DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.126 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

电气连接方式和排列形状对圆柱锂电池模组热失控传播的影响

李 杰[1]，程 乐[2]，赵鸿祥[2]，王 飚[1]，任彦丽[3]
(1.长安大学能源与电气工程学院，西安 710018；2.长安大学电子与控制工程学院，西安 710018；
3.中铁长安重工有限公司，西安 710032)

摘要：单体电池在滥用条件下会发生严重的热失控，随后热量以热对流和热辐射的方式传递给邻近电池，从而导致电池包、整车燃爆。因此，基于自制热失控传播实验平台，分析单体电池在不同荷电状态SOC(state of charge)、不同加热功率下的热滥用影响，研究电池组不同电气连接方式和排列形状对热失控传播的影响规律，对电动汽车的安全防护及预警具有重要意义。结果表明，单体电池热滥用可以分为加热阶段、二次加热阶段、热失控产生阶段和冷却与熄灭阶段；随着SOC的增大，电池电压下降时间、排气时间、最高温度等呈现一定的线性关系；随着加热功率的增大，电压下降、排气和到达最高温度均会提前；不同电气连接方式热失控的传播速度从快到慢依次是并联、串联和无电气连接；形状因子为三角形和菱形时，热失控的传播速度最快，且速度接近，其次为正方形。

关键词：锂离子电池；热失控传播；电气连接方式；排列形状

Effect of Thermal Runaway Propagation on Electrical Connections and Arrangement Shape of Cylindrical Lithium-ion Battery Modules

LI Jie[1], CHENG Le[2], ZHAO Hongxiang[2], WANG Biao[1], REN Yanli[3]
(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China; 2. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China; 3. China Railway Chang'an Heavy Industry Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: Under abusive conditions, the battery cell will experience severe thermal runaway. The heat is then transmitted to the adjacent battery through thermal radiation and convection, which may cause a battery pack and entire electric vehicle to explode. Therefore, the effects of heat abuse of battery cells under various state of charge (SOC) and heating powers, as well as the effects of various electrical connection modes and battery pack arrangement shapes, are investigated on thermal runaway propagation based on an experimental platform that was created by the user. It is of great significance to the safety protection and early warning of electric vehicles. According to the findings, there are four stages of thermal abuse for single cells: heating, secondary heating, thermal runaway, cooling and extinguishing. The battery voltage drop time, exhaust time, and maximum temperature all exhibit a certain linear relationship as SOC increases. Voltage drop, exhaust, and maximum temperature will all advance as heating power increases. The propagation speed of thermal runaway in different electrical connection modes from fast to slow is parallel, series and non-electrical connection. When the shape factors are triangles and diamonds, the propagation speed is the fastest and close, followed by squares.

Keywords: Lithium-ion battery; thermal runaway propagation; electrical connection modes; arrangement shape

收稿日期：2024-08-14；**修回日期**：2024-09-27；**录用日期**：2024-10-18；**网络首发日期**：2024-11-27
基金项目：陕西省重点研发计划资助项目(2022GY-178)；国家市场监督管理总局科技计划资助项目(2021MK104)
This work is supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province under the grant 2022GY-178; the Science and Technology Program Project of Chinese State Administration for Market Regulation under the grant 2021MK104

为应对全球气候变暖和保护生态环境，提出了“碳达峰”和“碳中和”的战略目标[1]。近年来，锂离子电池由于其能量密度高、循环寿命长、无污染及无记忆效应[2]等特点，被广泛应用于电动汽车领域[3]。锂离子电池单体在机械滥用、电滥用及热滥用[4-5]的极端条件下，会发生严重的热失控，随后热量通过热对流、热辐射和热传导等[6]方式蔓延到邻近电池，即热失控的传播[7]。因此，分析锂离子电池热失控的传播对锂离子电池安全设计具有重要意义。

目前，国内外研究人员已经对热失控的传播进行了大量实验分析，并且取得了令人瞩目的进展。Fang 等[8]研究了竖直方向上电池荷电状态 SOC (state of charge)和间距对热失控传播的影响，结果表明，热对流和热辐射是热失控传播的主要因素，并计算了传热系数和电池的比热容；邓志彬等[9]研究了不同体系中锂离子电池热失控传播的过程，结果表明，金属外包装的半封闭体系比敞开体系更容易发生热失控传播；Zhong 等[10]利用圆柱形加热器研究了加热功率、电池间隙和 SOC 对热失控过程的影响，结果表明，电池热失控传播的时间约为 240~280 s，电池间距为 4 mm 时的冷却效果最好；张青松等[11]基于风险评估理论对三元锂电池热失控气体发生爆炸的概率进行了定量评价，结果表明，高 SOC 热失控气体爆炸范围更广；文献[12-14]分别研究了软包电池、方形电池及圆柱形电池对热失控传播的影响。

现有文献对热失控传播的研究主要集中在不同的电池形态、SOC、间隙及环境特性，对不同电气连接方式和不同电池排列形状下热失控传播速度的特性研究较少。因此，研究不同电气连接方式和不同排列形状对优化电池的排列方式及预防热失控的传播具有重要意义。

1　实验介绍

1.1　实验对象

实验对象选用某国产商用 18650 锂离子电池，主要由内芯和钢外壳组成，如图 1 所示。正极材料由钴酸锂和集流体铝箔组成，负极材料由石墨涂层和集流体铜箔组成，隔膜为聚乙烯材料。电池的基本信息参数见表 1。利用新威电池充放电循环测试仪 Neware CT−4000T−5V6A 搭配中位机对电池进行充放电，采用恒流、恒压方式将电池充放至实验所需 SOC。假设 Q_1 为当前电池剩余电量，Q_t 为电池的总电量，则

