



## 地下车库场景下的全尺寸电动汽车火灾特征及抑制性能试验

王杰<sup>1</sup>, 赵晨曦<sup>1</sup>, 李长征<sup>1,2</sup>, 王学辉<sup>1</sup>, 陈钦佩<sup>3</sup>, 米文忠<sup>2</sup>, 徐国<sup>4</sup>, 汪箭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; <sup>2</sup>清华大学合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601; <sup>3</sup>应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; <sup>4</sup>上海嘉定区消防救援支队, 上海 201800)

**摘要:** 本工作对地下车库场景下的电动汽车热失控火灾特性及水喷淋抑制效果进行了研究, 通过对车内不同位置以及车外顶棚温度在水喷淋前后的变化, 得出了电动汽车热失控发展过程的不同特点。搭建了全尺寸的地下车库电动汽车火灾试验平台, 通过电加热的方式触发车内电池包中的锂离子电池热失控, 测试了电动汽车热失控发展中电池包、车身、顶棚处的温度变化。结果表明电池包内的电池热失控过程是由近及远的, 主要传热方式是热传导, 其最高温度超过600℃。车舱内的温度变化相较于电池包的变化来说, 存在一定的滞后性, 会导致车内人员安全错觉。当现场已经充满了大量黑烟时, 顶棚处的最高温度仅为46.1℃, 相较于温度传感器, 烟雾传感器可能是地下车库一个更好的选择。水喷淋灭火试验表明一般的水喷淋灭火方式灭火效果有限, 主要由于水喷淋无法直接作用在电池, 降温效果有限, 只能起到一定的减缓作用, 并不能使其降至安全温度。本工作研究结果有助于深入认识受限空间内的电动汽车热危险性, 为地下车库的消防安全设计提供基础数据支持与参考。

**关键词:** 全尺寸; 地下车库; 电动汽车; 热失控; 水喷淋

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0520

中图分类号: X 928.7; TU 998.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 11-3379-08

## Thermal runaway and water spray of full-size electric vehicle under the underground garage scene: An experimental study

WANG Jie<sup>1</sup>, ZHAO Chenxi<sup>1</sup>, LI Changzheng<sup>1,2</sup>, WANG Xuehui<sup>1</sup>, CHEN Qinpei<sup>3</sup>,  
MI Wenzhong<sup>2</sup>, XU Guo<sup>4</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>2</sup>Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 230601, Anhui, China; <sup>3</sup>Tianjin Fire Protection Research Institute of Emergency Management Department, Tianjin 300381, China; <sup>4</sup>Shanghai Jiading Fire and Rescue Division, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** This study investigates the thermal runaway fire characteristics of electric vehicles (EVs) in an underground garage scenario and the suppression effect of water spray. Different characteristics of the thermal runaway development process of EVs are derived from the temperature changes at different locations inside the vehicle and the roof temperature outside the vehicle before and after the water spray. We scrutinized the temperature evolution of the

收稿日期: 2023-08-02; 修改稿日期: 2023-08-18。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3006300), 工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室开放课题 (2022KLIB07), 国家消防救援局科技计划项目“电动汽车应急救援破拆装备及实战应用技术” (2023XFCX37), 广东省基础与应用基础研究基金 (2021B1515130008)。

第一作者: 王杰 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车安全, E-mail: wj17346863559@mail.ustc.edu.cn; 通信作者: 王学辉, 副研究员, 研究方向为新能源汽车火灾防治及调查技术, E-mail: wxuehui@ustc.edu.cn。

引用本文: 王杰, 赵晨曦, 李长征, 等. 地下车库场景下的全尺寸电动汽车火灾特征及抑制性能试验[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3379-3386.

Citation: WANG Jie, ZHAO Chenxi, LI Changzheng, et al. Thermal runaway and water spray of full-size electric vehicle under the underground garage scene: An experimental study[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3379-3386.

battery pack, body, and roof during the development of EV thermal runaway. Our results showed that the battery thermal runaway process in the battery pack was proximal and distal, and the primary mode of heat transfer was heat conduction, with the highest temperature exceeding 600 °C. When water could not directly act on the battery, the cooling effect was limited and only played a mitigating role, failing to reduce the temperature to a safe level. Compared with the change in the battery pack, the temperature change in the cabin had a certain lag, leading to the illusion of safety for the people in the car. We also found that when the scene was filled with a lot of black smoke, the highest temperature on the roof was only 46.1 °C. The smoke sensor was more suitable for an underground garage than temperature sensor. The results of this study contributed to an in-depth understanding of the thermal hazard of EVs in confined spaces and provided basic data support and reference for the fire safety design of underground garages.

