



## 煤矿尘雾凝并降尘增效研究现状与展望

姜伯洋 齐艺裴 张嘉勇 郭立稳 李嘉 肖洋

### 引用本文：

姜伯洋, 齐艺裴, 张嘉勇, 等. 煤矿尘雾凝并降尘增效研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(S1): 183–200.  
JIANG Boyang, QI Yipei, ZHANG Jiayong. Current status and prospects of research on coal mine dust mist condensation and dust reduction efficiency enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 183–200.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1585>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 复配表面活性剂对烟煤润湿性影响及微观机理研究

Study on effect of compound surfactants on wettability of bituminous coal and its microscopic mechanism  
煤炭科学技术. 2024, 52(11): 346–355 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1418>

##### 基于LNMR的表面活性剂对高阶煤孔隙润湿效果研究

Study on the effect of NMR-based surfactants on pore wetting of high-order coal  
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 111–120 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1974>

##### 湿式旋流抽尘净化器的除尘机理研究

Study on dust removal mechanism of wet cyclone scrubber  
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 118–124 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f1b01b80-7708-4bf7-bb6a-f49bc86669e2>

##### 大采高工作面截割可吸入煤尘监测与降尘方法改进

Monitoring of inhalable coal dust generated from cutting process of high coal mining face and improvement of dust reduction method  
煤炭科学技术. 2022, 50(9): 114–120 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/39d04531-07f4-4e30-99a4-e49e634e7be2>

##### 表面活性剂泡沫性能对煤中瓦斯缓释影响试验研究

Experimental study on the influence of surfactant foam properties on the slow release of gas in coal  
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 129–139 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1765>

##### 我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展与展望

Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years  
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9eaa144a-fb7d-4a67-8eb8-7f569d90f617>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

姜伯洋,齐艺裴,张嘉勇,等.煤矿尘雾凝并降尘增效研究现状与展望[J].煤炭科学技术,2025,53(S1):183-200.  
JIANG Boyang, QI Yipei, ZHANG Jiayong, et al. Current status and prospects of research on coal mine dust mist condensation and dust reduction efficiency enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(S1): 183-200.

## 煤矿尘雾凝并降尘增效研究现状与展望

姜伯洋<sup>1</sup>,齐艺裴<sup>1,2</sup>,张嘉勇<sup>1,2</sup>,郭立稳<sup>1,2</sup>,李嘉<sup>1</sup>,肖洋<sup>3</sup>

(1.华北理工大学 应急管理与安全工程学院,河北 唐山 063210; 2.河北省矿业开发与安全技术重点实验室,河北 唐山 063210;

3.华北理工大学 化学工程学院,河北 唐山 063210)

**摘要:**矿井机械化、智能化水平提升所导致的煤尘问题愈发严重,喷雾广泛用于井下工作面煤尘问题治理,尘雾凝并过程可实现煤尘沉降,继而缓解煤尘对职工健康的危害与安全生产压力。为进一步完善工作面降尘措施,提高井下工作环境质量,优化矿井工作面湿式除尘体系,加速实现绿色矿山目标。查阅国内外相关文献,结合相关理论发展历程与实践研究现状,分析当前尘雾凝并湿式除尘技术的研究进展,包括雾滴捕尘过程及机理、煤尘润湿性研究、表面活性剂优化进展、内外流场射流破碎雾化机理、喷嘴发展历程。同时针对喷雾降尘接触—润湿—结合—沉降机理研究不透彻、液态介质在喷雾内流场外流场作用下射流破碎雾化行为认识不足、雾化效果各影响因素间耦合关系不明朗、措施优化缺乏足够理论支撑、现场应用与实验室结果不符等问题,在除尘及雾化机理、煤尘润湿性、表面活性剂、喷嘴雾化特性、现场应用等方面提出研究展望。研究表明,我国矿井煤尘防治体系已初具雏形,未来研究重点将转向润湿—捕尘机理研究、深层次多角度煤尘润湿性影响因素联合分析、雾化及降尘效果表征参数及测量手段完善、尘-雾多角度喷嘴雾化特性优化、无害强增效表面活性剂研制和现场应用普及。

**关键词:**湿式除尘;雾滴捕尘机理;煤尘润湿性;表面活性剂;雾化机理

**中图分类号:**TD714.4    **文献标志码:**A    **文章编号:**0253-2336(2025)S1-0183-18

## Current status and prospects of research on coal mine dust mist condensation and dust reduction efficiency enhancement

JIANG Boyang<sup>1</sup>, QI Yipei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiayong<sup>1,2</sup>, GUO Liwen<sup>1,2</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>3</sup>

(1. North China University of Science and Technology, College of Emergency Management and Safety Engineering, Tangshan 063210, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology, Tangshan 063210, China;

3. North China University of Science and Technology, College of Chemical · Engineering, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** The problem of coal dust caused by the improvement of mine mechanization and intellectualization is becoming more and more serious. spray is widely used to treat coal dust problems in underground working faces. The coalescence process of dust mist can achieve coal dust settlement, and then alleviate the harm of coal dust to workers' health and the pressure on safe production. In order to further improve the dust reduction measures at the working face, improve the quality of the underground working environment, optimize the wet dust removal system at the working face of the mine, and accelerate the achievement of the goal of green mining. By reviewing relevant literature at home and abroad, combined with the development history of relevant theories and the current status of practical research, this paper analyzes the research progress of dust mist condensation wet dust removal technology, including the process and mechanism of droplet dust collection, research on coal dust wettability, progress in surfactant optimization, mechanism of internal and external flow field jet fragmentation and atomization, and the development history of nozzles. At the same time, in view of the lack of thorough research on the contact wetting combination sedimentation mechanism of spray dust reduction, insufficient understanding of the atomization behavior of

收稿日期:2023-11-01    责任编辑:常琛    DOI: 10.12438/cst.2023-1585

基金项目:河北省重点研发计划资助项目(21376202D);河北省中央引导地方科技发展资金资助项目(236Z7603G);唐山市科技计划资助项目(23130211E);高校基本科研业务费资助项目(JQN2023004)

作者简介:姜伯洋(1998—),男,辽宁海城人,硕士研究生。E-mail:jby13124125999@163.com

liquid medium under the action of the external flow field in the internal flow field of spray, unclear coupling relationship between various influencing factors of atomization effect, lack of sufficient theoretical support for measures optimization, inconsistency between field application and laboratory results, and other problems, the impact of the impact of the spray on the atomization mechanism, coal dust wettability, surfactant, nozzle atomization characteristics. Propose research prospects for on-site applications and other aspects. Research has shown that the prevention and control system for coal dust in China's mines has begun to take shape. In the future, the focus of research will shift to the study of wetting dust collection mechanism, joint analysis of factors affecting the wettability of deep-seated and multi-angle coal dust, improvement of characterization parameters and measurement methods for atomization and dust reduction effects, optimization of atomization characteristics of dust mist multi-angle nozzles, development of harmless and synergistic surfactants, and popularization of on-site applications.

**Key words:** wet dust removal; mechanism of droplet dust capture; coal dust wettability; surfactant; atomization mechanism

随着煤炭资源开采程度的加深,开采技术愈发成熟与机械化水平逐步提升过程中所带来的安全问题不容忽视,煤尘作为煤矿五大灾害之一,开采期间岩巷掘进、工作面回采等多道工序均会产生大量岩尘和煤尘,粉尘浓度过高不仅威胁职工生命安全,还影响正常生产<sup>[1]</sup>,开采过程中所产生的粉尘中煤尘较于岩尘产尘量更大,与施工人员接触概率更多,所导致的危害更严重。目前,喷雾湿式除尘作为工作面主要除尘手段应用广泛,提升喷雾湿式除尘效果成为需要解决的关键问题<sup>[2]</sup>。降尘效果受到煤物化性质、喷雾雾滴粒径及速度等多种因素的影响<sup>[3-5]</sup>。因此,为了体现最新的研究成果,推动工作面湿式除尘控尘体系的发展,着重分析除尘效果影响因素,提出尘雾凝并湿式除尘技术未来发展趋势。

## 1 射流破碎雾化机理

现阶段矿井工作面液态介质高压雾化除尘方法应用广泛,连续液态介质在雾化喷嘴作用下经过射流、分裂、破碎等过程形成离散雾滴颗粒<sup>[6-7]</sup>。由喷嘴内部结构和风流场构成的内、外流场共同作用决定了喷嘴的雾化效果。

### 1.1 内流场射流雾化机理

喷嘴内部流场的原理是对液态水进行加压,通过不同结构、不同孔径的喷嘴将水压等势能转化为液体的动能,通过喷孔变为微小的雾滴颗粒,形成高速射流喷出。势能转化为动能以流体力学中伯努利方程为基本原理,分析喷嘴内部流场中的能量,喷嘴进口、出口两截面能量关系<sup>[8]</sup>如下:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho_1 v_1^2 + \rho_1 g H_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 + \rho_2 g H_2 \quad (1)$$

式中:  $P_1$  为喷嘴进口压力, Pa;  $P_2$  为喷嘴出口压力, Pa;  $\rho_1$  为喷嘴进口液体密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_2$  为喷嘴出口液体密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_1$  为流入喷嘴液体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $v_2$  为流出喷嘴液体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $H_1$  为喷嘴进口高度, m;  $H_2$  为喷嘴出口高度, m;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

喷嘴进出口高度差近似为 0, 喷嘴进、出口流量守恒,且液体水作为普遍使用的喷雾液体介质,常温常压下为不可压缩流体,则出口速度公式为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_1 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right]}} \quad (2)$$

式中:  $d_1$  为喷嘴进口半径, m;  $d_2$  为喷嘴出口半径, m;  $\rho_1$  为常温常压下流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

实际应用中,喷嘴内部结构差异性导致内部流场中流体转动、截面变化造成能量损失,实测值小于公式计算的理论值。

### 1.2 外流场射流雾化机理

雾化过程受自身表面张力、黏性力等内、外力共同作用的结果,其本质是液体介质克服介质表面张力、黏性力,增大表面能促使连续介质破碎,雾化过程包括一次雾化、二次雾化 2 个阶段<sup>[6-7,9]</sup>,如图 1 所示。

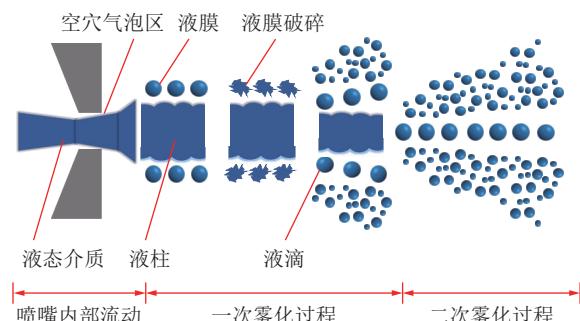


图 1 水力雾化过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of hydraulic atomization process

一次雾化是液态介质在喷嘴作用下形变成膜、丝、滴等多种形状的液态介质单元,经一次雾化处理会形成毫米量级单元,液态介质自身惯性力、喷嘴内部结构差异导致不同单元具有各向异性,这是影响一次雾化的主要因素;二次雾化是一次雾化后的液态介质单元在周围空气介质作用下进一步撕裂形成更小介质单元,经二次雾化处理会形成微米量级单元,空气介质和自身表面张力耦合关系是影响二次

雾化的主要因素<sup>[10-11]</sup>。

### 1.3 液态介质破碎雾化机理

介质单元在高速流动空气介质作用下,依次形变为椭圆型、杯型、半水泡型;液体介质和气体介质的相对速度大于液体介质元破碎临界速度会导致液体介质破碎,在其中心产生微米量级介质单元,如图2所示。

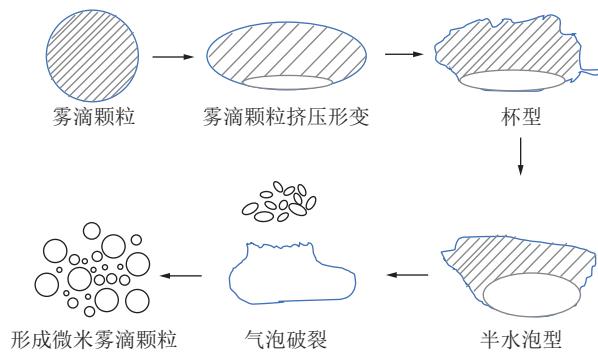


图2 球形液滴破碎过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of spherical droplet fragmentation process

