

中文引用格式:张天,穆新升,陶爽,等. 新型超音速气动雾化喷嘴雾化特性及降尘性能[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11): 239-246.

英文引用格式:ZHANG Tian, MU Xincheng, TAO Shuang, et al. Research on atomization characteristics and dust reduction performance of new supersonic pneumatic atomization nozzles[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 239-246.

新型超音速气动雾化喷嘴雾化特性及降尘性能*

张天^{1,2}讲师, 穆新升^{1,2}, 陶爽^{1,2}, 郭雨浩^{1,2}, 沈社伏^{1,2}, 陈星宇^{1,2}

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000)

中图分类号: X964

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0603

基金项目: 国家自然科学基金资助(52204216); 中国博士后启动基金资助(2022M711456); 辽宁省自然科学基金资助(2022-BM-331); 国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室开放基金资助(KLECDH20230101)。

【摘要】 为解决现有气动喷雾技术对呼吸性粉尘的实际降除效果不佳的问题, 研创一种新型超音速气动雾化技术, 通过试验和数值模拟方法分析该技术的雾化特性, 并通过多尺度试验对比分析该技术与超音速虹吸式、内混式气动雾化降尘技术的瞬态降尘性能。结果表明: 新型超音速气动雾化喷嘴喷雾场中形成高速细雾域, 随喷射距离的增加, 雾滴粒径逐渐增大、雾滴速度逐渐减小; 不同水流量时, 随着压力的增大, 雾滴粒径减小, 雾滴运动速度增大, 降尘效率逐步提升; 与超音速虹吸式和内混式气动雾化喷嘴相比, 不同水流量下, 当气动压力为 0.3~0.4 MPa 时, 新型喷嘴均具有更小的雾滴粒径和更大的雾滴运动速度, 具有更高的降尘效率, 最高可达 90%。随气动压力的增大, 新型喷嘴形成的高速细雾区域范围增大, 微雾浓度增加, 使不同时刻小粒径粉尘的降尘效率升高; 当气动压力为 0.4 MPa、水流量为 10 L/h 时, 对 2.5~10 μm 的呼吸性粉尘降尘效果最佳。

【关键词】 超音速气动雾化; 雾化喷嘴; 雾化特性; 降尘性能; 高速细雾

Research on atomization characteristics and dust reduction performance of new supersonic pneumatic atomization nozzles

ZHANG Tian^{1,2}, MU Xincheng^{1,2}, TAO Shuang^{1,2}, GUO Yuhao^{1,2},
SHEN Zhifu^{1,2}, CHEN Xingyu^{1,2}

(1 College of Safety Science and Technology, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: Respirable dust in coal mine operation space seriously endangers the health of workers. The existing pneumatic spray technology is not effective in reducing and removing respirable dust. To this end, a new supersonic pneumatic atomization technology was developed. The atomization characteristics were studied by experiments and numerical simulation. The transient dust reduction performance of this technology was compared with that of supersonic siphon and internal hybrid pneumatic atomization dust reduction technologies through multi-scale experiments. The results show that the high-speed fine mist

domain is formed in the spray field of the new supersonic pneumatic atomization nozzle, and the droplet size and velocity gradually increase with the increase of spray distance. Compared with supersonic siphon and internal mixing pneumatic atomization nozzles, when the pneumatic pressure is 0.3–0.4 MPa and under different water flows, the new nozzles have smaller droplet size, higher droplet movement speed, and higher dust reduction efficiency, which can reach up to 90%. With the increase of pneumatic pressure, the range of high-speed fine mist area formed by the new nozzle increases, and the concentration of micro-mist increases, so that the dust reduction efficiency of small particle size dust increases at different times. When the pneumatic pressure is 0.4 MPa and the water flow rate is 10 L/h, the dust reduction effect of 2.5–10 μm respirable dust is the best.

