生物消光材料大气悬浮沉降特性

陈 曦,胡以华,顾有林,赵欣颖,黄宝琨,杨 彪

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(国防科技大学),安徽 合肥 230037;
2. 电子制约技术安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘 要:生物材料具有生产成本低、粒径分布广、环保无污染等优点,可作为一种新型消光材料。为了更好地研究生物材料的大气悬浮沉降特性,针对制备的球状生物材料 FANS 233D,根据斯托克斯沉降规律及粒子数加权平均方法计算其沉降速度。利用团簇-团簇凝聚模型模拟了该生物凝聚粒子的空间结构,结合牛顿第二定律研究了不同空间结构凝聚粒子的沉降速度,并通过凝聚粒子的孔隙率、分形维数对其结构特征加以分析。结果表明:包含不同原始微粒数的凝聚粒子,其平均沉降速度随原始微粒数的增大而增大;包含相同原始微粒数的凝聚粒子,其沉降速度同该凝聚粒子的孔隙率与分形维数有关。针对生物消光材料大气悬浮沉降特性的研究将为其实际应用提供理论基础。

关键词:生物消光材料; 沉降速度; 凝聚粒子; 团簇-团簇模型

中图分类号:O433.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0521003

Atmospheric suspension settling characteristics of biological extinction material

Chen Xi, Hu Yihua, Gu Youlin, Zhao Xinying, Huang Baokun,Yang Biao

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser(National University of Defense Technology), Hefei 230037, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract: The biological material has the characteristics of low production cost, wide particle size distribution and no pollution, it can be used as a new type of extinction material. In order to study the atmospheric suspension settling characteristics of biological extinction material FANS 233D, the settling velocity according to the Stokes law and the weighted average algorithm of particle number was calculated. A cluster-cluster aggregation model was used to simulate the fractal structure of the biological aggregated particles while Newton′s second law was used to calculate the settling velocity of aggregated particles with different fractal structures. The results indicate that the average settling velocity of the aggregated particles with different original particles increases with the increase of the number of original particles, the settling velocity of aggregated particles with the same number of original particles is related to the porosity and fractal dimension. The study on the atmospheric suspension characteristics of biological extinction material provides a theoretical basis for its practical application.

Key words: biological extinction material; settling velocity; aggregated particles; cluster-cluster model

收稿日期:2018-12-10; **修订日期**:2019-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61271353,60908033);安徽省自然科学基金(1408085MKL47)

作者简介:陈曦(1994-),男,硕士生,主要从事红外光谱分析方面的研究。Email: 965365025@qq.com

导师简介:胡以华(1962-),男,教授,博士生导师,主要空间和光电信息处理的方式。Email: skl_hyh@163.com

0 引 言

目前,传统无机消光材料在军事、医疗、化工等领域得到了广泛的应用, 然而这些消光材料存在着消光波段受限、对环境存在污染等缺点,在一定程度上制约了其长远的发展。生物材料具有环保安全、效费比高等优点, 可发展为新型消光材料以弥补传统无机消光材料的不足。目前,针对生物材料消光特性国内外已经开展了相关研究[1-9]。K.P.Gurton[10]等测量了雾化枯草芽孢杆菌红外波段的透过率,分析了枯草芽孢杆菌的红外消光性能。D.Chicea 和 I.Turcu[11]通过蒙特卡罗方法和有效相位函数理论研究了生物细胞的光散射问题。李乐等[12]采用压片法得到三种生物材料的镜面反射光谱,根据 Krames-Kronig(K-K) 关系计算了三种材料红外波段的复折射率,由 Mie 散射理论得到了静态质量消光系数。在对生物材料进行性能研究时, 不仅要分析生物材料的静态消光特性, 其在空气中的沉降扩散规律同样具有重要意义。孙杜娟等[13]采用有限差分方法对粒子的运动方程和气溶胶平流扩散方程进行差分运算, 构建了重力作用下烟幕“沉降—扩散”联合动态数值模拟方法。李乐等[14]根据莱赫特曼扩散理论,建立生物材料扩散模型, 然后针对典型自然环境下的生物材料扩散进行了仿真。肖凯涛等[15]研究了在烟幕箱中测定乱流沉降速度的搅拌沉降模型。文中针对选取的生物消光材料 FANS 233D,基于斯托克斯沉降理论以及粒子数加权平均的方法计算了单颗粒及分散粒子群的沉降速度,并采用团簇-团簇(CCA)模型[16]模拟了 FANS 233D 生物凝聚粒子的空间结构, 结合牛顿第二定律计算了不同结构凝聚粒子的沉降速度, 并通过孔隙率与分形维数对凝聚粒子的结构特征加以分析,将得到的结果进行讨论。

