

引用本文

范孝勇,邹凯予,谢佳,等.配电柜绝缘材料热解粒子浓度规律及探测参量优化研究[J].消防科学与技术,2026,45(8):7-15.

Fan Xiaoyong, Zou Kaiyu, Xie Jia, et al. Research on the concentration characteristics of thermal decomposition particles and optimization of detection parameters of insulation materials for distribution cabinets[J]. Fire Science and Technology, 2026, 45(8): 7-15.

配电柜绝缘材料热解粒子浓度规律及探测参量优化研究

范孝勇¹, 邹凯予¹, 谢佳^{1,2}, 陆守香¹

(1. 中国科学技术大学 火灾安全全国重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:为研究配电柜典型电气绝缘材料起火早期的热解粒子数量浓度规律及热解粒子探测参量的选取优化,本研究搭建了配电柜3种典型绝缘材料的热解粒子探测试验平台,模拟了电气材料的低温热解过程,获取了0.3~10.0 μm 的粒子数量浓度及PM0.5、PM1.0和PM2.5粒子质量浓度规律,建立了热解粒子数量浓度数据集,并基于此数据集,采用随机森林算法获取了不同粒径范围的粒子数量浓度对于早期热解的重要程度,优化热解粒子探测参量选取。结果表明:3种热解材料均出现了明显热解固体颗粒的粒子数量浓度变化,热解粒子数量浓度趋势为先保持基值,后增长,再饱和或下降;粒子质量浓度呈现先增长后降低的趋势;粒径分布主要集中在1.0 μm 粒径范围以内;相对于ABS和FR-4环氧树脂材料,PVC更易产生大粒径颗粒物。在热解粒子探测设计中,可优选粒径大于0.3 μm 的粒子数量浓度为单一探测参量,粒径大于1.0 μm 粒子数量浓度与PM2.5质量浓度的搭配为双探测参量。本研究可为电气火灾监测系统中测量热解粒子式电气火灾探测技术的应用提供依据。

关键词:电气绝缘材料;粒子数量浓度;粒子质量浓度;电气火灾探测;探测参量

中图分类号:X932;TU892 **文献标志码:**A **DOI:**10.20168/j.1009-0029.2026.08.0007.09

Research on the concentration characteristics of thermal decomposition particles and optimization of detection parameters of insulation materials for distribution cabinets

Fan Xiaoyong¹, Zou Kaiyu¹, Xie Jia^{1,2}, Lu Shouxiang¹

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei Anhui 230061, China)

Abstract: To study the concentration law of pyrolysis particles and optimize the selection of pyrolysis particles detection parameters during the early stage of ignition of typical electrical insulation materials in Distribution Cabinets, this study established a pyrolysis particles detection test platform for three typical insulating materials in distribution cabinets. The platform simulates the low-temperature pyrolysis process of electrical materials, obtaining the number concentration laws of particles ranging from 0.3 to 10.0 μm and the mass concentration laws of PM0.5, PM1.0 and PM2.5. A pyrolysis particles concentration dataset was established. and based on this dataset, the random forest algorithm was used to obtain the importance of particle concentrations in different particle size ranges for early pyrolysis, thereby optimizing the selection of pyrolysis particle detection parameters. The results show that all three pyrolysis materials exhibit significant changes in the concentration of pyrolytic solid particles. The trend of the number concentration of pyrolysis particles is to maintain the baseline value first, then increases, and finally reaches saturation or decreases. The mass concentration shows a trend of first increasing

作者简介: 范孝勇, 中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室硕士研究生, 主要从事电气火灾安全、电气火灾监控技术等研究, 安徽省合肥市蜀山区黄山路443号, 230026。

通信作者: 陆守香, 中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室教授, 火灾风险评估研究室主任, sxlu@ustc.edu.cn。

收稿日期: 2025-04-23; **修回日期:** 2025-09-16

and then decreasing. The particle size distribution is mainly concentrated within the range of 1.0 μm . Compared with ABS and FR-4 epoxy resin materials, PVC is more likely to generate large-sized particles. In the design of pyrolysis particle detection, the number concentration of particles larger than 0.3 μm is preferred as a single detection parameter, and the combination of the number concentration of particles larger than 1.0 μm and the PM2.5 mass concentration is recommended as dual detection parameters. This research can provide a basis for the application of the electrical fire detection technology of measuring pyrolysis particles in electrical fire monitoring system.

Key words: electrical insulation materials; particle number concentration; particle mass concentration; electrical fire detection; detection parameter

从电气火灾的发展过程来看,无论由何种电气故障导致的元件起火,电气绝缘材料均会经历早期受热分解、阴燃、明火燃烧等阶段。其中,受热分解阶段主要释放烟粒子和气体粒子,它们可被统称为热解粒子^[1]。热解粒子探测技术通过监测材料热解中物理和化学变化的粒子浓度参量,可以检测、识别电气火灾早期的热解现象和起火隐患。

目前的热解粒子探测技术主要分为热解气体探测和热解颗粒物探测。其中,热解气体探测技术(电子鼻技术、气敏型探测技术等)研究较多,并开发了相应的热解气体识别算法,但现有热解气体探测技术主要针对还原性气体作出响应,且气体探测技术需要提前明确热解气体的产物。针对性地对某类气体进行监测,并不具备泛化性,在一些特殊场所依然存在漏报、误报等问题。例如,李宁宁^[1]研究了PVC绝缘外皮在150℃下的热解气体成分,分析出主要热解气体为邻苯二甲酸二(2-乙基己)酯,虽表明热解气体探测可用于含PVC材料的低压配电柜电气火灾预警,但监测气体为不常见的还原性气体,并不适用于监测其他绝缘材料。Han J等^[2]采用TG-FTIR-GC-MS研究了电缆热解气体,通过静电纺丝合成了Au元素改性的SnO₂纳米纤维气敏材料,用于电缆过热测试,发现电缆过热气的响应与其他气体响应得到很好的区分,有利于减少实际应用中的误报率,但依旧缺乏应用泛化能力。汪勤凡^[3]应用多层感知机、支持向量机、决策树和K-近邻算法进行对比识别研究,获得最优的热解气体粒子识别算法模型,以排除其他气体的干扰,但算法模型是否适用于识别非电缆类绝缘材料热解产物有待商榷。