$$S_{SOC}=\frac{Q_1}{Q_t}\times 100\% \tag{1}$$

式中，S_{SOC} 为电池的 SOC，通常用百分比表示。

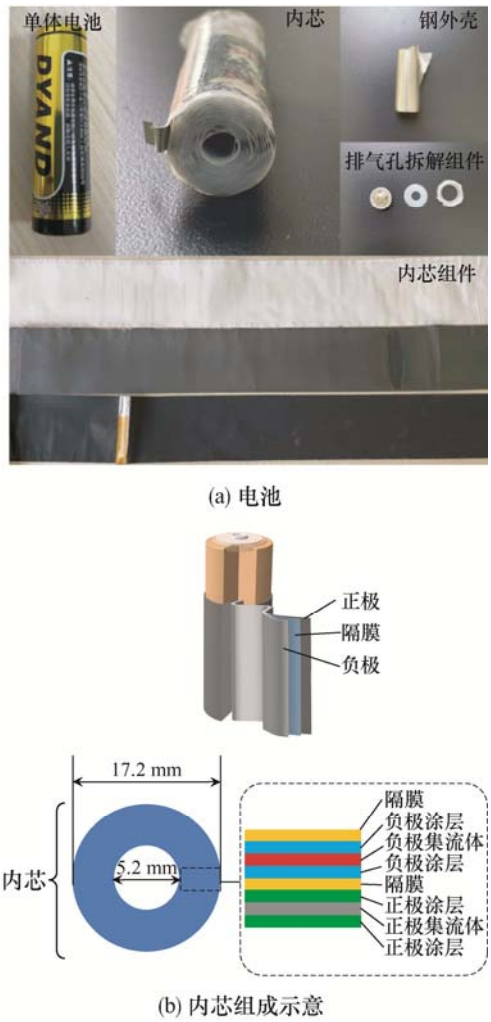


图 1　18650 锂离子电池

Fig. 1 18650 lithium-ion battery

1.2　实验平台介绍

自主搭建了热失控传播实验平台，如图 2 所示，热滥用实验所用加热管大小、形状与 18650 锂

表 1 电池参数

Tab. 1 Battery parameters

参数	数值/材料
电池高度/mm	65
电池直径/mm	18
额定容量/(mW·h)	4 600
额定电压/V	3.70
充电截止电压/V	4.20
放电截止电压/V	2.75
正极	钴酸锂
负极	石墨

离子电池完全相同，实验过程中记录电池的电压、温度、时间等参数。使用无纸化数据记录仪 F800 测量电池的电压，使用搭配 K 型热电偶的 JK4000 多路数据记录仪测量电池表面的温度。不同类型实验下传感器的位置如图 3 所示，图中，T_1~T_3 为实验过程中 K 型热电偶表面的温度。利用 FOTRIC348 红外热成像仪记录整个实验过程并且记录电池表面的温度变化，将热电偶放置于电池侧面的几何中心校准热成像仪的发射率，校准后发射率为 0.95。热成像仪放置于距离电池 1 m 处，并将采样时间设置为 1 s。使用 2 个 300×250×150 mm 的亚克力透明保护壳，容纳电池爆炸碎片和烟雾，以保证实验的安全性。利用宽度为 9 mm 的镍片对锂离子电池进行电气连接。

1.3 实验步骤

根据热失控传播的特点设计了 3 组实验，参数设置见表 2。第一组实验：Test1 中，电池 SOC 分别为 20%、40%、60%、80%和 100%，加热功率为 100 W，研究不同 SOC 对单体电池热滥用的影响，并利用电池 S_{SOC}=80%，分析电池的失效过程、温度演变和热失控现象规律；Test2 中，研究不同加热功率对单体电池热滥用的影响。第二组实验：电池的 SOC 分别为 50%、80%和 100%，电气连接方

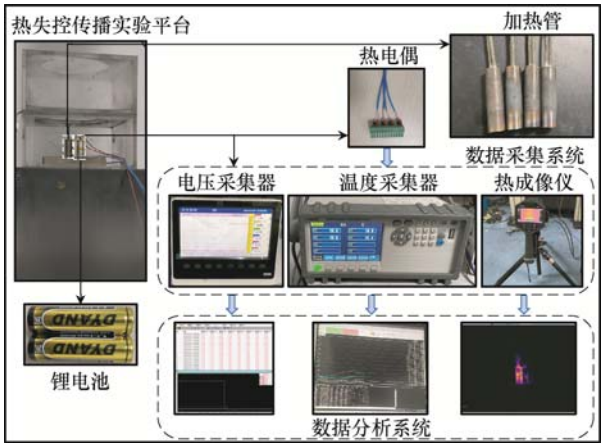


图 2 热失控传播实验平台实物图

Fig. 2 Experimental platform physical photograph of thermal runaway propagation

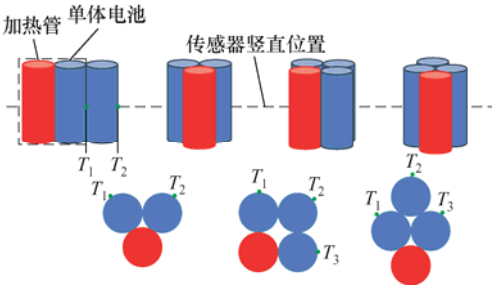


图 3 传感器位置

Fig. 3 Sensor position

表 2 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters

分组	测试	SOC/%	加热功率/W	排列形状	电气连接方式
第一组	Test1	20、40、60、80、100	100	单体	N
	Test2	40	100、200、300、400	单体	N
第二组	Test1	50、80、100	100	2 个单体	N
	Test2	50、80、100	100	2 个单体	S
	Test3	50、80、100	100	2 个单体	P
第三组	Test1	50、80、100	100	三角形	N
	Test2	50、80、100	100	正方形	N
	Test3	50、80、100	100	菱形	N

式分别为无电气连接(N)、串联(S)和并联(P)，分析不同电气连接方式对热失控传播的影响。第三组实验：电池 SOC 分别为 50%、80%和 100%，电池形状因子分别为三角形、正方形和菱形，分析不同形状因子对热失控传播的影响。此外，当实验过程中电池的电压骤降，立即切断加热管电源，认为此时电池已经失效。测试过程中，每组测试至少重复 3 次，以保证实验的重复性。

2　实验结果与讨论

2.1　热滥用下电池的热失控过程分析

第一组实验 Test1 中 S_{SOC}=80%的实验结果如图 4 所示，图 4(a)为电池的电-热响应曲线，结合实验现象、温度、电压分析其特点，将其分为 4 个阶段。

