

新能源汽车地下空间火灾防控体系优化研究

左沂汶 朱丹丽*

上海第二工业大学计算机与信息工程学院

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17873

[摘要] 锂离子电池热失控引发的火灾具有高热释放、强毒烟气、快蔓延、复燃等特征,对地下车库消防救援构成挑战。现行消防技术标准主要针对燃油车火灾,存在针对性不足、内部控火效能低、外部救援支撑弱等问题。本文提出完善技术标准体系、优化防火分区与排烟系统、提升应急响应能力等对策,设计集高压细水雾、低压CO₂与地面喷水为一体的多级联动自动灭火系统,并结合智能排烟与多传感器融合报警系统,为地下空间新能源汽车火灾防控标准修订和消防救援体系优化提供技术支撑。

[关键词] 新能源汽车; 锂离子电池; 地下空间; 热失控; 消防安全

中图分类号: TU998.1 **文献标识码:** A

Optimization of Fire Prevention and Control Systems for New Energy Vehicles in Underground Spaces

Yiwen Zuo Danli Zhu*

School of Computer and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University

[Abstract] Fires caused by thermal runaway of lithium-ion batteries have the characteristics of high heat release, strong toxic flue gas, rapid spread, and re-ignition, which pose a challenge to underground garage fire rescue. The current fire protection technical standards are primarily aimed at fuel vehicle fires, and there are issues such as insufficient relevance, low internal fire control efficiency, and inadequate external rescue support. This paper proposes to improve the technical standard system, optimize the fire prevention partition and smoke exhaust system, and improve the emergency response ability, and design a multi-level linkage automatic fire extinguishing system integrating high-pressure water mist, low-pressure CO₂ and ground water spray, and combine intelligent smoke exhaust and multi-sensor fusion alarm system to provide technical support for the revision of fire prevention and control standards for new energy vehicles in underground space and the optimization of fire rescue system.

[Key words] new energy vehicle; lithium-ion battery; underground space; thermal runaway; fire safety

引言

据公安部统计,截至2024年底新能源汽车全国保有量达3140万辆,但新能源汽车火灾事故数量也呈上升趋势(图1)。新能源汽车因动力电池特性具有较高火灾风险。锂电池通过电荷以锂离子形式在电解质中于阳极和阴极间迁移完成充放电,20-30℃范围内性能最佳^[1]。温度过高且散热不及时易触发热失控;温度过低则产生额外热效应,二者均增加火灾风险。热失控过程中,电池内部电解质及化学物质分解产生氢气(H₂)、一氧化碳(CO)、甲烷(CH₄)等可燃有毒气体,且可燃性气体燃烧消耗大量H₂、CO₂,形成自维持爆炸性环境。^[2]

大中型城市地下车库停车率较高(图2),但其封闭结构导致有毒气体积聚,现有消防系统难以阻断电池内部链式反应。2024年惠州市某小区地下车库因一辆新能源汽车热失控,导致三车

烧毁,同年韩国仁川一地下车库发生类似火灾,烧损70多辆车。新能源汽车火灾具有高热释放、大发烟量、复杂烟气成分、强毒性、高触电风险及复燃概率大等特征^[3],为地下空间消防救援带来严峻挑战。因此,开展地下空间火灾扑救策略与技术研究已成为保障公共安全的迫切需求。本文通过系统梳理现有消防技术标准不足,提出灭火系统升级、救援措施改进等建议,为消防安全法规修订提供技术支撑。

1 地下空间新能源汽车火灾消防救援困境分析

1.1既有规范针对性和可操作性不足

《电动汽车消防安全评价规程》试验条件与实际场景差异较大,对存量电动汽车指导作用有限。《电动汽车分散充电设施工程技术标准》(GBT 51313-2018)对充电接口、通信协议、电力容量等作出规定,但不同品牌电动汽车与充电设施兼容性差。

