

# 冷链仓库火灾低温灭火技术适配性研究

张旭湘

湘潭市岳塘区消防救援大队

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17849

**[摘要]** 冷链仓库低温环境对传统灭火技术构成严峻挑战,研究其适配灭火技术至关重要。本文聚焦冷链仓库火灾特殊性,分析低温环境对火灾发展及常规灭火技术效能的核心制约因素。通过系统探讨低温环境下火灾特性变化及现有技术失效机理,提出并重点研究针对性的灭火技术适配策略。研究旨在突破低温环境灭火瓶颈,构建适用于冷链仓库的新型高效灭火解决方案体系,显著提升该类特殊场所火灾防控能力与应急处置水平,为冷链物流安全管理提供关键技术支持。研究成果对保障冷链物资安全及产业链稳定运行具有重要意义。

**[关键词]** 冷链仓库; 火灾; 低温环境; 灭火技术; 适配性

**中图分类号:** S776.29+2 **文献标识码:** A

## Study on the Adaptability of Low-Temperature Firefighting Technology in Cold Chain Warehouses

Xuxiang Zhang

Xiangtan YueTang District Fire and Rescue Brigade

**[Abstract]** The low-temperature environment in cold chain warehouses poses severe challenges to traditional fire suppression technologies, making the study of suitable fire suppression techniques crucial. This paper focuses on the unique characteristics of cold chain warehouse fires, analyzing the core constraints of low-temperature environments on fire development and the effectiveness of conventional fire suppression technologies. By systematically exploring the changes in fire characteristics and the failure mechanisms of existing technologies in low-temperature environments, it proposes and prioritizes targeted fire suppression technology adaptation strategies. The research aims to overcome the bottleneck of fire suppression in low-temperature environments, establish a new and efficient fire suppression solution system suitable for cold chain warehouses, significantly enhance fire prevention and emergency response capabilities in such specialized facilities, and provide critical technical support for cold chain logistics safety management. The research findings hold significant importance for ensuring the safety of cold chain materials and the stable operation of the industry chain.

**[Key words]** Cold chain warehouse; Fire; Low-temperature environment; Fire extinguishing technology; Adaptability

### 引言

冷链仓库作为现代物流体系核心节点,承担着生鲜食品、药品疫苗等温敏物资的战略储备重任。其内部通常维持在 $-18^{\circ}\text{C}$ 至 $-25^{\circ}\text{C}$ 的极端低温,在火灾发生时带来了显著区别于常温仓库的独特挑战。常规水基灭火系统在此环境中面临快速冻结失效的困境,干粉灭火剂亦存在沉降加速、分散不均等性能劣化问题。低温不仅抑制火灾初期热释放速率,更使火灾发展趋于隐蔽复杂,显著提高早期探测与有效扑救的难度。同时,低温环境对消防员操作和装备可靠性产生严重制约。因此,深入探析冷链仓库火灾在低温条件下的复杂行为特征,精准评估现有灭火技术在

此特殊场景下的适配性不足,并基于此开发行之有效的新型灭火策略与技术方,已成为当前亟待攻克的行业安全重大课题,对于保障冷链仓储安全运行具有迫切的现实需求和深远意义。

### 1 冷链仓库火灾特性及低温环境影响分析

冷链仓库火灾除具备仓储火灾共性外,核心特殊性源于其持续的低温运行环境。该低温环境(通常 $\leq -18^{\circ}\text{C}$ )显著改变了火灾发展的内在规律与外在表现。可燃物燃烧反应速率在低温初始阶段受到强烈抑制,氧气消耗及热量释放均明显减缓,导致阴燃期可能延长且初期火焰蔓延速度慢于常温仓库。低温环境下的低温液体(如制冷剂)泄漏具备更低的引燃温度,且其蒸气比

