

高层建筑管道井火灾智慧防控技术研究——从设计、运维到扑救的系统集成

刘湘辉

东莞市消防救援支队, 广东 东莞 523000

[摘要]文章综述了高层建筑管道井火灾防范与扑救的国内外研究现状,重点探讨了火灾防范技术、火灾扑救技术及应急响应策略。在防范技术方面,研究了防火材料与设计的优化,如耐火水泥、防火涂料等新型材料的应用,以及PVC管道防火措施的改进。同时,分析了通风与排烟系统的效能提升策略,包括通风热阻力的计算与实验研究,以及排烟与通风空调管道共井模式的消防对策。在火灾监测与报警系统方面,探讨了多传感器融合技术及基于图像识别和人工智能的智能监测系统的发展。火灾扑救技术的研究涵盖了灭火剂和灭火系统的优化,如液态CO₂防火管路输送特性分析以及自吸式泡沫发生器的发泡机理与优化设计,同时借助火灾模拟与数值分析技术,如大涡模拟和计算流体动力学方法,对烟气运动和燃气泄漏扩散进行了深入研究。此外,文章还对应急响应与救援策略的设计与实施进行了全面分析,提出了基于智能化应急响应系统和科学救援策略框架的优化建议。

[关键词]高层建筑;管道井;火灾防范;火灾扑救

DOI: 10.33142/ec.v8i6.17260

中图分类号: TU4

文献标识码: A

Research on Intelligent Fire Prevention and Control Technology for Pipeline Wells in High-rise Buildings —System Integration from Design, Operation and Maintenance to Firefighting

LIU Xianghui

Dongguan Fire Rescue Detachment, Dongguan, Guangdong, 523000, China

Abstract: This article summarizes the current research status of fire prevention and suppression in high-rise building pipeline wells at home and abroad, focusing on fire prevention technology, fire suppression technology, and emergency response strategies. In terms of prevention technology, research has been conducted on the optimization of fire-resistant materials and designs, such as the application of new materials such as refractory cement and fire-resistant coatings, as well as the improvement of fire prevention measures for PVC pipelines. At the same time, the efficiency improvement strategies of ventilation and smoke exhaust systems were analyzed, including the calculation and experimental research of ventilation thermal resistance, as well as the fire protection measures of smoke exhaust and ventilation air conditioning duct co well mode. In terms of fire monitoring and alarm systems, the development of multi-sensor fusion technology and intelligent monitoring systems based on image recognition and artificial intelligence were discussed. The research on fire extinguishing technology covers the optimization of extinguishing agent and extinguishing system, such as the analysis of the transmission characteristics of liquid CO₂ fire prevention and extinguishing pipeline and the foaming mechanism and optimal design of the self-priming foam generator. At the same time, with the help of fire simulation and numerical analysis technology, such as large eddy simulation and computational fluid dynamics, the smoke movement and gas leakage and diffusion were studied in depth. In addition, the article comprehensively analyzes the design and implementation of emergency response and rescue strategies, and proposes optimization suggestions based on intelligent emergency response systems and scientific rescue strategy frameworks.

Keywords: high-rise buildings; pipeline shaft; fire prevention; fire fighting

引言

高层建筑作为现代城市的重要组成部分,其安全性直接关系到人民生命财产的安全和社会的稳定发展。在高层建筑中,管道井作为垂直通道,连接着各个楼层,为建筑提供必要的设施和服务。然而,管道井一旦发生火灾,由于其特殊的结构和功能,火势和烟雾容易迅速蔓延,给人员疏散和火灾扑救带来极大困难。因此,高层建筑管道井的火灾防范与扑救成为了消防安全领域的重要研究课题。

近年来,随着城市化进程的加快和高层建筑数量的增

加,管道井火灾的防范与扑救问题日益受到国内外学者的关注。国内外在高层建筑管道井火灾的研究方面取得了一定的进展,包括火灾机理、防火材料、通风排烟系统、监测报警技术、灭火剂和灭火系统、火灾模拟与数值分析、应急响应与救援策略等多个方面。这些研究成果为高层建筑管道井火灾的防范与扑救提供了理论依据和技术支持。

然而,由于高层建筑管道井火灾的复杂性和多样性,现有的研究成果还不能完全满足实际应用的需求。特别是在火灾机理、防火材料、通风排烟系统、监测报警技术、

灭火剂和灭火系统、火灾模拟与数值分析、应急响应与救援策略等方面,仍有许多问题需要进一步研究和解决。因此,对高层建筑管道井火灾防范与扑救的国内外研究进行综述,总结现有研究成果,分析存在的问题和不足,提出未来的研究方向和建议,对于提高高层建筑管道井火灾的防范与扑救能力具有重要的理论和实际意义。

