

中文引用格式:于俊玲,邓浩,任先培,等. 基于非晶氧化镓双波长光电探测的火灾烟雾判别模拟[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(5):182-189.

英文引用格式:Yu Junling, Deng Hao, Ren Xianpei, et al. Dual-wavelength photodetection with amorphous gallium oxide for simulated fire smoke discrimination [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5):182-189.

基于非晶氧化镓双波长光电探测的 火灾烟雾判别模拟*

于俊玲^{1,2}讲师, 邓浩³, 任先培²副教授, 向晖²副教授, 李强², 胡启威²副教授

(1 四川轻化工大学 射线检测学科与技术中心, 四川 宜宾 644000; 2 四川轻化工大学 物理系, 四川 宜宾 644000; 3 四川轻化工大学 人事处, 四川 自贡 643000)

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0033

基金项目:国家自然科学基金资助(42574242); 自贡市重点科技计划项目(2024GNYZ-12); 四川轻化工大学人才引进项目(2024RC030)。

【摘要】 为解决烟雾传感器的传统光散射探测器易受灰尘和水汽干扰、误报率高、且响应时间较长的问题,提出一种基于非晶氧化镓宽谱光电探测器的双波长光电烟雾探测模拟系统。基于 Mie 散射理论,采用 980 和 405 nm 等 2 种波长分别测量烟雾颗粒的体积占比和表面积占比,获得 Sauter 平均粒径(SMD),以有效区分火灾与非火灾烟雾;根据理论分析和仿真试验,优化探测角参数(980 nm:60°, 405 nm:120°),降低测量偏差,并通过模拟试验验证该系统的有效性。结果表明:系统能够将烟雾误报率控制在较低水平(火灾试验火 $\leq 3.3\%$,非火灾烟雾 $\leq 6.7\%$),显示出较高的灵敏度和低的误报率。

【关键词】 非晶氧化镓; 双波长; 光电探测器; 火灾烟雾; Sauter 平均粒径(SMD)

Dual-Wavelength photodetection with amorphous gallium oxide for simulated fire smoke discrimination

Yu Junling^{1,2}, Deng Hao³, Ren Xianpei², Xiang Hui², Li Qiang², Hu Qiwei²

(1 Research Center for Ray Detection Discipline and Technology, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin Sichuan 644000, China; 2 School of Physics and Electronic Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin Sichuan 644000, China;

3 Human Resources Department, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong Sichuan 643000, China)

Abstract: A dual-wavelength photoelectric smoke detection simulation system based on amorphous gallium oxide broadband photodetectors was proposed to resolve the limitations of traditional light-scattering smoke detectors. These traditional detectors were susceptible to interference from dust and moisture, exhibit high false alarm rates, and feature prolonged response times. Based on Mie scattering theory, dual wavelengths (980 and 405 nm) were employed by the system to measure smoke particle volume surface area concentration. And SMD was derived for effective differentiation between fire-related and non-fire-

related smoke. Measurement bias was minimized by optimization of detection angle parameters (980 nm; 60°, 405 nm; 120°) through theoretical analysis and simulation experiments. The system's effectiveness was validated by simulation tests. Results indicate that the system maintains low false alarm rates for test smoke (fire tests $\leq 3.3\%$, non-fire smoke $\leq 6.7\%$), demonstrating high sensitivity and low false alarm rates.

Keywords: amorphous gallium oxide; dual-wavelength; photodetector; fire smoke; sauter mean diameter (SMD)

0 引言

高灵敏度传感器已广泛应用于火灾探测与报警系统,是火灾早期识别与预警的重要技术手段,对保障人员生命安全和降低火灾财产损失具有重要意义。烟雾作为火灾早期最显著的特征,其探测成为火灾探测与报警系统的核心技术^[1-2]。目前,烟雾探测主要依赖于火灾烟雾颗粒对光线的散射效应,利用光电感烟探测器检测散射光强信号以实现烟雾感知^[3]。然而,在实际应用中,非火灾粒子(非失控燃烧行为产生的气溶胶态物质,如灰尘、水汽和合规工业排放物等)常对散射光信号产生干扰,导致误报现象发生^[4-6]。此外,探测器的灵敏度对于火灾探测系统的性能至关重要,但现有商用烟雾探测器(如热电偶或光学探测器)通常存在较长的光响应时间,限制其在高风险情境下提供快速、可靠警报的能力^[7]。因此,亟需开发一种高灵敏度烟雾探测器,能够在低质量浓度烟雾条件下有效识别火灾烟雾与非火灾烟雾的散射信号,降低误报率。