Keywords: supersonic pneumatic atomization; atomizing nozzle; atomization characteristics; dust reduction performance; high-velocity fine fog

0 引言

煤炭在开采过程中会产生大量的高质量浓度呼吸性粉尘,严重危害工作人员的身心健康,还可能引发爆炸事故造成重大人员伤亡^[1]。据统计,2021年,全国共报告各类职业病新病例12 212例,其中,职业性尘肺病报告9 173例,占比为75.11%^[2]。为防治煤矿粉尘,目前主要的除尘方式有通风除尘、喷雾降尘及除尘器除尘等。其中,喷雾降尘技术因操作简便、安装方便、成本低廉等优势被广泛应用^[3];但传统的降尘雾化喷嘴存在较多的缺陷,如耗水量大、降尘效率低、易堵塞等^[4]。

国内外学者对喷雾降尘技术进行了深入研究。刘荣华等^[5]提出一种新型组合式喷雾降尘装置,并对该新型装置气流场分布规律、雾化粒度的空间分布特性以及相关影响因素开展了试验研究。王鹏飞等^[6]为掌握内混式空气雾化喷嘴喷雾特性及降尘性能,对内混式空气雾化喷嘴雾滴粒径、雾滴速度等喷雾特性参数及降尘效率进行实测,并与试验结果作对比分析。BECK等^[7]分别在综采工作面拟态风速条件下对空心锥、全锥、空气雾化和液压雾化喷嘴降尘过程作了大量试验,较高的喷雾压力使雾滴具有较小粒径和较快的运动速度,从而在风流干扰下获得较高的降尘效率。荆德吉等^[8]为解决矿井胶带运输巷粉尘质量浓度超标问题,设计一种新型节能气动喷雾降尘方案,除尘效率可达94.1%。柳承徽等^[9]为探究不同气压下气动式细水雾流场的形态变化,分别使用质量流量控制器和粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)技术,测定气动式双流体细水雾喷嘴水雾流场特性。

综上所述,尽管国内外学者针对矿井粉尘的喷雾防治技术做了很多研究,但呼吸粉尘的防治依旧

缺乏高效的喷雾技术支撑。当前研发出的一种超音速同轴气动雾化喷嘴(简称同轴雾化喷嘴)^[2],经过试验验证了其呼吸性粉尘的捕集效率,但该喷嘴的雾化特性、喷雾流场及其降尘性能及与相似技术的对比效果仍需进一步研究。鉴于此,笔者拟通过试验和数值模拟方法,研究同轴喷嘴的雾化特性,并通过多尺度试验对比分析该喷嘴与超音速虹吸式气动雾化降尘喷嘴(简称虹吸雾化喷嘴)、内混式气动雾化降尘喷嘴(简称内混雾化喷嘴)的瞬态降尘性能,以期对超音速同轴气动雾化技术的进一步优化和现场应用提供指导。

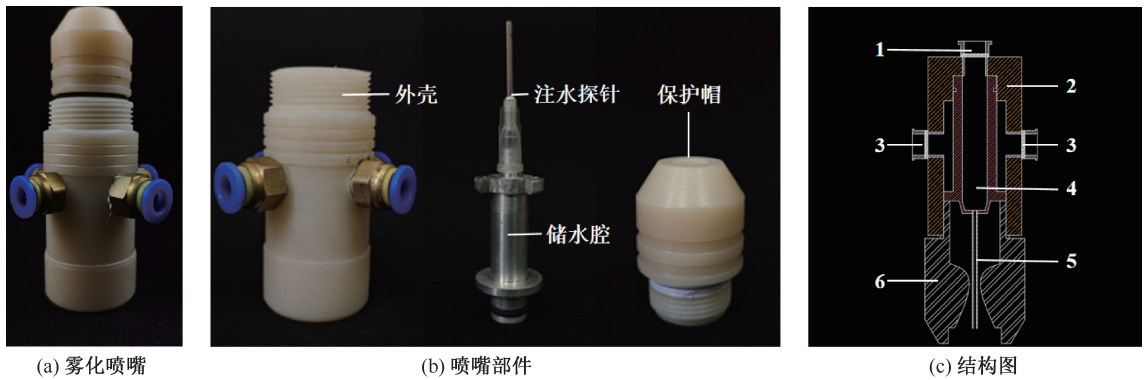
1 同轴雾化喷嘴

同轴雾化喷嘴利用超音速雾化原理,通过拉瓦尔喷管将气流先压缩再扩张使其达到超音速,在超音速流场中高压喷射使液体在其中受到高速剪切气流、大尺度涡旋和激波的共同作用,经液柱断裂、一次破碎、二次破碎之后成为微米级雾滴并具有较大运动速度^[10]。同轴雾化喷嘴的装配结构如图1所示。注水探针与拉瓦尔喷管产生的跨音速流场处于同轴状态,可有效减少探针对跨音速流场的能量损耗,提高雾化效果^[2]。