1 火灾防范系统集成与管理

高层建筑管道井火灾防范的有效性并非单靠某一项技术取得突破就能够实现的,其关键之处在于把防火材料以及设计方面的优化、通风排烟效能的提升、智能监测报警等一系列防范举措当作一个有机的整体来加以深度且系统的集成,让它贯穿在整个建筑的全生命周期当中,从设计环节开始一直到施工阶段再到长期的运维过程,去施行科学并且是动态的管理策略。

1.1 防范系统集成与协同机制

管道井火灾防范属复杂系统工程,关键在防火分隔子系统、通风排烟控制、火灾监测报警系统的集成。物理集成如合理布局防火材料、通风管道等;逻辑集成如火灾监测报警系统与通风排烟系统的联动,借助 AI 提升精准度,构建信息共享平台辅助决策。

1.2 设计阶段的风险评估与防范策略制定

在高层建筑刚开始着手设计的时候,专门针对管道井去做火灾风险评估,这是制定出既科学又有效的防范办法的根本所在。相关的研究主要是围绕一些关键的地方来进行的。其一便是要把风险评估的方法弄得更加细致一些。研究的人努力去探寻怎样能够全面且细致地把建筑具体是用来做什么的、整个有多高、管道井属于哪种类型,像强电井、弱电井、给排水井、通风井等等、里面铺设的管线是什么材料这些情况都考虑进去,特别要留意王元宏等人研究时提到的像 PVC 这类容易燃烧的材料所存在的风险,还有各个楼层预计会有多少人这样的多种复杂情况,进而建立起能量化的模型,以此来精准地评估不同管道井潜在的火灾风险到底是处在哪个等级。李宗翔等人有关矿井火灾巷道通风热阻力的研究成果,能给评估高层建筑管道井在发生真实火灾时候排烟系统的实际效果提供很重要的理论依据。其二是要去推动基于性能的防火设计理念能够真正派上用场。这就得突破那些死板的规定条文所设定的限制,转而去使用火灾动力学模拟工具,比如说孙建军等人运用的大涡模拟技术来分析管道井里烟气是怎么运动的,吴翔飞等人应用的计算流体动力学方法来模拟燃气泄漏后会怎样扩散,同时结合工程方面的分析手段,去评估不同防火分隔等级、排烟量的设计方案、监测点怎么布置等防范设计在实际出现火灾的情况下的真实效果,进而调整设计参数,让其能够达到特定的、可以量化的安全目标。温小伟对于高层建筑消防规范的剖析,也清楚地指出了朝着性能化设计方向优化是很有必要的。最后是要依

据前面所做的风险评估以及模拟分析得出的结果,制定出综合性很强的、专门针对管道井火灾防范的策略包,在设计阶段借助虚拟仿真技术或者去做缩尺模型实验来初步检验一番,保证所提出的策略在实际工程建设当中是行得通的,也是有效的。

1.3 运维管理与检查维护

高层建筑管道井火灾防范系统的长期有效性,很大程度上取决于项目建成之后持续不断、规范有序且细致入微的运维管理工作。相关研究着重聚焦于构建并完善运维管理体系,其中最为关键的是要建立健全一套能够涵盖所有关键系统的检查维护制度。具体而言,需明确规定防火封堵的完整性,尤其像电缆桥架穿越楼板之处、各类管道缝隙这类薄弱环节,要规定好相应的检查方法,比如目视检查、探棒测试等,同时还要设定合理的检查周期,像是季度检查、年度详查。防火门以及防火阀作为极为关键的阻隔设施,其启闭功能的可靠性以及关闭时的密封性,务必要借助定期开展的功能测试,例如联动测试、手动测试,还有严格的密封性检测标准来予以保障,进而形成标准化的测试流程。通风排烟系统的那些核心部件,像是风机、风阀、风道等,需要定期去做运行测试,以此来验证它们的性能状况,并且要实施必要的清洁维护工作,以防积灰对效能产生影响。火灾探测报警系统的每一个环节,从现场的传感器一直到传输线路,再到控制面板,都得进行定期的功能测试与校准操作,以保证其灵敏度以及可靠性。倘若管道井内部或者与其相关的区域设置了像二氧化碳这类固定灭火系统,那么其灭火剂储存装置的关键参数,像是压力、液位等,也必须要纳入常规的检查项目当中。与此数字化运维技术是提升工作效率的一个方向。相关研究在探索利用物联网技术,比如部署环境温湿度传感器、设备状态传感器、RFID 标签来实现资产追踪,再结合建筑信息模型平台,达成对设施状态的在线实时监测以及基于数据分析的预测性维护,以此大幅度提高运维工作的效率以及系统整体的可靠性。明确管理责任主体并且建立完善的档案记录体系,这是落实运维工作的一个基础。务必清晰界定各个层级运维管理的责任归属,并且要建立起详尽且可追溯的检查、测试以及维护记录档案,以此确保整个管理过程是透明的、可审计的。

