

火灾烟雾颗粒的光学散射特性研究

疏学明, 方俊, 邵荃, 袁宏永

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 从理论和实验两个方面研究了几种常见的燃烧烟雾在不同波长激光下的散射特性。从 Mie 散射理论出发, 比较几种 Mie 散射算法的优缺点, 采用一种改进的连分式算法对火灾烟雾颗粒的散射光强分布进行计算, 得出不同粒径大小和波长下光强分布图。结合理论计算, 设计一套实验装置, 测量并计算在不同角度下 3 种烟雾颗粒和面粉气溶胶散射光的相对光强比, 实验测量值与理论计算值吻合较好。研究结果表明不同种类烟雾散射光相对光强比互不相同, 火灾烟雾与非烟雾气溶胶差距较大, 从而表明散射光相对光强比是区分不同烟雾特定的物性参数, 为火灾烟雾探测技术发展提供理论依据。

[关键词] 火灾烟雾; Mie 散射; 算法; 相对光强比

[中图分类号] TK121 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)01-0045-05

1 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。“烟为火始”, 烟雾作为火灾探测的基础参量, 是火灾探测研究的基础内容。对火灾中产生的各种烟雾的物理特性, 尤其是对激光的散射特性进行深入研究是火灾烟雾探测研究的重要方向。

火灾烟雾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^[1,2]。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、组分和浓度等参数都不相同, 对入射光的散射和衰减特性也不相同, 因此, 设计一套烟雾散射装置, 对不同燃烧烟雾和非火灾气溶胶的散射特性进行深入的研究, 可为火灾烟雾探测技术发展提供理论指导。

火灾烟雾颗粒的散射特性能从米氏 (Mie) 散射理论中得到很好的解释, 但是, 由于 Mie 散射

理论的复杂性, Mie 散射系数的计算一直是个难点, 在火灾探测中需要找出一种计算准确快速、适用范围广的算法, 以提高火灾报警系统的可靠性和灵敏度, 达到早期准确报警的目的。

2 理论研究

光散射是指由于介质中的微粒对照射光束产生散射从而使光波偏离原来的传播方向而向四周散射的现象, 其物理本质是光波的电场与介质分子相互作用的结果^[3,4]。对于不均匀介质, 在各个方向上都会产生散射光, 散射光强大小与入射光的光强及波长、颗粒的几何尺寸及折射率、接收方向及距离等多个因素有关。

2.1 Mie 散射

火灾烟雾是由大量不均匀的颗粒组成, 其颗粒尺寸大都在几十纳米到几十微米之间^[1], 不同可燃物生成的烟雾颗粒粒径不同。由于火灾烟雾颗粒的粒径较小, 其光散射类型属于 Mie 散射^[5,6], Mie 散射理论是对处于均匀介质中的各向同性的单

[收稿日期] 2004-02-20

[基金项目] 九七三国家重点基础研究发展规划资助项目 (2001CB409608); 奥运科技专项 (2001BA904B10) 资助项目

[作者简介] 疏学明 (1970-), 男, 安徽枞阳县人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生, 工程师

个介质球在单色平行光照射下的麦克斯韦方程边界条件下的严格数学解,适用于均匀媒质中任意直径和任意成分均匀介质的球。

Mie 散射计算的核心是 Mie 散射系数 a_n 和 b_n , 它们的计算可以由下式得到:

$$a_n = \frac{\psi_n(a)\psi'_n(ma) - m\psi'_n(a)\psi_n(ma)}{\xi_n(a)\psi'_n(ma) - m\xi'_n(a)\psi_n(ma)} \quad (1)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(a)\psi'_n(ma) - \psi'_n(a)\psi_n(ma)}{m\xi_n(a)\psi'_n(ma) - \xi'_n(a)\psi_n(ma)} \quad (2)$$

其中 ψ_n 和 ξ_n 函数的表达式如下:

$$\psi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(z) \quad (3)$$

$$\xi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} H_{n+1/2}^{(2)}(z) \quad (4)$$

