

团 体 标 准

T/JSEE 00XX-XXXX

储能用锂离子电池热失控气体爆炸特性 测试方法

Explosion test method of thermal runaway gases from lithium-ion batteries for
energy storage system

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

江苏省电机工程学会 发布

目 次

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测试原理 2

5 测试环境 2

6 通用要求 2

7 测试装置与仪器 3

8 测试方法和步骤 4

9 数据处理 6

10 测试报告 6

附录 A（资料性） 热失控气体爆炸特性测试流程 8

附录 B（资料性） 热失控气体爆炸特性测试装置示意图 9

参考文献 10

前 言

本文件按照 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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省电机工程学会提出并归口。

本文件起草单位：国网江苏省电力有限公司、中国电力科学研究院有限公司、南京工业大学、应急管理部上海消防研究所、北京理工大学、国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司。

本文件主要起草人：孙蓉、陈浩、杨凯、王志荣、张永丰、郭东亮、尹秀娟、耿萌萌、汪峻岭、朱艳丽、张明杰、赵谊、贾俊、陈挺、肖鹏

引 言

锂离子电池储能是构建新型电力系统的重要调节资源，近年来发展迅速，截至 2025 年底，全国累计装机规模达 144.7GW，是“十三五”末的 45 倍。然而，锂离子储能安全问题突出，据不完全统计，全球范围内已发生 180 余起储能电站火灾事故。其中，“4·16”北京大红门储能电站事故就是由于电池热失控气体聚集后爆炸，造成两名消防员牺牲。研究表明，锂离子电池在热失控过程中会释放 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 等可燃气体，在受限空间内与空气混合后，遇到点火源即可能发生爆炸。开展锂离子电池热失控气体的爆炸特性测试，明确电池热失控气体的爆炸极限、最大爆炸压力和最大压力上升速率，可为储能系统防爆、泄爆设计和消防防护提供关键输入参数。

目前，国内外对锂离子电池热失控气体的爆炸特性测试尚缺乏统一、系统的标准化方法。GB/T 36276 对电池单体的热失控判定作出了规定，UL 9540A 等国际标准虽涉及热失控气体分析，但在气体收集、组分分析到爆炸特性测试的全流程方法上仍存在差异。不同实验室因测试装置、气样制备和测试条件不一致，所得结果往往缺乏可比性，难以有效支撑储能系统的安全设计与风险评估。本文件在充分借鉴国内外相关标准和技术成果的基础上，建立了从热失控触发与释气收集、气体组分分析到爆炸特性测试的全流程标准化方法，旨在为储能电池的热失控气体爆炸危险性表征与比较提供统一的技术依据，支撑储能系统的安全设计、风险评估和消防防护。

储能用锂离子电池热失控气体爆炸特性测试方法

1 范围

本文件规定了储能用锂离子电池单体和电池模块在受控条件下的热失控触发、释气收集、气体组分分析以及释气爆炸特性测试方法。

本文件适用于锂离子电池储能系统用电池单体和电池模块的实验室测试。本文件结果用于实验室危险性表征与比较分析，不直接替代消防设计、泄爆设计、系统布置审批和现场事故鉴定结论。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。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。

GB/T 12474 空气中可燃气体爆炸极限测定方法

GB/T 36276 电力储能用锂离子电池

GB/T 42368 高温高压条件下可燃气体（蒸气）爆炸极限测定方法

3 术语和定义

GB/T 36276—2023、GB/T 42313—2023界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

热失控 thermal runaway

电池单体放热连锁反应引起电池温度不可控上升的现象。

3.2

热失控气体 thermal runaway vent gas

锂离子电池发生热失控过程中，经安全阀、泄压口或壳体破口释放出的气态物质。

3.3

等效热失控气体 equivalent thermal runaway gas

依据实测热失控释放气体组分和比例配制的、用于爆炸特性测试的模拟混合气体。

3.4

热失控蔓延 thermal runaway propagation

电池单体发生热失控后触发与其相邻或其他部位的电池单体发生热失控的现象。

3.5

爆炸极限 explosion limits

规定条件下，热失控气体与空气混合后能够被点燃并形成自持火焰传播的最低和最高气体浓度，分别称为爆炸下限（lower explosion limit, LEL）和爆炸上限（upper explosion limit, UEL）。

