

# 车用锂离子动力电池系统的安全性

何向明, 冯旭宁, 欧阳明高

清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084

**摘要** 动力电池安全性是新能源汽车大规模推广应用过程中, 各方最关注的焦点问题之一。本文阐述锂离子动力电池作为车用电源系统的安全性问题及其有效的解决方案。动力电池系统安全性问题主要分为3个层次, 即“演变”、“触发”和“扩展”。“演变”是指动力电池安全性事故发生之前, 故障可能经历了长期的演化过程; “触发”是“演变”过程的转折点, 也可以是突发情况破坏了动力电池系统, 并导致安全性事故。阐述了锂离子动力电池热失控“触发”的机理, 对于不同种类的热失控触发形式进行了分析。在动力电池安全性事故“触发”问题上, 最为核心的是锂离子动力电池的热失控。热失控“触发”发生后, 应防止热失控“扩展”的发生。论述了热失控“扩展”过程的机理, 以便于提出更加合理的安全性设计方案, 防范热失控“扩展”的发生, 降低安全性事故造成的损害程度。基于热失控“演变”、“触发”与“扩展”的机理, 提出了事故防范和安全性监控的多项措施。

**关键词** 锂离子电池动力系统; 热失控; 电池管理系统; 安全性监控

为保证国家能源安全并有效降低碳排放量<sup>[1]</sup>, 新能源汽车已经成为中国“十二五”规划中大力培育和发展的战略性新兴产业之一<sup>[2]</sup>。电动汽车是新能源汽车的主体, 包括纯电动汽车, 混合动力汽车和燃料电池汽车<sup>[3]</sup>。动力电池是电动汽车的重要动力来源, 动力电池的安全性是电动车发展过程中首先要考虑和解决的问题<sup>[4]</sup>。锂离子电池因其具有高比能量、低自放电率及长寿命的特点, 是目前最具实用价值的电动汽车用动力电池<sup>[5]</sup>。然而, 以热失控为特征的锂离子电池系统的安全性事故时有发生, 困扰着电动汽车的发展。大容量、高电

压的锂离子动力电池系统的安全性是一个新的问题, 其中的影响因素复杂。只有对安全性问题进行深入的分析研究, 才能顺利解决<sup>[6]</sup>。本文结合理论与实验结果, 分析动力电池安全性事故的常见形式及成因, 提出动力电池系统的安全性问题的层次, 并尝试提出分层次的安全性事故防范措施。

## 1 动力电池安全性问题

表1为不完全统计得到的近年来发生的锂离子动力电池事故。图1列举了表1中部分事故所对应的图片。

表1 近年发生的锂离子动力电池事故

事故序号	发生时间	地点	事故描述	热失控触发原因
1	2008.6	哥伦比亚(美国)	普锐斯混合动力车锂离子电池组冒烟着火	接头松动造成的局部过热, 并引发电池热失控
2	2010.1	乌鲁木齐	电动大巴在车库内起火	单体电池故障, 静态异常起火
3	2011.4	杭州	示范运营的出租车起火	成组设计问题造成漏液, 而绝缘受损的短路引燃漏出的电解液
4	2012.5	深圳	比亚迪纯电动出租车被高速违章的跑车追尾, 后发生剧烈燃烧	高速撞击导致变形及高电压电路受损。受损的电路短路并产生电弧, 点燃了电池组内约1/4的电池及汽车内饰
5	2013.1* 2014.1	波士顿/高松/东京 (美国/日本/日本)	波音787客机陆续发生3起动力电池组起火	电池组热失控起源于部分单体内部的内短路。单体电池设计及电池管理系统亦存在缺陷
6	2013.10/11**	西雅图/田纳西(美国)	特斯拉Model S电动车在高速公路上撞击路面物体后电池起火	路面物体刺穿电池组保护层, 造成电池组变形, 并发生短路, 从而引燃部分电池
7	2015.4	深圳	五洲龙纯电动大巴充电时起火	电池管理系统无法切断充电接触器, 电池组长期持续过充直至热失控与起火

注: \*2013年1月在波士顿/东京各发生一起事故, 2014年1月在东京发生一起事故。\*\*从2013年10月开始, 特斯拉Model S纯电动车共计发生6次起火事故, 除本表中的2起外, 还有其他4起, 包括2起自燃事故、1起充电事故, 另1起原因不明。

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2016-02-14

基金项目: 中美清洁能源联合研究中心清洁能源汽车项目(2014DFG71590)

