吸气式感烟火灾探测系统在物流仓储建筑中的应用分析

扈超[1]，宋文超[2]，于波涛[2]，朱芳[2]
（1. 中国建筑科学研究院有限公司；2. 上海威探智能科技有限公司）

【摘要】随着中国物流仓储建筑向自动化高密度转型，现代高架仓储建筑高度普遍突破12m，部分立体仓库达24m以上，其大空间、强气流、高粉尘的特殊环境，对传统被动式火灾探测体系形成根本性挑战。本研究采用VTEC吸气式感烟火灾探测系统，论证了吸气式感烟火灾探测系统的适配价值。通过主动管网采样精准捕捉分层烟流，搭配高精度激光探测与智能算法，实现极早期预警、降低粉尘误报，为高密度仓储消防安全提供了可靠技术路径。

【关键词】吸气式感烟火灾探测系统；物流仓储建筑；应用分析
中图分类号：TU892；TU249　　DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2026.10.033

Analysis of the Application of Aspirating Smoke Fire Detection Systems in Logistics Warehouse Buildings

HU Chao[1], SONG Wen-chao[2], YU Bo-tao[2], ZHU Fang[2]
（1.China Academy of Building Research Co., Ltd.；2.Shanghai Weitan Intelligent Technology Co., Ltd.）

【Abstract】As China's logistics warehousing buildings undergo a transition towards automated high-density, modern elevated warehousing buildings commonly exceed a height of 12 meters, with some multi-level warehouses reaching over 24 meters. The unique environment characterized by large spaces, strong airflows, and high dust levels poses fundamental challenges to traditional passive fire detection systems. This study employs the VTEC aspirating smoke fire detection system to demonstrate its adaptability value. By accurately capturing stratified smoke flow through active pipe network sampling, coupled with high-precision laser detection and intelligent algorithms, it achieves extremely early warning and reduces false alarms due to dust, providing a reliable technical path for fire safety in high-density warehouses.

【Keywords】aspirating smoke fire detection system; logistics and warehousing building; application analysis

1 引言

随着电子商务、跨境贸易以及供应链数字化的推进，物流基础设施的形态发生了根本性变化。这种转型不仅体现在自动化设备和人工智能算法的应用上，更体现在物理空间的重构——建筑更高、存储密度更大、流通速度更快。这种演变直接导致物流仓储及分拣中心在火灾探测领域面临巨大难题。

2 物流仓储建筑特点及消防设计难点

2.1 传统民用建筑与物流仓储建筑火灾探测环境的本质区别

传统民用建筑（如办公楼、住宅或普通商业综合体）的火灾探测逻辑基于相对静态且封闭的空间。在这种环境下，天花板高度通常在3m～5m之间，烟雾在火灾发生后能够通过自然的浮力效应迅速聚集在顶棚，触发点型感烟探测器。然而，现代物流行业，尤其是大型高架仓库和分拣中心，其物理特性彻底颠覆了这一探测基准。

现代化大型物流中心的核心特征是巨大的跨度和垂直高度，这种物理结构对传统消防技术构成了巨大的挑战。如表1所示。

表1 传统建筑与物流建筑的技术难度及影响分析对比表

探测维度	传统建筑（办公/民用）	物流建筑（仓储/分拣）	技术难度及影响分析
建筑高度	3m～5m	12m～30m以上	巨大的垂直高度导致烟雾在上升过程中被剧烈稀释，且极易产生分层现象
空间容积	较小，多隔间	极大，开放式空间	烟雾在巨大的容积内迅速扩散，导致浓度难以达到普通探测器的报警阈值
气流状态	相对稳定，低换气率	强气流、高换气率、局部涡流	通风系统和自动分拣设备产生的强气流会吹散烟雾或改变其路径

续表

探测维度	传统建筑（办公/民用）	物流建筑（仓储/分拣）	技术难度及影响分析
环境负载	粉尘及干扰源较少	高粉尘、包装屑、尾气排放	货架摩擦、车辆作业产生的粉尘是传统探测器误报的主要诱因
存储密度	低	极高（垂直化存储）	密集货架形成了复杂的遮挡，探测器难以覆盖所有阴燃火点
维护难度	低（梯子即可触达）	极高（需专业登高车）	高空维护不仅成本昂贵，还会中断物流作业流程

