

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.028

# 软包和硬壳磷酸铁锂单体电池过充热传播研究

孙宜昕<sup>1</sup>, 宗梦然<sup>1</sup>, 黄强<sup>2</sup>, 马勇<sup>2</sup>, 蔚超<sup>2</sup>, 金阳<sup>1</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院电网储能与电池应用研究中心, 河南 郑州 450001;  
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**为了研究硬壳和软包磷酸铁锂单体电池过充对周围电池的热辐射影响,对磷酸铁锂软包和硬壳电池在仅单体、两单体电池紧贴和两单体电池相距1 cm 3种工况下的热传播行为进行分析。实验以充电倍率0.5 C的恒定电流分别对48 A·h的软包电池和24 A·h的硬壳电池进行过充,利用可见光监控、红外监控、多路温度记录仪分别对电池外部形貌、外部温度和表面温度变化进行实时监测。研究表明,过充阶段,硬壳过充电池温升65.5℃,平均温升速率0.039 2℃/s;软包过充电池温升57.3℃,平均温升速率0.014 3℃/s;相邻硬壳电池最高温升44℃,最大温升速率0.031 2℃/s;相邻软包电池最高温升7.9℃,最高温升速率0.006 3℃/s;软包电池过充后,产生的膨胀力对相邻电池影响更大,相邻电池产生的机械应力较大。实验结果可为研究模组内部硬壳或软包磷酸铁锂电池之间的热辐射影响提供理论和实验参考。

**关键词:**磷酸铁锂电池;软包电池;硬壳电池;过充;热传播

**中图分类号:** TM912

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)06-0191-08

## 0 引言

磷酸铁锂电池具有能量密度高、循环寿命长、安全无污染等优点<sup>[1-2]</sup>,在电网储能领域有着巨大的应用潜力<sup>[3-7]</sup>。但由于电网波动性等特点,储能用磷酸铁锂电池模组极易发生过充甚至热失控等危险事件<sup>[8]</sup>。电池模组在过充工况下,各个电池单体的温升速率或热失控程度不一致,主要由组成模组的各个单体之间的差异性决定<sup>[9]</sup>。对于温度较低或未发生热失控的充电电池单体,温度较高或者发生热失控的电池单体相当于一个外加热源,该热源会对相近充电电池单体产生重要影响,极有可能增大临近过充电池热失控概率或加剧其进程。因此,有必要研究磷酸铁锂单体电池过充产热对相邻电池的影响。

目前有关磷酸铁锂电池产热的研究多基于单体或模组电池计算热失控阶段电池燃烧时的热释放速率。文献[10]通过对比单体磷酸铁锂电池和额定电压12.8 V、额定容量200 A·h的电池模组热失控特性,计算模组热失控最大放热速率为240 kW。文献[11]以额定容量为50 A·h的磷酸铁锂电池模组为实验对象,通过耗氧量计算电池燃烧时的产热量,并计算出热释放速率为49.4 kW。上述关于热失控阶段的产热分析,有利于磷酸铁锂电池的消防灭火研究,但为了有效避免热失控,需要了解

热失控前一阶段的电池产热机理。文献[12]采用数值模拟方法建立了过充条件下锂离子电池的三维电热耦合模型,模拟计算了电池热失控临界时间、临界温度以及热分布。但这仅限于过充条件下锂离子电池自身产热分析,并未涉及产热对电池的影响。文献[13]利用外加热源研究了磷酸铁锂方形电池燃烧特性,加热到一定程度后,电池会发生爆燃。文献[14]研究了不同环境温度下锂离子电池过充特性,指出不同温度下的过充锂离子电池具有不同的形变程度,即过充条件下磷酸铁锂电池本身不仅产热,还可能对周围电池产生热影响。

文中从磷酸铁锂电池过充反应机理出发,设计实验对比了软包-铝塑膜外壳材料和硬壳-铝壳磷酸铁锂单体电池在仅单体、紧贴和相距1 cm 3种状态下的过充特性。通过分析过充时单体电池的产热、传热过程,研究过充工况下不同电池类型之间的热影响。

## 1 磷酸铁锂电池充电产热机理

磷酸铁锂电池在充电过程中,会以不同形式产生不同的热,按照热量来源不同分为:反应热、焦耳热和极化反应热<sup>[15]</sup>。

反应热是指磷酸铁锂电池工作时内部发生的大量化学反应,并非局限于电池内部的电化学反应。过充时,电池内部负极与电解液接触、电解液分解以及发生其他副反应,这些反应均会产生大量的反应热。

收稿日期:2020-05-17;修回日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807180)

焦耳热主要指由于电池内部存在欧姆电阻,包括电池正负极极柱内阻、材料内阻、电解液及隔膜电阻,当有电流通过时会产生焦耳热。

极化反应热主要指充电过程中电池发生极化现象时产生的热量,包括欧姆极化、浓差极化和电化学反应产热。

正常充电时,电池内部热量主要来源是焦耳热,即电池内欧姆电阻产生的不可逆热<sup>[16-18]</sup>,而反应热和极化反应产热较低。过充时,电池内部副反应产热大大增加,此外,电池极化反应产热也增强,加上电流热效应的耦合作用,共同导致电池内部热量积聚,甚至达到热失控或燃烧的程度<sup>[19]</sup>。

电池内部产生的热通常以3种形式传递<sup>[20]</sup>:热传导、热对流和热辐射。文中主要研究电池与外界物体的传热过程,忽略电池内部的热交换作用,将电池内部产热看做热源,研究其与外界传递热能的形式。

根据 Bernardi 电池产热速率理论,电池整体放热速率  $\dot{Q}$  为<sup>[21]</sup>:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_r + \dot{Q}_{ir} \quad (1)$$

