

掘进过程中隧道应用新式压风导流调控通风系统的控 - 除尘效果研究

刘 强, 刘新鹏, 华 赞, 刘士昊, 蔡源坤

山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年3月27日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月22日

摘 要

新式压风导流调控通风系统通过导流装置阻挡压风筒射流形成纵向空气幕, 将隧道分割为含尘区与清洁区, 配合抽风与除尘风机实现控 - 除尘一体化, 解决传统通风粉尘扩散与除尘不足问题。本文以大柳塔煤矿掘进工作面为对象, 采用CFD数值模拟与现场实测相结合的方法, 对比传统压入式通风系统, 分析风流 - 粉尘耦合规律与动态掘进过程粉尘控制特征, 优化压风筒安装参数。结果表明: 新系统可显著缩短粉尘扩散距离, 将高浓度粉尘限制在工作面局部区域; 在压、抽风量比1.5条件下, 最优安装方案为初始出风口距工作面12 m, 掘进至20 m时接长8 m柔性风筒并复位, 作业人员位置粉尘浓度始终低于150 mg/m³, 控除尘效果提高了43.9%。有效保障井下作业安全。

关键词

导流装置, CFD数值模拟, 粉尘污染控制

A Study on the Dust Control and Ventilation Effects of a New Pressurized Air Flow Control System in Tunnels during Tunneling Operations

Qiang Liu, Xinpeng Liu, Yun Hua, Shihao Liu, Yuankun Cai

School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: March 27, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 22, 2026

Abstract

The new pressurized air flow control ventilation system uses a deflector to block the jet from the

文章引用: 刘强, 刘新鹏, 华赞, 刘士昊, 蔡源坤. 掘进过程中隧道应用新式压风导流调控通风系统的控-除尘效果研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 607-621. DOI: 10.12677/me.2026.143062

pressurized air duct, creating a longitudinal air curtain that divides the tunnel into a dust-laden zone and a clean zone. By coordinating with exhaust and dust collection fans, it achieves integrated ventilation and dust removal, thereby addressing the issues of dust dispersion and inadequate dust removal associated with traditional ventilation systems. This study focuses on the tunneling face at the Daliuta Coal Mine. By combining CFD numerical simulation with on-site measurements, it compares the system with traditional forced-air ventilation systems, analyzes the coupling mechanisms between airflow and dust, and examines dust control characteristics during dynamic tunneling operations to optimize the installation parameters of the air ducts. The results indicate that the new system can significantly reduce the distance of dust dispersion, confining high-concentration dust to a localized area of the working face; under a supply-to-exhaust airflow ratio of 1.5, the optimal installation scheme involves positioning the initial outlet 12 m from the working face, extending the flexible duct by 8 m when excavation reaches 20 m, and then repositioning it. Dust concentrations at worker locations remain consistently below 150 mg/m^3 , with dust removal efficiency improved by 43.9%. This effectively ensures the safety of underground operations.

Keywords

Flow-Diverting Device, CFD Numerical Simulation, Dust Pollution Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球煤炭市场受世界经济贸易的影响,传统贸易流受到干扰,价格飙升,同时全球煤炭的总体需求将增长 1.2%,达到历史新高,首次超过 80 亿吨,煤炭主体能源地位短期内难以改变[1]。2022 年,中国煤炭供应紧缺,全年原煤产量 45.6 亿吨,比上年增长 10.4%,煤炭消费量占能源消费总量的 56.2%。总体看,中国能源构成中,煤炭仍处于主体性地位。据国家统计局公开的信息显示,中国 2022 年的发电量达到了 86,372 亿千瓦时¹,以煤炭作为主燃料的火力发电量,约为全社会发电量的 72.03%,火力发电仍占据着主导地位,由此带来的煤炭需求量尤为庞大。然而,在掘进开采过程中,会导致大量粉尘逸出,由于隧道空间狭小,短时间内粉尘难以及时扩散,导致单位体积内粉尘颗粒积聚,粉尘浓度随之上升,长期暴露于高浓度粉尘的作业环境中,井下施工作业人员极易患上尘肺病[2]。不仅如此,高浓度粉尘积聚随之带来的粉尘爆炸,对作业设备和精密仪器的磨损等危害都不容小觑[3]。

对于通风系统的研究,数值模拟对其发展起到了推动的作用。模拟本身具有较低的使用成本,在模拟过程中调整数据方便、读取数据直观等优势,因而广泛应用于实验研究。许多研究人员借助模拟对风流运移及粉尘扩散规律进行研究,对通风系统不断进行创新,极大提高了除尘效率。Shi [4]采用物理实测数据和数值模拟分析相结合的方法模拟实际工况,分析了粉尘控制系统在实际工况下设备的合理性和有效性,研究了粉尘浓度分布数值模拟二级平台。Zhou [5]等认为利用采煤机除尘风机实现综采工作面采煤过程中的有效降尘效果,对风流-粉尘规律进行了数值模拟,并将仿真结果与实验实测和现场试验相结合,研制出新型液压轴流除尘割煤风机。Zhang [6]等人通过开发梯形风幕解决异形粉尘控制区的粉尘控制要求,通过数值模拟实现了风幕机组的结构优化。为探索改善隧道空气质量的方法,Liu [7]等人采用数值模拟研究隧道通风系统控制岩尘的方法,确定了隧道不同参数下的降尘效果。以提高多产尘点除尘效率为目的,Jing [8]等人提出一种新型涡流吹吸尘控制技术,相比于单吸尘控制技术除尘效率更优。Liu [9]

¹https://paper.people.com.cn/rmrhwb/html/2023-01/28/content_25961122.htm

等人基于旋流射流理论设计了涡流除尘一体化系统,并通过数值模拟测试了粉尘控制和除尘效果。Nie [10] 等人基于含尘风流机械风助力负压吸尘结合喷雾降尘原理,研究了一种新型风辅助喷雾装置,通过对风辅助喷淋装置进行数值模拟并结合正交试验,验证了装置的可靠性。

CFD 数值模拟的广泛使用取得了一些成果,此外,对于空气幕的阻尘效果,研究人员也进行了相关研究。Wang 等人[11]采用 Fluent 仿真结合实验方法,分析了风幕机直径和内部风道结构对风幕机单一形状的影响,并研究了实际施工隧道中均匀通风对防尘隔热的影响。Liu 等人[12]研究了使用未完全覆盖房间宽度的再循环风幕的效果及再循环风幕对风幕长度、抽风位置和污染源位置的影响。Liu 等人[13]采用数值模拟和现场测量相结合的方法,研究了未使用风幕发生器和使用不同位置的风幕发生器时产生的粉尘污染的扩散特性。Xiao 等人[14]以小容积横流风幕发生器为研究对象,通过实验和 FLUENT 数值模拟研究了风幕发生器截面积、送风槽和导流叶片 3 个结构参数对成型风幕机均匀性、扩散率和偏差的影响。Li 等人[15]采用单因素设计研究了导叶间距、截面和导叶角度对风幕的影响。

尽管众多研究人员对粉尘控制进行了大量的研究,但当前开发的控-除尘设备受限于应用条件,不能发挥其最佳应用效果。当前较为先进的螺旋式风幕发生器,其在现场实际应用时对粉尘的控制有着优秀的效果。但其本身体积较为庞大,对于一些低矮隧道无法应用。在隧道推进过程中,由于其过于笨重的特性,拆卸并进行再安装时相当不方便。为解决上述问题,本文提出一种新式压风导流调控通风系统,采用计算流体动力学(CFD)数值模拟方法,研究对粉尘污染物的控制效果。通过对比传统压入式通风系统,确定新式通风系统的控-除尘效果。并在掘进过程中确定压风筒最优安装方案,为改善掘进工作面生产环境提供理论指导。