表面张力、黏性力是影响破碎结果的重要因素,表面张力是维持雾滴原有形状的重要作用力,可以有效阻止液滴形变;黏性力影响最终雾化颗粒粒径分布以及雾滴颗粒的运动状态。二者的相对作用达到破碎临界值,液体表面失稳、破碎。在喷雾雾化理论中,  $W_e$ 、 $Oh$ 等无量纲参数被用来表征液滴破碎<sup>[12-13]</sup>。

当空气动力等于液滴自身表面张力时,空气动力公式为

$$F_A = \frac{\varphi A_p \rho_g U_s^2}{2} = 2\pi d_g \sigma \quad (3)$$

式中:  $F_A$  为空气动力, N;  $\varphi$  为阻力系数;  $A_p$  为液滴颗粒表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho_g$  气体介质密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $U_s$  为液滴颗粒与空气之间的相对速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $d_g$  为液滴颗粒直径,  $\text{m}$ ;  $\sigma$  为液滴颗粒的表面张力系数,  $\text{N}/\text{m}$ 。

假设液滴颗粒为球体,可得:

$$\frac{2\rho_g U_s^2 d_g}{\sigma} = \frac{8}{\varphi} = W_e \quad (4)$$

式(4)右端为韦伯数  $W_e$ ,其用以表征空气动力与表面张力在液滴表面的无因次压强比,韦伯数越大,表明液滴破碎程度越高,公式表明:韦伯数的大小主要取决于液滴颗粒的惯性力与表面张力的比值,比值越大,形成的小雾滴颗粒粒径量级越小。

欧尼索数  $Oh$  公式为

$$Oh = \frac{\sqrt{W_e}}{R_e} \quad (5)$$

式中:  $R_e$  为雷诺数。

$$R_e = \frac{\rho_l v_l d_g}{\mu_l} \quad (6)$$

式中:  $\rho_l$  为液滴颗粒的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v_l$  为液滴颗粒的速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

其用以表征黏性力对液体破碎的影响。

### 2 雾滴捕捉煤尘过程及机理

尘雾凝并湿式除尘是利用喷嘴对液体介质实现雾化作用,雾化颗粒捕捉风流场中煤尘颗粒,最终实现除尘目的;雾化颗粒对煤尘颗粒的捕捉是多种作用共同影响的结果,其作用形式体现在重力沉降、惯性碰撞、拦截作用、布朗扩散、静电作用等多方面,如图3所示。

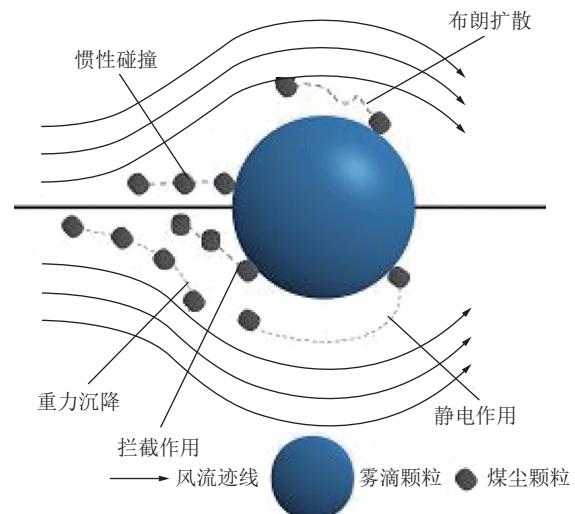


图3 层流流态下雾滴捕尘过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of droplet dust capture process under laminar flow regime

#### 2.1 重力沉降机制

重力沉降作用适用于本身具有足够质量且风流场对煤尘颗粒作用较小的情况,自身质量受到重力作用向地面沉降,沉降过程中与雾化颗粒接触被捕获;重力沉降主要与煤尘粒径与风流场速度相关,重力沉降效率公式为<sup>[14-15]</sup>

$$\eta_{\text{Gravitation}} = \frac{C d_s^2 g}{18 \mu_g U_t} \quad (7)$$

式中:  $\mu_g$  为空气动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $U_t$  为煤尘颗粒与风流场相对速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $d_s$  为煤尘颗粒粒径,  $\text{m}$ 。

由式(7)可知,当煤尘重力与浮力差值大于0,煤尘颗粒便会发生重力沉降,沉降效率与粒径大小、空气动力黏度、煤尘颗粒与风流场相对速度有关,煤尘颗粒自身重力越大,沉降效果越明显。

## 2.2 惯性碰撞机制

惯性碰撞适用于粒径较大的煤尘颗粒,风流场受雾滴颗粒作用导致其运移路径发生改变,较小粒径煤尘颗粒运动路径随风流场发生改变,大颗粒煤尘因其自身较大惯性偏离风流场轨道,按原路径运移与雾滴颗粒发生碰撞,从而被雾滴颗粒捕获<sup>[16]</sup>。在湿式除尘作业中,惯性碰撞是主要降尘机制<sup>[17]</sup>,1988年LICHT提出碰撞效应降尘效率公式<sup>[18]</sup>:

$$\eta_{\text{Collide}} = \frac{S_k^2}{(S_k + 0.35)^2} \quad (8)$$

式中:  $S_k$  为斯托克斯数。

$$S_k = \frac{\rho_g d_s^2 U_t}{18 \mu_g d_g} \quad (9)$$

式中:  $d_g$  为雾滴颗粒直径, m。

早期学者们利用极限轨迹法<sup>[19]</sup>用以表征液滴对煤尘颗粒的捕捉效率,目前的研究表明,该方法适用性较差,所以斯托克斯数是现阶段用以表征捕捉效率的重要参数<sup>[20]</sup>。由式(8)、式(9)可知,惯性碰撞效率与雾滴、煤尘二者粒径大小有关,提高煤尘颗粒与雾滴颗粒粒径比值、雾滴颗粒运动速度,可有效改善除尘效果。

## 2.3 拦截作用机制

拦截作用适用于质量较小颗粒,对于斯托克斯数较小的粒子,小质量煤尘颗粒在风流场中运动路径与空气同步,在运动路径上的煤尘会被雾滴颗粒捕捉,其捕捉效率公式为<sup>[21]</sup>

$$\eta_{\text{Intercept}} = \left(1 + \frac{d_s}{d_g}\right)^2 - \frac{1}{\left(1 - \frac{d_s}{d_g}\right)} \quad (10)$$

式中:  $\frac{d_s}{d_g}$  为拦截系数,  $\frac{d_s}{d_g} < 0.1$ 。

由式(10)可知,拦截作用效率只与雾滴颗粒和煤尘颗粒粒径比值有关,提高拦截系数可提高除尘效率。

## 2.4 布朗扩散作用机制

布朗扩散作用适用于粒径 1  $\mu\text{m}$  以下小颗粒煤尘,小粒径颗粒受浓度梯度影响从高浓度区域向低浓度区域运动被雾滴颗粒捕获<sup>[20]</sup>,其捕捉效率公式为<sup>[22]</sup>

$$\eta_{\text{Diffusion}} = 4.18 \sqrt{\frac{v_0 d_s \rho_g}{\mu_g}} \sqrt{\frac{v_0 d_s}{d_g}} \quad (11)$$

式中:  $v_0$  为流场流速, m/s。

由式(11)可知,提升流场流速和煤尘颗粒粒径可提高除尘效率。

## 2.5 静电作用机制

流场中煤尘颗粒多数本身带有正电荷,通过人为对液滴颗粒施加负电荷,由于异性相吸理论,煤尘与雾滴会因为库仑力的作用相互吸引、凝结、沉降,实现降尘<sup>[23]</sup>,其捕捉效率公式为<sup>[24]</sup>:

$$\eta_{\text{Electrostatics}} = \frac{4CQ_w}{3\pi\mu_g d_s v_0 \epsilon_p} \quad (12)$$

式中:  $Q_w$  为单位面积雾滴所带电荷量, C;  $\epsilon_p$  为煤尘介电常数, C/V  $\cdot$  m<sup>-1</sup>。

由式(12)可知,提升单位面积雾滴所带电荷量可提高除尘效率。

大煤尘颗粒相较于小煤尘颗粒在处理过程中去除难度低,因此在各除尘手段实施过程中,大颗粒煤尘优先被去除;雾滴颗粒与煤尘颗粒之间的耦合关系是决定除尘效果的重要因素,二者粒径接近,煤尘越易被雾滴颗粒捕捉,在除尘过程中,根据实际煤尘颗粒粒径适当调整雾滴颗粒大小可有效提升除尘效率。

## 2.6 涡流凝聚机制

当喷雾压力过大或风流场风速过大时,风流场经雾滴作用产生湍流导致出现涡流,如图 4 所示,涡流会导致煤尘颗粒产生卷吸效应,进而提升捕尘效率  $\eta_{\text{Eddy}}$ <sup>[25-26]</sup>。但是当前关于涡流捕尘效率公式尚未建立统一公式,这是喷雾降尘效率方面应该重点研究的方面。

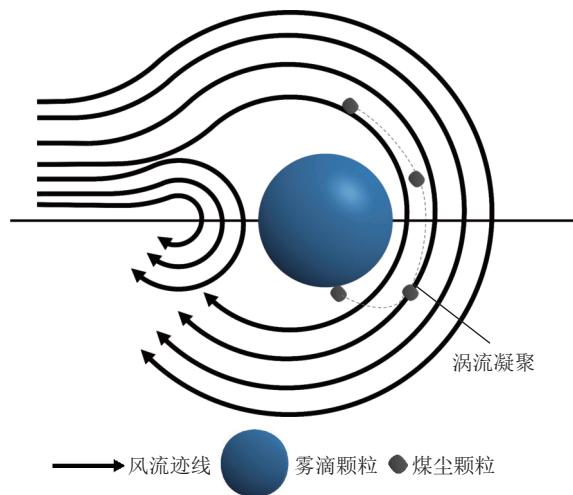


图 4 湍流流态下雾滴捕尘过程

Fig.4 Dust capture process of fog droplets under turbulent flow regime

## 2.7 总捕尘效率

在实际工程作业中,总捕尘效率是多种除尘机理共同作用的结果,单个捕尘效率公式为

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{\text{Gravitation}})(1 - \eta_{\text{Collide}})(1 - \eta_{\text{Intercept}})(1 - \eta_{\text{Diffusion}})(1 - \eta_{\text{Electrostatics}})(1 - \eta_{\text{Eddy}}) \quad (13)$$

式中:  $\eta_{\text{Eddy}}$  为涡流凝聚捕尘效率, %。

喷雾场多是以集群的形式存在于风流场中的整体, 在各个作用互不影响的情况下, 喷雾场总捕尘效率公式为

$$\eta = \left[ 1 - \prod_{i=2}^n (1 - \eta_i) \right] \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $\eta$  为总捕尘效率, %;  $\eta_i$  为单个液滴捕捉效率, %。

该总捕尘效率的前提是各捕尘作用之间互不影响, 各除尘作用对煤尘的捕捉效率均为 100%, 但在实际工程时间中, 各捕尘作用之间的相互影响导致捕尘效率理想化难度较大。

### 3 提高煤尘润湿性研究现状

雾滴颗粒对煤尘颗粒的润湿现象多发生在二者交界处, 煤尘颗粒在风流场中运动与雾滴颗粒接触被润湿的实质是液-气、固-气界面被固-液交界面取代, 这个过程称之为润湿<sup>[27]</sup>。

#### 3.1 煤尘润湿过程及机理

雾滴润湿煤尘的过程一般分为沾湿、浸湿、铺展 3 类<sup>[28]</sup>。

1) 雾滴与煤尘颗粒接触, 液-气、固-气表面转化为固-液表面的过程称作沾湿<sup>[28]</sup>, 沾湿过程如图 5 所示:



图 5 沾湿过程示意图

Fig.5 Schematic diagram of wetting process

沾湿过程体系自由能变化公式为

$$W_W = \gamma_{LG} + \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (15)$$

式中:  $\gamma_{LG}$  为液-气交界表面自由能,  $\text{mJ/m}^2$ ;  $\gamma_{SG}$  为固-气交界表面自由能,  $\text{mJ/m}^2$ ;  $\gamma_{SL}$  为固-液交界表面自由能,  $\text{mJ/m}^2$ ;  $W_W$  为沾湿功,  $\text{mJ/m}^2$ 。

沾湿功  $W_W$  是将煤尘颗粒从液态介质表面分离所需的最小能量, 其用以表征固-液表面的结合能力, 数值越大表示界面之间的结合能力越强; 增大  $\gamma_{LG}$ 、 $\gamma_{SG}$ , 减小  $\gamma_{SL}$  均会增大沾湿概率; 当  $W_W > 0$  时, 沾湿过程可自发进行<sup>[9]</sup>。