作者简介: 何向明, 副教授, 研究方向为动力电池及其安全性, 电子邮箱: hexm@tsinghua.edu.cn

引用格式: 何向明, 冯旭宁, 欧阳明高. 车用锂离子动力电池系统的安全性[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 32-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.06.003

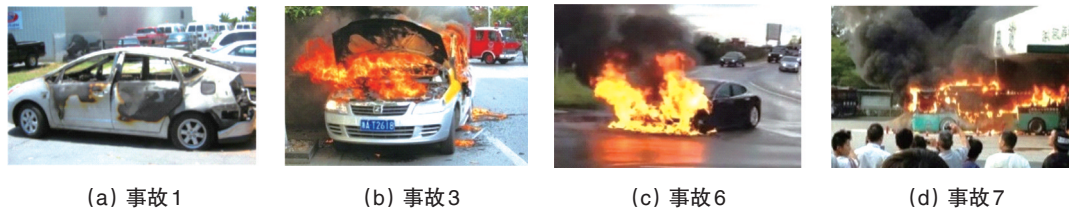


图1 近年来部分锂离子动力电池事故

可以看出,锂离子动力电池事故主要表现为因热失控带来的起火燃烧。起火燃烧是令人担忧的安全性问题,但事实上,目前发生的事故所造成的危害有限,除电池组燃烧、损坏车辆本体、引燃周围车辆之外,发生人员伤亡的情况较为罕见。大部分事故中,人员能够及时得到危险警示并安全撤离事故现场。事故4中的人员伤亡主要是由于高速碰撞造成车内乘员昏厥而无法逃生,事故6中的人员受伤是由于飞机紧急降落后的疏散过程中发生的摔伤。

研究锂离子动力电池的安全特性,并揭示安全事故的产生机理,对于解决动力电池系统安全性问题十分必要。一方面,这有助于消除民众对于“锂电池是否安全”的疑问;另一方面,从机理出发,制定对应的策略,可以有效地改进电池系统设计,保证锂离子动力电池系统的安全。

锂离子动力电池系统由多节电池组成,实际的车载工作条件复杂,其安全性问题表现为3个层次(图2)。

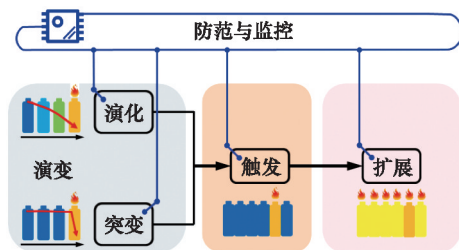


图2 动力电池系统安全性问题的层次

1) 电池系统安全性的“演变”。安全性事故发生前,有两种情况。一种是电池系统长期老化带来的可靠性降低,也称之为安全性“演化”,比如表1中的事故1、2、3、5、7;另一种是突发事件造成电池系统损坏并引发电池热失控与起火燃烧,也称之为安全性“突变”,比如表1中的事故4和6。安全性的“演化”与“突变”统称为“演变”。

2) 电池系统安全性事故的“触发”。电池系统长期老化与突发事件造成的电池系统损坏,可能会进一步“演变”为锂离子动力电池的热失控与起火燃烧。锂离子动力电池从正常工作到发生热失控与起火燃烧的转折点称为“触发”。

3) 电池系统安全性事故的“扩展”。单体电池或电池组内部分电池发生热失控“触发”之后,热失控与燃烧短时间内放出大量的热量。这些热量向周围电池与电池系统附件传递,会带来相应的次生危害,如周围电池依次发生热失控与燃烧,或火焰传播点燃车内线束与内饰等。这类热失控与起

火向周围传播的现象称为事故的“扩展”。

## 2 动力电池安全性演变

### 2.1 “演化”与“突变”

安全性事故发生前有两种情况。一种是电池系统长期老化带来的可靠性降低,也称之为安全性“演化”,如表1中的事故1、2、3、5、7;另一种是突发事件造成电池系统损坏并引发电池热失控与起火燃烧,也称之为安全性“突变”,如表1中的事故4和6。从时间尺度上看,安全性演化的耗时很长,而安全性突变的耗时很短。例如,事故1属于安全性演化,因装配问题造成的接头松动之前,电池经受了长期的车载振动<sup>[7]</sup>;事故5中属于安全性演化,从设计缺陷到内短路触发之前,电池需要经历长期的内短路“生长孕育期”及长期的不合理使用<sup>[8,9]</sup>;而事故6属于安全性突变,动力电池组受到瞬间撞击后机械变形,电池不仅受到挤压并且发生位置移动,从而造成短路与热失控<sup>[10]</sup>。相比而言,安全性突变难以预测,但是可以通过既有事故的形式来改进电池系统的设计;而安全性演化耗时长,伴随着电池系统的老化,可以通过检测电池系统的老化程度来评估电池系统安全性的变化。

