

## 人工制备生物消光材料空气动力学特性

黄宝锟, 胡以华, 顾有林, 赵义正, 李 乐, 赵欣颖

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 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:** 人工制备的几种生物材料生产成本低、密度小、形态可控、安全环保, 在可见光和红外等波段具有较好的消光能力, 可作为一种新型消光材料, 弥补无机消光材料的不足。针对当前军、民用领域对新型生物消光材料的需求, 将生物消光材料中的絮状生物颗粒等效为子弹玫瑰花型粒子, 根据牛顿第二定律和梯度-输运理论, 建立生物消光材料沉降模型和扩散模型, 并讨论絮状生物颗粒结构和风速、大气稳定度对生物消光材料空气动力学特性的影响。结果表明: 分枝数目、长度、半径决定絮状生物颗粒结构; 在某种特定条件下, 絮状生物颗粒沉降速度较等体积球颗粒沉降速度降低了 50%; 烟团遮蔽面积可达 20 m<sup>2</sup> 以上。模型的构建将为生物消光材料发展及实际应用提供理论基础。

**关键词:** 生物消光材料; 絮状结构; 沉降特性; 扩散特性; 沉降速度; 遮蔽面积

**中图分类号:** O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0204005

## Aerodynamic property of artificial biological extinction material

Huang Baokun, Hu Yihua, Gu Youlin, Zhao Yizheng, Li Le, Zhao Xinying

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

**Abstract:** Several kinds of artificial biological materials have the characteristics of low production cost, low mass density, controllable morphology, safety and environmental friendliness, and better extinction ability in the visible and infrared bands, which can be used as new extinction materials to make up for the shortage of inorganic extinction materials. With the increasing demands for new biological extinction materials in military and civilian fields, the flocculent biological particles in the biological extinction material are equivalent to bullet rosette particles. According to Newton's second law and gradient transport theory, the sedimentation and diffusion models of biological extinction material were established. The structures of flocculent biological particles and wind speed and atmospheric stability' influences on aerodynamic characteristics of biological extinction materials were discussed. The results indicate that the structures of flocculent biological particles are controlled by the number of branches, as well as their length and radius. Under given conditions, the settling rate of flocculent biological particle decreased by 50% compared with that of equal volume sphere particle. And the max covering area of smoke can reach

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-03

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: 黄宝锟(1992-), 男, 硕士生, 主要从事生物材料消光方面的研究。Email: 479912155@qq.com

导师简介: 胡以华(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间光电信息处理方面的研究。Email: skl\_hyh@163.com

more than 20 m<sup>2</sup>. The model provides a theoretical basis for the further development and use of biological extinction materials.

**Key words:** biological extinction material; flocculent structure; sedimentation characteristics; diffusion characteristics; settling rate; covering area

## 0 引言

当前,传统的无机消光材料被广泛应用于航天、医药、军事等各个领域,但由于其材料类型固定、消光对象单一、持续时间短、环境危害大等不足<sup>[1]</sup>,在一定程度上制约了其长远发展。生物材料具有生产成本低、密度小、形态多样且可控、安全环保等优点,可作为一种新型消光材料,弥补传统无机消光材料的不足。

目前,针对生物材料的消光特性研究已经取得了较多成果。顾有林<sup>[2-3]</sup>、李乐等<sup>[4]</sup>计算了黑曲霉孢子、梨花粉的复折射率,求出了它们在红外波段的质量消光系数,分析了黑曲霉孢子灭活前后的红外波段消光性能。孙杜娟等<sup>[5-7]</sup>测定了几种微生物远红外波段的复折射率,构建了生物颗粒远红外波段复折射率模型,分析了金属化生物材料的红外、微波的消光性能,得出了金属化生物材料具有作为红外与微波波段材料的潜力。赵欣颖等<sup>[8]</sup>采用团簇-团簇凝聚模型(CCA)构建了微生物凝聚粒子,结合离散偶极子近似法计算了消光截面,使用蒙特卡罗法研究了微生物凝聚粒子群中激光的衰减特性。

在评估一种生物消光材料的性能时,除消光特性外,生物消光材料的空气动力学特性同等重要<sup>[9]</sup>。只有将空气动力学特性和消光特性综合考虑,才能完整地评价一种生物消光材料的优劣。研究生物消光材料的空气动力学特性,将为生物消光材料的发展以及实际应用提供理论基础。姚国新<sup>[10]</sup>通过颗粒受力分析,系统研究了单个颗粒、絮团颗粒沉降特性。保石等<sup>[11]</sup>从扩散浓度方程出发,分析了烟团的扩散特性,评价了烟幕的使用性能。刘健<sup>[12]</sup>采用离散相模型模拟了生物气溶胶颗粒在建筑物密集的小区内的扩散规律,得到了生物气溶胶颗粒的数目分布情况。孙杜鹃等<sup>[13]</sup>基于牛顿第二定律,采用有限时域差分法构建了重力作用下生物材料的“沉降-扩散”联合动态模型。上述研究对于颗粒的建模,均是将其等