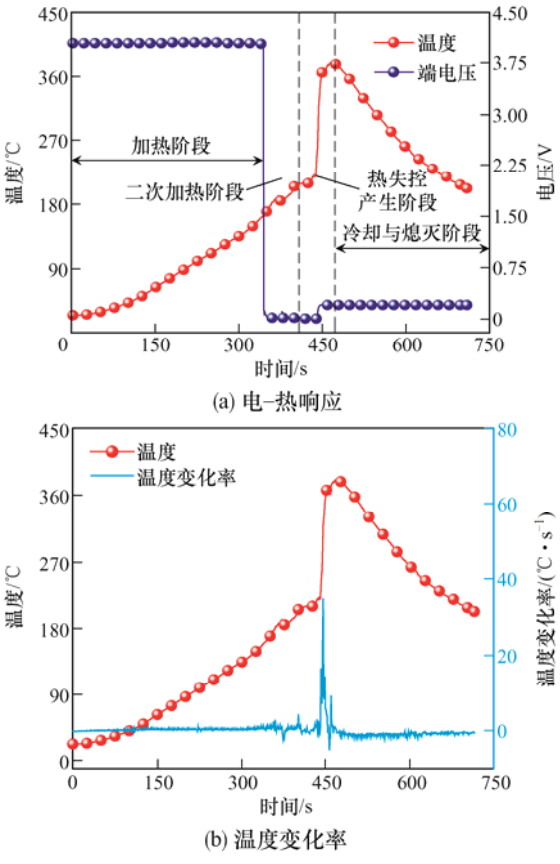


图 4　S_{SOC}=80%单体电池热滥用实验结果

Fig. 4 Experimental results of thermal abuse for battery cells with S_{SOC}=80%

加热阶段：在加热管持续加热下，电池温度逐渐升高；随着内部化学反应的进行，热量进一步积累；在 334 s 时，电池表面温度为 163.5 ℃；隔膜的加热分解导致正负极电解质反应，锂离子电池发生内短路[15]，电压经过 1~4 s 后迅速降为 0 V，此时将加热管电源断开。

二次加热阶段：由于加热管的温度仍高于电池的温度，加热管继续为电池加热；在 371 s 时，电池的表面温度为 192.1 ℃；电池内部压力大于电池安全气阀所能承受的最大压力，安全气阀开启，产生大量的白烟，电池中的部分能量随着白烟释放，电池表面温度略有下降，但是很快就会回升。

热失控产生阶段：电池内部发生一系列副反应，表面温度迅速升高；436 s 时电池表面温度达到 221.8 ℃，冒出剧烈白烟，电池发生了热失控，温升速率开始急剧上升，如图 4(b)所示，此时电池的温度变化率约为 40.0 ℃/s，文献[16]定义热失控为电池表面温度变化率超过 5.0 ℃/s；467 s 时电池的表面最高温度达到 381.3 ℃。

冷却与熄灭阶段：随着电池内部材料通过化学反应逐渐消耗殆尽，表面温度开始降低，电池进入热失控熄灭阶段。

上述为 S_{SOC}=80%单体电池单边加热的 4 个阶段，图 5 为相机拍摄的 4 个阶段。不同 SOC 和不

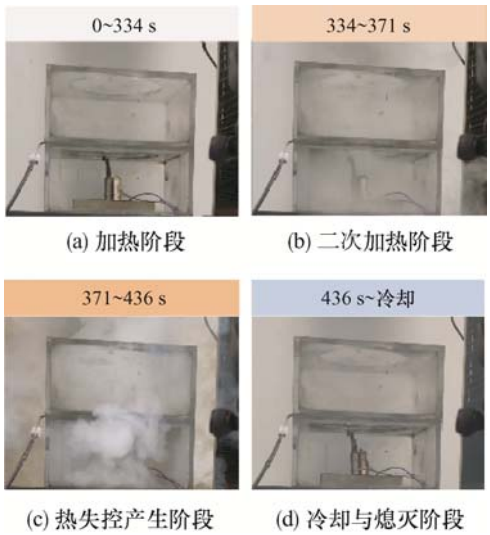


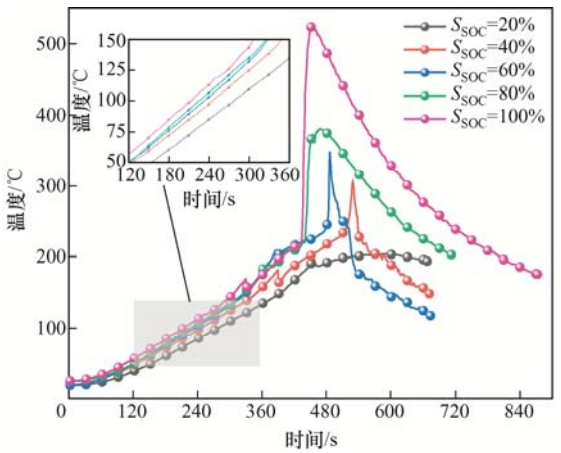
图 5　相机拍摄图

Fig. 5 Photograph taken by camera

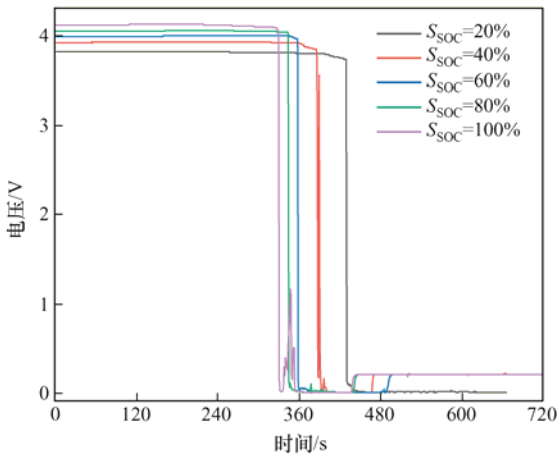
同加热功率下电压下降的时间、电池第一次排气和第二次排气的时间和温度均不同。

2.2 不同 SOC 对电池安全性能的影响

不同 SOC 单体加热响应曲线如图 6 所示。由图 6(a)可见，电池热失控的最高温度随着 SOC 的增大而增大，当 SOC 分别为 20%、40%、60%、80%和 100%时，单体电池热失控的最高温度分别为 204.0、305.7、348.9、381.3 和 525.4 ℃。电压掉落时间 t、排气时间 t_V、排气温度 T_V、达最高温度的时间 t_{max} 和最高温度 T_{max} 均不同，详细结果见表 3。当电池 S_{SOC}=100%时，电池失效之前表面可承受的最大温度为 128.8 ℃；S_{SOC}=20%时，电池失效之前可承受的最大温度为 195.6 ℃，相对于 S_{SOC}=100%增加了 52%。此外，S_{SOC}<20%时，仅发生了 1 次排气，表面温度达到最高后开始冷却。由图 6(b)可见，压降点能够直观反映电池的内短路失效，本研究中压降点为电池的端电压发生骤降时的时间。结果表明，由于电池 SOC 越大负极活性颗粒表面最大锂离子浓度越高，电池高温下的电化学反应越剧烈，电池更容易失效。



