

王海斌, 龙秀皇, 李金浩, 等. 火灾烟雾多波长探测器光学腔室优化设计[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2341–2350.
WANG H B, LONG X H, LI J H, et al. Optimized design of optical chamber for multi-wavelength fire smoke detector[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2341–2350.

火灾烟雾多波长探测器光学腔室优化设计*

王海斌^{1,2}, 龙秀皇², 李金浩², 董雨城², 刘全义^{1,2}

(1 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室, 四川广汉 618307;

2 中国民用航空飞行学院民航安全工程学院, 四川广汉 618307)

摘要:为解决多波长烟雾探测器在实际应用中面临的杂散光干扰严重、结构遮光设计不完善等问题,提出了一种三波长光学腔室优化设计方法。通过构建三维仿真平台,分析了典型电子器件材料的遮光性能,结合烟雾探测灵敏度要求,建立发射-接收夹角与遮光板几何参数的匹配模型,并提出一种折线形遮光板结构。仿真结果表明,黑色丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)材料在遮光性能与加工可行性方面在综合性能评估中表现较好,优化结构后,无烟状态下接收器辐照度由原设计的 94.23 W/m^2 降至 0.524 W/m^2 ,同时不影响有效探测区域。最后通过烟雾试验验证了优化结构下信噪比的提升。研究为多波长烟雾探测器的结构设计与材料选型提供了定量分析与优化依据。

关键词:安全工程;烟雾探测;光学腔室;遮光结构;光学仿真

中图分类号:X949;TU892

文献标志码:A

文章编号:1009-6094(2026)06-2341-10

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1181

0 引言

烟雾探测器作为火灾预警系统的关键部件,其性能高度依赖光学系统的结构设计和材料选型。目前探测早期火灾有多种方法,丁怀对等^[1]利用视频烟雾探测方法探测烟雾,但普通摄像机无法拍摄零照度(黑暗)甚至低照度环境下的烟雾图像。袁洁等^[2]采用红外摄像机通过主动红外烟雾识别方法来提高探测准确度,但红外相机成本较高,难以广泛应用于大规模生产和普通场景中。另外一种成本较低的方法是通过光电烟雾探测器进行探测,目前主流光电烟雾探测器多采用单波长或双波长配置,通过不同的发射与接收结构构建烟雾腔室。其中,立体式光学结构^[3-4]通过调整发射器与接收器在垂直方向的夹角,实现特定的散射角度,有效避免直射干扰。然而,根据 Mie 散射理论^[5],散射角度对探测灵敏度有重要影响。当需实现大后向散射角时,发射与接收器之间的夹角变小,此时接收器往往趋于垂直放置,容易积尘,进而影响长期稳定性与可靠性,形成潜在的机械结构缺陷。

相比之下,水平布置结构具有几何形状简洁、积

尘速度较慢等优势,在烟雾光学探测系统中得到较为广泛的应用。2017年, Lee 等^[6]首次对单波长光电式烟雾探测器暗室进行灰尘风速测试,但没有对其内部杂散光进行测试。并且单波长检测在面对多种类型烟雾颗粒时存在误报率较高、识别能力有限等问题,难以满足对火灾产物的准确区分与响应要求。为提升对不同烟雾类型的判别能力,2005年, Aspey 等^[7]首次使用多波长进行烟雾探测,但仍然没有对烟雾迷宫进行测试。近年来结合可见光与近红外波段的探测方法,多波长烟雾探测技术已逐渐成为研究热点^[8-10]。其中, Zheng 等^[11]提出了一种双波长烟雾光学腔室结构,旨在提高系统的探测维度和判别精度。华中科技大学在火灾烟雾光学探测的结构设计方面开展了一些探索。邓田^[12]提出双波长多参数火灾探测方法,建立了索特平均粒径与散射信号之间的定量关系,但研究更多集中在信号建模和粒径反演,光学腔室结构仍停留在常规的迷宫式或直线形设计。肖骁^[13]设计了双波长三通道烟雾探测器,但尚未对多波长条件下的内部遮光性能与探测区域优化进行系统分析。杜晓雨^[14]提出了多角度烟雾探测器,但在迷宫结构设计方面仍缺

* 收稿日期: 2025-07-07

作者简介:王海斌,博士研究生,教授,从事火灾早期预警技术、火灾探测传感器集成、机载防火装备适航研究, wanghaibin123@cafuc.edu.cn。

基金项目:四川省重点实验室建设项目(MZ2022JB01);国家重点研发计划项目(2024YFC3014400);四川省重点实验室建设项目(MZ2024JB02)

乏针对性的内部优化。综上,现有研究在多波长或多通道火灾烟雾探测方面虽取得一定进展,但在光学腔室优化设计方面,特别是针对三波长条件下由散射角度设计带来的光线干扰问题,仍存在不足。并且在水平布置结构下实现多波长共存与同层布置,仍面临一些技术挑战。由于水平布置结构在多波长共存、同层布置的情况下,可能由角度设计原因导致接收器部分波段发生信号饱和,影响系统的线性响应特性。此外,光学腔室内部的杂散光问题长期以来主要通过迷宫式结构、多级光阱等方式加以缓解,尽管其遮光效果理想,但普遍存在体积庞大、结构复杂、加工难度高等问题,难以兼顾烟雾探测设备对小型化和模块化的实际需求。现有研究尚缺乏针对多波长系统、轻量结构与抗干扰能力平衡性的结构优化设计。传统设计中通常使用单一接收器轮流采集多个波长的散射信号,受限于时间同步误差与环境波动,容易引发采集不稳定问题。多波段信号在同一接收器中处理还存在交叉干扰及响应曲线不一致的问题,阻碍多波段融合与有效烟雾判别。

针对上述问题,本文开展针对多波长探测器的光学结构优化研究,聚焦遮光结构设计和材料选型以抑制多波长干扰与信号饱和。提出一种基于“探测区域边界重构”思想的“折线式遮光板结构”,该结构虽仅为单次折弯,但通过几何空间的合理匹配,实现遮光效率与信号保持能力之间的优化平衡。同时提出一种双接收器光学结构,通过分别采集红外波段和可见光(蓝光和绿光)信号,实现异波段信号的同步采集与独立处理,从而降低通道间干扰,提高信号稳定性与识别准确性。为验证该方案的可行性,本文基于三维光学仿真平台,开展面向三波长探测系统的遮光结构优化设计研究。该方法系统分析典型电子器件材料的遮光能力与加工适应性,建立遮光结构与发射-接收几何参数间的匹配模型,并从多级复杂迷宫结构中提取有效遮光原则,简化为工

