

# 国内新能源乘用车起火事故分析

何忠青 王勃洋 石强 夏弋茹

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【欢迎引用】何忠青, 王勃洋, 石强, 等. 国内新能源乘用车起火事故分析[J]. 汽车文摘, 2024(5): 23-30.

【Cite this paper】HE Z Q, WANG B Y, SHI Q, et al. Analysis of Domestic New Energy Passenger Vehicle Fire Accidents[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(5): 23-30.

【摘要】为了从整车角度研究新能源乘用车起火事故的原因、关键影响因素和失效模式, 从用户使用场景出发补充除电池原因外其他导致起火事故的原因, 并找到规避方案, 对2021~2022年发生的新能源汽车起火事故进行深度分析, 总结新能源汽车起火事故发生时的用户场景和表面事故原因, 并对更深层次的失效模式进行拆解, 对一些典型的事故案例进行原因分析, 并在设计层面对起火事故的预防进行探讨, 提供解决思路, 对新能源汽车整车安全的研究方向进行了展望。

关键词: 新能源汽车; 热失控; 自燃; 动力电池; 事故分析

中图分类号: TM912 文献标志码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230002

## Analysis of Domestic New Energy Passenger Vehicle Fire Accidents

He Zhongqing, Wang Boyang, Shi Qiang, Xia Yiru

(Global R&D Center, China FAW Cooperation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】This paper aims to study the causes, key influencing factors, and failure modes of fire accidents in new energy passenger vehicles from a holistic perspective, and to supplement the causes of fire accidents beyond battery-related issues based on user usage scenarios, and identify preventive solutions. In this paper, an in-depth statistical analysis is conducted on fire accidents involving new energy vehicles from 2021 to 2022. The user scenarios and the root causes of these fire accidents are summarized. The failure modes at a deeper level and the causes of some typical accident cases are analyzed. The prevention of fire accidents at the design level is discussed. Several solutions are provided, and discussions are held on the research direction of vehicle safety for new energy vehicles.

Key words: New energy vehicle, Thermal runaway, Spontaneous combustion, Power battery, Incidents analysis

## 0 引言

在国家的大力支持与政策引导下, 国内新能源乘用车产业作为解决能源安全问题、实现碳中和、碳达峰国家战略的重要一环, 发展十分迅速。2023年国内新能源乘用车累计销量 774 万辆, 同比增长 36.4%, 累计渗透率达 35.7%<sup>[1]</sup>。随着国内新能源汽车销量及渗透率逐年升高, 新能源汽车事故的数量也急剧攀升, 社会关注度越来越高<sup>[2]</sup>。这些安全事故使公众对新能源汽车安全性产生不信任, 间接地制约了新能源汽车在国内的进一步普及和推广。在所有新能源乘用车事故中, 起火事故对财产安全及公共安全的影响最大, 所以受到广泛关注。对于新

能源汽车来说, 无论是哪种起火诱因, 严重起火爆炸的主要原因是电池的热失控<sup>[3-6]</sup>。除此之外, 导致起火事故的诱因中电气回路问题也不容忽视, 因此如何在设计和生产制造过程中尽可能地保证电池安全及电气安全成为汽车行业需要重点解决的难题。目前国内外对新能源汽车安全性的研究局限在电池安全的单一层面, 对电池本身的失效机理分析较为全面, 但并未从用户场景出发, 对整车进行全维度失效模式分析的研究成果<sup>[8-10]</sup>。

本文通过对 2021~2022 年国内新能源汽车起火事故报道进行统计分析, 总结新能源汽车起火事故发生时的用户场景和表面事故原因, 并分析得到较为全面的新能源汽车起火失效模式, 从而在设计层面对起火

事故的预防进行系统性方案研究,提供解决思路,填补以往研究中从电池中安全单一维度来解决整车安全问题的不足。

## 1 新能源乘用车起火事故统计分析

### 1.1 2021~2022年国内起火事故统计

从“十二五”开始,国家已经开始大力布局新能源汽车产业<sup>[7]</sup>,自2010年起新能源汽车经历了超过10年的国家补贴阶段。而随着补贴逐渐退坡,新能源汽车即将面临全面市场化竞争,为支撑国家能源战略落地,新能源汽车领域虽然有巨大发展机遇,但也同时面临巨大压力。因此在新能源汽车起火事故上需要挖掘真因并通过技术手段保证其安全性,才能消除起火爆炸等极端热失控案例给用户带来的不安。

