

引用本文

林晓晔,李凯玲,侯亚楠,等.锂电池安全阀朝向对电动自行车火灾特性的影响[J].消防科学与技术,2026,45(5):26—33.

Lin Xiaoye, Li Kailing, Hou Yanan, et al. Impact of safety vent orientation on fire characteristics in lithium-ion battery e-bikes[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(5): 26—33.

锂电池安全阀朝向对电动自行车火灾特性的影响

林晓晔, 李凯玲, 侯亚楠, 王永逸

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061)

摘要:针对电动自行车锂电池火灾这一城市安全重要问题,通过全尺寸燃烧试验分析了安全阀朝向对火灾发展过程的影响。结果表明,2次试验中,电动自行车火灾整体均呈现“初期燃烧、射流火—稳定燃烧、衰减熄灭”3个阶段。射流火次数与电池数量密切相关,而射流火焰规模与其发生次序无显著关联。安全阀竖直朝向(试验A)会显著提升其正上方区域火焰温度,平均最高温度达181.8℃,较水平朝向(试验B)提高约16%,且整车呈现“先车后部、后车前部”的完全燃烧模式,车前部由射流火直接引燃;而试验B的火焰水平喷射距离最远达2.5 m,但火灾仅局限于车后部。此外,试验A的总热释放量约为试验B的1.71倍。研究证明安全阀朝向可显著影响锂电池电动自行车火灾蔓延特征与燃烧强度。

关键词:电动自行车;锂电池;安全阀;燃烧特性;火灾危险性

中图分类号:X913.4;TM912 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.05.0026.08

Impact of safety vent orientation on fire characteristics in lithium-ion battery e-bikes

Lin Xiaoye, Li Kailing, Hou Yanan, Wang Yongyi

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710061, China)

Abstract: This study addresses the critical urban safety issue of lithium-ion battery fires in electric bicycles by analyzing the influence of safety vent orientation on fire development through full-scale burning tests. Results show that e-bike fires generally exhibit three distinct stages in both tests: initial combustion, jet fire followed by stable combustion, and decay leading to extinction. The number of jet fire incidents is closely related to the number of battery cells, whereas the scale of jet flames shows no significant correlation with their sequence of occurrence. When the safety vent is oriented vertically (Test A), the flame temperature directly above it is significantly increased, with an average peak temperature of 181.8 °C, approximately 16% higher than that observed in the horizontal orientation (Test B). Moreover, the entire e-bike in Test A is fully burned in a "rear-first, then front" pattern, where the front section is directly ignited by a jet flame. In contrast, Test B produces a horizontal jet flame with a maximum projection distance of 2.5 m, but the fire remains confined to the rear section. Additionally, the total heat release rate in Test A is about 1.71 times that of Test B. The study confirms that safety vent orientation significantly influences both fire spread behavior and combustion intensity in lithium-ion battery e-bike fires.

Key words: electric bicycle; lithium-ion battery; safety vent; combustion characteristics; fire risk

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52504200); 中国博士后特别资助基金项目(2025T180447)

作者简介: 林晓晔, 长安大学地质工程与测绘学院硕士研究生, 主要从事消防安全工程研究, 陕西省西安市雁塔区雁塔路南段126号, 710061。

通信作者: 李凯玲, 长安大学地质工程与测绘学院副教授, dcdgx21@chd.edu.cn。

收稿日期: 2025-10-21; **修回日期:** 2026-01-27

电动自行车作为我国重要的短途交通工具,社会保有量已接近4亿辆。然而,电动自行车火灾事故也呈现频发态势,造成严重人员伤亡与财产损失,已成为亟待解决的公共安全问题^[1]。随着GB 17761—2024《电动自行车安全技术规范》对整车质量限制(≤ 55 kg)的实施,锂电池凭借其高能量密度和轻量化优势正逐步取代传统铅酸电池。研究表明,在同等体积条件下,锂电池热失控释放的能量可达铅酸电池的5倍以上,在提升车辆续航能力的同时,也显著增加了火灾风险^[2]。锂电池电动自行车火灾的特殊性主要源于其热失控机制:电池内部链式反应具有自供氧特性,难以有效抑制,可在极短时间内释放大量可燃气体并通过安全阀猛烈喷射,引发剧烈燃烧甚至爆炸,并伴随火焰喷射现象,显著促进火势蔓延^[3-5]。因此,掌握锂电池电动自行车火灾演化规律,揭示安全阀朝向对火灾的作用机制,对提升防灾减灾能力具有重要意义。