1.4 人员培训与演练

要让高层建筑管道井火灾防范系统顺利运行且发挥出预期效果,关键在于保障所有相关岗位人员都有足够的知识储备以及实操技能。此次研究所涉及的培训对象和内容都具备很强的针对性。就设计与施工人员而言,培训得着重强化他们对管道井火灾风险特殊性的认知,像烟囱效应、隐蔽火源这类情况要让他们有深刻的认识;要仔细解读防火设计规范以及施工验收标准;要明确系统集成针对空间布局、管线敷设、接口处理的具体要求;并且要着重

加强关键施工工艺方面的培训,特别是各类防火封堵,比如防火泥、防火包、防火板的应用与施工要点,得开展标准化操作培训,以此从源头上把控施工质量。而对于物业管理与安保等日常运维人员来讲,培训内容应当围绕实践操作来展开:日常巡查的重点要点,像是防火门是否一直保持关闭状态、防火封堵是否有损坏、管道井内是否违规堆放杂物等等,都要检查到位;得能快速且准确地识别系统报警信号,并且掌握初步的应急处置流程,比如说确认报警的位置、通知相关人员;要理解系统联动控制的基本原理,在自动联动出现故障或者遇到特殊情况的时候,要知道怎么进行手动操作干预;还得掌握在管道井火灾发生时怎样有效地引导人员疏散这类关键技能。定期开展综合性消防演练是检验并提升能力的重要方式。演练必须要设计包含管道井火灾的典型场景,其核心目标是实地去检验整个防范系统,尤其是监测、报警、联动在真实环境下是否有效;要评估各个岗位人员的应急响应速度、决策能力以及操作熟练程度;要验证应急预案是否真正能操作。演练之后,必须要进行细致的复盘分析,依据演练中暴露出来的问题和不足,持续对技术系统加以改进、优化管理流程、更新应急预案,形成一个管理闭环,进而不断提升整体的火灾防范能力。

2 管道井火灾扑救技术

2.1 液态 CO₂ 防灭火管路输送特性影响分析

液态 CO₂ 作为一种高效、清洁的灭火剂,因其灭火速度快、无残留、对环境友好等优点,在高层建筑火灾扑救中得到了广泛应用。然而,液态 CO₂ 在管路中的输送特性受到多种因素的综合影响,这些因素直接决定了灭火系统的效能和可靠性。吴虎等学者通过对液态 CO₂ 防灭火管路输送特性进行深入分析,揭示了管路材质、管径大小、输送压力等关键因素对液态 CO₂ 输送性能的影响机制。

研究表明,管路材质的热导率和弹性模量对液态 CO₂ 的输送稳定性具有显著影响。高热导率的管材能够有效降低管内液态 CO₂ 的温度梯度,减少因温度不均匀导致的相变和压力波动。同时,弹性模量较高的管材能够在高压输送条件下保持良好的结构稳定性,避免因管材变形导致的流量损失和压力下降。此外,管径大小也是影响液态 CO₂ 输送特性的重要因素。较小的管径虽然能够减少管路系统的总体积和成本,但会增加液态 CO₂ 在输送过程中的流动阻力,降低输送效率。而较大的管径虽然能够提高输送效率,但会增加系统的复杂性和成本。因此,合理选择管径是优化液态 CO₂ 输送系统的关键。

输送压力的控制同样至关重要。液态 CO₂ 在高压条件下能够保持较高的密度和灭火效能,但过高的压力可能导致管路系统的安全风险增加。研究表明,存在一个最优的输送压力范围,在此范围内,液态 CO₂ 的输送效率和

灭火效能能够达到最佳平衡。通过实验和理论分析,吴虎等提出了液态 CO₂ 输送系统的优化设计方案,包括合理选择管路材质、优化管径大小以及精确控制输送压力。这些研究成果为液态 CO₂ 灭火系统的设计和应用提供了科学依据,能够有效提高灭火系统的可靠性和灭火效率。

