

生物材料消光特性研究进展

顾有林^{1,2,3*}, 张熙^{1,3}, 胡以华^{1,2,3}, 孟凡昊^{1,3}, 陈国龙^{1,3}, 丁婉莹^{1,3}, 王思雨^{1,3}¹国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;²先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;³国防科技大学, 安徽 合肥 230037

摘要 生物材料作为一种有别于传统无机消光材料的新型烟幕介质, 悬浮于空气中, 以烟幕的形式存在, 通过对光的吸收和散射作用改变光波的传输特性。本文根据生物材料的复折射率特点, 介绍了生物材料的吸收和散射特性, 概括了生物材料单粒子、单分散凝聚粒子和多分散凝聚粒子的消光特性的表征方式, 分析了影响生物材料消光特性的因素, 总结了生物材料消光性能测试方法。最后, 本文提出了生物材料在复杂空间结构模拟精确化、消光特性影响因素分析多元性、消光特性测试标准化方面的发展趋势, 以期新型消光材料的制备和改进等提供有益参考。

关键词 材料; 烟幕; 消光特性; 凝聚粒子; 复折射率

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL231191

1 引言

近年来, 随着激光和红外探测技术的迅速发展, 多波段烟幕的材料制备、生成方式、消光性能测试及效果评估等受到了广泛关注^[1]。烟幕通过悬浮分散于空气中的固体、液体或固液混合物微粒对光的吸收和散射来衰减光波信号, 达到遮蔽和保护我方目标的目的^[2]。金属粉末、化合物和金属混合物等传统的无机消光材料大部分存在消光波段单一、制备成本高、易燃烧、难降解、对环境不友好、释放方式单一等不足^[3-4], 因而具有强衰减、宽波段、长留空、低成本、无污染、无燃烧等特性的安全环保型宽波段消光材料受到了广泛关注。

人工可控制备的生物孢子或菌丝等生物材料是一些微小的生物粒子在静电、碰撞或黏附作用下形成的具有分形特征和复杂空间结构的随机取向凝聚粒子体系^[3]。生物材料是一种新型的安全环保型宽波段烟幕介质, 其释放到空气中形成的烟幕会对光产生吸收和散射, 从而能够有效地衰减紫外波段、可见波段和红外波段等宽波段光波^[5]。目前, 生物材料消光特性的研究工作已经取得了一定进展。根据生物材料的电镜图, 研究人员构建了球形粒子^[6-8]、典型非球形粒子^[9-12]、单分散凝聚粒子和多分散凝聚粒子^[13-15]等粒子结构模型, 并开展了相应结构生物材料的消光特性研究。同时, 根据不同活性状态的生物材料的消光特性

差异, 从定性^[16-17]、定量^[18-20]两个角度对材料的活性进行了判定, 并研究了不同风速^[21-23]、地面粗糙度^[23]和湿度^[24]等条件下生物材料的消光特性。通过研究人工可控制备的微生物菌丝和孢子等生物材料的消光特性发现, 生物材料具有形态多样、消光能力强、波段宽、阻抗高、环保无毒等特点^[25], 是一种潜在的安全环保型宽波段消光材料, 对于重要目标或设施的光电防护具有重要意义。

本文首先介绍了生物材料的消光特性, 概括了不同结构生物材料消光特性的表征方式; 然后从生物材料活性、风速、地面粗糙度和湿度等方面, 分析了生物材料消光特性的影响因素, 总结了生物材料的静态和动态测试方法; 最后展望了生物材料在复杂空间结构模拟精确化、消光特性影响因素多元性、消光特性测试标准化等方面的发展趋势。本文所提及的生物材料均为具有宽波段消光能力的人工可控制备的生物孢子或菌丝等生物材料。

2 生物材料的消光特性

生物材料的消光特性主要包括其对光能量的吸收和散射。复折射率表征材料对光波的色散和吸收能力, 是分析生物材料光波散射特性以及识别生物材料粒子种类的重要参数^[6]。生物材料因组成成分和空间结构的差异, 具有不同的吸收和散射特性, 从而具有不同的复折射率。研究生物材料的复折射率, 便于计算

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-14; 录用日期: 2023-09-15; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(62075241)、先进激光技术安徽省实验室基金(20191003)

通信作者: *ylgu0912@163.com

消光截面、质量消光系数等参数,有助于分析不同结构生物材料的消光特性。

2.1 生物材料的复折射率

复折射率 $m(\lambda)$ 是描述生物材料消光性能的重要参数,是先采用傅里叶变换红外光谱仪或显微红外光谱仪测量样品的光谱数据,然后根据样品在全波段的反射率 $R(\lambda)$,利用 Kramers-Kronig (K-K) 关系^[26-27]计算得到的。单粒子结构生物材料的复折射率为 $m(\lambda)$,可以表示为

$$m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda), \quad (1)$$

式中: λ 是反射波的波长;实部 $n(\lambda)$ 表征材料对光波的色散;虚部 $k(\lambda)$ 表征材料对光波的吸收^[17]。实部 $n(\lambda)$ 和虚部 $k(\lambda)$ 可以根据反射率 $R(\lambda)$ 和反射相移 $\theta(\lambda)$ 计算得到,计算公式^[28-29]为

$$n(\lambda) = \frac{1 - R(\lambda)}{1 + R(\lambda) + 2\sqrt{R(\lambda)} \cos \theta(\lambda)}, \quad (2)$$

$$k(\lambda) = \frac{-2\sqrt{R(\lambda)} \sin \theta(\lambda)}{1 + R(\lambda) + 2\sqrt{R(\lambda)} \cos \theta(\lambda)}. \quad (3)$$

测量全波段反射率 $R(\lambda)$ 时,需要考虑实际测试仪器的测量角度和工作波段。 $R(\lambda)$ 通常利用经验公式外推或常数外推^[29]得到。反射相移 $\theta(\lambda)$ 的计算公式^[28]为

$$\theta(\lambda) = \frac{\lambda}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\ln R(\lambda')}{(\lambda'^2 - \lambda^2)} d\lambda', \quad (4)$$

其中 P 是柯西主值函数。生物材料的成分决定了复折射率的性质,当生物材料的成分和结构特征发生变化时,其复折射率也随之发生变化,从而影响消光特性。生物凝聚粒子的等效复折射率 m_{eff} 利用孔隙率 ρ 和单粒子结构生物材料的复折射率 $m(\lambda)$ 计算得到,计算公式^[14]表示为

$$m_{\text{eff}}^2 = 1 + \frac{3(1-\rho)(m^2-1)/(m^2+2)}{1-(1-\rho)(m^2-1)/(m^2+2)}. \quad (5)$$

图 1 给出了某种生物孢子在 0.24~14.00 μm 波段的复折射率、透过率、消光比、吸收比和散射比等性能参数,其中,图 1(a) 为复折射率实部,图 1(b) 为复折射率虚部。

