锂离子储能电池舱自动灭火系统型式研究

赵 芬

四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610041

【摘 要】：锂离子储能电站快速增长，热失控引发的火灾事故频发。现行标准规定锂离子电池舱应设置自动灭火系统，但未明确灭火介质型式，工程中出现了全氟己酮、高压细水雾、压缩空气泡沫、液氮、热气溶胶等多种型式。本文从火灾机理出发提出灭火介质的七项要求，按统一框架介绍五种系统，并从技术、经济性两方面对比，提出选型原则与推荐方案。研究表明：单一系统难以同时满足“快速灭明火+持续冷却防复燃”的要求，宜构建“PACK 级早期抑制+簇级精准灭火+舱级持续冷却+站级水消防兜底”的多级复合防护体系。

【关键词】：储能电池舱；锂离子电池；热失控；自动灭火系统；全氟己酮

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.010

引言

在“双碳”目标驱动下，电化学储能电站建设需求迅猛释放。我国新型储能装机已达数十吉瓦时量级，磷酸铁锂电池占比超过 90%，预制舱式结构因安装便利、占地小、建设周期短而成为主流[1~2]。与此同时，锂离子电池热失控引发的火灾事故时有发生。2021 年某储能电站因电池内短路引发热失控扩散起火，可燃气体遇电气火花爆炸，造成重大损失。

近两年国家能源主管部门加强了安全监管，修订发布了《电化学储能电站设计标准》（GB/T 51048-2025）[3]，该标准规定锂离子电池舱应设置自动灭火系统，但未明确灭火介质的具体型式；《电化学储能电站安全规程》（GB/T 42288-2022）[4]同样仅作原则性要求。标准留白加之市场需求旺盛，催生了多种技术路线，全氟己酮、高压细水雾、压缩空气泡沫、液氮、热气溶胶等系统陆续推出并应用于工程。但各厂家的试验条件、电池规格、火灾模型尚不统一，结论可比性差，气体灭火与水系灭火孰优孰劣亦存争议。本文从火灾机理出发，梳理五种系统的技术特点，从技术和经济性两个维度对比分析，提出选型原则与推荐方案，为工程设计提供参考。

1 锂离子电池火灾特性及灭火介质要求

1.1 热失控机理与火灾发展过程

热失控由机械滥用、电滥用和热滥用引发，工程中以过充、过载及内部短路最常见。电池发生不可逆放热反应后依次经历 SEI 膜分解、负极与电解液反应、隔膜熔化、正极分解释氧等阶段，最终安全阀开启并喷出可燃气体与电解液混合物。根据相关试验[5]，将火灾发展划分为三阶段：（1）初期热失控，首个单体安全阀开启并释放少量烟气，可借助 H2、CO 特征气体探测早期预警；（2）剧烈热失控，大量可燃气体喷出，舱内被浓烟笼罩；（3）电池模块燃烧，初期呈瞬时爆燃，反复爆燃后转为稳定燃烧并持续 30 min 以上。最先失控的通常仅 1 只单体电池，火灾扩大主要靠热辐射触发相邻电池相继失控，即“热蔓延”[6]。

1.2 火灾危害特征

火灾主要危害特征为：（1）热失控触发温度低而燃烧温度高，起始约 140℃，簇级最高温度超过 1000℃[6]；（2）产气量大且具爆炸风险，H2、CO、CH4 等在密闭舱内积聚，遇电气火花即可能爆燃、爆炸；（3）复燃性强，明火扑灭后若不能持续冷却即会复燃；（4）火灾荷载大、扑救困难，单座 40 尺舱布置数千至上万只单体电池，模块密集堆砌、遮挡严重。（5）烟气毒性与腐蚀性强：产生大量浓烟及 CO、HF 等有毒腐蚀性气体，腐蚀电缆与电气开关，造成二次灾害。

1.3 灭火介质及系统选择要求

灭火介质及系统应满足：①快速扑灭明火；②具备持续冷却能力以抑制热失控、防止复燃，其重要性高于灭火速度；③可与探测系统联动实现早期预警、早期动作，严格执行“先断电、后灭火”；④电绝缘性良好、低毒环保；⑤适应极端温度并可靠防冻；⑥可实现 PACK 级、簇级、舱级的多级防护且费用可接受。

2 自动灭火系统型式

2.1 全氟己酮气体灭火系统

全氟己酮灭火以物理吸热为主：释放后与空气形成气态混合物，凭较高热容量吸热降温；同时含氟组分受热断键产生的自由基可捕捉火焰活性自由基，中断链式反应。

作者简介：赵芬，女，主要从事电力工程给排水消防设计与研究工作。

研究试验表明，全氟己酮灭火剂能快速熄灭电池明火，其抑制温升效果仅次于水基灭火剂[7]。全氟己酮可采用分时段多次喷放的方式以平衡快速灭火和防止复燃的要求，但全氟己酮灭火剂的量有时仍显不足。