效为结构简单的球体。由于生物颗粒形态丰富多样,此种等效未将生物颗粒结构的多样性突显出来。生物颗粒结构必将对生物消光材料的空气动力学特性产生较大影响。

针对一种人工制备生物消光材料,为进一步研究其空气动力学特性,文中构建了絮状生物颗粒模型以及生物消光材料沉降模型和扩散模型。重点讨论絮状生物颗粒结构、生物消光材料释放方式以及风速和大气稳定度对生物消光材料空气动力学特性的影响。

## 1 絮状生物颗粒几何描述模型

该课题组制备出某真菌类消光材料,图 1 为该生物材料光学显微镜图。由图 1 可以看出该生物颗粒(图中圆圈所示)是由数个丝状物彼此交错缠绕在一起,形成的絮状结构。此种结构能够在风力作用下长时间悬浮,沉降速度较小,利于颗粒的扩散。

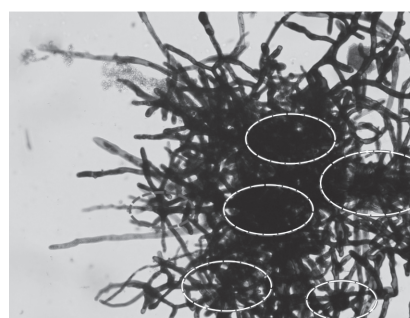


图 1 某生物材料

Fig.1 Biological material

为使计算结果能精确反映生物消光材料的空气动力学特性,将图 1 中絮状生物颗粒等效为子弹玫瑰花型粒子,该结构可用如下数学公式表示<sup>[14]</sup>:

$$r=[a\cos^{2\alpha}(m\theta)+c]^e[b\cos^{2\beta}(n\varphi)+d]^f \quad (1)$$

式中: $a, b, c, d, e, f, m, n, \alpha, \beta$  为控制子弹玫瑰花型粒子形状和结构的变量。当  $a=b=-1, c=d=1, e=f=50, m=n=3, \alpha=\beta=2$  时,可得到一个 14 枝的子弹玫瑰花型粒子,如图 2 所示。为简单起见,对子弹玫瑰花型

粒子进一步抽象简化, 将粒子分枝等效为圆柱加圆锥即尖角圆柱。尖角圆柱的个数为子弹玫瑰花型粒子的枝数  $N$ 。分枝半径  $R$  和柱体长度  $L$  如图 3 所示。



图 2 一个 14 枝的子弹玫瑰花型粒子

Fig.2 A bullet rosette particle with fourteen branches

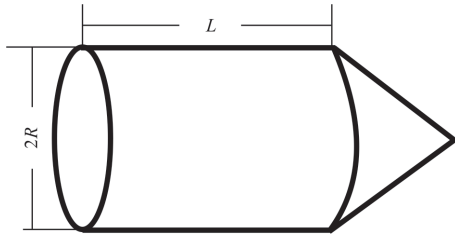


图 3 子弹分支结构参数

Fig.3 Bullet branch structural parameters

## 2 生物消光材料沉降模型

生物材料形成由高分散度絮状生物颗粒组成的悬浮于自由大气中的生物气溶胶。由于絮状生物颗粒空气动力学半径为几十微米, 絮状生物颗粒布朗扩散运动可以忽略。同时絮状生物颗粒间距相对于絮状生物颗粒空气动力学半径大得多, 絮状生物颗粒间相互作用力也可以忽略。因此生物消光材料空气动力学特性主要取决于重力作用和空气介质的活动。生物消光材料的沉降特性影响着生物材料的消光特性, 此节以絮状生物颗粒沉降速度表征生物气溶胶的沉降特性。

文中假设空气是不可压缩的, 絮状生物颗粒沉降过程中不存在形变和滑动, 单个絮状生物颗粒在大气中分散得较好, 并在絮状生物颗粒间无接触的条件下沉降。根据维纳-斯托克斯方程<sup>[15]</sup>, 絮状生物颗粒受力平衡方程为:

$$\frac{du}{dt} = \frac{G-F-F_f}{m} \quad (2)$$

式中:  $u$  为絮状生物颗粒速度;  $m$  为絮状生物颗粒质量;  $G$ 、 $F$ 、 $F_f$  为絮状生物颗粒在空气中所受的重力、浮力、阻力。

