

## 双波长抗干扰光电感烟探测机理\*

孙悟<sup>1)</sup> 邓小玫<sup>1)</sup> 李耀东<sup>2)</sup> 张永明<sup>2)†</sup> 郑赛晶<sup>3)</sup> 王维妙<sup>3)</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)

3) (上海烟草集团有限责任公司, 烟草行业卷烟烟气重点实验室, 上海 200082)

(2012年7月2日收到; 2012年8月21日收到修改稿)

基于 T 矩阵法, 选取双波长入射光, 对火灾烟颗粒与非火灾烟雾颗粒的光散射矩阵进行了详细的数值计算和比较分析. 结果表明, 入射光波长改变时, 烟颗粒光散射矩阵元素的变化明显不同于非火灾烟雾颗粒. 选用双波长脉冲激光入射, 通过检测合适的光散射矩阵元, 结合异或逻辑运算, 可区分火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒, 降低非火灾烟雾颗粒引起的误报.

关键词: 散射, T 矩阵, 双波长

PACS: 02.10.Yn, 42.68.Mj, 92.60.Ta

DOI: 10.7498/aps.62.030201

## 1 引言

烟雾是火灾过程的标志性产物之一, 火灾烟雾及时准确的探测对预防火灾的发生和蔓延具有重要意义. 光电感烟探测是当前采用最广泛的火灾探测技术, 现有的光电感烟探测器通过直接探测火灾烟颗粒散射光的光强进行报警, 容易受非火灾烟雾颗粒如水汽、油烟、粉尘等干扰而发生误报. 因此深入研究火灾烟雾颗粒与非火灾干扰颗粒的光散射特性、改善光电感烟探测机理, 对降低感烟探测器误报率有重要意义.

根据光散射理论, 颗粒的光散射特性受其形貌、大小和折射率的影响. 目前已建立的颗粒光散射模型中: Lorenz-Mie 光散射理论将颗粒近似为球形<sup>[1]</sup>; Koylu 和 Faeth 把烟颗粒描述为分型结构<sup>[2]</sup>; Zubko 使用体积随机填充法实现了对粉尘颗粒的模拟<sup>[3]</sup>.

本文采用多分散分形模型模拟火灾烟雾颗粒、球型模型模拟油滴悬浮颗粒、随机模型模拟粉尘悬浮颗粒. 应用 T 矩阵法<sup>[4,5]</sup>, 选取两个波长的入射

光, 对火灾烟雾颗粒、油滴颗粒和粉尘颗粒的光散射矩阵进行详细的数值计算和比较研究. 结果表明: 波长改变时, 火灾烟雾颗粒光散射矩阵元素的变化与非火灾烟雾颗粒存在显著差异. 在数值计算的基础上, 提出双波长入射光照区分非火灾颗粒的方法. 不同于传统光电感烟探测器, 该方法通过检测光散射矩阵, 区分火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒, 可减少非火灾烟雾颗粒引起的误报.

## 2 原理与方法

## 2.1 油滴颗粒、火灾烟雾颗粒、粉尘颗粒模型

图 1(a), (b), (c) 中分别给出了油滴悬浮颗粒、火灾烟雾颗粒和粉尘悬浮颗粒的模型示意图<sup>[6-8]</sup>.

大气中的油滴悬浮颗粒是由挥发的油脂、烟焦油等组成的近似球形的颗粒. 文献<sup>[9]</sup>进行的实验表明油滴粒径分布在 0.5 到 10  $\mu\text{m}$ , 计算中选取

\* 火灾科学国家重点实验室开放基金 (批准号: HZZ2009-KF08) 和上海烟草集团有限责任公司 (烟草行业卷烟烟气重点实验室) 开放课题 (批准号: 科 2011-1-010) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangym@ustc.edu.cn

油滴典型分布的中位径为  $b = 1 \mu\text{m}$ .

