

# 电动船三元锂电池舱与磷酸铁锂电池舱灭火对比试验研究

饶慧<sup>1</sup> 罗肖锋<sup>1</sup> 刘安<sup>1</sup> 汪志宏<sup>2</sup> 席庆庆<sup>3</sup> 张峥<sup>4</sup>

(1 中国船级社武汉规范研究所, 湖北武汉 430022; 2 浙江亚宁消防设备有限公司, 浙江衢州 324112; 3 江西三星气龙消防安全有限公司, 江西南昌 330013; 4 武汉现代长江摩根科技有限公司, 湖北武汉 430090)

**摘要:** 为研究三元锂电池电动船的消防安全, 搭建了一个船舶锂电池舱火灾试验平台, 通过模拟舱室火灾场景, 开展了一系列大尺寸灭火试验, 从灭火现象、冷却效果及复燃间隔时间等方面对比分析了四种船用固定式灭火系统对三元锂电池和磷酸铁锂电池初期火灾的抑制效果。试验表明, 压力水雾灭火系统对两种电池火体现出较好的抑制和冷却效果, 5L/min.m<sup>2</sup> 和 10L/min.m<sup>2</sup> 两种喷水强度下均未发生复燃; 二氧化碳、七氟丙烷及热气溶胶灭火系统均能瞬时扑灭这两种电池火, 但抑制时间有限, 存在复燃的可能, 其中热气溶胶冷却效果最差、电池复燃间隔时间最短, 其次是二氧化碳、七氟丙烷。总体而言, 三元锂电池火比磷酸铁锂电池火更难扑灭, 复燃率更高, 复燃间隔时间更短。根据比较结果, 对三元锂电池电动船提出了高于磷酸铁锂电池电动船的灭火对策。

**关键词:** 电动船; 三元锂电池; 磷酸铁锂电池; 灭火试验; 冷却; 复燃

## 引言

近年来, 随着世界能源消耗的日益增长和环境污染的不断加剧, 锂离子电池在电动汽车和电动船舶等交通领域逐步占据重要地位。当前, 锂离子电池驱动的电动船已在内河渡船、短途客船、观光游览船以及小型游艇上得到广泛应用。其中, 磷酸铁锂电池以其公认相对较好的化学稳定性成为我国锂电池电动船市场的主流类型, 而三元锂电池在世界其他地区如挪威更为普遍。但由于三元锂电池相对于磷酸铁锂电池具有电压平台高、能量密度高和循环寿命长等优势<sup>[1]</sup>, 可在减小船舶自重的同时增加船舶航程, 提高船舶经济效益, 因此在国内逐渐呈现出一定的应用需求。然而高能量密度意味着更大的能量和热量, 而且三元锂电池还会在热失控过程中自产氧分子<sup>[2]</sup>, 即便没有外界氧气的参与仍可自身构成燃烧三要素, 因此三元锂电池电动船比磷酸铁

锂电池电动船面临更高的火灾风险。2019年10月，挪威渡船公司 Norled旗下“MF Ytteroyningen”号客船的蓄电池室发生火灾和严重的气体爆炸事故，据报道该船的电池系统采用了三元锂电池，引起业界极大关注。因此，三元锂电池电动船的消防安全问题仍然是一个重大的技术挑战，现有磷酸铁锂电池电动船的消防措施是否足以应对三元锂电池火灾也不得而知。

虽然目前关于这两种电池的研究很多，但大部分局限于电池本身的安全性能，也有一部分针对陆上应用、生产、储存或空中运输场景下的电池消防安全<sup>[3-8]</sup>，但未将其与船舶应用环境结合，并局限于某一特定类型的电池，电池数量和容量也较小，不能体现船舶火灾的特点。因此，本文搭建了一个船舶锂电池舱火灾试验平台，以镍钴锰三元锂（NCM）电池为试验目标对象，以磷酸铁锂（LFP）电池为参照对象，通过模拟舱室火灾场景，开展了一系列电池包级别的大尺寸灭火试验，比较分析了四种不同类型的船用灭火系统对 NCM 电池和 LFP 电池初期火灾的抑制效果，并基于对比试验结果对 NCM 电动船提出了比现有 LFP 电动船更高的灭火对策建议。

