



## 三元锂电池低温充电老化特征及基于弛豫阻抗的析锂检测方法

王明深<sup>1</sup>, 袁晓冬<sup>1</sup>, 宋爽<sup>2</sup>, 潘益<sup>1</sup>, 李福<sup>2</sup>, 唐西胜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; <sup>2</sup>中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:** 三元锂电池以其高能量密度优势在电动车市场占据主导地位, 而当前电池低温充放电的寿命及安全问题日益突出。由负极析锂引起电池内部活性锂损失、活性材料损失、固体电解质 (SEI) 膜增厚, 电池寿命显著降低, 同时沉积的锂金属电化学活性高、锂枝晶的形成使得电池存在安全隐患。通过开展低温充放电及容量校正实验, 研究三元锂电池在 0℃、-10℃ 下充放电前后的容量衰减特征。进一步, 利用无损的弛豫电化学阻抗谱法, 研究了不同初始荷电状态 (SOC) 下的析锂情况, 具体地, 在恒压恒流充电过程中, 每间隔固定 SOC 测试两次弛豫电化学阻抗谱, 利用三元锂电池去极化过程快、电化学阻抗谱结果稳定的特点, 通过提取中低频转折点电阻  $R_0$  突变趋势, 判断恒流恒压充电过程的析锂 SOC 区间。最后, 通过事后拆解及扫描电镜测试进行了验证。研究得出, 使用电荷转移与扩散的转折点电阻在充电弛豫过程的变化作为析锂检测关键参数, 可以较好地对比三元锂电池在不同 SOC 下进行析锂诊断, 该方法具有参数获取直接、分析流程简洁的优势。对于本实验电池, 以 0℃、0.5C 倍率、5% SOC 间隔充电工况下, 析锂对应的 SOC 判定区间为 29.1%~59.4%, 与弛豫 1 h 的准稳态结果相比, 弛豫 0.5 h 测得的中低频转折点电阻  $R_0$  最大降幅接近 50%。三元锂电池在低温充电过程中的恒流到恒压转换阶段更容易析锂, 本研究为三元锂电池充电优化及延寿提供了新的视角。

**关键词:** 三元锂电池; 低温老化; 析锂检测; 弛豫阻抗; 电化学阻抗谱

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0157

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 08-3294-08

## Aging characteristics at low-temperature charging of ternary lithium-ion batteries and lithium plating detection method based on relaxation impedance

WANG Mingshen<sup>1</sup>, YUAN Xiaodong<sup>1</sup>, SONG Shuang<sup>2</sup>, PAN Yi<sup>1</sup>, LI Fu<sup>2</sup>, TANG Xisheng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, Jiangsu, China; <sup>2</sup>Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Lithium-ion batteries with ternary cathodes have dominated the electric vehicle market because of their high energy density. However, battery life and safety during low-temperature charging and discharging have become increasingly critical. Active lithium loss, active material loss, and solid electrolyte interphase film thickening caused by negative-electrode lithium plating markedly reduce battery life. The high electrochemical activity of

收稿日期: 2026-02-13; 修改稿日期: 2026-04-28。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (5400-202455371A-3-1-KJ)。

第一作者: 王明深 (1990—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为规模化车网互动关键技术及应用, E-mail: wmshtju@163.com; 通信作者: 宋爽, 助理研究员, 研究方向为电池安全检测与运行优化, E-mail: songshuangjee@mail.iee.ac.cn。

引用本文: 王明深, 袁晓冬, 宋爽, 等. 三元锂电池低温充电老化特征及基于弛豫阻抗的析锂检测方法[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3294-3301.

**Citation:** WANG Mingshen, YUAN Xiaodong, SONG Shuang, et al. Aging characteristics at low-temperature charging of ternary lithium-ion batteries and lithium plating detection method based on relaxation impedance[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3294-3301.

deposited lithium metal and lithium dendrite formation also pose safety risks. This study presents low-temperature charging, discharging, and capacity correction experiments to investigate the capacity decay characteristics of ternary lithium-ion batteries before and after charging and discharging at 0°C and -10°C. Relaxation electrochemical impedance spectroscopy (EIS), a nondestructive method, is further used to investigate lithium plating under different initial states of charge (SOC). Specifically, relaxation EIS is measured twice at fixed SOC intervals during the constant-current and constant-voltage charging. The rapid depolarization and stable EIS results of ternary lithium-ion batteries are used to extract the abrupt decrease in the mid-to-low-frequency transition resistance ( $R_d$ ) to determine the SOC range for lithium plating during constant-current and constant-voltage charging. Finally, the results are verified through postmortem disassembly and scanning electron microscopy. The study shows that changes in charge-transfer and diffusion transition resistance during relaxation serve as a key parameter for lithium plating detection and can effectively diagnose lithium plating in ternary lithium-ion batteries at different SOC levels. This method offers direct parameter acquisition and simple analysis. For the battery used in this study, under charging conditions of 0°C, 0.5C-rate, and 5% SOC intervals, the SOC range corresponding to lithium plating is 29.1%—59.4%. Compared with the quasisteady-state results after 1 h relaxation, the maximum reduction in the low-to-mid-frequency inflection-point resistance ( $R_d$ ) measured after 30 min relaxation is nearly 50%. The constant-current to constant-voltage transition stage during low-temperature charging is more prone to lithium plating. This study provides a new perspective for optimizing and extending the life of ternary lithium-ion batteries during low-temperature charging.

