

# 火灾烟雾的多波长衰减特性研究\*

赵建华 袁宏永 范维澄 宋卫国

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽, 合肥, 230026)

**摘要** 采用多波长激光同时与火灾烟雾和非火灾气溶胶相作用, 研究了火灾烟雾对多波长激光的衰减特性, 得到了熏香烟雾和柴油明火烟雾等 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶的 3 对波长消光系数比的数值. 结果表明, 消光系数比反映了气溶胶粒子对两个波长激光衰减的相对程度, 仅与气溶胶的本质特征有关, 不同烟雾气溶胶的消光系数比的数值有明显差别.

**关键词** 火灾烟雾, 多波长, 衰减特性, 消光系数比.

## MULTI-WAVELENGTH ATTENUATION PROPERTIES OF FIRE SMOKES\*

ZHAO Jian-Hua YUAN Hong-Yong FAN Wei-Cheng SONG Wei-Guo

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** Laser lights with different wavelengths were used to study the attenuation characteristics of fire smoke through considering the laser interaction with fire smoke and non-fire aerosol at the same time. Three pairs of extinction coefficient ratio(ECR) for five kinds of typical fire smoke and non-fire aerosol, including incense smoke and diesel-flame smoke, etc., were obtained. It was shown that ECR reflects the relative extinction degree of lasers with two different wavelengths, so that ECR is only dependent on the basic characteristics of aerosols, irrespective of the concentration of aerosols. Different smoke aerosols will have evidently different ECR.

**Key words** fire smoke, multi-wavelength, attenuation property, extinction coefficient ratio.

### 引言

火灾烟雾是可燃物燃烧产生的气溶胶, 是火灾的前兆和伴随产物, 也是感烟型早期火灾探测研究的基础, 它的主要组分是可燃物燃烧产生的气相产物与掺混进来的空气, 并混杂着许多微小的固体颗粒和液滴<sup>[1]</sup>. 烟雾的物理特性主要依赖于可燃物性质和燃烧状况, 不同可燃物燃烧产生的烟雾, 其颗粒的粒径分布、平均粒径、颗粒形状、组分和浓度是不同的, 对不同波长入射光的衰减特性亦不相同.

自 20 世纪 50 年代初, 瑞士的 W. C. Jaeger 和 E. Meili 等人发明了离子感烟火灾探测方法以来, 感烟型火灾探测在火灾自动探测技术中一直扮演着重要角色, 对有效地防止火灾发生, 最大限度地减少火灾损失, 实现火灾智能防治目标起到了举足轻重的作用. 近期的研究表明<sup>[2-7]</sup>, 感烟型火灾探测技术仍

是今后火灾探测技术的方向, 只是向着更深更高层次发展. Loepfe 等人<sup>[3]</sup>研究了火灾烟雾和非火灾气溶胶的不同散射角的偏振特性, 以不同散射角的偏振度对 5 种欧洲标准试验火灾烟雾和非火灾气溶胶进行辨识和报警; Chen Yonggang 等人<sup>[4]</sup>测量了火灾烟雾中的各种气体的浓度(如一氧化碳、二氧化碳、甲烷、甲醛等)的变化, 并以烟雾中各种气体的浓度作为神经网络的输入, 实现明火、阴燃火和环境干扰的辨识和报警. 深入研究火灾烟雾的物理特性(如偏振特性、衰减特性等), 对提高感烟火灾探测技术的灵敏度和可靠性具有重要的理论价值和现实意义.

本文从可见和近红外波段选取 6 束不同波长激光, 同时与火灾烟雾和非火灾气溶胶相作用, 深入研究了火灾烟雾对多波长激光的衰减特性, 并采用两个波长的消光系数比来反映火灾烟雾粒子对两个波长激光衰减的相对程度, 避免了烟雾浓度的影响, 取

\* 中国科学院知识创新工程资助项目

稿件收到日期 2001-09-27, 修改稿收到日期 2002-03-01

\* The project supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences

Received 2001-09-27, revised 2002-03-01

得了较好的结果,可用于火灾烟雾和非火灾气溶胶的自动辨识和报警.

## 1 理论基础

### 1.1 Lambert-Beer 定律

当一束强度为  $I_0$  的单色平行光入射到悬浮的火灾烟雾或非火灾气溶胶粒子上时,由于粒子的散射和吸收作用,其出射光强度  $I$  会发生衰减,根据 Lambert-Beer 定律,入射光强度  $I_0$  与出射光强度  $I$  之间的关系为<sup>[8]</sup>

$$I = I_0 \exp(-\mu L), \quad (1)$$

式中  $I$  为透过烟雾的光强,  $I_0$  为入射光强,  $L$  为平均射线行程长度,  $\mu$  为消光系数. 消光系数  $\mu$  与气溶胶粒子的 Sauter 平均粒径  $d_{32}$ 、粒子数浓度  $N$  和消光效率因子  $Q_{ex}(\lambda, n, d_{32})$  有关,可表示为<sup>[9]</sup>

$$\mu = \frac{\pi}{4} d_{32}^2 N Q_{ex}(\lambda, n, d_{32}), \quad (2)$$

式中消光效率因子  $Q_{ex}(\lambda, n, d_{32})$  是个无量纲量.

