

火灾烟颗粒群多分散与单分散光散射模型的比较研究

张延岗¹ 邓小玖¹ 李耀东² 孙 悟¹ 张永明^{2,*}

(¹合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009)
(²中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要 基于 T 矩阵法, 取入射激光的波长分别为 300、633、800 nm, 对正庚烷火灾烟颗粒群分形结构的多分散模型、单分散模型以及等体积的球形模型的光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布特性进行了详细的比较分析。结果表明, 当 $\lambda=300$ nm 时, 散射光能很好地反映正庚烷火灾烟颗粒凝团的分形结构及凝团中基本颗粒的分布特性; 当 $\lambda=633$ nm 时, 正庚烷火灾烟颗粒群分形结构的多分散模型和单分散模型的光散射特性基本一致; 当 $\lambda=800$ nm 时, 正庚烷火灾烟颗粒群 3 种模型的光散射特性趋于一致。

关键词 散射; 火灾烟颗粒; T 矩阵; 光散射模型

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0408004

Comparative Study on Polydisperse and Monodisperse of Smoke Particles for Light Scattering Model

Zhang Yan'gang¹ Deng Xiaojiu¹ Li Yaodong² Sun Wu¹ Zhang Yongming²

(¹School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)
(²State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract Based on the method of T-matrix, a detailed comparison of the distribution of light scattering Muller matrix elements with scattering angle on the polydisperse model, the monodisperse model and the equal-volume-sphere model of fractal structure of smoke particles is produced by flaming *n*-heptane, under the laser wavelength of 300, 633 and 800 nm respectively. The results show that scattering light could reflect the characteristics of the fractal structure of smoke particles and the distribution characteristics of primary particles in smoke particles when λ is equal to 300 nm, then the light scattering characteristics of fractal structure of polydisperse model and monodisperse model become identically when λ is equal to 633 nm, meanwhile, the light scattering characteristics of three models about the smoke particles produced by flaming *n*-heptane tend to be consistency when λ is equal to 800 nm.

Key words scattering; fire smoke particles; T-matrix; light scattering model

OCIS codes 200.4560; 200.4690; 290.5850

1 引 言

烟颗粒的形貌特征对光散射具有重要的影响, 因此烟颗粒光散射场的研究, 首先需要建立合适的颗粒形貌模型^[1~3]。火灾烟雾是具有近似分形结构、基本粒子数近似服从对数正态分布、空间随机取

向的烟颗粒群^[4~6]。现阶段对于火灾烟颗粒群的光散射研究, 主要采用单分散的球形模型和分形模型来计算^[7,8]。目前, 光电感烟火探测器的设计主要针对烟颗粒散射光的光强分布特征, 易受非火灾烟雾颗粒的干扰而发生误报。散射光的偏振特性能

收稿日期: 2011-12-13; 收到修改稿日期: 2011-12-31

基金项目: 火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2009-KF08)和上海烟草集团开放课题(科 2011-1-010)资助课题。

作者简介: 张延岗(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事颗粒光散射方面的研究。E-mail: zyg0826@163.com

导师简介: 邓小玖(1960—), 男, 教授, 主要从事应用光学基础理论方面的研究。E-mail: dengxjxls@sina.com

* 通信联系人。E-mail: zhangym@ustc.edu.cn

细致地反映烟颗粒的形貌、折射率等物理特性,因此为了有效解决光电感烟探测技术目前存在的问题,应深入研究分析烟颗粒光散射的各项信息,为推动新型光电感烟探测技术的发展提供必要的理论支撑^[1,9,10]。

本文以国家标准 GB4715-93 中规定的 4 种标准试验火中的正庚烷火为例,采用 T 矩阵法,取入射激光的波长分别为 300、633、800 nm,对烟颗粒分形结构的多分散模型光散射 Muller 矩阵元素进行了详细的数值计算,并与单分散的分形模型和等体积的球形模型的光散射 Muller 矩阵元素进行了比较研究,这对任意颗粒群的光散射研究具有一定的指导作用。

