

锂离子电池内短路研究综述

吴祎,王友仁

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘 要:锂离子电池作为多种设备及装置的核心供电部件,其安全性问题受到广泛关注。内短路是导致动力电池发生安全事故的重要诱因之一,因此针对锂离子电池内短路的研究已成为近年来研究热点。针对内短路安全问题,阐述了国内外内短路诱发实验方法,并归纳了内短路检测方法,给出了内短路问题的未来研究方向。

关键词:锂离子电池;安全;内短路;检测方法

中图分类号:TM912 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0169-04

Review of Internal Short Circuit of Lithium-ion Battery

WU Yi, WANG Youren

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Lithium-ion battery plays a vital role in power-based devices. The attention is paid to its safety problem. Internal short circuit (ISC) is one of the root causes resulting in the safety accidents of lithium-ion battery. Therefore, researching on ISC becomes a research hotspot in recent years. This paper explains the experimental method of bringing out the internal short circuit at home and abroad. The ISC detecting method is summarized and the future research direction for ISC is discussed.

Keywords: lithium-ion battery; safety; internal short circuit; detection method

0 引言

近年来,为缓解全国环境污染和能源危机等问题,国家已在“十三五”规划中明确表示重点发展新能源产业^[1]。锂离子电池作为一种新型能源,具有能量密度高、容量大、循环寿命长、无记忆效应等优点,已广泛应用于电子产品(如手机、计算机)、机电设备(如电动汽车)^[2]。锂离子电池作为各类设备及装置的重要动力来源,其失效或故障会导致系统故障,造成巨大经济损失,甚至引发灾难性故障。近年来已发生多起与锂离子电池相关的安全事故^[3-4],因此针对锂离子电池安全性问题的研究备受关注。

内短路是导致动力电池发生安全事故的重要诱因之一。内短路通常指电池内部正极和负极之间连通,形成局部短路,导致电池内部电流迅速升高、化学反应加速,温度迅速升高^[5]。当电池内短路严重时,则会发生热失控,造成电池起火甚至爆炸。因此,研究及时、有效的内短路检测方法是预防锂离子电池安全事故、提高电池安全性的重要措施之一。

本文针对锂离子电池内短路安全问题,就国内外对锂离子电池内短路的研究现状进行概述,总结了常见的锂离子电池内短路诱发实验方法及内短路检测方法。

1 锂离子电池内短路诱发实验方法

引起锂离子电池内短路的因素众多且复杂,为了研究电池内短路机理,模拟不同情况下的内短路,获取内短路早期特征,设计内短路诱发实验具有重要意义。目前研究人员研究设计了多种锂离子电池内短路诱发实验方案。

1.1 滥用条件法

基于滥用条件引发锂离子电池内短路的方法主要包括基于机械滥用条件、电滥用条件和热滥用条件3类方法。基于机械滥用条件的方法通过挤压或刺穿等方式来诱发电池内短路。SAHRAEI E等人^[6]对18650圆柱形电池在荷电状态(state of charge, SOC)为10%的条件下开展了一系列机械滥用实验(包括横向挤压、平板挤压、三点弯曲等)直至电池短路,并在此过程中观察施加力、电池位移、电压及温度的相互关系,最终构建了电池均向和各向异性计算模型,以模拟电池在不同负载下的全局动态响应。WANG H等人^[7]通过对不同容量的锂离子电池进行穿刺实验模拟电池内短路,并分析了不同穿刺位置(内短路位置)对电池热性能的影响。该类方法只能模拟外部变形引起的电池内短路,而无法模拟实际使用过程中无外部形变的内短路情形。

基金项目:南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ14-04);中央高校基本科研业务费专项资金(KYLX-0251);江苏省研究生培养创新工程

第一作者简介:吴祎(1990—),女,安徽淮南人,博士研究生,研究方向为蓄电池健康管理。

基于电滥用条件的方法通过对电池进行过充或过放电,诱导负极金属锂枝晶生长,刺穿隔膜并连接正负极,从而引发电池内短路。GUO R 等人^[8]设计了过放电诱发内短路实验,以模拟在电池安全管理系统失效情况下,串联电池组中某一单体电池过放电的情况。实验表明:在过放电超出标准容量 12% 时电池出现内短路现象;在过放电超出标准容量 20% 时,发生严重内短路。

基于热滥用条件的方法主要通过对电池进行高温试验,引发电池内短路。FENG X 等人^[9]采用加速量热仪 (accelerating rate calorimetry, ARC) 对 25 Ah 圆柱形 NMC 电池进行过热测试,在电池内部温度发生急剧升高 15~40 s 后,电池电压迅速下降,发生内短路,最终电池内部温度高达 870 °C,发生热失控。

