

引文格式:王旭阳,王子鉴,胡玲玲,等.电动航空器动力电池智能传感技术与超声监测研究现状及展望[J].航空制造技术,2026,69(19):26020244.

WANG Xuyang, WANG Zijian, HU Lingling, et al. Research progress and perspectives on intelligent sensing technologies and ultrasonic monitoring for electric aircraft batteries[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 26020244.

电动航空器动力电池智能传感技术与超声监测研究现状及展望

王旭阳¹,王子鉴¹,胡玲玲¹,苏众庆²,香 勇³,李叶海¹

(1. 中山大学,深圳 518107;

2. 香港理工大学,香港 999077;

3. 清能博创(珠海)科技有限公司,珠海 519085)

[摘要] 电动航空器动力电池长期服役于高倍率放电、快速补能、温度气压波动以及振动冲击等复杂工况,其性能退化与安全失效过程涉及电化学、热学和力学行为的多场耦合,对状态监测与安全预警提出了远高于地面应用的要求。传统电池管理系统主要依赖电压、电流和温度等外部参数进行状态估计,难以直接感知电池内部结构演化及早期失效过程。为提升电池健康管理与安全预警能力,智能电池技术逐渐成为研究热点。本文首先分析了电动航空器动力电池面临的极端服役环境、退化与损伤机制以及状态与安全监测需求,随后讨论了薄膜传感和光纤传感等智能电池关键技术的发展现状,重点总结了超声技术在荷电状态与健康状态评估、循环退化与机械损伤识别,以及热失控早期预警等方面的研究进展。最后,对航空动力电池智能监测与健康管理体系的发展趋势与关键挑战进行了展望。

关键词: 电动航空器;锂离子电池;智能电池;超声监测;状态评估;热失控预警

中图分类号: V242

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26020244



王旭阳

博士研究生,研究方向为锂电池超声健康监测。

在新一代航空技术变革的背景下,电动航空器正成为未来绿色航空体系的重要组成部分,并逐步由单一平台向高频次、长航时及高可靠性的综合任务载体演进,其应用已覆盖低空无人系统、城市空中交通(UAM)及通用航空等多个领域。特别是在低空经济快速发展的驱动下,其在物流运输、农林植保、应急救援及精密测绘等领域展现出巨大的产业潜力与社会价值^[1-2]。在这些高能耗应用场景中,动力系统的性能与安全性成

为决定任务成功率和飞行安全的关键因素。锂离子电池(LIBs)凭借其高能量密度、轻量化设计、长循环寿命及高电压平台等显著优势,已成为电动航空器的主要动力来源^[3-4]。然而,电动航空器作业时常常面临高倍率充放电、剧烈机械振动与冲击以及环境温度气压波动等极端工况^[5],这将显著加速电池内部电化学与结构退化,易诱发电极开裂、产气、析锂、电解液局部退浸润等损伤演化,并进一步导致热失控等灾难性失效,这对

收稿日期: 2026-06-15; 退修日期: 2026-07-21; 录用日期: 2026-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(52005493)

通信作者: 李叶海,副教授,博士,研究方向为无损检测与结构健康监测、柔性超声传感器及网络。

香勇,正高级工程师,博士,研究方向为锂电池及其材料表征和检测、锂电池安全检测与健康监测、材料无损检测。

动力电池在能量密度、功率密度、循环寿命、快充性能及安全可靠性等关键指标上提出了更高要求,也使其荷电状态(SOC)、健康状态(SOH)及潜在损伤呈现更强的动态性和隐蔽性^[6]。目前,传统电池管理系统(BMS)主要依赖电压、电流、温度等外部信号进行状态估计与安全控制,其监测对象仍局限于宏观电学与热学响应。受此限制,具备原位感知、自诊断与状态预测能力的“智能电池”概念逐渐受到关注。智能电池不再只是被动供能单元,而是集成感知、诊断、预测与管理能力于一体的主动化储能系统,其核心在于通过多源传感和数据融合,实现对电池内部演化的深层认知^[7]。围绕这一目标,面向电池内部状态感知的智能监测技术迅速发展,形成了包括薄膜、光纤以及超声等多种传感技术路径^[8-9]。其中,超声传感能够以无损、非侵入的方式获取具有物理可解释性的内部信息^[10]。由于其对层间界面、材料弹性和内部缺陷较为敏感,超声技术在电池内部结构演化表征、状态评估与早期安全预警等方面展现出显著优势,被认为是实现动力电池深层感知与智能监测的重要技术方向之一^[11]。

1 电动航空器动力电池关键挑战

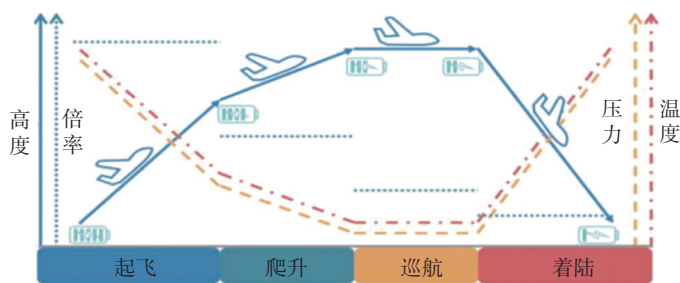
电动汽车的快速发展与普及推动了电动航空器的研究开发,涵盖从低空出行的电动垂直起降航空器(eVTOL)到高空巡航的电动固定翼航空器。然而,相较于地面交通,航空环境在温度、气压和功率需求等方面均更为严苛^[12],导致动力电池出现快速老化和服役寿命缩短的问题,对飞行安全构成了重大挑战^[6]。用于航空领域的锂离子电池性能要求已不再局限于单一的高能

量密度指标,而是必须在高能量密度、高功率密度、快速补电能力、长循环寿命和高安全性之间实现多目标协同优化。研究表明,电动航空器在典型飞行任务剖面(包括起飞、悬停、爬升、巡航及着陆等阶段)中呈现出显著差异化的动态功率需求^[13],如图1(a)所示。其中,起飞与着陆悬停阶段属于极端的高功率脉冲工况,对电池瞬态峰值输出能力及热管理能力提出了极高要求;而巡航阶段则以相对稳定的中低功率输出为主,主要考验电池的持续供能与能量效率^[14]。总体而言,航空动力电池长期运行于高于地面电动汽车的平均放电倍率条件下,并在起飞、爬升等高功率阶段承受剧烈的功率波动^[15]。与此同时,高低温与高空低气压航空环境、不可避免的碰撞冲击与机械振动,以及为应对复飞或迫降而设定的严格备用能量冗余约束,进一步使动力电池面

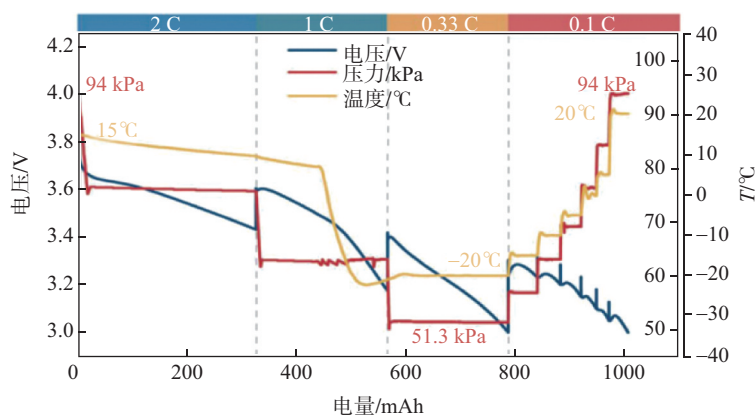
临复杂的安全性和可靠性挑战^[16]。低空经济在经历了2024—2025年的政策爆发期后,进入了商业化落地的“验证期”,然而相应安全监管体系却严重滞后。2025年11月,工业和信息化部装备工业发展中心发布《低空航空器动力电池技术路线图(2025版)》,明确提出低空航空动力电池适航安全相关要求和方向^[17]。2026年5月,中国民用航空局设立低空安全司,并将低空安全统筹作为其重要职责之一。在此背景下,锂离子电池在航空极端运行条件下所表现出的性能不确定性和潜在安全风险,已成为制约电动航空器大规模商业化应用的关键瓶颈之一。

1.1 极端服役工况条件

电动航空器在不同的飞行阶段对功率的需求呈现出巨大的差异,这主要取决于飞行器在不同阶段所需克服的物理力(重力与空气



(a) 电动飞机主要任务剖面段示意图



(b) 模拟飞行条件下的温度、空气压力以及相应的首循环电化学曲线

图1 电动飞机极端动态工况^[13]

Fig.1 Variations of flight conditions for electric aircraft^[13]

阻力)的本质区别,以及其气动设计的固有特征。以eVTOL锂离子电池为例,巡航阶段所需功率密度通常约为150~350 W/kg,对应放电倍率约0.75~1.5 C;而起飞和降落悬停阶段所需功率密度可达500~900 W/kg,对应放电倍率约2.5~4.5 C。且若电池能量密度较低或电池质量占整机质量的比例较小,则单位电池质量所需承担的功率负荷将进一步增大,实际放电倍率可能升高至6 C;整个航程中,电池的平均放电倍率通常在1 C以上,远高于电动汽车在城市工况下的0.1 C及高速行驶时的0.3 C^[5]。这表明,电动航空器动力电池不仅需要关键飞行阶段承受高功率放电负荷,还需在较高平均放电倍率下持续运行,从而显著放大其热、力与电化学耦合响应。除高倍率放电外,快速充电也是航空动力电池区别于地面电池系统的另一关键特征。UAM强调高频次的周转和运营效率,航空器往往需要在极短时间内完成补能,以支撑下一阶段的飞行任务^[18]。相关研究指出,面向UAM/eVTOL应用的动力电池通常需要在5~10 min内补入足以完成下一次典型飞行任务的可用能量,其大多数充电事件本质上属于快充工况,而这与电动汽车以家庭或工作场所慢充为主的充电模式存在显著差异^[19]。

航空环境因素进一步增加了动力电池服役条件的复杂性。对于主要运行于低空空域(通常在1000英尺以下)的eVTOL,其外部环境在地面交通场景类似,需要考虑宽温域环境(-20~60 °C)对电池性能和安全性的影响。除外部环境外,航空动力电池长期工作于更高倍率条件,导致内部热积累快速增加,其热负荷水平明显高于电动汽车动力电池^[20]。根据电池产热与电流平方成正比关系,典型eVTOL动力电池(1 C)产热水平可达到电动汽车电池(0.1 C/0.3 C)的9倍或100倍,使其

热管理系统面临严峻挑战^[6]。对于处于高空巡航状态的电动飞机,以及低空飞行器航空运输过程,动力电池还可能暴露于更加极端的低温低压环境中^[21]。如图1(b)所示^[13],在模拟飞行条件下,爬升到17000英尺时,温度会降低至-20 °C,气压则大幅跌落至51.3 kPa,低温低压耦合环境将进一步加剧电池热安全与服役可靠性问题。

除环境、电热负荷外,动力电池运行过程中还不可避免地受到持续振动、碰撞及着陆冲击等机械载荷作用,这同样属于航空动力电池不可忽视的极端服役工况,对其性能衰减与安全可靠性提出了更高要求^[22]。NASA针对eVTOL储能系统的动态测试研究表明,机械滥用诱发的内部短路与热失控等失效事件,已成为eVTOL电池设计中的核心安全问题之一^[12]。同时,电芯在动态载荷作用下的失效极限往往显著低于准静态条件下的失效极限,说明传统静态机械评价方法可能低估真实飞行工况下的安全风险^[23]。

综合来看,航空动力电池所承受的极端工况并非单一静态负荷,而是高功率脉冲放电、快速补能、环境变化及机械振动等共同作用下形成的动态复合工况。这种服役特征显著加剧了电池内部的热-力-电耦合行为,使容量衰减、阻抗增长、局部损伤和安全失效的演化过程更加动态且隐蔽,并对开展电池退化机理研究、状态评估与安全监测提出了更高要求。

1.2 退化与损伤机制

对于地面电动交通而言,容量衰减和内阻上升通常能够较好地表征电池老化状态;然而在低空飞行器等航空应用场景中,动力电池长期处于多场耦合极端工况之下,仅依赖这类外部电学指标已难以反映其复杂的内部退化过程^[24]。事实

上,容量衰减只是电池老化的宏观结果,更深层的退化往往发生在电极/电解液界面演化、固体电解质界面膜(SEI)生长、析锂、气体析出、层间脱黏及微结构损伤等多种退化机制的耦合作用下。这些内部结构与界面状态的持续劣化不仅会导致容量保持率下降和功率性能衰退,还会改变电池内部热量产生与传递过程,削弱热稳定性和结构完整性,进而增加热失控及突发安全失效风险^[25]。

现有研究表明,结构劣化与快速循环诱发的析锂被认为是锂电池容量衰减的重要因素之一^[13]。这一问题在航空场景下尤为突出,因为快充和高倍率放电并非偶发工况,而是接近常态化运行模式。在高倍率条件下,锂离子难以及时嵌入石墨负极层间,更容易在负极表面沉积形成金属锂,并在持续累积过程中演化为枝晶状结构^[26]。析锂不仅会造成活性锂的不可逆损失,导致容量衰减和功率性能下降,还会改变局部电流密度分布,加剧界面退化并破坏电极结构稳定性^[27]。更为严重的是,枝晶生长可能刺穿隔膜,引发内部微短路。此类失效在早期往往不会产生明显的温升或电压异常,因此具有较强的隐蔽性。

除析锂外,热失效风险同样不容忽视。微量热研究表明,在模拟eVTOL起飞和降落等高倍率放电条件下,锂离子电池的热响应会由温和工况下的吸热特征转变为显著放热特征,表明不可逆副反应被明显强化^[28]。随着热量快速积累,SEI膜分解、电解液消耗以及CO₂、C₂H₄等气体析出过程不断加速,进一步削弱电池热稳定性。当温度达到临界阈值后,安全阀开启、隔膜融化以及内部短路等失效现象将相继发生,并最终诱发热失控^[29-30]。因此,航空动力电池面临的挑战已不仅是能量衰减,更是容量保持、功率输出与

