

文章编号:1001-9014(2007)04-0279-05

# 火灾烟颗粒 Stokes 散射矩阵的实验研究

谢启源, 张和平, 张永明, 万玉田, 乔利锋

(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:**针对火灾烟颗粒的 Stokes 散射矩阵,利用电光调制器、1/4 波片、偏振片及锁相放大器等设计与搭建了火灾烟颗粒光散射实验平台;并基于该平台测量了棉绳阴燃、正庚烷明火及檀香阴燃生成的 3 种烟颗粒的 Stokes 散射矩阵中 16 个元素的角度分布.实验结果表明,这些烟颗粒在光散射过程中都体现出明显的非球形效应,尤其是阴燃过程生成的灰烟颗粒.这说明基于球形模型的 Lorenz-Mie 散射理论对于分析烟颗粒光散射特征存在一定的局限性,而为了进一步挖掘火灾烟颗粒光散射过程中的光强与偏振等信息,需要建立合理的非球形模型,从而为光电感烟火灾探测技术的发展提供指导与支撑.

**关键词:**Stokes 散射矩阵;烟颗粒;光电感烟

**中图分类号:**O436.2; S776.29+2 **文献标识码:**A

## EXPERIMENTAL STUDY ON STOKES SCATTERING MATRIXES OF SMOKE PARTICLES

XIE Qi-Yuan, ZHANG He-Ping, ZHANG Yong-Ming, WAN Yu-Tian, QIAO Li-Feng

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

**Abstract:** Aiming at the Stokes scattering matrix of smoke particles, an experimental setup was designed and built with an electro-optic modulation, a quarter waveplate, polarizers and a lock-in amplifier. Through the setup, the angular distributions of the Stokes scattering matrix were measured for the smoke particles generated from smoldering cottons, flaming heptane and smoldering sandals. The results show that the non-sphericity of smoke particles, especially the gray smoke particles, plays an important role on the light scattering. There are some shortcomings for Lorenz-Mie theory, which is based on a spherical model, to analyze the light scattering by smoke particles. In this case, it is suggested that non-spherical models are required to analyze the characteristics, e. g. intensity and polarization etc, of light scattering by smoke particles.

**Key words:** Stokes scattering matrix; smoke particles; photoelectric smoke detection

### 引言

对火灾准确、可靠、及时地探测是为早期灭火与人员疏散争取宝贵时间,有效控制火灾带来的各种危害,减少人员伤亡及财产损失的重要手段之一<sup>[1,2]</sup>.烟颗粒是火灾早期最重要的特征参量之一,由于离子感烟探测器中使用了放射性元素,基于烟颗粒光散射原理的光电感烟火灾探测器逐渐取代了离子感烟探测器而成为最广泛使用的产品<sup>[3]</sup>.现有光电感烟火灾探测技术仅利用颗粒光散射过程中的散射光强信息,从而判断火灾是否发生.然而,由于粉尘与水蒸气等微粒与火灾烟颗粒存在一些类似的光散射特征,可能导致现有光电感烟探测器发生误

报警<sup>[4,5]</sup>.根据 Maxwell 电磁传播理论,颗粒光散射过程中包含 3 项信息:光强、偏振与相位,除了散射光强,偏振特征的变化也是光散射过程中的重要信息,且相对于相位信息较容易获取<sup>[6,7]</sup>.以 Stokes 向量描述入射光与散射光,相应地,Stokes 散射矩阵则全面描述了烟颗粒光散射过程中的光强与偏振等各项信息<sup>[8]</sup>.

此外,目前对于新型光电感烟火灾探测器的设计依然缺乏一个可靠、准确的烟颗粒光散射模型进行指导与支撑,已有研究大多对烟颗粒进行球形假设,采用 Lorenz-Mie 散射理论进行近似分析<sup>[11]</sup>.然而,对各种烟颗粒的微观形貌拍摄与分析表明,烟颗粒凝团呈分枝链状结构,具有明显的非球形特

收稿日期:2006-11-09,修回日期:2006-12-31

基金项目:国家自然科学基金重点(50536030)资助项目

作者简介:谢启源(1978-),男,福建上杭人,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士后,主要研究方向为火灾探测,建筑火灾等.