**Keywords:** ternary lithium-ion batteries; low-temperature aging; lithium plating detection; relaxation impedance; electrochemical impedance spectroscopy

负极析锂是影响锂离子电池运行安全的关键问题。负极析锂的诱发因素包括过电压充电、低温充电<sup>[1-2]</sup>、大倍率充电、电池内部制造缺陷等<sup>[3]</sup>。当负极电位降低到低于锂参考电位时, 由于动力学降低, 例如锂离子固相扩散受阻、插层减少、界面电位下降, 金属锂会在负极表面沉积。负极析锂后会电池的寿命和安全带来不利影响<sup>[4]</sup>: ①活性锂消耗, 电池性能下降; ②电极孔隙堵塞, 锂离子迁移率下降, 电池性能下降; ③沉积的金属锂活性强, 电池自发热提前, 电池热稳定性降低; ④锂枝晶形成后, 内短路风险增加, 电池可靠性降低。

鉴于析锂对电池充电速度、寿命、安全的显著影响, 析锂检测方法已经被广泛研究, 按照检测原理可分为形貌观察法、理化分析法、外特性法三大类<sup>[5-7]</sup>。形貌观察法采用精密仪器观察析锂后的电池厚度、负极表面颜色、形貌等特征变化, 观察手段包括肉眼观测、扫描电子显微镜 (SEM)、透射电

子显微镜 (TEM)、光学显微镜、断层扫描 (CT) 等, 可观察到负极表面苔藓、枝晶或层状的析锂形态。理化分析法通过物理化学表征仪器, 测试样品中含有的金属锂成分, 实验方法包括核磁共振 (NMR)、X 射线衍射 (XRD)、中子衍射、电子顺磁共振 (EPR)、质谱滴定 (MST) 等。形貌观察法和理化分析法是非常直观、有效的析锂检测方法, 但由于需要拆解电池或昂贵的检测设备, 很难实际应用。外特性法是基于电池外特性如电信号 (电压、容量、阻抗)、热信号、力信号、声信号、厚度等, 通过分析处理外特性数据来探测析锂, 具体包括弛豫微分电压<sup>[8]</sup>、放电微分电压<sup>[9]</sup>、三电极电势<sup>[10]</sup>、弛豫内阻<sup>[11-12]</sup>、电化学阻抗谱 (EIS)<sup>[13-15]</sup>、高精度库仑效率<sup>[16]</sup>、厚度测量<sup>[17]</sup>、膨胀力测量<sup>[18]</sup>等。

与其他析锂检测方法相比, 外特性法的数据容易获取, 无需拆解电池, 具有较高的在线应用潜力<sup>[19]</sup>。基于电压信号的析锂检测方法基本原理是电

池析锂后弛豫或放电过程中锂剥离、回嵌反应时具有电压平台<sup>[20]</sup>。在充电后的弛豫或放电过程，负极电势回升，析出的金属锂将会被氧化为锂离子，该过程的微分电压曲线上会出现对应的峰。相比放电微分电压分析法，弛豫微分电压法无静电流的干扰，无需额外的放电过程，是一种更实用化的析锂检测方法。然而，一些学者发现了基于电压平台的析锂检测方法灵敏度低的问题，尤其大容量电池更明显<sup>[21]</sup>。电压平台征兆与可逆锂的量呈正相关，当充电过程析出的可逆锂有限时，很难从弛豫电压曲线上识别出电压平台<sup>[22]</sup>。高精度库仑效率法是基于析锂后的容量损失特征，不可逆析锂会降低库仑效率。但是，由于容量会受到温度、电流等因素影响，库仑效率法需要严格控制充放电条件，因此该方法更适用于实验室环境下的析锂检测。电化学阻抗谱是一种原位内部信息检测技术，通过向电池施加不同频率的小幅度交流扰动，提取不同频率下的复频域阻抗，将电极内部的电子移动、界面反应、扩散等过程有效区分。负极析锂后将使得特定频段的阻抗减小，可基于这一特征来检测析锂的发生。电化学阻抗谱法相比于其他的外特性法，能获取的信息更多，灵敏度更高。

以往研究主要是基于析锂阻抗降低的特点，通过动态EIS提取电池充电过程中的析锂起始SOC，但缺乏对整个恒流恒压充电过程中，不同SOC阶段的析锂阻抗特征的深入研究。本研究采用EIS与容量衰减法，量化三元锂电池（2 Ah）在低温充电后的容量衰减率，研究在恒流恒压间隔充电过程中的析锂特征及检测方法。

