

储能锂离子电池系统关键技术专刊



锂离子电池储能安全评价研究进展

李晋<sup>1,7,10</sup>, 王青松<sup>2</sup>, 孔得朋<sup>3</sup>, 王晓冬<sup>4</sup>, 俞振华<sup>5</sup>, 乐艳飞<sup>6</sup>, 黄鑫炎<sup>8</sup>, 胡振恺<sup>9</sup>, 吴候福<sup>11</sup>,  
方华斌<sup>12</sup>, 曹伟<sup>13</sup>, 张少禹<sup>1,7,10</sup>, 卓萍<sup>1,7,10</sup>, 陈晔<sup>1,7,10</sup>, 李紫婷<sup>1,7,10</sup>, 梅文昕<sup>2</sup>,  
张越<sup>3</sup>, 赵丽香<sup>4</sup>, 唐亮<sup>5</sup>, 黄宗侯<sup>2</sup>, 陈簏<sup>6</sup>, 刘彦辉<sup>8</sup>, 储玉喜<sup>1,7,10</sup>, 许晓元<sup>1,7,10</sup>,  
张晋<sup>1,7,10</sup>, 李贻恺<sup>9</sup>, 冯蓉<sup>11</sup>, 杨标<sup>12</sup>, 卢波<sup>13</sup>, 杨晓滢<sup>1,7,10</sup>

(<sup>1</sup>应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; <sup>2</sup>中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; <sup>3</sup>中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555; <sup>4</sup>中国电子技术标准化研究院, 北京 100171; <sup>5</sup>中关村储能产业技术联盟, 北京 102629; <sup>6</sup>苏州UL美华认证有限公司, 江苏 苏州 215000; <sup>7</sup>工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室, 天津 300381; <sup>8</sup>香港理工大学消防安全工程研究中心, 香港 九龙 999077; <sup>9</sup>南方电网调峰调频发电有限公司储能科研院, 广东 广州 510630; <sup>10</sup>天津市消防安全技术重点实验室, 天津 300381; <sup>11</sup>广州鹏辉能源科技股份有限公司, 广州 广东 511400; <sup>12</sup>北京卫蓝新能源科技有限公司, 北京 102600; <sup>13</sup>阳光储能技术有限公司, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 本文针对目前锂离子电池储能安全评价研究进展进行了综述, 梳理了锂离子电池储能安全评价相关标准现状, 从电池本征安全、储能故障及事故统计、热失控机理及火蔓延机制等方面总结了锂离子电池储能安全评价相关理论的研究进展, 分析了从锂离子电池单体到储能系统的安全评价数值模拟技术, 系统介绍了电池单体到储能系统的安全测试评价技术以及锂离子电池储能电站安全评价技术的现状。研究表明, 随着电池技术的不断迭代, 储能系统结构的不断升级, 储能的安全评价将愈发复杂, 现有的评价技术和标准有待进一步提升和完善。未来, 需要根据储能电池本质安全、电气与消防安全等技术的发展及时调整与更新安全评价指标, 结合仿真、实验手段的进步, 明确安全指标阈值, 并充分考虑储能系统投运后容量衰减、老化过程伴随的安全性能演变, 构建覆盖多体系、多场景、多要素, 融合动静态指标的安全性能等级评价体系, 发展涵盖“单体-模组-簇-系统-电站”层层分级的储能系统安全性能等级评价技术。同时, 制定国际适用的储能系统安全性能等级评价标准, 为全球储能安全提供中国方案。

**关键词:** 锂离子电池; 储能; 安全评价技术; 储能安全标准

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0252

中图分类号: O 646.21

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 07-2282-20

收稿日期: 2023-04-25; 修改稿日期: 2023-06-05。

基金项目: 国际锂离子电池储能安全评价关键技术合作研发(2022YFE0207400)。

第一作者及通讯联系人: 李晋(1966—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事危险化学品火灾、建筑防火、消防标准化和消防安全评估工作, E-mail: lijn@tfri.com.cn; 共同第一作者: 卓萍, 副研究员, 主要从事电池安全及标准化研究, E-mail: zhuoping@tfri.com.cn; 王青松, 研究员, 主要从事锂离子电池火灾安全领域相关研究, E-mail: pinew@ustc.edu.cn; 孔得朋, 教授, 主要从事油气及新能源安全相关研究, E-mail: kongdepeng@upc.edu.cn; 王晓冬, 高级工程师, 主要从事锂电池及电子产品标准化研究, E-mail: wangxd@cesi.cn; 唐亮, 工程师, 主要研究方向为储能安全与标准, E-mail: liang.tang@cnesa.org。

引用本文: 李晋, 王青松, 孔得朋, 等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2282-2301.

Citation: LI Jin, WANG Qingsong, KONG Depeng, et al. Research progress on the safety assessment of lithium-ion battery energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2282-2301.

## Research progress on the safety assessment of lithium-ion battery energy storage

LI Jin<sup>1, 7, 10</sup>, WANG Qingsong<sup>2</sup>, KONG Depeng<sup>3</sup>, WANG Xiaodong<sup>4</sup>, YU Zhenhua<sup>5</sup>, LE Yanfei<sup>6</sup>, HUANG Xinyan<sup>8</sup>, HU Zhenkai<sup>9</sup>, WU Houfu<sup>11</sup>, FANG Huabin<sup>12</sup>, Caowei<sup>13</sup>, ZHANG Shaoyu<sup>1, 7, 10</sup>, ZHUO Ping<sup>1, 7, 10</sup>, CHEN Ye<sup>1, 7, 10</sup>, LI Ziting<sup>1, 7, 10</sup>, MEI Wenxin<sup>2</sup>, ZHANG Yue<sup>3</sup>, ZHAO Lixiang<sup>4</sup>, TANG Liang<sup>5</sup>, HUANG Zonghou<sup>2</sup>, CHEN Chi<sup>6</sup>, LIU Yanhu<sup>8</sup>, CHU Yuxi<sup>1, 7, 10</sup>, XU Xiaoyuan<sup>1, 7, 10</sup>, ZHANG Jin<sup>1, 7, 10</sup>, LI Yikai<sup>9</sup>, FENG Rong<sup>11</sup>, YANG Biao<sup>12</sup>, HU Bo<sup>13</sup>, YANG Xiaoying<sup>1, 7, 10</sup>

(<sup>1</sup>Tianjin Fire Research Institute of Emergency Management Department, Tianjin 300381, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; <sup>3</sup>China University of Petroleum(East China), Qingdao 266555, Shandong, China; <sup>4</sup>China Electronics Standardizations Institute, Beijing 100171, China; <sup>5</sup>China Energy Storage Alliance, Beijing 102629, China; <sup>6</sup>UL-CCIC Company Limited, Suzhou 215000, Jiangsu, China; <sup>7</sup>Key Laboratory of Fire Protection Technology for Industry and Public Building, Ministry of Emergency Management, Tianjin 300381, China; <sup>8</sup>Research Centre for Fire Safety Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon 999077, Hong Kong, China; <sup>9</sup>Power Storage Research Institute, Guangzhou 510630, Guangdong, China; <sup>10</sup>Tianjin Key Laboratory of Fire Safety Technology, Tianjin 300381, China; <sup>11</sup>Guangzhou Great Power Energy & Technology Company Limited, Guangzhou 511400, Guangdong, China; <sup>12</sup>Beijing Weilan New Energy Technology Company Limited, Beijing 102600, China; <sup>13</sup>Sungrow Energy Storage Technology Company Limited, Hefei 230601, Anhui, China)

**Abstract:** In this study, research progress on safety assessment technologies of lithium-ion battery energy storage is reviewed. The status of standards related to the safety assessment of lithium-ion battery energy storage is elucidated, and research progress on safety assessment theories of lithium-ion battery energy storage is summarized in terms of battery intrinsic safety, energy storage failure and accident statistics, thermal runaway mechanism, and fire spread mechanism. Numerical simulations and safety assessment technologies from lithium-ion battery cells to energy storage systems are analyzed, and the current situation of the safety assessment technology of energy storage power stations is introduced. The results indicate that, with the continuous iteration of battery technology and the continuous upgrading of energy storage system structures, the safety assessment of energy storage becomes more and more complex; thus, existing assessment techniques and standards must be further improved. In the future, safety assessment indexes must be adjusted and updated according to the development of energy storage battery intrinsic safety and electrical and fire safety technologies. By combining the progress of simulation and experimental means, safety index thresholds are clarified, as well as the evolution of safety performance accompanying capacity decay and aging after the energy storage system is put into operation. This study aims to build a safety performance level assessment system covering multiple systems, scenarios, and elements; integrate dynamic and static indicators; and develop a safety performance rating assessment technology for energy storage systems that covers "cell-module-unit-system-power plant" layers. Finally, we aim to develop an internationally applicable safety performance assessment standard for energy storage systems and provide Chinese solutions for global energy storage safety.

**Keywords:** lithium-ion batteries; energy storage; safety assessment technology; energy storage safety standards

随着“双碳”目标推进，大力发展新能源、优化能源结构、实现清洁低碳发展成为全球共识。储能能够促进新能源消纳，提高电力系统灵活性，支撑新型电力系统安全稳定运行，已成为构建新型电力系统的关键技术之一<sup>[1-6]</sup>。近年来，尽管面临国际竞争、疫情等不利因素，但是储能产业仍保持高速发展态势。根据中关村储能产业技术联盟(CNESA)全球储能数据库的不完全统计，2022年，国内新增投运新型储能项目装机规模达7.3 GW/15.9 GWh，功率规模首次突破7 GW，能量规模首次突破15 GWh，与2021年同期相比，增长率均超过

200%。单个项目规模与以往相比大幅提升，百兆瓦级项目成为常态。

然而在储能产业高速发展的同时，储能的安全建设和运行压力也在不断增加。根据CNESA不完全统计，从2011年起全球累计发生储能安全事故70多起。即便在经历十多年发展后，2022年全球储能安全事故仍发生17起(表1)，国外还发生数起户用储能事故。除1起事故项目是铅蓄电池之外，均为锂离子电池。随着储能装机容量快速增加，储能安全隐患也在不断增加，安全已成为制约锂离子电池储能产业进一步发展的瓶颈。

表1 2021—2022年全球储能事故  
Table 1 Global energy storage accidents in 2021 and 2022

序号	项目名称	电池类型	电站状态	事故时间
1	京港澳高速武汉江夏区附近货车运输中的储能系统	磷酸铁锂	运输中	2022-01
2	韩国蔚山SK工厂储能项目	三元	投运2年	2022-01
3	韩国庆尚北道军威郡新谷里太阳能发电厂储能项目	三元	投运3年	2022-01
4	中国江西上饶黄金埠某储能项目	磷酸铁锂	调试	2022-02
5	美国加州蒙特雷县Moss Landing储能项目	三元	投运1年	2022-02
6	中国台湾工研院龙井储能项目	三元	投运2年	2022-03
7	美国亚利桑那Chandler电池储能项目	三元	投运3年	2022-04
8	美国加州Valley Center储能项目	三元	投运0.2年	2022-04
9	法国科西嘉岛某光伏电站储能集装箱		投运4年	2022-06
10	美国加州Rio Dell房车公园一铅蓄电池系统事故	铅酸电池		2022-08
11	韩国仁川Hyundai Steel Plant储能项目		投运0.5年	2022-09
12	美国加州特斯拉储能项目	三元		2022-09
13	韩国板桥数据中心	三元		2022-10
14	中国海南莺歌海盐场光储项目	磷酸铁锂		2022-10
15	中国江苏启东市海洪路启东沃厂房内储能电箱			2022-10
16	韩国全罗南道潭阳郡光伏电站储能项目	三元		2022-12
17	韩国全罗南道灵岩郡光伏电站储能项目	三元		2022-12