(a) 温度响应曲线



(b) 电压响应曲线

图 6 不同 SOC 单体电池加热响应曲线

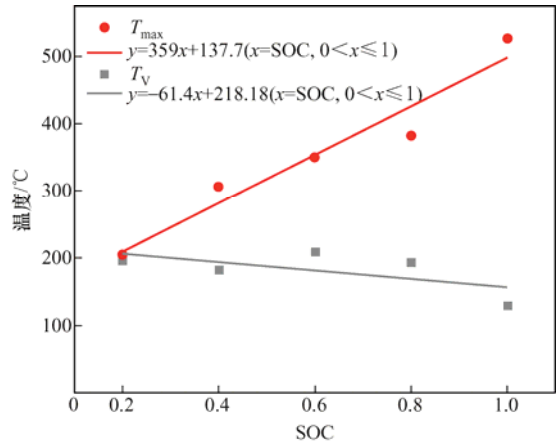
Fig. 6 Heating response curves of single cell with different SOC

表 3 不同 SOC 实验结果

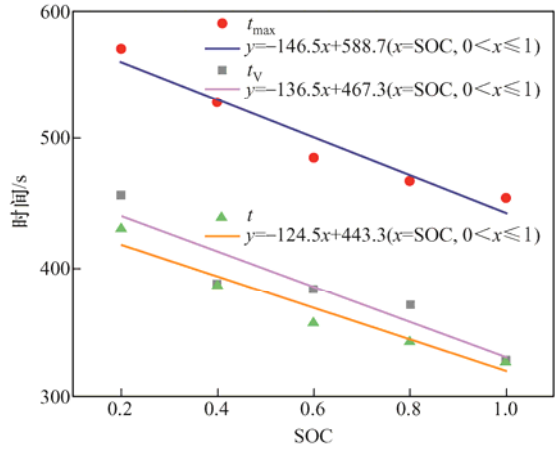
Tab. 3 Experimental results under different SOC

SOC/%	t/s	t_V/s	T_V/℃	t_{max}/s	T_{max}/℃
20	430	456	195.6	570	204.2
40	386	388	181.3	528	305.7
60	357	384	208.9	485	348.9
80	343	371	192.1	467	381.3
100	327	328	128.8	454	525.3

各参数随 SOC 变化的拟合曲线如图 7 所示，t、t_V、T_V、t_{max} 与 SOC 呈负相关，T_{max} 与 SOC 呈正相



(a) 温度随SOC的拟合曲线



(b) 时间随SOC的拟合曲线

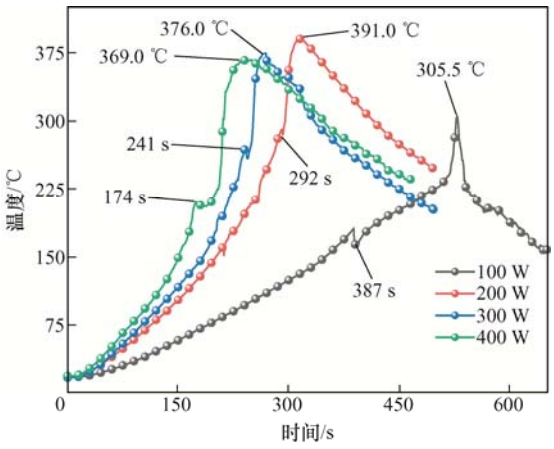
图 7 各参数随 SOC 变化的拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of each parameter with SOC changes

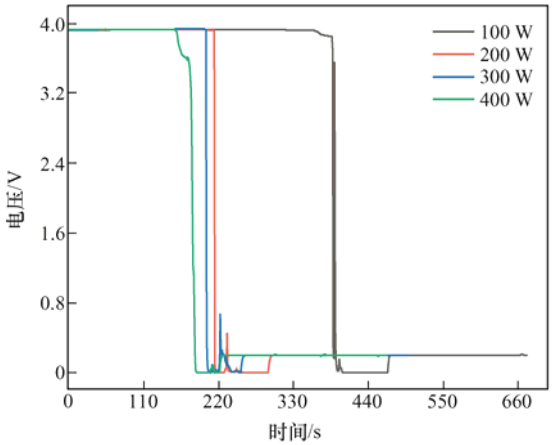
关。因为具有较高 SOC 的锂离子电池的负极具有更多的嵌入锂[17]，负极材料失去固体电解质界面 SEI(solid electrolyte interphase)膜的保护并释放一些可燃气体时，嵌入锂将直接与电解质溶液发生反应。负极锂离子浓度越高，化学反应速率越快，从而导致反应产生气体的速率越快，使电池更快失效和排气。另外，SOC 越高意味着电池中的电能越多，电池内部材料的稳定性越差，所以 t、t_V、T_V、t_{max} 与 SOC 呈负相关；T_{max} 与 SOC 呈现正相关是因为负极嵌入锂的增加，使化学反应产生了更多的热能。

2.3 不同加热功率对电池安全性能的影响

第一组实验 Test2 中的实验结果如图 8 所示，随着加热功率的增加，电池压降会提前，加热功率为 200、300 和 400 W 时比 100 W 时电压下降分别