程可实现性更高的折线式结构方案,从而在保证性能的同时降低设计复杂性。通过棉绳烟雾对比试验,验证所提设计方案的有效性和实用性。

1 材料与结构设计

1.1 材料选择与分析

在多波长烟雾探测器的结构设计中,遮光板和腔室材料的选择对于抑制杂散光、增强散射信号与背景信号之间的对比度至关重要。特别是在多波长系统中,不同波长光源对表面反射和吸收特性更为敏感,遮光材料需同时满足低反射率(抑制杂散光)、热稳定性(耐受环境温变)及工艺适应性(便于复杂结构加工)。因此,选择合适的材料不仅关系到光学性能,还直接影响整体探测灵敏度和系统长期稳定性。本文初步列出了五种典型的电子器件外壳材料,性能对比见表1。

如表1所示,PA(尼龙)存在由吸水率大导致的变形风险,PVC(聚氯乙烯)的热稳定性不足,均不符合设计要求。而ABS、PC(聚碳酸酯)与金属材料在满足基础热性能和加工性的同时,具备表面改性实现低反射率的潜力,因此,为保证烟雾腔室外壳兼具光学吸收性、热稳定性、加工成型性与表面处理兼容性,将这三种材料引入后续光学仿真阶段。针对上述材料,为实现材料性能的定量评估,首先使用CAD软件对烟雾迷宫进行三维几何建模,构建的三维光学仿真模型如图1所示。

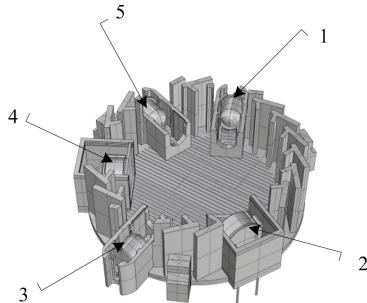
将三维光学仿真模型以STEP格式导入内置三维几何建模内核的TracePro(v7.4.3)光学仿真软件中进行光线追迹分析。在仿真中,光源设定为LED档案光源,波长分别为450 nm(蓝光)、550 nm(绿光)和950 nm(近红外),发射通量为0.21 W。材料的光学参数采用TracePro(v7.4.3)内置的材料数据库,该数据库基于公开发表的光学常数数据集,能够自动调用波长相关的复折射率模型。具体而言,

表1 常见的电子器件外壳的材料性能对比

Table 1 Comparison of material properties for common electronic device housings

材料	全称	特点与应用	是否适合光学腔室或遮光结构
ABS	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯	成本低,强度好,易加工,表面易做消光处理	适合
PC	聚碳酸酯	耐热耐冲击,尺寸稳定性好,光学透明性强	通过处理后较为适合
PA	尼龙	强度高、耐磨,但吸水率大,易变形	易吸湿变形,不稳定,不适合
金属材料	铝、不锈钢等	强度高、耐热,成本低、阻燃性好,但热稳定性	较为适合
PVC	聚氯乙烯	一般	热变形风险较大,不适合用于光学件

ABS 的折射率约为 1.58,PC 材料在 450 nm、550 nm 和 950 nm 下的折射率分别为 1.600、1.589 和 1.566,金属材料在 450 nm、550 nm 和 950 nm 下的折射率分别为 1.16、0.94 和 0.31。



1—红外光;2—红外光电接收二极管;3—蓝光;4—接收蓝光与绿光的光电接收二极管;5—绿光。

图 1 多波长烟雾探测器三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model diagram of multi-wavelength smoke detector

通过三维建模并对多波长烟雾探测器进行光学仿真,对比了不同材料在无烟雾场景下对光电接收器辐照度的影响,结果如图 2 所示。图 2(a)显示,金属材料能完全阻挡入射光,其后方接收器的辐照度为 0,表明其遮光性能较强。图 2(b)中,PC 材料由于具备一定透明性,导致后方接收器平均辐照度仍高达 85.896 W/m²,表明 PC 材料自身难以有效屏蔽杂散光。图 2(c)所示的 ABS 塑料同样表现出优异的遮光能力,辐照度为 0,几乎无光泄漏。

在图 2 中,通过仿真分析了三种材料在无遮光结构下对接收器背景辐照度的抑制能力,结果显示,金属和 ABS 材料均能有效阻挡直射光,接收器处辐照度降至 0,实现了完美遮光。然而,仅凭材料本身的不透光性无法全面评估材料在复杂结构中的遮光表现。为进一步模拟实际烟雾腔室中的光传播情况,图 3 引入了“表面接收到的辐照度”作为评价指标,即光线在腔体内部多次反射后的残余能量分布,吸收辐照度高意味着该材料表面对杂散光具有更强的吸收作用,从而减少系统内部多次反射形成的次级干扰。当不同材料表面均涂覆相同的高吸收黑色消光涂层后,整体的吸收特性主要由涂层决定,基底材料折射率的差异对最终表面吸收辐照度的影响被显著削弱。因此,在 450 nm、550 nm 和 950 nm 波长范围内,即便基底材料折射率存在一定差异,其表面吸收辐照度的变化幅度仍较小。本文只采用 950 nm 波长光源对不同材料进行光线追迹分析。

