

基于云室成核法的电力绝缘材料热解早期检测方法研究^{*}

郭彬¹, 罗海军^{1,2}, 张建¹, 林松¹, 杨晨¹, 王洁¹, 汪秋成¹, 李文豪¹

(1. 重庆师范大学 物理与电子工程学院; 2. 重庆师范大学 重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

摘要:针对材料阴燃阶段前热释物质隐蔽、传统红外与烟雾传感器响应滞后的问题,提出一种基于云室成核法的电力绝缘材料热解早期检测方法。通过在密闭腔体内实施快速气动膨胀,使热解早期释放的热解粒子与粒径为1~10 nm的挥发性前驱物在过饱和条件下转化为粒径为0.5~10 μm 的可测冷凝核粒子,并利用激光直角散射实现粒子浓度定量检测。构建了单次检测周期仅为8 s的集成式高时间分辨率检测系统,并在聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)电缆与硅橡胶绝缘子上开展验证实验。结果表明,在未出现可见烟雾且远低于着火温度时即可获得明显的粒子信号,冷凝核粒子峰值浓度在长度为10 cm的PVC电缆样品中达到254.32万颗 $\cdot\text{cm}^{-3}$,在90°扇形绝缘子样品中达到241.97万颗 $\cdot\text{cm}^{-3}$ 。该方法在热解开始后的20~30 s内即可触发报警,较红外和烟雾检测具有更高灵敏度与更早响应特性,且不依赖直视路径,可有效识别结构遮挡下的隐蔽热故障。

关键词:云室成核;热解早期检测;激光散射;早期预警

中图分类号:TP212

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2026)03-0109-09

材料热解阶段是发生于可见阴燃或明火燃烧之前的一种隐蔽而危险的物理化学过程,它的本质涉及高分子链受热后的降解与断裂^[1],演化过程如图1a所示。在这一阶段中,绝缘介质如聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)与复合绝缘子在未出现明显温升或可见烟雾前会释放出大量粒径为1~10 nm的热解特征粒子及挥发性前驱物^[2-3](图1b)。由于这些早期信号尺寸极小且不具备明显的热辐射特征,传统的红外成像与烟雾探测手段往往难以进行有效捕捉^[4-5]。在开关柜、配电箱等紧凑型电力电气设备内部,绝缘劣化诱发的热解过程常因结构封闭而具有极强的隐蔽性^[6]。现代城市电力系统中,电缆隧道与综合管廊的火灾防控同样面临严峻挑战^[7]。近些年来,已多次发生因电气过热引发的重大火灾事故,如某些高压电缆隧道发生的链式火灾,导致电网运行中断并造成巨大的经济损失^[8]。因此,针对材料热解初期的特征粒子来开发具备极早期感知能力的主动监测技术,已成为预防电力火灾、保障系统及建筑安全运行的迫切需求^[9-10]。

传统火灾监测方法存在固有局限。光电感烟探测器依赖大粒径气溶胶对光线的散射作用,通常需要减光率达到5%~15% m^{-1} 时才能触发警报,此时往往已有大量可见浓烟产生^[11];线型感温电缆通过热敏材料物理状态随温度的变化进行监测,属于接触式测温,警报发出时间严重滞后;红外热成像仪虽能以非接触方式感知表面温升,但极易受电气设备外壳等物理结构的遮挡限制,无法探测设备内部的隐蔽热解^[4];烟雾传感器通常在大量气溶胶形成后才进行响应^[5],而已有研究证实该类方法存在滞后性,即烟雾警报触发通常发生在阴燃过程已经开始之后^[12],因而在早期阶段难以及时识别隐蔽火灾隐患。

针对上述火灾监测方法的不足之处,本研究引入一种基于云室诱导成核的检测策略。材料初期热退化阶段释放的微量热解粒子及挥发性前驱物在密闭腔体内经快速压降后可作为成核中心,在过饱和条件下形成冷凝核粒子(图1c),且相关云室扩展实验已验证该过程的可行性^[13]。冷凝核粒子可通过光学散射手段进行定量检测,已有研究表明,基于弹性散射的测量方法能够实现对亚15 nm尺度粒子的高灵敏探测^[14]。该机制将原本不可直接感知的热解早期阶段热释物质转化为可测粒子浓度信息,从而为早期火灾隐患识别提供新的技术途径。表1对比了现有主流火灾监测方法与本研究提出的云室成核法的原理、优点和局限性(或适用范围)。

^{*} 收稿日期:2026-01-15 修回日期:2026-03-19 网络出版时间:2026-05-29T16:37

资助项目:国家电网公司总部技术项目(No. 5700-202325252A-1-1-ZN5700-202325252A-1-1-ZN)

第一作者简介:郭彬,男,研究方向为光电转换技术与系统,E-mail:2023110511027@stu.cqnu.edu.cn;通信作者简介:罗海军,男,教授,博士,E-mail:luohaijun@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20260529.1024.002