热解颗粒物(热解不完全产物)探测相对于热解气体(热解较完全产物)探测可以将预警时间提前,且绝缘材料产生的热解颗粒的几何特性(如尺寸、粒径等)具有共性,相对于热解气体探测,提升了应用泛化性。但热解颗粒物探测依旧存在粒子浓度规律不清晰、探测参量(探测粒径范围、探测浓度种类)选取缺乏科学性的问题。如陈现平等^[4]采用恒温加热方法

研究航天常用非金属材料的静态热解颗粒物特性,虽发现材料的热散发颗粒物随温度变化呈现不同的分布特征,且粒径分布与温度相关,但却未进一步讨论粒径分布规律对热解粒子探测的应用价值。邢国新等^[5]研究发现,采用动态权重算法融合粒子质量浓度参量的DT-300/RJ型火灾探测器可减少地铁电气火灾的误报、漏报,但忽视了粒子数量浓度的监测可行性。GB 14287.5—2025《电气火灾监控系统 第5部分:测量热解粒子式电气火灾监控探测器》^[6]规定了PM1.0质量浓度为表征典型电气绝缘材料的热解特征参量,而未提及其他粒径范围的粒子参量。Wu Z G等^[7]采用加热方法,对比了颗粒物质量浓度传感器与甲烷、乙炔等气体传感器的响应情况,发现颗粒物传感器在90℃时可以响应,而气体传感器在136℃前无响应,虽验证了颗粒物探测相对于气体探测的优势,但颗粒物传感器粒径范围选取较为笼统,且阈值设定并未考虑浓度规律。总的来说,热解颗粒物探测存在以下局限性。

1)热解颗粒物数量浓度参量的研究较少,特定粒径的数量浓度规律仍不清晰,即多数研究仅观测了粒子质量浓度规律,而缺乏监测粒子数量浓度的变化规律,未讨论粒子数量浓度监测的应用价值。

2)热解粒子探测参量的选取过于笼统,缺乏试验研究及重要性研究,未明确对比不同粒径范围粒子浓度的适用性和优选性,进而影响探测技术的“早期预警能力”和“预警准确性”。

因此,有必要开展典型电气绝缘材料的低温(低于200℃)热解粒子探测试验及热解探测参量优化研究,对比分析不同粒径范围的粒子数量浓度及质量浓度规律,为热解探测参量的选取优化提供数据支撑。

本文针对配电柜内常见的电气元件绝缘材料(PVC、ABS、FR-4),依据GB 14287.5—2025^[6]中的试验方法,开展材料的低温(低于200℃)热解试验,并采用激光粒子计数传感技术探究不同材料在低温条件下的热解粒子浓度规律。研究了粒径小于10.0 μm 颗粒物的粒子数量浓度规律和PM0.5、PM1.0、

PM2.5粒子质量浓度规律(应用场景为配电柜等狭小空间)。基于热解试验的颗粒物浓度数据集,采用随机森林算法,训练热解颗粒物浓度数据,探究不同粒径范围的热解特征参量的相对重要程度及特征间的相关系数,给定热解特征参量的选取建议。在实际工程中为热解粒子探测器报警阈值的确定、误报漏报率的降低提供了数据支撑及依据。

1 热解试验设置

1.1 试验材料

选取聚氯乙烯(PVC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和FR-4环氧树脂为试验的3种电气绝缘材料,这3种材料是标准编制组根据大量调研工作确定的主要热解材料,如图1所示。3种材料的质量控制为 (10 ± 1) g。

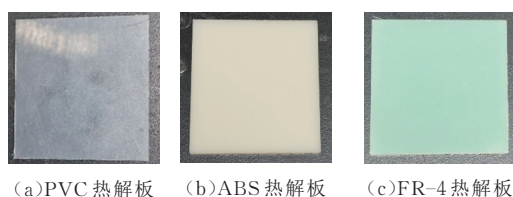


图1 热解试验材料实物图

Fig. 1 Photographs of pyrolysis test materials

聚氯乙烯通常为低压配电柜中的线缆外包装材料,ABS通常为电气元件的塑料外壳材料,环氧树脂复合材料是一种绝缘热固性塑料,燃点约为 530°C ^[8]。

1.2 试验装置

材料低温热解试验平台由标准试验舱、程序控温加热平台、颗粒物浓度测量系统和温度测量系统组成。试验系统组成如图2所示。

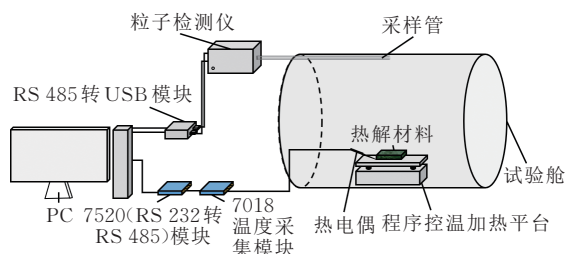


图2 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test system

1.2.1 标准试验舱

依据标准,试验舱为圆柱体状,横向放置,如图3所示,右侧部分轮廓以虚线表示延伸结构。试验舱的直径为 (570 ± 5) mm、深 (636 ± 5) mm。

1.2.2 程序控温加热平台

程序控温加热平台为热解材料提供热源,平台配置如表1所示。设置平台的升温速率可调节为 $0 \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

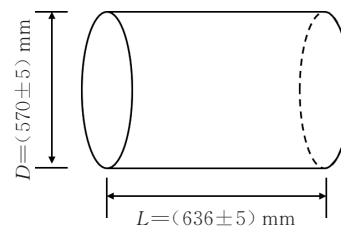


图3 标准试验舱示意图

Fig. 3 Diagram of standard test chamber

表1 程序控温加热平台配置

Table 1 Configuration of programmed temperature control heating platform

供电电压(AC)/V	220
输出功率/W	1 000
加热方式	八段曲线加热
温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	$0 \sim 600$
发热面积/ $\text{mm} \times \text{mm}$	160×160
长 $\times$ 宽 $\times$ 高/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$220 \times 220 \times 220$
铜板厚度/mm	15