3.6

最大爆炸压力 maximum explosion pressure

规定测试条件下，不同浓度热失控气体—空气混合物爆炸产生的最大绝对压力。

3.7

最大压力上升速率 maximum rate of explosion pressure rise

规定测试条件下，爆炸压力—时间曲线一阶导数的最大值。

4 测试原理

4.1 电池热失控测试原理

将规定荷电状态的测试样品置于具有已知有效自由容积的气体收集装置内，在氧含量受控条件下按照GB/T 36276规定的热失控触发与判定原则使测试样品发生热失控和热失控蔓延，同步记录温度、电压、电流、压力及氧含量等参数。

4.2 热失控气体爆炸测试原理

依据收集容器内气体状态变化计算净产气量和产气速率，并对均化后的代表性气样进行组分分析。依据等效气体近似原则和道尔顿分压定律，将代表性气样或根据其组分配制的等效热失控气体与空气按规定浓度配制，按照定容燃烧法原理在标准爆炸容器内点火，测定爆炸下限、爆炸上限、最大爆炸压力和最大压力上升速率。

5 测试环境

5.1 除另有规定外，热失控产气测试环境温度应为15℃~40℃，相对湿度应不大于80%，大气压力应为86 kPa~106 kPa；

5.2 常温常压爆炸特性测试的初始温度应为(25±2)℃，初始绝对压力应为(100±5) kPa。采用其他温度或压力时，应在报告中说明，并按GB/T 42368或经验证的方法执行；

5.3 同一组对比测试试验的环境温度差宜不大于3℃，气样调理温度差宜不大于2℃。

6 通用要求

6.1 测试样品

6.1.1 测试样品应无外观破损、漏液、异常鼓胀及电压异常，并应具有可追溯的型号、批次和制造信息；

6.1.2 除另有规定外，样品应按GB/T 36276完成初始化充电，并处于100% SOC或制造商定义的满充状态。开展其他荷电状态、循环后或老化后样品测试时，应分别成组，不应与初始状态结果混合平均；

6.1.3 电池单体产气测试的有效测试样品数量不应少于3个。电池模块测试数量可由供需双方根据风险和样品成本约定，但不应少于1个；电池模块的额定容量宜不小于制造商产品规格书中的标称值，具体容量由供需双方协商确定。

6.1.4 用于形成混合气样的测试样品应具有相同材料体系、结构、标称容量、荷电状态和热失控触发方式。

6.1.5 本文件适用于不同材料体系（如磷酸铁锂、三元材料等）和不同电解液成分的锂离子电池。不同材料体系或电解液成分的测试结果应分别报告，不应混合平均。

6.2 测试安全

6.2.1 热失控和爆炸测试应在具备抗爆、泄压、强制通风、消防和废气净化条件的测试区域内远程实施；

6.2.2 测试系统应设置超温、超压、氧浓度异常、可燃气体超限和通风故障联锁；

6.2.3 测试人员应配备防护用品，测试区域应设置警戒和有毒有害气体监测，宜配置 CO、HF、HCN 和总可燃气体监测；

6.2.4 触发后排风、采样、开舱应设置联锁条件和人员暴露控制程序；

6.2.5 测试结束后应形成安全事件记录。

7 测试装置与仪器

本文件涉及的测试系统应至少包括热失控产气收集装置、气体分析系统、配气装置和爆炸测试装置；开展模块热释放速率测试时，还应配置热释放速率测量系统。

7.1 热失控产气收集装置

7.1.1 试验舱有效容积应经标定，设计压力应大于测试可能达到的最大压力；

7.1.2 试验舱设置测试样品安装结构、加热与充电引入端子、温度和电压测量接口、绝对压力传感器、氧含量测量接口、取样接口、惰性气体接口并设置安全泄压和紧急排放装置；

7.1.3 舱内应设置温度、绝对压力和氧浓度测点，温度和电压采样周期不大于1 s，压力测量精度不低于0.5级；

7.1.4 收集装置与爆炸测试装置之间的气样转移应采用惰性管路连接，管路内壁应经过钝化处理或采用惰性材料，管路长度宜不大于2 m，以减少气样吸附和分层。测试挥发性有机组分时宜采用伴热或保温措施；

7.1.5 系统在100 kPa表压下保压30 min，经温度修正后的压力变化不应大于初始绝对压力的1%。

7.1.6 转移操作应在气样采集完成后30 min内完成；因气样量不足需配制等效气体时，等效气体配制应在气样组分分析完成后24 h内完成。

7.2 气体分析系统

7.2.1 气体分析系统应至少报告H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、O₂，宜报告HF、HCN及代表性VOCs；