其中 $J_{n+1/2}(z)$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}(z)$ 分别是半奇阶的第一类贝塞尔函数和第二类汉克尔函数, $z = a$ 或 $z = ma$; a 为颗粒的尺寸参数 ($a = \pi d/\lambda$), m 是粒子相对于周围介质的折射率 ($m = n - ik$)。

尽管 Mie 散射理论早在 1908 年就已提出,但是任意大小和折射率的球形粒子散射场的精确计算近些年来才成为现实,主要原因是对 Mie 理论结果直接编程会导致严重的计算错误^[7,8], 这尤其表现在复变量贝塞尔函数的计算上,国外有许多学者发表了对 Mie 散射的数值解法,如 1968 年的 Dave 算法,1976 年的 Lentz 连分式算法和 1980 年 Wiscombe 的倒推算法等。所以,对 Mie 散射系数计算必须要找出一种准确快速、计算适用范围广的算法,还须借助于电子计算机才能进行。

通过对几种算法的深入比较,我们会发现各自具有不同的优缺点: Dave 算法具有运算速度快的优点;但是,如果折射率虚部足够大时,计算是高度不稳定的,而且 Dave 算法无论采用向前还是向后递推,都将有舍入误差的积累,这使得 Dave 算法只能对一般的 Mie 参数进行有效的计算,而对某些情况如大粒子或吸收率高的粒子,即使采用双精度也会溢出。

连分式算法能在几乎全部有实际意义的参数下进行而不溢出,算法占用内存少,用连分式计算每一步都是独立的,与前后项的准确性没有关系,不存在不稳定、发散等问题,适用范围广;但是,此算法的运算速度比较慢。

修正倒推算法是从 Dave 后推算法中演变而来,继承了 Dave 算法中时间复杂度较小的优点,运算速度快,稳定性好;但仍然无法完全克服 Dave 算

法的缺点。因为它依旧使用了递推关系式,依旧有舍入误差和占用内存大、使用范围小等缺陷。

2.2 改进的连分式算法

针对连分式算法的特点,多位学者^[7,9,10]采用不同的方法对此算法进行改进,有提高计算精度,也有提高运算速度的。作者采用一种改进的连分式算法来计算 Mie 散射系数及散射光强分布,它具有精度高、运算速度较快以及适用范围广等优点。首先对 Mie 散射系数 a_n 和 b_n 进行简化:

$$a_n = \frac{[A_n(ma)/m + n/\alpha] \operatorname{Re}[\xi_n(\alpha)] - \operatorname{Re}[\xi_{n-1}(\alpha)]}{[A_n(ma)/m + n/\alpha] \xi_n(\alpha) - \xi_{n-1}(\alpha)} \quad (1')$$

$$b_n = \frac{[A_n(ma)/m + n/\alpha] \operatorname{Re}[\xi_n(\alpha)] - \operatorname{Re}[\xi_{n-1}(\alpha)]}{[A_n(ma)/m + n/\alpha] \xi_n(\alpha) - \xi_{n-1}(\alpha)} \quad (2')$$

式中, Re 为取实部符号,关键是计算 A_n 值:

$$A_n(ma) = -\frac{n}{ma} + \frac{J_{n-1/2}(ma)}{J_{n+1/2}(ma)} \quad (5)$$

根据文献^[9], $J_{n-1/2}(z)/J_{n+1/2}(z)$ 可写成连分式形式 (这里 $z = ma$):

$$J_{n-1/2}(z)/J_{n+1/2}(z) = [a_1, a_2, \dots, a_p] \quad (6)$$

式中 $a_l = (-1)^{l+1} \left(n + l - \frac{1}{2}\right) z^{-1}$, $l = 1, 2, \dots, p$, 阶数 p 由计算 $J_{n-1/2}(z)/J_{n+1/2}(z)$ 的精度要求来确定:当某个 p 阶分子与分母因子在所要求的精度下相等时,即 $[a_p, \dots, a_1] = [a_p, \dots, a_2]$ 时,计算就可停止。因为先确定了循环参量 P 减少了循环次数,所以时间复杂度大大减少。运算速度也就大大提高了,在单精度下运算的速度提高了 1 倍,在双精度下运算则快了 2 倍。此算法在火灾探测报警中有很好的应用前景。

