

# 孔隙率对气溶胶凝聚粒子光学特性的影响

黄朝军<sup>1,2</sup> 吴振森<sup>1</sup> 刘亚锋<sup>2</sup> 龙姝明<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071  
<sup>2</sup> 陕西理工学院物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001)

**摘要** 采用 Monte-Carlo 方法,对气溶胶凝聚粒子进行了模拟,讨论了凝聚粒子的孔隙特性,分析了空间结构、原始粒子数目对凝聚粒子孔隙率和等效折射率的影响。结合物质的电结构,将气溶胶凝聚粒子离散为一系列偶极子,利用离散偶极子近似方法,数值计算了不同孔隙率气溶胶凝聚粒子的散射、吸收和消光截面各种取向的统计平均值。结果表明,气溶胶凝聚粒子的孔隙率明显取决于其空间形状和所含原始微粒的数目;气溶胶凝聚粒子的等效折射率、吸收、散射和消光截面则随孔隙率的增加而减小。研究结果可为全面理解气溶胶粒子光学特性提供参考;也可为某些涂层材料光学性能的改变提供参考,通过改变涂层材料中凝聚粒子的孔隙率来改变涂层材料的等效折射率,进而改变涂层材料对光的散射和吸收。

**关键词** 物理光学;气溶胶凝聚粒子;孔隙率;等效折射率;光学截面

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0129001

## Effect of Porosity on Optical Properties of Aerosol Aggregate Particles

Huang Chaojun<sup>1,2</sup> Wu Zhensen<sup>1</sup> Liu Yafeng<sup>2</sup> Long Shuming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China  
<sup>2</sup> School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology,  
Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

**Abstract** Taking Monte-Carlo method to simulate the aerosol aggregate particles and discussing the porosity characteristics of aggregate particles, the effects of spatial shape and number of original particles on the porosity and effective refractive index of aggregate particles are analyzed. According to the electrical structures of substance, the aerosol aggregates particle are dispersed into a series of dipoles, and by discrete dipole approximation method, the statistical average values of scattering, absorption and extinction cross sections of aerosol aggregate particles with different porosities are obtained. The results show that the porosity of aerosol aggregate particles significantly depends on the spatial shape and number of original particles of aerosol aggregate particles. The effective refractive index, absorption, scattering and extinction cross section decrease with the porosity increasing. The findings can provide a reference for a comprehensive understanding of the optical properties of aerosol particles, and for the optical property of some coating materials by changing the porosity of aggregate particles in the coating material. This affects the effective refractive index of the coating material so that the light scattering and absorption of the coating material are changed.

**Key words** physical optics; aerosol aggregate particles; porosity; effective refractive index; optical cross section

**OCIS codes** 260.2110; 290.1090; 290.5850; 290.2200

**收稿日期**: 2012-08-21; **收到修改稿日期**: 2012-09-13

**基金项目**: 国家自然科学基金(41105107, 61172031)和陕西省教育厅专项科研计划(11JK0727)资助课题。

**作者简介**: 黄朝军(1977—),男,博士研究生,主要从事无线电物理和大气光学方面的研究。

E-mail: chaojun1125@yahoo.com.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光散射特性及电磁波传播等方面的研究。

E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

# 1 引言

大气气溶胶粒子是指悬浮在大气中的尘埃、烟粒、微生物以及云雾、冰晶等固体和液体微粒共同组成的多相体系,是大气的重要组成部分。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、粘附等作用形成的具有分形结构的随机取向凝聚粒子体系<sup>[1,2]</sup>。近年来,随着大气气溶胶气候、环境效应研究的深入开展以及卫星遥感、大气探测、目标定位和信号传输等应用领域的迫切需要,大气气溶胶粒子光学特性的研究一直是众多学者密切关注的问题。一方面,气溶胶粒子的不对称因子、光学截面以及大气气溶胶的光学厚度等特征量是评价大气环境污染、研究气溶胶辐射气候效应非常关键的参数<sup>[3,4]</sup>;另一方面,气溶胶粒子的光学截面、不对称因子及散射相函数等光学特征量还是激光雷达、红外遥感以及气溶胶中红外激光传输特性研究的重要参数<sup>[5~7]</sup>。