2) 煤尘颗粒由置于气流场中转化为浸入液态介

质中, 固-气表面逐渐转化为固-液表面的过程称作浸湿<sup>[28]</sup>, 在这一过程中液态介质表面没有发生变化, 浸湿过程如图 6 所示:

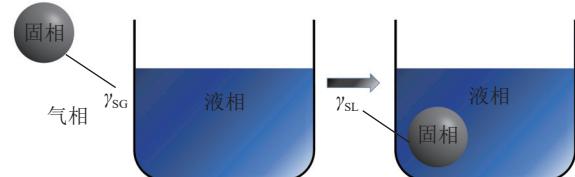


图 6 浸湿过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of soaking process

浸湿过程体系自由能变化公式为

$$W_S = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (16)$$

式中:  $W_S$  为浸湿功,  $\text{mJ/m}^2$ 。

浸湿功  $W_S$  用以表征液态介质在煤尘颗粒表面上取代气体的能力, 数值越大表示界面之间的结合能力越强; 增大  $\gamma_{SG}$ , 减小  $\gamma_{SL}$  均会增大浸湿概率; 当  $W_S > 0$  时, 浸湿过程可自发进行<sup>[9]</sup>。

3) 煤尘颗粒与雾滴颗粒接触, 雾滴在煤尘颗粒表面展开形成液膜, 固-气表面转化为固-液表面的过程称作铺展<sup>[28]</sup>, 铺展过程如图 7 所示:



图 7 铺展过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of paving process

铺展过程体系自由能变化公式为

$$W_U = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \quad (17)$$

式中:  $W_U$  为铺展功,  $\text{mJ/m}^2$ 。

铺展功  $W_U$  用以表征雾滴在煤尘表面铺展的能力, 数值越大, 液滴包裹煤尘颗粒形成液膜的能力越强; 增大  $\gamma_{SG}$ , 减小  $\gamma_{SL}$ 、 $\gamma_{LG}$  均会增大铺展概率; 当  $W_U > 0$  时, 铺展过程可自发进行<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 煤尘润湿性测定方法及表征参数

不同煤尘润湿性的测定方法大致分为定性测量方法和定量测量方法; 其中定性测量方法包括浸透速度法、水膜浮选法、水蒸气吸附法和煤体吸湿法<sup>[29-32]</sup>, 定量测量方法包括改进的浸透速度法和接触角测量法<sup>[33-34]</sup>, 如图 8 所示。

浸透速度法是利用毛细作用比较不同玻璃管内煤样相同时间内润湿高度差异用以表征润湿性差异<sup>[29]</sup>, 相同时间内试样润湿高度越高, 润湿性越强, 测定装置如图 9 所示。

水膜浮选法是利用测量一定时间内洒落在液态

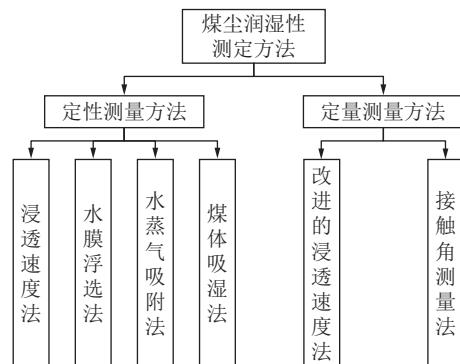


图 8 煤尘润湿性测定方法分类

Fig.8 Classification of methods for determining the wettability of coal dust

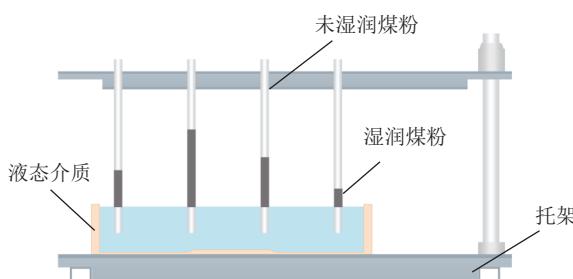


图 9 浸透速度法测定装置

Fig.9 Immersion rate method measuring device

介质表面上的煤尘浸入液态介质中质量比例用以表征润湿性差异<sup>[30]</sup>, 相同时间内浸入比例越大, 润湿性越强, 测定装置如图 10 所示。

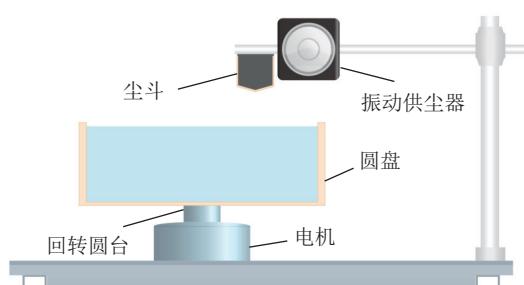


图 10 水膜浮选法测定装置

Fig.10 Water film floatation method measuring device

但上述 2 种方法受实验样品粒度分布差异影响导致该方法只适用于不同煤样的润湿性测定, 具有一定局限性。水蒸气吸附法通过测量水蒸气及其他惰性气体的吸附量或水蒸气在煤尘颗粒表面的吸附等温线用以表征润湿性差异, 水蒸气吸附量与惰性气体吸附量比值大于 1 即为亲水性煤尘<sup>[31]</sup>; 煤体吸湿法通过测量煤块浸入液态介质中一段时间后质量变化用以表征润湿性差异<sup>[32]</sup>, 相同时间内质量增加越多, 润湿性越强, 测定装置如图 11 所示。

定量测定方法中改进的浸透速度法利用改进的

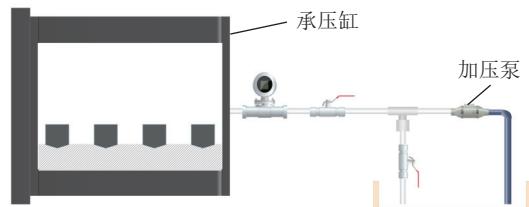


图 11 煤体吸湿法测定装置

Fig.11 Coal moisture absorption method measuring device

装置测量(图 12), 改进后的装置可以弥补煤尘浸透高度存在主观性的缺点<sup>[33]</sup>; 接触角测量法利用测量液态介质液滴在片状煤尘试样上切线与试样夹角用以表征润湿性差异<sup>[34]</sup>。接触角测量法较于其他四种方法其操作简答、重现性好、结果直观且准确。

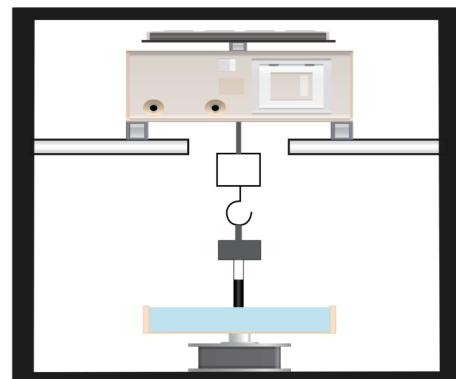


图 12 改进的浸透速度法测定装置

Fig.12 Improved Immersion Rate Measurement Device

### 3.3 润湿性与接触角关系

接触角是液滴剖面在交界处的切线与煤尘表面之间的夹角, 交界处的相互作用多用接触角来表征<sup>[35]</sup>, 也是评判煤尘能否被液滴自发润湿的重要参数<sup>[36]</sup>。润湿界面能是导致润湿现象的主要因素。在煤尘颗粒被润湿之前, 煤尘颗粒与风流交界处和煤尘颗粒与雾滴颗粒交界处界面能处于平衡状态<sup>[19]</sup>, 如图 13 所示。最早接触角公式是于 1805 年由 T. Young 提出的杨式方程<sup>[37]</sup>:

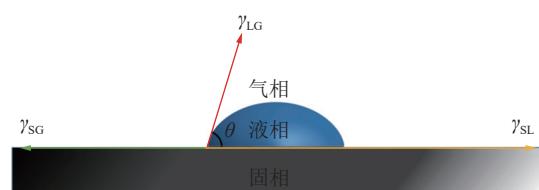


图 13 煤尘颗粒上液滴颗粒表面张力平衡关系

Fig.13 Surface tension equilibrium relationship of droplets on coal dust particles

$$\gamma_{SG} = \gamma_{LG} \cdot \cos \theta + \gamma_{SL} \quad (18)$$

式中:  $\theta$  为接触角,  $^{\circ}$ 。

接触角作为可表征润湿性的重要参数之一,接触角越小,对煤尘颗粒的湿润程度越大,反之越小; $\theta=0^\circ$ ,煤尘颗粒完全润湿,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 时为可润湿,  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时为不可润湿。工作面所产煤尘颗粒表面多为疏水性表面,被润湿难度大<sup>[24]</sup>。结合接触角与3种润湿过程交界处表面自由能变化可以得出3种润湿过程自发进行的条件:

$$W_W = \gamma_{LG} (\cos \theta + 1) \quad (19)$$

$$W_S = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (20)$$

$$W_U = \gamma_{LG} (\cos \theta - 1) \quad (21)$$

从交界处表面自由能和接触角角度判定过程能否自发进行条件见表1。

表1 润湿过程自发进行判定依据

Table 1 Determination basis for spontaneous wetting process

润湿过程	自由能判据	接触角判据
沾湿	$W_W \geq 0$	$\theta \leq 180^\circ$
浸湿	$W_S \geq 0$	$\theta \leq 90^\circ$
铺展	$W_U \geq 0$	$\theta = 0$ 或不存在

### 3.4 煤尘颗粒润湿性影响因素

煤尘颗粒的润湿性在矿井湿式除尘作业中是1个极为重要的参数,多数煤尘颗粒自身疏水性导致直接使用降尘效果较差,专家学者们从20世纪就从煤尘颗粒性质到雾滴颗粒性质、由宏观到微观对此现象进行了大量理论研究和实验,将多种参数对煤润湿性的影响进行联合分析并探究作用形式;对煤尘颗粒润湿性的研究由宏观发展至微观、从表面深入至内部结构。

在从宏观角度对润湿性影响因素的研究中,多通过对不同变质程度煤种的不同粒度颗粒差异以及孔隙结构对润湿性的影响进行研究,研究手段多为测量接触角用以表征润湿性能的优劣。村田逞诠<sup>[38]</sup>研究发现不同煤种润湿能力随煤样中灰分含量提升愈发容易。谭烜昊等<sup>[39]</sup>利用毛细作用原理衡量煤尘润湿性,用反渗透速度表征润湿难易程度,评估不同粒径的无烟煤颗粒润湿性,发现煤尘粒径越大亲水性越强,越易被润湿。

KOLLIPARA等<sup>[40]</sup>发现增大颗粒与液态介质的接触时间可有效提高润湿程度。陈跃等<sup>[29]</sup>选取同一煤矿不同层理方向煤样作润湿性测试,结果表明润湿性从高到低依次为:垂直层理、斜交层理、平行层理;不同煤种的孔隙结构差异同样影响润湿性,连通

性差、分选差、孔径小导致表面粗糙,疏水性更强,如图14所示。

SAVITSKYI<sup>[41]</sup>在分析了表面粗糙度、孔隙率、压力对润湿性能的影响后,发现煤尘颗粒在碱性液体介质中接触角会增大,亲水性减弱。从宏观角度对煤尘润湿性研究来看,宏观层面的研究手段多为通过单一实验方法探究煤尘亲水、疏水性能,如煤尘颗粒粒度、接触角、表面张力、液体介质pH值,对煤尘的选择仅体现在煤种变质程度和煤尘颗粒粒度大小。煤尘的表面裂隙特征如图15所示。

从微观角度研究煤尘润湿性,研究重点由表面发展至内部结构,即颗粒表面基团、元素占比、有机物、无机物矿盐含量;研究手段涉及红外光谱、XRD

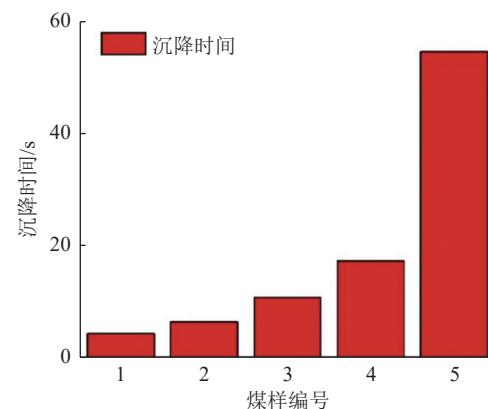


图14 不同粒径无烟煤颗粒在液态介质中的沉降时间<sup>[39]</sup>

Fig.14 Settling time of anthracite particles with different sizes in liquid medium<sup>[39]</sup>