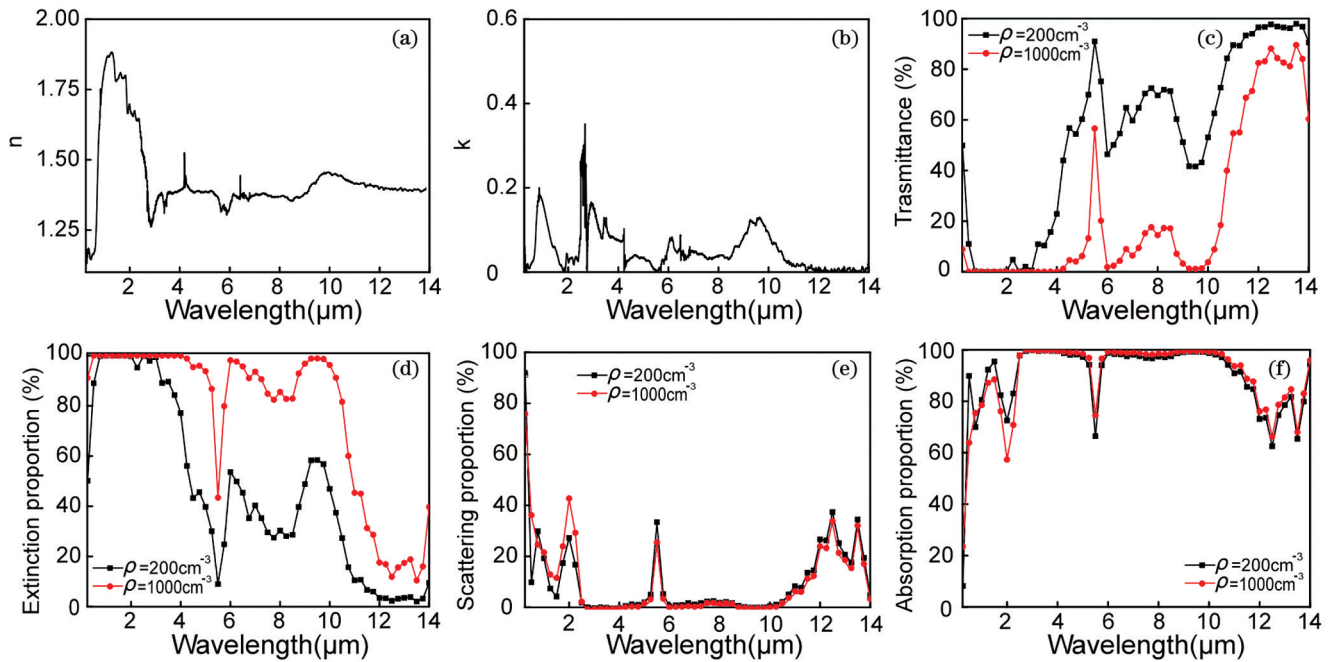


图 1 生物孢子的消光特性^[5]。(a)(b)复折射率;(c)透过率;(d)消光比;(e)散射比;(f)吸收比

Fig. 1 Extinction properties of biological spores^[5]. (a)(b) Complex refractive index; (c) transmittance; (d) extinction proportion; (e) scattering proportion; (f) absorption proportion

随着复折射率精确测量和校准方法的进一步发展,消光特性计算值与测量值之间的偏差进一步减小。李乐等^[30]探究了复折射率的影响因素,并分析了测量反射光谱的入射角和反射率外推值对复折射率计算的影响。结果表明:测试时,18°入射角以及长波长、短波长区不同的反射率外推值对复折射率的计算结果影响不大,利用反射光谱计算花粉复折射率的方法是可行的。顾有林等^[31]进一步提出了适用于微生物材料复折

射率反演的光谱外推方法和迭代计算程序,有效避免了复折射率虚部为负的情况。图 2 给出了 Chen 等^[32]计算得到的单种质生物孢子和混合生物孢子在 0.25~2.40 μm 和 3~15 μm 范围内的复折射率。

2.2 生物材料的吸收特性

生物材料对光波的吸收是生物材料消光特性的一种表现形式,主要表现为凝聚核的吸收和材料表面良导体的吸收。一方面,凝聚核的吸收能力主要取决于

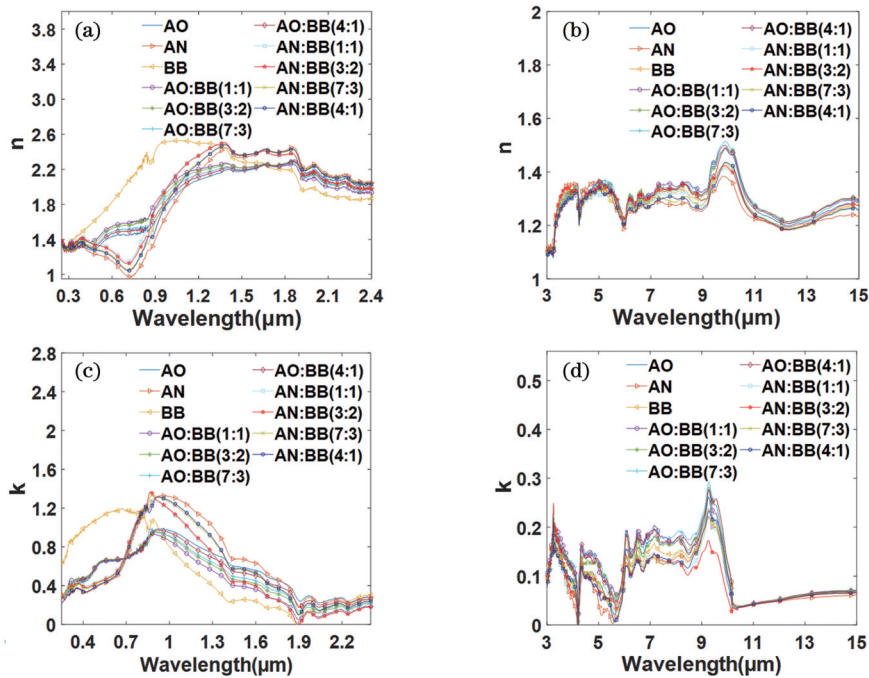


图 2 不同波段生物材料的复折射率^[32]。(a)(c)0.25~2.40 μm; (b)(d)3~15 μm

Fig. 2 Complex refractive indexes of biomaterials in different bands^[32]. (a)(c) 0.25~2.40 μm; (b)(d) 3~15 μm

生物材料组成粒子的特定官能团和化学键。Hu 等^[5]通过理论计算和烟幕箱实验研究了生物材料在紫外、可见光和红外波段的宽波段消光能力,并测试了几种典型生物材料的消光性能。光谱分析结果表明,水、蛋白质和核酸是生物材料中的主要吸收组分,生物材料的吸收峰可以近似看作是这些组分在各波段的吸收峰。孙杜娟等^[33]发现,若镀铜处理不当,导致花粉未顺利镀铜或粒子表面附着少量水时,粒子中的官能团或化学键就会因弯曲振动和伸缩振动等对光波产生吸收作用,从而导致吸收峰出现。另一方面,当材料表面镀