凝聚粒子形成过程的随机性和复杂的空间结构,导致其光学特性的研究只能以数值解的形式给出,而其中的关键就是如何获得凝聚粒子的空间形态和结构。随着分形理论的逐步完善、计算机技术和计算手段的提高,自 20 世纪 60 年代起相继有学者提出了扩散限制凝聚(DLA)、团簇-团簇凝聚(CCA)、弹道粒子-团簇凝聚(BPCA)和弹道团簇-团簇凝聚(BCCA)等模型来模拟凝聚粒子的空间形态,相应地发展了一系列数值计算凝聚粒子光学特性的方法,如离散偶极子近似(DDA)、T-Matrix、矩量法(MOM)和瑞利-甘斯-迪拜近似(RGD)等,并将这些方法应用于尘埃、烟尘和气溶胶凝聚粒子光学特性的数值计算,分析了凝聚粒子中原始微粒的数目、成分和粒径大小等因素对光学特性的影响。实际上,利用 DLA、CCA、BPCA 和 BCCA 这些模型来模拟的凝聚粒子都存在孔隙,不同的孔隙结构对于凝聚粒子光学特性的影响显然不同。国外已有一些学者开始研究孔隙对凝聚粒子光学特性的影响<sup>[8~11]</sup>,研究对象大多以尘埃粒子为例,主要研究了原始微粒数目和采用的模型对所模拟凝聚粒子孔隙率和光学特性的影响,而没有考虑凝聚粒子形成过程的随机性对其孔隙特性和光学特性的影响。事实上,凝聚粒子形成过程的随机性,必将导致每一次模拟得到的凝聚粒子空间结构存在差异,即使对相同数目原始微粒基于同一种模型模拟的凝聚粒子,每一次模拟得到的凝聚粒子的空间结构和孔隙特性

也不会完全一致,其光学特性也必将不同。本文采用 Monte-Carlo 方法,模拟了气溶胶凝聚粒子的空间形态,不仅分析了凝聚粒子的空间结构、原始微粒数目对孔隙率的影响,还详细讨论了凝聚粒子形成过程的随机性对孔隙率的影响;并采用 DDA 方法数值计算了不同孔隙率气溶胶凝聚粒子的光学截面。期望所得结果能为更全面地了解凝聚粒子的光学特性提供参考和依据,并能为气溶胶中激光传输、涂层材料的光学特性、烟幕的消光特性等与凝聚粒子电磁(光)散射相关领域的研究提供有效的方法。

## 2 基本理论

### 2.1 DDA 方法

DDA 方法由 Purcell 等<sup>[12]</sup>于 1973 年提出,后经 Draine 等<sup>[13~16]</sup>学者的不断改进和完善,现已广泛应用于凝聚粒子光学特性的研究。该方法的优点是迭代效率高、计算速度快、灵活性和通用性好,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。对气溶胶凝聚粒子,可将其离散为  $N$  个偶极子,偶极子的极化率  $\alpha_j$  采用 Draine 等<sup>[17]</sup>修正过的网格色散关系(LDR)极化率,设第  $j$  个偶极子的坐标为  $\mathbf{r}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ),则气溶胶凝聚粒子中第  $j$  个偶极子的偶极矩为<sup>[13]</sup>

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

式中  $\mathbf{E}_j = \mathbf{E}_{\text{inc},j} + \mathbf{E}_{\text{sca},j}$  为第  $j$  个偶极子所在位置的总电场强度,是入射场  $\mathbf{E}_{\text{inc},j}$  与其他所有偶极子散射场  $\mathbf{E}_{\text{sca},j}$  的总和。在获得每一个偶极子的电偶极矩  $\mathbf{p}_j$  之后,就可以由  $\mathbf{p}_j$  求得气溶胶凝聚粒子的吸收截面  $C_{\text{abs}}$ 、散射截面  $C_{\text{sca}}$  和消光截面  $C_{\text{ext}}$ :

$$C_{\text{abs}} = \frac{4\pi k}{|\mathbf{E}_{\text{inc}}|^2} \sum_{j=1}^N \left\{ \text{Im}[\mathbf{p}_j (\alpha_j^{-1})^* \mathbf{p}_j^*] - \frac{2}{3} k^3 |\mathbf{p}_j|^2 \right\}, \quad (2)$$

$$C_{\text{ext}} = \frac{4\pi k}{|\mathbf{E}_{\text{inc}}|^2} \sum_{j=1}^N \text{Im}(\mathbf{E}_{\text{inc},j}^* \cdot \mathbf{p}_j), \quad (3)$$

