

储能锂离子电池系统关键技术专刊



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

陈钦佩^{1,2}, 王学辉³, 米文忠⁴

(¹应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; ²工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室, 天津 300381; ³中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; ⁴清华大学合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 本工作开展了全尺寸电动汽车锂离子电池系统热失控火灾气体成分及燃爆特性研究, 搭建了全尺寸电动汽车火灾试验平台, 设计了一种气体采集装置, 利用红外傅里叶光谱分析仪、爆炸极限测试仪对毒害气体成分特征、燃爆特性进行了测量, 分析了电动汽车火灾的气体释放过程, 根据热失控特征将电池舱内气体释放分为四个阶段, 分析了四个阶段的气体成分特征。第一阶段释放的主要为电解液蒸气; 第二阶段主要为氢气; 第三阶段出现了大量的二氧化硫气体, 浓度达到10906.4 ppm (1 ppm=0.0001%), 并分析了二氧化硫的产生机理; 第四阶段驾驶舱内燃烧初期会产生氰化氢气体, 最高浓度为120.4 ppm, 分析驾驶舱内各种毒害气体的主要来源。测量了不同阶段电池舱内气体的爆炸极限, 电池舱释放气体的爆炸极限在4.83%~73.77%。计算了各阶段的爆炸危险性, 表明电池舱热失控的第二阶段爆炸危险性最大。分析了电池舱释放的混合气体爆炸特征变化规律, 发现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。

关键词: 电动汽车; 锂离子电池; 气体成分; 气体爆炸危险性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0294

中图分类号: TM 911.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 07-2256-07

Experiential study on the toxic and explosive characteristics of thermal runaway gas generated in electric-vehicle lithium-ion battery systems

CHEN Qinpei^{1,2}, WANG Xuehui³, MI Wenzhong⁴

(¹Tianjin Fire Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China; ²Key Laboratory of Fire Protection Technology for Industry and Public Building, Ministry of Emergency Management of China, Tianjin 300381, China; ³State Key Laboratory of Fire Science, University of Science of Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; ⁴Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In this study, the gas-composition and ignition characteristics of thermal runaway fires in full-sized electric-vehicle lithium-ion battery systems are investigated. A full-sized electric-vehicle fire-test platform is built, and a gas collection device is designed. The toxic gas composition and ignition characteristics are measured using Fourier transform infrared spectroscopy and an explosion-limit test instrument. The gas release process during an electric vehicle fire

收稿日期: 2023-04-28; 修改稿日期: 2023-05-12。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目课题“锂离子电池储能系统清洁高效经济灭火及分级应急处置技术”(2021YFB2402003), 天津市自然科学基金面上项目“锂离子动力电池火灾危险性及关键防控技术研究”(22JCYBJC01690)。

第一作者: 陈钦佩 (1989—), 男, 工学博士, 助理研究员, 从事储能消防, E-mail: chenqinpei@tfri.com.cn; 通讯作者: 王学辉, 特任副研究员, 从事储能消防, E-mail: wxuehui@ustc.edu.cn。

引用本文: 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.

Citation: CHEN Qinpei, WANG Xuehui, MI Wenzhong. 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.

is analyzed, and the gas release in the battery compartment is divided into four stages according to the thermal runaway characteristics. The gas-composition characteristics in these four stages are analyzed. In the first stage, electrolyte vapor is primarily released, whereas in the second stage, hydrogen is mainly released. A large amount of sulfur dioxide gas is released in the third stage, with the concentration reaching 10906.4 ppm, and the mechanism of sulfur dioxide generation is analyzed. Hydrogen cyanide gas is produced in the early stages of combustion in a cockpit, with a maximum concentration of 120.4 ppm. The main sources of various toxic gases in the cockpit are analyzed. The explosion limits of the gases in the battery compartment in different stages are measured. The explosion limits of the gases released from the battery compartment range from 4.83% to 73.77%. The explosion hazards calculated for each stage indicate that the second stage of thermal runaway in the battery compartment has the highest explosion hazard. The analysis of variations in explosion characteristics of the gas mixture released from the battery compartment suggests that the inert gas content mainly affects the lower explosion limit of the mixtures, whereas hydrogen content mainly affects the upper explosion limit of the mixture.