近年来,相关学者针对电动自行车火灾开展了广泛研究。李季梅等^[6]通过九度分析模型指出,在锂电池个人终端应用的3大领域中,电动自行车火灾爆炸风险最高,其次是电动汽车,最后是手机。荣建忠等^[7]研究了电动自行车磷酸铁锂电池、三元锂电池在半封闭空间内的热失控特性。李青蔚等^[8]发现了电动自行车火焰向上蔓延速率大于向下蔓延速率,向车尾蔓延速率大于向车头蔓延速率,且火焰高度可达2 m以上。刘振飞等^[9]、何学超等^[10]通过实体燃烧试验测得单车燃烧峰值热释放速率分别达1 290 kW和1 337 kW,最高燃烧温度分别为730 ℃和646 ℃,同时证实火灾过程中会伴随射流火与爆炸现象,进一步凸显单车火灾的危害强度。李君^[11]较早开展了豪华型与简易型电动自行车燃烧特性的对比研究。LIL M等^[12]在高层住宅环境中开展了全尺寸试验与数值模拟,得到6辆电动自行车同时燃烧的最大热释放速率约为1 600 kW。

上述研究共同构建了电动自行车火灾危害强度的认知框架,然而均将安全阀默认为被动泄压通道,其朝向对火焰喷射动力学与整车温度场的主动调控机制尚未得到系统性研究。为此,将安全阀朝向作为独立变量引入电动自行车火灾研究,以搭载15块20 Ah棱柱形锂电池模组的电动自行车为研究对象,设计开展安全阀竖直(试验A)与水平(试验B)朝向的全尺寸燃烧对比试验。通过分析温度场分布、热释放速率和视频数据,揭示不同安全阀朝向向下电动自行车火灾的燃烧发展过程与热释放特性,填补安全阀几何构型影响研究的理论空白,为电动自行车火灾防控技术优化及安全标准制定提供理论支撑与试验依据。

1 试验设计

1.1 试验对象

试验选用市售常见两轮电动自行车(图1),并搭

载由15块20 Ah棱柱形锂电池串联组成的锂电池模组。试验车辆符合GB 17761—2024《电动自行车安全技术规范》,试验电池符合GB 43854—2024《电动自行车用锂离子蓄电池安全技术规范》,电池参数见表1。



图1 试验用电动自行车

Fig. 1 Test e-bike sample

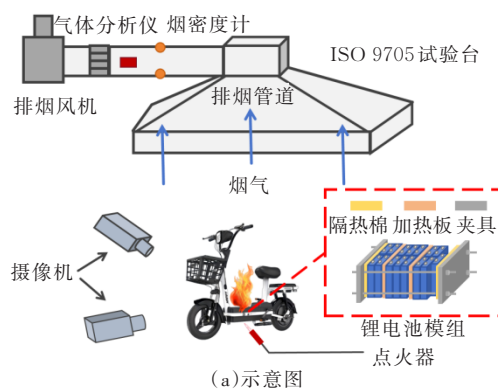
表1 电池参数

Table 1 Battery parameters

参数	取值
尺寸(长×宽×高)/mm	65×22×148
标称容量/Ah	20
标称电压/V	3.2
工作电压/V	2.50~3.65
正极材料	LiFePO ₄
负极材料	石墨
荷电状态	100%

1.2 测量设备及测点布置

试验布置见图2。



(a)示意图



(b)现场图

图2 试验布置图

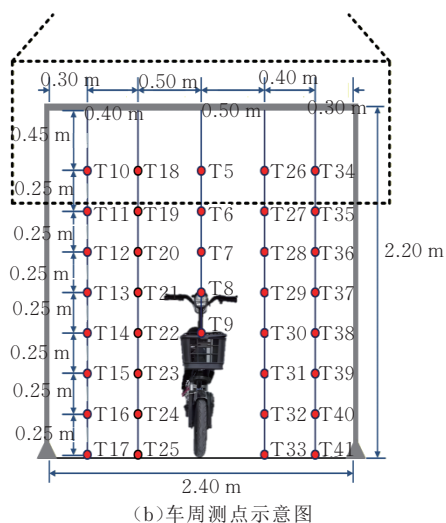
Fig. 2 Test layout diagram

试验前以恒压恒流方式将电池充电至SOC=100%，静置24 h后，使用特制夹具将电池样品、加热板及隔热棉固定并安装于电池舱内，锂电池模组结构如图2(a)所示。单辆电动自行车实体火灾试验于北京密云开展，试验车置于ISO 9705试验台集烟罩下方，采用耗氧法测热释放速率；车体前、侧方各设1台高清摄像机记录燃烧过程；温度监测采用直径1 mm的K型铠装热电偶。

温度测点系统布设方案如图3所示。车身温度监测，于前/后轮胎及前/后座中心各配置1支热电偶，编号T1~T4(图3(a))；锂电池模组正上方0.50~1.50 m高度范围内垂直布置1排测点，间距0.25 m，共5个，编号T5~T9，用于测定火焰垂直温度分布；车辆两侧水平距离0.50 m及0.90 m处各设2排环境温度测点，每排8支，间距0.25 m，从左至右、从上到下依次编号为T10~T41(图3(b))。



