中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

第 44 卷第 10 期 煤 炭 学 报 Vol. 44 No. 10
2019 年 10 月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY Oct. 2019

陈景序,荆德吉,葛少成,等. 掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置的研制与实验[J]. 煤炭学报,2019,44(10):3233-3240. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1370

CHEN Jingxu,JING Deji,GE Shaocheng,et al. Research and experiment on dust control device with external pneumatic vortex mist curtain for road-header[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(10):3233-3240. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1370

移动阅读

掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置的研制与实验

陈景序[1,2],荆德吉[1,2],葛少成[1,2,3],马 恒[1,2],孙丽英[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; 3. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院,山西 太原 030000)

摘 要:为有效控制由掘进机截割头旋转破碎引发的粉尘污染,基于高压喷雾在涡旋气体射流场中的运动规律及二次雾化破碎特性,研制了一种可以阻隔工作区域高质量浓度粉尘迁移扩散的新型掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置。绘制了包含掘进系统的气动涡旋雾幕控尘装置的比例模型,并通过利用 CFD 数值模拟软件获得该型设备外部风流场迁移规律和液滴粒子运动规律,以模拟结果为理论基础建立实验平台,并对设备的雾化性能及控尘性能进行了实验测定。模拟结果表明:在环状风筒前端形成了完整旋转风幕,外环高压喷雾受内环高速旋转风流冲击,加剧了液滴的破碎、迁移扩散与捕尘性能。雾化性能实验结果表明:该型设备雾化性能主要由气体射流与高压喷雾的相间速度差决定,喷雾夹角为 45°~75°,相间速度差较大,气相射流风速对雾化性能影响占主导地位;喷雾夹角大于 75°时,相间干涉减小,喷雾压力占主导地位;随着沿流向方向的距离增大,风速快速衰减,液滴运动趋于稳定。控尘性能实验研究结果表明:当喷雾压力、喷雾夹角不变的情况下,单独提高引射射流风速时,涡旋雾幕前方粉尘捕集较差,全尘和呼尘平均捕集率分别为 21.21% 和 26.24%;而雾幕后方,不同风速下的全尘捕集率分别为 84.98%,87.88% 和 90.70%,呼吸性粉尘捕集率为 83.89%,87.87% 和 88.71%,照比传统高压喷雾表现出更好的控尘性能。

关键词:掘进机;雾化;冲击射流;涡旋气动雾幕装置;除尘性能

中图分类号:TD421.5 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2019)10-3233-08

Research and experiment on dust control device with external pneumatic vortex mist curtain for road-header

CHEN Jingxu[1,2],JING Deji[1,2],GE Shaocheng[1,2,3],MA Heng[1,2],SUN Liying[1,2]

(1. *College of Safety Science and Technology,Liaoning Technical University,Fuxin* 123000,*China*; 2. *Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education,Fuxin* 123000,*China*; 3. *College of Safety and Emergency Management Engineering,Taiyuan University of Technology,Taiyuan* 030000,*China*)

Abstract:To effectively control the dust pollution caused by the road-header cutting head rotary breaking,based on the motion law of the high-pressure spray in the vortex gas jet and the secondary atomization fragmentation characteristics,a new type of dust control device with external vortex air mist screen for road-header has been developed,which can prevent high concentration dust dispersion in underground mining area. A scale model of a pneumatic vortex mist curtain dust control device including a tunneling system was drawn. Through the numerical simulations,the wind flow field

收稿日期:2018-10-13 **修回日期**:2018-12-25 **责任编辑**:郭晓炜
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274116);国家自然科学基金青年基金资助项目(51704146)
作者简介:陈景序(1989—),男,辽宁鞍山人,博士研究生。E-mail:chanjingxu@sina.com
通讯作者:荆德吉(1984—),男,辽宁抚顺人,副教授,博士。E-mail:jingdeji@sina.com

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

migration law and droplet particle motion law of the device were obtained by using CFD software. An experimental platform was established based on the simulation results, and the atomization performance and dust control performance were obtained by experiment. The simulation results show that a complete rotating air curtain was formed at the front of the ring-mounted air duct. The outer high-pressure spray was impacted by the high-speed vortex rotating airflow, which aggravated the droplet breakage, diffusion and dust-collecting performance of the spray field. The atomization performance experiment results show that the main performance of the mist curtain is determined by the velocity difference between the gas jet and the high pressure spray. When the spray angle is between 45°-75°, the velocity difference between phases is great, and influence of gas jet velocity on atomization performance is dominant. When the spray angle is greater than 75°, the interphase interference decreases and the spray pressure dominates. With the increase of the distance along the direction of flow, the fast attenuation of wind speed leads to the stabilization of droplet motion. The dust-collecting performance experimental results shows that when the spray pressure and the spray angle are constant, when raising the jet velocity alone, the dust collection in front of the vortex mist curtain is poor, and the average dust-collecting rates of dust and respiratory dust are 21.21% and 26.24% respectively. At rear of the mist screen, the dust collection rates at different wind speeds are 84.98%, 87.88%, and 90.70% respectively. The respiratory dust collection rates are 83.89%, 87.87%, and 88.71% respectively, which shows a better dust control performance than that of traditional high pressure spray.

