

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.008

基于参比电极的析锂电池安全充电控制

钱广俊, 汪宇, 卢兰光, 韩雪冰

(清华大学(汽车安全与节能国家重点实验室), 北京 100084)

摘要: 电池系统是支撑下一代新型电网的关键, 然而不合理的充放电策略会使电池发生析锂副反应, 导致电池充放电性能大幅减弱。因此, 文中针对三元锂离子电池, 基于参比电极揭示了析锂后电池的充电性能变化情况, 并对其安全充电电流进行控制。首先, 设计不同温度下的充放电循环实验, 得到低温循环与高温循环后的电池; 其次, 通过植入参比电极标定安全充电曲线对比电池的负极电位, 发现高温循环后的电池发生了析锂, 且平均充电电流相比新电池降低了 61.7%; 最后, 对析锂后的电池建立安全充电电荷电状态-温度-电流等高线图, 对比新电池等高线图后发现, 200 A 以上的充电电流区域减少了 69.84%。文中提供了一个析锂后电池充电性能衰减的量化指标, 需要在实际的锂离子电池全生命周期管理中予以考虑。

关键词: 析锂电池; 参比电极; 负极电位; 充电标定; 充电性能; 等高线图

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)03-0071-07

0 引言

电化学储能系统作为能源存储转换的关键, 发挥着重要作用^[1-3]。然而, 锂离子电池作为电化学储能的代表, 随着充放电次数增加, 其内部会发生不可逆的物理变化和化学反应^[4], 导致电池的健康状态(state of health, SOH)下降^[5-7]。且不合理的充放电策略可能会导致析锂、过热、产气等恶劣的副反应^[8], 加速电池老化, 同时威胁电池的安全^[9-10]。因此, 探究发生副反应后的电池充电性能变化非常关键^[11], 且制定老化后合理的充放电策略在电池的全生命周期管理中具有重要的应用价值^[12-13]。

文献[14]基于耦合电化学-热老化电池模型提出一种新的健康感知多目标优化充电策略, 从而在缩短充电时间的同时缓解电池老化。文献[15]使用多因素耦合老化模型和双目标粒子群优化算法, 推导出适合低温下锂离子电池的充电模式。文献[16]建立电-热-老化综合模型, 提出一种基于多物理过程变量约束的电池快速充电方法, 可实现电池内部状态的有效约束, 提升锂离子电池充电过程的快速性、安全性和耐久性。以上充电策略考虑了温度、充电时间和老化等因素, 可适用于一定的场景, 但仍无法解决电池析锂后的安全充电问题。文献[17]使用不同老化状态的电池进行实验, 提出一种考虑充电时间和温升的充电优化方法。结果表明, 对于老化状态未知的电池, 所提出的充电策略在保

持最大温升和提高充电速度方面具有优势, 但该研究中的不同老化状态并不包括发生析锂等副反应的情形, 难以分析由析锂等产生的老化对电池充电性能的影响^[18], 更无法制定相应的安全充电策略。

因此, 文中针对上述问题, 设定低温与高温循环工况, 并基于参比电极探究了不同温度循环后电池的最大安全充电电流。同时, 在不同温度下基于参比电极对析锂后的电池使用线性插值的方法得到荷电状态(state of charge, SOC)-温度(T)-电流(I)等高线图, 并与相同方法获得的新电池等高线图进行了比较。

1 基础理论

1.1 析锂判据

文献[19]指出, 锂离子电池发生析锂的判据有 2 种: 浓度判据和电势判据。浓度判据认为, 当锂离子嵌入负极的速度小于锂离子在内部扩散的速度时会发生负极析锂副反应。浓度判据的内部信息难以获取, 故文中采用电势判据。电势判据认为负极析锂副反应由其过电势 η 控制。

$$\eta = \varphi_s - \varphi_e - U_e \quad (1)$$

式中: φ_s 为负极固相电势; φ_e 为负极液相电势; U_e 为析锂反应的平衡电势, 一般为 0 V。根据电势判据, 当 $\eta < 0$ 时, 负极发生析锂副反应。因此, 控制负极不发生析锂副反应的重点在于控制负极电位, 考虑到参比电极的测量误差和控制余量, 将负极电位阈值设置为 20 mV。

1.2 安全充电电流标定原理

20 世纪 60 年代, 科学家 Joseph A. Mas 在第二届

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177217); 北京市自然科学基金资助项目(3212031)