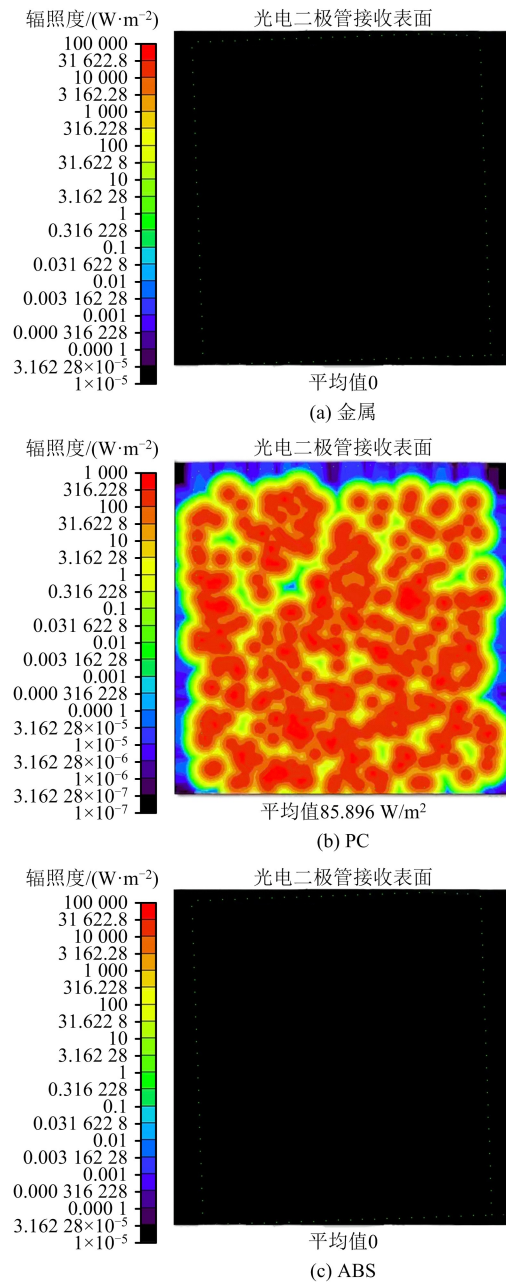


图 2 不同材料后方接收器表面辐照度分析

Fig.2 Analysis of irradiance on the rear surface of receivers constructed from different materials

图 3 结果显示:在相同黑色涂层条件下,ABS 材料表面的吸收辐照度平均为 227.53 W/m²,表明 ABS 材料具有更强的散射光吸收能力。虽然金属材料遮光能力强,但其表面反射率可能导致内部光反弹,而 ABS 材料在涂覆黑色哑光层后对于吸收剩余光线相较于金属更强,有助于提升腔体的整体抗干扰能力。ABS 作为内部结构时,可以进一步对反射光进行抑制。结合 ABS 材料本身良好的加工性与低成本,最终选择黑色 ABS 作为烟雾腔室的构造材料。

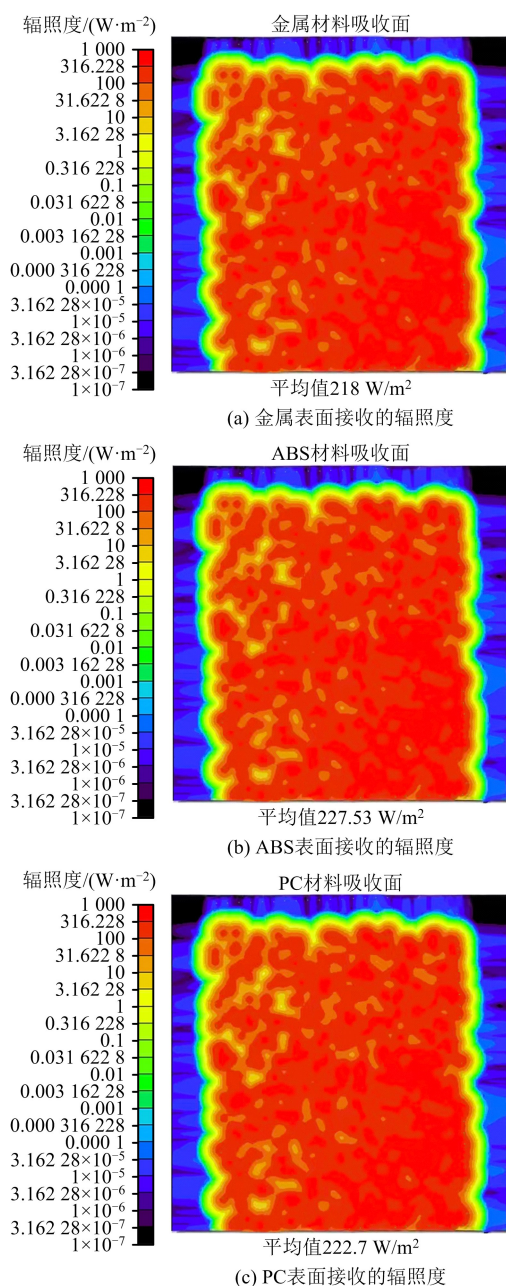


图3 不同材料表面接收到的辐照度对比分析

Fig.3 Comparative analysis of irradiance received on different material surfaces

然而,仅通过优化材料仍无法彻底抑制杂散光的干扰。为进一步提升探测器系统的抗干扰能力,还需结合系统的光路特性,设计更为合理的遮光结构。下一节将基于三波长探测器的具体布局,提出一套针对性的遮光构型设计方案。

1.2 多参数火灾探测模型设计

在多波长烟雾探测器中,烟雾腔室不仅承担光学引导功能,还须有效屏蔽外界环境光和杂散光干扰。遮光板作为核心结构,其几何形状与位置设计

直接影响系统在无烟环境下的暗电流水平及在有烟状态下的信号响应能力。合理设计遮光板,有助于提升探测灵敏度和信噪比,是优化烟雾探测器性能的关键环节。在理想情况下,接收光电二极管在无烟状态下应尽可能接收到最小的背景辐照度,从而在烟雾出现时产生显著的信号变化,利于实现烟雾识别。但由于多波长结构中发射器与接收器之间存在夹角差异,部分接收器在无烟状态下仍可能接收到较高强度的杂散光,长期运行易导致光电器件饱和或误触发。因此,有必要对遮光板的结构进行针对性优化,以改善此类问题。

本节在选定黑色ABS材料的基础上,构建多种遮光板结构模型,并通过三维光学仿真分析其遮光性能及对有效探测区域的影响。图4为无遮光板结构下红外光电接收器的辐照度分布。仿真结果表明,接收器仍接收到较高的背景辐照度,达到94.231 W/m²。这表明该结构在无烟环境下易受杂散光干扰,难以实现稳定探测。

