矿山井下锂离子蓄电池电源热失控及次生灾害防控技术研究进展*

刘东[1,2]，贺耀庭[1,2]，王西涛[1,2]，李富伟[1,3,4]，李广[1,3,4]，
曹凤金[1,5]，梁龙[1,3,4]，邹岢艺[1,5]，申勇[1,2]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心， 湖南 长沙 410012；
3.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
4.深部金属矿安全智能开采国家矿山安全监察局重点实验室， 湖南 长沙 410012；
5.国家金属采矿工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：随着“双碳”战略目标的深入推进与新质生产力发展，智能化新能源装备在矿山领域的应用日益广泛，锂离子蓄电池电源已成为矿山装备的重要动力源。然而，矿山作业环境复杂、空间有限，锂电池热失控及其引发的次生灾害风险显著增高，为有效防控矿山井下锂离子蓄电池电源灾害风险，围绕“诱因—热失控预警—次生灾害”致灾链条进行综述。结果表明：锂离子蓄电池电源在商用及储能领域已形成较为系统的热失控诱因分析与监测预警体系，但针对矿山复杂环境下热失控演化机制的研究仍不够深入；矿用热失控预警技术应进一步向多源信息融合与智能化方向发展，并加强主动预警与被动防护措施的协同建设。研究结果可为矿山井下锂离子蓄电池电源安全应用提供支撑。

关键词：锂离子蓄电池电源；热失控；状态监测；灾害防控
中图分类号：TD611 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)09-0117-13

Research Progress on Thermal Runaway and Secondary Disaster Prevention and Control Technology of Lithium-Ion Battery Power Supply in Underground Mine

Liu Dong[1,2], *He Yaoting*[1,2], *Wang Xitao*[1,2], *Li Fuwei*[1,3,4], *Li Guang*[1,3,4],
Cao Fengjin[1,5], *Liang Long*[1,3,4], *Zou Keyi*[1,5], *Shen Yong*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co. Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Key Laboratory of National Mine Safety Administration for Safe and Intelligent Mining of Deep Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
5.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: With the in-depth advancement of the “Dual-Carbon” strategic goals and the development of new-quality productive forces, intelligent new-energy equipment has been increasingly widely applied in the mining industry, and the lithium-ion battery power supply has become an important power source for mine equipment. However, due to the complex working environment and limited space in mines, the risk of thermal runaway of lithium battery and its secondary disasters is significantly increased. To effectively prevent and control the disaster risk of lithium-ion battery power supply in mines, the disaster chain of “inducement-thermal runaway warning-secondary disaster” was reviewed. The results show that the lithium-ion battery power supply has formed a relatively systematic thermal runaway inducement analysis and monitoring and early warning system in the field of commercial and energy storage, but the research on the thermal runaway evolution mechanism in the complex environment of mines is still not deep enough. The early warning technology of mine thermal runaway should be further developed in the direction of multi-source information fusion and intelligence, and the coordination

* **收稿日期**：2026-07-19
基金项目：国家科技重大专项资助项目(2025ZD1010906)；金属矿山安全技术国家重点实验室资助项目(2024GZKJ02, 2025GZKJ05)
作者简介：刘东(1990—)，男，湖南长沙人，硕士，高级工程师，主要从事矿山机电装备安全技术研究。E-mail:ldyc_30@163.com
通信作者：申勇(1995—)，男，湖南邵阳人，博士，工程师，主要从事矿山机电装备安全技术研究。E-mail:shenyongvincent@163.com

construction of active early warning and passive protection measures should be strengthened. The research results can provide support for the safe application of lithium-ion battery power supply in underground mines.

Key words: Lithium-ion battery power supply, Thermal runaway, Condition monitoring, Disaster prevention and control

0 引言

随着矿山向高端化、智能化、绿色化方向发展,新能源装备在矿山应用日益广泛。锂离子电池凭借能量密度高、无记忆效应等优势[1],已成为矿用新能源装备首选动力源[2]。然而,锂离子蓄电池电源作为一种高能物质[3],存在火灾及爆炸风险,在矿山应用时需重点考虑这一风险点。与地面应用场景相比,矿山井下空间受限、通风条件复杂,且矿用车辆长期承受振动、冲击、高负荷运行、粉尘、淋水等不利因素作用。一旦电池发生热失控,高温、火焰、可燃及有毒气体可能与井下环境相互耦合,形成火灾、燃爆和中毒窒息等连锁性灾害。

从安全准入角度来看,矿用电池在材料体系、单体容量等方面均提出了严格要求。磷酸铁锂电池具有较高的热稳定性和良好的循环性能,已成为当前煤矿井下大容量锂离子蓄电池动力电源的主要技术路线,相关准入要求规定,磷酸铁锂电池的单体电池许用容量上限为 230 Ah。而钴酸锂离子蓄电池已被列入禁止井工煤矿使用的设备目录,热稳定性相对较差的三元锂电池在井下的应用同样受到严格限制。

在商用储能和地面新能源装备等应用场景中,国内外学者围绕锂离子电池热失控诱发机制、传播规律、监测预警及工程防护方面开展了大量研究。在热失控诱因方面,主要通过过充、过放、内外短路、外部加热、针刺和挤压等常用试验,系统分析不同触发方式、荷电状态及结构参数对热失控发生与演化特征的影响。在监测预警方面,现有研究已形成外部传感与内部植入式传感两类主要技术路线,并进一步融合电压、温度、气体、压力和应变等多源信息,结合机器学习、深度学习等智能算法,实现电池异常状态识别、故障诊断及热失控风险预测。在工程防护方面,相关研究主要聚焦于隔热阻燃、定向泄压、传播阻隔及消防抑制等技术,以降低热失控扩展及其次生灾害风险。但目前针对矿用锂离子电池的研究仍相对不足。矿山井下复杂环境中热失控的诱发、演化、传播及次生灾害形成路径尚未得到系统梳理,热失控过程与受限通风、爆炸性气体等矿山环境因素之间的耦合作用机制仍有待深入研究。

综上,本文围绕“诱因—热失控—次生灾害”致灾链条,剖析热失控及级联传播特征、次生灾害致灾链条、监测预警、次生灾害阻断技术 4 个方面的研究进展,以期为矿用锂离子蓄电池电源安全技术研究提供新思路。

1 矿山井下锂离子电池热失控的诱发因素与演化扩散

锂离子电池热失控是产热超过散热时触发的自加速放热连锁反应,伴随可燃有毒气体释放,可引发火灾或爆炸[4]。热失控的诱因分为电滥用、热滥用和机械滥用三类,三者之间存在耦合:机械损伤可诱发电池内短路,进而引发电滥用和热滥用,电滥用产热又促进热滥用[5]。热失控诱因如图 1 所示。

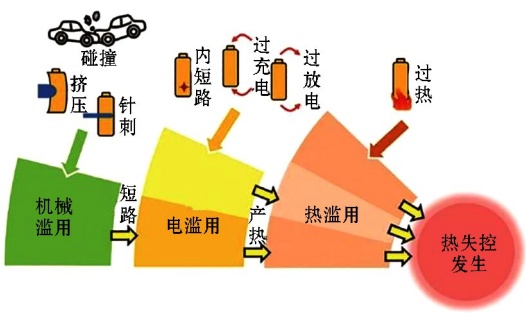


图 1 热失控诱发因素[6]

Fig.1 Inducing factors of thermal runaway[6]

