

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230801002

## 气幕均匀性影响因素及其隔尘效果研究\*

王佩<sup>1,3</sup>, 蒋仲安<sup>2</sup>, 陈建武<sup>3</sup>, 王慧<sup>2</sup>

(1. 首都经济贸易大学管理工程学院, 北京 100070; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;  
3. 中国安全生产科学研究院职业危害所, 北京 100012)

**摘要:**近年来,空气幕作为一种有效隔绝易于扩散粉尘的装置,被频繁地用于矿山、隧道施工过程中产尘较多的场所,而均匀的气幕会带来更佳的隔尘效果。运用Fluent数值模拟结合相似实验的方法分析了气幕直径和气幕内部风道结构变化对气幕均匀性的影响,并将设计后可以均匀供风的气幕安装在实际施工隧道模型中模拟分析其隔尘效果。结果表明:直径增加,供风装置内气流轴向惯性力降低,有充足的时间改变流出方向,气幕装置轴向静压更加均匀,形成气幕更加均匀,但直径的变化对气幕均匀性的影响不是线性变化的,即存在一个临界直径使直径继续增加对均匀性的改善效果不明显,并且气幕临近直径的范围会随供风装置长度的增加而增加;在长度1 m、临界直径180 mm的气幕装置基础上,依据风道设计原理安装计算出的弧高为149.9 mm的楔形扇面阻体后,气幕装置内部平均压力梯度从38.4 Pa/m降低到19.3 Pa/m,出口风速均匀度从87.6%提高到93.2%,气幕均匀性显著提升;安装气幕后,隔尘区域内回弹的含尘气流被阻隔,区域内风流变得混乱复杂、涡流增加,粉尘停留时间增加,相对较大的粉尘颗粒有更长的时间沉降。整个隔尘区域粉尘浓度明显升高,气幕隔尘效果显著。

**关键词:**空气幕; 职业健康; 隔绝粉尘; 均匀分布; 数值模拟

**中图分类号:** X964 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1000-11

## Research on Factors Influencing the Uniformity of Air Curtain and Its Dust Isolation Effect

WANG Pei<sup>1,3</sup>, JIANG Zhongan<sup>2</sup>, CHEN Jianwu<sup>3</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>

(1. School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;  
2. School of Civil and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
3. Institute of Occupational Health, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In recent years, air curtains, as an effective device to isolate diffused dust, are frequently used in dust-prone environments, such as mining and tunneling construction. A more uniform air curtain provides better dust isolation. Fluent numerical simulation, combined with similar experimental methods, was used to analyze the effects of air curtain diameter and internal air duct structure on air curtain uniformity. A uniformly designed air curtain was installed in a tunnel construction model to simulate and evaluate its dust isolation efficiency. The results showed that as the diameter increased, the axial inertial force of airflow within the supply system decreased, allowing sufficient time for the flow direction to change. Meanwhile, the axial static pressure of the air curtain device became more uni-

\* 收稿日期:2023-08-01;修回日期:2023-10-21

基金项目:国家自然科学基金(51874016)、北京市教育委员会科研计划项目(KM202310038002)资助

作者简介:王佩(1987—),女,讲师,博士。主要从事职业卫生和因人因工效研究。E-mail:wangpei@cueb.edu.cn

form, forming a more homogeneous air curtain. However, the relationship between diameter and air curtain uniformity was nonlinear, with a critical diameter beyond which further increases had minimal effect on uniformity. Additionally, the effective range of diameters increased with the length of the air supply device. In a 1-meter air curtain system with a critical diameter of 180mm, the installation of a wedge-shaped fan-shaped blocking body with an arc height of 149.9mm, calculated according to air duct design principles, reduced the average pressure gradient inside the air curtain device from 38.4Pa/m to 19.3Pa/m, while the uniformity of the exit airflow increased from 87.6% to 93.2%, significantly enhancing air curtain uniformity. Finally, after installing the air curtain, the rebound of dust-bound airflow in the isolated area was blocked, leading to more chaotic airflow with increased turbulence. This prolonged the dust retention time, allowing larger dust particles more time to settle. The dust concentration in the whole dust isolation area increased significantly, demonstrating the air curtain's effective dust isolation performance.

**Keywords:** air curtain; occupational health; dust isolation; uniform distribution; numerical simulation

## 0 引言

近年来,政府为了防治对工人健康危害性最大的职业病——尘肺病,不断加强对工业性粉尘的控制与治理<sup>[1]</sup>。但对于矿山、隧道等需要大面积开挖岩石、岩壁的作业中,产生的大量的不能完全被密封住粉尘随着风流不断向整个工作区域扩散,这是工业性粉尘控制工作亟需解决的问题<sup>[2]</sup>。因此,对大断面掘进工作面的隔降尘技术的研究具有重要意义。

空气幕利用其出口条缝喷出具有一定强度的均匀风墙,可以起到隔热、隔烟和防潮的作用,同时凭借其较好的粉尘控制作用,被越来越多地应用到实际工作现场中以解决各种介质的控制问题<sup>[3-5]</sup>。最早的空气幕是用来隔绝室内室外气流热交换的,由 F. C. Hayes 等<sup>[6]</sup>首次发明并在 1960s 投入使用,从此开启空气幕研究的热潮。为后续大门空气幕的发展奠定基础,主要用于隔绝室内外热交换和风流循环<sup>[7-8]</sup>。随着气幕理论的深入研究以及大量实际应用,气幕发展至今已被用于更多场景用来解决问题。其中,由于空气幕对火灾烟尘有较好的隔绝效果,同时又可以隔绝火灾产生的大量热量,被用于高层建筑以及地铁隧道中处理火灾烟尘问题<sup>[9-11]</sup>。其次,空气幕对污染物的隔绝作用,包括粉尘污染物、气体污染物、咳嗽粉末污染物等,被广泛研究并应用于处理矿山开采、隧道开挖时处理粉尘和有害气体<sup>[12-15]</sup>。

空气幕的均匀性是决定空气幕隔绝效果的重

要特性,因为隔绝的物质会从不均匀空气幕的薄弱的位置扩散出去,起不到较好的隔离效果。肖迪等<sup>[16]</sup>通过深入研究气幕装置横截面积、导向叶片、气幕内部结构对均匀性的影响,建立了气幕模型,并通过实验验证得到均匀性最好的气幕参数。在此基础上,李小川课题组<sup>[17]</sup>通过数值模拟研究了气幕出口长度对空气幕均匀性的影响。他们<sup>[18]</sup>重点研究了气幕装置的分离角对其均匀性的影响,通过分析空气幕内部静压的变化发现弧形对称导向叶片能更好的提高空气幕的均匀性。

