

# 呼吸性煤尘表面异质核化凝结效果预测及降尘试验

林汉毅<sup>1,2,3</sup>, 袁亮<sup>1,2,3</sup>, 江丙友<sup>1,2,3</sup>, 章玉前<sup>1,2,3</sup>, 王一凡<sup>1,2,3</sup>, 王浩宇<sup>1,2,3</sup>

(1. 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; 2. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽淮南 232001;  
3. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽淮南 232001)

**摘要:** 煤尘颗粒表面润湿性是制约湿式除尘效率的重要因素, 煤尘颗粒表面异质核化凝结是一种无任何污染、无需考虑颗粒表面润湿性, 且能有效提升煤尘颗粒被液滴捕捉效率的方法, 而人为干涉温湿度环境变化是激发煤尘颗粒表面核化凝结效应的必要条件。为获得不同干涉条件对矿井呼吸性煤尘颗粒核化凝结效果的影响, 基于颗粒核化凝结试验系统, 围绕煤尘初始温度、干涉气体相对湿度、干涉气体凝结温差 3 个因素开展单因素分析和多因素正交试验。结合使用均方差赋权法、非线性回归分析法、预测效果评价指标, 确定各影响因素在煤尘颗粒核化凝结效果中的权重占比, 构建颗粒核化凝结多元非线性回归预测模型, 且评价模型预测的准确性。搭建颗粒核化凝结与喷雾协同降尘试验系统, 对比分析二者协同与单一降尘方式对呼吸性煤尘的治理效果。结果表明: 干涉气体相对湿度对核化凝结效果影响最大, 二者呈正相关性, 且当干涉气体相对湿度大于 70% 时才能激发明显的核化凝结效应; 干涉气体凝结温差对核化凝结效果的影响仅次于干涉气体相对湿度, 凝结效果会随着温差的增大呈先下降后上升趋势; 煤尘初始温度对权重的影响最小, 且对于煤尘颗粒粒径  $\leq 1 \mu\text{m}$  和  $> 2 \mu\text{m}$  的颗粒群分别呈现正向和反向激励; 基于多种方法结合构建的多元非线性回归模型的预测准确性较优, 误差小, 可用于量化表征一定范围内温湿度干涉条件下的矿井呼吸性煤尘颗粒核化凝结效果; 利用颗粒核化凝结与喷雾协同降尘可以有效解决煤尘表面润湿性差的问题, 相较于纯水喷雾的降尘效率提升了 131.84%。

**关键词:** 煤尘; 异质核化凝结; 正交试验; 回归分析; 降尘效率

**中图分类号:** TD714    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1609-13

## Prediction of heterogeneous nucleation condensation effect on the surface of respiratory coal dust and test of dust reduction test

LIN Hanyi<sup>1,2,3</sup>, YUAN Liang<sup>1,2,3</sup>, JIANG Bingyou<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yuqian<sup>1,2,3</sup>, WANG Yifan<sup>1,2,3</sup>, WANG Haoyu<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Industrial Dust Prevention and Control & Occupational Safety and Health, Ministry of Education, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China;

3. National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Surface wettability of coal dust particles is an important factor restricting the efficiency of wet dust removal. Heterogeneous nucleation condensation on the surface of coal dust particles is a means without any pollution, without con-

收稿日期: 2024-09-18    策划编辑: 王晓珍    责任编辑: 王晓珍    DOI: 10.13225/j.cnki.jcgs.2024.1119

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2503201, 2022YFC2503202); 国家自然科学基金资助项目(52074012)

作者简介: 林汉毅(1998—), 男, 海南万宁人, 博士研究生。E-mail: hlinhanyi@163.com

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

引用格式: 林汉毅, 袁亮, 江丙友, 等. 呼吸性煤尘表面异质核化凝结效果预测及降尘试验[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1609-1621.

LIN Hanyi, YUAN Liang, JIANG Bingyou, et al. Prediction of heterogeneous nucleation condensation effect on the surface of respiratory coal dust and test of dust reduction test[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1609-1621.



移动阅读

sidering the surface wettability of particles, and can effectively improve the efficiency of coal dust particles being captured by droplets. Human interference with the change of temperature and humidity environment is a necessary condition to stimulate the surface nucleation condensation effect of coal dust particles. In order to obtain a quantitative prediction mathematical model for the influence of temperature and humidity conditions on the condensation effect of mine respiratory coal dust particles, based on the visualization experiment platform of particle condensation, single factor and multi-factor orthogonal experiments were carried out around three factors: initial temperature of coal dust particles, relative humidity of hot and humid gas, and temperature difference of condensation temperature. Combined with mean square error weighting method, nonlinear regression analysis method and prediction effect evaluation index, the weight proportion of each influencing factor in the condensation effect of coal dust particles was determined. Based on this, a multivariate nonlinear regression prediction model for particle condensation was constructed, and the accuracy of the model prediction was evaluated. Based on the experimental system of particle nucleation condensation and spray synergistic dust suppression, the control effects of the two synergistic and single dust suppression methods on respirable coal dust were compared and analyzed. The results show that the relative humidity of hot and humid gas has the greatest influence on the nucleation condensation effect, and the two are positively correlated, and the obvious nucleation condensation effect can be activated only when the relative humidity is greater than 70%. The influence of temperature difference on condensation effect was second only to gas relative humidity, and the condensation effect decreased first and then increased with the increase of temperature difference. The influence weight of the initial temperature of coal dust particles is the least, and the particle groups with particle size  $\leq 1 \mu\text{m}$  and  $> 2 \mu\text{m}$  are stimulated positively and reversely, respectively. The multivariate nonlinear regression model based on the combination of various methods has better prediction accuracy and small error, and can be used to quantify the condensation effect of coal dust particles nucleation under the condition of temperature and humidity interference in a certain range. The problem of poor surface wettability of coal dust can be effectively solved by using particle nucleation condensation and spray, and the dust removal efficiency is increased by 131.84% compared with pure water spray.

**Key words:** coal dust; heterogeneous nucleation; orthogonal experiment; regression analysis; dust reduction efficiency

## 0 引言

随着煤炭工业机械化水平的发展,煤炭的开采效率日渐提升。然而,高效机械化的生产作业导致了开采区域的粉尘质量浓度升高和能见度降低等问题,且可燃性粉尘的爆炸危险性大,存在严重的安全隐患<sup>[1]</sup>。此外,煤矿工人长期处于高质量浓度粉尘的作业环境中,极易因吸入大量呼吸性粉尘导致尘肺病<sup>[2]</sup>,既不利于煤矿开采的可持续发展,也不利于绿色矿山的建设<sup>[3]</sup>。当前,在煤炭开采现场常用的防尘和治尘措施有煤层注水<sup>[4]</sup>、喷雾降尘<sup>[5]</sup>和通风除尘<sup>[6]</sup>等,此外,还有使用了尘源智能监测技术的跟踪喷雾降尘<sup>[7]</sup>,以及针对煤尘亲水性差的抑尘剂增润喷雾降尘<sup>[8]</sup>等。为此,研究人员探究了煤的矿物质组成<sup>[9-10]</sup>、煤颗粒表面的微观结构特征<sup>[11]</sup>、煤颗粒的微观孔隙特征<sup>[12]</sup>等自身因素对煤尘被润湿性能的影响,并且有针对性地研发了多种增润抑尘材料。从整体来看,抑尘剂因粉尘类型多样、现场作业环节和应用环境复杂等影响,抑尘效果差异较大、普适性差,且多数抑尘剂只能提高煤尘表面被润湿能力,无法改变微细煤尘的粒径分布。有

研究表明,喷雾降尘对于  $\text{PM}_{2.5}$  的降尘效率较差<sup>[13]</sup>,而对粒径大于  $\text{PM}_{2.5}$  的颗粒其沉降效率超 90%。由此可知,提升空间漂浮性粉尘的颗粒粒径和表面被润湿性能是提高降尘效率的关键。

