

关于铁路机车自动灭火装置应用的研究分析

马国柱

国能朔黄铁路发展有限责任公司车辆分公司, 河北 沧州 062350

DOI: 10.61369/SSSD.2025190029

摘 要 : 铁路机车运行环境复杂, 电气设备密集, 存在显著的火灾隐患。本文系统分析了高压细水雾、超细干粉、气溶胶及气体灭火系统的技术特点与应用现状, 通过对比存储压力、工作温度、灭火浓度等关键参数, 评估各类系统的适用性。研究表明, 全氟己酮气体灭火系统在安全性、环境适应性、灭火效率及环保性方面具有显著优势。基于研究结果, 提出了集智能探测、多重驱动控制及差异化布置于一体的优化方案, 为提升机车消防安全水平提供理论依据与实践参考。

关 键 词 : 铁路机车; 自动灭火系统; 全氟己酮; 安全性分析; 智能控制

Research and Analysis on the Application of Automatic Fire Extinguishing Devices for Railway Locomotives

Ma Guozhu

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd. Locomotive and Rolling Stock Branch, Cangzhou, Hebei 062350

Abstract : Railway locomotives operate in complex environments with dense electrical equipment, posing significant fire hazards. This paper systematically analyzes the technical characteristics and application status of high-pressure water mist, ultra-fine dry powder, aerosol, and gas fire extinguishing systems. By comparing key parameters such as storage pressure, operating temperature, and extinguishing concentration, the applicability of various systems is evaluated. Research shows that the perfluorohexanone gas fire extinguishing system has significant advantages in safety, environmental adaptability, fire extinguishing efficiency, and environmental protection. Based on the research results, an optimized scheme integrating intelligent detection, multi-drive control, and differentiated layout is proposed. This scheme provides theoretical basis and practical reference for improving the fire safety level of locomotives, especially addressing the fire suppression challenges in narrow spaces with vibration and ventilation during locomotive operation.

Keywords : railway locomotives; automatic fire extinguishing systems; perfluorohexanone; safety analysis; intelligent control

引言

铁路机车作为铁路运输的核心装备, 其内部结构复杂, 电气设备密集, 运行环境恶劣。近年来, 多起机车火灾事故造成了严重损失, 如2018年G281次列车火灾导致车辆报废, 2019年D5689次列车火灾引发重大运营中断^[1]。这些事故暴露出传统手提灭火器在响应速度、灭火效率等方面的局限性。目前, 大多数机车仅配备手提式干粉或水基灭火器, 这些装置依赖人工操作, 在火灾初期难以有效发挥作用^[2]。因此, 研发和应用固定式自动灭火系统, 实现早期预警和自动灭火, 已成为提升机车消防安全水平的迫切需求。

一、自动灭火系统应用现状

(一) 国外应用现状

发达国家在轨道交通领域已普遍采用固定式自动灭火系统, 并建立了完善的标准体系。欧洲标准化委员会(CEN)等机构制定了相关技术规范, 为车载固定式灭火系统的设计与安装提供了详细指导^[3]。在具体应用方面, 英吉利海峡隧道的“欧洲之星”高速列车在动力设备间内设置了完整的自动探测和灭火系统; 意大利NTV公司的ITALO高铁在乘客区域安装了独立的细水雾灭

火系统; 瑞士Traxx机车平台配备了先进的人工智能火灾识别系统, 能够精准定位火源并自动联动灭火装置^[4]。这些案例表明, 固定式自动灭火系统已成为国际轨道交通的安全标配, 并朝着探测智能化、灭火精准化的方向发展。

(二) 国内应用现状

我国铁路机车自动灭火系统的应用相较于国际先进水平存在一定差距, 目前尚未出台专门的国家级技术规范。这种标准的缺失直接导致国内主机厂在新造机车设计阶段, 普遍未将完整的自动灭火系统作为标准配置^[5]。为了弥补这一安全短板, 部分铁路局

