

# 火灾烟颗粒分形模型和球形模型 光散射的比较研究\*

张 青<sup>1)2)</sup> 邓小玖<sup>1)</sup> 张启兴<sup>2)</sup> 李耀东<sup>1)</sup> 张永明<sup>2)†</sup>

1) (合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 合肥 230009)

2) (中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

(2009 年 11 月 8 日收到; 2009 年 12 月 10 日收到修改稿)

对烟颗粒的光散射进行模拟计算是研究火灾烟颗粒光散射特性的重要手段, 目前对于火灾烟颗粒光散射的数值计算多采用球形或椭球模型. 实际上, 火灾烟颗粒的形貌与球形和椭球均存在着显著差异. 扫描电子显微镜图像表明, 烟颗粒具有近似分形的结构. 本文利用离散偶极近似方法计算了随机取向的火灾烟颗粒分形凝团以及同体积的球形颗粒的光散射 Muller 矩阵, 并对两者的归一化 Muller 矩阵元素随散射角的分布进行了比较. 研究表明: 火灾烟颗粒分形模型和球形模型的归一化矩阵元素  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$ ,  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  和  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布情况存在显著差异; 利用两种模型的光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的差异, 可以有效区分烟颗粒与球形干扰颗粒.

**关键词:** 感烟探测, 火灾烟颗粒, 分形模型, 球形模型

**PACC:** 8270R, 0555, 4225F

## 1. 引 言

烟雾是火灾早期最重要的特征参量之一, 火灾探测领域应用最广泛的光电感烟探测技术正是基于烟颗粒的光散射原理进行火灾探测<sup>[1,2]</sup>. 对烟颗粒的光散射进行模拟计算是研究火灾烟颗粒光散射特性的重要手段, 目前对于火灾烟颗粒光散射的数值计算多采用球形或椭球模型<sup>[1-4]</sup>. 实际上, 火灾烟颗粒的形貌与球形和椭球均存在显著差异. 扫描电子显微镜 (SEM) 图像表明, 烟颗粒具有近似分形的结构.

国内外已有文献利用多种模型模拟大气科学等领域的微小颗粒, 研究其光散射特性<sup>[5-11]</sup>. Kimura<sup>[6]</sup>用分形模型模拟星际尘埃的形貌, 分别用  $T$  矩阵和离散偶极近似 (discrete dipole approximation, 简记为 DDA) 方法计算了分形凝团的光散射矩阵元素, 对主粒子大小、凝团结构以及材料成分对光散射特性的影响进行了研究. 目前针对火灾烟颗粒凝团的光散射模型的研究较少, 通常采用基

于球形模型的 Lorenz-Mie 散射理论进行近似分析, 与实际烟颗粒的光散射存在较大差异. 因此有必要对烟颗粒的光散射模型做进一步的研究, 为新型光电感烟探测器的设计提供指导与支撑.

本文利用 DDA 方法计算了随机取向的火灾烟颗粒分形凝团以及同体积的球形颗粒的光散射 Muller 矩阵, 并对两者的归一化 Muller 矩阵元素随散射角的分布进行了比较.

## 2. 理论与方法

### 2.1. 火灾烟颗粒凝团的分形结构

火灾烟颗粒的 SEM 图像可直接、可靠地反映烟颗粒的微观形貌. 我们采用 JSM-6700F 高分辨场发射扫描电子显微镜拍摄了正庚烷明火的烟颗粒图像, 如图 1 所示.

由图 1 可见, 正庚烷明火的烟颗粒是由不同数量的基本颗粒凝聚而成, 基本颗粒的外形接近球体, 整个烟颗粒凝团近似呈分形结构, 这种结构可

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50776084) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20060358018) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhangym@ustc.edu.cn

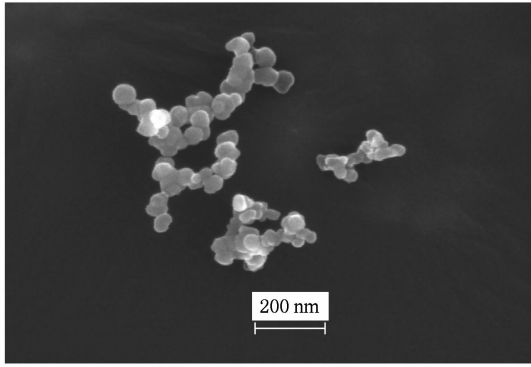


图 1 正庚烷明火烟颗粒 SEM 图像

近似看作由一定数量的大小相同的球形基本颗粒组成的具有分形结构的凝团. 结构参数满足 (1) 式<sup>[12]</sup>:

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

其中  $N$  表示凝团中基本颗粒的数量,  $D_f$  为分形维数,  $k_f$  是分形前因子,  $a$  是基本颗粒的半径,  $R_g$  是凝团对应的质量回转半径<sup>[13,14]</sup>.

文献[15]对火灾烟颗粒 SEM 图像进行了分析, 获取了分形结构中的基本颗粒个数、凝团分形维数、基本颗粒半径等参数. 根据文献[15], 我们在计算中基本颗粒个数  $N$  取数学期望值 117, 分形维数  $D_f = 1.85$ , 前置因子  $K_f = 3.77$ , 基本颗粒半径  $a = 30.8 \text{ nm}$ . 入射波长取  $300 \text{ nm}$ , 此时对应的烟颗粒折射率为  $1.37 + 0.72i$ <sup>[16]</sup>. 为了满足烟颗粒的随机取向特征, 计算中做了  $10 \times 10 \times 10$  个方向的取向平均.

## 2.2. 光散射 Muller 矩阵

Stokes 向量是描述光波特性的一种状态量, 满足近似随机取向的颗粒群散射的入射光与散射光的 Stokes 向量的变换关系为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I_s(\theta) \\ Q_s(\theta) \\ U_s(\theta) \\ V_s(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{12}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_i(\theta) \\ Q_i(\theta) \\ U_i(\theta) \\ V_i(\theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中  $I$  表示光强,  $Q, U, V$  表示光波的极化状态, 矩阵

$\{F_{ij}(\theta) (i, j = 1, 2, 3, 4)\}$  为光散射的 Muller 矩阵, 是描述光散射从初态到待测态变化关系的一个过程量, 包含 6 个独立的变量, 用颗粒光散射 Muller 矩阵元素随散射角的分布可以完整地描述散射光的强度与偏振特征.

对光散射 Muller 矩阵进行归一化, 即矩阵元素  $F_{11}(\theta)$  相对于  $0^\circ$  散射角的值进行归一化  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$ , 表示散射光相对强度的角分布; 各矩阵元素  $F_{ij}(\theta)$  相对于  $F_{11}(\theta)$  的归一化. 归一化的 Muller 矩阵与光强的绝对大小无关, 能更好地反映光散射过程的物理本质.

## 2.3. DDA 方法

DDA 方法可以计算任意形状颗粒的光散射. DDA 算法的基本思想是利用有限个离散的偶极子来近似任意形状的颗粒, 偶极子通过对局域电场的响应获得偶极矩, 偶极子之间通过各自产生的电场相互作用. 设将散射体离散为  $N$  个偶极子, 各偶极子的极化率为  $\alpha_j$ , 坐标为  $\mathbf{r}_j (j = 1, 2, \dots, N)$ , 各个位置的极化强度为  $\mathbf{P}_j = \alpha_j \mathbf{E}_j$ , 其中  $\mathbf{E}_j$  是该处的电场,  $\mathbf{E}_j$  为入射场  $\mathbf{E}_{\text{inc},j}$  与其他  $N-1$  个偶极子激发的电场的叠加:

$$\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{\text{inc},j} - \sum_{k \neq j} \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k, \quad (3)$$

系数  $\mathbf{A}_{jk}$  是  $3 \times 3$  的矩阵:

$$\mathbf{A}_{jk} = \frac{\exp(ikr_{jk})}{r_{jk}} \times \left[ k^2 (\hat{\mathbf{r}}_{jk} \hat{\mathbf{r}}_{jk} - \mathbf{I}_3) + \frac{ikr_{jk} - 1}{r_{jk}^2} (3\hat{\mathbf{r}}_{jk} \hat{\mathbf{r}}_{jk} - \mathbf{I}_3) \right] \quad j \neq k, \quad (4)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $r_{jk} = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k|$ ,  $\hat{\mathbf{r}}_{jk} = (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k)/r_{jk}$ ,  $\mathbf{I}_3$  是  $3 \times 3$  单位矩阵. 定义  $\mathbf{A}_{ij} = \alpha_j^{-1}$ , 则 (3) 式变为:

$$\sum_{k=1}^N \mathbf{A}_{jk} \mathbf{P}_k = \mathbf{E}_{\text{inc},j}, \quad (5)$$