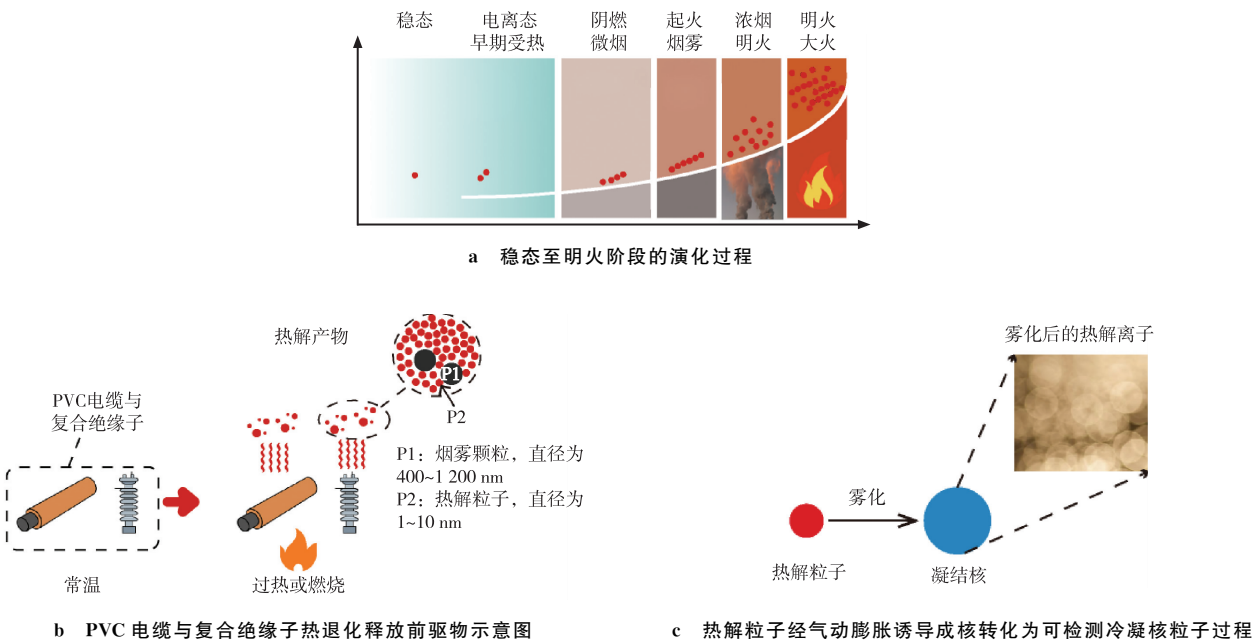


图 1 燃烧阶段与热解特征粒子早期检测示意图

Fig. 1 Schematic of combustion stages and early detection of pyrolysis characteristic particles

表 1 传统火灾监测方法与云室成核法效能对比

Tab. 1 Performance comparison between traditional fire monitoring methods and the cloud chamber nucleation method

检测类型	原理	优点	局限性或适用范围
红外与温度型	热辐射温度	成熟、直观	对隐性热源不敏感
烟雾报警	光散射	成本低、稳定	无法检测热解早期阶段
云室成核法	云室增强成核	早期检测	更适用于封闭或半封闭空间

1 检测原理与方法

本研究提出的检测方法基于云室成核机理。当含有热解粒子与挥发性前驱物的气体在密闭腔体内经历快速压降过程时,气体发生近似绝热冷却。此过程可用理想气体状态方程描述:

$$PV=nRT,$$

其中: P 为气体压强, V 为气体体积, n 为气体的物质的量, R 为理想气体常数, T 为热力学温度。随着气体压强的快速降低,气体温度同步下降,气体-蒸汽混合物进入过饱和状态,满足冷凝成核发生的必要条件^[15]。在该条件下,体系中原有的热解粒子及微小团簇作为异相成核中心,液滴形成的临界半径明显减小。该过程可由 Kelvin 方程描述:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2\sigma V_m}{rRT},$$

其中: p 为半径为 r 的液滴表面的平衡蒸汽压, p_0 为平面液面的饱和蒸汽压, σ 为液体表面张力, V_m 为液体摩尔体积。该机理使原本不可直接探测的粒径约 1~10 nm 的纳米级热解粒子转化为尺度可被光学方法感知的冷凝核粒子^[16]。在过饱和气相环境中,热解粒子作为异相成核中心吸附蒸汽迅速生长,它的几何尺寸可跨越式增长至亚微米及微米量级。这种成百上千倍的尺寸放大效应,使原本微弱的亚 15 nm 粒子成功跨入 Mie 散射的高效探测区间,从而实现了极早期微弱热释物质的定量检测。

为实现成核过程的可控重复触发,本研究采用了密闭云室结构。相关研究表明,在受控饱和比条件下,通过快速气动膨胀可稳定诱导异相液滴成核及冰核激活过程^[17]。便携式与中尺度云室系统已实现对压力、温度及过饱和度的精确控制,为该方法在工程检测中的应用提供了可行性验证^[17]。

当冷凝核形成后,它的浓度可通过弹性光散射方式进行测量。对于半径为 r 的球形粒子而言,它的散射强度(I)角分布遵循 Mie 散射理论:

$$I(\theta) \propto |S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2,$$

其中: θ 为散射角固定在 90° , S_1 与 S_2 为与尺寸参量 $x=2\pi r/\lambda$ (λ 为入射光波长)及折射率对比度相关的散射振幅函数。本研究采用直角散射结构以兼顾检测灵敏度与系统结构紧凑性。已有光学研究表明,弹性散射技术对亚15 nm粒子的检测具有较高灵敏度,从而为热解早期阶段微弱热释物质的识别提供了技术储备^[18-19]。

检测系统结构与工作原理如图2所示。含热解前驱物的气体由气泵吸入密闭腔体,并通过电磁阀实现瞬时泄压。在快速压降过程中形成过饱和环境并诱导冷凝核生成,随后利用激光直角散射检测系统对粒子浓度进行实时检测。

