

# 基于超声体波的方形铝壳锂离子电池梯次分选

张为<sup>1</sup>, 吕炎<sup>2</sup>, 高杰<sup>2</sup>, 何存富<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124;

2. 北京工业大学信息学部 北京 100124)

Email: weizhang@emails.bjut.edu.cn

**摘要:** 随着电动汽车退役数量的猛增, 锂离子动力电池的梯次回收再利用具有良好的发展前景。基于电学参数的检测手段难以判断单体局部范围的潜在异常状态。而超声参数可分区域地检测出方形铝壳动力电池的内部材料均匀性, 进一步筛选出适合梯次利用或者需要报废回收的电池。本研究首先搭建了超声体波试验系统, 并使用该系统对复杂工况下的方形铝壳锂离子电池进行了一激一收实验, 以探究方形铝壳锂离子电池中超声体波的传播规律, 实验工况包括低速率和高速率的充放电以及阶梯变温现象。随后对低倍率充放电实验结果进行了交叉小波变换分析以验证信号激励频率的合理性。最后搭建了方形铝壳电池梯次筛选试验系统, 对已知容量的一类商用电池的不同三批次进行了多阵元检测, 以探究不同电池健康下的商用电池包的局部超声特征, 接下来对整块电池的点阵进行均匀性分析, 实验结果可以较好的分类筛选在役、临近退役和退役后可梯次利用的三批电池。为动力电池的无损梯次分类奠定了基础。

**关键词:** 锂离子电池; 超声体波; 复杂工况; 梯次利用; 均匀性分析; 分类筛选

## 1、研究背景

近年来, 我国新能源电动汽车销量逐年飙升, 有望于 2030 年突破 1 亿余辆<sup>[1]</sup>。同时, 2022 年中国储能累计装机量达 48.1GW, 其中锂离子电池储能占比 94.5%。随着电动汽车市场的发展, 动力电池需求量迅速增加, 但其在运行过程中, 锂离子电池的性能会因电化学反应逐渐退化。电池容量衰减 20% 或内阻增加 100% 时即需更换, 否则将影响车辆性能<sup>[2]</sup>。因此, 如何有效回收和再利用退役动力电池成为产业发展的关键问题。根据工信部数据<sup>[3]</sup>, 自 2023 年起, 2013-2015 年期间的新能源动力电池将逐步退役, 2025 年退役量将高达 78 万吨。

动力电池含有大量重金属和有毒电解质, 如不回收将带来安全和环境污染问题。此外, 镍、锂等重金属的再利用对于资源节约和经济效益至关重要。梯次利用是未来能源基础设施的重要措施, 可以为电动汽车电池创造循环经济, 并提供更低的存储成本。动力电池健康状态 (SOH) 在 80% 以上时可继续用于电动汽车; 低于 80% 时, 可通过筛选和重组技术用于储能、低速电动车等领域; 低于 20% 时用于材料回收。

超声法检测锂离子电池是一种新兴技术, 马里兰大学<sup>[4]</sup>和普林斯顿大学<sup>[5]</sup>的研究表明, 超声波技术可以有效识别电池内部的结构变化并与电池的充放电状态相关联。国内的研究<sup>[6-7]</sup>也取

得了一定进展，例如，开发出用于无损研究锂离子电池内部变化的超声成像技术。

健康状态（SOH）是衡量锂离子电池性能退化程度的关键参数，现有的 SOH 检测方法多基于信号与电池性能参数的映射关系。常用的材料表征技术包括扫描电镜法<sup>[8]</sup>和 X 射线能谱<sup>[9]</sup>法等。这些技术虽然有效，但需要拆解电池，适用于小规模研究。

为了实现梯次电池的回收再利用，需要对退役电池进行批次分类筛选。超声体波检测技术以其高速、非接触和高准确率的优势，提供了一种新的解决方案。本研究首先探讨了单阵元一激一收超声体波在复杂工况下的传播规律，随后使用多阵元一激一收方法实现不同梯次动力电池的健康状态检测及分类筛选，为退役动力电池的梯次利用提供了新思路。