(a) 车身测点示意图



(b) 车周测点示意图

图3 热电偶分布示意图

Fig. 3 Diagram of thermocouple locations

为模拟电动自行车锂电池热失控后实际燃烧场景，采用2片500 W的加热板诱导锂电池热失控，于首个锂电池安全阀开启后，关闭加热板，启动模组侧上方的点火器，引燃热失控释放的可燃混合气体，以模拟锂电池部位着火引燃电动自行车。

试验设2组，除锂电池模组安全阀朝向不同外，其余参数均一致：试验A为“锂电池模组安全阀竖直朝向”，试验B为“锂电池模组安全阀水平朝向”，安全阀朝向布置见图4。



(a) 试验A



(b) 试验B

图4 安全阀朝向布置图

Fig. 4 Safety vent orientation diagram

2 试验结果与分析

2.1 燃烧演化过程

燃烧过程始于外部加热，安全阀开启后计时($t=0$ s)，手动点燃喷出气体。图5为射流火焰喷射长度图，图6为不同工况下电动自行车火灾的燃烧演化过程(只截取部分典型图像)。结合图5、图6可得，锂电池电动自行车火灾演化可分为3个阶段。

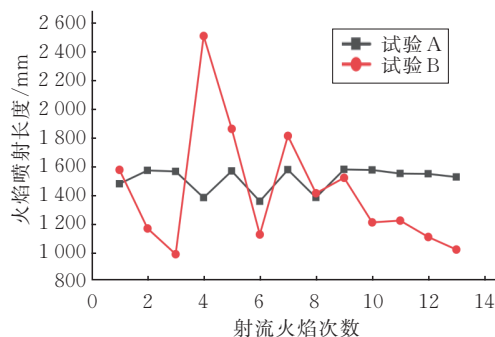


图5 射流火焰喷射长度图

Fig. 5 Jet flame spray length diagram

在阶段①(燃烧初期阶段)，2种工况下的火势发展均较为有限，火焰主要集中在锂电池模组所在区域，火焰高度均低于0.5 m，烟气流动缓慢且辐射热通量较低；同时，火焰形态模糊并伴随显著抖动，呈毛刷状分布，且产生少量黑烟。其中试验B因受侧壁阻

挡,温升有限,故进行了二次加热。

进入阶段②(射流火-稳定燃烧阶段)后,多节锂电池相继发生热失控。当锂电池安全阀开启后,可燃气体高速喷出的同时被周围火焰及高温热辐射引燃形成典型射流火。表2统计显示,15块电池中除前2次安全阀开启未产生明火外,其余13块电池均引发射流火,表明射流火频次与电池数量具有良好的相关性。进一步以火焰喷射长度对射流火规模进行分析,由图5可知,各次射流火规模与发生时序无显著关联。

每次射流火后常出现短暂稳定燃烧,这是由于喷射至电池外壳、线束及周边塑料件上的电解液等可燃

物持续燃烧,其燃烧特性与常规液体或固体燃料类似。随着火焰蔓延,火焰高度显著增加,燃烧加剧,黑烟增多。同时,在高温作用下,车身外壳、鞍座、轮胎等非金属部件热解、熔化并滴落,形成类似“池火”的燃烧现象,进一步促进火势蔓延。

阶段③(衰减及熄灭阶段)火灾持续进行,电池内部的电解液、电极材料等核心可燃成分逐渐燃烧殆尽,同时车身框架上的塑料部件、橡胶组件等辅助可燃物也在高温作用下完成燃烧或炭化,导致火场中的可燃物质总量持续减少,无法继续为火焰提供充足的能量支撑。火焰的燃烧强度明显减弱,火焰高度同步降低,最终完全熄灭。



图6 电动自行车火灾燃烧演化图

Fig. 6 Evolution diagram of e-bike fire process

表2 射流火焰时刻表

Table 2 Jet flame event timetable

射流火焰次数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
射流火焰时刻/s	试验 A	74	81	174	254	289	391	419	527	587	588	615	619	671
	试验 B	529	622	738	829	835	919	934	950	985	1 005	1 096	1 116	1 231

在阶段②,2种工况的火灾演化过程存在明显差异。具体如下。

1)火焰形态。由图6可知,试验A火焰呈“射流火+火羽流”耦合燃烧形态,竖直方向火焰高度优势显著,在实际场景中会对电动自行车上部车棚结构造成强烈热威胁,最终导致不可避免的结构性损伤;试验B火焰高度主要依赖火羽流维持,水平射流火焰受重力与浮力耦合作用形成不对称湍流结构,空气卷吸效率高,火焰更延展、长径比更大,且水平喷射能力强,最远可达2.5 m,实际场景中易引燃周边可燃物(如相邻电动自行车车身部件),扩大火灾影响范围。