式中:  $\dot{Q} > 0$  为放热,  $\dot{Q} < 0$  为吸热;  $\dot{Q}_r$  为电池化学反应中锂离子和电子转移的产热速率;  $\dot{Q}_{ir}$  为充电过程中电池的欧姆热和极化热速率之和。

$$\dot{Q}_r = -IT \frac{dV_{rev}}{dT} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ir} = I(V_C - V_{rev}) = IR^2 \quad (3)$$

$V_{rev}$  与  $V_C$  的关系为:

$$V_C = V_{rev} + IR \quad (4)$$

式中:  $V_{rev}$  为开路电压;  $I$  为充电电流;  $T$  为热力学温度;  $V_C$  为充电电压;  $R$  为电池内阻,包括欧姆内阻  $R_0$  和极化内阻  $R_p$ 。

由于电池壳较薄,假设电池内部产热与电池壳无热交换,整个电池与外界环境主要以热对流形式传热。根据能量守恒定律,充电过程中的电池导热微分方程为<sup>[22]</sup>:

$$mC_p \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{Q}_n \quad (5)$$

式中:  $m$  为电池总质量;  $C_p$  为电池的等效比热容;  $t$  为充电时间;  $\dot{Q}_n$  为电池与环境的热量交换速率,用牛顿冷却定律表示如式(6)所示。

$$\dot{Q}_n = -hA(T_{amb} - T_{surf}) \quad (6)$$

式中:  $h$  为电池的对流换热系数;  $A$  为电池表面积;  $T_{amb}$ ,  $T_{surf}$  分别为环境、电池表面温度。

## 2 实验设计

### 2.1 实验平台

实验所用磷酸铁锂软包及硬壳电池放置于  $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  实验舱内,实验控制、监测设备统一布置在实验舱外,如图1所示。

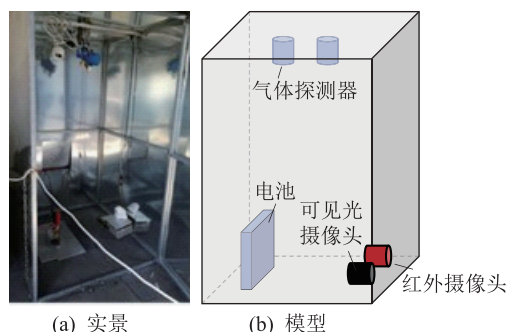


图1 实验平台

Fig.1 Experimental platform

实验采用可调充电机对空电状态下的磷酸铁锂单体电池进行过充,充电倍率为  $0.5\text{ C}$ ,记录起始充电时刻(以起始充电时刻为  $0$  时刻,文中采用相对时间)和充电结束时刻(安全阀打开或电池包破裂后,电池冒出大量烟气时)。采用多路可见光监控系统记录实验过程,红外监控系统监测电池外部及周围环境温度,多路温度记录仪记录电池表面温度变化。

### 2.2 实验对象

实验所用软包单体电池为  $3.2\text{ V}/48\text{ A}\cdot\text{h}$ ,硬壳单体电池为  $3.2\text{ V}/24\text{ A}\cdot\text{h}$ ,其简化模型如图2所示。

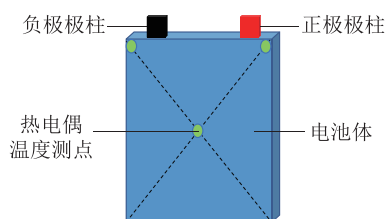


图2 单体电池简化模型

Fig.2 Simplified model of single cell

以硬壳电池为例,紧贴和相距  $1\text{ cm}$  模式下的充电模型如图3所示。

图3中连接有红线和黑线的电池表示该电池是充电电池,否则为相邻参照电池,参照电池未参与充电。另规定两电池面相对的一侧为电池正面中心,与其相对的一侧为外侧中心。图3中  $T_1$  为过充正极;  $T_2$  为过充负极;  $T_3$  为过充中心(外侧);  $T_4$  为过充电池与参照电池的间隔中心;  $T_5$  为对照正极;  $T_6$  为对照负极;  $T_7$  为对照中心(外侧)。

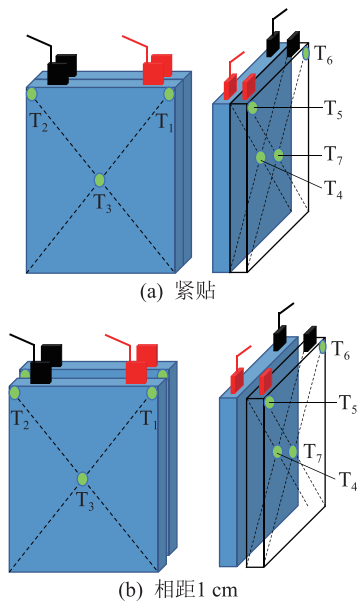


图3 不同距离充电模式

Fig.3 Charging modes with different distances

### 3 实验结果分析

#### 3.1 红外图像热分析

图4—图6为硬壳电池在3种工况下的可见光和红外图像。红外图像中,亮度越高表示温度越高,每个时刻对应一个最高温度在图中标出。安全阀打开后产气位置用白色虚线圈出,电池对周围空气的热影响范围用红色虚线圈出。