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

式中  $k \equiv 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,  $\hat{n}$  为散射方向,  $d\Omega$  为立体角微元, 上标 \* 表示取复共轭。

## 2.2 气溶胶凝聚粒子模型

气溶胶凝聚粒子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, 不仅具有复杂的空间结构, 而且还具有分形特征, 常用凝聚粒子所含原始微粒的数目  $M$  和回旋半径  $R_g$  来表示:

$$M = k_g (R_g/r_p)^{D_f}, \quad (5)$$

式中  $k_g$  为前向因子,  $D_f$  为分形维数, 一般是一个给定的常数,  $r_p$  为原始微粒的半径, 回旋半径  $R_g$  可用下式来计算:

$$R_g^2 = \frac{1}{2M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2, \quad (6)$$

式中  $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个原始微粒在空间的坐标。

模拟气溶胶凝聚粒子空间结构最常用的是采用 CCA 模型利用 Monte-Carlo 方法来模拟<sup>[1,18]</sup>。CCA 模型的基本思想是: 让所有原始气溶胶单体粒子同时

进入一个区域并做随机运动, 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。图 1 给出的就是利用 Monte-Carlo 方法模拟的由 64 个半径为  $0.25 \mu\text{m}$  的单一成分球形原始微粒凝聚而成的 8 种取向烟尘气溶胶凝聚粒子。相对于水溶性、沙尘性及海洋性等其他气溶胶粒子, 烟尘性气溶胶粒子的折射率具有较大的虚部, 其对能量的吸收更为突出, 计算结果更具有普遍性和实用性。模拟过程中前向因子  $k_g$  和分形维数  $D_f$  的取值参照文献<sup>[19]</sup>, 分别取 1.3 和 1.8。由图 1 可以看出, 由于凝聚过程中原始微粒和小粒子团运动的随机性, 导致原始微粒形状和数目都相同的烟尘气溶胶凝聚粒子空间形状和取向完全不同, 而且具有明显的孔隙结构。这说明在研究气溶胶粒子光学特性时, 不仅需要考虑到气溶胶凝聚粒子空间形状和取向对其光学特性的影响, 而且还应该考虑孔隙特性对气溶胶凝聚粒子光学特性的影响。

