

文章编号: 1674-8190(2024)04-179-10

飞机货舱可燃物在干扰源状态下火灾特征参数研究

卜宗豪^{1,2}, 王海斌¹, 张志慧¹, 刘全义¹

(1. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 目前民用飞机货舱主要采用传统光电式烟雾探测器来识别火灾烟雾,但由于飞机货舱中悬浮有其他干扰颗粒(灰尘、水蒸气等)会触发火灾探测器报警,传统光电式烟雾探测器存在误报率高的问题。采用基于双波长及索特平均粒径的光电式烟雾探测器采集飞机货舱典型燃烧物、干扰源的红外光散射功率、蓝光散射功率,以此作为火灾参数,通过对颗粒物红外光散射功率与蓝光散射功率进行分析,结合索特平均粒径分析,为研发复合型烟雾探测器优化火灾参数。结果表明:红外光和蓝光对火灾烟雾颗粒有较好地响应,结合索特平均粒径,可以有效区分火灾烟雾颗粒与非火灾烟雾颗粒,降低误报率,干扰源误报率不超过6.7%。

关键词: 火灾烟雾识别;索特平均粒径;散射光功率;光电式烟雾探测器;火灾特征参数;红外光;蓝光

中图分类号: V244.1⁺²

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.20

Research on the characteristic parameters of fire in the cargo hold of aircraft in the presence of combustible materials and an ignition source state

BU Zonghao^{1,2}, WANG Haibin¹, ZHANG Zhihui¹, LIU Quanyi¹

(1. College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

(2. College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: At present, the civilian aircraft cargo hold is mainly used photoelectric smoke detector as a fire smoke identification, due to the other interference particles (dust, or water vapor, etc) will be suspended in the aircraft cargo hold, which will trigger the fire detector alarm, there is a high false alarm rate problem. Based on the dual-wavelength photoelectric smoke detector can effectively reduce the problem of high false alarm rate, the collection of aircraft cargo hold typical combustibles as well as interference sources of infrared light scattering power, blue light scattering power as a fire parameter, through the particulate matter of infrared light scattering power and blue light scattering power analysis, as well as a collection of the Sauter mean particle size analysis for the subsequent development of composite smoke detector optimization of the fire parameter. Results show that the infrared and blue light have a good effect on the fire smoke particles, and a better response to fire smoke particles. Combined with the Sauter mean particle size, which can effectively distinguish between fire smoke particles and non-fire smoke particles, reduce the false alarm rate. The false alarm rate of the interference source does not exceed 6.7%.

Key words: fire smoke identification; Sauter mean particle size; scattered light power; photoelectric smoke detectors; fire characterization parameters; infrared light; blue light

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U2033206); 四川省重点实验室项目(MZ2024JB02, MZ2022JB01)

通信作者: 王海斌(1984-), 男, 博士, 副教授。E-mail: wanghaibin@cafuc.edu.cn

引用格式: 卜宗豪, 王海斌, 张志慧, 等. 飞机货舱可燃物在干扰源状态下火灾特征参数研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 179-188.

BU Zonghao, WANG Haibin, ZHANG Zhihui, et al. Research on the characteristic parameters of fire in the cargo hold of aircraft in the presence of combustible materials and an ignition source state[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 179-188. (in Chinese)

0 引言

近年来,飞机货舱火警误报事件频发,已经严重影响民航飞机的正常飞行。目前,飞机货舱火灾烟雾探测器主要有两种类型:光电式烟雾探测器和离子式烟雾探测器。在火灾燃烧初期,绝大多数可燃物处于阴燃阶段,会产生大量烟雾,因此烟雾探测成为现代飞机货舱火灾探测的主要手段。离子式烟雾探测器主要通过探测烟雾颗粒运动,改变离子探测室里面的电流或者电压大小进行预警,但是其探测室有放射性元素,现已基本被淘汰,只有部分老式飞机仍在使用。光电式烟雾探测器是目前飞机货舱烟雾探测的主流,它主要通过测量烟雾颗粒改变散射光强度的信号,通过判断光散射强度是否达到预警阈值,判断是否有火灾发生。但是非烟雾颗粒同样会引起光散射(其原理同烟雾颗粒一致),从而改变散射光强度,如水蒸气、灰尘、油烟等。在航空安全领域,由于光电烟雾探测器只能通过单一角度接收单个波长的散射光信号,当达到设定的烟雾浓度阈值时,就会触发报警,并不能满足当前运行需要。根据中国民用航空局发布的安全信息报告显示,近三年内国内飞机火警与冒烟事故中,所有报警均为虚假火警^[1-2],这一现象不仅严重影响飞行安全,导致飞机不必要的备降,增加运营成本,还对乘客心理造成不必要的恐慌,甚至可能导致空难事故发生。因此迫切需要对光电式烟雾探测器进行技术改进,以提升其探测准确性并降低误报率,为飞行安全提供更为可靠的保障。

现有飞机烟雾探测器容易受环境因素干扰,因此亟待提高飞机货舱烟雾探测器探测的准确率,降低误报率,为此国内外研究人员开展了大量工作。方俊等^[3]提出一种多参数复合火灾探测器,通过监测环境中的气体成分、温度变化以及火焰光谱特征等多个维度的数据,利用神经网络算法的学习和预测能力,结合模糊算法的模糊推理能力,对收集到的数据进行综合分析和判断,将多种信息进行融合并判断是否有火灾险情发生,提高火灾探测器的抗干扰能力,实现火灾的智能报警;尚峰等^[4]研发了一种基于多参数的复合型火灾探测器,将光电烟雾传感器、温度传感器和一氧化碳气体传感器融为一体,通过BP网络构造的智能算法对输入信号进行智能化处理和识别,可以有效降低误报率,提高火灾预警的准确率;荣建忠^[5]提

出了一种新型火灾烟雾探测技术,对目标特征提取、目标识别算法进行改进,分析火焰的特征纹理,构建火焰特征的BP神经网络分类模型,适合开放空间,但对火灾早期不能有效识别;赵建华等^[6]根据球形粒子的米氏散射理论,推导出两种不同波长的平均粒径和折射率只与气溶胶的本征性质有关,提出改进双波长烟雾探测的方法,同时测量散射光和消光来减少误报,结果表明该检测系统可以应用于防火和烟雾检测;Philipp等^[7]设计了一款双波长多角度的火灾烟雾探测器,基于一个红外光、两个绿光,将这三个光源光散射信号的比值作为区分火灾气溶胶与非火灾气溶胶的参数。