2 雾化特性测试

2.1 试验平台

影响喷雾降尘效率的雾滴特性主要包括雾滴粒径与雾滴速度,为此,搭建超音速同轴雾化喷嘴雾化特性试验平台,如图2所示。该平台主要由喷雾系统和雾滴分析系统组成。喷雾系统主要包括空压机、水泵、液体流量计、气体稳压阀、喷嘴等。雾滴分析系统主要通过激光粒度分析仪和PIV测速仪分别测试雾滴的粒径和速度。试验过程中,首先校准

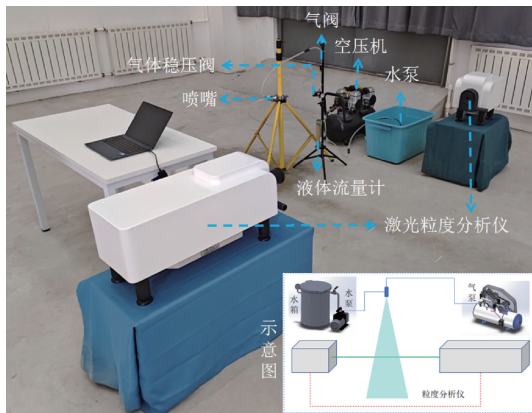


1-进水口;2-外壳;3-进气口;4-储水腔;5-注水探针;6-保护帽

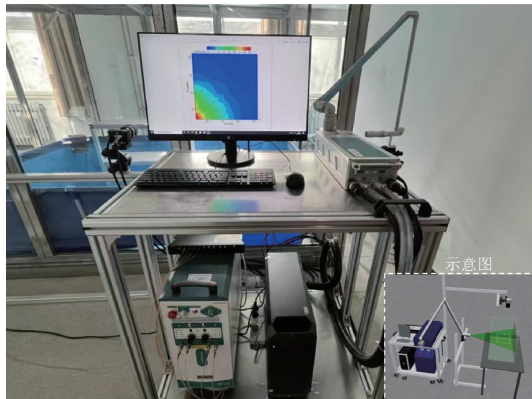
图 1 同轴雾化喷嘴结构和雾化原理

Fig. 1 Structure and atomization principle of supersonic coaxial atomization nozzle

激光粒度分析仪和 PIV 测速仪;然后调整气压、水流量以及喷雾距离,并开启喷雾使雾场的中心位于测试激光上;最后进行测试。粒径测试过程统计小于雾滴体积占全部雾滴体积 50% 的中位粒径的雾滴。



(a) 雾滴粒径测试平台



(b) 雾滴速度测试平台

图 2 雾化特性测试试验平台

Fig. 2 Experimental platform for testing atomization characteristics

2.2 雾滴粒径测试

1) 气压对雾滴粒径的影响。在喷雾距离为 1 m,水流量为 10 L/h 时,对不同气压下的雾滴粒径进行测试,测试结果如图 3 所示。3 种雾化喷嘴所产生的雾滴粒径均随着压力增大而减小,是由于压力增大,流场总能量增大并转化为动能,流场速度增大,气流场对液滴的破碎剪切作用增强,雾化效率提高。0.2 MPa 时,由于气动压力较小,同轴雾化喷嘴不能将液滴完全雾化,故雾滴粒径小于虹吸雾化喷嘴和内混雾化喷嘴。随着气动压力的增大,同轴雾化喷嘴产生的雾滴粒径减小幅度更大,当气动压力大于 0.3 MPa 时,同轴雾化喷嘴产生的雾滴粒径达到 40 μm 以下,明显小于虹吸式和内混式。这是因为同轴式雾化喷嘴流场动能受压力影响较大。

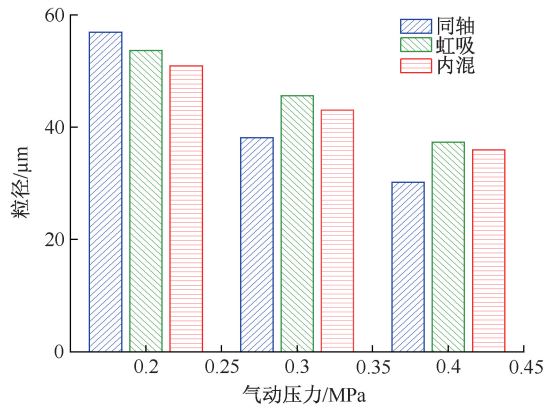


图 3 不同压力下雾滴粒径变化

Fig. 3 Variation of droplet size under different pressures

2) 喷雾距离对雾滴粒径的影响。为探究喷雾距离对同轴雾化喷嘴所产生的雾滴粒径的影响,在气压 0.4 MPa,水流量 10 L/h 时,测试不同喷雾距离的雾滴粒径,其测试结果如图 4 所示。各距离上,同

