

乌东煤矿复杂煤层煤尘物化特性研究与分析

张艺文

山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年3月9日; 录用日期: 2026年4月11日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

煤矿粉尘是矿井生产过程中重要的职业危害因素, 其理化特性直接影响粉尘扩散规律及降尘效果。以乌东煤矿急倾斜厚煤层开采条件为研究对象, 通过现场采样与实验测试相结合的方法, 对综放工作面、掘进工作面及喷浆作业区粉尘的浓度分布、粒径特征及润湿性进行了研究。结果表明: 掘进工作面粉尘污染程度高于综放工作面, 掘进机司机处总尘浓度达到 322.3 mg/m^3 ; 综放工作面采煤机司机处和移架区域粉尘浓度较高。矿井粉尘粒径主要集中在 $5\sim 13 \mu\text{m}$ 范围内, 呼吸性粉尘比例最高达到57.6%。煤尘接触角分布在 $31^\circ\sim 113^\circ$ 之间, 多数煤层表现为疏水性。研究表明, 矿井粉尘污染与作业方式、粒径分布及煤尘润湿性密切相关, 应通过源头抑尘与喷雾降尘优化实现综合治理。

关键词

煤矿粉尘, 粒径分布, 润湿性, 粉尘浓度, 矿井粉尘治理

Research and Analysis of Physicochemical Properties of Coal Dust from Complex Coal Seams in Wudong Coal Mine

Yiwen Zhang

School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: March 9, 2026; accepted: April 11, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

Coal mine dust is an important occupational hazard factor in the production process of coal mines. Its physical and chemical properties directly affect the dust dispersion pattern and dust suppression

effect. Taking the mining conditions of a steeply inclined thick coal seam in Wudong Coal Mine as the research object, through the combination of on-site sampling and experimental testing, the concentration distribution, particle size characteristics, and wettability of dust in the comprehensive mining face, tunneling face, and spraying operation area were studied. The results show that the dust pollution degree in the tunneling face is higher than that in the comprehensive mining face, and the total dust concentration at the driver's position of the tunneling machine reaches 322.3 mg/m^3 ; the dust concentration at the coal mining machine driver's position and the moving support area in the comprehensive mining face is relatively high. The particle size of mine dust mainly falls within the range of $5\sim 13 \mu\text{m}$, and the proportion of respirable dust is the highest, reaching 57.6%. The contact angle of coal dust ranges from 31° to 113° , and most coal seams exhibit hydrophobicity. The study indicates that mine dust pollution is closely related to the working method, particle size distribution, and wettability of coal dust, and comprehensive control should be achieved through source dust suppression and spray dust suppression optimization.

Keywords

Coal Mine Dust, Particle Size Distribution, Wettability, Dust Concentration, Mine Dust Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着煤炭开采机械化、自动化水平的不断提高, 矿井生产过程中产生的粉尘污染问题日益突出, 煤矿粉尘已成为影响矿井安全生产和职业健康的重要因素之一。研究表明, 煤尘不仅具有爆炸危险性, 还会对矿工呼吸系统造成严重危害, 长期接触高浓度粉尘易诱发煤工尘肺病等职业病, 因此矿井粉尘的产生机理、理化特性及其防治技术一直是国内外研究的热点[1]-[3]。

国外学者较早开展了煤矿粉尘特性及其危害机理研究, 重点集中在粉尘粒径分布、化学组成及其健康影响等方面。相关研究通过扫描电子显微镜(SEM)、动态光散射(DLS)等多种测试方法对可吸入煤矿粉尘进行表征, 结果表明矿井粉尘中普遍存在大量微米级及纳米级颗粒, 其中粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的呼吸性粉尘易进入人体肺部并沉积于肺泡区域, 对人体健康危害显著[4] [5]。

国内学者围绕矿井粉尘的产生来源、分布规律及其防治技术开展了大量研究。研究表明, 采煤、掘进及运输等生产环节是矿井粉尘的主要来源, 其中采掘工作面产尘量占矿井总产尘量的绝大部分, 粉尘在井下风流作用下呈现明显的扩散、迁移和沉降规律[6]。

在煤尘理化特性研究方面, 通过红外光谱、电泳及接触角测试等实验手段, 揭示了煤尘表面化学结构和润湿机理, 研究表明煤尘普遍具有较强的疏水性, 这也是影响喷雾降尘效果的重要因素之一[7]。

总体来看, 国内外学者在煤矿粉尘扩散规律、理化特性及防治技术等方面已取得一定研究成果, 但针对复杂地质条件下煤尘理化特性及其对降尘效果影响的系统研究仍相对不足。因此, 有必要结合具体矿井条件, 对煤尘粒径分布、润湿特性及相关影响因素进行系统分析, 以期对矿井粉尘治理技术的优化提供理论依据。

2. 总尘及呼尘浓度测试与分析

粉尘浓度是评价矿井作业环境污染程度及职业健康风险的重要指标, 其中总尘反映空气中颗粒物总

体污染水平,而呼吸性粉尘则直接关系到粉尘在人体呼吸系统深部沉积的潜在危害。当粉尘中游离 SiO_2 含量一定时,粉尘浓度与尘肺病发病率具有较为明显的相关性,因此研究不同作业区域粉尘浓度的空间分布特征,对于识别主要产尘源及制定有效的控尘措施具有重要意义。

本研究采用 CCZ20 矿用粉尘采样器对乌东煤矿综放工作面、掘进工作面及喷浆作业区进行现场采样测试。在采样地点将粉尘采样器安装在支架上,把采样头安在采样器上,预置采样时间后即可启动采样器,将电机调速至大于 20 L/min ,采样到达预置时间后自动停机。采样时间因粉尘浓度变化而变化,一般情况下,采集在冲击板上及滤膜上的粉尘增量均不应小于 0.5 mg ,不大于 10 mg 。所采用的粉尘采样器的基本参数如下:采样流量超过 20 L/min ;连续工作时间 $>120 \text{ min}$;防爆形式为矿用本质安全型。各测点总尘与呼吸性粉尘均进行平行重复采样,每个测点重复 3 次,取其平均值作为该测点最终测试结果;当平行样相对偏差大于 10% 时,重新采样测试。采样前后均对采样器进行流量校准,校准误差控制在 $\pm 5\%$ 以内;滤膜在采样前后置于恒温恒湿条件下平衡 24 h 后称重,以减小环境温湿度波动对称量结果的影响。综放工作面共布置 6 个测点,分别为采煤机司机处(A 测点)、移架产尘点(B 测点)、采煤机下风侧 20 m (C 测点)、破碎机处(D 测点)、回风巷 20 m (E 测点)及回风巷 40 m (F 测点);掘进工作面设置 6 个测点,分别为掘进司机处(A 测点)、距迎头 10 m (B 测点)、转载处(C 测点)、距迎头 20 m (D 测点)、距迎头 40 m (E 测点)及距迎头 60 m (F 测点),通过滤膜称重法获得各测点粉尘浓度,用于粒度与润湿性测试的煤尘样品采用洁净采样袋/密封离心管收集,样品编号后立即密封保存,并置于避光、干燥条件下运输回实验室。实验前样品统一保存在温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 的环境中,保存时间不超过 3 d 。为避免样品受潮团聚或表面性质发生变化,样品在测试前不与外界空气长时间接触,取样后尽快完成粒度与接触角测试。结果如表 1。