## 1 测试平台及实验方案设计

实验平台采用武汉蓝电电子股份有限公司5V10A-CT2001B电池测试系统、瑞士万通电化学工作站、电池高低温防爆箱。选取2 Ah三元锂电池作为测试对象，具体为天能三元锂电池，电芯型号TNL-ITR18650-2000P，充放电截止电压分别为4.2 V、2.8 V，电芯的标准充电倍率0.2 C，最大充电倍率0.5 C，标准放电倍率0.5 C（1C=2 A），测试平台及实验电芯如图1所示。

首先进行了三元锂电池低温充电实验，研究不同低温温度（-10℃、0℃）、不同倍率（0.2 C、0.5 C）对三元锂电池容量衰减率的影响。在室温

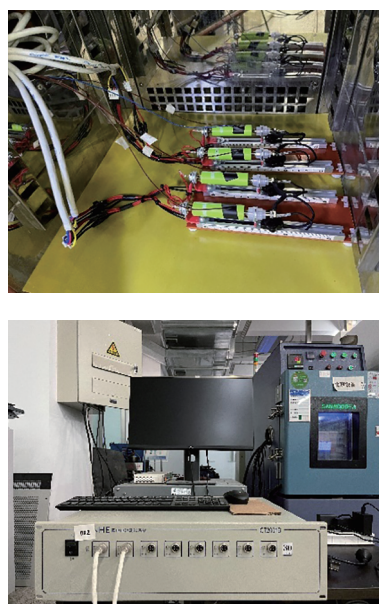


图1 三元锂电池低温充放电实验电芯及电池测试设备  
Fig. 1 Experimental equipment for low-temperature charging and discharging of small-capacity ternary lithium-ion batteries

下对新电池进行了容量校准。采用0.2 C充电倍率对电池恒流恒压（CCCV）充电，恒流充电截止电压为4.2 V、恒压充电截止电流为0.05 C，搁置1 h后，以标准放电倍率0.5 C恒流放电，放电截止电压为2.8 V，以上述充放电工况在室温下进行3次充放电循环，以第3次循环容量作为电芯容量。首先，设计了0℃下不同充电倍率对电池老化的影响实验。将电芯置于高低温箱内，在0℃下静置3 h，随后分别采用0.2 C或0.5 C充电倍率对电池CCCV充电，恒流充电截止电压为4.2 V、恒压充电截止电流为0.05 C。部分电池在充电结束后，直接以与充电同样的倍率恒流放电，放电截止电压为2.8 V，提取充放电库仑效率。随后，开展了不同低温温度对电池老化的影响实验。将电芯置于高低温箱内，在-10℃下静置3 h，随后采用0.2 C充电倍率对电池CCCV充电，恒流充电截止电压为4.2 V、恒压充电截止电流为0.05 C。部分电池在充电结束后，直接以0.2 C倍率恒流放电，放电截止电压为2.8 V，提取充放电库仑效率。最后，将所有进行过低温充放电实验的电芯放置于室温，搁置24 h后，进行标准充放电工况下的容量校准。

进一步，设计了不同温度（-10℃、0℃、25℃）不同倍率（0.2 C、0.5 C）下的三元锂电池

恒流恒压间隔充电实验，在充电间隔测试电池在不同 SOC 下的弛豫 EIS。具体地，将电池单体置于 0℃ 的高低温箱内，在设置温度下静置 3 h，利用瑞士万通电化学工作站，对电池 CCCV 充电，其中每隔固定 5% SOC 停止充电，分别在充电停止后 33 min 和 73 min 测试电化学阻抗谱，直到电池达到 CCCV 充电结束，即达到恒流充电截止电压 4.2 V 和恒压充电截止电流 0.05 C。由于 -10℃ 电池电化学反应很慢，阻抗谱测试频率范围设置为 1.5849 mHz~100 kHz，扫频一次需要 43 min，因此分别在每隔 10% SOC 充电停止后的 54 min 和 108 min 测试电化学阻抗谱。将以上使用的电池在室温下容量校准，以单次充放电后的前后容量损耗验证析锂。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三元锂电池低温充电容量衰减特征

表 1 展示了三元锂电池在某一倍率低温充电两次循环后与新电池初始容量相比的容量衰减率、充放电库仑效率。由表可知，本实验对象在 0℃ 以 0.2C 倍率充放电，容量衰减较少，库仑效率 100%，该条件下不会造成负极析锂。然而，以 0℃、0.2 C 充电倍率为基础，降低温度或提高充电倍率，均会造成电池老化加速，甚至增加安全隐患。由实验结果可知，本实验对象在 -10℃、0.2 C 下进行两次充电，就会使得新电池 SOH 降低到 90% 以下，等同于在正常工况下使用两年的寿命衰减量。

| 表 1 低温充放电后三元锂电池容量衰减率与库仑效率                                                                                                        |      |       |            |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------------|---------|
| Table 1 Capacity attenuation rate and Coulomb efficiency of lithium-ion batteries after low-temperature charging and discharging |      |       |            |         |
| 电芯序号                                                                                                                             | 温度/℃ | 充电倍率  | 2 次循环容量衰减率 | 库仑效率    |
| 1                                                                                                                                | 0    | 0.2 C | 0.39%      | —       |
| 2                                                                                                                                | 0    | 0.2 C | 0.4%       | 100.55% |
| 3                                                                                                                                | 0    | 0.5 C | 7.62%      | —       |
| 4                                                                                                                                | 0    | 0.5 C | 7.51%      | 98.5%   |
| 5                                                                                                                                | -10  | 0.2 C | 10.3%      | —       |
| 6                                                                                                                                | -10  | 0.2 C | 11.68%     | 95.4%   |

