

煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆风险防控技术研究现状与挑战

姚勇征^{1,2}, 王奕渊¹, 周福宝^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 3. 中国矿业大学 安全工程学院,
江苏 徐州 221116)

摘要: 在“双碳”背景下, 锂离子储能电池、信息技术与煤矿深度融合的能源电子产业蓬勃发展, 2024 年前 4 个自然月, MA “锂” 相关认证同比增长 94%, 煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态孕育而生。新业态为煤炭绿色转型带来了发展机遇的同时, 新风险也随之而来。锂离子蓄电池作为一种高能物体, 本质上仍存在火灾或爆炸风险, 一旦锂离子蓄电池在煤矿井下受限空间发生热失控, 灾害后果不堪设想。为保障煤矿井下锂离子蓄电池安全运行, 电池被放置在 1~2 cm 厚高强度钢板制成的防爆外壳内部, 且设置了较大的冗余空间容纳热失控产生的气体, 但由于设备的续航能力受限, 锂离子蓄电池应用于大型辅助运输和开采设备进程受到影响。为降低煤矿井下锂离子蓄电池热失控风险, 提高设备续航能力, 推动煤矿井下锂离子蓄电池向纵深发展, 研究聚焦煤矿井下大容量锂离子蓄电池安全问题, 剖析了煤矿井下锂离子蓄电池热失控机理、安全评价与管理、监测预警、电源结构与功能设计、充电与换电安全和应急处置 6 方面的研究现状及不足, 提出了包括典型场景下锂离子蓄电池燃爆与煤矿灾害之间的耦合孕灾机制、适用于煤矿井下的高安全性锂离子蓄电池、煤矿井下锂离子蓄电池热失控超前预警技术与监控策略、煤矿井下锂离子蓄电池电源高强度阻燃隔爆与轻量化设计、煤矿井下锂离子蓄电池智能化安全充电与换电技术装备和煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆灾害快速控制技术等 6 项亟需解决的关键问题, 期望为解决新业态下的锂离子蓄电池安全问题和续航能力不足问题提供指引。

关键词: 煤矿; 锂离子蓄电池; 热失控; 安全; 风险防控

中图分类号: X45 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)04-2158-17

Research status & challenges on prevention and control technology for thermal runaway combustion-explosion of lithium-ion battery in coal mines

YAO Yongzheng^{1,2}, WANG Yiyuan¹, ZHOU Fubao^{2,3}

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the continuous promotion of the “carbon neutral& carbon peak” process, the energy electronics industry

收稿日期: 2024-07-13 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0825

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52234006); 中央高校基本科研业务费自然科学创新培育类资助项目(2024ZKPYAQ05)

作者简介: 姚勇征(1991—), 男, 河北承德人, 副教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yaoyz@cumt.edu.cn

通讯作者: 周福宝(1976—), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zfbcumt@163.com

引用格式: 姚勇征, 王奕渊, 周福宝. 煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆风险防控技术研究现状与挑战[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2158-2174.

YAO Yongzheng, WANG Yiyuan, ZHOU Fubao. Research status & challenges on prevention and control technology for thermal runaway combustion-explosion of lithium-ion battery in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2158-2174.



移动阅读

that deeply integrates lithium-ion energy storage batteries, information technology and coal mines is flourishing. A new industry for the application of lithium-ion batteries in coal mines has emerged. In the first four natural months of 2024, MA certification for “lithium” increased by 94% year-on-year. While the new industry has brought development opportunities for the green transformation of coal mines, new risks have also arisen. As a high-energy object, lithium-ion batteries still inherently carry the risk of fire or explosion. Once the battery experiences thermal runaway in the confined space of coal mines, the consequences of the disaster are unimaginable. Besides, to ensure the safe of lithium-ion batteries in coal mines, the batteries are placed inside explosion-proof housings made of high-strength steel plates of 1–2 cm thick with plenty of redundant space, which limits the endurance of the equipment and the process of applying lithium-ion batteries to large-scale auxiliary transport and mining equipment. In order to reduce the risk of thermal runaway of lithium-ion batteries in coal mines, improve equipment endurance, and promote the development of lithium-ion batteries in coal mines in depth, this study focus on the safety problem of large capacity lithium-ion batteries in coal mines, analyzing the research status and shortcomings in six aspects: thermal runaway mechanism, safety evaluation and management, monitoring and early warning, power structure and function design, charging and swapping safety and emergency response. Besides, six key issues that urgently need to be addressed in coal mines for the safety of lithium-ion batteries are proposed, including the coupled disaster triggering mechanism between lithium-ion battery combustion and explosion and common coal mine disasters in typical scenarios, the development of high safety lithium-ion batteries in coal mines, the thermal runaway advanced warning technology and monitoring strategy of lithium-ion battery, the high strength, flame retardant, explosion-proof and lightweight design of lithium-ion power, the intelligent and safe of charging & switching technology and equipment, and rapid control technology for thermal runaway explosion disasters. These are expected to provide guidelines for solving the safety problem and insufficient endurance problem of lithium-ion batteries in the new industry.

Key words: coal mine; lithium-ion battery; thermal runaway; safety; risk prevention and control

0 引言

“十四五”是能源低碳转型的关键窗口期,推进煤炭清洁高效利用对如期实现“碳达峰”“碳中和”目标具有重要战略意义^[1-3]。近年来,锂离子储能电池、信息技术与煤矿深度融合的能源电子产业蓬勃发展,在煤炭行业绿色化、智能化改造方面具有显著成效^[4],煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态孕育而生。以“锂”为关键词检索煤安认证条目已有732条,且呈现逐年递增趋势。2024年前4个自然月认证条目142条,较2023年同比增长94%,据国家矿用产品安全标志中心不完全统计,煤矿井下以锂离子蓄电池电源为动力的大型运输载具约有3 000台。截至目前,锂离子蓄电池已覆盖井下照明、通信、监测预警、柴油机启动、车辆运输、机器人、紧急避险设施等^[5-8]技术领域,为运、供、救等作业提供保障。

相较地面开敞空间,煤矿井下在锂离子蓄电池选用上具有更高的安全需求,热稳定性较差的三元锂电池禁止在煤矿井下使用,较为稳定、安全的锰酸锂电池和磷酸铁锂电池在煤矿井下逐渐得到应用。锰酸锂电池被限制在10 Ah以内,主要为便携式设备提供电力保障。磷酸铁锂电池则使用在更高续航、更大容

量需求的场景,例如监测通信系统电源、机器人、运输车辆电源等,最大允许容量为230 Ah,由于设备使用场景环境限制,不同用途的锂离子蓄电池电源容量上限要求也有所不同。

新业态为煤炭绿色转型带来了发展机遇,但新风险也随之而来。锂离子蓄电池作为一种高能物体^[9],其本质上仍存在着火灾或爆炸的风险,尤其是在煤矿井下这种受限空间,一旦电池单元发生火灾,可能会引发相邻多个电池单元的连锁反应,发生燃爆事故。这种燃爆灾害具有荷载大、易复燃、危险性高且难以扑灭的特点。此外,电池热失控灾害与煤矿井下原生灾害之间存在相互诱发的风险,事故放大、耦合、衍生的可能性和严重程度增大。除锂离子蓄电池种类和容量受到限制,大容量煤矿井下锂离子蓄电池被放置在1~2 cm厚高强度钢板制成防爆外壳内,且根据锂离子蓄电池容量,至少具有2~7倍电池单体体积冗余空间,保障煤矿井下锂离子蓄电池使用安全。

然而,受限于效率、成本和环境等因素,锂离子蓄电池仍具有热失控风险,锂离子蓄电池在煤矿井下的安全性并未得到根本保障。此外,电池容量受限与厚重隔爆外壳导致设备续航能力有限,锂离子蓄电池应用于大型辅助运输和开采设备进程受到限制,制约了

现代化技术在煤矿井下的应用范围,影响生产效率。为进一步推进煤矿井下锂离子蓄电池向纵深发展,降低耦合灾害风险,维护煤矿开采的安全性和经济稳定性,煤矿井下锂离子蓄电池综合安全技术攻关迫在眉睫。

综上,笔者立足于煤矿井下大容量锂离子蓄电池安全,剖析了锂离子蓄电池热失控机理、安全评价与管理、监控预警、电源结构与功能设计、充电与换电安全和应急处置6方面的研究进展,提出了包括煤矿井下锂离子蓄电池热失控超前预警技术与监控策略、煤矿井下锂离子蓄电池隔爆箱体高强度阻燃隔爆与

轻量化设计、煤矿井下锂离子蓄电池智能化安全充电与换电技术装备和煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃烧灾害快速控制技术等6项亟需解决的关键问题,期望为解决煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态下的安全问题和续航能力不足问题提供指引。

1 煤矿井下锂离子蓄电池热失控机理

随着锂离子蓄电池应用规模逐渐扩大,其热失控风险逐渐显露,煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态及热失控风险如图1所示。



图1 煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态现状及热失控风险概述

Fig.1 Current situation and thermal runaway hazards of new industry of lithium-ion battery application in underground coal mines

锂离子蓄电池热失控是指在电池异常情况下,电池内部发生不可逆的热化反应,失去控制,释放毒害气体,甚至起火燃爆的现象。一旦锂离子蓄电池在煤矿井下充电硐室和狭长巷道等受限空间发生热失控,高温烟气和毒害气体会快速扩散,严重威胁井下作业人员安全。此外,热失控还可能产生喷射火焰和爆炸冲击波,能量密度高,强度大,极易引发火蔓延和爆炸破坏传播,造成更严重的事故影响。本节论述了煤矿井下典型场景锂离子蓄电池热失控诱发机制和传播演化规律研究,并对可能发生的耦合灾害进行剖析。

1.1 煤矿井下锂离子蓄电池热失控诱发机制

锂离子蓄电池在极端条件下(如热滥用、电滥用、机械滥用等)会触发热失控灾害^[10]。图2总结了煤矿井下锂离子蓄电池可能出现的滥用情况。

煤矿井下环境复杂多变,具有高热、潮湿、多尘、强振动等特点^[11-14],均可能诱发煤矿井下锂离子蓄电池发生热失控。例如,高热环境可能会加速锂离子蓄电池内部反应,造成热滥用;潮湿环境则可能成为电池电滥用的诱因,造成短路;振动可能对电池造成机械冲击,诱发由机械滥用导致的热失控;而多尘环境

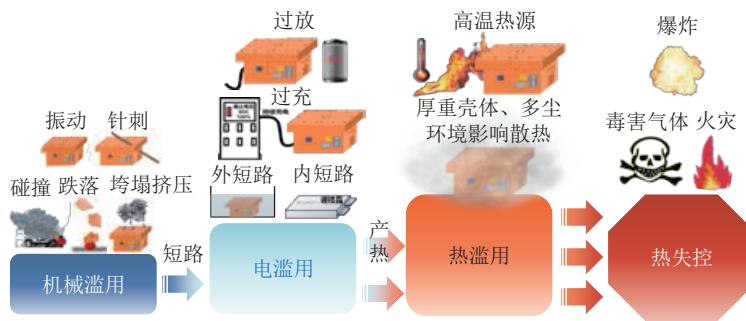


图2 煤矿井下锂离子蓄电池热失控诱发条件

Fig.2 Thermal runaway-inducing conditions of lithium-ion batteries in underground coal mines