**Keywords:** full-size; underground garage; electric vehicle; thermal runaway; water sprinkler

《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》明确指出:发展新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路,也是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措<sup>[1]</sup>。据乘联会数据显示,国内2023年上半年以来新能源汽车累计零售305.9万辆,已占据汽车市场份额的32%<sup>[2]</sup>。其中,电动汽车因其环保、经济、易保养等特点,成为新能源汽车发展的主要推动力量<sup>[3-5]</sup>。

随着电动汽车数量的增加,因锂离子电池热失控而引发的电动汽车火灾事故不断发生<sup>[6-9]</sup>。作为电动汽车的核心部件,锂离子电池具有高能量密度的特点,一旦遭遇过充放电、挤压、碰撞等外部条件影响,就有可能发生热失控,导致汽车着火、爆炸等严重后果<sup>[10-11]</sup>。为了解决这一问题,国内外科研机构对锂离子电池热失控过程进行了大量研究,包括单个电池<sup>[6, 12-15]</sup>,电池与电池<sup>[16-17]</sup>以及模组与模组之间的热失控传播<sup>[18]</sup>。然而,对于电动汽车整车燃烧现象的研究较为缺乏,Truchot等人<sup>[19-20]</sup>在隧道场景下开展了电动汽车实验,以调查电动汽车火灾中排放的有毒气体的危害。结果发现电动汽车氟化氢的累积量较高,但没有给出火焰传播行为以及灭火阶段对水的响应。Li等人<sup>[21]</sup>开展了仅含车外框架的电动汽车燃烧实验,对锂离子电动车火灾危险性进行了评估,发现在灭火阶段由于电池包盖的遮挡,水无法直接作用到电池,限制了降温效果。朱难难等人<sup>[22]</sup>开展了完整电动汽车的整车燃烧实验,发现在电动车燃烧初期底盘电池包产生的喷射火最远可达2.6 m;车外热流最大值为4.878 kW/m<sup>2</sup>;此外,

研究还发现压缩空气泡沫对于电动汽车的灭火效果比细水雾更好。陈钦佩等人<sup>[23]</sup>通过全尺寸电动汽车锂离子电池系统热失控气体毒害及爆炸特性研究发现电池舱释放气体的爆炸极限在4.83%~73.77%,惰性气体含量主要影响混合物的爆炸下限,氢气主要影响混合物的爆炸上限。目前的相关研究均集中在敞开空间,由于目前大量的新能源汽车都停放在地下车库或者类似受限空间中,这种工况下热量集聚快、排烟困难,造成“多米诺”连环汽车火灾、有毒气体累积,给扑救带来极大的困难。而目前针对地下车库场景的电动汽车研究较少。

本工作旨在通过在地下车库场景下进行真实电动汽车热失控与消防灭火实验,研究电动汽车火灾演化过程,对汽车火灾发生过程中的温度、有毒有害气体浓度进行了分析,为今后类似火灾事故的消防救援提供重要的场景参考和数据支持,为地下车库的消防安全设计提供有益的指导,以提高地下车库的消防安全性能。

## 1 实验内容

### 1.1 实验设计

本次实验在某单位的大空间实验场地进行,场地分为车辆热失控区、数据采集区、消防车辆区。为了还原地下车库的真实场景,设计并搭建了一个高为2.2 m的可移动式顶棚,该顶棚由轻钢龙骨与石膏板组成,作为车库顶,实验的具体布置情况如图1所示。