Table 1. Dust concentration measurement results at Wudong Coal Mine

表 1. 乌东煤矿粉尘浓度测定结果

+443B3-6 综放面				+418 m 水平上部车场掘进面			
作业点	编号	总尘(mg/m^3)	呼尘(mg/m^3)	作业点	编号	总尘(mg/m^3)	呼尘(mg/m^3)
采煤机司机处	A 测点	218.8	79.1	掘进司机处	A 测点	322.3	133.2
移架产尘点	B 测点	152.4	44.3	距迎头 10 m	B 测点	276.3	132.5
采煤机下风侧 20 m	C 测点	72.3	30.6	转载处	C 测点	253.2	103.7
破碎机处	D 测点	117.2	58.0	距迎头 20 m	D 测点	243.4	96.3
回风巷 20 m 处	E 测点	107.3	47.9	距迎头 40 m	E 测点	176.5	63.4
回风巷 40 m 处	F 测点	84.5	46.7	距迎头 60 m	F 测点	146.4	60.4
北区喷浆工作面							
作业点	原始粉尘浓度(mg/m^3)		新喷浆机粉尘浓度(mg/m^3)		除尘效率		
距喷射手下风侧 1 m 处	32.5 mg/m^3		5.4 mg/m^3		83.38%		
距喷浆机下风侧 1 m 处	22.6 mg/m^3		2.9 mg/m^3		87.17%		
距喷浆机下风侧 5 m 处	6.1 mg/m^3		0.5 mg/m^3		91.80%		

测试结果表明,综放工作面粉尘浓度具有明显的空间差异。采煤机司机处总尘和呼尘浓度分别达到 $218.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $79.1 \text{ mg}/\text{m}^3$,为工作面前部的主要高值区;移架产尘点总尘浓度为 $152.4 \text{ mg}/\text{m}^3$;采煤机下风侧 20 m 处总尘浓度下降至 $72.3 \text{ mg}/\text{m}^3$,但在破碎机处又回升至 $117.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。由此可见,综放工作面

粉尘分布并非单纯随距离增加而递减,而是受采煤机截割、移架扰动及转载破碎等多种产尘源叠加影响。回风巷 20 m 和 40 m 处总尘浓度分别为 107.3 mg/m³ 和 84.5 mg/m³,虽然总体有所降低,但呼吸性粉尘比例仍然较高,表明细颗粒粉尘在风流输运过程中具有较强的悬浮能力。

相比之下,掘进工作面粉尘污染更为严重。掘进机司机处总尘浓度达到 322.3 mg/m³,呼尘浓度为 133.2 mg/m³,显著高于综放工作面对应测点。随着与迎头距离增加,总尘浓度逐渐降低,但在距迎头 60 m 处仍达到 146.4 mg/m³,说明高浓度粉尘能够沿巷道长距离扩散。其主要原因在于掘进机破岩过程中产生大量细颗粒粉尘,同时掘进巷道空间较为封闭,通风稀释条件相对有限,使粉尘难以及时排出。

喷浆作业区测试结果表明,新型喷浆设备对粉尘具有明显抑制作用。距喷射手下风侧 1 m 处粉尘浓度由 32.5 mg/m³ 降至 5.4 mg/m³,除尘效率达到 83.38%;距喷浆机下风侧 5 m 处粉尘浓度进一步降至 0.5 mg/m³,除尘效率达到 91.80%,表明通过优化喷浆设备和工艺可以有效降低初始产尘强度。

综合分析可以看出,矿井粉尘浓度分布受作业工艺、通风条件及粉尘粒径特性等多因素共同影响。采掘机械截割和破碎过程是主要粉尘来源,而细颗粒粉尘由于悬浮能力强,往往能够在风流作用下向巷道下游迁移并形成持续污染。因此,矿井粉尘治理不仅应强化源头抑尘措施,还应通过优化通风组织、加强呼吸性粉尘控制以及改进作业设备等方式实现综合治理,以降低作业人员的职业暴露风险。

3. 粉尘粒度检测及分析

分散度是指粉尘粒子大小组成的百分构成,较小直径的微粒百分比大,则分散度高,反之,分散度低,粉尘被吸入机体的机会及其危害程度与分散度有直接关系。生产性粉尘在其性质和剂量相同情况下,对机体危害程度取决于粉尘颗粒直径的大小,粉尘分散度越高,对人体的危害越大。小于 5 μm 的尘粒易被吞噬细胞吞噬引起尘肺病变,其中 1~25 μm 的尘粒引起病变最严重,而小于 1 μm 的尘粒只引起毒性反应而无纤维化病变。一般粉尘的分散度越高,喷雾降尘越困难[8]-[10]。

如图 1,本文运用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪对乌东煤矿急倾斜厚煤层开采中采掘工作面采集的尘样进行粒度测试,该粒度分析仪相关参数指标部分如下:可测粒径范围为 0.01~3500 μm,检测器排列方式为非均匀交叉大面积补偿三维立体系统,对数间隔排列,角度范围达到 0.015°~144°。首先,称取现场采集煤尘样品 0.2~0.3 g,加入盛有去离子水的烧杯中,采用 200 W 超声分散 5 min,并轻微搅拌 2 min,使样品充分分散;必要时加入少量分散剂以减弱颗粒团聚。随后将样品缓慢加入仪器分散池中,控制遮光度在 10%~20%范围内后开始测量,每个样品重复测试 3 次,取平均值作为最终粒度结果,获得的粒度分析结果如图 2。

