因^[8-11]。尽管自2011年以来,煤矿爆炸事故造成的死亡人数有所减少,但新报告的煤工尘肺病病例的数量仍在继续增加。2020年通报职业尘肺病例90.3万例,截至2021年底,全国统计职业性尘肺病例达91.5万例,新增职业性尘肺病病例约11 809人,且50%以上与煤矿行业有关,中国煤炭工人尘肺新增病例、累计病例和职业病死亡病例数均位居世界前列^[12-15]。因此,煤矿井下工人作业区域的粉尘防控科学治理成为了煤炭高效开采的关键性问题。

通风降尘是目前煤矿井下主要的粉尘治理方式之一,能有效避免粉尘聚集^[16-20]。随着煤矿井下综掘工作面尺寸和深度的不断加大,以长压短抽为代表的混合通风方式成为了有效的控尘除尘手段,与单一的

压入(抽出)式通风相比,压抽结合的方式能在保证空间供风要求的同时,将粉尘颗粒吸入除尘装置以净化^[21-25]。因此,如何进一步提高长压短抽的除尘效率成为了学者们的研究重点。陈芳等^[26]通过数值模拟的方式总结了长压通风与短抽除尘参数之间的匹配关系,大幅降低了工作面粉尘质量浓度。LIU等^[27]利用模拟软件分析了长压短抽系统中的压力通风出口与隧道面不同距离时的气流和粉尘场迁移行为,阐明了长压通风系统风幕形成原理和粉尘控制规律。ZHOU等^[28]通过CFD数值模拟,探究了不同粉尘质量浓度下的短抽管道与风头距离的最佳参数。NIE等^[29]基于流体动力学计算技术,研究了分区域切煤过程中在不同抽风量条件下的气流—粉尘混合物的分布特性。龚晓燕等^[30-31]在模拟结果的基础上利用响应面法确定合理的压风口和抽风口风流综合调控方案,改变巷道风流分布,有效降低粉尘质量浓度。现阶段,针对长压短抽通风除尘的研究主要基于固定产生源位置的数值模拟,探究长压通风和短抽除尘之间的流场变化特性和通风参数调控规律。

然而,产生源位置的动态变化对空间流场及长压短抽通风除尘性能的影响不明,且不宜用上述模拟方法分析。鉴于此,笔者通过自主搭建的长压短抽通风

除尘相似模拟实验平台,设计4种尘源移动路径,测试不同通风参数下抽尘前、后区域的粉尘分布情况,对比不同尘源移动路径下的通风除尘性能,分析不同粒径尺寸粉尘颗粒受通风除尘的影响规律,总结尘源移动路径下工人作业区域的粉尘扩散规律,为煤矿井下掘进工作面通风除尘技术改进提供依据。

1 实验平台和方法

1.1 实验平台

实验平台是以陕北某煤矿综掘工作面为原型,依据相似理论按1:2比例缩小所搭建,如图1所示。巷道平台的主体尺寸为:长9 m、宽2 m、高2 m。气溶胶发生器位于平台前端,头部安装有锥形均尘装置,用于保证粉尘发生速率和发尘量的稳定。压风口和抽风口的通风风量由2台变频风机分别调控,可确保风量在300 m³/min以内稳定调节。压风管主体采用柔性风筒,通过滑移模块可实现压风筒空间位置的调节,平台内部具体结构参数见表1。实验平台左侧设有智能控制平台,用于实验员对巷道内部参数变量进行实时调控。平台与抽风管末端安装湿式粉尘净化装置,保证长压短抽实验的安全性和环保性。

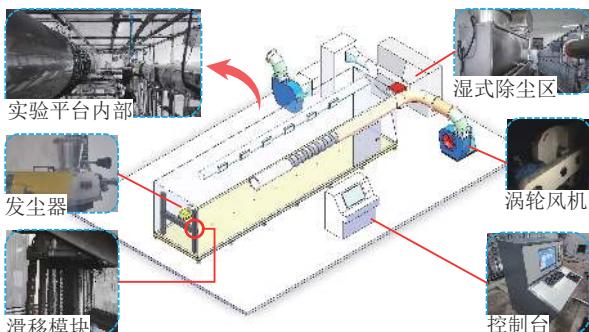


图1 长压短抽实验平台

Fig.1 Experimental platform for long pressure and short extraction

表1 实验平台参数

Table 1 Parameters of the experimental platform

参数	数值
压风口直径/m	0.4
压风筒至产生面距离/m	1.6(可调)
压风筒高度/m	1.55
压风筒至压风侧壁距离/m	0.55(可调)
抽风口直径/m	0.3
抽风筒至产生面距离/m	0.8(固定)
抽风筒高度/m	1.37
抽风筒至抽风侧壁距离/m	0.22(固定)

1.2 尘源移动路径

根据煤矿井下综掘工作面作业的实际产生情况^[32-33],选用“S”型路径作为尘源移动路径,并设计4种移动方案,如图2所示。图2(a)和(b)分别为垂直方向上自下而上的“纵(向)五刀”和“纵(向)三刀”的移动路径;图2(c)和(d)分别为水平方向上由左往右的“横(向)五刀”和“横(向)三刀”的移动路径。现场作业中,截割产生的粉尘受风流作用会在极短的时间内与风流保持同一速度,因此粉尘产生后的变速过程对粉尘的扩散情况影响在实验设计过程中可忽略不计^[34]。实验过程中,模拟尘源沿设计路径做匀速运动,以设定好的流量向空间持续喷撒煤粉,移动到路径终点后即刻停止。这里需要指出的是:所有方案中的模拟尘源移动速度和喷撒流量均保持一致。

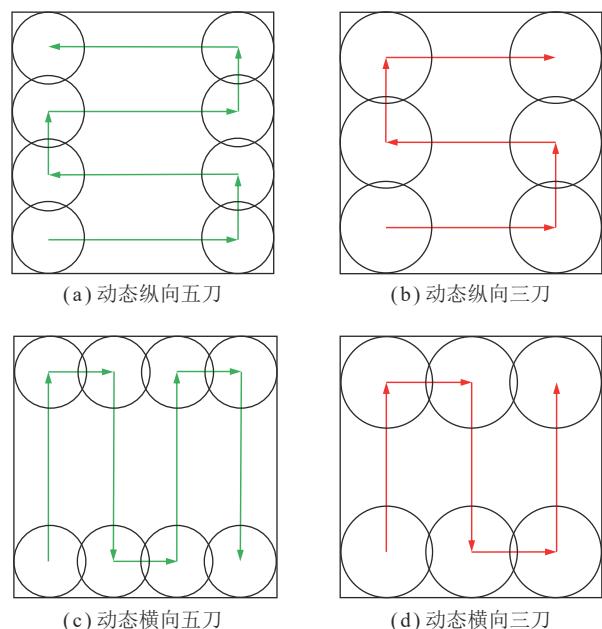


图2 尘源移动路径

Fig.2 Dynamic dust generation path

1.3 通风参数和检测区域

通过长压短抽实验平台测试了4种尘源移动路径的通风除尘效果,其中粉尘采样区域和压风筒位置设置如图3所示。根据综掘工作面的现场通风状况结合相似原理,实验中压风筒风量设置为250 m³/min,抽风筒设置为200 m³/min,风量压抽比为1.25。为保证实验的完整性和可靠性,以产尘源、抽尘口、司机、司机后方以及行人呼吸带5个位置为基准,在平台中轴线呼吸带高度对应位置设立5个采样区域,记为采样区域1、2、3、4、5。其中,采样区域2位于抽风筒A旁,并与A口所在平面重合;采样区域3位于压风筒B旁,与B口所在平面重合;在5个采样区域所在平面的“压风(B)”、“中间”和“抽风(A)”位置分别放