远场近似条件下的散射场为:

$$\mathbf{E}_{\text{scat}} = \frac{k^2 \exp(ikr)}{r} \sum_{j=1}^N \times \exp(-ik\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}_j) (\hat{\mathbf{r}} \hat{\mathbf{r}} - \mathbf{I}_3) \mathbf{P}_j. \quad (6)$$

应用 DDA 算法时必须满足以下两个条件<sup>[18,19]</sup>:

1)  $|m|kd < 1$ , 其中  $m$  为颗粒的相对折射率,  $k$  为波数,  $d$  为相邻偶极子的间距;

2)  $d$  必须足够小 ( $N$  必须足够大), 可以很好地描述颗粒的形貌.

### 3. 结果与分析

图 2 给出了烟颗粒分形凝团和同体积球形颗粒的光散射矩阵元素  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  随散射角的分布. 由图 2 知, 散射角  $\theta \leq 40^\circ$  时, 分形凝团的  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  值随散射角  $\theta$  的增大急剧下降, 当  $\theta \geq 40^\circ$  时基本接近于零; 球形颗粒的  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  值随散射角  $\theta$  的增大下降相对缓慢,  $\theta = 120^\circ$  时达到极小值.

光散射 Muller 矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta) \neq 1$  反映了散射颗粒的非球形特征. 图 3 给出了分形凝团光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布. 由图 3 知,  $\theta = 115^\circ$  时, 分形凝团的光散射 Muller 矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  有极小值 0.87, 较好地体现了烟颗粒的非球形特征.

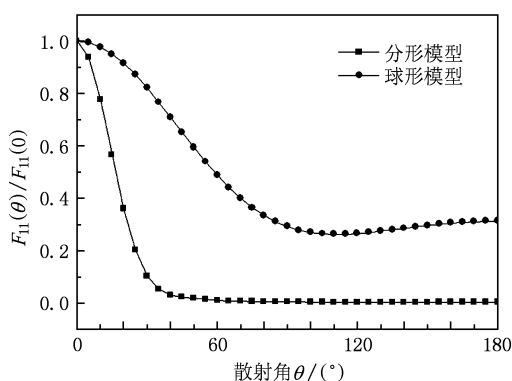


图 2 光散射矩阵元素  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  的角分布

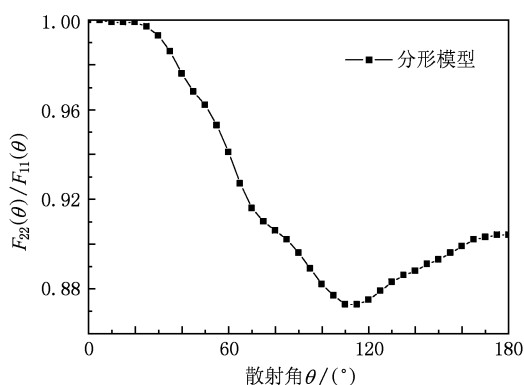


图 3 光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角分布

图 4—6 分别给出了烟颗粒分形凝团和同体积球形颗粒的光散射矩阵元素  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$ ,  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  和  $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布.