2. 建立 CFD 模型

2.1. 建立全尺寸物理模型

以大柳塔煤矿 52,608 运顺掘进工作面为研究对象进行研究。对于传统压入式通风系统,其主要设备由掘锚机、梭车、压风筒构成。隧道断面尺寸为长 60 m,宽 5.4 m,高 4.2 m。掘锚机为 MB670 型掘锚机,长 1.12、宽 5 m、高 3.2 m。掘锚机切割工作面产生煤炭,通过梭车将煤炭向隧道出口运出。压风筒为阻燃柔性正压风筒,每段风筒长 8 m,直径 0.6 m,悬挂于隧道顶板靠近左侧壁处。对于新式压风导流调控通风系统,增加了抽风筒、除尘风机,并在压风筒出风口前端安装压风导流智能调控与自移装置(以下简称导流装置(diversion stall))。导流装置包括控制器、遮风挡板、杠杆、动力电机、C 形固定装置、行走机构、钢丝绳,通过阻挡压风筒风流形成稳定的挡尘空气幕。装置悬挂于钢丝绳上,装置的移动通过控制器控制行走机构在钢丝绳上移动实现。行走机构安装于 C 形固定装置内部,包括动力电机、齿轮、滚轮。行走机构的机械结构为齿轮传动结构:动力电机运转带动齿轮#1 旋转,通过齿轮传动带动齿轮#2 旋转。齿轮#2 通过转轴与滚轮连接,滚轮在钢丝绳上滚动,从而实现装置在钢丝绳上行走的功能。该装置材质轻,移动及拆卸方便;体积小,可以适用于不同尺寸的隧道。利用 Solidworks 建立了两种通风系统的 1:1 等比例的物理模型。为保证模拟过程的准确性,保留设备主要功能,对结构进行适当简化。新式压风导流调控通风系统的设备布置如图 1 所示,其中抽风筒进风口距掘进工作面 5 m,抽风筒直径 0.6 m,导流装置距压风筒出风口 2 m。除抽风筒、除尘风机、导流装置外,两种通风系统设备布置情况均相同。

2.2. 网格划分与独立性检验

模拟的结果与网格精细化程度有关,这直接决定了模拟中离散误差的大小,因此需要进行网格独立性检验。将建立的物理模型导入 ICEM-CFD 生成三种非结构化网格,网格质量分别为低、中和高(分别表示为网格 A、B 和 C),通过风场模拟确定不同质量网格的差异性。在隧道左侧距离工作面 30 m 的范围内均匀选取 30 个测量点测量风速的差异。图 2 展示了不同网格下的风速测量结果。不同质量网格模拟结果

接近, 其中网格质量 B、C 模拟结果较为接近。网格质量为 A 时, 网格质量较低, 风流模拟时产生较大误差, 测量结果与网格 B、C 相比差距较大。在综合考虑模拟结果及美观程度, 选取 C 网格进行数值模拟。总共获得了 1,610,063 个网格, 最小网格质量为 0.120933, 最大网格质量为 0.999494, 平均网格质量为 0.734989873067。图 3 展示了网格的质量分布情况。网格质量超过 0.45 的网格占总数的 99.87%, 网格质量较好, 可用于数值模拟。

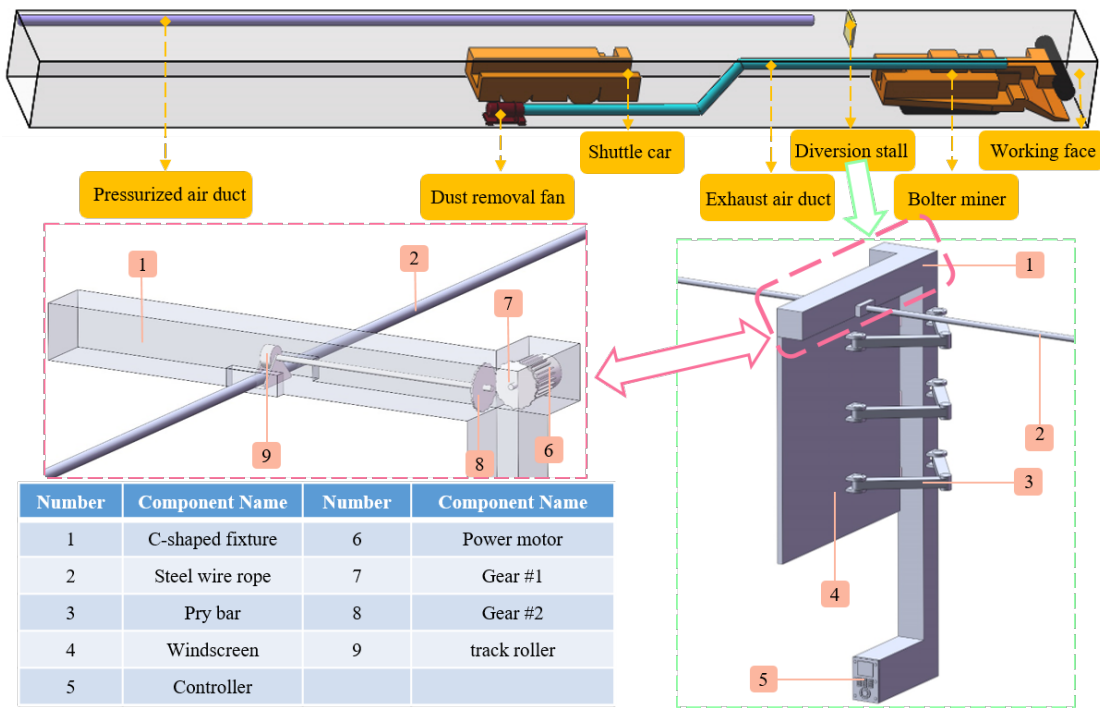


Figure 1. Full-size physical model and flow guiding device structure
图 1. 全尺寸物理模型及导流装置组成结构