1.2.3 颗粒物浓度测量系统

颗粒物浓度测量系统包含粒子检测仪和485转USB模块与计算机软件。其中,粒子检测仪基于颗粒物对激光的散射原理,可检测所试环境中的单位体积空气内的粒子粒径分布(不同粒径粒子数量浓度)及质量浓度,仪器符合JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪检定规程》^[9]的相关要求,颗粒物激光传感器原理如图4所示。仪器配置如表2所示。采样管连通粒子检测仪的吸气泵,可引导外界空气进入传感器内部。

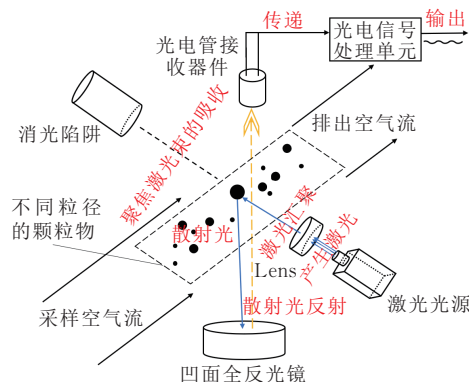


图4 颗粒物激光传感器原理

Fig. 4 Principle of particle laser sensor

表2 颗粒物粒子计数器配置

Table 2 Configuration of particle counters

粒径监测范围/ μm	$0.3 \sim 10.0$
质量浓度监测通道/ μm	$0.5, 1.0, 2.5$
监测精度/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.1
量程/ mg/m^3	$0 \sim 50$
长 $\times$ 宽 $\times$ 高/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$215 \times 70 \times 160$

1.2.4 温度测量系统

温度测量系统由K型铠装热电偶与温度数据转换模块7018-7520组成。K型热电偶配置如表3所示,温度原始信号通过7018-7520模块转化成电信号,最终可在PC端通过上位机采集。

表3 K型铠装热电偶配置

Table 3 Configuration of K-sheathed thermocouple

量程/℃	-200~1 300
精度/℃	±1.5
响应时间/s	1
端部直径/mm	1

1.3 试验方法与试验工况

将热解材料置于程序控温加热平台表面,材料与加热平台接触面设置一个热电偶测点,以监测温升情况;加热平台上方距材料0.5 m处设置有耐热采样管,采集材料受热分解释放的热解粒子并泵入粒子检测仪中分析;热电偶和粒子检测仪通过RS 485通信传递给计算机采集软件,实时监测和储存传感器温度、不同粒径的粒子数量浓度和质量浓度数据。

区别于传统的火灾探测器,电气火灾监控系统的系列标准设计目标是通过监测电气线路或者电气设备的异常参数,实现火灾隐患的早期预警。因此,针对此类探测器并不需要加热至起火,而是要在出现火灾隐患的时候做到早期预警。并且200℃之后,材料热解产生的烟颗粒已经能够使感烟探测器发挥作用,无须采用热解粒子式探测器。因此,将终点温度设定在200℃之前。试验工况如表4所示。

表4 材料低温热解试验工况

Table 4 Experimental condition of low temperature pyrolysis of materials

电气元件绝缘材料	质量/g	始末温度/℃	升温速率/℃/min
聚氯乙烯(PVC)	10±1	80~180	10
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)		90~190	
FR-4 环氧树脂玻纤布			

2 试验结果与分析

2.1 热解粒子数量浓度规律

PVC、ABS和FR-4环氧树脂材料在标准升温速率下产生的热解粒子数量浓度(粒子数量浓度指单位体积的粒子个数,pcs表示个数,粒子计数领域常用pcs/L来表示采样单位体积的粒子数量浓度)如图5~图7所示。聚氯乙烯以10℃/min的速率从80℃升温至180℃,ABS和FR-4环氧树脂材料以10℃/min的速率从90℃升温至190℃,所有材料均耗时600 s。

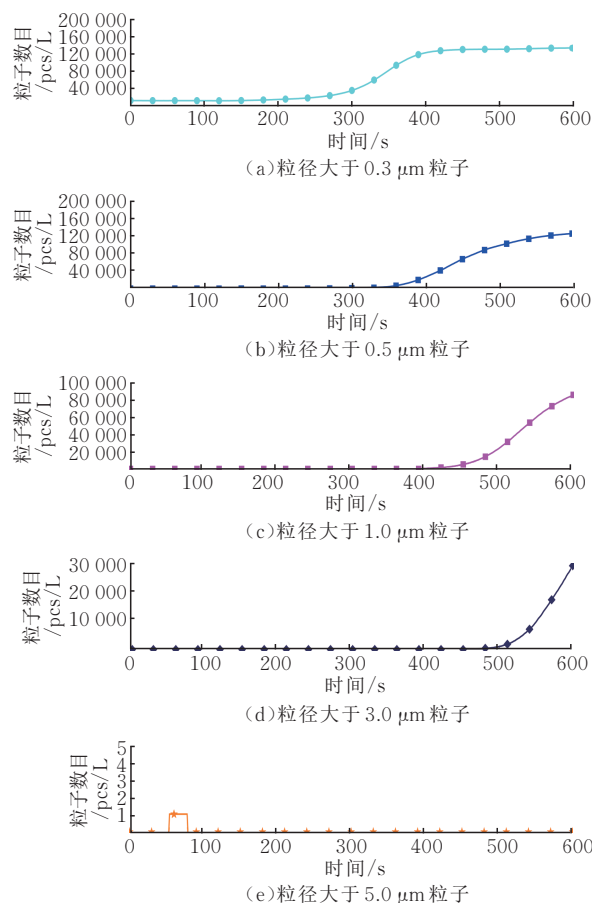


图5 PVC低温热解中不同粒径粒子数量浓度

Fig. 5 Particle number concentration of different particle sizes during low temperature pyrolysis of PVC