## 1 试验部分

### 1.1 试验平台

为模拟船舶舱室环境，搭建了一个电池试验舱（见图 1）。该试验舱由钢质材料建造，设计尺寸长为 5898mm，宽为 2350mm，高为 2390mm。舱内壁敷设隔热材料，侧壁上开设一个具备防火防爆性能的

观察窗，舱顶设有进、出风口和风机。舱内安装了灭火系统管道、喷嘴等设备和组件。

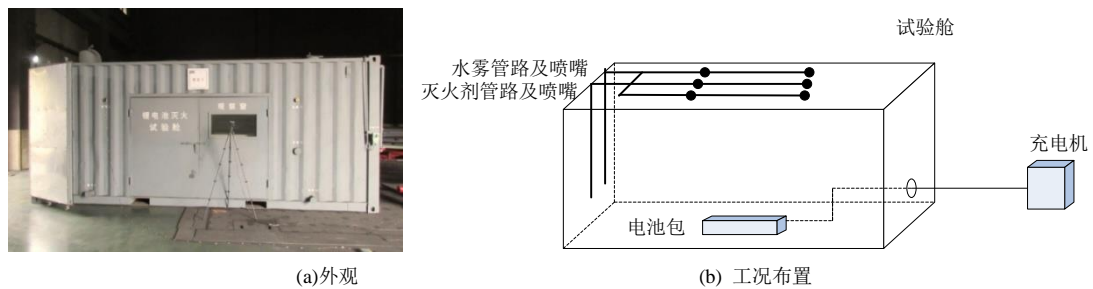


图1 试验舱

## 1.2 工况设置

选取两型尺寸基本相当的NCM电池包和LFP电池包作为试验样品（见表1），二者负极材料均为石墨，NCM电池正极材料为 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3})\text{O}_2$ ，每个电池包尺寸为1280 mm \*500 mm \*195 mm，包含72个电芯，总容量为6840 Ah；LFP电池正极材料为 $\text{LiFePO}_4$ ，每个电池包尺寸为1100mm\*630 mm \*240 mm，含48个电芯，总容量为13008 Ah。为使电池充分燃烧，将电池包外壳顶部拆除。将电池包样品置于试验舱内中间位置，模拟电池因过充而引发火灾的场景。由于本试验不是安全测试实验，而是破坏性实验，因此采用超出安全标准的过充方式引燃电池。在引燃过程中，所有舱门关闭，并用密封条进行密封，仅通风口保持开启，风机持续工作以提供电池燃烧所需足够的空气。在灭火系统启动前，关闭通风口和风机。

表1 试样信息

电池类型	电池包数量 (个)	电池包尺寸 (mm×mm×mm)	每个电池包内 电芯数量(个)	电池包总容量 (Ah)
NCM	10	1100×630×240	48	13008
LFP	6	1280×500×195	72	6840

## 1.3 试验方案

选择了二氧化碳、七氟丙烷、热气溶胶和压力水雾等四种船用固

定式灭火系统（如图 2 所示），分别就这四种灭火系统对抑制或扑灭 NCM 电池火和 LFP 电池火的有效性进行试验，各灭火系统设计均满足相应的船舶技术标准，灭火浓度或喷水强度如表 2 所示。待电芯起火且火势逐渐加大并引发整个电池包燃烧约 2min 时，手动启动灭火系统。判定灭火有效的衡准如下：灭火系统启动后能将火焰完全扑灭，且 24 小时内电池不复燃或爆炸。同时实时测量电池包及试验舱的温度变化，如图 3 所示。试验时仅对电池包内中间一组模组过充，相邻模组上布置若干热电偶，1#所示温度为分布在未过充的模组上各单体电池所测得的最高温度值；2#所示温度为试验舱顶部外壁中心位置所测得的温度值；3#所示温度为试验舱侧面内壁中心位置及沿其垂直高度方向上下各 0.5m 位置所测得的最高温度值。



(a)二氧化碳灭火系统(管网式) (b)七氟丙烷灭火系统(柜式) (c)气溶胶灭火系统(柜式) (d)压力水雾灭火系统（水泵供水）

图2 试验用灭火系统

表2 试验灭火浓度/喷水强度表

灭火系统类型	灭火浓度/喷水强度
二氧化碳	40%
七氟丙烷	9%
气溶胶	260g/m <sup>3</sup>
压力水雾	5L/min.m <sup>2</sup> （开启2个喷嘴） 或10L/min.m <sup>2</sup> （开启4个喷嘴）

