

中文引用格式:李青蔚,朱烨瑞,杨智翔,等. 温度对受限空间锂电自行车燃烧特征的影响[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(3): 99-106.

英文引用格式:LI Qingwei, ZHU Yerui, YANG Zhixiang, et al. Influence of temperature on combustion features of lithium-ion electric bicycles in confined spaces[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 99-106.

## 温度对受限空间锂电自行车燃烧特性的影响\*

李青蔚 副教授, 朱烨瑞, 杨智翔, 吕自琦, 康付如 副教授, 任立峰 副教授  
(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号: X932 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0620

基金项目: 国家自然科学基金资助(52104219); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-479)。

**【摘要】** 为解决地下室、地下仓库等受限空间因锂电自行车火灾蔓延迅速、热烟气蓄积引发的安全风险, 采用试验与数值模拟方法, 探究不同环境温度下锂电自行车燃烧的温度场演变、火焰特征及烟气扩散行为, 阐明初始环境温度对火灾动力学行为的作用机制。结果表明: 试验条件下, 受限空间燃烧中心平均温度约为 600 °C, 最高温度超过 920 °C。环境温度对锂电自行车燃烧初期的影响较为显著, 40 °C 环境温度下锂电自行车燃烧进入快速发展阶段的时间比 20 和 0 °C 环境下均缩短 20 s; 附近温度达到锂电自行车燃点的时间比 20 和 0 °C 环境下缩短大约 25 s, 约 80 s 后升温速率趋于一致; 20 s 时不同环境下锂电自行车燃烧火焰形态差异较为明显, 40 °C 环境温度下的火焰高度约为 20 °C 环境下的 1.15 倍、0 °C 环境下的 1.32 倍, 约 80 s 后火焰形态趋于一致; 30 s 内 40 °C 环境温度下烟气扩散速度和产生速率明显高于 20 和 0 °C 的环境温度, 约 50 s 后烟气含量基本一致。

**【关键词】** 锂电自行车; 受限空间; 环境温度; 燃烧; 数值模拟

### Influence of temperature on combustion features of lithium-ion electric bicycles in confined spaces

LI Qingwei, ZHU Yerui, YANG Zhixiang, LYU Ziqi, KANG Furu, REN Lifeng

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,  
Xi'an Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** To address the safety risks caused by rapid fire spread and thermal smoke accumulation in confined spaces such as basements and underground warehouses due to lithium-ion electric bicycle fires, this study combines experimental and numerical simulation methods to investigate the temperature field evolution, flame characteristics, and smoke diffusion behavior of lithium-ion electric bicycle combustion under different ambient temperatures, clarifying the effect of temperature on combustion characteristics. The results show that under experimental conditions, the average temperature at the combustion center in the confined space is approximately 600 °C, with a peak temperature exceeding 920 °C. Ambient temperature significantly affects the initial stage of lithium-ion electric bicycle combustion. In a 40 °C environment, the time for combustion to enter the rapid development phase is shortened by 20 seconds

compared to 20 and 0 °C environments. The time required for nearby temperatures to reach the ignition point of the lithium-ion electric bicycle is reduced by approximately 25 seconds compared to 20 and 0 °C environments. After about 80 seconds, the temperature rise rates converge. At 20 seconds, the flame morphology of lithium-ion electric bicycle combustion differs noticeably across environments: the flame height at 40 °C is approximately 1.15 times that at 20 °C and 1.32 times that at 0 °C. Flame morphology converges after about 80 seconds. Within the first 30 seconds, the smoke diffusion velocity and production rate in a 40 °C environment are significantly higher than those at 20 and 0 °C, but smoke concentrations stabilize to similar levels after approximately 50 seconds.

**Keywords:** lithium-ion electric bicycles; confined spaces; ambient temperature; combustion features; numerical simulation

## 0 引言

据统计,我国(不含港澳台地区)锂电自行车(简称锂电池)销量和使用量占全球 90% 以上<sup>[1]</sup>; 2023 年,我国锂电池保有量达 4 亿辆,并预计 2024 年可达到 4.2 亿辆<sup>[2]</sup>。因锂电池自身材料属性、电池自燃特性、不安全充电行为等<sup>[3-5]</sup>,锂电池火灾频发,且呈逐年增加的趋势。据国家消防救援局统计,2023 年,全国共接报锂电池火灾 2.1 万起,较 2022 年上升 17.4%<sup>[6]</sup>。研究锂电池燃烧特征,对掌握锂电池火灾发展情况,提升防灾减灾能力具有重要意义。