对于絮状生物颗粒, 公式(2)中絮状生物颗粒质量  $m$  为:

$$m = \sum_{i=1}^N [\pi \cdot R_i^2 \cdot L_i \cdot \rho] = \pi \rho \sum_{i=1}^N [R_i^2 \cdot L_i] \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为絮状生物颗粒密度;  $N$  为絮状生物颗粒分枝数目;  $L_i$ 、 $R_i$  为絮状生物颗粒第  $i$  个分枝的分枝长度和分枝半径。因此絮状生物颗粒重力  $G$  为:

$$G = \pi g \rho \sum_{i=1}^N [R_i^2 \cdot L_i] \quad (4)$$

式中:  $g$  为重力加速度。

根据阿基米德原理, 絮状生物颗粒浮力  $F$  为:

$$F = \sum_{i=1}^N [\pi \cdot R_i^2 \cdot L_i \cdot \rho_{\text{air}} \cdot g] = \pi g \rho_{\text{air}} \sum_{i=1}^N [R_i^2 \cdot L_i] \quad (5)$$

式中:  $\rho_{\text{air}}$  为空气密度。

对于空气密度和空气粘滞系数为定值的流体, 絮状生物颗粒相对流体运动受到的阻力  $F_f$  由颗粒在运动方向上的投影面积  $A$  以及颗粒相对于流体的运动速度  $u$  共同决定。絮状生物颗粒所受阻力为<sup>[16]</sup>:

$$F_f = \frac{1}{2} \xi A \rho_{\text{air}} u^2 \quad (6)$$

假设絮状生物颗粒分枝取向任意, 分枝长度  $L$  远大于分枝半径  $R$ 。絮状生物颗粒在运动方向上的投影面积  $A$  可采用如下公式计算:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (2RL_i + \pi R_i^2) \quad (7)$$

因此絮状生物颗粒有效直径  $d_p$  为:

$$d_p = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (2RL_i + \pi R_i^2)} \quad (8)$$

式中:  $\xi$  为雷诺数  $Re$ <sup>[16]</sup> 的函数, 雷诺数  $Re$  是反应絮状生物颗粒在流体流动中所受惯性力与粘滞力的对比关系、判断流体形态的参数<sup>[17]</sup>。

$$\xi = \varphi(Re) = \varphi\left(\frac{d_p \mu \rho_{\text{air}}}{\eta}\right) \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为空气粘滞系数。

公式(9)函数需要根据经验公式确定, 一般来说,  $\xi$  的计算公式<sup>[16]</sup>如下:

$$\text{层流区}(Re < 1) \quad \xi = 24/Re$$

$$\text{过渡区}(1 < Re < 500) \quad \xi = 10/\sqrt{Re}$$

$$\text{湍流区} (500 < Re < 10^5) \quad \xi = 4/9 \quad (10)$$

将公式(3)~(10)代入公式(2),有:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho - \rho_{\text{air}}}{\rho} g - \frac{\sqrt{18\pi} \eta \sqrt{\sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2)}}{\pi \rho \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]} \cdot u$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho - \rho_{\text{air}}}{\rho} g - \frac{\sqrt[4]{\frac{625\pi}{32}} \sqrt{\eta \rho_{\text{air}}} \left[ \sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2) \right]^{\frac{3}{4}}}{\pi \rho \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]} \cdot u^{\frac{3}{2}}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\rho - \rho_{\text{air}}}{\rho} g - \frac{\rho_{\text{air}} \sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2)}{9\pi \rho \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]} \cdot u^2 \quad (11)$$

由公式(11)可以看出,当  $\frac{du}{dt} = 0$  时,絮状生物颗粒做匀速运动。此时,絮状生物颗粒速度  $u_\tau$  为沉降速度。得到絮状生物颗粒在不同沉降区域的沉降速度计算公式如下:

$$u_\tau = \frac{\pi g (\rho - \rho_{\text{air}}) \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]}{\sqrt{18\pi} \eta \sqrt{\sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2)}}$$

$$u_\tau = \left\{ \frac{\pi g (\rho - \rho_{\text{air}}) \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]}{\sqrt[4]{\frac{625\pi}{32}} \sqrt{\eta \rho_{\text{air}}} \left[ \sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2) \right]^{\frac{3}{4}}} \right\}^{\frac{2}{3}}$$