### 2.2 电池低温间隔充电阻抗测试结果

在室温下以 0.2 C 充电、5% SOC 为间隔的阻

抗测试实验电压曲线如图 2 所示。室温下以 0.2 C 充电、5% SOC 为间隔的电化学阻抗谱 Nyquist 图如图 3 所示。0℃ 以 0.2 C 充电、5% SOC 为间隔电化学阻抗谱 Nyquist 图如图 4 所示。0℃ 以 0.5 C 充电、5% SOC 为间隔电化学阻抗谱 Nyquist 图如图 5 所示。-10℃ 以 0.2 C 充电、10% SOC 为间隔电化学阻抗谱 Nyquist 图如图 6 所示。表 2 为电池在低温间隔充电实验前后的容量衰减率。

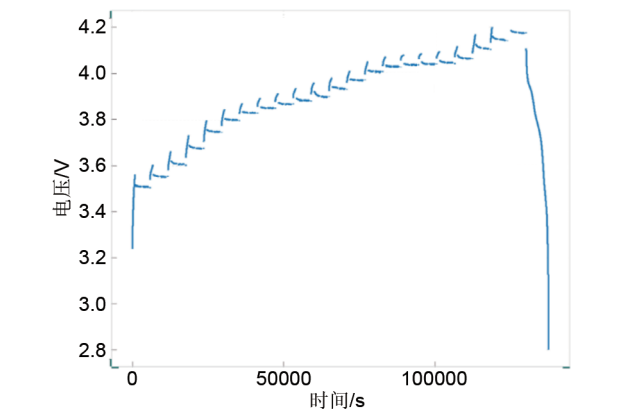


图2 室温下以 0.2 C、5% SOC 间隔充电测试的实验电压曲线

Fig. 2 Voltage curve of impedance experiment at room temperature with a charging rate of 0.2 C and an interval of 5% SOC

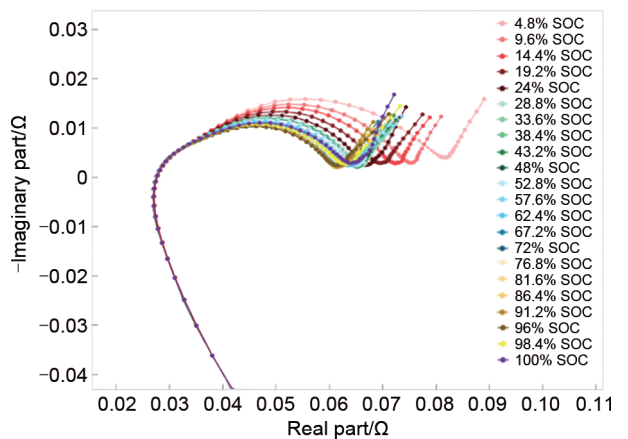


图3 室温下以 0.2 C、5% SOC 间隔充电的弛豫阻抗结果的 Nyquist 图

Fig. 3 Nyquist plot of impedance experiment at room temperature with a charging rate of 0.2 C and an interval of 5% SOC

根据实验前后的单体容量校准结果可知，对于此次低温间隔充电阻抗测试，在 0℃、以 0.2 C 的标准充电倍率、5% SOC 间隔充电到 100% SOC，无容量衰减，该过程无析锂发生。而在 0℃、以

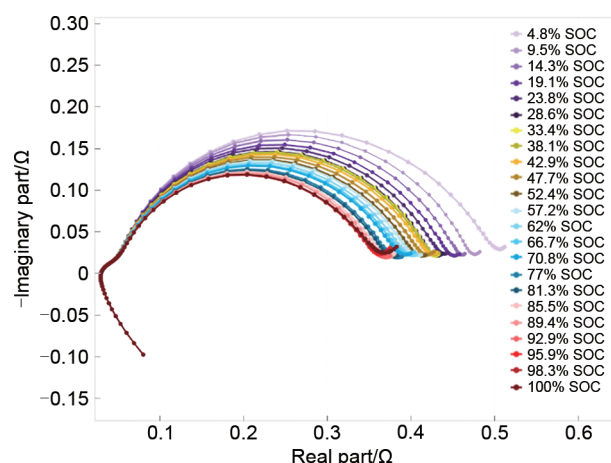


图4 0°C以0.2 C、5% SOC间隔充电的弛豫阻抗结果的Nyquist图

Fig. 4 Nyquist plot of impedance experiment at 0°C with a charging rate of 0.2 C and an interval of 5% SOC