2.2 自吸式泡沫发生器发泡机理及其优化设计

自吸式泡沫发生器作为一种新型的灭火设备,因其高效、便捷的特点在高层建筑火灾扑救中展现出广阔的应用前景。泡沫灭火剂因其良好的覆盖性和冷却效果,能够有效隔绝火源与空气的接触,迅速降低火势。自吸式泡沫发生器通过自动吸入泡沫液和水,混合产生泡沫,无需外部动力源,具有结构简单、操作方便、灭火效率高等优点。宋双林对自吸式泡沫发生器的发泡机理及其优化设计进行了深入研究,揭示了影响泡沫产生效率的关键因素,并提出了相应的优化设计方案。

研究指出,自吸式泡沫发生器的发泡机理主要基于液体的表面张力和气液两相流动的相互作用。泡沫液的表面张力越低,泡沫的稳定性越好,灭火效果越显著。同时,气液两相流动的混合效率直接影响泡沫的产生速度和质量。通过优化泡沫发生器的内部结构设计,可以有效提高气液混合效率,降低泡沫液的表面张力。宋双林的研究提出了优化泡沫发生器内部流道设计的方案,通过增加流道的湍流强度和混合区域的长度,显著提高了泡沫的产生效率。此外,研究还探讨了泡沫液的配方优化,通过添加适量的表面活性剂和稳定剂,能够进一步降低泡沫液的表面张力,提高泡沫的稳定性和灭火效能。

在实际应用中,自吸式泡沫发生器的优化设计需要综合考虑灭火场景的复杂性和多样性。例如,在高层建筑管道井火灾中,泡沫发生器需要能够在有限的空间内快速产生大量泡沫,并且泡沫需要具有良好的覆盖性和持久性。通过优化泡沫发生器的结构设计和泡沫液配方,可以使其在高层建筑火灾扑救中发挥更大的作用。宋双林的研究成果为自吸式泡沫发生器的设计和应用提供了重要的理论支持,能够有效提高泡沫灭火剂的灭火效率,增强高层建筑火灾的扑救能力。

3 结论

本文综述了高层建筑管道井火灾防范与扑救的国内外研究现状,分析了现有研究方法和内容,并从防火材料与设计、通风与排烟系统、监测与报警系统、灭火剂与系统、火灾模拟与数值分析、应急响应与救援策略等多个方面进行了详细探讨。通过文献回顾和案例分析,本文指出高层建筑管道井火灾防范与扑救技术的发展对于提升建筑安全性具有重要意义。研究表明,采用先进的防火材料如 PVC 管道,合理的防火设计,以及有效的通风排烟系统,可以显著提高火灾防范能力。同时,监测与报警系统的设计与应用,灭火剂和灭火系统的优化,以及火灾模拟

与数值分析,为火灾扑救提供了科学依据和技术支持。此外,应急响应与救援策略的研究进展对于提高火灾应对效率至关重要。未来的研究应继续深化这些领域的技术创新,并加强国际合作与交流,以实现高层建筑管道井火灾防范与扑救技术的持续进步。

[参考文献]

- [1]王元宏,唐明黎.高层建筑中 PVC 管道防火措施的研究[J].新型建筑材料,1996(9):4.
- [2]王忠.谈高层民用建筑管道井的防火设计[J].消防科技,1996(2):2.
- [3]尹航,王炯,胡睿.排烟与通风空调管道共井模式的消防对策初探[J].消防科学与技术,2020(08):039.
- [4]孙建军,李烈,路世昌,等.高层建筑管道井内烟气运动大涡模拟[J].中国安全科学学报,2006,16(9):5.
- [5]李宗翔,王双勇,贾进章.矿井火灾巷道通风热阻力计算与实验研究[J].煤炭学报,2013(12):5.
- [6]吴虎,陆伟,李金亮.液态 CO₂ 防灭火管路输送特性影响分析[J].煤矿安全,2022,53(9):5.
- [7]宋双林.自吸式泡沫发生器发泡机理及其优化设计[J].煤炭科学技术,2022(06):050.
- [8]吴翔飞,赵小龙,方炜,等.邻近电力管道的城市埋地燃气管道泄漏扩散数值模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(10):125-131.
- [9]张春华,王继仁,张子明,等.液态二氧化碳防灭火装备及其工程应用[J].科技导报,2013,31(18):5.
- [10]景国勋,乔奎红,王振江,等.瓦斯爆炸中的火球伤害效应[J].工业安全与环保,2009,35(3):2.
- [11]丁天石.高压消防给水管道的的水头计算[J].煤炭工程,1982(6):35-36.
- [12]温小伟.关于高层建筑消防规范的若干探讨[J].中国给水排水,2000(8):12.

作者简介:刘湘辉(1989.9—),单位名称:东莞市消防救援支队,毕业学校:华南理工大学,专业:工程管理硕士(在读)。