
目 录

1 绪论.....	1
1.1 行业发展现状及趋势.....	1
1.2 梯次利用典型应用场景.....	2
1.2.1 储能领域梯次利用发展现状.....	3
1.2.2 备电领域梯次利用发展现状.....	3
1.2.3 低速车领域梯次利用发展现状.....	4
1.3 梯次利用消防安全现状.....	4
1.3.1 储能电站消防安全现状.....	4
1.3.2 回收服务网点消防安全现状.....	7
1.4 本项目拟开展的工作.....	8
3 锂离子电池的燃烧性能研究.....	9
3.1 锂离子电池单体的热失控特性研究.....	9
3.1.1 磷酸铁锂电池热触发的失控特性.....	9
3.1.2 锂电池单体过充电诱导的热失控特性.....	13
3.2 三元锂电池的热失控及蔓延特性.....	19
3.2.1 锂电池.....	19
3.2.2 试验模型.....	19
3.2.3 试验方法.....	19
3.2.4 三元锂电池模组过充蔓延特性分析.....	20
3.2.5 三元锂电池的火焰传播规律分析.....	21
3.3 锂电池模组的量热测试研究.....	21
3.3.1 基于耗氧原理的测试系统.....	21
3.3.2 测试样品与方法.....	26
3.3.3 测试结果.....	27
3.4 模拟储能电柜内的锂电池燃烧特性.....	31
3.4.1 锂电池.....	31
3.4.2 测试场景与方法.....	31
3.4.3 测试结果.....	32
3.5 锂离子电池逸出气体爆炸性能分析.....	34
3.6 小结.....	35
4 热失控特征与探测技术研究.....	37
4.1 火灾探测与模式识别.....	37
4.1.1 感烟探测器.....	37
4.1.2 感温火灾探测器.....	38
4.1.3 感光火灾探测器.....	38
4.1.4 可燃气体火灾探测器.....	39
4.2 动力电池系统火灾重构模拟实验装置研究.....	41
4.2.1 系统组成.....	41
4.2.2 系统结构.....	43
4.2.3 数据采集.....	45
4.2.4 锂离子电池热失控触发形式.....	45
4.3 锂离子电池热失控早期探测实验设计.....	47
4.4 锂离子电池热失控温度与电压分析.....	48

4.5	锂离子电池热失控产气压力分析.....	49
4.6	锂离子电池逸出气体时序性分析.....	50
4.7	小结.....	52
5	锂离子电池火灾灭火技术研究.....	53
5.1	抑制锂电池灭火剂技术国内外研究进展.....	53
5.1.1	DEKRE 锂电池火灾灭火剂技术.....	53
5.1.2	FAA 锂电池火灾灭火剂技术.....	53
5.1.3	CAA 锂电池火灾灭火剂技术.....	56
5.1.4	中船社锂电池火灾灭火剂技术.....	57
5.2	灭火剂理论分析.....	58
5.2.1	氢氟碳类灭火剂.....	58
5.2.2	氟碘碳类灭火剂.....	58
5.2.3	惰性气体灭火剂.....	59
5.2.4	热气溶胶灭火剂.....	59
5.2.5	超细干粉灭火剂.....	59
5.2.6	细水雾灭火剂.....	59
5.2.7	BTP 灭火剂.....	60
5.2.8	全氟己酮灭火剂.....	60
5.2.9	典型灭火剂综合对比.....	61
5.3	锂离子电池火灾灭火实验平台研制.....	62
5.3.1	实验平台简介.....	62
5.3.2	水系灭火系统试验装置.....	63
5.3.3	气体灭火系统试验装置.....	65
5.4	锂离子电池火灾灭火策略研究.....	69
5.4.1	明火后喷放.....	69
5.4.2	失控初期喷放.....	71
5.5	模拟储能电柜内的锂离子电池火灾灭火实验研究.....	72
5.6	火灾防控装置研发.....	73
5.6.1	锂离子电池热失控早期探测装置工程化.....	74
5.6.2	锂电池火灾灭火单元工程化.....	75
5.7	锂离子电池火灾防控装置效能检验.....	77
5.7.1	实验模型.....	77
5.7.2	实验结果.....	78
6	动力电池梯次利用消防安全标准研究.....	78
6.1	动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估指南.....	79
6.1.1	标准制定原则.....	79
6.1.2	标准主要技术内容.....	79
6.1.3	主要工作过程.....	81
6.2	动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置性能要求与试验方法.....	82
6.2.1	标准制定原则.....	82
6.2.2	标准主要技术内容.....	83
6.2.3	主要工作过程.....	83
6.3	动力电池梯次利用储能系统消防安全技术条件.....	85
6.3.1	标准制定原则.....	85

6.3.2 标准主要技术内容.....	85
6.3.3 主要工作过程.....	86
6.4 动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制指南.....	87
6.4.1 标准制定原则.....	87
6.4.2 标准主要技术内容.....	88
6.4.3 主要工作过程.....	90

图 注

图 3-1 锂电池热失控实验温度布置图与实物图.....	9	
图 3-2 锂电池热失控的温度与电压变化.....	10	
图 3-3 热失控实验典型过程截图.....	11	
图 3-4 热失控实验典型过程截图.....	12	
图 3-5 锂电池热失控的温度与电压变化.....	13	
图 3-6 热失控实验实物图.....	13	
图 3-7 锂电池热失控的温度与电压变化.....	14	
图 3-8 热失控实验典型过程截图.....	15	
图 3-9 热失控实验典型过程截图.....	17	
图 3-10 锂电池热失控的温度与电压变化.....	18	
图 3-11 实验示意图.....	19	
图 3-12 三元锂电池模组热失控过程的温度变化.....	20	
图 3-13 三元锂电池模组的燃烧状态.....	20	
图 3-14 锂电池扩散间隔时间的变化规律.....	21	
图 3-15 测试系统俯视图.....	22	
图 3-16 排烟系统示意.....	22	
图 3-17 测试段烟管.....	23	
图 3-18 差压探头.....	23	
图 3-19 风速测算系统.....	23	
图 3-20 烟气分析系统.....	24	
图 3-21 气体取样探头.....	24	
图 3-22 光路测试系统示意.....	24	
图 3-23 管道流速分布测试系统.....	25	
图 3-24 燃烧控制系统.....	25	
图 3-25 电池模组结构图	图 3-26 电池模组热失控触发示意图.....	26
图 3-27 锂电池热失控的温度 (cell1、3、5、7、8) 与电压变化.....	27	
图 3-28 锂电池模组热失控实验典型照片.....	28	
图 3-29 锂电池模组表面温度变化.....	28	
图 3-30 锂电池热失控的温度 (cell9、10、12、14) 与电压变化.....	28	
图 3-31 锂电池热失控的温度 (cell24、25、26) 变化.....	29	
图 3-32 锂电池模组的热失控速率与总热释放量曲线.....	30	
图 3-33 锂电池模组的烟气生长和总烟气量曲线.....	30	
图 3-34 测试模组示意图.....	31	
图 3-35 锂电池热失控实验结构图与实物图.....	32	
图 3-36 电柜内锂电池实验典型照片.....	33	
图 3-37 电柜内锂离子电池热失控实验电柜温度曲线.....	33	
图 3-38 电柜内锂离子电池热失控实验模组温度曲线.....	34	
图 4-1 电动汽车退役动力电池系统火灾重构模拟实验装置.....	41	
图 4-2 罐体结构示意图.....	44	
图 4-3 锂离子电池过热触发示意图.....	46	
图 4-4 锂离子电池针刺触发示意图.....	47	

图 4-5 锂电池热失控实验触发示意图.....	47
图 4-6 锂离子热失控实验前后照片.....	48
图 4-7 锂电池的热失控温度和电压曲线.....	49
图 4-8 锂电池的热失控温度压力曲线.....	50
图 4-9 锂电池的热失控压力和压力上升速率曲线.....	50
图 4-10 锂离子电池热失控逸出仪器的 FTIR 实验结构图.....	51
图 4-11 锂离子电池逸出 CO 和烃类气体变化曲线.....	51
图 4-12 锂离子电池逸出 CO 和苯系物气体变化曲线.....	52
图 5-1 抑制锂电池火灾实验装置图.....	55
图 5-2 锂电池火灾扑救实验平台示意图.....	56
图 5-3 实验灭火单室及动力锂电池实物图.....	57
图 5-4 水灭火系统试验装置外形示意图.....	63
图 5-5 水灭火系统试验装置实物图.....	64
图 5-6 气体灭火系统试验装置外形示意图.....	66
图 5-7 气体灭火系统试验装置实物图.....	66
图 5-8 较小空间内的磷酸铁锂电池着火进程.....	70
图 5-9 较小空间内的三元锂电池着火进程.....	71
图 5-10 磷酸铁锂电池初期喷放.....	72
图 5-11 三元锂电池初期喷放.....	72
图 5-12 锂离子电池热失控灭火实验典型照片.....	73
图 5-13 热失控探测系统示意图.....	74
图 5-14 热失控探测系统实物图.....	74
图 5-15 全氟己酮灭火装置结构组成.....	76
图 5-16 锂离子电池火灾防控装置效能验证试验模型.....	77
图 5-17 效能验证实验照片.....	78
图 5-18 灭火装置检验温度曲线.....	78

表 注

表 3-1 热失控实验进程.....	11
表 3-2 热失控实验进程.....	13
表 3-3 热失控实验进程.....	15
表 3-4 热失控实验进程.....	18
表 3-5 锂电池热失控气体组分与含量.....	34
表 4-1 火灾探测器的选择.....	39
表 4-2 系统关键零部件技术参数表.....	41
表 5-1 FK-5-1-12 灭火剂理化性能.....	60
表 5-2 几种哈龙替代灭火剂的性能对比.....	62
表 5-3 锂离子电池热失控灭火实验进程表.....	73
表 5-4 锂离子电池热失控探测器技术参数.....	75
表 5-5 灭火装置技术参数表.....	76

1 绪论

1.1 行业发展现状及趋势

2018年2月26日，工信部、科技部、环境保护部、交通运输部、商务部、质检总局、能源局联合印发了《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》，要求汽车生产企业承担动力蓄电池回收的主体责任，强调落实生产者责任延伸制度，要求汽车生产企业承担动力蓄电池回收的主体责任，而相关企业在动力蓄电池回收利用各环节履行相应责任，提出废旧动力蓄电池的利用应遵循先梯次利用后再生利用的原则，保障动力蓄电池的有效利用和环保处置。为适应行业发展新形势，引导行业持续健康发展，引导新能源汽车行业的持续健康发展，2019年12月16日，工信部印发《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件（2019年本）》和《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法（2019年本）》两个行业规范文件，明确对新能源电池企业在布局和项目选址、技术装备和工艺、资源综合利用及能耗、环境保护要求、产品质量和职业教育以及安全生产、人身健康和社会责任等方面作出具体解释和原则要求。工信部明确指出，《规范条件》中的综合利用是指对新能源汽车废旧动力蓄电池进行多层次、多用途的合理利用，主要包括梯级利用和再生利用。此外，《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法（2019年本）》则明确对申请符合《规范条件》公告的新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用企业作出具体条件要求，要求该类企业必须具备独立法人资格，经营范围涵盖新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用的相关业务，并符合《规范条件》中有关规定的要求。2020年10月10日，为加强新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理，提升资源综合利用水平，保障梯次利用电池产品的质量，2020年10月10日，工业和信息化部节能与综合利用司发布了《新能源汽车动力蓄电池梯次利用管理办法（征求意见稿）》，根据文件，鼓励梯次利用企业研发生产适用于基站备电、储能、充换电等领域的梯次产品，不得开发充电宝、手持照明设备等不易回收的梯次产品。鼓励采用租赁、规模化利用等便于梯次利用产品回收的商业模式。

经过 20 余年的发展，我国新能源汽车实现从科研、产业化到市场推广的“三

级”转变。截至 2020 年底，我国新能源汽车累计产量已突破 550 万辆，成为全球最大的新能源汽车市场。新能源汽车发展进入快车道，带动了对动力蓄电池的强劲需求，我国新能源汽车动力蓄电池累计配套量已超过 131 GW·h（约 90 万 t），产业规模位居世界第一。随之而来，新能源汽车退役动力蓄电池回收利用问题日益紧迫，动力蓄电池大量退役后，如未经妥善处置将带来安全、环境问题，并浪费资源。我国政府高度重视动力蓄电池回收利用，并在已发布的多项管理政策中明确表示在保证安全可控的前提下，鼓励按照先梯次利用后再生利用原则对废旧动力蓄电池开展多层次、多用途合理利用。目前，行业普遍认为当动力蓄电池容量衰减至额定容量的 80% 时，将不再满足作为新能源车辆动力蓄电池使用，需要从车辆上完成退役。然而，其车载寿命阶段仅占据了动力蓄电池全生命周期的 1/3 左右。退役动力蓄电池开展梯次利用一方面是国家政策所鼓励采取的方式，另一方面也有助于发掘退役动力蓄电池最大化剩余价值，延长使用寿命，减少资源浪费。随着新能源汽车使用年限的增加，退役动力蓄电池退役量逐年增加，并将迎来大规模退役期。相关行业研究机构综合考虑新能源汽车历年产量、未来预测产量、电池质保年限及车辆运行工况等因素，对新能源汽车动力蓄电池退役量进行预测。预计至 2025 年，我国退役电池累计退役量约为 116 GW·h（约 78 万 t），退役电池累计梯次利用量约 65 GW·h（约 55 万 t）。

1.2 梯次利用典型应用场景

当前，动力蓄电池退役量较少，梯次利用大部分处于试验示范阶段，主要集中在备电、储能、低速车等领域。由于梯次利用企业大多处于技术研发和积累阶段，对人才和技术需求较高，其主要集中在人才、资金和技术较为聚集的京津冀、长三角及珠三角等地区一线城市和部分基础较好的中小城市。随着动力蓄电池退役潮的到来，各相关企业已在动力蓄电池梯次利用领域加快布局，开展了梯次利用产品的研究与应用，并探索动力蓄电池梯次应用的安全性及经济性。经过多年发展，我国梯次利用产业正处于由示范工程向商业化转变的过渡阶段。在通信基站备电、电网储能、低速车等领域，梯次利用已开始实用化。基站备电场景应用主要是将梯次利用电池应用在通信基站备用电源系统，在停止供电的情况下为基站用电设备供电。电网储能场景应用主要是实现发电侧储能的负荷调节、提高新

能源消纳等，输配电储能的电能质量提高、线路损耗降低等，以及用户侧分布储能的削峰填谷、负荷转移等。低速车场景主要是在微型电动车、电动自行车等低速车上，替代原用的铅酸电池，减轻装载电池重量，提升电池循环使用寿命等，主要使用领域包括外卖、物流、环卫等。

1.2.1 储能领域梯次利用发展现状

我国新能源汽车动力蓄电池梯次利用在示范研究阶段，主要在储能领域探索。当前，我国储能领域正在调整能源结构，向清洁能源、新能源转变，为梯次利用电池产品进军储能领域创造了机遇。国家电网在北京大兴建设了 100 kW·h 梯次利用锰酸锂电池储能系统示范工程，用于稳定节点电压，并在电网失电情况下通过移动储能电站支持用户离网运行；在郑州建设由退役电池储能系统与多晶硅光伏发电系统、风力发电系统、退役电池储能双向变流器组成的风光储微电网系统；在张北建设了 1 MW·h 梯次利用磷酸铁锂电池储能系统示范工程，用于接纳可再生能源发电和调频等同时，研究组建了退役电池分选评估技术平台，制定了电池配组技术规范，研制了高效可靠的电池管理系统。比亚迪深圳市龙岗区宝龙比亚迪工业园区建立全球首个兆瓦级退役电池梯次利用示范电站，具备调节用电峰谷、平滑光伏发电、提高电网利用率的作用。长沙雨花环保工业园区示范电站正在建设实施。北京匠芯研发梯次利用风光储能系统，生产的梯次利用产品达 14 MW·h。北京普莱德与国家电网、北汽合作实施了储能电站项目、集装箱式储能项目及青海风光储能项目等，累计梯次利用量约 75 MW·h。江苏南京江北储能电站破土动工，这是我国首个也是全球最大规模新能源汽车动力电池梯次利用的电网侧储能电站，共利用“旧电池”总容量为 7.5 万 kW·h。

1.2.2 备电领域梯次利用发展现状

2018 年 7 月，工业和信息化部等七部委组织开展新能源汽车动力蓄电池回收利用试点工作，在中国铁塔股份有限公司开展梯次利用示范工程。中国铁塔公司于 2015 年开始，陆续在 12 个省市 3 000 多个基站开展梯次利用电池替换铅酸电池试验，充分验证了梯次利用安全性和技术经济性可行。2018 年，中国铁塔公司已停止采购铅酸电池，从深圳比亚迪等 20 个企业采购梯次利用电池。据铁塔公示，截至 2018 年底，已在全国 31 个省市约 12 万个基站使用梯次电池约 1.5GW·h，替代铅酸电池约 4.5 万 t，成为全国梯次利用行业的领头者。

据中国铁塔公司测算，其在网蓄电池总数为 240 万组，总容量为 22 GW·h，如全部以梯次利用电池替代，预计可消纳退役电池超过 25 万 t。同时，中国铁塔公司与电池生产、汽车生产及综合利用企业合作，组织成立行业联盟，共建回收利用体系，并在备电、储能及对外发电应用场景加强业务拓展。

1.2.3 低速车领域梯次利用发展现状

继储能、基站备电等使用场景后，低速车成为梯次利用主流发展领域之一，当前已在多种车型进行探索使用。星恒电源为我国早期探索退役动力蓄电池梯次利用于低速车领域的企业之一，当前已实现了对自产电芯的梯次利用创新研究，至 2017 年底星恒累计实现了对 17.68 万支电芯的修复，梯次利用电池产品主要应用于电动自行车、电动三轮车及低速四轮车等轻型车领域的售后市场，用于替换原有的铅酸电池及故障锂电池。杭州市易源科技有限公司自 2018 年起运用退役的磷酸铁锂电池模组，开发用于快递三轮车，并与国内物流快递系统智慧物流运营平台浙江天邮达成战略合作，在全国范围内开展新能源快递物流电动车及配套梯次电池产品的批量投放。中天鸿锂为目前在低速车领域开展梯次利用的典型企业，旗下的“中天动力”品牌采用互联网共享租赁的模式，将动力蓄电池梯次利用模块以租赁的模式应用于顺丰京东等物流企业的快递物流车、美团、饿了么等外卖送餐车，在全国 30 多个城市设置梯次产品客服中心、换电站。宇通环卫与傲蓝得环保科技两家公司合作将旗下使用的环卫三轮洒水车、三轮扫街车和四轮垃圾装载车等低压电动车辆车辆，装配梯次利用电池产品取代现有铅酸电池，现已有 200 台车辆已投入郑州市内的环卫示范运营。

1.3 梯次利用消防安全现状

1.3.1 储能电站消防安全现状

项目组调研走访了蔚来汽车梯次利用储能电站、上海电气集团梯次利用储能电站等场所，全面评估了现阶段储能电站的消防安全现状，并提出了有关建议。

（1）储能电站防火设计标准法规不健全。

目前我国尚未建立储能电站消防安全标准体系，尤其缺少储能电站防火设计规范、消防设施配置规范、消防安全管理规范等，储能电站设计施工时的平面布置设置、安全距离划定、灭火器材配置、应急救援通道设置等缺乏科学合理的依据，导致储能电站消防安全等级较低。

（2）储能电站火灾风险排查手段缺乏。

储能电池是储能电站行业发展的重要基础，储能电池在受外部环境激励或内部制造缺陷的影响下会发生热失控，从而引发火灾、爆炸事故。储能电站装机容量大，单元电池一旦着火，极易蔓延成灾，造成巨大财产损失。储能电站高压电线路较多，排布复杂，高压接触件长时间老化易形成局部热点，造成电气短路引发火灾。储能电站运营过程中对上述火灾隐患的排查缺乏针对性，导致火灾事故风险增加。

（3）储能电站灭火装置设置方法尚未建立

储能电站装机容量大，能量密度高，具有较大的火灾风险。目前，我国仍未建立储能电站灭火装置效能评价和配置标准，储能电站现有的消防系统缺乏科学且有针对性的方法进行验证，多数储能电站未设置针对储能电池热失控或火灾特点的探测报警装置和灭火装置，导致储能电站火灾在初期时未能得到有效控制，致使火灾进一步扩大。

（4）储能电站事故应急救援技术薄弱

随着储能电站产业的持续高速发展，储能电站火灾事故时有发生，目前，国内消防等应急救援部门还未掌握储能电站工况结构、高压电线路分布及储能电池火灾特点等基本信息。针对该类火灾蔓延速度快、火灾负荷大、存在高压泄漏风险等特点，若采用传统的灭火技战术，具有较大的安全隐患。

根据资料查阅分析及现场调研情况，在储能电站消防安全方面提出了以下几点建议：

（1）制定储能电站行业相关技术标准规范

储能电站装机容量大，动力电池成组复杂，易受外部激励或电池内部作用而引发热失控，且由于动力电池排布密集，极易引发热失控扩展和火灾蔓延，国内现有的相关标准规范并未对储能电站的防火设计提出特别要求。应加快制定国家、行业、地方的储能电站防火设计技术标准和管理规定，针对动力电池的火灾危险性，提出有具体的针对性的防火设计要求和管理规定，提高储能电站消防安全设计标准化水平。

（2）加强储能电站建筑防火措施设计

目前我国建设的大多为集装箱式储能电站，单个集装箱内的电池装机容量大，

火灾负荷大，高温热辐射易引起相邻集装箱内的电池发生热失控，因此，应加大防火间距，确保集装箱间不发生火灾蔓延。同时，应加强集装箱内的防火分隔，储能电站集装箱内动力电池一般以电池模组或电池包为单元进行排列，应加强电池模组或电池包间的防火分隔，降低或阻止动力电池间的火灾蔓延，为消防应急救援赢得时间。

（3）完善储能电站消防设施设置

消防设施是火灾防控的重要措施和第一道防线，消防设施不完善或维护保养不到位导致设施存在故障，在火灾发生时将无法正常工作，无法在火灾初期给予抑制和保护，这将对后续的消防应急扑救造成极大困难。因此，应完善储能电站各类消防设施的配置，并在日常做好设施的维护保养工作，确保其具有良好的效能。此外，动力电池火灾具有特殊性，应建立以动力电池火灾特点为基础的消防设施配置方法，如自动灭火系统、热失控或火灾早期探测报警装置、以及消防给水，同时，应根据储能电站自身的设计特点，设置合理的灭火器材、防排烟、防爆和应急疏散标志等各类消防设施。

（4）开展储能电站消防安全评估

储能电站在我国正处于发展的初期阶段，经营管理者对储能电站的消防安全管理经验不足，隐患排查能力较弱，建议政府主管或行业主管部门委托有资质、有实力、有经验的第三方评价机构定期对储能电站开展消防安全隐患和消防设施检测工作，此举可有利于及时找出储能电站运行过程中存在的消防安全问题，并提出有针对性整改措施和建议，提高储能电站的火灾防御能力。

（5）提高储能电站消防安全管理水平

储能电站企业应建立消防安全责任制度，加强落实消防安全隐患排查、设备检测保养、人员巡检、教育培训等制度，并做好有关实施记录。储能电站在运营过程中，动力电池进行着不断的充放电过程，具有较大的火灾风险，应实时检测储能电站的运行安全数据，如 BMS 数据等，及时发现火灾隐患。动力电池火灾具有特殊性，如何有效识别动力电池在热失控初期的特征尤为重要，因此，应加强对动力电池火灾特点的培训，提高对储能电站火灾事故探测预警及火灾初期的处置能力。

（6）完善储能电站火灾应急预案

应编制储能电站火灾事故应急预案，预案至少应包括组织执行机构、报警接警程序、处置对策、应急疏散、通讯联络、后勤保障等内容，同时，针对动力电池火灾事故的特点，还应建立储能电站典型诱导热失控事故的专项预案，并定期进行演练。同时，应加强专职消防队伍建设，在储能电站内配备专门的灭火救援器材和个人防护装具，提高储能电站的自我处置能力。

1.3.2 回收服务网点消防安全现状

2019年10月31日，工信部发布了《新能源汽车动力蓄电池回收服务网点建设和运营指南》，提出了新能源汽车废旧动力蓄电池以及报废的梯次利用电池（以下统称废旧动力蓄电池）回收服务网点建设、作业以及安全环保要求，同时要求已建设的回收服务网点如不符合本指南要求，应在本指南实施之日起6个月内完成整改，该指南对回收服务网点提出了消防安全要求，主要包括以下几个方面：

（1）回收服务网点应配套搬运工具、废液收集装备、温湿度监测装置、贮存货架、消防安全设备等基础设施。贮存B类及C类废旧动力蓄电池的回收服务网点应配置放电柜、应急盐水池等专业设施。集中贮存型回收服务网点还应配备防爆箱等设施。

（2）回收服务网点应安装通风设施，配备消防沙箱、水基灭火器、消防栓、消防喷淋系统等消防设备，消防设备数量及灭火器类型应符合《建筑灭火器配置设计规范》（GB50140）的要求。集中贮存型回收服务网点应参照《建筑设计防火规范》（GB 50016）的要求设计厂房类型、耐火等级、安全疏散和防火间距等，厂房应不低于丙类要求，耐火等级应不低于二级，同时配备烟雾报警装置、红外热成像监控装置等安全防护设施。

（3）回收服务网点应配备必要的安全管理人员，安全管理人员应经过培训掌握消防知识并熟悉废旧动力蓄电池的种类、特性，具备应急处置能力等。集中贮存型回收服务网点应配备24小时值班的安全管理人员。

（4）回收服务网点应参照《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》（GB/T 29639）的要求编制安全环保应急预案，具有安全环保应急处置能力。定期检查贮存废旧动力蓄电池的状态，如发现安全、环保等隐患应及时采取措施处置并移交至综合利用企业。

1.4 本项目拟开展的工作

本项目针对动力电池梯次利用全过程中的消防安全问题与关键技术，从风险辨识、评估和控制的角度的角度，提升动力电池梯次利用的消防安全保障能力。重点研究动力电池梯次利用全过程的火灾风险评估技术，识别关键风险源，建立典型应用场景消防安全评估方法；研究移动充电车、分布式储能电站火灾防控技术，建立移动充电车、分布式储能电站典型诱导火灾模型，开发多参数融合的层级式预警与灭火装置，提出火灾扑救策略；编制动力电池梯次利用典型场所防火设计、灭火系统效能评价、消防安全管理等方面的标准。

3 锂离子电池的燃烧性能研究

过热和过充电是锂电池发生着火、爆炸的最主要原因之一，Rivière P 等基于锥形量热仪及 FTIR、FID 检测技术，研究了锂电池在热辐射条件下生成的烟气成分，发现锂电池热失控会产生大量 CO、CO₂、NO、SO₂、HCl、HF 及 THC 等有毒气体，存在爆炸的风险。Andersson P 等基于锥形量热仪及 FTIR 分析技术，研究了锂电池在 LPG 火作用下的 HF 及 PO₂F₃ 生成规律，发现 PO₂F₃ 生成量约为 HF 生成量的 5-40%，但其毒性更大。厘清锂离子电池的燃烧特性，对锂离子电池火灾防护具有重要意义。

3.1 锂离子电池单体的热失控特性研究

3.1.1 磷酸铁锂电池热触发的失控特性

本小节针对磷酸铁锂电池单体，在开放空间内通过加热板加热的方式触发热失控，在有无外部点火源两种情况下开展热失控实验，电池单体通过两块金属板加紧以模拟锂电池在正常工作时的约束状态，磷酸铁锂电池的容量为 50Ah，SOC 为 100%。使用热电偶采集锂电池单体侧面、正极极耳、泄压阀口及上方位置的温度，温度测点布置如图 3-1（a）所示，测试过程中通过摄像头实时记录电池单体的热失控进程，实验实物如图 3-1（b）所示。

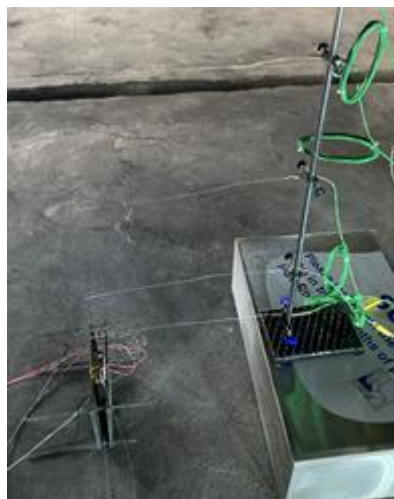
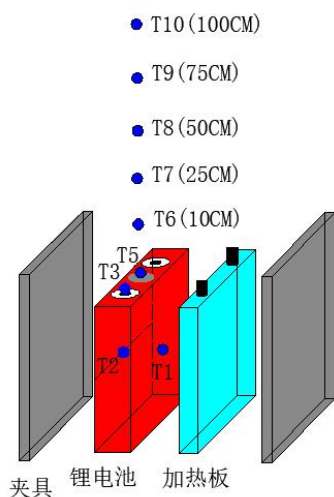


图 3-1（a） 温度测点布置示意图

图 3-1（b） 热失控实验实物图

图 3-1 锂电池热失控实验温度布置图与实物图

3.1.1.1 无外部点火源条件下的热失控实验

采用 3.1.1 所述方法进行磷酸铁锂电池的热失控实验，开始加热后，锂电池

侧面、正极极耳及泄压阀位置的温度随即快速上升，如图 3-2 所示。

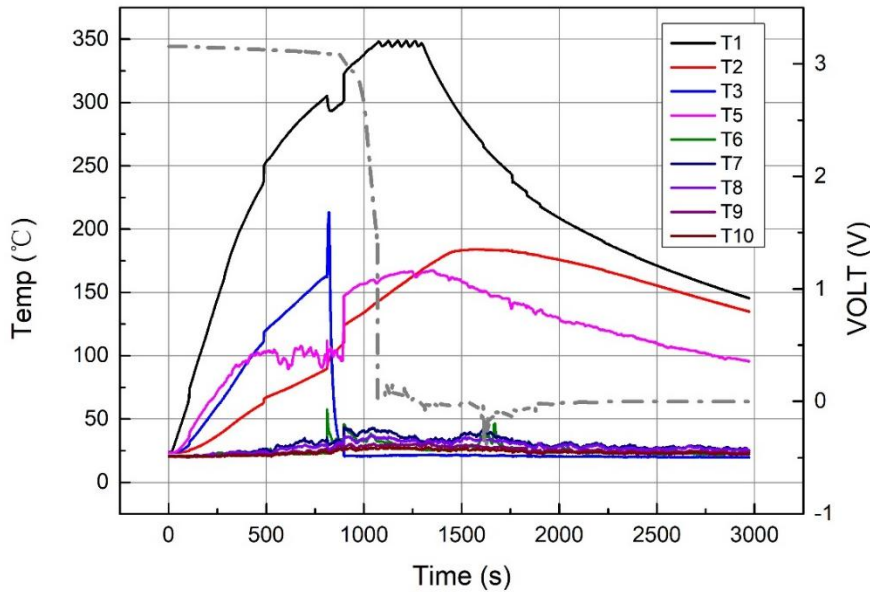


图 3-2 锂电池热失控的温度与电压变化

加热板的温度在约 1000s 内上升至约 350°C，并保持基本恒定，升温速率约为 0.31°C/s；泄压阀与正极极耳处的温度上升速率期初基本相同，在 400s 内从 23°C 上升到了约 100°C，升温速率约为 0.2°C/s，随后泄压阀位置的温度基本保持稳定，而正极极耳处的温度仍按 0.2°C/s 的速率继续上升，这主要是因为正极集流体一般使用铝金属，锂电池内部热失控产生的热量可通过集流体迅速传导至极耳处，而泄压阀处材料的热传导速率一般比较慢，且与锂电池内部没有直接接触，因此在温度达到 100°C 左右后，产热速率与外界吸热速率基本相同，因此此处的温度基本稳定。在加热约 10min 后，正极极耳处的热电偶出现脱离，快速恢复到常温，后续温度未能有效检测到。在加热约 14min 后，锂电池侧面的温度约为 130°C，泄压阀开启，并开始冒出白烟，泄压阀处的温度由于内部高温烟气的影晌迅速上升至 150°C，锂电池冒出的烟气量呈现先变多，后变少的趋势，如图 3-3 所示。

