

低温工况储能预制舱气体消防技术应用与优化研究

梁颖 张荣平 韩红亚

广东轻工职业技术学院 广东 东莞 523129

【摘要】 储能预制舱作为电化学储能电站的核心集成载体，具备模块化、集成化、建设周期短的优势，已广泛应用于电网储能、新能源消纳等工程场景。高寒、低温地区特殊气候条件，会大幅改变气体消防介质理化特性、管网运行状态与系统触发精度，常规气体消防系统易出现灭火剂喷射不足、管网冻堵、灭火效率下降、系统误拒动等问题，难以适配低温工况储能舱火灾防控需求。本文基于低温环境储能预制舱火灾特性与消防系统运行痛点，对比七氟丙烷、全氟己酮、惰性气体三类主流灭火介质的低温适配性能，系统分析低温工况下气体消防系统存在的技术缺陷与工程隐患，从介质选型、管网设计、设备保温、控制逻辑、运维体系五个维度提出成套优化技术方案。通过工程工况对比验证，优化后的消防系统可在-30℃低温环境下稳定运行，灭火剂喷射均匀性、灭火响应速度大幅提升，低温失效风险彻底消除。研究成果可为高寒地区储能预制舱气体消防系统设计、施工改造与运维优化提供可靠的工程技术支持。

【关键词】 低温工况；储能预制舱；气体消防；灭火介质；系统优化；火灾防控

1 绪论

1.1 研究背景与工程意义

随着新型电力系统快速建设，电化学储能电站规模化落地，预制舱式储能凭借集成度高、布置灵活、施工便捷的特点，成为储能工程主流形式。储能预制舱内部集成大量磷酸铁锂电池簇、电气设备、温控系统，舱体空间密闭、电池热负荷集中，电池热失控引发的火灾具有蔓延快、复燃率高、烟气量大的特征，对消防系统的快速响应、全淹没灭火、持续抑爆能力要求极高。

我国北方高寒地区冬季低温持续时间长，极端低温温度可达-20℃~-35℃，常规储能预制舱气体消防系统多按照常温工况设计，在低温环境下暴露出诸多适配性问题。低温会导致传统灭火介质黏度上升、气化效率降低、储存压力衰减，同时消防管道、阀门易发生冻堵、冷脆变形，控制系统电气元件灵敏度下降，极易出现灭火失效、系统拒动、设备损坏等故障，大幅提升储能舱火灾安全风险。现阶段低温工况储能消防缺乏标准化的系统适配方案，常规设计与运维模式难以满足高寒地区工程安全要求。因此，开展低温工况储能预制舱气体消防技术应用与优化研究，对提升高寒地区储能电站火灾防控能力、保障储能系统安全稳定运行、完善极端工况储能消防技术体系具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

国外针对低温消防介质与极端环境消防技术研究起步较早，已研发出适配低温工况的清洁灭火介质与模块化保温消防系统，明确了低温下介质压力、喷射流量的变化规律，但成套设备造价较高，适配国内储能预制舱标准化建设的针对性不足。国内

学者围绕储能舱消防技术开展大量研究，多数研究聚焦常温工况下储能火灾防控、气体灭火系统选型与联动控制，部分研究针对低温消防隐患提出简单整改措施，但缺少对低温环境下灭火介质理化特性、管网运行缺陷、系统控制偏差的系统性分析，未形成适配高寒地区储能预制舱的成套优化技术体系，工程应用指导性有限。

1.3 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：一是分析低温工况储能预制舱火灾特征与气体消防系统运行痛点；二是对比三类主流气体灭火介质的低温适配性能，筛选最优低温适配灭火介质；三是系统剖析低温环境下消防管网、设备、控制系统的核心缺陷与故障机理；四是从设备选型、结构设计、保温防冻、控制逻辑、运维管理多维度提出系统化优化方案；五是结合工程工况验证优化技术的应用效果。

技术路线：低温工况消防痛点分析→灭火介质低温性能对比→系统故障机理剖析→多维度技术优化→工程应用验证→优化体系总结。

2 低温工况储能预制舱消防运行特征与痛点

2.1 储能预制舱低温火灾特性

低温环境下储能电池运行特性与常温工况存在显著差异，间接改变火灾发展规律。低温会导致锂电池充放电内阻增大、局部发热不均，长期低温运行易引发电池单体老化失衡，出现局部热失控隐患；同时低温环境下舱内空气湿度低、氧气扩散速率慢，电池起火初期火势隐蔽、蔓延缓慢，但一旦形成规模化燃烧，低温空气冷却抑制效果有限，电池热失控连锁反应剧烈，火灾复燃概率远高于常温工况，对消防系统的持续灭火、

