

本刊专稿

电动汽车热失控事故引发的智能动力电池发展与思考

洪吉超^{1,2}, 李萌^{1,2}, 邓树源^{1,2}

摘要 随着电动汽车产业快速发展,对动力电池的安全性、能量密度和使用寿命提出了更高要求。然而,时有发生的热失控事故暴露出传统电池管理系统在早期故障预警和主动防护上的不足。智能电池技术因此应运而生,通过集成多源传感器、边缘计算单元与智能算法,实现从被动防护向主动安全的转变。以电动汽车热失控为问题导向,围绕材料本征安全、制造与感知体系、智能管理3条路径,系统分析了智能电池的关键技术,包括高能量密度和高安全性材料研发、长寿命材料优化、精密制造工艺及智能传感架构,并阐述了智能电池管理系统在故障诊断、状态预测和自适应优化中的关键功能。展望未来,智能电池技术将朝着更高智能化与绿色化方向发展,为电动汽车提供安全高效的能源解决方案。

关键词 电动汽车;智能电池;电池材料;多源传感;安全管理

近年来,动力电池热失控和起火事故已成为制约其规模化应用与高能量密度发展的关键瓶颈,尤其在电动汽车领域,对用户安全构成严重威胁^[1]。传统电池管理系统(battery management system, BMS)主要依赖电压、电流和温度等有限参数,难以感知电池应力、压力、气体析出及微结构损伤等早期异常信号,同时电池组单体数量多、存在热耦合和一致性差异,导致局部异常检测与干预滞后。在极端温度、快充或高倍率放电条件下,这些局部失效易迅速扩散,放大安全风险。因此,传统的防护策略已无法满足当今电池系统在高安全性、自适应性等方面的性能要求,亟待发展具备原位感知、智能诊断和快速响应能力的主动安全电池管理体系,实现从被动防护到主动安全的技术转型。

从事故机理看,电动汽车动力电池的热失控通常经历局部异常、热源累积、失控触发和热蔓延4个阶段。其诱因不限于机械和电滥用,还涉及微观电化学反应,如析锂、微裂纹生成及固体电解质界面(solid electrolyte interphase, SEI)膜失效。局部异常会引发SEI膜分解等早期副反应,随后电解液分解和极片副反应产生的热量积累形成自加速反馈,当热量增长超过散热能力时,电池将进入快速不可逆失控,并在模组和电池包层面形成链式蔓延。针对此演化链条,智能动力电池的发展可从3方面推进:材料与结构层面,通过高安全电极/电解质、阻燃或固态体系及智能隔膜降低热源强度和可燃物供给;加工与感知层面,通过精密制造和多物理场传感原位捕捉压力、形变及气体等早期异常,实现热失控前兆识别;系统管理层面,依托多源数据融合与智能算法,构建具备状态估计、故障预测和自适应调度能力的智能电池管理系统(intelligent BMS, iBMS),实现从单体到整车的主动安

1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

2. 北京科技大学顺德创新学院, 佛山 528000

收稿日期: 2025-07-18; 修回日期: 2026-02-04

基金项目: 北京市科技新星交叉合作课题项目(20250484955); 广东省自然科学基金面上项目(2024A1515012804)

作者简介: 洪吉超, 副教授, 研究方向为动力电池安全管理, 电子信箱: hongjichao@ustb.edu.cn

引用格式: 洪吉超, 李萌, 邓树源. 电动汽车热失控事故引发的智能动力电池发展与思考[J]. 科技导报, 2026, 44(15): 34-44; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.07.00094

全防护。基于此,本文系统分析了智能电池在关键材料研发、精密加工与传感技术及智能化管理方面的进展,整体逻辑如图1所示。

1 智能电池概念与功能

智能电池是一种集状态感知、边缘计算、主动反馈与通信交互于一体的新型电池系统,可实现对自身

运行状态的实时监测、智能管理与故障预警。该技术融合先进电池材料、多物理场微型传感器、单体/模组侧边缘处理芯片,使电池由传统的能量存储单元升级为具备感知、计算和交互能力的智能终端,如图 2 所示。相较于仅依赖电压、电流和外部温度监测的传统方案,智能电池能够在单体或模组层面原位感知应力、气体和局部热异常,并对信号进行初步处理后上传至整包级 iBMS。基于多源信息融合,系统可对健