动力电池作为新能源汽车的车载储能装置需要具有较高的能量存储能力及充放电能力,因此普遍应用能量密度更高、循环寿命更长但安全性更难控制的锂离子电池<sup>[11]</sup>。在复杂甚至极端的车用环境下保证动力电池安全可靠且不会发生热失控成为一项较难攻克的研究课题<sup>[12]</sup>。随着近10年电池相关技术的成熟和发展,通过有效的热管理系统设计、充放电控制策略优化及全面的结构防护等手段对电池热失控进行控制,已经取得较为显著的效果。2021年以来,新能源汽车销量增势迅猛,用户使用场景更加丰富,在实际应用场景中发现了更多的起火事故诱因值得研究,对新能源汽车整车级安全防护技术提出了更高的要求。

表1与表2详细统计了2021~2022年有过报道且受到广泛关注的新能源汽车起火事故(信息来自于网络,此处为有事故原因的重点事故报道统计),其中2021年统计的事故有36起,2022年为30起,所统计的事故几乎可以覆盖用户全部用车场景,也覆盖了国内市场大多数汽车品牌,包括销量较高的比亚迪与特斯拉等,说明电池安全及整车电气安全问题仍然普遍存在且未得到较好解决,需要更深层的分析与研究来保证用户用车安全。

### 1.2 新能源汽车起火原因分析

由上述统计可知,新能源汽车起火事故发生的主要场景为静置停放、充电、行驶中及碰撞后,而表面现象可以分为车辆静置中自燃、使用中自燃、其他状态下自燃及碰撞后短路起火。从表面现象方面分析,2021~2022年的重点事故中,在静置停放、充电及行驶中的起火事故原因均为自燃,除了较为特殊的人为纵

火或者周边事物起火以及被外部火源引燃,大多数起火事故的原因均是车辆自身原因导致的自燃。之前出现较多的在充电时由于充电安全技术不成熟及充电设备不规范导致的外接充电设备起火或短路引起的车端起火现象已不在重点事故报道的范围。随着充电安全技术的逐渐成熟,充电安全问题导致的事故也逐渐减少,公众对充电安全担忧有所缓解,但是由于车辆本身安全问题导致的自燃起火事故仍然占有相当大的比例。

从图1及图2可以看出,2021年事故原因占比最大的为使用中自燃,比例为61%,静置中自燃的比例为22%。而在2022年,静置中自燃的事故占比最高,比例为47%,使用中自燃的比例为40%。经过对2年事故对比发现,不仅是在行驶和充电使用场景下的自燃事故占有很大比例占2年总事故数量的55%,静置中自燃的比例也相当高,占2年总事故数量的30%。这是新能源汽车独有的特性,在正常生产生活中新能源汽车使用者一般认为切断能量源的对外输出后,设备会处于一种相对安全的状态,但是由于新能源汽车是复杂的系统工程,在整车断电静置的状态下动力电池本身也可能存在安全风险,这种风险的原因复杂多样,一般可以分为电芯的内部原因及外部原因。

从外部原因来看,若电池包在之前使用的过程中防护失效导致进水,或是冷却液泄漏,当导电介质积累到一定量后会出现如下2种情况<sup>[6,13]</sup>:

(1)快速失效:高压带电部件与箱体间绝缘失效,最终导致短路或者拉弧。

(2)缓慢失效:长时间浸泡后电芯壳体发生电化学腐蚀后电解液泄漏,液体电导率上升,在绝缘距离不足的情况下导致拉弧或短路,最终起火。

从内部原因来看,有如下2种情况:

(1)过充<sup>[14]</sup>或过放后内短路:电极出现晶枝,刺破隔膜,持续放热,热量积累到达一定程度后引发连锁反应导致热失控。

(2)电芯缺陷自引发内短路:由于隔膜质量、正极或电解液杂质等原因导致的内短路。

无论是内部原因还是外部原因都存在潜伏期长且不易发现的特点,在充电、淋雨涉水、底部碰撞后水冷板有微小漏点等情况下,很长时间之后才会引发的电池热失控,最终造成起火事故。这种事故原因表明,除了监控动力电池的运行状态,在整车断电后如何对动力电池失效风险进行有效监控及预警也是需要关注和重点攻关的研究方向。