2)火灾蔓延与残留物。阶段②出现的高强度射流火焰或火星,因初始喷射动量主导,喷射角度随机,

未严格遵循电池极耳方向,导致两种放置方式的火灾蔓延差异明显。试验A引发了整车完全燃烧,且按“电池舱、车辆后部、车辆前部”的顺序发展,车辆前部的燃烧由第11次射流火直接引燃车把手所致,随后火势在车前部扩散。试验B中未出现射流火引燃车把手的现象,火势仅局限于车辆后部及电池舱,未向车辆前部蔓延。这表明,电动自行车车前部燃烧主要依赖锂电池射流火直接作用,车后部燃烧则受射流火与整体火焰蔓延的双重影响。到阶段③,两者燃烧残留差异突出:试验A前轮持续燃烧、损毁严重,试验B仅后轮胎燃烧,车前部结构基本完好。

由上述分析可知,安全阀朝向通过改变射流火焰的喷射方向,对电动自行车火灾的蔓延路径及最终燃烧范围产生显著调控作用。具体表现为:试验

A火焰为“射流火+火羽流”耦合形态,整车按“先车后部、后车前部”的顺序完全燃烧,车前部由射流火直接引燃;试验B火焰以火羽流为主导,水平喷射能力突出,火灾仅局限于车后部及电池舱,车前部结构基本完整。

2.2 温度分布

2.2.1 车身温度

车身温度变化如图7所示。结合2.1节火灾蔓延与残留物可知,试验A车辆燃烧过程遵循“先车后部、后车前部”的顺序展开,各关键测点的温度变化趋势与燃烧蔓延进程呈现高度同步性。前座、后座、后轮胎、前轮胎分别在291、444、745、1652 s达到峰值,峰值温度分别为860.8、667.7、700.3、952.3℃;试验B中车身各关键测点的温度峰值出现时间呈现高度集中性,均为约770 s。前座、后座峰值温度分别为748.9、496.1℃。其中,试验B后轮胎因热电偶脱落导致数据异常,其余测点数据均准确。

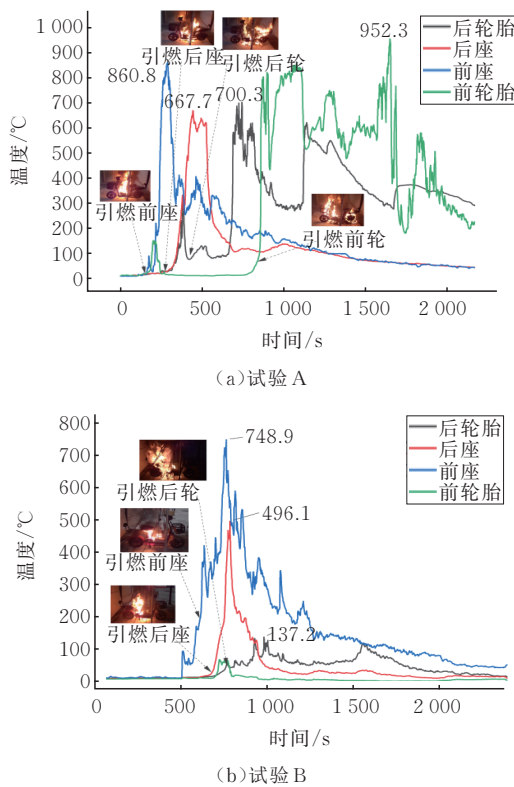


图7 车身温度变化图

Fig. 7 Diagram of e-bike body temperature variation

2.2.2 车周温度

车身周围温度分布如图8及图9所示。试验A所测最高温度分别为79.1、132.8、68.0、66.2℃,试验B最高温度则为89.9、601.9、888.8、888.8℃。由于锂电池安全阀布置差异,试验A中车辆两侧温度变化趋势基本一致,且数值较为接近;而在试验B中,水平方向

