

1.06 μm 激光气溶胶凝聚粒子散射特性

黄朝军^{1,2}, 吴振森¹, 刘亚锋²

(1. 西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071;
2. 陕西理工学院 物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 气溶胶是大气电磁环境中的重要组成部分, 气溶胶粒子严重影响 1.06 μm 激光的传输特性。单次散射反照率和不对称因子是研究气溶胶中激光传输特性的一个重要参量。基于 CCA 模型, 模拟了由 64 个球形原始微粒凝聚而成的四种取向气溶胶凝聚粒子。利用离散偶极子近似方法, 数值计算了 1.06 μm 激光入射情况下四种形状气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率和不对称因子随入射角变化的值; 并分析了尺寸参数对单次散射反照率和不对称因子的影响。结果显示: 对于相同数目原始微粒的气溶胶凝聚粒子, 其单次散射反照率和不对称因子明显依赖于入射光的入射角度和气溶胶凝聚粒子的形状; 对于不同尺寸参数的气溶胶凝聚粒子, 其单次散射反照率和不对称因子随尺寸参数的增大而增大, 当尺寸参数大于 3 时, 气溶胶凝聚粒子的散射主要集中于前向散射。

关键词: 气溶胶凝聚粒子; 散射特性; 单次散射反照率; 不对称因子

中图分类号: O434.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2353-05

Scattering characteristics of aerosol aggregation particles of 1.06 μm laser

Huang Chaojun^{1,2}, Wu Zhensen¹, Liu Yafeng²

(1. School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: The aerosol is an important ingredient of atmospheric electromagnetic environment, the aerosol particles affect on the transmission of 1.06 μm laser seriously. The single scattering albedo and asymmetry factor is an important parameter for the research on the laser transmission characteristics in aerosol. Cluster-cluster aggregation (CCA) model was used to simulate four kinds of aerosol aggregation particles consisting of 64 spherical original particles. Combined with the discrete dipole approximation method, the value of single scattering albedo and asymmetry parameter under different incident angles with 1.06 μm laser incident were numerically calculated, and the influence of the size parameters of the single scattering albedo and asymmetry factor was analyzed. The results show that the single scattering albedo and asymmetry factor are significantly dependent on the incident angle and shapes for the aerosol

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(41105107, 61172031); 陕西省自然科学基金(2010JM5011);
陕西省教育厅专项科研项目(2013JK0853)

作者简介: 黄朝军(1977-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事无线电物理和大气光学方面的研究。Email: slghcj@sina.cn

导师简介: 吴振森(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂目标环境电磁光散射特性及波传播方面的研究。

Email: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

aggregation particles with same number of original particles. And for the aerosol aggregation particles with different size parameters, the single scattering albedo and asymmetry factor increases with increasing size parameter, when the size parameter is greater than 3, the scattering of aerosol aggregation particles is mainly concentrated in the forward scattering.

Key words: aerosol aggregation particles; scattering characteristic; single scattering albedo; asymmetry factor

0 引言

自 20 世纪 60 年代第一台激光器问世以来,激光以其高亮度、良好的单色性、方向性和相干性等独特的性质促进了激光技术的飞速发展,并在激光雷达、制导、遥感、探测、通信等军事和民用方面得到了广泛的应用,而这些应用都与激光的大气传输特性密切相关^[1-3]。大气气溶胶作为大气电磁环境的重要组成部分,是指悬浮在大气中直径在 0.001~100 μm 之间的尘埃、烟粒、微生物以及由水和冰组成的云雾、冰晶等固体和液体微粒共同组成的多相体系。大气气溶胶的存在严重影响激光信号的传输质量,特别是对应用最广的 1.06 μm 激光波长,其在大气中传输的衰减主要是气溶胶粒子的散射和吸收。因此,1.06 μm 激光大气传输一直以来都是研究的热点和焦点问题^[1-2,4-6]。

气溶胶粒子的单次散射反照率和不对称因子不仅是描述气溶胶中散射衰减占激光总消光衰减比例和前向散射占总散射比例特性的参数,而且还是研究气溶胶中激光传输特性的重要参量。单次散射反照率和不对称因子的准确计算对气溶胶粒子的激光散射特性和气溶胶中激光传输特性的研究具有重要的应用价值。