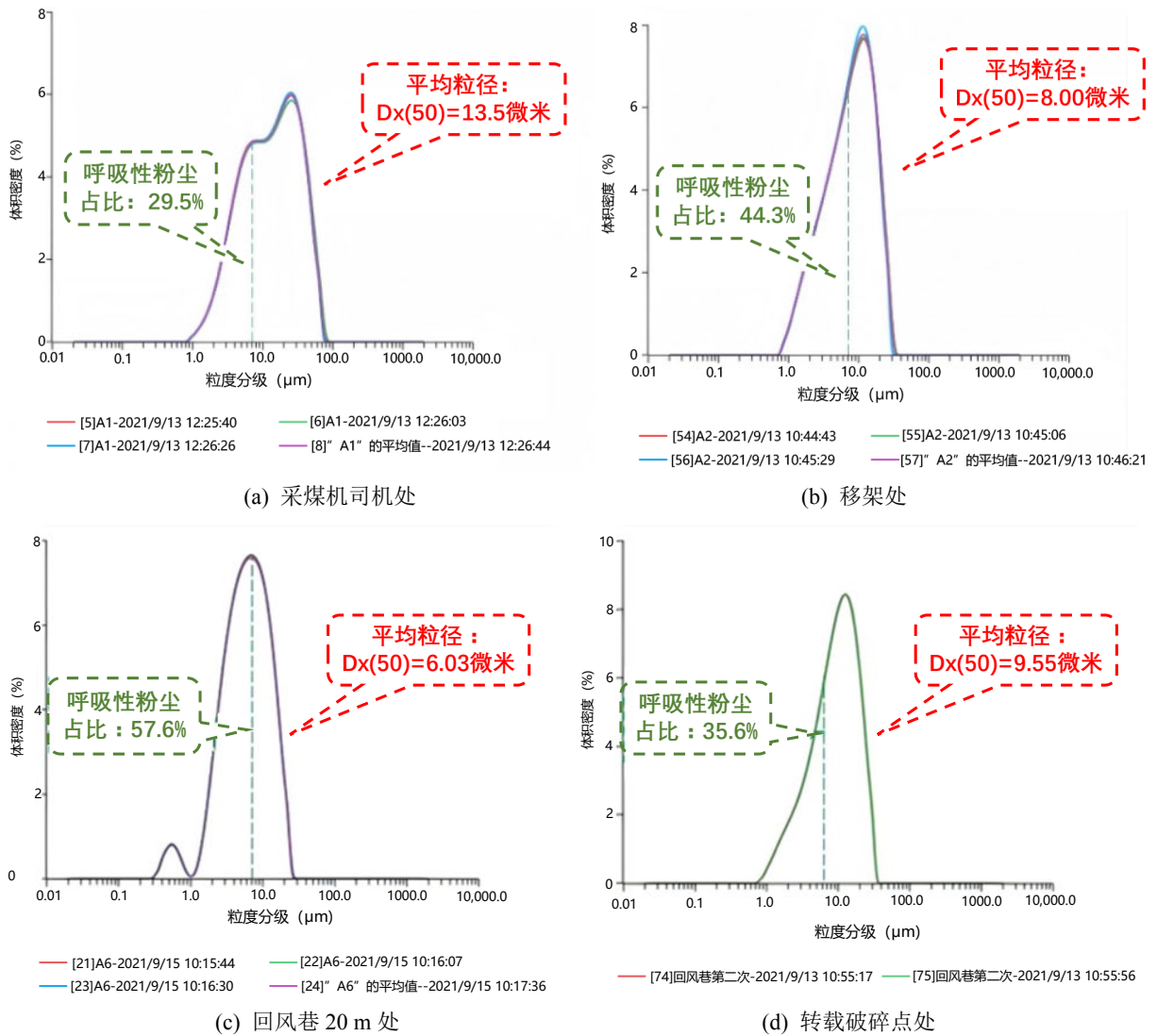
3.1. 乌东煤矿+443B3-6 综放工作面粒度分布结果

乌东煤矿+443B3-6 综放工作面结果发现:采煤机司机处平均粒径达到 13.5 μm,呼吸性粉尘占比高达 29.5%,司机处呼吸性粉尘占比较高,应重点调配压风量,使该处呼吸性粉尘降至安全水平。移架处测定结果发现:移架处平均粒径达到 8.00 μm,呼吸性粉尘占比高达 44.3%,移架处呼吸性粉尘明显高于司机处的呼吸性粉尘,表明该处是重要的呼吸性粉尘产生处。

回风巷 20 m 处、转载破碎点处、第二次回风巷 20 m 处和距离迎头 40 m 处平均粒径分别达到 6.03 μm、9.55 μm、7.00 μm、6.63 μm,呼吸性粉尘占比分别为 57.6%、35.6%、49.9%、53.7%,对比分析发现:回风巷 20 m 和 40 m 处的平均粒径相差在 1 μm 以内,呼吸性粉尘占比相差在 5%以内,整体变化不大,且呈现出随着扩散距离的增大而增加的规律,推测为风流携带粉尘快速扩散至距迎头 40 m 巷道处,应合理调配压风量以获得更合适的排尘风速。



Figure 1. Mastersizer 3000 laser diffraction particle size analyzer
图 1. Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪



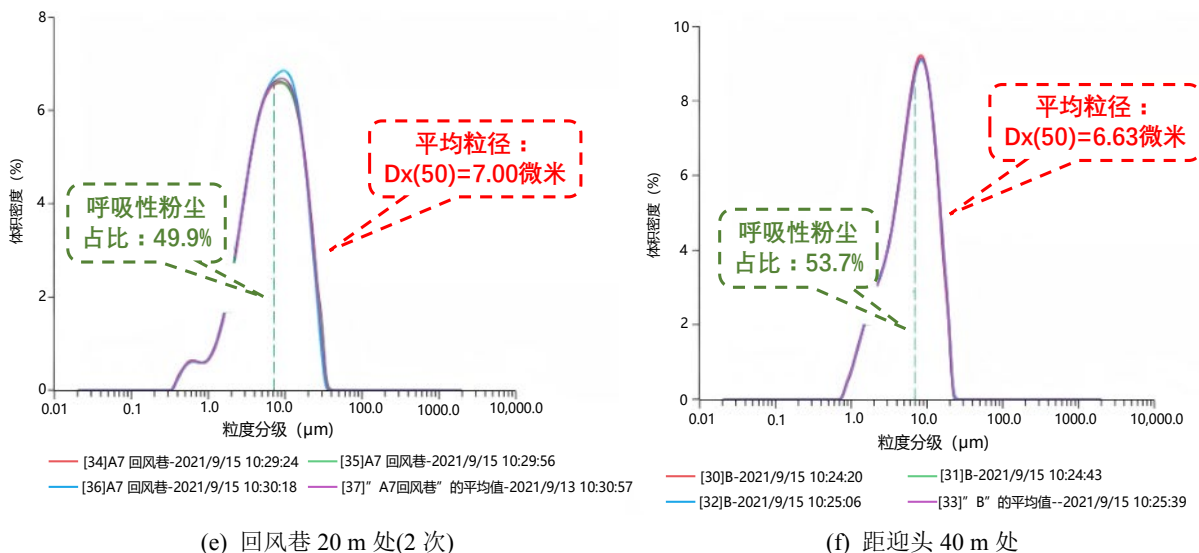


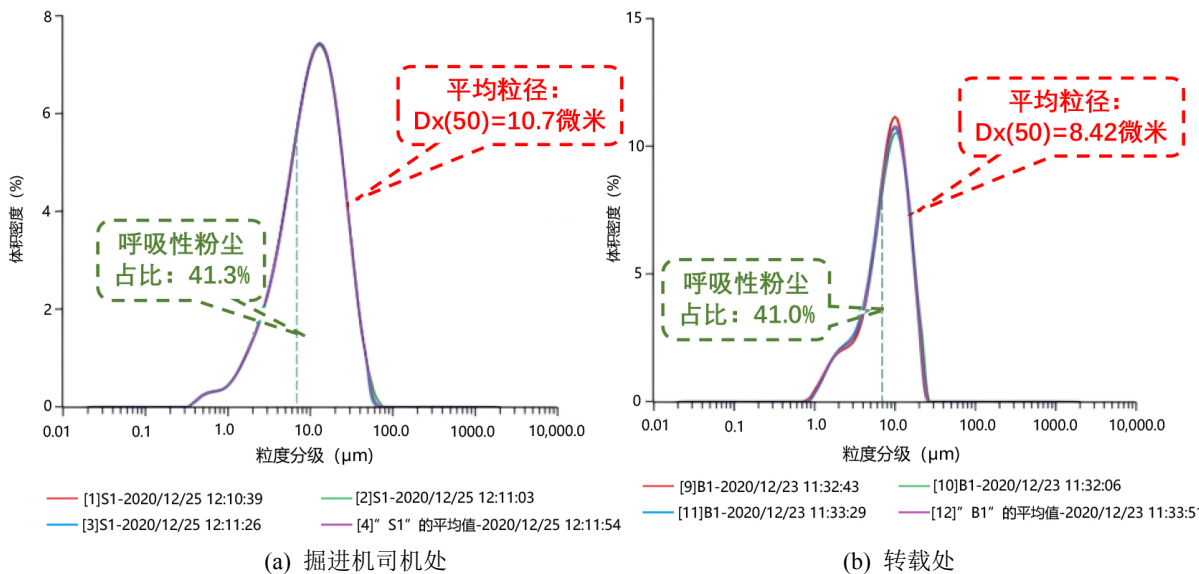
Figure 2. Particle size distribution results at various measuring points in the +443 B3-6 fully mechanized longwall face of Wudong Coal Mine

图 2. 乌东煤矿+443 B3-6 综放工作面各测点粒度分布结果

3.2. 乌东煤矿+418 m 综掘工作面粒度分布结果

如图 3，乌东煤矿+418 m 综掘工作面粒度结果发现：掘进机司机处平均粒径为 10.7 μm，呼吸性粉尘占比高达 41.3%，司机处呼吸性粉尘占比较高，应重点采取控尘措施与个体防护装备，以减少粉尘对掘进机司机造成的危害。转载处测定结果发现：转载处平均粒径达到 8.42 μm，呼吸性粉尘占比为 41.0%，与司机处结果相比，转载处平均粒径有大幅度减少，但是呼吸性粉尘占比变化不大，仍需采取喷雾等措施来减少转载处粉尘危害。

距迎头 10 m 处、20 m 处、60 m 处测定结果发现：其平均粒径分别为 10.3 μm、8.44 μm、6.6 μm，呼吸性粉尘占比分别为 48.0%、39.6%、41.3%，分析发现：随着与迎头距离的增加，平均粒径与呼吸性粉尘占比均呈减少趋势，与掘进工作面巷道特点相吻合，应更加重视源头控尘。



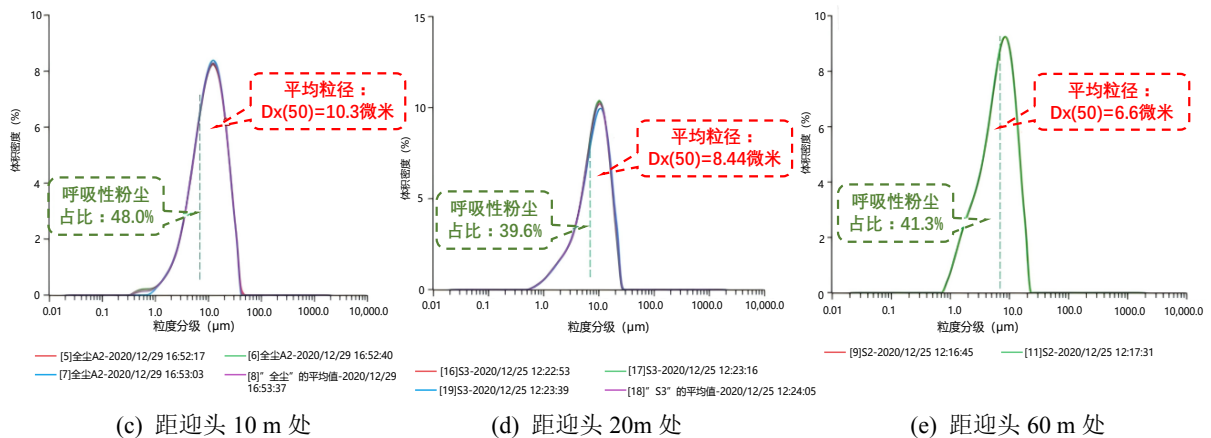
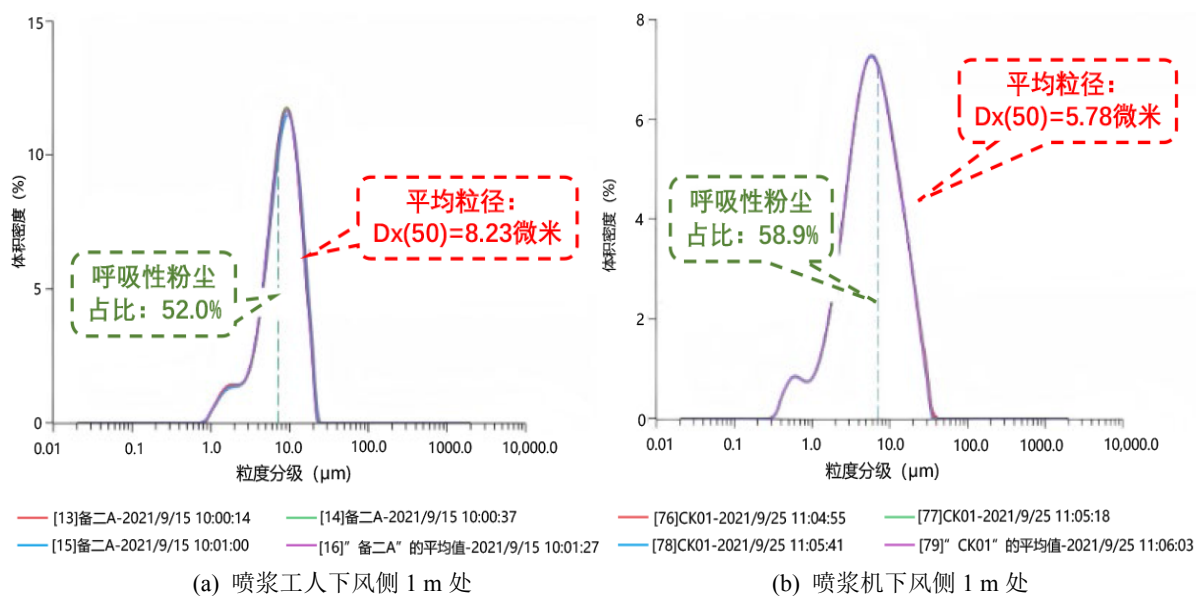


