

# 微雾喷嘴雾化特性及降尘性能

李浩轩<sup>1</sup>, 刘荣华<sup>1,2\*</sup>, 王鹏飞<sup>1,2</sup>, 邬高高<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**微雾喷嘴是一种改良型的湿式除尘构件。为了解其雾化特性和降尘效果, 选用斯普瑞、泰格、LN 这 3 种不同微雾喷嘴, 基于现有实验平台及分析仪器进行了 2 组实验研究。结果表明: 在出口直径相同时, 随着水压的升高, 3 种喷嘴的流量、射程均增大, 雾滴粒径减小, 雾化角则先增大后减小; 当固定水压时, 这 3 种喷嘴的流量、雾化角和雾滴粒径随喷嘴出口直径增大而增大, 射程随出口直径增大而减小; 当出口直径为 0.5 mm 时, 随着水压增加, 3 种喷嘴的全尘和呼吸性粉尘降尘效率均先升高后降低, 斯普瑞喷嘴的降尘效率在多数工况下优势明显。

**关键词:**微雾降尘; 供水压力; 雾化特性; 降尘效率

中图分类号: TD714.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2022)01-0063-07

## Atomization Characteristics and Dust Reduction Performance of Micro-Mist Nozzle

LI Haoxuan<sup>1</sup>, LIU Ronghua<sup>1,2</sup>, WANG Pengfei<sup>1,2</sup>, WU Gaogao<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safety Mining Techniques of Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The micro mist nozzle is an improved wet dust removal component. In order to understand its atomization characteristics and dust reduction effect, three different types of micro-mist nozzles, namely Spray, Tiger, and LN, are selected, and two groups of experimental studies are carried out based on the existing experimental platform and analytical instruments. Results show that when the outlet diameter is the same, as the water pressure increases, the flow rate and range of the three nozzles increase, the droplet size decreases, and the atomization angle first increases and then decreases. When the water pressure is fixed at this time, the flow rate, atomization angle and droplet size of these three nozzles increase with the increase of the nozzle outlet diameter, and the range decreases with the increase of the outlet diameter. When the outlet diameter is 0.5 mm, as the water pressure increases, the dust reduction efficiency of all dust and respirable dust of the three nozzles increases first and then decreases. The dust reduction efficiency of the Spray nozzle has obvious advantages in most working conditions.

**Keywords:** micro-mist dust suppression; water supply pressure; atomization characteristics; dust reduction efficiency

据国家统计局发布的近三年国民经济和社会发展公报显示, 我国煤炭消费总量逐年递增, 同时, 煤炭消费量在能源消费总量中占比长期稳定在 60% 左右, 可以预计, 煤炭这种主要能源为我国社会经济发展

收稿日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574123); 湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A185)

\* 通信作者, E-mail: rhliu2008@sina.com

发挥重要作用的现状短期内不会发生改变<sup>[1-3]</sup>。随着我国煤矿智能化建设的大力推进,开采过程中的机械化、自动化水平不断攀升,其产尘量也大幅激增,污染工作环境的同时,对井下作业人员的健康也构成了巨大威胁,尤其是粉尘粒径小于  $7.07\ \mu\text{m}$  的呼吸性粉尘,可引起包括尘肺病在内的多种严重疾病,粉尘治理刻不容缓<sup>[4-8]</sup>。喷雾降尘具有装置简单、适用范围广等特点,已成为目前湿式除尘领域普遍采用的一种有效措施<sup>[9-11]</sup>。

目前,国内外学者对喷雾降尘机理及其降尘效果影响因素进行了大量相关研究。S.Chand 通过对水喷淋降尘做了大量系统性实验后,发现只有在尘粒与雾滴均具有一定初始动能的前提下,二者才能发生有效碰撞并聚集在一起<sup>[12]</sup>。徐立成等结合空气动力学的观点分析研究,结果显示在雾滴与含尘气流相遇后,后者不会沿着流线绕开雾滴,而是根据惯性作用的原理继续沿原运动方向移动,进而将会和雾滴发生碰撞,最终被其捕集并共同沉降<sup>[13]</sup>。王鹏飞等自主设计搭建喷雾降尘实验平台模拟巷道工况,对喷雾装置进行性能测试和雾化特性研究,并通过系统性的实验,分析降尘效率的影响因素,实验结果显示当雾滴平均粒度接近粉尘颗粒粒径时降尘效果最好<sup>[14-18]</sup>。当前普遍采用的喷嘴具有一定局限性,主要体现在其对呼吸性粉尘的降尘效果不尽人意,于是微雾降尘技术应运而生,该技术的特点是能够产生粒径更小、与粉尘颗粒粒度更接近的雾滴,从而有效提升降尘效率。目前,微雾喷嘴已应用于雾炮车、雾炮机等湿式除尘设备中<sup>[19-21]</sup>。本文通过实验的方法对微雾喷嘴的雾化特性和降尘性能进行研究,研究成果将对微雾喷嘴在湿式除尘领域更广泛的应用提供参考。