(a) 温度响应曲线



(b) 电压响应曲线

图 8　不同加热功率下的电−热响应

Fig. 8 Electro-thermal response under different heating power

提前了 95、146 和 213 s。随着加热功率的增加，排气、达到最高温度的时间均提前。由图 8 还可以看出，加热功率为 200、300 和 400 W 发生热失控时的最大温度和第一次排气时的温度随着加热功率的增大而减小。因为加热功率越大，电池受到高温加热的时间越长，电池内部各种化学反应存在的时间越长，导致锂离子电池排气时的温度越低。在电压下降后，会切断电源，导致大功率加热管的热量仅有较少部分传递给了单体电池，所以最高温度随着加热功率的增加呈现减小的趋势。100 W 加热管最高温度为 305.5 ℃，因为低加热功率，电池经过长时间的少量排气，会使电池本身的热量被排气带走，此外，随着时间的增加电池本身与空气的热量交换会增加。

2.4 不同电气连接方式对热失控传播的影响

图 9 为 2 个电池组成的不同电气连接方式下的时间−电压响应，图 10 为 2 个单体电池并联和串联方式示意。图中：U_1 为串并联方式下靠近加热器件单体电池的电压；U_2 为串并联方式下远离加热器件单体电池的电压。由图 9(a)~(c)可见，并联模式下，2 号电池与 1 号电池同时发生热失控(电池标号与图 3 温度传感器标号一致)；由图 9(d)~(f)可见，串联模式下，2 号电池发生热失控比 1 号电池晚 100 s 以内；由图 9(g)~(i)可见，S_{SOC}=50%无电气连接下，2 号电池并未达到热失控的临界温度。S_{SOC}=80%和 S_{SOC}=100%时，2 号电池发生热失控时间均大于 150 s。

图 11 为不同电气连接方式下电池峰值温度，相同 SOC 下，1 号和 2 号电池峰值温度从大到小依次为并联、串联和无电气连接，且 1 号电池的最高温度略高于 2 号电池。因为在并联的电气连接方式下，1 号电池靠近热源会率先发生热失控，导致电池失效，电压降为 0 V；由于并联的作用，此时 1 号电池充当 1 个电阻很小的导体，进而 2 号电池外短路；远离加热源一侧的电池会短时间内放出大量的电能，由于欧姆热的作用，1 号电池的温度也会升高。这一过程几乎是瞬间发生的，所以 2 个

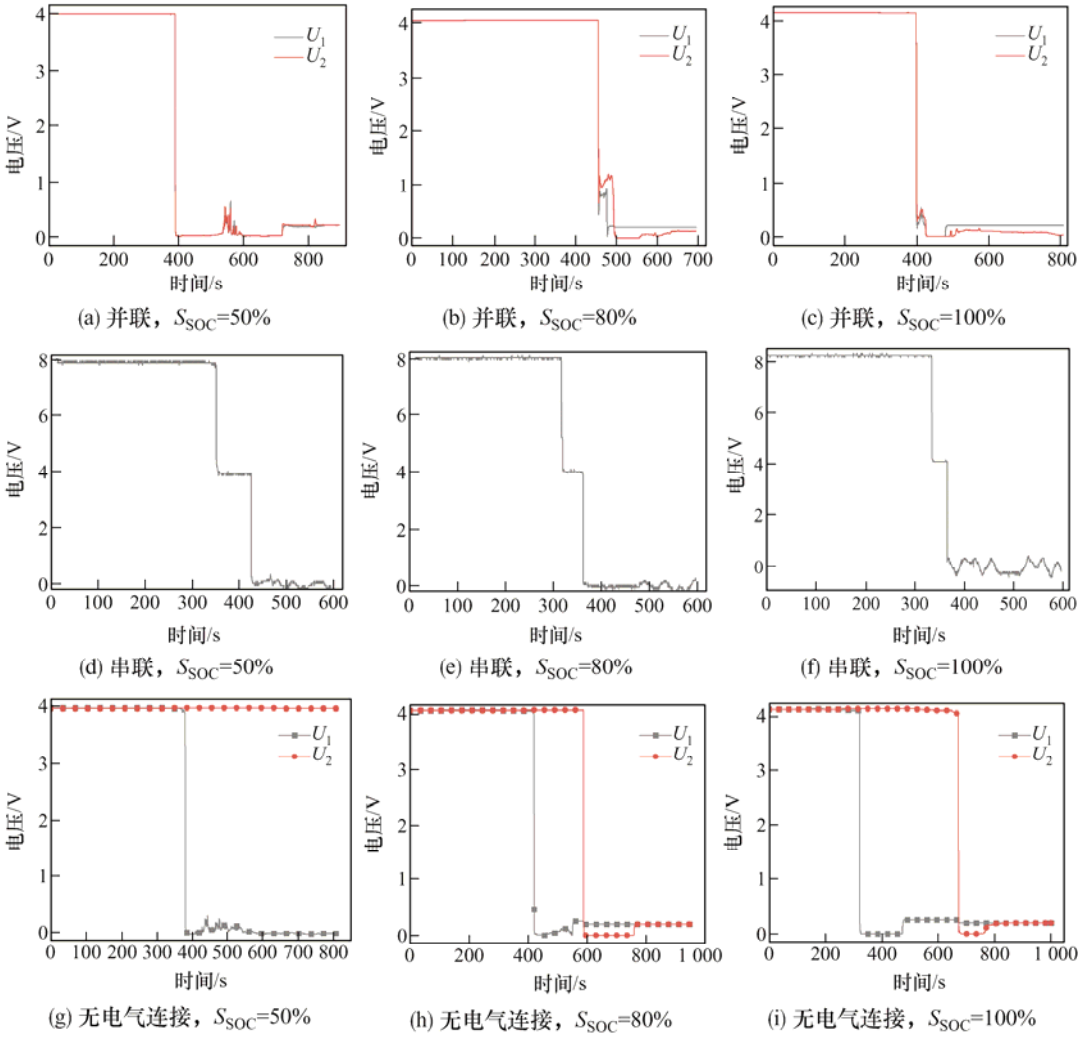


图 9 不同电气连接方式电压变化

Fig. 9 Voltage variation of different electrical connection modes

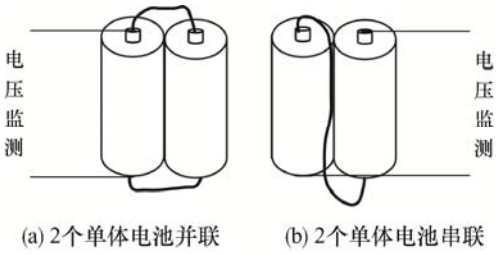


图 10 不同电气连接方式示意

Fig. 10 Schematic of different electrical connection modes

电池的电压几乎同时下降，与此同时，2 号电池由于外短路产生大量焦耳热[18]，使 2 号电池的温度上升。串联模式下，2 号电池的绝缘外壳起到了一定的保护作用，当传播温度高于绝缘外壳的保护能力时，1 号电池的钢外壳充当导线导致 2 号电池外短路。无电气连接方式下，热量通过热对流和热辐射传递。由此可见，热失控传播速度从快到慢的电气连接方式依次是并联、串联和无电气连接。