矿山井下常年处于高温、高湿、高尘及振动等恶劣复杂工况,井下空间受限且通风散热能力不足,设备运行产生的热量易在电池箱及局部区域积聚,使电池工作温度升高,热安全裕度降低,从而增加热滥用风险;高湿环境会加剧电气连接部件腐蚀,造成绝缘性能劣化,易产生短路风险形成外短路;持续振动与冲击则可能引起极耳、连接件及电芯结构的累积损伤,进而诱发机械滥用或内短路等异常问题。因此,系统分析不同滥用诱因及其作用特征,对揭示矿井复杂环境下锂离子蓄电池热失控致灾规律、降低热失控风险具有重要意义。

1.1 电滥用

电滥用类型包括过充、过放、内短路、外短路等。电池充放电过程中产生的热能与充放电电流呈正相

关,大电流充放电时,电池将累积大量热量。内短路通常与电池制造缺陷或锂枝晶堆积相关,会形成局部焦耳热。外短路会产生瞬时大电流,并在电池内阻、极耳及连接部位形成显著焦耳热,最终触发热失控。

过充属于典型的电滥用情况,过充会显著提高正极电位,引发正极过度脱锂,从而诱发锂沉积等一系列副反应[7],还会造成固体电解质界面分解[8]。在持续过充条件下,电池内部热量持续累积,电池隔膜熔化,热失控全面爆发[9]。相关学者为了明晰过充风险,开展了大量研究。Liu 等[10]对 20 Ah 电池进行过充热失控试验,从其燃烧产物中检测到了铝元素,推测认为过充致使正极分解 Fe_2O_3,与铝箔发生铝热反应。杨帆等[11]发现随着过充倍率增加,热失控持续时间与质量损失均有一定程度减少,且在高过充倍率情况下,热失控发生概率更高。Jia 等[12]以 86 Ah 的磷酸铁锂(LFP)电池为研究对象,对比研究了过充与加热两种不同触发模式下的热失控表现,发现过充工况下电池内部气体生成率较高,安全阀开启早于加热触发模式。莫子鸣等[13]发现过充倍率会影响热失控初期温度,各副反应的反应速率也会随之变化,且高倍率过充导致泄压阀更易开启,加速热失控全面发生。因此,矿山井下应严格限制电池充电倍率,可通过与矿用充电机联锁实现控制。

过放电滥用是一种潜在的热失控致灾因素,主要表现为单体电池间的差异性导致个别单体反复过放电,致使电池老化加剧,形成累积效应,最终引发热失控[14-15]。Liu 等[16]对 LFP 电池进行深度过放后发现,SEI 膜厚度发生了显著变化。Zheng 等[17]对电池进行了不同程度的过放电试验,发现随着放电程度增加,SEI 膜进一步分解,导致过放电阻抗增加。马迷娜等[18]研究发现,过放电循环会加快电池内阻增加与容量衰减,降低电池热稳定性,使得热失控触发时间早于经过健康及正常循环的电池。杨小钰等[19]研究了高温与过放电对电池老化的共同作用,结果表明,二者会加速活性锂损失,加剧电池正极结构破坏。因此,在矿用锂离子蓄电池电源使用过程中,应通过电池管理系统限制电池过度放电输出,并在电池出厂后严格检查单体电池间的一致性,避免个别单体电池发生持续过放-充电的恶性循环。

内短路诱因包括内部诱因和外部诱因,内部诱因包括电极老化、制造缺陷等;外部诱因通常与机械滥用、热滥用共同作用,致损原理为外部因素导致隔膜破裂或熔解,正负极直接接触,进而引发热失控[20]。也有学者将内短路总结为机械滥用、电滥用和热滥用最终引发热失控全面爆发的共性环节[21]。综合来看,内短路的演化过程分为 3 个阶段:初期短路面积小、产热可被散热抵消,难以察觉;中期短路区域扩大、温度显著升高;末期出现大面积短路,瞬间释放巨大热量,热失控不可阻断[22]。在内部诱因方面,周远翔等[23]建立了内短路模型,分析了锂枝晶对热失控的影响,结果表明,内短路温度和锂枝晶半径呈二次正相关关系。因此,在内部诱因控制方面,应当以更加严格的要求规范生产制造,尽量降低内部缺陷引发热失控的概率;在外部诱因方面,同样需要在实际生产中采用针对性措施予以限制。

外短路诱因是指电池外部回路正负极直接短接,电流经内阻产生焦耳热,温度升高后会激活 SEI 分解等连锁反应,形成电-热正反馈,触发热失控[24-25]。Abaza 等[26]通过外接电阻研究锂离子电池短路特性,分析了不同阻值对短路特性的影响。周兴振等[27]通过可控外短路测试平台,验证了锂电池外短路存在破裂泄漏、内部熔断及累积损伤 3 种损伤模式。在矿山实际工况下,外部短路多由电缆磨损或接线端子腐蚀引起,因此,应定期检查锂离子电池外部线束的完整性。

1.2 热滥用

矿山井下通风条件相对较差,设备作业负荷较大,局部热量易于积聚,因此热滥用诱发锂离子蓄电池电源热失控的风险不容忽视。井下设备密集布置在狭窄巷道中,本身通风受限,加之粉尘沉积形成隔热层,热量持续积聚无法散出,最终形成正反馈循环,触发热失控[28]。李奕彤等[29]采用外部火烧与加热片加热两种方式触发热失控,发现火烧触发热失控的时间存在滞后性,但最大升温速率较高。Huang 等[30]研究了不同加热位置对热失控的影响,发现大壁面加热时热失控析出气体量最多,而侧面及底部加热触发的热失控传播速度更快。Jin 等[31]研究发现加热面积越小,诱发热失控的速度越快。因此,在矿用场景中,应使锂离子蓄电池电源尽量远离热源,同时避免设备因过载运行产生局部过热。

1.3 机械滥用

矿山作业工况复杂,路面颠簸,同时存在落石等危险源,因此电池机械滥用风险较高。目前车用领域常用针刺试验与挤压试验等方法来验证单体电池机械滥用[32]。针刺试验是一种极端的外物侵入试

验[33]。李梓衡等[34]采用该试验方法分析了热失控过程中电压、温度的变化规律。赵颖等[35]研究了针刺速度及深度对热失控的影响。王海斌等[36]通过高荷电状态(SOC)下的针刺试验发现,热失控温度越高,电压压降越明显。挤压试验是为了验证电池受机械载荷引发的挤压失效风险,试验包括 3 种不同模式[37]。张涛等[38]分析了在平面压缩、局部压痕及三点弯曲 3 种挤压模式下的"力-电-热"多场响应行为。李杰等[39]研究了荷电状态、加载速度、压头加载角度以及压头半径对热失控特性的影响。综合上述研究成果,矿用车辆动力电池应通过加强电池包壳体与底部防护、优化电芯支撑和缓冲结构、提高抗冲击与抗挤压能力、合理控制电池荷电状态等措施,降低尖锐异物侵入、碰撞及挤压等机械滥用诱发电池内短路和热失控的风险。

1.4 单体-模组-电池包级联热失控特性

单体电池热失控后,释放的热量通过电池外壳和连接器热传导、高温气体和喷射物热对流,以及热辐射传递至相邻电池,使相邻电池温度升高至热失控触发阈值,进而引发链式蔓延[40]。Wang 等[41]研究发现电池模组较单体电池有更加猛烈的热失控过程。王帆等[42]研究了辐射加热模式下模组内热失控传播行为及能量释放机制。Zhu 等[43]研究发现模组内荷电状态对热失控传播的影响更大。Zhao 等[44]研究了单体不同连接条件对电池组热失控传播的影响。朱国庆等[45]以 100 Ah 的 LFP 多电池模组为研究对象,揭示了热失控传播的非线性动力学规律。