Key words: road-header; atomization; impinging jet; pneumatic vortex mist curtain; dust removal performance

在中国,煤炭能源的使用总量占据中国能源消费的65%,伴随着地下矿井的生产需要,高效综合机械挖掘技术的进步有效保证了煤矿开采的生产效率[1-2]。然而,地下矿井高效掘进作业带来的负面影响就是掘齿截割破碎过程中产生大量煤尘占据了整个工作面80%以上[3]。悬浮在空气中的呼吸性粉尘极易通过呼吸系统渗透进入人体肺部,长期暴露于工作面上的工人面临着严重肺部疾病肺尘病(CWP)的威胁,统计数据显示大部分CWP患者来源于矿井中掘进或者采煤工作面[4-5]。

掘进工作面粉尘常规治理方法是采用水喷雾捕捉空气中悬浮粉尘。鉴于煤料的疏水特性,研究者指出普通喷雾所产生的雾滴粒径较大,对悬浮的呼吸性煤尘捕集效果并不明显,破碎更细化的雾滴对呼吸性粉尘的捕集效果更好,并对液滴雾化破碎尺度进行了深入分析[6-8]。气体射流的冲击加剧了液滴不稳定性,进而促进液滴形态改变发生二次破碎,增强液滴破碎程度,改变了雾化场结构与雾滴运动速度分布[9-11]。近年来,中国学者在原有除尘系统基础上提出风幕控尘技术,利用通风系统强制控制风流场运动形成压风风幕,虽能有效的阻碍由掘进机旋转截割破煤工作过程中所产生的粉尘,但单独使用风幕控尘装置无法捕集随内部风流场迁移的粉尘[12-16]。为更加有效解决掘进工作面粉尘污染问题,结合以上喷雾降尘及风幕控尘技术特点,笔者提出一种新型掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置。

该装置可用于控制掘进作业过程中产生的粉尘污染,可在掘进头位置形成控尘雾幕,有效阻碍粉尘扩散。笔者采用数值模拟方法分析气动涡旋雾幕形成机理,并通过实验测试了不同条件下的雾化规律及粉尘沉降性能,为掘进工作面降尘工艺提供指导意义。

1 气动涡旋雾幕形成机理

沿环状风筒内环均匀布置高压风流引向器出口处形成高速涡旋冲击射流,当外置于环状风筒的喷嘴向外喷雾时,喷雾受内环多重涡旋气流冲击而强制改变喷雾方向,形成了向壁面运动高速旋转螺旋网状控尘雾幕墙,进而达到了包裹尘源的效果。基于2种流体速度差引起运动流体边界层不稳定性,雾滴发生二次破碎,加强雾滴扩散性能与捕捉能力。幕墙中心区域由于正压风流斜向墙壁运动而产生的指向内环风筒中心负压区域,吸入的含尘气流在负压流场内,被迫与雾滴碰撞、凝结而快速沉降,来达到进一步净化目的。图1为气动涡旋雾幕控尘装置机理示意。

结合掘进工作面粉尘污染特性,对气动涡旋雾幕除尘效果影响因素进行如下分析:

(1)气动涡旋雾幕的形成主要由高压风流引向器风速、喷雾压力、喷嘴工作角度共同决定。单独增大喷雾压力并不能明显改善雾幕范围,反而影响煤质,增大环境湿度。面对不同截面积的掘进巷道,为减少由除尘雾幕性能不足而导致的粉尘逃逸,有必要对新型气动涡旋雾幕雾化性能各影响因素进行实验分析。

(2)涡旋雾幕除尘装置设计为圆环风筒和单面出风形式,该装置整体安装于掘进机臂,又因工作过

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

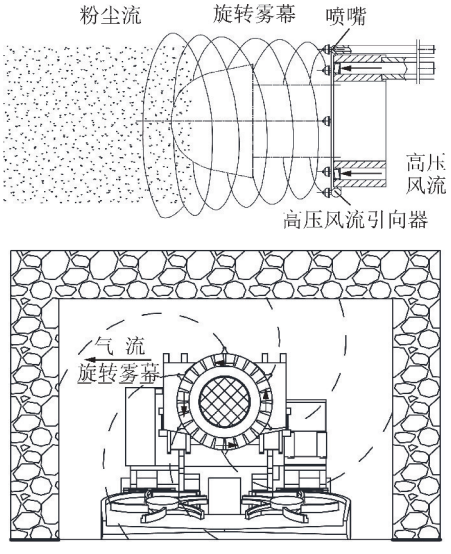


图 1　气动涡旋雾幕控尘装置机理示意

Fig. 1　Schematic diagram of external pneumatic vortex mist curtain mechanism

程中截割破煤产尘及地下煤质的影响,导致作业过程中所产生的粉尘粒径不同,进而对粉尘捕集效率产生影响。因此,基于相似原理构建气动涡旋雾幕装置样机系统,选择可完全封闭掘进巷截面的雾化参数,对气动涡旋雾幕装置样机系统除尘性能进行实验分析。

2　数值模拟

利用 CFD 模拟软件对涡旋高速气流冲击高压雾化水射流中流场迁移化进行模拟,直观展示了气动涡旋雾幕控尘装置高压风流引向器出口处风流场的运动规律。本研究为气动涡旋雾幕应用在掘进工作面进行粉尘控制现场提供了理论依据。