可能导致电池散热不良,加速热失控进程。

充电硐室与换电硐室是煤矿井下锂离子蓄电池典型的储存、充电与换电应用场景,在锂离子蓄电池储存过程中,电池绝缘若发生破坏,潮湿和多尘环境可能形成电池外部短路,产热增加,诱导电池热失控发生;在充电过程中,由于电池单体间存在差异,可能导致过充的电滥用条件发生,进而引发内部短路,诱发电池热失控。此外,充电与换电过程可能需要对电池进行搬运、拆卸和安装,在此过程中具有碰撞和跌落的风险,造成电池机械滥用。狭长巷道是大容量锂离子蓄电池应用于车辆动力系统的主要场景,巷道狭

长杂乱,车辆行进过程中,电池模组不仅受路面颠簸和车辆机械振动影响,还存在碰撞和挤压风险,锂离子蓄电池受到机械滥用的风险大。此外,电池模组在行进过程中放电,在电池管理系统失效时,可能会导致过放,经过严重过放电的电池内部结构受到不可逆损伤,容量下降,再次充电时,风险较大,易造成燃爆事故。

煤矿井下锂离子蓄电池除上述情况外,电池缺陷、内部老化和人员误操作可能存在于锂离子蓄电池在煤矿井下运行过程中任意环节,具有较大的热失控诱发风险,表1较为详细地给出了锂离子蓄电池在充电硐室、换电硐室和狭长巷道中热失控诱发因素。

表1 煤矿井下充电硐室、换电硐室与狭长巷道内锂离子蓄电池热失控的常见诱发因素

Table 1 Common triggers of thermal runaway of lithium-ion batteries in underground charging and switching chambers and narrow roadways in coal mine

诱因种类	诱发条件
电池缺陷 产热增加	受电池制造工艺和水平限制,电池材料中可能存在杂质,存在质量缺陷,此类缺陷将伴随电池全生命周期,加速电池老化,
电池老化	电池老化在使用过程中普遍存在,可分为循环老化和储存老化,电池老化会导致电池容量衰退,内阻增大,热稳定性下降,具有发生内短路的风险
热滥用	①受地质环境、机械设备散热等因素影响,煤矿井下可能存在高温环境 ②违规作业,例如吸烟、使用明火等产生的高温热源 ③潮湿、多尘环境可能会阻碍电池散热
电滥用	①过充、过放 ②绝缘破坏导致的外部短路 ③违规作业导致的外部短路
机械滥用	①煤矿井下强振动环境 ②电池充电与换电搬运过程中操作不当可能存在跌落、碰撞、挤压等机械滥用风险 ③巷道狭长,电池碰撞风险增加
固有传统 风险诱发	①煤矿井下常见的瓦斯(热滥用、机械滥用)、煤尘(热滥用、机械滥用)、水(电滥用)、火(热滥用)和顶板(机械滥用)五大灾害诱发 ②一旦发生,电池在极端灾害环境下极有可能成为诱发二次灾害的起点,诱发更大规模的灾害,反之也如此

1.2 煤矿井下锂离子蓄电池热失控演化规律

煤矿井下锂离子蓄电池发生热失控时,受限环境中热失控灾害传播速度快,危害大,极易造成群死群伤事故,研究受限空间内锂离子蓄电池热失控传播演化规律,对煤矿井下监测预警和应急处置策略具有深刻意义。

尽管针对煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害演化规律的研究十分有限,但仍能从已有的受限空间内锂离

子蓄电池热失控研究汲取经验,研究思路如图3所示。

一般受限空间锂离子蓄电池热失控研究中,YAN等^[15]定量分析了密闭和半密闭空间内锂离子蓄电池组热失控过程传热传质量过程,揭示了锂离子蓄电池模组在受限箱体阻隔下电池热失控传播机制。张青松等^[16]建立了受限空间内锂离子蓄电池热解气体燃烧的产热模型并估算了热释放速率,为受限空间内锂

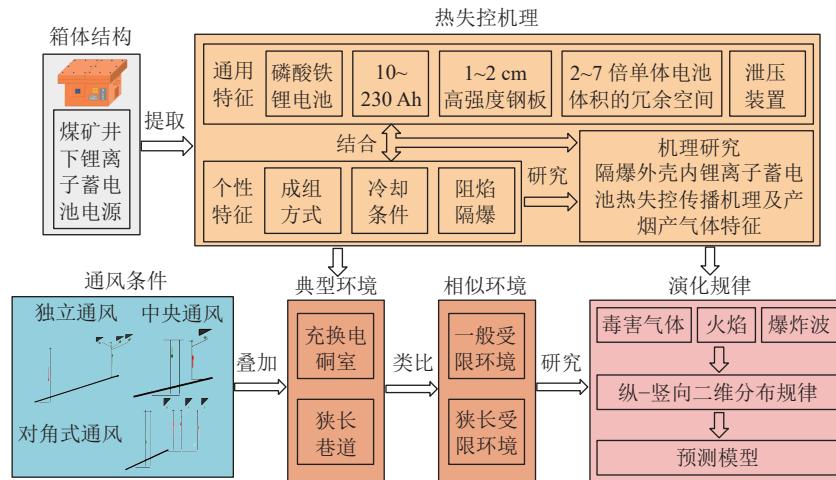


图 3 煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害演化规律研究思路

Fig.3 Research idea of evolution law of thermal runaway disaster of lithium-ion battery in coal mine

离子蓄电池热失控温度传播研究奠定基础。BAROWY 等^[17]则研究了不同点火延迟状况对引燃集装箱密闭空间内锂离子蓄电池热失控燃爆气体的影响。

在有限的狭长受限空间锂离子蓄电池热失控研究中, ZHU 等^[18]分析了隧道中较大容量单体锂离子蓄电池热失控火焰、温度及 CO 气体分布特性。LI 等^[19]将锂离子蓄电池火灾进行简化, 类比塑料 PVC 火灾, 通过 FDS 模拟井下巷道中火灾烟气迁移, 建立矿用锂离子蓄电池火灾多风险评价模型。STURM 等^[20-21]在隧道内开展了锂离子电动汽车火灾的试验, 获得了温度和气体浓度的纵向分布规律。李松^[22]利用模型尺寸隧道对不同 SOC 的 6 Ah 磷酸铁锂蓄电池火灾特性研究, 发现电池燃烧时顶棚纵向温度分布与距火源距离间呈幂指数衰减。WANG 等^[23]在狭长石英管中探讨了纵向风对热失控行为的影响机制, 结果表明纵向风可以延缓热失控进程。

上述研究能够对评估煤矿井下锂离子蓄电池热失控风险和通风散热系统设计提供借鉴经验, 但也要认识到, 这些研究未能与煤矿井下复杂恶劣环境相结合, 具有一定的局限性。

1.3 煤矿井下锂离子蓄电池热失控与原生灾害间的诱发耦合风险

煤矿井下常见的五大灾害与锂离子蓄电池热失控间存在相互诱发的风险, 图 4 给出了锂离子蓄电池热失控与五大灾害间直接诱发因素。

井下锂离子蓄电池应用规模仍较小、时间较短, 目前并未公开报道过由锂离子蓄电池热失控诱发的典型重特大链式连锁灾害, 但从与其热失控燃爆风险和致灾后果具有较高相似性的铅酸蓄电池过往典型事故中可以看出, 蓄电池热失控与甲烷积聚灾害间的耦合灾害后果十分严重, 表 2 给出了典型的井下蓄电池热失控事故。以 2001 年美国吉姆·沃特资源公司

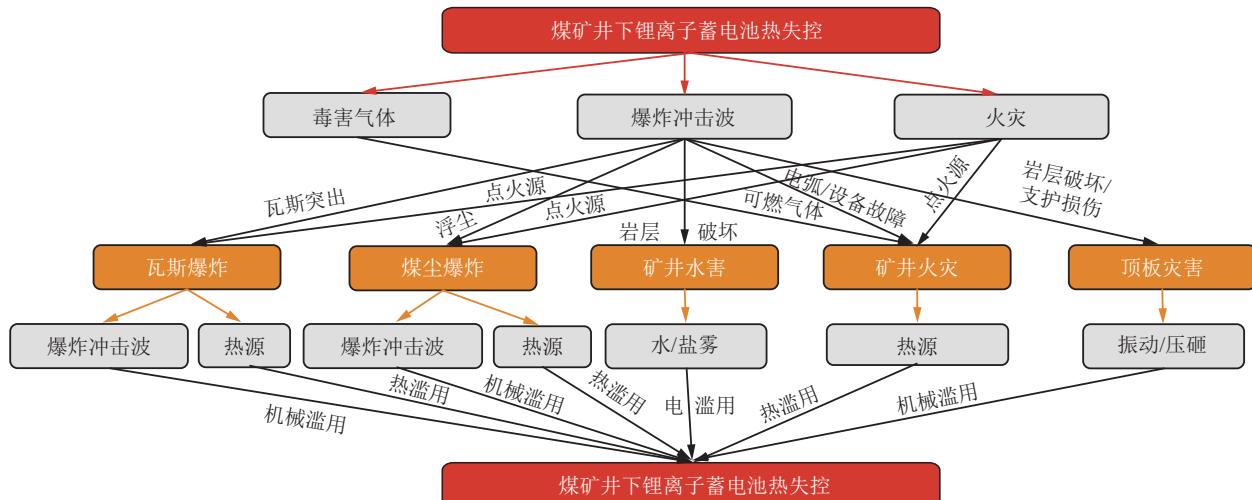


图 4 井下锂离子蓄电池热失控与五大灾害间直接诱发因素

Fig.4 Direct predisposing factors between thermal runaway of lithium-ion batteries and five major hazards in coal mines

第五煤矿事故^[24]为例,这是一次典型的顶板坍塌造成的电池热失控与瓦斯燃爆耦合灾害,顶板坍塌不仅造成了瓦斯突出,还造成了充电站电池受损短路,电池发生热失控,引燃了积聚的甲烷,发生一次爆炸,爆炸波传播过程中,信号灯灯罩炸毁,电路火花再次引爆积聚的甲烷气体,造成13人死亡;无独有偶,2017年伊朗Zemestan Yort煤矿^[25-26]违规使用外部电池为电

机车供电,产生的火花引燃积聚的甲烷气体,造成42人死亡73人受伤的特别重大事故。

由此可见,煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害与五大灾害间不仅存在相互诱发的风险,其后果也相较于单一的锂离子蓄电池热失控灾害更为严重,弄清煤矿井下常见灾害与锂离子蓄电池热失控间的深度诱发机制和耦合灾害演化规律尤为重要。