1 材料的制备

文中所采用的生物消光材料 FANS 233D 由中国科学院离子束生物工程重点实验室提供,经“物料配置→种子罐消毒→物料接种→大型发酵罐发酵→菌体提取→真空冷冻干燥机干燥→样品筛过筛”流程制备得到生物材料样品[12],样品存放在加硅胶的干燥皿中,室温下包藏。FANS 233D 生物材料颗粒呈球形,表面有褶皱、空洞及突起物,粒径分布在 2~5 μm。

2 沉降模型

2.1 单粒子沉降

生物材料 FANS 233D 的单颗粒在空气运动时垂直方向上主要受到重力、空气浮力、空气阻力的作用,根据牛顿第二定律得到受力平衡方程:

$$G-F_d-F_f=m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中:m 为颗粒质量;v 为颗粒的沉降速度;G 为颗粒所受重力;F_f 为颗粒所受空气浮力;F_d 为颗粒相对大气运动所受的空气阻力,三个力的计算公式为:

$$G=\frac{1}{6}\pi d^3 g\rho \tag{2}$$

$$F_f=\frac{1}{6}\pi d^3 g\rho_{\mathrm{air}} \tag{3}$$

$$F_d=\frac{1}{8}\pi d^2 \rho_{\mathrm{air}}\xi v^2 \tag{4}$$

式中:g 为重力加速度;d 为生物颗粒的直径;S 为生物颗粒在垂直方向的投影面积;ρ 为生物颗粒密度;ρ_{air} 为大气密度;ξ 为无因次阻力系数,是颗粒相对于介质运动时雷诺数[17]的函数;生物颗粒在沉降初期作加速运动,当上述三个力达到平衡时作匀速运动,获得的最终沉降速度。由于粒子作加速运动的时间极短,可忽略不计,文中所研究的沉降速度即为粒子受力平衡时的最终运动速度。将公式(2)~(4)代入公式(1),即可得到沉降速度 $v\tau$ 的计算公式:

$$v_\tau=\frac{g(\rho-\rho_{\mathrm{air}})}{18\mu} \tag{5}$$

公式(5)即为斯托克斯公式,其中,μ 为大气粘度。

2.2 多分散粒子群的平均沉降速度

由于不同粒径的粒子的沉降速度是不同的,对于该生物材料,其粒径在 2~5 μm 不等,因此可利用粒子数加权平均的方法计算得到多分散粒子群的平均沉降速度。假设生物颗粒的粒径分布服从正态分布:

$$P(d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_g}\exp\left[-\frac{(d-d_g)^2}{2\sigma_g^2}\right] \tag{6}$$

式中:σ_g 为均方差;d_g 为平均粒径; 则分散粒子群的

平均沉降速度可根据下式计算：

$$\bar{v}=\int_{d_{\min}}^{d_{\max}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma_g}\exp\left[-\frac{(d-d_g)^2}{2\sigma_g^2}\right]v_{\tau d}\,\mathrm{d}d \tag{7}$$

式中：$d_{\min}$ 与 $d_{\max}$ 分别为粒子群中的生物颗粒的最小、最大粒径；$v_{\tau d}$ 为粒径为 d 的粒子的沉降速度。

2.3 凝聚粒子的沉降

上述计算仅是通过计算单颗粒和统计生物粒子群沉降速度的平均值来考查该生物材料的沉降情况。实际上，生物材料在空气中的整体沉降规律并不是单颗粒沉降简单的加权，生物材料在漂浮情况下，粒子之间由于碰撞、粘附作用而凝聚的现象是普遍存在的，因此，研究生物材料凝聚粒子的沉降可以更为准确地了解其大气悬浮沉降特性。