表1 2021年电动汽车起火事件

序号	时间	能源类型	电池类型	地点	车辆状态	起火原因
1	2021年1月	纯电动	三元锂电池	浙江杭州	静止停放	静置中自燃
2	2021年1月	混合动力	三元锂电池	上海	行驶中	使用中自燃
3	2021年1月	纯电动	三元锂电池	上海	行驶中	使用中自燃
4	2021年1月	纯电动	三元锂电池	广东中山	充电	使用中自燃
5	2021年1月	纯电动	三元锂电池	海南海口	充电	使用中自燃
6	2021年2月	纯电动	三元锂电池	广东肇庆	行驶中	使用中自燃
7	2021年2月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
8	2021年2月	纯电动	三元锂电池	山西太原	行驶中	使用中自燃
9	2021年3月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	充电	使用中自燃
10	2021年4月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	静止停放	静置中自燃
11	2021年4月	纯电动	三元锂电池	广东广州	充电	使用中自燃
12	2021年4月	纯电动	三元锂电池	广东广州	静止停放	静置中自燃
13	2021年4月	纯电动	三元锂电池	广东广州	碰撞	碰撞后短路起火
14	2021年4月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	静止停放	静置中自燃
15	2021年5月	纯电动	三元锂电池	江苏南通	碰撞	碰撞后短路起火
16	2021年5月	纯电动	三元锂电池	浙江杭州	行驶中	使用中自燃
17	2021年5月	混合动力	三元锂电池	上海	碰撞	碰撞后短路起火
18	2021年5月	纯电动	三元锂电池	广东广州	碰撞	碰撞后短路起火
19	2021年5月	混合动力	三元锂电池	辽宁铁岭	其他	其他状态自燃
20	2021年5月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	行驶中	使用中自燃
21	2021年5月	纯电动	三元锂电池	广东河源	充电	使用中自燃
22	2021年6月	纯电动	三元锂电池	上海	行驶中	使用中自燃
23	2021年6月	纯电动	三元锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
24	2021年6月	纯电动	三元锂电池	河南濮阳	静止停放	静置中自燃
25	2021年7月	纯电动	三元锂电池	山西太原	充电	使用中自燃
26	2021年7月	纯电动	三元锂电池	江苏苏州	静止停放	静置中自燃
27	2021年7月	纯电动	三元锂电池	江苏苏州	行驶中	使用中自燃
28	2021年7月	纯电动	三元锂电池	河南郑州	充电	使用中自燃
29	2021年7月	纯电动	三元锂电池	海南海口	充电	使用中自燃
30	2021年7月	纯电动	三元锂电池	陕西西安	充电	使用中自燃
31	2021年7月	纯电动	三元锂电池	广东深圳	行驶中	使用中自燃
32	2021年7月	纯电动	三元锂电池	上海	碰撞	碰撞后短路起火
33	2021年8月	纯电动	三元锂电池	附件莆田	充电	使用中自燃
34	2021年8月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	行驶中	使用中自燃
35	2021年8月	纯电动	磷酸铁锂电池	江苏苏州	行驶中	使用中自燃
36	2021年8月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	充电	使用中自燃

而在使用过程中的起火事故原因则比较常规,可以分为整车部件失效和动力电池失效2种。由整车部件引发的起火事故主要诱因是B级电压部件或者低压部件由于老化或者承受外力后破损甚至泡水后绝缘失效,导致短路后产生欧姆热、热量累积。虽然电

气系统部件大多是阻燃材料不易起火,但车内其他部件如毛毡、隔音棉、塑料、油污等均为易燃品,会被发热点引燃最终造成起火事故。根据现有文献,动力电池失效主要原因是外短路、内短路、过充电及过放电导致的电池热失控,最终导致电池起火<sup>[14-18]</sup>。

