

车载动力电池系统热失控 分析与研究

胡晓雄

孚能科技（镇江）有限公司 江苏镇江 212000

摘要：电动汽车使用车载动力电池系统热失控方面的安全性关系重大，为解决车载动力电池系统热失控问题，对车载动力电池系统热失控进行了试验分析与研究。通过对比设计的防止热失控的方案，得出了一种比较优异的试验方案，能够通过较为严苛的UL2271标准，该方案一定程度上可以增强车载动力电池系统使用的安全性和稳定性，为车载动力电池系统实现无热失控，无热扩散，无明火设计方面提供了重要的设计参考依据。

关键词：热失控；动力电池系统；热扩散；无明火；电动汽车

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.11.009

车载动力电池系统是一种能够独立提供动力源的产品^[1~3]，车载动力电池系统作为电动汽车的核心零部件，其安全性和可靠性显得至关重要^[4~7]。热失控是动力电池系统不可忽视的问题，其原理是个别电芯发生故障产生热扩散，从而导致整个动力电池系统发生热失控，超过安全温度，最终导致起火、爆炸现场的发生^[8]。

为了更好地保证动力电池系统的安全性，特别是发生热失控时候能够有效降低热蔓延，设计了一套热失控试验方案。通过对比改善前后的试验方案，得出了一种能够有效防止车载动力电池系统发生热失控的方案，为车载动力电池系统实现无热失控，无热扩散，无明火设计方面提供了重要的设计参考依据。

搭建试验模型

1.触发位点选择

如图1所示，选取二层支架下层远离防爆阀M6模组

作为触发模组；Cell 7做为触发电芯，将原本的PU泡棉改为2mm的气凝胶，cell 7和气凝胶之间放置加热片。

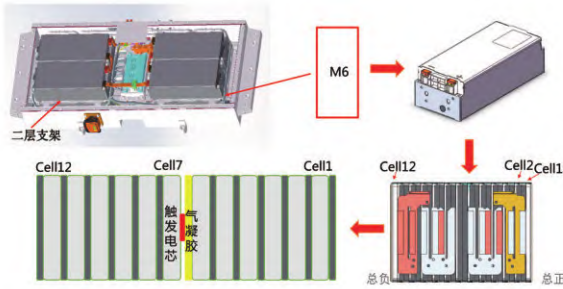


图1 热失控触发位

2.加热位点和加热片选型

如图2所示，加热片放置于电芯中心，加热片选型见表1。

3.温度采集点布置

电芯温度采集点布置如图3所示。T1采集的是Cell 1

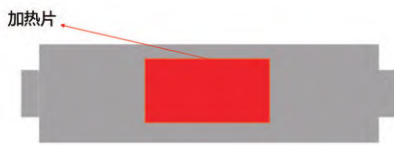


图2 加热片位置

表1 加热片参数

尺寸/mm × mm	功率/W	功率密度/(W/cm ²)
60 × 60	300	8

温度, T2采集的是Cell 5温度, T3采集的是Cell 6温度, T4采集的是加热片温度, T5采集的是触发电芯Cell 1背面温度; T6采集的是Cell 8温度, T7采集的是Cell 9温度, T8采集的是Cell 12温度, T9采集的是触发模组M6端板外侧温度, T10采集的是触发模组M6靠近邻近模组M5大面中心温度, T11采集的是靠近M6邻近模组M5外壁大面中心温度, T12采集的是触发模组上层模组M1温度, T13采集的是邻近模组上层模组M2温度, T14采集的是防爆阀温度。

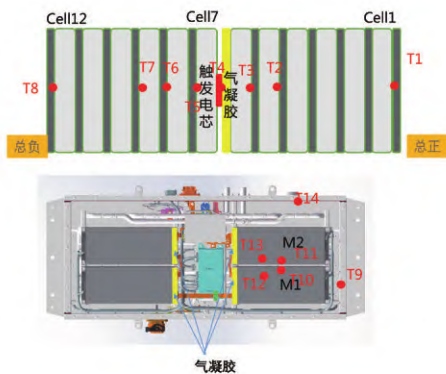


图3 温度采集点布置

4.电压采集点布置

电压采集布置如图4所示:

- 1) 模组外部采集触发模组M6、邻近模组M5电压。
- 2) 采集M6和M5的电压 V_{m6} 和 V_{m5} 。
- 3) 模组外部上左右三个方向粘贴2mm厚度哥斯拉防火材料。

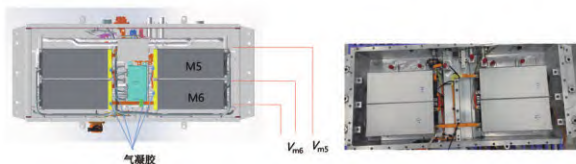


图4 电压采集布置

5.热失控触发条件

(1) 测试环境 将待测样品放置恒温设备内均温至45~55℃ (测试要求温度)。

(2) 触发方式 加热触发热失控, 加热片功率采用300W。

(3) 样品电量 补电至100%SOC。

(4) 触发判断 ①当发生触发电芯电压下降到2.5V以下; ②触发电芯背温温升速率达到1℃/s, 且持续3s; ③防爆阀温度前后温差>20℃, 当满足①②或①③时, 立即切断电源, 停止加热。

(5) 液冷状况 测试前液冷板蓄满水, 通过液冷调整电池包温度45~55℃。

(6) 数据采集 视频监控和数采监控, 两者时间一致, 视频记录不少于两个角度, 数采记录间隔不大于1s。视频和数据记录24h, 因数据量大, 建议采用以下方式: 触发失控时记录1h数据, 失控后12h再记录1h数据, 失控后24h再记录0.5h数据。

(7) BMS通信 加入热失控报警策略, 热失控测试时开启BMS通讯记录数据;

(8) 其他事项 当发生大规模燃烧、爆炸、电弧现象, 需要立即沉水处理;

(9) 判定通过标准 满足标准UL2271发生热失控1h无明火。

试验过程与研究分析

1.热失控时间轴

热失控试验过程如图5所示。

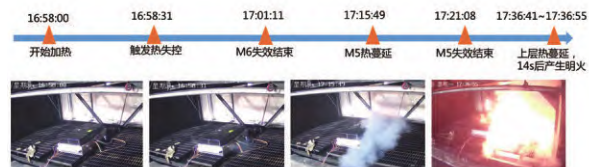


图5 热失控试验过程

2.视频时间分析

从图5所示分析可知:

- 1) 加热片加热31s模组发生热失控, 防爆阀喷出明火时间为38min24s。
- 2) 触发模组M6失效时长为2min40s, M6失效结束14min18s后M5发生热蔓延。

- 3) 邻近模组M5失效时间为5min19s，M5失效结束15min33s后上层模组发生热蔓延。
- 4) 上层模组38min10s时发生热蔓延伴随着多个电芯同时失效产生强烈气流且伴随大量火星，约14s后防爆阀喷火。
- 5) 未满足1h无明火要求。

根据触发模组M6热失控结果（见图6）和热失控温感变化时间（见表3），触发模组数据分析如下：

- 1) 触发模组M6从温度看失效时间为：2min40s。
- 2) 2mm气凝胶隔热时间T4~T3为74s。
- 3) 左侧T3~T1蔓延时间为115s，右侧T5~T8蔓延时间为105s。

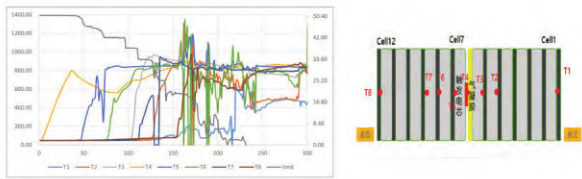


图6 触发模组M6热失控

表3 热失控温感变化时间 (单位: s)