### 2.2 安全性演化机理

电池系统任何部件的老化都可能带来安全事故的触发。事故1中,错误的装配顺序使得电池连接线接头在长期车载振动条件下发生松动,继而导致接头处电阻增大。而混合动力电动车行驶过程中,电池充放电的电流在松动的接头处产生大量的热量,加热了部分电池,最终导致电池热失控事故的发生。事故7中,电池管理系统的失效,造成电池组长期持续过充电,最终导致热失控事故的发生。

需要注意的是,以上事故中,电池系统部件从老化到发展为最终的热失控事故,经历了较长时间。例如,对于有预紧力的螺纹接头,少量松动对于接头处的电阻影响并不是很大<sup>[11]</sup>;而有研究表明,少量的电池过充对于电池的性能也并不会会有太大的影响<sup>[12]</sup>。

除了电池系统其他部件的老化之外,电池本身的安全性演化主要表现为内短路的发展。内短路被认为是系列事故5的主要原因<sup>[8,9]</sup>。内短路在最终发生之前,会经历相当长的“生长孕育期<sup>[13]</sup>”。锂离子动力电池发生内短路的原因很多,其中电池内部的金属枝晶生长是造成内短路的主要原因之一。金属枝晶生长可以来自电池正极中的过渡金属(铜、铁等)的溶解与再生长,也可以来自锂金属的析出与生长<sup>[14]</sup>。电池设

计与生产过程中的缺陷会有利于金属枝晶的生长,比如电池在制造过程中混入的杂质,或者电池极片由于装配应力作用发生的褶皱,金属枝晶在杂质和褶皱附近更容易生长。锂金属的析出与生长还与充电倍率,充电温度相关。大倍率充电或低温充电都可能增加锂金属析出的可能<sup>[15]</sup>。如图3所示,金属枝晶的长期生长可能会挤入隔膜的孔隙,并最终刺穿隔膜,造成内短路甚至热失控事故<sup>[16,17]</sup>。需要注意的是,锂枝晶生长刺穿隔膜导致热失控之前,老化电池的安全性相对新鲜电池而言已经发生了变化:一方面,由于能量密度的降低,电池热失控造成的危害可能会降低;但另一方面,由于内部金属枝晶的存在,老化后的电池可能更容易发生热失控<sup>[18,19]</sup>。

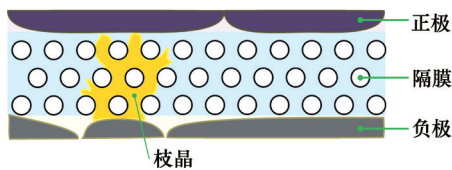


图3 锂离子电池内部金属枝晶的生长与隔膜的刺穿

### 3 电池安全事故触发

#### 3.1 热失控机理

经过演变过程,电池事故将会进入“触发”阶段。一般在

进入触发阶段之后,锂离子动力电池内部的能量将会在瞬间集中释放,此过程不可逆且不可控,也称之为热失控(thermal runaway)。热失控后的电池发生剧烈升温,温度可高达1000℃,并可以观察到冒烟、起火与爆炸等现象。

当然,从“安全性”的广义定义来看,电池安全事故中,也可能不发生热失控。如电池发生碰撞事故后并不一定发生热失控;而电池组绝缘失效造成人员高电压触电,电池漏液产生异味造成车载人员身体不适等情况下,电池也不会发生热失控。在动力电池系统的安全设计当中,以上情况都需要考虑。而热失控则是安全性事故最常见的事故原因,也是锂离子动力电池安全性事故特有的特点,故本文以热失控为核心进行了专门介绍。

大量实验研究表明,热失控后的电池不一定会同时发生冒烟、起火与爆炸,也可能都不发生,这取决于电池材料发生热失控的机理。图4、图5与表2展示了某款具有三元正极/PE基质的陶瓷隔膜/石墨负极的25 A·h锂离子电池的热失控机理。图4为该款锂离子电池绝热热失控实验中的温度与电压曲线,根据其热失控温度变化的特征,将热失控过程分为了7个阶段。在不同阶段,电池材料发生了不同的变化,图5通过一系列的图片解释了各个阶段电池材料的变化情况。