1.2 人工设计内部缺陷法

人工设计内部缺陷的方法是通过在锂离子电池内植入温控材料或杂质颗粒^[10],从而增大电池正常运行时内短路的发生概率。ORENDORFF C J 等人^[11]在电极材料上植入低熔点 (34 °C ~ 40 °C) 的金属或合金杂质,并用该电极材料组装电池。当电池内部温度高于金属熔点时,金属将融化变为液体,破坏隔膜的绝缘性,引发电池内短路。ZHANG M 等人^[12]在电池内部植入形状记忆合金,该合金在低温时为平面状态,当达到某一特定温度后会发生形变,产生凸起并刺穿隔膜,从而使得电池内部发生短路。通过去除形状记忆合金附近的电极材料,可触发不同类型的内短路。实验表明负极材料和铝之间的内短路最为严重,容易引发热失控,而正极和负极材料之间发生内短路时,由于正极材料导电性较差,通常会引起中等自放电现象。

1.3 等效电阻法

上述电池内短路诱发实验方法多在较短时间内迅速引发电池严重内短路,使得电池发生热失控,且难以模拟并复现电池不同时期内短路现象。因此,近年来相关人员在研究电池内短路检测方法时,通常采用在外部正、负极间短接不同阻值的电阻,模拟电池内短路的严重程度,该方法具有可重复性及可控性好等优点。OUYANG M 等人^[13]将常规电池等效电路模型与短路电阻并联以构建电池短路等效电路模型,如图 1 所示。基于外短路等效实验结果,提出了 3D 电化学—热—内短路耦合模型。该模型可以获取电池在内短路下的电化学响应和热响应,且可模拟在电池内部不同位置发生的不同程度内短路。

2 锂离子电池内短路检测方法

为了对早期内短路进行检测,以有效阻止电池严重失效的发生,研究人员提出了多种内短路检测方法。现有的电池内短路检测方法主要基于电池管理系统 (battery management system, BMS) 中提供的可用检测信号 (如电压、电流、温度等) 来进行短路检测,可分为基于直接特征的内短路检测方法和基于间接特征的内短路检测方法。

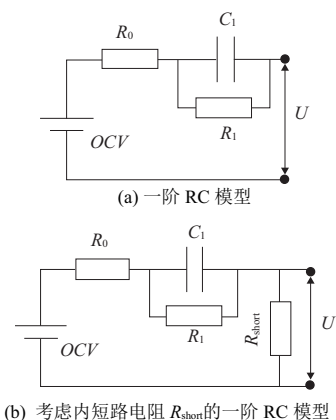


图 1 锂离子电池一阶 RC 等效电路模型

2.1 基于直接特征的内短路检测方法

电池内短路通常会导致电池自放电,并在电池内部大量生热,其对 BMS 中传感信号的直观影响表现为电压下降、电流增加及温度升高等,因此可基于直接特征的方法通过直接分析 BMS 传感信号的变化,实现内短路的故障检测。1) 判断传感信号是否超过故障阈值: XIA B 等人^[14]通过同时检测电池端电压下降率和温度上升率判断电池是否发生内短路。KIM G 等人^[15]通过分析电池组中的支路电流差异性,实现电池组内部短路检测。2) 比较电池组内单体电池传感信号的变化规律: 当电池组中某一电池发生内短路时,其电压变化规律与其余电池呈现出较大差别,因此, XIA B 等人^[16]通过计算单体电池电压之间的相关系数来实现电池短路检测。当某一单体电池与其他电池的电压相关系数发生突降时,判定该电池发生内短路。基于直接特征的方法实施简单,可实现内短路在线检测,但其无法准确探测内短路的早期征兆,难以量化内短路严重程度,且需要提前设定合理的检测阈值。

2.2 基于间接特征的内短路检测方法

基于间接特征的内短路检测方法是首先建立电池内短路状态与电池间接特征 (如等效模型参数、自放电电流、内短路等效电阻) 之间的关系,将电池内短路检测问题重构为参数估计问题。然后,基于合适的电池参数化等效模型,辨识能表征电池内短路状态的模型参数,实现电池内短路检测。

清华大学的欧阳明高团队对内短路建模及检测方法进行了一系列研究: 1) 建立了电池 3D 电化学—热—内短路耦合模型,并基于该模型分析了多种内短路场景下 (内短路等效电阻、内短路位置以及内短路区域) 的电池热耦合特征 (温度、电压响应),同时分析了与内短路状态相关的电池模型物理参数,确定了可用于内短路检测的有效特征 (如电阻、电容、SOC 及产热内阻等)^[17-18]; 2) 提出了基于“平均—差异”假设理论的串联电池组内短路检测方法,其算法框架如图 2 所示^[19]。首先,通过对单体电池电压和表面温度的一致性预判,确定疑似异常的“差异电池”,并将电池组中的其余电池简化为一个“平均电池”,然后基于电池等效模型,结合辨识算法 (卡尔曼滤波、最