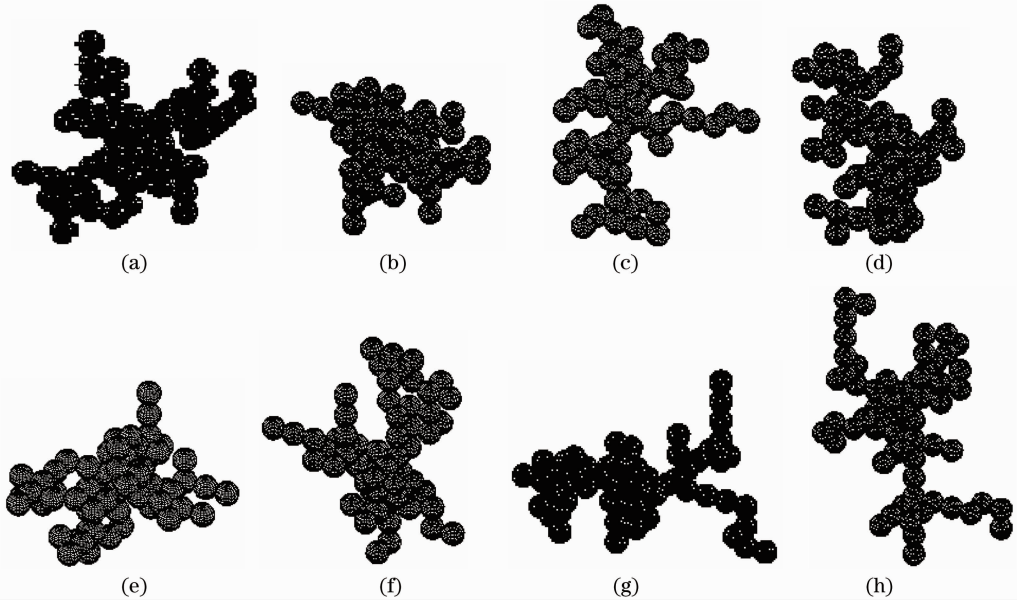


图 1 随机取向烟尘气溶胶凝聚粒子 ( $M=64$ )

Fig. 1 Randomly oriented soot aerosol aggregate particles ( $M=64$ )

为描述孔隙结构对凝聚粒子光学特性的影响, 需要先求出描述孔隙特性的参数孔隙率  $P$ 。参照文献<sup>[20]</sup>, 凝聚粒子的孔隙率可以用凝聚粒子所含原始微粒数目  $M$  和回旋半径  $R_g$  来定义, 即

$$P = 1 - M[r_p/(\sqrt{5/3}R_g)]^3. \quad (7)$$

求出凝聚粒子的孔隙率之后就可以给出具有孔隙结构的气溶胶凝聚粒子的等效折射率  $m_{\text{eff}}$ <sup>[21]</sup>:

$$m_{\text{eff}}^2 = 1 + \frac{3(1-P)(m^2-1)/(m^2+2)}{1-(1-P)(m^2-1)/(m^2+2)}, \quad (8)$$

式中  $m$  为烟尘气溶胶粒子的折射率, 在计算中用等效折射率  $m_{\text{eff}}$  来代替烟尘粒子的折射率  $m$ , 所得结果必然能反映孔隙率对烟尘气溶胶凝聚粒子光学特性的影响。

对于随机取向的气溶胶凝聚粒子, 其光学截面可以通过求统计平均的方法获得:

$$\langle C \rangle = \frac{1}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} d\beta \int_{-1}^1 d\cos\Theta \int_0^{2\pi} d\Phi C(\beta, \Theta, \Phi), \quad (9)$$

式中 $\langle C \rangle$ 为气溶胶凝聚粒子光学截面各种取向的统计平均值, $C(\beta, \Theta, \Phi)$ 为系统中某特定取向气溶胶凝聚粒子的光学截面, $\beta, \Theta, \Phi$ 为气溶胶凝聚粒子在系统坐标系中的空间方位角,其取值范围为 $\beta \in [0, 360^\circ], \Theta \in [0, 180^\circ], \Phi \in [0, 360^\circ]$ 。

### 3 数值结果

#### 3.1 孔隙率与等效折射率

图2给出的是50次随机生成的气溶胶凝聚粒子的回旋半径和孔隙率的值,其中每一次生成的凝聚粒子所含原始微粒数目都为64个,原始微粒都是半径为 $0.25 \mu\text{m}$ 的球形粒子。由图可以看出,50次随机生成的气溶胶凝聚粒子回旋半径并不完全相同,且呈现随机波动趋势。主要原因在于凝聚过程中原始微粒和小粒子团运动的随机性,使得原始微粒形状和数目都相同的凝聚粒子的空间形状及紧密程度不同,从而导致回旋半径不同,并最终影响凝聚粒子孔隙率的值。根据(7)式,当凝聚粒子中所含原始微粒的数目 $M$ 和原始微粒的半径 $r_p$ 给定之后,凝聚粒子的孔隙率仅取决于回旋半径,回旋半径不同,必将导致孔隙率不同,回旋半径越大,孔隙率也越大。同时由图2还可以看出,尽管50次随机生成的气溶胶凝聚粒子回旋半径和孔隙率的值呈现随机波动趋势,但受气溶胶凝聚粒子所包含的原始微粒数目和形状都相同的限制,总体上它们都分别有一个变化范围。