表2 2022年电动汽车起火事件

序号	时间	能源类型	电池类型	地点	车辆状态	起火原因
1	2022年1月	纯电动	磷酸铁锂电池	天津	静止停放	静置中自燃
2	2022年1月	纯电动	三元锂电池	海南三亚	行驶中	使用中自燃
3	2022年1月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	其他	其他状态自燃
4	2022年1月	混合动力	磷酸铁锂电池	福建三明	静止停放	静置中自燃
5	2022年2月	混合动力	磷酸铁锂电池	广东中山	行驶中	使用中自燃
6	2022年3月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
7	2022年3月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
8	2022年3月	纯电动	三元锂电池	广东深圳	静止停放	静置中自燃
9	2022年4月	混合动力	磷酸铁锂电池	广东韶关	静止停放	静置中自燃
10	2022年4月	纯电动	三元锂电池	四川成都	充电	使用中自燃
11	2022年4月	纯电动	三元锂电池	广西南宁	充电	使用中自燃
12	2022年4月	纯电动	三元锂电池	海南海口	充电	使用中自燃
13	2022年5月	纯电动	三元锂电池	广东深圳	充电	使用中自燃
14	2022年5月	纯电动	三元锂电池	香港	静止停放	静置中自燃
15	2022年5月	纯电动	三元锂电池	广州	充电	使用中自燃
16	2022年5月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
17	2022年6月	混合动力	磷酸铁锂电池	广西贵港	行驶中	使用中自燃
18	2022年6月	混合动力	磷酸铁锂电池	广东佛山	行驶中	使用中自燃
19	2022年6月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东珠海	静止停放	静置中自燃
20	2022年6月	纯电动	磷酸铁锂电池	内蒙古鄂尔多斯	静止停放	静置中自燃
21	2022年6月	纯电动	磷酸铁锂电池	上海	静止停放	静置中自燃
22	2022年6月	纯电动	三元锂电池	广东佛山	静止停放	静置中自燃
23	2022年6月	纯电动	磷酸铁锂电池	广东深圳	静止停放	静置中自燃
24	2022年6月	纯电动	三元锂电池	湖北襄阳	静止停放	静置中自燃
25	2022年7月	混合动力	磷酸铁锂电池	上海	行驶中	使用中自燃
26	2022年7月	纯电动	三元锂电池	上海	碰撞	碰撞后短路起火
27	2022年7月	纯电动	三元锂电池	浙江杭州	碰撞	碰撞后短路起火
28	2022年7月	纯电动	三元锂电池	台湾桃园	碰撞	碰撞后短路起火
29	2022年7月	纯电动	三元锂电池	河南郑州	行驶中	使用中自燃
30	2022年8月	纯电动	磷酸铁锂电池	四川阆中	行驶中	使用中自燃

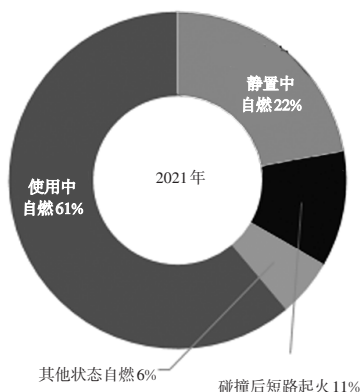


图1 2021年起火事故表面原因分布

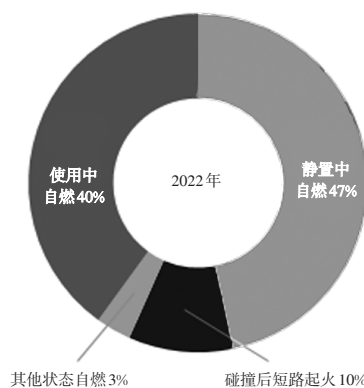


图2 2022年起火事故表面原因分布

经过对2021—2022年起火事故发生时间的统计分析(见图3),可以看出,起火事故虽然大多集中在5~7月的夏季,峰值在7月,但是1月和8月均有较高的事故量,分别有9起和5起,说明虽然夏季高温对起火事故的发生有一定影响,但并不是唯一诱因,随着动力电池热管理技术的发展与逐步成熟,针对高温工况下的电池热失控可以得到有效控制,还是应该从整车层面对整体的失效诱因进行全面且系统的研究。

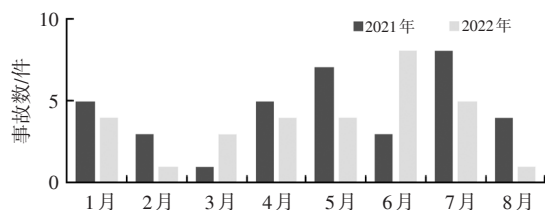


图3 起火事故月份分布

如图4所示,从电池材料体系对发生事故的影响进行分析,统计结果为三元锂电池发生的起火事故较多,占比64%。三元锂电池能量密度较高,材料活性更高,安全性较难保证,对于应用三元锂电池的新能源汽车在电池安全方面需要更多的安全保障措施。虽然磷酸铁锂电池发生起火事故的占比较低,但仍然发生安全事故24起。所以电芯材料体系虽然对于电池的安全性有一定的影响,但是无论是三元锂电池还是磷酸铁锂电池都应该在控制策略、结构设计、生产质量控制、状态监控及故障预警等层面进行全方位的安全设计。