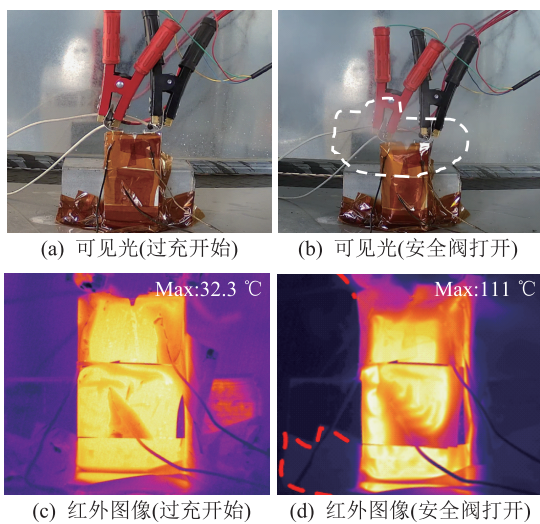


图4 硬壳单体过充的可见光和红外图像

Fig.4 Visible and infrared images of aluminum cell during overcharge

由图4—图6中(c)图可知,电池温度与环境温度差异较小,表明正常充电时电池内部化学反应产热少,磷酸铁锂电池内部主要发生的电化学反应如式(7)所示<sup>[23]</sup>。结合图4、图5可知,过充硬壳电池

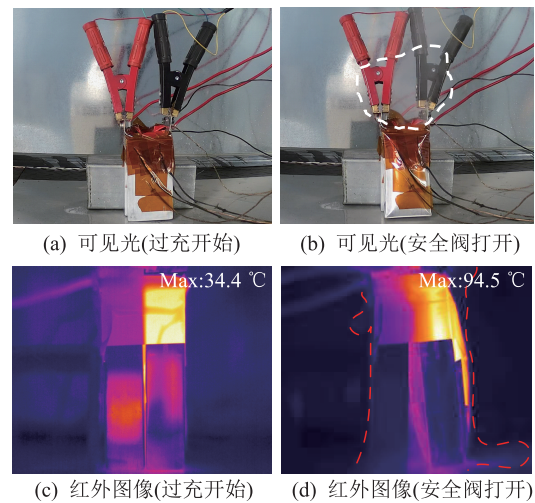


图5 硬壳电池紧贴过充的可见光和红外图像

Fig.5 Visible and infrared images of aluminum cell during adjacent overcharge

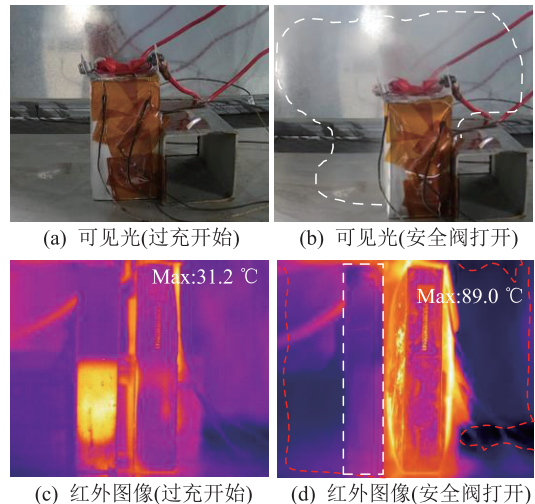


图6 硬壳电池相距1 cm过充的可见光和红外图像

Fig.6 Visible and infrared images of aluminum cells during overcharge with distance of 1 cm

发生明显鼓胀,电池内部主要发生正负极、固体电解质界面和电解液分解,以及极化反应产热。随着过充时间推移,热量堆积使电池发生形变,此时过充电池内部存在热应力。由图5红外图像可知,紧贴工况下,过充电池膨胀变形将临近电池推挤开,该过程中,相邻电池一方面受热影响温度升高,产生热应力,另一方面受过充电池的外力作用,产生机械应力。由图6红外图像可知,相距1 cm工况下,过充电池膨胀变形恰好接触到相邻电池,此时相邻电池受热影响仅产生热应力。此外,由图4—图6计算可得,3次实验中,从过充开始至安全阀打开,硬壳电池温升均值为65.5 °C。

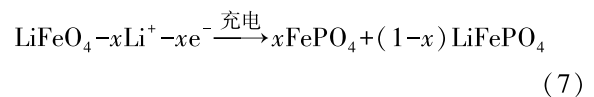




图7—图9为软包电池在3种工况下的可见光图像与红外图像。电池包破裂后,单体和相距1 cm工况下,气体喷出位置用白色虚线圈出。紧贴情况下电池破裂时,由于电池膨胀力将参照电池弹开,遮挡了破裂边缘,故未在图中标出。

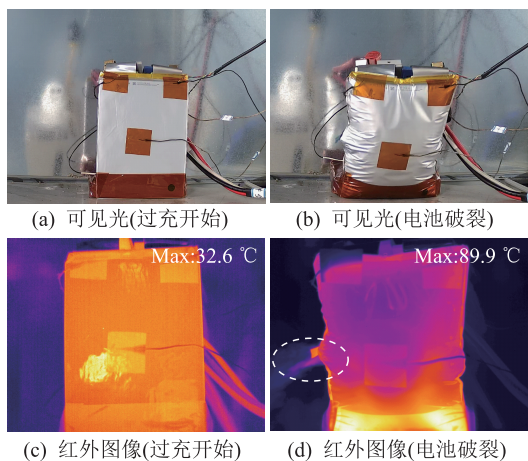


图7 软包单体过充的可见光和红外图像  
Fig.7 Visible and infrared images of pouch cell during overcharge

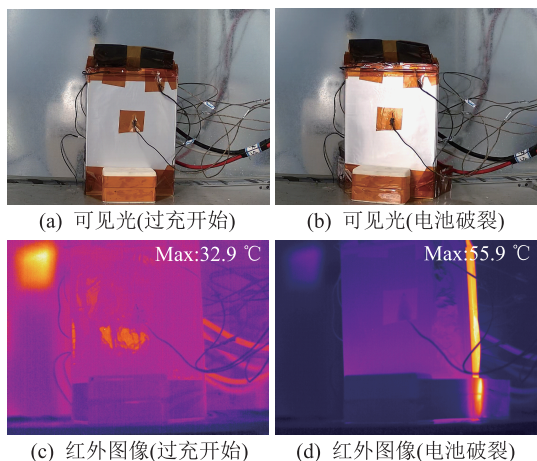


图8 软包电池紧贴过充的可见光和红外图像  
Fig.8 Visible and infrared images of pouch cells during adjacent overcharge