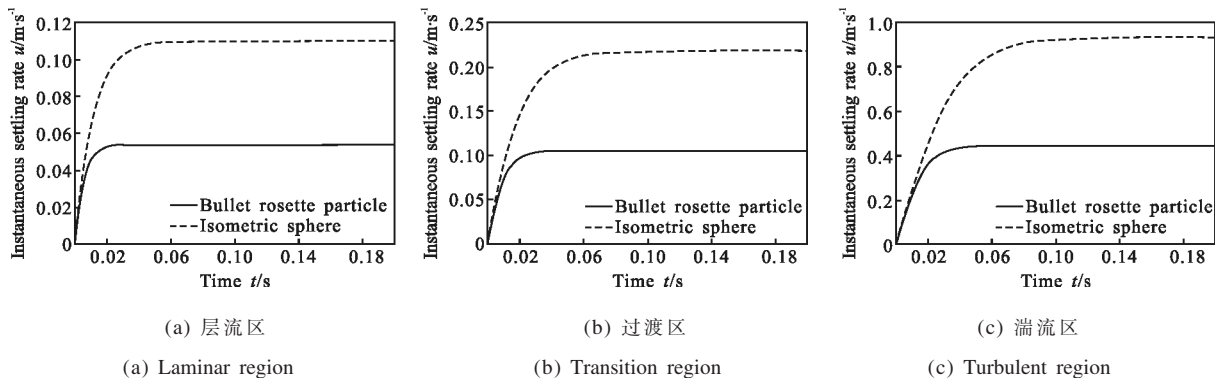


Fig.5 Instantaneous rate of flocculent biological particle and isometric sphere

段时间很短,只有 0.1 s 左右。第二阶段为匀速阶段,此阶段絮状生物颗粒所受阻力等于重力与浮力之差,受力平衡,絮状生物颗粒以速度  $u_\tau$  匀速沉降。

$$u_\tau = \left\{ \frac{9\pi g (\rho - \rho_{\text{air}}) \sum_{i=1}^N [R_i^2 L_i]}{\rho_{\text{air}} \sum_{i=1}^N (2R_i L_i + \pi R_i^2)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

为进一步研究絮状生物颗粒沉降特性,以及絮状生物颗粒分支数目、分枝长度、分枝半径对其沉降速度的影响,进行如下计算。假设空气密度  $\rho_{\text{air}} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 、空气粘滞系数  $\eta = 1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、絮状生物颗粒密度  $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ 、分枝数目  $N = 62$ 、分枝长度  $L = 100 \mu\text{m}$ 、分枝半径  $R = 5 \mu\text{m}$ 。上述结构絮状生物颗粒如图 4 所示。该结构絮状生物颗粒和等体积球在各个区域内的瞬时速度如图 5 所示。

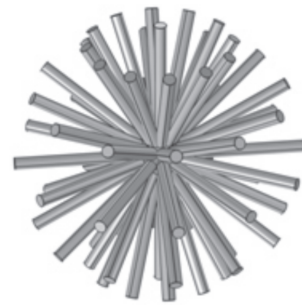


图 4 絮状生物颗粒  
Fig.4 Flocculent biological particle

由图 5 可知,絮状生物颗粒沉降过程可分为两个阶段。第一阶段为加速阶段,此阶段由于重力作用,絮状生物颗粒速度不断增大。随着速度的增大,所受阻力增大,加速度减小,直至为零。通常加速阶

该结构絮状生物颗粒沉降速度为  $u_\tau = 5.37 \text{ cm/s}$  (层流区)、 $u_\tau = 10.44 \text{ cm/s}$  (过渡区)、 $u_\tau = 44.55 \text{ cm/s}$  (湍流区)。在文中以下的计算中,絮状生物颗粒沉降区域

均选为层流区。

对比该结构絮状生物颗粒与等体积球沉降速度可以发现，絮状生物颗粒沉降速度约为等体积球沉降速度的一半。这是由于絮状生物颗粒的比表面积要远大于等体积球。因此，絮状结构颗粒能有效地在

风力作用下长时间悬浮，降低沉降速度，提高气溶胶留空时间。

絮状生物颗粒沉降速度随分支数目、分枝长度、分枝半径的变化趋势分别如图 6(a)~(c)所示。

由图 6 可以看出，絮状生物颗粒沉降速度随分

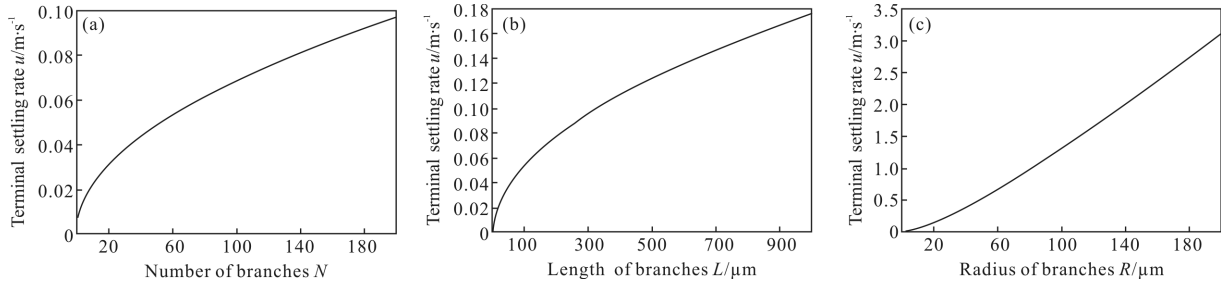


图 6 絮状生物颗粒沉降速度

Fig.6 Settling rate of flocculent biological particle

枝数目、分枝长度、分枝半径基本呈线性增长趋势。随着分枝数目、分枝长度、分枝半径的增加，絮状生物颗粒所受重力、浮力增大，投影面积  $A$  增大导致阻力增大。但絮状生物颗粒所受阻力增大较重力慢，因此沉降速度变大。

