

锂离子电池汽车全尺寸火灾试验研究进展综述

杨晓茜, 张 怡, 邓 玲, 谢元一

(应急管理部四川消防研究所, 四川 成都 610036)

摘 要:分析近年来国内外发生的锂离子电池电动汽车火灾事故,对电动汽车的火灾风险进行简要概括。重点针对美国、加拿大、奥地利、瑞典、中国等国家在锂离子电池电动汽车全尺寸火灾试验及火灾防控方面的科研成果进行综述。根据国内外研究成果,对不同电池容量的锂离子电池电动汽车的热释放速率进行汇总,重点总结燃烧总热释放量、热释放速率峰值和释放有毒氟化氢气体与电池容量的关系。旨在为我国锂离子电池电动汽车火灾防控和火灾风险评估技术研究提供必要的数据参考。

关键词:锂离子电池;电动汽车;全尺寸火灾试验;热释放速率

中图分类号:X913.4;TM912 **文献标志码:**A

文章编号:1009-0029(2024)01-0029-05

随着锂离子电池技术的快速发展,我国电动汽车数量大幅增长,锂离子电池由于高能量密度的优点成为最常见的动力电池。然而,电动汽车的消防安全一直是业界重点关注的问题。热释放速率是衡量火灾危险性的的重要参数,例如在隧道的通风排烟系统设计中,热释放速率是计算排烟量和临界风速的重要输入参数。电动汽车的燃烧热释放速率是其消防安全的重要研究内容。

1 电动汽车事故案例及火灾风险

1.1 电动汽车火灾事故案例

近年来,国内外电动汽车火灾事故频发^[1]。综合电动汽车火灾事故案例发现,电动汽车火灾的常见原因为锂离子电池受到外部冲击起火或充电状态下发生热失控,如图1所示,充电起火占30.8%,撞击起火占34.7%。

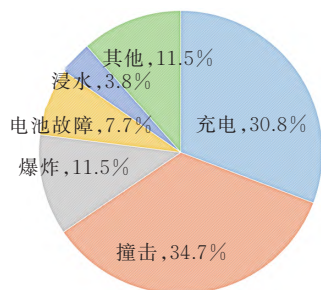


图1 电动汽车火灾事故原因分布

Fig. 1 Distribution of cause of EV fire accident

1.2 电动汽车的火灾风险

热失控是指由于外部加热或电池内部产生热量而导

致电池温度升高,如果温度继续升高,电池中的电解液会沸腾,导致电池内压力升高,压力达到临界点,电池就会破裂,释放可燃气体,这些气体与周围空气中的氧气混合,可能形成爆炸性混合物。混合物遇到火源很容易燃烧,使得周围的电池进一步受热,并引起级联反应。当热失控发生时,会产生烟雾、起火甚至爆炸,见图2^[2]。

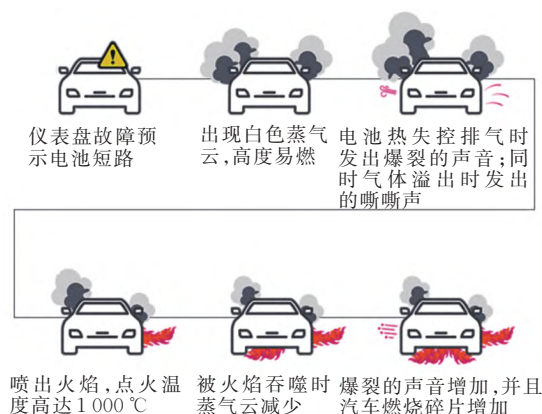


图2 电动汽车火灾事故发展示意图

Fig. 2 EV fire behavior diagram

2 锂离子电池电动汽车全尺寸火灾试验研究进展

2.1 美国

2.1.1 NFPA

2009年,美国国家消防协会(NFPA)与美国能源部和汽车行业合作,针对电动汽车火灾中的个人防护装备、灭火抑制策略以及灾后清理措施等问题,实施了一项培训,目的是保护电动汽车火灾事故处置时应急救援人员的安全。

2013—2014年,NFPA联合其他研究机构进行了电动汽车实体火灾试验研究,试验目的主要是研究水基抑制剂对锂离子电池火灾的抑制作用。针对电动汽车火灾抑制方法及灭火剂的选择、消防应急救援人员的个人防护装备等技术措施,探讨了电动汽车火灾与传统机动车火灾的不同之处,以及应急救援人员在电动汽车火灾与传统机动车火灾扑救过程中战术战略的不同^[3]。NFPA开展了6组模拟电动汽车火灾全尺寸试验,利用丙烷点火器引燃电池,灭火之前允许电池燃烧8~20 min。同时,对用于插电式混合动力汽车(PHEV)的16 kWh锂离子电池和用于混合动力汽车HEV的4.4 kWh锂离子电池进行燃烧测试。试验中,4.4 kWh锂离子电池安装在车辆货仓下

