

张媵妮,张雨辰,杨华,等.不同过充电流下大容量三元锂电池热失控危险性[J].西安科技大学学报,2026,46(2):267-279.

ZHANG Yanni,ZHANG Yuchen,YANG Hua,et al. Thermal runaway hazard of large-capacity ternary lithium-ion batteries under various overcharge currents[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2026,46(2):267-279.

## 不同过充电流下大容量三元锂电池 热失控危险性

张媵妮<sup>1,2</sup>,张雨辰<sup>1</sup>,杨华<sup>3</sup>,黄罗鑫<sup>1</sup>,章鹏程<sup>1</sup>,弥芯怡<sup>1</sup>,李佳维<sup>1</sup>

(1.西安科技大学安全科学与工程学院,陕西西安710054;

2.西安市城市公共安全与消防救援重点实验室,陕西西安710054;

3.西安科技大学电气与控制工程学院,陕西西安710054)

**摘要:**为探究大容量三元锂电池过充热失控危险性,以117 Ah与153 Ah这2种大容量三元锂电池为研究对象,通过搭建大型锂电池热失控试验平台,在30,45和60 A这3种过充电流条件下开展试验研究,并基于多热失控特征参数,采用AHP-熵权法对热失控危险性进行综合评估。结果表明:117 Ah电池热失控过程呈现四阶段变化,153 Ah电池则因壳体直接破裂未经历开阀过程;随着过充电流增大,2种电池的热失控触发时间均显著缩短;117 Ah电池的峰值温度、产气总量及可燃气体含量均随电流增大而上升,呈现明显的电流依赖性,153 Ah电池则因内部结构与反应时间的差异呈现相反趋势;热失控释放气体以CO、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>为主,其相对含量受电流与泄压方式的协同调控;117 Ah电池热失控危险性随电流增加而显著增加,而153 Ah电池在低电流条件下因过充时间延长反而呈现出更高的危险性,容量增大会显著降低电池的安全电流阈值。研究可为建立容量与电流匹配关系的差异化安全体系提供一定参考。

**关键词:**大容量三元锂电池;过充;热失控特性;危险性评估;AHP-熵权法

中图分类号:TM 912

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0267-13

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0204

## Thermal runaway hazard of large-capacity ternary lithium-ion batteries under various overcharge currents

ZHANG Yanni<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuchen<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>3</sup>, HUANG Luoxin<sup>1</sup>,  
ZHANG Pengcheng<sup>1</sup>, MI Xinyi<sup>1</sup>, LI Jiawei<sup>1</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Urban Public Safety and Fire Rescue, Xi'an 710054, China;

3. College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To explore the thermal runaway hazard of overcharging in large-capacity ternary lithium-ion batteries, 117 Ah and 153 Ah batteries were studied. Experiments were performed on a large-capacity lithium-ion battery thermal runaway test platform at overcharge currents of 30, 45 and 60 A. A comprehensive assessment of the thermal runaway hazard was performed using the AHP-entropy weight meth-

收稿日期:2025-11-15

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2024GX-YBXM-444);能源陕西实验室科技项目(ESLB202427)

通信作者:张媵妮,女,山西阳城人,教授,博士生导师,E-mail:zyn2099@xust.edu.cn

od based on multiple characteristic parameters. The results indicate that: The thermal runaway process of the 117 Ah battery is characterized by four distinct stages. The venting process is not experienced by the 153 Ah battery due to the direct rupture of its casing. The thermal runaway trigger time for both battery types is markedly shortened with increasing overcharge current. For the 117 Ah battery, key hazard parameters including peak temperature, total gas production, and flammable gas content increase with higher current, demonstrating a clear current dependence. In contrast, an opposite trend is shown by the 153 Ah battery, due to differences in its internal structure and reaction time. The main components of the gases released by thermal runaway are identified as CO, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>. The relative content of these gases is influenced by the combined effects of the current and the pressure release method of the battery. The thermal runaway hazard of the 117 Ah battery increases significantly with higher current. Conversely, a higher hazard is presented by the 153 Ah battery under low current conditions due to prolonged overcharge time. An increased capacity is found to notably reduce the safe current threshold of the battery. These findings provide a reference for establishing a differentiated safety system that considers the relationship between battery capacity and current.

**Key words:** large-capacity ternary lithium-ion batteries; overcharging; thermal runaway characteristics; hazard assessment; AHP-entropy weight method

## 0 引言

随着全球能源结构转型推进,锂电池由于长充放电循环寿命、无记忆效应以及良好的环境兼容性等优势已成为医疗设备、电动汽车及其他储能系统中最具前景的储能技术之一<sup>[1]</sup>。然而在生产应用中,电池可能会因异常工况导致热失控的发生,进而引发火灾或爆炸等严重事故,对人类生命和财产安全构成重大威胁<sup>[2-3]</sup>。

根据正极材料不同,主流锂电池类型分为磷酸铁锂电池和镍钴锰三元锂电池<sup>[4]</sup>。三元锂电池凭借其更高能量的密度和优异的低温性能,是高端电动汽车、长续航增程式车型及航空器动力电池的首选<sup>[5]</sup>。然而,能量密度特性与热失控风险呈强正相关,与磷酸铁锂电池相比,三元体系锂电池热失控危险性高、行为剧烈,其热失控过程不仅产生白色可燃烟气、喷出高温可燃电解液,还可能出现明火燃烧,甚至爆炸<sup>[6-7]</sup>。在实际工程运用中,为避免电池包排列的复杂性,降低连接点失效风险,提高空间利用率,电池单体的容量设计日趋增加,但由此造成的热失控后果也更加严重<sup>[8]</sup>。

过充被认为是最常见和最危险的锂电池滥用方式之一<sup>[9]</sup>。在实际场景中,电池管理系统故障或设计缺陷等情况可能导致电池过充<sup>[10]</sup>。研究者们已对锂电池过充引发热失控的机制展开大量研究,发现锂电池过充会提高电池正极电位,当正极

电位高于正极内部金属分解电位时,大量的 Li<sup>+</sup> 会沉积在阳极中,形成锂枝晶<sup>[11-12]</sup>。随着过充的进行,锂枝晶刺穿隔膜,造成电池内部短路,引发连锁放热反应,高温进一步触发固体电解质界面(SEI)膜分解、正负极材料分解等副反应,最终导致热失控<sup>[13-15]</sup>。相关研究者通过试验深入探究了充电倍率对特定型号锂电池热失控过程及特征的影响。WANG 等在不同充电倍率下研究了锂电池的产热与产气特性,发现电池内短路产热量随充电倍率增加而增加,且在高充电倍率下电池的产气行为更加剧烈<sup>[16]</sup>;唐佳等研究了不同充电倍率、不同容量锂电池过充热失控温度、产气、形变特征,发现其中形变是能最早检测到的特征参数,可作为电池过充热失控预警的指标<sup>[17]</sup>;JIANG 等对 43 Ah 锂电池进行了不同充电速率下的过充试验,认为过充过程中电压平台出现的原因是锂枝晶刺穿隔膜形成微小的局部内短路,平衡了电压的上升<sup>[18]</sup>。在相同过充电流条件下,电池的总能量、电极面积等特性差异,会影响其内部短路的发展速率、产热产气规模以及热失控的剧烈程度<sup>[19]</sup>。