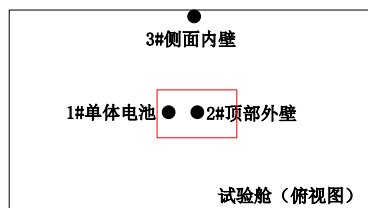


图 3 热电偶布置示意图

## 2 试验结果及分析

### 2.1 灭火现象及冷却效果对比

#### (1) 二氧化碳灭火试验

二氧化碳灭火共进行了 3 次重复性试验，包括 2 次 NCM 和 1 次 LFP。3 次试验中灭火剂释放后电池明火瞬间均被扑灭，试验舱及电池温度出现小幅度下降，舱内出现大量白烟，一段时间后各试验中电池包均复燃，且无法控制，只能让其自由燃烧，持续时间较长。试验舱及电池温度由于电池复燃而再次升高，并出现一些波动。待静置 24h 后检查电池残留物，电池包已完全烧毁。试验典型现象及温度变化分别如图 4、5 所示。

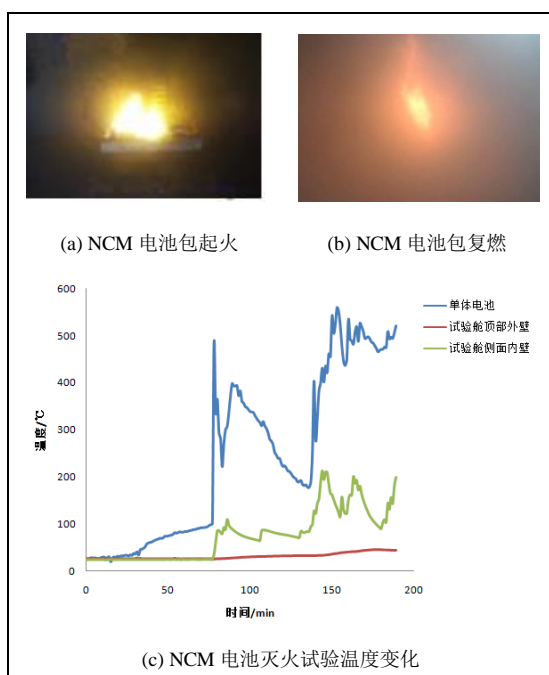


图4二氧化碳灭NCM火试验典型现象及温度变化

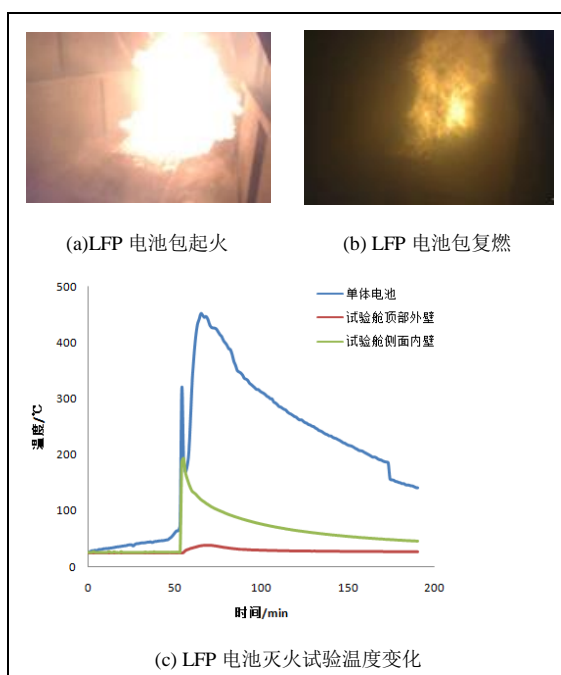


图5二氧化碳灭LFP火试验典型现象及温度变化

#### (2) 七氟丙烷灭火试验

七氟丙烷灭火共进行了 3 次重复性试验，包括 2 次 NCM 和 1 次 LFP。2 次 NCM 试验中灭火剂释放后明火瞬间均被扑灭，试验舱及电池温度出现小幅度下降，舱内出现大量白烟，一段时间后电池包均复燃

燃，且无法控制，只能让其自由燃烧，持续时间较长。试验舱及电池温度由于电池复燃而再次升高，并出现一些波动（如图 6 所示）。待静置 24h 后检查电池残留物，电池已完全烧毁。但 LFP 试验中灭火剂释放后明火瞬间均被扑灭，且试验舱及电池温度持续下降直至环境温度，电池包未复燃（如图 7 所示）。待静置 24h 后检查电池残留物，仅过充的模组遭受烧蚀，未影响到其他模组。

