

电动汽车库火灾蔓延与演变特征研究

黄晓家^{1,2}, 张瑞峰¹, 陈 斌³, 南天辰²

(1. 南华大学 土木学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国中元国际工程有限公司, 北京 100089; 3. 深圳市消防救援支队, 广东 深圳 518000)

摘 要: 本文通过对车库环境进行单车和并排双车实体燃烧试验, 采用124路热电偶和两侧对称热流计探究火灾演变和蔓延特征, 观察烟气蔓延和燃烧痕迹特征, 研究多种火灾抑制技术对电动汽车火灾的抑制效果。结果表明, 热失控引发的电动汽车火灾由起火电池沿底盘向四周蔓延, 烟气在天花板形成厚厚的烟层; 按传统车库设置的各种水灭火设施只能抑制火灾蔓延, 无法扑灭火灾; 电池单体的总体烧毁率为49%。

关键词: 电动汽车; 火灾蔓延; 汽车库; 火灾扑救

中图分类号: X932; TM912

文献标志码: A

文章编号: 1009-0029(2023)12-1618-07

电动汽车问世于100多年前, 随着其价格的下降和人们环保意识的提高, 如今越来越受欢迎^[1]。与传统电池相比, 锂离子电池因其重量轻、能量密度高、循环寿命较长的优点而受到电动汽车行业的青睐。据估计, 到2025年, 全球电动车市场将增长到931亿美元^[2]。然而, 当电动汽车电池组在过热、过充、机械碰撞、涉水等恶劣条件下, 均可能引发热失控, 进一步导致电动汽车火灾, 给人们的生命财产安全带来巨大威胁^[3]。根据不完全统计, 中国2021年被媒体报道的烧车事故共276起, 相比2020年增长了123%, 其他国家也面临着此类问题。

国内外研究机构对车载锂离子电池火灾危险性进行了大量研究, 也不乏对电动汽车整车的燃烧试验, 但缺乏针对在具体场景(比如电动汽车库)的火灾特性研究。SOMANDEPALLI V等^[4]采用GC-MS测试锂聚合物电池产生的可燃气体成分以及释放量, 得出可燃气体主要由CO、CO₂和H₂等组成。GOLUBKOV A W等^[5]使用定制设备研究3种商业的18650型锂电池热稳定性, 得出: 能量密度越高热安全性越差。LARSSON F等^[6]通过丙烷燃料加热不同阴极材料和不同电量的锂离子电池组, 得到电池的单位容量总释放热量为28~75 kJ/Wh。STURK D等^[7]进行了软包7 Ah LFP和14 Ah NCM两种规格的锂离子电池的单体和模组燃烧试验, 发现电池SOC值几乎不影响燃烧释放的总热量, 电池中存储的化学能是燃烧热的主要来源。PING P等^[8]对50 Ah磷酸锂电池进行燃烧试验, 期间共出现3次强烈的射流火, 最大热释放速率和释放总能量分别为49.4 kW和18 195 kJ。RICHARD M N等^[9]试验测量了SEI膜在高温环境下的热力学性能, 并得到SEI膜燃烧过程的放热曲线, 表明SEI膜燃烧时释放的高热量是造成电池温度升高的重要

原因。LECOCQ A等^[10]通过全尺寸试验获得了电动汽车火灾的有毒气体释放量。OLEKSANDR L等^[11]根据全面试验的结果, 得出扑灭电动汽车电池所需的平均水量从2 500 L到6 000 L不等, 这可能超过了一辆消防车所携带的水量, 并且在距离带有装饰元件的燃烧汽车模型1.5 m处, 其热辐射量在8.1 kW/m²到11.9 kW/m²之间。

笔者通过加注盐水模拟电池短路的方式触发电动汽车锂离子电池热失控, 开展电动汽车火灾在车库环境下的燃烧特性试验研究。针对不同工况设计两次电动汽车燃烧试验, 使用红外摄像机、数码摄像机、热电偶、热流计等设备研究了电动汽车燃烧过程中的火灾蔓延情况、火场温度场分布及辐射热流演变规律。研究不同灭火方式对于电动汽车火灾的抑制效果, 提出电动汽车消防安全的要求和优化方向。

1 汽车库与消防安全

在过去, 停车场相对于其他场所很少发生火灾, 因此火灾风险相对较低。例如, 2006年英国登记的火灾事件总数为426 200起, 其中发生在停车场的火灾事件不到0.1%^[12]。相比之下, 同年在英国, 13%的火灾发生在住宅, 14%发生在道路车辆^[13]。然而, 最近在停车场发生的重大火灾, 如斯塔万格机场火灾, 300多辆汽车被烧毁^[14], 引起了人们对停车场消防安全的担忧。

以往对汽车火灾的研究认为, 停车场的火灾负荷小, 火势蔓延概率小, 因此不会造成明显的火灾危险。BUTCHER E G等^[15]在1968年通过试验发现, 火势不太可能蔓延, 在一辆普通的机动车中, 可燃材料的数量呈现出相对较低的火灾负荷。但是BUTCHER E G等的试验是在当时可用的汽车上进行的。正如美国国家消防协会(NFPA)关于停车场的研究^[16]中提到的, 旧车的测试不应该作为现行法规和指导的依据。