Received date: 2006-11-09, revised date: 2006-12-31

征<sup>[10,11]</sup>. 因此,通过对实际火灾烟颗粒 Stokes 散射矩阵的全面测量,一方面能够进一步深入地挖掘烟颗粒光散射过程中的各项信息,从而为新型光电感烟火灾探测技术的发展提供指导与支撑.

### 1 理论基础

如前文所述,以  $4 \times 1$  的 Stokes 向量描述光波,则能够方便地描述其光强与偏振状态,而散射介质对于光波的作用则由  $4 \times 4$  的 Stokes 散射矩阵  $F(\theta)$  进行描述. 矩阵中的每一元素  $F_{ij}(\theta)$  都表征了颗粒光散射过程中的某项特征.

在颗粒光散射的实际运用中,往往针对由大量微小颗粒组成的颗粒群,且颗粒不断运动变化,近似有随机取向的特征,因而可视为宏观上各向同性. 此时的 Stokes 散射矩阵  $F(\theta)$  具有分块对角的结构,相应颗粒群的光散射传递方程如式(1)所示.

$$\begin{bmatrix} I^{sca}(\theta) \\ Q^{sca}(\theta) \\ U^{sca}(\theta) \\ V^{sca}(\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \frac{1}{k^2} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{21}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & F_{43}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^{inc} \\ Q^{inc} \\ U^{inc} \\ V^{inc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $r$  为散射光测量位置离散射中心的距离,  $k$  为入射光的波数,  $\theta$  为散射角度. 而且,式(1)中的 Stokes 散射矩阵  $F(\theta)$  有式(2)与(3)所示的关系.

$$F_{12}(\theta) = F_{21}(\theta) \quad (2)$$

$$F_{43}(\theta) = -F_{34}(\theta) \quad (3)$$

此外,对于球形颗粒光散射,具有恒等式  $F_{22}(\theta) \equiv F_{11}(\theta)$  成立,而  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值偏离“1”的多少即反映了颗粒光散射过程中其非球形影响的程度.

### 2 实验方法

#### 2.1 测量原理

现有的光电感应元件只能对于光强进行测量,因此,为了测量烟颗粒光散射过程中的 Stokes 散射

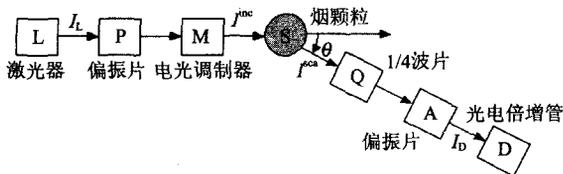


图1 火灾烟颗粒光散射实验平台的原理示意图  
Fig. 1 Measuring principle of experimental setup for light scattering by smoke particles

矩阵中的所有元素,实验平台中除了基本的入射激光与散射光强测量器件如光电倍增管外,这里采用光电调制器对入射光进行调制,并在光电倍增管前端安装  $1/4$  波片与偏振片.

图1给出了烟颗粒 Stokes 散射矩阵实验测量原理的光路示意图.

由于光电倍增管只能直接测量散射光的光强,即式(4)左边散射光 Stokes 向量的第1个分量  $I^{sca}(\theta)$ ,而无法对其余3个分量进行直接测量. 因此,如何巧妙地组合实验装置中各光学器件光轴的取向角度,从而测量出 Stokes 散射矩阵中的所有元素,是本烟颗粒光散射实验平台设计的关键. 通过光电调制器的调制,使具有角频率  $\omega$  的光入射至烟颗粒发生光散射,略去三阶以上谐波,经整理,可得光电倍增管所测的散射光信号为

$$I^{sca}(\theta) = c_2 [DC(\theta) + 1.0383S(\theta) \sin \omega + 0.8635C(\theta) \cos 2\omega t] \quad (4)$$

式中,  $c_2$  为常数,与入射光的 Stokes 参数及光学器件的相关参数有关,  $DC(\theta)$  为散射光信号的直流分量即光强,  $S(\theta)$  为散射光信号的一阶谐波,  $C(\theta)$  为散射光信号的二阶谐波.  $DC(\theta)$ 、 $S(\theta)$  与  $C(\theta)$  中包含了烟颗粒光散射的 Stokes 散射矩阵元素. 其中,直流分量  $DC(\theta)$  可通过直流放大后直接测量,而一阶谐波  $S(\theta)$  与二阶谐波  $C(\theta)$  则需要通过锁相放大器进行同步采集.