与非火灾烟雾相比,火灾烟雾颗粒在相同体积浓度(体积浓度是指单位体积内烟雾颗粒体积占比,下称体积占比)下通常具有更大的比表面积浓度(比表面积浓度为单位体积内烟雾颗粒表面积占比,下称表面积占比)^[8]。王殊等^[9]提出使用 Sauter 平均粒径(Sauter Mean Diameter, SMD)代替传统烟雾质量浓度作为火灾探测的指标,以有效区分火灾与非火灾烟雾颗粒,并表明火灾与非火灾烟雾颗粒之间的 SMD 界限约为 1 μm ,而相关传感方案因引入校正通道增加了系统复杂性。文献[10]表明:非晶氧化镓光电探测器对紫外-近红外波段的光具有较高的探测率和较快的响应时间,为发展紧凑、高效的烟雾探测系统提供可能。

因此,笔者拟基于 Mie 散射理论,利用非晶氧化镓宽谱光电探测器设计一双波长光电烟雾探测模拟系统,来测量烟雾颗粒的 SMD,从而有效区分火灾与非火灾烟雾;通过火灾烟雾及非火灾烟雾颗粒粒

径分布差异,研究 2 种入射光波时颗粒体积占比和表面积占比对散射光强的影响,通过该探测系统测量不同入射波长的电信号,以期有效区分火灾烟雾与非火灾烟雾,减少非火灾烟雾的误报率。

1 双波长探测系统设计原理

1.1 散射光强与颗粒尺寸的关系

三区定律描述了在烟雾颗粒的统计测量中散射强度 q_s 随粒子尺寸变化的关系。Baron 等^[11]认为,在烟雾颗粒的统计测量中,散射强度与粒径的关系可近似为粒径的简单函数。散射强度 $q(x, m, \lambda, \theta)$ 定义为单个粒子散射到接收器中的单色光强度,单位体积颗粒的散射光强 q_v 表示为:

$$q_v = \frac{q(x, m, \lambda, \theta)}{\frac{\pi}{6}x^3} \tag{1}$$

式中: x 为粒子直径, nm; m 为折射率; λ 为入射光波长, nm; θ 为发射器到接收器之间的探测角度, (°)。

图 1 描述了单位体积颗粒的散射光强 q_v 与粒子直径 x 和入射光波长 λ 的关系。根据入射光波长与颗粒尺寸的关系,分为 3 个区域:①I 区。当 $x < \lambda$ 时, $q_v \approx A_I \cdot x^3$, $q(x, m, \lambda, \theta) \approx T_I \cdot x^6$; ②II 区。当 $x \approx \lambda$ 时, $q_v \approx A_{II} \cdot x^0$, $q(x, m, \lambda, \theta) \approx T_{II} \cdot x^3$, 散射光强与粒子的体积成正比关系; ③III 区。当 $x > \lambda$ 时, $q_v \approx A_{III} \cdot x^{-1}$, $q(x, m, \lambda, \theta) \approx T_{III} \cdot x^2$, 散射光强与粒子的表面积成正比关系。

A_I, A_{II}, A_{III} 为每个区域中颗粒粒径 x 和单位体积颗粒的散射光强 q_v 的转换因子。 T_I, T_{II}, T_{III} 为分别为 I、II、III 区域颗粒粒径 x 与散射光强 q_v 的转换系数。因此, $T_I = \pi \cdot A_I / 6$, $T_{II} = \pi \cdot A_{II} / 6$, $T_{III} = \pi \cdot A_{III} / 6$ 。根据曲线的连续性,由边界条件可得: $A_I \cdot b_{I-II}^3 = A_{II} \cdot b_{I-II}^0$ 和 $A_{II} \cdot b_{II-III}^0 = A_{III} \cdot b_{II-III}^{-1}$ 。进而得到 $b_{I-II} = (A_{II} / A_I)^{1/3}$, $b_{II-III} = A_{III} / A_{II}$ 。

由于火灾粒子及非火灾烟雾包含不同粒径的颗粒,将其定义为粒径分布函数 $f(x)$,则散射光强可

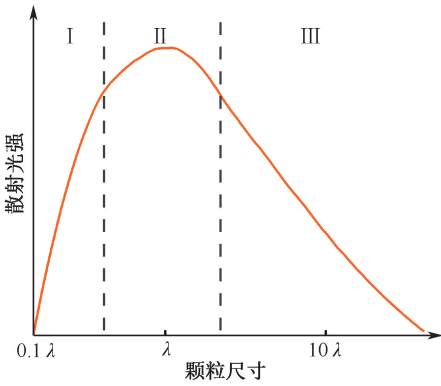


图1 单位体积颗粒的散射光强与颗粒尺寸及入射光波长的关系的“三区”定律^[12]

Fig. 1 Three region law of the relationship q_v between scattering intensity per unit volume of particle and particle size x with wavelength of incident light λ