出现的射流火焰导致车辆右侧测点温度出现显著波动,该现象出现的时间与表2所记录的射流火发生时刻基本吻合。

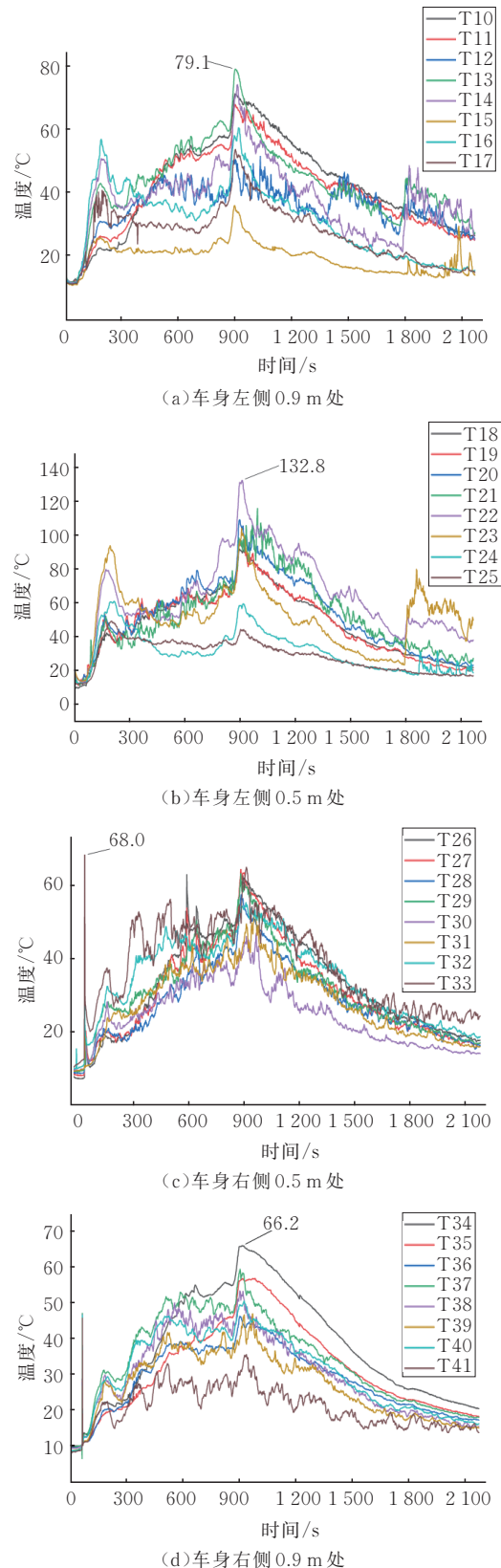
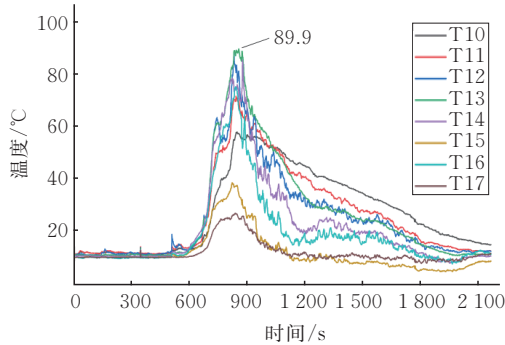


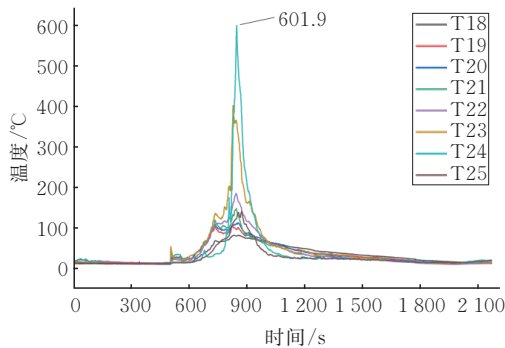
图8 试验A车身周围的温度

Fig. 8 The temperature around the e-bike body in Test A

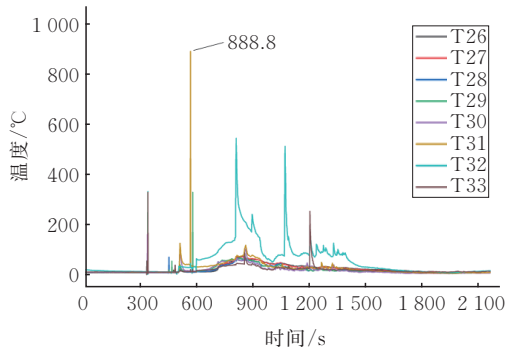
结果表明,试验B车身周围温度分布明显受到锂电池射流火的影响,增大了对周边车辆的热引燃风险,该结论与第2.1节中观察到的火焰形态特征一致。



