



移动扫码阅读

王鹏飞, 邬高高, 田 畅, 等. 基于正交试验的内混式空气雾化喷嘴结构参数优化[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 129–139.

WANG Pengfei, WU Gaogao, TIAN Chang, *et al.* Structural parameters optimization of internal mixing air atomizing nozzle based on orthogonal experiment[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 129–139.

基于正交试验的内混式空气雾化喷嘴结构参数优化

王鹏飞^{1,2}, 邬高高², 田 畅², 刘荣华^{1,2}, 高润泽²

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害治理安全生产试验室, 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)

摘要: 为掌握结构参数对内混式空气雾化喷嘴雾化特性和降尘效率的影响规律, 从而获得经济合理的喷嘴结构参数, 采用自行设计开发的喷雾降尘试验平台, 应用正交设计方法, 开展了不同结构参数组合下的喷嘴雾化特性及降尘效率试验。试验结果表明: 随着液体帽注水孔直径的增大, 喷嘴水流量不断增加, 而气流量不断减小; 喷嘴气流量随液体帽注气孔数量增加而增大, 喷嘴水流量受液体帽注气孔数量的影响较小。当逐渐增大注水孔直径时, 索太尔平均粒径(D_{sm})不断增大; D_{sm} 随着注气孔数量的增加呈现出先减小后增大的变化规律, 当注气孔数为 4 时达到最小值, 雾化效果最好; 空气帽出口直径为 2.0 mm 和 2.5 mm 时, 喷嘴雾滴粒径较小。全尘和呼吸性粉尘降尘效率均随着液体帽注水孔直径和注气孔数量的增加呈现先增大后减小的变化规律, 并分别在注水孔直径为 1.5 mm 和注气孔数量为 4 时获得最佳的降尘效果; 随着空气帽出口直径的增大, 全尘和呼吸性粉尘降尘效率均有所提高, 但空气帽出口直径大于 2.0 mm 后, 降尘效率增幅较小。综合考虑喷嘴雾化特性参数和降尘效率, 对于喷嘴空气帽, 其出口直径应选择 2.0 mm; 对于喷嘴液体帽, 注水孔直径为 1.5 mm 和注气孔数量为 4 时较为合理, 能够获得最高的降尘效率。工业应用现场采用以上结构参数组合的喷嘴较为合理, 该种结构参数组合的喷嘴在耗气量和耗水量较低时, 能获得较小的雾滴粒径和较高的降尘效率。

关键词: 内混式空气雾化喷嘴; 结构参数; 雾化特性; 降尘效率; 正交试验

中图分类号: TD714

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)09-0129-11

Structural parameters optimization of internal mixing air atomizing nozzle based on orthogonal experiment

WANG Pengfei^{1,2}, WU Gaogao², TIAN Chang², LIU Ronghua^{1,2}, GAO Runze²

(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)

Abstract: In order to grasp the influence of structural parameters of internal mixing air atomizing nozzles on the atomization characteristics and dust reduction efficiency, so as to obtain economical and reasonable nozzle structure parameters, the self-designed and developed spray dust reduction experimental platform and the orthogonal design method was used to carry out experiment on nozzle atomization characteristics and dust reduction efficiency under the combination of structural parameters. The experimental results shown that, with the diameter of the liquid cap injection hole increased, the nozzle water flow rate increased, while the air flow rate decreased continuously. Nozzle air flow increased with the number of liquid cap injection hole, whereas nozzle water flow was less affected by the number of liquid cap injection hole. When the diameter of the water injection hole gradually increased, the Sauter Mean Diameter (SMD) increased continuously. SMD with the increase of the number of air injection holes shown a change law of first decrease and then increase, and the minimum value was reached when the number of air injection holes was 4, where the atomization effect was the best. When the air cap outlet diameter was 2.0 mm and 2.5 mm, the nozzle droplet size was smaller. With the increase of the diameter of the water injection holes

收稿日期: 2022-09-06

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1446

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274197); 湖湘青年英才资助项目(2021RC3111); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30266)

作者简介: 王鹏飞(1984—), 男, 江西九江人, 教授, 博士生导师。Tel: 0731-58290280, E-mail: pfwang@sina.cn

and the number of air injection holes of the liquid cap, the dust reduction efficiency of total dust and respirable dust both first increased and then decreased, and the best effect of the dust reduction was obtained in the diameter of water injection holes of 1.5 mm and the number of air injection holes of 4, respectively. With the diameter of the air cap outlet increased, the dust reduction efficiency of both total dust and respirable dust increased, but the increase of the dust reduction efficiency was smaller when the diameter of the air cap outlet was greater than 2.0 mm. Comprehensively considering the nozzle atomization characteristics and dust reduction efficiency, for the nozzle air cap, the outlet diameter should be 2.0 mm, for the nozzle liquid cap, it was reasonable to use a water injection hole diameter of 1.5 mm and the number of air injection holes to be 4, which can obtain the highest dust reduction efficiency. It is more reasonable to use the nozzles with the combination of above structure parameters for industrial applications, which can obtain smaller droplet size and higher dust reduction efficiency with lower air and water consumption.

Key words: internal mixing air atomizing nozzle; structural parameters; atomization characteristics; dust-reduction efficiency; orthogonal experiment

0 引言

喷雾降尘是煤炭行业最常用的一种粉尘治理技术^[1-3]。在喷雾降尘现场,一般采用压力喷嘴实现水的雾化^[4]。然而,压力喷嘴由于工作压力的限制,雾化效果往往较差,降尘效率普遍偏低。而且,传统压力喷嘴供水压力大且耗水量多,废水对降尘现场造成一定程度的污染^[5-6]。空气雾化技术利用气液两相的相互碰撞与摩擦,在碰撞应力、摩擦应力等力的作用下实现液体雾化。相对于传统的压力雾化,空气雾化具有对水压要求低、耗水量小、喷雾降尘效率高(特别针对呼吸性粉尘)、喷嘴不易堵塞等优势^[7-8]。

空气雾化喷嘴是实施空气雾化的关键部件,分为内混式和外混式2种类型^[9-10]。内混式空气雾化喷嘴是压缩空气和液体于喷嘴内部相互作用,产生的喷雾均匀且雾滴粒径小,广泛应用于各种降尘场所^[11-12]。因此,国内外学者对其展开大量研究,LEFEBVRE、BRONJARZ、FERREIR等研究团队率先对该类喷嘴的结构和雾化机理开展了较为全面的研究,发现影响喷嘴雾化质量的主要因素包括空气的扰动、液体黏度、表面张力、喷嘴结构参数等^[13-15]。一些学者还开展了空气雾化喷嘴雾滴粒径的理论预测和数学模型的建立工作,并得出了一些有价值的经验公式^[16-19]。曹建明、白博鹏等^[20-23]采用数值模拟和试验对该类喷嘴进行了全面的雾化特性研究工作,研究了工况参数对空气雾化的影响。在雾化特性研究的基础上,近些年,一些研究学者开展了该类喷嘴降尘理论与现场应用的研究工作。蒋仲安团队以煤矿综掘工作面气水喷雾降尘过程为研究对象,建立了相应的数学模型,推导出空气雾化喷嘴降尘效率的计算模型^[24-27]。MOHAN对洗涤塔内采用的内混式空气雾化喷嘴降尘效率开展了理论预测,并验证预测模型的准确性^[28]。PROSTANSKI将该类