有铝、铜、石墨等良导体时,光波会引起自由电子运动,因此良导体对红外波的吸收较强。孙杜娟等^[33]利用傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪采集镀铜前后油菜花粉的光谱数据,对光谱数据进行研究后发现:该花粉粒子因为铜镀层的存在而对红外波段电磁波具有强吸收和强散射的能力,其在 2.5~25.0 μm 波段范围内的电磁波透过率均在 25% 以下。Cao 等^[19]利用红外光谱分析了生物材料的活性状态对材料结构和吸收特性等的影响,得到了不同活性生物材料的红外光谱特征峰,如图 3 所示。

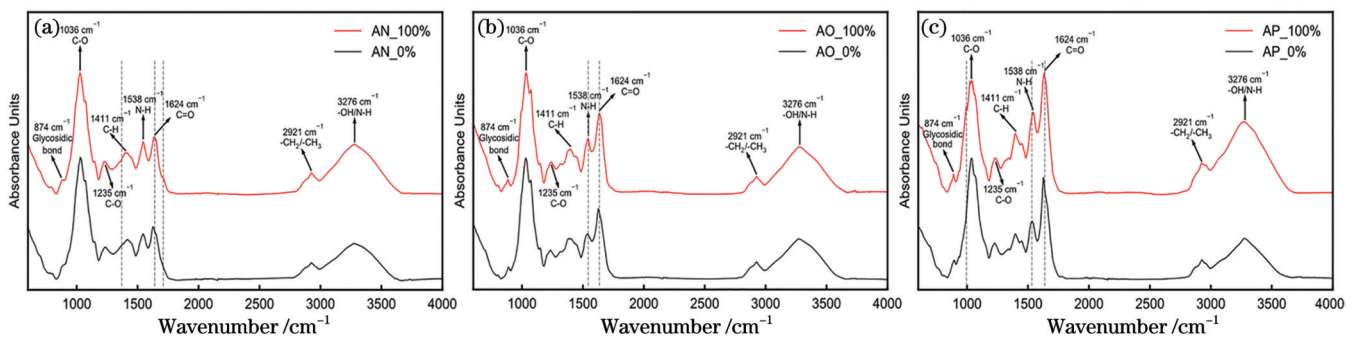


图 3 生物材料特征峰^[19]。(a)AN0616; (b)AO0622; (c)AP0627

Fig. 3 Characteristic peaks of the biomaterials^[19]. (a) AN0616; (b) AO0622; (c) AP0627

2.3 生物材料的散射特性

生物材料对光波的散射是生物材料的另一种消光形式,主要表现为可见光消光作用下的瑞利散射以及粒子与入射光之间谐振作用产生的 Mie 散射。散射强度与生物材料的粒径、辐射波长密切相关。通常,当生物材料的粒径大于信号波长或与信号波长相当时,散射作用较强^[34]。孙杜娟等^[33]采集了镀铜前后油菜花粉

的 FTIR 光谱,对 FTIR 光谱研究后发现:金属化花粉颗粒对电磁波的散射遵循 Mie 散射定律,即,随着波数增加,金属化花粉颗粒对电磁波的散射截面增大,因此衰减增强,透过率减小;金属化花粉颗粒对红外和微波具有较强的反射和吸收作用。Zhao 等^[35]从细胞组成和结构两方面研究了微生物材料的含水量对其复折射率和红外消光性能的影响,并定量计算了含水率与散

射特性之间的关系。结果表明:生物粒子复折射率的实部随着含水量的增加而减小;可以通过调节温度来控制细胞代谢,从而获得不同结合水含量的生物粒子,控制微生物在红外波段的消光性能。Zhao 等^[36]研究了波长对生物材料凝聚粒子散射强度的影响,结果表明:在各个散射角 θ 下,生物材料凝聚粒子的散射强度随着入射波长的增加而减小;散射能量主要集中在 $0^\circ \sim 40^\circ$ 散射角之间,前向散射效果明显。图 4 展示了

0.2~14.0 μm 波段 AN02 生物材料的散射情况^[37]。

3 生物材料的消光特性表征

消光截面和质量消光系数是研究生物材料光波衰减特性、评价生物材料消光性能的重要参数。生物材料的消光特性主要采用离散偶极子近似法 (DDA)^[38] 计算获得。使用 DDA 计算生物材料消光特性的主要过程如下:首先选择测试消光特性的生物材料,根据材料电镜图构建粒子模型并获得其形态结构参数,同时通过生物材料的反射光谱,根据相应的推导公式得出全波段反射率,并计算材料的复折射率;然后设置 DDSCAT 输入参数,基于以上参数调用 DDSCAT,获取生物粒子的消光特性参数。基于 DDSCAT 针对生物材料消光特性的计算流程如图 5 所示。

在利用 DDSCAT 计算消光特性时,需要设置偶极子坐标模型文件、复折射率参数文件、计算的波长范围、波长数量、生成粒子的数目以及粒径范围等输入参数。图 5 所示流程选择材料电镜图构建粒子模型并获得其形态结构参数等过程,有利于将生物材料的位置坐标信息转换为 DDSCAT 计算所需的偶极子坐标模型文件。利用生物材料的反射光谱得出全波段反射

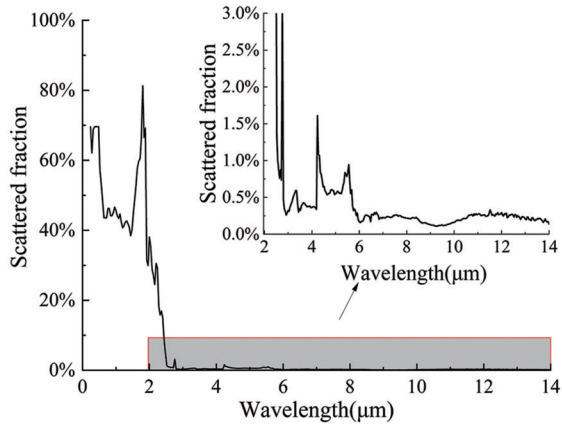


图 4 AN02 生物材料的散射分数^[37]

Fig. 4 Scattered fraction of AN02 biomaterials^[37]

