



移动阅读

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):1570-1579. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0488

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): 1570-1579. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0488

## 内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘效率研究

王鹏飞<sup>1,3</sup>, 李泳俊<sup>2</sup>, 刘荣华<sup>2,3</sup>, 谭焜昊<sup>2</sup>, 田畅<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害治理安全生产实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 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:**为了掌握内混式空气雾化喷嘴喷雾特性及降尘性能,借助自主研发的喷雾降尘实验平台,对内混式空气雾化喷嘴与X旋流型压力喷嘴流量、雾化角、射程、雾滴体积分数、雾滴粒径、雾滴速度等喷雾特性参数及降尘效率进行了实测,并对实验结果作对比分析。结果表明:随着供水压力的增加,内混式空气雾化喷嘴水流量和气流量分别呈指数形式递增和递减,气液质量流量比不断下降;压力喷嘴水流量随着供水压力的增大而增大,水流量与供水压力的1/2次方成正比。随着供水压力的增加,2种喷嘴的雾化射程、雾滴体积分数及雾滴速度均增大。X旋流型压力喷嘴雾化角明显大于空气雾化喷嘴,其喷雾作用范围更宽;随着供水压力的不断提高,空气雾化喷嘴雾化角呈现先增大后减小的变化规律,而压力喷嘴则一直以较小的幅度不断减小。空气雾化喷嘴由于有压缩空气作为助力,在供水压力较低时能获得较为理想雾滴粒径,且随着供水压力的增大,雾滴粒径不断增大;普通压力喷嘴的雾化粒径随着供水压力的提高而减小,且需在较高的供水压力下才能获得理想的雾滴粒径。在相同的供水压力下,空气雾化喷嘴雾滴粒径和水流量均小于压力喷嘴,而雾滴体积分数、雾滴速度及降尘效率均高于压力喷雾。气水喷雾较压力喷雾具有明显的优势,获得相同的降尘效率,气水喷雾耗水量仅约为压力喷雾的一半。

**关键词:**空气雾化;压力喷嘴;雾化特性;降尘效率

中图分类号:TD714.41

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)05-1570-10

## Spray characteristics and dust removal efficiency of internal-mixing air atomizing nozzle

WANG Pengfei<sup>1,3</sup>, LI Yongjun<sup>2</sup>, LIU Ronghua<sup>2,3</sup>, TAN Xuanhao<sup>2</sup>, TIAN Chang<sup>2</sup>

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resource, Environment & Safety Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the spray characteristics and dust removal properties of internal-mixing air atomizing nozzle, based on the experimental platform designed by authors for spray and dust removal, the dust removal efficiencies and spray performance parameters of the internal-mixing air atomizing nozzle and the X-type swirl pressure nozzle were measured. The spray performance parameters measured in the experiment include flow rate, droplet size, droplet volume

收稿日期:2018-04-12 修回日期:2018-09-12 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574123);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2017JJ3076);湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A185)

作者简介:王鹏飞(1984—),男,江西九江人,副教授,硕士生导师。Tel:0731-58290040, E-mail: pfwang@sina.cn

通讯作者:刘荣华(1964—),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师。E-mail: rhliu2008@sina.com

concentration, spray angle and droplet velocity. The study results indicate that the water flow rate of air atomizing nozzle appears exponential growth with the increase of water supply pressure, and the air flow rate decreases in the way of exponential. The air-liquid mass flow ration (ALR) decreases with the increase of water supply pressure. For the pressure nozzle, the water flow rate increases with the increase of the water supply pressure, and the water flow rate is proportional to the square root of water pressure. With the increase of water supply pressure, the spray range, droplet volume concentration and droplet velocity of two kinds of nozzle all increase. The atomization angle of swirl pressure nozzle is significantly larger than that of air atomizing nozzle, which has wider coverage. As the water supply pressure increases, the atomization angle of atomizing nozzle increases first and then decreases, and it decreases continuously at a modest pace for the X-type swirl pressure nozzle. With the help of compressed air, the atomizing nozzle can acquire the ideal droplet size under low water pressure, and the droplet size increases with the increase of the water supply pressure. For the pressure nozzle, the droplet size shows a change rule of decreasing with the further increase of the water supply pressure, only when the water pressure is high can reach the appropriate droplet size. Under the same water pressure, the droplet size and water flow rate of air atomizing nozzle are both less than those of pressure nozzle, but the droplet volume concentration, droplet velocity and dust removal efficiency are all higher than those of pressure nozzle. Compared with the pressure spray, the air-water spray has a significant advantage. For the same dust removal efficiency, the water consumption of air-water spray is merely half of those of pressure spray.

**Key words:** air atomizing; pressure nozzle; atomization characteristics; dust removal efficiency

依据我国卫生健康委员会近三年发布的职业病报告,我国每年的尘肺病例约占总职业病病例的90%,而尘肺病例当中,煤炭和有色金属矿开采相关行业占50%以上。由此可见,我国尘肺病的主要来源为矿山开采和辅助行业。目前,喷雾降尘是矿山采掘作业场所最主要防尘措施,喷雾降尘设施主要包括采掘机内外喷雾、破碎转载点喷雾及风流净化水幕等<sup>[1-3]</sup>。上述喷雾降尘设施通常采用常规压力喷嘴,传统的压力喷雾存在耗水量大、环境污染严重及降尘效率偏低等缺陷<sup>[4-7]</sup>。

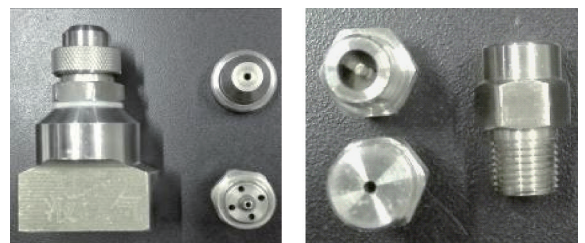
空气雾化是一种新型雾化方式,其雾化原理为剪切破碎,即利用气液两相的相互碰撞与摩擦实现液体雾化。相对于传统的压力雾化,空气雾化具有耗水量小、水压低、不易堵塞及降尘效率高等特点<sup>[8-10]</sup>。空气雾化喷嘴是实现气水喷雾的关键部件,由于该类喷嘴结构和雾化原理复杂,针对于该类喷嘴开展理论研究需较深的流体力学、多相流及空气动力学知识,所以有关该类喷嘴理论研究较少,而多数采用数值模拟和实验手段对其开展研究<sup>[11-16]</sup>。近几年,国内同忻、龙东、陈四楼等现代化煤矿开展了采掘工作面气水喷雾降尘现场试验,取得了较好的降尘效果<sup>[17-19]</sup>。目前,虽然气水喷雾降尘已成功应用于国内少数煤矿采掘作业场所,但有关空气雾化喷嘴流量、雾化特性、喷雾流场及其降尘性能等相关的研究欠缺,导致该技术不能很好地推广应用。因此,笔者借助自行开发的喷雾降尘实验平台,对矿山采掘作业场所气水喷雾降尘常采用的内混式空气雾化喷嘴流量、雾化特性及降尘

