

储能测试与评价

磷酸铁锂电池包微短路诊断方法的研究

秦欢¹, 黄碧雄¹, 严晓², 王影¹, 徐华源¹, 刘双宇³

(¹上海工程技术大学, 上海 201600; ²上海玖克生储能科技有限公司, 上海 201600;

³浙江华云信息科技有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要: 锂电池以其优越的性能广泛应用于新能源电动汽车与储能中, 但锂电池微短路问题对于车用和储能的电池包均是使用过程中的安全隐患, 为了诊断电池包是否发生微短路并对微短路的单体进行判定, 本文提出了一种根据单体相对充电时间变化诊断微短路的方法。本方法在电池包充电结束时, 以最先达到充电截止电压单体的电压曲线为基准, 分析其他单体在能够继续充电的条件下, 达到充电截止电压的充电时间, 并以相对充电时间表征。由于微短路电池的电能持续消耗, 导致其相对充电时间随着充电次数增加, 根据此特性, 对电池包中各单体的相对充电时间进行分析, 并通过箱型图进行异常检测。检测结果的异常单体中, 重复出现次数最多的即为微短路单体。在分析相对充电时间的同时, 需分析直流内阻对诊断结果的影响, 由此可提高诊断结果的准确性。经过对比分析, 诊断结果与实际结果具有高度一致性, 此方法的实施无需对电池包进行特殊测试, 且操作便捷, 可为电池包安全检测提供方法指导。

关键词: 电池包; 微短路; 相对充电时间; 箱型图

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0349

中图分类号: TM912.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2021) 02-664-07

Research on diagnosing micro-short circuit of LiFePO₄ battery pack

QIN Huan¹, HUANG Bixiong¹, YAN Xiao², WANG Ying¹, XU Huayuan¹, LIU Shuangyu³

(¹Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; ²Shanghai Makesens Energy Storage Technology Co., Ltd., Shanghai 201600, China; ³Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China)

Abstract: Lithium batteries are widely used in new energy electric vehicles and energy storage because of their superior performance. However, micro-short circuits in lithium batteries are a safety hazard during the use of battery packs. This paper proposes a method to diagnose micro-short circuits on the basis of the change in the relative charging time of the cell to determine whether the battery pack is micro-short and judge the micro-short circuit cell. At the end of the battery pack charging, this method uses the voltage curve of the cell that first reaches the charge cut-off voltage as a reference, analyzes the charging times for other cells to reach the charge cut-off voltage under the condition that they can continue to be charged, and characterizes these with the relative charging time. Because of the micro-short circuit battery's continuous consumption of electrical energy, its relative charging time increases with the number of charging times. Accordingly, each cell's relative charging time in the battery

收稿日期: 2020-10-23; 修改稿日期: 2020-11-15。

第一作者: 秦欢 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为动力电池微短路、自放电, E-mail: 2491270883@qq.com; 通信作者: 黄碧雄,

硕士, 实验师, 研究方向为新能源汽车动力电池, E-mail: hbxzc@hotmail.com。

pack is analyzed, and abnormality detection is performed through the box diagram. Among the abnormal monomers detected, the micro-short circuit cell has the most repeated occurrences. While analyzing the relative charging time, analyzing the influence of the DC internal resistance on the diagnosis result is necessary to improve the result's accuracy. After a comparative analysis, the diagnosis results are highly consistent with the actual results. The implementation of this method does not require special tests on the battery pack; the operation is convenient, which can guide battery pack safety testing.

Key words: battery pack; micro short circuit; relative charging time; box diagram

锂电池在长期使用过程中逐渐老化, 微短路即为老化特性之一, 其若不能及时被检测会导致内短路, 而内短路情况的恶化通常伴随着自放电率和热量的增加, 进而发生热失控, 引发安全事故^[1-2]。锂电池内部微短路较易触发, 即使不是由于制造的原因, 在使用过程中过度充、放电, 剧烈震动等滥用会使得负极表面形成锂枝晶, 刺穿隔膜也导致锂电池内部发生微短路^[3]。因此, 锂电池的微短路诊断仍是电池管理中亟待解决的问题。