统计为所有粒子散射光之和:

$$q = C_N \int f(x) q(x, m, \lambda, \theta) dx \quad (2)$$

式中 C_N 为指散射粒子个数。

当散射颗粒粒径分布位于区域 II 时, $q(x, m, \lambda, \theta) \approx T_{II} \cdot x^3$, 此时, 散射强度正比散射颗粒的体积。因此, 散射强度式(2)可转化为体积占比散射强度 q_v 的函数表达式:

$$q_v = \frac{6}{\pi} T_{II} \cdot C_N \int f(x) \left(\frac{\pi}{6} x^3 \right) dx = T_v \cdot C_v \quad (3)$$

式中: C_v 为散射颗粒的体积占比; $T_v = \pi \cdot T_{II}/6$ 为散射颗粒体积占比转换系数。

同样地, 当颗粒粒径分布位于区域 III 时, $q(x, m, \lambda, \theta) \approx T_{III} \cdot x^2$, 此时, 散射强度正比散射颗粒的表面积。因此, 散射强度式(2)可转化为表面积浓度散射光强 q_s 的函数表达式:

$$q_s = \frac{1}{\pi} T_{III} \cdot C_N \int f(x) (\pi x^2) dx = T_s \cdot C_s \quad (4)$$

式中: C_s 为散射颗粒的表面积占比; $T_s = T_{III}/\pi$ 为散射颗粒表面积占比转换系数。

1.2 基于 SMD 探测烟雾颗粒的设计理论

通常非火灾烟雾的粒径比火灾烟雾的粒径大得多, 如果采用质量浓度作为火灾探测器警报阈值, 无法有效区分火灾与非火灾干扰颗粒。火灾烟雾颗粒具有比非火灾烟雾更高的比表面积。将颗粒体积占比 C_v 与表面积 C_s 的比值定义为 SMD, 即 $d_{32} = 6C_v/C_s$ 。SMD 能够反映出颗粒比表面积信息, 识别非火灾干扰颗粒。结合式(3)和式(4)得出 d_{32} 与 C_v 及 C_s 的散射光强之间的函数关系:

$$d_{32} = 6C_v/C_s = T'_{SMD} q_v/q_s \quad (5)$$

式中 T'_{SMD} 为散射颗粒 SMD 的转换系数。

设计一种基于双波长散射光强检测的光电烟感探测器。通过同步测量烟雾粒子的体积浓度和表面积浓度的散射信号, 构建 SMD 估算模型。该模型通过粒径特征参数可有效区分火灾烟雾和非火灾烟雾颗粒, 相较于传统单一质量浓度阈值检测方法, 降低了系统误报率。

基于前期关于非晶氧化镓宽谱光电探测器的研究, 结果表明: 光电探测器的光电流与光功率呈幂指数关系, 指数为 0.81。因此, 光电探测器的光电流可较为准确地反映出烟雾颗粒体积占比散射光强和表面积占比散射光强, 式(5)中 d_{32} 可写为光电流的函数:

$$d_{32} = T_{SMD} \left(\frac{I_v}{I_s} \right)^{1.23} \quad (6)$$

式中 T_{SMD} 为散射颗粒电信号与 SMD 的转换系数。

1.3 双波长选择原理

由“三区”定律可知: II 区和 III 区的散射强度分别与颗粒体积浓度 C_v 和表面积浓度 C_s 成正比。图 1 每个区域的边界由粒子直径 x 和入射光波长 λ 决定。因此, 测量 C_v 和 C_s 应选择合适的入射波长, 使烟雾颗粒粒径分别落在 II 或 III 区。在测量 C_v 时, 选择与烟雾粒径相当的 $\lambda_1 = 980 \text{ nm}$ 的入射波长, 使得烟雾粒径主要分布在区域 II, 如图 2 实线所示。在测量 C_s 时, 选择小于 x 的 $\lambda_2 = 405 \text{ nm}$ 的波长, 使得烟雾粒径分布在区域 III, 如图 2 虚线所示。

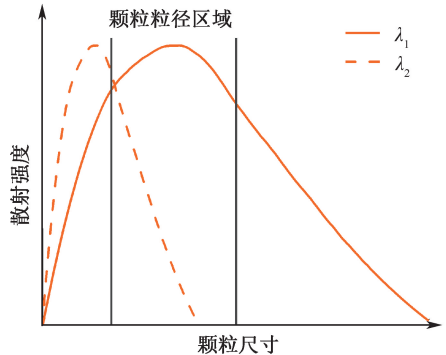


图2 双波长测量原理

Fig. 2 Dual-wavelength measurement principle

1.4 探测角优化设计原理

已知散射强度 $q(x, m, \lambda, \theta)$ 与粒子直径 x , 折射率 m , 入射光波长 λ , 以及发射器到接收器之间的探测角度 θ 相关, 其中折射率为常数。因此, 为使获