综上所述,国内外对火灾烟雾探测器从探测技术、原理等角度进行多方面改进,但未在干扰源状态下进行火灾烟雾探测与分析。本文依靠民航机火灾科学与安全工程四川省重点实验室搭建的飞机货舱实验室,在干扰源状态下进行火灾烟雾探测与分析,以期为新研复合型烟雾探测器优化火灾参数。

1 实验详情

1.1 实验工况

为验证在细水雾、烟雾作为干扰源条件下,典型可燃物火灾烟雾参数,本文在模拟飞机货舱密闭环境中进行,采用自搭建的实验平台完成数据的采集,采用 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的密闭性试验货舱作为典型可燃物的燃烧环境。依据国家标准《点型感烟火灾探测器》(GB 4715—2005)中规定的感烟探测器性能标准试验火,包括棉绳阴燃火(SH2)、木材热解阴燃火(SH1)。实验采用控制变量方法,选取飞机货舱中常见易燃物榉木、棉绳作为实验材料,每次燃烧实验均选用 20 g 可燃物,烟雾探测系统示意图如图1所示,实验具体内容如表1所示。

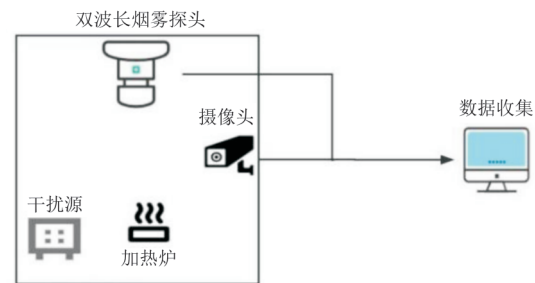


图1 烟雾探测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the smoke detection system

表1 实验详情
Table 1 Experimental details

| 序号 | 实验物料 | 详情 |
|----|------|--------------------|
| 1 | 棉绳 | 240 mm×7 mm |
| 2 | 榉木 | 100 mm×100 mm×4 mm |
| 3 | 加热炉 | 功率450 W |
| 4 | 水雾 | 超声波雾化 |
| 5 | 烟雾 | 标准烟雾油+二氧化碳高温下雾化 |

1.2 实验仪器

ADPD188BI传感器采用光学双波长技术,将蓝光和红外光光源、AFE(整流与回馈模块)、光电探测器封装成一个光学模块,用于烟雾检测,是一套完整的光电式测量系统^[8]。其基本原理如图2所示,该模块集成了高效的测量部件,主要由蓝光和红外(IR)发光二极管(LED)、光电二极管(PD)组成,通过LED发出脉冲光源,光源经过烟雾微粒散射后射到光电探测器上产生相应的电流,电流与烟雾的浓度有关,通过两个LED所产生的电流比值计算出相应的烟雾种类。

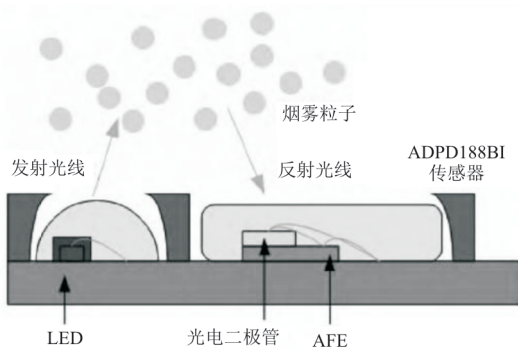


图2 ADPD188BI传感器组成结构

Fig. 2 ADPD188BI sensor composition structure

烟雾发生器是用于模拟和产生火灾场景中的设备,如图3所示,是一种比较安全可靠的烟雾发生装置,其主要原理基于燃烧和烟雾扩散机制^[9],如图4所示。烟雾发生器首先需要有一个燃烧源,通常使用具有可燃性的液体或固体物质,这些可燃物质被点燃,燃烧过程中产生的热量会引起可燃物质的蒸发和分解,释放出可燃气体。本文使用基于石蜡油的烟雾发生器,首先使用二氧化碳气体推动石蜡油到达电烤炉,使得石蜡油在高温下变成可燃气体,可燃气体进一步与空气中的氧气发生化学反应,生成烟雾颗粒。为了将产生的烟

雾有效地扩散到空气中,烟雾发生器通常采用风扇或加热泵来增加气流速度。通过控制风扇或加热泵的运行,可以调节烟雾的流动方向、速度和覆盖范围。烟雾发生器还配备了喷嘴或出口,用于释放烟雾到室内环境。喷嘴的数量、位置和形状等因素会对烟雾扩散和分布产生影响。



图3 烟雾发生器

Fig. 3 Smoke generator

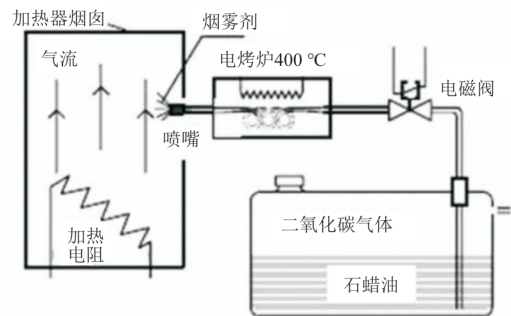


图4 石蜡油烟雾发生器功能原理

Fig. 4 Paraffin oil aerosol generating functional principle

1.3 实验步骤

由于在不同实验环境下,烟雾颗粒的粒径大小、烟雾浓度、环境温度等特征参数会有明显的差异,采用控制变量法设置对照组。分别在有干扰源与无干扰源情况下进行数据收集,为保证数据可信度,每次实验均重复三次。

1) 根据钟德超等^[10]对飞机货舱烟雾探测器布局的研究,在飞机货舱模拟中,将双波长探测器置于靠近货舱角落并远离通风口、加热炉上方180 cm处位置。烟雾颗粒受自身粒子分布、折射率等性质影响,对蓝光、红外光的散射会呈现出不同

