

煤矿掘进机外喷雾装置设计及应用

李金华¹, 王鹏飞^{2*}, 孙世彪¹, 王新喆²

(1. 潞安集团司马煤业有限公司, 山西 长治 047105; 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: 针对当前综掘工作面掘进机外喷雾装置耗水量大、降尘效率低的问题, 设计一种新型外喷雾装置。该装置采用内混式空气辅助雾化喷嘴, 具有耗水量低、雾化效果好、降尘效率高等优点。运用数值模拟方法, 对不同喷嘴布置方案 and 不同供水压力下掘进机外喷雾装置的喷雾场进行对比分析, 得到外喷雾装置在不同工况下雾化特性的变化规律, 最后应用于现场并测试实际降尘效果。现场测试结果表明: 该装置能有效降低掘进机作业工作面内的粉尘浓度, 其中全尘和呼吸性粉尘的降尘效率分别为 90.9% 和 77.1%。

关键词: 综掘工作面; 外喷雾; 内混式空气辅助雾化喷嘴; 数值模拟

中图分类号: TD714

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)02-0072-07

Design and Application of Outer Spray Device for Coal Mine Boring Machine

LI Jinhua¹, WANG Pengfei², SUN Shibiao¹, WANG Xinzhe²

(1. Sima Coal Industry Co., Ltd., Lu'an Group, Changzhi 047105, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at the problems of high water consumption and low dust removal efficiency of the current external spray device of roadheader in comprehensive excavation face, a new type of external spray device is designed. The device adopts internal mixing air-assisted atomizing nozzle, which has the characteristics of low water consumption, good atomization effect and high dust removal efficiency. The optimal arrangement of nozzle and operating condition of the device are obtained by numerical simulation. It is applied to the scene, testing the dust removal efficiency. Results show that the device can effectively reduce the dust concentration in the working face of the road header, and the dust removal efficiency of the total dust and respirable dust are 90.9% and 77.1%, respectively.

Keywords: comprehensive excavation face; the spray; internal mixing air-assisted atomizing nozzle; the numerical simulation

近年来, 大型机械化掘进机在巷道开挖中的应用越来越广泛。掘进机在巷道开挖过程中会产生大量扬尘, 对工作环境造成较大污染, 严重影响现场工作人员的身体健康。除采矿作业扬尘污染外, 巷道开挖扬尘污染逐渐占据较大比重^[1]。高浓度粉尘严重危害作业场所内员工的身体健康, 根据国家卫生健康委员会近 10 a 尘肺病发病率的统计, 虽然 2016 年以来新发职业病病例数呈现持续下降的趋势, 但尘肺病患者的比例仍然很大, 采矿业的治理任务依然艰巨^[2], 有必要进一步研究和优化现有的扬尘控制措施。

控制掘进机扬尘的主要方式是通风和喷雾降尘, 但现有喷雾装置的降尘效果并不稳定, 由于喷嘴自身

性能的影响,装置喷雾雾化效果较差,无法对掘进机的粉尘源产生良好的阻隔^[3-5]。空气辅助雾化喷嘴是一种新型喷嘴,已有学者对其进行研究。白鹏博等^[6]利用马尔文粒径分析仪对内混式喷嘴在不同供气供水压力下的雾化特性进行试验研究,发现内混式喷嘴在较高供气供水压力和气液比工况下能得到更小的雾滴粒径;李祥松^[7]通过试验对比压力喷嘴和空气雾化喷嘴的降尘效率,结果表明空气雾化喷嘴在除尘能力方面有较大优势;张哲等^[8]用空气雾化喷嘴形成封闭隧道断面的喷雾幕,全尘最大降尘效率达到86.4%,呼尘最大降尘效率达到88.6%,降尘效果显著。

近年来,随着计算机技术不断迭代,使用计算机模拟喷嘴系统成为一种主要研究手段。左桂兰等^[9]利用数值模拟方法对内喷雾装置的喷嘴安装位置对降尘效率的影响进行研究,得到最佳喷嘴安装位置,现场应用后获得较好控尘效果;李忠等^[10]通过对掘进机喷雾系统缺陷的分析,改进设计一种高效外喷雾系统;聂文等^[11]研究掘进工作面不同喷嘴压力下气-液两相相互作用对降尘效果的影响,得到井下掘进工作面最适喷雾降尘供水压力。针对现有掘进机外喷雾设备不能满足除尘要求的现状,提出将现有外喷雾装置所使用的压力喷嘴替换为内混式空气辅助雾化喷嘴,提高雾化效果的方案^[12-14]。在此基础上,对喷雾装置安装方式和喷雾参数进行模拟分析,设计开发高效喷雾降尘设备,从而有效提高控尘效果,改善工作环境。