基金项目:应急管理部四川消防研究所基科费项目(T2019880103,20238801Z,20238812Z);消防救援局重点研发计划项目(2022XFZD12)

方,16 kWh锂离子电池安装在车辆底板下方。试验发现:水基抑制剂既能灭火,又能冷却电动汽车,但随着时间的推移,可能引发更多的电气故障,并与锂发生反应,释放氢气。与传统汽车火灾相比,电动汽车和混合动力汽车的火灾灭火救援用水量更大,灭火时间更长。研究发现,扑救混合动力汽车火灾的用水量为1~4 L,熄灭时间为15~56 min,扑灭纯电动汽车火灾用水量为4.4~10.0 L,熄灭时间为36~60 min。传统汽车火灾通常在5 min内被扑灭。

2.1.2 美国消防研究基金会

2020年,美国消防研究基金会(FPRF)与燃烧科学与工程公司(CSE)完成了一项关于停车场及车辆运输车中电动汽车风险的项目^[4],旨在更好地评估和分析停车场电动汽车起火对其他车辆的威胁,量化电动汽车的火灾危险和蔓延特性,以确定停车库结构的防火要求。该项目提出了以下3个潜在的研究重点:一是电动汽车火灾的早期探测技术;二是针对电动汽车火灾的自动喷水灭火保护装置的有效性;三是电动汽车火灾中车辆之间的火灾蔓延特性。研究结果表明:火焰在汽车间的蔓延,特别是从第一辆车到第二、第三辆车,是决定火灾严重程度和消防部门成功控制和扑灭火灾的关键。为了评估影响电动汽车火灾的扩散动力学和关键参数,需要进行全尺寸火灾测试。

2.2 加拿大

2015年,加拿大国家研究院(NRC)与加拿大交通部的人员针对2辆汽油车辆和5辆电动汽车,进行了传统燃油汽车与电动汽车对比燃烧测试研究^[5],在试验过程中,车辆和电池组配备了多个热电偶、电压传感器、热流计、烟雾探测器和气体采样管线进行参数测试。

试验中,试验车辆放置于量热计下方,测试车辆燃烧过程中的热释放速率。车辆被悬挂于丙烷点火器上方,依据UL 2580中电动汽车暴露在外火源的试验条件:5 min内温度上升至590℃,燃烧持续20 min。试验结果表明:

- 1)虽然测试过程中产生大量喷射火焰,但试验车辆并未出现剧烈爆炸。
- 2)如果以组件级别进行热释放速率测试,充电状态SOC应保持在最高水平,以确保储能系统对车辆的供电。
- 3)储能系统内部的启动反应时间不足2 min。
- 4)应当遵循UL 2580中的试验要求对储能系统施加外部火源。

2.3 奥地利

2019—2021年,为了研究隧道内使用的电动汽车的燃烧特性,奥地利格拉茨工业大学、奥地利格拉茨工业大学车辆安全研究所等多家研究机构联合,在奥地利伯格隧道(Zentrum am Berg)研究中心进行了7组锂离子电池组模块试验和2组电池包试验^[6-8],电池组模块分别是6

组NCM镍钴锰酸锂电池($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$),1组LFP磷酸铁锂电池(LiFePO_4),试验电池组模块充电状态为SOC=100%,隧道内的风速为1.5~2.0 m/s,试验测试了电池组模块的电压、温度、空气流速、湿度及大气压力,同时测量了电池模块的质量损失,利用不同测试方法测试了电池模块燃烧过程中释放气体的浓度。同时,在同样的试验隧道内进行了3辆电动汽车、2辆燃油汽车的全尺寸火灾试验研究,并且在试验过程中分别利用水及防火毯进行灭火试验。试验结果表明:锂离子电池汽车火灾热释放速率及温度与传统燃油动力汽车相似,然而,燃烧过程中释放的氟化氢气体及磷酸显著增加。灭火试验发现,采用常规量的水灭火并不能达到预期效果,但直接进入电池区域的水可以有效抑制电池燃烧。

