

新型电化学储能电站火灾风险特性与初期应急处置流程研究

袁福江

(浙江道宇安环科技有限公司, 浙江 杭州 310022)

摘要 本文针对规模化电化学储能电站快速发展伴随的火灾安全风险, 系统分析了其火灾风险特性。首先梳理了储能电站的基本构成与主要电池类型, 重点阐述了锂离子电池热失控的诱因及连锁反应机理; 其次深入剖析了储能电站火灾的典型特性: 隐蔽性、突发性、爆炸性、复燃性、毒害性与复杂性。针对这些特性, 构建了一套以“早期预警、快速抑制、防止蔓延”为核心的初期应急处置流程, 强调了“P. I. E. R.”(隔离、抑制、降温、评估与处置)原则在实战中的应用; 最后对未来技术与管理方向进行了展望, 以期提升电化学储能电站的安全水平与应急响应能力提供参考。

关键词 电化学储能; 锂离子电池; 火灾风险; 热失控; 应急处置

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.041

0 引言

在全球能源结构向清洁化、低碳化转型的背景下, 以风电、光伏为代表的可再生能源不断发展。然而, 在产业繁荣的背后, 安全问题日益凸显, 其中火灾风险尤为突出。国内外已发生多起电化学储能电站火灾爆炸事故。例如: 2021 年北京丰台储能电站事故、2023 年甘肃省民勤县某磷酸铁锂储能电站火灾事故等, 深刻揭示了电化学储能, 特别是锂离子电池, 在特定故障条件下可能引发难以控制的热失控火灾, 其破坏力远超传统火灾。

与常规电力设施或建筑物火灾相比, 电化学储能电站火灾在物质燃烧特性、发展演化机理及灾害后果上均表现出显著的独特性与极高的危险性。电池模组或系统内部积聚的化学能瞬间释放, 可能导致爆炸、喷射火、有毒气体大量释放及长时间的复燃风险, 给传统消防救援理念与措施带来巨大挑战。

1 电化学储能电站火灾风险特性分析

1.1 储能系统基本构成与电池类型

典型的大型电化学储能电站主要由电池系统(电池模组、电池簇、电池架及电池管理系统 BMS)、功率转换系统(PCS)、能量管理系统(EMS)、温控系统以及配套的电气与建筑设施构成。其中, 电池系统是

核心能量载体, 也是主要风险源^[1]。当前主流技术路线包括锂离子电池(磷酸铁锂 LFP、三元锂 NMC 等)、液流电池、钠硫电池等。锂离子电池, 尤其是 LFP 电池, 因综合性能优势占据市场主导, 也是火灾事故的主要关联对象, 故本文以其为主要分析对象。

1.2 锂离子电池热失控机理

火灾风险的根源在于电池“热失控”(Thermal Runaway)。热失控是指电池内部生热速率远超散热速率, 积累的热量引发一系列连锁放热副反应, 导致电池温度急剧升高(可达 800℃以上), 最终可能引发起火爆炸的过程^[2]。主要诱因可分为三类:

1. 机械滥用: 如碰撞、挤压、针刺导致隔膜破裂, 引发内部短路^[3]。
2. 电滥用: 包括外部短路、过充电、过放电。过充电可能导致负极析锂、正极结构破坏并释氧; 过放电极化可能导致铜集流体溶解。
3. 热滥用: 外部高温环境或局部过热, 导致 SEI 膜分解、隔膜收缩熔化等。

一旦触发, 连锁反应通常遵循以下路径: SEI 膜分解→负极与电解液反应→隔膜熔化→内部短路→正极材料分解释氧→电解液燃烧分解。此过程伴随大量可燃气体(如 H₂, CO, CH₄, C₂H₄ 等)和有毒气体(如 CO, HF, POF₃ 等)的释放。

作者简介: 袁福江(1972-), 男, 本科, 注册安全工程师、一级注册消防工程师、一级安全评价师, 研究方向: 工业电气安全、储能电站消防安全、安全评价。

1.3 火灾风险典型特性

基于热失控机理, 储能电站火灾呈现出以下鲜明且高危的特性:

1. 隐蔽性与突发性: 热失控初期(数分钟至数小时)可能在电池内部缓慢孕育, 外部征兆不明显。传统烟感、温感探测器难以及时发现。BMS 虽能监测电压、温度异常, 但对内部微观短路的预警能力有限。一旦内部反应达到临界点, 能量释放将极为迅猛, 表现为突然的明火、爆炸或气体喷射, 留给人员响应的时间窗口极短。

2. 爆炸性与喷射火风险: 热失控产生的高温高压可燃气体在电池壳体内积聚, 当压力超过壳体承受极限时会发生物理爆炸(壳体破裂)。释放出的可燃气体与空气混合, 遇火源即发生剧烈的气体爆炸(化学爆炸)。同时, 高压气体携带高温固态颗粒物和火焰从泄压阀或破裂口高速喷出, 形成喷射火(Jet Fire), 可瞬间引燃数米甚至更远距离的可燃物, 极具杀伤力和蔓延性^[4]。

