

# 铁路隧道施工过程中粉尘治理及其技术的研究

## ——以相山隧道为例

张超<sup>1</sup>, 杨玉如<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国铁路上海局集团有限公司合肥铁路枢纽工程建设指挥部, 安徽 合肥

<sup>2</sup>中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月24日

### 摘要

铁路隧道建设发展迅速, 钻爆法作为铁路隧道工程的主要施工技术, 其爆破作业会导致掌子面区域产生高浓度粉尘。粉尘扩散迅速, 既恶化作业环境, 也对施工人员构成健康风险, 甚至触发爆炸事故。本文依托相山铁路隧道施工污染物分布特性相关课题, 聚焦爆破粉尘的相关研究与其治理技术, 介绍了选题的工程背景与必要性, 梳理了国内外相关研究成果, 对比了不同研究方法, 归纳了当前该领域常用的技术手段与尚存问题, 分析了粉尘在隧道空间内的分布规律及其主控因素, 进而为现场通风方案优化和人员防护措施制定提供参考依据。

### 关键词

隧道, 钻爆法, 粉尘, 治理技术

# Research on Dust Control and Its Technology during Railway Tunnel Construction

## —A Case Study of the Xiangshan Tunnel

Chao Zhang<sup>1</sup>, Yuru Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hefei Railway Hub Project Construction Headquarters of China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hefei Anhui

<sup>2</sup>School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 24, 2026

## Abstract

Railway tunnel construction has developed rapidly, and the drill-and-blast method, as the dominant construction technology for railway tunnel engineering, produces high concentrations of respirable dust at the tunnel face during blasting operations. Rapid dispersion of these respirable particles through the confined underground space degrades air quality and imposes cumulative respiratory hazards on operatives; under certain conditions, elevated dust loads may also present explosion risks. Drawing on the research project investigating the distribution characteristics of construction pollutants in the Xiangshan railway tunnel, this study examines blast-induced fugitive dust and its mitigation strategies. It presents the engineering background and necessity of the research topic, systematically reviews relevant domestic and international research achievements, compares different research methodologies, and summarizes the commonly used technical approaches and persistent research gaps in this field. The analysis characterizes spatial dust distribution patterns and their governing parameters, offering practical guidance for ventilation optimization and formulating personnel protection measures.

## Keywords

Tunnel, Drilling and Blasting Method, Dust, Control Technology

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

目前中国铁路隧道建设中常用方法是钻爆法,然而,在实际建设铁路隧道施工时,采用钻爆方法会产生大量的粉尘,再加上隧道的半封闭空间减弱了粉尘颗粒的有效扩散,隧道内的粉尘长时间保持在较高浓度,严重降低了隧道建设机械的性能,同时威胁到施工人员的生命健康[1]。

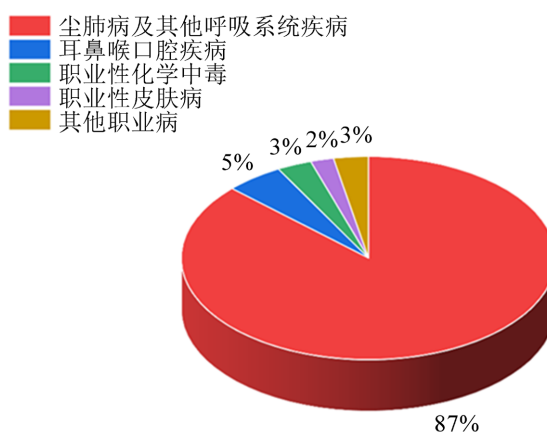


Figure 1. Pie chart of the proportion of various occupational diseases in China from 2014 to 2024

图 1. 2014~2024 年我国各类职业病占比饼状图

施工过程中产生粉尘的源头有很多,以相山隧道为例,在隧道挖掘、钻孔、爆破、装渣运输和喷混

凝土过程中都会产生大量的粉尘, 施工人员长时间处于这种高浓度的粉尘中且没有采取有效的防护措施时, 粉尘就会不断沉积在工人的肺部, 逐渐破坏正常的肺组织和功能, 从而引发尘肺病[2]。相关研究表明, 隧道施工和煤炭行业中的工人因为长期接触高浓度粉尘, 导致他们的尘肺病发病率远高于其他行业[3]。除了粉尘, 隧道施工中的氮氧化物、一氧化碳、甲烷等有害气体也会对人体生命健康造成威胁。尘肺病是一种严重的职业性肺部疾病, 在隧道工程领域, 其发病与隧道污染物的扩散有相当密切的关系。尘肺病是我国危害最严重和最常见的职业病, 约占我国所有报告职业病总数的 80%~90%, 如图 1, 截至 2021 年底, 中国累计报告职业性尘肺病患者 91.5 万人, 现存活职业性尘肺病患者大概还有 45 万人[4]。尘肺患者可能在相当长的时间内无明显症状, 从接触粉尘危害到出现症状, 可能要经过几年, 甚至几十年, 而且实际患病人数远远大于报告人数[5]。

## 2. 铁路隧道施工钻爆法

### 2.1. 铁路隧道施工方法分类

铁路隧道的施工方法主要有钻爆法、盾构法、全断面隧道掘进法等。这些方法都是基于岩土力学原理, 在不同地质条件下结合工程实际进行技术迭代后的多学科交叉隧道施工体系方法[6]。

#### (1) 钻爆法隧道施工

钻爆法是一种基于岩体力学破碎原理, 通过钻孔内部装填炸药后实施控制爆破的方式, 利用爆破产生的应力波和爆炸生成的气体对岩体进行压缩和拉伸破坏, 随后采用人工处理或者机械排渣的方式来开凿隧道的方法。该方法需要配合混凝土和锚杆或者钢拱架等主动支护技术维持围岩稳定。其核心理论依据是新奥法的围岩自承理念。钻爆法适用于山岭隧道等地质条件较硬的硬岩地层, 具有底层适应性强, 成本低等优点, 但由于存在爆破过程, 对爆破过程中的振动控制和支撑保护要求严格。

#### (2) 盾构法隧道施工

盾构法[7]是依靠一种全断面隧道掘进设备盾构机来进行隧道的挖掘的方法。盾构机通过前端的刀盘旋转切割周围的土壤和岩石, 利用螺旋输送机或泥水循环系统排除切割后的残渣, 同时将预制混凝土管片拼装形成衬砌环。盾构法适用于高水压软土的地质条件和砂卵石等地层, 存在施工过程自动化程度高, 受环境的影响有限等优点, 但盾构机的设备与维护成本较高。

#### (3) 全断面隧道掘进法隧道施工

全断面隧道掘进法[8]基于连续机械破岩机制, 使用滚刀群在掌子面施加高压实现岩体剪切破碎, 并且该方法集成支护、出渣与通风系统于一体。其掘进效率可达钻爆法的 3~5 倍, 但全断面隧道掘进法地质适应性受限, 需要在施工之前精确预探前方岩性。

### 2.2. 钻爆法施工的过程

钻爆法是以钻孔、装药、爆破为开挖手段, 以围岩结构共同作用为支护设计理论, 采用复合式衬砌结构的隧道施工方法[9]。钻爆法按照《公路隧道施工技术规范》要求其作业过程可分为爆破开挖和结构成形两个关键阶段。

#### (1) 钻爆法爆破开挖阶段

施工之前要对爆破施工位置的地质条件进行精确探测, 结合作业掌子面的围岩进行分级评定。根据《工程岩体分级标准》要求结合围岩等级确定爆破是围岩钻孔的深度和装药系数, 如: III级围岩钻孔深度控制在 3.0~3.5 m, 装药系数控制在 0.6~0.8 kg/m<sup>3</sup>。