## 1 实验系统及方案

### 1.1 实验系统

本研究所涉及的实验基于喷雾降尘实验平台进行,该实验平台由巷道模型、发尘装置、供水系统、供气系统及测量设备等 5 个部分组成,主要仪器仪表有马尔文实时高速喷雾粒度分析仪、BPZ75/12 型高压水泵、高速摄像仪、AG410 型干粉气溶胶扩散器、CCZ-20 型粉尘采样器等仪器。实验系统如图 1 所示。

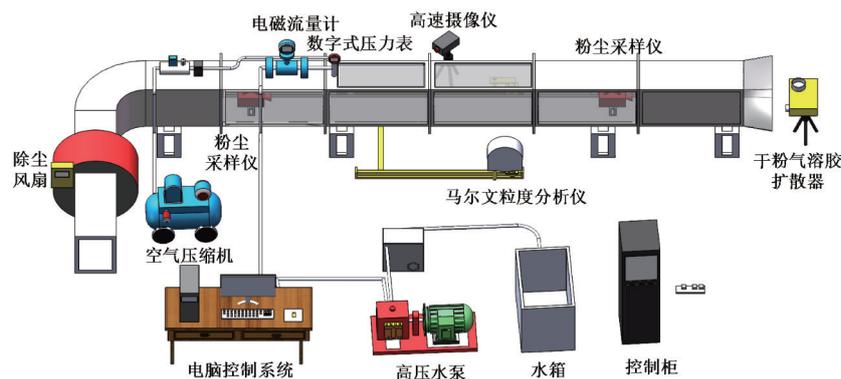


图 1 喷雾降尘实验系统

经过前期现场调研和实测,实验所使用的喷嘴定为斯普瑞、泰格和 LN 微雾喷嘴,这 3 种微雾喷嘴内部结构设计合理,具有较为理想的雾化效果,雾化场均呈实心圆锥状,每种喷嘴均选取 3 种规格,即出口直径分别为  $0.5, 0.7, 1.1\ \text{mm}$ 。

### 1.2 实验方案

本研究共设计 2 组实验。第 1 组为微雾喷嘴的雾化特性实验,主要研究雾化角、雾滴粒径、射程和喷嘴流量等参数与供水压力的关系。通过调节高压水泵,设定供水压力分别为  $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\ \text{MPa}$  这 6 种工况,再依次测定上述工况下斯普瑞、泰格、LN 这 3 种微雾喷嘴在 3 种不同出口直径下的雾化特性参数。首先通过高速摄像仪记录不同工况下喷嘴产生的喷雾流场,再利用 Image-ProPlus 6.0 软件对数据进行提取、处理和分析,得出喷嘴的雾化角和射程;喷嘴流量通过电磁流量计直接读取;将马尔文实时高速喷雾粒度分析仪的激光发射器与接收器分别安设在沿雾流喷射方向与喷嘴水平距离  $50\ \text{cm}$  处的巷道模型两侧,并取该处截面中心作为雾滴特性参数采集点,测定并分析得出喷雾场雾滴的粒径及分布。

第 2 组为微雾喷嘴降尘性能实验。选择在第 1 组实验中雾滴粒径参数最小时对应的出口直径,测定该直径下 3 种喷嘴在第 1 组实验中 6 种供水压力下的降尘效率。实验所用粉尘粒径小于  $106\ \mu\text{m}$ ,采用 150 目(筛孔尺寸为  $100\ \mu\text{m}$ )标准工业筛通过筛分得到。发尘装置为 AG410 型干粉气溶胶扩散器,设置发尘量为

15 g/min,输送气压为 0.2 MPa.通过调节变频除尘风机,使整个降尘实验过程中巷道模型内的风速稳定在 1.0 m/s.在喷雾段前后分别设置 CCZ-20 型粉尘采样器,设置采样时间为 120 s,吸气流量为 15 L/min.对采集到的粉尘样品进行烘干操作,通过 LS13320 型激光粒度分析仪分别对前后两种粉尘样品进行粒径体积频率分析,得出喷雾段前、后含尘气流中的全尘和呼吸性粉尘的质量浓度,进而计算出微雾喷嘴的降尘效率.

## 2 实验结果分析

### 2.1 宏观雾化特性参数分析

在喷雾降尘的现场应用中,喷嘴的流量、雾化角和射程是评价其降尘性能的 3 项关键指标,其中雾化角和射程决定了雾滴与尘粒发生有效碰撞的空间范围的大小,而喷嘴流量则是衡量喷嘴单位时间雾化水能力的重要指标<sup>[22-23]</sup>.3 种喷嘴在不同出口直径下喷嘴流量与供水压力的关系如图 2 所示.