轴雾化喷嘴和内混式雾化喷嘴雾化产生的雾滴粒径随距离的增加而增大。虹吸雾化喷嘴雾化产生的雾滴粒径随距离的增大先增大后减小。原因是同轴雾化喷嘴和内混雾化喷嘴的流场是轴对称分布的且分布均匀,故雾滴再向前运动的过程中,主要以运移、凝并和蒸发作用为主,粒径较小的雾滴一部分蒸发掉,另一部分凝并为粒径较大的雾滴继续向前运移。而虹吸雾化喷嘴由于汲水探针的存在,使气流场分布不均并引起震荡,导致雾滴在运动的过程中逆喷射方向向喷雾中心的卷动,积聚,凝并。喷雾距离相同时,同轴雾化喷嘴探针与流场同轴的排布方式极大地减少了能量的损耗,提高了雾化效率,因此,雾滴粒径均小于虹吸式和内混式。

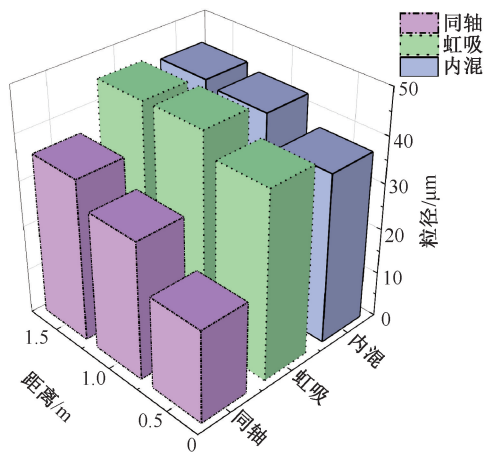


图4 不同喷雾距离下雾滴粒径变化

Fig. 4 Variation of droplet size at different spray distances

3) 水流量对雾滴粒径的影响。在气动压力为0.4 MPa、喷雾距离1 m时,不同水流量下雾滴粒径的变化如图5所示。3种雾化喷嘴雾化所产生的雾滴粒径均随水流量的增大而增大。其原因是气动压力不变,流场总能量不变,水流量增大使得局部气液比降低,气流场对液滴的破碎剪切作用减弱。但在水流量下同轴雾化喷嘴雾化产生的雾滴粒径明显小于虹吸式和内混式,且雾滴粒径变化受水流量影响相对较小。原因是同轴雾化喷嘴探针的同轴排布方式减小了经拉瓦尔喷管加速的超音速流场的能量损耗,流场具有较高的动能。

综上,雾滴的粒径变化受到气动压力、喷雾距离、水流量的共同影响,影响程度:气动压力>喷雾距离>水流量。

2.3 雾滴速度测试

1) 气压对雾滴速度的影响。在喷雾距离时1 m时,不同压力下3种雾化喷嘴产生的雾滴速度测试

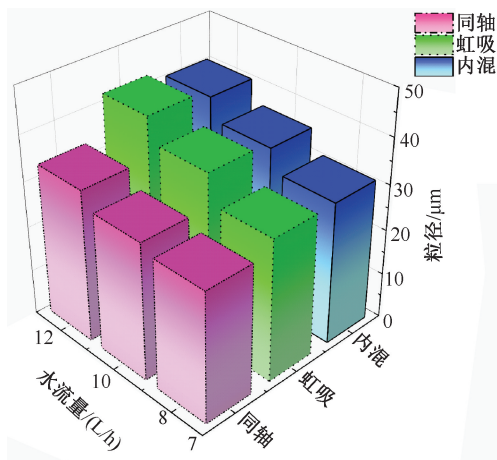


图5 不同水流量时雾滴粒径变化

Fig. 5 Variation of droplet size at different water flows

结果如图6所示。3种雾化喷嘴产生的雾滴速度均随气动压力的增大而增大,原因是压力的增大使整个流场的能量增大,并转化为流场的动能。相同压力时,同轴雾化喷嘴产生的雾滴速度明显高于虹吸式和内混式,最高可达7 m/s,约是虹吸式雾化喷嘴的2倍。同时,同轴雾化喷嘴产生的雾滴速度随压力变化的幅度明显高于虹吸式和内混式。这是由于经同轴雾化喷嘴内拉瓦尔喷管加速的气流场随压力增大流场动能不断增大,且供水探针的同轴排布方式,有效地降低了流场能量的损耗。