安全可靠性的协同保障。与此同时,低温环境还会进一步增加电池运行负担,不仅增大析锂等异常反应发生的可能性,还可能引起界面接触恶化、材料性能衰退以及结构稳定性下降等问题。低温条件下,电解液黏度升高,局部甚至可能出现冻结现象,从而导致离子电导率下降和电解液传输动力学受阻^[31]。不仅如此,溶剂化结构变化和去溶剂化能垒会进一步抑制界面反应动力学^[32]。此时电压滞后,电池容量、功率和倍率性能均明显下降,表明负极嵌锂动力学已难以匹配外部功率需求,极化显著增加,并伴随析锂风险增加^[33]。

与低温对界面动力学和离子输运的影响不同,低压环境造成的退化更偏向于结构层面。随着飞行高度上升,外界气压持续降低,电池内外压差增大,促使电芯发生膨胀变形,破坏电极、隔膜与电解液之间原有的紧密接触关系,进而诱发电解液退浸润、界面接触恶化及局部传输受阻,表现为内阻增加、极化加剧以及容量衰减加速。在模拟17000英尺时的航空低温低压环境下,正极和负极的孔隙空间占比分别由常温常压循环下的1.58%和12.29%增至2.13%和13.39%,反映出电极微结构发生了明显变化^[13]。对于软包动力电池而言,低压环境还可能影响封装完整性、产气膨胀及破裂后的泄压排气行为^[34]。更值得关注的是,低压不仅会加速常规退化过程,还会改变动力电池从安全阀开启到热失控发生的演化路径,并显著影响热失控传播时间和峰值温度,使航空工况下的热安全问题更加复杂^[35-36]。

机械载荷也是航空动力电池退化与损伤机制中不可忽视的一环。外部冲击、挤压、局部压痕和弯曲均可能导致电极层变形、活性物质压实以及隔膜破损等结构损伤。一旦

隔膜失效,正负极直接接触便可能触发内部短路,并进一步演化为热失控^[37]。相较于瞬时机械冲击,长期振动带来的危害更具累积性。持续振动可能造成电池包结构疲劳,并在电极、集流体及界面层中不断积累不可逆机械损伤,最终表现为连接件松动(如极耳焊点脱焊)、电极破裂、活性物质脱落、极片滑移和内阻增加等退化现象^[38-39]。因此,机械冲击与长期振动不仅是航空动力电池的结构可靠性问题,也与其寿命衰减和灾难性安全失效直接相关。

总体来看,在上述多场耦合航空工况作用下,动力电池形成了区别于常规地面应用的热-力-电化学耦合退化与失效机制。高倍率运行会加剧析锂、产气、SEI膜重构、电极开裂及局部退浸润等退化过程;低温环境导致离子输运受限和界面反应动力学恶化,低压环境则诱发电芯膨胀、层间接触退化及结构稳定性下降,两者共同促进内部结构与界面状态劣化;机械振动和冲击载荷进一步加速微裂纹萌生、界面脱黏及损伤扩展。上述因素相互耦合、相互强化,使电池内部结构演化、电化学反应及热行为呈现高度复杂的动态耦合特征,不仅导致容量衰减和功率性能下降,还显著增加内部短路和热失控风险。因此,航空动力电池的失效往往具有更强的隐蔽性、突发性和灾难性,对内部状态感知、健康评估及热失控早期预警提出了更高要求。

1.3 状态与安全监测需求

对于电动航空器而言,电池监测不仅服务于能量管理,还直接关系到不同飞行阶段下的任务可执行性与安全裕度,必须结合完整任务剖面与运行条件变化,否则难以准确掌握其真实状态^[40]。正因为如此,航空动力电池的监测不能局限于一般意义上的运行参数,而必须同时覆盖剩余能

量、寿命老化和安全前兆3个层面。对航空动力电池而言,状态监测的核心并不只是事后判断电池是否已经失效,或分析失效发生的原因,而是要在飞行任务执行前及运行过程中持续评估其安全可用边界,判断电池是否仍具备满足当前任务需求的能量输出能力和安全裕度。因此,实现对电池内部结构演化和损伤发展的原位感知,是提升低空飞行器动力电池健康管理与安全保障能力的关键。

在各类状态参数中,SOC是最直接、最关键的指标。对于电动航空器而言,SOC的准确估计不仅影响电池能量管理的精度,还直接影响飞行任务的执行能力和安全裕度判断,是动力电池监测中的核心问题^[41]。航空动力电池并非追求最大容量利用率,而是在安全冗余约束下追求可预测能量管理。其运行过程必须始终保留足够的能量储备,以应对复飞、备降以及突发工况下的额外动力需求^[42]。例如,eVTOL电池在降落阶段通常要求SOC不低于10%,因为过低SOC区间内电压会急剧下跌,同时存在明显的电流尖峰,从而迅速放大运行风险^[43]。因此,对于航空应用而言,电池额定容量并不等同于可安全使用的容量,真正能够用于任务执行并保障飞行安全的容量窗口通常更为有限^[44]。因此,在航空应用中,SOC估计已从传统意义上的剩余续航能力评估指标,演变为飞行任务执行与安全裕度管理的重要基础,成为保障飞行器安全运行的关键参数。

与SOC偏重短期任务执行能力不同,SOH反映电池的长期性能退化情况,其重要性更直接关联到航空运营的可行性和经济性^[45]。以eVTOL为例,为实现商业化运营目标,通常需要维持极高的利用率,年运行时间需达约1600 h,并经历约1600次等效全循环,这种使用强度远高于典型地面车辆的间歇式运行,也意味着电池寿命在航空应用中会

被更快消耗^[46]。研究表明,一块寿命约3300次等效全循环、可支撑电动汽车行驶一百万英里的电池,在eVTOL使用场景中可能仅能维持约两年的安全运行,而商用航空器的设计寿命通常超过25年。这种落差不仅体现在更换频率增加,更意味着维护成本上升、机队可用率下降以及全寿命周期经济性受损^[42]。因此,在航空应用中,SOH监测已从传统意义上的老化状态评估指标,演变为动力电池全生命周期健康管理及持续适航保障的重要基础,成为支撑维护决策和保障长期安全运行的关键参数。

如果说SOC和SOH主要反映电池的可用性和寿命状态,那么安全性则是航空动力电池监测的核心关注点。当前高能量密度LIBs体系虽然能够满足电动航空器对续航能力和功率输出的需求,但其热稳定性相对有限,安全窗口较窄。在各类失效模式中,热失控因其后果最为严重,被认为是威胁飞行安全的首要风险。热失控过程中,SEI膜分解、正极活性材料失稳以及电解液分解等放热反应相互耦合,不仅产生大量可燃气体并引发冒烟、起火甚至爆炸,还可能释放高温微粒物质(如PM_{2.5}以及镍、钴和锰等重金属),从而造成环境污染和生物毒性等额外威胁^[47]。更为严重的是,单体电芯发生热失控后产生的热量会迅速向相邻电芯传播,诱发热失控蔓延,形成连锁反应,最终导致电池系统整体失效甚至引发灾难性事故。热失控通常由机械、电或热滥用触发,而电动航空器长期承受高倍率放电、快速补能、低温低压及持续振动等复杂环境作用,更容易诱发局部热积累、析锂、内部短路及结构损伤等失效过程,从而增加热失控发生风险^[48]。尽管热失控属于低概率事件,但航空领域对安全事故具有近乎“零容忍”的要求。即使极少数严重事故,也可能导致机型停飞、适航审查收紧以及运营中断,产生巨大的安全 and 经济影响。因此,航空

动力电池安全管理不仅要求避免热失控发生,还要求能够在热失控前驱阶段及时识别内部异常演化,为主动干预、故障隔离和安全处置提供充足时间窗口^[49-50]。在航空应用中,安全监测则已从传统意义上的故障告警手段,演变为主动风险管理与事故预防的重要基础,成为保障飞行器本质安全的关键支撑。

1.4 小结

电动航空器对动力电池监测的需求,本质上源于高安全冗余、高利用率和低容错空间等严苛运行要求。SOC决定电池能否安全完成当前任务,SOH反映系统的长期稳定运行能力,而安全监测则直接关系到潜在失效风险能否被及时识别与有效处置。三者相互关联,共同定义了动力电池在实际飞行中的可用边界。为了实现上述监测目标,不仅需要掌握电池的宏观运行参数,还需进一步获取与性能退化和安全失效直接相关的内部信息。在航空极端工况下,SOC和SOH的准确评估依赖于对内部电化学反应、材料性质及界面状态变化的持续表征,而析锂、产气和局部热积累等异常状态的识别及热失控预警,也需要借助温度、应变、压力、气体和结构特征等多维信息。由此,建立面向电池内部热-力-电化学及结构演化过程的多源感知能力,成为提升状态评估精度和实现早期安全预警的关键。因此,航空动力电池监测体系需要超越传统的外部宏观感知模式,向内部状态感知、结构演化追踪及早期失效预警方向发展,以实现动力电池全生命周期健康与安全状态的精准评估。这也推动动力电池由传统储能单元向具备状态感知、故障诊断和健康管理能力的智能电池演进。

2 基于新型内部感知技术的智能电池

现有BMS主要依赖电压、电流

和温度等外部宏观信号,并结合模型与算法对动力电池的荷电状态、健康状态和安全边界进行估计与判断^[51]。虽然外部宏观信号是电池状态评估的重要基础,但难以充分表征电池内部真实状态和潜在损伤,部分失效甚至在临近发生时才表现出可检测特征^[52]。因此,面向前述航空极端服役工况及复杂退化损伤形式,仅依赖现有BMS感知技术难以及时识别电池内部的早期异常,难以提供充足的安全处置时间窗口。尤其是在起飞、悬停和复飞等高功率阶段,电池状态可能在短时间内快速变化,这对监测系统的状态感知精度、响应速度、轻量化水平、长期可靠性以及与机载BMS的兼容性提出了更高要求。在此背景下,研究人员开始探索多源信息协同感知技术,通过与电池结构相适配的传感器设计和集成,实现对电池内部状态的直接获取^[53]。由此发展出的智能电池逐渐成为航空动力电池安全管理的重要研究方向。与传统电池作为被动储能单元不同,智能电池通过传感器、数据采集系统、状态分析算法及控制策略的深度融合,使电池具备状态感知、故障诊断、寿命预测及主动管理能力^[54]。其核心并非简单增加传感器数量,而是在尽可能保持电池能量密度、循环寿命和结构完整性的前提下,利用先进感知技术获取传统电学参数难以表征的内部信息,实现航空复杂工况下的状态监测与早期失效预警。

从传感器与电池结构的结合方式来看,面向智能电池的先进感知方案大体可分为表面集成式和内部嵌入式两类^[55]。表面集成式传感器通常布置于电芯外壳表面或铝塑膜、极耳或模组结构表面,通过采集表面温度、压力、应变、膨胀变形等信号,间接反映电池内部状态变化^[56]。这类方式对电芯结构扰动小,安装和维护相对方便,易于与现有电池制造、封装和模组集成工艺兼容,因此具有较

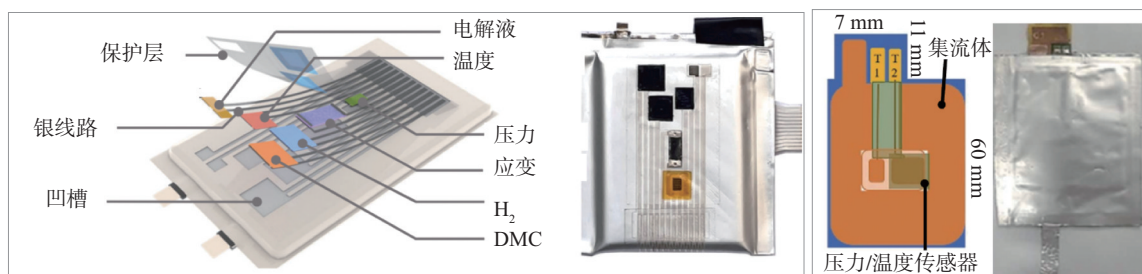
好的工程应用基础。相比之下,内部嵌入式传感器通常布置在裸电芯表面、集流体与电极活性层内或层间界面处,更接近电化学反应区域,能够直接感知内部温度、应力、压力及局部异常信息^[57-58]。这类方式缩短了信号传递路径,减少了封装层引起的信号衰减与响应延迟,因此在早期失效识别和安全预警方面展现出更高的灵敏度和响应速度。然而,传感器嵌入可能对电池结构完整性、电化学稳定性及循环寿命产生影响,同时还需满足耐电解液腐蚀、长期服役可靠性以及低空间占用等要求,因此其工程化应用

仍面临诸多挑战。如图2所示^[7,59-63],智能电池传感技术主要包括薄膜、光纤和超声3类技术路线。

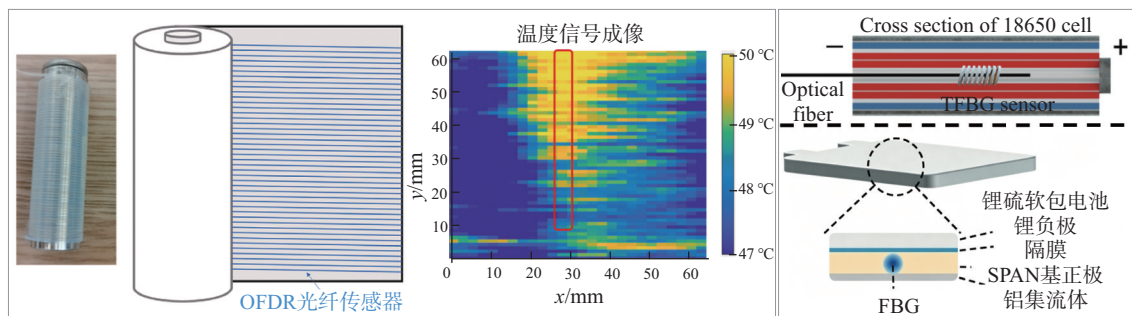
2.1 薄膜传感器

对于电动航空器而言,任何附加监测装置都会增加系统质量和空间占用,进而影响系统能量密度和有效载荷。因此,相较于体积较大、集成度较低的外部检测设备,轻薄、柔性且易于集成的薄膜传感器更适合用于单体电池和电池模组的原位监测。如图2(a)所示,Sun等^[7]提出了一种全打印多功能传感阵列,将温度、压力、应变、氢气(H_2)、碳酸二甲酯蒸气