Keywords: electric vehicle; lithium-ion battery; gas composition; gas explosion risk

随着“碳达峰”“碳中和”战略目标的提出，我国电动汽车产业迅猛发展，截至2022年底，全国新能源汽车保有量达1310万辆，占汽车总量的4.10%，其中纯电动汽车保有量1045万辆，占新能源汽车总量的79.78%^[1]。同时，电动汽车安全问题也逐渐显现出来。根据应急管理部发布的数据显示，2022年第一季度电动汽车共发生火灾事故640起，比去年同期增加32%，高于交通工具火灾事故的平均增幅8.8%。电动汽车火灾事故主要是由锂离子电池热失控引发的，且锂电池的燃烧对汽车火灾燃烧进程具有显著的影响，使得新能源汽车火灾呈现出与传统燃油汽车火灾明显不同的特性^[2]。新能源汽车在燃烧过程中会释放出大量的气体，包括锂电池产生的气体以及车身内饰等产生的气体等，具有一定的燃爆、毒性，会对汽车火灾蔓延、探测报警、消防救援等产生重要影响。虽然目前国内外学者针对电池的燃烧特性做了大量的研究，但是目前对于电动汽车全尺寸热失控火灾试验的研究还较少，且主要局限于温度场和救援战术的研究^[3]，对于全尺寸火灾的产气特性研究甚少^[4]。

本工作开展了全尺寸电动汽车火灾试验，利用气体采集系统进行了火灾过程中气体采样，结合傅里叶红外光谱分析仪和5L球形爆炸极限测定仪，研究了整车火灾过程中的毒害气体特性和气体爆炸特性，以期能够为消防救援人员在扑救电动汽车火

灾中的战术运用和作战安全方面提供基础数据和科学指导。

1 实验设计

1.1 新能源汽车及车体材料介绍

本试验对象为一款4门5座3厢某品牌电动汽车，电动汽车长宽高为4.7 m×1.8 m×1.5 m，其电池包采用的是三元锂离子电池，单体电量为50 Ah，电池包额定电压为350 V，额定输出电流为102 A，试验前已对电池进行满电处理。车体的可燃材料及主要分布如表1所示。

表1 汽车可燃材料及分布

Table 1 Automotive combustible materials and distribution

位置	材料种类
电池舱	三元锂电池
驾驶舱	木材、聚氨酯、聚氯乙烯等

1.2 气体采样与分析

整车燃烧实验中，采用电热板加热电池包内单体电池触发热失控的方式点火，图1为本实验系统原理图。本工作自主设计了一套气体采集设备，使用真空泵、采集管路与储气囊，采集了汽车电池舱、驾驶舱气体。由于采用离线采样分析，需要进行分段抽样储存，抽样根据现场观察到的燃烧进程特征来进行，具体分析见2.1节，每个阶段均采用