美国消防协会根据2003—2007年期间的火灾统计数据, 提供了美国使用自动喷水灭火系统减少死亡和财产损失的数据, 给出了一些建筑类型的死亡人数和财产损失, 但没有对停车场进行分类^[17]。黄晓家团队通过FDS仿真模拟研究各国自动喷水强度对车库火灾的控火效果, 发现自动喷水系统可以阻止火灾在传统汽油车之间的蔓延^[18]。

在设有自动喷水灭火系统的建筑物中, 死亡、受伤和财产损失的数量有所减少。停车场自动喷水灭火系统性能试验结果表明, 自动喷水灭火系统能有效地控制火灾,

防止火势蔓延。但是现有试验数据和停车场测试大都基于传统油车,对新能源汽车研究较少。笔者开展地下车库场景下电动汽车火灾蔓延情况、火场温度场分布及辐射热流演变规律研究以及不同灭火方式对于电动汽车火灾的抑制效果研究,研究结果对电动汽车火灾风险的评估、隧道和地下停车场火灾探测系统的设计、消防队员和居民免受热危害的保护、汽车储能系统的消防安全优化具有指导意义。

2 试验设计

2.1 单车试验

单车试验场地为临时搭建的地上车库,车库三面维护结构采用轻质砌块砖及水泥砂浆搭建,顶部采用钢架及钢板搭建,现场设置800 mm的挡烟垂壁。依据GB 50067—2014《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》,机械排烟设计排烟量为30 000 m³/h。排烟风机采用轴流式消防排烟风机,设计风速为18.93 m/s,如图1所示。试验车位位于图1的2号车位,以加注质量分数为3.5%的盐水使电池短路的方式触动力电池热失控。试验车为四门三厢五座车,长、宽、高分别为4.765、1.837、1.515 m。电池类型为磷酸铁锂电池。

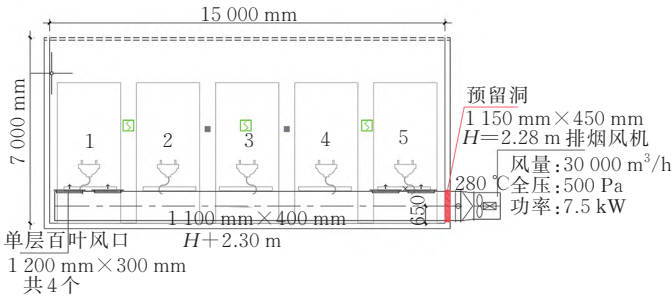


图1 机械排烟系统平面图

Fig. 1 Plan of mechanical smoke extraction system

试验在车后轮两侧外1.2 m,高0.6 m处设置热流计测量辐射热流,另采用99个直径为6 mm的K型铠装热电偶(耐温0~1 300 ℃)测量车内和车外典型位置的温度变化,建立温度场模型。热流计与热电偶均接入多通道数据采集模块,根据测量数据判断火灾蔓延情况和汽车燃烧情况。一台高清摄像机设置在车前,一台红外摄像机设置在车侧,在保持安全距离的情况下拍摄汽车燃烧过程。同时测试了自动喷水灭火系统对电动车火灾的灭火效果,自动喷水灭火系统采用闭式系统,喷头设置为车位居中上喷,间距满足地下车库危险级中危II级要求,自动喷水灭火系统设计喷水强度为8 L/(min·m²)。系统通过消防车供水,供水压力为0.22 MPa,系统布置如图2所示。

2.2 双车试验

双车试验研究燃烧车辆对相邻停放车辆的影响,并验证水基灭火器、雨淋系统、细水雾系统、地面喷水系统对于燃烧车辆及周围环境的火灾抑制作用及影响。

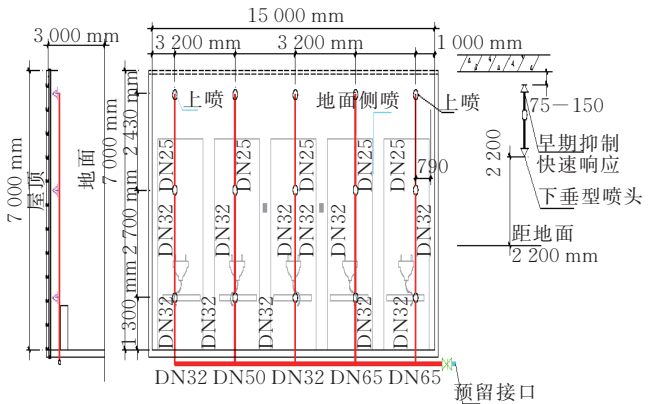


图2 自动喷水系统平面图

Fig. 2 Plan of automatic sprinkler system

试验车位上方及毗邻区域顶棚、设备支架、结构柱刷涂防火涂料3 mm。本次验证试验4号车位停放燃烧车辆,5号车位停放邻车。燃烧车辆与停放车辆均对车轮进行放气处理。燃烧车辆连接电池信息采集数据线,电池仓下方开口安装盐水注入软管。同时在底盘开设另一泄压口,用于排出电池热失控时的气体。燃烧车辆电池为168节串联的三元锂电池,剩余电量为86%,电量为56.4 kW·h。停放车辆电池为132节串联的磷酸铁锂电池,剩余电量为74%。热电偶布置如图3所示。