同的响应,因此采集红外光、蓝光散射光的接收光与发射光功率的比值(Ratio of the Received Optical Power to the Transmitted Optical Power,简称PTR)表征烟雾颗粒的特性,用于火灾气溶胶与非火灾气溶胶的区分。

2) 摄像头设置在距离加热炉横向 1.8 m、纵向 1.0 m 处,用于记录实验燃烧的图像。

3) 烟雾发生器放置在距离加热炉横向 2.0 m、纵向 2.0 m 处,用于实际的烟雾发生。

4) 超声波细水雾放置在加热炉正前方 1.0 m,用于模拟水雾发生。

实验采用的加热炉功率为 3 000 W,实验开始时将被加热物放置于加热炉中央,通电加热,加热 5 min 左右达到 370 °C 保持恒温,每组实验保持 15 min 左右,通过摄像头远距离观察可燃物的加热状态。通过加入不同的干扰颗粒,模拟飞机货舱环境,其中加湿器的功率为 21 W,加湿量 290 mL/h;烟雾发生器最大发烟量为 430 m³,烟雾发生器生成的烟雾粒径在 0.1~0.3 μm。由于外界环境对火灾探测的影响较大,每次实验结束后都会用抽风机,将实验舱内的气体抽离,保证下次实验环境和初始实验环境的一致性,每次实验之间间隔 1 h。

2 干扰源状态下可燃物的火灾特征参数研究

2.1 双波长探测器原理介绍

基于 Lorenz-Mie 的散射理论可知,烟雾颗粒的散射光强度分布特征由多个因素共同决定。光源的属性,包括波长和偏振特性,对散射光的强度和分布具有显著影响。烟雾颗粒的物理特性,如粒径、折射率以及颗粒的微观形态,也在散射过程中起着关键作用。粒径的变化会影响散射光的角分布,而颗粒的折射率则直接关系到散射光的强度。此外,颗粒的微观形态,如是否具有不规则表面或内部结构的异质性,亦能显著改变散射光的方向和集中度。

不同波段的光对于烟雾颗粒的散射能力不同,散射光的光学特性可用于定量表征烟雾颗粒的表面积浓度及其总体积。研究表明,当两种烟雾颗粒的体积浓度保持一致时,较小的粒径(即索特粒径较小的烟雾颗粒)相较于较大的粒径(索特粒径较大的烟雾颗粒)表现出更高的表面积浓度^[11]。基于以上原理,在常温常压下开展本次实

验,利用红外光、蓝光的反射光功率计算烟雾颗粒物的索特平均粒径,以此减少干扰粒子的误报。

2.2 双波长红蓝光分析

双波长探测器是一种光学探测器,采用两个不同波长的光来进行测量和分析。它基于两个波长下光的特性差异,通过比较两个信号的强度或比率来获得有关样品的信息,通过基于空气中悬浮粒子对于不同波段的光响应 PTR 不同,可以表征空气中悬浮粒子浓度的不同信息^[12]。本文采用的双波长探测器,在火灾烟雾颗粒物监测中,蓝光被主要用于测定烟雾颗粒的表面积浓度,而红外光则用于表征其体积浓度。此外,散射光比值(PTR 数值)反映烟雾颗粒物的表面积和体积浓度的变化趋势,二者的变化趋势几乎一致。选用 AD-PD188BI 双波长传感器,其中蓝光波长为 470 nm,红外光波长为 870 nm,数据采集频率为 1 个/秒,由于采集数据众多,采用离散的数据方式展现,如图 5~图 6 所示。

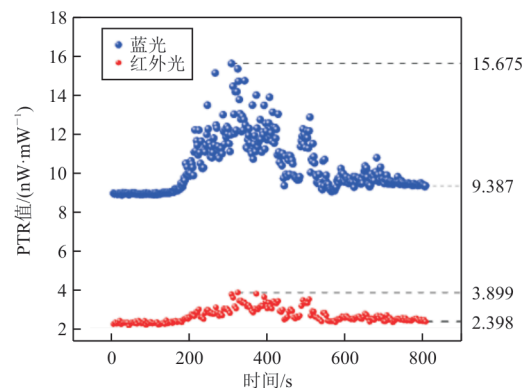


图 5 棉绳发生阴燃散射光功率

Fig. 5 Scattered light power from cotton rope undergoing negative combustion

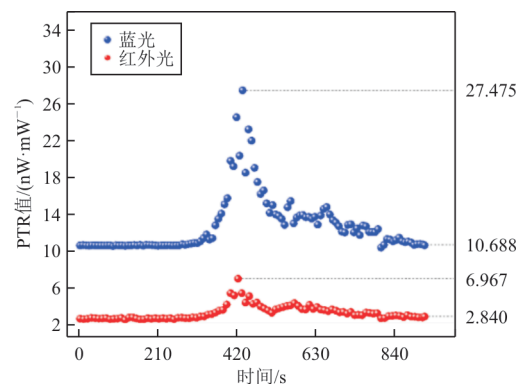


图 6 榉木发生阴燃散射光功率

Fig. 6 Scattered light power of beech wood undergoing cloudy combustion

从图5~图6可以看出:在对棉绳和榉木阴燃实验中,得到棉绳、榉木PTR初始值大小分别为:棉绳蓝光PTR值(8.930 ± 0.1) nW/mW、红外光PTR值(2.398 ± 0.1) nW/mW;榉木蓝光PTR值(10.627 ± 0.1) nW/mW、红外光PTR值(2.570 ± 0.1) nW/mW。当加热炉分别加热到200、310 s时,棉绳与榉木开始热分解冒出稀薄的白色烟雾,随着加热炉功率提高,当温度达到350 °C以后,棉绳与榉木热分解速度加快,烟雾生成速率越来越快,棉绳外表面从刚开始的浅白色烟雾逐渐变成浓稠的黄白色烟雾,榉木外表面从刚开始的浅白色烟雾逐渐变成灰白色烟雾。棉绳与榉木的蓝光与红外光PTR值分别在310、420 s达到最大值,棉绳蓝光PTR值15.675 nW/mW、红外光PTR值27.475 nW/mW;榉木蓝光PTR值3.899 nW/mW、红外光PTR值6.967 nW/mW。随后持续加热,棉绳与榉木在高温状态下分别在600、630 s基本分解完毕,随后蓝光和红外光PTR值基本稳定不变,最终在棉绳蓝光PTR值9.387 nW/mW、红外光PTR值10.688 nW/mW,榉木蓝光PTR值2.398 nW/mW、红外光PTR值2.840 nW/mW左右。通过对比红蓝光PTR值和分解时间,在阴燃状态下,棉绳的阴燃分解能力大于榉木,这两种典型可燃物的红外光PTR值与蓝光PTR值均有明显的变化趋势。