本实验电动汽车型号某车企生产的电动汽车产

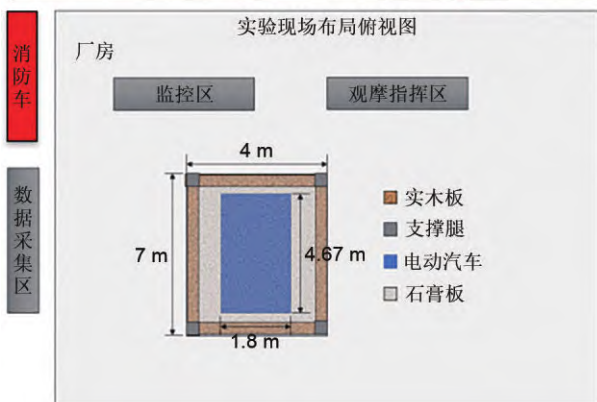


图1 现场区域分布

Fig. 1 Site area distribution

品, 车身结构为4门5座三厢车, 其长、宽、高分别为4.670、1.806、1.474米。该车采用NCM523锂离子电池, 容量为50 Ah, 电池包额定电压为

350 V, 电池包额定输出电流为102 A, 有16个模组, 电池共2并96串。实验开始前车辆电池包荷电状态约为98%。实验仪器配置和测量位置如图2~图4所示, 实验中采用直径为1 mm的K型热电偶(0~1300 °C)测量电池包内电池(图2)与车内典型位置(图3)以及车顶棚处(图4)的温度, 以监测车辆热失控过程以及评估车外空间危险性, 测点详情如表1所示, 但由于现场环境复杂, 一些热电偶在试验过程中由于短路而出现故障。同时, 采用两个热流计测量车身周围(车头和侧面)的辐射热流, 以量化车身周围的热辐射通量, 并在两个热流计中间布置了一个片光源装置, 以显示试验中的烟气流动情况。此外, 实验中还测试了细水雾对热失控电动汽车的抑制效果。

## 1.2 实验过程

本实验采用两块220 V、400 W的电加热片触发电动汽车内部电池热失控, 电动汽车整车热失控过程及灭火措施的抑制效果如图5所示。在打开加热片电源5分钟左右后, 汽车底盘开始向外释放出大量白色烟气, 如图5(a)所示, 此时断开加热片电源, 现场持续释放出大量烟气并伴有异响; 大约半个小时后, 大量黑烟冒出, 见图5(b), 并且迅速蔓延至顶棚; 此时指挥室下达灭火命令, 车顶部喷淋装置启动, 由于水的冷却效果, 车辆热失控过程受到阻碍, 黑烟渐渐散去, 重新变为白色, 见图5(c); 喷淋装置持续作业25分钟左右后停止, 见图5(d), 随后消防队员入场, 使用高压水枪对车身内部进行降温处理, 见图5(e); 大约15分钟后, 消防队员停止水枪作业, 随后在汽车左后轮胎处放置千斤顶, 见图5(f); 静置一段时间后, 车身周围又有大量白烟冒出, 见图5(g); 大约五分钟后, 车顶喷淋装置



图2 电池包内布局与测点位置

Fig. 2 Conditions in the battery pack and measuring position



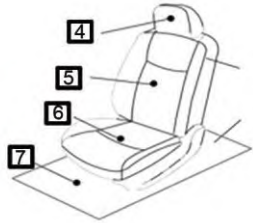


图3 车舱内布局与测点位置

Fig. 3 Cabin layout and measuring position

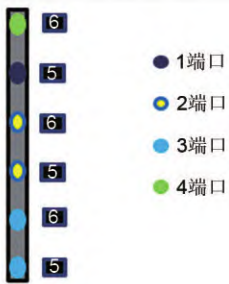


图4 顶棚处布局与测点位置

Fig. 4 Ceiling layout and measuring position

表1 热电偶测点详情

Table 1 Details of thermocouple measuring point

位置	测点	说明
电池包	TC0~TC9	近端模组(其中1、8损坏)
	TC0~TC3	远端模组(其中2、3损坏)
	TC0~TC6	加热片模组(其中3、4损坏)
车舱	TC0	后座底板
	TC1	后备箱
	TC2	后挡风玻璃上沿
	TC3	车顶层
顶棚	TC4~TC7	驾驶位(其中4与6损坏)
	1TC0~1TC5	顶棚下侧
	2TC0~2TC6	顶棚右侧
	3TC0~3TC6	顶棚左侧
顶棚	4TC0~4TC5	顶棚上侧

重新启动，现场白烟开始变淡，见图5(h)；大约半小时后，确认电车热失控程度受到控制，消防队员开始撤离，见图5(i)，实验结束。为确保安全，防止再次热失控，车顶喷淋装置一直保持开启状态。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 电池包内温度数据分析

