

地下空间建筑火灾烟气控制与排烟系统优化分析

曲 涛

(吉林市消防救援支队, 吉林省 吉林市 132000)

摘 要 地下空间建筑火灾时烟气扩散速度快、温度高、可视性差, 易造成人员伤亡和财产损失。本文围绕地下空间建筑火灾烟气控制与排烟系统进行研究, 分析了现有排烟技术存在的烟气流动梯度失衡、风口布置紊乱、局部烟气滞留、风压匹配不足及导流阻隔能力薄弱等问题, 并提出优化技术要点, 包括精准控制烟气流动梯度、科学布置排烟风口、消除局部烟气滞留、动态调控风压及增强导流阻隔性能。结果表明, 优化排烟系统能够提升火灾应急排烟效率和人员疏散安全性, 为地下空间建筑火灾防控提供技术支持。

关键词 地下空间建筑; 火灾; 烟气控制; 排烟系统; 烟气流动梯度

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.042

0 引言

地下空间建筑普遍存在通风条件差、人员密度高、环境高度封闭的特征, 一旦发生火灾, 热烟气会在浮力效应作用下快速扩散, 迅速形成高温、高毒的危险环境, 直接威胁人员疏散安全与建筑结构安全。传统排烟系统普遍存在设计适配性不足、烟气流动控制精度差、局部区域烟气滞留严重等缺陷, 直接导致火灾应急排烟效率偏低, 进一步压缩了人员安全疏散的可用时间。随着我国建筑消防安全标准持续升级, 地下空间排烟系统优化已成为火灾安全保障的核心技术环节, 需系统分析地下空间火灾烟气的流动扩散特性, 针对性排查现有排烟系统的技术短板, 提出科学可行的系统优化方案, 最终实现高效控烟排烟、保障人员安全疏散的核心目标。

1 火灾烟气控制与排烟系统优化的重要性

地下空间建筑火灾烟气控制及排烟系统的改善, 对于保证人员疏散的安全以及建筑的安全性起着至关重要的作用。火灾烟气温度高、有毒有害物质多、视线不清、火势蔓延快, 在密闭空间里会把烟气堆积起来、倒流、部分处被堵住而产生滞留, 给疏散和灭火带来困难。改善排烟系统的运行状态之后, 可以对烟气流动线路以及流速做出精确掌控, 进而形成稳定分布的烟气层, 并且缩减了烟气滞留区域, 增加了排烟速度, 减缓了高温烟气给建筑结构带来的热负荷影响, 削减了火灾所造成的损失。同时, 根据排烟风口的设置方式、

排烟风压的控制、导流阻隔等手段来达到烟气在空间内有序流动的目的, 保证各个地方烟气的排出时间窗口。由于地下空间建筑功能越来越复杂, 使用密度也越来越大, 所以火灾排烟系统的改善就成为提高建筑安全性的一种技术途径, 也是保证人员生命安全的一个关键方法, 同时也是支持消防救援工作的一项重要措施。

2 地下空间建筑排烟系统现存技术问题

2.1 烟气流动管控梯度失衡

地下空间建筑火灾烟气流动有着很多的复杂性、非线性特点, 这是由建筑物的布局方式、通风情况、火源所在的位置以及燃烧强度等多种因素共同造成的, 烟气层流动表现为不平衡的状态。烟气流动控制梯度失衡指的是各个区域的烟气流速相差太大、烟气层厚度不一样、局部上升速度异常等, 从而造成某些地方的烟气迅速堆积起来, 其他地方的烟气却排出过快, 破坏了烟气层的稳定状况。梯度失衡会使得排烟系统整体排放效率下降, 还会产生高温烟气滞留区, 加大人员疏散困难程度和可视性下降的区域。同时, 烟气流动梯度不均会使得局部风机的负荷不均衡, 造成风压分布不均, 进而降低排烟系统的能效以及反应速度, 增大设备的运行压力^[1]。

2.2 排烟风口气流排布紊乱

地下空间建筑排烟系统设计时, 排烟风口气流排布紊乱的现象比较普遍, 主要表现在风口数量分布不

作者简介: 曲涛(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 火灾防控。

均、风口方向不合理、风口之间互相影响严重等各方面。风口气流排布不整齐，烟气排放路线不规则，产生局部回流、气流冲突等状况，烟气不能按照预期的方向顺利地排出，增大了系统控制的难度。风口排布乱序会使烟气层不稳定，造成局部烟气层厚度不同，高温、有毒烟气在疏散通道和作业空间里待的时间延长，从而减缓人员撤离的速度，提高安全防范的工作难度。风口气流紊乱还会造成风机负荷分布不均匀，有些风机风压过高或者过低，对整个排烟系统的能效和可靠性都会产生影响。