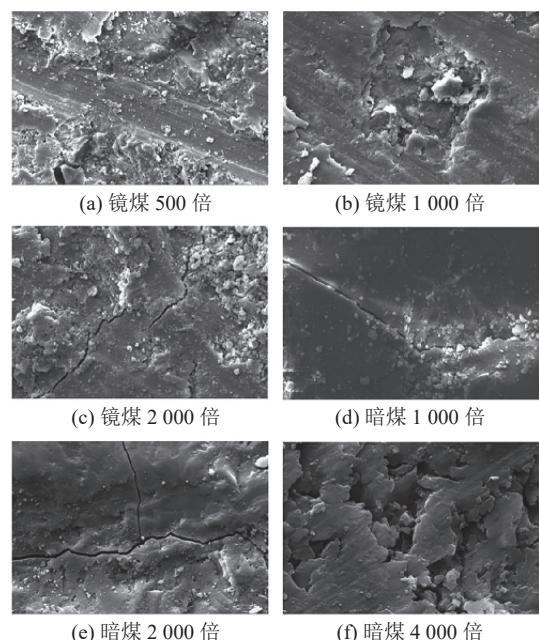


图15 镜煤和暗煤扫描电镜下表面裂隙特征<sup>[29]</sup>

Fig.15 Surface crack characteristics of vitrinite and dark coal under scanning electron microscopy<sup>[29]</sup>

衍射实验、NMR 核磁共振、XPS 化学分析电子能谱测试等。煤尘颗粒分形特征如图 16 所示。煤尘颗粒表面结构参数量化的完善,由初期的测定比表面积发展至煤尘表面分形维数的测定,分形维数相较于比表面积对研究煤尘润湿性适用性更强,可以更好用于表征润湿性的优劣<sup>[42-43]</sup>。杨静等<sup>[42]</sup>采用分形维数用以表征煤尘颗粒表面特性更具代表性; LI 等<sup>[43]</sup>发现挥发分含量较高的样品表面越易形成气膜,润湿难度愈大。



图 16 煤尘颗粒分形特征示意图<sup>[43]</sup>

Fig.16 Schematic diagram of fractal characteristics of coal dust particles<sup>[43]</sup>

除对表面物理特性的研究外,学者们发现煤尘表面官能团相关参数均会对润湿性造成影响<sup>[44-46]</sup>,煤尘颗粒表面基团包括含碳、含氧、含硫、含氮基团以及烷基侧链,以羟基、羧基、羰基为主的含氧基团是煤尘润湿性研究重点,如图 17 所示。

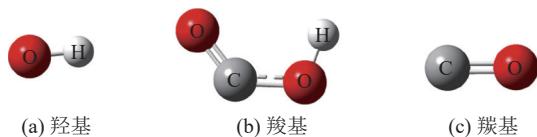


图 17 煤尘表面含氧官能团

Fig.17 Oxygen containing functional groups on the surface of coal dust

程卫民等<sup>[44]</sup>利用核磁共振和化学分析电子能谱实验测试煤种表面含氧、含碳基团分布,认为变质程度不同的煤种表面含氧、含碳基团随演化规律存在差异,其中芳香基团、羟基分别作为两种基团的主要影响公因子对润湿性产生影响。LIU 等<sup>[45]</sup>发现高阶煤种较低阶煤种表面含氧基团含量低,导致从低阶煤到高阶煤疏水性呈现梯度式增长。XU 等<sup>[46]</sup>选用 Walker 测试方法,发现增大含氧基团中的羟基含量可有效改善润湿性,表面与有机成分相关的无机矿物盐含量增多会增大疏水性,其关系如图 18 所示。

内部结构的研究重点在化学键结构、骨架结构参数、煤尘构成成分等方面<sup>[47-51]</sup>。文献 [47-50] 利用红外光谱、固体核磁共振技术、XRD 实验等开展了系列研究,发现煤的灰分、无机硅酸盐、表面含氧官能团、C—H 键分子结构与润湿性相关性较大,润湿性与固定碳含量呈负相关关系;芳环碳、质子化芳碳、

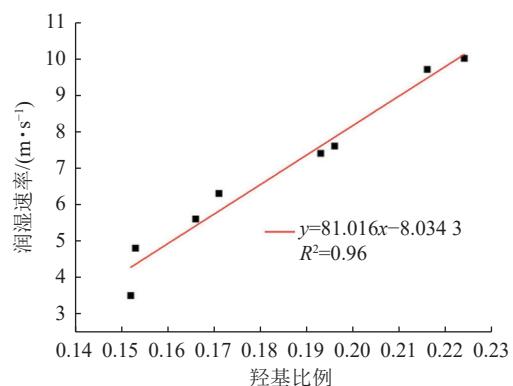


图 18 润湿速率与羟基的关系<sup>[46]</sup>

Fig.18 Relationship between wetting rate and hydroxyl groups<sup>[46]</sup>

桥接芳碳与煤尘疏水性呈正相关,醚氧碳、次甲基碳、氧接脂碳与煤尘亲水性呈正相关;煤的润湿性与堆砌度和延展度呈正相关,与微晶结构的面网间距呈负相关;煤中无机矿物含量提升导致煤种灰分含量提升,灰分含量是提升煤种亲水性能的主要影响因素。

当前很多学者从多种角度,采用多种实验方法对煤的润湿性进行了详细研究。但当前研究大多定性考虑了各因素的影响,缺少多种因素的定量关系的探究。

#### 4 优化喷雾特性研究现状

在矿井工作面降尘作业过程中,喷嘴是实现液态水转化为雾状水的主要工作元件,雾滴的形成与喷嘴结构密不可分<sup>[52]</sup>;现阶段喷嘴类型以流体类型为划分依据可分为单流体压力喷嘴和多流体压力喷嘴,以内部结构为划分依据可分为内结构喷嘴和外结构喷嘴<sup>[53]</sup>,喷嘴分类如图 19 所示。

大量研究表明喷雾特性优化手段主要分为喷嘴参数优化和施工参数优化 2 大类,其中喷嘴参数优化涉及喷嘴孔径、内部结构及喷孔形状等相关参数<sup>[54]</sup>,施工参数优化涉及供水压力、供气压力、气液压力比等相关参数<sup>[55]</sup>,喷雾特性参数优化手段分类如图 20 所示。

##### 4.1 喷雾特性表征参数及测定方法

喷雾特性是决定雾化效果优劣的重要参数,直接影响尘雾凝并湿式降尘效果。现阶段喷雾特性表征参数分为宏观参数和微观参数,其中宏观参数涉及喷雾射程<sup>[56]</sup>、雾化角<sup>[57]</sup>,微观参数涉及雾滴速度<sup>[58]</sup>、粒径分布<sup>[59]</sup>。表征参数测量手段涉及高速摄像机<sup>[60]</sup>、粒子图像测速仪<sup>[61]</sup>、多普勒法<sup>[62]</sup>及 Fraunhofer 衍射法<sup>[63]</sup>等多种测试方法,表征参数及测量手段如图 21 所示。



图 19 雾化喷嘴分类

Fig.19 Classification of atomizing nozzles

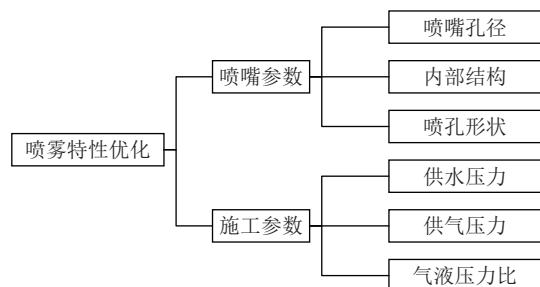


图 20 喷雾特性参数优化手段分类

Fig.20 Classification of optimization methods for spray characteristic parameters

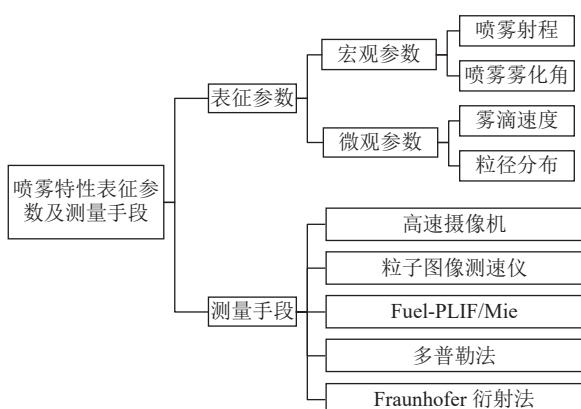


图 21 喷雾特性表征参数及测量手段

Fig.21 Characterization parameters and measurement methods of spray characteristics

#### 4.1.1 喷雾射程及测量手段

喷雾即为液态介质从喷嘴喷孔射流继续向前运动的距离, 其中涉及喷雾有效射程和喷雾最大射程 2 个概念<sup>[64]</sup>, 如图 22 所示; 液态介质离开喷孔, 该区

域内空间有限, 单位空间内雾滴数量多、粒径小, 沿射流方向速度快, 可以有效处理粉尘<sup>[65]</sup>; 之后受到风流场和重力等作用对雾滴造成能量损失, 导致雾滴速度变慢, 向地面运动, 在这一过程中雾滴之间会结合、凝聚导致粒径变大, 不利于对粉尘进行处理<sup>[66]</sup>。

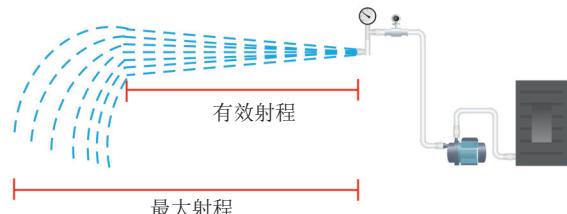


图 22 喷雾射程示意图

Fig.22 Schematic diagram of spray range

针对喷雾射程的测量手段多为高速摄像机获取喷雾场图像, 再利用数字图像处理技术对射程进行读取, 数字图像处理技术涉及对原始图像进行二值化处理<sup>[67]</sup>, 使喷雾场与气流场边界明显, 有利于对喷雾射程进行测量, 处理过程如图 23 所示。

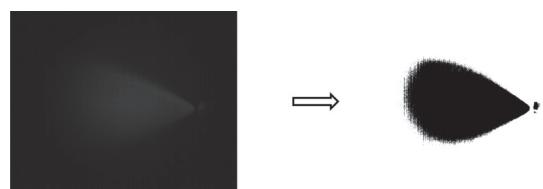


图 23 喷雾射程处理过程

Fig.23 Spray range treatment process

#### 4.1.2 喷雾雾化角及测量手段

喷雾雾化角决定喷雾的覆盖范围, 喷雾雾化角越大, 雾滴接触煤尘的概率越高, 越容易实现对粉尘的处理<sup>[68]</sup>。目前针对喷雾雾化角的测量手段多为高速摄像机获取喷雾场图像, 再利用数字图像处理技术对雾化角进行读取, 数字图像处理技术涉及对原始图像进行二值化处理<sup>[67]</sup>, 利用 MATLAB<sup>[69]</sup> 等软件对二值化后的图像进行处理, 处理过程如图 24 所示。

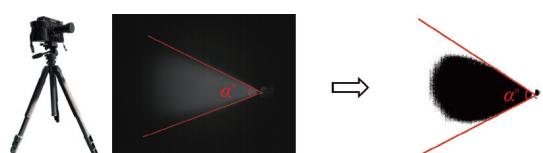


图 24 喷雾雾化角处理过程

Fig.24 Spray atomization angle treatment process

#### 4.1.3 雾滴粒度分布、运动速度及测量手段

雾滴粒径分布是影响降尘效果的重要表征参数之一, 实施喷雾降尘手段过程中雾滴粒径和粉尘粒径表达式<sup>[70]</sup> 为

$$d_p = \sqrt{\frac{9u_g \cdot d_g \cdot S}{\rho_p \cdot v_0}} \quad (22)$$

式中:  $S$  为惯性碰撞系数;  $\rho_p$  为粉尘密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