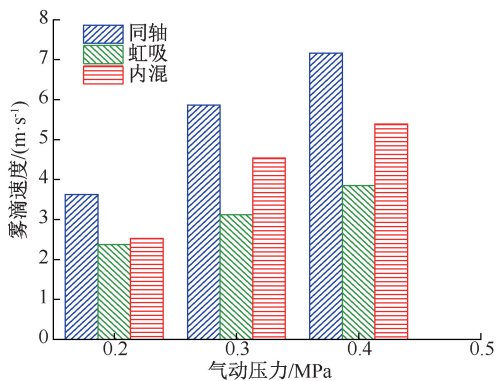


图6 不同气动压力下雾滴速度变化

Fig. 6 Variation of droplet velocity under different aerodynamic pressures

2) 喷雾距离对雾滴速度的影响。气动压力0.4 MPa时,不同喷雾距离下3种雾化喷嘴产生的雾滴速度测试结果如图7所示。3种雾化喷嘴产生的雾滴速度均随喷雾距离的增加不断减小,其原因是高速气流场携带雾滴在喷射出喷嘴后受到空气阻力的作用,雾滴被二次雾化,气流场的动能在不断降低。但在相同喷雾距离下,同轴雾化喷嘴产生的雾

滴速度仍明显大于另外 2 种雾化喷嘴产生的雾滴速度,且在 1 m 范围内具有较高的速度,形成高速细雾区域。是由于距离喷嘴 1 m 范围内的近雾场,流场速度大,气流对液滴的曳力、剪切、破碎作用强,雾滴获得的动能大,平均粒径小。

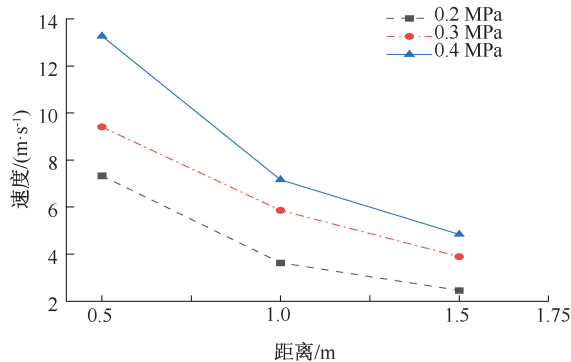


图 7 不同距离下雾滴速度变化

Fig. 7 Variation of droplet velocity at different distances

3 数值模拟

为探究拉瓦尔喷管内雾滴的雾化特性及高速细雾区域形成的原因,对拉瓦尔喷管内液滴的雾化过程开展了数值模拟研究。基于能量守恒、完全气体状态方程、一维等熵流动方程、纳维斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程、K-H 破碎模型以及计算流体

动力学方法,通过 COMSOL 数值模拟软件中的 Spalart-Allmaras 和液滴雾化粒子追踪模块建立可靠的超音速雾化数值模型^[11]。

3.1 物理模型及网格划分

相应简化喷嘴,其物理模型及网格划分如图 8 所示。拉瓦尔喷管尾部直径为 5.2 mm,口部直径为 5 mm,长度为 20 mm;空气区域高为 6 m,直径为 3 m。为得到更好的网格质量,沿轴向细化处理网格,可以看出,网格颜色对应着较高的单元质量,说明网格划分是可靠的,满足计算精度要求。相关参数设定见表 1。