注：不包括户用储能事故。信息来源：CNESA全球储能数据库。

储能的生产、运输、安装、调试、投运等任何一个环节都有可能发生安全事故，容不得一点疏忽。不断发生的储能事故也引起了监管部门关注，《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《国家能源局综合司关于加强电化学储能电站安全管理的通知》《“十四五”国家安全生产规划》等文件从不同层面对储能安全提出了相关要求。加快锂离子电池储能安全技术研究，推动建立安全标准及管理体系，加强安全风险防范，已成为当下储能行业的重点发力方向，其中，对储能的安全评价涉及储能项目从设计、验收到运行的全寿命环节，是保障储能

安全的重要手段。

锂离子电池储能安全评价是一个系统性问题，涵盖单体电芯、模组、簇、系统及整个电站的各个层级，但目前针对锂离子电池储能安全评价的研究相对有限，虽已初步建立起储能系统安全评价指标体系框架，但仍存在要素不全面、应用性较差的问题。随着储能安全研究的不断成熟，建立更加完善、精细化的指标体系，发展多要素动静结合的储能系统安全性能等级评价技术将成为提高储能安全评价水平的必然要求。

# 1 锂离子电池储能电站安全评价相关标准现状

安全评价是保障储能系统稳定运行和可持续发展的重要途径，国内外行业组织和科研机构在这一领域积极开展研究，取得了一定的进展，初步建立

了锂离子电池储能系统的安全标准体系。

## 1.1 电池安全评价相关标准

IEC(国际电工委员会)、中国电子技术标准化研究院、UL 等国内外标准化机构均制定了多项评估储能用锂离子电池安全性的标准，旨在提高锂离子电池在储能终端应用上的安全性，促进技术升级。

表 2 电池安全评价标准  
Table 2 Safety evaluation standards for battery

序号	标准名称	对象	适用范围
1	IEC 62619 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications	工业用 锂离子电池	规定了工业应用(包括固定应用)中使用的锂蓄电池和电池系统的安全运行要求和测试要求
2	IEC 63056 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in electrical energy storage systems	储能系统 用锂离子电池	规定了最大直流电压为 1500 V(标称值)的电力储能系统中使用的锂蓄电池和电池产品安全和测试要求。在 IEC 62619 基本安全要求基础上，提出对电力储能系统用锂蓄电池和电池系统的附加或特定要求
3	UN 38.3 Recommendations on the Transport of Dangerous Goods	含锂电池货物	规定了锂电池运输状态条件的一系列测试要求，包括高度模拟、热测试、振动、冲击、55 ℃ 外短路、撞击试验、过充电试验、强制放电试验等
4	IEC 62281 Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport	锂离子电池	该标准规定了一次和二次(可充电)锂电池和电池组的试验方法和要求，以确保其在运输过程中的安全性
5	UL 1973 Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications	储能电池	规定了对电池的产品结构要求、电气试验、机械试验、环境试验、铭牌标识、用户手册、出厂测试要求等，并在附录中给出了零部件应符合的标准以及高温钠电池、液流电池测试要求
6	GB/T 36276—2018 电力储能用锂离子电池	电力储能用 锂离子电池	规定了电力储能用锂离子电池的规格、技术要求、试验方法和检验规则等内容

国际标准化领域，负责制定储能用锂离子电池分技术的委员会是 IEC/TC21/SC21A(含碱性及其他非酸性电解质二次电池和电池组)，具体由其下设的 WG 5(工业设备用锂离子电池)负责制定，目前已经制定了 IEC 62619<sup>[7]</sup>和 IEC 63056<sup>[8]</sup>两项储能用锂蓄电池标准。其中 IEC 62619 是工业设备用锂蓄电池的基础安全标准，也被称为“保护伞”标准，IEC 63056 是根据电能存储系统的特点制定的对锂蓄电池/电池组系统的特殊要求和附加要求。在运输安全领域，UN(联合国危险货物运输委员会)制定了 UN 38.3<sup>[9]</sup>，IEC 将该标准转化成了 IEC 62281<sup>[10]</sup>。

国内标准化领域，中国电子技术标准化研究院(电子标准院，赛西/CESI)作为工信部锂离子电池及类似产品标准工作组秘书处承担单位，负责统

筹、组织我国储能用锂离子电池标准的制修订工作。目前已经牵头制定了两项电能存储用锂电池强制性国家标准：GB xxxx《电能存储系统用锂蓄电池和电池组安全要求》(计划号：20214450-Q-339，报批中)和 GB 40165<sup>[11]</sup>，IEC 62619(2022 版)的国内转化工作也在进行中。此外，中关村储能产业技术联盟(CNESA)、中国化学与物理电源行业协会(CIPAS)等社团组织也制定了相关团体标准。

国外标准化领域，UL(美国保险商实验室)制定了全球首部电能存储用电池标准 UL 1973<sup>[12]</sup>，该标准在北美普遍使用，其电池安全标准考虑全面而严谨，具有相当的影响力。欧洲、日韩等国家及地区多以直接转换 IEC 62619 为主，澳洲则是同时引用 IEC 和 UL 标准。

尽管全球范围内制定了多项储能用锂离子电池



安全标准,但是现有国内外标准只能满足对储能用锂离子电池安全性评估的基本要求,缺少评估长周期循环后锂电池安全性的试验项目/标准,缺少相应的锂离子电池安全等级评价标准。

现有安全评价标准的适用对象都是未投入使用的出厂 6 个月以内的锂电池新品。众所周知,锂离子电池因其制造工艺引入的缺陷和外部激源因素引发的其他问题会在长周期循环后被放大,增加锂电池的安全风险,最终增加发生安全事故的概率。后续标准制定过程中,在考虑如何更有针对性地评估新品的同时还应考虑长周期循环对锂离子电池安全性的影响,并制定评估长周期循环后锂离子电池安全性的项目或标准。此外,锂离子电池的安全性因

其使用的材料体系、隔膜、电解液的不同存在一定的差异。当前,国内外并未制定锂离子电池安全等级评价相关标准,厘清影响锂电池安全差异的因素,制定相应标准也是提高储能用锂离子电池安全性的重要手段。

### 1.2 储能系统安全评价相关标准

储能系统集成成了电池、储能变流器以及各类辅助系统。每个子系统首先要符合其对应的安全标准,例如锂离子电池需满足电池产品的安全标准。此外,当这些子系统集成为一个系统时,还需考虑子系统之间的兼容性以及整个储能系统的环境适用性。储能系统安全标准和法规是保证储能系统(ESS)的安全安装和运营的重要支撑。

表 3 储能系统安全评价标准  
Table 3 Safety evaluation standards for energy storage systems

序号	标准名称	对象	适用范围
1	IEC 62933-5-2 Electrical energy storage (EES) systems Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems Electrochemical-based systems	电化学储能系统	在 IEC TS 62933-5-1 的基础上进一步明确电化学储能系统(如电池系统)的安全要求,减少由于电化学储能系统子系统之间相互作用而产生危害或损害的风险
2	IEC 62933-5-4 Electrical energy storage (EES) systems Part 5-4: Safety test methods and procedures for grid integrated EES systems-Lithium ion battery-based systems	锂离子电池储能系统	规定了并网锂离子电池储能系统的安全测试方法和测试程序
3	NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems	固定式储能系统	规定了电池储能系统部署要求,列出了各种储能项目设计和安装注意事项,包括不同场所中的间距、消防装置、通风以及相关的防火等要求
4	UL 9540 Energy Storage Systems and Equipment	电化学、化学、机械和热能储能系统	涵盖了电化学储能系统、机械储能系统和储热系统的建设要求,并要求电池满足 UL 1973 标准,逆变器满足 UL 1741 标准
5	UL 9540A Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems	电池储能系统	评估电池热失控特性的测试方法,通过测试热失控下产生的各种气体的浓度以及燃烧速率、爆炸压力等来评估火灾、爆炸的危害
6	AS/NZS 5139:2019 Electrical installations-Safety of battery systems for use with power conversion equipment	电池储能系统	规定了与电源转换设备连接的电池系统的安全以及安装要求
7	GB/T 36558—2018 电力系统电化学储能系统通用技术条件	电力系统电化学储能系统	规定了储能系统的能量转换效率、充放电时间等性能要求以及保护、监控、通信、计量等要求
8	GB/T 40090—2021 储能电站运行维护规程	电化学储能电站	规定了储能电站的正常运行、异常运行及故障处理、维护等过程的技术要求
9	GB/T 42288—2022 电化学储能电站安全规程	电化学储能电站	规定了电化学储能电站设备设施、运行维护、检修试验、应急处置的安全要求

国际电工委员会(IEC) TC120 负责制定国际储能相关标准。欧洲、日本、韩国等国家及地区通常直接等同或修订采用 IEC 标准。

IEC 62933-5-2<sup>[13]</sup>以 IEC 62933-5-1<sup>[14]</sup>为基础,提供了电化学储能系统的安全要求,其第一版发布于 2020 年,第二版正在修订中。该标准涵盖了电

化学储能系统(包括锂离子电池储能系统)的危险因素、安全风险分析和评估、风险降低措施以及系统安全验证和测试。对于储能系统的安全验证和测试, IEC 6293-5-2 允许使用模拟信号来测试或者通过文件审查方式来验证。IEC 62933-5-4<sup>[10]</sup>则基于锂离子电池储能系统提供了使用实际电信号的测试方法和程序。

美国非常重视储能安全,其标准制定也相对领先和完善。美国保险商实验室(UL)是北美最大的安全标准制定机构,于2016年发布了第一版储能系统安全标准 UL 9540<sup>[10]</sup>,并被批准为美国和加拿大两国国家标准。目前 UL 9540 第三版正在修订中。UL 9540 标准从材料、零部件、结构要求、安全失效分析、功能安全、测试评估、标签和说明书方面对储能系统提出了全面要求,是电池储能系统安全保证的基石。UL 9540 被美国电工法 NEC 和国际消防规范 IFC 等众多规范引用,是储能系统进入北美的强制准入标准。

为了评估电池储能系统热失控蔓延的安全风险,保障储能系统消防安全,UL 于2017年发布了 UL 9540A<sup>[17]</sup>,目前第5版正在修订中。该标准从电芯、模块、单位以及安装层级共4个层级对电池储能系统进行测试,获取电芯热失控特性参数和电芯释放气体的燃烧特性参数,以及电池储能系统热失控蔓延时的气体/烟雾/热释放速率、热辐射、起火和爆炸情况等数据。这些数据可以有效地评估电池储能系统的火灾和爆炸风险,减少消防安全顾虑。

美国消防协会(NFPA)在2019年正式发布第一版 NFPA 855<sup>[18]</sup>,目前最新版为2023版。为了控制储能系统火灾风险,该标准明确要求储能系统必须 UL 9540 列名,并给出了安装间距、存储能量、防火隔离、通风、火灾探测、消防抑制等储能系统安装要求。对于超出安装限制条件的电池储能系统,必须提供 UL 9540A 测试报告以支持其安装许可。

澳大利亚和新西兰于2019年联合制定了 AS/NZS 5139:2019<sup>[19]</sup>,该标准规定了电池储能系统(BESS)的一般安装要求,对 BESS 的安装位置进行了限制,并对 BESS 附近的其他设备进行了限制。

在中国,全国电力储能标准化技术委员会(SAC TC550)负责电力储能领域国家标准的制修订,其制定的储能安全相关标准主要有 GB/T 36558—2018《电力系统电化学储能系统通用技术