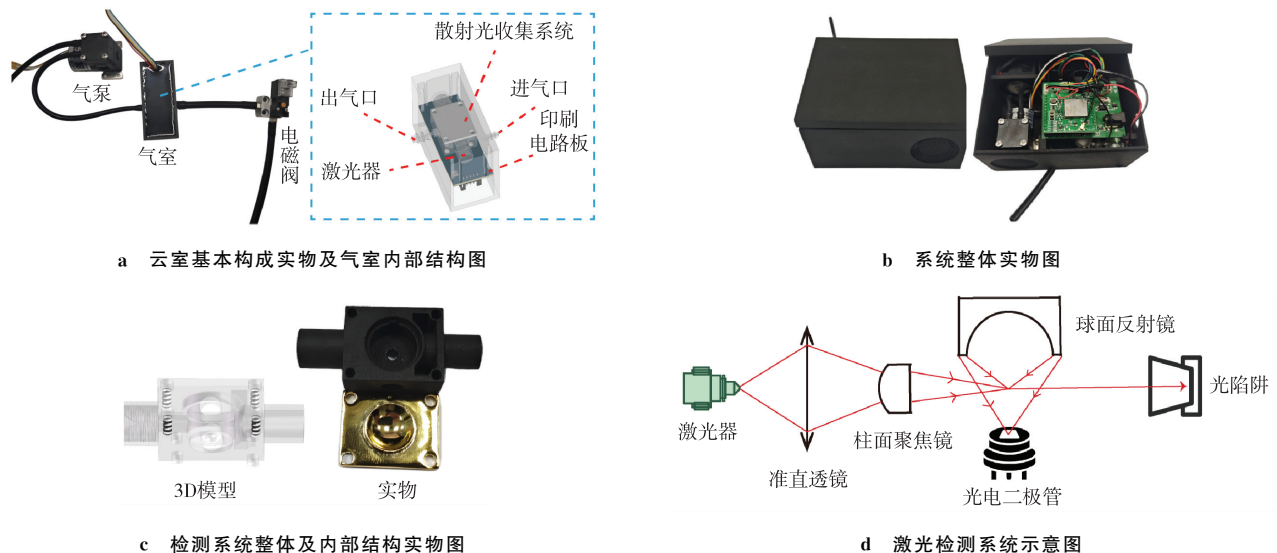


图2 检测系统结构与工作原理

Fig. 2 Structure and operating principle of the detection system

2 实验结果与分析

为了获取材料在未见可见烟雾时的热解早期特征信号,本研究选取了PVC电缆与硅橡胶复合绝缘子这2种典型电介质材料来开展受控加热实验。其中,PVC电缆广泛应用于电力系统,它的热分解温度约为 $350\sim 460^\circ\text{C}$ ^[20];而硅橡胶材料则具有更高的着火阈值,表现出较强的耐热性能^[6]。基于上述材料的热学特性,实验过程中2类样品的加热温度均被严格控制在远低于它们的分解温度区间内,以获取未见可见烟雾时的热解早期阶段信号。

为了确保实验结果的统计学意义并验证系统的运行稳定性,本研究针对每组温度与样品角度的组合的实验工况,重复5组独立平行试验,消除随机误差以保障实验结果的统计学可信度。

在每轮重复实验之间,系统执行严格的重置程序以保证条件的一致性:首先移除已受热的硅橡胶样品,并开启辅助气泵引入洁净空气对云室腔体及采样管路进行持续冲洗,直至粒子浓度回落并稳定在环境本底水平;待加热台表面温度完全冷却至室温后,更换相同规格的新鲜样品进行下一轮测试。

实验记录中的次数据点记录了单次实验内80 s的浓度动态演化过程。本研究所展示的曲线与峰值数据均为5轮独立重复实验结果的有效平均值,数据极小的标准差表现进一步印证了本研究检测方法的高重复性。

在实际应用中,由于待测场景通常为半开放或局部受限空间,例如真实的电缆沟道、开关柜内部等;因而环境中的背景气溶胶会对极早期探测产生影响。本研究特意在半开放或局部受限空间中进行实验,而不采用绝对封闭的理想真空舱,以验证系统在真实复杂环境下的可行性。空气中原有的小颗粒粉尘确实会随采样气流进入云室并形成冷凝核,这构成了系统在常温下约 $1\text{万颗}\cdot\text{cm}^{-3}\sim 10\text{万颗}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的基础本底值。为克服这一干扰,本研究采取了多重抗干扰机制:首先,空气中的大颗粒杂质会被系统前端配置的双级过滤系统有效滤除;其次,由于材料热解初期释放的纳米级粒子数量极为庞大,一旦发生预警级别热解,粒子浓度会瞬间激增至本底值的几十甚至上百倍,此时峰值会高达 $250\text{万颗}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。因此,系统通过实时监测环境的基线,并结合绝对浓度超 $10\text{万颗}\cdot\text{cm}^{-3}$ 或发生相对增量突变来实现报警。这种基于数量级差异与本底差分的动态阈值甄别逻辑

辑,成功规避了常规环境粉尘带来的误报干扰。此外,针对未来高粉尘场景的实际部署,可在进气口加装预过滤器(如惯性撞击器),仅允许粒径为 15 nm 的热解粒子进入检测腔,进一步提升系统的信噪比。

