DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.01.026

锂离子电池储能系统火灾爆炸风险分析与防控技术研究进展

陈素文[1,2*]，孔冠杰[2]，张亚雷[3]，李国强[1,2]

（1. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室，上海 200092；2. 同济大学土木工程学院，上海 200092；
3. 同济大学环境科学与工程学院，上海 200092）

摘要：在全球碳中和与能源结构转型背景下，锂离子电池储能系统作为新型电力系统的核心基础设施，呈现规模化快速发展态势，但相应火灾爆炸风险已成为制约行业安全与可持续发展的关键瓶颈，如国内外锂离子电池储能安全事故频发，暴露出热失控机制复杂、安全防控技术滞后、全生命周期管理不足等问题。本文以“机理–评估–防控”为研究框架，系统分析锂离子电池储能系统火灾爆炸事故的诱因与演化机理，识别“单体失效–系统扩散”多层级风险特征和影响因素，基于“本征安全–监测预警–多级防护”技术体系综述当前安全防控技术的研究现状与局限性。研究揭示了锂离子电池储能安全防控面临碎片化技术突破与系统性缺陷并存、成本效益失衡、新型场景风险涌现、全生命周期安全管理难等核心矛盾。为提高锂离子电池储能系统的安全韧性，提出了助力储能系统高质量发展的若干建议：聚焦锂离子电池安全基础技术研究，深化系统集成与工程化安全设计，强化全生命周期安全管理，优化标准体系和监管机制，完善应急响应和保险体系，促进产业链协同和跨学科融合。

关键词：锂离子电池；储能系统；火灾爆炸风险；防控策略；安全韧性

中图分类号：TM911；X932　　**文献标识码：**A

Fire and Explosion Risk Analysis and Prevention and Control Technology of Lithium-ion Battery Energy Storage Systems

Chen Suwen[1,2*], Kong Guanjie[2], Zhang Yalei[3], Li Guoqiang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the context of global carbon neutrality and energy structure transformation, the lithium-ion battery energy storage system, as a core infrastructure of a new power system, is experiencing rapid large-scale development. However, fire and explosion risks have emerged as a critical bottleneck, hindering the safe and sustainable development of the energy storage industry. In recent years, frequent safety accidents involving lithium-ion battery energy storage systems, both in China and abroad, have highlighted systemic challenges such as complex mechanisms of thermal runaway, lagging safety prevention and control technologies, and

收稿日期：2025-01-24；**修回日期：**2025-04-07

通讯作者：*陈素文，同济大学土木工程学院教授，研究方向为工程结构抗爆；E-mail: swchen@tongji.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“新形势下长江流域发展与安全战略研究”(2023-HYZD-02)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

insufficient lifecycle management. This study adopts a “mechanism-assessment-prevention and control” research framework to systematically analyze the causes and evolution mechanisms of fire and explosion accidents regarding lithium-ion battery energy storage systems. It identifies the hierarchical risk characteristics, described as “single cell failure to system-wide failure propagation.” Following a strategy of “battery safety-early warning-hierarchical protection,” the study reviews the current research status of safety prevention and control technologies. Furthermore, it reveals key challenges in the safety prevention and control technologies for lithium-ion battery energy storage systems, including the coexistence of individual technological breakthroughs and systemic defects, imbalance between cost and benefit, emergence of risks in new scenarios, and difficulties in lifecycle safety management. To enhance the safety resilience of lithium-ion battery energy storage systems and support the high-quality development of new energy systems, this study recommends focusing on fundamental research on lithium-ion battery safety, deepening system integration and engineering safety design, strengthening lifecycle safety management, optimizing standards systems and regulatory mechanisms, improving emergency response and insurance systems, and promoting industry chain collaboration and interdisciplinary integration.
Keywords: lithium-ion battery; energy storage system; fire and explosion risks; prevention and control strategies; safety resilience

一、前言

在全球碳中和与产业升级浪潮的驱动下，能源结构转型已成为不可逆的时代命题。储能技术作为新型电力系统的关键支撑，通过平抑新能源波动、优化电网运行，正从“配套角色”跃升为能源革命的核心基础设施。2023 年，全球储能新增装机规模首超历史累计，我国以 51 GWh 贡献近半数增量，领跑全球市场；2024 年，我国新型储能装机规模首次超过了抽水蓄能，达到 78.3 GW/184.2 GWh，其中新增投运规模为 43.7 GW/109.8 GWh，同比翻了一番[1,2]。随着新型储能的规模化扩张与技术迭代，其安全隐患也在增长。以锂离子电池储能为代表的技术路线虽占据主导，却因热失控频发安全事故，造成人员伤亡与巨额经济损失，致使产业快速发展与安全防控滞后的尖锐矛盾愈发凸显。

立足“双碳”目标与新型能源体系建设需求，破解锂离子电池储能安全困局不仅关乎技术迭代，更是国家能源战略安全的必然选择。因此深入理解锂离子电池储能安全风险、探讨安全防控技术壁垒与实践挑战极具迫切性。已有研究针对储能系统火灾安全等[3]进行了总结，但对爆炸风险、安全评价和安全防控新技术与发展趋势等问题关注不足。本文从“机理 – 评估 – 防控”三个维度构建研究框架，系统解构锂离子电池储能火灾爆炸事故诱因与发展机制，分析“单体失效 – 系统扩散”的危险性，总结“本征安全 – 监测预警 – 多级防护”技术现状与关键问题，进而凝练相关技术发展趋势、提出行业发展建议，以期为储能产业由“规模优先”向“安全为基”的范式转型提供理论支撑与实践路径，提升锂离子电池储能系统“全生命周期 – 全场景覆盖”的安全韧性。相应研究框架如图 1 所示。

二、锂离子电池储能系统火灾爆炸事故诱因

由热、电、机械等滥用条件或电池内部缺陷 / 污染发展触发的热失控是电化学储能事故发生的起点。在电化学储能系统中，热滥用、电滥用、机械滥用与内短路之间呈现互为因果的链式失效关系，热滥用是导致热失控的直接原因，内短路一般是三种滥用形式下的共性特征[4]。其中，电滥用（如过充、过放、大倍率运行）通过诱发锂枝晶生长或集流体腐蚀引发内短路；机械滥用（如碰撞、挤压）直接破坏电池结构完整性，导致电极短路；热滥用（如局部过热、环境高温）则促使隔膜熔融收缩或电解液分解，加剧内短路风险。内短路形成后，焦耳热与化学反应热的耦合释放将进一步触发热失控，形成自强化恶性循环。内部缺陷 / 污染会导致自诱发内短路，但其潜伏期较长，机制复杂尚未清楚揭示，目前针对自诱发内短路的替代测试、建模和诊断方法仍是研究重点[5,6]。在储能电站中，热滥用可能源于散热设计缺陷、热管理系统失效或异常环境温升；电滥用常由电池管理系统（BMS）保护阈值失准、电网波动或功率调度策略不当、电池间的不一致性、水浸泡、配套电气设施的拉弧短路和对地故障等引发；机械滥用则多与运输安装损伤、结构老化形变或外部冲击（如地震、异物侵入）相关。

在正常使用条件下，电池由于内阻的存在会产生一定的热量，但相对可控。然而在滥用条件下，由于内短路或正负极之间的化学反应串扰[7]，电池内部产生热量积累，引起一系列副反应，如固体电解质界面（SEI）膜分解、负极 – 电解液反应、隔膜熔化、正极分解反应、电解质溶液分解反应、负极与黏接剂反应等[4]，释放出大量热量。在电池储能

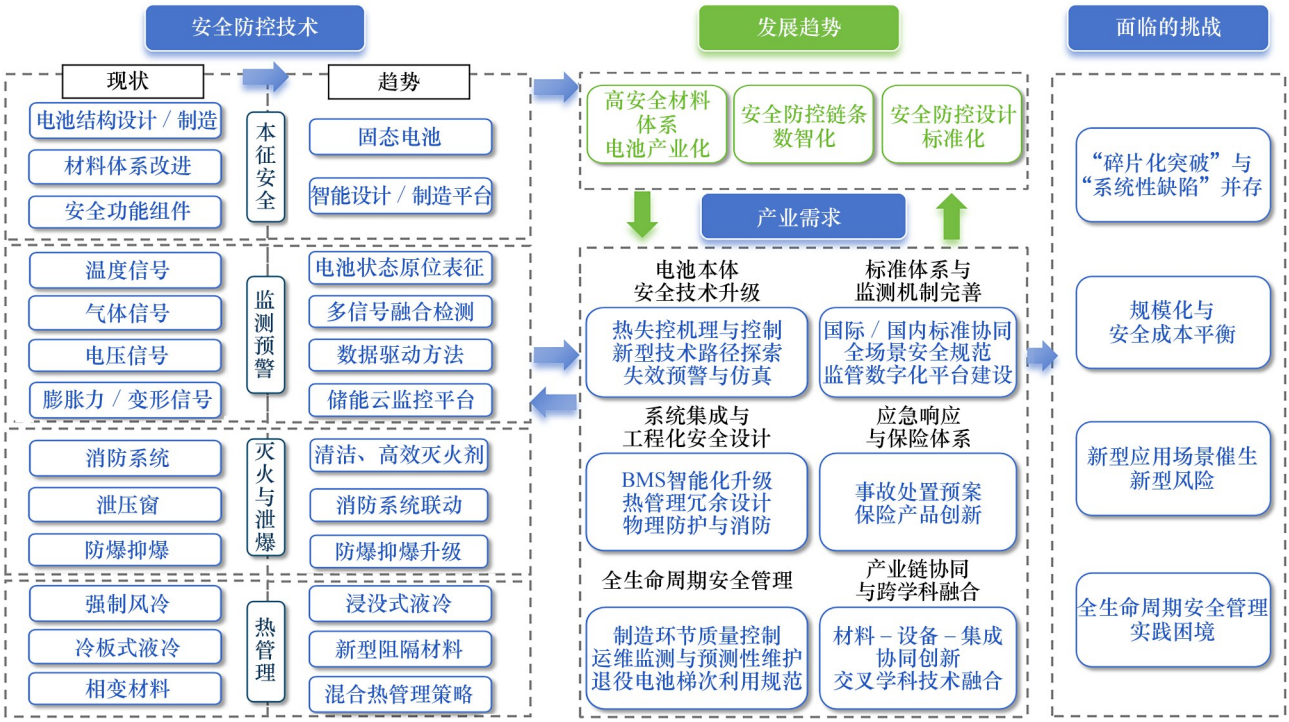

图1　锂离子电池储能系统火灾爆炸风险防控技术发展研究框架

系统中，单节电池发生热失控释放的热量通过对流、辐射、传导等形式将热传递到相邻电池，当发生热失控电池周围的电池温度达到热失控触发温度时，即诱发电池间的热失控蔓延（TRP），甚至进一步造成整个模组和电池包的热失控。