喷嘴应用到矿山掘进机截割头喷雾降尘,工程现场实测表明该喷嘴能够有效降低现场粉尘浓度,降尘效率较高^[29]。近几年,国内部分矿山企业将内混式空气雾化喷嘴应用于掘进工作面粉尘防治,相对于常规压力喷雾,不仅耗水量大幅减少,而且取得了良好的降尘效果^[30-31]。

在以往的研究中,通常选用某一固定结构参数的喷嘴,通过变换气、液两相压力或流量来考察工况参数对喷嘴雾化特性和降尘效率的影响,得出适合该喷嘴的工作条件。在对结构参数的研究中,也只是针对某一种单一的结构参数开展研究,而没有将喷嘴所涉及的主要结构参数进行综合分析,从而得出最佳的结构参数组合。导致工业应用现场在选择喷嘴时只能凭经验判断,缺乏科学合理的理论指导。鉴于内混式空气雾化喷嘴结构参数研究存在上述不足,本研究利用自行开发的喷雾降尘试验平台,运用正交设计法,研究主要结构参数对该类喷嘴雾化特性和降尘性能的影响,获得结构参数对喷嘴雾化特性及降尘效率的影响规律。在此基础上,综合考虑喷嘴雾化特性参数和降尘效率,并结合工业现场条件,得出最优的结构参数组合,为该类喷嘴工业应用提供理论支撑。

1 试验系统及方案

1.1 试验系统

研究所选用的内混式空气雾化喷嘴如图1所示。该喷嘴雾流形状为实心圆锥,主要由喷嘴底座、液体帽和空气帽等组成。

设计了一套喷雾降尘试验系统,该系统功能齐全,可模拟煤矿现场产尘、喷雾和通风等工况条件。系统主要由巷道模型、BPZ75/12型高压水泵、水箱、控制柜、AG420气溶胶发生器、空气压缩机、流量计及相关的管道、阀门、测量仪器和仪表等组成。巷道

模型由入口段、测量段、喷雾段、除尘风机及出口段等组成。巷道模型喷雾段采用板厚为 1 cm 的透明

有机玻璃制作,其他部分均由钢板加工制作而成。
图 2 为喷雾降尘试验系统。

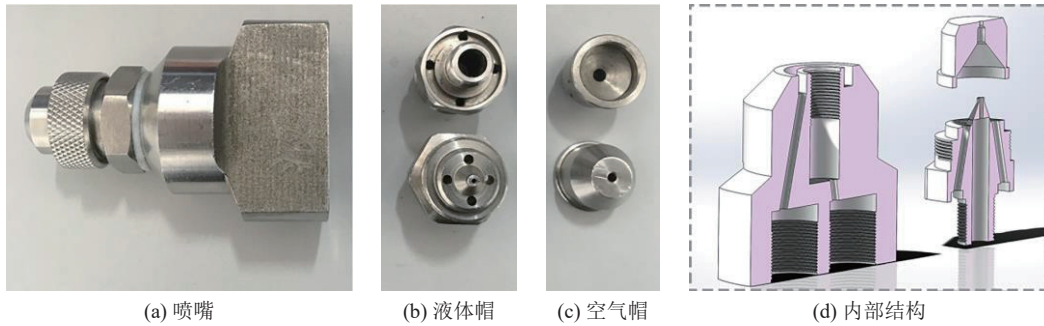


图 1 内混式空气雾化喷嘴和部件
Fig.1 Internal mixing air atomizing nozzle and components

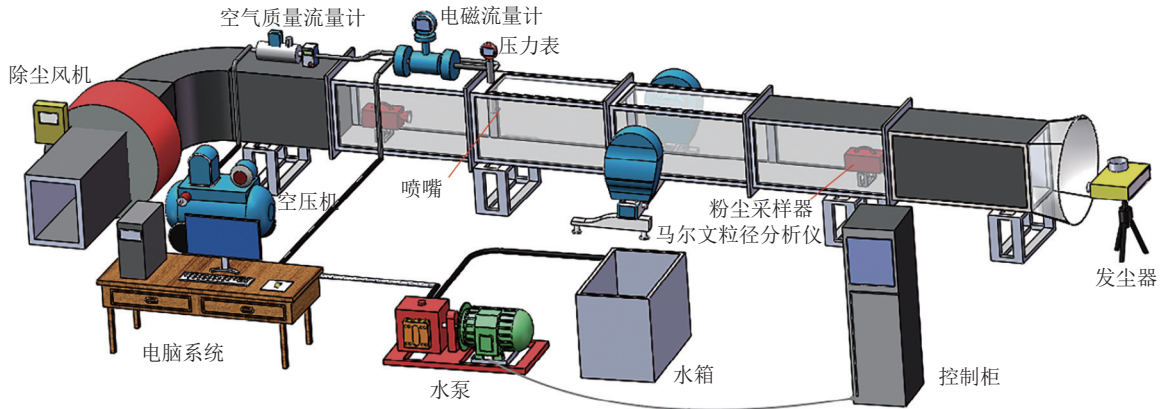


图 2 喷雾降尘试验系统
Fig.2 Spray dust reduction experiment system

1.2 试验方案

对于内混式空气雾化喷嘴,影响喷嘴雾化特性与降尘性能的主要结构参数为液体帽注水孔直径 d_l 、液体帽注气孔数量 n 及空气帽出口直径 d_c 。将液体帽注水孔直径 d_l 、液体帽注气孔数量 n 及空气帽出口直径 d_c 作为正交试验的 3 个因素,每个因素均设置 5 个水平,采用“三因素、五水平” $L_{25}(5^3)$ 正交试验设计方法。根据前期现场考察和实测,综合考虑降尘效率、耗水量及现场条件,确定三个结构参数所对应的水平范围,设计正交试验表,各因素和水平见表 1。

第 1 组试验为喷嘴雾化特性试验。按照表 1 的正交试验设计方案,对空气雾化喷嘴雾化特性进行测定,所涉及的雾化特性参数包括喷嘴水流量、气流量和雾滴粒径。在工业生产中,压缩空气源所提供的空气压力一般为 0.4 ~ 0.6 MPa。前期研究成果表明,当供水压力和供气压力较为接近时,喷嘴能够获得较为理想的降尘效率^[32]。因此,在开展喷嘴结构参