作者简介: 马国柱(1982.12—), 男, 汉族, 甘肃天水人, 本科, 工程师, 主要从事铁路运输安全装备与数据技术开发研究。

集团率先开展了技术试点。哈尔滨铁路集团、沈阳铁路集团等在其所属的 DF 系列内燃机车上批量加装了高压细水雾自动灭火系统，累计装车数量近千台，为该系统在振动环境下的适应性积累了宝贵的运行数据^[6]。近年来，随着技术的进步，以全氟己酮为代表的新型洁净气体灭火系统已在深圳地铁、天津地铁等多个城市轨道交通项目的车辆上成功应用，同时在国能朔黄铁路公司的部分机车上得到应用验证，展现出良好的推广前景^[7]。

二、自动灭火系统类型与技术特点

根据灭火介质的不同，适用于铁路机车的自动灭火系统主要分为以下几类：

- 1. 高压细水雾灭火系统：以水为灭火介质，在高压作用下产生粒径细小的水雾，通过冷却、窒息、阻隔辐射热等机理灭火。
- 2. 超细干粉灭火系统：释放平均粒径约10微米的干粉粉末，主要通过化学抑制、隔离覆盖等方式灭火。
- 3. 气溶胶灭火系统：通过电启动固体灭火剂发生氧化还原反应，生成由氮气、二氧化碳和金属盐微粒组成的凝集型气溶胶进行灭火。
- 4. 气体灭火系统：以液化或压缩气体作为灭火剂，通过窒息和冷却作用灭火^[8]，主要包括二氧化碳、七氟丙烷、IG541以及全氟己酮等。

从应用方式看，可分为保护整个封闭空间的全淹没式和保护特定设备表面的局部应用式；从系统结构看，可分为无管网的预制灭火系统和需敷设管网的管网式灭火系统。

三、安全性、可靠性及经济性综合评估

（一）关键性能参数对比分析

为进行客观评估，本文选取了存储压力、环境工作温度、灭火浓度、安全浓度及环保性等关键指标进行对比，详见表1。

表1 机车用主要灭火剂关键性能对比表

性能指标	全氟己酮	七氟丙烷	二氧化碳	气溶胶	超细干粉
存储压力（Mpa）	常压	2.5/4.2/5.6	5.7	常压	低压/常压
环境工作温度（℃）	-40 ~ +85	0 ~ +50	0 ~ +50	-20 ~ +55	-20 ~ +50
有效灭火浓度（%）	4 ~ 6	7.5 ~ 8.7	30 ~ 75	-	-
NOAEL（%）	10	9	5	-	-
大气残存时间（ALT）	~5天	31-42年	120年	-	-
全球变暖潜能值（GWP）	1	3800	1	-	-
臭氧耗减潜能（ODP）	0	0	0	-	-

对比分析：

- （1）存储与适应性：全氟己酮与气溶胶、超细干粉同为常压

存储，安全性高，且其工作温度范围（-40℃~+85℃）远超其他系统，能完美适应我国南北地域的巨大气候差异和机车内部的极端温差，无需额外加装保温设施。

- （2）安全性与环保性：全氟己酮在人员安全性（NOAEL/灭火浓度>2）和环保性（ALT短，GWP低）上均表现最佳^[9]。七氟丙烷的GWP值高达3800，环保压力日益增大。气溶胶和超细干粉因固体颗粒物问题，在人员安全与设备安全上均存在隐患。

- （3）灭火效率：在实际灭火试验中，全氟己酮扑救电气柜火灾的最快灭火时间可达15秒，而七氟丙烷系统因安全考虑通常设有30秒延时，其实际灭火时间相对更长。全氟己酮在扑灭液体火灾时也仅需数秒，效率显著。

（二）系统可靠性分析

系统的可靠性取决于其启动机制在各种极端工况下的保障能力。

- （1）火灾自动报警及灭火系统：这是最常见的模式，依赖外部电源供电。一旦机车主电源和备用电池均失效，系统将陷入瘫痪，可靠性存在短板。

- （2）探火管自动灭火装置：一种纯机械式系统，利用充压的探火管在火场最热处爆裂，直接驱动阀门释放灭火剂。其优点是完全无需电源，抗电磁干扰能力强。缺点是无法实现早期预警，且灭火动作后才会发出报警，缺乏人为干预和紧急启动功能。