实验观察和研究表明,大部分气溶胶粒子并不是单体形状,而是一些小的单体气溶胶原始微粒由于碰撞、粘附等作用形成具有分形结构的随机取向凝聚粒子体系^[7]。气溶胶凝聚粒子形成过程的随机性导致其不仅具有复杂的空间结构,而且还具有分形特征,其激光散射特性的研究只能以数值解的形式给出,比较常用的数值方法有扩展边界条件、矩量法、时域有限差分法和离散偶极子近似法(DDA)等。其中 DDA 方法以其迭代效率高、运算速度快以及灵活性和通用性好等优点,被广泛应用于气溶胶凝聚

粒子光学特性的研究。已有学者利用 DDA 方法分析了原始微粒的数目、粒径的大小、粒子的成分以及入射光的波长等因素对气溶胶凝聚粒子光学特性的影响,但对入射光的入射角度和尺寸参数对气溶胶凝聚粒子光学特性的影响很少讨论。实际上,气溶胶凝聚粒子空间结构的复杂性和形状的不规则性也必将导致其光学特性随入射光入射角的变化而变化;此外,尺寸参数是影响粒子光学特性的一个重要参量,不同的尺寸参数,气溶胶凝聚粒子的光学特性也将不同。结合实际应用,文中利用 DDA 方法数值计算了四种取向气溶胶凝聚粒子在 1.06 μm 红外激光入射情况下单次散射反照率和不对称因子随入射角和尺寸参数变化的值。期望所得结果能为 1.06 μm 红外激光在大气气溶胶中传输特性的研究提供参考和有效的计算方法。

1 理论分析

1.1 DDA 方法

DDA 方法是 Purcell 和 Pennypacker 于 1973 年提出,后经 Draine 等学者的进一步改进,现已成为一种成熟的算法^[8],并广泛应用于分析大气气溶胶粒子的光散射特性。该方法可应用于任意几何形状的散射体,且散射体可以是各向异性和非均匀的。DDA 方法的基本思想是:用有限个离散的、相互作用的小偶极子的阵列来近似实际的粒子,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,散射体所离散的所有偶极子在远场辐射的总和构成散射场。假设将气溶胶凝聚粒子离散为 N 个偶极子,第 j 个偶极子的极化率为 α_j ,坐标为 $\vec{r}_j(j=1,2,\dots,N)$,则气溶胶凝聚粒子中第 j 个偶极子的偶极矩为:

$$\vec{p}_j = \alpha_j \vec{E}_j \quad (1)$$

式中: $\vec{E}_j = \vec{E}_{inc,j} + \vec{E}_{sca,j}$ 为第 j 个偶极子的总电场强度,是入射场 \vec{E}_{inc} 与其他所有偶极子散射场 $\vec{E}_{sca,j}$ 的总和。在获

得每一个偶极子的电偶极矩 \vec{p}_j 之后, 就可由 \vec{p}_j 来求得气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率 ω 和不对称因子 g 。

$$\omega = C_{sca} / C_{ext} \quad (2)$$

$$g = \langle \cos \theta \rangle = \frac{k^3}{C_{sca} |\vec{E}_{inc}|^2} \int d\Omega \hat{n} \cdot \vec{k}^* \left| \sum_{j=1}^N [\vec{p}_j - \hat{n}(\hat{n} \cdot \vec{p}_j)] \exp(-ik\hat{n} \cdot \vec{r}_j) \right|^2 \quad (3)$$

式中: C_{sca} 和 C_{ext} 分别为气溶胶凝聚粒子的散射截面和消光截面, 由公式(4)和公式(5)求解^[8]。

$$C_{sca} = \frac{k^4}{|\vec{E}_{inc}|^2} \int d\Omega^* \left| \sum_{j=1}^N [\vec{p}_j - \hat{n}(\hat{n} \cdot \vec{p}_j)] \exp(-ik\hat{n} \cdot \vec{r}_j) \right|^2 \quad (4)$$

$$C_{ext} = \frac{4\pi k}{|\vec{E}_0|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(\vec{E}_{inc,j} \cdot \vec{p}_j) \quad (5)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$, λ 为入射激光波长; $d\Omega$ 表示立体角微元; \hat{n} 为散射方向的单位矢量; 上标 * 为取复共轭; Im 表示取虚部。