絮状生物颗粒沉降过程加速阶段的瞬时加速度随分支数目、分枝长度、分枝半径的变化趋势分别如图 7(a)~(c)所示。

由图 7 可以看出，絮状生物颗粒沉降加速阶段，由于空气阻力作用加速度迅速减小至零。加速度基

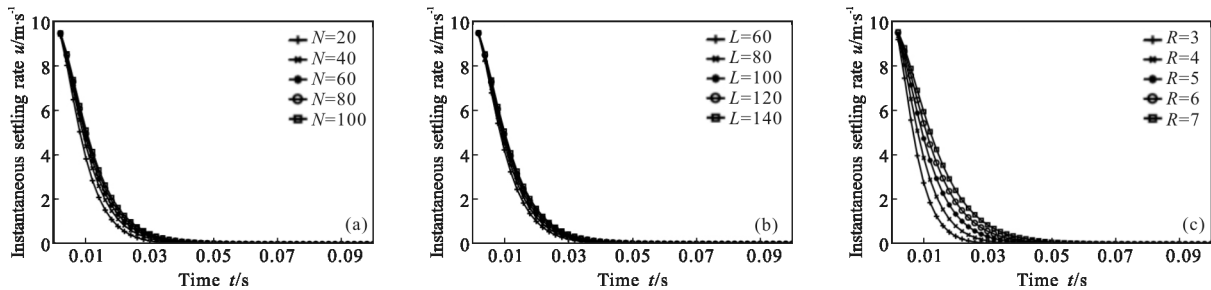


图 7 絮状生物颗粒瞬时加速度

Fig.7 Instantaneous acceleration rate of flocculent biological particle

本与分支数目、分枝长度、分枝半径无关，对分枝半径的变化相对较为敏感。

综上所述，絮状生物颗粒分支数目、分枝长度、分枝半径对沉降特性影响较大。絮状生物颗粒沉降速度不仅与絮状生物颗粒分支数目、分枝长度、分枝半径有关，还与空气稳定性、气流、温度、湿度、湍流强度有关。由于在数值计算中无法综合考虑这些因素的存在，仅能计算出理想情况下絮状生物颗粒沉降速度，絮状生物颗粒实际沉降速度要小于理论值。

### 3 生物消光材料扩散模型

生物消光材料空气动力学特性不仅取决于重力

作用，还取决于空气介质的活动。生物消光材料的扩散特性影响着生物材料的消光特性，本节讨论生物消光材料扩散模型，以生物消光材料浓度时域变化特征表征生物气溶胶的扩散特性。

生物消光材料在空中释放，在湍流的作用下迅速分散开来，生物消光材料有从高质量浓度区域向低质量浓度区域运动的趋势，造成了生物消光材料浓度在空间和时间上的分布。根据梯度-输运理论推出生物消光材料扩散方程<sup>[18]</sup>为：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (13)$$

式中： $C(x, y, z, t)$ 为生物消光材料  $t$  时刻在空间某点  $(x, y, z)$  处的质量浓度； $u, v, w$  为沿坐标轴各个方向的平均风速； $D_x, D_y, D_z$  为沿坐标轴各个方向的扩散系数，它们是时间、下风向距离以及大气稳定度的函数，一般通过理论和实验结果获得。其中，大气稳定度等级共分为 A、B、C、D、E、F 六级，分别对应着极不稳定到极稳定。

由于絮状生物颗粒动力学半径为几十微米，重力沉降作用不可忽略。在研究生物消光材料扩散特性的同时，必须考虑重力沉降项，综合考虑生物消光材料沉降、扩散特性。因此此节结合传统的高斯烟团、烟羽模型构建生物消光材料扩散模型。其基本思想是：生物消光材料在扩散的同时，重力沉降位移附加到扩散中心线上，导致扩散中心线为一条向下倾斜的直线，生物消光材料在向下倾斜的直线上扩散<sup>[21]</sup>。

### 3.1 高斯烟团模型

采用爆炸释放方式，大量生物消光材料在释放时刻由释放位置同时进入空域，初始烟幕体积可比拟烟幕扩散体积，因此可采用高斯烟团模型<sup>[16]</sup>：

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(x-vt)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right]\right\} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H+u_\tau t)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \alpha(x) \exp\left[-\frac{(z+H-u_\tau t)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (14)$$

式中： $C(x, y, z, t)$ 为生物消光材料释放  $t$  时刻后，在空间某点  $(x, y, z)$  处的质量浓度； $Q$  为生物消光材料的装填量； $v$  为沿  $x$  轴方向的平均风速； $H$  为生物消光材料爆炸释放时的高度； $u_\tau$  为絮状生物颗粒沉降速度； $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为沿  $x, y, z$  轴方向的扩散方差。 $\sigma_x = \sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1}$ 、 $\sigma_z = \gamma_2 z^{\alpha_2}$ ，取值参考《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》<sup>[19]</sup>。 $\alpha(x)$  为下垫面反射系数。 $\alpha(x)$  为经验常数，通常由经验公式(15)给出， $0 < \alpha(x) < 1$ 。

$$\alpha(x) = 1 - \frac{2u_\tau}{V_d + u_\tau + (Hv - u_\tau x) \sigma_z^{-1} \frac{d\sigma_z}{dx}} \quad (15)$$