2.1 PVC 电缆样品检测结果

选取外径为 8 mm,长度分别为 4、6、8 和 10 cm 的 PVC 电缆样品,在 60、100 和 140 ℃这 3 种温度条件下进行加热实验。每组实验重复 5 次,10 cm 的 PVC 电缆在不同温度下的热解粒子浓度如表 2 所示。在数据采集方式上,系统设定涵盖进气采样、腔体封闭、气动膨胀与光学探测全过程的单次检测周期为 8 s。实验记录中的“第 n 次检测”可直接映射为样品的持续受热时长。

结合表 2 与图 3 可以看出,冷凝核粒子浓度随加热时间检测次数的延长呈现出明显的动态演化规律:加热初期粒子浓度迅速攀升并达到特定峰值,以 140 ℃条件下第 3 次检测为例,粒子浓度峰值可达 $254.32 \text{ 万颗} \cdot \text{cm}^{-3}$;之后随着样品的冷却、腔体排气,粒子浓度逐渐回落至基线水平。

表 2 10 cm 的 PVC 电缆在不同加热温度下的粒子浓度
Tab. 2 Particle concentration of 10 cm PVC cable at different heating temperatures

第 n 次检测	不同温度下的热解粒子浓度/(万颗 $\cdot \text{cm}^{-3}$)		
	60 ℃	100 ℃	140 ℃
第 1 次检测	1.26	8.69	7.10
第 2 次检测	2.64	89.03	150.99
第 3 次检测	3.60	168.46	254.32
第 4 次检测	2.00	233.53	250.57
第 5 次检测	1.01	233.23	225.90
第 6 次检测	1.89	210.36	212.46
第 7 次检测	3.90	199.83	207.88
第 8 次检测	1.62	182.00	199.15
第 9 次检测	4.94	65.30	73.63
第 10 次检测	1.12	8.18	9.55

根据经典高分子材料热降解动力学基础理论,恒定受控温度下,参与热解反应的材料体积与长度越大,释放挥发性前驱物与特征粒子的总量必然同步增加。本研究设置不同长度梯度的样品进行测试,核心目的旨在验证所构建的云室成核系统的定量检测性能。图 3a~d 为 10、8、6 和 4 cm 的 PVC 电缆经平滑处理后的粒子浓度变化曲线,从中可以看出系统所输出的冷凝核粒子浓度峰值完美捕获并复现了这一宏观物理规律。面对不同尺寸样品释放的极微弱、不可见的纳米级粒子,本研究采用的系统不仅能实现精准捕捉,而且浓度实测值表现出与样品长度高度一致的正相关阶梯式增长规律。这一符合预期的测试结果,有力地反证了该系统在极早期微观粒子浓度定量检测方面的正确性、优异的线性响应能力以及高度的运行稳定性,为后续将它作为火灾预警判据提供了坚实的数据置信度。

在监测微观粒子浓度的同时,实验同步记录了不同受控加热温度下 PVC 电缆样品的宏观物理特征演化。图 3e、f 对比了 100 与 140 ℃条件下的响应差异,图 3g 展示了材料表面在热退化过程中的熔融现象。在 60 ℃恒温加热条件下,样品外观无任何肉眼可见的变化,绝缘外皮硬度保持正常,无异味及可见烟雾产生;当温度升至 100 ℃时,PVC 样品表面虽未出现明显变色,但触感表现出轻微的热软化现象,处于早期受热降解状态,依旧无可见烟雾;当温度进一步升至 140 ℃时,样品绝缘层出现明显的受热软化与轻微的物理形变,可观测到微小的表面起伏或贴合加热台面发生局部扁平化。同时可能伴随微弱的增塑剂挥发气味,但全程仍未观测到任何宏观可见烟雾或碳化变黑现象。结合前文的数据可知,尽管在上述温度区间内样品宏观形态变化微弱且处于无烟状态,但本研究采用的系统已探测到上百万颗 $\cdot \text{cm}^{-3}$ 量级的微观热解粒子。直观印证了热解粒子释放先于宏观形变和可见烟雾的物理规律。

2.2 复合绝缘子样品检测结果

选取厚度为 5 mm,角度分别为 30°、60°和 90° 3 种扇形硅橡胶绝缘子样品,在常温及 200、230 ℃这 3 种受控温度条件下进行实验。每组实验重复 5 次,90°扇形样品在不同温度下的代表性热解粒子浓度如表 3 所示。数据采集方式同 2.1 节。

