

为了改善电池包热失控性能，本文通过试验的方法，对电池包内部热失控的防护方式进行研究，对电池包内部不同的位置、不同防护材料进行对比，并分析了影响明火外泄的主要原因，经研究发现，针对绝缘性的防护是影响明火蔓延到电池包外部的重要原因。

□ 吉利汽车研究院（宁波）有限公司 于林 袁兆鹏 占莉  
□ 威睿电动汽车技术（宁波）有限公司 罗日萍

# 新能源电池包热失控防护方式探究

作为新能源电动汽车的核心零部件，电池安全尤为重要，电池失火以及热失控蔓延将会严重影响乘车人的安全。因此，降低电池起火风险以及电池包热失控阻隔防护，在新能源汽车安全中尤为重要。

为了提高电池系统的安全性能，企业和高校纷纷在电池包热失控防护方面做了大量的研究，并提出多种阻隔防护措施。张少禹等人以 NCM811 型电池为研究载体，通过试验的方法对比了不同阻隔材料、阻隔厚度及阻隔层数对热失控阻隔效果的影响；Chen Jie 等人针对冷却与热失控一体化的阻隔方案，确定了一种阻隔方案同时满足热失控蔓延和电池模组冷却；刘蒙蒙针对电池热失控分别从单体电芯、模组和 Pack 层面分别研究其失效机理，以及防护措施；高飞等人通过实验验证了三元乙丙橡胶在电池热失控中的阻隔作用；邹振耀等人通过对热失控总结研究，认为增加额外阻隔方案是控制热失控扩展的重要方向，同时多种阻燃材料被进行研究总结。

本文通过试验方法对比研究了电池包内部多种热失控阻隔方案。根据试验结果，对比研究了电池包内部阻隔位置、阻隔材料对热失控蔓延时间的影响，并分析了电池包内部高压器件在热失控过程中，与周边金属件的短接是影响热失控的重要因素。这对电池热失控防护设计具有重要参考价值。

## 电池包热失控试验分析

1. 电池包热失控发生机理  
如表 1 所示，导致动力电池热失控的主要触发机理为：机械滥用、电滥用和热滥用，本文试验选用热滥用触发机理。

### 2. 试验设置

表 1 热失控失效机理

| 机械滥用 | 隔膜破坏引发短路               |
|------|------------------------|
| 电滥用  | 过冲、过放使局部温度过高；外短路导致温度过高 |
| 热滥用  | 隔膜收缩、溃塌导致内短路           |

热失控触发方式采用加热平板（400 W、220 V）贴在电池包内某个电芯表面，恒定功率加热。当电池温升速率超过  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，持续 3 s，并且电池温度超过其工作使用温度，此为热失控开始时刻  $t_s$ ，并记录热失控开始时刻；电池包有明火泄出超过 5 s，记录此时时间  $t_w$ ；热失控防护保持时间为  $t_b$ ，其计算公式如下：

$$t_b=t_w-t_s \quad (1)$$

3. 温度检测  
电池包内部根据实验需求布置阻隔材料。同时，电池包内部不同位置需要进行温度采集，用于触发依据和结果分析。温度采集选用 K 型热电偶，其温度采集布置如图 1 所示。其中， $t_c$  检测电芯表面温度， $t_s$  检测防护材料近电芯侧温度， $t_f$  检测防护材料与电池壳体间的温度。

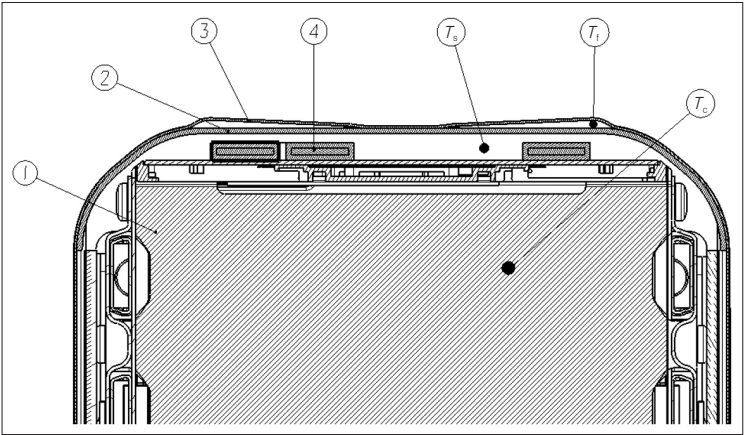


图 1 热失控温度检测点

电池包热失控试验结果

1. 阻隔方案设计

本文研究对象为 51 Ah 高镍锂离子方形电芯电池包，根据防护材料、防护位置不同，防护方案分别见表 2。方案一未做任何防护，用于跟其他 3 种防护阻隔效果对比，所选用的两种材料耐高温均超过 1 000 ℃，导热系数均小于 0.05 W/(m·K)。其中，方案二和方案三在电池包内防护位置如图 1 所示。其中，1 为模组；2 为防火材料，对应表 2 中方案二的预氧丝毛毡和方案三的陶瓷橡胶；3 为电池包上壳体；4 为高压连接件铜排，铜排的作用是串联电池模组以及整车高压连接件。方案四为高压连接件铜排外部包覆陶瓷橡胶，其包覆以后的实物如图 2 所示。