生物材料释放到空气中后，在粒子随机运动过程中由于碰撞、粘附等作用形成具有一定空间结构的凝聚粒子，在凝聚粒子形成后，粒子不会因外力而改变其空间结构，因此，不再考虑粒子间的相互作用力的影响，将凝聚粒子等效为一个具有一定空间结构的整体，在空气中运动时的整体受力同单颗粒一致，主要为重力、空气浮力和空气阻力，其计算公式分别为：

$$G=M\cdot\frac{1}{6}\pi d^3 g\rho \tag{8}$$

$$F_f=M\cdot\frac{1}{6}\pi d^3 g\rho_{\mathrm{air}} \tag{9}$$

$$F_d=\frac{1}{8}N\cdot\pi d^2\rho_{\mathrm{air}}\xi v^2 \tag{10}$$

式中：M 为凝聚粒子包含的原始微粒个数；N 为凝聚粒子在水平方向上的投影面积等效圆个数。根据牛顿第二定律可得沉降速度的计算公式为：

$$v_\tau=\frac{M\cdot g(\rho-\rho_{\mathrm{air}})}{N\cdot 18\mu}d^2 \tag{11}$$

在凝聚粒子的原始微粒数 M 确定的情况下，由 CCA 模型所模拟出的凝聚粒子的投影面积等效圆个数 N 可随机地选取 1~M 间的任意整数。由公式(11)可得到凝聚粒子平均沉降速度的表达式为：

$$\nabla v_\tau=\sum_{N=1}^{M}\frac{g(\rho-\rho_{\mathrm{air}})}{N\cdot 18\mu}d^2 \tag{12}$$

根据公式(11)可知，凝聚粒子的空间结构是影响生物凝聚粒子的沉降速度的主要因素。为此，选取孔隙率、分形维数来研究凝聚粒子的空间结构。凝聚粒子的回旋半径 Rg 与原始微粒数 M 的关系为[18]：

$$R_g^2=\frac{1}{2M^2}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\left|r_i-r_j\right|^2 \tag{13}$$

式中：r_i 和 r_j 为第 i 个和第 j 个原始微粒在空间上的坐标。根据凝聚粒子的回旋半径和原始微粒数可求得粒子的孔隙率 P[19]与分形维数 D_f：

$$P=1-M\left[d/(2\sqrt{5/3}\ R_g)\right]^3 \tag{14}$$

$$D_f=\ln\left(\frac{M}{k_f}\right)\Big/\ln\left(\frac{2R_g}{d}\right) \tag{15}$$

式中：k_f 为前向因子[20]，取 1.27。

3 数值计算与仿真分析

3.1 单颗粒与多分散粒子群

根据公式(5)可知，FANS 233D 单颗粒的沉降速度同颗粒的粒径和密度相关，取颗粒密度 ρ=1 200 kg/m^3；由于大气湿度、压强会随着高度而变化，因此空气密度是高度的函数，文中主要考虑生物材料在近地面的沉降速度，因此忽略高度对空气密度的影响，取空气密度 ρ_{air}=1.29 kg/m^3；大气粘度 μ=1.83×10^{-5} Pa·s；颗粒粒径为 3 μm，则可计算出单颗粒在空气中的沉降速度约为 0.321 mm/s；同时对不同粒径分布的生物粒子群 A 和 B 的平均沉降速度进行计算：颗粒密度均为 1.5×10^3 kg/m^3，粒径分布均服从正态分布，统计数据以 μm 为单位。其中 A 的平均粒径为 16，均方差为 1.3，最大粒径为 20，最小粒径为 10；B 的平均粒径为 5，均方差为 1.3，最大粒径为 8，最小粒径为 3；计算两个多分散生物粒子群的平均沉降速度，结果如表 1 所示。

表 1 两种分散粒子群的平均沉降速度

Tab.1 Average settling velocity of two dispersed particle swarms

Material	ρ/g·cm^{-3}	v/m·s^{-1}
A	1.5	0.047
B	1.5	0.005

根据表 1，粒子群 A 的平均沉降速度要高于粒子群 B 的平均沉降速度。在密度相同的条件下，选择粒径小的生物颗粒可降低粒子群的沉降速度，提高留空能力。

3.2 凝聚粒子

图 1 为 CCA 模型随机模拟的原始微粒数 M=20 生物材料凝聚粒子的空间结构，凝聚粒子的投影面积等效圆个数 N=10。图 1(a)为凝聚粒子的三维结构图，图 1(b)为凝聚粒子的俯视图。