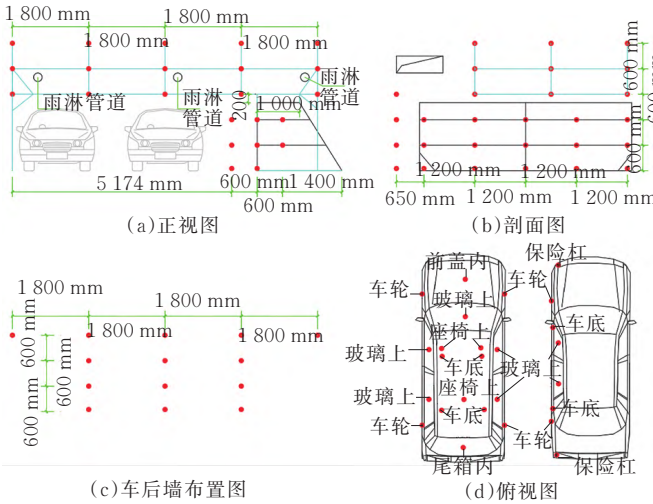


图3 双车试验测点布置图

Fig. 3 Layout of the measurement point of the two vehicle test

3 燃烧特征

3.1 燃烧现象

3.1.1 单车试验

以开始加注盐水为起始时间,8 min后电池包发出异响,10 min时注水软管出现剧烈振动现象,证明电池包内有大量气体生成,11 min左右车头右侧第一次喷出火花和黑烟,13 min时在同样位置喷出耀眼火花与白烟,随后是持续的电火花爆炸及烟雾释放,14 min左右火焰沿电池包空隙向前部动力机舱和后部轮胎处蔓延燃烧,火势巨大并伴有滚滚黑烟。14 min 40 s车正上方喷头爆裂,

30 s后其他喷头相继爆裂。16 min 50 s时自动喷水灭火系统已全面启动,但火势依旧巨大,从底盘两侧窜出的火焰高度超过2 m,21 min后,后轮及前部动力舱处火势依旧肉眼可见。最后使用消防水枪对火灾进行扑灭,但在撤去消防水枪一段时间后,电池包部位出现复燃现象,由此可见,电动汽车火灾的核心是电池包燃烧,对此类火灾进行扑灭时要谨防复燃。如图4所示。

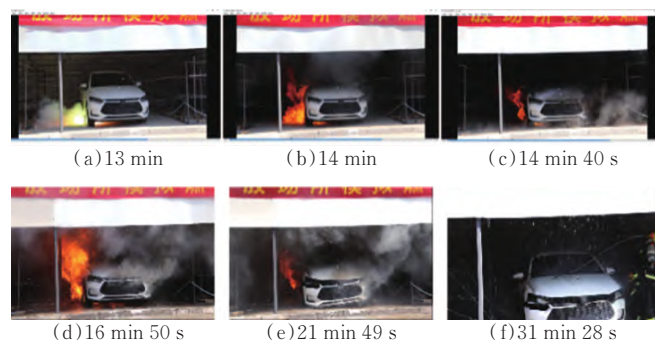


图4 单车试验过程

Fig. 4 Single vehicle test process

3.1.2 双车试验

以开始加注盐水为起始时间,4 min 40 s时漏电报警,17 min 10 s时发生爆响,持续产生白色烟雾,47 min 33 s时车辆右后轮处率先喷出火焰,火焰高度高于车顶,49 min时火焰迅速通过电池包与车体之间的缝隙蔓延到前部电机舱,58 min 10 s时使用水基灭火器对车头部位开始灭火效果验证,持续时间2 min,车头部位火势得到控制。61 min 30 s启用细水雾灭火系统,66 min 40 s雨淋系统启动,67 min 20 s地喷系统启动,直至整车火焰熄灭,为防止复燃,火焰熄灭后使用消防水枪对电池包位置进行持续冲水降温。如图5所示。

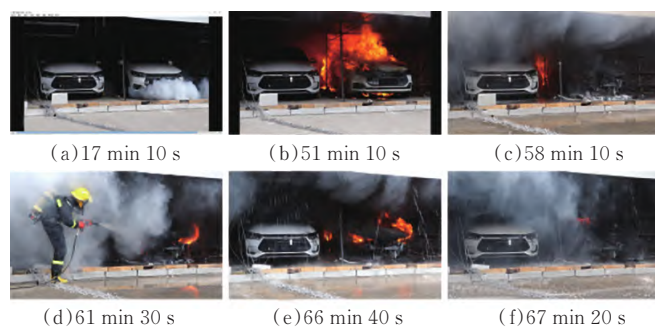


图5 双车试验过程

Fig. 5 Two vehicle test process

对比单车与双车试验现象,两次试验电动汽车起火初期都呈现出相同的特征,即底盘位置出现烟气,随后有火焰从侧方喷出,之后引起猛烈燃烧,火焰都是从电池包部分沿空隙向前部动力机舱与后部轮胎处蔓延。但双车试验中,汽车从出现烟雾到持续喷出火焰的时间远大于单车试验,火焰喷出位置也不同,推测是盐水灌注位置不同导致,可见电动汽车火灾蔓延方向因起火位置不同而不同。