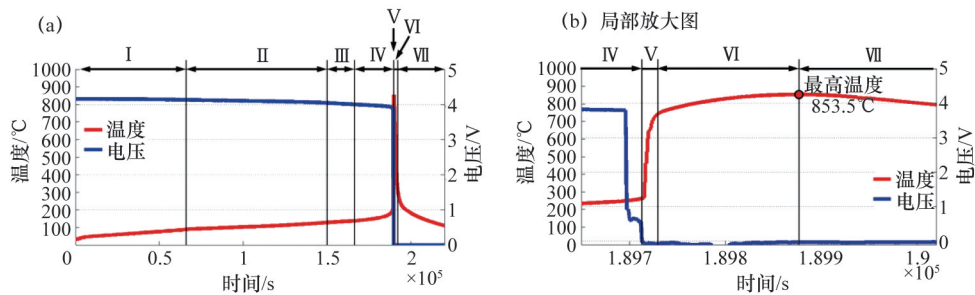


图4 某款三元锂离子电池热失控实验数据(实验仪器为大型加速绝热量热仪, EV-ARC)

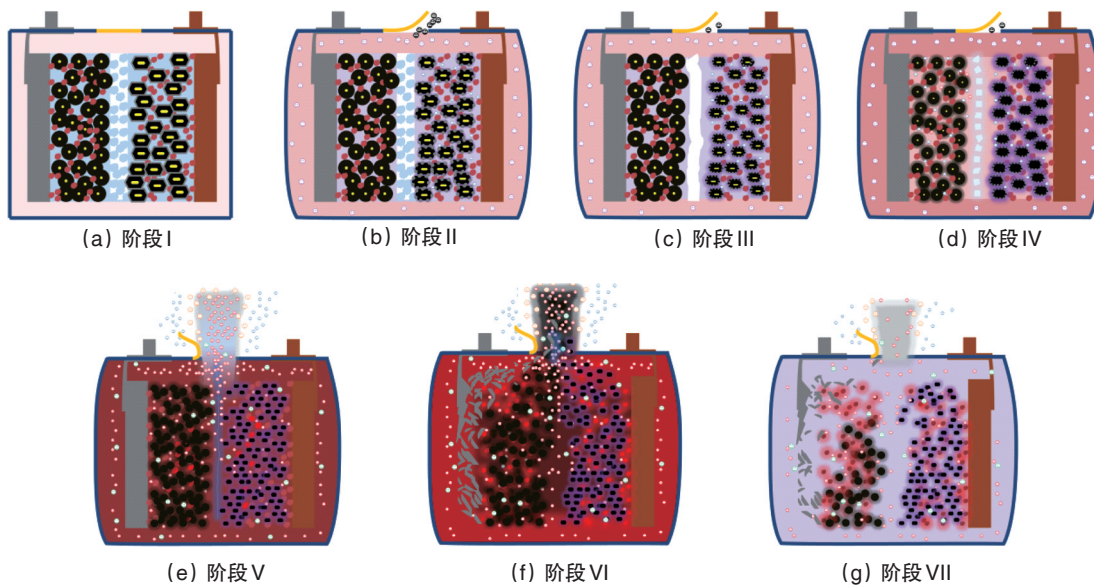


图5 某款三元锂离子电池热失控不同阶段的机理

表2<sup>[20,21]</sup>列出了该款锂离子动力电池热失控的7个分阶段的特征及相应的机理。结合图5与表2,可以解释热失控后电池冒烟、起火与爆炸的情况。对于冒烟的情况,在阶段V,如果电池内部温度低于正极集流体铝箔的熔化温度660℃,电池正极涂层就不会随着反应产生的气体喷出,此时观察到的会是白烟;而如果电池内部温度高于660℃,正极集流体铝箔熔化,电池正极涂层随着反应产生的气体大量喷出,此时观察到的会是黑烟。对于起火的情况,热失控事故中的起火一般是由电解液及其分解产物被点燃造成的。所以,从阶段II开始,从安全阀泄漏出来的电解液就有可能被点燃而起

火。从燃烧反应的3要素(可燃物、氧气、引燃物)来看,可燃物主要是电解液;氧气在电池内部存在不足,因此电解液需要泄漏出来才会发生起火;引燃的主要原因是喷出的气体温度高于其闪点。对于爆炸的情况,爆炸一般表现为高压气体瞬间扩散造成的冲击。电池内部具有高压气体聚集的条件,而安全阀则是及时释放高压聚集气体的关键。安全阀体如能在电池壳体破裂之前开启,并释放足够多在热失控过程中产生的高压气体,电池就不会发生爆炸;安全阀体如不能及时开启,就可能发生爆炸事故。