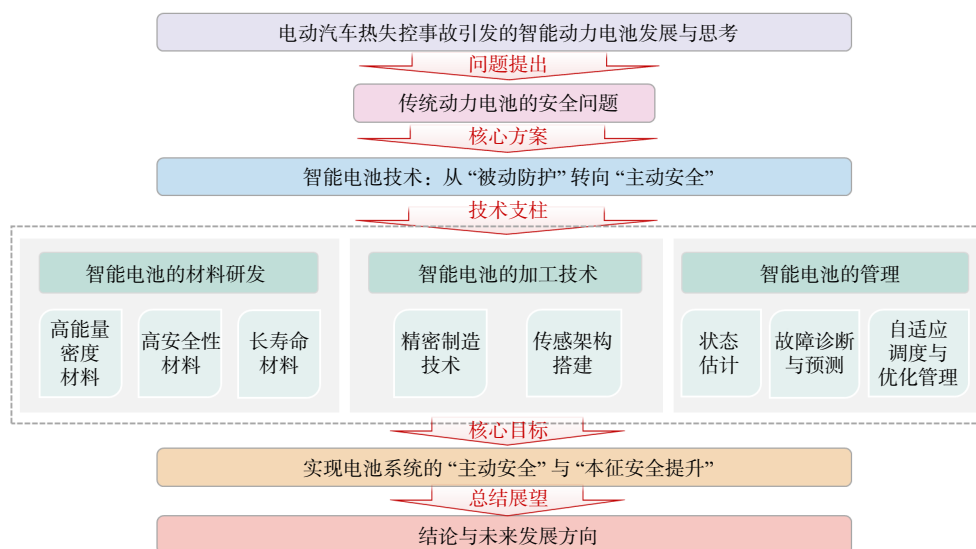


图 1 本研究逻辑框架示意

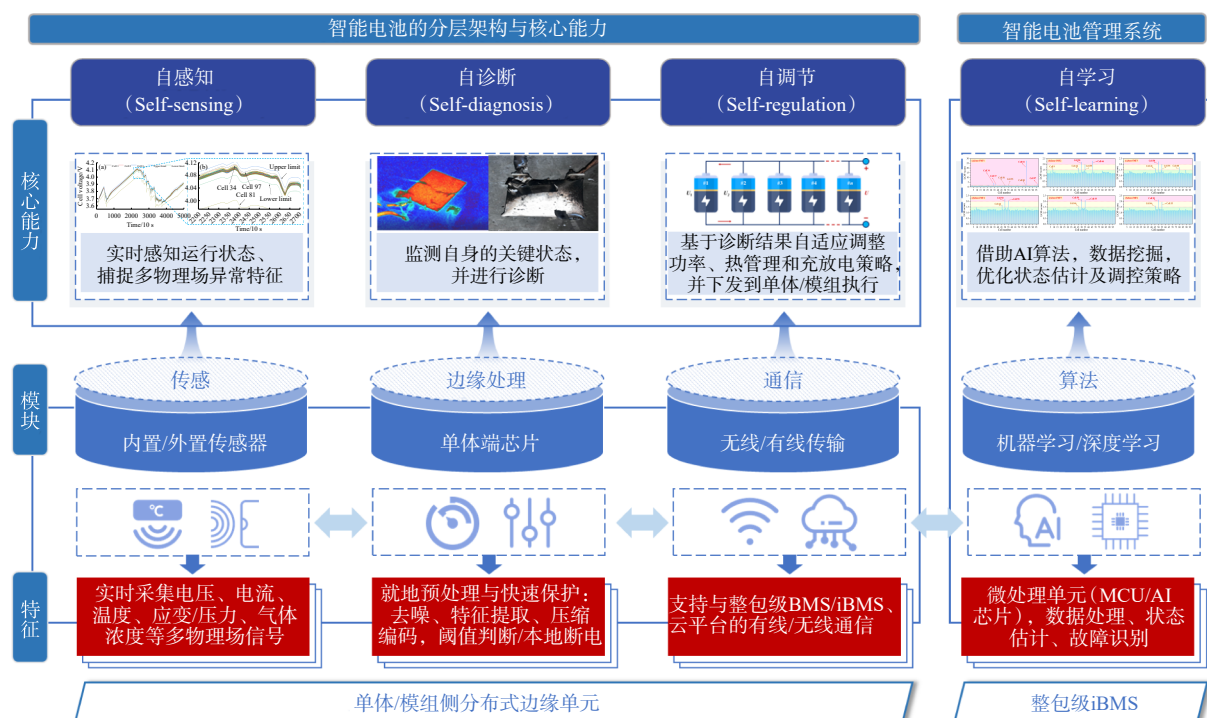


图2 智能电池技术

康状态(state of health, SOH)、荷电状态(state of charge, SOC)、剩余寿命(remaining useful life, RUL)等关键状态进行融合估计与风险预测,进而实施功率限制与热管理等主动安全控制,提升电池系统的安全性、可靠性和使用寿命。

2 智能电池的材料研发

智能电池材料研发是推动技术进步的核心方向,其智能体现在 2 个层面:一是材料本身具备自感知、自响应或自修复等特性,如智能隔膜和智能电解液;二是材料为系统智能化提供高性能基础,iBMS 的精密管理和主动安全策略依赖对高能量、高安全材料的深刻理解和优化。随着电动汽车对电池性能要求提升,开发新型高性能材料和提升现有材料性能已成为智能电池技术发展的关键。

2.1 高能量密度材料

高能量密度是智能电池的重要性能指标之一,尤其对电动汽车而言,直接关系到续航里程。目前锂离子电池仍是主流,为进一步提升其能量密度,研究重点逐渐转向新型负极、正极及电解质材料。在负极方面,硅基材料和锂金属负极因其超高理论比容量受到广泛关注,其中硅负极虽具有较高的能量储存能力,但其在充放电过程中的体积效应严重制约了循环稳定性,亟需通过合金化、复合化及电解液与隔膜优化加以改善;而锂金属负极则受限于枝晶生长和界面不

稳定问题,目前主要通过界面保护、电解液调控及结构设计等手段提升其安全性与循环寿命。对于正极材料,高镍三元材料因兼具高能量密度和较长循环寿命成为研究热点,同时富锂材料和固态电池正极也为实现更高能量密度提供了新的发展方向。

2.1.1 硅基负极材料的研究进展

硅基负极因其超高理论比容量被视为高能锂离子电池的理想选择,但充放电过程中剧烈的体积膨胀易引发颗粒粉化与界面失稳,制约其商业化应用^[2]。目前主流技术路线分为氧化亚硅(SiO_x)与硅碳(Si/C)体系:前者循环稳定性较好但首效偏低,后者首效较高但循环寿命受体积效应限制。为缓解上述问题,研究者从结构与界面工程两方面开展了系统研究^[3]。在结构设计方面,通过元素掺杂构建三维导电网络以改善 SiO_x 负极的应力与导电性能^[4],并针对 Si/C 负极引入多级碳骨架或多孔结构,为硅体积变化提供缓冲空间^[5-6]。在界面工程方面,通过调控电解液溶剂化结构,诱导形成高弹性、富 LiF 的稳定 SEI 膜,从而显著提升硅负极的循环稳定性^[7]。

2.1.2 高容量正极材料的创新进展

正极材料作为锂离子电池能量密度的关键限制因素,决定了电池性能的理论上限,表 1 对当前主流正极材料进行了性能对比。当前高能量密度正极主要集中在超高镍三元、富锂锰基等体系,通过成分优化、微结构调控及界面工程不断提升其能量密度与循环稳定性。

表 1 4 种类型的锂离子电池正极材料性能对比

对比项目	钴酸锂(LCO)	磷酸铁锂(LFP)	三元材料(NCM/NCA)	锰酸锂(LMO)
比容量/(mAh·g ⁻¹)	140~150	130~160	180~240	100~120
循环寿命/次	500~2000	2000+	1500~2000	500~1000
能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	180~240	130~160	180~240	130~180
安全性	一般	好	一般	好
成本	高	低	中、高	低
低温性能	好	一般	好	好
终端应用	消费电子等	储能、电动汽车等	储能、电动汽车等	两轮、三轮电动车及电动工具
优势	能量密度高、高温性能好、充放电稳定等	安全性好、循环寿命高等	能量密度高、低温性能好、循环稳定性好等	安全性高、低温性能优异、成本低等
劣势	钴资源紧缺、成本高、循环寿命差等	能量密度低、低温性能差等	工艺复杂、高温性能较差	能量密度较低、循环寿命差等