## 2、研究内容

### 2.1 锂电池超声体波传播规律实验探究

搭建了超声体波传播检测系统进行实验验证，实验在 25℃ 恒温条件下进行，实验结果如图 1 所示。结果表明，低倍率充放电对电池温度影响不大，充电时幅值上升，放电时幅值下降，幅值曲线对称演化。温度与幅值呈负相关，高温时信号幅值下降，低温时上升，说明温度是影响体波信号的重要因素，需考虑温度对声学信号预估电池荷电状态的影响。

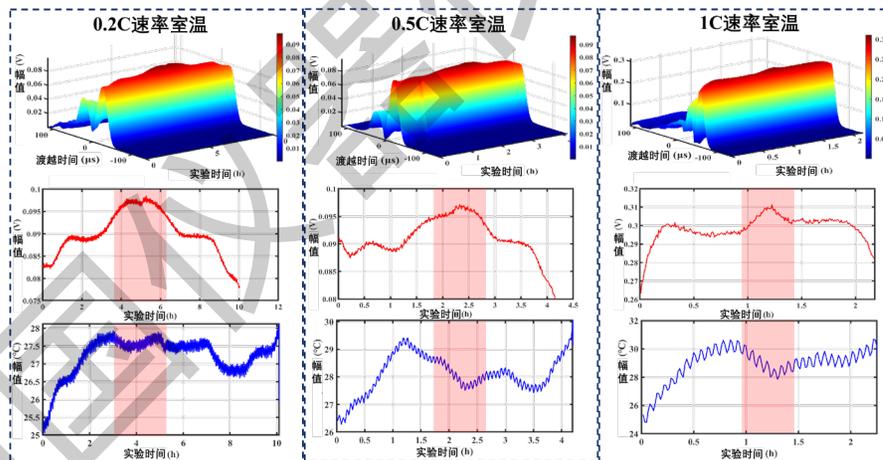


图 1 25 摄氏度下三种速率充放电实验结果

Fig. 1 Experimental Results of Charge and Discharge at Four Rates at 25°C

接下来，对 0.2C 和 0.5C 倍率下的充电信号进行连续小波变换分析。0.2C 倍率下有 1210 组信号，0.5C 倍率下有 500 组。通过交叉小波变换处理充电和放电信号，发现信号在 100  $\mu$ s 到 200  $\mu$ s 时域和 160kHz 以下频域高度一致，验证了 160kHz 激励频率的合理性。

### 2.2 退役锂电池梯次分类筛选

设计了阵列式规则正排布的夹持工装来验证超声多阵元透射法检测梯次方形铝壳锂离子电池

健康的可行性。夹持工装设计为两片带有孔的夹板，夹板两侧各有五行七列共 35 个孔来放置传感器。

使用上述设计的多阵元传感器与夹持工装对不同尺寸退役电池的多点进行一激一收透射实验，选择所有点快波信号幅值的均匀性方差来表征退役电池的健康状态，实验结果如图 2 所示。