1 喷嘴选型及外喷雾装置设计

1.1 喷嘴选型

本次开发的掘进机外喷雾装置所选用的喷嘴为内混式空气辅助雾化喷嘴,如图1所示。空气辅助雾化喷嘴是一种气-液两相流雾化装置,其原理主要是高速气体冲击喷嘴内部的液膜,液膜破碎分散成微小液滴,从而降低喷雾的雾滴粒径。本次开发的喷嘴主要由喷嘴底座、液体帽和空气帽等组成,喷嘴底座设有进气口和进水口,其内径均为12.0 mm,液体帽注气孔直径为2.0 mm。



图1 内混式空气辅助雾化喷嘴

综合考虑喷嘴雾化特性和降尘效率,结合作业场所实际情况,参考相关文献,喷嘴液体帽的注水孔直径为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;对于空气帽,其出口直径选择2.0 mm^[16-17]。

1.2 外喷雾装置设计

本次设计开发的外喷雾装置主要由环形喷头架、联动阀、控制柜及管道4部分组成,如图2所示。环形喷头架一端下方设有进气口、进水口,环形喷头架正面阵列设置有13个内混式空气辅助雾化喷嘴。内混式空气辅助雾化喷嘴通过在喷嘴内部设计空气流道,低速液体在高速空气强烈扰动作用下形成细小雾滴,细小雾滴捕捉井下粉尘使其聚集沉降。控制柜内部的进气管与进水管上分别设有气压调节阀水压调节阀,用于调节管内的气压和水压。

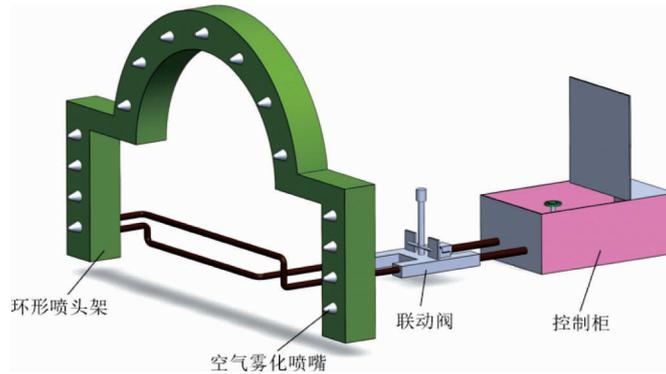


图2 掘进机外喷雾装置

2 计算模型建立及雾化效果研究

2.1 几何模型

为得到科学、准确的作业场所风流流场结构和粉尘颗粒运移分布规律,依据山西某煤矿综掘工作面现场测量所得真实尺寸,利用 Solidworks 等建模软件建立如图3所示的几何模型.综掘工作面采取单一的压入式通风,风筒直径为0.8 m,其出风口到掘进头端的距离为3 m.巷道整体截面尺寸为5.2 m×3.3 m,断面面积为17.16 m².选取较有代表性的前20 m巷道进行研究,其内部设有EBZ160型掘进机、第一运输机、转载点和第二运输皮带,且模型的重力方向为Y方向.