2.1　物理模型

采用 Solidworks 三维软件绘制掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置的物理模型,该物理模型由环状风筒、高压风流引射器、喷嘴、掘进机、掘进巷 5 部分组成。依据比例 10 ∶ 1 建立掘进巷断面尺寸为:长×宽×高=2.00 m×0.45 m×0.35 m 的长方体;掘进机总长度为 0.93 m;环状风筒为单面内倾 15°,外径 0.11 m,内径为 0.09 m 的圆环体,环状风筒中心轴线 z=0.175 m;高压风流引向器为均匀布置于环形风筒内倾壁面上的四面体,所设计出风口为规则的直角三角形指向桶壁切线方向;将喷嘴视为规则的圆柱体,分别布置 4 个口径为 0.2 mm 的喷嘴于桶壁外围。基于上述假设,所建立的三维模型以掘进机截割部涡旋气动雾幕控尘装置圆筒中心点为原点,x 轴负方向由原点指向掘进工作面,y 轴、z 轴正方向都由原点指向环状风筒侧壁,省略高压输水管、通风管。采用 CFD 数值模拟软件建立几何模型,依据物理场控制网格生成进行网格划分,获得约 63 万个自由四面体网格,物理模型如图 2 所示。



图 2　物理模型

Fig. 2　Physical model

2.2　数学模型

Kelvin-Helmholtz(K-H)模型广泛应用于高压雾化喷嘴的二次破碎研究。本研究基于不可压缩 k-ε 双方程湍流模型,粒子追踪破碎 K-H 模型,利用 CFD 数值模拟软件对掘进机外截割部气动涡旋雾幕两相流场进行模拟,k 为湍流脉动动能;ε 为湍流脉动动能的耗散率。高压水喷雾与横向气流 2 种流体之间的边界面上具有足够的速度差时,由于相间表面 K-H 不稳定波导致液滴受剪切作用下被剥离成更细碎的液滴,通过不同气体无量纲数 We 和 Ohnesorge 昂赛格数 Z,经过数值拟合得到 K-H 破碎模型[17-19],获得相应情况下最大频率(Ω_{KH})和增长波长(Λ_{KH}),Λ_{KH} 和 Ω_{KH} 计算式为

$$\Lambda_{KH}=\frac{9.02r_0(1+0.45\sqrt{Z})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865We_g^{1.67})^{0.6}} \tag{1}$$

$$\Omega_{KH}=\frac{0.34+0.385We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l r_0^2}} \tag{2}$$

其中,气体的韦伯数为 $We_g=\rho_g U_r^2 L/\sigma$;$U_r$ 为液相和气相之间的相对速度;L 为特征长度;σ 为液体的表面张力系数;ρ_g 和 ρ_l 分别为气相和液相的密度;Z 为昂赛格数,$Z=\sqrt{We_l}/Re_l$;We_l 为液体韦伯数;液体雷诺数为 $Re_l=\rho_l U_r^2 r/\mu_l$,$\mu_l$ 为液体黏度;$T=Z\sqrt{We_g}$ 为泰勒数。

破碎过程中,主液滴的时间变化率和尺度变化计算如下:

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=-\frac{r_0-r_{KH}}{\tau_{KH}},r_{KH}\leqslant r_0 \tag{3}$$

式中,r_{KH} 为新生成子液滴半径。

$\tau_{KH}=3.788B_1 r_0/\Lambda_{KH}\Omega_{KH}$ 是发生 K-H 破碎的时间尺度;B_1 为经验常数,取 1.73 ~ 40。基于液体射流稳定性理论,从主液滴表面拨落而形成小的子液滴,假设新生成的小液滴尺寸正比于最快的表面增长波长,那么半径可由下式表达:

$$\gamma_{KH}=\begin{cases}B_0\Lambda_{KH},(B_0\Lambda_{KH}\leqslant a)\\ \min\left\{\left(\dfrac{3\pi a^2U_r}{2\Omega_{KH}}\right)^{0.33},\left(\dfrac{3a^2\Lambda_{KH}}{4}\right)\right\},(B_0\Lambda_{KH}>a)\end{cases} \tag{4}$$

式中,B_0 为常数,取 0.61;U_r 为气液两相的速度差。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

2.3 数值模拟结果

为了获得气动涡旋雾幕的形成规律,对气动涡旋雾幕环状风筒外部风流场进行模拟,设定风筒外部计算区域,其中入口截面边界类型为速度入口,沿切面法向方向射入;出口边界类型为抑制回流的压力出口;材质为空气;选定不可压缩 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型;在计算模型中创建并加入粒子追踪模块,设置高压风流引向器的入口风速为 30 m/s;粒子在计算域中受风流场曳力和 z 轴重力场影响,增加液滴破碎模型,壁面条件粒子滑移。获得风流场计算结果如下图 3,4 所示,图 3 中的(a),(b),(c),(d)与图 4 一一对应;液滴分布如图 5 所示。