根据Zheng等^[11]的研究,入射光与气溶胶颗粒相互作用后会发生散射,部分散射光可进入接收器,形成可用于识别烟雾的有效信号。此散射光覆盖的空间范围即为烟雾腔室中的有效探测区域,即发射

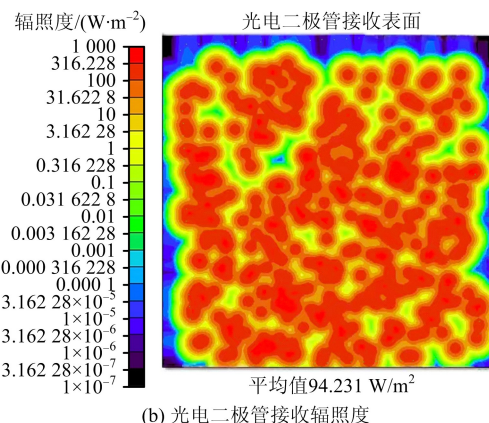
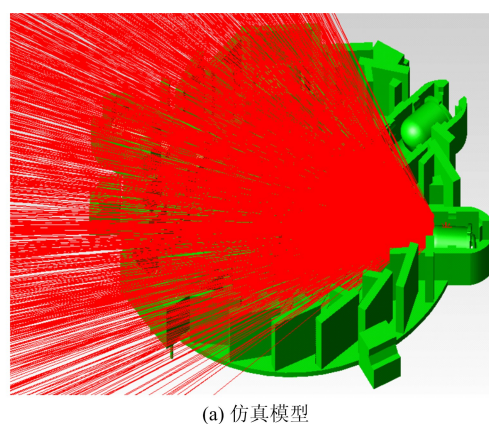


图4 未优化结构下辐照度分析

Fig.4 Irradiance analysis under unoptimised structures

光束与接收器视场的交集。如图 5 所示,接收器与发射器光路交叠区域即网格填充部分表示红外接收器的有效响应范围。因此,遮光板的尺寸与位置应尽可能与该探测区域相匹配,在确保遮光效果的同时,最大限度保留烟雾散射信号的进入路径,从而避免对探测灵敏度的不利影响。

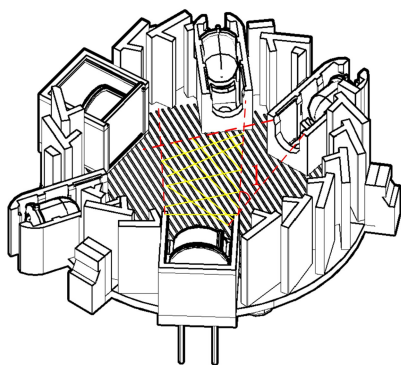
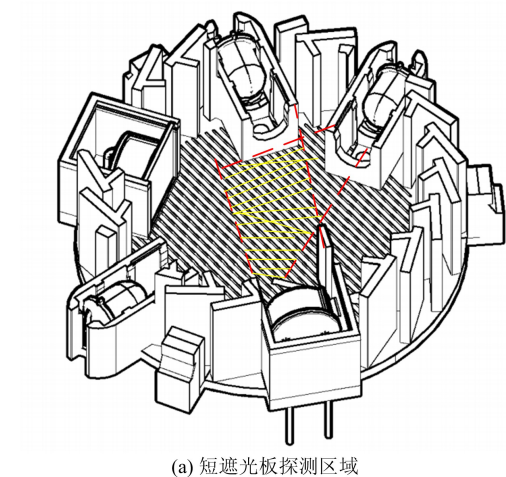


图 5 烟雾探测器区域

Fig. 5 Smoke detector area

如图 6 所示,当遮光板按照探测区域边缘并且



(a) 短遮光板探测区域

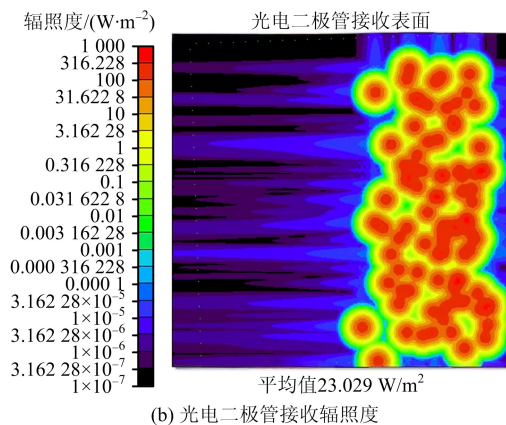
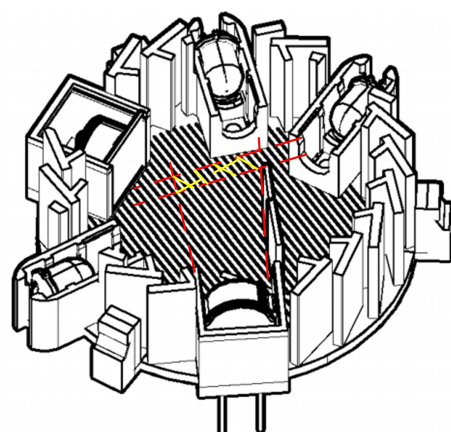


图 6 短型遮光板结构优化

Fig. 6 Optimisation of short-type sunshade structure

小于发光二极管腔室宽度设计放置时,光电二极管接收到光线的辐照度由 94.231 W/m²降到 23.029 W/m²。其探测区域相对较大,虽然对于遮挡红外光线的效果有所提升,但仍存在部分杂散光未被完全阻挡的问题。

相比之下,如图 7 所示,遮光板边缘与探测区域一致,且其宽度大于发光腔室的宽度。在该设计下,背景辐照度降为 0,遮光效果理想,几乎完全屏蔽了红外光。然而,该方案显著压缩了接收器的有效探测区域,可能降低系统对烟雾信号的响应能力。