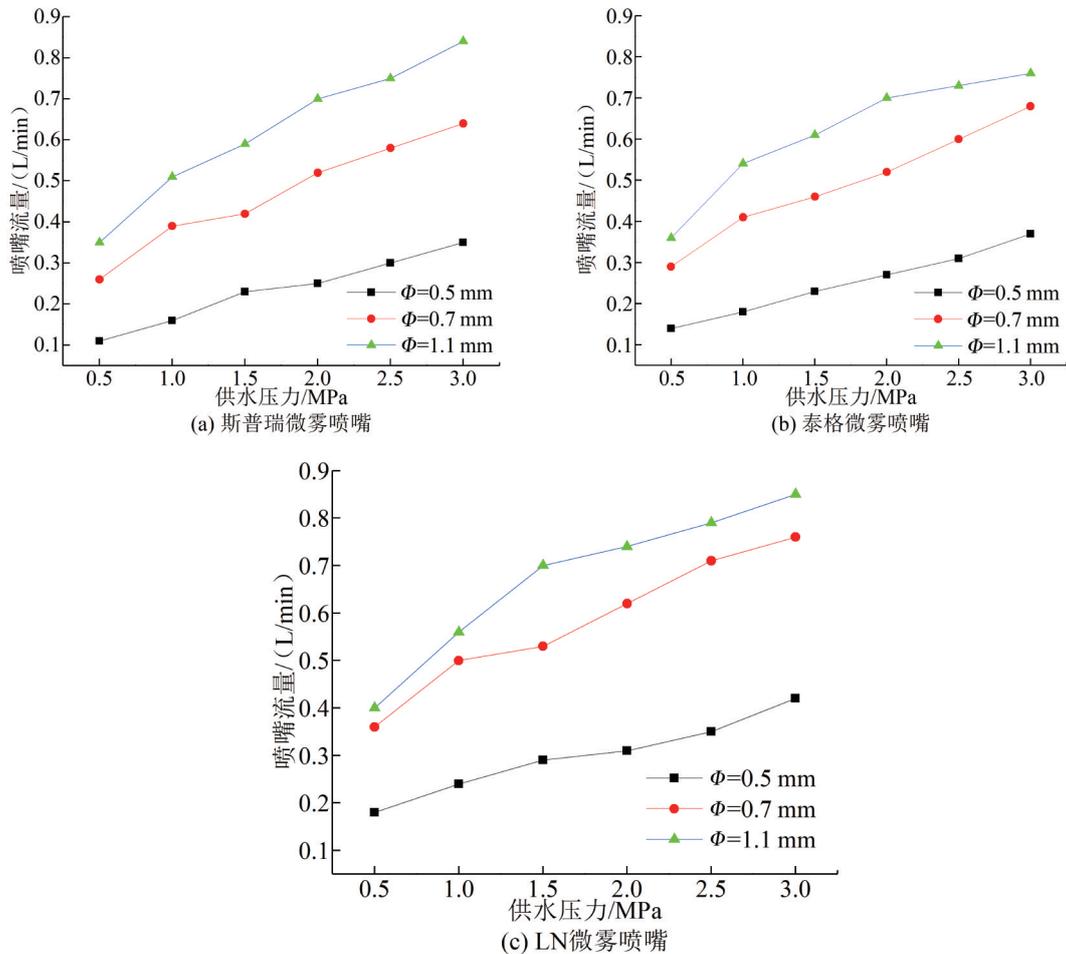


图 2 3 种喷嘴的喷嘴流量与供水压力关系

由图 2 可知:相同的供水压力下,3 种喷嘴的流量均随出口直径的增大而增加,这是由于出口直径的增大会减小出口处的局部阻力,有利于水的流动;同时,相同出口直径的喷嘴流量亦随供水压力的增加而增大.当出口直径为 0.5 mm 和 0.7 mm 时,相同的供水压力下 LN 微雾喷嘴的流量最大,其次是泰格,斯普瑞流量最小,且 LN 喷嘴的流量相较于其余 2 种喷嘴优势明显,后两者差值较小,如当供水压力为 2 MPa、出口直径为 0.5 mm 时, LN、泰格、斯普瑞喷嘴的流量依次为 0.31, 0.27, 0.25 L/min;相同水压下,出口直径为 0.7 mm 时, LN、泰格、斯普瑞喷嘴的流量依次为 0.62, 0.52, 0.52 L/min.不同喷嘴的流量随出口直径和水压变化的增减幅度不一.当出口直径为 1.1 mm 时,在供水压力为 0.5~1.5 MPa 时,泰格喷嘴流量大于斯普瑞喷嘴流量;在水压为 2.0 MPa 时两者数值相等,均为 0.7 L/min;而在 2.5~3.0 MPa 水压段,增长较快的斯普瑞喷嘴流量超过泰格;LN 喷嘴在各种水压下,其流量都是 3 种喷嘴中最大的,这是因为 LN 喷嘴相较于其他 2 种喷嘴在结构上具有明显的差异,斯普瑞和泰格微雾喷嘴出水口一端均为平口设计,而 LN 微雾喷嘴

