

引文格式:冯守中,常磊,宋远,等.公路隧道低能耗通风和抑控烟试验研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(5): 87-94.

DOI:10.3969/j.issn.1672-1098.2025.05.007

公路隧道低能耗通风和抑控烟试验研究

冯守中^{1,2},常磊¹,宋远¹,阚德远^{1,2}

(1.安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001;2.同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要:目的 公路隧道运营期通风能耗大,火灾隐患高,亟需探索有效的低能耗隧道通风和抑控烟技术。旨在通过足尺试验探究负离子净化器分解隧道内烟尘和控制隧道火灾烟气的可行性。**方法** 根据单极离子发生器研发并生产了公路隧道专用的负离子净化器,在实体隧道和试验隧道侧壁安装多个对称布置的负离子净化器组成负离子净化系统。通过记录实体隧道开关负离子净化器前后隧道内负离子浓度和细颗粒物浓度变化来探讨负离子净化器的空气净化效果。另一方面,通过记录火灾试验前隧道内负离子浓度、火灾试验过程中隧道内细颗粒物浓度变化和火灾时烟气状况来对比负离子净化器在不同状态下的抑控烟效果。**结果** 负离子净化系统可以显著降低隧道运营期间的细颗粒物浓度水平,从而有效改善隧道内的空气质量。负离子净化系统能对隧道火灾烟气起到很好的分解和净化效果,隧道内烟气分层现象明显,且能见度大。常开负离子净化系统的抑控烟效果优于火灾时临时开启负离子净化系统。**结论** 这为实现基于负离子净化的公路隧道低能耗通风和抑控烟系统提供了依据。

关键词:公路隧道;负离子净化;通风;火灾;烟气

中图分类号:U458.1 文献标志码:A 文章编号:1672-1098(2025)05-0087-08

Experimental Study on Low-Energy Consumption Ventilation and Smoke Suppression and Control of Road Tunnel Based on Negative Ion Purification

FENG Shouzhong^{1,2}, CHANG Lei¹, SONG Yuan¹, KAN Deyuan^{1,2}

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001,China; 2.School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092,China)

Abstract: Objective The ventilation energy consumption of road tunnels is high during operation, and there are high fire risks. It is urgent to explore effective low-energy tunnel ventilation and smoke control technologies. This paper aims to explore the feasibility of negative ion purifiers for decomposing smoke and controlling fire smoke in tunnels through full-scale experiments. **Methods** A specialized negative ion purifier for road tunnels was developed based on single-pole ion generators. Multiple symmetrically arranged purifiers were installed on the sidewalls of an actual tunnel and test one to form a purification system. The air purification effectiveness was evaluated by monitoring negative ion concentration and fine particulate matter (PM) levels before and after activation. For fire scenarios, the negative ion concentration in the tunnel before the fire test, the changes in fine particulate matter concentration during the fire test, and the smoke conditions during the fire were recorded to compare the smoke control effect of the negative ion purifier under permanent activation versus temporary activation during fire events. **Results** The negative ion purification system significantly reduced PM levels during tunnel operations, effectively improving air quality. It demonstrated excellent decomposition and purification of

收稿日期:2025-07-02

基金项目:安徽省博士后科研项目资助(2025C1151)

作者简介:冯守中(1963-),男,安徽滁州人,教授,博士,研究方向:隧道及地下工程研究。

fire-smoke emissions, resulting in distinct smoke stratification and enhanced visibility. Permanent activation of the system outperformed temporary activation during fires. **Conclusion** This study provides a basis for realizing a low-energy consumption ventilation and smoke control system based on negative ion purification for road tunnels.

Key words: road tunnels; negative ion purification; ventilation; fire; smoke

公路隧道能克服地形限制、缩短交通路线、提高运输效率,在交通运输领域发挥着越来越重要的作用。根据中国交通运输行业发展统计公报,截止 2024 年底,中国公路隧道共 28 724 处、总长 32 596.6km^[1]。中国正处于由交通大国向交通强国迈进的时代背景下,公路隧道由大规模建设期进入运营期^[2-3]。然而,保障隧道安全、高效运营正面临严峻挑战,其中构成纵向机械通风系统的大型射流风机是维持隧道内空气品质的核心设备,也是运营期最主要的能耗源之一^[4]。维持隧道日常通风所需电力消耗巨大,隧道运行成本高昂,与国家倡导的绿色低碳、节能减排理念存在显著矛盾^[5]。因此,探索低能耗的隧道通风与空气净化技术,对降低隧道运营成本、实现可持续发展具有重要意义。