1.2 计算模型

气溶胶凝聚粒子是由小的原始气溶胶单体粒子在随机运动过程中由于碰撞、粘附等作用凝聚而成, 这种形成过程适合用 CCA 模型模拟^[7]。CCA 模型的模拟过程是: 让所有原始气溶胶单体粒子同时进入一个区域并作随机运动, 一旦粒子与粒子相遇就形成粒子团, 这些粒子团进一步与其他随机运动的粒子或粒子团相遇形成更大的粒子团, 直到所有的原始微粒都凝聚在一起。为了对比气溶胶凝聚粒子形成过程的随机性, 文中基于 CCA 模型, 模拟了由 64 个球形原始微粒凝聚而成的四种取向气溶胶凝聚粒子, 如图 1 所示。模拟过程中原始微粒为半径等于

0.5 μm 球形粒子, 可以看出, 对于相同的原始微粒形状和数目, 由于原始微粒和凝聚过程中小粒子团运动的随机性, 导致最终所有原始微粒都凝聚在一起的气溶胶凝聚粒子的空间形态完全不同。说明在研究大气气溶胶光散射问题的实际应用中, 不能只考虑某一种取向气溶胶凝聚粒子空间形态对其光学特性的影响, 而且应该考虑气溶胶凝聚粒子所有可能取向的空间形态, 在计算随机取向气溶胶凝聚粒子的光散射特征量时, 应该对其可能存在的空间取向求统计平均值。

2 数值结果

结合实际应用, 1.06 μm 激光波长是激光制导、雷达、探测和大气遥感探测中最常用的波段, 文中在研究气溶胶凝聚粒子激光散射特性时, 入射面选 xz 平面, 参照参考文献[9], 对应 1.06 μm 激光波长, 气溶胶粒子复折射率为 1.75+0.44i, 数值计算了图 1 所示四种取向气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率和不对称因子随入射光入射角度变化的值。

图 2 给出的是图 1 所示 1.06 μm 激光波长四种取向气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率随入射角变化的曲线。气溶胶粒子的单次散射反照率不仅是描述气溶胶中散射衰减占激光总消光衰减比例的参数, 而且还是研究气溶胶中激光传输特性的一个重要参量。由图 2 可以看出, 对于原始微粒形状和数目都相同的四种取向气溶胶凝聚粒子, 除了个别入射角上有两种取向气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率相等外, 绝大部分入射角上四种取向气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率都不相等, 且四种取向气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率随入射角的变化趋势完全不同。原因在于图 1 所示四种取向气溶胶凝聚过程的随机性, 使得凝聚而成的气溶胶凝聚粒子的空间形态和取向完全不同, 这样, 当激光从不同角度入射时, 入射激光和凝聚粒子的相互作用过程就不一样, 从而导致气溶胶凝聚粒子的激光散射特性不同; 同样, 对于相同的入射角, 由于气溶胶凝聚粒子的空间取向不同, 也将导致入射激光和凝聚粒子的相互作用过程不同。图 2 数值结果也说明, 研究大气气溶胶激光散射问题的实际应用中, 不能只考虑某一种取向气溶胶凝聚粒子空间形态对其激光散射特性的影响, 而且应该考虑气溶胶凝聚粒子所有可能取向