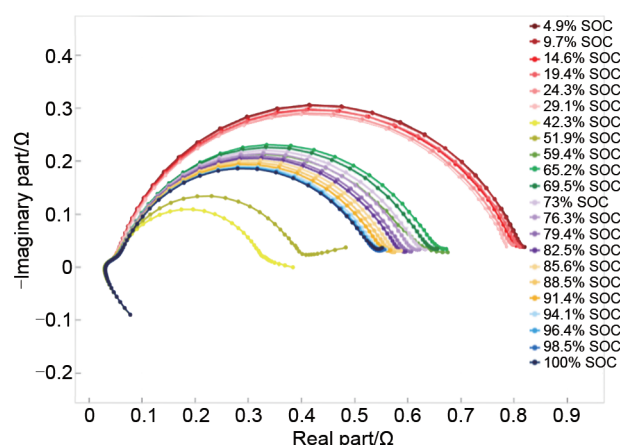


图5 0°C以0.5 C、5% SOC间隔充电的弛豫阻抗结果的Nyquist图

Fig. 5 Nyquist plot of impedance experiment at 0°C with a charging rate of 0.5 C and an interval of 5% SOC

0.5 C的充电倍率、5% SOC间隔充电到100%SOC,以及在-10°C、以0.2 C的标准充电倍率、10% SOC间隔充电到100% SOC这两次实验,分别存在3.13%和4.34%的容量衰减率,表示上述两种工况下电池存在析锂及容量的快速衰减。

将表1与表2中同样倍率和温度下的循环容量衰减率相比,低温间隔充电的容量衰减率小于完整充电的容量衰减率,即 $6.26\% < 7.51\%$ ,  $8.68\% < 10.3\%$ 。原因是,在充电过程中进行阶段式的搁置休息会帮助减少析锂量。在搁置期间,负极电位抬升,有部分可逆的金属锂将转化为锂离子,析出的

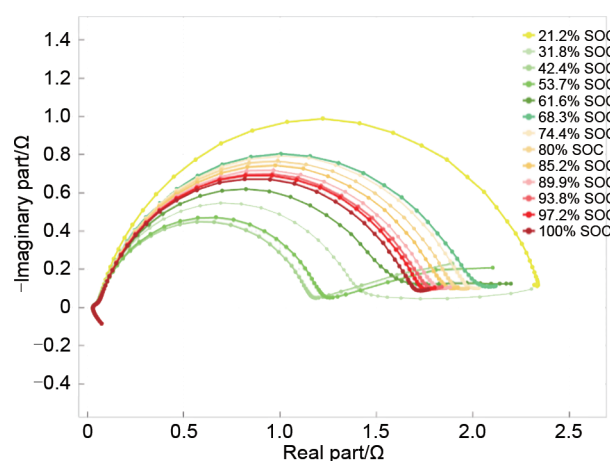


图6 -10°C以0.2 C、10% SOC间隔充电的弛豫阻抗结果的Nyquist图

Fig. 6 Nyquist plot of impedance experiment at -10°C with a charging rate of 0.2 C and an interval of 10% SOC

表2 三元锂电池低温间隔充电测试前后的容量衰减率

Table 2 Capacity attenuation rate of ternary lithium-ion batteries after low-temperature interval charging

| 电芯序号 | 温度/°C | 充电倍率  | 充电间隔 SOC | 1次循环容量衰减率 |
|------|-------|-------|----------|-----------|
| 8    | 0     | 0.2 C | 5%       | -0.5%     |
| 9    | 0     | 0.5 C | 5%       | 3.13%     |
| 10   | -10   | 0.2 C | 10%      | 4.34%     |

金属锂被剥离,并回嵌到石墨中。因此,对于低温析锂工况,间隔充电相比于恒流充电的容量衰减率更小。

### 3 恒流恒压间隔充电过程的析锂SOC区间分析

本研究的理论依据是三元锂电池的弛豫阻抗特性变化规律。三元锂电池充放电是单相反应,反应物浓度很快就能达到平衡,在弛豫过程中主要是游离的锂离子浓度变化,因此电荷转移电阻在弛豫过程中很快达到稳定,在后期基本不变。当三元锂电池发生析锂后,由于锂金属的反应活性高,表现为电化学阻抗谱的电荷转移电阻缩小,随后在弛豫过程中,电荷转移电阻逐渐增大,可以此特征来指示三元锂电池析锂的发生<sup>[19]</sup>。对于本研究对象三元锂电池,在充电后正常未析锂情况下,能在0.5 h内达到EIS准稳态。因此选取0.5 h和1 h作为弛豫时间点进行EIS测试。