隧道运营的另一重大安全威胁是火灾。对于公路隧道火灾,由于高温烟雾或有毒气体的存在,隧道内车辆和人员的安全受到严重威胁,人体吸入过量烟气会引发中毒甚至身亡。目前,公路隧道中采用的最常见的烟雾控制方法是纵向通风^[6]。在纵向通风的作用下,可以限制烟雾倒流,防止烟雾往隧道上游蔓延。而采用纵向通风控制火灾烟雾的关键在于掌握临界风速^[7],即防止烟雾倒流所需的最小通风速度。过高的通风速度可能会加剧火灾的演变和蔓延,过低的通风速度无法限制烟雾回流。临界风速的大小还受到隧道坡度、火势大小、隧道截面尺寸等因素的影响。此外,纵向通风只注重火源上游区域的保护,而忽视了下流的安全^[8]。杨项博等^[9]通过开展数值模拟研究,改变纵向风速、火源功率和火源有效高度,模拟分析公路隧道顶棚辐射热流分布、顶棚最大辐射热流及其位置等参数,揭示全尺寸隧道火灾顶棚辐射热流分布特征。缪文雯等^[10]采用数值模拟方法研究了盾构隧道在纵向通风与集中排烟协同作用下的隧道温度分布和烟气蔓延长度,分析不同纵向风速、排烟口间距及排烟量作用下隧道内温度分布和烟气蔓延长度,揭示了盾构隧道组合排烟模式下火灾时烟气流动特性。因

此,采用纵向通风控制隧道火灾烟雾存在诸多不足和限制,亟需探究更好的有效的抑控烟方法和技术。

负离子除尘技术是通过释放带负电荷的负离子,使其与空气中的细小颗粒物相互作用,导致细颗粒物沉降,从而达到除尘和净化空气的目的。高浓度的负离子可以与空气中的烟尘和有毒气体聚集成大粉尘颗粒^[11],降落到地面,能达到减少或消除烟雾和有毒气体的作用^[12-13]。目前,负离子空气净化已经被广泛应用到汽车、家庭、办公室、医院、工厂等场所以有效降低室内的细颗粒物水平^[14-15]。GRABARCZYK^[16]在 50m³ 的空置办公室内使用便携式负电晕电离器,并用激光计数器测量颗粒浓度,结果表明整个房间电离 2h 后颗粒浓度降低了 2 个数量级。MAYYA 等^[17]在一个典型的房间中研究了负离子电离器对颗粒去除率与颗粒浓度、颗粒大小和通风量的关系,并建立了能描述室内空气中单极电离器去除气溶胶的理论模型。至于隧道火灾烟气,它是燃烧过程的一种混合物产物,包括可燃物热解或燃烧产生的气相产物(如未燃气体、水蒸气、CO、CO₂、硫化物、氯化物、氰化物)、卷吸而入的空气、多种微小的固体颗粒物和液滴^[18]。火灾烟气中不仅含有会造成人中毒死亡的各种有毒气体,而且烟气中悬浮微粒也是有害的。这些细微颗粒物容易被人体吸入,对呼吸系统造成刺激,引发咳嗽、呼吸困难和气喘等症状^[19]。快速发展的负离子技术能够降除气溶胶颗粒和粉尘颗粒,为实现隧道内低能耗空气净化以及分解火灾烟气提供了新思路^[20]。

本团队根据基于电晕放电的单极离子发生器研发并生产了公路隧道专用的负离子净化器。为了探究负离子净化器分解隧道内烟尘和控制隧道火灾烟气的可行性,本研究拟通过在实体隧道和试验隧道侧壁安装多个对称布置的负离子净化器组成负离子净化系统,记录实体隧道开关负离子净化器前后隧道内负离子浓度和细颗粒物浓度变化来探讨负离子净化器的空气净化效果。