综上所述,目前相关研究成果主要聚焦于磷酸铁锂电池或小容量三元电池在不同充电倍率下的热失控特征,未考虑容量梯度与正极材料组成的耦合影响,无法反映高容量三元锂电池的特殊风险规律;现有的电池危险性评估体系多依赖单一参数或单一容量等级,未建立容量、电流协同作

用下的多参数量化评估体系,难以支撑差异化安全防护设计。基于此,本研究采用自主搭建的大型锂电池热失控试验平台,开展不同充电电流条件下大容量三元锂电池过充试验,根据不同充电电流、不同容量比较研究热失控现象、电池温度、电压的变化过程,并分析热失控后气相产物特征。构建 AHP-熵权法耦合的多参数综合评估体系,将热、电、气 3 类关键指标融入评估体系,实现对容量

- 电流耦合风险的精准量化,为建立基于电流和电池容量的差异化充电安全标准和热失控预警体系提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验对象

试验使用的电池是某商用品牌生产的 117 Ah 及 153 Ah 三元锂电池,电池具体参数见表 1。

表 1 电池参数

Table 1 Battery parameters

参数名称	序号	额定容量/Ah	外观尺寸/mm	正极材料	负极材料	重量/kg	内阻/(m·Ω)
参数值	1	117	220 × 33 × 102	LiNi <sub>0.8</sub> Co <sub>0.1</sub> Mn <sub>0.1</sub> O <sub>2</sub>	石墨	1.79	0.6
	2	153	148 × 79 × 106	LiNi <sub>0.6</sub> Co <sub>0.2</sub> Mn <sub>0.2</sub> O <sub>2</sub>	石墨	2.60	0.27

2 种电池均为工业级商用产品,在电动汽车、分布式储能系统及工业设备中有广泛应用,研究对象兼具理论普适性与工程实用性,可覆盖中高端大容量三元锂电池的应用场景,为建立差异化安全标准提供全面数据支撑<sup>[20-21]</sup>。

对于未使用过的电池,在进行 3 次预循环后会使其负极表面形成稳定的固体电解质界面膜<sup>[22-24]</sup>。为贴近真实应用场景,因此在试验前对电池进行 3 次充放电循环测试。采用 Neware BTS-5 V100 A 电池测试系统,对所有参与试验的电池在同一环境条件下进行 3 组充放电循环并将电荷量充至 100%。

### 1.2 试验条件

锂电池热失控试验平台,如图 1 所示。平台由锂电池热失控防爆舱、控制终端、傅里叶气体分析仪、锂电池过充电仪、高速摄影仪等装置组成。防爆舱内部直径 900 mm,长约 1 100 mm,恒定承受压力不低于 2.5 MPa,舱体右侧与顶部为法兰结构,含有温度、电压测量接口。控制终端采用西门子 PLC 及高精度模拟量模块,实现压力、温度等参数的实时监测,通过可视化界面实时显示关键参数。气体组分检测采用全自动傅里叶变换红外光谱仪 MATRIX-MG01,气体通入后经傅里叶变换算法处理获得特征红外光谱,实现多种气体成分的实时动态监测。试验前用高纯度氮气对气体池进行了充分吹扫和背景测试,以排除仪器及防爆舱中残留气体对试验数据的干扰。

将经过充放电循环处理的电池样品放置于锂

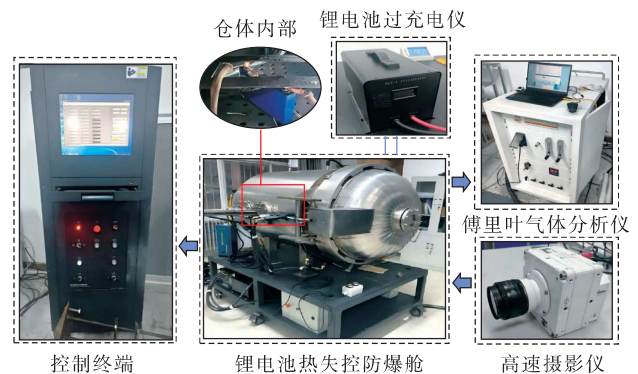


图 1 锂电池热失控试验平台

Fig. 1 Experimental platform for lithium-ion battery thermal runaway

电池热失控防爆舱中,模拟其在真实场景下的热失控行为。因此,不考虑用夹片将其夹紧固定,只用电池台架将其上下固定,通过外接充电仪以 30, 45, 60 A 将 2 种电池进行过充电,模拟电池从初始过充到剧烈热失控的递增滥用场景。同时,在相同电流下比较不同大容量电池热失控特性和危险性,具体试验工况见表 2。

采用高速摄影仪通过防爆舱上的可视窗记录电池热失控全过程。在电池表面布置 4 根 K 型热电偶,顶部测点精确位于距正极向内 1 cm 处,以直接监测该热失控关键副反应策源区的温升。其余三测点分别位于正面、侧面、底部正中心处,用于追踪热失控触发位置及热量在电池主要散热面的传导与扩散,具体位置如图 2 所示。在电池正负极上缠绕电压测量线,实时采集电池电压数据。

表2 试验工况  
Table 2 Test conditions

编号	电池容量/Ah	过充电流/A	截止条件
1	117	30	发生热失控
2		45	发生热失控
3		60	发生热失控
4		30	发生热失控
5	153	45	发生热失控
6		60	发生热失控

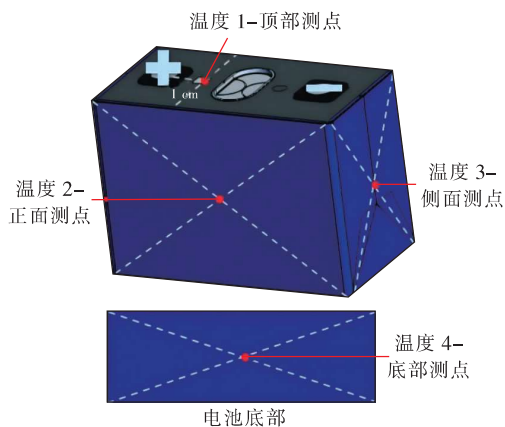


图2 温度测点位置

Fig. 2 Locations of temperature measurement points

## 2 结果与讨论

### 2.1 过充热失控行为分析

117 Ah 三元锂电池过充过程如图 3 所示。主要呈现四阶段变化。①过充初期。电池开始过充,处于比较稳定的状态,无外观变化;②明显鼓包。随着过充的进行,电池内部产气量增多,压力增大,电池发生明显鼓包;③开阀阶段。由于气体积聚导致电池内部压力达到安全阀开阀压力,安全阀破裂,释放出白色烟雾,成分为内部副反应产生的热失控气体以及电解液的混合物;④热失控阶段。电池温度在几秒内急剧上升,伴随着巨响和强光电池在一瞬间完成结构解体,内部材料大量喷出,电池顶部和侧面部分被撕裂。

153 Ah 三元锂电池过充过程中热失控行为与 117 Ah 三元锂电池存在部分区别,图 4 展示了 153 Ah 电池过充热失控行为。153 Ah 三元锂电池的 3 组试验均未开阀,而是因内压超过壳体承压极限直接导致电池壳破裂,释放出大量热失控气体,并在电池正极处持续产生电火花。随后电池内部材料几乎完全喷出壳体,舱内出现瞬间火光。