2.2 烟雾分层现象

在物流高架仓库中，最严峻的技术挑战莫过于“烟雾分层”现象。在具有高大天花板的环境中，建筑内部通常会因为太阳辐射（对屋顶的加热）或内部暖气设备在顶棚下方形成一个较热的空气层。当火灾处于初期阶段，特别是发生阴燃火时，产生的烟雾由于热浮力较弱，其羽流温度在上升过程中逐渐降低。当烟雾温度下降到与上方热空气层平衡时，烟雾将失去上升动力，无法到达顶棚，而是在半空中水平扩散。

对于安装在顶棚的传统点型探测器或红外光束探测器而言，这意味着在火灾发展的最关键初期，系统完全处于“致盲”状态。必须等到火势已经扩大，产生足够巨大的热量来冲破这一热屏障时，烟雾才能到达顶棚。然而，此时火势往往已经失控，造成不可挽回的财产损失。

2.3 高换气率与稀释效应的干扰

物流分拣中心和现代化仓库为了维持空气质量和人员舒适度，通常配备有强大的空调和强制换气系统。这些系统产生的气流会稀释烟雾浓度。在极短的时间内，原本有限的烟粒子被带入巨大的气流循环中，使得点式探测器感知的烟浓度远低于其预设的固定报警阈值。这种“稀释效应”使得传统被动探测技术无法在极早期阶段提供警报。

3 VTEC吸气式感烟火灾探测系统的技术原理分析

吸气式感烟火灾探测系统（Aspirating Smoke Detection, 简称ASD），在物流行业内通常被作为解决高大空间探测难题的首选方案。其核心原理从“被动等待”转变为“主动捕捉”，这一转变从根本上解决了上述物理难题。

3.1 VTEC吸气式感烟火灾探测系统的工作原理

吸气式感烟火灾探测系统通过高效吸气泵，经由铺设在保护区域内的采样管网，不断地将环境空气吸入探测器内部进行光学分析。探测器内置高精度激光传感器，能够检测空气样本中极微小的烟雾浓度变化。

这种主动采样的优势在于，它不依赖于烟雾自身的动力学上升。通过在采样管上合理布置采样孔，系统可以覆盖天花板下方、货架中间以及回风口等关键位置。即使发生烟雾分层，布置在分层高度以下的采样孔仍能捕捉到烟雾信号。

具体而言，VTEC吸气式感烟火灾探测系统的工作过程可分为空气采样、气流传输、光学检测和信号处理四个阶段。首先，探测器内部的高稳定性吸气泵产生负压，驱动保护区域内的环境空气经由采样管网上的采样孔进入管路系统。采样孔的孔径与间距经过专用管路计算软件精确设计，确保各孔位的吸气流量均匀一致。

空气样本进入探测器后，首先经过两级精密过滤装置：第一级粗滤网拦截大颗粒灰尘与纤维碎屑，第二级精滤器进一步去除亚微米级背景颗粒。经过净化的气流随后进入激光探测腔体。探测腔内，一束高功率半导体激光以特定角度照射气流中的悬浮粒子，粒子对入射光产生前向散射，散射光被高灵敏度光电二极管接收并转换为电信号。

在信号处理层面，探测器采用数字信号处理技术对光电转换信号进行连续采样与统计分析。系统内置的智能辨识算法能够根据粒子散射特征（如散射角分布、信号波动频率等）区分真实火灾产生的亚微米级烟粒子与物流环境中常见的大颗粒粉尘、水雾等干扰源。当检测到的烟雾浓度超过预设阈值时，系统按照预警、行动、火警等多级报警逻辑依次输出报警信号，联动火灾报警控制器执行相应的消防响应程序。