#### 2.2 整体架构

由于火灾烟颗粒是动态的散射介质,为了消除烟颗粒的波动给不同角度的散射光测量带来的影响,在该实验平台中添加另一路光电倍增管测量某一固定散射角上的散射光强随时间的变化曲线,该散射光强的变化反映了烟颗粒的波动,由于该路光电倍增管起“监视”烟颗粒流的稳定性的作用,故称

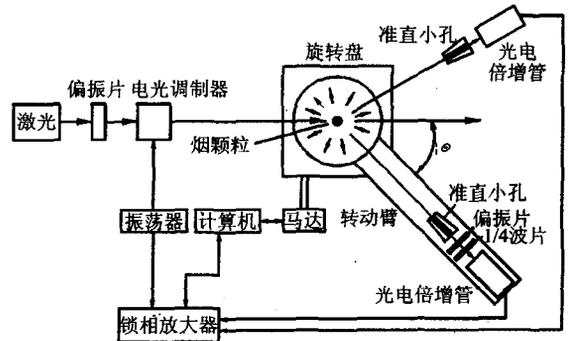


图2 烟颗粒光散射实验平台总体架构示意图  
Fig. 2 Schematic of the experimental setup for light scattering by smoke particles

表 1 3 种烟源的燃料用量与燃烧方式

Table 1 Descriptions for the generations of three kinds of smoke particles

序号	燃料种类	燃料用量	燃烧方式	备注
1	棉绳	1 根标准棉绳	悬挂, 阴燃	
2	正庚烷	50ml 正庚烷	10cm 内径油池火	水箱冷却
3	檀香	1 根檀香	插柱, 阴燃	

其为“监视器”。相应的, 随转臂一起转动的光电倍增管称之为“探测器”。这样, 整个实验平台中使用两路光电接收器件, 其中“监视器”只需测量散射光强, 用于对“探测器”所测信号值进行“归一化”处理, 如图 1 所示, 在“探测器”前端则加上 1/4 波片与偏振片。基于这种方案设计的烟颗粒光散射实验平台的总体架构如图 2 所示。烟颗粒光散射实验平台的主要光学与机械器件均安装于一个光学平台之上, 整个实验平台放置于光学暗室中, 烟颗粒光散射实验在暗室条件下进行。有关烟颗粒光散射实验平台的更详细介绍, 请参见<sup>[12]</sup>。

### 3 实验结果与分析

利用火灾烟颗粒光散射实验平台, 这里采用波长为 635nm 的红光作为光源, 针对棉绳阴燃火与正庚烷明火这两种标准火生成的烟颗粒进行光散射实验测量, 此外, 还针对檀香阴燃这种非标准火生成的烟颗粒进行实验, 测量其 Stokes 散射矩阵。分别在表 1 所列的 8 个组合条件下, 对各种烟颗粒进行多次实验测量。实验时, 分别采用的燃料用量与燃烧方式等如表 2 所列。由表 2 可见, 实验中所用燃料量较少, 所生成烟颗粒浓度较小, 这是由于火灾探测主要是火灾早期的特征信号识别, 因而这里针对早期烟浓度较小时的光散射特征。

进行每组实验时, 对烟颗粒的各角度散射光信号测量一周, 需要较长一段时间。这里测量的散射角度范围为 5° ~ 160°, 测量步长为 1.8°, 且每个散射角度测量 10 个数据进行平均。图 3 与图 4 分别给出了这 3 种烟颗粒的 Stokes 散射矩阵中各元素的角度分布曲线, 除了反映散射光强的  $F_{11}(\theta)$  元素外, 其余矩阵元素均给出了与  $F_{11}(\theta)$  的比值  $F_{ij}(\theta)/F_{11}(\theta)$ , 从而  $-1 \leq F_{ij}(\theta)/F_{11}(\theta) \leq 1$ , 便于分析其特征。以下逐一分析各矩阵元素的角度分布特征, 并比较不同种类烟颗粒的光散射特征之间的异同。