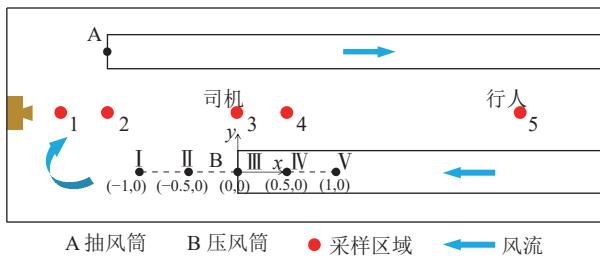


图3 粉尘采样区域和压风筒位置设置

Fig.3 Layout of dust sampling areas and pressure air duct location

置粉尘采样器进行采样,3组数据取平均值记为实验结果。以压风筒B的轴心为原点,沿y轴方向间隔0.5 m平行移动压风筒,将其所在位置分别划分为:内侧和外侧2个区域。沿x轴正负方向间隔0.5 m移动压风筒,将其风筒口B所处位置划分为I、II、III、IV、

V五个位置。其中,III坐落在原点,即与司机位置共平面,I坐落在(-1,0)位置,V坐落于(1,0)位置。基于设置的采样区域和压风筒位置来研究尘源移动路径下粉尘扩散规律以及确定最佳的长压短抽通风系统参数。

2 移动尘源的粉尘污染效应分析

2.1 移动尘源对粉尘质量浓度分布的影响

针对司机和行人呼吸带这2个关键位置^[35],开展了4种不同尘源移动路径下粉尘污染效应的物理实验,得到2种检测位置在不同通风系统参数条件下的粉尘质量浓度分布情况,如图4所示。

(1) 从图4中可以看出,横向路径在司机和行人呼吸带位置的粉尘污染程度远低于纵向路径,粉尘质量

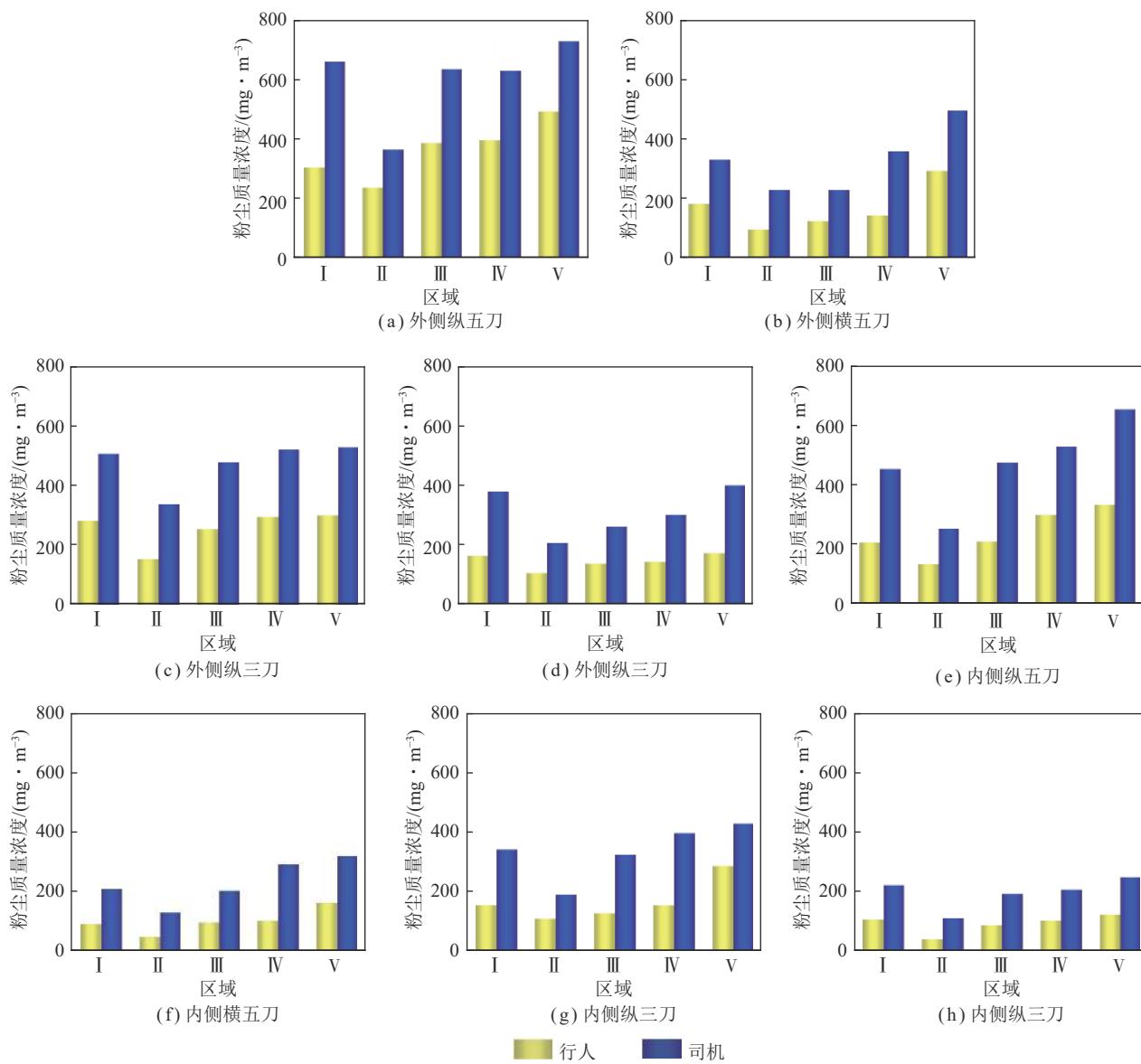


图4 不同动态路径下的粉尘质量浓度分布

Fig.4 Dust mass concentration distribution of different dynamic paths

浓度全都降低了30.0%以上,最高达到50.2%。压风筒沿y轴方向平移时,粉尘质量浓度会产生显著变化。以横向五刀为例,压风筒平移至内侧区域时,横向路径下司机和行人呼吸带位置的粉尘质量浓度较之压风筒位于外侧区域时均下降了18.0%以上,最高达到35.6%。

(2)为进一步分析尘源路径对通风除尘效果的影响,笔者采用熵权法计算各指标的信息熵和指标权重,即通风除尘效果,来对粉尘的污染效应进行定量分析^[36]。熵权法的计算步骤如下所示^[37]。首先,根据所选指标 X_{ij} 计算出所有变量的熵 E_j :

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (2)$$

其中, X_{ij} 为指标 j 关于第 i 个变量的标准值; P_{ij} 为第 i 个变量在指标 j 作用下的贡献,当 $P_{ij}=0$, $P_{ij} \ln P_{ij}=0$ 。为了确保 $0 \leq E_j \leq 1$,设置常数 $k=1/\ln m$,并将 m 设置为变量的总数。

然后,根据式(1)计算第 j 指标信息熵的一致性程度 d_j ,最后计算出估算指标的相对重要权重 W_j :

$$d_j = 1 - E_j \quad (3)$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (4)$$