性能开展实验研究,并与常规压力喷嘴进行对比分析。本研究成果对掌握空气雾化喷嘴雾化特性及降尘性能具有较好地借鉴意义,也为气水喷雾降尘工程应用提供基础性实验参数。

## 1 实验系统及方案

### 1.1 实验喷嘴选取

根据气液两相介质作用空间不同,空气雾化喷嘴分为内混式和外混式2种。内混式空气雾化喷嘴具有较好的雾化性能,矿山采掘气水喷雾场降尘场所一般采用该类喷嘴。实验所采用的内混式空气雾化喷嘴由空气帽、液体帽、气水端口等组成。其中,空气帽出口直径为2.0 mm,液体帽注水孔直径为1.5 mm,注气孔直径为2.0 mm,注气孔数量为4个,如图1(a)所示。同时,为了方便对比分析,也选取目前矿山喷雾降尘应用效果较优的X旋流型压力喷嘴进行雾化特性及降尘性能的测定。本次实验所选用的X旋流型压力喷嘴结构如图1(b)所示,雾流形状为实



(a) 内混式空气雾化喷嘴

(b) X旋流压力喷嘴

图1 实验所选用喷嘴

Fig 1 Nozzles used in experiment

心圆锥,喷嘴出口直径为 1.5 mm。

## 1.2 实验系统

如图 2 所示,喷雾降尘实验平台主要由模型巷道、供水系统、供气系统、发尘装置及相关的测量仪器仪表等组成。本次实验所涉及的仪器仪表包括马尔文实时高速喷雾粒度分析仪、PIV 三维粒子成像测速仪、风速仪、空气质量流量计、电磁流量计、数字压力

表、直读式粉尘浓度测定仪及粉尘采样器等。根据巷道模型各段所处位置和功能,可将其分成混合段、整流段、测量段、喷雾降尘段、除尘风机及出流段等若干部分,其中测量段包括喷雾前测量段和喷雾后测量段。为方便喷嘴喷雾效果观测及雾滴粒度和速度的测量,实验平台喷雾段由透明有机玻璃加工而成,其它部分均由不锈钢板材制作。

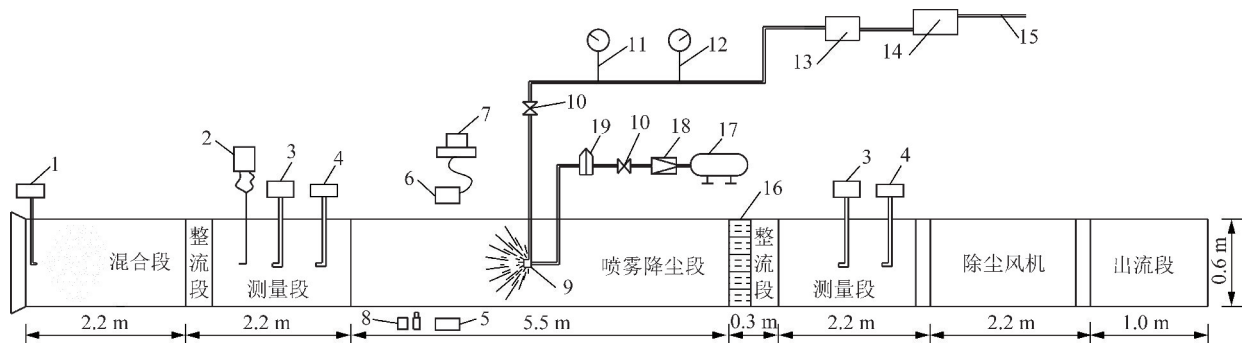


图 2 喷雾降尘实验平台

Fig. 2 Schematic of experimental platform for spraying and dust removal

- 1—干粉气溶胶扩散器;2—风速仪;3—粉尘浓度测定仪;4—粉尘采样器;5—激光发射器;6—激光接收器;7—马尔文粒度分析仪;  
8—PIV 三维粒子成像测速仪;9—雾化喷嘴;10—闸阀;11—压力表;12—电磁流量计;13—水泵;14—蓄水池;15—城市管网;  
16—整流装置;17—空压机;18—减压阀;19—空气质量流量计

## 1.3 实验方案

第 1 组实验为喷嘴流量特性实验。对于固定结构的内混式空气雾化喷嘴,影响喷雾特性与降尘效果的主要因素有供水压力和供气压力。煤矿井下压缩空气压力一般维持在 0.4 ~ 0.6 MPa,本次实验将供气压力固定为 0.5 MPa。采用电磁流量计和空气质量流量计,对 6 种 (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa) 供水压力下的内混式空气雾化喷嘴气液流量进行测定。同时,为方便对比分析,也对 X 旋流型压力喷嘴在 8 种供水压力下 (0.5, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 MPa) 的水流量情况进行了测定。

第 2 组实验为喷嘴雾化特性实验,所涉及的雾化特性参数包括雾化角、雾滴体积浓度、射程、雾滴粒径及雾滴速度。采用高性能数码相机拍摄喷嘴在上述工况条件下的喷雾场,并借助 Image-Pro Plus6.0 后处理软件进行雾化角和射程的计算。安设在喷雾段一侧的三维粒子成像测速 PIV 系统实现对喷雾流场和雾滴速度的测定。实验所采用的 PIV 系统一次拍摄最大区域为 60 cm×60 cm,为保证拍摄质量本次实验取 30 cm×30 cm 区域,通过不断移动 CCD 相机和激光片源,实现全喷雾流场的拍摄。采用马尔文实时喷雾粒度分析仪测定喷嘴雾滴粒径分布和雾滴体积浓度。选择喷嘴前方 50 cm 截面中心作为雾滴性能参数的采集线,所测定的雾滴粒径参数均为该采集线上所有雾滴的平均值<sup>[20]</sup>。