由图 3(a) 可见, 对于这 3 种烟颗粒, 其综合散射光强分布曲线  $F_{11}(\theta)$  整体都较平滑。在前向散射角度区域, 随着散射角度的增大, 散射光强急剧减

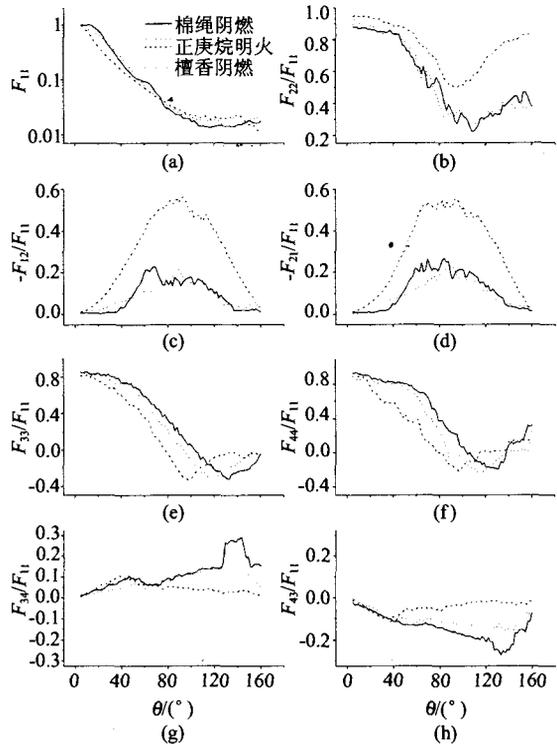


图 3 3 种烟颗粒 Stokes 散射矩阵中  $F_{11}(\theta)$  等元素的角度分布曲线

Fig. 3 Measured matrix elements (e.g.  $F_{11}(\theta)$  et al.) for three kinds of smoke particles

小, 而在 100° ~ 160° 的后向散射角度区域, 散射光强变化不明显。棉绳阴燃与檀香阴燃烟颗粒对应的  $F_{11}(\theta)$  分布曲线较接近, 而正庚烷明火烟颗粒对应的  $F_{11}(\theta)$  曲线与之存在较明显的差异。在散射角小于 60° 的范围内, 正庚烷明火烟颗粒的散射光强明显弱于两种阴燃烟颗粒。而在散射角大于 80° 的区域, 3 种烟颗粒对应的散射光强之间的差异较小, 且正庚烷明火烟颗粒比两种阴燃烟颗粒的散射光强略强些。由此可见, 在光电感烟火灾探测器的设计中, 其散射角度的选取对于探测器响应性能具有重要的影响。例如, 若取散射角度为 40°, 即基于前向散射原理, 则这种探测器对阴燃烟颗粒具有较高的响应灵敏度, 然而对于黑烟颗粒的响应较迟钝。因此, 这种前向散射式的感烟探测器对不同种类烟颗粒响应灵敏度的不一致, 易造成对于黑烟颗粒的迟报或漏报。而当散射角度取 130° 时, 即基于后向散射原理, 这种感烟火灾探测器对不同种类烟颗粒的响应灵敏度较一致, 对明火生成的黑烟与阴燃生成的灰烟颗粒都能及时报警。但由于颗粒后向散射光信号较弱, 其响应灵敏度受到限制, 而此时探测器中电子器件的噪声影响也较明显。

由图 3(b) 可见, 3 种烟颗粒对应的  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  实验测量曲线都明显偏离“1”. 相对于阴燃烟颗粒, 正庚烷明火烟颗粒的  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值较大, 其最小值约为 0.5. 而 2 种阴燃烟颗粒的  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  曲线分布较相似, 其最小值都约为 0.25. 亦即, 2 种阴燃烟颗粒的  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  曲线更显著地偏离“1”, 尤其在后向散射角度区域. 由于  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值偏离“1”的程度反映了颗粒光散射过程中非球形效应的强弱, 因此, 这里的实验测量结果表明, 3 种烟颗粒在光散射过程中都体现出明显的非球形效应, 尤其是灰烟颗粒.