结果显示,随着温度匀速升高,PVC材料热解产生的不同粒径粒子数量浓度先不变后增长,增长阶段的增长速率先增大后减小,最后,粒径范围最广(粒径大于0.3 μm)的粒子数量浓度趋向饱和。初始状态,由于温度较低,材料并未达到产生热解粒子的临界温度,粒子数量维持在常态附近;在达到临界温度点后,粒径大于0.3 μm的粒子数量浓度开始以一种较为缓慢的速率增长,而粒径大于0.5 μm的粒子数量浓度仍未增长。可见,此阶段主要为0.3~0.5 μm粒子的增长阶段。随着温度继续上升,更大粒径范围的粒子数量开始增长。因此,材料在低温(低于200℃)热解阶段,产生的不同粒径的粒子在数量浓度开始增长的时间存在延迟,小粒径的粒子数量先增长,且粒径越大,开始增长的时间越晚。从气溶胶颗粒的生成机理方面看,在材料最初热解阶段,温度较低条件下颗粒物热运动慢,分子相对稳定,大量粒子释放且粒子会通过碰撞团聚形成大粒径颗粒^[10];同时,增长的温度增强了颗粒间的范德华力,团聚速率大于分解速率,大粒径粒子数量增加。此外,由于粒径越小的粒子越容易从材料表面逃逸,且较大颗粒物的生成与材料温度和小粒径粒子的团聚和凝并相关,因此,不同粒径粒子数量的量级不一样,不论是初始值(实验

室环境的气溶胶稳定态)还是在低温热解过程中的增长值,小粒径粒子数量总是大于大粒径粒子数量。

ABS和FR-4材料热解产生的粒径大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子浓度曲线趋势与PVC材料类似,但其余粒径范围的粒子数量浓度均是先稳定在基值附近,后增长,再轻微下降。所有材料粒径大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量最终饱和的原因是随着温度增长,生成粒子的粒径向较高值偏移,而由于粒子数量量级的差异,大粒径粒子的数量浓度增长值相对于目前粒径大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 已经达到的粒子总数量浓度($100\text{ }000\text{ pcs/L}$)极低,所以从曲线方面上看,大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度最终会走向平缓。而其余粒径粒子的下降可能与材料热解产物相态的变化及小粒径粒子的浓度相关。

对比PVC、ABS和FR-4常见的3种电气元件绝缘材料在低温条件下的热解颗粒物数目规律可以发现,3种材料产生的粒径大于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量峰值接近,在 $100\text{ }000\sim 15\text{ }000\text{ pcs/L}$ 范围内。而对于粒径大于 0.5 、 1.0 、 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量峰值,PVC材料粒子数量>FR-4材料粒子数量>ABS材料粒子数量。可见,从热解粒子数量角度看,PVC在低温条件下比ABS和FR-4材料更易产生大粒径热解颗粒物。

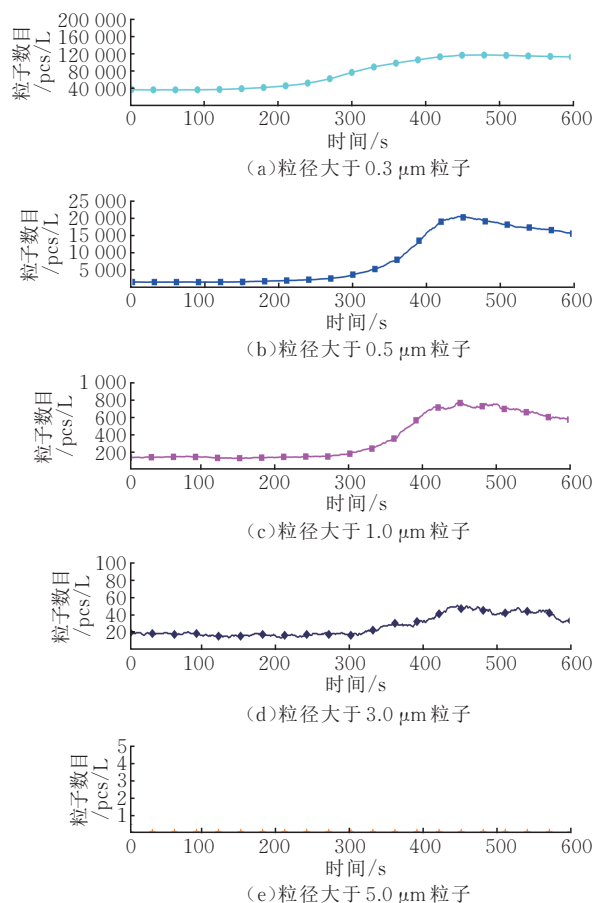


图6 ABS低温热解中不同粒径粒子数量浓度

Fig. 6 Particle number concentration of different particle sizes during low temperature pyrolysis of ABS

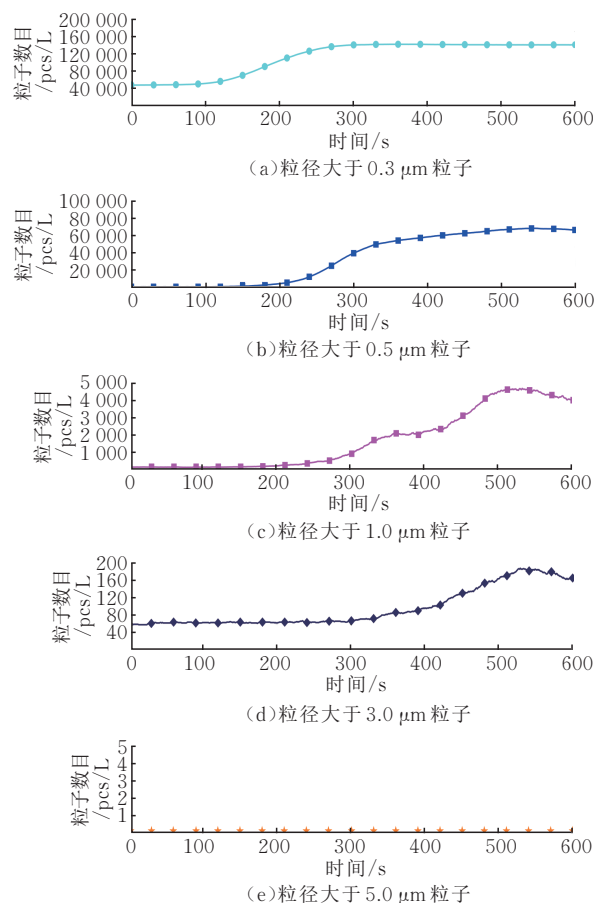


图7 FR-4低温热解中不同粒径粒子数量浓度

Fig. 7 Particle number concentration of different particle sizes during low temperature pyrolysis of FR-4