国际电动车会议上提出了“马斯充电三定律”，奠定了快速充电的理论基础^[20]。在充电过程中，设计实验装置调整电流，记录刚好产生气体的电流大小和时间，从充电开始到结束得到了一条和时间相关的电流曲线。该曲线界定了产气区和未产气区，是一条无副反应的最优充电电流曲线，也被称为马斯电流曲线，如式(2)所示。

$$i = I_0 e^{-at} \quad (2)$$

式中： i 为无产气电流； I_0 为最初可接受最大电流； a 为可接受系数； t 为充电时间。

文中安全充电电流标定原理与马斯曲线类似。在对带参比电极的电池进行充电时，锂离子不断地嵌入负极，负极电位下降。在大电流的情况下，降低电流能够减少负极电位的极化，从而使负极电位上升，维持在负极电位阈值附近。在此过程中，参比电极充当传感器的角色，能够实时监测负极电位，由此获得的充电电流可认定为无析锂安全充电电流。

2 实验研究

2.1 实验对象和设备

文中使用三元锂离子电池作为研究对象，其基本参数见表1。实验内容包括：不同温度循环、参比电极制作和不同温度的安全充电曲线标定。使用Neware 充放电机和 Bell 温箱进行不同温度的充放电循环实验。参比电极制作须在无氧和无水的手套箱中进行。使用 Arbin 充放电机进行不同温度的安全充电曲线标定，并用其辅助通道监测负极电位。实验设备参数见表2。

表1 电池参数

Table 1 Battery parameters

参数	数值
几何尺寸	148 mm×79 mm×103 mm
质量/kg	2.75
标称容量/(A·h)	156
工作电压/V	2.8~4.3
充电安全温度范围/℃	-20~55
放电安全温度范围/℃	-30~60
工作荷电状态/%	3~97

表2 实验设备参数

Table 2 Parameters of experimental equipments

设备	厂家	参数
充放电机 1	Neware	0~5 V, 0~1 mA
充放电机 2	Arbin	0~5 V, 0~300 A
温箱	Bell	-40~150 ℃

2.2 实验内容和步骤

首先，设计不同温度的充放电循环工况，得到正常循环和发生析锂副反应的电池。其次，分别在这2种电池中植入参比电极，通过25℃下1C充放电循环观察负极电位的变化，判断电池是否析锂，植入参比电极不仅是为了得到负极电位，也是为后续无析锂安全充电标定做准备。接着，对电池进行安全充电标定，得到安全充电等高线图。最后，对电池充电电流进行比较。具体步骤如图1所示。

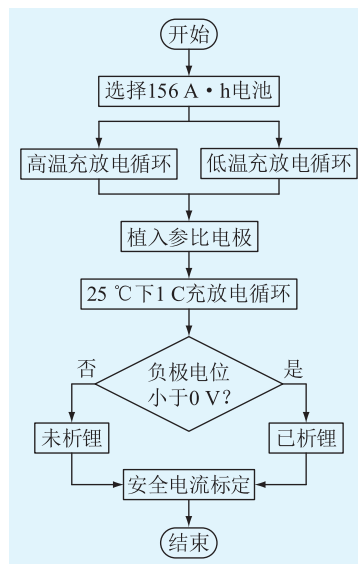


图1 实验步骤

Fig.1 Experimental steps

2.2.1 不同温度循环实验

为了得到不同温度充放电循环后的电池，设计表3所示实验。电池SOH设置为95%的原因如下：(1) SOH老化到90%和80%都需要大量的实验时间；(2) 循环后的参比植入实验存在失败的可能性，实验室条件限制无法支持更多的电池同时开展实验；(3) 文中仅关注析锂后电池的最大充电电流持续时间，并重点对比循环后的析锂情况。

表3 循环实验工况

Table 3 Aging experimental working condition

工况	电池编号	实验项	条件	SOH
一	1号	低温循环	-5℃, 0.5 C 充/1 C 放	95%
二	2号	高温循环	45℃, 1 C 充/1 C 放	96%

2.2.2 参比电极制作

文中介绍了一种可用于商业锂离子电池基于铜丝镀锂的参比电极制备方法。具体制作流程如下：(1) 选取直径50~200 μm的带有漆包层的铜丝，截取8 cm左右铜丝线段，用浓硫酸浸泡铜丝，去除其漆包层；(2) 剪下一段宽1 cm、长2 cm的隔膜