小二乘法)获取“平均电池”和“差异电池”中与内短路状态相关的特征^[13,20-21]。通过对比“差异电池”特征偏离“平均电池”的程度,实现电池组内单体电池的内短路检测及定位。实验表明检测算法可至少在热失控前 30 min 正确检测出内短路。该方法通过检测电池一致性差异进行内短路的检测,当一致性差异达到设定阈值时认为电池发生内短路,因此,阈值的设定直接决定检测的准确性。此外,该方法目前仅适用于串联电池组。

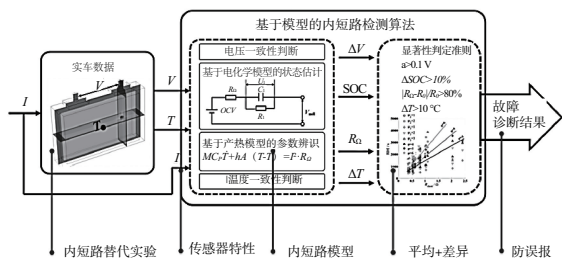
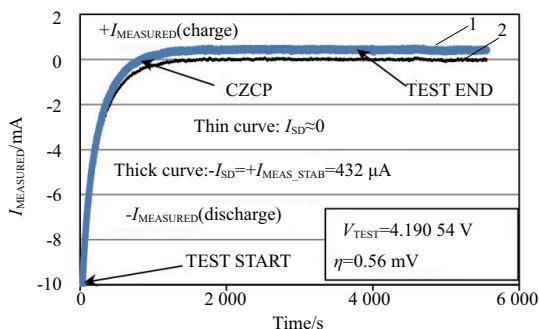


图2 基于“平均-差异”模型的锂离子电池内短路检测方法

锂离子电池发生内短路时,其自放电电流明显大于正常工作状态下的自放电电流,因此可通过辨识电池自放电电流来检测电池内短路。美国 TIAX 公司^[22]在电池处于均衡状态下,对电池施加等同于均衡电压的恒压,则最终测得的外部均衡电流与内部自放电电流相互补偿,即可间接测量出电池自放电电流。该方法要求电池处于均衡状态,需要较长的静置时间,在实际应用中具有一定的局限性。美国爱达荷国家实验室的 SAZHIN S V 等人^[23]对该方法进行改进,通过恒压源对待测电池施加一个略小于当前端电压的恒压,并监测电池电流。若电池未发生内短路,则其放电至与恒压源电压相等,电流最终趋于 0。反之,若电池发生内短路,其首先放电,当端电压与设定电压相等后,由于自放电作用,恒压源又会对其进行充电,电池电流由放电转为充电,如图 3 所示。因此,通过判断电流方向即可检测电池内短路,并间接获取自放电电流。该改进方法仅要求电池处于非工作状态而不要求其达到均衡状态。



1—具有内短路的电池电流曲线;
2—无内短路的电池电流曲线。

图3 基于自放电电流的内短路检测方法

由于内短路会导致锂离子电池内部存在额外电量损耗,使得电池组中发生内短路电池单体的剩余可充容量随

着充电周期不断增大。因此,KONG X 等人^[24]提出了一种基于剩余可充容量的串联电池组内短路检测及量化方法,通过比较相邻两次充电周期内电池单体的剩余可充容量差值来判断该单体是否发生内短路,并根据剩余可充容量差值及充电时间,计算获取电池内短路等效电阻。

SEO M 等人^[25]通过辨识电池内短路等效电阻,实现电池内短路检测。针对锂离子电池单体,其提出了基于开关切换模型(switching model method, SMM)的内短路检测方法,通过 SMM 模型更新电池短路等效电路模型,从而更准确估计模型中的开路电压(open circuit voltage, OCV)和 SOC,最后结合电池当前 SOC 和自放电理论,获取电池内短路等效电阻,提早预警电池内部短路情况。此外,SEO M 等人^[26]针对电池组中无法检测每个单体电压的情形,提出了一种仅需监测工作电流和电池组端电压的检测方法。首先,基于电池组端电压和卡尔曼滤波法估计电池组 SOC,然后以电池组 SOC 作为初始值,通过安时积分法估计电池组中正常电池的 SOC,根据电池组和正常单体 SOC 反推故障电池 SOC,最后基于故障电池的短路等效电路模型,结合故障电池 SOC 变化,获取电池内短路等效阻值。

基于间接特征的方法比基于直接特征的内短路检测方法更能准确、量化地提供内短路检测结果,但是该类方法通常需要对电池进行复杂的建模及测试过程。

3 结语

锂离子电池是一种非线性电化学系统,其工作条件复杂多变,导致内短路故障成因复杂。综合国内外近几年研究现状,针对内短路问题的研究虽取得一定进展,但尚存在一些问题需要解决。