的出水口位于半球面的顶部位置,该构造有利于减小水流阻力,故其喷嘴流量在相同水压和出口直径的情况下更大。

图3为3种喷嘴在不同出口直径下雾化角与供水压力的关系。由图3可知:喷嘴出口直径保持一定时,随着供水压力增加,喷嘴的雾化角按照先增大后减小的规律变化;同时,在相同水压下,喷嘴的雾化角随出口直径的增大而增大。由前文可知,提高供水压力可使喷嘴流量增大,不断增大的水流量提高了喷嘴内部旋流强度,进而增大了喷嘴出口处的射流径向速度,导致雾化角随之增大。但这种变化并不是线性的,并且当供水压力增大至一定程度时,随着流量和雾滴速度的提高,雾化场中心产生较大负压,雾化场的边界在负压作用下不断向内收缩,雾化角将随之变小。由图3还可发现,在任意工况下LN喷嘴的雾化角均为3种喷嘴中的最小值。如供水压力为1.0 MPa时,LN喷嘴在出口直径为0.5,0.7,1.1 mm时的雾化角分别为51.96°,64.08°,67.58°,而泰格和斯普瑞喷嘴在相应工况下的雾化角分别为68.45°,88.52°,98.73°和72.13°,83.68°,95.26°。此外,随着出口直径的增大,3种喷嘴雾化角由增至减的拐点处对应的供水压力逐渐变低,如当直径为0.5 mm时,3种喷嘴雾化角在供水压力为2.5 MPa时开始减小,当直径增加至0.7 mm时,拐点处对应的供水压力为2.0 MPa。