电池热失控过程中会伴生产气和排气行为。一般锂电池热失控后产生气体的主要成分是 H_2、CO_2、CO、CH_4、C_2H_6、C_2H_4、C_3H_8、C_3H_6 和电解液蒸气等，同时可能含有 HF、HCl 等有毒气体；各组分含量由于电池状态、电池容量、测量环境、测试手段等不同而有所区别，一般 H_2、CO_2、CO 三种组分的含量居前。在排气前，可将电池看作一个封闭系统，随着电池内部压力的增加，电池会发生膨胀变形。电池内部的压力达到一定阈值后，安全阀打开，副反应产生的气体和电解液喷出，同时也会有一些内部反应物的固体颗粒，此时电池变为一个开放体系，但由于内部温度仍然较高，电解液会继续蒸发。

当锂离子电池排放的可燃气体遇到点火源时，如喷射的高温固体颗粒，甚至电池高温表面，喷射气体就会燃烧形成喷射火。此外，电池喷发过程可能改变电弧形成的介质氛围、破坏电气部件绝缘包覆、改变电气间距，使击穿电弧更容易发生[8]，从而点燃可燃气体。如果气体在排放后没有立即被点燃，混合气体会向周围扩散或积聚在受限空间，当浓度达到爆炸极限时，在存在上述点火源的情况下将产生爆炸。在热失控蔓延初期，电池包安全阀开启后进入电池包的空气量有限，可能火势并不明显，但是电池排气喷出的高温颗粒物吸附在电池包顶板，由于温度远高于气体温度，颗粒物对电池包顶板的传热会导致其内部产生热应力，造成结构失效[9]，即火焰“烧穿”电池包。当电池包结构失效后，大量空气与热失控气体混合，产生剧烈的燃烧现象[10]。

三、锂离子电池储能系统火灾爆炸特性分析

（一）单体电池火灾爆炸特性分析

研究表明，一般情况下不同正极材料的热稳定性顺序为磷酸铁锂（LFP）>锰酸锂（LMO）>镍钴锰酸锂（NCM）>镍钴铝（NCA）>钴酸锂（LCO）[11]。高镍氧化物正极材料 $LiNi_xM_{1-x}O_2$（x≥0.8，M=Co，Mn，Al，Mg 等）具有更高的能量密度和电导率，即使在较低温度下也能延长电动汽车的续航里程，近年来受到广泛关注[12,13]。然而随着镍含量的增加，正极材料热稳定性变差[14]，针对此类正

极材料的热稳定性评估和热安全性改善仍是当前的研究重点[15]。

电动汽车中常采用的三元锂电池的正极为层状的NCM，在高温下会发生相变并释放大量活性氧与电解液和石墨负极发生反应，产生大量CO和CO_2，推动电池温度迅速上升，电池内部的热失控强度一般较高，热失控过程中的温升速率和所能达到的最高温度普遍高于LFP电池。而橄榄石形状的LFP热稳定性好，发生热失控的概率较低，所以目前国内储能采用电池的主流技术类型为LFP电池。但是LFP的氧化程度较低，强P—O共价键使LFP在热失控时免于释放大量O_2，导致H_2等还原性气体无法在热失控过程中被充分氧化，因此在大多数热失控产气测试中，LFP电池热失控产生气体中的H_2和C_2H_4含量高于NCM电池，而CO和CO_2的含量相对较低。

电池热失控气体的燃爆危险性可通过热释放速率、层流燃烧速度、爆炸极限和爆炸超压等指标来评估。相较于NCM电池，在过充和过热条件下，气体喷射是LFP电池热失控的主要行为，一般不会出现射流火。但在针刺条件下，穿刺针和电池外壳之间摩擦产生的火星可能点燃可燃气体，火焰首先从刺孔处喷出，并在安全阀处形成射流火[16]。由于实验条件和触发方式的差异，不同研究测得的LFP电池火焰的峰值热释放速率表现出一定的随机性，但大体上随着容量增加，峰值热释放速率逐渐升高，且对于200~300 Ah的大容量LFP电池，峰值热释放速率逐渐趋于稳定[3]。实验研究表明[17~19]，由于H_2的最低爆炸极限（LEL）远低于CO，LFP电池热失控气体的爆炸极限相较于NCM电池更低，但NCM电池的爆炸上限（UEL）略高于LFP电池；LFP电池热失控产气的爆炸超压更高，可能对相邻电池、电池包甚至电池舱体的机械结构带来更不利的影响；由于H_2和C_2H_4的含量较高，LFP电池热失控气体层流燃烧速度更快。即不同正极材料电池内部的热失控强度和外部燃爆危险性之间存在协调现象[19]。因此，虽然LFP电池发生热失控的概率较低，但一旦发生热失控，其产生的气体爆炸风险和危险性更高。

除H_2、C_2H_4等可燃气体外，电解液蒸气的危害也不容忽视，2021年北京大红门储能电站的火灾爆炸事故很大程度上归咎于电解液蒸气爆炸。锂离子电池的电解液由有机溶剂、锂盐和添加剂三类物质组成，碳酸乙烯酯（EC）、碳酸丙烯酯（PC）、碳酸二甲酯（DMC）、碳酸二乙酯（DEC）、碳酸甲乙酯（EMC）等碳酸酯类是最常用的有机溶剂。由于这些有机溶剂的沸点较低，在电池热失控的高温下会迅速蒸发，安全阀开启后随可燃气体一起通过安全阀排出。有学者[20]使用20 L球形爆炸容器测量了三种常见电解质溶剂（DMC、EMC和DEC）的爆炸特性，并通过化学动力学分析软件Cantera对爆炸压力结果进行了理论分析，发现它们的爆炸强度参数与H_2、CH_4和C_3H_8相似且略高，但该研究未考虑多相混合爆炸危险性。此后，有学者研究了可燃气体与DMC混合的爆炸危险性[21]，研究结果表明，DMC的存在将增加混合物的爆炸危险性。近期，有学者基于加速量热仪实验确定了340 Ah LFP电池第一次排气产物中的可燃气体和电解液蒸气两种成分含量的真实比例，并基于该比例通过改进的20 L爆炸球测定了混合物的爆炸特性参数[22]。结果表明，在两相系统的耦合爆炸中，EMC使系统更容易爆炸，具有更大的爆炸威力，而热失控气体扩大了其爆炸浓度范围。它们共同弥补了彼此在单相介质爆炸参数上的不足，从而提高了两相系统的爆炸危险性。但是，上述研究大多采用100%荷电状态（SOC）的电池进行实验，并且在排气过后收集产物进行分析，忽略了电池不同状态（SOC、健康状态（SOH））对排气产物的影响以及电池排气过程本身的动态特征，并且相关的理论建模工作较为匮乏，对多相产物爆炸机理认知尚存一定的局限性。

在排气过程中，高温的射流火焰可能会氧化固体颗粒并生成一些烟尘，其主要成分是碳。模拟研究表明[23]，固体颗粒的存在会导致：可燃气体点火时间延迟，火焰温度上升减缓；射流火焰不再呈现规则的火炬形状，存在显著的湍流扰动；相邻电池表面的辐射和对流传热速率提高。因此，固体颗粒对相邻电池的加热效应非常重要，这将对电池间的TRP产生影响。此外，固体颗粒粉尘的存在也会增加可燃气体的爆炸危险性[24]。然而目前固体颗粒的喷射机制、传热贡献以及多相产物之间的相互作用机理尚不清晰。

明确电池热失控燃烧和爆炸特性是储能系统安全设计的前提。中国科学技术大学团队发现锂离子电池的燃烧过程通常经历第一喷射火阶段、稳定燃

烧阶段、第二甚至第三喷射火阶段、最终稳定燃烧阶段以及熄灭阶段[25]，多阶段的喷射火焰是锂离子电池燃烧的特殊现象。随着SOC的增加，燃烧反应将更加剧烈，100%SOC电池的归一化峰值热释放速率甚至与燃油相当[26]。该团队还通过计算流体力学（CFD）还原了火灾或爆炸前的气体扩散过程[27]，研究表明，开放空间中爆燃产生的火球引起了热失控并喷射火焰。由于可燃区（燃料–氧气混合区）在安全阀打开后迅速扩大，爆燃倾向于发生于安全阀的上方位置，而非发生在安全阀处[27]。因此，在电池包设计时，需避免可燃气体在阀体上方形成混合聚集区，通过物理引导将可燃气体快速分散至非敏感区域；结合LFP产气特性优化泄压阀开启压力阈值，平衡泄压效率与气体可燃风险。此外，应制定可燃气体扩散状态与爆燃能量的量化评估方法，建立不同通风条件下的气体危险浓度阈值数据库，探究多尺度通风系统（电芯–模组–机柜–集装箱）的协同防护效能。

北京理工大学团队通过实验数据分析和理论建模，对开放环境下NCM软包电池的爆炸特性进行了比较系统的研究，发现爆炸冲击波速随着SOC的增大而增大，确定了爆燃到爆轰的边界条件，建立了电池爆炸的等效TNT模型，提出了爆炸风险和灾害评估方法[28~30]。电池包是封装构型，爆炸冲击波可能会在电池包中来回反射并形成马赫杆，爆燃将会转变为更严重的爆轰，因而可考虑设置吸能材料来改进电池包设计。此外，相关理论分析手段可为LFP电池爆炸危险性的分析提供参考。

（二）“模组–包–舱体”多层级火灾爆炸特性分析

对模组、电池包、电池簇和电池舱层级火灾爆炸危险性进行分析的前提是明确热失控多层级蔓延特性。对于模组和电池包层级的热失控蔓延特性，目前多采用实验以及模拟方法进行研究。而对于电池簇和电池舱层级的热失控蔓延，实验成本和危险性均不可控，一般采用数值模拟进行研究，目前仅阳光电源股份有限公司和比亚迪股份有限公司等公司公开报道了针对单个和多个储能舱体的大规模燃烧测试[31,32]。