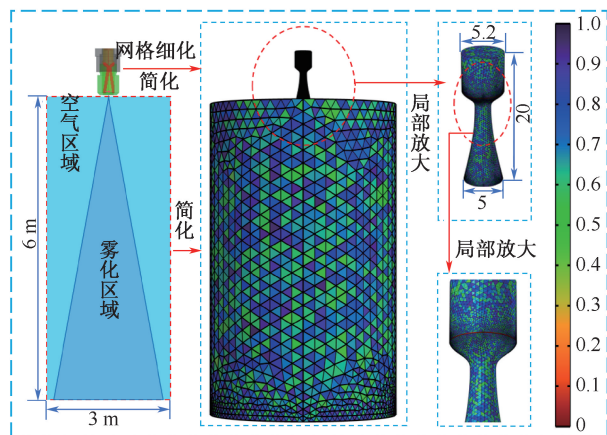


图 8 物理模型及网格划分

Fig. 8 Physical model and meshing

表 1 边界条件及参数设定

Table 1 Boundary conditions and parameter settings

边界名称	参数设定值	边界名称	参数设定值	边界名称	参数设定值
液相质量流率 $m_v/$ ($g \cdot s^{-1}$)	1×10^{-3}	计算步长 Step/s	($0, 10^{-6}, 3 \times 10^{-4}$)	K-H 模型常数 C_0	5
液滴初速度 $V_0/$ ($m \cdot s^{-1}$)	0.87	液滴直径 $D_0/$ mm	1.2	气相动力黏度 μ_a ($Pa \cdot s$)	17.9×10^{-6}
气体常数 $R_i/$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	287	比热容 γ	1.4	普朗特数 Pr	0.72
液滴密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	1 000	液相表面张力 $\sigma/$ ($N \cdot m^{-1}$)	0.072 9	液相动力黏度 $\mu_1/$ ($mPa \cdot s$)	= 1

3.2 数值模拟结果分析

不同气动压力下,对管内 400 μs 时液滴雾化特性的粒子追踪结果如图 9 所示。雾滴场中粒径及速度沿轴向和法向均匀分布。当气动压力增大时,雾滴粒径减小,沿雾场中心向边缘增大,雾滴速度不断增大,沿雾场中心向边缘减小,且呈现出阶梯式分布。整个雾滴场具有较高喷射速度的同时,还具有较小的微米级粒径。随着雾滴向外的喷射移动,进

一步衍生出外部雾场中的高速细雾区域。

4 降尘性能测试

雾化降尘试验平台主要由降尘箱体、雾化喷嘴、采样器、发尘器以及气水供应源等组成,如图 10 所示。试验过程中,通过气体稳压阀控制气动压力,通过液体流量计控制水流量为 10 L/h。试验所用粉尘样本采集来自陕西榆林某矿综采工作面,筛取 50

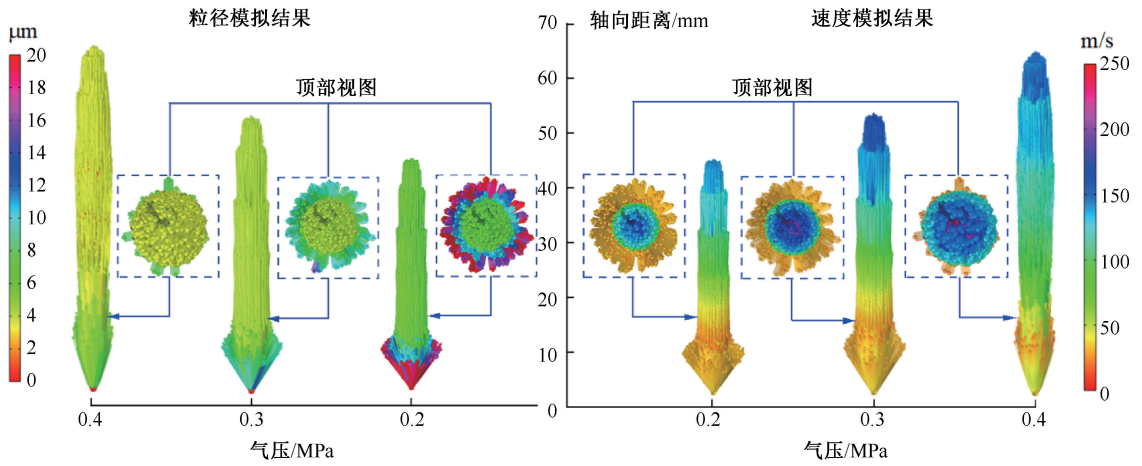


图9 雾化特性数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of atomization characteristics

μm 以下部分作为降尘试验的发生来源。具体试验步骤如下:①进行发尘,为确保每次发尘后箱体内存粉尘质量浓度一致,每次向箱体内发相同质量(50 g)的煤尘。②发尘结束后,开启粉尘采样器进行采样,记录粉尘采样器流量,作为分散度计算依据。③开

启喷雾,喷雾 1 min 后切换采样头继续采样,每隔 1 min 采一次,直到第 3 min 结束。样后将膜片进行烘干、称重,计算出不同降尘时刻箱体内存粉尘质量浓度,进而计算得到不同降尘时刻的降尘效率。



图10 雾化降尘试验平台

Fig. 10 Atomization and dust reduction experimental platform

4.1 降尘效率分析

通过试验、测量得到不同气动压力下,不同时刻 3 种雾化喷嘴的降尘效率,结果如图 11 所示。3 种雾化喷嘴的降尘效率均随气动压力的升高而增大,随降尘时间的增长而增大。这是因为,3 种雾化喷嘴产生的雾滴粒径随气动压力的增大逐渐减小到 $50 \mu\text{m}$ 以下,与粉尘的尺寸接近,同时具有较高的速度,提高了与粉尘碰撞捕集的效率。