- （3）三重驱动自动灭火模式：此为当前最可靠的解决方案。它在标准火灾自动报警及灭火系统的基础上，增加了无源启动模块。该模块是一种温感物理元件，无需电力，当环境温度达到其设定阈值时，能机械式地直接启动灭火瓶。这相当于为系统增加了第三重独立于电气的保障，即使在全车断电、控制系统完全失效的最坏情况下，仍能保证灭火装置可靠启动，实现了“主动电控”与“被动温控”的完美结合^[10]。

（三）全生命周期经济性分析

- （1）前期投入：全氟己酮自动灭火系统单套价格（约15万元，通常包含司机室和蓄电池箱保护）相较于七氟丙烷和高压细水雾系统（每套12-15万元，不含司机室和蓄电池箱）略高或持平。但其集成度更高，功能更完善。

- （2）灭火与恢复成本：全氟己酮系统常采用模块化设计，单个电气柜模块动作后，仅需重新灌装该模块的灭火剂即可，成本低，恢复时间短（约24小时），期间其他模块仍处于保护状态。而七氟丙烷和高压细水雾系统多为集中储瓶，灭火后需对整套系统所有钢瓶进行专业灌装和调试，恢复周期长（7天以上），期间整个区域失去保护，且总费用高昂。

- （3）维护成本：全氟己酮储瓶为常压容器，法规允许10年免维护。而高压储瓶（七氟丙烷、细水雾驱动气体）需定期进行水压测试，维护周期短，流程复杂，长期维护成本显著^[6]。

综合来看，全氟己酮系统在全生命周期内具有更优的性价比。

四、铁路机车自动灭火系统综合应用建议

基于以上分析，本文提出如下针对性的应用建议方案：

（一）灭火剂优选：坚定不移选用全氟己酮

对于新建机车和在役机车改造，建议优先选用全氟己酮作为

自动灭火系统的核心灭火剂。其卓越的安全性、环境适应性、环保性以及便捷的维护特性,使其成为满足铁路机车特殊需求的理想选择。值得注意的是,我国的标准化进程正在加速,山东省已于2019年率先发布了《全氟己酮灭火系统设计、施工及验收规范》(DB37/T3642-2019),国家层面的《全氟己酮灭火剂》标准也正在制定中,将为该技术的规范应用提供坚实支撑。

(二) 系统核心组件配置

(1) 智能探测终端: 复合型火灾探测器

为降低误报率,提高预警能力,应选用复合型火灾探测器。它可融合感知烟雾、温度、火焰等多种火灾特征参数,并可外接2路温度探头和1路感温电缆,实现对防护区域的多维度、全天候温度监测与火灾预警,真正做到“防患于未然”。

(2) 控制中枢: 高可靠性智能消防主控制器

主控制器是系统的大脑,应选用符合军用标准、具备防水、防震、防尘性能的工业级产品。它应集成手动/自动切换、系统自检、状态实时显示、故障报警与提示、以及与云端和车载网络通信等功能。

(3) 可靠性保障: 三重驱动启动模式

为确保万无一失,系统必须采用“三重驱动”架构,即:主电源供电、备用蓄电池供电、以及无源温感启动模块。这三重保障相互独立,构成冗余,极大提升了系统在极端意外情况下的生存与行动能力。

(三) 基于车型结构的差异化布置方案

(1) 交流传动机车(如HXD系列)

其各电气柜(控制电源柜、主变流柜、辅助变流柜等)均为独立密闭金属结构,是理想的全淹没防护单元。建议在每个重点电气柜、司机操纵台内部、蓄电池箱内安装独立的无管网全氟己酮灭火模块。这种“点对点”的保护方式,不破坏柜体结构,安装便捷,且灭火针对性强,能将火灾控制在最小范围内。

