

动力电池热失控触发方法研究

一、研究背景及概述

随着新能源汽车在中国的迅猛增长，半固态甚至全固态电池作为新一代锂离子电池的使用也日益普及。半固态电池目前已有商业化应用，未来有着巨大的消费市场。但同时，半固态电池的安全性也成为制约其发展的关键因素。由于半固态电池的物化性质相对传统液态锂离子电池不同，如何判断其安全性能，获得具有适用性的动力电池的热失控评价技术，是行业当前亟需解决的难题。

本研究采用传统液态锂离子电池和半固态锂电池作为研究对象，综合对比国内外最新标准中热失控技术，并完成国内外热失控触发技术研究 with 新一代动力电池热失控触发验证，为国家标准的修订提供初步方案和支撑数据。

二、研究内容

（一）前期准备

本课题对 8 项安全标准（GB 38031—2020、GB 38032—2020、GB/T 36276—2018、IEC 62619:2022、SAE J2464-2009、UL 2580:2020、UL 9540A:2019、JIS C 8714:2017）中涉及的热失控触发方式和判定方法进行深入对比研究，并尝试提炼出具有普适性的动力电池热失控触发方法。接着，我们会将这一热失控触发方法运用到液态锂离子电池与半固态电池的单体测试中。这两种电池虽然在正负极成分上相同，但在电解质上存在差异：液态锂离子电池完全由液体电

解质组成，而半固态电池的电解质则包括 90%的固体和 10%的液体。除了电解质，两者其他参数均一致。

在试验开始前，本文将液态锂离子电池和半固态电池两个电池单体进行预处理，预处理制度为 1C 恒流充电至截止电压，随后恒压充电至两单体的 SOC 达到 90%以上。对于加热触发热失控试验，本文使用平面状加热装置，其表面与电池表面直接接触，加热装置面积大小与电池的表面积相当。加热装置的最大功率为 300 W。对于过充导致的热失控，本文将电池单体以 1C 恒流方式充电至热失控或者充电时间达到 1h 时停止。热失控判定标准：①触发对象产生电压降；②监测点温度达到制造商规定的最高工作温度；③监测点的温升速率 $\geq 2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，且持续 3s 以上。当①和③或者②和③发生时，判定发生热失控。条件②中锂电池的最高工作温度为 60°C 。

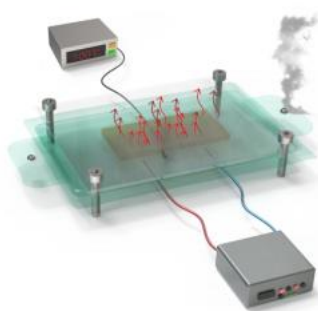


图 1 电池加热触发时温度传感器的布置位置示意图

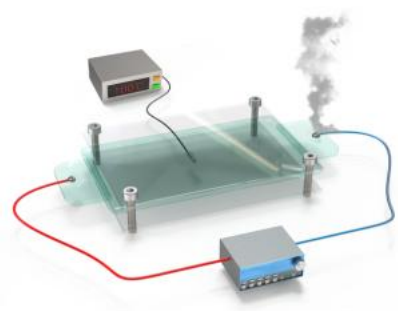


图 2 电池过充触发时温度传感器的布置位置示意图

（二）试验结果与讨论

2.1 标准比较

下表将 8 项标准关于热失控触发的方式进行了罗列。加热触发在全部的标准中都有涉及，说明外部加热最容易导致

发生热失控；其次，有 6 条标准提到关于过充导致热失控的方法。这两者是常见导致电池热失控的原因。相对而言，只有 5 条标准涉及针刺触发方法。其他方式中，IEC 62619: 2022 标准使用激光触发法来加热电池，测试电池系统热失控性能，目的可能是为了在加热过程中确保加热位置更为精准，不影响周围的其他电芯。