1 试验设计

本试验考虑公路隧道日常运营工况和特殊火灾工况。日常运营工况的试验地点位于铁门关隧道,而特殊火灾工况的试验地点位于安徽中益新材料科技股份有限公司搭建的试验隧道。

1.1 运营工况试验设计

1) 试验隧道 铁门关隧道是 G0711 乌尉高速公

路工程沿线隧道,是巴音郭楞蒙古自治州铁门关市境内的隧道,该隧道全长 2 910m。铁门关隧道为双向双车道,隧道净高度为 7.15m,车道净宽度为 7.5m。隧道标准段断面图如图 1 所示。试验期间,铁门关隧道还未通车,但是隧道内每日多辆施工车辆往返,隧道内灰尘大,空气质量差。因此,本试验以此环境模拟隧道实际运营工况,探究负离子净化系统对隧道运营期间空气质量的改善效果。

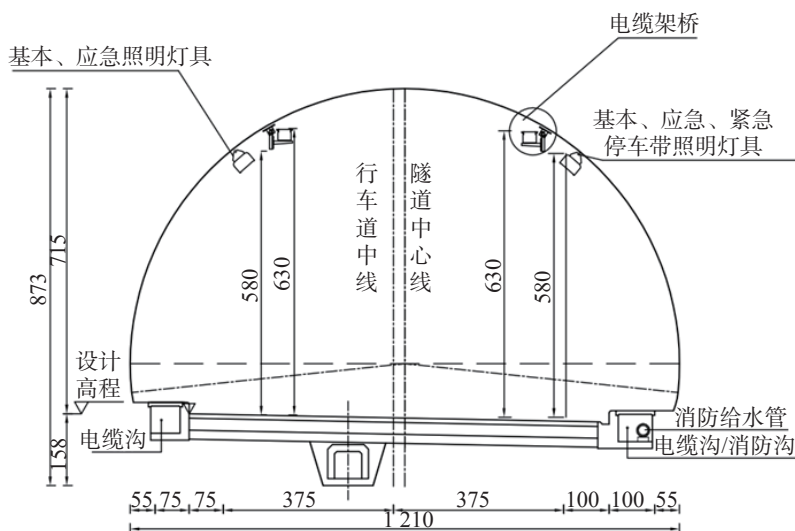


图 1 铁门关隧道断面图(单位: cm)

2) 负离子净化系统 本研究的负离子净化系统由多个对称布置的负离子净化器组成,由安徽中益新材料科技股份有限公司生产,型号为 ZY-S220C,工作功率为 8W。负离子净化器的外观如图 2 所示,该设备按照电晕放电原理,在微针尖端加有较高的电位差。利用尖端直流高压产生高电晕,高速地放出大量的电子,释放的电子立刻会被空气中的氧分子捕捉,从而生成空气负离子。在本工况中,负离子净化器分别安装在隧道两侧的侧壁 3m 高度处,纵向安装间距均为 5m。

3) 测量指标 本工况的测点位于隧道中部,距离隧道出口约 1 500m 处。为避免来往车辆对测量设备产生影响,测点位于隧道检修道上。本工况的测量指标包括开启负离子净化器 280min 内和关闭负离子净化器后的 280min 隧道内测点处的负离子浓度和颗粒物浓度变化。使用空气负离子检测仪测量隧道内的负离子浓度,测量精度为 $10 \text{ 个}/\text{cm}^3$,每隔 1min 记录 1 次数据。颗粒物浓度包括 PM2.5 和 PM10 浓度;采用便携式细颗粒物检测仪,测量精度为 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

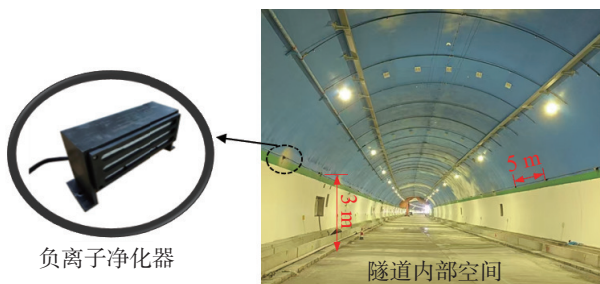


图 2 负离子净化器外观及其安装位置

1.2 火灾工况试验设计

1) 试验隧道和火源设置 试验隧道是由钢结构搭建而成,全长 160m。试验隧道为双车道,隧道净高度为 7.5m,车道净宽度为 7.9m。隧道内部壁面和顶板由浅灰色铝板填充,两侧壁面 3m 高度范围内涂装了黄色涂料。隧道内铺设混凝土路面,两侧 LED 灯具对称布置。试验隧道内部如图 3 所示,隧