得烟雾颗粒体积浓度和表面积浓度的探测器电信号反映的烟雾颗粒的散射光强与基于 Mie“三段式”的散射理论更加吻合,在选定入射光波长($\lambda_1=980\text{ nm}$, $\lambda_2=405\text{ nm}$)使得颗粒粒径分布分别落在 II 区和 III 区后,应分别模拟测试不同探测角度时的电信号,确定出最优探测角,以减少火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾 SMD 的测量偏差。根据式(6),散射颗粒的电信号与 SMD 的转换系数 T_{SMD} 与探测角相关。分别将 2 种入射光的探测角划分为 Y 个,以使 λ_1 、 λ_2 分别有 Y 个入射通道。因此, λ_1 在第 i 个通道, λ_2 在第 j 个通道时的转换系数为 T_{SMD}^{ij} ,其中, i,j 均取 $1,2,\cdots,Y$ ($Y=1,\theta=40^\circ$; $Y=2,\theta=60^\circ$; $Y=3,\theta=80^\circ$; $Y=4,\theta=100^\circ$; $Y=5,\theta=120^\circ$; $Y=6,\theta=140^\circ$),此时,定义转换系数为:

$$T_{\text{SMD}}^{ij} = \frac{1}{4}(T_{\text{SMD-M}}^{ij} + T_{\text{SMD-J}}^{ij} + T_{\text{SMD-JA}}^{ij} + T_{\text{SMD-Z}}^{ij})$$

(7)

式中 $T_{\text{SMD-M}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-J}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-JA}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-Z}}^{ij}$ 分别表示棉绳、榉木、聚氨酯与正庚烷在 λ_1 为第 i 个通道, λ_2 为第 j 个通道时的转换系数。定义所有通道下的平均转换系数为:

$$T_{\text{SMD}} = \frac{1}{Y^2} \sum T_{\text{SMD}}^{ij}$$

(8)

为评估平均转换系数 T_{SMD} 与不同探测角时转换系数 T_{SMD}^{ij} 之间的误差,将该误差描述为转换系数标准偏差(Relative Standard Deviation, RSD),表示为 $\text{RSD}(ij)$:

$$\text{RSD}(ij) = \sqrt{\frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y \sum_{j=1}^Y \frac{(T_{\text{SMD}} - T_{\text{SMD}}^{ij})^2}{T_{\text{SMD}}^2}}$$

(9)

当探测角使标准偏差较大时,可能导致部分烟雾颗粒的 SMD 落在探测范围外,导致测量准确度降低。因此,确定最佳探测角以最小化 $\text{RSD}(ij)$,提高烟感探测器的测量准确度。定义 $\text{RSD}(ij)$ 取得最小时的探测角为最佳探测角:

$$\theta_{ij} = \{\theta | \min(\text{RSD}(ij))\}$$

(10)

2 光电烟感探测器模拟试验平台

为模拟并验证基于非晶氧化镓的双波长光电烟感探测器区分火灾烟雾与非火灾烟雾颗粒的有效性,搭建光电烟感探测器模拟试验平台,如图 3 所示,主要由 3 部分组成:模拟烟雾发生系统、烟雾探测系统和光电显示系统。模拟烟雾发生系统介绍如下:燃料被放置在一个直径约 20 cm、边缘高 3 cm 的

不锈钢容器中,试验火的阴燃及明火在一个长 30 cm 的立方室内进行。非火灾干扰烟雾包括水汽与水泥灰,分别由雾化器和鼓风机产生。烟雾探测系统包括入射光激光发生器与非晶氧化镓光电探测接收器,并通过半导体参数分析仪将器件探测到的散射光信号转化为电信号,在光电显示系统上显示。烟雾探测系统的光学设计结构如图 4 所示,由于非晶氧化镓光电探测器具有探测 254~1 064 nm 宽谱的能力,因此,采用该探测器件可实现双波长光响应。激光发生器由波长为 980 和 405 nm 的 2 个激光器组成,2 个激光器相继发出脉冲信号,通过颗粒散射由探测器接收。光电探测接收器固定在器壁上,并设计有防干扰设计。2 个激光器可在圆周器壁上移动以检测不同散射角下的散射光强,从而确定区分火灾烟雾颗粒与非火灾烟雾最佳探测角。

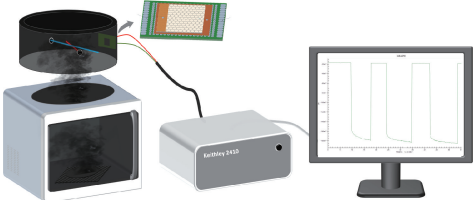


图 3 光电烟感探测器模拟试验平台

Fig. 3 Simulation platform of smoke detector

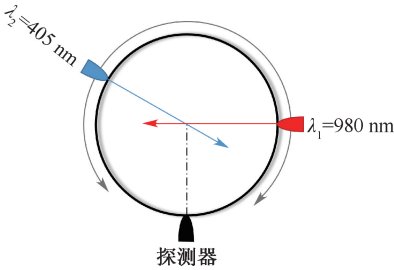


图 4 烟雾探测系统的光学设计结构

Fig. 4 Optical design drawings for smoke detection systems

3 光电烟感探测器判别模拟结果与分析

3.1 探测角确定

基于双波长光电烟感设计原理及探测系统设计模型,获得探测器在选定波长下的最佳探测角。仿真试验中,分别测试 2 种波长在 6 个通道下的 4 种试验火及干扰烟雾颗粒散射光光电流信号。由于非晶氧化镓光电探测器具有较高的探测率和低的暗电流,所以其表现出良好的探测弱光的能力,能有效区分噪声。统计这 6 种模拟烟雾不同探测角时的平均 I_V 、 I_S 如图 5、图 6 所示,结果表明:不同的探测角度下的散射颗粒显示出不同强度的光电流信号。