3.2 热流及温度特征

3.2.1 单车试验

图6清晰地展示了电动汽车后轮两侧辐射热流的变化规律。试验中,随着盐水的不断加入,电池发生短路引发发热失控开始升温,汽车底部喷出大量白烟触发烟雾报警装置,辐射热在第一次爆燃约3 min 40 s后开始瞬间升高,快速达到峰值 8.05 kW/m^2 (1号车位侧), 9.08 kW/m^2 (2号车位侧),足见电动汽车火灾发展之迅速,之后因为自动喷水灭火系统打开,辐射热流在 $1.5 \sim 7.0 \text{ kW/m}^2$ 之间剧烈波动,20 min后降至较低水平且波动相对较缓,这也说明了自动喷水灭火系统不能扑灭电动车火灾,且抑制作用的发挥需要一定时间。

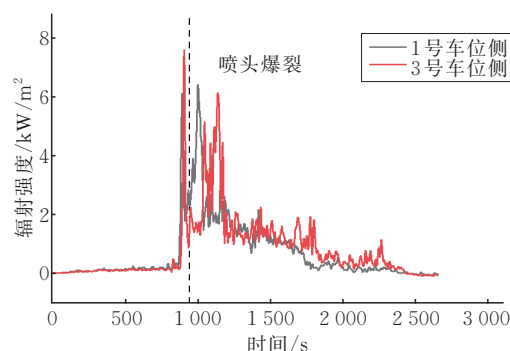


图6 单车试验热流变化曲线

Fig. 6 Heat flow curve of single vehicle test

为探究电动汽车燃烧过程中车辆周围温度场分布情况,单车试验分别在车两侧、车后墙、车顶天花板、车底、车体上布置了共99路热电偶,温度曲线如图7所示,虚线表示喷头爆裂时间。车后墙上共布置13只热电偶,上面两排温度较高,符合火焰向上、向外喷射的特点,喷头爆裂后,温度上升趋势不减,在1200 s左右达到峰值。天花板上7个测点呈“十”字形分布,温度分布特点为中间低,两侧高,温度明显上升的位置是车侧上方,同样解释了车左侧上方喷头最先喷水的现象,验证了电池火焰从车侧喷出的事实。由于同时受下方火焰炙烤和上方喷头喷水的作用,车玻璃以及车外壳上的测点温度曲线呈不规则振荡状态。车后两侧车轮靠近电池处升温迅速,51号测点在16 min 30 s时达到峰值 672.8°C ,88号测点在15 min 36 s到达峰值 645.1°C ,喷头打开后温度没有继续上升,但是也保持在 $350 \sim 650^\circ\text{C}$ 。车头左侧车轮52号测点在15 min 44 s温度达到峰值 384°C ,在喷头打开后温度迅速下降。车头右侧89号测点温度曲线较为平缓,最高温度只有 102.2°C ,推测这两点受喷淋影响较大。车底电池左车头处最先喷出火焰,其测量点为底部温度最高,在18 min时达到最高温度 860.1°C ,由于测点均位于车下,测点温度在喷淋打开后未受过多影响。车的两侧对称布置了从下到上数量依次减少的3层共56只热电偶,3层测点距离车体较远且直接受喷淋影响,最高温度均未超过 100°C ,故不做分析。车内座椅上方共布置4个测点,54号测点设

备出现接触不良,数据波动大且不规律,由于自动喷水灭火系统延缓了火焰蔓延至车内的速度,内饰并没有完全燃烧,所以测点温度上升比较缓慢且峰值较低,直到35 min左右才达到最高283.4℃。

可以看出,电动汽车火灾从初起阶段到发展阶段不到2 min,火灾从起火部位迅速向相邻电池及车头和车尾蔓延,测点温度在自动喷淋系统工作的情况下迅速升高。

3.2.2 双车试验

双车试验热流变化曲线如图8所示,此次试验目的是汽车之间的火灾蔓延规律,因此没有设置自动喷水灭火系统。由数据可知,双车试验中,燃烧车辆两侧的辐射热流明显比单车试验高,峰值分别达到25.25 kW/m²(车左)、18.93 kW/m²(车右)。手动开启灭火设施后,热流数值急剧下降。