温感	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
电芯	1S	5S	6S	触发电芯7S	7S	8S	9S	12S
时间点	220	129	105	31	50	79	115	155

模组M6-模组M5表面温度变化如图7所示，触发模组-邻近模组外部温度：触发模组M6外侧温度T10始终保持在500℃之上，始终对邻近模组M5进行热传导。

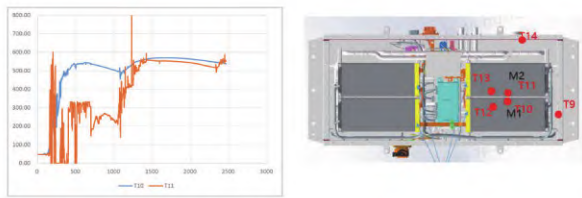


图7 模组M6-模组M5表面温度变化

模组M5电压变化如图8所示，邻近模组数据分析：邻近模组M5电压有规律的掉落，云母片对电芯间热蔓延有一定防护作用。

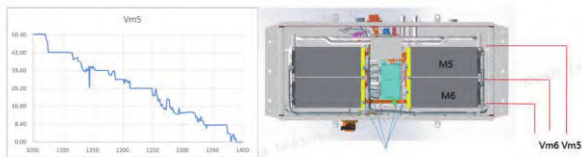


图8 模组M5电压

上层模组温度变化如图9所示：

- 1) T12为触发模组上层模组表面温度，在很长时间内一直在慢慢升温，在2383s时间点突然陡升，说明此时该上层模组发生热蔓延。
- 2) 上册模组失效原因：①基于触发模组端板排气，且主要通过端板上半部分塑料件区域排气，其排气方向会对二层之间造成直接冲击；②触发模组M6和邻近模组M5失效后温度长时间处于600~800℃，二层之间和上层模组始终处于烘烤状态；③液冷不进行循环，液冷板内的水会被快速加热到一定温度，起不到散热作用。
- 3) 最终：触发模组→传热→二层支架→导热→二层模组，二层模组底部快速升温发生热失控。

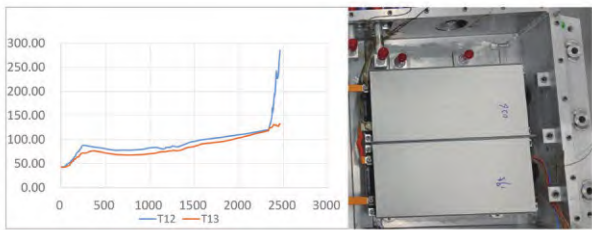


图9 上层模组温度

热失控模组状态如图10所示，触发模组分析：

- 1) 触发模组M6外壳保存完好。
- 2) 邻近模组M5靠近防爆阀边出现模组上封边和侧封边撕裂（椭圆形区域）。
- 3) 触发模组M6通过膨胀与邻近模组紧挨着，处于较高温度的M6通过导热方式对M5进行传热，导致M5发生热失控（矩形区域）。

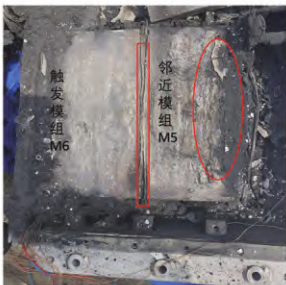


图10 热失控模组状态

上层模组状态如图11所示，上层模组分析：

- 1) 触发模组的喷发方向为箭头①，主要喷到边梁和上层支架上。
- 2) 图二圆圈位置二层支架和上层模组铝端板通过螺栓紧密相连，会导致支架温度快速传递至上层模组铝