在本研究中，为了监测记录模组电池温度变化，在电池包内部安装了多个热电偶，并在第1节中介绍了具体布置情况。图6展示了加热片所在模

组7000 s内热电偶温度数据变化，可分为五个阶段。在第一阶段(0~360 s)，加热片持续供电，相邻电池温度不断上升，最高温度超过100℃，已超过电池热失控临界温度<sup>[6]</sup>。同时现场已经有少量白烟冒出，表明电解液已经开始蒸发，进一步证明该模组内有电池已进入热失控阶段。在第二阶段(360~2070 s)，由于加热片断电，TC1的温度迅速下降，而被加热模组的电池按照离加热片的距离依次步入热失控阶段，模组内的所有电池温度迅速升高。然而，在达到某一温度顶点后，各电池温度又开始下降，这可能是因为各个电池的泄压阀动作，一部分热量随着电解液蒸发喷溅出去流失，但电池内还在持续发生剧烈的热失控，不断产生热量与可燃气体并积聚，所以温度又开始上升，此时车身周边迅速冒出大量黑烟。在第三阶段(2070~3800 s)，车顶喷水灭火装置开始工作，各个电池温度迅速开始下降，车身周围的黑烟也开始变淡。然而，由于各个电池温度仍高于热失控临界温度，电池内反应继续发生，重复阶段二内的温度变化。在第四阶段(3800~5300 s)，消防队员进入现场后使用高压水枪对车厢内部进行喷射，各个电池温度迅速下降。大约在4800 s左右停止作业，随后消防队员在车身左侧放置千斤顶，使得车辆抬高让更多空气进

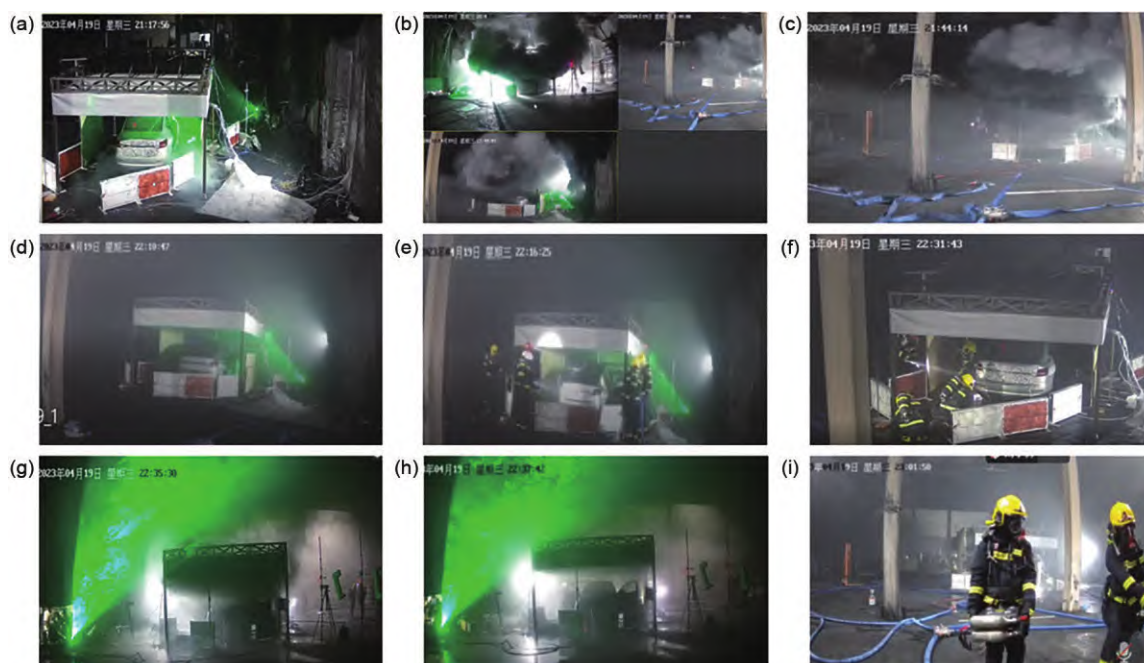


图5 实验过程

Fig. 5 Experimental process

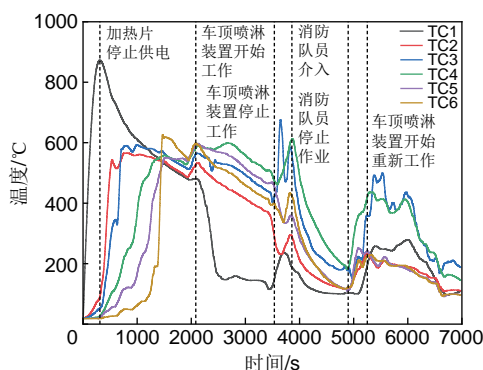


图6 加热片模组温度变化

Fig. 6 Temperature change of heater module

入,而此时电池温度还是高于热失控临界温度,反应继续进行,现场又有大量白烟冒出。在第五阶段(5300 s后),由于电池温度还是过高,热失控反应继续进行,车顶喷淋装置重新打开,各个电池温度开始下降,现场白烟也开始变淡。