式中： $V_d$  为生物消光材料干沉降速度，通常由外场试验或实验室测定得到。

设絮状生物颗粒沉降速度  $u_\tau = 5 \text{ cm/s}$ ，装填量  $Q$  为  $1 \text{ kg}$ ，参考面  $5 \text{ m}$  处风速  $v$  为  $1 \text{ m/s}$ ，生物消光材料爆炸释放时的高度  $H$  为  $5 \text{ m}$ ，大气稳定度为 D 级，则  $t = 10 \text{ s}$  时，生物消光材料在参考面处的浓度分布

如图 8 所示。

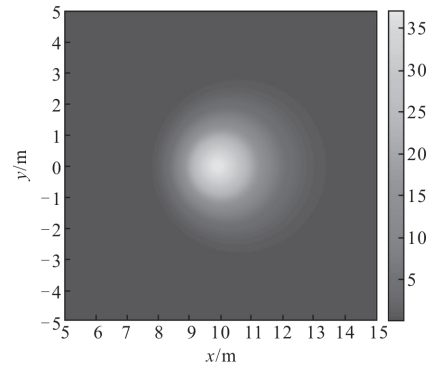
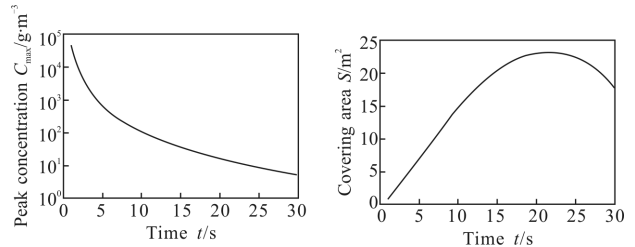


图 8 释放 10 s 后，生物消光材料在参考面处浓度分布

Fig.8  $t=10 \text{ s}$ , concentration profiles of the biological extinction material on reference height

由图 8 可以看出，生物材料释放后，由于水平和垂直扩散作用，生物消光材料烟团呈现椭球形，形状较为规则。在下风向和横风向，生物消光材料浓度呈高斯分布。

在不同时刻，烟团峰值浓度  $C_{\max}$  和烟团遮蔽面积  $S$  如图 9 所示。



(a) 烟团峰值浓度 (b) 烟团遮蔽面积

(a) Peak concentration of smoke (b) Covering area of smoke

图 9 烟团峰值浓度和遮蔽面积

Fig.9 Peak concentration and covering area of smoke

由图 9 可以看出，随着时间的变化，由于扩散作用，烟团峰值浓度急剧减小，烟团遮蔽面积逐渐变大并趋于稳定后逐渐减小。这是由于扩散作用导致烟团浓度减小，当其浓度不足以对电磁波产生消光作用时，烟团遮蔽面积逐渐减小至零。烟团最大遮蔽面积约为。