数试验时,将供气压力和供水压力均设置为 0.5 MPa。分别采用 D07-60B 空气质量流量计和 YY-LED15K4C 型电磁流量计测量喷嘴气流量和水流量。采用马尔文雾滴粒径分析仪测量雾滴粒径,选择喷口前方 50 cm 中心作为数据采集区域。采用索太尔平均粒径(D_{sm})作为雾滴粒径的评价指标。图 3 为正交试验所选用的喷嘴液体帽和空气帽。

表 1 正交试验因素和水平
Table 1 Orthogonal experimental factors and levels

水平组数	影响因素		
	d_l/mm	n	d_c/mm
1	1.0	2	1.5
2	1.2	3	2.0
3	1.5	4	2.5
4	1.8	5	3.0
5	2.0	6	3.5

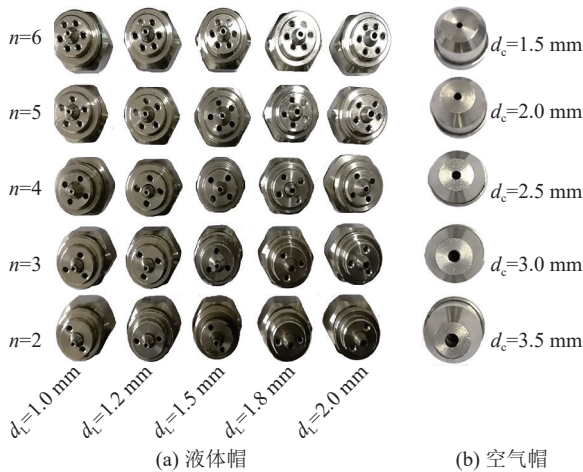


图 3 试验用液体帽和空气帽

Fig.3 Liquid cap and air cap for the experiment

第 2 组试验为喷雾降尘试验。按照表 1 的正交试验设计方案,对喷雾降尘效率进行测定。试验所选用的粉尘为煤粉,其特征粒径 D_{10} , D_{50} 和 D_{90} 分别为 2.68、36.43、123.12 μm , 粒径分布如图 4 所示。采用德国 AG420 气溶胶发生器发尘,设置发尘量为 15 g/min。在模型巷道喷雾前测量段与喷雾后测量段内布置 FCC-25 型防爆粉尘采样器各 1 台,将采样时间和采样流量分别设置为 2 min 和 15 L/min。两测尘点在同一时间采样,每个工况连续采样 4 次取平均值。采用电子分析天平对采样前后粉尘滤膜称重,从而计算全尘质量浓度 c_{mi} 和全尘降尘效率 η_t 。利用 LS13320 型激光粒度分析仪将所采集的粉尘样品进行粒度分析,得出喷雾前后呼吸性粉尘占比情况,并结合全尘质量浓度 c_{mi} 得出呼吸性粉尘质量浓度 c_{mr} 和呼吸性粉尘降尘效率 η_r 。通过对轴流风机进行变频调节,将试验巷道模型内风速稳定在 1.0 m/s。

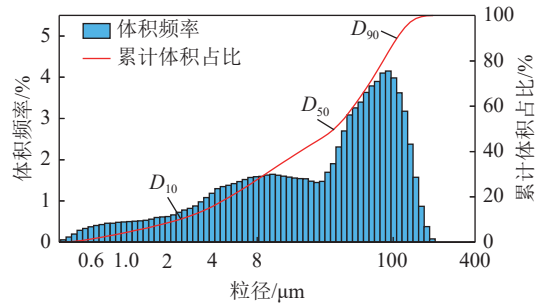


图 4 煤尘样品粒径分布

Fig.4 The particle size distribution of coal dust

2 试验结果

根据表 1 正交设计方案展开试验,试验结果汇总于表 2。图 5 为 25 种工况下的雾滴粒径分布图,图中红色实线代表雾滴粒径的累积占比,蓝色柱子代表雾滴粒径体积频率。从表 2 和图 5 中的正交试验结果可看出,喷嘴雾化特性参数分布较为宽广,水流量分布在 0.30 ~ 3.50 L/min,气流量分布在 25 ~ 303 L/min, D_{sm} 分布在 32.18 ~ 162.10 μm 。从表 2 的降尘效率数据也能发现,本次试验方案所对应的降尘效率范围覆盖面较广,全尘降尘效率分布在 41.22% ~ 74.73%,呼吸性粉尘降尘效率分布在 40.96% ~ 77.91%。

从以上结果可看出,采用本正交试验方案所测定的雾化特性参数和降尘效率覆盖较为宽广,基本可以满足考察和分析的要求。在工业生产场所中,可根据工程现场对空气雾化喷嘴雾化特性和降尘效率的要求,从正交试验结果表 2 中选择满足或近似满足条件要求的结构参数组合;同时,可以根据具体试验条件的要求,通过选择合理的喷嘴结构参数组

表 2 喷嘴结构参数正交试验结果

Table 2 Orthogonal experiment results

序号	影响因素			试验结果				
	d_l/mm	n	d_c/mm	$Q_l/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_{\text{air}}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$D_{\text{sm}}/\mu\text{m}$	$\eta_t/\%$	$\eta_r/\%$
1	1.0	2	1.5	0.30	25	64.09	52.90	52.85
2	1.0	3	2.0	0.37	29	44.81	59.33	70.68
3	1.0	4	2.5	1.43	98	38.11	53.98	60.42
4	1.0	5	3.0	0.32	123	62.47	57.91	62.70
5	1.0	6	3.5	1.21	303	39.44	56.08	62.35
6	1.2	2	2.0	0.34	34	32.18	53.23	54.69
7	1.2	3	2.5	1.13	92	50.55	64.71	73.46
8	1.2	4	3.0	0.77	103	50.90	70.69	75.68
9	1.2	5	3.5	1.73	251	57.44	59.60	70.87
10	1.2	6	1.5	0.73	31	106.29	46.83	42.98
11	1.5	2	2.5	1.07	48	50.41	60.26	65.87
12	1.5	3	3.0	1.47	143	49.41	63.16	71.97

续表

序号	影响因素			试验结果				
	d_i/mm	n	d_e/mm	$Q_l/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_{\text{air}}/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$\eta_l/\%$	$\eta_d/\%$
13	1.5	4	3.5	2.63	204	81.80	74.73	77.91
14	1.5	5	1.5	0.57	33	136.42	55.56	54.58
15	1.5	6	2.0	0.71	39	91.30	62.91	71.87
16	1.8	2	3.0	1.53	102	162.10	58.63	76.76
17	1.8	3	3.5	2.50	174	101.77	66.65	70.64
18	1.8	4	1.5	0.93	27	102.40	55.30	45.35
19	1.8	5	2.0	2.63	36	46.10	49.91	55.53
20	1.8	6	2.5	1.37	104	88.41	58.67	68.69
21	2.0	2	3.5	3.07	145	105.10	57.30	66.47
22	2.0	3	1.5	1.47	25	157.20	41.22	40.96
23	2.0	4	2.0	0.77	43	110.20	63.10	76.93
24	2.0	5	2.5	1.70	71	135.80	61.21	71.49
25	2.0	6	3.0	3.50	103	91.20	53.76	54.53