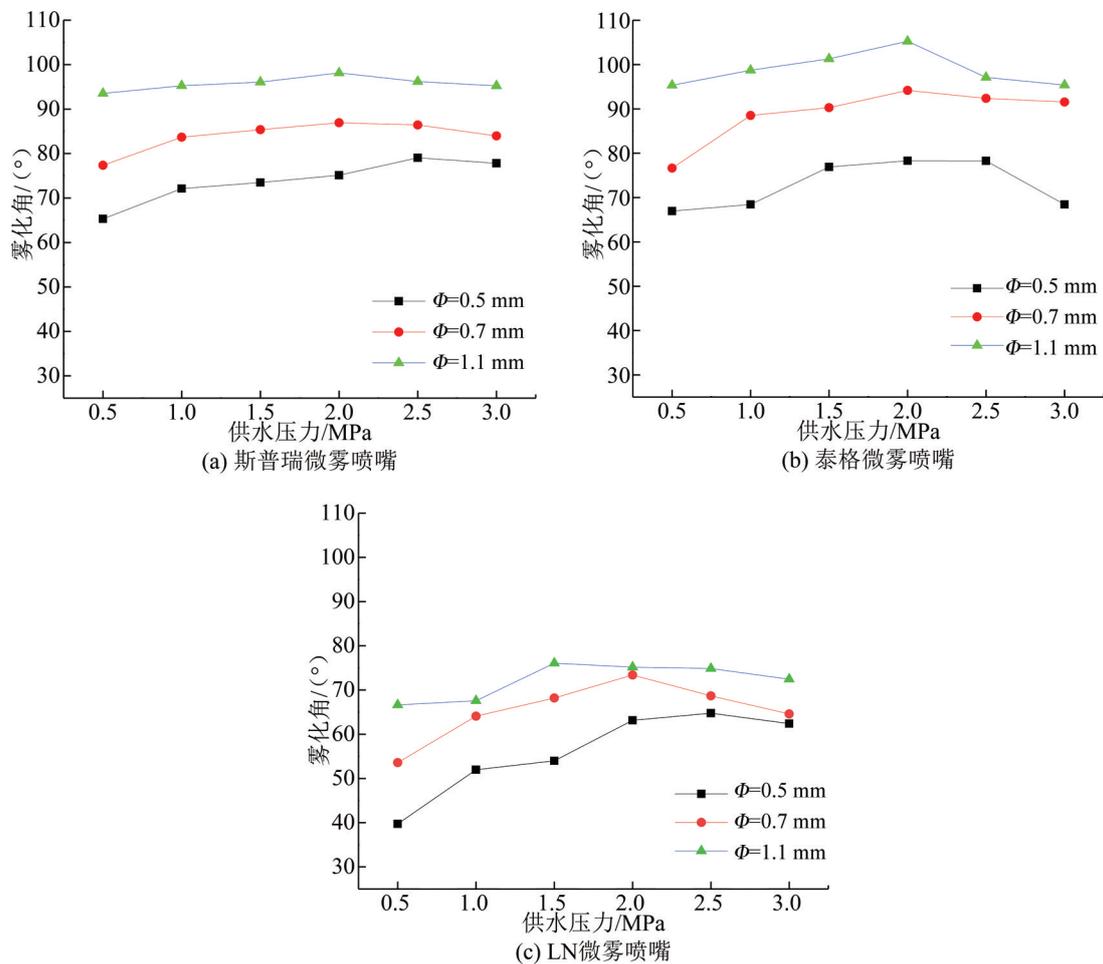


图3 3种喷嘴的雾化角与供水压力关系

3种喷嘴在不同出口直径下射程与供水压力的关系如图4所示。在相同出口直径下,射程随供水压力的增大而增大;在相同供水压力下,射程则随出口直径增大而减小。结合前文对流量和雾化角的分析可知,微雾喷嘴的流量随出口直径的增大有不同程度的提高,但流量增大的同时雾化角也会大幅增加,导致射流的轴向速度被分散削减,从而射程随出口直径的增大逐渐变小。对3种喷嘴横向比较可以看出:当水压为0.5~2.0 MPa时,在射程方面LN喷嘴相较其余2种喷嘴具有明显的优势。如当水压为2.0 MPa时,LN喷嘴在出口直径为0.5,0.7,1.1 mm下的射程依次为133,125,118 cm,而泰格和斯普瑞喷嘴的射程依次为113,110,106 cm和118,111,108 cm。当水压增至3.0 MPa时,3种出口直径下斯普瑞和泰格喷嘴的射程均超越

LN 喷嘴.以出口直径 0.5 mm 为例,斯普瑞喷嘴射程为 171 cm,泰格喷嘴射程为 161 cm,而 LN 喷嘴射程仅为 157 cm,比斯普瑞和泰格喷嘴分别低 8.2% 和 2.5%.由此可见 LN 喷嘴在低水压区间射程优势明显,但其射程随水压变大的增长率最小.进一步分析还可发现,射程随出口直径的增大而减小的幅度并不明显.6 种供水压力下,3 种喷嘴在出口直径从 0.5 mm 增至 0.7 mm 和从 0.7 mm 增至 1.1 mm 两段,斯普瑞、泰格、LN 喷嘴的射程平均降低率分别为 5.5%,5.0%;5.5%,4.6% 和 5.8%,3.9%.

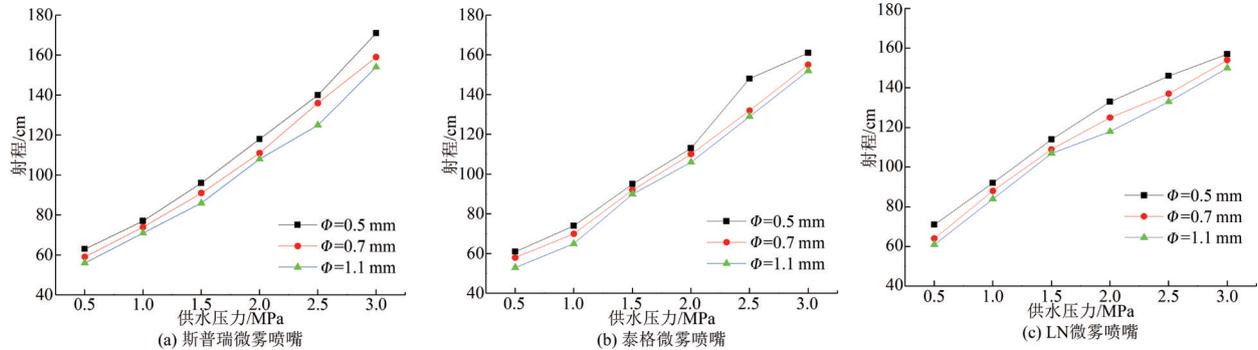


图 4 3 种喷嘴的射程与供水压力关系

根据上述分析,在微雾降尘实际应用中,可结合喷嘴特性对微雾喷嘴进行合理的选择与布置.当水压较低且需要远距离降尘时,宜选用 LN 小口径喷嘴;若作业环境可提供较高的供水压力时,则优先选用斯普瑞微雾喷嘴;对于需要大面积降尘的现场作业,则适合选用雾化角较大的泰格微雾喷嘴,可减少安设的喷嘴数量.