3.2 VTEC吸气式感烟火灾探测系统的技术优势

①高精度激光探测技术：吸气式感烟探测器采用总散乱光探测原理，对可燃性溶剂火灾产生的微小粒子具有超高灵敏度，探测精度达0.001%obs/m。

②智能环境辨识算法：系统内置算法能够识别颗粒的大小与特征，有效区分真实的火灾烟雾与物

流环境中常见的纸屑粉尘、水雾，降低了误报率。

③符合国家特种标准：产品严格符合GB15631《特种火灾探测器》标准并获得3C认证，确保在工业级物流环境中的合规性与可靠性。

④长寿命设计与绝对校准：通过两级过滤装置去除灰尘，保护光学表面免受污染。绝对校准技术确保探测器在全生命周期内保持稳定的灵敏度，无须频繁调试。

3.3 采样管网的设计原则

对于物流高架库，采样管网的设计可以根据建筑结构进行深度定制。

天花板采样：将采样管贴在屋顶布置，作为基本的区域覆盖。

货架内采样：这是解决物流行业难题的关键。采样管可以安装在货架的中层，直接切入烟雾可能水平扩散的区域。这种布置方式能够显著克服烟雾分层和气流稀释问题。

回风口采样：利用物流园区的通风系统，将采样点设在空气回风口，利用自然风流提高烟雾捕捉效率。

3.4 吸气式感烟火灾探测系统的日常维护与维修后复检

吸气式感烟火灾探测系统作为物流仓储建筑消防安全的最后一道技术防线，其长期稳定运行离不开科学规范的日常维护管理。尤其在物流仓储环境中，高粉尘、强气流的工况条件对系统的过滤装置和采样管路提出了更高的维护要求。建立系统化的维护制度，是保障探测系统始终处于最佳工作状态的关键环节。

日常维护工作主要包括以下几个方面。①过滤装置的定期检查与更换。根据物流仓储环境的粉尘浓度，建议每季度检查一次初级过滤器和精密过滤器的污染程度，当过滤器压差超过规定限值或外观明显发黑时应及时更换，以保证采样气流的通畅性和探测腔体的洁净度。②采样管路的完整性检查。定期目视检查采样管有无变形、脱落、堵塞或机械损伤，确认各采样孔未被货架货物或包装材料遮挡。③气流功能验证。通过探测器面板或远程监控软件查看各管路的气流速度读数，确认其处于正常设计范围内；若气流偏差超过±15%，应排查管路泄漏或堵塞原因。④灵敏度功能测试。每年至少进行一次加烟试验，在采样孔处施加标准试验气溶胶，验证探测器能否在规定时间内（通常不超过120s）正确响应并发出报警信号。

当探测系统因故障维修、部件更换或管路改造后，必须进行维修后复检，以确认系统恢复至设计性能指标。复检内容应包括：①气流校准——维修后重新测量各采样管路的气流速度，与设计值进行比对，偏差应控制在±10%以内；②灵敏度验证——在维修涉及的管路末端采样孔进行加烟响应试验，确认报警响应时间满足要求；③报警功能联调——模拟各级报警条件，验证探测器与火灾报警控制器之间的信号传输、联动逻辑及声光报警装置均工作正常；④系统自检——执行探测器内置的完整自检程序，确认光学腔体、吸气泵、电子线路板等核心部件无异常。复检合格后，应形成书面记录并归档，作为系统运维档案的组成部分。

通过建立“定期维护+维修后复检”的双重保障机制，能够有效避免因设备老化、管路损伤或维修不当导致的探测性能下降，确保吸气式感烟火灾探测系统在物流仓储建筑的全生命周期内持续发挥极早期火灾预警功能。

4 结语

综上，吸气式感烟火灾探测系统凭借超高探测灵敏度，在火灾尚处于阴燃萌芽阶段就能捕捉到极微量的烟粒子信号，将预警窗口从传统探测的“明火已起”提前至隐患初现的数小时之前，为仓储运营方争取到了切断火源、疏散人员、转移高价值货物的黄金处置时间。同时，其分层布管的灵活设计，让采样孔可以精准覆盖货架中层、回风口、顶棚下方等传统设备完全触达不到的关键位置，从根源上规避了烟雾分层、气流涡流带来的探测失效问题。

吸气式感烟火灾探测系统搭载的智能环境辨识算法，能够精准区分粉尘、包装碎屑等仓储常见干扰源与真实火灾烟粒子，大幅降低了误报概率，避免了因误触发喷淋造成的货物二次损毁与全仓作业中断的巨额损失。

参考文献

[1] GB 55036-2022. 消防设施通用规范[S].
[2] GB 50116-2013. 火灾自动报警系统设计规范[S].
[3] GB 50016-2014（2018年版）. 建筑设计防火规范[S].