从热解粒子探测角度看,由于小粒径的粒子数量在时间序列方面先于大粒径的粒子增长,因此,为将探测识别时间向材料热解早期推进,可优先选取监测小粒径粒子数量浓度。而根据试验数据可见,粒径大于 $5.0\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量接近于0,且几乎不变,粒径大于 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量仅PVC大量产生,故相对于其余粒径范围,粒径大于 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度在表征各类材料的低温热解反应方面具有局限性,在探测标志浓度中不宜被采用。

2.2 临界热解温度

由于在低温 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温速率条件下,小粒径的粒子数量在时间上快于大粒径粒子的产生,因此本研究中率先监测到了最小粒径为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的粒子数量的增长,采用 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 粒子信号开始显著变化的温度点为临界温度点。

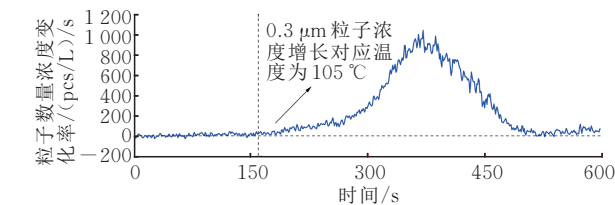
粒子浓度变化率反映了粒子数量随时间变化的瞬时速度,能够衡量粒子数量的增长快慢。因传感器信号采样间隔是以离散的秒为单位,离散点数据无法采用严格的极限定义处理传感器信号。相对于前向差分和后向差分法,中心差分法考虑了更多的信息来近似导数,能够更好地反映该点的变化趋势,从而减

少误差,中心差分法处理变化率可以用式(1)求解。

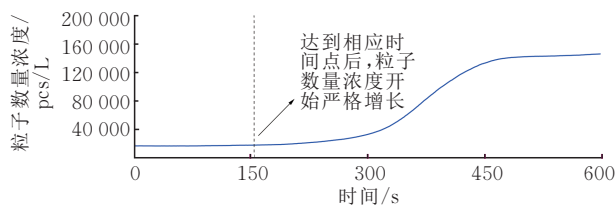
$$S'(t_i) \approx \frac{S(t_{i+1}) - S(t_{i-1}))}{2t} \quad (1)$$

式中: $S'(t_i)$ 为传感器信号 S 在时间节点 t_i 的导数近似值。

PVC材料热解粒子(粒径 $>0.3\mu\text{m}$)浓度变化率随时间的变化如图8所示。从154s开始,粒子数量浓度变化率恒大于等于0;154s所对应的温度为 105°C ;达到154s后,粒子数量浓度开始严格增长。因此,PVC材料热解粒子释放的临界温度为 105°C 。同理获得ABS和FR-4的临界温度,如表5所示。



(a) 粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 粒子的数量浓度变化率曲线及临界增长点判决



(b) 粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 粒子的数量浓度曲线及热解态的划分

图8 PVC材料热解粒子数量浓度变化率随时间的变化

Fig. 8 The variation rate of the number concentration of pyrolysis particles of PVC material with time

表5 材料临界热解温度

Table 5 Critical pyrolysis temperature of the material

材料	PVC	ABS	FR-4环氧树脂
临界温度/ $^\circ\text{C}$	105	120	100

2.3 粒子粒径分布

PVC、ABS和FR-4环氧树脂材料在不同温度条件下的热解颗粒物粒径分布特征如图9~图11所示。由图可知,3种材料产生的热解粒子粒径分布主要集中在 $1.0\mu\text{m}$ 粒径范围以内。随着温度上升, $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 粒径的粒子比例先增长后减小, $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 粒径的粒子比例先降低后增长。PVC材料在 180°C 时产生的 $3.0\sim 5.0\mu\text{m}$ 粒径粒子占据了总粒子数量的11%,远大于ABS和FR-4环氧树脂材料(低于1%)。可见,PVC材料热解可产生相当数量的大粒径颗粒物(粒径大于 $2.5\mu\text{m}$),与ABS和FR-4环氧树脂材料的热解机理与热解现象存在明显差异。

从电气火灾早期探测角度分析,相对于ABS和FR-4材料,针对PVC材料可选择的热解粒子探测粒径范围更广。电气火灾的发生常从线缆外绝缘皮的异常升温开始(线缆漏电、线缆过载、线缆短路),而PVC材料又是供配电线缆广泛使用的绝缘材料。因

此,从适用场所看,激光粒子计数传感器在以PVC材料为核心可燃物的供配电场所更为适用。

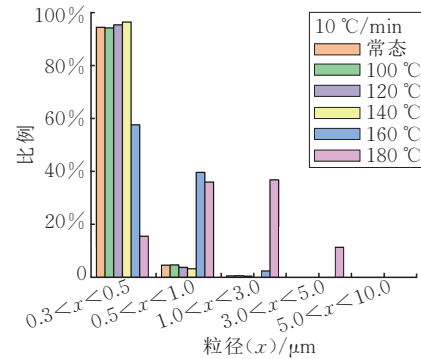


图9 PVC材料热解颗粒物粒径分布特征

Fig. 9 Particle size distribution characteristics of PVC material pyrolysis particles

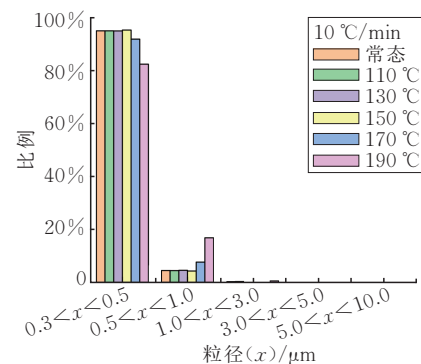


图10 ABS材料热解颗粒物粒径分布特征

Fig. 10 Particle size distribution characteristics of ABS material pyrolysis particles

