

基于纵向通风隧道车厢烟气蔓延的人员疏散策略研究

刘 唤¹, 赵兰英²

(1. 商丘工学院, 河南 商丘 476000;

2. 齐鲁理工学院, 山东 济南 250000)

摘 要 隧道作为基础设施在公共交通工具中扮演着十分重要的角色, 隧道火灾具有温度高、能见度低、蔓延速度快、灭火时间长、事故发生随机和不可预测等特点, 一旦隧道发生火灾, 由于典型的狭窄和受限结构, 乘客密度高和车站内部距离长, 有毒烟雾将极大地威胁隧道中人们的生命安全, 造成较多的人员伤亡。本文将基于纵向通风(机械通风)系统机理, 在分析环境因素、隧道内障碍物、隧道尺寸及其形状和坡度几方面的基础上, 研究纵向通风下隧道车厢人员疏散策略。

关键词 纵向通风; 烟气蔓延; 坡度

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)01-0124-03

隧道作为基础设施在公共交通工具中扮演着十分重要的角色, 随着全球隧道数量的快速增长以及火灾事故的不断增加, 对隧道火灾的研究也在不断增加。相关数据显示: 在火灾中, 由于燃料的未完全燃烧, 隧道发生火灾时会产生大量烟雾。高温烟雾造成的人员伤亡约占80%^[1]。烟雾会降低氧气浓度并产生有毒气体, 如二氧化硫和硫化氢。在隧道内发生火灾, 产生的烟雾会比类型火灾产生的烟雾更多。隧道火灾具有温度高、能见度低、蔓延速度快、灭火时间长、事故发生随机和不可预测等特点, 一旦发生火灾, 由于乘客密度高和车站内部距离长, 有毒烟雾将极大地威胁隧道中人们的生命安全, 造成较多的人员伤亡(见图1)。基于此, 本文将在分析临界风速的影响因素的基础上, 研究纵向通风隧道中人员疏散策略。

1 纵向通风系统(机械通风)的机理

机械通风过程包括纵向或横截面通风系统, 通过降低车辆污染物排放水平, 在正常运行条件下更新隧道环境。在火灾情况下, 通风通过在上游或烟雾层下方的适当高度提供新鲜空气来清除隧道中的烟雾。早期的纵向通风系统通常安装在隧道中, 以使其中的空气循环。如今的通风系统也可用于控制和保护隧道火

灾过程安全的烟雾运动, 纵向机械通风系统被广泛用于防止隧道火灾中的烟气分层。PID控制器的自动通风系统在未知火灾大小情况下, 可迅速判断烟雾大小并实时防止烟气分层, 为疏散救援工作提供时间。与基于恒定通风速度的系统相比, 它对未知火灾大小具有良好的适应性, 对于较高的火灾热释放率, 烟锋也会比较稳定。但当增加隧道高度时, 该系统则需要更长的时间来测试烟锋的稳定, 这是因为足够高的火焰(与隧道高度相比)会导致温度快速升高。

在纵向通风下, 当火焰从隧道中部向上游(左侧开口)移动时, 由于隧道内部的纵向流动, 火焰向下游(右侧开口)倾斜。倾斜角随着火灾接近隧道开口而增加。相应地, 产生的最高天花板气体温度的位置从火源的正上方移动到下游侧, 天花板气体的最高温度也会降低。此外, PID系统还可以在上游和下游方向观察到天花板气体温度的不对称纵向分布。天花板气体温度在两个方向上呈指数衰减, 较短一侧(火灾与最近开口之间距离较短的一侧)的衰减率较低。

纵向通风相对于横向通风而言, 造价和经营费用较低, 但它最初只限于长度不超过1km的隧道, 后放宽至2km, 不适用于较长隧道。

★基金项目: 河南省高等学校重点科研项目“顶部排烟与纵向通风协同作用下的隧道火灾回流烟气蔓延特性研究”(21B620002); 商丘工学院2022年度校级科研项目(2022KYXM24)。