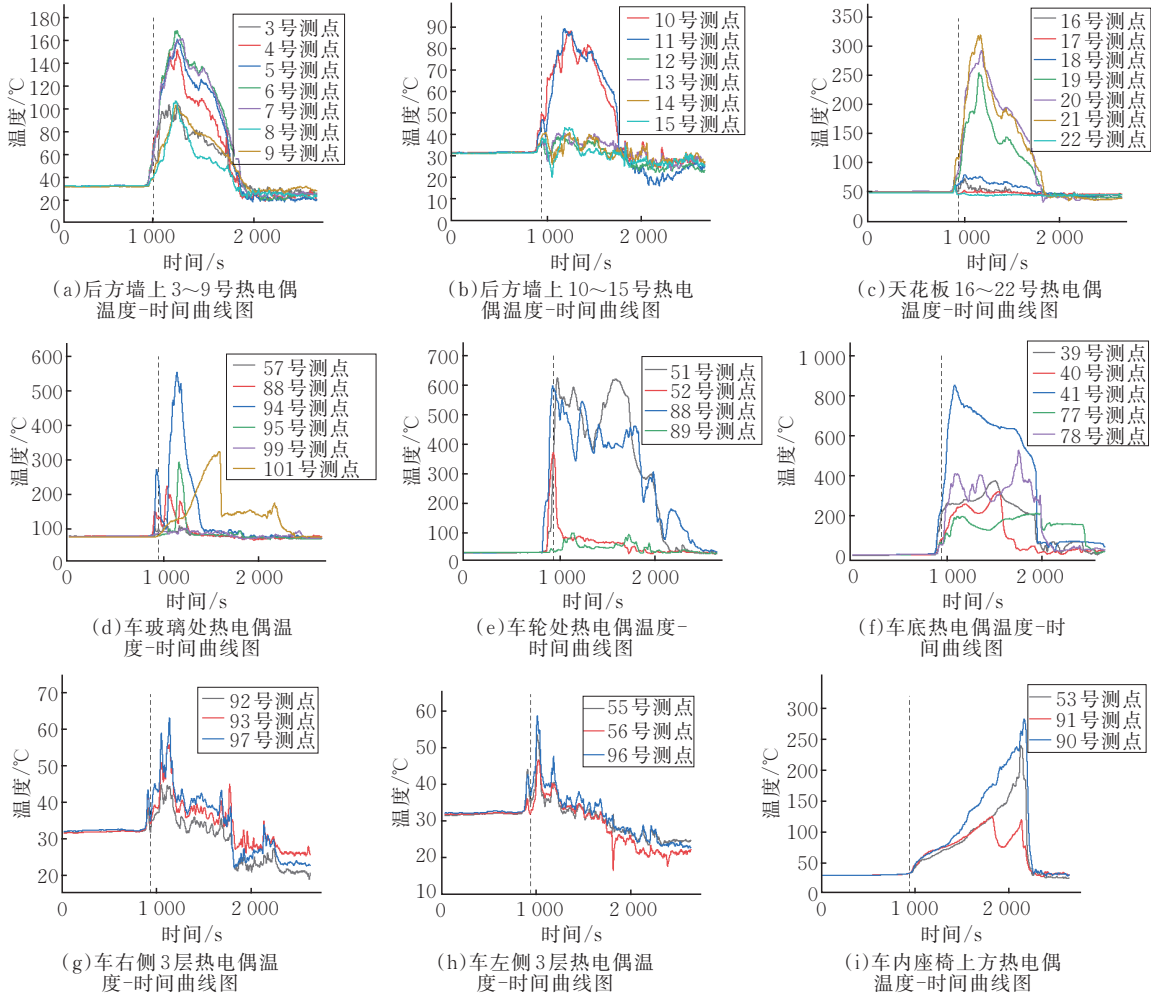


图7 单车试验热电偶温度变化曲线图

Fig. 7 Temperature change curve of thermocouple in single vehicle test

邻车车轮处测点试验最高温度为剧烈燃烧阶段且无灭火措施时的后轮为85.6℃,远低于橡胶轮胎燃点289℃。车左后轮左侧0.6 m处辐射热最高值为24.67 kW/m²。根据相关文献可知,橡胶轮胎能在短时间被点燃的最大热辐射约为20 kW/m²[19]。试验中左侧无停放车辆,但辐射热理论上可引燃,邻车车轮。虽然邻车后车轮测点处辐射热最高值为18.926 kW/m²,略低于20 kW/m²,试验中邻车车轮未被引燃,但发生表面熔融现象,仍存在燃烧车辆通过热辐射形式引燃邻车车轮的风险。辐射热公式和火灾增长系数公式[20]见式(1)和式(2)。

$$R = (Q / (12\pi q))^{0.5} \quad (1)$$

$$\alpha = q / t^2 \quad (2)$$

式中: R 为距离火源中心距离,m; Q 为火源热释放速率,kW; q 为辐射热流,kW/m²; α 为火灾增长系数; q 为热释放速率,kW; t 为所需时间,s。

根据公式计算得出燃烧车辆后轮距地0.6 m高处热释放速率为11 212.06 kW,燃烧车辆侧正中距地0.6 m处火灾经过5 min 6 s到达最高热释放速率时,火灾增长系数为0.119 7 kW/s²,介于快速火和超快速火之间。

轮胎短时间点燃所需热辐射20 kW/m²,通过辐射热公式推算出邻车轮胎易燃距离为3.85 m。根据现有地下车库车位设计尺寸,已知车辆间隔停放距离约为0.6~1.2 m,因此在没有灭火设施启动的情况下,邻车轮胎容易被燃烧车辆引燃。