根据刘佳^[13]对典型火灾烟雾散射规律的研究,白烟的折射率大致为 $(1.66 \pm 0.02)i$,而黑烟的折射率大致为 $(1.66 \pm 0.5)i$ 。其中,折射率的虚部代表物质对发射光吸收能力的大小,而实部代表物质对发射光反射能力的大小。白色烟雾由较小的气溶胶颗粒组成,主要表现出对入射光的反射能力;而黑色烟雾由较大或更密集的碳基颗粒构成,与白色烟雾呈现相反的特性,对入射光表现出吸收特性。在阴燃后期,黑烟的产生会增多,其浓度可能会超过白烟。这种现象导致入射光的散射光强度受到遮挡和减弱,这是由于黑烟中碳颗粒的高吸光性所致。

在本实验中,阴燃刚开始时,白烟的浓度较高,红外光和蓝光的散射光功率较大;而当白烟转变为黑烟时,散射光功率降低。因此,在火灾烟雾探测的早期阶段,可以根据红蓝光的散射光功率进行区分。

水蒸气和烟雾的散射光信号如图7~图8所示,可以看出:水蒸气与烟雾的PTR初始值大小分

别为:水蒸气蓝光PTR值(30.930 ± 0.1) nW/mW、红外光PTR值(6.398 ± 0.1) nW/mW;烟雾蓝光PTR值(25.398 ± 0.2) nW/mW、红外光PTR值(3.784 ± 0.2) nW/mW。在实验开始前,往封闭货舱内通入稳定的细水雾,再进行数据采集。细水雾中蓝光与红外光具有明显的分层带,这是由于加湿器中生成的是液态小水滴,水分子是由一个氧原子和两个氢原子组成的,根据张志远^[14]对水相关的分子间氢键作用电子结构理论研究,水分子主要通过氢键相互连接,形成一个三角形的结构,由于氧原子比氢原子更容易吸引电子,它在分子中呈现负电荷状态,并使氢原子带有部分正电荷。这种极性导致水分子之间的相互吸引力。当红蓝光射到水分子上时,水分子对蓝色光吸收较弱,而对红色光吸收更强些。因此双波长烟雾探测器接受端蓝光的散射光功率相比于红外光的散射光功率要大,蓝光PTR值在同一时间大于红外光PTR值。烟雾的蓝光与红外光并无明显的分层带,红外光较蓝光更为聚集。

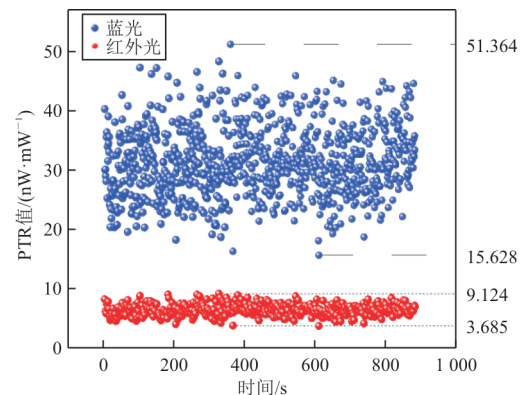


图7 纯水雾状态下散射光功率

Fig. 7 Scattered light power in the state of pure water mist

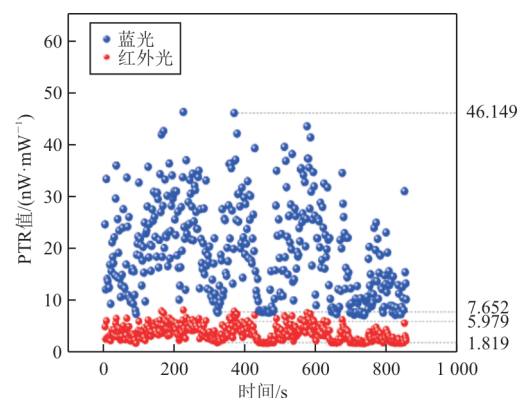


图8 烟雾发生器发烟状态下散射光功率

Fig. 8 Scattered light power of the smoke generator in the smoke-generating state

可燃物产生的烟雾颗粒对蓝光与红外光有散射作用,而水蒸气和烟雾也有散射作用,甚至更为明显,这也是目前火灾探测误报率高的关键问题所在。

根据米氏散射公式^[15],散射光强度 I 为

$$I = I_0 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 l^2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \quad (1)$$

式中: I_0 为光源的入射光强; λ 为入射光的波长; l 为粒子与检测点之间的距离; $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$ 为散射角度与散射光的强度函数。

根据公式(1),在干扰粒子与烟雾粒径相近的情况下,发生散射时,蓝光和红外光的散射强度会与入射光的波长成正比。这意味着,散射光的强度变化可以通过调节入射光的波长来观察和测量(蓝光波长为 470 nm,红外光波长为 870 nm)。根据公式(1)计算可知,蓝光波长与红外光波长的比值较小,大致为 0.29。当榉木或棉绳等典型燃烧物在阴燃状态下烟雾颗粒发生散射时,其烟雾颗粒属于粒径较小粒子,而且根据光的散射理论,此时散射主要为 Rayleigh Scattering(瑞丽散射)^[15],入射光的波长对散射光的强度有着显著影响,为四次方正相关,蓝光与红外光散射强度之比大约为 11.74,火灾烟雾颗粒由于较小的粒径,使其散射特性与分子散射相似,蓝光的散射较强。与此相对应,干扰气溶胶颗粒较大,红外光的散射较强,与火灾烟雾颗粒的散射特性不同,通过对蓝光和红外光信号的比值分析,可以有效进行区分。因此,本文提出基于蓝光、红外光的两种光学信号对火灾烟雾颗粒和干扰气溶胶颗粒的索特平均粒径方法。