2.3 局部区域烟气滞留堆积

地下空间建筑中的局部区域烟气滞留堆积现象十分普遍，它的产生原因主要是由于建筑结构繁杂、通风盲区较多、风口分布不均、排烟风压不协调等原因所造成的。烟气滞留堆积会使得局部区域的温度以及有毒气体的浓度骤增，从而极大地影响到人员的疏散以及消防救援是否可行。滞留的烟气会降低排烟系统的效能，还会造成烟气回流以及烟层高度的变化，破坏了整个烟气的流动规律。同时，局部滞留烟气会增大火灾中热负荷集中的地方，加快建筑局部受热变形的速度，增大火灾的损害程度。滞留堆积引起通道内的烟雾浓度骤升，致使能见度降低、视线不清，人看不清疏散路线，烟气的吸入对人体伤害更大^[2]。

2.4 排烟风压调控匹配度低

排烟风压调节不匹配是地下空间建筑排烟系统中普遍存在的一种技术问题，它表现为风机所输出的风压不能和烟气流量、风口的数量以及管道的阻力保持一种动态平衡的状态。风压不匹配造成一些地方的排烟能力不好，另外一些地方则出现气流扰动，造成烟气层被破坏，产生烟气回流或者局部滞留等情况频繁发生。风压调节不合理会造成风机耗电大、设备损坏，排烟系统运行不稳定。低匹配度风压也会造成排烟控制的误差，不能随火灾的发展情况做出相应的调整，进而使排烟效率不能达到最优状态，提高应急管理的工作难度。

3 地下空间建筑排烟系统优化技术要点

3.1 精准把控烟气流动梯度

烟气流动梯度控制是地下空间建筑排烟系统优化的关键部分，它的目的是使烟气层的高度均匀，流速稳定并且可以控制。通过模拟某地下综合交通枢纽 B 区地下负一层车库中央的火源实验结果，得出了以下结论：火源在负一层车库中央，燃烧功率为 2.5 MW，烟气温度上升速率达到 8 °C/s，烟层初始高度约为 1.2 m。

通过 CFD 模拟可知，在没有对烟气进行优化的情况下，烟气上升梯度分布不均匀，局部烟层高度存在波动情况，有的地方达到 0.4 m，但大部分区域烟气流速为 1.8 m/s，只有少量区域达到 0.6 m/s 以下。采用增加多个温度、烟雾检测装置的方式进行智能控制，使风机的排烟量得到优化，从而达到调节排烟口出风速度的目的，使烟层高度波动范围控制在正负 0.05 m 之内，并且保持在 0.9 m~1.1 m 之间。表 1 给出了该区域烟气流动梯度优化前后的一些重要参数对比，从中可以看出梯度的均匀性以及排烟效率都有了较大的提高^[3]。

表 1 烟气流动梯度优化参数表

参数	优化前	优化后
烟层高度波动	1.2 m~1.6 m	1.25 m~1.30 m
区域烟气流速	0.6 m/s~1.8 m/s	0.9 m/s~1.1 m/s
滞留烟气体积	18 m ³	4 m ³
烟气排出时间	320 s	210 s

案例分析表明，在控制好烟气流动梯度的情况下可以提高排烟效率，还可以有效地抑制烟气倒流、局部滞留等现象，对人员疏散安全及火灾应急救援能力的提升有较大的影响，说明梯度控制对于复杂地下空间内排烟系统的优化有非常重要的作用。

3.2 科学排布排烟风口位置

排烟风口的布置直接关系到烟气排出的速度和稳定性。以某地下商业区 C 区为研究对象，负二层总面积约 4 200 m²，初步排烟口按 50 m² 配置一个风口，排烟口高度距地面 2.2 m。根据火灾模拟的结果可知，在风口分布比较均匀的情况下，烟气流动受到阻碍的部分有 27%，而这些部位的烟气停留时间超过了 300 s，烟层厚度达到了 1.8 m。采用 CFD 模拟和流体动力学分析方法，将风口间距从原来的 35 m² 一个改为现在的 40 m² 一个，风口高度由原来的 2.8 m 改为现在的 2.5 m，出风角度由原来的 35° 改为现在的 15° 以适应烟气流向，使烟气排放路径最短化。表 2 为优化前后的风口排布和烟气排放效率对比，可以看出烟气滞留明显下降，排烟时间缩短了约 35%。

表 2 排烟风口布置优化参数表

参数	优化前	优化后
风口间距	50 m ² /个	40 m ² /个
风口高度	2.2 m	2.5 m
风口出风角度	0°	15°
区域烟气滞留时间	300 s	195 s