道出口处设置了距离地面 2m 的黑色挡板来阻挡烟气。火灾试验在自然通风条件下开展,试验过程中几乎静止无风。

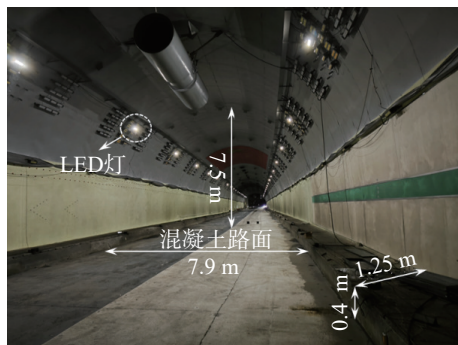


图 3 试验隧道内部空间

试验的火源装置包括尺寸为 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 燃油盘和用于隔热的木架,火源装置放于隧道某一车道中间。柴油为主要燃料,加入黑色橡胶粉用于产生更多烟雾和黑色颗粒物。每组试验消耗 10L 柴油和 15kg 橡胶粉。每次试验将柴油和橡胶粉充分混合后燃烧,混合物燃烧状态如图 4 所示。

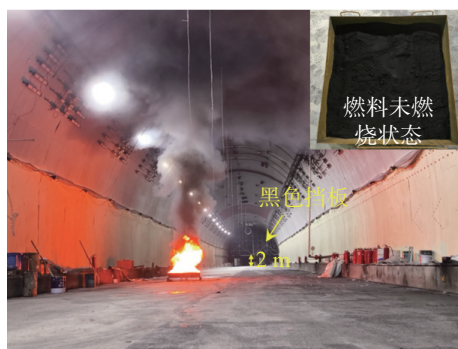
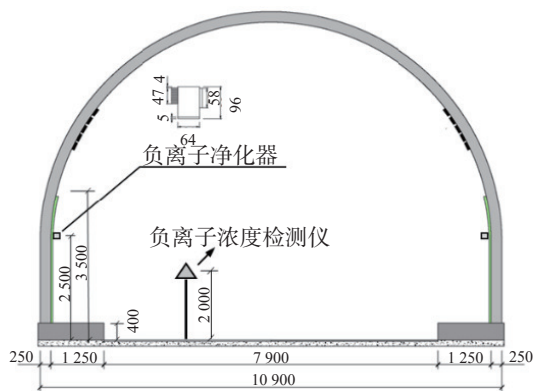
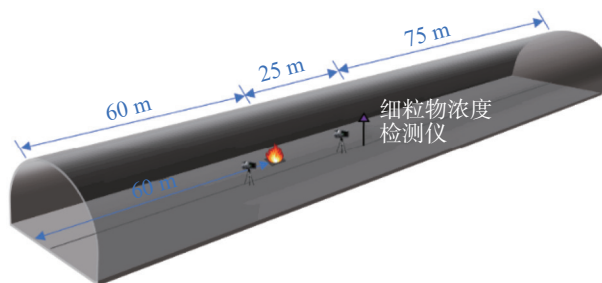


图 4 火源燃烧状态

2) 负离子净化系统和试验过程 本工况的负离子净化系统同样由图 2 所示的负离子净化器构成。



(a) 负离子浓度测点 (单位: mm)



(b) 颗粒物浓度测点

图 6 试验隧道示意图及测点位置

负离子净化器分别安装在隧道两侧的侧壁 2.5m 高度处,负离子净化器的纵向安装间距均为 5m,如图 5 所示。



图 5 试验隧道负离子净化器安装位置

在进行火灾试验前,先使用图 6(a)所示的空气负离子检测仪测量负离子净化器安装后隧道内的负离子浓度。负离子浓度测点位于隧道中间段某一车道的中心线上,测量高度为 2m。如图 6(b)所示,将油盘放于车道中心线,距离隧道入口 60m 处。采用高清摄像机拍摄记录火源下游隧道内烟气状况。细颗粒物($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$)检测仪位于火源下游 25m 处,测量高度为 2m。细颗粒物检测仪的具体位置如图 6(b)所示。