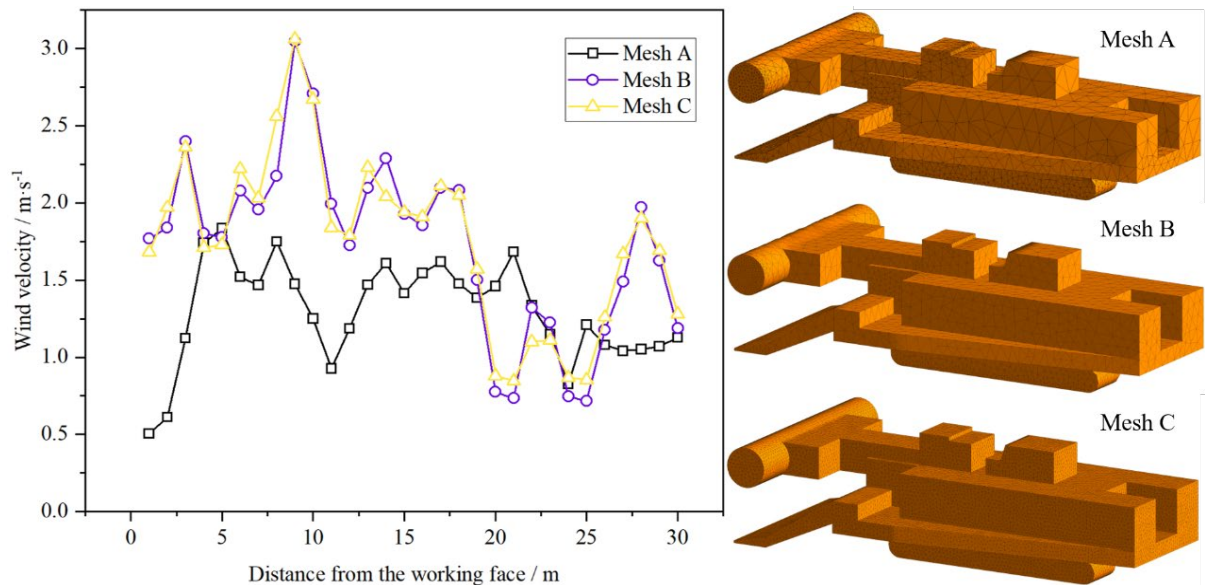


Figure 2. Mesh independence test
图 2. 网格独立性检验

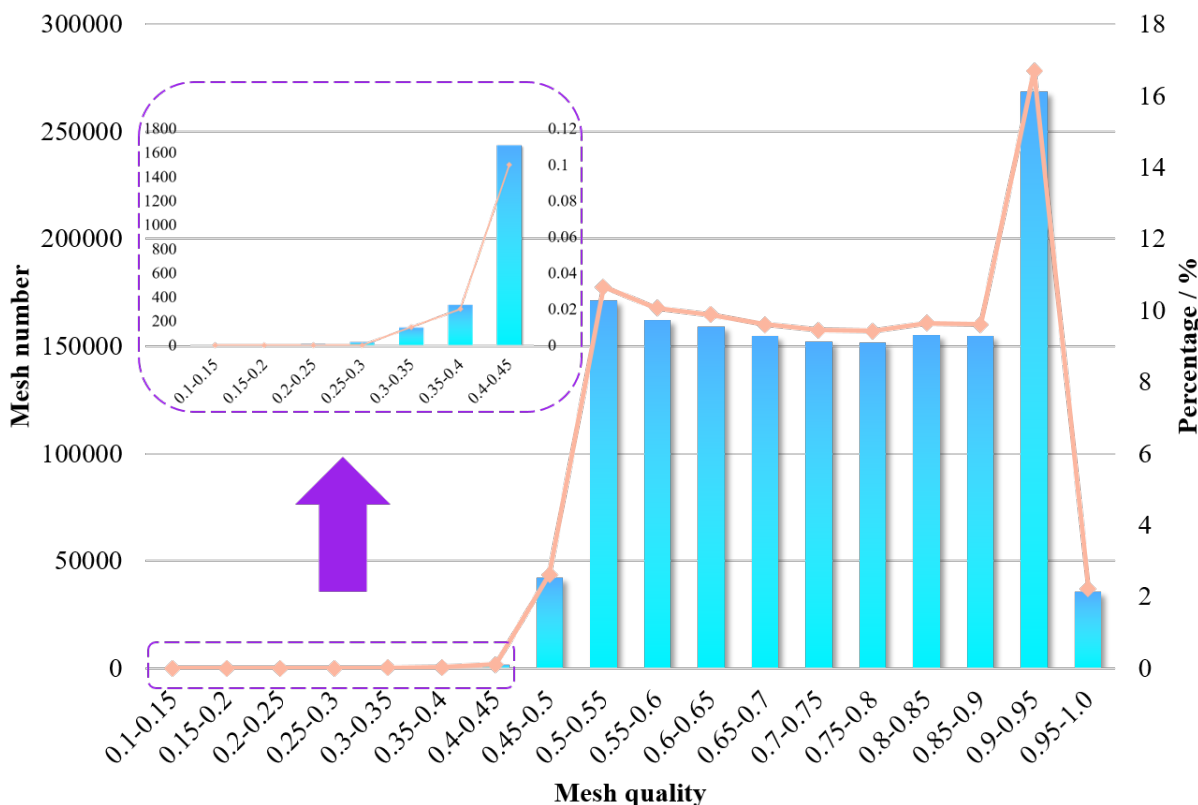


Figure 3. Mesh quality distribution
图 3. 网格质量分布

3. 模拟结果可视化分析

基于 CFD 模型，进行数值模拟研究新式压风导流调控通风系统的风流 - 粉尘耦合行为，通过对比传统压入式通风系统，分析其气流结构与粉尘扩散的规律，以此确定粉尘控制方案，为新式压风导流调控通风系统的现场应用提供理论指导。

3.1. 两种通风系统气流结构研究

为了研究新式压风导流调控通风系统的控 - 除尘效果，分别模拟了传统压入式通风系统与新式压风导流调控通风系统的风流 - 粉尘耦合特征。对于传统压入式通风系统，压风量为 $600 \text{ m}^3/\text{min}$ ，压风筒出风口距离工作面 15 m 。对于新式压风导流调控通风系统，压风量为 $600 \text{ m}^3/\text{min}$ ，抽风量为 $400 \text{ m}^3/\text{min}$ ，压风筒出风口距离工作面 15 m ，导流装置设置于压风筒出风口前侧 2 m 处，抽风筒进风口距离工作面 5 m 。图 4 为两种通风系统风流 - 粉尘耦合结果。为了有效地表示气流速度，最大气流速度 (15 m/s) 和最小气流速度 (0 m/s) 在彩虹柱中用红色和蓝色标记。

由图 4 可知：

1) 对于传统压入式通风系统，压风筒以 35.37 m/s 的速度向工作面注入高速射流，由于卷吸效应，高速射流吸入周围空气，射流横截面增大。由于空气阻力的存在，随着移动距离的增加，风流动能消耗导致风速逐渐降低。受隧道空间的限制，风流撞击工作面和右侧隧道壁，形成与初始方向相反的回流，向隧道出口方向移动。由于压风筒出风口不断供给高速射流，根据伯努利定理，隧道前端风流流速快，使得隧道前端压强减小，形成负压区域。

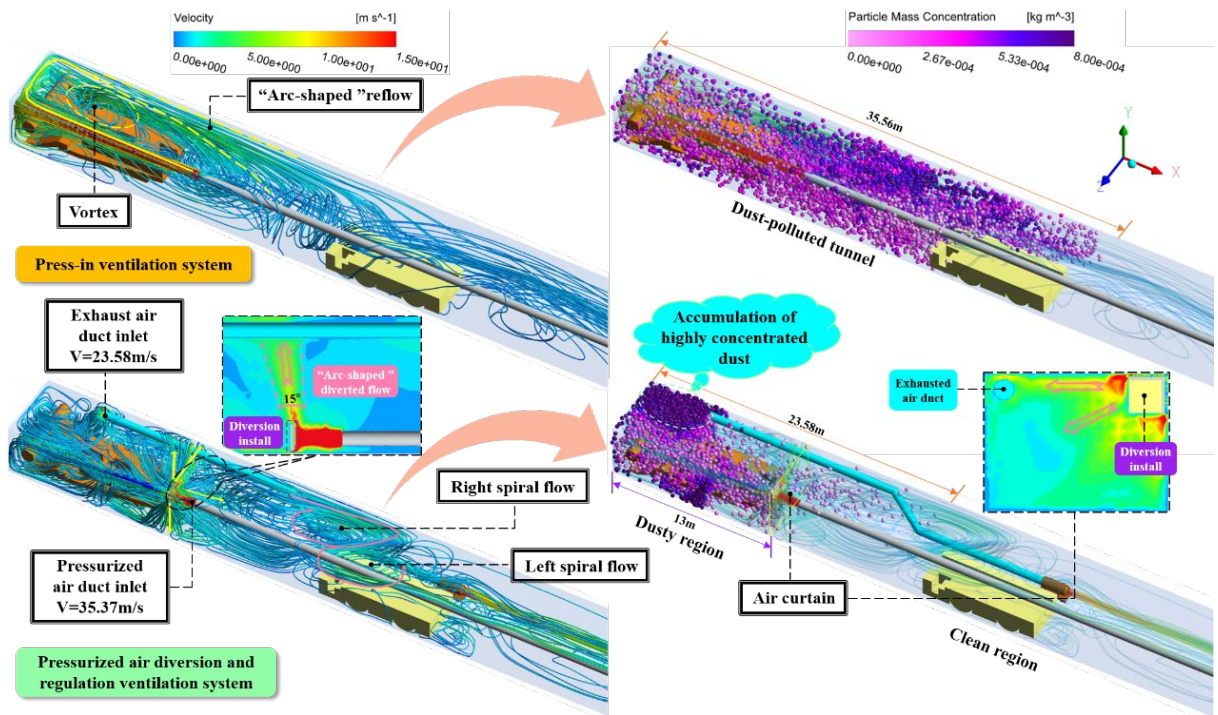


Figure 4. Airflow-dust coupling results for the two ventilation systems
 图 4. 两种通风系统风流 - 粉尘耦合结果

2) 部分回风流受负压区域影响, 向压风筒靠近, 与高速射流汇合形成二次射流, 在距离工作面 15 m 范围内形成涡流风场。回风流的另一部分向隧道后部移动, 两部分风流呈弧形扩散, 形成“弧形”回风流。之后风流超过梭车, 风速保持在 0.54 m/s 以下, 形成稳定风场。

3) 对于新式压风导流调控通风系统, 压风筒同样以 35.37 m/s 的速度注入高速射流, 撞击导流装置后沿正方形挡风挡板平面扩散。到达挡板边缘以弧形沿水平方向扩散, 形成“弧形”导流, 角度约为 15°。垂直方向向隧道右侧壁及底板方向移动, 在距离工作面约 13 m 的位置形成覆盖范围为向工作面倾斜 15° 的纵向空气幕, 阻止粉尘大规模向隧道出口扩散。

4) 风流接触右侧壁与底板后在附壁效应下形成两个方向的分流(向前和向后)。风流接触底板后, 由于掘锚机的存在, 向前的分流受到阻挡发生转向, 在右侧壁附近与向后的分流汇合。此时汇合风流速较快, 且有向顶板流动的趋势, 在距工作面 20 m 处到达顶板附近, 速度逐渐降低, 保持在 1.5 m/s 以下。由于压风筒出风口高速射流通过卷吸作用形成负压区域, 汇合风流速度降低后受到负压区域影响向左侧壁及工作面方向移动。撞击左侧壁后在风流两侧形成左、右螺旋风流(逆时针方向为左旋, 相反为右旋)。

5) 抽风筒在除尘风机的影响下将周围空气吸入, 形成 23.58 m/s 的除尘风流。由于导流装置的存在, 压风筒的高速射流对掘锚机上方的气流干扰较小, 隧道前端主要受除尘风流的影响。风流集中存在于掘锚机上部。

3.2. 两种通风系统粉尘行为对比研究

图 5 显示了两种通风系统隧道内粉尘分布情况。同样, 为了有效地表示粉尘浓度, 彩虹柱中的最大浓度(800 mg/m³)和最低浓度(0 mg/m³)用 indigo 和粉色标记。我们规定, 粉尘浓度小于 400 mg/m³ 的区域称为相对低粉尘浓度区域, 粉尘浓度大于 400 mg/m³ 的区域称为相对高粉尘浓度区域。