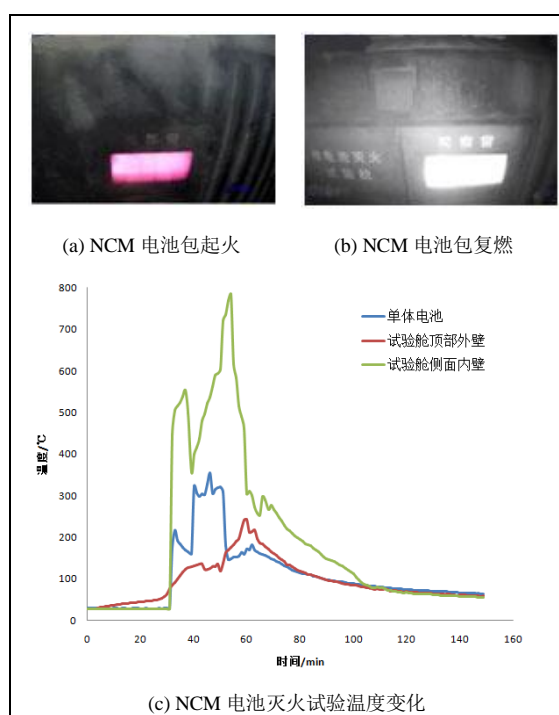


图 6 七氟丙烷灭 NCM 火试验典型现象及温度变化

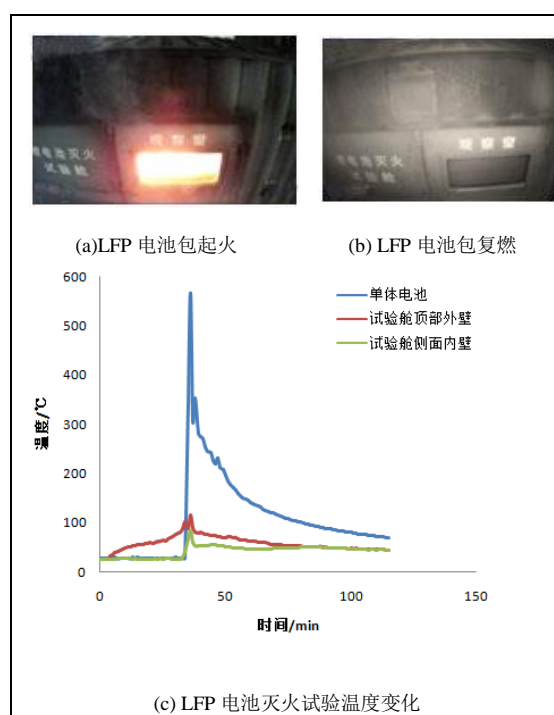


图 7 七氟丙烷灭 LFP 火试验典型现象及温度变化

### (3) 热气溶胶灭火试验

热气溶胶灭火共进行了 3 次重复性试验，包括 2 次 NCM 和 1 次 LFP。3 次试验中灭火剂释放后明火瞬间均被扑灭，试验舱及电池温度出现小幅度下降，舱内出现大量白烟，一段时间后电池包均复燃，且无法控制，只能让其自由燃烧，持续时间较长。试验舱及电池温度由于电池复燃而再次升高，并出现一些波动。待静置 24h 后检查电池残留物，电池包已完全烧毁。试验典型现象及温度变化分别如图 8、

