

地铁隧道活塞风与机械通风耦合作用下的气流组织优化

赵立强

北京玛斯特系统工程有限公司 北京

【摘要】地铁作为城市重要交通方式，其隧道内气流组织状况关乎运营安全与乘客舒适度。在地铁隧道中，活塞风与机械通风存在耦合作用，该作用对气流组织产生复杂影响。通过构建数学模型并运用数值模拟手段，深入探究不同工况下二者耦合对气流速度、压力分布的影响规律。结果显示，合理调控活塞风井设置与机械通风参数，能够有效优化气流组织，减少气流死区，提升通风效率。此研究为地铁隧道通风系统设计与优化提供科学依据，助力打造更安全、舒适的地铁运营环境。

【关键词】地铁隧道；活塞风；机械通风；耦合作用；气流组织优化

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 19 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250027

Optimization of airflow organization in subway tunnels under the coupling of piston wind and mechanical ventilation

Liqiang Zhao

Beijing Master System Engineering Co., Ltd, Beijing

【Abstract】 As a vital mode of urban transportation, the airflow organization within subway tunnels is crucial for operational safety and passenger comfort. In subway tunnels, the coupling effect between piston wind and mechanical ventilation has a complex impact on airflow organization. By constructing mathematical models and employing numerical simulation techniques, this study explores the influence of the coupling effect on airflow velocity and pressure distribution under various operating conditions. The results show that by reasonably adjusting the settings of piston wind wells and the parameters of mechanical ventilation, the airflow organization can be effectively optimized, dead zones reduced, and ventilation efficiency improved. This research provides a scientific basis for the design and optimization of subway tunnel ventilation systems, contributing to the creation of a safer and more comfortable subway operating environment.

【Keywords】 Subway tunnel; Piston wind; Mechanical ventilation; Coupling effect; Airflow organization optimization

引言

随着城市化进程加速，城市地铁网络规模呈指数级扩张态势，隧道通风系统的优化设计已成为保障地铁安全高效运营的关键环节。活塞风与机械通风耦合形成的复杂气流组织，不仅直接决定隧道内空气质量与温湿度分布，更在火灾等突发事件中影响烟气扩散路径与速度。当前工程实践中，二者耦合作用下存在通风效率低、区域气流不均、设备能耗过高等技术瓶颈。亟需通过多学科交叉研究，深入剖析耦合作用机制，探索兼顾安全性与经济性的气流组织优化策略，从而显著提升地铁运营品质与应急响应能力。

应能力。

1 隧道气流组织问题剖析

在地铁隧道复杂的空间环境中，气流组织问题如同隐藏在暗处的顽疾，持续影响着地下交通系统的健康运转。部分区域的气流速度长期处于极低水平，形成空气流动的“死水潭”。这些区域往往位于隧道的末端、设备舱附近或是弯道的背风侧，由于空气缺乏有效流动，乘客呼出的二氧化碳、列车运行产生的粉尘以及刹车磨损带来的细微颗粒，都在此处不断积聚。随着时间推移，污染物浓度逐渐升高，不仅让乘客在乘车过程中感到闷热、呼吸不畅，长期暴露

在这样的环境中，还可能对人体健康造成潜在威胁。

地铁隧道中的弯道、交叉口等特殊地段，更是气流组织的“重灾区”。当气流流经弯道时，由于惯性作用，空气无法及时顺应弯道的走向，外侧空气压力升高，内侧压力降低，从而形成强烈的漩涡。这些漩涡如同无形的枷锁，阻碍着气流的顺畅通行，使得原本就有限的通风量难以均匀分布到整个空间。在交叉口处，来自不同方向的气流相互碰撞、挤压，形成紊乱的涡流场。这不仅降低了通风系统对污染物的排出效率，还会导致部分区域出现气流死角，使得新鲜空气难以到达，而污浊空气又无法排出，进一步恶化了局部空气质量^[1]。这种复杂的气流紊乱现象，严重削弱了通风系统的效能，给乘客的出行体验带来负面影响。

客流量的动态变化如同无形的指挥棒，指挥着地铁通风需求的起伏，但现有的气流组织模式却难以跟上这多变的节奏。在高峰时段，地铁站内人头攒动，大量乘客涌入车厢，每个人都是一个二氧化碳的“排放源”，同时人体散发的热量也迅速升高了车厢内的温度^[2]。此时，乘客对新鲜空气的需求如同干涸的土地渴望甘霖，然而传统的通风系统却常常力不从心，无法及时提供充足的新鲜空气来稀释污浊气体、降低温度，导致车厢内闷热难耐，乘客的舒适度大打折扣。

