

锂离子电池内部信号无损检测技术发展及应用

陈绍敏 付微婷

贵州梅岭电源有限公司 贵州遵义 563000

摘要: 随着新能源汽车、智能设备等领域的快速发展,锂离子电池作为关键的能源存储元件,其安全性与性能稳定性日益受到关注。无损检测技术以其非接触、非破坏性的优势,在锂离子电池内部状态监测中发挥着越来越重要的作用。本文综述了锂离子电池内部信号无损检测技术的发展历程、关键技术及应用以及未来发展趋势,重点介绍了超声检测、红外热成像技术等无损检测技术在锂离子电池领域的应用,并探讨了未来无损检测技术的发展趋势和挑战,为锂离子电池的安全监测与健康管理工作提供技术支持与理论参考。

关键词: 锂离子电池; 内部信号; 无损检测; 技术应用

引言

锂离子电池以其高能量密度、长循环寿命等优点,在新能源汽车、移动设备等领域得到了广泛应用。然而,锂离子电池在使用过程中,由于电极材料结构演变、电解液分布变化以及副反应等原因,可能会出现产气、析锂等现象,进而影响电池寿命和安全。传统的破坏性检测方法虽然能够获得一定的内部信息,但无法实时、无损地监测电池状态。因此,开发新型无损检测技术,实时监测锂离子电池内部状态,对于提高电池性能、保障电池安全具有重要意义^[1-3]。

无损检测技术作为一种非接触、非破坏性的检测方法,能够实时获取电池内部状态信息,为电池的安全监测与健康管理工作提供了有力手段。本文将从无损检测技术的发展历程、关键技术及应用以及未来发展趋势等方面,对锂离子电池内部信号无损检测技术进行综述,以期对锂离子电池的安全性及性能稳定性提供技术支持。

一、无损检测技术发展历程

锂离子电池内部信号无损检测技术经历了多个阶段的发展。早期的无损检测方法主要依赖于对电池外部特征的分析判断,如观察电池外观、测量电池电压和电流等。然而,这些方法往往只能提供有限的电池状态信息,无法实现对电池内部状态的实时监测和评估^[4]。

随着科技的进步和研究的深入,人们开始尝试利用更先进的无损检测技术对锂离子电池内部信号进行监测和分析。其中,超声检测技术作为一种新兴的无损检测方法,具有效率高、成本小、无污染且定位精准的特点,逐渐在锂离子电池内部信号无损检测领域得到应用。除了超声检测技术外,还有其他一些无损检测方法也在锂

离子电池内部信号检测领域得到了应用,如红外热成像技术、X射线检测、中子衍射等。这些方法各具特点,但在实际应用中仍存在一些局限性,如灵敏性、快速性和便捷性等方面的不足。因此,未来还需要进一步研究和开发更加先进、高效的无损检测技术,以满足锂离子电池内部信号检测的需求。

二、关键技术分析及应用

1. 超声检测技术

超声检测技术是近年来备受关注的无损检测手段之一。超声检测技术利用超声波在锂离子电池内部传播的特性,通过测量超声波的传播速度、衰减程度等参数,可以获取电池内部的温度、压力、应变等信号的变化情况。同时,超声检测技术还可以结合图像处理技术,实现对电池内部结构的可视化分析,如电池内部是否有裂纹、电解液分布不均或内部短路等问题,为电池的安全性和性能稳定性评估提供更为全面和准确的数据支持。

华中科技大学黄云辉和沈越教授团队自主研发了锂离子电池超声扫描成像设备,并在动力与储能电池产业界和学术界获得广泛应用。通过超声技术,可以观测到电池内部的“退浸润”现象,从而更准确地分析电池的内部结构和失效机制。

Wu等人通过使用超声波检测电池在循环测试和过充电测试过程中的健康状态,并且研究数据融合方法和健康指标来量化电池的健康状态,同时诊断由过充电引起的灾难性故障^[5]。

近期研究提出了基于锂离子电池内部超声阻尼的荷电状态检测方法,突破了常规超声研究局限于外部检测的现状。对于超声信号的分析方法也在不断进步。研究人员通过对超声信号强度进行无量纲化处理,可以观察

到不同荷电状态下信号强度的变化规律。这些规律有助于我们更深入地理解锂离子电池的内部结构和工作机制，进而实现对电池荷电状态的无损检测。

2. 电化学阻抗谱 (EIS)

电化学阻抗谱 (EIS) 是一种广泛应用于电池健康状态监测的技术。它通过分析电池在不同频率下的阻抗响应，来识别电池内部的物理化学过程，如电荷转移、扩散过程等。EIS能够揭示电池内部的复杂电化学反应，对于早期诊断电池性能衰减和析锂现象具有重要意义。