不同风速条件下，不同时刻烟团峰值浓度  $C_{\max}$  和烟团遮蔽面积  $S$  如图 10 所示。

由图 10 可以看出，随着风速的增大，在同一时刻烟团峰值浓度减小，烟团遮蔽面积变大。扩散速度加快，扩散范围加大。

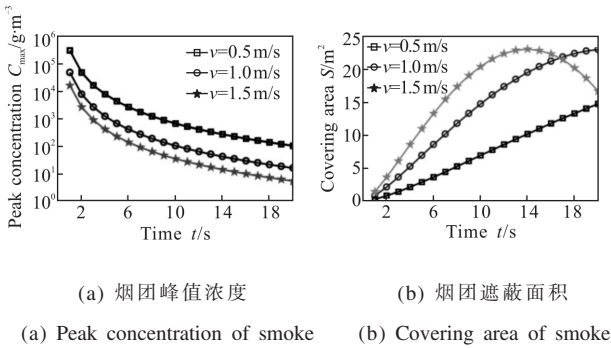


图 10 烟团峰值浓度和遮蔽面积

Fig.10 Peak concentration and covering area of smoke

不同稳定度条件下, 不同时刻烟团浓度  $C_{max}$  和烟团遮蔽面积  $S$  如图 11 所示。

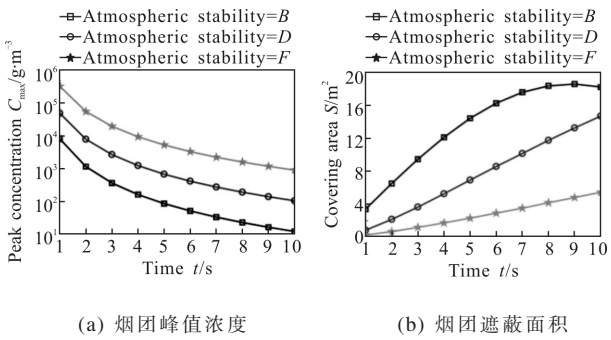


图 11 烟团峰值浓度和遮蔽面积

Fig.11 Peak concentration and covering area of smoke

由图 11 可以看出,随着大气稳定度级别由不稳定状态变为稳定状态,在同一时刻烟团峰值浓度增大,烟团遮蔽面积变小。扩散速度减慢,扩散范围减小。

### 3.2 高斯烟羽模型

采用喷洒释放方式,大量生物消光材料连续在释放时刻由释放位置进入空域,初始烟幕体积远小于烟幕扩散体积,因此可采用高斯烟羽模型<sup>[11]</sup>:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[ \exp\left[-\frac{\left(z-H+\frac{u_x x}{v}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \alpha(x) \exp\left[-\frac{\left(z+H-\frac{u_x x}{v}\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right] \quad (16)$$

式中:  $C(x, y, z, H)$  为生物消光材料释放有效高度  $H$  后,在空间某点  $(x, y, z)$  处的质量浓度;  $Q$  为生物消光材料的释放速率;  $v$  为沿  $x$  轴方向的平均风速;  $H$  为生物消光材料流的有效高度;  $\sigma_y, \sigma_z$  为沿  $y, z$  轴方向的扩散方差,取值参考文献[20]。

设絮状生物颗粒沉降速度  $u_s=5$  cm/s, 释放速率  $Q$  为  $100$  g/m<sup>3</sup>, 参考面  $3$  m 处风速  $v$  为  $1$  m/s, 生物消光材料流的有效高度  $H$  为  $5$  m, 大气稳定度为  $D$  级, 则生物消光材料扩散至稳态时在参考面处的浓度分布如图 12 所示。

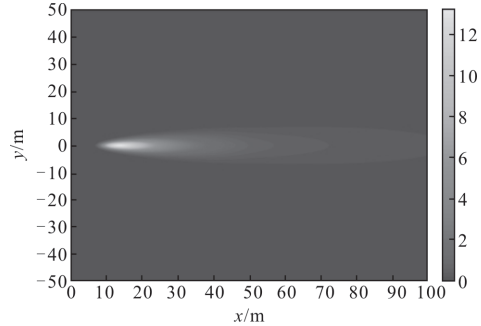


图 12 生物消光材料浓度分布

Fig.12 Concentration profiles of the biological extinction material

由图 12 可以看出,生物材料释放后,由于水平和垂直扩散作用,生物消光材料烟团呈现纺锤形,形状较为规则。生物消光材料沿下风向扩散,在横风向浓度呈高斯分布。在下风向,生物消光材料质量浓度先迅速增大至峰值后缓慢减小,浓度趋于稳定。稳定时,生物消光材料烟团遮蔽面积约为  $S=80$  m<sup>2</sup>。

不同风速、不同大气稳定度条件下,生物消光材料扩散至稳态时烟团峰值浓度  $C_{max}$  和烟团遮蔽面积  $S$  如表 1 所示。

表 1 烟团峰值浓度和遮蔽面积

Tab.1 Peak concentration and covering area of smoke

Wind speed /m · s <sup>-1</sup>	Atmospheric stability	$C_{max}/g \cdot m^{-3}$	$S/m^2$
0.5		151 720	163.19
0.8		103 430	101.87
1	D	75 859	87.22
1.2		68 289	69.99
1.5		54 631	55.67
	A	2 884	65.54
	B	6 595	77.86
	C	14 328	85.67
1	D	75 859	87.22
	E	115 890	100.98
	F	163 330	117.23

由表 1 可以看出,随着风速的增大,稳定状态时烟团峰值浓度减小。烟团遮蔽面积变小,扩散范围减小。

同时,随着大气稳定度级别由不稳定状态变为稳定状态,稳定状态时烟团峰值浓度增大。烟团遮蔽面积变大,扩散范围加大。

综合 3.1、3.2 节所述,风速和大气稳定度对于生物材料扩散特性影响较大。生物材料瞬时释放时,生物消光材料浓度随时间逐渐减小,烟团逐渐加大。风速增大,生物消光材料烟团加大,浓度扩散速度加快;大气稳定度提高,絮状生物颗粒烟团减小,浓度扩散速度减慢。生物材料连续释放时,风速增大,生物消光材料浓度烟团减小;大气稳定度提高,生物消光材料烟团加大。

实际上,生物消光材料的扩散特性不仅受到大气稳定度的影响,还受到气象条件、下垫面条件等因素的影响,影响因素众多且复杂。文中所述方法能从理论上计算理想情况下生物消光材料的空气动力学特性。

#### 4 结束语

生物材料因其独有的特性,可作为一种新型功能材料,弥补传统无机消光材料不足。将制备出的絮状生物颗粒等效为子弹玫瑰花型粒子,构建生物消光材料沉降模型和扩散模型。结果表明:絮状生物颗粒形态结构及风速、大气稳定度对生物消光材料空气动力学特性存在较大影响。