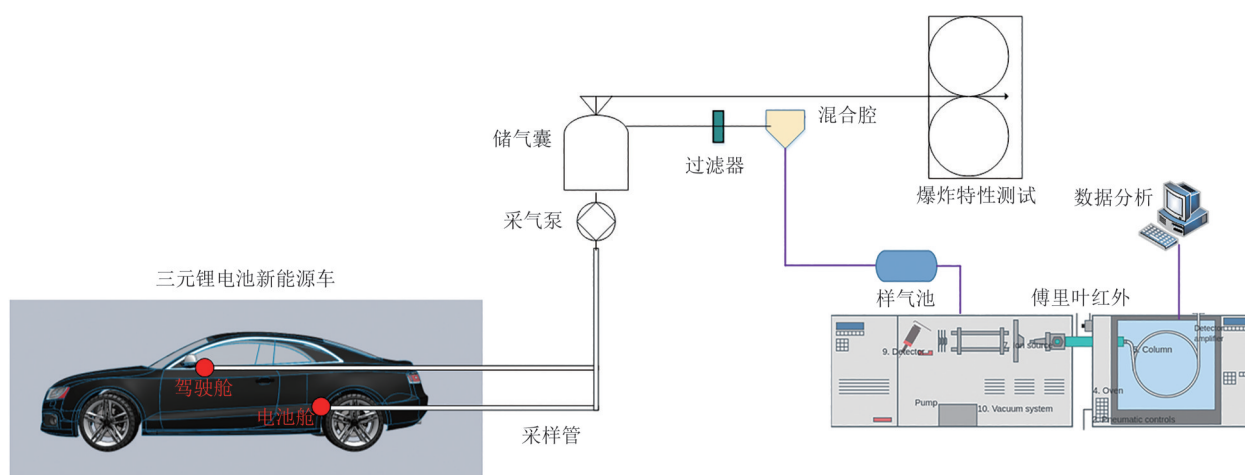


图1 气体采集与分析系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of gas acquisition and analysis system

不同的储气囊进行采集储存, 以确保各阶段气体相互不受影响。抽样后利用储气囊密封保存气体, 利用 AtmosFIR 傅里叶红外气体分析仪定性定量分析不同位置、不同时间的气体成分, 并采用 5 L 球形爆炸极限测定仪测定了气体的爆炸极限。

2 结果与讨论

2.1 汽车火灾气体释放过程

电动汽车火灾燃烧过程如图2所示。按照有毒有害气体的主要释放部位, 主要分为电池舱与驾驶舱两部分。对于电池舱, 按照燃烧发展进程可以将

气体释放过程分为电池热失控初期、电池舱射流火出现、电池舱稳定燃烧、火灾扩大蔓延发生四个阶段, 四个阶段出现的时间分别为 6 min、11 min、14 min、26 min, 本工作收集了四个阶段的电池舱的气体进行成分分析。对于驾驶舱, 初期并未发生燃烧, 在电池舱火灾扩大蔓延后, 第 37 min 出现了驾驶舱内的燃烧, 实验过程中呈现稳定的燃烧状态, 在后期出现了燃烧的衰减。抽样选取了 37 min、60 min、74 min、79 min 四个时期的采样数据进行分析。综上, 电动汽车火灾燃烧过程、有毒气体释放过程以及选取的气体采样时间如表2所示。