### 1.2 消光系数比

定义任意一对波长的消光系数的比值为一对波长的消光系数比  $R_{\lambda_1/\lambda_2}$ , 由式(2)可得

$$R_{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{\mu_{\lambda_1}}{\mu_{\lambda_2}} = \frac{Q_{ex}(\lambda_1, n, d_{32})}{Q_{ex}(\lambda_2, n, d_{32})}. \quad (3)$$

在实际应用中,消光系数比  $R_{\lambda_1/\lambda_2}$  可由式(1)用两个波长的入射光强和出射光强表示,即

$$R_{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{\mu_{\lambda_1}}{\mu_{\lambda_2}} = \frac{Ln(I_0/I)_{\lambda_1}}{Ln(I_0/I)_{\lambda_2}}, \quad (4)$$

式中  $(I_0/I)_{\lambda_i}$  为波长为  $\lambda_i$  的入射光强和出射光强的比值,可通过入射光强和出射光强的间接测量,由式(4)计算得到消光系数比的值.

消光系数比  $R_{\lambda_1/\lambda_2}$  反映了气溶胶粒子对两个波长激光衰减的相对程度,仅与气溶胶粒子的本质特征(粒径分布、平均粒径和折射率)有关,避免了气溶胶粒子浓度的影响,可用此值来表征火灾烟雾和非火灾气溶胶对多波长激光的衰减.

## 2 实验方法

在实验装置测试室中,激光探测组件的配置如图1所示,在探测组件中安装6只半导体激光器,3只I型光电探测器和3只II型光电探测器,半导体激光器的波长分别为670nm、785nm、980nm、1060nm、1310nm、1550nm, I型光电探测器的接收管选用PIN硅光电二极管,响应波长为500~1000nm, II型光电探

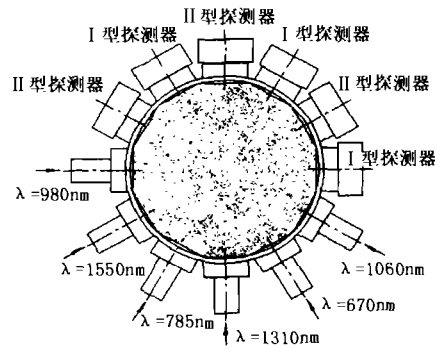


图1 激光探测组件配置图

Fig. 1 Layout of laser detection components

测器的接收管选用 InGaAs 光电二极管, 响应波长为 0.9~1.7 $\mu\text{m}$ , I型和II型光电探测器采用交叉布置, 以避免相邻探测器之间的相互影响.

火灾烟雾和非火灾气溶胶试样分别选用熏香烟雾、柴油明火烟雾、聚氨酯泡沫塑料明火烟雾、柴油和聚氨酯泡沫塑料混合烟雾以及硅酸盐水泥粉尘. 实验时将烟雾聚集到集烟罩的顶部, 待烟雾聚集到一定量时, 再将烟雾送入激光探测实验装置的测试室中, 用 670~1550nm 的 6 种不同波长激光, 同时探测测试室中的烟雾及其对入射激光的衰减. 光电探测器输出的电压信号经前置放大器放大处理后, 送入数据采集卡进行 A/D 转换, 经 A/D 转换后的数字量再送入微型计算机进行信号处理和储存.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 火灾烟雾和非火灾气溶胶的衰减响应

采用波长为 670nm、785nm、980nm、1060nm、1310nm、1550nm 的 6 束激光, 同时对熏香烟雾、柴油明火烟雾等 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶进行探测实验, 当烟雾浓度变化时, 测得 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶对 6 束不同波长激光的衰减响