条件》、GB/T 40090—2021《储能电站运行维护规程》和 GB/T 42288—2022《电化学储能电站安全规程》。为满足北京市储能项目安全建设需求,2021年12月,北京市地方标准 DB11/T 1893—2021《电力储能系统建设运行规范》正式发布,明确了储能系统设计、施工、验收、运行维护及退役和应急处置要求。

## 2 锂离子电池储能安全评价相关理论研究

### 2.1 锂离子电池本征安全研究

锂离子储能电池本身是影响储能安全的首要因素,作为储能系统的核心部件,电池在各种复杂工况下存在潜在的过充、短路、挤压、振动、碰撞等引起的突发性燃烧和爆炸现象,是实际应用中面临的安全难题。因此,要从根本上解决锂离子电池的安全性问题,需要从电池本征安全方面展开研究。

本征安全主要是在材料层面提升各电芯材料的热稳定性,在工艺层面从设计和制造的角度保证电芯可靠性。目前,在正极材料方面,主要通过材料选型、本体改性(表面包覆、元素掺杂等)与材料复配,提升材料热稳定性;隔膜材料方面,为了改善隔膜热稳定性,通常在隔膜表面涂上一层耐高温的涂覆材料,以改善隔膜热收缩性能,同时提高隔膜穿刺强度,防止锂枝晶刺穿,提升电池安全性<sup>[20]</sup>;电解液材料方面,通过在电解液中引入阻燃、过充保护等安全添加剂来有效改善电池安全<sup>[21]</sup>;集流体材料方面,通过改善集流体的力学性能,避免其在加工使用过程中形成毛刺和断裂,以降低电芯安全风险;电芯设计方面,overhang 设计、NP 比设计、配方设计、电极设计、结构设计、安全阀设计、绝缘保护等均会对电芯安全产生影响,综合优化各方面设计因素是实现电芯高稳定性、高安全的关键之一;工艺制造方面,减少内部异物、边缘毛刺等对电池安全有着至关重要的影响,通过制造工艺升级、产线智能化改造、过程监测强化等措施降低电芯缺陷,是降低电池安全隐患的重要举措。此外,固态电池作为下一代电池技术,有望彻底解决锂离子电池本征安全问题<sup>[22]</sup>。有机电解液热分解温度与隔膜融化温度在 160℃ 以下,而固态电解质热分解温度高(如氧化物固态电解质热分解温度在

500 ℃ 以上), 用固态电解质代替液态电解液和隔膜, 可以大大降低电池热失控风险。

## 2.2 锂离子电池储能故障及事故数据集

储能系统运行过程中的各类故障是诱发电池热失控、导致火灾爆炸事故发生的重要原因。储能系统涉及的故障类型多样, 而电池热失控的诱发可能是多种故障耦合作用的结果。为进一步挖掘分析储能系统故障的发生条件、故障部位、表现形式、故障后果等, 有必要建立储能事故综合信息平台, 通过对储能事故、故障等信息的进一步收集, 逐步构建起储能故障数据集。

目前储能事故信息平台的建设尚处于起步阶段, 国外 EPRI(美国电力研究院)上线了事故 wiki 页面, 对全球事故进行简单的汇总和统计。国内还没有公共权威的储能事故信息发布平台, 亟需建立专业化的储能事故信息平台以促进事故信息及时准确发布, 不断总结事故经验教训。

储能事故信息的数据来源涉及产业链各方以及监管部门, 需要全产业链共同支持以及多方合作协调。信息平台在建设过程中需要结合市场需求, 不断改进优化, 保证信息的准确、及时更新。平台的建设不仅有利于信息资源的合作共享, 储能安全水平的提升, 也有利于政府监管。通过平台一系列科学的、系统的、结构化的分析模型工具, 可以对收集到的事故、事故征候、其他不安全事件相关信息进行分析, 提出相应的安全建议。

图 1 为事故信息平台架构提出了初步设计方案。平台将综合事故、项目、产品、企业、测试以及产品溯源、警情和事故调查等多渠道信息, 通过数据集成并提供可视化分析, 进一步挖掘分析储能事故/故障的发生条件、部位、表现形式、故障后果等特征规律, 确定引发储能电池热失控的储能故障数据集, 并为未来储能事故分析、故障识别等提供数据基础。

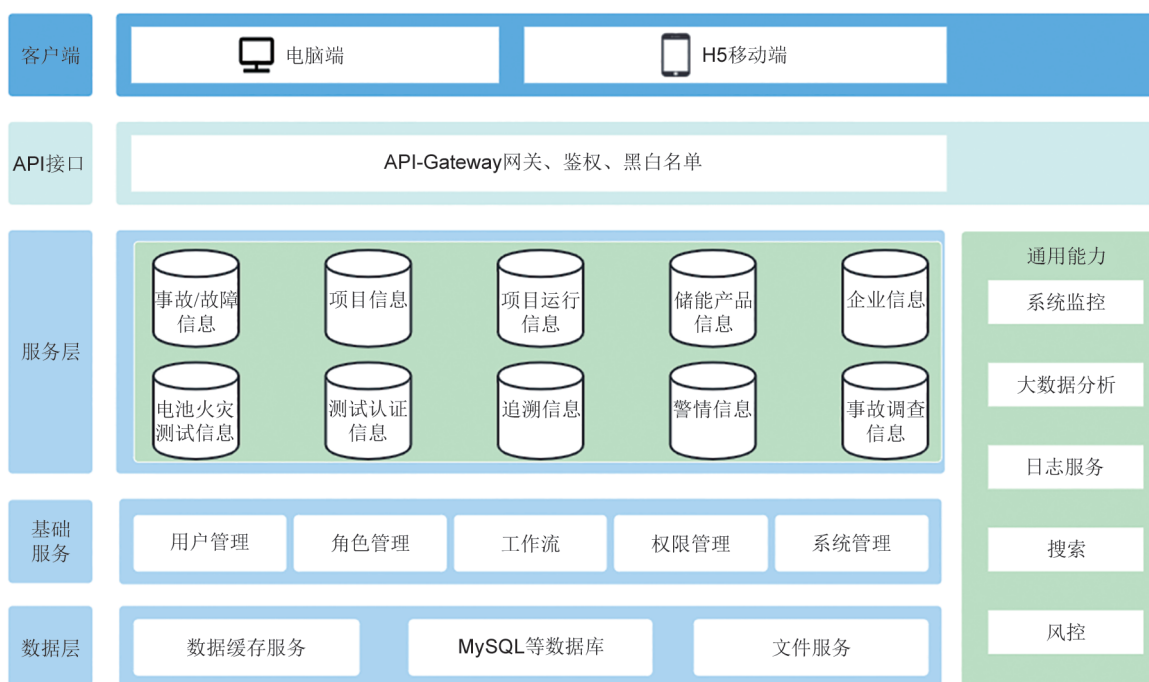


图 1 储能事故综合信息平台

Fig. 1 Comprehensive information platform for energy storage incidents

平台不仅可以对产品信息、项目信息、试验数据、事故信息等数据进行集成, 亦将在储能系统设计、选型、安全评价甚至事故故障的预测等方面发挥越来越重要的作用, 有效提升信息平台价值和公共服务能力, 也为日后引入人工智能方法提供必不

可少的数据基础。上述均有待于更细致和深入地研究, 此外关键数据信息的脱敏、不同信息平台的对接也有待在建设过程中逐步完善。

## 2.3 储能用锂离子电池热失控机理及火蔓延机制

锂离子电池热失控的本质是滥用条件触发电池



内部的链式副反应,放出热量进一步提升电池内部的温度,并成功触发更高温度区间的副反应,形成“热量-温度-反应”闭环回路,该回路在高温条件下循环直至发生热失控。以储能用锂离子电池为例,其热失控机理可以总结为:在滥用条件下电池温度异常升高,首先触发电池内部负极表面的保护层(SEI膜)的分解,电解液的还原/氧化反应,电池内部温度逐渐升高。在 $150\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,隔膜开始收缩和熔化;然后发生内部短路,内部电解液蒸汽压

增大,副反应产气导致安全阀打开。随着电池温度的升高,发生链式放热反应,负极的活性锂会与电解液反应并产生巨大的热量,触发磷酸锂正极释放氧气并与电解液发生反应释放热量。电极中剩余的锂与黏合剂在更高的温度下反应,进一步提高电池温度直至发生热失控<sup>[23]</sup>。上述链式反应的反应顺序和反应温度区间因电池材料体系和热失控触发方式等因素的变化而呈现一定的差异性,但本质上是上述链式反应相互交替、叠加所导致。

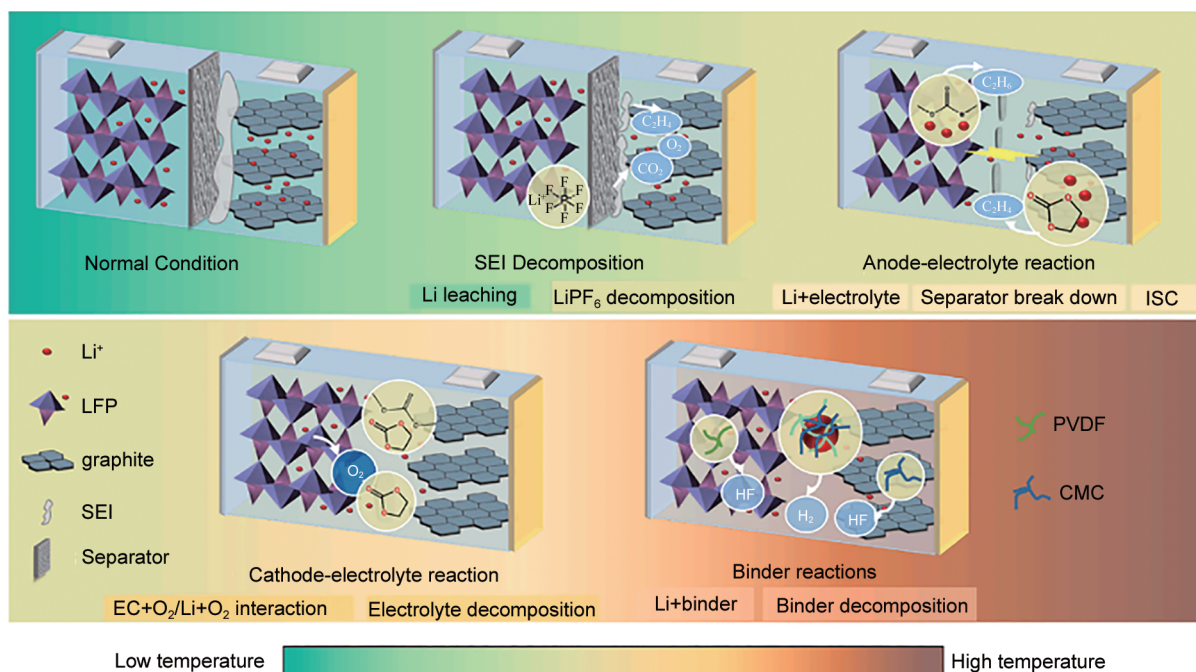


图2 储能用锂离子电池热失控机理图<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for energy storage

在储能电池系统中,单节电池发生热失控释放大量的热量,并通过对流、辐射、传导等形式将热传递到相邻电池,当触发电池周围的邻近电池温度达到热失控触发温度时,即诱发热失控蔓延<sup>[3]</sup>。Feng等人<sup>[24]</sup>通过对6节25 Ah方形硬壳三元电池模组开展针刺触发下的热失控传播实验,揭示了热失控蔓延机制,即在热失控蔓延过程中,高温热失控电池通过正面壳体接触而向邻近电池侧向剧烈传热,导致被加热电池内部沿厚度方向产生巨大温度梯度,当被加热电池前端面温度达到热失控触发温度时,即发生热失控蔓延。而对于储能用磷酸铁锂电池而言,其热失控蔓延机制类似,Song等人<sup>[25]</sup>分析了280 Ah磷酸铁锂电池模组热失控蔓延过程中的热流路径。他们发现通过壳体接触面传递的用