在模组及电池包级别开展试验,可验证其在机械冲击、振动工况下的热失控特性。机械冲击试验用于模拟车辆发生碰撞时动力电池所承受的冲击工况,主要评估电池在瞬时高加速度脉冲作用下的结构完整性和安全性能[46]。振动试验则用于模拟电池在生产运输及车辆运行过程中受到的持续颠簸与周期性振动,重点考察长期振动载荷对电池连接可靠性、结构稳定性及热安全性能的影响[47]。因此,矿用电源装置设计过程中,不仅需要合理优化电池单体及模组的排布方式,还应充分考虑连接结构的可靠性、整体结构强度及抗冲击和抗振性能,以降低热失控发生与传播的风险。

2 热失控次生灾害及致灾链条

锂离子蓄电池电源在矿山井下发生热失控后,由于空间受限、通风受阻等,易发生火灾、爆炸及有毒气体泄漏等次生灾害,其致灾因素如图 2 所示。



图 2 次生灾害致灾因素

Fig.2 Disaster-causing factors of secondary disasters

在火灾行为研究方面,Wang 等[48]对比了 100%SOC 状态的 LFP 与 NCM 电池,发现 LFP 电池火灾行为主要表征为喷射火焰,而 NCM 电池的火灾则呈飞溅火花、烟雾喷射、燃爆等多种形态。Liu 等[49]对比了不同 SOC 状态下 LFP 电池的火灾行为,发现随着 SOC 增加,其火灾行为由稳定燃烧转向剧烈喷射。Liu 等[50]对 243 Ah 的 LFP 电池进行了加热触发热失控试验,发现热失控进程中热释放速率出现了两个峰值,且火灾风险随着 SOC 状态的增加而升高。Huang 等[51]、Ping 等[52]采用 ISO 9705 全尺寸燃烧试验装置,研究了辐射加热条件下 50 Ah 锂镍钴锰氧化物/钛酸锂电池包与 50 Ah 磷酸铁锂/石墨电池包的燃烧行为。以上研究重点探讨了锂离子电池火灾的热危害特性,得出最大温度和热释放速率均受 SOC 影响的结论,可为井下受限空间内火灾风险评估提供参考。

在气体组分分析及燃爆特性分析方面,Wang 等[53]研究了不同 SOC 状态的 18650 电池在热失控期间产气的燃烧和爆炸风险。Zhang 等[54]分析了不同荷电状态下 70 Ah 方形 LFP 电池的循环产气动力学,并评估了其燃爆风险。Wang 等[55]研究发现,NCM811 电池 TR 产气爆炸极限与电池 SOC 有关,即爆炸下限(LEL)随电池 SOC 的增加先增大后减小,爆炸上限(UEL)随电池 SOC 的增加而增大。Baird 等[56]对 3 种不同类型电池的关键指标进行了研究,结果表明,相对于 LFP 电池排放的气体,镍钴铝(NCA)三元电池和钴酸锂(LCO)电池排放的气体产生了更高的火焰速度和最大超压,LFP 电池具有更高的爆炸下限(LFL)。Qian 等[57]对 50 Ah LFP 电池在惰性环境中开展了现场喷发研究,检测了气体释放量和电池最高温度,明确产气主要成分为 CO、H_2、CO_2、CH_4、C_2H_4 等。Zhou 等[58]分析了 104 Ah LFP 电池在热失控不同阶段的产气机理,并对其层流火焰特性进行了分析。Shen 等[59]以 228

Ah矿用锂离子电池为研究对象,分析了热失控过程中多参数响应及分阶段产气爆炸特性,揭示了大容量矿用电池热失控与气体爆炸风险的演化规律。Yu等[60]进一步研究了常规电池在甲烷气氛下热失控释放气体的燃烧特性,结果表明,瓦斯环境可能对电池热失控产气的燃烧危险性产生影响。

在有毒有害气体分析方面,Peng等[61]在辐射加热条件下研究了68 Ah磷酸铁锂/石墨电池的气体毒性和热危害,并提出电池的热危害和气体毒性均随SOC升高而增加。解洪嘉等[62]通过加热触发18650锂离子电池热失控,发现热失控过程产生浓烟,并释放包括丙烯醛在内的高毒、剧毒气体。

综上,为降低锂离子电池热失控对矿山安全生产的次生灾害影响,应综合考虑灭火、防爆及加强通风,及时排控,避免井下受限空间内有毒有害气体聚集。

3 热失控多特征预警技术及井下应用要求

3.1 热失控多特征预警技术

为保障锂离子蓄电池电源安全高效工作,通常需要监测其运行参数,实现电池异常状态的预警。目前常见监测技术包括外部传感器、内部植入传感器及基于智能算法的预警技术。

3.1.1 外部传感器监测技术

(1) 电压监测技术。

锂离子蓄电池电源常见的电压信号异常包括欠压、过压及电压一致性差等[63]。Xia等[64]研发了一种用于监测单体电池端电压的多电压传感器交错拓扑测量系统。邓原冰[65]分析总结了不同滥用模式下电池电压变化状态。Li等[66]提出了一种长短期记忆递归神经网络模型和等效电路模型相结合的异常电压检测方法。

(2) 温度监测技术。

锂电池热失控往往伴随不同程度的化学反应,随着反应进行,反应热在电池内部不断积累。Yu等[67]采用分布式光纤传感器有效监测了电池的内外部温度。杨赟等[68]通过热电偶监测了不同充放电状态下电池热失控过程的温度变化,并基于此建立了电池多级预警系统。

(3) 力学参数监测技术。

锂离子电池充放电过程中,锂离子在正负极间不断运动,SEI膜持续演化,并伴随有电解质、分解等副反应,导致锂离子电池产生不同程度的形变。国内外学者通过不同类型力学传感器对形变进行了监测,张晋等[69]采用贴片式应变传感器对280 Ah LFP电池热失控状态进行了监测,试验结果表明,应变传感器能准确捕捉热失控早期电池膨胀变形状态。Lyu等[70]监测了LFP电池多种异常工况下的膨胀力变化,并由此提出了一种基于膨胀力的异常检测方法。

(4) 气体监测技术。

当电芯内部电解液分解、SEI膜破裂时,会提前释放CO、烷烃类可燃气体及HF等腐蚀性气体[71],这为气体监测技术提供了路径。石爽等[72]对比了多种气体探测方法对LFP电池舱过充安全预警的有效性。Liao等[73]将C_2H_4、CH_4及CO作为特征气体,采用光声光谱仪对电池热失控状态进行监测。Cai等[74]研究了不同条件下热失控的气体组成,最终采用非色散红外CO_2传感器对热失控状态进行监测。

3.1.2 内部植入传感器监测技术

为直接感知电池内部状态,捕捉热失控初期特征变化,学者们通过内置微型、高灵敏度传感器实现多参数原位监测。Peng等[75]采用柔性印刷电路制作了电池压力/温度监测微型薄膜传感器,可实现电池内部机械形变及热损伤的实时监测。Bae等[76]发现将光纤嵌入电极内部,可有效监测与电极膨胀收缩相关的应变。Mei等[77]开发了一种可插入18650锂电池的光纤传感器,能够连续监测电池内部温度及应力变化。褚维达等[78]将光纤植入电芯内部,并研究了传感器耐电解液腐蚀的性能。Zhu等[79]研制了一种耐内部腐蚀的柔性温度传感器,实现了电池内部多点温度测量。Zhu等[80]利用薄膜应变片传感器原位监测电池内部应变。