9 所示。

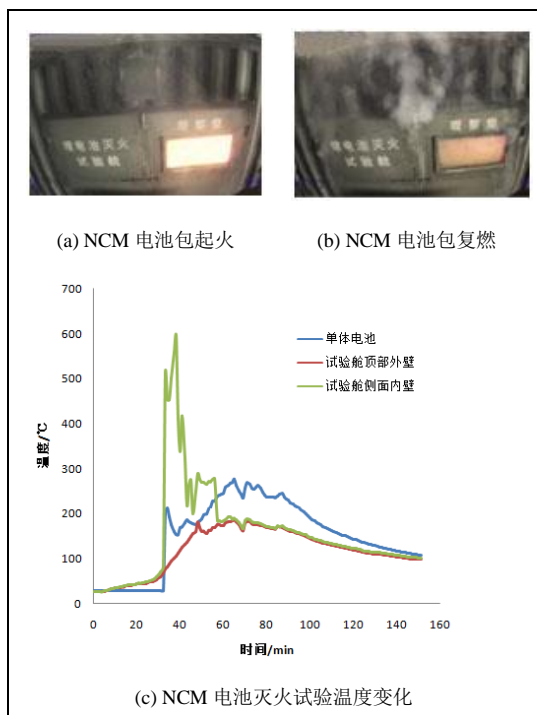


图 8 热气溶胶灭 NCM 火试验典型现象及温度变化

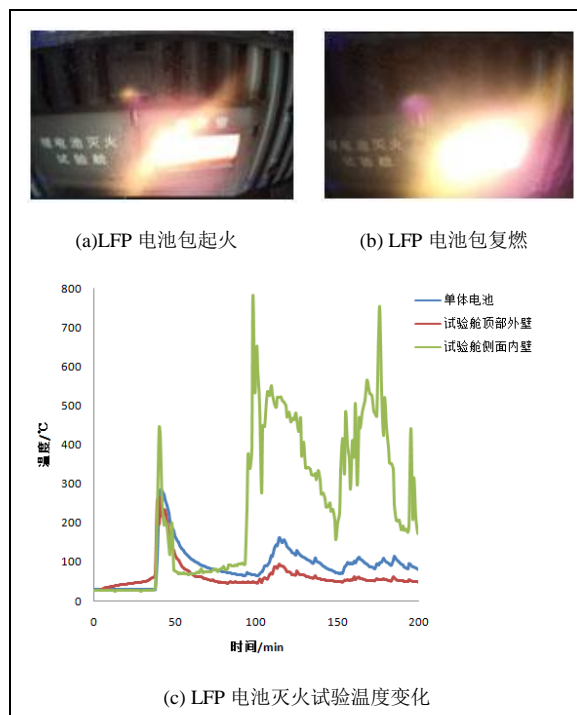
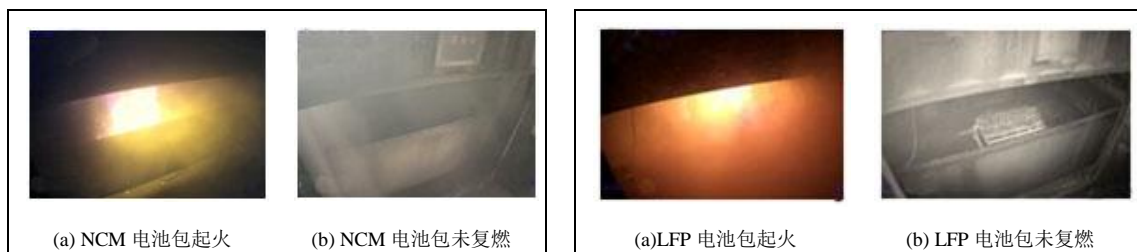


图 9 热气溶胶灭 LFP 火试验典型现象及温度变化

#### (4) 压力水雾灭火试验

压力水雾灭火共进行了 5 次重复性试验，包括 3 次 NCM（喷水强度分别为  $5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 、 $10\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  和  $10\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ ）和 2 次 LFP（喷水强度分别为  $5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  和  $10\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ ）。5 次试验中系统启动后明火瞬间均被扑灭，舱内出现少量白烟并逐渐消退，电池包均未复燃，试验舱及电池温度持续下降直至环境温度（如图 10、11 所示）。待静置 24h 后检查电池残留物，仅过充的模组遭受烧蚀，未影响到其他模组，但浸水损坏较为严重。