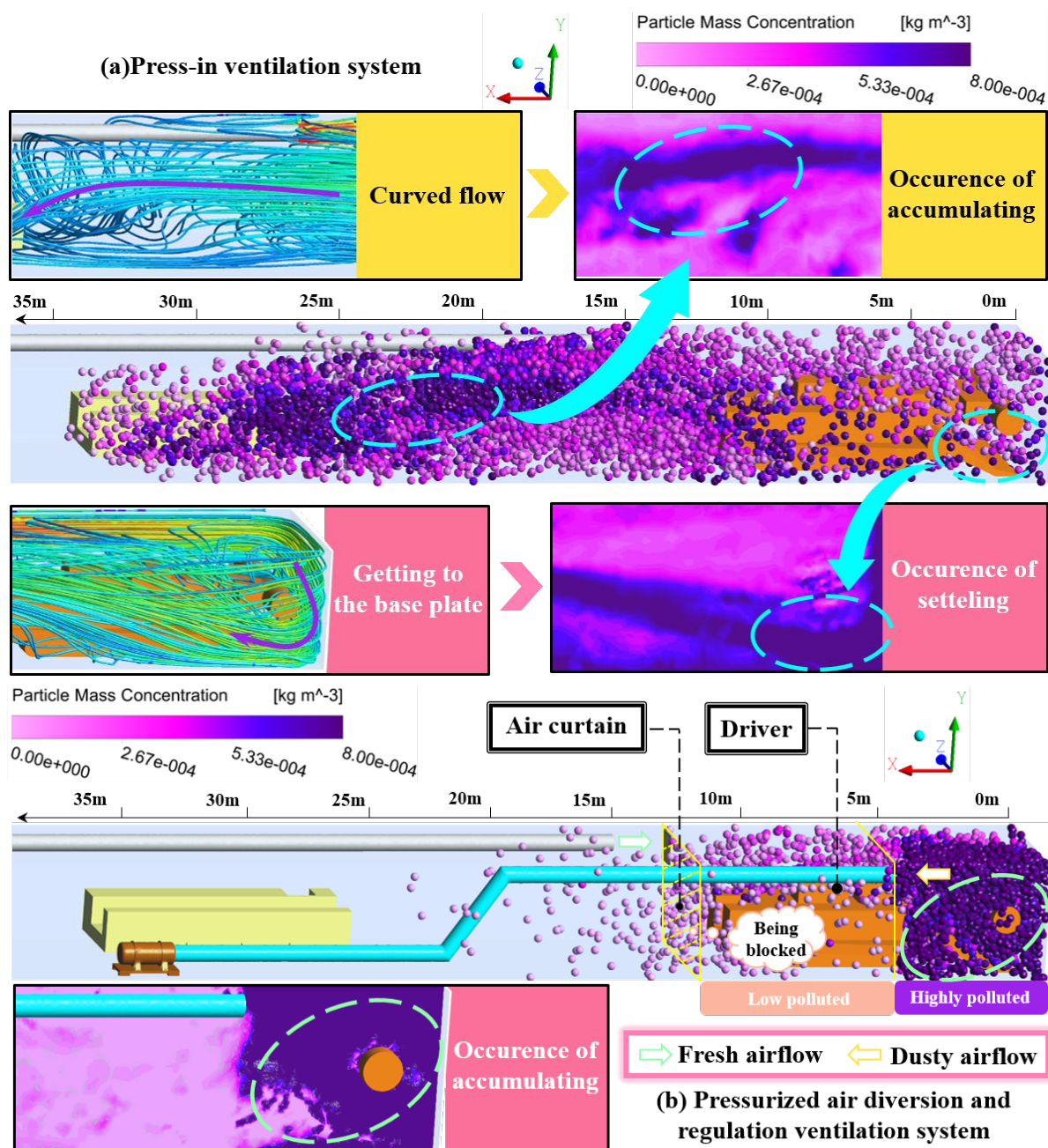


Figure 5. Dust distribution results for the two ventilation systems
图 5. 两种通风系统粉尘分布结果

由图 4 和 5 所示:

1) 对于传统压入式通风系统, 当开始掘进工程后, 工作面随即产生大量粉尘。高速射流撞击工作面后形成含尘风流, 在撞击右侧壁后, 向隧道后部扩散。此时风流流速较快, 粉尘扩散状态随风流发生变化, 颗粒间距较大。由于高速射流不断补充, 工作面不断被风流冲刷, 粉尘难以聚集, 使得隧道前端粉尘分布稀疏, 传统压入式通风系统巷道内的平均粉尘浓度为 175.32 mg/m^3 。

2) 如图 5(a)所示, 高浓度粉尘主要聚集在圆圈标注的两处位置。风流流经掘锚机与右侧壁, 此处空间狭小, 粉尘被风流携带至此。由于空间限制和自身重力影响, 不能第一时间扩散开, 粉尘逐渐聚集, 发

生沉降, 导致浓度升高。其余粉尘以更为分散的状态向隧道后方扩散。在距离工作面 12~25 m (即掘锚机后端至梭车前端范围内), 由于不存在障碍物, 粉尘大面积扩散, 整个区域粉尘数量较多。此范围内, 高浓度粉尘集中于右侧壁上部, 这是由于回流速度降低, 所携带粉尘自身具有粘附性, 附着于右侧壁并开始堆积导致的。随着时间的推移, 粉尘会逐渐蔓延至梭车司机处。风流流速降低导致粉尘在梭车司机位置流动减慢, 梭车司机处粉尘浓度将会进一步升高。由于系统中不存在除尘设备, 这将对梭车司机造成巨大伤害。

3) 对于新式压风导流调控通风系统, 由于导流装置的存在, 压风筒喷射的高速射流不能直接冲刷工作面, 工作面产生的粉尘受高速射流影响较小。除尘风机运作将空气由抽风筒进风口吸入, 粉尘向抽风筒进风口方向移动。如图 5(b) 圆圈标注的位置, 受抽风筒吸力影响, 高浓度粉尘聚集于右侧壁与掘锚机之间。受除尘风机除尘效率的限制, 到达抽风筒进风口的粉尘不能全部被抽风筒吸入, 高浓度粉尘分布在距离工作面 6 m 的范围内。

4) 观察图 4 和图 5(b) 新式压风导流调控通风系统中粉尘扩散情况, 空气幕将隧道分隔为 0~13 m 的含尘区域和 13~60 m 的清洁区域。含尘区域主要表现为距离工作面 0~6 m 无人作业区域和 6~13 m 的掘锚机司机作业区域, 超过 700 mg/m^3 的高浓度粉尘被集中控制在无人作业区域。掘锚机司机位于抽风筒进风口后侧, 远离高浓度粉尘, 除尘风机进一步降低了粉尘浓度, 对司机危害较小。大部分粉尘无法通过空气幕, 只有少量粉尘逸出。逸出的粉尘浓度较小, 分布稀疏, 对梭车司机危害较小。

传统压入式通风系统仅依靠压风筒提供风量满足人员呼吸及减少隧道前端粉尘。粉尘扩散较快, 扩散距离达到 35.56 m。隧道右侧粉尘浓度高于左侧, 缺少限制粉尘移动的手段, 生产过程的粉尘仍停留在隧道中, 隧道整体环境较差。新式压风导流调控通风系统在传统压入式通风系统基础上加入导流装置和除尘装置, 所形成的空气幕有效地阻挡了高浓度粉尘的扩散。少量逸出的粉尘, 总体扩散距离仅为 23.58 m。对于堆积的粉尘经除尘装置去除, 粉尘浓度控制在安全水平, 整体隧道环境良好。

空气幕将大量粉尘阻隔在隧道前端, 有利于隧道控尘, 改善梭车司机的呼吸环境, 这是改善作业环境的第一重保障。当粉尘的扩散被阻隔, 抽风筒和除尘风机的存在大大减少了隧道前端局部空间内的粉尘浓度, 有利于隧道降尘, 保证掘锚车司机处于较为良好的呼吸环境中, 这是改善作业环境的第二重保障。因此, 本发明具有可观的应用前景。

3.3. 动态掘进过程粉尘污染控制规律研究

随着掘进工程的进行, 隧道工作面不断向前推进, 压风筒距工作面的距离不断增加。为满足生产供风的需要, 当该距离达到一定值时, 应接入一段新的柔性风筒, 该距离记为 D 。在实际生产过程中, 为了不影响施工, D 一般不小于 3 m。为此, 应用新式压风导流调控通风系统, 模拟了 D 分别为 4、8、12、16、20 m, 压、抽风量比为 1.5 的 5 组气流 - 粉尘耦合扩散结果, 并据此分析粉尘污染特征。图 6 显示了不同距离 D 下的风流结构。