目前，对模组内热失控在不同影响因素下蔓延特性的探究相对充分，如分析了不同电池形状（方形、软包、圆柱）、不同电极体系（三元、LFP）、不同电池状态（SOC、SOH）、电连接方式（串联、并联）、散热条件（风冷、液冷、相变冷却）、热失控触发条件（加热、针刺、过充）和空间状态（封闭、开放、半开放）等对TRP的影响。① 相较于方形和软包电池侧面直接接触加热，圆柱电池的弧形表面减少了热量传递。在圆柱电池模组中，TRP可能主要由电连接、喷出高温物质等因素影响，而对于方壳及软包电池，传热可能是更重要的影响因素[33]。② 相较于三元电池，LFP电池发生TRP的难度较大，针对不同SOC下LFP电池模组的TRP实验表明，只有在100% SOC下，才会发生TRP[34]。③ 高SOC下，热失控更加剧烈。老化会改变电池特性，增加电池发生热失控的风险，但是由于内部活性材料的损失，热失控剧烈程度低于新鲜电池，且热失控特性与老化路径相关[35]。④ 并联的电连接方式会加速TRP，促进正在发生热失控的电池释放更多能量，还会缩短电池排气和热失控之间的时间间隔[36]，不利于热失控预警。⑤ 在电池热失控触发后，将热量进行快速且合理的疏导，避免大量传递至临近电池是抑制TRP的关键，目前主要有风冷技术、液冷技术和相变冷却技术[37]。风冷技术的研究主要关注基于强制空气冷却的电池热管理系统改进，包括电池排列和气流通道设计。液冷技术的研究主要关注液体冷却剂的选择、流道的优化、流速的优化等。相变冷却的研究主要关注解决相变材料（PCM）热导率差、可用潜热有限和易燃的缺点。通过添加金属颗粒与碳纳米管等高导热添加剂可得到高热导率的复合相变材料，通过将PCM与微通道冷板、液冷流体通道等其他组件集成可有效解决潜热有限的问题，可通过添加阻燃剂来降低易燃性。由于流体的热导率更高，液体冷却系统具有更明显的散热能力、更快的冷却速度，所以液冷技术正成为目前储能系统冷却形式的主流选择。同时，得益于高潜热、高比热、化学稳定、无毒无腐蚀性，以及操作方便和维护成本低等特点，PCM近年来也逐步得到应用，但仍需深入研究以探索大规模商业应用的可行性。⑥ 不同触发方式对模组前三节电池TRP行为产生影响，对后几节电池的影响不大[38]。⑦ 相较于封闭体系，开放体系的电池爆炸、电池喷射出的火焰对其他电池影响较小，而受限空间内的热失控火焰将促进模组内热失控的传播[39]。

当某一模组完全失控并起火时，喷射火焰将引

起并主导竖向热失控传播，进而导致模组间的TRP行为。TRP一般表现出顺序蔓延、无序蔓延和同步蔓延的传播特征[6]，其中顺序蔓延和无序蔓延指空间尺度传播特征，同步蔓延指时间尺度传播特征。热失控在空间尺度无序蔓延的同时，一般表现出同步蔓延的特点，即不同位置多个电池的热失控在一个很小的时间窗口内发生。TRP初期，在相邻电池固体传热主导下，触发热失控电池所在的下层模组一般表现出顺序蔓延的特征；由于热失控产生的火焰预热效应，上层模组的TRP加快，能量释放更加集中，热危害更大，但上层模组的TRP顺序在不同实验中有所差别，即表现出同步蔓延和无序蔓延的特点[10,36,40,41]。当模组间TRP无法抑制时，可能进一步形成电池包层级的TRP。由于同步蔓延期间能量释放比较集中，对应着更大的热释放率，因此在该蔓延期间，高温烟雾烧穿了电池包顶盖，导致大量气体进入与可燃气体混合，试验观察到猛烈喷射火焰，电池外壳损坏和质量损失更严重。然而，由于电池表面接触传热、火焰、烟气流动等传热机制相互耦合以及电池排气、内部化学反应进程本身的随机性，尚不清楚哪种类型的传热效应在触发热失控中起关键作用[6,32,36,37]。

电池包层级TRP特性的研究相对匮乏。相较于模组，TRP过程中电池包内相邻电池的传热量增加，意味着电池包内可能更容易发生TRP[3]。热失控触发方式同样影响电池包TRP特性，过充条件比热触发条件更具危害性[42]，因此对储能系统充电状态的监测极为重要。由于电池包是封装的，在顶板的存在下，热失控火焰将促进TRP；此外，电池喷阀产物将在电池包上部空间积聚，合理的电池包通风面积、空腔体积和通风策略[43,44]可使可燃气体体积分数维持在爆炸下限（LEL）以下，从而避免爆炸事故的发生。

对电池簇层级的火灾研究发现，单个电池包起火可能引发两个非相邻电池包之间的TRP，即电池包的热失控能够通过火焰辐射实现跳跃式传播[3]。如果电池包层级的热失控未得到有效抑制，电池热失控喷阀产物和火焰可能将蔓延至整个储能舱。已有研究基于FLACS等软件分析可燃气体在储能舱内的扩散行为和可燃气体探测器位置的优化布置[45,46]。Barowy等[47]的实验表明，不断扩散的热失控可能通过产生极易点燃的气体环境而引发爆炸危险，爆炸情景可能发生在单体电池排气后的几秒内（即快速点火），也可能是在气体长时间积聚后发生的延迟点火，尤其是当消防系统启动时更为常见。为防止储能舱体的爆炸破坏造成更大范围的灾害蔓延，需根据相关标准进行通风和泄爆口设计，但是这些基于经验和半经验公式的预测结果尚需提高精度。因此，中国石油大学（华东）团队基于OpenFOAM建立了三维全尺寸储能舱燃烧模型[48]，通过该模型评估了气体爆炸对储能舱结构以及周围环境的影响。此外，还基于热阻网络和CFD建立了储能舱层级火蔓延的半降阶模型（SROM）[49]，以较高的计算效率实现整舱火蔓延预测。数值模拟结果表明，热失控触发位置对TRP及火灾行为具有显著影响。当热失控在较高位置触发时，失效电池的数量较少。相比角落位置，起源于电池簇中心的热失控将引发更高的火灾发展速率和峰值热释放率。但是以上研究假设较多，难以反映真实情况，如未考虑气体爆炸对热失控传播的影响；可燃气体组分含量的设定基于真实电池热失控产气的比例，未考虑热失控传播过程中的动态变化；未考虑电解液蒸气和颗粒物等多相产物的影响等。

虽然对“电池单体–模组–电池包–舱体”多层级的TRP特性有了一定的认识，但对模组及以上层级储能系统的火灾爆炸危险性的量化分析较为匮乏，关键难点之一在于难以获取电池喷阀速度、成分、多相温度等边界条件以及考虑排气和热失控传播的随机性，即储能系统的火灾爆炸危险性无法通过基于电池单体的分析简单扩展得到。目前的一种做法是，基于一种气体成分的产生只与一种化学反应相关、气体组分固定等假设，建立电池热失控产气、排气等子模型，直接模拟电池喷阀，进而通过CFD模拟热失控产物在电池包内的扩散行为，获取各成分含量变化情况，计算着火下限（LFL）、LEL等燃爆危险性动态变化指标[44]。另外一种方法是通过精心设计热失控实验获得上述边界条件[9,50]，然后将其作为CFD模型的输入，消除了额外假设和电池子模型需求，在降低计算成本的同时提高准确性，但实验方法的通用性还需进一步探讨。所以，由于机理认知和模拟手段的局限性，仍不能实现热失控传播的多相多尺度耦合建模，尚不能准确量化储能系统的各层级燃爆危险性。已有研究中，电连接形式、电池组布置方式[51]、电池包结构设计等因

素也暂未得到充分考量。

四、锂离子电池储能系统火灾爆炸风险防控技术研究现状

（一）电池本征安全

电池是储能系统的基本能量存储单元，是储能系统的核心部件。从结构设计、制造工艺和材料体系改进等方面提高电池本体的安全性，是从根本上解决锂离子电池储能安全问题的重要手段。

合理的电池结构设计可以提高能量密度、功率密度、循环寿命和安全性等关键性能指标，最大限度发挥材料性能、抑制副反应和衰减机制，从而提升综合性能和使用寿命。如合理的CB值与N/P比设计等；通过设置正温度系数（PTC）部件等断路装置，可在电池过流、过热时自动切断电路，防止事故扩大；设置安全阀等泄压装置，当电池内部压力异常升高时，安全阀可以自动开启，释放气体，防止电池爆炸。

锂离子电池的制造工艺包括：正极和负极材料的混料、涂布、辊压、裁片、卷绕或叠层、极耳焊接、注液、封口、化成、排气、分容等步骤，其中每一道工序都可能导致电池内阻升高或短路而形成安全性问题[52]。比如电极基体平整度差、活性材料中混入杂质、极耳焊接不牢、极片边缘有毛刺等问题都会增大电池间的不一致性，影响电芯的安全性。在电池制造过程中控制正负极浆料配置、涂布质量和干燥、压片与切片以及电池装配环节的规范性可减少制造缺陷，降低电池本身的安全隐患。

电池材料改进是提高电池热稳定性的重要手段[53,54]。当前一般通过掺杂（如Al掺杂）、表面涂层（如氟化物、磷酸盐、固体氧化物）和表面包覆（金属氧化物）等方法提高正极材料的热稳定性；大多数商业电池的负极材料是石墨等碳基材料。为提高负极材料稳定性，有学者提出采用新型负极材料（如硅基材料），并通过多级碳结构策略和共价包覆等手段提升其稳定性[53]；在热失控过程中，电解液与电池正负极活性材料反应，产生可燃气体，释放大量热量。目前常见的做法是通过阻燃剂等添加剂改善电解液的安全性[55]，如通过在电解液中添加抗氧化剂（如β-Ca）可以在保持电化学性能的同时，有效抑制高镍NCM电池热失控过程中由正极活性氧释放引起的交叉反应，阻止热失控发生[56]。固态电解液因其出色的结构和热稳定性而受到研究者的青睐，有望从源头解决电池安全性问题[57]。但固态电池并不绝对安全，如陶瓷固态电解质仍面临锂枝晶生长等问题[58]，美国桑迪亚（Sandia）国家实验室的一项研究[59]表明，在短路失效场景下，高能量密度配置固态电池的温升可能会超过传统锂电池，引发更高的风险，因此固态电池热失控机理仍需深入研究[60]；常用的隔膜材料包括聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）或二者的复合材料。在电池滥用或高温条件下，聚烯烃材料的隔膜可能会发生收缩，导致孔隙率降低，从而增加电池内部短路的风险。为此，研究人员开发了具有更好热稳定性的新型隔膜，如结合聚偏二氟乙烯（PVDF）和低成本无纺布（NWF）制成的复合隔膜[61]以及通过多巴胺（PDA）–陶瓷复合改性隔膜，使隔膜即使在230 ℃时也无明显热收缩[62]。在提高隔膜热稳定的基础上，开发出了多途径控制热失控反应的新型隔膜，如Thermal-Coupled Overheating Response（TCOR）隔膜[63]兼顾了高热稳定性、良好的导热性并可以通过热响应切断电池内部反应，十溴联苯乙烷—CaO双面涂覆的PE隔膜[64]具有抑制电解液的链式分解反应、通过消除自由基有效扑灭火焰的双重阻燃机制，使电池的火灾爆炸安全风险被进一步降低。