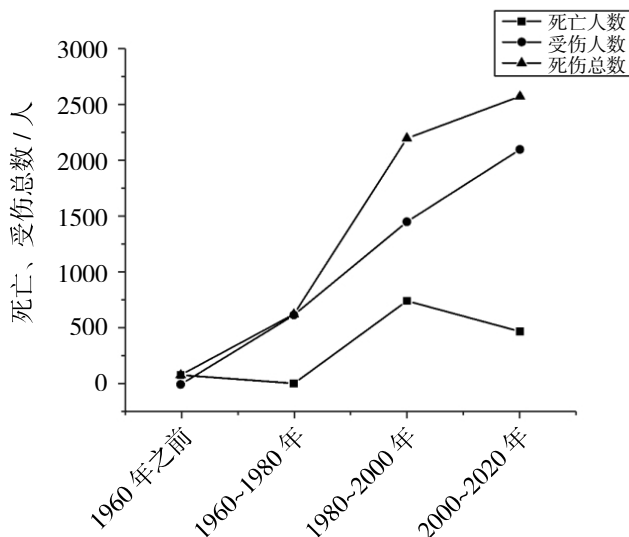


图 1 国内外地铁火灾死亡、受伤人数统计

2 纵向通风系统下影响烟气蔓延的因素

为防止火灾烟气逆流，隧道纵向通风风速应大于一定的值，当大于该值后，烟气将不会逆流，这个速度称为临界风速，临界风速纵向通风系统设计的关键，也是判断隧道火灾烟气逆流情况的重要指标，为火灾后续救援和人员逃生提供重要依据。纵向通风作为隧道内常见的通风排烟形式，对其临界风速的影响因素开展研究将具有重要的现实意义，本文重点分析环境、障碍物、隧道尺寸及其形状和坡度几方面对临界风速的影响^[2]。

2.1 环境因素

隧道内的环境因素主要涉及温度、风、颗粒物等。当隧道内发生火灾时，隧道内环境即可发生变化，火灾前期环境温度越高，火情恶化越早，火势蔓延越厉害。

无风时，火源周围的热空气积聚，温度上升较快，烟气向上移动，隧道天花板积聚大量固态颗粒，但对火源周围影响较小；风速较小时，空气流动加快，火灾产生的热空气在较短时间内被带走，热量不能累积，火源周围温度上升速度降低；风速很大时，氧气含量高，火势蔓延加快，温度上升速度快。

有风条件下，烟气迅速上移并沿风速方向扩散，上部烟气厚度较大，能见度降低，尤其是隧道内有障碍物，会大大增加疏散救援难度，不利于安全救援工作的开展。

2.2 隧道内障碍物

在正常的隧道内可能会有许多的障碍物（如列车

车厢等），这些障碍物在隧道内可以在很大程度上改变纵向风到达火源附近的风速，并改变纵向风的风向，显著的影响火源及火势的发展。

一般来说，火灾较小时，火焰不与隧道顶棚接触，阻塞效应可使风速在火源处被局部放大，加快烟气排出，带走大量热量；火灾较大时，火焰与隧道顶棚相接触，火焰区的最高温度一般不受火源功率和隧道通风条件的影响，因而亦不受阻塞效应的影响。当烟气蔓延方向与障碍物位于火源同侧时，烟气蔓延速度最大，无障碍物时次之，与障碍物位于火源异侧时最小；当火灾功率改变时，障碍物位置对顶棚烟气最高温升的影响也会发生变化；阻塞效应会使得烟气向有障碍物侧纵向蔓延的温度衰减速度降低，而向无障碍物侧的纵向蔓延则不受此影响^[3]。

2.3 隧道尺寸及其横断面形状

目前，常用的盾构标准断面形式有单线盾构圆形隧道标准断面、单跨矩形隧道标准断面和设中柱的双跨单洞双线矩形隧道标准等，我国主要采用单线盾构圆形隧道标准断面，这三种断面的临界风速与烟气逆流层长度的变化关系几乎呈线性关系。一般来说，单线盾构圆形隧道所对应的临界风速最大，隧道顶部蓄烟能力较大，烟气层下降较慢；双跨矩形隧道着火点中心纵断面烟气的温度和浓度下降速度最慢；设中柱的单洞双跨矩形隧道所对应的临界风速最小。

2.4 隧道坡度

无坡度的隧道内，烟气在火源两侧基本呈对称分

布,随着隧道坡度增加,火源上游烟气层厚度会减小。当隧道坡度增大时,隧道上游端部的烟气越稀薄,烟气蔓延长度越小;隧道坡度达到一定程度时,火源上游隧道端部附近烟气层分界中性面可能会消失,这时烟气将不再向远端蔓延。