空气更易积聚形成局部爆炸风险。仓库内充斥大量保温材料(如聚氨酯、聚苯乙烯泡沫),其高燃烧热值及释放有毒气体的特性加剧火灾危险性。低温导致的空气密度增大、水蒸气含量极低会强化烟气沉降现象、增加烟气毒性浓度,并对灭火介质(尤其水)造成冻结失效的威胁。低温对常规感烟/感温探测器的灵敏性产生负面影响,导致火灾自动报警延迟,形成潜在的重大安全隐患。这些特点共同决定了冷链仓库火灾的复杂性与扑救难度。

低温对常规灭火技术效能构成多维度严重制约。水基灭火系统(如自动喷淋)喷出的水雾或水滴在极低温的冷库空气中瞬间冻结成冰晶甚至冰块,丧失冷却和窒息作用,并堵塞管网。干粉灭火剂在低温下因颗粒静电力减弱,结团倾向加剧,严重影响气动输送效率和空中分散覆盖面积,灭火效能急剧下降。低温使二氧化碳等气体灭火剂喷射后的体积膨胀率降低,维持有效浓度的持续时间缩短,同时,低温气体沉降加速,不利于保护高大货架的顶部区域。环境低温还加剧了消防设备(如泵组)液压油/润滑油粘度增加、密封材料脆化失效、消防员个人防护装备灵活性下降、电池性能劣化等问题。低温冷凝形成的霜雾极大地降低了库内作业的可视度,显著威胁消防员的安全以及灭火指挥协调工作。现有灭火技术及装备在冷链仓库环境中面临整体适配性不足的严峻挑战<sup>[1]</sup>。

## 2 灭火技术适配性的理论基础与原理探讨

低温灭火技术的有效性根植于其对低温环境物理化学特性的深刻理解与应用。在低温环境下实现有效灭火的核心在于克服或巧妙利用低温对燃烧链式反应的多重抑制作用。燃烧反应速率常数遵循阿伦尼乌斯公式,低温导致活化分子占比锐减,显著降低了氧化反应速率及自由基生成速度,使火焰传播能量供给不足。这要求灭火剂在低温下仍需具备极高的化学中断自由基的能力(如全氟己酮)或极强的物理窒息效率(如高浓度惰性气体)。低温显著增加了气体密度,输送灭火介质时应充分考虑密度差形成的自然分层效应(如高密度惰性气体下沉、低密度上浮),以优化空间分布的均匀性。低温还强化了散热过程,要求灭火介质具备更高的比热容(如液氮)或相变潜热(如特定配方气溶胶),以便在低温环境中仍能高效吸热,破坏燃烧的能量平衡。成功的低温灭火方案需精心整合化学反应抑制、氧气稀释窒息及冷却降温这三种核心机制中的至少两种优势<sup>[2]</sup>。

开发具备低温环境适配能力的灭火技术需系统考量其独特技术原理。惰性气体(IG541、N<sub>2</sub>、Ar)主要依靠物理窒息作用,在低温环境下,需解决体积膨胀不足、沉降分层过快等问题,以提高空间覆盖的均匀性。全氟己酮(FK-5-1-12)灭火剂兼具高效化学中断自由基和物理冷却特性,需克服其在低温条件下粘度增大导致的雾化不良与扩散受限问题,通常需与惰性气体形成预混增强系统(如FK-5-1-12/N<sub>2</sub>)。液氮凭借极低温(-196℃)实现强大的吸热冷却与窒息双重作用,技术关键在于抑制其在喷射过程中的相态变化,并设计喷射流型,以形成有效的覆盖层。高效气溶胶技术通过超细微粒在空间内长时间悬浮来吸收热量、捕获自由基、降低氧浓度,其在低温下的难点在于防止微

粒过早凝结沉降,并保障释放的均匀性。新兴的真空气体排出技术直接抽离火区的空气及燃烧产物,兼具窒息与防止复燃的作用,但其系统响应速度与应用场景受到一定限制。核心技术原理需围绕破解低温带来的传质、传热与反应动力学障碍进行定向设计优化。