表2 部分矿山井下蓄电池热失控耦合灾害事故

Table 2 Thermal runaway coupling hazards of underground storage batteries in mine

年份	国家	煤矿	事故及原因	后果	潜在危害
2017	伊朗	Zemestan-Yort ^[25]	使用外部电池为机车供电而产生火花,火花点燃积聚甲烷导致爆炸事故	42人死亡,73人受伤 ^[26]	点火源
2001	美国	吉姆·沃特资源公司 第五煤矿 ^[24]	顶板坍塌释放甲烷,充电站电池组短路且坍塌致电池受损使热量积聚,电池作为点火源引发第1次爆炸;第2次爆炸点火源为信号灯	2次爆炸共13人死亡	点火源
1987	美国	Double R Coal Co ^[27]	甲烷和煤尘积聚,电池充电电缆故障致爆炸	1人死亡	点火源
1984	美国	Greenwich Collieries ^[27-28]	甲烷积聚,蓄电池供电机车电弧引发爆炸(此矿禁止使用电机车)	3人死亡	点火源
1976	美国	Scotia ^[27,29]	甲烷积聚,由蓄电池供电机车的正常电弧引发爆炸	15人死亡	点火源

2 煤矿井下锂离子蓄电池安全评价与管理

煤矿井下锂离子蓄电池热失控影响因素复杂,灾害耦合风险高,易引发严重事故,危害极大。正因如此,应为煤矿井下锂离子蓄电池制定全面且可靠的全生命周期安全评价体系,保障锂离子蓄电池在煤矿井下安全稳定运行。此外,科学且合理的日常运维管理对消除潜在安全隐患、延长电池使用寿命具有至关重要的作用,二者相辅相成,互为补充。本节将煤矿井下锂离子蓄电池生命周期划分为设计准入、应用与退役回收3个阶段,分别总结了各个阶段安全管控的基本要求及发展路径。

2.1 煤矿井下锂离子蓄电池安全准入与质量管控

安全准入评价是保障煤矿井下锂离子蓄电池安全应用的第一道门槛,目前主要依照国家安标中心《矿用锂离子蓄电池安全技术要求(试行)》^[30]对应用于煤矿井下10~230 Ah锂离子蓄电池进行质量控制,涉及电池及模组外观、电气性能和安全性能技术要求与检验规则。另外,为满足煤矿井下防火隔爆安全需求,锂离子蓄电池需在测试条件下灵敏快速泄压、不起火、不爆炸。

然而,上述安全测试对电池具有不可逆的破坏性,无法适用于每颗应用在煤矿井下的锂离子蓄电池。事实上,电池本体安全更取决于电池设计与制造环节的质量管控,矿用锂离子蓄电池设计需充分考虑煤矿井下高热、潮湿、多尘、强振动等环境影响,选用合理的电池材料,并通过绝缘与泄压阀等安全结构设计,降低电池热失控燃爆风险。目前,针对电池制造过程

中质量监测正由人工向智能化管控转变,未来有望通过实时监控、异常预警、闭环控制、大数据分析、辅助决策等智能化手段,提升煤矿井下锂离子蓄电池产品质量,提高电池应用安全性。

综上,细化煤矿井下锂离子蓄电池安全准入标准,严格执行锂离子蓄电池准入要求是目前煤矿井下锂离子蓄电池安全评价的重点之一。此外,通过优化电池安全设计方案,管控生产流程,制造适用于煤矿井下的高安全性锂离子蓄电池仍是降低井下锂离子蓄电池热失控风险的根本途径。

2.2 煤矿井下锂离子蓄电池应用安全与运维管理

日常运维管理是保障煤矿井下锂离子蓄电池应用安全的重要措施,也是煤矿井下锂离子蓄电池热失控风险管控的重难点。**表3**给出了MT/T 1200《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》^[31]中有关现场使用与维护管理相关规定。

表3 井下锂离子蓄电池现场使用与维护管理的规定

Table 3 Regulations on use and maintenance management of lithium-ion battery in coal mines

现场使用与维护管理规定	管理周期
电源数据异常、报警信息和故障信号检查	≤1周
电源外观、防爆结构和线束的完好性检查	≤1月
进行一次完整充放电循环,实现电源容量自校准	≤6月
禁止在高温下贮存或使用,同时还应该远离火源及热源,做好防湿防潮工作	实时
监控电源运行数据,确保在良好状态下运行	实时
电源的维修与电池的更换应由制造商进行,需保持其原有质量与一致性	—

煤矿井下锂离子蓄电池热失控与瓦斯爆炸灾害

间具有强耦合关系,可能诱发严重的链式反应灾害,因此,瓦斯状况是限制锂离子蓄电池在煤矿井下应用极为重要的门槛。MT/T 1200《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》^[31]要求:煤矿井下锂离子蓄电池电源应能在有甲烷、煤尘爆炸危险,但无破坏绝缘的腐蚀性气体场使用;在进行MA产品认证时,其适用范围被进一步限制,不允许在煤与瓦斯突出矿井的回风巷使用,在高、低瓦斯矿井采掘区回风巷使用时,应制定专门的安全技术措施。为保证煤矿井下人员安全,建议在瓦斯积聚区域禁止使用锂离子蓄电池及其相关产品。

然而,锂离子蓄电池瓦斯浓度适用范围仍未有定量指标进行界定,运维管理方案缺乏技术参数作为支撑,关于矿井环境、设备运行、人员操作、检修维保、教育培训等方面的要求仍不明确,煤矿井下锂离子蓄电池应用安全评价体系尚不完善,制定统一的国家或行业标准势在必行。

2.3 煤矿井下锂离子蓄电池退役评价与判定

电池退役判定条件是煤矿井下锂离子蓄电池安全评价与管理的重要方面,定期检查电池健康状况,及时更换满足退役条件的电池,有助于降低煤矿井下锂离子蓄电池燃爆风险。同时,若同一批次锂离子蓄电池出现质量召回或家族性缺陷等问题时,应立即启动退役评价,及时发现潜在的隐患。此外,当锂离子蓄电池受到极端滥用条件后,也应及时开展退役评价,煤矿井下锂离子蓄电池退役评价与判定需要考虑的因素如图5所示。



图5 锂离子蓄电池退役评价与判定考虑因素

Fig.5 Considerations factors of retirement evaluation and judgment for lithium-ion batteries

电池退役评价与判定应至少包括外观、安全性、电性能和经济性等方面,电性能与经济性退役条件主要以“效率”作为评价指标,当电池性能无法满足应用需求、损害经济效益时,应进行退役处理。而电池外观与安全性则是煤矿井下锂离子蓄电池退役评价的重难点,一方面,受限于技术和成本等因素,外观与安全性退役指标实时监测分析困难,另一方面,针对煤矿井下锂离子蓄电池的退役评价与判定缺乏定量评

价指标。

现阶段,针对煤矿井下锂离子蓄电池退役评价与判定准则研究十分有限。新能源电动汽车普遍采用“电池容量衰退至80%以下”作为电池退役回收指标^[32],但电池容量衰退往往伴随电池热失控风险的增加,按照现有汽车行业共识作为煤矿井下锂离子蓄电池退役条件,能否满足井下安全生产需求还有待考量。

综上,亟需结合煤矿井下安全需求开展锂离子蓄电池退役评价与判定准则研究,建立完备的锂离子蓄电池退役评价体系与判定机制,结合准入与应用评价体系,加快煤矿井下锂离子蓄电池应用新业态的发展进程。

3 煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测预警技术

热失控监测预警在煤矿井下锂离子蓄电池安全保障体系中占据着举足轻重的地位。通过热失控监测预警,实时掌握煤矿井下锂离子蓄电池和矿井环境运行状态,一旦发现异常,能迅速采取措施,防止热失控发生。本节总结了煤矿井下锂离子蓄电池BMS电池管理系统要求,介绍了煤矿井下外部监测锂离子蓄电池热失控各类手段,分析了光纤光栅传感技术应用于煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测的利弊,最后展望了机器学习应用于煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测预警的前景,引导煤矿+人工智能产业蓬勃发展。

3.1 煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测预警手段

在煤矿井下复杂环境下,对锂离子蓄电池安全监测尤为关键,目前,最为常见和有效的监测预警手段是BMS电池管理系统。

MT/T 1200《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》^[31]对矿用锂离子蓄电池电源中电池管理系统做出了基本要求,规定要对单体电池电压($\pm 0.5\%$ FS)、单体电池温度($\pm 2^{\circ}\text{C}$)、电池组电流($\pm 2\%$ FS)、电池组电压($\pm 0.5\%$ FS)、SOC估算($\leq 5\%$)和绝缘电阻(超过48 V电源, $\pm 10\%$)等参数实时监测,并具有监测信息显示和故障报警功能;针对过充(充电截止电压 $\leq 3.5\text{ V}$,保护失效电压 $\leq 3.6\text{ V}$)、过放(放电截止电压 $\geq 2.75\text{ V}$,保护失效电压 $\geq 2.45\text{ V}$)、过流(最大充电倍率 $\leq 0.5\text{ C}$)、过温、短路等故障要有保护和失效检测功能。此外,对易发生热失控的充电过程,还应具有充电均衡功能、低温禁止充电功能和严重过放电后不允许充电功能,保障煤矿井下锂离子蓄电池充电及运行安全,具体管理机制如图6所示。

为确保锂离子蓄电池在使用过程中的稳定性和安全性,除电池管理系统外,研究人员还建立一系列监测手段,如利用摄像头图像识别和电应变计检测锂离子蓄电池外壳应变、热敏电阻传感器和红外热成像

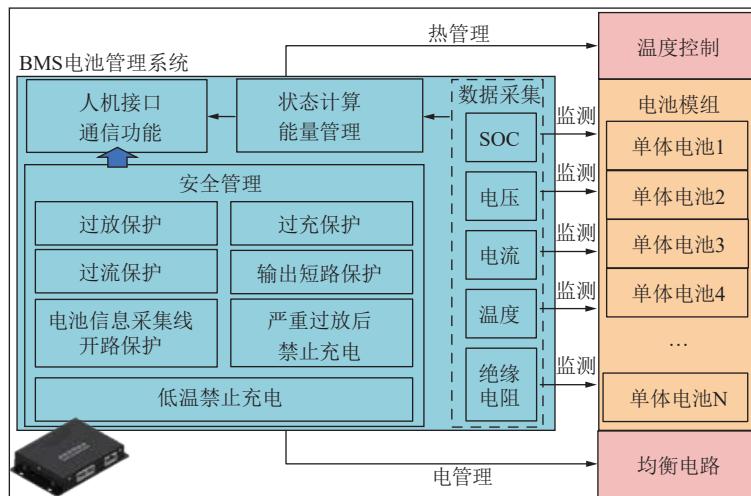


图 6 煤矿井下锂离子蓄电池电源 BMS 电池管理系统

Fig.6 BMS battery management system for lithium-ion battery power in underground coal mine