2. 试验结果对比

将表 2 中四种试验方案分别进行热失控试验，分别统计其热失控防护保持时间，其试验结果如图 3 所示。方案一无任何防

表 2 阻隔试验方案

|     | 防护材料        | 防护位置     |
|-----|-------------|----------|
| 方案一 | 无防护         | 无防护      |
| 方案二 | 预氧丝毛毡（高温导电） | 电池包壳体内壁面 |
| 方案三 | 陶瓷橡胶（高温绝缘）  | 电池包壳体内壁面 |
| 方案四 | 陶瓷橡胶（高温绝缘）  | 高压连接件    |



图 2 方案四实物

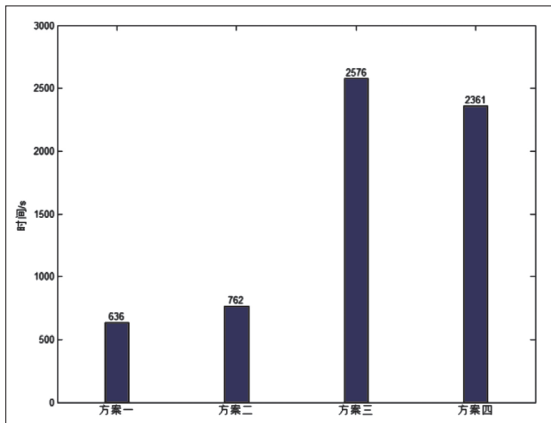


图 3 不同方案热失控时间对比

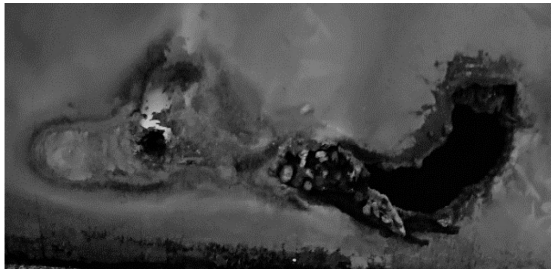


图 4 方案一壳体失效形式

护阻隔措施，其热失控保持时间为 636 s，方案三和方案四的防护保持时间分别为 2 576 s 和 2 361 s，与方案一相比，其热失控防护阻隔效果明显。方案二防护保持时间为 762 s，与方案一相比，其热失控防护阻隔没有明显效果。

热失控试验结果分析

1. 热失控失效形式对比

分别拆解试验以后的 4 个电池包，分别针对其火焰泄露位置、壳体失效形式及电池包内部零部件试验以后的状态进行分析。

方案一和方案二的热失控电池包壳体火焰泄露区域分别如图 4 和图 5 所示，其壳体失效形式类似，均为高温融穿孔洞；其失效位置均为远离电芯喷火处，并且均不是电芯防爆阀正对位置；其附近均有高压连接件铜排，并且铜排均有熔断现象，图 6 为

高温熔断的铜排；电池包内部存在多处铜排与金属件熔融搭接现象；电池包内部所有非金属件均烧成灰烬，包括铜排表面绝缘层，金属部件相对完整。

方案三和方案四火焰泄露位置以及壳体失效形式相似，均为电池包壳体上方，其失效形式为壳体受压膨胀变形过大导致的裂纹，如图 7 所示。电池包内部非金属件烧成灰烬，非金属件较为完整。

2. 电池包内部温度分析

图 8 ~ 10 为试验过程中，电池包内部温度传感器随试验时间温度变化曲线，表示电池包壳



图 5 方案二壳体失效形式

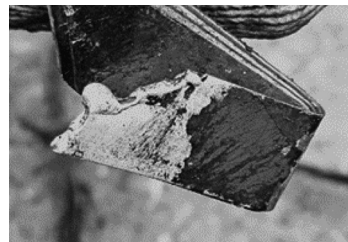


图 6 熔断铜排

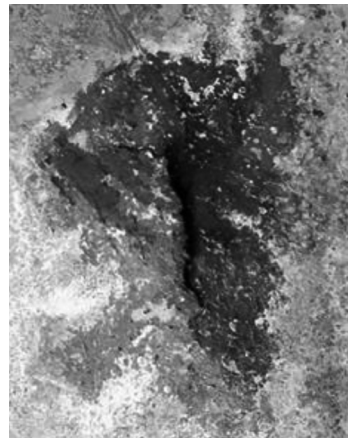


图 7 方案三、方案四壳体失效形式

表 3 试验结束电池壳体温度

|      | 方案一 | 方案二 | 方案三   | 方案四   |
|------|-----|-----|-------|-------|
| 温度/℃ | 426 | 509 | 1 132 | 1 259 |