电化学阻抗谱是一种无损检测技术,可通过Nyquist图解析电池内部的电化学过程,包括电解质离子传输( $R_l$ )、电子传输( $R_{el}$ )、SEI层传输( $Z_{SEI}$ )、电荷转移( $Z_{CT}$ )和扩散( $Z_{diff}$ )。正常充电且未发生析锂时,Nyquist图呈现典型特征:高频区为欧姆内阻 $R_0$ ( $R_0=R_l+R_{el}$ ),对应Nyquist图中与实轴交点的电阻;中频区为半圆弧,主要反映负极/正极SEI界面过程和电荷转移过程( $Z_{CT}+Z_{SEI}$ ),半圆弧直径约为 $R_d-R_0$ ;低频区为扩散过程,受活性材料中锂离子固相及液相扩散控制。当充电条件导致负极电位低于0 V时,发生析锂,锂离子在石墨表面直接还原为锂金属,形成枝晶或致密层。析锂阻抗理论依据源于Butler-Volmer方程的非线性行为,析锂所生成的新锂金属/电解质,引入新的电化学界面,破坏原有SEI层,导致SEI重构、电荷转移电阻增加。析锂后,Nyquist图的具体变化过程为:新SEI生长增加了接触电阻,高频区欧姆内阻 $R_0$ 略微增大,这里可忽略不计;中频圆弧显著缩小,负极SEI层传输和电荷转移受锂金属覆盖的影响,对应石墨/电解质界面的电阻 $R_{CT(N)}/R_{PL}$ 急剧下降,锂金属表面的新电荷转移和相关SEI过程具有独特的时间常数;随之,由于界面离子浓度差变化,低频扩散弧偏移<sup>[14]</sup>。

通过以上析锂阻抗理论分析可知,只需在EIS数据中提取中低频转换点阻抗的实部,若实部缩小,即可指示析锂。在EIS数据处理时,仅需要找到中频圆弧与低频尾线之间的转折点,获取转折点阻抗的实部,即 $R_d$ ,数据提取过程非常方便,无需经过等效电路拟合。接下来通过提取电荷转移圆弧与扩散转折点的电阻 $R_d$ ,判断恒流恒压间隔充电过程中析锂的SOC区间。

图7显示了在不同环境温度、充电倍率下间隔充电过程中,中低频转折电阻 $R_d$ 随SOC的变化曲线。图8显示了间隔充电过程电池电压随SOC的变化曲线。对于本研究对象的电池,在正常充电工况下如室温或0℃下以标准倍率充电,电荷转移电阻随SOC增长而下降,直到约95% SOC后略有升高。从图7(a)、(b)可以看出,对于未析锂的电池,休息33 min时测试的电化学阻抗谱的 $R_d$ 与休息73 min时几乎一致。这说明对于以5% SOC间隔充电的锂离子电池,经过了0.5 h左右的休息,电池已经趋近于准稳态,其电荷转移电阻不变。

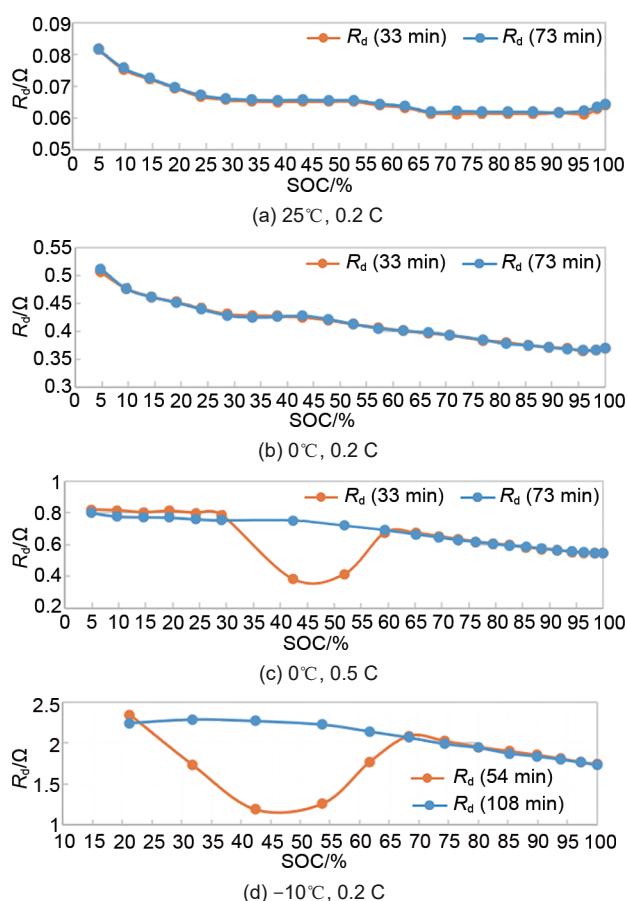


图7 不同环境温度、充电倍率下间隔充电过程电化学阻抗谱的 $R_d$ 随SOC的变化曲线

Fig. 7 Variation of  $R_d$  during interval charging process with SOC at different temperatures and charging rates