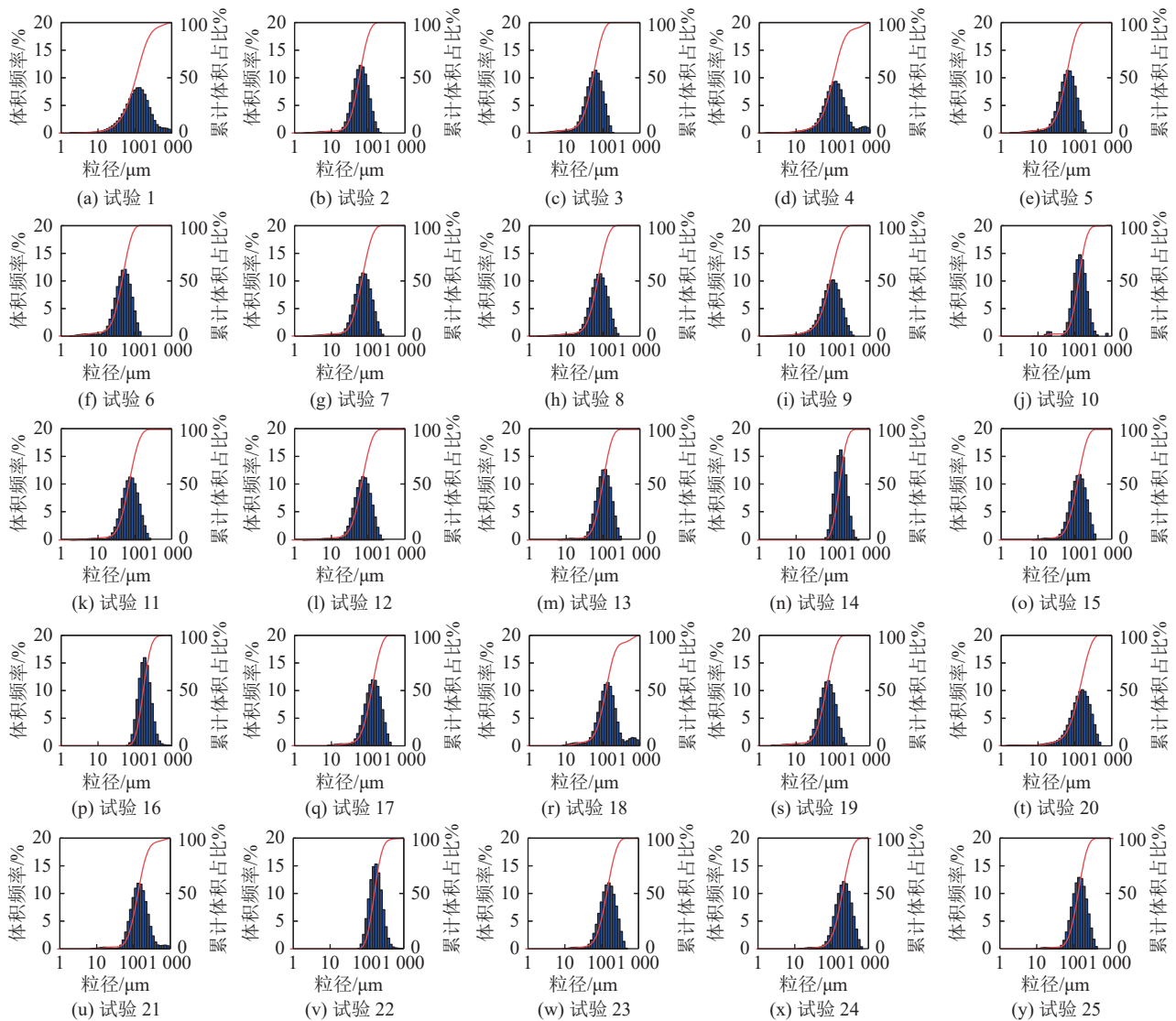


图5 雾滴粒径分布

Fig.5 Droplet size distribution

合,使喷嘴的雾化特性和降尘效率达到最优值。

3 分析与讨论

根据正交试验理论,得出每个因素在相同水平时的综合平均值及各影响因素的极差。同时,可根据条件要求,将每个因素下的最佳水平进行组合,从而得到最优试验条件^[33-34]。

3.1 喷嘴流量

表3为喷嘴流量综合平均值与极差分析结果。

表3 喷嘴流量正交试验结果综合平均值与极差

Table 3 Comprehensive average value and range analysis results of nozzle flow

项目	$Q_L/(L \cdot \text{min}^{-1})$			$Q_{\text{air}}/(L \cdot \text{min}^{-1})$		
	d_L	n	d_c	d_L	n	d_c
综合平均值1	0.73	1.26	0.80	115.60	70.80	28.20
综合平均值2	0.94	1.39	0.96	102.20	92.60	36.20
综合平均值3	1.29	1.31	1.34	93.40	95.00	82.60
综合平均值4	1.80	1.39	1.52	88.60	102.80	114.80
综合平均值5	2.10	1.50	2.23	77.40	116.00	215.40
极差	1.38	0.24	1.43	38.20	45.20	187.20
因素主次	$d_c > d_L > n$			$d_c > n > d_L$		