(a) 长遮光板探测区域

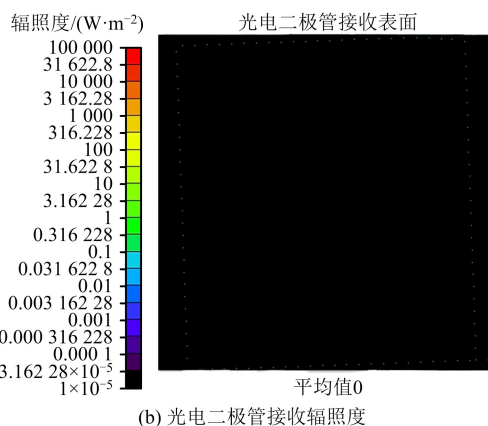
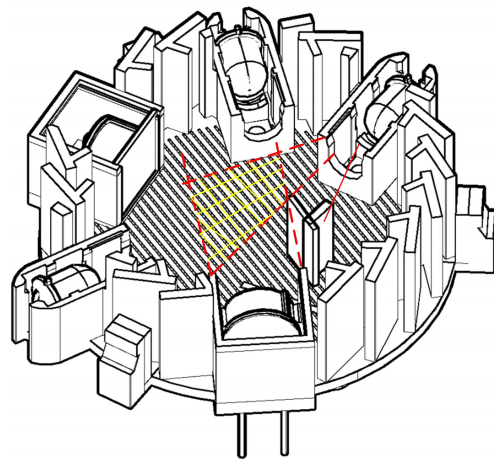


图 7 长型遮光板结构优化

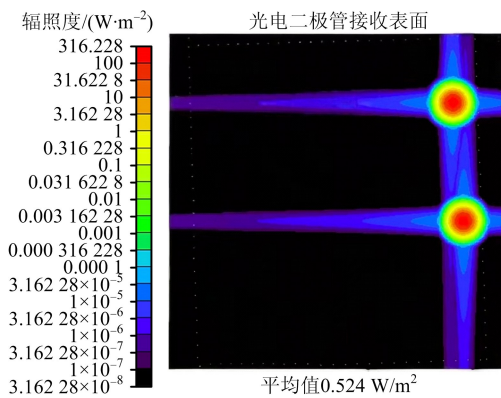
Fig. 7 Optimisation of long-type sunshade structure

如图 8(a) 所示,当遮光板尺寸适中,且依照探测区域边界及图 5 中夹角 1 的几何形状设计放置时,其探测区域相比图 7 显著扩大,为烟雾散射光的进入留出了充足通道。尽管其遮光效果略劣于图 7,光电二极管接收到的背景辐照度为 0.524 W/m²,但相较于无遮光板或遮光板尺寸较小时方案,遮光性能有了显著改善。

综合分析图 6~8 各方案,在保证接收器遮光需求的基础上,图 8 中的折线形遮光板通过与散射区



(a) 折线形遮光板探测区域



(b) 光电二极管接收辐照度

图8 折线形遮光板结构优化

Fig.8 Optimisation of zigzag-shaped sunshade structure

域边缘等高匹配的方式,在不显著增加结构复杂度的前提下,有效降低背景辐照度降至 0.524 W/m^2 ,同时保留了相对完整的探测区域。相较于多级迷宫式遮光结构,该结构仅需一次折弯,显著降低了加工成本与对装配精度的依赖,更适合烟雾探测器类中小型光学腔室的集成化应用场景。通过3D打印技术制作的实物如图9所示。

完成材料与结构设计后,为进一步验证优化方案的实际效果,搭建试验平台,通过测试实际烟雾,定量评估不同结构下的探测器响应差异。

2 试验设计

2.1 试验方法

索特平均粒径 (Sauter Mean Diameter, SMD) D_s 是衡量火灾与非火灾的重要指标,是一种用来描述颗粒大小的统计平均值^[15-16], D_s 可以表示为

$$D_s = 6 \frac{C_V}{C_S} \quad (1)$$

式中 C_V 为气溶胶的等效球面体积浓度, $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$;

2346

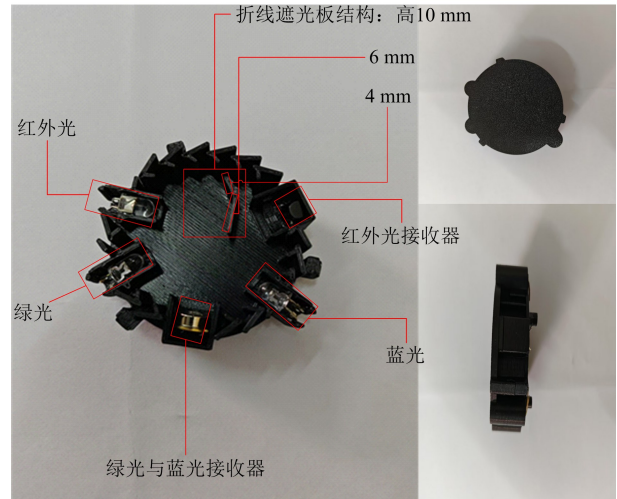


图9 三波长烟雾腔室实物图

Fig.9 Physical diagram of a three-wavelength smoke chamber

C_s 为气溶胶的等效球面表面积浓度, $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ 。 C_V 和 C_s 描述如下。

$$C_V = \frac{6}{\pi} C_N \int f(D) D^3 dD, \quad (2)$$

$$C_s = \pi C_N \int f(D) D^2 dD$$

为了将索特粒径与散射光强联系起来,根据 Mie 散射理论及 Baron 等给出的“三段式”理论^[17],气溶胶散射强度可以描述为

$$P = C_N \int f(D) I(D, m, \lambda, \theta) dD \quad (3)$$

式中 $f(D)$ 为气溶胶的粒度分布; $I(D, m, \lambda, \theta)$ 被描述为单粒子散射光强度, W/m^2 ; λ 被描述为入射光波长, nm ; θ 为光源散射与接收光源的散射角度, $(^\circ)$; m 为颗粒物折射率; D 为颗粒物粒径, nm ; C_N 是气溶胶的数浓度, m^{-3} 。其中球形粒光散射强度 $I(D, m, \lambda, \theta)$ 可以表示为

$$I = [\lambda^2 / (8\pi^2 r^2)] [|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2] I_0 \quad (4)$$

式中 I_0 为自然光强, W/m^2 ; r 为散射体到测量点的距离, mm ; $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 分别是垂直偏振和平行偏振的量纲一米氏散射振幅函数。

因此,当入射光波长与颗粒物的粒径 D 接近时,散射强度 P 与颗粒物的体积有关,光散射模型处于三段式理论中的区间 II, P 可以写为 P_V (体积散射强度, mW)。

$$P_V = \frac{6}{\pi} C_N T_{II} \int f(D) \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) dD \quad (5)$$