## 2.2 雾滴粒径分析

雾滴粒径是与微雾喷嘴雾化除尘效果紧密相关的参数.现有研究表明,雾滴粒径与尘粒粒度越接近,除尘效果越明显<sup>[24-25]</sup>.衡量雾滴粒径的指标较多,常用的有  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  等特征直径,其中使用频率最高的是  $D_{50}$ ,即颗粒的质量中值直径,其含义为当颗粒物中小于某一直径的各种粒度的颗粒物质量之和占有颗粒物总质量的 50%,则称该直径为质量中值直径,该项指标的增减情况很大程度反映了雾滴粒径的变化趋势.实验得到不同出口直径下 3 种喷嘴的雾滴质量中值直径与供水压力的关系,如图 5 所示.

由图 5 可知:3 种喷嘴在相同出口直径下,其雾滴质量中值直径随着供水压力的提高均出现不同幅度的下降.当出口直径为 0.5 mm,供水压力从 0.5 MPa 增至 3.0 MPa 时,泰格微雾喷嘴的  $D_{50}$  从 82.86  $\mu\text{m}$  减小到 54.55  $\mu\text{m}$ ,降幅达到 34.17%,LN 喷嘴的  $D_{50}$  从 88.20  $\mu\text{m}$  减小至 59.30  $\mu\text{m}$ ,斯普瑞喷嘴的  $D_{50}$  从 63.75  $\mu\text{m}$  减至 49.58  $\mu\text{m}$ ,降幅分别为 32.77% 和 22.23%.当出口直径为 0.7 mm 和 1.1 mm,水压从 0.5 MPa 升高到 3.0 MPa 时,斯普瑞、泰格、LN 喷嘴的  $D_{50}$  分别下降了 34.03%,43.21%;38.73%,43.69%;41.90%,29.09%.在 0.5 mm 和 1.1 mm 出口直径下,3 种喷嘴中泰格微雾喷嘴雾滴粒径随供水压力的升高而减小的幅度最大,而在出口直径为 0.7 mm 时,则是 LN 微雾喷嘴减小幅度最大.

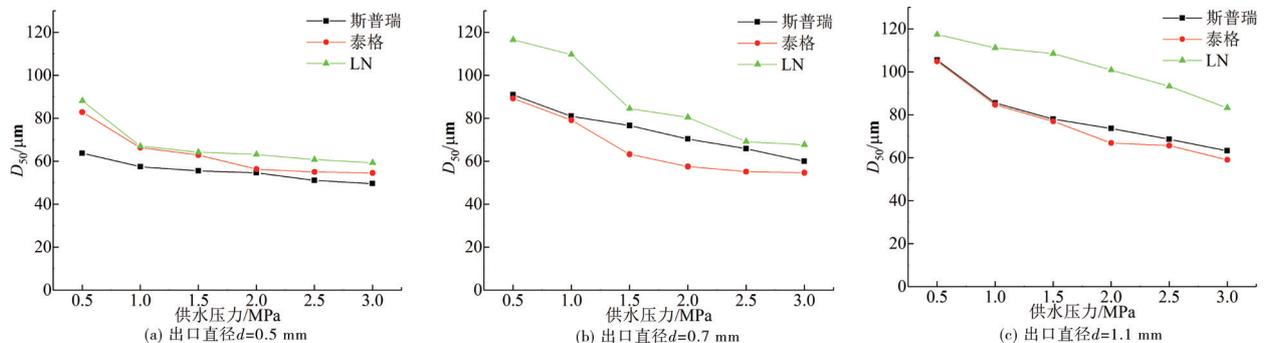


图 5 3 种喷嘴的  $D_{50}$  与供水压力关系

由图 5 还发现:3 种喷嘴在不同出口直径下  $D_{50}$  的排序不同.任意出口直径下,LN 喷嘴的  $D_{50}$  均为 3 种

喷嘴中数值最大的,且多数工况下远大于其余2种喷嘴的 $D_{50}$ ,随着出口直径的增大,3种喷嘴的 $D_{50}$ 均出现不同幅度的增长.当出口直径从0.5 mm增至0.7 mm时,斯普瑞、泰格、LN喷嘴在6种不同水压下的 $D_{50}$ 平均涨幅分别为33.42%,5.01%,30.40%;当出口直径从0.7 mm增至1.1 mm时,三者的涨幅分别为5.07%,15.69%,18.94%.总体来看,斯普瑞、泰格、LN喷嘴在出口直径由0.5 mm增至1.1 mm的过程中, $D_{50}$ 平均增长率分别为19.24%,10.35%,24.67%.