诸多学者对此开展了研究,如陈胜朋等<sup>[7]</sup>开展模拟研究,发现楼梯间锂电池燃烧火焰卷吸处上方的无量纲温度随楼梯井垂直高度的增加而减小;潘鸣宇等<sup>[8]</sup>利用火灾动力学模拟软件,模拟分析了电动汽车锂离子电池组火灾过程中的热释放速率(Heat Release Rate, HRR)、烟气、能见度、温度、CO 和 CO<sub>2</sub> 含量的变化;刘得星<sup>[9]</sup>模拟发现,12 Ah 三元软包电池火灾的 HRR 峰值为 37 kW 左右;张青松等<sup>[10]</sup>利用标准 18650 型锂离子电池 HRR 曲线模拟电池组的火灾蔓延,验证了修正后的等效 HRR 模型的可靠性;张阳琳等<sup>[11]</sup>研究发现,环境温度对三元锂电池的工作效率影响较为显著。可以看出,目前的研究主要集中在电池的燃烧和热失控特性方面,对地下室、地下仓库、储藏室等受限空间环境温度对锂电池燃烧特征的影响研究较少。

因此,笔者拟通过试验测试和数值模拟相结合的方法,研究环境温度对受限空间锂电池燃烧过程中的温度、火焰形态和烟气产生及分布情况的影响,分析锂电池燃烧特征变化情况,以为锂电池防火提供理论支持。

## 1 锂电池受限空间燃烧试验

### 1.1 试验系统

试验模拟地下车库受限空间,空间长×宽×高为 7 m×3.5 m×2.2 m,混凝土墙厚 0.2 m,如图 1 所示。

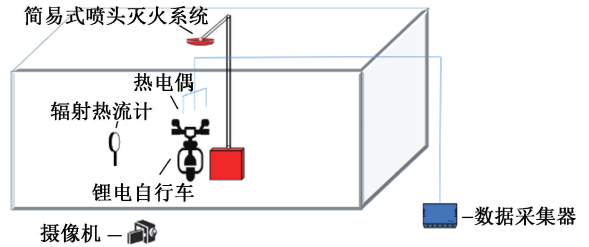


图 1 试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of test system

试验锂电池(简称试验车)正前方设置摄像机,以采集试验车燃烧过程中的图像。试验车置于试验系统中心位置。选择 1.5 m 为危险临界高度<sup>[12]</sup>,在距地面 1.5 m 的位置设置 2、3 号(T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub>)热电偶,距地面 1.3 m 处设置 1 号(T<sub>1</sub>)热电偶,测点布置如图 2 所示。T<sub>1</sub> 位于车头正上方,T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 位于电瓶车上方,与 T<sub>1</sub> 水平距离 0.1 m,分别靠近坐垫、车头侧。为保证试验过程中的安全,试验车正上方设置管道式喷头灭火系统。

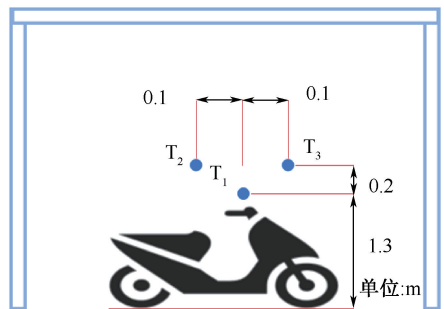


图 2 热电偶布置

Fig. 2 Arrangement of thermocouples

## 1.2 试验车辆及过程

试验车搭载 48 V 12 Ah 的 18650 三元锂电池 (26 cm×15 cm×7 cm), 如图 3 所示。车身除电池、充电线路和相应的控制系统之外, 还有仪表表盘、车头灯以及大量的塑料件, 座位部分安装泡沫坐垫, 主要可燃物的燃烧特征参数见表 1。



图 3 试验车

Fig. 3 Bike used for experiment

表 1 试验车主要可燃物燃烧参数

Table 1 Combustion parameters of main combustible materials contained in experimental bike

可燃物	主要材料	燃点/ ℃	氧指数/ %	最大烟密度/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
座椅	PU	205	17	99
轮胎	BR	420	38	420~630
车体塑料	PVC	180~220	17.3	<300

注: 聚氨酯泡沫 (Polyurethane Foam, PU); 顺丁橡胶 (Butadiene Rubber, BR); 聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC)。

## 1.3 数值模拟

### 1.3.1 主要材料参数

分别以 PVC、BR 和 PU 作为模拟锂电车的主要车体、轮胎和座椅材料。选用大涡模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 方法计算, 环境参数为 20 ℃。模拟时长设置为 150 s。车棚处于受限空间, 不考虑风速影响, 设置室内风速为 0 m/s, 相对湿度、重力等参数设置为软件默认数值。