既有地下车库修建主要依据《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》(GB50067-2014)、《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014)等标准,这些标准主要针对燃油车火灾风险制定,对锂电池火灾缺乏针对性措施,导致灭火设备、防火卷帘等配置未达到新要求,增加火灾安全隐患。

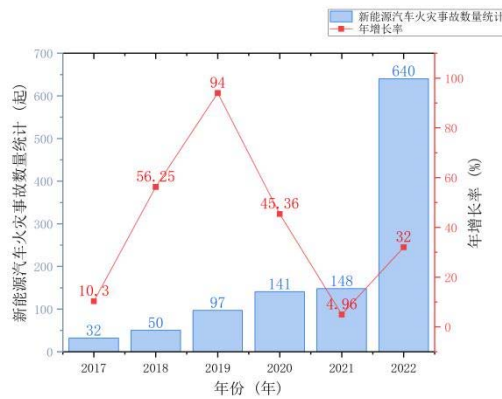


图1 2017-2022年中国新能源汽车火灾事故(不完全统计)

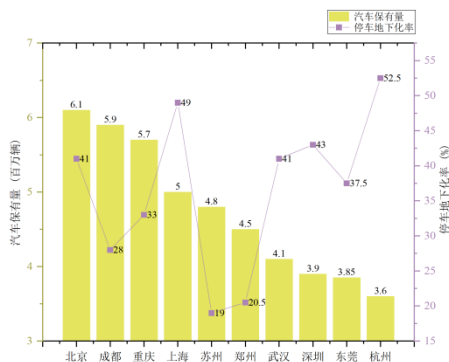


图2 全国十大城市2022年停车地下化率

1.2内部火势控制效能低下

1.2.1排烟系统存在设计缺陷

地下车库半密闭性和通风不良导致排烟效率远低于地面,造成烟气聚集、能见度下降。GB 50067-2014第8.2.5条要求排烟量不小于 $31500\text{m}^3/\text{h}$ (净高4m),风速不大于 10m/s ,风机 280°C 连续运行30min。GB55036-2022第11.3.5条规定,排烟管道烟气温度达 280°C 时连锁关闭。但火灾外围温度快速超过 800°C 致使排烟系统失效,烟气滞留形成高温高毒环境。

1.2.2灭火系统效能不足

常规灭火剂(水、干粉、 CO_2 、泡沫)存在显著缺陷。 CO_2 或化学灭火剂可抑制明火,但会损坏电子设备并与锂反应释放 H_2 ,当积累至 40000ppm - 750000ppm 时遇火花会导致二次灾害;水可冷却锂电池,但无法阻止其内部短路和电解液分解,与锂反应会生成更多 H_2 ,增加复燃风险。

传统地下空间主要采用泡沫-水喷淋灭火系统,无法满足新能源汽车火灾扑救需求。GB50084-2017第8.0.11条规定充水时间不大于2分钟,普通喷头(68°C)2-4分钟爆裂,但热失控在60s内^[4]进入猛烈燃烧阶段。时间差导致喷淋系统完成管道充水并

全面喷洒时,火势已快速发展,灭火效率显著降低。电池包阻碍灭火剂渗透,外部灭火后内部电芯仍可能持续放热复燃。喷淋系统无法同时实现快速降温、隔氧、阻断链式反应的综合灭火需求。

1.2.3监控系统预警滞后

许多地下车库消防监控系统依赖温感和烟感探测器,未考虑新能源汽车火灾特殊性。锂电池热失控初期可能不产生明显烟雾,传统烟雾探测器难以及时发现隐患,且缺乏智能预警功能,无法实时监测温度异常、 H_2 泄漏等潜在风险,导致预警滞后,错失最佳扑救时机。

1.3外部救援能力不足

根据相关规定和实地调查,小区地下车库净高约2.7m,净宽约4m。常见4-8t轻型消防车高约3.5m、宽约2.5m、转弯直径约9m,无法进入地下停车场,只能依靠手持设备;能进入救援的特种消防车一般为一吨型水罐消防车。但完全扑灭一辆新能源汽车火灾需用水量高达 10.85吨 ^[5], 500GPM 流量下可持续喷淋约5分钟,需不小于5英寸的管道。但传统喷淋系统管道为1-3in.,无法满足新能源汽车火灾救援的高水量需求。