由式(22)可知, 降尘效率与雾滴粒径成负相关关系<sup>[71]</sup>, 雾滴粒径从  $100 \mu\text{m}$  减小到  $20 \mu\text{m}$ , 总粉尘和呼吸性粉尘降尘效率提升近 10%, 适用于对呼吸性粉尘进行处理的雾滴粒径区间在  $9 \mu\text{m}$  至  $30 \mu\text{m}$  之间<sup>[72]</sup>。当前对喷雾粒径分布的描述多采用平均粒径概念<sup>[73]</sup>, 其中 Sauter Mean Diameter(SMD) 应用最为广泛, 其表达式<sup>[74]</sup> 为

$$\text{SMD} = \frac{\sum N_i \cdot d_i^3}{\sum N_i \cdot d_i^2} \quad (23)$$

式中:  $d_i$  为不同雾滴粒径,  $\text{m}$ ;  $N_i$  为粒径为  $d_i$  的雾滴数量。

当前针对粒度分布的测量手段多为获取拍摄图像后, 再利用数字图像处理技术对粒度分布进行数字化处理<sup>[75]</sup>, 如图 25 所示。

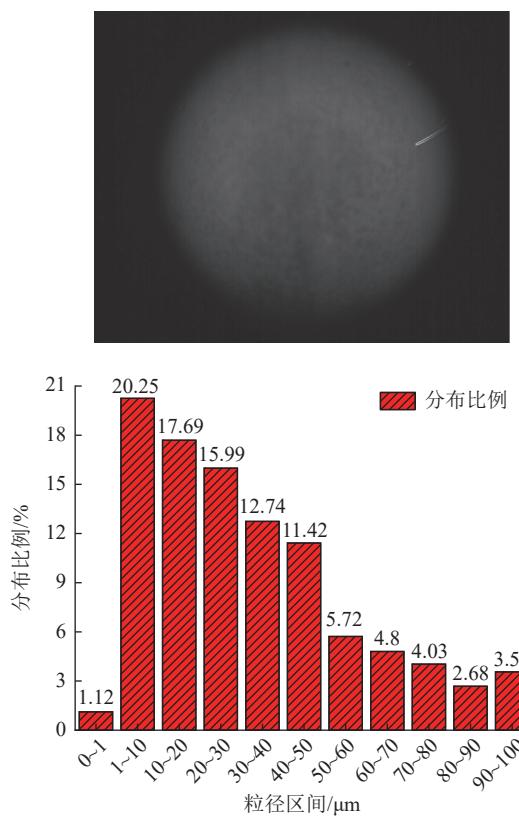


图 25 喷雾粒度分布处理过程

Fig.25 Spray particle size distribution treatment process

提高雾滴速度有利于雾滴和粉尘颗粒结合<sup>[76]</sup>, 同时可以提高润湿效率<sup>[77]</sup>。针对雾滴速度的测量多采用多普勒法和粒子图像测速仪, 多普勒法难以对近端喷雾场中的粒径分布进行测量<sup>[78]</sup>, 粒子图像测

速仪可对喷雾场全方位、各个角度的截面结构及瞬时图像<sup>[79]</sup>, 弥补多普勒法测量的缺点。因风流场对喷雾场的扰动, 喷雾内部粒径分布无法直观体现, 同时现阶段测量手段只针对单一表征参数, 多表征参数之间的耦合关系研究尚不完善。

## 4.2 雾化喷嘴类型

### 4.2.1 单流体喷嘴

单一流体机械雾化喷嘴在矿井工作面除尘作业中应用广泛, 雾化结果差异主要体现在喷嘴类型、孔径、供水压力等方面。ZHALEHRAJABI 等<sup>[80]</sup> 基于液滴成核理论, 采用实验、模拟相结合的手段, 探究喷嘴类型、压力和温度对雾化特性的影响, 发现增大压力对雾化特性影响明显, 温度与雾化颗粒粒度呈正相关。CHEN 等<sup>[81]</sup> 基于多普勒粒子分析平台对带有自激振动腔燃料喷嘴雾化特性进行测试分析, 自带结构腔结构参数会影响索特尔平均直径(SMD) 和算术平均直径(AMD), 优化雾化效果。陈琛等<sup>[82]</sup> 利用数值模拟手段分析旋流芯雾化喷嘴时发现开槽口喷嘴可弥补不开槽口喷嘴对水质要求高、易堵塞等缺点, 提升工作面除尘效率。王健等<sup>[83]</sup> 发现旋流叶片型喷嘴较于螺旋型、切向孔型喷嘴除尘效果好。AGARWA 等<sup>[84]</sup> 利用 X 射线断层扫描技术对喷嘴表面积和特征进行重构, 发现圆柱不对称水平特性会对射流的扰动更强烈, 导致较短完整芯长度和较好的一次雾化效果。苗懂艳等<sup>[85]</sup> 研究多参数对喷嘴雾化特性的影响, 螺旋喷嘴螺旋倾角会对雾化角、射程等数据产生影响, 同时优选出对雾滴轴向速度影响最大的压力。WANG 等<sup>[86]</sup> 研究压力旋流喷嘴射流雾化沿程粒度-速度分布特性, 将雾化场区域沿程分为混合区、膨胀区、稳定区、衰减区和稀薄区 5 个区域, 如图 26 所示, 根据沿程粒度-速度联合分析, 稳定区、衰减区是实现降尘的重点区域。

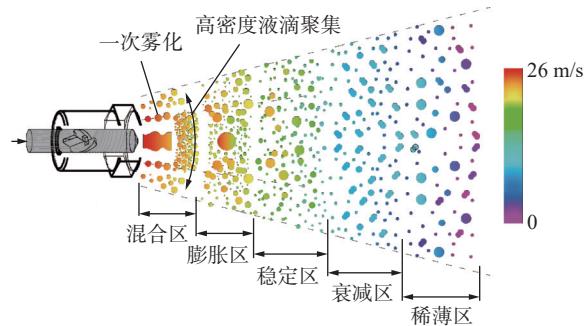


图 26 粒度-速度喷雾分区图<sup>[86]</sup>

Fig.26 Particle size velocity spray zoning diagram<sup>[86]</sup>

ZHOU<sup>[87]</sup> 对液态介质雾化喷射器一次雾化破碎特性进行研究, 采用 VtD 分析不同喷射速度条件下

雾化特性差异, 雾化角与射流速度呈正相关关系, 雾化液滴颗粒粒径在破碎过程中不断减小。

#### 4.2.2 多流体喷嘴

多流体喷嘴具有耗水量低, 雾化效果好的优点, 其研发可弥补单介质压力喷嘴耗水量大、雾化效果欠佳等缺点, 多相介质喷嘴主要侧重研究气相和液相的组合参数对雾化特性的影响。

陈聪等<sup>[88]</sup>从宏观、微观两角度对气、液压力组合作用下雾化特性进行研究, 在喷雾沿程轴线方向雾滴颗粒增大, 轴向、分向速度减小。袁辉等<sup>[89]</sup>探究不同气液比参数下两相流喷嘴雾化降尘效果, 气液比在一定范围内可改善雾化特性, 粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的雾滴颗粒对呼吸性煤尘的去除效果良好。蒋仲安等<sup>[90]</sup>分别采用一次雾化和二次雾化理论对影响雾化效果的主要因素进行分析, 雾化特性受多因素影响, 喷雾轴向沿程粒径分布符合增大—减小—增大趋势, 其中气液流量比与压力比存在幂指数关系, 如图 27 所示。

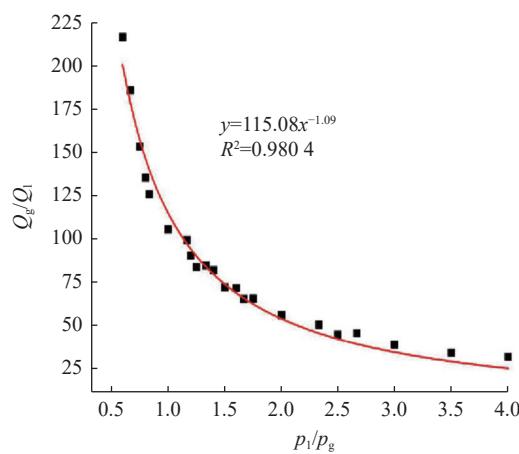


图 27 气液流量比与液气压力比的关系<sup>[90]</sup>

Fig.27 Relationship between gas-liquid flow rate ratio and gas-liquid pressure ratio<sup>[90]</sup>

WANG 等<sup>[91]</sup>探究气液两相喷嘴同水压、气压情况下不同喷射孔参数条件下除尘效果, 分析注水孔直径、空气注入孔数量、空气帽出口直径等参数对雾化效果的作用形式, 选择合适的参数组合可以在省水省气的前提下实现更好的除尘效果。蒋仲安等<sup>[92]</sup>分析新型气液雾化喷嘴雾化特性、冲击气流对控尘效率的影响规律, 如图 28 所示, 气液流量比是影响雾化特性的主要因素, 其中气压与雾化效果的关联度高于水压。

#### 4.3 雾化特性参数影响因素

雾滴颗粒数量、粒径、运动速度、浓度等特性参数是决定雾滴颗粒捕捉效果的重要因素。在液态介

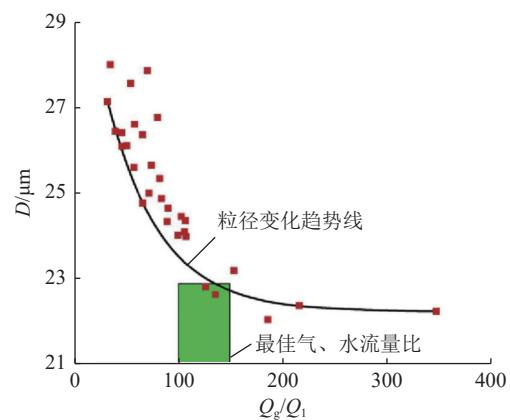


图 28 雾滴平均粒径随气、水流量比变化<sup>[92]</sup>

Fig.28 Average particle size of fog droplets varies with ratio of air to water flow rates<sup>[92]</sup>

质流量恒定的情况下, 雾滴颗粒粒径越小, 其在空间单位体积内数目越多, 与煤尘颗粒碰撞概率越大, 从而改善除尘效果; 但如果雾滴颗粒过小, 对改善捕捉煤尘颗粒效果提升并不明显, 其容易被矿井内的风流带走, 同时小颗粒的雾滴容易蒸发, 使原本已被捕捉的煤尘颗粒从又悬浮在工作空间, 降低除尘效果。二者之间的相对速度也是影响捕尘效果的重要参数, 提升雾滴颗粒速度, 可有效克服雾滴颗粒表面张力, 提高对煤尘颗粒的捕捉包裹能力; 但如果二者相对速度过大, 喷雾场会导致风流场紊乱, 造成二次扬尘; 快速运动的雾滴颗粒具有较大的动能, 能量过大促使雾滴颗粒蒸发, 降低除尘效果。

MA 等<sup>[93]</sup>利用 LIF 和 PIV 测试系统对不同气雾喷嘴不同压力组合下的雾化特性进行探究, 不同雾化方式和不同压力组合会影响雾滴颗粒速度、雾化角和雾化效果。王鹏飞等<sup>[67]</sup>设计仿真煤矿实验系统, 利用喷雾粒度仪测试不同供水压力、喷嘴孔径下的喷雾颗粒粒度分布, 数据显示增大供水压力导致流量增加, 雾化效果更好, 雾滴颗粒粒径减小; 在相同供水压力下, 增大喷嘴孔径会导致单位空间物化水量增大, 粒径增大; 雾滴颗粒粒度与供水压力呈现负相关关系, 与喷嘴孔径呈负相关。吴恩启等<sup>[94]</sup>改变气液夹角, 利用仿真和实验手段对不同结构喷嘴喷雾颗粒粒度分布进行模拟, 结果显示夹角为 20° 时, 雾化效果达到最优, 索特尔平均直径最小。刘赵森等<sup>[95]</sup>针对不同旋流槽数离心式喷嘴不同压力下雾化特性, 旋流槽数增多, 液膜破碎程度越高, 雾滴颗粒分布越均匀, 增大供水压力也可优化液膜破碎效果, 雾滴粒度减小。吴正人等<sup>[96]</sup>对不同压力、孔径下雾化液滴的直径分布进行模拟, 结果表明增大供水压力可优化雾化效果, 雾滴颗粒直径减小。