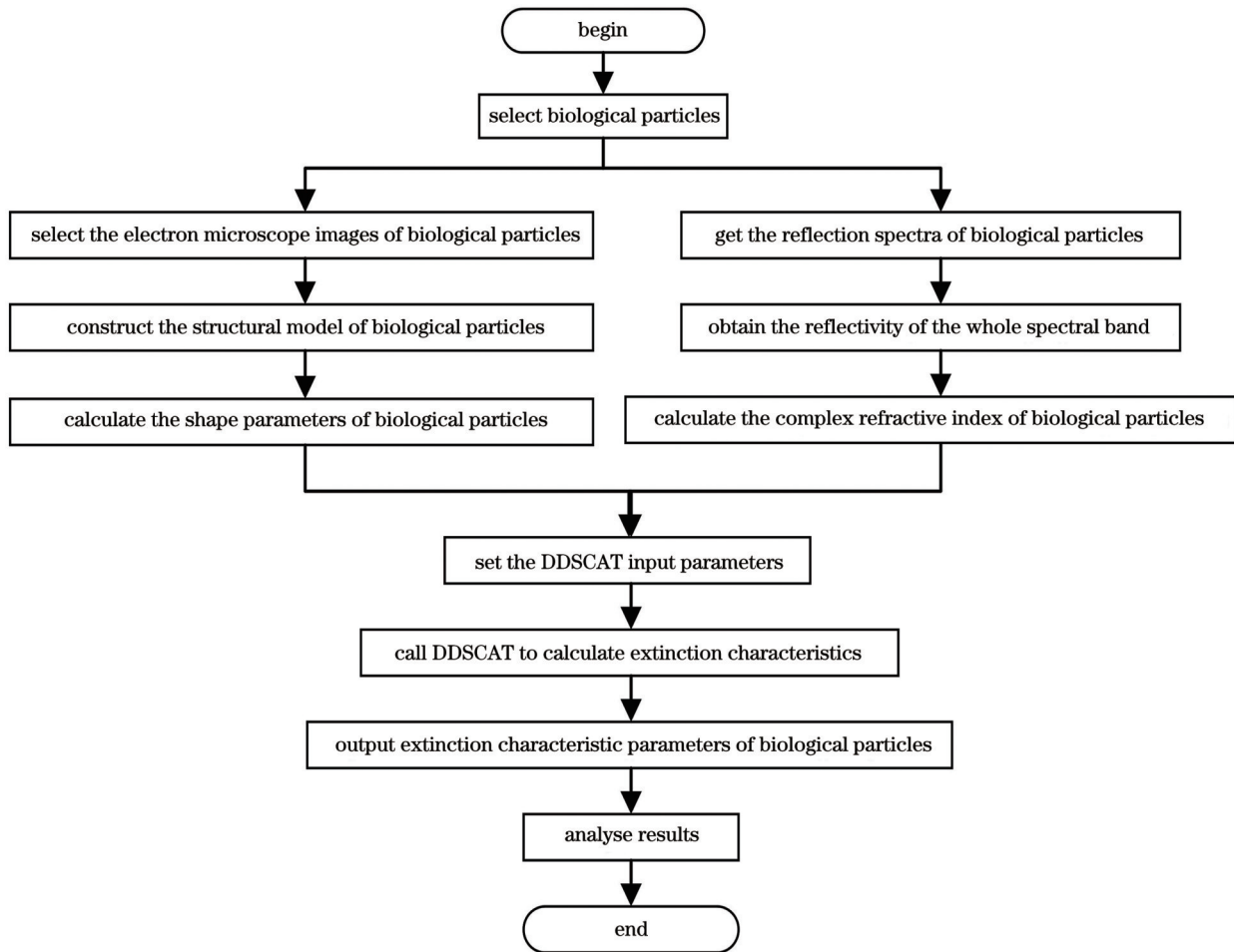


图 5 生物材料消光特性的计算流程

Fig. 5 Calculation flow of biomaterials extinction properties

率,并计算材料的复折射率等过程,为 DDSCAT 计算提供了复折射率参数文件,有利于设置计算的波长范围、波长数量等参数。

生物材料的消光特性参数因其组成成分和空间结构等不同而产生差异。生物材料的空间结构特征是影响其消光性能计算的重要参数,而空间结构存在单粒子和凝聚粒子两种形式。下文将按照空间结构特征分类,详细介绍单粒子、单分散凝聚粒子和多分散凝聚粒子的消光特性。

3.1 单粒子的消光特性

生物材料的消光性能与粒子形状、尺寸以及粒子分支数量、长度等因素密切相关。目前针对多种表面形态结构的生物材料消光特性的研究,未考虑粒子相互作用以及外界环境对消光特性的影响,大多数研究是针对单粒子结构生物材料进行的。

单粒子因其细胞成分^[34]和空间结构^[9]等方面的差异,在不同波段下测得的复折射率各不相同,因而计算得出的消光特性也不相同。赵欣颖等^[7-8]探究了不同细胞结构生物材料对复折射率和消光特性的影响,他们通过测量三种真核孢子和三种原核杆菌微生物材料在 0.25~15.00 μm 波段的光谱反射率,计算了材料的复折射率,结果发现真核生物和原核微生物材料在特定波长下具有不同的消光能力。孙杜娟等^[6]使用显微红外光谱仪测量了 3 种生物材料的反射光谱,计算了 6~14 μm 波段的复折射率,根据水、蛋白质和核酸的红外吸收特性得出了生物材料的含水量,并构建了生物粒子在 6~14 μm 波段的复折射率模型。李乐等^[39]采集了生物材料在 2.5~25.0 μm 的反射光谱,利用 K-K 关系计算了复折射率,并根据 Mie 散射理论求得了质量消光系数,结果表明:平均质量消光系数随着粒子粒径增大而不断减小。Li 等^[40]测量了生物材料在 2.5~15.0 μm 波段的反射率,并利用 K-K 关系和 Mie 散射理论计算了 3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段的复折射率和消光系数,结果表明:生物材料在 3~5 μm 范围内的平均质量消光系数为 0.51 m^2/g ,在 8~14 μm 范围内的平均质量消光系数为 0.48 m^2/g 。与普通无机化合物相比,生物材料在红外波段具有更好的消光性能。

随着研究的深入,人们发现生物材料单粒子结构还存在链状、椭球状和絮状等形态。为研究此类典型非球形单粒子结构,研究人员利用球形或子弹玫瑰花形等形状的粒子进行合成模拟,构建了抽象简化的非球形生物粒子模型,并对其消光特性进行了分析。Ding 等^[12]研究了不同结构微生物细胞的消光性能,结果表明:在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内,组成球较多、弯曲角为 60° 的链状粒子和轴长比为 1:2 的椭球状粒子具有较好的消光性能。黄宝锷等^[9-11]研究了不同形态的絮状生物粒子结构对宽波段消光特性的影响,他们将絮状生物粒子结构简化成子弹玫瑰花形粒子,利

用 DDA 法计算其消光性能,结果发现:在远红外波段,生物粒子的消光性能随着波长的增大而增大,且与粒子分支的个数、长度成正相关;在毫米波波段,生物粒子的消光性能随着波长增大而减小,与粒子分支的长度成正相关,而与分支的个数无关。探究生物粒子对目标探测等电磁设备的影响或者测量粒子的消光性能时,需要充分考虑复杂结构生物粒子的分支数目和分支长度的作用。

图 6 为不同形状结构的单粒子在 3.0~5.0 μm 波段的消光性能^[12](以消光效率因子 Q_{ext} 作为消光特性指标),其中:图 6(a)是椭球状、圆柱状、杆状和链状粒子在 3.0~5.0 μm 波段的 Q_{ext} 值,椭球状粒子的结构参数为长短轴之比,圆柱状和杆状粒子的结构参数为长度和半径之比,链状粒子的结构参数为组成球数量(n)和弯曲角度;图 6(b)是有效半径为 1.6~2.4 μm 链状粒子的 Q_{ext} 值;图 6(c)是组成球数量为 4~10 的链状粒子的 Q_{ext} 值;图 6(d)是弯曲角度为 60°、90°、120° 和 180° 链状粒子的 Q_{ext} 值。