从以上过程可以得出,模组内电池热失控时热量传递主要是通过热传导的方式进行,且水喷淋对电动汽车的热失控有着很好的降温抑制作用,可为现场消防救援行动时争取宝贵时间。然而,由于无法直接作用到电池表面,电池包内电池温度仍然维持在临界温度之上,导致会反复多次发生热失控现象。因此,为了确保现场人员安全,需要维持长时

间喷淋操作。值得注意的是,电池热失控过程中产生的热量和可燃气体可能会引发爆炸,因此在消防救援行动中需要采取相应的安全措施。

图7展示了近端模组7000 s内热电偶温度数据变化,可分为四个阶段。在第一阶段(0~2070 s),离加热模组较近的5678模组先开始发生热失控,其中最近的6模组热失控下的最高温度达到了600℃以上,其发展过程与加热模组类似。其他模组则是在2000 s左右才呈现出热失控趋势,与图5(b)中的大量冒出黑烟的现象符合。这表明,临近模组的热失控过程与加热模组相比,由于热传递过程的滞后性,存在一定的时间差。在第二阶段(2070~

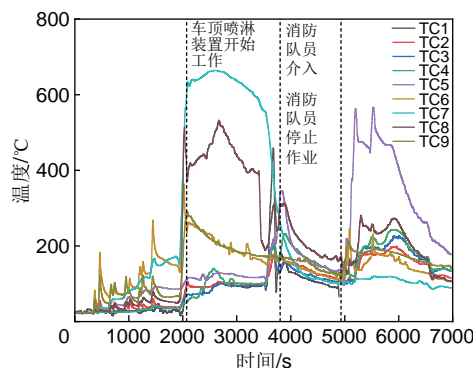


图7 近端模组温度变化

Fig. 7 Temperature change of near-end module



3800 s), 由于喷淋装置的降温作用, 导致热失控过程受到抑制。5678 s模组由于在前期已进入完全热失控状态, 电池内所剩化学反应物质较少, 所以温度下降较为明显。然而, 其他模组由于还存在大量放热化学反应物质, 在这段时间内的反应放热与喷淋水蒸发吸热形成了一个热平衡过程, 所以温度并没有太大变化。在3600~3800 s内, 由于车顶灭火措施的停止, 各个模组迅速进入热失控状态, 温度重新上升。这表明, 电动车灭火困难的原因之一是三元锂电池的高能量密度特性, 导致热失控反应难以控制。第三和第四阶段的过程与加热模组相似, 不再赘述。从以上分析过程可以得出, 电动车热失控过程中, 邻近模组的热失控存在一定的滞后性, 加上三元锂电池的高能量密度特性, 使得电动车灭火困难, 需要连续性喷淋降温处理。因此, 在电动车的设计和生产中, 需要考虑如何维持电池高能量密度的同时来提高电动汽车的安全性能。

图8展示了远端模组5000 s内热电偶温度数据变化。由于后期远端模组的数据采集装置损坏, 因此只对其前5000 s数据进行分析。远端模组热电偶温度变化可大致分为三个阶段。在第一阶段(0~2070 s), 前期两模组温度几乎保持不变, 但在2000 s左右, 温度开始呈现上升趋势, 这也与图5(b)中大量黑烟冒出的情况相符合。值得注意的是, 由于远端模组距离加热模组较远, 因此其热失控反应的发展速度较慢, 存在一定的时间差。在第二阶段(2070~3800 s), 由于灭火装置的喷淋作用, 热失控反应过程受到了一定的抑制。然而, 由于一模组离被加热模组距离相对较近, 其电池温度也比二模组高。在3600 s左右, 灭火装置停止工作, 两模组电池温度又开始呈现上升趋势, 而一模组已经进