具体试验过程如下:首先,在关闭负离子净化器的情况下在隧道内进行火灾试验,记录火源点燃后 15min 隧道内的颗粒物浓度变化。15min 后,用灭火器灭掉火源并打开风机消除隧道的烟雾。随后,在负离子净化器处于常开状态和临时开启状态时分别进行火灾试验。常开状态是指发生火灾前负离子净化器已经开启 5h 以上,而临时开启状态是指发生火灾前负离子净化器刚刚开启。

2 运营工况试验结果分析

2.1 隧道内负离子浓度变化

图7展示了开启负离子净化器280min内和关闭负离子净化器后的280min隧道中负离子浓度变化过程。负离子净化器开启后,隧道内迅速充满了负离子。然而,在负离子净化器处于开启阶段时,隧道内的负离子浓度值持续波动,这说明由于自然风和车辆行驶产生的气流变化会对隧道内负离子分布产生扰动。在关闭负离子净化器后,隧道内负离子浓度迅速持续下降至恒定值。

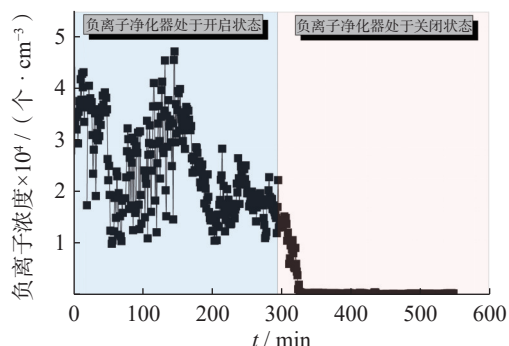
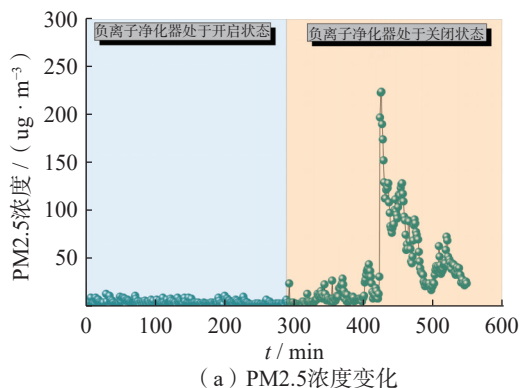


图7 铁门关隧道内负离子浓度变化过程

2.2 隧道内颗粒物浓度变化

图8展示了开启或关闭负离子净化器280min内隧道中细颗粒物浓度变化过程。如图9(a)所示,在负离子净化器处于开启阶段时,隧道内的PM2.5浓度值持续处于较低的状态;但负离子净化器关闭后,隧道内的PM2.5浓度值开始上升,随后处于上下波动状态。如图8(b)所示,隧道内的PM10浓度的变化趋势与PM2.5浓度变化一致,但PM10浓度的变化趋势与PM2.5浓度变化一致,但PM10浓度



值略高于PM2.5浓度值。结合铁门关隧道内细颗粒物浓度的变化情况,可以得出负离子净化系统能有效改善隧道内空气质量。

试验观测到的PM2.5等颗粒物浓度显著下降,其核心机理在于负离子发生器释放的高浓度空气负离子对颗粒物的荷电与凝并作用。空气负离子在电场作用下与悬浮颗粒物发生碰撞。颗粒物通过扩散荷电或场致荷电机理捕获负离子,从而带上负电荷。荷电后的颗粒物之间产生库仑斥力,增加了碰撞频率。荷电颗粒与环境大量未荷电或弱荷电的中性颗粒之间,由于镜像力或诱导作用,吸引力显著增强。这种电学作用促进了不同粒径颗粒间的碰撞、粘附与合并,形成更大粒径的团聚体。粒径增大后的颗粒物,其重力沉降速度显著提高。同时,荷电颗粒更容易被隧道壁面、地面等接地的表面所吸引,从而加速其沉积。此外,大颗粒物在通风气流作用下也更容易被带出隧道或被过滤器捕获。本试验中,负离子发生器在隧道内形成了高浓度的负离子环境,有效促进了上述荷电-凝并-沉降过程,这是运营工况下颗粒物浓度得以有效降低的根本物理机制。