随后进行精准钻孔作业和安装装药控制结构, 进行爆破。该过程严格按照国标规定进行操作, 使用数码电子雷管进行起爆, 保证爆破过程中的安全。在爆破结束后需要进行爆破效果评估。爆后及时对断

面进行检测, 使用三维激光扫描仪获取开挖面的形态数据。超挖量控制在 15 cm 以内, 半孔残留率不低于 80%。同时应需要对爆破振动速度进行监测, 依据萨道夫斯基公式验算质点振动速度是否满足周边建筑物安全标准。

### (2) 钻爆法结构成型阶段

搭建高效出渣系统保证施工中隧道挖掘后的残渣快速运出隧道内部。配置电动装载机与可自动卸渣的汽车联合作业, 设置隧道内临时的集渣平台, 采用分层剥离法控制装运顺序, 同时实施粉尘浓度实时监测, 确保作业环境 PM10 浓度低于  $5 \text{ mg/m}^3$ 。构建初期支护体系, 初次喷混凝土采用湿喷工艺, 采用锚杆按梅花型布置, 钢拱架安装形成支护体系, 喷射混凝土厚度通过埋设检测钉进行过程控制。

二次衬砌施工确保混凝土密实度, 完成隧道的结构框架施工, 建立三维激光扫描 - 地质雷达 - 应力监测综合检测系统, 衬砌厚度检测采用电磁波反射法, 强度发展监控应用成熟度仪。防水层施工实施气密性检测, 接缝部位进行真空负压检漏。

## 3. 污染物分布特性研究最新进展

随着铁路隧道施工机械化程度和生产强度不断提高, 铁路隧道产尘量剧增, 世界范围内对其相关研究内容也非常广泛, 但铁路隧道中粉尘污染物问题极其复杂, 严重影响铁路隧道施工生产安全。长期以来, 对于铁路隧道施工粉尘运移规律及粉尘防治有关研究持续进行, 研究铁路隧道粉尘分布和运移规律就是对微小颗粒在流体中受力分析, 气固两相流理论是研究粉尘运移规律的重要理论依据[10]。

Porras-Amores 等人[11]评估了地下建筑物的热和自然通风行为, 并解释了建筑部件在一年中不同时期被动行为。他们使用 CFD 模型考虑了地形温度梯度, 能够真实模拟地下通风情况。结果显示, 在室外温度比较极端情况下, 洞穴内依旧能够实现无消耗热稳定。通道在地下通风中起着关键性作用, 地面温度对自然通风影响较大, 通风烟道影响效果比较小。

Chen Z 等人[12]结合某铁路现场测量数值, 运用数值模拟方法研究了隧道爆炸后粉尘产生和扩散过程。使用粉尘仪检测现场粉尘浓度, 采用 Origin 软件对现场粉尘浓度进行数据拟合, 用拟合公式测算爆炸粉尘质量, 从而得出隧道周围岩石爆破产生粉尘特性。进行了三阶段(冲击波的产生、预通气和后通气)数值模拟。该研究为隧道爆破粉尘总质量计算及其数值模拟提供了方法, 为降尘策略提供了数据参考。

Chen Y C 等人[13]基于质量平衡方程和非线性参数估计法, 根据粉尘浓度随时间 - 变化的关系, 估计了粉尘沉降速率和尘源的产尘速率, 提出了产尘误差小于 2%、沉降误差小于 7% 的粉尘动态预测法。

Stovern 等人[14]研究介绍了一个可用于预测风力传输尾矿库粉尘的沉积和沉降模型。该模型利用尾矿现场的实地观测数据和气溶胶传输理论模拟来参数化模型, 包含一种用于模拟不同粒径分级沉降模式方法, 能够转化为其他地区和应用于不同风力传输尘源。该模型是利用亚利桑那州德威 - 亨伯铁王矿尾矿库数据开发的, 该尾矿库是一个受铅和砷严重污染超级基金场地。通过表层土壤的铅和砷测量值作为尾矿库风力传输粉尘示踪剂, 对该模型进行了初步验证。尾矿示踪剂支持由沉降预测模型生成预测沉降模式。

Mao 和 Alexeev [15]研究了固体椭球粒子在简单剪切流中运动。利用格子 Boltzmann 方法, 他们研究了流体惯性和颗粒转动惯量的单独作用以及它们组合在低和中等雷诺数下对球形颗粒动力学和轨迹的影响。单个球体运动取决于颗粒雷诺数、颗粒长径比、颗粒初始取向和斯托克斯数。具有随机初始取向的球体被发现在流体惯性和/或粒子惯性影响下漂移到稳定轨道。具体来说, 长椭球体向翻滚运动模式漂移, 而扁椭球体向滚动运动模式漂移。随着斯托克斯数增加, 滚球旋转周期和角速度变化量减小。随着雷诺数增大, 角速度最大值和最小值均减小, 而颗粒旋转周期增大。我们表明, 粒子惯性并不影响流体对粒子力矩。我们还证明, 在足够低雷诺数下, 叠加可以用来估计流体惯性和颗粒惯性对球形颗粒动力学综合影响。

Guo Yin 等人[16]为有效解决爆破后粉尘污染问题, 本研究在吹风通风条件下, 对爆破后 100 秒内粉尘和可吸入颗粒物的空间 - 时间演变规律进行了探究。采用欧拉 - 拉格朗日法模拟空气与粉尘耦合运动; 考虑空气流速对粉尘及可吸入颗粒物分布影响, 并利用现场实测数据验证模拟结果。研究显示, 爆破产生较重粉尘颗粒在风筒回风侧前方底部沉积; 粒径小于等于 10 微米可吸入颗粒物则更均匀地分散于整个隧道空间, 且空气流速越高, 这一过程所需时间越短。此外, 通过分析拟合颗粒物沿隧道长度方向移动距离, 可预测粉尘迁移到特定位置大概时间。本研究对粉尘和可吸入颗粒物空间 - 时间演变规律预测, 可为实际工程清洁生产提供一定指导。

我国对于粉尘防治相关研究虽然起步较晚, 但从 20 世纪 80 年代开始, 我国对于粉尘防治相关研究工作不断深入, 已经形成了扎实理论和实验基础, 对我国生产和施工过程中粉尘防治有一定指导意义。现阶段国内外对于粉尘分布特性及防治相关研究主要利用数值模拟方法进行。

陈凯等人[17]研究主题是井下综掘机在移动掘进过程中产生粉尘扩散规律。陈凯等人进行仿真建模和 CFD 模拟计算, 模拟计算了掘进机切割煤岩全过程。分析了掘进机在不同位置作业条件下粉尘扩散时空变化, 研究了司机操作区域粉尘污染情况。研究发现: 在掘进机移动切割过程中, 高浓度粉尘会跟随切割头移动轨迹同步扩散。当切割头运行到靠近回风通道一侧时, 产生粉尘会在回风气流作用下快速扩散到司机操作区。

刘荣华等人[18]在压入式通风掘进工作面风流流场结构有其自身特点基础上, 他们研究将工作面粉尘分布划分为三个区域: 射流区、回流区及涡流区, 并针对这三个不同区域分别构建了粉尘浓度计算模型。研究发现, 回流区和涡流区粉尘浓度相对较高, 而且粉尘分布较为均匀; 射流区粉尘浓度相对较低, 粉尘浓度沿着出射方向呈现变化趋势是: 距离风筒出口越远, 射流断面处粉尘平均浓度越高。此外, 射流卷吸比对掘进工作面粉尘分布均匀性有显著影响, 卷吸比值越大, 整个工作面粉尘分布越均匀。