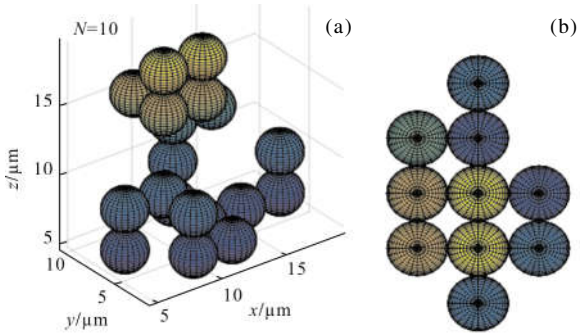


图 1 生物凝聚粒子示意图(M=20)

Fig.1 Schematic of biological aggregated particles(M=20)

由于 CCA 模拟的凝聚粒子是随机的，因此当单一凝聚粒子包含 20 个原始微粒时，其投影面积等效圆个数 N 可在 1~20 之间取任意整数，根据公式(11)可计算出不同 N 值的凝聚粒子的沉降速度，如图 2 所示。

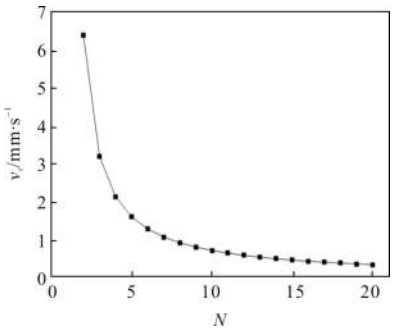


图 2 沉降速度随投影面积等效圆个数变化

Fig.2 Change of settling velocity with the number of equivalent circles of the projected area

由图 2 可知，凝聚粒子的沉降速度随着投影面积等效圆个数 N 的增加而降低，且降低的速度随着 N 的增加逐渐变缓，这是由于 N 越大，凝聚粒子所受到的空气阻力就越大，沉降速度就越小。当 N=1 时，凝聚粒子的沉降速度约为 6.4 mm/s；而当 N=20 时，凝聚粒子的沉降速度则取最小值为 0.32 mm/s，同单粒子的沉降末速度一致。利用 CCA 构建了原始微粒数为 10、20、30 三种随机取向的凝聚粒子，并根据公式(11)计算了不同原始微粒数的凝聚粒子的沉降速度随 N 值变化的曲线，如图 3 所示。由图 3 可知，原始微粒数不同的凝聚粒子的沉降速度与 N 值的关系均为递减关系，且在相同的 N 值下，凝聚粒子所包含的原始微粒数目越大，其沉降速度也越大。

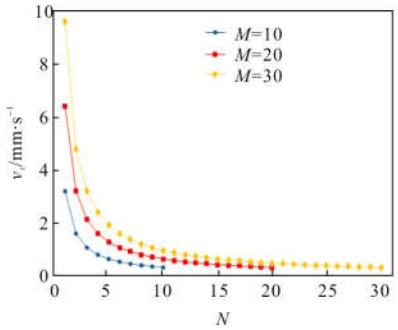


图 3 沉降速度随原始微粒数变化

Fig.3 Change of settling velocity with numbers of original particles

根据公式(12)可得到凝聚粒子的平均沉降速度随原始微粒数 M 值的变化曲线，如图 4 所示。由图 4 可知，凝聚粒子的所包含的原始微粒数越多，平均沉降速度 δ_{v_T} 越大，且随着 M 值的增大，δ_{v_T} 的增长速率逐渐变缓。