上述分析表明喷嘴的内、外流场相关参数均会对射流破碎过程种一次雾化和二次雾化的射流—破碎—雾化方式产生影响,进而影响尘雾凝并湿式除尘效果。内部流场的扰动结构会导致液态介质各向异性和不稳定性愈发明显,越易破碎、雾化;外部流场与经内流场处理后的液态介质相互作用导致破碎、雾化。优化内部流场结构可以减小能量损失,提升液滴与外部流场的相对速度可有效提升雾化效果。大量研究证明:在矿井工作面风流场中,针对所产粉尘粒径特征,雾滴粒径在30~120 μm<sup>[97]</sup>、雾滴速度在20~30 m/s<sup>[98-99]</sup>可有效改善除尘效果。现阶段单流体喷嘴和多流体喷嘴的研究重点分别为高压雾化喷嘴和气液雾化喷嘴,研究内容包括不同喷嘴结构、孔径、施工参数条件下对雾化特性的探究,用以表征喷嘴雾化效果,但大多数研究是基于工程背景,针对雾化机理与实践联系不够紧密,导致现有井下防尘系统施工参数不合理。雾化喷嘴作为评估工作面控尘系统除尘效果最为重要的部件,对不同雾化形式的喷嘴研究并不深入,现阶段研究结果表明气液雾化喷嘴较于高压雾化喷嘴雾化特性更为良好,但定性定量的比较分析尚不全面。

## 5 液态介质改性研究现状

### 5.1 液态介质特性对雾化效果影响

喷雾射流、雾化机理表明,液态介质物理特性和风流场扰动是导致破碎、雾化的主要因素,而表面张力是雾滴表面维持原本形状的作用力<sup>[100]</sup>。液态介质表面张力对雾化效果的作用机制主要体现在粒径分布中平均粒径参数,减小液态介质表面张力,促进液态介质破碎、雾化进程,减小液滴平均直径<sup>[101]</sup>。同时黏性力也是影响雾滴形成的中重要原因之一<sup>[102]</sup>,低黏度液态介质雾滴平均粒径差异不明显,随着黏度增加,雾滴平均粒径增大,粒径分布区间范围增大<sup>[103]</sup>。

### 5.2 表面活性剂作用机制

表面活性剂对煤尘润湿性的提升主要体现在降低液态介质表面张力和改变煤尘表面的性质两个方面,以增强液态介质对煤尘的润湿作用<sup>[104]</sup>。煤尘表面改性的主要作用形式是表面活性剂吸附在煤尘表面导致形成高能表面,交界处表面张力下降,进而提升润湿性能<sup>[105]</sup>。表面活性剂对尘雾凝并能力的促进作用主要体现在降低液态介质表面张力,改变与煤尘之间的疏水性能,有效提高雾滴和煤尘的结合能力,如图29、图30所示。同时,相同条件下添加表

面活性剂在经喷雾系统作用会降低雾滴大小、增多雾滴数量,增大其与煤尘的碰撞概率,进而提升除尘效率。

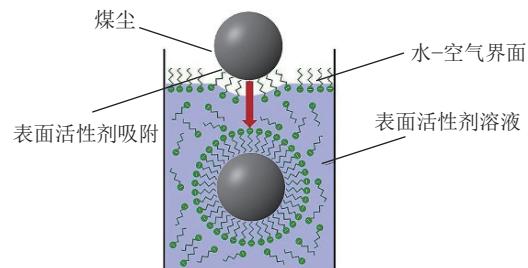


图29 煤尘从气-水界面进入溶液的动态润湿过程<sup>[105]</sup>  
Fig.29 Dynamic wetting process of coal dust entering solution from gas-water interface<sup>[105]</sup>

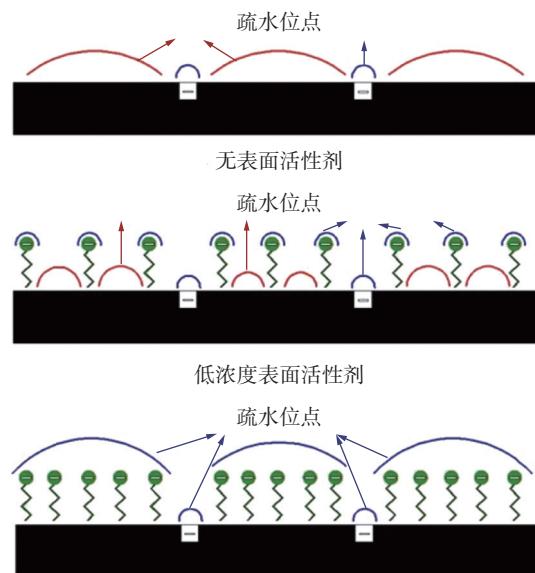


图30 疏水位点<sup>[105]</sup>  
Fig.30 Hydrophobic site<sup>[105]</sup>

### 5.3 表面活性剂研究现状

郑源臻等<sup>[106]</sup>构建润湿渗透模型用以表征表面活性剂溶液对沉积煤尘层的渗透润湿过程。齐健等<sup>[107]</sup>发现表面活性剂溶液浓度在临界胶束浓度CMC时,接触角最小,润湿能力最强。表面活性剂的分类判定依据多采用亲水性基团的差异来分类,亲水基团结构差异导致表面活性剂溶于水体现出的电荷性能不同<sup>[108-110]</sup>,以此依据大致将其分为阳离子表面活性剂、阴离子表面活性剂、非离子型表面活性剂、两性离子型表面活性剂<sup>[111]</sup>。WANG等<sup>[112]</sup>研究阳离子表面活性剂与褐煤吸附情况发现,阳离子表面活性剂更易吸附在煤样表面的负电位点。WANG等<sup>[113]</sup>研究阴、阳离子和非离子复配表面活性剂对润湿性的影响发现,离子液体和非离子表面活性剂可

有效提升润湿性能。王成勇等<sup>[114]</sup>采用测定红外光谱、接触角测定和密度泛函理论探究阴、阳离子表面活性剂低阶煤表面润湿性的调控机制,发现低阶煤表面润湿性受表面活性剂亲水基电荷分布、疏水基长度和药剂吸附量的影响。WANG等<sup>[115]</sup>研究发现复配活性剂溶液降尘效果优于水喷雾。刘硕等<sup>[116]</sup>通过实验和量子化学计算相结合的方法研究发现煤润湿特性受水分子、表面活性剂分子及煤分子三者的表面静电势分布影响。

国内外学者分析表面活性剂作用下溶液的接触角、表面张力、临界胶束浓度等参数评估表面活性剂对润湿性能的影响方面做了大量的工作。单一表面活性剂有作用形式单一、持续时间短、对不同变质程度煤种作用效果不一等缺点,通过混合复配的方式可弥补缺点,但复配表面活性剂对不同煤种的适用性及其与煤尘接触的规律等相关问题还需深入研究。

## 6 我国矿井尘雾凝并湿式除尘研究展望

国内外学者采用理论分析、实验研究等方法对尘雾凝并湿式除尘技术开展了诸多有益探索,但在实际应用中,仍存在雾化效果控制难度大,除尘效果不稳定等问题。此外,由于除尘效果影响因素复杂,喷雾雾化理论体系缺乏系统认知,除尘过程中煤尘、雾滴结合作用机制仍需研究,喷雾除尘效果评价标准尚不完善,粉尘和液滴在风流场中碰撞、团聚直至沉降过程不明确且该过程与粉尘、液滴二者之间的粒径分布、浓度/密度、碰撞角度/速度以及彼此间的动态接触角等参数关系不明确也在一定程度上制约了该技术的推广应用。为提高尘雾凝并降尘效果,仍需从以下几个方面进一步开展工作:

1)在降尘及雾化机理研究方面,围绕湿式除尘作业过程中雾滴与颗粒之间接触—润湿—结合—沉降过程、多效应协同降尘过程、内外流场对液态介质破碎—雾化协同作用过程等关键环节,明晰润湿过程及多种降尘机理协同作用机制,增强对内流场和外流场在液态介质破碎、雾化过程中的协同作用特点的系统认知,深入研究除尘作业时流场作用对雾化效果的作用规律。综合运用多种实验手段,从润湿—降尘机理、内外流场作用机制分析解决上述问题,完善除尘、喷雾雾化机理,促进尘雾凝并湿式除尘技术发展,形成矿井煤尘防治理论体系。

2)在提升煤尘润湿性方面,首先,通过对湿式除尘作业中气—固—液三相物质在煤尘润湿过程中的耦

合作用关系,增强对润湿过程的认识,构建表面张力与交界表面能的解析模型;然后,综合运用多种实验手段,由宏观入微观,由表面入内部分析多参数耦合作用;其次,建立润湿性能与影响参数间的量化关系,基于实验获得煤尘润湿过程中各因素对润湿过程的影响规律,联合分析多种参数对煤润湿性的影响特征并探究作用形式。

3)在完善雾化、降尘效果表征参数及测量手段方面,首先,针对喷雾场内部粒径分布,探究喷雾场内、外部喷雾特性差异,完善多雾化特性表征参数之间作用耦合关系,采用标准化测试手段对喷雾特性进行系统性研究,实现雾化特性多参数精准测量,提高评价结果准确性。

4)在优化雾化喷嘴雾化特性方面,首先,针对单流体喷嘴,在调控施工参数对雾化效果的基础上,采用重要度分析方法分析内外流场对改善雾化特性影响因素权重,明朗内流场结构及对液态介质的作用机制,优化单流体喷嘴内部结构以减小能量损失进而提升雾化效果;其次,基于双流体喷嘴体现出较于单流体喷嘴的优点和应用潜力,深入研究液态介质破碎、雾化这一过程涉及包括两相作用、动态变化等多种复杂物理现象,探寻一种适用于多种情况且可对雾化特性进行定性、定量分析的判别标准;同时,构建多因素耦合场,解析多因素协同作用的关系方程,量化复合参数的影响作用,从根本上解决喷嘴雾化效果不佳的煤尘防治难题。

5)在表面活性剂材料研发方面,首先,利用天然材料,通过对表面活性剂增强润湿性能微观反应机理,实现表面活性剂低价格、无毒害、无二次污染;然后,借助现代化设备和效果分析手段评估材料对润湿性的提升性能;其次,基于原子层面材料对表面张力作用机理,获得影响增效性能的主要影响因素并优化材料优选标准;最后,通过复配方式弥补单一材料缺陷,研制出适用于不同变质程度煤种的新型表面活性剂。