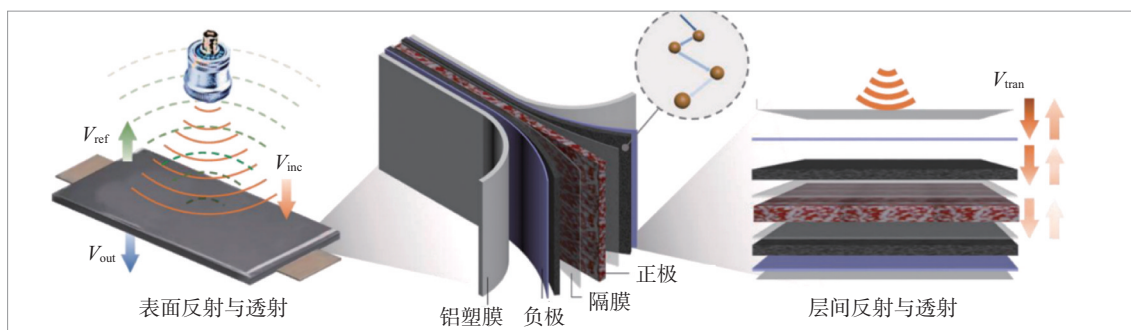
(DMC)及电解液泄漏等传感单元集成于电池铝塑膜中,用于构建多参数协同智能锂离子电池。该方法通过在铝塑膜外层加工凹槽并打印传感器,使其能够贴合电池封装形变,同时减少外部传感器带来的体积和质量负担。该传感阵列总增重仅约49 mg,对软包电池质量和能量密度的影响分别约为0.23%和0.22%,在保持电池性能的同时,可为过充、过放、低温析锂、内短路、机械破损和热滥用等异常状态提供及时的预警信息。Peng等^[59]将柔性薄膜温度应变传感器嵌入软包电池内部的集流体



(a) 薄膜传感器在表面铝塑膜和内部集流体的集成方式^[7, 59]



(b) 光纤传感器在电池表面、内部中心轴孔和电极层内的集成方式^[60-62]



(c) 超声波在电池中的非侵入内部感知机制示意图^[63]

图2 下一代智能电池内部信息感知技术路线

Fig.2 Pathway of next-generation intelligent battery internal information sensing technology

上,并通过引线将内部温度信号传输至外部采集设备。温度传感器厚度通常小于 $100\text{ }\mu\text{m}$,对电池内部结构和电化学性能影响较小,可在电芯内部布置多个测温点,实现不同位置温度的实时监测。研究表明,在 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 充放电条件下,电池内部温度通常比表面温度高 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;在更高倍率充放电或热失控诱发阶段,内部温度与表面温度的差值甚至可超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与传统表面温度监测相比,该方案能够更准确地反映电芯内部反应区域的热状态,提前捕捉局部热积累和异常温升现象。Fan等^[64]提出了一种嵌入式无线感知系统,将厚度约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的薄膜温度传感器与薄膜应变传感器集成于贴附在正极集流体预留的空白区域,再将微型无线通信芯片单独封装并布置于电池壳体内部或顶盖区域,用于将内部信号传输至外部接收模块。内部温度信号可用于识别局部短路及热失控风险,内部应变信号则能够辅助判断电极断裂等机械损伤的位置,实现了温度和应变信号的实时采集与无线传输。试验结果表明,该系统在1000次循环后容量保持率为93.74%,而未集成系统的对照电池为94.57%,表明该嵌入集成方式对电池性能的影响极小。在局部内部短路发生时,内部温度信号可提供至少15 min的预警时间;而在剧烈热失控条件下,内部温度在约2 s内即出现显著上升,表面温度达到预警阈值则需滞后约35 s。

然而,大部分内部嵌入式薄膜传感器需要长期与电解液和活性材料接触,处于复杂电化学环境中,其应用仍面临较多挑战。一方面,薄膜材料必须具备良好的耐腐蚀性和电化学稳定性,避免在循环过程中发生性能衰减;另一方面,传感器的嵌入不能明显改变电极/隔膜界面接触状态,也不能显著增加电池内阻或降低能量密度。内部嵌入式薄膜传感器虽然更接近智能电池的深层感知目

标,但其规模化应用仍需要在材料兼容性、封装可靠性和长期循环稳定性方面进一步验证^[57]。需要指出的是,航空场景对长期可靠性的要求明显高于一般实验室条件。除传感精度外,传感器对电池质量、能量密度、循环寿命和封装完整性的影响,也应作为评价其航空适用性的关键指标。

2.2 光纤传感

大部分薄膜传感器仍需通过引线传输电信号,易受电磁干扰、单点测量局限及布线复杂等因素制约。相比之下,光纤传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干扰能力强以及易于多路复用等优势,能够实现从单点到准分布式乃至分布式的状态感知,特别适用于获取单体电池或电池组温度场、应变场等丰富的空间维度信息^[65-66]。航空动力电池运行过程中形成的非均匀温度场和变形场,难以通过传统单点传感器准确表征,通过在电池内部或表面布设光纤传感器,可实现多位置甚至分布式温度与应变监测,从而更有效地识别局部异常发热、非均匀膨胀以及潜在失效区域,为电池状态评估和早期故障预警提供支撑。

从现阶段的应用来看,光纤传感最成熟的方向仍然集中在温度和应变监测^[67]。以光纤布拉格光栅(FBG)为代表的传感方式,能够利用布拉格波长对外界扰动的敏感响应,实现对电池热-力行为的原位跟踪^[68]。在实际部署中,FBG既可以贴附于电池外壳表面,用于宏观温升与鼓胀形变的外部表征;亦可以通过内嵌方式深入电芯内部,零延迟地反馈充放电过程中由锂离子嵌脱、材料膨胀及应力积累所引起的状态变化^[69]。如图2(b)所示,对于圆柱电池,FBG可插入中心轴孔中,可以有效避免传感器与电极材料和电解液的直接摩擦与干扰^[61]。Miao等^[62]将FBG嵌入硫化聚丙烯腈正极材料中,实现了对电极内部应变演化的原位监测。进

一步地,随着光频域反射技术(OFDR)等高空间分辨率分布式感知手段的突破,光纤监测已不再局限于少数离散点,而是开始具备获取温度^[70]、应变^[71]和气体^[72]全局空间分布的能力。表面布设方式对电芯原有结构扰动较小,适合开展多点或分布式温度监测。Guo等^[60]将分布式光纤传感器沿21700圆柱电池表面螺旋缠绕,并将圆柱表面展开映射为二维平面,实现了电芯表面温度场的空间成像;结果表明,圆柱电池表面温度分布具有明显的非均匀性,正极极耳附近更容易形成局部高温区域。上述研究表明,光纤传感正在由传统的表面温度测量逐步拓展至分布式热场成像和电极内部状态感知。然而,仅凭温度和应变是否足以支撑更深入的状态判断,这一问题也促使光纤传感向更丰富的化学信息维度拓展。近年来,光纤与光谱技术相结合的原位电化学示踪技术备受学界与产业界关注^[73]。光纤传感已不再局限于温升与鼓胀等宏观响应监测,而是开始尝试借助光谱特征捕捉电解液环境、界面反应及材料状态变化。对于服役工况极端复杂的航空动力电池而言,这种感知能力具有显著的吸引力,因为许多早期退化并不会立刻转化为显著的温升或形变,却可能已经在局部化学环境中留下痕迹^[74]。因此,光纤传感开始从传统的温度-应变监测工具,逐步转向兼顾热、力、化学多维信息的综合感知平台。

综上所述,光纤传感已经不再只是实验室中的辅助表征手段,而是在朝着多参数、分布式、原位化的方向持续发展。然而,机载应用不仅关注测量分辨率,还受到设备重量、布线复杂度、解调系统体积和功耗的约束。光纤传感器在航空动力电池中的规模化应用,仍需解决温度-应变交叉敏感、复杂机械载荷下的信号稳定性、模组级布设方式以及与现有BMS的高效集成等一系列关键工程问题。

2.3 小结

综合来看,薄膜传感与光纤传感技术均能够突破传统外部电参数监测的局限,实现对电池内部运行状态的直接感知,为电池健康管理提供更加丰富的信息来源。两类技术虽然在传感原理和实现方式上存在差异,但都能够有效反映电池内部物理与化学过程的动态演化,对于揭示性能衰退机理和识别潜在安全风险具有重要意义。然而,面向产业化应用,薄膜与光纤传感技术仍需在低成本、长寿命、轻量化和监测便捷性等方面进一步突破。薄膜传感器虽具有柔性集成和规模化制备潜力,但其长期服役寿命、封装可靠性以及配套采集与传输模块的功耗仍需进一步验证;光纤传感器本体轻小且无需电驱动,但其解调与数据采集设备通常成本较高、体积和重量较大,布设、标定及维护流程也相对复杂。因此,开发低成本传感单元、微型低功耗采集与解调设备,并简化安装和监测流程,是推动两类技术产业化应用的重要方向。另一方面,超声传感技术能够以非侵入方式获取电芯内部结构信息,如材料弹性、界面状态及内部缺陷演化,在SOC/SOH评估、内部损伤识别及热失控早期预警中展现出巨大潜力,因此下文将重点展开讨论。3种智能感知技术的对比如表1所示。

3 基于超声传感技术的锂电池健康监测

随着超声无损检测技术应用领

域的不断拓展,具有较强穿透能力的超声已逐渐成为动力电池内部状态感知的重要手段^[85]。LIBs内部由封装层、多孔电极、隔膜和电解液等多种介质构成,超声波在传播过程中会受到声阻抗差异、材料特性及层状结构的共同影响。如图2(c)所示,声波进入电池时,由于探头、封装层与内部材料之间存在声阻抗差异,部分声能在电池表面发生反射;声波在多孔电极、隔膜和电解液中传播时受到材料黏弹性耗散、孔隙散射等作用;电池内部层状结构会引起多次反射、透射及波模态转换。由于电池的荷电状态、老化程度及内部损伤均会引起材料弹性性质、孔隙结构和层间接触状态的改变,因此,超声传播时间、信号幅值和频谱特征等参数可作为表征电池内部状态演化的重要指标,而这些变化通常早于电压、电流或表面温度等外部参数出现明显异常^[82]。因此,超声不仅能够用于SOC和SOH评估,还能够对内部损伤演化和热失控前驱过程进行原位感知。同时,作为一种能够直接表征内部结构与力学状态的独立信息源,超声可与电压、电流、温度等传统监测信息进行融合,实现多源信息互补与交叉验证,从而进一步提升动力电池状态评估和安全预警的准确性与可靠性^[86]。

按照耦合方式的不同,当前电池超声检测技术主要分为液浸式扫描、接触式检测和非接触式检测等类型,如图3所示^[81,87-88]。在实验室条件

下,液浸式超声扫描显微镜利用水或硅油作为耦合介质,能够获得高分辨率的内部结构成像结果,适用于电池内部缺陷、界面状态及微观结构变化的精细表征^[89]。接触式检测则通过界面耦合介质实现换能与电池表面之间的声能传递,是目前应用最广泛的试验测试方案,具有设备成熟、信噪比较高和测试灵活等优点^[90]。此外,随着先进无损检测技术的发展,激光超声^[81]与电磁超声^[91]等非接触式方法也逐渐被应用于电池研究领域。该类技术无需物理接触,也不需要耦合介质,可避免耦合条件变化对测试结果的影响,但通常存在设备复杂、成本较高以及系统集成难度较大的问题,目前主要用于机理研究和特定场景下的测试验证。总体而言,上述监测方式大多面向实验室环境,难以满足动力电池长期在线监测对稳定性、小型化和系统集成性的要求。因此,近年来电池超声监测研究重点逐渐转向固定式小型压电换能器方案,通过将换能器长期集成于电池表面,实现电池全寿命周期的原位监测。如图4所示,目前常用的换能器包括压电晶片(PZT)^[92]、纤维复合材料(MFC)^[80,93]及1-3型压电复合材料^[79]等。这类方案兼具较高的机电转换效率和良好的结构集成能力,为动力电池健康状态评估、内部损伤监测及热失控早期预警提供了重要技术基础。

从波动传播机制来看,超声技术还可进一步分为体波与导波两类。

表1 面向电动航空器动力电池的典型智能感知技术

Table 1 Intelligent sensing technologies for electric aircraft power batteries

传感技术	主要感知对象	典型集成方式	主要优势	主要局限
薄膜传感	温度、压力、应变、膨胀及气体泄漏等物理化学信息	表面贴片 ^[75-76] 、表面封装集成 ^[7] 或内部嵌入电芯层间 ^[77] 和电极层内 ^[59,64]	轻薄柔性、易阵列化、可多参数感知	长期可靠性和材料兼容性有待验证
光纤传感	温度、应变、压力等物理参数及局部化学环境变化信息	表面布设 ^[65] 、缠绕 ^[60] 或内部嵌入电芯层间 ^[61,67-68,70,72-73] 和电极层内 ^[74,78]	抗电磁干扰、支持多点和分布式感知	存在温度-应变交叉敏感,系统成本较高
超声监测	材料弹性、界面状态及内部缺陷演化等结构信息	表面集成 ^[79-84]	非侵入感知电池内部结构变化	易受温度、压力及耦合条件影响