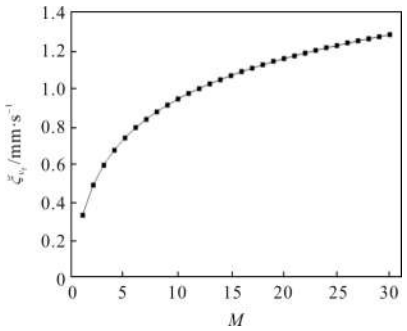


图 4 平均沉降速度随原始微粒数变化

Fig.4 Change of average settling velocity with numbers of original particles

3.3 孔隙率与分形维数

为研究凝聚粒子的空间结构对粒子沉降速度的影响，利用 CCA 模型构建了原始微粒数目从 10~300 的生物凝聚粒子，不同原始微粒数凝聚粒子的孔隙率及分形维数与原始微粒数的关系如图 5 与图 6 所示。由图 5 与图 6 可知，凝聚粒子的孔隙率和分形维数随着 M 的增大而波动变化，但总体都呈上升趋势。产生该变化的原因在于当粒子的原始微粒数增大时，回旋半径也越大，粒子的分支多导致自相似性增大，根据公式(14)、(15)可得孔隙率与分形维数也越大，曲线的波动变化则是由于凝聚粒子聚合

时的随机性导致的。

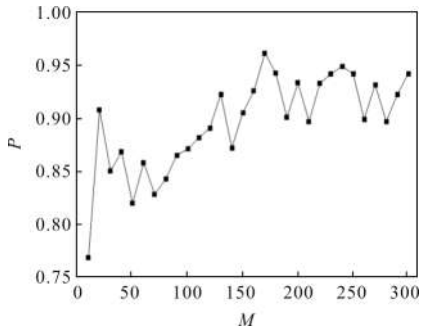


图 5 孔隙率随原始微粒数变化

Fig.5 Change of porosity with original particles

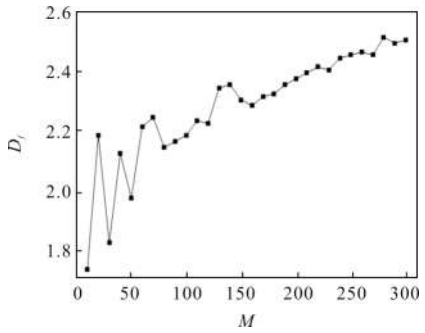
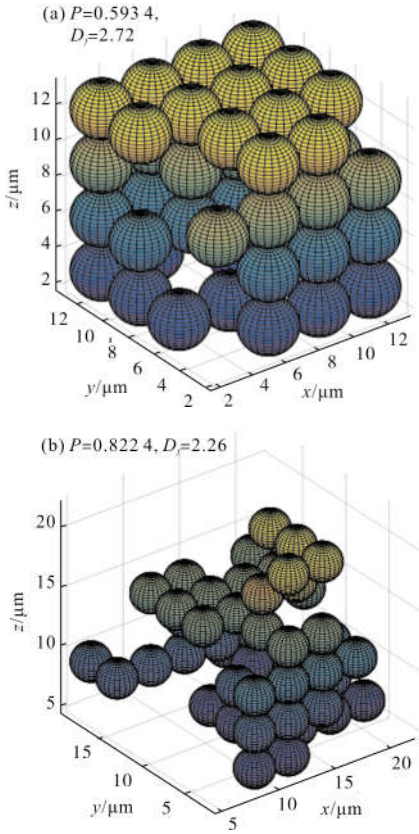


图 6 分形维数随原始微粒数变化

Fig.6 Change of fractal dimension with numbers of original particles



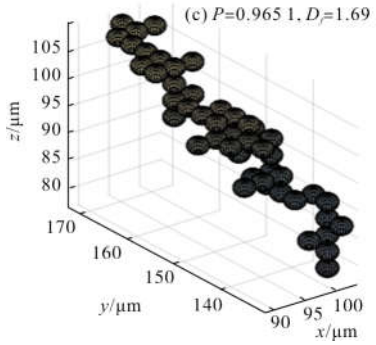


图 7 生物凝聚粒子示意图(M=50)

Fig.7 Schematic of biological aggregated particles(M=50)

图 7 为 CCA 模拟的原始微粒数为 50 的三个不同孔隙率与分形维数的凝聚粒子。由图 7 可知,凝聚粒子的结构不同,其孔隙率与分形维数也不同。

为研究相同原始微粒数的凝聚粒子的孔隙率和分形维数与粒子投影面积等效圆个数之间的关系,利用 CCA 模拟了 M=50 条件下不同孔隙率与分形维数区间中投影面积等效圆个数 N 的统计平均值,结果如表 2、3 所示,

表 2 不同孔隙率区间内投影面积等效圆个数平均值

Tab.2 Average number of equivalent circles of projected area in different porosity intervals

