

# 火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略研究

侯志强

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

**摘要:** 本文聚焦火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略。首先阐述协同控制基础理论,剖析管道火灾特性与通风排烟耦合机制,指出独立运行局限及协同作用关键因素。接着构建协同控制策略,涵盖总体框架、基于火灾阶段与管道类型的策略及设备联动逻辑。最后设计工程应用流程,提出运行维护保障措施。旨在提升管道类空间火灾防控能力,为实际工程应用提供理论支撑与技术指导。

**关键词:** 火灾工况;管道通风;排烟协同控制策略

引言: 在各类建筑与工业设施中,管道类空间火灾防控至关重要。火灾发生时,管道通风与排烟系统的运行状态直接影响人员疏散安全与火灾蔓延控制。然而,传统通风与排烟系统独立运行,难以适配火灾工况动态变化,存在诸多防控短板。研究火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略,构建科学有效的协同控制体系,成为提升管道火灾防控能力的迫切需求。

## 1 火灾工况下管道通风与排烟协同控制基础理论

火灾工况下管道通风与排烟协同控制基础理论,是基于流体力学、燃烧学及自动控制理论的交叉学科核心内容。其核心要义在于通过统筹通风系统与排烟系统的运行状态,实现火灾烟气的有序排出、有毒有害气体浓度降低及燃烧供氧的合理调控,兼顾人员疏散安全与火灾蔓延控制。该理论以火灾烟气流动规律为核心依据,明确通风量与排烟量的动态匹配关系,破解单一系统运行导致的烟气滞留、倒灌等问题。同时,结合热力学原理分析火灾场景下管道内温度场、压力场的分布特征,为协同控制参数设定提供理论支撑<sup>[1]</sup>。另外,该理论还涵盖系统响应延迟特性、设备联动兼容性等关键内容,构建“感知-决策-执行”的闭环控制逻辑,为后续耦合机制分析与控制策略设计奠定坚实的理论基础,是提升管道类空间火灾防控能力的核心支撑。

## 2 火灾工况下管道火灾特性与通风排烟耦合机制

### 2.1 管道火灾动态演化特性

管道火灾动态演化特性呈现显著的封闭性、传导性与阶段性特征,与开放空间火灾存在本质差异。火灾初期,管道内可燃物受热分解产生可燃蒸气,与空气混合形成预混气体,受管道壁面约束,燃烧范围局限于局部区域,温度与烟气浓度缓慢上升,此时火灾蔓延速度受通风条件与管道截面尺寸影响显著。发展阶段,火势沿管道轴向快速蔓延,形成稳定火羽流,管道壁面吸热后加速热量传导,

导致相邻区域可燃物快速升温,引发连锁燃烧反应,同时烟气在管道内积聚形成正压区,推动烟气向两端扩散。鼎盛阶段,管道内达到完全燃烧状态,温度峰值可达数百度,管道材料因高温发生变形、破损,可能引发火势突破管道蔓延至外部空间。衰退阶段,可燃物逐渐耗尽,火势减弱,烟气温度缓慢下降,但有毒有害气体仍需持续排出。整个演化过程中,管道坡度、材质、内部介质及接口密封性等因素,均会改变火灾蔓延速度与烟气流动轨迹,呈现复杂的动态变化规律。

### 2.2 通风与排烟系统独立运行的局限性

通风与排烟系统独立运行时,难以适配火灾工况的动态变化需求,存在诸多防控短板与安全隐患。通风系统单独运行时,其设计初衷为日常空气循环,火灾发生后若持续常规运行,会为燃烧提供充足氧气,加速火势蔓延与烟气生成,同时可能将烟气推送至非火灾区域,扩大污染范围,阻碍人员疏散通道。若紧急关停通风系统,管道内易形成负压环境,导致外部烟气倒灌,加剧局部有毒气体积聚。排烟系统单独运行时,受单一排烟动力限制,难以实现管道内烟气的全面排出,尤其是长距离、多分支管道,易出现排烟死角,部分区域烟气滞留时间过长。同时,单独排烟易导致管道内压力失衡,引发烟气跨区域扩散,且无法根据火灾发展阶段调整排烟量,在火灾初期可能因排烟量过大破坏火羽流稳定性,鼎盛阶段又因排烟能力不足导致烟气溢出。两套系统独立运行缺乏协同联动,易出现运行冲突,如通风与排烟方向相悖,降低整体防控效果,无法满足火灾工况下的动态防控需求。