2 原理与方法

2.1 烟颗粒凝团的分形结构

图 1 是应用 JSM-6700F 高分辨场发射扫描电子显微镜(SEM)拍摄的正庚烷火焰颗粒图像,它直观地反映了烟颗粒的微观形貌。

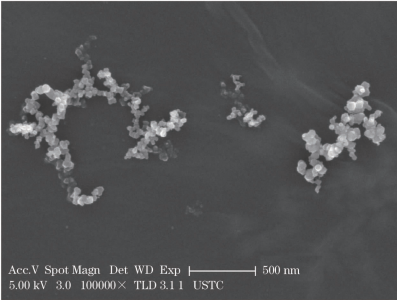


图 1 正庚烷火焰颗粒 SEM 图

Fig. 1 SEM of smoke particles produced by flaming n-heptane

由图 1 可见正庚烷火焰颗粒是由不同基本颗粒数组成的、近似呈现分形结构的凝团。假设这些基本粒子是等径球形颗粒,其结构参数满足^[1,6]

$$N = K_f \left(\frac{R_g}{a} \right)^{D_f}, \quad (1)$$

式中 N 表示凝团中基本粒子的数量, K_f 是分形前因子, R_g 为凝团对应的质量回转半径, a 为基本颗粒半径, D_f 为分形维数。当其他参数确定时,烟颗粒的尺度大小由凝团的基本粒子数决定。根据文献^[7],采用分形前因子 $K_f = 3.77$, 分形维数 $D_f = 1.85$, 基本粒子半径 $a = 30.8 \text{ nm}$ 。

2.2 T 矩阵法原理

光散射 Muller 矩阵能全面描述烟颗粒散射光场的特征,因此,烟颗粒的光散射问题可以归结为

Muller 散射矩阵的求解问题。在基于麦克斯韦方程组求解颗粒光散射的问题中, T 矩阵以其计算精确、功能强大而被广泛使用^[11,12]。

T 矩阵方法的原理是:将入射场 $\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r})$ 和散射场 $\mathbf{E}^{\text{sca}}(\mathbf{r})$ 在向量球形波函数(VSF)下展开^[13,14]:

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=-n}^n [a_{nm} R_g \mathbf{M}_{nm}(k\mathbf{r}) + b_{nm} R_g \mathbf{N}_{nm}(k\mathbf{r})], \quad (2)$$

$$\mathbf{E}^{\text{sca}}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=-n}^n [p_{nm} \mathbf{M}_{nm}(k\mathbf{r}) + q_{nm} \mathbf{N}_{nm}(k\mathbf{r})], \quad |\mathbf{r}| > r_0, \quad (3)$$

式中 r_0 是散射颗粒限制圆半径,并且假设坐标系的原点在颗粒限制圆内,由于麦克斯韦方程组和边界条件的线性性,散射场系数 p_{nm} 和 q_{nm} 与入射场系数 a_{nm} 和 b_{nm} 是线性关系,并通过转换矩阵 T 得到

$$p_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{\max}} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mm'n'n'}^{11} a_{m'n'} + T_{mm'n'n'}^{12} b_{m'n'}], \quad (4)$$

$$q_{nm} = \sum_{n'=1}^{n_{\max}} \sum_{m'=-n'}^{n'} [T_{mm'n'n'}^{21} a_{m'n'} + T_{mm'n'n'}^{22} b_{m'n'}]. \quad (5)$$

(4)、(5)式可简化写成

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{11} & \mathbf{T}^{12} \\ \mathbf{T}^{21} & \mathbf{T}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad (6)$$

(6)式就是 T 矩阵方法的基础,入射平面波的展开系数 a_{nm} 与 b_{nm} 由入射场确定^[13]。通过 T 矩阵计算散射光场,进而确定颗粒光散射的 Muller 矩阵。T 矩阵法的基本特点是 T 矩阵中各元素与入射场和散射场无关,仅仅取决于散射颗粒的形状、大小以及折射率, T 矩阵法只需通过一次计算便可求得随机取向的烟颗粒散射光的平均值^[13~15]。

2.3 计算方法

正庚烷火焰颗粒凝团包含的基本粒子数 N 服从 $\mu = 2.00, \sigma = 2.35$ 的对数正态分布,其密度分布函数为^[8]

$$f(N|\mu, \sigma) = \frac{1}{N\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln N - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (7)$$