2.3 计算结果

根据资料^[11,12]和 TSI 仪器测试烟雾颗粒粒径的结果,选取理论计算参数如下:棉绳的粒径系数 $\alpha = 0.9 \sim 1.0$, 榉木的粒径系数 $\alpha = 0.8 \sim 0.9$, 檀香的粒径系数 $\alpha = 0.6 \sim 0.7$, 在波长 $0.537 \mu\text{m}$ 时,烟雾的折射率 $m = 2.74 - 0.83i$, 在波长 $0.632 \mu\text{m}$ 时,折射率 $m = 2.76 - 1.02i$, 根据此算法编写运算程序,计算结果如图 1 和表 1 所示。

3 实验研究

实验的目的是通过对几种火灾烟雾及非烟雾气溶胶粒子进行多角度、同区域、同步测量,提取不同角度上的散射光强值,与理论计算结果进行较,

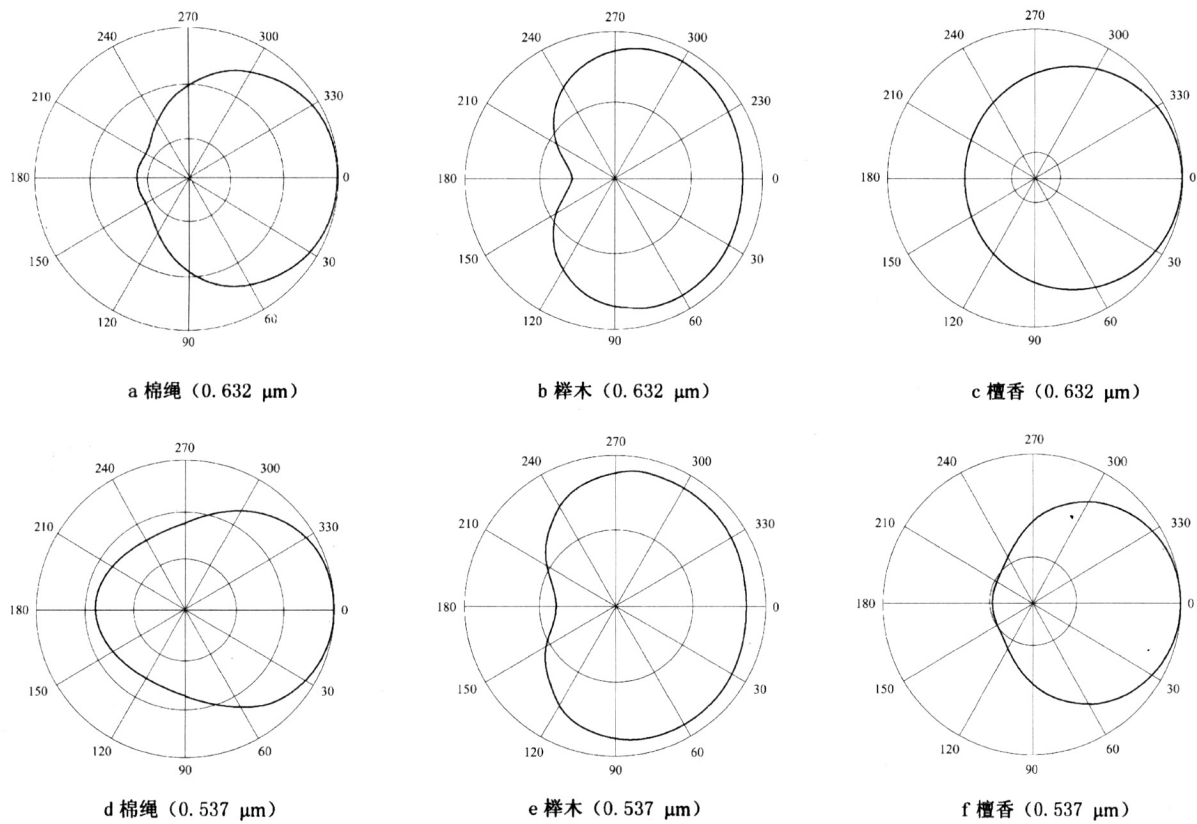


图 1 不同粒径参数的烟雾颗粒散射光强分布图

Fig.1 Distribution of scattering intensity of smoke particles in different parameters

表 1 3 种燃烧烟雾颗粒相对光强比的理论计算值

Table 1 Calculation values of relative ratio of scattering intensity of three type smoke

波长/ μm	棉绳	榉木	檀香
I_{60}/I_{90}	2.055~2.221	1.533~1.779	1.141~1.283
I_{120}/I_{90}	0.857~0.943	0.716~0.754	0.887~0.921
I_{60}/I_{90}	1.541~1.626	1.254~1.356	2.118~2.317