第 3 组实验为喷嘴喷雾降尘性能实验。根据文献[8]的研究结论,对于内混式空气雾化喷嘴,当气液两相压力接近时,喷雾降尘效果最佳。将气液两相压力均设置为 0.5 MPa,对模型巷道喷雾降尘段内分别设置单空气雾化喷嘴和双空气雾化喷嘴时的降尘效率进行了测定。同时,也对单个 X 旋流型压力喷嘴在上述 8 种供水压力下的降尘效率进行了测定。采用粒径小于 150 μm 的煤粉作为实验粉尘,发尘器以 15 g/min 的速度进行发尘。喷雾前后模型巷道内粉尘浓度数据由 CCF-1000 直读式粉尘浓度测定仪进行采集,并根据二者数值计算喷雾降尘效率。开展喷雾降尘性能测试时,将模型巷道内风速设置为 1.0 m/s。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 喷嘴流量特性

将供气压力设置为 0.5 MPa,通过调节供水压力,考察供水压力对空气雾化喷嘴流量的影响,得出喷嘴流量与供水压力的相关性规律,如图 3 所示。从图 3 中的实测喷嘴流量数据能够看出,维持喷嘴供气压力不变,当供水压力不断提高时,空气雾化喷嘴水流量升高而气流量下降。对于内混式空气雾化喷嘴,空气和水分别通过液体帽的注气孔和注水孔进入空气帽,并在其空腔内碰撞掺混后从出口喷出。当喷嘴供气压力固定时,随着供水压力的增大,喷嘴水流量

将不断增大。同时,由于喷嘴出口排泄能力有限,水流量的增加将导致空气帽空腔内气液两相压力升高,造成液体帽注气孔阻力增大,影响喷嘴气流量,从而导致喷嘴气液质量流量比随供水压力增加而不断下降,如图4所示。

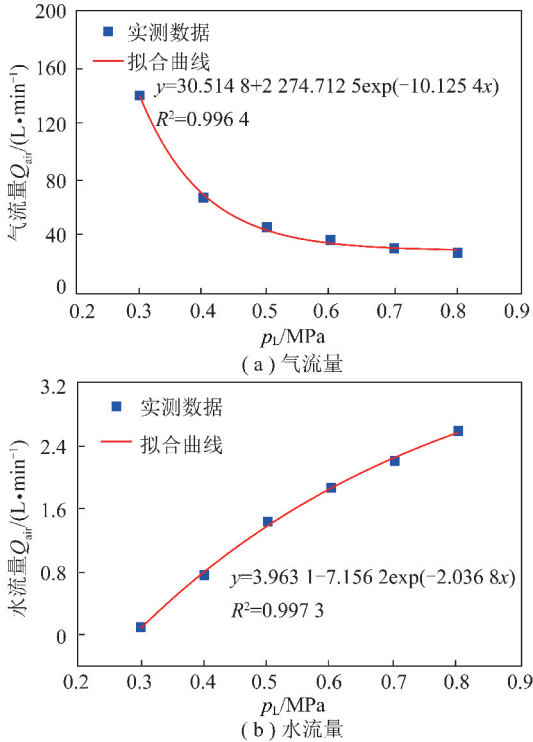


图3 空气雾化喷嘴流量与供水压力  $p_L$  的关系

Fig.3 Relationship between flow rate and water supply pressure of air atomizing nozzle

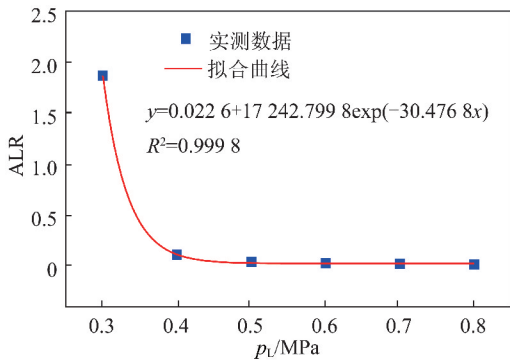


图4 空气雾化喷嘴气液质量流量比 ALR 与供水压力的关系  
Fig.4 Relationship between air/liquid mass flux ratio (ALR) and water supply pressure of air atomizing nozzle

采用 Origin 软件对实测流量数据拟合,得出喷嘴流量与供水压力的关系曲线如图3所示,喷嘴流量拟合方程为( $p_{air} = 0.5$  MPa 时):

$$Q_{air} = 2274.7125 \exp(-10.1254p_L) + 30.5148 \quad (1)$$

$$Q_L = 3.9631 - 7.1562 \exp(-2.0368p_L) \quad (2)$$

从图3的流量拟合曲线可以发现,喷嘴流量拟合

值和实测数据基本吻合,流量拟合方程可以用于该供气压力下的喷嘴流量理论计算。由图3(a)可知,当供气压力一定时,喷嘴气流量随着供水压力的提高呈指数形式下降,且降幅随供水压力增大而减小,即喷嘴气流量曲线随供水压力增大而趋于平缓。从图3(b)中的喷嘴水流量拟合曲线能够发现,随着供水压力增加,喷嘴水流量以指数形式递增,且供水压力越大,水流量增幅越小,曲线越平缓。

图5为X旋流型压力喷嘴水流量特性曲线。从图5的测定结果可以看出,压力喷嘴水流量随着供水压力的增大而增大,水流量与供水压力的1/2次方成正比。根据相关文献,对于固定结构的压力喷嘴,都有一个与之相对应的流量系数,该系数只跟喷嘴的结构有关,而与供水压力无关。压力喷嘴水流量影响因素包括喷嘴结构、喷嘴直径及供水压力等。对于普通的单孔压力型喷嘴,其水流量可以采用式(3)进行计算<sup>[21]</sup>:

$$Q_L = \frac{\pi}{4} C_q d^2 \sqrt{\frac{2p_L}{\rho}} \times 10^{-3} \quad (3)$$

其中, $Q_L$ 为喷嘴水流量, $m^3/s$ ;  $C_q$ 为流量系数,与喷嘴的结构有关;  $d$ 为喷嘴直径,mm;  $p_L$ 为供水压力,MPa;  $\rho$ 为水的密度, $kg/m^3$ 。根据式(3)及图5中的拟合公式,可计算出本次实验所选用的X旋流型压力喷嘴的流量系数为0.61。对比图3和图5两种不同类型喷嘴水流量数据可以发现,在相同的供水压力和出水孔直径下,压力喷嘴水流量高于空气雾化喷嘴。主要原因是内混式空气雾化喷嘴为气液两相流喷嘴,气液两相于喷嘴内部(空气帽)混合后不能及时排至外界环境,造成空气帽内气液两相流压力升高,进水端口阻力增加,导致注水孔水流量下降。