工程上宜采用“局部应用+全淹没”结合方式：以电池簇为局部应用单元、以电池舱为全淹没对象。着火簇分区阀开启后喷头向火源集中喷放形成局部高浓度“封闭罩”灭火，其后灭火剂淹没全舱并间歇点喷维持浓度。同时配套设置自动喷水灭火系统，在电池舱内布置成干式管道连接至舱外。此种型式在目前的储能电站中应用最广泛。

2.2 高压细水雾灭火系统

高压细水雾通常指压力 10～21 MPa、雾滴中位径小于 100μm 的系统，灭火是多重机理协同：表面冷却，雾滴比表面积大、汽化迅速；窒息，水汽化后体积膨胀约 1700 倍稀释氧气；隔绝热辐射，水雾屏障衰减火焰热辐射；洗涤烟气，雾滴吸附烟尘与有毒气体。

系统主要由高压泵组（或瓶组）、分区控制阀、安全溢流阀、过滤装置、不锈钢管网和专用喷头组成。电池舱内一般以电池簇为一个防护分区，喷头在簇内分层布置实现局部保护；管道管径小、占用空间少，一套泵组可保护多座电池舱。其局限性在于高寒地区管道防冻与泵房保温难度大；存在一定水渍损失，采用后电池舱基本报废；喷头堵塞风险须依靠过滤装置与旋芯式专用喷头控制。

2.3 压缩空气泡沫灭火系统

压缩空气泡沫将空气注入泡沫混合液形成高稳定性泡沫，机理为“覆盖隔离+水基冷却”：泡沫层隔绝氧气并抑制可燃气体逸散，析出水分蒸发吸热，灭火效率高于纯水，多用于舱级保护或机动处置。其局限是泡沫难以渗透至 PACK 内部，对早期火灾抑制能力不足，缺乏统一试验数据与专用规范支撑。

2.4 液氮灭火系统

液氮灭火利用液氮汽化时巨大的吸热能力将电池温度快速降至热失控温度以下，同时氮气稀释氧气、惰化窒息并抑制产气燃烧，冷却能力最强。系统由储罐或制氮装置、汽化器、管网与喷头组成，可按模组级、簇级或舱级注入。其难点是自然蒸发损失使其难以长期“零消耗待机”，需定期补液，工程案例较少。

2.5 热气溶胶灭火系统

热气溶胶由药剂燃烧反应生成，气相组分捕捉燃烧自由基中断链式反应，固相微粒吸热灭火，用药量小、无需耐压容器，便于贴装于 PACK 内部。典型配置为“PACK 级+舱级”两级：PACK 级装置就地抑制，舱级悬挂式或探火管式装置全舱保护。其局限是不具备持续冷却能力，灭火后仍需其他冷却手段；喷放产生高温气流与固体微粒，仅适用于无人场所，且应绝缘安装。国外储能电站多采用此种型式。

3 自动灭火系统对比分析

3.1 技术分析

按灭火介质及系统应满足的要求，对全氟己酮、高压细水雾、压缩空气泡沫、液氮、热气溶胶五种系统进行对比，综合评价见表 1。

表 1 五种自动灭火系统技术综合对比

比较项目	全氟己酮	高压细水雾	压缩空气泡沫	液氮	热气溶胶
灭火机理	物理吸热为主+化学抑制	冷却+窒息+隔热辐射+洗涤烟气	泡沫覆盖隔离+水基冷却	深冷吸热+惰化窒息	气相化学抑制+固相微粒吸热
灭明火速度	快（10 s 级）	较快	较快	快	快（10 s 级）
持续冷却/防复燃能力	较弱，需间歇点喷维持	强，可持续喷雾	较强，依赖泡沫析液	最强	无
抑制热失控有效性	中等，取决于浓度与浸渍时间	强	中等	强	弱
适用防护层级	簇级局部+舱级全淹没	簇级分层局部/舱级	舱级、站级及机动处置	簇级/舱级	PACK 级/模组级/舱级
对舱体密封性要求	较高	无要求	无要求	较高	较高
一套系统可保护舱数	1 套/舱	1 套可保护多舱	1 套可保护多舱	1 套/舱或多舱	1 套/舱
电绝缘性	好	好（雾滴不连续）	较差（泡沫导电）	好	需绝缘安装

对设备二次影响	小	有水渍损失	有泡沫残留	低温脆化需评估	有微粒沉积
人员毒性/环保性	无毒，高温下可产生 HF	无毒，可降烟降毒	低毒，废液需处理	无毒，有窒息风险	微粒有刺激性，须确认无人
低温环境适应性	好	需防冻措施	需低温发泡验证	好	好
药剂有效期/寿命	约 2 年需更换	定期换水，寿命长	泡沫液需定期更换	需持续补液	一般 5～10 年
规范支持程度	地方标准，无锂电池参数	较完善	薄弱	空白	产品标准为主
工程应用成熟度	较多	较多	较少	较少	较多（PACK 级）