由图7可知,软包单体电池过充后膨胀变形较硬壳电池更为明显。由于软包电池外壳材料是铝塑壳,受热影响变化明显,过充后的单体电池整体呈“松弛”状态,此时过充电池内部存在热应力。由图8可知,过充软包电池将紧贴的软包电池弹开一段位移,此时该紧贴软包参照电池一方面受温度升高影响产生热应力,另一方面受外力作用产生机械应力。由图9可知,相距1 cm工况下,相邻的软包参照电池受膨胀力影响仍有小段位移,此时软包参照电池内部存在热应力和机械应力。

由图7—图9红外图像可知,3次实验中,软包

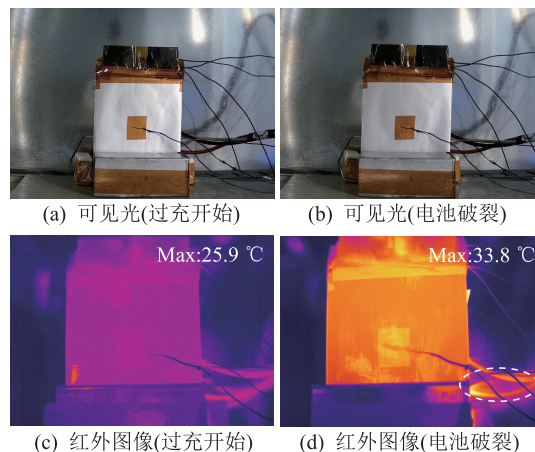


图9 软包电池相距1 cm过充的可见光和红外图像  
Fig.9 Visible and infrared images of pouch cells during overcharge with distance of 1 cm

电池外部温升分别为57.3 °C, 23 °C, 7.9 °C。不同于硬壳电池,3个温升值分别代表不同的含义。图7为软包单体电池工况,57.3 °C可以整体反映软包电池从过充至电池包破裂的温升情况。图8为两软包电池紧贴工况,电池包破裂时,电池膨胀力将参照电池弹开,过充电池暴露在红外探头下,因此23 °C表示过充电池在电池破裂时刻与对照电池在过充开始时刻的温度差。图9为两电池相距1 cm工况,此时红外探头正对参照电池外侧中心,因此7.9 °C表示参照电池从过充开始至电池包破裂,电池外侧中心的温升。过充前后软包电池形貌如图10所示。

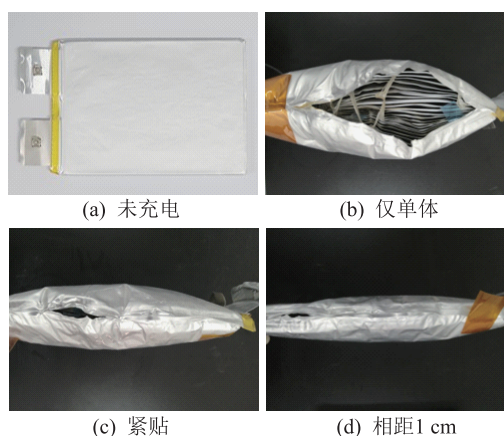


图10 过充前后软包电池形貌  
Fig.10 Appearance of pouch cell before and after overcharge

由于实验环境等差异,3次实验过充软包电池破裂程度不同,与硬壳电池相比,过充软包电池变形程度更大。对比硬壳和软包电池可知:

(1) 过充后电池本体温度与过充前电池温度差异明显,说明过充后电池内部化学反应产热远高于正常充电时的电化学反应产热。同时过充工况主



要造成电池内部材料发生各种副反应,导致电池产热加剧。

(2) 硬壳电池过充后单体温升  $65.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而软包电池过充后单体温升  $57.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 硬壳和软包电池温度升高后都将产生热应力,与充电距离模式无关,即热应力普遍存在于过充电池和参照电池内部。而当过充电池发生热膨胀并对参照电池产生力的作用时,参照电池表面存在机械应力。此外,软包电池破裂时,产生的膨胀力作用效果更显著,因此,软包参照电池产生的机械应力较大。

### 3.2 电池表面温度变化

根据热电偶记录的过充电池和参照电池的的表面温度变化,将参照电池受热影响区域分为3个部分:正极、负极以及电池正面中心(两电池相对的一侧),分别探究其温度分布情况。3次实验中,硬壳电池安全阀打开时刻和软包电池破裂时刻如表1所示。

表1 硬壳电池安全阀打开和软包电池破裂时刻

Table 1 Safety valve opening moment of aluminum cells and battery rupture moment of pouch cells s

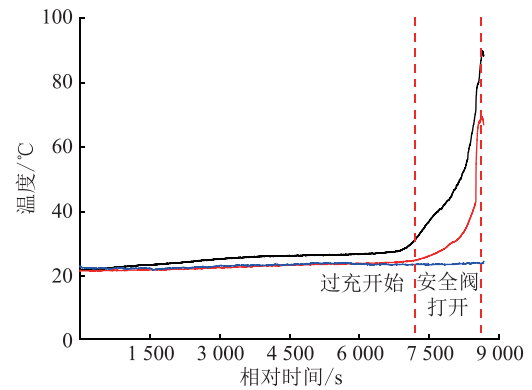
电池类型	仅单体	紧贴	相距1 cm	平均时刻
硬壳	8 703	8 458	8 676	8 612
软包	8 516	8 277	8 587	8 460