除电池材料改进、PTC等内部安全策略，通过在电池内部布置其他安全功能组件，可降低电池热失控风险。如通过在软包电池中加入温度响应毒化层（TPL）或冷却功能隔膜（CFS）[65]，阻断了电池热量积累早期还原性气体对正极的“还原攻击”路径，在强制加热条件下成功阻止了热失控的发生。但上述内部安全策略存在响应速度慢、操作电压窗口小、不可逆性等问题，因此研究人员提出了一种基于热响应聚合物开关（TRPS）的新型材料[66]，该材料由电化学稳定的石墨烯包覆的尖峰状镍纳米颗粒和高热膨胀系数的聚合物基质组成，在正常温度下，TRPS薄膜具有高导电性，电池可以正常充放电。然而，当电池内部温度升高到TRPS材料的转变温度（如70 ℃）时，聚合物基质发生热膨胀，导致导电颗粒之间的接触断开，电导率急剧下降，从而迅速切断电流，防止电池过热和热失控。当温度降低后，聚合物基质收缩，导电颗粒重新接触，电导率恢复，电池可以继续正常工作。为解决全固

态锂金属电池中锂枝晶生长的问题，研究人员提出了一种创新的界面工程设计策略[67]：在正极与电解质之间引入普鲁士蓝类过渡金属捕获层，能够高效吸附正极溶解的过渡金属离子，阻止其迁移至负极并诱发锂枝晶成核。

（二）主被动防控手段

1. 监测预警

安全监测技术通过监测储能系统中各组件和设备的运行状态，及时发现可能的安全风险并作出应对，对事故的发生起到一定的预防作用。目前的监测手段主要基于BMS和各种传感器实现。主要监测的参数包括温度、气体、电压、变形、膨胀力等。

电池温度可以通过热电偶、热敏电阻、电阻式温度探测器（RTD）、薄膜传感器和光纤传感器[68]等进行监测，其中RTD、薄膜传感器和光纤传感器可以植入电池内部来监测电池内部的温度信号。当电池发生热失控时，其内外温差可能很大（相差数百摄氏度），电池内部热过程从开始到转移至电池表面的时间间隔可能有几十秒，内部和外部温度的过大差异以及温度传播的延迟会导致预警、冷却和灭火等安全措施的滞后，所以获取电池内部的温度信息非常重要。薄膜传感器和光纤传感器是近年来的研究热点。薄膜传感器的嵌入可与电池组装工序兼容，在增加一部分成本的同时显著提高BMS的可靠性。随着具有良好导电性、高比表面积和优异机械性能的柔性传感器出现[69]，通过内置传感器实现对多个参数的实时监测已成为可能，为智能电池的推广创造了基础[70]。光纤传感器具有良好的耐腐蚀性和抗电磁干扰性，但是其成本较高、技术集成难度大。除传感器直接监测方式外，通过监测电池表面温度和电化学模型预测电池内部温度已经在商业锂电池中广泛应用[68,71]。虽然基于模型的温度预测可以准确预测电池的内部温度，但它们通常需要大量的电池信息，电池内阻随SOC、SOH和温度的变化以及电池内部成分之间复杂的相互作用为建模带来了很大的困难。电化学阻抗谱[68,71]不需要任何传感器，消除了传热延迟问题，但是会带来很多额外成本，测试所需时间较长，此外在测试数据中解耦电池老化和极化效应带来的影响等问题仍未得到充分解决。如何非破坏性地、准确地且在动态操作条件下量化锂离子电池内部温度分布和变化对电池热安全管理具有重要意义，上述手段均无法同时满足这些要求，针对此问题，采用同步辐射X射线衍射断层扫描（XRD-CT）和多通道准直器—XRD（MCC-XRD）技术，实现了对18650电池在高倍率充放电条件下的内部温度分布高时空分辨率实时监测[72]。

气体传感器主要包括H_2传感器、挥发性有机化合物（VOC）传感器、CO传感器等。对于气体检测，CO和碳氢化合物被认为是安全警告（热滥用或过充情况）的有效指标。然而，上述气体来自电解质或SEI分解（>90 ℃），在电池内部温度较低（<50 ℃）且热失控尚未出现的锂枝晶生长期不能作为指标。Jin等[73]首次提出了一种通过H_2捕获来检测微米级锂枝晶的方法，以实现更早期的安全预警。通过电池簇级的安全预警实验，表明在检测到H_2的同时关闭充电电源，即使被真实储能舱中的其他电池组阻挡，H_2仍然可以作为预警指标，实验中既没有观察到烟雾也没有观察到火灾。此外，电池排气的声音信号也被用作预警信号[74]，LFP电池模组的热失控实验表明，通过检测该信号可以在火焰出现前1061 s实现预警，但该信号容易受到噪声干扰。

电池热失控过程中会伴随着电压的变化。目前常用的方法有定性判断法、阈值判断法、基于模型的方法和基于数据驱动的方法[68]。在LFP电池的过充实验中识别了电压转折点（V_{TP}），将这一特征作为最早预警指标[75]。基于阈值的判断方法多依赖于经验，但电池工作环境复杂，难以设置合适阈值，需要根据环境条件和电池实际状态动态调整阈值设定。基于模型的方法[76]通过数学模型描述电池在过充等情况下的电压和温度变化，或通过等效电路模型中的电压和局部异常因子进行故障检测，能更全面地呈现电池电压在故障条件下的演变过程，实现早期预警。数据驱动方法因不需要准确的电池模型而受到研究者的青睐，如基于串联电池包交错电压测量拓扑的多故障诊断方法[77]和基于k均值聚类算法的电压不一致波动故障在线诊断与预测方法[78]等。但是需要大量数据训练以提高准确性，且多数数据源于实验室，其运行环境与实际差异大，数据集稳健性差，模型泛化性无法保证，难以在实际储能运行中得到验证。

热失控过程中的内部压力上升会导致电池膨胀，因此变形和膨胀力也是热失控监测预警的有效信号。目前对电池变形的监测可以通过应变片、激光器、相机和光纤传感器实现[71]。应变片具有成本低、有效性和适应性强等优点，是一种出色的机械变形传感器，应用范围广泛。应变片可以安装在不同形状电池（软包、棱柱形和圆柱形电池）的表面，用于变形测量。然而，应变片容易受到热和电磁干扰；使用激光和相机对变形进行非接触式测量，精度高，但是这种非接触式测量方法通常用于实验室研究，不适合在现场应用中进行实时监测；光纤传感器的优势除了良好的化学稳定性和耐腐蚀性之外，还可以实现内部温度、压力以及变形等多信号的实时高精度监测。此外，如果考虑大规模电池系统中的每个电池单元的监测，则具有大量电缆和记录设备的传感系统将极其复杂且昂贵[71]，分布式光纤传感器将在多点同时监测方面表现出显著优势。

在电池热失控多维信号演变研究中，研究人员[79~81]发现膨胀力信号的异常要早于电压、气体和温度信号，并且该信号在充电倍率、环境温度、预紧力和初始SOC等条件改变时表现出了更好的稳健性，同时压力传感器技术成熟、布置简单（一个串联模组只需布置一个传感器），因此开始关注将电池膨胀力升高速率异常作为最早的预警指标。该指标在过充和加热条件下都表现出了更好的预警效果，及时断电或关闭加热板能够有效防止热失控传播[79~81]。此外，有学者通过设计机械装置放大热失控时的膨胀力使电池架倾覆，从而减少电池表面的接触热传递，即使有火焰存在也能阻止TRP[82]。但在利用电池膨胀信号进行预警时需要注意，在正常的充放电过程中由于锂离子在正负极的脱嵌，正负极内应力和体积发生变化，电池产生可逆膨胀变形，膨胀力也会随之波动，在测量时应考虑此影响，避免将正常操作检测为故障。此外，电池老化会造成电池机械性能变化，产生不可逆膨胀[83]，因此应在不同老化条件下确定膨胀相关信号检测阈值。目前，不同的研究中设定的阈值不尽相同[79~81,84]，应综合考虑电池材料、容量、状态、使用条件和包装类型的差异，以准确确定警告阈值。

综合以上监测技术，有学者提出了基于多信号融合监测的储能系统多级预警策略。如电压–温度–气体联合预警策略[75]、膨胀力–温度–电压信号联合预警策略[85]等。目前储能电站主要监测温度、电压和气体信号，并设置特性参数阈值进行警告，但大多数情况下，热失控发生时电池内部的不可逆连锁反应已被触发，监测预警效果往往不及预期，并且由于成本、空间、数据收集和存储的限制，储能电站无法实现对所有电池的完整参数进行实时监控。随着储能云平台的建立，通过智能数据压缩算法和第五代移动通信（5G）技术控制数据传输和存储成本，借助云端强大算力，储能系统的实时智慧监测将成为可能。

2. 消防和泄爆抑爆

锂离子电池火灾比较特殊，相较于其他火灾形式，其燃烧剧烈，火势蔓延迅速，释放大量有毒气体和粉尘颗粒。即使将明火扑灭，由于电池内部的化学反应仍在持续进行并释放热量，电池容易复燃，难以通过常规物理稀释隔绝氧气或切断燃烧链的方法彻底扑灭。所以，高效的灭火技术对控制锂离子电池储能系统火灾事故发展、减轻锂离子电池储能系统火灾事故后果至关重要。

用于锂离子电池火灾的常见灭火剂包括水基灭火剂和气体灭火剂。水基灭火剂是储能电站灭火的常见选择，细水雾喷头能有效扑灭电池明火，给燃烧模组降温，短时间细水雾一般不会影响电池使用。虽然细水雾系统对电池模组的损害很低，但是高压细水雾的成本比较高，并且可能造成电气设施的短路。气体灭火剂也是一种重要的选择，七氟丙烷、全氟己酮可以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[86]。目前储能系统常采用全氟己酮／七氟丙烷+细水雾的消防模式，即通过全氟己酮／七氟丙烷扑灭初期火灾，通过细水雾降温防止复燃。但如前所述，这一消防模式中，细水雾可能威胁电气设施安全，而只采用全氟己酮／七氟丙烷又无法有效防止复燃，所以目前很多储能和消防从业人员认为大水漫灌和放任燃烧仍是最有效的方式。因此，众多学者提出了针对锂离子电池的新型灭火策略，如清洁高效新型灭火剂（干水、F-500灭火剂、灭火微胶囊、液氮）和不同灭火剂之间的协同（细水雾与CO_2协同、细水雾与液氮协同等）[86~89]，在实验室阶段取得很好的成效。

