

# 退役锂离子电池整包热失控实验研究与热失控 预防方案设计

徐威, 王宝林, 韩松, 王远德, 李鸿露

(特来电新能源股份有限公司, 山东 青岛 2661042)

**摘要:** 针对退役锂离子电池进行整包热失控研究, 将额定容量为 25.6 kWh 的整包磷酸铁锂电池以 0.125 C 的倍率进行过充, 直至充至热失控状态, 记录该过程中单体电池电压变化、电池模组温度变化及整包电池电压变化等数据, 通过实验结果表明, (1) 将电池 SOC 充至 79.6% 时, 单体最高电压就已经达到额定值, 所以梯次电池的 SOC 值不可作为热失控判定的条件; (2) 单体电池最高电压增加了 60% 后发生热失控, 可将单体电池最高电压变化率作为判定依据。 (3) 热失控时电池模组的最高温度为 79 °C, 在 30 s 内电池模组由 45 °C 突变至 79 °C, 所以温度变化率可作为电池热失控判定依据。 (4) 热失控发生时, 率先产生以氢气、甲烷、乙烯和一氧化碳为主体的可燃性气体, 之后产生明火。根据实验数据, 设计了一套热失控预防方案, 为退役锂离子电池在分布式储能电站应用的安全性设计与整包电池热失控防护提供了一定的理论参考。

**关键词:** 磷酸铁锂电池; 过充; 整包电池热失控; 安全性

## Lithium ion battery explosion pressure and the whole package of underwater thermal runaway battery thermal runaway fire control strategy

XU Wei, WANG Baolin, HAN Song, WANG Yuande, LI Honglu  
(TELD NEW ENERGY CO., LTD. Qingdao, Shandong 2661042)

**Abstract:** This paper studies the whole package of thermal runaway for retired lithium ion batteries. The whole package of Lithium iron phosphate battery with a Nameplate capacity of 25.6 kWh is overcharged at a rate of 0.125C until it is charged to the state of thermal runaway. The data such as the voltage change of single battery, the temperature change of battery module and the voltage change of the whole package of battery are recorded during this process. The experimental results show that (1) when the battery SOC is charged to 79.6%, the maximum voltage of single battery has reached the rated value. Therefore, the SOC value of the cascade battery cannot be used as a condition for judging thermal runaway. (2) When the maximum voltage of a single battery increases by 60%, thermal runaway occurs. The maximum voltage change rate of a single battery can be used as a judgment basis. (3) When Thermal runaway occurs, the maximum temperature of the battery module is 79 °C, and the battery module suddenly changes from 45 °C to 79 °C within 30s, so the temperature change rate can be used as the judgment basis for Thermal runaway of the battery. (4) When Thermal runaway occurs, combustible gases mainly composed of hydrogen, methane, ethylene and carbon monoxide will be generated first, and then open fire will be generated. Based on the experimental data, this paper designs a set of thermal runaway prevention scheme, which provides a theoretical reference for the safety design of retired lithium-ion batteries in distributed energy storage power stations in the future and the protection of thermal runaway of the whole package of batteries.

**Key words:** lithium iron phosphate battery; overcharging; thermal runaway of the whole battery; security

## 0 引言

锂离子电池由于其能量密度大、比能量高的特点得到广泛应用, 近几年首批投入市场的新能源汽

车锂离子电池动力相继退役, 但其电池剩余可用容量还处于一个相对较高的水平, 可将梯次电池作为分布式储能电站中的电能存储介质。但随之而来的是电池失效带来的安全隐患, 其中电池热失控是危

险性最大也是最常见的一种失效形式<sup>[1-6]</sup>。

目前许多学者对于电池热失控过程进行了研究。文献[7-8]等从锂离子动力电池热失控现象出发,总结热失控的演化过程,阐明机械、热、电及内短路导致电池热失控的机制。文献[9-11]等针对电池热失控后释放的可燃性气体进行研究,并将释放的多种可燃性气体混合后进行爆炸测试,为锂离子动力电池储能电站可燃性气体检测、通风设计提供了理论基础。文献[12-13]对 NCM811 锂离子进行了高温条件下的不同 SOC 电池热失控爆炸试验,从试验结果可以看出,NCM811 电池爆炸危险性随 SOC 值的增大而增大,90%SOC 电池爆炸时 1L 容器中超压为 512 kPa。文献[14-16]进行绝热条件下电池热失控实验,得到热失控时的触发温度和最高温度,对储能电站火灾爆炸事故具有理论指导意义。