建议电动汽车制造商可以通过在电池连接的外电路上增加外电路保护装置，防止热失控进一步传播，造成更大的经济损失和人员伤亡；此外，应该对电池加装更加耐高温的绝缘外壳，防止绝缘外壳破损造成的外电路短路。

2.5 不同排列形状对热失控传播的影响

电池模块一般需要根据应用场景排列成各种形状，如宝马 MINI Cooper SE 等采用电池模组“T”形排列的方式；大型储能电站为了方便组装和安装将圆柱电池排布成正方形或长方形；电动工具为了提升续航和工作效率会根据其自身结构将

电池排布成圆形或三角形等。不同排列形状的电池模组热失控传播特性存在差异，目前对不同形状模块的热失控传播特性研究较少，因此研究不同形状模块的热失控传播特性具有实际意义。

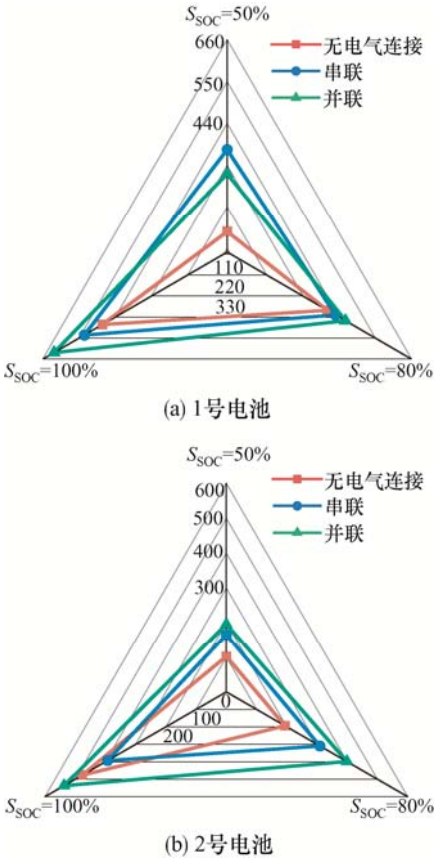


图 11　不同电气连接方式下电池峰值温度

Fig. 11 Peak temperature values of batteries with different electrical connection modes

三角形模块电−热响应如图 12 所示。图 12(b)为 S_{SOC}=80%的三角形模块热失控传播过程。第Ⅰ阶段：加热阶段。在加热管的作用下，电池表面温度稳定上升，当温度达到 150.0 ℃时，电池内部隔膜融化断裂，正负极溶液混合，电池发生内短路，电池电压下降，此时关闭加热管电源，但由于内部副反应的发生，电池表面温度继续上升。第Ⅱ阶段：气体释放阶段。由于电池内部温度在稳定缓慢上升，内部副反应逐渐增加产生大量可燃气体，当电池内部压力大于安全阀所能承受的最大压力时，安全阀打开，大量可燃气体释放，电池温度不断升高。第Ⅲ阶段：热失控阶段。当电池温度升高到一定程度时，电池内部副反应处于不可控阶段，电池发生剧烈的热失控，大量烟雾和气体从电池正极排气口喷出，电池温度迅速增加，排放出来的可燃气体与空气混合，当温度达到可燃气体的燃点时，会发生严重的火灾甚至爆炸。