以硬壳电池过充开始  $7\ 200\text{ s}$  和安全阀打开平均时刻  $8\ 612\text{ s}$  为界,将硬壳电池过充实验分为3个阶段,如图11中的红色虚线所示。同理,以软包电池过充开始时刻  $7\ 200\text{ s}$  和软包电池平均破裂时刻  $8\ 460\text{ s}$  为界,将软包电池过充实验分为3个阶段,如图12中红色虚线所示。为减少偶然因素影响,引入过充电池平均温升,如对于硬壳电池正极,过充电池平均温升指过充硬壳电池的正极在3次过充实验中的平均变化值。

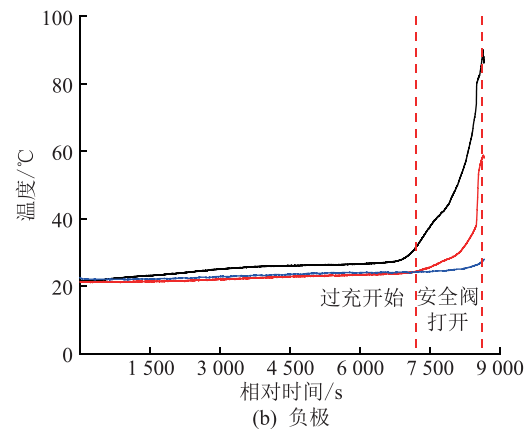
以过充正极平均温度、过充负极平均温度和过充中心平均温度为基准,绘制出3个区域下参照电池相对于该基准的温度变化情况,如图11(a)~(c)所示。对比图11(a)~(c)可知,3个区域的电池温度为:过充电池>紧贴参照电池>相距1 cm参照电池。即参照电池离过充电池越近,温升越高。电池之间的空气间隙越大,热量散失越多,这一现象符合理论分析。

在过充电池各区域温升幅度相近的情况下,参照电池正、负极温升高于正面中心温升,即临近参照电池正、负极受热影响变化较大。

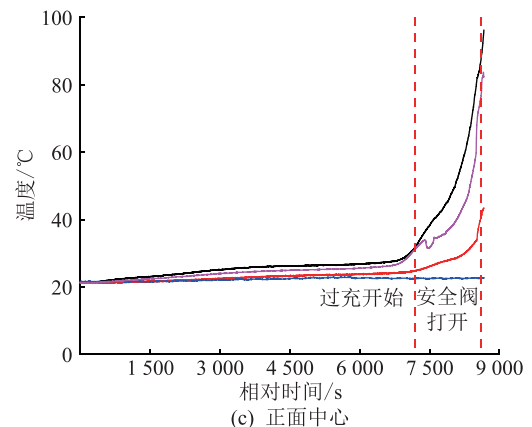
从时间轴分析温升变化,正常充电情况下电池



(a) 正极



(b) 负极



(c) 正面中心

— 过充电池平均温升 — 参照电池(紧贴)  
— 参照电池(相距1 cm) — 电池间隔(紧贴)

图11 硬壳电池表面温度变化

Fig.11 Surface temperature change of aluminum cells 温升速率基本为0,自过充开始至安全阀打开,紧贴工况下参照电池温升速率逐渐增大,但相距1 cm工况下参照电池温升速率仍基本为0。

表2、表3分别为硬壳电池过充开始时刻至  $7\ 200\text{ s}$ 、安全阀打开平均时刻至  $8\ 612\text{ s}$  时,不同距离下电池不同区域的温度值。

由表2、表3对比电池各区域和各种距离下的温度分布,过充后,临近参照电池在两电池紧贴情况下正极温升最高,为  $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相距1 cm情况下的电池正面中心温升最低,为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

根据表2、表3可计算出硬壳电池正极、负极和

表 2 7 200 s 硬壳电池表面温度

Table 2 Surface temperature of aluminum cells at 7 200 s °C

位置	过充平均温度	紧贴	相距 1 cm
正极	31.3	24.6	23.3
负极	31.4	24.4	24.2
正面中心	32.0	24.9	22.5

表 3 8 612 s 硬壳电池表面温度

Table 3 Surface temperature of aluminum cells at 8 612 s °C

位置	过充平均温度	紧贴	相距 1 cm
正极	86.8	68.6	23.6
负极	86.1	57.4	27.2
正面中心	88.1	40.9	22.6

正面中心在过充阶段的平均温升速率,如表 4 所示。

表 4 硬壳电池各区域平均温升速率

Table 4 Average temperature rise rate of aluminum cells in different regions °C·s<sup>-1</sup>

工况	正极	负极	正面中心
过充电池	0.039 3	0.038 7	0.039 7
参照电池(紧贴)	0.031 2	0.023 4	0.011 3
参照电池(相距 1 cm)	0.000 2	0.002 1	0.000 1

由表 4 可知,过充电池各区域温升速率相近,均值为 0.039 2 °C/s。对于参照电池,紧贴工况下各区域温升速率均值为 0.022 0 °C/s,但各区域温升速率差异较大。紧贴模式正极温升速率最高,为 0.031 2 °C/s;相距 1 cm 模式下电池正面中心的温升速率最低,为 0.000 1 °C/s。

图 12 为软包电池表面温度变化。过充电池平均温升指 3 次软包电池实验(仅单体、紧贴和相距 1 cm)中过充软包电池各区域的温升均值。以过充正极、过充负极和过充正面中心的平均温升为基准,绘制参照电池温度变化规律,如图 12(a)~(c)所示。对比图 12(a)~(c)可知,过充阶段的电池温度为:过充电池>紧贴参照电池>相距 1 cm 参照电池。与硬壳电池相同,参照电池离过充电池越近,温升越高。