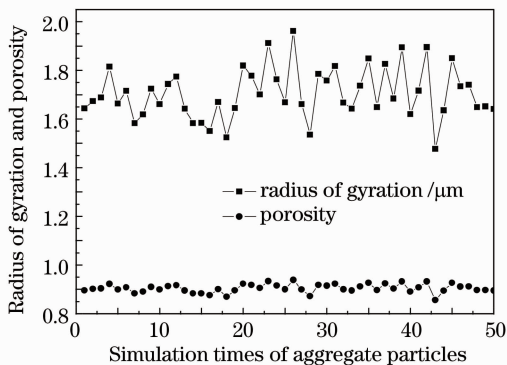


图2 凝聚粒子的回旋半径和孔隙率

Fig. 2 Radius of gyration and porosity of aggregate particles

图3给出的是50次随机生成的气溶胶凝聚粒子的等效折射率 $m_{\text{eff}}$ 的值。由图3可以看出,等效折射率的实部和虚部也呈随机波动趋势,这是因为

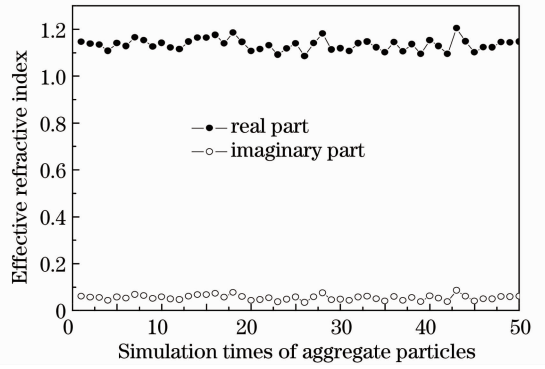


图3 凝聚粒子的等效折射率

Fig. 3 Effective refractive index of aggregate particles

根据(8)式,当气溶胶粒子的折射率 $m$ 给定之后(文中 $m$ 取与 $1.06 \mu\text{m}$ 波长对应的烟尘气溶胶粒子的折射率 $^{[22]}, m = 1.75 + 0.44i$ ),等效折射率只取决于气溶胶凝聚粒子的孔隙率,图2所示孔隙率的随机波动趋势和取值范围也必将导致凝聚粒子等效折射率的随机波动和取值范围。而且,对比图2和图3可以看出,凝聚粒子等效折射率的实部和虚部的变化趋势与凝聚粒子孔隙率的变化趋势完全相反,孔隙率越大,凝聚粒子等效折射率的实部和虚部越小。

图2,3反映了凝聚粒子凝聚过程形成的空间结构对孔隙率和等效折射率的影响,根据(6)式和(7)式,凝聚粒子所含原始微粒的数目不仅直接影响凝聚粒子的孔隙率,而且还通过影响凝聚粒子的回旋半径,进而间接影响凝聚粒子的孔隙率,并最终影响凝聚粒子的等效折射率,改变凝聚粒子对光的散射和吸收。为说明凝聚粒子所含原始微粒数目对凝聚粒子孔隙率和等效折射率的影响,本文给出孔隙率和等效折射率随凝聚粒子所含原始微粒数目变化的结果,如图4、5所示。同时,为进一步说明凝聚粒子形成过程的随机性对孔隙率和等效折射率的影响,对包含相同数目原始微粒的凝聚粒子,分别计算了5种随机生成的凝聚粒子孔隙率和等效折射率的值。

图4中每组离散点分别表示包含相同数目原始微粒5种凝聚粒子孔隙率的值,实线表示5种凝聚粒子孔隙率的平均值随原始微粒数目增加的变化曲线。由图4可以看出,对于原始微粒数目相同的5种凝聚粒子,原始粒子数目越少,孔隙率的变化范围越大,当凝聚粒子所含原始粒子数目大于100个时,随机生成的含相同原始微粒数目5种凝聚粒子孔隙率的值差别不大。原因在于,对于给定的区域,原始微粒数目越少,粒子凝聚过程表现的随机性越强,凝