针对消防系统的设计，有学者提出了热失控灭火和火蔓延灭火的分阶段灭火策略[90]，并探索了

电池簇、电池模组等层级的分布式灭火方式[91,92]以及储能电站层级的集中式灭火方式[93]。随着《电化学储能电站安全规程》的颁布与实施，Pack级全氟己酮消防技术在储能消防领域已得到广泛应用和认可。目前消防探测和预警系统一般参照《火灾自动报警系统设计规范》设计，采用独立通信方式、在本地集中控制，缺少与BMS、电能管理系统（EMS）智慧联动的安全管理策略[94]。因此，文献[94]基于电池热失控过程中的副反应现象设计了储能电站火灾探测报警系统，并提出火灾探测多系统联动和分级预警设计构想。在储能消防装备设计方面，有学者基于多层协同预警技术和不同防护灭火策略开发了储能系统的靶向消防防控装备[95]，但也有研究指出，大多数消防项目设置存在“重部件、轻系统”的倾向[96]，组件设计存在集成化度低、兼容性差等严重的技术不足。因此，有必要从储能系统的整体视角优化消防系统的设计、布置和控制策略，从硬件和软件两方面进行消防系统集成；同时通过研究锂离子电池靶向消防装备，提高消防装备对大规模锂离子电池火灾的适用性。

关于储能系统的泄爆抑爆设计，现有储能舱体主要采用设置泄压口的泄爆方式，泄压对于集装箱式锂离子电池储能系统的有效性得到了验证，但国内尚没有针对储能系统泄爆面积的计算方法，设计时多参考美国NFPA 68标准中的方法[33]。目前，国内针对防爆的解决方案主要通过在可燃气体探测器报警后开启防爆风机，通过气体置换降低储能预制舱内的可燃气体浓度，以达到防爆效果。但在事故发生时，需关闭事故防爆风机以维持预制舱内的灭火剂浓度，若灭火剂无抑爆效果，整个储能舱将存在巨大爆炸风险。因此，利用惰性气体控制舱内可燃气体浓度、降低可燃气体极限氧浓度[97]，研究具有更高防爆抑爆性能的材料，将有效提高储能系统的防爆抑爆能力。

由于消防系统的经济效益并不直接体现，且其功能并非持续发挥，往往容易出现投机行为。作为储能安全的最后一道防线，近年来国内外对消防安全的重视程度进一步增加，从国家标准层面对储能消防配置提出了明确的底线要求。2023年，美国保险人（UL）安全试验室修订了UL 9540《储能系统和设备》，新增了交流与直流储能系统概念，基于大规模燃烧测试修订了储能系统容量限制，新增了防爆泄爆保护要求；该试验室还在2024年颁布了UL 9540B标准，填补了住宅储能系统大规模防火测试的空白。美国消防协会在2023年修订了NFPA 855《固定式储能系统安装标准》，增加和修订了对火灾探测和灭火、爆炸控制、排气通风、气体探测的要求，并提出了大规模火灾试验要求。2024年英国标准协会发布PAS 63100《电气装置 住宅用电池储能系统的防火保护规格》，规定了在使用固定式二次电池作为储能介质的家庭住宅中安装小型电池储能系统（BESS）的消防安全要求。我国目前消防设计所遵循的国标为《电化学储能电站设计规范》以及《电化学储能电站安全规程》，然而这两项国标在储能消防系统的设计环节并未提供详尽的规范细则，而且从火灾定性的角度来看，业内人士普遍认为其标准设定偏于宽松。因此，即将施行的修订新版本提升了储能火灾的危险等级评定。由沈阳消防研究所负责起草的《电化学储能电站火灾监测预警系统通用技术要求》正处于征求意见阶段，该征求意见稿进一步规整了消防联动的控制逻辑，清晰界定了探测装置的响应临界值，并且依据风冷、液冷储能的不同特性做出了针对性区分。

3. 热管理

除前文提到的风冷、液冷和PCM外，近期，有学者提出了通过气凝胶、云母、发泡硅胶等隔热材料保护电池包盖板结构[9]；有研究人员开发了一种集成了气体调节功能的阻隔材料，不仅具有导热、吸热、隔热能力，而且在高温下可以释放惰性气体，有效隔离可燃气体与火源（如高温表面、电弧等）[98]；通过在连接的石墨烯层之间嵌入热膨胀微球开发的热传输/隔离可切换的小型化热调节器[99]，在电池组正常工作条件下能够降低电池组温度差异，提高电池电化学性能；热失控下能够提供一个宽热传导窗口缓冲积累的热量，防止热失控传播。这些研究为电池的热安全管理开辟了新的途径。

相较于冷板式液冷，近年来全浸没式液冷技术逐渐得到市场关注。全浸没式液冷是一种直接冷却方式，通过冷却液与电池直接接触，散热效率很高，提高了电池组的一致性；冷却液将电池与空气隔离，同时兼具灭火效果，降低了火灾爆炸风险[100]；冷却液近乎绝缘的特性也大大降低了击穿电弧出现的可能。基于不同冷却液的实验研究表明，浸没式冷

却可以有效阻止热失控的传播[101]甚至热失控的发生[102]。目前，浸没式液冷技术已在储能电站领域应用[103]，大多数储能公司均推出了浸没式液冷储能产品。但是全浸没式液冷系统运维成本较高，尚未进入大规模应用阶段；由于发展时间较短，各种冷却介质和储能系统各组件之间是否能在整个生命周期内保持良好的相容性尚不确定。

五、锂离子电池储能系统火灾爆炸风险防控技术发展趋势和面临的挑战

（一）发展趋势

1. 电池本体高安全材料体系技术产业化

《新型储能制造业高质量发展行动方案（征求意见稿）》强调重点布局大容量高安全储能电池、高功率高能效电池、储能用固态电池等先进储能型锂电池产品。固态电池具有高能量密度、本质安全、长寿命、宽温域适应性和快速充电等优势，有望彻底解决传统锂电池的瓶颈问题。因此固态电解质材料类型选择（硫化物、氧化物、聚合物、卤化物等）、离子电导率提升、界面工程、电极材料创新（高镍三元、富锂层状氧化物等）、锂枝晶抑制等问题一直是研究热点[104,105]。尽管当前仍面临成本高、量产工艺复杂等挑战，但其技术突破将推动电动汽车、储能系统、消费电子等领域的全面升级，被视为下一代电池技术的核心方向，是各国在电池领域必争的技术高地。

固态电池的技术路线选择与产业化推进正呈现多元竞争与协同突破的态势。目前，硫化物、氧化物、聚合物三大技术路线各具优劣：硫化物因高离子电导率和适配高能量密度材料（如高镍三元正极、硅碳负极）成为主流方向，但主要以日本和韩国的企业主导，国内正加速布局[106]；氧化物路线凭借热稳定性和较低成本率先实现半固态电池量产，但其作为一种过渡策略，并不是颠覆性技术，良品率、充电倍率、循环寿命等都差强人意；聚合物路线加工兼容性强，但受限于低电导率，主要面向消费电子领域。从全球范围来看，固态电池技术路线呈现“硫化物主导、多路线互补”格局，部分企业尝试复合电解质以取长补短。

在产业化进程中，半固态电池已进入规模化应用阶段，国内外企业发布的全固态电池量产时间表大多在2026—2030年。随着量产窗口临近，技术路线将逐步收敛，全固态电池有望在高端电动车、低空飞行器等领域率先渗透，同时部分电池企业也在积极推进固态电池在储能领域及民用领域的规模化应用[107]。

2. 安全防控链条数智化

安全始终是储能行业发展的核心关注点，而数智化技术为解决安全问题提供了新的途径。目前，利用机器学习对电池进行充放电优化和状态估计等技术已经在电池安全管理领域发挥巨大作用[108~110]。在热失控预测方面，也开始有学者基于深度学习技术对电池安全边界预测[111]以及基于电池材料实验的热失控特征温度预测[112]进行探究。

在设计制造环节，数字化贯穿于原材料、装备、工艺等各个方面。《新型储能制造业高质量发展行动方案》提出推动区块链、大数据、人工智能、5G等新一代信息技术在新型储能制造业广泛应用。人工智能技术深度介入材料筛选和电池设计，通过大语言模型和垂直领域数据库，搭建人工智能能源材料平台，可大幅提高研发效率并节省成本。建立数字化的制造车间，引入在线检测能力，能实现对制造过程的全流程监控和质量追溯。一旦出现问题，可迅速定位到具体生产环节并进行调整优化，保障电芯的高质量制造，减少制造缺陷带来的安全隐患。

在储能系统安全管理方面，智能化的BMS能紧密耦合能量管理系统、储能变流器等软硬件，实现数据信息的实时共享和交互。同时，远程监控与基于数字孪生的智能运维平台[113]的广泛应用，让运维人员突破时空限制，实时掌控储能系统动态，一旦出现异常可以迅速响应。借助大数据、云计算和人工智能技术，建立高精度的储能系统仿真模型，对电池的全生命周期状态、循环寿命、能量输出等关键参数进行精准预测，实现对储能系统的精细化、自适应控制。

3. 安全防控设计标准化

随着电化学储能技术在各领域的广泛应用，安全防控设计趋向标准化成为必然发展方向。《新型储能标准体系建设指南》明确提出，到2025年在电化学储能等新型储能领域要形成较为完善的系列标准，加强国内外交流，支撑标准“走出去”，逐步构建适应技术创新趋势、满足产业发展需求、对标

国际先进水平的新型储能标准体系。

标准化设计通过建立普适性技术指标（如热失控阈值、BMS响应精度等），明确各环节安全边界，促使电池厂商、集成商与运营商形成技术共识，降低因接口混乱或性能错配引发的隐性风险，推动产业从“无序竞争”转向“协作创新”。

标准化为技术优化提供可量化对标体系。例如，通过统一热失控抑制效能评价方法，可加速新型阻燃材料或智能灭火技术的研发验证；通过规范电池健康状态监测算法，可提升大数据驱动的寿命预测模型可靠性。在标准化框架下，企业研发投入更具方向性，技术成果更易转化为行业通用方案，形成“技术突破—标准更新—市场推广”良性闭环。

标准化设计通过明确安全性能分级和认证流程，为政府制定准入政策、保险机构评估风险、用户选择产品提供客观依据。同时，标准化技术参数（如消防系统响应时间、绝缘失效阈值）可转化为监管部门的执法抓手，避免“事后追责”的滞后性，实现全生命周期风险闭环管控。