图 3(c) 与图 3(d) 分别给出了  $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $-F_{21}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角度分布曲线. 由图可见, 对于每种烟颗粒, 这 2 条曲线分布较相似, 总体都呈“峰”状分布, 在中间散射角度区域有明显的峰值. 正庚烷明火烟颗粒对应的  $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值明显大于 2 种阴燃烟颗粒的相应值, 其中正庚烷明火烟颗粒的  $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  峰值约为 0.6, 而 2 种阴燃烟颗粒相应峰值都约为 0.2.

图 3(e) 与图 3(f) 分别给出了  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角度的变化曲线. 由图可见, 随着散射角度的增加, 3 种烟颗粒对应的  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  曲线都逐渐减小, 且在后向散射角度达到最小值而后略有增加. 然而, 各种烟颗粒的  $F_{33}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{44}(\theta)/F_{11}(\theta)$  曲线达到最小值时相应的散射角度彼此不同, 由小至大依次为: 正庚烷明火烟颗粒、檀香阴燃烟颗粒与棉绳阴燃烟颗粒.

图 3(g) 与图 3(h) 分别给出了  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的角度分布曲线, 对于各种烟颗粒,  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  2 条曲线都具有关于  $x$  轴“对称”的关系. 由图 3(g) 可见, 实验测量的  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值都大于零且具有一个明显的峰值. 由图 3(h) 可见, 实验测量的  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  值都小于零且具有一个“谷值”. 2 种阴燃烟颗粒光散射对应的  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  都在后向散射角度区域达到峰值, 而正庚烷明火烟颗粒则在前向散射角度区域达到其峰值.

图 4(a) ~ 图 4(h) 分别给出了 3 种烟颗粒的 Stokes 散射矩阵中其余散射元素的实验测量曲线. 由图 4 中所示的 8 条曲线分布可见, 这 8 个矩阵元素即  $F_{13}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{31}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{14}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{41}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{23}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{32}(\theta)/F_{11}(\theta)$ 、 $F_{24}(\theta)/F_{11}(\theta)$  及  $F_{42}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的实验测

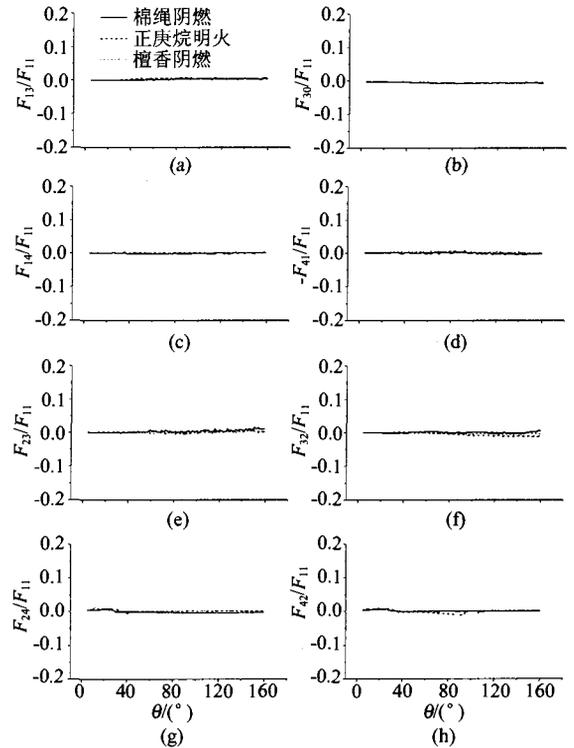


图 4 3 种烟颗粒 Stokes 散射矩阵中  $F_{13}(\theta)/F_{11}(\theta)$  等元素的角度分布曲线

Fig. 4 Measured matrix elements (e. g.  $F_{13}(\theta)/F_{11}(\theta)$  et al.) for three kinds of smoke particles

量值均较小, 接近于零. 此外, 前文已分析出, 图 3(c) 与图 3(d) 所示的  $-F_{12}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $-F_{21}(\theta)/F_{11}(\theta)$  彼此相似, 而图 3(g) 与图 3(h) 所示的  $F_{34}(\theta)/F_{11}(\theta)$  与  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  关于  $x$  轴对称. 由此可见, 这 3 种烟颗粒群, 其光散射特征都可用式(1)所示的传输方程进行描述, 即相应的 Stokes 散射矩阵具有“分块对角”的特征, 且存在一定的对称关系. 此即表明, 这些烟颗粒群具有“随机取向”的特征.

