

# 锂离子电池储能系统热失控防控与消防技术研究

张克龙 沈智春 冉佳

三峡集团云南能源投资有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18223

**[摘要]** 锂离子电池储能系统在能源领域的应用日益广泛,然而热失控问题严重制约其安全稳定运行。为提升系统安全水平,需深入研究热失控的防控机制与高效消防技术。本文在分析热失控触发原因的基础上,提出针对性防控策略,并优化消防技术方案,以有效抑制热失控扩散、降低事故损失,为锂离子电池储能系统的安全推广奠定基础。

**[关键词]** 锂离子电池储能系统; 热失控防控; 消防技术; 安全运行

**中图分类号:** U664.88 **文献标识码:** A

## Research on Thermal Runaway Prevention and Fire Protection Technology for Lithium-ion Battery Energy Storage Systems

Kelong Zhang Zhichun Shen Jia Ran

China Three Gorges Corporation Yunnan Energy Investment Co., Ltd.

**[Abstract]** The application of lithium-ion battery energy storage systems (LIBESS) is becoming increasingly widespread in the energy sector. However, thermal runaway (TR) poses a significant threat to their safe and stable operation. To enhance system safety, it is crucial to conduct in-depth research on TR prevention mechanisms and effective fire protection technologies. This paper analyzes the triggering factors of TR, proposes targeted prevention strategies, and optimizes fire protection schemes to effectively suppress TR propagation and reduce accident losses, thereby laying a foundation for the safe deployment of LIBESS.

**[Key words]** Lithium-ion battery energy storage system; Thermal runaway prevention; Fire protection technology; Safe operation

### 引言

锂离子电池储能系统以其高效储能特性,在可再生能源消纳、电网调峰等领域发挥着重要作用。然而,由热失控引发的安全事故频发,不仅造成财产损失,也对人员安全和周边环境构成威胁。因此,深入探究热失控的产生机理,研发科学有效的防控方法与适配的消防技术,已成为推动锂离子电池储能系统健康发展的关键课题。开展热失控防控与消防技术的系统研究,有助于弥补相关技术空白,完善安全保障体系,推动能源领域向更安全、高效的方向发展。

### 1 锂离子电池储能系统热失控问题分析

#### 1.1 热失控触发因素

锂离子电池储能系统热失控的触发并非单一因素所致,而是与电池自身特性、运行环境及系统设计密切相关。从电池自身看,电极材料老化、电解液分解等问题会降低电池的热稳定性,充放电过程中易引发局部过热。在运行环境中,温度过高、过低或湿度过大等异常情况会破坏电池的正常工作状态,增加热失控风险。系统设计方面,若电池模组结构不合理、散热通道堵塞,

热量无法及时散发,会在电池组内积聚并最终触发热失控。此外,外部短路、过充过放等操作失误也会直接导致电池内部化学反应失衡,加速热失控发生<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 热失控蔓延规律

热失控一旦触发,其蔓延过程具有特定规律。单个电池发生热失控后,会释放大量热量和可燃气体。热量通过热传导、热辐射和热对流三种方式传递至相邻电池:热传导使相邻电池温度迅速升至热失控临界点;热辐射对周围电池产生持续加热效应;热对流则借助高温气体在电池组内部流动,进一步扩大受热范围。释放的可燃气体与空气混合后,在特定条件下可能引发燃烧或爆炸,从而加快热失控蔓延速度、加重破坏程度,导致事故范围持续扩大。

#### 1.3 热失控危害评估

热失控带来的危害涉及多个方面。在财产方面,可导致电池模块损毁、储能系统瘫痪,设备修复或更换成本高昂。环境方面,热失控过程中释放的氟化氢、一氧化碳等有毒有害气体污染空气,若扩散至周边区域还可能影响土壤与水源。更为严重的是,