3.1.3 基于智能算法的预警技术

随着计算机科学及AI技术的发展,基于智能算法的锂离子蓄电池状态估计与故障诊断成为主要发展路径。为提升监测准确率,学者们围绕多维信号融合开展了大量工作。刘炜等[81]融合了电压、温度、开阀状态等10种安全状态参量,构建了多层感知神经网络,实现了对锂离子蓄电池安全状态的预测。朱永乐等[82]将电压、电流、温度的时序退化特征相融合,建立了Transformer-AGCN-MoE容量拐点预测模型。Li等[83]将电热信号归一化处理后,通过PSO-TCN-Attention模型实现了SOC的有效预测。

与此同时,部分学者围绕相关应用场景提出了智能算法应用框架。吕云鹏等[84]为优化储能系统

配置方案,提出了一种基于 SPEA2-SA 算法的云边协同方法。申勇等[85]针对矿用作业场景,提出了一种深度学习-安时积分的云边协同 SOC 预测框架,经验证该算法具备良好的预测性能。

综上,随着传感器性能提升及智能算法发展,锂离子蓄电池的状态监测方法日趋多样化。但矿用新能源装备受电池管理系统(Battery Management System, BMS)算力、存储资源及功耗限制,复杂数据驱动模型在边端部署仍存在计算负荷较大、实时性不足等问题;同时,井下作业区域分散、通信环境复杂,单纯依赖云端计算易受通信带宽、时延及稳定性影响,难以满足热失控预警对实时性和可靠性的要求,亟须轻量化智能算法赋能。

3.2 矿用电源装置监测要求

目前,矿用锂离子蓄电池电源装置常通过 BMS 对其电参数、温度参数进行监测。《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》(MT/T 1200—2023)[86]对 BMS 设计提出了基本要求,监测误差要求见表 1,保护功能阈值见表 2。

表 1 监测误差要求

Table 1 Monitoring error requirements

单体电池电压值	单体电池温度	电池组电流	电池组电压	SOC 估算	绝缘电阻
±0.5%FS	±2 ℃	±2%FS	±0.5%FS	≤5%	±10%

表 2 保护功能阈值

Table 2 Protection function thresholds

序号	保护功能	阈值
1	单体电池过充电压保护功能	充电截止电压≤3.5 V
2	单体电池过充电压保护失效检测功能	保护失效电压≤3.6 V
3	单体电池过放电压保护功能	放电截止电压≤2.75 V
4	单体电池过放电压保护失效检测功能	保护失效电压≤2.45 V
5	充电过流保护功能	最大充电倍率≤0.5 C
6	放电过流保护功能	应有,无阈值要求
7	输出短路保护功能	—
8	温度保护功能	—
9	充电均衡功能	—
10	电池信息采集线开路保护	—
11	低温禁止充电功能	—
12	严重过放电后不允许充电功能	—
13	低功耗和休眠唤醒监控功能	实际功耗≤正常工作功耗的 10%

综上所述,随着新型传感与智能诊断技术的发展,在满足矿用安全标准及相关规程要求的基础上,通过引入多参数感知技术并优化边-云协同计算模式,可实现锂离子蓄电池异常状态的早期识别与热失控风险预警,进一步提升矿用电池系统的本质安全水平。

4 矿山井下热失控次生灾害阻断技术

为降低热失控次生灾害的扩散风险,矿山井下通常采用物理隔离等阻断措施,以限制高温、火焰等传播。受作业环境等因素影响,非煤矿山与煤矿对锂离子蓄电池电源的结构设计和安全防护性能提出了不同要求。

在煤矿井下,瓦斯等易燃易爆气体可能发生积聚。锂离子蓄电池电源一旦发生热失控,其产生的高温、火焰、电弧及可燃气体可能成为点火源,进而诱发燃烧或爆炸事故。为降低锂离子蓄电池电源热失控与瓦斯等危险介质耦合作用所引发的安全风险,煤矿井下通常采用防爆结构对潜在点火源及爆炸传播过程进行隔离和阻断,相关标准及技术要求见表 3。

表 3 相关标准及技术要求

Table 3 Relevant standards and technical requirements

实施日期	标准名称	适用容量/Ah	防爆型式	技术规定
2012 年 5 月	《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》[87]	20～100	隔爆(兼本安)型	电池或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。
2021 年 10 月	《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)》(AQYQ-AAC-2021-01)[88]	10～230	隔爆(兼本安)型	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。

续表

实施日期	标准名称	适用容量/Ah	防爆型式	技术规定
2023 年 7 月	《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》(MT/T 1200—2023)[86]	≥10	隔爆(兼本安)型	①增加：应符合《爆炸性环境 第 2 部分：由隔爆外壳“d”保护的设备》(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；②泄压装置要求修改为运输车辆用特殊要求。
2023 年 9 月	《煤矿局部通风机用蓄电池电源安全标志管理方案(试行)》[89]	10～100	隔爆(兼本安)型	外壳材质应为钢板或铸钢，防护等级应不低于 IP54(泄压阀除外)，并应有防外物、防淋水等保护措施。
2024 年 3 月	《基于正压保护的矿用防爆特殊型锂离子蓄电池电源安全标志管理方案(试行)》[90]	≥10	浇封特殊保护型	采用正压防护的电池箱压力值不得低于 50 Pa，并有压力自动检测和补气装置，所需气体量应经计算和试验验证，压力自动检测系统应融入安全保护系统，当正压力低于 50 Pa 时必须有保证安全的可靠措施。
2024 年 3 月	《基于浇封特殊保护方式的矿用防爆锂离子蓄电池电源装置及配套电源、控制箱安全标志管理方案》[91]	10～230	特殊型	需提供：①点燃危险评定报告；②所采用的防爆特殊型保护方式相关前期基础性研究证明材料。
2024 年 6 月	《矿用产品安全标志审核发放实施规则防爆锂离子蓄电池电源》(ABGZ-MA-AAC-2024-01)[92]	10～230	隔爆(兼本安)型	替代《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)》(AQYQ-AAC-2021-01)

由表 3 可知，近年来锂离子蓄电池电源的适用容量呈增大趋势，且防爆型式、产品类型逐渐趋于多样化。其中，隔爆型结构因技术成熟、适用范围广，在煤矿井下实际生产中应用较为普遍，其典型结构如图 3 所示。



图 3　矿用隔爆型锂离子蓄电池电源典型结构

Fig.3　Typical structure of flameproof lithium-ion battery power supply for mine

矿用隔爆型锂离子蓄电池电源的结构设计主要依据《爆炸性环境 第 1 部分：设备通用要求》(GB/T 3836.1—2021)、《爆炸性环境 第 2 部分：由隔爆外壳“d”保护的设备》(GB/T 3836.2—2021)、《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》(MT/T 1200—2023)等标准。综合考虑外壳耐爆性能、隔爆性能及异常工况下的安全防护要求，其物理阻隔设计应满足以下要求：(1)电池腔外壳应能承受不小于 1.5 MPa 静压试验；(2)电池腔应具有手动隔离开关，以便在异常状态时切断输出；(3)在电池腔自由空间方面，额定容量≤100 Ah 时，自由空间应超过单体电池体积的 2 倍，额定容量＞100 Ah 时，自由空间应超过单体电池体积的 7 倍；(4)外壳防护等级不得低于 IP54；(5)运输车辆用电源应具有泄压装置；(6)能通过 GB/T 3836.1—2021、GB/T 3836.2—2021 规定的外壳耐压试验、热试验及内部点燃的不传爆试验。