### 1.3.2 火源功率确定

参照文献[13-16], 利用修正后的等效 HRR 模型模拟锂电池火灾。表 2 为不同火源功率的模拟结果。可以看出, 火源功率为 1 200 kW/m<sup>2</sup> 时, 模拟达到最高温度结果与实际情况结果和现有研究结果较为吻合<sup>[7]</sup>。因此, 设置火源功率为 1 200 kW/m<sup>2</sup>。

### 1.3.3 模型建立及网格划分

Pyrosim 模拟结果的准确性和模拟时长受网格精度、尺寸影响, 合理选择网格尺寸对于火灾数值模

表 2 火源功率模拟结果

Table 2 Simulation results of heat source power

火源功率/ ( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ )	1.5 m 平面 最高温度/℃	存在问题
400	65	测点温度过低
800	200	测点温度过低
1 200	907	较符合实际情况
1 600	1 487	测点温度过高

拟极为重要。Pyrosim 在  $y$  轴、 $z$  轴上的部分计算采用基于快速傅里叶变换的泊松求解器,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的单元格数量不能为质数, 且需分别满足  $2^k \times 3^m \times 5^n$  的要求 ( $k$ 、 $m$ 、 $n$  为整数)。经过网格敏感性分析, 网格尺寸与特征火焰直径的比值应在 1/16~1/4 之间, 一般取 1/12~1/8<sup>[17]</sup>。特征火焰直径  $D^*$  (m) 表示为:

$$D^* = (Q^{-1} \rho_{\infty} C_p T_{\infty} g^{-2})^{-2/5} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为火源 HRR, 取 4 302 kW;  $T_{\infty}$  为环境温度, 取 303 K;  $C_p$  为空气比热, 取 1.006 9 J/(kg·K)<sup>[18]</sup>;  $\rho_{\infty}$  为环境空气密度, 取 1.769 kg/m<sup>3</sup>;  $g$  为重力加速度, 取 9.80 m/s<sup>2</sup>。网格空间为 7.0 m×2.2 m×3.5 m, 设置网格尺寸为 0.1 m×0.1 m×0.1 m, 网格总数为 53 900, 经计算符合要求, 网格划分结果如图 4 所示。锂电车正上方, 距地面 2 m 处设置感烟探测器, 温度测点设置与试验条件相同。

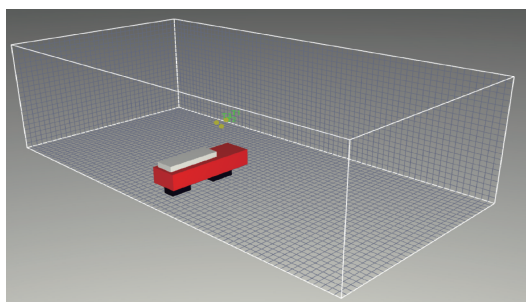


图 4 数值模型网格划分

Fig. 4 Grid division of numerical model

## 2 试验车燃烧特征

### 2.1 试验车燃烧蔓延过程

图 5 为试验车火灾的蔓延过程。可以看出, 引燃 30 s 时燃烧进入快速发展阶段, 靠近引燃部位的车体的塑料部件开始燃烧; 47 s 时座椅开始燃烧, 102 s 时车头燃烧进入稳定燃烧阶段, 120 s 时整个车体开始燃烧。