国内外的专家学者在形成气幕射流的理论基础、影响气幕作用效果的影响因素、气幕现场实际应用效果以及对气幕的模拟仿真上,都进行了很多的研究并取得了众多成果。气幕应用的地点虽已从商场超市转向矿山和隧道中去,但更多研究集中在城市隧道、公路隧道的大门空气幕隔烟隔热的作用上。隔尘研究则多集中在煤矿采煤工作面和掘进工作面上,很少有隧道施工空气幕的研究工作。其次,对于空气幕均匀性的研究多集中在单一的参数变量中,研究涉及的变量相对较多,每个因素与均匀性之间的影响情况下取得成效。但是很多均匀性研究的各个因素相对独立,并没有将各个影响因素串联起来设计出可以得到均匀气幕的系统方法,并将设计好的均匀气幕放置到实际施工条件下分析。

综上所述,本文在前人研究的基础上,先对影响气幕均匀性的部分重要内部结构进行模拟研究,包括供风管道的直径、内部渐变楔形结构,并结合实验结果分析气幕均匀性的影响情况,最后用该气

幕装置对实际大断面隧道模型进行隔尘效果模拟,旨在为作业现场控尘提供更有效的隔尘方法。

## 1 实验研究

### 1.1 实验系统

如图1(a)所示,空气幕产生装置主要由鼓风机、连接风管、气幕主体风管、气幕长方体条缝出口四个部分组成。其中,气幕的主体长1100 mm,直径200 mm的一段加盖的空心圆柱形管道;气幕条缝出口为长1000×10×35 mm的空心长方体,其中可以安装导向叶片提高气幕工作性能;150~210 mm的变接头连接风管将550 w功率的离心鼓风机与气幕主体相连。

由于需要满足以下两个要求才可认为气幕是均匀的<sup>[19]</sup>:(1)整条送风管道内有相同的静压;(2)条缝出口的射流方向尽量要与气幕风道垂直。故为了更精确地分析气幕的均匀性变化,对其腔内静压和出口风速进行多次测量,实验的仪器以及测点如图1(b)、(c)所示。每隔100 mm选取一个截面布置测点,出口风速的测点布置就在条缝出口处,多测测量取平均值;静压测点布置在圆环面积等分线上,并且在相互垂直的两个直径上布置测孔,根据计算,本次实验按照面积布点法应至少划分2个等面积圆环,每个断面布置5个测点。

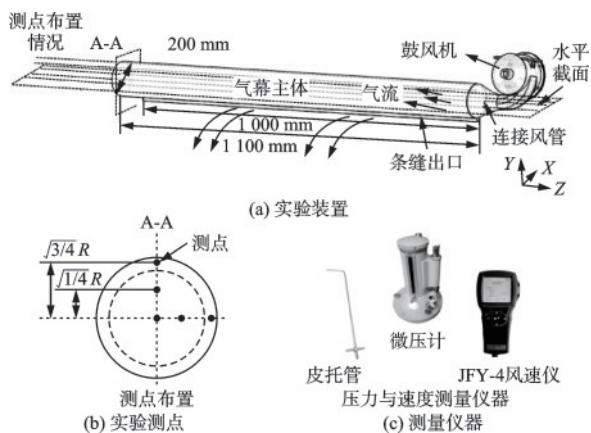


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

### 1.2 实验方案设计

本文主要进行了空气幕直径与内部风道结构

改变对气幕均匀性影响的实验研究,故实验设计从这两个方面入手。如图2所示,通过对气幕主体按照圆形轮廓填充的方法改变气幕主体直径,直径设置五个变量,100、130、150、180、200 mm,寻找气幕性能最佳时的直径。在此基础上,依照均匀风道设计方法设计气幕内部楔形圆柱阻体,制作阻体并对添加阻体后气幕均匀性效果进行实验。

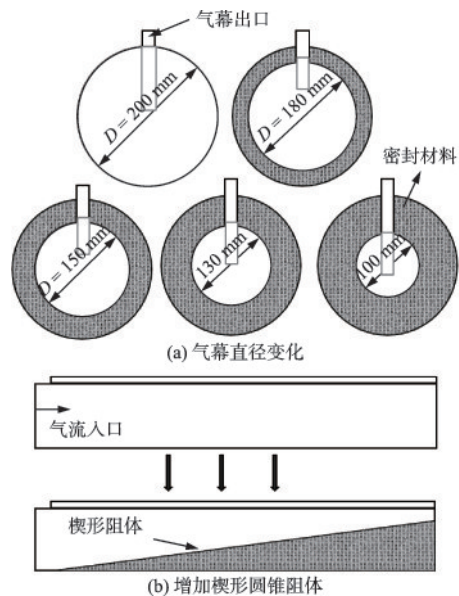


图2 气幕均匀性验证实验设计

Fig.2 Experimental design for validating air curtain uniformity

### 1.3 内部风道结构设计

当风道内部的截面面积保持不变时,由于存在阻力,风流动时损失的动压会转化为静压,导致气幕内部静压变化,而楔形风道的设计原则就是通过截面面积的改变弥补动压的损失,保证内部静压均匀。

条缝出口的静压速度为:

$$v_j = \frac{v_0}{\mu} \quad (1)$$

式中: $v_0$ 为出口速度,可按照公式(1)计算得到,m/s; $\mu$ 为流量系数,气幕为等宽条缝出口, $\mu$ 取0.62。

将气幕风道均匀的划分为10个截面(图3),截面1-1的动压为:

$$P_{d1} = \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D_1^4} \quad (2)$$