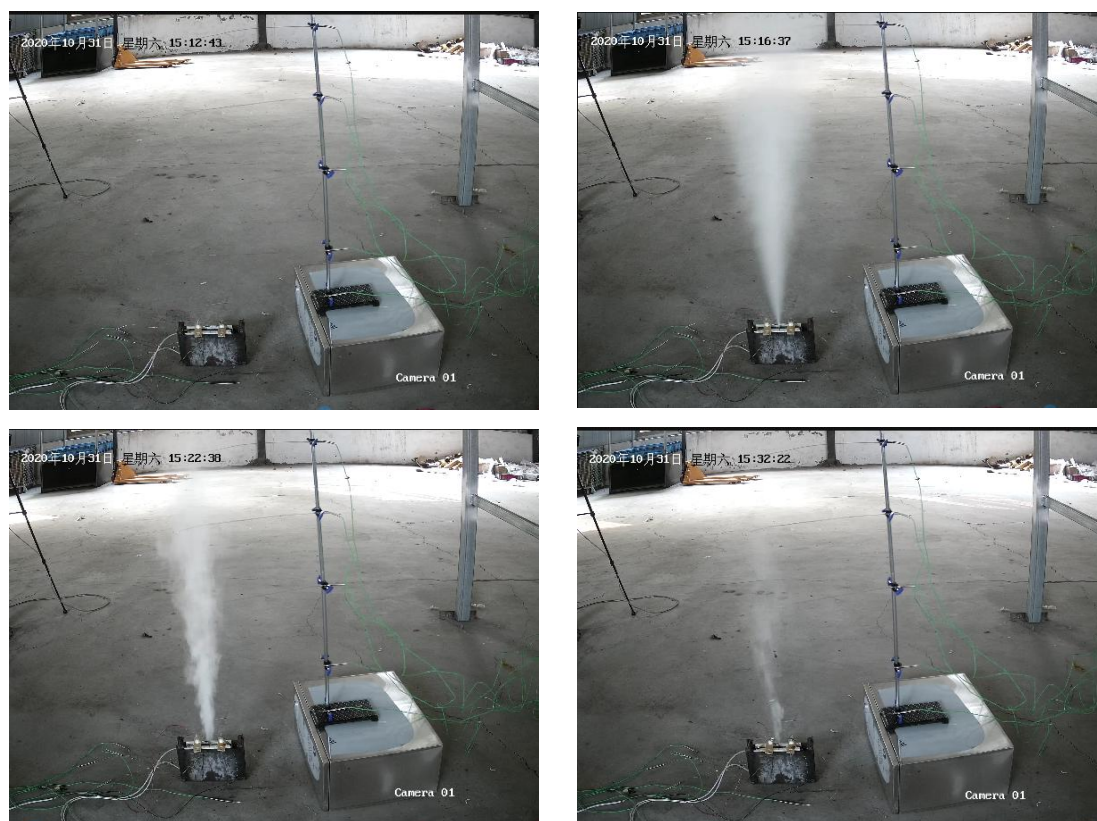


图 3-3 热失控实验典型过程截图

在整个加热的过程中，锂电池的电压缓慢降低，直到泄压阀开启时，迅速降为 0V。在本小节的测试条件下，该款磷酸铁锂电池的热失控诱导时间约为 14min，整个冒烟过程持续约 20min，热失控的最高温度约为 184℃，且未出现明火，但需关注其逸出气体的毒性和爆炸性，实验进程如表 3-1 所示。

表 3-1 热失控实验进程

时间	事件
15:02:40	开始实验
15:16:37	电池开阀喷烟
15:35:11	几乎不再有烟冒出
15:38:00	结束实验

3.1.1.2 有外部点火源条件下的热失控实验

为研究锂电池在有外部点火能量情况时发生热失控的状态，通过在磷酸铁锂电池泄压阀正上方 10cm 处布置静电点火器，可模拟锂电池在热失控的同时遇到外界短路等点火能事故场景。锂电池泄压阀开启后，启动静电点火器，在持续点火约 24s 后，锂电池被点燃，如图 3-4 所示。

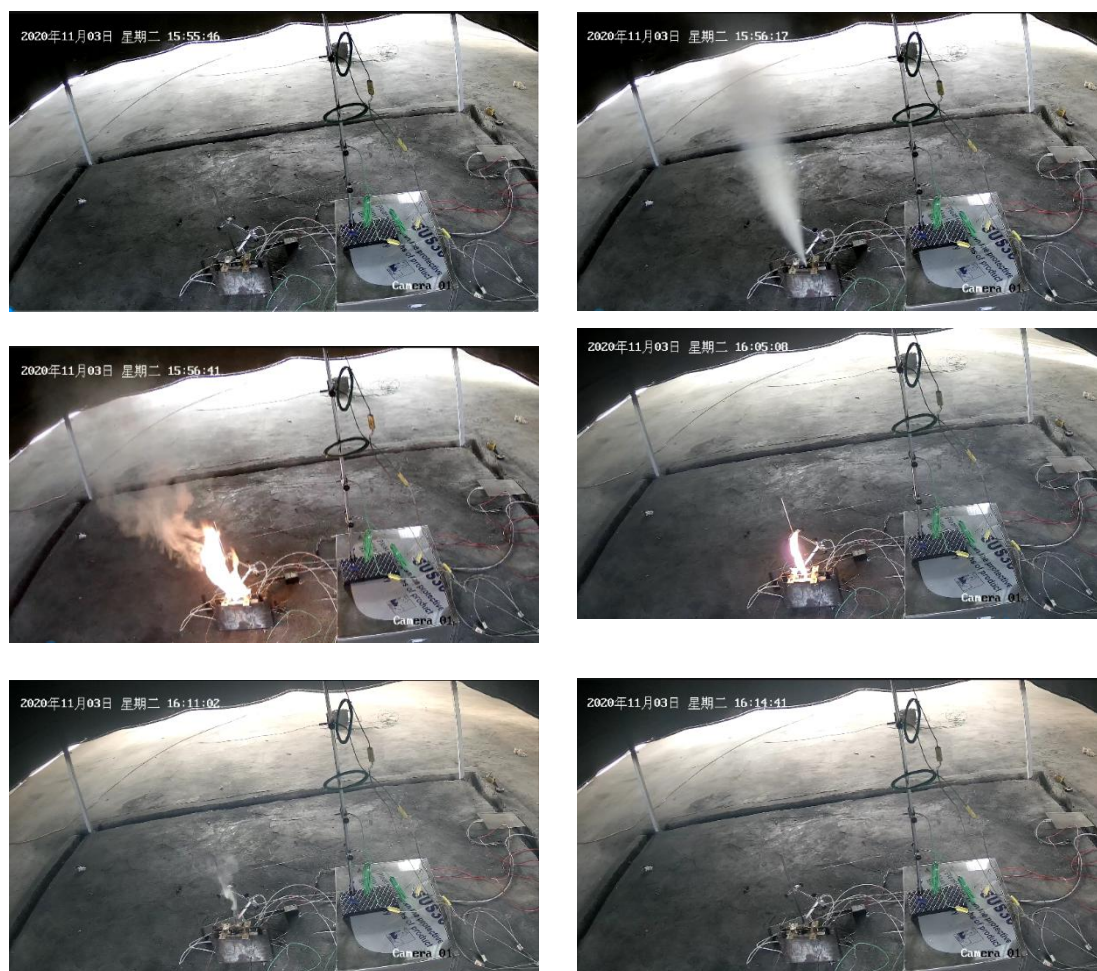


图 3-4 热失控实验典型过程截图

通过对锂电池正上方不同高度处温度的测量，火焰的最高温度达 740℃，如图 3-5 所示，说明磷酸铁锂电池热失控产生的气体具有可燃性，存在较大的火灾风险。

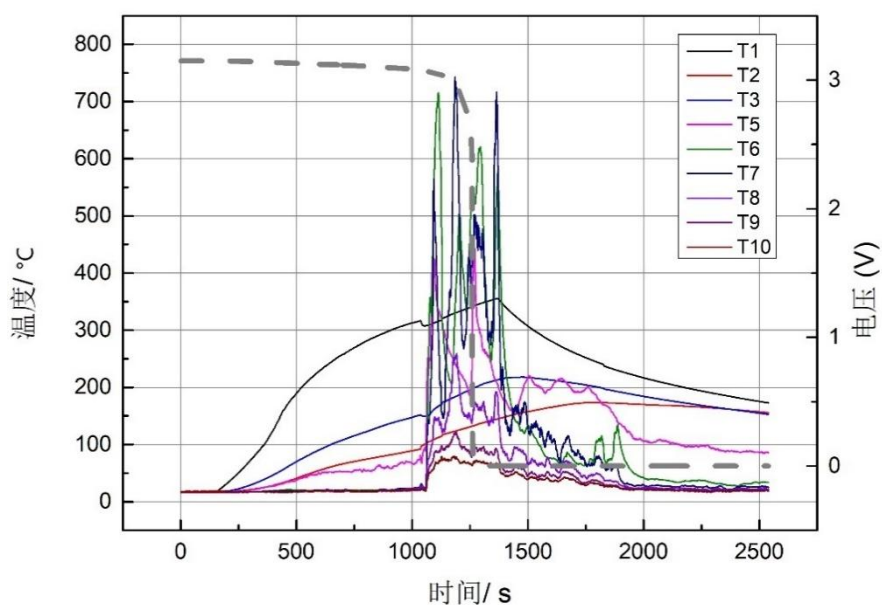


图 3-5 锂电池热失控的温度与电压变化

整个燃烧过程持续近 15min，燃烧时间较长，这主要是因为火焰集中于泄压阀处，火焰面积较小，因此锂电池内部可燃物消耗较慢，整个实验进程如表 3-2 所示。

表 3-2 热失控实验进程

时间	事件
15:41:14	开始实验
15:55:13	有烟冒出
15:56:17	电池开阀喷出浓烟（尝试点火）
15:56:41	点燃浓烟，出现明火
16:03:20	火势减小
16:11:03	火焰熄灭，轻烟冒出
16:16:30	不再有烟冒出，实验结束

3.1.2 锂电池单体过充电诱导的热失控特性

本小节针对磷酸铁锂电池单体，在开放空间内通过过充电的方式触发热失控，在有无外部点火源两种情况下开展热失控实验，电池单体通过两块金属板加紧以模拟锂电池在正常工作时的收约束状态，磷酸铁锂电池的容量为 50Ah，SOC 为 100%，充电电流为 50A。使用热电偶采集锂电池单体侧面及上方位置的温度，温度测点布置如图 3-1（a）所示，测试过程中通过摄像头实时记录电池单体的热失控进程，实验实物如图 3-6 所示。

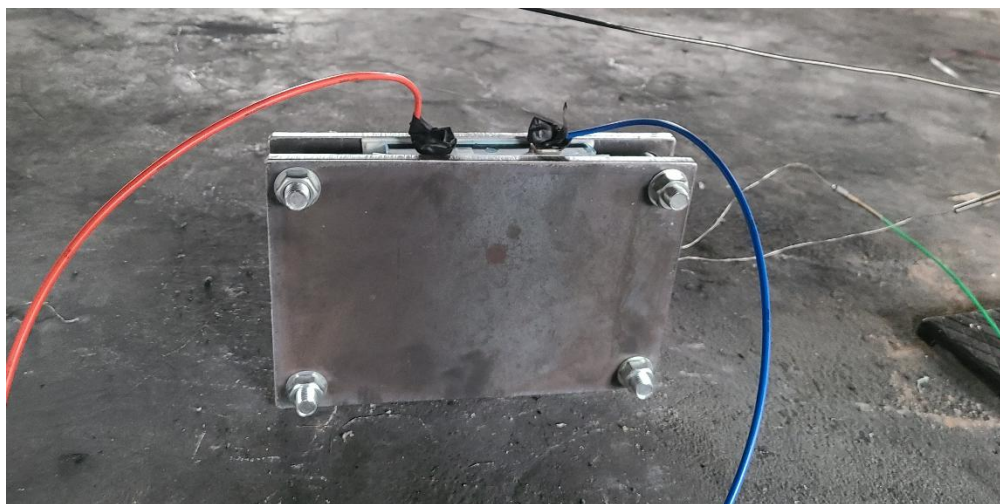


图 3-6 热失控实验实物图

3.1.2.1 无外部点火源条件下的热失控实验

采用 3.1.2 所述方法进行磷酸铁锂电池的热失控实验，测试结果表明，锂电池依次经历了稳定阶段、准失控阶段和热失控阶段三个阶段。开始充电后，锂电池侧面温度随即缓慢上升，充电 70min 后，表面温度从 10°C 升至 28°C，升温速率较低，此时锂电池的电压基本保持稳定，如图 3-7 所示。随后温度上升速率和电压上升速率明显标快，表面温度在 1000s 内从 28°C 上升至 63°C，电压在 700s 内从 4.66V 上升至 6.23V，在这个阶段，锂电池内部已经发生了副分解反应，产生一定的热量，随时有可能发生热失控。

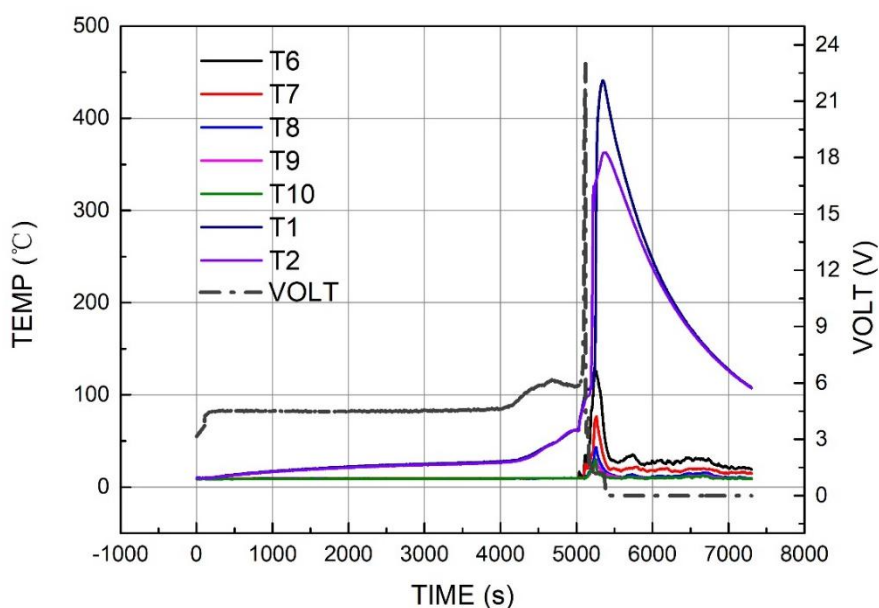


图 3-7 锂电池热失控的温度与电压变化

充电约 1h24min 后，磷酸铁锂电池泄压阀开启，并伴随有白色烟气产生，如图 3-8 所示。此时电池电压迅速上升至 22V 左右，而后快速降为 0V，充电停止。



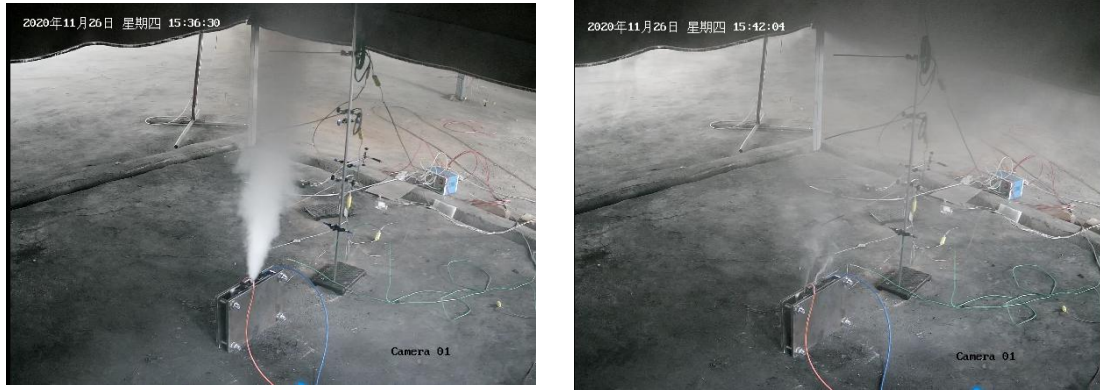


图 3-8 热失控实验典型过程截图

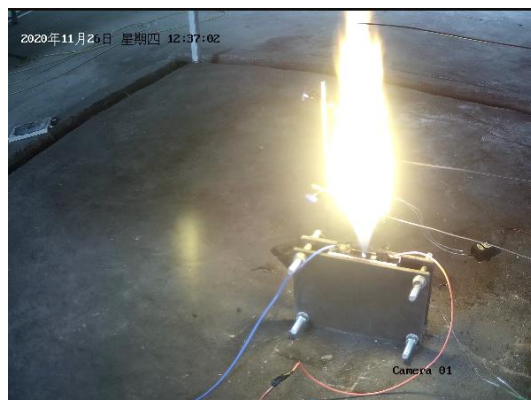
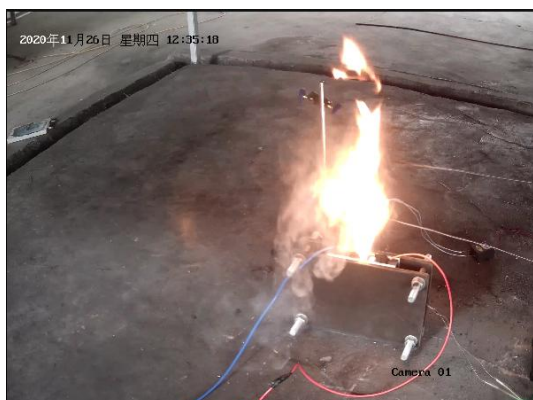
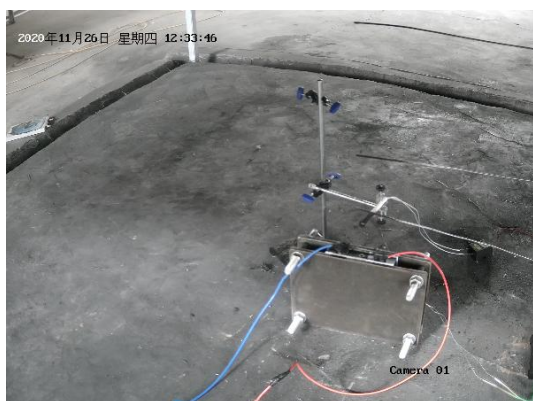
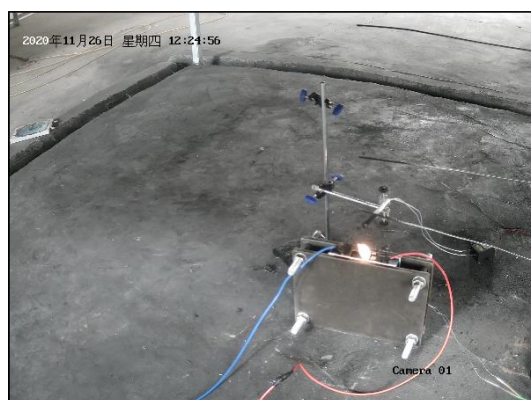
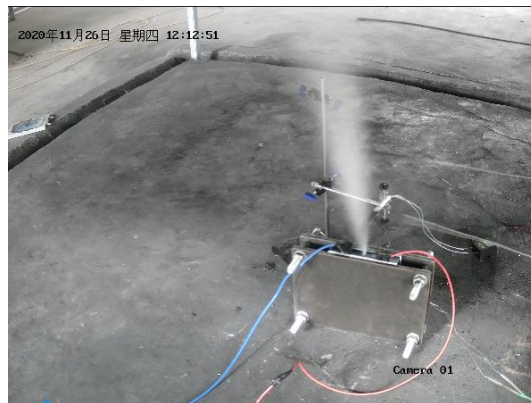
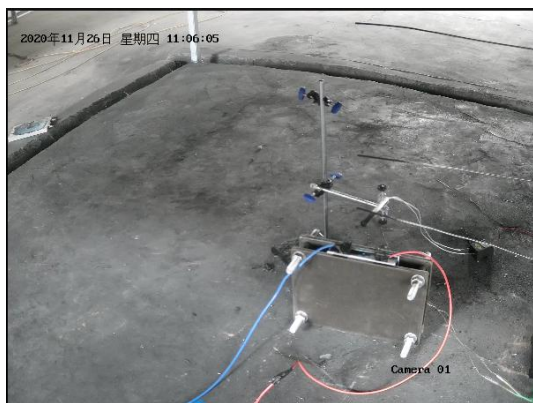
锂电池泄压阀开启后，侧面的温度迅速上升，最高温度达 450°C 左右，这明显要高于用加热方式触发热失控时的温度，说明在过充电条件下，锂电池从外部引入了电能，进一步转化为化学能，在热失控时反应速率更快，放出能量更多。通过对泄压阀正上方不同位置的温度监测，发现锂电池逸出气体的温度约为 127°C，实验进程如表 3-3 所示。

表 3-3 热失控实验进程

时间	事件
14:11:03	开始实验
15:35:04	电池开阀，喷出烟气
15:36:00	电解液溅射
15:36:17	烟雾变浓
15:41:44	烟雾变淡
15:47:36	烟气消失
15:58:00	实验结束

3.1.2.2 有外部点火源条件下的热失控实验

为研究锂电池在有外部点火能量情况时发生热失控的状态，通过在磷酸铁锂电池泄压阀正上方 10cm 处布置静电点火器，可模拟锂电池在热失控的同时遇到外界短路等点火能事故场景。锂电池泄压阀开启后，启动静电点火器，在持续点火仅约 3s 后，锂电池被点燃，且火焰强度较大，明显要大于通过使用加热方式触发时的火焰强度，如图 3-9 所示。



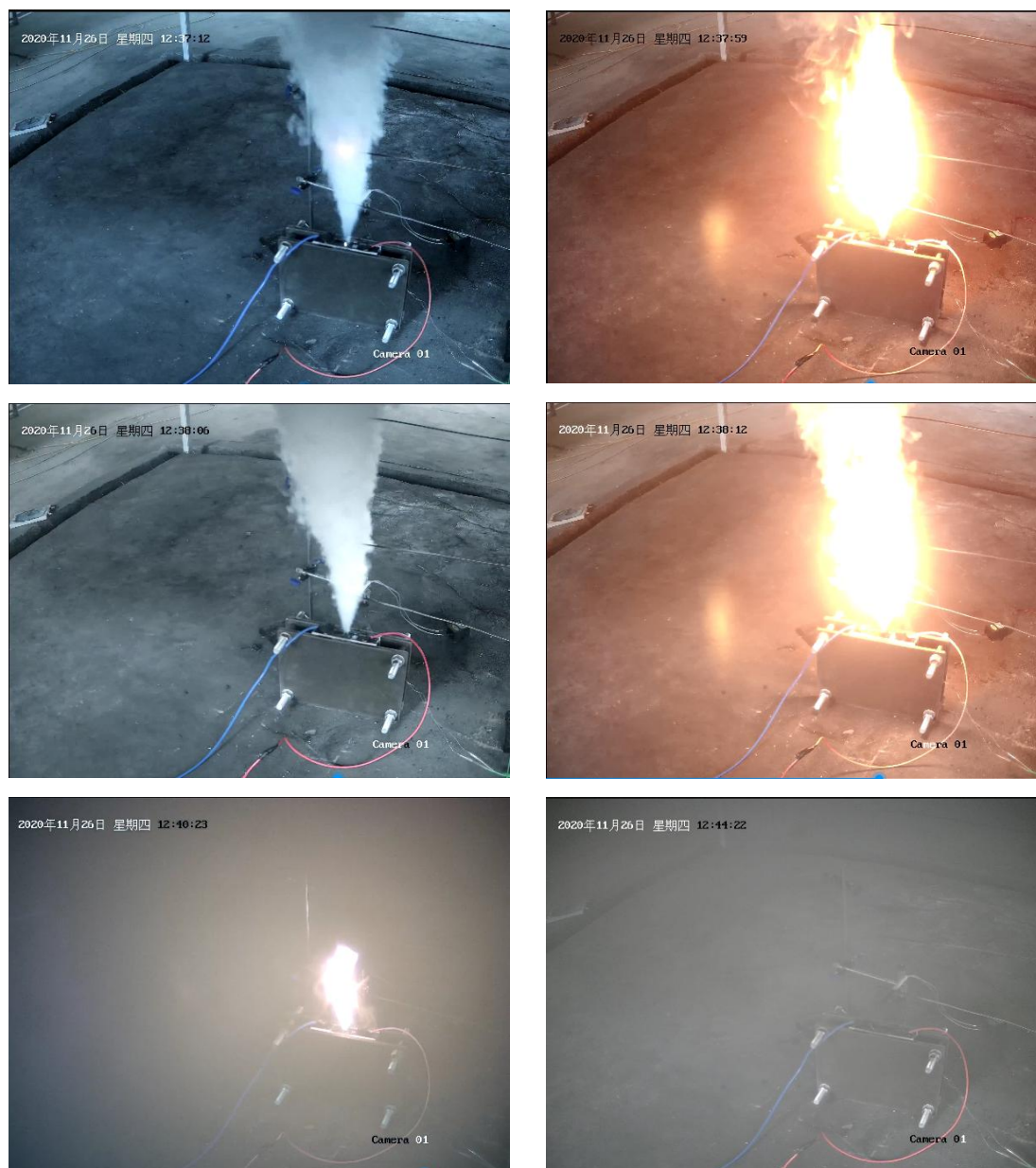


图 3-9 热失控实验典型过程截图

磷酸铁锂电池被点燃后，立刻停止充电，此时火焰温度约为 700°C ，约 2min 后，火焰强度明显减小，此时锂电池的电压约为 3.8V，与充电起始电压变化不大，说明此时锂电池内部并未发生内短路，内部的正负极材料、电解液未分解完全，因此仍保持了部分的完整性。为继续研究锂电池的热失控状态，在停止充电约 500s 后，再次开启充电器进行充电，此时火势明显增大，再次停止充电，停止充电约 13min 后，明火消失，此时电压仍为 3.8V 左右，明火持续时间约为 24min；在明火消失后，再次启动充电器进行充电，并持续点火，在充电 12s 后，点燃浓烟，出现明火，此时火焰温度约为 700°C ，与第一次的明火温度相当，停止充电，明火持续燃烧约 2min 后，突然消失，并伴有大量的浓烟喷出，再次充电并

点火，在充电 47s 后，再次点燃浓烟，火势较大，立刻停止充电，此次明火持续时间仅为 6s，而后突然熄灭，再次充电 7s 后，明火再次点燃，火焰温度较高，最高温度达 1000°C，此时电池电压降为 0V，明火持续约 7min 后熄灭，热失控结束，整个热失控过程中的温度和电压变化如图 3-10 所示。

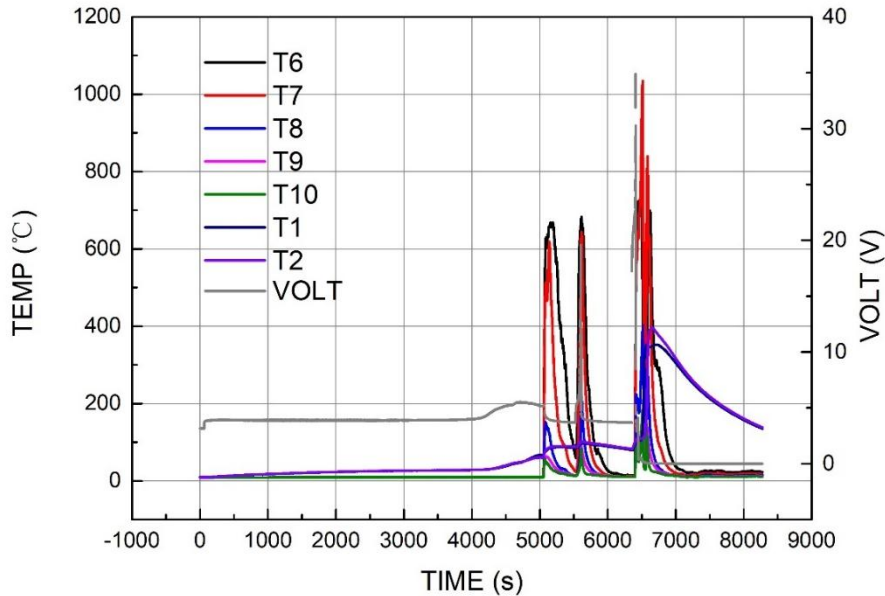


图 3-10 锂电池热失控的温度与电压变化

锂电池的热失控进程经历了四次“充电—点火—减弱/熄灭”过程，这主要是由于该锂电池火灾的可燃物主要来源于泄压阀处由于电池内部副反应产生的可燃气体，停止充电后，锂电池内部的热失控反应速率急剧降低，产生的可燃气体减少，因此表现为火势减弱或熄灭，当锂电池发生内短路时引发的热失控反应最剧烈，因此火焰温度最高，约为 1000°C，整个热失控进程如表 3-4 所述。

表 3-4 热失控实验进程

时间	事件
10:49:35	开始实验
12:12:51	电池开阀喷出浓烟（开始点火）
12:12:54	点燃浓烟，火势较大（停止充电）
12:14:55	火势减小
12:21:20	火势增大（再次充电）
12:22:30	火势减小（停止充电）
12:35:05	明火消失，冒出轻烟（再次充电）
12:35:17	烟雾变大，并且再次点燃（停止充电）

12:35:29	火势变大
12:37:12	明火突然消失，浓烟喷出（再次充电）
12:37:59	再次点燃浓烟，火势较大（停止充电）
12:38:05	明火突然消失，浓烟喷出（再次充电）
12:38:12	第四次点燃浓烟，火势较大（停止充电，电压降为 0V）
12:38:43	火势减小
12:45:20	火焰熄灭
12:46:53	实验结束

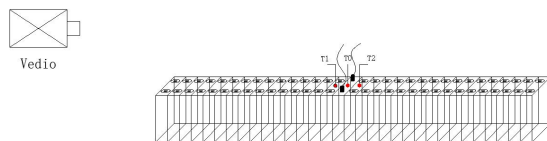
3.2 三元锂电池的热失控及蔓延特性

3.2.1 锂电池

本节选取软包三元锂电池为试验对象，镍钴锰比例为 6: 2: 2，锂电池单体的尺寸为 232mm×160mm×9.5mm，开路电压为 4.2v，容量为 38Ah，SOC 为 100%，三元锂电池模组采用 32 片锂电池单体串联组成。

3.2.2 试验模型

本章在开放空间内，采用过充电的方式开展锂电池模组的热失控试验，选取三元锂电池模组正中间的电池单体作为过充电的触发对象，断开该单体与其他电池的电连接，在触发锂电池及相邻电池单体上布置热电偶，用于监测锂电池模组热失控及火焰传播过程中的温度变化；试验过程中，实时记录锂电池的电压变化，实验示意图如图 3-11 所示。



(b) 三元锂电池模组过充实验示意图

图 3- 11 实验示意图

3.2.3 试验方法

开展三元锂电池模组的热失控试验时，首先将充电线连接到触发电池单体的两端，并在固定位置布置热电偶，然后启动温度、气体和电压数据记录系统，最后打开充电机开始充电，试验过程中，采用摄像仪实时记录锂离子电池的热失控过程。