### 2.2 试验车燃烧温度变化

试验车燃烧温度变化如图 6 所示。可以看出,

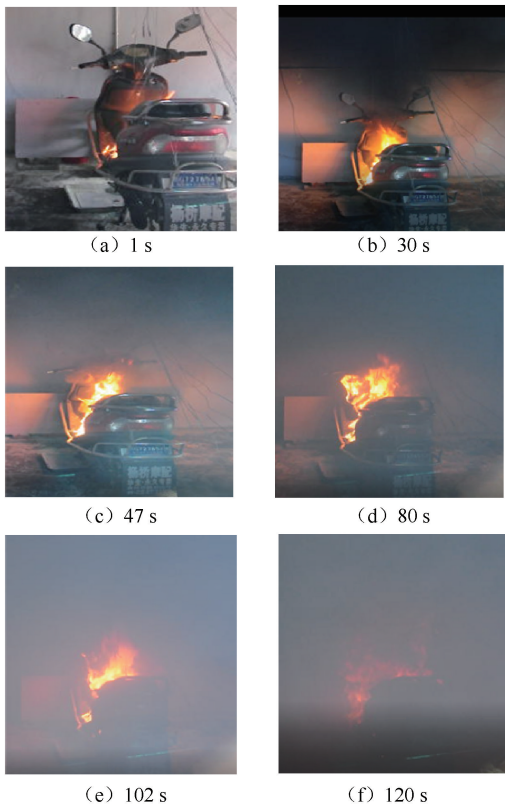


图5 试验车火灾蔓延过程

Fig. 5 Fire spread process of experimental bike

燃烧温度在 20 s 之前上升缓慢,在 20~30 s 后明显加速; $T_2$  和  $T_3$  温度分别在 60、80 s 之后波动降低,其原因是燃烧产生的烟气在受限空间内大量累积,一定程度上抑制可燃物燃烧过程,而  $T_1$  离火源更近,温度无明显波动; $T_2$  和  $T_3$  温度分别在 80 和 100 s 以后上升。 $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  温度总体上先缓慢上升,后快速上升,最后快速下降,分别在 118、105 和 119 s 达到最大温度值,最高温度达到 920 °C,整个过程平均温度约为 600 °C。与敞开空间锂电池燃烧时 0~350 s 温度均呈上升趋势<sup>[19]</sup>的结果相比,受限空间试验车燃烧的加速过程明显提前,发展过程缩短,更早进入衰退阶段。这是因为受限空间热量蓄积,且缺乏氧气的持续供给,进入衰退阶段后,燃烧强度迅速降低,温度快速下降。

### 3 环境温度对锂电池燃烧温度的影响

#### 3.1 不同环境温度下火源温度变化特征

图 7 为  $T_3$  处试验和模拟温度对比分析结果。从图 7 可以看出,模拟和试验曲线在前 50 s 内温度缓慢上升,在 50 s 左右温升加速,80 s 左右出现温度极大值。模拟过程由于是理想条件下,进入充分燃

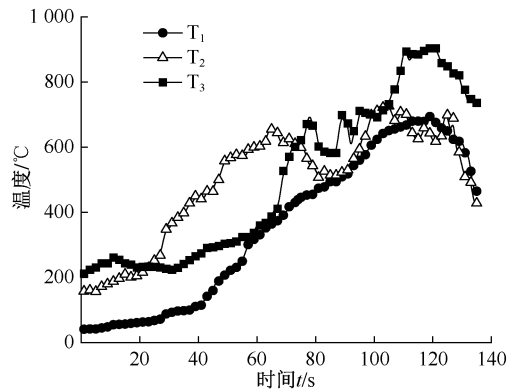


图6 不同时刻燃烧温度

Fig. 6 Combustion temperatures at different times

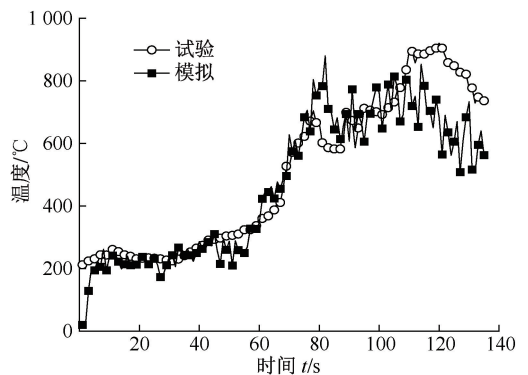


图7  $T_3$  处数值模拟温度与实测温度

Fig. 7 Comparison between numerical simulation and measured values at  $T_3$

烧阶段后,温度迅速上升,由于受限空间烟气难以流通,温度也会聚集起来。而在试验中燃烧产生的烟气等在受限空间内大量累积,包裹可燃材料,抑制燃烧过程,对氧气向可燃物表面扩散形成阻力,因此在 80 s 时出现模拟结果和测试结果峰值差距较大的情况。整体上看,模拟结果和实测曲线的变化趋势相似,在前 70 s 温度曲线几乎一致,后 80 s 内温度变化特征点相近,因此,认为模型建立及参数选择合理,模拟结果可靠。

图 8 为 0、20 和 40 °C 环境温度下燃烧平均温度(锂电池上方 3 个测点温度的平均值)的变化特征,表 3 为 80 s 前燃烧平均温度与时间的线性关系。

从图 8 可以看出,不同环境温度下锂电池在受限空间中燃烧温度的变化趋势相同,即燃烧初期温度变化不大,随后开始加速上升,达到极大值后开始缓慢下降。在 80 s 以前,燃烧温度随着环境温度的升高而升高;环境温度为 0 和 20 °C 时,50 s 之后平均升温速率(即表 3 中拟合方程式的斜率)明显增大,温度上升稳定加速,燃烧进入快速发展阶段,而