于触发热失控蔓延的热量仅占单体电池热失控总产热的5%~7%,而超过75%的能量用于电池自产热。此外,也有一些学者通过实验和数值方式分析了储能用电池模组在不同电连接方式<sup>[26-27]</sup>,不同触发方式<sup>[28-29]</sup>,不同荷电状态<sup>[6]</sup>,不同间距<sup>[30]</sup>,不同环境压力<sup>[31]</sup>,不同电极体系<sup>[32-33]</sup>,不同环境氛围<sup>[34]</sup>等因素下的热失控蔓延特性。具体可以归纳为:相比于无连接和串联模组,并联模组呈现最高的热失控传播危害性;增大电池间距和降低荷电状态均会有效延缓热失控蔓延行为的发生;过充、针刺、加热触发方式对模组前三节电池热失控蔓延行为产生影响,对后几节电池的影响不大;电池体系对模组热失控传播的影响较大,三元电池相较于磷酸铁锂电池更容易发生热失控,并且在热失控蔓延的过程



中会出现大量的射流火,而磷酸铁锂电池发生热失控蔓延的难度较大,且在热失控过程中未见到射流火等明火行为;随着环境压力的降低,锂离子电池热失控蔓延的速率会降低,同时热失控蔓延过程中燃烧燃爆导致的传热量也会降低;此外,空气氛围下的模组热失控传播速度比氮气氛围下的模组热失控传播速度更快。当某一模组完全失控并起火时,即使模组之间有空气域存在,模组间的热失控蔓延也会发生<sup>[35]</sup>;导致这一现象的主要原因是模组全部热失控产生的射流火面积和放热量的增加加速了模组间的固体传热量,进而导致模组间的热失控蔓延行为。针对锂离子电池包,当电池包内任一模组内单体触发热失控时,整个系统在无防护的作用下都会发生热失控蔓延,热失控蔓延会呈现倒叙蔓延、顺序蔓延等多种蔓延现象,电池包的蔓延行为则呈现出更加复杂的规律<sup>[36]</sup>。尽管国内外学者对电池模组热失控蔓延开展了大量的研究,然而这些研究工况与储能电站实际场景存在一定出入。对于真实储能电站场景下的热失控蔓延且出现燃烧行为,其火灾场景属于顶棚射流火焰范畴,火焰对模组中毗邻电池的辐射传热加剧,进而加快模组热失控蔓延,因此,揭示火焰对电池模组热失控蔓延的影响机制,对于储能电站的消防安全设计具有重要指导意义。

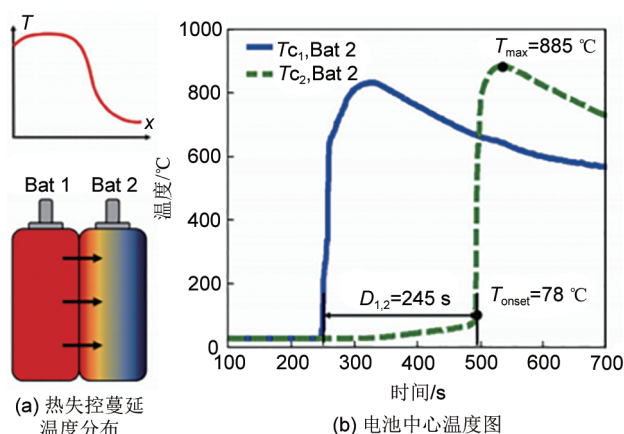


图3 热失控蔓延机理图<sup>[24]</sup>

Fig. 3 Diagram of thermal runaway spread mechanism<sup>[24]</sup>

综上所述,对于锂离子电池热失控机理,前人大多研究不同滥用条件、材料体系等因素下电池热失控演化机制和差异,对于储能故障导致电池热失控的全链条演化过程及机制缺乏系统认知,不同故

障类型导致的电池滥用形式及热安全边界尚未明确。未来将重点开展诱导电池热失控故障类型及模式识别分析,确定诱导不同材料体系电池热失控的临界故障条件及热安全边界阈值,明确多因素动态耦合激励下电池热失控行为及其能量流动分布特征,揭示不同储能故障作用下电池系统热安全边界演化规律及热失控致灾机制,对于规模化储能系统安全应用具有重要科学意义。

对于锂离子电池模组热失控蔓延问题,以往研究对热失控传播机制的解释大多停留在热失控电池对邻近电池外部传热的维度,忽略了电池自产热贡献,因此,量化模组热失控蔓延过程中的电池自产热贡献是储能电池模组热失控蔓延问题研究的重点。同时,目前的研究大多在敞开环境下开展,而在实际储能电站场景下,电池模组层层堆叠于电池支架上,一旦发生热失控故障,同时在满足点火源条件下,热失控过程喷射的可燃气体被点燃诱发剧烈燃烧,喷射火焰对同层电池模组剧烈传热,同时也炙烤上层支架电池模组,其热失控蔓延方向可能涉及水平和竖直方向两个维度。因此,开展储能预制舱内电池模组竖直和水平热失控蔓延特性研究及火焰辐射传热对热失控蔓延影响机制的研究是未来储能用电池模组热失控蔓延研究的重点,可为储能电站的消防安全设计提供更多的理论基础和技术指导。

### 3 锂离子电池储能系统安全评价的数值模拟技术

锂离子电池储能系统的安全评价依赖于各种特征参量及指标,数值模拟技术由于能够解析电池、模组、系统内部的能量流动特征及演化机制,在储能系统安全评价方面具有显著优势。目前,锂离子电池热动力学建模已成为领域研究重点,大量学者针对锂离子电池单体、模组和预制舱/电站三个层面的热失控行为进行了数值模拟研究。

#### 3.1 电池单体的数值模拟技术

目前针对单体电池的数值模拟研究主要集中在热失控方面,通常采用 Arrhenius 定律描述电池在热失控时内部一系列副反应的放热速率<sup>[37-41]</sup>,对于电池热失控过程中的排气及喷射火行为数值研究则相对较少。一些研究者基于集总模型<sup>[42-44]</sup>和 CFD 方法<sup>[45-46]</sup>对电池排气过程进行了数值分析,获得了电

池内部压力变化及排气特征。由于锂离子电池的排气及燃烧是一个高度瞬态的过程,因此对火焰燃烧特征及外部瞬态流场的精确模拟是一个难点。Kim等<sup>[47]</sup>基于多孔介质模型建立了锂离子电池排气和热失控行为的数值模型,但在计算精度上存在不足。中国石油大学(华东)孔得朋团队<sup>[48]</sup>首次提出了动态边界耦合电池内外热失控特征参数的新方法,实现了喷射火火焰高度和热释放率变化的准确预测;之后建立了多相排气过程的多尺度数值模型,揭示了电池热失控过程中气体以及颗粒的喷射机制<sup>[49]</sup>。然而,现有模型大多未考虑力学响应,例如排气时开阀、壳体破裂等行为的影响。面向大规模储能系统的安全评价需求,未来单体层级数值模拟技术应向热失控-燃爆-力响应多物理场耦合方向发展。同时,还需要进一步完善数值模拟结果的验证方法,保障数值模拟的可靠性。

### 3.2 电池模组的数值模拟技术

模组层级的数值模拟技术主要集中于热失控传播相关研究。现有模型主要包括热阻网络模型和三维热模型两种,其中热阻网络模型将电池作为一个

节点,忽略电池内部温度梯度变化,在计算效率上具有明显优势;三维热模型则更为精确,可以呈现出电池内部温度分布情况<sup>[50]</sup>,缺点是计算量更大。大量学者利用热失控传播模型研究了过充<sup>[51]</sup>、过热<sup>[52]</sup>、针刺<sup>[53]</sup>等触发方式下电池组的热失控特征变化,另外部分研究分析了相变材料<sup>[54-55]</sup>、风冷<sup>[56]</sup>、液冷<sup>[57-58]</sup>等热管理方式对热失控传播的抑制效果,主要关注模组热安全方面的表现。此外,考虑到电池排气对模组中热失控传播行为的重要影响,Mishra等人<sup>[59]</sup>通过三维CFD模型对模组气体扩散的影响展开了分析,同时,中国石油大学(华东)孔得朋团队<sup>[60]</sup>基于CFD模拟研究了喷射火影响下的热失控传播,揭示了火焰对电池失效的传热贡献。然而,CFD模拟通常需要巨大的计算资源,这限制了其在大尺度空间上的进一步应用。针对这一问题,孔得朋团队<sup>[61]</sup>开发了基于耦合热阻网络和CFD的数值模拟技术,初步提出了兼顾精度与效率的解决方案。但随着储能规模持续扩大,对计算资源的需求将继续增大,提出高效的热失控建模方案仍是未来重要的研究方向。

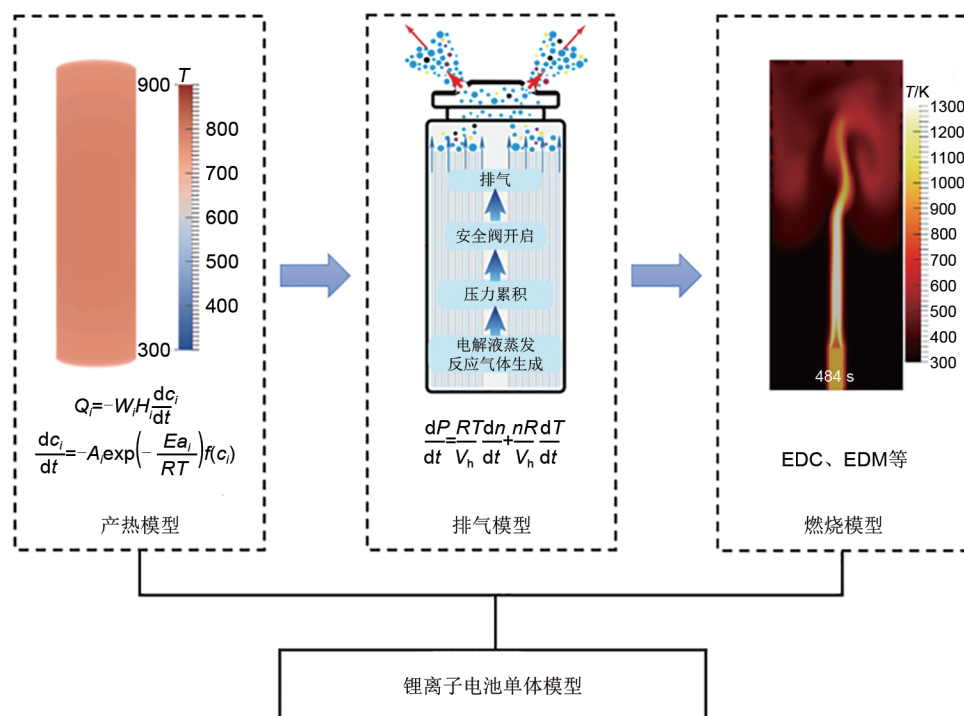
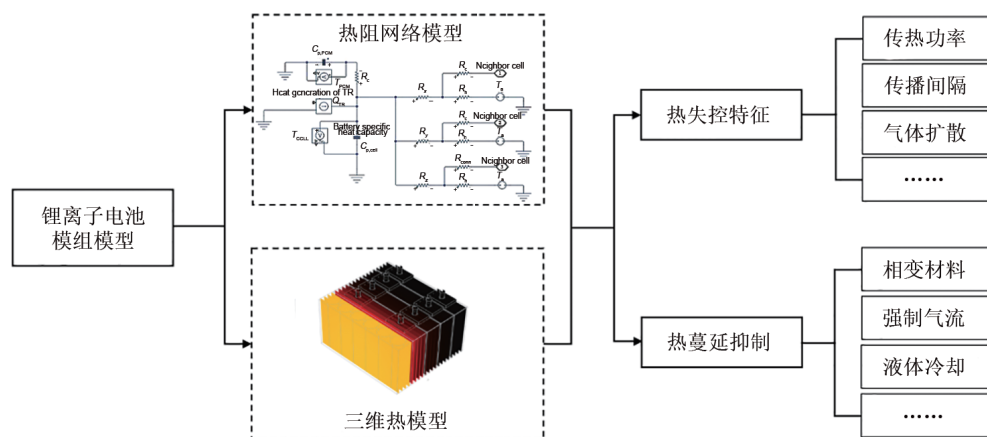