体试验过程中的温度变化。其中，试验结束时，壳体温度采集点最高温度如表 3 所示。

3. 试验结果分析

电池包壳体材料为钣金材料，材料牌号为 DC06，其熔点超过 1 500 ℃。方案一和方案二试验结束时候采集的温度均低于熔点温度。所以，导致壳体融穿的温度并不是热失控的高温导致的熔化，应为局部区域温度突变增高导致。针对方案二和方案三、方案四的试验对比，其主要差异性为绝缘性防护，特别是高压连接件绝缘性防护。因此，高压连

接件铜排在热失控中的绝缘失效，是影响方案二防护时间短的重要因素。

根据试验结果分析，电池壳体局部温度突然增高超过熔点，并非电芯燃烧或者泄压所致，但是其附近铜排均有熔断现象，并且对电池包内部拆解均有铜排与附近金属件搭接短路熔融现象。

因此，可以得出结论，方案一和方案二导致热失控时间短的主要原因：铜排在热失控过程中，由于绝缘皮高温烧毁，同时铜排以及周边零部件的高温变形、损坏，导致铜排与上壳体短接，形成局部瞬间高温，引起上壳体局部熔化、穿孔，导致明火外泄。同时，方案四通过对铜排的防护，

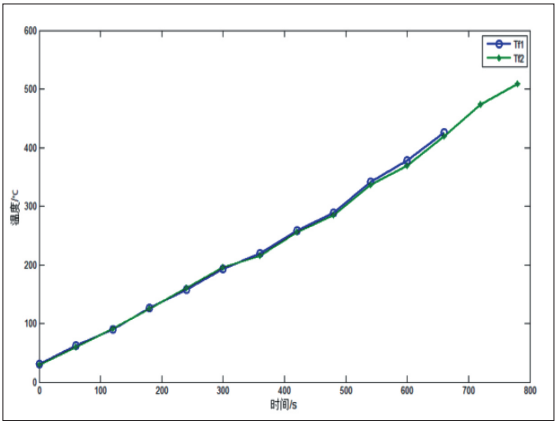


图 10 方案三、方案四温度变化曲线

证明了高压连接件铜排在热失控防护中的影响，铜排与上壳体短接引起局部高温融穿导致的热失控失效，是导致影响热失控防护一个关键因素。对于防止内部高压连接件与壳体短接导致高压短路，也是电池包热防护一个关键的防护措施。

结论

1. 本文通过试验的方法，对电池包内部选用不同的试验材料、零部件防护位置进行对比试验研究。试验表明，高温绝缘隔热材料阻隔效果明显优于非绝缘隔热材料。

2. 本文通过对试验过后壳体失效形式研究，分析其热失控失效主要因壳体融穿失效。这是因高压连接件短接壳体，并非电芯燃烧导致。

3. 本文通过研究发现除了热失控防护设计，对于高压连接件短接的防护是阻断热失控蔓延的关键因素之一。 **A1**

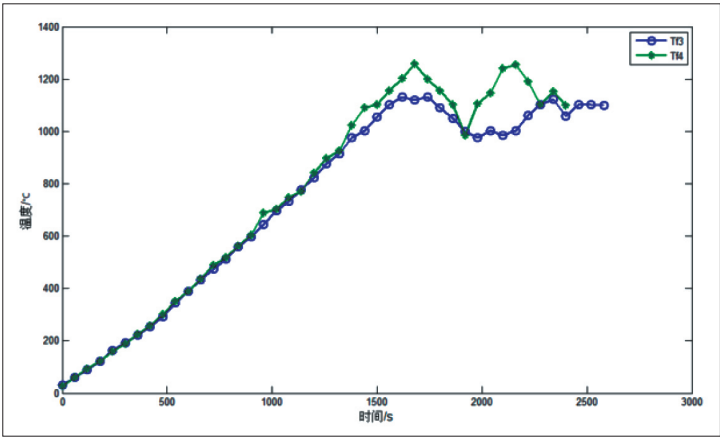


图 8 温度变化曲线

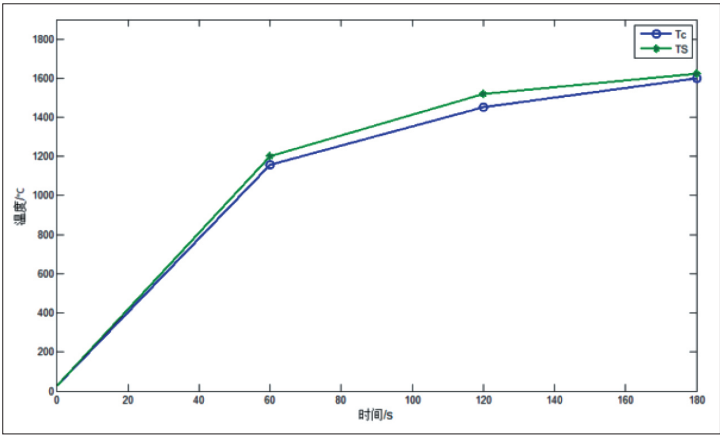


图 9 方案一、方案二温度变化曲线