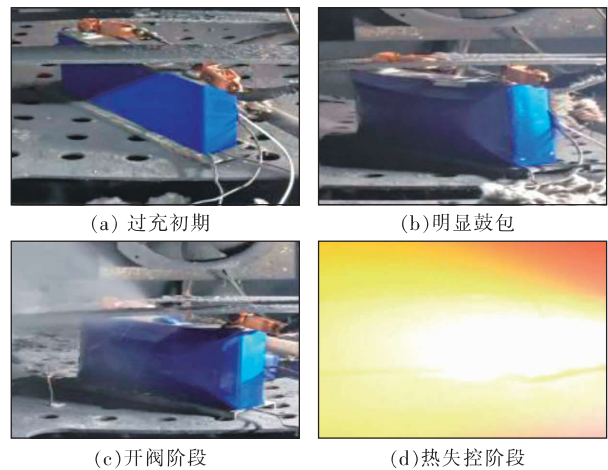


图3 117 Ah 三元锂电池热失控行为

Fig. 3 Thermal runaway behavior of 117 Ah ternary lithium-ion battery

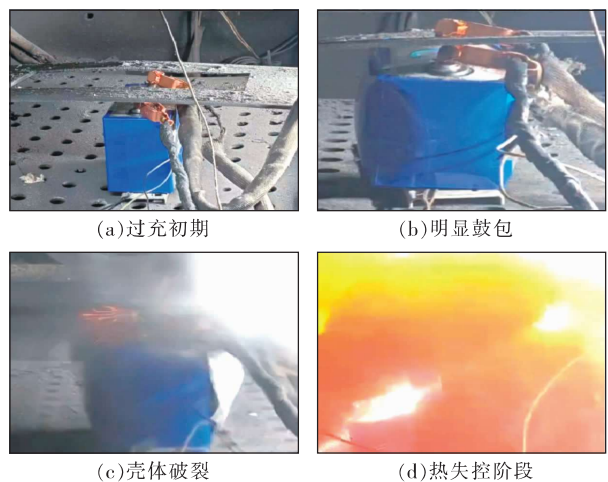


图4 153 Ah 三元锂电池热失控行为

Fig. 4 Thermal runaway behavior of 153 Ah ternary lithium-ion battery

### 2.2 温度变化过程及特征分析

图 5 为在不同过充电流下不同容量的 2 种三元锂电池表面温度随时间的变化曲线图。图 5(a)~图 5(c)展示了 117 Ah 三元锂电池在不同过充电流下电池温度变化情况。在过充初期,电池表面 4 点的温度由起始点攀升,主要原因是锂电池在过充过程发生副反应缓慢释放极化热和焦耳热,此阶段每组最高温度均出现在温度 3。在 30, 45, 60 A 充电电流下,安全阀分别在 3 398, 2 586, 1 910 s 开启。安全阀开启时,电池内部高温气体迅速向上堆积并携带着热量从安全阀喷出,造成各点位温度出现波动,电池除底部外各部分的温升速率加快,且顶部测点温升速率最快。在安全

阀开启短暂时间后,各点位温升速率放缓。在开阀后 5 min 内,3 组电池均进入热失控阶段,电池内部发生隔膜大面积崩溃、内短路、正负极材料与电解液剧烈反应。30,45,60 A 过充电流下,3 组分别

在 3 582,2 814,2 106 s 发生热失控,触发温度分别为 114,111,107 °C。在之后 8 s 内,3 组电池达到热失控峰值温度,分别为 494.3,665.7,886.2 °C,3 组电池峰值温度均出现在温度 1。