片,制作成图2所示隔膜套,并将铜丝的一端插入隔膜套中;(3)利用绝缘刀具打开方壳电池的安全阀,在任一极片和隔膜缝隙中植入隔膜套包裹的铜丝并补充少量电解液;(4)将电池的安全阀用密封胶封住,静置12 h;(5)使用Neware充放电机接通参比电极与负极,进行多阶段微小电流充电,完成铜丝镀锂。

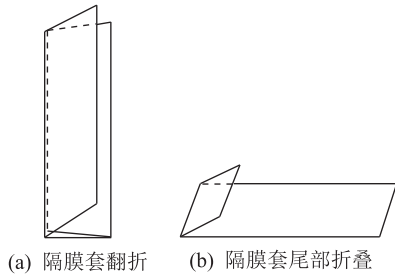


图2 隔膜套制作示意

Fig.2 Schematic diagram of diaphragm sleeve production

2.2.3 电池安全充电实验方法

使用Arbin充放电机实时监测电池负极电位,并调节充电电流使负极电位保持在阈值附近,从反应原理上避免析锂副反应的发生。

具体实验过程如下:(1)将电池置于温箱中,调整为目标温度静置3 h,将Arbin充放电机主通道连接电池正负极,辅助通道连接参比电极和负极;(2)将热电偶放置在电池大面中心,监测充放电过程中电池的温度变化;(3)设置多阶段逐渐递增的恒流充电电流,使用设备最大充电电流对电池进行恒流充电,同时在主控制器观察端电压、负极电位和温度的变化;(4)当负极电位降低至20 mV附近时,主控制器开始降低充电电流,调整电流步长为0.05 C;(5)充电过程以截止电压4.3 V为停止条件,得到安全充电电流曲线。图3为电池安全充电实验方法示意。