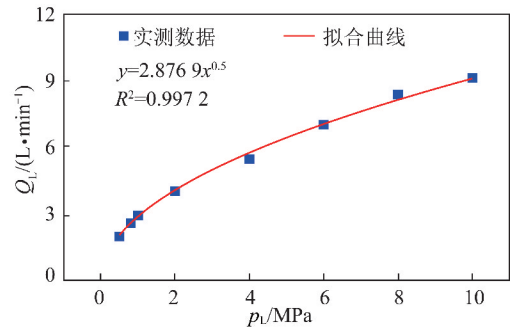


图5 压力喷嘴水流量与供水压力的关系

Fig.5 Relationship between water flow rate and water supply pressure of pressure nozzle

## 2.2 喷嘴雾化特性

### 2.2.1 宏观雾化特性参数

表1为不同供水压力时2种喷嘴宏观雾化特性

参数(雾化角、喷雾射程、雾滴体积浓度)实验测定数据。从表1中的空气雾化喷嘴宏观雾化特性参数可以发现,当供水压力不断增加时,由于喷嘴水流量的增加,喷嘴所形成的雾流射程和雾滴体积浓度均随之增加。从表1中的空气雾化喷嘴雾化角实验数据能够发现,随着供水压力的增加,雾化角呈现先增大后减小的变化规律。这是因为在低水压区( $<0.6$  MPa),随着供水压力的增大,雾化角逐渐增大;当水压增大到一定程度时,气液相互作用达到一稳定值,喷雾面上雾滴分布最均匀,有效喷雾面积最大,雾化角达到最大值;当水压继续增大时,破坏了该平衡,气液质量流量比不断接近0,喷雾主要流体为液体,喷嘴特性愈趋近普通平口喷嘴,喷雾流呈现出水柱形式,雾化角不断减小。

表1 不同供水压力时喷嘴宏观雾化特性参数

Table 1 Macroscopic atomization characteristics parameters of nozzles with different water supply pressure

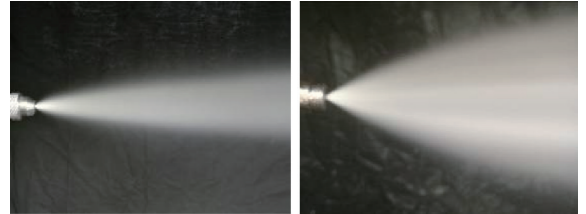
喷嘴类型	$p_L/\text{MPa}$	$\alpha/(\text{°})$	$s/\text{m}$	$C_V/10^{-6}$
内混空气雾化喷嘴	0.3	32.32	2.9	58.2
	0.4	39.02	3.7	191.1
	0.5	42.22	4.2	276.4
	0.6	49.10	4.9	327.5
	0.7	40.62	5.6	374.2
	0.8	38.75	5.7	476.3
X-旋流型压力喷嘴	0.5	57.03	1.9	197.2
	0.8	56.47	2.4	224.7
	1.0	56.43	2.9	266.0
	2.0	55.81	3.7	375.2
	4.0	55.40	4.3	755.7
	6.0	55.06	5.0	996.5
	8.0	54.90	5.9	1 174.5
	10.0	54.16	6.9	1 354.8

注: $\alpha$ 为雾化角; $s$ 为喷雾射程; $C_V$ 为雾滴体积分数。

从表1中的X旋流型压力喷嘴宏观雾化特性参数可以发现,随着供水压力的不断提高,喷雾射程和雾滴体积分数均不断增加,而雾化角有所减小,但幅度较小。对于压力喷嘴,随着供水压力的增加,喷嘴水流量和雾滴初速度均不断提高,导致喷雾射程和雾滴体积分数不断增大;同时,由于雾滴流量和速度的提高,雾场中心负压增大,使得雾场边界向雾流中心收缩,从而导致喷雾雾化角有所减小。

对比2种喷嘴雾化角实验数据可以发现,由于2种喷嘴内部结构和雾化原理的差异,X旋流型压力喷嘴雾化角明显大于空气雾化喷嘴,喷雾作用范围更宽。内混式空气雾化喷嘴气液两相流在空气帽内部

撞击混合后从出口射出,而X旋流型压力喷嘴内部设有旋流喷芯,水在喷嘴内部加旋后从喷嘴出口射出,由于旋转离心力作用,使得喷嘴出口雾流向四周扩散,从而具有较大雾化角,如图6所示。对比2种喷嘴雾滴体积分数数据可以发现,在相同的供水压力下,内混式空气雾化喷嘴体积分数高于X旋流型压力喷嘴。这主要是由于X旋流型压力喷嘴具有较大雾化角,雾滴较为分散,而内混式空气雾化喷嘴雾滴分布较为集中。



(a) 空气雾化喷嘴 (b) 旋流压力喷嘴

图6 2种喷嘴喷雾雾化角( $p_L=0.5$  MPa)

Fig. 6 Spray angles of two kinds of nozzle ( $p_L=0.5$  MPa)

## 2.2.2 雾滴粒径参数

表2为2种喷嘴在不同供水压力下的雾滴粒径参数。从表2中的内混式空气雾化喷嘴雾滴粒径参数能够看出,当增加供水压力时,雾滴特征粒径和平均粒径均随之增加,如供水压力由0.3 MPa增加至0.8 MPa时,雾滴平均直径 $D_{[3,2]}$ 由22.50  $\mu\text{m}$ 增加至129.8  $\mu\text{m}$ ,特征粒径 $D_{50}$ 则由33.22  $\mu\text{m}$ 增加至197.5  $\mu\text{m}$ 。图7为空气雾化喷嘴在不同供水压力下的雾滴粒径分布。从图7中的累计体积分数曲线可以看出,雾滴特征粒径 $D_{90}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{10}$ 均表现出和表1相同的变化规律。从图7可看出,固定供气压力,供水压力提高时,雾滴体积频率峰值不断向右偏移即朝着雾滴粒径增大的方向;同时,从体积频率柱状图还可以看出,随着供水压力的增加,雾滴粒径分布范围拓宽,而体积频率峰值表现出下降的趋势。

内混式空气雾化喷嘴属于介质雾化喷嘴,借助高速空气流对低速液柱实施剪切与碰撞而使液体于混合腔内完成雾化。从图4空气雾化喷嘴气液质量流量比与供水压力的关系曲线可知,供水压力增大时,喷嘴气液质量流量逐渐下降,即单位质量的液滴所能获得破碎动能减小,液滴难以破碎成细小雾滴,从而造成雾滴粒径随供水压力的增大而增大。