1) 当 $D=4 \text{ m}$ (D_1) 时, 此时压风筒出风口距工作面为 4 m。导流装置位于压风筒出风口前端, 装置距离工作面仅有 2 m。压风筒喷出的高速射流在撞击导流装置后沿遮风挡板平面扩散。小部分风流向工作面方向发生偏移。由于装置距工作面较近, 发生偏移的风流直接冲击工作面。大部分风流沿水平方向到达抽风筒进风口附近, 被抽风筒吸入。未被吸入的部分撞击右侧壁向底板及出口方向流动, 风流接触底板后有向上流动的趋势。受高速射流形成的负压区域影响, 产生回流, 流动方向指向压风筒出风口。之后与高速射流汇合形成二次射流, 形成覆盖范围为 8 m 的涡流场。

2) 当工作面向前推进 4 m (D_2) 时, 此时导流装置仍处于掘锚机上方。沿挡板平面扩散形成的空气幕处于掘锚机司机前方, 不断有新鲜风流补充。随着工作面继续推进 4 m (D_3), 此时导流装置距工作面 10 m, 位于掘锚机尾部。沿挡板平面扩散的风流到达右侧壁与底板附近, 之后形成两个方向的分流(向前和

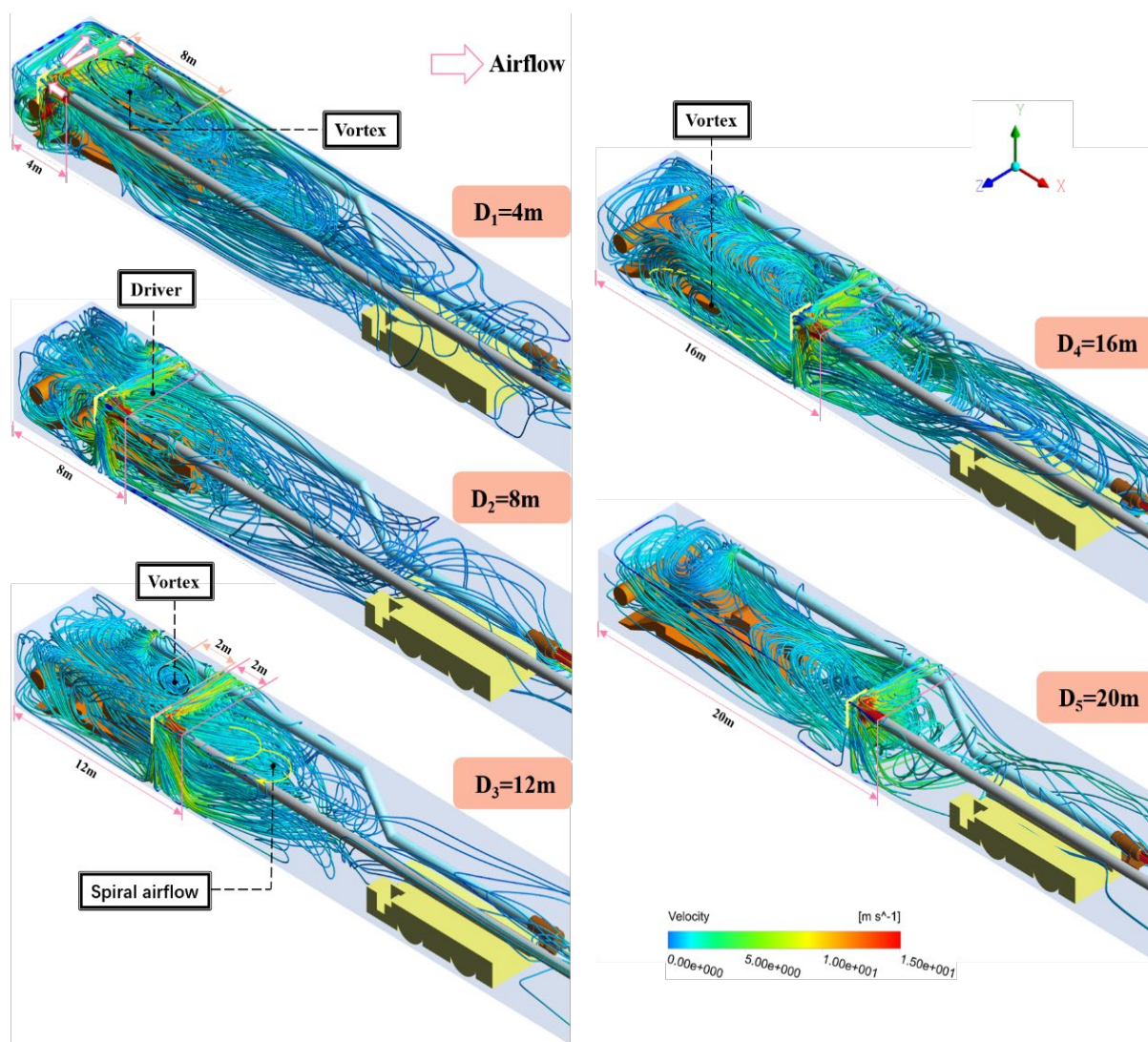


Figure 6. Airflow structure at different distances D
图 6. 不同距离 D 下的风流结构

向后)。向前的分流受掘锚机阻挡，在掘锚机司机右侧形成覆盖范围为 2 m 的涡流场。向后的分流受高速射流负压区域影响，再次流向压风筒出风口，形成螺旋气流。D = 16 m (D_4) 时，掘锚机与左侧壁之间形成纵向涡流场。当压风筒出风口距离工作面超过 16 m (D_4 - D_5) 时，此时形成的空气幕不再被掘锚机阻挡，覆盖范围大。

图 7 展示了不同距离 D 下的粉尘扩散结果。当 D = 4 m (D_1) 时，由于导流装置距离工作面过近，沿挡板扩散的风流发生偏移直接冲击工作面。粉尘被风流携带向隧道出口快速移动，空气幕阻尘效果不明显，这不利于控 - 除尘。粉尘大规模扩散，抽风筒所吸入粉尘较少，粉尘扩散距离远，整个隧道分布了大量粉尘。当 $D \geq 8$ m (D_2 - D_5) 时，此时导流装置位于压风筒出风口后部。沿挡板扩散的风流无法直接到达工作面，大多数粉尘被较好地限制在工作面与导流装置之间的范围内。其中当 D = 8、12 m (D_2 - D_3) 时，粉尘聚集于工作面与导流装置之间，粉尘移动范围受限，分布密集，导致浓度较高。当 $D \geq 16$ m (D_4 - D_5) 时，工作面与导流装置之间移动空间较大，随着与工作面距离的增大，粉尘浓度有所降低。隧道抽风筒侧堆积的粉尘第一时间被抽风筒吸入，浓度进一步降低。而压风筒侧的粉尘受空间限制，风流流速低，