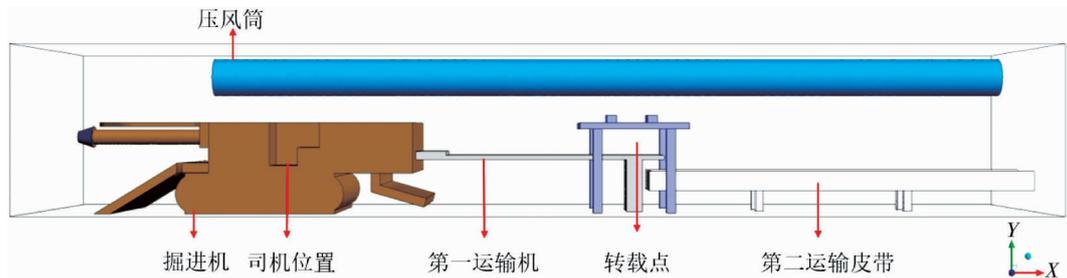


图3 综掘工作面模型

利用 ANSYS 自带的 Meshing 网格划分软件对所建立的几何模型进行网格划分,如图4所示.由于所建立模型的内部几何结构较为复杂,故采用自处理效果好、生成速度快、操作简便的四面体网格对模型进行划分^[18].将 Element size 设置为100 mm, Growth rate 设置为1.2, Target skewness 设置为0.6,共生成877 264个基本网格.以歪斜度作为衡量所划分网格质量好坏的标准,歪斜度为0~1,且越趋近于1代表网格质量越高.此次划分网格的网格质量集中在0.3左右,最大歪斜度为0.59.

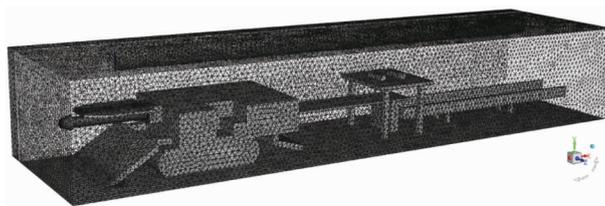


图4 综掘工作面网格

2.2 数学模型

综掘工作面粉尘及流场的运动属于气-固两相流求解问题,对此 FLUENT 提供 Eulerian-Eulerian 方法和 Eulerian-Lagrange 方法进行分析.Eulerian-Eulerian 方法适用于离散体积分数大于10%的情况,Eulerian-Lagrange 方法适用于固体体积分数小于10%的气-固运移问题.由于作业场所粉尘体积分数远小于10%,

故选择基于 Eulerian-Lagrange 方法的 $k-\varepsilon$ 模型研究作业场所的流场结构,并根据气体-粉尘两相运移的特性以及气-固两相流理论,应用离散相模型(Dispersed Phase Model, DPM)对作业场所的粉尘运移及分布规律进行研究。

FLUENT 提供的 $k-\varepsilon$ 模型包 3 种形式,即 Standard $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。不同的湍流模型所适用的模拟计算情况都不尽相同,具体应用时要综合考虑所求解问题对精度的要求、工作站的算力及所需时间等限制因素。Realizable $k-\varepsilon$ 模型是在 Standard $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型的基础上发展而来的,“Realizable”表示模型满足某种数学约束,和湍流的物理模型是一致的。这个模型对于广泛的流动有效,包括旋转均匀剪切流,喷射混合流,管道边界流,以及分离流。因此该模型要优于 Standard $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型。综上所述,本研究分析作业工作面流场结构时选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型进行求解。

2.3 喷嘴布置方式对外喷雾装置雾化效果的影响

综掘工作面巷道内气流对扬尘和喷雾影响很大,喷雾角度不宜过大^[19]。喷雾角度过大会使喷雾液滴过于分散,但雾化角度小时也须足以形成喷雾屏障^[20]。因此,我们需要增加喷头的数量来实现喷头的防尘和过滤。根据综掘机头的粉尘产生规律,设计 4 种喷嘴布置方案,如图 5 所示。根据方案设置喷嘴的位置和数量,并进行仿真分析。