图4 锂离子电池单体模型(修改自文献<sup>[38, 48]</sup>)

Fig. 4 Lithium-ion battery monomer model<sup>[38, 48]</sup>

图5 锂离子电池模组模型现状(修改自文献<sup>[52, 55]</sup>)Fig. 5 Status of Li-ion battery module model<sup>[52, 55]</sup>

### 3.3 储能系统的数值模拟技术

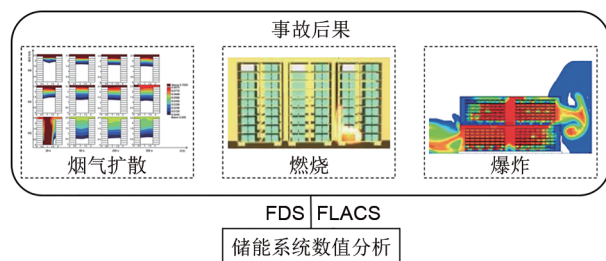
由于储能系统实际规模远大于单体及模组，因此针对舱/电站层级的数值模拟多将内部的电池单体及模组作为一个整体，忽略单体及模组内部的梯度变化，以简化模型，减少数值计算量。相关数值模拟研究多采用FLACS和FDS(fire dynamics simulator)仿真软件，主要对储能系统热失控过程中的烟气扩散<sup>[62-63]</sup>、燃烧和爆炸<sup>[64-65]</sup>现象进行了数值分析；此外，部分学者针对储能电站的安全防护措施，如加装隔离板<sup>[66]</sup>、喷淋灭火<sup>[67]</sup>等开展数值研究，对储能电站安全设计具有一定的指导意义。然而，由于仿真软件的局限性，目前的研究只能对气体燃烧爆炸过程进行分析且多关注于事故后果，对于储能安全防护措施的数值研究还相对匮乏。在实际储能系统热失控事故中，可燃气体的燃烧与爆炸会加快模组间的热失控传播，产生新的可燃气体参与反应并进一步加剧事故的危险性。但现有模型均未考虑热失控传播和可燃气体排放的耦合关系，因此未来系统层级的模拟研究仍需进一步完善。

### 3.4 总结与发展方向

现有的储能系统数值模拟技术主要分为电池单体、模组及储能系统/预制舱三个层级：单体电池数值模拟研究主要关注电池在热失控时的内部反应和温度表现，近年来热失控过程中的排气和喷射火行为也得到了关注，然而现有模型大多未考虑力学响应的影响，如安全阀的开启过程、壳体破裂等；模组层级的数值模拟技术主要针对热失控传播开展研究，包括不同触发方式下电池组的热失控特征变化，以及热管理方式对热失控传播的抑制效果等，主要关注模组热安全方面的表现，同时也有部分研究分析了气体扩散行为对热失控传播的影响，但巨大的计算量限制了进一步应用；储能系统、预制舱层级的热失控数值模拟研究主要关注烟气扩散、燃烧和爆炸后果，对储能电站安全防护措施也开展了部分数值研究，然而由于仿真软件及模型的局限性，现有数值研究均未考虑热失控传播过程对烟气扩散、燃烧、爆炸行为的影响。

综上所述，数值模拟技术已在锂离子电池储能系统中广泛应用，为储能系统安全评价提供了可靠的数据支撑，但仍面临着许多不足和挑战。随着规模化电化学储能的发展，储能安全对数值模拟技术提出了更多要求：

(1) 在储能系统的安全评价中，单体层级单一的热模型已不能满足要求。随着规模化储能系统应用的进一步扩大，模组以及预制舱层级面临着热失控、燃烧爆炸以及力学响应等全方位的安全评价需求。因此，单体层级模型应作为数值研究基础，并向热失控-燃爆-力学响应多物理场耦合的方向发展，

图6 储能系统数值研究现状(修改自文献<sup>[62, 65, 67]</sup>)Fig. 6 Status of numerical research on energy storage systems<sup>[62, 65, 67]</sup>



以满足储能系统安全评价的要求。此外,为了保证数值模拟的可靠性,还需要进一步研究完善数值模拟结果的验证方法。

(2) 储能模组内电池处于受限空间,热失控火焰将促进模组内热失控的传播<sup>[68]</sup>。当前电池组热失控模型仅局限于燃烧对失效传播行为的单方面影响,对于模组内火焰和热失控耦合过程的模拟,如火蔓延行为,仍然存在空白。因此,未来针对电池组的仿真模型应当考虑火焰和热失控的相互作用,以更全面地开展储能模组安全评价。同时,需要进一步提高面向模组和系统层级的CFD模拟计算效率,以适应大尺度空间的计算需求。

(3) 对于更大规模的预制舱、电站层级,当前的数值模拟研究多关注于燃烧爆炸分析,缺少对安全防护措施的研究,未来需要进一步完善。此外,储能系统中的事故发展是一个动态过程,电池的热失控传播决定着烟气扩散、燃烧、爆炸演化过程。因此,未来面向储能预制舱层级的数值模拟技术需要考虑热失控传播和可燃气体排放的耦合过程,以实现事故演化和致灾后果更加准确地预测和模拟。

## 4 锂离子电池储能系统安全测试评价技术

除数值模拟外,实验测试是获得锂离子电池储能系统安全评价指标性能的关键手段。现阶段,对锂离子电池单体、模组、簇等层级安全指标的测试方法与技术已初步实现了标准化,但是对系统层级涉及电气安全、消防安全等指标方面的测试技术方法仍不明确和统一,目前仍侧重于对有效的安全技术方面的研究。

### 4.1 电池单体的安全测试技术

为了避免电池因内部瑕疵发生内短路从而诱发热失控,造成起火、爆炸等安全事故,现有标准制定了一些试验项目进行模拟,以便及时发现缺陷并评估电池发生起火、爆炸时的危险性。IEC 62619中引入了内部短路试验,目的是确定电池内部短路不会导致整个蓄电池组系统起火或火灾在蓄电池组系统外蔓延。考虑到内部短路试验的局限性和可操作性,在GB 31241—2014<sup>[69]</sup>和GB T31485—2015<sup>[70]</sup>中引入了挤压和针刺试验,检验电池内部是否存在可诱发内部短路的金属杂质等缺陷以及电池正负极接触时是否会发生内部短路。

电池热滥用和电滥用同样会导致电池发生内短路诱发热失控。IEC 62619规定的电池热滥用是将满电电池放置在热箱中,热箱以 $(5\pm 2)^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升至 $(85\pm 5)^\circ\text{C}$ ,并保持3 h后停止加热,若电池发生起火爆炸则不合格,GB/T 31241—2014中电池热滥用同样是将电池放置在热箱中以 $(5\pm 2)^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升温,但是考虑到隔膜的熔点等问题将热滥用的温度和时间分别改为 $(130\pm 2)^\circ\text{C}$ 和1 h。UL 1973<sup>[72]</sup>的热滥用试验则采用UL 1642<sup>[71]</sup>的试验方法,高温搁置温度为 $(130\pm 2)^\circ\text{C}$ ,时间仅为10 min。该项目不仅考察了储能用锂离子电池长时间高温搁置的安全性能,还考虑了高温搁置时电池的温度,其中 $(130\pm 2)^\circ\text{C}$ 要更符合实际应用。此外,在IEC、GB、UL标准中都有过压充电考核项目,目的是考核电池发生过压充电时材料结构的稳定性,对电池的设计和选材有指导意义。

电池长周期循环老化后材料结构稳定性变差、内部缺陷因素诱发的安全风险也会升高。然而,现有储能用锂离子电池标准的使用对象都是新电池,缺少对长周期循环老化后电池安全性的评估项目,而且部分储能事故是在投入运营一定时间后发生的。因此还需研发对电池长周期循环后安全性的评估项目或者是进行模拟试验,建立相关检测技术和标准对使用过的电池进行测试和评估。

### 4.2 锂离子电池模组的安全测试评价技术

锂离子电池系统通常由众多模组和电池管理系统串联组成。模组配有监测单元用于采集电池单体的电压和温度数据,并将这些数据传输给电池管理系统。模组通常没有完备的保护设备,依赖于电池系统中的电池管理系统来为其提供电气保护(如防止过充或过放等)。此外,模组一般依赖于电池系统的外壳为其提供机械和环境保护。然而,模组本身也需具备一定的电气滥用耐受能力,GB/T 36276—2018<sup>[72]</sup>对锂离子电池模组提出了相应的安全要求,包括过充电、短路、挤压、跌落等测试,此外电池系统的部分测试也可以适用于模组,比如耐压、绝缘和热失控测试等。其中短路和热失控扩散测试是表征电池模组安全的重要测试项,对锂离子电池系统的安全影响重大。

短路测试是将充满电的模组正负极经外部电阻短路,模拟储能系统运输、安装、维护或运行过程中输出端被意外短路的情况,通常外部电阻值在

20 m $\Omega$  以内。由于锂离子电池单体的内阻特别小, 100 Ah 以上的 LiFePO<sub>4</sub> 电芯通常在 1 m $\Omega$  以内, 因此短路电流会特别大, 可以达到上千安培, 对模组内电芯、连接器、线缆的大电流承受能力都是极其严峻的考验, 很容易发生电池泄气、起火或者爆炸事故。如果模组有合适的熔丝或者过流保护设计, 则可以快速切断短路电流, 有效保障模组的安全。

热失控扩散测试是用合适的方法使模组中的一个电池单体热失控, 观察热失控是否会蔓延进而造成整个模组甚至电池系统的起火或者爆炸。该测试主要评估电池系统或模组承受单个电池单体失效的能力。良好的模组设计可以有效地抑制电池热量在单体之间传递, 使热失控只局限在 1 颗或者相邻几颗电池单体内, 不会造成整个模组的起火或者爆炸。

#### 4.3 锂离子储能系统中的电气安全评价技术

在储能系统的电气安全评价技术方面, 全球标准暂不完善。除 UL 9540 对储能系统的电气安全有明确的测试方法外, 其他国际或地区标准, 如 IEC、EN、GB 暂时没有以储能系统电气安全为主要评价对象的技术标准和规范。

UL 9540 是针对储能系统的安全标准, 其范围涵盖充放电系统、控制保护系统、功率转换系统、通信、冷热管理系统等, 包含离网运行和并网运行的储能系统, 提出了较为清晰的电气安全要求, 规定了如下储能系统中的电气要求: ①电气结构方面规定了非金属材料、危险部件的防护罩和防护措施、电气间隔和分离、绝缘水平和保护性接地、控制系统的要求; ②电气测试包括温升测试、绝缘耐压测试、脉冲测试、接地和等电位测试、绝缘电阻测试; ③EMC 测试: EMI、静电放电、射频、快速瞬变、抗浪涌能力等。