## 3 低温灭火技术适配性关键策略研究

### 3.1 基于功能互补的低温优化灭火剂/系统复配选型集成策略

面对低温对单一灭火剂性能的限制,策略核心在于选择与低温适配性强的基础灭火药剂(如低凝点惰性气体IG541、N<sub>2</sub>或具备优异低温流动与分散性的氟代酮),并将其与另一种具有互补优势的高效灭火剂进行深度复配或系统整合。典型方案设计包括:惰性气体(IG541/N<sub>2</sub>)与全氟己酮(FK-5-1-12)形成预混药剂系统(如专用NOVEC气体系统),惰性载体保障其低温流动性及喷放距离,氟代酮提供核心化学灭火力;惰性气体(IG541/N<sub>2</sub>)与超细干粉联用(如特制纳米级ABC粉),惰气解决干粉分散难题,干粉在接触火源时增强抑制效能;惰性气体或液氮与高效固体气溶胶发生剂集成部署方案。此外,系统设计需融入强化低温环境适应性的专用设备组件。优化设计要点涵盖:预混系统比例与相容性保障技术、特制低温用干粉配方、高效复配喷头设计(确保多相介质均匀分布)、精确的药剂剂量计算模型(充分考虑低温气体密度变化及气溶胶沉降特性)。此策略通过功能协同与物理化学机制优势叠加,显著提升了整体系统在低温下的灭火速率与空间覆盖可靠性<sup>[3]</sup>。

### 3.2 低温环境专用消防器材及耐寒部件强化策略

低温导致常规消防设备液压油粘度剧增、密封件脆化、塑料管道变硬,构成系统功能失效关键风险点。本策略聚焦为冷链仓库专用灭火系统构建全方位耐寒保障体系:管道系统须摒弃PVC等材料,采用耐低温冲击、强度高的改性PPR、HDPE或加装保温层/伴热带的改性金属(含低温镀层)管道,阀门及执行机构采用耐低温专用型号并内嵌可自动激活的电热丝与保温层,防止冻结卡涩。系统工作介质应优化为特制低温液压油及防冻型传动液。为应对喷头在极度低温下可能因冷凝水冻结而堵塞的问题,应在喷头内部集成微型电热元件,在系统启动初始阶段即可快速加热解冻或安装压力驱动式防冻密封盖。关键压力容器及瓶组须优先选用在超低温服役下仍保持优异抗冲击韧性的特种金属材料(如特定牌号奥氏体不锈钢),并在制造过程中引入严格的低温环境模拟验证。所有耐寒组件需执行基于冷链仓库真实工况的低温加速老化试验、极端温度循环冲击测试,并结合物联网传感器对运行关键点实施实时远程监测(如油温、管路温度、压力异常波动)。唯有构建贯穿设计、制造与运维全链条的耐寒保障体系,才能确保持续低温环境下的灭火系统本质可靠性与快速响应性能。

### 3.3 智能感知驱动的低温环境火灾早期主动预警与定向释能联动策略

克服冷链仓库低温环境对火灾早期光学烟雾粒子沉降快及

探测器灵敏度的限制,关键在于构建多谱段深度融合的智能火灾探测网络系统技术体系。该网络核心在于密集部署激光散射与吸气式复合型烟雾传感系统,确保对低温环境下初期阴燃的碳烟颗粒的稳定捕获能力。关键货架隐蔽区域加装分布式光纤测温传感单元,形成全覆盖温度异常监测能力。为对抗低温影响,系统需融合红外热成像、VOC特征气体等谱段探测技术,构建多源异构信息输入空间。基于深度学习的时空融合智能预警算法为该网络的中央处理单元,它整合时序、空间及谱间特征进行精准风险判定与分级,结合三维空间位置信息实时定位疑似火点坐标。系统联动核心在于高精度目标定位喷射技术。针对货架高位火灾,采用自寻轨伸缩式复合喷射机构(水雾、混合气)实现精准仰角喷射覆盖(喷射仰角自动计算);针对密集存储区,部署多自由度轨道载具式喷射机器臂(可多方向调节喷嘴姿态),喷射距离与角度由中央系统动态优化。

