

纵向通风对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响

林亚伟

中交机电工程局有限公司 北京 100088

摘要: 本研究聚焦于纵向通风对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响。通过理论分析与模拟实验,揭示了通风风速、火源位置、隧道及车厢结构等因素与烟气温度分布的关联。结果表明,合理的纵向通风设计能有效降低车厢内烟气温度,改善温度分层现象,为人员疏散和消防救援创造有利条件。本研究为地铁隧道通风系统优化及火灾防控提供了理论依据和技术支持。

关键词: 纵向通风; 隧道; 地铁列车; 烟气温度特性

1 纵向通风与烟气特性相关理论基础

1.1 纵向通风原理与系统组成

纵向通风是一种在特定空间内,如隧道、车间等,通过引入新鲜空气并沿纵向(即长度方向)流动,以稀释和排出污浊空气的通风方式。其基本原理是利用风机的推力或自然风的压力差,使新鲜空气从一个端口进入,污浊空气从另一个端口排出,形成连续的空气流动。纵向通风系统主要由以下几个部分组成;进风口:用于引入新鲜空气,通常设置在空间的一端或顶部。风机:用于产生推力,推动空气沿纵向流动。风机可以是射流风机、轴流风机等,具体选择取决于通风需求和空间特点。通风管道:在某些情况下,为了更有效地引导气流,可能会使用通风管道。但在纵向通风中,通风管道并非必需,因为空气是沿空间长度方向流动的。出风口:用于排出污浊空气,通常设置在空间的另一端或底部。纵向通风的主要优点是节省土建费用、风机投资及运营费。

1.2 烟气产生与传播理论

烟气是燃烧过程中产生的气体和固体颗粒物的混合物。其产生和传播过程涉及多个物理和化学过程。(1) 烟气的产生,燃烧是物质与氧气发生化学反应的过程,释放出光和热。在燃烧过程中,可燃物(如木材、纸张、布料等)在高温下迅速燃烧,产生大量的气体和固体颗粒物,形成烟气。烟气的成分和浓度取决于可燃物的类型和燃烧条件。一般来说,烟气中含有多种有害物质,如一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、醛类、有机酸类等^[1]。(2) 烟气的传播,烟雾在热力作用下,通过空气流动造成的垂直方向上的传播。其速度较快,受外部环境影响较大,如风向、风速等。烟雾在浓度差的作用下,通过分子运动造成的水平方向上的传播。其速度较慢,但传播距离较远,不受外部环境影

响。由于火灾中火焰、热气流的扰动,造成烟雾在空间中的不规则传播。其传播路径不规则,速度和距离受扰动程度影响较大。烟气的传播方向和速度受多种因素影响,包括楼层高度、建筑物的封闭性、通风开口的大小和位置、风向风速、烟雾的物理性质(如温度、颗粒大小)等。

2 纵向通风对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响分析

2.1 通风风速对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响分析

纵向通风是隧道火灾防控中的重要手段,它通过控制通风风速来影响烟气在隧道内的蔓延和温度分布。在地铁列车车厢发生火灾时,通风风速对烟气温度的影响尤为显著。首先,通风风速能够直接影响烟气的蔓延速度。研究表明,当通风风速在0.5-1.0m/s时,烟气在隧道内的蔓延速度相对较慢,车厢内温度在10分钟内可升高至200-300℃;当通风风速提升至2.0-3.0m/s时,烟气能在5-8分钟内被较快地地带离火源区域,车厢内最高温度可降低至150-200℃。然而当通风风速过高,超过5.0m/s时,虽然能够迅速带走烟气,但也可能导致火势的扩大和蔓延,因为高速气流可能助燃火势,使火灾更加难以控制。其次,通风风速还会影响烟气的温度分层现象,在火灾初期,烟气在浮力作用下向上移动,形成明显的温度分层。通风风速的增加会打破这种分层现象,使烟气在隧道内更加均匀地分布,从而降低车厢内顶部的温度,但也可能导致车厢内整体温度的上升。这是因为高速气流会加速烟气的混合和扩散,使得高温烟气与冷空气之间的热交换更加频繁。