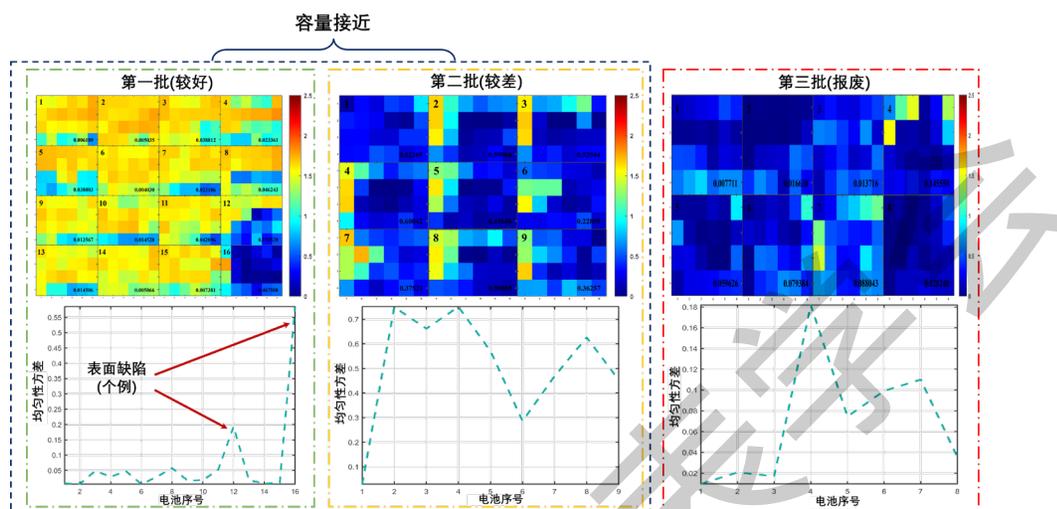


图 2 超声多阵元一激一收透射实验结果图

Fig. 2 Result graph of ultrasonic multi-element one excitation-one reception transmission experiment

### 3、结论

1) 本研究通过搭建超声体波试验系统，针对复杂工况下的方形铝壳锂离子电池进行了一激一收实验，探讨了不同充放电速率和温度条件下超声体波的传播规律。结果揭示了超声体波在低速率和高速率充放电及阶梯变温情况下的传播规律。

2) 使用交叉小波变换对实验结果进行了分析，验证了信号激励频率的合理性。实验发现，充电和放电信号在特定频域范围内表现出高度一致性，支持了 160kHz 激励信号频率的选择，并进一步说明了该频率在超声检测中的有效性。

3) 为了探究不同健康状态下商用电池的超声特征，研究搭建了方形铝壳电池梯次筛选试验系统，对已知容量的商用电池进行了多阵元检测。通过对整块电池的点阵进行均匀性分析，实验结果能够较好地地区分在役、临近退役和退役后可梯次利用的电池。此方法不仅验证了前人关于电池健康状态与超声特征关系的部分观点，也提出了新的评估手段，为动力电池的无损梯次分类奠定了基础。然而，本研究在电池内部复杂机理解析和更广泛应用验证方面仍存在一定的不足，有待进一步深入研究。

### 参考文献

[1] 欧阳明高. 中国新能源汽车的研发及展望 [J]. 科技导报, 2016, 34(06): 13-20.

- OUYANG M. New energy vehicle research and development in China[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(06): 13-20. (in Chinese)
- [2] 朱元, 韩晓东, 田光宇. 电动汽车动力电池 SOC 预测技术研究 [J]. 电源技术, 2000, (03): 153-156.
- ZHU Y, HAN X D, TIAN G Y. Research on estimation technology of traction-battery SOC for electric vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2000, (03): 153-156. (in Chinese)
- [3] 工信部. 新能源汽车动力蓄电池回收利用调研报告 [R].(2019-02-22).[https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art\\_08ff90bef15c431b8dcffd6c3c132cb1.html](https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2020/art_08ff90bef15c431b8dcffd6c3c132cb1.html)
- [4] SOOD B, OSTERMAN M, PECHT M. Health monitoring of lithium-ion batteries[C]. 2013 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (ISPCE). IEEE, 2013: 1-6.
- [5] HSIEH A G, BHADRA S, HERTZBERG B J, et al. Electrochemical-acoustic time of flight: in operando correlation of physical dynamics with battery charge and health[J]. Energy & environmental science, 2015, 8(5): 1569-1577.
- [6] GAO J, LYU Y, HE C F. Estimating state of charge of Lithium-ion batteries by using ultrasonic guided waves detection technology[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2198(1): 012015.
- [7] DENG Z, HUANG Z, SHEN Y, et al. Ultrasonic scanning to observe wetting and “unwetting” in Li-ion pouch cells[J]. Joule, 2020, 4(9): 2017-2029.
- [8] GUAN T, SUN S, YU F, et al. The degradation of LiCoO<sub>2</sub>/Graphite batteries at different rates[J]. Electrochimica Acta. 2018, 279: 204-212.
- [9] SHUTTHANANDAN V, NANDASIRI M, ZHENG J, et al. Applications of XPS in the characterization of battery materials[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2019, 231: 2-10.