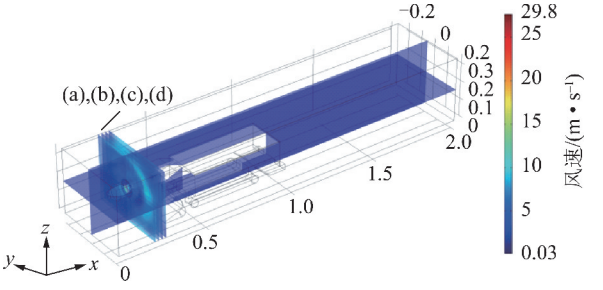


图 3 掘进工作面风流场模拟结果

Fig. 3 Simulated result of wind flow field in heading face

由图 3,4 可知:在长方体计算域中,x=0.26 m 为风筒出风口截面,高速风流沿计算域 x 轴负方向运动,可明显看出风流方向由环状风筒出口中心向四周壁面扩散,形成向外扩散的环状漩涡风流场(旋转气幕);出风口流出的高速气流卷吸周边空气进入引射流场,共同向前运动,然而受场中速度梯度、沿程阻力及空气自身的黏滞性影响,高速气流动量快速衰减,流速不断降低;在引射风流出口处,风速由最高 29.8 m/s 快速衰减至 3.85 m/s,所形成的旋转气幕有效工作距离较小;环状冲击射流流场内部由于负压作用形成指向环状风筒内环的涡流风流场。

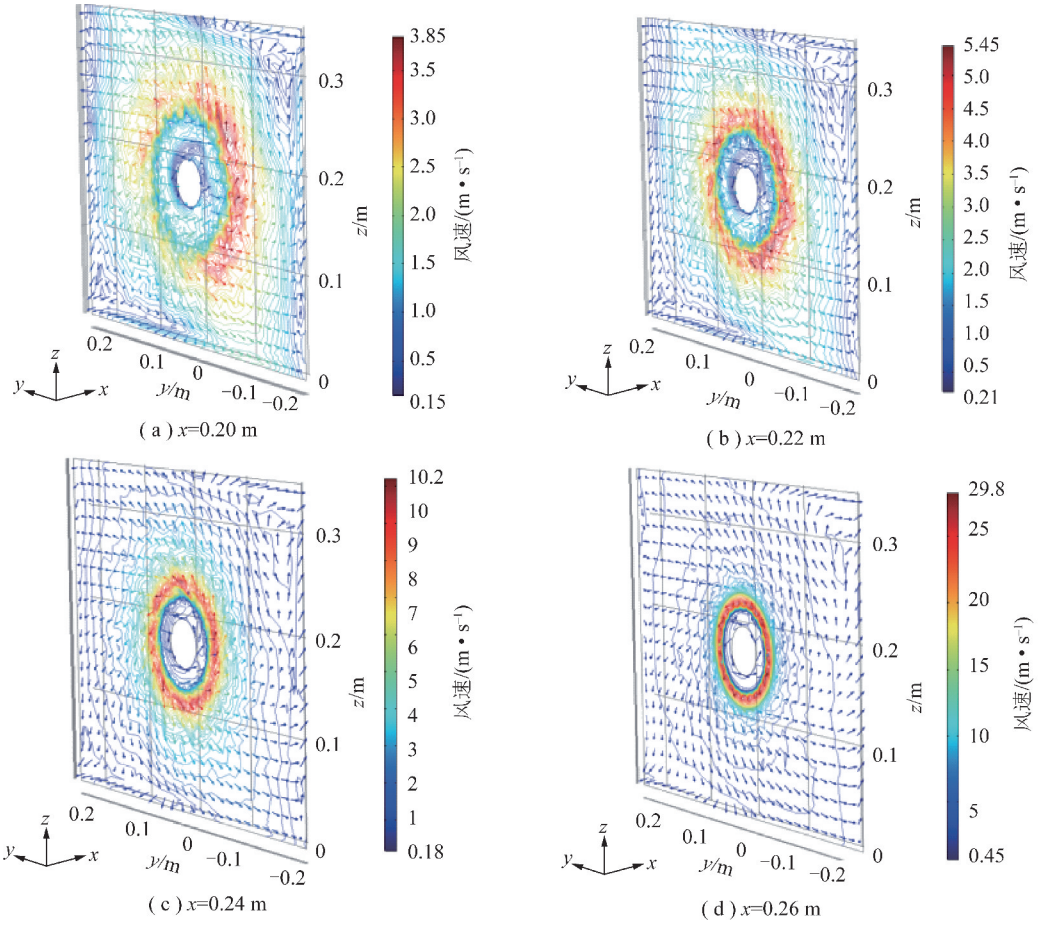


图 4 风流场迁移模拟结果(截面)

Fig. 4 Simulated result of wind flow field migration

由图 5 可知,喷嘴在环状风筒外指向 x 轴负方向喷雾,高速雾滴受内环旋转风幕墙冲击影响,运动方向发生改变,并加速向四周壁面旋转扩散运动,从而形成了流动方向指向 x 轴负方向工作面的雾幕—气动涡旋雾幕;其余部分破碎雾滴被内环负压涡流场卷入,形成了一个涡流雾滴场捕集粉尘。