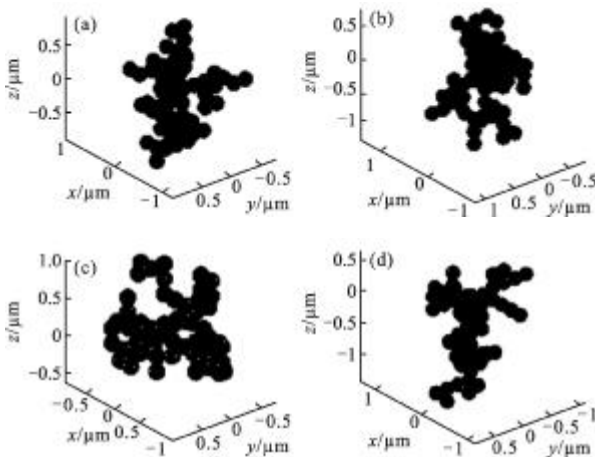


图 1 气溶胶凝聚粒子形状

Fig.1 Shapes of aerosol aggregation particles

的空间形态,在计算气溶胶凝聚粒子的激光散射特征量时,应该对其可能存在的空间取向求统计平均值。

散射衰减随气溶胶凝聚粒子尺寸参数的增加占激光总消光衰减的比例逐渐增大。

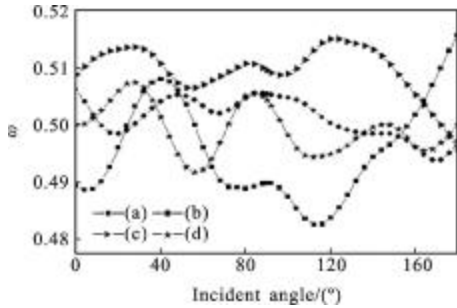


图 2 单次散射反照率因子随入射角变化的值
Fig.2 Change of single scattering albedo with incident angle

图 3 给出的是图 1 所示四种取向气溶胶凝聚粒子不对称因子的值随入射角的变化曲线, 不对称因子 g 不仅是刻画散射体前向散射的方向性和前向散射动量以及辐射压力效率因子等与描述粒子光散射特性的一个重要参量, 还是描述粒子前向散射和后向散射不对称性的一个参量。由图 3 可以看出, 四种取向气溶胶凝聚粒子的不对称因子关于入射角不具有对称性, 说明了这种随机形成的气溶胶凝聚粒子体系也没有对称性。

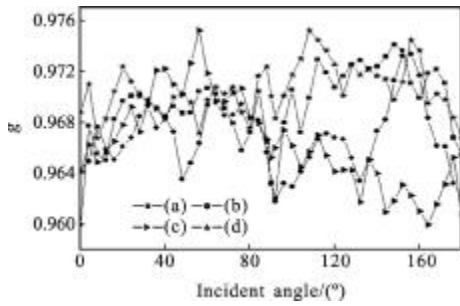


图 3 不对称因子随入射角变化的值
Fig.3 Change of asymmetry parameter with incident angle

图 4 给出的是气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率随凝聚粒子尺寸参数变化的数值曲线, 尺寸参数是影响粒子激光散射特性的一个重要参量。由图 4 可以看出, 在尺寸参数大于 3 时, 气溶胶凝聚粒子单次散射反照率随尺寸参数的增大而快速增大, 当尺寸参数介于 3-7 时, 气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率随尺寸参数的增加出现一次波动, 随后气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率又随尺寸参数的增加而缓慢增加。说明对于 1.06 μm 激光波长, 总体而言,

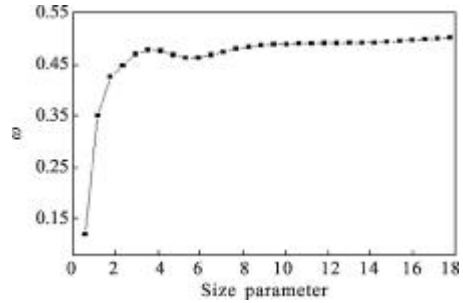


图 4 单次散射反照率随尺寸参数变化的值
Fig.4 Change of single scattering albedo with size parameter

图 5 给出的是气溶胶凝聚粒子的不对称因子随凝聚粒子尺寸参数变化的数值曲线。由图 5 可以看出, 不对称因子随尺寸参数的增加呈增加趋势, 当尺寸参数小于 3 时, 不对称因子增加较快, 当尺寸参数大于 3 时, 不对称因子的值变化的比较缓慢, 且随着尺寸参数的增加趋近于 1, 说明随着尺寸参数的增大, 气溶胶凝聚粒子前向散射越发明显, 计算结果与 McCartney 所得结论相一致^[10]。