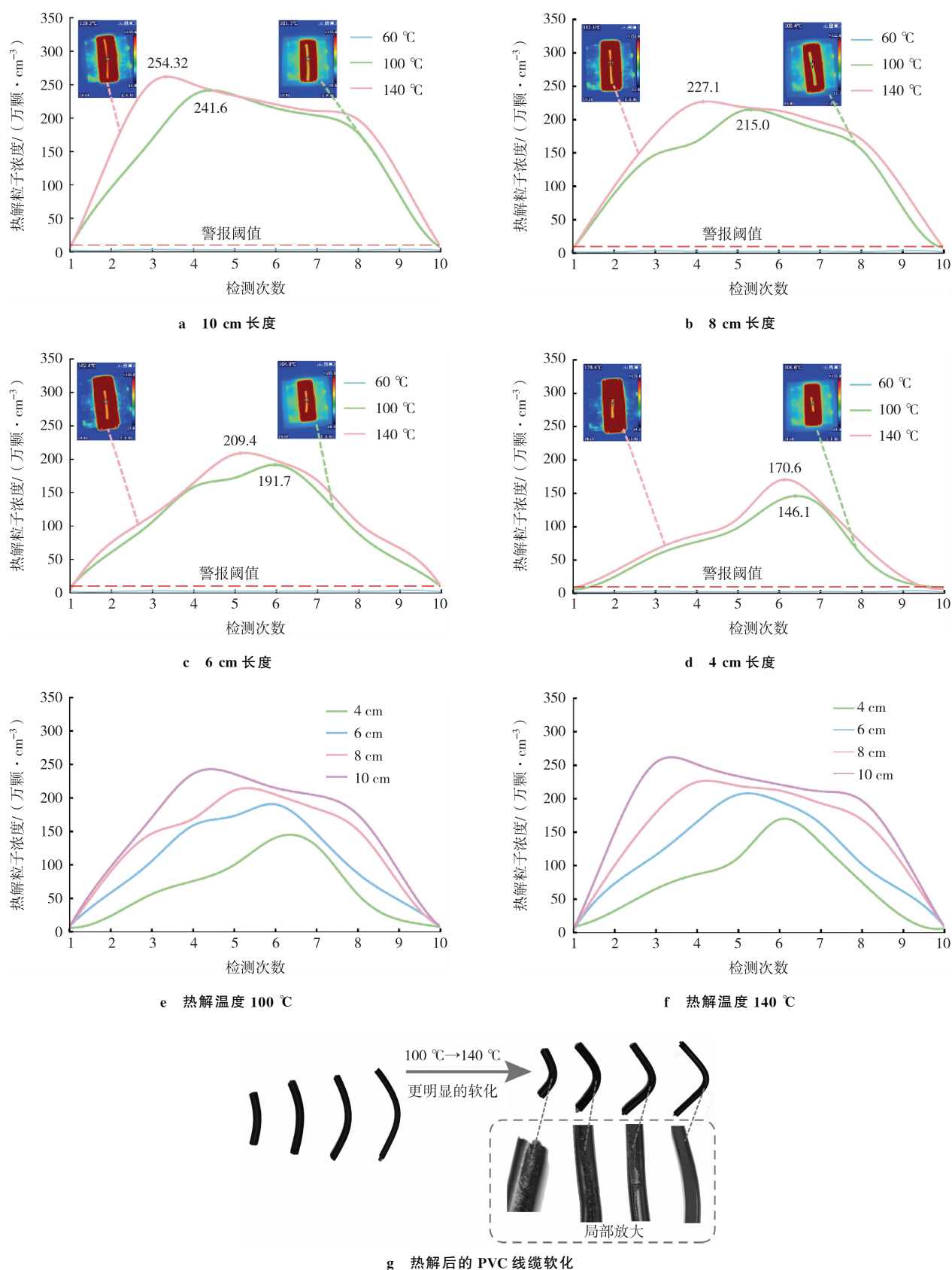


图3 PVC 线缆样品的热解粒子响应特性及形貌变化

Fig. 3 Response characteristics of pyrolysis particles and morphological changes of PVC cable samples

结合表3与图4可以看出,硅橡胶样品的冷凝核粒子浓度随加热时间的延长呈现出明显的动态演化规律:粒子浓度在加热初期迅速攀升,并在达到特定峰值后随样品的移除及腔体排气而逐渐回落至基线水平。

表 3 90°扇形复合绝缘子不同温度下的粒子浓度
Tab.3 Particle concentration of 90° sector composite insulator at different temperatures

第 <i>n</i> 次检测	不同温度下的热解粒子浓度/(万颗·cm ⁻³)		
	常温	200 ℃	230 ℃
第 1 次检测	3.26	3.62	6.06
第 2 次检测	3.69	82.87	135.01
第 3 次检测	1.17	128.77	241.97
第 4 次检测	2.37	200.63	237.88
第 5 次检测	1.64	188.06	216.56
第 6 次检测	3.70	120.73	135.01
第 7 次检测	3.52	106.92	108.56
第 8 次检测	3.45	86.62	98.60
第 9 次检测	1.65	52.39	43.25
第 10 次检测	1.68	11.30	14.32

图 4a~c 为 3 种角度绝缘子样品的平均粒子浓度曲线,样品尺寸越大,粒子浓度峰值越高。在监测过程中,实验同步观察了硅橡胶复合绝缘子在不同受控温度下的宏观形态。与 PVC 材料相比,硅橡胶表现出更为优异的热稳定性:在常温以及 200、230 ℃ 的连续加热条件下,所有尺寸的硅橡胶样品均未出现任何肉眼可见的变色、软化或物理形变,绝缘层表面保持完好,且全程无任何异味或可见烟雾产生。即便处于无烟无形变的极早期热分解阶段,本系统仍能敏锐地捕捉到样品内部因微量分子链降解而释放的纳米级热解粒子。这一强烈的宏观与微观反差充分验证了本研究提出的检测方法对高耐热绝缘材料潜伏性热故障的超前感知能力。