现有的锂电池微短路检测方式主要是通过特定装置和等效电路模型检测。李克锋等^[4]通过极片组微短路检测装置, 在垂直于电池极片组的方向上均匀施加压力, 发生短路的隐患点在压力下正、负极导通后, 向两极间施加直流电压测试两极间的绝缘电阻值, 微短路极片的绝缘阻值低于阈值则证明其存在微短路。但该方法适用于单体电池, 需要特定的装置, 不易实施。郑岳久等^[5-6]通过电池两次充电结束之间的自放电电流来量化微短路, 计算两次充电后的剩余可充电容量可得到漏电量, 进而得到自放电电流, 并结合微短路单体的等效电路模型, 计算出内短路阻值, 根据其阈值判定该单体是否发生微短路。但该方法依赖于内短路阻值阈值的设定, 仅适用于新电池包微短路的诊断, 对老化电池包的诊断误差较大。

针对以上两种方法存在的难点, 本文利用电池包充电过程中的时间和电压, 提出了一种电池包的微短路诊断方法。其优点在于, 仅需要电池包充电数据, 不需要特定的检测设备或设定相关参数的阈值, 计算量小易实施, 且可在电池包的单体层面上进行微短路诊断。

1 锂电池微短路的诊断方法

1.1 锂电池的微短路特性

当锂电池单体的隔膜被附着的粉尘刺穿、隔膜质量差而表面积缩小或破损时, 单体的正、负极直接接触, 导致单体发生微短路^[7]。在由单体串、并联而成的电池包中, 相较于正常的单体, 发生微短路的单体在充电、放电、存储的过程中会持续消耗电能^[8], 影响电池包正常工作。

如图1所示, 其中6条电压曲线为同一18650磷酸铁锂单体电池在不同SOH下的充电电压曲线, 其额定容量为1 A·h、额定电压为3.3 V、充电截止电压为3.65 V。将图1中的6条充电电压曲线模拟为1个电池包在某次充电的电压曲线, 该电池包由6个单体串联而成, 分别用1~6为其编号。

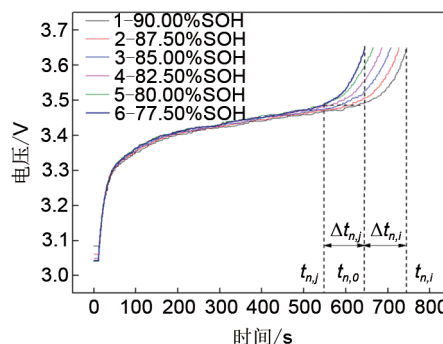


图1 LiFePO₄电池充电曲线

Fig. 1 Charging curve of LiFePO₄ battery

由这6个单体串联组成的电池包, 在 $t_{n,0}$ 时6号单体最先达到充电截止电压3.65 V时停止充电, 而其它5个单体并未能充满。如果可以对电池包中的某一未充满的单体继续单独进行充电, 可得到该单体的相对充电时间 $\Delta t_{n,i}$, 计算公式为

$$\Delta t_{n,i} = t_{n,i} - t_{n,0} \quad (1)$$

其中, n 为充电次数; $t_{n,0}$ 为电池包第 n 次充电

结束时的时间; $t_{n,j}$ 为电池包充电结束时未达到截止电压的 j 号单体, 单独充电至截止电压的时间。

在电池包实际充电过程中, 是无法对某一单体单独充电的, 因而充电结束时未达到充电截止电压单体的准确剩余充电时间是无法得到的, 但是可通过最先达到充电截止电压单体的电压曲线为基准获取^[9-10]。在图1中, 以最先达到截止电压的6号单体的充电电压曲线为基准, 通过电池包中其他单体充电结束时的电压和基准充电电压曲线, 可计算得到相对充电时间 $\Delta t_{n,j}$, 表征该单体的剩余充电时间, 计算公式为

$$\Delta t_{n,j} = t_{n,j} - t_{n,0} \quad (2)$$

其中, n 为充电次数; j 为单体的序号; $t_{n,j}$ 为第 n 次充电时, 基准充电曲线上与 j 号单体充电结束时电压相同的电压点所对应的充电时间。

根据锂电池的微短路特性, 在电池包中没有单体发生微短路时, 每次充电过程中未最先达到截止电压的各单体相对充电时间基本不变; 电池包中有单体发生微短路时, 相比于其他未发生微短路的正常单体, 该单体的相对充电时间随着充电次数的增加而不断延长。