式中, $P_{d1}$ 为截面动压,Pa; $\rho$ 表示空气的密度,

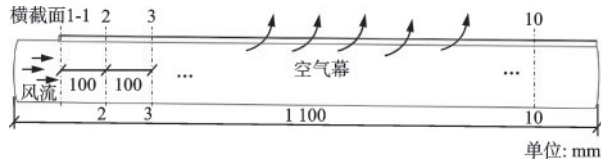


图3 气幕风道划分情况

Fig.3 Division of air curtain ducts

$\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $Q_1$ 为截面1-1提供的风量(总供风量),  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $D_1$ 为风管直径,  $\text{m}$ 。由于各截面大小尚未确定,故认为截面2-2上单位长度摩擦损失就代表前一管段的平均值,可按风道单位长度摩擦损失的简化公式计算。故摩擦损失可利用以下公式计算:

$$\Delta P_m = P_{m1}l = 1.05 \times 10^{-2} \times D_1^{-1.21} \times v_{d1}^{1.925} \times l \quad (3)$$

式中,  $P_{m1}$ 为单位长度摩擦损失,  $\text{Pa}$ ;  $v_{d1}$ 为截面1-1的动压速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $l$ 为气流流动的距离,  $\text{m}$ 。同时,对于纵向条缝风道,可认为通路局部损失为零。故对于截面2-2有:

$$P_{j1} + P_{d1} = P_{j2} + P_{d2} + \sum h \quad (4)$$

式中:  $P_j$ 为截面静压,  $\sum h$ 为压损。保证静压相等,于是有:  $P_{d2} = P_{d1} - \Delta P_{m1}$ 。由此可算出第二个截面的动压速度  $v_{d2}$ ,同时因为保证了均匀送风,通过截面  $n-n$ 的风量可按照下式计算:

$$Q_n = [1 - 0.1(n - 1)]Q \quad (5)$$

式中,  $Q$ 为供风管总长,  $\text{m}$ 。接下来就可计算截面2-2的断面积  $A_2 = Q_2 / v_{d2}$ 。由此根据下面公式可以计算楔形圆柱阻体在截面2-2处的断面高度和宽度(图4):

$$S = A_1 - A_2 = \frac{1}{2} aR^2 - \frac{1}{2} R^2 \sin \alpha \quad (6)$$

$$b = AC = 2R \sin \alpha$$

$$h = BD = R - R \cos \alpha$$

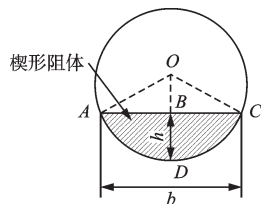


图4 阻体区域计算示意图

Fig.4 Schematic diagram of blocking body region calculation

由此可以计算出截面2-2的水利直径  $D_2$ :

$$D_2 = 4R_s = \frac{A_2}{(2\pi - \alpha) \times \frac{D_1}{2} + b} \quad (7)$$

重复上述计算步骤,可以计算每一个截面的断面积,截面计算完后可以得到一个从风流入口处到气幕另一端的面积有规律增加的楔形圆柱阻体。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立及网格划分

主要针对空气幕的均匀性和气幕隔尘效果进行研究,因此对气幕以及含气幕隧道模型进行建模。如图5(a)所示,通过Solidworks软件建立的简易气幕模型。此外,以实际的施工隧道为原型,并对复杂的隧道模型简化,通过Solidworks软件建立1:1的含气幕的隧道模型(图5(b)),隧道为半圆形拱体,尺寸为  $300 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ ;直径2 m的压风管放置在掌子面前30 m处为隧道施工供风;气幕悬挂在掌子面前20 m处,对含尘气流进行阻隔。

通过Mesh网格划分整体几何模型的网格,由于网格的大小会影响模拟计算结果,故在初步划分网格的基础上,对模型的气幕出口部分及掌子面产尘部分采用Sizing再次进行网格加密,生成质量0.881与数量128 093的单独气幕网格和质量0.863与数量1 034 916的含气幕隧道网格,如图5所示。

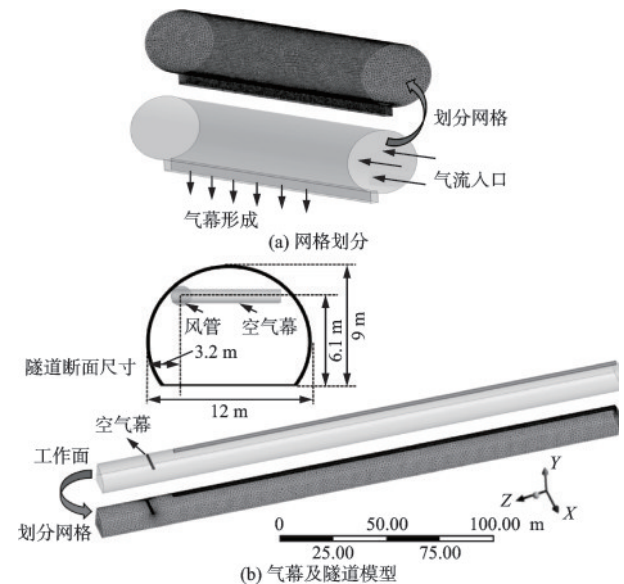


图5 气幕及隧道模型建立及网格划分

Fig.5 Air curtain and tunnel modeling and meshing

### 2.2 边界条件设置

生成的网格导入Fluent中进行模拟,使用压力

基稳态求解器求解,湍流模型选择 Realizable  $k-\epsilon$  方程模型;隧道供风压风管设置为速度出口,按照实际施工要求风管供风量为  $1\ 800\ \text{m}^3/\text{min}$ ,出口风速设为  $9.5\ \text{m/s}$ ;气幕出口设为压力出口;隧道使用 DPM 离散相模型对粉尘源进行设置;隧道出口设置为压力出口,隧道壁面为无滑移壁面,具体设置参数属性及数值见表 1。

表 1 边界条件设置情况

Table 1 Boundary condition settings		
参数类型	参数	取值或设置
边界条件	气幕入口边界条件	pressure-inlet
	气幕出口边界条件	pressure-outlet
	风管出口风速	$9.5\ \text{m/s}$
求解设置	求解器	Pressure-based
	湍流模型	Realizable $k-\epsilon$
	壁面边界	绝热无滑移
DPM 离散模型设置	喷射类型	面喷射
	粉尘材质	$\text{SiO}_2$
DPM 离散模型设置	粉尘密度	$2320\ \text{kg/m}^3$
	粒径分布类型	R-R 分布
	特征粒径	$2.58 \times 10^{-5}\ \text{m}$
	总质量流率	$0.002\ \text{kg/s}$