2 地下空间新能源汽车火灾消防救援的优化建议

本文提出自动灭火系统协调运行的逻辑框图(图3),各系统相互协作,实现排出可燃有毒有害气体,有效控制火势蔓延。

2.1完善消防技术规范体系

应在GB 50067-2014和GB 50016-2014基础上,针对新能源汽车火灾地下空间防火需求,升级灭火系统配置标准,完善排烟系统相关规定,并依据GB/T 51313-2018强化地下空间充电桩的防火要求。通过提升被动防火设施配置水平以及主动灭火能力,全面增强地下空间火灾预防与应对能力。

2.2内部消防系统升级改造策略

2.2.1排风排烟系统优化

建议增设机械排烟系统,机械排烟可在火灾初期迅速排出高浓度有毒烟气,降低消防员进入救援的难度。结合车库布局和烟气扩散情况合理布置排烟口,提高排烟效率。引入智能排烟控制系统,结合烟气传感器、温度探测器和气体分析仪,对火灾现场烟气浓度、温度进行实时监测,自动调整排烟模式。例如,当 H_2 浓度超过安全阈值时,优先排放可燃气体防止爆炸;当温度过高、烟雾浓度过大时,加强局部排烟力度提升可视度。同时结合风机智能调控技术^[6],实现平时送、排风口开启,导流风机开启将送风引至排风口处,排烟口关闭(设 280°C 常闭远控排烟防火阀,着火时自动开启)。着火时导流风机停止运转,平时排风风口停止工作(可设 70°C 电动防火阀),风机转为排烟模式,确保火灾排烟系统有效运作。

2.2.2自动灭火系统优化配置

高压细水雾灭火系统能快速冷却燃烧车辆并灭火,汽化后产生大量水蒸气使燃烧物周围氧气浓度降低达窒息灭火效果,有效阻断热辐射。低压 CO_2 扑灭锂电池火灾效果良好,弥补高压 CO_2 冷却性能不足,具有抑爆作用。^[7]但考虑到新能源汽车电池一般位于车体底部,王青松团队全尺寸电动汽车燃烧实验发现,