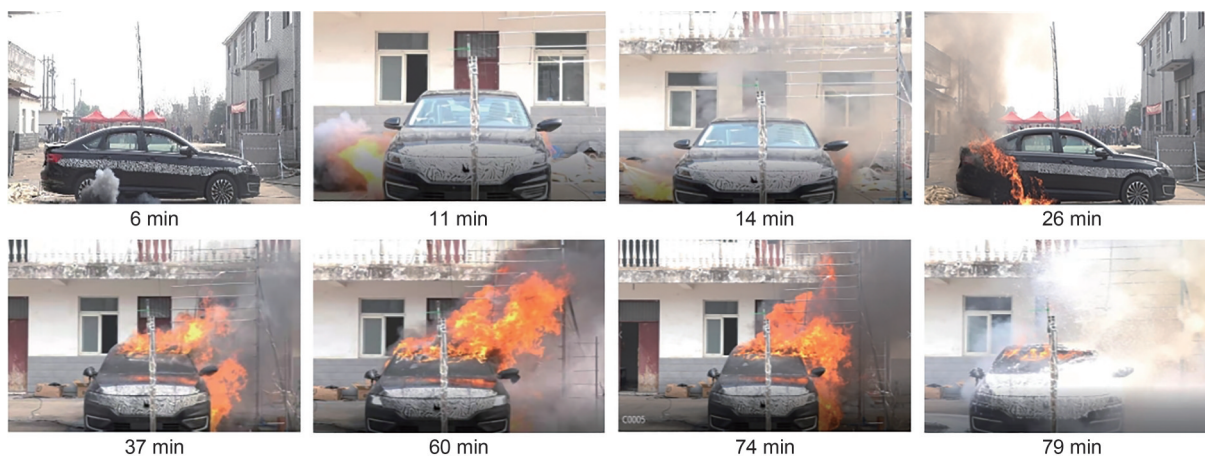


图2 电动汽车火灾发展过程及气体采样时间序列

Fig. 2 Electric vehicle fire development process and gas sampling time series

2.2 电池舱气体特征分析

前人的研究表明^[6], 锂电池热失控会产生

如甲烷、氢气等可燃气体, 而对毒害气体的关注较少。为保证毒害气体的测量精度, 本工作所使用的

表2 电动汽车电池舱、驾驶舱火灾阶段及标志性特征

Table 2 Battery compartment, cockpit fire stage and iconic characteristics of electric vehicle

舱室	阶段	阶段分类	开始时间	标志性特征
电池舱	热失控初期	阶段1	6 min	白烟冒出
	热失控发展	阶段2	11 min	射流火出现
	热失控稳定	阶段3	14 min	稳定燃烧
	热失控蔓延	阶段4	26 min	驾驶舱出现燃烧
驾驶舱	稳定燃烧	采样阶段1	37 min	稳定火焰
		采样阶段2	60 min	
		采样阶段3	74 min	
	火灾衰减	阶段4 衰减阶段	79 min	火焰衰减

傅里叶红外光谱分析仪仅对常见的毒害气体进行了测定。对电池舱内不同燃烧阶段的燃烧气体进行成分分析,四个阶段的毒害气体成分及浓度值如图3所示。电池舱内的气体成分主要包括氟化氢、氯化氢、二氧化硫、一氧化氮、一氧化二氮、二氧化氮、一氧化碳、二氧化碳、甲烷等。一氧化碳与二氧化碳浓度相对其他气体含量较高,随着燃烧的进行,电池舱内的一氧化碳浓度持续升高,二氧化碳浓度在整车火灾发生阶段出现了峰值,达到了20.4%(图4)。氟化氢的最高含量出现在第三阶段,为137.9 ppm,氯化氢的最高含量出现在第三阶段,为2610 ppm。电池热失控初期的毒害气体浓度较少,锂电池热失控初期主要释放的气体为高温蒸发喷射出的电解液,从燃烧现象上表现为释放出大量的白烟,白烟主要是高沸点的锂电池电解液蒸发后液化形成的小液滴,此时电池包温度较低,未开始发生剧烈的燃烧反应与电化学反应。因此,一氧化碳、二氧化碳等毒害气体浓度较低,主要气体成分为电解液蒸气。氯化氢、氟化氢、一氧化氮等

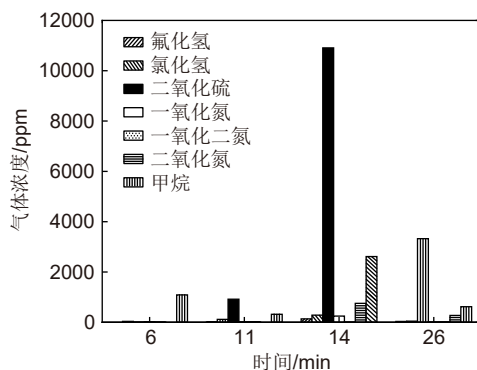


图3 电池舱的毒害气体浓度-时间图

Fig. 3 Toxic gas concentration-time graph in battery compartment

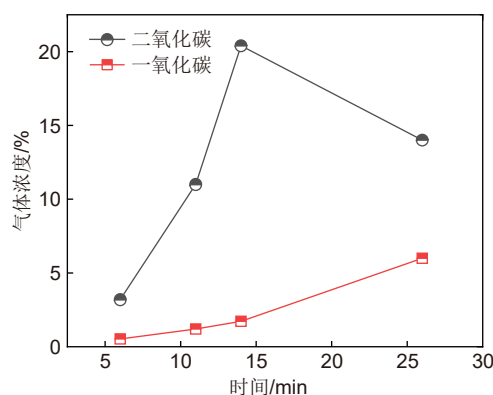
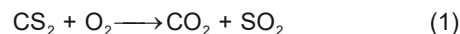