3.2.4 三元锂电池模组过充蔓延特性分析

三元锂电池模组开始充电后，锂电池表面温度及电池电压变化较慢，充电约 2.5 小时后电压开始缓慢上升，约 3 小时后，锂电池温度开始缓慢上升。充电约 5 小时后，锂电池模组开始泄露出少量电解液，此时温度约为 120°C，相邻两片电池的温度分别为 80°C 及 105°C。在继续充电约 7 分钟后，锂电池开始冒出少量白烟，紧接着 4 秒后，充电锂电池上部破裂，逸出的白烟变多，并从电池底部喷射出大量火星，锂电池瞬间被点燃，整个冒烟到着火的过程仅在几秒内完成，火焰呈喷射状，强度较大，此时火焰温度约为 750°C，如图 3-12 所示，电压瞬间降为 0。电池维持强烈燃烧约 35 秒后，火焰喷射趋势减缓，但强度依然很大，18 秒后，锂电池发生热扩散，火焰再次呈喷射状，强度变大。锂电池燃烧初始阶段由于火焰强度较大，热扩散现象不明显，燃烧的中后期总共发生了 25 次扩散，每次扩散 1 片电池，最终，所有锂电池都参与了燃烧。整个三元锂电池模组的持续燃烧时间约为 33 分钟，锂电池模组着火状态如图 3-13 所示。

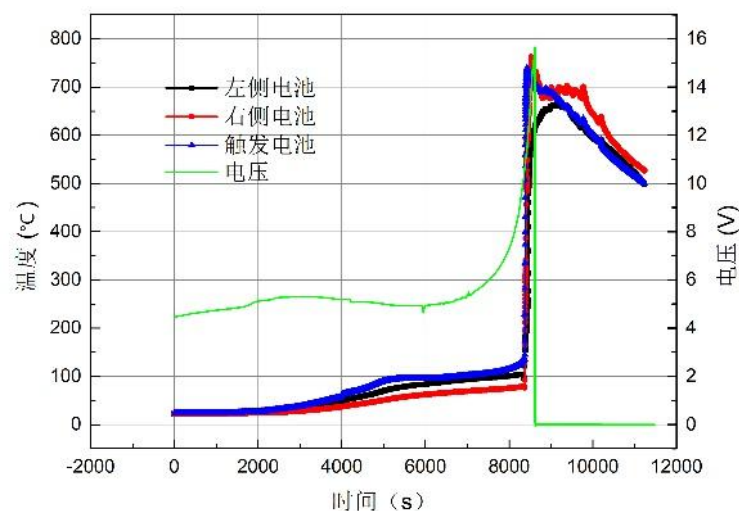


图 3-12 三元锂电池模组热失控过程的温度变化



图 3-13 三元锂电池模组的燃烧状态

3.2.5 三元锂电池的火焰传播规律分析

三元锂电池模组燃烧过程中出现了明显的火焰传播和蔓延现象，通过对观测到的 25 次锂电池火焰传播扩散间隔时间的统计和分析，结果显示，锂电池模组燃烧前期的温度较高，火焰传播速度较快，前 10 次的扩散间隔时间都在 20 秒左右，如图 3-14 所示。锂电池模组燃烧的后期，火焰传播速度逐渐下降，扩散间隔时间呈现交替上升和下降的变化规律，最短间隔时间为 50 秒，最长间隔时间为 179 秒。

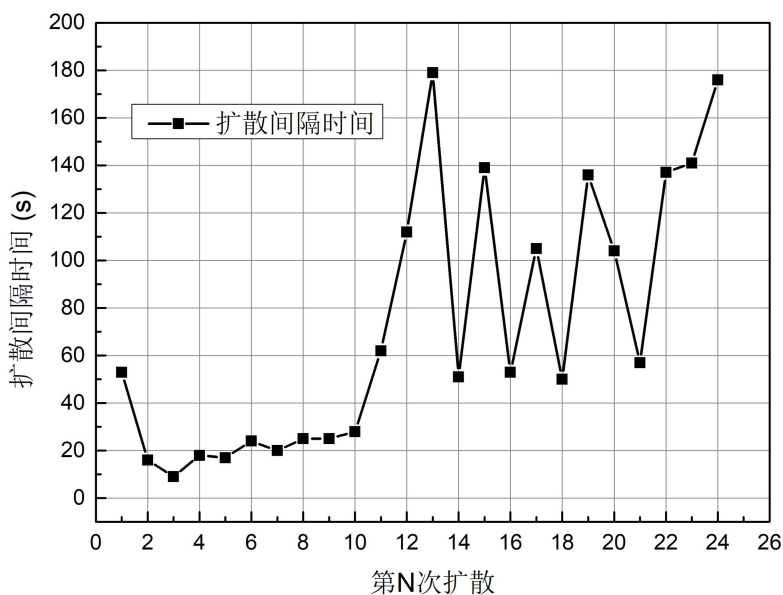


图 3-14 锂电池扩散间隔时间的变化规律

3.3 锂电池模组的量热测试研究

3.3.1 基于耗氧原理的测试系统

耗氧法（Oxygen-consumption Method）是火灾研究领域测量热释放速率的重要方法之一，其原理是根据单位质量氧气消耗所产生的能量是 13.1MJ/kg，该值是由 Huggett 在大量聚合物燃烧实验数据整理基础上得来的。锥形量热仪可根据耗氧原理计算锂电池火灾过程中的热释放速率、总热释放量，烟气生长速率、总烟气量等火灾特征参数，主要由燃烧室、集烟罩、气体传感器、烟密度传感器、排烟系统等组成。

3.3.1.1 燃烧室

燃烧室如图 3-15 所示。



图 3-15 测试系统俯视图

3.3.1.2 排烟系统

如图 3-16 所示，通过变频器控制排烟风机的风量大小，使用差压探头及差压传感器的数据测算排烟风量的大小。



图 3-16 排烟系统示意

3.3.1.3 量热测试段示意

热释放速率测试分为体积流速测算系统和烟气分析系统，如图 3-17 所示。

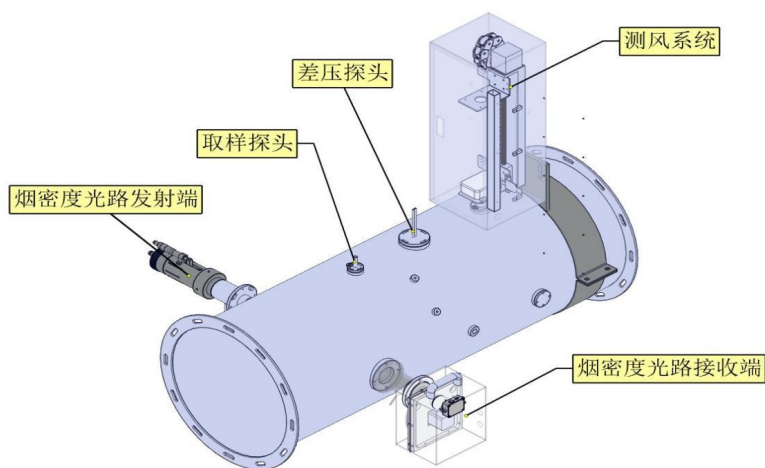


图 3-17 测试段烟管

3.3.1.4 体积流速测算系统

体积流速测算系统包括差压探头（如图 3-18）、差压传感器以及 PLC 数据采集系统和 PC 的集成数据处理系统（图 3-19）组成。

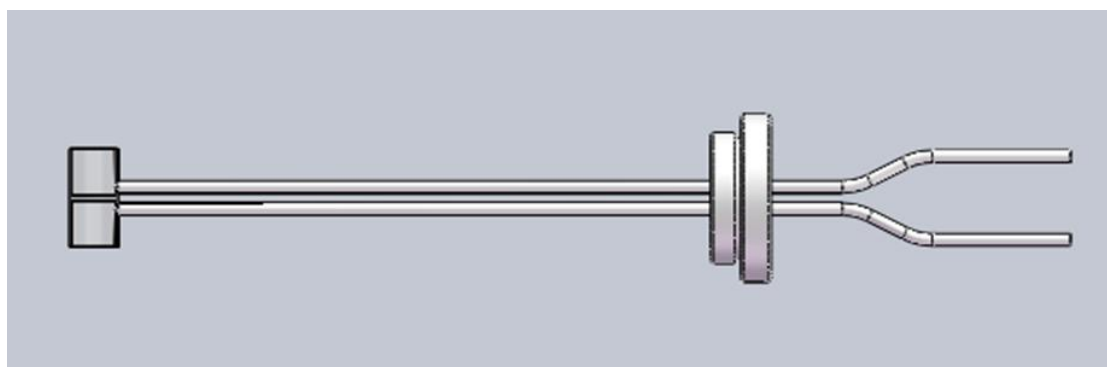


图 3-18 差压探头



图 3-19 风速测算系统

3.3.1.5 烟气分析系统

烟气分析系统（图 3-20）包括取样探头（如图 3-21）、一级过滤、二级过滤、

取样泵、冷凝器、三级过滤、干燥剂、气体分析仪与集成数据处理系统组成。



图 3-20 烟气分析系统

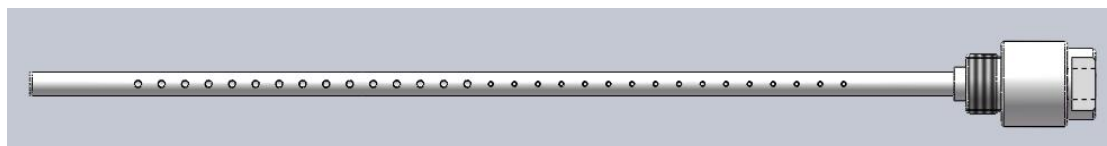


图 3-21 气体取样探头

3.3.1.6 光路测试系统

光路测试系统示意如图 3-22 所示，主要包括光源、光源调节装置、透镜、滤光片、光接收器、光路校准系统。

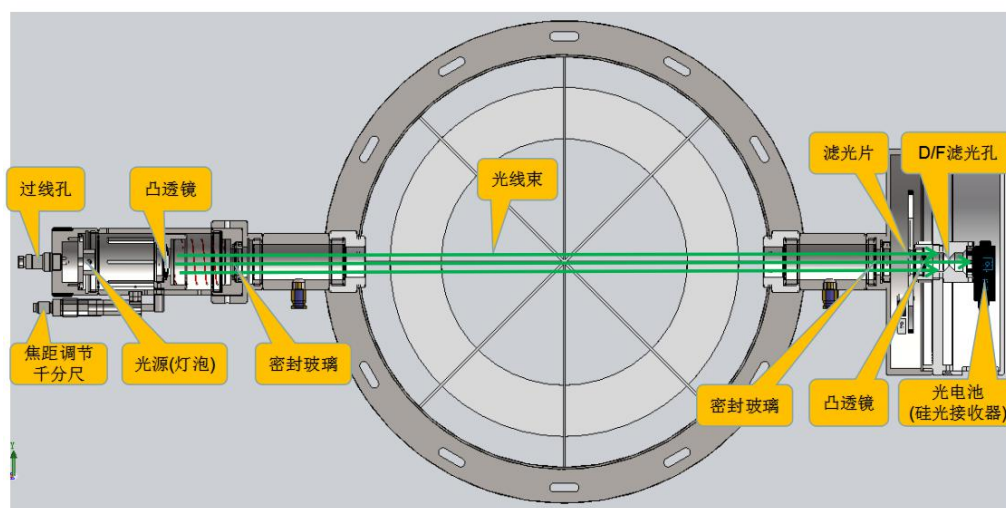


图 3-22 光路测试系统示意

3.3.1.7 管道流速分布测试系统

管道流速分布测试系统（图 3-23）通过电机控制风速仪运动至不同的位置并测量该位置的风速以测得排烟管道内的气体流速分布状态。

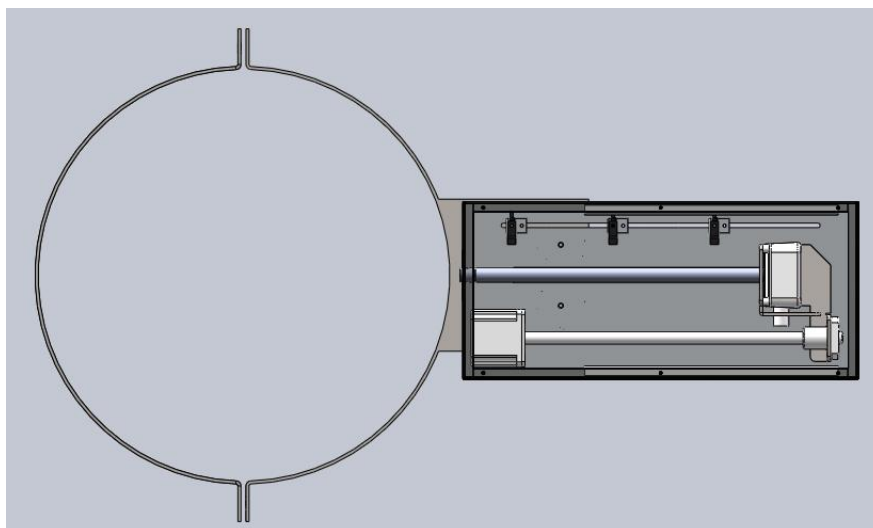


图 3-23 管道流速分布测试系统

3.3.1.8 燃烧控制系统

燃烧控制系统（如图 3-24 所示）包含燃烧器/流量及压力控制系统，安全管路系统，包括减压阀、电磁阀、质量流量控制器等，可以通过拍下急停或停止试验切断燃气。

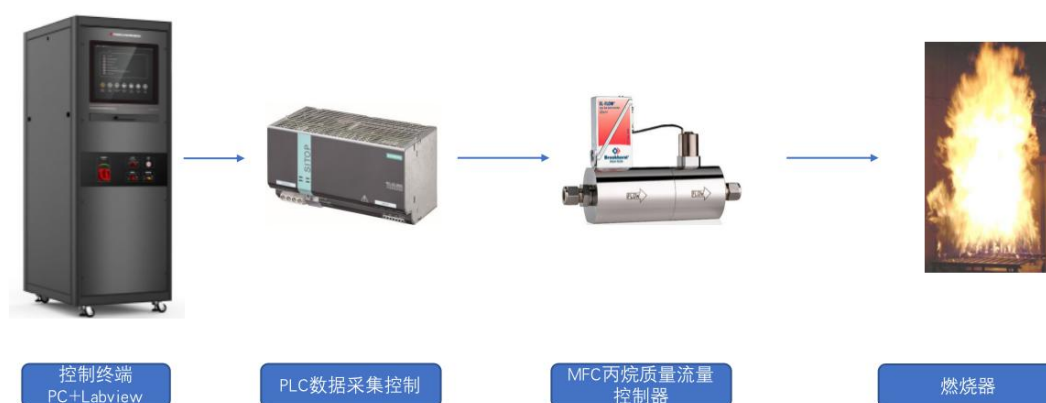


图 3-24 燃烧控制系统

燃烧控制系统通过减压阀将通入系统的燃气压力降至元器件的使用范围中，通过电磁阀的通断来控制燃气在系统中的通断，通过丙烷质量流量控制器控制燃气的流量并进行实时反馈。

在试验过程中，PC 通过 LabVIEW 软件与 PLC 通讯控制丙烷质量流量控制器中通过的燃气流量。

根据丙烷热值 46.4kJ/g，使用的丙烷质量流量控制器的流量范围为 0-2.3g/s，由此可计算燃气功率范围为 0-106KW。

3.3.1.9 热释放速率的计算

热释放速率的计算涉及到体积流速、氧气浓度初始值、氧气浓度实时值、二氧化碳初始值、二氧化碳实时值、环境中的温湿度与大气压。

$$HRR_{\text{total}} = E^1 \dot{V}_{298} x_{O_2}^a \left(\frac{\phi}{\phi(\alpha - 1) + 1} \right)$$

$$\phi = \frac{x_{O_2}^0 (1 - x_{CO_2}) - x_{O_2} (1 - x_{CO_2}^0)}{x_{O_2}^0 (1 - x_{CO_2} - x_{O_2})}$$

$$x_{O_2}^a = x_{O_2}^0 \left[1 - \frac{H}{100p} \exp \left\{ 23.2 - \frac{3816}{T_a - 46} \right\} \right]$$

3.3.2 测试样品与方法

本小节针对磷酸铁锂电池模组，在开放空间内通过加热板加热的方式触发热失控，锂电池模组为 16 串 2 并，共 32 个电芯，容量为 180Ah，SOC 为 100%，模组电压为 51.2V，电池模组结构如图 3-25 所示。在 8 号和 9 号电芯中间布置与电芯尺寸相同的加热板，加热板两侧通过导热片与电芯接触，以保证热量可快速传递至相邻电芯，如图 3-26 所示。

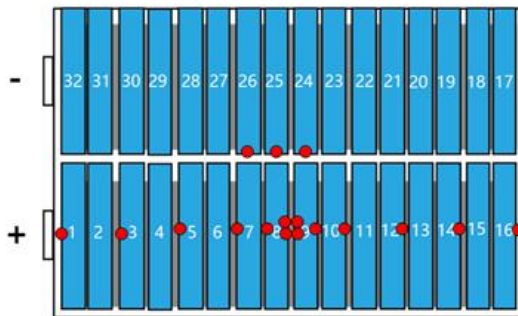


图 3-25 电池模组结构图

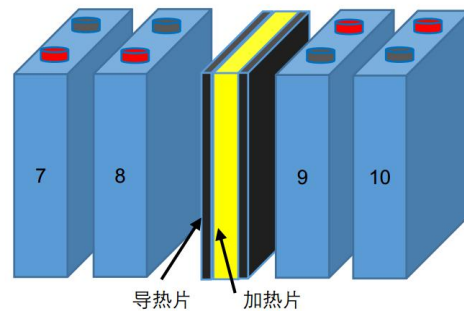


图 3-26 电池模组热失控触发示意图

在 8 号电芯右侧大面（与加热片接触面）的中心位置同一位置布 2 个热电偶，在 9 号电芯左侧大面（与加热片接触面）的中心位置也在同样在相同位置布 2 个热电偶，8 号/7 号/5 号/3 号/1 号电芯左侧及 9 号/10 号/12 号/14 号/16 号电芯右侧中心，各布 1 个热电偶，24 号、25 号、26 号电芯面对触发电芯的窄面中心，各布一个热电偶，共 17 个热电偶，如图 3-25 所示。热电偶的编号与电芯编号相同。

本节参照 UL9540A 标准中对于锂电池模组热失控性能测试时的加热方式，加热板的温度首先以 5.5°C/min 的升温速率升至 147°C，然后保持 4h 恒温，再以 5.5°C/min 的升温速率加热直到电芯发生热失控。

3.3.3 测试结果

3.3.3.1 测试温度分析

通过对锂电池模组内部温度的监测，当与加热板直接接触的电芯表面温度达到 285°C 时，触发电芯发生了热失控，此时关闭加热器，停止加热，由于锂电池内部发生热失控，促使电芯表面温度上升，热失控最高温度约为 424°C，此时被触发电芯内部发生短路，电压下降了 3.8V，即为一个电芯的电压，但相邻电芯还未发生热失控，由于散热的作用，电芯表面的温度开始下降，在 22min 内下降到了 273°C，下降了约 150°C，此时电芯突然着火，锂电池模组内的温度均急剧上升，模组内部最高温度约为 580°C，模组外表面的最高温度约为 750°C，如图 3-27 所示，模组着火时的状态如图 3-28 至 3-31 所示。

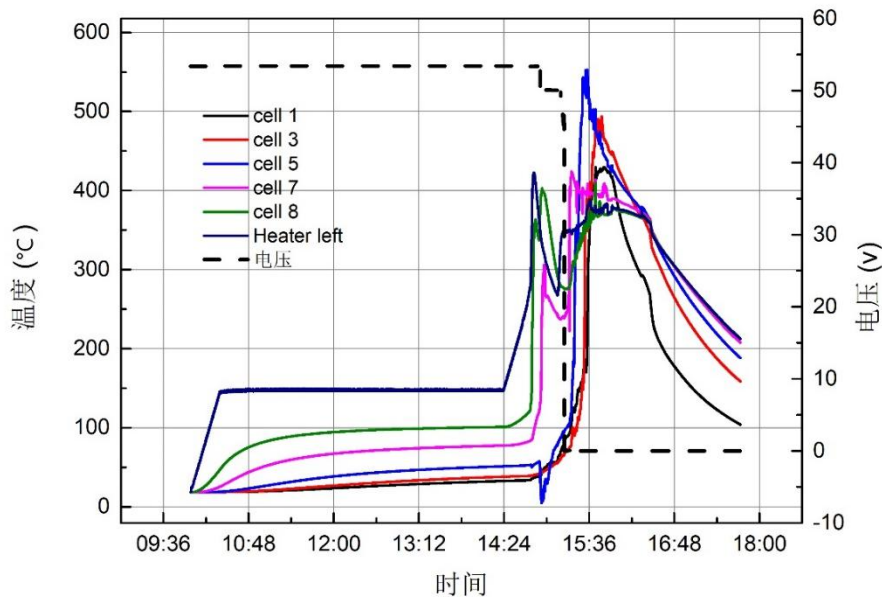


图 3-27 锂电池热失控的温度（cell1、3、5、7、8）与电压变化



图 3-28 锂电池模组热失控实验典型照片

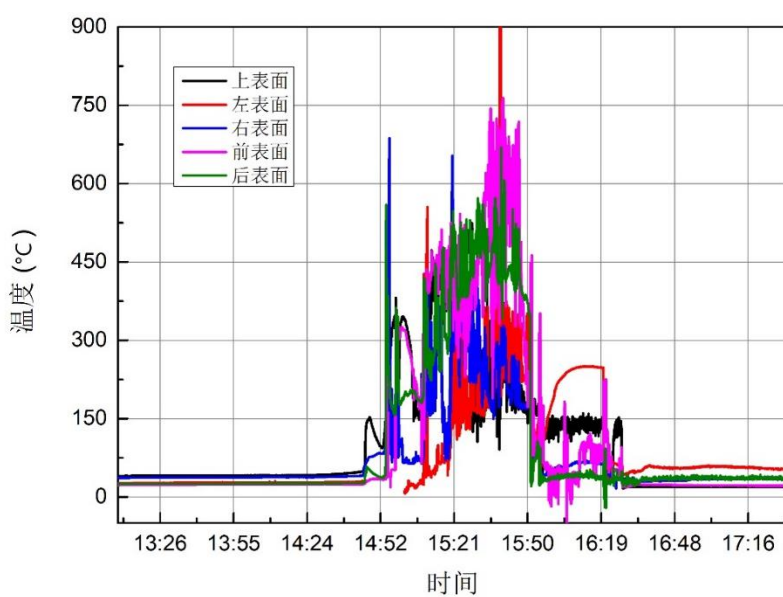


图 3-29 锂电池模组表面温度变化

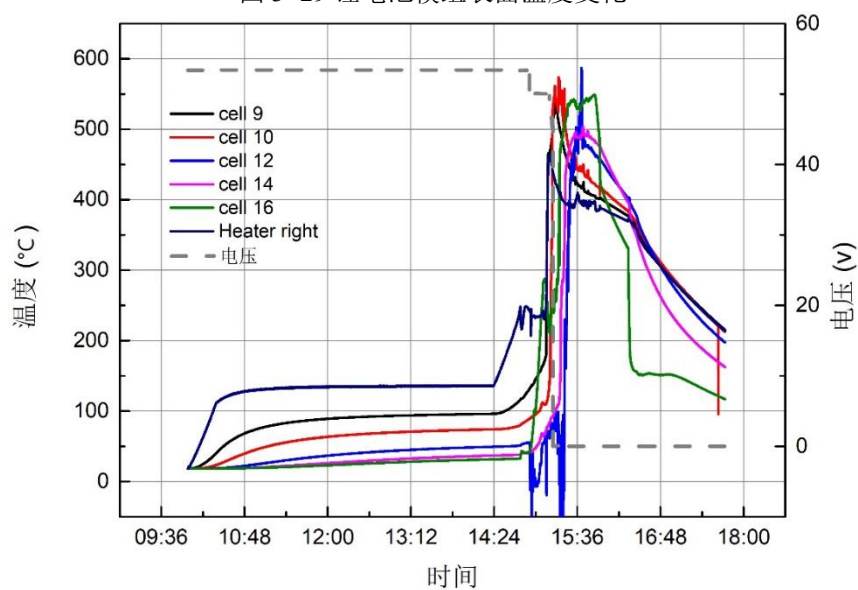


图 3-30 锂电池热失控的温度 (cell9、10、12、14) 与电压变化

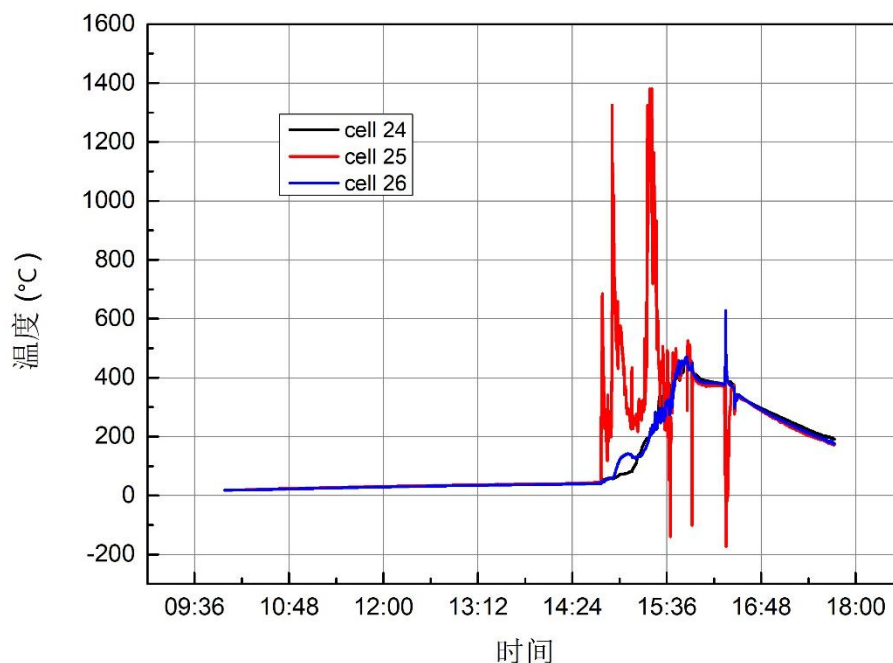


图 3-31 锂电池热失控的温度（cell24、25、26）变化

3.3.3.2 热释放速率

测试过程中，通过耗氧原理实时监测锂电池模组的热释放速率，总热释放量等参数，测试结果显示，锂电池火灾为非稳定燃烧，热释放速率呈间歇性变化，当火灾从一个锂电池单体传递到另一个单体时，热释放速率迅速上升，而后因燃烧可燃物浓度下降导致热释放速率下降，直到锂电池再发生扩展，如此周而复试，直到锂电池模组燃烧完全。锂电池模组刚起火时，由于仅有 1-2 个电芯参与燃烧，热释放速率较低，大约为 30kW，随着更多的锂电池单体参与燃烧，热释放速率逐渐增大，最大热释放速率约为 260kW，如图 3-32 所示。

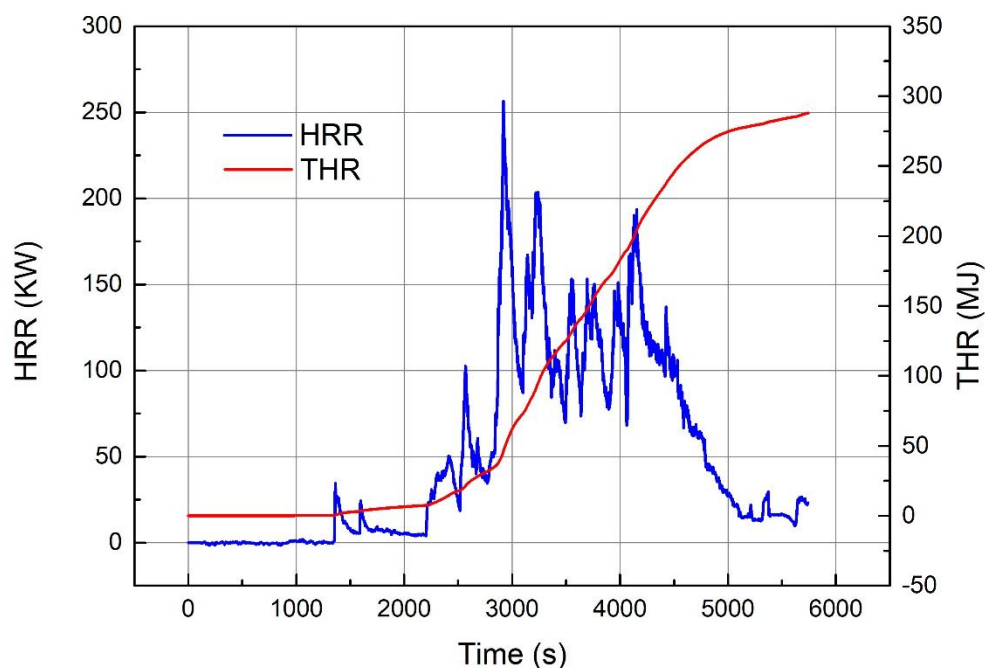


图 3-32 锂电池模组的热失控速率与总热释放量曲线

3.3.3.3 烟雾生长速率

测试过程中，通过实时监测锂电池模组的烟气生长速率、总烟气量等参数，测试结果显示，锂电池着火前冒出白烟的最大烟气生长速率约为 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ ，着火后的最大烟气生长速率约为 $1.4 \text{ m}^2/\text{s}$ ，如图 3-33 所示。

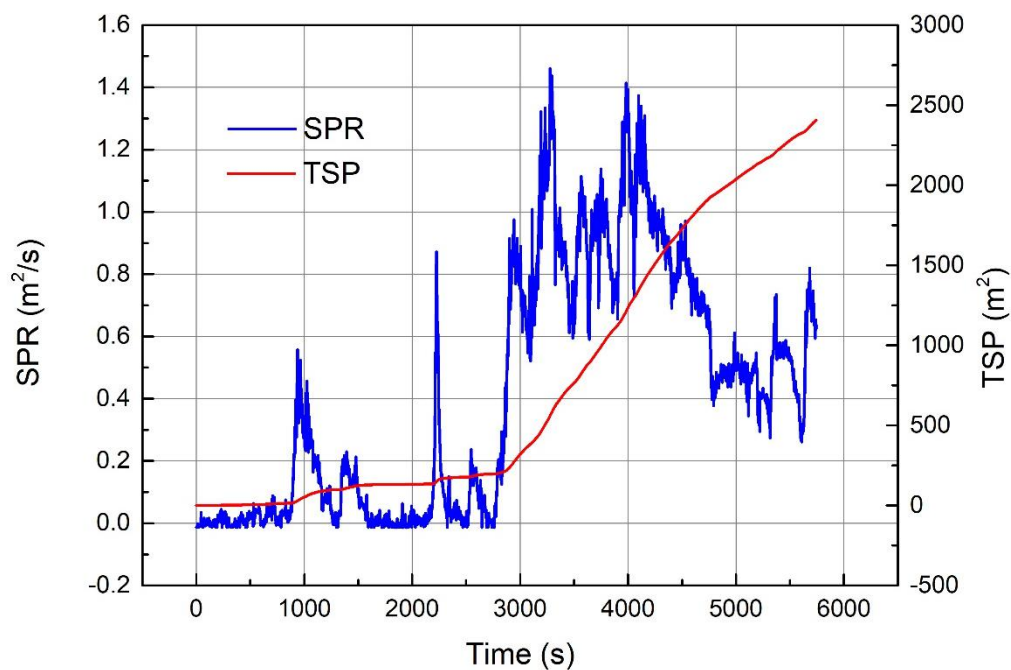


图 3-33 锂电池模组的烟气生长和总烟气量曲线

3.4 模拟储能电柜内的锂电池燃烧特性

3.4.1 锂电池

本小节采用如图 3-34 所示结构的小型磷酸铁锂锂电池模组进行测试，锂电池模组由 5 个电芯串联而成，在第 1 和第 2 个电芯之间布置有同等尺寸的加热板和隔热棉，以保证热量向电芯较多的方向传递，磷酸铁锂电池单体的容量为 50Ah，SOC 为 100%。