式中, n 为指标总数。

以尘源移动路径为外侧纵五刀时司机位置的粉尘污染情况为例,首先将I~V五个区域的粉尘质量浓度求和,此时 $m=5$;然后根据式(2)计算每一个区域的贡献值 P_{ij} :

$$P_{11} = \frac{X_{11}}{\sum_{i=1}^5 X_{ii}} = 0.219; P_{21} = \frac{X_{21}}{\sum_{i=1}^5 X_{ii}} = 0.121;$$

$$P_{31} = \frac{X_{31}}{\sum_{i=1}^5 X_{ii}} = 0.210; P_{41} = \frac{X_{41}}{\sum_{i=1}^5 X_{ii}} = 0.209;$$

$$P_{51} = \frac{X_{51}}{\sum_{i=1}^5 X_{ii}} = 0.241$$

将得到的5个贡献值代入式(1),然后将 $m=5$ 替换为常数 k ,得到所有尘源路径相对于面积指标的熵 E_1 :

$$E_1 = \frac{1}{-\ln 5} \sum_{i=1}^5 P_{i1} \ln P_{i1} = 0.985$$

将得到的尘源路径的熵值 E_1 代入式(3)得到各信息熵的一致性程度 $d_1=1-E_1=0.015$ 。然后对其他4个贡献指标进行汇总,代入式(4)计算出最终的权重 W_j ,即通风除尘效果。

$$W_1 = \frac{d_1}{\sum_{j=1}^4 d_j} = 0.108$$

在这一步中,还计算了其他3个区域指标的相对重要性。用熵权法得到的不同区域的权值见表2。从表中发现,对于五刀的尘源路径在司机位置处,横向移动的通风除尘权重分别为0.297、0.304,均大于纵向移动路径(0.108、0.289),同时,压风筒位于内侧情况下的除尘权重也都略高于外侧情况,最高达到了28.9%和30.4%;行人呼吸带位置横向移动的通风除尘权重分别为0.277、0.321,同样高于纵向移动路径(0.171、0.223),同时,压风筒位于内侧情况下的除尘权重也都略高于外侧情况,最高达到了23.1%和32.1%;三刀的尘源路径对通风除尘效果的权重规律与五刀保持一致。造成这种现象的原因可能是:一方面,自左而右的横向路径相较于自下而上的纵向路径会有更多的粉尘颗粒获得垂直方向上的初速度,从而影响粉尘颗粒沿水平方向的扩散速度,致使粉尘颗粒在产尘源和抽尘区域停留的时间更久,更容易被抽风筒排

表2 不同尘源路径的通风降尘权重

Table 2 Weighting of ventilation and dust reduction for different dust source paths

尘源路径	压风筒位置	司机位置(五刀)			行人呼吸带位置(五刀)			司机位置(三刀)			行人呼吸带位置(三刀)		
		E_j	d_j	W_j	E_j	d_j	W_j	E_j	d_j	W_j	E_j	d_j	W_j
纵向	外侧	0.985	0.015	0.108	0.968	0.032	0.171	0.978	0.021	0.182	0.977	0.022	0.152
	内侧	0.960	0.040	0.289	0.956	0.043	0.231	0.969	0.031	0.259	0.971	0.029	0.199
横向	外侧	0.958	0.042	0.297	0.959	0.041	0.277	0.967	0.033	0.276	0.949	0.051	0.302
	内侧	0.959	0.041	0.304	0.947	0.053	0.321	0.966	0.034	0.283	0.955	0.045	0.345

出净化;另一方面,当压风筒靠近内侧区域改变了工作面附近的风流分布,通风过程中难以形成较大的涡流回旋从而减少粉尘的汇聚^[30]。

(3)结合图4和表2,能够发现对于司机和行人呼吸带位置,压风筒沿x轴方向平移时,2个位置的粉尘质量浓度在I~V五个压风位置呈先下降后上升的趋势,压/抽风筒形成的风流场会随着压风筒的移动而发生改变从而影响除尘效率。横向五刀路径下,压风筒位于y轴方向内侧区域和x轴方向II位置,熵权值最大,分别到达0.304和0.321,说明除尘效果最好。根据相似实验原理:当压风筒位于靠近抽风筒一侧(内侧区域)且压风口位于司机前方约1 m区域时,粉尘质量浓度达到最低,分别为132.76、51.47 mg/m³;横向三刀路径下粉尘的质量浓度变化趋势与五刀一致,熵权值最大(0.283、0.345),粉尘质量浓度最低,达到113.22、43.99 mg/m³。

2.2 移动尘源对粉尘颗粒占比的影响

研究粉尘扩散造成的污染效除了要关注司机和行人呼吸带位置的总粉尘质量浓度,呼吸性粉尘的质量浓度也是一项重要评估标准^[38]。使用激光粒度

仪扫描了称重滤膜上的粉尘颗粒,选取2.1节司机和行人呼吸带位置粉尘质量浓度最低点的通风参数:压风筒位于y轴方向内侧区域和x轴方向II位置进行实验,得出尘源移动路径下可吸入颗粒物PM₁₀、可入上呼吸道颗粒物PM_{2.5}、可入肺颗粒物PM₁的粉尘粒径占比情况,如图5所示。对比图5(a)和(b)可以发现:在司机位置,纵向路径相较于横向路径中的PM₁₀有所降低,五刀路径下的PM₁₀从37.31%降低到35.68%,但PM₁占比则呈上升状态,PM₁从0.43%增加到0.49%;对于PM₁₀和PM₁的占比情况,三刀与五刀呈现出的规律一致。PM_{2.5}的占比则表现为纵五刀(3.56%)大于横五刀(3.17%),纵三刀(3.2%)略低于横三刀(3.44%)。

行人呼吸带位置处,观察图5(c)和(d)中的颗粒占比情况可以看出:纵向路径相较于横向路径中PM₁₀占比有所增加,五刀路径下PM₁₀占比分别从40.02%增加到41.31%和从0.45%增加到0.49%;这一点与三刀的规律一致。然而,PM_{2.5}的分布则表现为纵五刀(4.01%)低于横五刀(4.82%),纵三刀(4.66%)高于横三刀(4.14%)。纵向路径相较于横向路径中PM₁占