非煤矿山井下爆炸性气体环境发生概率和危险程度相对较低。因此，非煤矿山用锂离子蓄电池电源安全防护的重点为机械冲击、振动、粉尘侵入等，其典型结构如图 4 所示。



图 4　矿用一般型锂离子蓄电池电源典型结构

Fig.4　Typical structure of general-type lithium-ion battery power supply for mine

矿用一般型锂离子蓄电池电源的结构设计主要参照《矿用一般型电气设备》(GB/T 12173—2008)及《矿用一般型锂离子蓄电池电源实施规则》(ABGZ-KA-AAC-2024-01)等标准及规范要求。其手动隔离开关、自由空间的参数要求与矿用隔爆型锂离子蓄电池电源基本一致。在外壳强度方面，要求外壳应采用厚度≥1.5 mm 的钢板；在车用电源泄压阀方面，要求采用高灵敏度单向阀，且需要在两个

不同方向分别安装;在外壳防护等级方面,要求防护等级不低于 IP67;单体电池间采用激光焊接,建议电源配备灭火器。

综上,矿山井下锂离子蓄电池热失控防控技术需根据不同应用环境的危险特征进行针对性设计。煤矿井下受瓦斯等爆炸性气体环境影响,防控重点在于通过隔爆、泄压及电气隔离等措施限制热失控产生的高温、火焰及潜在点火源向外部危险环境传播,降低次生爆炸风险;非煤矿山爆炸性气体环境风险相对较低,其防护重点更多集中于提高电池箱体的机械防护、环境适应及异常泄压能力,降低振动、冲击、粉尘、淋水等复杂工况对电池安全性能的影响。总体来看,现阶段矿用锂离子蓄电池热失控防控已形成以结构防护、危险能量隔离和异常泄压为主的技术路径,但针对热失控传播抑制、产气排控及主动消防等方面仍存在进一步完善的空间。

5 矿山井下热失控预防其他要求

为保障锂离子蓄电池电源在井下可靠使用,相关部门及标准对其使用及维护也作出了明确规定。2024 年 7 月国家矿山安全监察局山东局与省能源局联合印发了《关于加强煤矿井下防爆锂电池单轨吊安全管理的规定》[93],分别从源头管理、充电管理、使用管理及应急处置 4 个方面对防爆锂电池单轨吊安全管理进行了要求。《矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求》(MT/T 1200—2023)[83] 中,明确列出了矿用锂离子蓄电池电源维护检查项目及周期见表 4。

表 4 维护保养要求

Table 4 Maintenance requirements

检查项目	周期
检查数据异常、报警信息、故障信号。	≤1 周
检查外观、防爆结构、线束完整。	≤1 月
进行 1 次完整充放电循环,实现电源容量自校准。	≤6 月
禁止高温储存或使用,远离火源、热源。	—
电源维修及锂离子蓄电池更换应由制造商进行,更换的锂离子电池厂家型号规格应与原来保持一致。	—
宜对电源运行数据进行监测。	—

6 结论与展望

本文聚焦矿用锂离子蓄电池电源的热失控及次生灾害防护问题,围绕热失控及级联传播特征、次生灾害致灾链条、监测预警,以及次生灾害阻断技术 4 个方面进行综述分析,得出以下主要结论。

(1) 电滥用、热滥用和机械滥用是锂离子电池热失控的主要诱因,不同诱因通过内短路、局部焦耳热和界面副反应等过程相互耦合。现有研究已较充分揭示了民用与商用电源典型单因素滥用条件下的基本规律,但针对矿用锂离子蓄电池电源热失控,及其与使用环境(如高温、高湿、瓦斯聚集等)耦合作用的研究较少。因此,实现热失控与矿山特殊环境的解耦分析,能够更准确地明晰致灾机理,为靶向防控提供思路。

(2) 目前针对锂离子蓄电池电源状态的监测预警,主要依赖于电池管理系统端,受算力、存储资源及功耗限制,存在精度低、累积误差等问题。车用、储能等商用领域已围绕多源数据融合、智能故障诊断开展了大量研究,矿用锂离子蓄电池电源可充分借鉴历史经验,研发适配矿用场景的智慧监测系统。

(3) 现有热失控次生灾害阻隔技术多以物理结构防护为主。在兼顾安全性与经济性的前提下,对防护外壳结构进行优化设计,可有效提升新能源装备的运行使用效率。

(4) 未来针对矿山井下复杂工况,可围绕以下几个方面开展研究:构建包含高温、高湿、粉尘、振动、冲击及受限通风等条件的多因素耦合试验体系,揭示矿用锂离子电池热失控诱发、传播及次生灾害演化机制;融合电压、温度、气体、应变等多源信息,研发本质安全、低功耗的多模态智能预警技术;统筹整合快速隔离、阻燃隔热、定向泄压、通风排控及消防抑制技术,形成主动预警与被动防护协同的全过程防控体系,为矿用新能源装备安全应用提供支撑。

参考文献(References):

[1] 胡循泉,耿莉敏,舒俊豪,等.采用全局健康因子和残差模型的锂离子电池健康状态估计[J].西安交通大学学报,2025,59(4):105-117.
Hu Xunquan, Geng Limin, Shu Junhao, et al. Estimation of lithium-ion battery state of health using global health factor and residual model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025,59(4):105-117.

[2] 李富伟,曹凤金,李高升,等.锂离子蓄电池动力电源在非煤地下矿山的安全应用研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):208-216.
Li Fuwei, Cao Fengjin, Li Gaosheng, et al. Research on safety application of lithium-ion battery power supply in non-coal underground mines[J]. Mining Research and Development,2023,43(8):208-216.

[3] 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.

[4] 杨坤，雷洪钧，肖博文，等.锂离子电池热失控机理分析与解决策略[J].江汉大学学报(自然科学版)，2020，48(5)：14-20.
Yang Kun, Lei Hongjun, Xiao Bowen, et al. Mechanism analysis and solution strategy for thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 14-20.

[5] 李奎杰，楼平，管敏渊，等.锂离子电池热失控多维信号演化及耦合机制研究综述[J].储能科学与技术，2023，12(3)：899-912.
Li Kuijie, Lou Ping, Guan Minyuan, et al. A review of multi-dimensional signal evolution and coupling mechanism of lithium-ion battery thermal runaway[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 899-912.

[6] Feng Xuning, Ouyang Minggao, Liu Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.

[7] Kim G H, Pesaran A, Spotnitz R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 476-489.

[8] Verbrugge M W, Xiao X C, Baker D R. Experimental and theoretical examination of low-current overcharge at lithiated graphite porous electrodes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(8): 080523.

[9] Qi C, Zhu Y L, Gao F, et al. Mathematical model for thermal behavior of lithium ion battery pack under overcharge[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 552-563.

[10] Liu W, Zhao F S, Liu S, et al. Chemical analysis of the cause of thermal runaway of Lithium- ion iron phosphate batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2021, 168(6): 060507.