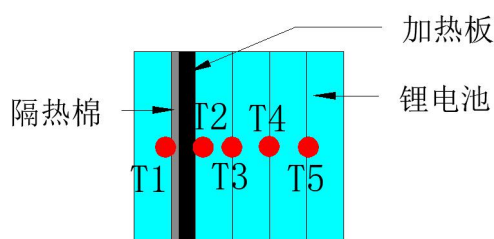


图 3-34 测试模组示意图

3.4.2 测试场景与方法

本小节在定制的模拟储能电柜内开展热失控实验，储能电柜的净尺寸为 800mm*600mm*2100mm，内部平均分为 7 层磷酸铁锂电池模组放置在模拟储能电柜的第四层，触发锂电池上方布置有静电点火器，以锂电池在储能电柜内发生热失控后遇到点火能事故场景，其他层用电池假体填充，实验结构和实物如图所示，使用热电偶采集锂电池单体侧面的温度，温度测点布置如图 3-35 所示，测试过程中通过摄像头实时记录电池的热失控进程。

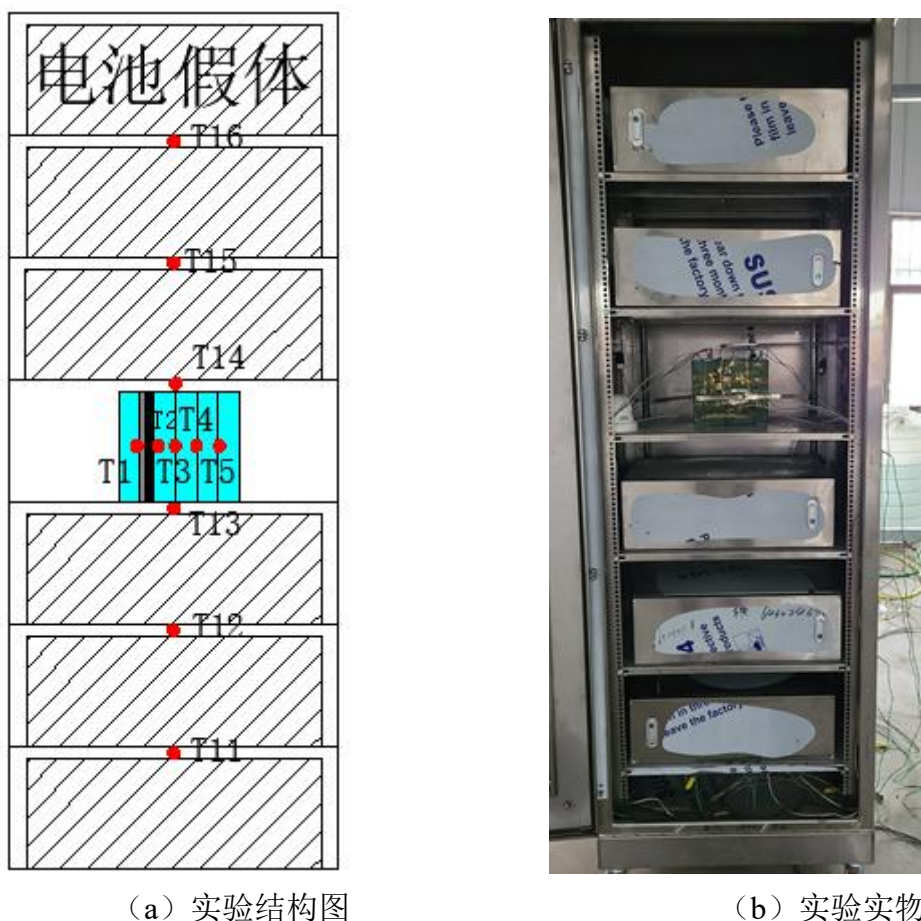


图 3-35 锂电池热失控实验结构图与实物图

3.4.3 测试结果

由于模拟储能电柜是一个相对封闭的空间，锂电池逸出的可燃气体达到了爆炸下限，遇到外界点火能时，即可发生爆炸，火焰充满整个电柜，如图 3-36 所示，储能电柜的门被炸开，表现出了巨大的危险性。爆炸发生后，由于在极短的时间内消耗了大量的可燃气体，因此，明火持续时间较短，电柜内的温度也较低，最高温度约为 240℃，如图 3-37 所示。



图 3-36 电柜内锂电池实验典型照片

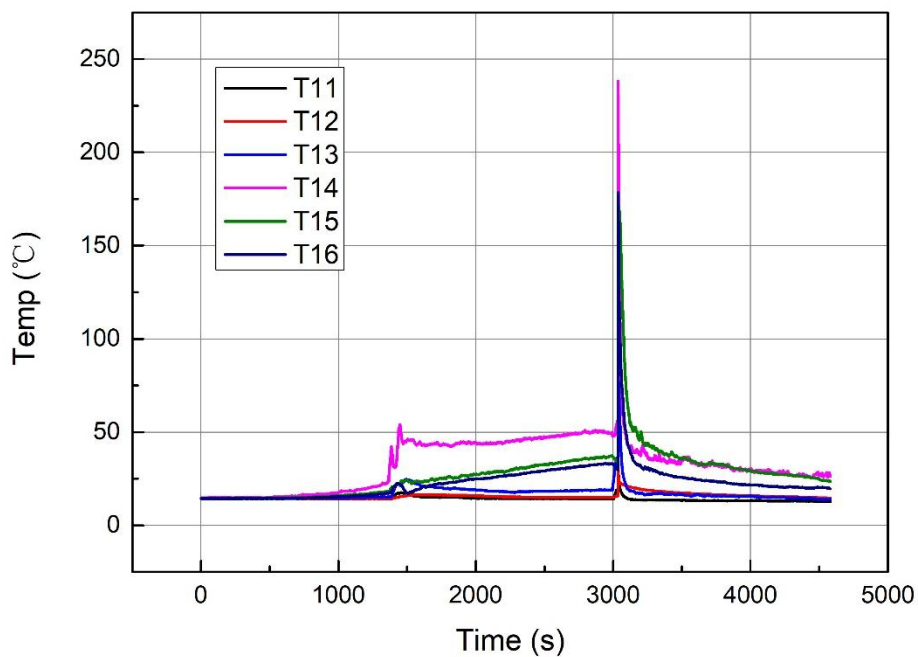


图 3-37 电柜内锂离子电池热失控实验电柜温度曲线

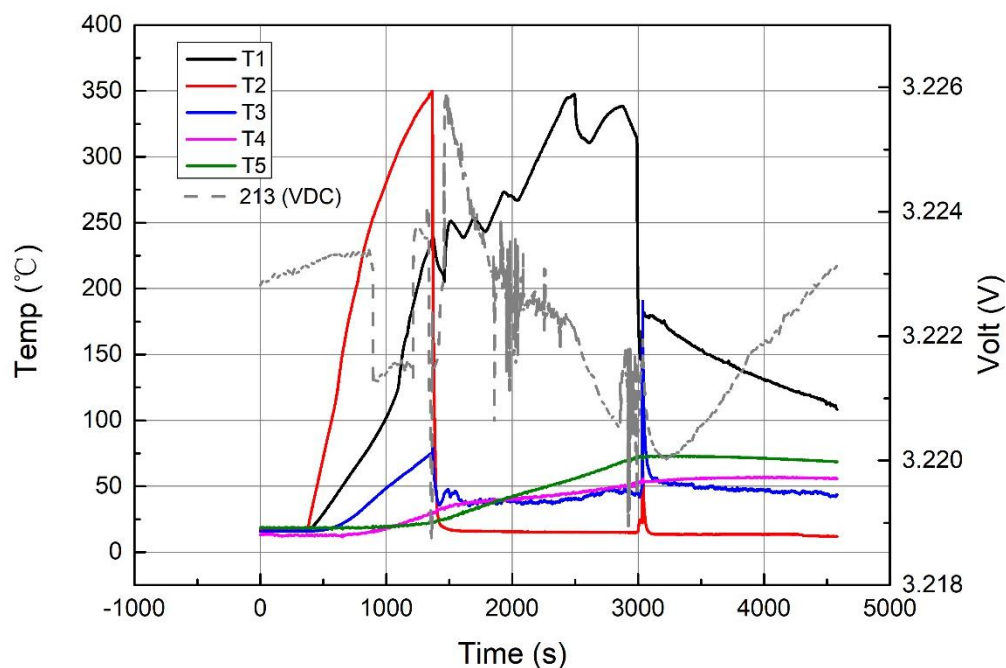


图 3-38 电柜内锂离子电池热失控实验模组温度曲线

3.5 锂离子电池逸出气体爆炸性能分析

本小节通过在模拟储能电柜内开展磷酸铁锂电池热失控试验，不设置外部点火能，因此，磷酸铁锂电池未发生着火。热失控实验结束后，通过采气泵采集锂离子电池的热失控气体，并经气相色谱定量分析，锂离子电池热失控产生的气体主要为 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_3H_8 、 C_3H_6 、 C_4H_8 、 C_4H_{10} 、 C_5H_{12} 、 H_2 、 CO 、 CO_2 ，具体含量如表 3-5 所示，其中，含量最高的组分为氢气，约为 56.3%。磷酸铁锂电池的热失控气体出 CO_2 外，均具有爆炸危险性，因此，明确该混合气体的爆炸下限对电动汽车梯次利用电池的安全防护具有重要意义。

表 3-5 锂电池热失控气体组分与含量

组分	含量% (v/v)	爆炸下限% (v/v)
CH_4	4.356	4.9
C_2H_6	1.185	3.0
C_2H_4	12.178	2.8
C_3H_8	0.296	2.1
C_3H_6	0.593	2.0
C_4H_8	0.089	1.6
C_4H_{10}	0.148	1.5

C ₅ H ₁₂	0.059	1.1
H ₂	56.267	4.0
CO	2.370	12.0
CO ₂	22.459	--
总量	100	4.8

由多种可燃气体组成的爆炸性混合气体的爆炸下限，可根据各组分的爆炸极限进行计算，计算公式如下：

$$L_m = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{L_1} + \frac{\varphi_2}{L_2} + \frac{\varphi_3}{L_3} + \frac{\varphi_n}{L_n}}$$

对于含有惰性气体，如氮气、二氧化碳等的爆炸性混合气体，可先求解混合气体中由单一可燃气体和惰性气体混合气的爆炸下限，再代入上式求解整个整体爆炸下限。

根据气象色谱测得的锂电池热失控混合气体的组分和含量，首先求解氢气和二氧化碳混合气体的爆炸下限，二氧化碳和氢气的体积比约为 0.4，因此(22.459% CO₂+56.267% H₂) 的爆炸下限为 5.5%，进而求得该款锂离子电池热失控混合气体的爆炸下限为 4.8%。

3.6 小结

本章针对磷酸铁锂电池，在开放空间内通过加热板加热的方式触发热失控，在有无外部点火源两种情况下开展热失控实验，测试结果显示，磷酸铁锂电池在无外部点火能量时仅冒出白烟，热失控的最高温度达 40℃以上；存在外部点火能量时，有明火出现，火焰温度达 700℃-800℃左右；三元锂电池模组在过充电条件下会发生明显的热失控扩展，热扩展的最短时间间隔仅约 20s；基于耗氧原理，采用锥形量热仪对磷酸铁锂模组进行量热性能测试，测得该模组的最大热释放速率约为 260kW，最大烟气生长速率约为 1.4 m³/s；为分析动力电池梯次利用储能电柜的火灾危险性，在模拟储能电柜内开展了存在外部点火能量时的磷酸铁力电池热失控实验，测试过程中储能电柜的门被炸开，表现出了巨大的危险性；通过采集磷酸铁锂电池的热失控气体，并经气相色谱定量分析，锂离子电池热失控产生的气体主要为 CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈、C₃H₆、C₄H₈、C₄H₁₀、C₅H₁₂、H₂、CO、CO₂，其中含量最高的组分为氢气，约为 56.3%，通过理论计算获得了该锂

离子电池热失控混合气体的爆炸下限为 4.8%。

4 热失控特征与探测技术研究

锂电池的热失控探测是有效处置锂电池火灾、爆炸事故的基础，研究发现，锂电池单体的导热性能极差，锂电池单体在热失控初期产生的热量很难传递到相邻电芯，因此，温度探测不适合用于锂电池的早期探测，具有延滞性。

锂电池在热失控早期在出现明火前，一般会因内部发生热失控而产生气体，且由此还会导致电池系统内气压的升高，本章在分析不同类型火灾探测模式的基础上，自主设计研发了动力电池系统模拟电池箱，开展了热失控实验，分析了锂电池热失控产生的气体与含量，并采集了动力电池箱内由于锂电池热失控逸出气体而导致的压力变化，分析了适合于锂电池热失控早期的探测模式。

4.1 火灾探测与模式识别

火灾探测器是火灾自动报警和自动灭火系统最基本和最关键的部件之一，对被保护区域进行不间断的监视和探测，把火灾初期阶段能引起火灾的参数（烟、热及光等信息）尽早、及时和准确地检测出来并报警。

除易燃易爆物质遇火立即爆炸起火外，一般物质的火灾发展过程通常都要经过引燃、发展和熄灭三个阶段。因此，火灾探测器的选择原则是要根据被保护区域内初期火灾的形成和发展特点去选择有相应特点和功能的火灾探测器。火灾探测主要有以下几种类型：

4.1.1 感烟探测器

感烟探测器是用于探测物质燃烧初期在周围空间所形成的烟雾粒子含量，并自动向火灾报警控制器发出火灾报警信号的一种火灾探测器。它响应速度快，能及早地发现，是使用量最大的一种火灾探测器。点型感烟探测器是对某一点周围空间响应的火灾探测器。感烟探测器从作用原理上分类，可分为离子型、光电型两种类型。离子感烟火灾探测器是对能影响探测器内电离电流的燃烧产物敏感的探测器。光电感烟探测器是利用火灾时产生的烟雾粒子对光线产生吸收遮挡、散射或吸收的原理并通过光电效应而制成的一种火灾探测器。光电感烟探测器可分为遮光型和散射型两种。线型感烟探测器是一种能探测到被保护范围中某一线路周围烟雾的火灾探测器。探测器由光束发射器和光电接收器两部分组成。它们分别安装在被保护区域的两端，中间用光束连接（软连接），其间不能有任何可

能遮断光束的障碍物存在，否则探测器将不能工作。常用的有红外光束型、紫外光束型和激光型感烟探测器三种，故而又称线型感烟探测器为光电式分离型感烟探测器。

4.1.2 感温火灾探测器

感温火灾探测器是对警戒范围内某一点或某一线段周围的温度参数敏感响应的火灾探测器。根据监测温度参数的不同，感温火灾探测器有定温、差温和差定温三种。探测器由于采用的敏感元件不同，又可派生出各种感温探测器。与感烟火灾探测器和感光火灾探测器比较，感温火灾探测器的可靠性较高，对环境条件的要求更低，但对初期火灾的响应要迟钝些，报警后的火灾损失要大些。它主要适用于因环境条件而使感烟火灾探测器不宜使用的某些场所；并常与感烟火灾探测器联合使用组成与门关系，对火灾报警控制器提供复合报警信号。由于感温火灾探测器有很多优点，它是仅次于感烟火灾探测器使用广泛的一种火灾早期报警的探测器。在可能产生明燃或者若发生火灾不及早报警将造成重大损失的场所，不宜选用感温火灾探测器；温度在 0°C 以下的场所，不宜选用定温火灾探测器；正常情况下温度变化较大的场所，不宜选用差温火灾探测器；火灾初期环境温度难以肯定时，宜选用差定温复合式火灾探测器。

4.1.3 感光火灾探测器

感光火灾探测器又称为火焰探测器，它是一种能对物质燃烧火焰的光谱特性、光照强度和火焰的闪烁频率敏感响应的火灾探测器。它能响应火焰辐射出的红外、紫外和可见光。感光探测器的主要优点是：响应速度快，其敏感元件在接受到火焰辐射光后的几毫秒，甚至几个微秒内就发出信号，特别适用于突然起火无烟的易燃易爆场所。它不受环境气流的影响，是惟一能在户外使用的火灾探测器。另外，它还有性能稳定、可靠、探测方位准确等优点，因而得到普遍重视。在火灾发展迅速，有强烈的火焰和少量烟、热的场所，应选用火焰探测器。在可能发生无焰火灾、在火焰出现前有浓烟扩散、探测器的镜头易被污染、探测器的“视线”（光束）易被遮挡、探测器易受阳光或其他光源直接或间按照射、在正常情况下有明火作业及!射线、弧光影响等情形的场所，不宜选用火焰探测器。工程中主要用红外火焰型和紫外火焰型两种。

红外感光火灾探测器是一种对火焰辐射的红外光敏感响应的火灾探测器。红外线波长较长，烟粒对其吸收和衰减能力较弱，致使有大量烟雾存在的火场，在距火焰一定距离内，仍可使红外线敏感元件感应，发出报警信号。因此，这种探测器误报少，响应时间快，抗干扰能力强，工作可靠。

紫外感光火灾探测器是一种对紫外光辐射敏感响应的火灾探测器。紫外感光探测器由于使用了紫外光敏管为敏感元件，而紫外光敏管同时也具有光电管和充气闸流管的特性，它具有响应速度快、灵敏度高的特点，可以对易燃物火灾进行有效报警。由于紫外光主要是由高温火焰发出的，温度较低的火焰产生的紫外光很少，而且紫外光的波长也较短，对烟雾穿透能力弱，所以它特别适用于有机化合物燃烧的场所。

4.1.4 可燃气体火灾探测器

可燃气体包括天然气、煤气、烷、醇、醛、炔等。可燃气体火灾探测器是一种能对空气中可燃气体含量进行检测并发出报警信号的火灾探测器。它通过测量空气中可燃气体爆炸下限以内的含量，以便当空气中可燃气体含量达到或超过报警设定值时，自动发出报警信号，提醒人们及早采取安全措施，避免事故发生。可燃气体探测器除具有预报火灾、防火防爆功能外，还可以起监测环境污染的作用。和紫外火焰探测器一样，主要在易燃易爆场合中安装使用。

表 4-1 火灾探测器的选择

类型	类别	分类	宜选择场所	不宜选择场所	其他
点型火灾探测器	点型感烟火灾探测器	点型离子感烟	1 饭店、旅馆、教学楼、办公楼的厅堂、卧室、办公室、商场、列车载客车厢等。 2 计算机房、通信机房、电影或电视放映室等。 3 楼梯、走道、电梯机房、车库等。 4 书库、档案库等。	1 相对湿度经常大于95%。 2 气流速度大于5m/s。 3 有大量粉尘、水雾滞留。 4 可能产生腐蚀性气体。 5 在正常情况下有烟滞留。 6 产生醇类、醚类、酮类等有机物质。	
		点型光电感烟		1 有大量粉尘、水雾滞留。 2 可能产生蒸气和油雾。 3 高海拔地区。 4 在正常情况下有烟滞留。	
	点型感温火灾探测器		1 相对湿度经常大于95%。 2 可能发生无烟火灾。 3 有大量粉尘。 4 吸烟室等在正常情况下有烟或蒸气滞留的场所。 5 厨房、锅炉房、发电机房、烘干车间等不宜安装感烟火灾探测器的场所。 6 需要联动熄灭“安全出口”标志灯的安全出口内测。 7 其他无人滞留且不适合安装感烟火灾探测器，但发生火灾时需要及时报警的场所。	可能产生阴燃火或发生火灾不及时报警将造成重大损失的场所。	
	定温探测器			温度在0℃以下的场所。	
	具有差温特性的探测器			温度变化较大的场所。	
	点型火焰探测器或图像型火焰探测器		1 火灾时有强烈的火焰辐射。 2 可能发生液体燃烧等无阴燃阶段的火灾。 3 需要对火焰做出快速反应。	1 在火焰出现前有浓烟扩散。 2 探测器的镜头易被污染。 3 探测器的“视线”易被油雾、烟雾、水雾和冰雪遮挡。 4 探测区域内的可燃物是金属和无机物。 5 探测器易受阳光、白炽灯等光源直接或间接照射。	
	单波段红外火焰探测器			探测区域内正常情况下有高温物体的场所。	
	紫外火焰探测器			正常情况下有明火作业，探测器易受X射线、弧光和闪电等影响的场所。	
	可燃气体探测器		1 使用可燃气体的场所。 2 燃气站和燃气表房以及存储液化石油气罐的场所。 3 其他散发可燃气体和可燃蒸气的场所。		
	点型一氧化碳火灾探测器				在火灾初期产生一氧化碳的下列场所可选择： 1 烟不容易对流或顶棚下方有热屏障的场所。 2 在棚顶上无法安装其他点型火灾探测器的场所。 3 需要多信号复合报警的场所。
间断吸气的点型采样吸气式感烟火灾探测器或具有过滤网和管路自清洗功能的管路采样吸气式感烟火灾探测器					污物较多且必须安装感烟火灾探测器的场所应选择。
线型火灾探测器	线型光束感烟火灾探测器		无遮挡的大空间或有特殊要求的房间。	1 有大量粉尘、水雾滞留。 2 可能产生蒸气和油雾。 3 在正常情况下有烟滞留。 4 固定探测器的建筑结构由于震动等原因会产生较大位移的场所。	
	缆式线型感温火灾探测器		1 电缆隧道、电缆竖井、电缆夹层、电缆桥架。 2 不易安装点型探测器的夹层、闷顶。 3 各种皮带输送装置。 4 其他环境恶劣不适合点型探测器安装场所。		
	线型光纤感温火灾探测器		1 除液化石油气外的石油储罐。 2 需要设置线型感温火灾探测器的易燃易爆场所。 3 需要监测环境温度的地下空间等场所宜设置具有实时温度监测功能的线型光纤感温火灾探测器。 4 公路隧道、敷设动力电缆的铁路隧道和城市地铁隧道等。		
	线型定温火灾探测器				线型定温火灾探测器的选择，应保证其不动作温度符合设置场所的最高环境温度的要求。
吸气式感烟火灾探测器	吸气式感烟火灾探测器		1 具有高速气流的场所。 2 点型感烟、感温火灾探测器不适宜的大空间、舞台上方、建筑高度超过12m或有特殊要求的场所。 3 低温场所。 4 需要进行隐蔽探测的场所。 5 需要进行火灾早期探测的重要场所。 6 人员不宜进入的场所。		
	没有过滤网和管路自清洗功能的管路采样式吸气感烟火灾探测器				灰尘比较大的场所，不应选择。

根据火灾报警探测器原理分析，结合第3章锂离子电池火灾燃烧特性分析，综合考虑动力电池初期特征、电池包内适用性等方面，本章对可燃气体探测器和气体压力探测进行深入研究和分析。

4.2 动力电池系统火灾重构模拟实验装置研究

锂离子电池的火灾探测除了与电池的本体特性有关之外，还与电池所处的环境、空间、结构等因素有很大关系，本章以整包利用的退役动力电池系统为对象，自主设计研制了动力电池系统模拟实验装置，开展了锂离子电池火灾早期探测方法的研究。

研究发现，电滥用（主要为过充）、热滥用（过热）和机械滥用是锂离子电池着火的主要诱因，基于此，本文设计加工了电动汽车动力电池系统火灾重构模拟实验装置，该装置符合车载动力电池系统高密闭性要求，设计工作压力为1.0MPa，可模拟动力电池箱内由于锂电池热失控引起的火灾、爆炸事故，并实时采集装置内的温度、压力、气体类型等参数。

4.2.1 系统组成

电动汽车锂离子电池箱火灾防控装置检验系统的设计工作压力为1.0MPa，罐体材质为碳钢，内部尺寸为1000*800*300mm，主要由罐体、顶部开关盖、安全阀接口、取样接口、脉冲点火接口、静电点火接口、压力传感器接口、温度传感器接口、抽真空接口（送气口）、备用口、石英玻璃视窗、支架、滑轮、推把手等组成，配件主要包括脉冲点火系统，静电点火系统，以及压力、温度监测装置、以及各连接管道、阀门、起吊装置和代替模拟电池的电池假体等，如图4-1所示，表4-2列明了该装置的基本技术参数。

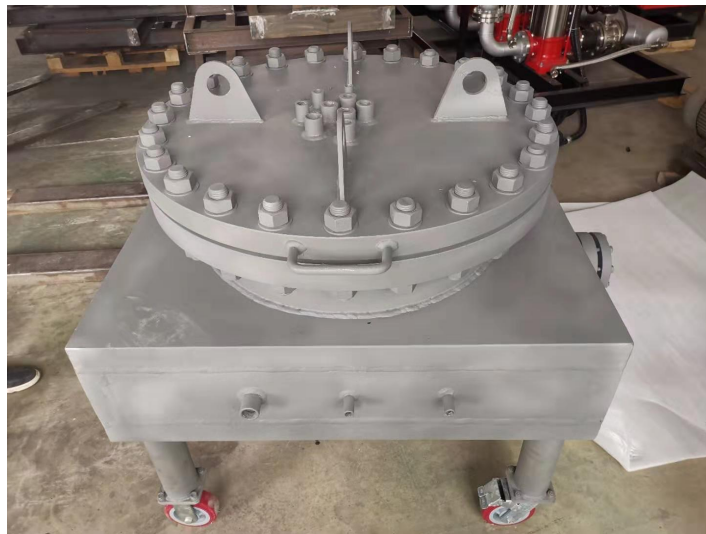


图 4-1 电动汽车退役动力电池系统火灾重构模拟实验装置

表 4-2 系统关键零部件技术参数表

序	名称	规格参数	单位	数
---	----	------	----	---

号				量
1	电动汽车火灾模拟电池箱	材质：碳钢，额定工作压力：1.0MPa,内部尺寸：1000*800*300mm，含罐体、顶部开关盖、安全阀接口、取样接口、脉冲点火接口、静电点火接口、压力传感器接口、温度传感器接口、抽真空接口（送气口）、石英玻璃视窗、支架、滑轮等；	台	1
2	脉冲点火系统	组合件	套	1
2.1	点火变压器	输入电压：AC220V，2*7KV,双路输出	个	1
2.2	高压线	200cm,含接头	根	2
2.3	点火器	陶瓷棒长度 72.3mm，直径 11.8mm	个	2
3	静电点火系统	组合件	套	1
3.1	电容器电路板	450V	个	1
3.2	石墨电极	石墨芯种类：“H”， $\phi 2\text{mm} \times 65\text{mm}$ ，纯度 99.999%	个	4
4	排污阀	DN15,内螺纹 Rc1/2,1.6MPa,304	个	1
5	电磁阀	DN10,内螺纹 Rc3/8,1.6MPa,304, AC220V,防爆等级：II	个	5
6	安全阀	DN15,动作压力范围 0-1.6MPa,304,	个	1
7	绝缘密封插头	单芯，M20*2.5,最高工作温度 300°C	个	2
8	绝缘密封插头	双芯，M24*3,最高工作温度 300°C	个	2
9	压力传感器	-0.1~0.1MPa,精度等级： $\pm 0.5\%FS$ ，4-20mA,螺纹 M20*1.5,不锈钢，传感器带宽;50Hz.最大超	个	2

		压:2 倍量程		
10	压力传感器	-0.1~1MPa,精度等级: ± 0.5%FS, 4-20mA, 螺纹 M20*1.5,不锈钢, 传感器带宽;50Hz.最大超压:2 倍量程	个	1
11	压力传感器	0~1MPa,精度等级: ± 0.1%FS, 4-20mA,螺纹 M20*1.5,不锈钢, 传感器带宽;20kHz.最大超压:2 倍量程,	个	3
12	铠装 K 型温度传感器	探测温度范围: 0-1300°C	个	1
13	电池假体	不锈钢焊接件	套	1
14	吊机	载重 500Kg,360°旋转, 电机 220V, 功率 3000W, 主体材质: 碳钢;	套	1
15	配件	接头管道	套	1

4.2.2 系统结构

4.2.2.1 罐体

电动汽车火灾防控装置检验系统罐体主要是为动力汽车火灾模拟试验提供一个封闭的空间, 设计最大工作压力 1.0MPa, 电池箱上设置有用于观察电池箱内情况的石英玻璃视窗以及可以将整个电池箱打开以方便实施相关试验操作的开关盖, 电池箱内部依次设置设置有取样口、抽真空口、灭火剂及空气供应口、压力传感器接口、温度传感器接口、石墨电极点火器接口、安全阀接口、脉冲点火器接口、航空插头接头(备用)等用以安装试验用的各种充气、探测以及点火装置, 并致力于保证试验的安全可靠性, 电池箱底部设置有轮毂, 顶部设有推动把手, 方便移动, 罐体的结构如图 4-2 所示。

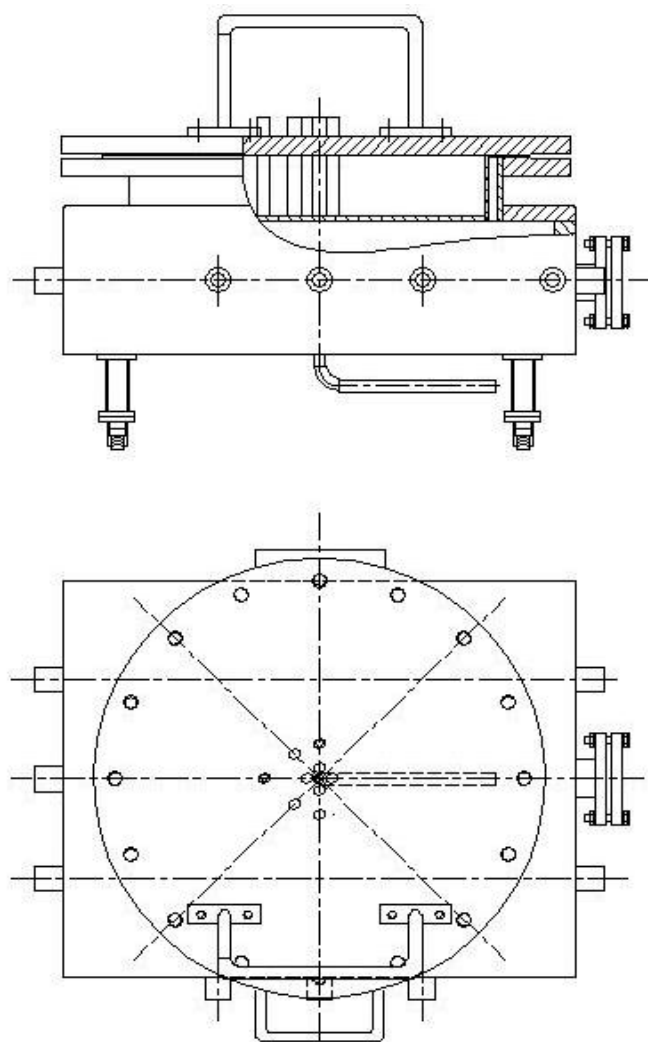


图 4-2 罐体结构示意图

4.2.2.2 脉冲点火系统

系统主要由点火变压器、高压线和点火器组成，整个系统受控制箱（借用）控制，在控制箱发出点火指令后，点火变压器动作，随即将 DC220V 电压转换成 2 路 7KV 的高压电通过高压线输入至安装在试验容器内的点火器，点火器在高压电的作用进行尖端放电，进而由放电产生的火花点燃电池箱内的可燃物。