当前对于电池热失控实验大部分是以单体电芯作为实验对象,几乎没有以整包电池作为研究对象进行过充实验,并记录实验过程中的电池数据,本文使用某新能源车拆车后所取下的整包梯次电池作为实验对象进行过充实验,记录了从过充到热失控状态电池的温度、SOC 值及单体最高、最低电压的数据。

### 1 整包电池热失控实验设计

该实验所用电池为某新能源车拆车后所取下的梯次电池,该电池为磷酸铁锂电池,电池系统参数:额定电压为 330 V,总容量为 25.6 kWh,质量为 353 kg,单体电池额定电压为 3.3 V,出厂日期为 2014 年 10 月。

实验方案:将实验设备分为控制仓和电池仓,电池舱内安装连有脱钩系统的梯次电池,热失控发生时触发机械脱钩使电池脱落至正下方的水坑中,通过安装摄像头分别观察舱内试验电池包的情况及电池包热失控后落水情况,并在电池包模组上分别布置温度采样点,共 9 组采样,在舱室顶部安装可燃性气体探测器,热失控后释放的可燃性气体,控制仓安装充电模块及可监控 BMS 数据的微网控制器,其中一台电池的 BMS 系统做屏蔽处理并进行过充,实验设备如图 1、图 2 所示。

由于是梯次电池,电池 SOC 值达到 79.6%后,该数值没有再增加,并且单体电池电压已经达到 3.3 V,此时电池的状态可以看做电池已充满的状态,在此基础上对电池使用 0.125 C 的充电倍率对电池进行充电,期间微网控制器屏蔽 BMS 对电池的所有动作,只读取 BMS 上传的数据。

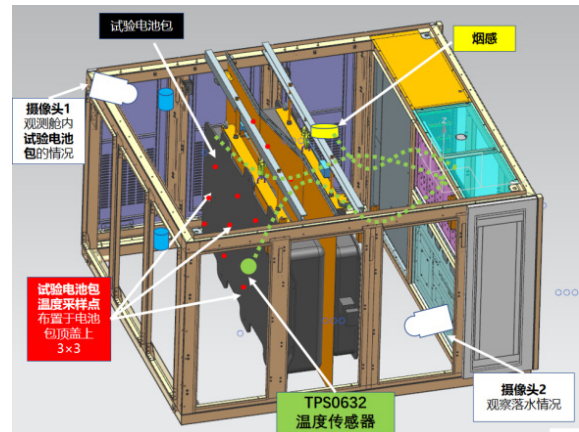


图 1 热失控实验设备

Fig. 1 Thermal runaway experimental equipment

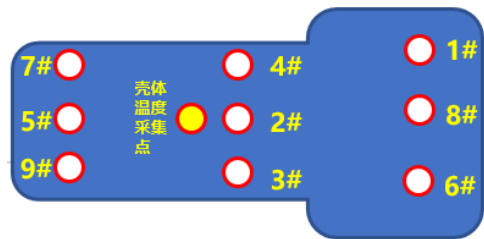


图 2 整包电池温度采集布置图

Fig. 2 Temperature collection layout of the entire battery pack

### 2 实验结果与数据分析

对整包电池进行过充实验,获取以下实验过程数据:整包电池 SOC 变化情况、整包电池电压、最高单体电压、整包电池温度采样点最高温度,整包电池在过充 8219s 后发生热失控,通过分析数据可知:

- (1) 最高单体电池电压在 3.3 V 持续 2590 s 后开始阶梯式升高,在 4741 s 电压达到 4.87 V 后缓慢增长,最终热失控时电压为 5.13 V。
- (2) 整包电池电压在 330 V 维持 2908 s 后开始线性上升,最终热失控时电压达到 492 V。
- (3) 在整包电池模组温度的 9 个采样点中,2# 采样点温度始终保持最高,温度在 25 °C 持续了 3592 s,之后保持阶梯式上升,在 8219 s 时温度从 45 °C 突变至 79 °C,电池发生热失控。
- (4) 在对电池进行过充的 8100s 中,电池的 SOC 值一直在上升,从 79.6% 上升至 96.4%,在 96.4% 持续了 119 s 后,电池发生热失控。
- (5) 可燃性气体探测器探测出热失控发生前,电池释放以氢气、甲烷、乙烯和一氧化碳为主体的可燃性气体。