7.2.2 分析永久气体和轻质烃类时，宜采用气相色谱仪、傅里叶变换红外光谱仪或其他经验证的仪器；分析VOCs时，宜采用GC-MS、GC-FID或等效方法；

7.2.3 仪器量程、检出限和校准气体应与预期浓度相匹配。

7.3 配气装置

配气浓度的扩展不确定度不应超过设定值的2%或0.2%（体积分数），取两者中的较大值。配气系统应具备抽真空、惰性气体置换、混合和取样验证功能。

7.4 爆炸测试装置

7.4.1 爆炸测试容器宜采用有效容积为 $20\text{ L} \pm 1\text{ L}$ 的球形定容容器，耐压不低于 2 MPa ，配置中央点火器、配气系统和快速压力采集系统；

7.4.2 装置应能同步测量初始压力、爆炸压力和火焰传播信号，并应通过空白点火测试确定点火源本身造成的压力扰动；

7.4.3 动态压力传感器量程不小于 2 MPa ，精度不低于0.5级，采样频率不低于 10 kHz ；

7.4.4 点火源应位于容器几何中心，同一组对比测试应采用相同的点火能量、点火方式和点火延迟时间。

7.5 热释放速率测量系统

宜采用大尺度热释放速率测量系统。系统设计和建造可参照 GB/T 25207 的相关原则执行。

8 测试方法和步骤

8.1 测试准备

8.1.1 测量并记录样品质量、额定容量、额定能量、材料体系、荷电状态及试验舱有效容积；

8.1.2 按 GB/T 36276 的要求布置加热部件和测温点，将样品固定于测试位置；

8.1.3 采用抽真空—充氮方式置换试验舱，直至氧体积分数不大于1.0%；

8.1.4 置换完成后，试验舱初始绝对压力宜控制在 $(100 \pm 5)\text{ kPa}$ ，并稳定5 min后记录 P_0 、 T_0 及背景气体组分；

8.1.5 确认数据采集、联锁、排风和应急处置系统处于正常状态后方可开始测试。

8.2 电池单体热失控测试

8.2.1 宜采用加热或恒流充电的方式触发热失控，连续记录电压、电流、温度、温升速率和舱内压力；

8.2.2 热失控判定应按GB/T 36276执行；

8.2.3 已判定发生热失控时，应停止施加触发能量，并继续记录不少于1 h；

8.2.4 未发生热失控且样品表面温度达到 300°C 或测试时间达到4 h时，可终止测试，并判定本次未触发；

8.2.5 若出现持续燃烧并导致气体明显消耗，则本次气样不应用于爆炸特性测试，应降低初始氧浓度或改进抑制措施后重新测试；

8.2.6 舱内平均温度低于 50°C 且压力连续10 min基本稳定后，启动混合装置不少于2 min，采集气样并记录终态压力 P_1 和温度 T_1 ；

8.2.7 永久气体和轻质烃类气样宜在24 h内完成分析；HF、HCN和VOCs 宜在更短时间内完成分析或按经验证条件保存和分析。

8.3 电池模块热失控测试

8.3.1 电池模块测试可选择在热释放速率测量系统或密闭试验舱中进行。在热释放速率测量系统中测试时，电池模块放置于集烟罩下方中心处；

8.3.2 电池模块热失控测试宜根据风险分析选择触发对象，可选中心位置、边缘位置、热屏障最弱位置或最小并联单元，监测对象应覆盖触发对象相邻和关键热传播路径位置；

8.3.3 宜采用加热或恒流充电的方式触发热失控，恒流充电触发要求电池模块中的其他电池单体不应过充；

8.3.4 热失控及蔓延判定应按GB/T 36276执行；

8.3.5 应同步记录热失控蔓延时间、发生热失控的电池单体数量及模块结构变化，在热释放速率测量系统中进行的电池模块测试宜同步测量热释放速率和气体组分；

8.3.6 自最后一个新增热失控事件起，应继续记录不少于1 h；在热释放速率、典型温度和压力无明显上升后结束测试。

8.4 气体组分与产气量测试

8.4.1 气体组分测试

8.4.1.1 H₂、O₂、N₂、CO、CO₂等永久气体及CH₄、C₂H₄、C₂H₆等轻质烃类的测定可按GB/T 8984、GB/T 28124或GB/T 27894.8执行；

8.4.1.2 挥发性有机组分的测定可按GB/T 37185执行；

8.4.1.3 采用傅里叶变换红外光谱法时可按GB/T 47882执行；

8.4.1.4 气体组分应至少报告H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、O₂和可定量的主要挥发性有机组分。