Figure 3. Particle size distribution results at various measuring points in the +418 m tunneling face of Wudong Coal Mine
图 3. 乌东煤矿+418 m 掘进工作面各测点粒度分布结果

3.3. 乌东煤矿喷浆工作面粒度分布结果

如图 4，乌东煤矿喷浆作业粉尘粒度结果发现：喷浆工人下风侧 1 m 处粉尘平均粒径为 8.23 μm，呼吸性粉尘占比为 52.0%，呼吸性粉尘占比较高，需考虑对该处粉尘进行重点控制。喷浆机下风侧 1 m、3 m 和 5 m 处平均粒径分别达到 5.78 μm、4.68 μm、5.81 μm，呼吸性粉尘占比分别为 58.9%、70.8%、58.9%，通过对粒度分析报告进行对比，发现经筛分后煤粉粒度分布基本上呈现正态分布。

乌东煤矿采掘及喷浆作业过程中产生的粉尘粒径主要集中在 5~13 μm 范围内，属于对人体呼吸系统危害较大的粒径区间。不同作业区域粉尘粒径呈现明显的“近源粗、远场细”分布特征，即在采掘源头区域颗粒相对较大，而在回风巷及下风侧区域细颗粒粉尘比例逐渐增加。该现象主要是由于大颗粒粉尘在输运过程中受惯性沉降和重力沉降作用而优先沉积，而细颗粒粉尘能够随气流长距离扩散并在巷道后部区域富集。喷浆作业区域粉尘平均粒径相对较小，呼吸性粉尘比例较高，说明该区域细颗粒粉尘污染更为突出。因此，在矿井粉尘治理过程中，应重点针对 5~10 μm 细颗粒粉尘采用高压细雾喷雾或局部抽尘等措施，提高细颗粒粉尘的捕集效率。



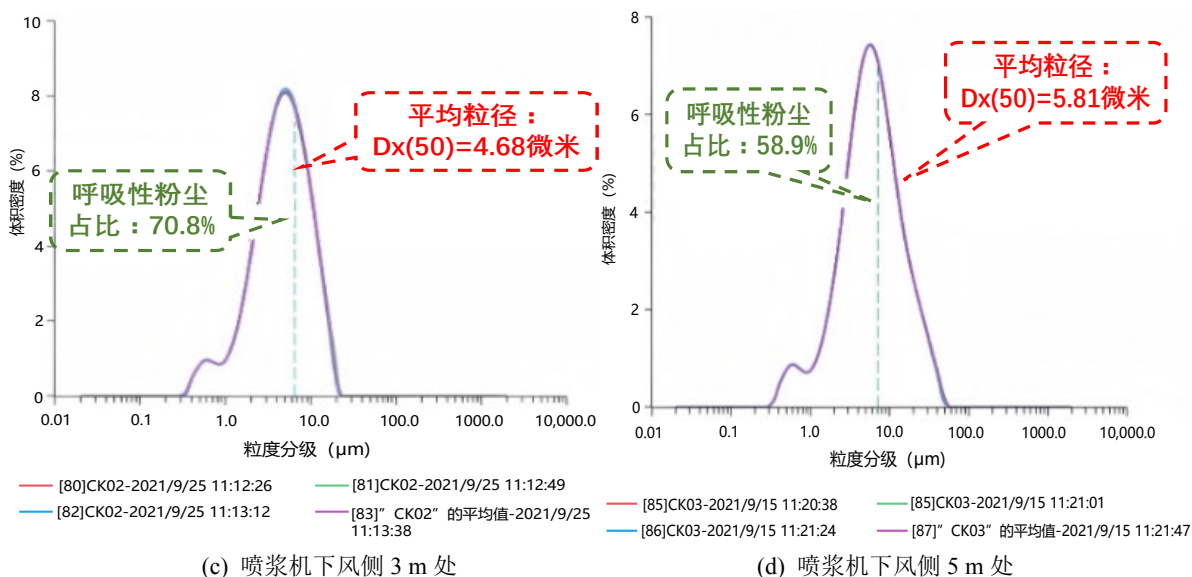
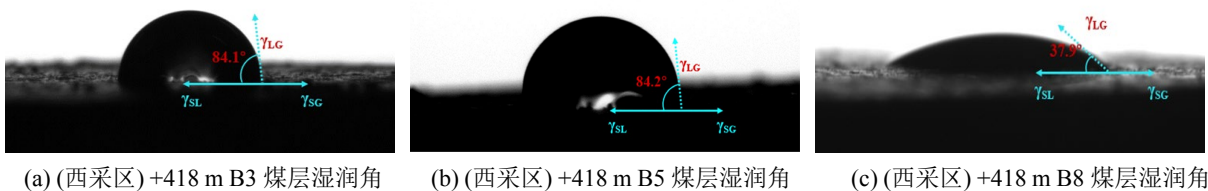


Figure 4. Particle size distribution results at various measuring points on the shotcrete working face of Wudong Coal Mine
图 4. 乌东煤矿喷浆工作面各测点粒度分布结果

4. 粉尘湿润性测定及分析

煤尘颗粒与水滴之间的相互作用直接影响喷雾降尘效果，其中润湿边角(接触角)是评价粉尘润湿性的常用指标。接触角反映水滴在固体表面的铺展能力，其大小与水分子和煤尘表面分子之间的作用力有关。当接触角较小时，水滴在颗粒表面能够迅速铺展并形成稳定附着，粉尘表现为亲水性；而当接触角较大时，水滴在颗粒表面呈收缩状态，难以形成有效接触，粉尘则表现为疏水性。通常将接触角小于 60° 的粉尘归为亲水性粉尘，大于 60° 则为疏水性粉尘。润湿性差异会直接影响喷雾水滴对粉尘颗粒的黏附概率，从而决定喷雾降尘效率[11]。

为研究乌东煤矿煤尘润湿特性，实验前将煤样研磨并过 200 目筛，采用压片机制备直径 13 mm、厚约 1 mm 的煤饼，在 20 MPa 压力下压制成型。待测样品放到测试平台固定，安装好注射器；用 DSA Device Control 控制面板控制针头的位置、液滴的形状；按 Baseline Detective 测定基线后，按 Contact Angle 测定接触角，利用快速拍照，从初始到平衡，由仪器读出接触角的数值。DSA100 光学接触角测量仪的接触角测量范围为 0°~180°，最大样品体积(LxWxH)：300 × ∞ × 150 mm (500 × ∞ × 48 mm)；分辨率为 0.01 mN/m；摄像系统为 50 帧(360 或 1000 fp/s 可选)，6 种不同的方法分析座滴形态，自动基线调整，温度范围：-60°~400°，电压为 110 V~240 V。该测量方法相对操作简单，仪器精度高，测量结果准确，并且重现性好。图 5 为利用该系统测得的乌东矿不同尘样在蒸馏水与自来水条件下的接触角实测结果。本项目针对乌东煤矿典型矿井进行煤尘润湿角测定，将煤样研磨后过筛 200 目，采用压片机制成煤饼，测试过程中通过软件自动识别液滴轮廓并计算接触角，从液滴初始状态到稳定状态连续采集图像，从而获得稳定接触角值。图 5 给出了不同煤层煤尘在测试条件下的接触角结果。