图4 电池舱内一氧化碳、二氧化碳浓度分布

Fig. 4 Carbon monoxide and carbon dioxide concentration distribution in the battery compartment

气体浓度随着燃烧的进行而降低,在第四阶段其含量已经接近于0,这说明相关气体的释放反应已经基本停止。

从图3中可以看出,除了常见的氟化氢、氯化氢气体外,在电池舱热失控过程中还出现了二氧化硫、二氧化氮等气体,对于硫化物、氮化物,目前的相关研究关注较少。氮化物的含量相对较少,二氧化氮一般在高温下才能产生,在电池舱开始发生剧烈燃烧时,二氧化氮浓度出现了峰值,为753.5 ppm。对于一般的锂离子电池,为了促进电池中SEI膜的形成,添加了如 CS_2 、 S_x^{2-} 、丙烯亚硫酸盐(PS)等硫基添加剂^[9],前人对锂电池电解液的成分分析中,也发现了含硫化物^[7]。硫化化合物在低温下一般较为稳定,在热失控初期,由于电池温度较低,硫化物难以发生反应,在电池发生明火燃烧时,高温状态下硫化化合物会发生反应进而产生二氧化硫气体,如 CS_2 在低温下较为稳定,但是在高温状态下,会与氧气发生燃烧反应^[9]:



从图3中可以看出,在电池舱出现射流火时,二氧化硫气体出现,浓度为919.4 ppm,在电池包进一步剧烈反应时,硫化物的浓度达到了10906.4 ppm。

2.3 驾驶舱气体特征分析

驾驶舱内有毒气体浓度变化情况如图5、图6所示。从图中可以看出,驾驶舱内气体成分包括氟化氢、氯化氢、氟化氢、一氧化氮、一氧化二氮、一氧化碳、二氧化碳等气体。由于电池舱位于车身底部,其产生的气体可能会扩散进入驾驶舱,需要对驾驶舱气体与电池舱气体进行对比分析。从图3

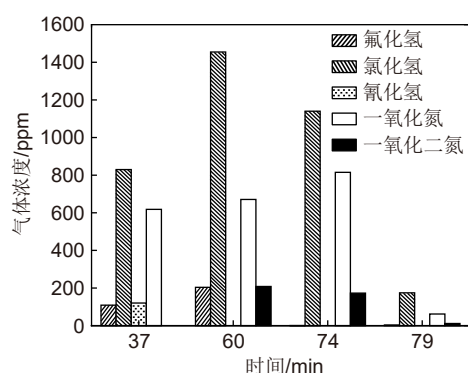


图5 驾驶舱的毒害气体浓度-时间图

Fig. 5 Toxic gas concentration in cockpit-time graph

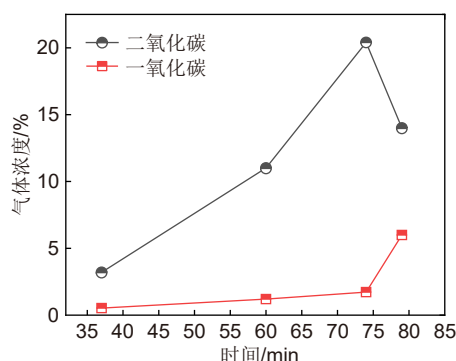
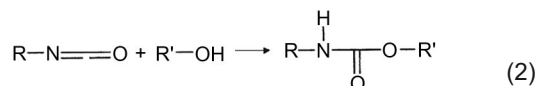