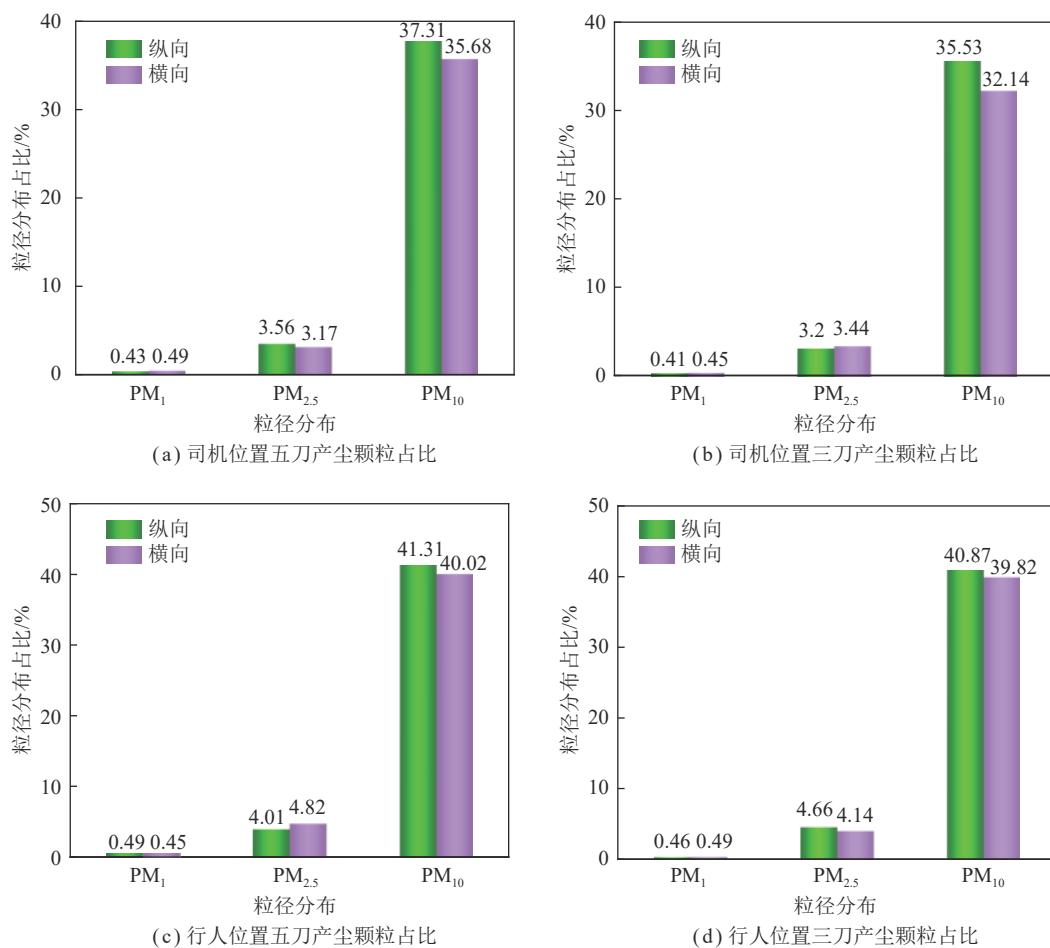


图5 不同动态路径的粒径占比

Fig.5 Particle size proportion of different dynamic paths

比则表现为:五刀路径下占比增加0.71%,三刀路径下占比下降0.52%。综上,呼吸性粉尘PM₁₀占比分布表现为横向路径在司机和行人呼吸带处,均低于纵向路径;PM_{2.5}以及PM₁的占比分布则存在变化,无法形成有效的尘源路径对颗粒粒径占比分布影响规律。造成这种现象的原因是:在压/抽风区域除了存在压抽风筒形成的风流场还会产生一些小型的涡旋从而干扰粉尘的除降,粉尘颗粒的粒径越小,受涡流场的影响越大,因此粒径较小的粉尘颗粒如PM_{2.5}、PM₁的分布则无法得到统一的分布规律;而PM₁₀和PM_{2.5}之间粒径较大的颗粒相较于涡流的影响则更易受自身重

力的作用呈现出固定的规律^[18]。

2.3 移动尘源对粒径分布的影响

通过2.2节实验结果可知:粉尘颗粒粒径占比难以总结尘源移动路径和粉尘污染程度之间的规律,还需要结合实际的产尘量来评估致病性粉尘的污染程度。通过结合二者之间的联系,将粉尘质量浓度和颗粒粒径占比的乘积定义为粉尘粒径质量浓度,定量计算不同粒径范围粉尘颗粒的质量浓度。以此得到尘源移动路径下PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁的粉尘粒径质量浓度,并将司机和行人呼吸带位置独立出来进行分析,如图6所示。

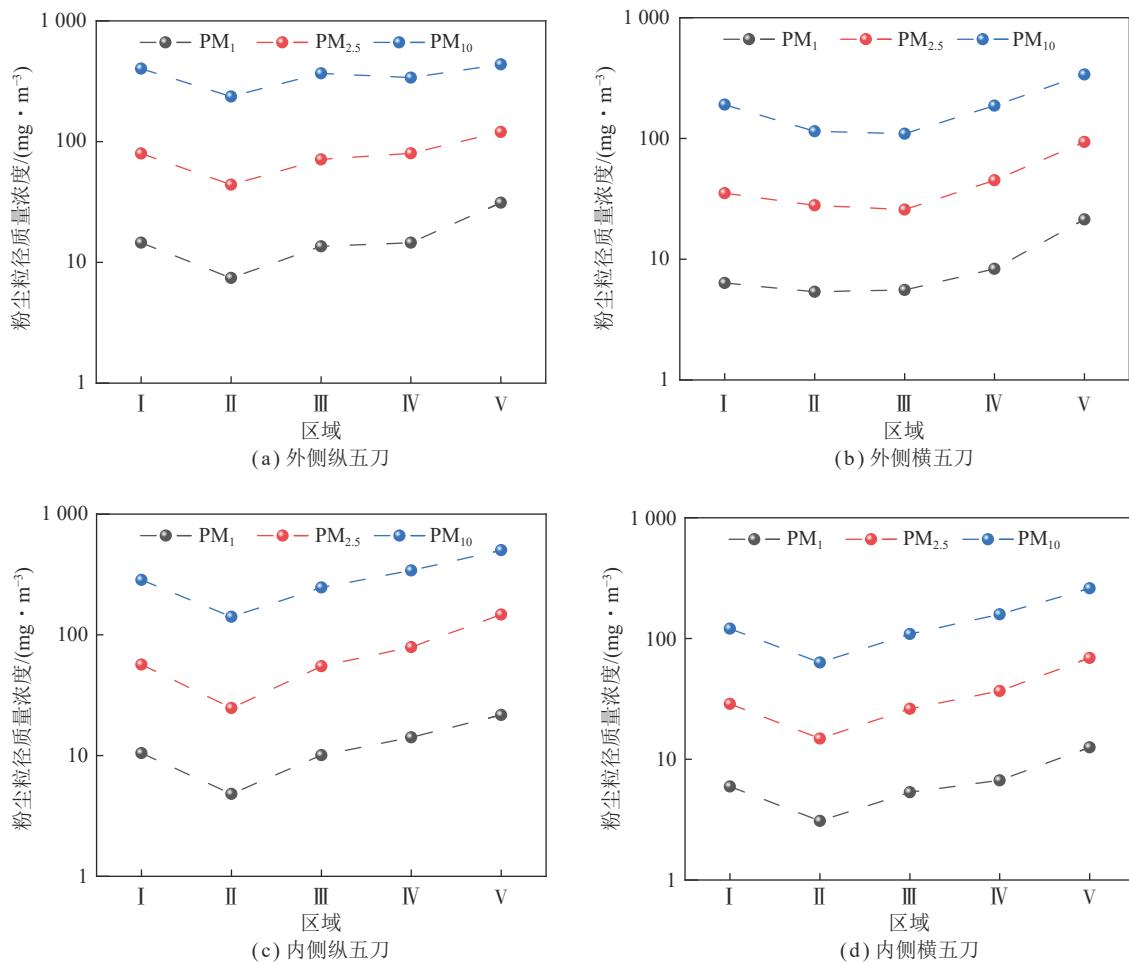


图6 司机位置五刀路径下粉尘粒径质量浓度

Fig.6 Mass concentration of dust particles under the five knife path at the driver's position

从图6中可以看出,对于司机位置,压风筒从外侧移动到内侧时,横向五刀路径中PM_{2.5}和PM₁₀的粉尘粒径质量浓度相较于纵向路径均下降约20%,PM₁的粒径质量浓度变化不明显,但也存在一定程度的下降。同时,粉尘PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀的粉尘粒径质量浓度呈先下降后上升的趋势;这种现象说明压风筒位置的改变优化了尘源面附近的风流场,使得粉尘颗粒更容易进入抽风筒净化排出,从而表现为PM₁、PM_{2.5}

和PM₁₀的粒径质量浓度呈现出最低值。当压风筒位于y轴方向内侧区域和x轴方向II位置时,即当压风筒位于靠近抽风筒一侧且压风口位于司机前方约1 m区域时,横向路径下PM₁、PM_{2.5}和PM₁₀的粒径质量浓度达到最低,分别为3.07、14.84和63.28 mg/m³,相较于其他4个位置,粉尘粒径质量浓度降低了10%以上。

图7为三刀路径下司机位置的粉尘粒径质量浓

度,可以看出:一方面,横向路径下 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粒径质量浓度均低于纵向路径趋势,表现为先下降后上升,与五刀的动态产生趋势一致;另一方面,当压风筒位于靠近抽风筒一侧且压风口位于司机前

方约 1 m 区域时,粉尘 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粒径质量浓度达到最低,分别为 3.40、13.09 和 55.10 $mg \cdot m^{-3}$,相较于其他 4 个位置,粉尘粒径质量浓度降低了 8% 以上,最佳通风位置与五刀相同。