表2 某款锂离子动力电池热失控的分阶段特征与机理

阶段	图示	温度范围/℃	特征描述
I	图5(a)	50~100	当热失控触发发生后,电池因受到异常加热而温度升高,此阶段电池发生高温条件下的容量衰减。
II	图5(b)	90~120	电池负极表面SEI膜分解,负极与电解液直接接触并发生反应。反应放出量热可测的热量,绝热条件下,电池温度受自生热影响继续升高。温度在100~110℃,电解液气化导致电池膨胀,安全阀可能会打开,部分电解液泄漏。
III	图5(c)	120~140	PE基质的隔膜吸热熔化并开始闭孔。由于隔膜的关断效应,电池内阻迅速上升。该款电池的隔膜上具有陶瓷涂层,隔膜闭孔后不会迅速崩溃造成内部大规模短路的发生。
IV	图5(d)	140~260	正极/负极分别与电解液发生反应,反应放热造成电池温度继续升高。随着温度的升高,反应放热速率逐渐加大。
V	图5(e)	260~740	陶瓷涂层崩溃,电池内部发生大规模内短路,电池电压急坠为零,并放出大量的热。内部高温反应同样集中释放出大量的热量。瞬时累积的大量热量带来电池温度的瞬间大幅升高,即热失控发生。另外,生热反应也会产生大量的气体,电池内部压力急剧升高,电池内部物质随着高压气体喷出。
VI	图5(f)	740~850	热失控快速放热后,部分残留的放热反应还能够将电池温度再升高一段,直到达到最高温度。
VII	图5(g)	850~常温	热失控放热反应结束,残余物降温至常温。

### 3.2 事故触发的分类

造成锂离子动力电池热失控事故的触发原因很多,根据触发的特征,可以分为机械触发、电触发和热触发3类<sup>[22]</sup>。如图6所示,3类触发形式具有一定的内在联系。一般地,机械触发会引发短路并造成电触发,而电触发产热造成了热触发,热触发造成的热失控是事故触发的核心。其他触发形式的机理分析都离不开对于热触发机理的研究。对于热触发机理的研究,最为理想的研究仪器是绝热量热仪,对于大型动力电池而言,需要采用大型动力电池量热仪(EV-ARC)来进行热失控特性的测试。

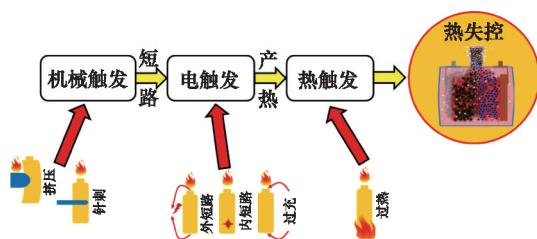


图6 事故触发的分类

机械触发包括挤压、针刺、跌落等,主要特征是电池受力发生形变;电触发包括外短路、内短路、过充电、过放电等,主要特征是触发过程中存在电流流动;热触发包括异常加热、火焰加热等,主要特征是电池持续吸收环境中的热量而温度升高。安全性测试标准中规定了根据事故分析所获得的详尽的各类事故触发因素。通过了安全性测试标准的电池发生触发事故的概率也大大降低。但是,由于实际工况非常复杂,事故触发的原因可能与安全性测试标准中的规定的情况有所出入。这解释了为什么表1中所列的各类动力电池系统均通过了安全性测试标准,事故仍然可能发生。

## 4 热失控在电池系统内的扩展

### 4.1 热失控扩展的危害

热失控触发后,局部单体热失控后释放的热量向周围传播,将可能加热周围电池并造成周围电池的热失控,也称为热失控在电池组内的“扩展”。单体电池热失控所释放的能量是有限的,但是如果发生链式反应造成热失控的扩展,整个电池组的能量通过热失控释放出来,将会造成极大的危

害。图4、图5所示的25 A·h三元锂离子电池(具有约0.1 kW·h的电能)热失控时释放出的能量约为630 kJ,相当于0.15 kg TNT当量。对于一个具有60 kW·h的纯电动车的动力电池系统而言,如果所有单体由于热失控扩展而释放出全部能量,将会相当于释放出90 kg TNT当量的能量。也就是说,热失控扩展一旦发生,造成的危害将会很大。因此,人们需要防范热失控扩展的发生,把热失控局限于部分单体。