I_{120}/I_{90}	0.633~0.719	0.807~0.977	0.854~0.916

以验证计算结果的可靠性。

3.1 实验装置

采用如图 2 和图 3 所示的实验装置，由 3 台 CCD 摄像机、2 束不同波长激光 ($0.537 \mu\text{m}$ 和 $0.632 \mu\text{m}$)、实验烟箱、烟雾粒子探测腔、稳压电源、图像采集卡和计算机组成。

在与激光源成 60° 、 90° 、 120° 的位置摆放上 3 台 CCD 摄像机，调试测试程序使其能同时、同区域采集散射光强信息；三台 CCD 摄像机正对区域均为腔体的中心，探测腔为近似黑箱，不漏光、不

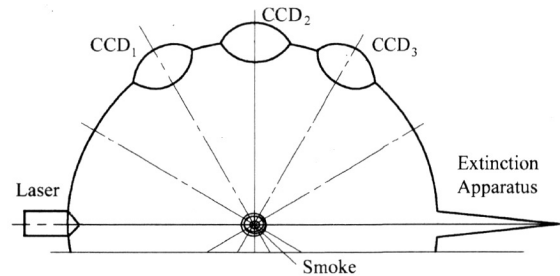


图 2 激光散射烟雾探测装置示意图

Fig.2 Schematics of lase scattering detection

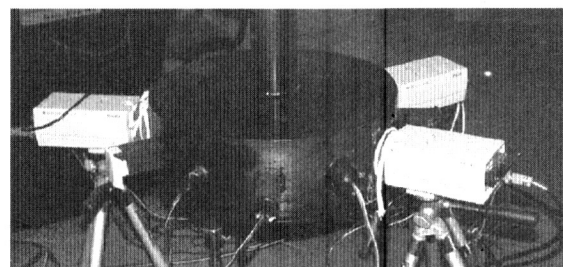


图 3 激光散射烟雾探测装置实物图

Fig.3 Experimental setup of laser scattering detection

产生反射光、不对散射光强造成任何影响,以保证测量的散射光强的准确性。

分别采用棉绳、檀香、榉木等燃烧材料和非燃烧材料的面粉作为实验材料,实验时采用引风机将燃烧烟雾或气溶胶依次吸入探测腔中,采用3束不同波长的激光在非常短暂的时间间隔内分别射入探测腔中,CCD从不同方向接收入射激光的散射光强值,由计算机进行信号处理和储存。每种试样反复做3次,以确保实验数据的可靠性和重复性。

3.2 结果与分析

得到熏香烟雾、棉绳烟雾、榉木烟雾和非烟雾的面粉气溶胶的散射响应曲线如图4~7所示。实验测得的相对光强比可验证理论计算结果,并可表征不同种类烟雾光散射特性的差异,从而区分出不同燃烧烟雾和非火灾气溶胶。

