引用格式：黄合欢，李九歌，权朝明，等. 基于技术演进与国际对标双视角下我国电化学储能系统消防标准体系优化路径研究[J]. 标准化学报，2026(11)：122-133.
HUANG Hehuan, LI Jiuge, QUAN Chaoming, et al. Research on the Optimization Path of Fire Protection Standard System for Electrochemical Energy Storage Systems in China from the Dual Perspectives of Technological Evolution and International Benchmarking[J]. Journal of Standardization, 2026(11): 122-133.

基于技术演进与国际对标双视角下我国电化学储能系统消防标准体系优化路径研究

黄合欢[1]　李九歌[2]　权朝明[3]　梁慧恒[4]　符和锟[4]　许希军[5*]

（1.深圳市钛和巴伦技术股份有限公司；2.深圳市国计钛和电力技术服务有限公司；
3.青海黄河上游水电开发有限责任公司；4.东莞市巴能检测技术有限公司；5. 广东工业大学）

摘　要：【目的】系统梳理我国电化学储能消防技术的演进和现行储能消防标准制定情况，分析国际储能消防标准体系构建模式，探究我国电化学储能消防标准体系优化路径。【方法】通过文献标准资料分析，从本体、系统、空间3个维度开展研究。本体层面已从单纯延缓热失控触发升级为有效限制传播；系统层面防护逻辑由被动响应转向全面的闭环过程控制；空间层级的治理方式则由依赖经验数值向复杂的风险量化方法演进。【结果】基于技术演进发展，对照国内标准研制情况，发现国内标准与当前技术有一定契合度，但整体仍滞后于技术创新步伐，尤其在极早期预警、系统级蔓延评价及新型抑制技术等领域存在显著滞后与空白。与国际标准体系构建特征比较，我国标准建设仍以合规性控制与固定数值管理为主，风险量化与测试驱动机制有待完善。【结论】我国储能消防安全标准体系正处于由“规范分层管理”向“风险闭环治理”转型的关键阶段，为有效应对大规模储能部署下的严峻安全挑战，亟须通过前瞻性顶层设计，构建主动型风险治理机制。

关键词：电化学储能；消防安全；技术演进；标准建设；国际对标；路径研究
DOI编码：10.3969/j.issn.2097-857X.2026.11.014

Research on the Optimization Path of Fire Protection Standard System for Electrochemical Energy Storage Systems in China from the Dual Perspectives of Technological Evolution and International Benchmarking

HUANG Hehuan[1]　LI Jiuge[2]　QUAN Chaoming[3]　LIANG Huiheng[4]
FU Hekun[4]　XU Xijun[5*]

(1.Ti Group Shenzhen BALUN Technology Co., Ltd.; 2. Shenzhen Guoji Taihe Electric Power Technology Service Co., Ltd.; 3. Qinghai Yellow River Upper Reaches Hydropower Development Co., Ltd.; 4.Dongguan Baneng Testing Technology Co., Ltd.; 5.Guangdong University of Technology)

Abstract: [Objective] This paper aims to systematically review the evolution of fire protection technologies for electrochemical energy storage in China and the current status of relevant fire protection standards, analyze the construction models of international energy storage fire protection standards systems, and explore pathways for optimizing China's

基金项目：本文受青海省重点研发平台建设专项“青海省十大国家级科技创新平台培育建设专项（三期）”（项目编号：2025-ZJ-J02）、“青海黄河上游水电开发有限责任公司C类科技项目”（项目编号：KY-C-2025-CN03）资助。
作者简介：黄合欢，本科，助理工程师，研究方向为电化学储能及储能安全。
许希军，通信作者，博士，副教授，研究方向为电池及电池安全。

electrochemical energy storage fire protection standards system. [Methods] Through literature and standard documentation analysis, research is conducted from three dimensions: the cell level, the system level, and the spatial level. At the cell level, the approach has evolved from merely delaying the initiation of thermal runaway to effectively limiting its propagation. At the system level, the protection logic has shifted from passive response to comprehensive closed-loop process control. At the spatial level, governance methods have progressed from reliance on empirical values to complex risk quantification approaches. [Results] Based on technological evolution and a review of domestic standard development, it is found that domestic standards have a certain degree of alignment with current technologies, but overall they still lag behind the pace of technological innovation. Notable gaps and delays exist particularly in areas such as ultra-early warning, system-level propagation evaluation, and novel suppression technologies. Compared with the structural characteristics of international standards systems, China's standard development remains primarily focused on compliance control and fixed-value management, with risk quantification and test-driven mechanisms requiring further improvement. [Conclusion] China's energy storage fire safety standards system is at a critical stage of transitioning from "hierarchical compliance management" to "closed-loop risk governance". To effectively address the severe safety challenges posed by large-scale energy storage deployment, it is imperative to establish proactive risk governance mechanisms through forward-looking top-level design.

Keywords: electrochemical energy storage; fire safety; technological evolution; standard construction; international benchmarking; path research

0 引言

在全球能源转型与“双碳”目标驱动下，电化学储能已成为构建新型电力系统的关键支撑技术，其装机规模呈现爆发式增长[1]。当前，电化学储能的技术路线呈现出多元化发展态势，包括锂离子电池、液流电池、钠离子电池及铅碳电池等。锂离子电池，特别是磷酸铁锂体系，因其在能量密度、循环寿命和成本之间的综合平衡，已成为绝对的主流选择。截至2025年6月，累计投运的锂离子电池项目总能量170.33 GWh，占比97.34%（锂离子项目中99.93%为磷酸铁锂），其他技术路线占比较低，行业技术格局呈现高度集中态势[2]。然而，伴随规模化应用的快速推进，锂离子电池热失控引发的火灾与爆炸事故频发，其安全风险逐步凸显，已成为行业高质量发展的核心瓶颈[3-4]。在此背景下，储能安全治理需求由“规模扩张驱动”向“安全约束强化”加速转变。现有消防标准在适用性、系统性及协同性方面逐渐显现滞后性，难以有效支撑新型储能系统的复杂安全防护需求。因此，构建科学完善、与国际接轨且符合我国国情的储能消防标准体系，已成为行业发展的关键基础与现实迫切任务。