3 火灾工况试验结果分析

3.1 隧道内负离子浓度变化

图9展示了负离子净化器在关闭和开启状态下试验隧道内负离子浓度变化。当负离子净化器处于关闭状态时,隧道内的负离子浓度大约为300个/cm³。当负离子抑烟净化器安装在侧壁2.5m高度处时,隧道测点处10min内的负离子浓度值在20 000~30 000个/cm³,且负离子浓度值总体上呈缓慢上升的趋势。

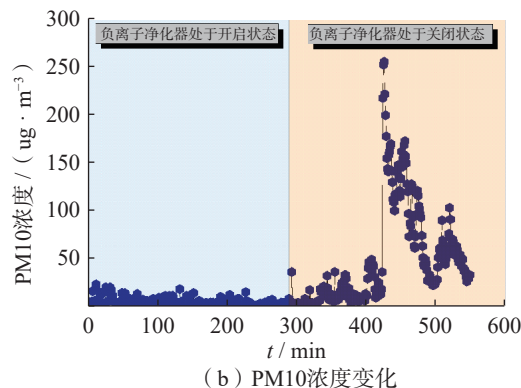


图8 铁门关隧道内细颗粒物浓度变化过程

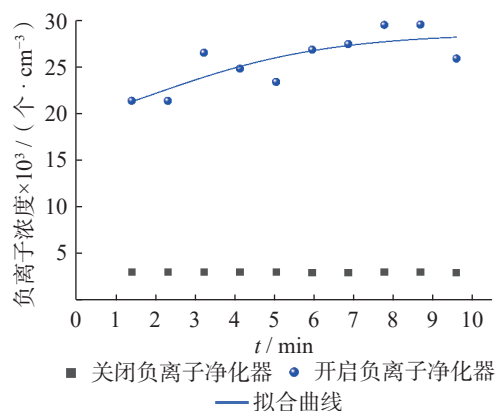


图 9 试验隧道内负离子浓度变化

3.2 隧道内颗粒物浓度变化

图 10 展示了负离子净化器在常开和临时开启状态下隧道内 2m 高度处的细颗粒物浓度变化情况。

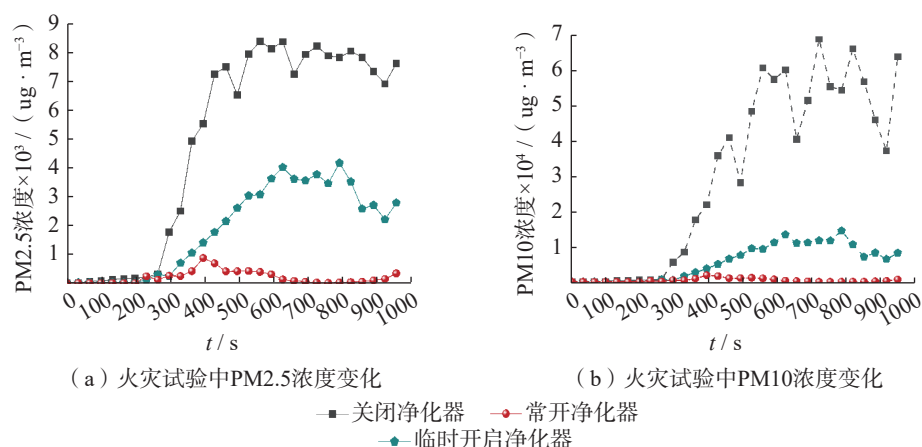


图 10 火灾试验中隧道内细颗粒物浓度变化情况

3.3 隧道内烟气状况

图 11 展示了负离子净化器处于关闭状态时隧道内的烟气状况。如图 11(a)所示,火源在点燃 5min 后燃烧旺盛,烟气沿着顶棚蔓延到了隧道两端;随后,烟气在黑色挡板阻隔下开始向下蔓延。如图 11(b)所示,火源燃烧 8min 后烟气层向下蔓延,隧道内的空间烟气弥漫。如图 11(c)所示,火源燃烧 15min 后火势变小,但隧道内烟气浓度高,使得隧道内能见度低;高浓度的烟气削弱了 LED 灯的灯光,使得隧道内亮度变低。图 11(d)展示了燃烧 15min 后火源下游隧道内的烟气状况;隧道下游烟气弥漫、能见度低、亮度低。