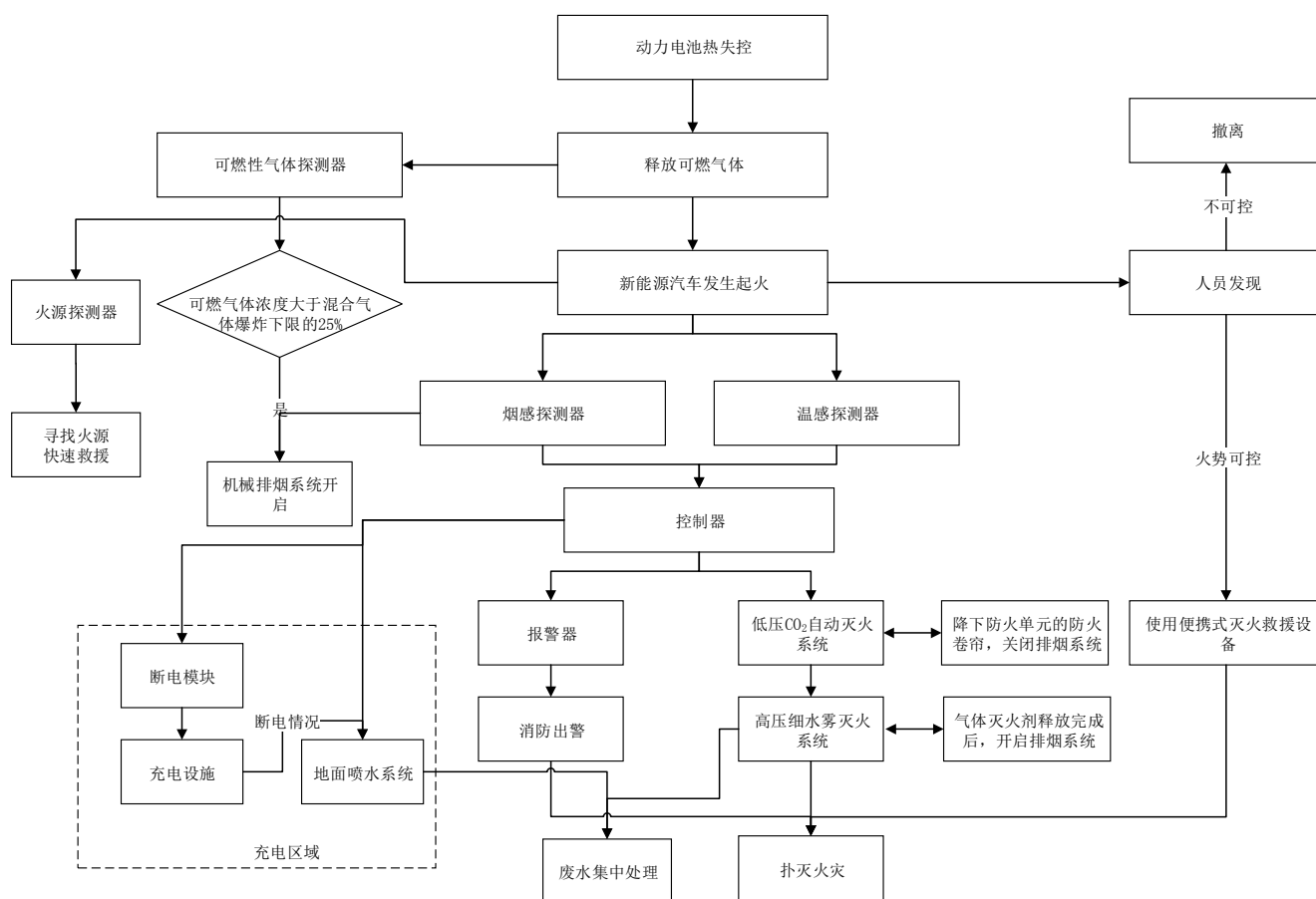


图3 自动灭火系统协调运行逻辑框图

冷却水不直接作用于电池，冷却效果受限。^[8]裘明哲等针对隧道新能源汽车火灾提出地面式水喷雾隔热阻火系统，有效抑制底盘处火焰。^[9]因此，在停车位地面安装一种自动喷水灭火系统，火灾时有效扑灭明火，降低电池温度。

2.2.3 火灾报警系统改进

实验发现车库顶棚处温度46.1℃时现场已充满大量烟雾，因此烟雾探测器比温度探测器更具优势。为提高报警准确性及迅速定位火源，安装烟雾探测器、可燃性气体探测器、温度探测器以及火源探测器协同运作，采用多传感器融合实施火灾报警^[10]，帮助消防员灭火。

2.3 外部救援能力提升

本文提出微型消防站装备升级及外部救援策略(图4)。移动式排烟机、消防机器人可在排烟时迅速定位火源，消防机器人可适应相对密闭地下空间环境^[11]。高温灭火毯扑灭新能源汽车火灾明火和控制烟气扩散有明显作用。^[12]因此，微型消防站可配备灭火毯、移动式排烟机，适用火灾初期，及时控制火势、烟气扩散，为后续消防救援提供帮助。