2.4 瑞典和瑞士

2.4.1 瑞典RISE研究所

2019年,瑞典RISE与当地的汽车企业联合进行了相关研究^[9],通过调查电动汽车火灾风险与安全解决方案,制定锂离子电池电动汽车相关的风险管理程序,并通过全面试验,评估灭火与紧急冷却系统的有效性,评估该灭火系统及冷却系统集成到锂离子电池组中的可能性及安全性。研究从不同层级考虑了锂离子电池的安全解决方案。针对模块级别,解决方案包括:在模块之间提供传热屏障、在电池组壁上设置通风口以及设置专用的冷却或惰性气体系统等。针对电动汽车,研究人员开发了基于各种测量参数的模型,如温度、湿度、电压、电阻和电流,预测潜在的内部短路及发生火灾的风险。

2020年,瑞典RISE研究所进行了“电动汽车火灾释放有毒气体”的试验研究^[10],试验发现:电动汽车火灾可释放出一氧化碳、有机刺激物和致癌有机化合物。锂离子电池燃烧释放出的有毒气体为氟化氢,对现场的应急救援人员会产生严重危害。根据RISE研究团队的研究结果:电动汽车起火产生的烟尘中可能含有大量的钴、镍和锰化合物。这些重金属会使未受保护的皮肤产生严重过敏反应。因此,电动汽车起火后的清理工作应该由专业人员进行,并配备足够的防护装备。同时,燃烧损坏的锂离子电池需要隔离14 d后,才能安全查看。

2022年,瑞典RISE研究所针对一辆纯电动汽车、一辆燃油汽车、一辆拆除电池组的纯电动汽车进行了实体燃烧灭火试验^[11]。其中,纯电动汽车电池组电池类型为锂-镍-锰-钴氧化物(NMC)型电池,电池能量为50 kWh,充电状态为SOC为90%。该试验中,对电动汽车灭火试验中产生的灭火用水水样进行化学分析和急性毒性测试。对比传统车辆灭火试验中的水样可以发现,电动汽车和电池组中的灭火用水水样含有更高浓度的镍、钴、锂、锰和氟化物。

2.4.2 瑞典SP技术研究所

2014年11月,瑞典SP技术研究所对一辆电动混合动力公交车进行了全尺寸火灾试验^[12]。试验的主要目的

是调查一辆燃烧的电动混合动力公交车是否会对灭火救援工作带来不同的挑战,以及火灾中电池是否会掉入发动机舱,是否存在爆炸的风险,在整个火灾试验中,未启动灭火抑制系统。测试结果表明:整个试验过程中,电池并未掉入发动机舱,此外,电池的温升速率比车辆内的温升速率晚7 min左右。但当电池开始燃烧时,火势非常猛烈,从电池开始燃烧时可以明显观察到火势的增加,电池增加了燃烧过程中的可燃物,33~36 min左右电池发生轻微的爆炸,随后轮胎发生猛烈爆炸。

2017年5月,瑞典SP技术研究所与Skien消防部门、Grenland能源公司和挪威东南大学学院合作,对2辆电动汽车进行了全尺寸电动汽车燃烧测试^[13-14]。电动汽车全尺寸火灾试验中,分别选择2种工况:电动汽车因机械撞击引发火灾,外部火源引燃电池组引发火灾。

在试验过程中,电池由26 kWh的镍锰钴氧化物(NMC)阴极锂离子电池组成,并分成12个模块,每个模块有30个电池单元。

1) 工况a:电动汽车因机械撞击引发火灾。工况a中,电动汽车尾部朝下,从20 m的高度降落并以70 km/h的速度撞击地面,主要研究电动汽车受到机械冲击是否会引发电池热失控起火。试验过程中,汽车撞击地面后立即冒烟,电池组的温度迅速升高。撞击的最初几分钟内,烟雾量有所变化,但撞击后3~6 min内温度保持稳定,甚至有所下降。6 min后,温度再次迅速升高,电池开始燃烧,火势蔓延到汽车的其他部位。9 min后,汽车被火焰吞没,此后,汽车自由燃烧,并在90 min内完全烧毁。最后,在火焰熄灭后很长一段时间内,电池组的温度仍然较高,在撞击后的150 min内,电池组不同部位的温度为310~540℃。

2) 工况b:外部火源引燃电动汽车的电池组引发火灾。工况b中,通过外部加热电池组引发锂离子电池热失控,研究灭火用水量。试验中,将小型丙烷燃烧器放置在车辆底部电池组的正下方。试验约10 min后观察到火焰,12 min时移除丙烷燃烧器。共进行了2次灭火,第一次是在14 min进行的,明火被熄灭,用水量约为100 L。此后不久,电动汽车复燃,28 min时进行第二次灭火,此时电动汽车已经完全被火焰吞没,灭火时间约为4 min,火焰熄灭,用水量约为550 L,温度未再次升高。