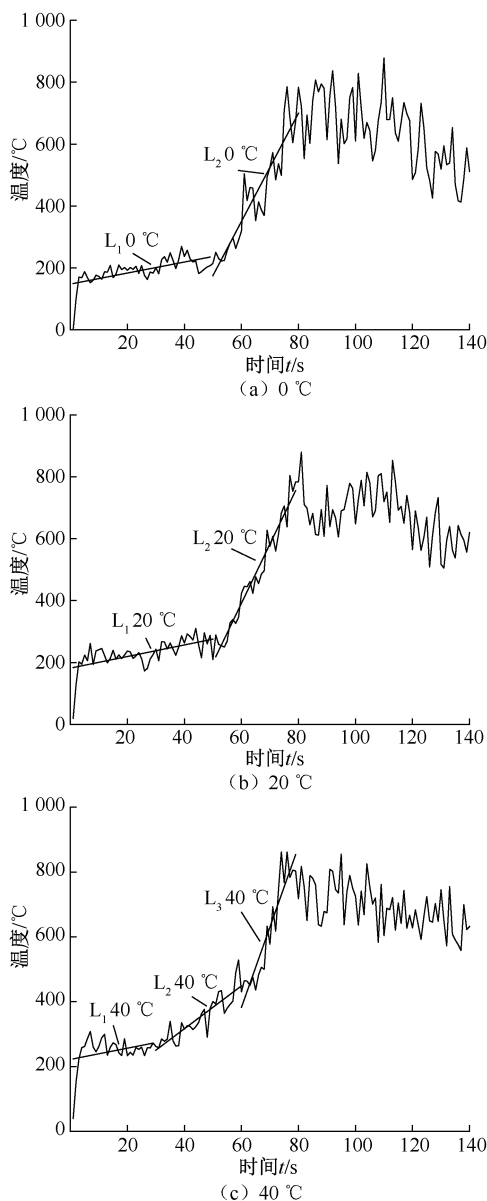


图8 不同环境温度下锂电池燃烧平均温度

Fig. 8 Average temperature during lithium-ion bike combustion at different ambient temperatures

表3 燃烧平均温度与时间的线性关系

Table 3 linear relationship between average temperature and time

拟合线段	拟合区域/s	拟合方程式
L <sub>1</sub> 40 °C	[ 0, 30)	$y = 0.292x + 250.946$
L <sub>2</sub> 40 °C	[ 30, 60)	$y = 6.828x + 42.636$
L <sub>3</sub> 40 °C	[ 60, 80]	$y = 24.794x - 1105.230$
L <sub>1</sub> 20 °C	[ 0, 50)	$y = 1.345x + 196.697$
L <sub>2</sub> 20 °C	[ 50, 80]	$y = 19.097x - 754.053$
L <sub>1</sub> 0 °C	[ 0, 50)	$y = 1.340x + 161.681$
L <sub>2</sub> 0 °C	[ 50, 80]	$y = 17.159x - 682.176$

当环境温度为40 °C, 30 s之后平均升温速率明显增

大, 进入快速发展阶段, 比环境温度20 °C和0 °C提前了40%, 而平均温度比0 °C和20 °C环境下分别增大56 °C和19 °C。这一燃烧特征的动态演变受限于热力学条件, 当燃烧强度持续增强时, 受限空间氧气供给不足, 烟气积聚效应开始主导燃烧过程, 不同环境温度下的燃烧特征逐渐显现趋同性, 约80 s后温度值及其变化速率趋于一致。

### 3.2 不同环境温度下火焰形态特征

不同环境温度火焰形态如图9所示。可以看出, 在0 °C、20 °C和40 °C下, 第20 s时平均火焰高度(火焰高度根据模型比例换算)依次为81、93和107 cm, 40 °C环境温度下火焰高度几乎是20 °C下的1.15倍, 是0 °C下的1.32倍。从燃烧三要素的角度分析, 燃烧的剧烈程度跟可燃物与助燃物的含量直接相关。初始温度的升高会增加气体分子的平均动能, 促进燃烧反应, 导致更快的燃烧速率和更剧烈的火势蔓延。这一燃烧特征的动态演变在80 s后趋于收敛即不同环境温度下火焰形态趋于一致, 这是因为燃烧反应逐渐达到稳定状态, 燃烧产物的生成速率逐渐减缓, 温度和化学组成会趋于稳定, 不再受到初始条件的影响。