表1 2023年国内部分省市锂离子电池储能项目安全事故统计

省份	储能项目 数量(个)	投运总容 量(MWh)	发生热失控 事件次数	涉及起火/ 爆炸事故数	平均单次事故损失 (万元)	数据来源
广东	42	860	7	3	280	《中国电化学安全年报(2023)》, 中国化学与物理电源行业协会
江苏	35	720	5	2	210	国家能源局华东监管局《储能运行安全通报(2023Q4)》
浙江	28	510	4	1	150	浙江省能源局《新型储能安全评估报告(2023)》
山东	19	380	3	2	190	《电力系统自动化》2024年第2期附录数据
河北	15	290	2	1	120	国网河北省电力公司技术简报(2023年12月)

热失控引发的火灾或爆炸可能威胁人员生命安全, 造成伤亡, 并破坏周边建筑物等基础设施, 引发连锁安全事故, 产生恶劣的社会影响。

## 2 锂离子电池储能系统热失控防控技术

### 2.1 基于电池材料改进的防控技术

从电池材料入手改进是防控热失控的重要方向。在电极材料方面, 可研发掺杂改性的高稳定性正极材料, 优化负极结构以提升储锂性能与循环稳定性, 从而降低局部过热风险。在电解液方面, 可添加阻燃剂或开发固态电解质, 替代传统液态电解质, 从根本上降低热失控可能性。同时, 改进隔膜材料以提高其耐高温性能, 防止电池内部短路。这些技术的研发与应用, 需要材料化学、电化学等专业人才的支持。

### 2.2 基于系统结构优化的防控技术

优化系统结构能有效阻断热失控传播路径。可采用模块化分组设计布局电池组, 并预留足够的散热与防火间隔, 防止热失控快速蔓延。散热系统应结合主动散热(如风扇、液冷)与被动散热(如散热片、热管)技术<sup>[2]</sup>, 确保电池组处于适宜工作温度。此外, 在电池模组内部设置状态监测点, 实现实时监控, 并在异常时及时预警、启动断电或降温措施。此类系统优化工作需机械设计、热能工程等专业工程师协作完成。

### 2.3 基于运行管理强化的防控技术

强化运行管理是防控热失控的基础保障。应建立电池状态监测体系, 利用传感器与数据采集系统实时获取运行参数, 通过数据分析评估电池健康状况, 提前识别故障风险。制定科学的充放电管理制度, 避免过充过放, 设定合理参数以延长电池寿命。定期对系统进行维护检修, 及时更换老化部件, 并加强对操作人员的培训, 提升其安全意识与应急处理能力。这些运维管理工作为数据分析、设备维护、安全管理等领域创造了就业岗位。

## 3 锂离子电池储能系统适配消防技术开发

### 3.1 消防技术需求分析

锂离子电池储能系统的特性决定了其对消防技术的特殊需求。系统热失控时具有温度高、火势蔓延快、并释放有毒有害及可燃气体的特点, 常规消防手段难以有效应对。因此, 消防技术需具备快速响应能力, 在热失控初期及时干预以遏制火势发展; 同时应能有效降温, 防止复燃。此外, 需具备气体收集与处理功能, 以减轻对环境和人员的危害。消防系统还应与储能系统结构相适配, 避免造成二次损坏, 并尽量保障灭火后系统具备可恢复性。

### 3.2 新型气体灭火技术的应用研究

新型气体灭火技术在锂离子电池储能系统中展现出良好应用前景。例如, 全氟己酮灭火剂具有灭火速度快、降温效果显著、环保性较好等优点。在实际应用中, 需根据储能系统空间布局与电池排列方式, 合理设计喷头布置方案, 确保灭火剂均匀覆盖保护区域。同时, 需研究灭火剂喷射时间与剂量的精准控制策略, 避免因喷射不当导致电池组结构受损或因剂量不足影响灭火效果。此外, 应确保灭火系统在带电环境下能安全可靠运行, 防止引发次生电气故障。