由上表可知：（1）灭明火速度方面，全氟己酮、液氮、热气溶胶均可在 10 s 级扑灭明火，高压细水雾与压缩空气泡沫稍慢但差距不大。（2）持续冷却与防复燃能力方面，液氮最强，细水雾次之且可持续喷雾，压缩空气泡沫依赖泡沫析液，全氟己酮需间歇点喷维持，热气溶胶基本不具备冷却能力。（3）防护层级上，热气溶胶可实现 PACK 级就地抑制，全氟己酮与细水雾可实现簇级精准灭火，压缩空气泡沫和液氮更适合舱级及以上尺度。（4）环境适应性上，全氟己酮高寒地区优势明显，细水雾与压缩空气泡沫需重点解决防冻。（5）共享性上，细水雾与压缩空气泡沫可“一拖多舱”，气体类系统一般每舱独立设置。

在以上各个比较项目中，快速扑灭明火的能力有助于控制初期火灾，持续冷却与防复燃是区分系统有效性的关键，而这两种能力难以由单一系统同时满足。

3.2 经济性分析

以单座 40 尺电池舱为基准单元，各系统投资可分为灭火剂及储存（发生）装置、管网与喷头、探测报警与控制、安装施工四部分。以全氟己酮单舱初投资为基准 1.0，各系统的相对造价指数及全寿命周期成本见表 2。

表 2 单舱投资及全寿命周期成本相对对比

比较项目	全氟己酮	高压细水雾	压缩空气泡沫	液氮	热气溶胶
灭火剂及储存（发生）装置	中	高（泵组）	中	高（储罐/制氮）	低
管网与喷头	中	中	中	高（绝热管道）	低
探测报警与控制	中	中	中	中	中
安装施工	中	较高	中	较高	低
单舱初投资指数	1.00	0.85～1.10（多舱共享时更低）	0.90～1.15	1.20～1.50	0.60～0.85
药剂更换周期	约 2 年	定期换水	定期更换泡沫液	持续补液	5～10 年
年维护成本	较高	低	中	高	低
10 年全寿命成本指数	1.00	0.60～0.80	0.85～1.05	1.30～1.60	0.55～0.75

由上表可见：热气溶胶初投资与全寿命成本最低，但需配合其他冷却手段；细水雾初投资中等、运维成本极低，多舱共享时经济性突出；全氟己酮初投资中等但药剂更换周期短、全寿命成本较高；液氮初投资与运维成本均最高；压缩空气泡沫居中。经济性分析还应计入灭火失效的风险成本——一次火灾造成的舱体报废与电站停运损失远高于各系统投资差额，造价相近时宜优先选择灭火可靠性更高的型式。

3.3 方案选择

在进行方案选择时，应遵循以下原则：①以满足“快速灭明火+持续冷却防复燃”为首要目标，其余要求作为约束条件；②因地制宜，综合考虑气候、舱型（风冷/液冷）、舱数规模与运维能力；③采用分级复合防护理念，即“PACK/模组级早期抑制+簇级精准灭火+舱级持续冷却或全淹没+站级水消防兜底”，避免由单一系统承担全部功能；④设计参数应经试验验证。

结合以上原则，在工程设计时可采用以下三种方案：方案一，高寒地区或对水渍敏感场所，采用全氟己酮簇级局部应用+舱级全淹没并间歇点喷，另设半固定水喷淋备用；方案二，多舱集中且具备泵房条件，采用 PACK 级全氟己酮气体+高压细水雾簇级分层保护，一套细水雾泵组保护多座电池舱；方案

三，新建液冷舱或空间受限，采用热气溶胶 PACK 级就地抑制+舱级热气溶胶或细水雾。液氮与泡沫宜作为兜底与机动处置手段。目前工程设计中，国内工程方案一使用最为广泛，国外工程较多接受方案三。

4 结论

（1）储能电池舱火灾的核心难点是复燃与热蔓延，灭火介质的根本要求是“快速灭明火+持续冷却抑制热失控”。

（2）五种系统各有优劣：全氟己酮灭火迅速、洁净、耐低温，但冷却能力有限；高压细水雾兼具灭火、降温、隔绝热辐射与洗涤烟气作用，但需解决防冻与水渍；压缩空气泡沫控火较好、用水量少，但对早期火灾抑制不足；液氮冷却最强，但补给困难、成本最高；热气溶胶可 PACK 级就地抑制、造价最低，但无冷却能力。

（3）单一系统难以满足全部要求，宜依据气候、舱型与运维能力确定主系统型式，构建“PACK 级早期抑制+簇级精准灭火+舱级持续冷却+站级水消防兜底”的多级复合防护体系。

参考文献：

[1] 国家能源局.新型储能发展报告（2023）[R].北京,2023.

[2] 中国电力企业联合会.电化学储能电站行业发展报告[R].北京,2023.

[3] 住房和城乡建设部.电化学储能电站设计标准:GB/T 51048—2025[S].北京:中国计划出版社,2025.

[4] 中国电力企业联合会.电化学储能电站安全规程:GB/T 42288—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[5] 卓萍,郭鹏宇等.预制舱磷酸铁锂电池储能电站防火设计[J].消防科学与技术,2021(3):132-134.

[6] 蔡兴初,朱一鸣等.全氟己酮气体灭火系统在磷酸铁锂电池储能预制舱的应用[J].储能科学与技术,2022,08:95-102.

[7] 刘昱君,段强领,黎可,陈昊东,王青松.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,2018,06:157-164.