技术监测锂离子蓄电池温度变化、特征气体传感器监测锂离子蓄电池热失控产气等^[33]。《“十四五”矿山安全生产规划》^[34]提出要推广煤矿火灾光纤监测技术,而光纤应用于煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测也具有广阔前景。

相较于传统监测手段,光纤光栅传感技术拥有明显优势:①光纤本体采用玻璃纤维或聚合物材料,传感部分不包含任何电磁元件,因此基于光波作为信息载体的光纤光栅传感器不易受到电磁干扰,即使在煤矿井下复杂电磁场环境中仍能正常运作;②光纤光栅传感器具有灵敏度高、响应快、低功耗的特点,且满足

煤矿井下多重锂离子蓄电池热失控特征信号(电压、电流、温度、应力、加速度、倾斜角、压强、振动及气体浓度)监测需求,能够及时发现煤矿井下锂离子蓄电池可能出现的安全风险;③光纤光栅传感器体积小、质量轻,不仅适用于煤矿井下热失控的外部宏观监控,还可以嵌入到锂离子蓄电池内部或贴合至壳体表面,通过在单根光纤中串联多个光栅,可同时对煤矿井下大容量锂离子蓄电池电源内多个单体电池实时监控。

因此,光纤光栅传感技术作为一项先进监测手段,有望为煤矿井下锂离子蓄电池的安全性能提供更为全面、精确的热失控监测,详细路径如图 7 所示。然

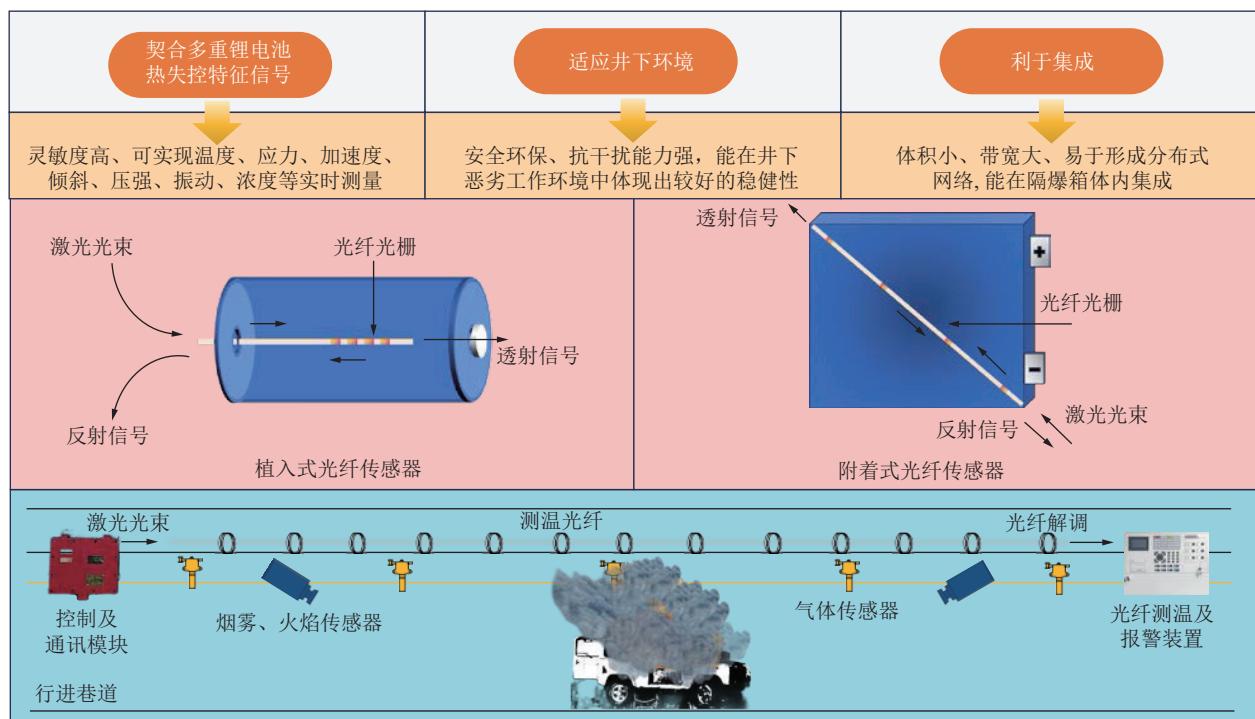


图 7 光纤光栅传感器监测煤矿井下锂离子蓄电池热失控

Fig.7 Fibre-optic grating sensors to monitor thermal runaway of lithium batteries in coal mines

而,受制于产线升级成本高、嵌入式光纤传感器电池制造难度大、解调器价格昂贵等因素,应用嵌入式光纤光栅传感技术监测锂离子蓄电池热失控仍停留在研究阶段。此外,嵌入式结构对电池本质安全影响、传感器与电池寿命间匹配度等关键性难点还有待突破,未来仍需要进一步深入拓展光纤光栅传感技术在煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测领域的应用场景,优化应用方案,降本增效,为煤矿井下锂离子蓄电池使用保驾护航。

3.2 煤矿井下锂离子蓄电池热失控智能监测学习系统

近年来,互联网+人工智能技术与煤矿安监深度融合,尤其是机器学习技术的引入已为煤矿安全提供了一系列创新解决方案。机器智能学习通过识别、学习和分析海量过往的锂离子蓄电池故障数据,探索规律,并提供及时的反馈与干预,最终实现智能化监测预警、辅助决策等功能,机器学习已经成为提升电池BMS电池管理系统智能化水平的重要手段^[35],有望实现煤矿井下锂离子蓄电池热失控智能化监测和管理。

目前,机器智能学习在监测锂离子蓄电池健康状况(SOH)、功率状态(SOP)、功能状态(SOF)和剩余使用寿命(RUL)取得了重要成效^[36],应用机器学习预测锂离子蓄电池状态的部分途径如图8所示。

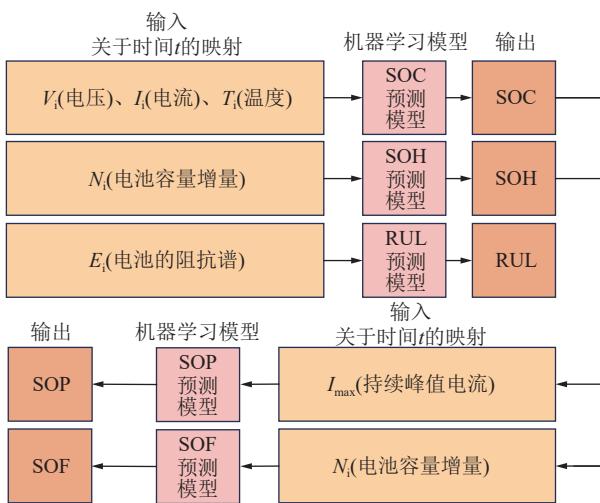


图8 应用机器学习预测锂离子蓄电池状态的部分途径^[36]

Fig.8 Way to apply machine learning to predict state of lithium-ion batteries^[36]

在SOH监测方面,KHALEGHI等^[37]对锂离子蓄电池充电电压曲线进行探索,提取出描述电池健康轨迹的健康指标,采用非线性自回归外生(NARX)模型,建立起电池健康指标与SOH间的依赖关系。在SOP监测方面,WEI等^[38]在考虑迟滞效应的电路模型基础

上,利用极值搜索算法,识别包含滞后效应的电路模型参数,提出了一种考虑电池电压和电流限制的SOP预测算法。在SOF监测方面,OUYANG等^[39]基于模糊逻辑控制算法(FLCA)建立了SOF评价方法,并根据应用需求进行了修正。在RUL监测方面,YANG等^[40]在二维和三维卷积神经网络的基础上,构建了一种混合卷积神经网络(CNN)进行RUL预测,并在不同充电策略下实现了较好的电池充放电循环寿命的早期预测和RUL估计。以上研究对利用机器智能学习解决煤矿井下锂离子蓄电池热失控监控问题提供了重要的参考和借鉴。

事实上,煤矿井下复杂恶劣环境对机器学习算法监控锂离子蓄电池热失控提出了更高的要求,现有机器学习方法仅考虑了锂离子蓄电池热失控特征数据,而未将锂离子蓄电池热反应、电化学反应考虑其中,在未来的研究中,可通过深度优化锂离子蓄电池电化学模型,实现对电池健康与安全状态更为精确的评估。此外,还需充分考虑煤矿井下高温、高湿、强振动的极端环境对算法准确度的影响。

4 煤矿井下锂离子蓄电池电源结构及功能设计

煤矿井下锂离子蓄电池电源主要由电池模组、电池管理系统和隔爆箱体组成,其中隔爆箱体的结构与功能设计对保障煤矿井下锂离子蓄电池安全极为关键。隔爆箱体不仅需要有效地隔离电池系统的内、外部工作环境,还需具备防爆、防尘、耐腐蚀等多重功能^[41]。本节回顾了煤矿井下锂离子蓄电池电源结构设计标准沿革,总结了电池模组冷却散热方式和电源阻焰隔爆功能设计需求,期望以安全视角为井下锂离子蓄电池电源设计提供指引。

4.1 煤矿井下锂离子蓄电池电源结构设计标准沿革及要点

随着煤矿井下锂离子蓄电池应用不断推进,相关标准和规范持续更新和完善,为锂离子蓄电池电源结构设计提供了明确的技术要求和指导,相关标准沿革见表4。

锂离子蓄电池电源隔爆箱体是锂离子蓄电池在煤矿井下安全运行的保护壳,将锂离子蓄电池燃爆风险限制在隔爆箱体内部,避免与瓦斯、煤尘等更大的风险因素形成耦合灾害,降低事故后果。隔爆箱体应采用双腔室闭锁设计,将电池和设备独立放置,防止因误操作导致锂离子蓄电池直接暴露在井下复杂爆炸性环境中,保障锂离子蓄电池在煤矿井下运行安全。在技术规定层面,电池腔体应至少能承受1.5 MPa静

表4 煤矿井下锂离子蓄电池电源结构设计技术标准沿革

Table 4 Development of technical standards for design of lithium-ion batteries power supply in coal mines