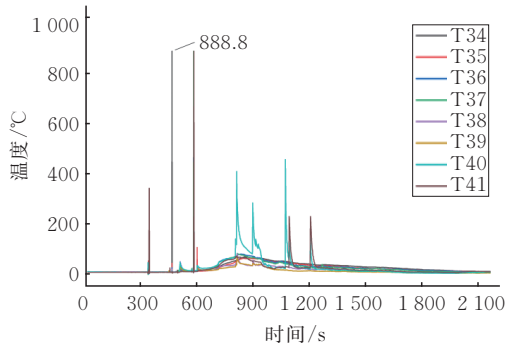
(a) 车身左侧 0.9 m 处



(b) 车身左侧 0.5 m 处



(c) 车身右侧 0.5 m 处



(d) 车身右侧 0.9 m 处

图9 试验B车身周围的温度

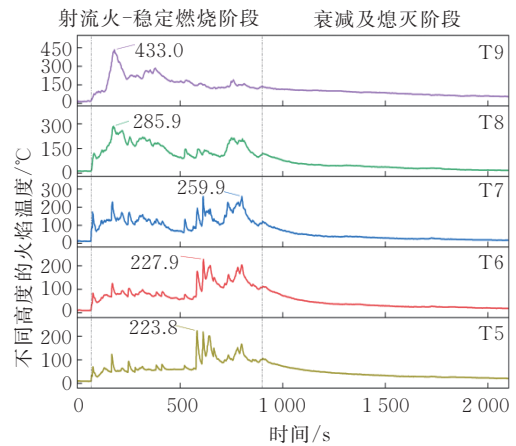
Fig. 9 The temperature around the e-bike body in Test B

2.2.3 不同高度火焰的温度

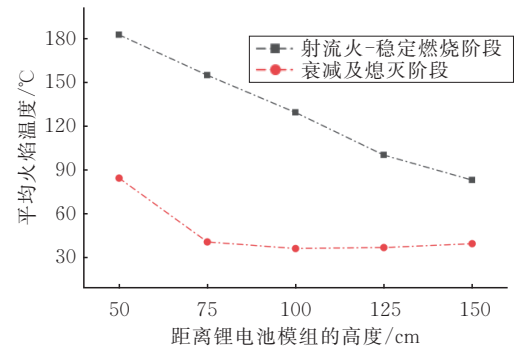
为进一步探究锂电池射流火在燃烧演化中的作用,通过图10、图11呈现了竖直(试验A)与水平(试验B)两种朝向锂电池模组上方不同高度的火焰温度变化规律。结合火焰形态观测与温度趋势分析,可将其明确分为射流火-稳定燃烧阶段与衰减及熄灭阶段。

在射流火-稳定燃烧阶段,试验A射流方向与浮力同轴,两侧空气卷吸率低,正上方出现显著热积聚和高温,高温区域集中在T8~T9,在T9处平均火焰温度最高,达181.8°C;试验B水平射流因重力弯曲产生强湍流卷吸,能量分散严重,导致其正上方测点温度大幅度低于试验A,平均火焰最高温度为76.5°C,同样出现在T9处。

进入衰减及熄灭阶段,两种朝向模组的火焰温度均呈现随高度增加而逐渐降低的趋势。其中,试验A在T9高度处平均温度降至84°C,更高的T5处,火焰几乎完全消失,火焰平均温度为39°C。试验B在此阶段最高平均火焰温度相对更低,仅为24.9°C。



(a) 不同高度火焰温度



(b) 时间平均火焰温度

图10 试验A电池锂电池模组上方不同高度火焰温度变化图

Fig. 10 Evolution of flame temperature with height above the battery module in Test A

2.3 热释放速率

图12是试验A、B燃烧热释放速率(HRR)、总热释放量(THR)随时间变化的曲线。电动自行车火灾

初期HRR较低,主要由锂电池贡献。试验A于点火后81 s达到首个HRR峰值(111.631 kW),试验B于点火后489 s达首个峰值(49.812 kW)。随着车身外壳、鞍座、轮胎等易燃组件逐步参与燃烧,HRR呈快速上升趋势,试验A、B分别于点火后588 s和798 s达到HRR峰值(319.433、322.565 kW),同时THR增速显著加快。随后因可燃物消耗,HRR逐步下降,THR增速减缓直至熄灭。

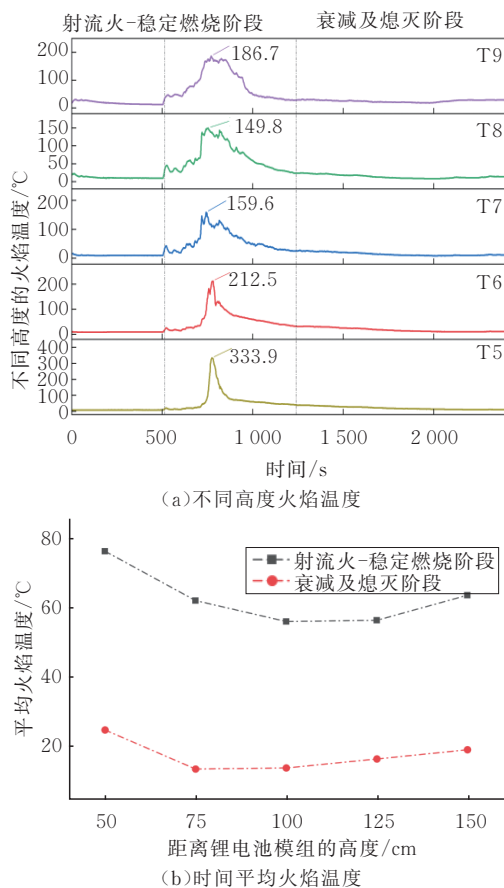


图11 试验B电池锂电池模组上方不同高度火焰温度变化图
Fig. 11 Evolution of flame temperature with height above the battery module in Test B