### 2.3 通风与排烟协同作用机制

通风与排烟协同作用机制以“动态匹配、精准调控、优势互补”为核心,通过统筹两套系统的运行参数与启停逻辑,实现火灾防控效能最大化。其核心机制体现在三

个维度：一是压力场协同，通过调控通风量与排烟量的差值，在管道内构建合理的压力梯度，使非火灾区域保持正压、火灾区域保持负压，有效阻止烟气向疏散通道及相邻区域扩散，同时避免烟气倒灌。二是流量场协同，根据火灾发展阶段动态调整通风与排烟流量配比，火灾初期以低风量通风辅助排烟，减少烟气扰动；发展阶段增大排烟量并适度控制通风量，在抑制火势蔓延的同时高效排出烟气；鼎盛阶段维持最大排烟量，配合阶段性通风降低管道内有毒气体浓度。三是时序协同，通过精准捕捉火灾信号，实现通风与排烟系统的有序启停、参数切换，避免运行冲突，形成“先排烟、后调控通风、全程动态适配”的联动逻辑，破解单一系统运行的功能短板，实现烟气控制与火势抑制的双重目标。

#### 2.4 协同作用的关键影响因素

火灾工况下通风与排烟协同作用的效果，受多维度关键因素影响，且各因素相互关联、相互制约。系统参数层面，通风机与排烟机的额定流量、风压、调节范围是核心基础，流量与风压的适配性直接决定压力场与流量场的调控精度，若设备参数不匹配，易导致协同失衡。管道结构层面，管道长度、截面尺寸、分支数量、坡度及接口密封性影响烟气流动阻力与扩散路径，长距离多分支管道易出现局部阻力过大，导致协同调控滞后<sup>[2]</sup>。火灾特性层面，火灾规模、燃烧物类型、烟气温度与成分决定协同策略的调整方向，不同燃烧物产生的烟气毒性与蔓延速度差异较大，对通风排烟配比要求不同。控制精度层面，火灾探测设备的响应速度、传感器布置密度及控制算法的合理性，影响协同指令的精准度与执行效率，探测滞后易导致协同调控错失最佳时机。另外，设备联动兼容性、现场环境温湿度等因素，也会间接影响协同作用的稳定性与可靠性。

### 3 火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略构建

#### 3.1 协同控制总体框架设计

火灾工况下管道通风与排烟协同控制总体框架，采用“分层管控、闭环联动、智能适配”的设计思路，构建由感知层、决策层、执行层及保障层组成的四级架构体系。感知层通过布置温度、烟雾、压力、气体浓度等多类型传感器，实现管道内火灾参数的实时采集与动态监测，同时联动视频监控系统，精准捕捉火灾位置与蔓延趋势，为决策提供数据支撑。决策层作为核心枢纽，基于预设算法与专家知识库，对感知层传输的数据进行分析处理，判断火灾发展阶段、管道内工况状态，进而生成通风排烟参数调整指令、设备联动逻辑及应急处置方案。执行层负责指令落地，包括通风机、排烟机、防

火阀、调节阀等设备的启停、转速调节与阀门切换，确保协同策略精准执行。保障层涵盖设备冗余设计、备用电源供应、通信链路保障及应急手动控制模块，应对设备故障、断电等突发情况，同时建立系统自检机制，保障框架持续稳定运行，形成全流程、全方位的协同控制体系。

#### 3.2 基于火灾阶段的动态协同控制策略

基于火灾阶段的动态协同控制策略，核心是根据火灾初期、发展期、鼎盛期、衰退期的不同特性，针对性调整通风与排烟系统的运行模式与参数配比。火灾初期，系统检测到烟雾或异常温度信号后，立即启动排烟系统并以中低风量运行，同时关停非必要通风支路，仅保留火灾区域附近低风量通风，避免烟气扩散的同时为后续排烟创造条件，此时防火阀自动关闭，划定火灾控制区域。发展期，火势快速蔓延，排烟系统切换至最大风量运行，通风系统根据管道内压力变化适度调节风量，维持火灾区域微负压状态，阻止烟气倒灌，同时联动开启相邻区域补风支路，保障排烟效率。鼎盛期，持续保持最大排烟量，严格控制通风量，避免过量供氧加速燃烧，同时通过温度传感器反馈数据，调节排烟机运行功率，防止高温损坏设备。衰退期，逐步降低排烟量，适度增大通风量，加速管道内残留有毒气体排出，直至烟气浓度达标后，依次关停排烟与通风系统，全程实现动态适配与精准调控。

#### 3.3 基于管道类型的场景适配控制策略

基于管道类型的场景适配控制策略，需结合不同管道的功能属性、结构特征及火灾风险等级，制定差异化协同方案，确保策略的针对性与可行性。对于长距离输送管道，如工业输气、输油管道，采用“分段管控、分区协同”模式，按距离划分管控单元，每个单元配备独立的通风排烟设备与传感器，火灾发生时仅启动对应单元设备，避免全管联动导致的资源浪费与烟气扩散，同时调节管道两端压力差，抑制火势轴向蔓延<sup>[3]</sup>。对于多分支管道，如建筑通风管道、综合管廊，采用“主支分流、优先排烟”策略，优先开启主管道排烟机，再根据分支火灾情况开启对应分支的通风与排烟设备，通过调节分支阀门开度，控制各支路风量配比，消除排烟死角。对于高温、高压特种管道，强化通风排烟设备的耐高温、耐压性能适配，采用“低风量持续通风+阶段性强排烟”模式，避免管道内压力骤变引发安全事故，同时结合管道介质特性，优化协同参数，降低火灾扩大风险。