6)在现场应用方面,首先,从煤尘和液态介质2个角度对除尘效果进行优化,考虑煤种与液态介质之间的适用性;其次,基于工作面除尘工程实践,继续完善除尘技术应用规范,优化施工技术,研究并生产配套机械设备;再者,制定湿式除尘工艺参数标准,进行技术复合革新,扩展应用范围;最后,紧密联系实验室与工程实践,建立尘—雾协同作用下除尘效果判定准则,构建更为合理的除尘、喷雾雾化理论体系,促进降尘技术发展。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24–34.  
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, et al. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 24–34.
- [ 2 ] 张宏, 郭奋超, 马亮, 等. 综掘工作面气水联动除尘装置影响因素及应用效果分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(3): 189–194.  
ZHANG Hong, GUO Fenchao, MA Liang, et al. Analysis on influencing factors and application effect of air-water linkage dust removal device in fully mechanized heading face[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(3): 189–194.
- [ 3 ] 相海涛, 寇凯博, 严国超, 等. 表面活性剂对无烟煤润湿影响实验研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 127–131.  
XIANG Haitao, KOU Kaibo, YAN Guochao, et al. Experimental study on influence of surfactant on wetting of anthracite[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(4): 127–131.
- [ 4 ] 王利文. 综采工作面综合防尘技术应用[J]. 煤炭科技, 2023, 44(1): 131–134.  
WANG Liwen. Application of comprehensive dust prevention technology in fully-mechanized mining face[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2023, 44(1): 131–134.
- [ 5 ] 杨海鹏. 煤矿综掘面降尘技术研究[J]. 能源与节能, 2023(2): 115–119.  
YANG Haipeng. Dust suppression technology in fully mechanized excavation face of coal mines[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(2): 115–119.
- [ 6 ] 张袁宁, 刘刚, 童富果. 基于水气两相流的泄洪雾化机理及规律研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020, 35(4): 515–525.  
ZHANG Yuanning, LIU Gang, TONG Fuguo. Mechanism and change law of water-air two-phase flood discharge atomization [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(4): 515–525.
- [ 7 ] 严红, 陈福振. 航空发动机燃油雾化特性研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(9): 2038–2058.  
YAN Hong, CHEN Fuzhen. Review on fuel atomization in aer-oengine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(9): 2038–2058.
- [ 8 ] 杜云贺. 单/双流体喷嘴雾化及降尘性能实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021: 8–12.  
DU Yunhe. Experimental study on atomization and dust suppression performance of single/double fluid nozzle[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021: 8–12.
- [ 9 ] 吴超. 化学抑尘 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003: 76–78.
- [ 10 ] QIAN L J, LIN J Z, BAO F B. Numerical models for viscoelastic liquid atomization spray[J]. *Energies*, 2016, 9(12): 1079.
- [ 11 ] ZENG Z Y, LI Y F, SHANG T L, et al. Effects of the atomisation spray on heating transfer in evaporative condensers: A numerical study[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 42: 101923.
- [ 12 ] 曹建明. 液体喷雾学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 43–54.
- [ 13 ] XIA Y K, KHEZZAR L, ALSHEHII M, et al. Atomization of impinging opposed water jets interacting with an air jet[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 93: 11–22.
- [ 14 ] 魏伟. 综掘工作面粉尘扩散与不同粒径粉尘的沉降规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(5): 38–42.  
WEI Wei. Research on dust diffusion and settlement law of different particle size in fully mechanized excavation face[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(5): 38–42.
- [ 15 ] 张天, 荆德吉, 葛少成, 等. 超音速汲水虹吸气动雾化降尘技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3912–3921.  
ZHANG Tian, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Supersonic siphon suction water aerodynamic atomization in dust removal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3912–3921.
- [ 16 ] SUN B, CHENG W M, WANG J Y, et al. Development of Venturi negative-pressure secondary dedust device and application of local spray closure technique[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(1): 42–54.
- [ 17 ] NIE W, LIU Y H, WANG H, et al. The development and testing of a novel external-spraying injection dedusting device for the heading machine in a fully-mechanized excavation face[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 109: 716–731.
- [ 18 ] PAK S I, CHANG K S. Performance estimation of a Venturi scrubber using a computational model for capturing dust particles with liquid spray[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 138(3): 560–573.
- [ 19 ] LODGE J P Jr. Air pollution control engineering: Basic calculations for particulate collection[J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1980, 14(12): 1454–1455.
- [ 20 ] LIU Z Q, NIE W, PENG H T, et al. The effects of the spraying pressure and nozzle orifice diameter on the atomizing rules and dust suppression performances of an external spraying system in a fully-mechanized excavation face[J]. *Powder Technology*, 2019, 350: 62–80.
- [ 21 ] XU C W, NIE W, LIU Z Q, et al. Multi-factor numerical simulation study on spray dust suppression device in coal mining process[J]. *Energy*, 2019, 182: 544–558.
- [ 22 ] 王惠, 王贵昌, 蔡遵生, 等. 布朗扩散系数对胶体分形粒子簇扩散控制聚集动力学影响的 Monte Carlo 模拟[J]. 高等学校化学生物学报, 2000, 21(6): 922–925.  
WANG Hui, WANG Guichang, CAI Zunsheng, et al. Monte Carlo simulation to the effect of cluster Brownian diffusion coefficient on the colloidal fractal cluster aggregation kinetics[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2000, 21(6): 922–925.
- [ 23 ] CHEN S, CHEUNG C S, CHAN C K, et al. Numerical simulation of aerosol collection in filters with staggered parallel rectangular fibres[J]. *Computational Mechanics*, 2002, 28(2): 152–161.
- [ 24 ] YILBAS B S, HASSAN G, AL-SHARAFI A, et al. Water droplet dynamics on a hydrophobic surface in relation to the self-cleaning of environmental dust[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2984.
- [ 25 ] 侯腾彦, 高贵军, 刘邱祖. 矿用风水雾化器液滴破碎机理及其

- 降尘效率研究[J]. 矿山机械, 2014, 42(7): 132–135.
- HOU Tengyan, GAO Guijun, LIU Qiuizu. Study on droplet breakup mechanism and dust-fall efficiency of mine wind-water atomizer[J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(7): 132–135.
- [26] 陈建泽, 宋淑然, 孙道宗, 等. 远射程风送式喷雾机气流场分布及喷雾特性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 72–79.
- CHEN Jianze, SONG Shuran, SUN Daozong, et al. Test on air-flow field and spray characteristics for long-range air-blast sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 72–79.
- [27] AZADI TABAR M, GHAZANFARI M H, DEHGHAN MONFARED A. Compare numerical modeling and improved understanding of dynamic sessile drop contact angle analysis in Liquid-Solid-Gas system[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106552.
- [28] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 1991: 355–361.
- [29] 陈跃, 马东民, 夏玉成, 等. 低阶煤不同宏观煤岩组分润湿性及影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 97–104.
- CHEN Yue, MA Dongmin, XIA Yucheng, et al. Study on wettability and influencing factors of different macroscopic components in low rank coal[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 97–104.
- [30] ZHUO Q M, LIU W L, WANG P H, et al. Influence of flotation reagents on separation mechanism of macerals: A multi-scale study[J]. Fuel, 2023, 333: 126480.
- [31] LIU Z J, PU C, DU X D, et al. Combined effects of pore structure and surface chemistry on water vapor adsorption characteristics of coal: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(6): 104790.
- [32] XIE B, ZHANG X H, GE S C, et al. Hygroscopicity of coal powders with different ranks[J]. Fuel, 2024, 356: 129583.
- [33] DING Y S, YIN D W, HU H, et al. Influence characteristics and macro-meso mechanism of pressure immersion time on tensile properties for coal materials[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 2358–2370.
- [34] JIANG B Y, ZHOU Y, JI B, et al. Investigation on the effect of functional groups on the wettability of coal dust: Experiments and theoretical validation[J]. Fuel, 2023, 351: 128987.
- [35] BRACCO G, HOLST B. Surface science techniques[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [36] XU G, CHEN Y P, EKSTEN J, et al. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1060–1076.
- [37] LU W W, LIU Y, ZHANG Z Y, et al. Dual emissive amphiphilic carbon dots as ratiometric fluorescent probes for the determination of critical micelle concentration of surfactants[J]. Analytical Methods, 2022, 14(6): 672–677.
- [38] 村田逞诠. 煤的润湿性研究及其应用 [M]. 朱春笙, 龚祯祥译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992: 31–34.
- [39] 谭烜昊, 王鹏飞, 易波波, 等. 煤尘润湿性能与粒径关系的实验研究[J]. 矿业工程研究, 2018, 33(2): 14–17.
- TAN Xuanhao, WANG Pengfei, YI Bobo, et al. Experimental study on relationship between wetting performance and particle size of coal dust[J]. Mineral Engineering Research, 2018, 33(2): 14–17.
- [40] KOLLIPARA V K, CHUGH Y P, MONDAL K. Physical, mineralogical and wetting characteristics of dusts from Interior Basin coal mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 127: 75–87.
- [41] SAVITSKYI D P. Impact of the pH on angles of contact of water wettability of brown coal[J]. Journal of Water Chemistry and Technology, 2015, 37(4): 155–160.
- [42] 杨静, 徐辉, 高建广, 等. 粒度对煤尘表面特性及润湿性的影响[J]. 煤矿安全, 2014, 45(10): 140–143.
- YANG Jing, XU Hui, GAO Jianguang, et al. Influence of particle size on surface characteristic and wetting mechanism of coal dust[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(10): 140–143.
- [43] LI Q Z, LIN B Q, ZHAO S, et al. Surface physical properties and its effects on the wetting behaviors of respirable coal mine dust[J]. Powder Technology, 2013, 233: 137–145.
- [44] 程卫民, 徐翠翠, 周刚. 煤尘表面碳、氧基团随变质增加的演化规律及其对润湿性的影响[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(3): 295–304.
- CHENG Weimin, XU Cuicui, ZHOU Gang. Evolution law of carbon and oxygen groups on coal surface with increasing metamorphic grade and its effect on wettability[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2016, 44(3): 295–304.
- [45] LIU S Y, LIU X Y, GUO Z Y, et al. Wettability modification and restraint of moisture re-adsorption of lignite using cationic gemini surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 508: 286–293.
- [46] XU C H, WANG D M, WANG H T, et al. Effects of chemical properties of coal dust on its wettability[J]. Powder Technology, 2017, 318: 33–39.
- [47] 程卫民, 薛娇, 周刚, 等. 基于红外光谱的煤尘润湿性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2256–2262.
- CHENG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Study of coal dust wettability based on FTIR[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2256–2262.
- [48] 周刚, 程卫民, 徐翠翠, 等. 不同变质程度煤尘润湿性差异的<sup>13</sup>C-NMR 特征解析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2849–2855.
- ZHOU Gang, CHENG Weimin, XU Cuicui, et al. Characteristic analysis of <sup>13</sup>C-NMR for the wettability difference of coal dust with diverse degrees of metamorphism[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2849–2855.
- [49] 周刚, 薛娇, 程卫民, 等. 基于 X 射线衍射实验的堆垛结构对煤尘润湿性的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1535–1541.
- ZHOU Gang, XUE Jiao, CHENG Weimin, et al. Effect of stacking structure on the wettability of coal dust based on X-ray diffraction experiment[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(12): 1535–1541.
- [50] 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

- 系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(3): 462–468.
- CHENG 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.
- [51] 张新花, 徐翠翠, 颜国强, 等. 不同煤种润湿性影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(1): 156–158, 162.
- ZHANG Xinhua, XU Cuicui, YAN Guoqiang, et al. Influencing factors analysis of different types of coal wettability[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(1): 156–158, 162.
- [52] 邱贵霞, 侯力, 易宗礼, 等. 离心喷嘴喷口结构参数对雾化性能的影响分析[J]. 推进技术, 2020, 41(12): 2782–2789.
- QIU Guixia, HOU Li, YI Zongli, et al. Effects of structure parameters of centrifugal nozzle on atomization performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(12): 2782–2789.
- [53] 裴娜, 杨华, 刘联胜, 等. 喷孔结构对双旋流气泡雾化喷嘴喷雾特性的影响[J]. 流体机械, 2021, 49(9): 1–5, 12.
- PEI Na, YANG Hua, LIU Liansheng, et al. Effect of orifice structure on spray characteristics of double swirl effervescent atomizer[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(9): 1–5, 12.
- [54] HAN H, WANG P F, LI Y J, et al. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(1): 252–268.
- [55] LI Z H, WU Y X, CAI C R, et al. Mixing and atomization characteristics in an internal-mixing twin-fluid atomizer[J]. Fuel, 2012, 97: 306–314.
- [56] 马威. 煤矿井下气水喷雾化效果实验研究及应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 32–37.
- MA Wei. Experimental research and application of atomization effect of gas-water spray in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(11): 32–37.
- [57] 刘旭泽, 高贵军. 基于Hartmann哨超声喷嘴的雾化特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(3): 268–272.
- LIU Xuze, GAO Guijun. Atomization characteristics of ultrasonic nozzle with hartmann whistle structure[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(3): 268–272.
- [58] WANG H T, WU J L, DU Y H, et al. Investigation on the atomization characteristics of a solid-cone spray for dust reduction at low and medium pressures[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(5): 903–910.
- [59] WONGWAILIKHIT K, DIETRICH N, HÉBRARD G, et al. Performance of a monofiber optical probe in determining the droplet size and velocity in spray systems compared with a high-speed camera[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(51): 23366–23379.
- [60] WANG X G, HUANG Z H, KUTI O A, et al. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(4): 659–666.
- [61] 马中飞, 张于祥, 杨秀莉, 等. 自吸式喷雾降尘性能试验[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 97–101.
- MA Zhongfei, ZHANG Yuxiang, YANG Xiuli, et al. Experiment on dust suppression performance of self-priming sprayer [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 97–101.
- [62] YAO C D, GENG P L, YIN Z H, et al. Impacts of nozzle geometry on spray combustion of high pressure common rail injectors in a constant volume combustion chamber[J]. Fuel, 2016, 179: 235–245.
- [63] MINOV S V, COINTAULT F, VANGEYTE J, et al. Spray droplet characterization from a single nozzle by high speed image analysis using an in-focus droplet criterion[J]. Sensors, 2016, 16(2): 218.
- [64] NIE W, LIU F, XU C W, et al. Study on the optimal parameter range of droplet-wrapped respirable dust in spray dustfall by mesoscopic method[J]. Environmental Research, 2022, 214: 114035.
- [65] 聂文, 刘阳昊, 程卫民, 等. 综采面架间喷雾引射除尘技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4384–4390.
- NIE Wen, LIU Yanghao, CHENG Weimin, et al. Dust removal technology of eject spraying between hydraulic supports on fully mechanized mining face[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4384–4390.
- [66] 程超, 葛少成, 孙丽英, 等. 超音速气动液滴荷电雾化及降尘性能试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(12): 89–96.
- CHENG Chao, GE Shaocheng, SUN Liying, et al. Experimental study on charged atomization and dust reduction performance of supersonic pneumatic droplets[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(12): 89–96.
- [67] 王鹏飞, 刘荣华, 汤梦, 等. 煤矿井下高压喷雾化特性研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4433–4439.
- WANG Pengfei, LIU Ronghua, TANG Meng, et al. Study on atomization characteristics of high pressure spray in underground coal mines[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(9): 4433–4439.
- [68] 邬长福, 欧阳启明, 陈祖云, 等. hyd型低压除尘喷嘴雾化特性的实验研究[J]. 热能动力工程, 2016, 31(5): 99–105, 155–156.
- WU Changfu, OUYANG Qiming, CHEN Zuyun, et al. Experimental study of the atomization characteristics of a HYD type low pressure dust-removal nozzle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(5): 99–105, 155–156.
- [69] SHAFAEE M, BANITABEI S A, ESFAHANIAN V, et al. An investigation on effect of geometrical parameters on spray cone angle and droplet size distribution of a two-fluid atomizer[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(12): 3047–3052.
- [70] GAO G J, WANG C J, KOU Z M. Experimental studies on the spraying pattern of a swirl nozzle for coal dust control[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1770.
- [71] YAN J J, WANG F, LI Y C, et al. Influence of swirl intensity on atomization characteristics and dust-reduction using pressure swirl nozzle[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2025(47): 10895–10915.