在左侧壁与掘锚机之间停滞并发生沉降。隧道左侧粉尘浓度比右侧高。

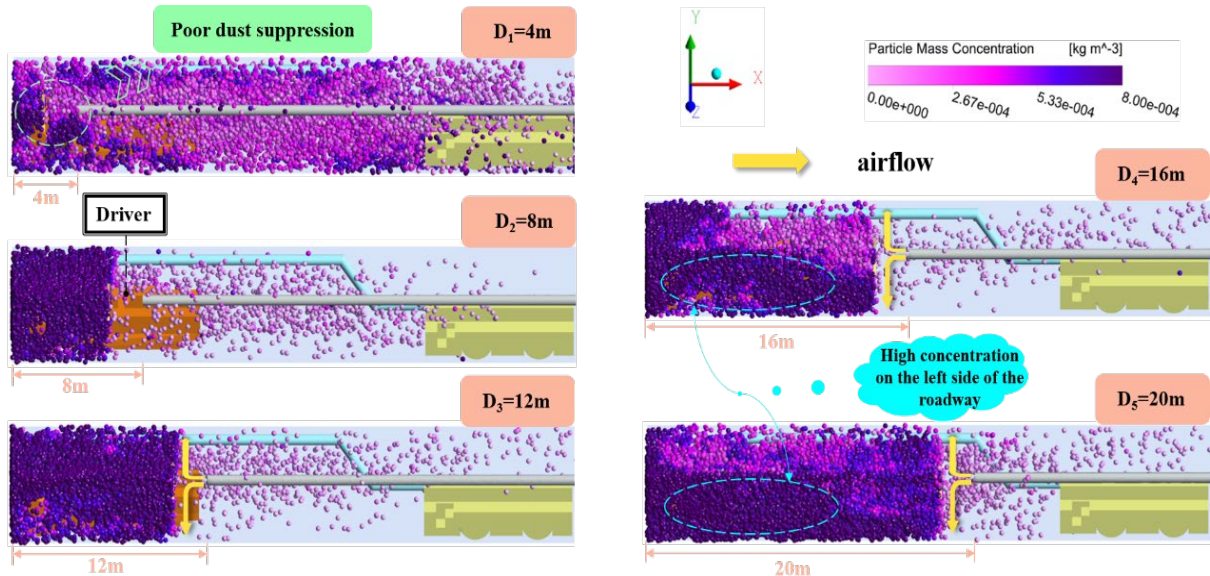


Figure 7. Dust diffusion at different distances D
图 7. 不同距离 D 下的粉尘扩散情况

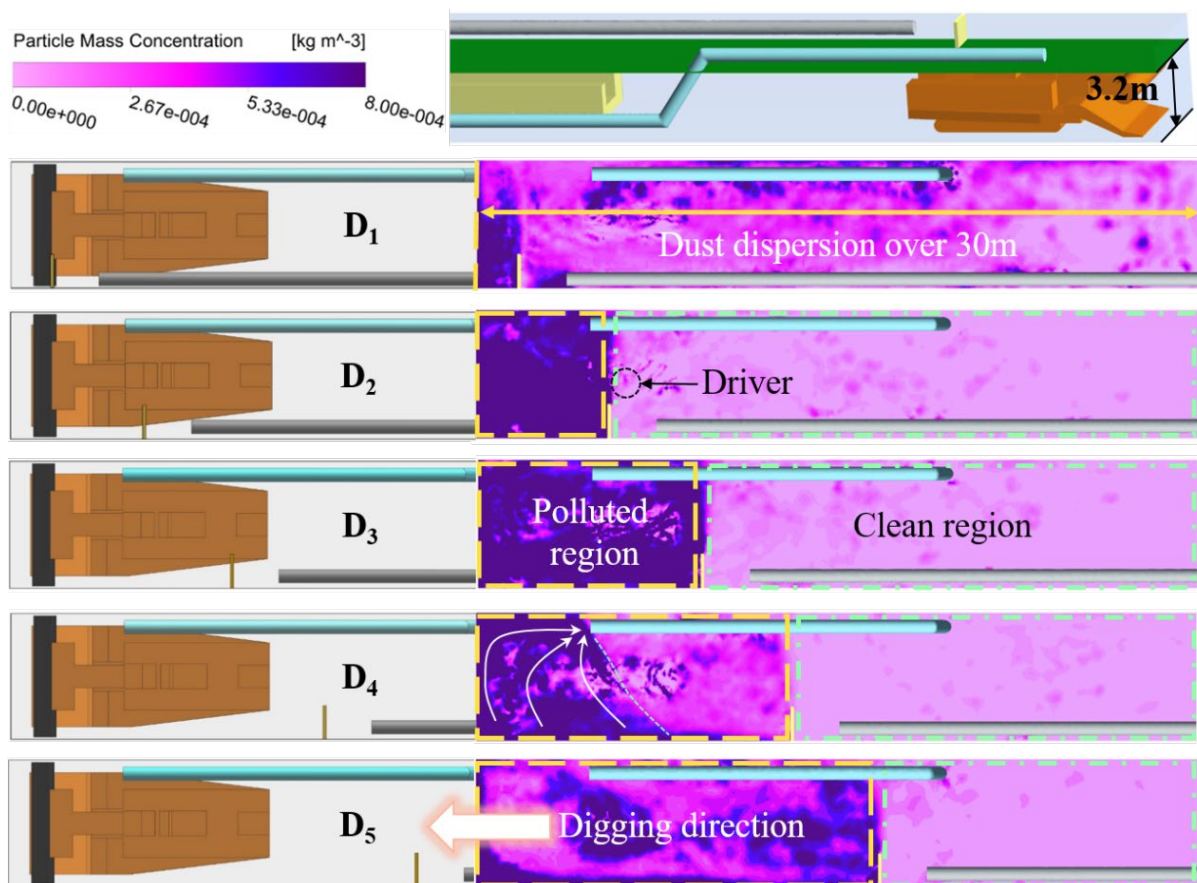


Figure 8. Dust distribution at the breathing height of the roadheader operator
图 8. 掘锚机司机呼吸高度粉尘分布情况

图 8 展示了掘锚机司机呼吸高度粉尘污染情况。 $D = 4 \text{ m}$ (D_1)时, 空气幕不能有效阻隔粉尘, 高浓度粉尘聚集在工作面附近及抽风筒侧隧道。粉尘扩散距离超过 30 m , 隧道整体环境较差。 $D \geq 8 \text{ m}$ (D_2 - D_5)时, 导流装置形成的空气幕将隧道分隔为污染区域和清洁区域。污染区域聚集高浓度粉尘; 清洁区域粉尘数量少, 分布稀疏, 浓度较低。 $D = 8 \text{ m}$ (D_2)时, 形成的空气幕位于掘锚机司机面前, 司机位于隧道内清洁区域。继续向前掘进 4 m (D_3)时, 掘锚机司机进入高浓度粉尘污染区域, 司机被高浓度粉尘包围。随着掘锚机继续向前掘进, 粉尘在污染区域移动范围变大, 且部分粉尘被抽风筒吸入, 司机处粉尘浓度有所下降。

3.4. 压风筒最优安装方案

新式压风导流调控通风系统在控 - 除尘方面具有一定优势, 有利于改善隧道作业环境, 减少污染。根据掘进过程供风系统不同位置导致的掘锚机司机处风流及粉尘的差异, 确定压风筒最优连接方案。

随着掘进工程的进行, 压风筒出风口与工作面的距离 D 逐渐增大。施工时, 当 D 达到一定值时, 此时压风筒距工作面较远, 无法满足供风要求, 控 - 除尘效果削弱。需要停下施工, 连接压风筒将其延长以满足供风要求。具体操作为, 将导流装置前移, 并在原来压风筒出风口位置接上新的一段柔性风筒(风筒长度为 8 m), 之后继续下一段隧道的施工。

当 $D = 4 \text{ m}$ (D_1)时, 导流装置与工作面较近, 高速射流沿挡板偏移流向工作面, 携带粉尘快速向后移动。所形成的空气幕并未能有效阻止粉尘扩散。此外, 抽风筒进风口位于导流装置后侧距离 3 m 处, 距离较近。由于逸散的粉尘扩散速度较快, 抽风筒吸入的粉尘能力有限, 大部分粉尘失去控制发生大规模扩散。此时通风系统中导流装置并未发挥作用, 仅依赖除尘风机对隧道环境进行改善。当 $D \geq 8 \text{ m}$ (D_2 - D_5)时, 高速射流沿导流装置形成的空气幕均控制了粉尘的扩散, 粉尘被有效控制在了工作面到导流装置的局部空间内。

此外, 我们选择了掘锚机司机鼻子呼吸处作为测量点, 测量该处风速和粉尘浓度, 如图 9 所示。在不同 D 值下, 平均风速均能满足作业人员呼吸的最低要求(0.25 m/s)。当 $D = 8 \text{ m}$ 时, 空气幕位于司机前方, 沿平面扩散的风流直接流向掘进机司机处。当风从人的面前吹过时, 风的区域是低压区, 人的肺部是高压区, 空气从高压区流向低压区。这时人如果想吸入空气, 就需要克服这个压力。风速越大, 产生的气压越低, 相对的气压越大, 人呼吸需要克服的压力越大, 呼吸就越困难。此时风流流速较快, 对司机影响大, 导致呼吸困难, 不利于人员作业。

根据图 9 掘锚机司机处粉尘浓度拟合曲线, 我们获得了粉尘浓度(C_D)随压风筒出风口距工作面距离(D)变化的拟合方程: $C_D = 0.1261D^4 - 6.1254D^3 + 102.51D^2 - 678.68D + 1494.6$ 。通过拟合方程可以看出, 当 $D \leq 8 \text{ m}$ 时, 拟合曲线部分的粉尘浓度出现负值。这是由于导流装置距工作面过近, 空气幕未发挥作用, 导致拟合出不符合实际情况的数据。当 $D \geq 8 \text{ m}$ 时, 司机处粉尘浓度呈现出先上升再下降再上升的趋势。当 D 约为 12.2 m 和 18.0 m 时, 粉尘浓度分别达到最大值 143.0 mg/m^3 和最小值 5.7 mg/m^3 。

通过分析, 当 $D = 4、8 \text{ m}$ 时, 均不利于施工过程的进行。所以当需要停止施工, 安装完新一段柔性风筒后, 压风筒出风口距工作面的距离 D 不应小于 8 m , 即停止施工时压风筒出风口距工作面距离 D 不应小于 16 m 。