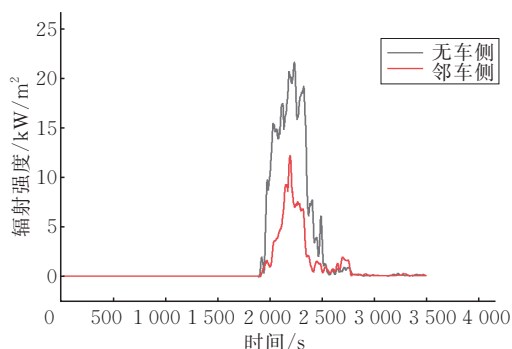
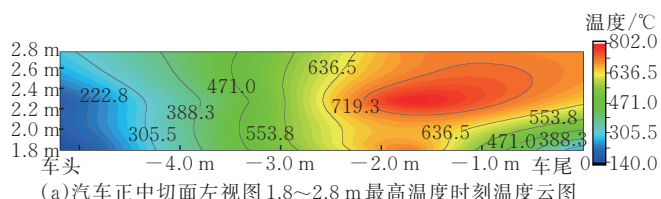


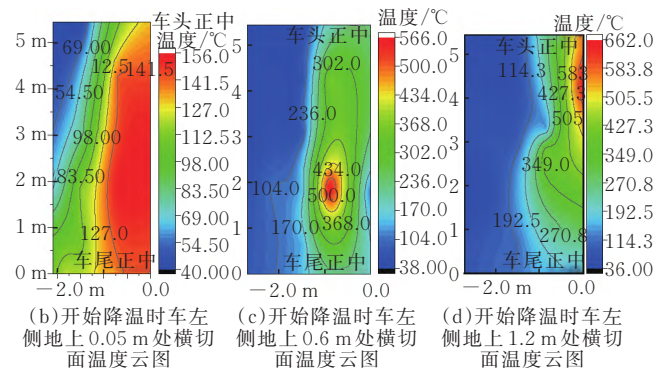
图8 双车试验热流变化曲线

Fig. 8 Heat flow curve of two vehicle test

双车试验对热电偶的数量和位置进行了增加和优化,通过搭建如图3所示的热电偶支架布置124只热电偶,为了更好地契合火焰向上向外喷射的特点,热电偶数量从下到上依次增加,车侧热电偶呈倒梯形,车上方三层热电偶呈矩形均匀分布。根据热电偶监测所得数据绘制温度切片云图,如图9所示。



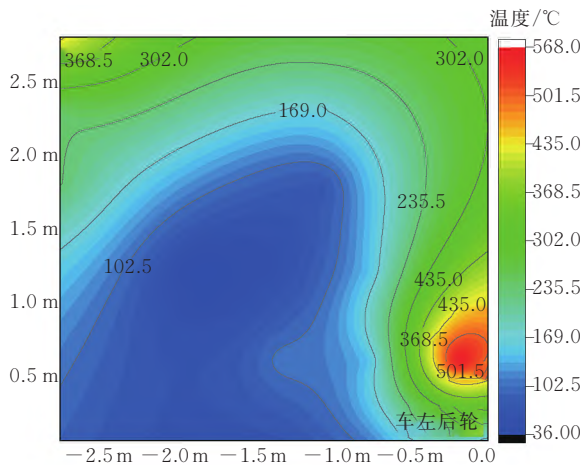
(a)汽车正中切面左视图1.8~2.8 m最高温度时刻温度云图



(b)开始降温时车左侧地上0.05 m处横切面温度云图

(c)开始降温时车左侧地上0.6 m处横切面温度云图

(d)开始降温时车左侧地上1.2 m处横切面温度云图



(e)开始降温时汽车后轮左侧纵切面温度云图

图9 双车试验温度切片云图

Fig. 9 Temperature slice cloud of two vehicle test

根据0.05 m高度切片云图,在剧烈燃烧段燃烧车辆正后方墙壁处达到最高温度点160.8℃,高温主要集中在燃烧车辆后轮处。根据0.60 m高度切片云图,温度分布与0.05 m切片相仿,最高温度点仍为车辆正后方墙壁处,达218.9℃。根据1.2 m高度切片云图,燃烧车辆正后方墙壁处达到最高温度点为222.7℃。温度分布与0.05、0.60 m切片相仿。根据车顶距地1.8 m高度切片云图,温度最高点位于车后部上方,达718.3℃。在剧烈燃烧段温度分布为车后方高,往四周逐渐降低,车上方温度高,向两侧逐渐降低。在3300 s后,车辆两侧温度超过车辆上方温度,且车辆上方温度急剧下降。根据1.8~2.8 m高度切片和后轮纵切片温度数据可知,烟气层瞬时最高温度分别为844.0℃和802.2℃。热空气上升,周围冷空气在燃烧区上方形成对流烟柱,最高温度区随切片高度向车后侧墙处偏移。车侧高温区存在于后轮周围,且随高度增加而温度上升。整个温度场体现热流向上向外的流动特性,符合火灾蔓延热对流的规律。