当入射光波长小于颗粒物的粒径 D 时,散射强

度 P 与颗粒物的表面积有关,光散射模型处于三段式理论中的区间Ⅲ, P 可以写为 P_s (表面积散射强度, mW)。

$$P_s = \frac{1}{\pi} C_N T_{\text{III}} \int f(D) \left(\frac{\pi}{6} D^2 \right) dD \quad (6)$$

式中 T_{II} 和 T_{III} 为颗粒物粒径 D 与颗粒物散射光强度 q 之间的转换系数。因此,用散射强度表示索特平均粒径公式为

$$D_s = \frac{T_{\text{III}}}{T_{\text{II}}} \frac{P_v}{P_s} \quad (7)$$

由于散射强度与 D_s 之间的转换系数不仅受到散射角的影响,还与实际应用中接收电路的响应参数密切相关,因此准确的转换系数通常需要依赖大量实际测量与标定试验获得。而本研究的目标主要是探讨遮光结构对接收信号的影响,因此仅考虑有无遮光板的仿真与试验场景,暂不涉及全面的电路响应建模。为简化分析并初步验证两个波长的光响应功率比值 T 反演粒径的可行性,采用仿真方式估算 T 与索特粒径之间的关系。选用 950 nm 的红外光作为测量气溶胶体积浓度的入射光光源和 450 nm 蓝光与 530 nm 绿光作为测量气溶胶表面积浓度的入射光光源。选择 $\theta_{450 \text{ nm}} = 45^\circ$, $\theta_{530 \text{ nm}} = 75^\circ$, $\theta_{950 \text{ nm}} = 165^\circ$ (θ 表示发射光与接收光的散射角度),再参考 Schneider 等^[18] 不同类型燃烧颗粒物的粒径特性,以及邓田^[12]、肖骁^[13] 测得的棉绳烟雾的真实粒径参数,提取如表 2 所示的典型特征粒径。

为了计算索特粒径,将气溶胶的粒度分布 $f(D)$ 表示为

$$f(D) = \frac{1}{D_p \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{\left(\ln \frac{D_p}{D_0} \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (8)$$

然后将棉绳粒径参数代入上述公式进行仿真,计算得到相应的转换系数。又由于红外光与蓝光和绿光的输出响应功率可以近似地表示对应的散射强度 P , 所以通过红外光与蓝光或绿光的输出响应功率比值 T 可以求出索特平均直径,表示为

$$D_s = \frac{T_{\text{III}}}{T_{\text{II}}} T \quad (9)$$

而 T 可以表示为长波与短波的光功率的比值,

可以间接作为判断烟雾特性的指标,即

$$T_1 = \frac{P_v(\text{红外光})}{P_s(\text{蓝光})}, T_2 = \frac{P_v(\text{红外光})}{P_s(\text{绿光})} \quad (10)$$

因此,将试验中测得的 T 直接代入该仿真模型,可以反推出近似的索特粒径。

2.2 试验平台与内容

为了准确评估遮光结构在多波长烟雾探测中的性能,搭建了一套基于三波长光电探测的试验平台。系统主要包括三波长发光二极管(450 nm 蓝光、550 nm 绿光、950 nm 红外光)、两组接收通道(硅光电池+带通滤光片/红外光电二极管)、两种烟雾腔室结构(无遮光结构与折线形遮光结构)、电源模块、IV 转换电路、STM32 主控芯片及黑色封闭暗箱等组成部分。发射端采用 STM32 主控芯片实现蓝绿光频闪与红外光常亮的混合驱动模式,接收端通过 IV 转换电路与 32 位 AD 模块采集前向/后向散射信号,并经 STM32 主控芯片串口传输至计算机进行后续处理。烟雾源采用符合 GB 29837—2013 标准的规范棉绳,通过控制阴燃方式产生稳定烟雾。试验均在黑色封闭暗箱中进行,以保证数据的可重复性和环境一致性。

在试验流程方面,为确保不同结构下试验条件一致,所有测试均采用相同的发光电流、驱动参数和器件布置方案。在无遮光板结构和折线形遮光板结构两种条件下,分别完成发射与接收器件的角度布置、电路模块调试及通信接口配置,确保光路结构与系统参数一致。烟雾发生过程保持火源位置固定,棉绳材料在面积、厚度与形状上保持一致,以提升试验数据的可比性与科学性。每组试验持续时间为 60 s,并重复三次以排除偶然性误差。在采集过程中,两个接收通道分别记录红外与蓝绿波段的散射信号变化,并计算红外/蓝光(T_1)与红外/绿光(T_2)的响应功率比值,用于评估不同波长组合下的烟雾响应特性。为避免试验的偶然性,每种试验工况重复 3 次试验。

3 试验结果与分析

为验证所提出遮光结构的有效性,对比测试了在无遮光板与采用折线形遮光板结构两种条件下接

表 2 棉绳气溶胶粒径特征参数

Table 2 Characteristic parameters of aerosol particle size from cotton rope

名称	颗粒物直径 D_p/nm	折射率 m	几何标准差 σ	几何平均直径 D_0/nm
棉绳	243.3	1.55 + 0.02i	1.5 ~ 1.9	221

收器的电压输出,结果如图10所示。图10(a)展示了在无遮光板条件下接收器的电压输出情况,可以看到,即使在无烟状态下,950 nm 红外接收通道仍存在较强的背景响应,静态电压维持在约3.1 V,表明系统受到较强的环境干扰。注入烟雾后,由于原始背景信号已较高,烟雾所引起的散射扰动被显著掩盖,导致电压变化不明显。图10(b)展示了加入优化后的折线形遮光结构后接收器的响应,相比之下,在无烟状态下,950 nm 通道的背景电压显著降低,平均仅约为0.06 V。当有烟雾进入时,探测器的输出电压波动明显增强,烟雾扰动带来的响应更具辨识度,表明遮光结构可以抑制光源发射与接收的角度原因造成的背景光干扰,提升了信噪比。