试验发现:工况a中,电动汽车电池组受到机械冲击导致热失控而引发火灾,此类火灾会受到冲击能量、电池保护方式以及电池类型等因素的影响;工况b中,电动汽车电池组受到外部热源冲击,导致汽车本身的燃烧,移除外部热源后,汽车的持续燃烧会导致电池组发生热失控。通过电动汽车灭火用水量的测试,用水量和灭火时间与传统的燃油汽车火灾相似。通过对温度曲线和电池的研究发现,工况b中,电池没有发生热失控。电池没有发生热失控时,预计电动汽车火灾可以像传统车辆的火灾一样被扑灭。

2.4.3 瑞士联邦材料科学与技术实验室

2019年12月,瑞士联邦材料科学与技术实验室(EMPA)与Walthert Progress AG合作进行了电动汽车实体火灾试验^[15],以测试电动汽车在停车场或隧道中着火时可能造成的损害和灾难。研究人员在3种受控的火灾场景下测试了电动汽车的燃烧:封闭空间内电动汽车火灾,有喷水灭火系统的空间内电动汽车火灾,通风隧道内电动汽车火灾。研究发现:虽然在某些情况下,电动汽车电池火灾并不比其他类型的汽车火灾更危险,但释放的烟雾和煤烟含有有毒的金属氧化物,会对火灾后的清理工作带来危险。

2.5 中国

2020年,王青松团队为了评估电动汽车的火灾危险性及火焰在电动汽车上的蔓延情况,针对锂离子电池组进行了全尺寸热失控试验^[16]。试验过程可分为3个阶段:触发热失控事件阶段、不同模块间热失控传播阶段和灭火阶段。在试验中,主要对触发热失控事件时电池组件的温度及利用红外热像仪对热失控的红外图像进行了测试。试验发现,从触发热失控事件到火焰可以通过整个车厢传播的最短时间为22 s。

此外,大量的水可以有效地扑灭电动车火灾。然而,水对防止电池组内部热失控的作用较小,并且由于灭火剂不能直接作用于电池,冷却效果很大程度上也受到限制。

2022年,为深入研究电动汽车火灾机理、灭火措施,清华合肥公共安全研究院联合海南省消防救援总队、安徽省消防救援总队等单位,在合肥市开展了全尺寸电动汽车燃烧试验^[17]。试验通过电池热失控引发电动车辆整体燃烧,采用热电偶、热辐射计、压力传感器、气体成分抽样采集系统等,观察电动汽车电池热失控及火灾蔓延,获取热失控各阶段电池舱及周边温度、爆炸冲击力、烟毒特性等数据。结果表明:全氟己酮灭火剂延缓了电池热失控的速度,灭火毯对车体燃烧有明显的控制作用,压缩空气泡沫可有效扑灭车体(除电池舱)火灾,电池舱需要大量冷却液彻底冷却以防止复燃。

3 锂离子电池电动汽车实体火灾试验结果分析

3.1 锂离子电池电动汽车火灾热释放速率汇总

对已有研究的电动汽车火灾试验热释放速率进行汇总,见表1。

3.2 总热释放量与电池容量的关系

瑞典RISE研究所在锂离子电池电动汽车有毒气体释放研究项目中,利用量热计测量锂离子电池燃烧的总热释放量,提出锂电池燃烧总热释放量与电池容量的关系,见式(1)。拟合相关系数 $R^2=0.99$ 。

$$Q_{\text{all}} = 48.5E \quad (1)$$

式中: Q_{all} 为锂离子电池电动汽车燃烧的总热释放量,kJ; E 为锂离子电池容量,Wh。

表1 不同类型电动汽车火灾试验热释放速率

Table 1 HRR rate in fire test of different types of electric vehicles

车辆类型	电池能量&充电状态	热释放速率峰值/MW	到达峰值的时间/min
纯电动汽车A ^[10]	40 kWh SOC 80%	5.2	22.0
纯电动汽车B ^[10]	24 kWh SOC 80%	6.7	25.0
纯电动汽车1A ^[18]	SOC 100%	6.0	7.0
纯电动汽车1B ^[18]	SOC 85%	6.0	6.0
纯电动汽车2 ^[18]	SOC 100%	7.0	10.0
2014电动汽车A ^[19]	SOC 100%	6.0	7.0
2014电动汽车B ^[19]	SOC 80%	5.9	5.8
2013电动汽车B ^[19]	SOC 100%	6.9	10.2
电动汽车(电池+塑料外壳) ^[20]	24.0 kWh	6.3	—
电动汽车1 ^[21]	16.5 kWh	4.2	—
电动汽车2 ^[22]	23.5 kWh	4.7	—

