

储能站火灾防控关键技术及应用实践

曹光强

(中石化胜利油田分公司胜利应急救援中心(消防支队), 山东 东营 257000)

摘 要 电化学储能站作为新型电力系统的关键单元,在电网调峰调频、新能源消纳、用户侧能源供给等方面扮演着重要角色。而当前多数储能站以锂离子电池作为能量储存载体,受到电池材料不稳定、系统设计不合理、运维管理不到位等诸多因素的影响,发生火灾风险、爆炸风险的概率大幅提升,并且由此引发二次事故,不仅会损害储能设备,还会危及现场及周边人员的生命安全。基于此,本文围绕储能站火灾危险性及其成因展开论述,系统研究惰性气体窒息、定向高压细水雾冷却、电池热失控隔离阻断三种火灾防控关键技术的应用路径及实践效果,并结合火灾成因提出有效的处置对策,旨在为储能站的安全稳定运行提供参考。

关键词 储能站;火灾防控;惰性气体窒息;定向高压细水雾冷却;电池热失控隔离阻断

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.017

0 引言

在应对储能站火灾事故时,应当基于“损失最小化”原则,通过对电池材料特性、系统设计、运维管理等影响因素的深度解析,从技术根源着手,基于火灾防控“预防为主、防消结合”的核心原则,建立一套“预警、隔离、灭火”相结合的一体化技术应用体系,以实现火灾风险的有效管控,切实解决电化学储能站运营安全问题,促进电化学储能产业的规模化发展。

1 储能站火灾危险性分析

1.1 电池单体燃爆扩散的危险性

一旦储能站电池单体出现热失控,电池内部温度就会急剧上升,最高可达数百摄氏度,在高温作用下,电池外壳的耐热、耐压性能瞬间到达极限,导致内部电解液大量喷溅。喷溅出的高温电解液引燃能力极强,能够直接点燃电缆绝缘层、保温材料等易燃物及可燃物,故而形成持续性明火。由于电解液始终处于流动状态,因此,火势蔓延极快,火灾现场的复杂局面极难控制。另外,电池内部经过电化学反应之后,将释放出大量的氢气、一氧化碳、甲烷等易燃易爆气体,如果这些气体在短时间内快速积聚,则很容易达到爆炸极限,一旦与高温热源或者微小电火花接触,就会直接引发爆炸事故。而爆炸过程产生的明火将迅速向周边扩散,火势蔓延的风险进一步加剧。加之热失控环节产生的氟化氢、氯化氢等强腐蚀性有毒气体的存在,过火区域也将成为有毒危险区域,这就给后续救援工作增加了难度^[1]。

1.2 电池模组密集布局的连锁反应危险性

相比单体电池,电池模组排布密集,电池单体一旦出现明火,电池模组将直接出现“多米诺骨牌”的连锁反应风险,即便是局部火灾,也会在极短时间内升级为大规模火灾事故。在电池模组安装过程中,多数储能站均采用密集堆叠、矩阵排列的方式,模组之间通过汇流排、电缆桥架等导电部件连通,这就给热量传递、火势蔓延创造了有利条件。模组发生火灾以后,释放出的热量直接通过热辐射、热对流的方式传导至相邻模组,如果突破热失控阈值,将直接引发火灾事故。另外,储能站内的通风管道、消防管道等设施,往往成为火势蔓延的便捷通道,明火经过这些通道之后,其影响范围瞬间扩大数倍,随着热量在有限空间的持续积累,空间环境温度急剧上升,这就使未燃电池发生热失控的风险概率大幅增加,后续火灾扑救难度明显提升^[2]。

1.3 系统级火灾的次生灾害叠加危险性

当储能站火灾达到系统级之后,将极易引发一系列次生灾害,其危险性及其破坏力远超火灾本身。例如:火灾产生的持续高温直接影响储能站内的逆变器、配电柜、变压器等电气设备,加剧绝缘层碳化、老化速度,缩短设备使用寿命,甚至还会引发设备击穿、母线短路、电弧放电等故障,进而出现新的电弧火源。一旦电池火灾与电气火灾叠加在一起,场面控制难度极大。而在设备出现短路故障以后,电网电压骤降,严重的会造成区域性停电事故,给区域内的工业生产,以及居

作者简介:曹光强(1976-),男,本科,工程师,研究方向:应急管理。

民的正常生活造成严重影响。如果发展至系统级火灾，烟气中含有一氧化碳等有毒有害气体，在风力驱动下，会迅速向周边扩散，对周边环境造成严重污染。

2 储能站火灾成因分析

2.1 电池本体的技术缺陷

触发电池热失控的主要原因取决于电池本体的材料特性与制造工艺缺陷，电池正极材料的热稳定性存在天然技术局限性，比如三元锂电池的正极材料在受热条件下易发生分解反应，释放出大量氧气与热量，为热失控提供了充足的氧化剂与能量来源。而磷酸铁锂电池在极端工况下存在晶格结构破坏、产热加剧的风险。在制造工艺方面，如果工艺精度不足，则会加快火灾风险的发生速度。电极涂布环节，如果涂布厚度不均、涂层存在针孔或杂质，将造成电池内部电流分布失衡，局部区域因电阻过大产生大量焦耳热。电芯装配环节，如果极耳焊接不牢固、隔膜褶皱或破损，则极易引发电池内部正负极直接接触，形成内短路故障。如果不及时予以排查，将成为导致热失控的一大关键因素^[3]。

