

2024年7月，第2版

# 风险控制实践：特殊危险

## 固定型电池储能系统手册

**Didier L. SCHÜTZ**

风险控制实践负责人  
SCOR

**SCOR**  
The Art & Science of Risk

## 重要通知和免责声明

**SCOR** 对任何一方使用本快速参考手册 (QRH) 不承担任何责任或义务。

本出版物的内容 (包括任何专业意见) 仅供专业教育、开发和营销之用, 不得将全部或部分内容作为专业意见或建议使用。本出版物的内容和所表达的任何观点仅供 **SCOR** 的客户、业务合作伙伴或 **SCOR** 与之分享本文的潜在客户使用。未经 **SCOR** 事先书面同意, 不得向任何第三方披露或以其他方式引用或提及本文稿的全部或部分内容。

© 版权所有 **SCOR SE**.保留所有权利。允许复制, 仅供个人和教育使用。

© **Adobe Stock**: 图片由 [stock.adobe.com](https://stock.adobe.com) 授权使用

© 标明可重复使用的谷歌图片

© 谷歌地球 (“版权合理使用”)

© **Franck Orset - FPO**

© **Didier Schütz - DLS**

# 目录

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| <b>范围</b>                        | <b>5</b>  |
| <b>1 简介</b>                      | <b>6</b>  |
| 1. 储能设备的分类                       | 6         |
| 2. 充电电池的基础原理                     | 6         |
| 3. 充电电池类型                        | 6         |
| <b>3.1 铅酸 (PbA) 电池</b>           | <b>7</b>  |
| <b>3.2 镍电池</b>                   | <b>8</b>  |
| <b>3.3 锂离子 (Li-Ion) / 锂聚合物电池</b> | <b>8</b>  |
| <b>3.4 其他电池类型</b>                | <b>13</b> |
| <b>3.5 液态电解质的发展</b>              | <b>14</b> |
| 4. 直流电池系统基础知识                    | 14        |
| 5. ESS/BESS 基础知识                 | 15        |
| 6. 损失案例                          | 15        |
| <b>2 聚焦直流电池系统</b>                | <b>18</b> |
| 1. 位置、布置和隔离                      | 18        |
| 2. 电气设备                          | 18        |
| 3. 通风                            | 18        |
| 4. 火患检测和防火装置                     | 19        |
| 5. 溢漏控制                          | 20        |
| <b>3 聚焦 ESS/BESS</b>             | <b>21</b> |
| 1. 标准和认证                         | 21        |
| 2. NFPA 855 与 FM GLOBAL 数据表 5-33 | 22        |
| 3. 持续存在的质量与安全问题                  | 23        |
| 4. 锂离子电池储能系统 (LiB-ESS/BESS) 的选择  | 23        |
| 5. LFP 与 NMC 锂离子电池               | 24        |
| 6. 危险、火患蔓延特性和保护方案                | 25        |
| 7. 位置、布置和隔离                      | 25        |
| <b>7.1 位置和隔离</b>                 | <b>25</b> |
| <b>7.2 存放</b>                    | <b>29</b> |
| <b>7.3 车辆撞击保护</b>                | <b>29</b> |
| 8. 电气设备                          | 30        |
| 9. 通风                            | 30        |
| 10. 火患检测和防火装置                    | 31        |

- 11. 溢漏控制 ..... 33
- 12. 消防部门 ..... 33
- 4 技术参考 ..... 35**
  - 1. 美国消防协会 ..... 35
  - 2. FM 财产防损数据表 ..... 35
  - 3. 其他 ..... 35
- 5 附件 ..... 36**
  - 1. 为什么要为锂离子聚合物电池 (干电池) 提供自动喷淋保护? ..... 36
  - 2. 滞留的电量 ..... 36
  - 3. 应急计划或防火预案 ..... 36
  - 4. 消防水泵接合器 (FDC) ..... 38
  - 5. 建筑组件的耐火性 ..... 40
  - 6. BESS 故障事件数据库 ..... 40

## 范围

第 1 版发布时间：2022 年 1 月

第 2 版修订及更新时间：2024 年 7 月 - 第 3 章“聚焦 ESS/BESS”

本手册 (指导说明) 旨在为保险师和风险控制工程师提供有关电池和储能系统及其相关特殊危险的全面技术支持。

本文为固定型电池储能系统提供指导，包括：

- 用于固定型应用备用运行的直流电池系统，包括但不限于发电厂、变电站、电信、数据中心、开关设备保护系统、过程控制系统、应急电源和不间断电源 (UPS)。所有类型的电池 (湿电池/干电池) 均在考虑之列，但不包括锂离子聚合物电池 (干电池)。
- 电力储能系统 (ESS) 或电池储能系统 (BESS)：从电网或发电厂/电源充电 (收集能量)，然后在需要时放电，提供电力或其他电网服务。仅使用锂离子聚合物电池 (干电池) 的 ESS/BESS 在考虑之列。

本手册重点介绍火患爆炸的风险隐患。相关的特殊危害也有提及。本手册没有锅炉和机械风险的详细信息。本手册也列出一些相关的损失案例供参考。

核风险防损工程师 Franck Orset (FPO) 参与了本手册的编写。非常感谢他做出的宝贵贡献。

本手册所提出的标准建议是根据公认的相关国际标准和行业最佳作业方式。此外，NFPA (美国消防协会) 和 FM 财产防损数据册对这课题已经有很好的论述。所以，建议读者在相关情况下可直接查看这些参考资料。

- NFPA 资料网站：<http://www.nfpa.org/>
- FM 财产防损数据表网站 (下载需要注册)：<http://www.fm.com/>

请注意，这些参考资料会定期修订及更新。请关注上述网站的更新和/或修订版。

# 1 简介

## 1. 储能设备的分类

根据储能技术的不同，储能设备可分类为机械、电化学、化学、电气和热储能：

- 机械类包括抽水蓄能发电和飞轮发电(动能储存)，是历史最为悠久的历史。
- 化学类包括燃料电池等储能技术和机械技术包括双电层电容器。
- 电化学类包括称作“电池”的电化学装置，电池可将电能转化为化学能，反之亦然。这类技术包括铅酸蓄电池、钠硫电池和锂电池。由于最近移动信息技术 (IT) 设备和电动汽车的普及、以及锂二次电池的大规模生产及成本降低，对使用此类电池的储能设备的需求也随之增加。
- 储能设备可用于不间断电源 (UPS)、支持输配电 (T&D) 线路系统或大规模供电系统，具体取决于储能应用的技术和容量。
- 在电化学储能、化学储能和物理储能设备中，近期最受关注的应用是 UPS 和 T&D 系统支持技术。

电化学储能设备可分为以下两种类型：

- 一次电池/电芯为“一次性使用”的电池，不能再充电。干式电池和 (大多数) 碱性电池都属于一次电池。
- 二次电池/电芯为充电电池。放电过程中发生的化学反应可以通过反向的电流来逆转。充电电流必须由其他来源提供，可以是发电机或电源。二次电池包括镍镉 (Ni-Cd) 电池、铅酸电池和锂离子电池。

## 2. 充电电池的基础原理

本手册重点介绍采用电化学技术的充电电池 (二次电池)。充电电池、储能电池或二次电芯 (旧称“蓄电池”) 可多次充电、放电和再充电，这与用完即丢的一次性电池不同。此类电池由一个或多个电化学电芯组成。

充电电池的初始成本通常高于一次性电池，但是因为可以多次充电使用，充电成本很低。因此，总成本和对环境的影响要比一次性电池低很多。有些充电电池类型的尺寸和电压与一次性电池相同，可以替换使用。

“蓄电池”一词的使用，是因为它是通过可逆变的电化学反应来蓄积和储存电量。

事实证明，电池是一种具有商业可行性的储能技术。

多种应用和用途均采用基于电池的储能系统，包括频率调节、维持电压、可再生能源整合、调峰、微电网和黑启动能力 (即在无电网供电的情况下重新启动发电机)。

全球正在投入数十亿美元的研究经费来改进电池技术，相关行业也在集中精力制造更好的电池。充放电效率是可用于评估电池效率的性能指标。锂二次电池的充放电效率最高，为 95%，而铅酸电池约为 60%-70%，氧化还原液流电池约为 70%-75%。

储能设备的性能可通过输出功率和能量密度 (kW/kg) 来定义。提高能量密度是目前电池技术开发的主要方向。

使用寿命是储能设备的一个重要性能要素，对评估经济效益的影响最大。

另一个主要考虑因素是环保性，即设备对环境无害和可回收的程度。

电池系统由“电池组”组成，连接多个电芯以获得所需电压和容量。

## 3. 充电电池类型

充电电池有多种不同的形状和尺寸，小到纽扣般的电池，大到用于稳定配电网的兆瓦级系统。使用的电极材料和电解质有几种不同的组合，包括铅酸 (Lead-acid)、锌空气 (Zinc-air)、镍镉 (Ni-Cd)、镍金属氢化物 (Ni-MH)、锂离子 (Li-ion)、磷酸铁锂 (LiFePO<sub>4</sub>) 和锂离子聚合物 (Li-ion polymer)。

最常见的固定型备用电池为铅酸 (Lead-acid) 电池、镍镉 (Ni-Cd) 电池、镍金属氢化物 (Ni-

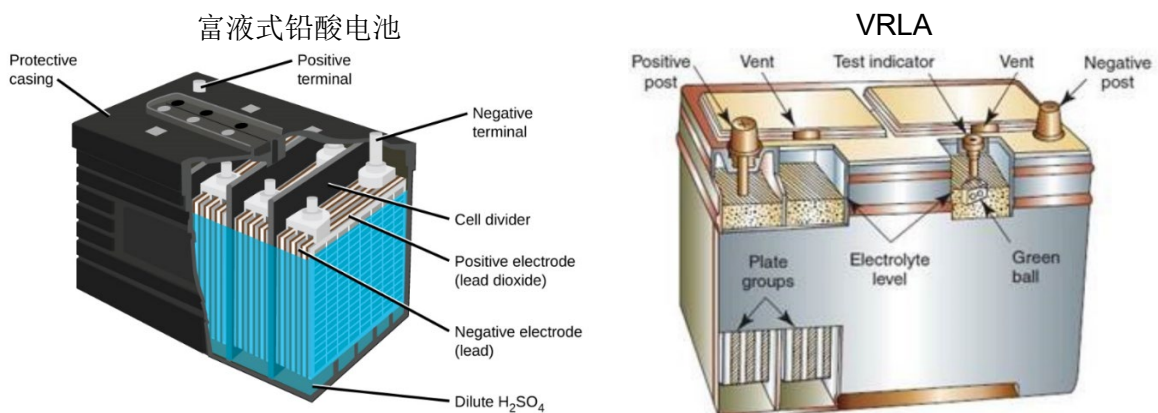
MH) 电池和锂离子 (Li-ion) 电池。

### 3.1 铅酸 (PbA) 电池

这类“二次电芯”广泛应用于车辆和其他需要高负载电流的应用。铅酸电池是最古老的可充电电池。主要优点是成本低、技术成熟和回收效率高。铅酸电池可分为富液式 (“湿”= 液态电解质) 和阀控式 (VRLA)。

#### 3.1.1 富液式铅酸电池

- 在这种电池的构造中，液态电解质完全覆盖 (浸没) 于有多个隔板的透明容器中。
- 透明容器便于目视检查隔板和内部组件。
- 正常充电时会产生气体，消耗液态电解质中的水分。
- 虽然这表示需要补充电解质，但是也正是如此，富液式电池在过度充电和高温工作下的耐受能力比 VRLA 电池强。因此，如果维护得当，富液式铅酸电池的平均使用寿命可达到 15-20 年。



谷歌创意共享。署名 4.0 协议国际版 (CC BY 4.0)

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/CNX\\_Chem\\_17\\_05\\_Lead.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/CNX_Chem_17_05_Lead.png)



富液式铅酸电池电解质维护 (补充水)

#### 3.1.2 阀控式铅酸电池 (VRLA)

- 这类电池也称为“密封电池”、“密封铅酸电池 (SLA)”或“免维护电池” (因为无需补充水)，最早出现于 1970 年代中期。考虑到铅酸电池不可能完全密封，因此工程师们认为使用“密封

铅酸电池”一词可能带来误解。顾名思义，密封电池是封闭的，在符合规格要求的情况下工作可防止电解质的溢出或流失。电池的多个隔栅是封闭的，但设有阀口，按需要释放内部压力。这类电池内的化学反应可使气体重组，进而减少耗水量。泄压阀可调节内部压力，优化气体重组效率，“阀控式”一词即因此而来。

- 非溢漏型电池：非溢漏型电池是指采用凝胶或吸液式玻璃纤维隔板 (AGM) 技术的密封铅酸 (SLA) 电池/VLRA 电池。
- 警告：非溢漏型一词有误导性，人们会误以为这种电池是完全密封的。密封电池并不能自动防溢漏。采用液态电解质的标准密封铅酸电池也会发生溢漏。美国国际航空运输协会将非溢漏型电池定义为不含自由流动液体的电池。这种电池主要用于摩托车启动电池、微型混合动力汽车的启停功能，以及需要电池循环使用的海洋运载工具和房车。
- 这类电池的结构使它可以在任何位置和方向上使用。
- VRLA 电池内产生的气体可以在正常使用情况时产生的 99% 以上的气体重组。这类电池配有低压排气装置，当气体压力超过正常水平时，该装置会释放多余气体和压力然后自动重新关闭。虽然通常认为密封电池可在封闭区域内安全使用，但低压排气装置在某些情况下仍会导致一些气体逸出。
- 在正常的气体再化合情况下，阀控式电池会定期排出少量的氢气，有些氢气也可能会透过塑料外壳逸出。
- 当充电电压超出制造商建议的电压值或在高温下使用时，VRLA 电池中的氢气和氧气可能会排出更多和/或造成电解液过度消耗，进而可能导致热失控。
- 因此，在使用普通“湿”式电池时，务必要遵循所有的安全注意事项，尤其是在充电过程中。
- 这类电池采用重型铅钙合金板栅，因此特别适合需要经常进行深度放电和循环使用的 UPS 服务。密封铅酸电池 (SLA) 也适用于小型 UPS、应急照明和轮椅。由于价格低廉、工作可靠、维护要求低，SLA 一直是医院和养老院医疗保健服务的首选电池类型。
- 在维护使用得当的情况下，VRLA 电池的平均使用寿命不超过 10 年。VRLA 电池使用不到 5 年就需要更换的情况也并不少见。在极端情况下，VRLA 电池必须每两年更换一次。

### 3.2 镍电池

镍电池技术包括镍镉 (Ni-Cad)、镍金属氢化物 (Ni-MH) 和镍锌 (Ni-Zn)