1)内短路诱发实验:目前存在的内短路诱发实验种类繁多,尚缺少统一的标准。基于滥用条件和人工植入缺陷法可有效模拟真实内短路过程,但其内短路发展过程难以控制。等效电路法可定量控制内短路程度,但其与真实内短路机制存在差别。因此,如何最大程度地模拟真实情况下的内短路从初期形成到发展为热失控的过程,设计定量可控的内短路诱发实验是当前锂离子电池内短路研究中的难题之一。

2)内短路检测方法:在内短路检测方法方面,可以进一步寻找对内短路更灵敏的有效特征,同时检测多个特征以提高方法的可靠性和灵敏度。在研究对象方面,目前的内短路检测方法多针对单体电池或串联电池组,而实际系统中的电池组既有串联又有并联结构,对并联电池组的内短路有效检测问题仍需解决。

参考文献:

- [1] 梁嘉羿,王友仁,黄薛,等. 蓄电池能量均衡技术研究综述[J]. 机械制造与自动化,2018,47(3):26-30.
- [2] LIPU M S H, HANNAN M A, HUSSAIN A, et al. A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: challenges and recommendations[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 115-133.

- [3] WILLIARD N, HE W, HENDRICKS C, et al. Lessons learned from the 787 dreamliner issue on Lithium-ion battery reliability [J]. *Energies*, 2013, 6(9): 4682-4695.
- [4] 俞骏威, 杨小波, 张晓云. 电动汽车碰撞事故特征与电池约束安全设计探讨[J]. *机械制造与自动化*, 2016, 45(4): 63-65.
- [5] MALEKI H, HOWARD J N. Internal short circuit in li-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191(2): 568-574.
- [6] SAHRAEI E, CAMPBELL J, WIERZBICKI T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 220: 360-372.
- [7] WANG H, SIMUNOVIC S, MALEKI H, et al. Internal configuration of prismatic lithium-ion cells at the onset of mechanically induced short circuit[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 306: 424-430.
- [8] GUO R, LU L, OUYANG M, et al. Mechanism of the entire-overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 302-308.
- [9] FENG X, FANG M, HE X, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 294-301.
- [10] SANTHANAGOPALAN S, RAMADASS P, ZHANG J Z. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 550-557.
- [11] ORENDORFF C J, ROTH E P, NAGASUBRAMANIAN G. Experimental triggers for internal short circuits in lithium-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(15): 6554-6558.
- [12] ZHANG M, DU J, LIU L, et al. Internal short circuit trigger method for lithium-ion battery based on shape memory alloy [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017, 164(13): A3038-A3044.
- [13] 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: 272-283.
- [14] XIA B, MI C, CHEN Z, et al. Multiple cell lithium-ion battery system electric fault online diagnostics [C]. 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn, MI, USA, 2015.
- [15] KIM G, SMITH K, IRELAND J, et al. Fail-safe design for large capacity lithium-ion battery systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 210: 243-253.
- [16] XIA B, SHANG Y, NGUYEN T, et al. A correlation based fault detection method for short circuits in battery packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 337: 1-10.
- [17] FENG X, WENG C, OUYANG M, et al. Online internal short circuit detection for a large format lithium ion battery [J]. *Applied Energy*, 2016, 161: 168-180.
- [18] FENG X, HE X, LU L, et al. Analysis on the fault features for internal short circuit detection using an electrochemical-thermal coupled model [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, 165(2): A155-A167.
- [19] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京:清华大学, 2016.
- [20] FENG X, PAN Y, HE X, et al. Detecting the internal short circuit in large-format lithium-ion battery using model-based fault diagnosis algorithm[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 18: 26-39.
- [21] GAO W, ZHENG Y, OUYANG M, et al. Micro-short-circuit diagnosis for series-connected lithium-ion battery packs using mean-difference model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(3): 2132-2142.
- [22] MCCOY C H. System and methods for detection of internal shorts in batteries: US, 20140266229A1 [P]. 2014-09-18.
- [23] SAZHIN S V, DUFEK E J, GERING K L. Enhancing li-ion battery safety by early detection of nascent internal shorts [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(1): A6281-A6287.
- [24] KONG X, ZHENG Y, OUYANG M, 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: 358-368.
- [25] SEO M, GOH T, PARK M, et al. Detection of internal short circuit in lithium ion battery using model-based switching model method[J]. *Energies*, 2017, 10(1): 76-80.
- [26] SEO M, GOH T, PARK M, et al. Detection method for soft internal short circuit in lithium-ion battery pack by extracting open circuit voltage of faulted cell [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1669-1675.

收稿日期: 2019-04-30