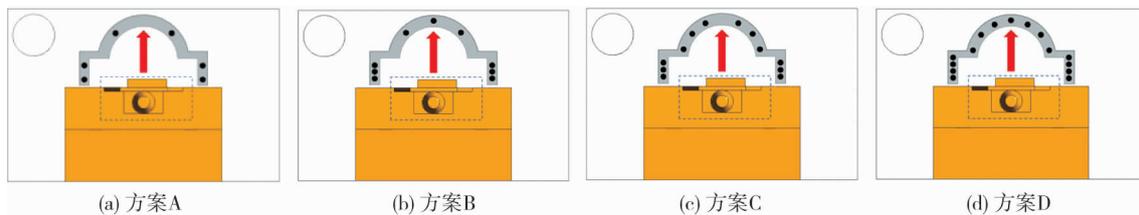


图 5 喷嘴安装方案

为了分析不同喷嘴安装方式对外喷雾装置雾化效果的影响,按照图 5 所示的喷嘴布置方案进行数值计算,提取掘进端头处喷雾所形成的雾滴浓度云图,得到结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出:各个方案的喷嘴均形成一定浓度的雾幕,且随着喷嘴数量的增加,掘进端头处的雾滴浓度也逐渐增大,喷嘴所形成的雾幕也更加完整。方案 A 虽然也形成雾幕,但其雾幕范围在 4 个方案中最小,且所形成的雾幕中含有一定的孔洞,实际使用时会导致粉尘从空洞处逃逸,无法有效阻止粉尘向后扩散;方案 B 中,喷嘴所形成的雾幕基本融为一体,但左右两侧仍有空隙;方案 C 中,由于在两侧各增加一个喷嘴,在掘进端头处形成一个较为完整的雾幕;方案 D 在方案 C 的基础上,于掘进机上方增加一个喷嘴,在掘进机头周围形成完整的水雾屏障,完全屏蔽掘进机产生的粉尘扩散,达到良好的喷雾抑尘效果。

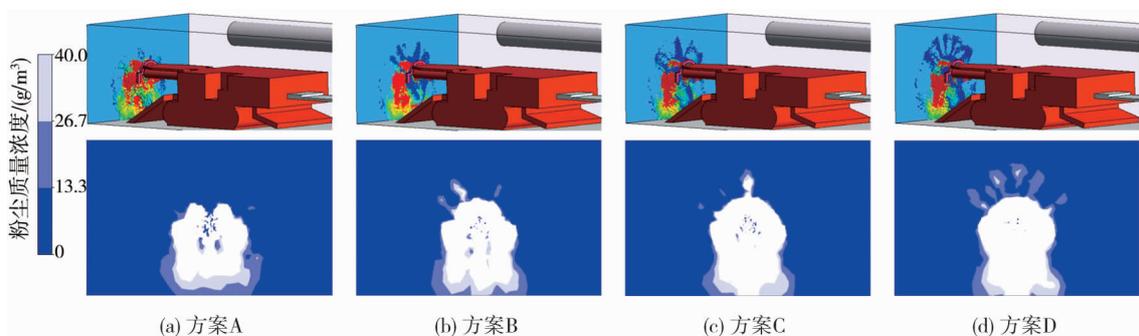


图 6 不同喷嘴安装方案下掘进端头雾滴质量浓度分布

2.4 供水压力对外喷雾装置雾化效果的影响

为了研究不同供水压力下外喷雾装置的雾化效果,为综掘工作面降尘工作的实际应用提供指导,据喷嘴布置方案 D,模拟供气压力为 0.5 MPa 情况下不同供水压力(0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa)的外喷雾装

置的雾滴粒径,结果如图7所示.从图7中不难发现:在0.8 MPa的供水压力下,雾滴粒径大部分颜色较深,喷嘴所喷射雾滴粒径超过 $136.2\ \mu\text{m}$;当供气压力一定时,随着供水压力逐步降低,原本集中在 $136.2\ \mu\text{m}$ 左右的雾滴粒径逐渐集中分布到 $26.3\ \mu\text{m}$ 处.这是因为内混式空气辅助雾化喷嘴主要依靠气体和液体之间的速度差所引起的相对运动来使液滴破碎,当供气压力固定时,单位时间内流经喷嘴内部的气流量也不变;但是当供水压力不断增加,喷嘴内单位时间通过的水流量也随之增加,原有气流供给的液滴破碎的能量变小,导致液体破碎程度降低,无法形成直径较小的细雾,从而增大了该工况下的雾滴粒径分布.