图6 驾驶舱中的一氧化碳、二氧化碳浓度-时间图

Fig. 6 Carbon monoxide, carbon dioxide concentration-time graph in the cockpit

中可以看出, 电池舱在 26 min 时产生的氯化氢、氟化氢等气体浓度已基本为 0, 这说明此时电池舱中的相关产气反应已经接近停止, 而图 5 表明 37 min 时驾驶舱中的氯化氢、氟化氢、氰化氢等气体浓度均超过了 100 ppm, 这说明此时的气体均为驾驶舱内的材料燃烧释放的。在驾驶舱燃烧的前三个阶段, 驾驶舱内的氟化氢、氯化氢、一氧化氮等气体浓度变化不大, 氯化氢浓度范围为 830~1400 ppm (图 5), 一氧化氮浓度范围为 610~810 ppm, 氟化氢的浓度在 108~203 ppm。在第一阶段出现了氰化氢剧毒气体, 浓度为 120.4 ppm, 这可能是由于驾驶舱底部的聚氨酯泡沫塑料质在电池舱的高温作用下发生裂解反应产生了氰化氢气体, 其产生的机理为^[9]:



在燃烧的初期氰化氢裂解反应物消耗完全, 后续三个阶段均未出现氰化氢剧毒气体。驾驶舱内前两个阶段出现了氟化氢气体, 不同于电池舱的氟化氢产生过程, 驾驶舱中的氟化氢气体主要来源于内

饰材料的卤化物阻燃剂的高温裂解, 从含量上可以看出, 驾驶舱中卤化物阻燃剂产生氟化氢气体的浓度高于电池舱中的氟化氢气体。驾驶舱内的二氧化碳浓度为 14%~30.2%, 一氧化碳浓度为 2.9%~9.5%, 在燃烧的第三个阶段, 一氧化碳和二氧化碳浓度出现了峰值, 证明此时燃烧化学反应较为剧烈。最后阶段驾驶舱内的气体含量均出现明显下降, 此时可燃物已经被消耗完毕。根据内饰材料的成分与测量得到的燃烧产物特征, 对各种气体的主要来源分析如表 3 所示。

表3 汽车内饰材料释放的气体成分分析

Table 3 Analysis of Gas Components Released from Automotive Interior Materials

燃烧气体种类	内饰材料种类
CO ₂ 、CO	木材、塑料等含碳物
HCN	塑料、聚氨酯
HCl	聚氯乙烯等含氯化合物
氮氧化物	含氮物
卤化氢	阻燃剂

2.4 电池舱气体爆炸特征

对电池舱内不同阶段的气体进行爆炸特性测试, 测量得到的爆炸极限、爆炸压力如表 4 所示。从表中可以看出, 不同时期的电池舱气体爆炸极限变化较大, 最低的爆炸下限为 4.83%, 最高的爆炸上限达到 73.77%, 最大爆炸压力的范围为 0.514~0.732 MPa。气体爆炸危险性可以利用爆炸危险性公式计算:

$$\text{EH} = \frac{\text{UEL} - \text{LEL}}{\text{LEL}} \quad (3)$$

式中, UEL 为气体的爆炸上限; LEL 为气体的爆炸下限; EH 为爆炸危险性。

表4 电动汽车电池舱气体爆炸特征数据

Table 4 Characteristic data of gas explosion in electric vehicle battery compartment

时期	爆炸下限/%	爆炸上限/%	爆炸危险性	最大爆炸压力/MPa
阶段1	18.09	37.28	1.06	0.732
阶段2	4.83	73.77	14.27	0.626
阶段3	31.60	57.60	0.82	0.514
阶段4	40.20	59.24	0.47	—

计算得到气体的爆炸危险性如表 4 所示, 从表中可以看出, 电池舱气体的爆炸危险性呈现出先增加后减小的趋势, 在第二阶段射流火出现的时期, 爆炸危险性突然上升, 达到了 14.27, 这说明第二

阶段的电池舱气体爆炸危险性很强。

电池舱中的气体为混合气体，且电池舱中包含了复杂的气体成分，混合气体的爆炸极限与各组分的爆炸特性以及含量有关。混合气体爆炸极限可以基于 Le Chatelier 公式进行估算：

$$EL_{mix, f} = \frac{100}{\sum_i \frac{V_i}{EL_i}} \quad (4)$$

式中， $EL_{mix, f}$ 为混合体系爆炸极限； EL_i 为各组分的爆炸极限； V_i 为各组分的体积分数。对于含有惰性气体的混合物，爆炸极限可以表示为：

$$EL_{mix} = EL_{mix, f} \times \frac{100 \times \left(\frac{1 + \varphi}{1 - \varphi} \right)}{100 + EL_{mix, f} \times \frac{\varphi}{1 - \varphi}} \quad (5)$$