2.3 索特平均粒径分析

通过上述分析可以发现,典型可燃物在阴燃状态下、细水雾以及纯烟雾对红外光、蓝光均有较强的散射作用。为有效降低干扰源对典型可燃物的火灾探测的影响,引入索特平均粒径方法,以颗粒的粒径大小作为区分火灾烟雾与干扰气溶胶颗粒的参数,降低火灾探测的误报率。利用米氏散射理论,可以揭示不同波长散射信号的分布特征,利用同类型气溶胶在不同波长光线下的散射特性差异,通过测量在同一角度下双波长光强比,可以区分火灾气溶胶和非火灾气溶胶,从而实现对气溶胶种类的标定。双波长光强比可表示为

$$D_{\text{WIR}} = \frac{I_s(\lambda_2)}{I_s(\lambda_1)} = \frac{A_{\lambda_2}}{A_{\lambda_1}} \quad (2)$$

式中: I_s 为散射光强度; A_{λ_i} 为相应波长的电学信号幅值; λ_1 为蓝光波长; λ_2 为红外光波长。

索特平均粒径表达式为

$$D_{32} = 6 \times \frac{T_s}{T_v} \times D_{\text{WIR}} \quad (3)$$

式中: T_v 为烟雾颗粒体积浓度与散射光强度的转换系数,即单位体积内烟雾颗粒体积浓度的散射光强度; T_s 为烟雾颗粒表面积浓度与散射光强度的转换系数,即单位体积内烟雾颗粒表面积浓度的散射光强度。

在实验过程中,散射光信号会从模拟信号转换成电信号进行采样,因此转换系数 T_s 和 T_v 会受探测器的系统增益系数、LED 的有效发光效率等因素影响。本文根据 Wang S 等^[16]关于索特粒径中对双波长探测器响应的研究,确定转换系数 T_s/T_v 的值为 98。

纯细水雾状态下和纯烟雾状态下的索特平均粒径分别如图 9~图 10 所示。

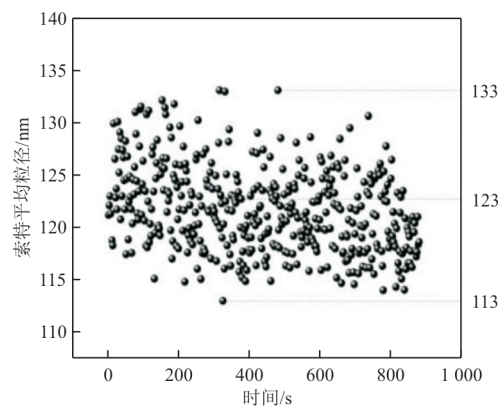


图 9 纯细水雾状态下索特平均粒径
Fig. 9 Sauter mean particle size in pure fine water mist condition

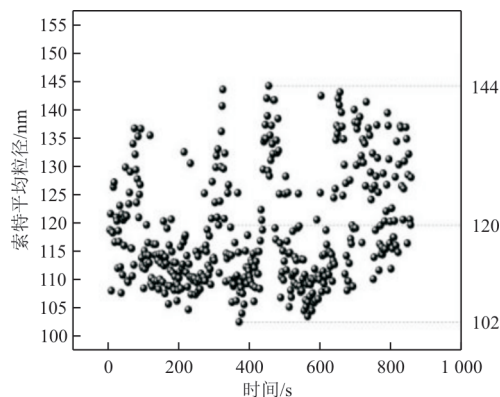


图 10 纯烟雾状态下索特平均粒径
Fig. 10 Sauter mean particle size in pure smoke state

从图9~图10可以看出:细水雾与纯烟雾在稳定状态下索特粒径分布基本相同,细水雾的索特平均粒径(123 ± 10) nm,纯烟雾的索特平均粒径(120 ± 20) nm,这是由于细水雾与纯烟雾的生成机制相似,均是将液体或气体分散成细小颗粒的过程。在水雾生成过程中,液滴在喷嘴处受到高速气流的作用,将其破碎成细小液滴。而在烟雾发生器中,气体在出口处受到冷却或凝结作用,形成细小颗粒,细水雾与纯烟雾的粒径分布相近,都呈现出较为集中的特点。根据气液两相流雾化理论,在相同操作条件下,细水雾与纯烟雾的粒径分布相似。

棉绳和榉木的索特平均粒径分布分别如图11~图12所示,可以看出:棉绳与榉木的索特平均粒径分布差别较大,其中棉绳阴燃时的索特平均粒径(156 ± 11) nm,榉木阴燃时的索特平均粒径(436 ± 20) nm,两者索特平均粒径的差异在于物质碳含量不同。