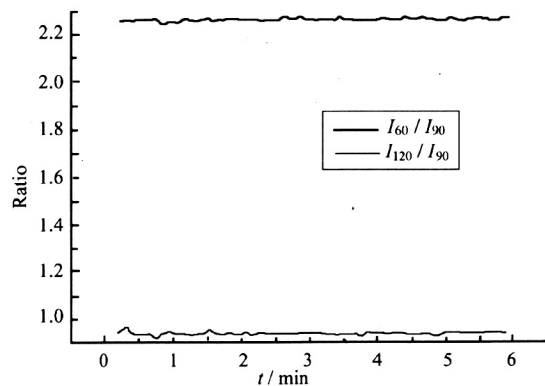


图4 檀香烟雾颗粒的相对光强比
($\lambda = 0.537 \mu\text{m}$)

Fig.4 Relative ratio of scattering intensity of sandalwood smoke

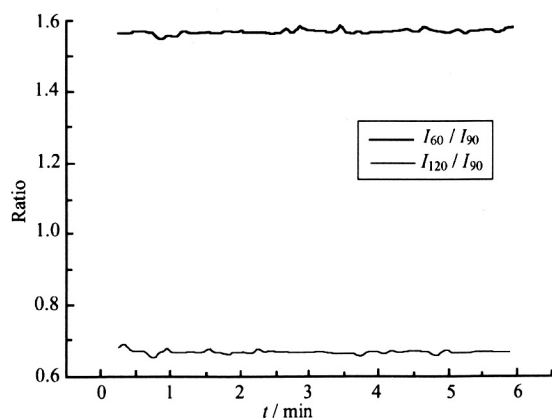


图5 棉绳烟雾颗粒的相对光强比
($\lambda = 0.537 \mu\text{m}$)

Fig.5 Relative ratio of scattering intensity of cotton wick smoke

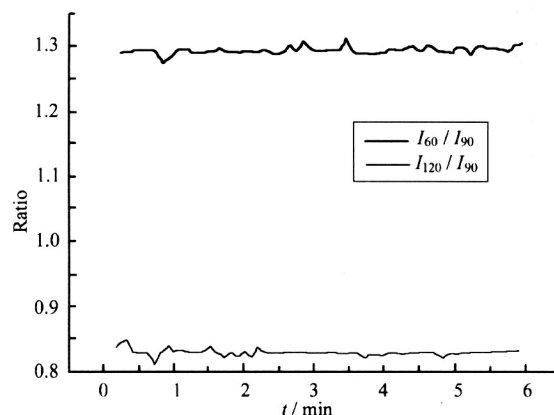


图6 榉木烟雾颗粒的相对光强比
($\lambda = 0.537 \mu\text{m}$)

Fig.6 Relative ratio of scattering intensity of beech wood smoke

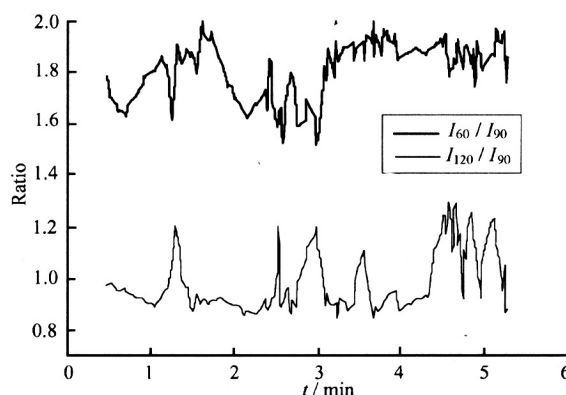


图7 面粉气溶胶相对光强比 ($\lambda = 0.537 \mu\text{m}$)

Fig.7 Relative ratio of scattering intensity of flour

从图4~6可知,尽管由于通过测量区域的烟雾是不稳定流场,烟雾粒子的粒径和烟雾浓度存在着一定的波动范围,光强散射比值存在一定的波动性,但是,整体上来说,实验曲线基本稳定,实验误差不大,表2是实验得出的光强角度比值的平均值。但是,图7的面粉气溶胶的相对光强比稳定性较差,与其它燃烧烟雾颗粒相比,数值差别较大。