2.2 火源位置对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响分析

火源位置的不同会导致烟气蔓延路径和温度分布的

差异。当火源位于车厢中部时,烟气会向车厢两端蔓延,形成对称的温度分布。相关模拟实验显示,此时车厢中部温度在火灾发生15分钟后可达350-400℃,向两端逐渐降低,车厢两端温度约为200-250℃。这种温度分布对车厢内的人员疏散和火灾扑救都带来了较大的挑战。当火源位于车厢一端时,烟气会主要向另一端蔓延,形成非对称的温度分布^[2]。此时,火源端的温度在15分钟内可飙升至400-450℃,远离火源端的温度相对较低,约为150-200℃。这种温度分布有利于人员向远离火源端疏散,但也增加火源端人员的疏散难度和火灾扑救的复杂性。火源位置还会影响烟气的逆流现象,当火源位于车厢上游时,在纵向通风的作用下,烟气可能会逆流至车厢下游,导致下游区域温度上升。而当火源位于车厢下游时,烟气则主要向隧道出口方向蔓延,对车厢上游的影响相对较小。

2.3 隧道结构参数对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响分析

隧道结构参数,如隧道长度、截面形状和尺寸等,也会对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性产生影响。隧道长度是影响烟气蔓延距离和温度分布的重要因素。研究数据表明,在长度为1000m的隧道中,烟气蔓延至出口需15-20分钟,车厢内最高温度可达350-400℃;而在长度为500m的较短隧道中,烟气能在8-12分钟内被排出隧道,车厢内最高温度可降低至250-300℃。隧道截面形状和尺寸也会影响烟气的流动和温度分布。圆形截面隧道相较于矩形截面,更有利于烟气的均匀分布和排出。隧道截面的尺寸也会影响烟气的蔓延速度和温度上升速率。较大的截面尺寸能够容纳更多的烟气,从而减缓烟气的蔓延速度和温度上升速率。例如,截面面积为50m²的隧道,烟气蔓延速度相较于30m²的隧道可降低20%-30%,温度上升速率也会相应减缓。

2.4 列车车厢结构对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响分析

车厢的密封性、开口位置和大小等因素都会影响烟气的蔓延和温度分布。车厢的密封性是影响烟气蔓延和温度分布的关键因素之一。密封性较好的车厢能够减缓烟气的蔓延速度,降低车厢内的温度上升速率。而密封性较差的车厢则容易导致烟气迅速蔓延至整个车厢,使车厢内温度迅速升高。车厢的开口位置和大小也会影响烟气的流动和温度分布,当车厢开口位于火源附近时,烟气会通过开口迅速蔓延至车厢外部,从而降低车厢内的温度。而当车厢开口远离火源时,烟气在车厢内的积聚时间更长,导致车厢内温度上升得更高。开口的大小

也会影响烟气的流动速度和温度分布范围。较大的开口能够加速烟气的流动和扩散,从而降低车厢内的温度;而较小的开口则可能限制烟气的流动和扩散,使车厢内温度上升得更高。

3 影响纵向通风对车厢烟气温度特性作用的因素探讨

3.1 隧道与车厢结构因素

隧道与车厢的结构设计对纵向通风效果及车厢烟气温度特性具有显著影响。隧道的几何形状、长度及横截面积会直接影响通风气流的流动路径和速度分布。隧道的内壁粗糙度也会影响气流摩擦阻力,粗糙度较大的隧道内壁会增加气流能量损失,降低通风效率。车厢结构方面,车厢的密封性、门窗位置及大小、内部布局等均对烟气温度特性有重要影响^[3]。密封性良好的车厢能有效阻止外部空气无序流入,维持通风系统的预定气流组织,有利于烟气的有序排出和温度控制。而门窗作为车厢与外界通道,其位置和大小会直接影响通风气流的进出路径和流量,进而影响车厢内的温度分布。车厢内部布局,如座椅排列、行李架设置等,也会改变气流流动模式,对烟气温度特性产生间接影响。

3.2 通风系统参数因素

通风系统的参数设置是调控车厢烟气温度特性的关键。通风风速作为最直接的控制参数,其大小直接影响烟气的排出速度和车厢内的温度分布。适当的通风风速能有效稀释和排出烟气,降低车厢内温度;而风速过大或过小则可能导致烟气滞留或通风不足,影响温度控制效果。通风模式的选择也对烟气温度特性有重要影响。常见的通风模式包括单向通风、双向通风及混合通风等。不同的通风模式会形成不同的气流组织,进而影响烟气的扩散路径和温度分布。通风系统的运行稳定性也是影响烟气温度特性的重要因素,通风设备的故障、老化或维护不当都可能导致通风效率下降,进而影响车厢内的温度控制。