EIS为我们提供了一种非侵入性的电池检测手段，这使得维护团队能够在不损害电池封装的前提下，对电池的健康状况进行准确的评估。该技术尤其适合于电池长期稳定性与可靠性要求较高，例如电动汽车、大规模储能系统等。以电动汽车为例，定期EIS测试可对电池组寿命及维护周期做出预测，以保障汽车安全行驶及能效最优化。

EIS还可以辅助电池开发者进行电池设计优化，并通过分析各种材料与结构对阻抗谱产生的影响来筛选出最优的电池材料与结构设计。随着科技的发展，现代EIS设备已能实现较快测量及较高精度数据，为电池即时健康评估提供了可能。由于这些明显的优势，EIS已经成为锂离子电池健康管理的关键工具之一。

3. 红外热成像技术

红外热成像技术通过捕捉电池表面的热辐射，能够直观地展示电池内部的热量分布情况。对于锂离子电池而言，其工作过程中会产生热量，而红外热像仪可以非接触式地测量电池表面的温度，并生成相应的热像图。这种热像图可以帮助我们快速发现电池中可能存在的过热或温度异常区域，能够为电池的安全使用和维护提供重要依据。

红外热成像技术还可以用于评估锂离子电池的热失控风险。热失控是锂离子电池在工作过程中可能遇到的一种严重安全问题，一旦发生，可能导致电池起火甚至爆炸。通过红外热成像技术，我们可以实时监测电池组各单体之间的温差和热量分布情况，从而及时发现潜在的热失控风险，并采取相应的预防措施。

红外热成像技术还可以用于分析锂离子电池在充放电过程中的热效应。通过实时监测电池组在不同工况下的温度变化，我们可以了解电池组的热量产生和分布规律，进而优化充放电策略，提高电池的利用率和安全性。

然而，虽然红外热成像技术在锂离子电池检测中具有诸多优势，但其仍受到一些限制，例如对于某些特定类型的电池或特定情况下的故障，可能无法提供足够的检测精度或深度。因此，在实际应用中，我们需要结合

其他无损检测技术进行综合评估，以确保检测的准确性和可靠性。

4. 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术是一种基于光与物质相互作用的检测技术，基于拉曼散射效应，通过非接触式的方式，能够实时获取电池内部材料的分子振动和转动信息，进而分析电池内部的化学状态和物理结构变化。

在锂离子电池内部信号无损检测中，拉曼光谱技术可以应用于多个方面。首先，通过实时监测电池充放电过程中的光谱变化，可以分析电极材料的结构演变和电学性能变化，从而揭示电池性能衰减的机理。其次，拉曼光谱技术可以用于检测电池内部的杂质、缺陷和副反应产物，为电池质量控制和工艺优化提供指导。此外，该技术还可以用于研究新型电池材料的性能和机理，为电池技术的创新和发展提供支持。

近年来，随着拉曼光谱技术的不断进步和应用领域的拓展，其在锂离子电池内部信号无损检测中的应用也取得了重要进展。例如，研究者们通过结合电化学工作站与拉曼光谱仪，搭建了电化学原位拉曼光谱测量系统，实现了对锂电池在不同充放电状态下的光谱信号的实时采集和分析，这不仅有助于了解电池内部材料的结构变化，还能为电池性能评估和故障诊断提供重要依据。原位拉曼光谱技术的发展使得实时、在线监测电池内部反应成为可能，为电池性能评估和故障诊断提供了更加准确和可靠的方法。同时，随着高灵敏度和高分辨率的拉曼光谱仪的研制成功，使得对电池内部微观结构和界面性质的精细分析成为可能。

虽然拉曼光谱技术在锂离子电池内部信号无损检测中取得了显著的进展，但仍存在一些挑战和限制。例如，对于某些特定类型的电池或特定情况下的故障，拉曼光谱技术可能无法提供足够的检测精度或深度。因此，在实际应用中，需要结合其他无损检测技术进行综合评估，以确保检测的准确性和可靠性。

5. X射线与中子衍射技术

X射线与中子衍射技术能够穿透电池外壳，直接观测到电池内部的电极材料、电解液等组分的分布情况。这些技术为分析电池内部的结构变化、材料相变等提供了有力手段。

X射线显微镜在锂离子电池内部缺陷检测方面发挥了重要作用。它能够实现电池内部缺陷、毛刺、杂质等质量问题的无损检测，为优化工艺调整提供判断依据。例如，在封装电池过程中，X射线显微镜可以识别电芯卷绕的紧密程度，从而判断隔膜和正负极的卷绕状态对