(2) 直流传动机车

其机械间空间紧凑,设备布局密集,且密封性不佳。建议采用“点面结合”的混合布置方案:对密封性较好的微机柜、电源柜、端子柜等采用预制灭火模块进行全淹没保护;对空间相对敞开的变压器室、整流柜、功补柜等区域,则采用有管网的组合分配系统进行区域性全淹没保护。组合分配系统的优势在于,一套共同的无管网系统可以保护多个区域,通过阀门控制,只向着火区域释放灭火剂,从而大幅减少灭火剂总用量和钢瓶数量,节约空间与成本。

(3) 内燃机车

其火灾风险主要集中在动力室和电气间。建议在此两大区域采用有管网的组合分配系统进行整体保护。对于两端的司机室和独立的蓄电池箱,则单独设置预制灭火模块进行局部重点保护。具体布置可参考图1所示的系统示意图。

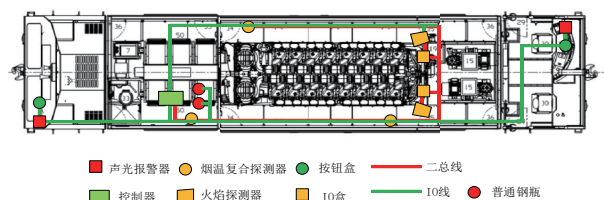


图1 内燃机车自动灭火系统布置图

(四) 系统集成与智能化升级

(1) 全车网络化控制: 在现代电力机车上,可利用机车现有的以太网或CAN总线等局域网,将各节车厢的智能消防主控制器联网通信。这样,A、B节司机室可以同步显示全车的火灾报警信息,实现对整台机车消防状态的统一监控与集中管理,避免了复杂的硬线连接。

(2) 云端远程智能运维: 通过加装4G/5G通信模块,将机车消防系统接入云平台智能控制中心。实现的功能包括:远程实时监测系统状态、接收并推送火警与故障信息、进行大数据分析以预测火灾风险、以及远程启动灭火系统(在确认安全的前提下)。同时,可开发配套的手机APP,使管理人员能够随时随地查看防护区域的实时视频(若有)和历史数据,实现移动办公与智能运维,特别适合于段内停放或无人值守的机车。

五、结论与展望

本文通过系统的对比研究与综合分析,得出以下核心结论:

在铁路机车这一特殊的密闭、有人、振动、宽温域应用场景下,自动灭火系统的选择需综合考量灭火效率、人员设备安全、环境适应性与全生命周期经济性。

全氟己酮洁净气体灭火系统在上述维度均展现出超越其他传统系统的综合优势,是当前技术条件下的最优解。

一个理想的机车自动灭火系统,应由“全氟己酮灭火剂+复合型智能探测器+三重驱动控制模式+基于车型的差异化布置+网络化/智能化监控平台”共同构成。

展望未来,随着《全氟己酮灭火剂》国家标准的即将出台,以及物联网、人工智能技术的不断渗透,铁路机车自动灭火系统将朝着更加标准化、模块化、智能化的方向演进。我们期待,本文提出的综合解决方案能够为推动我国铁路机车消防安全技术的进步与升级提供有力的支撑,为实现更高水平的“平安铁路”建设贡献力量。

参考文献

- [1] 中国铁路总公司. 铁路机车车辆火灾事故统计分析报告[R]. 北京: 中国铁路总公司, 2020.
- [2] 张明, 李强. 铁路机车消防系统现状与发展趋势[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 45-52.
- [3] European Committee for Standardization. Fire protection on railway vehicles[S]. Brussels: CEN, 2019.
- [4] Yamamoto T. Advanced fire suppression systems in Japanese railway vehicles[J]. Journal of Railway Engineering, 2022, 15(2): 78-85.
- [5] 国家铁路局. 铁路技术政策[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
- [6] 王建军, 刘涛. 高压细水雾灭火系统在铁路机车的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(4): 23-28.
- [7] 陈志刚, 周华. 全氟己酮灭火系统在城市轨道交通的应用分析[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 67-72.
- [8] 公安部天津消防研究所. 气体灭火系统设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [9] 李伟, 张强. 全氟己酮灭火剂性能研究与应用前景[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 89-94.
- [10] 赵建国. 铁路机车自动灭火系统可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.