（二）面临的挑战

1.“碎片化突破”与“系统性缺陷”并存

在事故诱因分析层面，研究多聚焦于电池材料失效、滥用条件等单一因素，对多物理场耦合作用下的跨尺度链式演化机制缺乏动态解析；在危险性评估领域，针对单体电池的热失控机理已有较成熟模型，但对模组、舱体及系统层级的风险传播规律与量化评价方法仍显不足；在防控技术方面，本征安全改性、热管理优化等被动防御手段虽取得进展，但基于数字孪生的主动预警、多级协同阻遏等智能化防控体系尚处于探索阶段。与此同时，储能应用场景向高能量密度、分布式方向延伸，进一步加剧了传统防控技术与复杂动态风险间的适配性挑战。此外，安全防控技术评价偏重实验室环境下的单一技术验证，缺少工程场景下的技术集成适配性研究。为满足政府、企业和用户等各方主体对新型储能安全性、可靠性的要求，亟需构建储能系统多层级安全动态评价体系，探索各系统安全运行边界，进而优化整体协同工作效能。

2. 安全防控成本与经济效益平衡难

锂离子电池储能的规模化发展在降低度电成本的同时，也加剧了安全防控投入与经济效益的结构性矛盾：一方面，材料集约采购（如碳酸锂价格下降）、工艺优化（良品率提升）与技术迭代效应（能量密度提升）推动电芯成本持续下降；另一方面，本征安全技术（如高热稳定性材料、电芯优化设计、固态电池）、系统级防护（热管理、监测及消防系统）和基于数字孪生的预测性运维体系导致安全成本非线性攀升。破解该矛盾需通过“材料–工艺–系统”三级协同优化，开发兼具安全性与经济性的材料体系，应用人工智能等数字化技术优化质检工艺、提升制造精度，并通过安全系统联动与安全管理策略智能化升级降低系统冗余成本；同时依托政策工具（阶梯补贴、安全基金）与产业链协同（标准化接口、循环利用）分摊风险，最终实现规模化降本与安全强化的动态均衡。

3. 新型应用场景催生新型风险

百兆瓦时级电站可集成数十万电芯，传统单点防护策略失效。虽然在当前测试标准下，由滥用条件触发电池大规模内短路的概率已经极低，但作为多层级复杂系统，储能系统安全风险层层富集，系统级故障概率随储能规模增加快速攀升；在多技术耦合场景中，锂电与液流电池、氢储能的混合部署引发热管理兼容性难题；极端环境适应性缺口凸显，热带高湿地区可能导致绝缘失效事故率激增，而高寒工况（<–40 ℃）下电解液低温性能不良引起的风险尚未在现行标准体系中充分考虑；长时储能下锂电池高深度循环可能加剧电极材料结构疲劳，提高安全风险。需构建多层级防护架构：通过电芯级本征安全设计、模组级物理隔离及系统级智能阻断，建立覆盖新型技术组合的跨学科安全设计准则与动态环境适应型标准，实现规模化与安全性的协同演进；开发多物理场耦合仿真平台，精准预测10年以上超长周期下的材料失效路径，构建自适应安全边界调控算法，实现新型储能体系从“被动防护”向“寿命周期主动免疫”的范式升级。

4. 全生命周期安全管理实践困境

在制造阶段，工艺波动引发的本征缺陷难以被常规检测手段完全捕获，导致隐性风险向后续环节传递；在运行阶段，电池老化路径的强非线性特征使得传统健康状态评估模型预测精度不足，运维策略难以精准匹配实际衰减进程；在退役环节，因梯次利用标准缺失与残值评估体系不完善，导致重组

电池安全阈值模糊，低质产品流入次级市场形成隐患。生命周期中全链条数据割裂进一步加剧管理盲区：制造期、服役期乃至与退役诊断信息未能有效贯通，将阻碍风险溯源与跨阶段协同防控。各环节安全边界的动态演变与技术迭代速度的失衡，最终形成“局部优化、整体脆弱”的系统性风险积累态势。需构建“制造–应用–回收”数据贯通体系，开发多尺度缺陷数字孪生检测平台与基于人工智能技术的电池状态预测方法，建立覆盖电池“出生”至“再生”的区块链溯源认证网络，实现全链条风险穿透式管理。

六、锂离子电池储能系统火灾爆炸风险防控措施建议

（一）聚焦锂电池安全基础技术研究

研发先进原位表征技术，动态解析电池充放电循环、热失控等关键过程的微观演化规律，揭示电池失效机理与安全边界阈值。建立电化学参数、热力学参数与电池宏观性能的定量映射关系，解耦多场耦合下电化学相互作用机制，突破理论设计与实际制造间的匹配性瓶颈。开发高精度、多尺度仿真模型，深入理解电池从微观到宏观的失效演化过程，实现对失效演化路径的精准预测。基于仿真模型建立基于人工智能的电池设计–检测一体化平台，实现材料选型、结构优化与制造工艺的闭环验证。结合实验验证与大数据驱动方法，构建“机理–数据”双轮驱动的电池安全知识图谱，为高本征安全性电池体系设计及主动防控策略提供理论支撑，推动电池技术从经验试错向精准设计范式升级。

（二）深化系统集成与工程化安全设计

锂电储能安全防控需以系统集成与工程化设计的深度协同为突破口，解决“局部优化、整体脆弱”的工程难题。通过构建“电芯–模组–包–簇–舱体”层级的全链条安全架构，整合热管理、消防抑制、电气隔离等子系统的动态协同机制，设计自适应冗余策略与故障容错逻辑；推动标准化接口与模块化工程方案，提升系统兼容性与迭代效率。利用数字孪生技术模拟复杂场景下的链式失效路径，结合多物理场仿真优化安全裕度与阈值参数；建立覆盖设计、制造、运维的全生命周期安全验证体系，通过实验数据与模型驱动的双向反馈，量化系统级安全边界，实现从“功能叠加”到“系统韧性”的工程范式跃迁，为规模化储能提供高可靠性的集成解决方案。

（三）强化全生命周期安全管理

建立并严格执行从原材料纯度控制、极片制备工艺、电芯装配到模组 / 系统集成的全流程一致性标准，实现对关键工艺参数的精细化控制、在线质量监测技术的应用以及严格的出厂测试，确保电池产品在初始状态即具备高可靠性和一致性；借助数字孪生、边缘计算等先进技术，构建储能电站的实时健康状态评估体系，实现对电池性能衰退、潜在故障的早期识别。通过对历史运行数据和实时监测数据的深度挖掘与分析，建立实现精准预警的运维监测系统，能够在故障发生前进行预警和干预，有效避免安全事故的发生，并延长系统使用寿命；制定完善的退役电池残值评估和安全检测标准，包括对电池容量、内阻、循环寿命以及安全性能等关键参数的评估，建立健全的退役电池追溯体系，明确各环节责任主体，保障梯次利用过程安全可控。

（四）优化标准体系与监管机制

进一步对齐并融合国内外标准，形成统一的安全测试、生产制造、监测运维的标准和认证体系；推动电芯、模组、系统层级的安全认证与国际主流标准的接轨，促进全球储能产业的健康有序发展；针对工商业储能、大型储能电站、移动储能、家用储能等不同应用场景，细化安全规范，制定更具针对性和可操作性的安全标准；加快标准体系建设，匹配技术迭代速度，使标准体系尽快覆盖固态电池等新型技术路线。构建由政府主导、企业参与的储能安全大数据平台，实现对储能系统运行状态的实时监控、安全风险的动态评估与预警，以及事故发生后的快速溯源与责任追溯；整合企业运行数据、政府监管数据以及第三方检测数据，形成全方位、多维度的数据支撑，为政府监管决策提供科学依据，同时促进企业提升安全管理水平。

（五）完善应急响应和保险体系

制定多级应急响应机制和预案，涵盖从预警、

事故确认到应急处置的全过程，明确各环节的责任主体和操作流程，如热失控隔离措施、故障快速切除机制以及紧急停机程序等；进行常态化安全演练，检验预案的可行性，提升应急队伍的协同作战能力和快速反应能力。积极推动保险产品创新，开发针对储能系统特点的专属保险，涵盖设计、制造、安装、运行维护以及退役等各个环节的潜在风险；探索将安全技术指标（如热失控抑制能力、系统防护等级）与保险费率挂钩的机制，通过经济杠杆促进企业提升储能系统的本质安全水平。

（六）促进产业链协同与跨学科融合

建立涵盖材料研发、制造工艺、系统集成及循环利用的标准化协作框架，推动电池模组、消防设备等接口的标准设计，降低兼容性成本；搭建跨学科联合研发平台，融合电化学、材料科学、力学、人工智能及环境工程等多领域技术，攻克热失控多物理场耦合机理、动态风险评估等共性难题。强化“政–企–研”协同机制，构建数据共享与联合验证体系（如区块链溯源网络、多层级实验平台），加速本征安全材料、智能阻断技术的产业化落地。通过政策引导（如专项基金、标准互认）与市场激励（如绿色金融、碳足迹认证），形成“技术攻关–标准制定–商业推广”闭环，最终实现安全防控技术的高效迭代与规模化应用。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 24, 2025; **Revised date:** April 7, 2025

Corresponding author: Chen Suwen is a professor from College of Civil Engineering, Tongji University. Her major research field is engineering structure explosion resistance. E-mail: swchen@tongji.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development and Security Strategy of the Yangtze River Basin under the New Situation” (2023-HYZD-02)

参考文献

[1] 储能领跑者联盟. 2024中国新型储能行业发展白皮书——机遇与挑战 [R]. 上海: 储能领跑者联盟, 2024.
Electric Energy Storage Alliance. 2024 white paper on the development of China’s new energy storage industry—Opportunities and challenges [R]. Shanghai: Electric Energy Storage Alliance, 2024.

[2] 新华网. 新增43.7 GW/109.8 GWh! 2024年度CNESA储能数据重磅发布 [EB/OL]. (2025-01-16)[2025-01-20]. https://www.xinhuanet.com/energy/20250116/6cb0175bd08f46b18830c5eb4c5b84da/c.html.
Xinhua Net. Added 43.7 GW/109.8 GWh! CNESA energy storage data for 2024 is released with heavy weight [EB/OL]. (2025-01-16)[2025-01-20]. https://www.xinhuanet.com/energy/20250116/6cb0175bd08f46b18830c5eb4c5b84da/c.html.

[3] Jia Z Z, Jin K Q, Mei W X, et al. Advances and perspectives in fire safety of lithium-ion battery energy storage systems [J]. eTransportation, 2025, 24: 100390.