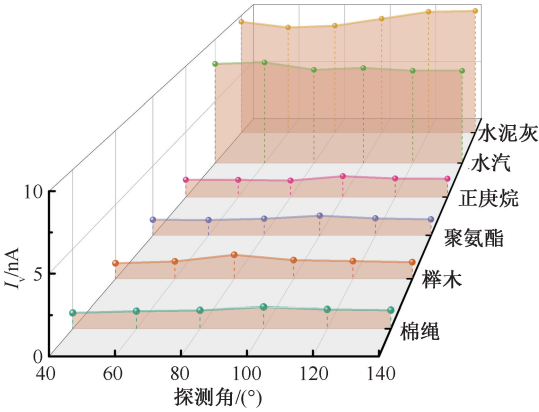


图 5 980 nm 入射光下的平均散射光电流 I_V
Fig. 5 Average photocurrent I_V with light at 980 nm

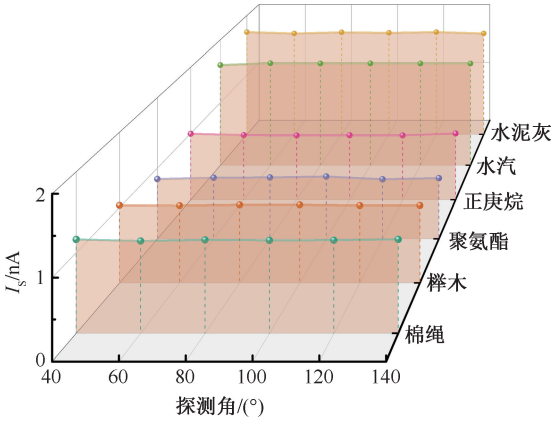
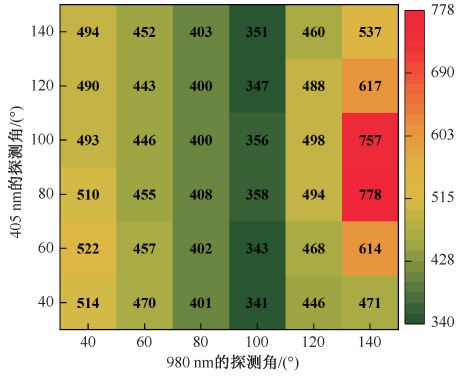


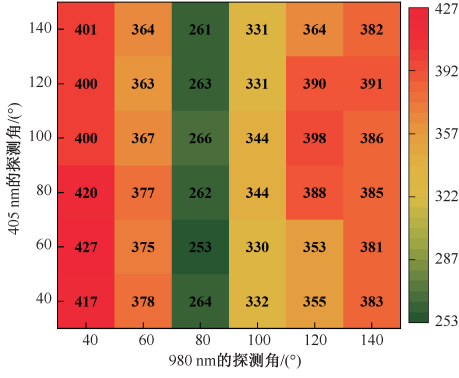
图 6 405 nm 入射光下的平均散射光电流 I_S
Fig. 6 Average photocurrent I_S with light at 405 nm

以 $1\text{ }\mu\text{m}$ 作为区分烟雾颗粒与干扰颗粒的界限,根据 2 种入射波长不同探测角下所测的烟雾颗粒体积浓度及表面积浓度的散射光电流信号 I_V 与 I_S ,通过式(6)计算,分别得出 4 种试验火在双波长的不同探测角时的转换系数 ($T_{\text{SMD-M}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-J}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-JA}}^{ij}$, $T_{\text{SMD-Z}}^{ij}$)。2 种入射波长不同探测角下的不同试验火的转换系数如图 7 所示。由图 7 可知:4 种试验火在相同的探测角具有不同的转换系数,因此,通过式(7)计算出每个通道 4 种试验火的平均转换系数 T_{SMD}^{ij} ,其随探测角的变化如图 8 所示。通过式(8)计算得出该光电烟感探测器的平均转换系数 T_{SMD} 约为 330。