为便于分析,将表2中X旋流型压力喷嘴雾滴粒径与供水压力之间关系绘制成曲线,如图8所示。从图8中可发现,对于常规压力喷嘴,随着供水压力的增加,雾滴平均粒径参数均减小,且雾滴粒径在低压区变化较为剧烈,如供水压力由0.5 MPa提升至

表 2 2 种喷嘴不同供水压力下的雾滴粒径参数

Table 2 Droplet size parameters of two kinds of nozzle under different water supply pressure

喷嘴类型	水压/MPa	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{[3,2]}/\mu\text{m}$	$D_{[4,3]}/\mu\text{m}$
内混式空气雾化喷嘴	0.3	14.84	33.22	68.94	22.50	38.21
	0.4	34.91	68.90	129.90	53.92	76.51
	0.5	42.29	104.20	332.40	76.61	154.80
	0.6	50.27	137.10	478.70	90.67	205.20
	0.7	55.81	167.60	569.10	103.70	245.70
	0.8	62.50	197.50	606.10	129.80	272.20
X 旋流型压力喷嘴	0.5	110.52	210.50	424.60	179.80	244.80
	0.8	87.56	189.20	389.50	149.40	215.70
	1.0	79.92	179.50	364.20	138.10	201.40
	2.0	61.15	169.80	337.50	117.90	194.60
	4.0	53.42	145.40	327.30	101.70	169.80
	6.0	51.23	116.10	317.00	88.91	158.70
	8.0	49.70	89.63	308.70	80.78	147.80
10.0	47.71	81.75	317.10	74.92	136.40	

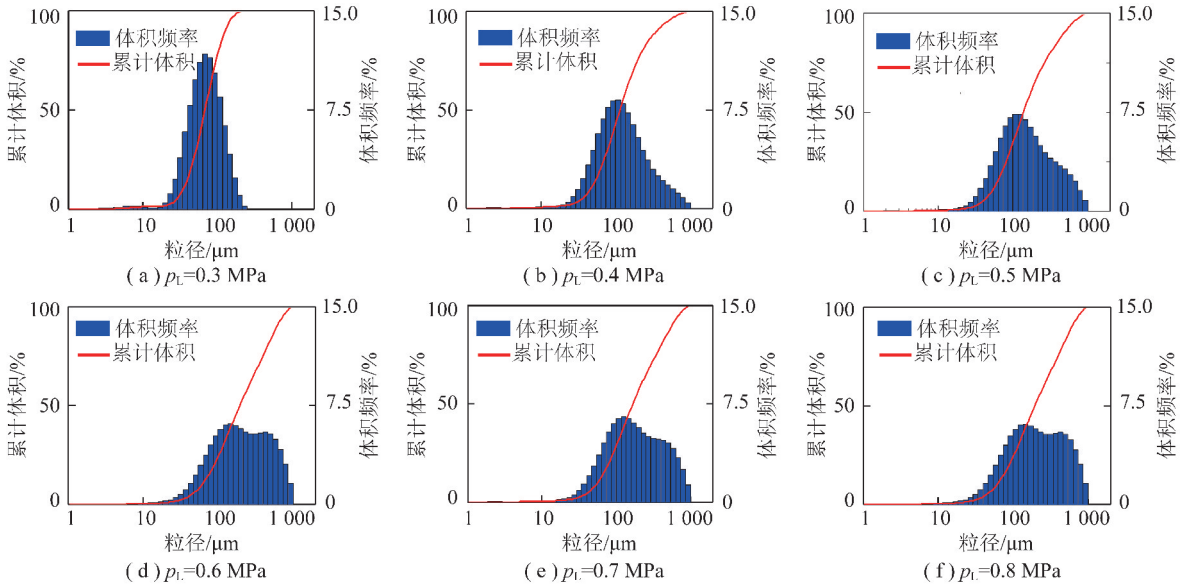


图 7 空气雾化喷嘴不同供水压力下的雾滴粒径分布

Fig. 7 Droplet particle size distribution of air atomizing nozzle under different water supply pressure

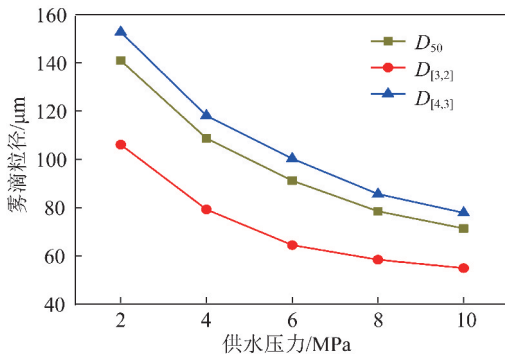


图 8 压力喷嘴雾滴粒径与供水压力的关系

Fig. 8 Relationship between droplet particle size and water supply pressure of pressure nozzle

2.0 MPa, 雾滴索太尔平均直径  $D_{[3,2]}$  由 179.81  $\mu\text{m}$  减小至 117.99  $\mu\text{m}$ 。在供水高压区域 ( $p_L > 4.0$  MPa), 压力喷嘴雾滴粒径随供水压力变化较为平缓, 如供水压力由 8 MPa 提升至 10 MPa,  $D_{50}$  和  $D_{[3,2]}$  仅分别减小了 7.88  $\mu\text{m}$  和 5.86  $\mu\text{m}$ 。随着供水压力的不断增大, 压力喷嘴液流韦伯数增大, 使得水射流表面的扰动波增长率加大, 最大扰动增长率、失稳波数范围及最大扰动波增长率所对应的波数均随之增大, 从而导致射流失稳破碎的雾化粒径越小<sup>[22]</sup>。

对比 2 种喷嘴的雾滴粒径实验结果可以发现, 对于压力喷嘴, 当供水压力低于 1.0 MPa 时, 喷嘴所产生的雾滴粒径较大,  $D_{[3,2]}$  均大于 130  $\mu\text{m}$ , 而相同供

水压力下的空气雾化喷嘴所获得的雾滴粒径较为理想。普通压力喷嘴需将供水压力调节至 6.0 MPa 以上才能获得较为理想雾滴粒径 ( $D_{[3,2]} < 90 \mu\text{m}$ ), 而空气雾化喷嘴由于有压缩空气作为助力, 对供水压力要求较低。