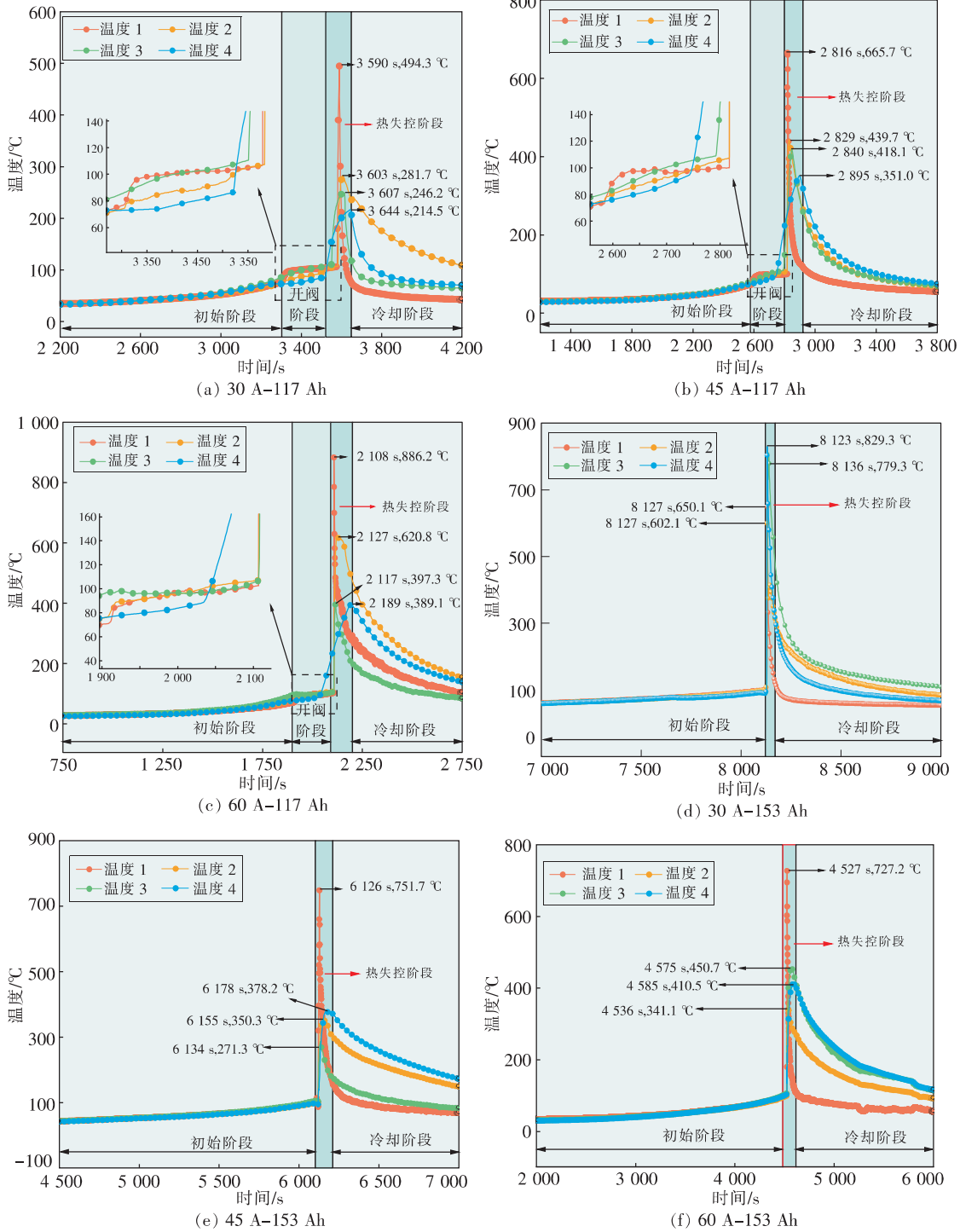


图 5 电池温度变化

Fig. 5 Variation of batteries temperature

图 5(d) ~ 图 5(f) 展示了 153 Ah 三元锂电池在不同电流下电池温度变化情况。3 组曲线整体

变化趋势与 117 Ah 电池类似,但在部分阶段和温度点位存在差异。3 组均未开阀,前期温度未产生

波动变化。153 Ah 电池其初始阶段更漫长且平稳,4 条温度曲线几乎重叠上升。这表明在相同的过充电流持续输入下,电池内部同样发生了副反应产热,但由于其拥有更大容量,导致其热量累积的时间更长。30,45,60 A 过充电流下,3 组分别在 8 120,6 123,4 524 s 发生热失控,触发温度均为 110 °C 左右。在之后 5 s 内,3 组电池达到热失控峰值温度,分别为 829.3,751.7,727.2 °C。在 45,60 A 充电电流下电池热失控峰值温度最高点出现在温度 1,而在 30 A 的充电电流下,电池热失控峰值温度最高点出现在温度 4,与其他 2 组峰值温度出现点位不同,结合此组残骸撕裂口蔓延到底部可以判断,此组热失控首先在电池的底部或靠近底部的内部触发,使温度 4 瞬间飙升至 800 °C 以上,随后高温才向上蔓延,导致顶部温度上升相对滞后且峰值较低。

图 6 呈现了不同过充电流下 117 Ah 和 153 Ah 三元锂电池热失控触发时间。热失控触发时间以温升速率  $>1$  °C 且持续 3 s 为判断依据。可清晰地看出,随着充电电流增大,2 种电池的热失控触发时间逐步缩短,且在同电流下,更大容量电池热失控触发时间显著增加。这主要由于电流增大导致电池的热积累速率加快,电池达到其关键材料热分解临界温度所需的时间缩短,最终使热失控触发时间相应缩短。在相同电流下,更大容量电池因其更大的电极面积,导致单位面积的焦耳热产率降低,延缓了副反应的剧烈发生,从而推迟了热失控触发时间。

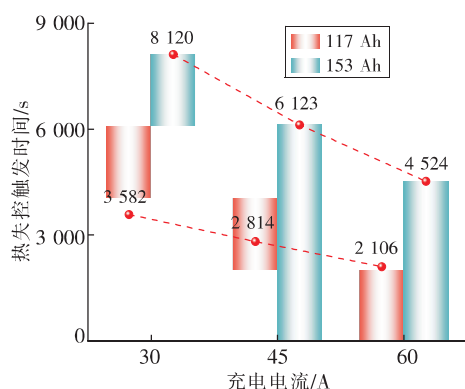


图 6 热失控触发时间

Fig. 6 Trigger time of thermal runaway

图 7 展示了在不同过充电流下电池热失控峰值温度。热失控峰值温度则呈 2 种不同的变化趋势,117 Ah 电池热失控峰值温度与过充电流呈正

相关,而 153 Ah 电池随着充电电流增大热失控峰值温度呈减小趋势,主要是因为更长过充时间为电池内部提供了更长的反应期,使得副反应更充分、热积累更彻底,最终在热失控时更多的活性物质参与了放热反应,从而实现了更高的整体峰值温度。

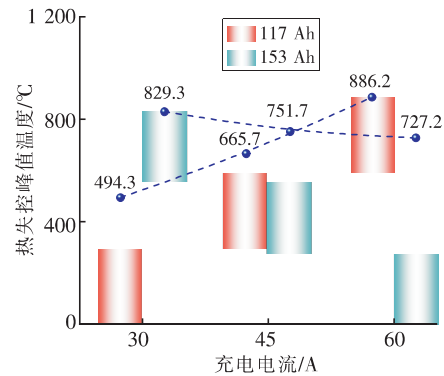


图 7 热失控峰值温度

Fig. 7 Peak temperature during thermal runaway

### 2.3 电压变化过程及特征分析

电压变化是表征过充锂电池热失控特性的重要指标,图 8 展示了在不同过充电流下电池电压随时间变化的曲线。

在过充电前期,电压缓慢上升至第一拐点 A,此阶段电压变化主要由电化学副反应主导。当电池被过充至远超其额定电压上限(4.2 V)后,正极材料中  $\text{Li}^+$  过度脱出并嵌入到负极材料中,晶格结构发生相变并析出活性氧,同时电解液在正极表面发生氧化分解,生成气体和固态副产物。这些副反应消耗了部分充电电流,产生了电化学极化,为了维持恒定的过充电流,电压持续攀升<sup>[25]</sup>。

电压从 A 点回落至 B 点标志着电池内部开始发生微短路。随着第一阶段副反应的持续,电池内部压力升高,导致隔膜被在负极表面生成的锂枝晶刺穿,从而在正负极之间建立起导电通道。新形成的短路点会分流电流,使得用于电化学反应的电流减小。尽管电池内部的损坏正在加速累积,但在恒流充电条件下,这种分流会导致电池电压下降。

随后 2 种电池的电压变化出现了较大区别。如图 8(a)~图 8(c)所示,117 Ah 电池电压从 B 点逐渐加速并最终飙升至第二峰值点 C 点,这是大规模内短路引发内部电弧和最终热失控的直接体现。当内短路点迅速扩大并产生高温时,电池内部元件之间形成电弧。电弧具有极低的电阻和极

高的温度, 此时测量到的异常高电压是电流流过低电阻电弧通道时产生的巨大欧姆压降。如图 8 (d) ~ 图 8 (f) 所示, 153 Ah 电池电压仅缓慢上升 0.1 V 左右就到达了第二峰值点 C 点, 由于安全阀未能及时开启, 导致内部压力在短时间内急剧积聚, 最终以物理性的壳体破裂而非电化热失控

电压飙升作为终结, 因此没有出现如 117 Ah 电池那样因电弧和大规模内短路形成的高压现象。当温度达到隔膜熔点时, 隔膜收缩熔化导致电池完全短路, 电弧在瞬间释放出巨大能量, 引发正极材料全面分解、电解液燃烧等连锁放热反应, 导致电池结构被彻底摧毁, 电压骤降为 0 V。