#### 3.2.1 镍镉 (Ni-Cd) 电池

镍镉电池 (Ni-Cd) 是一种充电的电池，可用于便携式计算机、电钻、摄像机及其他需要均匀放电的小型电池驱动设备。镍镉电池使用碱性电解质 (也称为“干电池”，采用湿度仅足以使电流流动的糊状电解质，即氢氧化钾 = KOH，固体矿物，熔点 406 °C)。正极板的活性物质为氢氧化镍，负极板的活性物质为金属镉。这带来了良好的低温情况下的使用性能。在良好的控制环境下，固定型备用镍镉电池的预期寿命为 20-25 年，相当于或优于富液式铅酸电池的使用寿命，也比 VRLA 电池的寿命更长。价格经济实惠：镍镉电池的单次循环成本最低。这种电池有多种尺寸和性能可供选择。

#### 3.2.2 镍金属氢化物 (Ni-MH) 电池

镍金属氢化物电池 (干电池) 结合了密封镍镉电池的成熟正极化学反应技术和为先进氢能存储概念开发的金属合金储能的特性。镍金属氢化物电池的性能比其他的充电电池更好，容量更大，电压衰减更小。镍金属氢化物电池目前广泛应用于高端便携式电子产品，特别是当电池性能参数 (尤其是运行时间) 是产品购买决策中的首要考虑因素时。与其他类型的一次电池相比，这种电池在极端低温条件下 (-20 °C) 的使用效率更具优势。

### 3.3 锂离子 (Li-Ion) / 锂聚合物电池

本节及以下有关锂离子电池的内容专门介绍锂离子 (Li-Ion) / 锂聚合物电池。

锂离子 (Li-Ion) 电池或锂聚合物电池从第一个锂离子和锂金属电池 (湿电池) 发展而来。主要区别在于，这种电池不采用储存在有机溶剂中的液态锂盐电解质 (例如 LIPF6)，而是采用“固态”聚合物电解质 (半固态/凝胶状/糊状电解质)，如聚氧化乙烯 (PEO)、聚丙烯腈 (PAN)、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 或聚偏二氟乙烯 (PVdF)。

锂离子 (Li-Ion) 或锂聚合物电池化学成分的能量密度最高。无需记忆效应或定期充放电来延长电池寿命。锂离子电池可用于相机、计算器、笔记本电脑和手机等电子设备，并且越来越多地用于电动汽车。

- “锂离子电池”的主要材料构成包涵广泛化学品。该产品应被视为一个由集成组件组成的系统，而不仅仅是一组独立的单元。传统锂离子电池系统的组件包括锂离子电池、整体部件和辅助系统，包括电池管理系统 (BMS)。制造商将这些组件封装在称为电池组、模块或单元的配置中。充电器可以集成到电池系统中，也可以作为一个单独的组件。
- 锂离子电池具有较高的比能量密度，而且对电滥用和环境滥用更敏感，因此需要使用电池管理系统 (BMS) 进行有效管理。管理水平取决于所选的特定化学物质。锂离子电池电阻低，储电量高，如果管理不当，很容易达到“热失控”状态。因此，评估锂电池可靠性的一个关键决定因素是电池管理系统能否可靠、安全地监测和控制运行参数。
- 如果在受控环境中运行，锂离子电池的平均使用寿命可达 15 年。
- 电池的比能量和负载能力高。在高温和高电压储存条件下，电池性能会下降。在冰点温度 ( $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $<32\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) 下，无法快速充电。
- 锂离子电池有很多类型，例如氧化钴锂电池 ( $\text{LiCoO}_2$ )、氧化锰锂电池 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )、氧化镍锰钴锂电池 ( $\text{LiNiMnCoO}_2$  或 NMC)、磷酸铁锂电池 ( $\text{LiFePO}_4$ ) 和钛酸锂电池 ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )。
- 固态电池或锂金属电池 (据称是“下一代”电池) 用固态电解质 (即固态锂金属阳极和固态陶瓷电解质) 代替液态或凝胶状电解质，执行电极间的离子传导。

### 3.3.1 特殊危险

虽然锂离子电池技术有很多优势，但在考虑防火时存在一些特殊危险，包括容易产生大量热量，以及损坏时会释放有毒/易燃气体。这可能会给整个电池单元带来连锁反应，这种现象称为“热失控”，可能会引起火患或爆炸。

一旦 ESS/BESS 完全失火，就很难控制火势发展。ESS/BESS 还储存大量电量，会长时间 (通常为数小时) 燃烧，即使熄灭后也可以重新点燃。

### 3.3.2 锂离子 (Li-ion) 电池为何会发生故障？

与额定 Ah 值较低的老式设计相比，采用厚度为  $24\mu\text{m}$  或以下的超薄分隔层 (千分之 24 mm) 的电池更容易受到杂质的影响。

采用 18650 类的 1,350mAh 电池可以承受穿刺测试 (\*)，而高密度 3,400mAh 电池在进行相同测试时可能会燃烧。

(\*) 锂电池滥用测试 (穿刺测试)：穿刺测试是一种模拟内部短路的安全测试。穿刺样品电池以模拟内部短路，验证电池不会起火或爆裂。

请注意，UL1642 保险商实验室 (UL) 测试在锂电池安全验收方面不再要求进行穿刺测试。

电池内部短路意味着问题开始。外部的保护设备在阻止热失控方面无效。

电池故障基本分为两种：

- 一种是可预测的故障，发生概率是百万分之一，与电极、分隔层、电解质或工艺的设计缺陷有关。
- 另一种是与设计缺陷无关的随机故障，更难解决。可能是由于压力事件 (例如在零度以下充电、振动)，或类似于被流星击中的极端事件。

所有电池错误使用方法包括：过度振动、高温下使用、以及在冰点温度以下为锂离子电池充电。

事实上，电池组件重量轻，这意味着电池单元之间的分隔层和外壳很薄。分隔层和外壳也都相当脆弱，如果穿刺损坏电池，则会发生短路，产生的火花可能会点燃具有高活性的锂物质。

另外，电池可能会因电池内部发生过热而产生热量和压力，可能导致爆炸。

造成这种现象的原因有以下五种：

1. 不受控制的内部发热，导致阴极材料释放氧气，引发大量副反应。
2. 分隔层缺陷 (因热收缩或机械损坏引起)，造成电池短路，使电池中储存的能量迅速释放，伴随而来的不良化学连锁反应，释放大量热量。
3. 阴极界面处发生电解质分解，尤其是在高荷电状态 (SOC) 下。这会导致热量积聚，造成阴极释放氧气，损坏分隔层。
4. 局部热损害引起的电化学反应。如果正常运行时产生的热量不能有效迅速散去，就会导致该特定位置的分隔层收缩或破裂。
5. 电池机械性损害，导致短路和/或空气渗入电池。

上述五类电池安全事故的主要导因是短路，原因包括：2. 分隔层损坏；3. 电解质分解；5. 电池机械性损害。

当锂离子电池发生热失控 (温度升高) 时，有多种热源。例如：

- 燃烧 - 电解液、封装着火.....
- 电阻 - 高电流流经短路引起部件的温度增加
- 热力学 - 如果电极隔离缺失，系统将在达到启动能量时，恢复到相关温度下的最低能量状态
- 化学 - 电极材料与电池其他组件 (电解质) 发生反应，金属氧化物电极 (尤其是氧化钴) 发生热分解。

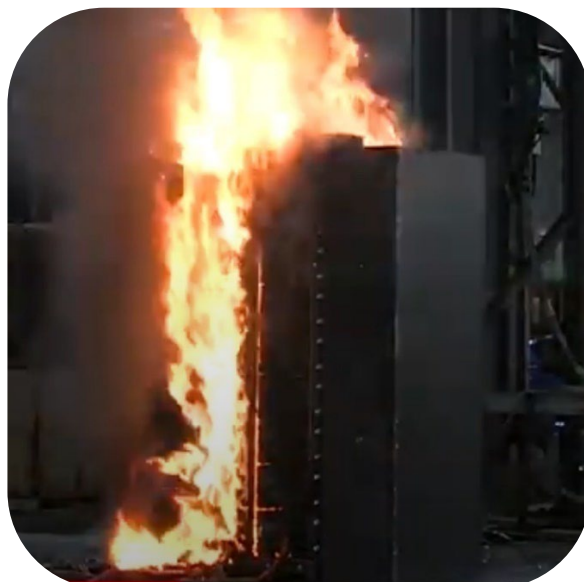
除了上述多种损害机制外，电池单元的设计通常也会阻碍灭火剂直接进入火源区。

热失控会导致高温和气体积聚，可能造成电池单元爆炸性破裂，进而引发火患和/或爆炸。在热失控期间，电池组内故障电池可能会将高热量蔓延到其他电池，使它们也变得不稳定。随之而来的连锁损坏在不同电池单元的时间不一定都一样。因此，随着每个电池单元的损耗，电池组的摧毁时间可能短至几秒，也可能长达数小时。

以下为 2019 年 9 月 13 日在 YouTube 上发布的“83 kWh 磷酸铁锂电池储能系统 FM Global 火患危险”视频的屏幕截图。

<https://www.youtube.com/watch?v=uLzPSN8iaqk>

版权声明：© 2019 Factory Mutual Insurance Company. 保留所有权利。



### 3.3.3 发生火患怎么办？

迄今为止，还没有公开的测试数据可以证实任何主动式灭火措施能有效地保护储能系统。

**建议采用自动喷淋灭火系统，以抑制火势向周围建筑、设备和建筑物内部蔓延。** (请参见章节：电池室/电池储能，了解更多详情。另请参见附件 1 和 2)。

如果锂离子电池过热、发出嘶嘶声或外壳鼓起，应立即将电池隔离易燃物，并放置在不可燃的护板上。

如果可能，应将电池移至室外，让它燃烧殆尽。仅将电池隔断电源可能无法阻止燃烧的继续。

在大多数情况下，最好使用冷却、遏制和抑制方法来应对锂离子电池火患。可能出现的热失控问题可能使我们不能 100% 扑灭锂离子电池火患。

锂离子电池起火不需要外来的氧气即可燃烧，这在本质上可视为化学类火患。

可将着火的电池模块浸入水中。使用水为媒介的灭火产品可以很容易获得，也非常合适，因为锂离子中能与水发生反应的锂金属含量非常少。水还能帮助邻近区域降温，防止火势蔓延。研究实验室和工厂也使用水扑灭锂离子电池火患。(详情见附件)

小型锂离子电池火患的处理方式和处理任何其他可燃物相似。

为达到最佳灭火效果，可使用泡沫灭火器、二氧化碳、干粉、石墨粉、铜粉或苏打(碳酸钠)。

对于小火患，可使用经认可的锂离子电池火患专用灭火器，如 Lith-Ex 灭火器。

便携式灭火器可用于内部装有电池的设备(手机和平板电脑等)，以及存放电池和/或电池充电的区域。

请注意，由于 D 类灭火器的灭火剂无法附着于垂直表面或其他斜面，因此这种灭火器一般只能用于平面。

铜基 D 类灭火器的设计使灭火剂能附着于垂直表面，但也对锂电池火患没有效用。

若发生锂离子电池火患，这种灭火剂无法冷却电池，不能防止火势蔓延到整个电池模块。

对于大型锂离子电池火患(如电动汽车起火)，可能需要让它燃烧殆尽。可以使用含铜材料的水。水能降低燃烧温度，即使是大型锂离子电池火患，也可以用水灭火。然而，不建议用于含有锂金属的电池火患。(详情见附件。)

### 3.3.4 安全预防措施

电池充电站与任何可燃物之间应保持足够的安全间距。

大型电池充电站之间的最小间距建议为 0.9 m (3 ft)，而小型电池(如工具中使用的电池)之间的最小间距建议为 0.3 m (1 ft)。

电池坞站/充电站应置于不可燃的平坦护板上。

在存放区，建议在小型锂离子电池的充电器周围设置隔离墙，以防止物品存放距离少于 1.5 m (5 ft)。

对于大型锂离子电池(如叉车或自动导引车中使用的电池)，最好将所有充电器放置在距离任何设施 15 m (50 ft) 的独立建筑中，或放置在有 2 小时防火墙、天花板和门的隔离室中。隔离室内建议安装自动喷淋系统(EH1 - 1 类特别危险)进行保护，保护范围为整个室内面积或 232 m<sup>2</sup> (2,500 ft<sup>2</sup>)，以较小者为准。最小设计流量为 12.2 mm/min (0.3 gpm/ft<sup>2</sup>)。EH1 消防栓设计流量为 1900 L/min (500 gal/min)。EH1 消防供水时间为 90-120 min。建议为消防用水和潜在污染物提供排水系统，并连接到一个容量足够大的地下水箱。



建议更换任何外部有明显损坏的锂离子电池，并将废电池丢入专用处置桶。当电池受到外力或掉落到坚硬的表面/地面上时，电池内部的完整性 (组件和机构) 很容易受到严重损坏。

### 3.3.5 废旧/损坏电池的处置

- 处置前应对电池端子进行保护处理 (用绝缘材料包裹)。这样可以防止电池触点意外接触金属或其他触点导致放电。
- 物理或机械性损坏的电池应与其他电池分开存放。
- 处置损坏/废弃/丢弃的电池时，应与装有其他可燃材料的垃圾桶或可燃材料保持至少 3 m (10 ft) 的安全间距。
- 锂离子电池废弃处置桶应由金属制成 (不应使用塑料)，并配有金属盖。

### 3.3.6 储存大量锂离子电池的区域的防火措施

- 存放大量锂离子电池的商品分类建议为“不膨胀塑料”，并根据 NFPA/FM 安装喷淋保护。
- 若存放在纸箱中，商品分类建议为“不暴露的不膨胀塑料”；如果没有使用包装材料，则建议为“暴露的不膨胀塑料”。
- 储存区域内的锂离子电池的充电量不应超过电池总容量的 50%。充满电的锂离子电池具有更高的能量密度，因内部缺陷而导致短路 (会产生大量热量) 的风险更大。
- 为了减少因制造或内部缺陷而导致的热失控风险，存放区的温度建议保持在 4 至 27 °C (40-80 °F) 之间。
- FM Global 制作了一个关于电池存放及自动喷淋灭火装置的有趣视频，可在以下网址观看：<https://www.youtube.com/watch?v=NeaK9V69Xks>

## 3.4 其他电池类型

以下类型的电池通常不用于直流电池系统和储能系统：

- **熔盐电池：**使用熔盐作为电解质的一种电池。不可充电的传统固态类电池在加热激活之前，可在室温下长期存放。液态金属充电电池 (例如采用密封焊接和隔热材料的钠镍电池) 可用于工业备用电源和特种电动汽车，也可用于电网储能，以平衡太阳能电池板和风力涡轮机等间歇性可再生能源的不稳定供电。
- **钠硫 (Na-S) 电池：**Na-S 电池或液态金属电池是一种由钠和硫熔融的金属电池。这种电池的能量密度高，充放电效率高 (89%–92%)，寿命长，制造材料价格低。然而，因为多硫化钠的工作温度高达 300 °C - 350 °C 且腐蚀性很强，这种电池主要用于电网储能等大规模非移动型应用。