然而, 在 IEC 标准体系中, 大部分锂离子电池标准都更关注电芯本体安全, 仅有部分标准涉及锂离子电池系统的电气安全设计和测试要求, 但是存在测试和评价内容不全, 标准范围覆盖不全, 缺少可操作性等问题。此外, 在目前的测试和评价中, BMS 的电气安全常被忽略, 但是和 BMS 相关的电气失效是测试中较为常见的失效。其主要原因是 BMS 最初被使用在电动汽车领域, 电气架构一般被设计为安全电压, 或者浮地系统, 对电气安全的要求极少考虑和电网电压等级相关的电气安全。

锂离子电池储能系统电气安全评价应充分考虑

储能系统的电气安全和电化学安全风险。电气安全应关注储能系统在运行维护过程中的电气故障对人员和动物、设备、财产及环境造成直接或者间接的危害和概率。电化学安全则应结合储能系统的电气安全来综合考虑。锂离子电池储能系统存在由于设计、运行和维护的不周导致电气拉弧、短路、对地故障等一次故障, 进而引起锂离子电池的电/热方面的二次失效, 最后发生热失控乃至起火爆炸风险, 也是电气安全评价应考虑的方向。未来, 应在 IEC 62477-1<sup>[73]</sup>、IEC 62040<sup>[74]</sup>、IEC 62485-5<sup>[75]</sup> 和 UL 9540 等已有的评价标准基础上, 提出一个新的国际适用的标准, 适合锂离子电池储能系统的电气安全的电气结构要求、测试要求和评价要求, 旨在考虑常规的电气对人/动物、财产和环境的危险外, 也可以通过降低电气风险进而降低锂离子电池火灾和爆炸的风险。

#### 4.4 储能系统消防安全评价技术

消防安全是储能系统安全的重要组成部分, 是保障系统整体安全的最后一道屏障。储能系统中包含多类消防设施, 大致可分为探测预警类、灭火抑制类、通风排烟和防爆抑爆类。

##### 4.4.1 探测预警

早期感知辨识电池热失控征兆特征对于防范化解储能系统火灾和爆炸事故至关重要。2023 年工信部等六部委发布了关于推动能源电子产业发展的指导意见, 意见中明确提出加强储能电池热失控安全预警技术和评价体系的开发与应用, 研发基于声、热、力、电、气多物理参数的智能安全预警技术, 发展基于数据驱动和人工智能算法的储能系统安全状态智能评估技术。现阶段, 青鸟消防、霍尼韦尔等国内外消防产品制造商围绕储能电站的火灾探测问题, 从工程应用的角度分别提出了以 PACK 级、预制舱级、场站级为架构的多层级、一体化的火灾风险监测预警方案。在 PACK 层面, 通常采用小型化、柔性、嵌入式的传感设备, 如感温线缆或微型感温探测器、电解液泄漏探测器、吸气式烟雾和气体探测器等。预制舱采用感温和感烟火灾探测, 手动报警, CO 或甲烷、氢气等可燃气体探测等传统火灾自动报警系统。对于储能场站, 依托集控中心采用视频图像采集、红外热成像测温等手段进行远距离、宽范围的集中监控, 并基于电池系统运行状态的大量多维数据, 构建了智慧消防管理云



平台。同时,围绕故障状态下电池的声、热、力、气等多维特征参量演化规律,国内外研究机构针对单一或耦合参量的特征识别和故障状态预测技术开展了大量而深入的研究工作<sup>[76-78]</sup>。锂离子电池在热失控前析出锂枝晶、局部过热、产气、鼓包、安全阀打开、爆燃等一系列过程伴随着电流、电压、电化学阻抗等电气参量变化,锂电池内部和表面温度显著升高,安全阀开启以及气体爆喷发生特征声音,电解液等发生化学反应和热分解导致氢气、CO、碳氢化合物以及黑烟粒子的扩散蔓延,气体释放造成电池模组、电气柜等封闭空间的压力陡增。研究人员在实验室环境通过阻抗测量装置、热电偶、感温光纤、应变片、气体传感器、压力变送器以及声音、图像、热成像等采集设备对电池热失控全过程多物理参量进行采样分析,基于大量数据集统计分析,研究出了具有不同特点的数据回归预测模型和预测预警样机。然而,当前针对锂离子电池储能系统监测预警技术的研发应用还处在早期试验阶段,今后探测感知技术和设备的大范围工程应用需要从结合经济性、精准度、可靠性、环境适应性、使用年限、安装形式等多方面综合考虑。截至目前,针对锂离子电池储能设施探测预警方面的安全评价标准体系尚未全面建立。总之,在全球工业体系向数字化、信息化转型的趋势下,基于多维数据泛在感知和高速云计算平台,构建大数据挖掘算法和人工智能模型,建立科学合理的工程应用技术标准体系,为实现针对锂离子储能设施安全风险的高精度预测预警提供行之有效的解决方案。

#### 4.4.2 灭火抑制

目前国内工程中多使用七氟丙烷和全氟己酮灭火系统,但应急管理部天津消防研究所通过在实尺度储能预制舱内的电池模组灭火实验发现,全淹没设计的七氟丙烷、全氟己酮虽能有效扑灭储能电池模组的初期火灾,但无法防止模组发生复燃<sup>[79]</sup>。基于此,有学者通过搭建1:1的储能实验平台,探究了细水雾对储能电池模组的灭火效果<sup>[80-81]</sup>,并发现在模组内设置细水雾喷头能有效扑灭电池明火并防止复燃。然而,在储能系统高电压运行状态下,水基灭火剂的使用可能会造成电路短路或设备故障,因此其工程应用还需进一步研究和验证。近两年来,针对储能灭火痛点问题,研究人员又在新型灭火剂和改良的灭火方式方面有所发力。中国科学

技术大学采用间歇喷雾模式<sup>[82]</sup>释放灭火剂,在降低灭火剂用量的同时提高了灭火效率。同时,研究发现采用簇级释放全氟己酮的方式明显优于舱级释放方式。在新型灭火剂方面,研究人员探究了羧甲基纤维素与氯化铝溶液混合制备的水凝胶灭火剂的灭火性能<sup>[83]</sup>,以及含物理、化学复合添加剂水雾对电池火灾的抑制效果<sup>[84]</sup>。北京理工大学<sup>[85]</sup>研究了F-500对锂离子电池火灾的灭火机制,发现3%的F-500溶液可通过吸收特征气体和出色的冷却能力来抑制电池火灾。此外,液氮因其优秀的冷却和窒息灭火效能,受到了研究人员的重点关注<sup>[86-88]</sup>,应急管理部天津消防研究所正在基于实际尺度的储能预制舱液氮灭火试验,研发储能用液氮灭火系统和工程应用方案。

#### 4.4.3 通风排烟与泄爆抑爆

储能系统中电池热失控过程中释放的大量可燃气体在预制舱内积聚,极易引发系统的爆炸事故。为了防止储能爆炸事故的发生,需加入主动通风、抑爆和被动泄爆措施。目前我国缺少专门针对储能系统及储能电站工程的防烟排烟设施标准规范,《山东省建设工程消防设计审查验收技术指南(电化学储能电站)》(征求意见稿)中要求储能电站防烟排烟设施应按照《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251)相关规定进行设计。中国电力企业联合会团体标准《预制舱式磷酸铁锂电池储能电站消防技术规范》(T/CEC 373)<sup>[89]</sup>中要求通风系统应采用防爆型,具备联动启动和现场手动启动功能,且启动时每分钟排风量不小于设备间容积。

储能系统泄爆主要采用设置泄压口的泄爆方式,但目前国内并没有针对储能系统泄爆面积的计算方法,工程中多参考美国NFPA 68<sup>[90]</sup>中给出的方法进行计算设计。在抑爆方面,多利用惰性气体控制预制舱内可燃气体浓度、降低可燃气体极限氧浓度的方法来防止爆炸的发生。应急管理部天津消防研究所针对电池热失控产出易爆气体的含量、组分和爆炸极限等特征,研究了惰性气体主动惰化抑爆应用技术,以及兼具“灭火-降温-抑爆”功能的液氮、二氧化碳多相灭火剂联用技术,将实现灭火、降温、抑爆的一体化防控。

综上所述,目前针对锂离子电池储能的消防安全技术正处于发展阶段,对应的评价技术尚不健全和完善。未来在储能系统探测预警方面,应基于多



维数据泛在感知和高速云计算平台，构建大数据挖掘算法和人工智能模型，建立科学合理的探测预警工程应用技术标准体系，并提出探测预警效能的评价指标和方法；在灭火技术方面，需要研发清洁高效经济的灭火技术，并统一灭火设施试验方法和灭火效能评价指标，明确评价指标阈值，建立储能系统灭火设备效能定量分级评价方法；在通风排烟效能评价方面，需要研究明确储能系统通风排烟设施效能评价指标，建立通风排烟系统效能的分级评价方法；在泄爆与抑爆方面，需要研发高效成熟的泄爆抑爆技术，逐步建立储能用泄爆抑爆设施效能的评价技术和方法。

### 5 锂离子电池储能电站安全评价技术

锂离子电池储能电站的安全评价是一个庞大的体系，需要从电池安全、电气安全、运行状态、消防设计与配置、安装环境、工程规范性、可靠性与可维护性、运维管理、厂商服务等多个因素考虑，并根据储能电站的风险特性和评价需求选择合适的评价方法。表4梳理了国外标准、学术论文和技术报告中主要涉及的储能电站安全评价方法。IEC 62933-5-1-2017 中的安全评价方法相对具体：故障类型及其影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)、

危害与可操作性分析(HAZOP)等方法被推荐用于评价着火、爆炸或有毒气体排放的可能性，而失效模式效应与关键性分析法(FMECA)可用于低风险和低复杂度系统的安全评价。上述方法在其他国外标准中也得到了简要列举，其应用要依据IEC制定的相应规范。此外，学术界和工业界也研究了传统安全评价方法在储能电站中的应用。例如，DNV咨询公司2015年发布的大规模、固定式、并网的锂离子电池储能系统安全评估手册使用FMECA对不同层级故障的严重程度和概率进行量化，提出相应的缓解措施并形成最终的安全评价报告<sup>[91]</sup>。由美国能源部资助、桑迪亚(Sandia)国家实验室主导的技术报告(SAND2020-9360)《Grid-scale Energy Storage Hazard Analysis & Design Objectives for System Safety》使用系统理论过程分析(STPA)对发电侧的电池储能电站进行危险性分析<sup>[92]</sup>。STPA也被桑迪亚国家实验室和美国麻省理工学院的学者用于锂离子电池储能电站的安全评价，并与传统的概率风险评估(PRA)进行比较<sup>[93]</sup>。赫瑞瓦特大学马来西亚分校的学者则对STPA方法进行改进，提出了混合概率分析模式的安全评价方法(STPA-H)，在复杂储能电站的安全评价中表现出明显优势<sup>[94]</sup>。近期，美国独立研究所Jensen Hughes使用领结模型(Bowtie

表4 国外标准、学术论文和技术报告中举例的储能电站安全评价方法  
Table 4 Safety evaluation methods for energy storage plants as exemplified in foreign standards, academic papers and technical reports