进一步地,在过充软包参照电池各区域温升幅度基本一致的情况下,软包参照正、负极温升略大于正面中心温升,说明软包电池正、负极受热影响较大。但其正面中心温升较硬壳电池有明显增加,说明软包电池正面中心受热影响较硬壳电池大,这是由于过充软包电池膨胀后,电池正面中心与参照电池的正面中心接触紧密,而软包电池铝塑外壳隔热性较差,导致软包参照电池正面中心温升较高。

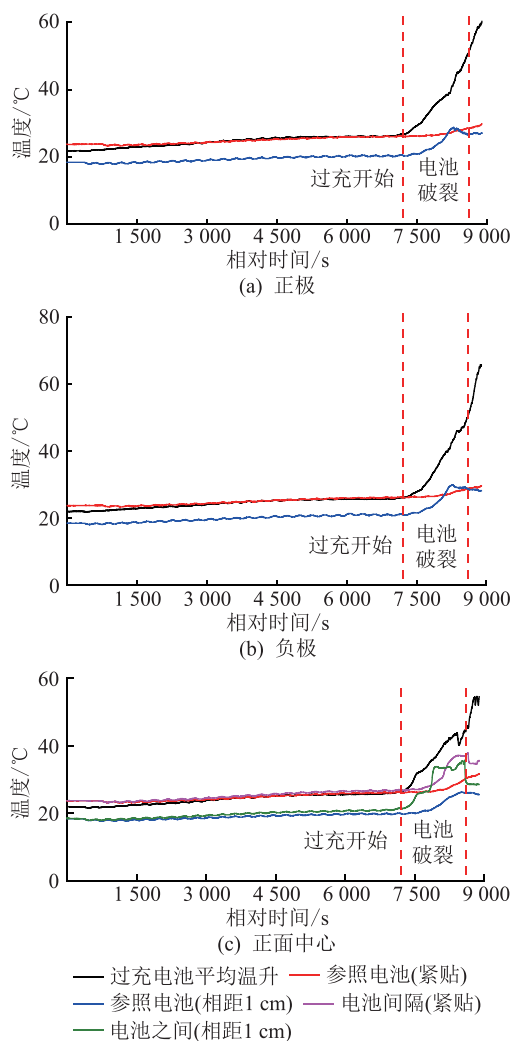


图 12 软包电池表面温度变化

Fig.12 Surface temperature change of pouch cells

从时间轴看,7 500 s 以后,相距 1 cm 参照电池的温升速率明显增大,至 8 300 s 左右,该模式下的参照电池温度反超紧贴模式下的电池温度。原因是随着过充时间增加,过充电池膨胀形变增大,使得紧贴模式下参照软包电池被弹开,而相距 1 cm 模式下的参照电池与过充电池接触面积增大,进而导致温升值反超。

表 5、表 6 分别为软包电池在过充开始时刻至 7 200 s、电池包平均破裂时刻至 8 460 s 的表面温度。

表 5 7 200 s 软包电池表面温度

Table 5 Surface temperature of pouch cells at 7 200 s °C

位置	过充平均温度	紧贴	相距 1 cm
正极	26.8	26.1	20.4
负极	26.0	26.2	21.0
正面中心	26.4	26.1	19.9

由表 5、表 6 可知,相距 1 cm 情况下,软包参照电池负极温升最高,为 7.9 °C;紧贴情况下,软包参



表6 8 460 s 软包电池表面温度  
Table 6 Surface temperature of pouch cells at 8 460 s  $^{\circ}\text{C}$

位置	过充平均温度	紧贴	相距 1 cm
正极	46.5	28.0	27.2
负极	46.6	28.2	28.9
正面中心	40.3	29.0	25.9

照正极温升最低,为 1.9  $^{\circ}\text{C}$ 。根据表 5、表 6 计算出软包电池正极、负极和正面中心在过充阶段的平均温升速率,如表 7 所示。

表7 软包电池各区域平均温升速率  
Table 7 Average temperature rise rate of pouch cells in different regions  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$

工况	正极	负极	正面中心
过充电池	0.015 6	0.016 3	0.011 0
参照电池(紧贴)	0.001 5	0.001 6	0.002 3
参照电池(相距 1 cm)	0.005 4	0.006 3	0.004 8

由表 7 可知,过充电池各区域温升速率相近,均值为 0.014 3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;紧贴工况下,软包参照电池各区域温升速率均值为 0.001 8  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;相距 1 cm 工况下,各区域温升速率均值为 0.005 5  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。可见,过充电池温升速率远大于参照电池温升速率,相距 1 cm 工况下电池温升速率大于紧贴工况下电池温升速率。对比硬壳和软包电池表面温度变化规律可知:

(1) 过充硬壳电池温升为 20~90  $^{\circ}\text{C}$ ,平均温升速率为 0.039 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;过充软包电池温升为 20~60  $^{\circ}\text{C}$ ,平均温升速率为 0.014 3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。可见,过充硬壳电池温升高,且温升速率约为软包电池的 3 倍。

(2) 过充阶段,硬壳参照电池最高温升 44  $^{\circ}\text{C}$ ,最大温升速率为 0.031 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;软包参照电池最高温升 7.9  $^{\circ}\text{C}$ ,最大温升速率为 0.006 3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。可见,硬壳参照电池受热影响温度变化程度更大。

(3) 参照电池温升速率关系为:硬壳电池(紧贴)  $\gg$  软包电池(相距 1 cm)  $>$  软包电池(紧贴)  $\gg$  硬壳电池(相距 1 cm)。可见,电池间隔对硬壳电池温升影响大,软包参照电池温升速率受电池膨胀力影响较大。

## 4 结论

通过分析红外热成像和电池表面温度变化可得出以下结论:

(1) 从过充开始至安全阀打开,过充硬壳电池温升 65.5  $^{\circ}\text{C}$ ,各区域平均温升速率为 0.039 2  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ;从过充开始至电池破裂,过充软包电池温升 57.3  $^{\circ}\text{C}$ ,平均温升速率为 0.014 3  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。可见,硬壳电池组成