注:安全性、成本和低温性能为典型商用电芯的相对评价,具体表现受材料组成、电解液、负极、电芯结构及热管理等条件影响。

尽管超高镍单晶三元正极($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$, $x > 0.9$)具备较高能量密度,但其界面反应剧烈、离子传输受限,循环稳定性仍待提升。富锂锰基正极($x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiMO}_2$)因阴、阳离子协同氧化还原机制展现出较高理论能量密度,但在实际应用中仍面临首效低、电压衰减快等问题^[8]。近年来通过表面包覆、掺杂改性和结构调控取得了一定进展^[9]。除传统层状材料外,聚阴离子化合物和硫正极等新型体系也受到广泛关注,其中硫正极凭借高理论比容量和低成本优势展现出良好应用前景^[10]。这些多元化正极材料的研究为突破锂离子电池能量密度极限提供了新的技术路径。

2.1.3 锂金属负极与电池界面工程

锂金属负极因其超高理论比容量和低电化学电势,在满足日益增长的高比能储能需求方面展现出巨大的潜力,但其实际应用长期受枝晶生长、体积变化和界面不稳定等问题制约。近年来,通过合金化设计、三维结构构建和界面工程等策略,锂金属负极研究取得了显著进展,为全固态电池等高能量密度体系的发展奠定了基础。Wang 等^[11]揭示了合金化元素动态富集机制。通过在锂中引入少量 Ag、Mg 组分形成 Li-Ag、Li-Mg 固溶体,既保持了金属锂的高比容量优势,又通过合金元素在电极表面的动态富集调控了锂沉积行为。在轻量化复合锂负极设计方面,Guo 等^[12]提出一种由非晶态 LiF/LiBO 顶层和亲锂的 Li-Ag 合金底层组成的双层人工界面,顶层与合金底层二者协同实现无枝晶锂沉积,即使在高电流密度下也能保持良好性能。

2.1.4 黏结剂与电解液的协同创新

电极黏结剂和电解液是高能量密度电池系统中的关键辅助材料,传统黏结剂和电解液设计往往难以满足高容量电极材料的特殊需求,尤其针对硅基负极和高压正极等新型材料体系。近年来,通过分子结构设计和界面调控等策略,研究者开发出一系列创新性黏结剂和功能电解液,提升了高能量密度电池的循环稳定性和安全性。Hong 等^[13]提出了一种基于纤维素原纤维的新型黏结剂,用于高载量锂离子电池电极。该黏结剂源自天然木材,具有纳米级直径、高表面积和阴离子电荷密度,可促进碳添加剂均匀分散,抑制界面副反应。Zhang 等^[14]开发了一种超支化动态交联

结构聚合物电解质,该电解质在包括零下温度的宽温度范围内保持非晶态,实现了快速锂离子传导、高机械强度和稳定的界面化学性能,提升了锂金属电池的低温循环稳定性。

2.2 高安全性材料

在电动汽车的应用中,电池发生热失控、短路,甚至爆炸等安全问题制约了高能量密度电池的发展。因此,开发具有更高安全性的材料成为材料研发的重要任务,目前,研究者通过材料体系革新与界面优化来提高电池的本征安全性,涵盖固态电解质、阻燃电解液、智能隔膜等多个方向。

2.2.1 全固态电解质材料的安全创新

采用固态电解质替代液态电解液可显著提升电池热稳定性并消除泄漏及降低火灾风险,同时通过引入高温稳定聚合物骨架或陶瓷电解质等功能性材料,抑制枝晶生长,防止内短路及提高热失控触发温度。固态电解质已成为高安全性智能电池研究的核心方向。根据化学组成,目前固态电解质主要分为聚合物型、氧化物型、硫化物型及卤化物 4 类,见表 2。

2.2.2 高安全电解液与添加剂体系

尽管固态电解质前景广阔,但液态电解液因工艺成熟、界面润湿性优异,仍主导当前电池市场。为提升液态体系安全性,研究者开发了阻燃电解液、原位聚合电解质及功能添加剂,通过分子设计提高电解液的热稳定性和抗滥用性能。人工智能在阻燃电解液设计中可加速分子筛选与性能预测,大幅提高研发效率^[15]。阻燃电解液设计的关键在于溶剂化结构优化和分子结构调控,通过精确调节组分间相互作用,实现阻燃性、电化学稳定性及界面兼容性的协同提升^[16]。温度响应型智能电解液则能根据环境温度变化自主调节物理化学性质,通过溶剂化结构智能调控和分子结构动态响应,在宽温域电池和安全储能系统中展现应用价值^[17]。

2.2.3 智能隔膜与界面工程进展

智能电池的安全性可通过自修复聚合物增强。当电池内部发生热失控或机械应力时,自修复聚合物能够依靠化学键或分子间作用力的动态重组修复微裂纹和损伤,从而保障结构完整性。智能隔膜是智能电池关键内层组件,对防止短路和提升安全性至关重要。通过在隔膜中引入自修复聚合物或纳米材料,可