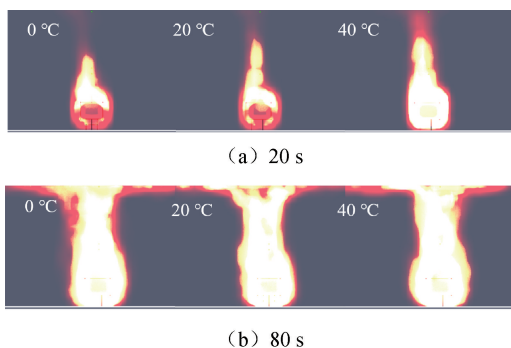


图9 不同环境温度下锂电池燃烧火焰形态

Fig. 9 Flame morphology during lithium-ion electric bicycles combustion under different environmental temperatures

### 3.3 不同环境温度下受限空间温度分布特征

图10为不同环境温度下燃烧时第50 s时的温度分布。可以看出, 当0 °C、20 °C环境温度下即将进入快速发展阶段(即燃烧持续至约50 s)时, 40 °C下燃烧已经进入快速发展阶段, 并持续了约20 s。燃烧50 s时, 0 °C和20 °C环境温度下, 距离锂电池1.5 m范围内的温度分别达到180 °C和200 °C; 而在40 °C环境温度下, 1.5 m范围内的温度达到340 °C(该温度超过了大多数可燃固体的燃点), 比20 °C和0 °C环境温

度下达到 340 °C 的时间提前 25 s。这一燃烧特征的显著差异源于环境温度对燃烧反应的影响机制,在较低环境温度下,燃烧反应的起始速率较低,火势发展较为迟缓;而在较高环境温度下,燃烧反应的起始速率较高,燃烧反应更容易迅速发展并维持。

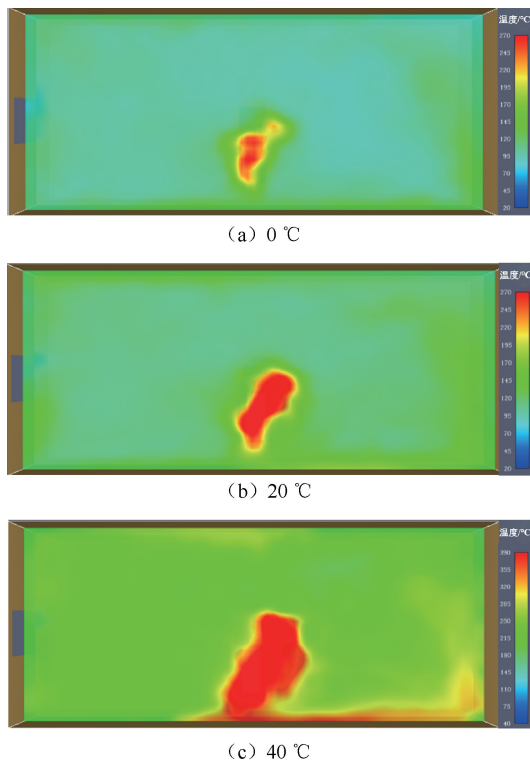


图 10 不同环境温度下第 50 s 温度分布  
Fig. 10 Temperature distribution at 50 seconds under different ambient temperatures

## 4 环境温度对锂电池燃烧烟气的影响

### 4.1 锂电池燃烧烟气体积分数

CO<sub>2</sub> 常被用作衡量烟气特征的参考指标<sup>[8]</sup>,图 11 为不同环境温度下锂电池燃烧过程中 CO<sub>2</sub> 体积分数变化。可以看出,30 s 之前,环境温度越高,CO<sub>2</sub> 体积分数越高;40 °C 下的 CO<sub>2</sub> 体积分数平均约为 20 和 0 °C 下的 1.60 和 2.24 倍。30 s 之后,尽管环境温度越高,CO<sub>2</sub> 体积分数越高,但不同环境下 CO<sub>2</sub> 体积分数的差异性逐渐减小。在 50~150 s 范围内,40 °C 环境下的 CO<sub>2</sub> 体积分数与 20 和 0 °C 环境下比值的平均值分别约为 1.05 和 1.06,CO<sub>2</sub> 体积分数基本变化不大。这一燃烧特征演变源于环境温度对燃烧过程的影响机制,在低温环境下,燃烧蓄热环境较差,燃烧温度较低,火焰规模较小,导致燃烧不充分,烟气产生量相对较低;较高的环境温度提供