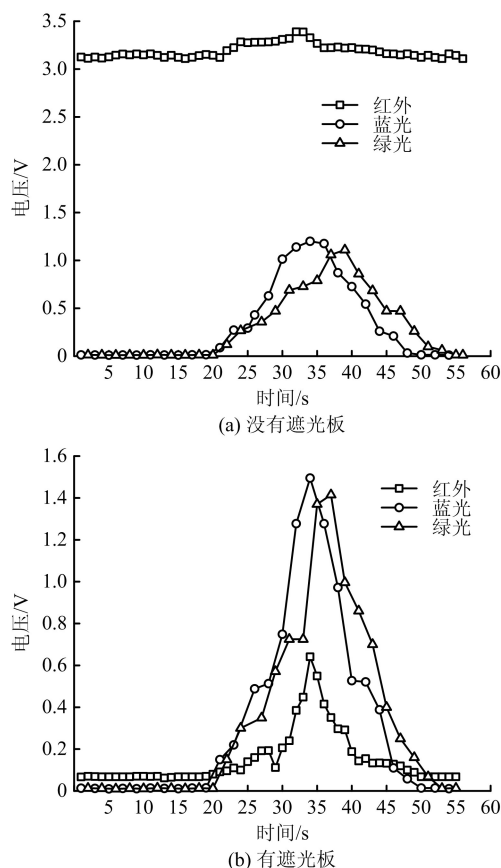


图10 多波长烟雾探测器电压变化对比

Fig. 10 Comparison of voltage changes in multi-wavelength smoke detectors

为了进一步对比遮光结构对 T 变化的影响,获得更稳定的指标,选取变化趋势明显的 25 ~ 45 s 区间计算平均 T ,见图11。图11(a)为无遮光板条件下的 T 变化曲线,尽管数值波动较大,但主要由背景信号主导,烟雾特征信号易被掩盖,25 ~ 45 s 内平均 T 为 1.2。相对而言,图11(b)中加入遮光结构后, T

整体显著降低,且波动范围收敛,表明背景光被有效抑制。25 ~ 45 s 内的 T 平均约为 0.35,相较无遮光结构下降一个数量级以上,更能真实反映烟雾扰动对光信号的影响。

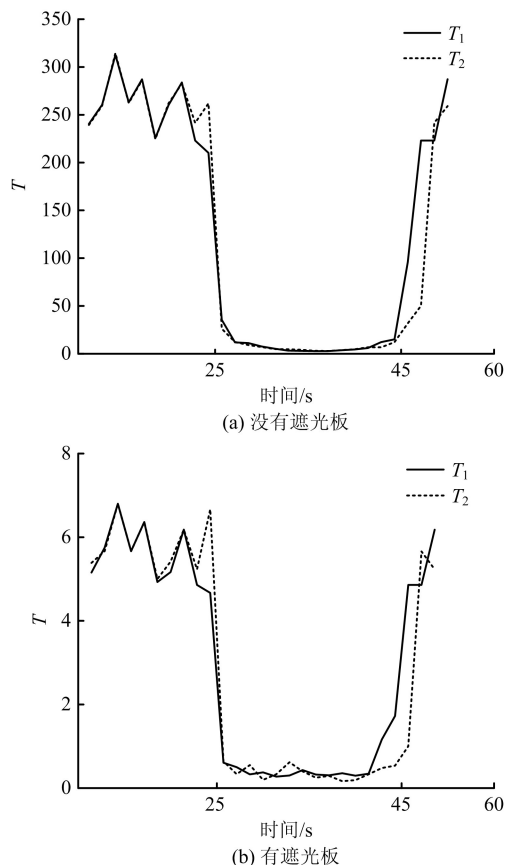


图11 多波长烟雾探测器 T 对比

Fig. 11 Comparison of T for multi-wavelength smoke detectors

图12将试验中获得的变化趋势明显的 25 ~ 45 s 区间的 T 代入索特平均粒径计算公式进行反演,

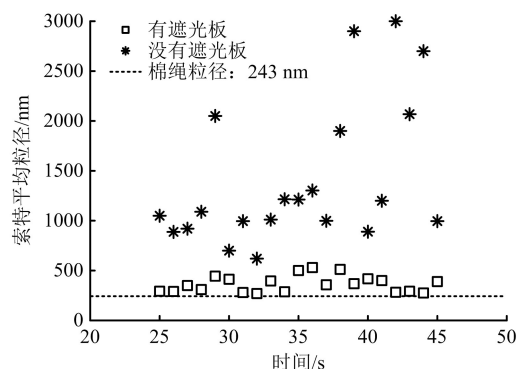


图12 有无遮光板条件下的索特平均粒径对比

Fig. 12 Comparison of Sauter mean diameter with and without sunshades

结果表明:在无遮光结构下,因背景信号大幅干扰,导致反演出的索特粒径明显偏离实际值;而采用遮光结构后,计算结果与实际棉绳烟雾的粒径更为接近,验证了系统测量准确性的提升。

综上所述,试验结果验证了仿真分析的合理性。无遮光结构下红外接收通道长时间工作在高电压状态(约 3 V),不仅易导致信号饱和、降低动态响应范围,甚至存在长期损坏器件的风险。同时,过强的背景光也会掩盖真实的烟雾信息,影响测量准确性。而优化后的遮光结构有效降低了背景响应,提高了探测器对烟雾散射变化的灵敏度和抗干扰能力,为实际应用提供了支持。

4 结 论

本文围绕多波长烟雾探测器的结构光学设计,提出了一种折线形遮光板光学腔室优化方案。对 ABS、PC 及金属材料在波长下的遮光性能进行了建模分析,结果表明黑色 ABS 材料在遮光效果、加工可行性和结构稳定性之间取得较好平衡,适合作为光学腔室的构造材料。优化后的遮光结构在无烟条件下显著抑制了背景辐照度,使无烟状态下接收器辐照度由原设计的 94.23 W/m^2 降至 0.524 W/m^2 ,同时保持了有效探测区域的完整性。最后通过对比试验验证了遮光结构对三波长烟雾探测器性能的影响。

本文从材料选型、结构设计到光学响应仿真进行了系统分析,为多波长探测器在抗干扰能力、信号稳定性及制造实现方面提供了理论参考与设计依据。然而,本研究仍主要是验证有无遮光板下的效果,只使用了棉绳进行试验和仿真,后续可结合多波长探测器与其他材料进行测试,进一步验证结构优化的通用性与工程适应性。