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

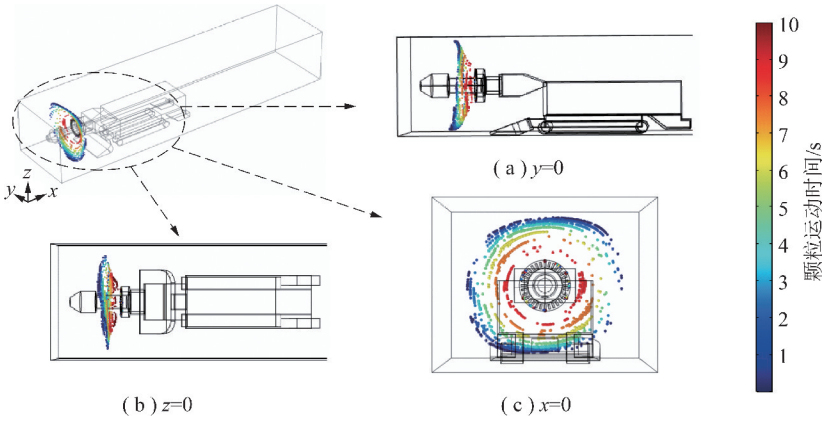


图 5　液滴分布

Fig. 5　Distribution of droplets

3　基于相似实验的雾化性能测定

3.1　实验装置的研制

根据掘进机截割作业粉尘运移特征及 2.3 节中涡旋雾幕形成机理,研制了气动涡旋雾幕控尘装置,实现了利用气动风幕与雾滴高度耦合的旋转雾幕墙,图 6 为装置结构安装示意图。新型控尘装置呈“圆环”形固定布置于截割臂尾端,包含进风管、环状水管、喷嘴、高压风流引射器、环状风筒。环形风道基本尺寸:外环径 1.1 m,内环径 0.9 m,宽 0.3 m;与风道相连的是高压风流引射器,高压风流引射器等间距均匀布置于内倾 15°内壁圆环的内壁上;环状水管布置于环外壁上,水管上沿圆周布置朝向截割头工作点方向的喷头,喷嘴与水管连接处选择可变倾角的旋转接头,可通过改变喷嘴喷雾夹角和高压风流引射器间风速大小改变喷射距离,控制所产生的气动雾幕扩散范围。

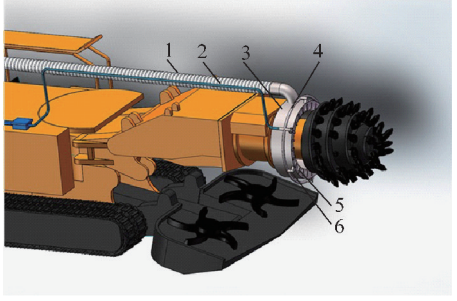


图 6　装置结构安装示意

Fig. 6　Schematic diagram of device structure installation

1—进风管;2—水管;3—环状风筒;4—环状水管;
5—高压风流引射器;6—喷嘴

由图 6 可知,所研制涡旋气动雾幕控尘装置布置于截割臂末端,截割头在缓慢工作状态下发生运动时,对雾幕的形成不会造成剧烈影响。因此,所形成雾幕墙可有效隔绝含尘气流运移,进而实现捕尘、降尘的作用。

3.2　实验布置及喷雾性能测定

本研究选择相似实验方法对所研制控尘装置的性能进行实验验证。当设备工作时内部流体流动处于完全紊流状态,惯性力占主导,黏性力可以忽略不计,只要满足动力相似,流体运动特性得到充分模拟时可以保持流动相似[20]。本实验雾幕发生装置参照 2.1 节中物理模型,建立与实物几何尺寸比为 $C=L:L'=10:1$ 的实验环状风筒直径为 0.11 m,并在外围布置 4 个高压雾化喷嘴,其中,L 为原型尺寸;L' 为模型尺寸。实验大气条件 $P_{amb}=0.1$ MPa,$T_{amb}=298$ K,其中,P_{amb} 为实验大气压力;T_{amb} 为热力学温度,图 7 为实验装置示意图。

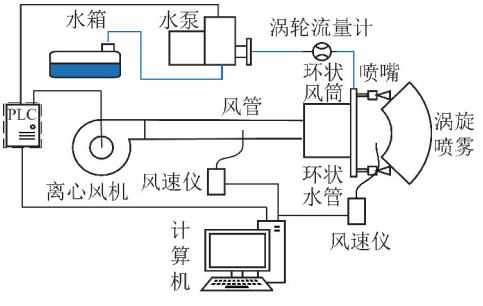
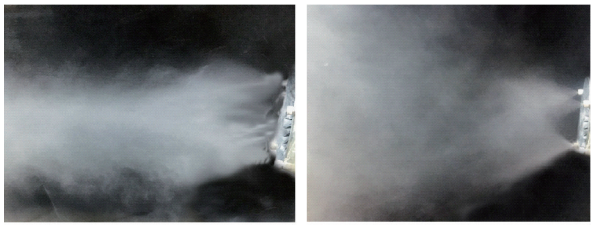


图 7　实验装置示意

Fig. 7　Schematic diagram of experimental device

按照掘进巷中设备布置情况,对气动涡旋雾幕的雾化性能进行了实验测定,测定了该装置在不同的风速条件、喷雾压力以及喷雾角度条件下的最远射程及相应的雾幕半径。实验采用风速仪(GM-8903)测定引射器出口风速大小分别为 20,25,30 m/s,选择 4,6,8 MPa 三个喷雾压力,并测量了喷嘴在 45°,60°,75°,90°,105°五种工况角度条件下的喷嘴雾幕半径,图 8 为该气动涡旋雾幕装置的雾幕效果图,获得本装置喷雾覆盖范围数据,如图 9 所示。