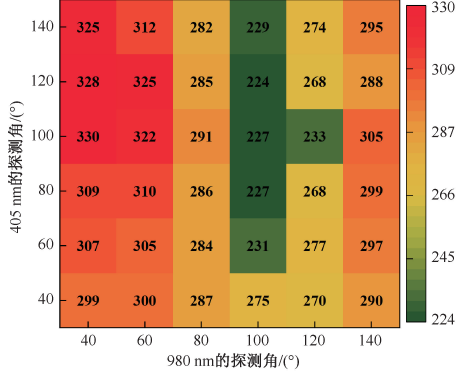
基于 4 种火灾试验火不同探测角的平均转换系数 T_{SMD}^{ij} (图 8) 与计算所确定的光电烟感探测器的平均转换系数 T_{SMD} ,由式(9)计算得出 2 种波长不同探测角时的转换系数标准偏差 $\text{RSD}(ij)$,如图 9 所示,横轴表示 980 nm 的观察角度,纵轴为 405 nm 的观察角度, $\text{RSD}(ij)$ 值由颜色条表示。由图 9 可知:



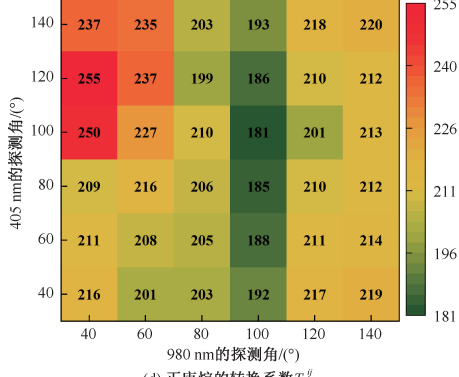
(a) 棉绳的转换系数 $T_{\text{SMD-M}}^{ij}$



(b) 榉木的转换系数 $T_{\text{SMD-J}}^{ij}$



(c) 聚氨酯的转换系数 $T_{\text{SMD-JA}}^{ij}$



(d) 正庚烷的转换系数 $T_{\text{SMD-Z}}^{ij}$

图 7 2 种入射光不同探测角下的不同试验火的转换系数
Fig. 7 Conversion coefficients of different test fires for two incident light at different detection angles

当 980 nm 入射光的探测角 $\theta_v \approx 60^\circ$, 405 nm 入射光的探测角 $\theta_s \approx 120^\circ$ 时, 转换系数标准偏差 $RSD(ij)$ 取得最小值 21%。因此, 最终确定将入射光 $\lambda_1 = 980\text{ nm}$, 探测角 $\theta_1 = 60^\circ$ 与 $\lambda_2 = 405\text{ nm}$, 探测角 $\theta_2 = 120^\circ$ 作为光电烟感探测器的最佳设计参数。

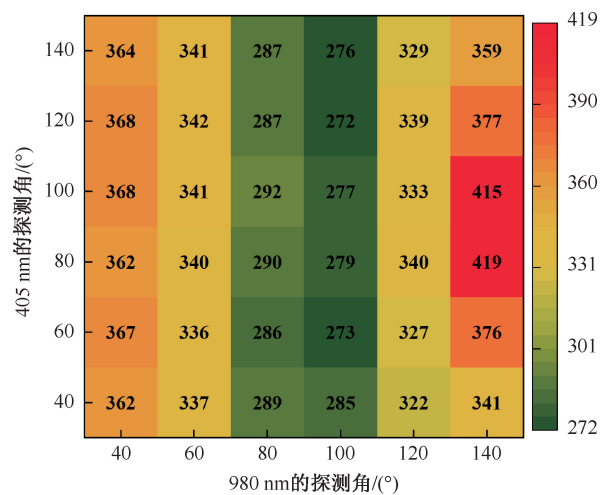


图 8 2 种入射光不同探测角下的平均转换系数 T_{SMD}^{ij}

Fig. 8 Average conversion factor of detector at different detection angles for two incident lights

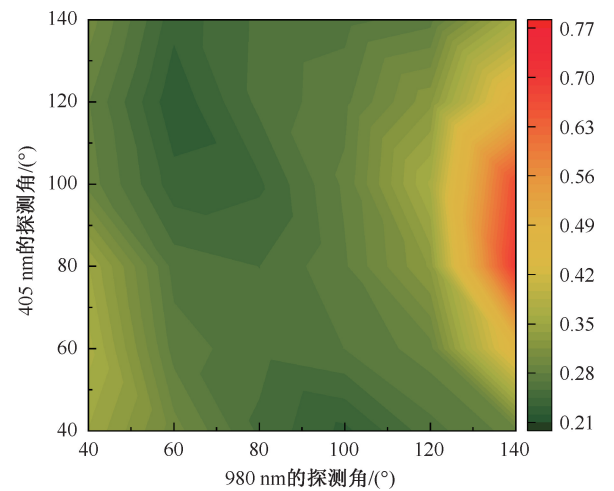


图 9 探测器 2 种入射光不同探测角下的转换系数标准偏差 $RSD(ij)$

Fig. 9 Standard deviation of conversion factor $RSD(ij)$ of detector under two incident lights with different detection angles

