

文章编号:1004-5309(2016)-00224-04

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2016.04.10

双波长气溶胶粒径传感方法及其火灾烟雾探测器

王 殊, 邓 田*, 窦 征, 朱 明

(华中科技大学电子信息与通信学院, 武汉, 430074)

摘要:提出了双波长光散射气溶胶粒径传感方法,设计实现了采用该方法的双波长火灾烟雾探测器。使用短波长和长波长的双波长光源,通过计算其光功率比值,利用其与中值粒径的关系函数获得气溶胶粒径,并根据不同粒径下的气溶胶浓度分别给出大小不同粒径的火灾烟雾或干扰气溶胶提示。因而,不仅可以有效区分大小不同粒径的火灾烟雾气溶胶,以正确探测火灾,而且能够识别微米级的大粒径干扰粒子,降低火灾误报率,可以应用于飞机等航空器空中密闭的特殊环境。

关键词:烟雾探测;气溶胶粒径;双波长

中图分类号: X93; X932

文献标识码: A

0 引言

飞机等航空器是一个处于高空的小型密闭空间的特殊环境,装载的仪器及电气设备精密复杂,存在过流过热等火灾隐患,货舱中也可能存在火灾危险且难以人工监测。由于气压等原因,飞机火灾的燃烧状态、燃烧产物以及对火情预警的性能要求等均与地面火灾有所不同。特别是误报警难以人工确认,一旦发生火灾会造成远高于地面的重大人员财产损失,因此亟需开发适用于飞机特殊需求的低误报率的火灾探测系统。火灾早期阶段最明显的特征产物是热解气溶胶,NASA的空间测量结果表明,燃烧烟雾气溶胶大都处于亚微米量级,集中分布在100 nm~500 nm之间^[1],而非火灾气溶胶如灰尘和水蒸气等粒径均大于1 μm ^[2]。光散射型火灾烟雾探测是火灾早期探测的主要方法,常用的红外光电烟雾探测器对300 nm以下的粒子敏感度较低,对大于1 μm 的干扰粒子响应却很强,因此并不能有

效地用于探测飞机火灾隐患并易产生误报警。普通的双波长光电烟雾探测方法可以大致区分气溶胶粒径是否大于1 μm ^[3],但不能传感粒径的具体大小。因此虽然可以减少非火灾气溶胶的误报警,但对均衡响应大小粒子烟雾气溶胶仍有不足。

我们在双波长光电烟雾探测技术研究的基础上,考虑到飞机等航空器烟雾探测的需要,提出了一种双波长光散射气溶胶粒径传感方法,并设计实现了利用该方法的双波长光散射火灾烟雾探测器。该方法使用短波长和长波长的2种传感光源,通过计算其光功率比值获得气溶胶粒径,并根据不同粒径下的气溶胶浓度分别给出大小不同粒径的火灾烟雾或干扰气溶胶提示,能够在有效探测大小不同粒子的火灾烟雾的前提下,抑制微米量级的灰尘、纤维、水蒸气等大颗粒干扰源,减少了误报警。

1 双波长气溶胶粒径传感方法

我们已经知道,粒子大小对判断火灾与非火灾

收稿日期:2016-01-04;**修改日期:**2016-07-07

作者简介:王殊(1956-),男,回族,博士,华中科技大学电子信息与通信学院教授,博士生导师,长期从事烟雾和气溶胶传感、信号处理和超声气体检测技术研究。

通讯作者:邓田,E-mail:Bedivere@hust.edu.cn

气溶胶具有重要作用。气溶胶粒径有不同的度量方法,中值粒径不仅是度量气溶胶粒径的方法之一,而且还可以在在一定程度上反映粒子粒径的分布情况。物质燃烧生成的气溶胶粒径的数量分布通常都可以用对数正态分布函数描述,因而可以用中值粒径与标准差这两个参数表征该分布,通常燃烧物质气溶胶的标准差为 1.6~1.9,因此分布函数主要受中值粒径影响^[4]。