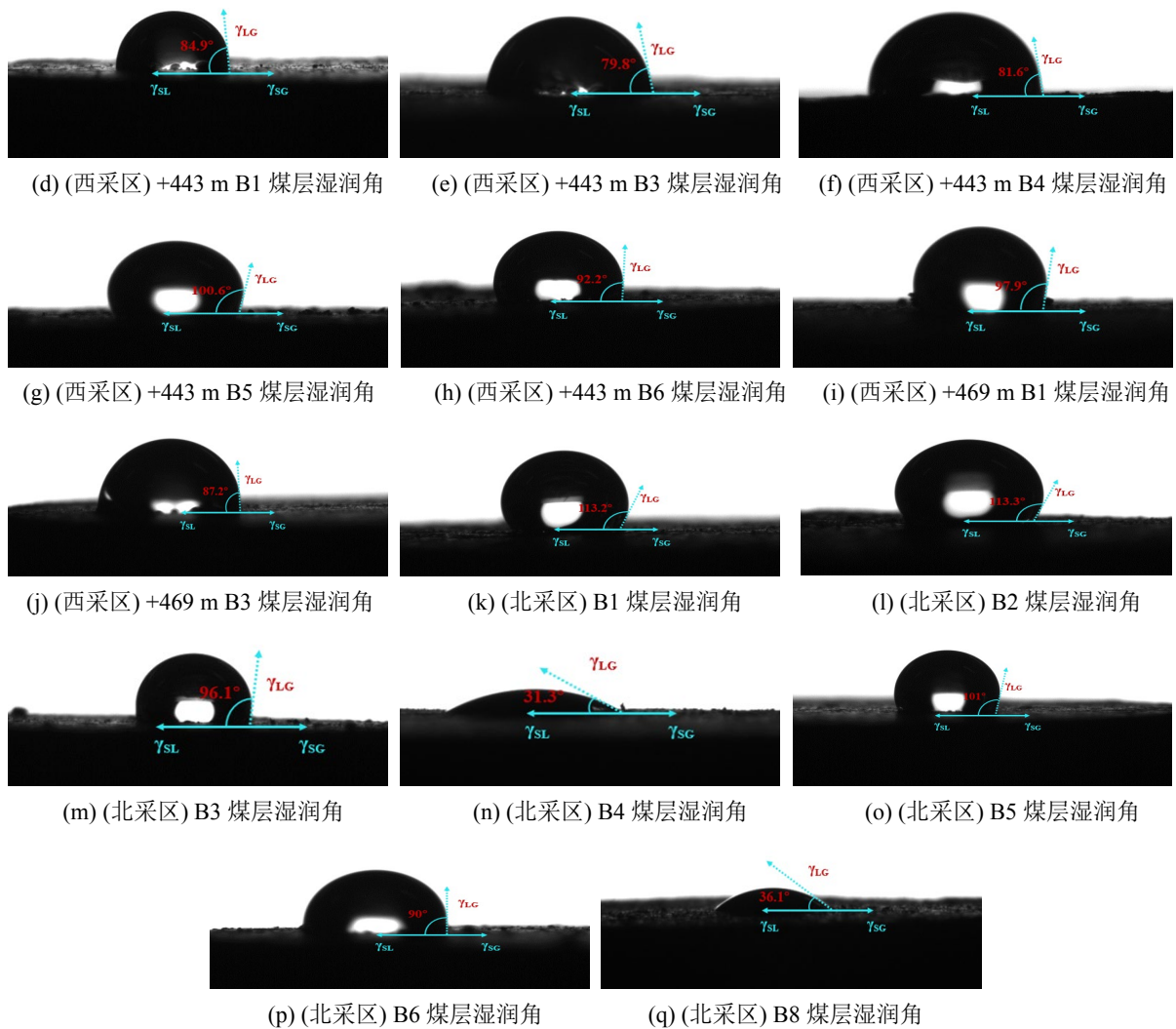


Figure 5. Wetting angles of different coal seams
图 5. 不同煤层湿润角

测试结果表明，乌东煤矿不同煤层煤尘润湿性差异明显，但整体以疏水性粉尘为主。在+418 m 采区，B3 煤层和 B5 煤层的接触角分别约为 84.1°~84.7°和 84.2°左右，均明显大于 60°，表现出较强的疏水特性；而 B8 煤层接触角约为 37.9°，小于 60°，说明该煤层煤尘具有较好的亲水性。+443 m 采区多个煤层接触角均超过 60°，其中 B5 煤层约为 100.6°，B4 煤层达到 113.1°，B1 煤层约为 81.6°~81.9°，表明这些煤层煤尘普遍不易被水润湿。+469 m 采区 B1 和 B3 煤层接触角分别约为 97.9°和 87°左右，同样表现为疏水性。相比之下，北采区 B4 与 B8 煤层接触角较小，分别约为 31.3°和 36.1°~43.9°，属于典型亲水性煤尘，而 B1、B2、B5 等煤层接触角多在 90°以上，显示出明显的疏水特征。

从形成机理上看，煤尘润湿性主要受煤的化学组成和表面结构影响。煤中有机质含量较高时，其表面往往含有较多非极性结构，如芳香环和烃类基团，这类结构与水分子之间的相互作用较弱，因此容易表现出疏水性。而当煤中矿物质含量较高或含有较多极性官能团时，颗粒表面与水分子之间更容易形成吸附作用，从而表现出较好的亲水性。煤尘在破碎过程中形成的不规则微观结构也会影响水滴铺展状态，使不同煤层之间出现明显的润湿差异。

乌东煤矿煤尘接触角分布范围约为 31°~113°，多数煤层接触角大于 60°，说明矿井煤尘整体以疏水性

粉尘为主。表明单纯依靠清水喷雾往往难以获得理想的降尘效果。在实际生产中,可通过加入表面活性剂或采用高压细雾喷雾等方式降低水的表面张力,提高水滴在粉尘表面的铺展能力,从而增强水滴与粉尘颗粒之间的黏附作用。由于煤层组成和表面结构存在差异,不同煤层粉尘的润湿特性也有所不同,因此矿井粉尘治理措施应结合煤尘润湿性特点进行针对性优化,以提高降尘系统的整体效率。