3.2 单分散凝聚粒子的消光特性

生物材料在释放过程中因静电、碰撞、黏附等作用易发生凝聚,因而多以凝聚粒子形态存在,其形成的松散多孔凝聚粒子结构会导致入射光在凝聚体中多次散射,对入射光的衰减作用增强,导致透过率下降。因此,为了研究生物凝聚粒子对光波的作用,研究人员通常采用凝聚模型模拟微生物凝聚粒子的空间结构,利用初始粒子的消光特性和凝聚粒子的孔隙率等参数计算其消光特性。目前,凝聚模型主要基于分形理论,采用蒙特卡罗或分子动力学方法模拟粒子的凝聚运动过程^[41]。用于模拟粒子凝聚过程的凝聚模型主要有扩散限制凝聚(DLA)、反应限制凝聚(RLA)、弹道凝聚(BA)、弹道粒子-团簇凝聚(BPCA)、扩散限制团簇凝聚(DLCA)、反应限制团簇凝聚(RLCA)、团簇-团簇凝聚(CCA)和弹道团簇-团簇凝聚(BCCA)模型^[42]。

生物凝聚粒子的结构表征参数主要包括等效半径 r_{eff} 和孔隙率 p 。孔隙率 p 用来描述凝聚粒子内部结构的稀疏性,其计算公式^[14]为

$$p = 1 - \frac{1}{r_c^3} \sum_{i=1}^n r_i^3, \quad (6)$$

式中: r_i 是第 i 个粒子的原始半径; r_c 是 n 个粒子生成的凝聚粒子的特征半径。凝聚粒子的等效半径 r_{eff} 的计算公式^[14]为

$$r_{\text{eff}} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n r_i^3}. \quad (7)$$

r_c 与凝聚粒子的回旋半径 r_g 的关系^[14]为

$$r_c = \sqrt{\frac{5}{3}} r_g, \quad (8)$$

式中: r_g 可用原始粒子数 n 、第 i 个和第 j 个原始微粒在

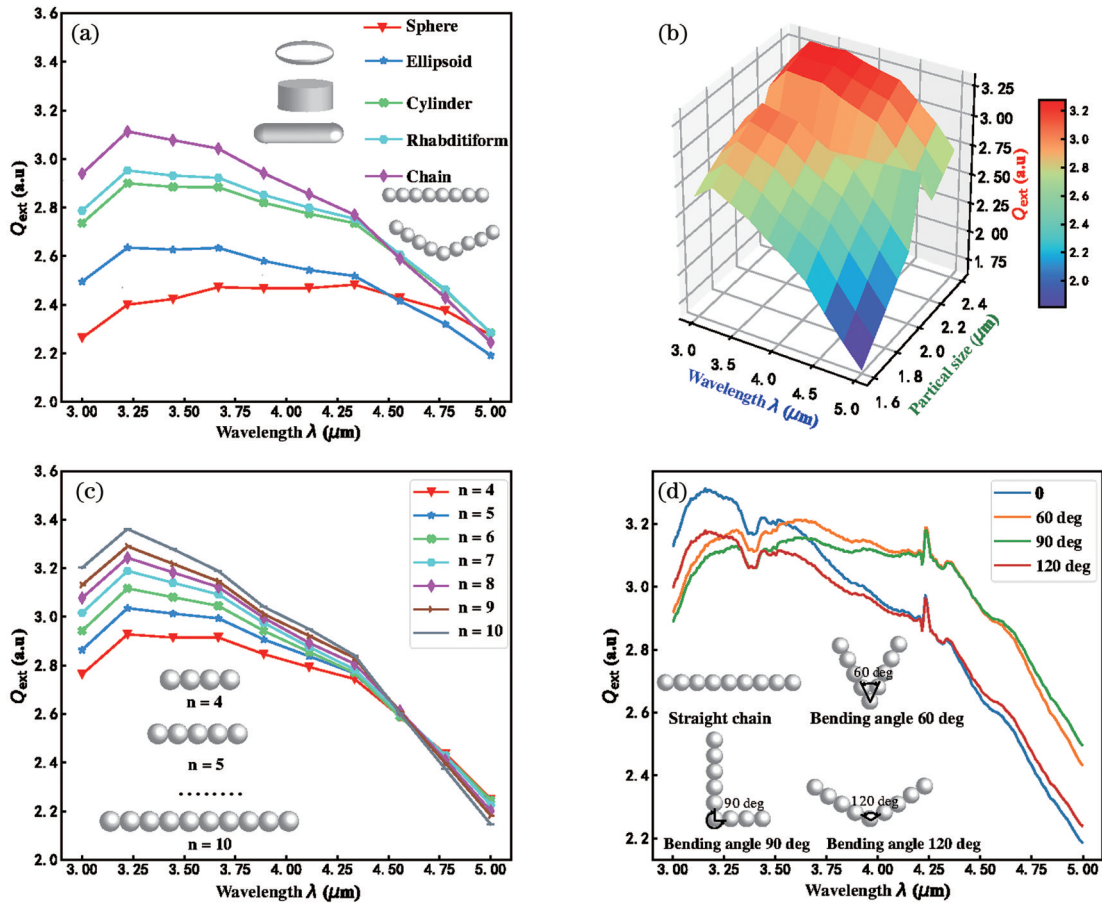


图 6 复杂结构生物粒子的消光效率因子 $Q_{ext}^{[12]}$ 。(a)典型粒子；(b)~(d)链状粒子

Fig. 6 Extinction efficiency factor Q_{ext} of complex structured biological particles^[12]. (a) Typical particles; (b)~(d) chain particles

空间上的坐标向量 \mathbf{r}_i 和 \mathbf{r}_j ^[14] 表示为

$$r_g = \frac{1}{2n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2. \quad (9)$$

对于粒径一致的原始粒子生成的单分散凝聚粒子,原始粒子的粒径大小、形状和数量对生成的凝聚粒子的孔隙率和分形维数等空间结构有显著影响,进而影响凝聚粒子的消光特性^[43-44]。增大原始粒子的半径,降低凝聚粒子的孔隙率,都可以有效增强生物材料的宽波段消光特性^[37]。凝聚粒子的有效复折射率随着孔隙率的增大而减小,凝聚粒子的消光性能与孔隙率成正相关^[9]。孔隙率是描述生物凝聚粒子空间结构的参数,孔隙率越大,凝聚粒子的空间结构越松散^[36,45]。

Zhao等^[46]研究发现,凝聚粒子的孔隙率是影响质量消光系数的关键因素,生物粒子的凝聚会降低质量消光系数,孔隙率越大,生物材料的质量消光系数越小。Wang等^[37]探究了原始粒子数与凝聚粒子孔隙率之间的关系,结果显示:随着原始颗粒数量的增加,凝聚粒子的孔隙率平均值逐渐增大,孔隙率分布范围逐渐缩小,间接影响宽波段消光特性。Chen等^[47]研究了孔隙率对消光特性的影响,他们首先模拟了5种原始粒子数相同而孔隙率不同的生物凝聚粒子,然后采用DDA计算了不同空间结构的凝聚粒子在远红外波段