[11] 杨帆，李煌，李志远，等.过充和加热滥用下大容量磷酸铁锂电池热失控特性[J].储能科学与技术，2025，14(12)：4554-4566.
Yang Fan, Li Huang, Li Zhiyuan, et al. Thermal runaway in high-capacity lithium iron phosphate batteries under overcharging and thermal abuse[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4554-4566.

[12] Jia Z Z, Wang S P, Qin P, et al. Comparative investigation of the thermal runaway and gas venting behaviors of large-format LiFePO4 batteries caused by overcharging and overheating[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106791.

[13] 莫子鸣，饶宗昕，杨建飞，等.锂离子电池过充热失控气热模型构建及关键参数影响分析[J].储能科学与技术，2025，14(5)：1784-1796.
Mo Ziming, Rao Zongxin, Yang Jianfei, et al. Construction and characteristic analysis of key parameters in a gas-thermal model for thermal runaway in lithium-ion battery based on overcharge[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(5): 1784-1796.

[14] Ruiz V, Pfrang A, Kriston A, et al. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1427-1452.

[15] 曹凤金，郭淼，亢荣，等.电动牵引车辆锂离子动力电源安全性能研究[J].电器工业，2022(6)：72-75.
Cao Fengjin, Guo Miao, Kang Rong, et al. Research on the safety performance of lithium-ion power sources for electric traction vehicles[J]. Electrical Appliance Industry, 2022(6): 72-75.

[16] Liu Y D, Liu Q, Li Z F, et al. Failure study of commercial $LiFePO_4$ Cells in over-discharge conditions using electrochemical impedance spectroscopy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(4): A620-A632.

[17] Zheng Y, Qian K, Luo D, et al. Influence of over-discharge on the lifetime and performance of $LiFePO_4$/graphite batteries[J]. RSC Advances, 2016, 36(6): 30474-30483.

[18] 马迷娜，张宸宇，张艳辉，等.三元锂离子电池过放电循环后性能及热稳定性试验[J].中国安全科学学报，2026，36(4)：160-167.
Ma Mi'na, Zhang Chenyu, Zhanf Yanhui, et al. Experiment on performance and thermal stability of ternary lithium-ion batteries after over-discharge cycles[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 160-167.

[19] 杨小钰，马文斌，谢松.高温环境轻微过放电对锂电池老化行为的影响[J].北京航空航天大学学报，2024，50(12)：3903-3911.
Yang Xiaoyu, Ma Wenbin, Xie Song. Influence of slight over-discharge on aging behavior of lithium-ion batteries in high-temperature environments[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(12): 3903-3911.

[20] 时天禄.内短路诱发锂离子电池热失控行为机理及故障诊断方法研究[D].兰州：兰州理工大学，2025.
Shi Tianlu. Research on thermal runaway mechanism and fault diagnosis method of lithium-ion batteries induced by internal short circuit[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2025.

[21] 黄莉莉，卢兰光，刘小斌.锂离子电池内短路机理与测试技术综述[J].电池工业，2026，30(1)：96-101.
Huang Lili, Lu Languang, Liu Xiaobin. Review of internal short-circuit mechanism and test methods in lithium-ion batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2026, 30(1): 96-101.

[22] 苟琦智，许冀阳，孟妮.锂离子电池内部短路研究综述[J].小型内燃机与车辆技术，2022，51(4)：89-95.

Gou Qizhi, Xu Jiyang, Meng Ni. Research progress on internal short circuit of lithium-ion bBattery[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique,2022,51(4):89-95.

[23] 周远翔,魏振强,袁新齐,等.锂离子电池枝晶内短路引起的电热效应研究[J].电气工程学报,2025,20(5):273-282.
Zhou Yuanxiang, Wei Zhenqiang, Yuan Xinqi, et al. Study on the electrothermal effect caused by internal short circuit in lithium-ion battery dendrites[J]. Journal of Electrical Engineering,2025,20(5):273-282.

[24] 赵亚兵.外部短路诱发锂离子电池热失控行为特征及机理研究[D].兰州:兰州理工大学,2023.
Zhao Yabing. Study on characteristics and mechanism of thermal runaway behavior of lithium-ion batteries induced by external short circuit[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2023.

[25] 安周建,安娴,杜小泽,等.锂离子电池外部短路热失控失效特征及机理[J].工程热物理学报,2024,45(9):2742-2749.
An Zhoujian, An Xian, Du Xiaoze, et al. Failure characteristics and mechanism of external short-circuit thermal runaway of lithium-ion battery[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2024,45(9):2742-2749.

[26] Abaza A, Ferrari S, Wong H K, et al. Experimental study of internaland external short circuits of commercial automotive pouch lithium-ion cells[J]. Journal of Energy Storage,2018,16:211-217.

[27] 周兴振,孙丙香,张智,等.磷酸铁锂电池外短路损伤特性及熔断防护研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):78-89.
Zhou Xingzhen, Sun Bingxiang, Zhang Zhi, et al. External short-circuit damage characteristics and fusion protection for lithium-iron phosphate batteries[J]. Power System Protection and Control,2023,51(12):78-89.

[28] 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.

[29] 李奕彤,许乐俊,孙均利,等.磷酸铁锂锂离子电池热滥用的热失控特性[J].电池,2025,55(4):699-705.
Li Yitong, Xu Lejun, Sun Junli, et al. Thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate li-ion battery by thermal obuses[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(4): 699-705.

[30] Huang Z H, Yu Y, Duan Q L, et al. Heating position effect on internal thermal runaway propagation in large format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Energy, 2022, 325:119778

[31] Jin C Y, Sun Y D, Wang H B, et al. Model and experiments to investigate thermal runaway characterization of lithium-ion batteries induced by external heating method[J].J Power Sources,2021,504:230065.

[32] 王方,吴泽昊,苗秀娟,等.老化锂离子电池机械滥用安全性研究综述[J].中国科学:技术科学,2025,55(7):1077-1104.
Wang Fang, Wu Zehao, Miao Xiujuan, et al. A review of mechanical abuse safety of lithium-ion batteries under different aging approaches[J]. Scientia Sinica Technologica, 2025,55(7):1077-1104.

[33] Ahmed A, Stefania F, Hin K W, et al. Experimental study of internal and external short circuits of commercial automotive pouch lithium-ion cells[J]. Journal of Energy Storage,2018,16:211-217.

[34] 李梓衡,刘承鑫,陈泽宇,等.锂离子电池针刺热失控特性及影响因素研究[J].电气工程学报,2025,20(3):225-232.
Li Ziheng, Liu Chengxin, Chen Zeyu, et al. Study on characterization and impact factors of lithium-ion battery thermal runaway induced by nail-penetration[J]. Journal of Electrical Engineering,2025,20(3):225-232.

[35] 赵颖,郝纪波,杨杰,等.针刺工况下锂电池未触发热失控的失效分析[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(12):2-13.
Zhao Ying, Hao Jibo, Yang Jie, et al. Failure analysis of lithiumbatteriy without triggering thermal runaway under acupuncture condition[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2024,46(12):1-13.

[36] 王海斌,王茂华,郭君,等.不同荷电状态下三元锂离子电池针刺热失控试验研究[J].安全与环境学报,2021,21(5):2059-2067.
Wang Haibin, Wang Maohua, Guo Jun, et al. Experimental study on the thermal runaway of ternary lithium-ion batteries under different charge[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(5):2059-2067.

[37] 罗海灵.机械滥用下的锂离子软包电池结构失效机理与建模研究[D].北京:清华大学,2018.
Luo Hailing. Structural failure mechanism and modeling of lithium-ion pouch batteries under mechanical abuse[D]. Beijing: Tsinghua University,2018.