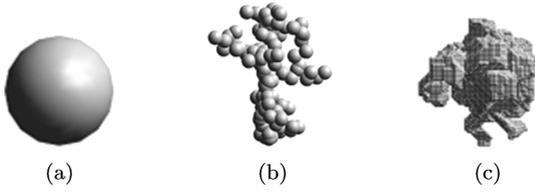


图1 颗粒模型示意图 (a) 油滴颗粒; (b) 烟颗粒; (c) 粉尘颗粒

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, 其结构参数满足 [7]

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

其中  $N$  表示烟颗粒中的基本粒子数,  $k_f$  是分形前置因子,  $R_g$  为烟颗粒的质量回转半径,  $a$  为基本粒子半径,  $D_f$  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], 计算中采用分形前置因子  $k_f = 3.77$ , 分形维数  $D_f = 1.85$ , 基本粒子半径  $a = 30.8 \text{ nm}$ , 折射率为  $1.54 + 0.46i$ .

粉尘悬浮颗粒由于产生的机理和环境不同, 是各种有机物和无机物等复杂成分构成的一种随机结构颗粒 [7], 根据文献 [10], 计算中取  $d = 2 \mu\text{m}$ .

## 2.2 T 矩阵方法

T 矩阵方法是将入射场  $\mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r})$  和散射场  $\mathbf{E}^{\text{sca}}(\mathbf{r})$  在向量球形波函数下展开 [1,12,13]:

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

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

其中  $r_0$  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, 散射场系数  $p_{mn}$  和  $q_{mn}$  与入射场系数  $a_{mn}$  和  $b_{mn}$  是线性关系, 并通过转换矩阵  $T$  得到:

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

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

上两式可简化写成

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

(6) 式是 T 矩阵方法的基础, 入射平面波的展开系数  $a_{mn}$  与  $b_{mn}$  由入射场 [6] 确定. 通过 T 矩阵计算散射光场, 进而确定颗粒光散射矩阵. T 矩阵法的基本特点是 T 矩阵中各元素与入射场、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颗粒散射光的平均值 [11-13].

## 2.3 多分散烟颗粒群光散射的计算

正庚烷标准火烟颗粒凝团中包含的基本粒子数  $N$  服从  $\mu = 2.00$ ,  $\sigma = 2.35$  的对数正态分布, 其密度分布函数为 [14,15]

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

其数学期望值为  $e^{\mu + \sigma^2/2} = 117.2$ .

烟颗粒群光散射的计算与其浓度有较大关系, 浓度较低时, 颗粒群的光散射可以看作是单颗粒光散射的线性叠加, 利用统计平均方法进行颗粒群的光散射计算. 已知颗粒群的粒径分布函数  $f(N)$ , 其光散射矩阵元素  $F_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, 4$ ) 可以表示为 [14]

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

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

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

其中  $N_{\max}$  取 400.

## 3 结果与分析

经数值计算, 得到了入射脉冲激光波长分别为 300 和 900 nm 时, 多分散火灾烟颗粒群、粉尘颗粒

与油滴颗粒归一化散射矩阵元素  $F_{ij}(\theta)$  随散射角的分布,如图2—5所示.

图2(a), 3(a), 4(a), 5(a)反映了入射光波长为300 nm时三种颗粒光散射矩阵元素随散射角的变化;图2(b), 3(b), 4(b), 5(b)反映了入射光波长为

900 nm时三种颗粒光散射矩阵元素随散射角的变化.由图2(a), 2(b)可知:入射光波长为300 nm时,颗粒光散射矩阵元素  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  主要集中在前向散射,当入射光波长增大为900 nm时,前向散射增强;由图4(a), 4(b)可知:入射光波长为300 nm