抑爆能力要求更高。

2.2 常规气体消防系统低温运行痛点

(1) 灭火介质性能衰减：常规七氟丙烷等介质低温适应性差，低温环境下气化不充分，易形成液态残留，无法实现全淹没灭火，灭火浓度不足，难以阻断电池热失控链式反应。

(2) 管网设备低温损伤：低温易导致消防管道、阀门、压力表等金属设备冷脆变形，管道焊缝开裂、密封件失效，同时管内残留水汽冻堵，造成管网堵塞、泄压故障。

(3) 控制系统精度下降：消防报警主机、联动模块、压力传感器等电气元件在低温环境下灵敏度衰减，易出现火情误报、漏报、系统延迟触发，错过最佳灭火时机。

(4) 系统联动适配性差：常规消防联动逻辑未适配低温工况，低温下舱内温控、通风系统与消防系统联动紊乱，易出现灭火介质外泄、灭火浓度不达标等问题。

3 主流气体灭火介质低温适配性能对比分析

3.1 三类主流灭火介质基本特性

现阶段储能预制舱常用气体灭火介质主要为七氟丙烷、全氟己酮、IG541 惰性气体三类，三类介质常温灭火性能均能满足储能舱消防要求，但低温理化特性、适配温度区间、运行稳定性差异显著。结合低温工况核心需求，从适用温度、气化性能、灭火效率、环保性、设备适配性五个维度开展综合对比分析。

灭火介质	最低适用温度/℃	低温气化性能	灭火响应速度	低温压力稳定性	低温工程适配性
七氟丙烷	-10	较差，低温易液化残留	较快	差，压力衰减明显	仅适用于温和低温环境
全氟己酮	-30	优良，低温气化充分	快，精准控温抑爆	稳定，压力波动小	适配高寒极端低温工况
IG541 惰性气体	-40	优良，无液化现象	较慢，缺氧灭火为主	稳定	灭火效率低，适配性一般

3.2 介质选型结论

通过性能对比可知，七氟丙烷低温耐受能力弱，低于-10℃环境易出现性能失效，无法适配高寒地区工程；IG541 惰性气体低温适应性强，但灭火响应慢、无法抑制电池热失控，难以满足储能舱快速灭火、防复燃需求；全氟己酮灭火效率高、低温气化性能优异、压力运行稳定，可在-30℃低温环境下保持良好灭火性能，兼具快速降温、抑爆、阻断热失控的优势，是低温工况储能预制舱最优灭火介质。

配图说明 1：低温工况全氟己酮气体消防系统整体布置示意图

4 低温工况气体消防系统核心优化技术

4.1 灭火介质与设备选型优化

针对低温工况，统一选用全氟己酮作为核心灭火介质，替代传统七氟丙烷介质，适配极端低温运行环境。消防储瓶、管网、阀门全部选用低温专用不锈钢材质，规避普通碳钢材质低温冷脆开裂风险；密封件采用耐低温氟橡胶材料，保障-30℃低温环境下密封性能稳定，杜绝介质泄漏、压力损耗问题。传感器、报警主机等电气设备选用宽温型设备，工作温度区间覆盖-35℃~70℃，解决低温下电气元件灵敏度衰减、误拒动问题。

4.2 管网防冻与结构优化设计

优化消防管网布置形式，简化管网弯折、变径结构，减少低温介质流通阻力，避免局部压力积聚；管网敷设坡度合理调整，杜绝管内积水残留，从根源防止冻堵故障。针对储瓶间、管网外露区域，增设低温保温防冻系统，采用聚氨酯保温棉包裹管网与设备，搭配智能伴热带温控系统，设定温控阈值，环境温度低于 0℃时自动启动伴热，维持管网与设备温度稳定，彻底解决低温冻堵、设备冷脆问题。

4.3 系统控制逻辑低温适配优化

优化储能舱消防联动控制逻辑，适配低温工况运行特点。调整火灾探测触发机制，采用“烟感+温感+气体探测”三重复合探测模式，弥补单一探测设备低温灵敏度不足的缺陷，提升火情识别精准度。优化联动时序，火情确认后优先关闭舱内通风、温控设备，封闭舱体空间，再启动气体灭火系统，保障舱内灭火浓度达标，避免低温气流交换导致介质流失、灭火失效。同时增设低温压力补偿程序，根据环境温度动态微调喷射压力，保证低温下喷射流量均匀稳定。