喷雾降尘是矿井主要的降尘手段,其工作原理是通过液滴捕捉裹携粉尘从而实现粉尘的除降<sup>[14]</sup>。然而,粉尘颗粒表面凹凸不平导致其润湿性差,难以被液滴捕捉,从而影响喷雾降尘效率<sup>[15-16]</sup>。异质核化凝结(简称“核化凝结”)是指气体中的水分子在一定条件下凝聚在其他物质颗粒表面,以该物质颗粒为凝结核并逐渐发展为更大液滴颗粒的过程<sup>[17]</sup>。人为制造条件干涉颗粒表面核化凝结已被国内外证实是提高微细颗粒去除率的一种简单有效的手段<sup>[18-20]</sup>,通过向目标区域增湿形成过饱和蒸汽环境,使水汽在微细颗粒表面发生非均相凝结形成含尘液滴,使微细颗粒更容易被喷雾捕捉且无需考虑颗粒表面被润湿性能。在机理研究方面,凡凤仙等<sup>[21]</sup>基于颗粒凝结增长理论,预测了蒸汽凝结过程中  $\text{PM}_{2.5}$  的粒径分布变化特征。徐俊超等<sup>[22]</sup>建立燃煤颗粒凝结动力学模型,并利用数值模拟法探究了不同运行参数下颗粒表面的液滴生

长情况。在工业应用方面,LI等<sup>[23]</sup>在天然气锅炉尾气排放处安装了基于非均相冷凝技术的膜形冷凝器,结果表明该冷凝器能有效捕获锅炉尾气的微细颗粒。CHEN等<sup>[24]</sup>在治理燃煤电厂排放颗粒物(Particulate matter, PM)研究中加入二次冷凝洗涤器,有效降低了可冷凝颗粒物(Condensable particulate matter, CPM)的含量。PEI等<sup>[25]</sup>通过碱喷雾和湍流团聚技术协同增大气溶胶污染物的颗粒尺寸,使得颗粒物更容易被冷凝器清除。

上述研究,验证了核化凝结在微细颗粒物治理方面的有效性,揭示了微细颗粒物在核化凝结过程中的演化机理。然而,该技术在煤矿生产性粉尘治理领域鲜有应用,缺乏针对实际生产环境温湿度条件下煤尘颗粒与不同温湿度蒸汽的核化凝结效果研究。鉴于此,结合正交试验数据与回归分析方法,探究煤尘初始温度 $T_{S0}$ 、干涉气体凝结温差 $\Delta T$ 和干涉气体相对湿度(Relative Humidity of interfering gases,  $RH_{ig}$ )对煤尘颗粒表面核化凝结效果的影响;使用均方差赋权分析各因素权重,建立液滴—颗粒粒径比多元非线性回归预测数学模型;搭建颗粒核化凝结与喷雾协同降尘试验系统,对比分析二者协同与不同单一方式的降尘效果,并分析协同降尘技术的工程应用可行性,为核化凝结在煤矿呼吸性粉尘现场治理方面的研究提供理论和试验数据支撑。

## 1 颗粒核化凝结过程观测试验

### 1.1 试验系统

基于安徽理工大学颗粒分散度光学测试试验平台改造搭建颗粒核化凝结试验系统,如图1所示。试验系统主要由光学显微观测平台、温湿度传感器、温湿度可调气体发生器、恒温恒湿储气箱、信息控制及数据分析系统、干涉气体出口管路、样品载物台、恒

温恒湿环境箱和数据采集器等组成。光学显微观测平台由光学显微装置和高精度相机组成,可实现载物平台颗粒群粒度分布的实时监测。恒温恒湿环境箱可以为试验空间提供温度区间为10~50℃、相对湿度区间为50%~90%的相对稳定环境,以满足煤矿作业现场的实际温湿度要求。恒温恒湿储气箱和干涉气体出口管路能瞬间且持续性改变载物台局部区域空气的温湿度,使蒸汽在颗粒表面凝结。信息控制及数据分析系统给执行部件发送工况指令,同时接受温湿度及光学监测信息的反馈。样品载物台选用表面疏水性硅化盖玻片,经试验验证该类盖玻片可有效避免凝结过程中因其自身的凝结效应影响试验结果。

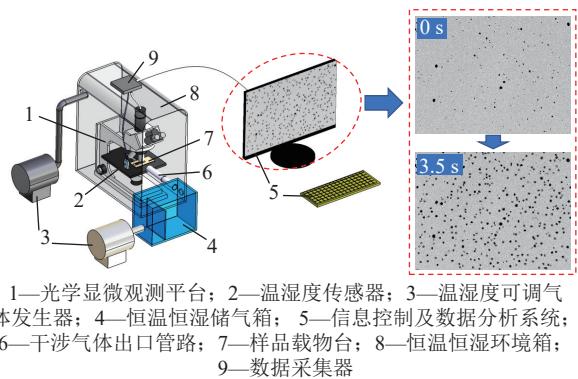


图1 颗粒核化凝结试验系统

Fig.1 Experimental system for nucleation of particles

### 1.2 煤样制备

选用陕北某合作煤矿的烟煤作为核化凝结试验对象,以便后期开展湿式凝结降尘技术的现场试验。对煤样进行处理,步骤如图2所示。

1) 用破碎机将大块煤样分解为小块煤样,然后使用球磨机破碎煤体。

2) 将粉碎后的煤粉放入温度为50℃的烘干箱,干燥24 h以去除煤粉的外在水分。



图2 煤粉制备流程

Fig.2 Process of preparing pulverized coal

3) 使用自动振筛机筛分煤粉,选用孔径为 10 和 2.5  $\mu\text{m}$  的标准筛网。

4) 将筛分后的煤粉放入混匀装置并进行搅拌,尽可能保证不同粒度的煤粉混合均匀。

5) 使用马尔文激光衍射粒度分析仪测试筛分混匀后煤粉的粒度分布情况,若粉尘粒度分布  $D_{90} > 2.5 \mu\text{m}$ ,将重新使用球磨机配合小尺寸钢球对煤粉进行精细研磨。

重复上述步骤,最终制得 600 g 煤样,且使用马尔文激光衍射粒度分析仪测得其粒径分布指数  $D_{50}=1.02 \mu\text{m}$ ,  $D_{90}=2.09 \mu\text{m}$ 。

### 1.3 试验方案

试验考虑煤尘初始温度  $T_{S0}$ 、干涉气体凝结温差  $\Delta T$ 、干涉气体相对湿度  $RH_{ig}$  对煤尘颗粒凝结效果的影响。此处引入相对零点温度  $T_0$ ,  $T_0$  指煤尘初始温度  $T_{S0}$  对应的干涉气体在煤尘颗粒表面的凝结温度阈值。其中,干涉气体凝结温差  $\Delta T$  是干涉气体温度  $T_g$  与相对  $T_0$  之差(如  $T_{S0}$  为 22 °C、 $\Delta T$  为 2 °C、 $RH_{ig}$  为 80% 时,对应的  $T_0$  为 25.71 °C,则干涉气体温度为 27.71 °C)。

根据《煤矿安全规程》<sup>[26]</sup>第六百五十五条规定,采掘工作面空气温度不得超过 30 °C,长期工作区域不得超过 26 °C,对环境相对湿度没有具体要求。因此,按照 3 因素、5 水平的  $L_{25}(5^3)$  正交试验设计方法确定试验方案,详见表 1。

表 1 正交试验水平和因素

Table 1 Orthogonal Test Levels and Factors

水平组数	影响因素		
	$T_{S0}/\text{°C}$	$RH_{ig}/\%$	$\Delta T/\text{°C}$
1	18	65	2
2	20	70	4
3	22	75	6
4	24	80	8
5	26	85	10

其中,  $T_{S0}$  在 18~26 °C 区间按 2 °C 为递增梯度选取,  $\Delta T$  在 2~10 °C 区间按 2 °C 为递增梯度选取,  $RH_{ig}$  在 65%~85% 区间按 5% 为递增梯度选取。此外,为了与多因素正交结果相互佐证,对  $RH_{ig}$  和  $\Delta T$  分别开展单因素试验,取值范围与正交试验相同。上述试验均严格按照既定试验步骤进行:

1) 确定试验工况,此处选择的示例工况为  $T_{S0}=22 \text{ °C}$ ,  $\Delta T=2 \text{ °C}$ ,  $RH_{ig}=65 \text{ %}$ 。