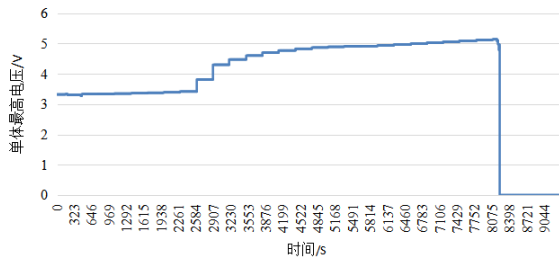


图3 最高单体电压

Fig. 3 Highest cell voltage

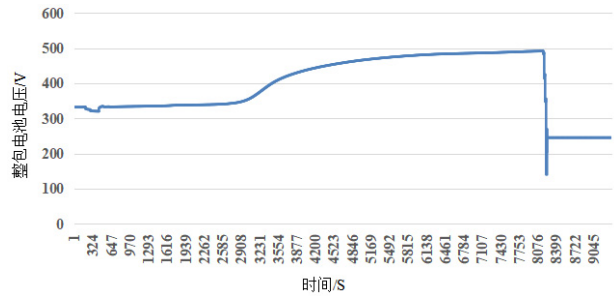


图6 整包电池电压

Fig. 6 Battery voltage of the whole pack

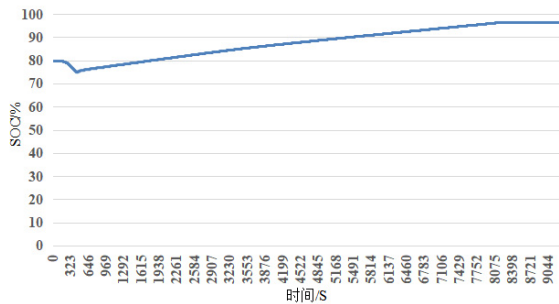


图4 电池SOC值

Fig. 4 SOC value of battery

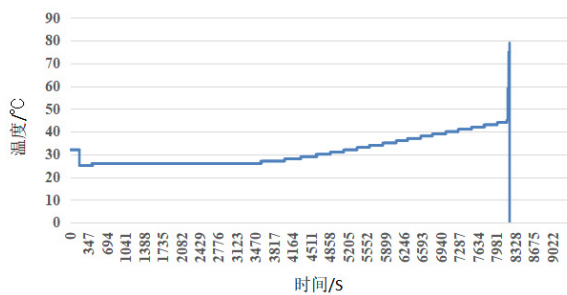


图5 电池模组最高温度

Fig. 5 Maximum temperature of the battery module

### 3 梯次电池热失控预防方案设计

由于梯次动力电池的容量已衰减至 80%，所以电池的 SOC 值无法作为电池是否充满的判断依据，根据上述实验内容及得到的数据，本文设计了一套电池热失控预防方案。

1) 单体电池最高温度  $\geq 60^\circ\text{C}$  且持续 1 s；本次实验中 2#模组率先发生热失控，在过充 8195 s 时温度达到  $60^\circ\text{C}$ ，24 s 后发生热失控，实验测试出的是模组温度，实际单体电池温度会率先到达  $60^\circ\text{C}$ 。

2) 单体电池温度变化率  $\geq 1$  且持续 1 s；在正常充电过程中，单位时间内温度变化率不会超过 1，在过充实验中，8184 s 时温度为  $45^\circ\text{C}$ ，9 s 后温度上升到了  $55^\circ\text{C}$ ，此时的温升速率已经大于 1，而且一直在持续，一直到 8219 s 温度上升到  $79^\circ\text{C}$ ，电池发生热失控。

3) 单体电池电压变化率  $\geq 25\%$ ；通过实验数据显示，在 2589 s 时的电压相比于额定电压已增加了近 20%，3023 s 时增加了 35%，在这两个时间点上，电压发生了突变，最后在增加到 60% 的时候电池发生热失控。