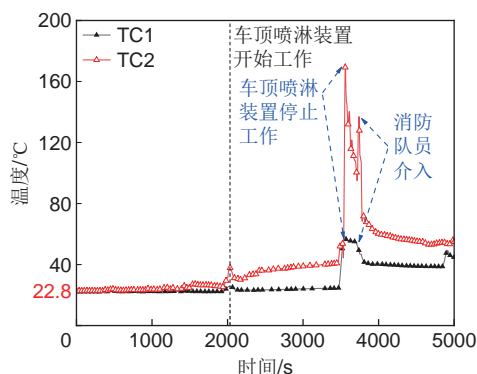


图8 远端模组温度变化

Fig. 8 Temperature change of remote module

入热失控阶段。在第三阶段(3800 s后), 消防队员入场开始进行高压水枪冲击, 两模组温度都开始下降。然而, 在5000 s左右停止操作后, 模组温度又开始呈现上升趋势, 说明相关模组依然存在热失控风险。这表明, 即使远离热源的模组在初步灭火操作之后也存在热失控风险性, 需要进行持续性消防灭火操作。综上所述, 电动车热失控过程中, 远离热源的模组有着热失控反应发展速度较慢的特点。因此, 在相关救援活动中, 需要进行持续性消防灭火操作, 以确保电动车的安全。

## 2.2 车舱内温度数据分析

图9展示了车舱内热电偶温度数据变化, 可分为三个阶段。在第一阶段(0~2070 s), 车舱内各个位置温度几乎没有变化, 保持在23°C左右。这表明, 在电动车热失控初期, 车舱内温度变化较为缓慢, 人员难以感知。在第二阶段(2070~4000 s), 由于车顶喷淋装置开始工作, 车舱内的热电偶由于直接接触水流的冲击, 温度开始剧烈波动起来, 但总体还是在23°C左右。然而, 在4000 s左右, 消防队员在使用高压水枪时, 采用了间歇操作的方式, TC0与TC7两监测点又布置于车舱内底座, 与车身底部的热源距离较近, 能够更早接触到电池热失控所传递的热量, 于是温度开始迅速上升。这表明, 在电动车热失控后期, 车舱内温度变化速度会加快, 人员需要及时采取措施。在第三阶段(4000 s后), 由于消防队员重新开始作业以及后续顶部喷淋装置的再次启用, 这两个监测点的温度又开始下降, 而在此期间, 车舱内其他探测点位置的温度仅有一些微小波动。这表明, 在电动车热失控后期, 消防队员的灭火操作可以有效地降低车舱内温度, 但需要注意的是, 车舱内不同位置的温度变化可能

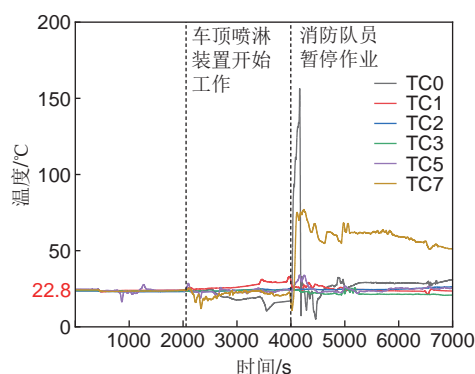


图9 车舱内温度变化

Fig. 9 Temperature change in the cabin

存在差异。综上所述,电动车热失控时,车舱内温度变化较为缓慢,人员难以感知。然而,在热失控后期,车舱内温度变化速度会加快,人员需要及时采取措施。此外,电动车的设计和生产中,需要充分考虑车内安全警报提示的设置,以提高车内人员的安全意识。

### 2.3 车库顶棚温度数据分析

图 10 展示了车库顶棚热电偶温度数据在 7000 s 内的变化情况。可以看出,所有热电偶数据呈现相似的变化趋势,可分为三个阶段。在第一阶段(0~2000 s),由于电池包内热失控电池数量较少,现场只有少量白烟蔓延至顶棚,因此顶棚温度保持平稳。这表明,在电动车热失控初期,车顶温度变化较为缓慢。在第二阶段(2000~5000 s),由于大量电池进入热失控状态,车身周围大量黑烟冒出,高温烟气迅速向上蔓延至顶棚,使得顶棚温度迅速升高,并形成顶棚射流现象<sup>[24]</sup>,黑烟在整个空间内迅速扩散,如图 5(b)所示,此时车顶的最高温度显示为 46.1 °C。随后现场为了模拟火灾发生时烟气传感器的作用,指挥室迅速下达了灭火指令,车顶喷淋装置开始工作,黑烟渐渐散去,顶棚温度也随之下降至初始温度。在第三阶段(5000 s 后),由于现场停止了降温作业,且在车身左后侧放置了千斤顶翘起车身底座,大量新鲜空气得以进入底部的电池模组内,底部电池由于还处于高温状态,继续进行热失控反应,车身周围又出现大量黑烟,车顶棚温度随之开始上升,随后指挥室再次下达灭火命令,喷淋装置重新开始工作,顶棚温度再次下降。