P	N	P	N
0.5–0.55	16	0.75–0.8	22.5
0.55–0.6	16	0.8–0.85	23.9
0.6–0.65	16	0.85–0.9	26.9
0.65–0.7	18.2	0.9–0.95	29.2
0.7–0.75	21.3	0.95–1.0	31.2

表 3 不同分形维数区间内投影面积等效圆个数平均值

Tab.3 Average number of equivalent circles of projected area in different fractal dimension intervals

D_f	N	D_f	N
1.7–1.8	31.5	2.2–2.3	24.3
1.8–1.9	30.2	2.3–2.4	21.2
1.9–2.0	29.2	2.4–2.5	20.8
2.0–2.1	26.7	2.5–2.6	18.2
2.1–2.2	25.7	2.6–2.7	16

在原始微粒数 M 相同的情况下，凝聚粒子的投影面积等效圆个数 N 的平均值随着孔隙率区间值的增大呈上升趋势,而随着分形维数区间值的增大而呈下降趋势,其原因在于在相同的原始微粒下,凝聚粒子的孔隙率越大,粒子的紧凑度越差,原始微粒排列得较为分散,投影面积等效圆个数相对较大,沉降速度就越小;同理,粒子的分形维数越小,粒子的聚集性越小，则具有相对较大的投影面积等效圆个数与较小的沉降速度。图 8、9 为投影面积等效圆个数 N 的统计平均值随孔隙率及分形维数区间的变化情况。

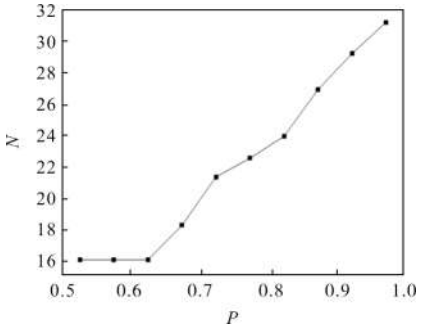


图 8 投影面积等效圆个数随孔隙率变化

Fig.8 Change of the number of equivalent circles of projected area with porosity

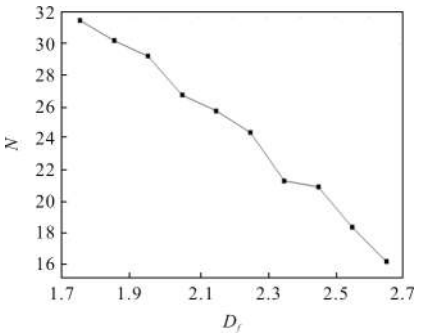


图 9 投影面积等效圆个数随分形维数变化

Fig.9 Change of the number of equivalent circles of projected area with fractal dimension

4 结 论

通过 CCA 模拟了生物消光材料 FANS 233D 的空间结构，并计算了单颗粒与不同形态的生物凝聚粒子的沉降速度,结果表明：

(1) 包含相同原始微粒数的凝聚粒子的沉降速度随着投影面积等效圆个数的增加而降低，当投影面积等效圆个数与原始微粒数一致时，凝聚粒子的沉降速度等于单粒子的沉降速度。

(2) 凝聚粒子的平均沉降速度随着该粒子的原始微粒数的增加而增大，且凝聚粒子的平均沉降速度总是大于单粒子的沉降速度。

(3) 凝聚粒子的孔隙率与分形维数影响投影面积等效圆的个数,在相同原始微粒数下,粒子投影面积等效圆个数随孔隙率增大与分形维数减小呈上升趋势,沉降速度逐渐减小。

生物材料在释放到空中时，其凝聚规律及具体扩散形态有待进一步分析。针对生物材料大气悬浮沉降特性的研究为生物消光材料的实际应用提供了理论基础。

参考文献：

[1] Velazco-Roa M A, Zhongova E D, Thennadil S N. Complex refractive index of nonspherical particles in the visible near infrared region—application to Bacillus subtilis spores[J]. ***Appl Opt***, 2008. 47(33): 6183-6189.

[2] Wang Peng, Liu Hongxia, Zhao Yizheng, et al. Electromagnetic attenuation characteristics of microbial materials in the infrared band [J]. ***Applied Spectroscopy***, 2016, 70(9): 1456-1463.