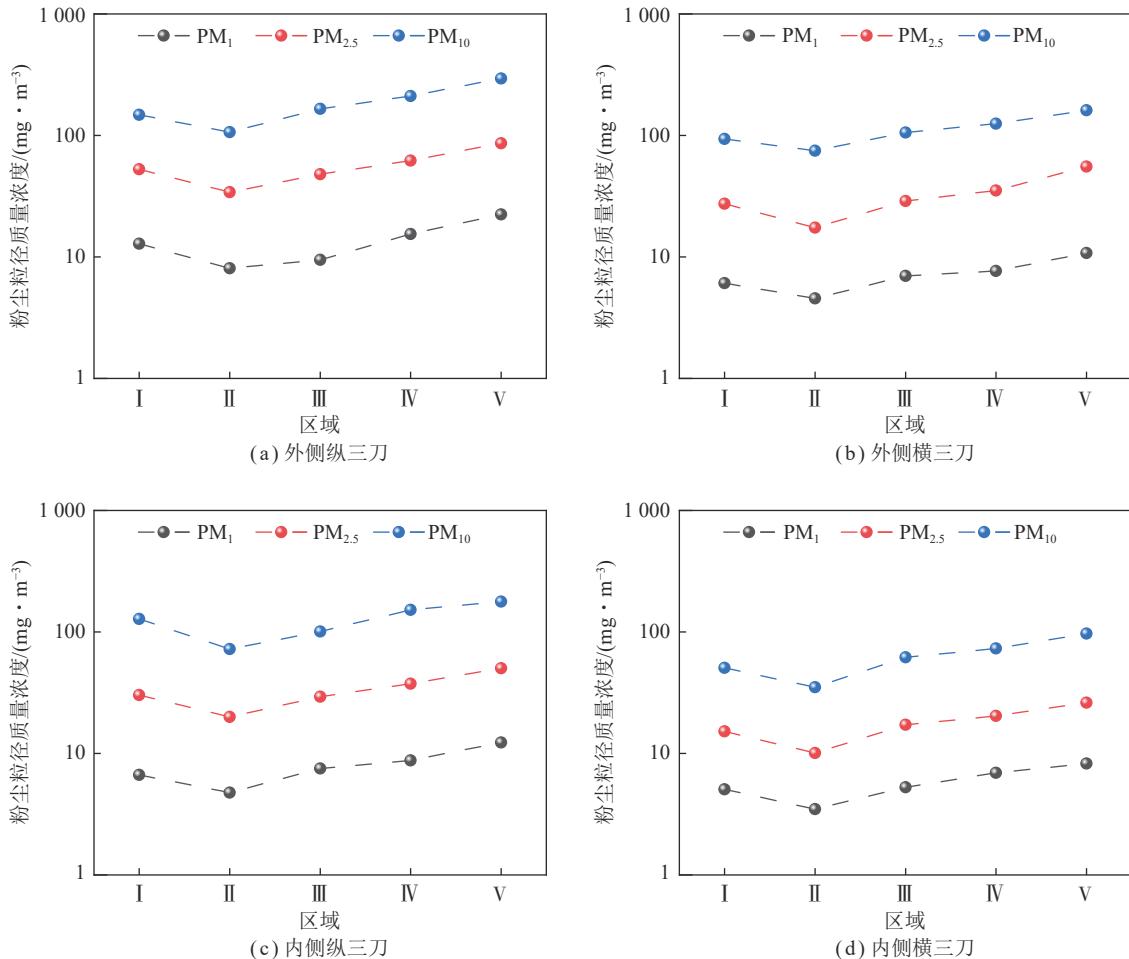


图 7 司机位置三刀路径下粉尘粒径质量浓度

Fig.7 Mass concentration of dust particles under the three knife path at the driver's position

通过同样的计算方法得到尘源路径—五刀在行人呼吸带位置的粉尘粒径质量浓度变化情况,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,压风筒向内侧平移时,横向路径中 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粒径质量浓度相较于纵向路径显著下降。纵向路径 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粉尘粒径质量浓度均低于横向路径,呈现先下降后上升的趋势,与司机位置的粒径质量浓度变化情况相似,在压风筒位于内侧区域和 II 位置时,粉尘 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粉尘粒径质量浓度达到最低,分别为 1.34、6.23 和 26.26 $mg \cdot m^{-3}$,相较于其他 4 个位置,粉尘粒径质量浓度降低了 15% 以上。对比图 6(d)和图 8(d)中压风筒最佳位置的除尘效果可以发现:行人呼吸带位置的粉尘粒径质量浓度变化相比于司机位置受压风筒位置移动的影响效果更大。造成这种情况的主要

原因是粉尘从尘源扩散到司机和行人呼吸带位置的距离会影响压抽风形式下的除尘效率^[39-40]。随着压风筒的移动,行人位置的粉尘扩散距离会产生变化,其风流中包含的粉尘颗粒受重力作用发生的沉降情况也会随着改变,从而影响降尘效率;然而司机位置离抽风口较近,主要受抽风口位置的风流场影响,粉尘扩散距离的变化量较小,粉尘颗粒的沉降几乎可以忽略不计;因此司机位置的粉尘粒径质量浓度受压风筒位置移动的影响效果没有行人呼吸带位置明显。

对于三刀的尘源移动路径,从图 9 可知,横向路径下 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 三者的粉尘粒径质量浓度均低于纵向路径且变化趋势与司机位置保持一致。当压风筒位于内侧区域和 II 位置时,其 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的粒径质量浓度达到最低点,分别为 1.28、5.88 和 23.82 $mg \cdot m^{-3}$,略低于横向五刀时的行人呼吸带位置的

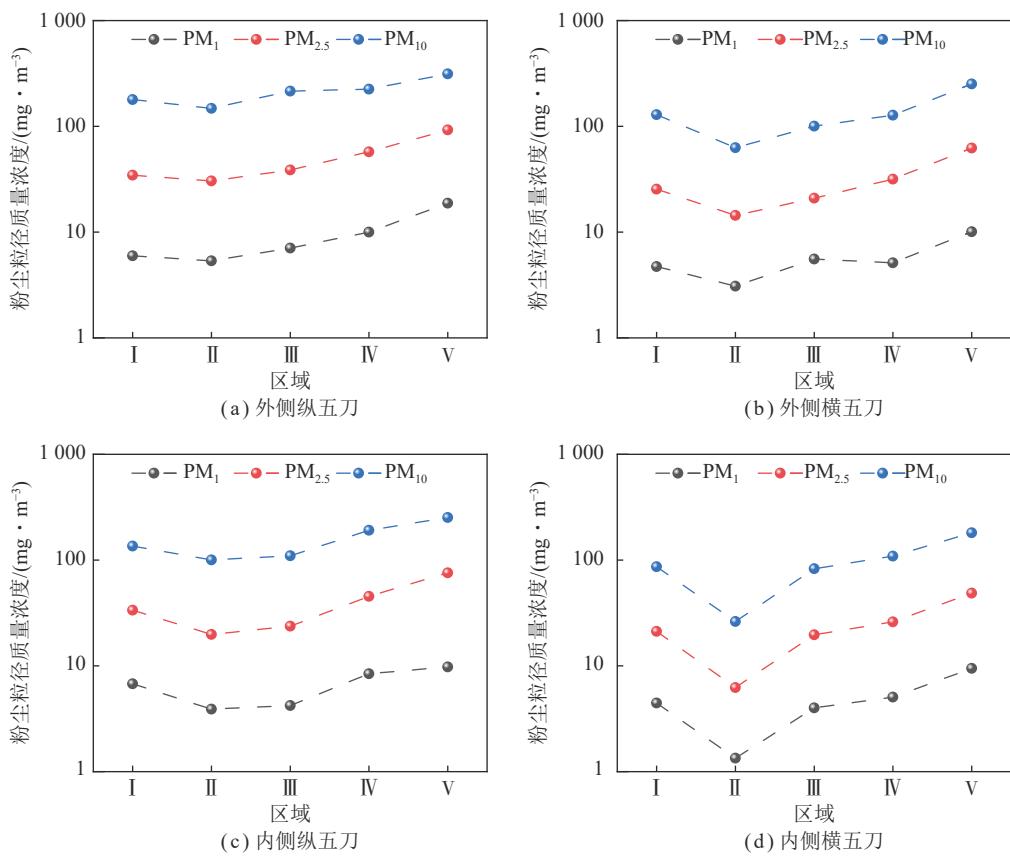


图8 行人呼吸带五刀路径下粉尘粒径质量浓度

Fig.8 Mass concentration of dust particles under the five knife path of pedestrian breathing belt