3.2 光电烟感探测器工作流程

设计的光电烟感探测器采用双波长散射探测原理, 通过分析烟雾颗粒在 980 和 405 nm 波长下的散射光电信号特征, 建立基于 d_{32} 的火灾识别模型。具体而言, 当烟雾颗粒进入探测区域时, 系统采集双

波长散射光电信号, 依据式 (6) 计算 d_{32} 值。若 $d_{32} < 1\text{ }\mu\text{m}$, 则判定为火灾烟雾, 其流程如图 10 所示。

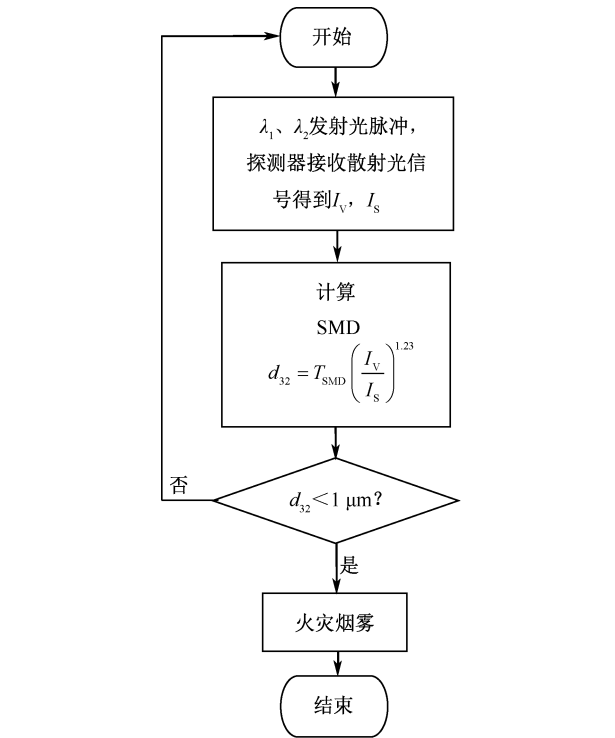


图 10 双波长光电烟感探测器工作流程
Fig. 10 Dual-wavelength smoke photodetector

3.3 随机火灾烟雾判别模拟试验

为验证所设计光电烟感探测系统在火灾识别准确性和抗干扰性能方面的有效性, 对 4 种标准试验火及 2 类典型干扰烟雾 (水蒸气、粉尘) 各进行 30 次随机重复测试。试验数据显示, 干扰烟雾的散射光强比值 (I_v/I_s) 显著高于试验火。这一现象源于火灾烟雾颗粒具有更小的比表面积, 导致 980 nm 波长下的体积散射光强 I_v 与 405 nm 波长下的表面积散射光强 I_s 比值降低。

根据设计程序第 3 步, 由式 (6) 估算相应 d_{32} , 已设定的该光电烟感探测器的平均转换系数 $T_{SMD} = 330$ 。为比较随机测试 d_{32} 与响应阈值 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的大小, 测试得出的 4 种试验火及 2 种干扰烟雾的 d_{32} 与 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的关系 (图 11)。定义所测火灾烟雾 d_{32} 大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以及非火灾烟雾粒径小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 为误报, 图 11 中用红心符号标记。统计模拟结果表明: 大部分试验烟雾的误报率可控制在 4.4% 内, 火灾试验火的误报率控制在 3.3% 内, 非火灾烟雾的误报率可控制在 6.7% 内, 低于文献中报道的误报率的统计结果^[13-14]。与当前火灾与非火灾烟雾识别的主流技术对比 (表 1), 该模型在无需融合其他物理量的条

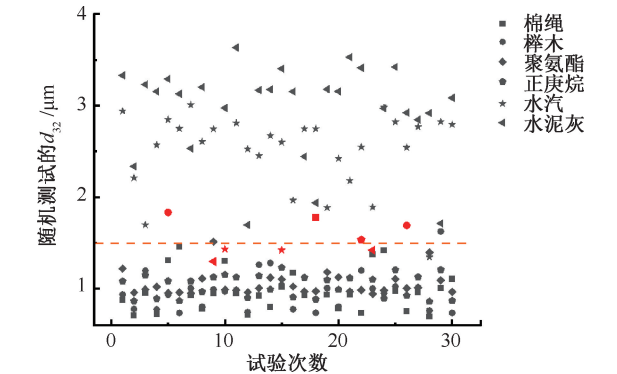


图 11 随机模拟测试烟雾颗粒的 d_{32}

Fig. 11 d_{32} of smoke particles from random simulation tests

表 1 不同火灾烟雾探测技术方案对比

Table 1 Comparison of different fire smoke detection technology

技术方案	原理	优势	不足
本文双波长光学模型	双波长散射光强比推粒子粒径	成本较低、抗干扰提升、易于集成	精度低于直接粒子分析
复合探测器	烟雾、温度或 CO 等多物理融合判断	判别逻辑全面,对典型火灾综合误报率低	硬件成本较高;对仅冒烟而无明显温升或 CO 的早期火情响应可能滞后
烟雾分析仪	激光粒子计数分析	灵敏度极高,可极早期预警,提供精确粒径分布数据	系统昂贵,安装复杂(需布设采样管网),维护要求高
视觉图像烟雾探测	计算视觉分析烟雾图像特征	可视复核、大范围监视、火源定位	受环境光照、遮挡、雾气影响大;隐私顾虑;算法易受动态光影干扰