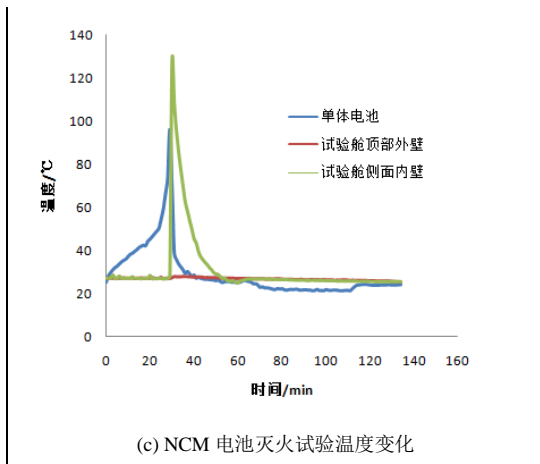


图 10 压力水雾灭 NCM 火试验典型现象及温度变化

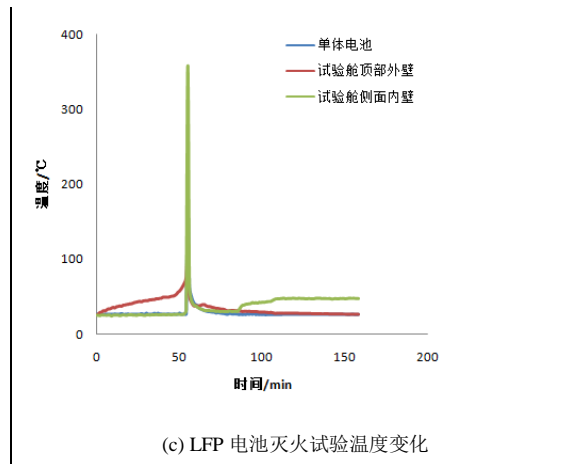


图 11 压力水雾灭 LFP 火试验典型现象及温度变化

## 2.2 复燃及间隔时间对比

表 3 统计了各试验中电池包复燃与否及复燃间隔时间，可得：

(1) 二氧化碳、七氟丙烷和热气溶胶灭火系统扑灭 NCM 电池火后均发生了复燃，且间隔时间非常短，不足 30min，其中热气溶胶灭火后电池复燃的间隔时间最短；

(2) 二氧化碳和热气溶胶灭火系统扑灭 LFP 电池火后也发生了复燃，但间隔时间长于各自扑灭 NCM 电池火后的复燃间隔时间，热气溶胶灭火后电池包复燃的间隔时间同样小于二氧化碳，七氟丙烷灭火系统扑灭 LFP 电池火后未复燃；

(3) 压力水雾灭火系统扑灭两种电池火后均未发生复燃。

表 3 灭火试验复燃情况

灭火系统类型	试验序号	电池类型	是否复燃
二氧化碳	1	NCM	是 (29min 后复燃)
	2	NCM	是 (18min 后复燃)
	3	LFP	是 (1h25min 后复燃)
七氟丙烷	1	NCM	是 (25min 后复燃)
	2	NCM	是 (16min 后复燃)
	3	LFP	否
热气溶胶	1	NCM	是 (12min 后复燃)
	2	NCM	是 (6min 后复燃)
	3	LFP	是 (25min 后复燃)
压力水雾	1	NCM	否

2	NCM	否
3	NCM	否
4	LFP	否
5	LFP	否

---

### 2.3 试验小结

综合各种灭火系统作用下的灭火现象、冷却效果及复燃间隔时间，比较得出：

(1) 二氧化碳对抑制 NCM 和 LFP 电池火的作用均有限，其隔绝和稀释氧作用虽能使这两种电池火瞬时熄灭，但灭火效率不高，主要原因在于其降温作用有限，无法抑制电池热失控扩散，导致电池包复燃，此外电池舱气密性一定程度的丧失致使外界新鲜空气进入也是复燃的因素之一。后续试验对电池舱气密措施进行了加强，但由于电池燃烧反应较为剧烈，且伴随有气体爆炸，安全释压口作用有限，舱门仍被冲开，虽及时予以关闭，但仍影响了二氧化碳灭火的效果。

(2) 七氟丙烷对 LFP 电池初期火灾抑制效果较好，与相关文献中的试验结果一致<sup>[9-10]</sup>，主要在于七氟丙烷的物理和化学灭火作用，其汽化分解和断键分解快速吸收火场热量成为冷却电池从而抑制电池热失控扩散的关键因素。但七氟丙烷对 NCM 电池火的抑制效果并不明显，分析其原因一方面是 NCM 电池材料更不稳定并在自产热过程中会自身释放氧，影响灭火效果，另一方面是由于在出现可见火焰之前 NCM 电池内部早已发生了剧烈的氧化还原反应，尽管试验中灭火剂的施放时刻几乎一致，但相对于 LFP 电池来说其灭火时机稍显滞后，只能扑灭明火并进行短暂的降温，无法持续抑制电池模组的热失控扩散。此外，还需注意到也有文献中论述了七氟丙烷灭 LFP 电池火的试验结