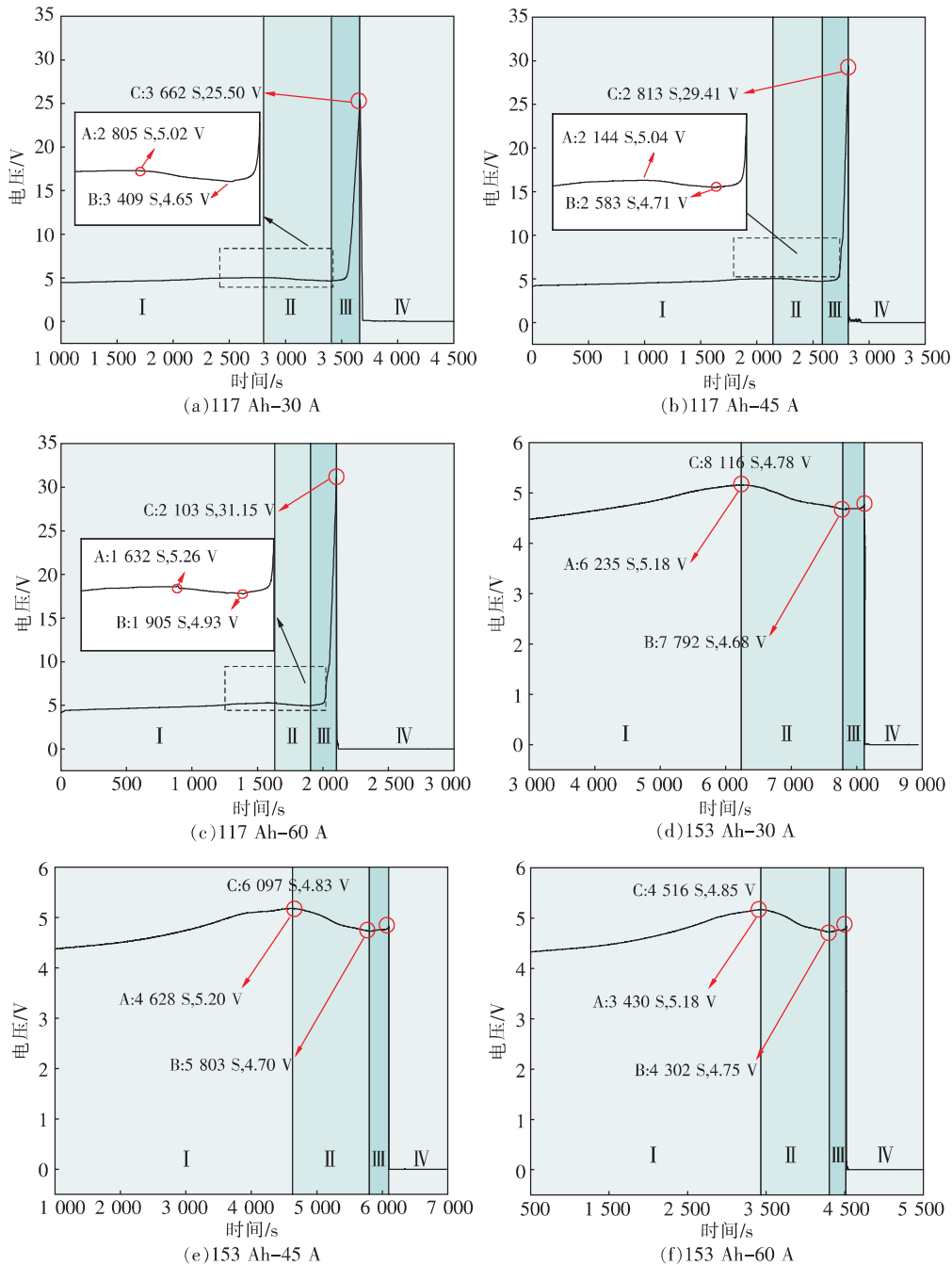


图 8 电池电压变化

Fig. 8 Variation of batteries voltage

而 153 Ah 电池在相同过充电流下, 随着过充电流的增加, 三点临界电压无明显变化趋势, 这说明了电池在更大容量下, 过充电流对电池电压

影响更小。测量的参数中, 电压信号相较于温度信号更早发生异常变化, 通过监测电池电压发生骤降的时刻可以更有效地为热失控预警提供支持。

## 2.4 热失控气体总量及气体组分分析

### 2.4.1 气体总量

图9为700 L密闭电池舱内压力变化曲线。当电池发生热失控时,容器内压力迅速上升,随后开始下降。峰值压力反映了电池内部的化学能在瞬间释放的强度,在30、45、60 A下,117 Ah电池舱内峰值压力与电流成正相关,其内部反应化学能受输入电流主导,而153 Ah电池舱内峰值压力与电流成负相关,低电流下的长时间过充为更充分的内部反应提供了条件,从而引发了更高强度的能量释放。且在相同过充电流下,153 Ah电池舱内峰值压力皆大于117 Ah电池舱内峰值压力。其中,117 Ah电池在30、45、60 A过充电流在压力稳定时的压力分别为152.3、155.9、156.8 kPa,153 Ah电池分别为181.6、175.4、178.8 kPa。

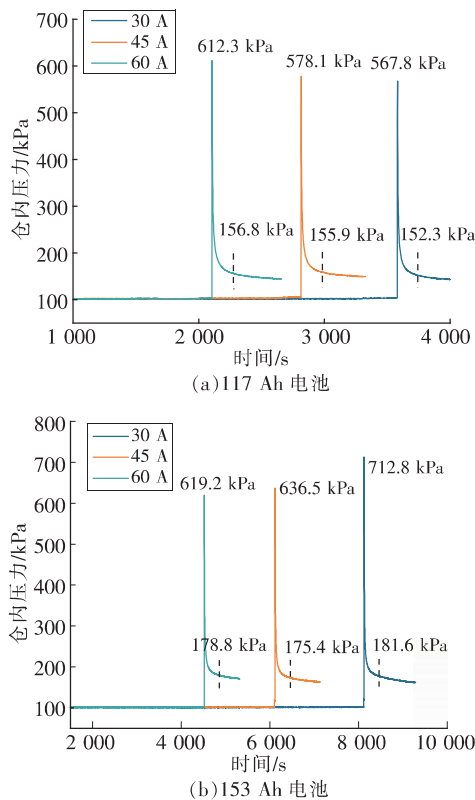


图9 舱内压力变化

Fig.9 Pressure variation in the chamber

根据理想气体状态方程,采用舱内压力及温度作为计算参数,折算到标准状态下气体量( $V_{in, std}$ ),公式为

$$V_{in, std} = \frac{\Delta nRT_{std}}{P_{std}} = V \frac{T_{std}}{P_{std}} \left( \frac{P_{in}}{T_{in}} - \frac{P_0}{T_0} \right) \quad (1)$$

式中  $V$  为电池舱体积, L;  $T_0$  为初始温度, K;  $P_0$  为初始压强, kPa;  $T_{in}$  为稳定时温度, K;  $P_{in}$  为稳定时压

强, kPa;  $T_{std}$  为 298.15 K,  $P_{std}$  为 101 kPa。

根据式(1)计算得到各电池产气量,见表3。对比计算结果显示,在30、45、60 A下,117 Ah产气量与过充电流成正相关;153 Ah产气量与过充电流成负相关。且电池容量对产气量的影响要大于过充电流,153 Ah电池产气量最小为185.2 L,117 Ah电池的产气总量最大只有165.4 L。

表3 电池热失控产气量

Table 3 Gas production from battery thermal runaway

计算结果	117 Ah			153 Ah		
	30 A	45 A	60 A	30 A	45 A	60 A
产气量/L	152.5	162.7	165.4	213.8	193.5	185.2

### 2.4.2 气体组分

通过气体分析装置对舱内压力稳定时的气体组分进行分析,选取含量出现大于  $10\ 000 \times 10^{-6}$  的热失控主要气体,产气组分及其绝对浓度见表4。

表4 热失控主要气体绝对浓度

Table 4 Absolute concentration of main

gases in thermal runaway  $\times 10^{-6}$

试验条件	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
117 Ah 30 A	168 057	103 849	86 463	10 589	9 299
117 Ah 45 A	155 152	132 805	102 638	10 988	9 232
117 Ah 60 A	146 363	140 938	113 898	11 414	9 765
153 Ah 30 A	140 192	143 022	94 368	27 319	16 489
153 Ah 45 A	131 866	129 698	96 863	26 066	15 896
153 Ah 60 A	120 052	109 445	104 967	27 201	15 543