2.2 系统运行控制的技术故障

电池管理系统（BMS）中的硬件故障直接影响电池状态的监测与控制效果，如电压采集模块精度漂移，无法准确识别单体电池的过充、过放状态。电流传感器故障会造成充放电电流监测失真，导致电池长期处于过载运行状态。温度传感器失效或布置位置不合理，技术人员无法及时捕捉电池模组的局部高温，错失热失控早期干预时机等。而电池内部储能系统的控制策略与算法缺陷，也会增加火灾风险，如果 BMS 的充放电策略设计不合理，如采用恒流恒压充电模式时，充电截止电压设置过高，容易导致电池单体过充，电解液分解速率加快，产热与产气剧增。而均衡控制算法失效或均衡策略滞后，电池模组内单体将出现较大的电压差，部分电池因过度均衡处于过充或过放状态，引发局部热失控。与此同时，储能系统在进行功率转换时，容易形成外部短路火源，引燃电池模组。例如：逆变器的功率开关器件损坏，将引发逆变器输出电流畸变，故而产生大量谐波，使得电池模组充放电电流异常波动，增强发生火灾事故的风险。

2.3 外部环境与防护系统的技术短板

储能站在运行过程中，环境参数对运行安全性、稳定性造成直接影响。在高温环境下，电池热稳定性大幅降低，温度一旦超过电池正常工作温度范围，电池内部的化学反应速率就会加快，充放电过程中产热

增加，且热量难以有效散出，极易引发局部过热。而在低温环境下，电池电解液黏度明显增大，离子迁移速率下降，充放电过程中内阻增大，导致产热加剧。另外，电池内部储能装置的热管理系统一旦出现技术短板，电池模组热量将快速积聚，如果超出热失控阈值，则极易引发火灾。例如：风冷散热系统若风机选型不当、风道设计不合理，将造成散热风量不足、气流分布不均，电池模组内部存在散热盲区，局部高温无法有效驱散。液冷散热系统如果出现冷却液泄漏、管路堵塞或流量不足的情况，散热效率就会大幅下降，电池模组温度持续升高，最终引发热失控。

3 储能站火灾防控关键技术与应用实践

3.1 惰性气体窒息灭火技术

该技术的灭火原理主要是向储能舱室内充入氮气、氩气等惰性气体，置换并稀释舱内的氧气浓度，使其降至可燃物的临界燃烧氧浓度以下，以阻断燃烧反应的链式过程，达到灭火抑爆的效果。与过去的水基、泡沫灭火技术相比，惰性气体窒息灭火技术不会对电池模组造成二次水渍污染，也不会残留具有腐蚀性的化学物质，并且可以保留火灾后的电池残骸，这就为后续事故原因的溯源和电池性能分析提供完整的物证支撑。

以某 200 MW·h 磷酸铁锂储能电站火灾应急处置为例。该储能站在运行期间，由于单个电池模组热失控引发局部火情，现场监控系统在检测到舱内温度异常升高和可燃气体泄漏后，立即触发了惰性气体灭火系统的自动启动程序。系统在 15 秒内完成氮气的加压输送和舱室充注，通过持续调节舱内氧气浓度至 12% 以下，成功在 30 分钟内抑制了明火蔓延。在整个处置过程中，采用惰性气体窒息灭火技术既可以快速控制火势，也避免了二次爆炸事故的发生，为现场人员的生命安全提供了坚实的保障。惰性气体窒息灭火技术在储能站火灾扑救与处置领域的推广和使用，需要建立适配不同储能系统类型的参数调控体系。例如：集装箱式储能电站，应当结合舱体容积、电池类型和布置密度，精准计算惰性气体的充注量和充注速率，避免因气体压力过高导致舱体结构损坏。而针对大型储能电站的电池阵列，可以采用分区充注的方式，通过设置防火分隔单元，实现对火情区域的精准围堵，减少惰性气体的消耗量，提升灭火效率，最大限度地减少火灾损失^[4]。

3.2 定向高压细水雾冷却灭火技术

定向高压细水雾冷却灭火技术主要利用高压泵组将水加压至 10 ~ 20 MPa，然后，通过雾化喷头将水流

破碎为直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的细水雾滴, 这些雾滴兼具快速吸热汽化和隔绝氧气的功能。细水雾滴在与高温电池表面接触以后, 快速汽化, 使电池模組的温度大幅下降, 有效阻断了热失控的蔓延路径。同时, 水汽化后形成的水蒸气会在舱内形成均匀的气幕, 进一步稀释氧气浓度, 辅助抑制燃烧反应。与传统的大流量喷淋技术相比, 高压细水雾的用水量仅为其 $1/10 \sim 1/5$, 灭火过程节省了大量水资源。