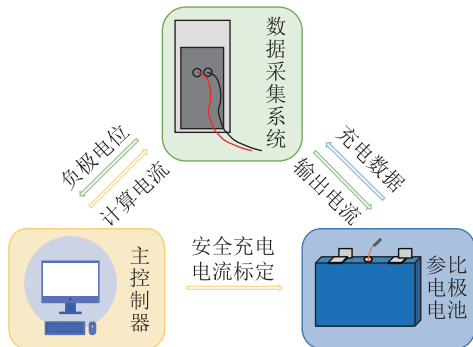


图3 电池安全充电实验方法示意

Fig.3 Schematic diagram of the experimental method for safe battery charging

3 实验结果与分析

3.1 基于参比电极的电池循环实验结果

为探究锂离子电池高温循环和低温循环后相对于新电池负极电位的变化情况,分别对3种工况电池植入参比电极,在25℃下使用1 C充放电倍率循环3次,结果如图4所示。

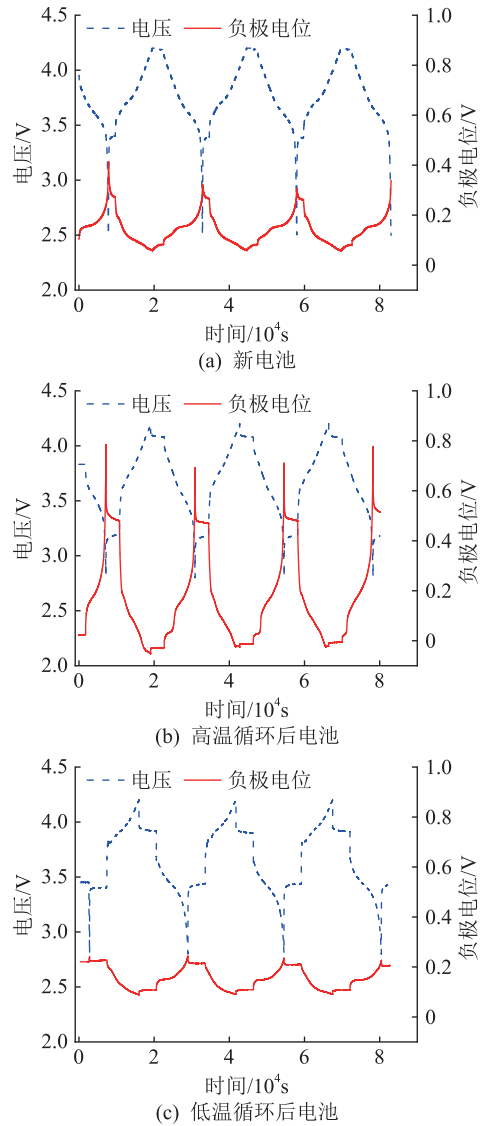


图4 基于参比电极的电池循环结果

Fig.4 Battery cycling results based on reference electrodes

图4中,新电池3次循环下每个充电段最低的负极电位分别为58.7 mV、59.5 mV、57.7 mV,均大于0 V,电池未析锂。高温循环后电池3次循环下每个充电段最低的负极电位分别为-50.6 mV、-21 mV、-23 mV,均小于0 V,电池发生析锂副反应。相关研究认为高温下产气会导致析锂副反应发生^[21-22]。因此,实验中认为电池析锂的原因可能是高温大倍率充电,电池产气,在极片内部形成气泡,

而形成气泡的电池内部容易发生析锂反应。低温循环后电池3次循环下每个充电段最低的负极电位分别为89 mV、90 mV、91 mV,均大于0 V,电池未析锂。

综上,高温循环后电池负极电位在3次1 C充放电循环中均低于0 V,判断为电池内部发生析锂;新电池和低温循环后电池负极电位均大于0 V,判断为未发生析锂。

3.2 安全充电电流标定结果

在25℃下使用安全充电方法对上述3种电池进行安全充电电流标定,结果如图5所示。

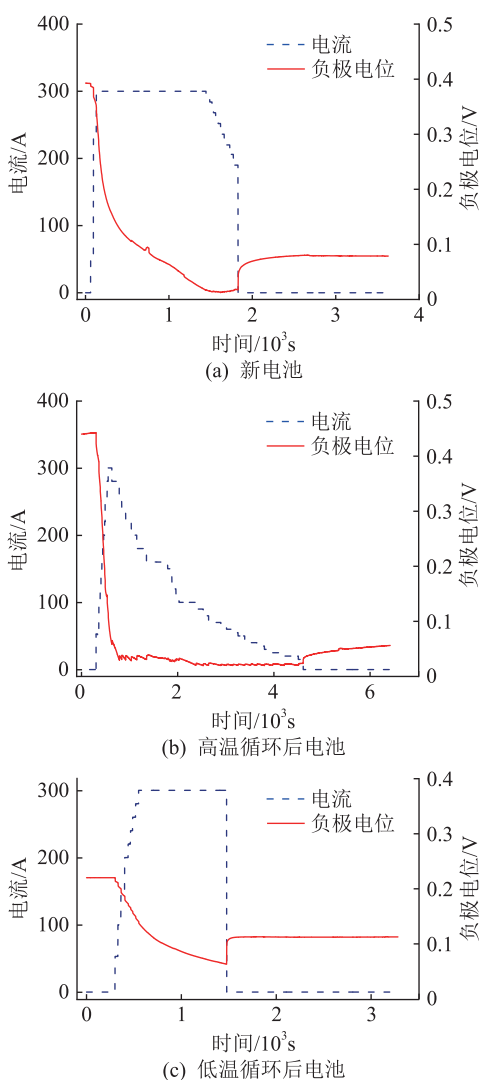


图5 25℃下电池安全充电电流标定

Fig.5 Safe battery charging current calibration for three states at 25℃

图5(a)为新电池,用最大电流300 A充了1 314 s,在高SOC区间使负极电位达到20 mV,即阈值,平均充电电流为281.3 A,总充电时间为1 766 s。图5(b)为高温循环后电池,以300 A电流充电76 s后达到负极电位阈值附近,平均充电电流为107.6

A,总充电时间为4 297 s。图5(c)为低温循环后电池,使用300 A充电电流持续充电926 s,平均充电电流为275.7 A,总充电时间为1 171 s。低温循环后电池最大充电电流持续时间较新电池下降29.5%,平均充电电流下降2%,而总充电时间却下降了33.7%,整体充电性能较新电池未发生明显变化。高温循环后电池最大充电电流持续时间较新电池下降94.2%,平均充电电流下降61.7%,总充电时间增加143.3%,整体充电性能较新电池发生较大衰减。

由图5可知,若将负极电位是否大于20 mV作为充电的限制条件,则高温循环后的析锂电池的充电倍率会下降,充电时间变长。而低温循环后未析锂的电池的充电倍率维持不变,可使用与新电池相同的充电策略。