根据气溶胶光学 Mie 散射模型^[5-7],在某一散射角上给定接收孔径内被探测气溶胶的散射光功率 P_n 为:

$$P_n = C_n \int_0^{\infty} f(d) P_{\lambda}(d, \lambda, m) dd \quad (1)$$

其中 C_n 为气溶胶的质量浓度; $f(d)$ 为粒径分布函数; $P_{\lambda}(d, \lambda, m)$ 为单个粒子 Mie 散射光强。 d 为粒径,对于对数正态分布的 $f(d)$ 可用中值粒径表达 d 。 λ 为入射光波长,这里为短光波长或长光波长。 m 为粒子折射率。

由式(1)中散射光功率 P_n 正比于粒子质量浓度 C_n 可以看出,气溶胶散射光功率与气溶胶浓度成正比关系。如果使用短波长,可以定义式(1)的 P_n 为 P_S ,对于长波长为 P_L 。

在散射角、接收孔径和光短波长、光长波长均确定的情况下,且在同样质量浓度和折射率的气溶胶中,粒子的质量浓度 C_n 相同,因此短波长光散射功率 P_S 和长波长光散射功率 P_L 的比值 R 为:

$$R = \frac{P_S}{P_L} = \frac{\int_0^{\infty} f(d) P_{\lambda}(d, \lambda_S, m) dd}{\int_0^{\infty} f(d) P_{\lambda}(d, \lambda_L, m) dd} \quad (2)$$

其中 λ_S 和 λ_L 分别是光短波长和长波长。

显然式(2)是光散射功率比值 R 与中值粒径 d 的函数,因此通过 R 的大小与 d 的对应关系即可得到气溶胶的中值粒径。根据公式(2)对颗粒物的散射行为进行了仿真。通过遍历筛选不同角度和波长组合的比值与中值粒径的关系,获得蓝光和红外光功率比值与中值粒径的单调对应关系。如图 1 所示,当探测器采用 460 nm 短波长的蓝光, 960 nm 长波长的红外光,散射角度分别为 145°和 85°时,式(2)的 R 与中值粒径 d 的关系是单调递减的。

因此,当气溶胶粒径服从对数正态分布和分布的标准差在 1.6~1.9 范围内时,在一定散射角度上粒子对两种波长的光散射功率之比,与气溶胶中值

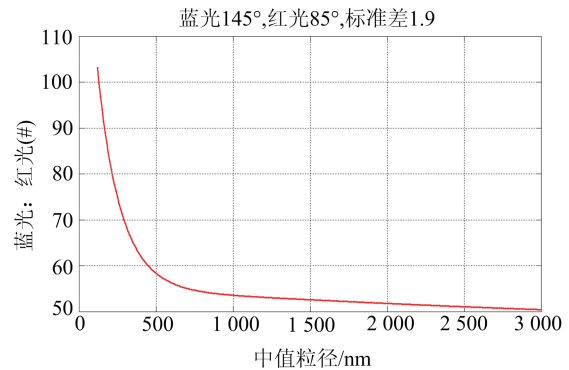


图 1 蓝光和红外光功率比值与中值粒径关系

Fig. 1 Median diameter versus ratio of dual wavelength scattering signal

粒径直接对应,由此可以得出气溶胶中值粒径数值,并以此作为传感器的气溶胶中值粒径输出信号。同时,由于气溶胶浓度与散射光功率直接对应,因此把两个波长的散射光功率作为传感器的气溶胶浓度输出信号。

2 双波长火灾烟雾探测器

根据上节双波长光散射气溶胶粒径传感方法,我们设计实现了利用该方法的双波长光散射火灾烟雾探测器。在光源的选择上,在优先满足气溶胶粒径传感要求的前提下,考虑市场可得性与成本,根据粒子 Mie 散射理论,短波长采用 460 nm 的蓝光 LED,长波长采用 960 nm 的红外光 LED,其探测范围在 50 nm~2700 nm,考虑到接收器件的响应范围,实际有效范围大约在 100 nm~1500 nm,仍覆盖了火灾烟雾和部分非火灾干扰物粒径。通过仿真优化,我们构造了 2 种探测器,一种为双前向结构,选择蓝光散射角度 135°,红外光散射角度为 135°。另一种为前后向结构,选择蓝光散射角度 145 度,红外光散射角度为 85°,探测器结构如图 2 所示,图 2 中略去电路和未标出编号的部分,其余部分:4 为光室端面、5 为接收管腔、6 为第一发射管腔、10 为迷宫、11 为防虫网、12 为外罩、13 为进烟间隔、14 为光室、15 为进烟口。