其数学期望值为 $\exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) = 117.2$ 。

烟颗粒群的散射光场在满足不相干单散射的条件下可视为单个烟颗粒散射光场的线性叠加,则多分散分布烟颗粒群的光散射 Muller 矩阵元素 $F_{ij}^g(\theta)$ 可表示为^[16]

$$F_{ij}^g(\theta) = \int F_{ij}(N, \theta) f(N) dN, \quad (8)$$

计算中取基本颗粒数间隔为 $\Delta N = 10$ 的加权平均来

等效(8)式,即

$$F_{ij}^g(\theta) = \frac{\sum_{N=1}^{N_{\max}} f(N) \cdot \Delta N \cdot F_{ij}(N, \theta)}{\sum_{N=1}^{N_{\max}} f(N) \cdot \Delta N} = \frac{\sum_{N=1}^{N_{\max}} f(N) \cdot F_{ij}(N, \theta)}{\sum_{N=1}^{N_{\max}} f(N)}, \quad (9)$$

式中 N_{\max} 取 400。用含有期望值近似为 117 个基本粒子数的单分散分形模型以及等体积的球形模型计

算烟颗粒群的光散射 Muller 矩阵元素,并与(9)式计算的结果归一化后进行比较。

3 结果与分析

取入射光波长分别为 $\lambda = 300 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 800 \text{ nm}$, 对应正庚烷火烟颗粒的折射率为 $m = 1.37 + i0.72$, $m = 1.53 + i0.38$, $m = 1.55 + i0.42$ ^[17,18], 计算正庚烷火烟颗粒分形结构的多分散、单分散模型以及等体积的球形模型的归一化光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布,如图 2~4 所示。

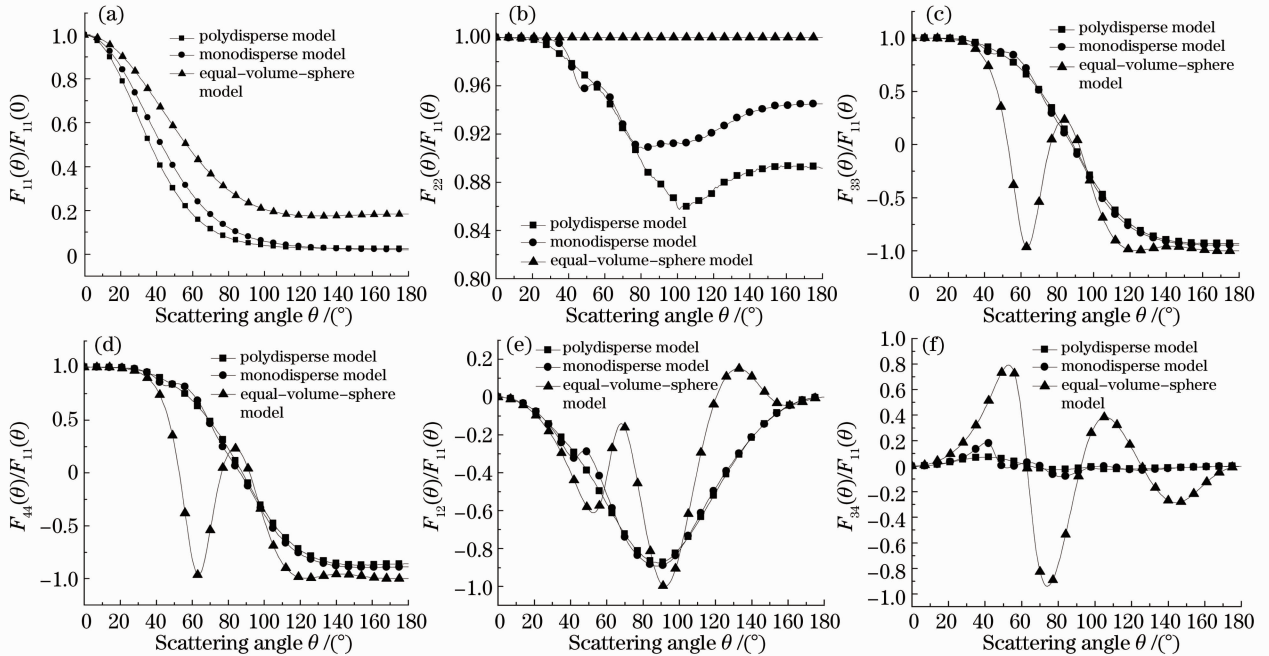


图 2 300 nm 波长光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布

Fig. 2 Distribution of light scattering Muller matrix with scattering angle at 300 nm