1.2 电池包微短路的诊断

获得电池包中单体每次充电的相对充电时间后, 可计算得到单体相邻两次充电的相对充电时间差值, 并通过单体当前的相对充电时间与对应的相对充电时间差值计算得到 $K_{n-n-1,j}$ 值, 可判定该单体相对充电时间的变化趋势, $K_{n-n-1,j}$ 值计算公式为

$$K_{n-n-1,j} = \frac{|\Delta t_{n,j} - \Delta t_{n-1,j}|}{\Delta t_{n,j}} \quad (3)$$

由于微短路单体的相对充电时间随着充电次数的增加而延长, 因而电池包中发生微短路单体的 $K_{n-n-1,j}$ 值会大于其他正常单体的 $K_{n-n-1,j}$ 值。同时, 内阻较大的单体由于每次充电时间存在波动, 导致充电结束时的电压波动较大, 从而使得每次的相对充电时间变化较大, $K_{n-n-1,j}$ 值也会变大。可根据各整个电池包中的各单体 $K_{n-n-1,j}$ 值的一致性, 并结合内阻对 $K_{n-n-1,j}$ 值的影响, 判别是否有单体出现微短路。具体判断方法如下:

(1) 通过箱型图对各单体 $K_{n-n-1,j}$ 值一致性进行分析;

(2) 统计 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的单体序号;

(3) 计算各单体的直流内阻, 并通过箱型图进

行一致性分析;

(4) 分析 $K_{n-n-1,j}$ 值异常单体直流内阻的一致性, 判断其中是否存在直流内阻异常或较大的单体;

(5) 根据直流内阻对单体进行筛选, 重复步骤(1)~(2)进行 $K_{n-n-1,j}$ 值一致性分析;

若某单体的 $K_{n-n-1,j}$ 值异常且作为异常值重复出现次数最多, 则该单体出现微短路。

某个单体的 $K_{n-n-1,j}$ 值异常且作为异常值重复出现次数最多, 可能是因为该单体的直流内阻较大, 根据直流内阻对单体进行筛选, 不影响诊断结果, 且可提高诊断结果的准确性。

2 锂电池微短路诊断方法的应用

2.1 测试对象及步骤

测试对象为梯次万向 A123 有限公司所生产的 WXL12S537300A 的锂电池模块, 该梯次利用磷酸铁锂电池包由 13 个模组串联, 每个模组由 6 个软包单体并联, 单体的额定容量为 50 A·h, 额定电压为 3.3 V。

测试时选用 arbin evts 600 V/300 A 大功率动力电池测试设备及哈丁科技(重庆)试验设备有限公司的 TU410-5 温控箱。整个测试过程在温控箱 45 °C 的环境中进行, 静置 5 min, 以 300 A 的电流对电池包进行放电至任一模组达到截止电压 2.7 V, 然后以 300 A 的电流对电池包进行充电至任一模组达到截止电压 3.6 V, 由此对电池包进行充放电循环。以相同的充放电循环测试步骤共进行 3 次测试, 电池包在相邻两次测试的静置过程中均处于 45 °C 恒温状态。

2.2 测试数据的选取

选取所有测试数据中的充电数据, 在计算电池包的各模组相对充电时间 Δt_j 时, 考虑到相邻两次充电容量、充电结束时各模组电压的差值一致性, 需要对所有充电数据进行筛选, 在不影响结果的条件下, 以保证微短路诊断的准确性, 数据选取原则如下:

(1) 计算电池包每次充电容量与后一次充电容量差值 ΔC 并相互对比, 选取 ΔC 数值较小的对应充电数据, 由于正常充放电循环中相邻两次充电容量基本不变, 由此选择可以防止每次充电时模组的相对充电时间 Δt_j 波动较大;

(2) 计算电池包每次充电结束时各模组电压与

后一次充电结束时各模组电压差值 ΔU 并相互对比,选取 ΔU 数值较小的对应充电数据,由于相邻两次以相同电流充电时各模组在充电结束时的电压基本不变,由此选择可以防止每次充电时模组的相对充电时间 Δt 波动较大;

(3) 统计电池包每次充电过程中最先达到截止电压的模组序号,在所有充电数据中选取模组序号不变的对应充电数据。电池包的充电容量取决于最先达到充电截止电压的模组,因为最先达到截止充电电压的模组改变,则电池包的充电容量和充电时间随之改变,充电结束时各模组的电压会随之大幅改变,从而导致相对充电时间 Δt 波动较大;若电池包的充电数据在最先达到截止充电电压的模组改变后仍满足(1)~(2)数据选取原则,则保留相对应数据。