果并不理想<sup>[11]</sup>，出现了复燃，说明七氟丙烷扑灭锂离子电池火存在一定偶然性，虽然试验证明其冷却和化学抑制效果优于二氧化碳和热气溶胶，但仍不是应对锂离子电池火灾的最佳灭火剂。

(3) 热气溶胶对 NCM 和 LFP 电池火基本上无明显抑制作用。热气溶胶主要是通过自身发生氧化还原反应形成大量凝集型灭火气溶胶，主要成分有 N<sub>2</sub>、少量 CO<sub>2</sub>、金属盐固体微粒等，但冷却效果有限，无法抑制电池热失控扩散，大量烟气持续释放使热量在有限空间内迅速积聚，导致电池包很快复燃，相比二氧化碳和七氟丙烷，热气溶胶对电池冷却效果最差、电池复燃间隔时间最短。

(4) 压力水雾对 NCM 和 LFP 电池火抑制作用非常明显，不仅可迅速扑灭明火，还能持续冷却电池，水雾在火场中快速吸热气化成为防止电池热失控扩散的有效途径。由此可见，其灭火效果取决于喷水强度和喷水持续时间。试验中采用了 5L/min.m<sup>2</sup>（相关船舶技术标准中对 LFP 电池舱的要求）和 10L/min.m<sup>2</sup> 两种喷水强度，均持续喷放直至火势被彻底扑灭，虽然显示灭火效果基本一致，但考虑 NCM 电池舱火灾风险高于 LFP 电池舱，且实际火灾规模可能大于试验模拟的场景，灭火难度更大，因此在实船设计时可根据电池数量、总体积及舱室净空高度在 5L/min.m<sup>2</sup> 基础上适当增大喷水强度，同时保证足够排水能力。

(5) 总体而言，NCM 电池火比 LFP 电池火更难扑灭，复燃率更高，复燃间隔时间更短，可能不足以满足船上人员的逃生时间需求。但大部分小船不具备安装压力水雾灭火系统的条件，只能选择气体灭火系

统，因此目前 LFP 电动船采用电池舱七氟丙烷灭火系统和全船水灭火系统共同保护，但水灭火系统依赖船员临近火场操作，不利于船员生命安全，如 NCM 电池舱也采用七氟丙烷灭火系统，尚需在电池热失控扩散抑制、火灾早期预警及应对复燃方面提出更高的要求，如电池包独立火灾抑制装置、电池舱灭火系统二次保护等。此外，当必须依赖船员灭火时，鉴于船上消防水枪出水通常为水柱，就冷却效果而言，水雾枪优于常规水枪。

### 3 结论

通过对电动船 NCM 电池舱和 LFP 电池舱灭火试验的对比分析，可得如下结论：

(1) NCM 电池火和 LFP 电池火在初期阶段均可被压力水雾灭火系统彻底扑灭，建议在电池舱内优先安装压力水雾灭火系统，为保证冷却效果，视情对 NCM 电池舱增大喷水强度，同时注意船舶排水系统需保证足够的排水量，避免排水不及时影响船舶稳性造成倾覆或沉没。

(2) NCM 电池和 LFP 电池火在二氧化碳、七氟丙烷及热气溶胶灭火剂释放后均能被瞬时扑灭，但抑制时间有限，存在复燃可能，其中热气溶胶冷却效果最差、电池复燃间隔时间最短，然后依次是二氧化碳、七氟丙烷。因此不建议在电池舱内安装二氧化碳和热气溶胶灭火系统，在不具备安装压力水雾灭火系统的前提下暂可考虑七氟丙烷，但灭火后须保证足够的浸渍时间，并维持舱室气密性防止外界空气进入。对 NCM 电池舱，建议该系统设计成在电池复燃时能够再次释放，

以提供对舱室的第二次保护，延长可用于人员逃生的时间，但该措施可能带来船舶自重和船东经济成本的增加。

(3) NCM 电池比 LFP 电池燃烧反应更为剧烈，虽然二者灭火系统的施放时刻几乎一致，但对于 NCM 电池，在出现可见火焰之前电池内部早已发生了剧烈的氧化还原反应，因此相对于 LFP 电池其灭火时机稍显滞后。建议对安装七氟丙烷灭火系统的 NCM 电池舱，可为每个电池包单独设置火灾抑制装置，通过对电池热失控早期预警及时释放以冷却效果为主的介质，阻止电池单体或电池模组之间的热扩散。目前适用于 NCM 电池的火灾抑制装置尚处于研发阶段，还存在缺乏相应的设计和认可标准以及成熟的市场应用等问题。