- [ 72 ] FANG X M, YUAN L, JIANG B Y, 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.
- [ 73 ] MUGELE R A, EVANS H D. Droplet size distribution in sprays [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1951, 43(6): 1317–1324.
- [ 74 ] 聂文, 彭慧天, 晋虎, 等. 喷雾压力影响采煤机外喷雾喷嘴雾化特性变化规律 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 41–47.
- NIE Wen, PENG Huitian, JIN Hu, et al. The effect of spray pressure on atomization characteristics of external spray nozzle on coal mining machine [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(1): 41–47.
- [ 75 ] WANG H T, DU Y H, WEI X B, et al. An experimental comparison of the spray performance of typical water-based dust reduction media [J]. *Powder Technology*, 2019, 345: 580–588.
- [ 76 ] 陈曦, 葛少成, 张忠温, 等. 基于 Fluent 多喷嘴喷雾干涉数值模拟分析 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(6): 2503–2508.
- CHEN Xi, GE Shaocheng, ZHANG Zhongwen, et al. Numerical simulation and analysis of multi-nozzle interference base on Fluent [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(6): 2503–2508.
- [ 77 ] 王茂华. 喷雾降尘中加速沉降尘粒雾滴尾流效应研究 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 21–24.
- WANG Maohua. Research on droplet's wake effect with dust particle's accelerated sedimentation in dust control by spraying [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(9): 21–24.
- [ 78 ] ZHOU Z F, WU W T, CHEN B, et al. An experimental study on the spray and thermal characteristics of R134a two-phase flashing spray [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(15–16): 4460–4468.
- [ 79 ] GONO T, SYUTO T, YAMAGATA T, et al. Time-resolved scanning stereo PIV measurement of three-dimensional velocity field of highly buoyant jet [J]. *Journal of Visualization*, 2012, 15(3): 231–240.
- [ 80 ] ZHALEHRAJABI E, RAHMANIAN N, ZARRINPASHNE S, et al. Investigation of the growth of particles produced in a Laval nozzle [J]. *Particulate Science and Technology*, 2014, 32(6): 595–601.
- [ 81 ] CHEN B, GAO D R, WU S F, et al. Influence of self-excited vibrating cavity structure on droplet diameter characteristics of twin-fluid nozzle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(1): 73.
- [ 82 ] 陈琛, 郭增乐, 白淑敏. 旋流芯式喷嘴喷雾降尘数值模拟与现场应用 [J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 186–189.
- CHEN Chen, GUO Zengle, BAI Shumin. Numerical simulation and field application of swirling-cored nozzle for dust suppression [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(5): 186–189.
- [ 83 ] 王健, 刘荣华, 王鹏飞, 等. 常用压力式喷嘴雾化特性及降尘性能研究 [J]. 煤矿安全, 2019, 50(8): 36–40.
- WANG Jian, LIU Ronghua, WANG Pengfei, et al. Study on atomization characteristics and dust reduction performance of common pressure nozzles [J]. *Safety in Coal Mines*, 2019, 50(8): 36–40.
- [ 84 ] AGARWAL A, TRUJILLO M F. The effect of nozzle internal flow on spray atomization [J]. *International Journal of Engine Research*, 2020, 21(1): 55–72.
- [ 85 ] 苗懂艳, 高贵军. 喷嘴螺旋倾角对雾化性能影响的试验研究 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 14–17.
- MIAO Dongyan, GAO Guijun. Experimental study on influence of nozzle spiral inclination angle on atomization performance [J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(4): 14–17.
- [ 86 ] WANG J P, XU C C, ZHOU G, et al. Spray structure and characteristics of a pressure-swirl dust suppression nozzle using a phase Doppler particle analyze [J]. *Processes*, 2020, 8(9): 1127.
- [ 87 ] ZHOU R, SHEN C B, JIN X. Numerical study on the morphology of a liquid-liquid pintle injector element primary breakup spray [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2020, 21(8): 684–694.
- [ 88 ] 陈聰, 刘振. 基于多普勒技术的气水喷嘴雾场粒度速度实验研究 [J]. 煤矿安全, 2017, 48(12): 33–36.
- CHEN Cong, LIU Zhen. Experimental study on particle size velocity of air-water nozzle fog field based on Doppler technology [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(12): 33–36.
- [ 89 ] 袁辉, 徐锐, 陈本良, 等. 气水两相流喷嘴喷射条件对雾化降尘影响的实验研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 127–132.
- YUAN Hui, XU Rui, CHEN Benliang, et al. Experimental study on influence of the spray condition to dust removal of gas-liquid two-phase flow nozzle [J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(12): 127–132.
- [ 90 ] 蒋仲安, 许峰, 王亚朋, 等. 空气雾化喷嘴雾化机理及影响因素实验分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2360–2367.
- JIANG Zhongan, XU Feng, WANG Yapeng, et al. Experimental analysis of atomization mechanism and influencing factors of air atomizing nozzle [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(10): 2360–2367.
- [ 91 ] WANG P F, SHI Y J, ZHANG L Y, et al. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 128: 316–328.
- [ 92 ] 蒋仲安, 王亚朋, 许峰. 金属矿山气-水喷头雾化特性及降尘能力实验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(1): 184–192.
- JIANG Zhongan, WANG Yapeng, XU Feng. Experimental study on atomization characteristics and dust reduction capacity of gas-water nozzles in metal mines [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(1): 184–192.
- [ 93 ] MA R, DONG B, YU Z Q, et al. An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 149–156.
- [ 94 ] 吴恩启, 顾自明, 赵兵, 等. 空气雾化喷嘴的设计与实验研究 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(4): 69–75.
- WU Enqi, GU Ziming, ZHAO Bing, et al. Design of an air atomized nozzle and its experimental study [J]. *Journal of Engineering*

- ing for Thermal Energy and Power, 2018, 33(4): 69–75.
- [ 95 ] 刘赵森, 李泽轩, 林家源, 等. 压力条件对旋流槽数不同的离心式喷嘴液膜破碎及雾化的影响研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 247–256.
- LIU Zhaomiao, LI Zexuan, LIN Jiayuan, et al. Effect of the slot number on the breakup and atomization of liquid film in swirl nozzle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(4): 247–256.
- [ 96 ] 吴正人, 吴启东, 肖华, 等. 喷嘴组的雾化特性及液滴直径分布影响因素研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 741–747.
- WU Zhengren, WU Qidong, XIAO Hua, et al. Influencing factors of atomization characteristics and droplet diameter distribution of nozzle groups[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2022, 36(6): 741–747.
- [ 97 ] COLINET J, HALLDIN C N, SCHALL J. Best practices for dust control in coal mining[M]. Second edition. Pittsburgh: DH-HS, 2021.
- [ 98 ] 程卫民, 周刚, 左前明, 等. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1308–1313.
- CHENG Weimin, ZHOU Gang, ZUO Qianming, et al. Experimental research on the relationship between nozzle spray pressure and atomization particle size[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1308–1313.
- [ 99 ] 周刚, 程卫民, 聂文, 等. 高压喷雾射流雾化及水雾捕尘机理的拓展理论分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 121–126.
- ZHOU Gang, CHENG Weimin, NIE Wen, et al. Extended theoretical analysis of jet and atomization under high-pressure spraying and collecting dust mechanism of droplet[J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(3): 121–126.
- [ 100 ] SHIN J, KIM D, SEO J, et al. Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle[J]. *Energy*, 2020, 205: 118090.
- [ 101 ] EJIM C E, RAHMAN M A, AMIRFAZLI A, et al. Effects of liquid viscosity and surface tension on atomization in two-phase, gas/liquid fluid coker nozzles[J]. *Fuel*, 2010, 89(8): 1872–1882.
- [ 102 ] LI Z H, WU Y X, YANG H R, et al. Effect of liquid viscosity on atomization in an internal-mixing twin-fluid atomizer[J]. *Fuel*, 2013, 103: 486–494.
- [ 103 ] KHAN M A, GADGIL H, KUMAR S. Influence of liquid properties on atomization characteristics of flow-blurring injector at ultra-low flow rates[J]. *Energy*, 2019, 171: 1–13.
- [ 104 ] 肖进新, 赵振国. 表面活性剂应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [ 105 ] XU C H, WANG D M, WANG H T, et al. Experimental investigation of coal dust wetting ability of anionic surfactants with different structures[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 121: 69–76.
- [ 106 ] 郑源臻, 李庆钊, 代华明, 等. 沉积煤尘层表面渗透润湿模型的试验研究[J]. *中国煤炭*, 2015, 41(7): 100–103, 115.
- ZHENG Yuanzhen, LI Qingzhao, DAI Huaming, et al. Experimental study on wetting and permeating model of fallen coal dust surface[J]. *China Coal*, 2015, 41(7): 100–103, 115.
- [ 107 ] 齐健, 闫奋飞, 王怀法. 不同煤种接触角及润湿性规律探究[J]. *矿产综合利用*, 2018(2): 112–117.
- QI Jian, YAN Fenfei, WANG Huaifa. Study on contact angle and wetting property of different coal[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(2): 112–117.
- [ 108 ] NI G H, SUN Q, XUN M, et al. Effect of NaCl-SDS compound solution on the wettability and functional groups of coal[J]. *Fuel*, 2019, 257: 116077.
- [ 109 ] MENG J Q, XIA J K, MENG H X, et al. Effects of surfactant compounding on the wettability characteristics of Zhaozhuang coal: Experiment and molecular simulation[J]. *Tenside Surfactants Detergents*, 2020, 57(5): 390–400.
- [ 110 ] SHI G Q, HAN C, WANG Y M, et al. Experimental study on synergistic wetting of a coal dust with dust suppressant compounded with noncationic surfactants and its mechanism analysis[J]. *Powder Technology*, 2019, 356: 1077–1086.
- [ 111 ] 张雪洁, 陈明义, 张同浩, 等. 表面活性剂水溶液抑制煤体瓦斯解吸作用的研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(6): 738–751.
- ZHANG Xuejie, CHEN Mingyi, ZHANG Tonghao, et al. Research progress of surfactant aqueous solution inhibiting the desorption of gas in coal[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(6): 738–751.
- [ 112 ] WANG J, HE Y Q, ZHANG Y, et al. Research on cationic surfactant adsorption performance on different density lignite particles by XPS nitrogen analysis[J]. *Fuel*, 2018, 213: 48–54.
- [ 113 ] WANG K, DING C N, JIANG S G, et al. Application of the addition of ionic liquids using a complex wetting agent to enhance dust control efficiency during coal mining[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 122: 13–22.
- [ 114 ] 王成勇, 邢耀文, 夏阳超, 等. 离子型表面活性剂对低阶煤润湿性的调控机制[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3101–3107.
- WANG Chengyong, XING Yaowen, XIA Yangchao, et al. Regulation mechanism of ionic surfactant on the wettability of low rank coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 3101–3107.
- [ 115 ] WANG X N, YUAN S J, LI X, et al. Synergistic effect of surfactant compounding on improving dust suppression in a coal mine in Erdos, China[J]. *Powder Technology*, 2019, 344: 561–569.
- [ 116 ] 刘硕, 葛少成, 王俊峰, 等. 基于量子化学分析表面活性剂对不同煤种润湿机理的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 105–111.
- LIU Shuo, GE Shaocheng, WANG Junfeng, et al. Influence of surfactants on wettability mechanism of different coals based on quantum chemistry analysis[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(11): 105–111.