5. 讨论

5.1. 倾角 - 煤层厚度 - 开采工艺耦合作用对煤尘理化特性的影响

乌东煤矿急倾斜厚煤层条件下煤尘表现出的高浓度、以 5~13 μm 为主的特定粒径分布以及较强疏水性,并非单一因素作用结果,而是地质赋存条件与作业工艺共同耦合的表现。首先,急倾斜煤层赋存条件改变了粉尘的运移与沉积行为。在大倾角条件下,采落煤岩沿层面滑移、滚落和碰撞更加频繁,煤体在重力分量作用下更易发生二次破碎与扬散,使工作面局部区域持续存在多次产尘和再悬浮现象;同时,倾斜空间内风流稳定性相对较差,局部涡流和回流现象易导致细颗粒粉尘在作业点附近及回风侧富集,从而形成较高粉尘浓度。其次,厚煤层特征决定了开采过程中截割范围大、煤体暴露面积广、放煤及转载环节多,粉尘释放具有持续时间长、强度大的特点。厚煤层开采中顶煤冒放、破碎和转载叠加作用明显,不仅增加了总产尘量,也使部分大颗粒在反复碰撞中进一步细化,最终形成以呼吸性粉尘为主的粒径组成特征。文中测试结果显示,多个测点平均粒径集中于 5~13 μm ,且回风侧和远离尘源区域呼吸性粉尘比例升高,这正反映出大颗粒优先沉降、细颗粒持续输运富集的耦合结果。

从工艺角度看,综放与综掘等不同开采工艺进一步强化了上述地质因素的影响。综放工作面中采煤机截割、移架扰动、顶煤放落及转载破碎等多个动态产尘源同时存在,使粉尘分布呈现非均匀、多峰值特征;掘进工作面则由于掘进机破岩强度大、作业空间相对封闭、通风稀释条件受限,更容易在迎头及其下风侧形成高浓度粉尘区。尤其是在急倾斜厚煤层条件下,机械截割所产生的初生粉尘、煤岩滑落引起的二次扬尘以及转载破碎产生的再生细尘相互叠加,导致粉尘浓度明显高于一般缓倾斜煤层工作面。测试中掘进机司机处总尘浓度达到 322.3 mg/m^3 ,显著高于综放面典型测点,也说明工艺扰动强度与复杂赋存条件叠加后,会进一步放大粉尘危害。

强疏水性的形成也可从“煤层性质 - 破碎方式 - 颗粒表面结构”耦合作用进行理解。一方面,不同煤层本身有机质组成和表面官能团差异决定了煤尘润湿性的基础特征,多数煤层接触角大于 60° ,表明其表面非极性有机结构占优;另一方面,在急倾斜厚煤层机械化开采过程中,煤体经截割、碰撞、摩擦和反复破碎后,颗粒表面会暴露更多粗糙微结构和裂隙孔隙,这些微观形貌会增强液滴在表面的收缩状态,降低水滴铺展能力,从而进一步强化煤尘的表观疏水性。也就是说,煤层原有的表面化学特征决定了“不易润湿”,而复杂开采工艺下形成的颗粒形貌又进一步放大了这种润湿障碍,最终使乌东煤矿煤尘呈现出“多数煤层接触角偏大、清水喷雾降尘效果受限”的综合特征。

5.2. 对比分析

近五年来,关于复杂条件下煤尘问题的研究已逐步由单纯浓度监测转向“生成 - 运移 - 物化表征 - 精准防控”一体化分析框架。煤尘危害程度不仅取决于产尘强度,还与煤体赋存条件、机械扰动方式、通风结构、颗粒粒径分布及表面润湿性等因素密切相关。特别是在复杂煤层、强机械化扰动和多产尘源共存条件下,煤尘更易表现出高浓度、细颗粒富集和润湿性差等特征,这与传统条件下煤尘污染的形成机制存在明显差异。近年来的综述进一步指出,未来煤尘研究应更加重视现场原位煤尘的真实物化特性,并基于颗粒性质差异开展差异化治理[12]。

从煤尘生成机理看,近年的研究认为,复杂条件下煤尘的产生已不再是单一截割过程的结果,而是

截割、压裂、滑移、碰撞、转载及再悬浮等多阶段耦合作用的体现。有关截割粉尘与多源呼吸性粉尘的研究显示,机械化采掘过程中高能破碎和后续扰动会显著提高细颗粒煤尘比例,并增强粉尘的持续释放能力[13]。从煤尘运移规律看,近五年的研究普遍认为,工作面粉尘空间分布受风流组织影响显著,尤其在掘进面和多设备耦合作业区域,风筒出口位置、送风方式、设备遮挡和局部回流会直接决定高浓度区的位置及呼吸性粉尘的富集程度。相关数值模拟和现场试验表明,掘进工作面风筒出口距迎头距离及高度变化,可明显改变迎头附近和司机呼吸带粉尘浓度;在多源尘源条件下,较粗颗粒易于近源沉降,而较细颗粒则更易随风流向向下风侧迁移并在回风侧富集[14]。本文结果与近年研究一致,复杂煤层条件下煤尘呈现多源耦合产尘、细颗粒富集和沿程迁移增强等特征,不同之处在于,乌东煤矿复杂煤层条件下这种粒径分选现象更为明显,说明急倾角、厚煤层及综放/综掘工艺的共同作用强化了细颗粒运移和局部富集。

从煤尘物化特性表征看,近年的一个重要进展是越来越多研究开始强调“现场原始煤尘”与“实验室粉碎煤样”之间存在明显差异。Li [15]直接采集井下原始煤尘样品,指出原始煤尘的粒径、孔隙结构、表面组成及其变化规律与实验室粉碎样并不完全一致,因此现场采集样品更能反映真实工作面煤尘的物化特征。与此同时,有研究对可吸入煤尘的粒度、形貌、孔隙及氧化潜势进行综合表征,发现不同粒径区间煤尘在表面结构和健康风险方面均存在明显差异。本文采用现场采样煤尘进行粒度和润湿性测试,结果显示煤尘以 5~13 μm 为主,具有较强现场代表性,这与近年强调原位煤尘表征的研究思路高度一致。与部分文献中实验室煤样粒径分布较宽、润湿性结论较理想的结果相比,本文结果更能体现实际生产条件下煤尘“细颗粒占优、分散性强、控制难度大”的真实特征。

从润湿性及防控适配性看,近五年的研究普遍认为,煤尘润湿性不仅受煤阶和表面官能团影响,还与颗粒粒径、孔隙结构、表面粗糙度和颗粒团聚状态密切相关。已有研究指出,原始煤尘表面孔隙特征对其润湿行为具有重要调控作用;随着煤尘粒径减小,比表面积增大、表面活性位点增多及微观粗糙结构暴露,都会增强其表现疏水性,使传统清水喷雾的润湿和捕集效率下降[16]。本文测试表明,乌东煤矿煤尘整体表现出较强疏水性,这一结果与近年关于原始煤尘表面孔隙特征及润湿性耦合关系的认识相一致。不同的是,本文对象处于急倾斜厚煤层和强扰动开采条件下,煤尘表面结构更可能经历反复破碎和摩擦改造,从而进一步放大其疏水表现。

5.3. 复杂条件下煤尘精准防治建议

结合本文测试结果及近五年相关研究进展,乌东煤矿复杂煤层粉尘防治不宜停留在“通风-喷雾-除尘”泛化叠加的传统思路,而应围绕“高浓度、多源耦合、5~13 μm 细颗粒占优和煤尘疏水性强”等关键特征,构建更具针对性的精准防治体系。近年的研究表明,单一措施往往难以同时解决尘源释放、颗粒迁移和界面润湿不足等问题,而以煤尘颗粒性质为导向的分区、分级、分介质治理更具应用前景。