的消光特性。结果表明:凝聚粒子的孔隙率越大,远红外消光性能越好。Wang等^[48]利用两种常用的凝聚粒子模型CCA和BCCA,模拟了生物材料的粒子结构,分析了不同模型模拟的凝聚粒子结构对孔隙率和消光特性的影响。结果显示:1)两种模型模拟的凝聚粒子的孔隙率分布存在较大差异。2)当凝聚粒子的孔隙率分布较宽或小于0.6时,使用BCCA模型模拟凝聚粒子的空间结构效果较好;当孔隙率分布较窄或孔隙率较高时,CCA模型的模拟效果更好。胡以华等^[49]发现人工制备的絮状生物材料在远红外波段具有良好的消光性能,其平均消光效率因子与尺寸因子、孔隙率成正相关。图7展示了数量为10、20、30、50个AN02孢子形成的单分散凝聚粒子的消光特性模拟结果。

3.3 多分散凝聚粒子的消光特性

实际上生物材料的粒径各不相同,为了更准确地表征其消光特性,利用任意数量的不同粒径粒子构建多分散生物凝聚粒子模型进行模拟。研究人员利用BCCA优化模型分别模拟了由N个粒径服从均值为2.0、方差为0.5的正态分布的生物粒子组成的多分散生物凝聚粒子模型^[15],其中,N分别为16、25、32、50、64、93、108、128,如图8所示。

陆卫等^[14]利用BPCA模型研究了孔隙率与粒

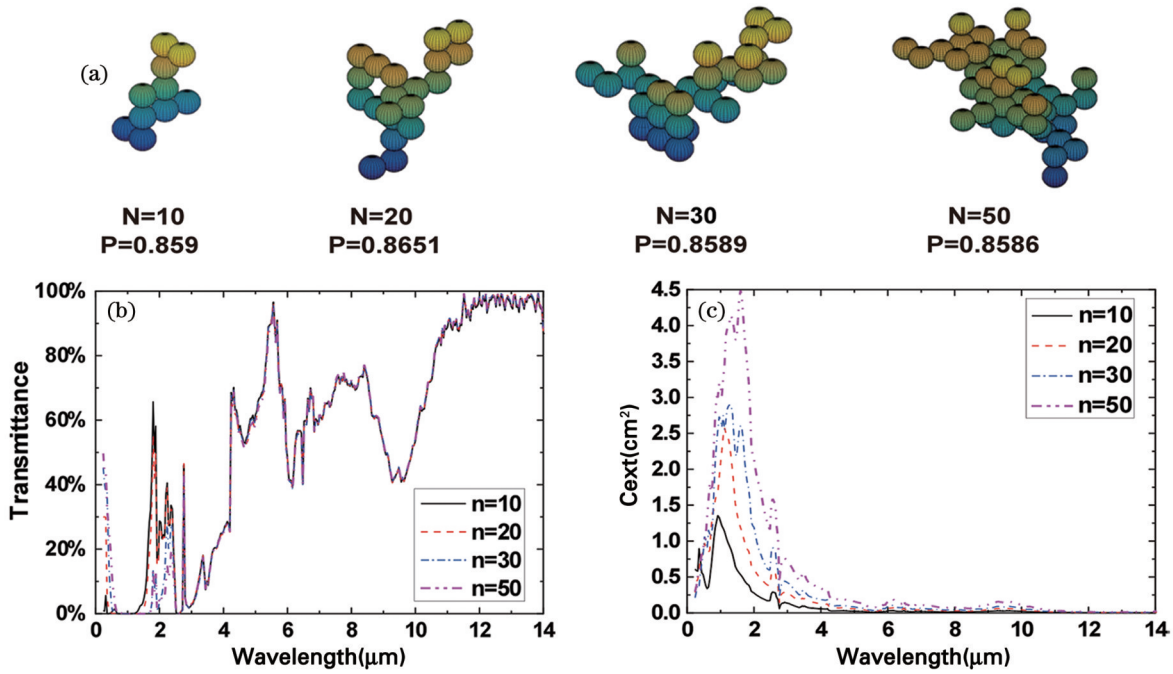


图 7 单分散生物凝聚粒子的消光特性^[37]。(a)凝聚粒子模型；(b)透过率；(c)消光截面

Fig. 7 Extinction properties of monodisperse biological aggregated particles^[37]. (a) Aggregated particles models; (b) transmittance; (c) extinction cross-section

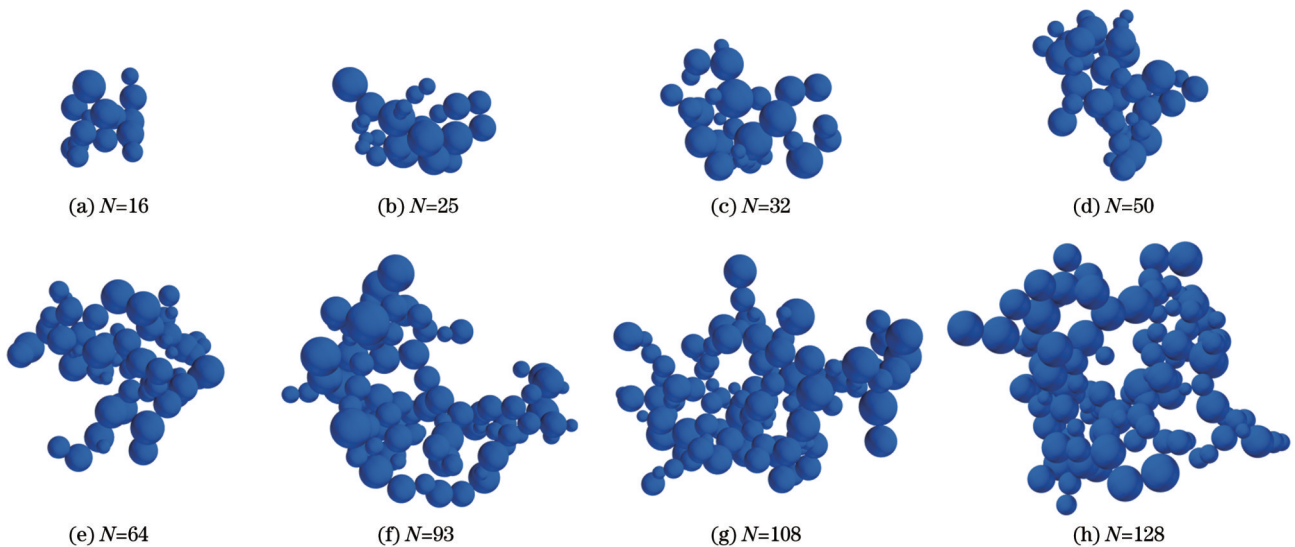


图 8 多分散生物凝聚粒子模型^[15]

Fig. 8 Polydisperse biological aggregated particles models^[15]