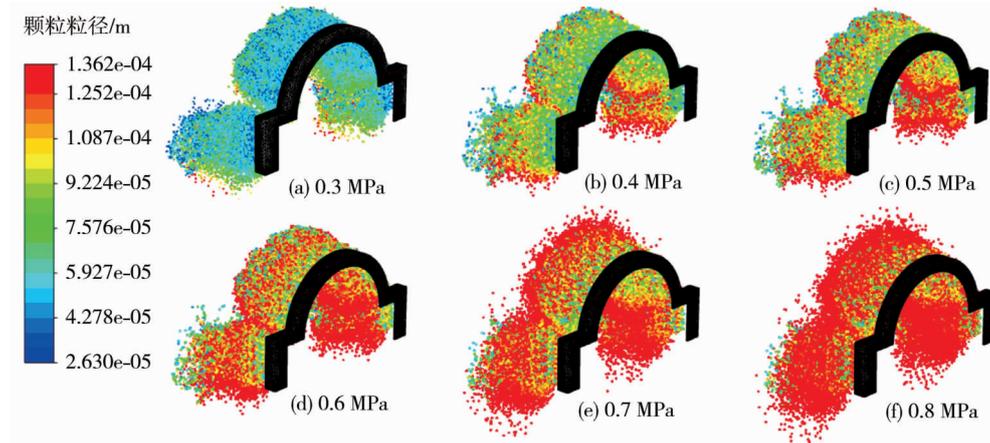


图7 不同供水压力下喷雾场中雾化效果

在喷雾模拟中,液滴尺寸大小按 Rosin-Rammler 方程分布.图8显示了不同供水压力下喷嘴的液滴尺寸均匀分布指数的变化和喷雾压力的最大拟合误差.从图8中可以发现:随着供水压力增加,液滴尺寸分布的拟合误差逐渐减小,表明数值模拟的拟合程度增强.该装置的雾滴粒径分布均匀指数在供水压力从0.3 MPa逐步提升至0.5 MPa时显著增大并渐趋稳定,于0.7 MPa时达到峰值;然而,当供水压力超过0.7 MPa后,其均匀分布指数则略有回落.根据上述观察,当喷雾压力自0.3 MPa逐渐增大时,液滴尺寸表现出均匀分布,并且在喷雾压力为0.7 MPa时分布最均匀.

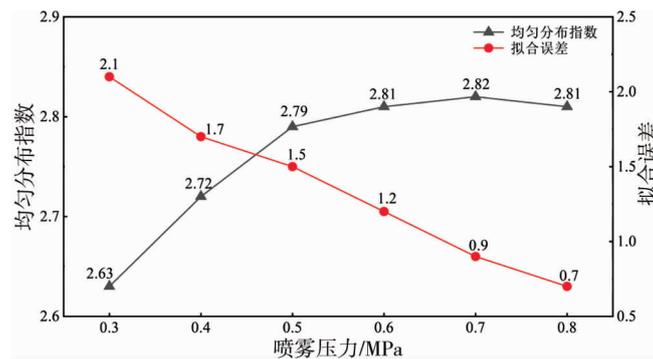


图8 不同供水压力下装置液滴粒径分布均匀性指数变化规律

3 现场应用

根据现场实测的掘进机尺寸设计喷淋模块,加工制造外喷雾装置,处理后的装置实物如图9所示.根据喷嘴布置方案的模拟结果,各个喷嘴均采用方案D安装.通过对综掘工作面掘进时流场结构和粉尘运移规律的研究,将外喷雾装置安装在掘进机截割臂后的车体上,安装支架在机身周围并使用螺丝固定.装置安装完成后可以形成一道包裹截割头的雾幕,有效封堵掘进作业时所产生的粉尘,并使粉尘快速沉降到地面,从而降低巷道内的粉尘质量浓度.



图9 外喷雾装置的加工与测试

为了验证外喷雾装置的除尘效果,选择山西某煤矿工作面为试验点,测量装置开启前后综掘工作面粉尘变化规律,根据结果绘制巷道内粉尘质量浓度分布情况(图10).从图10可以看出:当外喷雾装置未开启时,大粒径粉尘由于自重较大,无法在巷道内长时间悬浮在空气中,从而在距掘进端头3 m内迅速沉降;随着粉尘继续向后运动,由于5 m处左右存在一定回流,此时粉尘质量浓度下降速度减缓,但粉尘质量浓度整体走向仍然降低;巷道内粉尘质量浓度远高于《煤矿安全规程》规定的标准(总粉尘 10 mg/m^3 ,呼出粉尘 3.5 mg/m^3),总粉尘质量浓度最高值为 420.7 mg/m^3 ,呼吸性粉尘质量浓度为 105.5 mg/m^3 .外喷雾装置开启后,掘进端头掘进时所产生的粉尘在喷雾作用下被大量沉降,掘进端头3 m范围内的测点最大总粉尘质量浓度为 86.1 mg/m^3 ,最大呼吸性粉尘质量浓度为 44.3 mg/m^3 ,大量粉尘得到有效控制,其中总粉尘的平均除尘效率约为90.9%,可呼吸性粉尘的平均降尘效率约为77.1%,综掘工作面巷道内的粉尘质量浓度显著降低,取得良好的降尘效果.