而在更低温度或更高电流倍率下,电池容易在充电过程中发生析锂。如图7(c)、(d)所示,这两块电池分别在29.1%~59.4% SOC和21.2%~68.3% SOC范围内阻抗下降,由间隔大约40 min的两次电化学阻抗谱的 $R_d$ 对比可知,橘色线相比蓝色线在该SOC范围内出现了阻抗下降,表现为橘色曲线在该段SOC范围内下凸。由于析锂后,锂金属的电化学反应速率较快,析锂电池电荷转移电阻下降,从而导致该现象发生。

由实验结果可知,对于此种三元锂电池,在0℃下以0.5 C倍率快充,在29.1%~59.4% SOC阶段会发生析锂。因此,建议不要在低温下进行快速充电。另外,根据图7、图8,此三元锂电池在恒流、恒压充电转换的阶段更容易发生析锂。在恒流充电阶段后期,负极电位较低,容易达到析锂电位。在恒压充电初期,电流还没有下降太多,容易

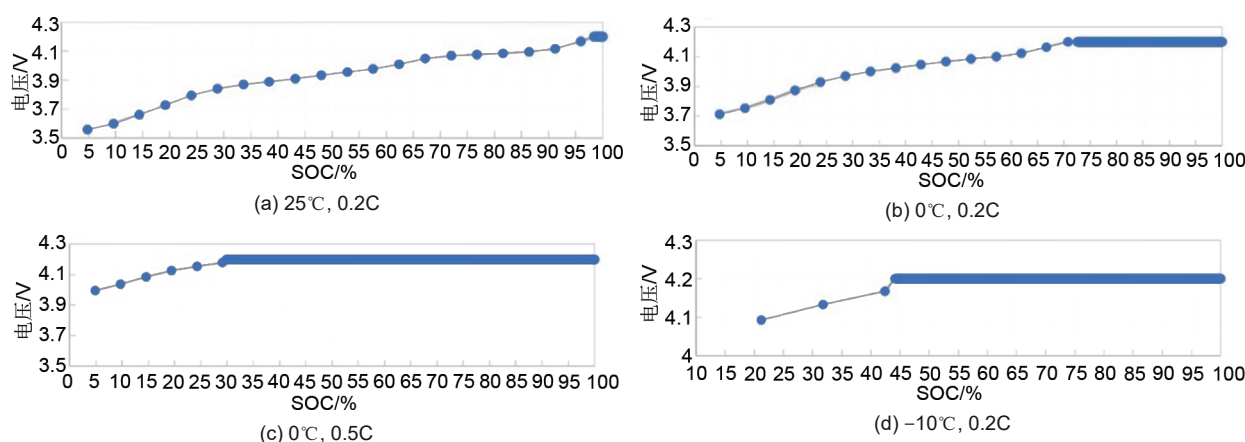


图8 不同环境温度、充电倍率下间隔充电过程电池电压随SOC的变化曲线

Fig. 8 Variation of voltage during the interval charging process with SOC at different temperatures and charging rates

进一步诱发析锂。

通过负极极片SEM测试进一步验证了提出的析锂检测方法。在析锂实验结束后，在干燥间拆解了实验电池。取电芯内不同位置的适量负极极片，通过碳酸二甲酯（DMC）清洗后干燥，进行负极极片的颜色形态观测，利用日立S4800扫描电子显微镜-能谱仪，在3 kV加速电压下进行SEM-EDS

测试，进一步验证析锂的发生。图9展示了以0℃、0.2 C间隔充电未析锂电芯和以0℃、0.5 C间隔充电析锂电芯的负极SEM对比。图9(a)中未析锂的石墨颗粒表面干净，颗粒边缘光滑，表明电池的负极表面SEI膜薄，性质稳定。图9(b)中看到析锂电池负极极片的局部位置出现管枝状物，石墨颗粒边缘粗糙。

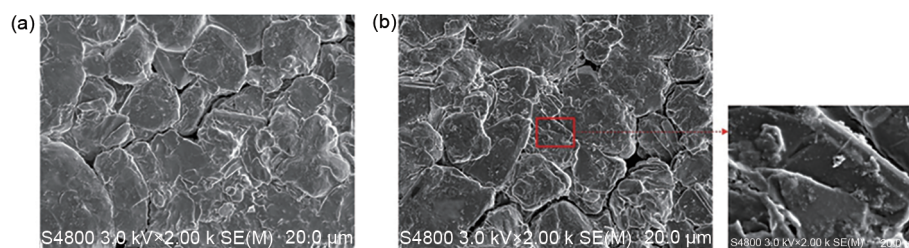


图9 间隔充电电池的负极SEM对比：(a)以0℃、0.2C间隔充电未析锂电芯；(b)以0℃、0.5C间隔充电析锂电芯  
Fig. 9 SEM images of negative electrodes of interval charging batteries at (a) 0℃ and 0.2C without lithium plating; (b) 0℃ and 0.5C with lithium plating

## 4 结 论

本研究讨论了基于EIS的三元锂电池析锂检测方法及容量衰减率，由于三元锂材料本征特征，使用电荷转移与扩散的转折点电阻 $R_0$ 在弛豫过程的变化作为析锂检测关键参数，可以较好地对三元锂电池在不同SOC下进行析锂诊断，进而判断恒流恒压充电的析锂SOC区间。通过间隔充电弛豫阻抗测试，进一步明晰了三元锂电池低温充电过程中在恒流和恒压转换阶段更容易析锂。