综合考虑司机处粉尘浓度及风速, 提出了最优粉尘污染控制策略。在压、抽风量比为 1.5 的条件下, 当开启一段隧道的挖掘工程时, 初始压风筒出风口安装在距工作面 12 m (D_3)处。之后随着隧道继续掘进, 压风筒出风口距工作面距离逐渐增加, 向 $D_4、D_5$ 过渡。当压风筒出风口距工作面 20 m (D_5)时将导流装置前移, 接入新一段柔性风筒(8 m)后, 此时压风筒出风口距离工作面 $D = 12 \text{ m}$ (D_3), 开启下一段隧道的掘

进工程，以此往复。在此方案下，首先，避免了导流装置距工作面过近，失去阻尘效果。其次，避免了高速风流影响掘锚机司机呼吸。最后，根据司机处粉尘浓度拟合曲线可知，掘锚机司机处粉尘浓度最大不超过 150 mg/m^3 ，巷道内平均粉尘浓度为 98.36 mg/m^3 。保持在安全水平。在不同掘进阶段，大多数粉尘被控制在空气幕至工作面的范围内，保障了作业人员的安全。

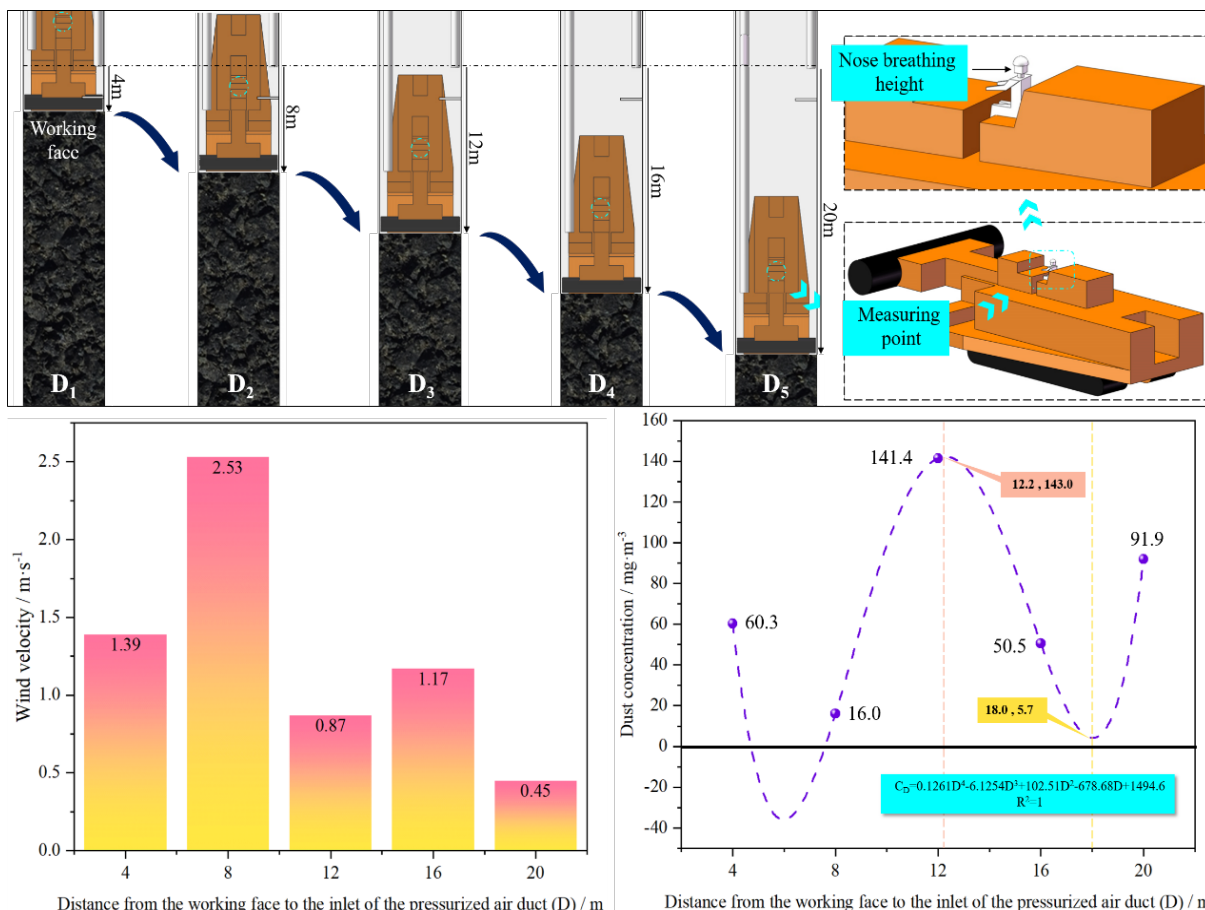


Figure 9. Wind speed, dust concentration, and fitted curves at different distances from driver D
图 9. 不同距离 D 司机处风速、粉尘浓度及拟合曲线

4. 控尘方案现场验证

我们在现场对三种情况下(D_3 - D_5)隧道内不同测量点的风速及粉尘浓度进行了测量，与模拟结果进行比较，并计算相对误差。对于测量点的选取，主要设置在隧道中作业人员作业及可能经过的位置。每组测量点一共 9 个，对他们进行编号：1~9。其中点 1 为掘锚机司机呼吸处，坐标为(7, 3.2, 0)。点 2-5 为梭车司机在隧道中运输煤炭沿途经过的点，高度为梭车司机呼吸高度，坐标分别为(A_i , 1.9, 2.2)， $A_i = 13$ 、19、25、31，点 6~9 为工作人员在隧道中行走时经过的点，距底板 1.5 m，坐标分别为(B_i , 1.5, -1.2)， $B_i = 13$ 、19、25、31。图 10 展示了 D_3 时隧道内测量点的分布情况。使用 TSI-9545 风速仪和 CCZ-20(A)型粉尘采样器测量粉尘浓度，为降低人为测量产生的误差，每组数据在相同测量点处取多次测量的平均值。随后，将数值模拟结果与现场实测结果进行了对比，并对误差进行了计算。

根据表 1~3，分析结果表明，风速和粉尘浓度的实测值与模拟值的相对误差分别为 1.1%~17.34%和 0.00%~14.29%。结果表明，误差大多在 10%以内，数值模拟结果与现场实际情况吻合较好。

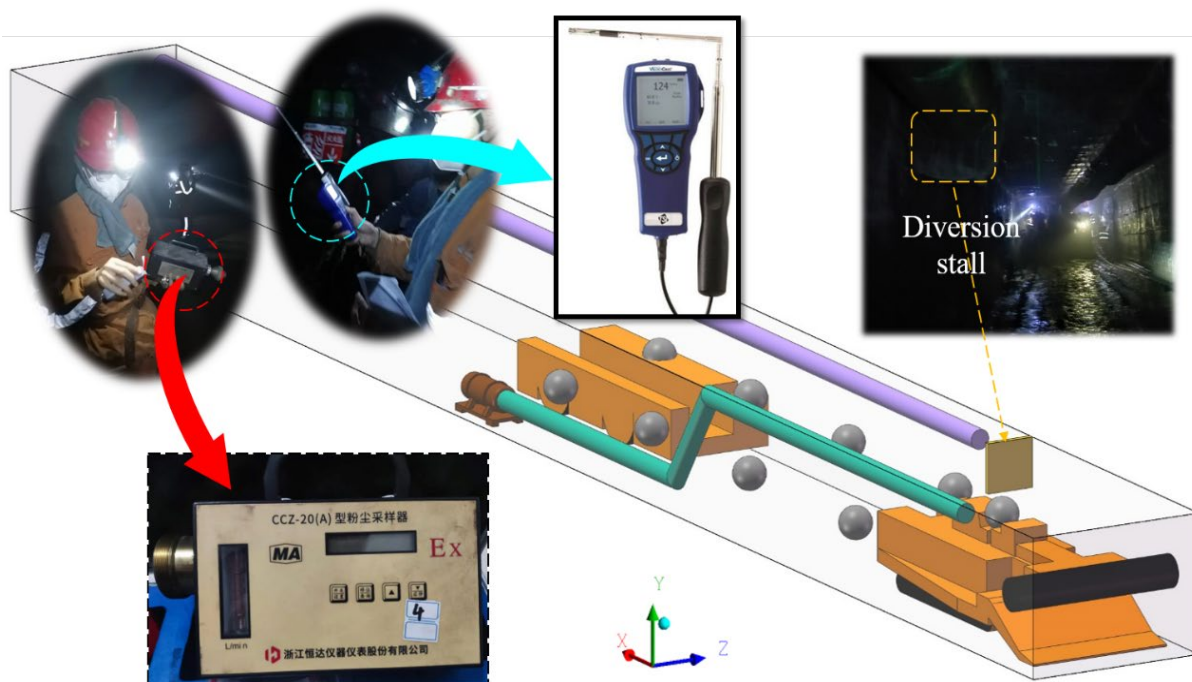


Figure 10. Distribution of measurement points measured on site

图 10. 现场实测的测量点分布

Table 1. Wind speed and dust concentration at each measurement point D₃

表 1. D₃ 各测点风速及粉尘浓度

Measuring point	Wind speed (m/s)			Dust Concentration (mg/m ³)		
	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)
1	0.82	0.87	6.1	125.8	141.4	12.4
2	1.53	1.67	9.15	4.2	4.5	7.14
3	0.67	0.56	16.42	0.68	0.66	2.94
4	0.45	0.42	6.67	0.51	0.49	3.92
5	0.26	0.28	7.69	0.14	0.14	0
6	1.79	1.9	6.15	15.9	16.2	1.89
7	1.25	1.34	7.2	3.7	3.2	13.51
8	0.34	0.29	14.71	0.45	0.46	2.22
9	0.25	0.27	8	0.32	0.3	6.25