由此可见,LN喷嘴的 $D_{50}$ 总涨幅、分段涨幅和初始值均为3种喷嘴中的最大值,故其雾滴粒径始终大于其余2种喷嘴;斯普瑞喷嘴初始 $D_{50}$ 小于泰格,增长速度先快后慢,且总涨幅仅次于LN喷嘴,故其仅在0.5 mm出口直径下雾滴粒径最小;泰格微雾喷嘴因其增幅最小,是出口直径为0.7 mm和1.1 mm时雾滴粒径最小的喷嘴.

### 2.3 降尘性能分析

雾滴粒径是喷嘴除尘效率的主要影响因素,且微雾喷嘴与传统压力喷嘴相比,其核心优势为雾滴粒径更小.故选取0.5 mm出口直径的3种喷嘴,依次测定其在第1组实验中6种供水压力下的降尘效率.通过第2组实验得到3种喷嘴的全尘降尘效率和呼吸性粉尘降尘效率,如图6和图7所示.

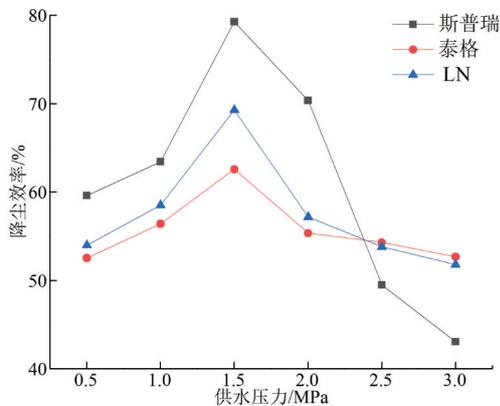


图6 喷嘴结构对全尘降尘效果的影响

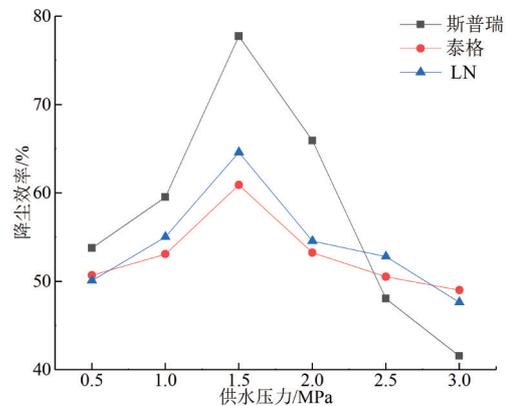


图7 喷嘴结构对呼吸性粉尘降尘效果的影响

由图6和图7可知:随供水压力的提高,3种喷嘴在全尘和呼吸性粉尘降尘效率2项指标上呈现大致相同的规律,均表现为先升高后降低的变化特点.这是由于喷雾降尘主要是通过尘粒与雾滴之间的惯性碰撞原理发挥作用,故雾滴粒径与粉尘粒度越接近,发生碰撞的概率就越大.因此,在初始阶段,升高供水压力使雾滴在喷嘴内被破碎成更小的颗粒,雾滴粒径的缩小对喷嘴降尘效率的提高起到了立竿见影的效果.然而这并不表示雾滴的粒径越小越好,因为过小的雾滴不仅蒸发过快、极易随气流流动,且无法完全润湿尘粒,碰撞结合后的雾滴-尘粒组合体仍可悬浮于空气中,无法达到降尘目的,这种情况下反而不利于降尘效率的提升.同时由雾化特性实验可知,当供水压力超过一定范围后,继续提升水压将使雾化角不断减少,这种情况下所产生的雾化场将更加集中,使其在巷道的截面上所形成的有效降尘面积大幅缩减,同样对降尘不利.

由图6和图7还发现:供水压力在0.5~1.5 MPa时为降尘效率的递增区间,且增幅逐渐变大,3种喷嘴在水压为1.5 MPa时降尘效率达到峰值;供水压力在1.5~3.0 MPa时为降尘效率的递减区间,在此区间内,泰格和LN喷嘴的降尘效率减小幅度逐渐趋于平缓,斯普瑞喷嘴的降尘效率减幅先大后小.横向对比3种喷嘴,在供水压力为0.5~2.0 MPa时,斯普瑞微雾喷嘴的降尘效率相比于其余2种喷嘴具有明显优势,其次是LN喷嘴.如水压为1.5 MPa时,斯普瑞喷嘴的全尘和呼吸性粉尘降尘效率分别为79.27%,77.73%,而泰格、LN喷嘴对应的效率则分别为62.58%,60.92%;69.28%,64.60%.继续增大水压至2.5 MPa,斯普瑞喷嘴的降尘效率锐减,降至低于泰格和LN喷嘴的水平.当供水压力为2.5 MPa和3.0 MPa时,泰格和LN喷嘴的全尘降尘效率较为接近,而在呼吸性粉尘降尘效率上,LN喷嘴在2.0 MPa和2.5 MPa水压下数值较大,而在3.0 MPa水压下则是泰格喷嘴较大.

