

文章编号:1004-4213(2010)06-1021-5

# 激光在随机分布烟尘团簇粒子中的衰减特性\*

类成新<sup>1</sup>, 吴振森<sup>2</sup>, 张化福<sup>1</sup>, 刘汉法<sup>1</sup>

(1 山东理工大学 理学院, 山东 淄博 255049)

(2 西安电子科技大学 理学院, 西安 710071)

**摘要:**基于分形理论,采用团簇-团簇凝聚模型对随机分布烟尘团簇粒子的分形结构进行了模拟.利用离散偶极子近似方法研究了不同类型的随机分布烟尘团簇粒子的单次散射特性.利用蒙特卡罗方法研究了激光信号在随机分布烟尘团簇粒子中的传输衰减特性.讨论了入射角、激光波长、烟尘粒子数密度以及组成单个烟尘团簇粒子的原始微粒粒径和数目等参量对激光衰减特性的影响.研究结果对激光在复杂随机介质中的传输衰减特性分析提供了理论依据.

**关键词:**烟尘团簇粒子;离散偶极子近似方法;蒙特卡罗方法;衰减特性

**中图分类号:**TN24;TN012

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103906.1021

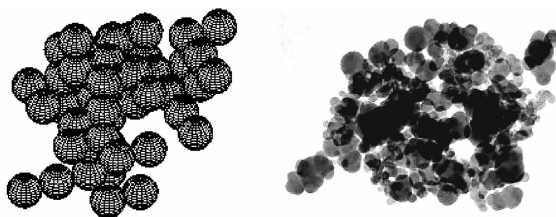
## 0 引言

大气中的烟尘对工作在一定波段的激光武器系统的性能有着不可忽略的影响.特别是在复杂的战场环境下,由于爆炸或燃烧引起的烟雾,以及爆炸所掀起的沙尘将会对激光信号产生衰减、闪烁和去极化效应.激光在烟尘中散射与衰减的研究对烟尘大气环境下激光目标探测、跟踪、测距和定位,遥感,激光通信质量,导弹制导和引信等方面都有重要的理论和应用价值.在研究随机分布介质中激光传输衰减特性时,通常采用实测研究或理论研究.由于实测研究不仅需要复杂的测试设备,还需要大范围的实验场地,同时要花费大量的人力和时间,因此,至今缺乏足够的实测数据.在理论研究中通常有两种方法:一种是将由稀疏分布的悬浮粒子组成的烟尘视为一种等效介质,而求解激光在这种介质中的传输衰减特性;另一种方法是先求出单个烟尘粒子的散射特性,然后,考虑烟尘介质整体对激光传输的影响.由于烟尘中的粒子是由大量的基本粒子聚集而成的具有复杂分形结构的团簇粒子,其结构千变万化,具有一定的随机性,另外组成团簇粒子的原始微粒的粒径和数目对其吸收散射特性影响比较大<sup>[1]</sup>,因此团簇粒子的散射特性不能按单个散射体理论来进行计算,按其他的具体简单形态进行计算也不理想<sup>[2]</sup>.本文采用第二种方法,首先采用离散偶极子近似方法<sup>[1]</sup>研究了不同类型随机分布烟尘团簇粒子的

单次散射特性,然后利用蒙特卡罗方法研究了激光在随机分布烟尘团簇粒子层中的传输衰减特性,并重点讨论了烟尘对激光传输衰减的影响因素.

## 1 计算物理模型

文中的烟尘团簇粒子是以团簇-团簇凝聚(Cluster-Cluster Aggregation, CCA)模型<sup>[3]</sup>为基础,利用计算机仿真模拟的,模拟结果如图1(a).图1(b)是在电子显微镜下观察到的已经凝聚而成的炭黑凝聚粒子,图中可以清晰地显示出原始微粒及其凝聚形态.从图1可以看出,采用CCA模型可以很好地模拟实际的烟尘团簇粒子.该模型粒子数目与分形维数之间的关系为 $N = k_f (R_g / d_p)^{D_f}$ ,其中 $d_p$ 和 $N$ 分别为烟尘团簇粒子中原始微粒粒径和数目, $D_f$ 为团簇粒子的分形维数, $k_f$ 为分形因子,两者都是常量,文中取值分别为 $D_f = 1.8$ , $k_f = 5.8$ <sup>[1]</sup>.



(a) Simulative soot agglomerates (b) TEM of carbon agglomerates

图1 烟尘与炭黑团簇凝聚粒子的形貌图

Fig.1 The morphology of soot and carbon agglomerates

## 2 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是研究激光与强散射介质相互作用的常用的数值模拟方法.与其它方法相比较,该方法更能揭示烟尘粒子的多重散射现象,对研究对象

\* 国家自然科学基金(60371020)资助

Tel:0533-2786289

Email:xdpostgraduate@163.com

收稿日期:2009-09-25

修回日期:2009-12-16

的物理模型和几何边界没有任何限制,并且理论上随着模拟光子数量的增加可以达到任意准确度<sup>[4-5]</sup>. 该方法已经成为研究激光在随机分布散射介质中辐射传输问题的常用方法和非实验检验标准,越来越广泛地应用于激光在水下、生物组织以及大气中等传输领域<sup>[6-8]</sup>.

激光穿过随机分布烟尘团簇粒子层传输时,可以将激光考虑成一束光子. 进入烟尘层后,光子在介质空间传播或与烟尘散射体碰撞而发生散射或吸收. 若不考虑非线性效应,则光子与烟尘散射体的碰撞不改变入射波的频率. 单个光子的随机步长和随机行走方向可以通过相应的概率模型和随机数发生器产生的随机数来决定. 光子运动步长由平均自由程的累计概率分布决定,即

$$s = -\ln(1-\xi)/\mu_t \quad (1)$$

这里  $\xi$  为 0 和 1 之间均匀分布的随机数;  $\mu_t$  为衰减系数,它是吸收系数  $\mu_a$  和散射系数  $\mu_s$  之和. 光子在每一个随机位置会发生散射和吸收作用,作用后光子一部分能量被衰减,相应的权重将不断减少,减少的权重  $\Delta W$  可以由式(2)决定

$$\Delta W = W_m \mu_s / \mu_t \quad (2)$$

式中  $\mu_s/\mu_t$  为单个烟尘团簇粒子的单次散射反照率,光子运动一个自由程之后剩余的权重为

$$W_{m+1} = W_m \exp(-\mu_a s_m) \quad (3)$$

另外,光子运动方向的偏移主要由 Henyey-Greenstein<sup>[9]</sup> 相函数决定,其表达式为

$$P(\theta) = (1-g^2)/(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2} \quad (4)$$

式中,  $g$  是不对称因子,表征散射函数的不对称性,反映散射的各向异性程度,散射的方向选择取决于不对称因子. 重复以上行走和作用的过程直到满足某种条件而使光子消亡. 通过对大量( $N$  个)光子的散射路径抽样以及散射方向和位置跟踪,最后检验从介质中逃逸和被吸收的光子<sup>[10]</sup>. 获得平均透过率为

$$T = \frac{1}{N} \sum_1^N P_t \quad (5)$$

式中  $P_t$  为透过率无偏估计,具体表达式为<sup>[11]</sup>

$$P_t = \sum_{m=0}^{\infty} P_m = \sum_{m=0}^{\infty} W_m \exp\left[-\mu_t \frac{h-z_m}{\cos a_m}\right] \cdot \eta(\cos a_m) \cdot \prod_{i=1}^m \eta(h-z_i) \eta(z_i) \quad (6)$$

式中  $a_m$  为光子第  $m$  次散射方向与  $z$  轴的夹角;  $\eta(x)$  为方向函数,  $x > 0$  时,  $\eta(x) = 1$ ;  $x \leq 0$  时,  $\eta(x) = 0$ ;  $W_0 = 1$  为光子的初始权重.

定义衰减率为<sup>[12]</sup>

$$A = 10 \times \log(1/T) \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

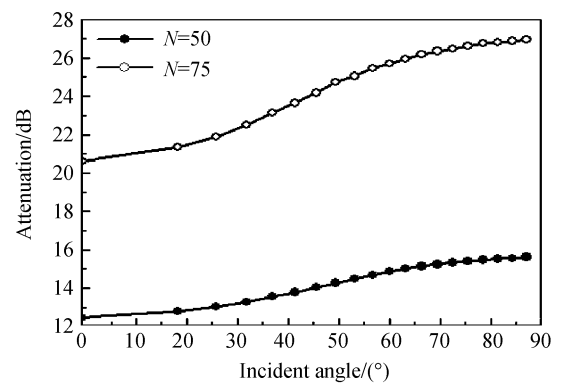
### 3 数值结果及分析

由离散偶极子近似方法计算出的不同类型烟尘团簇粒子的单次散射参量具体数值见表 1,其中  $\lambda$  为入射波长,  $d_p$  和  $N$  分别为组成烟尘团簇粒子的原始微粒粒径和数目,  $\sigma_t, \sigma_s, \sigma_a$  分别为单个烟尘团簇粒子对激光的消光截面、散射截面和吸收截面,  $\omega$  为单次散射反照率,  $g$  不对称因子. 利用所需数据算出粒子层中总的平均消光系数  $\mu_t = n\sigma_t$ , 散射系数  $\mu_s = n\sigma_s$ , 吸收系数  $\mu_a = n\sigma_a$ , 其中  $n$  为烟尘粒子中粒子数密度,然后利用蒙特卡罗方法计算激光的衰减率.

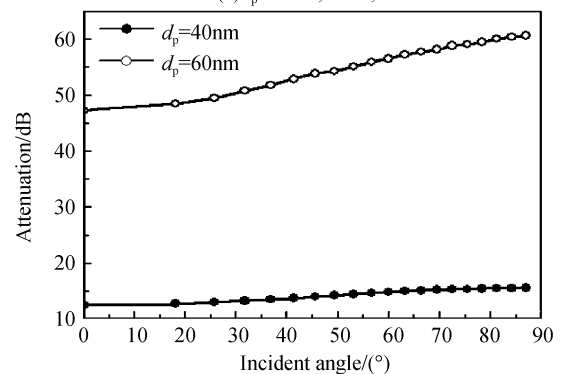
表 1 不同类型的烟尘团簇粒子的单次散射参量  
Table 1 The single scattering parameters of some different soot clusters

$\lambda/\mu\text{m}$	$d_p/\text{nm}$	$N$	$\sigma_a/\mu\text{m}^2$	$\sigma_s/\mu\text{m}^2$	$\sigma_t/\mu\text{m}^2$	$\omega$	$g$
0.532	40	50	0.024 92	0.011 55	0.036 47	0.316 8	0.666 5
	40	75	0.039 16	0.024	0.063 16	0.38	0.703 6
	60	50	0.082 72	0.063 08	0.145 8	0.432 6	0.702 3
1.06	40	50	0.013 113	0.002 197	0.015 31	0.143 5	0.443 9
	40	75	0.021 22	0.004 88	0.0261	0.187	0.562 9
	60	50	0.045 07	0.013 92	0.058 99	0.236	0.606 6

图 2 给出不同类型团簇粒子层中激光能量衰减随入射角的变化曲线. 计算所用激光波长 532 nm, 对应的烟尘团簇粒子的折射率为  $m = 1.85 + 0.5i$ <sup>[13]</sup>,



(a)  $d_p = 40 \text{ nm}, N = 50, 75$



(b)  $N = 50, d_p = 40 \text{ nm}, 60 \text{ nm}$

图 2 不同团簇粒子层中激光能量衰减随入射角的变化  
Fig. 2 Attenuation vs incident angle with different clustered agglomerates

烟尘粒子数密度为  $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , 烟尘粒子层厚为 1 m, 其它参量见表 1. 由图 2 可以看出, 在粒子数密度及介质厚度一定的情况下, 激光能量的衰减随着入射角的增大而增大, 原因在于入射角增大时激光在烟尘粒子层中经过的路程变长, 多重散射的作用增强, 激光被烟尘粒子散射和吸收的概率增大, 能量衰减增大. 另外, 由于组成单个烟尘团簇粒子的原始微粒的粒径和数目都能影响团簇粒子对激光的散射和吸收(如表 1), 因此, 原始微粒的粒径和数目的变化对激光能量的衰减影响也比较大. 如图 2(a), 烟尘粒子层中的烟尘团簇粒子是由相同粒径  $d_p = 40 \text{ nm}$ , 不同粒子数目  $N = 50, 75$  的原始微粒组成的. 随着原始微粒数目的增大, 激光的能量衰减明显增大且随着入射角增长而增大的趋势变大; 图 2(b) 给出的是烟尘团簇粒子原始微粒数目  $N = 50$  时, 原始微粒粒径对激光能量衰减的影响; 激光能量衰减随着烟尘粒子原始微粒粒径的增大而急剧增大. 另外, 图 2 还反映出, 烟尘团簇粒子的原始微粒粒径对激光能量衰减的影响要比其数目对激光能量衰减的影响要显著得多.

图 3 给出不同团簇粒子层中激光能量衰减随粒子数密度的变化曲线. 让激光垂直粒子层入射, 即入射角为  $0^\circ$ , 其它参量和图 2 相同. 由图 3 可以得到:

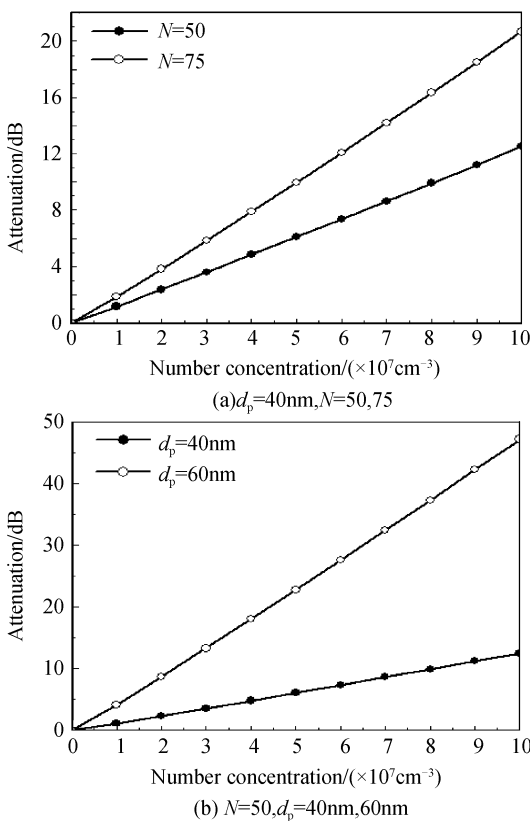


图 3 不同团簇粒子层中激光能量衰减随粒子数密度的变化  
Fig. 3 Attenuation vs number concentration with different clustered agglomerates

在不同团簇粒子组成的相同厚度粒子层中, 激光能量的衰减随着粒子数密度的增大呈线性骤然增大, 因粒子数密度增大时, 光子在粒子层中运动的平均自由程相应减小, 光子在粒子层中传输相同距离与烟尘粒子碰撞的次数增多, 激光的能量衰减将随之增大. 另外, 当团簇粒子的原始微粒的粒径和数目增大时, 激光能量衰减随粒子数密度增大而增大的趋势变大, 这是由于原始微粒粒径和数目增大时, 团簇粒子对激光的散射和吸收效应增强造成的.

图 4 和图 5 分别给出了不同波长激光(入射波长为  $1060 \text{ nm}$  时, 对应的烟尘团簇粒子的复折射率为  $m = 1.8 + 0.5i$  [13])在相同烟尘粒子层中传输时, 其能量衰减随入射角和粒子数密度变化曲线. 其中两图中烟尘粒子层厚为 1 m, 原始微粒粒径  $d_p = 40 \text{ nm}$ , 数目  $N = 50$  是相同的, 不同是图 4 中烟尘团簇粒子的粒子数密度为  $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , 图 5 中激光入射角为  $0^\circ$ . 由图 4 和图 5 可知: 激光在同一烟尘粒子层中的能量衰减随着其波长的增长而减小且随着入射角和粒子数密度的增大其减小的幅度逐渐变大, 其根本原因在于不同波长对应团簇粒子的复折射率和尺寸参量不同(入射波变大时, 对应粒子的尺寸参

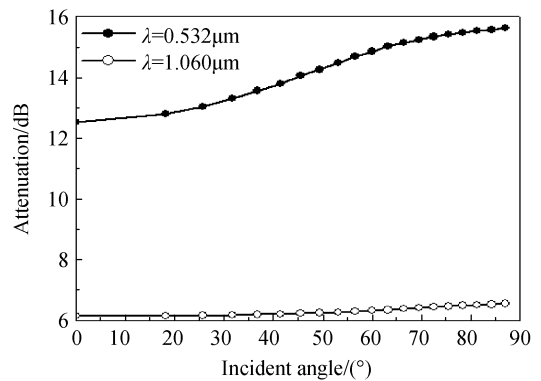


图 4 不同波长激光能量衰减随入射角变化  
Fig. 4 Attenuation vs incident angle with different wavelengths

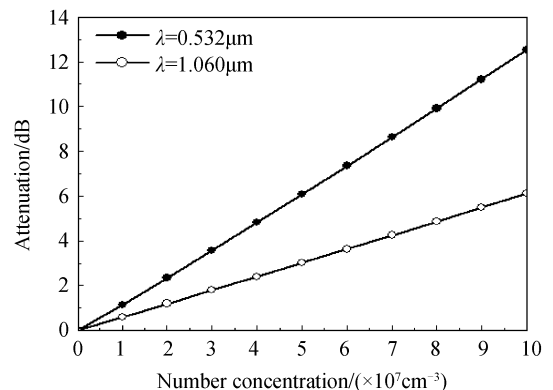


图 5 不同波长激光能量衰减随粒子数密度变化  
Fig. 5 Attenuation vs number concentration with different wavelengths

量反而变小),从而影响团簇粒子对入射激光的散射和吸收效率,进而影响激光能量的衰减.

## 4 结论

本文利用离散偶极子近似方法研究了不同类型的随机分布烟尘团簇粒子的单次散射特性,利用蒙特卡罗方法研究了激光在随机分布烟尘团簇粒子层的传输衰减特性.结果表明:在随机分布烟尘团簇粒子中,激光能量的衰减取决于团簇粒子的结构(组成团簇粒子的原始微粒的粒径和数目)、烟尘中粒子数密度、入射激光的入射角度以及入射波长等因素.激光能量的衰减与烟尘中粒子数密度成线性正比关系.在实际情况中烟尘粒子的粒子数密度分布随高度变化,在研究激光在烟尘中传输时,还需要考虑烟尘粒子分布的非均匀性对激光能量衰减的影响.本文的研究结果可以用于战场烟尘中激光制导、传输、跟踪和光电对抗中.

### 参考文献

- [1] LEI Cheng-xin, ZHANG Hua-fu, LIU Han-fa. Numerical calculation of Mueller matrices of randomly distributed soot cluster agglomerates[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(10): 7168-7175.  
类成新, 张化福, 刘汉法. 随机分布烟尘簇团粒子缪勒矩阵的数值计算[J]. *物理学报*, 2009, **58**(10): 7168-7175.
- [2] HOLLER S, AUGER J C, STOUT B, *et al.* Observations and calculations of light scattering from clusters of spheres[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(36): 6873-6887.
- [3] ALSUNAIDI A, LACH H M, GONZALEZ A E, *et al.* Cluster-cluster aggregation in binary mixtures[J]. *Phys Rev E: Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, 2000, **61**(1): 550-556.
- [4] SEYOUNG M, DONGHYUN K, EUNJI S. Monte Carlo study of coherent diffuse photon transport in a homogeneous turbid medium; a degree-of-coherence based approach[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(3): 336-345.
- [5] FOWLER A J, MENGUC M P. Propagation of focused and multibeam laser energy in biological tissue[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2000, **122**(5): 534-540.
- [6] YANG Hong, YANG Xiao-li, TIAN Yong-hong. Analysis of characteristics of light propagation through clouds and monte carlo simulation[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5): 477-479.  
杨虹, 杨小丽, 田永洪. 激光在云层中传输的特性分析及蒙特卡罗模拟[J]. *激光技术*, 2008, **32**(5): 477-479.
- [7] LI Zhen-hua, XU Xiao-dong, HE An-zhi. The application of monte carlo method in simulating light propagation in complex biological-tissue [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2000, **24**(6): 557-560.  
李振华, 徐晓东, 贺安之. 复杂生物组织中光传输规律的 Monte Carlo 方法及应用[J]. *南京理工大学学报*, 2000, **24**(6): 557-560.
- [8] YANG Hong-qin, LIN Qing-yuan, XIE Shu-sen, *et al.* Monte carlo to determine the temperature distribution inside biological tissue[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2007, **18**(10): 1269-1272.  
杨洪钦, 林清源, 谢树森, *等*. 蒙特卡罗方法确定生物组织体内温度分布[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(10): 1269-1272.
- [9] BINZONI T, LEUNG T S, GANDJBAKHACHE A H, *et al.* The use of the Henyey - Greenstein phase function in Monte Carlo simulations in biomedical optics[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2006, **51**(17): 313-322.
- [10] LEI Cheng-xin, WU Zhen-sen. Studying on the properties of light propagation and attenuation in the soot [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, **19**(Suppl): 217-220.  
类成新, 吴振森. 光波在煤烟中的传播与衰减特性研究[J]. *电波科学学报*, 2004, **19**(Suppl): 217-220.
- [11] WU Zhen-sen, YOU Jin-guang, YANG Rui-ke. Study on laser attenuation character in sand and dust storms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(9): 1075-1080.  
吴振森, 由金光, 杨瑞科. 激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1075-1080.
- [12] LIU Ming-hai, HU Xi-wei, JIANG Zhong-he, *et al.* Property of electromagnetic wave attenuation in the artificial plasmas of atmosphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(6): 1317-1320.  
刘明海, 胡希伟, 江中和, *等*. 电磁波在大气层人造等离子体中的衰减特性[J]. *物理学报*, 2002, **51**(6): 1317-1320.
- [13] KRISHNAN S S, LIN K C, FAETH G M. Extinction and scattering properties of soot emitted from buoyant turbulent diffusion flames[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, **123**(2): 331-339.

## Attenuation Characteristics of Laser in the Randomly Distributed Soot Agglomerates

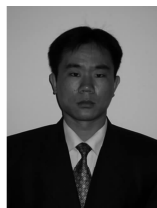
LEI Cheng-xin<sup>1</sup>, WU Zhen-sen<sup>2</sup>, ZHANG Hua-fu<sup>1</sup>, LIU Han-fa<sup>1</sup>

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

(2 *School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

**Abstract:** Based on fractal theory, the cluster-cluster aggregation (CCA) model is used to simulate the fractal structure of the soot agglomerates with random distribution, and the properties of single scattering of randomly distributed soot agglomerates are studied using the discrete dipole approximation (DDA) method. Then the laser attenuation characteristics in the randomly distributed soot cluster agglomerates are studied using Monto Carlo method. The effects of the incident angle, laser wavelength, number concentration, the number and diameter of primary particles in soot agglomerates on the attenuation properties of laser are discussed. The research result provides theoretical basis to the propagation and attenuation characteristics of laser in the complex random medium.

**Key words:** Soot agglomerates; Discrete dipole approximation method; Monto Carlo method; Attenuation characteristics



**LEI Cheng-xin** was born in 1976 and received the M. S. degree from Xidian University in 2005. Now he works at Shandong University of Technology, and his research interests focus on the scattering characteristics of the laser.