#### 4.2 热失控扩展的机理

从能量守恒的角度而言,当热失控单体的周围电池受到的热失控扩展造成的加热功率大于其本身的散热功率时,受到加热的周围电池的温度就会升高,继而发生热失控触发。如图7(a)所示的方形电池模块内,热失控扩展过程中的热量传递有3条可能的主要路径:1) 相邻电池壳体之间的导热;2) 通过电池极柱的导热;3) 单体电池起火对周围电池的炙烤。

壳体导热与极柱导热的两条路径主要作用于相邻电池之间,容易分析与控制<sup>[23]</sup>。对于方形电池而言,在壳体与壳体之间接触良好的情况下,通过壳体的导热要远大于极柱的导热<sup>[23]</sup>。而对于圆柱形电池模块而言,如图7(b)所示,单体与单体之间的传热还可能需要考虑热辐射的影响<sup>[24]</sup>。而起火炙烤既可以作用于相邻电池,也可以作用于周围的电池系统附件,评估其对于电池系统造成的危害会更加复杂与困难<sup>[25,26]</sup>。有研究表明,电池起火燃烧放出的热量要高于不起火时单纯热失控放出的热量<sup>[27]</sup>。发生起火后,火焰一般附着在热失控电池阀体周围。同时,由于火焰的外焰温度最高,因此阀体开启方向上的电池及附件受到的加热最为剧烈。另外,从设计角度看,电池系统本身具有一定的密闭性,热失控产生的高温气体来不及扩散,也可能会加热周围的电池。

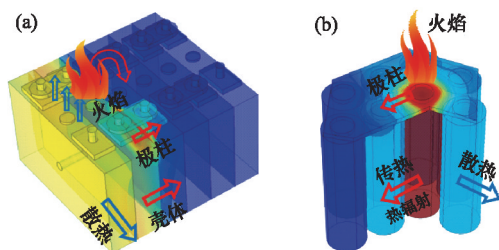


图7 热失控扩展的几条可能路径

#### 4.3 防范热失控扩展与电池系统设计的矛盾

根据热失控扩展的机理,可以有针对性地设计防范热失控扩展的方案。

首先,需要防止火焰的发生。可以通过阀体喷射方向的设计,来引导火焰的生成方向;也可以加入灭火剂来进行灭火。当然,动力电池系统通过了安全性测试标准,火焰发生的概率已经得到降低;同时,动力电池系统密封性良好使电池系统内部氧气含量不足,也不利于火焰的生成与发展。

其次,要考虑高温气体扩散对电池系统其他部件的影响。部分电池已经具有能够及时排出高温气体的系统。

同时,要适当阻隔电池之间的传热路径,如在单体电池之间设置隔热层<sup>[28]</sup>。需要注意的是,在热管理中,电池壳体间可能预留有空气空隙以供风冷,并将相邻电池隔开。但是在热失控扩展过程中,热失控电池膨胀,空气空隙将因为电池的膨胀而消失。此时,电池与电池之间的传热仍然是快速导热,用单纯预留空气空隙的方法防范热失控扩展是行不通的。

另外,可以通过在单体热失控触发之后,增强电池系统内部的散热;将故障电池周围的电池进行放电;在电池之间填充相变材料吸收热量等方法来抑制热失控的扩展。

然而,防范热失控扩展的设计与电池系统的其他功能设计存在一定的矛盾。阻隔传热路径的方法可能造成电池组内部温度不均匀程度的加剧,这与电池组热管理设计中,温度一致性的设计目标相矛盾。另外,增加灭火、排气、隔热等措施,均会降低电池系统比能量,增加电池系统的设计成本。如何合理地配置安全性措施,以防范热失控扩展的发生,同时考虑电池系统性能指标和设计成本,是电池系统安全性设计的重要议题之一。

### 5 电池事故防范与安全性监控

除热失控扩展的防范之外,动力电池系统需要全方位的事事故防范措施与安全性监控措施。

#### 5.1 安全性测试标准

锂离子动力电池在大规模生产销售之前,必须要通过相关的安全性测试标准的认证。安全性测试标准针对不同的热失控触发与扩展的情况而制定,因此,能够获得认证的锂离子动力电池发生安全性事故的概率也会大大降低。中国于2015年5月发布了一系列安全性测试标准,如GB/T 31485—2015、GB/T 31467.3—2015、GB/T 31498—2015等。国外相关的标准包括ISO 12405—2014、IEC 62133—2015、US 2580—2010、SAE J1929—2011、JIS-C 8715—2—2012等。