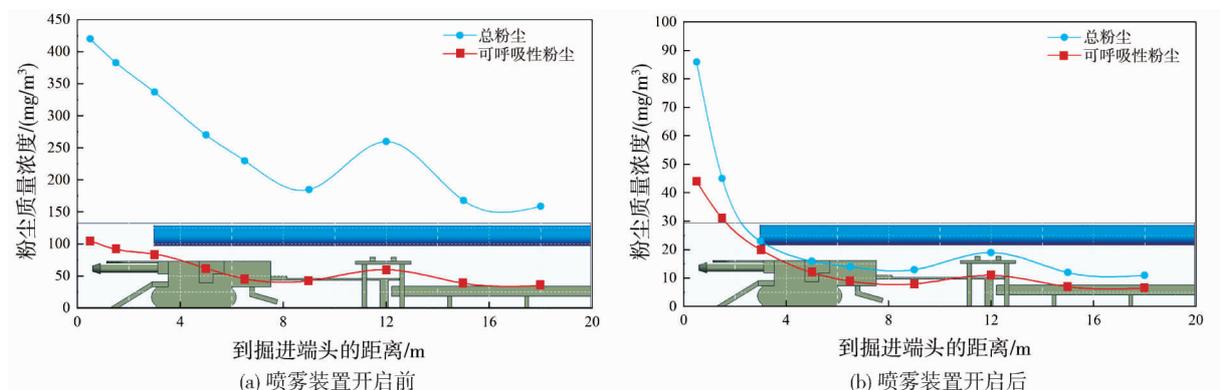


图10 掘工作面粉尘质量浓度分布

4 结论

1) 布置15个内混式空气辅助雾化喷嘴的方案D在掘进机头周围形成完整的水雾屏障,完全屏蔽掘进机产生的粉尘扩散,达到良好的喷雾抑尘效果.

2) 当供气压力不变时,随着供水压力的增加,外喷雾装置雾化场中液滴尺寸显著增大且表现出更均匀地分布,并且在喷雾压力为0.7 MPa时分布最均匀.

3) 外喷雾装置能有效降低综掘工作面的粉尘质量浓度,其中全尘和呼尘的降尘效率分别为90.9%和77.1%.

参考文献:

[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.

- [2] 张宏.探索煤炭行业“双碳”战略发展新路径[J].中国煤炭工业,2022(2):32-35.
- [3] 李明忠,赵国瑞.基于有限元仿真分析的高压雾化喷嘴设计及参数优化[J].煤炭学报,2015,40(增刊1):279-284.
- [4] WANG L, QI G L, LI Z J, et al. Numerical simulation of flow behavior of top-gas jet in a gas-particles bubbling fluidized bed [J]. Powder Technology, 2018, 338: 664-676.
- [5] WU F, ZHANG X, ZHOU W J, et al. Numerical simulation and optimization of hydrodynamics in a novel integral multi-jet spout-fluidized bed[J]. Powder Technology, 2018, 336: 112-121.
- [6] 白鹏博,邢玉明,王泽.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.
- [7] 李祥松.掘进机喷嘴除尘机理分析与试验研究[J].煤炭工程,2015,47(7):130-132.
- [8] 张哲,蒋仲安,闫鹏.公路隧道喷雾降尘数值模拟与应用[J].现代矿业,2016,32(1):208-211.
- [9] 左桂兰,程越,章伊华.采煤机内外喷雾系统的优化研究[J].煤炭技术,2014,33(11):226-228.
- [10] 李忠,卢进南,谢苗.EBZ-160A型掘进机高压喷雾系统的设计[J].煤矿机械,2009,30(11):143-145.
- [11] WEN N, SUN N, LIU Q, et al. Comparative study of dust pollution and air quality of tunnelling anchor integrated machine working face with different ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122(4):1-15.
- [12] 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.
- [13] 李泳俊.综掘工作面附壁旋流通风污染物控制数值模拟研究[D].湘潭:湖南科技大学,2019.
- [14] 白鹏博,邢玉明,王泽.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.
- [15] 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.
- [16] 刘荣华,郭高高,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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王鹏飞,刘荣华,王海桥,等.煤矿井下气水喷雾雾化特性实验研究[J].煤炭学报,2017,42(5):1213-1220.
- [20] 葛跃武.煤矿综采工作面防尘技术研究现状及趋势[J].矿业装备,2021(3):132-133.
- [21] 刘荣华,朱必勇,王鹏飞,等.综掘工作面双径向旋流屏蔽通风控尘机理[J].煤炭学报,2021,46(12):3902-3911.