按照实验设计以及均匀风道理论,气幕风管直径( $D$ )和长度( $L$ )是影响其均匀性的重要结构,通过对不同长度下不同气幕发生装置的供气直径时以及改变内部风道结构时的模拟,结合实验结果分析结构参数对气幕均匀性的影响。

### 3 结果与分析

#### 3.1 直径改变对气幕均匀性的影响分析

##### 3.1.1 数值模拟结果分析

根据实际气幕供风情况,模拟不同长度 1、2、3 m 时不同直径的气幕内部静压分布情况,模拟结果如图 6 所示。当气幕发生器的长度固定时,随着直径的增加,内部压力分布变得更加均匀,但随着直径继续增加,静压虽向着更均匀的方向发展,但是变化幅度在减缓,说明直径增加对均匀性的改善是一个增长率不断降低的过程。也就是说存在一个临界直径使直径的增加对均匀性的影响较小,此时可以不考虑直径的改变来改善气幕均匀性。分析图 7 中气幕内部静压变化趋势可以更直观的观察出这种趋势。

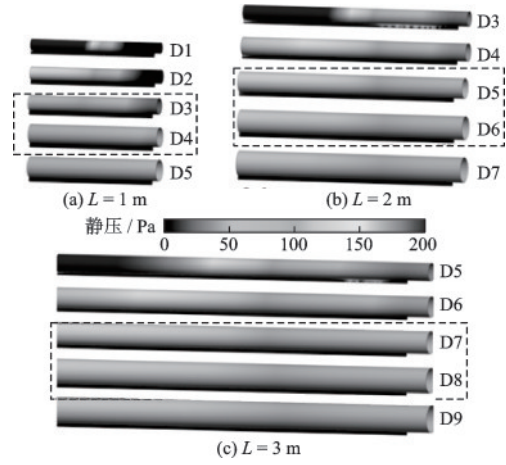


图 6 不同空气幕发生装置长度下直径变化时内部静压分布  
Fig.6 Variation of internal static pressure with the diameter changes under different lengths of air curtain generators

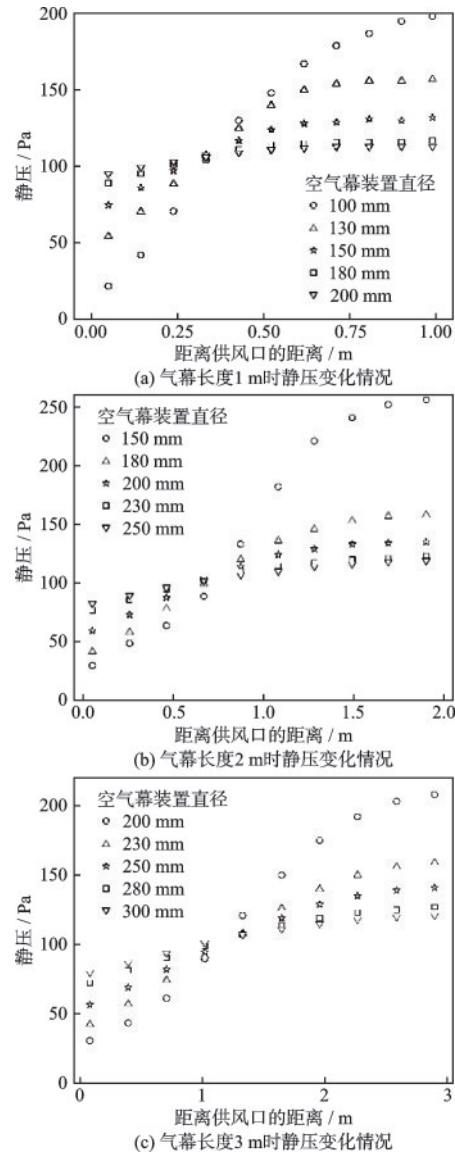


图 7 不同气幕发生装置长度下直径变化时内部静压变化情况  
Fig.7 Variation of internal static pressure with diameter change for different air curtain generator lengths

分析不同长度时直径改变时气幕内部静压变化趋势可以发现：

(1)直径较小时供气孔的气流速度大,轴向惯性力大,大量气流没有足够的时间改变方向从条缝出口流出,而是积聚在气幕发生器的另一端,从而在底部产生较高的静压,且底部出口速度较大,气幕不均匀。

(2)在直径较大的空气幕装置中,由于静压沿轴向稳定分布,气流速度适中,气流均匀稳定地充满整个空间,形成均匀的空气幕。

(3)随着空气幕发生装置长度的增加,临界直径也在不断的增加,因为管道长度增加后,供风口处入口气流需要花费更多的时间达到发生装置的另一端。在持续供风的情况下,部分风流在没有到达底端时就从条缝口流出,导致静压很难平衡,需要更大的直径来稳定轴向气流,使空气幕变得更加均匀。

### 3.1.2 实验结果分析

选取 $L=1$ 的空气幕发生装置,对200 mm的空气幕供气装置内部填充不同厚度的密封圆柱海绵板以改变气幕主体的直径,观察气幕均匀性的变化情况。

分析实验结果图8和实验数据图9可知：

(1)随着直径不断增加,出口处的质量可忽略的丝带被射流吹起的角度明显更垂直气幕风道,说

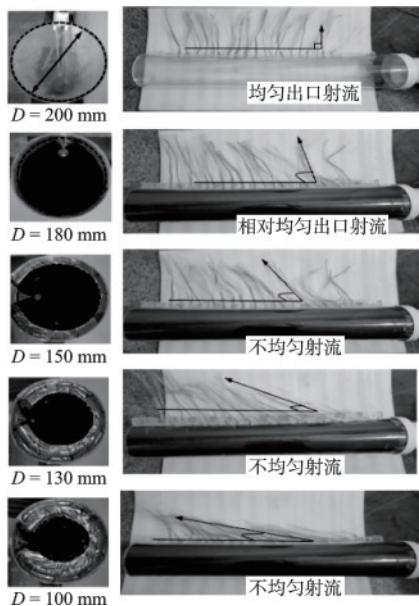


图8 空气幕供气管直径对空气幕均匀性影响实验

Fig.8 Experiment on the effect of air curtain supply pipe diameter on air curtain uniformity