表 1 各标准采用的热失控触发方法列表

标准号	加热	过充	针刺	其他方法
GB 38031—2020	√	×	√	×
GB 38032—2020	√	×	×	×
GB/T 36276—2018	√	√	×	×
IEC 62619:2022	√	√	√	推荐使用激光触发
SAE J2464-2009	√	√	×	可涉及过充
UL 2580:2020	√	√	√	1) 内部短路 2) 内部加热 3) 挤压 4) 电芯短路
UL 9540A:2019	√	√	√	1) 外部短路 2) 过放电
JIS C 8714:2017	√	√	√	1) 挤压导致内部短路 2) 外部短路 3) 过充

下表为列明的 8 项标准中具体的加热和过充触发方式，可以看出，三个国家的标准对于加热方式的规定基本一致，都对加热面积、加热装置、加热功率以及加热温度有一定的要求。其中 GB 38031—2020 和 GB 38032—2020 都对加热片的表面材质有一定要求；GB/T 36276 的征求意见稿中有加热时间的要求，要求加热 4h。国外对于加热方式的要求参差不齐，其中 IEC 62619: 2022、UL 2580: 2020 和 UL9540A: 2019 都没有加热温度上限的要求。对于加热功率，GB

38031—2020、GB 38032—2020 和 GB/T36276 都有着明确统一的数值要求，国外则对温升速率没有统一明确的要求。

表 2 各标准加热和过充触发热失控方式

标准号	加热	过充
GB 38031—2020	1) 加热片表面覆盖陶瓷、金属或者绝缘层; 2) 加热面积不大于电池单体的表面积; 3) 加热装置背面安装温度传感器, 尖端<1 mm; 4) 以最大功率进行加热, 最大功率依据触发对象电能而定; 5) 触发热失控后或者监控温度超过 300 °C, 停止试验。	/
GB 38032—2020	同 GB 38031—2020	/
GB/T 36276—2018	1) 加热面积不大于电池单体的表面积; 2) 加热装置背面安装温度传感器。尖端<1 mm; 3) 以最大功率进行加热, 最大功率依据触发对象电能而定; 4) 触发热失控后或者监控温度超过 300 °C, 停止试验。	电池单体以恒流方式充电至电压达到电池单体充电终止电压的 1.5 倍或时间达到 1 h 时停止
IEC 62619:2022	1) 加热片、燃烧器、电感加热触发; 2) 电池出现骤然升温。	采用厂商推荐的方式
SAE J2464-2009	1) 样品温度稳定在 55 °C 或者最高使用温度; 2) 缓慢均匀将样品加热到 400 °C 或者出现热失控。	无具体方式
UL 2580:2020	外部加热片不能直接影响非触发电芯, 直到目标电芯失控后关闭电热装置。	1) 从最高电压开始进行充电, 然后每增加 1 V 保持 1 min, 直到电池失控; 2) 充电倍率应该在最大额定倍率的 1.1 倍。
UL 9540A:2019	采用外部加热片, 以 4~7 °C/min 持续加热。	使用制造商规定的最大充电倍率进行充电, 直到样品出现热失控。
JIS C 8714:2017	烘箱以 5 °C/min ± 2 °C/min 的速率升高至 130 °C ± 2 °C 温度。在测试停止之前, 电池在此温度下保持 10 min。	通过使用上限充电电压和最大充电电流对电池进行充电, 直到使用恒压充电控制时充电电流降至 0.05 I_t A。

表 3 触发电能与加热装置对照表

触发对象电能 E/Wh	加热装置最大功率/ W
$E < 100$	30 ~ 300
$100 \leq E < 400$	300 ~ 1000
$400 \leq E < 800$	300 ~ 2000
$E \geq 800$	> 600

对于过充触发方式，GB 38031—2020 和 GB 38032—2020 没有涉及相关信息；而 GB/T 36276—2018 则是以 1C 恒定电流过充的方式，将电池充电至单体电池电压的 1.5 倍或充电时间达到 1 小时。国外标准在这方面也不统一。IEC 62619: 2022 和 SAE J2464-2009 只是提及过充可以作为热失控触发的手段，但是并没有列举具体的方法；UL 2580: 2020、UL 9540A: 2019 和 JIS C 8714: 2017 则是列举了具体的过充方式，基本上都是采用增大电压和电流的方式。