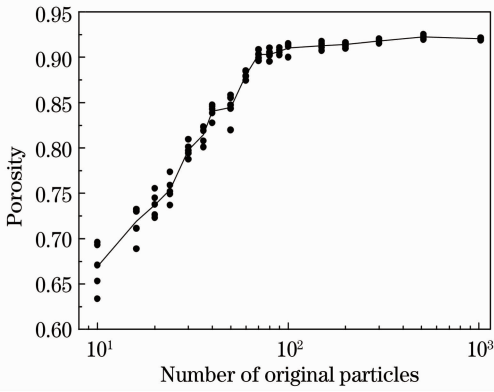


图4 孔隙率随原始粒子数目的变化

Fig. 4 Change of porosity with number of original particles

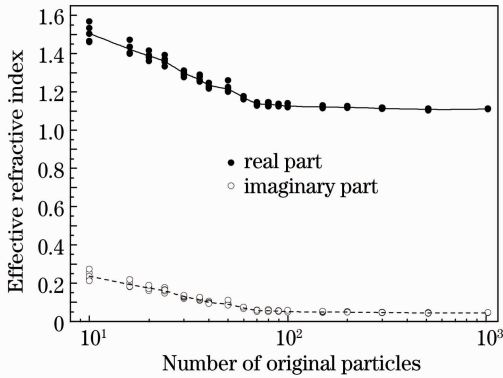


图5 等效折射率随原始粒子数目的变化

Fig. 5 Change of effective refractive index with number of original particles

聚粒子空间结构的差异越大,孔隙率的变化范围也越大。同时,由图4孔隙率随凝聚粒子所含原始微粒数目变化的总体趋势和5种凝聚粒子孔隙率的平均值随原始微粒数目增加的变化曲线可以看出,在凝聚粒子所含原始粒子数目小于100个时,孔隙率随原始粒子数目的增加急剧增大,当凝聚粒子所含原始粒子数目大于100个时,孔隙率随原始粒子数目的增加缓慢增大,而且当凝聚粒子所含原始粒子数目增大到一定程度时,孔隙率几乎不再增大。原因在于,当凝聚粒子所含原始粒子数目较少时,虽然凝聚粒子的回旋半径较小,但其分支少,致密度较好,从而孔隙率较小;随着所含原始粒子数目的增加,凝聚粒子的分支越来越多,慢慢形成深孔,外围做随机运动的原始粒子或形成的小粒子团要想进入凝聚粒子内部,必须克服沿途已经凝聚的粒子的干扰,而由于沿途粒子的干扰,做随机运动的原始粒子

或形成的小粒子团与沿途粒子发生碰撞并凝聚的几率更大,这样,做随机运动的原始粒子或形成的小粒子团大部分在深孔的孔口处凝聚,进而又起到封口的作用,阻止后续粒子的进入,这样,就会在凝聚粒子内部形成一些深孔,最终造成所形成的凝聚粒子致密性差,孔隙率较大。但根据(6)式可知,随着凝聚粒子所包含原始粒子数目的继续增大,凝聚粒子的回旋半径也将增大,结合(7)式,在凝聚粒子所包含原始粒子数目增大到一定值时,其孔隙率将趋于平稳。

图5给出的是等效折射率随原始粒子数目变化的曲线,对于每一个给定的原始微粒数目,分别计算了5种随机生成凝聚粒子的等效折射率,如图中每组离散点所示,其中实线和点线分别代表5种随机生成的凝聚粒子等效折射率实部和虚部的平均值随原始粒子数目增加的变化曲线。由图5可以看出,总体上,随着凝聚粒子所含原始粒子数目的增加,等效折射率呈减小的趋势,且当原始粒子数目大于100个时,等效折射率随粒子数目的增加几乎没有变化。对照图4,结合(8)式,可以看出,图5反映的实质是孔隙率决定了凝聚粒子的等效折射率,凝聚粒子孔隙率的变化范围和取值直接影响等效折射率的变化范围和取值。总体上,凝聚粒子孔隙率越大,其等效折射率的值越小,这样,当光与凝聚粒子作用时,其对光的散射和吸收也就越小。

### 3.2 孔隙率与光学截面

为说明孔隙率对气溶胶凝聚粒子光学特性的影响,表1给出了 $1.06\ \mu\text{m}$ 波长入射情况下图1所示8种气溶胶凝聚粒子散射、吸收和消光截面各种取向的统计平均值,同时还给出了这8种气溶胶凝聚粒子的回旋半径 $R_g$ 、孔隙率 $P$ 、等效折射率 $m_{\text{eff}}$ 实部 $\text{Re}(m_{\text{eff}})$ 和虚部 $\text{Im}(m_{\text{eff}})$ 的值。