子消光特性之间的关系,结果表明:多分散生物凝聚粒子在 $10.6 \mu\text{m}$ 处的消光系数随着孔隙率的减小、原始粒子数量的增加和粒径分布均值的增大而增大。陈曦等^[50]研究了生物材料的大气悬浮沉降特性,基于粒子数加权平均法和斯托克斯沉降理论,计算了单粒子及多分散粒子群的沉降速度,同时采用 CCA 模型模拟了生物凝聚粒子的空间结构,并结合牛顿第二定律计算了不同结构凝聚粒子的沉降速度。研究结果表明:包含不同原始微粒数的凝聚粒子,其平均沉降速度随着原始微粒数的增加

而增大;包含相同原始微粒数的凝聚粒子,其沉降速度与该凝聚粒子的孔隙率、分形维数有关。Ding 等^[15]基于优化的 BCCA 模型,提出了粒径大小和数量可任意设置的多分散粒子凝聚模型,计算了生物凝聚粒子的消光特性,研究了不同孔隙率和粒子数量对凝聚粒子吸收和散射特性的影响。结果表明,随着孔隙率的降低和粒子数量的增加,生物材料的消光性能得到了提高。图 9 展示了孔隙率、初始粒子数量、粒径分布方差和粒径分布均值对消光性能的影响^[14]。

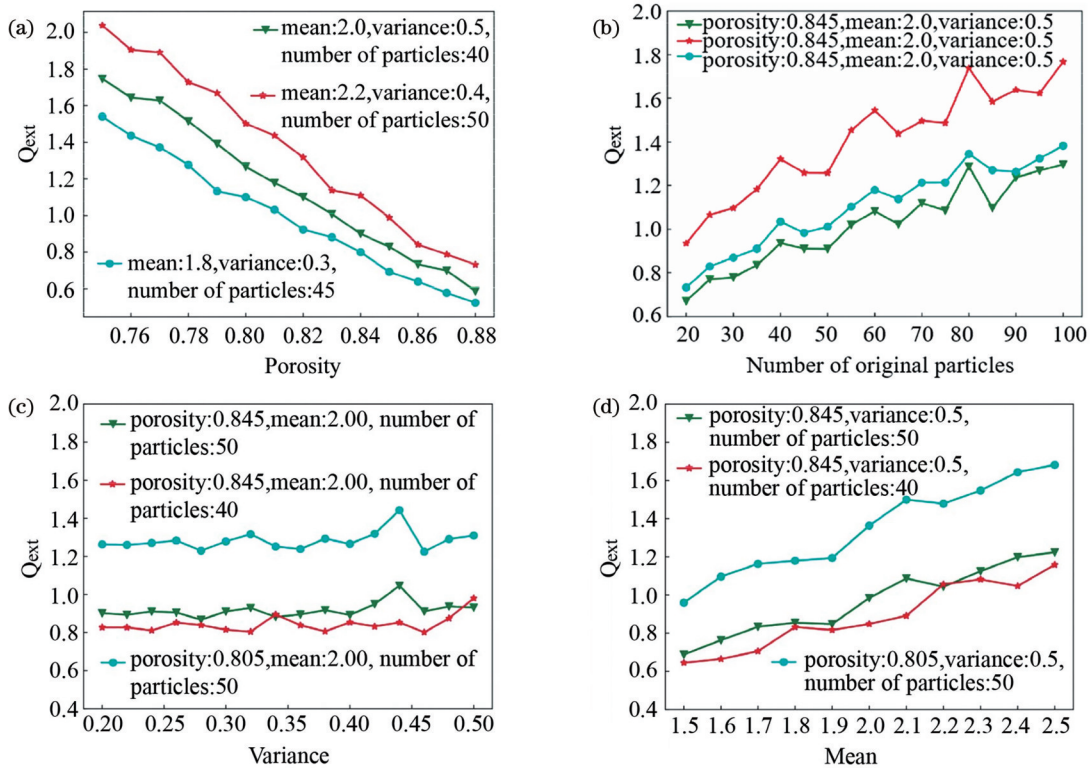


图9 生物粒子消光特性的影响因素^[14]。(a)孔隙率;(b)初始粒子数;(c)粒径方差;(d)粒径均值

Fig. 9 Factors affecting extinction properties of biological particles^[14]. (a) Porosity; (b) the number of original particles; (c) particle size distribution variance; (d) particle size distribution mean

4 生物材料消光特性的影响因素

4.1 材料活性对生物材料消光特性的影响

生物材料的生物活性对消光性能起着至关重要的作用。根据 Lorenz-Mie 和朗伯-比尔定律等理论,利用微生物的平均质量消光系数可以区分活菌和死菌,定性判别孢子或菌丝体的生物活性。考虑到灭活对微生物红外消光特性的影响,顾有林等^[16]采用湿热灭活法对生物材料进行灭活处理,并根据测定的反射光谱,计算了孢子灭活前后在 2.5~15.0 μm 波段的复折射率以及在 3~5 μm 、8~14 μm 波段的质量消光系数。结果显示:生物材料灭活对中红外波段的光波衰减影响不大,但对远红外波段的光波衰减影响很大。Gu 等^[17]发现在 3~5 μm 范围内活菌孢子或菌丝比死菌孢子或菌丝具有更好的消光性能,基于此,他们提出了一种通过 Lorenz-Mie 理论计算的微生物粒子平均质量消光系数来区分活菌和死菌的方法,该方法在微生物材料粒子的活性鉴定和光学特性评定等方面具有潜在的应用前景。因此,为了保持微生物的消光性能,需要使用特定的储存方法保存材料。图 10 是根据 Lorenz-Mie 理论和朗伯-比尔定律分别求得的活菌孢子或菌丝和死菌孢子或菌丝的平均质量消光系数^[17],其中图 10(a)、(b)是基于 Lorenz-Mie 理论计算得到的平均质量消光系数,图 10(c)、(d)是基于朗伯-比尔定律计算得到的平均质量消光系数。可看出,在 3~5 μm 范围内,同一

种微生物的活菌孢子或菌丝的消光能力强于死菌孢子或菌丝的消光能力。

不同活性的生物材料,其对应的光谱图以及对入射光的透过率、复折射率和质量消光系数等消光特性参数均有所差异,因此利用生物材料的红外光谱,结合算法模型进行分析,可以实现对生物材料活性的定量判定。Cao 等^[18]使用主成分分析(PCA)法对活的和死的微生物粒子的紫外可见光谱数据进行无监督聚类,利用深度学习算法中的卷积神经网络构建了生物孢子的活性判别模型。实验结果表明,该模型的判别准确率为 100%,具有替代传统生物孢子死菌和活菌测定方法的潜力。