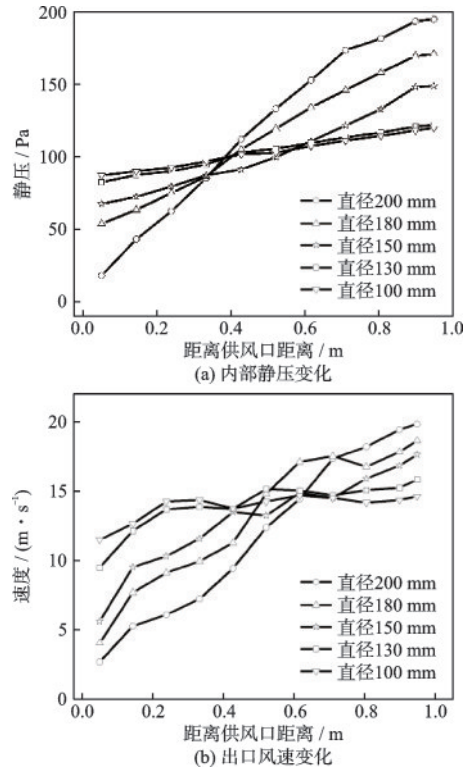


图9 实验测定不同气幕直径时静压及出口风速的变化结果  
Fig.9 Experimentally determined results of internal static pressure and outlet air velocity changes for different air curtain diameters

明气幕出口气流风速水平方向分量降低,即气幕出口射流向着更均匀的方向发展。

(2)引入平均压力梯度( $k$ )来表示静压的变化,即空气幕发生装置单位长度内静压的变化,从图中可以看见静压随着气幕风管直径的增加而越发均匀, $k$ 值以不断减缓的速度降低。直径 $D_3=150$  mm时 $k$ 为80.7 Pa/m,而之后的气幕平均压力梯度变化 $D_4=180$  mm时的38.4 Pa/m,降低到 $D_5=200$  mm时的 $k$ 为28.8 Pa/m,可以看出直径对空气幕发生装置内部静压的影响在降低,继续增加供风管的直径依然会增加气幕的均匀性,但也增加了材料的费用,综合考虑均匀性的改善效果,考虑 $D_4$ 为实验条件下的临界直径。

(3)引入均匀度 $u$ 来表征气幕出口风速的均匀性, $u$ 的计算公式如下<sup>[16]</sup>：

$$u = 100 - (100 \times (s/V_a))\%$$

式中, $s$ 为数据的标准差; $V_a$ 为气幕出口风速平均值。将实验结果带入公式中,直径从 $D_1=100$  mm增加到 $D_5=200$  mm时的计算结果见表2,气幕出口风速的均匀性从50.6%增加到93.3%,说明更大的供风直径确实增加了气幕出口射流的均匀性。

表2 不同直径出口风速均匀度计算

Table 2 Calculation of outlet air velocity uniformity for different diameters

直径/mm	100	130	150	180	200
标准差	11.9	12.9	13.1	13.9	13.8
平均值	5.9	4.9	3.4	1.7	0.9
均匀度	50.6	62.1	73.9	87.6	93.3

结合模拟结果分析临界直径的产生原因,发现直径较小时装置内气流速度大,轴向惯性力大,大量气流没有足够的时间改变方向向条缝出口流出,而是积聚在气幕发生器的另一端,气幕不均匀。直径增加后,气流速度适中,气流均匀稳定地充满整个空间,形成均匀气幕。也就是说当直径达到一定范围时,内部气流的流动相对稳定了,增加直径对气流的分布产生不了太大的影响。所以, $D_4$ 、 $D_5$ 的均匀性效果相近时,选择 $D_4$ 为长度1 m时气幕装置的临界直径,在此基础上再进行均匀性其他改善。

### 3.2 风道结构变化对气幕均匀性的影响分析

根据前面章节中风道结构设计方法,计算1 m长度气幕的内部楔形结构,计算结果见表3,得到的直径为180 mm,弧高为149.9 mm的楔形扇面阻体(图10)。将计算得到的装置放置到空气幕的内部中,进行实验比较增加阻体前后空气幕均匀性情况,分析阻体的作用。

采用不通风的材料按照表5中数据加工定做大小1:1的楔形圆柱阻体。并将其安装到1 m长的空气幕当中,对空气幕供风,观察气幕出风口射流情况

表3 气幕均匀送风风道断面面积计算

Table 3 Calculation of air curtain uniformity duct cross-sectional area

编号	截面风量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	动压/ Pa	流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	截面面积/ $m^2$	阻体尺寸 $b \times h$
1	0.208	40.0	8.17	0.025 45	0×0
2	0.187 2	39.5	8.11	0.023 08	128.1×26.8
3	0.166 4	39.0	8.06	0.020 64	154.6×43.9
4	0.145 6	38.4	8.00	0.018 19	168.9×58.9
5	0.124 8	37.8	7.94	0.015 71	176.9×73.3
6	0.104 0	37.1	7.86	0.013 22	179.9×87.3
7	0.083 2	36.3	7.78	0.010 69	178.5×101.3
8	0.062 4	35.4	7.68	0.008 12	172.3×115.9
9	0.041 6	34.3	7.56	0.005 50	159.6×131.6
10	0.020 8	32.8	7.93	0.002 81	134.3×149.9

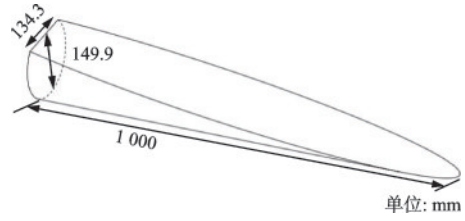


图10 楔形圆锥型阻体模型

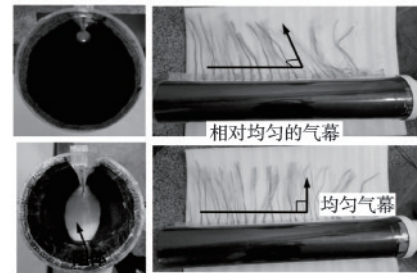
Fig.10 Wedge-cone blocking body model

况,并测定气幕内部静压和出口风速的变化情况。

分析图11可知:

(1)增加阻体前后空气幕吹出射流效果图,发现增加阻体后,条缝出口射流处放置的红丝带近乎垂直与风道,说明气幕均匀性得到了一定程度的提高。

(2)从实验测定数据中可以发现,增加阻体后送风管道平均压力梯度 $k$ 从38.4 Pa/m降低到19.3 Pa/m,出口风速的均匀度 $u$ 从87.6%提高到93.2%,也说明楔形风道极大程度的提高了气幕的均匀性。