由图 2 可见:入射光波长 $\lambda = 300 \text{ nm}$ 时,正庚烷火烟颗粒群分形结构的多分散、单分散模型的光散射 Muller 矩阵元素 $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 随散射角的分布存在明显差异并不等于 1,很好地反映了正庚烷火烟颗粒凝团的非球形特征及凝团中基本颗粒数的多分散特性;球形模型的光散射 Muller 矩阵元素 $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$, $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 随散射角的变化存在一定的振荡与分形结构有较大差异,表明当入射光波长与烟颗粒群的平均粒径相当时,必须考虑烟颗粒形貌特征,采用分形结构模型。

由图 3 可见:当 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 时,正庚烷火烟颗粒群分形结构的多分散、单分散模型的光散射特性基本一致,因而可以采用单分散的分形模型来描述正庚烷火烟颗粒群的光散射,节省大量计算时间;分形

模型与球形模型的光散射 Muller 矩阵元素 $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 仍然存在较大差异。

由图 4 可见:当 $\lambda = 800 \text{ nm}$ 时,正庚烷火烟颗粒群 3 种模型的光散射特性趋于一致,表明入射光波长远远大于烟颗粒群的平均粒径时(正庚烷火烟颗粒群的平均等体粒径约等于 150 nm),烟颗粒可近似用球形颗粒来描述。这对任意颗粒群的光散射研究也具有一定的指导作用。

4 结 论

通过对正庚烷火烟颗粒群分形结构的多分散模型、单分散模型以及等体积的球形模型的光散射 Muller 矩阵元素比较分析可知,当入射光波长与烟颗粒群的平均粒径相当时,散射光能很好地反映烟颗粒的形貌、大小、粒径分布等物理特性,这对新型