表 2 4 大类型固态电解质对比

固态电解质类型	聚合物	氧化物	硫化物	卤化物
材料	聚环氧乙烷及其衍生物、聚偏氟乙烯及其共聚物等	石榴石型氧化物电解质、钙钛矿型氧化物电解质等	玻璃态硫化物电解质、玻璃陶瓷态硫化物电解质等	复合金属氯化物、溴化物等
界面稳定性	柔性较好,能够在一定程度上适应电极体积变化,界面接触相对较好	化学和热稳定性较好,但材料刚性大,固—固界面接触较差;长期循环中可能出现孔隙和接触损失	材料易压实,初始界面接触较好;但与正负极可能发生副反应,长期循环中易因电极体积变化和锂沉积/剥离出现孔隙、裂纹及接触损失	与高电压正极的稳定性相对较好,但与锂金属兼容性较差;颗粒型界面在循环中也可能出现接触损失
优点	易加工、易规模化制备,柔性和界面贴合性较好	安全性较高、热稳定性好、电化学稳定性较高	离子电导率高、机械延展性较好、易压实、初始界面接触好	高电压正极侧稳定性较好,较易压实,部分体系合成功艺相对简单
缺点	室温离子电导率偏低,高电压稳定性有限;机械强度与离子传导性能较难兼顾	界面接触较差,材料脆,易产生裂纹;长期循环可能形成界面孔隙,部分体系需要一定压力或柔性界面层维持接触	对空气和水分敏感,可能释放H ₂ S,界面副反应明显;长期循环中容易出现界面孔隙、裂纹和接触衰退,通常需要一定的持续堆叠压力;部分含Ge体系原料成本较高	多数体系具有吸湿性,与锂金属兼容性较差;颗粒型电池通常需要一定堆叠压力,部分组成还存在成本问题
技术难度	中:需要兼顾室温离子电导率、机械性能和循环稳定性	高:材料脆性、致密化、薄层制备,以及长期固—固界面接触控制	高:空气和水分控制、界面副反应、长期固—固接触及低压运行	高:材料纯度、湿度控制、负极界面稳定性及低压运行

恢复结构完整性和绝缘性能,同时赋予良好的离子透过性、机械强度及温度响应、自关闭和枝晶抑制等多功能特性,进而增强电池本征安全性。Hu 等^[18]制备的氟功能化二氧化钛复合隔膜,通过表面定向组装实现优异热稳定性、机械性能、电解液润湿性和离子电导率,在 250℃ 下仍保持结构完整,提升锂离子电池的安全性和电化学性能。Dong 等^[19]在商用隔膜上涂覆 SiO₂ 包覆石蜡微球,当温度升至 115℃ 时微球破裂释放石蜡,阻塞锂离子传输,实现高温断路,进一步提高电池防滥用能力。

2.3 长寿命材料

电池循环寿命直接影响电动汽车全生命周期成本。延长寿命的关键在于优化材料性能和界面稳定性。研究者通过纳米结构调控和界面设计,提升电极导电性、缓解容量衰减,例如利用碳纳米管、石墨烯、合金化或复合材料增强负极稳定性,从而显著提高电池循环性能。

2.3.1 纳米结构设计与导电网络构建

纳米结构设计通过优化电极物理化学特性显著提升性能。纳米级构筑增加比表面积,产生三重效应:增强电极/电解液界面接触,降低电荷转移阻抗;缩

短锂离子扩散路径,改善反应动力学;暴露更多活性位点,提高电化活性。纳米结构还可缓解体积膨胀,一维纳米线/纳米管通过弹性形变吸收应力^[20],三维多孔结构通过孔隙网络分散膨胀应力^[21],降低机械破坏风险。此外,高表面能纳米材料为界面工程提供平台,通过纳米级包覆可抑制副反应,提升循环稳定性。

导电网络构建可显著提升电极的电子导电性和锂离子传输效率,从而增强电池倍率性能和循环稳定性。常用导电材料包括碳材料、金属纳米线和导电聚合物,通过构建三维导电网络,可将纳米结构电极均匀分布在导电基体中,形成高效电子通道并改善电解液浸润。Fu 等^[22]通过层状结构工程制备的碳纳米管气凝胶薄膜,展现了高导电率和多孔结构优势,提升了电子/离子协同传输效率。Zhang 等^[23]的空间层次碳宿主和 Yang 等^[24]的多级孔碳电极,则通过微沟道和连续导电网络优化离子分布和电子通路,显著改善高容量电极的传输极化问题。这些设计展示了导电网络在提升电极性能和延长电池寿命中的核心作用。

2.3.2 合金化与界面稳定化

合金化和界面稳定化技术作为提升电池性能的技术手段,通过将活性材料与惰性或导电金属结合形

成金属间化合物或固溶体,可显著改善电极材料的结构稳定性和电化学活性。以硅基负极为例,Sun等^[25]通过引入铁氟硅酸盐改性硅基复合负极,有效抑制体积膨胀并促进稳定SEI膜形成,从而改善循环稳定性和倍率性能。在界面稳定化方面,研究重点集中于人工SEI层构建和界面调控以抑制副反应与枝晶生长。Wu等^[26]在锂金属表面原位构建LiF-Li₃N复合保护层,显著延长了多种硫化物电解质体系的循环寿命;此外,Yan等^[27]通过调控短程有序界面结构,提高材料屈服强度的同时保持良好的塑性,为电池材料界面设计提供新思路。

3 智能电池的加工技术

智能电池的加工技术在其高效、安全和长寿命应用中至关重要。除了传统生产工艺,还需在制造过程中融入精细化设计与严格控制,从材料选择到组件设计的每一环节均保持高度一致性与协调性。精密制造技术通过自动化和精细化工艺,确保电池性能稳定、质量可靠。

3.1 精密制造技术

精密制造技术是智能电池制造的核心,直接影响结构设计、性能和寿命。随着电池的体积缩小和能量密度提升,对工艺精度要求不断提高。激光切割与焊接、3D打印和薄膜技术等新兴工艺,使电池组件设计更灵活、内部结构更可控,为高效、稳定的智能电池生产提供保障。

3.1.1 激光切割与焊接技术

激光切割和焊接技术在智能电池加工中具有重要作用。激光切割通过高能束聚焦材料,实现微米级精度的无接触切割,可快速加工复杂形状,保证组件尺寸精确,减少机械应力和材料损伤。激光焊接用于电池单体连接和封装,通过高强度冶金结合实现精确焊接,热影响区小,避免对内部敏感材料造成性能损失。相比传统焊接或机械连接,激光焊接提高了接头强度、抗震性能和耐腐蚀性,显著提升电池组的长期可靠性和安全性。

3.1.2 3D打印技术

3D打印技术通过逐层堆积材料构建复杂结构,在智能电池制造中受到广泛关注^[28]。该技术能够精

准打印复杂电池组件,实现结构优化、功能集成和高自由度设计,支持定制化电池外形、电极排列及电池组集成方式。此外,3D打印可快速制作原型,缩短研发周期,并适用于小批量定制化生产。尽管具有显著优势,3D打印仍面临材料性能、打印速度、规模化生产和质量一致性等挑战,需要开发高性能材料、提升打印效率并优化质量控制策略,以推动其在智能电池制造中的广泛应用。