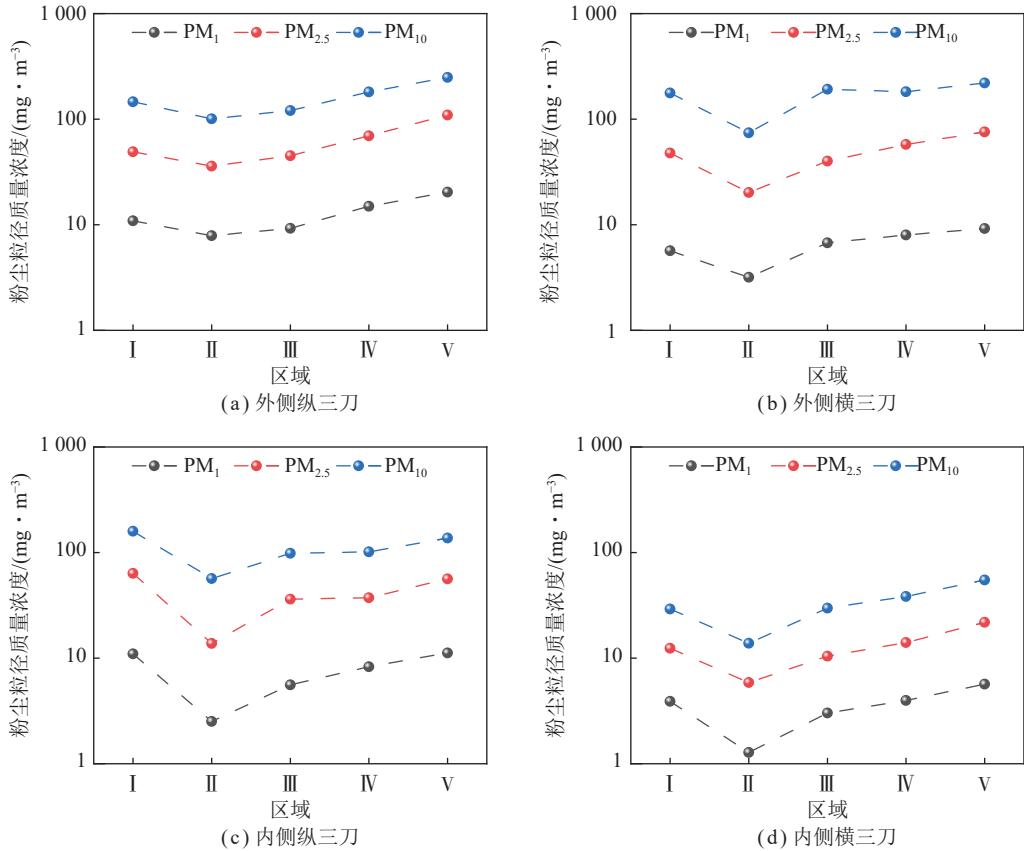


图9 行人呼吸带三刀路径下粉尘粒径质量浓度

Fig.9 Mass concentration of dust particles under the three knife path of pedestrian breathing belt

粉尘粒径质量浓度,相较于其他4个位置,粉尘粒径质量浓度降低了12%以上,其粉尘分布规律和压风筒位置移动对除尘效果的影响规律与五刀的情况基本一致。

结合上述实验结果可知一方面,横向路径相较于纵向路径在司机和行人呼吸带位置的粉尘质量浓度和粉尘PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的粉尘粒径质量浓度均有明显下降,说明自左而右的尘源移动路径减少了司机和行人呼吸带位置的粉尘污染。另一方面,压风筒放置的区域位置也会影响粉尘的污染情况。在4种尘源移动路径下,压风筒位于y方向内侧区域和x方向II位置,即压风筒位于靠近抽风筒一侧且压风口位于司机前方约1m区域时,司机和行人呼吸带位置的粉尘质量浓度和粉尘粒径质量浓度都到达最低,说明该压风筒位置是所有尘源移动路径下的最佳通风系统参数。

3 尘源移动下粉尘扩散规律

3.1 粉尘分布规律

为探究尘源移动路径下粉尘在巷道内的分布规律,在2.1节已经检测完成的司机(采样区域3)和行人呼吸带(采样区域5)位置的基础上额外添加“产生源”、“抽尘口”和“司机后方”3个检测位置,分别对应于采样区域1、2和4;基于2.3节确定的最佳通风参数条件下展开实验,得到尘源移动路径下粉尘分布情况,如图10所示。从图10中可以看出:

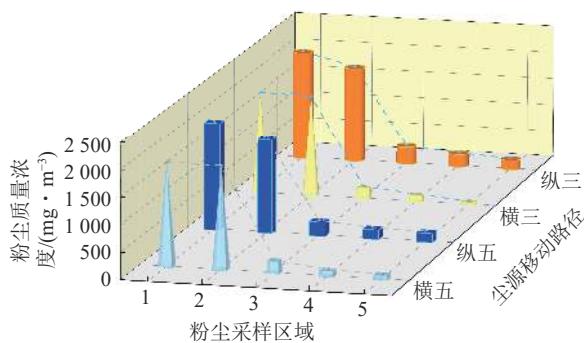


图10 尘源移动路径下粉尘分布情况

Fig.10 Dust distribution under dynamic dust generation path

(1) 横向和纵向4种尘源移动路径,在整个扩散区域内粉尘质量浓度变化统一表现为:随着粉尘扩散距离的增加,粉尘质量浓度总体呈现下降趋势。具体表现为:产生源到抽尘口的粉尘质量浓度略有下降;抽尘口到司机位置的粉尘质量浓度大幅下降;司机、司机后方和行人呼吸带位置的粉尘质量浓度依次缓慢降低。

(2) 横向路径下产生源位置的粉尘质量浓度略低于纵向路径,同时在抽尘口的粉尘质量浓度明显高于纵向路径,说明横向路径中更多的粉尘颗粒在压风筒

和抽风筒的混合作用下被吸入抽尘区域进而排出;图中采样区域1、2连接的灰色虚线斜率对比同样验证了横向路径的除尘效率高于纵向路径。

(3) 对于司机、司机后方以及行人呼吸带位置,横向路径相较于纵向路径的粉尘总量较小;同时观察这3个点的连线斜率可知,横向路径在上述3个区域的粉尘质量浓度依次下降,但下降趋势较为缓慢。

3.2 粉尘粒径占比

在2.3节所述最佳通风参数的基础上,进一步分析横向路径下产尘源、抽尘口、司机、司机后方以及行人呼吸带位置(采样区域1、2、3、4、5)的粉尘粒径分布占比,统计了上述位置的不同粉尘粒径尺寸区间占比:0~1、1~2.5、2.5~10、>10 μm。图11为横向五刀路径的粒径尺寸分布情况。如图11可知,粒径尺寸为0~1、1~2.5、2.5~10 μm的粉尘,在产生源位置的占比均低于抽尘位置;在司机位置,上述3个粒径区间的粉尘占比,较之抽尘口位置均明显下降,具体表现为:0~1 μm的粉尘粒径占比从4.84%下降到0.43%,下降率为91.12%;1~2.5 μm的粉尘粒径占比从4.84%下降到0.43%,下降率为80.79%;2.5~10 μm的粉尘粒径占比从51.64%下降到34.17%,下降率为50.97%;而粒径>10 μm的粉尘占比大幅上升,从27.22%上升到67.27%。对于司机后方和行人呼吸带位置,粒径>10 μm的粉尘占比逐渐减小,其余3个粒径区间的粉尘占比相较司机位置均略有增加。