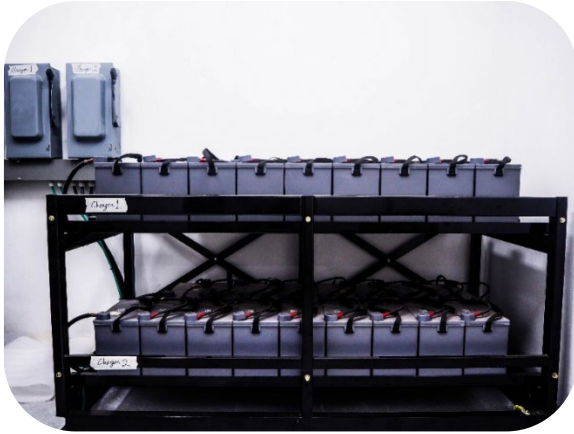
- **氯化钠镍“Zebra”电池：**“Zebra (Zero Emission Batteries Research Activity)”电池是一种氯化钠镍电池，在瑞士限量生产，用于电动汽车。这种电池是专为用于电动汽车生产的电池。该技术最早在 70 和 80 年代在南非开发。氯化钠镍电池技术的主要缺点是需要高温。电池内部的工作温度必须保持在 270 °C 至 350 °C，才能有效工作。
- **氧化还原液流电池 (RFB - Redox Flow Battery)：**Na-S 电池或液态金属电池是一种由钠和硫熔融的金属电池。这种电池具有能量密度高和充电效率高的特点。RFB 通过钒离子或类似离子的氧化还原反应进行充放电。RFB 的电池寿命长达 20 年，可进行无限次的充放电循环，性能也不会衰减。此外，电解质可以半永久使用。与其他类型的电池相比，RFB 的能量密度通常较低。其他 RFB 类型的氧化还原电池包括钒氧化还原电池 (VRB)、多硫化溴电池 (PSB) 和锌溴电池 (Zn-Br)。
- **燃料电池：**燃料电池是一种电化学类电池，通过一对氧化还原反应，将燃料 (通常是氢气) 和氧化剂 (通常是氧气) 的化学能转化为电能。燃料电池不同于大多数电池，需要连续的燃料和氧气来维持化学反应，而在其他电池中，化学能通常来自于电池中的金属及其离子或氧化物。第一块燃料电池于 1838 年发明。自 60 年代中期以来，碱性燃料电池一直用于美国宇航局的太空计划，为卫星和太空舱供电。燃料电池也一直用作偏远地区设施的备用电源。

### 3.5 液态电解质的发展

- 钾在自然界的含量比锂高得多，因此钾二次电池是下一代储能设备的竞争者。然而，各种瓶颈的出现 (如高活性金属钾、易燃有机电解质或由 1-乙基-3-甲基咪唑氯化物/AICl<sub>3</sub>/KCl/双氟磺酰亚胺钾组成的离子液态电解质) 引发了安全问题。

## 4. 直流电池系统基础知识

- 电池大部分时间都在浮充方式下运行，很少放电 (即浮充状态)。直流电池系统可安装在配电室内或专用独立建筑的隔离室内。
- 电池最常用于不间断电源 (UPS)：
  - 不间断电源 (UPS) 是一种电气设备，可在输入电源或主电源发生故障时提供应急电源。
  - UPS 通常用于保护计算机、数据中心、电信设备或其他电气设备等硬件。这些硬件若发生意外断电，可能会造成人员伤亡、严重的营业中断或数据丢失。在这种情况下，UPS 设备可在主电源断电时，确保计算机至少能在短时间内继续运行。
  - 对于计算机而言，当 UPS 设备检测到主电源断电时，内部电池就会“启动”。如果终端用户在使用计算机时收到 UPS 发出的断电信号，他们就可以使用备用电源 (电池) 电量完成保存正在处理的数据，然后退出系统。UPS 设备还提供电涌保护。
  - 数据中心 UPS：虽然 UPS 系统通常被称为双转换、线路交互和备用设计，但这些术语的使用并不一致，制造商的执行方式也不尽相同。
  - 工业控制系统 UPS：常用于工业，作为分布式控制系统的即时备用电源，防止系统出现电源中断，确保备用电力能够在主电源断电情况下可以安全关闭设备。
  - UPS 与辅助或应急电源系统或备用发电机的不同之处在于，可通过提供电池 (以及超级电容器或飞轮) 中存储的电能，在主电源中断时提供近乎瞬时的电力供应。
  - 每台 UPS 通过整流器将输入的交流电转换为直流电，再通过逆变器将直流电转换回交流电。电池或飞轮储存电能，可在电力供应出现中断时使用。电路将电源通过整流器和逆变器，为供电系统或发电机提供电力。
  - 大多数不间断电源的电力持续时间相对较短 (从几分钟到最高 2 小时)，但足以启动备用电源 (即柴油驱动的发电机) 或完成受保护设备 (即工艺设备) 的关闭程序。这是一种持续供电系统。



铅酸电池



镍电池

备用应急电池室

## 5. ESS/BESS 基础知识

- 储能系统 (ESS) 也称为电池储能系统 (BESS)。
- ESS/BESS 是一种通过电网或发电厂/电源充电 (或收集能量)，然后在需要时释放电量，以提供电力或其他电网服务。
- 如今，人们对储能的需求越来越大，特别是在可再生能源开发项目和/或现有热电厂并网和离网的开发项目中集成 ESS/BESS。
- 由于可再生能源发电不一定与电力需求一致，因此将大规模可再生能源系统和新兴智能电网技术集成到传统电力系统中具有一定挑战性。过剩电力必须削减或外输。电力的存储是提高系统灵活性的一种做法。存储为灵活性提供了一个可能的来源。
- ESS/BESS 机柜可置于室外、专用建筑物或建筑物内的防火隔离室中。ESS 和 BESS 机柜是模块化的，可以部署在标准运输集装箱中。



## 6. 损失案例

### 拉丁美洲 - 里氏 8.8 级地震 (2011 年) - 直流电池系统

- 纸浆厂电气室：地震期间，一个装有 30 块酸性 UPS 电池的架子倒塌。酸性液体从破损电池的塑料外壳中流出，与地面上的环氧树脂涂料和塑料部件发生反应。这导致具有高度腐蚀性和毒性的烟雾充满了装有几排电气柜的整个电气室。由于停电，通风设备在地震发生后自动关闭，无法排出电气室内的烟雾。后来，整个电气室和设备的清理工作用了大约两周时间。共使用 50 人和 3 家承包公司。

## 韩国 – ESS/BESS

- 2017-2019 年期间发生了 23 起火患。随后，政府下令关闭大约 35% 已安装的 ESS。尽管采取这种预防性关闭措施，2019 年仍发生了 5 起火患。因此，目前法律规定 ESS 的充电率不得超过 80-90%。

美国也报道发生了一些有关 ESS/BESS 的重大事故，如：

- **亚利桑那州 (2012)**

一个 1.5 兆瓦的系统起火。

ESS 由一个容纳 16 个机柜的集装箱组成，每个机柜装有 24 个锂离子电池。

本次事故调查表明，一个老化电池过度放电，影响到邻近电池，进而引发火患。

2012 年这起事故的根本原因是系统控制逻辑有问题。

- **夏威夷风电场 (2012)**

一家 15 兆瓦的发电厂烧毁。

发电厂的制造商提供的是先进的铅酸类电池，不是锂离子技术。该制造商在两年后破产。

消防员对“12,000 块电池”的毒性存在顾虑，所以直到大火燃烧 7 小时后才进入建筑物内。

18 小时后，消防部门停止灭火，让建筑物自行烧毁。

部分建筑物倒塌。没有人员受伤。

消防部门表示，2011 年 4 月在该建筑物发生的火患自行熄灭。今年 5 月又发生了一起火患，这两起火患都是涉及逆变器中的 ECI 电容器。

- **亚利桑那州太阳能项目 (2019)**

设施于 2017 年安装，是太阳能项目的一部分。

4 名消防员在检查电池外壳时被爆炸物 (涉及锂离子电池) 炸伤。

下午 5 时 41 分左右，调度员接到电话，称在城市郊区的电池储能系统 (BESS) 现场周围出现烟雾和“难闻的气味”。

三辆消防车在 10 分钟内赶到现场。第一响应人到达现场后，很快就发现火患涉及带电电池，需要危险品处理小组的协助。与发电厂工作人员协商并确定行动计划后，一名消防队长和三名消防队员在晚上 8 点前接近机柜门，准备将门打开。

BESS 机柜门打开后，可燃气体 (在事故发生几小时前以来一直在内部积聚) 混入氧气流，瞬间形成火源。

可燃气体随后着火，被称为“爆燃事件”。

最初的火患实际上是 BESS 内部发生了大范围的连锁热失控事件，由一个电池单元的内部故障引发。故障原因是电池单元内出现“异常的锂金属沉积和枝晶生长”。

一旦发生故障，热失控就会通过热传导从一个电池单元蔓延到同一机柜中的其他电池单元和模块。电池单元之间“缺乏足够的热障保护”促进了热失控蔓延，否则热失控可能会得到阻止或减缓。

机柜由 NOVEC 1230 系统保护，但气体保护系统在这次事故中不起作用。

随着事故发展，BESS 内部产生了大量可燃气体云。由于缺乏外部通风，这些气体在集装箱柜内形成了可燃气体。热失控开始大约 3 小时后，当消防员打开 BESS 机柜门时，可燃气体接触到热源 (或火花)，发生爆燃。

## 美国加利福尼亚州 (2001) – UPS/电池室

- **UPS/电池室发生氢气爆炸。**  
爆炸毁坏了大部分屋顶，导致整个建筑物的多处墙壁和天花板坍塌，严重损坏电池室所在建筑物的其他大部分区域。  
该设施以前是一个大型计算机/数据中心，配有电池室和应急发电机，已于前段时间搬空。电池室的通风设备与氢气监测系统联动。氢气警报器有启动，但仅发出在地警报 (没有远程报告)。  
爆炸发生后，无法确定通风设备是否失灵，或者是在建筑物搬空时已切断电源。

#### **英国 (2020) – ESS/BESS**

- **2020 年**，一家太阳能发电厂的 ESS 起火。  
这家太阳能发电厂于 2019 年初完工。  
2020 年 9 月 15 日，20 兆瓦 ESS 发生火患。  
火患发生在接近凌晨 1 点，消防队不得不使用大型消防水枪和地面消防炮进行几小时的灭火。上午 11 时 45 分，仍有一辆消防车在现场执行任务，灭火工作仍在继续，但这时只需使用一个手持式消防泵。

#### **澳大利亚 – ESS/BESS**

- 一座燃煤发电站正在安装 BESS (700 兆瓦电池)。  
该电池项目预计在 2021 年底的夏季需求高峰期之前完工。被称为是南半球“最大的电池”项目。  
2021 年中，执行系统测试时发生火患。一个 13 吨重的锂电池起火，火焰随后蔓延到邻近的电池组。  
维多利亚州消防救援队和乡村消防局的 150 多名消防人员及 30 多辆消防车和支援车辆参与了灭火行动，火患得到控制和密切监控，直至自行熄灭。  
经过三天多的努力，火患终于被扑灭。  
火患扑灭后，消防部门人员与工厂工作人员和承包商继续留在现场监测两个受影响电池组的冷却降温情况。  
有关部门表示，介于火患的特殊性质 - 一个 13 吨重的电池，消防员无法有效用水灭火，也不能使用一般的灭火方法。消防员只能让它“燃烧殆尽”，等待集装箱冷却降温到可以打开门的程度。

## 2 聚焦直流电池系统

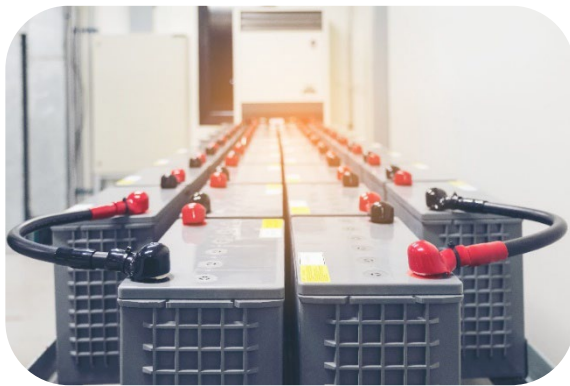
本节主要介绍直流电池系统：

- 直流电池系统应用于固定备用系统 (包括但不限于发电厂、变电站、电信、数据中心、开关设备保护系统、工艺控制系统、应急电源和不间断电源 -UPS)。
- 所有类型的电池 (湿电池/干电池) 均在考虑之列，但不包括使用锂离子聚合物的电池 (干电池)。(请参考第 3 节：“聚焦 ESS/BESS”)。

本文不包括电池存放区 (即存放但不使用电池) 的应用。(请参见 NFPA 标准：“商品防火”)。

### 1. 位置、布置和隔离

电池室有各种规模，从储存电能供日后使用的小房间 (少量电池) 到大房间，包括使用太阳能板和风力涡轮机等可再生能源进行电能补充或储存电能然后在电价波动时释放电能。



位置

- 电池建议安装在一个独立的 2 小时防火区域内。
- 在核电厂中，在提供冗余保护的电池室建议有至少 3 小时防火隔离墙，将相关的电池室相互隔开，也与核电厂其他区域隔开。

为了限制氢气产生，电池室或电池区的温度应尽可能保持接近 25 °C (77 °F)。

电池室内不得存放与电池室无关的可燃物。

存放可燃物的区域和使用可燃建筑材料的周边的最小间距建议为 2.7 m (9 ft)。

在存放与电池室有关的不可燃材料的区域和使用不可燃建筑材料的周边的最小间距建议至少为 90 cm (3 ft)。

在非专用建筑物内的直流电池系统，单个区域内氯化钠镍电池的最大额定容量建议为 600 kWh (铅酸电池和镍电池没有限制)。

### 2. 电气设备

- 对于所有会产生易燃易爆气体的交流电池系统，如富液式铅酸电池、富液式 (湿式) 镍镉电池 (Ni-Cd)、富液式 (湿式) 镍氢电池 (Ni-MH) 和阀控式铅酸电池 (VRLA) /“密封铅酸”电池 (SLA)，所有在电池室内安装或使用的电气设备都应为本安型 (或防爆型)。
- 直流开关设备和逆变器不建议安装在电池室中。

### 3. 通风

对于所有会产生易燃易爆气体的交流电池系统，如富液式铅酸电池、富液式 (湿式) 镍镉电池 (Ni-Cd)、富液式 (湿式) 镍氢电池 (Ni-MH) 和阀控式铅酸电池 (VRLA) /“密封铅酸”电池