的电池模组易发生热积聚,工程实践中应根据实际情况合理选择电池单体类型。

(2) 从过充开始至安全阀打开平均时刻,硬壳参照电池最高温升 44  $^{\circ}\text{C}$ ,紧贴模式下各区域平均温升速率最高,为 0.022 0  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,相距 1 cm 模式下温升速率最低,为 0.000 8  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。从过充开始至电池破裂平均时刻,软包参照电池最高温升 7.9  $^{\circ}\text{C}$ ,其中紧贴模式下各区域平均温升速率 0.001 8  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,相距 1 cm 模式下为 0.005 5  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。可见,硬壳参照电池受热影响的温升情况与距离模式相关性较大,组成硬壳磷酸铁锂电池模组时,选取合适的单体间距离,可有效削弱单体之间的热影响。

(3) 软包电池过充后,产生的膨胀力对参照电池影响更大,即软包参照电池易产生机械应力。应在工程实践中合理设计空间结构,适应软包电池可能发生的膨胀变形。

## 参考文献:

- [1] 钟国彬,周方方,魏增福,等. 磷酸铁锂电池作为变电站用直流电源的特性[J]. 广东电力,2015,28(4):57-61.  
ZHONG Guobin,ZHOU Fangfang,WEI Zengfu,et al. Characteristic of lithium iron phosphate battery as direct current power source of substation [J]. Guangdong Electric Power,2015,28(4):57-61.
- [2] 李瑾,张宇,李景霖,等. 磷酸铁锂电池在变电站系统应用的可行性分析[J]. 华东电力,2009,37(10):1693-1697.  
LI Jin,ZHANG Yu,LI Jinglin,et al. Feasibility analysis of application of lithium iron phosphate battery in substation system [J]. East China Electric Power,2009,37(10):1693-1697.
- [3] 吴静云,黄峥,郭鹏宇. 储能用磷酸铁锂(LFP)电池消防技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2019,(3):495-499.  
WU Jingyun,HUANG Zheng,GUO Pengyu. Research progress on fire protection technology of LFP lithium-ion battery used in energy storage power station [J]. Energy Storage Science and Technology,2019,8(3):495-499.
- [4] 赵倩,杨帅,章珂,等. 基于启发式调度策略包含蓄电池储能的微网经济调度[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(6):51-57.  
ZHAO Qian,YANG Shuai,ZHANG Ke,et al. Micro-grid economic dispatch considering battery storage based on heuristic scheduling strategy [J]. Electric Power Information and Communication Technology,2019,17(6):51-57.
- [5] GUO B,NIU M,LAI X,et al. Application research on large-scale battery energy storage system under global energy interconnection framework [J]. Global Energy Interconnection,2018,1(1):79-86.
- [6] 彭建华,潘继雄,周幼华. 磷酸铁锂电池能量转移均衡策略及其电路研究[J]. 电源技术,2020,44(6):875-879.  
PENG Jianhua,PAN Jixiong,ZHOU Youhua. Study on energy transfer equalization strategies and its circuit implementation for

- lithium iron phosphate battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(6): 875-879.
- [7] 韩华春, 史明明, 袁晓冬. 动力电池梯次利用研究概况 [J]. 电源技术, 2019, 43(12): 2070-2073.  
HAN Huachun, SHI Mingming, YUAN Xiaodong. Review on echelon utilization of power battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(12): 2070-2073.
- [8] 吴唐琴. 锂离子电池产热和热诱导失控特性实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
WU Tangqin. Experimental study on heat generation and thermal induced runaway of lithium-ion battery [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [9] 李腾, 林成涛, 陈全世. 磷酸铁锂电池组成组过程的不一致性分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2012, 52(7): 1001-1006.  
LI Teng, LIN Chengtao, CHEN Quanshi. Inconsistency analysis of LiFePO<sub>4</sub> battery packing [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(7): 1001-1006.
- [10] 于东兴, 李毅, 张少禹, 等. 基于实体试验的磷酸铁锂电池火灾危险性分析 [J]. 消防科学与技术, 2017, 36(12): 1731-1734.  
YU Dongxing, LI Yi, ZHANG Shaoyu, et al. Fire risk analysis of LiFePO<sub>4</sub> batteries based on full scale test [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(12): 1731-1734.
- [11] PING P, WANG Q, HUANG P, et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test [J]. Journal of Power Sources, 2015, 285: 80-89.
- [12] HUANG P, WANG Q, LI K, et al. The combustion behavior of large scale lithium titanate battery [J]. Scientific Reports, 2015(5).
- [13] 齐创, 朱艳丽, 高飞, 等. 过充电条件下锂离子电池热失控数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(10): 1048-1055.  
QI Chuang, ZHU Yanli, GAO Fei, et al. Thermal runaway analysis of lithium-ion battery with overcharge [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(10): 1048-1055.
- [14] 孙庆, 杨秀金, 代云飞, 等. 温度对磷酸铁锂电池性能的影响 [J]. 电动自行车, 2011(9): 22-27.  
SUN Qing, YANG Xiujin, DAI Yunfei, et al. Effect of temperature on the performance of lithium iron phosphate battery [J]. Electric Bicycle, 2011(9): 22-27.
- [15] 王宏伟, 邓爽, 肖海清, 等. 不同环境温度下锂离子动力电池过充过放研究 [J]. 电源技术, 2014, 38(3): 431-433.  
WANG Hongwei, DENG Shuang, XIAO Haiqing, et al. Research of overcharge/overdischarge of power Li-ion battery under different ambient temperatures [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(3): 431-433.
- [16] 孙磊. 锂离子电池热特性分析及管理技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.  
SUN Lei. Lithium ion battery thermal characteristics analysis and management research technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [17] 刘磊, 王芳, 高飞, 等. 锂离子电池模组热失控扩展安全性的研究 [J]. 电源技术, 2019, 43(3): 450-452.  
LIU Lei, WANG Fang, GAO Fei, et al. Study on thermal runaway propagation safety of Li-ion battery module [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(3): 450-452.
- [18] 杨东, 席陈彬, 王淞阳, 等. 磷酸铁锂电池的热效应研究 [J]. 化学学报, 2011, 69(17): 1987-1990.  
YANG Dong, XI Chenbin, WANG Songyang, et al. Study on the thermal effect of LiFePO<sub>4</sub> lithium ion battery [J]. Acta Chimica Sinica, 2011, 69(17): 1987-1990.
- [19] 李存俊, 胡宁, 白志浩. 磷酸铁锂电池温升特性的研究 [J]. 北京汽车, 2016(2): 5-7.  
LI Cunjun, HU Ning, BAI Zhihao. Research on temperature rising characteristics of lithium iron phosphate battery [J]. Beijing Automotive Engineering, 2016(2): 5-7.
- [20] 李海英, 贾永丽, 张丹, 等. 动力磷酸铁锂电池产热特性研究 [J]. 电源技术, 2016, 40(5): 968-970, 1083.  
LI Haiying, JIA Yongli, ZHANG Dan, et al. Heat production characteristic of power lithium iron phosphate batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(5): 968-970, 1083.
- [21] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWNAM J. A general energy balance for battery system [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.
- [22] 李礼夫, 龚定旺, 韦毅, 等. 磷酸铁锂电池恒流充电过程中的温度特性分析 [J]. 电源技术, 2017, 41(12): 1706-1708, 1732.  
LI Lifu, GONG Dingwang, WEI Yi, et al. Lithium iron phosphate battery temperature characteristic analysis during constant current charging [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(12): 1706-1708, 1732.
- [23] 宋真玉. 磷酸铁锂动力电池化学特性分析与应用 [J]. 现代盐化工, 2016, 43(6): 3-4.  
SONG Zhenyu. Chemical characteristics analysis and application of lithium iron phosphate power battery [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2016, 43(6): 3-4.