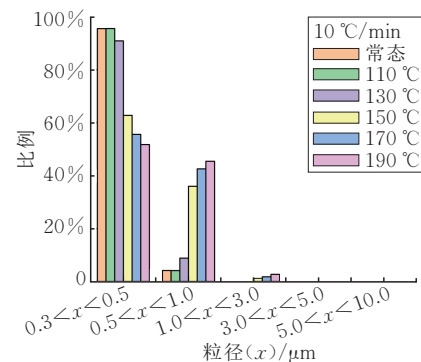


图11 FR-4材料热解颗粒物粒径分布特征

Fig. 11 Particle size distribution characteristics of FR-4 material pyrolysis particles

2.4 粒子质量浓度规律

PM_{1.0}(粒径小于 $1.0\mu\text{m}$)为GB 14287.5—2025指定需监测的粒子粒径质量浓度范围,而考虑到 $1.0\sim 3.0\mu\text{m}$ 内的粒子也会在 200°C 内产生,因此设定环境监测中重要的监测参数PM_{2.5}(粗细颗粒物的分类界限^[11])和PM_{0.5}为试验另一监测值。

若颗粒物的平均密度为 ρ ,利用颗粒物的等效体积粒度分布 $l(D_v)$,颗粒物的质量浓度 C_m 可表示为式(2)。

$$C_m = \frac{\rho}{6} \int_{D_{V,\min}}^{D_{V,\max}} l(D_V) D_V^3 dD_V \quad (2)$$

式中: $D_{V,\max}$ 和 $D_{V,\min}$ 分别表示颗粒物的最大和最小体积等效直径。

PVC、ABS和FR-4环氧树脂材料在标准升温速率下产生的热解粒子质量浓度如图12~图14所示。

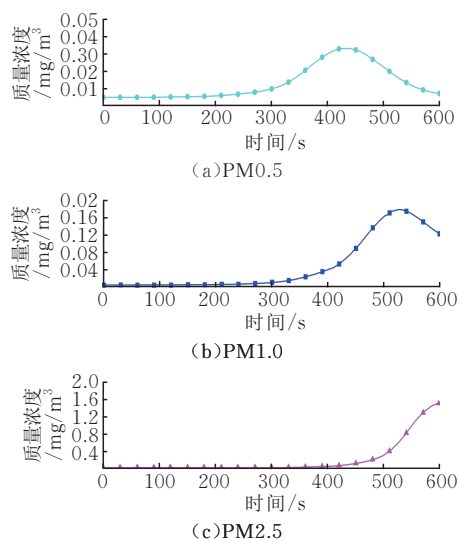


图12 PVC材料热解颗粒物质量浓度

Fig. 12 Mass concentration of PVC pyrolytic particles

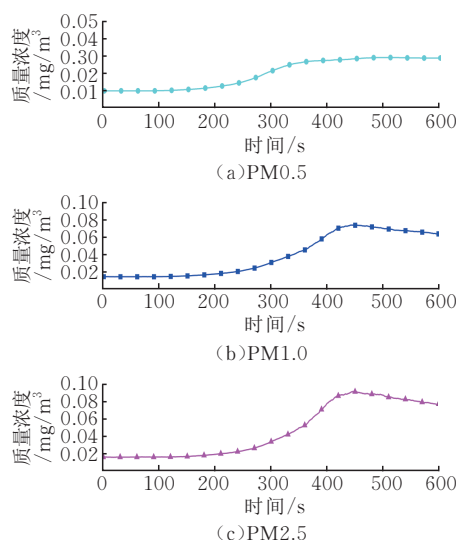


图13 ABS材料热解颗粒物质量浓度

Fig. 13 Mass concentration of ABS pyrolytic particles

由图可知,PM0.5、PM1.0和PM2.5的粒子质量浓度存在先增长后降低的趋势。由于大粒径粒子的体积较大,因此较大粒径粒子的质量浓度量级要大于小粒径的粒子质量浓度量级,如PVC曲线的PM0.5质量浓度峰值为 $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而PM1.0的粒子质量浓度峰值为 $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$,约为PM0.5质量浓度的6倍。对比3种电气元件绝缘材料的粒子质量浓度产量大小可见,在同一粒径范围内,PVC产量>FR-4环氧树脂产量>ABS产量。

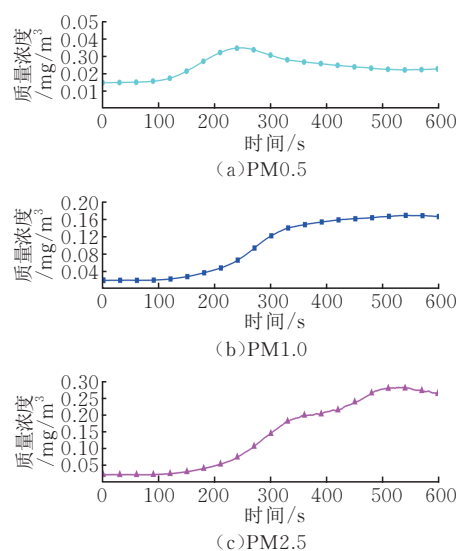


图14 FR-4环氧树脂材料热解颗粒物质量浓度

Fig. 14 Mass concentration of FR-4 epoxy resin pyrolytic particles

从热解粒子探测角度看,选取PM1.0质量浓度作为监测参量可反映热解材料的升温情况。

3 基于随机森林算法的热解参量选取优化

热解探测参量的增多可能会导致数据冗余,加大探测器处理器自身的计算成本和工程成本。另外,根据材料低温热解的试验结果,部分粒径范围(如粒径 $>5.0 \mu\text{m}$)的粒子产量极少,对于热解粒子探测的贡献度极低。因此,有必要对激光粒子计数器内部的热解探测参量进行筛选,优化热解参量的复合。笔者采用随机森林机器学习算法,对比低温热解试验中各个探测参量表征热解行为的重要度,筛选重要度更高的探测参量,同时考虑特征间的关联性,优化热解探测参量。结果给出了单一参量选取方案和双参数复合搭配方案,可为提升热解粒子探测器的早期探测能力与探测准确性,以及优化电气火灾预警算法的输入特征选取提供思路。