3.3 电池SOC-T-I等高线图标定

为实现宽温度区间高温循环后电池的安全充电,选择不同的环境温度对电池进行安全充电电流标定,结果如图6所示。环境温度分别为-10℃、0℃、25℃和30℃。图6(a)中,开始充电温度-10℃,到截止电压4.3 V时共充入82.3 A·h,最大电流150 A充电7 min后电流下降,高SOC区间电池的充电电流下降,充电时最高温度达到15.7℃。图6(b)中,开始充电温度0℃,充电至截止电压,共充入110 A·h,最大充电电流200 A,最高温度22℃。图6(c)中,开始充电温度25℃,共充入了129 A·h,最大充电电流300 A,最高温度48℃,温差达23℃。图6(d)中,考虑到继续使用最大电流300 A可能会造成充电过程中电池最高温度超过55℃,因此30℃下使用的最大充电电流为250 A,共充入105 A·h。

利用以上4个环境温度下的安全充电曲线,找到电池在负极电位阈值为20 mV时最大的充电倍率边界。基于已有的电池温升、电流和时间数据,建立SOC-T-I等高线图。步骤如下:(1)对图6中的电流进行安时积分,计算SOC值;(2)按照计算的SOC值的10%~80%(间隔为10%,共8个SOC点),在标定的安全充电曲线中找到对应的电流值并记录温度值;(3)设定电流范围为15~300 A;(4)在设定的电流范围内对每个SOC点对应的电流值按照温度变化进行分段线性插值;(5)得到图7所示SOC-T-I等高线图。

3.4 电池充电性能对比

文献[23]使用相同型号的电池标定了新电池的SOC-T-I等高线图。为了定量对比新电池与高温

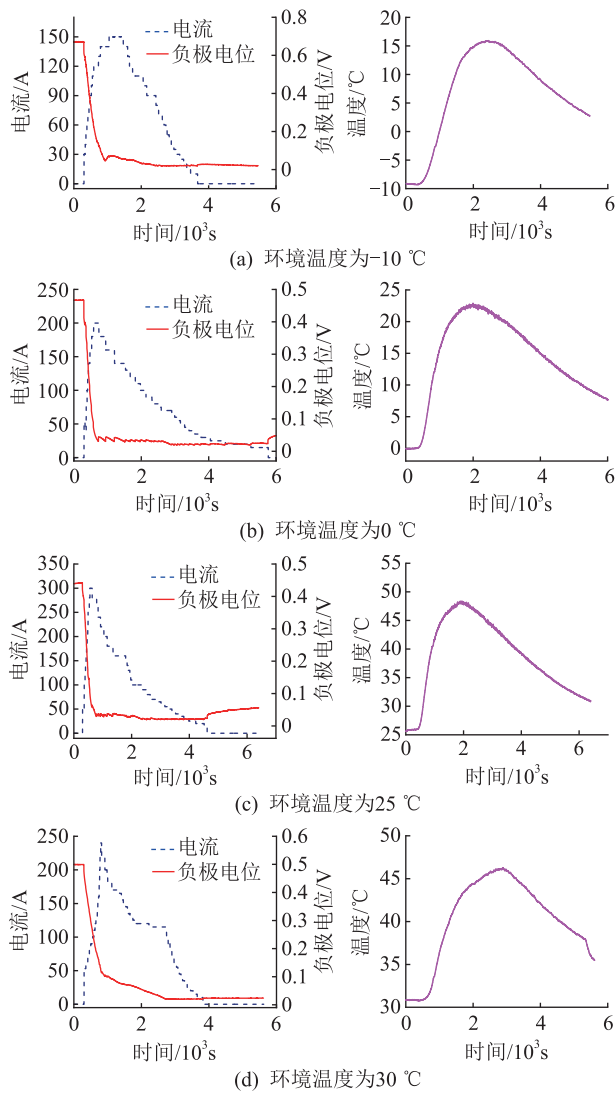


图6 高温循环后电池不同温度安全充电曲线

Fig.6 Safe charging curves of batteries at different temperatures after high temperature cycling