## 2 失效模式分析

由于统计数据仅涵盖2021~2022年的起火事

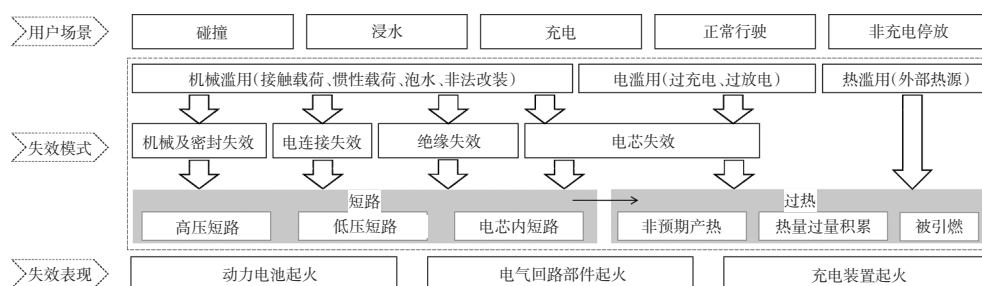


图5 新能源汽车整车起火事故失效模式分析

### 2.1 机械滥用场景下的失效模式

机械滥用场景下的失效模式主要包括:由于接触载荷或者惯性载荷的作用、泡水或非法改造成成机械/密封失效、电连接失效、绝缘失效或者直接导致电芯失效。机械滥用场景下的直接失效过程主要有以下情况<sup>[20]</sup>:

(1)碰撞后直接造成的短路失效。在运行过程中的带电线束或电气部件在碰撞的过程中产生带电部

件,起火事故诱因种类并不全面,且从报道的信息无法分析出事故的根本原因,所以从用户使用场景出发,结合现有文献,从整车层面进一步拆解出所有可能的失效模式。本文主要探讨整车级和系统级的安全防护,聚焦整车和系统的集成设计,所以在整车失效分析过程中不考虑电芯本身缺陷造成的失效。

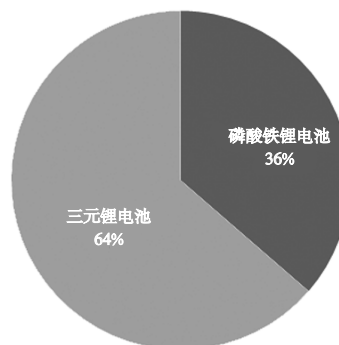


图4 新能源汽车起火事故电池类型分布

如图5所示,从用户的使用场景出发,异常或极端的使用场景为碰撞和浸水,正常的使用场景主要为充电、行驶和非充电停放,在这些使用场景中产生的滥用模式主要为机械滥用、电滥用和热滥用。无论是哪种场景最终的失效模式主要表现为短路与过热。短路主要为高压回路的短路、低压回路的短路及电芯的内短路;过热主要为电池包的热量过量积累或非预期产热导致的超温。短路由于欧姆热效应同样会导致过热,并最终导致整车电气部件起火、动力电池起火或外接充电设备起火<sup>[19]</sup>。

件的绝缘失效或者电连接失效,造成高压或电气回路短路,产生短路热效应引燃周边易燃部件,或直接导致电池包的外短路造成电池包热失控。此类过程起火部分为电气回路或动力电池。

(2)碰撞后的电芯失效。整车行驶中碰撞或者底部碰撞后直接造成电芯的塑性形变,导致电芯内短路引起电池包热失控。此类过程起火部分主要为动力电池。

(3)浸水情况下的密封失效。在整车泡水后,泡水工况超出了电气部件或者动力电池的密封等级要求,造成密封失效,会造成电气部件进水后短路或者电池包进水后发生电芯外短路。此类过程起火部分为电气回路或动力电池。

机械滥用场景下的间接失效过程主要有以下情况:

(1)在非法改装或者碰撞后并未造成直接的短路,但却破坏了电气部件或动力电池的绝缘措施,造成带电部分外露,在之后的行驶振动过程中、涉水情况下或再次碰撞时,造成了整车或电池包内的高低压回路短路,进而导致起火。此类过程起火部分为电气回路或动力电池。