2) 将煤尘颗粒样品(所用样品均经过 40 °C 干燥

箱预处理 12 h) 均匀地撒在样品载物台上,通过光学显微观测平台选取粒径分布范围满足  $\text{PM}_{10}$  的颗粒观测视野。

3) 调节恒温恒湿环境箱温度为 18 °C, 相对湿度 60%(其他工况与之一致), 保持 30 min, 以确保环境内所有设备温度(含样品)稳定。

4) 调节恒温恒湿储气箱内干涉气体温度至 27 °C, 干涉气体相对湿度 65%(步骤 1 所述工况对应的相对零点温度约为 25 °C)。

5) 待恒温恒湿储气箱内的干涉气体温湿度稳定后,开启干涉气体出口管路开关,向样品载物台吹送干涉空气,同时开启实时录像功能记录液滴的成长过程,该过程持续 20 s。

6) 关闭干涉气体出口管路开关,关闭录像,提取试验结果。

7) 图像分析及数据处理步骤如图 3 所示。

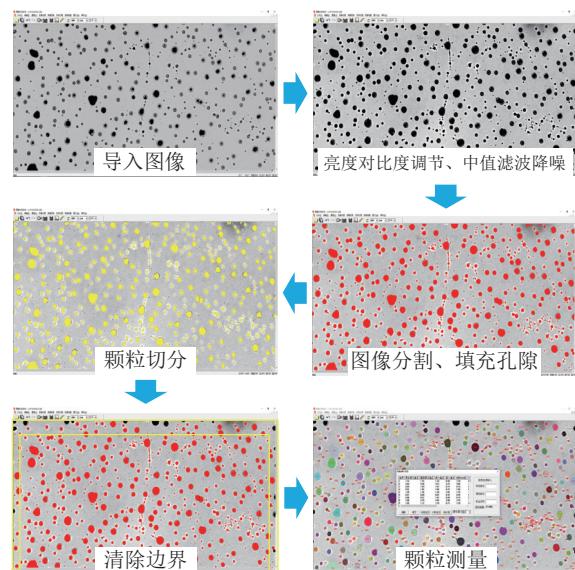


图 3 颗粒群图像处理流程

Fig.3 Process of particle group image processing

在完成过程图像处理之后,软件会计算出颗粒的粒径尺寸信息。为进一步了解颗粒核化凝结的效果,设置 3 种评价指标:颗粒整体粒径  $d_t$ 、液滴等效粒径  $d_e$ 、液滴—颗粒粒径比  $d_e/d_0$ , 其中  $d_0$  为颗粒初始粒径。颗粒整体粒径  $d_t$  在图像处理结束后即可得到,  $d_t$  指观测到的颗粒粒径尺寸; 颗粒初始粒径  $d_0$  即为颗粒成长初始记录图像中的颗粒整体粒径  $d_t$  的计算结果; 液滴等效粒径  $d_e$  则由式(1)和式(2)求得:

$$S_e = S_t - S_0 \quad (1)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{4S_e}{\pi}} \quad (2)$$

式中:  $S_e$  为液滴覆盖投影面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $S_t$  为颗粒整体投影面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $S_0$  为颗粒初始投影面积,  $\mu\text{m}^2$ ;  $d_e$  为液滴等效粒径,  $\mu\text{m}$ 。

为提高试验结果的有效性,每种工况重复3次。试验结束后,按照0.5 s为一个时间节点取值分析,为了更加直观地表征液滴在煤尘颗粒表面的成长效果,选取面积等效直径  $D_s$  作为评价指标。第3节试验结果分析出现的粒径均为面积等效直径,其中  $D_{50}$  和  $D_{90}$  分别为每个时间节点的颗粒面积等效直径分布值。

## 2 试验结果分析

### 2.1 干涉气体凝结温差

为分析干涉气体凝结温差对煤尘颗粒凝结效果的影响,设置煤尘初始温度为22 °C,干涉气体相对湿

度为80%,干涉气体凝结温差按2 °C为递增梯度选取2~10 °C中的共5个梯度值,试验结果如图4所示,其中图4a—图4c为  $D_{50}$ ,图4d—图4f为  $D_{90}$ 。

从试验结果可以看出,5种工况下的液滴凝结生长趋势均为先快速增长后逐渐趋于平稳。为了更好理解试验结果的趋势变化,引入了LEE等<sup>[27]</sup>提出的液滴凝结成长机制(如图5所示),该机制认为液滴在颗粒表面的凝结分为表面水分子直接扩散和表面吸附水间接扩散。已有研究发现,在液滴凝结开始发生阶段,颗粒表面水分子的间接扩散作用比直接扩散作用高出百倍有余<sup>[28]</sup>。因此,在液滴凝结开始阶段,液滴的生长速率骤增至峰值,当表面吸附水消耗殆尽时,仅依靠直接扩散作用促使液滴凝结,将导致液滴的生长速度趋于平缓。

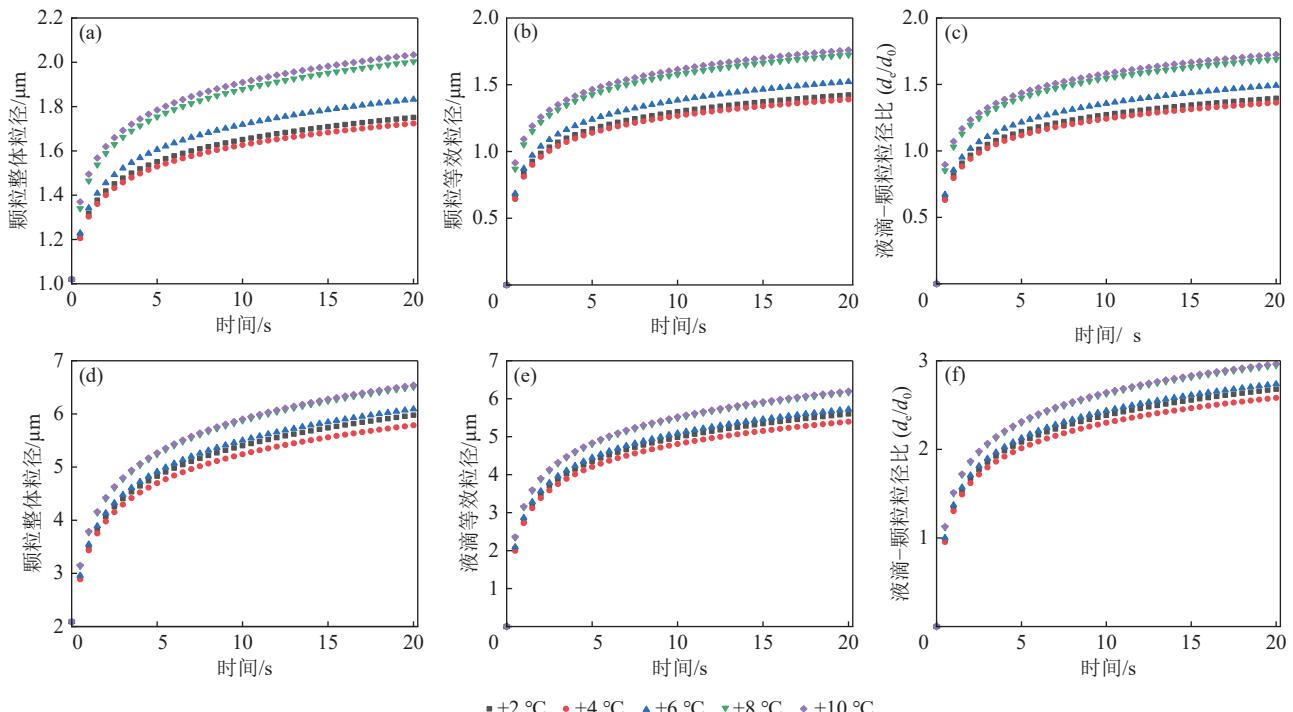


图4 干涉气体凝结温差对煤尘颗粒表面凝结作用的影响

Fig.4 Effect of temperature difference on surface condensation of coal dust particles