不同气动压力下,3 种雾化喷嘴的降尘效率所

呈现的规律有所不同,0.2 MPa 时,气动压力较小,同轴雾化喷嘴不能将液滴完全雾化,故同轴雾化喷嘴的降尘效率小于虹吸雾化喷嘴和内混雾化喷嘴。0.3 MPa 时,降尘 1 min 以及 2 min 后,同轴雾化喷嘴的降尘效率均小于另外 2 种喷嘴,降尘 3 min 后大于另外 2 种喷嘴。是因为同轴雾化喷嘴产生的高速细雾捕捉到粉尘后,不能很快的凝并沉降,并继续悬浮在箱体内。随降尘时间的进一步增加,箱体内雾滴浓度升高,凝并效率升高,小的雾滴、含尘雾滴不

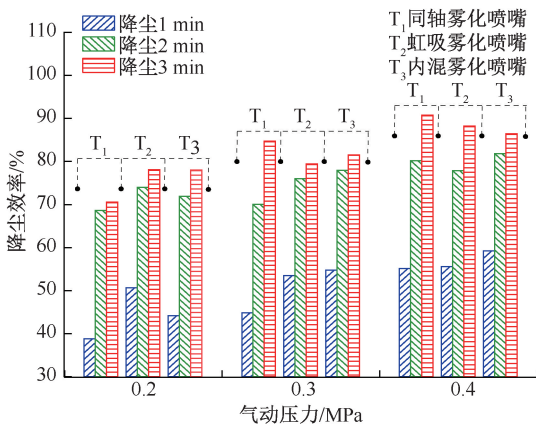


图 11 3 种雾化喷嘴的降尘效率

Fig. 11 Dust reduction efficiency of three atomizing nozzles

断凝并为大的雾滴、含尘雾滴并沉降到箱体底部时,降尘效率由 45% 升高到 85%。0.4 MPa 时,压力的进一步升高,使得喷雾 1 min 后,箱体内便具有较高的雾滴浓度,故同轴雾化喷嘴的降尘效率 2 min 后达 90.8% > 虹吸 88.2% > 内混 86.4%。

4.2 分散度分析

为探究同轴雾化喷嘴对不同粒径粉尘的降尘效果,采用分散度测试仪对试验样本进行分析得到不同气动压力下各个粒径区间粉尘分散度测试结果如图 12 所示。由于 20~50 μm 大粒径的粉尘在重力作用下沉降到箱体底部,故不同降尘时间的分散度均很小。随压力的增大,同轴雾化喷嘴对微细粉尘的降尘效果更优。这是因为雾场中微米级雾滴所占比例与对呼吸性粉尘的降尘效率有较大关系。0.2 MPa 时,同轴雾化喷嘴未将液滴未完全雾化,产生的雾滴粒径较大,故对 10~20 μm 区间内较大粒径的粉尘具有较好的降尘效果。0.3 MPa 时,随流场能量的升高,同轴雾化喷嘴的雾化效率提高,产生的微米级雾滴所占比例增加,对 5~10 μm 呼吸性粉尘的捕集效率提升。0.4 MPa 时,流场能量得到进一步提升,同轴雾化喷嘴产生高质量浓度,大速度,小粒径的微米级雾滴,形成高速细雾区域,对 2.5~10 μm 区间内的呼吸性粉尘降尘效果显著。