式中， φ 为惰性气体的体积分数。式(5)适用于计算含有惰性气体的物质的爆炸下限。对于电池包中的可燃气体，主要包括电解液(碳酸二甲酯、碳酸二乙酯、碳酸乙烯酯等)、甲烷、氢气等，其爆炸极限数据如表5所示，从表中可以看出，几种可燃气体的爆炸下限在 1.4%~4.9%。根据公式(4)，对于纯可燃气体，其爆炸下限介于各个组分的爆炸极限之间，第 1、3、4 阶段的气体爆炸下限远高于各组分的爆炸极限，这说明混合气体中含有大量的惰性气体，如氮气、二氧化碳等。为了分析惰性气体含量对混合物爆炸下限的影响，可以根据公式(4)将混合气体看作一种气体，几种气体的爆炸下限相差不大，可假设其中各种气体的含量相同^[10]，因此可以计算得到混合燃气的爆炸极限为 2.58%~18.0%。根据公式(4)，不同浓度惰性气体含量下，混合气体爆炸下限变化如图 7 所示，从图中可以看出，惰性气体对于气体爆炸下限的影响较大，初期气体爆炸下限对应的惰性气体体积分数大约为 77%，主要是由于初期释放的可燃气体较少，这说明电池舱中含有大量原有的氮气，以及释放的二氧化碳等惰性气体。

表 5 电池包内可燃气体的爆炸极限数据^[10]

Table 5 Explosion limit data of flammable gases in battery packs^[10]

气体	爆炸下限/%	爆炸上限/%
氢气	4.0	75.6
甲烷	4.9	16.0
碳酸二甲酯	3.1	20.5
碳酸二乙酯	1.4	11.0
碳酸乙烯酯	3.6	16.1

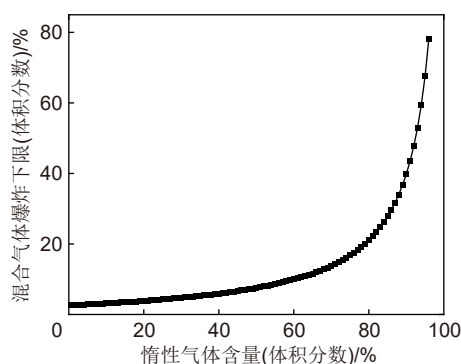


图 7 惰性气体对电池舱气体爆炸下限的影响

Fig. 7 Influence of inert gas on gas explosion limit of battery compartment

在阶段 2 中，爆炸下限出现了明显的降低，爆炸上限出现了明显的升高，阶段 2 中气体的爆炸上下限几乎与氢气一致，这说明，阶段 2 中的气体主要为氢气。在射流火出现后，氢气等可燃气体开始消耗，并且开始出现二氧化碳等惰性气体，导致阶段 3、阶段 4 的气体爆炸下限出现了升高。四个阶段的爆炸上限均高于 37%，只有氢气的爆炸极限高于此数值，这说明四个阶段中均含有氢气，可见氢气对于电池包的气体爆炸危险性具有重要的影响。根据公式(3)计算得到不同氢气浓度下可燃气体的爆炸上限，如图 8 所示，图中表明氢气含量对电池舱气体的爆炸上限具有重要的影响。

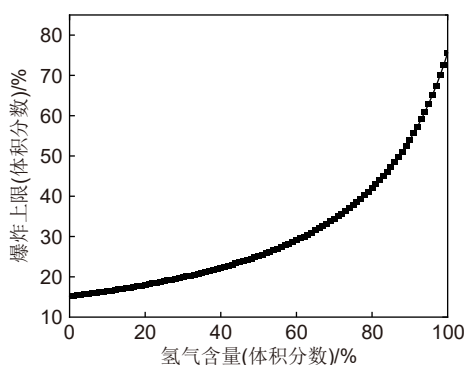


图 8 氢气含量对电池舱气体爆炸上限的影响

Fig. 8 Influence of hydrogen content on the upper limit of gas explosion in battery primary chamber