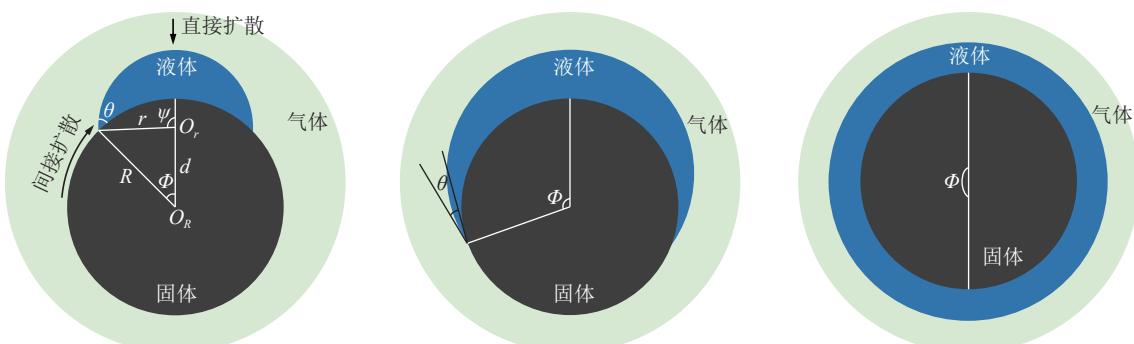


图5 颗粒表面核化凝结成长过程

Fig.5 Nucleation condensation growth process on particle surface

对比5种工况的液滴凝结结果可以得出,当仅改变干涉气体凝结温差时(此处仅针对干涉气体凝结温差区间为2~10℃的结果),无论 $D_{50}$ 还是 $D_{90}$ 的结果均显示干涉气体凝结温差对煤尘颗粒凝结效果的影响呈先下降后上升趋势,整体效果由好到差排名为10℃>8℃>6℃>2℃>4℃。为了更好地解释该现象,参考对比凡凤仙等<sup>[17]</sup>对PM<sub>2.5</sub>的液滴凝结理论预测结果,显示在蒸汽饱和度不变的情况下,气体温度与颗粒凝结后的粒径呈正相关,但由于其选择的气温分别为40、60和80℃,该结论不完全适用于低温差梯度的粒径变化关系。对此,引入KULMALA等<sup>[29]</sup>推导的颗粒表面液滴凝结动力学模型进行辅助解释,该模型中液滴凝结速率为:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{S - S_a}{\rho_d r \left\{ \frac{R_g T_g}{\beta_m M_v D_v p_s [1 + (S + S_a) p_s / (2p)]} + \frac{S_a L^2 M_v}{\beta_t R_g K_g T_g^2} \right\}} \quad (3)$$

式中: $r$ 为颗粒半径, m;  $t$ 为凝结时间, s;  $S$ 为蒸汽饱和度;  $S_a$ 为颗粒表面平衡蒸汽饱和度;  $\rho_d$ 为凝结液体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $R_g$ 为气体常数, J/(mol·K);  $T_g$ 为气体温度, K;  $M_v$ 为蒸汽摩尔质量, kg/mol;  $D_v$ 为蒸气扩散系数, m<sup>2</sup>/s;  $p_s$ 为饱和蒸气压, Pa;  $p$ 为气体总压强, Pa;  $L$ 为凝结潜热, J/kg;  $K_g$ 为气体导热系数, W/(m·K);  $\beta_m$ 为质量流率修正因子;  $\beta_t$ 为热流率修正因子。

分析式(3),考虑到试验监测最小粒径 $\geq 0.1\mu\text{m}$ ,

可认为 $S_a=1$ ,当气体温度 $T_g$ 上升时,蒸汽饱和度 $S$ 直接影响液滴的凝结速率。结合试验结果可知:在初始环境温度为22℃且干涉气体相对湿度为80%的情况下,不同干涉气体凝结温差(2、4、6、8、10℃)对应的蒸汽饱和度分别为1.125、1.263、1.416、1.585、1.770,饱和度差值分别为0.138、0.153、0.169、0.185。可以看出,干涉气体凝结温差为等差变化,而对应的蒸汽饱和度差值呈变差值加速上升趋势。由此可知,改变干涉气体凝结温差试验中,在温差范围2~6℃内存在一个凝结效果最差值,当温差值继续增大,颗粒表面的液滴凝结效果会逐渐提升。

## 2.2 干涉气体相对湿度

当煤尘初始温度 $T_{S0}$ 和干涉气体凝结温差 $\Delta T$ 不变时,改变干涉气体相对湿度 $RH_{ig}$ 会直接改变相对零点温度 $T_0$ 。为了得到干涉气体相对湿度对蒸汽在煤尘颗粒表面凝结效果的影响特征,试验设置 $T_{S0}$ 为22℃,  $\Delta T$ 为6℃,  $RH_{ig}$ 按5%的递增梯度在区间65%~85%中选取5个梯度值。不同 $RH_{ig}$ 的凝结结果如图6所示,其中图6a—图6c为 $D_{50}$ ,图6d—图6f为 $D_{90}$ 。

经计算, $RH_{ig}$ 为65%、70%、75%、80%、85%对应的相对零点温度分别为29.26、27.98、26.80、25.71、24.69℃,对应的干涉气体温度分别为35.26、33.98、32.80、31.71、30.69℃,对应的蒸汽饱和度分别为1.403、1.407、1.412、1.416、1.420,即干涉气体在局部

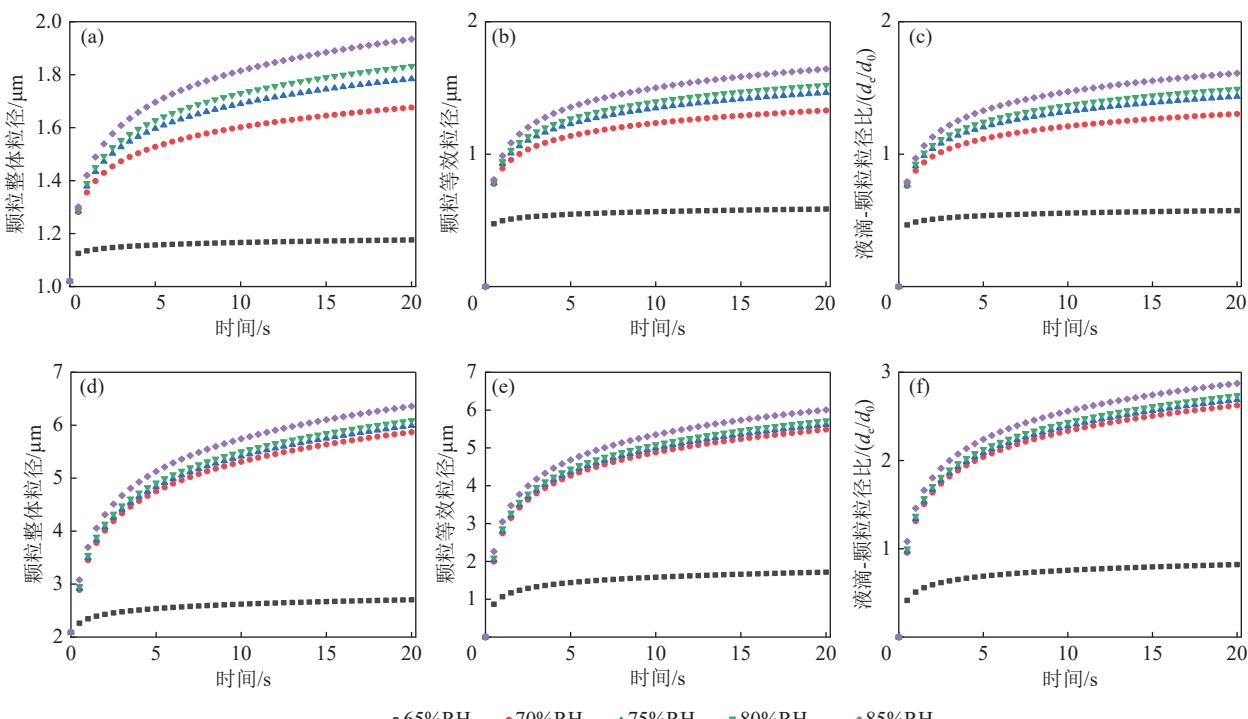


图6 干涉气体相对湿度对煤尘颗粒表面核化凝结效果的影响

Fig.6 Effect of gas relative humidity on condensation effect of coal dust particles