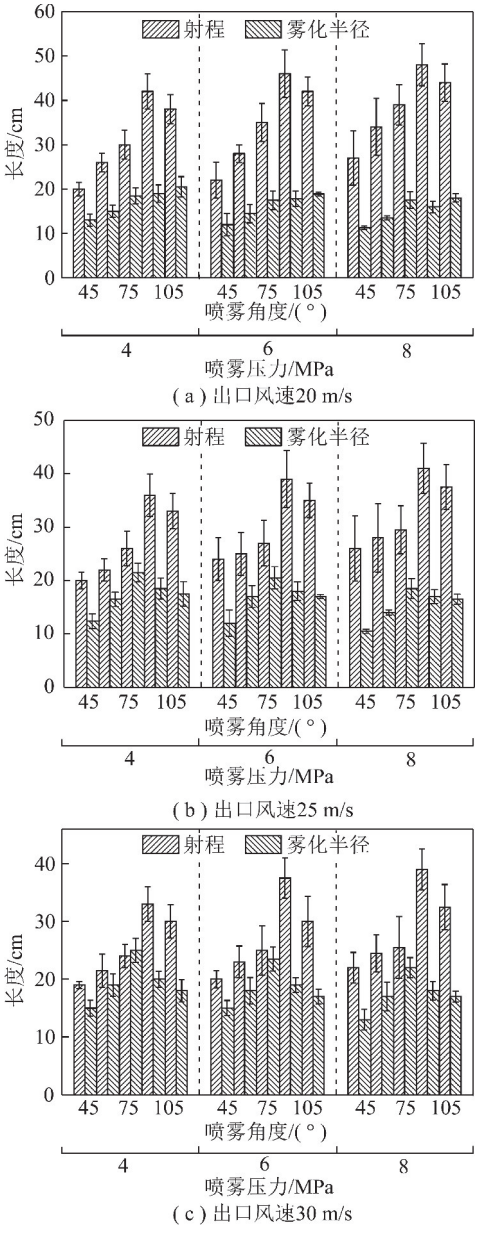
中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net



(a)无引射风流 (b)开启引射风流

图 8 设备喷雾效果

Fig. 8 Spray effect of the device



(a)出口风速20 m/s

(b)出口风速25 m/s

(c)出口风速30 m/s

图 9 设备雾化性能

Fig. 9 Equipment atomization performance

开启气动涡旋雾幕除尘设备后雾化效果如图 8 所示。由图 9 实验结果可知:

(1)雾化压力和工作夹角不变,只改变高压引射风流风速时,环状风筒前端形成了涡旋风幕场,气雾两相间运动干涉随风速的增大改变较为明显,致使雾滴运动方向发生改变,雾化性能表征随风速的改变呈现出线性关系:即当喷雾压力 4 MPa,工作夹角 75°时,随着引射风速由 20 m/s 增大到 30 m/s,气动涡旋雾幕射程随风速的增大而降低,由 30 cm 降至 24 cm;工作半径随风速的增大而增大,由 18.5 cm 增至 25.0 cm。

(2)当风速和工作夹角保持不变时,随喷雾压力由 4 MPa 增大到 8 MPa 过程中,雾幕射程呈增大趋势,增加幅值在 1 ~ 5 cm;雾幕半径随压力的增大呈降低趋势,降低幅值在 0 ~ 3 cm,说明压力的增大有利于雾化射程的增大,但不利于雾化半径的扩大。

(3)当引射风速和喷雾压力不变时,单独改变雾化喷嘴喷雾角度,当喷雾角度由 45°增至 75°时,雾幕射程、雾幕半径呈现出随角度的增大而增大;但当喷雾角度达到 90°时,雾场速度方向逐渐与引射风流场方向平行,减少干涉雾滴径向扩散影响,使得雾幕工作半径随角度的增加而随之降低,而雾幕射程受风流影响大幅增大;当喷雾角度超过 105°时,气雾两相流场相间干涉变小,雾幕射程,雾幕半径均降低,雾化压力的改变起决定因素。

(4)当引射风流风速为 30 m/s,雾化角度 90°,实验雾幕半径为 18 ~ 20 cm,与模拟结果 20 cm 误差较小,证明了模拟结果的正确性。

3.3 应用效果实验分析

为了研究 3.2 节中气动涡旋雾幕控尘装置的降尘性能,建立与 2.1 节中物理模型相同的实验区域,长×宽×高为 2.00 m×0.45 m×0.35 m 的半封闭实验箱。在半封闭实验箱壁面设置自制发尘器作为发尘源,实验用粉尘选用阜新电厂原煤经破碎后使用筛孔尺寸 0.045 mm 筛网去除较大粒径煤尘,按 30 g/min 进行发尘作业。在轴向断面布置 4 个测尘点:Ⅰ(0 m,0.15 m),Ⅱ(0.5 m,0.15 m),Ⅲ(1.0 m,0.15 m),Ⅳ(1.5 m,0.15 m),各测点间距 0.5 m。实验实物和实验测点如图 10,11 所示。