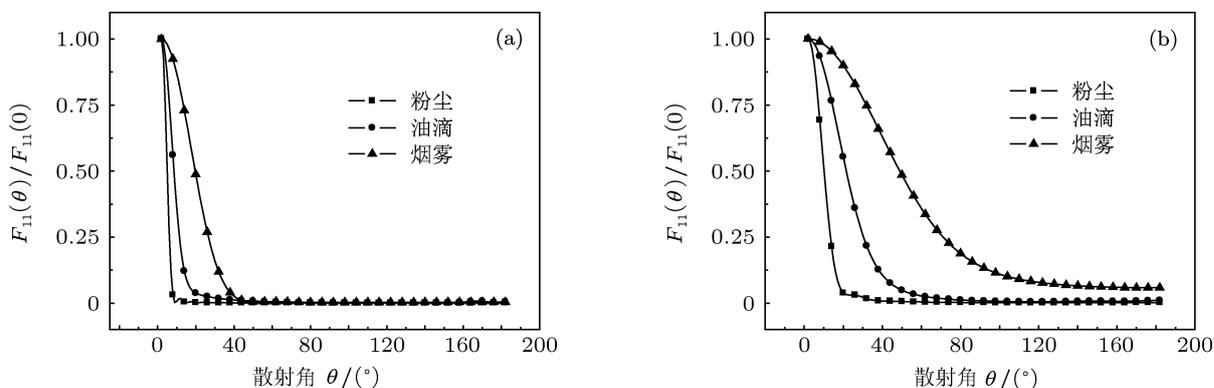


图2 归一化散射矩阵元素  $F_{11}(\theta)/F_{11}(0)$  随散射角的分布 (a) 入射光波长为 300 nm; (b) 入射光波长为 900 nm

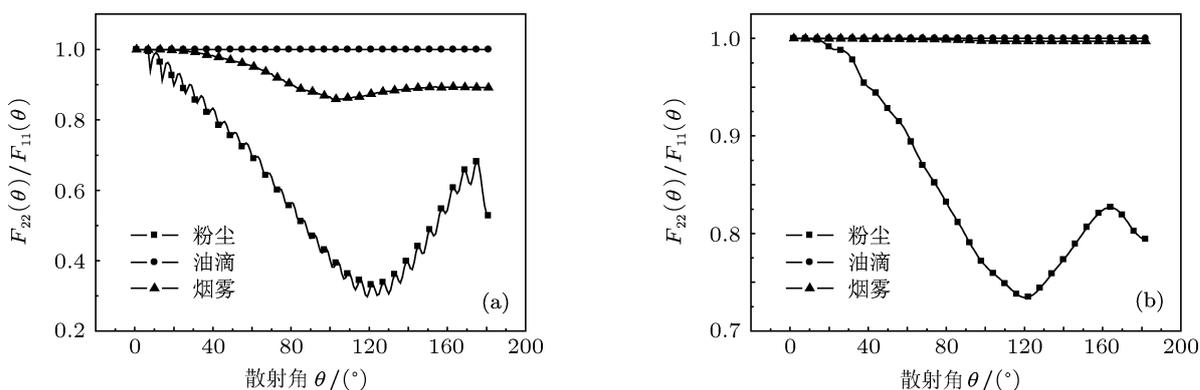


图3 归一化散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布 (a) 入射光波长为 300 nm; (b) 入射光波长为 900 nm

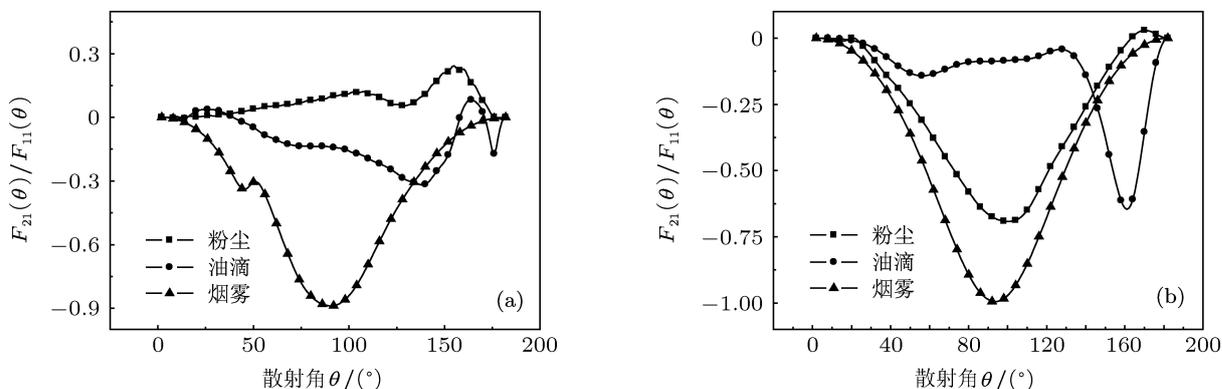
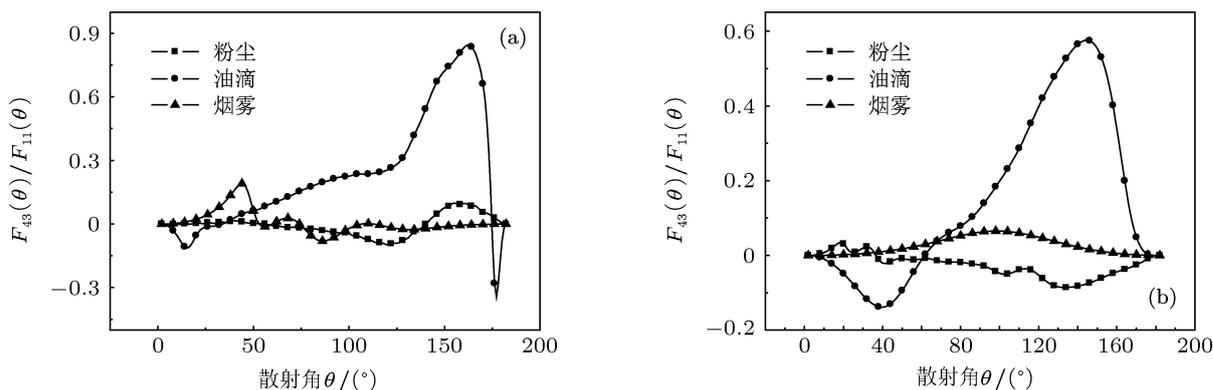