刘晴等人[19]为深入了解综采工作面粉尘分布特性, 其研究运用数值模拟以及现场实测这两种方式, 针对采煤机截割所产生粉尘以及工作面沿程粉尘分布状况展开探究。研究显示, 在采煤机顺风割煤情形下, 顺着风流方向, 从后滚筒到前滚筒这一区域, 粉尘浓度呈现持续上升态势, 风流所引发扩散现象对粉尘浓度上升起到了较为显著推动作用; 而当采煤机处于逆风割煤状态时, 工作面沿程粉尘浓度整体上呈现出上升趋势, 尤其是在产尘源区, 粉尘浓度变化相对更为迅速, 此时滚筒自身产生粉尘成为了工作面粉尘污染关键因素。基于以上研究结果, 在采取防尘措施时, 对于顺风割煤情况, 应重点考虑风流因素对粉尘扩散影响; 而在逆风割煤时, 则需将主要精力放在针对滚筒自身产尘防控上。然而, 不论是在何种工况条件下, 截割过程所产生粉尘始终是综采工作面粉尘污染主要源头。

## 4. 污染物治理技术研究

近年来, 我国在隧道内粉尘治理技术方面的研究和应用主要包括: 喷雾除尘、泡沫除尘、通风除尘等技术。

### 4.1. 喷雾除尘技术

喷雾抑尘技术因其显著除尘功效和成本优势而被广泛应用于粉尘污染防治, 在隧道爆破作业中, 喷雾抑尘技术往往与通风除尘技术结合使用, 其喷淋抑尘效果也会随风场多变性而无法达到预期, 对此, Yang Shaokun 等[20]开展多因素正交试验, 分析风速、喷嘴口径和喷雾压力对降尘效率协同效应。喷雾抑尘技术工作机理是利用液滴通过惯性碰撞、直接拦截、静电效应、扩散效应和重力来捕获粉尘颗粒, 其中, 惯性碰撞和直接拦截起着主要作用, 飞沫捕获粉尘的机理如图 2 所示。惯性碰撞是造成直径大于 1  $\mu\text{m}$  的尘埃颗粒被液滴捕获并沉降现象主要原因, 在势流状态下, 当斯托克斯数  $K_p > 0.2$ , 惯性碰撞除尘效率可以表示为:

$$K_p = \frac{C d_p^2 \rho_p v_0}{9 \mu d_c} \tag{1}$$

$$\eta_l = \left( \frac{K_p}{K_p + 0.7} \right)^2 \tag{2}$$

在(1)中,  $\rho_p$  是粉尘密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $d_p$  是粉尘颗粒直径,  $\text{m}$ ;  $v_0$  为液滴和粉尘颗粒平均相对运动速度,  $\text{m/s}$ ;  $\mu$  为气动黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $d_c$  是液滴直径,  $\text{m}$ 。为了确保数值模拟精度, 该团队基于相似理论搭建了实验平台, 监测风速和粉尘浓度, 如图 3、图 4 所示。经数值模拟和实验对比最终得出隧道内气流场根据其稳定性可分为涡流区域、过渡区域和稳定区域三个区域, 如图 5 所示, 且当喷雾压力为 5 MPa 时, 具有较好除尘效果。

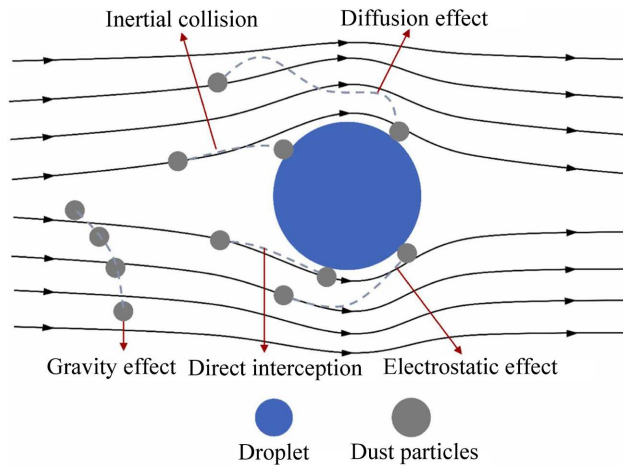


Figure 2. Mechanism of dust suppression via spraying [20]  
图 2. 喷雾抑尘机理[20]

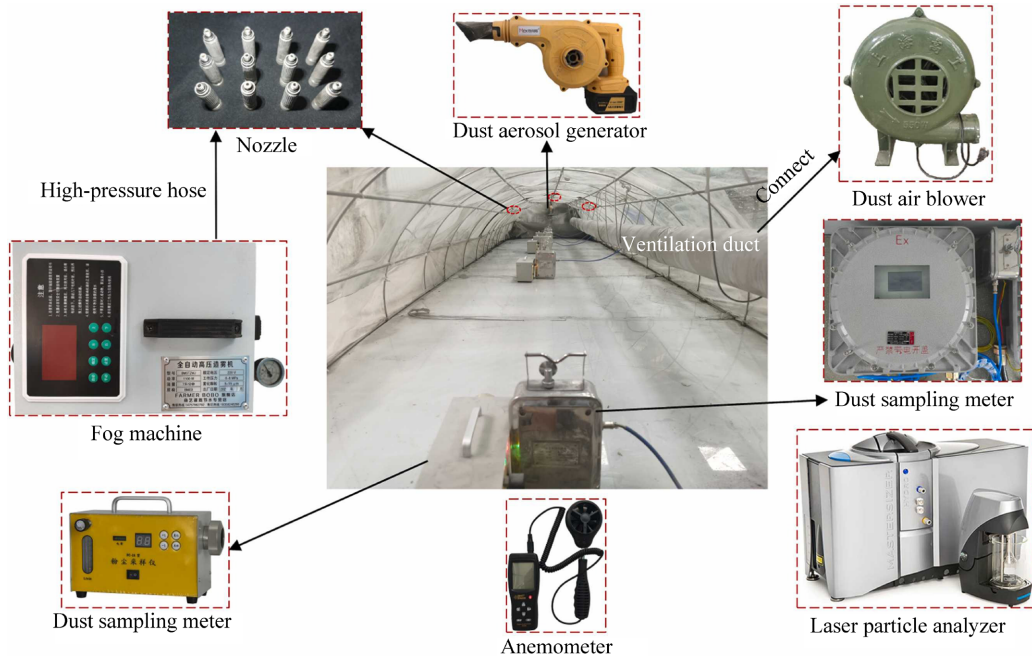


Figure 3. Experimental platform [20]  
图 3. 实验平台[20]