2种电池热失控过程排气的组分主要为CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>,其中CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>3种气体绝对浓度较高,均达到了  $100\ 000 \times 10^{-6}$  级别,CH<sub>4</sub>及C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>的绝对浓度均较低,在6组试验中CH<sub>4</sub>的浓度在  $10\ 000 \sim 28\ 000 \times 10^{-6}$ , C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>的浓度在  $9\ 200 \sim 17\ 000 \times 10^{-6}$ 。

为更直观地比较不同过充电流下117 Ah与153 Ah锂电池5种热失控主要气体浓度差异,将氮气、其他少量热失控气体去除后得到5种气体相对含量百分比,如图10所示。

随着过充电流增大,CO<sub>2</sub>比例在2种电池中均持续下降,这主要是因为相对更大的电流引入了更剧烈的电滥用和热积累,在电池内部高热量下部分CO<sub>2</sub>会发生还原反应,导致其比例下降。H<sub>2</sub>比例则与过充电流呈强正相关,这也表明了更大的电流使热累积加剧,电解液溶剂和锂盐发生副

烈的热分解与 SEI 膜被破坏后的重生反应共同导致了  $H_2$  比例增加。CO 在 2 种电池中呈现 2 种完全不同的变化态势,随着过充电流增大,117 Ah 电池 CO 比例从 27.49% 增加至 33.38%,153 Ah 电池则是从 33.91% 降低至 29.12%,造成这种差异性的主要是 2 种电池泄压方式的不同,117 Ah 电池通过正常开阀的泄压方式维持了内部持续的高

温环境,使得高温生成 CO 的反应被充分促进,而 153 Ah 电池是以壳体破裂的泄压方式中断了需要更长时间、更高温度进行的 CO 生成反应。 $CH_4$  和  $C_2H_4$  比例在不同电流下无明显变化,但在同电流下 2 种电池横向对比发现 153 Ah 电池的  $CH_4$  和  $C_2H_4$  比例显著高于 117 Ah 电池,烃类的差异性说明了 2 种电池的电解液配比和粘结剂成分有所不同。

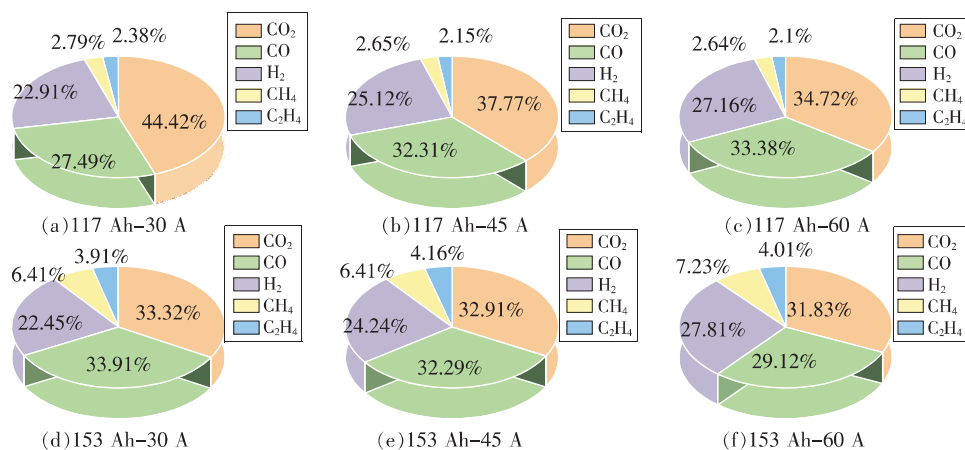


图 10 热失控主要气体相对含量百分比

Fig. 10 Relative content percentage of major gases of thermal runaway

## 2.5 电池热失控危险性评估

大容量三元锂电池因其储存能量巨大,在热失控演变过程中存在较大安全风险,电池的热失控危害受多种因素影响,单一的参数评估无法全面反映其危害程度。因此,基于对 117 Ah 与 153 Ah 三元锂电池在不同过充电流下热失控试验中多参数监测,选取了 5 个关键特征参数,并对电池热失控危险性进行综合评估,为储能系统安全设计提供快速量化工具,具体参数见表 5。对于 5 个关键特征参数的选取主要存在以下考量:热失控触发温度体现电池内部的热稳定性;热失控峰值温度能够反映热失控的剧烈程度;电压是过充过程中最重要的指标之一,能反映电池内短路和电弧风险,由于 2 种电池热失控过程中峰值电压差异过大,因此选用第二拐点电压值;产气量和可燃气体 ( $CO$ 、 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_4$ ) 含量能够反映电池热失控气体泄漏后的发生火灾风险和对人员的危害性。

由于不同特征参数无法直接进行比较,因此采用最小-最大标准化处理,得到标准化值  $x_i'$

$$x_i' = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (2)$$

式中  $x_i$  为原始参数值; $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$  分别为该特征参数在试验中的最小值和最大值。

表 5 热失控关键特征参数

Table 5 Key characteristic parameters of thermal runaway

试验条件	$T_{TR}$ /s	$T_{max}$ /°C	$U_b$ /V	$V_{稳}$ /L	$c_{可燃}$ /%	
117 Ah	30 A	114.3	494.3	4.65	152.5	55.58
	45 A	111.1	665.7	4.71	162.7	62.23
	60 A	107.1	886.2	4.93	165.4	65.28
153 Ah	30 A	110.1	829.3	4.68	213.8	66.68
	45 A	104	751.7	4.70	193.5	67.07
	60 A	106.7	727.2	4.75	185.2	68.17

注: $T_{TR}$ 为热失控触发温度; $T_{max}$ 为热失控峰值温度; $U_b$ 为第二拐点电压值; $V_{稳}$ 为稳定状态气体量; $c_{可燃}$ 为可燃气体相对含量。

将标准化数据绘制成电池热失控危险性雷达图,如图 11 所示。117 Ah 电池随着过充电流越大,热失控峰值温度、第二拐点电压明显升高,可燃气体含量明显增加,而热失控产气量则有少量增加;热失控触发温度与过充电流呈负相关。153 Ah 电池热失控峰值温度、热失控产气量与过充电流呈负相关,第二拐点电压与过充电流呈正相关,热失控触发温度、可燃气体含量与过充电流大小无明显相关性关系。