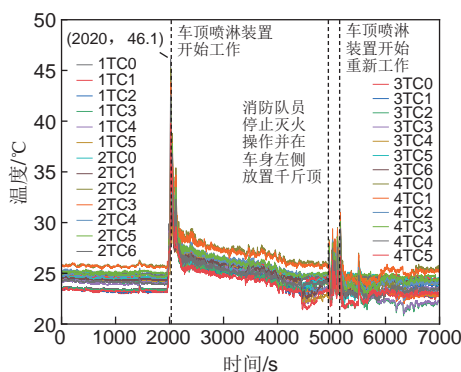


图 10 顶棚温度变化

Fig. 10 Roof temperature change

由以上过程可得,车顶的存在会加重电动汽车热失控所造成的危害,当电动汽车在地下车库内发

生热失控时,大量高温有毒有害气体会迅速蔓延至整个空间,造成大量的人员伤亡与经济损失。随着电动汽车持有量的增加,地下车库内的充电桩数量也在逐年递增,相较于加油站的多年发展与严格的安全标准,其还处于刚刚起步阶段,还存在一些安全隐患<sup>[25-26]</sup>。因此现代设计地下车库时需要更加合理地布置感烟感温探头以及消防管路,以便在火灾事故发生前期及时检测并提供一定的灭火措施,有效抑制电动汽车的热失控过程,为消防队员后续的灭火救援工作提供宝贵时间。这一措施对于保障地下车库内人员和财产的安全具有重要意义。

## 3 结 论

本工作开展了地下车库场景下的全尺寸电动汽车热失控实验,分析了电动汽车热失控过程中电池包、车身以及顶棚处的温度特性,得出了以下结论:

(1) 电池包内的电池热失控过程是由近及远的,主要传热方式是热传导,其最高温度超过 600 °C,当水无法直接作用在电池时,降温效果有限,只能起到一定的减缓作用,并不能使其降至安全温度。因此,在这种情况下需要进行持续性喷淋处理,以有效抑制电池包内的温度升高。

(2) 在电动车热失控初期,车舱内温度变化较为缓慢,相较于电池包的变化来说,存在一定的滞后性,车内人员难以感知,会做出错误判断,导致车内安全错觉。因此,各家车企在进行安全设计环节中应当充分考虑这一因素,做好车内安全警报提示。

(3) 车库顶棚处的最高温度为 46.1 °C,但此时现场已经充满了大量黑烟。因此,在地下车库内,烟雾传感器相较于温度传感器可能是一个更好的选择,能够更早发现火情并采取措施,以保障车库内人员和财产的安全。

综上所述,本实验结果对于地下车库内电动汽车热失控的监测和控制具有重要意义,为地下车库的安全管理提供了有益的参考。

## 参 考 文 献

- [1] 国务院办公厅. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)[EB/OL]. [2020-11-02]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/02/content\\_5556716.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/02/content_5556716.htm).  
General office of the state council of the People's Republic of China. Development plan of new energy automobile industry (2021—2035) [EB/OL]. [2020-11-02]. <https://www.gov.cn/zhengce/>