区域形成的环境相对湿度分别为 140.3%、140.7%、141.2%、141.6%、142.0%。可以发现,随干涉气体相对湿度的增加,蒸汽饱和度(或局部环境相对湿度)呈近似等差数列略有提升,但差别极小。然而,颗粒表面蒸汽凝结效果随干涉气体相对湿度的增加提升明显。此处引入于松宁等<sup>[30]</sup>在对流传热传质条件下针对液滴蒸发过程的研究结果:当空气中的水汽含量一定时,若湿热空气与液滴之间温差增大,饱和水蒸气分压差随之增大,水分子转移速度加快,直接导致液滴蒸发速率提升。试验结果显示的凝结效果排名 65% < 70% < 75% < 80% < 85% 也和上述结论相符,且在干涉气体相对湿度为 65% 时差距最为明显。该情况可能表示煤尘颗粒表面凝结和液滴生长存在激活条件,否则凝结效果较差,不利于后续阶段对煤尘颗粒的处理。

### 2.3 正交试验及多元非线性回归预测

#### 2.3.1 正交试验结果

根据上文的单因素试验结果可知:干涉气体凝结温差和干涉气体相对湿度均为蒸汽在煤尘颗粒表面凝结的直接影响因素,上述结果定性验证了这 2 种因素的影响效果。为进一步分析温湿度条件对颗粒表面凝结作用的影响,结合正交试验与多元非线性回归预测方法定量分析,具体试验结果见表 2。考虑在实际作业过程中,颗粒初始温度由矿井实际环境温度决定,且直接影响相对零点温度和颗粒表面附近空气的饱和蒸气压,因此将其作为正交试验的影响因素之一。

#### 2.3.2 多因素权重确定

在多指标影响的模型中,指标权重的确定至为关键。对于自然科学研究而言,客观赋权法能尽量避免人为因素对各指标赋权的影响。均方差法<sup>[31]</sup>因其概念清楚、计算简便,且依据数据自身离散度赋权,客观性较强,因此适用于上述正交试验结果分析,具体步骤如下<sup>[32]</sup>:

1) 根据表 2 数据分别计算  $D_{50}$  和  $D_{90}$  各影响因素的综合平均值  $Z_{ij}$ ,详见表 3。

2) 计算各影响因素的均值  $E(X_j)$ ,进而求各影响因素的标准差  $V(X_j)$ :

$$E(X_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{ij} \quad (4)$$

$$V(X_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{ij} - E(X_j))^2}{n}} \quad (5)$$

表 2  $L_{25}(5^3)$  正交试验结果

Table 2 Results of  $L_{25}(5^3)$  orthogonal experiment

编号	影响因素			第20s试验结果	
	$T_{S0}/^{\circ}\text{C}$	$RH_{ig}/\%$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$(d_e/d_0), D_{50}$	$(d_e/d_0), D_{90}$
1	18	65	2	0.403	0.398
2	18	70	4	0.801	1.324
3	18	75	6	1.189	2.551
4	18	80	8	1.645	2.928
5	18	85	10	1.909	3.063
6	20	65	8	1.051	2.031
7	20	70	10	1.374	2.679
8	20	75	2	0.925	1.668
9	20	80	4	1.340	2.655
10	20	85	6	1.573	2.827
11	22	65	4	0.517	0.720
12	22	70	6	1.304	2.624
13	22	75	8	1.484	2.755
14	22	80	10	1.725	2.965
15	22	85	2	1.454	2.732
16	24	65	10	1.265	2.594
17	24	70	2	0.865	1.500
18	24	75	4	1.228	2.571
19	24	80	6	1.514	2.776
20	24	85	8	1.823	3.021
21	26	65	6	0.669	0.841
22	26	70	8	1.085	2.297
23	26	75	10	1.621	2.876
24	26	80	2	1.419	2.706
25	26	85	4	1.554	2.806

表 3 第 20s 液滴-颗粒粒径比综合平均值计算结果

Table 3 Results of comprehensive average at the 20th second

水平组数	$D_{50}$			$D_{90}$		
	$T_{S0}$	$RH_{ig}$	$\Delta T$	$T_{S0}$	$RH_{ig}$	$\Delta T$
1	1.189	0.781	1.013	2.053	1.317	1.801
2	1.253	1.086	1.088	2.372	2.085	2.015
3	1.297	1.289	1.250	2.359	2.484	2.324
4	1.340	1.529	1.418	2.492	2.806	2.606
5	1.270	1.663	1.579	2.305	2.890	2.835
极差 $R$	0.151	0.882	0.566	0.439	1.573	1.034

式中:  $n$  为试验次数;  $i$  为试验水平组数。

3) 根据步骤 2) 的计算结果,进一步计算各影响因

素的权重值  $W(X_j)$ , 详见表 4。对比分析表 3 的各影响因素极差  $R$  和表 4 的权重计算结果, 可以发现二者评价各因素对颗粒表面核化凝结的影响主次均为  $RH_{ig} > \Delta T > T_{S0}$ 。

$$W(X_j) = \frac{V(X_j)}{\sum_{i=1}^k V(X_i)} \quad (6)$$

式中:  $k$  为影响因素的数量。

表 4 各影响因素权重计算结果

Table 4 Analysis results of weight of influencing factors

影响因素	$T_{S0}$	$RH_{ig}$	$\Delta T$
$D_{50}$ 权重	0.087	0.550	0.363
$D_{90}$ 权重	0.132	0.524	0.344

### 2.3.3 多元非线性回归预测模型建立

非线性回归分析是在传统线性回归分析的基础上, 借助计算机迭代处理复杂非线性问题的常用方法, 有助于深入探索多变量与影响因素间的非线性关系。针对上述正交试验数据, 使用 SPSS 27 和 MATLAB 软件协同分析, 具体步骤如下:

1) 建立、优选各影响因素的一元回归预测模型。根据不同影响因素, 分别建立线性函数、对数函数、逆函数、二次函数、幂函数、S型函数和指数函数等 7 种一元回归预测模型, 分析模型的决定系数  $R^2$ 、统计检

验值  $F$  和显著性系数<sup>[33]</sup>等拟合结果, 优先考虑决定系数  $R^2$ ( $R^2$  越趋近于 1, 模型拟合度越高) 最优的模型。根据该方法, 分别确定  $D_{50}$  和  $D_{90}$  中 3 种不同影响因素的一元回归预测模型, 优选结果见表 5, 单因素拟合关系式汇总结果见表 6。

2) 结合各影响因素的权重计算结果, 建立多元非线性回归预测模型。上述正交试验有 3 种影响因素, 基于均方差法计算权重值, 考虑各影响因素单独作用和彼此间的相互作用, 并引入修正项<sup>[34]</sup>, 分别对  $D_{50}$  和  $D_{90}$  建立 1 个含 7 个待定系数的多元非线性回归预测模型, 即式(7)、式(8)。

$$y = 0.087a_1 \exp(0.603 - 9.234/x_1) + 0.550a_2(-6.914 + 17.526x_2 - 8.743x_2^2) + 0.363a_3(0.831 + 0.073x_3) + \sum_{i=1, j=1}^m a_m x_i x_j + a_7 \quad (7)$$

$$y = 0.132a_1 \exp(1.402 - 14.223/x_1) + 0.524a_2(-26.517 + 69.706x_2 - 41.314x_2^2) + 0.344a_3(1.518 + 0.133x_3) + \sum_{i=1, j=1}^m a_m x_i x_j + a_7 \quad (8)$$

式中:  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别代表  $T_{S0}$ 、 $RH_{ig}$ 、 $\Delta T$ 。

分别将式(7)、式(8)代入 SPSS 27 软件中, 使用非线性回归分析迭代计算各待定参数的估值, 待定参数估算结果分别见表 7、表 8。

表 5 一元回归预测模型优选结果

Table 5 Optimal result of unitary regression prediction model

粒径分布参数	影响因素	优选模型	模型统计摘要					模型参数		
			$R^2$	$F$	自由度1	自由度2	显著性	常数	系数1	系数2
$D_{50}$	$T_{S0}$	S型	0.021	0.500	1	23	0.486	0.603	-9.234	—
	$RH_{ig}$	二次	0.648	20.211	2	22	<0.001	-6.914	17.526	-8.743
	$\Delta T$	线性	0.280	8.949	1	23	0.007	0.831	0.073	—
$D_{90}$	$T_{S0}$	S型	0.029	0.676	1	23	0.420	1.402	-14.223	—
	$RH_{ig}$	二次	0.568	14.445	2	22	<0.001	-26.517	69.706	-41.314
	$\Delta T$	线性	0.244	7.434	1	23	0.012	1.518	0.133	—