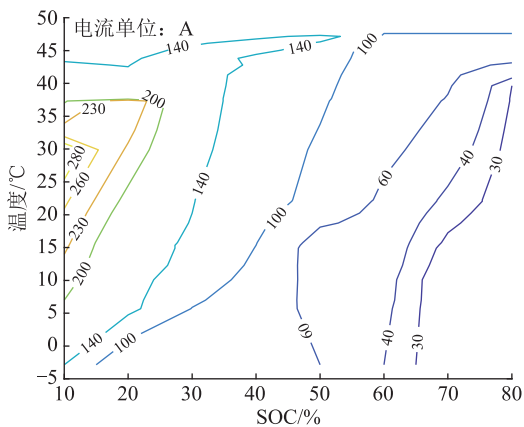


图7 高温循环后电池 SOC-T-I 等高线图

Fig.7 SOC-T-I contour map of batteries after high temperature cycling

循环后电池的充电性能变化,可以使用 SOC-T-I 等高线图中 200 A 以上充电电流区域占总区域的比例

进行量化比较。具体步骤如下:(1) 在新电池 SOC-T-I 等高线图中找到与高温循环后相同的温度区间 ($-5\sim 50^{\circ}\text{C}$) 和 SOC 区间 ($10\%\sim 80\%$);(2) 分别将高温循环后电池 SOC-T-I 等高线图与新电池 SOC-T-I 等高线图 200 A 以上充电电流区域标记为灰色和粉色,如图 8 所示;(3) 将 2 个 SOC-T-I 等高线图标签和数值抹去,只留标记后的 2 个区域;(4) 分别在 MATLAB 中转化为灰度图像;(5) 对 2 个灰度图像进行二值化处理;(6) 将处理好的结果填充至图像中;(7) 计算区域占比。

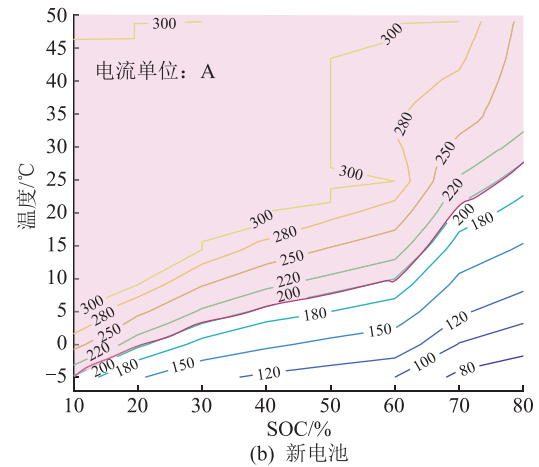
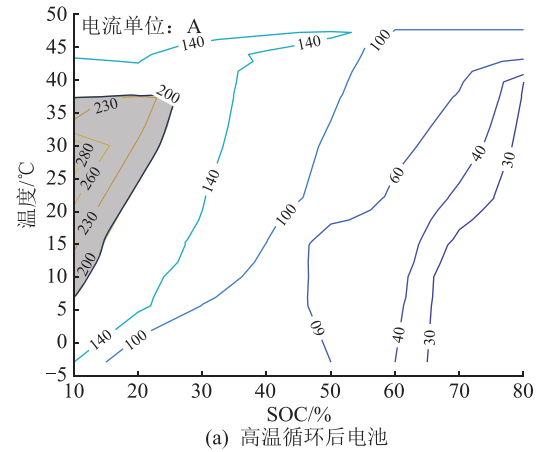


图8 电池 200 A 以上充电区域

Fig.8 Battery charging area above 200 A

结果发现高温循环后电池 200 A 以上充电电流区域仅占整个区域的 26.98%,而新电池 200 A 以上充电电流区域占整个区域的 89.46%。电池高温循环析锂后,200 A 以上充电电流相较新电池下降了 69.84%,在 SOH 仅损失 4%的情况下大电流充电范围大幅下降。

4 结论

文中设计了 -5°C 低温循环和 45°C 高温循环实验。为探究 2 种循环后电池析锂情况和充电性能变化,分别植入参比电极,做相同工况的循环测试获

取负极电势的变化曲线。对比新电池负极曲线,发现高温循环后电池负极电位下降严重,判断其发生了析锂副反应。而低温循环后电池的负极电位略有上升,电池未发生析锂。进一步,对高温循环、低温循环和新电池进行安全充电曲线标定,发现25℃下高温循环后电池的平均充电电流对比新电池降低了61.7%。因此,对-10℃、0℃、25℃、30℃安全充电曲线分段线性插值,获取高温循环后电池SOC- T - I 等高线图。对比新电池等高线图后发现,200 A以上的充电电流区域减少了69.84%。