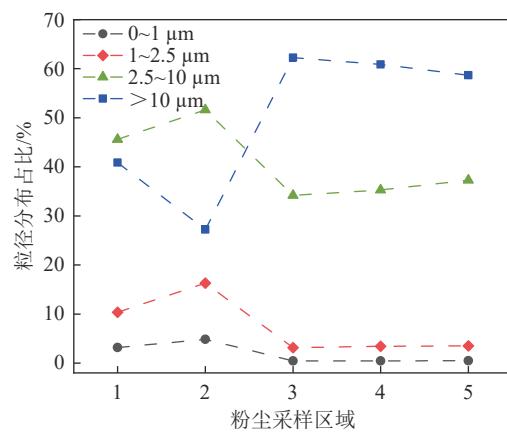


图11 不同扩散区域的颗粒区间分布

Fig.11 Particle interval distribution in different diffusion regions

综上分析,长压短抽通风除尘性能与粉尘粒径尺寸成负相关。结合长压短抽除尘机理分析可知:由于粒径<2.5 μm的粉尘颗粒极易受风流场影响,超80%会跟随负压风流被抽风筒集中收集净化;而粒径>10 μm的粉尘颗粒因自身惯性较大,超60%从抽尘区域逃逸并扩散到司机位置。表明长压短抽通风方式对微小尺寸粉尘颗粒的除尘性能极佳。然而,长压

短抽的有效除尘范围较小。通过对司机后方和行人呼吸带位置粉尘粒径占比分析可知,对于压抽风口后方区域粉尘的除降效果几近于无。此外,因横向三刀路径的粒径尺寸分布情况与横向五刀基本一致,进一步验证了上述分析。

4 现场应用效果及分析

为了验证最佳通风参数的有效性,基于室内平台试验得到的横向路径最优通风除尘工况,在陕北某煤矿2304综掘工作面开展现场试验,该综掘工作面生产期间的产尘源移动路径与平台试验的横向路径基本一致。将现场的压风筒拆卸下来安置在掘进机的机台上,将风筒前端部分用骨架软管替换使其能够随着司机的移动而同步进行移动。在司机位置设置测点

1,在破碎机转载点旁0.5 m位置的行人呼吸带高度设置测点2,并使用粉尘采样器收集总粉尘和呼吸性粉尘质量浓度测试样本,具体布置如图12所示。开采作业前,根据实验室得出的最佳通风参数,按相似理论的比例调整为现场参数。试验结果见表3,使用滤膜称重法同时对司机和行人呼吸带位置的粉尘取样5组,每组15 min,计算平均值。通过现场试验可知,将长压短抽通风参数优化后,横向路径下司机和行人呼吸带位置的总粉尘质量浓度从原先的292.9 mg/m³和148.2 mg/m³分别降低至85.6 mg/m³和15.3 mg/m³,降尘率最高达到76.9%;呼吸性粉尘质量浓度从原先的14.2 mg/m³和35.7 mg/m³分别降低至21.9 mg/m³和10.5 mg/m³,降尘率最高达到85.2%,治理效果显著。

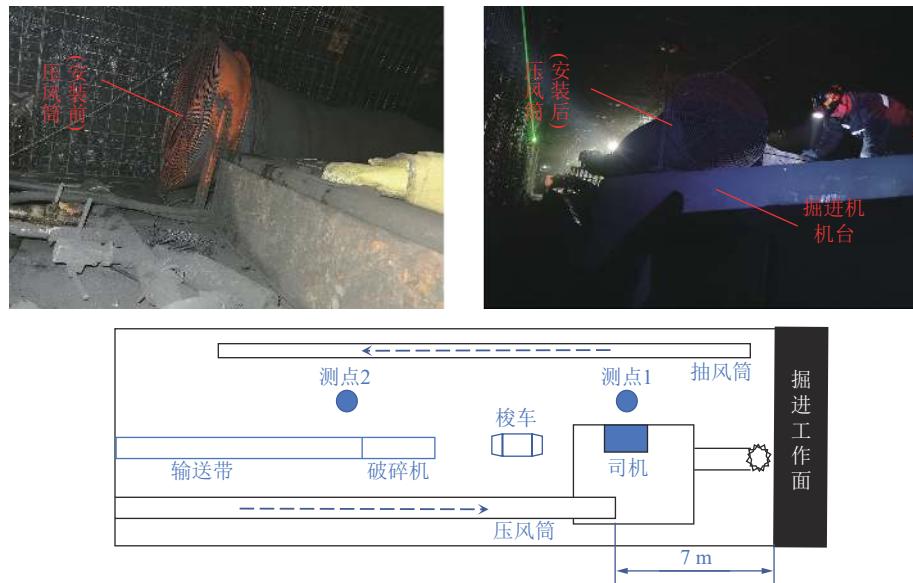


图12 掘进工作面示意

Fig.12 Schematic diagram of digging working face

表3 煤矿现场降尘效果

Table 3 Dust reduction effect on coal mine site

检测区域	优化前粉尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	优化后粉尘质量浓度/(mg·m ⁻³)	粉尘类型	降尘率/%
司机位置	292.9	85.6	总粉尘	70.8
	148.2	21.9	呼吸性粉尘	85.2
行人呼吸带	66.4	15.3	总粉尘	76.9
	35.7	10.5	呼吸性粉尘	70.5

5 结 论

(1)根据煤矿井下综掘工作面的实际生产情况,通过考虑产尘源位置沿横、纵2种方向的运动路径及往复次数,基于长压短抽试验平台设计了4种尘源移动路径、10处压风筒移动位置,深入探究了尘源移动路

径与通风参数对粉尘分布规律的影响。

(2)对于司机和行人呼吸带位置,采用熵权法定性分析横向路径和纵向路径的粉尘质量浓度;证明了自左而右的尘源移动路径减少了司机和行人呼吸带位置的粉尘污染。通过总粉尘和粉尘粒径质量浓度的对比,确定了最佳通风参数。

(3) 结合长压短抽除尘机理分析得知,长压短抽通风除尘性能与粉尘粒径尺寸成负相关。粒径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 的粉尘颗粒极易受风流场影响,超 80% 会跟随负压风流被抽风筒集中收集净化;而粒径 $> 10 \mu\text{m}$ 的粉尘颗粒因自身惯性较大,更易从抽尘区域逃逸并扩散到司机位置。