由以上 3 种烟颗粒 Stokes 散射矩阵的实验结果的对比分析表明, 棉绳与檀香阴燃过程生成的灰烟颗粒的光散射特征较相似, 而与正庚烷明火生成的黑烟颗粒存在较明显的差异, 反映了灰烟与黑烟颗粒的折射率差异的影响. 可见, 烟颗粒自身物理特性对其光散射过程产生重要影响, 而烟颗粒的特性不仅与燃料种类有关, 而且与其燃烧方式也紧密相关. 因此, 根据烟颗粒物理特性与其光散射特征的关系, 可发展基于颗粒光散射的非接触式物性参数的诊断方法.

#### 4 结语

本文针对火灾烟颗粒 Stokes 散射矩阵的测量,

采用电光调制器对入射光进行调制,并在光电倍增管前端添加 1/4 波片与偏振片的方法,成功设计并研制了烟颗粒光散射实验平台,阐述了其测量原理。基于该实验平台,对棉绳阴燃、正庚烷明火与檀香阴燃生成 3 种典型烟颗粒的 Stokes 散射矩阵中的 16 个元素进行了全面测量,得到了烟颗粒的散射光强与偏振等特性。结果表明,这些烟颗粒在光散射过程中都体现出明显的非球形效应,尤其是两种阴燃过程生成的烟颗粒。明火生成的黑烟颗粒与阴燃生成的灰烟颗粒的光散射特征存在一定的差异,体现了烟颗粒折射率的影响。此外,虽然烟颗粒是非球形的,但整个烟颗粒群具有“随机取向”的特征。

### REFERENCES

- [1] WU Long-Biao, FANG Jun, XIE Qi-Yuan. *Fire Detection and Signal Processing* [M]. Beijing: Chemical Industry Press (吴龙标, 方俊, 谢启源. 火灾探测与信息处理. 北京: 化学工业出版社), 2006, 15—21.
- [2] ZHANG Xiao-Hua, ZHANG Ren-Cheng, GONG Xue, *et al.* Detection and estimation of early fires' process character by using infrared spectrum [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves* (张晓华, 张认成, 龚雪, 等. 火灾早期过程特征的红外光谱探测和诊断. 红外与毫米波学报), 2006, 25(5): 382—385.
- [3] Fujisawa T, Suzuki T, Yoshikawa Y, *et al.* Optical smoke detector using dual light spectrum [C]. The 13th International Conference on Automatic Fire Detection, H. Luck editor, proceeding of AUBE '04, 2004, Duisburg, Germany, 527—536.
- [4] XIE Qi-Yuan, YUAN Hong-Yong, GUO Hui-Liang. Experimental analysis on false alarms of fire detectors by cooking fumes [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2004, 22(4): 325—338.
- [5] XIE Qi-Yuan, YUAN Hong-Yong, SU Guo-Feng, *et al.* Experimental study on the sensitivity and nuisance immunity of smoke detectors [J]. *Journal of Applied Fire Science*, 2002 ~ 2003, 11(4): 323—334.
- [6] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 224—233.
- [7] ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li, *et al.* Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探. 红外与毫米波学报), 2005, 24(6): 441—444.
- [8] Mishchenko M I, Hovenier J W, Travis L D. *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications* [M]. San Diego: Academic Press, 2000, 528—529.
- [9] Gustav Mie. Beitrage zur Optik Truber Medien, Speziell Kolloidaler Metallosungen [J]. *Annalen der Physik*, 1908, Series IV, 25(3): 377—445.
- [10] XIE Qi-Yuan, ZHANG Yong-Ming, YUAN Hong-Yong. Preliminary comparison on the morphologies of smoke particles and dusts through SEM imaging [J]. *Journal of Applied Fire Science*, 2003—2004, 12(3): 195—202.
- [11] Koylu U O, Faeth G M, Farias T L, *et al.* Fractal and projected structure properties of soot aggregates [J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100(4): 621—633.
- [14] XIE Qi-Yuan. Study on the Model of Light Scattering by Smoke Particles [D]. These for Ph. D. Degree, University of Science and Technology of China (谢启源. 火灾烟颗粒光散射模型的研究. 博士学位论文, 中国科学技术大学), 2006, 77—101.