#### 3.4 协同控制设备联动逻辑设计

协同控制设备联动逻辑设计，以“精准触发、有序

联动、安全冗余”为原则,明确各设备的启停顺序、参数联动关系及故障应急处置逻辑,确保系统协同高效运行。正常火灾工况下,联动逻辑遵循“探测报警-设备预检-排烟启动-通风调控-阀门切换-全程监测”的流程,火灾探测器发出报警信号后,系统先对通风机、排烟机、阀门等设备进行预检,无故障后启动排烟设备,再根据压力、温度数据调节通风设备运行参数,同步切换防火阀、调节阀至预设位置。设备参数联动方面,排烟机转速与通风机风量联动调节,压力传感器数据实时反馈至控制系统,当管道内压力超过阈值时,自动增大排烟量或减小通风量,维持压力平衡。故障应急联动方面,若某一设备故障,系统立即启动备用设备,同时调整其他设备运行参数,弥补故障设备功能缺口,如排烟机故障时,启动备用排烟机并降低通风量,避免烟气积聚。此外,设置手动联动切换模块,应对自动控制失效场景,保障联动逻辑的可靠性。

#### 4 协同控制策略工程应用与保障措施

##### 4.1 工程应用流程设计

火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略的工程应用流程,分为前期准备、方案设计、施工安装、调试运行、验收交付五个核心阶段,确保策略落地的规范性与适配性。前期准备阶段,开展现场勘查,明确管道类型、结构参数、运行工况及火灾风险点,收集历史火灾数据与同类工程案例,结合现场实际制定应用可行性分析报告。方案设计阶段,基于勘查结果与协同控制策略,细化设备选型、传感器布置位置、控制逻辑参数,绘制施工图纸与设备联动流程图,同步完成方案的安全评估与优化调整。施工安装阶段,严格按照图纸规范施工,确保通风机、排烟机、阀门、传感器等设备安装精准,管道接口密封严密,控制线路铺设规范,避免因施工误差影响协同效果。调试运行阶段,通过模拟火灾场景与实际试运行,检验设备联动可靠性、参数调控精度,排查运行故障并优化调整。验收交付阶段,组织多方验收,出具验收报告,同步完成操作手册编制与人员培训,确保工程投入后可规范运行。

##### 4.2 运行与维护保障措施

运行与维护保障措施是确保协同控制系统长期稳定发挥效能的核心支撑,涵盖日常管理、定期维护检修、故障应急处置三大板块。日常管理方面,建立24小时值班制度,实时监控系统运行状态,记录设备运行参数、烟气监测数据,定期分析运行趋势,及时发现异常隐患;制定标准化操作流程,规范工作人员操作行为,避免误操作导致系统故障<sup>[4]</sup>。定期维护检修方面,按季度开展设备全面检修,清洁通风机、排烟机叶轮,检查阀门开关灵活性、传感器灵敏度,测试备用电源性能,及时更换老化、损坏部件;每年进行一次系统全面调试,模拟火灾场景检验协同控制逻辑与设备联动可靠性,优化控制参数。故障应急处置方面,建立应急预案,明确故障响应流程、责任分工,配备应急维修工具与备用部件,确保设备故障可快速修复;定期开展应急演练,提升工作人员应急处置能力,最大限度降低故障对系统运行的影响。

##### 结束语

火灾工况下管道通风与排烟协同控制策略研究,对保障人员生命安全与减少财产损失意义重大。本文提出的协同控制策略,从理论到实践构建了完整体系,通过合理设计总体框架、动态调整运行参数、适配不同管道场景及优化设备联动逻辑,有效提升火灾防控效能。未来,需持续优化策略,结合新技术提升系统智能化水平,为管道火灾防控提供更可靠保障。

##### 参考文献

- [1]何绍波,张发斌,唐传坤.智能通风技术在地下洞室施工中的应用[J].云南水力发电,2024,40(S2):148-151.
- [2]范子豪,张华,耿一超,等.地下工程指挥大厅气流组织设计难点与对策分析[J].节能,2023,42(07):11-13.
- [3]李三宝.工业建筑与中央空调系统协同节能设计及优化[J].新城建科技,2025,34(03):79-81+85.
- [4]唐小荣.煤矿矿井火灾事故应急通风防控[J].内蒙古煤炭经济,2024,(09):103-105.