### 3.4 精细化空间分割与主动隔离屏障构建策略

冷链仓库连续大空间易造成火势快速蔓延,而低温环境又不利于灭火介质扩散覆盖。此策略的核心在于强化物理空间限制能力并阻断热流连续性,实现火势有效区隔离控制。核心实施路径包括三方面协同推进:首先构建多级联动密封隔离体系设计,重点区域采用模块化防火单元布局,单元间采用特制A60级耐低温防火隔墙封堵,顶面及沿墙布置密封条和导轨以形成立体阻隔边界。其次建设多通道主动泄压与气体置换系统,火灾启动时主动打开预设泄压口(通道)以排除火灾初期压力冲击波与高温烟流;并联双通道设计(如排烟通道与惰气注入通道)确保气体置换效率。更为关键的是快速部署智能化密封卷帘系统,集成感温触发装置与中央联动控制,可在接警后30秒内完成密闭区间主动划分。卷帘本体材料选用硅酸铝纤维增强复合结构以同时满足密封、绝热、机械稳定性三项要求,导轨机构内置加热带与润滑剂保障低温环境无卡阻运动。该策略有效将大型低温仓库转化为多个独立子空间控制单元,显著降低蔓延可能性,提高灭火介质浓度维持能力。

### 3.5 极端温度条件下系统集成化、模块化与快速部署能力策略

冷链火灾亟需快速灭火响应,传统复杂管网系统在大型低温库中建设成本高、周期长且维护困难。本策略颠覆传统管路

布局方式,推进灭火系统的高度集成化和可移动化发展。部署核心是基于集装箱式灭火单元技术框架,将灭火剂贮存装置、增压驱动系统、耐寒型智能控制柜、高效雾化/喷射模块全部集成至单个隔热防护箱体中,可实现全自动控温运行(-40℃至50℃)。在库区内依据分区防护需求分布式部署标准集装箱单元,各单元之间仅需通信线路连接。单元内置电池与备压驱动气体保障30分钟独立不间断运行能力。当火灾发生时,系统利用轨道或轮式自主平台(AGV)携带灭火单元实现快速移动部署能力。针对重点区域预设接驳端口结构,保证设备可在15秒内完成电源与信号通联建立功能连接。同时基于BIM模型构建库区三维部署决策支持系统,可根据定位信息智能生成最优移动路线与灭火战术方案指引(如喷射角度、路径点规划)。

## 4 结语

本文深入研究揭示了冷链仓库低温特殊环境对火灾特性演变及现有灭火技术效能的根本性制约作用,剖析了低温环境火灾灭火面临的适应性障碍。通过引入功能互补的系统化药剂集成技术、耐寒部件优化设计、智能监测预警控制联动、空间精细化分割管理和高度灵活模块化部署等五项核心策略,构建起一系列针对性强、科学有效的技术解决路径。研究结论表明,基于低温环境的特殊物理化学条件,实施多层次互补的技术适配策略可显著提高灭火效率和防控可靠性。未来应在推进相关技术标准制定、完善极端工况验证模型以及促进多技术深度协同方向持续深化探索,为冷链物流系统关键节点本质安全水平的持续提升提供理论指导和实践经验。

## [参考文献]

- [1]王新山.冷链物流仓库火灾原因分析与处置对策研究[J].消防界(电子版),2024,10(04):90-92.
- [2]樊永勇,王新瑞.急倾斜特厚煤层分段采空区低温氮气防火技术研究与实践[J].能源与环保,2024,46(11):254-262.
- [3]马杰.大南湖五号矿井22煤低温快速氧化现象与防灭火技术实践[J].煤炭科技,2024,45(05):136-139.

## 作者简介:

张旭湘(1981--),男,汉族,湖南湘潭人,本科,中级,研究方向:灭火救援。