实施日期	标准名称	适用容量/Ah	技术规定
2012年 5月14日	《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》 ^[42]	20~100	电池或者电池组应放置在独立的隔爆或隔爆兼本安型电池腔内,电池腔应能承受不小于1.5 MPa的静压试验 增加:①自由空间预留要求:单体电池容量不超过100 Ah,电池腔中预留的自由空间应超过单只电池体积的2倍;单体电池容量超过100 Ah,电池腔中预留的自由空间应超过单只电池体积的7倍;②电池腔应具有满足防爆要求的泄压措施,并提供相应证明材料
2021年 10月25日	AQYQ-AAC-2021-01 《矿用产品安全标志通用安全技术要求矿用防爆锂离子蓄电池电源》 ^[43]	10~230	
2023年 7月1日	MT/T1200 《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》 ^[31]	≥10	增加:应符合GB/T3836.2—2021中“10构成隔爆外壳一部分的呼吸装置和排液装置”的相关规定

压压力,并根据电池单体容量,预留不同体积倍率的自由空间以容纳热失控产生的大量气体,设置泄压装置可在隔爆箱体内部锂离子蓄电池热失控时,给予气体逸散通道,降低箱体内部压力与燃爆气体浓度,减小热失控传播风险。

此外,除了标准要求的泄压防爆功能外,还需充分考虑电池散热和热失控监测等问题,隔爆箱体腔室间应设有接口以方便传感器接入,用于实时监测电池的温度、电流、电压等关键参数。这些传感器与隔爆箱体整体结构应协同设计,有助于及早发现煤矿井下电池系统异常状态,采取相应措施防止事故发生或扩大。

4.2 煤矿井下锂离子蓄电池模组冷却抑制技术

冷却抑制手段不仅是锂离子蓄电池模组日常散热的重要保障,在发生锂离子蓄电池热失控时,合理的冷却抑制策略可有效阻止热失控在模组内部的传播^[44]。目前主流锂离子蓄电池模组冷却抑制手段有空气冷却、液体冷却、相变冷却和热电冷却,如图9所示。

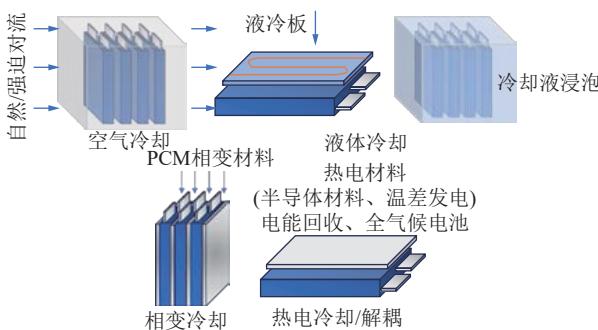


图9 常见的锂离子蓄电池模组冷却抑制手段

Fig.9 Common cooling inhibition means of lithium-ion battery module

空气冷却作为锂离子蓄电池模组的主流散热手段之一,通过有效的热传导和对流机制,为电池系统提供了可靠而高效的温度调控模式。刘剑等^[45]对锂离子蓄电池充放电设备中空气冷却系统研究后发现

环形风口位置和数量对电池组热特性起关键作用。在液体冷却方面,研究人员提出了交叉流道、回流流道、横向流道等液冷形式^[46-48],有效减缓了扰流增益和流动阻力之间的矛盾,从而获得更加优越的热管理性能。HASSANI等^[49]等通过试验研究发现,液冷系统的流动模式对锂离子蓄电池模组的温度影响十分显著,双通道液冷模式为相互逆流时降温效果较好,与共流模式的最大增幅约为5.2 K。在相变冷却方面,凌子夜等^[50]利用材料在相变过程中释放或吸收潜热的特性,提供了一种高效的温度调控方法。罗昭顺等^[51]设计了基于PCM结构的双层相变冷却模块,内层选用导热性能优越、潜热较低的相变材料,外层选择导热性能较差、潜热较高的相变材料,在环境温度分别达到35 °C和40 °C的情况下,与尺寸相同但采用单一相变材料的散热模型相比,最高温度分别降低了4.34 °C和16.67 °C。热电冷却是一项新兴的热管理技术,其通过利用热电效应,将热能直接转化为电能^[52],热电冷却技术提供了一种可调控、高效的冷却手段,为锂离子蓄电池模组的温度控制和热管理提供了新的解决方案。

综上,空气冷却、液体冷却、相变冷却以及热电冷却等不同技术在控制电池温度、提高电池系统稳定性方面展现出各自的优势,这些锂离子蓄电池系统冷却手段研究对于煤矿井下锂离子蓄电池模组温度控制具有重要参考意义。但在实际应用过程中,还需兼具考虑散热形式对隔爆箱体阻焰隔爆和泄压功能的影响。

4.3 煤矿井下锂离子蓄电池电源阻焰隔爆设计

在煤矿井下爆炸性气体环境中,锂离子蓄电池电源的阻焰隔爆性能不仅关系着锂离子蓄电池模组的安全稳定,更是防止电池热失控诱发瓦斯和煤尘爆炸、遏制重特大矿难发生的关键。电源阻焰隔爆性能主要受电池模组成组方式、隔爆外壳材料及结构设计、呼吸泄压设计等因素影响。

锂离子蓄电池排列结构和模组内材料选择直接

影响电源阻焰隔爆效果。常见的排列结构包括直接成组、类蜂窝结构和层状结构^[53-55],如图10所示。电池直接成组简化了电池结构,降低了成本,但电池组的安全性饱受争议,在煤矿井下高危险环境采用直接成组的排列方式并不是明智之选。蜂窝结构针对圆柱形电池设计,单体电池被隔离板、灌注胶和冷却液进行电热隔离,在单体电池发生燃爆时,电池热失控被局限在小的单元仓内,阻止热失控传播。层状结构针对方形电池设计,同样采用隔离板和冷却系统将电池单体隔开,增加电池散热,降低燃爆风险。

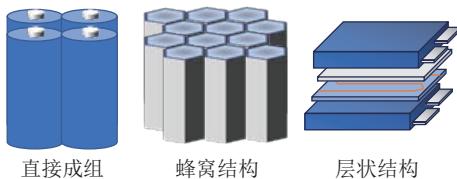


图 10 常见的电池成组方式

Fig.10 Common battery assembly methods

隔爆箱体是电源阻焰隔爆的主体,其阻焰隔爆效果主要依赖于隔爆箱体材料的选择和结构设计。目前,煤矿井下锂离子蓄电池隔爆箱体主要采用1~2 cm厚的高强度钢板,整体耐压能力达到1.5 MPa以上,另外有研究机构提出使用环氧玻纤SMC复合材料和环氧树脂复合材料^[56-57]对隔爆箱体进行改进,达到降低隔爆箱体质量、增强阻焰隔爆能力的目的。在技术未成熟前,也可通过在热失控风险更高的场景增加额外的隔爆装置保障锂离子蓄电池在井下的运行安全,笔者团队提出以多孔介质材料为主体,结合多层次柔性网状结构^[58],套装在煤矿井下储存、充电的电源外部,增强其安全性。

在结构设计方面,李军^[59]通过对隔爆外壳壳壁、法兰和螺栓的强度设计计算,较准确地推导出满足试验要求的外壳材料厚度,由此可计算出煤矿井下锂离子蓄电池电源隔爆箱体材料厚度要求。朱高鹏^[60]对方形隔爆箱螺栓组布局的优化设计进行验证,提出了一种有效的螺栓组布局优化方法。此方法在降低螺栓最大应力方面表现出显著的优势,使螺栓组中各个螺栓的受载能力得到显著均衡,对于改善压力容器螺栓组布局、优化煤矿井下锂离子蓄电池电源隔爆箱体结构设计具有一定的参考价值。

呼吸泄压设计也是隔爆箱体需要重点考虑的问题,锂离子蓄电池热失控初期会在瞬间产生大量易燃易爆气体,一旦无法及时泄压,隔爆箱体内积聚的高温易燃易爆气体不仅会加速相邻电池热失控,还可能被直接引燃,发生爆炸,最大压力达7~10 MPa^[61],远超现有标准要求的1.5 MPa耐压隔爆强度。因此,我

国相关标准规定要考虑内部冗余空间和呼吸泄压装置以降低箱体内发生的燃爆的风险。然而,呼吸泄压装置实质上仍然是隔爆箱体内部向外连接的通道,这与阻焰隔爆和防水密封间仍然存在一定的矛盾。目前,主流的泄压装置包括烧结金属元件和压紧金属丝网元件^[62],多孔结构具有一定的阻焰泄爆能力,但泄压与隔爆功能之间如何平衡,还需要进一步计算测试并开展系统研究。

5 煤矿井下锂离子蓄电池电源充电与换电安全技术装备

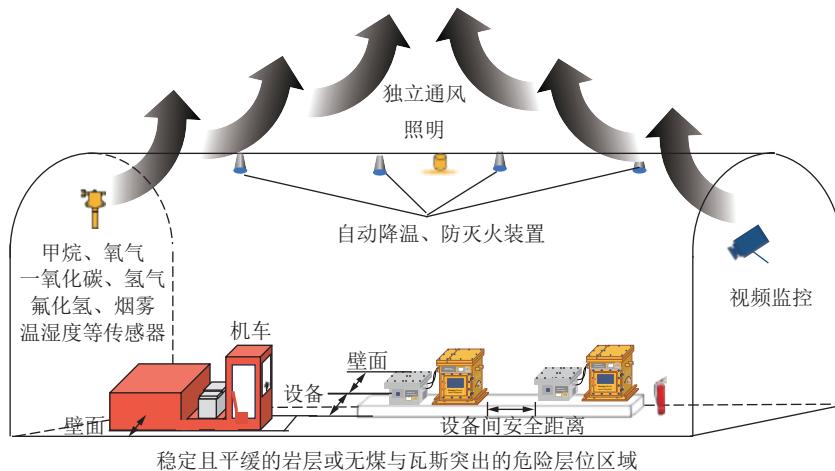
动力锂离子蓄电池在煤矿井下充电或换电是煤矿降本增效和智能化、无人化的重要途径,然而,锂离子蓄电池在煤矿井下充电或换电仍存在不小的安全挑战和技术难题。本节总结了锂离子蓄电池电源充电硐室和换电硐室设置要点,在设备和操作安全两方面对充电与换电过程进行了剖析,并展望了未来煤矿井下锂离子蓄电池电源智能化充电或换电技术与装备的应用前景。

5.1 煤矿井下锂离子蓄电池电源充电硐室、换电硐室设计要点

煤矿井下锂离子蓄电池电源充电与换电过程是电池安全管控相对薄弱的一环,而充电硐室与换电硐室是煤矿井下锂离子蓄电池集中充电和换电的场所,具有高能量密度的特点,受制于井下空间和复杂环境,硐室选址、内部设备布局、监控、通风及应急处置等环节对保障充电与换电安全尤为重要,如图11所示。