电池性能的影响。

同时，X射线显微镜也用于锂离子电池的寿命与老化分析。通过无损检测电池充放电循环前后内部结构的变化，研究人员能够观察到电极材料在循环过程中的微观结构演变，进而分析电池容量衰减的机理。RAHE等^[6]利用高分辨率X射线CT扫描技术研究了车用锂离子单体电池在使用过程中正极颗粒开裂、铝集流体腐蚀等问题，同时还研究了电池使用老化问题。

而中子衍射技术，则具有对轻元素敏感的特性，使得它在研究锂离子电池中的锂分布和扩散行为方面具有独特优势。通过中子衍射实验，研究人员可以获取电池在充放电过程中的实时结构信息，从而揭示锂离子的嵌入和脱嵌机制。

X射线与中子衍射技术都为电池内部结构的精细观测提供了有力的工具，有助于我们更深入地理解电池的工作机制，从而优化其性能。然而，由于X射线和中子对人体具有一定的辐射危害，因此在实际应用中需要采取严格的安全防护措施。

6. 智能诊断系统

智能诊断系统正是基于无损检测技术的原理，通过集成多种传感器和算法，实现对锂离子电池内部信号的实时监测和分析。具体来说，该系统可以通过超声波、X射线、红外线等多种手段，获取电池内部的图像、温度、压力等信息，进而分析电池的健康状况、性能衰减情况以及潜在的失效模式。

在超声波无损检测方面，智能诊断系统可以通过分析超声波在电池内部的传播特性，来评估电池内部的浸润状况、产气情况以及SEI生长情况等。这些信息对于判断电池的性能和安全性至关重要。

此外，智能诊断系统还可以结合机器学习和人工智能算法，对大量的无损检测数据进行处理和分析，提取出有用的信息，实现电池的自动诊断和预警。这不仅可以提高检测的准确性和效率，还可以降低人工检测的成本和误差。

然而，智能诊断系统在锂离子电池内部信号无损检测技术中的应用仍面临一些挑战。例如，电池内部信号的复杂性和多样性使得准确诊断变得困难；不同类型、不同规格的锂离子电池可能存在差异，需要系统具有较高的通用性和适应性；同时，如何降低系统的成本、提高其实用性也是未来需要解决的问题。

三、面临挑战与未来发展趋势

尽管锂离子电池内部信号无损检测技术已经取得了

一定的进展，但在实际应用中仍面临着一些挑战。首先，电池内部的多层结构和复杂的化学反应机制导致无损检测技术的精度和可靠性仍需进一步提高。其次，无损检测设备的成本较高且操作复杂，限制了其在实际应用中的普及和推广。此外，随着锂离子电池能量密度的不断提升和新型电池材料的不断涌现，对无损检测技术的要求也越来越高。

未来，锂离子电池内部信号无损检测技术将朝着以下几个方向发展：一是提高检测精度和可靠性，实现对电池内部状态的更加准确和全面的监测；二是降低检测成本和操作复杂度，推动无损检测技术的普及和应用；三是加强与其他技术的融合与创新，如与人工智能、大数据等技术相结合，提高数据处理和分析能力；四是针对不同类型和规格的锂离子电池，开发专用的无损检测技术和设备，以满足不同领域的需求。

结论与展望

锂离子电池内部信号无损检测技术的发展与应用对于提高电池的安全性和性能稳定性具有重要意义。通过综述现有技术的发展历程、关键技术及应用以及挑战与未来发展趋势，我们可以看到无损检测技术在锂离子电池领域的应用前景广阔。未来，随着科技的进步和应用领域的不断拓展，锂离子电池内部信号无损检测技术将得到更加深入的研究和广泛的应用，为新能源汽车、智能设备等领域的发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 潘天乐, 江浩业, 晏仁健, 等. 基于超声波的锂离子动力电池无损检测技术[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(06): 28-33.
- [2] 田慧, 秦鹏, 李凯, 等. 锂离子电池健康状态研究现状及建议[J]. 清洁生产学报, 2020, 26(1): 120813.
- [3] 李志涛, 王志明, 冯磊, 等. 基于可靠性的电动汽车锂离子电池组设计[J]. 可靠性工程与系统安全, 2015, 34(4): 169-177.
- [4] 张建军, 王晓明, 等. 电动汽车锂离子电池可靠性与安全性评价研究进展[J]. 应用能量, 2019年, 251: 113343.
- [5] 吴勇, 等. 锂离子电池超声健康监测[J]. 电子, 2019, 8(7): 751.
- [6] 张建军等. 汽车锂离子电池老化的纳米x射线成像[J]. 电源学报, 2019, 43(3): 126631.