参考文献:

- [1] QIAN G J,ZHENG Y J,LU Y F, et al. On-line equalization for lithium iron phosphate battery packs based on voltage threshold integral[J]. International Journal of Energy Research,2022,46(15):23244-23258.
- [2] 钱广俊,韩雪冰,卢兰光,等. 锂离子电池系统均衡策略研究进展[J]. 机械工程学报,2022,58(24):145-162.
QIAN Guangjun,HAN Xuebing,LU Languang, et al. Advances in lithium-ion battery system equalization strategy research[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022,58(24):145-162.
- [3] 李相俊,刘晓宇,韩雪冰,等. 电化学储能电站数字化智能化技术及其应用展望[J]. 供用电,2023,40(8):3-12.
LI Xiangjun,LIU Xiaoyu,HAN Xuebing, et al. Digitalization and intelligence technologies of electrochemical energy storage stations and their application prospects[J]. Distribution & Utilization,2023,40(8):3-12.
- [4] 任东生,冯旭宁,韩雪冰,等. 锂离子电池全生命周期安全性演变研究进展[J]. 储能科学与技术,2018,7(6):957-966.
REN Dongsheng,FENG Xuning,HAN Xuebing, et al. Recent progress on evolution of safety performance of lithium-ion battery during aging process[J]. Energy Storage Science and Technology,2018,7(6):957-966.
- [5] HALES A,PROSSER R,BRAVO DIAZ L, et al. The cell cooling coefficient as a design tool to optimise thermal management of lithium-ion cells in battery packs[J]. eTransportation,2020,6:100089.
- [6] 费陈,赵亮,王云恪,等. 基于XGBoost算法的锂离子电池健康状态估算[J]. 浙江电力,2022,41(5):14-21.
FEI Chen,ZHAO Liang,WANG Yunke, et al. SOH estimation of Li-ion battery based on XGBoost algorithm[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(5):14-21.
- [7] 王宁,陈志强,刘明义,等. 基于模糊综合评价的锂离子电池健康状态评估[J]. 发电技术,2022,43(5):784-791.
WANG Ning,CHEN Zhiqiang,LIU Mingyi, et al. Health status assessment of lithium-ion battery based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power Generation Technology,2022,43(5):784-791.
- [8] 马勇,李晓涵,孙磊,等. 基于三维电化学热耦合析锂模型的锂离子电池参数设计[J]. 储能科学与技术,2022,11(8):2600-2611.
MA Yong,LI Xiaohan,SUN Lei, et al. Parameter design of lithium-ion batteries based on a three-dimensional electrochemical thermal coupling lithium precipitation model[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(8):2600-2611.
- [9] ZINTH V,VONLÜDERS C,HOFMANN M, et al. Lithium plating in lithium-ion batteries at sub-ambient temperatures investigated by in situ neutron diffraction[J]. Journal of Power Sources,2014,271:152-159.
- [10] 牛志远,王怀铷,金阳,等. 不同倍率下磷酸铁锂电池模组过充热失控特性研究[J]. 电力工程技术,2021,40(4):167-174.
NIU Zhiyuan,WANG Huairu,JIN Yang, et al. Overcharging and runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules at different rates[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(4):167-174.
- [11] KATZER F,DANZER M A. Analysis and detection of lithium deposition after fast charging of lithium-ion batteries by investigating the impedance relaxation[J]. Journal of Power Sources,2021,503:230009.
- [12] 孙涛,郑侠,郑岳久,等. 基于电化学热耦合模型的锂离子电池快充控制[J]. 汽车工程,2022,44(4):495-504.
SUN Tao,ZHENG Xia,ZHENG Yuejiu, et al. Fast charging control of lithium-ion batteries based on electrochemical-thermal coupling model[J]. Automotive Engineering,2022,44(4):495-504.
- [13] 夏向阳,邓子豪,张嘉诚,等. 基于动力锂离子电池健康状态的全寿命周期优化充电策略[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(6):17-24.
XIA Xiangyang,DENG Zihao,ZHANG Jiacheng, et al. Life cycle optimal charging strategy based on the SOH of power lithium ion battery[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(6):17-24.
- [14] GAO Y Z,ZHANG X, GUO B J, et al. Health-aware multi-objective optimal charging strategy with coupled electrochemical-thermal-aging model for lithium-ion battery[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2020,16(5):3417-3429.
- [15] YOU H Z,DAI H F,LI L Z, et al. Charging strategy optimization at low temperatures for Li-ion batteries based on multi-factor coupling aging model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2021,70(11):11433-11445.
- [16] 魏中宝,钟浩,何洪文. 基于多物理过程约束的锂离子电池优化充电方法[J]. 机械工程学报,2023,59(2):223-232.
WEI Zhongbao,ZHONG Hao,HE Hongwen. Multiphysics-constrained optimal charging of lithium-ion battery[J]. Journal of Mechanical Engineering,2023,59(2):223-232.
- [17] SUN J L,MA Q,TANG C Y, et al. Research on optimization of charging strategy control for aged batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(12):14141-14149.
- [18] YANG B W,WANG D F,ZHANG B, et al. Aging diagnosis-oriented three-scale impedance model of lithium-ion battery inspired by and reflecting morphological evolution[J]. Journal of Energy Storage,2023,59:106357.