电池包在前2次测试中可以正常充、放电,在第3次测试后期不能充、放电。如图2所示,在电池包第3次测试中各模组循环充、放电电压曲线中,第29次充电后电压曲线出现异常,由于电池包中的模组在短时间内达到充电截止电压和放电截止电压,导致电池包不能正常充、放电。因此,选取电池包前28次的充电数据进行分析,在28次充电数据中根据数据选取原则(1)~(3),选取符合的充电数据。

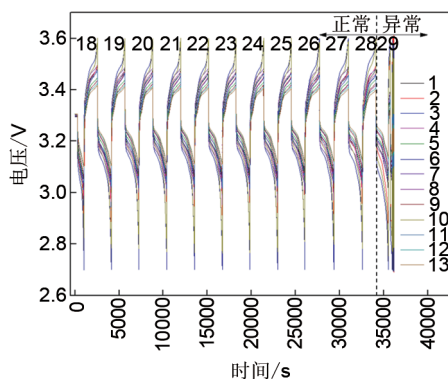


图2 第3次测试中各模组的电压曲线

Fig. 2 The voltage curve of each module in the third test

图3为电池包在3次测试中每次充电容量,根据每次充电容量计算每次充电容量与后一次充电容量差值 ΔC 。3次测试中的充电容量差值曲线如图4所示,纵坐标为相邻两次充电容量差值,横坐标为对应的相邻两次充电次数。在3次测试中,后2次

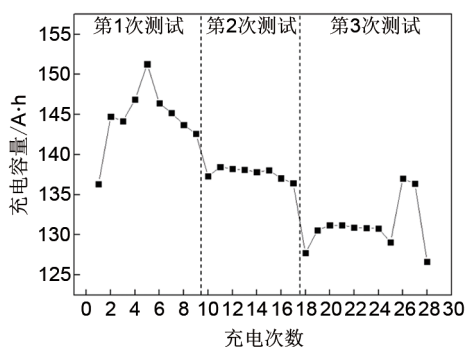


图3 电池包充电容量曲线

Fig. 3 Charging capacity curve of the battery pack

测试过程中充电容量数值变化较小, ΔC 基本保持在 $\pm 2 \text{ A}\cdot\text{h}$ 内。以 $-2 \text{ A}\cdot\text{h} \leq \Delta C \leq 2 \text{ A}\cdot\text{h}$ 为充电数据选取条件,并结合图3和图4,选取测试1中的第2、3、6~9次充电数据、测试2中的所有数据以及测试3中的第19~25、27次充电数据。

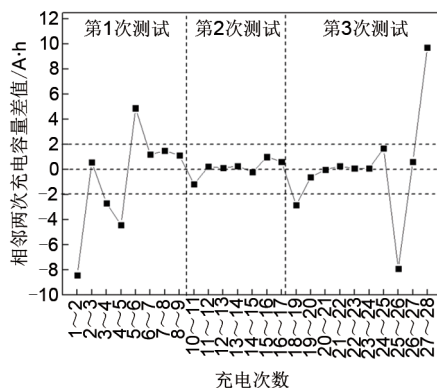


图4 电池包 ΔC 曲线

Fig. 4 ΔC curve of the battery pack

在分析电池包 ΔC 的同时,对电池包各模组的 ΔU 进行分析。图5为电池包3次测试中每次充电结束时各模组的电压曲线,可计算得到 ΔU ,各模组 ΔU 曲线如图6所示。电池包的13个模组中,多数模组的 ΔU 不超过 $\pm 10 \text{ mV}$,以 $-10 \text{ mV} \leq \Delta U \leq 10 \text{ mV}$ 为充电数据选取条件^[9],并结合图5和图6,选取测试1中的6~9次充电数据、测试2中的第11~17次充电数据、测试3中的第20~25次充电数据。