端板（②箭头方向）。

3) 模组端板上方为塑料区域，为热失控后的喷发位置。



图11 上层模组状态

3.试验结果分析及改善方案

(1) 试验结果分析。

1) 模组表面粘贴2mm的哥斯拉，不足以防止模组间热蔓延，需更换更佳隔热材料；

2) 基于模组的喷发位置在模组端板的上半部分，底层触发模组热失控后喷发的气流会对二层支架造成直接冲击和加热，且二层之间和上层模组的铝端板由螺栓紧密连接，间接导致触发模组失效喷发的热量快速传递至上层模组端板和底部。

(2) 改善方案。

1) 堵和疏原则：基于液冷不能循环、不能疏散热量，只能通过增强隔热来堵以增加隔热时间（从试验的38min增加至1h）。

2) 针对第一点：模组外部两个面2mm厚度哥斯拉更替为2mm厚度气凝胶（图12箭头所示）；相邻模组之间的双层2mm厚度哥斯拉更替为2mm厚度的气凝胶，以增强模组间隔热防护（见图12中方框标识所在位置）。

3) 如图13所示，方框标识的地方为二层支架热失控冲击区域。该区域的底部粘贴2mm厚度的哥斯拉（或2mm厚度云母+气凝胶组合件），以防护底层模组失效对二层支架的冲击传热，间接防护二层模组发生热蔓延。

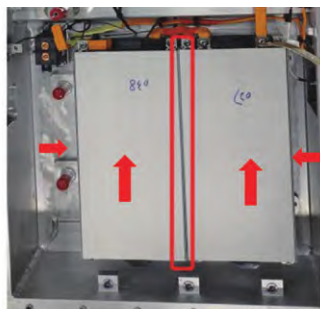


图12 模组防护

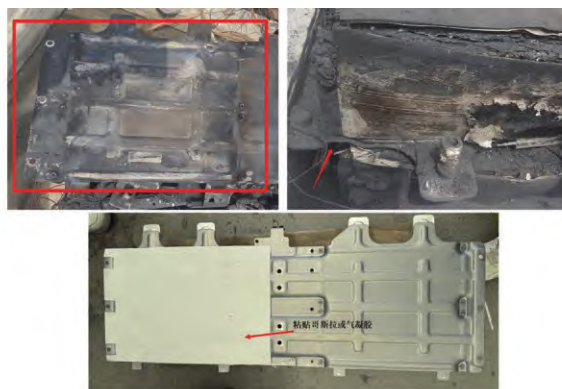


图13 二层支架防护

(3) 视频时间分析 从改善后热失控试验过程（见图14）分析可知：

1) 加热片加热31s模组发生热失控，两个模组失效，实现1h无明火。

2) 触发模组M6失效时长为3min27s，M6失效结束41min25s后M5发生热蔓延。

3) 邻近模组M5失效时间为3min28s，上层模组未发生蔓延。

4) 相邻模组之间的双层2mm气凝胶材料隔热时间41min25s，无法满足横向相邻模组间热蔓延需求。

5) 模组上层2mm厚度的气凝胶材料和二层支架底部2mm厚度的哥斯拉材料可以防止上下层模组间热蔓延。



图14 改善后热失控试验过程

结语

本文对车载动力电池系统热失控试验方案进行了设计与研究。通过对改善前后的试验方案进行对比，从而获得了一种防止热失控发生的较佳方案，该方案可以通过严苛的UL2271标准，为车载动力电池系统实现无热蔓延，无热失控方面提供了重要的参考依据，可以在一定程度上保障了车载动力电池系统使用的安全性和可靠性，为实现车载动力电池实现无热扩散设计方面提供一定的参考价值意义。

（下转第58页）

度几乎呈线性关系，硬度低则疲劳强度下降。

结论：焊接时焊渣溅落点造成销轴表面组织转变硬度下降，形成局部软点，疲劳开裂源在此形成；销轴热处理组织异常、基体硬度低导致疲劳强度降低，两方面原因造成销轴早期断裂失效。