表 6 单因素与  $D_{50}$ 、 $D_{90}$  拟合关系式汇总

Table 6 Summary of fitting relationship between single factor and  $D_{50}$ ,  $D_{90}$

粒径分布参数	影响因素	模型表达式	拟合关系式	$R^2$
$D_{50}$	$T_{S0}$	$y_1 = \exp(b_1 + b_2/x_1)$	$y_1 = \exp(0.603 - 9.234/x_1)$	0.021
	$RH_{ig}$	$y_2 = b_1 + b_2 x_2 + b_3 x_2^2$	$y_2 = -6.914 + 17.526x_2 - 8.743x_2^2$	0.648
	$\Delta T$	$y_3 = b_1 + b_2 x_3$	$y_3 = 0.831 + 0.073x_3$	0.280
$D_{90}$	$T_{S0}$	$y_1 = \exp(b_1 + b_2/x_1)$	$y_1 = \exp(1.402 - 14.223/x_1)$	0.029
	$RH_{ig}$	$y_2 = b_1 + b_2 x_2 + b_3 x_2^2$	$y_2 = -26.517 + 69.706x_2 - 41.314x_2^2$	0.568
	$\Delta T$	$y_3 = b_1 + b_2 x_3$	$y_3 = 1.518 + 0.133x_3$	0.244

**表 7  $D_{50}$  非线性回归预测模型参数估算值**  
**Table 7  $D_{50}$  Nonlinear regression prediction model parameter estimation values**

参数	估算	标准错误	95% 置信区间	
			下限	上限
$a_1$	7.870	23.756	-42.040	57.781
$a_2$	1.954	0.582	0.732	3.177
$a_3$	12.619	3.557	5.146	20.093
$a_4$	0.030	0.063	-0.102	0.162
$a_5$	-0.005	0.003	-0.010	0.000
$a_6$	-0.199	0.102	-0.414	0.017
$a_7$	-5.655	2.111	-10.091	-1.220

**表 8  $D_{90}$  非线性回归预测模型参数估算值**  
**Table 8  $D_{90}$  Nonlinear regression prediction model parameter estimation values**

参数	估算	标准错误	95% 置信区间	
			下限	上限
$a_1$	-9.782	11.934	-34.855	15.291
$a_2$	2.211	0.508	1.145	3.278
$a_3$	27.073	5.426	15.673	38.474
$a_4$	0.217	0.113	-0.021	0.455
$a_5$	-0.013	0.007	-0.026	0.001
$a_6$	-1.099	0.265	-1.656	-0.543
$a_7$	-16.186	3.712	-23.986	-8.387

将表 7 和表 8 的计算估值分别代入式(7)、式(8)后化简即得到对应的多元非线性回归预测模型,即式(9)、式(10),二者的决定系数  $R^2$  分别为 0.956 和 0.920,均有较好的拟合表现。

$$\begin{aligned} y = & 0.685 \exp(0.603 - 9.234/T_{S0}) + 18.84RH_{ig} - \\ & 9.399RH_{ig}^2 + 0.334\Delta T + 0.03T_{S0}RH_{ig} - \\ & 0.005T_{S0}\Delta T - 0.199RH_{ig}\Delta T - 9.281 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y = & -1.291 \exp(1.402 - 14.223/T_{S0}) + 80.789RH_{ig} - \\ & 47.883RH_{ig}^2 + 1.239\Delta T + 0.217T_{S0}RH_{ig} - \\ & 0.013T_{S0}\Delta T - 1.099RH_{ig}\Delta T - 32.782 \end{aligned} \quad (10)$$

3) 验证预测模型与试验数据的吻合程度。对比试验数据与多元非线性回归模型的预测数据,计算二者的相对误差,如图 7 所示。

由图 7 可知:预测值与试验数值趋势拟合程度较高。其中,  $D_{50}$  的最大相对误差为 22.5%,有 15 组数据的相对误差小于 5%;  $D_{90}$  的最大相对误差为 59.96%,仅有 1 组预测值较之试验值偏高,有 13 组数据的相对误差小于 5%,大部分数据的相对误差均小

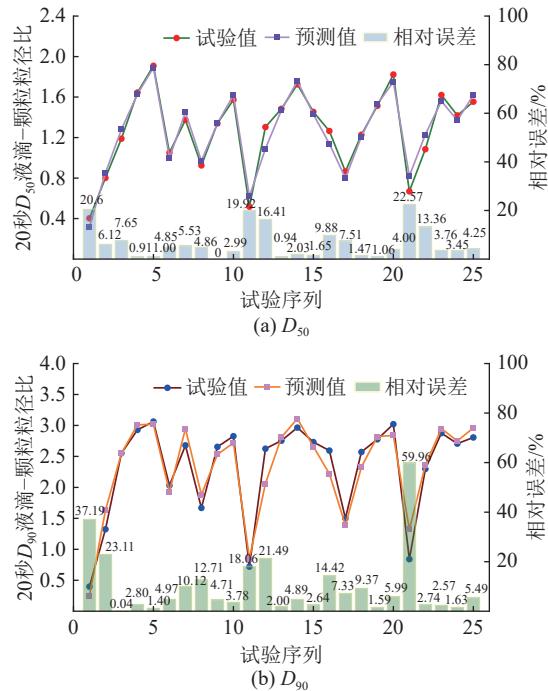


图 7 异质核化凝结第 20 s 试验结果与预测结果对比

Fig.7 Comparison between experimental and predicted values of heterogeneous nucleation condensation at the 20th second

于 10%。特别是模型在干涉气体相对湿度处于 75%~85% 范围内的预测结果误差极小。试验结果表明上述范围对激励煤尘颗粒表面核化凝结效果明显,是后续研究的推荐取值范围。因此,认为该模型有效,且预测结果精准。

为了更加具体化分析回归预测模型的准确程度,计算得到  $D_{50}$  的试验值与预测值的均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)3 种评价指标<sup>[35]</sup>分别为 0.0823、0.0654、6.6715%,  $D_{90}$  的 3 种评价指标分别为 0.2148、0.165、10.3197%。

综上可知,在正交试验所涉及的煤尘初始温度、干涉气体相对湿度、干涉气体凝结温差的取值范围内,使用均方差法确定权重的多元非线性回归预测模型能较好的预测颗粒表面核化凝结效果。由于上述 3 种影响因素在取值时几乎覆盖了煤矿现场实际作业环境的温湿度情况,因此,能有效地指导煤矿现场采用核化凝结机制净化受限空间中的呼吸性煤尘。

### 3 降尘效果试验

#### 3.1 试验系统及方案

颗粒核化凝结与喷雾协同降尘试验系统如图 8 所示,该系统基于安徽理工大学喷雾降尘试验平台搭建,该平台基于陕北某合作煤矿的掘进工作面尺寸按 1:2 比例打造。

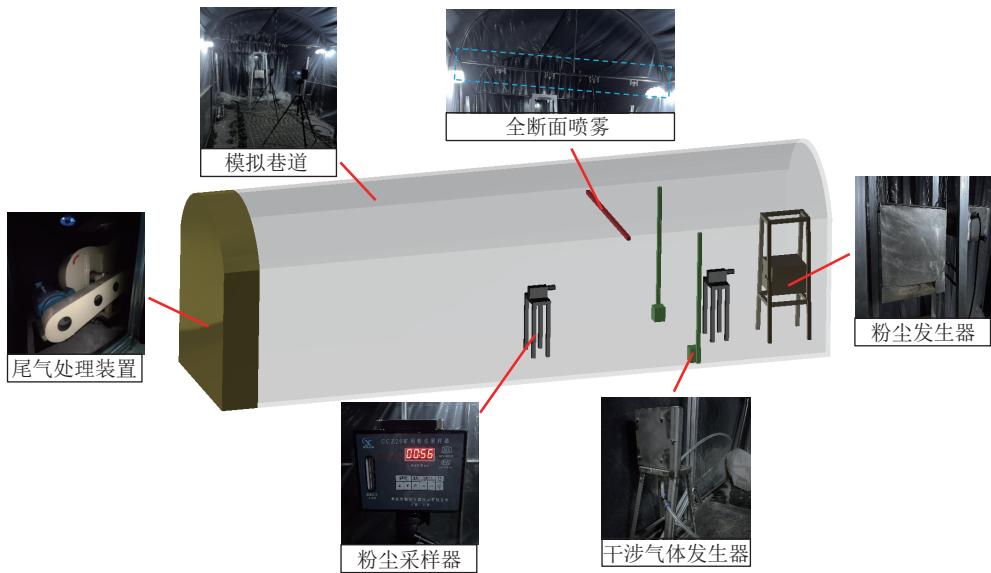


图 8 颗粒核化凝结与细水雾协同降尘试验系统

Fig.8 Test system of particle nucleation condensation and water mist synergistic dust removal