### 2.2.3 雾滴速度

图 9 为不同供水压力下的空气雾化喷嘴雾滴速度矢量图, 测量范围为喷嘴下游 50 ~ 80 cm 主流区

域。由图 9 可知, 喷嘴下游雾滴速度沿喷嘴轴线方向均呈现不断衰减的变化趋势。从图 9 中还可以发现, 当供气压力固定时, 雾滴速度随着供水压力的增加而不断增大, 但增幅不断减小; 当供水压力达到 0.6 MPa 以后, 继续提高供水压力, 雾滴速度增加不明显。空气雾化是一种以压力水和压缩空气作为双动力的喷雾方式, 随着供水压力的增加, 喷嘴水流量和出口动能不断增大, 导致雾滴速度增大; 但从喷嘴

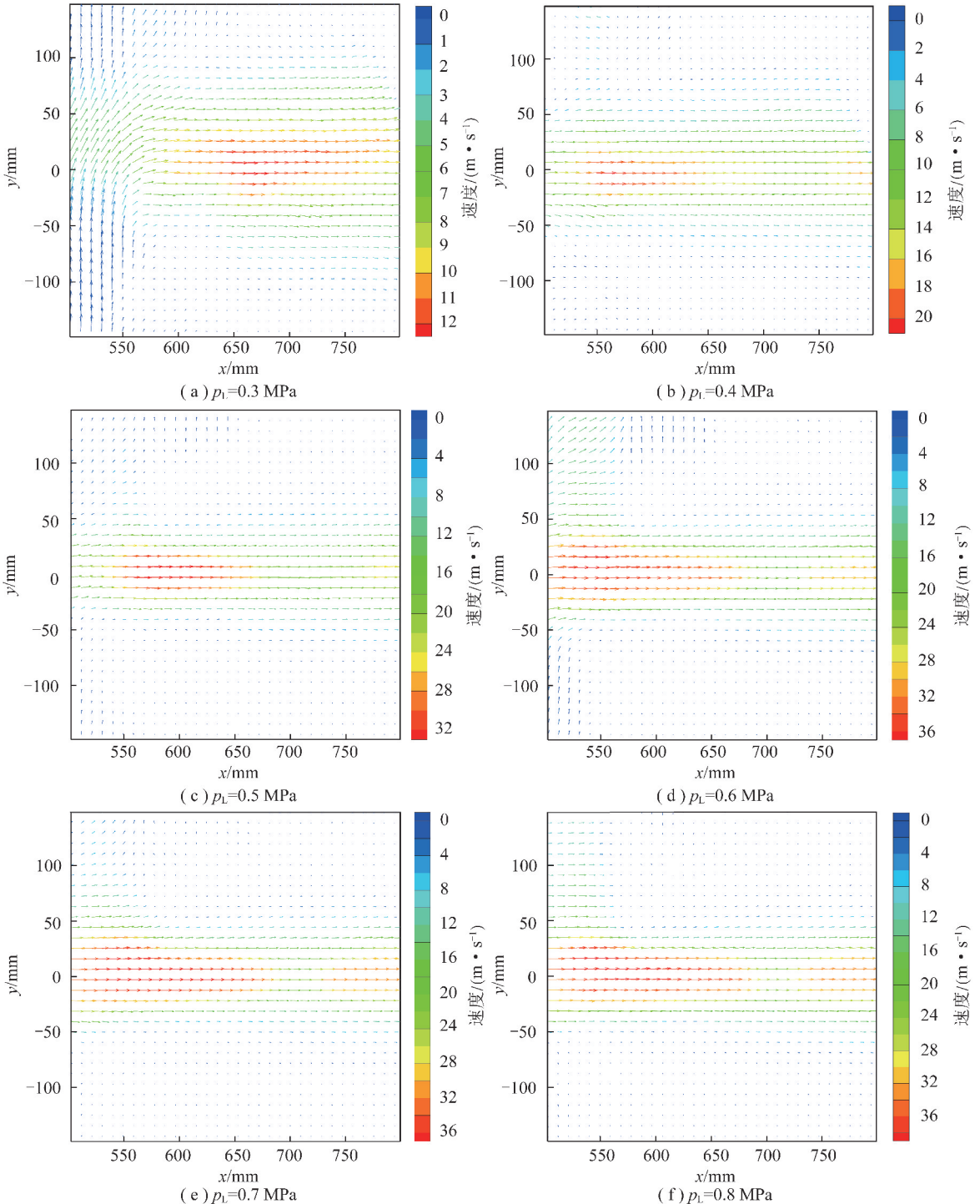


图 9 不同供水压力下空气雾化喷嘴雾滴速度矢量

Fig. 9 Droplets velocity vector of air air atomizing nozzle under different water supply pressure

流量特性实验能够看出,随着供水压力的增加,水流量增加同时气流量不断减小,意味着压缩空气所能提供液相的动能下降,导致供水压力增加至一定值后雾滴速度增加不明显。

图10为供气压力为0.5 MPa时,不同供水压力下空气雾化喷嘴轴线雾滴速度衰减曲线。从图10可以发现,图10表现出与图9中相同的变化规律,即雾滴速度沿轴线方向不断衰减,且随着供水压力的增加,雾滴速度不断增加。液体在喷嘴内部及出口附近完成雾化形成雾滴,雾滴以较高的初速度沿喷嘴轴线运动,由于受空气阻力作用,雾滴速度沿喷嘴轴线不断衰减。对比图10中3条曲线还可以发现, $p_L = 0.3$  MPa对应的雾滴速度衰减曲线斜率明显小于其他两条,即该工况下雾滴速度沿轴线衰减最为缓慢。这主要是因为该工况下雾滴初速度较小,而雾滴所受空气阻力与雾滴速度的平方成正比。从图10中还能发现,曲线2( $p_L = 0.5$  MPa)斜率略大于曲线3( $p_L = 0.8$  MPa),这主要是由于2种工况下雾滴初速度接近,但所形成的雾滴粒径有明显差异(76.61  $\mu\text{m}$ 和129.8  $\mu\text{m}$ )。大颗粒雾滴所具有的惯性大,穿透性强,速度衰减相对缓慢,所以曲线3斜率略小于曲线2。

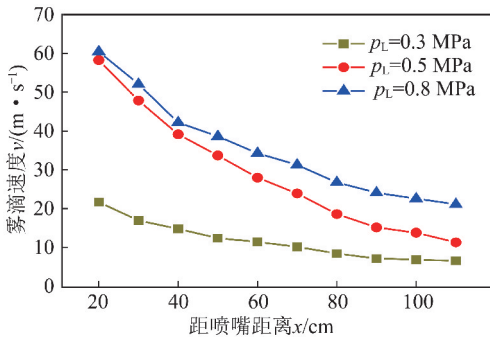


图10 喷嘴轴线雾滴速度衰减曲线

Fig. 10 Attenuation curves of droplet velocity along the direction of nozzle axis