3.1.3 薄膜技术

薄膜技术是一种精密制造手段,通过在电极、隔膜和电池外壳等关键部件沉积均匀薄层,实现纳米至微米级的精确厚度与结构控制^[29]。该技术可调节导电性、绝缘性、热导性等材料特性,支持金属、陶瓷和聚合物等多种材料沉积,并可形成多层功能化结构,优化电极导电性和稳定性、隔膜离子传导性及热管理性能。薄膜技术在智能电池中广泛应用,包括电极优化、隔膜改进、热管理系统设计及外壳封装,显著提升能量密度、循环寿命、充放电效率和安全性,同时增强机械强度、抗腐蚀性和抗湿性,为高性能智能电池提供可靠保障。

3.2 传感架构搭建与布置方式

智能电池作为新一代电动汽车动力系统的核心,其智能化的实现高度依赖于传感技术的发展^[30]。传感器作为智能电池系统的“感受器”,通过实时捕捉电池内部的电-热-力-气等多物理场信息^[31],为BMS提供精准的状态感知数据,从而实现从被动防护到主动安全调控的模式转变。有效克服了传统BMS仅依赖电压、电流等宏观电信号,无法感知电池内部如局部产气、析锂、应力累积等微观状态的局限性,是实现主动安全预警的核心。

3.2.1 智能电池传感技术体系架构

智能电池的传感系统是一个多层次、多维度的复杂监测网络,其技术架构可分为感知层、传输层和处理层3个层次,如图3所示。

感知层是智能电池系统的前沿,负责实时获取电池的电压、电流、温度、压力、气体成分等物理和化学参数。从功能上看,传感器可分为2类,一类是传统的宏观电-热传感器,包括电压、电流和温度传感器,为BMS的SOC估计、SOH评估及过充、过放保护提供基础数据;另一类是近年来备受关注的、可引入电池

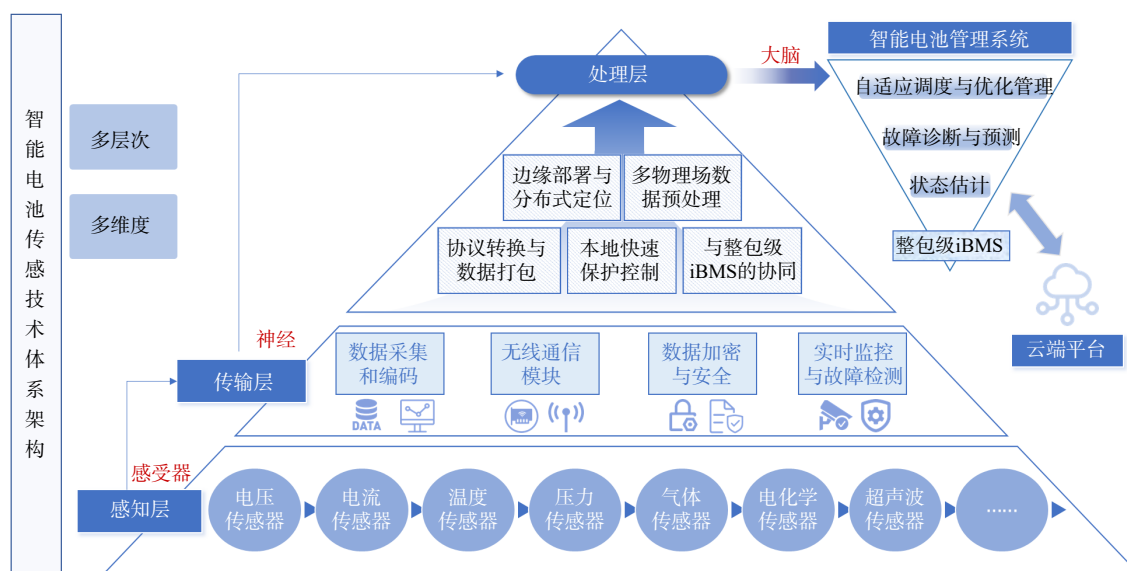


图3 智能电池传感技术体系架构

监测的状态传感器,如压力、气体和电化学传感器,支持主动安全和早期故障预警。具体来说,电压传感器监测端电压,为核心状态估计提供依据;电流传感器用于判断充放电及负载状态;温度、压力和气体传感器可捕捉异常变化,实现热失控早期预警与结构健康监测;电化学传感器可原位监测电压、电流、阻抗等关键参数,并正向微型化、多功能集成发展;超声波传感器利用介质传播特性差异,对电极缺陷和材料膨胀进行无损检测,实现内部结构健康评估。

传输层将感知层采集的多源数据传输至单体或模组侧的边缘处理芯片进行预处理。随着传感器数量增加和采样频率提升,数据规模和传输带宽需求显著增长,对可靠性、实时性、低时延和数据安全提出更高要求。为满足这些需求,传输层通常集成数据采集与编码、无线通信、数据加密以及实时监控与故障检测等关键功能。数据采集与编码模块负责对原始数据进行压缩和编码,为高效传输提供基础;无线通信模块如Wi-Fi和蓝牙支持多源数据的低功耗实时传输;加密机制保障数据隐私与完整性,防止篡改或丢失;嵌入式监控与故障检测可实时发现数据丢失或传输延迟等异常,确保信息流稳定可靠。

处理层主要负责对本地多物理场信号进行预处理并实现快速安全保护,其核心为部署在电池单体或模组侧的边缘处理芯片,作为分布式边缘计算节点就近接入传感器,实现单体或局部区域的感知与初步处理。针对感知层采集的电、热、力、气等多源信号,处

理层完成去噪、零漂校准、特征提取及压缩编码,将海量数据转化为结构化特征量,降低传输负载并提升后续分析效率。同时,处理层对特征数据进行格式规范、协议转换和数据打包,以满足电池包通信总线及上层iBMS接口要求。在安全敏感场景下,处理层可依据阈值或简化规则对过温、过压、异常电流等风险实施快速本地保护,如限流或断开,缩短故障响应时间并抑制风险扩散。上报的多源特征数据构成整包iBMS的数据基础,而全局状态估计、故障诊断及自适应调度等高级功能由iBMS统一完成,第4节从系统管理角度进行专门讨论。