3.1 随机森林算法

随机森林模型(Random Forest, RF)是一种集成学习方法。其基础学习器为决策树,使用Bagging算法对原始数据集进行随机自助采样,构建多棵不同的决策树,形成森林^[12]。在存在相关预测变量的情况下,利用随机森林算法可解决变量选择的问题^[13]。

3.2 训练集的构建

将不同低温热解试验采集到的试验数据作为训练样本,构建训练集。基于3种典型电气绝缘材料的加热试验结果可知,粒径大于 $3.0 \mu\text{m}$ 的粒子数量浓度不易表征低温热解现象,故仅保留粒径分别大于 0.3 、 0.5 、 $1.0 \mu\text{m}$ 的粒子数量浓度和PM0.5、PM1.0、PM2.5粒子质量浓度6个特征参量。同时,将数据集划分常态(normal)和热解(pyrolysis)两个标签。

3.3 训练随机森林模型

随机森林模型算法的实现主要有以下几个步骤:调用成熟的机器学习库中的随机森林模块;读取创建的训练集文件,提取特征和标签;训练随机森林分类器;计算特征的重要程度及特征之间的相关系数矩阵。

3.4 结果分析

图15为训练后的1号决策树的不完全结构,在每个节点中呈现了该决策树的分裂条件、Gini系数、节点样本数量占总样本量的比例、类别分布概率值、目标类别标签。整个随机森林的结果则是由多颗决策树采用Bagging集成决策决定。

特征重要度衡量的是某一参数对模型预测结果的贡献程度,重要度越高,说明该参数对热解粒子析出的解释能力越强。图16为热解特征参量的重要程度图,可见,6个热解特征参量的重要度排序为:粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度、PM2.5质量浓度、PM1.0质量浓度、PM0.5质量浓度、粒径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度、粒径大于 $1.0\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度。因此,在采用本试验选取的激光粒子探测技术的条件下,粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度为划分材料是否热解最重要的特征参量,在本研究中为早期析出的主要粒子群体,能通过

单一维度快速反映热解过程的开端。在热解粒子探测技术中可作为最优单一探测参数,而粒径大于 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1.0\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度重要度相对较低,不易选取。

相关系数衡量两个变量间线性相关的强度,绝对值越接近1,表示相关性越强。采用RF算法,对低温-热解试验数据进行处理,可获取6个热解参量的相关热力系数图,如图17所示。两参量的相关系数越接近于1,说明在判定热解时,两个系数的复合性越好。根据相关热力系数图可知,相关系数较好($r \geq 0.85$)的搭配指标为:粒径大于 $1.0\mu\text{m}$ 粒子数量浓度和PM2.5质量浓度;粒径大于 $0.5\mu\text{m}$ 粒子数量浓度和PM1.0质量浓度;粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 粒子数量浓度和PM1.0质量浓度。粒径大于 $1.0\mu\text{m}$ 的粒子数量浓度与PM2.5质量浓度的相关性达0.97,说明两者在表征热解粒子析出时呈现极强的同步变化趋势。通过这两个参数的组合,能更全面地反映热解过程中粒子的析出特征,可以通过互补维度提升对热解过程的表征精度。在实际应用中,可基于两者符合热解粒子特征的同步变化模式将两种信号耦合,通过预设的协同判定规则对探测器是否报警做出输出,从而提高探测的准确度。

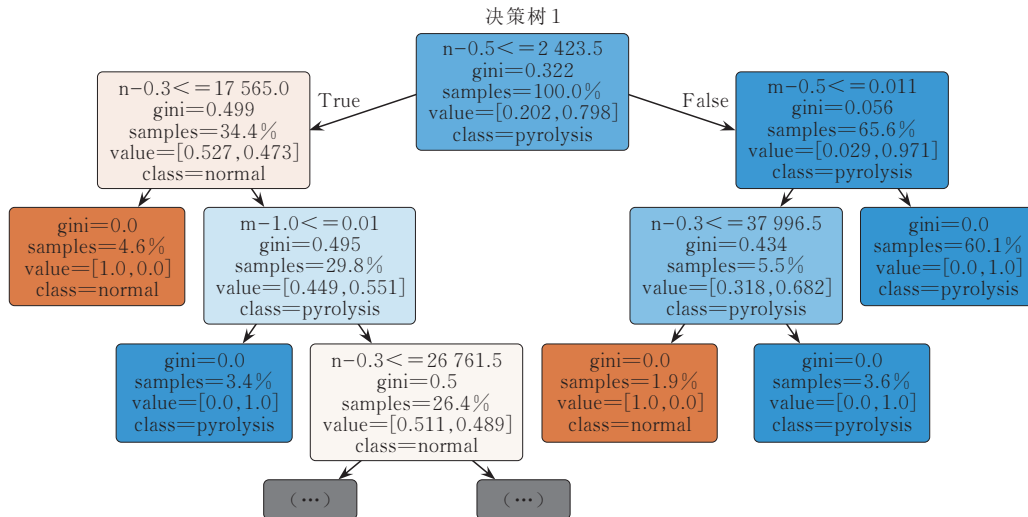


图15 决策树1的不完全结构

Fig. 15 Incomplete structure of decision tree 1

4 结 论

搭建了配电柜内3种典型绝缘材料(PVC、ABS和FR-4环氧树脂)的热解粒子探测试验平台,通过试验获取了不同粒径范围的粒子数量浓度及质量浓度规律(适用于配电柜等狭小空间),并结合随机森林算法讨论了热解特征参量的选取。得到以下结论。

1)粒子数量浓度规律。热解粒子数量浓度趋势为:先几乎不变,后增长,再饱和或下降;PVC在低温条件下比ABS和FR-4材料更易产生大粒径热解颗粒

物,即3种材料产生的粒径大于 $0.3\mu\text{m}$ 的粒子数量接近,而对于其余粒径的粒子数量,PVC材料产生的数量>FR-4材料产生的数量>ABS材料产生的数量。