体波主要以纵波或横波形式在电池内部传播,当前研究多采用沿厚度方向传播的透射或脉冲回波检测模式,适用于结构厚度方向整体状态评估与平均性质变化分析^[94]。其中,脉冲回波法采用同一换能器完成信号的发射与接收,通过分析反射回波的传播时间、幅值及波形变化来表征内部界面与结构状态。由于仅需单侧布置,该方法在空间受限或结构封闭的电池系统中具有一定优势。透射法则采用分置于电池两侧的发射和接收换能器,通过分析透射波特征进行表征。与体波不同,导波受电池层状结构约束,主要沿电池平面方向传播,多采用同侧间隔布置的“一发一收”检测模式,能够在较长距离内与多个界面持续相互作用,因此对层间接触状态、界面退化及局部损伤等现象表现出较高

敏感性^[92]。基于不同传播机制与检测模式,体波与导波技术在空间覆盖范围、检测深度及敏感对象等方面形成互补,为动力电池荷电状态与健康状态评估、内部损伤识别以及热失控早期预警提供了重要技术手段。

3.1 基于超声波的电池状态评估

LIBs的SOC和SOH变化均会引起内部材料、界面状态及结构特征的变化^[95],为超声状态评估提供了物理基础。SOC变化通常对应超声传播时间、信号幅值及波形特征的可逆变化,而SOH下降引起的结构退化则会导致超声特征发生长期累积性的不可逆偏移。由于超声波能够与电池内部材料、孔隙、电解液及界面持续相互作用,其响应不仅能够反映电池的实时运行状态,还能够表征传统电学参数难以直接获取的内部结构

退化信息。因此,超声技术为动力电池复杂工况下的原位状态感知提供了新的监测维度,并为构建多源感知与智能诊断体系提供了重要支撑。

体波检测具有构型简单、接触式和非接触式均可实现,信号处理和物理解释相对直接等特点,因而被广泛应用。体波主要包括纵波与剪切波,其传播特性受材料弹性、密度及内部结构状态等因素影响。Sood等^[96]的工作被认为是最早将超声体波用于LIBs状态评估的代表性研究之一,该研究采用厚度方向透射模式,利用中心频率为5 MHz的超声换能器对未受约束的软包锂离子电池进行检测,并比较了电池老化前后的超声响应,其中老化后电池的SOH降至约75%;结果表明,穿过老化电芯后的超声信号表现出明显的传播延迟和幅值衰减。这种变化与多种老化机制有关,包括气体生成、SEI膜形成与增厚,以及循环应力引起的电极起伏。更重要的是,这项研究提出了后续文献中最常用的两类超声特征参数,即信号幅值(SA)和飞行时间(TOF)。其中,SA主要反映超声传播过程中的衰减特征,而TOF则表征声波传播速度变化,两者均能够对电池内部材料性质、结构状态及老化过程产生响应,因此成为SOC和SOH评估中最常用的超声特征参数。

已有研究表明,随着SOC的提高,锂离子嵌入石墨负极,使负极材料弹性模量和电芯等效刚度增加,从

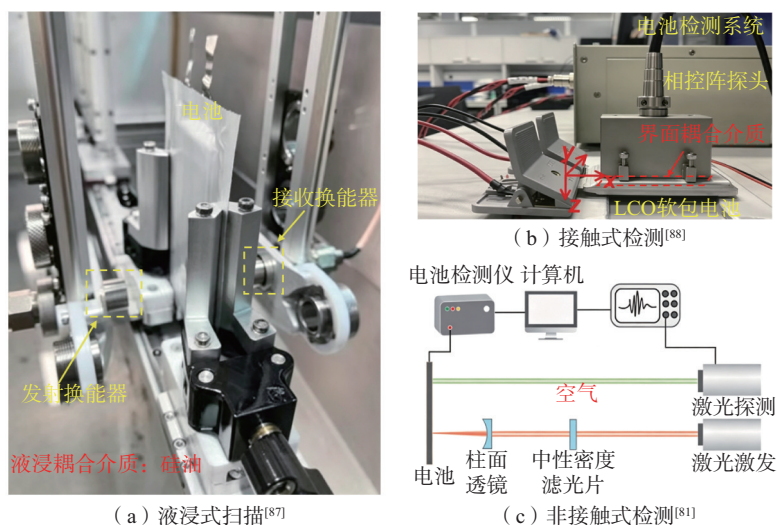


图3 电池超声检测不同耦合方式的基本原理和特征

Fig.3 Fundamental principles and characteristics of different coupling configurations for battery ultrasonic inspection

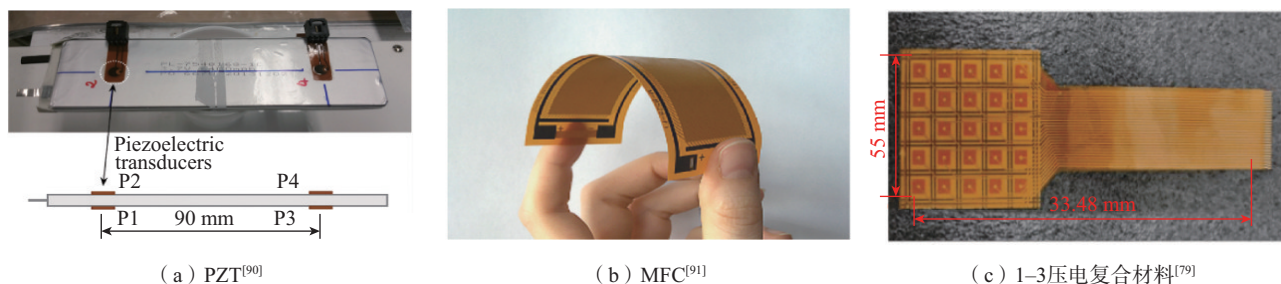


图4 用于在线监测的小型压电换能器

Fig.4 Miniaturized piezoelectric transducers for online monitoring

而提高超声传播速度。尽管嵌锂过程会引起电芯厚度轻微膨胀,但声速提升的影响通常占主导,因此 TOF 整体呈下降趋势。这一规律在不同材料体系和电池结构中均得到了广泛验证,使 TOF 成为 SOC 评估中应用最广泛的超声特征参数之一^[90,97-103]。相比之下,SA 对 SOC 的响应具有更强的条件依赖性。部分研究观察到 SOC 增加时 SA 下降,而另一些研究则发现其变化并不显著或呈现不同趋势^[94,97,102,104-105]。这种差异可能与波动模式、边界条件、耦合状态以及能量衰减机制等因素有关。因此,SA 通常更适合作为辅助特征,与 TOF、波形参数及频谱特征联合用于 SOC 表征。

类似地,对于 SOH 估计的研究表明,TOF 通常被视为更稳定的老化表征参数,而 SA 更适合作为辅助特征,与其他超声或多物理量参数联合用于状态分析。在整个 SOC 区间内,随着 SOH 下降,TOF 整体呈上升趋势^[103,106-107]。这一现象一方面可能源于传播路径长度的增加,另一方面也可能与电芯有效刚度或密度的演化有关。例如,电池老化引起的体积膨胀,即使声速变化有限,传播距离的延长仍会导致 TOF 增大。相较而言,SA 对 SOH 的响应虽然同样具有一定敏感性,但其变化方向与幅度在不同研究中存在差异^[108-109],呈现出更强的机理依赖性与试验条件敏感性。

超声导波是受结构边界约束而传播的弹性波,具有传播距离长、多模态和频散特征等特点^[110]。Ladpli 等^[92]的工作被普遍认为是超声导波用于电池监测的早期代表性研究。该研究基于一发一收模式,在 100~200 kHz 频率范围内激励导波,并采用 SA 与 TOF 两类超声特征对电池状态进行分析。相较于体波,超声导波在 SOC 评估中的应用仍处于相对探索阶段,但已有研究初步揭示

出一定规律。多数工作表明,随着 SOC 的提高,导波信号的 TOF 通常呈下降趋势^[92,106,111-115],这与电池嵌锂过程中材料等效力学性质变化及导波群速度增加有关。然而,也有研究报道 SOC 升高时 TOF 反而增加^[116]。这种差异表明,导波响应不仅受材料性质变化影响,还与模态类型、频散效应、边界约束及层间接触状态等因素密切相关,其作用机理尚需进一步厘清。相比之下,SA 的变化规律表现出较高一致性,现有研究普遍发现其随 SOC 增加而升高^[92,106,111-112,116]。导波用于 SOH 估计的研究则更为有限,且多集中于早期老化阶段,这意味着导波特征在长期老化过程中的演化规律仍缺乏系统认识。在已有少数研究中,随着 SOH 下降,TOF 在不同 SOC 区间内通常呈下降趋势^[92,117]。而 SA 与 SOH 之间的关系则尚未形成统一认识,其变化方向和幅度在不同研究中存在明显差异,反映出导波幅值同时受到模态转换、能量泄漏、耦合条件及局部结构退化等多种因素影响。因此,导波特征与电池老化机制之间的定量关系仍有待进一步研究。

除单一波模式外,还有一些研究尝试结合导波与体波信息,以获得对电池内部状态更为全面的表征结果。相较于单一超声信号,联合利用不同传播路径或多模态超声信号,有助于同时增强对层间界面变化、局部热损伤及整体结构异常的感知能力。例如,McGee 等^[101]在锂离子电池局部热滥用研究中结合了导波与厚度方向体波信号,而 Álvarez-Arenas 等^[118]则进一步采用多模态非接触超声方法,将不同传播模式与传播方向相结合,以提升对电芯内部状态的综合识别能力。

在此基础上,超声监测正逐步由整体平均状态评估向空间分布感知发展。传统 SOC 评估通常给出电芯整体平均状态,而超声反射或透射扫

描能够在局部尺度感知材料力学性质变化,从而实现 SOC 空间分布的表征^[119-120]。这种空间异质性具有重要意义,因为电池内部锂存量和活性材料利用率往往并非均匀分布,而局部富锂或贫锂区域可能进一步诱发非均匀老化并加速性能衰退。例如,Xie 等^[121]利用体波超声扫描研究低温快充条件下的非均匀锂沉积现象,实现了局部 SOC 变化的识别。需要指出的是,这类空间分布监测并不局限于体波方法,通过构建传感网络,导波同样已被用于电池状态的空间异质性研究^[80]。除 SOC 分布外,体波还被进一步拓展到电池内部温度空间分布的表征中,不同传播方向的体波为构建电芯内部热状态图谱提供了新的可能^[122]。

温度效应始终是影响超声特征解释的重要干扰因素之一。已有研究表明,不同充放电倍率条件不仅会改变电池内部的电化学状态,还会通过焦耳热与熵热效应引起不同程度的温升,从而进一步影响超声传播行为。换言之,超声信号对电池状态的响应并非仅由 SOC 或 SOH 单独决定,而往往叠加了倍率与温度的耦合影响。因此,如何在不同运行工况下有效解耦充放电倍率与温度对超声特征的共同作用,仍是当前研究面临的重要挑战之一^[109]。若忽略循环过程中的温度效应,可能导致对电池内部状态的误判,这一问题在基于 TOF 进行 SOC 估计时表现得尤为典型。已有研究指出,在 15~35 °C 的温度变化范围内,相对于 25 °C 基准状态,温度效应引起的 TOF 偏移最高可达约 0.7 μs^[123]。Borujerdi 等^[124]对 TOF 与 SOC 映射关系中的充放电迟滞现象进行了量化分析,结果发现未经温度校正时,TOF-SOC 曲线存在明显迟滞,他们认为主要原因是充放电过程中温度变化差异的影响;在引入动态温度补偿后,3 种不同容量电池的迟滞面积分别降低了 33%、60% 和

67%,表明温度校正能够显著改善超声特征与SOC之间的对应关系。类似地,另一项研究发现,放电深度(DoD)与TOF映射关系的最大迟滞通常出现在约80%DoD附近,而这一位置恰好对应最显著的温度偏差区间;将温度引起的TOF偏移从总信号中剔除后,原本明显的迟滞现象显著减弱,不同倍率条件下原本彼此分散的TOF-DoD曲线也趋于重合^[125]。值得注意的是,即使经过温度补偿,滞后现象仍未完全消失,循环末端仍存在轻微偏差,这部分残余效应可能与温度测量误差有关,也可能源于石墨负极在锂离子嵌入与脱嵌过程中的物理化学不对称性。总体而言,所谓倍率效应对超声特征的影响,在相当程度上是通过温度场变化间接体现的。因此,在利用超声特征进行电池状态估计时,温度补偿不仅关系到估计精度,更是保证超声信号物理可解释性的关键前提。

值得注意的是,体波与导波在老化响应上的部分结论甚至表现出明显不一致^[109]。部分体波研究表明,随着SOH下降,电池厚度方向的等效纵向刚度趋于减小;而导波结果却提示刚度可能增加。导波传播同时受到材料弹性参数、层间界面状态、厚度变化以及频散效应等因素影响,其表征的等效力学性质并不等同于体波所反映的纵向刚度。因此,这种差异并不一定意味着试验结果相互矛盾,而更可能反映了电池老化过程中材料性质、界面耦合及层状结构参数的协同演化。未来仍需结合波动理论、数值模拟和试验研究,从传播路径、模态敏感性及界面力学机制等角度进一步阐明体波与导波响应差异的物理本质,从而建立更加统一的超声状态评估理论框架。

3.2 基于超声波的电池内部损伤识别

超声检测技术对材料内部结构、界面状态及力学性能变化具有较高

敏感性,已逐渐成为锂离子电池内部缺陷诊断与故障识别的重要手段。从损伤演化的诱发机制来看,航空动力电池在极端服役工况下的内部异常可大体归结为两类:一类是随长历时缓慢累积的循环退化损伤,另一类是由动态机械载荷触发的机械滥用损伤。前者源于长期充放电过程中持续发生的电化学反应与材料老化,其典型特征包括SEI膜持续生长、析锂现象、活性颗粒开裂、电极分层、孔隙率变化、电解液局部浸润不良以及局部宏观刚度下降等。后者则主要由碰撞、跌落、硬着陆、鸟撞等外部冲击载荷,以及飞行振动引起的长期交变应力所诱发,主要表现为电极与隔膜变形、层间失稳、界面脱黏、局部断裂以及内部短路等结构损伤。值得注意的是,尽管两类损伤在诱发条件、演化过程及时间尺度上存在显著差异,但由于超声波传播特性对介质力学状态高度敏感,上述结构演化均会进一步引起声速、衰减、散射以及频谱特征的改变^[126]。因此,超声响应能够作为表征电池内部损伤演化的重要载体,为缺陷识别、状态评估及失效机理分析提供具有物理基础的诊断信息。基于这一原理,超声检测不仅能够实现内部缺陷的存在性判别,还能够进一步区分不同损伤模式并追踪其演化过程。下面将分别从循环退化损伤和机械滥用损伤两个方面,对超声技术在锂离子电池损伤识别中的研究进展进行讨论。