由表1可以看出,对于相同数目和形状的原始粒子凝聚而成的气溶胶凝聚粒子,凝聚粒子的孔隙率随回旋半径的增大而增大,而凝聚粒子的等效折射率的实部和虚部都随回旋半径和孔隙率的增大而减小,相应的凝聚粒子的吸收、散射和消光截面也随凝聚粒子的回旋半径和孔隙率的增大而减小。数值结果说明,对于相同数目和形状的原始粒子凝聚而成的气溶胶凝聚粒子,其内部孔隙越多,孔隙率越大,其对光的吸收和散射也越小。这一结果可为改变某些光学涂层材料的性能提供参考:可以通过改变涂层材料中凝聚粒子的孔隙率来改变涂层材料的等效折射率,进而改变涂层材料对光的散射和吸收。

表 1 不同孔隙率烟尘气溶胶凝聚粒子光学截面的统计平均值

Table 1 Statistical average of optical cross section of soot aerosol aggregate particles with different porosities

$R_g/\mu\text{m}$	$P/\%$	$\text{Re}(m_{\text{eff}})$	$\text{Im}(m_{\text{eff}})$	$\langle C_{\text{sca}} \rangle / \mu\text{m}^2$	$\langle C_{\text{abs}} \rangle / \mu\text{m}^2$	$\langle C_{\text{ext}} \rangle / \mu\text{m}^2$
1.5242	86.87	1.1854	0.0774	2.6600	3.3247	5.9847
1.5505	87.53	1.1756	0.0731	2.4338	3.1664	5.6002
1.5837	88.30	1.1643	0.0681	2.0328	3.0206	5.0534
1.6360	89.39	1.1484	0.0611	1.7825	2.7589	4.5414
1.6702	90.02	1.1392	0.0571	1.6259	2.5944	4.2203
1.7343	91.09	1.1238	0.0505	1.2215	2.3290	3.5505
1.8158	92.24	1.1074	0.0435	0.9941	2.0407	3.0348
1.8956	93.18	1.0940	0.0379	0.7518	1.7871	2.5389

## 4 结 论

利用 Monte-Carlo 方法模拟了随机取向气溶胶凝聚粒子的空间形态,讨论了凝聚粒子的孔隙特性,分析了凝聚粒子的空间结构以及凝聚粒子所含原始粒子的数目和凝聚粒子形成过程的随机性对其孔隙率的影响,给出了凝聚粒子等效折射率随孔隙率变化的数值结果。结果表明,孔隙率取决于凝聚粒子的空间形态和其所含原始粒子的数目。对于由相同数目和形状原始粒子凝聚而成的气溶胶凝聚粒子,孔隙率随回旋半径的增大而增大,对于不同数目原始粒子凝聚而成的气溶胶凝聚粒子,总体上孔隙率随原始粒子数目的增多而增大,但当原始粒子数目增加到一定值之后,孔隙率几乎不再变化;凝聚粒子的等效折射率则随孔隙率的增大而变小,相应地导致凝聚粒子的吸收、散射和消光截面也随孔隙率的增大而减小。研究结果不仅可以为全面理解气溶胶凝聚粒子光学特性提供参考,还可以为改变某些光学涂层材料的性能提供参考,可以通过改变涂层材料中凝聚粒子的孔隙率来改变涂层材料的等效折射率,进而改变涂层材料对光的散射和吸收。

## 参 考 文 献

- Z. F. Wu, I. Colbeck. Studies of the dynamic shape factor of aerosol agglomerates[J]. *Eur. Phys. Lett.*, 1996, **33**(9): 719~724
- S. K. Friedlander, C. Xiong. Measurements of fractal-like atmospheric particles[J]. *J. Aerosol Sci.*, 2000, **31**(suppl.1): 226~227
- F. J. Olmo, A. Quirantes, V. Lara *et al.*. Aerosol optical properties assessed by an inversion method using the solar principal plane for non-spherical particles [J]. *J. Quant. Spectrosc. Ra. Transfer*, 2008, **109**(8): 1504~1516
- J. Quaas, O. Boucher. Impacts of greenhouse gases and aerosol direct and indirect effects on clouds and radiation in atmospheric GCM simulations of the 1930~1989 period[J]. *Clim. Dynam.*, 2004, **23**(7-8): 779~789
- Liu Botao. The attenuation of laser in the atmosphere[J]. *J.*