(2)在非法改装或者碰撞后造成了电连接失效或者电气部件/动力电池密封的失效,在涉水或下雨的情况下出现了电气部件/电池包进水,造成了整车或电池包内的高低压回路短路,进而导致起火。此类过程起火部分为电气回路或动力电池。

## 2.2 电滥用场景下的失效模式

电滥用场景主要的失效原因为电池的过充电及过放电,进而导致电芯失效引起热失控<sup>[21]</sup>。

过充电的失效是由于充电功率表设计不合理或充电设备/电池管理系统(Battery Management System, BMS)控制失效导致的超过电池能力充电,电压超出正常使用范围。在高电位作用下,正极界面发生系列氧化副反应导致电芯的内部热量累积,引发链式反应并负极析锂,发生内短路,进而触发电芯热失控。

过放电的失效是由于放电MAP设计不合理或BMS控制失效导致的持续过放电,使负极电位过高,发生铜箔集流体溶解反应,铜离子到达正极后还原为铜,沉积到一定程度后刺穿隔膜引发内短路,进而触发热失控。

## 2.3 热滥用场景下的失效模式

热滥用的场景主要为整车处于超出设计的高温环境、热管理系统能力的覆盖范围不足或热管理系统失效,导致动力电池热量累积后超温,并无法及时散热而导致电池进入链式反应进程逐步引发热失控<sup>[22]</sup>。

热滥用的其他外部失效模式为接触外部热源或火源导致电池过热,或是整车部件、动力电池直接被外部火源引燃,之后引起的整车起火。

## 2.4 典型案例分析

本研究所统计的起火事故报道,虽然大部分只报道了事故场景及表面原因,但是存在几起报道详细的

典型案例,可供进行原因分析,并可以与整车失效模式拆解相互印证。

事故1发生于河北石家庄,整车在雨中涉水后在空旷场地静置停放一段时间之后发生起火自燃,属于静置中自燃的表面原因。经过对事故车辆详细分析后发现,整车失效过程是在非法改装后导致电池包高压电连接密封失效。而后在整车涉水时,电池包从电连接处进水,但进水量并未导致直接的带电部件短路,在静置一段时间后由于电芯壳体电化学腐蚀导致电解液泄漏,液体电导率上升后绝缘失效导致了电池包前部和后部的拉弧和短路(见图6),最终导致电池包起火,整个过程属于机械滥用场景下的间接失效过程。



图6 事故1电池前部拉弧

事故2是纯电动汽车在充电过程中起火,通过数据监控发现起火时单个模组电压急速下降,符合过充电时高电位作用下导致的电芯热失控现象,分析事故原因是过充电,符合电滥用场景下的电芯失效模式。

事故3发生于广东,事故现象是机舱前部发生浓烟,一段时间后起火,起火点最终锁定为散热器及散热风扇,起火原因锁定为该处低压线束老化磨损后短路发热,最终导致周边可燃物被引燃,属于机械滥用场景下惯性载荷引起的低压回路短路失效。

## 2.5 设计层面预防思路

由于电池管理系统控制技术已经基本发展成熟,2021~2022年电滥用场景下的过充电或者过放电失效模式已经从控制层面得到了较好改善。热滥用场景通过阻燃材料的合理选用与易燃部件的隔离也得到了较好的改善。

从事故原因占比中看,机械滥用场景中碰撞或泡水工况下的失效模式仍处于多发状态,具体分析如下。

针对碰撞工况,首先对带电部件碰撞后产生绝缘失效或者电连接失效,造成的高压或者电气回路短路情况进行规避。在设计过程中需要考虑高、低压线束及相关带电部件的布置是否在碰撞路径中,通过合理地布置规划结合碰撞仿真,尽量避免出现在前舱或侧

围的碰撞路径中,如果无法避免被碰撞到,需要对关键的带电部分尤其是电连接件进行充分的绝缘防护,外加护壳或增加其他绝缘手段,保证碰撞后仍满足接触防护等级要求。

其次对于碰撞导致的电池包相关的高、低压回路短路或者电芯失效进行规避。在常规的对整车正面碰撞、小偏置碰撞及侧面柱碰工况下的电池包及整车的结构防护设计基础上,需增加对电池底部托底、石击、球击等情况的结构防护,保证电池底部的刚度及强度足够承受各类工况下的撞击并且不造成内部结构的失效,不建议将水冷板布置于电池底部,可考虑底部增加额外防护结构。另外,不能只依靠底部额外增加的防护结构来保证底部碰撞安全,需考虑电芯本身的热阻隔防护,避免热扩散,以及极端工况下底部水冷板变形漏液后的绝缘防护,可考虑增加箱体内部金属表面的绝缘材料覆盖率,尽量做到100%。