3. 复燃性: 即便明火被扑灭, 电池内部(尤其是大型模组或簇内部的电池)可能仍处于高温或持续反应状态。残余热量可能导致相邻电池发生热蔓延, 引发新的热失控。深层或内部的电池因灭火剂难以渗透, 冷却不彻底, 极易在数小时甚至数天后再次复燃, 给现场监护和清理工作带来长期挑战^[5]。

4. 毒害性: 电池电解液(含锂盐、有机溶剂)及电极材料在热分解和燃烧过程中, 会产生大量有毒、腐蚀性气体。氟化氢(HF)是最危险的产物之一, 具有极强的刺激性和腐蚀性, 低浓度即可对呼吸道和皮肤造成严重伤害, 且不易被常规过滤式防毒面具滤除。此外, 一氧化碳(CO)、五氟化磷(POF_3)、各类有机物蒸气等也构成严重的健康威胁和环境污染^[6]。

5. 火灾发展复杂性: 火灾在储能舱或集装箱内的蔓延受多种因素影响: 电池排列方式、电气连接、热管理系统状态、舱体通风条件、灭火系统介入时机等。火灾可能从单个电池通过热传导、热辐射、火焰蔓延或喷射火引燃等方式, 沿模组、电池簇、电池架路径呈指数级扩散, 形成多点同时热失控的“雪崩效应”, 灭火难度极大^[7]。

2 储能电站火灾初期应急处置流程构建

鉴于上述风险特性, 传统的“发现大火—报警—出水灭火”模式完全无法应对。初期应急处置(通常指从异常发现到专业消防救援力量全面接管前的阶段)的核心目标是: 快速预警、控制事态、防止灾难性升级、为专业救援创造有利条件。流程应遵循“P. I. E. R.”原

则: 隔离(Isolate)、抑制(Suppress)、降温(Cool)、评估与处置(Evaluate&Respond)。

2.1 第一阶段: 早期预警与确认

1. 预警信号识别: 运维人员或监控系统需高度关注多层次预警信号。

2. BMS/EMS 告警: 电池电压异常(压差过大)、温度异常升高(簇内温差超限)、绝缘故障、气体探测器(对 H_2 , CO, VOC等)报警、烟雾探测器报警^[8]。

3. 物理征兆: 异常声响(如泄压阀动作声、爆裂声)、异味(电解液溶剂味、塑料烧焦味)、电池舱/集装箱通风口冒出白烟。

4. 初步研判与确认: 任何异常信号都不应被忽视。监控中心应立即调取相关视频、数据记录, 远程初步判断风险等级。同时, 通知现场巡检人员在做好全套个人防护(至少为自给式空气呼吸器 SCBA、防火服、耐 HF 手套)的前提下, 从安全距离外进行观察确认, 严禁无防护靠近或打开舱门。

2.2 第二阶段: 初期应急响应启动

一旦确认存在热失控迹象或初期火情(如冒烟), 立即启动紧急停机与隔离。

1. 电气隔离: 通过 EMS 远程或现场紧急切断开关, 断开故障储能单元与电网及站内其他健康系统的电气连接, 防止电气短路扩大。

2. 能量泄放(如条件允许且安全): 在确保隔离的前提下, 通过可控方式对故障簇进行放电, 降低其能量状态。

3. 区域隔离: 警示并清空危险区域(建议初始半径不小于 50 米), 设立警戒线, 禁止无关人员进入。

4. 启动固定灭火系统: 若储能舱/集装箱设计有固定式灭火系统(目前以全淹没七氟丙烷等气体系统和细水雾系统为多), 应立即手动或自动启动。其作用主要是抑制明火、稀释可燃气体浓度、争取时间。但需清醒认识, 气体灭火剂难以穿透电池内部实现深度冷却, 仅靠此系统无法保证不复燃。

2.3 第三阶段: 初期火灾抑制与冷却

此阶段是防止灾难性升级的关键, 可能由受过专业训练的站内应急队或首批到达的消防力量执行。

1. 安全评估与防护: 救援人员必须佩戴 SCBA, 穿着 A 级化学防护服或专业灭火防护服, 确保全面防护有毒气体(特别是 HF)和高温。

2. 通风与排烟(谨慎进行): 如果储能舱设有联动的防爆排烟系统, 可启动以排出有毒烟雾和可燃气体, 降低内部温度和爆炸风险。严禁在未评估情况下强行破拆通风, 以免引入新鲜空气引发爆燃。

3. 关键战术：大量水持续冷却。

(1) 核心原则：针对锂离子电池火灾，大量、持续、直接的注水冷却是目前最有效的方法。水能有效吸收热量，降低电池温度至热失控反应阈值以下，并能稀释和冲刷有毒腐蚀性液体^[9]。