基于上述背景，本文围绕电池本体安全、系统级消防设计及站区空间防火布局3个层级，系统梳理国内技术演进与标准建设情况，并对比国际典型标准体系的结构特征，深入研究电化学储能系统消防标准体系优化路径。

1 国内储能消防技术演进现状

1.1 电池本体

在电化学储能系统的消防安全体系里，电池本体层技术是基础防线。电池本体安全目标是从电池材料和集成设计层面，提升其自身的抗滥用能力，最大限度地延缓或阻止热失控的引发与蔓延。本体层技术的发展路径正从被动防御向主动阻断转变。早期，本体层安全设计主要是围绕提升材料本身的稳定性来进行的。随着对热失控原理的认识逐渐深入，现在技术重点变成了构建高效的热扩散阻断机制。图1为储能本体消防安全核心技术体系图。

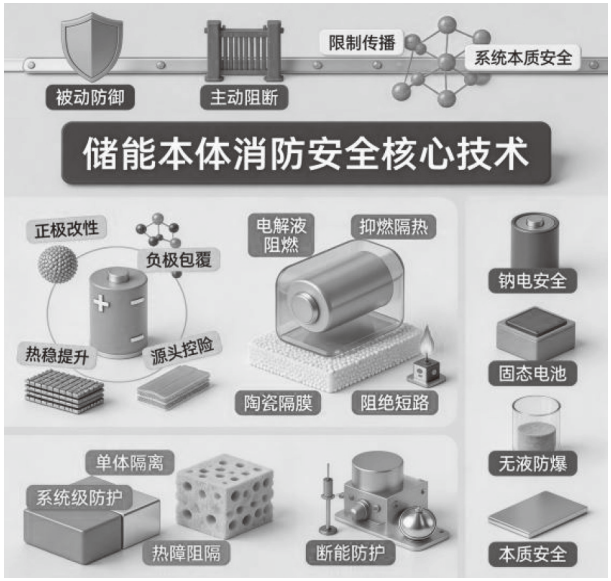


图1 储能本体消防安全核心技术体系图

在材料层面，主要通过正极材料纳米化与表面包覆[5-8]、负极材料防护涂层和原子掺杂技术[9-10]，在电解液中添加阻燃剂或采用新型锂盐[11-13]，以及发展固态/半固态电解质等技术[14-15]，持续提升电池本征热稳定性。在电芯结构层面，关键设计包括采用陶瓷涂覆等高热稳定性隔膜提升耐热收缩温度并降低内短路扩展风险[16-20]，以及优化防爆阀（CID）确保及时泄压与断电[21]。为将风险控制在最小范围，在电芯间填充气凝胶等超低导热率的不燃隔热材料以构建“热屏障”，并结合物理隔板设计限制热失控影响范围[22-23]。为从根本上消除液态电解质泄漏、挥发及引发的燃烧风险，采用不可燃固态电解质替代传统液态电解质的下一代电池正加速发展[1,24]。钠离子电池则从材料本征层面，以其高热稳定性和不可燃特性，成为下一代安全储能技术的重要方向[25-26]。

1.2 储能系统

在储能产业发展初期，消防安全方案基本是对传统工业与建筑消防技术的直接移植。热管理主要依赖风冷技术，难以实现电池温度的均匀控制。通风仅为普通散热，无针对性防爆排烟。火灾监控完全依赖传统的点型烟感和温感探测器，只能在明火或高温出现后报警，响应严重滞后，灭火方案则普遍采用以扑灭明火为目的的全淹没式气体灭火系统，虽能快速降低空间氧浓度，但灭火剂难以穿透电池内部，无法冷却已发生热失控的电芯，面对电池内部持续的放热反应，“死灰复燃”几乎无法避免[24]。而且，初期的消防系统是一个独立的子系统，与电池管理系统（BMS）及热管理系统几乎没有数据交互和联动控制，所以响应孤立而滞后[27-29]。

当前，储能消防已进入“系统化智能联动”的主动防御新阶段，其核心目标是构建一个基于热失控全过程管理、多子系统深度协同的智能安全体系。在架构上，系统演进为簇级或组串式分散管理，实现故障单元的快速电气隔离。液冷技术凭借优异温控精度成为储能热管理标配，并与强制性防爆通风系统联动，实现从单一热管理向系统化源头管控的转型[30-33]。预警技术由单一参数监测演进为电—热—气多源融合与智能预测体系。通过监测电压、温度及H_2、CO、VOC等特征气体，可较传统烟温感提前数分钟至数十分钟发出预警[34-35]。近年来，面向热失控早期识别的监测技术快速发展。电化学阻抗谱、机械形变及声学阵列识别等方法可在热失控触发前数百秒捕捉内部结构与压力异常，实现早期预警[36-37]。在灭火策略方面，技术路径由全淹没式气体灭火演进为“PACK级精准抑制+舱级持续冷却”的复合体系，全氟己酮用于局部抑燃，细水雾或强化冷却用于防止复燃，液氮等低温介质用于阻断热蔓延[24,38-42]。在联动控制层面，依托分级触发逻辑，消防系统与电池管理系统（BMS）、能量管理系统（EMS）形成深度联动，系统形成“监测—隔离—通风—抑制”的自动响应链条，推动储能消防由单点处置向层级化传播阻断与智能协同防御转型[43]。

1.3 空间层级防火

在本体层与系统层防控措施之外，若单簇或单系统防护失效，事故风险将向更大尺度空间传播。因此，电化学储能空间层级防火技术的演进，本质上体现为由经验型物理隔离向风险量化驱动的精细化防控转型。产业初期，站区布局主要参照传统建筑防火规范，通过固定防火间距与常规分

区控制延缓火势蔓延。然而，锂离子电池热失控具有高热释放速率（HRR）、持续放热及可燃气体快速聚集并可能爆燃的耦合特征，其传播机理明显区别于一般固体火灾。在高能量密度、大规模集成场景下，单纯依赖物理距离难以有效削弱爆炸冲击波叠加与高温烟气跨舱传播风险，经验型间距控制逐渐暴露出局限性[44]。

随着事故经验积累与热失控机理认知深化，空间防护理念逐步转向“单元化风险隔断”。分舱布置成为核心策略，通过将储能系统划分为独立防火单元或电池舱，构建结构边界与物理隔断，降低群组耦合导致的多米诺蔓延概率[45-47]。在此基础上，单防火分区容量控制进一步成为控制火灾规模上限的关键防线。基于火灾动力学分析与能量释放规律，单元容量与潜在火灾荷载呈正相关关系，容量集中易突破常规消防系统的控制能力[48]。通过限制单分区最大容量，可将事故强度控制在可干预阈值内，为应急处置争取时间。同时，针对热失控产气与爆炸压力快速积聚问题，空间设计引入泄爆导向结构，利用压差释放原理将高温高压气流定向排放至安全区域，实现由被动承压向主动卸荷的转变[46]。当前阶段，空间布局进一步引入CFD数值模拟、热辐射与爆炸压力模型开展风险量化分析，布局参数由固定数值控制逐步向性能化设计过渡[49]。空间治理由经验规范型升级为模型支撑的风险评估体系，标志着储能电站防控逻辑由设备尺度控制向多尺度空间风险约束深化。

2 国内储能消防标准建设现状

随着新型储能产业规模化发展，消防安全已成为行业高质量发展的核心底线，储能消防标准作为防范化解安全风险、规范产业发展的重要支撑，建设进程持续提速。近年来，国家层面强化政策引导，各部门、各标准化技术委员会协同发力，逐步构建起覆盖多领域、多环节的储能消防标准体系。2025年，国家能源局等五部门联合发布的《关于加强电化学储能安全管理有关工作的通知》明确了各部门在标准制定中的职责分工，标志着我国储能安全管理将从部门分治转向协同联治。目前，电池本体材料标准主要由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）等归口制定，全国电力储能标准化技术委员会（SAC/TC 550）主要负责电力储能技术领域的国家标准制修订工作，全国消防标准化技术委员会火灾探测与报警分技术委员会（SAC/TC 113/SC 6）负责消防预警方面的标准制定，工业和信息化部（电子）归口锂离子电池生产质量管理的标准制定工作。

2.1 电池本体层标准建设

在材料层面，已形成较为完备的产品标准与检测方法体系，见表1。正极材料方面，GB/T 30835等产品标准对磷酸铁锂等材料提出技术指标要求[50]；GB/T 46514（晶体结构XRD测定）[51]、GB/T 45324（粉末电阻率）[52]、GB/T 44330（压实密度）[53]、GB/T 45330（水分含量）[54]及GB/T 43092（高温电化学性能）[55]等标准，从晶体结构稳定性、电导发热特性、杂质控制与高温行为等维度强化质量一致性管理。负极材料方面，GB/T 24533（石墨类负极材料）[56]、GB/T 30836（钛酸锂及其炭复合负极材料）[57]及YB/T 6139系列标准（石墨类负极材料检测方法）对石墨化度、结构完整性与杂质控制进行规范[58-59]。电解液领域形成SJ/T 11723、HG/T 4067等产品标准，以及SJ/T 11995等测试方法标准[60-62]，对水分、金属杂质、电导率及溶剂组成进行限定；隔膜领域则通过GB/T 36363及相关团体标准对热收缩率、强度及耐热性能提出指标要求[63-66]。

在电芯与电池组层面，GB 44240—2024《电能存储系统用锂蓄电池和电池组 安全要求》构成储能电芯强制性安全底线标准，要求电池在冲击、挤压、浅刺、热滥用、跌落、热失控等试验条件下不起火、不爆炸，电池组系统热扩散后电池间应不发生热扩散，电池组系统应无外部火焰，电池组系统外壳应不发生破裂[67]；GB/T 36276—2023《电力储能用锂离子电池》从绝热温升特性、热失控性能、热失控扩散性能、报警和保护功能4个方面

表1 电池本体材料相关标准

材料类别	标准号	标准名称	归口单位	发布时间	实施时间
正极材料	GB/T 30835—2014	锂离子电池用炭复合磷酸铁锂正极材料	全国钢标准化技术委员会（SAC/TC 183）	2014/6/24	2015/4/1
	GB/Z 155—2025	钠离子电池正极材料通则	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2025/12/3	2025/12/3
	GB/T 43092—2023	锂离子电池正极材料电化学性能测试 高温性能测试方法	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2023/9/7	2024/4/1
	GB/T 41704—2022	锂离子电池正极材料检测方法 磁性异物含量和残余碱含量的测定	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2022/10/12	2023/2/1
	GB/T 45330—2025	锂离子电池正极材料 水分含量的测定 卡尔费休库伦法	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2025/2/28	2025/9/1
	GB/T 45324—2025	锂离子电池正极材料粉末电阻率的测定	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2025/2/28	2025/9/1
	GB/T 44330—2024	锂离子电池正极材料 粉末压实密度的测定	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2024/8/23	2025/3/1
	GB/T 46514—2025	锂离子电池正极材料检测方法 晶体结构的测定 X射线衍射法	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2025/10/5	2026/5/1
负极材料	GB/T 24533—2019	锂离子电池石墨类负极材料	全国钢标准化技术委员会（SAC/TC 183）	2019/3/25	2020/2/1
	GB/T 33827—2017	锂电池用纳米负极材料中磁性物质含量的测定方法	全国纳米技术标准化技术委员会（SAC/TC 279）	2017/5/31	2017/12/1
	GB/T 30836—2014	锂离子电池用钛酸锂及其炭复合负极材料	全国钢标准化技术委员会（SAC/TC 183）	2014/6/24	2015/4/1
	YS/T 1509系列	硅碳复合负极材料化学分析方法	全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）	2021/12/2	2022/4/1
电解液	SJ/T 11723—2018	锂离子电池用电解液	工业和信息化部	2017/7/4	2018/10/1
	SJ/T 11995—2025	锂离子电池电解液中金属杂质含量测试方法	工业和信息化部	2025/5/9	2025/8/1
	SJ/T 11568—2016	锂离子电池用电解液溶剂	全国半导体设备和材料标准化技术委员会	2016/1/15	2016/6/1
隔膜	GB/T 36363—2018	锂离子电池用聚烯烃隔膜	全国碱性蓄电池标准化技术委员会（SAC/TC 77）	2017/7/4	2019/1/1
	T/CIET 1045—2025	锂电池用高强超薄隔膜	中国国际经济技术合作促进会	2025/2/26	2025/2/26
	T/CI 842—2024	锂离子电池隔膜技术规范	中国国际科技促进会	2024/12/24	2024/12/24

规定了电池的热安全性能[68]；GB/T 42728—2023《锂离子电池组安全设计指南》重点规范锂离子电池组在设计阶段的安全技术要求，涵盖电池选型、电路保护、热管理、防火设计等关键环节[69]。

为提升锂离子电池生产制造过程的质量控制水平，从源头上保障电池产品的安全性与一致性，工业和信息化部（电子）归口组织制定了《锂离子电池生产质量管理》系列推荐性国家标准。该

系列标准共分为4个部分：总体要求、电池材料管控、电池单体过程管控与成品测试、电池组过程管控与成品测试，已于2026年3月发布，旨在通过规范生产工艺质量管控，实现电池产品失效率从百万分之一（ppm）级别向十亿分之一（ppb）级别的跨越式提升，从根本上增强电池本体的安全性与可靠性[70-73]。

2.2 储能系统层标准建设

电化学储能产业自21世纪初开始伴随可再生能源发展而起步，并在2010年后随着锂离子电池成本下降和技术成熟进入规模化示范与应用阶段。在发展初期，由于缺乏专门的储能消防标准，消防安全设计主要参照建筑消防规范，如GB 50016—2014《建筑设计防火规范》[74]和GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》[75]等标准。2014年，GB 51048—2014《电化学储能电站设计规范》[76]（已废止）的发布是我国储能消防标准从“完全参照通用”迈向“拥有专门规定”的关键一步。

伴随储能消防技术由“被动抑制”向“系统化智能联动”转型，标准体系也逐步走向体系化构建。在系统集成架构层面，GB/T 51048—2025《电化学储能电站设计标准》明确储能系统可采用簇级或组串式分散管理架构，并通过电气隔离与保护协调设计，为故障单元的快速切除提供依据，从源头支撑“故障精准隔离”理念的实现[77]。在热管理与防爆通风层面，液冷技术暂时没有国家标准和行业标准，目前已制定地方标准和团体标准，从设计规范（DB34/T 5137—2025）[78]、技术规范（T/CIET 1175—2025）[79]到运行维护（T/CASMES 421—2024）[80]，覆盖了液冷系统全生命周期，特别是T/CES 381—2025《浸没式液冷锂电池储能系统技术规范》对浸没式液冷这一前沿技术提出了详细的量化指标[81]。同时，防爆通风目前主要依据GB/T 51048—2025，该标准规定锂离子电池室/舱设置泄压（泄爆）设施，并要求配置与气体探测报警系统联动的事故排风系统。在运行控制层面，GB/T 34131—2023《电化学储能电站用锂离子电池管理系统技术规范》对BMS的数据采集精度、保护阈值及切断策略作出技术规定，为基于簇级管理的快速电气隔离提供精确的控制逻辑[82]。

在预警层面，GB/T 42288—2022《电化学储能电站安全规程》规定电池室/舱内应设置可燃气体，感温和感烟等火灾探测器，每个电池模块可单独配置探测器[83]；GB/T 46261—2025《电化学储能电站火灾监测预警系统通用技术要求》提出多参数融合监测的性能要求，将CO和H_2等特征气体纳入监测指标体系，并结合液冷、风冷等不同冷却方式设置差异化报警阈值，为储能系统早期预警提供技术依据[84]。然而，电化学阻抗谱、机械形变与声学阵列等极早期预警技术尚处于实验室研究阶段[85]，目前还未启动标准研制。在灭火层面，GB 50370—2005《气体灭火系统设计规范》[86]、T/CFPA 054—2026《全氟己酮灭火系统技术规程》[87]、GB 50898—2013《细水雾灭火系统技术规范》[88]及GB 50084—2017《自动喷水灭火系统设计规范》[89]等，为精准抑制与持续冷却提供工程依据，但液氮等低温惰化介质及材料内置安全机制尚缺乏国家级系统规范。在联动控制层面，GB/T 44026—2024《预制舱式锂离子电池储能系统技术规范》规定火灾自动报警系统应与直流开断设备、储能变流器、热管理系统等设备联动，并明确消防系统应设置独立通信接口[90]；GB/T 42288—2022《电化学储能电站安全规程》则要求消防系统与通风空调系统、视频与环境监控系统具备联动功能，且自动灭火系统应与电池管理系统、火灾探测器、可燃气体探测装置及排风系统协同控制，使“监测—隔离—通风—抑制”的闭环逻辑在标准层面得以制度化确立[83]。

在储能消防整系统层面，《防止电力生产事故的二十五项重点要求（2023版）》强调灭火系统需经模块级试验验证；2025年3月6日—4月25日，由应急管理部天津消防研究所等单位承担《电化学储能系统火灾抑制试验方法》行业标准征求意见，该标准的测试是对电化学储能系统进行的火灾测试，适用于额定容量不小于100 kWh的预制舱式磷

酸铁锂电池储能系统[91]。总体来看，我国储能消防标准体系已覆盖热失控全过程的主要环节，但在极早期智能预测、系统级火灾蔓延量化评估及新型抑制技术标准化方面仍处于探索阶段。表2为储能系统消防安全核心标准。

2.3 空间层标准建设

空间层标准主要依托建筑防火与爆炸危险环境规范，并由储能专用设计标准进行补充，共同构成限制事故规模扩大的物理防线。在通用规范层面，GB 50016—2014（2018年版）《建筑设计防火规范》、GB 55037—2022《建筑防火通用规范》[92]及GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》[93]为舱体耐火等级、防火分区划分与泄爆面积计算提供了强制性的制度基础。在储能专项设计层面，GB/T 51048—2025《电化学储能电站设计标准》在总平面布置章节中，对防火间距、分舱布置与单元容量控制提出了针对性的专项要求，将“簇级分散管理”与“舱级风险隔断”的理念转化为具体的工程设计参数。

从结构特征看，空间层标准目前仍以固定数值控制为主要模式。不管是设计规范里的防火间距米数，防火分区面积上限，建筑规范里的耐火极限小时数，还是防爆标准里的区域划分等级，均采用刚性量化指标进行约束。这种模式虽然在一定程度上对设计个性化有所限制，但极大地简化了工程审批和验收流程，为我国大规模电化学储能电站的快速建设确立了统一的安全底线。但基于热辐射模型与爆炸压力模型的风险量化方法尚未形成统一的制度化标准。当前，空间层标准正逐步由经验数值型向风险评估型过渡，未来有望借助性能化防火设计方法，实现对复杂火灾蔓延场景的更精准防控。

3　国际储能安全标准建设模式分析

从国际实践来看，电化学储能电站的安全管理已形成以“法规强制性约束、技术标准化认证、设计本质化优化”为核心的三维治理逻辑。美国通过NFPA消防规范与UL产品安全标准的高度衔接，建立了覆盖全链条的全球最严格安全框架；欧洲依托IEC国际标准体系及强制性安全认证制度，推动了跨国的系统化协同监管；日韩等国家则聚焦于本国电网结构与电池技术特性，通过本土化技术改良与标准适应性修订，实现对共性安全框架的有效补充。

3.1 美国：认证驱动的闭环型体系

美国形成了以NFPA与UL标准为核心的成熟安全框架。NFPA 855《固定式储能系统安装标准》是全球首个系统性规范储能系统安装的综合性安全标准，对不同电池类型、容量等级、防火间距、分区控制、通风及灭火配置提出明确要求，并与地方消防法规相衔接，成为工程审批的重要依据[94]。UL 9540《储能系统和设备安全标准》涵盖了储能系统的设计、构造、测试和操作，并对电气安全、热安全、机械安全、防火安全、系统性能和系统可靠性等提出了严格的要求。UL 9540不关注单个组件，而是将所有组件整合在一起以评估储能系统[95]。UL 9540A《电池储能系统热失控火焰传播评估测试方法》是一项安全认证

表2 储能系统消防安全核心标准

序号	标准号	标准名	归口管理组织	发布时间	实施时间
1	GB/T 51048—2025	电化学储能电站设计标准	住房和城乡建设部	2025-12-10	2026-04-01
2	GB/T 34131—2023	电力储能用电池管理系统	全国电力储能标准化技术委员会（SAC/TC 550）	2023-03-17	2023-10-01
3	GB/T 46261—2025	电化学储能电站火灾监测预警系统通用技术要求	全国消防标准化技术委员会（SAC/TC 113）	2025-08-29	2026-09-01
4	GB/T 42288—2022	电化学储能电站安全规程	全国电力储能标准化技术委员会（SAC/TC 550）	2022-12-30	2023-07-01

标准，目标是对电池储能系统整体的安全风险评估和测试，以确保系统在正常操作、异常情况和事故情况下均能保持安全。标准通过大规模火烧测试验证电池储能系统、控制系统、消防系统、机械结构和通风系统的有效性，评估电池热失控传播风险[96]。NFPA 855明确引用UL 9540A测试结果作为设计与容量控制的依据，从而形成“产品认证—系统级测试—工程设计优化—消防审批”的技术闭环。这种以测试数据支撑设计参数的制度结构，是美国体系区别于其他国家的重要特征。美国最新发布的CSA/ANSI C800:25，首次将“全尺寸火灾测试”纳入规范化要求，强调储能系统在持续燃烧条件下的火焰蔓延、热释放速率及相邻单元的影响[97]。NFPA 855:2026版也将大规模火灾场景测试（LSFT）从“可选”升级为“预期要求”，特别是针对大规模、高密度部署场景。这标志着国际储能消防标准正从“验证热失控不蔓延”向“验证火灾后果可控”深化。

3.2 欧洲及其他国家：IEC框架下的协同型体系

国际电工委员会电力储能系统技术委员会IEC/TC 120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等同或修改采用 IEC 标准。其中，IEC 62933-5-2《电力储能（EES）系统 第5-2部分：电网集成EES系统的安全要求 电化学储能系统》规定了电化学储能系统的安全要求，该标准涵盖了电化学储能系统的危险因素、安全风险分析和评估、风险降低措施及系统安全验证和测试[98]。与UL 9540A等特定测试获取数据不同，IEC 62933-5-2更侧重于风险分析方法学与系统安全验证。

英国RISC Authority（风险洞察、战略与控制机构）与 FPA（英国消防协会）于2022年制定发布了《Need to Know Guide RE1-Battery energy storage systems - commercial lithium-ion battery installations》，旨在降低商业锂离子电池储能系统带来的火灾风险。该指南规定所有的储能系统安装都应经过适当的火灾风险评估。消防策略应基于每一个案例的具体情况来确定，依据电池类型、安装位置、布局、电池仓结构、系统重要性及其他相关因素综合制定。消防策略应该是多层次的，包括良好的设计、避免热失控、早期探测、自动灭火。人工灭火措施及规划包括水源供应，应与储能系统及现场的其他可燃物相适应[99]。

澳大利亚发布的AS 5139《储能系统安装安全规范》，对储能系统的分类提出了明确要求，并根据安装位置，将系统划分为室内型、室外型和混合型，不同类型的系统需要满足不同的安全要求，特别是防火、防爆和热管理方面的规定。对于锂离子电池系统，特别强调了热失控的预防措施，要求安装专用的灭火系统和热管理系统[100]。

韩国在多起储能事故后颁布了《储能电站安全强化对策》，涉及“产品—安装—运行 ”各环节的安全强化、安全监控、强制维修、消防应对等管理制度，体现出事故反馈驱动制度快速调整的特点[101-102]。

4 我国电化学储能消防标准体系优化路径

基于储能消防技术由单点防护向系统化风险治理演进，以及国际标准体系以系统级测试和风险量化为核心枢纽的模式比较，我国标准体系建设应按照“补齐基础方法—推动性能化转型—实现国际协同”的分阶段路径推进。

4.1 持续完善基础方法标准

推动GB/T 46261—2025《电化学储能电站火灾监测预警系统通用技术要求》的落地实施，填补了早期预警产品标准空白，使电—热—气多参数融合探测从可选配置转化为规范化要求。参照美国CSA/ANSI C800:25《储能系统全尺寸火灾测试标准方法》的技术框架，加快制定《电化学储能电站大规模火灾测试方法》国家标准，改变我国长期依赖UL 9540A测试数据的被动局面。针对山东、广东等地已出台地方消防验收指南，但国家层面尚缺统一规范的现状，启动《电化学储能电站消防验收技术规范》编制，明确验收程序、检测项目与合格判定标准；同时，鉴于

液氮等低温惰化介质在热失控阻断中的独特优势已得到最新研究成果证实，应启动《液氮等低温惰化介质灭火系统技术规范》的制定工作，填补新型灭火介质国家标准空白。通过上述工作，在短期内补齐我国标准体系在国际比较中暴露的LSFT缺失、验收规范空白、新型介质无据可依等主要短板。

4.2 推动性能化制度转型

借鉴NFPA 855允许基于UL 9540A测试数据缩减防火间距的性能化设计理念，结合第一阶段LSFT国家标准的发布实施，适时修订GB/T 51048《电化学储能电站设计标准》和GB 50016《建筑设计防火规范》，引入“以数据换空间”的制度安排，允许通过大规模火灾测试验证数据优化防火间距、防火分区等关键设计参数。同时，建立储能电站火灾风险量化评估标准体系，规定火灾场景设定、热辐射计算模型、爆炸压力预测方法及可接受风险基准，使风险量化评估成为大型储能项目审批的制度化环节。针对钠离子电池加速示范应用的产业趋势，制定《钠离子电池储能系统消防安全技术规范》，基于钠电池热失控特性（产气成分、温度阈值等与传统锂电存在显著差异），规定专属预警参数、灭火介质选型与防火设计要求。同时，针对各厂商联动协议不统一、制约系统集成的现实问题，制定《储能电站消防系统与BMS/EMS联动控制接口规范》，统一通信协议、数据格式与响应时序。

4.3 深化国际协同

依托我国在锂离子电池产业规模和技术创新上的全球领先地位，将GB 44240—2024中严于国际标准的过充测试方法（恒压过充1小时）、振动冲击等特色技术条款，通过IEC/TC 120等国际标准化平台，推动转化为国际标准提案，提升我国在储能安全领域的国际话语权。在固态/半固态电池、钠离子电池等新型储能技术领域，依托我国先发优势，同步开展国内标准研制与国际标准布局，实现“技术研发—标准制定—市场应用”的协同推进。建立覆盖电芯本征安全、系统集成防控、站区物理隔离、运维阶段管理、退役处置安全的全生命周期、多技术路线的完整标准体系，形成可向“一带一路”共建国家输出的“中国方案”。定期开展国内外标准比对分析，建立动态更新机制，确保我国标准体系始终与国际前沿保持同步。通过上述工作，实现我国储能消防标准从“国际接轨”到“国际引领”的质变。

5 结 论

本文通过对储能消防技术演进情况梳理、国内储能消防标准制定情况研究，以及国际储能安全标准体系模式对比分析，得出以下主要结论：

（1）储能消防技术已进入系统化主动防御新阶段：电池本体层从材料改性走向热扩散阻断，储能系统层从孤立响应走向多源融合智能联动，空间防护层从固定间距控制走向风险量化评估。

（2）总体来看，我国已初步构建了涵盖电芯安全、系统防护与联动控制的储能消防标准框架，部分关键标准在指标水平与系统联动方面已达到国际先进水平。然而，现行体系仍存在结构性不足：本体层面缺乏面向新型电池体系及热失控机理的统一评价方法与分级判据；系统层面新型热管理与极早期预警技术尚未标准化，系统级火灾蔓延量化评估及新型抑制手段缺乏工程规范；空间层面风险量化方法尚未制度化，整体仍以经验参数控制为主。

（3）国际储能安全标准体系正加速由“固定参数约束”向“性能化风险评估”转型。美国基于NFPA 855与 UL 9540A 构建数据驱动的测试—设计闭环，欧洲依托IEC体系形成风险评估方法框架，澳大利亚等国家强调全生命周期安全管理。相比之下，我国标准体系仍以“指标约束+经验设计”为主，缺乏试验数据对设计优化的反向支撑及贯穿全生命周期的风险评估体系。

（4）我国储能消防标准体系正处于由“合规性安全”向“风险可控安全”转型的关键阶段，未来需向“数据驱动、风险量化、动态迭代”的体系方向升级。

参考文献

[1] 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书（2026）[R]. 北京: 中关村储能产业技术联盟, 2026.

[2] 中国电力企业联合会, 国家电化学储能电站安全监测信息平台. 2025年上半年电化学储能电站行业统计数据[R]. 2025.

[3] 袁帅, 崔煜杰, 程东浩, 等. 2017—2024年全球电化学储能电站火灾爆炸事故统计分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14（6）: 2362–2376.

[4] Dong–Hyeon I, Ji–Bum C. Social construction of fire accidents in battery energy storage systems in Korea[J]. Journal of Energy Storage,2023,71:108192(1–8).

[5] Han L F, Cao Y K, Liao C, et al. Novel silica–coated cathode to realize internal–short–circuit proof, high–interface–stabilized, high–safety lithium batteries[J]. Journal of Power Sources, 2024, 602: 234273(1–8).

[6] Xu Y L, Wang L, Geng J, et al. Conformal LATP surface engineering for Ni–rich cathodes: enhancing interfacial stability and thermal safety in lithium–ion batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(1): 1234–1245.

[7] Kim S, Kim J, Kang J, et al. Cathode wrapping strategy with metal chalcogenide nanosheet for safer and longer lasting Li–ion batteries[J]. npj 2D Materials and Applications, 2025, 9:14(1–11).

[8] Xie L J, Sun H Q, Dou J W, et al. Spinel–encapsulated Ni–rich cathodes for enhanced thermal safety: unraveling the decomposition kinetics and interfacial reconstruction[J]. Nanomaterials , 2026, 16(3): 183(1–20).

[9] Sethuraman A V, Kowolik K, Srinivasan V. Increased cycling efficiency and rate capability of copper–coated silicon anodes in lithium–ion batteries[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(5): 2234–2242.

[10] Wang L, Zhang Y, Chen X. Review on improving the performance of SiOx anodes for a lithium–ion battery through insertion of heteroatoms: state of the art and outlook[J]. Chemical Society Reviews, 2025, 54(4): 1890–1915.

[11] Xiong Q, Wang R J, Li D D, et al. Covalent and polyfluorinated lithium salt for stable $LiCoO_2$ batteries at high temperature and high voltage[J]. Advanced Materials, 2025, 16: 10325(1–11).

[12] Kim J H, Hyun J H, Kim S, et al. Phosphorus–based flame–retardant electrolytes for lithium batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 15: 2500587(1–26).

[13] Shi T W, Lix Q, et al.Tailored electrolyte salt anion chemistry for enhanced high–nickel lithium–ion batteries[J]. Nature communications, 2025, 16: 11210(1–13).

[14] Yang J S, Yuan H, Yao N, et al. Intrinsically safe lithium metal batteries enabled by thermo–electrochemical compatible in–situ polymerized solid–state electrolytes[J]. Advanced materials , 2024: 2405086(1–10).

[15] Chen K, Hu A, Zhu R G, et al. Versatile molecular engineering of in situ cross–linked multifunctional electrolytes for long–lifetime and safe semisolid lithium metal batteries[J]. ACS Nano, 2025, 19(12): 12345–12356.

[16] 茆志友, 宁小玉, 张培培, 等. 陶瓷隔膜对锂离子电池热失控影响及电池设计优化分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13（4）: 1154–1158.

[17] 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, 2025, 18(5): 2345–2356.

[18] 孙文浩, 刘娜, 张锟, 等. 高安全锂离子电池用耐高温隔膜的研究进展[J]. 材料工, 2025, 53(7): 104–120.

[19] 赵新晨, 雷西萍, 肖婉彤, 等. 基于聚烯烃类锂离子电池隔膜的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42（8）: 4268–4282.

[20] 王晓, 蔡戬, 盛德星. 聚合物锂离子电池隔膜的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52（11）: 154–164.

[21] 厉运杰, 张光雨, 祝维文, 等. 基于壅塞流的动力电池防爆阀泄压特性的动态仿真[J]. 储能科学与技术, 2023, 12（3）: 960–967.

[22] 李和雨, 洪小波, 陈子涵, 等. 多孔隔热板对锂离子电池模组热蔓延阻隔效果研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14（2）: 832–841.

[23] 鲍荣清, 梁玲敏, 严培培, 等. TPMS与相变材料协同强化的电池散热系统设计[J]. 储能科学与技术, 2025, 14（3）: 1203–1212.

[24] 余威. 锂离子电池储能系统消防安全技术研究进展[J]. 消防科学与技术, 2026, 45（1）: 64–74.

[25] Kausthubharam, Singh A, Gupta R, et al. Perspective on thermal stability and safety of sodium–ion batteries[J]. ACS Energy Letters, 2025, 10(3): 1256–1265.

[26] Dang Y, Yu Y, Wang Z, et al. Blocking thermal runaway

propagation in large-format sodium-ion battery system through localized energy release[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 104: 514-526.

[27] 王雅博, 刘渊, 李海龙, 等. 电池储能系统热管理现状综述[J]. 制冷与空调, 2025, 25(10): 60-70, 90.

[28] 翁兴航, 苏盛. 新型电力系统电网侧电化学储能电站消防安全管理研究综述[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(5): 155-172.

[29] 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(11): 3387-3394.

[30] Zhang Y, Wang L, Chen H, et al. Research progress on risk prevention and control technology for lithium-ion battery energy storage power stations: a review[J]. Batteries, 2025, 11: 301(1-36).

[31] 梁沁沁, 韩方源, 唐彬, 等. 锂/钠电池热管理系统中液冷技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(1): 128-139.

[32] Olugbemide D, Liu Y, Wang X. CFD analysis of performance-based explosion protection design for battery energy storage systems[J]. Fire Safety Journal, 2025, 152: 104312(1-17).

[33] Jia Z, Jin K, Mei W, et al. Advances and perspectives in fire safety of lithium-ion battery energy storage systems[J]. Energy Storage Materials, 2025: 100390(1-57).

[34] 刘颖佳, 管旭琳, 李玥, 等. 电化学储能产业标准化建设现状及发展建议[J]. 标准科学, 2025(11): 102-108.

[35] 刘宇峥, 李响卓淳, 曹芮晗. 新能源电池的火灾防控和安全性能研究进展[J]. 消防科学与技术, 2025, 44(11): 1619-1631.

[36] Ma H, He Q, Zhang F, et al. Research progress on early warning method and suppression technology of thermal runaway of lithium battery[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 119: 116377-116377.

[37] 陈静, 孙杰, 李吉刚, 等. 基于电化学阻抗谱的锂离子电池热失控早期预警方法研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4780-4794.

[38] Wu Y, Zhang P, Liu H. Detection and localization of early-stage abnormal sounds in lithium-ion battery thermal runaway[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6): 5890-5899.

[39] 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.

[40] 王红羽, 袁狄平, 石兵兵, 等. 储能模组内多孔防火材料增强液氮灭火效能研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3334-3342.

[41] Zhou L, Wang Y, Chen X. Inhibition effect of liquid nitrogen on thermal runaway of lithium-ion battery: different injection dose and fire compartments[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 185: 1234-1245.

[42] 彭冠林, 凌晓东, 林俣洁, 等. 并列式预制舱换电站爆炸与泄爆模拟研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3387-3394.