4.2.2.3 静电点火系统

系统主要由直流电源、电容器电路板、石墨电极组成，整个系统由控制箱，在待工作状态下，控制箱控制直流电源给电容充电；在需要点火时，控制箱发出点火指令，使电容通过安装在电池箱内的石墨电极进行放电，由放电产生的电火花为电池箱内的可燃物点火。

4.2.2.4 空气供应装置/采集样气装置

由管道直接接通大气，其通断通过控制控制电磁阀的启闭来实现，当充当空气供应装置时的主要作用是向电池箱内提供试验所需的空气；当充当集样气装置时主要是在试验结束后通过控制柜控制控制该管路上的电磁阀开启，随后通过采气泵从电池箱内抽取试验后的气体进入气体采样袋，用于数据分析。

4.2.2.5 吊机

由于该电池箱的箱盖较重，通过人力开启比较困难，故采用小型吊机操作来实现箱盖的启闭，省时省力。

4.2.3 数据采集

4.2.3.1 压力传感器

该装置设置有五个压力传感器，具体功能如下：

（1）压力传感器（-0.1-1.0MPa）共三个，其中两个为高速压力传感器（20KHz），主要是用来通过数据采集装置采集在引燃电池后电池箱内的压力变化，进而判断产品是否通过检验，另外一个传感器为常规压力传感器，主要作用是控制柜（借用）通过其来监测电池箱内的压力变化，进而控制各高速压力传感前的电磁阀门的启闭来实现对高速压力传感器的保护。

（2）压力传感器（-0.1-0.1MPa）共两个，皆为常规压力传感器，一个用于数据采集，另一个用于控制真空泵（借用）的启闭。

4.2.3.2 温度传感器

监测整个试验过程中试验容器内的温度变化。

4.2.4 锂离子电池热失控触发形式

4.2.4.1 过热触发

当采用过热触发锂离子电池热失控时，在锂离子模组内热量最容易积聚的位置放置加热板，如模组正中心位置，如图 4-3 所示，加热板两侧粘贴导热片，以便于加热板产生的热量传递到模组电芯，当加热板两侧任意电芯发生热失控时，停止加热，观察锂离子电池模组的热失控蔓延过程。加热板电源线通过耐高温高压的航空插头实现模拟动力电池系统内外部的连接，实验过程中，通过热电偶实时采集锂电池模组典型位置的温度变化，通过压力传感器实时监测装置内部的压力变化，以获取锂电池热失控的典型特性。

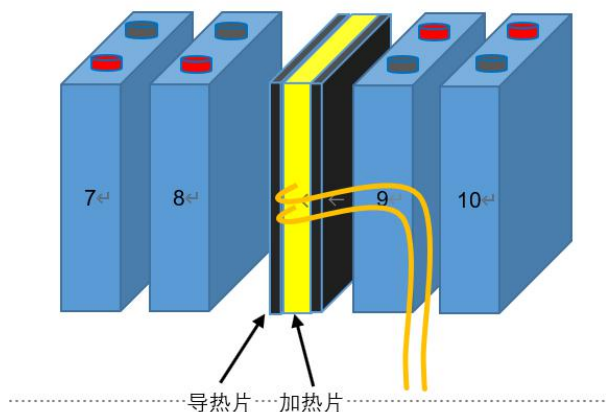


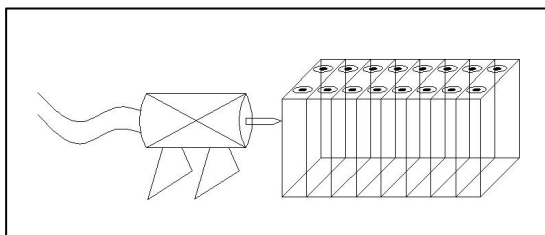
图 4-3 锂离子电池过热触发示意图

4.2.4.2 过充电触发

当采用过充电触发锂离子电池热失控时，选择锂离子模组内热量最容易积聚的电芯作为触发对象，如模组正中心位置，当加热板两侧任意电芯发生热失控时，停止充电，观察锂离子电池模组的热失控蔓延过程。过充电电源线通过耐高温高压的航空插头实现模拟动力电池系统内外部的连接，过充电电流可达 50A，实验过程中，通过热电偶实时采集锂电池模组典型位置的温度变化，通过压力传感器实时监测装置内部的压力变化，以获取锂电池热失控的典型特性。

4.2.4.3 针刺触发

当采用针刺触发锂离子电池热失控时，首先调节模组的位置使得模拟动力电池系统穿刺孔正对锂离子电池中心，然后用夹具将锂离子电池模组固定，调节外置的油压针刺装置，使得穿刺针可顺利通过模拟动力电池系统穿刺孔，以触发锂离子电池模组穿刺后发生热失控。该针刺装置由油压泵提供穿刺动力，保证穿刺针头具备足够的推力，并通过电路设计，实现的穿刺实验装置前进和后退的远程操控，穿刺针头为一直径为 30mm 的不锈钢探针，在实验状态下可顺利穿透 3 片电池单体。实验过程中，通过热电偶实时采集锂电池模组典型位置的温度变化，通过压力传感器实时监测装置内部的压力变化，以获取锂电池热失控的典型特性，图 4-4 为针刺装置示意图和实物图。



(a) 针刺示意图

(b) 针刺装置

图 4-4 锂离子电池针刺触发示意图

4.3 锂离子电池热失控早期探测实验设计

本项目在电动汽车动力电池系统火灾重构模拟实验装置内开展了磷酸铁锂电池的热失控实验,采用铝制加热板对锂电池进行加热,直至锂电池发生热失控,通过夹具将锂电池与加热板固定,并使电池处于受挤压的约束状态,以模拟锂电池在车载动力电池系统内的真实状态,锂电池、加热板、夹具的布置位置如图 4-5 所示。

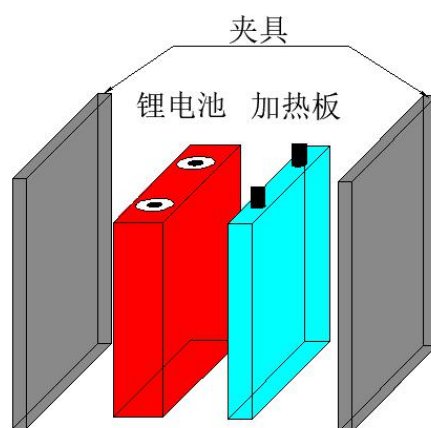


图 4-5 锂电池热失控实验触发示意图

实验过程中,控制加热板的升温速率为 $5.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,当加热板温度达到锂离子电池隔膜熔化温度 10°C 以上时,保持加热温度恒定 4 小时,以模拟锂离子电池单体内部发生故障导致热失控的场景,而后再以 $5.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热锂离子电池直至发生热失控。实验过程中,实时采集了锂离子电池侧面中心点、正极极耳的温度以及电池的电压,并监测模拟动力电池系统内部的压力,分析计算锂离子电池的产气速率和产气量。锂离子电池热失控实验结束后,利用抽气泵采集实验装置内部锂离子电池热失控逸出的气体,并通过气相色谱分析,测得了锂离子电池热失控逸出气体的成分与含量,进而通过理论计算,得到了锂离子电池逸出气体的爆炸下限,锂离子电池测试前后实物如图 4-6 (a) 和 (b) 所示。



(a) 测试前



(b) 测试后

图 4-6 锂离子热失控实验前后照片

4.4 锂离子电池热失控温度与电压分析

锂离子电池在程序升温加热条件下，电池表面温度不断上升，同时单体电压出现较大幅度的波动，电压波动范围为 3.348V 至 2.195V，波动幅度达 35%，而后电压趋于稳定。当加热板以 5.5°C/min 的升温速率加热至 150°C 时，电池侧面的温度上升至约 87°C，而后在控温阶段，电池侧面的温度上升至约 110°C，且温度基本稳定，同时，电池电压逐步平稳下降，从起始电压 3.348V 下降为 3.172V，下降幅度约为 5%，下降速率为 44mV/h。锂离子电池在恒温加热过程中未发生热失控，而后进入二次升温阶段，加热约 350 秒后，加热板的温度上升至 180°C，电池侧面的温度上升至约 112°C，此时锂电池泄压阀开启，锂电池内部高温气体向外扩散，对外做功，导致锂电池的温度略有下降，下降至约 101°C，下降了约 10°C，此时电池的电压迅速下降至 118mV，并在出现短暂波动后，降为 0V。锂电池由于热失控导致表面温度迅速上升，此时关闭加热板，锂电池的热失控最高温度约为 312°C，锂电池的热失控温度和电压曲线如图 4-7 所示。

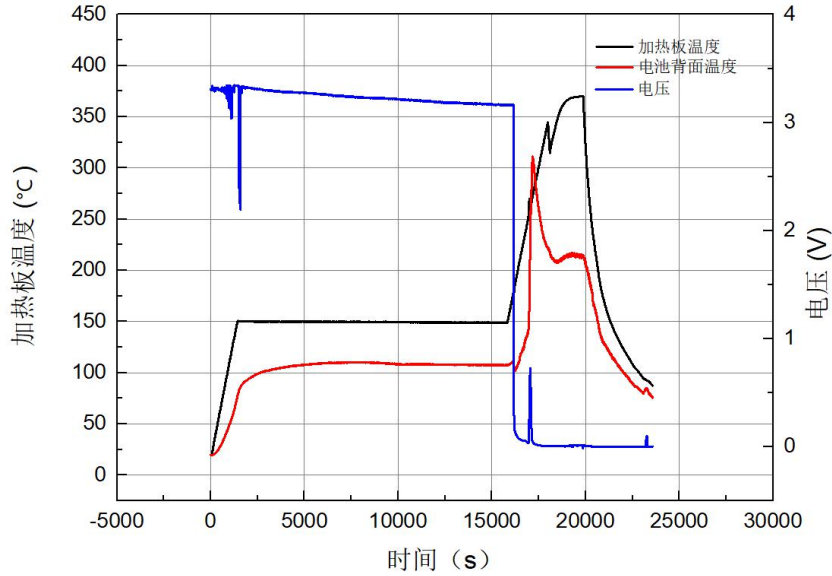


图 4-7 锂电池的热失控温度和电压曲线

4.5 锂离子电池热失控产气压力分析

在锂离子电池的热失控过程中，通过实时监测装置内部的压力，可粗略得到锂离子电池的产气过程，如图 4-8 和图 4-9 所示。该款锂离子电池的产气过程可分为三个阶段，如图所示，第一阶段为锂电池泄压阀开启时，此时的逸出气体导致的压力上升速率最大，约为 9.7kPa/s ，如图所示，这主要是由于锂电池泄压阀开启时，内部集聚的热分解气体瞬间喷出而形成，但此时热失控气体的绝对含量不高，装置内部压力约为 20kPa ，若不考虑温度对压力的影响，此时的产气量约为 16L 。随着锂离子电池热失控的进一步发展，约 13 分钟后，锂离子电池出现第二次产气，此次产气量较多，到了装置的压力上升幅度约为 45kPa ，若不考虑温度对压力的影响，此时的产气量约为 36L ，但产气速率较泄压阀开始时明显要低，约为 1.0kPa/s 。随着锂离子电池热失控的进一步发展，锂离子电池很快出现了第三次产气，两次产气时间间隔约为 1 分钟，此时，装置内部压力达到最大，约为 80kPa ，第三次的产气速率和第二次产气速率基本相同，约为 1.0kPa/s ，若不考虑温度对压力的影响，此时的产气量约为 24L ，因此，该款锂离子电池的总产气量为 76L 。

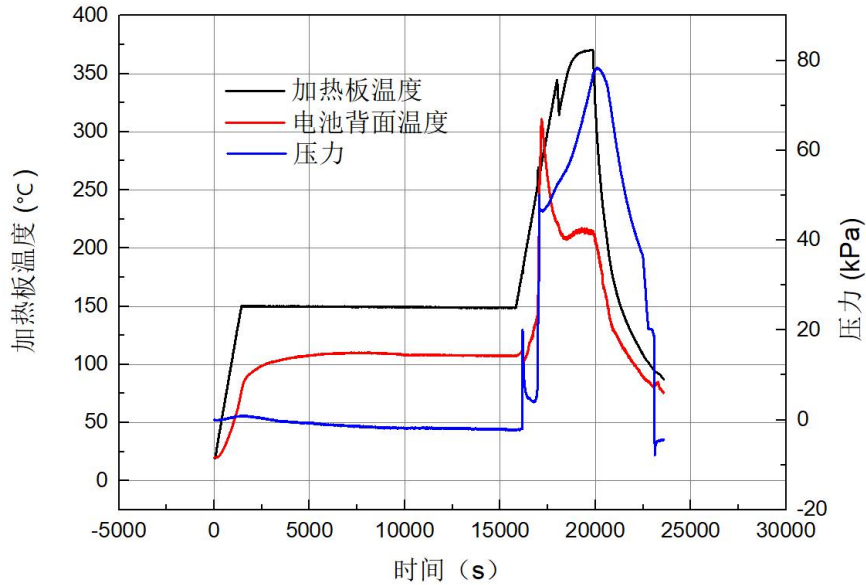


图 4-8 锂电池的热失控温度压力曲线

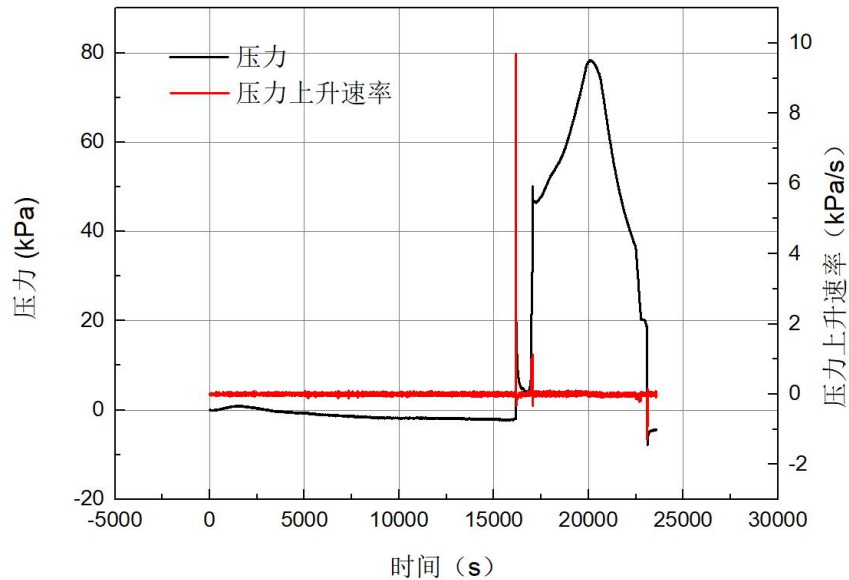


图 4-9 锂电池的热失控压力和压力上升速率曲线

4.6 锂离子电池逸出气体时序性分析

为研究锂离子电池热失控逸出气体的时序性，厘清锂离子电池热失控后最先逸出的气体，为热失控早期探测奠定基础，本文在锥形量热系统的基础上，通过在排烟管道上布置在线式傅里叶红外气体分析仪（FTIR），如图 4-10 所示，实时采集了锂离子电池的热失控气体，获取了锂电池逸出气体含量与时间的关系，如图 4-11 和 4-12 所示。根据对多款锂离子电池样品的测试，结果显示，锂离子电池热失控最先逸出的气体为一般为一氧化碳、烃类（如甲烷、乙烷、丙烷、乙烯）以及苯系物（乙苯、苯乙烯、零二甲苯、间二甲苯）等，其中，烃类气体中含量

最多的是丙烷，苯系物中含量最多的是间二甲苯，同时，综合考虑该类气体探测器的成本，抗干扰性，一氧化碳是作为锂离子电池热失控探测的较优模式。

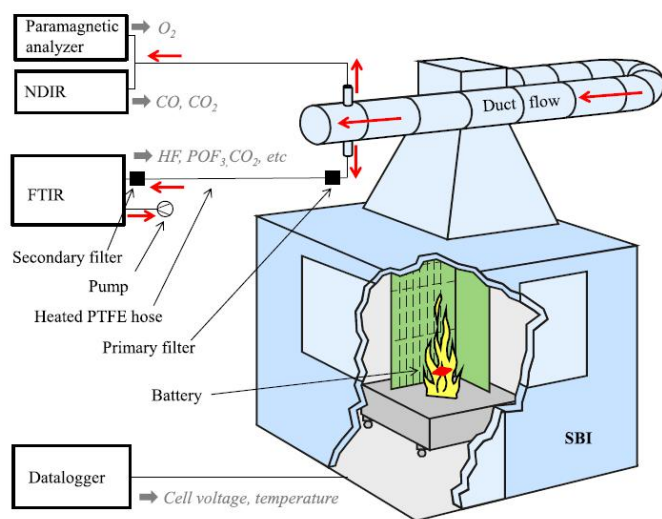


图 4-10 锂离子电池热失控逸出仪器的 FTIR 实验结构图

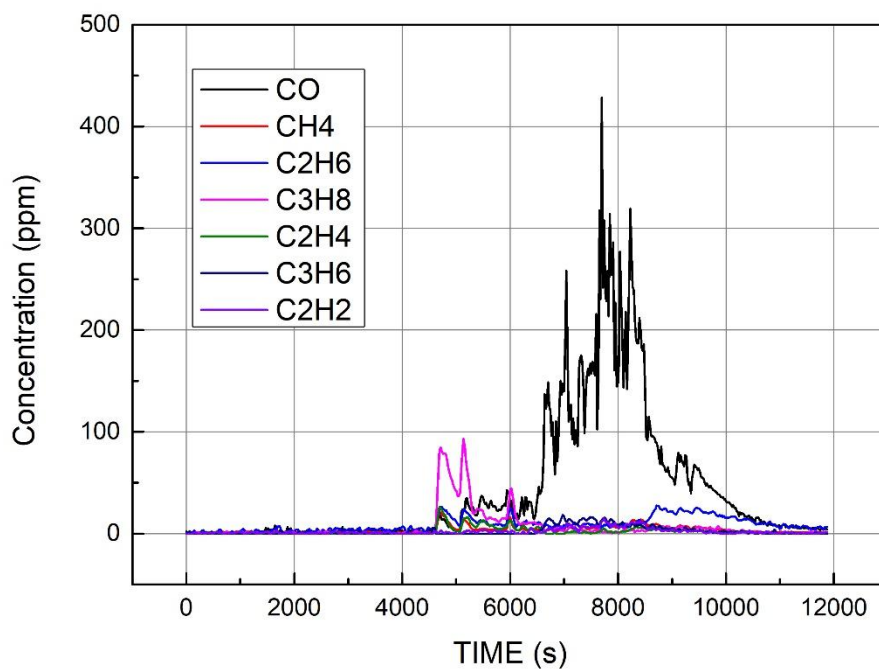


图 4-11 锂离子电池逸出 CO 和烃类气体变化曲线

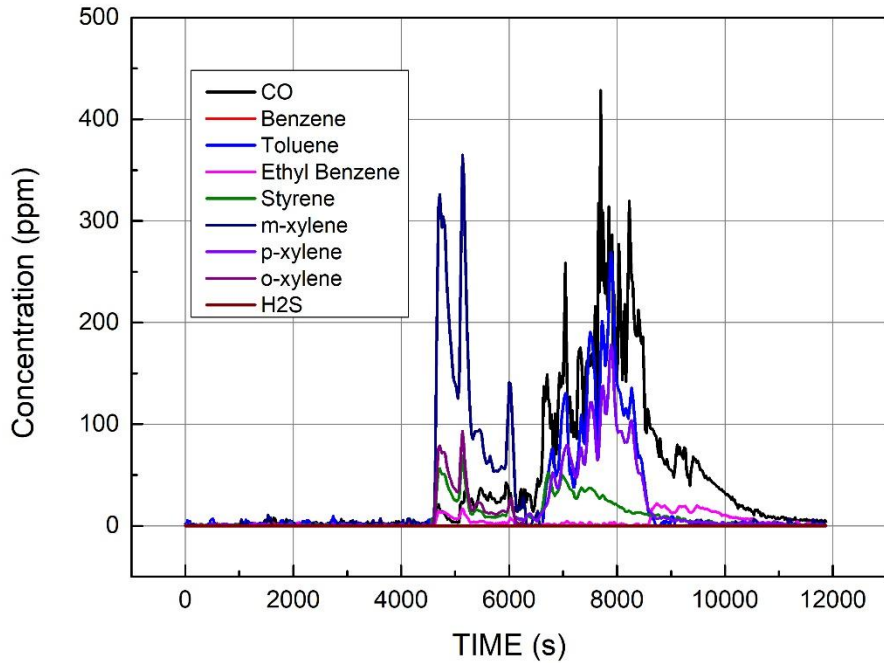


图 4-12 锂离子电池逸出 CO 和苯系物气体变化曲线

4.7 小结

本章理论分析了各类型火灾探测器的识别模式和优缺点，重构了动力电池系统火灾模型，开展了锂离子电池的热失控实验，采集了热失控过程中的温度、电压、气压及特征气体含量等参数，结果显示，当锂离子电池发生热失控时，其表面温度会迅速上升，但仅热失控电池的表面温度会出现较大上升，同时单体电压会下降；锂离子电池热失控后会产生热分解气体，导致动力电池系统内部产生压升，上升速率约为 1.0 kPa/s ，总产气量约为 76L ；锂离子电池热失控最先逸出的气体为一般为一氧化碳、烃类（如甲烷、乙烷、丙烷、乙烯）以及苯系物（乙苯、苯乙烯、零二甲苯、间二甲苯）等，其中，烃类气体中含量最多的是丙烷，苯系物中含量最多的是间二甲苯，同时，综合考虑该类气体探测器的成本，抗干扰性，一氧化碳是作为锂离子电池热失控探测的较优模式。

5 锂离子电池火灾灭火技术研究

灭火剂是火灾扑救技战术的重要基础与前提，通过梳理和分析现有灭火剂的类型、机理及应用场所等信息，依托电动汽车动力电池仓的主要特点，并结合灭火实验，筛选出抑制锂电池火灾的最佳灭火剂，是保障电动汽车产业健康发展的基础与当务之急。

5.1 抑制锂电池灭火剂技术国内外研究进展

5.1.1 DEKRE 锂电池火灾灭火剂技术

2009年，德国联邦总理默克尔宣布，到2020年德国运营或行驶的电动汽车要达到100万辆，在这一国家战略的大力推动下，德国国内电动汽车产业发展迅猛，数量急剧增加，与此同时，电动汽车火灾却屡有发生，而德国消防部门缺乏对电动汽车火灾的认识，尤其是相关技战术水平偏低。德国机动车监督协会（DEKRE）归纳了困扰消防部门的三大问题：电动汽车火灾是否可以采取与传统汽车相同的灭火技战术？水是否是扑救电动汽车火灾的有效灭火剂？电动汽车火灾是否有爆炸危险？为解决困扰消防部门的三大难题，DEKRE筛选了三种灭火剂，研究了其扑救电动汽车动力锂电池火灾的效果。

德国机动车监督协会（DEKRE）参照电动汽车锂电池结构，使用正庚烷引燃锂电池的方式，搭建了火灾模型，对比了水，F-500及Firesorb凝胶灭火剂三种药剂对扑救锂电池火灾的效果，正庚烷自由燃烧时间约为11min，20min后消防员开始灭火。

通过模拟实验，德国机动车监督协会（DEKRE）发现，水可成功扑救电动汽车锂电池火灾，但存在耗水量大，扑救时间长等不足。F-500和Firesorb等添加剂可有效提高锂电池火灾扑救效率，灭火时间从几十秒缩短至几秒，且大大减少耗水量。

5.1.2 FAA 锂电池火灾灭火剂技术

美国联邦航空管理局（FAA）是最早开展锂电池火灾灭火剂技术研究的机构之一，随着便携式锂电池设备应用的越来越广，锂电池设备发生失控、火灾甚至爆炸的事件屡有发生，而一旦此类着火爆炸事件发生在航班上，就要求机组人员能够快速灭火，否则，极易引起恐慌和骚乱，后果不堪设想。FAA的测试表明，

批量锂电池易引发爆炸和超压，而货仓配备的自动灭火系统对于此类火灾的效果不佳，目前已向国际航空组织提交报告，敦促国际组织禁止航空公司在客机上批量运输锂电池。2013年1月7日美国东部时间上午10点21分，停靠在波士顿国际机场的日本航空公司JA829J次航班突然发生辅助动力舱锂离子蓄电池模块冒烟起火事故，引发了全球波音787停飞的多米诺骨牌效应。

2009年，FAA经过多年研究，提出了飞机上便携式锂电池设备灭火安全警示，主要包括两个原则：

（1）使用哈龙、哈龙替代或水基型灭火器扑灭便携式锂电池设备火灾，阻止其蔓延。

（2）灭火结束后，将便携式锂电池设备浸没到水或其他溶剂中，防止发生二次失控。

FAA同时指出，锂电池火灾的本质是内部活性反应物质的热失控，灭火剂必须具备足够的冷却降温能力，才能有效阻止锂电池成组的火灾蔓延，防止二次失控。基于此，FAA进行了扑救便携式锂电池设备火灾有效灭火剂的筛选研究，通过灭火剂降温效应评价试验，并通过火灾模拟实验研究综合评价其有效性。

为评价灭火剂的降温能力，美国联邦航空管理局（FAA）搭建了一个模拟实验平台。灭火剂经过1/4英寸的管道喷洒到铝板正中央，铝板热功率为750W，采集铝板的温度变化，从而判断灭火剂的降温能力，实验过程如图5-1所示。实验有针对性地对比了Halon1211灭火剂，水基型灭火剂，如水、AF-31、AF-21、A-B-D灭火剂，洁净气体灭火剂，如FM-200、FE-36、HalotronI，干粉灭火剂Purple-K，新型灭火剂FK-5-1-12共10种灭火剂。

结果显示，水基型灭火剂具有良好的降温能力，且随着灭火剂用量的增加及喷洒流量的降低，其降温能力显著提高；而非水基型灭火剂降温能力偏低，且随着灭火剂用量的增加，其降温能力变化不大。

FAA在灭火剂降温效应评价实验的基础上，搭建了如图5-2所示的实验平台，开展了抑制锂电池火灾的模拟实验研究。

实验选用了18650标准锂电池，电池容量为2600mAh，SOC为50%。通过镍铬线将5块锂电池并排连接，相邻电池间及电池两侧均布置有热电偶，用以监测灭火过程中的温度变化。采用100W管炉及己烷加热致使电池失控，加热器位置

如图5-2所示。

首先，打开管炉加热器，待第一块电池加热到100°C时，打开己烷加热器，在第一块电池失控后，开始喷洒灭火剂。灭火时，常温常压下是液态的灭火剂，如水，AF-31，AF-21，A-B-D及FK-5-1-12灭火剂，采用手持式500ml水瓶倾洒；其他灭火剂，如Halon1211，HalotronI, FM-200、FE-36、CO₂及Purple-K灭火剂采用手持式灭火器喷射，灭火结束后关闭加热器。

结果显示，在没有灭火剂的条件下，所有锂电池均发生失控，而仅需500mL液体类灭火剂即可有效抑制锂电池火灾的传播，而非液体类灭火剂不起作用。

美国联邦航空管理局（FAA）通过此项目的研究，发现，灭火剂降温效应评价实验结果和锂电池火灾灭火实验结果吻合度较好，验证了灭火剂降温能力是阻止锂电池火灾蔓延的关键因素。水基型灭火剂对抑制锂电池火灾的效果最佳，而气体及干粉类灭火剂对抑制锂电池火灾无效。



图 5-1 抑制锂电池火灾实验装置图

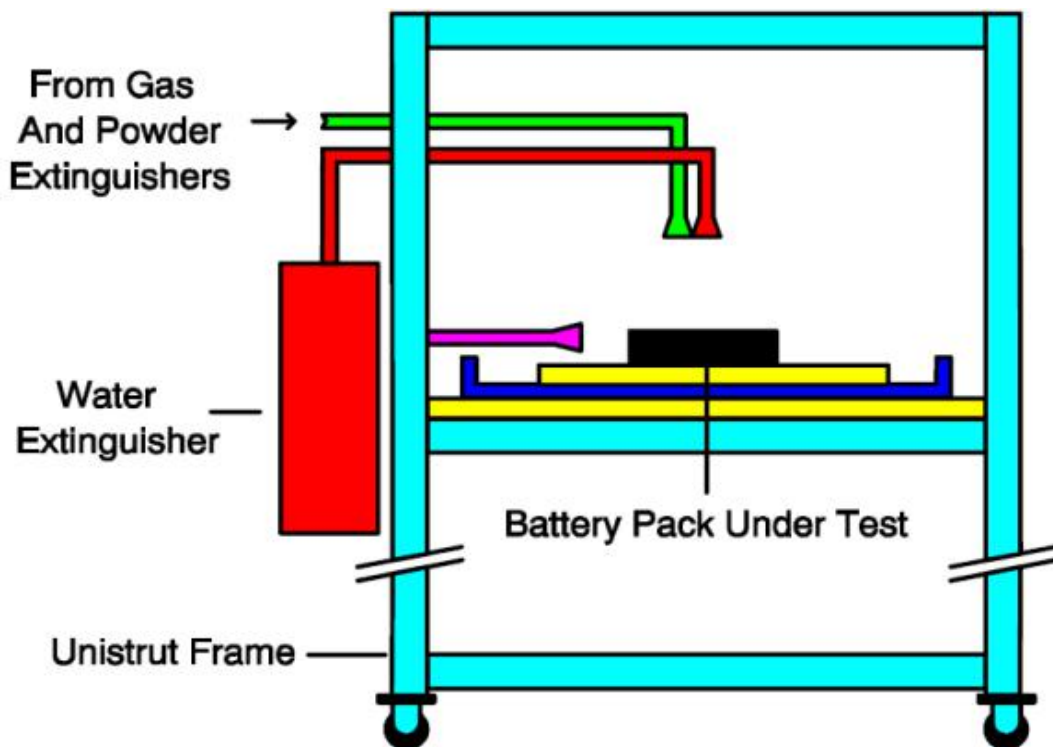


图 5-2 锂电池火灾扑救实验平台示意图

5.1.3 CAA 锂电池火灾灭火剂技术

与美国联邦航空管理局（FAA）一样，为提高航班内便携式锂电池设备消防安全技术，2003年，英国民航局（CAA）研究了水基型、哈龙、FE-36、干粉灭火剂及灭火毯对扑救锂电池火灾的效果，旨在筛选出抑制便携式锂电池设备火灾的最佳灭火剂。并在此项研究的基础上，发布了飞机上便携式锂电池设备火灾处置技术指导手册。

英国CAA选择了不同型号的灭火器，研究了水基型、哈龙、FE-36、干粉灭火剂及灭火毯对扑救锂电池火灾的效果，通过改进的灭火器喷头及管道，采用过充或加热的方式，在锂电池安全性能标准测试装置内开展灭火实验。灭火室内布有两个通风口，以模拟空气流动，实验装置如图2-2所示。

CAA 针对便携式电子设备用典型锂电池，包括方形锂电池、柱状锂电池及镍氢锂电池等，搭建锂电池成组着火、电子设备着火及行李包内电子设备着火三类火灾模型，进行灭火实验，发现，火灾模型及灭火剂类型是影响锂电池火灾灭火效果的重要因素，且 Halon 和 FE-36 的灭火效果更好。