3.2.2 传感器布置方式

1) 传感器外置。外置传感器系统通过非侵入方式监测电池外部特征参数,具有安装简便且不影响电池内部结构的特点,通常用于电池组整体性能监测。由于安装灵活、通用性强且成本低,外置传感器适用于大多数监测场景。常见类型包括红外热像仪、超声波传感器、气体传感器阵列、应变片及霍尔电流传感器等。这些传感器可从电池表面获取温度分布、壳体形变、逸出气体成分及充放电电流等信息,并可间接反映内部结构变化,具备非接触测量、高电气隔离度和可视化优势。然而,由于测量位置受限于电池外部,其信号存在一定时滞,且易受机械振动和环境干扰影响。

2) 传感器内置。内置传感器直接植入电池内部关键位置,可实时监测电池的物理参数,并实现电化学过程的多参数原位采集。此类传感器通常采用微

型化设计,并与处理层联动,在异常发生时辅助系统及时调整工作状态,防止过充、过放等安全风险。典型类型包括微型热敏电阻、光纤光栅、薄膜压力传感器、三电极系统及阻抗传感器等。内置传感器可对电池内部核心温度、应变、压力、电极电位及电化学阻抗谱等多物理场参数进行高保真采集,实现实时状态监测、局部异常快速响应、抗干扰以及热失控早期预警。然而,其规模化应用仍受限于耐电解液腐蚀的封装工艺、对电池密封性和循环寿命的潜在影响、高昂的集成成本,以及复杂信号解耦算法的开发难度。

4 智能电池的管理

BMS 作为电池系统的“大脑”,通过实时监测电池状态并优化充放电过程。主流 BMS 架构主要包括集中式和分布式两类:前者结构简单、成本较低,但受限于长线束带来的抗干扰问题及中央控制器的算力瓶颈;后者虽具备良好的扩展性并减少了线束复杂度,但在模组间数据同步与协同控制方面仍面临挑战。随着智能电池对海量多物理场数据实时处理需求的提升,传统 BMS 架构面临算力受限与通信延迟并存的问题。单纯依赖本地计算难以支撑复杂深度学习模型运行,而完全依赖云端又面临通信延迟与隐私风险。针对上述痛点,智能电池的边缘-车端-云端闭环框架通过算力分配优化了系统效能。其中,边缘侧(单体/模组级)负责高频数据采集与初步特征提取,实现对微秒级故障(如内部短路、瞬态产气)的快速响应;云端利用高算力开展长周期 SOH 建模与模型迭代;车端的整包级 iBMS 负责云端模型部署与局部快速控制,实现对多源数据的高效处理与精准决策,推动电池管理向更高精度和智能化方向发展^[32-33]。

4.1 状态估计

传统状态估计多采用等效电路模型或电化学模型,通过参数辨识与滤波算法实现 SOC 与 SOH 估算。其中,扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)^[34]和无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)^[35]是常用方法,可在非线性系统下实现动态估计。但此类方法对参数敏感,难以在实车复杂工况下保证精度。随着 AI 与大数据的发展,数据驱动的状态估计方法逐渐成为主流^[36]。利用机器学习与深度

学习模型,可通过大量历史与实时数据学习电池的非线性特征,实现 SOC、SOH、功率状态(state of power, SOP)的高精度预测^[37]。LSTM 模型能够捕捉电池退化过程中的时间序列特征,实现 SOC 预测^[38]。Yu 等^[39]提出了基于机器学习的电池包内单体 SOH 评估方法,采用双向门控循环单元精准估计支路充电容量,融合老化、不一致性与工况特征,通过支持向量回归实现全单体 SOH 高精度预测。此外,混合模型结合模型驱动与数据驱动的优势,可在数据稀缺或噪声较大的情况下保持较高精度与鲁棒性。

智能电池终端通过嵌入式多源传感器阵列,实时采集电压、电流、温度和应力等多维数据,并在处理层完成初步预处理后发送至 iBMS。随后,数据经智能终端设备 T-box 上传至云端高算力平台,用于 SOC、SOH 的估计以及预测模型的训练,构建数据驱动的深度学习模型。训练完成的模型下发至车端 iBMS,用于电池状态实时评估和控制决策。同时,依托云端大数据平台的在线迁移与增量学习机制,模型能够在电池全生命周期内持续更新,形成边缘与云协同的闭环优化体系,从而有效应对电池非线性、时变和老化带来的精度衰减问题,提升状态估计的鲁棒性、泛化能力和长期可靠性。

4.2 故障诊断与预测

故障诊断与预测是智能电池管理系统的关键功能,旨在实现从被动防护向主动安全调控的转变。传统 BMS 依赖电压或温度阈值判断,难以应对复杂多变的电化学退化与安全风险,而智能化诊断系统通过多源传感与 AI 数据驱动融合,实现了高精度、多维度的健康监测与预测性维护^[40],见表 3。iBMS 利用嵌入式微传感器实时监测单体内部参数,实现从外部宏观信号到内部微观过程的精准感知。结合电-热-力-气等多物理场耦合模型,在早期识别锂枝晶生长、产气反应等潜在故障及其演化趋势,实现热失控预警。进一步地,基于 AI 的故障诊断模型通过对电压、电流、温度响应等时序特征进行联合分析,实现自动特征提取、模式识别。在此基础上,构建面向故障演化的时序预测模型,对电池故障指标的未来变化趋势进行预测,为运行策略优化和预防性维护提供决策支持。

表 3 传统 BMS 故障诊断与智能电池故障诊断体系对比

对比维度	传统BMS故障诊断	智能电池多物理场故障诊断
感知数据源	仅依赖电压、电流、温度	融合“电压、电流、温度、应变、压力、气体、声学”等多源信号
诊断方法	基于固定阈值或简单规则	AI数据驱动
响应模式	被动响应(故障发生后报警,滞后明显)	主动预警(识别微观异常,如析锂、微裂纹,提前干预)
准确率与泛化性	易受工况干扰,误报率高,参数漂移后失效	具备自适应能力,通过云端迭代更新模型,鲁棒性强
防护层级	仅做切断回路处理	分级防护:功率限制、热管理介入、主动隔离、提前排气