为了评估电池热失控危险性,考虑将所有热失控关键特征参数赋权,计算所有工况下危险指数并进行比较。AHP 法是通过在两两指标之间的

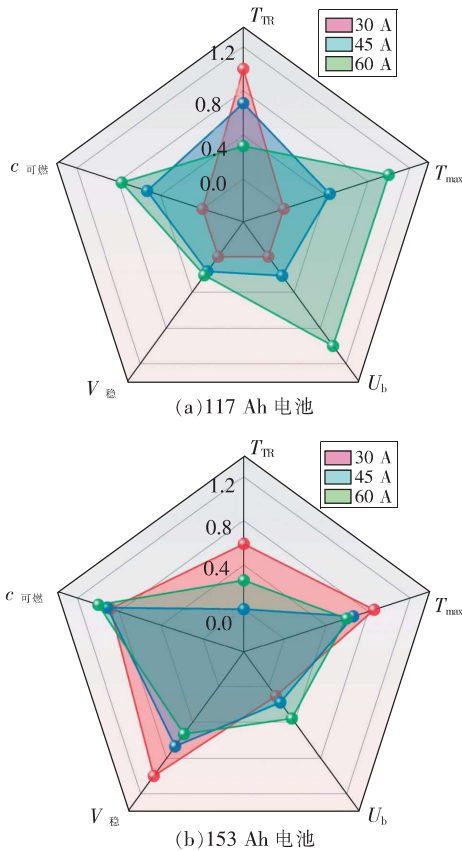


图 11 电池热失控危险性雷达图

Fig. 11 Radar chart of battery thermal runaway hazard

重要程度作出比较判断,建立判断矩阵,计算判断矩阵的最大特征值以及对应特征向量得出不同方案重要性程度的权重,但其易受到主观因素影响<sup>[26]</sup>。熵权法是一种客观赋权的方法,通过指标包含信息量的多少确定权重,可以更好反映指标间的相互关系<sup>[27]</sup>。不同的评估模型具有各自的优势,目前大多采用单一模型去统计和评估材料火灾危险性,难免出现弊端,本研究将2种方法结合,得到的权重既有理论依据又有数据支撑,使评估模型更加科学合理。

运用 AHP 法建立判断矩阵,得到各参数的权重,见表 6。判断矩阵的构建参考了前人研究中关于锂电池热失控关键参数重要性的成果<sup>[28-30]</sup>,并结合大容量三元锂电池特性进行调整,最终通过一致性检验( $CR < 0.1$ )确保其逻辑合理。

熵权法是一种常用的多指标评估方法,通过计算各指标的信息熵来确定其权重。利用熵权法,将标准化后的数据代入公式求指标信息熵  $E_j$

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

表 6 AHP 层次分析判断矩阵

Table 6 Judgment matrix of Analytic Hierarchy Process

矩阵	$T_{TR}$	$T_{max}$	$U_b$	$V_{稳}$	$c_{可燃}$	权重值
$T_{TR}$	1	0.4	0.545	0.75	0.462	0.1134
$T_{max}$	2.5	1	1.364	1.875	1.154	0.283 0
$U_b$	1.833	0.733	1	1.375	0.846	0.207 5
$V_{稳}$	1.333	0.533	0.727	1	0.615	0.150 9
$c_{可燃}$	2.167	0.867	1.182	1.625	1	0.245 2

式中  $n$  为特征参数数量; $p_{ij}$ 为表 6 第  $i$  行第  $j$  列

指标比例; $p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}$ 。

确定第  $j$  项指标的权重  $w_j$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (4)$$

式中  $w_j$  为第  $j$  个热失控特征参数的权重; $d_j$  为信息效用价值, $d_j = 1 - E_j$ 。

依据以上方法,计算得到各工况下各热失控特征参数的信息熵和权重分别见表 7。

表 7 熵权法计算权重结果

Table 7 Weighting results from the entropy method

参数	信息熵值 $E$	信息效用值 $d$	权重值 $w$
$T_{TR}$	0.849	0.151	0.165
$T_{max}$	0.812	0.188	0.205
$U_b$	0.861	0.139	0.152
$V_{稳}$	0.846	0.154	0.168
$c_{可燃}$	0.715	0.285	0.311

本研究对于 AHP 法和熵权法无偏好性,特征参数的理论认知与统计特性同等重要,因此将 2 种方法得出的权重求平均值得到综合权重,见表 8。

表 8 热失控特征参数综合权重

Table 8 Comprehensive weights for characteristic parameters of thermal runaway

计算结果	$T_{TR}$	$T_{max}$	$U_b$	$V_{稳}$	$c_{可燃}$
综合权重值	0.139 2	0.244 0	0.179 8	0.159 5	0.278 1

运用综合权重,计算电池热失控危险指数  $S$ ,见下式

$$S = 0.139 2 T_{TR}' + 0.244 0 T_{max}' + 0.179 8 U_b' + 0.159 5 V_{稳}' + 0.278 7 c_{可燃}' \quad (5)$$

式中  $T_{max}'$ ,  $T_{TR}'$ ,  $U_b'$ ,  $V_{稳}'$ ,  $c_{可燃}'$  分别为各参数标准化数值。代入数据计算,得到 3 组过充电流下 2 种电池的热失控危险性评估指数,见表 9。

表9 危险性评估指数结果

Table 9 Results of the hazard assessment index

计算结果	117 Ah			153 Ah		
	30 A	45 A	60 A	30 A	45 A	60 A
S	0.139 2	0.434 4	0.785 6	0.753 2	0.611 1	0.657 3

危险性指数从大到小排序为 60 A-117 Ah、30 A-153 Ah、60 A-153 Ah、45 A-153 Ah、45 A-117 Ah、30 A-117 Ah。危险指数 S 的排序结果与试验测量到的热失控严重程度高度吻合:过充电流增大显著提升了 117 Ah 电池的热失控危险程度,其在低电流下相对安全,但高电流时危险性激增;153 Ah 电池的危险性并不随电流单调递增,其在 30 A 最小电流下反而呈现出最高危险指数,该工况下最高的产气量与峰值温度是支撑此排序的直接证据,验证了基于多参数融合评估体系的有效性。这一发现归因于更大容量电池拥有更复杂的热失控特性,对于 153 Ah 电池,更大卷芯结构导致其热阻增加与中心区域散热困难,在 30 A 低电流过充时电池经历了更长的热积累过程,使得内部副反应得以充分进行,能量持续积聚。一旦达到热失控临界点,所积累的巨大化学能便会以更剧烈的方式集中释放。表明容量是影响电池过充热失控特性的关键因素之一,容量提升会降低电池的安全电流阈值,传统上主要依据电流大小的风险评估方法,低估了大容量电池在低电流过充下的潜在危害。

### 3 结论

1)在不同过充电流下,117 Ah 与 153 Ah 三元锂电池的热失控过程均呈现阶段性变化,但泄压行为存在显著差异,153 Ah 电池壳体直接破裂,未经历开阀过程。电压变化呈现 3 个典型拐点,其异常信号较温度信号更早出现,监测电压变化可为热失控早期预警提供关键依据。

2)2 种电池热失控触发时间均随过充电流增加而缩短,同时 117 Ah 电池热失控峰值温度、峰值电压、热失控产气量、可燃气体含量与过充电流大小呈明显正相关;153 Ah 电池仅峰值电压与过充电流大小呈正相关,热失控峰值温度、产气量与过充电流大小呈负相关。 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_4$  为大容量三元锂电池热失控后主要气体成分。