(a) 增加阻体前后气幕均匀性实验情况

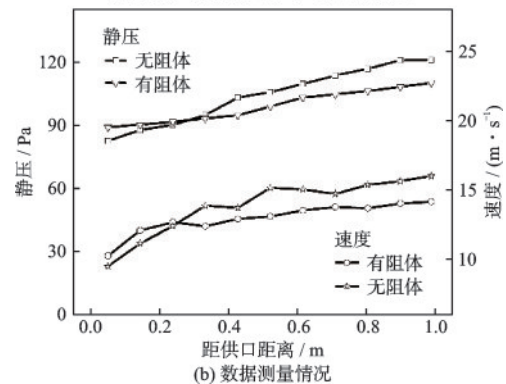


图11 增加阻体前后气幕均匀性实验及数据测量情况

Fig.11 Experiments and data measurements of air curtain uniformity before and after adding blocking bodies

### 3.3 均匀气幕隔尘效果分析

特长大隧道施工中,工作面粉尘产生后随风流动传播,向空气中扩散。在此过程中,将粉尘颗

粒从静止状态转变成漂浮空中的状态的过程称为“尘化现象”，主要通过摩擦和抛落两种方法产生，为污染工作区域的主要来源。爆破、喷浆、出渣、钻孔作业等作业过程会产生大量的粉尘，特别是钻爆法掘进隧道时，隧道内的粉尘浓度会达到一个较高的水平。传统的通风除尘和水除尘方法在特长大隧道中的效果相对一般。因此，通过用气幕将粉尘隔绝在一定区域范围内后集中除尘的方法就格外适合特长大隧道施工粉尘处理情况。

为了得到能覆盖整个断面的有效气幕，结合现场工作面附近实际工作情况将气幕安装在距掌子面 25m 处的隧道的正上方，向下吹拂形成空气幕；将空气幕放置在和风管水平同轴心处，为了给气幕提供足够的风流，将两部分气幕通过可忽略距离的连接装置连接构成一个整体，并通过两个相同型号的鼓风机进行供风；气幕水平距离压入风管侧隧道壁面一定距离处，尽量不让压风管气流影响空气幕的强度。

在 1:1 隧道模型中安装能覆盖断面的均匀气幕，通过风流流场和污染物运移规律分析均匀气幕隔尘效果。

### 3.3.1 风流场分析

气幕开启前后隧道内风流场的变化如图 15 所示，其中沿隧道每隔 20 m 记录断面平均风速，观察隧道内流场分布规律。

由图 12 可知：

(1)气幕开启前，风管射流以较高的速度带动周围空气吹向掌子面，根据动量守恒，卷吸后的风流沿程不断降低速度；当射流到达掌子面后，撞壁面造成风流反向形成回流向隧道扩散，此时流场比较复杂混乱，区域流场稳定性较差；随着扩散距离的增加，风流速度减低并趋于稳定。

(2)气幕开启后，风管射流吹向掌子面的途中，出口风速较大的气幕将部分射流卷吸；气幕阻隔的大部分风流经气幕风墙反弹后在掌子面与气幕间区域混乱流动，涡流较多，最终稳定扩散。

(3)从风流矢量图可以看出，不开气幕时风流冲击掌子面后正常反弹回流，而开启气幕，风流回流受阻后回弹与回流相互干扰形成螺旋涡流；

### 3.3.2 污染物运移分析

结合风流场的模拟结果，分析气幕隔尘的原理如图 13 所示。空气幕并不像固体墙壁一样阻止粉尘粒子穿过，而是形成一个无形透明的屏障。该屏

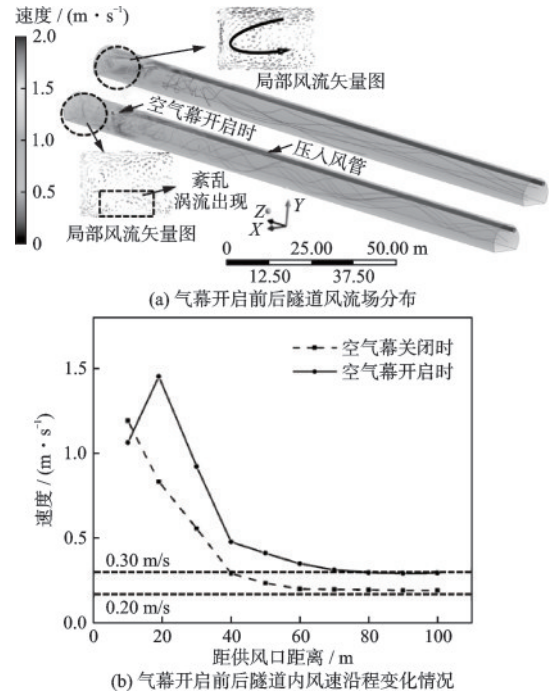


图 12 空气幕开启前后隧道风流场变化情况

Fig.12 Changes in tunnel air flow field before and after air curtain operation

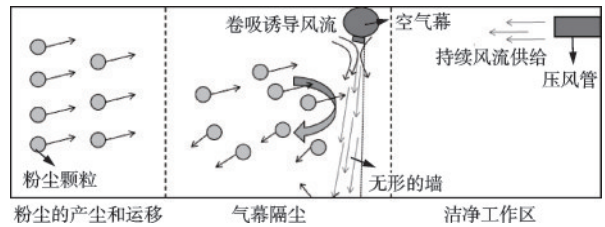


图 13 气幕隔尘原理

Fig.13 Principle of air curtain dust isolation

障不仅起到了阻隔的作用，它还有不断卷吸工作面方向的含尘气流并稀释的作用。粉尘接触空气幕后，被风流卷吸向下，随射流冲向地面，受到地面的限制后向两侧发散，由于存在一定的角度，故被稀释和卷吸的含尘气流更多的返回产尘侧。因此，粉尘做了类似一个圆周运动，粉尘就被隔离在产尘的一侧，达到了隔尘的效果。

接下来结合气幕隔尘原理分析气幕的隔尘效果。当掌子面产生粉尘已经在隧道中扩散一段时间后，此时观察气幕开启前后粉尘的运移变化情况以及呼吸带  $Y=1.5\text{ m}$  处粉尘浓度沿程变化情况。