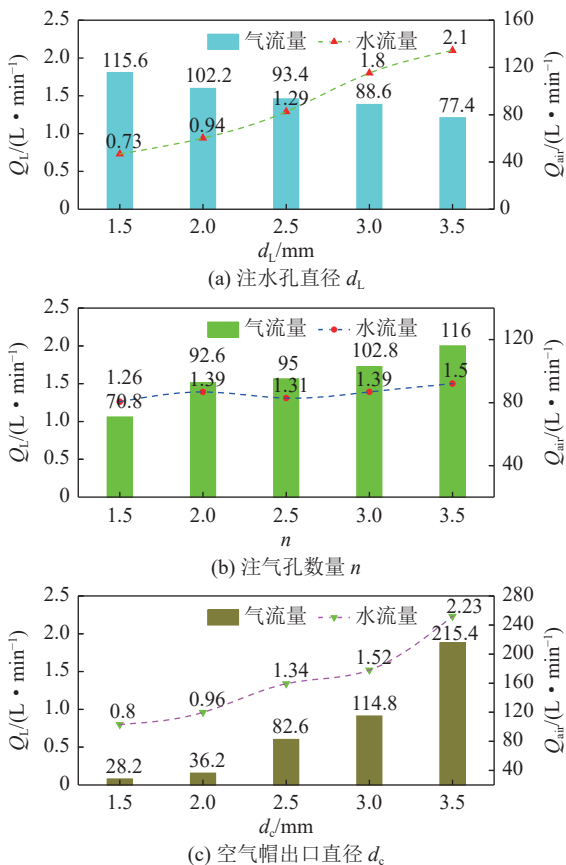


图6 结构参数对喷嘴流量的影响

Fig.6 Effect of structural factors on nozzle flow

从表3的极差分析结果可以看出,3个结构参数对于喷嘴水流量的影响重要度排序为 $d_c > d_L > n$;对于喷嘴气流量的影响重要度排序为 $d_c > n > d_L$ 。3个结构参数中,空气帽出口直径 d_c 对喷嘴水流量和气流量的极差值均为最大,说明该结构参数是最重要的因素。为了更直观地分析各因素对喷嘴流量的影响规律,并分析其影响机理,根据表3喷嘴流量的综合平均值,做出各因素与喷嘴流量的关系图,如图6所示。

图6a为不同注水孔直径下的喷嘴综合平均流量。图中显示,随着液体帽注水孔直径 d_L 的增大,喷嘴水流量 Q_L 不断增大,而气流量 Q_{air} 不断减小。当工况参数固定时,随着注水孔直径的增大,注水孔水流量和水流速度均不断增大,导致空气帽混合腔内气液两相流压力升高,加大了注气孔出口阻力,从而使得气流量下降。从图6b不同注气孔数量 n 下的喷嘴综合平均流量结果可知,喷嘴气流量 Q_{air} 随着注气孔数量 n 的增加而增大,而水流量 Q_L 相对稳定,仅在小范围内波动。增加注气孔数量,意味着进气面积的增加,空气注入空气帽的局部损失降低,总的气流量不断增加。虽然注气孔数量的增加引起气流量有所增加,但由于气流量增加的幅度有限,而进气面积大幅度的增大,造成单孔注气速度有所下降。在空气总流量增加和单孔速度降低2个共同因素作用下,空气帽混合腔气液两相压力仅在一个小范围波动,从而导致水流量随注气孔数量的增加变化幅度也较小。图6c显示,随着空气帽出口直径 d_c 的增大,喷嘴水流量 Q_L 和气流量 Q_{air} 均逐渐增大。空气帽出口直径的增大,提高了喷嘴出口的排泄能力,导致空气帽混合腔内两相流压力降低,减小了液体帽注水孔和注气孔的出口阻力,从而使得喷嘴水流量和气流量均增大。

3.2 雾滴粒径

图7为 D_{sm} 综合平均值与喷嘴3个结构参数的关系。从图7a可以发现, D_{sm} 随着注水孔直径 d_L 的增大而增大。从喷嘴流量试验可知,注水孔直径的增大,会引起水流量上升和气流量下降,从而导致气液质量流量比不断下降。气液质量流量比的下降,意味着空气能够提供给单位质量的液体雾化能量下降,从而使得液滴难以破碎成细小雾滴,造成 D_{sm} 增大。图7b显示,随着注气孔数量 n 的增加, D_{sm} 呈现先减小后增大的变化趋势,并在注气孔数量 $n=4$ 时达到最小值。当喷嘴液体帽注气孔数量 n 在2~4之间变化时,随着注气孔数量的增加,喷嘴总供气量不断增大,单位质量的水所获得空气雾化能量增加,

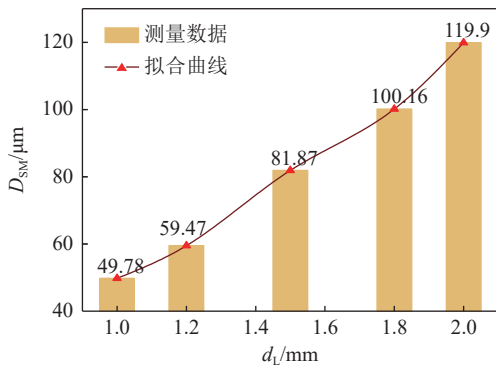
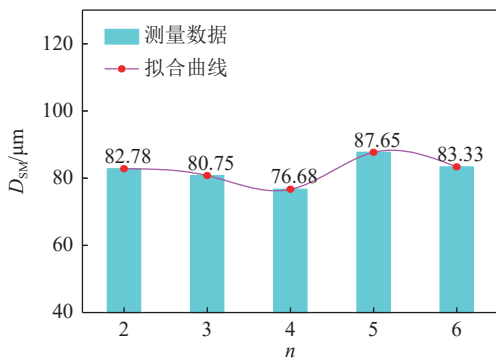
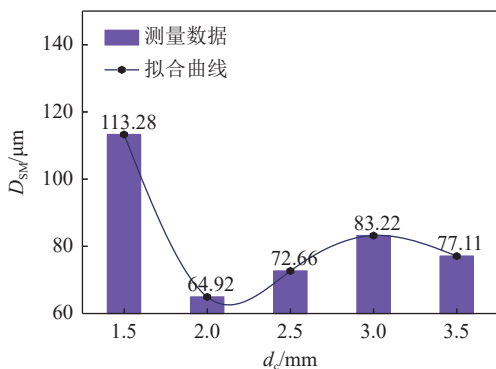
(a) 注水孔直径 d_L (b) 注气孔数量 n (c) 空气帽出口直径 d_c

图7 结构参数对SMD的影响

Fig.7 Effect of structural factors on SMD

所以雾化质量有所改善。当注气孔数增加至4时,继续增加注气孔,虽然总供气量有所增加,但供气量增加的幅度变缓,且由于进气面积的增加,空气注入混合室的速度减缓,减小了气液两相相对速度,雾化效果受到一定程度的影响,导致雾滴粒径有所增大。从整体上看,注气孔数量对雾滴粒径的影响并不大,雾滴粒径仅在一个小范围变化,这一点由极差分析结果也能得到体现。

图7c为 D_{sm} 与空气帽出口直径的关系曲线。由图可知,空气帽出口直径为1.5 mm时所形成的雾滴粒径明显偏大。从喷嘴流量试验结果可知,当空气帽出口直径为1.5 mm时,喷嘴气液质量流量比明显偏低,液体雾化能量较小,造成雾滴粒径偏大。出口直径为2.0 mm的喷嘴雾化质量最好,所形成的 D_{sm} 最小。图7c中显示,当空气帽出口直径在2.0~3.0 mm之间变化时, D_{sm} 随着出口直径的增大而增大。空气帽出口直径的增大,提高喷嘴的排泄能力,气液两相在空气帽内破碎撞击时间缩短,雾化不完善,造成 D_{sm} 随出口直径增大而不断增大。从图7c还可以看出,当出口直径增加至3.0 mm后,继续增加出口直径,雾滴粒径有所下降,但变化不明显,这主要是由于大直径的空气帽导致雾滴孔口凝聚效应减弱。