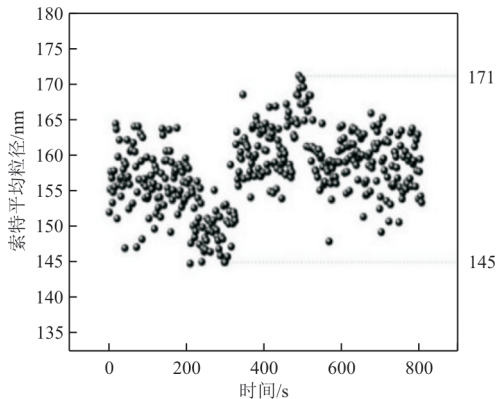


图11 棉绳索特平均粒径

Fig. 11 Sauter mean particle size of cotton rope

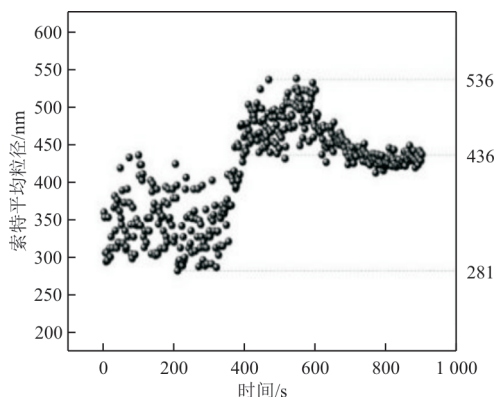


图12 榉木索特平均粒径

Fig. 12 Sauter mean particle size of beech

在火灾探测阴燃阶段的研究中,王殊等^[17]通过双波长气溶胶粒径传感方法详细阐述了火灾烟雾的产生机制,其指出,火灾烟雾的形成主要始于阴燃阶段,在这一过程中,烟雾颗粒物由不完全燃烧的产物组成,包括固体颗粒物、碳氢分解物以及空气组成的混合气溶胶系统。马绥华等^[18]在高温气溶胶生成烟雾颗粒机制中进一步阐明,燃烧反应主要涉及物理变化和化学变化两个方面。物理变化包括热分解和挥发,而化学变化则主要涉及氧化和燃烧过程。烟雾颗粒的生成和演变受到成核、凝并和沉降过程的多重影响。首先,成核过程是烟雾颗粒形成的初始阶段,化学反应在燃烧过程中会生成高能分子,这些分子在适当的条件下会聚集并形成初始的烟雾颗粒,成核过程受到化学反应速率、反应物浓度和温度等因素的影响;凝并过程是指初始形成的烟雾颗粒通过相互碰撞和聚集形成更大颗粒的过程,在阴燃环境中,气流的紊动和烟雾颗粒增加会促进颗粒的凝并,这个过程不仅影响颗粒的大小和分布,还决定后期烟雾的光学特性和探测信号;沉降过程是烟雾颗粒受到热对流扩散和环境空气稀释的影响,逐渐分散并在重力作用下,最终在空间内沉降。

从上述烟雾产生过程分析可知,火灾烟雾颗粒的产生是一个动态过程。在阴燃初始阶段,榉木与棉绳开始热分解,由于榉木含碳量高于棉绳,在热分解阶段会冒出黑烟,而棉绳会冒出白烟,棉绳与棉绳的烟雾颗粒对光的散射作用基本相同。但是,榉木冒出的黑烟对光的吸收作用比棉绳强,红外光与蓝光在散射烟雾颗粒时,蓝光被黑烟吸收的较多,而红外光被吸收的较少。根据Mie散射理论,当入射光与物质粒径相近时,散射光强度与物质体积浓度呈正比,因此榉木的索特平均粒径比棉绳的索特平均粒径大。

在有烟雾发生器作为干扰源状态下进行烟雾颗粒探测,模拟飞机货舱中的粉尘环境,选取稳定阴燃阶段,并在后期进行排烟。棉绳和榉木在烟雾干扰源下的索特平均粒径分布分别如图13~图14所示,可以看出:棉绳在烟雾作为干扰源状态下的索特平均粒径(767 ± 200) nm,榉木在烟雾干扰源状态下的索特粒径(599 ± 100) nm。

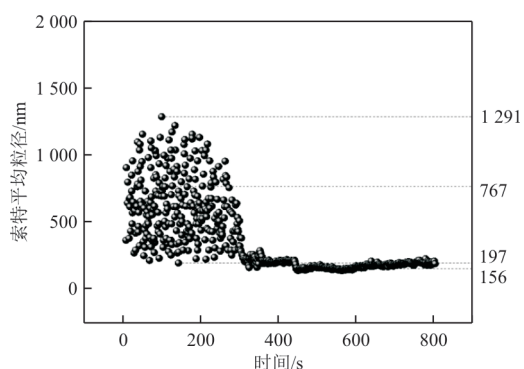


图 13 棉绳在烟雾干扰源下索特平均粒径

Fig. 13 Sauter mean particle size under smoke interference source for cotton rope

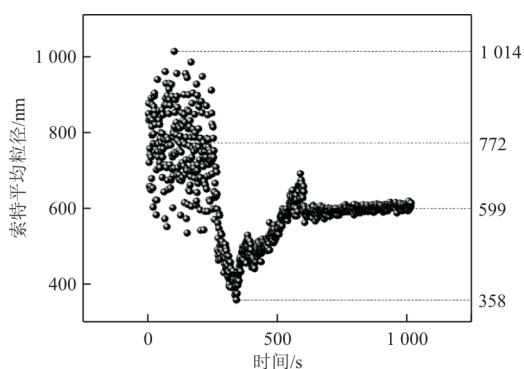
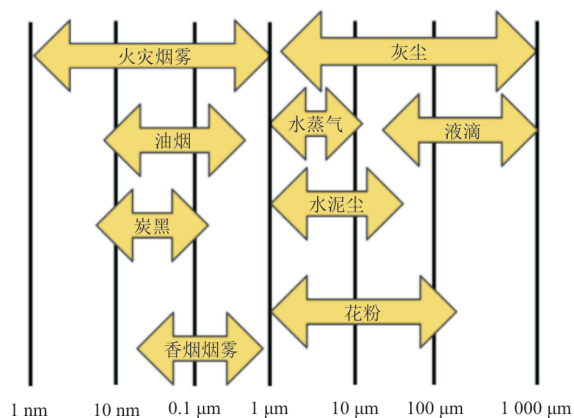


图 14 榉木在烟雾干扰源下索特平均粒径

Fig. 14 Sauter mean particle size in beech wood under smoke disturbance sources

常见颗粒物的索特粒径分布如图 15 所示。

图 15 常见颗粒物的索特粒径分布^[19]Fig. 15 Sauter particle size distribution of common particles^[19]

从图 15 可以看出:火灾烟雾索特粒径主要小于 $1\ \mu\text{m}$, 少部分燃烧不充分的烟雾颗粒会大于 $1\ \mu\text{m}$, 而非火灾烟雾颗粒主要集中在 $1\ \mu\text{m}$ 以上, 由于非火灾烟雾颗粒较大, 在空气中以悬浮物的状态存在, 会发生凝并与沉降, 最终大部分会集中在

$10\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。综上,火灾烟雾颗粒与非火灾烟雾颗粒粒径范围存在差异,且非火灾烟雾颗粒索特粒径大于火灾烟雾颗粒索特粒径。