再次对于底盘下部300 mm涉水线以下的高低电压束及电气部件,防护等级需同时满足静态泡水工况及静态涉水工况,防水防尘等级需考虑在耐久工况过后仍能满足防护等级要求,设计及验证均考虑动态交变工况。

### 3 新能源汽车整车安全研究探讨

#### 3.1 整车及三电系统的失效模式需进一步探究

以往起火事故的失效模式研究大多数都只聚焦于动力电池的单一领域中,通过起火事故原因的统计分析发现新能源汽车起火事故的诱因复杂且多样,甚至有时是多重失效模式同时作用导致。在进行完整的失效模式分析之前,对于绝缘的防护及整车高压部件的防护并未被较好的关注,高压线束及高压部件的破损短路或绝缘失效也是相当大的风险项。因此从整车和三电系统的视角去探究起火事故的失效模式,能更加全面地了解整车起火事故的失效过程,并且根据失效过程的详细拆解形成系统级失效模式与影响分析,才能更好地指导整车安全设计,并且形成系统全面的安全设计方案,并且有利于建立更可信、更高精度的车端诊断系统级云端预警系统。

#### 3.2 整车/系统电安全试验开展及数据库构建的必要性

整车/系统电安全不仅包含电池安全也包含整车高压电气部件的安全,涉及正常充电和行驶过程中的安全,还包括碰撞和浸水工况下的安全。当前的电池安全的机械滥用试验多为静态下或者准静态下的加

载,且为仅有电池包单一部件的试验模拟,而碰撞工况下负载状态、载荷状态都是动态的,而且实车环境下的系统相互影响也是单一部件的台架试验无法模拟的,所以开展整车级和系统级的碰撞安全试验十分必要。传统车的安全技术经历了漫长的试验积累,其中包括大量的整车碰撞试验和台架试验,新能源汽车也要经历相同的历程,只有不断完善试验条件、优化试验方法并积累试验数据、探索试验方向,才能从根源上突破现有整车电安全技术的瓶颈,真正形成完善的新能源汽车电安全体系。

#### 3.3 云端故障预警监控的发展和应用

通过统计数据可知,还有大量的起火事故在断电后静置状态下发生,此时的车辆状态既无车端诊断系统监控也无驾驶员监管,规避此类场景只能依靠云端的大数据监控及AI智能预警,并且需要依托较为精细的系统级故障模型,做到精准预警由于车端算力有限,云端更适合进行这种多故障诱因的精细化模型计算。

### 4 结束语

本文说明了新能源汽车发生起火事故的主要原因在车辆本身,部分起火失效表现为电池起火,另有一些起火失效形式为电气回路和充电设备起火,另外,电池起火失效模式中也有相当大一部分的失效诱因是由于系统设计安全性考虑不足导致的,并非电池本身安全设计存在问题。在理论层面对机械滥用、电滥用及热滥用场景下的主要失效过程分析研究,证实了电池起火原因主要归结为内短路与外短路,但是过充电和过放电的失效原因最终也可归结为内短路,所以本文将过充电与过放电的失效模式归结为起火失效的整车级电滥用失效模式,并补充了机械/密封失效、电连接失效、绝缘失效、电芯失效4个系统级的失效模式,至此补全了整车起火事故的失效模式,解决了过往研究无系统级与整车级全维度失效诱因分析,无法有针对性地提出系统级解决方法的问题。本文围绕当前整车安全技术研究的不足进行了一些研究方向的探索,对于新能源汽车整车电安全的设计方向提供了参考和一定的依据,在后续的研究中仍需对所提安全技术进行详细的方案设计和试验验证,总结行之有效的系统级解决方案。

#### 参 考 文 献

- [1] 乘用车市场信息联席会. 2024年1月份全国新能源市场深度分析报告[EB/OL]. (2024-02-29)[2023-12-30]. <https://www.caam.org.cn/>