图11为2种喷嘴出口附近( $x=20$  cm)雾滴速度随供水压力的变化曲线。由图11可知,随着供水压力的增加,2种喷嘴所对应的出口雾滴速度均增大,且增幅不断减小。对比2种喷嘴出口雾滴速度变化曲线可以发现,相同供水压力下,空气雾化喷嘴出口雾滴速度远高于压力喷嘴,如供水压力为0.5 MPa时,压力喷嘴出口附近雾滴速度仅为9.65 m/s,而空气雾化喷嘴由于有压缩空气作为助力,出口附近雾滴速度高达58.23 m/s。从图11中还能发现,对于压力喷嘴,即使供水压力提高至8.0 MPa,喷嘴出口附近雾滴速度仍低于40 m/s;而对于空气雾化喷嘴,当供

水压力高于0.4 MPa时,喷嘴出口附近雾滴速度均高于40 m/s。通常情况下,雾滴与粉尘相对速度越高,粉尘越容易被捕获,尤其是呼吸性粉尘,由于其表面吸附空气形成保护气膜,需要更高的雾滴速度将其捕获。由此可见,相对于压力喷嘴,空气雾化喷嘴具备较高的雾滴速度,在喷雾降尘方面存在明显优势。

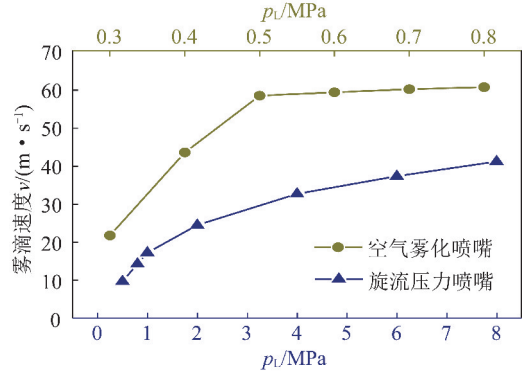


图11 不同供水压力2种喷嘴出口附近雾滴速度( $x=20$  cm)

Fig. 11 Droplet velocity near the outlet of two nozzles under different water supply pressure ( $x=20$  cm)

### 2.3 喷嘴降尘性能实验

表3为3种喷雾方式下喷雾前、后粉尘浓度与降尘效率。从表3能够发现,单喷嘴压力喷雾作用下,随着供水压力的增加,全尘和呼吸性粉尘降尘效率均提高,且增幅呈下降趋势。这主要是因为供水压力越高,所形成的雾滴越细,且雾流速度和雾滴浓度均增加,提高了雾滴与粉尘的碰撞概率。同时,随着供水压力的不断提高,由于雾化角的减小且供水压力对雾滴粒径的影响降低,导致降尘效率增幅不断减小。从表3还能发现,当供水压力达到一定值后,继续提高喷雾压力,降尘效率几乎不改变。由此可见,对于压力喷雾,依靠提高供水压力来提高降尘效率存在一定局限性。

对比表3中单喷嘴压力喷雾和单喷嘴气水喷雾降尘效率可以发现,在相同的供水压力下( $p_L = 0.5$  MPa),虽然空气雾化喷嘴流量小于压力喷嘴,但空气雾化喷嘴降尘效率高于压力喷嘴,尤其是呼吸性粉尘降尘效率。这主要是由于空气雾化喷嘴对供水压力要求低,在压缩空气助力下雾化效果较好,所形成的雾滴粒径小;而且,空气雾化喷嘴具备较高的雾滴速度,提高了雾滴捕获粉尘(特别是呼吸性粉尘)的能力。随着供水压力的增加,压力喷雾流量不断增大,当供水压力达到2.0 MPa后,压力喷雾水流量远高于单喷嘴气水喷雾,如图12所示;同时,压力喷雾雾滴粒径随着供水压力的增大而不断减小,导致压力喷雾供水压力超过2.0 MPa后全尘和呼吸性粉尘降尘效率均高于单喷嘴气水喷雾,见表3。

表3 不同喷雾方式测量段内粉尘浓度及降尘效率

Table 3 Dust concentration and dust removal efficiency in measurement section under different kinds of spray

实验内容	供水压力/ MPa	喷雾前全尘浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	喷雾前呼尘浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	喷雾后全尘浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	喷雾后呼尘浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	全尘降尘 效率/%	呼尘降尘 效率/%
单喷嘴压力喷雾	0.5	358.68	69.28	164.92	36.48	54.02	47.35
	2.0	367.13	71.33	128.28	25.38	65.06	64.42
	4.0	361.22	71.21	92.65	20.49	74.35	71.23
	6.0	372.36	70.67	68.92	17.18	81.49	75.69
	8.0	359.45	67.56	46.37	15.04	87.10	77.74
	10.0	362.73	68.54	37.54	14.22	89.65	79.26
单喷嘴气水喷雾	0.5	367.45	74.78	155.84	28.27	57.67	62.19
双喷嘴气水喷雾	0.5	374.19	72.25	96.69	19.98	74.16	72.35

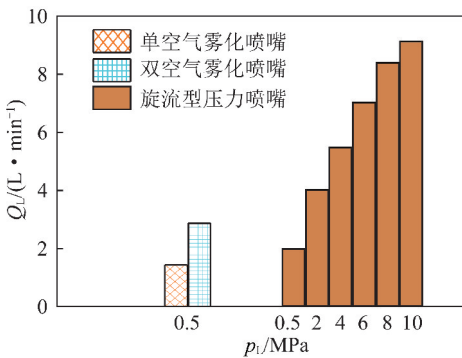


图12 不同喷雾方式水流量

Fig. 12 Water flow rate with different kinds of spray

对比表3中的单喷嘴压力喷雾和双喷嘴气水喷雾降尘效率实验数据发现,双喷嘴气水喷雾降尘效率与单喷嘴压力喷雾  $p_L=4.0$  MPa 时的降尘效率接近。从图12可以看出,单喷嘴压力喷雾  $p_L=4.0$  MPa 时所对应的喷嘴耗水量为  $5.47$  L/min,而双喷嘴气水喷雾总耗水量仅为  $2.86$  L/min。虽然双喷嘴气水喷雾耗水量仅约为压力喷嘴的0.5倍,但由于双喷嘴气水喷雾所获得雾滴粒径更细,雾滴速度更高,且双喷嘴喷雾覆盖面积更广,增大了喷雾有效作用面积,导致二者降尘效率较为接近。从以上不同喷雾方式降尘效率对比实验可知,在相同的供水压力和出水孔直径下,空气雾化喷嘴降尘效率高于普通压力喷嘴,特别是呼吸性粉尘降尘效率;气水喷雾较压力喷雾具有明显优势,获得相同的降尘效率,气水喷雾耗水量仅约为压力喷雾的一半。