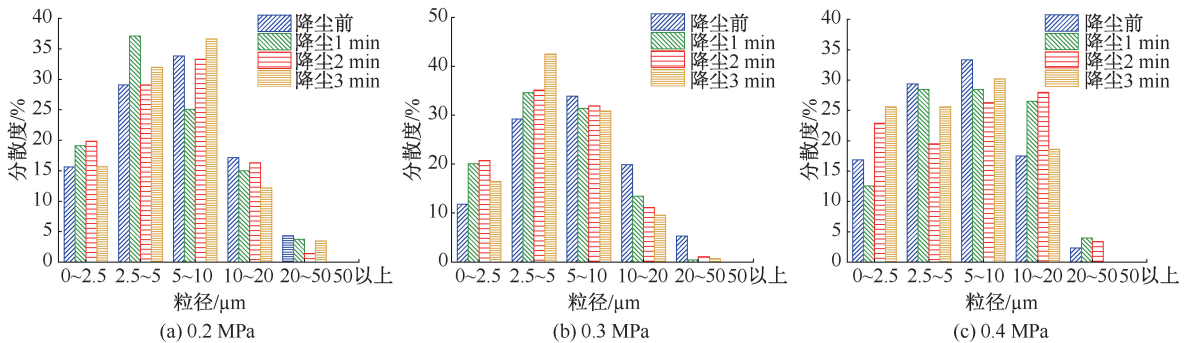


图 12 不同压力下各个粒径区间粉尘分散度

Fig. 12 Dust dispersion in each particle size interval under different pressures

5 结 论

- 1) 同轴雾化喷嘴的雾化特性沿轴向和法向均匀分布,随着气动压力的增大,新型喷嘴产生的雾滴粒径减小,雾滴速度增大,形成高速细雾区域。
- 2) 与虹吸雾化喷嘴和内混雾化喷嘴相比,气动压力为 0.3~0.4 MPa 时,同轴雾化喷嘴具有更小的雾滴粒径和更大的雾滴速度,从而具有更高的降尘

效率,最高可达 90%。

- 3) 同轴雾化喷嘴随气动压力的增大,对不同时小粒径粉尘的降尘效率升高,当气动压力为 0.4 MPa、水流量为 10 L/h 时,对 2.5~10 μm 的呼吸性粉尘降尘效果最佳。对小粒径区间粉尘的降尘效率增加,在 0.4 MPa 时,对 2.5~10 μm 的呼吸性粉尘降尘效果显著。

参 考 文 献

[1] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
YUAN Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Journal of China Coal Society,

- 2020, 45(1): 1-7.
- [2] 张天,穆新升,葛少成,等. 超音速同轴气动雾化降尘技术[J]. 煤炭学报,2024,49(7):3 118-3 128.
ZHANG Tian, MU Xinsheng, GE Shaocheng, et al. Dust reduction technology of supersonic coaxial aerodynamic atomization[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3 118-3 128.
- [3] CHENG Weimin, MA Youying, YANG Junlei, et al. Effects of atomization parameters of dust removal nozzles on the de-dusting results for different dust sources[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 1 025-1 032.
- [4] 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):3 912-3 921.
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): 3 912-3 921.
- [5] 刘荣华,朱必勇,莫世途,等. 一种新型组合式喷雾降尘装置流场及雾化特性试验研究[J]. 安全与环境学报,2024, 24(5):1 749-1 757.
LIU Ronghua, ZHU Biyong, MO Shitu, et al. Experimental study on flow field and atomization characteristics of a new type of combined spray dust reduction device[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(5): 1 749-1 757.
- [6] 王鹏飞,李泳俊,刘荣华,等. 内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘效率研究[J]. 煤炭学报,2019,44(5): 1 570-1 579.
WANG Pengfei, LI Yongjun, LIU Ronghua, et al. Spray characteristics and dust removal efficiency of internal-mixing air atomizing nozzle[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1 570-1 579.
- [7] BECK T W, SEAMAN C E, SHAHAN M R, et al. Open-air sprays for capturing and controlling airborne float coal dust on longwall faces[J]. Mining Engineering, 2018, 70(1): 42-48.
- [8] 荆德吉,魏德宁,马明星,等. 胶带运输巷粉尘运移及气动喷雾降尘技术[J]. 中国安全科学学报,2021,31(11): 93-99.
JING Deji, WEI Dening, MA Mingxing, et al. Study on dust movement in belt transportation roadway and pneumatic spray dust control technology[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 93-99.
- [9] 柳承徽,陈先锋,张威,等. 基于PIV的气动式细水雾流场研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(7):120-126.
LIU Chenghui, CHEN Xianfeng, ZHANG Wei, et al. Research on aerodynamic water mist flow field based on PIV[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 120-126.
- [10] PERURENA J B, ASMA C O, THEUNISSEN R, et al. Experimental investigation of liquid jet injection into Mach 6 hypersonic crossflow[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(3): 403-417.
- [11] ZHANG Tian, JING Deji, GE Shaocheng, et al. Supersonic antigravity aerodynamic atomization dusting nozzle based on the Laval nozzle and probe jet[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42: 1-15.



作者简介: 张天 (1992—),男,辽宁阜新人,博士,讲师,主要从事安全科学与技术、职业安全健康、矿井通风与粉尘防治理论及技术方面的研究。E-mail: zhangtian@lntu.edu.cn。