通过图7中的 D_{sm} 综合平均值,亦可以算出各影响因素的极差,发现液体帽注水孔直径 d_L 的极差最大,说明注水孔直径是影响 D_{sm} 的最重要的因素。三因素对 D_{sm} 影响的主次顺序依次为: $d_L > d_c > n$ 。

3.3 降尘效率

从以上试验结果可知,结构参数对内混式空气雾化喷嘴水流量、气流量及雾滴粒径均有着较为明显的影响。水流量和雾滴粒径是影响喷雾降尘效率的主要雾化特性参数,结构参数对喷嘴降尘效率的影响较为复杂。目前,并不清楚结构参数对降尘效率的作用规律,还需要通过对降尘效率正交试验结果进行分析,从而确定各结构参数与降尘效率之间的关系。

3.3.1 极差分析

表4为降尘效率综合平均值与极差分析结果。从表4中可以发现,对于全尘降尘效率 η_t 和呼吸性粉尘降尘效率 η_r ,3个因素中,空气帽出口直径 d_c 的极差最大,说明空气帽出口直径是影响全尘和呼吸性粉尘降尘效率最重要的因素。特别是针对呼吸性粉尘来说,空气帽出口直径的极差比其他两个结构参数极差要大很多,说明空气帽出口直径对呼吸性

粉尘降尘效率的影响很大。根据表 4 的极差分析结果, 3 个因素对于全尘降尘效率的影响重要度排序为:

$d_c > d_L > n$; 对于呼吸性粉尘降尘效率的影响重要度排序为: $d_c > n > d_L$ 。

表 4 降尘效率正交试验结果综合平均值与极差

Table 4 Comprehensive average value and range analysis results of dust-reduction efficiency

水平组数	$\eta_i/\%$			$\eta_i/\%$		
	d_L	n	d_c	d_L	n	d_c
综合平均值1	56.04	56.46	50.36	61.80	63.33	47.34
综合平均值2	59.01	59.01	57.70	63.54	65.54	65.94
综合平均值3	63.32	63.56	59.77	68.44	67.26	67.99
综合平均值4	57.83	56.84	60.83	63.39	63.03	68.33
综合平均值5	55.32	55.65	62.87	62.08	60.08	69.65
极差	8.01	7.91	12.51	6.64	7.17	22.30
因素主次	$d_c > d_L > n$			$d_c > n > d_L$		

从雾化特性参数极差分析结果可知, 对于喷嘴水流量, 空气帽出口直径的极差是最大的, 说明空气帽出口直径对喷嘴水流量影响最显著。同时, 对于雾滴粒径, 空气帽出口直径的极差也位于三者中间。水流量和雾滴粒径是影响喷雾降尘效率的最重要的两个参数。所以, 在两者的综合作用下, 空气帽出口直径也表现出对降尘效率最显著的影响, 所对应的极差值最大。从以上分析发现, 对于喷雾降尘效率, 空气帽出口直径是最重要的一个结构参数, 在工业生产场所进行喷嘴选择和喷雾降尘方案设计时, 应对空气帽出口直径这个喷嘴结构参数进行重点关注。

3.3.2 液体帽结构参数与降尘效率的关系

根据表 4 中的分析数据, 绘制降尘效率综合平均值随液体帽结构参数变化的柱状图, 如图 8 所示。从图 8a 可以看出, 全尘和呼吸性粉尘降尘效率均随着注水孔直径的增大呈现先增大后减小的变化规律, 并在注水孔直径为 1.5 mm 时达到最大值。在巷道粉尘浓度相对稳定且风流速度不变的情况下, 喷雾降尘效率主要取决于空间含水量和雾滴粒径。从喷嘴流量和雾滴粒径试验发现, 随着注水孔直径的增大, 喷嘴水流量和雾滴粒径均不断增大。当注水孔直径为 1.0 mm 时, 虽然所获得的雾滴粒径较小, 但由于水流量太小, 巷道空间含水量和雾滴浓度较低, 不利于粉尘的捕集与沉降。因此, 该注水孔直径下的全尘和呼吸性粉尘降尘效率均较低, 分别仅为 56.04% 和 61.8%。当注水孔直径为 1.2 mm 和 1.5 mm 时, 虽然雾滴粒径的增加不利于粉尘的捕集和沉降, 但其增幅相对较小, 注水孔直径由 1.0 mm 增大至 1.2 mm 和 1.5 mm 时, D_{sm} 由 49.78 μm 增大至 59.47 μm 和 81.87 μm 。同时, 喷嘴水流量随着注水

孔直径的增大几乎保持线性增长, 增大了巷道空间含水量, 有利于喷雾降尘效率的提高。当注水孔直径为 1.8 mm 和 2.0 mm 时, 尽管喷嘴水流量的增加有利于降尘效率的提高, 但由于该注水孔直径下的 D_{sm} 偏大(均大于 100 μm), 且此时 D_{sm} 对降尘效率的影响占据主导地位, 所以导致全尘和呼吸性粉尘降

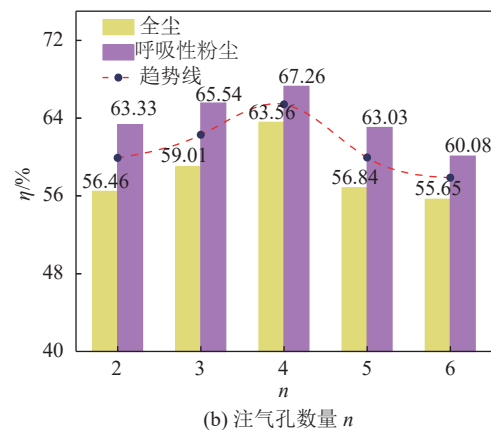
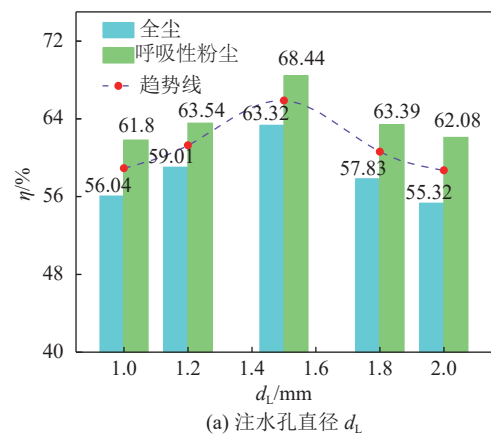


图 8 液体帽参数对降尘效率的影响
Fig.8 Effect of liquid cap parameters on dust-reduction efficiency