(2) 操作方法：使用消防水带，从舱门、泄压口或专门设计的消防接口，向电池架（尤其是故障簇）进行持续、大流量（建议不低于 500 L/min per cluster）的注水冷却。即使明火已灭，仍需对受影响区域及相邻电池进行长时间（数小时甚至更久）的持续冷却，直至温度传感器显示整体温度降至环境温度且长时间稳定。

(3) 注意事项：水流可能导致电池短路产生火花，但与热失控的巨大能量相比风险可控。应使用雾状水以减少对电气设备的直接冲击，并注意积水可能导致的触电风险（已进行电气隔离的前提下）。

2.4 第四阶段：现场监护与移交

1. 持续监护：明火扑灭且冷却停止后，必须对现场进行至少 24 ~ 48 小时的严密热成像监测，持续监控温度变化，严防复燃。

2. 环境监测：使用有毒气体检测仪持续监测现场周边空气，特别是 HF 浓度，确保疏散和警戒范围安全。

3. 信息移交：将事故发生的详细过程、已采取措施、电池类型、潜在危险等信息完整移交给后续抵达的专业消防救援指挥员和事故调查组。

4. 废水处理：灭火冷却产生的废水中含有毒有害物质，必须进行收集，按照危险废物管理要求进行处置，防止二次污染。

3 虚拟储能电站初期火灾应急处置推演

为验证上述流程，设想某 100 MW/200 MW·h 磷酸铁锂储能电站一个电池舱发生热失控预警。

1. 情景：监控平台显示 A05 电池簇温度以 2 °C/min 速率异常升高，同时 VOC 探测器报警。

2. 预警与确认：监控员立即锁定 A05 舱视频，发现轻微白烟从通风口溢出。判定为热失控初期征兆，启动应急预案。

3. 隔离：远程指令断开 A05 簇及所在 PCS 的断路器，并切断该舱供电。现场安保迅速清空周围 100 米区域。

4. 固定系统动作：自动气体灭火系统启动。监控显示舱内明火未起但烟雾浓度增加。

5. 初期灭火冷却：站内应急队（3 人，全套防护）抵达舱外安全位置。连接消防栓，通过预留的消防注水口，向 A05 电池架位置持续注入雾状水，流量约 600 L/min。同时启动防爆排烟风机。

6. 结果：注水开始后 15 分钟，舱内温度从峰值 280 °C 开始稳定下降。持续冷却 4 小时后，温度降至 50 °C 以下并稳定。此期间无明火爆发，无爆炸发生。

7. 监护：使用热像仪持续监测 12 小时，温度无回升。设置警戒，废水由专业公司收集处理。

8. 推演结论：快速预警、果断电气隔离、及时启动固定系统以及最关键的早期大流量水冷却干预，成功将事故遏制在萌芽状态，避免了热失控链式反应和灾难性火灾，印证了初期应急处置流程的关键作用。

4 结束语

电化学储能电站的火灾风险具有隐蔽突发、易爆复燃、毒害复杂的鲜明特性，对传统消防安全体系构成了全新挑战。应对这一挑战，必须树立“防救并重、重在初期”的理念。未来仍需从多维度提升储能安全水平：在技术上，研发安全性更高的电池材料（如固态电池）、智能预警 BMS、高效定向灭火与冷却系统；在标准与设计上，强化消防安全设计规范，强制要求设置消防接口、安全距离、防爆泄压及废水收集设施；在管理上，制定并常态化演练针对性的应急预案，加强运维与消防人员的专业培训，形成“设计—制造—安装—运维—应急”的全链条安全管理闭环。

参考文献：

- [1] 中国电力企业联合会，全国电力储能标准化技术委员会. 电力储能用电池管理系统：GB/T 34131-2023[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
- [2] 周志钻，王博轩，宋露露，等. 锂离子电池热失控行为及火灾危险性研究综述[J]. 消防科学与技术，2024，43(05): 605-610.
- [3] 王腾. 基于机械滥用的动力电池热失控特性分析研究[J]. 当代化工研究，2024(22):30-32.
- [4] 胡斯航，王世杰，刘洋，等. 锂离子电池热失控风险综述[J]. 电池，2022，52(01):96-100.
- [5] 钱宇清，左付山，叶健，等. 锂离子电池热失控机理分析及控制方法研究[J]. 电源技术，2022，04(11):1227-1232.
- [6] 许乐俊，王世林，王勇，等. 低压环境下锂离子电池热失控特性研究进展[J]. 电池，2023，53(06):687-691.
- [7] 曹勇，杨大鹏，朱清，等. 大容量磷酸铁锂电池模组热失控研究[J]. 储能科学与技术，2024，13(07):2462-2469.
- [8] 李润源，郭傅傲，赵钢超. 集装箱式锂离子电池储能系统消防安全早期预警方法[J]. 储能科学与技术，2024，13(05): 1595-1602.
- [9] 徐宝勇. 电化学储能电站火灾分析及处置措施研究[J]. 今日消防，2023，08(04):11-13.