[3] Tuminello P S, Arakawa E T, Khare B N, et al. Optical properties of Bacillus subtilis spores from 0.2-2.5 μm [J]. ***Appl Opt***, 1957, 36(3): 2818-2824.

[4] Ross K F A, Eve Billing. The water and solid content of living bacterial spores and vegetative cells as indicated by refractive index measurement [J]. ***J Gen Microbiol***, 1997, 16: 418-525.

[5] Liu Jianbin, Zeng Yingxin, Yang Chuping. Light scattering study of biological cells with the discrete dipole approximation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(7): 2204-2208. (in Chinese)
刘建斌, 曾应新, 杨初平. 基于离散偶极子近似生物细胞光散射研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2204-2208.

[6] Feng Chunxia, Huang Lihua, Zhou Guangchao, et al. Computation and analysis of light scattering by monodisperse biological aerosols [J]. ***Chinese J Lasers***, 2010, 37(10): 2592-2598. (in Chinese)
冯春霞, 黄立华, 周光超, 等. 单分散生物气溶胶光散射特性的计算与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2592-2598.

[7] Zhao Xinying, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Transmittance of laser in the microorganism aggregated particle swarm [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2015, 35(6):

0616001. (in Chinese)
赵欣颖, 胡以华, 顾有林, 等. 微生物凝聚粒子群的激光透射率研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0616001.

[8] Gu Youlin, Hu Yihua, Zhao Xinying, et al. Discrimination of viable and dead microbial materials with Fourier transform infrared spectroscopy in 3-5 μm [J]. ***Optics Express***, 2018, 26(12): 15842-15850.

[9] Gu Youlin, Cao Guanghua, Hu Yihua, et al. Measurement of ultraviolet and Infrared composite extinction performance of biological materials [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(3): 0321003. (in Chinese)
顾有林, 曹光华, 胡以华, 等. 生物材料紫外红外复合消光性能[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0321003.

[10] Gurton K P, Ligon D A, Kvavilashvili R. Measured infrared spectral extinction for aerosolized Bacillus subtilis var. Niger endospores from 3 to 13 μm[J]. ***Appl Opt***, 2001, 40(25): 4444.

[11] Chicea D, Turcu I. An alternative random walk Monte Carlo code to simulate light scattering in bioligical suspensions[J]. ***Optik***, 2007, 118: 232-236.

[12] Li Le, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Infrared extinction performance of Aspergillus niger spores [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(7): 2175-2179. (in Chinese)
李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 黑曲霉孢子红外波段消光性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2175-2179.

[13] Sun Dujuan, Hu Yihua, Li Le. Numerical simulation of aerosol sedimentation and diffusion [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(2): 449-453. (in Chinese)
孙杜娟, 胡以华, 李乐. 气溶胶“沉降—扩散”联合动态数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 449-453.

[14] Li Le, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Diffision characteristics of biological extinction material. [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(6): 0621001. (in Chinese)
李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 生物消光材料的扩散特性[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0621001.

[15] Xiao Kaitao, Gong Youguo, Yao Lujiu. Method for measurement and calculation of multi-disperse aerosol deposition velocity[J]. ***The Chinese Journal of Process Engineering***, 2002, 2(S): 47-51. (in Chinese)
肖凯涛, 龚有国, 姚禄玖. 多分散气溶胶沉降速度测定及计算方法[J]. 过程工程学报, 2002, 2(S): 47-51.

[16] Chao Li, Xiong H. 3D simulation of the cluster-cluster aggregation model [J]. ***Computer Phisics Communications***, 2014, 185(12): 3424-3429.

[17] Yao Lujiu, Gao Junlin, Xiao Kaitao, et al. Theory and Testing Technique of Smoke [M]. Beijing: National Defense Industry Publishing Company, 2004. (in Chinese)
姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛, 等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[18] Lattuada M, Wu H, Morbidelli M. Radial density distribution of fractal clusters [J]. ***Chemical Engineering Science***, 2004, 59(21): 4401-4413.

[19] Kozasa T, Blum J, Mukai T. Optical properties of dust aggregates [J]. ***Astronomy and Astrophysics***, 1992, 263 (1-2): 423-432.

[20] Steinvall K O, Kopparl K K, Karlsson V C M [J]. ***Opt Eng***, 1993, 32(6): 1307-1321.