[38] 张涛,郑家豪,张新春,等.不同挤压工况下圆柱形锂离子电池的压缩响应研究[J].材料导报,2024,38(20):9-14.
Zhang Tao, Zheng Jiahao, Zhang Xinchun, et al. Study on compression responses of cylindrical lithium-ion batteries under various compression conditions[J]. Materials Reports,2024,38(20):9-14.

[39] 李杰,赵鸿祥,程乐,等.软包锂电池在挤压工况下热失控的实验研究[J].计量学报,2026,47(1):111-121.
Li Jie, Zhao Hongxiang, Cheng Le, et al. Experimental study on thermal runaway of soft-pack lithium battery under extrusion condition[J]. Acta Metrologica Sinica, 2026, 47(1):111-121.

[40] 陈国贺，吕培召，李孟涵，等.锂离子电池热失控传播特性及其抑制策略研究进展[J].储能科学与技术，2024，13(7)：2470-2482.
Chen Guohe，Lyu Peizhao，Li Menghan，et al. Research progress on thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion batteries and its inhibiting strategies[J]. Energy Storage Science and Technology，2024，13(7)：2470-2482.

[41] Wang B X，Zhou Z Z，Li L，et al. Experimental study on thermal runaway and its propagationof large format prismatic lithium-ionbatteries [J]. Journal of Energy Storage，2022，55：105550.

[42] 王帆，罗思义，沙浩瀚，等.动力锂电池模组热失控传播与能量释放研究[J].电源技术，2026，50(5)：862-872.
Wang Fan，Luo Siyi，Sha Haohan，et al.Study on thermal runaway propagation and energy release in power lithium battery module[J]. Chinese Journal of Power Sources，2026，50(5)：862-872.

[43] Zhu M H，Zhang S Y，Chen Y，et al. Experimental and analytical investigation on the thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery module with NCM pouch cells under various state of charge and spacing[J]. Journal of Energy Storage，2023，72：108380.

[44] Zhao L Y，Han Z X，Guo W，et al. An experimental study on thermal runaway propagation over cyclic aging lithium-ion battery modules with different electrical connections[J]. Journal of Energy Storage，2024，89：111823.

[45] 朱国庆，崔少琦，胡翔宇，等.磷酸铁锂电池热失控及级联传播特性研究[J].中国矿业大学学报，2026，55(2)：537-545.
Zhu Guoqing，Cui Shaoqi，Hu Xiangyu，et al. Study on thermal runaway and cascade propagation characteristics of lithium iron phosphate batteries [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2026，55(2)：537-545.

[46] Hu L L，Zhang Z W，Zhou M Z，et al. Crushing behaviors and failure of packed batteries[J]. International Journal of Impact Engineering，2020，143：103618.

[47] Yao L，Wang Z P，Ma J. Fault detection of the connection of lithium-ion power batteries based on entropy for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources，2015，293：548-561.

[48] Wang Z，Zhu K，Hu J Y，et al. Study on the fire risk associated with a failure of large-scale commercial $LiFePO_4$/graphite and $LiNixCoyMn1-x-yO_2$/graphite batteries [J]. Energy Science & Engineering，2019，7(2)：411-419.

[49] Liu P J，Liu C Q，Yang K，et al. Thermal runaway and fire behaviors of lithium iron phosphate battery induced by over heating[J]. Journal of Energy Storage，2020，31：101714.

[50] Liu P J，Li Y Q，Mao B B，et al. Experimental study on thermal runaway and fire behaviors of large format lithium iron phosphate battery[J]. Applied Thermal Engineering，2021，192：116949.

[51] Huang P F，Wang Q S，LI K，et al. The combustion behavior of large scale lithium titanate battery[J]. Scientific Reports，2015，5：7788.

[52] Ping P，Wang Q S，Huang P F，et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test[J]. Journal of Power Sources，2015，285：80-89.

[53] Wang S L，Gong X，Liu L N，et al. Numerical analysis of explosion characteristics of vent gas from 18650 $LiFePO_4$ batteries with different states of charge [J]. Journal of Electrochemistry，2024，30(8)：2309241.

[54] Zhang Q，Song W C，Zhou G，et al. Gas production dynamic characteristics and fire-explosion risk assessment of the full cycle of thermal runaway in 70Ah lithium iron phosphate battery in confined space[J]. Applied Thermal Engineering，2025，279：127988.

[55] Wang Q S，Mao B B，Stoliarov S，et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies [J]. Progress in Energy and Combustion Science，2019，73：95-131.

[56] Baird A R，Archibald E J，Marr K C，et al. Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas[J]. Journal of Power Sources，2020，446：227257.

[57] Qian F，Wang H W，Li M H，et al. Thermal runaway vent gases from high-capacity energy storage $LiFePO_4$ lithium iron[J]. Energies，2023，16(8)：3485.

[58] Zhou G，Zhao J J，Zhang S Z，et al. Stage-specific gas generation dynamics and laminar flame characteristics of mixed gases during full-cycle thermal runaway in 104 Ah prismatic $LiFePO_4$ batteries[J]. Fuel，2026，411：137978.

[59] Shen Y，Zhang X F，Zou K Y，et al. Multi-parameter thermal runaway and staged gas explosion characteristics of a 228 Ah mining lithium-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering，2026，302：132092.

[60] Yu X Y，Wang Z，Yin B，et al. Combustion characteristics of gases released from thermal runaway batteries under methane atmosphere[J]. Energy，2025，330：136983.

[61] Peng Y，Yang L Z，Ju X Y，et al. A comprehensive investigation on the thermal and toxic hazards of large format lithium-ion batteries with $LiFePO_4$ cathode [J]. Journal of Hazardous Materials，2020，381：120916.

[62] 解洪嘉，孙杰，李吉刚，等.锂离子电池电热触发热失控泄漏毒物研究[J].储能科学与技术，2019，8(6)：1082-1088.
Xie Hongjia，Sun Jie，Li Jigang，et al. Research of leaked toxics from Li-ion battery electrical heat triggering thermal runaway[J]. Energy Storage Science and Technology，2019，8(6)：1082-1088.

[63] 马敬轩，赖铱麟，吕娜伟，等.锂离子电池智能传感监测及预警技术[J].电工技术学报，2025，40(3)：941-963.
Ma Jingxuan，Lai Yilin，Lyu Nawei，et al. Lithium-ion battery intelligent sensing monitoring and early warning technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(3)：941-963.

[64] Xia B，Mi C. A fault-tolerant voltage measurement method for series connected battery packs [J]. Journal of Power Sources，2016，308：83-96.

[65] 邓原冰.锂离子动力电池热失控及其预警机制的试验与仿真研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
Deng Yuanbing. Experimental and simulation study on thermal runaway and early warning mechanism of lithium-ion battery[D].Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2017.

[66] Li D, Zhang Z S, Liu P, et al. Battery fault diagnosis for electric vehicles based on voltage abnormality by combining the long short-term memory neural network and the equivalent circuit model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(2):1303-1315.

[67] Yu Y F, Vincent T, Sansom J, et al. Distributed internal thermal monitoring of lithium ion batteries with fibre sensors[J]. Journal of Energy Storage,2022,50:104291.

[68] 杨赟,刘凯,陈翔宇,等.18650 型锂离子电池火灾爆炸预警装置研究[J].消防科学与技术,2018,37(7):939-942.
Yang Yun, Liu Kai, Chen Xiangyu, et al. Research on explosion early warning device of 18650 lithium ion battery fire[J]. Fire Science and Technology,2018,37(7):939-942.