4 燃烧痕迹特征

4.1 车体燃烧痕迹特征

电动汽车整车的能量来源均为位于底盘位置的动力电池包,锂电池热失控后火焰会沿着电池包与车体的空隙处向车体蔓延,并在底盘区域形成长时间稳定燃烧。如图10所示,通过观察两次试验后车体燃烧痕迹发现,车外燃烧痕迹集中于前部动力舱和后轮这两个部位,单车试验中内部燃烧痕迹集中于后排座位底部且燃烧起点为坐垫中间部位,证明火焰是从座位下方预留孔蔓延进乘员舱内的,因自动喷水灭火系统作用,前排座位基本完好,未见明显燃烧痕迹,车窗玻璃没有爆裂。双车试验中,由于手动开启灭火措施时间较晚,整车燃烧程度明显大于单车试验,车前后部分燃烧殆尽,车窗玻璃全部爆裂。与单车试验不同的是,双车试验中车内部燃烧程度前排大于后排,说明电池包热失控后火焰蔓延的方向主要是车前动力舱和车尾部分,但哪个方向更为剧烈是随机的,跟起火部位和车体结构存在一定的联系。



图10 双车试验车体燃烧痕迹特征

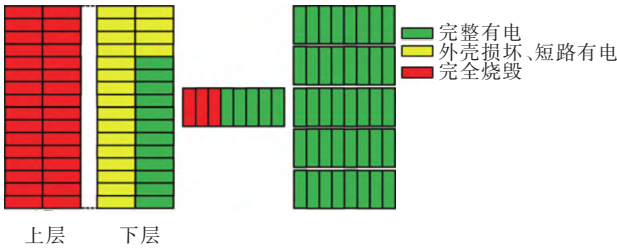
Fig. 10 Characteristics of combustion traces of two car bodies

邻车表面温度最高点位于靠近燃烧侧的车门车窗处,温度最高时为剧烈燃烧阶段且无灭火措施时的126.7℃,试验结束后车玻璃完好。因此,在无灭火措施的情况下,邻车玻璃大概率不会被破坏。车窗窗框存在塑料覆盖件,经过高温发生熔融现象,产生刺激性气味。

邻车后保险杠和尾灯存在融化现象,根据测点热电偶数据可知,邻车后保险杠处温度最高为92.6℃。而前保险杠处的最高温度为65.7℃,试验结果显示前保险杠受到影响较小。邻车靠近燃烧车侧表面油漆呈黄土色,靠近车位区域呈现大面积焦黑色。因此,邻车距燃烧车辆0.6 m时,在没有灭火设施干预的情况下,火灾很有可能会蔓延到相邻车辆。

4.2 动力电池包燃烧痕迹

由于底盘的动力电池包是电动汽车火灾的重点燃烧区域,在后期调查过程中,将双车试验电池包拆卸,观察其燃烧程度并使用万用表测量单个电池带电情况,调查发现,车尾部分有上下两层电池,其中上层电池完全烧毁,下层电池大部分外壳被烧毁,使用万用表测量发现有电;中间电池部分完全烧毁,其他完整有电;车头部分电池包防火垫层损坏,但电池外壳完好无损,电表显示有电。电池包的整体燃烧痕迹如图11所示,单电池较为完整且带电数量为57块(绿色),外壳损坏但仍有电压的单电池数量为20块(黄色),完全烧毁的电池数量为35块(红色)。电池包整体烧毁率为49.1%。根据电池包烧毁情况判断起火部位为车尾,电池烧毁率说明电动车火灾是可控的。



(a)结构图



(b)实物图

图11 双车试验电池包燃烧痕迹特征

Fig. 11 Characteristics of combustion marks of battery pack in two vehicle test

5 结论

电动汽车电池储能系统储存巨大的能量,有极大的火灾危险性。如何在火灾发生时抑制火灾蔓延,减少人员伤亡与财产损失是一个重要课题。本课题搭建电动汽

车整车燃烧试验平台,设计两次燃烧试验,使用热电偶、热流计等设备构建全方位温度场探测体系,实现电动汽车燃烧过程温度场探测分析和精准定位。在现有汽车库自动喷水灭火系统上增加多种火灾抑制技术,观察了各自在电动汽车火灾防火灭火中的优劣。

1)电动汽车火灾蔓延方式与传统汽车火灾不同,当电动汽车内部电池包发生热失控时,从汽车底盘释放出来的白烟是电动汽车火灾的前兆,从最早出现白烟到起火燃烧有一定的时间间隔,两次试验起火位置分别为电池包前部和后部,火焰沿电池包与车体之间的间隙向四周蔓延,且向其他电池蔓延的速度快于向乘员舱的蔓延速度。

2)起火燃烧后火焰迅速升温,电池包周围温度经过4 min便达到600~800℃的峰值,电池包内部温度则可以达到1 000℃以上,越靠近热失控电池的车身部位温度越高。