2)粒径分布规律。3种材料产生的热解粒子粒径分布主要集中在 $1.0\mu\text{m}$ 粒径范围以内,随着温度上升, $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ 粒径的粒子比例先增长后减小, $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 粒径的粒子比例先降低后增长。PVC材料在低温条件下可产生相当数量的大颗粒物,相对于ABS和FR-4环氧树脂材料,PVC的热解机理与热解现象存在明显差异。

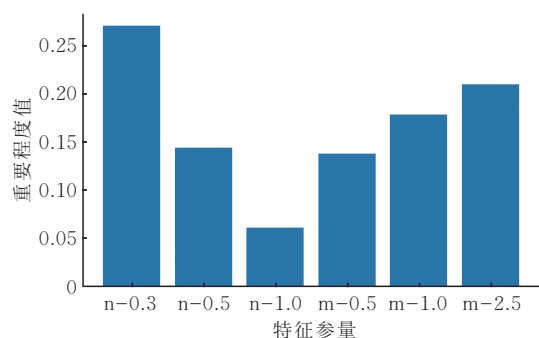


图 16 热解特征参量的重要程度图

Fig. 16 Diagram of the importance of pyrolysis characteristic parameters

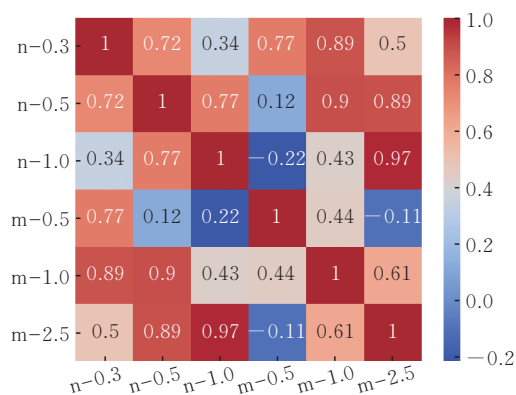


图 17 热解特征参量的相关热力系数图

Fig. 17 Correlation thermodynamic coefficients of pyrolysis characteristic parameters

3)质量浓度规律。PM0.5、PM1.0和PM2.5的粒子质量浓度存在先增长后降低的趋势;较大粒径粒子的质量浓度量级要大于小粒径粒子的质量浓度量级。

4)采用随机森林机器学习算法训练了低温热解试验的数据集,计算了各热解特征参量的重要程度和Pearson相关系数。结果表明:部分粒径的粒子数量浓度和质量浓度的复合搭配对表征热解粒子的析出有较好的效果,尤其是粒径大于1.0 μm 粒子数量浓度与PM2.5质量浓度的搭配可达到0.97的相关性;粒径大于0.3 μm 的粒子数量浓度占据着最大的参数重要度,其次是3种粒径范围的粒子质量浓度。在热解粒子探测设计中,可选取粒径大于0.3 μm 的粒子数量浓度为单一探测参量以做到早期探测,粒径大于1.0 μm 粒子数量浓度与PM2.5质量浓度的搭配为双探测参量以提升探测准确度。

参考文献:

- [1] 李宁宁. 低压配电柜电气火灾监控新技术研究[J]. 建筑电气, 2014, 33(7):26-29.
Li N N. Study on new electrical fire monitoring technology for low-voltage distribution cabinet[J]. Building Electricity, 2014, 33

(7):26-29.

- [2] Han J, Chen W J, Yu A H, et al. Detection of semi-volatile plasticizers as a signature of early electrical fire[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6:250.
- [3] 汪勤凡. 面向电气火灾的热解粒子探测方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2023.
Wang Q F. Research on pyrolytic particle detection method for electrical fire[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.
- [4] 陈现平, 胡松林, 高郁晨, 等. 6种航天常用非金属材料热解及散发颗粒物特性研究[J]. 载人航天, 2024, 30(4):478-485.
Chen X P, Hu S L, Gao Y C, et al. Thermal decomposition and particulate emission characteristics of six common non-metallic materials used in manned spaceflight[J]. Manned Spaceflight, 2024, 30(4):478-485.
- [5] 邢国新, 赵海龙, 吴志强. 热解粒子式电气火灾探测器在地铁中的应用[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(11):1695-1698.
Xing G X, Zhao H L, Wu Z Q. Application of pyrolytic particle electric fire detector in subway[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(11):1695-1698.
- [6] GB 14287.5—2025 电气火灾监控系统 第5部分:测量热解粒子式电气火灾监控探测器[S].
GB 14287.5—2025 Electrical fire monitoring system—Part 5: Pyrolysis sensing electrical fire monitoring detectors[S].
- [7] Wu Z G, Wang Q, Wu K, et al. Experiment on early fire detection of medium-voltage switchgear based on pyrolytic particles[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3012(1):012041.
- [8] 姜德亮. 10 kV 高压开关柜火灾预警及灭火技术研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
Jiang D L. Research on fire warning and extinguishing technology of 10 kV high-voltage switchgear[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [9] JJG 846—2015 粉尘浓度测量仪检定规程[S].
JJG 846—2015 Verification regulations for dust concentration measuring instruments[S].
- [10] 何俊捷. 生活垃圾焚烧火焰中碳烟颗粒的生成和演化特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2023.
He J J. Research on formation and evolution characteristics of soot particles in msw incineration flames[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [11] Lertsinsruttavee A, Kanabkaew T, Raksakietisak S. Detection of forest fires and pollutant plume dispersion using IoT air quality sensors[J]. Environmental Pollution, 2023, 338: 122701.
- [12] 张启明. 云南省森林草原火险预报预警方法及应用[D]. 成都:电子科技大学, 2024.
Zhang Q M. Method and application of forest-grassland fire risk forecasting and warning in yunnan province[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [13] Gregorutti B, Michel B, Saint-Pierre P. Correlation and variable importance in random forests[J]. Statistics and Computing, 2017, 27(3):659-678.

(责任编辑:邢玉军)