#### 5.2 动力电池系统安全性设计

以防范热失控事故为核心,动力电池系统的安全性设计需要考虑事故的“演变”、“触发”与“扩展”等因素。防范热失控事故的触发,可以通过改善单体电池材料的安全性实现<sup>[29]</sup>,也可以利用电流断路器、正温度系数电阻(PTC)等安全器件实现<sup>[30]</sup>。进一步地,动力电池系统安全性设计除了关注以热失控为核心的问题之外,还要对于各个部件的失效模式有清楚的认识,从而全方位地防范动力电池安全性事故的发生。实际设计过程中,应充分借鉴系统安全工程相关理论,从功能安全设计出发,进行故障类型与影响分析(FMEA)<sup>[31]</sup>,分析所有可能的事故起因,并针对各种故障进行有针对性的设计。

#### 5.3 动力电池系统安全性监控

除了进行安全性设计以外,动力电池系统在运行过程中需要进行妥善的管理,以防止电池系统遭到滥用,并对于可能的事事故触发倾向进行监测与预警。动力电池管理系统

(BMS)的一个重要功能即是对于动力电池系统的安全性进行监控<sup>[32]</sup>。首先,动力电池管理系统设定了动力电池组的安全工作范围。动力电池在输出功率时,应工作在设定的安全工作范围之内。其次,动力电池管理系统对于各节动力电池单体,进行包括荷电状态(SOC)、电池寿命状态(SOH)、电池剩余能量状态(SOE)、电池功能状态(SOF)及电池安全状态(SOS)在内的状态估计。对于异常的单体进行关注,对于出现的一致性问题进行合理的均衡。再者,电池管理系统基于电池系统的热管理设计,对于电池温度进行监控,保证电池系统温度的合理与一致性。随着电池单体寿命的延长,人们逐渐意识到动力电池事故存在长期“演化”的问题,设计动力电池管理系统时,还应开发相应的算法,对于可能的事故“演化”过程,如内短路等进行监控。另外,对于超出安全阈值的事件,动力电池管理系统应具有主动的报警功能,保证人员能够有充足的时间撤离<sup>[32]</sup>。

## 6 结论

动力电池系统安全性问题主要分为3个层次,即“演变”、“触发”与“扩展”。动力电池安全性事故发生之前,应通过系统算法对安全事故进行预警。热失控触发生后,应防止热失控扩展的发生。热失控扩展过程机理的进一步认识有助于优化设计方案,降低安全性事故造成的损害。进一步深入研究安全性问题各个层次的机理及其演变过程,提出有效的事防范措施和安全性监控措施,是下一步研究的工作重点。

现有的锂离子动力电池经过了安全性标准测试,同时在电池系统中也具有对应的安全措施,其动力电池系统的安全性已经有了很大的提高。但是,尽管现有的安全性事故造成的危害有限,随着锂离子动力电池的比能量的提高,单次安全性事故造成的危害会增大;电动汽车的大规模普及也将使安全性事故发生的频率增多。相关厂家必须重视锂离子动力电池系统的安全性问题,绝不能通过牺牲电池系统的安全性来降低生产成本。因为,安全性事故一旦发生,危害的是消费者的生命财产安全,当然也意味着企业产品信誉的损失。