综合考虑电池包 ΔC 和各模组的 ΔV ,选取的具体充电数据如表1所示。

2.3 电池包中模组的微短路分析

选取最先达到充电截止电压的模组,以其电压曲线为基准,计算每次充电时各模组的相对充电时间 $\Delta t_{n,j}$ 。电池包某次充电的电压曲线如图7所示,

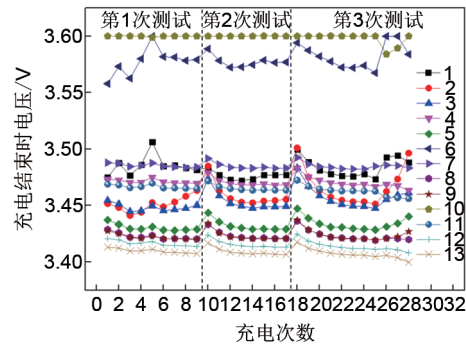


图5 充电结束时各模块的电压曲线
Fig. 5 Voltage curve of each module at the end of charge

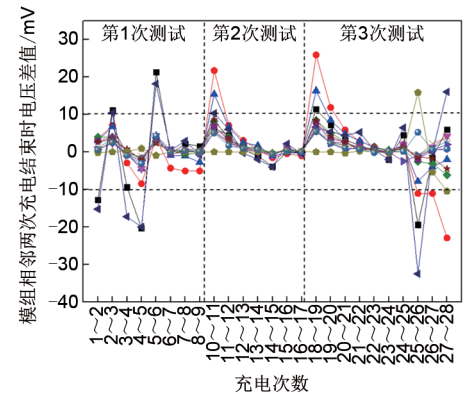


图6 电池包中各模块ΔU曲线
Fig. 6 ΔU curve of each module in the battery pack

表1 选取的充电数据统计
Table 1 Statistics of selected charging data

测试次数	选取的充电数据 (充电次数)
1	6~9
2	11~17
3	20~25

充电过程中10号模组最先达到充电截止电压,以10号模组的充电电压曲线为基准,计算其他模组的相对充电时间 $\Delta t_{n,j}$ 及 $K_{n-n-1,j}$ 值,并通过箱型图分析 $K_{n-n-1,j}$ 值的一致性。

各模组 $K_{n-n-1,j}$ 值箱型图如图8所示,图中出现了多个异常值,统计 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的模组序号如表2所示, $K_{n-n-1,j}$ 值异常的模组为2号和6号模组。导致 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的原因有两个,分别是微短路和內阻较大,计算各模组內阻,做进一步的分析。

通过每次测试前静置的电压与充电电压计算各模组的直流內阻^[11],直流內阻计算公式为

$$R_{k,j} = \frac{U_{2-k,j} - U_{1-k,j}}{I_k} \quad (4)$$

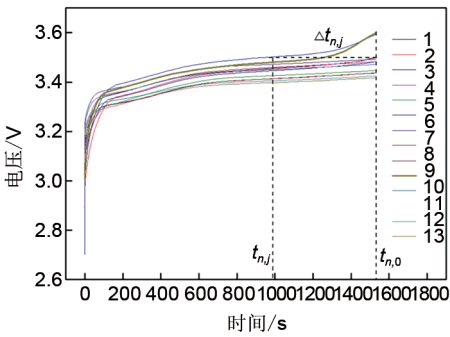


图7 充电时各模块电压曲线
Fig. 7 Voltage curve of each module during charging

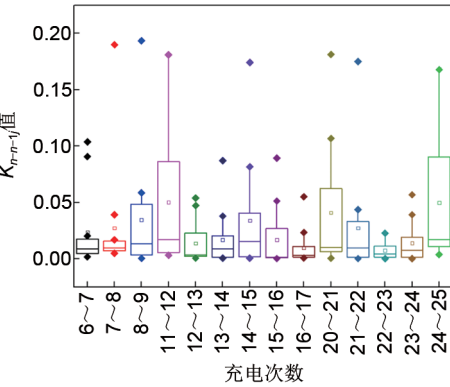


图8 相邻两次充电各模组 $K_{n-n-1,j}$ 值箱型图
Fig. 8 Box diagram of $K_{n-n-1,j}$ value of each module charged twice adjacently

表2 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的模组序号统计
Table 2 Statistics of module serial numbers with abnormal $K_{n-n-1,j}$ values

充电次数	异常模组序号	充电次数	异常模组序号
6~7	2、6	15~16	6
7~8	2、6	16~17	6
8~9	2	20~21	6
11~12	—	21~22	6
12~13	—	22~23	—
13~14	6	23~24	6
14~15	6	24~25	—

其中, k 为测试次数; $U_{1-k,j}$ 为 j 号模组 k 次测试静置时的电压; $U_{2-k,j}$ 为 j 号模组 k 次测试开始充电后10 s的电压; I_k 为 k 次测试的充电电流。