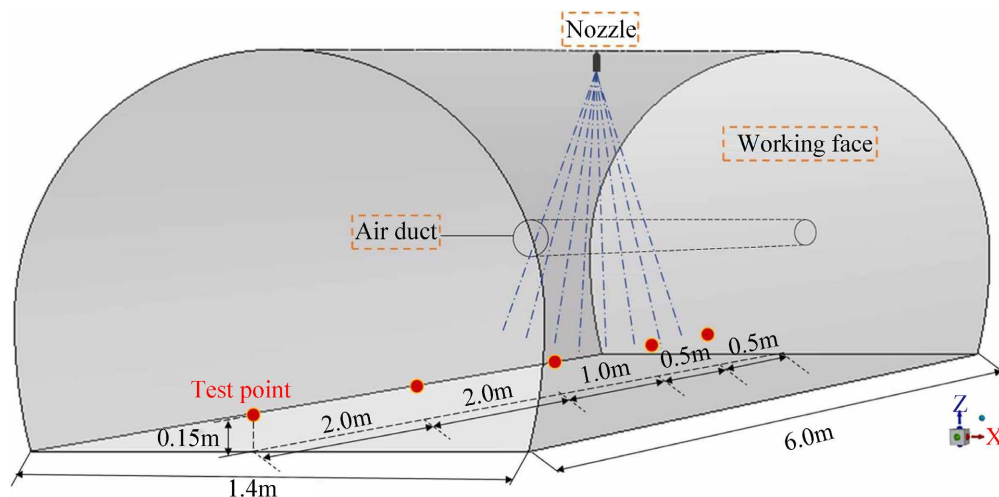


Figure 4. Monitoring station layout [20]

图 4. 监测点布局[20]

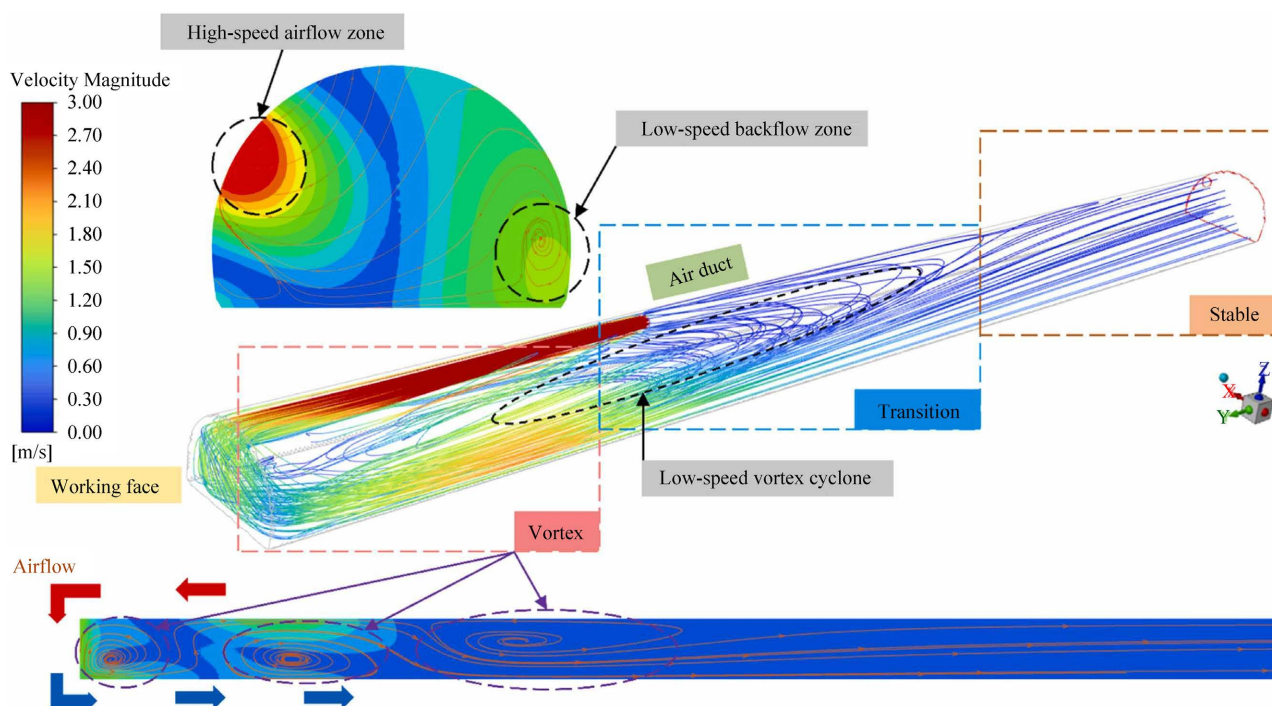


Figure 5. Results of the flow field simulation [20]

图 5. 风流场模拟结果[20]

Seaman 等[21]为开发一种可以沿着采煤机下风长壁安装的水幕, 使用实时测量方法的来评估水幕在模拟长壁环境中的沉降效率, 其实验装置图如图 6 所示, 该水幕系统由三根集流管组成, 每根集流管最多可安装 7 个喷嘴, 喷嘴间距为 0.15 m, 喷嘴选用全锥喷嘴, 实验结果如图 7 所示, 21 号喷雾配置对浮点粉尘和可吸入粉尘组分具有最高的沉降效率(KE), 并且与 6、5c、5w 和 3 号喷雾配置的总粉尘量有显著差异( $p < 0.05$ ), 并且与除可吸入粉尘的 18 号喷雾外的所有配置均有显著差异。喷雾配置之间的最宽间隔是在每个歧管的中心进行一次喷雾, 其总粉尘和可吸入粉尘的 KE 最低。该研究表明喷雾可以有效去除隧道内粉尘。

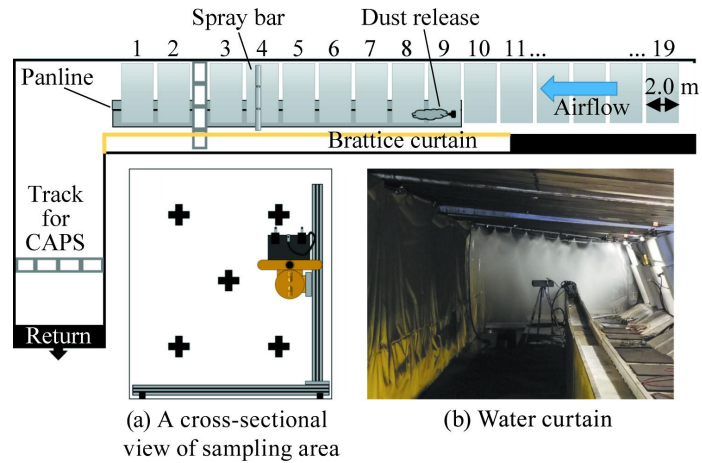


Figure 6. Schematic diagram of the experimental setup [21]

图 6. 实验装置示意图[21]

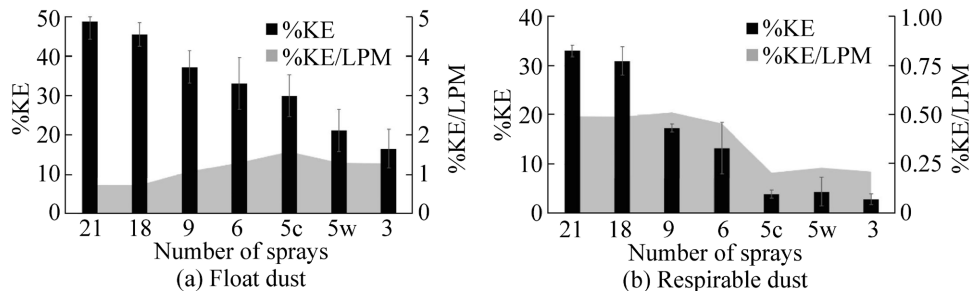


Figure 7. Experimental results [21]

图 7. 实验结果[21]