- zhengceku/2020-11/02/content\_5556716.htm.
- [2] 中国汽车流通协会汽车市场研究分会. 2023年6月份全国乘用车市场分析[EB/OL].[2023-7-10].<http://www.cpcauto.com/newslst.php?types=csjd&id=3167>. Passenger Union. National passenger car market analysis in June 2023[EB/OL]. <http://www.cpcauto.com/newslst.php?types=csjd&id=3167>.
- [3] RAO Z H, WANG S F. A review of power battery thermal energy management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4554-4571.
- [4] WANG H B, DU Z M, RUI X Y, et al. A comparative analysis on thermal runaway behavior of  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z)\text{O}_2$  battery with different nickel contents at cell and module level[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122361.
- [5] WANG Q S, MAO B B, STOLIAROV S I, et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73: 95-131.
- [6] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.
- [7] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A review of battery fires in electric vehicles[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361-1410.
- [8] 夏继豪. 纯电动汽车的火灾特性及热释放速率探讨[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1028-1032.
- XIA J H. Discussion on fire characteristics and heat release rate of blade electric vehicles[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 1028-1032.
- [9] 张良, 张得胜, 陈克, 等. 动力电池热失控引发电动汽车火灾的典型特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 94-99.
- ZHANG L, ZHANG D S, CHEN K, et al. Research on typical characteristics of electric vehicle fire caused by thermal runaway of power battery[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(7): 94-99.
- [10] JEEVARAJAN J. A darker shade of green: Hazards associated with high voltage high capacity lithium-ion batteries[J/OL]. The Journal of High Technology Law. [2023-07-01]. <http://www.questia.com/read/1G1-560558032/a-darker-shade-of-green-hazards-associated-with-lithium-ion>.
- [11] MAO B B, CHEN H D, CUI Z X, et al. Failure mechanism of the lithium ion battery during nail penetration[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 1103-1115.
- [12] BAK S M, HU E Y, ZHOU Y N, et al. Structural changes and thermal stability of charged  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  cathode materials studied by combined *in situ* time-resolved XRD and mass spectroscopy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(24): 22594-22601.
- [13] PING P, WANG Q S, HUANG P F, et al. Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method[J]. Applied Energy, 2014, 129: 261-273.
- [14] REN D S, LIU X, FENG X N, et al. Model-based thermal runaway prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components[J]. Applied Energy, 2018, 228: 633-644.
- [15] YAMAKI J I, SHINJO Y, DOI T, et al. The rate equation for oxygen evolution by decomposition of  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$  at elevated temperatures[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(10): A1648-A1654.
- [16] FENG X N, SUN J, OUYANG M G, 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.
- [17] GAO S, FENG X N, LU L G, et al. An experimental and analytical study of thermal runaway propagation in a large format lithium ion battery module with NCM pouch-cells in parallel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 135: 93-103.
- [18] GAO S, LU L G, OUYANG M G, et al. Experimental study on module-to-module thermal runaway-propagation in a battery pack[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(10): A2065-A2073.
- [19] LECOCQ A, BERTANA M, TRUCHOT B, et al. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle[C]//FIVE 2012 SP Technical Research Institute of Sweden. Boras, 2012.
- [20] TRUCHOT B, FOUILLEN F, COLLET S. An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires[J]. Fire Safety Journal, 2018, 97: 111-118.
- [21] LI H, PENG W, YANG X L, et al. Full-scale experimental study on the combustion behavior of lithium ion battery pack used for electric vehicle[J]. Fire Technology, 2020, 56(6): 2545-2564.
- [22] 朱难难, 王学辉, 余佳灵, 等. 全尺寸电动汽车火灾特性试验研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(1): 38-41.
- ZHU N N, WANG X H, YU J L, et al. Full-scale experimental study on fire characteristics and fire-fighting performance of an electric vehicle[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(1): 38-41.
- [23] 陈钦佩, 王学辉, 米文忠. 电动汽车锂离子电池系统热失控气体毒害及爆炸特性研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2256-2262.
- CHEN Q P, WANG X H, MI W Z. Experiential study on the toxic and explosive characteristics of thermal runaway gas generated in electric-vehicle lithium-ion battery systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2256-2262.
- [24] 陈龙飞. 纵向通风与顶棚集中排烟作用下隧道火灾顶棚射流行为特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- CHEN L F. Studies on tunnel fire ceiling jet characteristic with longitudinal ventilation and ceiling smoke extraction[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [25] 颜少卿. 电动汽车充电桩现场安全问题的探究[J]. 低碳世界, 2021, 11(8): 243-244.
- YAN S Q. On-site safety problems of electric vehicle charging piles[J]. Low Carbon World, 2021, 11(8): 243-244.
- [26] 张然. 电动汽车充电桩安全管理研究[J]. 交通节能与环保, 2020, 16(1): 10-13.
- ZHANG R. Research on safety management of electric vehicle charging pile[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2020, 16(1): 10-13.