*Light Scattering*, 2007, **19**(1): 43~48

- 刘波涛. 大气对激光传输的影响[J]. *光散射学报*, 2007, **19**(1): 43~48
- Wu Dong, Zhang Xiaoxue, Yan Fengqi *et al.*. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIPSO lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0828002
- 吴东, 张小雪, 阎逢旗等. 基于星载激光雷达数据的海面风速探测[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0828002
- Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong *et al.*. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0514001
- 陈涛, 赵玉洁, 刘东等. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶定标反演新方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0514001
- J. Lasue, A. C. Levasseur-Regourd. Porous irregular aggregates of sub-micron sized grains to reproduce cometary dust light scattering observations [J]. *J. Quant. Spectrosc. Ra. Transfer*, 2006, **100**(1-3): 220~236
- Y. Shen, B. T. Draine, E. T. Johnson. Modeling porous dust grains with ballistic aggregates. I. Geometry and optical properties[J]. *Astrophys. J.*, 2008, **689**(1): 260~275
- H. Chang, K. Okuyama. Optical properties of dense and porous spheroids consisting of primary silica nanoparticles[J]. *J. Aerosol Sci.*, 2002, **33**(12): 1701~1720
- P. Hull, I. Shepherd, A. Hunt. Modeling light scattering from diesel soot particles[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(17): 3433~3441
- E. M. Purcell, C. R. Pennypacker. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains [J]. *Astrophysical J.*, 1973, **186**: 705~714
- B. T. Draine. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains [J]. *Astrophys J.*, 1988, **333**: 848~872
- Lei Chengxin, Liu Hanfa, Zhang Huaifu. Research on laser scattering property by randomly oriented soot clustered agglomerates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 876~880
- 类成新, 刘汉法, 张化福. 随机取向烟尘团簇粒子激光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 876~880
- Wang Hongxia, Ma Jin, Song Zibiao *et al.*. Light scattering properties of fractal aggregates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0329001
- 王红霞, 马进, 宋仔标等. 分形凝聚粒子的光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0329001
- Lei Chengxin, Wu Zhensen, Feng Dongtai. Extinction characteristics of soot-silicate mixed agglomerates in random distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0429001
- 类成新, 吴振森, 冯东太. 随机分布黑碳-硅酸盐混合凝聚粒子的消光特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0429001
- B. T. Draine, J. Goodman. Beyond Clausius-Mossotti-wave propagation on a polarizable point lattice and the discrete dipole

- approximation [J]. *Astrophys J.*, 1993, **405**: 685~697
- 18 M. Balthasara, M. Frenklachb. Monte-Carlo simulation of soot particle coagulation and aggregation: the effect of a realistic size distribution [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, **30**(1): 1467~1475
- 19 V. Eymet, A. M. Brasil, M. E. Hafi *et al.*. Numerical investigation of the effect of soot aggregation on the radiative properties in the infrared region and radiative heat transfer [J]. *J. Quant. Spectrosc. Ra. Transfer*, 2002, **74**(6): 697~718
- 20 T. Kozasa, J. Blum, T. Mukai. Optical properties of dust aggregates[J]. *Astron. Astrophys.*, 1992, **263**(1-2): 423~432
- 21 M. Min, C. Dominik, J. W. Hovenier *et al.*. The 10  $\mu\text{m}$  amorphous silicate feature of fractal aggregates and compact particles with complex shapes[J]. *Astron. Astrophys.*, 2006, **445**(3): 1005~1014
- 22 T. L. Farias, M. G. Carvalho, Ü. Ö. Köylü. Radiative heat transfer in soot-containing combustion systems with aggregation [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, **41**(17): 2581~2587

栏目编辑：李文喆