由于二者燃烧参与范围的差异,导致试验A的THR显著高于试验B。由THR差异可推断,安全阀朝向可间接影响燃烧效率。结合图5可知,试验A有利于火焰向上延烧并引燃整车,整车骨架残留物炭化较为均匀,塑料及橡胶等部件基本烧尽,燃烧总面积更大、持续时间更长,THR更高;试验B因射流火水平喷射,烧毁区域集中在车中及后部,燃烧范围受限,整体燃烧持续时间相对较短,THR较低,燃烧充分性较弱。

上述可知试验A、B峰值HRR接近,燃烧强度相当,但总热释放量差异显著,表明安全阀朝向对峰值HRR(试验B略高)影响有限,主要影响火灾持续时间与总热释放量。

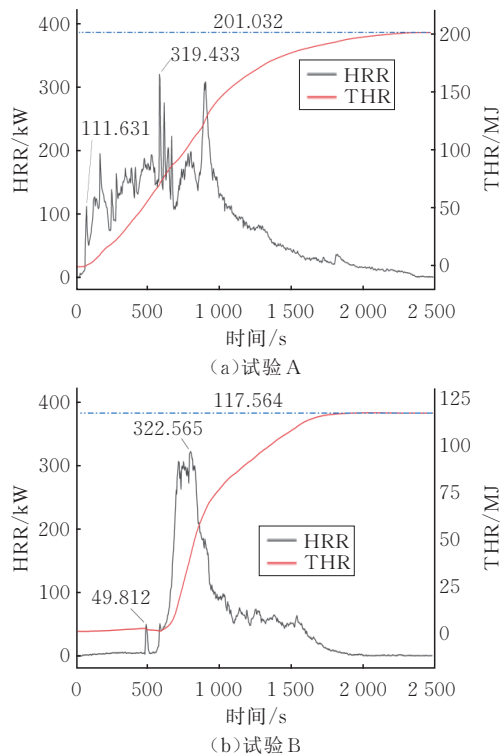


图12 热释放速率与总热释放量随时间变化曲线

Fig. 12 Curves of heat release rate and total heat release versus time

3 结论

通过两组全尺寸实体燃烧对比试验,研究了安全阀朝向对锂电池电动自行车火灾行为的影响,主要得出以下结论。

1)锂电池电动自行车火灾演化分3阶段:初期燃烧、射流火-稳定燃烧、衰减熄灭。射流火次数均与锂电池数量密切相关,但射流火焰的规模与射流火发生的先后顺序无明显关系。

2)安全阀朝向通过改变射流火焰喷射方向,成为影响火灾蔓延模式的核心机制。试验A形成“射流火+火羽流”耦合形态,火焰纵向引燃整车;试验B射流火横向喷射达2.5 m,但燃烧局限车后部,车前部保持完整。两种朝向因喷射路径不同导致燃烧范围根本差异。通过控制火焰传播路径与燃烧范围,安全阀朝向显著影响火灾持续时间与总热释放量,但对峰值热释放速率影响有限。试验A、B的HRR峰值接近,燃烧强度相当,但总热释放量差异显著,试验A的THR是试验B的1.71倍。

3)射流火直接影响车身周围温度分布,温度变化与火焰形态变化趋势一致。在射流火-稳定燃烧阶段,试验A车体两侧温度分布均衡,安全阀上方形成显著热积聚,高温区集中于T8~T9,其中T9处平均最高温度达181.8°C;试验B车身周围温度分布不均,因射流火对车辆右侧区域构成显著热威胁,温度最高

达888.8℃,而安全阀上方热积聚效应显著削弱,平均最高温度仅为76.5℃。

综上,电动自行车锂电池安全阀朝向是影响火灾蔓延路径与强度的关键因素。水平朝向的瞬时引燃风险更高,但竖直朝向的整体连锁火灾风险更严峻。建议安全阀避免竖直朝向布设,优先采用水平或斜向下朝向,以限制大规模火灾蔓延。未来需进一步研究不同电池体系、排列方式与泄压策略的耦合效应,为电动自行车火灾防控设计提供支撑。

参考文献:

- [1] 电动自行车安全“防护网”持续升级[EB/OL]. [2025-08-04]. https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202508/04/content_30093330.html.
- [2] 饶球飞,甘卫锋.电动自行车起火风险分析和起火特征研究[J].消防科学与技术,2023,42(11):1597—1602.
- [3] YU Z L, SHEN X L, XU R, et al. Understanding the combustion behavior of electric bicycle batteries and unveiling its relationship with fire extinguishing[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 91: 609—618.
- [4] 袁帅,台枫,钱新明,等.磷酸铁锂离子电池热失控产物爆炸下

限预测方法[J].爆炸与冲击,2025,45(2):126—136.