棉绳、榉木在常温常压下燃烧时,产生的烟雾颗粒较小,其索特平均粒径也较小。然而,在烟雾干扰源的影响下,棉绳、榉木的索特平均粒径增大明显,虽然索特平均粒径会缺少物质浓度信息,但是可以区分出棉绳与榉木是否在干扰源状态下。

在飞机货舱中烟雾探测器主要依据光电探测器探测的烟雾浓度作为指示,当烟雾浓度达到设定阈值后,烟雾报警器触发报警指示。当前飞机货舱烟雾探测器存在误报率高的问题,主要原因有两点:一是 CCAR25 部中第 25.857 条规定^[20],飞机烟雾探测器必须在火警发生 60 s 内给出报警,因此烟雾探测器灵敏度设置较高,容易频繁误报;二是飞机货舱环境较为复杂,会对烟雾探测器造成干扰,在干扰源状态下,干扰颗粒的浓度会与可燃物阴燃状态下较为接近,而烟雾报警器无法有效区分干扰源与可燃物。

在棉绳与榉木发生阴燃期间,空间中的气体与干扰源充满整个飞机模拟舱中,在烟雾颗粒成核过程中,烟雾干扰源颗粒与可燃物的烟雾颗粒发生碰撞、聚集,在烟雾干扰源状态下,颗粒之间的相互作用力(如范德华力)会使颗粒相互吸引,导致颗粒聚集。这种相互作用力随着颗粒浓度的增加而增强,进一步促使颗粒粒径接近,形成较大的颗粒;同时,在高温条件下,烟雾颗粒表面变得活跃,粒径分布会更广,更容易诱发烟雾报警器报警。

传统的烟雾探测器通过测量光功率是否达到阈值来判断是否有火灾发生,这种单一判定方法,在飞机货舱环境下容易诱发误报警。本文采用的双波长烟雾探测器,在有干扰源无燃烧物状态下,会诱发烟雾探测器报警,因此针对现有飞机货舱烟雾探测器火警工作原理进行改进。

根据曹振等^[21]对光电感烟探测器技术及发展趋势的研究,降低烟雾探测器的误报率,可以从三个方面进行优化:优化烟雾识别算法、多传感技术融合、升级光电传感方案。值得注意的是,为不漏报火灾险情,抗干扰烟雾传感器针对假火警的识别要尤为谨慎。

而飞机货舱中烟雾探测相较于误报,漏报情况会导致更为严重的结果,但是频繁的误报也会

严重影响飞行安全与飞行效率,有研究表明,飞机货舱烟雾误报警高达99%,200次飞机货舱火警信号,只有两次是真火警^[22]。

本文通过将实验数据导入双波长烟雾探测器软件平台,根据软件输出结果判断火灾烟雾颗粒发生概率和非火灾烟雾颗粒发生概率。

实验采集蓝光PTR值、红外光PTR值共4 840组真实数据,如表2所示,本文随机选取每种材料468组数据进行报警实验,基于浓度阈值的判断结果如表3所示,基于索特平均粒径与浓度联合的判断结果如表4所示。

表2 实验样本名称与样本数

Table 2 Experimental sample name and sample size

| 样本名称 | 样本个数 | 样本名称 | 样本个数 |
|------|------|--------|------|
| 棉绳 | 823 | 烟雾油 | 725 |
| 榉木 | 845 | 干扰源下棉绳 | 856 |
| 水蒸气 | 712 | 干扰源下榉木 | 879 |

表3 基于浓度阈值判断结果统计

Table 3 Statistics of judgment results based on concentration thresholds

| 实验对象 | 检测次数 | 误报次数 | 误报率/% |
|--------|------|------|-------|
| 棉绳 | 468 | 26 | 5.7 |
| 榉木 | 468 | 29 | 6.1 |
| 水蒸气 | 468 | 101 | 21.6 |
| 烟雾油 | 468 | 91 | 19.4 |
| 干扰源下棉绳 | 468 | 149 | 31.8 |
| 干扰源下榉木 | 468 | 160 | 34.2 |

表4 基于索特平均粒径与浓度联合判断统计结果

Table 4 Statistical results based on the joint judgment of the Sauter mean particle size and concentration

| 实验对象 | 检测次数 | 误报次数 | 误报率/% |
|--------|------|------|-------|
| 棉绳 | 468 | 10 | 2.1 |
| 榉木 | 468 | 15 | 3.2 |
| 水蒸气 | 468 | 26 | 5.6 |
| 烟雾油 | 468 | 31 | 6.7 |
| 干扰源下棉绳 | 468 | 57 | 9.7 |
| 干扰源下榉木 | 468 | 47 | 10.1 |

对比表3和表4,可以看出:基于索特粒径与浓度联合判断方法的预测与实际情况较为吻合,能够较好地区分火灾烟雾颗粒与非火灾烟雾颗粒,误报率不超过10.1%,误报率均值为6.2%。

传统烟雾传感器存在误报率高的问题,误报率最高为34.2%,平均误报率为19.8%。而采用索特平均粒径相结合的双波长烟雾探测方法,可

以有效区分火灾烟雾颗粒和非火灾颗粒,提高火灾预测准确率。因此双波长烟雾探测器可以结合索特平均粒径进行综合判断,当疑似燃烧物的烟雾浓度在一定时间内达到阈值,且索特平均粒径达到该燃烧物的粒径标准后,进行综合判断后输出报警信息,可有效降低探测误报率。

本文提出的索特粒径相结合的探测方法与传统探测方法相比,可以降低烟雾探测器误报率,干扰源误报率不超过6.7%。

3 结 论

1) 棉绳与榉木在阴燃状态下,红外光PTR值与蓝光PTR值响应度不同,可以根据烟雾浓度进行判断。而细水雾与纯烟雾同棉绳、榉木的浓度较为接近,因此在飞机货舱中易诱发报警。

2) 非火灾烟雾颗粒与火灾烟雾颗粒的索特平均粒径存在较大差别,但是传统判断方法在水蒸气、烟雾油等非火灾烟雾颗粒上误报率较高,误报率高达21.6%,而基于索特平均粒径与浓度联合的判断方法,误报率不超过6.7%,能够有效降低误报率。