3 结论

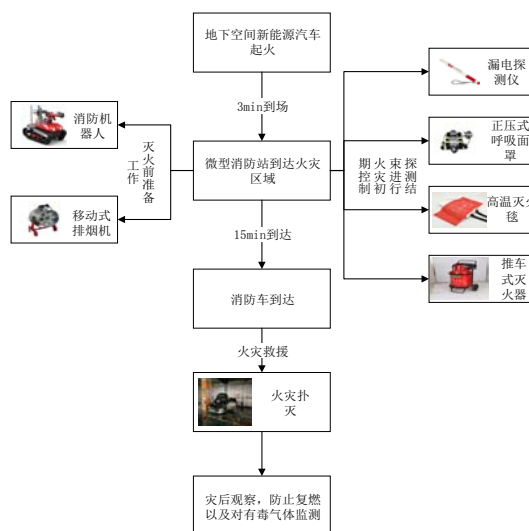


图4 微型消防站装备升级及外部救援策略

本文系统分析新能源汽车地下空间火灾消防救援困境，从完善规范、优化救援体系和升级技术装备等方面提出针对性对策。通过构建规范修订、应急能力建设和技术系统升级三个维

度的综合防控体系,实现消防安全治理精准化和可持续发展,保障公共安全。

4 展望

(1)基于本文提出的多级联动喷水灭火系统的地面喷水系统,由于缺乏实际案例、仿真和试验数据,因此首要任务是通过Pyrosim和FDS仿真,模拟地面喷水对整车燃烧过程中电池的热释放速率和烟气变化,以寻找最优的地面喷水释放策略。其次,通过仿真设计整车燃烧实验,对地面喷水系统进行实际应用,并进行比较分析,以确定最佳的喷水压力、喷水占空比等参数。(2)城市地下空间扑灭新能源汽车火灾产生的消防废水能够通过收集集中处理,而城乡地区发生新能源汽车火灾后产生的重金属、氟化物浓度超标的消防废水如何处理,也是后续急需考虑的问题。

[参考文献]

[1]Xu L,Wang S,Li Y,et al.Thermal runaway propagation behavior and gas production characteristics of NCM622 battery modules at different state of charge[J].Process Safety and Environmental Protection,2024,185:267-276.

[2]Wang G,Kong D,Ping P, et al. Revealing particle venting of lithium-ion batteries during thermal runaway: a multi-scale model toward multiphase process[J].Etransportation,2023,16:100237.

[3]刘昱君,段强领,黎可.多种灭火剂扑救大容量锂离子电池火灾的实验研究[J].储能科学与技术,2018,7(6):1105-1112.

[4]Wu Y,Li K,Wang J,et al.Experimental study and numerical modeling on cylindrical lithium-ion power battery thermal inertia[J].Energy Procedia,2019,158:4396-4401.

[5]Blum A,Long R T.Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries[J].SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2015,8(2):565-572.

[6]Stan C,Nastase I,Bode F,et al.Smoke and hot gas removal in underground parking through computational fluid dynamics:a state of the art and future challenges[J].Fire,2024,7(11).

[7]邓捷,陈宝辉,陆佳政.低压二氧化碳与常规灭火剂抑制锂离子电池火灾特性对比[J].高电压技术,2023,49(1):364-372.

[8]杨晓菡,张怡,邓玲,等.锂离子电池汽车全尺寸火灾试验研究进展综述[J].消防科学与技术,2024,43(1):29-33.

[9]裘明哲,崔言,牛帅杰,等.水喷雾系统抑制电动汽车火灾有效性实验研究[J].消防科学与技术,2022,41(1):82-86.

[10]Mei W,Liu Z,Wang C,et al.Operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies[J].Nature Communications,2023,14(1):5251.

[11]黄渊,刘弘毅.多模消防机器人在应急领域的设计和应用[J].消防界(电子版),2023,9(1):37-39.

[12]张向辉.基于超高温灭火毯技术的机场新能源设备消防战术演练与研究[J].民航学报,2022,6(S1):155-159,172.

作者简介:

左沂汶(2002--),女,汉族,河南人,硕士研究生,研究方向:新能源汽车热失控机理及其火灾风险数据分析。

*通讯作者:

朱丹丽(1998--),女,汉族,上海人,硕士研究生,研究方向:研究生教学。