根据公式(4)计算出3次测试中各模组的直流內阻,各模组的直流內阻曲线如图9所示,图中6号模组的直流內阻值最大,证明6号模组 $K_{n-n-1,j}$ 异常的原因是直流內阻值大。利用箱型图对电池包中模组的直流內阻一致性进行分析^[12],如图10所示,电池包中不存在直流內阻异常的模组。为消除直流內

阻对于诊断结果的影响,选取直流内阻值不超过 3/4 中位数的模组数据,即直流内阻值较大的 6、7、10 号模组的数据,以确保诊断结果的准确性。

直流内阻较大,其 $K_{n-n-1,j}$ 值异常是受到了直流内阻的影响,且 2 号模组重复出现的次数最多,证明 2 号出现微短路。

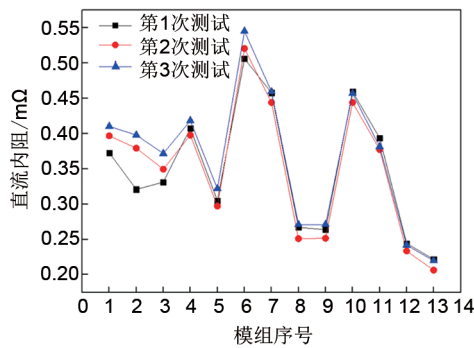


图 9 各模组直流内阻
Fig. 9 DC internal resistance of each module

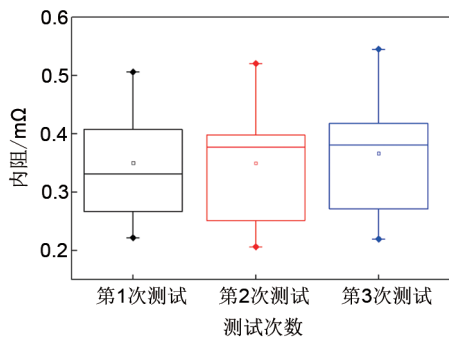


图 10 各模组直流内阻箱型图
Fig. 10 Box diagram of each module's DC internal resistance

对于剩余的模组进行 $K_{n-n-1,j}$ 值一致性分析,各模组 $K_{n-n-1,j}$ 值箱型图如图 11 所示。统计 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的模组序号,如表 3 所示,1、2 号模组出现异常,对比 1、2 号模组的直流内阻可知,1 号模组的

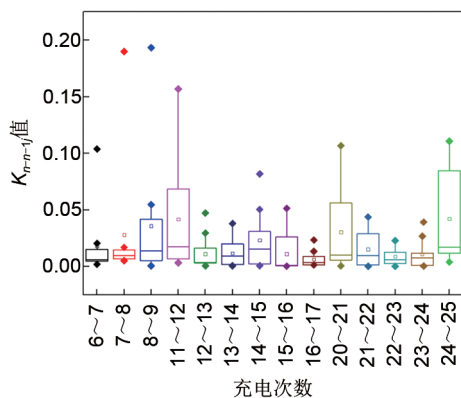


图 11 剩余模组相邻两次充电的 $K_{n-n-1,j}$ 值箱型图
Fig. 11 Box diagram of $K_{n-n-1,j}$ value of the remaining modules charged twice adjacently

表 3 剩余模组中 $K_{n-n-1,j}$ 值异常的模组序号统计
Table 3 Statistics of module serial numbers with abnormal $K_{n-n-1,j}$ values in the remaining modules

充电次数	异常模组序号	充电次数	异常模组序号
6~7	2	15~16	—
7~8	2	16~17	2
8~9	2	20~21	—
11~12	—	21~22	—
12~13	2	22~23	—
13~14	—	23~24	1
14~15	1	24~25	—