图4 归一化散射矩阵元素  $F_{21}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布 (a) 入射光波长为 300 nm; (b) 入射光波长为 900 nm


 图5 归一化散射矩阵元素  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布 (a) 入射光波长为 300 nm; (b) 入射光波长为 900 nm

时, 三种颗粒的光散射矩阵元素  $F_{21}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的变化无明显规律性, 当入射光波长为 900 nm 时, 粉尘、烟雾的光散射矩阵元素  $F_{21}(\theta)/F_{11}(\theta)$  呈近似反抛物线趋势, 而油滴颗粒在散射角  $120^\circ$  到  $180^\circ$  区间呈局部反抛物线趋势; 由图 5(a), 5(b) 可知: 除油滴颗粒外, 烟雾颗粒和粉尘颗粒的光散射矩阵元素  $F_{43}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的绝对变化相对较小。

$F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  反映了颗粒在形貌上的区别. 如图 2(a), 2(b) 所示: 入射光波长由 300 nm 变化到 900 nm 时, 由于颗粒形貌的差异, 三种颗粒的归一化光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角  $\theta$  的分布曲线出现了不同的变化: 油滴悬浮颗粒的散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  没有发生变化, 数值保持为 1; 粉尘颗粒的散射矩阵元  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布特性近似相同, 大约在散射角  $\theta = 120^\circ$  有最小值, 并在散射角  $30^\circ$  到  $180^\circ$  之间显著偏离数值 1; 相比之下, 火灾烟雾颗粒矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布曲线发生了显著的改变, 入射光波长为 300 nm 时, 在散射角  $80^\circ$  到  $180^\circ$  的区间内, 明显偏离数值 1, 而入射光波长为 900 nm 时,  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  近似为数值 1. 总之, 入射光波长由 300 nm 变化到 900 nm 时, 颗粒光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  的分布变化更加具有规律性, 可结合数字逻辑运算加以区分。

#### 4 利用双波长入射光区分非火灾烟雾颗粒

如上一节所述, 当入射光波长由 300 nm 变化到 900 nm 时, 火灾烟雾颗粒与非火灾烟雾颗粒的归一化散射矩阵元  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$  随散射角的分布

呈现了显著差异, 因此可以通过信号处理和逻辑判断对火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒加以区分。

如图 6 所示, 脉冲激光器交替产生波长分别为 300 和 900 nm 的入射光, 经颗粒群散射, 探测归一化的光散射矩阵元素  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)$ , 并输出逻辑信号: 当  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta) = 1$  时, 输出逻辑信号 1; 当  $F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta) \neq 1$  时, 输出逻辑信号 0. 将入射光波长分别为 300 和 900 nm 时得到的输出信号进行逻辑处理

$$A \oplus B = \bar{A}B + A\bar{B}, \quad (10)$$

其中  $A$  为入射光波长为 300 nm 时,  $[F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)]_{300}$  输出的逻辑真值;  $B$  为入射光波长为 900 nm 时,  $[F_{22}(\theta)/F_{11}(\theta)]_{900}$  输出的逻辑真值.  $A \oplus B = 0$  表示不报警,  $A \oplus B = 1$  表示报警. 在探测器光学散射腔内出现以下四种情况时, 报警器的状态分别为:

1) 光学散射腔中只存在油滴颗粒, 入射光波长分别为 300, 900 nm 时, 得到逻辑信号  $A = 1, B = 1$ , 逻辑处理结果为  $A \oplus B = 0$ , 不报警, 减少了油滴颗粒引起的误报;

2) 光学散射腔中只存在火灾烟雾颗粒, 入射光波长分别为 300, 900 nm 时, 得到逻辑信号  $A = 0, B = 1$ , 逻辑处理结果为  $A \oplus B = 1$ , 报警, 实现了火灾烟雾的报警;

3) 当光学散射腔中只存在粉尘颗粒时, 入射光波长分别为 300, 900 nm 时, 得到逻辑信号  $A = 0, B = 0$ , 逻辑处理结果为  $A \oplus B = 0$ , 不报警, 减少了由粉尘颗粒引起的误报;

4) 当光学散射腔中颗粒浓度很小、散射光很弱时, 入射光波长分别为 300, 900 nm 时, 得到逻辑信号  $A = 0, B = 0$ , 逻辑处理结果为  $A \oplus B = 0$ , 不报警。

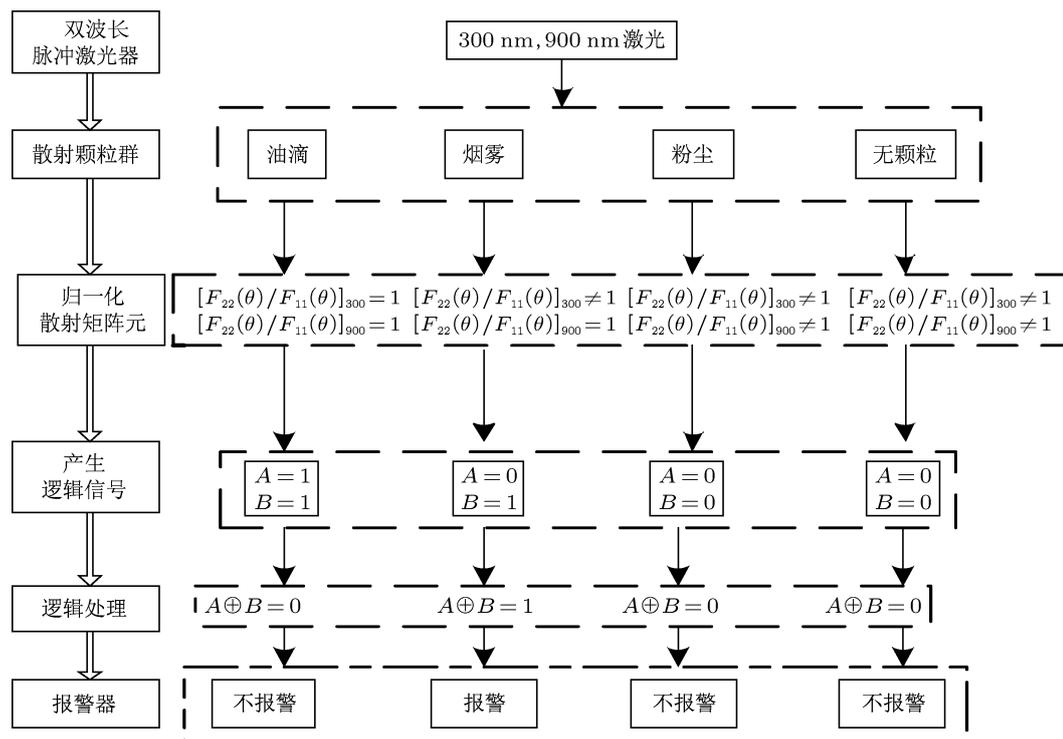


图6 双波长入射光区分非火灾烟雾颗粒方法的流程图示意图

## 5 结论

火灾烟雾颗粒和油滴悬浮颗粒、粉尘悬浮颗粒等非火灾烟雾颗粒在微观形貌上的区别,对反映颗粒光散射特性的散射矩阵有重要影响.通过对火灾烟雾颗粒的多分散分形模型以及油滴的球形模型和粉尘的随机模型光散射矩阵的数值计算和比较研究发现:入射光波长改变时,火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒的光散射矩阵存在着显著差异.传