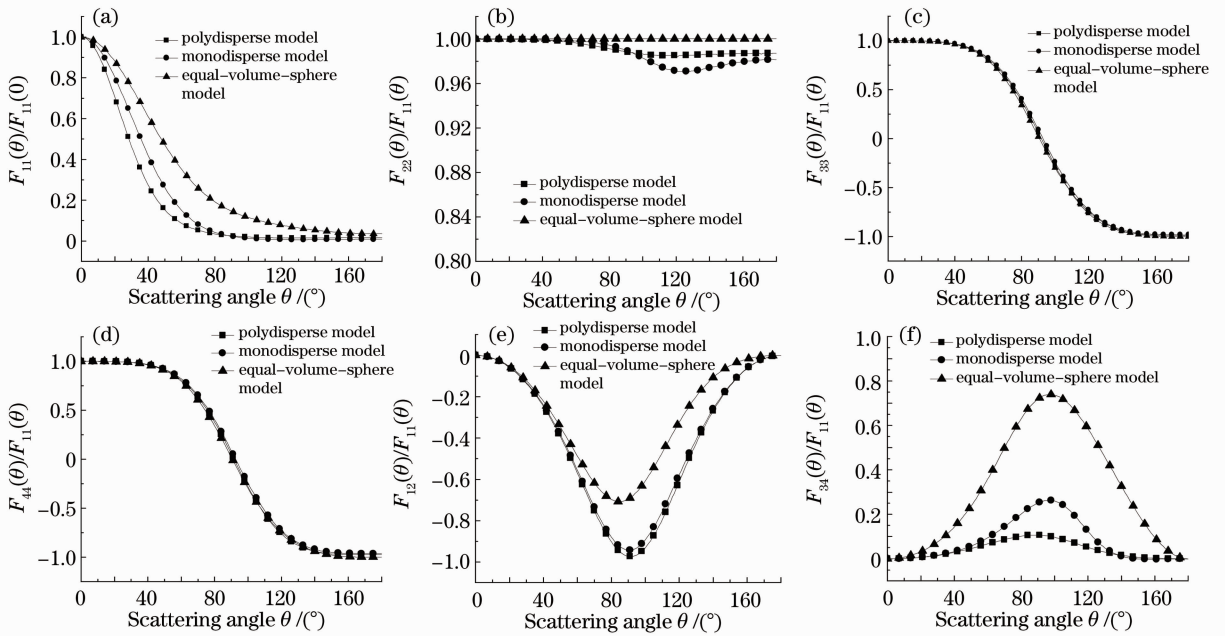


图3 633 nm 波长光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布

Fig. 3 Distribution of light scattering Muller matrix with scattering angle at 633 nm

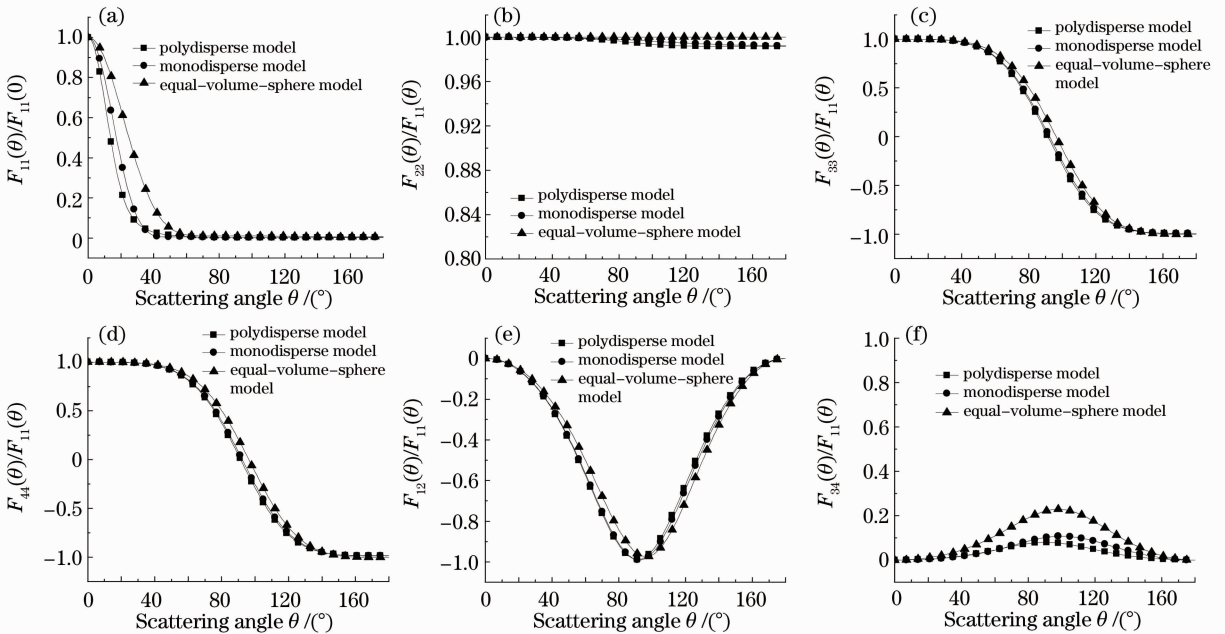


图4 800 nm 波长光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布

Fig. 4 Distribution of light scattering Muller matrix with scattering angle at 800 nm

光电感烟火灾探测器的设计具有重要意义;当入射光波长远大于烟颗粒群的平均粒径时,烟颗粒可近似用球形颗粒来描述。这对任意颗粒群的光散射研究也具有一定的指导作用,在实际应用中可节省大量计算时间。

参 考 文 献

1 Xie Qiyuan. Study on the Model of Light Scattering by Smoke Particles[D]. Hefei: University of Science and Technology of