相比无坡道隧道而言,坡度隧道内高温区域的厚度变小,高温区域范围减小^[4]。有坡度的隧道内发生火灾时,烟气受坡度限制,烟气在火源两侧蔓延状态不同,火源下游烟气层分界中性面不再呈现水平状态,与隧道顶板平行,但位于火源上游区域的烟气层基本保持水平状态,受坡度变化的影响作用较小。随着坡度的增大,隧道内低能见度区域变小,烟气层变薄,火源上游烟气蔓延距离变小^[5]。

坡度隧道内的火灾烟气蔓延会形成烟囱效应,烟气更有利于向火源下游蔓延;若风向与坡度方向一致,烟气层会更好控制,不易紊乱,隧道内会有较高的清晰层;反之,隧道内将需要大量空气涌入且需加大通风速度,否则极易破坏烟气分层,导致隧道空间内充满烟气,影响人员的逃生和消防救援。

3 基于烟气蔓延的人员疏散策略研究

3.1 完善的消防联动控制系统

消防联动控制系统在检测到火灾信号后,能自动关闭防火阀、电动防火门、防火卷帘门,开启排烟阀,迅速接通事故照明及疏散标志灯,并通过控制中心的控制器启动灭火系统。隧道内的大部分人员对隧道环境并不熟悉。隧道发生火灾时,传达和获取疏散信息是疏散人员的关键问题。由于隧道通常照明较低,隧道外的连接也相对较少,因此完善的消防联动控制系统可以为隧道被困人员提供基础的安全疏散信息,帮助并指导被困人员注意紧急情况、寻找出口和引导路径用,方便人员快速、安全撤离。根据相关数据显示:由设备因素引发地铁火灾事故比例最高,因此,应时常定期维护更新相关设备,不要抱侥幸心理,一旦发现问题立即更换设备,不要让消防联动控制系统流于形式。

3.2 在隧道设置水幕防火分隔

在隧道内设置水幕可以阻止部分烟气扩散,冷却烟气,降低二氧化碳浓度和增加水帘外的氧气浓度,同时还可以有效避免防火门、防火卷帘易损坏、寿命低的特点,降低隧道的维护成本。但高温烟雾会使水幕气化,产生大量水蒸气,从而增加烟尘密度,降低能见度。

因此,在设置水幕灭火系统时应注意水幕排烟口间距和通风系统排烟速率的设置。一般来说,水幕排烟口间距12m左右,排烟速率 $60\text{m}^3/\text{s}$ 时,防火比较有效,安全疏散比较有利。

3.3 合理设置隧道坡度和横断面形状

不同的隧道坡度和横断面形状,烟气蔓延长度、烟气层、火羽流和烟气羽流也不同,合理设置隧道坡度和横断面形状可以增加疏散时间,减少人员伤亡。一般情况下,当隧道坡度大于1.3%时,人员密度对下坡方向疏散速度的影响占据了主导作用,建议尽量采用往下坡方向疏散的策略;对于坡度小于1.3%的隧道,可以同时选择上下坡两个出口尽早开展疏散行动。根据我国常用的盾构标准断面形式来看,断面越接近圆形,隧道顶部温度越低,由于圆形隧道不仅在拱顶处集聚热烟气,还通过隧道两侧形成的弧形区间集聚大量热烟,所以我国隧道横断面大多都接近于圆形。

4 结论

本文在纵向通风(机械通风)的基础上,分析了影响隧道车厢内烟气蔓延的环境因素、隧道内障碍物、隧道尺寸及其横断面形状、隧道坡度等,并结合上述因素,制定了相应的人员疏散策略,旨在为相关人员提供参考。

参考文献:

- [1] 郭春,王明年,赵海东.铁路特长隧道火灾应急救援问题研究[J].中国安全科学学报,2007(09):153-158,181.
- [2] 唐海峰.横截面形状和坡度对隧道火灾烟气分布影响研究[J].消防科学与技术,2022,41(01):58-61.
- [3] 游温娇,徐志胜,孔杰.盾构铁路隧道坡度对火灾烟气蔓延的影响研究[J].中国安全生产科学技术,2021,17(09):132-138.
- [4] 叶美娟.自然通风隧道内火灾烟气运动特性与控制效果研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
- [5] 刘轩,王新祥,马焯红,等.水平交叉隧道间夹角对火灾烟气特征参数分布的影响研究[J].广东土木与建筑,2022,29(03):33-36.