8.4.2 产气量测试

总产气量按式（1）换算到20℃、101.325 kPa的标准状态：

$$V_g = V_c \times \left(\frac{P_1 T_n}{P_n T_1} - \frac{P_0 T_n}{P_n T_0} \right) + V_1 \quad (1)$$

式中：

V_g ——标准状态下净产气量，单位为升（L）；

V_c ——扣除样品占用体积后的试验舱有效容积，单位为升（L）；

P_0 ——初态绝对压力，单位为千帕（kPa）；

P_1 ——终态绝对压力，单位为千帕（kPa）；

T_0 ——初态热力学温度，单位为卡尔文（K）；

T_1 ——终态热力学温度，单位为卡尔文（K）；

P_n ——标准大气压，取值为101.325 kPa；

T_n ——取值为293.15 K；

V_1 ——泄漏修正量，单位为升（L）。

单位容量产气量按 V_g 与样品额定容量之比计算，单位为L/Ah；必要时同时给出L/kWh。

8.5 测试气体制备

8.5.1 爆炸测试可采用均匀混合后的实测气样；气样量不足或在热释放速率系统中开展的热失控测试无法直接收集代表性气样时，可按实测组分配制等效热失控气体；

8.5.2 等效气体应包含全部主要可燃组分和主要惰性组分，已定量组分之和应不低于扣除置换氮气后干气体积分数的90%；不得用单一可燃气体代替热失控混合气体；

8.5.3 各配制组分与目标值的偏差应不大于目标值的5%或0.1%（体积分数），取较大者；

8.5.4 测试气体浓度为热失控气体在热失控气体—空气混合物中的体积分数。

8.6 爆炸极限测试

8.6.1 将爆炸容器及管路抽至绝对压力不大于1 kPa，按分压法依次充入测试气体和空气，使初始绝对压力为（100±5）kPa、初始温度为（20±5）℃；

8.6.2 混合均匀后，充气结束至点火的延迟时间为60 s±5 s，启动点火并记录压力—时间曲线；

8.6.3 可根据组成气体的已知爆炸极限估算初始范围，按照GB/T 12474的有关规定，以1.0%为浓度步长扫描，接近边界时步长不应大于0.5%；

8.6.4 点火后最大压力增量不小于初始绝对压力的5%时,判定为发生爆炸;边界浓度点应重复3次,至少2次发生爆炸时判定该浓度为爆炸浓度;

8.6.5 每次测试后应用空气或惰性气体充分吹扫容器,确认残余可燃气体浓度低于其LEL的10%后方可开展下一次测试。

8.7 最大爆炸压力测试

8.7.1 在LEL与UEL之间选取不少于5个浓度点,浓度点应覆盖压力峰值附近区域;

8.7.2 各浓度点按7.6的规定进行测试,记录最大绝对压力 $P_{\max}$ 和最大压力上升速率 $(dP/dt)_{\max}$;峰值浓度点应至少重复3次;

8.7.3 以各浓度点中的最大值作为最大爆炸压力和最大压力上升速率;

8.7.4 必要时,可按 GB/T 803 的有关规定给出与最大压力上升速率对应的爆炸指数结果。

9 数据处理

9.1 爆炸极限

爆炸下限和爆炸上限分别按下式计算:

$$LEL = \frac{CLE + CLNE}{2} \quad (2)$$

$$UEL = \frac{CUE + CUNE}{2} \quad (3)$$

式中:

CLE——发生爆炸的最低浓度,以体积分数表示,单位为%;

CLNE——低于CLE且不发生爆炸的最高浓度,以体积分数表示,单位为%;

CUE——发生爆炸的最高浓度,以体积分数表示,单位为%;

CUNE——高于CUE且不发生爆炸的最低浓度,以体积分数表示,单位为%。

9.2 最大爆炸压力

$(dP/dt)_{\max}$ 为最大压力上升速率,单位为kPa/s,最大爆炸超压按 $P_{\max}$ 与初始绝对压力之差计算,若报告爆炸指数,应说明其计算方法和使用的容器容积。