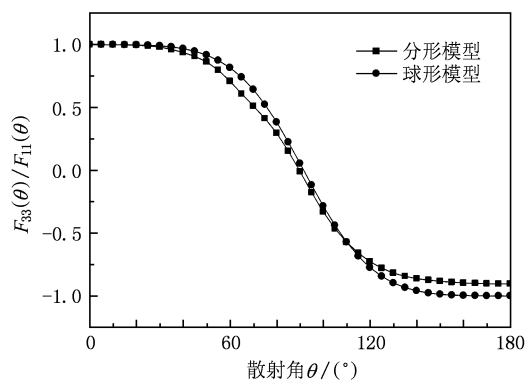


图 4 光散射矩阵元素  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角分布

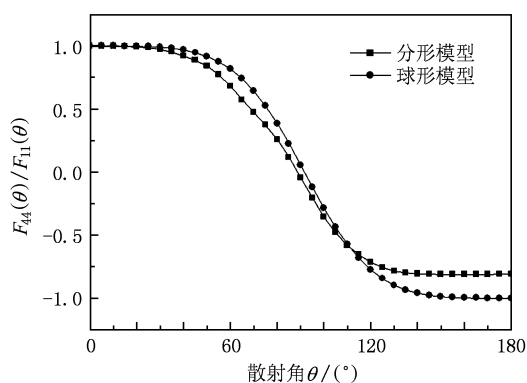


图 5 光散射矩阵元素  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角分布

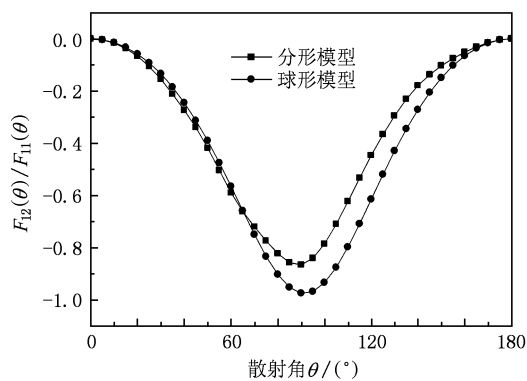


图 6 光散射矩阵元素  $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角分布

由图可知, 分形凝团和球形颗粒的光散射矩阵元素  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$ ,  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  和  $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布情况相似.

图 7 给出了烟颗粒分形凝团和球形颗粒的光散射矩阵元素  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布. 由图 7 可知, 球形颗粒的  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  呈单极值分布, 极大值点位于  $\theta = 95^\circ$ , 而分形凝团的  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$

呈多极值振荡分布.

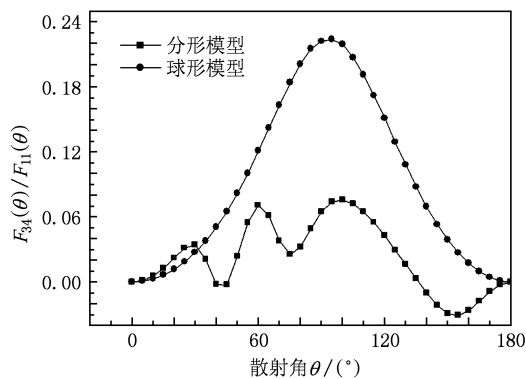


图 7 光散射矩阵元素  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角分布

## 4. 结 论

本文利用 DDA 方法, 计算了随机取向的火灾烟颗粒分形凝团以及同体积的球形颗粒的光散射 Muller 矩阵, 并对两者的归一化 Muller 矩阵元素随

散射角的分布进行了比较研究. 在 300 nm 波长的单色平面光波照射下, 基于分形模型和球形模型的火灾烟颗粒的光散射矩阵元素  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$ ,  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  和  $F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布情况相似;  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$ ,  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  和  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  存在显著差异. 分形结构模型更接近于烟颗粒的实际形貌, 因此, 深入研究分形结构火灾烟颗粒凝团的光散射特征, 对光电感烟探测技术的发展具有重要的理论意义和实际应用价值; 利用火灾烟颗粒分形模型和球形模型的光散射 Muller 矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的差异, 可以有效区分烟颗粒与球形干扰颗粒, 这对设计新型光电感烟探测器, 降低火灾误报率具有重要的指导意义. 本文计算的是随机取向条件下粒径一定的烟颗粒群的光散射 Muller 矩阵, 进一步的研究工作可计算粒径服从一定分布的烟颗粒群的光散射 Muller 矩阵.

特别感谢 B. T. Draine 教授提供的 DDSCAT 程序.