分析图 14 可知：

(1)通风一段时间后，粉尘随着风流向整个隧道呈“倒 U”型扩散，在风流速度较低区域的大颗粒粉尘已部分沉降；

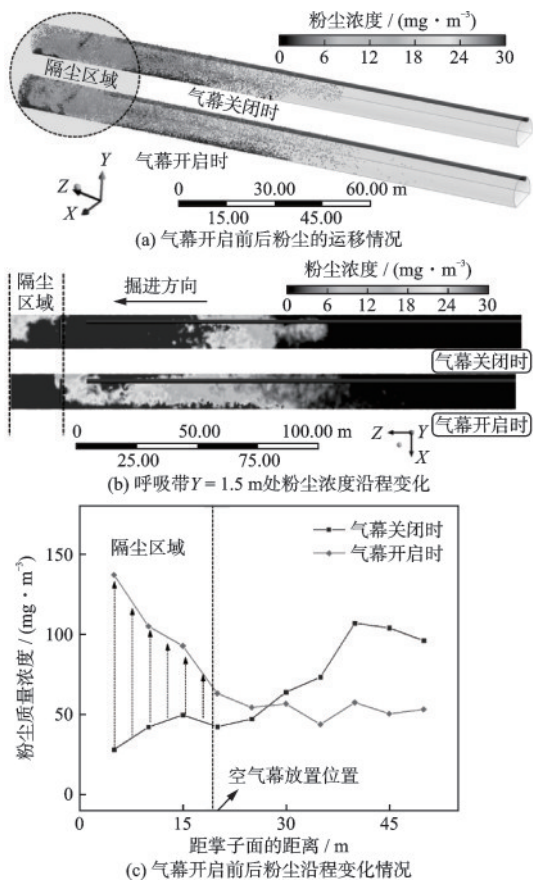


图14 气幕开启前后粉尘浓度沿程变化情况  
Fig.14 Variation of dust concentration along the tunnel before and after the air curtain operation

(2) 观察粉尘浓度分布云图(b), 不开启气幕时, 更多的粉尘颗粒随着风管持续供风向隧道中部扩散, 较多的扩散和沉降在隧道中部, 污染整个隧道, 而气幕开启后大部分粉尘还隔绝在气幕前区域, 小部分粉尘逃逸并沉降在隧道中部, 此时采用的隔降尘技术可取得较好的效果;

(3) 记录各截面粉尘平均浓度变化数据绘制成图(c), 可以明显得看到开启空气幕后隔尘区域粉尘浓度有明显得升高, 说明气幕发挥了明显的隔尘效果。

工作面的粉尘产生后不断向隧道中后部转移和扩散, 在这个过程中, 形成的均匀气幕持续对粉尘起到隔绝作用。随着更多的粉尘冲击气幕, 气幕隔尘效果也随着时间不断改变, 因此对形成一定强度气幕在不同时间时的隔尘效果进行分析, 图 15 为气幕开启前后不同时刻时隧道内粉尘沿程变化情况。

同时, 分别记录气幕开启前后距掌子面不同距离截面的粉尘浓度变化情况, 如图 15 所示。

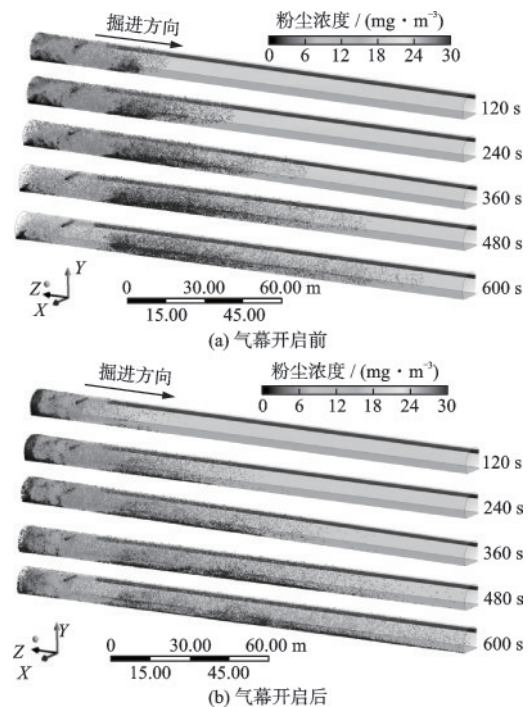


图15 气幕开启前后不同时刻时隧道内粉尘沿程变化情况  
Fig.15 Variation of dust along the tunnel at different moments before and after the air curtain operation

观察气幕开启前后粉尘运移情况, 分析得到:

(1) 不开启气幕时(图 16(a)), 不同截面的粉尘浓度都经历了先快速增加后逐渐下降的过程, 而且远离掌子面的截面峰值浓度不断降低, 说明粉尘随着时间的推移发生整体的扩散, 且扩散的距离越远沉降的粉尘就越多。

(2) 开启气幕时(图 16(b)), 其中截面 10 m 为气幕隔尘区域内部的截面, 该截面粉尘浓度升高较多, 说明此时气幕有较好的隔尘效果, 隔尘区域内也隔住了大量的粉尘, 直到 300 s 左右, 持续的风流携带更多粉尘逃逸, 隔尘区域粉尘浓度开始下降, 外部各个截面也陆续扩散了较多的粉尘, 气幕隔尘效果下降。

## 4 结 论

通过模拟和实验研究了气幕装置直径和内部风道结构对气幕均匀性的影响, 并模拟了实际隧道中气幕的隔尘效果, 具体结论如下:

(1) 气幕供气装置直径的增加改善了气幕的均匀性, 但是改善效果不断减弱, 模拟结合实验研究发现, 到达临界直径后直径继续增加对气幕均匀性的改善效果不明显。

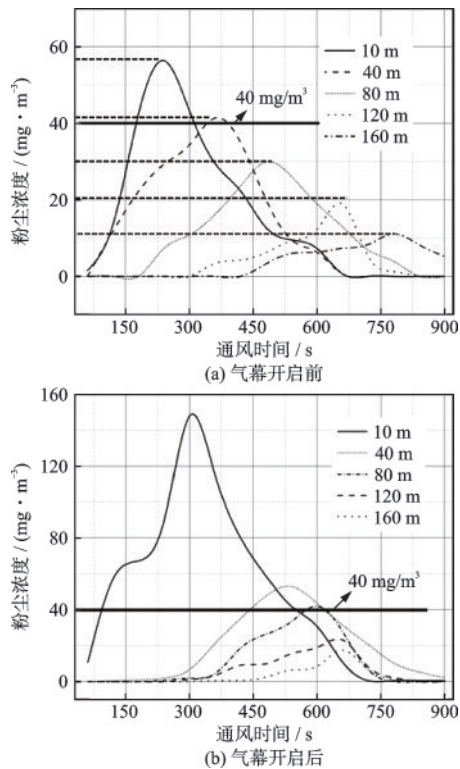


图16 气幕开启前后不同截面粉尘浓度随时间变化  
Fig.16 Variation of dust concentration over time in different cross sections before and after air curtain operation