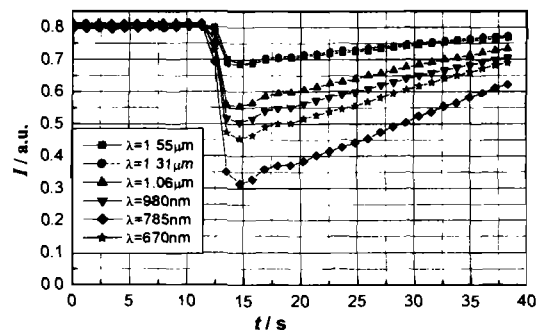


图2 熏香烟雾对激光的衰减响应

Fig. 2 Attenuation responses of incense smoke to laser

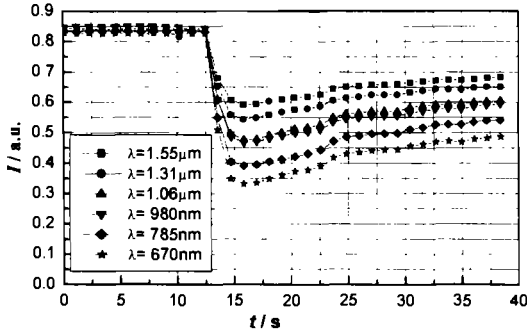


图3 柴油明火烟雾对激光的衰减响应

Fig.3 Attenuation responses of diesel-flame smoke to laser

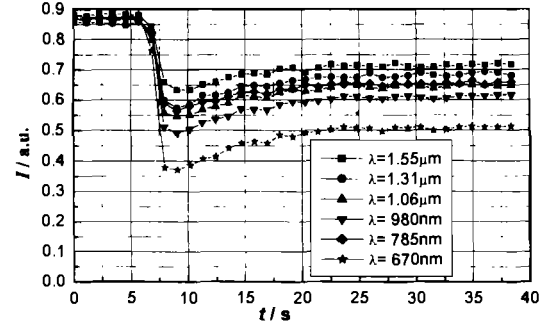


图5 柴油和聚氨酯泡沫塑料混合烟雾对激光的衰减响应

Fig.5 Attenuation responses of urethane foam and diesel flame smoke to laser

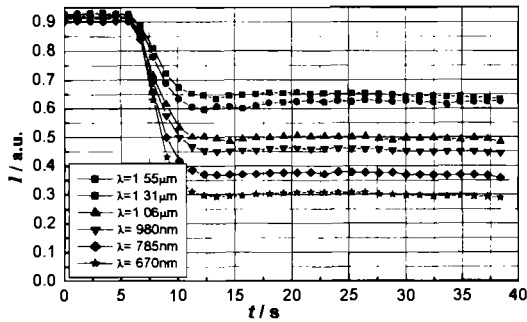


图4 聚氨酯泡沫塑料明火烟雾对激光的衰减响应

Fig.4 Attenuation responses of urethane foam flame smoke to laser

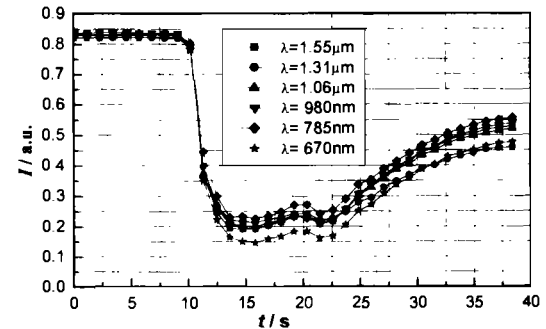


图6 硅酸盐水泥粉尘对激光的衰减响应

Fig.6 Attenuation responses of portland cement dust to laser

应随时间的变化,如图2~6所示。

由图2~6看出,熏香烟雾对波长为  $1.55\mu\text{m}$  和  $1.31\mu\text{m}$  的激光的衰减最小(响应曲线几乎重叠),对  $785\text{nm}$  的激光的衰减最大;柴油明火烟雾和聚氨酯泡沫塑料明火烟雾对6种不同波长激光的衰减呈现出相同的趋势,对波长为  $1.55\mu\text{m}$  的激光衰减最小,对  $670\text{nm}$  的激光衰减最大,其衰减与激光的波长成反比;柴油和聚氨酯泡沫塑料混合烟雾对6种不同波长激光的衰减与柴油明火烟雾和聚氨酯泡沫塑料明火烟雾对6种不同波长激光的衰减大致相同;硅酸盐水泥粉尘对波长为  $670\text{nm}$  的激光的衰减最大,对波长为  $785\text{nm}$  的激光的衰减最小,但对6种波长激光的衰减几乎相近。

### 3.2 消光系数比的变化

通过实验测得5种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶对多波长激光的衰减随时间的变化,由式(4)可得当烟雾浓度变化时,其3对波长( $1.55\mu\text{m}/1.06\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}$ 、 $1.06\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}$ )的消光系数比随时间的变化曲线。图7为熏香烟雾的3对波长的消光系数比随时间的变化曲线,实验表明

消光系数比不随烟雾浓度变化,只在一确定值附近波动。其他4种火灾烟雾和非火灾气溶胶的3对波长的消光系数比随时间的变化曲线与图7具有相同的趋势,且不同烟雾的消光系数比是不同的。实验得到的5种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶的3对波长的消光系数比的平均值如表1所示。