图 12 展示了常开负离子净化器和临时开启负离子净化器状态下燃烧 15min 后火源下游隧道内

如图 10(a)所示,与对照组(关闭负离子净化器)相比,常开负离子净化器和临时开启负离子净化器时隧道内 PM2.5 浓度均明显下降。其中,常开负离子净化器时 PM2.5 浓度值总体下降超过 90%,临时开启负离子净化器时 PM2.5 浓度值总体下降超过 50%。这说明火灾时临时开启负离子净化器和负离子净化器处于常开状态下均能有效净化火灾烟气。图 10(b)展示了负离子净化器在常开和临时开启状态下隧道内 2m 高度处的 PM10 浓度变化情况。与对照组(关闭负离子净化器)相比,常开负离子净化器和临时开启负离子净化器时隧道内 PM10 浓度也均明显下降。其中,常开负离子净化器时 PM10 浓度值总体下降超过 95%,临时开启负离子净化器时 PM10 浓度值总体下降超过 75%。这也表明开启负离子净化器能有效净化火灾烟气。

的烟气状况。负离子净化器处于开启状态时,对隧道内火灾烟气的分解和净化效果较好。相比于对照组(关闭负离子净化器),隧道内的亮度增加,能见度变大,烟气分层现象明显。图 12(a)中的烟气层厚度小于图 12(b)中的烟气层厚度,负离子净化器处于常开状态时对烟气净化的效果优于临时开启负离子净化器。

隧道火灾发生后,燃烧产物在火源上方形成高温、低密度的热羽流。热羽流在浮力作用下持续上升,撞击隧道顶棚后向四周水平扩散,形成逐渐增厚的顶棚射流和稳定的热烟气层。烟气层内含高浓度的悬浮颗粒物和燃烧气体,对光线具有强烈的吸收和散射作用,导致光强衰减显著增加,表现为隧道亮度变低和能见度急剧下降。



图11 关闭负离子净化器状态下隧道内的烟气状况

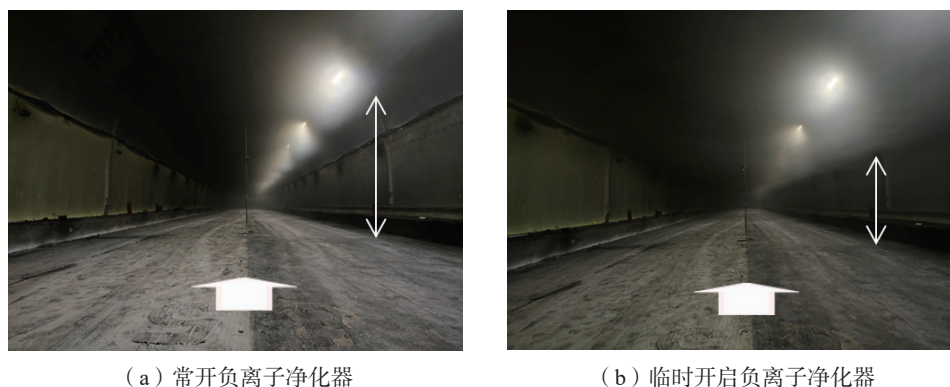


图12 开启负离子净化器状态下点火后15 min隧道下游烟气状况

开启负离子发生器后,释放的高浓度负离子使烟气中的亚微米级碳黑颗粒大量荷电。荷电颗粒间增强的电凝并作用促使小颗粒快速聚集成较大粒径的团聚体。这一过程带来两方面关键影响:粒径增大效应和沉降增强效应。根据颗粒光学理论,对于亚微米级碳黑,其质量消光系数随粒径增大而降低。因此,凝并增大粒径可在一定程度上降低单位质量颗粒物的消光能力,有助于缓解光衰减。同时,荷电颗粒(尤其是带负电)受到隧道接地结构(壁面、顶棚)的静电力吸引,进一步加速其从烟气层中沉积移除。上述电凝并导致的颗粒粒径增大

和沉降加速,共同作用使得烟气层中颗粒物数浓度和质量浓度降低,对光线的总体消减弱化,从而解释了试验中观察到的“亮度变低”现象得到缓解以及“能见度改善”的结果。此外,颗粒物的快速沉降和移除也可能间接影响烟气层的稳定性与蔓延速度。

运营工况下的除尘效果与火灾工况下的抑烟效果虽然同属负离子技术,但负离子技术在火灾这种极端、动态、高浓度气溶胶环境下的抑烟机制比常规除尘更为复杂,涉及更强烈的颗粒间电相互作用,并受到热力学和流体力学因素的共同作用。本试验观测到的烟气浓度降低、能见度改善现象,是