- // www.epcaauto.com/newslist.php?types=csjd&id=3386.
- [2] 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.
- [3] SUN P, BISSCHOP R, NIU H, et al. Correction to: A Review of Battery Fires in Electric Vehicles[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1411.
- [4] 冯旭宁. 车用锂离子动力电池热失控诱发与扩展机理、建模与防控[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [5] FENG X, OUYANG M, LIU X, et al. Thermal Runaway Mechanism of Lithium Ion Battery for Electric Vehicles: A Review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.
- [6] DIETZ RAGO N, BAREÑO J, LI J, et al. Effect of Overcharge on Li(Ni<sub>0.5</sub>mn<sub>0.3</sub>co<sub>0.2</sub>)O<sub>2</sub>/graphite Lithium Ion Cells with Poly(Vinylidene Fluoride) Binder. I – Microstructural Changes in the Anode[J]. Journal of Power Sources, 2018, 385: 148-155.
- [7] 科学技术部. 关于印发国家十二五科学和技术发展规划的通知[EB/OL]. (2011-07-13)[2023-12-30]. [https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzd/gknr/qtwj/qtwj2011/201107/t20110713\\_88228.html](https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzd/gknr/qtwj/qtwj2011/201107/t20110713_88228.html).
- [8] 尚蛟. 我国新能源汽车安全情况浅析[J]. 汽车工业研究, 2020(1): 34-37.
- [9] 阮艺亮. 我国新能源汽车起火事故分析与对策[J]. 汽车工业研究, 2019(3): 31-35.
- [10] 佟丽珠. 新能源汽车安全问题现状分析[J]. 时代汽车, 2018(9): 61-62.
- [11] 黄学杰. 电动汽车与锂离子电池[J]. 物理, 2015, 44(1): 1-7.
- [12] 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.
- [13] GUO R, LU L, OUYANG M, et al. Mechanism of the Entire Overdischarge Process and Overdischarge-Induced Internal Short Circuit in Lithium-Ion Batteries[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 30248.
- [14] HONG J, WANG Z, QU C, et al. Investigation on Overcharge-caused Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries in Real-world Electric Vehicles[J]. Applied Energy, 2022, 321: 119229.
- [15] 舒俊豪, 武小花, 杨佳璐, 等. 新能源汽车动力电池安全问题分析及改进趋势综述[J/OL]. 电源学报.(2022-10-09)[2024-03-20]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=DFdco8Sly0Jm73AoplI7JnRrZw-KoV22Y0fNkOkT-MyoRDs8fvURT8Adez4ZcDvE4vLFdYD2R\\_cxEA9IN4uU1Z2P5ZPUENS0u2P6mXsg4RoJt-Qc-qUOZk2Dw8smS2y5T2xjUGAom4IY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=DFdco8Sly0Jm73AoplI7JnRrZw-KoV22Y0fNkOkT-MyoRDs8fvURT8Adez4ZcDvE4vLFdYD2R_cxEA9IN4uU1Z2P5ZPUENS0u2P6mXsg4RoJt-Qc-qUOZk2Dw8smS2y5T2xjUGAom4IY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [16] 王芳, 王峥, 林春景, 等. 新能源汽车动力电池安全失效潜在原因分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1411-1418.
- [17] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-104+116.
- [18] 易密, 王震坡. 锂离子动力电池过充热失控行为及失效机制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [19] MENG L H. Research and Analysis of Electric Vehicle Fire Accidents and Review of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Mechanism[J/OL]. International Journal of New Developments in Engineering and Society, 2022, 6(2): 252331097.
- [20] LI H, ZHOU D, ZHANG M, et al. Multi-field Interpretation of Internal Short Circuit and Thermal Runaway Behavior for Lithium-Ion Batteries Under Mechanical Abuse[J]. Energy, 2023, 263: 126027.
- [21] ZHANG G, WEI X, CHEN S, et al. Revealing the Impact of Slight Electrical Abuse on the Thermal Safety Characteristics for Lithium-Ion Batteries[J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(11): 12858-12870.
- [22] LARSSON F, MELLANDER B E. Abuse by External Heating, Overcharge and Short Circuiting of Commercial Lithium-Ion Battery Cells[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2014, 161(10): A1611-A1617.

(责任编辑 明慧)

#### 【作者简介】

何忠青(1993—),男,中国第一汽车股份有限公司研发总院,工程师,研究方向为新能源汽车三电开发及三电系统集成。

E-mail: hezhongqing@faw.com.cn