尘效率均有不同程度地下降。

图 8b 为不同注气孔数量所对应的降尘效率。图中显示,全尘和呼吸性粉尘降尘效率均随着注气孔数量的增加先增大后减小,并在注气孔数量为 4 时获得最佳的降尘效果。从注气孔数量对喷嘴流量与雾滴粒径影响的试验结果可知,当注气孔数量不断增加时,喷嘴水流量几乎保持不变,而雾滴粒径先减小后增大,并在注气孔数量为 4 时获得最小的雾滴粒径,导致降尘效率表现出图 8b 的变化规律。从图 8b 还可以看出,该组试验所测得的 5 个不同注气孔数量的降尘效率均比较接近,这主要是由于该组试验喷嘴水流量几乎相等,且雾滴粒径变化范围较小。从液体帽结构参数来看,在注水孔直径为 1.5 mm 和注气孔数量为 4 时能够获得最佳的降尘效果。

3.3.3 空气帽出口直径与降尘效率的关系

为便于对比分析,根据表 3 和表 4 将不同空气帽出口直径下的喷雾降尘效率 η 和喷嘴流量 Q 绘制成图 9。从图 9c 可以看出,随着空气帽出口直径的增大,全尘和呼吸性粉尘降尘效率均有所提高。对

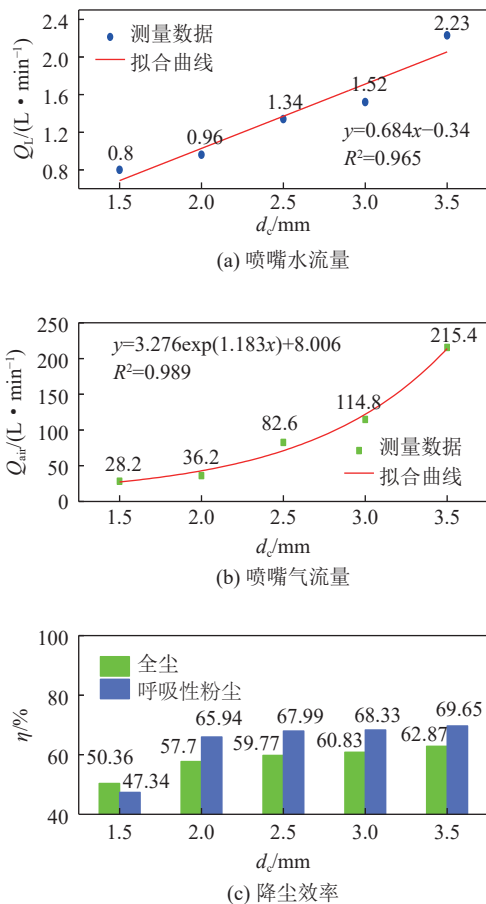


图 9 不同空气帽出口直径下的喷嘴流量与降尘效率

Fig.9 Dust reduction efficiency and nozzle flow under different diameters of the air cap outlet

比图 9c 中的 5 种空气帽出口直径所对应的全尘和呼吸性粉尘降尘效率可以发现,空气帽出口直径为 1.5 mm 时的全尘和呼吸性粉尘降尘效率均为最低。喷嘴雾化特性试验可知,空气帽出口直径为 1.5 mm 时,喷嘴水流量较小,同时所形成雾滴粒径偏大,导致该空气帽出口直径下的全尘和呼吸性粉尘降尘效率均偏低。所以,通过对比发现,出口直径为 1.5 mm 的空气帽由于降尘效率偏低,在工业应用现场不宜采用。

当出口直径在 2.0 ~ 3.5 mm 区间变化时,雾滴粒径在一定范围内呈现先增大后减小的变化规律,而喷嘴水流量则保持增大的趋势。虽然雾滴粒径在出口直径为 2.0 ~ 3.5 mm 区间有所变化,但整体变化幅度较小,喷嘴水流量对降尘效率的影响占据主导地位,导致全尘和呼吸性粉尘降尘效率均随着空气帽出口直径增大而不断升高。从图 9c 中的降尘效率增幅数据能够发现,虽然降尘效率随着空气帽出口直径的增大而有所提高,但当空气帽出口直径达到 2.0 mm 后,继续增大出口直径,全尘和呼吸性粉尘降尘效率变化并不明显,增幅较小,仅分别为 5.17% 和 3.71%。同时,图 9a 和图 9b 喷嘴流量数据显示,随着空气帽出口直径增大,喷嘴水流量和气流量分别以线性和指数形式递增,分别增大至原来的 2.32 倍和 5.95 倍。由以上分析可知,当空气帽出口直径达到 2.0 mm 后,继续增大空气帽出口直径,从经济角度并不合理。而且,喷嘴耗水量过大也会对工业现场作业环境造成一定程度的污染。综合考虑喷嘴雾化特性参数和降尘效率,选择出口直径为 2.0 mm 的空气帽较为经济合理。因为在该结构参数下,喷雾能够获得较为理想的雾滴粒径。同时,能够确保以较低的耗气量和耗水量获得较高的降尘效率。

4 结 论

1) 随着液体帽注水孔直径的增大,喷嘴水流量不断增加,而气流量不断减小;当增加液体帽注气孔数量时,喷嘴气流量不断增大,而水流量几乎保持不变;喷嘴水流量和气流量均随着空气帽出口直径的增大而增大。

2) D_{sm} 随着注水孔直径的增大而增大;随着注气孔数量的增加, D_{sm} 呈现先减小后增加的变化趋势,并在孔数为 4 时达到最小值,雾化效果最好;当空气帽出口直径为 2.0 mm 和 2.5 mm 时能够获得较为理想的雾滴粒径。

3) 全尘和呼吸性粉尘降尘效率均随着液体帽注

水孔直径和注气孔数量的增加呈现先增大后减小的变化规律,并分别在注水孔直径为 1.5 mm 和注气孔数量为 4 时获得最佳的降尘效果;随着空气帽出口直径的增大,全尘和呼吸性粉尘降尘效率均有所提高,但当空气帽出口直径达到 2.0 mm 后,增幅较小。

4)综合考虑喷嘴雾化特性参数和降尘效率,对于喷嘴空气帽,其出口直径应选择 2.0 mm;对于喷嘴液体帽,注水孔直径为 1.5 mm 和注气孔数量为 4 时较为合理,能够获得最高的降尘效率。

参考文献(References):