### 3.3 冷却抑爆一体化消防技术的研发与应用

冷却抑爆一体化消防技术可实现对热失控的全方位控制。该技术融合了冷却降温与抑爆功能: 在热失控初期, 通过喷射超细水雾等冷却介质快速吸收热量, 抑制热失控蔓延; 同时利用抑爆剂阻断可燃气体与氧气的接触, 防止爆炸发生。研发过程中需优化冷却介质与抑爆剂的配比, 以提升协同效能。针对不同规模的储能系统, 可设计相应的消防系统结构, 如小型系统采用移动式装置, 大型电站则构建固定式管网系统。此外, 需通过模拟不同热失控场景开展性能测试, 验证技术的有效性与稳定性, 为实际应用提供依据<sup>[3]</sup>。见表1:

## 4 锂离子电池储能系统安全保障体系构建与实践

### 4.1 热失控防控与消防技术协同机制

构建防控与消防技术的协同机制是安全保障体系的核心。应明确两类技术在不同阶段的职责与协作方式:在预防阶段,防控技术起主导作用;一旦热失控发生,消防技术需迅速启动并协同处置。监测系统检测到电池温度异常时,可先启动散热或断电等防控措施;若温度持续上升,则立即触发消防系统进行灭火降温。同时,建立数据共享平台,实现两类系统之间电池状态、消防资源等信息的实时交互,从而动态调整策略,提升整体防护效能。

#### 4.2 安全保障体系在实际项目中的应用验证

将构建的安全保障体系应用于不同规模、不同场景的实际储能项目中,进行验证与优化。在项目运行中,详细记录系统工作状态、热失控预警及应急处置效果,分析体系在实际应用中的优势与不足。针对发现的如防控响应延迟、消防覆盖盲区等问题,及时调整技术方案与系统配置。通过持续的应用验证与迭代优化,提升体系对复杂工况的适应性与可靠性,为其大规模推广积累实践经验。

#### 4.3 安全保障体系的标准化与推广策略

制定标准化规范是推动安全保障体系广泛应用的关键<sup>[4]</sup>。应基于研究成果与实践经验,明确热失控防控技术、消防技术的各项指标、设计标准、安装规范及协同工作流程,形成统一的行业标准。标准内容应覆盖系统设计、设备选型、施工安装、运行维护等全环节。在推广方面,需加强标准宣传与培训,提升行业认知;与设备制造商、工程企业合作,将标准融入产品与项目设计中;同时,建议政府部门出台鼓励政策,对符合标准要求的项目给予支持,加速体系在全行业的普及,整体提升锂离子电池储能系统的安全水平。

## 5 结语

本文围绕锂离子电池储能系统热失控防控与消防技术展开研究,分析了热失控的触发因素、蔓延规律及危害,探讨了针对性的防控技术与适配的消防方案,并在此基础上构建了协同安全保障体系。相关研究成果有助于提升锂离子电池储能系统的安全性能,降低热失控事故的发生概率与损失程度。未来仍需持续跟踪技术发展动态,不断优化和完善相关技术体系,为锂离子电池储能系统在能源领域的持续、安全、健康发展提供更有力的支撑,助力能源结构转型与产业升级。

### [参考文献]

- [1]徐成善,孙焯,杨智凯,等.储能锂离子电池系统热失控诱发电弧研究进展[J].储能科学与技术,2025,14(08):3037-3050.
- [2]王凯明,白生军,王燕,等.锂离子电池储能系统浸没式油基冷却液的研制[J].合成润滑材料,2025,52(02):1-5.
- [3]贾磊磊.锂离子电池储能系统靶向消防装备设计分析[J].张江科技评论,2025,(03):125-127.
- [4]张巍.电化学储能电池舱消防系统标准建设研究[J].建筑电气,2025,44(08):53-57.

### 作者简介:

张克龙(1985--),男,汉族,四川叙永人,本科,中级工程师,研究方向:光伏、风电、储能等新能源安全。

沈智春,(1991--),男,汉族,云南元谋人,本科,中级工程师,研究方向:新能源安全生产技术。

冉佳(1991--),男,汉族,云南姚安人,本科,中级工程师,研究方向:新能源项目质量安全环保管理及监督检查。