**(SLA)，以及使用有机溶剂等液态电解质 (湿电池) 的锂离子电池：**

1. 电池室应具备自然通风，将氢气浓度保持在 1% 以内 (LEL 爆炸下限的 25%)，并安装氢气检测系统。  
应对氢气浓度进行监控。  
或者
2. 机械排气通风装置的速度不应低于电池室建筑面积的每平方英尺每分钟 1 立方英尺 (0.0051 m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> 或 1 ft<sup>3</sup>/min/ft<sup>2</sup>) 的设计，由氢气检测系统启动，设置为在 LEL 的 25% (电池室内 H<sub>2</sub> 的 1%) 时运行通风。  
应对氢气浓度进行监控，并为氢气检测系统提供至少 2 小时的备用电源。  
在检测到易燃气体浓度低于爆炸下限 LEL 的 25% 之前，机械通风装置应保持开启。  
或者
3. 不间断通风速度应不低于电池室建筑面积的每平方英尺每分钟 1 立方英尺 (0.0051 m<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup>) [1 ft<sup>3</sup>/min/ft<sup>2</sup>] 的设计。  
当浓度过高 (>1 % 容量) 和/或通风不良和/或氢气检测系统故障时，应在有专人值守的地点 (主控室) 发出警报。  
排气通风管应位于防火隔间的顶端。

**除上述装置外，也建议在数据中心、UPS 电池室或通信电池室等关键电池系统提供以下装置：**

- 与其他设备区分开的暖通空调 (HVAC) 系统，用于热管理。
- 室温监控装置，并将警报远程发送到有专人值守的地点。

## 4. 火患检测和防火装置

**检测：**

- 电池室内应安装火患检测装置。

**室内保护：**

- 本节适用于使用电池的电池室。
- 请注意，以下情况不需要固定防火系统：
  - 在通信设施内用于通信设备，由通信公司专门控制，位于室外或专门用于此类系统的建筑空间内的交流 50v、直流 60v 以下的铅酸电池和镍镉电池系统。
  - 不间断电源中的铅酸电池系统，用于备用电源应用，不超出直流电池系统所在楼层面积的 10%。
  - 用于变电站控制和发电站控制或安全关闭的直流电源，由电力公司专门控制，位于室外或专门用于此类系统的建筑空间内的铅酸电池和镍镉电池系统。
- 对于所有其他情况，消防设计的重点是电池装置，通常指带塑料外壳的电池单元模块紧密堆叠在机柜中的情况。
- 这些系统通常由多个机柜组成，因此主要消防目的是发生火患时，能够将火势控制在一个机柜内。
- 如果火患能从一个机柜蔓延到另一个机柜，火患则可能会持续相当长的时间，可能使自动喷淋系统不起作用或供水耗尽。
- 为了缓解这种风险，任何消防系统的目标之一都应该是通过安装自动喷淋系统和保持足够的电池组间距，将火势控制在起火的机柜中。

- 水是一种适用于大多数电池火患的灭火剂。因此，自动喷淋系统是首选的固定灭火方法 (如果设计得当)。
- 电池室最好使用自动喷淋系统进行保护，保护范围为整个室内面积或 232 m<sup>2</sup> (2500 ft<sup>2</sup>)，以较小者为准。最小设计流量为 12.2 mm/min (0.3 gpm/ft<sup>2</sup>)。
- 如果需要减少设备损坏和非热损坏，可提供洁净气体灭火系统作为补充保护。
- 不建议在电池室中单使用气体灭火系统保护，原因如下：
  - 相关功效：截至 2019 年，没有证据表明气体灭火装置可有效扑灭或控制涉及电池的火患。
  - 气体灭火系统可减缓或中断火患中的化学反应，但只能持续一段时间。持续时间一般为 10 分钟，这并不足以完全扑灭电池火患。
- 无论如何，全淹没型气体灭火系统的设计应能确保设计浓度在室内保持足够长的时间，以确保火已熄灭，电池已冷却降温到低于存在的可燃物质的自燃温度和可能导致热失控的温度 (至少 10 分钟)。
- 系统设计应考虑以下要素：
  - 特定可燃材料所需的灭火剂浓度。
  - 设备和外墙的具体配置。
- 不建议使用水雾或干粉系统保护电池室。

## 5. 溢漏控制

安装在室内的电池如果使用液态电解质的单个容器的容量超过 208 litre (55 gallon)，或总容量超过 3,785 litre (1,000 gallon)，应配备防溢漏装置，以防止液体流入周边区域。

密封阀控式铅酸蓄电池 (VRLA) 和其他采用固定电解质和固定危险液态的设备不需要安装防溢漏装置。

当需要提供电池酸液防溢漏装置时：

- 只使用经批准的 (4955 级) 电池酸液吸收垫。
- 只要出现接触酸性物质的迹象 (如吸收垫面料出现明显的颜色变化)，就应按照情况移除或更换吸收垫。
- 及时更换漏液的电池，以消除对电池酸液吸收垫保护的需求。

## 3 聚焦 ESS/BESS

本节将介绍以下储能系统 (ESS) 或电池储能系统 (BESS)：

- 通过电网或发电厂/电源充电 (或收集能量)，然后在需要时释放电量，以提供电力或其他电网服务。
- 只使用锂离子聚合物电池 (干电池)。(请参考第 2 节：“聚焦直流电池系统”了解使用液态电解质的锂离子湿电池)。

本文不包括电池存放区 (即存放但不使用电池) 的应用。(请参见 NFPA 标准：“商品防火”)。锂离子电池的 ESS 系统越来越受欢迎，但有一些特定的额外风险。

### 1. 标准和认证

#### ESS/BESS 安全规范和标准：

任何行业的规范和标准都是为了提供保护生命安全和财产的最低标准，以及订立行业最佳实践做法。

规范被写入地区性法律，因此具有强制性，而标准由具有相关资质的组织如保险商实验室 (UL) 和国际电工委员会 (IEC) 等编写，所以只在规范中引用时才具有强制性。

在北美，储能系统“标准”基本上包括：

- UL 9540 “储能系统和设备安全标准”
- UL 9540A “评估电池储能系统热失控火焰蔓延的测试方法标准”
- NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”

在欧洲，符合评估的程序可以采用**自我认证**，也可以是**第三方认证**，具体取决于产品的风险等级。**CE** 标志不是产品质量标志，而是保证产品符合欧盟规定的最低健康和安全要求。这可能包括要求电池的设计和制造符合欧洲有关电池和工业产品的现行规范要求。获取 **CE** 标志所需符合的基本欧洲条款规定要求如下：

- 2014/30/EU 指令 (EMC) 电磁兼容性
- 2014/35/EU 指令 (LVD) 低电压
- 2011/65/EU 指令 (RoHS) 限制使用某些有害物质
- 1907/2006 号条例 (EC) 化学物质 (REACH)
- 1542/2023 号条例 (EC) 电池新法规

除了将锂电池归类为危险运输品外，还必须验证是否符合《联合国试验和标准手册》(通常称为 **UN38.3**) 中列明的要求。

请注意，此类产品 (锂离子电池) 的市场相对不规范，产品缺少测试标准标志 (**CE** 标志之外) 或检测报告，是应该值得关注的。

#### UL 安全标准和限制：

**UL** 代表保险商实验室。然而，该公司最近进行了品牌重塑，现在称为 **UL**。**UL** 是一家全球性标准制定公司，为各种消费品 (尤其是带有电气部件的消费品) 制定安全标准。

**UL** 认证产品指产品经过测试，符合严格的安全性和可持续性标准。这些标准可能包括防火和阻燃性、功能性和潜在的电气危险。产品接受测试并确定功能良好且符合标准后，才能获得 **UL** 认证。

**UL** 认证是一个较宽泛的术语，包括 **UL** 列名、**UL** 认可 (1) 和 **UL** 分级 (只表示产品已通过某一项特定标准测试，如可持续性)。

---

注 1：部件获得 **UL** 认证会提高产品的可信度。此外，**UL** 制定的标准有助于确保安装 **UL** 认可组件的人员的安全。

UL 9540 是 UL 制定的储能系统安全标准。该标准为确保 ESS 安全和可靠地运作提供了方案。涵盖了这些系统的设计、建造、测试和使用。UL 9540 对电气安全、热安全、机械安全、消防安全、系统性能、系统可靠性和系统文件编制都有严格的要求。大多数人都同意该标准是确保 ESS 安全和性能的基准。

UL 9540 是储能系统 (ESS) 必须达标的一套标准。UL9540 本身并不个别涵盖储能系统的组件，而是将所有组件集成而来的系统视为一个整体。

UL 9540A 是一种评估 ESS 热失控的方法；对 ESS 中使用的电池管理系统 (BMS) 列出了额外要求。它涵盖 BMS 的功能和性能，包括电池安全、性能和软件编程。最终，UL 9540A 可验证 ESS 防护等级对关键热失控和火患危险的有效性。

UL 9540 认证意味着一家国家认可测试实验室 (NRTL) 已对产品进行独立评估和验证，并证实其符合 UL 9540 规定的要求。然而，除非特别说明，否则并不一定表示已包括 UL 9540A 测试。

尽管 UL 9540A 是电池储能系统测试的关键起点，提供了非常有用的信息，但范围仍然有限，因为测试设置参数可能无法包括所有可以引发火患的条件。

UL 9540A 并非测试证书，只提供热失控情况的标准测试数据。测试结果需要正确解释，而且是主观的。

#### **NFPA 855 及限制：**

NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”为 ESS/BESS 的设备、布置、应急规划以及被动式和主动式防火提供了指导。

当 ESS/BESS 安装在非专用建筑内，单个防火区域中锂离子电池的最大额定电量不应超过 600 kWh。

基本的电池组布置方式是 50kWh 并与其他设备组和墙壁保持 0.9 m (3 ft) 的间距。

其他布置方式要求应以大规模火患测试为基础。

#### **大规模防火测试的必要性：**

关于如何进行大规模防火测试的细节，业内尚无明确规定。

根据 NFPA 855，大规模火患测试的定义是在测试设备引发可以代表储能系统火患的测试，评估火患是否会蔓延到周围的电池单元、设备或蔓延超过防火墙。

## **2. NFPA 855 与 FM GLOBAL 数据表 5-33**

#### **事实：**

NFPA (美国消防协会) 是一个自筹资金的非营利组织。NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”受建筑或消防规范的约束。

FM Global 是一家为客户提供消防标准的“保险公司”。制定的标准通常比 NFPA 更严格。数据表 (DS) 5-33 专门适用于“电力储能系统”。

有管辖权的政府机构 (AHJ) 是负责管理建筑规范、消防规范和其他法规的政府或非政府机构。AHJ 的审查是确保设计符合 NFPA 标准，不是 FM 标准。

#### **从风险控制立场 (SCOR)：**

- NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”目前为日益增长的 ESS/BESS 安装提供了当前最实用的答案。
- FM Global DS 5-33 “电力储能系统”目前为 ESS/BESS 开发的未知情况提供了最保守的答案。

### 从风险控制角度 (SCOR) :

- 我们视 NFPA 855 为 SCOR 的当前最低要求，将 FM Global DS 5-33 视为当前最严格的要求。
- 因此，下文将对 NFPA 855 和 FM Global DS 5-33 进行讨论。

## 3. 持续存在的质量与安全问题

### 高度易燃的液态电解质：

电气器材开发人员迫切希望找到在等量空间内增加更多电能的方法。

一项重要创新是具有先进非挥发性且机械强度可调的聚合物电解质，取代传统锂离子电池中高度易燃的液态电解质

### ESS/BESS 电池单元需要高精度制造工艺：

Clean Energy Associates (CEA)<sup>2</sup> 在过去六年内，对容量超过 30 GWh 的锂离子储能项目进行了工厂质量审核：

- 对超过 52 家电池储能系统 (BESS) 工厂进行超过 320 次检查
- 对全球 64% 的一级电池制造商进行了审核
- 总共发现超过 1,300 个质量问题

Clean Energy Associates 最近的报告 (2024) 发现：

- 26% 的受检储能系统存在与火患检测和灭火系统有关的质量问题 (如部件故障、传感器无响应)。
- 18% 的受检系统存在与热管理系统有关的质量问题 (即因循环系统组件故障导致液态冷却系统失灵、压缩机主板短路)。

在电池储能系统 (BESS) 中发现的所有缺陷中，系统级问题占近一半：

- 58% 的系统级问题因组件缺陷和系统集成程序不当造成。
- 34% 的系统级问题与外壳有关：电池外壳制造过程中的缺陷和运输过程中的不当处理。
- 8% 的系统级问题与性能测试有关：各种制造缺陷和/或系统集成不当。

系统相关问题较多有两个原因：一是 BESS 集成工艺多为人工处理完成；二是上游组件缺陷造成了很多问题，早期的质量检查可能没有发现这些缺陷。

尽管制造过程中的自动化程度较高，但电池问题仍占 CEA 发现问题的 30%，其中三分之一发生在电池单元制造过程中，38% 发生在电池组装过程中，30% 发生在电池外壳完成过程中。

最后，在 CEA 发现的全部问题中，有 23% 涉及生产线，更具体地说是因为生产线的手动操作性质。这些问题中有一半与焊接有关，原因是因为手动操作和缺乏有效的质量控制程序。

需要高度自动化电池生产流程来确保严格的精度和安全要求。

系统级问题占 BESS 缺陷的近一半 (energy-storage.news)

## 4. 锂离子电池储能系统 (LiB-ESS/BESS) 的选择

应禁止使用翻新或二手 LiB-ESS/BESS 的组件包括电池和模块 (包括从电动汽车上回收的锂离子电池：在固定应用中重新利用电动汽车回收的锂离子电池，可以是大型公共规模的储能应用具有成本效益的解决方案)。

LiB-ESS 的设计应与应用相匹配，包括电池类型和电池管理系统 (BMS) 等。

应制定变更管理 (MOC) 程序，以确保电池或 BMS 组件符合系统修改后的要求，或确保替代品适合现有系统要求。

---

注 2：Clean Energy Associates (CEA) 是一家成立于 2008 年的清洁能源咨询公司，在美国丹佛和中国上海设有办事处。是一家北美太阳能光伏、绿色氢能和电池储能服务提供商。CEA 提供以下服务：供应商排名与市场情报、工程与设计服务、供应链管理与溯源、质量控制与测试、制造策略、环保 (环境、社会及治理)。

## 5. LFP 与 NMC 锂离子电池

锂离子电池有很多类型，例如氧化钴锂电池 ( $\text{LiCoO}_2$ )、氧化锰锂电池 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )、氧化镍锰钴锂电池 ( $\text{LiNiMnCoO}_2$  或 NMC)、磷酸铁锂电池 ( $\text{LiFePO}_4$ ) 和钛酸锂电池 ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )。

锂离子电池 (干电池) 或锂聚合物电池使用固态聚合物电解质，例如：

- 聚氧化乙烯 (PEO) ；
- 聚丙烯腈 (PAN) ；
- 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) ；
- 聚偏二氟乙烯 (PVdF)。

当今使用的主要锂离子电池类型：

- NCA = 锂镍钴铝
- NMC = 镍锰钴锂
- LFP = 磷酸铁锂 (磷酸铁)

对于 ESS/BESS：

- NMC = 镍锰钴锂
- LFP = 磷酸铁锂 (磷酸铁)