通过此次项目研究，英国民航局（CAA）推荐Halon和FE-36灭火剂处置航班便携式锂电池设备火灾。

5.1.4 中船社锂电池火灾灭火剂技术

近年来，为应对国际海事组织（IMO）船用排放的高要求，进一步推动中国海洋保护相关政策，新型清洁能源如大容量锂电池等在航海领域已得到越来越多的应用，但与此同时，锂电池火灾安全问题变得越来越突出。为降低锂电池火灾危险性，中国船级社武汉规范研究所开展了扑救船用动力锂电池火灾灭火剂有效性的研究，对比分析了二氧化碳，干粉及七氟丙烷灭火剂对抑制锂电池的效果。

武汉规范研究所搭建了如图5-3所示的锂电池火灾扑救模拟单室，实验用锂电池容量为100Ah，工作电压为3.2V，外壳用塑料包装，配有泄压口。实验采用LPG外火引燃的方式，灭火剂通过管网，从侧面喷入单室，并通过热电偶记录单室内的温度变化。



图 5-3 实验灭火单室及动力锂电池实物图

为筛选出扑救锂电池火灾的最佳灭火剂，实验选择了二氧化碳，干粉及七氟丙烷三种药剂，以灭火时间，复燃率及产烟效果三个方面综合评价其有效性，单组实验进行三次平行实验。

实验发现，使用二氧化碳灭火效果较差，出现了复燃；干粉灭火剂对锂电池火灾几乎没有效果，甚至在实验过程中还出现了爆炸；七氟丙烷灭火剂对扑救锂电池火灾效果最佳，未发生复燃。

在灭火剂筛选实验的基础上，武汉规范研究所对船用动力锂电池消防安全给出了如下几点建议：

- （1）锂电池火灾危险性较大，存储时应控制数量，并建立防火分区。
- （2）电池外部包装应用不燃或难燃材料。
- （3）建议在电池仓库安装七氟丙烷灭火系统。
- （4）若在电池仓库安装二氧化碳灭火系统，则要有足够的冷却时间，且灭火后不得立即开门。

(5) 电池应尽可能安装在船中部，以避免碰撞起火。

5.2 灭火剂理论分析

5.2.1 氢氟碳类灭火剂

目前市场上认可且应用比较广泛的主要是七氟丙烷（HFC-227）灭火剂和三氟甲烷（HFC-23）灭火剂。

(a) 七氟丙烷灭火剂

七氟丙烷灭火剂是由美国大湖公司开发的，商品名称为 FM200。它是一种无色无味的气体，化学分子式为 $\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$ ，相对分子质量为 170，密度约为空气的 6 倍，由氮气作为驱动气体，分为内储压和外储压式。其灭火机理主要是抑制化学链式反应，灭火浓度约为 7%。但是其 GWP 值（温室效应潜能值）高达 3880，大气存留时间为 36.5 年，且据美国 FM 的检测，七氟丙烷产生的氟化氢是哈龙 1301 的 8~10 倍，联合国于 1997 年 12 月在日本京都签订的《京都议定书》中，HFC-227 被列为受限物质之一。

(b) 三氟甲烷灭火剂

三氟甲烷灭火剂是由美国杜邦公司率先人工合成的气体灭火剂，商品名为 HFC-23，化学分子式为 CHF_3 ，是一种无色，几乎无味，不导电的气体，密度大约为空气的 2.4 倍。三氟甲烷灭火剂主要以物理和化学方式抑制火焰，灭火浓度为 12.4%，比哈龙 1301 高 1 倍。三氟甲烷的 ODP 值（消耗臭氧潜能值）为 0，但是 GWP 值为 6，但 ALT 值（大气存留寿命）高达 243 年，因此，不宜作为长期使用的哈龙替代灭火剂。

5.2.2 氟碘碳类灭火剂

氟碘碳灭火剂主要是指三氟碘甲烷灭火剂（FIC-13），分子式为 CF_3I ，三氟碘甲烷灭火剂主要以化学机理抑制火焰，当其与火焰作用时，由于高温的作用分解出碘基参与中断燃烧的链式反应，从而达到灭火效果，灭火效率高。三氟碘甲烷的设计浓度为 5%，比哈龙 1301 灭火剂设计浓度要低。但是其 NOAEL 值（未观察到不良反应最高浓度）仅为 0.2%，LOAEL（可观察到不良反应最低浓度）仅为 0.4%，都远远低于设计浓度，因此不宜在有人场所下使用，这使得三氟碘甲烷的应用具有很大的局限性。

5.2.3 惰性气体灭火剂

惰性气体灭火剂主要指 IG-541, IG-55, IG-100, IG-01 等灭火剂, 它们主要由氮气, 二氧化碳及氩气组成, 这些组成成分在大气中均自然存在, 其物理化学性质稳定, 清洁, 环境友好, 对人体无害, 目前在计算机房, 数据处理室, 图书馆等场所得到了较为广泛的应用。但是, 由于惰性气体灭火剂主要是通过降低空间内氧气浓度的方式而熄灭火焰的, 这导致了其灭火浓度偏高, 灭火剂用量巨大, 如 IG541 的灭火浓度约为 30%。惰性气体灭火系统所使用的气瓶数较哈龙 1301 及 HFC-227 多 1~3 倍, 系统庞大, 且由于这些灭火剂的成分均属于不凝性气体, 灭火剂气罐储压高, 危险性较大。

5.2.4 热气溶胶灭火剂

热气溶胶灭火剂是由氧化剂、还原剂及粘合剂等组分经氧化还原反应生成的具有灭火效能的气溶胶, 主要通过化学抑制及吸热降温机理抑制火焰, 灭火效能高, 无需耐压设备, GWP 及 ODP 值均为 0, 目前, 在通讯基站, 油库及计算机房等场所得到了广泛的应用。但是, 由于氧化还原反应过程中会产生高温, 这对灭火具有一定的副作用, 用户对于高温也会存在抵触心理, 且气溶胶存在一定的腐蚀性, 对于精密仪器等高科技设备场所并不适用, 这些都限制了热气溶胶灭火剂的进一步开发与应用。

5.2.5 超细干粉灭火剂

超细干粉灭火剂是指粒径一般为 $0.1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 的超细微粒, 采用高压气体作为驱动力, 使其分散于灭火场所中, 以化学抑制及吸热降温机理熄灭火焰。超细干粉灭火剂与普通干粉灭火剂相比, 具有粒径小, 灭火浓度低, 流动扩散性能好等优点, 适合扑灭全淹没及局部火灾, 在仓库, 船舶客舱及配电站等场所均已得到广泛应用^[22]。虽然超细干粉灭火剂的 ODP 和 GWP 值均为 0, 且能成功扑灭 A、B、C 及带电火灾, 但其类气体的流动扩散性能会大大降低能见度, 且灭火后有残留, 因此不适合在有人场所和精密仪器场所中使用。

5.2.6 细水雾灭火剂

细水雾是指在最小设计工作压力下, 距喷嘴 1m 处的平面上, 测得的细水雾微粒直径 $D_{v0.99}$ 不大于 $1000\mu\text{m}$ 的雾滴。细水雾灭火剂对环境人均不会产生危害, 灭火效率高, 耗水量少, 现已在动力机房, 燃气涡轮封闭室, 船舱及图书馆

等场所得到了较为广泛的应用。但是，细水雾灭火系统的成本相对较高，且由于细水雾灭火剂在全淹没条件下主要通过窒息机理熄灭火焰，导致了其灭大火容易，灭小火困难，而灭火系统主要针对的大多为初期火灾，这使得细水雾灭火系统的应用受到了一定的限制。

5.2.7 BTP 灭火剂

1994 年美国环保署、国防部等通过 20 年的联合研究，发现 1-溴-3,3,3-三氟丙烯（1-BTP）是一种极具开发潜力和应用价值的新型哈龙替代灭火剂。BTP 液体密度为 1.65g/m^3 ，分子量为 174.95，ODP 值为 0.0037，ALT 值约为 4 天，美国国家标准技术研究院公布的研究表明，其灭火浓度约为 2.6%，但其 NOAEL 值仅为 0.5%，LOAEL 值仅为 1.0%。而 2-BTP 的 NOAEL 值也仅为 2.6%，LOAEL 值为 4.0%，毒性与哈龙 1211 相当，因此，BTP 灭火剂不适合在有人场所使用。

5.2.8 全氟己酮灭火剂

2001 年 5 月，美国 3M 公司推出了商品名为 FK-5-1-12 的防火液体，即全氟己酮，化学代号为 FK-5-1-12，英文名为 $\text{C}_6\text{-Fluoroketone}$ ，简称为 PFMP，分子式为 $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{COCF}(\text{CF}_3)_2$ 。目前，全氟己酮在美国、加拿大、欧洲、澳大利亚、日本和韩国等地已登记使用，且由安素公司开发的全氟己酮灭火系统也已经上市，气体介质灭火系统委员会和美国国家消防协会已将全氟己酮添加进了 ISO-14520 和 NFPA2001 标准中，全氟己酮被美国《时代周刊》评为 2004 年最佳发明之一，被誉为是一种可完全替代哈龙且能长期使用的灭火剂，2010 年被加拿大温哥华冬奥会指定为气体灭火剂唯一使用产品。此外，Hodges S E 等研究发现，全氟己酮还可被用作表面清洁剂，发泡剂和溶剂。

全氟己酮灭火剂是一种无色透明的液体，相对分子质量为 316.04，密度约为 1.6g/cm^3 ，沸点为 49.2°C ，常温下为液体，适合运输和储存，且无泄漏风险，因为室温下泄漏的只是氮气，只需重新密封充氮即可。全氟己酮的汽化热只有水的 $1/25$ ，而蒸汽压则是水的 12 倍，因此施放后可迅速气化，扩散至灭火空间，特别适合扑灭全淹没火灾。根据 ISO14520-5 标准及相关研究报告显示，全氟己酮灭火剂可以在 -20°C 至 50°C 正常使用，表 5-1 为全氟己酮灭火剂的理化性能表。

表 5-1 FK-5-1-12 灭火剂理化性能

物理性质	全氟己酮
化学式	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$

相对分子量	316.04
沸点(1atm), /°C	49.2
冰点, /°C	-108
密度 (25°C下饱和液体), / (g/mL)	1.6
密度(25°C下 1atm 下的气体), / (g/mL)	0.0136
比容 (25°C下 1atm 下), / (m ³ /kg)	0.0733
液体粘度 0°C/25°C, / (cSt)	0.56/0.39
汽化热 (在沸点时), / (kJ/kg)	88.0
水在全氟己酮中的溶解度 25°C, wt%	<0.001
蒸汽压 25°C, /Pa	5.85
绝缘强度, 1atm (N ₂ =1.0)	2.3

全氟己酮灭火剂灭火浓度低, 约为 4%~6%, 和 Halon1301 灭火剂相当。对金属腐蚀性小, 不导电, 易挥发, 灭火后无残留, 主要通过物理降温机理熄灭火焰。ODP 值为 0, GWP 值为 1, 在大气中的寿命仅约为 5 天, 不存在环境污染问题。Jackson D A 等发现全氟己酮在大气中的光解, 水解及水合作用是共同存在的, 且光解占主导作用。Rayne S 等研究了全氟己酮与水的热力学平衡, 发现施放到大气中的全氟己酮几乎全部都存在于气相中。D'Anna B 等研究了全氟己酮灭火剂在太阳光作用下的分解情况, 发现全氟己酮的分解速率约为 $6.4 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$, 在大气中存活的时间约为 1 周, 而它的 GWP 值被认为可以忽略, 这与量子理论相符。

3M 公司研究发现, 将纸张, 电视机等浸没到全氟己酮药剂中, 未产生任何损坏, 对丁基橡胶和丁腈橡胶等无明显化学反应, 是一种绿色环保的灭火剂, 已经获得美国环保署新替代物政策 (SNAP) 认可, 被批准用于有人场所。全氟己酮灭火剂 NOVEL 值和 LOAEL 值均大于 10%, 安全余量高达 67~150%, 研究显示, 全氟己酮的大鼠皮肤或食入的半数致死剂量 (LD₅₀) 均大于 2000mg/kg, 大鼠吸入蒸汽的 LD₅₀ 为 1227mg/L。

5.2.9 典型灭火剂综合对比

综上所述, 对于非气体灭火剂而言, 细水雾灭火系统虽然清洁, 无污染, 但其运营及维护成本较高, 且不利于扑灭初期火灾; 超细干粉和热气溶胶灭火剂灭

火浓度低，GWP 和 ODP 值均为 0，但灭火后残留大，有腐蚀，会造成二次污染；对于气体灭火剂而言，七氟丙烷灭火剂毒性低，灭火效率高，但其 GWP 值高达 3880；三氟甲烷灭火剂毒性小，沸点低，但其灭火效率不高，ALT 值高达 243 年；三氟碘甲烷灭火效率高，但其 NOAEL 仅为 0.2%，远低于设计浓度，无法用于有人场所；IG541 等惰性气体灭火剂虽然清洁，环保，但其灭火效率低，储存压力高，且存在安全隐患；BTP 灭火剂灭火效率高，在大气中易分解，但其 NOAEL 值仅为 2.6%，安全余量低；而全氟己酮灭火剂不但灭火效率高，GWP 和 ODP 值均为 0，安全余量高，且施放后无残留，对人和环境均无影响，是一种极其高效环保的哈龙替代灭火剂。表 5-2 为几种哈龙替代灭火剂的性能对比表。

表 5-2 几种哈龙替代灭火剂的性能对比

灭火剂	HFC-227	HFC-23	FIC-13	2-BTP	FK-5-1-12
分子量	170	70	196	175	316
沸点（℃）	-16.4	-82.1	-22.5	33.5	49.2
灭火浓度（杯式燃烧器，正庚烷，%）	6.7	12.6	3.5	约 2.6	4.5
ODP 值	0	0	0	0.0037	0
GWP 值	3880	6	<5	4	1
ALT 值	36.5 年	243 年	<1 天	4 天	5 天
NOAEL（%）	9.0	30	0.2	2.6	10
LOAEL（%）	10.5	>30	0.4	4	>10
安全余量	3-20%	78-130%	无	无	67-150%

基于灭火剂理论分析，结合电动汽车动力电池仓特点，项目组选用了水基型灭火剂、干粉灭火剂、FK-5-1-12 灭火剂开展灭火实验，旨在筛选得到抑制动力电池火灾的最佳灭火剂。

5.3 锂离子电池火灾灭火实验平台研制

5.3.1 实验平台简介

锂电池火灾自动试验平台是一套专门为锂电池灭火试验开发的集成性试验灭火平台，主要应用于锂电池灭火试验，平台主要由水系统灭火试验装置和气体

灭火系统试验装置两部分组成，两部分共用一套控制柜，整套平台具有喷放细水雾、水喷雾、泡沫喷雾、七氟丙烷和全氟己酮等灭火剂的功能，具有整体自动化程度高，使用简单方便，占地面积小，可重复使用等特点。

5.3.2 水系灭火系统试验装置

5.3.2.1 装置组成

本系统装置主要由细水雾灭火系统供水装置和水喷雾灭火系统供液装置两大部分组成，其中水喷雾灭火系统供液装置又包含了固定式水喷雾灭火系统供液装置和泡沫水喷雾联用系统供液装置两部分，具体组成见下图：

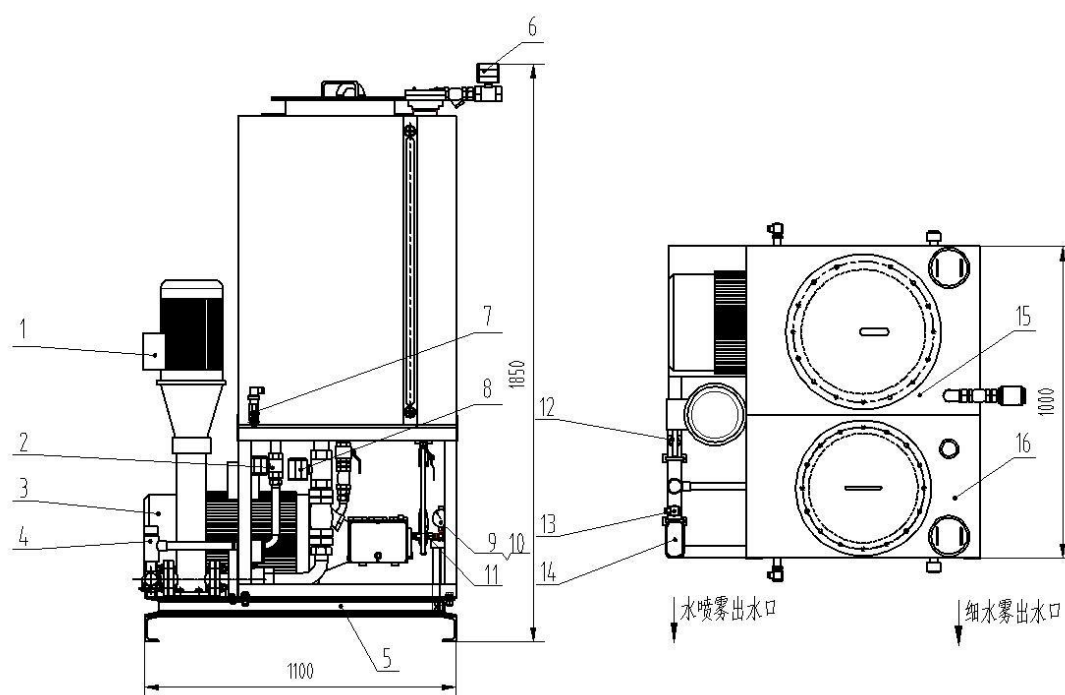


图 5-4 水灭火系统试验装置外形示意图



图 5-5 水灭火系统试验装置实物图

5.3.2.2 工作原理

水系统试验装置的工作原理可分为细水雾灭火系统工作原理和水喷雾灭火系统工作原理两部分：

（1）细水雾灭火系统工作原理

本试验装置的细水雾灭火系统根据实际情况选用开式细水雾灭火系统，然后经过一定的改制而成，主要由泵组单元、水箱、喷头以及供水管网等组成，其工作原理是通过电机带动高压柱塞泵抽取装置水箱内部的洁净水经管网输送至特制的细水雾喷头处喷放灭火：

装置有两种启动方式，分别为手动启动和自动启动，自动状态下，可以通过总控制柜预设启动时间、预设喷放时长从而达到自动启停的目的；手动状态下可以通过总控制柜上的启动、停止按钮，直接控制装置的启停；在整个试验过程中，试验前可以通过安装在装置上的调压泄压阀来预设系统的工作压力，系统的压力可由安装在主管路上的压力传感器实时监测并传输至控制柜。

（2）水喷雾灭火系统工作原理

常规水喷雾系统的工作原理是：当系统的火灾探测器发现火灾后，自动或手动

打开雨淋报警阀组,同时发出火灾报警信号给报警控制器,并启动消防水泵,通过供水管网到达水雾喷头,水雾喷头喷水灭火;考虑到本系统的应用主要在灭火试验,故在常规水喷雾系统上做了一定的改动,本水喷雾灭火系统装置使用一套泵组装置(离心泵),具备可选择喷放水雾或喷放泡沫水雾的功能,其主要工作原理是通过总控柜控制泵组进液口的进液选择阀和安全溢流出口的回流选择阀,从而控制泵组抽取的对象(选择从水箱抽取水或从泡沫液箱抽取泡沫液),进而实现喷放水雾或泡沫喷雾的目的。

装置有两种启动方式,分别为手动启动和自动启动,自动状态下,首选需要选择喷放形式(喷水雾或泡沫水雾),然后通过总控制柜预设启动时间、预设喷放时长从而达到自动启停的目的;手动状态下可以通过总控制柜上对应的水雾或泡沫喷雾的启动、停止按钮,直接控制装置的启停;在整个试验工程中,试验前可以通过安装在装置上的调压泄压阀来预设系统的工作压力,系统的压力可由安装在主管路上的压力传感器实时监测。

水系统试验装置水箱和泡沫箱上均安装有液位传感器可实时监测水箱内的液位信息,实现高、低液位报警以及枯液位自动停泵报警等功能,同时在低液位时水箱部分也可联动电磁阀为水箱自动补水。

5.3.3 气体灭火系统试验装置

5.3.3.1 装置简介

气体灭火系统试验装置是一套本着方便试验、节约占地面积、兼顾功能和经济成本等理念设计的一套试验用灭火装置,其主要有由外贮压七氟丙烷灭火系统和外贮压全氟己酮(1230)灭火系统两部分组成,外贮压七氟丙烷灭火系统和外贮压全氟己酮(1230)灭火系统共用一套动力气瓶,其控制部分和水灭火系统试验装置共用一个总控制柜,如图 5-6、图 5-7 所示。

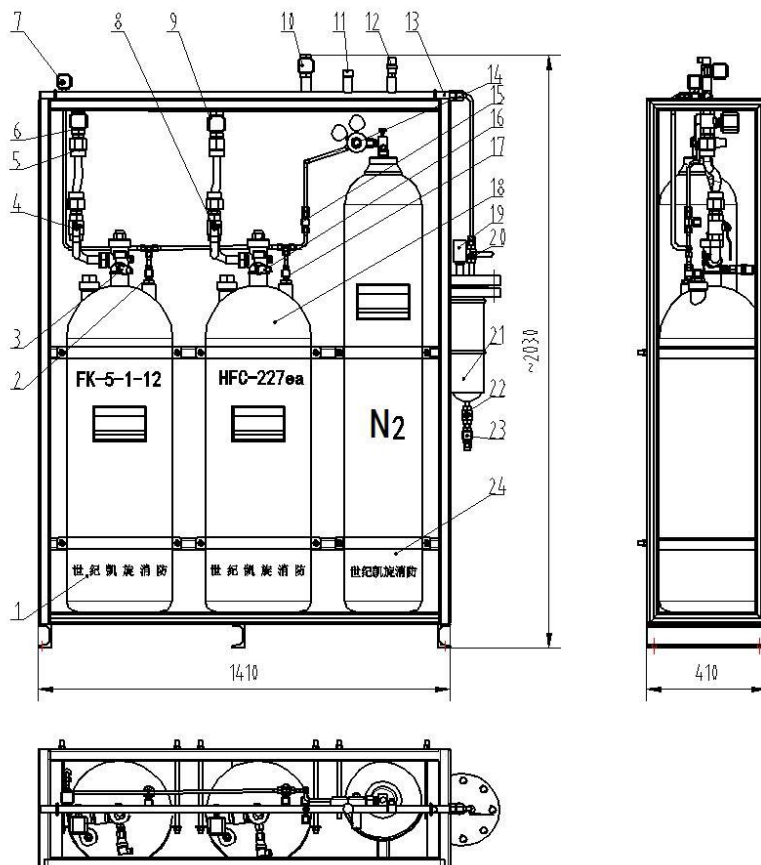


图 5-6 气体灭火系统试验装置外形示意图



图 5-7 气体灭火系统试验装置实物图

5.3.3.2 工作原理

气体灭火系统试验装置的工作原理可分为外贮压七氟丙烷灭火系统工作原理和外贮压全氟己酮灭火系统工作原理两部分，但由于两部分工作原理基本一致故本节只取其中的外贮压七氟丙烷部分加以说明，具体工作原理如下：

本试验用七氟丙烷灭火系统由于需要具定量输出灭火剂以及控制输出压力的功能，所以本装置在原外贮压七氟丙烷灭火系统的基础上进行了相应改动，其主要工作原理是动力瓶组释放出的动力气体（通过氮气减压器调节，压力略大于本次试验所需的压力值即可）经驱动管道通过进气管控制阀、动力气体电动控制阀进入灭火剂瓶组将灭火剂瓶组内的灭火剂压出，灭火剂经出气管路手动控制阀、出气管路电磁控制阀、集流管、转存瓶进气管路手动球阀等进入转存瓶，经安装在转存瓶上的液位检测装置检测液位，确定灭火剂的充入量；充装完毕后关闭动力气体电动控制阀、出气管路手动控制阀和出气管路电磁控制阀，打开充气管路电磁控制阀为转存瓶充气，待集流管上的压力传感器检测到系统压力达到设定值时，自动关闭进气管控制阀，此时转存罐完成一次充装，随后开启转存瓶出气管路手动球阀和气管路电磁控制阀即可实现喷放，当液位检测装置检测到喷放到试验所需的灭火剂量的时候，转存瓶出气管路电磁控制阀会自动关闭，若此时转存瓶内仍有余气体，可打开电磁排气阀，将瓶内压力排至略大于药剂饱和蒸汽压，随后关闭即可，一次试验结束。

系统具有自动启动和手动启动两种工作方式，主要启动流程为试验前需先通过氮气减压器调节动力瓶组的输出压力，一般调节为略大于本次试验的所需灭火剂瓶组压力（严禁大于 4.2MPa），然后在控制柜上输入灭火剂瓶组试压所需压力，灭火剂喷放量以及选择启动方式等，如果选择自动方式，则还需要提前预设启动时间，随后点击启动，装置开始自动充装灭火剂、然后自动充压，充压完成后自动按照预设启动时间开始喷放；如果选择手动方式，则需要手动点击操作充装灭火剂、充装压力以及手动启动喷放操作等；试验完成后若转存瓶内仍有余气体，可打开电磁排气阀，将瓶内压力排至略大于药剂饱和蒸汽压，随后关闭即可，然后系统复位即可。

5.3.3.3 七氟丙烷灭火系统

本项目设计研发了小当量外贮压式七氟丙烷灭火系统，该系统是将七氟丙烷

灭火剂和动力气体分别贮存于不同的容器内，在喷放灭火剂时，把动力气体充入灭火剂贮存钢瓶，使灭火剂容器内的压力迅速升高，推动灭火剂高速通过官网系统，实施喷放灭火。

由于灭火剂和氮气分别贮存于不同容器，不存在氮气溶解于灭火剂的现象，在输送过程中不好释放氮气，避免了气囊和双相流现象的发生，氮气推动液态七氟丙烷灭火剂在管路中能以单相流体流动，其灭火剂的流动性能得以优化，能够使用更细的管道输送更多的灭火剂。

平时灭火剂容器内的压力仅为灭火剂的饱和蒸气压，容器的充装密度可大大提高；通过压力的调整和氮气量的配置，提高灭火剂喷嘴入口压力，可改善灭火剂的雾化效果，增强灭火剂的灭火效果。

5.3.3.4 全氟己酮灭火系统

本项目研制的外贮压式全氟己酮灭火系统是将全氟己酮灭火剂和动力气体分别贮存于不同的容器内，在喷放灭火剂时，把动力气体充入灭火剂贮存钢瓶，使灭火剂容器内的压力迅速升高，推动灭火剂高速通过官网系统，实施喷放灭火。

由于灭火剂和氮气分别贮存于不同容器，不存在氮气溶解于灭火剂的现象，在输送过程中不好释放氮气，避免了气囊和双相流现象的发生，氮气推动液态全氟己酮灭火剂在管路中能以单相流体流动，其灭火剂的流动性能得以优化，能够使用更细的管道输送更多的灭火剂。

平时灭火剂容器内的压力仅为灭火剂的饱和蒸气压，容器的充装密度可大大提高；通过压力的调整和氮气量的配置，提高灭火剂喷嘴入口压力，可改善灭火剂的雾化效果，增强灭火剂的灭火效果。

外贮压式全氟己酮灭火系统具有以下诸多的优点：

（1）灭火剂输送距离将大大提高，最远可达 220m，更适合于远距离输送和大空间防护区；

（2）输送管路管径相对较小，可减少管道投资；

（3）喷嘴入口压力较高，改善了灭火剂的雾化效果，缩短了灭火剂喷放时间，加速灭火提高灭火效率；

（4）绿色环保。

外贮压式全氟己酮灭火系统特别适合于：

- (1) 大面积和大空间的气体灭火防护区；
- (2) 钢瓶间与防护区之间距离较远的工程。

外贮压式灭火系统不是简单的将动力气体贮存在另一个容器内或增加动力气体的贮存量，更重要的是如何在有效的时间内，充分利用动力气体的能量，使灭火剂得到更多的动力。外贮压式全氟己酮灭火系统采用了具有缓慢开启功能的电动控制阀，即使动力气体在一定的时间内恒压输出，其能量得到了充分利用，又能有效的避免了动力气体对灭火剂容器所构成的压力冲击。

5.4 锂离子电池火灾灭火策略研究

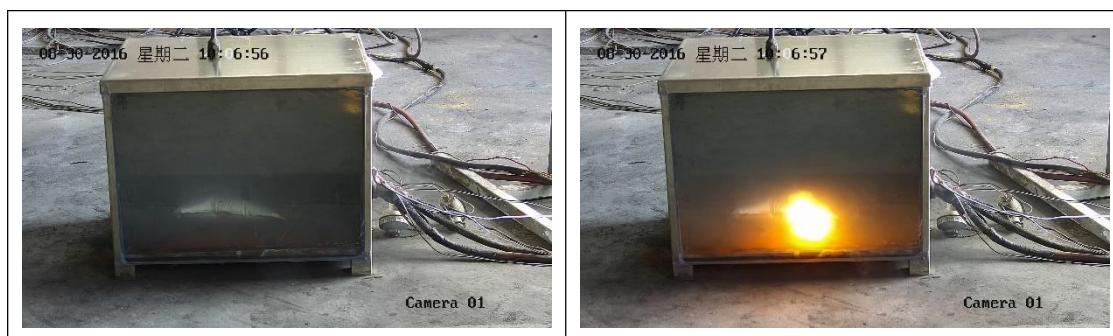
灭火剂的喷放时机直接关系到自动灭火系统的功能与效果，因此，在本项目中根据动力电池的燃烧特点，分别在出现明火和热失控初期释放灭火剂，观察灭火试验现象。

5.4.1 明火后喷放

采用过充的方式触发电池热失控，根据磷酸铁锂电池和三元锂电池燃烧特性，对于磷酸铁锂电池，在试验箱内布置点火装置，出现烟雾时点火；对于三元锂电池，则不布置点火装置。试验结果如下所示：

- (1) 较小空间内的磷酸铁锂电池

按照上述试验方法，将磷酸铁锂电池电芯过充至热失控，触发点火装置，点燃瞬间出现爆燃，将观察窗玻璃炸碎；手动启动灭火剂喷放装置，明火在 2s 内被扑灭，如图 5-8 所示。