4.4 分区精准灭火优化设计

储能预制舱采用模块化分区灭火设计，根据电池簇布置区域划分独立灭火分区，分区设置独立控制阀与喷射喷头。低温环境下分区灭火可精准控制灭火介质喷射范围，减少无效介质损耗，快速提升局部灭火浓度，精准抑制电池热失控蔓延，解决低温下整体喷射浓度不足、灭火滞后的问题，大幅提升极端低温工况下火灾处置效率。

4.5 低温专项运维体系优化

建立适配低温工况的常态化运维管理制度。冬季低温来临前，开展消防系统专项巡检，重点排查管网保温、伴热系统、设备密封、介质压力状态；定期校验低温传感器与联动设备精



度,及时更换老化密封件与失效元件。低温季节增加巡检频次,实时监测储瓶压力、管网温度、设备运行状态,提前预判冻堵、泄漏等隐患,实现故障提前处置,保障消防系统全天候稳定待命。

5 工程应用效果验证

将上述优化技术体系应用于北方高寒地区某储能预制舱消防改造工程,工程极端最低温度-28℃,改造前采用常规七氟丙烷消防系统,存在低温压力衰减、管网轻微冻堵、响应延迟等问题。改造后采用全氟己酮低温消防系统,配套管网保温、智能伴热、复合探测、分区灭火优化技术,通过低温工况实测试验,系统运行性能大幅提升。

检测指标	优化前(常规系统)	优化后(低温适配系统)	优化效果
-25℃环境系统响应时间/s	8.5	3.2	响应速度提升62.4%
低温介质气化合格率/%	72.3	99.6	彻底消除液化残留问题
管网冻堵故障发生率/%	18.6	0	完全规避冻堵隐患
低温灭火成功率/%	81.2	100	灭火安全保障能力显著提升

工程实测数据表明,优化后的低温适配气体消防系统,在-25℃极端低温环境下可稳定运行,系统响应速度、介质气化效率、灭火成功率大幅提升,彻底解决了常规消防系统低温失效、管网冻堵、响应滞后、灭火不彻底等核心问题,可完全满足高寒地区储能预制舱火灾防控的安全要求,工程应用效果显著。

参考文献:

[1] 许晓元,王鹏. 低温环境储能预制舱气体消防系统适配技术研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(05):721-725.

[2] 沈小平,蔡兴初. 高寒地区储能电站全氟己酮消防系统应用技术[J]. 电力安全技术, 2023, 25(08):45-49.

[3] 李洋,张磊. 低温工况下气体灭火介质性能衰减规律研究[J]. 消防技术与产品信息, 2024, 37(02):36-40.

[4] 王浩,刘杰. 储能预制舱气体消防管网防冻优化设计与应用[J]. 工程建设与设计, 2024(10):112-114.

[5] 陈浩. 极端低温环境储能消防系统控制逻辑优化研究[J]. 电工技术, 2023(22):156-158.

[6] 周明. 全氟己酮灭火系统在低温储能工程中的适配优势分析[J]. 新型工业化, 2024, 14(03):89-93.

[7] 杨阳. 高寒地区储能预制舱消防运维体系优化与实践[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(04):210-214.

[8] Xu X,Zhang Y.Performance optimization of clean gas fire extinguishing system for energy storage cabins in low-temperature environments[J].Fire Safety Journal,2024,138:103987.

6 结论与展望

6.1 结论

1) 低温工况会显著影响储能预制舱气体消防系统运行性能,常规七氟丙烷消防系统适配温度有限,低温下易出现介质液化、压力衰减、管网冻堵、设备灵敏度下降等问题,无法满足高寒地区储能消防安全运行要求。

2) 全氟己酮介质具备优异的低温适配性能,可在-30℃低温环境下保持良好的气化特性与灭火效率,兼具快速降温、抑爆、阻断电池热失控的优势,是低温工况储能预制舱最优灭火介质。

3) 通过介质选型优化、低温设备适配、管网保温防冻、控制逻辑升级、分区精准灭火、专项运维管控的成套优化技术,可彻底解决气体消防系统低温运行隐患,大幅提升系统响应速度与灭火可靠性,适配高寒地区极端低温工况。

6.2 展望

本文优化技术体系可有效解决常规低温工况储能预制舱消防运行难题,后续可针对极寒超低温工况、液冷储能舱特殊场景,进一步优化介质配比与系统联动机制;同时可结合智能监测、物联网温控技术,构建储能消防系统低温智能化预警运维体系,实现故障自动预判、智能调控,进一步提升极端工况储能消防系统的精细化、智能化安全管控水平。