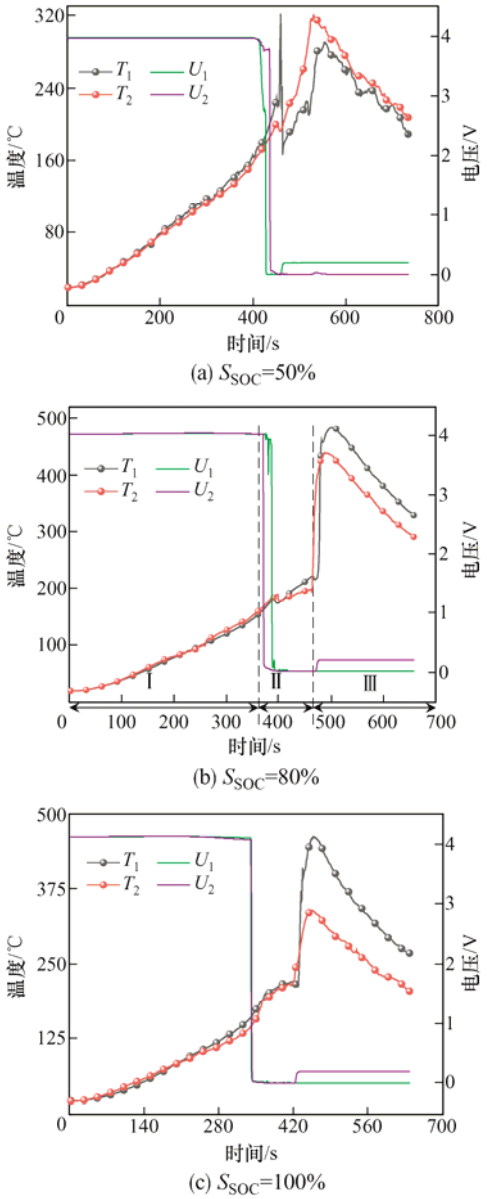


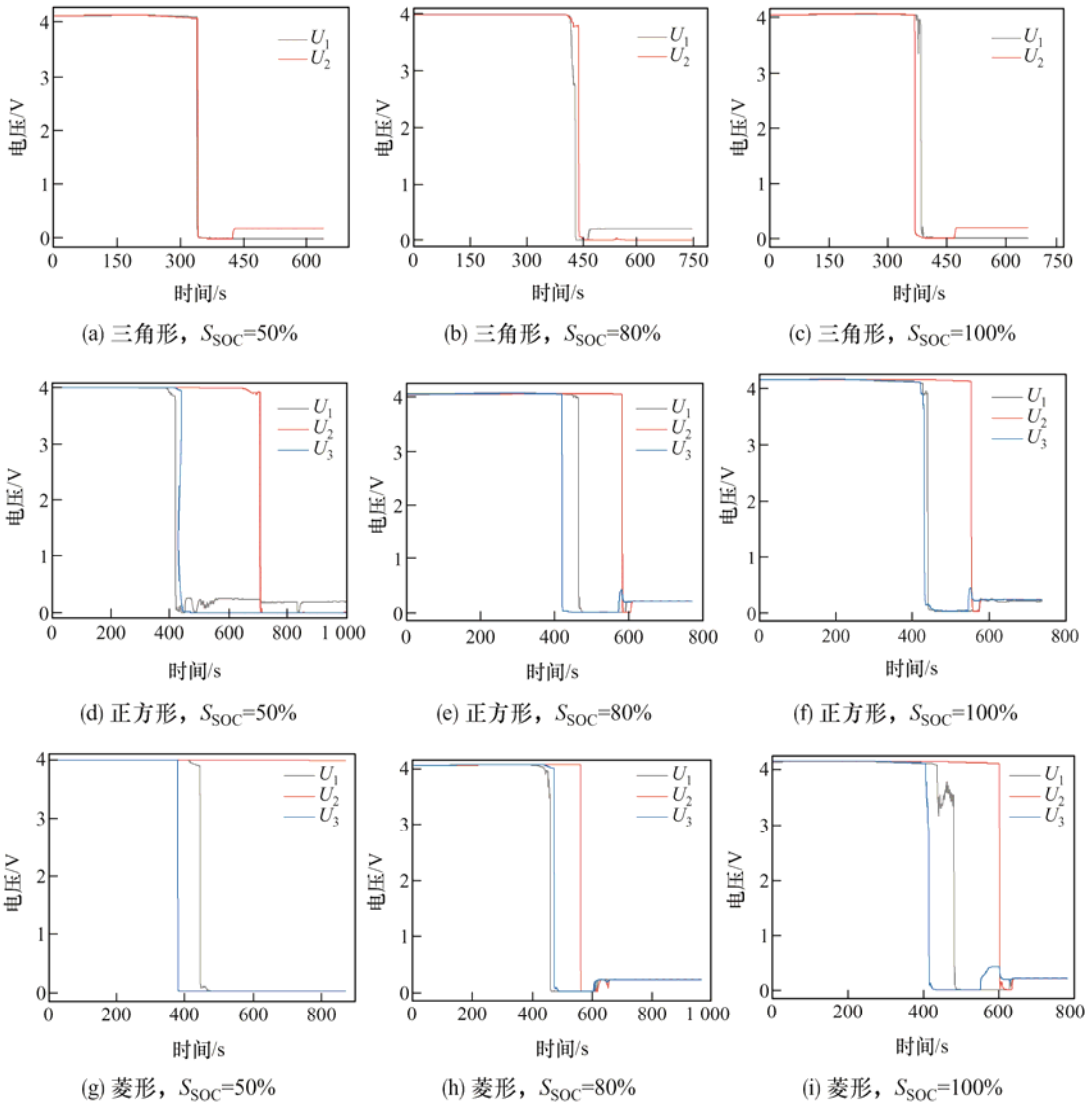
图 12　三角形模块电−热响应

Fig. 12 Electrical-thermal response of triangular module

由图 12 可见，在第Ⅰ阶段，1 号电池和 2 号电池的温度变化几乎一致，这是因为 2 个电池均紧靠加热管(这与实际情况相似，为了节省空间商家会将几个电池紧贴在一起)，所以在Ⅰ、Ⅱ阶段 2 个电池的温度甚至电压变化的趋势是同步的，第Ⅲ

阶段中，由于电池个体的差异，发生热失控的最高温度和排气时间略有差异。结果表明，随着 SOC 的升高，第Ⅰ阶段的时间会缩短，电压下降的时间也会提前。说明 SOC 越高，危害性越大，热失控传播速度越快。

不同形状模块电压变化如图 13 所示。图 13(a)、(d)、(g)为 S_{SOC}=50%时不同形状因子的电压变化，正方形模块的 2 号电池未发生热失控，表明 1 号和 3 号电池发生热失控，将热量传播给 2 号电池，未达到 2 号电池的临界温度；菱形模块下，2 号电池的电压下降发生在 1 号和 3 号电池电压下降约 300 s 后，这说明菱形模块下，热失控传播的速度要大于正方形模块。正方形模块的 2 号电池与三角形模块和菱形模块的差别在于离加热管的距离远，加热管直接将热量传递给 1 号电池和 3 号电池，然后通过 1 号电池和 3 号电池将热量传递给 2 号电池，这导致大部分热量在热对流过程中出现损失，达不到 2 号电池发生内短路的临界温度。因此，形状因子为三角形和菱形时，热失控传播速度最快，随后是正方形。建议电动汽车制造商可以通过适当增加电池模组内电池之间的距离，防止热失控进一步传播，造成更大的经济损失和人员伤亡；此外，可以在模组之间加入隔热材料，从根源上防止热失控传播到邻近电池。



(a) 三角形，S_{SOC}=50%　(b) 三角形，S_{SOC}=80%　(c) 三角形，S_{SOC}=100%

(d) 正方形，S_{SOC}=50%　(e) 正方形，S_{SOC}=80%　(f) 正方形，S_{SOC}=100%

(g) 菱形，S_{SOC}=50%　(h) 菱形，S_{SOC}=80%　(i) 菱形，S_{SOC}=100%

图 13　不同形状模块电压变化

Fig. 13 Voltage variation of different shape modules

3　结论

本文基于自制热失控传播实验平台，分析了不同 SOC 和加热功率对单体电池热滥用的影响，以及不同电气连接方式和排列形状对电池组热失控传播速度的影响，得出以下结论。

(1)在单体电池的热滥用实验中，电压掉落时间、排气时间、排气温度、达到最高温度的时间和最高温度，随着 SOC 的增加呈现一定的线性关系。随着加热功率的增加，电池失效会提前。