(2)供气装置长度( $L$ )不同时,临界直径也随之改变。 $L=1\text{ m}$ ,临界直径为150~180 mm; $L=2\text{ m}$ 时,临界直径为200~230 mm; $L=3\text{ m}$ 时,临界直径为250~280 mm。

(3)1 m长的临界直径气幕内部安装直径180 mm,弧高149.9 mm的楔形扇面阻体后,内部静压趋于均匀,送风管道 $k$ 值从38.4 Pa/m降低到19.3 Pa/m,出口风速的均匀度 $u$ 从87.6%提高到93.2%,气幕更加均匀。

(4)放置在隧道掌子面前的气幕能够起到较好的隔尘效果。对比气幕开启前后风流场变化及粉尘运移规律发现,气幕形成的“无形的墙”可以阻挡部分含尘气流的通过。

### 参考文献:

[1] 晋良海,吴志鹏,陈述,等.杨房沟水电站料场开挖爆破粉尘粒度分布特征[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):1045-1052.  
Jin L H, Wu Z P, Chen S, et al. Particle size distribution characteristics of blasting dust in excavation yard of yangfanggou hydropower station[J]. Journal of Disaster

Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1045-1052. (in Chinese)

[2] Feng X, Jiang Z A, Zhang G L. Study on CO diffusion law and concentration distribution function under ventilation after blasting in high-altitude tunnel[J/OL]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 220: 104871.

[3] 蒋仲安,罗晔,牛伟.矿井空气幕隔断巷道风流影响因素分析及实验[J].采矿与安全工程报,2013,30(1): 149-153.  
Jiang Z A, Luo Y, Niu W. Influencing factors of air curtain in cutting off roadway airflow [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 149-153. (in Chinese)

[4] 程鑫,卢平,余陶.地铁站台火灾空气幕阻烟的模拟研究[J].湖北理工学院学报,2022,38(4): 13-17.  
Chen X, Lu P, Yu T. Simulation research on fire smoke suppression by air curtain of subway platform fire [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2022, 38(4): 13-17. (in Chinese)

[5] 黄冬梅,梅秀娟,兰彬,等.防烟空气幕防烟有效性模拟实验研究[J].防灾减灾工程学报,2008,28(4): 497-501.  
Huang D M, Mei X J, Lan B, et al. Experimental simulation of effectiveness of smoke-preventing air curtain [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 497-501. (in Chinese)

[6] Hayes F C, Stoecker W F. Design data for air curtains [J]. Ashrae Transactions, 1969, 75(2): 168-180.

[7] Frank D, Linden P F. The effects of an opposing buoyancy force on the performance of an air curtain in the doorway of a building[J/OL]. Energy and Buildings, 2015, 96: 20-29.

[8] Liu Y, Qiu K, Shao X. Effect of a recirculated air curtain with incomplete coverage of room width on the protection zone in ventilated room [J/OL]. Building and Environment, 2022, 219: 109219.

[9] Ji J, Lu W, Li F. Experimental and numerical simulation on smoke control effect and key parameters of Push-pull air curtain in tunnel fire [J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 121: 104323.

[10] Li T, Yang Z, Li X. Experimental study on fire temperature distribution based on air curtain separation effect in a reduced-scale bifurcation tunnel [J/OL]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 126: 104548.

[11] 李静娴,何嘉鹏,周汝,等.建筑火灾中“走廊-前室缓冲

- 区”影响因素的试验研究[J].安全与环境学报,2011,11(4):176-179.
- Li J X, He J P, Zhou R, et al. An experimental study of the factors influencing the "corridor-anteroom buffer zone" in building fires[J]. Journal of Safety and Environment, 2011,11(4):176-179. (in Chinese)
- [12] Wei X, Yi D, Xie W. Protection against inhalation of gaseous contaminants in industrial environments by a personalized air curtain[J/OL]. Building and Environment, 2021, 206: 108343.
- [13] Xu J, Guo H, Zhang Y. Effectiveness of personalized air curtain in reducing exposure to airborne cough droplets[J/OL]. Building and Environment, 2022, 208: 108586.
- [14] 郭健翔,周紫涵,孙晋飞,等.空气幕距挡烟垂壁及火源不同距离的挡烟效果研究[J].安全与环境学报,2021,21(2):613-619.
- Guo J X, Zhou Z H, Sun J F, et al. Influence and effects of the different distances of the fire source between the air curtain and the hanging wall[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2): 613-619. (in Chinese)
- [15] 宋旭彪.压出式空气幕通风技术在隧道施工中的应用[J].现代隧道技术,2013,50(2):173-180.
- Song X B. Application of forced-out air curtain ventilation in tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013,50(2):173-180. (in Chinese)
- [16] Xiao D, Li X C, Yan W D, et al. Experimental investigation and numerical simulation of small-volume transverse-flow air curtain performances [J/OL]. Powder Technology, 2019, 352: 262-272.
- [17] Li X C, Zhao X L, Jiang Y F, et al. Air curtain dust-collecting technology: Influence factors for air curtain performance[J/OL]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 218: 104780.
- [18] Li X C, Jiang Y F, Fang Z C, et al. Air curtain dust-collecting technology: A simulation study on air jet distribution and departure angle of air curtain generator[J/OL]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101759.
- [19] 张利军,吕伟鹏,张天明,等.掘进工作面高压气幕控尘性能实验研究[J/OL].煤炭技术,2021,40(9):117-120.
- Zhang L J, Lyu W P, Zhang T M, et al. Experimental research on dust control performance of high pressure air curtain in heading face [J/OL]. Coal Technology, 2021,40(9):117-120. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)