- [5] XIE J, LU Y C. Designing nonflammable liquid electrolytes for safe Li-ion batteries[J]. Advanced Materials, 2025, 37(2): 2312451.
- [6] 李季梅,陈宁,姚晓晖.锂电池火灾爆炸风险九度分析模型及安全防范策略研究[J].消防科学与技术,2025,44(1):1—9.
- [7] 荣建忠,吕银华,张林志,等.半封闭空间内电动自行车锂离子电池热失控研究[J].消防科学与技术,2024,43(8):1086—1090,1099.
- [8] 李青蔚,杨智翔,邓军,等.电动自行车燃烧特性及简易分隔防火效果试验研究[J].安全与环境学报,2023,23(12):4271—4278.
- [9] 刘振飞,何学超,冯小军.电动自行车燃烧特性及火灾抑制效果试验研究[J].消防科学与技术,2025,44(1):48—53.
- [10] 何学超,刘振飞,何瑾.三元锂电池电动自行车火灾燃烧特性研究[J].消防科学与技术,2024,43(5):722—725.
- [11] 李君.电动车火灾调查与物证检测技术研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [12] LI L M, LIU B, ZHENG W, et al. Investigation and numerical reconstruction of a full-scale electric bicycle fire experiment in high-rise residential building[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 37: 102304.

(责任编辑:董里)

(上接第19页)

瞬时高温下橡胶管剪切面元素含量变化与PVC的热解、氧化反应密切相关。C元素随受热时间延长先波动后显著富集,O元素呈先升后降趋势,Cl元素持续下降,其变化规律与PVC的阶段热解脱氯反应机制一致。

全尺寸燃气爆炸环境与瞬时高温工况下的剪类工具痕迹存在显著差异:形貌上,实体爆炸与瞬时高温受热200ms时均能识别剪类工具痕迹,但实体爆炸后剪切面热影响区域更广泛,且炭化分布不均;元素含量上,C元素含量差异小,而实体爆炸环境因开放富氧和高强度热作用,表现为O元素含量更高、Cl元素含量更低。

本研究中明确了燃气爆炸环境下,剪类工具痕迹的可识别阈值(火焰温度 $(1\ 200\pm 50)\text{℃}$,受热时间200ms以内),揭示了不同瞬时高温工况下痕迹留存的差异及其机理。研究成果可为燃气爆炸案件中,剪类工具痕迹的检验鉴定、作案工具溯源提供科学依据,为瞬时高温试验模拟燃气爆炸现场的方法有效性提供了数据支持。

参考文献:

- [1] 付伟,王明超,胡祁斐,等.钳、剪工具刃口形态及其剪切痕迹形态特征[J].刑事技术,2017,42(5):359—364.

- [2] YUE C J, CHEN L, LI Z, et al. Research on the hazards of gas leakage and explosion in a full-scale residential building[J]. Defence Technology, 2025, 43: 168—181.
- [3] LIU Q M, ZHANG Y M, NIU F, et al. Study on the flame propagation and gas explosion in propane/air mixtures[J]. Fuel, 2015, 140: 677—684.
- [4] HJERTAGER B H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows[J]. Combustion Science and Technology, 1982, 27(5/6): 159—170.
- [5] CAO M T, ZHANG Y S, LI R Z, et al. Explosion and vented explosion behaviors of low-concentration gas in large-scale pipes[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2023, 42: 101410.
- [6] 李大武,臧泰琦,周昊,等.高温条件下钳剪痕迹特征的变化及对同一认定的影响[J].刑事技术,2022,47(4):382—387.
- [7] 崔军,杨宇波,王泳辉,等.利用剪切痕迹特征推断剪切工具[J].刑事技术,2015,40(4):272—274.
- [8] BROWN N, CRATE J M. Analysis of a failure in a polyethylene gas pipe caused by squeeze off resulting in an explosion[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(1): 30—36.
- [9] 韩斌.聚氯乙烯等塑料废弃物热解特性及动力学研究[D].天津:天津大学,2012.
- [10] 孙天威,滕阳,黄一麒,等.PVC塑料与橡胶的催化热解反应产物分布规律研究[J].应用化工,2024,53(9):2018—2023.
- [11] 田原宇,吕永康,谢克昌.PVC的热解/红外(Py/FTIR)研究[J].燃料化学学报,2002,30(6):569—572.

(责任编辑:毛星)