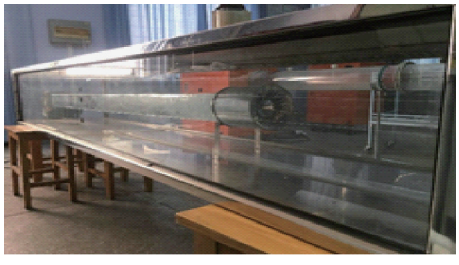


图 10 实验实物

Fig. 10 Experimental platform

本实验共设置 4 个高压喷嘴,保证实验喷雾过程中各喷嘴喷雾压力及水流量一致。在密闭实验空间

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

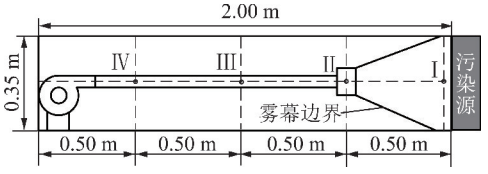


图 11　实验测点位置

Fig. 11　Experimental point location

内不同实验方案测定各测点粉尘质量浓度:① 选未开启除尘设备时,发尘后实验空间内粉尘质量浓度作为本实验初始质量浓度,由 LBT-CCZ-1000 直读式粉尘浓度测量仪依次测定实验空间内各测点的粉尘质量浓度(Dust Concentration,DC),呼吸性粉尘质量浓度(Respirable Dust Concentration,RDC);② 关闭掘进机外涡旋雾幕控尘装置,单独开启喷雾 4 MPa,高压引射风流风速为 0 时,改用粉尘采样器进行粉尘采集;③ 选择经济运行参数进行除尘效果实验,设置喷雾压力为 4 MPa,高压引射风流风速分别设置为 20,25,30 m/s,喷雾角度 75°,进行粉尘捕集性能测试。采用上述实验可获得不同控尘方案条件下各个测点粉尘质量浓度结果,见表 1。

表 1　各测点粉尘质量浓度

Table 1　Dust concentration of each measuring point　　mg/m³

方案		DC				RDC			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
初始质量浓度		719.2	603.5	482.3	326.8	63.6	47.8	34.4	20.2
单独水喷雾		335.7	192.6	132.6	95.8	32.9	15.6	11.6	6.6
气动涡旋喷雾	20 m/s	574.9	90.6	68.2	41.3	47.4	7.7	5.2	2.8
	25 m/s	559.2	73.1	53.5	33.4	46.6	5.8	3.8	2.1
	30 m/s	565.7	56.1	39.7	26.2	46.7	5.4	3.4	1.8

由表 1 实验粉尘质量浓度结果可知:

(1)初始质量浓度:未开启控尘设备时,在实验区域内Ⅰ~Ⅳ测点的粉尘质量浓度和呼吸性粉尘质量浓度随着距离的增大有不同程度的降低,说明较大粒径的粉尘颗粒随着运动距离的增大,受重力势能影响而逐渐自沉降,粉尘浓度变化呈递减状态。

(2)单独水喷雾控尘实验:在实验区域Ⅰ~Ⅱ测点,全尘和呼吸性粉尘的平均捕集率由 53.32% 和 48.15% 上升至 68.08% 和 67.42%。

(3)气动涡旋雾幕除尘:① 开启掘进机外气动涡旋雾幕除尘装置,引射风速由 20 m/s 升至 30 m/s,测点Ⅰ粉尘平均捕集率分别为 21.21% 和 26.24%。② 测点Ⅱ位置位于雾幕发生装置后方,高压风流引射器出口风速由 20 m/s 升至 30 m/s 时,全尘捕集率分别为 84.98%,87.88% 和 90.70%,呼吸性粉尘捕集率为 83.89%,87.87% 和 88.71%,这说明在掘进机外涡旋气动雾幕设备前端的混合涡流场中,吸入的含尘气流被迫与雾滴碰撞、凝结而快速沉降;对比单独喷雾捕尘效率,新型掘进机外涡旋气动雾幕更易于隔绝工作面运动的煤尘,对粉尘的治理效果更为优秀。③ 测点Ⅲ,Ⅳ处位于设备后方,表现出的控尘效果略高于自然降尘,但是由于粉尘虽然突破雾幕,但重量增加,更易发生自沉降。

4　结　　论

(1)采用 CFD 数值模拟方法获得了掘进机外气动涡旋雾幕除尘装置外部风流场及雾滴运动规律,为除尘装置的开发提供了理论依据。

(2)依据数值模拟结果设计除尘装置,对雾化进行性能测定,实验结果表明,雾幕的形成主要受射流风速、雾化角度和雾化压力变化而决定:① 当喷雾夹角小于 75°时,气液两相间干涉较大时,雾化性能的改变由喷雾角度、出口风速决定,喷雾压力对性能改变并不明显;② 喷雾角度超过 75°时,相间干涉变小,雾化性能主要由喷雾压力决定。③ 实验结果与模拟结果较为一致,证明了数值模拟的正确性。

(3)新型掘进机外气动涡旋雾幕控尘装置的应用效果实验分析结果表明:相对于单独喷雾捕尘,新型装置在测点Ⅱ处对全尘和呼吸性粉尘的平均捕集率分别提高了 19.77% 和 19.46%,这说明根据工作截面合理的选择雾化参数,形成完整的封闭工作区域,新型掘进机外涡旋气动雾幕更易于隔绝工作面运动的煤尘,阻碍前端工作面煤尘污染扩散,对粉尘的捕集效果更为优秀。

参考文献(References):

[1]　吴嘉林,辛德林,张建平. 井工开采技术的创新与发展[J]. 煤炭

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net

工程,2014,46(1):4-8.
WU Jialin, XIN Delin, ZHANG Jianping. Innovation and development of underground coalmining technology[J]. Coal Engineering, 2014,46(1):4-8.