了相对良好的蓄热环境和较高的反应活性,燃烧强度增大,烟气产生量增大。50 s 以后,不同环境温度下锂电池的燃烧均已进入快速发展阶段,初始环境温度对蓄热的影响被削弱,氧气的供给量成为影响燃烧的主要因素,燃烧状态相差不大,烟气产生量趋同。

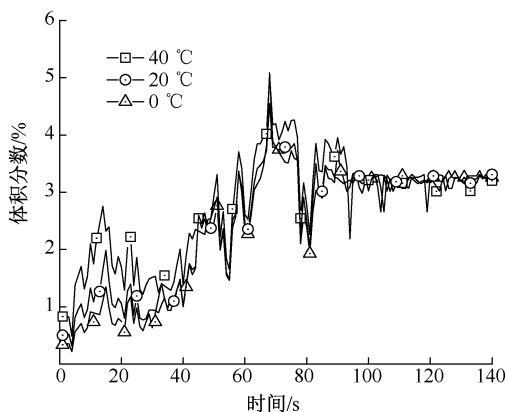


图 11 不同环境温度下 CO<sub>2</sub> 体积分数  
Fig. 11 Volume fraction of CO<sub>2</sub> at different ambient temperatures

### 4.2 不同环境温度下受限空间烟气分布特征

受限空间具有空气流动较差,烟气易聚积等特点。不同环境温度下受限空间中烟气分布特征如图 12 所示。

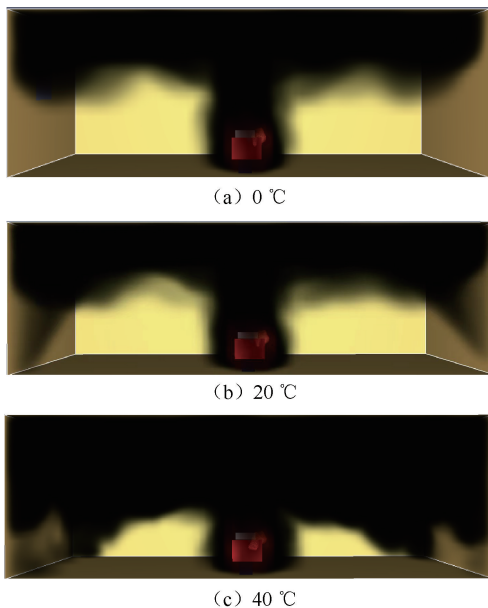


图 12 不同环境温度下第 30 s 烟气分布  
Fig. 12 Distribution of flue gas at 30 seconds under different ambient temperatures

从图 12 可以看出,到达快速发展阶段时,不同

环境温度下的烟气分布特征基本相同,而燃烧初期30 s之前的烟气分布特征差距较为明显。在燃烧初期,高温环境下气体密度低、热膨胀效应明显、对流速度快且燃烧效率高,促使烟气向上升腾并扩散;而低温环境下气体密度高、热膨胀效应不显著、对流速度慢且燃烧效率低,导致烟气可能在燃烧周围相对稳定地停留,呈现出不同的烟气分布特征。在0℃的低温环境下,由于气体分子活动减缓,烟气更倾向于在空间中停留较长时间,形成较为稳定的分布。20℃的中等温度环境下,烟气相对均匀地分布在空间中,受到温度影响较小。而在40℃的高温环境下,气体分子活动增强,烟气更快地扩散和上升,导致烟气分布更广泛且更快速。因此,燃烧特征的变化过程揭示了环境温度对气体扩散的调控机制,最终主导了烟气在受限空间中的扩散路径与体积分数分布。

## 5 结 论

1) 试验车在受限空间中燃烧30 s时进入快速发展阶段,47 s座椅开始燃烧,102 s进入稳定燃烧阶段,最高温度超过920℃。受限空间热量易聚集是试验车燃烧快速发展的主要原因。

2) 环境温度越高,锂电车燃烧初期温度越高,发展越快。当环境温度由0℃升高到40℃,到达快速发展阶段的时间和达到引燃邻近锂电车的温度的时间均提前40%,80 s后锂电车燃烧温度和发展过程趋于一致。

3) 环境温度越高,锂电车燃烧初期火焰高度、烟气含量越高。第20 s火焰形态差异较为明显,火焰高度增大32%;前30 s内CO<sub>2</sub>含量的差异性较为稳定,约增大124%。火焰高度和烟气含量分别在80 s和50 s以后趋于一致。