4.3 自适应调度与优化管理

在实现精确状态估计与智能诊断的基础上, iBMS 的最终目标是通过自适应调度与能量优化管理, 提升系统能效、延长寿命并保障运行安全。传统 BMS 采用固定策略控制电池充放电, 难以适应复杂多变的工况。在智能电池体系中, 边缘侧负责实时采集单体/模组的多源信息, 并进行数据清洗与特征提取, 为车端的整包级 iBMS 提供可靠的输入。基于处理后的数据, iBMS 能够执行快速局部响应, 包括动态充放电策略调整、热管理和功率分配优化, 从而在快充或高负载条件下减少过充、过热风险, 提升电池组一致性与安全性。与此同时, 云端平台对 iBMS 上传的聚合数据进行大规模分析和深度学习模型训练, 并将优化策略回传 iBMS, 实现边缘-车端-云端闭环协同。

5 工程应用场景与产业化挑战

从工程落地角度看, 智能动力电池在向车规级量产转化过程中仍面临材料、感知与算法等多维约束: 一方面, 高镍正极、硅基负极及固态电解质虽可提升能量密度和安全潜力, 但受制于原材料价格波动、制程窗口窄、界面阻抗与良率一致性控制困难, 与现有产线兼容性不足, 短期内难以实现低成本规模化应用; 另一方面, 多物理场传感虽能提升热失控预警能力, 但在车规环境下需在有限空间内兼顾长期可靠性、封装与接口复杂度, 工程上往往需在监测维度与成本、可靠性之间折中取舍; 同时, 引入复杂模型与 AI 算法的 iBMS 受限于车载算力、功耗及功能安全法规, 对模型压缩、可解释性、验证与跨平台泛化能力提出更高要求。实际应用中, 不同的滥用、火灾或极端工况场景对材料体系、安全结构、传感配置与 iBMS 策略的侧重各不相同, 智能电池的工程实现本质上是多技术模块在系统层面的协同优化与取舍, 而

非单一技术的简单叠加。

6 结论与展望

面向电动汽车对高能量密度、高安全性和长寿命的需求, 智能动力电池正由以材料性能和被动防护为核心的传统路线, 转向融合材料本征安全、多物理场原位感知与智能管理的系统级解决方案。从系统架构看, 智能动力电池以边缘-车端-云端分层协同体系为核心: 单体或模组级的边缘侧集成多物理场微型传感器和边缘计算芯片, 可实时采集电-热-力-气信号并预处理; 车端整包级 iBMS 融合边缘数据与模型, 实现 SOC/SOH 等关键状态的高精度估计、故障诊断和自适应调度, 承担实时决策与控制中枢功能; 云端依托历史数据和高算力平台开展老化机理分析、SOH/RUL 预测及模型迭代, 并下发更新至车端, 实现全寿命闭环优化。然而, 面向高安全、高效率和绿色低碳发展, 智能动力电池仍需在材料、感知、管理与标准体系等方面持续突破。在材料层面, 应统筹能量密度、安全性、寿命、成本与可回收性; 在感知层面, 发展车规量产的多物理场原位传感技术, 实现传感器与电化学体系兼容及结构一体化; 在管理层面, 构建数据驱动的 iBMS, 结合数字孪生与端边云协同, 实现全生命周期状态感知、诊断与自适应管理; 同时推进安全标准、测试规程和评价体系建设, 加强与车联网、智能电网及回收体系的融合。

参考文献(References)

[1] 洪吉超, 梁峰伟, 杨京松, 等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 49–59.

[2] Cheng Z L, Lin H H, Liu Y M, et al. A stress-buffering hierarchically porous silicon/carbon composite for high-energy lithium-ion batteries[J]. Advanced Functional Materials,

- 2026, 36(34): 2505207.
- [3] Chen X, Cheng W D, Liu H Y, et al. Research progresses on nano-structured silicon-based materials as anode for lithium-ion batteries[J]. *Materials*, 2025, 18(4): 830.
- [4] Tian Y F, Li G, Xu D X, et al. Micrometer-sized SiMg₂O₃ with stable internal structure evolution for high-performance Li-ion battery anodes[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(15): 2200672.
- [5] Mu Y B, Huang C Z, Chu Y Q, et al. Revolutionizing high-areal-capacity silicon anodes with a multi-level carbon construction strategy for practical Li-ion batteries[J]. *Carbon Energy*, 2025, 7(6): e702.
- [6] Huang C Y, Xu X Y, Chen D S, et al. Enhancing rate performance of Si@C anode with pore architecture regulated by foaming agent pre-blended with bead mill homogenized Si and graphene[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 112: 115571.
- [7] Tian Y F, Tan S J, Yang C P, et al. Tailoring chemical composition of solid electrolyte interphase by selective dissolution for long-life micron-sized silicon anode[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 7247.
- [8] Dong H Y, Guan Z R, Wang H, et al. Failure mechanism study of long-term cycling pouch cells with lithium-rich manganese-based cathode material[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024, 12(49): 17671–17680.
- [9] Chen T D, Ma L X, Hai C X, et al. Enhanced cycling stability of lithium-rich manganese-based cathodes via gradient modification of Mn₂O₃[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 629: 235967.
- [10] Song H M, Münch K, Liu X, et al. All-solid-state Li-S batteries with fast solid-solid sulfur reaction[J]. *Nature*, 2025, 637(8047): 846–853.
- [11] Wang X C, He Y F, Liu S Y, et al. Dynamic concentration of alloying element on anode surface enabling cycle-stable Li metal batteries[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(50): 2307281.
- [12] Guo J C, Tan S J, Zhang C H, et al. A self-reconfigured, dual-layered artificial interphase toward high-current-density quasi-solid-state lithium metal batteries[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(24): 2300350.
- [13] Hong Y K, Kim J H, Kim N Y, et al. Cellulose elementary fibrils as deagglomerated binder for high-mass-loading lithium battery electrodes[J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(1): 112.
- [14] Zhang J, Chou J, Luo X X, et al. A fully amorphous, dynamic cross-linked polymer electrolyte for lithium-sulfur batteries operating at subzero-temperatures[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(5): e202316087.
- [15] Zhan Y X, Ren X J, Zhao S, et al. Enhancing prediction of electron affinity and ionization energy in liquid organic electrolytes for lithium-ion batteries using machine learning[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 629: 235992.
- [16] Cui Z Z, Jia Z Z, Ruan D G, et al. Molecular anchoring of free solvents for high-voltage and high-safety lithium metal batteries[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2033.
- [17] Chen S S, Li Y, Feng Y Y, et al. Thermally responsive polymers for overcoming thermal runaway in high-safety electrochemical storage devices[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2023, 7(8): 1562–1590.
- [18] Hu X, Li Y H, Chen Z, et al. Anchoring porous F-TiO₂ particles by directed-assembly on PMIA separators for enhancing safety and electrochemical performances of Li-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 443: 141926.
- [19] Dong H, Wang P C, Yan S S, et al. A thermoresponsive composite separator loaded with paraffin@SiO₂ microparticles for safe and stable lithium batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 62: 423–430.
- [20] Fan X M, Cai T, Wang S Y, et al. Carbon nanotube-reinforced dual carbon stress-buffering for highly stable silicon anode material in lithium-ion battery[J]. *Small*, 2023, 19(30): 2300431.
- [21] Gao X J, Jiang L L, Lu X N, et al. High performance flexible lithium-ion battery anodes: Carbon nanotubes bridging bamboo-shaped carbon-coated manganese oxide nanowires via carbon welding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 971: 172728.
- [22] Fu C, Sheng Z Z, Zhang X T. Laminated structural engineering strategy toward carbon nanotube-based aerogel films[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(6): 9378–9388.
- [23] Zhang S Y, Wang D H, Xu X H, et al. Spatially hierarchical carbon enables superior long-term cycling of ultrahigh areal capacity lithium metal anodes[J]. *Matter*, 2022, 5(4): 1263–1276.
- [24] Yang Z P, Yang X Y, Yang T T, et al. 3D printing of carbon tile-modulated well-interconnected hierarchically porous pseudocapacitive electrode[J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 54: 51–59.
- [25] Sun J C, Liu X Y, Zheng P L, et al. Mitigating the volume expansion and enhancing the cycling stability of ferrous fluorosilicate-modified silicon-based composite anodes for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(38): 25747–25760.
- [26] Wu M, Li M Q, Jin Y M, et al. *In situ* formed LiF-Li₃N interface layer enables ultra-stable sulfide electrolyte-based all-solid-state lithium batteries[J]. *Journal of Energy Chem-*