China, 2006. 25~27

谢启源. 火灾烟颗粒光散射模型的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006. 25~27

2 Ü. Ö. Köylü, Y. Xing, D. E. Rosner. Fractal morphology analysis of combustion-generated aggregates using angular light scattering and electron microscope images[J]. *Langmuir*, 1995, **11**(2): 4848~4854

3 J. Cai, N. Lu, C. M. Sorensen. Comparison of size and morphology of soot aggregates as determined by light scattering and electron microscope analysis[J]. *Langmuir*, 1993, **9**(11): 2861~2867

4 Shu Xueming, Fang Jun, Shen Shifei *et al.*. Study on fractal

- coagulation characteristics of fire smoke particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4466~4471
- 疏学明, 方俊, 申世飞等. 火灾烟雾颗粒凝并分形特性研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4466~4471
- 5 Ü. Ö. Köylü, G. M. Faeth, T. L. Farias *et al.*. Fractal and projected structure properties of soot aggregates[J]. *Combustion and Flame*, 1995, **100**(4): 621~633
- 6 Lei Chengxin, Liu Hanfa, Zhang Huafu. Research on laser scattering property by randomly oriented soot clustered agglomerates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 876~880
- 类成新, 刘汉法, 张化福. 随机取向烟尘团簇粒子激光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 876~880
- 7 Li Yaodong, Zhang Qixing, Deng Xiaojie *et al.*. Inversion of size distribution of fire smoke particles based on simulated annealing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0108005
- 李耀东, 张启兴, 邓小玖等. 基于模拟退火的火灾烟颗粒粒径反演[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0108005
- 8 Qi Lifeng, Zhang Yongming, Xie Qiyuan *et al.*. Fractal shape simulation and light scattering calculation of fire smoke particles [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6736~6741
- 乔利锋, 张永明, 谢启源等. 火灾烟颗粒的分形结构形状模拟与光散射计算[J]. *物理学报*, 2007, **56**(11): 6736~6741
- 9 Wang Hongxia, Ma Jin, Song Zibiao *et al.*. Light scattering properties of fractal aggregates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0329001
- 王红霞, 马进, 宋仔标等. 分形凝聚粒子的光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0329001
- 10 X. Q. Huang, V. Lepiller, Y. Bailly *et al.*. Particle sizing and velocity measurement of microspheres from the analysis of polarization of the scattered light [J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2011, **50**(1): 57~63
- 11 Feng Chunxia, Huang Lihua, Zhou Guangchao *et al.*. Computation and analysis of light scattering by monodisperse biological aerosols [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2592~2598
- 冯春霞, 黄立华, 周光超等. 单分散生物气溶胶光散射特性的计算与分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2592~2598
- 12 P. C. Waterman. Symmetry, unitarity, and geometry in electromagnetic scattering[J]. *Phys. Rev. D*, 1971, **3**: 825~839
- 13 Sun Xianming, Wang Haihua, Shen Jin. Study on light back-scattering by spheroid with inclusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0829001
- 孙贤明, 王海华, 申晋. 含核椭球粒子后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0829001
- 14 M. I. Mishchenko, L. D. Travis. Capabilities and limitations of a current fortran implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, **60**(3): 309~324
- 15 D. J. WIELAARD, M. I. Mishchenko, A. Macke *et al.*. Improved T-matrix computations for large, nonabsorbing and weakly absorbing nonspherical particles and comparison with geometrical-optics approximation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18): 4305~4313
- 16 Q. Xie, H. Zhang, Y. Wan *et al.*. Characteristics of light scattering by smoke particles based on spheroid models[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2007, **107**(1): 72~82
- 17 Zhang Qing, Deng Xiaojie, Zhang Qixing *et al.*. Comparative study on fractal model and spherical model of fire smoke particles for light scattering [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(10): 7442~7446
- 张青, 邓小玖, 张启兴等. 火灾烟颗粒分形模型和球形模型光散射的研究比较[J]. *物理学报*, 2010, **59**(10): 7442~7446
- 18 Qiao Lifeng. Study on Polarized Light Scattering Characteristics of Fire Smoke Particles [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. 30~31
- 乔利锋. 火灾烟颗粒偏振光散射特征的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008. 30~31