探测器工作时将两个波长的散射光功率作为传感器的气溶胶浓度输出信号,气溶胶的中值粒径则由两个波长散射光功率的比值 R 确定,由图 1 可知,前后向探测器中蓝光前向接收的光信号强度远高于红外后向的光信号强度。为了均衡灵敏度,在实际设计中需要调整不同波长信号的增益,这将引

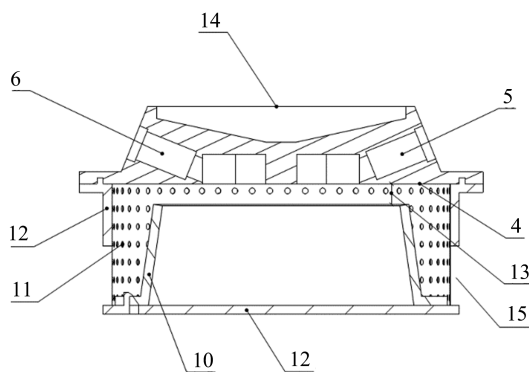


图 2 双波长探测器结构

Fig. 2 Structure schematic of the detector

起 R 的改变, R 与探测器的实际比值 R_D 可以用式 (3) 表示:

$$R = T \cdot R_D \quad (3)$$

其中 T 是比值转换系数, 它与探测器不同入射光的发光效率, 收光效率, 放大倍数等因素有关。

当两个波长的输出光功率中至少一个超过一定门限时, 即气溶胶达到一定浓度, 同时根据蓝光和红外光散射功率比值 R 与气溶胶中值粒径 d 的关系函数输出气溶胶粒径, 按照粒径大小和气溶胶浓度分别给出小粒子火灾烟雾、大粒子火灾烟雾、大粒子干扰气溶胶等不同的报警或提示信息。

探测器实物如图 3 所示。



图 3 双波长火灾烟雾探测器

Fig. 3 Picture of dual wavelength smoke fire detector

3 实验

我们对双波长火灾烟雾探测器进行了试验, 首先确定报警粒径门限, 通常把气溶胶中值粒径 $1 \mu\text{m}$ 作为火灾烟雾和灰尘、水蒸气等干扰的分界线, 由于

使用场合各异, 此分界线可以在一定范围内变化, 这里我们设定为 $1 \mu\text{m}$ 。其次确定火灾烟雾大小粒子门限, 根据我们对燃烧物质粒子的试验^[8], 选定 500 nm 为区分火灾烟雾粒径大小的界限值。粒径界限值可根据不同环境进行调整, 一般不超过 $1 \mu\text{m}$, 探测器对气溶胶浓度报警门限值也可以根据不同场合对灵敏度的要求设定。根据探测器响应, 确定该探测器比值转换系数 T 为 27。

我们试验了探测器对正庚烷试验火的响应, 其光功率输出比值如图 4 所示, 去除试验前后气溶胶浓度未达到门限时的比值, 可以看到试验期间该前后向探测器比值 R_D 稳定在 2.5 左右 (图 4 虚线)。

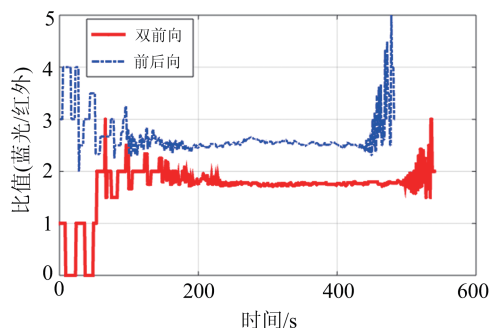


图 4 探测器对正庚烷的光功率比值

Fig. 4 Ratio of dual wavelength scattering response to *n*-heptane

可以得出此时 $R=67.5$, 从图 1 得到对应中值粒径在 330 nm 左右, 属于小粒子火灾烟雾, 也符合正庚烷试验火粒径分布。

我们也对探测器进行了灰尘实验, 采用 ISO12103-1 A2 标准灰, 粒径分布范围 $0.97 \mu\text{m} \sim 176 \mu\text{m}$, 探测器输出比值如图 5 所示, 其中该探测器比值 $R_D \leq 2$ (图 5 虚线), 实际灰尘信号期间 R_D