图 4d 展示了样品形貌,图 4e、f 为 200 与 230 ℃ 条件下的对比结果。图 4g 记录了加热后样品表面颜色变化,可见持续升温会使材料发生逐步热解退化。综合上述分析可知,硅橡胶样品的测试结果同样严格遵循了“参与反应的材料体积或表面积越大,热解产物释放总量越高”的经典物理动力学常识。针对不同于 PVC 的全新高分子材质,本研究采用的云室成核系统不仅能成功诱导其中的微量热解粒子成核,且测得的冷凝核浓度依旧展现出与样品尺寸高度一致的阶梯式线性增长规律。这一结果跨材质地验证了云室成核系统在极早期微观定量检测方面的普适性、正确性以及高度的运行稳定性,排除了单一材料测试可能带来的偶然性。

综合上述数据分析,在相同温度条件下,PVC 电缆样品长度越大,相应的粒子浓度峰值越高,其中长度为 10 cm 的样品中粒子浓度峰值达到 254.32 万颗·cm⁻³(140 ℃ 时);随着加热温度升高,粒子浓度上升速率加快、峰值增大且阈值到达时间提前。对于复合绝缘子而言,90°扇形样品中粒子浓度峰值最高,达到 241.97 万颗·cm⁻³(230 ℃ 时);温度由 200 ℃ 提升至 230 ℃ 后,粒子浓度峰值不仅进一步增大,而且阈值到达时间明显提前。

上述结果表明,在未出现可见烟雾前即可检测到明显的粒子信号,证实基于云室成核机理的检测方法能够实现热解早期阶段的早期预警。相较于红外成像,该方法不依赖于热辐射的直视路径,可避免结构遮挡带来的漏检问题^[21];与烟雾探测相比,该方法在时间分辨率上具有明显优势,可在阴燃初期阶段实现有效识别^[22-23]。此外,光学散射检测对电磁干扰不敏感,适用于高压及复杂电磁环境^[24],在电缆沟道、复合绝缘子、文物建筑等场景中具有良好的应用前景^[9-10]。

2.3 预警判别准则与定量分析

为了实现对电气材料受热异常的自动识别,本研究确立了定量预警判别准则。实验数据显示常温环境下粒子背景浓度均低于 5 万颗·cm⁻³。因此,本系统将报警阈值设定为 10 万颗·cm⁻³。

根据表 1 和表 2 可知,当材料受热异常时,例如 PVC 材料在 100 ℃ 工况、复合绝缘子材料在 200 ℃ 工况下,第 3 次检测周期即受热 24 s 时粒子浓度已高达 82.87 万颗·cm⁻³~150.99 万颗·cm⁻³,远超预警阈值。该准则能有效区分环境噪声与热解信号,实现对待测物品的极早期排查提醒。相比之下,传统感温电缆需等待环境升温至动作温度,响应通常滞后;光电感烟探测器则需等待烟雾颗粒浓度及粒径达到减光率阈值。本检测方法在响应时效上较传统手段提升了一个数量级,为电气设备的事事故预警与早期处置赢得了关键的时间窗口。

为了量化说明本研究采用的系统在处理隐蔽热源时的优势,需对比红外热成像的物理特性。红外探测本质上依赖于热辐射的直线传播,当热源被电缆沟支架、开关柜母线桥或设备外壳阻挡时,探测效率将大幅衰减甚至失效。