下表为热失控的判定条件，其中 GB 38031—2020 和 GB 38032—2020 的判定条件基本相似，都是电压降低 25%、温升速率超过每秒 1°C 和温度超过工作温度。只是对于热扩散的定义稍有不同，GB 38031—2020 强调时间上能够及时反应，而 GB 38032—2020 更强调起火与爆炸。在 GB/T 36276—2018 中，则是对于电压的要求标准比较严格，只要有电压下降，就可以成为热失控判定的依据之一。在 GB/T 36276—2018 的征求意见稿中还强调了失控温度不小于 90°C 。国外标准中，IEC 62619: 2022、SAE J2464-2009、UL 2580: 2020、UL 9540A: 2019 四项标准对于热失控判定条件均是电池出现极速的温度升高，但没有给出具体的数据指标。而对于热扩散的判定则是以不起火不爆炸为主要依据，SAE J2464-2009 和 UL 9540A: 2019 甚至对热扩散都

没有给出判定标准。

表 4 各标准热失控判定条件和判定要求

标准号	热失控判定条件	热失控/热扩散判定
GB 38031—2020	1)触发对象产生电压降,且下降值超过初始电压的 25%;	热失控触发后 5 min 内,提供热事件信号。
GB 38032—2020	2)监测点温度达到制造商规定的最高工作温度; 3)温升速率 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 持续 3 s 以上。 当 1)、3)或者 2)、3)发生时,判定出现热失控。	加热过程及加热结束 1 h 内,如果发生起火爆炸现象,则试验终止。
GB/T 36276—2018	1)触发对象产生电压下降; 2)监测点温度达到制造商规定的最高工作温度; 3)温升速率 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。 当 1)、3)或者 2)、3)发生时,判定出现热失控。	在试验和观察的过程中,电池不起火不爆炸,模组不应出现热蔓延。
IEC 62619:2022	触发样品温度速率极速升高 无法控制	不起火、无外壳破裂(因触发电芯引起的不计算在内)
SAE J2464-2009		/
UL 2580:2020		不起火不爆炸
UL 9540A:2019		/
JIS C 8714:2017		不起火,不爆炸

2.2 标准总结

结合国内外标准可以发现,国内对于加热触发和过充触发热失控都明确规定了试验方法,而国外的方式则较为笼统,缺少明确的数值要求。对于热失控标准,国内也对其进行了详细描述,例如电压、温度等具体数值,而国外标准内容为“温度无法控制”,人为因素对测试结果影响较大。并且上述标准都是面向液态电池制定的,对于半固态电池则欠缺较好的评价适用性。本文结合国内外标准内容,提出热失控触发方法和判定条件,以更好地应用在半固态电池,乃至固态电池上。

表 5 根据国内外标准拟定单体电池安全方法结果

项目	具体内容
加热	1) 加热片表面覆盖陶瓷、金属或者绝缘层;
	2) 加热面积不大于电池单体的表面积;
	3) 加热装置背面安装温度传感器, 尖端 $< 1\text{ mm}$;
	4) 以最大功率进行加热, 最大功率依据触发对象电能而定;
	5) 触发热失控后或者监控温度超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 停止加热。
过充	以恒流方式充电至电压达到电池单体充电终止电压的 1.5 倍或时间达到 1 h 时停止。
热失控判定条件	1) 触发对象产生电压下降;
	2) 监测点温度达到制造商规定的最高工作温度;
	3) 温升速率 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 持续 3 s 以上。当 1、3 或者 2、3 发生时, 判定出现热失控。

2.3 应用验证

根据本文拟定的新的热失控判定方法, 对液态电池和半固态电池进行热失控触发测试。结果如表 6 以及图 3、图 4 所示。所有测试结果均基于表 5 中“热失控判定条件”的 1) 和 2) 项的条件来做出判断。

对于加热热失控, 在图 3 中可以看到相较于液态锂离子电池, 半固态电池升温速度更快, 并在 978s 发生了热失控, 此时温升速率 $\geq 1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; 虽然在 949s 时, 温升速率达到 $2.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 但只持续了 1s; 整个试验过程中再也没有温升速率 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。失控时温度为 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时电压开始迅速下降, 电池温度大于其最高工作温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此判定为热失控。液体电池也是同样的标准判定, 热失控时间为 1346s, 电压开始下降, 温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 在 1352s 达到持续 3s 温升速率 $\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的判定标准, 此时温度为 $318\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但在此之前已经发生热失控。虽然半固态电池先于液态锂离子电池发生热失控, 但热失控后,