(2)根据 S_{SOC}=80%单体电池电−热响应曲线，结合实验现象、电池表面温度、电压等参数的特点，可将热失控过程分为 4 个阶段：加热阶段、二次加热阶段、热失控产生阶段和冷却与熄灭阶段。

(3)不同电气连接方式中，热失控传播速度从快到慢的顺序为并联、串联和无电气连接。建议在电池连接的外电路上增加外电路保护装置并对电池包使用更加耐高温的绝缘外壳，防止绝缘外壳破损造成的外电路短路。

(4)不同排列形状中，热失控传播速度最慢的是正方形模块，三角形模块和菱形模块的传播速度大致相同。建议增加单体电池间的距离，可以减缓热失控传播速度；在电池模组之间加入隔热材料，防止热失控传播到邻近电池。

参考文献：

[1] 肖兰兰. 碳中和背景下中国首脑外交与国家绿色战略能力建设[J]. 南京理工大学学报(社会科学版), 2023, 36(2): 7-15.
Xiao Lanlan. China’s summit diplomacy and national green strategy capacity construction in the context of carbon neutrality [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Social Sciences), 2023, 36(2): 7-15. (in Chinese)

[2] Ding Chao, Zhu Nannan, Yu Jialing, et al. Experimental investigation of environmental pressure effects on thermal runaway properties of 21700 lithium-ion batteries with high energy density [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 38: 102349.

[3] 唐文斌, 王湘雄. 新能源汽车之锂电池技术应用[J]. 低碳世界, 2017, 7(35): 100-101.
Tang Wenbin, Wang Xiangxiong. Application of lithium battery technology in new energy vehicles [J]. Low Carbon World, 2017, 7(35): 100-101. (in Chinese)

[4] Abbott K C, Buston J E H, Gill J, et al. Experimental study of three commercially available 18650 lithium ion batteries using multiple abuse methods [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 65: 107293.

[5] Liu Binghe, Jia Yikai, Yuan Chunhao, et al. Safety issues and mechanisms of lithium-ion battery cell upon mechanical abusive loading: A review [J]. Energy Storage Materials, 2020, 24: 85-112.

[6] 荣路清. 18650 型锂离子电池仓库储存安全性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
Rong Luqing. 18650 type lithium ion battery safety research of warehouse storage [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)

[7] 任可美, 戴作强, 郑莉莉, 等. 锂离子电池热失效机理和致爆时间研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 186-193.
Ren Kemei, Dai Zuoqiang, Zheng Lili, et al. Review on thermal failure mechanism and explosion time of lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 186-193. (in Chinese)

[8] Fang Jun, Cai Jiangning, He Xuanze. Experimental study on the vertical thermal runaway propagation in cylindrical lithium-ion batteries: Effects of spacing and state of charge [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 197: 117399.

[9] 邓志彬, 韩旭, 刘全义, 等. 不同体系中 18650 型锂离子电池热失控传播过程研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(2): 246-249.
Deng Zhibin, Han Xu, Liu Quanyi, et al. Thermal runaway extension of 18650 lithium-ion battery under different systems [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(2): 246-249. (in Chinese)

[10] Zhong Guobin, Li Huang, Wang Chao, et al. Experimental analysis of thermal runaway propagation risk

within 18650 lithium-ion battery modules [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(9): A1925-A1934.

[11] 张青松, 包防卫, 牛江昊. 三元锂电池热失控产气爆炸风险评估研究[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 324-332.
Zhang Qingsong, Bao Fangwei, Niu Jianghao. Study on risk assessment of thermal-runaway gas explosion of ternary lithium batteries [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 324-332. (in Chinese)

[12] Gao Shang, Feng Xuning, Lu Languang, et al. An experimental and analytical study of thermal runaway propagation in a large format lithium ion battery module with NCM pouch-cells in parallel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 93-103.

[13] Feng Xuning, He Xiangming, Ouyang Minggao, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25Ah $LiNi_xCo_yMn_zO_2$ large format lithium ion battery [J]. Applied Energy, 2015, 154: 74-91.

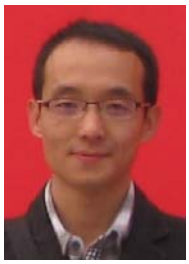
[14] Lamb J, Orendorff C J, Steele L A M, et al. Failure propagation in multi-cell lithium ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2015, 283: 517-523.

[15] 曹勇, 杨大鹏, 朱清, 等. 大容量磷酸铁锂电池模组热失控研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(7): 2462-2469.
Cao Yong, Yang Dapeng, Zhu Qing, et al. Thermal runaway of large capacity lithium-iron phosphate battery pack [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(7): 2462-2469. (in Chinese)

[16] 陈宝辉, 邓捷, 吴传平, 等. 气凝胶毡抑制磷酸铁锂电池模组热失控蔓延特性研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(1): 5-11.
Chen Baohui, Deng Jie, Wu Chuanping, et al. Inhibiting effect of aerogel mat on thermal runaway propagation of lithium iron phosphate battery modules [J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(1): 5-11. (in Chinese)

[17] 张青松, 牛江昊, 赵洋. 不同正极材料锂离子电池热失控产物研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(5): 598-602.
Zhang Qingsong, Niu Jianghao, Zhao Yang. Research on thermal runaway products of lithium-ion batteries with different cathode materials [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(5): 598-602. (in Chinese)

[18] 崔伦. 动力电池组热失控蔓延规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
Cui Lun. Research on spread rule of thermal runaway of the battery pack [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)



李杰

作者简介：

李杰(1984—)，男，博士，副教授。研究方向：锂电池安全，人工智能应用。E-mail：jli@chd.edu.cn。

程乐(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：锂电池安全，人工智能应用。E-mail：2022232063@chd.edu.cn。

赵鸿祥(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：锂电池安全，人工智能应用。E-mail：2022232034@chd.edu.cn。

王飚(1969—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：系统分析与优化，系统故障诊断与可靠性。E-mail：wangbiao@chd.edu.cn。

任彦丽(1977—)，女，硕士，正高级工程师。研究方向：工程机械电动化技术研究及产品开发，企业技术标准化。E-mail：renyanli.20g@crcc.cn。

(责任编辑：耿越)