[4] Feng X N, Ouyang M G, Liu X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review [J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246–267.

[5] Finegan D P, Darcy E, Keyser M, et al. Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits [J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(6): 1377–1388.

[6] Liu L S, Feng X N, Zhang M X, et al. Comparative study on substitute triggering approaches for internal short circuit in lithium-ion batteries [J]. Applied Energy, 2020, 259: 114143.

[7] Liu X, Ren D S, Hsu H J, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit [J]. Joule, 2018, 2(10): 2047–2064.

[8] Li C, Wang H W, Li Y L, et al. Venting particle-induced arc of lithium-ion batteries during the thermal runaway [J]. eTransportation, 2024, 22: 100350.

[9] Li J Y, Gao P, Tong B, et al. Revealing the mechanism of pack ceiling failure induced by thermal runaway in NCM batteries: A coupled multiphase fluid-structure interaction model for electric vehicles [J]. eTransportation, 2024, 20: 100335.

[10] Wang H B, Wang Q Z, Zhao Z Y, et al. Thermal runaway propagation behavior of the Cell-to-Pack battery system [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 84: 162–172.

[11] Liu B H, Jia Y K, Yuan C H, et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: A review [J]. Energy Storage Materials, 2020, 24: 85–112.

[12] Kim J, Lee H, Cha H, et al. Prospect and reality of Ni-rich cathode for commercialization [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(6): 1702028.

[13] Xia Y, Zheng J M, Wang C M, et al. Designing principle for Ni-rich cathode materials with high energy density for practical applications [J]. Nano Energy, 2018, 49: 434–452.

[14] Ouyang D X, Chen M Y, Weng J W, et al. Exploring the thermal stability of lithium-ion cells *via* accelerating rate calorimetry: A review [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 81: 543–573.

[15] Cui Z H, Liu C, Wang F, et al. Navigating thermal stability intricacies of high-nickel cathodes for high-energy lithium batteries [J]. Nature Energy, 2025, 10: 490–501.

[16] Cheng Z X, Wang C D, Mei W X, et al. Thermal runaway evolution of a 280 Ah lithium-ion battery with $LiFePO_4$ as the cathode for different heat transfer modes constructed by mechanical abuse [J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 93: 32–45.

[17] Wang H B, Xu H, Zhang Z L, et al. Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway: A comparative study [J]. eTransportation, 2022, 13: 100190.

[18] Wei G, Huang R J, Zhang G X, et al. A comprehensive insight into the thermal runaway issues in the view of lithium-ion battery intrinsic safety performance and venting gas explosion hazards [J]. Applied Energy, 2023, 349: 121651.

[19] Zhao L Q, Hou J X, Feng X N, et al. The trade-off characteristic between battery thermal runaway and combustion [J]. Energy Storage Materials, 2024, 69: 103380.

[20] Henriksen M, Vaagsaether K, Lundberg J, et al. Explosion characteristics for Li-ion battery electrolytes at elevated temperatures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 371: 1–7.

[21] Chang W D, Li G, Sun H G, et al. Explosion characteristics of lithium-ion batteries vent gases containing dimethyl carbonate at elevated temperatures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 90: 105326.

[22] Wang S L, Zhang C Y, Chen D P, et al. Explosion characteristics of two-phase ejecta from large-capacity lithium iron phosphate batteries [J]. eTransportation, 2024, 22: 100377.

[23] Zhang P F, Lu J J, Yang K B, et al. A 3D simulation model of thermal runaway in Li-ion batteries coupled particles ejection and jet flow [J]. Journal of Power Sources, 2023, 580: 233357.

[24] Zhou W, Li G, Zhao H R, et al. Experimental study of explosion parameters of hybrid mixture caused by thermal runaway of lithium-ion battery [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 178: 872–880.

[25] Wang Q S, Huang P F, Ping P, et al. Combustion behavior of lithium iron phosphate battery induced by external heat radiation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 961–969.

[26] Sun J H, Mao B B, Wang Q S. Progress on the research of fire behavior and fire protection of lithium ion battery [J]. Fire Safety Journal, 2021, 120: 103119.

[27] Tong B, Li J Y, Sun J H, et al. Restoring the gas diffusion field before the fire of the $LiNi_{0.7}Co_{0.2}Mn_{0.1}O_2$ lithium-ion battery thermal runaway [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 88: 111548.

[28] Shan T X, Zhu X Q, Wang Z P. Understanding the boundary and mechanism of gas-induced explosion for lithium-ion cells: Experimental and theoretical analysis [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 86: 546–558.

[29] Shan T X, Zhu X Q, Wang Z P, et al. Investigation on the explosion dynamics of large-format lithium-ion pouch cells [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 227: 120426.

[30] Shan T X, Wang Z P, Zhu X Q, et al. Explosion behavior investigation and safety assessment of large-format lithium-ion pouch cells [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 72: 241–257.

[31] 阳光电源. 真机不怕火炼!捍卫储能行业安全底线 [EB/OL]. (2024-11-16)[2025-01-20]. https://www.sungrowpower.com/news/1580.html.
SUNGROW. Real machines are not afraid of fire refining! Defend the safety bottom line of the energy storage industry [EB/OL]. (2024-11-16)[2025-01-20]. https://www.sungrowpower.com/news/1580.html.

[32] 比亚迪储能. 烈火淬炼, 铸就储能安全新高度 [EB/OL]. (2024-12-26)[2025-01-20]. http://www.bydenergy.com/news-center-detailid=124&type=hot&locale=ZH&pageContentType=NEWS_HOT_ARTICLE.
BYDEnergy. Blaze tempering, forging a new height of energy storage safety [EB/OL]. (2024-12-26)[2025-01-20]. http://www.bydenergy.com/news-center-detailid=124&type=hot&locale=ZH&pageContentType=NEWS_HOT_ARTICLE.

[33] 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.
Li J, Wang Q S, Kong D P, 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.

[34] Song L F, Huang Z H, Mei W X, et al. Thermal runaway propagation behavior and energy flow distribution analysis of 280 Ah $LiFePO_4$ battery [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 170: 1066–1078.

[35] Zhang G X, Wei X Z, Wang X Y, et al. Lithium-ion battery sudden death: Safety degradation and failure mechanism [J]. eTransportation, 2024, 20: 100333.

[36] Zhou Z Z, Zhou X D, Ju X Y, et al. Experimental study of thermal runaway propagation along horizontal and vertical directions for $LiFePO_4$ electrical energy storage modules [J]. Renewable Energy, 2023, 207: 13–26.

[37] Lv Y F, Geng X W, Luo W M, et al. Review on influence factors and prevention control technologies of lithium-ion battery energy storage safety [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108389.

[38] 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: 118760.

[39] 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.

[40] Gao P, Song L F, Jia Z Z, et al. Revealing the contribution of flame spread to vertical thermal runaway propagation for energy storage systems [J]. Journal of Power Sources, 2025, 628: 235897.

[41] Wang Q Z, Wang H B, Xu C S, et al. Multidimensional fire propagation of lithium-ion phosphate batteries for energy storage [J]. eTransportation, 2024, 20: 100328.

[42] Sun L, Wei C, Guo D L, et al. Comparative study on thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules under different overcharge conditions [J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1555–1574.

[43] Qin P, Jia Z Z, Wu J Y, et al. The thermal runaway analysis on $LiFePO_4$ electrical energy storage packs with different venting areas and void volumes [J]. Applied Energy, 2022, 313: 118767.

[44] 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: 120660.

[45] Shi S, Lyu N W, Jiang X, et al. Hydrogen gas diffusion behavior and detector installation optimization of lithium ion battery energy-storage cabin [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107510.

[46] Jia Z Z, Wang S P, Qin P, et al. Investigation of gas diffusion behavior and detection of 86 Ah $LiFePO_4$ batteries in energy storage systems during thermal runaway [J]. Process Safety and Environ-

mental Protection, 2024, 184: 579–588.

[47] Barowy A, Schraiber A, Zalosh R. Explosion protection for prompt and delayed deflagrations in containerized lithium-ion battery energy storage systems [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80: 104893.

[48] Peng R Q, Ping P, Wang G Q, et al. Numerical investigation on explosion hazards of lithium-ion battery vented gases and deflagration venting design in containerized energy storage system [J]. Fuel, 2023, 351: 128782.

[49] Wang G Q, Ping P, Peng R Q, et al. A semi reduced-order model for multi-scale simulation of fire propagation of lithium-ion batteries in energy storage system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 186: 113672.

[50] Li J Y, Tong B, Gao P, et al. A novel method to determine the multi-phase ejection parameters of high-density battery thermal runaway [J]. Journal of Power Sources, 2024, 592: 233905.

[51] Kwon B, Schraiber A, Jeevarajan J A. Evaluating fire and smoke risks with lithium-ion cells, modules, and batteries [J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(11): 5319–5328.

[52] 黄海江. 锂离子电池安全性研究及影响因素分析 [D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所(博士学位论文), 2005.
Huang H J. Study on safety of lithium-ion batteries [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (Doctoral dissertation), 2005.

[53] 潘新慧, 陈人杰, 吴锋. 电化学储能技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 225–236.
Pan X H, Chen R J, Wu F. Development of electrochemical energy storage technology [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 225–236.

[54] Xiao J, Shi F F, Glossmann T, et al. From laboratory innovations to materials manufacturing for lithium-based batteries [J]. Nature Energy, 2023, 8(4): 329–339.

[55] Wang Q S, Jiang L H, Yu Y, et al. Progress of enhancing the safety of lithium ion battery from the electrolyte aspect [J]. Nano Energy, 2019, 55: 93–114.

[56] Wu Y K, Zeng Z Q, Liu M C, et al. Restraining lattice oxygen escape by bioinspired antioxidant enables thermal runaway prevention in Ni-Rich cathode based Lithium-Ion batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(31): 2401037.

[57] Chen R S, Li Q H, Yu X Q, et al. Approaching practically accessible solid-state batteries: Stability issues related to solid electrolytes and interfaces [J]. Chemical Reviews, 2020, 120(14): 6820–6877.

[58] Zachman M J, Tu Z Y, Choudhury S, et al. Cryo-STEM mapping of solid-liquid interfaces and dendrites in lithium-metal batteries [J]. Nature, 2018, 560(7718): 345–349.

[59] Bates A M, Preger Y, Torres-Castro L, et al. Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries? [J]. Joule, 2022, 6(4): 742–755.