2 活塞风与机械通风原理

地铁列车在隧道内风驰电掣般的运行过程，恰似一个巨型活塞在封闭的气缸中往复运动，其引发的空气动力学效应塑造了独特的活塞风现象。每当列车启动，车头如同锋利的犁铧，强行挤压前方的空气，使得空气分子相互靠近，气压急剧升高，形成一个高压的正压区；而列车尾部则仿佛突然抽离的活塞，原本占据的空间瞬间空虚，周围空气迅速填充，气压降低，形成负压区。在这一推一拉之间，空气如同被无形的手驱动，沿着隧道产生强烈的流动，这便是活塞风的形成机制。活塞风的强度并非恒定不变，它与列车运行速度紧密相连，速度越快，空气被压缩和抽吸的力度就越大，活塞风也就越强劲。隧道与列车的尺寸比例也扮演着重要角色，当隧道相对列车较窄时，空气的流动空间受限，压缩和抽吸效应更为显著，活塞风也会随之增强。这种自然产生的气流，在地铁通风中既是机遇也是挑战。

机械通风系统犹如地铁隧道的“人工呼吸装

置”，通过精心设计的风机、风道等设备，为隧道空气注入新的活力。风机作为系统的核心动力源，根据不同的通风需求，可选择轴流风机、离心风机等多种类型。轴流风机适用于需要大流量、低风压的场合，能够高效地推动空气沿隧道轴向流动；离心风机则擅长在较高风压下输送空气，适用于需要克服较大阻力的通风路径。风道则如同人体的呼吸道，将风机产生的气流精准地输送到隧道的各个角落^[3]。通过合理规划风道的走向、截面尺寸以及出风口的位置，可以实现对空气流动方向和速度的精确控制。在正常运营时段，机械通风系统持续不断地引入新鲜空气，排出污浊气体，维持隧道内良好的空气质量；而在火灾等紧急事故发生时，它又能迅速切换至排烟模式，将烟雾及时排出，为乘客和救援人员争取宝贵的逃生时间，保障生命安全。

活塞风与机械通风虽然来源和动力机制截然不同，但在地铁隧道这个封闭空间中，二者并非孤立存在，而是相互交织、相互影响。活塞风凭借列车运行产生的自然动力，在隧道内形成强大的气流，这种气流的存在会对机械通风的气流路径产生干扰。当活塞风与机械通风气流方向不一致时，二者会相互碰撞、抵消，使得机械通风难以按照预定的路径将新鲜空气输送到指定区域，甚至可能出现新鲜空气被活塞风迅速带出隧道的情况，极大地降低了通风效率。反之，机械通风系统的运行也会对活塞风产生反作用^[4]。风机的开启和关闭会瞬间改变隧道内的局部压力分布，这种压力变化会沿着隧道传播，影响活塞风的形成和传播过程。在特定的运行条件下，机械通风与活塞风还可能产生共振效应，导致气流波动加剧，对隧道内的设备和人员安全构成潜在威胁。理解二者的相互作用机制，是实现高效通风的关键所在。

3 耦合作用详细分析

在地铁隧道的复杂气流环境中，活塞风与机械通风的耦合作用如同一场错综复杂的“空气博弈”，二者相互影响、相互制约，共同塑造着隧道内的气流形态。当列车在隧道内高速行驶时，强劲的活塞风宛如脱缰的野马，肆意改变着隧道内的气流格局。此时，机械通风系统若试图按照既定方案输送新鲜空气，往往会遭遇活塞风的“顽强抵抗”。在活塞风的作用下，机械通风送入的气流可能会偏离预定轨迹，原本计划输送到车厢内的新鲜空气，可能被活塞风裹挟着流向其他区域，导致通风效果大打折扣。

机械通风系统的运行同样会对活塞风产生不可忽视的影响,二者之间的相互作用是双向的。风机的开启和关闭就像在平静的湖面上投下石子,会在隧道内激起压力的涟漪。当风机启动时,它会向隧道内注入额外的气流,改变局部区域的气压分布^[5]。这种气压变化会沿着隧道传播,影响活塞风的形成和传播过程。原本稳定的活塞风压力波可能会被打乱,其强度和方向都会发生改变。在某些情况下,机械通风产生的压力波可能与活塞风的压力波相互叠加,导致局部压力异常升高,进而影响列车的运行阻力和能耗。