3.3 火灾热释放速率与电池容量的关系

香港理工大学消防工程研究中心的SUN P Y等^[22]对文献资料中不同类型锂离子电池、便携式电池模块、电动汽车锂离子电池、电动汽车火灾、电池电站火灾试验中热释放速率数据分析发现:不同类型锂电池的峰值热释放速率与其电池容量 E_B 的0.6次方呈线性关系,其适用范围为 $10\sim 10^7$ Wh,即从单个锂电池到大型锂电池储能装置都可适用,关系式为: $q_{\max} = 2E_B^{0.6}$ 。

3.4 火灾释放有毒气体研究

瑞典RISE研究所联合其他研究机构发起E-TOX项目,针对电动汽车火灾中有毒气体的释放进行了试验研究。在锂离子电动汽车燃烧过程中,锂离子电池在火灾中释放的有毒气体主要来自电解液的燃烧,电解液中含有六氟磷酸锂等其他含氟化合物,含氟化合物在加热或者燃烧的过程中释放出HF。

RISE的研究结果表明:HF的释放量与锂离子电池容量的关系符合式(2)。

$$m = 0.03E \quad (2)$$

式中: m 为氟化氢气体释放量,g; E 为电池的容量,Wh。

试验研究表明:氟化氢气体的释放是电动汽车燃烧与燃油汽车燃烧释放气体的最大区别。测得含量较高的物质是CO、HF、HCl、SO₂、Co、Li和多环芳烃,CO₂、HCN和NO的含量也相对较高。多环芳烃是一种致癌物质,会引发消防应急救援人员的健康问题。

4 总 结

1)通过对文献资料中新能源锂离子电动汽车燃烧产生的热释放速率峰值进行收集整理,电动汽车热释放速率峰值为4.2~7.0 MW,到达热释放速率峰值的时间为6~25 min。

2)通过对锂离子电池电动汽车及电池燃烧试验的整理分析,测试的热释放速率峰值随电池容量呈线性关系,

其关系式为: $q_{\max} = 2E_B^{0.6}$;锂电池燃烧的总热释放量与电池容量有如下线性关系: $Q_{\text{all}} = 48.5E$ 。

3)电动汽车火灾中会释放大量的有毒气体,氟化氢气体是锂离子电动汽车燃烧与燃油汽车燃烧释放气体的最大区别。根据RISE的研究结果:不同锂离子电池燃烧的HF气体释放量与锂离子电池容量的关系为: $m = 0.03E$ 。

4)锂离子电池电动汽车火灾的抑制方面,国内研究表明:大量的水可以有效地抑制电动汽车火灾。但是,水对防止电池组内部热失控的作用不大,而且由于灭火剂不能直接作用于电池,冷却效果也很大程度上受到限制。

5)锂离子电动汽车火灾毒性气体释放方面:电动汽车起火产生的烟尘中可能含有大量的钴、镍和锰化合物。此类重金属会引起皮肤过敏反应。因此,电动汽车起火后的清理工作应由专业人员进行,并配备足够的防护装备,损坏的锂离子电池需要隔离14 d后才能安全查看。

6)我国开展新能源锂离子电动汽车实体火灾试验的研究重点主要包括以下方面:一是电动汽车火灾的早期探测技术;二是针对电动汽车火灾的自动喷水灭火保护装置的有效性;三是电动汽车火灾中车辆之间的火灾蔓延特性;四是电动汽车火灾给应急救援人员带来的风险及应对策略。可从个人防护装备、灭火抑制策略、灾后清理的最佳措施入手,保障应急人员的健康。

参考文献:

- [1] Electric vehicle fire incidents and statistics[EB/OL].<https://www.labovick.com/blog/electric-vehicle-fire-incidents-and-stats/>[2021-06-29]
- [2] EV traction battery fire behavior[EB/OL]. <https://www.evfiresafe.com/ev-fire-behaviour>[2023-02-01].
- [3] LONG R, BLUM T, BRESS A, et al. Best practices for emergency response to incidents involving electric vehicles battery hazards: A report on full-scale testing results[R]. MA: the Fire Protection Research Foundation, 2013.
- [4] BOEHMER H R, KLASSEN M S, OLENICK S M. Fire hazard analysis of modern vehicles in parking facilities[J]. Fire Technology, 2021, 57: 2097-2127.
- [5] MACNEIL D D. Electric vehicle fire testing[C]// Presentation to the 8th EVS-GTR Meeting, 2015.
- [6] Fire tests show that Austria's tunnels are fit for electric cars[EB/OL]. <https://www.tugraz.at/en/tu-graz/services/news-stories/media-service/singLeview/article/brandversuche-zeigen-oesterreichs-tunnel-sind-fit-fuer-e-autos>[2022-10-07].
- [7] <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html>[2022-10-07].
- [8] KANG S, KWON M, CHOI J Y, et al. Full scale fire tests of battery electric vehicles[J]. Tunnel Safety and Ventilation, 2023, 332: 120497.
- [9] BISSCHOP R, WILLSTRAND O, AMON F, et al. Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles[R]. 2019.
- [10] WILLSTRAND O, BISSCHOP R, BLOMQVIST P, et al. Toxic

gases from fire in electric vehicles[R].2020.

- [11] QUANT M, WILLSTRAND O, MALLIN T, et al. Ecotoxicity evaluation of fire-extinguishing water from large-scale battery and battery electric vehicle fire tests[J]. Environment Science Technology, 2023, 57:4821–4830.
- [12] ANDERSON P, BRANDT J, WILLSTRAND O. Full scale fire-test of an electric hybrid bus[R].2016.
- [13] Full scale electric vehicle fire test[EB/OL].<https://www.fireproduct-search.com/full-scale-electric-vehicle-fire-test>[2022-01-03].
- [14] Understanding electric vehicle fires[EB/OL].<https://www.if-insurance.com/large-enterprises/insight/risk-consulting-magazine/risk-consulting-2020-4/electric-vehicle-fires>[2022-01-03].
- [15] Testing&safety [EB/OL].<https://www.batterytechonline.com/testing-and-safety/how-dangerous-are-burning-electric-vehicles>. [2020-10-14].
- [16] LI H, CHEN H D, SUN J H, et al. Full-scale experimental study on the combustion behavior of lithium ion battery pack used for electric vehicle[J]. Fire Technology, 2020, 56:2545–2564.
- [17] (清华合肥院)组织开展电动汽车燃烧试验[EB/OL].<http://www.tsinghua-hf.edu.cn/display/?id=570>[2022-01-03].
- [18] MACNEIL D D, LOUGHEED G, LAM C, et al. Electric vehicle fire testing[C]//8th EVS-GTR Meeting, 2015.
- [19] LAM C, MACNEIL D, KROEKER R, et al. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles[C]//Fourth International Conference on Fire in Vehicle, 2016.
- [20] WATANABE N, SUGAWA O, SUWA T, et al. Comparison of fire behaviours of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test[C]//Second International Conference on Fires in Vehicles, 2012.
- [21] LECOCQ A, BERTANA M, TRUCHOT B, et al. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle[C]//International Conference on Fires in Vehicles, 2012.
- [22] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A Review of battery fires

in electric vehicles[R].2020.

Review of full-scale fire test of lithium-ion battery electric vehicles

Yang Xiaohan, Zhang Yi, Deng Ling, Xie Yuanyi

(Sichuan Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Sichuan Chengdu 610036, China)

Abstract: Analyze the fire accidents of lithium-ion battery electric vehicles that have occurred both domestically and internationally in recent years, and briefly summarize the fire risks of electric vehicles. A review is focused on the scientific research achievements of the United States, Canada, Austria, Sweden, China and other countries in the full-scale fire testing and fire prevention and control of lithium-ion battery electric vehicles. Based on domestic and foreign research results, the heat release rates of lithium-ion battery electric vehicles with different battery capacities are summarized, with a focus on the relationship between the total combustion heat release, peak heat release rate, the release of toxic hydrogen fluoride gas and battery capacity, providing necessary data reference for the research of fire prevention and risk assessment technology for lithium-ion battery electric vehicles in China.

Key words: lithium-ion battery; electric vehicles; full scale fire test; heat release rate

作者简介:杨晓菡(1979—),女,甘肃天水人,应急管理四川消防研究所副研究员,主要从事建筑热释放速率的测试工作,四川省成都市金牛区金科南路69号,610036。

收稿日期:2023-03-02

(责任编辑:李艳娜)