(4) 基于室内实验平台结果开展现场试验,通过分析现场粉尘除降效果,司机和行人呼吸带位置的总粉尘和呼吸性粉尘降尘率最高达到 76.9% 和 85.2%,工作面能见度大幅提高,系统使用效果持续稳定,作业环境得到改善。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭工业高质量发展面临的挑战与对策[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 6–12.
YUAN Liang. Challenges and countermeasures for high quality development of China's coal industry[J]. China Coal, 2020, 46(1): 6–12.
- [2] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [3] 谢克昌. 以煤为主格局决定能源转型立足点和首要任务[N]. 中国科学报, 007: 1–2.
- [4] 周福宝, 魏连江, 夏同强, 等. 矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2225–2235.
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2225–2235.
- [5] 程卫民, 周刚, 陈连军, 等. 我国煤矿粉尘防治理论与技术 20 年研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 1–20.
CHENG Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 1–20.
- [6] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程执行说明[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [7] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137–142.
WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137–142.
- [8] 李德文, 隋金君, 刘国庆, 等. 中国煤矿粉尘危害防治技术现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 1–7, 13.
LI Dewen, SUI Jinjun, LIU Guoqing, et al. Technical status and development direction of coal mine dust hazard prevention and control technology in China[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 1–7, 13.
- [9] 人民网. 人脑中惊现空气污染微粒可能与脑部疾病有关[EB/OL]. <http://sc.people.com.cn/n2/2016/0907/c346399-28959552.html>, 2019-12-20/2023-10-17.
- [10] 袁亮, 姜耀东, 何学秋, 等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监
- 控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306–318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306–318.
- [11] WANG Z W, LI S G, REN T, et al. Respirable dust pollution characteristics within an underground heading face driven with continuous miner—A CFD modelling approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 267–283.
- [12] 2020 年我国卫生健康事业发展统计公报[J]. 中国病毒病杂志, 2021, 11(5): 321–329.
Statistical bulletin on the development of health care in China in 2020 [J]. Chinese Journal of Viral Diseases, 2021, 11(5): 321–329.
- [13] 顾大钊, 李全生. 基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 950–958.
GU Dazhao, LI Quansheng. Theoretical framework and key technologies of underground ecological protection based on coal mine occupational health prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 950–958.
- [14] 王平, 路国强, 徐洋. 煤矿粉尘及防治技术研究现状与展望[J]. 现代矿业, 2023, 39(11): 8–13.
WANG Ping, LU Guoqiang, XU Yang. Research status and prospects of coal mine dust and prevention and control technology[J]. Modern Mining, 2023, 39(11): 8–13.
- [15] XIE S, YU H M, YE Y X, et al. Research on a new method of “blocking-sealing” dust control and removal in fully mechanized heading face[J]. *Energy*, 2023, 283: 129031.
- [16] 刘荣华, 朱必勇, 王鹏飞, 等. 综掘工作面双径向旋流屏蔽通风控尘机理[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3902–3911.
LIU Ronghua, ZHU Biyong, WANG Pengfei, et al. Dust control mechanism of double radial swirl shielding ventilation in fully mechanized heading face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3902–3911.
- [17] ZHENG H T, JIANG B Y, ZHENG Y N, et al. Experimental study on forced ventilation and dust-control in a heading face based on response surface method[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 175: 753–763.
- [18] 张国梁, 蒋仲安, 杨斌, 等. 高原环境下矿井最低排尘风速的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2294–2303.
ZHANG Guoliang, JIANG Zhongan, YANG Bin, et al. Numerical simulation of the minimum mine dust exhausting wind speed under high altitude environment[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2294–2303.
- [19] ZHANG H Q, LIU R, CHUN J W, et al. Study on optimization of the dedusting air duct layout in coal mine roadway[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 855438.
- [20] HU S Y, LIAO Q, FENG G R, et al. Influences of ventilation velocity on dust dispersion in coal roadways[J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 683–694.
- [21] WEN H, MI W S, FAN S X, et al. Simulation study on crucial parameters of long-compressive and short-suction ventilation in large section roadway excavation of LongWangGou coal mine[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(3): 6435–6453.

- [22] 李泽佑, 黄锐, 赵淑琪, 等. 高海拔矿山独头巷道通风降尘方法优选[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 743–752.
LI Zeyou, HUANG Rui, ZHAO Shuqi, et al. Ventilation method optimization of dust extraction in an excavation roadway of high-altitude mine[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(5): 743–752.
- [23] 肖旸, 孙帅强, 杨雪儿, 等. 可变角度新鲜风流下煤巷掘进长压短抽除尘效果数值模拟[J]. 煤矿安全, 2023, 54(1): 38–45.
XIAO Yang, SUN Shuaiqiang, YANG Xueer, et al. Numerical simulation of dust removal effect of long pressure and short drainage in coal roadway tunneling with variable angle fresh air flow[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(1): 38–45.
- [24] 张云峰, 王明, 陈俊涛, 等. 综掘面长压短抽—雾幕除尘系统参数优化研究[J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(2): 22–28.
ZHANG Yunfeng, WANG Ming, CHEN Juntao, et al. Research on parameter optimization of long-pressure short-pumping and mist screen dust removal system in fully mechanized face[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(2): 22–28.
- [25] 邵良杉, 于保才, 陈晓永. 矿井智能通风关键技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 121–124.
SHAO Liangshan, YU Baocai, CHEN Xiaoyong. Key technology of mine intelligent ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(11): 121–124.
- [26] 陈芳, 张设计, 马威, 等. 综掘工作面压风分流控除尘技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 483–489.
CHEN Fang, ZHANG Sheji, MA Wei, et al. Research and application of pressure air diversion control dust removal technology in fully mechanized mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 483–489.
- [27] LU X X, SHEN C, XING Y, et al. The spatial diffusion rule and pollution region of disorganized dust in the excavation roadway at different roadheader cutting positions[J]. Powder Technology, 2022, 396: 167–180.
- [28] ZHOU G, DUAN J J, SUN B, et al. Numerical analysis on pollution law for dust and diesel exhaust particles in multi-ventilation parameter environment of mechanized excavation face[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 157: 320–333.
- [29] NIE W, CAI X J, PENG H T, et al. Distribution characteristics of an airflow-dust mixture and quantitative analysis of the dust absorption effect during tunnel sub-regional coal cutting[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 319–334.
- [30] 龚晓燕, 樊江江, 刘壮壮, 等. 综掘面出风口及抽风口风流综合调控下粉尘场优化分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 800–809.
GONG Xiaoyan, FAN Jiangjiang, LIU Zhuangzhuang, et al. Optimization analysis of dust field under the comprehensive regulation of air flow at the air outlet and exhaust port of fully mechanized mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 800–809.
- [31] 龚晓燕, 韩郑, 薛河, 等. 综掘工作面不同截割方式下的最佳风场调控规则[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 973–983.
GONG Xiaoyan, HAN Zheng, XUE He, et al. Optimal wind field regulation rules under different cutting methods in fully mechanized face[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 973–983.
- [32] JIANG W, XU X Y, WEN Z H, et al. Applying the similarity theory to model dust dispersion during coal-mine tunneling[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148: 415–427.
- [33] 王渭明, 吕显州, 秦文露. 半煤岩巷道快速综掘截割顺序优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5): 771–777, 785.
WANG Weiming, LYU Xianzhou, QIN Wenlu. Study on optimization of rapid combined excavation cutting sequence in half-coal rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5): 771–777, 785.
- [34] 林汉毅, 江丙友, 袁亮, 等. 煤矿掘进工作面粉尘延时采样测量方法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 199–206.
LIN Hanyi, JIANG Bingyou, YUAN Liang, et al. Measurement method of dust time-delay sampling in coal mine heading face[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10): 199–206.
- [35] 龚晓燕, 侯翼杰, 赵宽, 等. 综掘工作面风筒出风口风流智能调控装置研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 8–14.
GONG Xiaoyan, HOU Yijie, ZHAO Kuan, et al. Study on intelligent control device for airflow of air duct outlet in fully-mechanized heading face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 8–14.
- [36] TAI X L, XIAO W, TANG Y X. A quantitative assessment of vulnerability using social economic-natural compound ecosystem framework in coal mining cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120969.
- [37] LI Y J, ZHANG Q, WANG L Z, et al. Regional environmental efficiency in China: An empirical analysis based on entropy weight method and non-parametric models[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 124147.
- [38] National Institute for Occupational Safety and Health. Enhanced-coal workers' health surveillance program[EB/OL]. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-112/default.Html>(2019-12-20)/2023-10-17.
- [39] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. The effects of the installation position of a multi-radial swirling air-curtain generator on dust diffusion and pollution rules in a fully-mechanized excavation face: A case study[J]. Powder Technology, 2018, 329: 371–385.
- [40] LIU Q, NIE W, HUA Y, et al. Research on tunnel ventilation systems: Dust Diffusion and Pollution Behaviour by air curtains based on CFD technology and field measurement[J]. Building and Environment, 2019, 147: 444–460.