试验系统由模拟巷道、粉尘发生器、全断面喷雾、干涉气体发生器、粉尘采样器和尾气处理装置组成。模拟巷道横截面下半部分为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 正方形,上方为弧形,弧形部分高度为 $0.7\text{ m}$ ,横截面积为 $4.59\text{ m}^2$ ;粉尘发生器出口设置有粉尘扩散挡板,以避免粉尘仅沿出口方向运动;干涉气体发生器预混腔可以调节气温湿度,通过气体喷口向局部区域吹送湿热蒸汽;试验系统共设置了2台粉尘采样器,以模拟巷道长边指向尾气处理装置的方向为x轴正向,粉尘发生器位置为空间坐标原点(0,0,0),2台粉尘采样器分别位于(0.5,0,0)和(2.5,0,0),分别用以测量降尘前后的粉尘质量浓度;干涉气体发生器位于粉尘发生器沿x方向1m处的横截面两侧,吹送蒸汽可有效覆盖模拟巷道横截面;全断面喷雾位于干涉气体发生器沿x方向0.5m处的巷道顶部,使用气液两相喷嘴,建议工况为气压 $0.4\text{ MPa}$ 、水压 $0.3\text{ MPa}$ ;尾气处理装置提供巷道风流和净化逸散粉尘。

试验研究4种方式下的粉尘质量浓度变化:自然沉降、仅核化凝结、仅喷雾、核化凝结与喷雾协同。为了充分模拟合作煤矿目标工作面的作业环境,模拟巷道的风速设定为该工作面掘进机后方 $5\text{ m}$ 处的风速,取 $0.3\text{ m/s}$ ;基于现场实测呼尘质量浓度约为 $100\text{ mg/m}^3$ ,结合模拟巷道尺寸,计算得到粉尘发生器质量流量约为 $8.5\text{ g/min}$ 。模拟巷道的环境初始温度与相对湿度均和上述工作面作业环境温湿度相同,取温度为 $20^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $80\%$ 。

使用上一节的预测模型计算煤尘初始温度为 $20^\circ\text{C}$ 时颗粒的最佳核化凝结工况:干涉气体相对湿度为 $80\%$ ,干涉气体凝结温差为 $10^\circ\text{C}$ 。使用该工况对上

述4种方式分别开展3次试验,取算数平均值作为最终结果,粉尘采样器时间均为 $5\text{ min}$ ,煤尘与前序研究相同。

### 3.2 试验结果分析

试验结果如图9所示。其中,自然沉降、仅核化凝结、仅喷雾、核化凝结与喷雾协同4种方式在测点1的粉尘质量浓度分别为 $102.48$ 、 $105.13$ 、 $102.64$ 、 $103.85\text{ mg/m}^3$ ,数值相近,对比结果具有参考价值;测点2的粉尘质量浓度分别为 $99.65$ 、 $95.10$ 、 $69.66$ 、 $26.49\text{ mg/m}^3$ 。

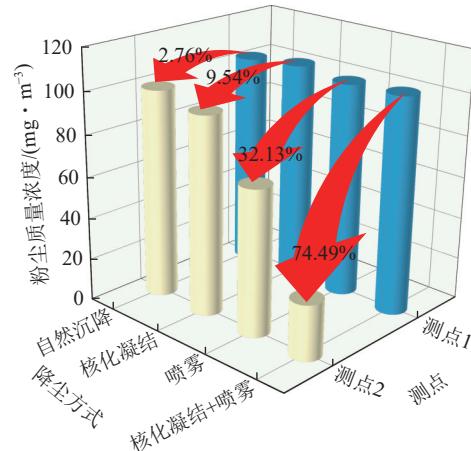


图 9 降尘效率对比  
Fig.9 Comparison of dust removal efficiency

由图9可以看出,对于粒径分布 $D_{90}=2.09$ 的颗粒群,自然沉降几乎没有效果;对于核化凝结方式,结合前述研究可以发现,凝结后颗粒群的粒径分布都小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,依然属于漂浮性颗粒的尺寸,且表面核化凝结的颗粒还会因为液滴蒸发效应导致周边形成上升流

场,从而影响沉降效果;对于喷雾方式,由于煤尘颗粒尺寸较小且颗粒表面呈疏水性,导致呼吸性粉尘降尘效率仅为32.13%。然而,当核化凝结与喷雾协同降尘时,前者在煤尘颗粒表面形成液滴,将液滴—煤尘的异相作用转变为液滴之间的相互碰撞凝并,从而使降尘效率提升至74.49%,相较于纯水喷雾的降尘效率提升了131.84%,非常适合呼吸性粉尘的浓度高的环境。

### 3.3 应用可行性分析

上述研究及试验结果表明,核化凝结与喷雾协同降尘方法较单一喷雾降尘方法对粉尘颗粒的捕捉沉降效果更好。试验涉及的煤矿初始温度、干涉气体相对湿度、气液两相喷嘴的气压和水压等参数均控制在《煤矿安全规程》<sup>[26]</sup>及相关技术规范要求的范围内。

由于干涉气体凝结温差直接决定干涉气体的温度,会影响干涉气体发生装置作用区域及周边环境的温度。为保证核化凝结与喷雾协同降尘方法的应用可行性,选取最高温度工况:煤尘初始温度为26℃、干涉气体相对湿度为65%,干涉气体凝结温差为10℃,计算得到干涉气体温度为43.5℃;喷雾降尘液体介质(此处选用的自来水)的温度为16℃。在低温喷雾横截面下游0.5m处设置了九宫格温度测试点,以区域左下角为坐标原点(0,0),模拟巷道风速为0.5m/s,每个点位温度测试时长为5min,记录最高值和平均值,具体测试坐标及温度见表9。由表9可知:协同降尘试验装置对降尘区域以外的作业空间温度影响不大,最高温度不超过30℃,平均温度不超过26℃,控制得当不会违反《煤矿安全规程》,具备技术应用的可行性。

表9 测试坐标及记录温度

Table 9 Test coordinates and record temperature

横截面坐标	最高温度/℃	平均温度/℃
(0.35, 0.35)	24.9	24.3
(0.35, 1.00)	26.5	24.5
(0.35, 1.65)	27.9	25.1
(1.00, 0.35)	24.3	23.8
(1.00, 1.00)	25.7	24.0
(1.00, 1.65)	27.3	24.9
(1.65, 0.35)	25.1	24.1
(1.65, 1.00)	26.6	24.8
(1.65, 1.65)	28.3	25.5

## 4 结 论

1) 在明确煤尘颗粒所处环境的温湿度条件下,提

供满足干涉气体凝结温差和干涉气体相对湿度条件的湿热气体,能使相对湿度较低的煤尘颗粒表面迅速核化凝结,并逐渐成长为更大尺寸的液滴,从而形成含尘液滴以提升煤尘被液滴捕捉及自沉降能力。

2) 干涉气体相对湿度对颗粒核化凝结效果的影响最大,二者呈正相关,且当相对湿度超过70%时,凝结效果增长明显;随干涉气体凝结温差的增大,颗粒核化凝结效果呈先下降后上升趋势,且存在最低值,即核化凝结作用与液滴蒸发作用的平衡点。

3) 基于均方差赋权法建立的多元非线性回归模型决定系数 $R^2$ 均超过0.9,表明预测结果与试验结果的多项误差评价指标优秀,能准确预测煤尘颗粒表面核化凝结效果随3种因素的变化特征。