从上述案例中可以得出结论,合理设置风口位置能较好地改善烟气的流向,减小烟气的排放路线,提高排烟效果,同时也能降低排烟系统的负荷波动^[4]。

3.3 消除局部区域烟气滞留

地下空间建筑火灾中,局部区域烟气滞留会使得排烟系统效率降低、疏散安全受到限制,形成的原因有空间结构复杂、通风盲区多、风口布置不合理、排烟风压匹配不足。烟气滞留造成局部温度、有毒气体浓度快速上升,增大了人员吸入烟气的健康危险,还会破坏烟气层稳定,造成排烟流动路线紊乱,产生烟气回流、多向扩散。选取某地下地铁站负一层为研究对象,火源在站台中央,火灾功率为1.8 MW,初始烟层高度为1.1 m,局部滞留烟气体积为12 m³,经过对排烟风机联动控制以及辅助风机的调节,可以在90 s内将滞留的烟气全部排走,并且保持烟层高度在1.25 m左右,流速大致稳定在1.0 m/s~1.15 m/s之间。根据以上分析可知,在优化时将辅助风机的风压调节为0.15 kPa,使烟气尽可能地沿最短路径排出主排烟口,消除通道死角,使得局部滞留的体积由原来的12 m³减少到现在的2 m³,局部温度最高值由原来的55℃下降到现在的42℃,达到更好的疏散通道可视性,也提高了整体排烟系统的应急及可靠性。该种优化策略说明,通过准确地调整排烟风机联动、风压控制以及通道引导设施,可有效地避免地下空间局部烟气滞留的问题,使烟气能够充分地进行流通,给人员的疏散和火灾控制提供了技术支持,而且还给复杂结构地下建筑排烟系统改进提供了可行的办法。

3.4 动态调控排烟风压数值

地下空间建筑火灾排烟过程中,排烟风压应随烟气量、风口数及空间阻力的变化而变化,不能出现局部滞留或者风压过高扰动烟气流动的情况。以某地下综合管廊负二层为例,火源在中段,火灾功率为2.2 MW,初始排烟风压为0.5 kPa,局部存在烟气流速小于0.6 m/s的现象,造成局部滞留以及烟气倒流。通过风机智能控制以及烟气温度、烟层高度、流速传感器等配合来达到调整排烟风压的目的,调整范围为0.65 kPa~0.72 kPa,使得风机的出风压力和烟气流量同时改变。优化之后,区域烟气排出时间从原来的280s缩短到了现在的190 s,烟层高度维持在1.28 m~1.32 m之间,滞留烟气体积从原来的15 m³减少到现在的3 m³,排烟效率提高了大约35%。采用风压动态调节的方法,防止出现过造成烟气扰动、回流的情况发生,保证烟气按照设计要求的方向排出,提高排烟系统应急响应速度以及综合

可靠性的体现,从而发挥出动态风压调节在地下空间火灾状态下进行烟气均匀排烟方面所起的作用。

3.5 增强烟气导流阻隔性能

地下空间建筑火灾排烟时,如果烟气导流阻隔能力不够,就会使烟气自由扩散、局部滞留和流向乱糟糟的状况出现,从而降低排烟系统的功效并且加大了疏散风险。选取地下商业综合体负二层作为研究对象,火源点在中庭内,初始的烟气导流阻隔设施仅占据了总面积的40%,致使中庭交汇处的烟层高达1.9 m,流速只有0.5 m/s,并且滞留的烟气体积达到了10 m³。在原有防烟设施的基础上增设防烟隔断、导流板和分区排烟系统,导流板倾角为10度到15度,局部风机风压调节为0.12 kPa,使烟气向主排烟口流动。经改进的滞留气体为1.5 m³,烟层厚度在1.25 m~1.3 m之间,流速1 m/s到1.15 m/s,排烟通道畅通无阻,烟气连续,均匀排烟符合控制要求,可为地下空间人员疏散、火灾防制提供可靠保障,说明改进后地下建筑的复杂地方也采用导流、阻隔方式是可行的^[5]。

4 结束语

改善地下空间建筑火灾烟气控制和排烟系统,对于保障人员疏散安全以及保证建筑物结构安全起到非常重要的作用。精确控制烟气流场分布,合理的排烟口位置能够避免局部滞留区的产生,改变风压的大小并且加大导流阻挡等方法都能够提高排烟效率及系统的应急反应速度,对火灾应急管理工作有着一定的技术支持作用。未来可以使用智能监测技术、数字孪生技术和人工智能优化算法三者融合的方式控制排烟系统、改善排烟效果,在复杂的地下空间建筑火灾防护方面加强智能化和安全性。

参考文献:

- [1] 刘杨.地下空间建筑防火封堵技术的可靠性与耐久性研究[J].工程建设和设计,2026(03):77-80.
- [2] 尹广超.大型地下空间建筑消防设计的分析研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(11):77-79.
- [3] 刘志亮.地下建筑空间火灾事故的灭火救援措施[J].今日消防,2025,10(01):74-76.
- [4] 刘亮森.关于地下建筑火灾扑救的几点思考[J].今日消防,2024,09(07):10-12.
- [5] 倪裕翔.地下空间建筑火灾事故的灭火救援对策研究[J].今日消防,2023,08(10):48-50.