统的火灾探测器采用单波长入射光照射,检测颗粒的散射光光强实现报警,无法区分火灾烟雾颗粒和非火灾烟雾颗粒,有可能引发误报.不同于传统的感烟探测,双波长抗干扰光电感烟探测采用 300, 900 nm 双波长入射光照射,检测颗粒的归一化散射矩阵元,并结合异或逻辑运算实现报警,可排除大气中油滴悬浮颗粒、粉尘悬浮颗粒等非火灾烟雾颗粒的干扰,降低非火灾烟雾颗粒引起的误报,完善光电感烟探测方法.

- [1] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A 2002 *Scattering, Absorption and Emission of Light by Small Particles* (UK: Cambridge University Press) 3 68
- [2] Kooyul U O, Faeth G M, Farias T L 1995 *Combust. Flame* **100** 621
- [3] Zubkoe, Shkuratovy, Videeng 2006 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **5100** 483
- [4] Waterman P C 1965 *Proc. IEEE* **53** 805
- [5] Waterman P C 1971 *Phys. Rev. D* **3** 825
- [6] Loepfe M, Ryser P, Tompkin C 1997 *J. Fire Safety* **29** 185
- [7] Xie Q Y 2006 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [谢启源 2006 博士学位论文(合肥:中国科技大学)]
- [8] Nousiainen T, Muinonen K 1999 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **63** 643
- [9] Wu Y, Zhou X D 2007 *J. Environ. Occ. Med.* **24** 528 (in Chinese) [吴禹,周向东 2007 环境与职业医学 **24** 528]

- [10] Zhang Q, Deng X J, Zhang Q X, Li Y D, Zhang Y M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7442 (in Chinese) [张青,邓小玖,张启兴,李耀东,张永明 2010 物理学报 **59** 7442]
- [11] Michael M I, Larry D T, Daniel W 1996 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **55** 535
- [12] Dingeman J W, Michael M I, Andreas M, Barbara E C 1997 *Appl. Opt.* **36** 4305
- [13] Zhang Y G, Deng X J, Li Y D, Sun W, Zhang Y M 2012 *Chin. J. Lasers* **39** 0408004 (in Chinese) [张延岗,邓小玖,李耀东,孙悟,张永明 2012 中国激光 **39** 0408004]
- [14] Qiao L F, Zhang Y M, Xie Q Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6736 (in Chinese) [乔利锋,张永明,谢启源 2007 物理学报 **56** 6736]
- [15] Shu X M, Fang J, Shen S F, Liu Y J, Yuan H Y, Fang 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]

# Mechanism of dual-wavelength anti-jamming photoelectric smoke-detection\*

Sun Wu<sup>1)</sup> Deng Xiao-Jiu<sup>1)</sup> Li Yao-Dong<sup>2)</sup> Zhang Yong-Ming<sup>2)</sup>†  
Zheng Sai-Jing<sup>3)</sup> Wang Wei-Miao<sup>3)</sup>

1) (*College 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*)

3) (*Technical Center of Shanghai Tobacco Corporation, Shanghai 200082, China*)

(Received 2 July 2012; revised manuscript received 21 August 2012)

## Abstract

Using the T-matrix method, detailed numerical computation and comparative analysis on the distributions of light scattering matrix of fire smoke particles and non-fire smoke particles are carried out. The results show that when the wavelength of incident light changes, the degrees of variation on elements of fire smoke particles are different from those of non-fire smoke particles. By using dual-wavelength pulsed laser as incident light, through detecting appropriate element of light scattering matrix and combining XOR logical operation, the fire smoke particles can be distinguished from non-fire smoke particles, thereby reducing the misinformation caused by non-fire smoke particles.

**Keywords:** scattering, T-matrix, dual-wavelength

**PACS:** 02.10.Yn, 42.68.Mj, 92.60.Ta

**DOI:** 10.7498/aps.62.030201

---

\* Project supported by the Foundation of State Key Laboratory of Fire Science of China (Grant No. HZ2009-KF08) and the Open Foundation of Shanghai Tobacco Corporation, China (Grant No. K2011-1-010).

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