## 参 考 文 献

- [1] 杨锡运, 朱江, 赵泽宇, 等. 考虑路网耦合下的低温电动汽车充电站规划[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 62-72. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.006.  
YANG X Y, ZHU J, ZHAO Z Y, et al. Low-temperature electric vehicle charging stations planning under the consideration of road network coupling[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2025, 44(6): 62-72. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.006.
- [2] 董晓红, 董进波, 王明深, 等. 基于新型健康特征的锂电池健康状态快速估计方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 136-142, 206.  
DONG X H, DONG J B, WANG M S, et al. Rapid estimation method of lithium battery state of health based on novel health feature[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1):

- 136-142, 206.
- [3] SONG S, TANG X S, SUN Y S, et al. Fault evolution mechanism for lithium-ion battery energy storage system under multi-levels and multi-factors[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 80: 110226. DOI: 10.1016/j.est.2023.110226.
- [4] 宋爽, 李福, 唐西胜. 锂离子电池安全状态评估研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(11): 3545-3555.
- SONG S, LI F, TANG X S. Research progress on the safety-state assessment of lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(11): 3545-3555.
- [5] GAO X L, LIU X H, XIE W L, et al. Multiscale observation of Li plating for lithium-ion batteries[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(11): 3038-3048. DOI: 10.1007/s12598-021-01730-3.
- [6] RUAN H J, BARRERAS J V, ENGSTROM T, et al. Lithium-ion battery lifetime extension: A review of derating methods[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 563: 232805. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232805.
- [7] ADAM A, WANDT J, KNOBBE E, et al. Fast-charging of automotive lithium-ion cells: *In-situ* lithium-plating detection and comparison of different cell designs[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2020, 167(13): 130503. DOI: 10.1149/1945-7111/abb564.
- [8] YANG X G, GE S H, LIU T, et al. A look into the voltage plateau signal for detection and quantification of lithium plating in lithium-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 395: 251-261. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.073.
- [9] PETZL M, DANZER M A. Nondestructive detection, characterization, and quantification of lithium plating in commercial lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 254: 80-87. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.060.
- [10] WALDMANN T, KASPER M, WOHLFAHRT-MEHRENS M. Optimization of charging strategy by prevention of lithium deposition on anodes in high-energy lithium-ion batteries-Electrochemical experiments[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 178: 525-532. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.08.056.
- [11] KOLETI U R, DINH T Q, MARCO J. A new on-line method for lithium plating detection in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 451: 227798. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227798.
- [12] DOTOLI M, MILO E, GIULIANO M, et al. Detection of lithium plating in Li-ion cell anodes using realistic automotive fast-charge profiles[J]. *Batteries*, 2021, 7(3): 46. DOI: 10.3390/batteries7030046.
- [13] KATZER F, MÖßLE P, SCHAMEL M, et al. Adaptive fast charging control using impedance-based detection of lithium deposition[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 555: 232354. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2022.232354.
- [14] KOSEOGLOU M, TSIOUMAS E, FERENTINOU D, et al. Lithium plating detection using dynamic electrochemical impedance spectroscopy in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 512: 230508. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230508.
- [15] SCHMIDT J P, ADAM A, WANDT J. Time-resolved and robust lithium plating detection for automotive lithium-ion cells with the potential for vehicle application[J]. *Batteries*, 2023, 9(2): 97. DOI: 10.3390/batteries9020097.
- [16] BURNS J C, STEVENS D A, DAHN J R. *In-situ* detection of lithium plating using high precision coulometry[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(6): A959-A964. DOI: 10.1149/2.0621506jes.
- [17] BITZER B, GRUHLE A. A new method for detecting lithium plating by measuring the cell thickness[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 262: 297-302. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.03.142.
- [18] CHEN Z P, ZHANG C P, CAI X, et al. Operando detection for lithium plating in lithium-ion batteries *via* expansion force signal decoupling[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 661: 238644. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.238644.
- [19] PAN Y, REN D S, HAN X B, et al. Lithium plating detection based on electrochemical impedance and internal resistance analyses [J]. *Batteries*, 2022, 8(11): 206. DOI: 10.3390/batteries8110206.
- [20] KATZER F, JAHN L, HAHN M, et al. Model-based lithium deposition detection method using differential voltage analysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 512: 230449. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230449.
- [21] LI F, TANG X S, SONG S, et al. On-site lithium plating detection in lithium-ion batteries for energy storage using electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 150: 120446. DOI: 10.1016/j.est.2026.120446.
- [22] WANG Y, ZHOU X, WANG R X, et al. High sensitivity detection of lithium plating in high-energy lithium-ion batteries based on time-domain distribution relaxation times analysis[J]. *Energy Storage Materials*, 2024, 69: 103369. DOI: 10.1016/j.ensm.2024.103369.