负离子在火灾特殊环境下促进电凝并和沉降的综合作用。

4 结论和展望

负离子净化系统在公路隧道应用中表现出显著优势:其能够有效降低隧道运营期间的细颗粒物浓度,显著改善空气质量,为构建基于负离子净化的低能耗通风系统提供了坚实依据。此外,负离子系统对隧道火灾烟气具有良好的分解和净化效果,能明显增强隧道内烟气分层现象并提高能见度,且常态开启的系统在抑烟效果上优于火灾时临时启动的方式。

考虑到隧道内负离子的空间分布受自然风和车辆行驶产生的气流扰动影响,浓度呈现动态波动,提示净化效果具有时空非均匀特征。未来计划在实际通车隧道中安装负离子净化系统并布设多点污染物监测,实现长期空气质量评估;同时结合火灾演练,全面评估该系统对人员疏散环境和安全性的影响。

参考文献:

- [1] 郭志国,李益铎,周令剑,等.公路隧道火灾应急技术研究现状与展望[J].隧道与地下工程灾害防治,2024,6(2):13-24.
- [2] 王强,章伟康,袁崇洋,等.基于改进云模型的公路隧道运营安全评估研究[J].浙江工业大学学报,2024,52(6):674-682.
- [3] 彭文波,张翔,王驭正,等.天山胜利隧道运营期交通事故风险评价与防控措施[J].公路,2024,69(12):299-310.
- [4] 侯云飞,王永东,乔博翔,等.隧道相向射流排烟功率对吸穿现象的影响[J].科学技术与工程,2025,25(14):6136-6145.
- [5] 曾艳华,赵东旭,涂云龙,等.特长公路隧道运营通风多模式转换及节能研究[J].现代隧道技术,2023,60(5):11-19.
- [6] 王明年,邓涛,于丽.中国交通隧道运营及防灾通风技术发展展望[J].现代隧道技术,2024,61(2):152-166.
- [7] 刘帅,陈建忠,王芳其.公路隧道纵向通风对火灾烟气分层影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1419-1423.
- [8] 王建华,范传刚,李玉豪,等.超长排烟行程下公路隧道人员疏散安全性研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(12):120-126.
- [9] 杨项博,万华仙,张玉春.纵向风对隧道火灾顶棚辐射热流的影响[J].中国安全科学学报,2025,35(4):145-151.
- [10] 缪文雯,王少锋,方若全,等.纵向风下大间距排烟阀集中排烟模式温度及烟气蔓延研究[J].安全与环境学报,2025,25(1):58-66.
- [11] HYUN J, LEE S G, HWANG J. Application of corona discharge-generated air ions for filtration of aerosolized virus and inactivation of filtered virus[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, 107: 31-40.
- [12] YU K P, LEE G W M, LIN S Y, et al. Removal of bioaerosols by the combination of a photocatalytic filter and negative air ions[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2008, 39(5): 377-392.
- [13] 焦卫宁,杨帅,蒋灿,等.负离子除尘技术在隧道中的应用与数值模拟研究[J].暖通空调,2024,54(10):102-107.
- [14] TAO S, ZHU Y, CHEN M, et al. PM1.0 removal enhancement in cooperated electric-ionic field by negative air ions carbon fiber electrode[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 355: 129619.
- [15] SUN T, ZHENG Q, LUO H, et al. Self-powered exhaust gas purification by negative ions and photoelectric catalysis based on triboelectric nanogenerator[J]. *Nano Energy*, 2023, 115: 108677.
- [16] GRABARCZYK Z. Effectiveness of indoor air cleaning with corona ionizers[J]. *Journal of Electrostatics*, 2001, 51-52: 278-283.
- [17] MAYYA Y S, SAPRA B K, KHAN A, et al. Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(8): 923-941.
- [18] ALARIE Y. Toxicity of fire smoke[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2002, 32(4): 259-289.
- [19] 宗琦,巩义鑫,汪海波,等.硬岩隧道爆破膏体封孔破岩效果研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2025,45(1):92-98.
- [20] 冯志文,晏长根.不同地震波对浅埋隧道下穿桥梁的影响[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2024,44(4):60-67.

(责任编辑:丁寒)