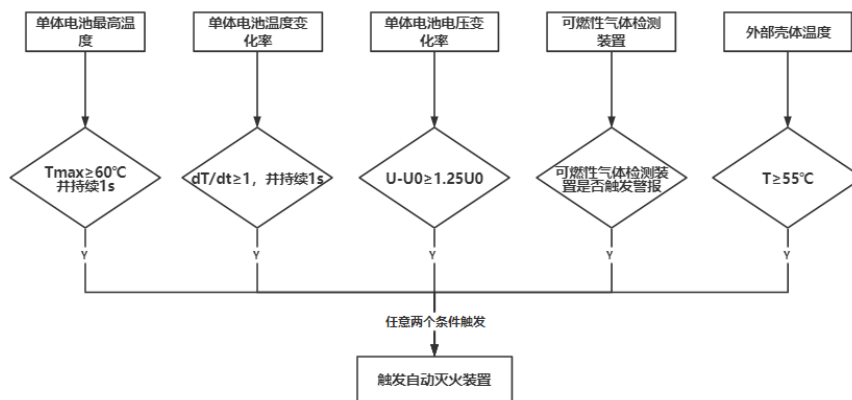


图7 电池热失控预防方案

Fig. 7 Battery thermal runaway prevention scheme

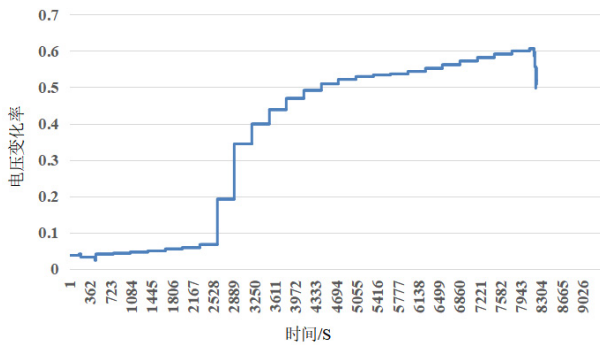


图8 单体电池电压变化率

Fig. 8 Voltage change rate of a single battery

4) 烟感触发；热失控发生时，先有浓烟冒出，后产生明火，实验中探测到的浓烟中带有氢气、甲烷、乙烯和一氧化碳等可燃性气体，所以烟感触发也可作为电池即将发生热失控的判断条件。

5) 外部壳体温度  $\geq 55^{\circ}\text{C}$ ；前三个条件是依赖电池 BMS 给到的数据，若 BMS 供电或通信出线问题，则前 3 个数据将无法获取，电池处于无法监控的状态，所以需要在电池外壳增加温度检测装置，以防 BMS 出现故障问题。

上述 5 个判定条件同时有两项触发则可以判定电池即将发生热失控。

## 4 结论

本次实验通过对额定容量为 25.6 kWh 的整包磷酸铁锂电池以 0.125 C 的倍率进行过充，直至充至热失控状态，记录该过程中单体电池电压变化、电池模组温度变化及整包电池电压变化等数据，并根据实验数据设计出一套梯次电池热失控预防方案，结论如下：

(1) 热失控发生时最高单体电压为 5.13 V，超出额定值 60%，整包电池的电压达到 492 V，模组最高温度达到  $79^{\circ}\text{C}$ ，SOC 值显示为 96.4%。

(2) 热失控发生时，先有浓烟冒出，后产生明火，实验中探测到的浓烟中带有以氢气、甲烷、乙烯和一氧化碳为主体的可燃性气体。

(3) 将电池 SOC 充至 79.6%时，单体最高电压就已经达到额定值，所以梯次电池的 SOC 值不可作为热失控判定的条件。

(4) 单体电池最高电压增加了 60%后发生热失控，可将单体电池最高电压变化率作为判定依据；热失控时电池模组的最高温度为  $79^{\circ}\text{C}$ ，在 30 s 内电池模组由  $45^{\circ}\text{C}$  突变至  $79^{\circ}\text{C}$ ，所以温度变化率可作为电池热失控判定依据。