### 3 结 论

(1)随着供水压力的增加,内混式空气雾化喷嘴水流量和气流量分别以指数形式递增和递减,气液质量流量比不断下降,而雾滴粒径不断增大。压力型喷嘴在较高的供水压力下才能获得较为理想雾滴粒径,而空气雾化喷嘴由于有压缩空气作为助力,对供水压

力要求较低。

(2)随着供水压力的增加,内混式空气雾化喷嘴雾化射程和雾滴体积分数均增大,而雾化角呈现先增大后减小的变化规律;由于内部结构和雾化原理的差异,旋流压力喷嘴雾化角明显大于空气雾化喷嘴。

(3)在相同的供水压力和出水孔直径下,空气雾化喷嘴水流量和雾滴粒径均小于压力型喷嘴,而雾滴体积浓度、雾滴速度和降尘效率均高于压力喷嘴。

(4)气水喷雾较压力喷雾具有明显优势,获得相同的降尘效率,气水喷雾耗水量仅约为压力喷雾的一半。

### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 周福宝,李建龙,李世航,等. 综掘工作面干式过滤除尘技术实验研究及实践[J]. 煤炭学报,2017,42(3):639-645.  
ZHOU Fubao, LI Jianlong, LI Shihang, et al. Experimental investigation and application of dry-type filtering dust collection technology in fully mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 639-645.
- [3] 周刚,张琦,程卫民,等. 煤矿锚喷作业区喷雾粉尘数值模拟与新型湿喷一体机研制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):606-614.  
ZHOU Gang, ZHANG Qi, CHENG Weimin, et al. Numerical simulation on gunite dust of bolt-shotcrete operating area in coal mine and development of new wet spraying integral machine[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(2): 606-614.
- [4] ZHOU Gang, ZHANG Qi, BAI Ruonan, et al. Characterization of coal micro-pore structure and simulation on the seepage rules of low-pressure water based on CT scanning data[J]. Minerals, 2016, 6(3): 1-16.

- [5] NIE Wen, CHENG Weimin, HAN Li, et al. Simulation on dissolute and dust dispersion in comprehensive mechanized heading face with forced-exhaust ventilation[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2011, 17(3):298-304.
- [6] 李德文, 马俊, 刘何清. 煤矿粉尘及职业病防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007.
- [7] 许满贵, 刘欣凯, 文新强. 煤矿综掘工作面高效喷雾降尘系统[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(2):1-7.  
XU Mangui, LIU Xinkai, WEN Xinqiang. Full-mechanized excavation face efficient sprinkler & dust fall system[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 30(2):1-7.
- [8] 王鹏飞, 程卫民, 周刚, 等. 供气压力对煤矿井下气水喷雾降尘的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S1):137-143.  
WANG Pengfei, CHENG Weiming, ZHOU Gang, et al. Influence of air supply pressure on the air-water spraying dust-settling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1):137-143.
- [9] 蒋仲安, 王明, 陈举师, 等. 气水喷雾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 Zhong'an, WANG Min, 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.
- [10] DARIUSZ Prostanski. Using of air-water spraying systems for improving dust control in mines[J]. Journal of Sustainable Mining, 2013, 12(2):29-34.
- [11] RUI Ma, BO Dong, ZHONG Qiangyu, et al. An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88(12):149-156.
- [12] RAJ Mohan Balakrish, JAIN Rajnik, MEKA Bhim. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(5):269-277.
- [13] 曹建明, 朱辉, 郭广祥, 等. 空气助力改善液滴雾化质量的研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(1):56-60, 87.  
CAO Jianming, ZHU Hui, GUO Guangxiang, et al. Study on assistant to improve quality of droplet atomization[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(1):56-60, 87.
- [14] 吉晓莉, 陈家炎, 赵云惠. 内混式空气雾化喷嘴的研究[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(3):47-49.  
JI Xiaoli, CHEN Jiayan, ZHAO Yunhui. Study on internal blend airblast atomizer[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1998, 20(3):47-49.
- [15] 郑斌, 姬丽霞, 路春美, 等. 电厂 SCR 空气雾化喷嘴的雾化特性研究[J]. 环境工程, 2009, 27(3):79-86.  
ZHENG Bin, JI Lixia, LU Chunmei, et al. Study on atomization characteristics of the SCR airblast atomizer in electric power plant[J]. Environment Engineering, 2009, 27(3):79-86.
- [16] 王鹏飞, 刘荣华, 桂哲, 等. 煤矿井下气水喷雾雾化特性及降尘效率理论研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9):2256-2272.  
WANG Pengfei, LIU Ronghua, GUI Zhe, et al. Theoretical research on atomization characteristics and dust suppression efficiency of air-water spray in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2256-2272.
- [17] 宋文超, 阙景文, 王明, 等. 气水喷雾降尘系统在采煤机上的应用研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(8):60-64.  
SONG Wenchao, KAN Jingwen, WANG Ming, et al. Study on application of gas-water spraying dust suppression system in coal mining machines[J]. Industrial Safety and Environment Protection, 2015, 41(8):60-64.
- [18] 蒋仲安, 王明, 陈举师, 等. 气水喷雾雾化特征及降尘效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2):151-157.  
JIANG Zhong'an, 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.
- [19] 句海洋, 凌标灿, 彭驰, 等. 综掘工作面机载气水两相喷雾装置的应用[J]. 煤炭工程, 2015, 47(4):131-133.  
JU Haiyang, LING Biaocan, PENG Chi, et al. Application of water-air two-phase spray device on coal shearer in fully mechanized tunneling working site[J]. Coal Engineering, 2015, 47(4):131-133.
- [20] 刘联胜, 傅茂林, 吴晋湘, 等. 气泡雾化喷嘴喷雾平均直径在下游流场中的分布[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5):653-656.  
LIU Liansheng, FU Maolin, WU Jinxiang, et al. The distribution of SMD downstream the discharge orifices of effervescent atomizers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5):653-656.
- [21] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005:116-156.
- [22] 聂涛, 高贵军. 压力旋流喷嘴雾化特性实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7):162-165.  
NIE Tao, GAO Guijun. An experimental study on the spray characteristics of pressure swirl nozzle[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7):162-165.