由上述分析可知,对于微雾喷嘴,只需提供较低的供水压力即可达到理想的雾化状态,并实现显著的

降尘效果,继续增大水压,不仅不利于粉尘的捕集,还会加剧设备的磨损和资源的浪费。3种喷嘴中,斯普瑞微雾喷嘴的降尘性能最好,在多种供水压力下的降尘效率具有明显优势,且在1.5 MPa水压下全尘和呼吸性粉尘的降尘效率均接近80%。

### 3 结论

1) 出口直径相同时,随着供水压力的升高,3种喷嘴的流量、射程均增大,雾化角先增大后减小;在固定的供水压力下,随着出口直径的增加,3种喷嘴的流量和雾化角均增大,射程反而减小。

2) 出口直径相同时,3种喷嘴的雾滴粒径随供水压力的升高而减小;固定供水压力时,雾滴粒径则会随出口直径的增大而增大。3种喷嘴中,当出口直径为0.5 mm时,斯普瑞微雾喷嘴所产生的雾滴粒径最小;当出口直径达到0.7 mm及以上的规格时,泰格微雾喷嘴雾滴粒径最小。

3) 随着供水压力的增加,3种喷嘴的全尘和呼吸性粉尘降尘效率均呈现先升高后降低的变化趋势,且斯普瑞喷嘴的降尘效率在水压为0.5~2.0 MPa时具有明显优势。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局.中华人民共和国2018年国民经济和社会发展统计公报[N].人民日报,2019-03-01(10).
- [2] 国家统计局.中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报[N].人民日报,2020-02-29(5).
- [3] 国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[N].人民日报,2021-03-01(10).
- [4] PALUCHAMY B, MISHRA D P, PANIGRAHI D C. Airborne respirable dust in fully mechanised underground metalliferous mines—Generation, health impacts and control measures for cleaner production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296:126524.
- [5] 王渊.浅谈煤矿尘肺病预防及粉尘危害防治[J].科技风,2018(26):151-152.
- [6] 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.
- [7] 钟任扬,温泉,孔祥钦,等.生产性粉尘危害与防护[J].职业卫生与应急救援,2017,35(1):97-99.
- [8] ZOU C F. Analysis on Dust Control Technology in Open-pit Quarry[J]. Journal of Energy and Natural Resources, 2021, 10(1):28-32.
- [9] 李仲科,蒋宜宸,王天暘.溜煤眼半封闭式干雾抑尘装置研发及应用[J].能源技术与管理,2021,46(2):20-22.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] CHAND S. The Role of Water in Air-jet Texturing (A Critical Review)[J]. Journal of the Textile Institute, 1995, 86(3):438-444.
- [13] 徐立成,孙和平.微细水雾捕尘理论与应用[J].通风除尘,1996(4):16-18.
- [14] 桂哲,刘荣华,王鹏飞,等.供水压强对气水喷雾雾化粒度的影响[J].矿业工程研究,2016,31(3):21-25.
- [15] GUO C, NIE W, XU CW, et al. A study of the spray atomization and suppression of tunnel dust pollution based on a CFD-based simulation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276:123632.
- [16] 汤梦,刘荣华,王鹏飞,等.高压喷雾雾化特性及降尘效率实验研究[J].矿业工程研究,2015,30(1):76-80.
- [17] WANG Y P, JIANG Z A, CHEN J S, et al. Study of high-pressure air curtain and combined dedusting of gas water spray in multilevel ore pass based on CFD-DEM[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(9):1789-1804.
- [18] 王鹏飞,刘荣华,汤梦,等.煤矿井下高压喷雾雾化特性及其降尘效果实验研究[J].煤炭学报,2015,40(9):2124-2130.
- [19] 黄妍清.封闭空间内细水雾降尘效率影响因素实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2018.
- [20] 岳敏,陈勇,韩世水.智能高压微雾的抑尘作用评价[J].山东化工,2020,49(24):263-267.
- [21] 杨志刚.不同因素对采煤机喷雾系统降尘效果的影响分析[J].机械管理开发,2018,33(8):60-61.
- [22] LILAN H Q, QIAN J B, PAN N, et al. Study on atomization particle size characteristics of two-phase flow nozzle[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(4):7837-7847.
- [23] 周建平.矿石输送系统的微雾抑尘技术应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [24] 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.
- [25] 高卫彬.大断面煤巷综掘机高压外喷雾降尘技术研究[J].机械管理开发,2021,36(4):169-170.