活塞风与机械通风的耦合作用在不同的工况下呈现出多样化的表现形式,其复杂性远超想象。在列车加速和减速阶段,活塞风的强度和方向会发生剧烈变化,这与机械通风系统的配合难度也随之增加。在列车加速时,活塞风迅速增强,可能会将机械通风送入的新鲜空气吹散,导致通风不均匀;而在减速阶段,活塞风减弱,机械通风又需要及时调整以填补通风不足的区域^[6]。不同类型的列车、不同的隧道结构以及不同的环境条件,都会对二者的耦合作用产生影响。长编组列车产生的活塞风与短编组列车不同,曲线隧道内的气流耦合情况也与直线隧道存在差异。

4 气流组织优化策略

优化地铁隧道气流组织的首要策略,在于对活塞风井进行科学合理的调整与布局。活塞风井作为利用活塞风改善隧道通风的关键设施,其位置和数量的设置直接影响着通风效果。在活塞风作用较弱的区域,如隧道的偏远地段、弯道内侧等,增设活塞风井能够有效增强活塞风对隧道内空气的搅动和排出能力。新增加的风井就像一个个“呼吸口”,让原本 stagnant 的空气流动起来,促进空气的更新与交换。合理规划活塞风井的位置至关重要。

优化机械通风系统参数是实现高效通风的另一重要举措。传统的机械通风系统往往采用固定的运行参数,难以适应地铁客流量的动态变化。为了改变这一现状,需要根据不同的运营时段,灵活调整风机的转速和风量^[7]。在高峰时段,地铁站内人潮涌动,乘客对新鲜空气的需求急剧增加,此时应提高风机转速,加大风量,确保有足够的新鲜空气进入隧道和车厢,迅速稀释污浊气体,降低二氧化碳浓度,为乘客营造舒适的乘车环境。而在低谷时段,客流量大幅减少,隧道内空气需求降低,可适当降低风机转速,减少风量,在保证基本通风需求的前提下,避免能源的浪费。

智能控制系统是优化气流组织的关键,通过传感器技术实时监测隧道内的关键参数,如空气质量、温度、湿度和客流量。这些传感器为通风系统提供了“智慧大脑”和“敏锐感官”^[8]。智能系统根据实时数据,运用算法动态调整通风,以应对如二氧化碳浓度升高或客流量变化等情况,确保通风效果与需求匹配,从而提高地铁隧道通风系统的自适应能力和效率。

5 结语

对地铁隧道活塞风与机械通风耦合作用下的气流组织研究,明确了现存问题,揭示了作用原理与耦合机制,并提出有效优化策略。通过优化,可改善隧道空气质量、提升通风效率。未来,需进一步深入研究不同工况下的耦合特性,结合新技术不断完善优化策略,以适应地铁系统持续发展需求,为乘客提供更优质的出行环境。

参考文献

- [1] 刘纪俭,孟鑫,兰慧峰,等.地铁隧道运动列车的活塞风特性研究[J].都市轨道交通,2025,38(03):27-34+47.
- [2] 高伟,王方敏,田婷婷,等.列车运行参数和迂回隧道参数对地铁车站轨行区迂回隧道通风效果的影响规律[J].城市轨道交通研究,2025,28(04):104-109.
- [3] 田婷婷,高伟,王方敏,等.地铁车站轨行区迂回隧道对其通风和热环境的影响[J].城市轨道交通研究,2025,28(01):183-187.
- [4] 刘剑春.不同地铁区间联络通道布置对防火门活塞风作用影响对比研究[J/OL].铁道标准设计,1-9[2025-06-23].
- [5] 武世强,那艳玲,刘云,等.活塞风道有效通风数值模拟研究[J].暖通空调,2024,54(S2):442-446.
- [6] 尹静,刘剑春.基于 OpenFOAM 地铁隧道防火门的活塞风作用时变特性研究[J].结构工程师,2024,40(05):79-87.
- [7] 赵伟,于恩禄,齐卫阳.地铁通风空调系统土建配合降本节能的思考[J].暖通空调,2024,54(S1):298-301.
- [8] 潘剑松.窄波束贴壁天线在地铁隧道通信覆盖的研究和实践[J].长江信息通信,2024,37(05):182-184.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS