

〈制导与对抗〉

随机分布烟幕凝聚粒子对激光的消光特性研究

类成新, 张化福, 刘汉法

(山东理工大学 理学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 基于团簇-团簇凝聚 (CCA) 模型采用蒙特卡罗方法对随机分布的碳黑烟幕凝聚粒子进行了模拟, 用离散偶极子近似 (DDA) 方法研究了该模型对激光的消光特性。研究表明: 碳黑烟幕凝聚粒子对激光的消光特性受原始微粒数量及粒径的影响, 粒子的凝聚将削弱烟幕的红外消光性能; 当凝聚结构中原始微粒的数量一定时, 存在使烟幕红外消光性能达到最大的原始微粒粒径。

关键词: 烟幕; 凝聚粒子; 消光系数; 离散偶极子近似方法

中图分类号: TQ567.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2009)09-0528-04

Study on Extinction Characteristics of Randomly Distributed Smoke Screen Cluster Agglomerates to the Laser

LEI Cheng-xin, ZHANG Hua-fu, LIU Han-fa

(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255049, China)

Abstract: Cluster-cluster aggregation (CCA) model based on Monte Carlo method was used to simulate the structure of the randomly distributed smokescreen cluster agglomerates, and the extinction characteristics of that model to the laser were calculated using the discrete dipole approximation (DDA) method. Results show that the extinction characteristics were determined by the diameter and number of primitive particles and they could be decreased by an aggregation process. For a given primitive particle number, maximum extinction is obtained by the clusters with optimum radius of primitive particles.

Key words: smokescreen; cluster agglomerates; extinction coefficient; discrete dipole approximation method

引言

20世纪60年代以来, 军用光电探测技术得到了迅速发展, 外国军队陆续装备了各种类型的光电观瞄器材, 改善了部队在夜间和不良条件下的作战能力, 同时各种制导系统的命中率也得到了提高。军用光电探测技术的迅速发展, 给防御方造成了很大的威胁, 而烟幕干扰技术是降低这种威胁的有效手段之一, 它通过对入射激光信号的散射和吸收, 削弱其能量, 以降低激光武器系统的效能。在烟幕的形成过程中, 烟幕原始微粒在相互间的作用下不可避免地发生碰撞, 从而聚集在一起形成具有分形结构的凝聚粒子^[1]。常见的一些烟幕微粒, 例如碳黑, 就是由微小粒子凝聚而成的凝聚粒子。凝聚粒子的消光特性对于烟幕的消光机理、新型烟幕技术等研究具有十分重要的意义。国内外对于给定结构的凝聚粒子的消光性能进行过

许多研究^[2-9], 但将消光性能研究与实际的复杂结构联系起来模拟开展的比较少。鉴于烟幕原始微粒的凝聚过程是随机的, 实际的凝聚粒子具有千变万化的结构, 反映出的消光特性是所有形态的统计平均, 因此有必要研究能客观反映实际烟幕凝聚粒子消光特性的方法。为此, 本文首先根据团簇-团簇凝聚 (CCA) 模型的分形理论采用蒙特卡罗方法对随机分布的碳黑烟幕凝聚粒子进行了模拟, 然后利用离散偶极子近似 (DDA) 方法研究了随机分布的烟幕凝聚粒子对激光的消光特性。此研究为进一步研究烟幕的消光机理, 改进和发展新型烟幕技术具有现实的指导意义。

1 基本理论

离散偶极子近似方法 (Discrete Dipole Approximation) 是由 Purcell 和 Pennypacker^[10]于1973年首次提出, 经过 Draine 等人的进一步改进, 逐步发展成为

收稿日期: 2009-6-1; 修订日期: 2009-08-08.

作者简介: 类成新 (1976-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事烟幕技术方面的研究。

一种原则上可应用于任意形状及尺寸的粒子的吸收、散射及消光等光学性质进行计算的数值方法^[11,12]。DDA 方法的基本思想是:将连续散射物体近似为有限个可极化的点阵,每个点通过对局域电场(入射场以及其他点的辐射场)的响应获得偶极矩,散射体上所有点在远场的辐射的总和构成散射场。若将散射体离散为 N 个点,每个点的极化率为 α_j , 坐标为 r_j ($j=1, 2, \dots, N$) 处的电场为 \vec{E}_j (入射场 $\vec{E}_{inc,j} = \vec{E}_0 \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}_j - i\alpha t)$ 与其他 $N-1$ 个偶极子的散射场的总和), 则该点的偶极矩 \vec{P}_j 为:

$$\vec{P}_j = \alpha_j \vec{E}_j = \alpha_j (\vec{E}_{inc,j} - \sum_{k \neq j} A_{jk} \vec{P}_k) \quad (1)$$

式中: 系数 A_{jk} 为 3×3 矩阵:

$$A_{jk} = \frac{\exp(ikr_{jk})}{r_{jk}} \left[k^2 (\hat{r}_{jk} \hat{r}_{jk} - \vec{I}_3) + \frac{ikr_{jk} - 1}{r_{jk}^2} (3\hat{r}_{jk} \hat{r}_{jk} - \vec{I}_3) \right] \quad (2)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$, λ 为入射波长; $r_{jk} = |\vec{r}_j - \vec{r}_k|$, $\hat{r}_{jk} = (\vec{r}_j - \vec{r}_k)/r_{jk}$, \vec{I}_3 为 3×3 单位矩阵。若定义 $A_{jj} = \alpha_j^{-1}$, 则偶极矩 \vec{P}_j 满足 $3N$ 个复线性方程组:

$$\sum_{k=1}^N A_{jk} \vec{P}_k = \vec{E}_{inc,j} \quad (3)$$

由式(3)可解出 \vec{P}_k , 求得 \vec{P}_k 后可以得到总消光截面 C_{ext} , 吸收截面 C_{abs} 以及散射截面 C_{sca} ^[11]:

$$C_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(\vec{E}_{inc,j} \cdot \vec{P}_j)$$

$$C_{abs} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im}[\vec{P}_j \cdot (\alpha_j^{-1})^* \vec{P}_j] - \frac{2}{3} k^3 |\vec{P}_j|^2 \right\} \quad (4)$$

$$C_{sca} = C_{ext} - C_{abs}$$

而相应的消光效率因子, 吸收效率因子和散射效率因子分别为: $Q_{ext} = C_{ext}/\pi a_{eff}^2$, $Q_{abs} = C_{abs}/\pi a_{eff}^2$, $Q_{sca} = C_{sca}/\pi a_{eff}^2$, 其中 a_{eff} 为等效半径(等体积球形粒子半径)。对于随机取向的烟幕凝聚粒子的消光特征量

由式(5)得到^[11]:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi Q(\beta, \theta, \phi) d\beta d(\cos \theta) d\phi \quad (5)$$

式中: $\langle Q \rangle$ 为烟幕凝聚粒子消光(吸收或散射)效率因子的统计平均值; $Q(\beta, \theta, \phi)$ 为系统坐标中某特定取向时烟幕凝聚粒子消光(吸收或散射)效率因子, 其中 β, θ, ϕ 为空间方位角, 取值分别为 $\beta \in [0, 2\pi)$, $\theta \in [0, \pi)$, $\phi \in [0, 2\pi)$ 。在研究烟幕时, 通常用质量消光系数(MEC)来度量其消光性能, 其质量消光系数(MEC)与消光效率因子的关系^[13]为:

$$\alpha = \frac{GQ_c}{\rho V} = \sum_i \frac{3Q_{ei}}{2\rho d_i} = \frac{3\langle Q_c \rangle}{2N\rho d} \quad (6)$$

式中: G 为微粒的几何横截面积; Q_c 为消光效率因子; ρ 为材料密度; V 为凝聚粒子的体积; d_i 为第 i 个粒子的直径, 文中我们考虑所有的粒子直径相同(均为 d) 的情况。

2 数值结果与分析

本文研究模型是以 CCA 模型^[14]为基础, 采用蒙特卡罗方法模拟具有分形结构的碳黑烟幕凝聚粒子, 部分(原始微粒数量 $N=50, N=100, N=150$) 碳黑烟幕凝聚粒子结构模拟结果如图 1 所示。

该模型原始微粒数量与分形维数之间的关系为 $N = k_f (R_g/d_p)^{D_f}$, D_f 为分形维数, k_f 为前向因子, 两者都是确定的常数, 文中两者取值分别为 $D_f=1.8$, $k_f=5.8$; R_g 为凝聚粒子的平均回转半径: $R_g^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2$,

其中 r_i 为第 i 个原始微粒到凝聚粒子的质心的距离。利用离散偶极子近似方法计算了随机分布碳黑烟幕凝聚粒子在 $1.06 \mu\text{m}$, $10.6 \mu\text{m}$ (军用激光制导系统常用短波红外和长波红外波段, 两个波长下碳黑凝聚粒子的复折射率分别为 $1.8+0.5i$, $3.102+1.30i$ ^[15]) 处的质量消光(吸收、散射)系数, 计算结果如图 2、图 3 所示。

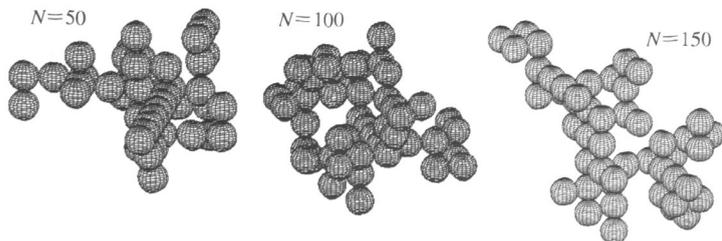


图 1 含不同数量原始微粒的凝聚粒子结构模拟结果

Fig.1 The structure of cluster agglomerates consisting of different number primary particles

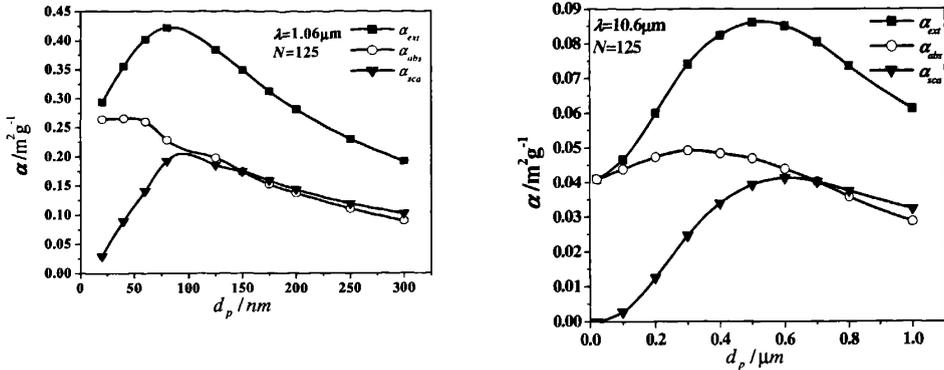


图2 不同入射波长下凝聚粒子消光系数、吸收系数和散射系数与原始微粒粒径的关系

Fig.2 Mass extinction coefficient, mass absorption coefficient and mass scattering coefficient vs primary particles diameter at different wavelength

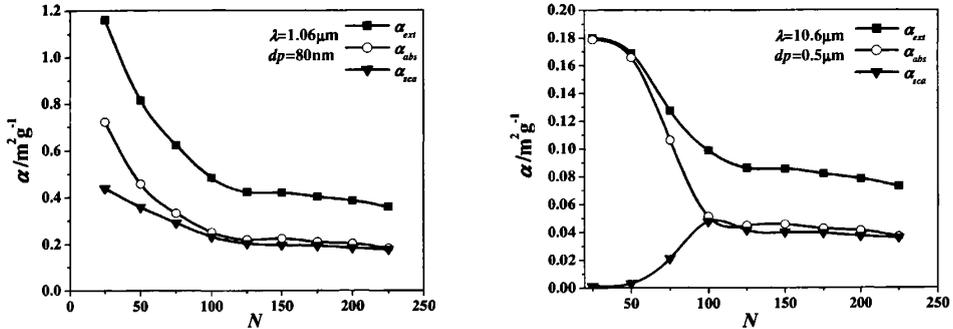


图3 不同入射波长下凝聚粒子消光系数、吸收系数和散射系数与原始微粒数量的关系

Fig.3 Mass extinction coefficient, mass absorption coefficient and mass scattering coefficient vs primary particles number at different wavelength

图2给出不同入射波长下,原始微粒数量为 $N=125$ 的随机分布碳黑烟幕凝聚粒子质量消光(吸收、散射)系数随原始微粒粒径变化曲线。由图2可以看出,对于这两个波长,碳黑烟幕凝聚粒子的质量消光(吸收、散射)系数曲线均具有一个峰值。这表明对于给定入射波长的辐射,碳黑烟幕凝聚粒子有一最佳粒径,这一粒径处,碳黑烟幕凝聚粒子对激光的消光性能最好,同时随着入射波长的不同,峰值的大小变化比较明显。图2还表明,烟幕凝聚粒子中原始微粒粒径较小时,消光作用以吸收为主,并且粒径越小,吸收效应越明显,随着粒径的增大,散射在消光中的比例开始变大,当粒径达到一定值后,散射在消光中占主导地位,这与单个球形Mie理论的结果类似。

图3给出了图2所示的碳黑凝聚粒子最佳粒径处,其质量消光(吸收、散射)系数随原始微粒数量变化曲线。由图3知,对于两个入射波长,随着凝聚原始微粒数量 N 的增加,碳黑烟幕凝聚粒子的质量消

光系数和吸收系数均减小,说明原始微粒的凝聚使烟幕的消光性能减弱,因此对于要求具有较好遮蔽能力的烟幕来说,采用某种手段提高烟幕凝聚粒子的分散性有助于提高烟幕对入射辐射的衰减能力。图3还表明,烟幕凝聚粒子中原始微粒数量较小时,消光作用以吸收为主,并且粒子数量越小,吸收效应越明显,这一现象在波长为 $10.6\mu\text{m}$ 时更为明显,说明碳黑烟幕凝聚粒子在远红外波段的红外消光主要以吸收为主,吸收在消光中占绝对主导地位;随着粒子数量的增大,散射在消光中的比例开始变大,当粒子数量达到一定值后,散射效应与吸收效应相接近。

3 结论

本文利用离散偶极子近似方法研究了由蒙特卡罗方法模拟的随机分布的碳黑烟幕凝聚粒子对激光的消光特性,给出了随机分布碳黑烟幕凝聚粒子对不同波长激光的质量消光(吸收,散射)系数与组成凝

聚粒子的原始微粒粒径和数量的数值关系。研究表明: ①随机分布的烟幕凝聚粒子对激光的消光特性主要取决于原始微粒的粒径和数量; ②凝聚粒子的消光和吸收系数随原始微粒数量的增加而减小, 说明原始微粒的凝聚使烟幕凝聚粒子的消光和吸收性能减弱, 采用某种手段提高烟幕凝聚粒子的分散性有助于提高烟幕对入射激光的衰减能力; ③当烟幕凝聚粒子中原始微粒数量一定时, 存在使消光性能达到最大的原始微粒粒径。如果采取某种技术手段控制烟幕凝聚粒子中的原始微粒的粒径, 就有望提高烟幕的消光性能。

特别感谢美国普林斯顿大学的 B. T. Draine 教授向本文作者提供的 DDA 程序。

参考文献:

- [1] Dobbins R A, Megaridis C M. Morphology of flame generated soot as determined by thermophoretic sampling[J]. *Langmuir*, 1987, 3(2): 254-259.
- [2] Mishchenko M I, Tracis L D, Mackowski D W. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer.*, 1996, 55(5): 535-575.
- [3] Mackowski D W, Mishchenko M I. Calculation of the T matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres[J]. *J Opt Soc Am A.*, 1996, 13(11): 2266-2278.
- [4] Dobbins R A, Mulholland G W, Bryner N P. Comparison of a fractal smoke optics model with light extinction measurements[J]. *Atmospheric Environment.*, 1994, 28(5): 889-897.
- [5] Mackowski D W. Calculation of total cross sections of multiple-sphere clusters[J]. *J Opt Soc Am A.*, 1994, 11: 2851-2861.
- [6] 李毅. 非球形微粒及其形成烟幕的消光机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- [7] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕中红外光谱和红外消光性能研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(5): 397-400.
- [8] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数测试研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(6): 636-640.
- [9] 王红霞, 刘代志, 宋子彪, 等. 纳米碳纤维烟幕红外消光性能研究[J]. *红外技术*, 2007, 29(6): 324-327.
- [10] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption by non-spherical dielectric grains[J]. *Astrophys. J.*, 1973, 186: 705-714.
- [11] Draine B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains[J]. *Astrophys. J.*, 1988, 333: 848-872.
- [12] Draine B T, Flatau P J. The discrete-dipole approximation for scattering calculations[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(4): 1491-1499.
- [13] Kenley R A, Tracht S, Townsend M, et al. ADA 104 761: 667.
- [14] Jullien R, Botet R. *Aggregation and fractal aggregates*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1987: 46-50.
- [15] Wu J S, Krishnan S S, Faeth G M. Refractive indices at visible wavelength of soot emitted from buoyant turbulent diffusion flames[J]. *ASME Journal of heat transfer*, 1997, 119: 230-237.