Table 2. Wind speed and dust concentration at each measuring point on D₄

表 2. D₄ 各测点风速及粉尘浓度

Measuring point	Wind speed (m/s)			Dust Concentration (mg/m ³)		
	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)
1	1.07	1.17	9.35	47.2	50.5	6.99
2	2.17	1.98	8.76	87.3	92.7	6.19
3	1.45	1.54	6.21	8.4	8.5	1.19

续表

4	1.21	1.16	4.13	0.27	0.26	3.7
5	0.98	0.81	17.34	0.07	0.06	14.29
6	0.86	0.92	6.98	149.8	142.2	5.07
7	2.72	2.69	1.1	7.2	7.0	2.78
8	0.35	0.37	5.71	1.2	1.2	0
9	0.25	0.26	4	2.5	2.7	8

Table 3. Wind speed and dust concentration at each measuring point on D₅
表 3. D₅ 各测点风速及粉尘浓度

Measuring point	Wind speed (m/s)			Dust Concentration (mg/m ³)		
	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)	Measured results	Simulation results	Relative errors (%)
1	0.48	0.45	6.25	92.5	91.9	0.65
2	1.62	1.67	3.09	4.4	4.5	2.27
3	0.6	0.56	6.67	0.21	0.2	4.76
4	0.38	0.42	10.53	0.09	0.08	11.11
5	0.3	0.28	6.67	0.02	0.02	0
6	1.76	1.97	11.93	18.4	17.1	7.07
7	1.34	1.39	3.73	3.8	4.0	5.26
8	0.37	0.36	2.7	0.08	0.09	12.5
9	0.24	0.23	4.17	1.3	1.2	7.69

5. 结论

采用理论分析、数值模拟和现场实测相结合的方法，对比了传统压入式通风系统和新式压风导流调控系统的气流结构和粉尘扩散规律。传统压入式通风系统中粉尘扩散快，缺乏除尘设备，隧道环境较差。为此，发明了一种新式压风导流调控系统，实现控-除尘一体化。研究表明：

1) 新式压风导流调控通风系统所形成的空气幕有效地阻挡了粉尘的扩散。对于堆积的粉尘通过除尘装置进行去除，将粉尘浓度控制在安全水平，整体隧道环境良好。

2) 随着掘进工程的进行，隧道工作面不断向前推进，压风筒距工作面的距离 D 不断改变。对比了不同 D 下的风流-粉尘耦合扩散结果，并据此分析粉尘污染特征。当 D = 4 m (D₁)时，由于导流装置距离工作面过近，空气幕阻尘效果不明显。粉尘扩散距离远，不利于控-除尘，隧道整体环境较差。当 D ≥ 8 m (D₂-D₅)时，导流装置形成的空气幕将大多数粉尘较好地限制在工作面与导流装置之间的范围内。

3) 根据掘进过程供风系统不同位置导致的掘锚机司机处风流及粉尘的差异，确定压风筒最优安装方案为：在压、抽风量比为 1.5 的条件下，当开启一段隧道的挖掘工程时，初始压风筒出风口安装在距工作面 12 m 处。随着掘进工程的进行，当压风筒出风口距工作面 20 m 时将导流装置前移，接入新一段柔性风筒后，开启下一段隧道的掘进工程，以此往复。此时巷道内的平均粉尘浓度为 98.36 mg/m³，相比较传统压入式通风系统巷道内平均粉尘浓度，控除尘效果提高了 43.9%。在此方案下，隧道内粉尘浓度始终处于安全水平以下，保障了隧道内作业人员的安全和健康。

4) 新式压风导流调控系统中，空气幕将大量粉尘阻隔在隧道前端，有利于隧道控尘，改善梭车司机

的呼吸环境。受到阻隔粉尘，被抽风筒吸入，通过除尘风机进行净化，隧道内的粉尘浓度降低，有利于隧道降尘，保证掘锚车司机处于较为良好的呼吸环境中。该研究可为隧道掘进过程中新式通风系统的应用提供理论指导。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2023. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html, 2026-04-02.
- [2] 黄雪赞, 王冬明, 梁如意, 等. 1990-2019 年中国煤工尘肺疾病负担研究[J]. 中华疾病控制杂志, 2022, 26(8): 876-881.
- [3] 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.
- [4] Shi, J. (2021) Study on the Secondary Platform of Numerical Simulation of Dust Concentration Distribution in Underground Fully Mechanized Excavation. 2021 *2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems*, Chongqing, 28-30 May 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3469213.3472790>
- [5] Zhou, G., Feng, B., Yin, W. and Wang, J. (2018) Numerical Simulations on Airflow-Dust Diffusion Rules with the Use of Coal Cutter Dust Removal Fans and Related Engineering Applications in a Fully-Mechanized Coal Mining Face. *Powder Technology*, **339**, 354-367. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.078>
- [6] Zhang, M., Li, X., Chen, J., et al. (2022) Numerical Simulation-Based Development and Field Application of Trapezoidal Air Curtain. *Powder Technology*, **407**, Article 117661. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117661>
- [7] Liu, Q., Nie, W., Hua, Y., Wei, C., Ma, H., Liu, C., et al. (2020) Study on Airflow Migration and Rock Dust Pollution Behavior in TBM Construction Tunnel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **45**, 8785-8801. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04858-z>
- [8] Jing, D., Jia, X., Ge, S., Zhang, T. and Ma, M. (2021) Numerical Simulation and Experimental Study of Vortex Blowing Suction Dust Control in a Coal Yard with Multiple Dust Production Points. *Powder Technology*, **388**, 554-565. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.067>
- [9] Liu, X., Qian, J., Wang, E. and Zhang, Z. (2020) Study of Integrated Vortex Ventilation and Dust Removal System in Mechanized Excavation Face. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **235**, 42-51. <https://doi.org/10.1177/0954408920936795>
- [10] Nie, W., Cha, X., Bao, Q., Peng, H., Xu, C., Zhang, S., et al. (2023) Study on Dust Pollution Suppression of Mine Wind-Assisted Spray Device Based on Orthogonal Test and CFD Simulation. *Energy*, **263**, Article 125590. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125590>
- [11] Wang, H., Jiang, Z., Wang, H., Zhang, G. and Xu, S. (2023) Experimental and Simulation Study of Air Curtain Uniformity and Analysis of Air Curtain's Dust Barrier Effect. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **233**, Article 105322. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105322>
- [12] Liu, Y., Qiu, K., Shao, X., Shi, P. and Liu, Y. (2022) Effect of a Recirculated Air Curtain with Incomplete Coverage of Room Width on the Protection Zone in Ventilated Room. *Building and Environment*, **219**, Article 109219. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109219>
- [13] Liu, Q., Nie, W., Hua, Y., Peng, H. and Liu, Z. (2018) The Effects of the Installation Position of a Multi-Radial Swirling Air-Curtain Generator on Dust Diffusion and Pollution Rules in a Fully-Mechanized Excavation Face: A Case Study. *Powder Technology*, **329**, 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.01.064>
- [14] Xiao, D., Li, X., Yan, W. and Fang, Z. (2019) Experimental Investigation and Numerical Simulation of Small-Volume Transverse-Flow Air Curtain Performances. *Powder Technology*, **352**, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.063>
- [15] Li, X., Zhao, X., Jiang, Y., Zhang, M., Wang, L., Liu, Y., et al. (2021) Air Curtain Dust-Collecting Technology: Influence Factors for Air Curtain Performance. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **218**, Article 104780. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104780>