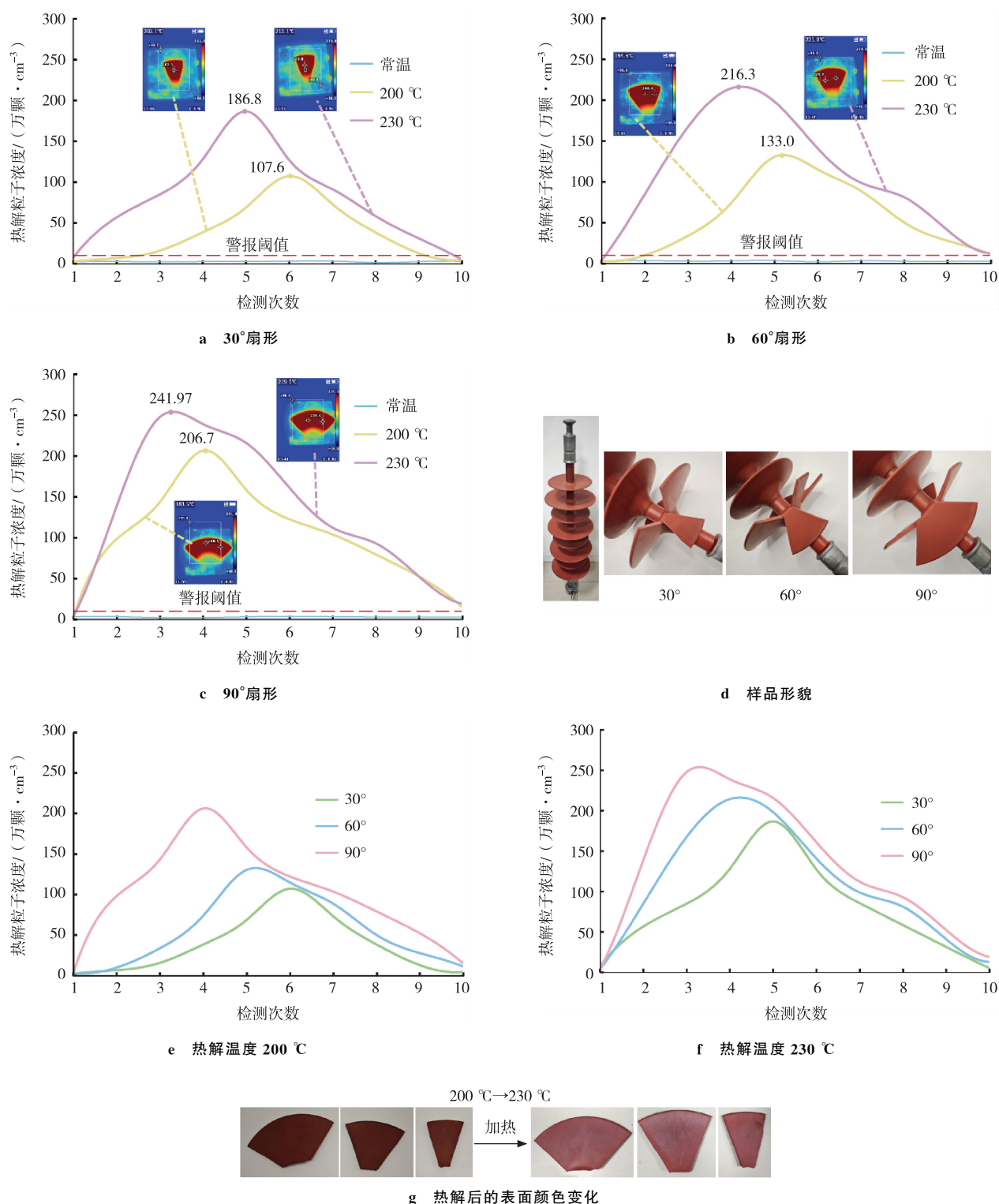


图4 硅橡胶绝缘子样品的热解粒子响应特性及形貌变化

Fig. 4 Pyrolysis particle response characteristics and morphological changes of silicone rubber insulator samples

与红外探测不同,本研究所用系统探测的载体是热解早期释放的物理实体粒子。这些纳米级粒子在受限空间内具有较强的扩散性,可随空气自然对流或系统的主动吸气采样进入云室。试验结果证实,在 100 °C 左右的热解早期,尽管样品表面尚未形成足以被远距离红外感知的热场特征,该系统仍可通过气路获取海量的特征粒子。这种基于“物质迁移”而非“辐射捕获”的探测机制,使本研究提出的检测方法在电缆隧道、封闭式配电柜以及由于遮挡而导致的红外监测盲区中,具有突出的实用价值。

此外,光学散射检测对电磁干扰不敏感,适用于高压及复杂电磁环境。结合核级电缆热解行为分析^[25]与电

力隧道火灾探测需求^[26],本研究采用的系统在电缆沟道、复合绝缘子及文物建筑等场景中展现出良好的工程应用前景。

3 总结

本研究提出并验证了一种基于云室成核机理的热解早期特征粒子检测方法,实现了材料在阴燃前阶段热解信号的有效感知。该方法通过快速气动膨胀将热解早期阶段释放的热解粒子与挥发性前驱物转化为可测冷凝核粒子,并结合激光散射实现粒子浓度定量检测。

在 PVC 电缆与硅橡胶复合绝缘子样品上的受控加热实验表明,在未出现可见烟雾且远低于着火温度时即可获得稳定而明显的粒子响应信号,验证了该方法在热解早期阶段的有效性。通过对不同尺寸样品的阶梯式测试,本研究不仅复现了热解产物随材料体积增加而增多的经典物理规律,更同步验证了云室成核检测系统在跨量级浓度区间内的线性响应精度与定量稳定性。这种对微观前驱物的高灵敏捕捉能力,结合 8 s 的高时间分辨率,为实现电气火灾的隐患阶段主动防控提供了可靠的技术支撑。

相较于传统烟雾探测方法,本研究提出的检测方法具有更高灵敏度与更早响应特性,同时具备良好的抗电磁干扰能力,适用于复杂电磁环境与结构遮挡条件下的工程应用。研究结果表明,该技术可为电缆沟道、复合绝缘子及文物建筑等场景提供极早期安全预警,为火灾隐患的主动防控提供了一种新的技术途径。

参考文献:

- [1] Liang Z R, Lin S R, Huang X Y. Smoldering ignition and emission dynamics of wood under low irradiation[J]. *Fire and Materials*, 2023, 47 (4): 514-524.
- [2] Sapkal M G, Rosch M, Kanji Z A. Development of a horizontal cloud condensation nuclei counter (HCCNC) to detect particle activation at temperatures below 4 °C and supersaturations below 0.05% [C]// *Aerosols/Laboratory Measurement/ Instruments and Platforms*. 2025.
- [3] Aghdaee M, Goodwin M J, Ojambati O S. Optical detection of single sub-15 nm objects using elastic scattering strong coupling[J]. *Nature Communications*, 2025, 16 (1): 8101.
- [4] Xie Y K, Zhu J, Guo Y K, et al. Early indoor occluded fire detection based on firelight reflection characteristics[J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 128: 103542.
- [5] Khan R A, Bajwa U I, Raza R H, et al. Beyond boundaries: advancements in fire and smoke detection for indoor and outdoor surveillance feeds[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, 142: 109855.
- [6] Vogel F, Lacher L, Nadolny J, et al. Development and validation of a new cloud simulation experiment for lab-based aerosol-cloud studies[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93 (9): 095106.
- [7] Xu D S, Li Y F, Li J X, et al. Evaluating the combustion and flame extension characteristics of cable fire in utility tunnels with spontaneous combustion scenarios: an experimental study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 140: 105244.
- [8] Lei Y T, Shen Z F, Tian F S, et al. Fire risk level prediction of timber heritage buildings based on entropy and XGBoost[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2023, 63: 11-22.
- [9] Shi Q, Zuo J X, Song W J, et al. An experimental analysis of a nuclear-grade cable based on fire combustion characteristics and pyrolysis behavior[J]. *Fire*, 2024, 7 (3): 101.
- [10] Fu H, Qiu L, Ai Y, et al. Fire hazard detection for power cable tunnel[J]. *Sensors and Materials*, 2025, 37 (6): 2185.
- [11] Alqahtani A A S, Sulaiman M, Alshayeb T, et al. From inception to innovation: a comprehensive review and bibliometric analysis of IoT-enabled fire safety systems[J]. *Safety*, 2025, 11 (2): 41.
- [12] Singh K, Yadav M, Barak D, et al. Reliability of IoT systems for fire detection[J]. *Procedia Computer Science*, 2025, 256: 63-70.
- [13] Jang H Y, Hwang C H. Obscuration threshold database construction of smoke detectors for various combustibles[J]. *Sensors*, 2020, 20 (21): 6272.
- [14] Grabowski W W, Pawlowska H. Technical note: phase space depiction of cloud condensation nuclei activation and cloud droplet diffusional growth[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2025, 25 (10): 5273-5285.
- [15] Erinin M A, Sagan C R, Ahmed I, et al. Droplet heterogeneous nucleation in a rapid expansion aerosol chamber[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2025, 96 (5): 055104.
- [16] Dorodnyy A, Smajic J, Leuthold J. Mie scattering for photonic devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17 (9):

- 2300055.
- [17] Winkler P M, Wagner P E. Characterization techniques for heterogeneous nucleation from the gas phase[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2022, 159: 105875.
- [18] Mohler O, Adams M, Lacher L, et al. The portable ice nucleation experiment (PINE): a new online instrument for laboratory studies and automated long-term field observations of ice-nucleating particles[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14 (2): 1143-1166.
- [19] Chen P Y, Lee K X, Meiler T C, et al. Topological momentum skyrmions in Mie scattering fields[J]. *Nanophotonics*, 2025, 14 (12): 2211-2217.
- [20] Swaathy S S, Kumar R M S. Identification and annotation of SOD gene family in *Aegle marmelos* through comparative BLAST search[J]. *International Conference on Application of Artificial Intelligence for Renewable Energy Sources and Environmental Sustainability*, 2025, 3252: 020180.
- [21] Chong N S, Abdulramoni S, Patterson D, et al. Releases of fire-derived contaminants from polymer pipes made of polyvinyl chloride[J]. *Toxics*, 2019, 7 (4): 57.
- [22] Kang N, Zhao Z Q, Lin J, et al. Ignition of silicone rubber sheaths by series arcs at different currents and durations[J]. *Fire Safety Journal*, 2023, 136: 103753.
- [23] Li C W, Shi Y, Lu M, et al. A composite insulator overheating defect detection system based on infrared image object detection[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2025, 40 (1): 203-214.
- [24] He X, Feng Y T, Xu F L, et al. Smart fire alarm systems for rapid early fire warning: advances and challenges[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 137927.
- [25] Elhanashi A, Essahraoui S, Dini P, et al. Early fire and smoke detection using deep learning: a comprehensive review of models, datasets, and challenges[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15 (18): 10255.
- [26] Ding Z Y, Guo H H, Liu K, et al. Advances in distributed optical fiber sensors based on optical frequency-domain reflectometry: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23 (22): 26925-26941.

Study on Early Detection Method of Pyrolysis in Electrical Insulating Materials Based on Cloud Chamber Nucleation Technique

GUO Bin¹, LUO Haijun^{1,2}, ZHANG Jian¹, LIN Song¹,
YANG Chen¹, WANG Jie¹, WANG Qiucheng¹, Li Wenhao¹

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University;

2. Chongqing National Center for Applied Mathematics, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To address the issues of concealed thermal release substances during the pre-smoldering stage of materials and the delayed response of traditional infrared and smoke sensors, a novel early detection method for the pyrolysis of electrical insulation materials based on cloud chamber nucleation is proposed. By rapidly expanding gas within a sealed chamber, pyrolytic particles and 1~10 nm volatile precursors released in the early pyrolysis stage are converted into detectable condensation nuclei from 0.5 μm to 10 μm under supersaturated conditions. Particle concentration is then quantitatively measured using laser right-angle scattering. An integrated high-time-resolution detection system with a single measurement cycle as short as 8 seconds was developed and validated on polyvinyl chloride (PVC) cables and silicone rubber insulators. Results show that significant particle signals can be detected even before visible smoke appears and well below ignition temperature, achieving peak concentrations of 2.543 2 million particles $\cdot \text{cm}^{-3}$ for a 10 cm PVC cable and 2.419 7 million particles $\cdot \text{cm}^{-3}$ for a 90° sector sample of an insulator. The method can trigger alarms within 20~30 seconds after the onset of pyrolysis, offering higher sensitivity and earlier response than infrared and smoke detection methods. Moreover, it does not rely on a direct line-of-sight path, enabling effective identification of hidden thermal faults behind structural obstructions.

Keywords: cloud chamber nucleation; early pyrolysis detection; laser scattering; early warning

(责任编辑 陈新颖)