(1) 絮状生物颗粒沉降速度与分支数目、分枝长度、分枝半径成正相关。在某种特定结构下,絮状生物颗粒沉降速度较等体积球颗粒沉降速度降低了 50%。

(2) 瞬时释放时,风速越大,生物消光材料烟团越大,浓度扩散速度越快;大气稳定度级别越高,生物消光材料烟团越小,浓度扩散速度越慢。连续释放时,风速越大,生物消光材料烟团越小;大气稳定度级别越高,生物消光材料烟团越大。

因此,在实际使用中,在计算生物消光材料沉降-扩散特性,评估生物消光材料的释放效果,一定要充分考虑絮状生物颗粒的形态结构以及释放地的自然环境,使消光材料性能充分达到要求。

#### 参考文献:

[1] Wang P, Liu H, Zhao Y, et al. Electromagnetic attenuation

characteristics of microbial materials in the infrared band[J]. *Applied Spectroscopy*, 2016, 70(9): 1456-1463.

[2] Gu Youlin, Wang Cheng, Yang Li, et al. Infrared extinction before and after aspergillus niger spores inactivation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 36-41. (in Chinese)

顾有林, 王成, 杨丽, 等. 黑曲霉孢子灭活前后红外消光特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 36-41.

[3] 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.

[4] Li Le, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Measurement and analysis on complex refraction indices of pear pollen in infrared band [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(1): 89-92. (in Chinese)

李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 梨花粉红外波段复折射率测定与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(1): 89-92.

[5] Sun Dujuan, Hu Yihua, Wang Yong, et al. Sub-microstructures' influences on cell's scattering prosperities [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(6): 710-714. (in Chinese)

孙杜娟, 胡以华, 王勇, 等. 生物细胞亚显微结构对光散射特性的影响[J]. *光子学报*, 2013, 42(6): 710-714.

[6] Sun Dujuan, Hu Yihua, Li Le. Test and analysis of infrared and microwave characteristics of metallic farinas[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2531-2535. (in Chinese)

孙杜娟, 胡以华, 李乐. 金属化花粉红外、微波特性测试与分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2531-2535.

[7] Sun Dujuan, Hu Yihua, Gu Youlin, et al. Preparation and performance testing of metallic biologic particles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 555-558. (in Chinese)

孙杜娟, 胡以华, 顾有林, 等. 金属化生物颗粒的制备与性能测试[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 555-558.

[8] 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.

[9] Qiao Xiaojing, Lu Zheng, Han Xiaoli. Study on the deposition velocity of smoke particles [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 1997: 30-33. (in Chinese)

乔小晶, 陆政, 韩晓利. 烟雾颗粒沉降速度研究 [J]. *火工品*, 1997: 30-33.



- [10] Yao Guoxin. Coarse particle settling properties study based on particle analysis [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)  
姚国新. 基于颗粒受力的粗颗粒沉降性质研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- [11] Bao Shi, Zhang Zihao. Analysis of motion characteristics of smoke cloud particles [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2015, 30(4): 20–23. (in Chinese)  
保石, 张紫浩. 烟幕云团运动特性分析[J]. 光电技术应用, 2015, 30(4): 20–23.
- [12] Liu Jian. Research on the simulation method of bioaerosols' diffusion in a housing estate [D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2012. (in Chinese)  
刘健. 城市小区环境中生物剂气溶胶的扩散模拟方法研究 [D]. 北京: 军事医学科学院, 2012.
- [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] Sun Xianming. Study on wave propagation and scattering characteristics of atmospheric discrete random media [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)  
孙贤明. 大气中离散随机介质的波传播和散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [15] Pan Gongpei, Yang Shuo. Pyrotechnics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997. (in Chinese)  
潘功配, 杨硕. 烟火学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [16] Yao Lujiu, Gao Junlin, Xiao Kaitao, et al. Theory and Testing Technique of Smoke[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 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.
- [17] Zheng Qiliang, Qian Zhiwei. Application of the Stokes law in cloudy beverages[J]. *Beverage Industry*, 1998, 1(1): 24–26. (in Chinese)  
郑其良, 钱志伟. 斯托克斯(Stokes)定律在混浊型饮料中的应用[J]. 饮料工业, 1998, 1(1): 24–26.
- [18] Corkum P B. Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, 71(13): 1994–1997.
- [19] Technical methods for making local emission standards of air pollutants. (GBT 3840–1991) (in Chinese)  
制定地方大气污染物排放标准的技术方法.(GBT 3840–1991)
- [20] Pasquill F. The estimation of the dispersion of windborne material[J]. *Meteorol Mag*, 1961, 90: 33–49.
- [21] Tong Zhiquan. Environmental Impact Assessment on Air[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988. (in Chinese)  
童志权. 大气环境影响评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.