消防专家告诉我们，锂离子电池会释放出易燃气体混合物：

- NCA 类型：氢气 28%，碳氢化合物 15% (如甲烷、丙烷、苯)，一氧化碳 27%，二氧化碳 29%。LEL 与丙烷-乙烯混合物类似
- LFP 类型：氢气 48%，碳氢化合物 19% (如甲烷、丙烷、苯)，一氧化碳 10%，二氧化碳 20%。LEL 与乙烯-乙炔混合物类似

氟化氢 (HF) 有毒，对消防有负面影响，但释放氟化氢是锂盐反应的一个重要迹象。

锂离子电池制造专家告诉我们：

- 碳氢化合物在溶剂中降解的早期阶段会产生一氧化碳。
- 研究热失控中释放气体的阶段非常重要，以便能够采取应对行动。
- LFP 的有趣之处在于电池内部的晶体结构。在 NCA 中，结构由锂构成，而在 LFP 中是由铁和磷构成。这减慢了电池晶体坍塌速度，因此这限制了  $\text{Li}^+$  的流动，减少了热量释放 => 更不容易形成热失控。此外，还有基于其他新型溶剂混合物的不易燃电解质 (但目前还存在其他性能问题)。
- 温度和气体监测可显示电池单元的耗损情况，但这很难检测。

消防员协会告诉我们：

- 没有明火的情况下发生的热失控情况，可以通过电池组冒出明显的白色/灰色烟雾来辨别。
- 严重的爆炸危险可能在没有明显迹象出现之前就已经形成。
- 当电池发生热失控并释放气体时，即使未燃烧，爆炸危险已开始形成了。
- 热失控期间产生的气体是易燃的，而且点火源也始终存在。
- 点燃时间具有随机性，迄今为止没有预测方法。
- 结论：电池爆炸的时间和严重程度是不可预测的。

根据供应商提供的信息，一般层面下，与采用其他化学成分的电池相比，LFP 锂电池管理中确定的风险如下：

- 热管理风险：在短路或电池出现问题时，一些电池组件会出现过热现象
- 化学风险：在电池损坏或出现问题时，由于电池内部电解质气化，可能会释放出气态化学物质

- 机械风险：由于电池较重，搬运或维护时需要使用起重设备
- 火患风险：出现异常时，电池可能会过热（最高温度为 144 °C，而其他电池化学成分的最高温度为 550 °C 以上），但不会产生火焰（不起火也不会蔓延<sup>3</sup>）；然而，电池释放的气体可能会使火焰扩大

## 6. 危险、火患蔓延特性和保护方案

ESS/BESS 危险包括：

- 热失控：热失控一语用于描述电池单元不受控制地快速释放热能；当电池单元产生的热量超过有效散热能力时，就会出现这种情况。单个电池单元发生热失控会导致连锁反应，使周围电池单元温度也升高。随着此现象持续，可能导致电池起火或爆炸。这通常会成为引起更大电池火患的点火源。
- 滞留的电量：与大多数电气设备一样，ESS 也存在触电危险，但其独特之处在于，即使在发生火患后，ESS 内通常仍滞留着电量。电池端子通常会损坏，很难放电，因此会对火患后进行检修的人员造成危害。滞留的电量还可能会在数小时甚至数天后导致火患复燃。
- 有毒和易燃气体的释放：大多数电池在发生热失控时会释放出有毒和易燃气体。如果气体在达到爆炸下限之前没有点燃，可能会在 ESS 室或集装箱内形成爆炸性气体环境。
- 深度火患：ESS 的电池通常保护在金属或塑料外壳中，装在大机柜内。这些保护层有助于防止系统受损，但也会使水不能有效进入着火区。这意味着需要大量的水才能有效消散 ESS 火患产生的热量，因为不能在火患最热的地方进行有效冷却降温。

目前的知识水平：

- 在评估火患蔓延特性和保护方案方面，对 LiB-ESS 系统的研究十分有限。
- 机柜设计、建筑材料、电池规格与化学成分和其他设计特点的影响仍不清楚。
- 热失控事件会产生大量热量。热量加上塑料结构组件可能会引发大火。
- 对于涉及锂离子 (LiB) ESS/BSS 的火患，水是最佳冷却降温方法。
- 无法用磷酸铁锂 (LFP) 和氧化镍锂/氧化锰锂 (LNO/LMO) 系统的测试结果来推断其他 LiB-ESS 系统的可能测试结果。
- NFPA 855“固定式储能系统安装标准”记录了自动喷淋系统在大型火患测试期间的运行情况。受测电池的热释放速率峰值及其火载荷因化学成分而各不相同。最坏的情况是 LNO/LMO 类电池着火，导致测试区域的所有自动喷淋系统都启动。对周围区域天花板环境温度的测量结果表明，在 230 m<sup>2</sup> (2500 ft<sup>2</sup>) 典型设计保护区域之外的其他自动喷淋系统也会启动。
- 因此，FM Global 数据表所反映的方法很保守，即假设 LiB-ESS/BESS 室内的所有自动喷淋系统将启动。

## 7. 位置、布置和隔离

### 7.1 位置和隔离

电池应安装在一个独立的 2 小时防火隔间内。

在核电厂中，在提供冗余保护的电池室建议有至少使用 3 小时防火墙，将相关的电池室相互隔开，并与核电厂其他区域隔开。

为了限制氢气的释放，电池室或电池区的温度应尽可能保持接近 25 °C (77 °F)。

储能系统 (ESS) 应分成多个电池模组并相互间隔，防止大规模和长时间的火患事件。

请注意，下面的最小间距不适于损失估算。最大可能损失 (MPL) 应根据 SCOR 损失估算 MPL 手册进行评估。

**最低要求是按照 NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”：**

---

注 3：请注意，安全阀释放的气体（电解质）可能会积聚，点燃后会导致火患或爆炸。

当 ESS/BESS 安装在非专用建筑内，单个防火区域中锂离子电池的最大额定电量不应超过 600 kWh。每个 ESS 单元(组)的最大储电量应为 50 kWh。

在间隔方面，NFPA 没有区分 NMC (镍锰钴锂) 和 LFP (磷酸铁锂) 电池化学成分。

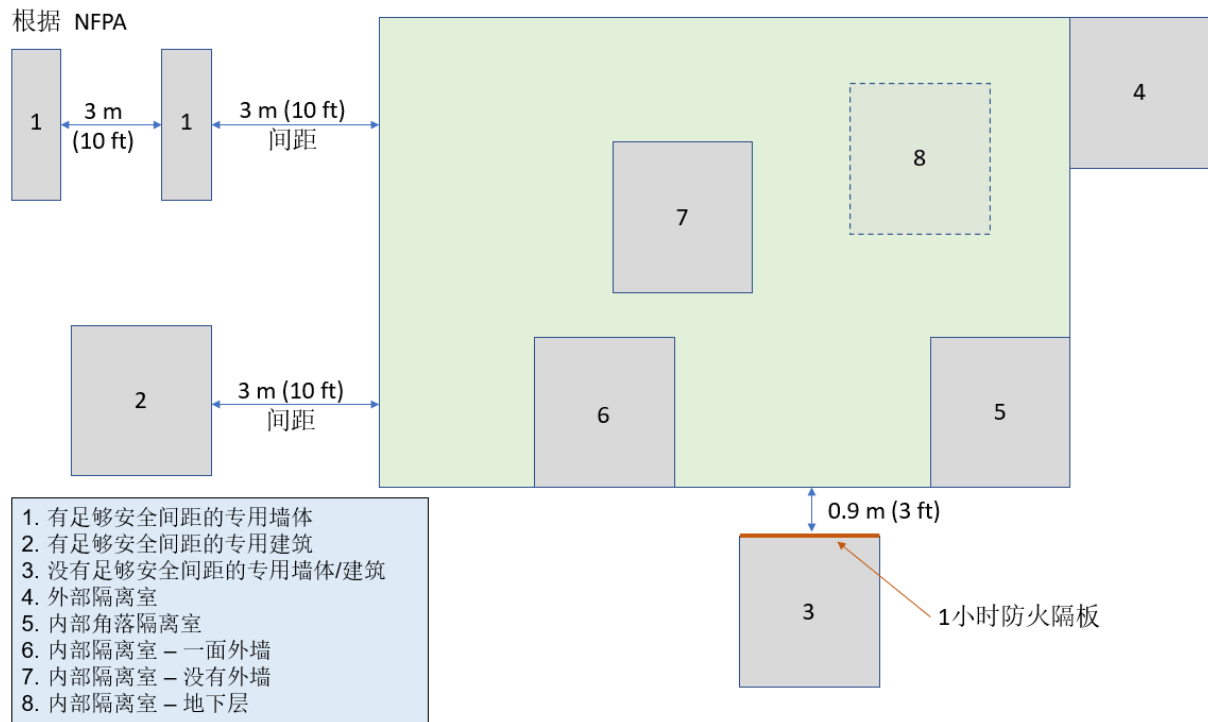
每组应与其他组及存放区域的墙壁保持至少 0.9 m (3 ft) 的间距。

应清除室外 ESS 周围 3 m (10 ft) 范围内的可燃植被和其他可燃植物。

对于 ESS 外部，应在 ESS 防火墙与邻近建筑物、关键公用设施或设备之间保持最小的间隔：

- 在提供外墙通风口或其他穿墙开口装置时，开口不应面向周围的设备和建筑物。
- 起火时，高温气体和燃烧物可能从开口中逸出，使周围设备或建筑物受到影响。穿透开口装置可能包括电缆、门和暖通空调设备。
- ESS 不可燃隔墙以及 ESS 隔墙与邻近建筑物/设备之间应保持至少 3 m (10 ft) 的间距。
- 如果 ESS 隔墙与邻近建筑物/设备之间的间隔少于 3 m (10 ft)，则应在机柜内侧或外侧设置至少 1 小时的隔热板 (见附件)。

储能系统应位于下面按优先序列出的区域之一 (如下图所示)：



按优先序列出的 ESS 位置 © Franck Orset (FPO)

1. 专用墙体 (即预制集装箱) 的详细说明，最小安全间距为 3 m (10 ft)

带防火墙的外部 ESS 机柜示例：

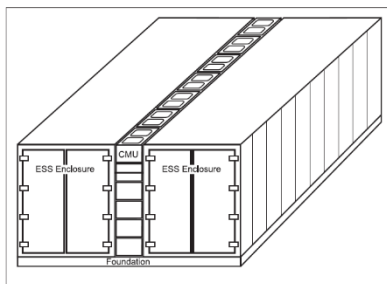


Fig. 2.3.2.2.1. Exterior ESS enclosures with the barrier

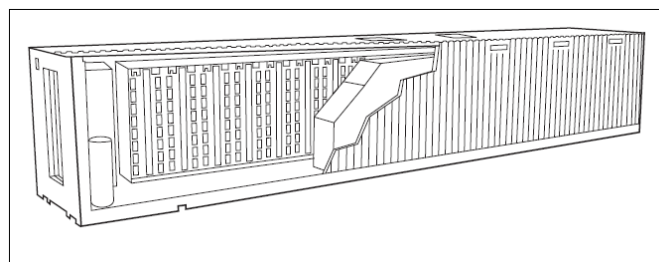


Fig. C.2.4(A). Exterior enclosure with multiple racks

FM Global 许可 ©2017-2024 Factory Mutual Insurance Company. 保留所有权利。

2. 仅包含 ESS 和相关配备的专用建筑物的细节，安全间距至少为 3 m (10 ft)

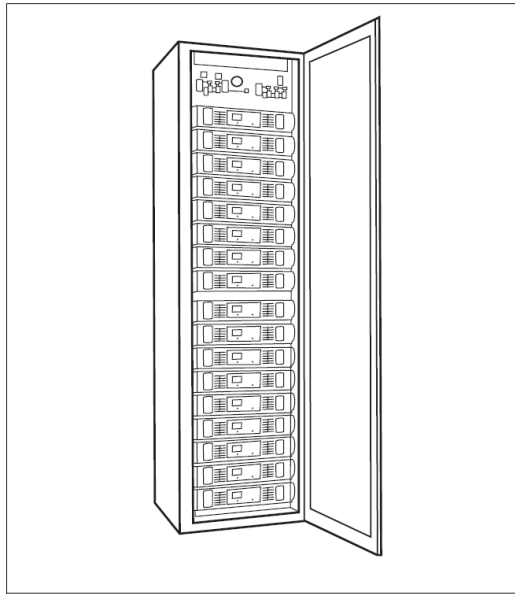
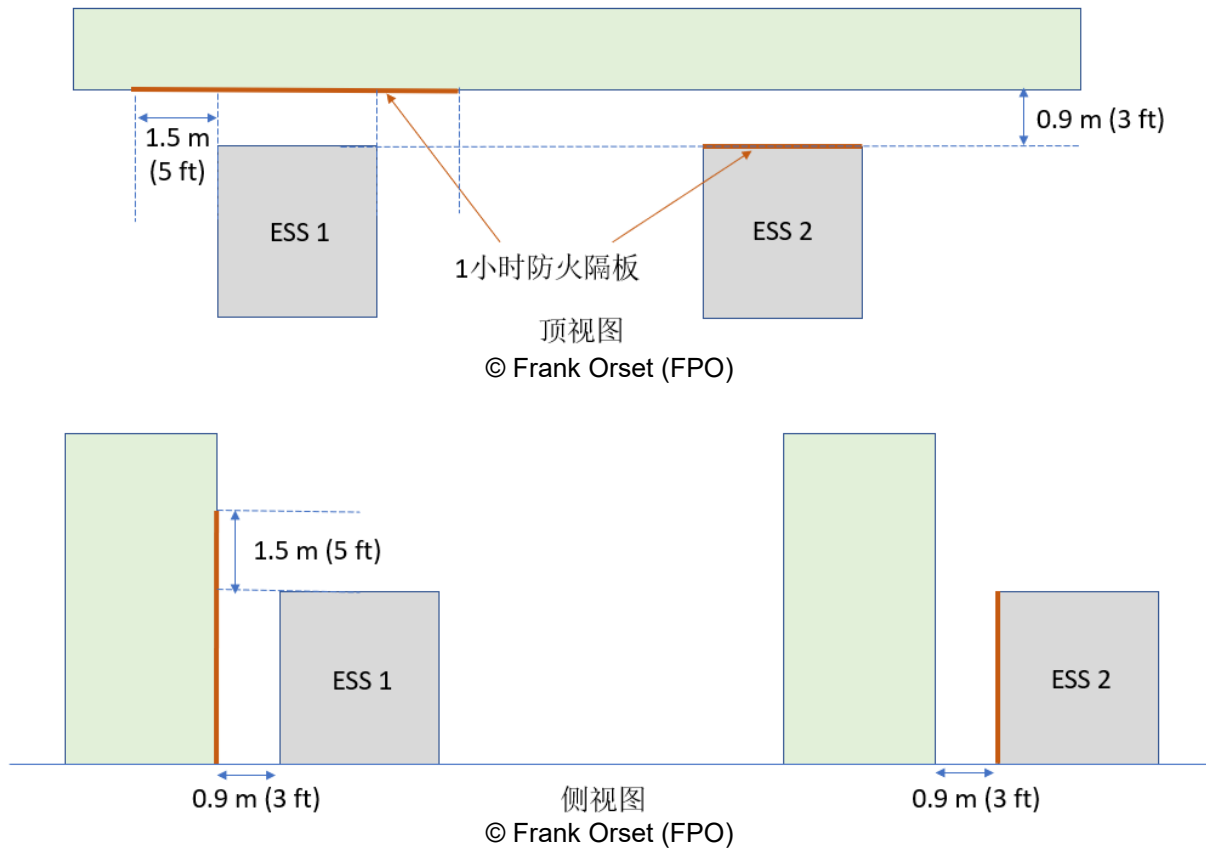