改进措施

疲劳起源于焊渣溅落处，因此焊接过程对销轴表面做防护措施，避免焊渣溅落到销轴表面造成表面软点。另一方面，45钢是中碳结构钢，冷热加工性能都不错，机械性能较好，但它的最大弱点是淬透性低，货车减振销轴断裂处直径达20mm，使用45钢，做调质处理，零件硬度无法达到设计要求。

对比40Cr与45钢淬透性（见表3），直径20mm的零件，用40Cr做调质处理，其硬度、金相完全可以满足设计要求。因销轴需要与其他零件做焊接处理，需考虑材料焊接性能，材料碳当量越高，焊接开裂风险越大，40Cr与45钢碳当量接近，更换材料对焊接质量

（上接第54页）

参考文献：

[1] 邓忠伟, 刘富佳, 聂文豪, 等.锂离子电池安全性能评估及过充电实例分析[J].电源技术, 2024, 48 (6) : 1083-1087.

[2] Jo S , Seo S , Kang K S , etc.Thermal Runaway Mechanism in Ni-Rich Cathode full-cells of Lithium-ion Batteries: The role of Multidirectional Crosstalk.[J]. Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 2024, e2402024-e2402024.

[3] 刘静如.软包型高能量密度三元锂离子电池热失控特性研究[J].安全、健康和环境, 2024, 24 (5) : 7-12.

[4] Goswami D R B , Abdisobbouhi Y , Du H , et al.Advancing battery safety: Integrating multiphysics and machine learning for thermal runaway prediction in lithium-ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2024, 614235015-235015.

[5] 李致远, 鲁锐华, 余庆华, 等.动力电池热失控特征及防控技术研究分析[J].汽车工程, 2024, 46 (1) : 139-150.DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.01.015.

几乎无影响。设计更换材料至今（近一年时间），未发生销轴断裂故障。

表3 40Cr与45钢淬透性对比

材料	淬透性		碳当量/%
	水淬临界直径/mm	油淬临界直径/mm	
45钢	8	5	0.72
40Cr	24	28	0.79

参考文献：

[1] 蒋小松, 杨川, 高国庆, 等.金属材料零部件失效分析基础与应用[M].成都: 西南交通大学出版社, 2021.

[2] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉.热处理工程师手册[M].北京: 机械工业出版社, 2005.

[3] 聂德福.40钢和40Cr钢压缩机曲轴表面感应淬火后的梯度组织与性能[J].金属热处理, 2023, 48 (12) : 222-229

[4] 沈明, 李少雨, 钱航, 等.淬火介质浓度对45钢淬硬层深度及组织性能的影响[J].大型锻铸件, 2022 (2) : 41-43, 50.AUTO1950

[6] 徐振恒, 周晓燕, 付佳龙, 等.锂离子电池热失控及其预警方法[J].科学通报, 2023, 68 (33) : 4501-4516.

[7] 张赛, 汪振毅, 胡世旺.基于电化学-热-力耦合模型的锂离子电池热失控研究[J].安全与环境学报, 2024, 24 (2) : 551-559.DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0191.

[8] 王功全, 孔得朋, 平平, 等.锂离子电池热失控模型综述[J].电气工程学报, 2022, 17 (4) : 61-71.

[9] 孙聪, 邵庆, 王致富, 等.锂离子电池热失控机理及安全提升策略研究进展[J].功能材料与器件学报, 2023, 29 (1) : 22-27.DOI:10.20027/j.gncq.2023.0008.

[10] 郭斌, 刘新华, 何蓉, 等.锂离子电池性能衰减与热失控机制研究进展[J].稀有金属, 2024, 48 (2) : 225-239.DOI:10.13373/j.cnki.cjrm.XY21050007.

[11] 赵璐璐, 张玉魁, 王荣, 等.锂离子电池失控机理模拟[J].有色金属工程, 2024, 14 (1) : 23-31.

[12] 王宁, 杨启亮, 邢建春, 等.基于混合模型的锂离子电池热失控预判方法[J].陆军工程大学学报, 2022, 1 (5) : 45-51.AUTO1950