其最高温度仅有 184°C ，远低于液态锂离子电池热失控后的最高温度 428°C ，这为之后阻止电池系统的热扩散带来较好的性能依据。无论是半固态电池还是液态锂离子电池，其电压下降都在达到最高温度前，说明在达到最高温度前，电池内部隔膜破裂，发生内部短路，电压急剧下降。同时内部短路带来了巨大的热释放，导致温度快速上升。因此，将电压下降作为判定热失控的条件是可行的。虽然半固态电池的热失控温度达到了 165°C ，比同一标准下的液态锂离子电池热失控温度要高，但半固态电池热失控后的最高温度相比于液态锂离子电池要低得多，且未发生起火与爆炸。在该温度下判定热失控，依然是有效和可靠的。

对于过充热失控，图 4 显示液态锂离子电池升温较快，在 262s 达到热失控，热失控时温度为 67°C 。在热失控后温度迅速上升达 288°C ，时间为 380s。温升速率 $\geq 2^{\circ}\text{C/s}$ 且持续 3s 的时间为 318s。电压则是在 262s 达到最大值 21.7V，随后由于内部短路，电压迅速下降。半固态电池的表现则比液态锂离子电池更为优异。半固态电池在 631s 时发生热失控，失控时温度为仅为 60°C 。热失控后，半固态电池温度迅速上升，在 684s 达到最高温度 159°C ，相比于液态锂离子电池，最高温度大大降低，温升速率 $\geq 2^{\circ}\text{C/s}$ 且持续 3s 的时间则是 663s。并且半固态电池能够达到更大的电压，在 631s 达到最大电压 48V。在整个过程中，半固态电池没有发生起火爆炸，且判定热失控温度仅为 60°C ，新拟定的方法能够较好地判定电池的热失控情况。

从测试结果来看，不论是通过加热还是过度充电，新制定的方法都能准确地判定热失控现象，并能有效区分液态锂离子电池与半固态电池。这为后续国家标准的修订提供了有力的数据依据。

表 6 半固态与液态锂离子电池测试过程中的时间温度数据

触发热失控方式	加热		过充	
电池类型	半固态	液态	半固态	液态
热失控温度/ °C	165	70	60	67
(时间/s)	(978)	(1346)	(631)	(262)
最高温度/ °C	184	428	159	288
(时间/s)	(1178)	(1380)	(684)	(380)
电压下降时间/s	978	1346	631	262
持续 3 s $dT/dt \geq 2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的温度/ °C	/	318	81.8	131.3
(时间 s)		(1352)	(663)	(318)

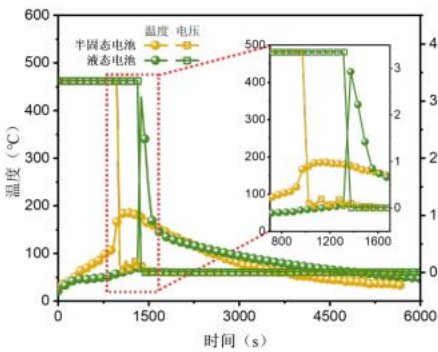


图 3 两种软包电池加热触发热失控时时间-温度-电压关系图

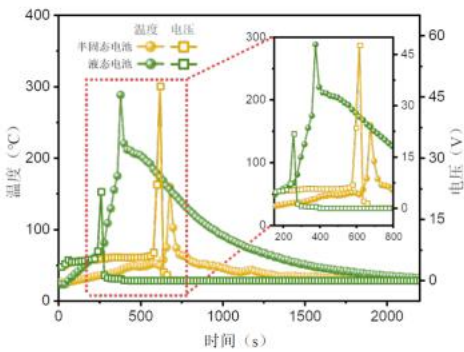


图 4 两种软包电池过充触发热失控时时间-温度-电压关系图

本部分内容节选自该课题研究报告，非全部内容，仅供参考了解。