标准/论文/技术报告	安全评价方法	方法依据/备注
IEC 系列规范: IEC 62933-5-1-2017, IEC 62933-5-2-2020, IEC 62619-2022	故障类型及其影响分析(FMEA)	IEC 60812
	失效模式效应与关键性分析法 (FMECA)	—
	故障树分析(FTA)	IEC 61025
	危害与可操作性分析(HAZOP)	IEC 61882
	系统理论事故模型和过程(STAMP)	—
UL 系列规范: UL 1973-2022, UL 9540-2020	故障树分析(FTA)	IEC 61025
	故障类型及其影响分析(FMEA)	IEC 60812
	保护层分析(LOPA)	IEC 61508
NFPA855-2023	故障树分析(FTA)	IEC 61025
	故障类型及其影响分析(FMEA)	IEC 60812
DNV (2015) <sup>[91]</sup>	失效模式效应与关键性分析法 (FMECA)	评估手册
美国 Sandia 国家实验室(2020) <sup>[92]</sup>	系统理论过程分析(STPA)	技术报告
Rosewater & Williams(2015) <sup>[93]</sup>	系统理论过程分析(STPA)	论文
Choo & Go(2022) <sup>[94]</sup>	混合系统理论过程分析(STPA-H)	论文
Conzen 等(2023) <sup>[95]</sup>	蝴蝶结分析法(Bowtie Analysis)	论文

model)确定储能电站的火灾和爆炸危险,并提出了缓解措施<sup>[95]</sup>。

综上,国内外的研究机构和行业组织在储能电站安全评价方法方面取得了一定进展,但随着储能电池技术的不断迭代,储能系统结构的不断升级,储能电站的安全评价将愈发复杂,传统安全评价方法的效率将面临严峻考验。因此,储能电站安全评价体系仍需进一步完善,需要结合储能电池本质安全提升、系统安装方式、消防有效性评价等技术的发展进行及时调整与更新安全风险,充分考虑储能系统投运后容量衰减、老化过程伴随的安全性能演变,以及全生命周期运行过程中的实时动态监测,进一步优化安全评价指标,提出可量化的科学评价方法。此外,随着物联网、大数据、人工智能等技术飞速发展,储能电站的管理运行也趋向智能化。基于大数据和人工智能的储能电站安全评价将为这一领域带来新的机遇。数值模拟技术可在设计规划阶段为储能电站的安全评价提供帮助,物联网传感器监测和人工智能算法可在工作过程中高效精准地实时评估安全风险,保证储能系统的安全运行。

## 6 结论与展望

为推动全球锂离子电池储能规模化安全应用,对储能系统的安全评价至关重要。本文重点从电池安全评价基础理论、数值模拟技术、安全测试评价技术和安全评价标准等方面进行了相关研究进展综述,并得到以下主要结论。

(1) 在故障导致热失控机理方面,国内外研究机构主要针对电池热失控机理及电池热失控演化与蔓延机制方面开展研究,对于储能故障导致电池热失控的全链条演化过程及机制缺乏系统认知。未来应通过构建储能系统故障与事故数据集,着眼于故障诱导电池热失控表现形式和演化机制的研究,明确对不同故障类型导致的电池滥用形式及电池热安全边界,揭示故障诱导下的储能电池热失控及致灾演化机制。

(2) 在数值模拟技术方面,国内外研究机构在电池单体热失控内部反应和温度表现,以及电池模组热失控传播等热安全模拟方面已进行了较为充分的研究,但关于热失控后产气-致灾行为的预测模型缺失,且针对大型储能系统的计算模型相对简化,模拟技术仍不完善。因此,未来需要建立故

障-电池热失控-产气模型及系统层级热失控燃爆耦合模型,提出储能系统全链条的安全模拟技术。

(3) 在安全评价技术方面,国内外研究机构主要针对储能用锂离子电池,规定了基本性能、安全性能等关键性能和技术指标的测试方法,但针对储能系统安全评价技术的研究相对有限,缺乏电气危害、火灾、爆炸和毒性等关键指标的定量评价,尚未针对应用场景和运行过程中的动态风开展评价方法研究。因此,构建覆盖多体系、多场景、多要素,融合动静态指标的安全性能等级评价体系,发展涵盖“单体-模组-簇-系统-电站”层层分级的储能系统安全性能等级评价技术,是未来的研究趋势。

(4) 在安全评价标准方面,国际上已发布 IEC 62619、IEC 63056、IEC 62933-5 系列标准以及 UL 1973、UL 9540 和 UL 9540A 等标准,涵盖了电池安全、储能系统安全和不同层级电池的热失控蔓延评价。国内发布了 GB 40165—2021、GB/T 36276、GB/T 36558 等电池、储能系统相关标准,但现有标准均不涉及锂离子电池储能系统的安全等级评价。因此,未来亟需制定国际适用的储能系统安全性能等级评价标准,为全球储能安全提供中国方案。

## 参考文献

- [1] WANG Q S, MAO B B, STOLIAROV S I, et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.
- [2] 中国能源研究会储能专委会. 储能产业研究白皮书2021[R]. 2021. China Energy Research Association Energy Storage Special Committee. Energy storage industry research white paper 2021 [R]. 2021.
- [3] FENG X N, REN D S, HE X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Joule, 2020, 4(4): 743-770.
- [4] LIU P J, LI Y Q, MAO B B, et al. Experimental study on thermal runaway and fire behaviors of large format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 192: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116949.
- [5] LIU P J, LIU C Q, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: doi: 10.1016/j.est.2020.101714.
- [6] LI H, DUAN Q L, ZHAO C P, et al. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  as cathode[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 375: 241-254.

- [7] International Electrotechnical Commission. IEC 62619 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications[S]. 2017.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 63056 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes-Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in electrical energy storage systems[S]. 2020.
- [9] NATIONS U. Recommendations[M]//Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Model Regulations. United Nations, 2015: 1-8.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 62281 Safety of primary and secondary lithium cells and batteries during transport[S]. 2019.
- [11] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 固定式电子设备用锂离子电池和电池组 安全技术规范: GB 40165—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Lithium ion cells and batteries used in stationary electronic equipments-Safety technical specification: GB 40165-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [12] JOINT CANADA-UNITED STATES NATIONAL STANDARD. UL 1973 STANDARD FOR SAFETY ANSI/CAN/UL-1973: Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications[S]. 2018.
- [13] Electrical energy storage (EES) systems-Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems-Electrochemical-based systems: IEC 62933-5-2 Ed. 1.0 b: 2020[S]. International Electrotechnical Commission [iec], 2020.
- [14] Electrical energy storage (EES) systems-Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems-General specification: IEC/TS 62933-5-1 Ed. 1.0 en: 2017[S]. International Electrotechnical Commission [iec], 2017.
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC 62933-5-4 Electrical energy storage(EES) systems Part 5-4-Safety test methods and procedures for grid integrated EES systems-Lithium ion battery-based systems[S]. 2018.
- [16] JOINT CANADA-UNITED STATES NATIONAL STANDARD. ANSI/CAN/UL-9540 Energy storage systems and equipment[S]. 2016.
- [17] JOINT CANADA-UNITED STATES NATIONAL STANDARD. UL 9540A test method for evaluating thermal runaway fire propagation in battery energy storage systems[S]. 2018.
- [18] National Fire Protection Association. NFPA 855 standard for the installation of stationary energy storage systems[S]. 2020.
- [19] 中国能源研究会储能专委会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2018[R]. 北京, 2018: 178-179.
- China Energy Research Association Energy Storage Special Committee, Zhongguancun Energy Storage Industry Technology Alliance. Energy storage industry research white paper 2018 [R]. Beijing, 2018: 178-179.
- [20] 刘天西. 高分子纳米纤维及其衍生物: 制备、结构与新能源应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- LIU T X. Polymer nanofibers and their derivatives[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [21] 冯旗. 尖晶石型钴酸锂储锂性能的研究[D]. 银川: 宁夏大学.
- FENG Q. Study on lithium storage performance of spinel type zinc cobaltate[D]. Yinchuan: Ningxia University .
- [22] 李泓, 许晓雄. 固态锂电池研发愿景和策略[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(5): 607-614.
- LI H, XU X X. R & D vision and strategies on solid lithium batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(5): 607-614.
- [23] ZHANG Y, CHENG S Y, MEI W X, et al. Understanding of thermal runaway mechanism of LiFePO<sub>4</sub> battery in-depth by three-level analysis[J]. Applied Energy, 2023, 336: doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120695.
- [24] FENG X N, SUN J, OUYANG M G, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 261-73.
- [25] SONG L F, HUANG Z H, MEI W X, et al. Thermal runaway propagation behavior and energy flow distribution analysis of 280 Ah LiFePO<sub>4</sub> battery[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 1066-1078.
- [26] ZHOU Z Z, ZHOU X D, WANG B X, et al. Experimentally exploring thermal runaway propagation and prevention in the prismatic lithium-ion battery with different connections[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 517-527.
- [27] HUANG Z H, ZHAO C P, LI H, et al. Experimental study on thermal runaway and its propagation in the large format lithium ion battery module with two electrical connection modes[J]. Energy, 2020, 205: doi: 10.1016/j.energy.2020.117906.
- [28] LAI X, WANG S Y, WANG H B, et al. Investigation of thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery modules under different trigger modes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 171: doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121080.
- [29] HUANG Z H, LIU J L, ZHAI H J, et al. Experimental investigation on the characteristics of thermal runaway and its propagation of large-format lithium ion batteries under overcharging and overheating conditions[J]. Energy, 2021, 233: doi: 10.1016/j.energy.2021.121103.
- [30] LOPEZ C F, JEEVARAJAN J A, MUKHERJEE P P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(9): A1905-A1915.
- [31] 付阳阳. 典型锂离子电池和电解液燃烧特性及航空运输环境对其影响机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- FU Y Y. Study on combustion characteristics of typical lithium-ion batteries and electrolytes and the influence mechanism of air transportation environment on them[D]. Hefei: University of Science and Technology of China .
- [32] HUANG Z H, LI X, WANG Q S, et al. Experimental investigation