## 参考文献

- [1] 周洋捷, 王震坡, 洪吉超, 等. 新能源汽车动力电池“过充电-热失控”安全防控技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 112-135.  
ZHOU Yangjie, WANG Zhenbo, HONG Jichao, et al. Review of overcharge-to-thermal runaway and the control strategy for lithium-ion traction batteries in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10): 112-135.
- [2] 顾卫娟, 黄文晓, 杨云, 等. 常见三元锂电池热失控过程分析[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(5): 58-62.  
GU Weijuan, HUANG Wenxiao, YANG Yun, et al. Analysis of thermal runaway process of common ternary lithium batteries[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(5): 58-62.
- [3] 李恺翔, 王珺瑶, 李士戎. 锂离子动力电池系统热失控检测方法和技术综述[J]. 科技创新与生产力, 2021(11): 42-47.  
LI Kaixiang, WANG Junyao, LI Shirong. Review of thermal runaway detection methods and technologies for lithium-ion power battery system[J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2021(11): 42-47.
- [4] 平平. 锂离子电池热失控与火灾危险性分析及高安全性电池体系研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [5] 张青松, 姜乃文, 罗星娜, 等. 锂离子电池热失控多米诺效应实证研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(10): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.10.050.
- [6] 李坤, 王敬, 王芳, 等. 不同循环周期锂离子电池热失控特性分析[J]. 电源技术, 2017, 41(4): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2017.04.011.
- [7] 陈素华, 白莹. 锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展[J]. 中国科学基金, 2023, 37(2): 187-198.  
CHEN Suhua, BAI Ying. thermal runaway mechanism and research progress on thermal management of lithium-ion power batteries[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2023, 37(2): 187-198.
- [8] 魏钟原, 袁威, 李子建, 等. 锂离子电池组热失控蔓延热传递机制的影响研究[J]. 工业安全与环保, 2021. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2021.03.001.
- [9] 阚强, 陈满, 任常兴. 锂离子电池热失控气体燃爆特征实验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(7): 959-962.  
KAN Qiang, CHEN Man, REN Changxing. Study on the characteristics of gas deflagration caused by the thermal

- runaway of lithium-ion battery[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(7): 959-962.
- [10] 崔发生, 鲁琦, 蒋锋, 等. 动力电池热失控下可燃性气体的研究[J]. 2018.
- [11] 马彪. 锂离子电池热失控释放气体可燃极限研究[D]. 北京交通大学[2024-06-13].
- [12] 郭志慧, 崔潇丹, 赵林双, 等. 高镍三元锂离子电池火灾及气体爆炸危险性实验[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 193-200.  
GUO Zhihui, CUI Xiaodan, ZHAO Linshuang, et al. Fire and gas explosion hazards of high-nickel lithium-ion battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 193-200.
- [13] 张青松, 郭超超, 秦帅星. 锂离子电池燃爆特征及空运安全性研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 6. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.02.009.
- [14] 宋来丰, 梅文昕, 贾壮壮, 等. 绝热条件下 280 Ah 大型磷酸铁锂电池热失控特性分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2411-2417.  
SONG Laifeng, MEI Wenxin, JIA Zhuangzhuang, et al. Analysis of thermal runaway characteristics of 280 Ah large LiFePO<sub>4</sub> battery under adiabatic conditions[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2411-2417.
- [15] 赵学娟. 锂离子电池在绝热条件下的循环产热研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [16] 卢立丽, 王松蕊, 刘兴江. 锂离子电池的热失控模拟[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2009. DOI: ConferenceArticle/5a9fde3fc095d722205c2c70.

---

收稿日期: 2023-08-13; 修回日期: 2024-03-20

作者简介:

徐威(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 特来电新能源股份有限公司系统集成研发中心总监, 从事汽车充电设备新产品的开发、质量测试、工艺、工业设计等领域; E-mail: xuwei@teld.cn

王宝林(1996—), 男, 硕士, 特来电新能源股份有限公司结构工程师, 研究方向: 电动汽车悬架系统、机械传动设计方法与理论; E-mail: wangbaol@teld.cn

韩松(1987—), 男, 本科, 高级工程师, 特来电新能源股份有限公司系统集成研发中心副总经理, 从事汽车充电设备研发, 微电网系统设计, 虚拟电厂技术研发等。E-mail: hansong@teld.cn