3) 烟雾探测器可以结合索特平均粒径和红外光PTR值、蓝光PTR值进行综合判断,能够有效区分火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒,进一步降低探测误报率。下一步还需要进行其他一系列实验,找到最佳索特平均粒径转换系数,优化基于索特平均粒径与浓度联合判断的逻辑,进一步提高烟雾探测器探测性能与准确率。

参考文献

- [1] 张文杰. 飞机货舱复合烟雾探测方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
ZHANG Wenjie. Research on composite smoke detection method in aircraft cargo hold [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [2] 王海斌, 王茂华, 瞿忱, 等. 飞机货舱典型可燃物燃烧火灾特征参数试验研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(12): 1654-1658, 1678.
WANG Haibin, WANG Maohua, QU Chen, et al. Experimental study on the characteristic parameters of typical combustible combustion fires in aircraft cargo compartments [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(12): 1654-1658, 1678. (in Chinese)
- [3] 方俊, 袁宏永, 赵建华. 气体传感器及其在火灾探测中的应用[J]. 火灾科学, 2002(3): 180-185, 191.
FANG Jun, YUAN Hongyong, ZHAO Jianhua. Gas sensors and their application in fire detection [J]. Fire Science,

- 2002(3): 180-185, 191. (in Chinese)
- [4] 高峰, 蒋国平, 王芳. 应用BP网络构造复合型智能火灾探测器[J]. 自动化仪表, 2003(3): 39-41.
SHANG Feng, JIANG Guoping, WANG Fang. Application of BP network to construct a composite intelligent fire detector[J]. Automation Instrumentation, 2003(3): 39-41. (in Chinese)
- [5] 荣建忠. 基于多特征的火焰图像探测研究及实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
RONG Jianzhong. Research and realization of flame image detection based on multi-feature [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [6] 赵建华, 袁宏永, 刘申友, 等. 多波长激光全散射法探测火灾烟雾的研究[J]. 应用激光, 2001(2): 79-81.
ZHAO Jianhua, YUAN Hongyong, LIU Shenyou, et al. Study on the detection of fire smoke by multiwavelength laser total scattering[J]. Applied Laser, 2001(2): 79-81. (in Chinese)
- [7] PHILIPP J, WEDLER G, ROSAM A. Pure optical false alarm resisting smoke detector[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Automatic Fire Detection. Duisburg, Germany: AIAA, 2014: 14-22.
- [8] 程心怡, 刘洋, 陈帅. 基于ADPD188BI传感器的主动吸入式烟雾探测装置设计[J]. 现代电子技术, 2023, 46(17): 139-143.
CHENG Xinyi, LIU Yang, CHEN Shuai. Design of active inhalation smoke detection device based on ADPD188BI sensor [J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(17): 139-143. (in Chinese)
- [9] 侯亚东. 基于FDS的运输类飞机货舱烟雾探测试验方法研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 14021-14029.
HOU Yadong. Research on the test method of smoke detection in cargo compartment of transportation aircraft based on FDS[J]. Science, Technology and Engineering, 2023, 23(32): 14021-14029. (in Chinese)
- [10] 钟德超, 杨军, 谢萌. 考虑通风效应的飞机货舱烟雾探测器布局[J]. 航空工程进展: 1-10[2023-11-30]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20231128.1237.002>.
ZHONG Dechao, YANG Jun, XIE Meng. Layout of smoke detector for aircraft cargo compartment fire considering ventilation effect[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering: 1-10[2023-11-30]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20231128.1237.002>. (in Chinese)
- [11] 张珊珊. 基于光散射原理的尾气颗粒物检测技术研究[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(5): 1254-1257, 1263.
ZHANG Shanshan. Research on exhaust particulate matter detection technology based on light scattering principle[J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47(5): 1254-1257, 1263. (in Chinese)
- [12] 邓田. 基于双波长的多参数火灾探测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
DENG Tian. Research on multi-parameter fire detection method based on dual wavelength[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [13] 刘佳. 典型火灾烟雾及大气气溶胶颗粒光散射矩阵角度分布规律研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
LIU Jia. Study on the angular distribution law of light scattering matrix of typical fire smoke and atmospheric aerosol particles[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [14] 张志远. 水相关的分子间氢键作用电子结构理论研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZHANG Zhiyuan. Theoretical study on the electronic structure of intermolecular hydrogen bonding interactions related to water[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [15] 韩宙, 熊泉, 郝朝龙, 等. 基于数字锁相技术的飞机货舱火灾烟雾光学参数方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(7): 193-200.
HAN Zhou, XIONG Xiao, HAO Zhaolong, et al. Research on optical parameterization of fire smoke in aircraft cargo hold based on digital phase-locking technique [J]. China Safety Production Science and Technology, 2022, 18(7): 193-200. (in Chinese)
- [16] WANG S, XIAO X, DENG T, et al. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 281: 920-932.
- [17] 王殊, 邓田, 窦征, 等. 载人航天器火灾探测技术研究[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(6): 444-447.
WANG Shu, DENG Tian, DOU Zheng, et al. Research on fire detection technology of manned spacecraft[J]. Aerospace Medicine and Medical Engineering, 2014, 27(6): 444-447. (in Chinese)
- [18] 马绥华, 张永明, 方俊, 等. 凝并作用下火灾烟颗粒粒径分布及变化[J]. 燃烧科学与技术, 2007(2): 147-151.
MA Suihua, ZHANG Yongming, FANG Jun, et al. Particle size distribution and change of fire smoke under condensation [J]. Combustion Science and Technology, 2007(2): 147-151. (in Chinese)
- [19] ZHENG R, LU S, SHI Z, et al. Research on the aerosol identification method for the fire smoke detection in aircraft cargo compartment [J]. Fire Safety Journal, 2022, 130: 103574.
- [20] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [21] 曹振, 刘晓鹏. 光电感烟探测器技术及发展趋势[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(7): 986-988, 994.
CAO Zhen, LIU Xiaopeng. Technology and development trend of photoelectric smoke detectors[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(7): 986-988, 994. (in Chinese)
- [22] BLAKE D. Aircraft cargo compartment smoke detector alarm incidents on US-registered aircraft: 1974-1999[R]. US: FAA, 2000.

(编辑: 马文静)