4) 对于粒径分布 $D_{90}=2.09\text{ }\mu\text{m}$ 、质量浓度为103.95 mg/m<sup>3</sup>的呼吸性粉尘环境,颗粒核化凝结与喷雾协同的降尘效率高达74.49%,较纯水喷雾的降尘效果提升了131.84%,对矿井呼吸性粉尘核化凝结治理有重要意义。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11–22.  
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11–22.
- [2] 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.
- [3] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. 绿色矿山, 2023(1): 25–32.  
WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 25–32.
- [4] 翁安琦, 袁树杰, 王晓楠, 等. 煤层注水降尘中表面活性剂复配应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 90–95.  
WENG Anqi, YUAN Shujie, WANG Xiaonan, et al. Study on application of surfactant compound in coal seam water injection for dust reduction[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 90–95.
- [5] FANG Xueming, YUAN Liang, JIANG Bingyou, et al. Effect of water-fog particle size on dust fall efficiency of mechanized excavation face in coal mines[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120146.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 聂文, 许长炜, 彭慧天, 等. 矿井新型增润促凝喷雾降尘剂的研制与抑尘性能研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(15): 264–272.
- NIE Wen, XU Changwei, PENG Huitian, et al. Development and research on dust suppression performance of a new type of spray dust suppressant for increasing moisturizing and accelerating coagulation in mines[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(15): 264–272.
- [9] 张薇, 宋强, 张帆, 等. 酸洗脱除矿物对煤化学组成及润湿性的影响[J]. *煤炭转化*, 2019, 42(3): 1–9.
- ZHANG Wei, SONG Qiang, ZHANG Fan, et al. Effects of acid treatment and mineral removal on coal chemical composition and wettability[J]. *Coal Conversion*, 2019, 42(3): 1–9.
- [10] 程卫民, 薛娇, 周刚, 等. 烟煤煤尘润湿性与无机矿物含量的关系研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 462–468.
- CHEUNG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Research on the relationship between bituminous coal dust wettability and inorganic mineral content[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(3): 462–468.
- [11] 高童桐. 可溶有机质对煤微观表面及其润湿特性影响机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- GAO Tongtong. Mechanism of soluble organic matter influencing on coal microscopic surface and wettability[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [12] 张锐. 突出煤层掘进工作面煤尘润湿特性及防尘技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHANG Rui. Study on coal dust wetting characteristic and dust-proof technology in driving face of outburst coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [13] 蒋仲安, 王明, 陈举师, 等. 气水喷嘴雾化特征与降尘效果分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 151–157.
- JIANG Zhongan, WANG Ming, CHEN Jushi, et al. Atomization characteristics and dust suppression mechanism of a gas-water nozzle[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 151–157.
- [14] 秦波涛, 周刚, 周群, 等. 煤矿综采工作面活性磁化水喷雾降尘技术体系与应用[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 3891–3901.
- QIN Botao, ZHOU Gang, ZHOU Qun, et al. Dust removal system and application of the surfactant-magnetized water spray in the fully mechanized mining face of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3891–3901.
- [15] 王鹏飞, 邬高高, 袁新虎, 等. 微纳米气泡强化喷雾降尘试验研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4495–4503.
- WANG Pengfei, WU Gaogao, YUAN Xinhua, et al. An enhanced spray dust suppression method by micro-nano bubbles[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4495–4503.
- [16] ZHAO Zidong, CHANG Ping, GHOSH Apurna, et al. The influence of surfactants' ionicity on the performance of coal dust suppression[J]. *Advanced Powder Technology*, 2024, 35(1): 104295.
- [17] ZHANG Rui, WU Hao, SI Xiaodong, et al. Improving the removal of fine particulate matter based on heterogeneous condensation in desulfurized flue gas[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 174: 9–16.
- [18] 余廷芳, 高巨, 熊桂龙, 等. 基于分子运动学的水汽在细颗粒表面异质核化的数值模拟[J]. *化工学报*, 2020, 71(7): 3071–3079.
- YU Tingfang, GAO Ju, XIONG Guilong, et al. Numerical simulation of heterogeneous nucleation of water vapor on surface of fine particles based on molecular kinetics[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(7): 3071–3079.
- [19] DE JOANNON M, COZZOLINO G, CAVALIERE A, et al. Heterogeneous nucleation activation in a condensational scrubber for particulate abatement[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 107: 113–118.
- [20] WU Hao, YANG Linjun, YAN Jinpei, et al. Improving the removal of fine particles by heterogeneous condensation during WFGD processes[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 145: 116–122.
- [21] 凡凤仙, 张明俊. 蒸汽相变凝结对PM2.5粒径分布的影响[J]. *煤炭学报*, 2013, 4(6): 694–699.
- FAN Fengxian, ZHANG Mingjun. Influence of vapor heterogeneous condensation on the PM2.5 particle size distribution[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2013, 4(6): 694–699.
- [22] 徐俊超, 于燕, 张军, 等. 液滴在燃煤细颗粒表面凝结的长大动力学特性[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2017, 47(3): 506–512.
- XU Junchao, YU Yan, ZHANG Jun, et al. Kinetics study of droplet growth on surface of coal-fired fine particles[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2017, 47(3): 506–512.
- [23] LI Zhaozhao, MI Dabin, ZHANG Heng, et al. Experimental study on synergistic capture of fine particles and waste heat from flue gas using membrane condenser[J]. *Energy*, 2021, 217: 119392.
- [24] CHEN Tailin, DENG Lejun, LI Yuzhong, et al. Improvement of the reduction of condensable particulate matter in flue gas scrubbing process[J]. *Environmental Research*, 2023, 237: 116945.
- [25] PEI Ting, MA Suxia, ZHAO Guanjia, et al. Promoting the synergistic removal of SO<sub>3</sub> aerosols and particles during the flue gas condensation by combining alkali spray and turbulent agglomeration[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 318: 123953.
- [26] 应急管理部. 煤矿安全规程 2022 年版[S].
- Emergency Management Department. Coal mine safety regulations 2022 edition[S].
- [27] LEE Yuhlang, CHOU Wensheng, CHEN Lianghuei. The adsorption and nucleation of water vapor on an insoluble spherical solid particle[J]. *Surface Science*, 1998, 414(3): 363–373.
- [28] POUND G M, SIMNAD M T, YANG L. Heterogeneous nucleation of crystals from vapor[J]. 1954, 22(7): 1215–1219.
- [29] KULMALA M, MORDAS G, PETÄJÄ T, et al. The condensation particle counter battery (CPCB): A new tool to investigate the activation properties of nanoparticles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2007, 38(3): 289–304.
- [30] 于松宁, 蔡戎辉. 对流传热传质中的液滴蒸发过程数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(9): 2477–2481.

- YU Songning, QI Ronghui. Numerical simulation of droplet evaporation in the process of convective heat and mass transfer[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(9): 2477–2481.
- [31] 张尧, 王建楠. 无人机飞行训练资源配置效率的 AHP-Arena 综合评价方法[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44(4): 204–212.  
ZHANG Yao, WANG Jiannan. AHP-Arena comprehensive evaluation method for the efficiency of allocation of UAV flight training resources[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(4): 204–212.
- [32] 江丙友, 章玉前, 余昌飞, 等. 基于正交试验与回归分析的巷道内喷雾降尘后煤尘粒度预测[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(12): 143–153.  
JIANG Bingyou, ZHANG Yuqian, YU Changfei, et al. Prediction of coal dust particle size after spraying dust reduction in roadway based on orthogonal experiment and regression analysis[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(12): 143–153.
- [33] 任至涵, 倪长健, 花瑞阳, 等. 成都 O<sub>3</sub> 逐日污染潜势关键时段优选的 GAM 模型[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5079–5085.  
REN Zhihan, NI Changjian, HUA Ruiyang, et al. Optimization of the key period of daily ozone pollution potential in Chengdu based on Generalized Additive Model[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5079–5085.
- [34] WANG Pengfei, TIAN Chang, LIU Ronghua, et al. Mathematical model for multivariate nonlinear prediction of SMD of X-type swirl pressure nozzles[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 228–237.
- [35] 李博, 吴煌, 李腾. 基于加权的综采导水裂隙带高度多元非线性回归预测方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(3): 536–545.  
LI Bo, WU Huang, LI Teng. Height prediction of water-conducting fractured zone under fully mechanized mining based on weighted multivariate nonlinear regression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(3): 536–545.