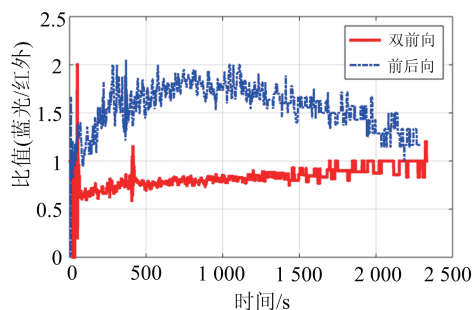


图 5 探测器对标准灰的光功率比值

Fig. 5 Ratio of dual wavelength scattering response to standard dust

约为 1.7, 则 $R=45.9$ 。由图 1 可知, 此时探测器输出粒径应该远大于 $1\ \mu\text{m}$, 符合该标准灰粒径分布。

图 4 和图 5 中还有双前向探测器的输出比值(实线), 也可以得到类似前后向探测器的结果, 此处不赘。

上述试验表明, 从该探测器对正庚烷试验火和灰尘的光响应比值信号, 按照式(2)的对应关系, 说明其可以有效区分火灾和非火灾气溶胶大小粒径。

4 结论

本文提出了双波长气溶胶粒径传感方法并设计实现了双波长火灾烟雾探测器, 通过计算短波长光和长波长光对气溶胶浓度的响应比值, 获得了该比值与气溶胶粒径的关系模型。由于该方法不仅可以

通过光散射信号得到气溶胶浓度, 而且可以通过两种波长的散射光功率的比值与气溶胶中值粒径的函数关系得到被探测气溶胶的中值粒径数值, 从而判断并发出火灾烟雾粒径大小的报警信号, 可以在飞机等航空器上根据烟雾不同种类采取针对性的合理消防措施。对该探测器的火灾烟雾和灰尘实验表明, 其区分粒径的方法有效。

此外, 此类探测器实际实现时, 短波长光可以采用波长为 $280\ \text{nm} \sim 490\ \text{nm}$ 的紫外至蓝光, 甚至绿光光源, 长波长光可以采用波长为 $830\ \text{nm} \sim 1050\ \text{nm}$ 的红外光源, 2 种波长的散射角度既可以为双前向, 也可以是前后向结合, 都可以均衡有效地传感气溶胶大小粒径。

参考文献

- [1] Urban DL, et al. Smoke particle sizes in low-gravity and implications for spacecraft smoke detector design[R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [2] Kruell W, et al. Characterization of dust aerosols in false alarm scenarios[A]. AUBE'14[C], Duisburg, Germany, 2014.
- [3] Cole M. Aerosol characterization for reliable ASD operation[A]. AUBE'05[C], Duisburg, Germany, 2005.
- [4] 疏学明, 等. 火灾烟雾颗粒的光学散射特性研究[J]. 中国工程科学, 2005, 7(1): 45-49.
- [5] Pramod P, et al. eds. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications[M]. John Wiley & Sons, 2011.
- [6] 赵建华, 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, 21(2): 79-81.
- [7] 谢启源. 火灾烟颗粒光散射模型的研究[D]. 中国科学技术大学, 2006.
- [8] 王殊, 等. 高灵敏度蓝光烟雾探测器研究[A]. 第一届飞机防火系统学术研讨会论文集[C], 天津, 2014.

Sensing method of aerosol median diameter based on dual wavelength and its application in fire smoke detectors

WANG Shu, DENG Tian, DOU Zheng, ZHU Ming

(Huazhong University of Science & Technology, School of Electronic Information and Communications, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposes an optical sensing method to measure the median diameter of aerosols by dual wavelength scattering, and designs a fire smoke detector by this method. A short and a long wavelength incident light are applied in the detector, and the ratio of scattering signals from dual wavelengths is used to calculate the median diameter of aerosols. Besides the aerosol concentration, the median diameter of aerosols is utilized to distinguish fire smoke and non-fire aerosols. The detector triggers different levels of warning based on comprehensive analysis of the concentration and the median diameter of aerosols. Therefore, the detector with dual wavelength technology could measure the particle size of fire smokes effectively and detect a fire correctly. Furthermore, it is particularly applicable in a closed environment like a plane in the air, since its unique ability to resist the false alarms by identifying non-fire aerosols consisting of big particles in micrometers.

Keywords: Smoke detection; Aerosol size distribution; Dual wavelength