3.3 火灾特性因素

火灾特性,包括火源位置、火势大小、燃烧物质类型等,对纵向通风对车厢烟气温度特性的作用具有决定性影响。火源位置的不同会导致烟气蔓延路径和温度分布的差异。例如,火源位于车厢中部时,烟气可能向两端蔓延,形成对称的温度分布;而火源位于车厢一端时,则可能形成非对称的温度分布。火势大小直接影响烟气的产生量和蔓延速度。大火势会产生更多的烟气,且蔓延速度更快,对通风系统的要求也更高。此时,需要更大的通风风速和更合理的通风模式来有效稀释和排出烟气,控制车厢内温度。燃烧物质类型也是影响烟气温度

特性的重要因素。不同物质燃烧时产生的烟气成分和温度不同,对通风系统的适应性和控制效果也有差异。

4 纵向通风对隧道内地铁列车车厢烟气温度优化策略与工程应用

4.1 通风系统优化设计

通风系统的优化设计是降低隧道内地铁列车车厢烟气温度、提升安全性能的关键。首先,需根据隧道的几何尺寸、列车运行特性及预期火灾场景,精确计算所需的通风量,确保在火灾发生时能够迅速有效地排出烟气。研究表明,对于一条长度为800m、截面面积为40m²的隧道,在火灾场景下,通风量需达到30-40m³/s才能有效排出烟气。这要求通风系统具备足够的送风能力和合理的气流组织,以形成稳定、高效的纵向通风流场。在通风系统布局上,应充分考虑隧道的实际结构,合理设置送风口和排风口的位置、数量及尺寸,确保气流能够均匀、顺畅地通过车厢,减少涡流和死角,提高通风效率。采用可调节的通风设备,如变频风机等,根据火灾发展的不同阶段动态调整通风量,实现更加精准的烟气控制。通风系统的优化设计还需考虑与隧道内其他安全设施的协同作用,如火灾自动报警系统、自动喷水灭火系统等,确保在火灾发生时能够迅速启动应急响应,形成多层次的火灾防控体系。

4.2 火灾应急预案

制定完善的火灾应急预案是应对隧道内地铁列车火灾事故的重要保障。在火灾应急预案中,应特别关注通风系统的应急操作,一旦火灾发生,应立即启动通风系统的应急模式,调整通风量,控制烟气蔓延方向,降低车厢内烟气温度。同时预案还应规定在火灾初期如何利用通风系统辅助乘客疏散,以及在火灾后期如何配合消防救援队伍进行灭火和排烟工作^[4]。火灾应急预案还应包括定期演练和评估机制,通过模拟火灾场景检验预案的可行性和有效性,及时发现并改进预案中存在的问题。

4.3 新型技术应用

随着科技的不断进步,新型技术在隧道内地铁列车

车厢烟气温度控制方面的应用日益广泛。该系统能够实时监测隧道内的空气质量、烟气浓度和温度等参数,根据火灾发展的实际情况自动调整通风量,提高通风效率。另外,新型灭火技术如细水雾灭火系统、惰性气体灭火系统等也在地铁列车火灾防控中得到了应用。这些技术能够在火灾初期迅速扑灭火焰,降低烟气温度,减少有毒有害气体的产生。它们还具有环保、高效等优点,符合现代地铁运营对安全、环保的要求。虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术也可以用于地铁列车火灾应急培训和演练中。通过模拟火灾场景,让乘客和工作人员在虚拟环境中进行疏散和救援演练,提高他们的应急反应能力和自救互救能力。新型技术的应用为隧道内地铁列车车厢烟气温度控制提供更加高效、智能的解决方案,有助于提升地铁运营的安全性和可靠性。

结束语

纵向通风作为地铁隧道火灾防控的重要手段,对车厢烟气温度特性具有显著影响。通过本研究,深入理解了其内在机制,并明确了优化方向。未来,应继续探索更高效的通风策略与新型技术,提升地铁运营的安全性与可靠性。同时加强应急演练与人员培训,确保在火灾发生时能够迅速响应,最大限度保障乘客生命安全与财产安全。

参考文献

- [1]彭敏,吴振坤,蒋顺,等.纵向通风对隧道内地铁列车车厢烟气温度特性的影响[J].消防科学与技术,2023,42(12):1656-1662.DOI:10.3969/j.issn.1009-0029.2023.12.011.
- [2]王桃桃.基于神经网络的地铁列车速度传感器自动化诊断[J].电子设计工程.2024,32(10).DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2024.10.019.
- [3]樊新阳,唐飞,黄亚军,等.隧道区间内运行列车车顶火灾特性研究[J].消防科学与技术.2024,43(9).DOI:10.20168/j.1009-0029.2024.09.1286.06.
- [4]李秋义,杨荣山,任西冲,等.市域铁路装配式无砟轨道结构关键参数研究[J].铁道工程学报,2024,41(02):38-43.