[43] 宋来丰, 郎需庆, 牛鲁娜, 等. 磷酸铁锂单体电池热失控火灾危险性[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3923-3933.

[44] Mahmood S, Khan A, Ali M. Combustion characteristics of thermal runaway gases from lithium-ion batteries: a systematic review[J]. Fire Technology, 2025, 61(2): 567-589.

[45] 张永强, 于勇, 陈晓飞, 等. 锂离子电池储能系统火灾防控技术研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2023(12): 37-40.

[46] 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): 1924-1932.

[47] Chen M, Zhao J R, Peng P, et al. Realization of building grade fire resistance in independent fire zone of energy storage system[J].Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2876: 012046(1-6).

[48] 张青松, 赵腾, 陈现涛, 等. 锂离子电池模组热失控传播特性与能量分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2193-2201.

[49] Shen X, Hu Q, Zhang Q, et al. An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 151: 107384(1-19).

[50] GB/T 30835—2014 锂离子电池用炭复合磷酸铁锂正极材料[S].

[51] GB/T 46514—2025 锂离子电池正极材料检测方法 晶体结构的测定 X射线衍射法[S].

[52] GB/T 45324—2025 锂离子电池正极材料 粉末电阻率的测定[S].

[53] GB/T 44330—2024 锂离子电池正极材料 粉末压实密度的测定[S].
[54] GB/T 45330—2025 锂离子电池正极材料 水分含量的测定 卡尔费休库伦法[S].
[55] GB/T 43092—2023 锂离子电池正极材料电化学性能测试 高温性能测试方法[S].
[56] GB/T 24533—2019 锂离子电池石墨类负极材料[S].
[57] GB/T 30836—2014 锂离子电池用钛酸锂及其炭复合负极材料[S].
[58] YB/T 6139.1—2023 石墨类负极材料检测方法 第1部分：石墨化度的测定[S].
[59] YB/T 6139.2—2023 石墨类负极材料检测方法 第2部分：吸油值的测定[S].
[60] SJ/T 11723—2018 锂离子电池用电解液[S].
[61] SJ/T 11995—2025 锂离子电池电解液中金属杂质含量测试方法[S].
[62] HG/T 4067—2015 六氟磷酸锂 [S].
[63] GB/T 36363—2018 锂离子电池用聚烯烃隔膜[S].
[64] T/CIAPS 0043—2025 锂离子电池用芳纶涂覆隔膜[S].
[65] T/CIET 1045—2025 锂电池用高强超薄隔膜[S].
[66] T/CI 842—2024 锂离子电池隔膜技术规范[S].
[67] GB 44240—2024 电能存储系统用锂蓄电池和电池组安全要求 [S].
[68] GB/T 36276—2023 电力储能用锂离子电池[S].
[69] GB/T 42728—2023 锂离子电池组安全设计指南[S].
[70] GB/T 47292.1—2026 锂离子电池生产质量管理 第1部分：总体要求[S].
[71] GB/T 47292.2—2026 锂离子电池生产质量管理 第2部分：电池材料管控[S].
[72] GB/T 47292.3—2026 锂离子电池生产质量管理 第3部分：电池单体过程管控与成品测试[S].
[73] GB/T 47292.4—2026 锂离子电池生产质量管理 第4部分：电池组过程管控与成品测试[S].
[74] GB 50016—2014 建筑设计防火规范[S].
[75] GB 50116—2013 火灾自动报警系统设计规范[S].
[76] GB 51048—2014 电化学储能电站设计规范[S].
[77] GB/T 51048—2025 电化学储能电站设计标准[S].
[78] DB34/T 5137—2025 电化学储能液冷系统设计技术要求[S].
[79] T/CIET 1175—2025 储能液冷热管理技术规范[S].
[80] T/CASMES 421—2024 储能锂离子电池 液冷热管理系统运行和维护规范[S].
[81] T/CES 381—2025 浸没式液冷锂电池储能系统技术规范[S].
[82] GB/T 34131—2023 电化学储能电站用锂离子电池管理系统技术规范[S].
[83] GB/T 42288—2022 电化学储能电站安全规程[S].
[84] GB/T 46261—2025 火灾监测预警系统通用技术要求[S].
[85] 张巍. 电化学储能电池舱消防系统标准建设研究[J]. 建筑电气, 2025, 44(8): 53-57.
[86] GB 50370—2005 气体灭火系统设计规范[S].
[87] T/CFPA 054—2026 全氟己酮灭火系统技术规程.
[88] GB 50898—2013 细水雾灭火系统技术规范[S].
[89] GB 50084—2017 自动喷水灭火系统设计规范[S].
[90] GB/T 44026—2024 预制舱式锂离子电池储能系统技术规范 [S].
[91] 应急管理部天津消防研究所.中华人民共和国消防救援行业标准《电化学储能系统火灾抑制试验方法》(征求意见稿)[EB/OL].(2025-02-20)[2026-04-20].https://lyzx.tfri.com.cn/upload/4/cms/content/editor/1741566920535.pdf.
[92] GB 55037—2022 建筑防火通用规范[S].
[93] GB 50058—2014 爆炸危险环境电力装置设计规范[S].
[94] NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems[S].
[95] UL 9540 Standard for Energy Storage Systems and Equipment[S].
[96] UL 9540A Standard for Safety for Energy Storage Systems and Equipment[S].
[97] CSA/ANSI C800:25 Standard for energy storage systems[S].
[98] IEC 62933-5-2:2025 Electrical energy storage (EES) systems-Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems- Electrochemical-based systems:[S].
[99] Energy Safe Victoria. Need to know guide RE1: battery energy storage systems–commercial lithium-ion battery installations[R]. Melbourne:Energy Safe Victoria,2024.
[100] AS 5139:2019 Electrical installations-Safety of battery energy storage systems[S].
[101] 韩国产业通商资源部. 储能系统安全标准强化措施[R]. 首尔: 韩国产业通商资源部, 2022.
[102] 孙旭东, 徐小宇, 罗魁, 等. 新能源应用安全风险防控战略框架研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 179-190.