### 参考文献(References)

- [1] 杨裕生,陈清泉,陈立泉,等.关于我国电动车的技术发展路线建议[J].新材料产业,2010(3):11-17.
- [2] 科技部.国家“十二五”科学和技术发展规划[EB/OL].2011-07-04.  
[http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/201107/t20110713\\_88230.htm](http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/201107/t20110713_88230.htm).
- [3] 陈清泉,孙立清.电动汽车的现状和发展趋势[J].科技导报,2005,23(4):24-28.
- [4] 陈薪,杨裕生.动力电池安全性不容小觑[J].低碳世界,2012(10):036-039.
- [5] 黄学杰.电动汽车与锂离子电池[J].物理,2015,44(1):1-7.
- [6] 杨裕生.对电动汽车发展路线的思考[J].汽车纵横,2012,1:68-69.
- [7] Beauregard G P. Report of investigation: Hybrids plus plug in hybrid electric vehicle[R]. Phoenix AZ: eTec, 2008.
- [8] Goto N. Aircraft serious incident investigation report: All Nippon airways Co., Ltd. JA804A[R]. Tokyo: Japan Transport Safety Board, 2014.
- [9] Aircraft incident report: Auxiliary power unit battery fire, Japan airlines Boeing 787, JA 829J, Boston, Massachusetts, January 7, 2013[R]. Washinton DC: National Transportation Safety Board, 2014.
- [10] Xia Y, Wierzbicki T, Sahraei E, et al. Damage of cells and battery packs due to ground impact[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267: 78-97.
- [11] Taheri P, Hsieh S, Bahrami M. Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196: 6525-6533.
- [12] Ouyang M, Ren D, Lu L, et al. Overcharge-induced capacity fading analysis for large format lithium-ion batteries with  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_{0.13}\text{Mn}_{0.13}\text{O}_2 + \text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$  composite cathode[J]. Journal of Power Sources, 2015, 279: 626-635.
- [13] Barnett B. Technologies for detection and intervention of internal short circuits in Li-ion batteries[C]//Presented at the 5th Annual Knowledge Foundation Conf. Battery Safety 2014, Washington DC, US, Nov-11-14, 2014.
- [14] Doughty D H, Pesaran A A. Vehicle battery safety roadmap guidance [R]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Oct. 2012.
- [15] Ouyang M, Chu Z, Lu L, et al. Low temperature aging mechanism identification and lithium deposition in a large format lithium iron phosphate battery for different charge profiles[J]. Journal of Power Sources, 2015, 286, 309-320.
- [16] Arora P, Zhang Z. Battery separators[J]. Chemical reviews, 2004, 104(10): 4419-4462.
- [17] Jana A, Ely D R, García R E. Dendrite-separator interactions in lithium-based batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 912-921.
- [18] Fleischhammer M, Waldmann T, Bisle G, et al. Interaction of cyclic ageing at high-rate and low temperature and safety in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 274: 432-439.
- [19] 黄海江. 锂离子电池安全性研究及影响因素分析[D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2005.
- [20] Feng X, Fang M, He X, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry[J]. Journal of Power Sources, 2014, 255: 294-301.
- [21] Feng X, Sun J, Ouyang M, et al. Characterization of large format lithium ion battery exposed to extremely high temperature[J]. Journal of Power Sources, 2014, 272: 457-467.
- [22] Wen J, Yu Y, Chen C. A review on Lithium-ion batteries safety issues existing problems and possible solutions[J]. Materials Express, 2012, 2(3): 197-212.
- [23] Feng X, Sun J, Ouyang M, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module[J]. Journal of Power Sources, 2015, 275: 261-273.
- [24] Lopez C F, Jeevarajan J A, Mukherjee P P. Experimental analysis of thermal runaway and propagation in lithium-ion battery modules[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2015, 162(9): A1905-A1915.
- [25] 平平. 锂离子电池热失控与火灾危险性分析及高安全性电池体系研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

- [26] Larsson F, Andersson P, Blomqvist P, et al. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 271: 414-420.
- [27] Liu X, Stolarov S I, Denlinger M, et al. Comprehensive calorimetry of the thermally-induced failure of a lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 280: 516-525.
- [28] Feng X, He X, Ouyang M, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25A·h LiNi<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub> large format lithium ion battery[J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 74-91.
- [29] Wang Q, Ping P, Zhao X, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210-224.
- [30] Balakrishnan P G, Ramesh R, Kumar T P. Safety mechanisms in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 55, 401-414.
- [31] Hendricks C, Williard N, Mathew S, et al. A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMEA) of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 297: 113-120.
- [32] Lu L, Han X, Li J, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 272-288.

## On the safety issues of lithium ion battery

HE Xiangming, FENG Xuning, OUYANG Minggao

State Key Laboratory of Automotive Safety & Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The safety of lithium ion battery power system should be enhanced before the massive application of electric vehicles. The safety problem needs to be fully combed in order to improve the safety of the vehicle power battery system. This paper attempts to interpret the safety problem of lithium ion power battery system and to find further solutions. The safety of power battery system is divided into three levels in this paper, namely, "evolution", "trigger" and "propagation". The "evolution" refers to that the failure may be experienced a long evolutionary process before the battery safety accident occurs. The "trigger" is the turning point of the "evolution", and can also be unexpected events that destroy the power battery system upon vehicle accidents. The thermal runaway mechanism of lithium ion power battery is expounded, and different triggering ways of thermal runaway are analyzed. On the issue of the "trigger" of the safety accident of the power battery, the most critical point is the thermal runaway. Its "propagation" should be prevented when thermal runaway "trigger" occurs. Understanding more about the thermal runaway "propagation" mechanism can help designers to optimize safety design, prevent thermal runaway "propagation", and reduce the degree of damage caused by safety incidents. Based on the discussion on the "evolution", "trigger" and "propagation", this paper puts forward a number of measures for accident prevention and safety monitoring.

**Keywords** lithium-ion battery power system; thermal runaway; battery management system; safety monitoring

(编辑 田恬)