[60] Wu Y, Zhang W J, Rui X Y, et al. Thermal runaway mechanism of composite cathodes for all-solid-state batteries [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 78(104223): 2405183

[61] Zhu Y S, Wang F X, Liu L L, et al. Composite of a nonwoven fabric with poly(vinylidene fluoride) as a gel membrane of high safety for lithium ion battery [J]. Energy & Environmental Science, 2013, 6(2): 618–624.

[62] Dai J H, Shi C, Li C, et al. A rational design of separator with substantially enhanced thermal features for lithium-ion batteries by the polydopamine-ceramic composite modification of polyolefin membranes [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(10): 3252–3261.

[63] Lu H T, Du A, Lin X P, et al. Rationally coupling thermal tolerance, thermal conductance, and overheating-response in a separator for safe batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(20): 7860–7869.

[64] Yang J H, Jeong Y K, Kim W, et al. Dual flame-retardant mechanism-assisted suppression of thermal runaway in lithium metal batteries with improved electrochemical performances [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(2): 2570006.

[65] Wang Y, Feng X N, Peng Y, et al. Reductive gas manipulation at early self-heating stage enables controllable battery thermal failure [J]. Joule, 2022, 6(12): 2810–2820.

[66] Chen Z, Hsu P C, Lopez J, et al. Fast and reversible thermoresponsive polymer switching materials for safer batteries [J]. Nature Energy, 2016, 1: 15009.

[67] Yun H, Lee E, Han J, et al. Voltage noise failure induced by Li dendritic micro-penetration in all-solid-state Li-metal battery with composite solid electrolyte [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(14): 2404044.

[68] Kong D P, Lv H P, Ping P, et al. A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107073.

[69] Jiang J, Chen X, Niu Y, et al. Advances in flexible sensors with MXene materials [J]. New Carbon Materials, 2022, 37(2): 303–320.

[70] Lu Y, Wang X D, Mao S Y, et al. Smart batteries enabled by implanted flexible sensors [J]. Energy & Environmental Science, 2023, 16(6): 2448–2463.

[71] Peng J, Zhao X, Ma J, et al. Enhancing lithium-ion battery monitoring: A critical review of diverse sensing approaches [J]. eTransportation, 2024, 22: 100360.

[72] Heenan T M M, Mombrini I, Llewellyn A, et al. Mapping internal temperatures during high-rate battery applications [J]. Nature, 2023, 617(7961): 507–512.

[73] Jin Y, Zheng Z K, Wei D H, et al. Detection of micro-scale Li dendrite *via* H_2 gas capture for early safety warning [J]. Joule, 2020, 4(8): 1714–1729.

[74] Su T L, Lyu N W, Zhao Z X, et al. Safety warning of lithium-ion battery energy storage station *via* venting acoustic signal detection for grid application [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102498.

[75] Zhang Y, Li S Y, Mao B B, et al. A multi-level early warning strategy for the $LiFePO_4$ battery thermal runaway induced by overcharge [J]. Applied Energy, 2023, 347: 121375.

[76] Chen Z H, Xu K, Wei J W, et al. Voltage fault detection for lithium-ion battery pack using local outlier factor [J]. Measurement, 2019, 146: 544–556.

[77] Kang Y Z, Duan B, Zhou Z K, et al. A multi-fault diagnostic method based on an interleaved voltage measurement topology for series connected battery packs [J]. Journal of Power Sources, 2019, 417: 132–144.

[78] Liu Q Q, Ma J, Zhao X, et al. Online diagnosis and prediction of power battery voltage comprehensive faults for electric vehicles based on multi-parameter characterization and improved K-means method [J]. Energy, 2023, 283: 129130.

[79] Li K J, Li J H, Gao X L, et al. Effect of preload forces on multidimensional signal dynamic behaviours for battery early safety warning [J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 92: 484–498.

[80] Li K J, Gao X L, Wang S S, et al. Comparative analysis of multi-dimensional signals evolution in prismatic and pouch $LiFePO_4$ batteries under thermal abuse [J]. Applied Energy, 2024, 372: 123818.

[81] Li K J, Chen L, Gao X L, et al. Implementing expansion force-based early warning in $LiFePO_4$ batteries with various states of charge under thermal abuse scenarios [J]. Applied Energy, 2024, 362: 122998.

[82] Chen S Q, Wei X Z, Zhang G X, et al. Active and passive safety enhancement for batteries from force perspective [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187: 113740.

[83] Louli A J, Ellis L D, Dahn J R. operando pressure measurements reveal solid electrolyte interphase growth to rank Li-ion cell performance [J]. Joule, 2019, 3(3): 745–761.

[84] Lin C J, Mao J B, Zhang X T, et al. A study of expansion force propagation characteristics and early warning feasibility for the thermal diffusion process of lithium-ion battery modules [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113076.

[85] Chen L, Li K J, Cao Y C, et al. Multidimensional signal fusion strategy for battery thermal runaway warning towards multiple application scenarios [J]. Applied Energy, 2025, 377: 124512.

[86] 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.

[87] 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.

[88] Liu Y J, Duan Q L, Xu J J, et al. Experimental study on a novel safety strategy of lithium-ion battery integrating fire suppression and rapid cooling [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28: 101185.

[89] Meng X D, Wang Z D, Liu B Z, et al. Enhancing extinguishing efficiency for lithium-ion battery fire: Investigating the extinguishing mechanism and surface/interfacial activity of F-500 microcapsule extinguishing agent [J]. eTransportation, 2024, 22: 100357.

[90] Barelli L, Bidini G, Ottaviano P A, et al. A novel concept for grid Li-ion BESS safety: Integration of Vanadium-air flow battery technology in fire protection system [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103086.

[91] 蔡兴初, 朱一鸣, 姜可尚, 等. 全氟己酮气体灭火系统在磷酸铁锂电池储能预制舱的应用 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2497–2504.
Cai X C, Zhu Y M, Jiang K S, et al. Application on perfluoro-2-methyl-3-pentanone in lithium battery premade energy storage cabin [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2497–2504.

[92] 郭东亮, 郭鹏宇, 孙磊, 等. 细水雾对磷酸铁锂储能电池模组性能影响研究 [J]. 消防科学与技术, 2022, 41(8): 1093–1097.
Guo D L, Guo P Y, Sun L, et al. Research on the influence of water mist on the performance of lithium iron phosphate energy storage battery modules [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(8): 1093–1097.

[93] 卓萍, 郭鹏宇, 路世昌, 等. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站防火设计 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(3): 426–428.
Zhuo P, Guo P Y, Lu S C, et al. Fire design of prefabricated cabin type lithium iron phosphate battery power station [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(3): 426–428.

[94] 王春力, 贡丽妙, 亢平, 等. 锂离子电池储能电站早期预警系统研究 [J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1152–1158.
Wang C L, Gong L M, Kang P, et al. Research on early warning system of lithium ion battery energy storage power station [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1152–1158.

[95] 管敏渊, 沈建良, 徐国华, 等. 锂离子电池储能系统靶向消防装备设计与性能 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1131–1138.
Guan M Y, Shen J L, Xu G H, et al. Design and performance research of targeted-fire fighting equipment for lithium-ion battery energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1131–1138.

[96] 李首顶, 李艳, 田杰, 等. 锂离子电池电力储能系统消防安全现状分析 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1505–1516.
Li S D, Li Y, Tian J, et al. Current status and emerging trends in the safety of Li-ion battery energy storage for power grid applications [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1505–1516.

[97] 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.

[98] Chen J Y, Xu C S, Liu J Y, et al. Enhanced barrier materials with integrated gas regulation capabilities to mitigate explosion risks in battery systems [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 503: 158235.

[99] Wang J, Feng X N, Yu Y Z, et al. Rapid temperature-responsive thermal regulator for safety management of battery modules [J]. Nature Energy, 2024, 9(8): 939–946.

[100] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2888–2903.
Zeng S H, Wu W X, Liu J Z, et al. A review of research on immersion cooling technology for lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2888–2903.

[101] 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: 228545.

[102] Li X T, Zhou Z Y, Zhang M J, et al. A liquid cooling technology based on fluorocarbons for lithium-ion battery thermal safety [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 78:

104818.

[103] 全球首个浸没式液冷电池储能电站投入运行 [EB/OL]. (2023-03-15)[2025-01-20]. http://www. sasac. gov. cn/n2588025/n2588124/c27454797/content.html.
The world's first submerged liquid cooled energy storage power station has been officially put into operation [EB/OL]. (2023-03-15)[2025-01-20]. http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c27454797/content.html.

[104] Albertus P, Anandan V, Ban C M, et al. Challenges for and pathways toward Li-metal-based all-solid-state batteries [J]. ACS Energy Letters, 2021: 1399–1404.

[105] Sun Y K. Promising all-solid-state batteries for future electric vehicles [J]. ACS Energy Letters, 2020, 5(10): 3221–3223.

[106] 全固态电池最新预测: 2025 年将确定主攻技术路线 [EB/OL]. (2025-02-20)[2025-04-05]. http://www. cnautonews. com/yaowen/2025/02/20/detail_20250220371981.html.
Latest prediction for all solid state batteries: the main technological route will be determined by 2025 [EB/OL]. (2025-02-20)[2025-04-05]. http://www. cnautonews. com/yaowen/2025/02/20/detail_20250220371981.html.

[107] 储能用固态电池迎来新突破: 太蓝新能源与南都电源携手共推规模化应用 [EB/OL]. (2024-12-31)[2025-01-20]. https://www.cena.com.cn/newenergy/20241231/125540.html.
Solid state batteries for energy storage usher in new breakthroughs: Talent New Energy and Narada Power Source join hands to promote large-scale applications [EB/OL]. (2024-12-31)[2025-01-20]. https://www.cena.com.cn/newenergy/20241231/125540.html.

[108] Attia P M, Grover A, Jin N, et al. Closed-loop optimization of fast-charging protocols for batteries with machine learning [J]. Nature, 2020, 578(7795): 397–402.

[109] Severson K A, Attia P M, Jin N, et al. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation [J]. Nature Energy, 2019, 4(5): 383–391.

[110] Jiang B B, Gent W E, Mohr F, et al. Bayesian learning for rapid prediction of lithium-ion battery-cycling protocols [J]. Joule, 2021, 5(12): 3187–3203.

[111] Li W, Zhu J E, Xia Y, et al. Data-driven safety envelope of lithium-ion batteries for electric vehicles [J]. Joule, 2019, 3(11): 2703–2715.

[112] Wang Y, Feng X N, Guo D X, et al. Temperature excavation to boost machine learning battery thermochemical predictions [J]. Joule, 2024, 8(9): 2639–2651.

[113] Dubarry M, Howey D, Wu B. Enabling battery digital twins at the industrial scale [J]. Joule, 2023, 7(6): 1134–1144.