- on thermal runaway propagation of large format lithium ion battery modules with two cathodes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 172: doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121077.
- [33] SAID A O, LEE C, STOLIAROV S I. Experimental investigation of cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays: Impact of cathode chemistry[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 446: doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227347.
- [34] SAID A O, LEE C, STOLIAROV S I, et al. Comprehensive analysis of dynamics and hazards associated with cascading failure in 18650 lithium ion cell arrays[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 415-428.
- [35] GAO S, LU L G, OUYANG M, et al. Experimental study on module-to-module thermal runaway-propagation in a battery pack[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(10): A2065-A2073.
- [36] 江发潮, 章方树, 徐成善, 等. 车用锂离子电池系统热蔓延试验与机理研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(14): 23-31.
- JIANG F C, ZHANG F S, XU C S, et al. Experimental study on the mechanism of thermal runaway propagation in lithium-ion battery pack for electric vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(14): 23-31.
- [37] COMAN P T, DARCY E C, VEJE C T, et al. Modelling Li-ion cell thermal runaway triggered by an internal short circuit device using an efficiency factor and Arrhenius formulations[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(4): A587-A593.
- [38] KONG D P, WANG G Q, PING P, et al. Numerical investigation of thermal runaway behavior of lithium-ion batteries with different battery materials and heating conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 189: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116661.
- [39] ZHANG Y, MEI W X, QIN P, et al. Numerical modeling on thermal runaway triggered by local overheating for lithium iron phosphate battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116928.
- [40] ZHANG L W, ZHAO P, XU M, et al. Computational identification of the safety regime of Li-ion battery thermal runaway[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114440.
- [41] 王洋, 卢旭, 张宇新, 等. 动力电池热失控排气策略[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(8): 2480-2487.
- WANG Y, LU X, ZHANG Y X, et al. Thermal runaway exhaust strategy of power battery[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(8): 2480-2487.
- [42] QIN P, SUN J H, WANG Q S. A new method to explore thermal and venting behavior of lithium-ion battery thermal runaway[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 486: doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.229357.
- [43] MAO B B, ZHAO C P, CHEN H D, et al. Experimental and modeling analysis of jet flow and fire dynamics of 18650-type lithium-ion battery[J]. *Applied Energy*, 2021, 281: doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116054.
- [44] COMAN P T, MÁTÉFI-TEMPFLI S, VEJE C T, et al. Modeling vaporization, gas generation and venting in Li-ion battery cells with a dimethyl carbonate electrolyte[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(9): A1858-A1865.
- [45] QIN P, JIA Z Z, WU J Y, et al. The thermal runaway analysis on LiFePO<sub>4</sub> electrical energy storage packs with different venting areas and void volumes[J]. *Applied Energy*, 2022, 313: doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118767.
- [46] LI W S, LEÓN QUIROGA V, CROMPTON K R, et al. High resolution 3-D simulations of venting in 18650 lithium-ion cells[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: doi: 10.3389/fenrg.2021.788239.
- [47] KIM J, MALLARAPU A, FINEGAN D P, et al. Modeling cell venting and gas-phase reactions in 18650 lithium ion batteries during thermal runaway[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 489: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229496.
- [48] KONG D P, WANG G Q, PING P, et al. A coupled conjugate heat transfer and CFD model for the thermal runaway evolution and jet fire of 18650 lithium-ion battery under thermal abuse[J]. *eTransportation*, 2022, 12: doi: 10.1016/j.etrans.2022.100157.
- [49] WANG G Q, KONG D P, PING P, et al. Revealing particle venting of lithium-ion batteries during thermal runaway: A multi-scale model toward multiphase process[J]. *eTransportation*, 2023, 16: doi: 10.1016/j.etrans.2023.100237.
- [50] 王功全, 孔得朋, 平平, 等. 锂离子电池热失控模型综述[J]. *电气工程学报*, 2022, 17(4): 61-71.
- WANG G Q, KONG D P, PING P, et al. Thermal runaway modeling of lithium-ion batteries: A review[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2022, 17(4): 61-71.
- [51] QI C, ZHU Y L, GAO F, et al. Mathematical model for thermal behavior of lithium ion battery pack under overcharge[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 552-563.
- [52] JIN C Y, SUN Y D, WANG H B, et al. Heating power and heating energy effect on the thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery module: Experiments and modeling[J]. *Applied Energy*, 2022, 312: doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118760.
- [53] FENG X N, LU L G, OUYANG M G, et al. A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module[J]. *Energy*, 2016, 115: 194-208.
- [54] KIZILEL R, SABBAAH R, SELMAN J R, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105-1112.
- [55] JIANG Z Y, QU Z G, ZHANG J F, et al. Rapid prediction method for thermal runaway propagation in battery pack based on lumped thermal resistance network and electric circuit analogy[J]. *Applied Energy*, 2020, 268: doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115007.
- [56] ZHOU H K, DAI C H, LIU Y, et al. Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 473: doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228545.
- [57] XU J, LAN C J, QIAO Y, et al. Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 883-890.

- [58] 张越, 孔得朋, 平平. 液冷板抑制锂离子电池组热失控蔓延性能及优化设计[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2432-2441.  
ZHANG Y, KONG D P, PING P. Performance and design optimization of a cold plate for inhibiting thermal runaway propagation of lithium-ion battery packs[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2432-2441.
- [59] MISHRA D, SHAH K, JAIN A. Investigation of the impact of flow of vented gas on propagation of thermal runaway in a Li-ion battery pack[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(6): doi: 10.1149/1945-7111/ac0a20.
- [60] WANG G Q, PING P, ZHANG Y, et al. Modeling thermal runaway propagation of lithium-ion batteries under impacts of ceiling jet fire[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 175: 524-540.
- [61] WANG G Q, KONG D P, PING P, et al. Modeling venting behavior of lithium-ion batteries during thermal runaway propagation by coupling CFD and thermal resistance network[J]. Applied Energy, 2023, 334: doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120660.
- [62] 徐成善, 鲁博瑞, 张梦启, 等. 储能锂离子电池预制舱热失控烟气流动研究[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2418-2431.  
XU C S, LU B R, ZHANG M Q, et al. Study on thermal runaway gas evolution in the lithium-ion battery energy storage cabin[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2418-2431.
- [63] CHEN J, REN D S, HSU H, et al. Investigating the thermal runaway features of lithium-ion batteries using a thermal resistance network model[J]. Applied Energy, 2021, 295: doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117038.
- [64] JIN Y, ZHAO Z X, MIAO S, et al. Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: doi: 10.1016/j.est.2021.102987.
- [65] 尹康涌, 陶风波, 梁伟, 等. 双层结构预制舱式磷酸铁锂储能电站热失控气体爆炸模拟[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2488-2496.  
YIN K Y, TAO F B, LIANG W, et al. Simulation of thermal runaway gas explosion in double-layer prefabricated cabin lithium iron phosphate energy storage power station[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2488-2496.
- [66] 牛志远, 金阳, 孙磊, 等. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站燃爆事故模拟及安全防护仿真研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1924-1933.  
NIU Z Y, JIN Y, SUN L, et al. Safety protection simulation research and fire explosion accident simulation of prefabricated compartment lithium iron phosphate energy storage power station[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1924-1933.
- [67] 禹进, 郭川钰, 张伟阔, 等. 磷酸铁锂电池在储能预制舱中的火灾模拟及其消防应急技术仿真研究[J/OL]. 高电压技术:1-9[2023-06-26]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221220>.  
YU J, GUO C Y, ZHANG W G, et al. Fire simulation of lithium iron phosphate battery in energy storage prefabricated chamber and its simulation study of fire emergency technology [J/OL]. High Voltage Technology:1-9 [2023-03-13]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221220>.
- [68] ZHAI H J, CHI M S, LI J Y, et al. Thermal runaway propagation in large format lithium ion battery modules under inclined ceilings[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: doi: 10.1016/j.est.2022.104477.
- [69] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 31241—2022 便携式电子产品用锂离子电池和电池组 安全技术规范[S]. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. GB 31241—2022 Lithium ion cells and batteries used in portable electronic equipments—Safety technical specification
- [70] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电动汽车用动力电池安全要求及试验方法: GB/T 31485—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety requirements and test methods for traction battery of electric vehicle: GB/T 31485-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [71] JOINT CANADA-UNITED STATES NATIONAL STANDARD. UL 1642 UL Standard For Safety Lithium Batteries[S]. 2020.
- [72] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力储能用锂离子电池: GB/T 36276—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
General Administration of Quality Supervision, Standardization Administration of the People's Republic of China. Lithium ion battery for electrical energy storage: GB/T 36276—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [73] International Electrotechnical Commission. IEC 62477-1 Safety requirements for power electronic converter systems and equipment-Part 1: General [S]. 2022.
- [74] International Electrotechnical Commission. IEC 62040 Uninterruptible power systems (UPS) [S]. 2018.
- [75] International Electrotechnical Commission. IEC 62485-5 Safety requirements for secondary batteries and battery installations-Part 5: Safe operation of stationary lithium ion batteries [S]. 2021
- [76] 陈银, 肖如, 崔怡琳, 等. 储能电站锂离子电池火灾早期预警与抑制技术研究综述[J]. 电气工程学报, 2022, 17(4): 72-87.  
CHEN Y, XIAO R, CUI Y L, et al. Research review on early warning and suppression technology of lithium-ion battery fire in energy storage power station[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(4): 72-87.
- [77] 周正, 徐仕先, 丁卫华, 等. 电化学储能安全性分析及预警技术进展[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(2): 54-56.  
ZHOU Z, XU S X, DING W H, et al. Progress in safety analysis and early warning technology of electrochemical energy storage[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(2): 54-56.
- [78] 孙丙香, 苏晓佳, 马仕昌, 等. 基于低频阻抗谱和健康特征融合的锂离子电池健康状态主动探测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 23-30.  
SUN B X, SU X J, MA S C, et al. An active detection method of lithium battery health state based on low-frequency EIS and health feature fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 23-30.
- [79] 卓萍, 高飞, 路世昌. 不同灭火装置对磷酸铁锂电池模组火灾的灭火效果[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(2): 152-156.

- ZHUO P, GAO F, LU S C. Study on fire extinguishing effect of different fire extinguishing devices on lithium-ion phosphate battery module fire[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(2): 152-156.
- [80] 赵蓝天, 金阳, 赵智兴, 等. 磷酸铁锂电池模组过充热失控特性及细水雾灭火效果, *电力工程技术*, 2021, 040(001): 195-200, 207.
- ZHAO L T, JIN Y, ZHAO Z X, et al. Thermal runaway characteristics of overcharged LiFePO<sub>4</sub> battery modules and the effect of fine water mist fire extinguishing, *Power Engineering Technology*, 2021, 040(001): 195-200, 207.
- [81] 郭莉, 吴静云, 黄峥, 等. 不同压强细水雾对磷酸铁锂电池模组的灭火效果[J]. *高电压技术*, 2021, 47(3): 1002-1011.
- GUO L, WU J Y, HUANG Z, et al. Fire extinguishing effect of water mist with different pressures on LFP battery module[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(3): 1002-1011.
- [82] MENG X D, LI S, FU W D, et al. Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires[J]. *eTransportation*, 2022, 11: doi: 10.1016/j.etrans.2021.100142.
- [83] 陆剑心, 张英, 马出原, 等. 水凝胶对磷酸铁锂电池灭火实验性能[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11: 2637-2644.
- LU J X, ZHANG Y, MA Z Y, et al. Experimental performance of hydrogel on lithium iron phosphate batteries for fire suppression[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11: 2637-2644.
- [84] WANG W H, HE S, HE T F, et al. Suppression behavior of water mist containing compound additives on lithium-ion batteries fire[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 161: 476-487.
- [85] YUAN S, CHANG C Y, ZHOU Y, et al. The extinguishment mechanisms of a micelle encapsulator F-500 on lithium-ion battery fires[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: doi: 10.1016/j.est.2022.105186.
- [86] HUANG Z H, LIU P J, DUAN Q L, et al. Experimental investigation on the cooling and suppression effects of liquid nitrogen on the thermal runaway of lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 495: doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229795.
- [87] WANG Z R, WANG K, WANG J L, et al. Inhibition effect of liquid nitrogen on thermal runaway propagation of lithium ion batteries in confined space[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 79: doi: 10.1016/j.jlp.2022.104853.
- [88] HUANG Z H, ZHANG Y, SONG L F, et al. Preventing effect of liquid nitrogen on the thermal runaway propagation in 18650 lithium ion battery modules[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 168: 42-53.
- [89] 中国电力企业联合会. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站消防技术规范: T/CEC 373—2020[S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [90] National Fire Protection Association. NFPA 68: Standard on explosion protection by deflagration venting, 2007 Edition: NFPA 68-2007[S]. 2007.
- [91] VERHAEGH N, BURGT J V D, TIGGELMAN A, et al. STALLION Handbook on safety assessments for large-scale, stationary, grid-connected Li ion energy storage systems[R/OL]. [2015-03-31]. [https://batterystandards.info/sites/batterystandards/files/d8\\_4\\_stallion\\_handbook\\_on\\_li-ion\\_safety\\_assessment\\_final.pdf](https://batterystandards.info/sites/batterystandards/files/d8_4_stallion_handbook_on_li-ion_safety_assessment_final.pdf).
- [92] ROSEWATER D M. Grid-scale energy storage hazard analysis and design objectives for system safety[R]. United States: the Energy Storage Systems Safety and Reliability Forum, 2021.
- [93] ROSEWATER D, WILLIAMS A. Analyzing system safety in lithium-ion grid energy storage[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 300: 460-471.
- [94] CHOO B L, GO Y I. Energy storage for large scale/utility renewable energy system-An enhanced safety model and risk assessment[J]. *Renewable Energy Focus*, 2022, 42: 79-96.
- [95] CONZEN J, LAKSHMIPATHY S, KAPAHI A, et al. Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 81: doi: 10.1016/j.jlp.2022.104932.