作者简介:



孙宜听

孙宜听(1997),男,硕士在读,研究方向为储能电站安全仿真建模(E-mail:yiting\_sun@163.com);

宗梦然(1993),男,硕士在读,研究方向为电池监测及BMS设计;

黄强(1974),男,硕士,高级工程师,主要从事电力系统分析、电网设备运维技术研究及管理工作。

(下转第219页)



## Scenario analysis of wind power output based on LHS and BR

CHE Bing<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>2</sup>, ZHENG Jianyong<sup>2</sup>, FU Hui<sup>3</sup>, DING Qunyan<sup>4</sup>

(1. State Grid Huaian Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huaian 223002, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In order to effectively analyze the scenario characteristics of wind power output, scenario analysis model based on Latin hypercube sampling (LHS) and backward reduction (BR) for the uncertain characteristics of wind speed is constructed. The model provides an important basis for rapid analysis of wind power output at any time. Firstly, wind speed characteristics are analyzed, and Weibull distribution of wind speed is introduced. Secondly, the parameter values of the Weibull distribution at each moment are calculated and a set of scenario generation methods based on LHS are proposed. Thirdly, the model of BR is used to reduce the scenarios, so that the several curves obtained can represent the change characteristics of the original scenario to greater extent. Finally, the example analysis proves that the proposed method is better than the traditional *K*-means clustering algorithm in compactness (CP), separation (SP) and Davies-Bouldin index (DBI), which means that the reduced scenario can better replace the original scenario.

**Keywords:** scenario generation; scenario reduction; Weibull distribution; Latin hypercube sampling (LHS); backward reduction (BR)

(编辑 吴楠)

(上接第 198 页)

## Thermal propagation process between the pouch and aluminum LFP battery under the condition of overcharge

SUN Yiting<sup>1</sup>, ZONG Mengran<sup>1</sup>, HUANG Qiang<sup>2</sup>, MA Yong<sup>2</sup>, WEI Chao<sup>2</sup>, JIN Yang<sup>1</sup>

(1. Research Center of Grid Energy Storage and Battery Application, School of

Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid

Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In order to explore the thermal effect of aluminum and pouch lithium iron phosphate (LFP) single cell on surrounding cells under overcharge condition, the thermal propagation behavior of aluminum LFP and pouch LFP under three operating conditions which include only single cell, two cell batteries close to each other, and two cell batteries separated by 1 cm are respectively studied. In the experiment, the 48 A·h pouch cell and 24 A·h aluminum cell are overcharged with a constant current of 0.5 C. Visible light monitoring, infrared monitoring and multi-channel temperature recorders are used to monitor the external appearance, external temperature and battery surface temperature changes in real time. The experimental result shows that during the overcharge, the temperature rise of the aluminum overcharged cell is 65.5 °C and the average temperature rise rate is 0.039 2 °C/s. The temperature rise of the pouch overcharged cell is 57.3 °C and the average temperature rise rate is 0.014 3 °C/s. The maximum temperature rise of adjacent aluminum cell is 44 °C and the maximum temperature rise rate is 0.031 2 °C/s. The maximum temperature rise of adjacent pouch cell is 7.9 °C and the maximum temperature rise rate is 0.006 3 °C/s. After overcharged, the expansion force generated by the pouch cell has greater impact on adjacent cells and the mechanical stress generated by adjacent cells is greater. The experimental results can provide theoretical and experimental references for studying the influence of thermal radiation of aluminum or pouch batteries inside the module.

**Keywords:** lithium iron phosphate (LFP) battery; pouch cell; aluminum cell; overcharge; thermal propagation

(编辑 吴楠)