(4) NCM 电池和 LFP 电池起火时舱室能见度极低，并可能产生气体爆炸，建议电池舱以自动灭火方式为主，当必须依靠船员灭火时，船员尽量不进入电池舱即可从外部进行灭火，并采用水雾水枪。锂离子电池尤其是 NCM 电池的灭火问题较为复杂，缺乏长期有效的实践经验，而灭火试验成本高且具备随机性，不能完全代表真实情况，因此还需要大量实践以及配套产品研发来支撑。

#### 参考文献

- [1] 张长煦，倪子潇. 车用三元锂电池与磷酸铁锂电池对比分析[J]. 新能源汽车, 2019, 23:28-29.
- [2] 周天，赵晖. 锂离子电池生产火灾危险性防范对策[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(5):716-720.
- [3] 张少禹，董海斌，李毅，于东兴等. 动力锂离子电池热失控火灾试验模型研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3):397-400.
- [4] 杜光超，郑莉莉，张志超，王栋等. 圆柱形高镍三元锂离子电池高温热失控实验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1):249-254.
- [5] Lain MJ, Teagle DA, Cullen J, Dass V. Dealing with in-flight lithium battery fires in portable electronic devices [N]. Civil Aviation Authority Paper, 2003.

- [6] Olajczak CJ, Wagner-Jauregg A. US FAA-Style Flammability Assessment of Lithium Ion Cells and Battery Packs in Aircraft Cargo Holds [R]. Exponent Failure Analysis Associates, Inc., 2005.
- [7] Benjamin Ditch, Jaap de Vries. Flammability Characterization of Lithium-ion Batteries in Bulk Storage[R]. FM Global, 2013.
- [8] 孙均利, 卞昶, 顾琮钰, 王一菁. 锂离子电池受热失控实验及其残留物分析[J]. 电源技术, 2019, 43(5) :758-771.
- [9] Hui Rao, Zhaoxia Huang, Hui Zhang, Shuming Xiao. Study of fire tests and fire safety measures on lithium ion battery used on ships [C]// Transportation Information and Safety (ICTIS), 2015 International Conference on. IEEE, 2015.
- [10] 张磊, 张永丰, 黄昊, 曹丽英. 抑制锂电池火灾灭火剂技术研究进展[J]. 科技通报, 2017, 33 (8) :255-258.
- [11] 张明杰, 杨凯, 张坚等. 七氟丙烷对磷酸铁锂储能电池的灭火效果[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8) :1168-1181.

## **Study on Comparative Fire Extinguishing Tests Between Ternary Lithium Battery Cabin and Lithium iron Phosphate Battery Cabin of Electric Ships**

### **Abstract**

For studying the fire safety of electric ships powered by ternary lithium batteries, an experimental platform of lithium battery cabin on a ship was established and a series of large-scale fire experiments were performed by simulating the fire scenario in the cabin. Ternary lithium batteries and lithium iron phosphate batteries were taken, and the suppression effectiveness of four types of marine fixed fire-extinguishing systems on their initial fires were compared in terms of fire suppression phenomena, cooling effect and re-ignition interval time. The results showed that pressure water-mist fire-extinguishing system had a good suppression effect on these two kinds of battery fires, and no re-ignition occurred when the water spraying intensity was  $5\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$  and  $10\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}^2$ . Carbon dioxide, heptafluoropropane and aerosol fire-extinguishing systems could extinguish these two kinds of battery fires instantly, but the suppression time was limited and there was the potential to re-ignite. Among these three systems, the cooling effect of aerosol was the worst and re-ignition intervals were the shortest, followed by carbon dioxide and then heptafluoropropane, and in general ternary lithium battery fires were more difficult to be extinguished than lithium iron phosphate battery fires, with higher re-ignition rate and shorter re-ignition intervals. According to the comparative results, some fire fighting countermeasures of electric ships powered by ternary lithium batteries were put forward, which were higher than that of electric ships powered by lithium iron phosphate batteries.

**Key words:** electric ships;ternary lithium batteries;lithium iron phosphate batteries;fire extinguishing test;cooling effect;re-ignition