3.2.1 循环退化损伤

电动航空器在极端服役工况下,动力电池内部界面反应、材料结构和层间接触状态会持续演变^[127]。与突发性故障不同,退化损伤通常没有明确的触发时刻,而是在反复充放电和多场耦合作用下逐渐形成,并最终体现在电极/电解液界面、活性颗粒、孔隙结构及层间接触状态之中^[25]。对于超声检测而言,这种渐进式变化并不意味着超声信号不明显,恰恰相

反,由于传播路径中的介质性质和界面条件始终在缓慢改变,传播时间、幅值衰减以及散射行为通常会表现出连续演化的趋势^[128]。因此,超声技术在退化损伤识别中的价值,不仅体现在判断电池是否老化,更在于揭示老化过程中内部结构如何发生变化。

Xie等^[121]通过对大尺寸锂离子电池进行超声诊断,并与拆解后的负极图像进行对比,揭示了析锂诱导的非均匀退化现象,说明超声信号能够反映负极表面锂沉积及其空间分布特征,如图5(a)所示。Xu等^[88]进一步利用相控阵超声成像对电池内部气体进行检测和定位,获得了气泡在横向及厚度方向上的空间分布,并通过X射线CT验证了成像结果;该研究表明,超声不仅可以判断是否发生产气现象,还能够追踪局部气体区域的形成、扩展和累积过程,如图5(b)所示。Deng等^[129]则利用超声扫描观察软包电池老化过程中的电解液退浸润现象,指出电解液是否填充多孔电极会显著改变声波传播路径和介质连续性,如图5(c)所示。上述研究表明,超声监测的意义并不局限于SOC和SOH估计,还在于捕捉退化过程中逐步形成的内部结构和界面异常。容量衰减、内阻增长与安全裕度降低并非彼此独立的结果,而是内部退化演化在不同尺度上的表现。因此,超声技术正在由传统状态监测进一步拓展至老化机理识别和失效前驱分析^[130]。

3.2.2 机械滥用损伤

对于航空动力电池而言,飞行过程中的硬着陆及异物冲击等工况,都可能在电芯局部区域产生集中载荷并引起内部结构损伤。由于这类工况下的受力特征难以直接复现,压痕试验(Indentation test)常被作为一种典型的机械滥用测试方法,用于模拟局部集中载荷作用下的失效过程。从图6(a)^[131]可以看出,随着压入过

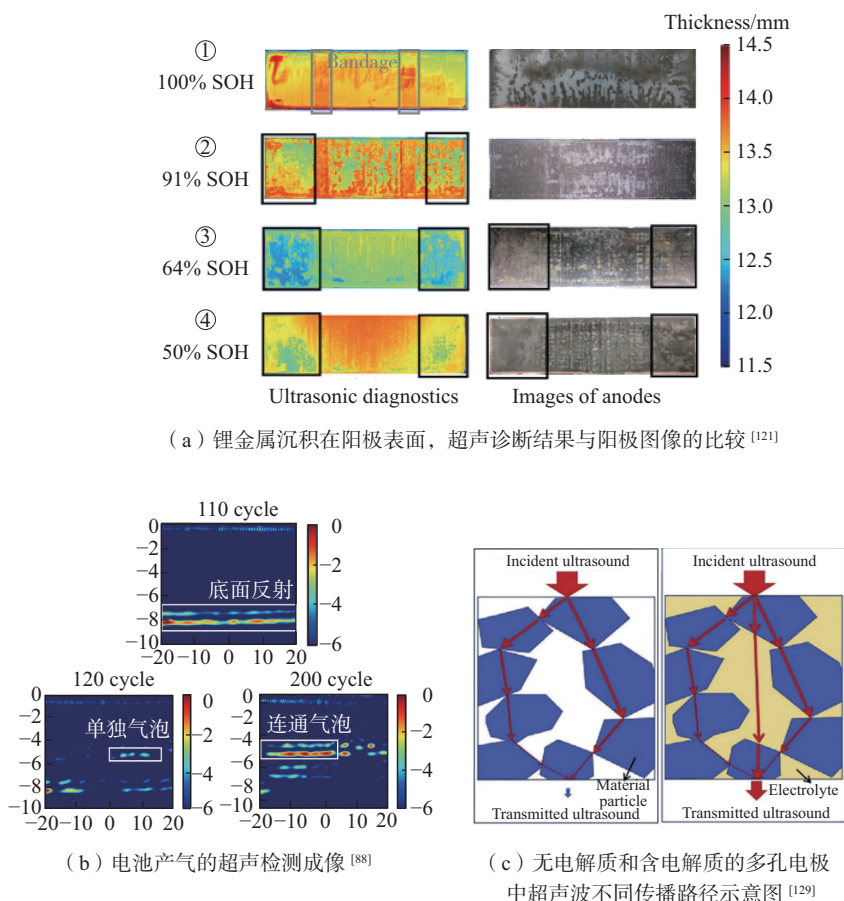


图5 超声检测对电池内部退化损伤的识别及其传播机理示意图

Fig.5 Schematic of ultrasonic identification of internal degradation damage in lithium-ion batteries and the corresponding propagation mechanisms

程持续进行,电池力载荷逐渐升高;当内部结构发生明显破坏后,力载荷、电压和温度响应均出现突变。图6(b)^[131]进一步展示了不同压痕位移下的内部损伤演化过程:在较小位移下,电芯内部首先出现局部变形和缺陷;随着压痕深度增加,金属箔片逐渐出现裂纹和断裂,并伴随泥裂状裂纹等局部损伤特征。结果表明,机械载荷作用下的内部损伤并非瞬间形成,而是经历了由局部变形逐步发展为裂纹扩展和结构破坏的过程。由于早期内部损伤未必会立即引起显著的端电压或表面温度变化,仅依赖传统外部信号难以及时判断电芯内部结构状态,因此有必要引入对裂纹、层间损伤及局部界面变化更加敏感的监测手段。

目前多数机械损伤研究仍主要

依赖压痕、预制损伤或冲击试验模拟实际工况,并结合拆解分析、X射线成像或热失控结果评价损伤程度,而对损伤形成过程的原位实时监测仍相对有限。外部冲击载荷往往会在较短时间内引起电极层、隔膜及层间界面的局部断裂、分层甚至内部短路^[132];相比之下,飞行振动和结构振动虽然单次作用强度较低,却可能通过长期累积效应导致连接松动、界面退化以及结构疲劳损伤,从而影响电池的服役可靠性^[133]。无论是瞬态冲击还是长期振动,其本质上均会改变电池内部的力学状态和界面接触条件,并进一步影响超声波传播特征。Chen等^[134]利用超声导波对软包锂离子电池压痕过程中的机械损伤进行实时监测。随着压痕深度增加,导波波形和能量分布逐渐偏离未损伤初始状

态;当压痕深度超过约3.0 mm时,导波特征变化可稳定超过噪声阈值,表明内部损伤被有效识别。研究进一步通过累积质心偏移等信号特征参数,实现了对损伤演化过程的连续追踪,表明超声导波不仅能够用于机械损伤诊断,还具备在线监测损伤萌生与发展的潜力。然而,相较于试验条件下可控的单一工况,在实际复杂服役工况下,机械损伤识别仍需综合考虑传播时间、幅值衰减、波形畸变及频谱变化等多维超声特征,并结合温度、压力与应变等多物理信息,以提高损伤识别的鲁棒性与工程适用性。

3.3 基于超声波的热失控早期预警

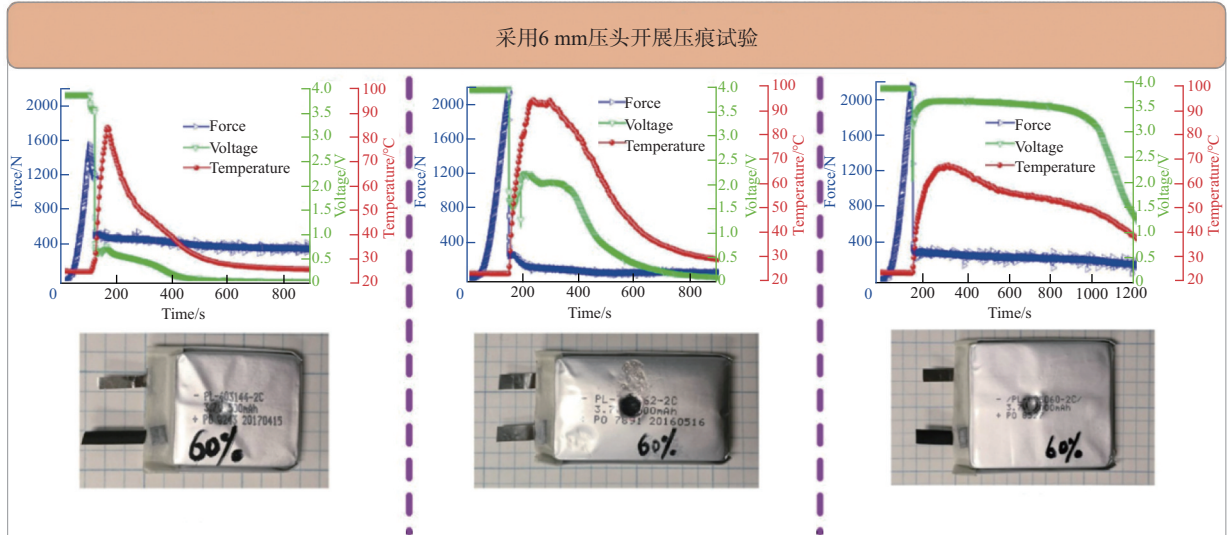
如图7所示^[135],锂离子电池热失控并非瞬间发生,而是伴随温度升高经历由缓慢副反应向剧烈放热反应逐步演化的过程。在80~120℃区间,固体电解质界面膜开始分解;当温度进一步升高至120℃以上时,负极与电解液之间的副反应逐渐增强,并伴随CO₂、C₂H₄等气体的生成。温度达到130~170℃后,隔膜可能发生熔化或收缩,局部离子阻隔能力下降,内部短路风险随之增加。当温度超过150℃时,电解液分解以及正极结构失稳等反应进一步加剧,并产生CO、CO₂、O₂和HF等气体;在更高温度下,电极材料、黏结剂及电解液之间的反应持续增强,最终可能推动电池进入不可逆热失控阶段。需要指出的是,不同电池体系、荷电状态和滥用条件下,各类反应的起始温度及演化顺序可能存在差异,图7中温度范围主要用于表征典型演化阶段。

与内部反应演化相对应,不同监测信号对热失控前驱过程的响应具有阶段性,但其响应时序受电池体系、触发机制和判据阈值等多种因素影响,并不存在统一的固定顺序。在热失控孕育初期,副反应产气、电极膨胀、界面失稳和材料软化等过程均可能引起内部压力和体积膨胀的异常变化。当内部压力达到安全阀开

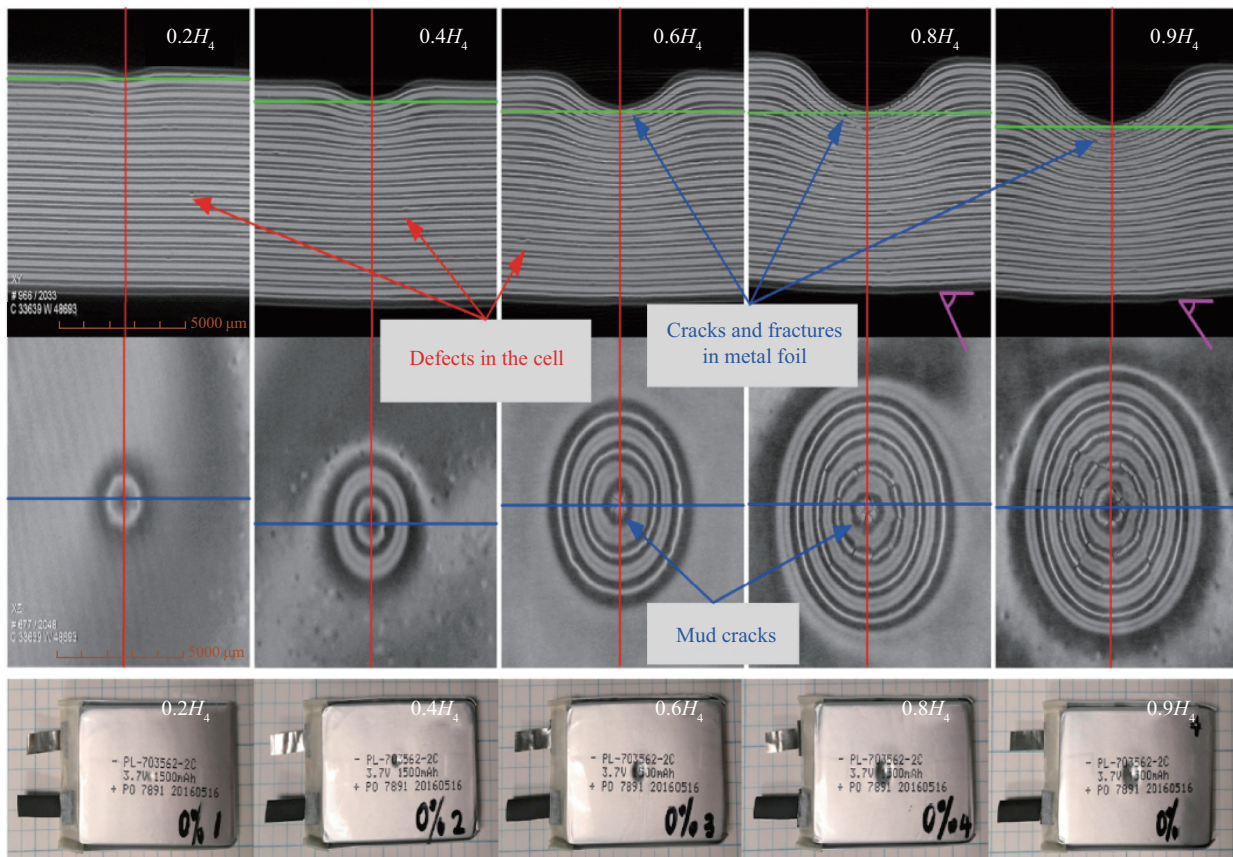
启或封装破裂阈值时,电池排气并产生可识别的特征声信号和气体信号。相比之下,端电压的明显突变通常与内部短路或严重结构失效密切相关,