9.3 结果有效性

9.3.1 空白点火测试的压力增量应小于初始绝对压力的1%;

9.3.2 试验舱和配气系统应满足泄漏检查要求;

9.3.3 最大压力对应浓度点3次测试的 $P_{\max}$ 相对偏差不应大于5%;不满足时应查明原因并增加测试;

9.3.4 不同电池材料体系、荷电状态、老化状态、触发方式或气样配比方式的结果不得直接合并平均;

9.3.5 测试失败、异常中断或样品持续燃烧导致气体明显消耗时,应判为无效结果并在报告中说明;

9.3.6 结果应注明初始温度、压力、湿度、点火能量、点火延迟、容器容积和气样基准状态。

10 测试报告

10.1 委托单位、测试机构、测试日期、标准编号和偏离本标准的事项;

10.2 样品制造商、型号、材料体系、额定容量和能量、生产批次、质量、尺寸、荷电状态及样品数量；

10.3 热失控触发方式、触发参数、加热部件或充电电流、热失控判据及原始温度、电压、压力—时间曲线；

10.4 试验舱有效容积、初始氧浓度、初态与终态压力和温度、净产气量及单位容量产气量；

10.5 模块热失控测试试验应记录触发对象、监测对象、蔓延路径、热失控电池位置和数量；

10.6 气体采样、保存和分析方法，各组分体积分数及测量不确定度；

10.7 测试气体为实测气样或等效热失控气体的说明；采用等效气体时，应给出目标组成和实际组成；

10.8 各浓度点的爆炸判定、压力—时间曲线、LEL、UEL、 $P_{\max}$ 、最大爆炸超压和 $(dP/dt)_{\max}$ ；必要时给出爆炸指数；

10.9 异常现象、测试照片、原始数据处理方法、安全事件及结果适用范围声明。

附录 A

(资料性)