在源头减尘方面,应优先针对采煤机截割、移架、破碎和转载等主要高能扰动环节进行工艺优化。对于综放工作面,应重点降低移架和顶煤放落过程中的二次扬尘,可通过优化移架节奏、改善支架间喷雾时序、加强破碎机入料点封闭抑尘等方式削弱多源叠加产尘;对于掘进工作面,应重点控制掘进机截割强度、刀具磨损状态和转载衔接过程,减少煤岩高能破碎和局部落料冲击引起的细颗粒再生。已有研究表明,工作面粉尘的形成与多源尘源协同释放密切相关,因此源头减尘的重点不只是降低总尘,更要抑制呼吸性细颗粒的持续生成。

在运移过程控制方面,应围绕高浓度区和人员呼吸带实施风流精细化调控。针对掘进工作面,应根据迎头空间和设备布置优化风筒出口距迎头距离与安装高度,尽量削弱迎头附近回流和司机位置涡流区,降低粉尘在呼吸带的滞留;对综放工作面,则应重点关注采煤机司机位、移架区、破碎机和回风巷等高

风险位置,在关键点位叠加局部雾幕、导流风帘或近源抽尘措施,形成“近源拦截-沿程削减-回风末端控制”的分段控制模式。已有研究已证明,合理优化送风结构和局部抽排耦合参数,可显著降低下风侧呼吸性粉尘浓度,因此对复杂煤层矿井而言,基于空间浓度分布特征的区域化控尘比平均化控尘更为有效。

对本文煤尘强疏水性的特点,湿式抑尘介质宜逐步从传统清水喷雾,向润湿增强型、复合功能型抑尘介质优化升级。近五年的研究表明,表面活性剂增强喷雾、SiO₂纳米流体、水基复合抑尘剂、天然聚合物/电解质体系及泡沫抑尘等技术,在改善煤尘界面润湿性、促进细颗粒凝并和提高持液保湿能力方面均显示出较好效果。对于乌东煤矿这类细颗粒比例高、疏水性强的复杂煤层工作面,建议优先考虑低表面张力表面活性剂复配体系,必要时联合纳米颗粒或高分子保湿组分,以兼顾润湿、凝并和抑制二次扬尘;在破碎机、转载点和高扰动卸载区,可探索泡沫或凝胶泡沫喷覆方式,以提高对持续产尘区域的包覆和滞尘能力。

6. 结论

本文以乌东煤矿急倾斜厚煤层开采条件为研究对象,通过现场采样与实验分析相结合的方法,对综放工作面、掘进工作面及喷浆作业区粉尘的浓度、粒径分布及润湿性等理化特性进行了研究,获得以下主要结论:

1) 掘进工作面粉尘污染程度高于综放工作面,其中掘进机司机处粉尘浓度最高,总尘浓度达 322.3 mg/m³,呼吸性粉尘浓度为 133.2 mg/m³;综放工作面采煤机司机处和移架产尘点浓度较高,总尘浓度分别为 218.8 mg/m³和 152.4 mg/m³。随着距离产尘源增加,粉尘浓度逐渐降低,但呼吸性粉尘比例变化较小。

2) 矿井粉尘平均粒径主要集中在 5~13 μm 范围,属于典型呼吸性粉尘粒径。随着粉尘在巷道中的扩散,大颗粒粉尘逐渐沉降,而细颗粒粉尘随风流输运,使远离产尘源区域的呼吸性粉尘比例升高。

3) 多数煤层粉尘接触角大于 60°,呈疏水性特征,不利于喷雾降尘。因此应通过优化喷雾参数或添加表面活性剂等措施提高降尘效率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李德文,郭胜均.中国煤矿粉尘防治的现状与发展方向[J].金属矿山,2009,38(S1): 747-752.
- [3] 程学珍,刘玫,王永宝,等.煤矿粉尘检测与控制技术[J].矿业研究与开发,2007(6): 78-79+85.
- [4] Abbasi, B., Wang, X., Chow, J.C., Watson, J.G., Peik, B., Nasiri, V., *et al.* (2021) Review of Respirable Coal Mine Dust Characterization for Mass Concentration, Size Distribution and Chemical Composition. *Minerals*, **11**, Article No. 426. <https://doi.org/10.3390/min11040426>
- [5] Pan, L., Golden, S., Assemi, S., Sime, M.F., Wang, X., Gao, Y., *et al.* (2021) Characterization of Particle Size and Composition of Respirable Coal Mine Dust. *Minerals*, **11**, Article No. 276. <https://doi.org/10.3390/min11030276>
- [6] 刘艾.矿井粉尘分布规律及防治措施[J].煤矿安全,2003(7): 45-47.
- [7] 杨静,谭允祯,王振华,等.煤尘表面特性及润湿机理的研究[J].煤炭学报,2007(7): 737-740.
- [8] 李刚,周哲,胡锦涛.基于知识图谱的我国矿井粉尘防治技术研究进展与展望[J].金属矿山,2023(7): 28-39.
- [9] 陈建忠,王稳飞,张军伟.平煤八矿综掘面粉尘理化特性分析及其防治方法[J].山东煤炭科技,2023,41(12): 81-84+89.
- [10] 蒋仲安,金龙哲,袁绪忠,等.掘进巷道中粉尘分布规律的实验研究[J].煤炭科学技术,2001(3): 43-45.
- [11] 秦桐,蒋曙光,张卫清.煤的润湿性研究进展[J].煤矿安全,2017,48(9): 163-166.

-
- [12] Han, F., Liu, M., Hu, F., Niu, G., Xue, D., Zhao, Y., *et al.* (2025) A Review of Water-Based Suppressants for Coal Dust Suppression. *International Journal of Coal Science & Technology*, **12**, Article No. 47. <https://doi.org/10.1007/s40789-025-00784-3>
- [13] Qiao, M., Roberts, J., Ren, T., Hines, J. and Wu, J. (2024) Dispersion and Migration Characteristics of Multisource Respirable Dust in Development Panels during Tunnelling Processes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **148**, Article ID: 105778. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105778>
- [14] Li, Y.F., *et al.* (2024) Dust Concentration Distribution and Analysis of Influencing Factors in the Heading Face of Shangwan Coal Mine. *Frontiers in Earth Science*, **12**, Article ID: 1512101. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1512101>
- [15] Shangguan, Y.F., *et al.* (2024) Physicochemical Characteristics and Oxidative Potential of Size-Segregated Respirable Coal Mine Dust: Implications for Potentially Hazardous Agents and Health Risk Assessment. *International Journal of Coal Geology*, **282**, Article ID: 104433. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104433>
- [16] Liu, J.G., *et al.* (2022) Surface Pore Characteristics of Original Coal Dust Produced in Underground Mining Sites and Their Impact on the Moisture Content. *Process Safety and Environmental Protection*, **167**, 284-298. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.025>