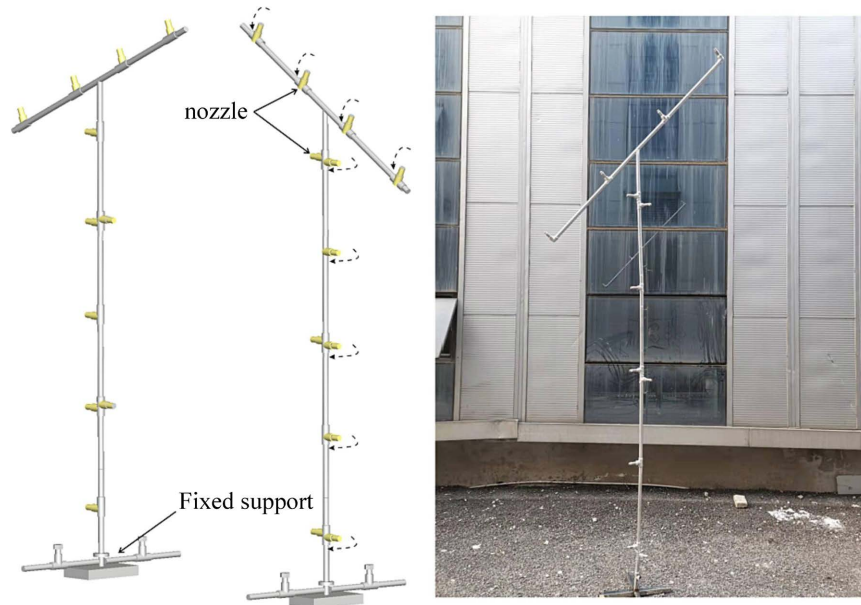


Figure 8. New zone-specific dust suppression spraying system [22]

图 8. 新型分区抑尘喷雾装置[22]

Liu Ning 等[22]研发了一种分区抑尘喷雾装置, 如图 8 所示, 该喷淋装置由立式镀锌水管、卧式镀锌

水管、三通接头和喷嘴组成。该设备的总高度为 3.17 m, 每个装置的垂直供水管道靠近隧道侧壁的侧面设置有五个喷嘴, 靠近隧道中心线的一侧设置有两个或三个喷嘴, 并交错排列, 倾斜管道设有 4 个喷嘴, 管道倾斜角度为  $30^\circ$ 。根据隧道工作面的实际情况, 建立了隧道模型和分区喷淋装置如图 9 所示, 经过模拟喷嘴不同的入射角度、喷射压力和风场对喷雾场的影响, 确定了喷嘴的最佳入射角度为  $30^\circ$ , 喷嘴应更换成细实锥喷嘴, 并在现场进行抑尘效果的检验, 如图 10 所示, 为测试新型隔断喷淋装置的降尘效率, 测定了 3 种工作环境下总粉尘和呼吸粉尘的浓度。工作环境如下: (1) 仅正常通风。(2) 在二次衬里使用喷淋装置保持正常通风。(3) 使用隔断喷淋装置。连续除尘 30 分钟后, 进行粉尘浓度测量, 结果表明在第一种工作环境下, 除尘仅依赖于隧道通风系统, 隧道掌子面附近总粉尘和呼吸性粉尘浓度达到  $54.59 \text{ mg/m}^3$  和  $39.17 \text{ mg/m}^3$ 。隧道入口处呼吸道粉尘浓度为  $34.19 \text{ mg/m}^3$ 。有必要采取粉尘控制措施。第二种工作环境是常用的粉尘控制措施。在两衬平台高压喷涂形成帷幕时, 各工作场所可吸入粉尘的粉尘效率均在 46% 以下, 降尘效果不显著。在第三种工作环境中, 呼吸粉尘和总粉尘的降尘效率均高于 70%, 比第二种工作环境的平均粉尘减量率提高了 30.02%, 入口段呼吸粉尘浓度和总粉尘浓度降至  $8.91 \text{ mg/m}^3$  和  $8.81 \text{ mg/m}^3$ , 可以有效防止粉尘在隧道内向外扩散。

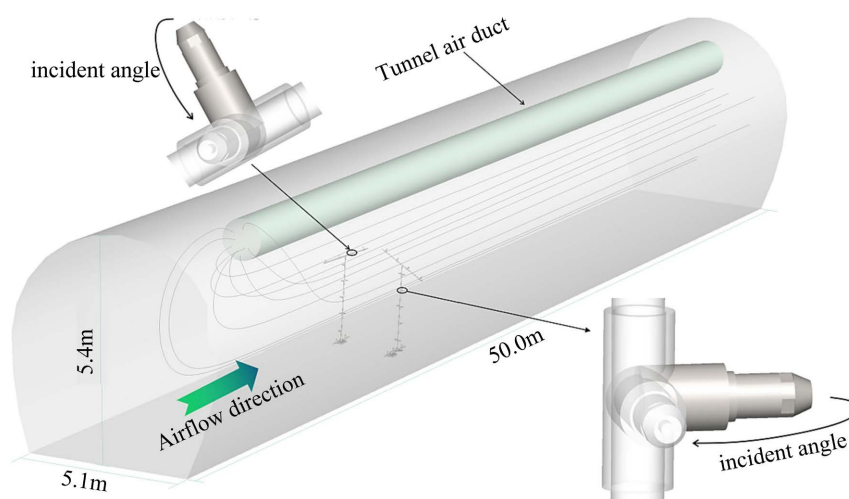


Figure 9. Physical model [22]

图 9. 物理模型[22]

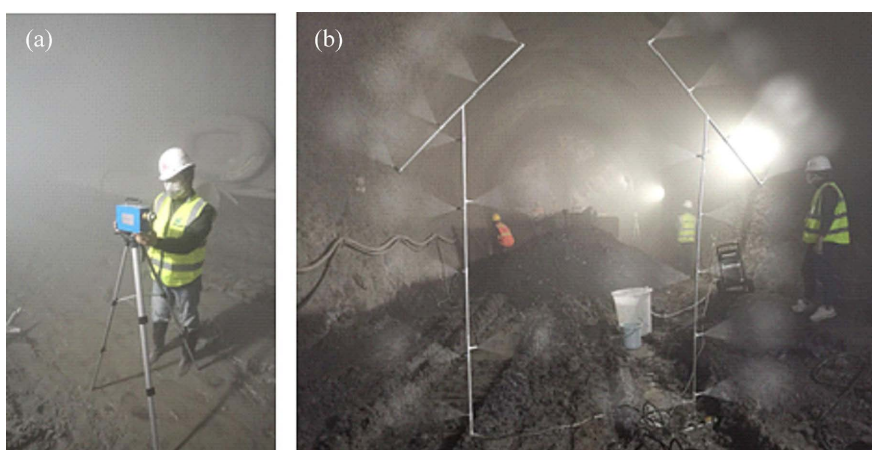


Figure 10. On-site sampling and testing [22]

图 10. 现场采样与测试[22]

### 4.2. 泡沫除尘技术

Tian Xinjiao 等[23]研制了一种  $\gamma$ -PGA/PVA/SDBS 交联网络抑尘凝胶泡沫, 该团队通过将  $\gamma$ -PGA 与 EGDE 交联, 在  $\gamma$ -PGA 和 PVA 之间形成氢键, 再加入 SDBS, 成功合成了  $\gamma$ -PGA/PVA/SDBS 泡沫抑尘剂。与传统的高分子抑尘剂相比, 该抑制剂具有出色的润湿性、改进的保水性和优异的粗糙性, 且经济、安全、环保, 可自然降解。为了验证该抑制剂对粉尘的抑制效果, 该团队采用风洞空气 - 粉尘环境模拟试验平台, 设计了 PM2.5 和 PM10 的抑制粉尘实验, 如图 11 所示。结果由表 1 可知,  $\gamma$ -PGA/PVA/SDBS 对 PM2.5 的抑制率分别为 97.68% 和 98.76%, 其中对 PM10 的抑制效果最强; 这些分别是使用水的 3.40 倍和 2.22 倍。因此, 这些发现表明  $\gamma$ -PGA/PVA/SDBS 在抑尘方面确实表现出较强的性能。