## 参 考 文 献

- [1] 温元舒. 新国标下电动自行车地方立法实施问题研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.  
WEN Yuanshu. Comparative analysis of local legislation of electric bicycle [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [2] 王亚利. 基于可持续理念的电动自行车充电设施设计研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.  
WANG Yali. Research on the design of electric bicycle charging facilities based on the concept of sustainability [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [3] WANG Qingsong, MAO Binbin, 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.
- [4] 李毅, 于东兴, 张少禹, 等. 锂离子电池火灾危险性研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(11): 36-41.  
LI Yi, YU Dongxing, ZHANG Shaoyu, et al. Research on fire hazard of lithium-ion battery [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 22(11): 36-41.
- [5] 高飞, 杨凯, 李大贺, 等. 锂离子电池组件燃烧性及危险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(8): 62-67.  
GAO Fei, YANG Kai, LI Dahe, et al. Evaluation of combustibility of lithium-ion battery components and dangers they involve [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 25(8): 62-67.
- [6] MENG Xiangdong, LI Shi, FU Weidong, et al. Experimental study of intermittent spray cooling on suppression for lithium iron phosphate battery fires[J]. eTransportation, 2022, 11: DOI: 10.1016/j. etran. 2021. 100141.
- [7] 陈胜朋, 梁栋, 莫善军. 楼梯间电动车火灾数值模拟研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(2): 100-106.  
CHEN Shengpeng, LIANG Dong, MO Shanjun. Numerical simulation of motorcycle fires in stairwells [J]. Fire Science, 2018, 27(2): 100-106.
- [8] 潘鸣宇, 及洪泉, 邱明泉, 等. 电动汽车锂离子电池组火灾数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 104-109.  
PAN Mingyu, JI Hongquan, QIU Mingquan, et al. Numerical simulation study on fire of lithium-ion battery pack in electric vehicles [J]. China Safety Production Science and Technology, 2020, 16(6): 104-109.
- [9] 刘得星. 车载电池包集成灭火系统关键参数仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
LIU Dexing. Simulation research on key parameters of integrated battery fire extinguishing system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [10] 张青松, 曹文杰, 罗星娜, 等. 基于多米诺效应的锂离子电池热释放速率分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2100-2106.

2017, 43(5): 902-907.

ZHANG Qingsong, CAO Wenjie, LUO Xingna, et al. Analysis method of heat release rate of lithium-ion battery based on domino effect [J]. Journal of Beihang University, 2017, 43 (5): 902-907.

- [11] 张阳琳, 别传玉, 高标, 等. 三元锂电池储能性能与工作环境温度关系研究[J]. 电源技术, 2022, 46(12): 1402-1406.
- ZHANG Yanglin, BIE Chuanyu, GAO Biao, et al. Research on relationship between energy storage performance and working temperature of ternary lithium battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(12): 1402-1406.
- [12] 王婷甜, 李剑峰, 龚宝钊, 等. 基于概率风险分析的地铁车站疏散性能评估[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2711-2719.
- WANG Yutian, LI Jianfeng, GONG Baoshan, et al. Evacuation performance evaluation of subway stations based on probabilistic risk analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2711-2719.
- [13] 李大燕. 地下车库火灾蔓延规律及烟气发展过程研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- LI Dayan. Study on fire spread mechanisms and smoke development in underground [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [14] 李晋, 王青松, 孔德明, 等. 锂离子电池储能安全评价研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2282-2301.
- LI Jin, WANG Qingsong, KONG Deming, et al. Research progress on the safety assessment of lithium-ion battery energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2282-2301.
- [15] 肖国清, 姚泽胜, 邓洪波, 等. 基于 FDS 的加油站便利店火灾模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 143-149.
- XIAO Guoqing, YAO Zesheng, DENG Hongbo, et al. Simulation on fire in convenience store of gas station based on FDS [J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14 (1): 143-149.
- [16] 刘健, 王志. 轻型飞机电池舱火灾模拟研究[J]. 科技资讯, 2018, 16(3): 83-85.
- LIU Jian, WANG Zhi. Simulation study on fire in light aircraft battery cabin [J]. Science and Technology Information, 2018, 16 (3): 83-85.
- [17] 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.
- LI Jun. Investigation on fire evidence testing technology for electric bicycle [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [18] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京: 新时代出版社, 1987: 203-204.
- [19] 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.
- LI Qingwei, YANG Zhixiang, DENG Jun, et al. Experimental study on the combustion characteristics of electric bicycles and the effect of simple separation fire [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(12): 4271-4278.

**作者简介:** 李青蔚 (1989—), 男, 河北景县人, 博士, 副教授, 主要从事火灾防控理论与技术方面的研究。E-mail: liqingwei90@126.com。