3)通过 AHP-熵权法联合评估体系明确了 117 Ah 电池危险性随过充电流增大而显著增大,

153 Ah 电池则在小电流过充条件下表现出更高的危险性,表明了容量提升会降低电池的安全电流阈值,为建立基于电流和电池容量的差异化安全标准和预警体系提供了理论依据。

### 参考文献(References):

- [1] HONG J, WANG Z, ZHANG X, et al. Collision-Caused thermal runaway investigation of Li-ion battery in Real-World electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121901.
- [2] 黄梦涛,胡礼芳,张齐波.基于 SQKF 的锂离子电池剩余寿命预测[J].西安科技大学学报,2022,42(5):994-1002.  
HUANG Mengtao, HU Lifang, ZHANG Qibo. Square-root quadrature Kalman filtering for remaining useful life prediction in lithium-ion battery[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(5): 994-1002.
- [3] LIU J, WANG Z, BAI J. Influences of multi factors on thermal runaway induced by overcharging of lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 70: 531-541.
- [4] 张熾妮,张帅,刘学,等.热表面作用下锂电池电解液着火特性研究[J].西安科技大学学报,2025,45(3):461-470.  
ZHANG Yanni, ZHANG Shuai, LIU Xue, et al. Characterization of lithium battery electrolyte ignition under hot surface action[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(3): 461-470.
- [5] SONG L, ZHENG Y, XIAO Z, et al. Review on thermal runaway of lithium-ion batteries for electric vehicles[J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 51(1): 30-46.
- [6] 张新新,岑官骏,乔荣涵,等.锂电池百篇论文点评(2025-06-01—2025-07-31)[J].储能科学与技术,2025,14(9):3229-3248.  
ZHANG Xinxin, CEN Guanjun, QIAO Ronghan, et al. Reviews of selected 100 recent papers for lithium batteries(June 1, 2025 to July 31, 2025)[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3229-3248.
- [7] 何雨潇,毕山松,张向军,等.三元锂离子电池热失控产气过程研究[J].稀有金属,2025,49(8):1190-1199.  
HE Yuxiao, BI Shansong, ZHANG Xiangjun, et al. Thermal runaway gas production of ternary lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2025, 49(8): 1190-1199.

- [8] 尤明伟,蒋锦辉,张宏. 4830 型三元锂离子电池热失控及灭火试验研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(10):3735-3742.  
YOU Mingwei, JIANG Jinhui, ZHANG Hong. Study on thermal runaway and fire extinguishing test of the 4830 ternary lithium-ion battery [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(10):3735-3742.
- [9] MEI W, CHENG Z, WANG L, et al. Thermal hazard comparison and assessment of Li-ion battery and Na-ion battery [J]. Journal of Energy Chemistry, 2025, 102: 18-26.
- [10] CAO X, DU J, QU C, et al. An early diagnosis method for overcharging thermal runaway of energy storage lithium batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 75: 109661.
- [11] LI H, DUAN Q, ZHAO C, et al. Experimental investigation on the thermal runaway and its propagation in the large format battery module with  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$  as cathode [J]. Journal of hazardous materials, 2019, 375:241-254.
- [12] QI C, LIU Z, LIN C, et al. Study on the thermal runaway characteristics and debris of lithium-ion batteries under overheating, overcharge, and extrusion [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72:108821.
- [13] 刘纪坤,段鑫濛,袁雪颖,等. 微过充三元锂电池热失控火灾安全特性研究[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(6):1158-1167.  
LIU Jikun, DUAN Xinmeng, YUAN Xueying, et al. Thermal runaway fire characteristics of slight-overcharged ternary lithium-ion batteries [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(6):1158-1167.
- [14] ZHANG Q, YANG K, NIU J, et al. Research on the lower explosion limit of thermal runaway gas in lithium batteries under high-temperature and slight overcharge conditions [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 79:109976.
- [15] XIE S, GONG Y, PING X, et al. Effect of overcharge on the electrochemical and thermal safety behaviors of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2/\text{graphite}$  lithium-ion batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 46:103829.
- [16] WANG K, WU D, CHANG C, et al. Charging rate effect on overcharge-induced thermal runaway characteristics and gas venting behaviors for commercial lithium iron phosphate batteries [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 434:139992.
- [17] 唐佳,于子轩,李雨珮,等. 磷酸铁锂储能电池过充热失控的多参量特性分析及热失控抑制技术研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(10):4724-4733.  
TANG Jia, YU Zixuan, LI Yupei, et al. Overcharge thermal runaway multi-parameter characteristics and thermal runaway suppression technology of lithium iron phosphate energy storage battery [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10):4724-4733.
- [18] JIANG L, LUO Z, WU T, et al. Overcharge behavior and early warning analysis of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2/\text{C}$  lithium-ion battery with high capacity [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2019, 166(6):A1055.
- [19] 陆豪宇,沈文锋,吕大伍,等. 锂电池热失控安全防护研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(14):5-23.  
LU Haoyu, SHEN Wenfeng, LV Dawu, et al. Research progress on safety strategies for thermal runaway in lithium-ion batteries [J]. Materials Reports, 2025, 39(14): 5-23.
- [20] LIU P, SUN H, QIAO Y, et al. Experimental study on the thermal runaway and fire behavior of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  battery in open and confined spaces [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158:711-726.
- [21] LI R R, LIU Z, ZHENG S, et al. Trifunctional composite thermal barrier mitigates the thermal runaway propagation of large-format prismatic lithium-ion batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73:109178.
- [22] 祝鑫彤,曹斌,闫崇,等. 锂离子电池石墨负极包覆研究进展[J]. 物理化学学报, 2025, 41(9):30-44.  
ZHU Xintong, CAO Bin, YAN Chong, et al. Advances in coating strategies for graphite anodes in lithium-ion batteries [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2025, 41(9): 30-44.
- [23] 赵应华,陈安碧,张增誉,等. 基于多模态深度学习的充电硐室锂电池健康状态预测[J]. 工矿自动化, 2025, 51(5):120-128.  
ZHAO Yinghua, CHEN Anbi, ZHANG Zengyu, et al. State of health prediction of lithium-ion batteries in charging chambers based on multi-modal deep learning [J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(5):120-128.
- [24] 李哲,樊亚敏. 优化的采样点卡尔曼滤波算法的剩余电量估计[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(10):1098-1103.  
LI Zhe, FAN Yamin. Sample point Kalman filter algorithm based on optimization estimate SOC [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(10):1098-1103.
- [25] REN D, FENG X, LU L, et al. Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions [J]. Applied Energy, 2019, 250:323

- 332.
- [26] 刘洋恺,孙伟卿,刘唯. 基于 AHP 和 TOPSIS-模糊综合评价的多场景储能选型方法[J]. 储能科学与技术,2024,13(2):691-701.  
LIU Yangkai,SUN Weiqin,LIU Wei. Multiscenario energy storage selection method based on AHP and TOPSIS-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Energy Storage Science and Technology,2024,13(2):691-701.
- [27] 贺佳伟,邵垒,杨文举,等. 基于多指标评估云模型的车载动力锂电池火灾风险研究[J]. 科学技术与工程,2023,23(20):8901-8906.  
HE Jiawei,SHAO Lei,YANG Wenju,et al. Fire safety of vehicle power lithium battery based on multi-index assessment cloud model[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(20):8901-8906.
- [28] 张宇,白伟,史砚磊,等. 基于热失控风险指数的锂电池安全评价方法[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(5):912-918.  
ZHANG Yu,BAI Wei,SHI Yanlei,et al. Evaluation method of lithium battery safety based on thermal runaway risk index[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2021,47(5):912-918.
- [29] FENG X,ZHENG S,REN D,et al. Key characteristics for thermal runaway of Li-ion batteries[J]. Energy Procedia,2019,158:4684-4689.
- [30] WANG Z,YUAN J,ZHU X,et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials:A comparison study[J]. Journal of Energy Chemistry,2021,55:484-498.

(责任编辑:刘洁)