- [1] 程卫民,周刚,陈连军,等.我国煤矿粉尘防治理论与技术20年研究进展及展望[J].煤炭科学技术,2020,48(2):1-20.
CHENG Weimin, ZHOU Gang, CHEN Lianjun, *et al.* Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 1-20.
- [2] 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.
- [3] 李发泉.掘进设备内喷雾技术研究现状[J].煤炭科学技术,2017,45(4):89-92,187.
LI Faquan. Research status on internal spraying technology of gateway driving equipment[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(4): 89-92,187.
- [4] 刘荣华,邬高王,王鹏飞,等.X形旋流压力喷嘴质量中值直径预测模型[J].安全与环境学报,2021,21(4):1467-1473.
LIU Ronghua, WU Gaogao, WANG Pengfei, *et al.* Prediction model of mass median diameter of X-type pressure nozzle[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(4): 1467-1473.
- [5] NIE Wen, MA Xiao, CHENG Weimin, *et al.* A novel spraying/negative-pressure secondary dust suppression device used in fully mechanized mining face: a case study[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 103: 126-135.
- [6] 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.
- [7] 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):2256-2262.
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): 2256-2262.
- [8] 蒋仲安,许峰,王亚朋,等.空气雾化喷嘴雾化机理及影响因素试验分析[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2360-2367.
JIANG Zhong'an, 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.
- [9] 黎西,袁锐波,钱俊兵,等.片烟加料外混式空气雾化喷嘴雾化粒径分布特性[J].烟草科技,2019,52(11):78-86.
LI Xi, YUAN Ruibo, QIAN Junbing, *et al.* Distribution characteristics of particle size of tobacco casing atomized by external-mixing air atomizing nozzle[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(11): 78-86.
- [10] 艾吉文,高智雪,张丽,等.内混式空气雾化喷嘴雾化性能的试验及模拟研究[J].计算机与应用化学,2019,36(6):645-651.
AI Jiwen, GAO Zhixue, ZHANG Li, *et al.* Experimental and simulation study on atomization performance of internal mixing air atomizing nozzle[J]. Computers and Applied Chemistry, 2019, 36(6): 645-651.
- [11] 王鹏飞,刘荣华,王海桥,等.煤矿井下气水喷雾雾化特性试验研究[J].煤炭学报,2017,42(5):1213-1220.
WANG Pengfei, LIU Ronghua, WANG Haiqiao, *et al.* Atomization characteristics of air-water spray in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1213-1220.
- [12] 江莉.喷嘴结构及喷射条件对内混式空气雾化性能影响试验研究[D].西安:长安大学,2015.
JIANG Li. Experimental study of atomization characteristics effected by injector geometry and spray condition on an internal mixing air atomizing nozzle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [13] Lefebvre A H, Ballal D R. Gas Turbine Combustion[M]. Florida:CRC & Press & LLC, 2010.
- [14] BRONIARZ P L, OCHOWIAK M, ROZANSKI J, *et al.* The atomization of water-oil emulsions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33: 955-962.
- [15] FERREIRA G, GARCÍA J A, BARRERAS F, *et al.* Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90: 270-278.
- [16] BABINSKY E, SOJKA PE. Modeling drop size distributions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28: 303-329.
- [17] LIU Haifeng, GONG Xin, LI Weifeng, *et al.* Prediction of droplet size distribution in sprays of prefilming air-blast atomizers[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61: 1741-1747.
- [18] URBÁN A, ZAREMBA M, MALÝ M, *et al.* Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 95: 1-11.
- [19] ZHOU Weixing, YU Zuhong. Multifractality of drop breakup in the air-blast nozzle atomization process[J]. Physical Review E, 2000, 63: 16302.
- [20] 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].试验流体力学,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.
- [21] 白鹏博, 邢玉明, 王 泽, 等. 内混式喷嘴雾化特性的试验与仿真研究[J]. *流体机械*, 2015, 43(2): 1–6.
- BAI Pengbo, XING Yuming, WANG Ze, *et al.* Experimental and simulation study on atomization characteristics of Internal mixing nozzles[J]. *Fluid Machinery*, 2015, 43(2): 1–6.
- [22] MA Rui, DONG Bo, YU Zhongqiang, *et al.* An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 149–156.
- [23] 刘丽艳, 杨 静, 孔庆森, 等. 空气雾化喷嘴的液滴雾化性能试验研究[J]. *化学工业与工程*, 2013, 30(3): 60–65.
- LIU Liyan, YANG Jing, KONG Qingsen, *et al.* Experimental study on atomization performance of droplets in air atomizing nozzle[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2013, 30(3): 60–65.
- [24] 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试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(1): 184–192.
- JIANG Zhong'an, WANG Yapeng, XU FENG. Experimental study on atomization characteristics and dustreduction capacity of gas-water nozzles in metal mines[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2020, 51(1): 184–192.
- [25] 蒋仲安, 王 明, 陈举师, 等. 气水喷嘴雾化特征与降尘效果分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 151–157.
- JIANG Zhong'an, WANG Ming, CHEN Junshi, *et al.* Analysis of atomization characteristics and dust reduction effect of gas water nozzle[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 151–157.
- [26] 宋文超, 阚景文, 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): 60–62, 66.
- SONG Wenchao, KAN Jingwen, WANG Ming, *et al.* Application research of gas water spray dust reduction system on shearer[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2015, 41(8): 60–62, 66.
- [27] 汲银凤, 陈举师, 张 波, 等. 气水喷嘴雾化特性试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(12): 27–32.
- JI Yin-feng, CHEN Jushi, ZHANG Bo, *et al.* Experimental study on atomization characteristics of gas-water nozzle[J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2017, 13(12): 27–32.
- [28] MOHAN B R, JAIN R K, MEIKAP B C, *et al.* 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.
- [29] PROSTANSKI D. Using of air-water spraying systems for improving dust control in mines[J]. *Journal of Sustainable Mining*, 2013, 12(2): 29–34.
- [30] 句海洋, 凌标灿, 彭 驰, 等. 综掘工作面机载水气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.
- [31] 岳 勃. 同忻矿综放工作面转载点粉尘分布特征及治理措施[J]. *现代矿业*, 2017, 33(7): 259–261.
- YUE Bo. Distribution characteristics and control measures of dust distribution at transfer point of fully mechanized caving face in Tongyu Mine[J]. *Modern Mining*, 2017, 33(7): 259–261.
- [32] 王鹏飞, 谭焯昊, 刘荣华, 等. 供水压力对气水喷雾雾化特性及降尘效果的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(6): 1348–1359.
- WANG Pengfei, TAN Xunhao, LIU Ronghua, *et al.* Effect of water supply pressure on atomization characteristics of gas-water spray and dust-reducing effect[J]. *Journal of Applied Basic and Engineering Science*, 2018, 26(6): 1348–1359.
- [33] 孙海涛, 朱墨然, 曹 偲, 等. 突出煤层相似材料配比模型构建的正交试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(8): 116–122.
- SUN Haitao, ZHU Moran, CAO Jie, *et al.* Orthogonal experimental study on proportioning model construction of similar materials of outburst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 116–122.
- [34] WANG Pengfei, TIAN Chang, LIU Ronghua, *et al.* Mathematical model for multivariate nonlinear prediction of SMD of X-type swirl pressure nozzles[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 228–237.