3 结 论

本工作通过傅里叶光谱仪和 5 L 球形爆炸极限测定仪定性定量探究了新能源汽车火灾过程中，产气特性与气体的爆炸危险性，为消防救援提供了一定的参考依据。主要结论如下：

(1) 电动汽车火灾过程中电池舱气体释放可以分为四个典型阶段: 电池热失控初期阶段、射流火出现阶段、稳定燃烧阶段、扩大蔓延阶段。不同阶段电池舱内的气体明显不同, 初期阶段主要为锂电池电解液蒸气、少量氢气; 射流火出现阶段主要的产气为氢气, 稳定燃烧阶段会产生大量的二氧化硫气体, 主要是由电池内的硫化化合物添加剂在高温作用下释放的。

(2) 电动汽车驾驶舱燃烧的初期会产生剧毒的氰化氢气体, 主要是由车舱底部的地毯、座椅等物质在高温作用下裂解产生的。驾驶舱在燃烧过程中会产生大量的氟化氢气体, 主要是由内饰材料中的卤化物阻燃剂在高温的作用下产生的。

(3) 电池舱中的气体具有较强的燃爆性能, 尤其在射流火出现的阶段, 爆炸危险性最强, 达到了14.27。电池舱中气体的燃爆性能主要受惰性气体与氢气的影响, 惰性气体主要影响混合气体的爆炸下限, 氢气主要影响混合气体的爆炸上限。

参考文献

- [1] 魏文强. 我国电动汽车的能效与经济性分析[J]. 时代汽车, 2023(4): 98-100.
WEI W Q. Analysis of energy efficiency and economy of electric vehicles in China[J]. Auto Time, 2023(4): 98-100.
- [2] 林烨, 黄国忠, 肖凌云, 等. 基于深度调查的电动汽车火灾原因分析技术[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(1): 145-148.
LIN Y, HUANG G Z, XIAO L Y, et al. An analysis technology of electric vehicle fire based on in-depth investigation[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(1): 145-148.
- [3] 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.
- [4] RISE. Toxic gases from fire in electric vehicles[R]. Swedish: RISE, 2020.
- [5] 董海斌, 张少禹, 李毅, 等. NCM811 高比能锂离子电池热失控火灾特性[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(S1): 65-70.
DONG H B, ZHANG S Y, LI Y, et al. Thermal runaway fire characteristics of lithium ion batteries with high specific energy NCM811[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(S1): 65-70.
- [6] ZHANG S S. A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(2): 1379-1394.
- [7] 史晋宜, 庞景和, 王威. GC-MS用于锂离子电池电解液成分分析研究[J]. 科技创新与应用, 2017(35): 191-192.
SHI J Y, PANG J H, WANG W. GC-MS applied to the analysis of electrolyte composition of lithium ion batteries[J]. Technology Innovation A, 2017(35): 191-192.
- [8] HOU J X, LU L G, WANG L, et al. Thermal runaway of Lithium-ion batteries employing $\text{LiN}(\text{SO}_2\text{F})_2$ -based concentrated electrolytes[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-11.
- [9] ZHAO H F, NAM P K S, RICHARDS V L, et al. Thermal decomposition studies of EPS foam, polyurethane foam, and epoxy resin (SLA) as patterns for investment casting; analysis of hydrogen cyanide (HCN) from thermal degradation of polyurethane foam[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(1): 18-25.
- [10] (美)J.A. 迪安(John A. Dean 主编, 魏俊发等译). 兰氏化学手册[M]. [2版]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 张青松, 刘添添, 郝朝龙, 曲奕润, 张伟, 陈达. 锂离子电池热失控气体快速检测及危险性方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报. (2022-03-03) [2023-04-26]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0668>.