任意一对波长的消光系数比综合反映了气溶胶粒子对两个波长激光衰减的相对程度,如熏香烟雾的3对波长消光系数比的平均值为  $R_{1.55\mu\text{m}/1.06\mu\text{m}} =$

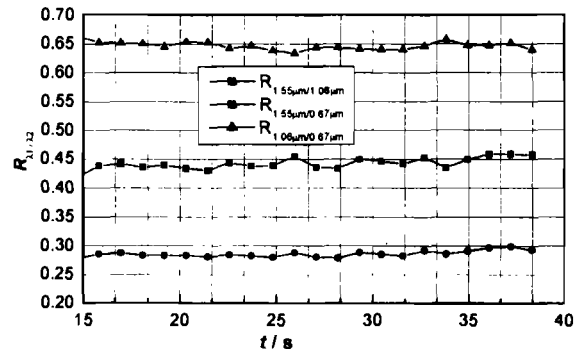


图7 熏香烟雾的消光系数比变化曲线

Fig.7 Changes of ECR of incense smoke

表 1 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶消光系数比的平均值

Table.1 Average values of ECR of five kinds of typical fire smokes and non-fire aerosols

序号	气溶胶类型	$R_{1.55\mu\text{m}/1.06\mu\text{m}}$	$R_{1.55\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}}$	$R_{1.06\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}}$
1	熏香烟雾	0.44	0.29	0.65
2	柴油明火烟雾	0.64	0.39	0.61
3	聚氨酯泡沫塑料明火烟雾	0.58	0.32	0.56
4	柴油和聚氨酯泡沫塑料混合烟雾	0.68	0.40	0.58
5	硅酸盐水泥粉尘	0.99	0.85	0.85

0.44、 $R_{1.55\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}} = 0.29$ 、 $R_{1.06\mu\text{m}/0.67\mu\text{m}} = 0.65$ ，则表明熏香烟雾对波长为  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  激光的衰减，仅为  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$  激光的 44%， $\lambda = 0.67\mu\text{m}$  激光的 29%，而对波长为  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$  激光的衰减为  $\lambda = 0.67\mu\text{m}$  激光的 65%。

#### 4 结语

本文在可见和近红外波段选取不同波长的 6 束激光，同时对熏香烟雾和柴油明火烟雾等 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶进行了探测实验，研究了火灾烟雾和非火灾气溶胶粒子对不同波长激光的衰减特性，得到了 5 种典型火灾烟雾和非火灾气溶胶的 3 对波长消光系数比的数值。实验表明消光系数比不随烟雾浓度变化，只在一确定值附近波动，且不同烟雾气溶胶的消光系数比是不同的，其平均值有明显差别，据此可实现火灾烟雾和非火灾气溶胶的自动辨识。

#### REFERENCES

- [1] Friedlander SK. *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior*. New York: Wiley, 1977
- [2] George W Mulholland, Erik L Johnsson, Marco G Fernandez, *et al.* Design and testing of a new smoke concentration meter. *Fire and Materials*, 2000, **24**:231—243
- [3] Loepfe M, Ryser P, Tompkin C, *et al.* Optical properties of fire and non-fire aerosols. *Fire Safety Journal*, 1997, **29**:185—194
- [4] Chen Y, Sathyamoorthy S, Serio M A. A new fire detection system using FT-IR spectroscopy and artificial neural networks. *Annual conference of Fire Research: Abstracts*. Gaithersburgh: National Institute of Standards and Technology, 1998. 1—2
- [5] ZHAO Jian-Hua. A study of fire smoke recognition based on multi-wavelength laser scattering. Thesis for Ph. D. Degree, University of Science and Technology of China (赵建华. 基于多波长激光散射的火灾烟雾识别研究. 博士学位论文, 中国科学技术大学), 2000
- [6] ZHAO Jian-Hua, YUAN Hong-Yong, LIU Shen-You, *et al.* Study on the detection of fire smoke by multi-wavelength laser total scattering method. *Applied Laser* (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. *应用激光*), 2001, **21**(2):79—81
- [7] ZHAO Jian-Hua, YUAN Hong-Yong, SU Guo-Feng, *et al.* Experimental study on the laser detection of concentration and particle size of smoke. *Laser and Infrared* (赵建华, 袁宏永, 苏国锋, 等. 烟雾浓度及粒径的激光探测实验研究. *激光与红外*), 2000, **30**(5):277—279
- [8] Uthe E. E. Particle size evaluations using multi-wavelength extinction measurements. *Applied Optics*, 1982, **21**(3): 454—459
- [9] McCartney E. J. *Optics of the Atmosphere, Scattering by Molecules and Particles*. New York: John Wiley and Sons, 1976