热失控气体爆炸特性测试流程

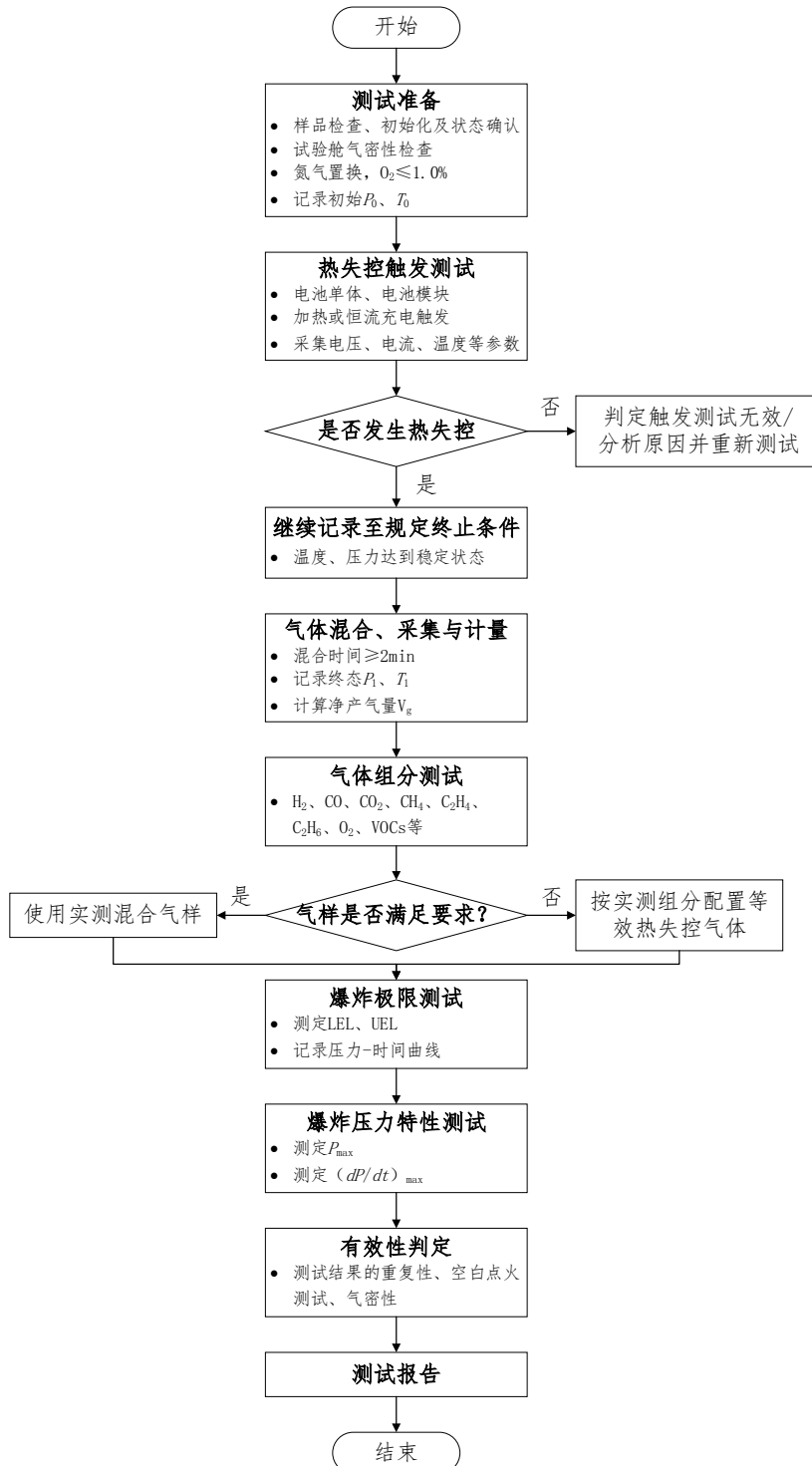


图 A.1 热失控气体爆炸特性测试流程图

附录 B

(资料性)

热失控气体爆炸特性测试装置示意图

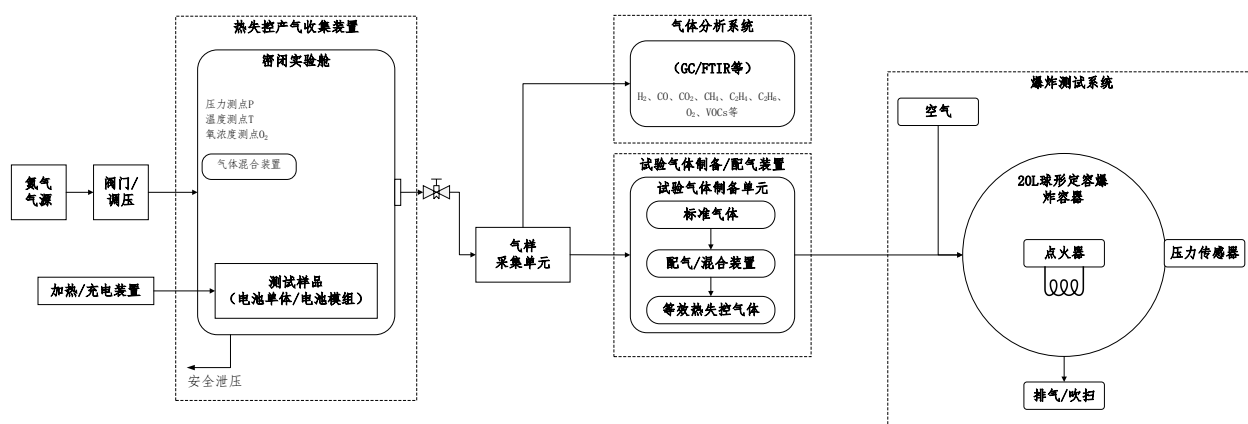


图 B.1 热失控气体爆炸特性测试装置示意图

参 考 文 献

- [1] GB/T 803 空气中可燃气体爆炸指数测定方法
 - [2] GB/T 25207 火灾试验 表面制品的实体房间火试验方法
 - [3] GB/T 8984 气体分析 气体中微量一氧化碳、二氧化碳和碳氢化合物含量的测定 火焰离子化气相色谱法
 - [4] GB/T 28124 气体分析 惰性气体中微量氢、氧、甲烷、一氧化碳含量的测定 氧化锆气相色谱法
 - [5] GB/T 27894.8 天然气 用气相色谱法测定组成和计算相关不确定度 第8部分：用微型热导测定氢、氧、氮、一氧化碳、二氧化碳和C1至C5及C6+的烃类
 - [6] GB/T 37185 气体分析 室内挥发性有害有机物的测定 “SUMMA罐-硅烷化管”采样气相色谱/质谱联用（GC/MS）法
 - [7] GB/T 47882 气体分析 基于比较测量的傅立叶变换红外光谱法
-