而表面温度异常则受限热量由电芯内部向外传导的过程,表现出一定滞后性。对于航空动力电池而言,一旦进入热失控不可逆放热阶段,可用

于功率降额、故障隔离或任务调整的时间窗口将显著缩短。因此,热失控预警的关键不在于单纯提高检测灵敏度,而在于能否捕获具有良好可重



(a) 采用直径为6 mm的压头进行压痕试验时,不同容量锂离子电池的载荷、电压及温度响应



(b) 不同压痕位移下的X射线计算机断层成像扫描图像

图6 压痕载荷作用下锂离子电池的外部响应与内部损伤演化^[131]

Fig.6 External responses and internal damage evolution of lithium-ion batteries under indentation loading

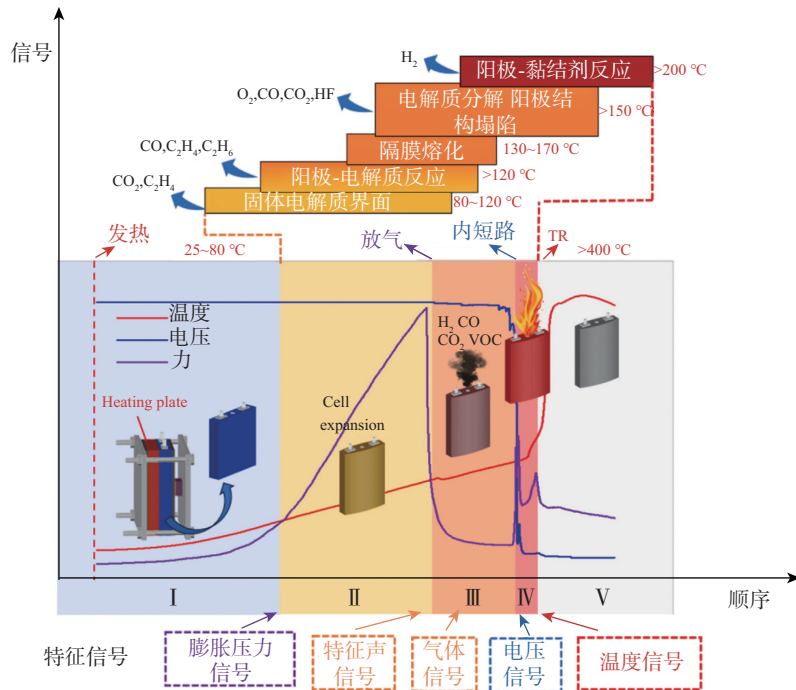


图7 热失控过程中LIBs的内部反应及特征参数^[135]

Fig.7 Internal reactions and characteristic parameters of LIBs during thermal runaway^[135]

复性和物理可解释性的前驱特征,并建立其与不同失效路径之间的稳定映射关系。然而,这些早期异常多发生于电池内部局部区域,且伴随的结构与材料变化幅度较小,难以通过传统外部测量手段直接感知,因此热失控早期预警仍面临较大挑战。Pham等^[136]将声学飞行时间谱与同步X射线成像相结合,研究了热滥用条件下

软包电池内部结构的变化。结果表明,产气诱发的层间脱黏可通过超声信号衰减及波形峰值位置偏移加以识别,说明超声响应不仅能够反映温度变化,还能够表征热失控前期的内部结构演变。

超声技术用于热失控预警的物理基础主要源于其对内部介质状态和层间接触关系变化的高度敏感

性。在热滥用或电滥用过程中,电解液分解与副反应会诱发局部产气,形成气-液-固多相共存区域。由于气体与固液介质之间存在显著的声阻抗差异,局部产气将引起超声传播过程中的反射增强、散射增强及衰减加剧等特征变化。如表2所示,现有超声热失控预警研究多数采用外部加热方式诱发电池进入热滥用状态,但不同研究在加热策略和试验条件上仍存在明显差异。部分研究通过不同功率对电芯进行整体加热,以分析升温速率和热输入强度对产气、界面失稳及热失控演化过程的影响^[82];另一些研究则采用持续外部加热,并对比不同初始SOC条件下的超声响应差异^[137]。与整体加热相比,局部加热能够在电芯内部形成更明显的温度梯度,更接近局部过热、内部短路或异常热源引起的非均匀失效过程。相关研究表明,在局部加热条件下,超声体波和导波均可在排气、封装破裂或端电压明显下降之前出现可识别的异常特征^[84,125]。此外,Appleberry等^[97]针对过充诱发失效提出了基于超声特征的预警-紧急分级预警方法。预警信号平均出现在总过充时间的15%处,而紧急停止信号平均

表2 基于超声监测的锂离子电池热失控早期预警研究

Table 2 Research on early warning of lithium-ion battery thermal runaway using ultrasound monitoring

电池类型	电池体系	滥用触发方式	超声模式	预警时间
软包电池	磷酸铁锂正极(LFP)/石墨负极	外部加热诱发热滥用(不同功率均匀加热)	体波	相较于排气事件提前282.0~953.8 s;相较于热失控事件提前377.5~851.2 s ^[82]
	锰酸锂正极(LMO)/石墨负极	热滥用(外部持续加热)	体波	相较于端电压明显下降,提前32.47 min(100% SOC)和27.21 min(0% SOC)发出预警 ^[137]
	镍钴锰酸锂正极(NMC532)/石墨负极	热滥用(局部加热)	体波/导波	相较于首次破裂或排气事件,超声特征可最高提前25.4 min发出预警 ^[84]
	商用LG1P-531A锂离子电池	电滥用(室温持续过充)	体波	相较于电池失效,预警可提前124 min;紧急停止可提前54 min ^[97]
	磷酸铁锂正极(LFP)/石墨负极	机械滥用(压痕刺穿)	导波	相较于端电压下降和表面温度突升,可提前约15 min识别机械损伤风险 ^[134]
	钴酸锂正极(LCO)/石墨负极	热滥用(局部/均匀加热)	体波	明显声学异常较热失控提前约250 s ^[125]

出现在35%处;在中间阶段采取控制措施,有可能阻止失效进一步发展。

需要指出的是,不同文献中关于预警提前量的结果不具有直接横向比较性。其主要原因在于电池体系、容量、封装结构、初始SOC、加热功率与位置以及判据定义等均会显著影响副反应速率、产气行为及热量传递过程。一般而言,整体缓慢加热通常能够提供较长的异常积累阶段,而局部高强度加热会使失效过程明显加速;类似地,过充、机械损伤及突发内部短路所对应的特征响应顺序也并不完全一致。尽管如此,现有研究普遍表明,相较于端电压突变、表面温升及排气等宏观外部信号,超声特征通常能够在电芯内部产气、层间分离及材料状态变化阶段更早出现可识别响应,从而为热失控风险提供更早的可观测窗口。

3.4 小结

综合来看,超声波传播特征能够对电池内部材料弹性、界面接触状态及结构缺陷的变化产生响应,从而形成由运行状态评估、退化与损伤识别到热失控早期预警的递进式监测体系。在状态评估方面,飞行时间、信号幅值及频谱等特征可用于表征SOC和SOH变化,其中飞行时间具有相对较好的稳定性,但其与电池状态之间的映射仍受温度、倍率及耦合条件等因素影响,温度补偿和机理解析是提高估计准确性的重要基础。在损伤识别方面,超声体波和导波能够感知循环老化引起的析锂、产气和层间退化,也可识别机械载荷作用下的局部变形、裂纹扩展及界面脱黏,并对损伤演化过程进行连续追踪。在安全预警方面,局部产气、材料软化和层间失稳等内部变化能够在端电压明显下降或表面温度突升前引起声学异常,现有研究已显示出分钟级乃至更长的预警潜力。

然而,现有研究仍多集中于单体电芯和实验室可控工况,不同电池体系、超声模式及测试条件下的特征规律尚未统一,温度、压力和耦合状态等因素也会影响监测结果,限制了超声技术的工程推广。产业化方面,部分主流动力电池企业已围绕超声检测开展专利布局和技术研发,专业检测企业及产学研联合项目也已进行样机验证,表明该技术具有明确的行业需求和初步工程基础。但现有应用仍主要集中于电池研发和制造质量控制,公开报道的量产应用较少,在商业化动力电池产品及机载BMS中的规模化集成尚未实现。其主要制约因素包括换能器及耦合层的服役寿命、长期信号稳定性、复杂工况下的标定与特征漂移,以及采集设备带来的额外成本、功耗、体积和重量,安装、维护及数据分析流程也仍较复杂。未来需推动监测系统向小型化、低成本、低功耗和长期可靠方向发展,以实现全寿命周期原位监测。

4 总结与展望

复杂航空服役环境对动力电池状态监测和故障预警提出了更高要求,传统基于电压、电流和温度等外部参数的监测方法已难以满足对内部失效过程的精准感知需求。近年来,薄膜、光纤和超声等先进传感技术的发展,为获取电池内部热-力-电状态及结构演化信息提供了新的技术途径。其中,薄膜与光纤传感器能够实现关键物理量的原位测量,超声技术则具备无损感知内部材料特性、界面状态及缺陷演化的独特优势。

尽管相关研究取得了较大进展,但面向电动航空器应用,动力电池监测技术仍存在诸多挑战,未来研究可重点关注以下6个方面。

(1) 传感器集成与长期可靠

性。航空动力系统对质量、体积、功耗和可靠性具有严格要求。未来监测技术的发展应在保证测量精度和灵敏度的同时,尽量降低对电池制造工艺、能量密度和循环寿命的影响。针对长期循环、高低温交变、振动冲击及复杂电化学环境,需要进一步提升传感器及其封装的稳定性和耐久性,并推动传感器、数据采集和无线传输系统的小型化、轻量化与工程化集成。

(2) 低成本传感器与低功耗监测系统的产业化应用。现有薄膜、光纤和超声监测技术已展现出较好的应用潜力,但其产业化仍主要受技术成熟度和系统工程化水平制约,而非缺乏行业需求。薄膜传感器仍需提高封装寿命与长期可靠性,光纤传感系统则受解调设备成本、体积和功耗限制;超声技术虽已逐步应用于电池研发和制造质量控制,但在商业动力电池及机载BMS中的规模化集成仍较有限。未来应开发低成本、可批量制造的传感单元和微型低功耗采集系统,提高传感器、耦合层及封装结构的服役寿命,并简化布设、标定和维护流程,推动智能监测技术由实验室验证和制造检测向动力电池全寿命周期在线监测转化。

(3) 复杂工况下的机理解析与特征解耦。动力电池监测信号通常受SOC、SOH、温度、倍率、压力及老化等多种因素共同影响。以超声监测为例,温度变化、倍率效应及结构退化均可能引起声学特征改变,从而影响状态识别的准确性。未来需要深入揭示电池内部电-热-力耦合过程与监测信号之间的关联机制,建立“工况-状态-损伤机制-特征响应”的定量关系,实现多因素影响的有效解耦与失效机理辨识。

(4) 多源信息融合与智能诊断。不同监测参数对电池失效过程的敏

感阶段存在差异,单一信号难以全面反映复杂失效行为。未来应充分融合温度、电压、压力、应变、气体以及超声等多源信息,结合机理模型、数据驱动方法和人工智能技术,构建具备状态评估、故障诊断和风险预测能力的智能监测体系,实现由状态监测向主动安全管理的转变。

(5)系统级验证与适航应用。目前大多数研究仍集中于单体电芯层面,而实际航空动力系统还受电芯一致性、热耦合效应、结构装配以及飞行环境等因素影响。未来需要进一步开展电池模组、电池包乃至整机层面的监测与验证研究,优化传感器布设、故障定位以及数据管理策略,并逐步建立适用于航空动力电池的测试评价标准和适航验证体系。

(6)面向新型电池体系的监测拓展。随着高比能固态电池等新型储能体系的发展,动力电池失效模式正在发生变化。界面退化、固态电解质开裂及锂枝晶穿透等问题对现有监测方法提出了新的挑战。未来需进一步研究薄膜、光纤及超声等传感技术在固态电池中的适用性,建立界面状态、应力演化及结构损伤与传感信号之间的映射关系,为下一代航空动力电池的健康管理和安全监测提供支撑。

总体而言,动力电池监测技术正由基于外部参数的状态估计逐步向面向内部状态的深层感知发展。随着先进传感、多源信息融合和智能诊断技术的不断进步,未来有望实现动力电池全生命周期健康管理及主动安全控制,为电动航空器的大规模应用和适航安全保障提供重要支撑。

参考文献

[1] Sripad S, Viswanathan V. The promise of energy-efficient battery-powered urban aircraft[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of

America, 2021, 118(45): e2111164118.

[2] 杨晓琳,张乐,陈红英.国内外eVTOL发展现状及应用场景[J].中国科技信息,2024(22): 59-61.

Yang Xiaolin, Zhang Le, Chen Hongying. Development status and application scenarios of eVTOL at home and abroad[J]. China Science and Technology Information, 2024(22): 59-61.

[3] Camargos P H, dos Santos P H J, dos Santos I R, et al. Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications: A review of state of the art[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(13): 19258-19268.

[4] Niu H Z, Zhang N, Lu Y, et al. Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 88: 111666.