[69] 张晋,马畅,刘冰汐,等.基于应变参量的锂离子电池热失控监测预警技术研究[J].消防科学与技术,2026,45(6):27-33+42.
Zhang Jin, Ma Chang, Liu Bingxi, et al. Research on monitoring and early warning technology for thermal runaway of lithium-ion battery based on strain parameters [J]. Fire Science and Technology,2026,45(6):27-33.

[70] Lyu H P, Kong D P, Ping P, et al. Anomaly detection of $LiFePO_4$ pouch batteries expansion force under preload force [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 176:1-11.

[71] 贾子润,王震坡,王秋诗,等.新能源汽车动力电池热失控机理和安全风险管控方法的研究[J].汽车工程,2022,44(11):1689-1705.
Jia Zirun, Wang Zhenpo, Wang Qiushi, et al. Research on thermal runaway mechanism and safety risk control method of power battery in new-energy vehicles[J]. Automotive Engineering,2022,44(11):1689-1705.

[72] 石爽,吕娜伟,马敬轩,等.不同类型气体探测对磷酸铁锂电池储能舱过充安全预警有效性对比[J].储能科学与技术,2022,11(8):2452-2462.
Shi Shuang, Lyu Nawei, Ma Jingxuan, et al. Comparative study on the effectiveness of different types of gas detection on the overcharge safety early warning of a lithium iron phosphate battery energy storage compartment[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(8):2452-2462.

[73] Liao Z H, Zhang J G, Gan Z Y, et al. Thermal runaway warning of lithium-ion batteries based on photoacoustic spectroscopy gas sensing technology [J]. International Journal of Energy Research,2022,46(15):21694-21702.

[74] Cai T, Valecha P, Tran V, et al. Detection of Li-ion battery failure and venting with carbon dioxide sensors [J]. Transportation,2021,7:100100.

[75] Peng X L, Han J, Zhang Q, et al. Real-time mechanical and thermal monitoring of lithium batteries with PVDF-TrFE thin films integrated within the battery[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2022,338:113484.

[76] Bae C J, Manandhar A, Kiesel P, et al. Monitoring the strain evolution of lithium-ion battery electrodes using an optical fiber Bragg grating sensor[J]. Energy Technology, 2016,4(7):851-855.

[77] Mei W X, Liu Z, Wang C D, et al. Operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-on-fiber technologies [J]. Nature Communications,2023,14(1):5251.

[78] 褚维达,童杏林,冒燕,等.锂离子电池内部植入光纤光栅传感器存活实验研究[J].激光杂志,2021,42(8):19-22.
Chu Weida, Tong Xinglin, Mao Yan, et al. Experimental study on survival of fiber Bragg grating sensor implanted in lithium ion battery[J]. Laser Journal,2021,42(8):19-22.

[79] Zhu S X, Han J D, An H Y, et al. A novel embedded method for in situ measuring internal multi-point temperatures of lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources,2020,456:227981.

[80] Zhu S X, Yang L, Fan J B, et al. In-situ obtained internal strain and pressure of the cylindrical Li-ion battery cell with silicon-graphite negative electrodes[J]. Journal of Energy Storage,2021,42:103049.

[81] 刘炜,王锐,郭鲁斌,等.基于多模态神经网络的锂电池安全状态预测[J].材料科学与工程学报,2025,43(6):946-954.
Liu Wei, Wang Rui, Guo Lubin, et al. Safety state prediction of lithium-ion batteries based on multimodal neural network [J]. Journal of Materials Science & Engineering,2025,43(6):946-954.

[82] 朱永乐,蒋凌,华亮,等.基于多参量数据融合决策的锂离子电池容量拐点预测[J].高电压技术,2026,52(6):2803-2815.
Zhu Yongle, Jiang Ling, Hua Liang, et al. Prediction of lithium-ion battery capacity knee point based on multi-parameter data fusion and decision-making[J]. High Voltage Engineering,2026,52(6):2803-2815.

[83] Li F, Zuo W, Zhou K, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries based on PSO-TCN-Attention neural network[J]. Journal of Energy Storage,2024,84:110806.

[84] 吕云鹏,兰叶深.基于 SPEA2-SA 算法的锂电池云边协同储能系统优化配置[J].太阳能学报,2026,47(3):514-524.
Lyu Yunpeng, Lan Yeshen. optimal allocation of lithium battery cloud-edge collaborative energy storage system based on SPEA2-SA algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2026,47(3):514-524.

[85] 申勇,杨雨康,邹岢艺,等.矿用场景下采用深度学习-安时积分云边协同的锂电池荷电状态估计[J/OL].西安交通大学学报:1-11[2026-06-19].https://link-cnki-net-s-11.libdb.csu.edu.cn/urlid/61.1069.t.20260612.1515.010.

Shen Yong, Yang Yukang, Zou Keyi, et al. A cloud-edge collaborative state of charge estimation method for lithium-ion batteries in mining environments integrating deep learning and ampere-hour integration[J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University: 1-11[2026-06-19]. Available at: https://link-cnki-net-s-11.libdb.csu.edu.cn/urlid/61.1069.t.20260612.1515.010.

[86] MT/T 1200—2023 矿用防爆锂离子蓄电池电源安全技术要求[S].

[87] 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(试样)[EB/OL].[2026-06-19]. https://www.aqbz.rg/Home/ABGG/wenjian/GG2013002.html.

[88] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司.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].[2026-06-19]. https://www.aqbz.org/prodapi/files/c766e71475134b15ab175d84fc4bc7e6.pdf.

[89] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司.煤矿局部通风机用蓄电池电源安全标志管理方案[EB/OL].[2026-06-19]. http://124.207.154.85:8080/upload//RuleFiles/Product/02474432KLTO.pdf.

[90] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司.基于正压保护的矿用防爆特殊型锂离子蓄电池电源安全标志管理方案(试行)[EB/OL].[2026-06-19]. http://124.207.154.85:8080/upload//RuleFiles/Product/2025714551VLOK.pdf.

[91] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司.基于浇封特殊保护方式的矿用防爆锂离子蓄电池电源装置及配套电源、控制箱安全标志管理方案(试行)[EB/OL].[2026-06-19]. http://124.207.154.85:8080/upload//RuleFiles/Product/202496447LYJJ.pdf.

[92] 安标国家矿用产品安全标志中心有限公司.矿用产品安全标志审核发放实施规则 防爆锂离子蓄电池电源[EB/OL].[2026-06-19]. http://124.207.154.85:8080/upload/RuleFiles/Product/ABGZ-MA-AAC-2024-01.pdf.

[93] 国家矿山安全监察局山东局. 山东局联合省能源局印发《关于加强煤矿井下防爆锂电池单轨吊安全管理的规定》[EB/OL].[2026-06-19]. https://sd.chinamine-safety.gov.cn/articles/ch00637/202407/8cf84f6f-87d4-4596-8720-cb5a28e30a43.shtml?f_link_type=f_linkinlinenote&flow_extra=eyJkb2NfaWQiOiJjYjI1MmE0MWFlNGQ5Y2ZhLWY2ZTc2OGQ1ZjhiZTkyZTUiLCJpbmxpbmVfZGlzcGxheV9wb3NpdGlvbiI6MCwiZG9jX3Bvc2l0aW9uIjowfQ%3D%3D.