参考文献(References):

- [1] 丁怀对,刘申友,许玉坤,等. 基于运动块追踪的視頻烟雾探测方法[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 96-100.
DING H D, LIU S Y, XU Y K, et al. Novel video smoke observation and detection method based on the motion track block [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4): 96-100.
- [2] 袁洁,袁伟,贾阳,等. 一种基于纹理特征的主动红外烟雾识别方法[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 86-89.
YUANG J, YUANG W, JIA Y, et al. Renovated identifying method of the active infrared smoke based on the texture feature analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 86-89.
- [3] 金鑫. 一种立式多光路双向散射感烟探测器迷宫: 201910317269.5 [P]. 2019-07-12.
JIN X. A vertical multi-optical path bidirectional scattering smoke detector maze: 201910317269.5 [P]. 2019-07-12.
- [4] 孙峻岭. 立式双向散射感烟探测器腔室: 200510104607 [P]. 2007-06-27.
SUN J L. Vertical bidirectional scattering smoke detector chamber: 200510104607 [P]. 2007-06-27.
- [5] 项建胜,何俊华. Mie 光散射理论的数值计算方法[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 363-366.
XIANG J S, HE J H. Numerical calculation of Mie theory [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 363-366.
- [6] LEE C H, LEE H S, KIM S K. A study on response characteristics of photoelectric type smoke detector chamber due to dust and wind velocity [J]. Fire Science and Engineering, 2017, 31(1): 50-57.
- [7] ASPEY R A, BRAZIER K J, SPENCER J W. Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis [J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(5): 1050-1056.
- [8] 许如臣. 一种三波长光电式烟雾检测的方法及传感器: 202010067273.3 [P]. 2020-05-19.
XU R C. A method and sensor for three-wavelength photoelectric smoke detection: 202010067273.3 [P]. 2020-05-19.
- [9] 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.
- [10] WEGRZYNSKI W, ANTOSIEWICZ P, FANGRAT J. Multi-wavelength densitometer for experimental research on the optical characteristics of smoke layers [J]. Fire Technology, 2021, 57(5): 2683-2706.
- [11] ZHENG R, ZHANG D, LU S, et al. Discrimination between fire smokes and nuisance aerosols using asymmetry ratio and two wavelengths [J]. Fire Technology, 2019, 55(10): 1753-1770.
- [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, 2017.
DENG T. Research on multi-parameter fire detection methods based on dual wavelengths [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [13] 肖骁. 基于多波长的颗粒物光学传感方法研究及其应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
XIAO X. Research on multi-wavelength optical sensing

- methods for particulate matter and their applications [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [14] 杜晓雨. 基于光散射的火灾烟雾颗粒形状和粒径分布联合传感方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- DU X Y. Research on a joint sensing method for fire smoke particle shape and particle size distribution based on light scattering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [15] LI K Y, LIU G, YUAN H H, et al. Dual-wavelength smoke detector measuring both light scattering and extinction to reduce false alarms [J]. *Fire*, 2023, 6 (4): 140.
- [16] LIN M X, ZHU M, LIU H, et al. General aerosol Sauter mean diameter measurement for spherical and non-spherical particles based on low-complexity scattering algorithm [J]. *Measurement*, 2024, 226: 114104.
- [17] KULKARNI P, BARON P A, WILLEKE K. *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications* [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] SCHNEIDER J, WEIMER S, DREWNICK F, et al. Mass spectrometric analysis and aerodynamic properties of various types of combustion-related aerosol particles [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2006, 258(1/2/3): 37–49.

Optimized design of optical chamber for multi-wavelength fire smoke detector

WANG Haibin^{1,2}, LONG Xiuhuang², LI Jinhao², DONG Yucheng², LIU Quanyi^{1,2}

(1 Sichuan Provincial Key Laboratory of Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering, Guanghan 618307, Sichuan, China;
2 Civil Aviation Safety Engineering College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: To address issues such as optical interference caused by scattering angles in multi-wavelength smoke detector applications, this study proposes an optimized approach for a three-wavelength optical chamber. A 3D optical simulation platform was constructed to evaluate the light-blocking performance of common electronic materials, including Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polycarbonate (PC), and metal. Based on the simulation results, a matching model was established between the emitter-receiver angle and the geometric parameters of obscura barriers. A zigzag-obscura barrier structure was proposed to balance light-blocking effectiveness with smoke signal preservation capabilities. Simulation results demonstrated that black ABS material exhibited the best overall performance, combining strong light absorption, good manufacturability, and low cost. After structural optimization, the receiver irradiance in the smoke-free condition was reduced from the original design value of 94.23 W/m^2 to 0.524 W/m^2 , while the effective detection zone remained unaffected. Compared to long or short straight barriers, the zigzag-obscura barrier achieved superior background light suppression without excessively compressing the scattering signal region. To validate the feasibility of the optimized chamber, experimental research was conducted using standard smoldering cotton rope smoke as the aerosol source. An experimental platform was built incorporating three-wavelength LEDs (450 nm blue, 550 nm green, and 950 nm infrared) with separate receiving channels for visible and infrared light. Receiver voltage and Power Transfer Ratio (PTR) metrics were recorded both without obscura barriers and with the optimized barrier structure. Experimental results showed that the infrared receiving channel exhibited a high static voltage (approximately 3.1 V) without obscura barriers, which masked smoke-induced signal fluctuations. The optimized structure reduced this background voltage to approximately 0.06 V, significantly improving the identification of smoke signals. Further PTR analysis revealed that the optimized chamber effectively suppressed fluctuations, enhancing measurement stability. Sauter Mean Diameter (SMD) values derived from data acquired with this optimized structure more closely reflected the actual aerosol particle size distribution, while data obtained without obscura barriers exhibited substantial deviations. In conclusion, the proposed optimization method for the optical chamber effectively increases the signal-to-noise ratio, enhances particle size measurement accuracy, and reduces the risk of detector saturation. This research provides a quantitative design basis for material selection and structural optimization in multi-wavelength smoke detection systems.

Key words: safety engineering; smoke detection; optical chamber; light-shielding structure; optical simulation