[5] Fredericks W L, Sripad S, Bower G C, et al. Performance metrics required of next-generation batteries to electrify vertical takeoff and landing (VTOL) aircraft[J]. ACS Energy Letters, 2018, 3(12): 2989-2994.

[7] Sun N, Rong Q L, Wu J, et al. Fully printable integrated multifunctional sensor arrays for intelligent lithium-ion batteries[J]. Nature Communications, 2025, 16: 7361.

[8] 张怡,葛筱渔,李真,等.用于锂电池监测的声学及光学传感技术研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(1): 167-177.

Zhang Yi, Ge Xiaoyu, Li Zhen, et al. Progress on acoustic and optical sensing technologies for lithium rechargeable batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(1): 167-177.

[9] 王文伟,刘帅邦,杨晓光,等.锂离子电池智能传感技术综述[J].电源技术,2023,47(9): 1107-1112.

Wang Wenwei, Liu Shuaibang, Yang Xiaoguang, et al. Review of smart sensing techniques for lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(9): 1107-1112.

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

[11] Wang Y Y, Lai X, Chen Q W, et al. Progress and challenges in ultrasonic technology for state estimation and defect

detection of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Materials, 2024, 69: 103430.

[12] Sripad S, Bills A, Viswanathan V. A review of safety considerations for batteries in aircraft with electric propulsion[J]. MRS Bulletin, 2021, 46(5): 435-442.

[13] Tang S H, Sun F, Wang H L, et al. Revealing the degradation mechanism of lithium-ion batteries for electric aircraft[J]. Advanced Materials, 2025, 37(29): 2502363.

[14] Dixit M, Bisht A, Witherspoon B, et al. Battery electrolyte design for electric vertical takeoff and landing (eVTOL) platforms[J]. Advanced Energy Materials, 2024, 14(29): 2400772.

[15] Osman A A, Mistarihi M Z, Ramadan M, et al. A review and bibliometric analysis of intelligent techniques for advanced battery state estimation in aviation propulsion systems[J]. Results in Engineering, 2025, 27: 106741.

[16] Rahman M M, Bisht A, Amin R, et al. Thermal dynamics and lithium plating detection in high-power Li-ion batteries for eVTOL applications[J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(47): e03292.

[17] 工业和信息化部装备工业发展中心. 低空航空器动力电池技术路线图(2025版)[R/OL]. (2025-11-28) [2026-06-14]. https://www.miit-eidc.org.cn/art/2025/11/28/art_1644_11869.html.

Equipment Industry Development Center of the Ministry of Industry and Information Technology, Technology roadmap for power batteries of low-altitude aircraft: 2025 edition[R/OL]. (2025-11-28) [2026-06-14]. https://www.miit-eidc.org.cn/art/2025/11/28/art_1644_11869.html.

[18] Qiao X T, Chen G T, Lin W C, et al. The impact of battery performance on urban air mobility operations[J]. Aerospace, 2023, 10(7): 631.

[19] Liu T, Yang X G, Ge S H, et al. Ultrafast charging of energy-dense lithium-ion batteries for urban air mobility[J]. eTransportation, 2021, 7: 100103.

[20] Papas P. Meeting the challenge of mitigating Li-ion battery fires for aviation[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2024, 20: 100286.

[21] Xie S, Yang X Y, Sun Q, et al.

Research progress and prospects on thermal safety of lithium-ion batteries in aviation low-temperature and low-pressure environments[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 83: 110734.

[22] Wang Z, Zhao Q J, Yu X Y, et al. Impacts of vibration and cycling on electrochemical characteristics of batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 601: 234274.

[23] Zhou M Z, Hu L L, Chen S R, et al. Different mechanical-electrochemical coupled failure mechanism and safety evaluation of lithium-ion pouch cells under dynamic and quasi-static mechanical abuse[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 497: 229897.

[24] Yang J F, Chen S, Pang T W, et al. A concurrent estimation framework for multiple aging parameters of lithium-ion batteries for eVTOL applications[J]. *Applied Energy*, 2025, 399: 126500.

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

[26] Kumar K, Rithvik G, Mittal G, et al. Impact of fast charging and low-temperature cycling on lithium-ion battery health: A comparative analysis[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 94: 112580.

[27] Fang Y, Smith A J, Lindström R W, et al. Quantifying lithium lost to plating and formation of the solid-electrolyte interphase in graphite and commercial battery components[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 28: 101527.

[28] Maher K, Boumaiza A, Amin R. Understanding the heat generation mechanisms and the interplay between joule heat and entropy effects as a function of state of charge in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 623: 235504.

[29] Hu D N, Huang S, Wen Z, et al. A review on thermal runaway warning technology for lithium-ion batteries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 206: 114882.

[30] Liu K, Liu Y Y, Lin D C, et al. Materials for lithium-ion battery safety[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaas9820.

[31] Zhang Y P, Li S Y, Shi J K, et al. Revealing the key role of non-solvating diluents for fast-charging and low temperature Li-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024,

94: 171–180.

[32] Holoubek J, Liu H D, Wu Z H, et al. Tailoring electrolyte solvation for Li metal batteries cycled at ultra-low temperature[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(3): 303–313.

[33] Lin X K, Khosravinia K, Hu X S, et al. Lithium plating mechanism, detection, and mitigation in lithium-ion batteries[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, 87: 100953.

[34] Sun Q, Liu H X, Zhi M Y, et al. Thermal characteristics of thermal runaway for pouch lithium-ion battery with different state of charges under various ambient pressures[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 527: 231175.

[35] Jia Z Z, Huang Z H, Zhai H J, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of 18, 650 lithium-ion battery modules with two cathode materials at low pressure[J]. *Energy*, 2022, 251: 123925.

[36] 何俊贤, 谢松, 陈现涛. 气压及加热功率对锂离子电池热安全的影响机制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(11): 3197–3206.

He Junxian, Xie Song, Chen Xiantao. Influence mechanism of air pressure and heating power on thermal safety of lithium-ion battery[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(11): 3197–3206.

[37] 牛灵慧, 季亚状, 喻国敏. 高安全性锂离子电池隔膜的研究进展[J]. *河南城建学院学报*, 2026, 35(3): 92–98, 118.

Niu Linghui, Ji Yazhuang, Yu Guomin. Research progress on high-safety separators for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2026, 35(3): 92–98, 118.

[38] Zhou M Z, Yan J Y, Ren Q F, et al. Strain-rate-dependent failure behavior of lithium-ion batteries: Role of liquid electrolyte in impact safety[J]. *ETransportation*, 2025, 26: 100490.

[39] Zhu X C, Xie Y, Chen H F, et al. Numerical analysis of the cyclic mechanical damage of Li-ion battery electrode and experimental validation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105915.

[40] Hatherall O, Barai A, Niri M F, et al. Novel battery power capability assessment for improved eVTOL aircraft landing[J]. *Applied*

Energy, 2024, 361: 122848.

[41] 张妮, 盛国超. 锂离子电池 SOC 估算方法概述[J]. *汽车实用技术*, 2026, 51(9): 123–129.

Zhang Ni, Sheng Guochao. Overview of SOC estimation methods for lithium-ion batteries[J]. *Automobile Applied Technology*, 2026, 51(9): 123–129.

[42] Liu W X, Che Y H, Zheng Y S, et al. Optimal battery charging of electric flying cars considering quantified safety and economic costs[J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 327: 119576.

[43] Ayyaswamy A, Vishnugopi B S, Mukherjee P P. Revealing hidden predicaments to lithium-ion battery dynamics for electric vertical take-off and landing aircraft[J]. *Joule*, 2023, 7(9): 2016–2034.

[44] Reid H T, Singh G, Palin E, et al. Key considerations for cell selection in electric vertical take off and landing vehicles: A perspective[J]. *EES Batteries*, 2025, 1(2): 227–241.

[45] Wang B J, Xu T, Zheng B L, et al. Predicting battery degradation for electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft: A comprehensive review of methods, challenges, and future trends[J]. *eTransportation*, 2025, 26: 100477.

[46] Müller F, Barke A, Nittinger O, et al. DOCEV: A new holistic model for direct operating cost estimation of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2026, 132: 102951.

[47] Li W F, Xue Y, Feng X B, et al. Enhancing understanding of particle emissions from lithium-ion traction batteries during thermal runaway: An overview and challenges[J]. *eTransportation*, 2024, 22: 100354.

[48] Feng X N, Ren D S, He X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 743–770.

[49] Jäger F, Bertram O, Lübke S M, et al. Battery-electric powertrain system design for the HorizonUAM multirotor air taxi concept[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2025, 16(3): 921–955.

[50] Bosch C, Pachchhao R, Yavrucuk I. Safety assessment for battery thermal runaway propagation for urban air mobility[J]. *CEAS*

Aeronautical Journal, 2026, 17(3): 1345–1354.

[51] Cheng K W E, Divakar B P, Wu H J, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 76–88.

[52] Attia P M, Weng A, Chueh W C. Limits of electrochemical data for predicting battery lifetime and failure[J]. Joule, 2026, 10(5): 102423.

[53] Shi Q L, Xu M S, Li J Y, et al. State monitoring and intelligent management of lithium-ion batteries based on advanced sensing technology: From principles to application[J]. Energy Storage Materials, 2026, 89: 105124.

[54] Meng Q Q, Huang Y X, Li L, et al. Smart batteries for powering the future[J]. Joule, 2024, 8(2): 344–373.

[55] Mohammadi Moradian J, Ali A, Yan X H, et al. Sensors innovations for smart lithium-based batteries: Advancements, opportunities, and potential challenges[J]. Nano-Micro Letters, 2025, 17(1): 279.

[56] Wang X, Zhang H Y, Qi X Y, et al. Flexible sensors for battery health monitoring[J]. Nano-Micro Letters, 2026, 18(1): 154.

[57] Guo S, Luo H, Gao Z, et al. Embedded sensing: The neural frontier and early-warning revolution in battery safety monitoring[J]. Energy Storage Materials, 2025, 82: 104582.

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

[59] 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.

[60] Guo Z, Briggs C, Vincent T A, et al. Global thermal image of cylindrical 21700 Li-ion batteries with distributed optical fibre sensor[J]. Journal of Power Sources, 2024, 592: 233980.

[61] Huang J Q, Han X L, Liu F, et al. Monitoring battery electrolyte chemistry via In-operando tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14

(12): 6464–6475.

[62] Miao Z Y, Xiao X P, Li J B, et al. Evaluating the effect of binder for sulfurized polyacrylonitrile cathode via optical fiber sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(5): 2301736.

[63] Meng K P, Chen X P, Zhang W, et al. A robust ultrasonic characterization methodology for lithium-ion batteries on frequency-domain damping analysis[J]. Journal of Power Sources, 2022, 547: 232003.

[64] Fan J B, Liu C C, Li N, et al. Wireless transmission of internal hazard signals in Li-ion batteries[J]. Nature, 2025, 641(8063): 639–645.

[65] Zhu Y H, Zhang X Q, Shang Y L, et al. Utilized distributed optical fiber sensor with spiral-serpentine deployment enabling high-precision full-field temperature reconstruction and thermal management for pouch lithium-ion battery[J]. Advanced Science, 2025, 12(44): e11030.

[66] Huang J Q, Boles S T, Tarascon J M. Sensing as the key to battery lifetime and sustainability[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(3): 194–204.

[67] 邢美华. 储能电池中光纤温度压强传感技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2025.

Xing Meihua. Research on optical fiber sensing technology for temperature and pressure in energy storage batteries[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2025.

[68] 黄丹茹, 葛筱渔, 张怡, 等. 光纤布拉格光栅原位监测揭示硬壳电池应变、温度演变机理研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(2): 252–262.

Huang Danru, Ge Xiaoyu, Zhang Yi, et al. FBG-based study of in-situ strain and temperature evolution in prismatic cell[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(2): 252–262.

[69] 王嫻琳, 李宜丁, 张月宁, 等. 智能电池嵌入式光纤感知技术综述[J]. 电源技术, 2026, 50(4): 581–592.

Wang Yanlin, Li Yiding, Zhang Yuening, et al. Review of embedded optical fiber sensing technology for smart batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(4): 581–592.

[70] Mei W X, Liu Z, Wang C D, et al. In-operando monitoring of thermal runaway in commercial lithium-ion cells via advanced lab-

on-fiber technologies[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5251.

[71] Zhang Y, Li Y P, Guo Z Z, et al. Health monitoring by optical fiber sensing technology for rechargeable batteries[J]. EScience, 2024, 4(1): 100174.

[72] Tan K, Wang S, Jiang J F, et al. In-operando monitoring gas pressure for accurate early warning of thermal runaway in lithium-ion batteries induced by overheating based on an optical fiber Fabry–Perot interferometer[J]. Journal of Power Sources, 2024, 615: 235096.

[73] Gervillière-Mouravieff C, Boussard-Plédel C, Huang J Q, et al. Unlocking cell chemistry evolution with in-operando fibre optic infrared spectroscopy in commercial Na(Li)-ion batteries[J]. Nature Energy, 2022, 7(12): 1157–1169.

[74] Wang R L, Zhang H Z, Liu Q Y, et al. In-operando monitoring of ion activities in aqueous batteries with plasmonic fiber-optic sensors[J]. Nature Communications, 2022, 13: 547.

[75] Hu X R, Jiang Z L, Yan L Q, et al. Real-time visualized battery health monitoring sensor with piezoelectric/pyroelectric poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) and thin film transistor array by in-situ poling[J]. Journal of Power Sources, 2020, 467: 228367.

[76] Li S S, Rong Q L, Sun N, et al. Enhancing lithium-ion battery safety with a multilayer integrated sensor for synchronous thermal-mechanical monitoring[J]. Advanced Materials, 2026, 38(24): e72963.

[77] Wang M Y, Yang Z X, Mao S Y, et al. Passive ultrasonic probe and communication for internal hazards in lithium-ion batteries[J]. Joule, 2026, 10(6): 102353.

[78] Zhang C H, Liu Z C, Lao Z J, et al. In-operando spatiotemporal super-resolution of thermal events monitoring in lithium metal batteries[J]. National Science Review, 2025, 12(5): nwaf088.