件下有效识别烟雾,为降低误报率提供了一种差异化的技术路径。

为评估基于非晶氧化镓的光电烟感探测器的灵敏度,根据《点型感烟火灾探测器》(GB 4715—2005)测试器件响应阈值。光电探测器的响应阈值为探测器判别为火灾烟雾时的烟雾质量浓度,用减光系数表示。

$$m = \left(\frac{10}{d}\right) \lg\left(\frac{P_0}{P}\right) \tag{11}$$

式中: m 为减光系数, dB/m; d 为试验火距离光电探测器的距离, m; P_0 为无烟雾时入射光功率, W; P 为有烟雾时器件判别为火灾烟雾时散射光功率, W。多次试验结果显示, $m_{\min} \approx 0.14$ dB/m, $m_{\max}/m_{\min} \approx 1.32$, 满足《点型感烟火灾探测器》中对光电探测器灵敏度的要求。

4 结 论

1) 建立一种基于双波长散射与 Suater 平均粒径识别的光电烟感模型,该模型通过同步获取颗粒体积与表面积浓度信息,能够有效区分火灾烟雾与非火灾烟雾。

2) 文中所建模型误报率较低,对火灾烟雾的误报率为 3.3%,对典型非火灾烟雾为 6.7%,相较于单一浓度探测方法,可显著提升探测可靠性。

3) 后续将研究新型复合烟雾的区分验证、系统集成优化与环境适应性。

5 致 谢

特别感谢四川轻化工大学物理与电子工程学院飞秒激光实验室的支持。

参 考 文 献

[1] Costea A, Schiopu P. New design and improved performance for smoke detector[C]. Proceeding in 2018, 10th International Conference on Edition Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2018: 1–7.

[2] Adenan M S M, Erwan A N M, Alfian M N H M, et al. Smart smoke detector[J]. International Journal of Recent Technology and Applied Science, 2021, 3(1): 16–31.

[3] Khan F, Xu Zhiguan, Sun Junling, et al. Recent advances in sensors for fire detection[J]. Sensors, 2022, 22(9): DOI:10.3390/s22093310.

[4] Wang Li, Zhang Xi, Li Liming, et al. Experimental study on early fire smoke characteristics in a high-volume space: a fire detection perspective[J]. Fire, 2024, 7(9): DOI:10.3390/fire7090298.

[5] Fonollosa J, Solorzano A, Marco S. Chemical sensor systems and associated algorithms for fire detection: a review[J]. Sensors, 2018, 18(2): DOI:10.3390/s18020553.

[6] Deng Li, Wu Dandan, Zhou Jin, et al. A review on aircraft cargo compartment fire detection using dual-wavelength sensors[C]. Third International Computing Imaging Conference (CITA), 2023: 612–630.

[7] Saran R, Curry R J. Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies[J]. Nature Photonics, 2016, 10(2): 81–92.

[8] Sun Wu, Deng Xiaojia, Li Yaodong, et al. Mechanism of dual-wavelength anti-jamming photoelectric smoke-detection[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3);DOI: 10.7498/aps.62.030201.

[9] Wang Shu, Xiao Xiao, Deng Tian, et al. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 281: 920–932.

[10] Yu Junling, Wu Geng, Han Xiao, et al. Amorphous gallium oxide nanosheets with broad absorption and spin polarization for Si-based UV-Vis-NIR photodetectors[J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(11): DOI: 10.1002/adom.202302410.

[11] Kulkarni P, Baron P A, Willeke K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011: 807–808.

[12] Deng Tian, Wang Shu, Zhu Ming. Dual-wavelength optical sensor for measuring the surface area concentration and the volume concentration of aerosols[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 236: 334–342.

[13] Liu Gang, Yuan Hongyong, Huang Lida, et al. A fire alarm judgment method using multiple smoke alarms based on Bayesian estimation[J]. Fire Safety Journal, 2023, 136; DOI:10.1016/j.firesaf.2023.103733.

[14] Festag S. False alarm ratio of fire detection and fire alarm systems in Germany;a meta analysis[J]. Fire Safety Journal, 2016, 79: 119–126.

作者简介： 于俊玲 （1989—）,女,河南周口人,博士,讲师,主要从事光功能材料及其应用研究。E-mail:yjl1021@suse.edu.cn。