[2] 王虹. 我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J]. 煤炭科学技术,2010,38(1):57-62.
WANG Hong. Present status and development of mine roadway heading technology and equipment in China coalmine[J]. Coal Science and Technology,2010,38(1):57-62.

[3] 薛纬. 滚筒采煤机外喷雾降尘技术[J]. 煤炭科学技术,2013,41(S1):86-88,91.
XUE Wei. Technology of dust suppression by spraying outside shearer[J]. Coal Science and Technology,2013,41(S1):86-88,91.

[4] MO J,WANG L,AU W,et al. Prevalence of coal workers' pneumoconiosis in China:A systematic analysis of 2001—2011 studies[J]. Journal of Hygiene and Environmental Health,2014,217(1):46-51.

[5] HAN Lei,HAN Ruhui,JI Xiaoming,et al. Prevalence characteristics of Coal Workers' Pneumoconiosis(CWP) in a state-owned mine in Eastern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2015,12(7):7856-67.

[6] 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.
WANG Pengfei, LIU Ronghua, TANG Meng, et al. Experimental study on atomization characteristics and dust suppression efficiency of high-pressure spray in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(9):2124-2130.

[7] 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.
CHENG Weimin, ZHOU Gang, ZUO Qianming, et al. Experimental research on the relationship between nozzle spray pressure and atomization particle size[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):1308-1313.

[8] 荆德吉,葛少成,刘剑,等. 破碎站粉尘逸散规律及降尘技术的数值模拟及其应用[J]. 环境工程学报,2013,7(9):3494-3500.
JING Deji, GE Shaocheng, LIU Jian, et al. Numerical simulation of dust diffusion rule and suppression technology in crushing station and its application[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(9):3494-3500.

[9] FLOCK A K,GUILDENBECHER D R,CHEN J,et al. Experimental statistics of droplet trajectory and air flow during aerodynamic fragmentation of liquid drops[J]. International Journal of Multiphase Flow,2012,47(3):37-49.

[10] 杜青,李献国,刘宁,等. 体旋转运动对类反对称模式下环膜液体射流破碎尺度的影响[J]. 天津大学学报,2008,41(5):569-575.
DU Qing,LI Xianguo,LIU Ning,et al. Effect of gas swirl on breakup scale of annular liquid jet for para-sinuous disturbances[J]. Journal of Tianjin University,2008,41(5):569-575.

[11] 刘日超,乐嘉陵,杨顺华,等. KH-RT 模型在横向来流作用下射流雾化过程的应用[J]. 推进技术,2017,38(7):1595-1602.
LIU Richao,LE Jialing,YANG Shunhua,et al. Application of KH-RT model in process of spray jet breakup in across-flow[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(7):1595-1602.

[12] 丁厚成,杨帆,张义坤. 综掘工作面粉尘运移规律及控制技术研究[J]. 安全与环境工程,2015,22(4):82-87.
DING Houcheng,YANG Fan,ZHANG Yikun. Research on dust migration law and control technology in fully-mechanized working face[J]. Safety and Environmental Engineering,2015,22(4):82-87.

[13] TORANO J,TORNO S,MENENDEZ M,et al. Auxiliary ventilation in mining roadways driven with road headers:Validated CFD modeling of dust behavior[J]. Tunnel Underground Space Technology, 2011,26(1):201-210.

[14] 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.

[15] 聂文,程卫民,周刚. 综掘工作面压风气幕形成机理与阻尘效果分析[J]. 煤炭学报,2015,40(3):609-615.
NIE Wen,CHENG Weimin,ZHOU Gang. Formation mechanism of pressure air curtain and analysis of dust suppression's effects in mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(3):609-615.

[16] 李雨成,李智,高伦. 基于风流及粉尘分布规律的机掘工作面风筒布置[J]. 煤炭学报,2014,39(S1):130-135.
LI Yucheng,LI Zhi,GAO Lun. Arrangement of air duct in tunneling working face based on the distribution laws of airflow and dust[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(S1):130-135.

[17] REITZ R. Modeling atomiza tion processes in high-pressure vaporizing sprays[J]. Atomization and Spray Technology,1987,3(4):309-337.

[18] 杨东超,朱卫兵,孙永超,等. 超声速气流中液体横向射流雾化破碎模型改进[J]. 推进技术,2017,38(2):416-423.
YANG Dongchao,ZHU Weibing,SUN Yongchao,et al. Modification of atomization breakup model for liquid jet into supersonic crossflow[J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(2):416-423.

[19] BEALE J C,REITZ R D. Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model[J]. Atomization and Sprays,1999,9(6):623-650.

[20] 谭聪,蒋仲安,王明,等. 综放工作面多尘源粉尘扩散规律的相似实验[J]. 煤炭学报,2015,40(1):122-127.
TAN Cong,JIANG Zhong'an,WANG Ming,et al. Similarity experiment on multi-source dust diffusion law in fully mechanized caving face[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(1):122-127.