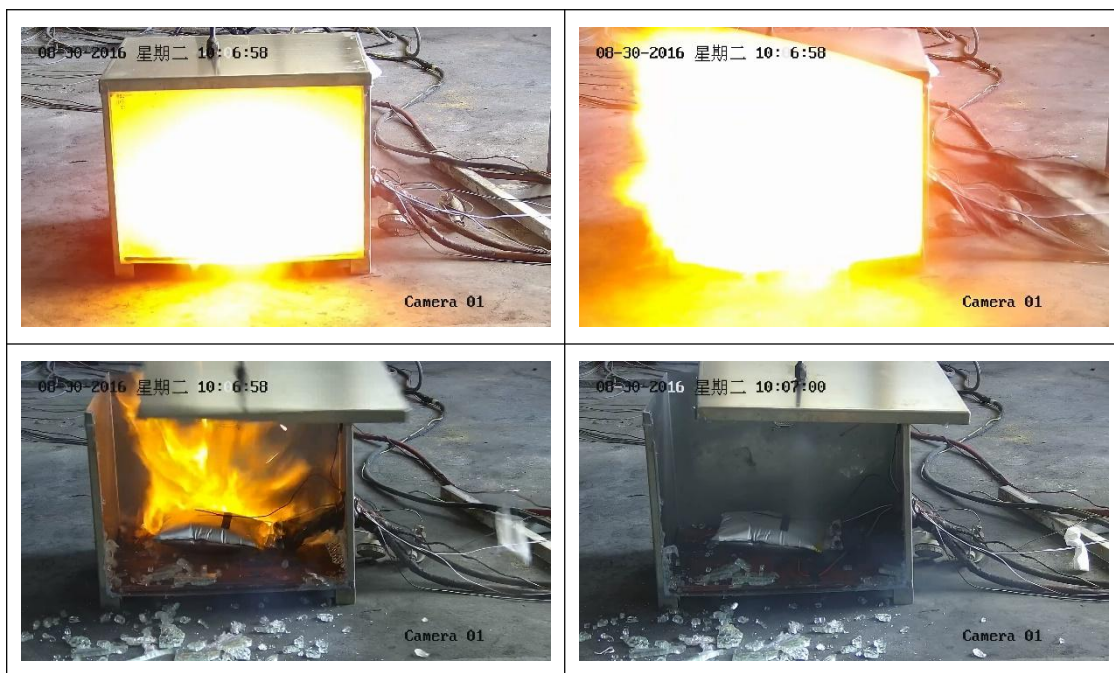
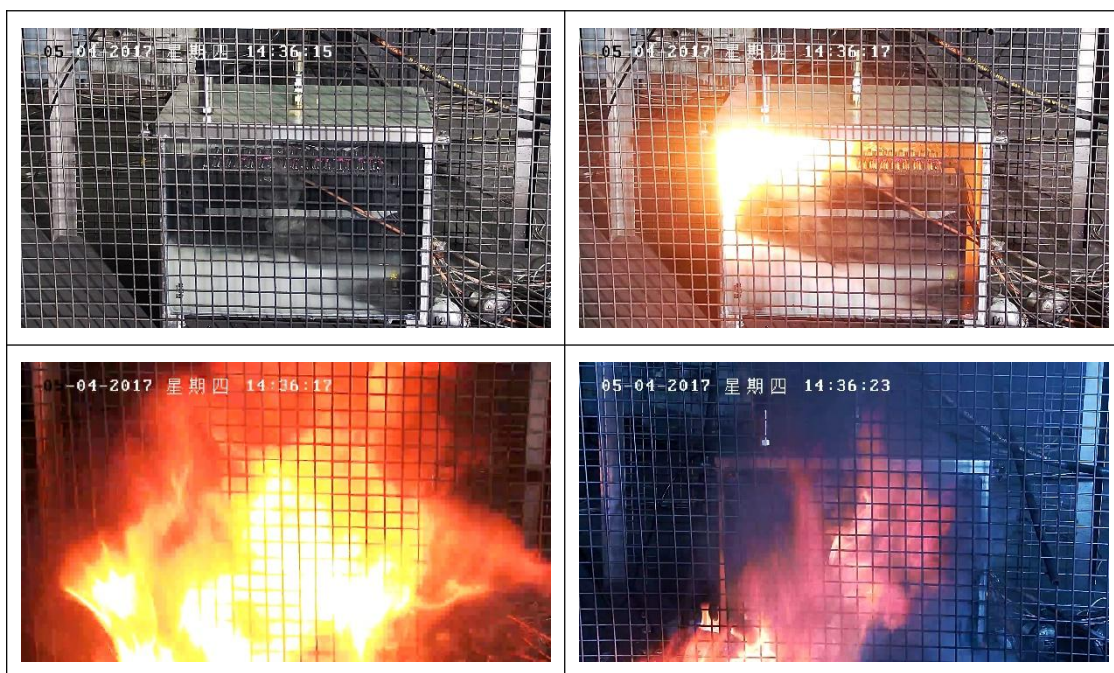


图 5-8 较小空间内的磷酸铁锂电池着火进程

(2) 较小空间内的三元锂电池

按照上述试验方法，将三元模块放置于试验箱中，过充至热失控，热失控初期溢出烟雾，一段时间后，电池左上角出现明火，随后形成爆燃，将观察窗炸碎；随后启动灭火剂喷放装置，随着灭火剂的喷放，火势逐渐减弱，最终明火完全扑灭。但三元锂电池随后发生热失控传递，溢出大量白色烟雾，在半敞开环境中出再次出现了轰燃，如图 5-9 所示。



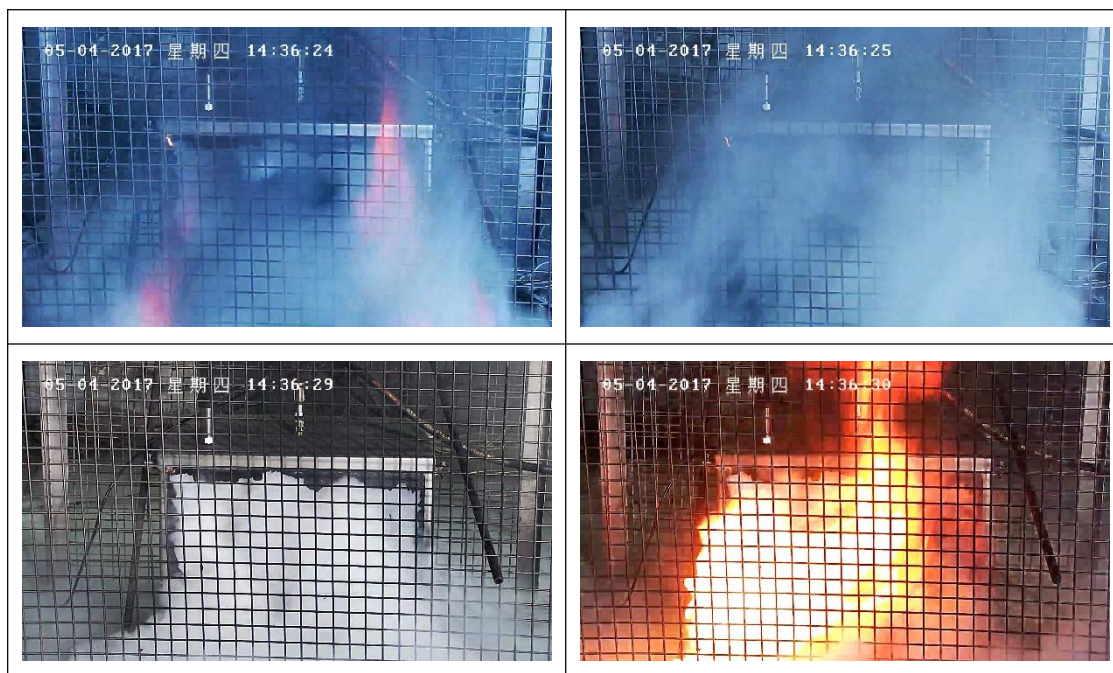


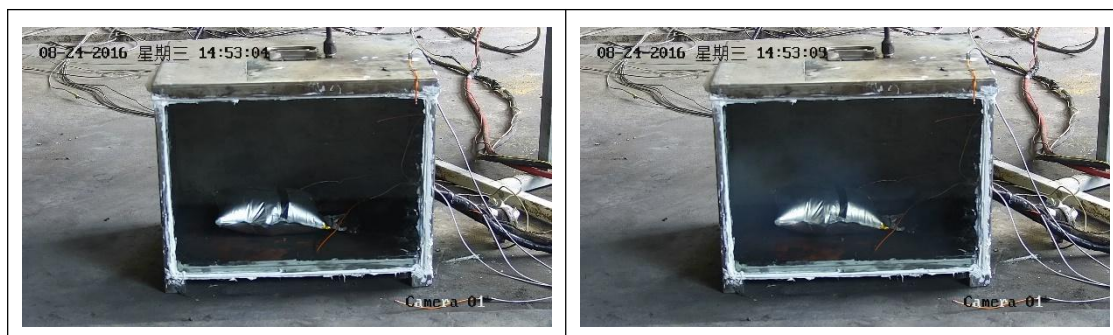
图 5-9 较小空间内的三元锂电池着火进程

通过上述试验现象可以看出,动力电池箱内电池发生热失控后,易发生爆燃、爆炸,突破电池包范围,造成火灾的蔓延扩散。在突破电池包后喷放灭火剂仅能对灭火剂直接作用空间的明火起到一定的抑制作用,灭火效果不佳。

5.4.2 失控初期喷放

(1) 磷酸铁锂电池

采用上述试验方法,在磷酸铁锂电池热失控初期,将灭火剂释放至模拟电池包箱体,随后触发点火装置。从视频截图中可知,在此条件下,模拟电池包箱体未发现明火。



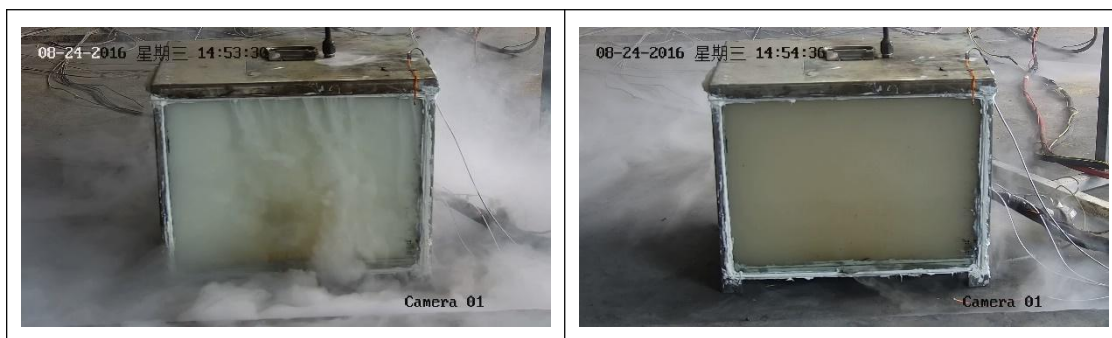


图 5-10 磷酸铁锂电池初期喷放

(2) 三元锂电池

采用同样的试验方法，在三元锂电池热失控初期，将灭火剂释放至模拟电池包箱体，通过视频观察试验现象。从视频截图中可知，在此条件下，模拟电池包内明火收到明显抑制，未出现充满箱体的火焰。



图 5-11 三元锂电池初期喷放

从上述的对比研究分析中可以看出，灭火剂喷放时机对于灭火效能尤为重要，在锂电池热失控初期将灭火剂释放至模拟电池包内，能有效避免电池包发生爆燃或爆炸。因此，灭火剂在热失控初期释放至电池包明显优于出现明火后释放。但是应当注意的是，灭火剂不能终止热失控电池的电化学反应，磷酸铁锂电池仍然能释放出大量可燃、有毒烟气。

5.5 模拟储能电柜内的锂离子电池火灾灭火实验研究

本文按 3.4 节所述的实验条件在模拟储能电柜内开展了灭火试验研究，灭火

装置灭火药剂采用全氟己酮，根据保护对象体积 800mm*600mm*2100mm 计算所需药剂量为 1.4kg，灭火装置使用 1.2Mpa 灌装压力。实验于 15:32:07 开始加热，于 15:47:25 开始出现烟气，烟气量逐渐增加，锂电池火灾探测装置探测数值增加，15:49:48 电池开阀，喷出浓烟，保护对象内充满浓烟。15:49:51 锂电池火灾探测装置达到报警值，此时手动启动灭火装置，8s 后灭火装置释放灭火药剂全氟己酮释放完成，保护对象内达到灭火浓度，然后观察 30min，期间使用 10kV 静电点火装置进行点火，点火周期为 1s，测试结果显示，30min 内储能电柜内未出现明火，实验进程如表 5-3 和图 5-12 所示。

表 5-3 锂离子电池热失控灭火实验进程表

时间	事件
15:32:07	开始实验
15:47:25	开始出现烟气
15:49:48	电池开阀，喷出浓烟，（未点燃）
16:03:47	气体散尽，实验结束



图 5-12 锂离子电池热失控灭火实验典型照片

5.6 火灾防控装置研发

根据火灾探测器选型和喷放方式的选择，课题组与杭州中传消防装备有限公司共同开展了火灾防控装置工程化的研究。

5.6.1 锂离子电池热失控早期探测装置工程化

锂离子电池热失控早期探测装置主要包括主控单元、测控单元和灭火剂释放单元等部分组成，其中主控单元部分用于实时接收各测控单元的采样信息，监测电池组运行状态，当测控单元发生告警或灭火事件时，主控单元可以记录事件数据信息，以供事后查询；测控单元部分用于实时测量动力电池包内温度和气体含量信息，根据测量结果、参比火灾探测设定参数、能够向主控单元发出告警信息或在火灾条件下控制灭火剂释放装置动作。同时，测控单元还能接收手动信号，启动灭火剂释放装置，功能示意图如图 5-13 所示。

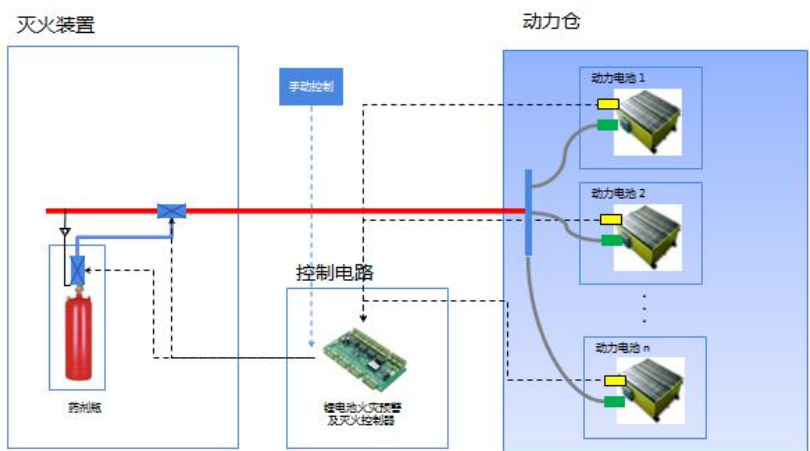


图 5-13 热失控探测系统示意图

本装置采用一氧化碳与温度的复合型火灾探测器，该探测器的实物如图 5-14 所示。

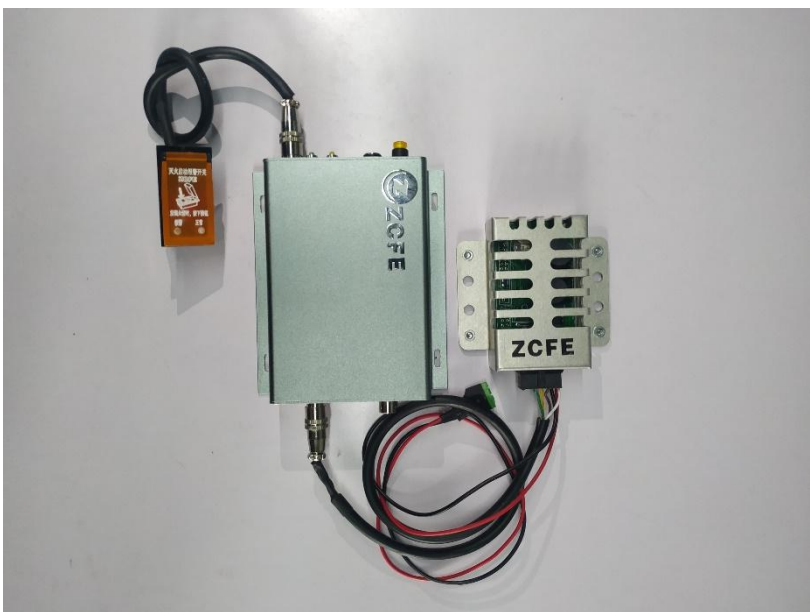


图 5-14 热失控探测系统实物图

在安装时，传感器模块安装在电池包内部，主控模块和手控开关安装在储能系统控制室，主控模块和传感器模块之间采用 CAN 总线通信，进行数据传输。本装置作为火情探测系统运行，发生异常时给出报警信号，驱动声光报警灯动作；同时提供动作信号给其它灭火单元启动自动消防控制，改装置的技术指标如表 5-4 所示。

表 5-4 锂离子电池热失控探测器技术参数

参数	指标	参数	指标
探测气体	一氧化碳	温度测量精度	±1℃
报警设定值	一氧化碳 190×10 ⁻⁶ 温度 69℃~85℃	气体测量精度	±10PPM
工作电压	24VDC	传感器模块功耗	0.6W
工作环境	温度-40℃~85℃， 湿度 90%~95%	主控单元功耗	1W
测温铂电阻	PT1000	满载数量	20 个

本装置主要有以下优点：

- (1) 实时监控电池箱内部温度和一氧化碳气体含量，可以上传后台显示。
- (2) 发现异常时记录数据便于事后分析。
- (3) 发现火情时分级控制，先发出告警信号，
- (4) 多重冗余设计防止误动作。
- (5) 每个电池箱配置一套传感器模块，多台传感器模块任意组合，实现整车监控。
- (6) 体积小巧，外观美观，方便运输

5.6.2 锂电池火灾灭火单元工程化

5.6.2.1 结构组成

根据锂离子电池火灾灭火效能测试结果，本项目选用全氟己酮灭火剂研制锂离子电池火灾灭火装置，灭火装置的组成主要由灭火剂贮存容器、电磁型容器阀、虹吸管、压力表组成，钢瓶内充装的灭火剂是全氟己酮灭火剂。全氟己酮灭火装置结构组成如图 5-15 所示。

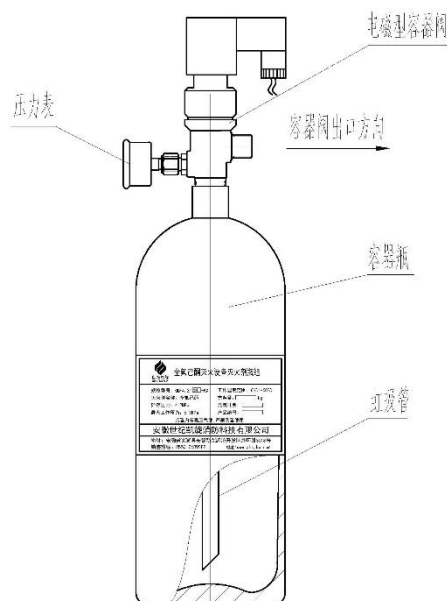


图 5-15 全氟己酮灭火装置结构组成

5.6.2.2 主要部件介绍

(1) 压力表

压力表采用的量程是 0~8MPa，绿色区域是 3.6 MPa~5.3MPa，材质是不锈钢，连接螺纹为 M10×1。

(2) 电磁型容器阀

容器阀的接口为 PZ27.8，材质为铜合金。安全阀爆破压力为 5.6 MPa±0.28 MPa，启动电源电压为 DC24V。

(3) 钢瓶

钢瓶采用无缝钢瓶，主体材质为 34Mn₂V，具体参数如下表。

表 5-5 灭火装置技术参数表

容积	公称工作压力/MPa	水压试验压力/MPa	直径/mm	高度/mm	重量/kg
4L	15	22.5	140	445	7
5L	15	22.5	140	470	7.5
7L	15	22.5	140	590	12.5
10L	15	22.5	159	690	15

5.6.2.3 灭火原理

一旦发生火灾时，通过火灾报警控制器发出启动信号启动电磁型容器阀，容

器阀阀芯打开，容器瓶内的全氟己酮灭火剂在内部氮气的挤下直接释放到管路中，沿着管路直接喷放到起火区域进行灭火。

5.7 锂离子电池火灾防控装置效能检验

5.7.1 实验模型

本文为验证锂离子电池火灾防控装置的性能，项目组委托了国家消防装备质量监督检验中心开展委托检验，以退役动力电池整包利用为场景，设计了如图 5-16 所示的灭火试验模型，采用 1000W 的加热片对锂离子电池进行加热，当被触发电芯发生热失控、且火灾防控装置启动后，关闭加热片，观测 30min，评价防护效能，测试评价实物照片如图 5-17 所示。

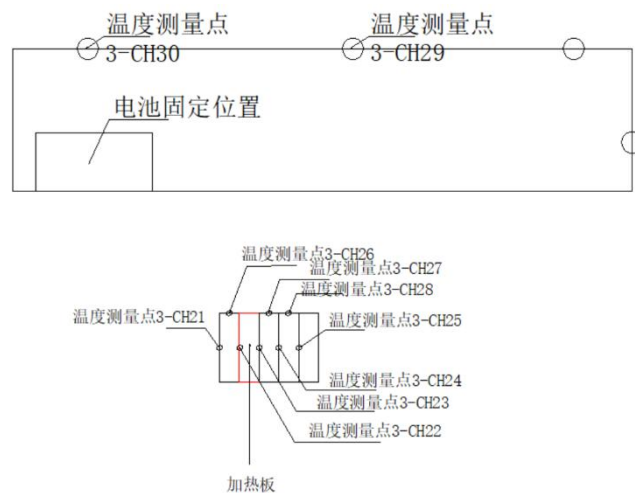


图 5-16 锂离子电池火灾防控装置效能验证试验模型



图 5-17 效能验证实验照片

5.7.2 实验结果

开始加热约 32min 后，锂离子电池发生热失控，但无明火出现，此时火灾防控装置随即启动，随后观测 30min，并实时监测动力电池包内的温度，结果显示，火灾防控装置启动 30min 内，电池包内与包外均无明火出现，且电池包测温点的温度都未超过 150°C，如图 5-18 所示，成功取得了国家消防装备质量监督检验中心的委托检验报告。

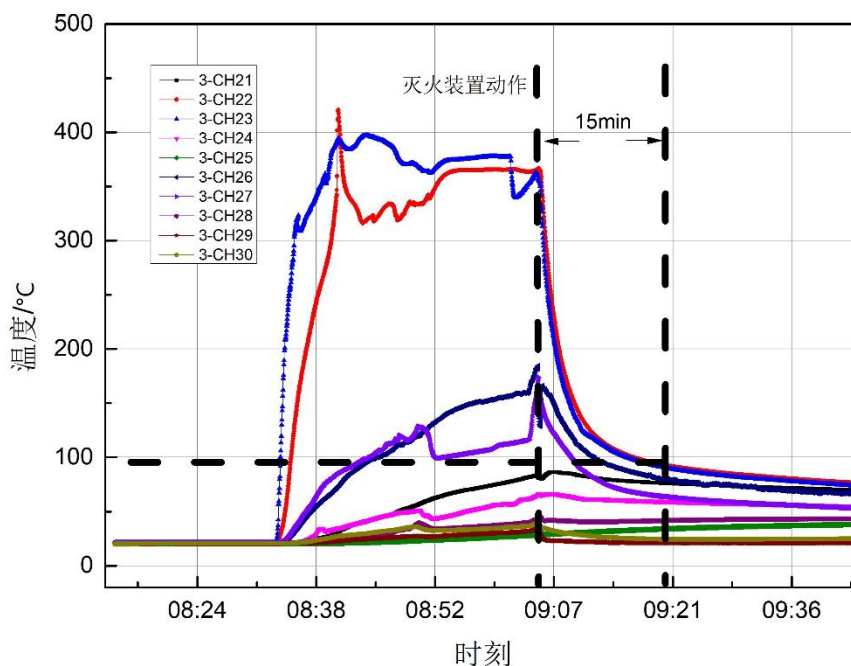


图 5-18 灭火装置检验温度曲线

5.8 小结

本章归纳了国内外对于锂离子电池火灾的抑制手段，理论分析了各类型灭火剂的灭火能力、实用范围、优缺点，研制了五合一的锂离子电池火灾灭火实验平台，对比了在锂离子电池在出现明火前后喷放灭火剂的抑制效果，测试结果显示，只有在锂离子电池出现明火前，预先喷放灭火剂，使得电池箱内部形成惰化氛围，才能有效抑制锂离子电池火灾，基于该喷放逻辑，本章在模拟储能电柜内开展了锂离子电池灭火实验，预先喷射灭火剂时无明火出现；融合灭火策略、探测模式，开发了锂离子电池储能系统火灾防控装置，并以动力电池梯次利用整包应用为场景，开展了灭火效能检验，火灾防控装置启动 30min 内，电池包内与包外均无明火出现，且电池包测温点的温度都未超过 150°C，成功取得了国家消防装备质量监督检验中心的委托检验报告。

6 动力电池梯次利用消防安全标准研究

6.1 动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估指南

储能电池是储能电站行业发展的重要基础，储能电池在受外部环境激励或内部制造缺陷的影响下会发生热失控，从而引发火灾、爆炸事故，而作为梯次利用的动力电池由于是二次利用，与新电池相比危险性更高。储能电站装机容量大，高压电线路较多，排布复杂，高压接触件长时间老化易形成局部热点，造成电气短路引发火灾，单元电池一旦着火，极易蔓延成灾，造成巨大财产损失。现阶段，运营企业对储能电站火灾危险性和危害认识不清晰，运营管理过程中如何辨识和评估火灾风险缺乏有效的手段。因此，伴随储能电站的大规模建设和投入使用，开展动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估方面标准的研究和制定，对于规范储能电站的火灾风险评估工作、提高运营企业预防和应对火灾事故的能力、提升储能电站消防安全水平具有重要的促进作用。

6.1.1 标准制定原则

在充分分析比较了国内相关领域火灾风险评估标准、调研了国内外动力电池梯次利用储能电站现状的基础上，参考了 GB 51048-2014《电化学储能电站设计规范》、XF/T 1369-2016《人员密集场所消防安全评估导则》、T/CSAE 88-2018《小型电化学储能电站消防安全技术要求》等标准的有关内容编写。本标准对动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估的工作程序及步骤、评估单元及评估内容、评估结论等方面做了较详细的规定，以便于规范储能电站的火灾风险评估工作，提升储能电站的消防安全水平。

6.1.2 标准主要技术内容

本标准共分为 6 章，规定了储能电站火灾风险评估的工作程序及步骤、评估单元及评估内容、评估结论。内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、评估的工作程序及步骤、评估单元及评估内容、评估结论分级。

（1）范围

本标准适用于动力电池梯次利用储能电站的火灾风险评估，规定了评估的工作程序及步骤、评估单元及评估内容、评估结论的要求，其它形式储能电站的火灾风险评估也可参照执行。

（2）规范性引用文件

列出了本标准中必不可少的引用文件。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

（3）术语和定义

对动力电池梯次利用储能电站进行了定义。

（4）评估的工作程序及步骤

动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估工作包括前期准备、现场检查、评估判定和报告编制等四个步骤。其中前期准备工作内容包括火灾风险评估对象和评估范围、组建评估组、收集火灾风险评估需要的相关资料、编制评估计划等；现场检查明确了检查的基本方法；评估判定明确了检查项的分类和评估结果分级依据；报告编制明确了火灾风险评估报告主要内容和报告附件的具体要求。

（5）评估单元及评估内容

评估单元及评估内容对本标准意义重大，依据动力电池梯次利用储能电站的实际情况确定了三个评估单元，包括消防安全管理单元、防火设计单元、消防设施单元等。其中：

- 1) 消防安全管理单元包含场所合法性、消防安全责任制、人员资质管理、消防安全培训及宣传教育、防火巡查和防火检查、火灾隐患整改、消防控制室管理、消防设施及器材维护管理、消防安全重点部位管理、专（兼）职消防队伍管理、灭火和应急疏散预案等 11 个方面的内容；
- 2) 防火设计单元包含选址、平面布置、耐火极限与防火间距、电池舱防火设计等 4 个方面的内容；
- 3) 消防设施单元包含消防给水系统、火灾自动报警系统、自动灭火系统、消防供电、消防器材配置、其他消防设施等 6 个方面的内容。

（6）评估结论分级

根据现场检查及评估判定的结果，给出了储能电站火灾风险分级标准，主要分为低风险、中风险、较高风险和高风险四级。

（7）附录

附录 A 和 B 分别给出了现场检查记录表和调查问卷内容示例，供标准使用

人员参考。

6.1.3 主要工作过程

标准起草过程中，调研了国内外资料，并开展大量实验获得一系列实验数据，在此基础上，标准编制组完成了《动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估指南（征求意见稿）》。具体工作过程如下：

- 1) 本标准于 2019 年 8 月 28 日获批立项。
- 2) 2019 年 10 月 10 日，成立了标准编制工作组，举行了工作组内部第一次会议，研究标准编制的主要思路和工作方向。
- 3) 2020 年 1 月 11 日，标准编制组完成第一稿标准草案，提交工作组内部讨论。在第二次编制工作会议上，对该标准草案针对的对象、内容等开展了集中研讨，并制定了具体工作计划。
- 4) 2020 年 3 月-8 月，编制组成员到北京、江苏、广东等地的消防部门、储能电站以及运营企业进行了实地调研和交流。
- 5) 2020 年 9 月 25 日，编制工作组内部第五次工作会议上，与会代表对该标准第二稿进行了集中研讨，提出了相关修改意见。
- 6) 2020 年 11 月 5 日，标准编制组在杭州召开了大范围的标准讨论会，来自国家消防装备质量监督检验中心、应急管理部沈阳消防研究所、中汽研、上海市质检院、宇通客车、吉利汽车、蔚来汽车、北汽、一汽、奇瑞、宁德时代、国轩高科、上海汽车城、吉利吉智、深圳泽宝、及安盾、枫盛汽车、Intertk、航天康达、威仕消防、中汽客、哲弗等参会单位的四十余名专家及技术人员参加了会议，会议对标准讨论稿的具体条款进行了讨论，收集了 30 余家单位 20 多条修改意见，起草组针对修改已经对标准文本进行了修改和完善，于 2020 年 11 月底形成了征求意见稿。
- 7) 2020 年 12 月 18 日至 2021 年 1 月 16 日征求意见，并对征求的意见进行汇总和处理，形成征求意见稿处理汇总表，2021 年 1 月 26 日形成送审稿，提交中国汽车工程学会；
- 8) 2021 年 2 月 2 日召开标准审查会。

6.2 动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置性能要求与试验方法

动力电池梯次利用储能系统易因自身制造缺陷、运行故障、外部激励等造成火灾或爆炸等灾害性事故。目前电动汽车梯次利用电池系统常用的三元锂电池和磷酸铁锂电池，其燃烧具有燃烧迅速、持续时间长、易复燃；燃烧温度高；燃烧猛烈、甚至爆炸；释放大量有毒有害、易燃气体；不同种类锂电池火灾行为差异较大等特点。安装火灾防控装置是抑制锂电池火灾，减少财产损失的有效措施之一，《动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置性能要求与试验方法》旨在为火灾防控装置的性能提出要求，并给出对应的试验方法，从而确保火灾防控装置的功能、质量满足动力电池梯次利用储能系统火灾防护的需要。

6.2.1 标准制定原则

本标准的制定是在充分调研动力电池梯次利用储能系统环境适应性与火灾防控装置灭火性能检验要求的基础上，针对车用梯次利用动力电池，开展了大量燃烧、灭火实验研究，掌握了锂电池灭火性能的关键技术指标，提出了相应的性能要求与试验方法，并以满足梯次利用储能系统应用要求为目标，对火灾防控装置及其零部件提出了相关性能要求，建立了实验方法。

本标准参考了 GB 2423.1《电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 A：低温》、GB 2423.2《电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验 A：高温》、GB/T 17626.2《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》、GB/T 17626.4《电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》、GB/T 17626.5《电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验》、GB/T 17626.6《电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度》、GB/T 17626.12《电磁兼容 试验和测量技术 振铃波抗扰度试验》、GB 25972《气体灭火系统及部件》、CSAE/T 86《电动汽车锂离子电池箱火灾防控装置性能要求与试验方法》等多个国家、行业标准。

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

6.2.2 标准主要技术内容

本标准共分为 6 章，规定了动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置的型号编制方法、性能要求、试验方法。内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、型号编制、性能要求、试验方法。

在火灾防控装置灭火性能方面，主要规定了 3 项要求：

（1）火灾防控装置启动时，若有明火出现，装置从接收到施放信号 30s 内应将明火扑灭，之后 30min 内不复燃，且电池试验箱测温点温度不超过 150℃；若无明火出现，装置从接收到施放信号 30min 内应无明火，且电池试验箱测温点温度不超过 150℃，从而保证快速灭火和抑制锂电池的火灾蔓延。