以某电网侧 $100 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 储能电站火灾处置为例。该储能站发生火情以后, 智能消防系统根据热成像传感器定位的火源位置, 自动启动了定向高压细水雾装置。通过对喷头角度的精准调整, 将细水雾精准喷射至起火的电池模組表面, 雾滴在高温作用下迅速汽化, 形成局部低温区域, 仅用 20 分钟就将电池温度从 600°C 以上降至 100°C 以下, 成功阻止了热失控向相邻电池包的扩散。这种处置技术既可扑灭明火, 避免火势蔓延与复燃, 也使储能站在火灾免受更大的财产损失。近年来, 随着人工智能算法的引入, 实现了喷头喷射方向和雾滴粒径的动态调节, 灭火的精准度显著提升。特别在冬季严寒地区, 可以在供水系统中添加防冻剂或设置伴热保温装置, 确保细水雾系统在低温环境下正常启动, 同时也给储能站的安全运行提供了强大的技术支撑^[5]。随着人工智能算法及物联网技术的深度融合, 技术人员可以利用智能控制算法, 实时采集火灾的火源温度、影响范围、蔓延速度等真实的数据, 然后对喷头喷射方向进行动态调控, 以提高灭火效率与人力、财力、物力资源利用率。

3.3 电池热失控隔离阻断技术

电池热失控隔离阻断技术不同于上述两种技术, 其基本原理是在储能站当中设置多层级防火隔离结构, 结合主动式的热失控抑制装置, 将单个电池模組的热失控限制在最小范围内, 防止连锁反应的发生。与传统的灭火技术相比, 电池热失控隔离阻断技术更加关注于“防蔓延”层面, 而不是“扑灭明火”, 应用该技术时, 防火分隔构件、热失控抑制组件和智能隔离控制系统协同工作, 实现从热失控预警到隔离阻断的全流程自动化处置^[6]。

以某城市工业园区 $50 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 刀片电池储能电站为例。该电站采用了舱内分区+模組隔挡的双层隔离设计, 集装箱储能舱内部, 利用耐火极限达 4 小时的防火隔板将舱体划分为 3 个独立的电池分区, 每个分区之间设置防火门和烟气导流通道。每个分区内部, 相邻的电池模組之间均安装了陶瓷纤维防火隔挡和热失控抑制片。在一次电池模組过充测试中, 某一电池模組发

生热失控, 其释放的高温烟气和火焰被防火隔挡有效阻挡, 无法直接蔓延至相邻模組。同时, 模組表面的热失控抑制片在检测到温度超过 150°C 后, 自动释放出高效吸热的相变材料, 快速吸收电池热量, 延缓热失控的发展速度。随着该技术的不断升级与持续发展, 逐步形成了一套标准化、规范化、模块化的隔离体系。储能舱体设计环节, 应当严格把控防火分隔构件的材料质量关, 选用耐高温、抗冲击的防火材料, 如硅酸铝纤维板、防火岩棉等, 确保隔离结构能够承受电池热失控产生的高温和冲击波。针对大容量储能电站, 可以采用“蜂巢式”隔离布局, 将每个电池模組作为一个独立的单元, 通过密集的防火隔挡形成相互隔离的空间, 彻底切断热失控的传播路径。另外, 通过与储能电站在线监测系统的结合, 可以借助光纤测温、电压监测等技术对电池状态数据进行实时采集, 如果发现单个模組出现热失控前兆, 需要立即触发隔离区域的封闭程序和抑制装置的启动指令, 以改善和提高隔离、阻断效果。

4 结束语

随着新型电力系统建设进程的逐年推进, 电化学储能站已逐步成为能源转型的核心应用载体, 其规模化、高效化、集约化的发展趋势已成定局。针对储能站火灾采取有效处置对策, 首先需要从技术角度着手, 切忌专注于管理而忽略了先进灭火技术的重要性, 并在灭火实践当中积极推广使用惰性气体窒息灭火、定向高压细水雾冷却灭火、电池热失控隔离阻断等灭火处置技术, 进而为储能产业的规模化发展打下坚实的基础, 实现各类处置技术的高效化应用、创造性发展, 筑牢电化学储能站的安全防线, 为电力事业的蓬勃发展注入源源不断的驱动力。

参考文献:

- [1] 张文杰, 范旭明, 杜倩媛, 等. 基于热释离子探测与直流快速灭弧的储能站安全提升技术[J]. 电力与能源, 2024, 45(05):611-615.
- [2] 刘新超, 吴信立, 朱伟星. 基于超声波的储能站锂电池火灾极早期检测技术[J]. 电力与能源, 2025, 46(02):126-129, 134.
- [3] 梁运华, 潘志敏, 肖勇, 等. 化学储能电站消防安全风险分析[J]. 电力安全技术, 2022, 24(02):11-14.
- [4] 赵北涛, 郭洪昌. 国内外电化学储能电站安全分析及展望[J]. 农村电气化, 2022(01):69-71.
- [5] 同 [2].
- [6] 朱玲. 电化学储能电站火灾事故处置研究与思考[J]. 中国消防, 2024(10):60-63.