- [19] 葛昊. 低温下抑制析锂的锂离子电池交流预热与快速充电方法[D]. 北京:清华大学,2017.
GE Hao. Alternating current preheating and fast charging of lithium-ion batteries with lithium plating prevention at low temperatures[D]. Beijing:Tsinghua University,2017.
- [20] 钱健. 快速充电:马斯三定律[J]. 蓄电池,1979,16(2):18-24.
QIAN Jian. Fast charging—Mas's three laws[J]. Chinese Labat Man,1979,16(2):18-24.
- [21] ITURRONDOBEITIA A, AGUESSE F, GENIES S, et al. Post-mortem analysis of calendar-aged 16 Ah NMC/graphite pouch cells for EV application[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2017,121(40):21865-21876.
- [22] MUSSA A S, LIIVAT A, MARZANO F, et al. Fast-charging effects on ageing for energy-optimized automotive LiNi₁/3Mn₁/3Co₁/3O₂/graphite prismatic lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources,2019,422:175-184.
- [23] 周旋,周萍,郑岳久,等. 锂离子电池宽温度区间无析锂快充策略[J]. 汽车安全与节能学报,2020,11(3):397-405.
ZHOU Xuan, ZHOU Ping, ZHENG Yuejiu, et al. Strategy of fast charging of lithium-ion batteries without lithium plating in a wide temperature range[J]. Journal of Automotive Safety and Energy,2020,11(3):397-405.

作者简介:



钱广俊

钱广俊(1992),男,博士在读,研究方向为锂离子电池组均衡算法和电化学阻抗谱模型(E-mail:qguangjun@163.com);

汪宇(1999),男,硕士在读,研究方向为锂离子电池析锂诊断与检测;

卢兰光(1967),男,博士,副研究员,研究方向为锂电池系统的集成、优化、控制和电池管理系统。

Charging performance of precipitating lithium batteries based on reference electrodes

QIAN Guangjun, WANG Yu, LU Languang, HAN Xuebing

(Tsinghua University (State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy), Beijing 100084, China)

Abstract: The battery system is the critical component to supporting the next generation of advanced power grids. However, parasitic lithium plating reactions can be triggered by improper charging and discharging strategies, leading to a significant compromise of the charge-discharge performance of batteries. Centered on ternary lithium-ion batteries, the degradation of charge performance due to lithium plating is elucidated through the utilization of a reference electrode-based approach in this study, followed by the implementation of measures to regulate safe charging currents. Diverse temperature-dependent charge-discharge cycling experiments are initially designed to evaluate batteries under both low-temperature and high-temperature cycling. Subsequently, the calibration of safe charging curves is conducted using a reference electrode, and the negative electrode potential of batteries undergoing high-temperature cycling is analyzed. The occurrence of lithium plating in batteries subjected to high-temperature cycling is identified, resulting in an average charging current reduction of 61.7% compared to pristine cells. Furthermore, a comprehensive charge state-temperature-current contour map is established for batteries with lithium plating. A reduction of 69.84% in the charging current region above 200 A is demonstrated through comparative analysis with the contour map of pristine batteries. A quantitative metric for assessing the degradation of charge performance in batteries with lithium plating is provided by this study, underscoring the necessity of considering these factors in the comprehensive lifecycle management of lithium-ion batteries.

Keywords: precipitating lithium battery; reference electrode; negative potential; charge calibration; charge performance; contour map

(编辑 方晶)