3)现有汽车库自动喷水灭火系统不能扑灭起火车辆的火灾,但是可以阻止火灾在汽车之间的蔓延;水基灭火剂可以抑制明火燃烧,但需要人工近距离操作且难以作用到底部电池包;细水雾对烟气有清洗作用,但无法扑灭电动汽车火灾;雨淋系统难以作用到起火核心部位;地喷系统由于设置在地面且在车两侧,能直接作用于电池包部位,对抑制火焰蔓延及降低温度效果明显。

4)观察燃烧过后的电池包动力电池单体,根据电池包壳体形变、变色程度、缺失程度和电表测量来判断电池包的烧损程度,仅一半的电池燃烧已经释放出巨大的能量,同时也证明电动汽车火灾是可控的。

参考文献:

- [1] FAYZIYEV P R, KROMOV A. History of the electric car, trends and the future developments[J]. Eurasian Research Bulletin, 2022, 6:89—94.
- [2] DIAZ L B, HE X Z, HU Z W, et al. Meta-review of fire safety of lithium-ion batteries: Industry challenges and research contributions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(9):090559.
- [3] DOUGHTY D H, ROTH E P. A general discussion of Li ion battery safety[J]. The Electrochemical Society Interface, 2012, 21(2):37.
- [4] SOMANDEPALLI V, MARR K, HORN Q. Quantification of combustion hazards of thermal runaway failures in lithium-ion batteries[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2014, 3(1): 98—104.
- [5] GOLUBKOV A W, FUCHS D, WAGNER J, et al. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes[J]. Royal Society of Advances, 2014, 4(7):3633—3642.
- [6] LARSSON F, ANDERSSON P, BLOMQVIST P, et al. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271(20):414—420.
- [7] STURK D, HOFFMANN L, TIDBLAD A A. Fire tests on e-vehicle battery cells and packs[J]. Traffic Injury Prevention, 2015, 16:S159—

- [8] PING P, WANG Q, HUANG P, et al. Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test[J]. Journal of Power Sources, 2015, 285:80—89.
- [9] RICHARD M N, DAHN J R. Predicting electrical and thermal abuse behaviours of practical lithium-ion cells from accelerating rate calorimeter studies on small samples in electrolyte[J]. Journal of Power Sources, 1999, 79(2):135—142.
- [10] LECOCQ A, ESHETU G G, GRUGEON S, et al. Scenario-based prediction of Li-ion batteries fire-induced toxicity[J]. Journal of Power Sources, 2016, 316:197—206.
- [11] OLEKSANDR L, VASYL L, BOHDAN S. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries[J]. Safety and Fire Technology, 2018, 52(4):108—117.
- [12] Building Research Establishment. Fire spread in car parks[R]. London: Department for Communities and Local Government, 2010.
- [13] The UK Home Office. Fire statistics data tables[R]. London: The Home Office, 2016.
- [14] SETHURUPAN N. Fire at Norway airport destroys hundreds of cars, grounds planes[R]. Stavanger: Norway News, 2020.
- [15] BUTCHER E G. Fire and car park buildings[J]. Fire Safety Science, 1970, 841:1—4.
- [16] BOEHMER H, KLASSEN M, OLENICK S. Modern vehicle hazards in parking structures and vehicle carriers[R]. New York: NFPA, 2020.
- [17] HALL J R. US Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment[M]. Quincy: National Fire Protection Association, 2007.
- [18] 王东勋, 黄晓家, 张雅君, 等. 地下车库自动喷水强度数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(1):80—84.
- [19] 王东勋, 黄晓家, 张雅君, 等. 汽车库火灾危险性分析与研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(10):1397—1405.
- [20] MCGRATTAN K, BAUM H, REHM R, et al. Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide[R]. Gaithersburg: NIST, 2010.

Research on the characteristics of fire spread and evolution in electric vehicle garage

Huang Xiaojia^{1,2}, Zhang Ruifeng¹, Chen Bin³,
Nan Tianchen²

(1. Civil Engineering College, University of South China, Hunan Hengyang 421001, China; 2. China IPPR International Engineering Co., Ltd., Beijing 100089, China; 3. Shenzhen Fire and Rescue Division, Guangdong Shenzhen 518000, China)

Abstract: In this paper, entity combustion tests of single vehicle and two vehicle side by side are carried out in the garage environment. The fire evolution and propagation characteristics were explored by using 124-channel thermocouples and symmetrical heat flux meters on both sides, and the characteristics of smoke propagation and combustion traces were observed, and the suppression effect of various fire suppression technologies on electric vehicle fires was studied. The results show that the combustion process of electric vehicle fire caused by thermal runaway spreads from the igniting battery along the chassis to the surrounding areas, and the smoke forms a thick layer of smoke in the ceiling. A variety of water fire extinguishing facilities according to the traditional garage set up can only inhibit the spread of fire, but cannot extinguish the fire. The overall burnout rate of the battery cells is 49%.

Key words: electric vehicle; fire spread; car garage; fire fighting

作者简介: 黄晓家(1964—), 男, 中国中元国际工程有限公司安全城市研究院院长, 教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 主要从事建筑与工业给水排水、城市节水、海绵城市、特殊消防设计、智慧消防等方面的研究, 北京市海淀区西三环北路5号, 100089。

收稿日期: 2023-09-07

(责任编辑: 梁 兵)