Figure 11. Simulation platform [23]

图 11. 模拟平台[23]

Table 1. Dust suppression effectiveness for PM2.5 and PM10 [23]

表 1. 对 PM2.5 和 PM10 的抑尘效果[23]

样本	PM2.5 浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	S (%)	PM10 浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	S (%)
$\gamma$ -PGA/SDBS	C0201.40	91.91	C0664.30	96.76
	C116.30		C121.50	
PVA/SDBS 系统	C0206.50	92.88	C0681.60	95.76
	C114.70		C129.20	
$\gamma$ -PGA/PVA/SDBS	C0198.60	97.68	C0655.80	98.76
	C14.60		C18.10	
水	C0197.30	22.20	C0651.10	30.63
	C1153.50		C1451.70	

### 4.3. 通风除尘技术

Nie Wen 等[24]对强制风幕抑尘技术进行了研究, 强制风幕抑尘技术应用在隧道综掘面附近, 该技术

利用抽风筒和压力送风筒在巷道内压风出口与抽风吸风口之间形成由压风与抽风协同作用的无色帘状屏障即强制风幕, 强制风幕截割粉尘控制在掘进机司机至掘进头之间的空间内, 随后含尘气流通过抽风筒被吸入除尘风机, 从而抑制粉尘从掘进头向作业区域扩散, 实现最优降尘效果, 其工作示意图如图 12 所示。该团队采用数值模拟的方法, 探索分析了强制风幕距离掌子面的最优位置及强制风幕对粉尘扩散的抑制能力, 模拟结果如图 13、图 14 所示, 结果表明强制风幕在距离掌子面 30 m 处时( $L_f = 30$  m)除尘效果最佳, 如图 15 所示, 大部分粉尘被吸入抽风筒, 抽风吸风口后方巷道内粉尘浓度较低, 且经现场实验验证可知,  $L_f = 30$  m 时除尘效果最佳, 实验结果与模拟结果一致, 这表明强制风幕可有效抑制综采岩巷工作面粉尘扩散。

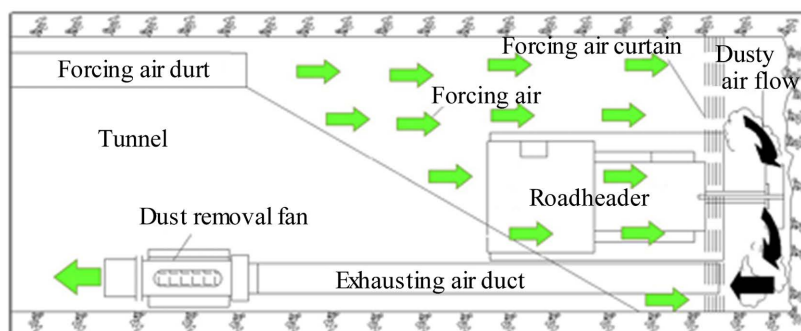


Figure 12. Schematic diagram of a forced-air air curtain in operation [24]

图 12. 强制风幕工作示意图[24]

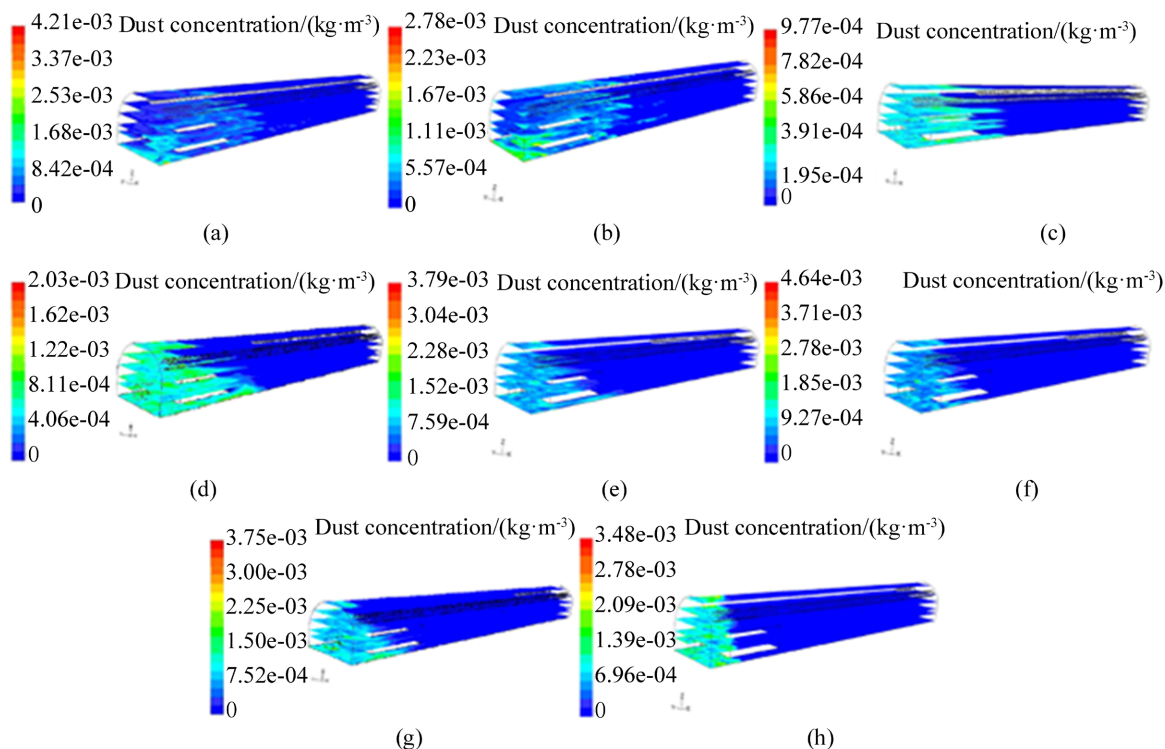


Figure 13. Dust dispersion under air curtains at different locations [24]

图 13. 不同位置风幕下的粉尘扩散情况[24]

魏魁伟等[25]以张汶高速中的赛尔龙 2 号隧道为工程背景, 采用直径为 1500 mm、长度为 10 m 的管

道与风机相连, 如图 16 所示, 转角处增设直径为 1000 mm 的负压风管, 洞外风机距井口的距离为 20 m 以上, 风管距掌子面的距离为 60 m, 在通风室旁增设 2 台 DMT-I-3 风机, 分别用于进、出口处通风。研究表明, 增设水雾除尘装置后, 混合式通风系统的除尘效果有较大提升, 如图 17 所示, 优化后, 粉尘的运移速率提升了 37.0%, 爆破 1400 s 后 PM10 的浓度即可稳定在规范限值以下; 而优化前, 爆破 2200 s 后 PM10 的浓度仍未达到规范的限值要求。