将计算结果与实验结果相比较,实验测量所得的散射光相对光强比 I_{60}/I_{90} 和 I_{120}/I_{90} 基本上都在计算范围内,理论计算与实验结果吻合较好,说明了该算法能真实准确地反映出烟雾散射的光强角度分布特征,在火灾烟雾探测上具有一定的应用价值。

实验和理论计算得出的相对光强比与烟雾种类有很大的关系,不同种类的烟雾颗粒散射光的比值有很大的差异,而且,非火灾气溶胶与燃烧烟雾颗

粒也有较大的差异。通过多次反复实验，结果相同，所以，该值可以作为区分火灾烟雾与非火灾气溶胶的有力判据。

表 2 实验得出的相对光强比的平均值

Table 2 Experimental values of relative ratio scattering intensity

	波长/ μm	棉 绳	桦 木	檀 香
I_{60}/I_{90}	0.635	2.106	1.557	1.204
I_{120}/I_{90}		0.941	0.728	0.902
I_{60}/I_{90}	0.537	1.562	1.294	2.259
I_{120}/I_{90}		0.676	0.835	0.907

4 结 论

1) 改进的连分式算法具有运算速度快、计算精度高和适用范围广的优点，满足火灾探测中燃烧烟雾颗粒对散射光强计算的需要。

2) 散射光相对光强比是不同烟雾种类特定的物性参数，可正确区分火灾与非火灾气溶胶，为火灾烟雾探测提供新的判据。

3) 实验测量的散射光相对光强比与理论计算结果吻合较好，证明理论计算的正确性，也说明了实验方案的合理性。

参 考 文 献

[1] 范维澄, 王清安, 等. 火灾学简明教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995

- [2] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- [3] 赵凯华, 钟锡华. 光学(上、下册) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984
- [4] Berne B J, Pecorn R. Dyanmic Light Scattering [M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 1976
- [5] Van H C de Hulst. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: John, Wiley & Sons, 1957
- [6] Van H C de Hulst. Multiple Light Scattering Tables, Formulas, and Applications [M]. New York: Academic Press, 1980
- [7] 余其铮, 马国强, 刘晓彦. Mie 散射算法的改进 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1987, (4): 21~26
- [8] Wiscombe W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. Applied Optics, 1980, 19(9): 1505~1509
- [9] Lentz W J. Generating bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions [J]. Applied Optics, 1976, 15(3): 668~671
- [10] Kattawar G W, Plass N G. Electromagnetic scattering from absorbing sphere [J]. Appl Opt, 1967, 6(8): 1377~1391
- [11] Felske J D, Charalampopoulos T T, Hura H S. Determination of the refractive indices of soot particles from the reflectivities of compressed soot pellets [J]. Combustions Science and Technology, 1984, 37(5): 263~284
- [12] Santoro R J, Semerjian H G, Dobbins R A. Soot particle measurements in diffusion flames [J]. Combustion and Flames, 1983, 51(2): 203~218

Study of Scattering Characteristic of Fire Smoke Based on Mie Theory

Shu Xueming, Fang Jun, Shao Quan, Yuan Hongyong
(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] The scattering characteristic of fire smoke is a major aspect in fire smoke detection fundamental research. Based on Mie scattering theory, the paper presented some research on comparison between different algorithms. An improved algorithm was adopted to calculate the scattering intensity and its distribution in all directions. To verify the theoretical calculation results, a set of experiment was designed to measure the light intensity in three directions of different fire smoke. From the experiments results, it could be found that the results of calculation and experiment had a good accord. It can be concluded that the relative ratio of scattering intensity is an important parameter for certain material, and different kinds of smoke by this ratio.

[Key words] fire smoke; Mie scattering; algorithm; relative ratio of scattering intensity