在选址方面,充电硐室与换电硐室应优先选择比较稳定且平缓的岩层区域,避开有煤与瓦斯突出的危险层位,并做好防水和防火处理。在内部设备布局方面,硐室应具有相对充足的空间保证安全充电或换电,设备与墙壁、设备与设备间应具有足够的距离,保障安全。在功能设计方面,应设置独立通风^[63],设置甲烷、氧气、一氧化碳、氢气、氟化氢、烟雾、温湿度等传感器,以及高清晰度、低照度红外摄像和温度测试仪,配合车辆原有监测手段,监测硐室内安全状态。此外,硐室内部还应具有瓦斯与温度电闭锁、防误插拔、紧急充电中止、电缆连接器防爆等安全技术措施^[64],并设置异常高温报警、自动降温、防灭火装置和异常电源隔离装置。

即便煤矿井下充电硐室和换电硐室设计上已有一些共识,但相应的理论研究还很匮乏,部分定量设计指标还有待商榷。中国煤炭学会在2022年10月曾发布《煤矿防爆锂电池车辆动力电源充电安全技术规范》和《煤矿防爆锂电池车辆动力电源换电安全技

图 11 充电硐室与换电硐室选址及环境布置示意^[63-65]Fig.11 Requirements of coal mine charge-discharge site and environmental layout^[63-65]

术规范》征集意见稿^[65]，对推动煤矿井下充电硐室与换电硐室建设具有一定指导作用。

5.2 煤矿井下锂离子蓄电池电源充电、换电安全保障技术

在未完全实现无人化、自动化充电或换电的情况下，大多数充电或换电过程仍由人来完成，而保障充电或换电过程主要涉及设备安全和操作安全 2 个方面。

在设备安全方面，主要涉及锂离子蓄电池电源安全和充电机安全，MT/T 1200《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》^[31]和 AQYQ-AMA-2021-01《矿用防爆锂离子蓄电池电源充电机安全技术要求(试行)》^[66]分别对电池电源和充电机设备安全做出了详细规定，例如，锂离子蓄电池动力电源应具有手动隔离开关，防止充电过程中发生带电拔插，严禁电火花产生。此外，对于无需拆卸电池，直接在车辆上充电的情况，还需要考虑车辆定位、电气安全和行进安全等。

在人员操作方面，充电或换电前应对锂离子蓄电池电源做充分的检查，检查锂离子蓄电池电源和连接设备是否破损或其他异常情况(外壳是否带电、充电或换电设备是否接地、手动隔离开关是否处于关闭状态等)，检查环境是否安全，严禁设备带病充电和换电，严禁在危险环境中充电和换电。在充电或换电过程中，涉及电源拆卸、转运和装载时，应由不少于 2 人配合操作完成^[65]，充电或换电过程应避免碰撞、跌落和翻滚。另外，充电或换电过程中，司机应制动断电，离开驾驶室，严禁在充电或换电过程中进行其他操作。充电或换电结束时，应及时检查设备，确保安全后再对车辆进行操作。

5.3 煤矿井下锂离子蓄电池电源智能充电、换电技术与装备

机械化换人、自动化减人、智能化无人是未来煤

矿发展的趋势^[67-68]，2023 年 6 月，国家矿山安监局在“权威部门话开局”应急管理部专题会中指出：目前全国煤矿智能化采掘工作面已经达到 1 300 余个，现场应用的煤矿机器人达到 31 种、1 000 台套，约 300 台无人驾驶车辆在 30 余处露天煤矿开展试验^[69]，取得巨大成效。接下来，煤矿井下无人驾驶车辆成为未来发展趋势，而无人充电技术和自动化换电技术是煤矿无人驾驶车辆示范的重要一环，如图 12 所示。

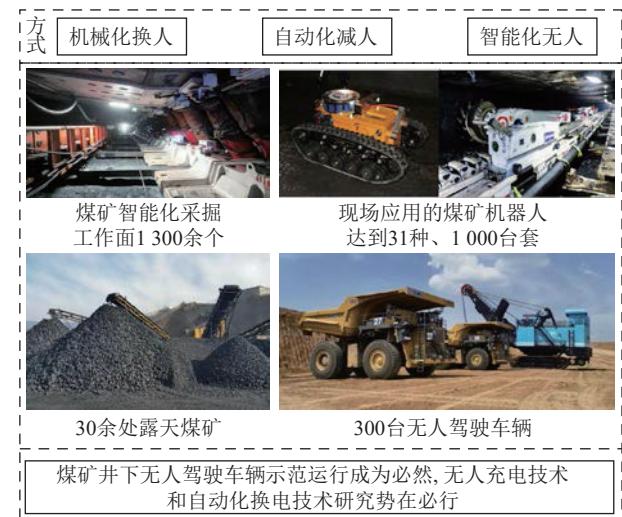


图 12 我国智能化煤矿建设现状

Fig.12 Status of intelligent coal mine construction in China

然而，针对无人化充电，目前仍存在技术瓶颈。在接触式充电方面，充电过程中防止电火花产生有赖于电源与插销间的锁止装置，因此锁止装置的可靠性^[70]至关重要。在非接触式充电方面，受制于煤矿井下 6 W 的电磁波功率^[71]限制，远远达不到井下设备高效运转的需求。一方面，亟需开展煤矿井下无线充电电磁波功率上限的安全评估，提高无线充电效率和可靠性，另一方面，还可寻求更为高效、安全的电力转换

途径。

针对自动化换电技术,煤矿井下设备体积大、质量高,井下换电技术成熟度不足,存在难度大、时间长、风险高等问题。目前的电池模组大都不是快换电源,且无统一配置,电池快速换电系统适配存在一定困难,换电过程中电池存在跌落、碰撞等可能,因此,如何保障锂离子蓄电池电源机械快换安全也是换电程序中的重大难题。一方面,要形成电源与快换技术装备间的配套,协同推进锂离子蓄电池电源快速换电技术研发,另一方面,换电装备的电池机械保护装置和自动化应急处置研究也必不可少。

6 煤矿井下锂离子蓄电池热失控应急处置技术

当煤矿井下发生锂离子蓄电池热失控事故时,迅速、有效地采取控制措施至关重要。然而,目前并无标准对煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害应急处置进行指导,相应的应急技术装备也很匮乏。本节梳理了锂离子蓄电池燃爆灾害后果分类分级方法,提出了煤矿井下锂离子蓄电池燃爆灾害后果分类分级原则,并总结了现有的煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害控制技术。

6.1 煤矿井下锂离子蓄电池热失控后果分类分级

煤矿井下锂离子蓄电池燃爆事故后果分类分级至关重要,有助于明确事故性质与严重程度,指导应急响应和救援措施,合理分配救援资源,提高救援效率,也是精细化管理的具体体现。

SUN 等^[72]基于大量的试验数据和真实的锂离子蓄电池燃爆事故,给出了基于车辆电池储能系统损坏程度的热失控分类分级方法,并以此给出了相应的应

急处置策略,但未评估锂离子蓄电池燃爆与环境之间的耦合影响。LI 等^[19]采用专家打分法和层次分析法,对特定矿山工作面在危险源、人员、工作环境、应急响应等多因素下锂离子蓄电池火灾风险进行计算和分级,但结果受专家主观影响,且未客观考虑锂离子蓄电池燃爆灾害后果,无法全面表征事故的真实严重程度,不具普适性。

因此,在确定煤矿井下锂离子蓄电池燃爆灾害后果分类分级标准时,既需要考虑锂离子蓄电池热失控程度、隔爆箱体破坏情况等锂离子蓄电池电源自身损伤,也需要考虑对煤矿井下作业环境和人员设备的影响,如毒害气体、明火火焰与爆炸波直接造成的事故后果,是否与瓦斯、煤尘等井下常见的危险源形成耦合灾害,即可按照环境毒害气体超限、设备破坏、人员伤亡、经济损失等情况进一步分类,实现对煤矿井下锂离子蓄电池燃爆事故应急处置的精确指导。

6.2 煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害控制技术

煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆灾害控制涉及人员疏散、灭火抑爆、通风、毒害气体消纳和应急通信等。人员疏散、通风及应急通信策略研究具有普适性,在煤矿井下锂离子蓄电池燃爆灾害中并无明显特殊性。锂离子蓄电池燃爆灾害控制难点主要集中在灭火抑爆和毒害气体消纳等方面。

在灭火抑爆方面,常见灭火剂对锂离子蓄电池热失控事故的灭火效能是评估和选择应急处置措施时的重要考虑因素。针对不同类型锂离子蓄电池火灾,选择合适的灭火剂可以有效地扑灭火焰并控制事态发展,降低损失和风险^[73]。结合已有研究,比较了常见灭火剂对锂离子蓄电池热失控的灭火抑爆效能,见表 5。

表 5 常见灭火剂对锂离子蓄电池火灾灭火效能对比

Table 5 Comparison of extinguishing efficacy of common extinguishing agents on lithium battery fire

灭火剂	现象	效果	延伸
CO ₂			
ABC干粉			
3%的水成膜泡沫	可以熄灭明火,但是灭火后电池会发生复燃	较差	发生复燃的时间与灭火剂的冷却能力成正比
灭火剂 ^[74]			
七氟丙烷 ^[75]	灭火效果良好,但灭火后电池容易发生复燃	较差	电池内部剧烈的链式分解反应难以有效抑制
全氟己酮 ^[76]	能够有效地扑灭锂离子蓄电池火灾	良好	—
液氮 ^[77]	对热失控具有良好的抑制效果	一般	安全阀打开前喷射1.2 kg液氮,能有效防止热失控,热失控后注入只能暂时降低温度
超细水雾 ^[78]	能够在短时间内有效扑灭电池火灾,并迅速降低电池表面温度	良好	添加表面活性剂的细水雾灭火效果优于未添加表面活性剂的情况
气凝胶 ^[79]	气凝胶灭火剂表现出色的明火抑制效果	良好	效果优于细水雾

此外,混有细水雾液滴的风流冷却^[80]、围堰式浸

没灭火、玻璃纤维防火隔离毯覆盖^[81]等方法也可以考

虑应用在煤矿井下锂离子蓄电池热失控灾害控制方面,但考虑到煤矿井下环境的特殊性,其适用性还有待进一步验证。在毒害气体消纳方面,应用于煤矿井下的CO沉降消纳技术^[82]已取得关键性成果,而针对煤矿井下HF、有机烷烃等毒害气体沉降技术研发还有待突破。

7 结 论

本文1~6章剖析了煤矿井下锂离子蓄电池热失控机理、安全评估、监控预警、电源结构与功能设计、充换电安全和应急处置6方面的研究与不足。在此基础上,围绕耦合灾害机理—电池安全评价—监控预警—电源设计—充换电安全—应急处置的煤矿井下锂离子蓄电池全链条安全保障体系,凝练出6项亟需解决的关键问题,期望为解决新业态下的煤矿井下锂离子电池应用安全问题提供指引,具体如下:

1) 充电硐室、换电硐室、巷道等典型场景下锂离子蓄电池燃爆与煤矿常见灾害间的耦合孕灾机制。锂离子蓄电池热失控与煤矿常见灾害间的耦合灾害危害大,极易造成群死群伤,耦合孕灾机制交织错节,研究难度大,但厘清锂离子蓄电池热失控与煤矿常见灾害间耦合孕灾机制对源头灾害控制、监测预警、箱体结构设计和应急处置等均具有指导意义。