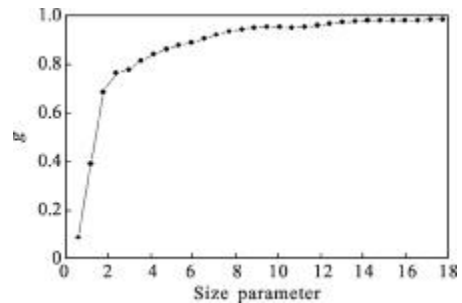


图 5 不对称因子随尺寸参数变化的值
Fig.5 Change of asymmetry parameter with size parameter

3 结 论

文中利用 CCA 模型模拟了由相同数目球形原始微粒凝聚而成的四种随机取向气溶胶凝聚粒子, 利用 DDA 方法, 数值计算了 1.06 μm 激光波长入射情况下, 不同入射角和不同尺寸参数气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率和不对称因子的值。结果显示: 对于由相同数目原始微粒凝聚而成的气溶胶凝聚粒子, 其光学特性明显依赖于入射光的入射角度和气溶胶凝聚粒子的取向; 对于 1.06 μm 激光波长而言, 气溶胶凝聚粒子的单次散射反照率和不对称

因子随尺寸参数的增加而增大, 当尺寸参数大于3时, 气溶胶凝聚粒子的散射主要集中于前向散射。单次散射反照率和不对称因子不仅是刻画气溶胶凝聚粒子激光散射特性的特征量, 而且还是研究气溶胶中激光传输特性的重要参量。计算结果可为气溶胶凝聚粒子激光散射特性的研究提供参考, 也可以为大气气溶胶中 1.06 μm 红外激光传输特性的研究提供有效的计算方法。当然, 文中只讨论了单一性状原始微粒凝聚而成的气溶胶凝聚粒子的激光散射特性, 进一步的研究还应当依据气溶胶粒子的尺度谱分布确定凝聚粒子中所含原始粒子的半径以及个数比例, 这样模拟出来的凝聚粒子更符合实际气溶胶粒子的特征, 其光学特性的数值计算结果更具有实际参考意义。

参考文献:

- [1] Cong Mingyu, Shao Chengxun, Wang Xuexiao. Target and atmospheric environment model of 1.06 μm laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 71-77. (in Chinese)
丛明煜, 邵成勋, 王学孝. 1.06 μm 激光半主动制导的目标与大气环境模型[J]. *红外与激光工程*, 2000, 29(4): 71-77.
- [2] Yang Zhao, Li Qiang, Sun Dongsong. Study about atmosphere extinction coefficient based on 1 064 nm Mie-scattering lidar [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 170-173. (in Chinese)
杨昭, 李强, 孙东松. 基于 1 064 nm 米散射激光雷达的大气消光特性的研究[J]. *激光技术*, 2006, 30(2): 170-173.
- [3] Yin Qing, He Jinhai, Zhang Hua. Application of laser radar in monitoring meteorological and atmospheric environment [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, 25(5): 48-56. (in Chinese)
尹青, 何金海, 张华. 激光雷达在气象和大气环境监测中的应用[J]. *气象与环境学报*, 2009, 25(5): 48-56.
- [4] Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng, et al. Numerical calculation of phase function of atmospheric aerosol particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 580-585. (in Chinese)
黄朝军, 吴振森, 刘亚锋, 等. 大气气溶胶粒子散射相函数的数值计算[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 580-585.
- [5] Chen Yuru, Li Qing, Wang Hongjuan. Theoretic calculation model of 1.06 μm laser atmosphere attenuation coefficient [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(2): 95-100. (in Chinese)
陈玉茹, 李晴, 王洪娟. 1.06 μm 激光大气衰减系数理论计算模型研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(2): 95-100.
- [6] Liu Weichao, Qi Linlin, He Hongrang, et al. Numerical study on atmospheric transmission of 1.06 μm laser[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 520-524. (in Chinese)
刘伟超, 齐琳琳, 何宏让, 等. 1.06 μm 激光大气透过特性的数值计算研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 520-524.
- [7] Wu Zhangfa, Colbeck I. Studies of the dynamic shape factor of aerosol agglomerates[J]. *Europhysics Letters*, 1996, 33(9): 719-724.
- [8] Draine B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. *Astrophys J*, 1988, 333: 848.
- [9] Liu Yafeng, Huang Chaojun, Lou Benzhuo. Numerical calculation of aerosol optical properties based on infrared band [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1605-1609. (in Chinese)
刘亚锋, 黄朝军, 娄本浊. 红外波段气溶胶粒子光学特性的数值计算[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1605-1609.
- [10] McCartney E J. *Optics of the Atmosphere* [M]. New York: Wiley, 1976.