- istry, 2023, 79: 272–278.
- [27] Yan Y Q, Cha W H, Liu S D, et al. Ductilization of 2.6–GPa alloys *via* short-range ordered interfaces and supranano precipitates[J]. *Science*, 2025, 387(6732): 401–406.
- [28] Reynolds C D, Alsofi G, Yang J R, et al. Design of slurries for 3D printing of sodium-ion battery electrodes[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 110: 161–172.
- [29] Li Y X, Wu Y J, Wang Z X, et al. Progress in solvent-free dry-film technology for batteries and supercapacitors[J]. *Materials Today*, 2022, 55: 92–109.
- [30] Meng Q Q, Huang Y X, Li L, et al. Smart batteries for powering the future[J]. *Joule*, 2024, 8(2): 344–373.
- [31] 马敬轩, 赖钦麟, 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.
- [32] 王亚楠, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 电动汽车动力电池研究展望: 智能电池、智能管理与智慧能源[J]. *汽车工程*, 2022, 44(4): 617–637.
- [33] 孙宾, 张陈峰. 基于大数据与AI协同的电动汽车动力电池智能诊断研究[J]. *汽车维护与修理*, 2025(19): 96–97.
- [34] Xie J M, Wei X Y, Bo X Q, et al. State of charge estimation of lithium-ion battery based on extended Kalman filter algorithm[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11: 1180881.
- [35] Zhang H P, Hu B, Yu Z L, et al. State-of-charge estimation of lithium-ion battery based on improved equivalent circuit model considering hysteresis combined with adaptive iterative unscented Kalman filtering[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114105.
- [36] 洪吉超, 梁峰伟, 杨海旭, 等. 大数据驱动动力电池智能安全管理与控制方法研究[J]. *汽车工程*, 2023, 45(10): 1845–1861.
- [37] 戴国洪, 张道涵, 彭思敏, 等. 人工智能在动力电池健康状态预估中的研究综述[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(4): 391–408.
- [38] 洪吉超, 裴佳琦, 梁峰伟, 等. 基于麻雀搜索优化LSTM的实车动力电池SOC估计研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(12): 41–50.
- [39] Yu Q Q, Nie Y W, Guo S S, et al. Machine learning enables rapid state of health estimation of each cell within battery pack[J]. *Applied Energy*, 2024, 375: 124165.
- [40] Huo Q, Ma Z K, Zhang T, et al. Lightweight fault diagnosis for EV battery packs *via* SpikingFormer and frequency slice wavelet transform[J]. *eTransportation*, 2025, 26: 100503.

Development and thoughts on intelligent power batteries triggered by thermal runaway incidents in electric vehicles

HONG Jichao^{1,2}, LI Meng^{1,2}, DENG Shuyuan^{1,2}

1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528000, China

Abstract With the rapid development of the electric vehicle industry, higher requirements are imposed on the safety, energy density, and service life of power batteries. However, occasional thermal runaway incidents reveal limitations of traditional battery management systems in early fault warning and active protection. Intelligent battery technology therefore emerges as a promising solution. By integrating multi-source sensors, edge computing units, and intelligent algorithms, this technology enables a transition from passive protection to active safety management. This study focuses on thermal runaway in electric vehicles and systematically analyzes key technologies of intelligent batteries from three perspectives, including intrinsic material safety, manufacturing and sensing systems, and intelligent management strategies. The discussion covers the development of high energy density and high-safety materials, long-life material optimization, precision manufacturing processes, and intelligent sensing architectures. In addition, the critical functions of intelligent battery management systems in fault diagnosis, state prediction, and adaptive optimization are clarified. Future development of intelligent battery technology advances toward higher intelligence and enhanced sustainability, providing safe and efficient energy solutions for electric vehicles.

Keywords electric vehicle; intelligent battery; battery materials; multi-source sensing; safety management ●



(责任编辑 赵庆圆)