Fig. C.2.3 Typical rack configuration with multiple modules

3. 专用独立建筑 (或外墙) 的细节，未达到安全间距。必须有 1 小时防火墙，间距为 0.9 m (3 ft)。隔热墙应延伸超过 ESS 装置物理边界 1.5 m (5 ft) 以上，为暴露面提供保护。



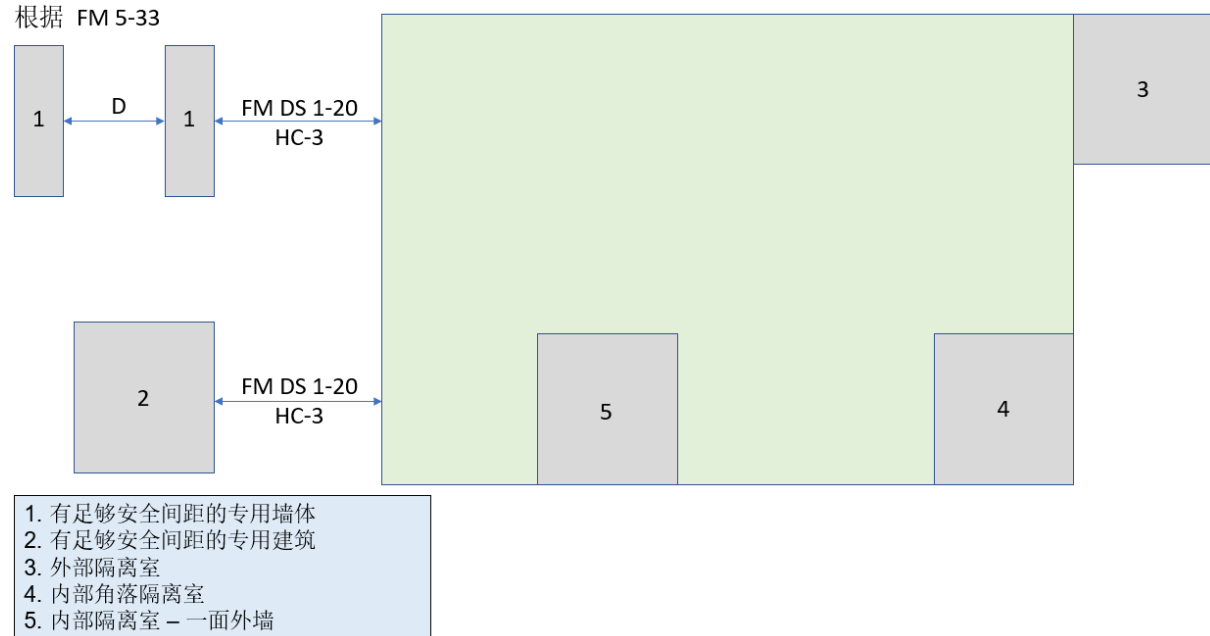
符合 FM Global 数据表 (DS) 5-33 “电力储能系统”的最严格要求：

室内 LiB-ESS 机柜与周围 LiB-ESS 机柜的接触表面、不可燃材料和不可燃建筑构件的间距至

少 1.8 m (6 ft)。

在间距方面，FM 对 NMC (镍锰钴锂) 和 LFP (磷酸铁锂) 做明确区分。

计算间距“D”时，基础考虑是机柜仅一侧有门，其他侧面都没有任何通风口或未做防护的开口。机柜或集装箱还配备了冷却系统 (暖通空调或液态冷却) 维持电池单元或模块的温度，如下所示 (摘自 FM DS 5-33 第 2.3.2 节，图 2.3.1)



© Franck Orset (FPO) DLS 修改后

对于不超过 46.5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) 的机柜 (即预制式集装箱)，FM 建议<sup>4</sup>：

- 对于使用磷酸铁锂 (LFP) 电池的 LiB-ESS 机柜，在有检修板、门或爆燃通风口的墙面提供至少 1.5 m (5 ft) 的间距。
- 对于使用镍锰钴锂 (NMC) 电池的 LiB-ESS 机柜，如果墙体结构未知或额定防火时间小于 1 小时，在有检修板、门或爆燃通风口的墙面提供至少 4.0 m (13 ft) 的间距。
- 对于有文件证明墙体结构的额定防火时间至少为 1 小时的 NMC LiB-ESS 机柜，至少 2.4 m (8 ft) 的间距是可以接受的。

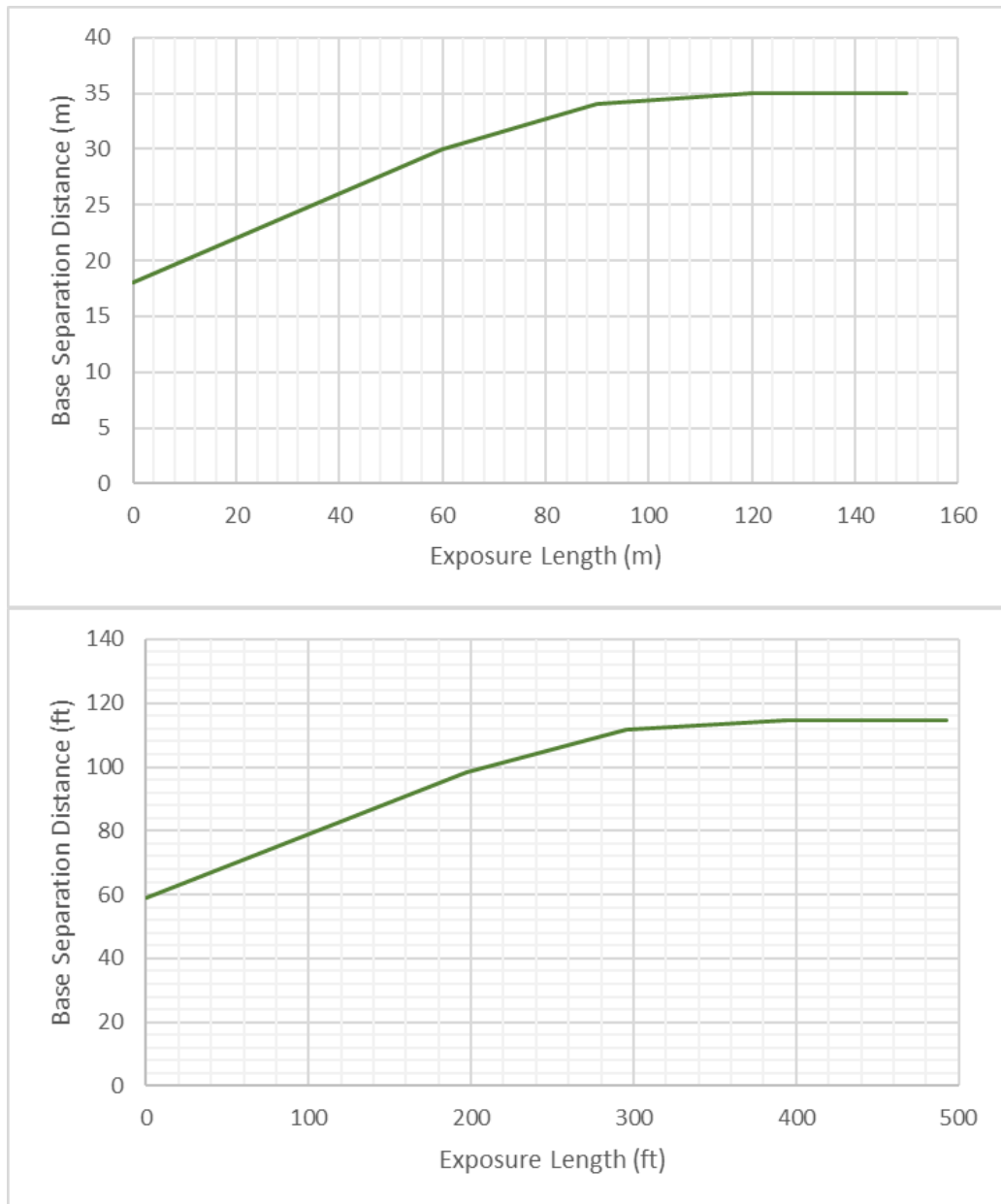
对于面积大于 46.5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) 的专用 LiB-ESS 建筑物或机柜，或面积不超过 46.5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) 的暴露建筑物，请参考 FMDS 1-20“外部火患暴露防护”，采用暴露建筑场所的危险类别 3 HC-3<sup>5</sup> 的间距要求，具体如下：

对于可燃结构，基于墙体面的暴露长度：

- 从 18 m (60 ft) 到 35 m (110 ft) (见以下基于 FM DS 1-20 图 1b 和图 1a HC-1/HC-2/HC-3 的曲线图)。

注 4：基于现有知识、研究和测试 (视为非结论性意见) 的保守措施，SCOR 建议在间距方面不区分 LFP (磷酸铁锂) 和 NMC (镍锰钴锂)。无论电池化学成分如何，只采用上述镍锰钴锂电池 (NMC) 的隔离方法。

注 5：FMDS 3-26 “非存放场所防火”将 HC-3 场所 (如表 2.2.2 所示) 定义为一般持续存在较多可燃物的区域，其中可能存放数量有限的可燃液态和/或较多塑料 (例如塑料制造、车辆制造和组装以及印刷厂)。



对于不可燃结构，不管墙体暴露面的长度：

- 12.5 m (40 ft) (基于 FMDS 1-20 图 2b 和图 2a HC-1/HC-2/HC-3 曲线图)

### 7.2 存放

- 电池室内不得存放与电池室无关的可燃物。
- 存放可燃物的区域和使用可燃建筑材料的周边的最小间距建议为 2.7 m (9 ft)。
- 与电池室有关的不可燃材料和不可燃建筑构件的最小间距应为 0.9 m (3 ft)。

### 7.3 车辆撞击保护

在 ESS/BESS 可能受到机动车撞击的区域，应提供车辆撞击防护，包括防护柱或其他经批准的方法。防护柱设计应如下所示：

- 防护柱由直径不小于 4 in. (100 mm) 的钢材制成。
- 防护柱用混凝土填充。
- 防护柱的间距不超过 1.2 m (4 ft)。
- 防护柱埋地深度不小于 0.9 m (3 ft) 并放置在直径不小于 380 mm (15 in.) 的混凝土基座上。

- 防护柱顶端离地面不小于 0.9 m (3 ft)。
- 防护柱与 ESS 的间距不小于 0.9 m (3 ft)。



太阳能发电厂中的 BESS

## 8. 电气设备

- 直流开关设备和逆变器不建议安装在电池室中。

## 9. 通风

对于包含使用富液式铅酸电池、富液式镍镉 (Ni-Cd) 电池和阀控式铅酸 (VRLA) 电池的 ESS/BESS 的隔离室，请参考直流电池系统中的“通风”小节。

*例外情况：锂离子电池和锂金属聚合物电池无需额外的通风设备，按照有人员使用的场所的通风需要处理即可。*

- FM 建议：为 LiB-ESS 防火隔离室提供通风，通风速率至少为地面面积的  $0.0051 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$  ( $0.3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  或  $1 \text{ cfm}/\text{ft}^2$ )。
- 提供使空气再循环进入室内的通风系统，并安装经 FM 认证的可燃气体检测器，能够在检测到可燃气体时使通风系统停止再循环，并恢复为全排气运行。注：作为电池管理系统的一部分，如果在每个 ESS 机柜上已安装可以关闭机柜的可燃气体检测装置，则无需在通风系统中安装可燃气体检测。

排气口：

- ESS 的非通风空气排气口与暖气、通风和空调 (HVAC) 进风口、窗户、门、装卸区、点火源以及建筑物和设施的其他开口至少 4.6 m (15 ft)。
- ESS 排气口不应对准逃生通道、人行道、行人或车辆行驶路线。

## 10. 火患检测和防火装置

### 检测:

- 电池室内应安装火患检测装置。
- 气体检测 (见上文“通风”)。

### 防护:

- 防火设计的重点在于电池装置, 通常指在机柜中垂直堆叠并紧密排列的电池模块单元。
- 这些系统通常由多个机柜组成, 因此主要消防目的是发生火患时, 能够将火势控制在一个机柜内。
- 如果火患能从一个机柜蔓延到另一个机柜, 火患则可能会持续相当长的时间, 可能使自动喷淋系统不起作用或供水耗尽。
- 对于包含使用富液式铅酸电池、富液式镍镉 (Ni-Cd) 电池和阀控式铅酸 (VRLA) 电池的 ESS/BESS 的防火隔离室, 请参考直流电池系统中的“火患检测和防火装置”小节。
- 迄今为止, 还没有公开的测试数据可以证实任何主动式消防措施能有效地保护锂离子电池储能系统。建议安装自动喷淋系统, 以抑制火势向周围建筑、设备和建筑物内部设施蔓延。
- 为了缓解这种风险, 任何 ESS/BESS 消防系统的目标之一都应该是通过安装自动喷淋系统和保持 ESS/BESS 电池组的间距, 将火势控制在起火的机柜中。
- 对于大多数 ESS/BESS 火患, 包括锂离子电池 ESS/BESS 火患, 水是一种有效的灭火剂。因此, 自动喷淋系统是首选固定防火方法 (如果设计得当)。(详情见附件第 1 节)。

### 符合 NFPA 855 “固定式储能系统安装标准”的最低要求:

- 测试表明, 对于电池 ESS, 水是最有效的冷却降温剂。因此, NFPA 855 要求按照 NFPA 13 “自动喷淋系统安装标准”设计自动喷淋系统。
- ESS 单元的最大储电量应为 50 kWh。
- ESS/BESS 室最好安装自动喷淋系统 (EH1) 进行保护, 保护范围为整个室内面积或 232 m<sup>2</sup> (2500 ft<sup>2</sup>), 以较小者为准。最小设计流量为 12.2 mm/min (0.3 gpm/ft<sup>2</sup>)。
- EH1 消防栓设计流量 (1 类特别危险) 为 500 gal/min (1,900 L/min)。
- EH1 消防供水时间 (1 类特别危险) 为 90-120 min。然而, 事实表明, 锂离子电池在损坏或发生火患后的很长时间内 (几小时、几天甚至几周后) 仍能点燃或复燃。因此, 关键在于制定充分的应急规划, 包括延长消防供水时间 (见附件中的应急预案和 FDC)。
- 使用消防水带: UL 研究“消防员安全和光伏装置研究项目” (2011) 指出, 对于不超过 1,000 伏的直流电压, 可在适当条件下安全地进行喷水。该研究演示了使用喷雾角度至少为 10 度的可调节喷嘴, 可在距离 1,000 伏直流电源 1.5 m (5 ft) 的区域安全地喷水; 然而, 由于积水具有潜在的导电性, 接触积水可能会使人触电。