（2）电池试验箱外无明火出现，从而阻止或减缓火灾在电池箱外部的蔓延。

（3）电池试验箱不应出现明显变形，从而避免对电池箱造成破坏，引发火灾向电池箱外的快速蔓延。

在灭火性能试验方法方面，鉴于当前电动汽车用锂离子电池大多为磷酸铁锂和三元锂电池，本标准规定了灭火试验用标准锂电池。应至少分别以磷酸铁锂电池模组和三元锂电池模组作为试验对象开展灭火试验，并采用 12 串 2 并的方式连接，或使用厂家提供的锂电池作为试验对象。

为提高灭火试验的可行性，除触发模组外，本标准规定用用锂离子电池模组假体填充，以尽可能地模拟真实锂离子电池储能系统，同时降低试验成本。

采用《电动客车安全技术条件》推荐的加热和过充模型作为本标准灭火试验的火灾触发方式，同时，火情触发对象热失控产生的热量应非常容易传递至相邻单体蓄电池。

为模拟锂电池热失控时，电池箱内部出现静电火花的情况，使用电压为 10kV 的静电点火器以周期为 1-2 秒持续点火，直至防控装置动作。

6.2.3 主要工作过程

本标准于 2019 年 8 月 28 日获批立项；2019 年 9 月到 2020 年 1 月进行了标准相关的试验研究工作；2020 年 3 月至 5 月进行了标准编写工作；2020 年 6 月至 10 月对标准进行了讨论和修改。预计 2020 年 12 月底前完成标准的审查与发布。

2019年9月-2020年1月，开展锂离子电池燃烧特性研究，在100余次锂离子电池火灾燃烧试验的基础上，建立了磷酸铁锂、三元锂电池等多种类型锂电池的燃烧特点及火灾蔓延规律；开展锂离子电池火灾灭火效能研究，针对气体、干粉、水基型等多种灭火剂的灭火效果，提炼了评价锂离子电池火灾灭火效能的关键指标。

2020年3月-2020年5月，走访电动汽车整车企业、锂离子电池生产厂商、梯次利用企业等机构，建立了火灾防控装置在储能系统应用中需满足的要求；开展锂离子电池火灾防控装置灭火性能要求的调研，走访国家消防装备质量监督检验中心等权威检测机构，建立适用于锂离子电池火灾防控装置的性能指标及试验方法。

2020年5月20日，标准起草工作组召开内部讨论会议，与会代表对该标准的大纲进行了集中讨论，并对功能要求和试验方法进行了深入探究，形成了标准框架；

2020年6月-2020年10月，《动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置性能要求与试验方法》标准起草工作组召开了4次工作组讨论会，会议对标准讨论稿进行了集中研讨，提出了相关意见，编制组成员根据与会代表提出的意见和建议对标准进行了修改完善。

2020年11月5日，标准编制组在杭州召开了大范围的标准讨论会，来自国家消防装备质量监督检验中心、应急管理部沈阳消防研究所、中汽研、上海市质检院、宇通客车、吉利汽车、蔚来汽车、北汽、一汽、奇瑞、宁德时代、国轩高科、上海汽车城、吉利吉智、深圳泽宝、及安盾、枫盛汽车、Intertk、航天康达、威仕消防、中汽客、哲弗等参会单位的四十余名专家及技术人员参加了会议，会议对标准讨论稿的具体条款进行了讨论，收集了30余家单位40多条修改意见，起草组针对修改意见对标准文本进行了修改和完善，于2020年11月底形成了征求意见稿，并公开征求意见。

2020年12月18日至2021年1月16日征求意见，并对征求的意见进行汇总和处理，形成征求意见稿处理汇总表，2021年1月26日形成送审稿，提交中国汽车工程学会。

2021年2月2日召开标准审查会。

6.3 动力电池梯次利用储能系统消防安全技术条件

动力电池梯次利用储能系统易因自身制造缺陷、运行故障、外部激励等造成火灾或爆炸等灾害性事故。目前电动汽车梯次利用电池系统常用的三元锂电池和磷酸铁锂电池，其燃烧具有燃烧迅速、持续时间长、易复燃；燃烧温度高；燃烧猛烈、甚至爆炸；释放大量有毒有害、易燃气体；不同种类锂电池火灾行为差异较大等特点。《动力电池梯次利用储能系统消防安全技术条件》旨在为梯次利用储能系统的消防设计提供指导，从而提高储能系统的防火性能及消防安全等级，以满足动力电池梯次利用储能系统安全设计的需要。

6.3.1 标准制定原则

本标准的制定是在充分调研锂离子电池生产厂商、梯次利用企业、建筑设计研究院等机构的基础上，针对车用梯次利用动力电池，开展了大量燃烧、灭火实验研究，掌握了锂电池的火灾特性，提出了消防安全设计要求。

本标准参考了 GB 50058《爆炸危险环境电力装置设计规范》、GB 50016《建筑设计防火规范》、GB 8624《建筑材料及制品燃烧性能分级》、GB/T 19666《阻燃和耐火电线电缆通则》、GB/T 2408《塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法》、DL/T 5707《电力工程电缆防火封堵施工工艺导则》等多个国家、行业标准。

本标准按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

6.3.2 标准主要技术内容

本标准共分为 7 章，规定了动力电池梯次利用储能系统规划选址、平面布置、防火设计、消防设施。内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、规划选址、平面布置、防火设计、消防设施。

2.3 关键技术问题说明

（1）为降低梯次利用储能系统与民用建筑的耦合风险，要求三元锂离子电池储能系统不应设置在民用建筑内，磷酸铁锂电池储能系统不应设置在住宅和高层公共建筑内，当设置在其他公共建筑内时，应布置在建筑首层，且建筑的耐火等级不应低于二级。

（2）为降低梯次利用储能系统与厂房的耦合风险，要求储能系统不应设置在甲乙类厂房内，当设置在其他厂房内时，应设置在首层，且厂房的消防安全等

级应满足现行国家标准 GB 50016《建筑设计防火规范》中关于丙类厂房的要求，耐火等级不应低于二级。

（3）为降低梯次利用储能系统之间的火灾蔓延风险，要求储能系统之间的防火间距不应小于 6 米，当室外储能系统采用防火墙时，防火间距可不小于 3 米，防火墙长度、高度应超出储能系统外廓各 1 米。

（4）为降低梯次利用储能系统内的火灾蔓延速率，要求储能系统的电池架应采用不燃隔热材料进行分隔，且分隔单元不应超过 100kWh。

（5）为降低梯次利用储能系统热失控后发生爆炸的风险，要求通风系统应与气体探测器联动，当气体探测器达到气体可燃性下限（LFL）的 25%时，启动事故排风。

6.3.3 主要工作过程

本标准于 2019 年 8 月 28 日获批立项；2019 年 9 月到 2020 年 1 月进行了标准相关的试验研究工作；2020 年 3 月至 5 月进行了标准编写工作；2020 年 6 月至 10 月对标准进行了讨论和修改。预计 2020 年 12 月底前完成标准的审查与发布。

2019 年 9 月-2020 年 1 月，开展锂离子电池燃烧特性研究，在 100 余次锂离子电池火灾燃烧试验的基础上，建立了磷酸铁锂、三元锂电池等多种类型锂电池的燃烧特点及火灾蔓延规律，掌握了锂离子电池的主要危险性。

2020 年 3 月-2020 年 5 月，走访电动汽车整车企业、锂离子电池生产厂商、梯次利用企业、建筑设计研究院等机构，编制了梯次利用储能系统消防安全技术要求大纲；2020 年 5 月 20 日，标准起草工作组召开内部讨论会议，与会代表对该标准的大纲进行了集中讨论，形成了标准框架。

2020 年 6 月-2020 年 10 月，《动力电池梯次利用储能系统消防安全技术条件》标准起草工作组召开了 4 次工作组讨论会，会议对标准讨论稿进行了集中研讨，提出了相关意见，编制组成员根据与会代表提出的意见和建议对标准进行了修改完善。

2020 年 11 月 5 日，标准编制组在杭州召开了大范围的标准讨论会，来自国家消防装备质量监督检验中心、应急管理部沈阳消防研究所、中汽研、上海市质检院、宇通客车、吉利汽车、蔚来汽车、北汽、一汽、奇瑞、宁德时代、国轩高

科、上海汽车城、吉利吉智、深圳泽宝、及安盾、枫盛汽车、Intertk、航天康达、威仕消防、中汽客、哲弗等参会单位的四十余名专家及技术人员参加了会议，会议对标准讨论稿的具体条款进行了讨论，收集了 30 余家单位 30 多条修改意见，起草组针对修改已经对标准文本进行了修改和完善，于 2020 年 11 月底形成了征求意见稿，并公开征求意见。

2020 年 12 月 18 日至 2021 年 1 月 16 日征求意见，并对征求的意见进行汇总和处理，形成征求意见稿处理汇总表，2021 年 1 月 26 日形成送审稿，提交中国汽车工程学会。

2021 年 2 月 2 日召开标准审查会。

6.4 动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制指南

储能电池是储能电站行业发展的重要基础，储能电池在受外部环境激励或内部制造缺陷的影响下会发生热失控，从而引发火灾、爆炸事故，而作为梯次利用的动力电池由于是二次利用，与新电池相比危险性更高。储能电站装机容量大，高压电线路较多，排布复杂，高压接触件长时间老化易形成局部热点，造成电气短路引发火灾，单元电池一旦着火，极易蔓延成灾，造成巨大财产损失。现阶段，运营企业对储能电站火灾危险性和危害认识不清晰，运营管理过程中如何辨识和评估火灾风险缺乏有效的手段。因此，伴随储能电站的大规模建设和投入使用，开展动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制方面标准的研究和制定，对于提高运营企业应对处置火灾事故的能力、保障站内外人员安全具有重要的促进作用。

6.4.1 标准制定原则

在充分分析比较了国内相关领域灭火和应急预案标准、调研了国内外动力电池梯次利用储能电站现状的基础上，参考了 GB/T 29639-2013《生产经营单位安全生产事故应急预案编制导则》、GB/T 38315-2019《社会单位灭火和应急疏散预案编制及实施导则》等标准的有关内容编写。本标准对动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制的原则、程序和主要内容等方面做了较详细的规定，以便于规范储能电站的火灾应急预案编制工作，提升储能电站应对处置火灾事故的能力。

6.4.2 标准主要技术内容

本标准共分为 6 章，规定了储能电站火灾应急预案编制的原则、程序和主要内容等。内容包括范围、规范性引用文件、术语和定义、一般规定、5 预案编制程序和预案主要内容。

（1）范围

本标准适用于动力电池梯次利用储能电站运维单位的火灾应急预案编制，规定了火灾应急预案编制的原则、程序和主要内容，其它形式储能电站运维单位火灾应急预案编制也可参照执行。

（2）规范性引用文件

列出了本标准中必不可少的引用文件。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

（3）术语和定义

对动力电池梯次利用储能电站进行了定义。

（4）一般规定

明确了动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案（以下简称“预案”）的编制原则，即预案应遵循以人为本、依法依规、符合实际、注重实效的原则，明确应急职责、规范应急程序、细化保障措施。同时，根据设定灾情的严重程度和场所的危险性，将预案从低到高依次划分为二级。

（5）预案编制程序

标准介绍了火灾应急预案编制程序包含的 6 个步骤，分别是成立疏散预案编制工作组、资料收集、风险评估、编写预案、预案评审和适时修订预案等。其中：

1) 成立预案编制工作组

针对可能发生的火灾事故，成立以单位主要负责人或分管负责人为组长，单位相关部门人员参加的预案编制工作组，也可以委托专业机构提供技术服务，明确工作职责和任务分工，制定预案编制工作计划，组织开展预案编制工作。

2) 资料收集

预案编制工作组应收集与预案编制工作相关的法律法规、技术标准，以及国内外同行业火灾教训及应急工作经验，并了解储能电站使用单体电池、电池模块、

电池簇及电池舱的相关技术资料。

3) 风险评估

全面分析储能电站火灾危险性、危险因素、可能发生的火灾类型及危害程度，确定消防安全重点部位和火灾危险源，客观评价本单位消防安全组织、员工消防技能、消防设施等方面的应急处置能力，并针对火灾危险源和存在问题，提出组织应急处置的主要措施。

4) 编写预案

在风险评估结果的基础上，针对可能发生的各种火灾事故和影响范围分级分类编制，科学编写预案文本，明确应急机构人员组成及工作职责、火灾事故的处置程序以及预案的培训和演练要求等。

5) 评审与发布

预案编制完成后，单位主要负责人应组织有关部门和人员，依据国家有关方针政策、法律法规、规章制度以及其他有关文件对预案进行评审，并由本单位主要负责人在评审通过后签署发布，以正式文本的形式发放到每一名员工。

6) 适时修订预案

根据单位和场所生产经营储存性质、功能分区的改变及日常检查巡查、预案演练和实施过程中发现的问题，及时修订预案，确保预案适应单位基本情况。

(6) 预案编制内容

标准介绍了预案编制内容包含的 11 个方面及其细则，具体分别是编制目的、编制依据、适用范围、应急工作原则、单位基本情况、火灾场景设定、组织机构及职责、应急响应、应急保障、应急响应结束和后期处置。其中：

1) 编制目的

简述预案编制的目的和作用等。

2) 编制依据

简述预案编制所依据的有关法律、法规、规章、规范性文件、技术规范 and 标准等。

3) 适用范围

说明预案适用的工作范围和事故类型、级别。

4) 应急工作原则

说明单位应急工作的原则，内容应简明扼要、明确具体。

5) 单位基本情况

介绍编制中所需的单位基本情况，包括单位名称、地址、使用功能、建筑面积、建筑结构、主要人员、火灾危险源、消防设施状况等情况，以及储能电站的电化学体系、电池系统总容量和总电压、电池舱的数量、电池管理系统信息。

6) 火灾场景设定

明确预案应设定和分析可能发生的火灾事故情况，并列表说明，同时分析大风、雷电、暴雨、高温、寒冬等恶劣气候对储能电站运行、应急处置和人员疏散的影响，并制定针对性措施。

7) 组织机构及职责

介绍预案编制中的应急组织体系、组织机构、岗位职责和应急指挥部设置情况。

8) 应急响应

介绍预案内容中的“应急响应”应包含响应措施、指挥调度、灭火行动和与消防救援队伍的配合等方面的内容。

9) 应急保障

明确预案中“应急保障”部分应包含通信与信息、应急队伍、物资装备等方面的保障内容。

10) 应急响应结束

说明现场应急响应结束的基本条件和要求。

11) 后期处置

说明火灾现场警戒保护及协助调查、事故信息发布、污染物处理、故障抢修、恢复工作、医疗救治、人员安置等内容。

(7) 附录

列出了火灾应急预案编制基本格式。

6.4.3 主要工作过程

标准起草过程中，调研了国内外资料，并开展大量实验获得一系列实验数据，在此基础上，标准编制组完成了《动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制指南（征求意见稿）》。具体工作过程如下：

- 1) 本标准于 2019 年 8 月 28 日获批立项。
- 2) 2019 年 10 月 23 日，成立了标准编制工作组，举行了工作组内部第一次会议，研究标准编制的主要思路和工作方向。
- 3) 2020 年 1 月 15 日，标准编制组完成第一稿标准草案，提交工作组内部讨论。在第二次编制工作会议上，对该标准草案针对的对象、内容等开展了集中研讨，并制定了具体工作计划。
- 4) 2020 年 3 月-8 月，编制组成员到北京、江苏、广东等地的消防部门、储能电站以及运营企业进行了实地调研和交流。
- 5) 2020 年 9 月 24 日，标准编制组内部第五次工作会议上，与会代表对该标准第二稿进行了集中研讨，提出了相关修改意见。
- 6) 2020 年 11 月 5 日，标准编制组在杭州召开了大范围的标准讨论会，来自国家消防装备质量监督检验中心、应急管理部沈阳消防研究所、中汽研、上海市质检院、宇通客车、吉利汽车、蔚来汽车、北汽、一汽、奇瑞、宁德时代、国轩高科、上海汽车城、吉利吉智、深圳泽宝、及安盾、枫盛汽车、Intertk、航天康达、威仕消防、中汽客、哲弗等参会单位的四十余名专家及技术人员参加了会议，会议对标准讨论稿的具体条款进行了讨论，收集了 30 余家单位 20 多条修改意见，起草组针对修改已经对标准文本进行了修改和完善，于 2020 年 11 月底形成了征求意见稿。
- 7) 2020 年 12 月 18 日至 2021 年 1 月 16 日征求意见，并对征求的意见进行汇总和处理，形成征求意见处理汇总表，2021 年 1 月 26 日形成送审稿，提交中国汽车工程学会；
- 8) 预计 2021 年 2 月召开标准审查会。

7 结论

本项目针对动力电池梯次利用全过程中的消防安全问题与关键技术，从风险辨识、评估和控制的角度的角度，提升动力电池梯次利用的消防安全保障能力。重点研究了动力电池梯次利用的火灾风险评估技术，识别关键风险源，建立了典型应用场景消防安全评估方法；研究了分布式储能电站火灾防控技术，建立分布式储能电站典型诱导火灾模型，开发了多参数融合的动力电池梯次利用火灾防控装置，提出了火灾扑救策略；编制了动力电池梯次利用典型场所防火设计、灭火系统效能评价、消防安全管理等方面的标准，可得到以下结论：

本项目针对磷酸铁锂电池，在开放空间内通过加热板加热的方式触发热失控，在有外部点火源两种情况下开展热失控实验，测试结果显示，磷酸铁锂电池在无外部点火能量时仅冒出白烟，热失控的最高温度达 40°C 以上；存在外部点火能量时，有明火出现，火焰温度达 700°C-800°C 左右；三元锂电池模组在过充电条件下会发生明显的热失控扩展，热扩展的最短时间间隔仅约 20s；基于耗氧原理，采用锥形量热仪对磷酸铁锂模组进行量热性能测试，测得该模组的最大热释放速率约为 260kW，最大烟气生长速率约为 1.4 m³/s；为分析动力电池梯次利用储能电柜的火灾危险性，在模拟储能电柜内开展了存在外部点火能量时的磷酸铁锂电池热失控实验，测试过程中储能电柜的门被炸开，表现出了巨大的危险性；通过采集磷酸铁锂电池的热失控气体，并经气相色谱定量分析，锂离子电池热失控产生的气体主要为 CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈、C₃H₆、C₄H₈、C₄H₁₀、C₅H₁₂、H₂、CO、CO₂，其中含量最高的组分为氢气，约为 56.3%，通过理论计算获得了该锂离子电池热失控混合气体的爆炸下限为 4.8%。

本项目理论分析了各类型火灾探测器的识别模式和优缺点，重构了动力电池系统火灾模型，开展了锂离子电池的热失控实验，采集了热失控过程中的温度、电压、气压及特征气体含量等参数，结果显示，当锂离子电池发生热失控时，其表面温度会迅速上升，但仅热失控电池的表面温度会出现较大上升，同时单体电压会下降；锂离子电池热失控后会产生热分解气体，导致动力电池系统内部产生压力，上升速率约为 1.0 kPa/s，总产气量约为 76L；锂离子电池热失控最先逸出的气体一般为一氧化碳、烃类（如甲烷、乙烷、丙烷、乙烯）以及苯系物（甲苯、苯乙烯、零二甲苯、间二甲苯）等，其中，烃类气体中含量最多的是丙烷，

苯系物中含量最多的是间二甲苯，同时，综合考虑该类气体探测器的成本，抗干扰性，一氧化碳是作为锂离子电池热失控探测的较优模式。

本项目归纳了国内外对于锂离子电池火灾的抑制手段，理论分析了各类型灭火剂的灭火能力、实用范围、优缺点，研制了五合一的锂离子电池火灾灭火实验平台，对比了在锂离子电池在出现明火前后喷放灭火剂的抑制效果，测试结果显示，只有在锂离子电池出现明火前，预先喷放灭火剂，使得电池箱内部形成惰化氛围，才能有效抑制锂离子电池火灾，基于该喷放逻辑，本章在模拟储能电柜内开展了锂离子电池灭火实验，预先喷射灭火剂时无明火出现；融合灭火策略、探测模式，开发了锂离子电池储能系统火灾防控装置，并以动力电池梯次利用整包应用为场景，开展了灭火效能检验，火灾防控装置启动 30min 内，电池包内与包外均无明火出现，且电池包测温点的温度都未超过 150°C，成功取得了国家消防装备质量监督检验中心的委托检验报告。

本项目编制了《动力电池梯次利用储能电站火灾风险评估指南》、《动力电池梯次利用储能系统火灾防控装置性能要求与试验方法》、《动力电池梯次利用储能系统消防安全技术条件》、《动力电池梯次利用储能电站火灾应急预案编制指南》，提高了动力电池梯次利用储能领域消防安全标准水平。

参考文献

- [1] 桂长清.动力电池(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2012
- [2] 王震坡,孙逢春.电动车辆动力电池系统及应用技术[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [3] 胡信国.动力电池技术与应用(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [4] <http://wangbinggangauto.blog.sohu.com/>
- [5] GB50016-2006《建筑设计防火规范》[S].
- [6] GB50140-2005《建筑灭火器配置设计规范》[S].
- [7] GB 12268-2005《危险货物物品名表》[S].
- [8] GB6944-2012《危险货物分类和品名编号》[S].
- [9] GB/T 15098-2008《危险货物运输包装类别划分方法》[S].
- [10] GB 19521.11-2005《锂电池组危险货物危险特性检验安全规范》[S].
- [11] GB 19433-2004《空运危险货物包装检验安全规范》[S].
- [12] MH/T 1020-2013《锂电池航空运输规范》[S].
- [13] MH/T 1052-2013《航空运输锂电池测试规范》[S].
- [14] GB13392-2005《道路运输危险货物车辆标志》[S].
- [15] GB 19269-2005《公路运输危险货物包装检验安全规范》[S].
- [16] JT617-2004《汽车运输危险货物规则》[S].
- [17] JT618-2004《汽车运输、装卸危险货物作业规程》[S].
- [18] GB 50067-1997《汽车库、修车库、停车场设计防火规范》[S].
- [19] SZDB/Z 29.2-2010《电动汽车充电系统技术规范 第2部分:充电站及充电桩设计规范》[S].
- [20] Q/CSG 11516.2-2010《电动汽车充电站及充电桩设计规范》[S].
- [21] Q/GDW 487-2010《电动汽车电池更换站设计规范》[S].
- [22] GB7258-2012《机动车运行安全技术条件》[S].
- [23] GB/T 17676-1999《天然气汽车和液化石油气汽车 标志》[S].
- [24] GB8410-2006《汽车内饰材料的燃烧特性》[S].
- [25] GB18565-2004《营运车辆综合性能要求和检验方法》[S].

- [26]司戈、王青松. 锂离子电池火灾危险性及相关研究进展, 消防科学与技术, 2012 31(9):994-996
- [27]夏兰、李素丽、艾新平、杨汉西. 锂离子电池的安全性技术. 化学进展, 2011 23(2/3):328-335
- [28] 彭琦、刘群兴、叶耀良, 锂离子电池安全技术综述, 电子产品可靠性与环境试验, 2012,30(2):48-51
- [29] SAE International and the National Fire Protection Association U.S.national electric vehicle safety standards summit, 2010
- [30] SAE International and the National Fire Protection Association 2nd Annual electric vehicle safety standards summit, 2011
- [32] Fire Protection Research Foundation. Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results, [2013-7]
- [33] National Fire Protection Association. Electric Vehicle Emergency Field Guide. Quincy, MA. 2012
- [34] Grant, C. Fire Fighter Safety and Emergency Response for Electric Drive and Hybrid Electric Drive Vehicles. Quincy, MA. 2010
- [35] Delphi Corporation. Hybrid Electric Vehicles for First Responders. Troy, MI. 2012
- [36] National Highway Traffic Safety Administration. Interim Guidance for Electric Vehicle and Hybrid-Electric Vehicles Equipped With High Voltage Batteries. Washington, D.C. 2012
- [37]Egelhaaf , M. and Kre, D. Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries, DEKRA Automobil GmbH, SAE International, 2012
- [38]Delphi Corporation. Hybrid Electric Vehicles for First Responders. Troy, MI. 2012
- [39]SP Technical Research Institute of Sweden. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests, 2014
- [40]杨君涛, 黄昊, 陈也. 电动汽车充换电站火灾风险评估的思考[J]. 现代职业

安全, 2014, (9).

[40]平平. 锂离子电池热失控与火灾危险性分析及高安全性电池体系研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.

[41]Lisbona D, Snee T. A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(6): 434-442.

[42]Larsson F, Andersson P, Blomqvist P, et al. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests[J]. Journal of Power Sources, 2014, 271:414-420.

[43]Kritzer P, Harry Doring, Emermacher B. Improved Safety for Automotive Lithium Batteries: An Innovative Approach to include an Emergency Cooling Element[J]. Advances in Chemical Engineering & Science, 2014, 04:197-207.

[44]Egelhaaf M, Kress D, Wolpert D, et al. Fire Fighting of Li-Ion Traction Batteries[R]. SAE Technical Paper, 2013.

[45]Summer S M. Flammability Assessment of Lithium-Ion and Lithium-Ion Polymer Battery Cells Designed for Aircraft Power Usage[M]. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2010.

[46]Maloney T. Extinguishment of Lithium-Ion and Lithium-Metal Battery Fires[M]. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2014.

[47]Lain M J, Teagle D A, Cullen J, et al. Dealing With In-Flight Lithium Battery Fires In Portable Electronic Devices[J]. CAA PAPER, 2003 (4).

[48]Rao H, Huang Z, Zhang H, et al. 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.

[49]Juarez A, Harper S A, Hirsch D B, et al. Development of a Standard Test Scenario to Evaluate the Effectiveness of Portable Fire Extinguishers on Lithium-ion Battery Fires[J]. 2013.

[50]Rodriquez B, Young G. Development of the International Space Station Fine Water Mist Portable Fire Extinguisher[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013: 1-8.

[51]Carriere T, Butz J R, Naha S, et al. Fire suppression test using a handheld water

- mist extinguisher designed for the international space station[C]//42nd International Conference on Environmental Systems, San Diego, California. 2012.
- [52]Blum A, Long R T. Full-scale Fire Tests of Electric Drive Vehicle Batteries[R]. SAE Technical Paper, 2015.
- [53]Wang Q, Shao G, Duan Q, et al. The Efficiency of Heptafluoropropane Fire Extinguishing Agent on Suppressing the Lithium Titanate Battery Fire[J]. Fire Technology, 2015:1-10.
- [54] 马洋博, 吕剑. 第三代 ODS 替代品 FIC-1311[J]. 化工新型材料, 2007, 12(35): 28-29
- [55] 包余泉. 氟碘烃混合物替代哈龙灭火剂的研究[D]. 北京工业大学, 2004
- [56] 周黎昶. 三氟碘甲烷应用进展[J]. 化工生产与技术, 2009, 4(16): 5-6
- [57] 张淑峰. 惰性气体灭火系统的相关性研究[D]. 河北工业大学, 2011
- [58] 王军朋. 惰性气体局部应用系统保护与灭火机理的分析[D]. 河北工业大学, 2011
- [59] 郭鸿宝. 气溶胶灭火技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [60] 王华. HEAE气溶胶灭火剂的配方设计, 性能及工艺研究[D]. 南京理工大学, 2003
- [61] 周文英, 介燕妮, 罗永乐, 等. 超细干粉灭火剂[J]. 消防技术与产品信息, 2004, 10: 71-72
- [62] 王戈, 王斌, 何明国. 超细干粉灭火剂的研发应用进展[J]. 消防技术与产品信息, 2013, 9: 75-77
- [63] 刘江虹, 廖光煊. 细水雾灭火技术及其应用[J]. 火灾科学, 2001, 10(1): 34-38
- [64] Andersson P, Holmstedt G. Limitations of Water Mist as a Total Flooding Agent[J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1998, 4: 31-50
- [65] 杜建科. 新一代哈龙替代灭火剂研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(008): 19-21
- [66] 周晓猛. 洁净气基灭火介质制备及其灭火性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2005
- [67] 归小平, 杨政. 三氟溴代烯烃作为洁净气体灭火剂的应用研究[J]. 消防科学

与技术, 2013, 32(8): 890-893

[68] 丁康生, 卢孔燎. 非挥发性哈龙替代物研究[J]. 化学世界, 1995, 36(3): 115-117

[69] 陈智伟. 哈龙替代灭火剂全氟乙基异丙基酮的应用探讨[J]. 科技与生活, 2011, 12:

[70] 吕晶. Li₂MnSiO₄ 正极材料的热合成动力学及电化学性能研究[D]. 山西师范大学, 2012.

[71] 罗曼. 纯电动汽车用锂离子电池组液体冷却散热结构分析及优化[D]. 重庆大学, 2014.

[72] 吴忠华, 李海宁. 电动汽车的火灾危险性探讨[J]. 消防科学与技术, 2014(11):1340-1343.

[73] 田宏, 小托马斯·朗, 安德鲁 F·布鲁姆. 电动汽车电池危险:用于应急救援的火灾实测数据[J]. 消防技术与产品信息, 2015(1):76-79.

[74] 张得胜, 张良, 陈克,等. 电动汽车火灾原因调查研究[J]. 消防科学与技术, 2014(9):1091-1093.

[75] 俞会根, 王彦红. 电动汽车用锂离子电池的安全性研究及对策[J]. 材料导报, 2012(s1):195-198.

[76] 彭强. 电动汽车用锂离子动力电池热效应研究[D]. 吉林大学, 2012.

[77] 王春生, 苏文威. 电动自行车火灾危险性分析[J]. 中国公共安全:学术版, 2011(3):97-99.

[78] 周波, 钱新明. 高能锂离子电池热危险性分析[C]// 全国爆炸与安全技术学术交流会. 2004.

[79] 陈梓铭. 混合动力公交客车锂离子动力电池舱的热特性研究[D]. 华南理工大学, 2014.

[80] 胡玉娟, 钱伟. 基于 FTA 法的电动车火灾事故的分析[J]. 防灾科技学院学报, 2011, 13(1):23-26.

[81] 王浩, 李建军, 王莉,等. 绝热加速量热仪在锂离子电池安全性研究方面的应用[J]. 新材料产业, 2013(1):53-58.

[82] 段冀渊. 锂离子电池安全性能评价技术研究[D]. 华东理工大学, 2013.

- [83]陈玉红, 唐致远, 卢星河,等. 锂离子电池爆炸机理研究[J]. 化学进展, 2006, 18(6):823-831.
- [84]王青松. 锂离子电池材料的热稳定性及电解液阻燃添加剂研究[D]. 中国科学技术大学, 2005.
- [85]王浩, 杨聚平, 王莉,等. 锂离子电池的安全性问题[J]. 新材料产业, 2012(9):88-94.
- [86]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.
- [87]袁荣忠, 瞿美臻, 于作龙. 锂离子电池镍系正极材料的热稳定性研究进展[J]. 无机材料学报, 2003, 18(5):973-979.
- [88]杨晖. 锂离子电池热爆炸机理的研究[C]// 全国化学与物理电源学术年会, 2006.
- [89]张遥. 锂离子电池热特性研究及实例仿真分析[D]. 南开大学, 2010.
- [90]赵学娟. 锂离子电池在绝热条件下的循环产热研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [91]李淋. 锂离子电池正极材料原料的热分析动力学研究[D]. 中国地质大学, 2012.
- [92]崔小锋, 李炳泉. 锂离子电动汽车的安全性[J]. 新安全东方消防, 2014(1).
- [93]史瑞祥. 锂离子动力电池安全性能影响因素分析[J]. 电池工业, 2014(3):145-147.
- [94]欧阳陈志. 锂离子动力电池热分析及优化[D]. 长沙理工大学, 2013.
- [95]王健. 汽车火灾原因调查及预防的研究[D]. 吉林大学, 2014.
- [96]林必昂, 赵光. 一起电动车火灾事故原因认定和分析[J]. 消防科学与技术, 2014(4):473-475.