2) 适用于煤矿井下的高安全性锂离子蓄电池及应用安全评价与管理体系。尽管短期内依靠电池材料和内部结构设计解决煤矿井下锂离子蓄电池安全问题尚无法实现,但仍然是今后发展的方向。此外,锂离子蓄电池应用安全评价与管理体系的完善也是当前任务的重中之重,建立一系列针对煤矿井下锂离子蓄电池全生命周期安全评价的国家/行业标准极为关键。

3) 煤矿井下锂离子蓄电池热失控超前预警技术。电源箱有限空间内锂离子蓄电池热失控超前预警技术是亟待突破的技术难点,光栅光纤传感技术是其可以考虑的方向之一,此外,基于机器智能学习的煤矿井下锂离子蓄电池热失控监测策略对提高响应能力也十分重要。

4) 煤矿井下锂离子蓄电池电源高强度阻燃隔爆与轻量化设计。煤矿井下锂离子蓄电池运行安全主要依赖于电源设计,如何在有限的成本内增加电源箱隔爆性能并对电源进行轻量化设计至关重要,可推进锂离子蓄电池在煤矿井下应用场景向纵深拓展。

5) 煤矿井下锂离子蓄电池智能安全充电、换电技术装备。煤矿智能化、无人化成为发展趋势,以锂离子蓄电池为动力的车辆设备自主安全充电技术与高

效率安全快换电技术装备亟待研发。

6) 煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆灾害快速控制技术。针对煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆灾害控制策略的研究明显不足,有关标准中也并未专门提及相关控制策略和应急预案,因此,加快煤矿井下锂离子蓄电池热失控燃爆灾害快速控制技术研发,并制定相应应急预案十分迫切。

参考文献(References):

- [1] 袁亮.煤炭工业碳中和发展战略构想[J].*中国工程科学*,2023,25(5): 103–110.
YUAN Liang. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 103–110.
- [2] 康红普,李全生,张玉军,等.我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J].*绿色矿山*,2023(1): 1–24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 1–24.
- [3] 王峰,李皓浩,吴建雄.中国经济绿色发展的政策演变、评价方法和实现路径[J].*绿色矿山*,2024(2): 136–149.
WANG Feng, LI Haohao, WU Jianxiong. Safety and protection technology of multi-coal seam mining under river[J]. *Journal of Green Mine*, 2024(2): 136–149.
- [4] 鲍久圣,张可琨,王茂森,等.矿山数字孪生 MiDT: 模型架构、关键技术及研究展望[J].*绿色矿山*,2023(1): 166–177.
BAO Jiusheng, ZHANG Kekun, WANG Maosen, et al. Mine Digital Twin: Model architecture, key technologies and research prospects[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 166–177.
- [5] 冒燕,童杏林,卢世刚,等.植入式锂离子电池光纤布拉格光栅温度传感器[J].*激光与光电子学进展*,2023,60(17): 1706005.
MAO Yan, TONG Xinglin, LU Shigang, et al. Implantable fiber Bragg grating temperature sensor inside lithium-ion battery[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(17): 1706005.
- [6] KURPIEL W, DEJA P, POLNIK B, et al. Performance of passive and active balancing systems of lithium batteries in onerous mine environment[J]. *Energies*, 2021, 14(22): 7624.
- [7] 鲁怀敏,方海峰,蔡李花,等.煤矿救灾机器人动力电源研究[J].*煤矿自动化*,2013,39(7): 38–42.
LU Huaimin, FANG Haifeng, CAI Lihua, et al. Research of power supply of coal mine rescue robot[J]. *Industry and Mine Automation*, 2013, 39(7): 38–42.
- [8] 张勇.煤矿紧急避险设施用锂离子蓄电池安全要求分析[J].*煤炭科学技术*,2017,45(6): 152–156.
ZHANG Yong. Analysis on safety requirements of lithium ion battery applied to mine emergency refuge facility[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 152–156.
- [9] 董海斌,羡学磊,马建琴,等.锰酸锂电池热失控特性研究[J].*消防科学与技术*,2022,41(1): 21–25.
DONG Haibin, XIAN Xuelei, MA Jianqin, et al. Research on thermal runaway characteristics of lithium manganate battery[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(1): 21–25.
- [10] 李谦,于金山,刘盛终,等.不同因素影响下锂离子电池热失控演

- 变特征及危害性综述[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(11): 1482–1487.
- LI Qian, YU Jinshan, LIU Shengzhong, et al. Review on the characteristics and hazards of lithiumion battery thermal runaway under various conditions[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(11): 1482–1487.
- [11] 韩颖, 李向威, 同志佳. 我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 186–189.
- HAN Ying, LI Xiangwei, YAN Zhijia. Research progress and prospect of heat damage prevention technology in high temperature mines in China[J]. Coal Technology, 2023, 42(10): 186–189.
- [12] 李宗翔, 王天明, 张明乾, 等. 矿井巷道淋湿蒸发换热系数构建及风流温度计算[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3176–3181.
- LI Zongxiang, WANG Tianming, ZHANG Mingqian, et al. Construction of air flow heat transfer coefficient and calculation of air-flow temperature in mine wet roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3176–3181.
- [13] 于海明, 叶宇希, 程卫民, 等. 高瓦斯煤矿模块化分风控尘方法及其排瓦斯规律分析[J/OL]. 煤炭学报, 2023: 1–9. [2024-03-05]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTXB20231031001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- YU Haiming, YE Yuxi, CHENG Weimin, et al. Modular dust control method and gas discharge law analysis in high gas coal mine[J/OL]. China Industrial Economics, 2023: 1–9. [2024-03-05]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTXB20231031001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] 贺文海, 王燕, 赵宇. 我国矿井辅助运输车辆振动及其控制技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 823–836.
- HE Wenhai, WANG Yan, ZHAO Yu. Vibration of mine auxiliary transport vehicles in China and its control technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 823–836.
- [15] YAN W, WANG Z R, CHEN S C. Quantitative analysis on the heat transfer modes in the process of thermal runaway propagation in lithium-ion battery pack under confined and semi-confined space[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 176: 121483.
- [16] 张青松, 翟祺悦, 赵子恒. 受限空间锂离子电池热解气体燃烧释能研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(12): 1711–1714.
- ZHANG Qingsong, ZHAI Qiyue, ZHAO Ziheng. Study of energy release from pyrolysis gas combustion of li-ion battery in confined space[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(12): 1711–1714.
- [17] 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.
- [18] ZHU N N, TANG F. Experimental study on flame morphology, ceiling temperature and carbon monoxide generation characteristic of prismatic lithium iron phosphate battery fires with different states of charge in a tunnel[J]. Energy, 2024, 301: 131725.
- [19] LI K K, WANG Y M, ZHANG Y C, et al. Multi-risk assessment of mine lithium battery fire based on quantitative factor characterization[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(1): 456.
- [20] STURM P, FÖBLEITNER P, FRUHWIRT D, et al. Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2022, 134: 103695.
- [21] STURM P, FÖBLEITNER P, FRUHWIRT D, et al. Dataset of fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels[J]. Data in Brief, 2023, 46: 108839.
- [22] 李松. 狹長受限空間磷酸鐵鋰電池火災特性及氣凝膠滅火研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- LI Song. Study on fire characteristics of lithium iron phosphate battery in narrow confined space and aerogel fire extinguishing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [23] WANG Z, ZHAO Q J, YIN B, et al. Influence of longitudinal wind on thermal runaway and fire behaviors of 18650 lithium-ion batteries in a restricted channel[J]. Journal of Power Sources, 2023, 567: 232974.
- [24] 郁振山. 美国吉姆·沃特资源公司第五煤矿爆炸事故[J]. 现代职业安全, 2019(2): 89–92.
- YU Zhenshan. The explosion accident of the fifth coal mine of Jim Walter Resources Company in the United States[J]. Modern Occupational Safety, 2019(2): 89–92.
- [25] RAY S K, KHAN A M, MOHALIK N K, et al. Review of preventive and constructive measures for coal mine explosions: An Indian perspective[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(3): 471–485.
- [26] MIRZAEI ALIABADI M, MOHAMMADFAIM I, SHABANI K. Causal analysis of the zemestan-yurt coal mine explosion in Iran[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(2): 519–530.
- [27] DUBANIEWICZ T H. From Scotia to Brookwood, fatal US underground coal mine explosions ignited in intake air courses[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 52–58.
- [28] WALA A, STOLTZ J. Three underground coal mine explosions: Twenty miners killed: One reason[C]//1999 Proceedings of the 8th US mine ventilation symposium, Rolla, MO (US), 1999: 740.
- [29] RICHMOND J K, PRICE G C, SAPKO M, et al. United States Government Printing Office. Historical summary of coal-mine explosions in the United States[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/8918>.
- [30] 安标国家矿用产品安全标志中心. 矿用产品安全标志通用安全技术要求矿用防爆锂离子蓄电池(试行)[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.aqbz.org/prodapi/files/c766e71475134b15ab175d84fc4bc7e6.pdf>.
- [31] 国家矿山安全监察局. 矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求: MT/T 1200—2023[S/OL]. [2024-03-05]. <https://hbba.sacinfo.org.cn/attachment/onlineRead/bcbe6767026c6571b5c614a31dca27f77ef0dabf47a4c3b239bd59f6a28c8918>
- [32] 于会群, 胡哲豪, 彭道刚, 等. 退役动力电池回收及其在储能系统中梯次利用关键技术[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1675–1685.
- YU Huiqun, HU Zhehao, PENG Daogang, et al. Key technologies for retired power battery recovery and its cascade utilization in energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1675–1685.
- [33] 罗磊鑫, 杨力帆, 张兴伟, 等. 磷酸铁锂电芯过充产物实验研究及热失控判断方法[J]. 电工技术, 2023(23): 45–49.
- LUO Leixin, YANG Lifan, ZHANG Xingwei, et al. Experimental study on overcharging product of lithium iron phosphate cell and determination method of thermal runaway[J]. Electric Engineering, 2023(23): 45–49.