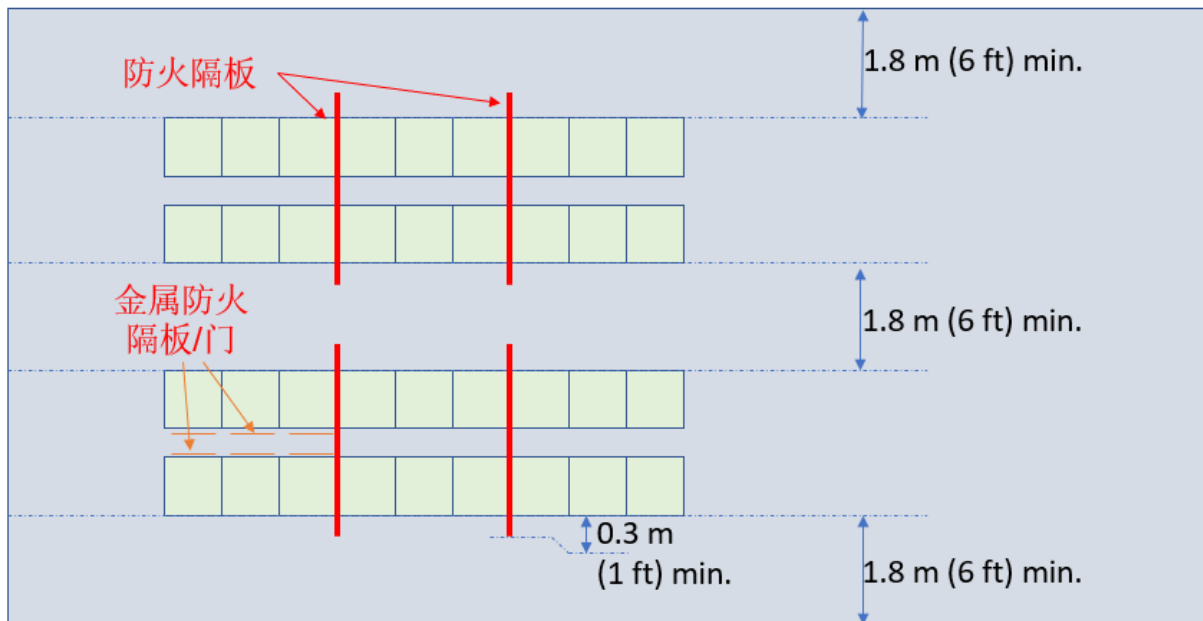
### 符合 FM Global 数据表 (DS) 5-33 “电力储能系统”的最严格要求:

- 根据 FM Global DS 5-33, 对使用锂镍氧化物/锂锰氧化物 (LNO/LMO) 电池的 125 kWh LiB-ESS 进行的测试指出, 火势蔓延最终超出了 2500 ft<sup>2</sup> 的设计覆盖面积。因此, 自动喷淋系统应根据房间面积进行设计。
- ESS/BESS 室最好安装自动喷淋系统 (EH1) 进行保护, 保护范围为整个室内面积或 232 m<sup>2</sup> (2500 ft<sup>2</sup>), 以较小者为准。最小设计流量为 12.2 mm/min (0.3 gpm/ft<sup>2</sup>)。
- 消防栓设计流量为 946 L/min (250 gal/min)。
- 消防供水时间 (DS 5-33): 供水系统应在火患持续期间内提供所需的自动喷淋系统和消防栓的用水量。预计供水时间取决于单个火患区域内的机柜数量。火患面积是所有没有保持至少 0.9 m (3 ft) 间距的一排或多排机柜。供水时间预计为 45 分钟乘以周围 LiB-ESS 机柜的数量。
- 排水: 应提供排水系统或其他缓解泄水措施。

如果自动喷淋保护区需要的供水量大于可使用的供水量，则应提供以下：

1. 在相邻机柜之间安装从地板到天花板的不可燃隔板并且在开口处安装经批准的防火挡板，以防止火势在机柜间或门蔓延。确保隔板从机柜面延伸至少 0.3 m (1 ft)。根据需保护的机柜数量和可用供水量提供保护。
2. 在每个机柜的背面 (非通道面) 安装一个坚固的金属隔板，以防止热量蔓延到下一排机柜。如果机柜设计采用实心金属背板 (无通风口)，则无需安装额外隔板。

请注意，在这种配置下，每机柜组与其他机柜组及存放室或区域与墙壁应保持至少 1.8 m (6 ft) 的间距 (FM Global 设计)。



安装防火隔板来减少火患风险面积  
© Franck Orset (FPO)

#### 其他防护：

- 如果需要减少设备损坏和非热损坏，可提供洁净气体灭火系统作为补充保护。
- 不建议在 ESS/BESS 应用中单使用气体灭火系统，原因如下：
  - 相关隐患风险的功效：截至 2019 年，没有证据表明气体灭火装置可有效扑灭或控制涉及储能系统的火患。
  - 气体灭火系统可减缓或中断火患中的化学反应，但只能持续一段时间。持续时间一般为十分钟，这并不足以完全扑灭 ESS/BESS 火患或防止热失控蔓延到邻近模块或机柜。
  - 冷却降温：FM Global 研究表明，冷却周围环境是保护结构或周围区域的关键因素，因为目前还没有办法用自动喷淋系统扑灭 ESS 火患。气体灭火系统无法为 ESS 或周围区域提供冷却降温。
  - 有限释放：FM Global 研究表明，ESS/BESS 火患可能会在火患被认为已经熄灭的数小时后重新燃烧。气体灭火系统只能释放一次，随后的复燃无法得到保护。
- 无论如何，全淹没型气体灭火系统的设计应能使外墙内的设计浓度保持足够长的时间，以确保火焰已熄灭、ESS/BESS 温度已冷却到低于机柜内可燃物质的自燃温度和可能导致热失控的温度 (至少 10 分钟)。
- 系统设计应考虑以下要素：
  - 特定可燃材料所需的灭火剂浓度。
  - 设备和外墙的具体配置。
- 不建议使用水雾或干粉系统保护电池室。

## 11. 溢漏控制

对于使用自由流动液态电解质的 ESS/BESS (如锂离子湿电池系统) 的区域, 请参考直流电池系统中的“溢漏控制”小节。

## 12. 消防部门

如上述有关消防的章节所述, FM Global 的研究表明, 冷却周围环境是保护结构或周围区域的关键因素, 因为目前还没有办法用自动喷淋系统来扑灭涉及锂离子电池的 ESS/BESS 火患。因此, 所有自动喷淋系统的目的都是控制火势, 以抑制火势向周围建筑、设备和建筑物内部设施蔓延。

因此, 火患持续时间可能远远超过自动喷淋系统的消防供水时间。

基于上述原因, 从理论上讲, 火患最终的熄灭是由消防员通过消防水泵接合器 (“FDC”-见附件) 持续向固定消防系统供水和使用手动灭火方法控制达到的。

第一和第二响应的消防人员负有重大责任, 必须确保滞留电量的危险得到妥善处理, 并且在火患结束后安全与妥善地处理电池如何减轻滞留电量的危险和安全处理电池的最有效方法仍不清楚。

消防员不得不面对“滞留电量”问题。滞留电量是指电能滞留在电池中没有得到任何有效方法将其消除的情况。当电池因外力、冷却剂泄漏、高温或进水而损坏, 停止正常工作时, 通常会出现这种情况。这还可能导致热失控。

应与消防队协调应急计划或防火预案, 形成正式文件, 包括平面图。消防员应熟悉相关设施和消防系统。(详情见附件: “滞留电量”)。

应提供消防水泵接合器 (FDC), 为消防员提供连接消防水带和为自动喷淋系统持续补水。(详情见附件: “消防水泵接合器” (FDC) )。

灭火剂注意事项:

- **对于锂离子电池**, 水是扑灭锂离子电池火患的首选灭火剂。水具有出色的冷却降温能力, (在许多地区) 储量充足, 容易输送到火患现场。虽然水可能是首选灭火剂, 但模块/机柜的布置可能会使水难以渗入, 无法有效冷却火源。但水仍然可有效控制火情。在高压系统中使用水来灭火也被认为是安全的。根据消防研究基金会的报告“涉及电动汽车电池危险事故的最佳应急措施: 全面测试结果报告”中公布的测试数据, 电流传导回消防水枪和消防员导致触电的可能性微乎其微。消防泡沫被认为对这些化学物质无效, 因为缺乏足够的冷却降温能力, 而且会导电。还有一些数据表明, 消防泡沫实际上可能会阻隔燃烧材料温度的消散, 加剧热量上升, 促进热失控的产生。  
使用干化学粉末灭火可以扑灭可见火焰。然而, 这种粉末不能冷却燃烧的电池组件。通常情况下, 即使扑灭可见火焰, 电池内部的热失控也会继续, 导致复燃。二氧化碳和惰性气体抑制剂也能扑灭可见火焰, 但可能无法提供足够的冷却来中断热失控现象。对于装有洁净气体灭火系统的 ESS, 通风系统与火患检测和控制面板联锁, 使暖通空调系统包括阀门关闭, 确保灭火剂在设计的浓度水平下有足够的持续时间, 实现有效灭火。在某些洁净气体灭火系统中, 暖通空调系统不会关闭, 而是循环工作, 提供一种分布洁净气体的方法。救援人员必须确保在进入电池室/集装箱之前已经保持了足够的系统灭火持续时间。应明确说明制造商建议的灭火持续时间。这些灭火剂还可以通过抑制氧气浓度来降低物质燃烧的速度, 但数据显示, 由于持续的加热, 可燃气体将继续释出, 当氧气重新进入保护空间时, 会形成容易发生闪爆或再燃的环境。
- **对于铅酸、镍镉和其他水性电池技术**, 水、粉末、惰性气体和二氧化碳都被认为是可接受的灭火剂, 可用于扑灭涉及这些电池的小火患。但是, 如果火势很大, 水是首选的灭火剂, 因为水便于取用和携带, 而且冷却降温效果也很好。

注意:

电池组件通常装在可以保护组件的机柜或其他装置中，进而限制了水流渗透能力。消防员不能使用穿透式高压消防水枪和消防铁铤。电池受机械损坏，或刺穿未燃烧或未损坏的电池，都可能会导致电池立即燃烧。此外，机柜内部短路可能会造成触电危险。

如果电池模组中的电池将活性材料或电池单元留在模块中，移动损坏的电池可能会导致电弧或复燃。在未咨询专业人员的情况下，不应移动模块。

灭火期间的通风至关重要。研究表明，锂离子电池在火患扑救期间和之后都可能继续释出易燃气体。此外，测试表明，在喷淋灭火期间，清除电池释放的燃烧和易燃气体可显著提高灭火效果。

测试指出，如果使用适当的水流并保持一定距离，通过消防水带水流传导的电流不会造成触电危险。如果系统已彻底损毁，在电势极低的情况下，可使用消防水带近距离向模块喷水，提供更直接的冷却降温。

在火患后的持续行动中，所有靠近损坏 **ESS** 的救援人员都应继续佩戴自给式呼吸器 (**SCBA**)，特别是系统位于密闭或通风不良的区域内或未得到充分冷却降温时。在此期间应监测气体 (特别是一氧化碳)，因为在火患后的测试中观察到这些气体可能会危险积聚。如有可能，应监测电池的余热和温度，因为未充分冷却降温的电池可能会复燃。

应确保电池所在区域的安全，并确保热量已消除，并且电池没有电气短路或机械损坏的风险。这些工作应在合格技术人员的指导下进行。

此时，火患现场应移交给业主、经营者或场地拥有者指定的责任方。

在起火燃烧的系统对周围的设备或环境几乎不构成风险的特殊情况中，采取防守战术，让系统燃烧净尽合理的处理方案。

然而，只有在对环境不构成风险，并且消防救援工作风险很大或未知时，才应考虑这一方案。

## 4 技术参考

### 1. 美国消防协会

- NFPA 13 - 自动喷淋系统安装标准
- NFPA 850 - 发电厂和高压直流变电站的推荐防火规范
- NFPA 855 - 固定式储能系统安装标准
- NFPA 研究基金会：
- 锂离子储能系统自动喷淋系统指南：<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Suppression/RFESSSprinklerProtection.pdf>
- 储能系统研究与设计挑战：<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Proceedings/RFESSResearchDesignChallenge.ashx>

### 2. FM 财产防损数据表

- FM Global 数据表 5-28 - 直流电池系统
- FM Global 数据表 5-33 - 锂离子电池储能系统
- FM Global 数据表 1-20 - 室外防火保护
- FM Global 数据表 1-21 - 建筑组件的耐火性
- FM Global 数据表 3-26 - 非存放场所防火

### 3. 其他

- <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc15-59.pdf>
- <https://www.smart-energy.com/storage/aps-completes-investigation-following-2019-battery-storage-fire-disaster/>
- 详情见 FDNY 资料：<https://drive.google.com/drive/folders/1zG1se9zzFwIPk-0QS0R8lffjtjY4UdT>
- 详情见国际消防长官协会资料：[建议消防部门对储能系统 \(ESS\) 采取的应对措施第 1 部分 \(iafc.org\) 或https://www.iafc.org/docs/default-source/1fire-prev/iafcresponseessfires.pdf](https://www.iafc.org/docs/default-source/1fire-prev/iafcresponseessfires.pdf)

## 5 附件

### 1. 为什么要为锂离子聚合物电池 (干电池) 提供自动喷淋保护?

请注意, 尽管锂离子电池 ESS 越来越受欢迎, 但涉及一些特定的额外危险。

当锂离子电池受到外部热源或内部短路带来的大量热量时, 可能会变得不稳定, 内部材料可能会发生不可控的反应, 进而引发热失控现象。

这一现象往往会导致热气喷出, 电池单元起火。在模块和电池系统设计中, 如果单个电池单元热失控在电池单元之间的蔓延无法得到控制, 情况会变得极其糟糕。

扑灭锂离子电池 ESS 火患的一个主要难题是: 如何将储能系统冷却降温到低于 ESS 在热失控事件中可能释放的易燃气体的自燃温度。

FM Global 制作了一个关于锂离子储能系统自动喷淋系统的有趣视频, 可在以下网址观看:

<https://www.youtube.com/watch?v=aspF-GFOqHo>

迄今为止, 还没有公开的测试数据可以证实任何主动式消防措施能有效地保护锂离子电池储能系统 (ESS)。

然而, 建议采用自动喷淋系统, 以抑制火势向周围建筑、设备和建筑物内部设施蔓延。

建议在整个房间内或 232 m<sup>2</sup> – 2500 ft<sup>2</sup> (以较小者为准) 的范围内安装设计密度为 12.2 mm/min (0.3 gpm/ft<sup>2</sup>) 的自动喷淋系统, 作为储能系统 (ESS) 的保护系统。

这个设计密度是根据现有研究、测试以及对这种危险的抑制系统性能的了解推断出来的。

允许使用测试表明有效的其他灭火方法, 但关于使用此类灭火方法控制 ESS 火患的可用信息或测试数据很少。

### 2. 滞留的电量

对于电动汽车 (EV), 如果汽车的锂离子电池在碰撞中损坏, 至今没有万无一失的方法可以去掉电池中的电量, 不像汽油可以从汽车油箱中排放。因此, 电量滞留在电池内部, 可能会发生一种被称为“热失控”的现象。在这种情况下, 电池会持续过热和过压, 最终可能导致起火、弧闪、放气, 有时甚至爆炸。

电池由十几个独立模块组成, 每个模块包含数百个电池单元。所有这些组件整齐地封装在一个长方形金属外壳中, 贯穿乘客座位下方的整个底盘。

目前, 救援人员无法确定损坏电池的滞留电量, 也无法耗尽这些电量来减少威胁。电池行业正在努力改进防护措施, 使热失控和滞留电量不再是问题。

用水冷却热失控中的损坏电池是目前救援人员的主要策略, 也是 NFPA 电动汽车和电池救援课程中教授的战术。根据消防研究基金会 (FPRF) 要求进行的火患测试, NFPA 建议消防员直接向电池外壳区域喷洒“大量的水”, 并使用热成像仪定期检查电池内部持续进行的化学反应所产生的热量。然而, 由于电动汽车电池通常安装在汽车底盘和乘客座位之间, 消防员很难或根本不可能直接向电池灌水。

阻止热失控的另一个潜在方法是耗尽电池中引发反应的电量, 但说起来容易做起来难。

很多制造商使用的典型断电方法是将受影响的电池浸泡入盐水中数天, 直到气泡停止 (表明电池内部的化学反应已停止)。但是, 这种方法对于高速公路上的紧急救援人员来说似乎不太理想, 由于缺乏移除损坏电池的技术知识, 也缺乏经过试验和测试的方法, 他们不得不发挥创意。

在荷兰, 消防人员使用拖车将大型集装箱运到电动汽车 (电池损坏) 事故现场使用。工作人员用小型起重机将车辆吊入装满水的集装箱中, 然后将车辆安全地送往处理场所。这种策略在欧洲在越来越普遍, 很多消防部门为了处理火车脱轨事故, 已经将云梯车改装成了小型起重机。

另请参阅 <https://www.nfpa.org/batteredbatteries>

### 3. 应急计划或防火预案

防火预案应包括以下信息:

- 由自动喷淋系统保护的建筑物和场所性质、保护范围以及所使用的自动喷淋系统类型 (干式、湿式、预作用式、全喷式.....)。
- 自动喷淋系统的供水, 包括供水来源和类型、可用的流量和压力, 以及预计供水时间。
- 所有自动喷淋系统控制阀的位置, 以及每个阀门的控制范围。
- 自动喷淋系统的消防水泵接合器 (FDC) 位置、每个接合器控制的具体区域, 以及给 FDC 供水的水源、消防水带和消防泵的布局。
- 负责为 FDC 连接供水的具体公司安排。
- 小口径水带的供水位置 (如有), 但这不能影响自动喷淋系统的正常供水。
- 在消防水泵接合器损坏时向系统供水的替代方式 (例如使用同一供水系统的私有消防栓)。

对于装有自动喷淋系统的建筑物, 防火预案应详细说明将由哪家消防队负责为 FDC 供水。通常的做法是由第二反应的消防队为喷淋系统供水。

在某些情况下, 例如出入门较少的大型建筑物, 或使用内部消防水带接口的建筑物, 合理的做法是由第一消防队为 FDC 供水。

如有可能, 消防部门为 FDC 供水的水源应独立于通常为自动喷淋系统供水的水源。不建议使用私有消防栓为 FDC 供水 (除非别无选择)。

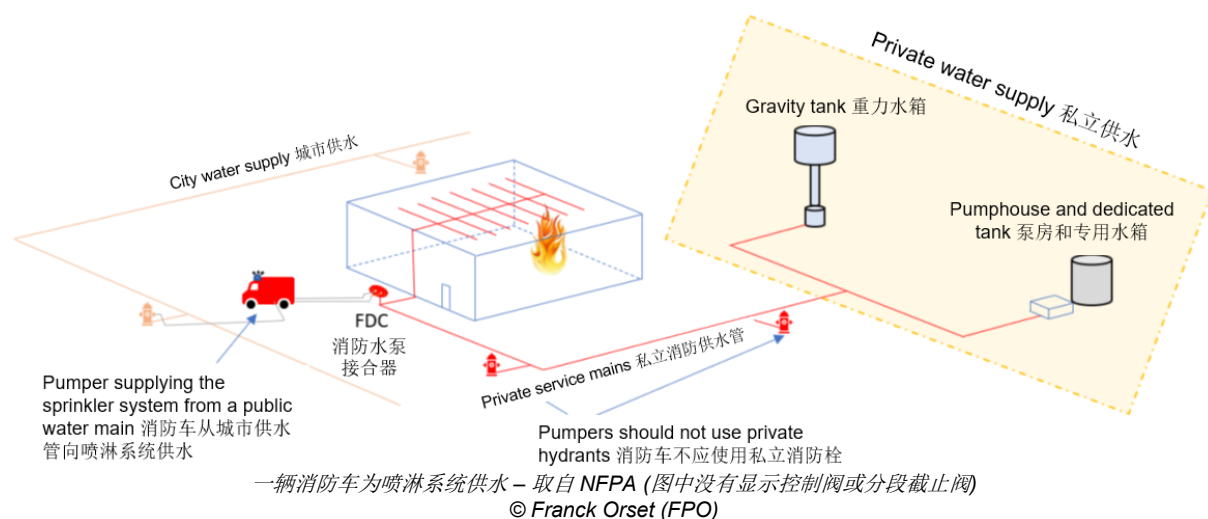
如果有公共水源, 公共消防栓应位于距离 FDC 15 to 22.5 m (50 to 75 ft) 的范围内。

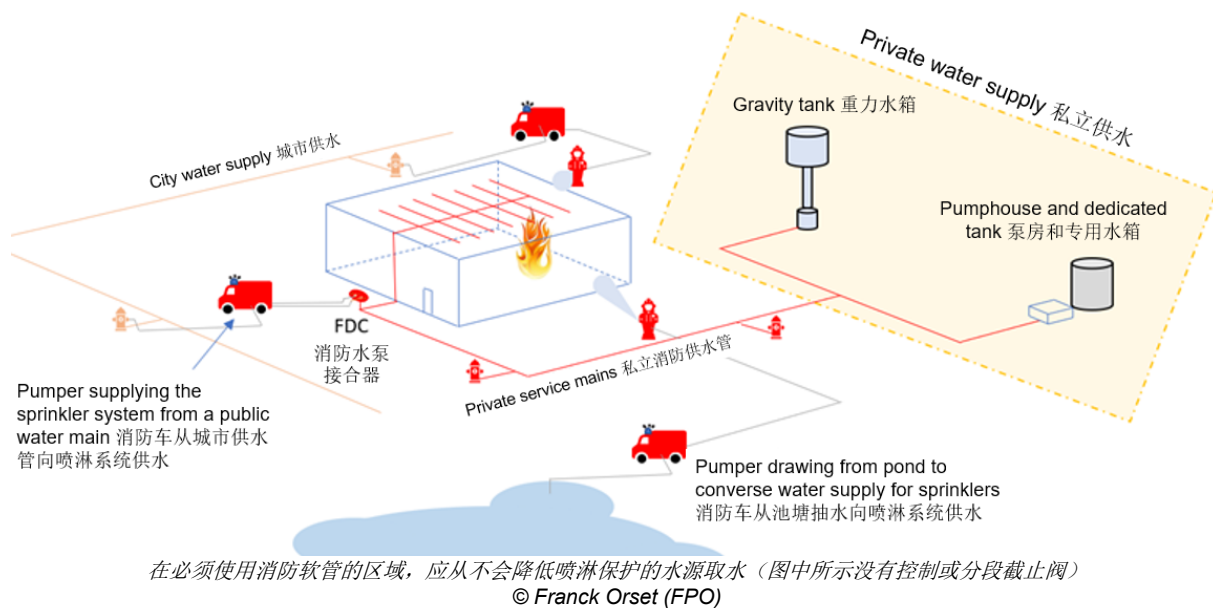
为消防供水的水源应从别于喷淋系统中取得 (除非别无选择, 并且考虑供水特性 (流量/压力/持续时间) 能同时满足这两种系统的设计需求)。

如果可能, 这些供水应为:

- 确定管道的流量经测试足以为自动喷淋系统和所需用的消防水带同时供水
- 不是为自动喷淋系统供水的供水管道
- 静态水源 (池塘, 江河.....)

如果必须使用消防水带, 应从不会影响自动喷淋系统的水源取水。





## 4. 消防水泵接合器 (FDC)

### 消防水泵接合器 (FDC) 标准

- 消防水泵接合器 (FDC) 或竖管水泵接合器可安装在泵房，也可直接安装在自动喷淋系统立管处。



知识共享许可协议 - 相同方式共享 2.0 通用 (CC BY-SA 2.0)

- FDC 为消防员提供连接消防水带以补助自动喷淋系统的在地供水。
- 请注意，FDC 并非用于输送特定流量的水。消防水泵接合器用于补充消防供水，但不一定满足整个自动喷淋系统的需求。
- FDC 必须妥善维护，以便在紧急情况下能够使用。
- 请注意，消防水泵接合器上不应安装隔离阀。
- FDC 包括：
  - 2 个带内螺纹接头 (消防部门连接消防水带，给系统供水) 的消防水带，也被称为“水泵接合器”。接合器的接口使用塑料或易打碎的护盖或螺纹盖保护。
  - 止回阀 (防止自动喷淋系统中的水倒流，避免从系统中取水 - 这样可以保持下游压力，避免 FDC 处漏水)。



知识共享许可协议 Jclemens 假定 (基于版权要求), CC BY-SA 4.0



知识共享许可协议 - 相同方式共享 3.0 未分类许可



知识共享许可协议 2.0 通用 (CC BY 2.0)

### 应定期维护 FDC:

- 应每月检查一次, 检查设备的可用性和状态 (保护盖在位、螺纹无损坏、止回阀无泄漏、球形滴漏器和排水器工作正常.....)。
- 在更换任何缺失/损坏的保护盖之前, 应确保水管中没有异物。

### FDC 最常见的问题包括:

- 阻碍:  
异物 (通常是垃圾) 通过未封盖的管口进入。  
发生火患时, 异物会被消防车增压的水流推进自动喷淋系统管道, 直至到达直径较小的喷淋支管或喷淋头, 阻碍水流进入火患区域。  
在一些情况下, 应对接合器进行反冲洗, 以清除异物。
- 可达性:  
FDC 的位置应清晰可见和容易达到。  
应修剪遮挡灌木丛。  
不允许在周围存放任何物品。  
应移走旁边的车辆和垃圾箱。应严格禁止在 FDC 附近停车。
- 冻霜结冰情况:  
如果 FDC 止回阀泄漏, 止回阀和接合器接口之间的水管可能会充满水并彻底冻结。为防止出现这种情况, 应定期检查接口和自动滴水装置是否有滴水。
- 锈蚀:  
FDC 干燥的管道可能会锈蚀, 导致水管从自动喷淋系统上脱落。  
应目测检查自动喷淋系统的水管。

## 5. 建筑组件的耐火性

请参考 FM 数据表 1-21 建筑组件的耐火性。

测试程序为 ASTM E 119 (NFPA 251, UL 263)。

1 小时耐火等级示例：

- 砌体墙混凝土 (膨胀矿渣或浮石骨料) - 最小厚度 53 mm (2.1 in.)
- 蒸压加气混凝土 (AAC 由波特兰水泥制成) 通常称为空心混凝土砌块 (HCB)：厚度不小于 75 mm (2.9 inches)，用于要求耐火时间小于 2 小时的非承重墙。
- 混凝土砌块 (CMU)：混凝土块，可以是空心的 (通常称为空心混凝土块 - HCB)，也可以是实心的，用于砌筑结构。空心 CMU 的内芯或内格通常用水泥灌浆填实 (如果建造多层 CMU)，以获得足够的防火等级：最小厚度 102 mm (4 in.)
- 混凝土墙的最小厚度取决于材料 (\*)：硅质 89 mm (3.5 in.)，钙质 81 mm (3.2 in.)，轻质 69 mm (2.7 in.)
- 实心非承重隔墙的最小厚度取决于材料：珍珠岩石膏 38 mm (1½ in.)，实心石膏砌块 51 mm (2 in.)

(\*) 碳酸钙 (或碳酸盐) 骨料：基于碳酸钙或碳酸镁的石料，如大理石、泥灰岩、石灰石或白云石制成的骨料。

*轻质混凝土*：重量密度约为 16-18 kN/m<sup>3</sup> (105-115 Lbs/ft<sup>3</sup>) 的混凝土。轻质混凝土每单位厚度的耐火性能通常优于普通混凝土。

*硅质骨料*：硅质岩 (如花岗岩、玄武岩、燧石或火石) 骨料。使用硅质骨料制成的混凝土和混凝土砌体的耐火等级通常在普通骨料中最低。如果骨料未知或无法核实，为达到耐火目的，应假定为硅质骨料。

## 6. BESS 故障事件数据库

有关 BESS 故障事件列表，请参考公共信息源：

[https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS\\_Failure\\_Event\\_Database](https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database)

本系列其他出版物：

- 风险控制实践：建筑材料
- 风险控制实践：暴露风险
  - 坠机应急手册
- 风险控制实践：特殊危险
  - 堤坝手册
  - 尾矿与尾矿管理设施手册
- 风险控制实践：使用类别
  - 可再生能源手册
  - 铝工业手册
  - 钢工业手册
  - 木材加工制浆及造纸手册
- 风险控制实践：损失估算
  - 最大可能损失 (MPL) 手册

如需了解有关 SCOR 策略、目标、承诺和市场的更多信息，请登录我们的网站。

[www.scor.com](http://www.scor.com)

通过社交媒体关注我们



Certified with **wiztrust** 

自 2024 年 1 月 1 日起，SCOR 集团发布的所有内容均通过 Wiztrust 认证。您可以在以下网站查看相关内容的真实性：[wiztrust.com](http://wiztrust.com)

**SCOR**  
The Art & Science of Risk