- [1] Xie Q Y, Zhang Y M, Yuan H Y, Qiao L F, Jiang Y L 2006 *J. Univ. Sci. Technol. China* **36** 320 (in Chinese) [谢启源、张永明、袁宏永、赵建华、乔利锋、蒋亚龙 2006 中国科学技术大学学报 **36** 320]
- [2] Shu X M, Fang J, Shao Q, Yuan H Y 2005 *J. Engng. Sci. China* **7** 0045 (in Chinese) [疏学明、方俊、邵荃、袁宏永 2005 中国工程科学 **7** 0045]
- [3] Loepfe M, Ryser P, Tompkin C, Wieser D 1997 *Fire Saf. J.* **29** 185
- [4] Zhao J H, Yuan H Y, Fan W C, Chen T 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 700 (in Chinese) [赵建华、袁宏永、范维澄、陈涛 2002 物理学报 **51** 700]
- [5] Lumme K, Rahola J, Hovenie J W 1997 *Icarus* **126** 455
- [6] Kimura H 2001 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **70** 581
- [7] Manickavasagam S, Menguc M P 1997 *Appl. Opt.* **36** 1337
- [8] Lei C X, Zhang H F, Liu H F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7168 (in Chinese) [类成新、张化福、刘汉法 2009 物理学报 **58** 7168]
- [9] Huang C J, Liu Y F, Wu Z S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4068 (in Chinese) [黄朝军、刘亚锋、吴振森 2007 物理学报 **56** 4068]
- [10] Sun X M, Shen J, Wei P Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6222 (in Chinese) [孙贤明、申晋、魏佩瑜 2009 物理学报 **58** 6222]
- [11] Dai B, Luo X D, Wang Y W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3864 (in Chinese) [戴兵、罗向东、王亚伟 2009 物理学报 **58** 3864]
- [12] Filippov A V, Zurita M, Rosner D E 2000 *J. Colloid Interfac. Sci.* **229** 261
- [13] Shu X M, Fang J, Shen S F, Liu Y J, Yuan H Y, Fan W C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4466 (in Chinese) [疏学明、方俊、申世飞、刘勇进、袁宏永、范维澄 2006 物理学报 **55** 4466]
- [14] Küylü Ü Ö, Faeth G M 1995 *Combust. Flam.* **100** 621
- [15] Qiao L F, Zhang Y M, Xie Q Y, Fang J, Wang J J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6736 (in Chinese) [乔利锋、张永明、谢启源、方俊、王进军 2007 物理学报 **56** 6736]
- [16] Klusek C, Manickavasagam S, Menguc M P 2003 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **79** 839
- [17] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A 2002 *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* (UK: Cambridge University Press) pp115, 83, 139
- [18] Draine B T, Flatau P J 1994 *J. Opt. Soc. Am. A* **11** 1491
- [19] Rao R Z 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 1790 (in Chinese) [饶瑞中 1998 物理学报 **47** 1790]

## Comparative study on fractal model and spherical model of fire smoke particles for light scattering\*

Zhang Qing<sup>1)2)</sup> Deng Xiao-Jiu<sup>1)</sup> Zhang Qi-Xing<sup>2)</sup> Li Yao-Dong<sup>1)</sup> Zhang Yong-Ming<sup>2)†</sup>

1) (Optical Engineering, School of Electronic Science and Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

2) (State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(Received 8 November 2009; revised manuscript received 10 December 2009)

### Abstract

It is important to research light scattering from fire smoke particles by numerical calculation. Traditionally, spherical or spheroid models were used to approximate the shape of smoke particles for light scattering calculations. But actually, smoke particles have a similar fractal structure, which is different from spherical structure. Using the discrete-dipole approximation method, the light scattering Muller matrices were computed for the randomly oriented fractal aggregate, as well as the spherical particle with the same aggregate volume, and then their normalized Muller matrix elements were compared. The results indicate that the angular distributions of the normalized matrix elements  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$ ,  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  and  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  have significant differences between the fractal model and spherical model. We can discriminate spherical non-fire aerosols from smoke particles, using the difference of  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  between fractal model and spherical model.

**Keywords:** smoke detection, fire smoke particle, fractal model, spherical model

**PACC:** 8270R, 0555, 4225F

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50776084) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20060358018).

† Corresponding author. E-mail: zhangym@ustc.edu.cn