- [34] 应急管理部,国家矿山安全监察局.关于印发《“十四五”矿山安全生产规划》的通知:应急〔2022〕64号[EB/OL]. [2024-03-05]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxgkpt/fdzdgknr/202208/t20220810_419897.shtml, 2022-08-10.
- [35] XU B, LEE J, KWON D, et al. Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111437.
- [36] 蔡涛,张钊诚,袁奥特,等.锂离子电池储能安全管理中的机器学习方法综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):178-187.
CAI Tao, ZHANG Zhaocheng, YUAN Aote, et al. Review of machine learning for safety management of li-ion battery energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 178-187.
- [37] KHALEGHI S, KARIMI D, BEHESHTI S H, et al. Online health diagnosis of lithium-ion batteries based on nonlinear autoregressive neural network[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116159.
- [38] WEI C, BENOSMAN M. Extremum seeking-based parameter identification for state-of-power prediction of lithium-ion batteries[C]//2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 67-72.
- [39] OUYANG J, DAN X, JING L. State-of-function evaluation for lithium-ion power battery pack based on fuzzy logic control algorithm[C]//2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 822-826.
- [40] YANG Y X. A machine-learning prediction method of lithium-ion battery life based on charge process for different applications[J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116897.
- [41] 姜星晨.动力电池组散热结构仿真研究[D].沈阳:沈阳理工大学, 2023.
JIANG Xingchen. Simulation study of power battery pack heat dissipation structure[D]. Shenyang : Shenyang Ligong University, 2023.
- [42] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司,《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》(安标字[2012]16号文发布)[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.aqbz.org/Home/ABGG/wenjian/GG2013002.htm>.
- [43] 安标国家矿用产品安全标志中心.矿用产品安全标志通用安全技术要求矿用防爆锂离子蓄电池电源(试行)[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.aqbz.org/prod-api/files/3919b015df0e4c3eb29583ca62d4f800.pdf>.
- [44] LIU T, HU J, ZHU X L, et al. A practical method of developing cooling control strategy for thermal runaway propagation prevention in lithium ion battery modules[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104564.
- [45] 刘剑,于立博,吴振兴,等.基于风冷的锂离子电池充放电设备热特性影响研究[J].储能科学与技术,2024,13(3):914-923.
LIU Jian, YU Libo, WU Zhenxing, et al. Effect of thermal characteristics of lithium-ion battery charging and discharging equipment on air cooling[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(3): 914-923.
- [46] 王学章,李科群.锂电池叉流道液冷结构设计及散热特性分析[J].物理学报,2022,71(18):194-203.
WANG Xuezhang, LI Kequn. Liquid-cooled structure design and heat dissipation characteristics analysis of cross-flow channels for lithium batteries[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(18): 194-203.
- [47] 许炳,赵荣超.改进液冷板结构后CTP动力电池包的热特性[J].*电源技术*, 2023, 47(2): 245-249.
XU Bing, ZHAO Rongchao. Thermal characteristics of CTP battery with improved structure liquid cooling plate[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2023, 47(2): 245-249.
- [48] 杜江龙,夏光宇,练成,等.基于波浪形液冷通道的锂离子电池热管理系统模拟分析[J].能源研究与管理,2023(1): 78-87, 94.
DU Jianglong, XIA Guangyu, LIAN Cheng, et al. Simulation and analysis of lithium-ion battery thermal management system based on wavy liquid cooling channel[J]. *Energy Research and Management*, 2023(1): 78-87, 94.
- [49] HASSANI S M, MAZLOUMI S H, KHOSHVAGHT-ALIABADI M. Analysis of liquid-based cooling system of cylindrical lithium-ion battery pack with co- and counter-flow patterns[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(11): 3617-3629.
- [50] 凌子夜,方晓明,汪双凤,等.相变材料用于锂离子电池热管理系统的研究进展[J].*储能科学与技术*, 2013, 2(5): 451-459.
LING Ziye, FANG Xiaoming, WANG Shuangfeng, et al. Thermal management of lithium-ion batteries using phase change materials[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(5): 451-459.
- [51] 罗昭顺,汪铭磊,吴启超,等.双层相变材料结构的圆柱形锂离子电池相变冷却模块仿真分析[J].*现代机械*, 2022(2): 14-19.
LUO Zhaojun, WANG Minglei, WU Qichao, et al. Simulation analysis of the phase change cooling module for cylindrical lithium-ion battery with double-layer phase change material structure[J]. *Modern Machinery*, 2022(2): 14-19.
- [52] 刘朝阳.基于热电元件的动力电池冷却/预热系统设计与性能研究[D].镇江:江苏大学, 2021.
LIU ZhaoYang. Design and performance research of cooling/pre-heating system for power battery based on thermoelectric elements[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [53] 张丹枫,孙金华,王青松.成组结构对锂离子电池相变热管理性能的影响[J].*储能科学与技术*, 2020, 9(5): 1526-1538.
ZHANG Danfeng, SUN Jinhua, WANG Qingsong. Effect of module structure on performance of phase change material based Li-ion battery thermal management system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(5): 1526-1538.
- [54] LAMB J, ORENDORFF C J, STEELE L A M, et al. Failure propagation in multi-cell lithium ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 283: 517-523.
- [55] GAO S, LU L G, OUYANG M G, 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.
- [56] 天地科技股份有限公司国际分公司,煤炭科学技术研究院有限公司,安标国家矿用产品安全标志中心有限公司等.矿用隔爆箱:2023111601415[P]. 2023-12-26.
- [57] 天地科技股份有限公司国际分公司,煤炭科学技术研究院有限公司,安标国家矿用产品安全标志中心有限公司等.隔爆箱:2023111614769[P]. 2024-01-09.
- [58] 中国安全生产科学研究院,中国矿业大学(北京).一种煤矿井下充电锂离子蓄电池电源隔爆装置:2022116717292[P].

2023-09-29.

- [59] 李军. 矿用隔爆型矩形箱体外壳强度设计计算[J]. 煤矿机械, 2009, 30(5): 26-28.
LI Jun. Design and calculation strength of flame proof rectangular tank for mine[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(5): 26-28.
- [60] 朱高鹏, 孙朝阳, 李攀攀. 方形矿用隔爆箱体螺栓组分布结构优化[J]. 应用科技, 2014, 41(6): 67-69.
ZHU Gaopeng, SUN Zhaoyang, LI Panpan. Distribution structure optimization of the bolts of a square flameproof box[J]. Applied Science and Technology, 2014, 41(6): 67-69.
- [61] SEE K W, 王运鹏, 张勇, 等. 矿用防爆锂离子电池电源安全设计影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 153-165.
SEE K W, WANG Yunpeng, ZHANG Yong, et al. Study on influencing factors of mine explosion-proof lithium-ion battery power supply safety design[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 153-165.
- [62] 宋占松. 煤矿用锂离子蓄电池电源用泄压措施的研究[J]. 电气防爆, 2023(4): 9-10, 15.
SONG Zhansong. Research on pressure relief measures for lithium ion battery power supply in coal mines[J]. Electric Explosion Protection, 2023(4): 9-10, 15.
- [63] 国家安全生产监督管理总局. 国家煤矿安全监察局编. 煤矿安全规程: 第一百六十七条[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [64] 贺海涛, 宋德军, 赵海兴. 煤矿辅助运输防爆车辆电动化和数智化的应用研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(2): 219-224.
HE Haitao, SONG Dejun, ZHAO Haixing. Application of electrification and digital intelligence of explosion proof vehicles for coal mine auxiliary transportation[J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 219-224.
- [65] 中国煤炭学会.《煤矿防爆锂电池动力电源充电安全技术规范》等 6 项团体标准征求意见[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.chinacaj.net/i,34,17962,0.html>.
- [66] 安标国家矿用产品安全标志中心. 矿用防爆锂离子蓄电池电源充电机安全技术要求(试行)[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.aqb.org/prod-api/files/ama.pdf>.
- [67] 王家臣, 刘云熹, 李杨, 等. 矿业系统工程 60 年发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 261-279.
WANG Jiachen, LIU Yunxi, LI Yang, et al. 60 years development and prospect of mining systems engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 261-279.
- [68] 王国法, 庞义辉. 智能化示范煤矿建设成效与发展方向[J]. 智能矿山, 2024, 5(1): 2-11.
WANG Guofa, PANG Yihui. Construction effect and development direction of intelligent demonstration coal mine[J]. Journal of Intelligent Mine, 2024, 5(1): 2-11.
- [69] 周圆. 权威部门话开局|全国煤矿智能化采掘工作面超 1300 个[N/OL]. [2024-03-05]. http://www.news.cn/2023-06/08/c_1129679428.htm.
- [70] 方崇全. 煤矿机器人井下自主快速安全充电方法研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 152-155.
FANG Chongquan. Research on autonomous fast and safe charging method of coal mine robot[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 152-155.
- [71] 孟积渐, 陈永冉. 煤矿井下无线充电安全影响因素分析及对策[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 109-112.
MENG Jijian, CHEN Yongran. Analysis of influencing factors of wireless charging safety in underground coal mine and countermeasures[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(12): 109-112.
- [72] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A review of battery fires in electric vehicles[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361-1410.
- [73] 陶致格, 朱顺兵, 侯双平, 等. 锂电池储能电站火灾与消防安全防护技术综合研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 536-545.
TAO Zhige, ZHU Shunbing, HOU Shuangping, et al. Comprehensive research on fire and safety protection technology for lithium battery energy storage power stations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 536-545.
- [74] 李毅, 于东兴, 张少禹, 等. 典型锂离子电池火灾灭火试验研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 120-125.
LI Yi, YU Dongxing, ZHANG Shaoyu, et al. On the fire extinguishing tests of typical Lithium-ion battery[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 120-125.
- [75] WANG Q S, SHAO G Z, DUAN Q L, et al. The efficiency of heptafluoropropane fire extinguishing agent on suppressing the lithium titanate battery fire[J]. Fire Technology, 2016, 52(2): 387-396.
- [76] WANG Q S, LI K, WANG Y, et al. The efficiency of dodecafluoro-2-methylpentan-3-one on suppressing the lithium ion battery fire[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2018, 15(4): 041001.
- [77] 王志, 殷波, 于永, 等. 液氮对磷酸铁锂储能电池热失控的抑制效果研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(10): 1315-1321.
WANG Zhi, YIN Bo, YU Yong, et al. Suppression effect of liquid nitrogen on thermal runaway of lithium iron phosphate energy storage batteries[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(10): 1315-1321.
- [78] ZHU M X, ZHU S B, GONG J H, et al. Experimental study on fire and explosion characteristics of power lithium batteries with surfactant water mist[J]. Procedia Engineering, 2018, 211: 1083-1090.
- [79] 刘通, 唐国才, 王亮, 等. 气凝胶灭火剂抑制锂离子储能电池热失控特性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(1): 107-112.
LIU Tong, TANG Guocai, WANG Liang, et al. Inhibition of thermal runaway of energy storage battery by aerogel-based fire extinguishing agent[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(1): 107-112.
- [80] LIU T, HUANG J H, HU X Y, et al. Experimental study on the cooling effect of fine water mist on the thermal runaway in a single lithium ion battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 240: 122194.
- [81] Fireisolator. Isolating and fighting EV car fires based on best practices and live testing [EB/OL]. [2024-03-05]. <https://fireisolator.com/#what-is-fire-isolator>.
- [82] HE S, GAO S, LI J, et al. Research on an *in situ* synchronous CO elimination method in blasting operations and engineering experimental application based on nano-CO catalysts[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113260.