[79] Gao J, Liu X, Lyu Y, et al. SOC detection of multi-regional lithium-ion battery based on ultrasonic flexible sensing technology[C]//2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 1–5.

[80] 刘轩, 吕炎, 高杰. 基于柔性压电纤

维阵列的锂离子电池荷电状态声学表征[J]. 湖南电力, 2025, 45(1): 29–36.

[80] Liu Xuan, Lyu Yan, Gao Jie. Acoustic characterization of lithium-ion batteries state of charge based on flexible piezoelectric fiber array[J]. Hunan Electric Power, 2025, 45(1): 29–36.

[81] Sampath S, Yin X S, Tham Z W, et al. Real-time and non-contact estimation of state of charge for lithium-ion battery using laser ultrasonics[J]. Journal of Power Sources, 2024, 605: 234544.

[82] Lee H, Seo Y H, Ma P S. Advanced ultrasonic detection of lithium-ion battery thermal runaway under various heating powers[J]. Applied Energy, 2025, 396: 126328.

[83] Yang F, Mao Q, Zhang J M, et al. Real-time state-of-charge estimation for rechargeable batteries based on in-situ ultrasound-based battery health monitoring and extended Kalman filtering model[J]. Applied Energy, 2025, 381: 125161.

[84] McGee T M, Neath B, Matthews S, et al. Ultrasonic inspection of lithium-ion pouch cells subjected to localized thermal abuse[J]. Journal of Power Sources, 2023, 583: 233542.

[85] 孔祥博, 彭丽莎, 蒋超凡, 等. 锂电池无损检测技术研究进展与比较分析[J]. 电工技术学报, 2026, 41(11): 3563–3588.

Kong Xiangbo, Peng Lisha, Jiang Chaofan, et al. Research progress and comparative analysis of non-destructive testing technologies for lithium batteries[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(11): 3563–3588.

[86] Yang F, Mao Q, Zhang J M, et al. Novel joint algorithm for state-of-charge estimation of rechargeable batteries based on the back propagation neural network combining ultrasonic inspection method[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 99: 113391.

[87] Zhao F Z, Han X B, Lu L G, et al. Accurate electrolyte volume of lithium-ion battery via ultrasonic sensing and time-delay neural networks[J]. eTransportation, 2026, 28: 100552.

[88] Xu W K, Yang Y W, Shi F, et al. Ultrasonic phased array imaging of gas evolution in a lithium-ion battery[J]. Cell Reports Physical Science, 2023, 4(9): 101579.

[89] Bauermann L P, Mesquita L V,

Bischoff C, et al. Scanning acoustic microscopy as a non-destructive imaging tool to localize defects inside battery cells[J]. Journal of Power Sources Advances, 2020, 6: 100035.

[90] Gold L, Bach T, Virsik W, et al. Probing lithium-ion batteries' state-of-charge using ultrasonic transmission—Concept and laboratory testing[J]. Journal of Power Sources, 2017, 343: 536–544.

[91] Liu Z H, Deng L M, Zhang Y C, et al. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT & E International, 2020, 109: 102193.

[92] Ladpli P, Kopsaftopoulos F, Chang F K. Estimating state of charge and health of lithium-ion batteries with guided waves using built-in piezoelectric sensors/actuators[J]. Journal of Power Sources, 2018, 384: 342–354.

[93] Yan L, Liang G, Jie G. SOC evaluation of lithium-ion battery based on MFC sensors[C]//Advances in Production. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 342–355.

[94] Zhang R N, Li X Y, Sun C Y, et al. State of charge and temperature joint estimation based on ultrasonic reflection waves for lithium-ion battery applications[J]. Batteries, 2023, 9 (6): 335.

[95] Wang Z L, Zhao X Y, Zhang H, et al. Active acoustic emission sensing for fast co-estimation of state of charge and state of health of the lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107192.

[96] Sood B, Osterman M, Pecht M. Health monitoring of lithium-ion batteries[C]//2013 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (ISPC). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1–6.

[97] Appleberry M C, Kowalski J A, Africk S A, et al. Avoiding thermal runaway in lithium-ion batteries using ultrasound detection of early failure mechanisms[J]. Journal of Power Sources, 2022, 535: 231423.

[98] Robinson J B, Pham M, Kok M D R, et al. Examining the cycling behaviour of Li-ion batteries using ultrasonic time-of-flight measurements[J]. Journal of Power Sources, 2019, 444: 227318.

[99] Copley R J, Cumming D, Wu Y, et al. Measurements and modelling of the response of an ultrasonic pulse to a lithium-ion

battery as a precursor for state of charge estimation[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 36: 102406.

[100] Chang W, Steingart D. operando 2D acoustic characterization of lithium-ion battery spatial dynamics[J]. ACS Energy Letters, 2021, 6(8): 2960–2968.

[101] McGee T M, Neath B, Matthews S, et al. Ultrasonic detection of pre-existing thermal abuse in lithium-ion pouch cells[J]. Journal of Power Sources, 2024, 595: 234035.

[102] Sun H B, Muralidharan N, Amin R, et al. Ultrasonic nondestructive diagnosis of lithium-ion batteries with multiple frequencies[J]. Journal of Power Sources, 2022, 549: 232091.

[103] Knehr K W, Hodson T, Bommier C, et al. Understanding full-cell evolution and non-chemical electrode crosstalk of Li-ion batteries[J]. Joule, 2018, 2(6): 1146–1159.

[104] Kirchev A, Guillet N, Brun-Buisson D, et al. Li-ion cell safety monitoring using mechanical parameters: Part I. normal battery operation[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(1): 010515.

[105] Galiounas E, Tranter T G, Owen R E, et al. Battery state-of-charge estimation using machine learning analysis of ultrasonic signatures[J]. Energy and AI, 2022, 10: 100188.

[106] Davies G, Knehr K W, Van Tassell B, et al. State of charge and state of health estimation using electrochemical acoustic time of flight analysis[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(12): A2746–A2755.

[107] Feiler S, Daubinger P, Gold L, et al. Interplay between elastic and electrochemical properties during active material transitions and aging of a lithium-ion battery[J]. Batteries & Supercaps, 2023, 6(4): e202200518.

[108] Williams D, Green J, Bugryniec P, et al. Battery age monitoring: Ultrasonic monitoring of ageing and degradation in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2025, 631: 236174.

[109] Williams D, Copley R, Bugryniec P, et al. A review of ultrasonic monitoring: Assessing current approaches to Li-ion battery monitoring and their relevance to thermal runaway[J]. Journal of Power Sources, 2024, 590: 233777.

- [110] de Vasconcelos L S, Xu R, Xu Z R, et al. Chemomechanics of rechargeable batteries: Status, theories, and perspectives[J]. Chemical Reviews, 2022, 122(15): 13043–13107.
- [111] Reichmann B, Sharif-Khodaei Z. Ultrasonic guided waves as an indicator for the state-of-charge of Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2023, 576: 233189.
- [112] Gao J, Zhang L H, Lyu Y, et al. Ultrasonic guided wave measurement and modeling analysis of the state of charge for lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108384.
- [113] Popp H, Koller M, Keller S, et al. State estimation approach of lithium-ion batteries by simplified ultrasonic time-of-flight measurement[J]. IEEE Access, 2019, 7: 170992–171000.
- [114] Tian Y, Yang S Y, Zhang R N, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries based on ultrasonic guided waves by chirped signal excitation[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110897.
- [115] 高杰, 张一凡, 韩振华, 等. 基于声波传播特性的锂离子电池荷电状态研究[J]. 声学学报, 2025, 50(4): 817–826.
- Gao Jie, Zhang Yifan, Han Zhenhua, et al. Study on the state of charge of lithium-ion batteries based on guided wave propagation characteristics[J]. Acta Acustica, 2025, 50(4): 817–826.
- [116] Li X Y, Hua W, Wu C X, et al. State estimation of a lithium-ion battery based on multi-feature indicators of ultrasonic guided waves[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 106113.
- [117] Zhao G Q, Liu Y, Liu G, et al. State-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion battery using the direct wave signals of guided wave[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102657.
- [118] Alvarez-Arenas T E G, Pinto A, Tichter T, et al. Multimodal contactless ultrasonic testing for Li-ion pouch cells[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 152: 120661.
- [119] Tang T, Xia Q, Xu M K, et al. Uneven internal SOC distribution estimation of lithium-ion batteries using ultrasonic transmission signals: A new data screening technique and an improved deep residual network[J]. eTransportation, 2025, 24: 100406.
- [120] Huang Z Y, Zhou Y, Deng Z, et al. Precise state-of-charge mapping via deep learning on ultrasonic transmission signals for lithium-ion batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(6): 8217–8223.
- [121] Xie Y C, Wang S, Li R H, et al. Inhomogeneous degradation induced by lithium plating in a large-format lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2022, 542: 231753.
- [122] Zhang S Y, Zuo P, Fan Z. Non-destructive monitoring of internal temperature distribution in prismatic Li-ion battery cells with ultrasound tomography[J]. Advanced Materials Technologies, 2025, 10(19): e00750.
- [123] Ajaereh M G, Courtney C, Vagg C. Temperature compensation in ultrasonic monitoring of lithium-ion batteries for accurate state of charge and ageing assessment[C]//2025 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Piscataway, NJ: IEEE, 2025: 1–4.
- [124] Borujerdi A S, Jin C R, Zhu J Y. Ultrasonic monitoring of lithium-ion batteries with in-situ self-temperature correction[J]. Journal of Power Sources, 2024, 597: 234103.
- [125] Owen R E, Wiśniewska E, Braglia M, et al. operando ultrasonic monitoring of the internal temperature of lithium-ion batteries for the detection and prevention of thermal runaway[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2024, 171(4): 040525.
- [126] Montoya-Bedoya S, McGee T M, Seok Lee J, et al. Review of ultrasonic methods for monitoring, damage detection, and processing of lithium-ion batteries throughout their life cycle[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2026, 160(1): 448–492.
- [127] 李佩泓, 张丽霞, 冯武彤, 等. 锂离子电池失效机理综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 153–159.
- Li Peixuan, Zhang Lixia, Feng Wutong, et al. Review on failure mechanism of lithium-ion battery[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 153–159.
- [128] Sun B, Zhang C, Xu Z C, et al. Ultrasonic diagnosis of the nonlinear aging characteristics of lithium-ion battery under high-rate discharge conditions[J]. Journal of Power Sources, 2023, 567: 232921.
- [129] Deng Z, Huang Z Y, Shen Y, et al. Ultrasonic scanning to observe wetting and “unwetting” in Li-ion pouch cells[J]. Joule, 2020, 4(9): 2017–2029.
- [130] Hamann T, Knight A, Sha Y N, et al. Multimodal assessment of battery aging by coupling ultrasound and impedance signatures[J]. ACS Applied Energy Materials, 2025, 8(20): 15051–15058.
- [131] Zhu X Q, Wang H, Wang X, et al. Internal short circuit and failure mechanisms of lithium-ion pouch cells under mechanical indentation abuse conditions: An experimental study[J]. Journal of Power Sources, 2020, 455: 227939.
- [132] 朱瑞卿, 胡玲玲, 周名哲. 锂电池多次冲击下的失效模式及损伤机制[J]. 固体力学学报, 2023, 44(6): 795–804.
- Zhu Ruiqing, Hu Lingling, Zhou Mingzhe. Failure modes and damage mechanisms of lithium-ion batteries under repeated impacts[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2023, 44(6): 795–804.
- [133] 李东琪. 多旋翼运转振动下动力锂电池安全性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2024.
- Li Dongqi. Research on the safety of power lithium battery under multi-rotor operation vibration[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2024.
- [134] Chen Z Y, Zhu Y M, Li L Z, et al. Real-time monitoring of mechanical damage in lithium-ion batteries using ultrasonic guided waves and cumulative energy feature analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2026, 252: 114261.
- [135] Xie S, Wang Z P, Fu J, et al. A review of sensing technology for monitoring the key thermal safety characteristic parameters of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2024, 624: 235598.
- [136] Pham M T M, Darst J J, Finegan D P, et al. Correlative acoustic time-of-flight spectroscopy and X-ray imaging to investigate gas-induced delamination in lithium-ion pouch cells during thermal runaway[J]. Journal of Power Sources, 2020, 470: 228039.
- [137] Zhang L S, Wei Z B, Liu C X, et al. One ultrasonic measurement for non-invasive and whole-life-cycle thermal diagnosis of lithium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(16): 7894–7904.

Research Progress and Perspectives on Intelligent Sensing Technologies and Ultrasonic Monitoring for Electric Aircraft Batteries

WANG Xuyang¹, WANG Zijian¹, HU Lingling¹, SU Zhongqing², XIANG Yong³, LI Yehai¹

(1. Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China;

2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

3. Tsing Bosch (Zhuhai) Technology Co., Ltd., Zhuhai 519085, China)

[ABSTRACT] Power batteries for electric aircraft operate under complex service conditions, including high-rate discharge cycles, fast charging, temperature and pressure fluctuations, as well as vibration and impact loads. Their performance degradation and safety failure processes involve coupled electrochemical, thermal, and mechanical behaviors, imposing more stringent requirements on state monitoring and safety warning than those encountered in ground transportation applications. Conventional battery management systems (BMSs) primarily rely on external parameters such as voltage, current, and temperature for state estimation, making it difficult to directly perceive internal structural evolution and early-stage failure processes. To enhance battery health management and safety warning capabilities, smart battery technologies have attracted increasing research interest. This paper first analyzes the extreme operating environments, degradation and damage mechanisms, and state and safety monitoring requirements of electric aircraft power batteries. The development of key smart battery technologies, including thin-film sensors and fiber-optic sensing, is then reviewed. Particular emphasis is placed on recent advances in ultrasonic techniques for state-of-charge and state-of-health evaluation, degradation and mechanical damage identification, and early warning of thermal runaway. Finally, future development trends and key challenges for intelligent monitoring and health management systems of aviation power batteries are outlined.

Keywords: Electric aircraft; Lithium-ion battery; Smart battery; Ultrasonic monitoring; State estimation; Thermal runaway warning

(责编 阳光)