图 12 为 2 号模组在第 3 次测试中的充放电电压曲线,对比图 2 和图 12 可知在测试末期,电池包不能正常充、放电是由于 2 号模组出现异常。2 号模

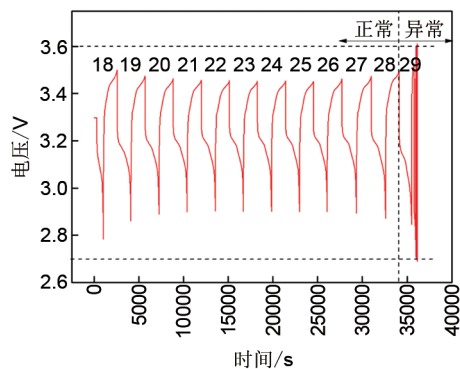


图 12 第 3 次测试中 2 号模组的电压曲线
Fig. 12 Voltage curve of No.2 module in the third test

组在充、放电循环中可在短时间内达到充、放电的截止电压,证明 2 号模组的容量在快速衰减,出现了微短路,诊断结果与实际结果一致。

3 结 论

针对电池包老化过程中的安全使用问题,本文提出了一种电池包的微短路诊断方法。电池发生微短路后会不断消耗电能,导致电池包中微短路单体的相对充电时间随着充电次数增多,从而异于正常的单体,该方法根据此特性通过电池包的充电数据对各单体的相对充电时间进行分析,由此可以判断电池包是否存在微短路,并对微短路的具体单体进行判定。

此方法对于电池包中发生微短路的单体进行定位时, 仅需充电数据, 无需特定工况下的测试即可对电池包进行微短路诊断, 不影响电池包的正常工作, 简单易操作, 且能够在线应用, 可为电池包的预防性检测及安全应用提供一定技术指导。

参考文献

- [1] 刘力硕, 张明轩, 卢兰光, 欧阳明高, 等. 锂离子电池内短路机理与检测研究进展[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(6): 1003-1015.
LIU Lishuo, ZHANG Mingxuan, LU Langaung, OUYANG Minggao, et al. Recent progress on mechanism and detection of internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1003-1015.
- [2] FINEGAN D P, DARCY E, KEYSER M, et al. Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(6): 1377-1388.
- [3] KONG Xiangdong, ZHENG Yuejiu, OUYANG Minggao, et al. Fault diagnosis and quantitative analysis of micro-short circuits for lithium-ion batteries in battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2018, 395(8): 358-368.
- [4] 李克锋, 耿盼盼, 张晓霞, 葛伟, 沈川杰. 一种锂离子电池极片组微短路故障检测方法[J]. 中国设备工程, 2018(24): 87-88.
LI Kefeng, GENG Panpan, ZHANG Xiaoxia, GE Wei, SHEN Chuanjie. Method for detecting micro-short circuit fault of pole piece assembly of lithium-ion battery[J]. China Plant Engineering, 2018(24): 87-88.
- [5] 孔祥栋, 郑岳久, 张振东, 周龙, 来鑫. 在线定量诊断电池微短路故障的方法: 中国, 108152755A[P]. 2018-06-12.
KONG Xiangdong, ZHENG Yuejiu, ZHANG Zhendong, ZHOU Long, LAI Xin. Method for online quantitative diagnosis of battery micro-short circuit fault: CN, 108152755A[P]. 2018-06-12.
- [6] 郑岳久, 孔祥栋, 周龙. 一种电池短路的故障诊断系统: 中国, 106443490A[P]. 2017-02-22.
ZHENG Yuejiu, KONG Xiangdong, ZHOU Long. A fault diagnosis system for battery short circuit: CN, 106443490A[P]. 2017-02-22.
- [7] ZHAO R, LIU J, GU J. Simulation and experimental study on lithium ion battery short circuit[J]. Applied Energy, 2016, 173(1): 29-39.
- [8] OUYANG M, ZHANG M, FENG X, et al. Internal short circuit detection for battery pack using equivalent parameter and consistency method[J]. Journal of Power Sources, 2015, 294(10): 272-283.
- [9] ZHENG Y, LU L, HAN X, et al. LiFePO₄ battery pack capacity estimation for electric vehicles based on charging cell voltage curve transformation[J]. Journal of Power Sources, 2013, 226(3): 33-41.
- [10] ZHENG Y, OUYANG M, LU L, et al. On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation[J]. Journal of Power Sources, 2014, 247(1): 676-686.
- [11] 杨万福. 锂离子动力电池内阻检测研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
YANG Wanfu. Research on internal resistance detection of lithium-ion power battery[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2018.
- [12] 徐敏, 刘中财, 严晓, 等. 容量增量内阻一致性在线检测方法[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1197-1203.
XU Min, LIU Zhongcai, YAN Xiao, et al. Online detection method for incremental capacity internal resistance consistency[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1197-1203.