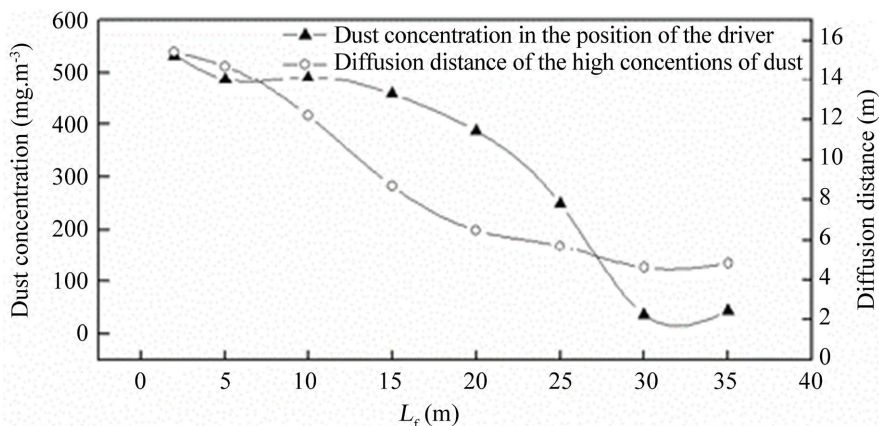


Figure 14. Distribution of dust concentration under air curtains at different locations [24]

图 14. 不同位置风幕下的粉尘浓度分布[24]

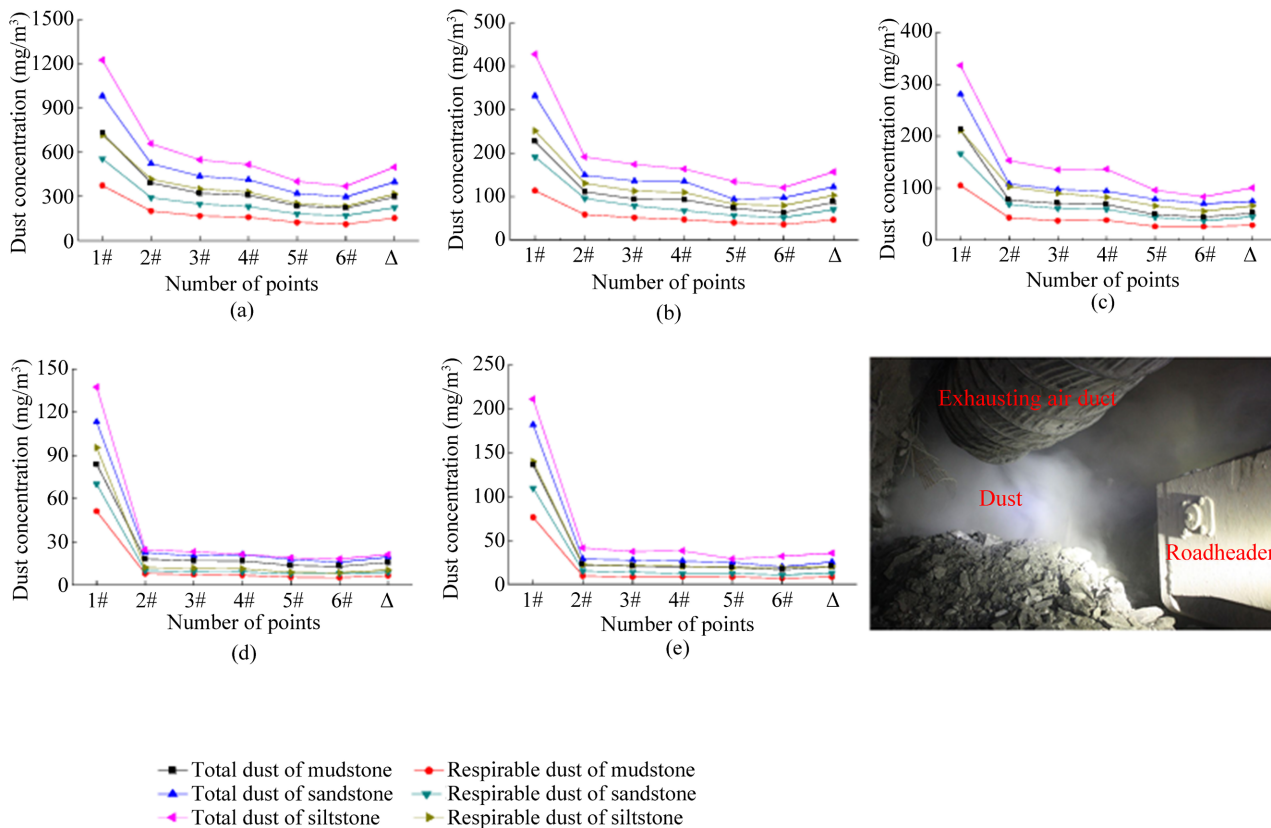


Figure 15. Site survey and data [24]

图 15. 现场勘测及数据[24]

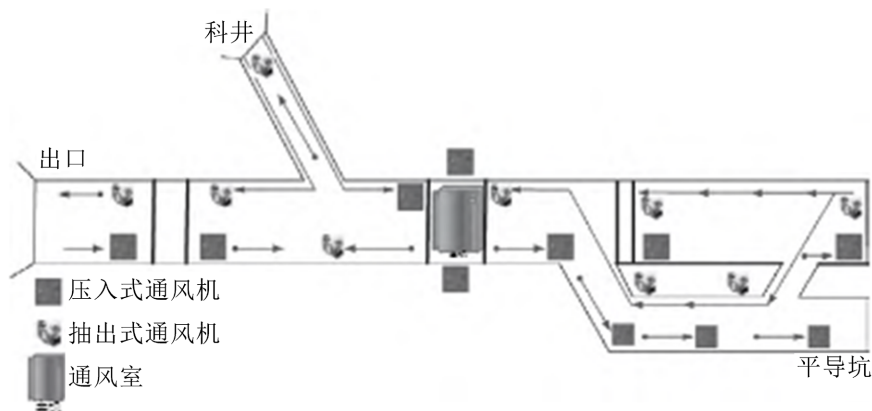


Figure 16. Ventilation system layout [25]

图 16. 通风系统布置图[25]

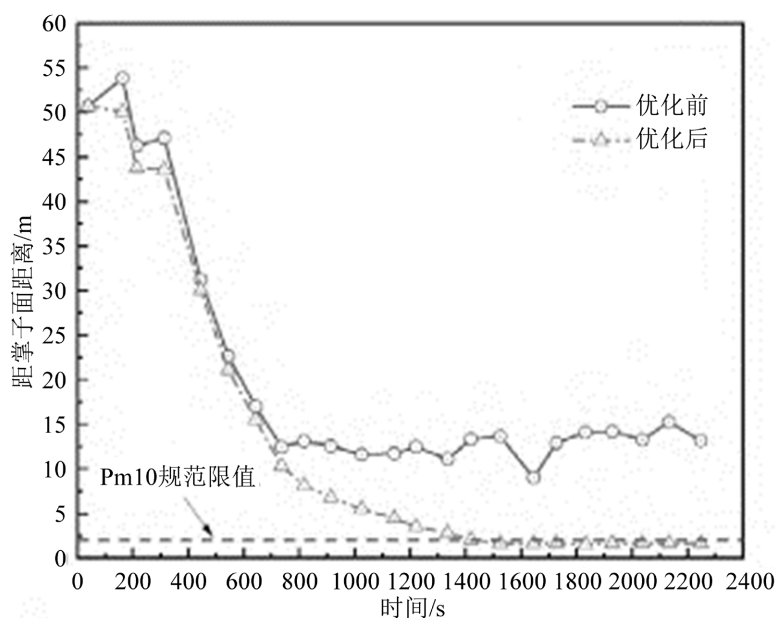


Figure 17. Comparison of dust removal efficiency in the ventilation system before and after optimization [25]

图 17. 优化前后通风系统除尘效果对比[25]

## 5. 结论与展望

Table 2. Comparison of dust removal technologies [26]-[28]

表 2. 除尘技术对比[26]-[28]

除尘技术	适用场景	优势	局限性
喷雾除尘	隧道钻爆作业、通用地下工程	参数可量化、适配性强、预测模型辅助优化	水压不稳定、耗水量大、需定期维护喷嘴
泡沫除尘	隧道、煤矿等对环保要求高的密闭空间	节水、保水性好、无二次扬尘、生物降解	制备成本较高、低温环境可能影响泡沫稳定性
通风除尘	隧道综掘施工	不影响视线、设备简单、无二次污染	除尘效率低、设备磨损快
混合式除尘	隧道等地下工程	适应性强、灵活性高、除尘效率高	设备多、能耗大

隧道内粉尘的理论研究主要依托数值模拟手段,且粉尘运移规律因隧道条件不同而呈现显著差异。因此,相关研究需立足具体工况环境,不宜采用统一化的分析模式。当前,各类除尘技术类型丰富,普遍具备较高的除尘效率,对于保障现场作业人员的职业健康具有重要价值。然而,不同技术手段亦存在各自的适用局限。如表 2 所示,单一除尘方式在实际应用中受限较为明显,相比之下,混合式除尘表现出更为显著的综合优势。

## 基金项目

中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2024140)。

## 参考文献

- [1] 李艳, 刘胜萍, 叶婷婷, 等. 尘肺病患者疾病预防知识及粉尘危害防治态度的影响因素分析[J]. 中国工业医学杂志, 2024, 37(1): 80-82.
- [2] 张伟, 韩静岭, 薛诚, 等. 某市报告的尘肺病病例分析[J]. 工业卫生与职业病, 2024, 50(3): 272-274, 288.
- [3] 王燕兵, 冯乐珍. 中国煤炭企业尘肺病现状和防治对策[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 412-416.
- [4] 国家卫生健康委员会宣传司. 国家卫生健康委员会 2022 年 4 月 25 日新闻发布会文字实录[EB/OL]. <https://www.nhc.gov.cn/xcs/c100122/202204/8a9cf8191a654f59ab799bfb07427566.shtml>, 2022-04-25.
- [5] 周雯, 王玉, 王平. 我国尘肺病护理与防治研究进展[J]. 职业与健康, 2024, 40(9): 1277-1281.
- [6] 张阜新. 隧道及地下工程钻爆法施工关键技术综述[J]. 铁道建筑技术, 2025(4): 181-183, 192.
- [7] 周新远, 李恩重, 张伟, 等. 我国盾构机再制造产业现状及发展对策研究[J]. 现代制造工程, 2019(8): 157-160, 147.
- [8] 李凤远, 曾垂刚. 全断面隧道掘进机智能制造与运维发展现状及趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S1): 6-13.
- [9] 谭忠盛, 吴金刚. 我国隧道钻爆法施工技术回顾与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(6): 899-920.
- [10] 廖奇. 综掘工作面粉尘分布规律的气固两相流模拟[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [11] Porras-Amores, C., Mazarrón, F.R., Cañas, I. and Villoría Sáez, P. (2019) Natural Ventilation Analysis in an Underground Construction: CFD Simulation and Experimental Validation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **90**, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.023>
- [12] Chen, Z., Zhao, S., Dong, C., Wang, S., Guo, Y., Gao, X., et al. (2024) Three-Stage Numerical Simulation of Tunnel Blasting Dust Diffusion Based on Field Monitoring and CFD. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **150**, Article ID: 105830. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105830>
- [13] Chen, Y.C., Yuanhui, Z. and Barber, E.M. (2000) A Dynamic Method to Estimate Indoor Dust Sink and Source. *Building and Environment*, **35**, 215-221. [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(99\)00014-1](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(99)00014-1)
- [14] Stovern, M., Rine, K.P., Russell, M.R., Félix, O., King, M., Eduardo Sáez, A., et al. (2015) Development of a Dust Deposition Forecasting Model for Mine Tailings Impoundments Using in Situ Observations and Particle Transport Simulations. *Aeolian Research*, **18**, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.07.003>
- [15] Mao, W. and Alexeev, A. (2014) Motion of Spheroid Particles in Shear Flow with Inertia. *Journal of Fluid Mechanics*, **749**, 145-166. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.224>
- [16] Guo, Y., Wang, Y., Geng, F. and Zhang, Z. (2023) Study on Dust Distribution in a Highway Tunnel during the Full-Face Excavation with Drilling-Blasting Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **139**, Article ID: 105229. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105229>
- [17] 陈凯, 王帅, 王绍涵, 等. 掘进面截割头动态割煤下粉尘扩散规律研究[J]. 金属矿山, 2026(3): 212-218.
- [18] 刘荣华, 王海桥, 施式亮, 等. 压入式通风掘进工作面粉尘分布规律研究[J]. 煤炭学报, 2002(3): 233-236.
- [19] 刘晴, 郝永江, 赵振保. 综采工作面粉尘分布规律及防尘措施研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 47-53.
- [20] Yang, S., Ren, J., Wan, G. and Ma, F. (2025) Experimental Study on Wind-Fog Coupling Dust Suppression Technology in Tunnel Drilling and Blasting Operations Based on CFD Numerical Simulation. *Chemical Engineering Research and Design*, **216**, 347-366. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2025.03.001>
- [21] Seaman, C.E., Shahan, M.R., Beck, T.W. and Mischler, S.E. (2020) Design of a Water Curtain to Reduce Accumulations of Float Coal Dust in Longwall Returns. *International Journal of Mining Science and Technology*, **30**, 443-447. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.001>

- 
- [22] Liu, N., Chen, K., Deng, E., Yang, W. and Wang, Y. (2023) Study on Dust Suppression Performance of a New Spray Device during Drilling and Blasting Construction in the Metro Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **133**, Article ID: 104975. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104975>
- [23] Tian, X., Huang, Y., Zhang, Q., Wang, H., Zeng, J., Yuan, C., *et al.* (2025) Development and Characterization of a  $\gamma$ -PGA/PVA/SDBS Cross-Linked Network Foam for Dust Suppression in Tunneling Construction. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 115085. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115085>
- [24] Nie, W., Hua, Y., Zhou, W., Liu, Q., Cai, X. and Cheng, L. (2022) Design and Application of a Dust Suppression Technology of the Forcing Air Curtain in Fully Mechanized Rock Tunnelling Faces. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 34943-34954. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18623-2>
- [25] 魏魁伟, 叶青, 刁卫江, 谭胜利, 李雄英. 特长公路隧道钻爆法施工过程粉尘分布规律及通风除尘优化研究[J]. *建筑机械*, 2025(9): 306-311.
- [26] 孙晨晨. 抑制煤尘的低浓度聚合物泡沫制备及特性研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [27] 冯恒原. 综掘面呼吸性粉尘运移规律及抑尘剂喷雾凝并团聚技术研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2024.
- [28] 岳基伟, 廖杰, 张雷林, 等. 微纳米气泡水对煤体的润湿特性及其增润机制[J/OL]. *煤炭学报*: 1-16. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1438>, 2026-04-21.