Cao 等^[19]根据不同活性生物材料吸收光谱的差异,提出了一种能够准确检测生物材料活性比的集成学习模型,该模型克服了传统方法在生物材料活性检测中耗时长、准确率低的问题。Cao 等^[20]利用傅里叶变换红外光谱仪采集不同活性生物材料的中红外光谱图,并结合化学计量学方法构建生物材料活性测定模型,降低了光谱分析中的噪声和散射效应,有效提高了生物材料活性测定模型的性能,有利于定量测定各种生物材料的活性。实验结果表明,连续投影算法联合偏最小二乘回归(PLSR)模型具有较高的决定系数(R^2)和较低的预测均方根误差(RMSEP),具有较大的测定生物材料活性的潜力。图 11 为 stacking 集成学习模型和其他 4 种单一模型对生物材料活性定量判定的预测结果^[19]。

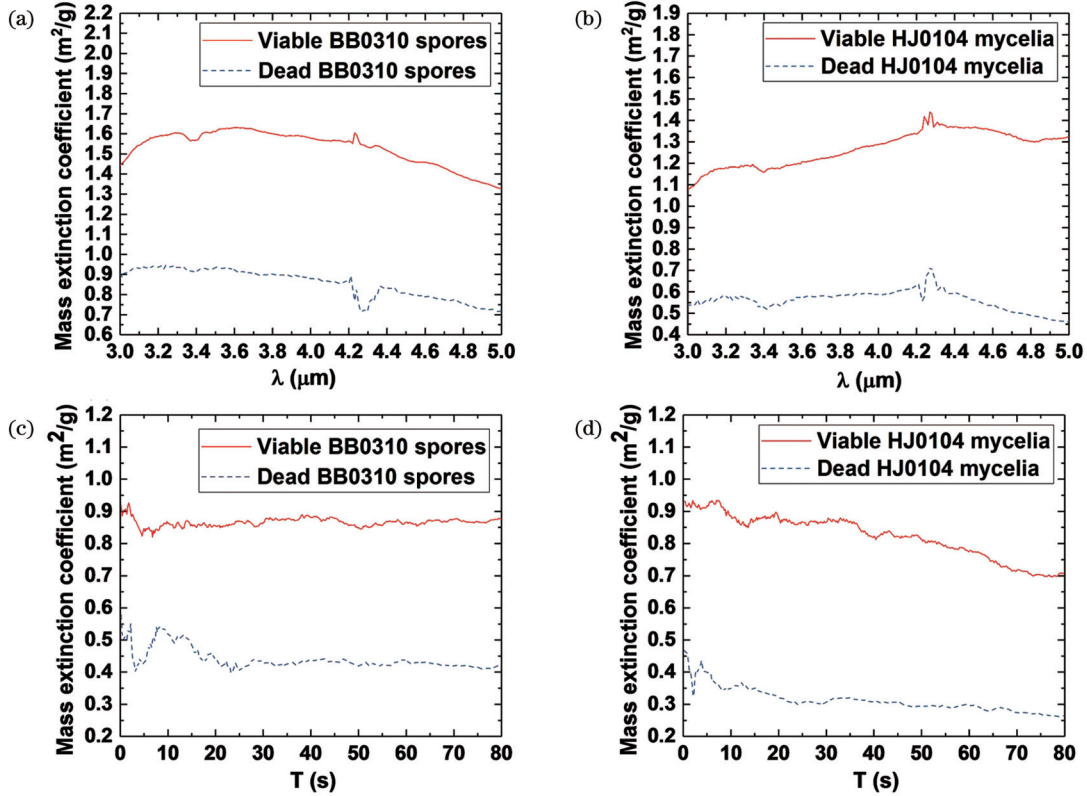


图 10 不同活性生物材料的质量消光系数^[17]。(a)(c)BB0310;(b)(d)HJ0104

Fig. 10 Mass extinction coefficient of different active biomaterials^[17]. (a)(c) BB0310; (b)(d) HJ0104

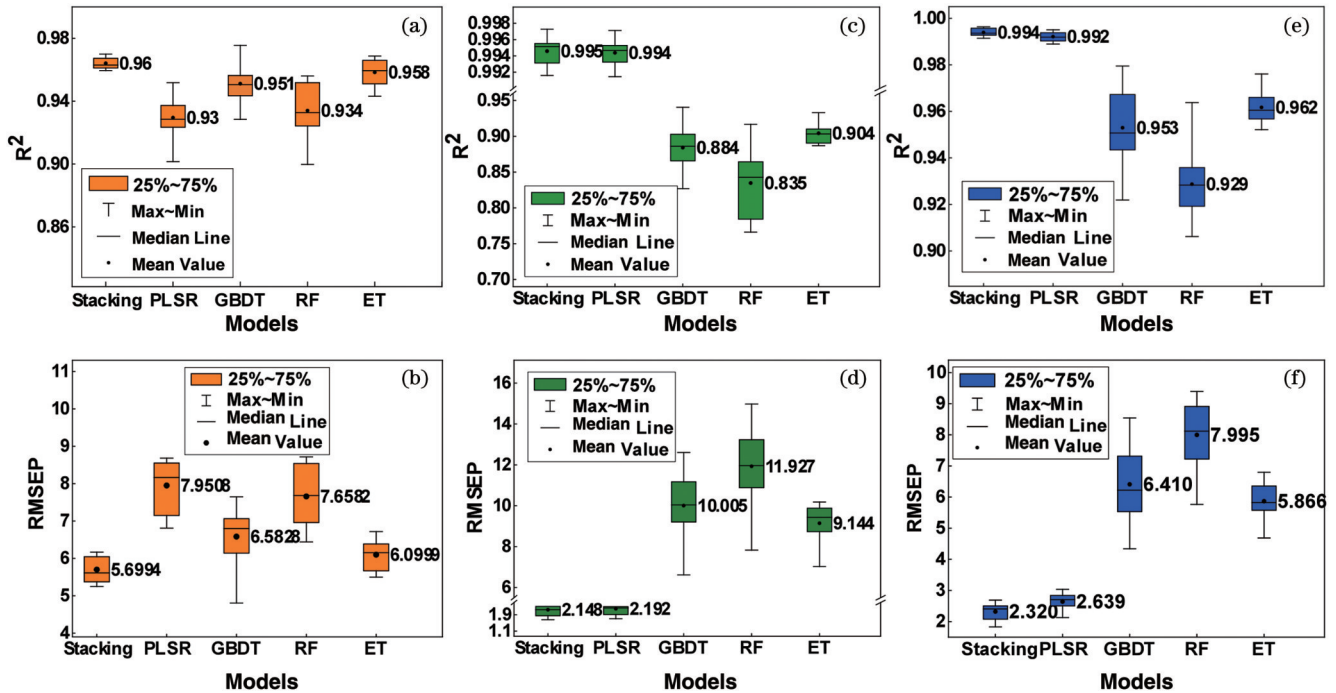


图 11 生物材料基于不同模型的 R^2 和 RMSEP 值^[19]。(a)(b) AN0616;(c)(d) AO0622;(e)(f) AP0627

Fig. 11 The values of R^2 and RMSEP corresponding to different models for the three biomaterials^[19]. (a)(b) AN0616; (c)(d) AO0622; (e)(f) AP0627

在图 11 中, stacking 集成学习模型的 R^2 值高于其他 4 个单一模型, RMSEP 的平均值较小, 说明 stacking 集成学习模型具有比另外 4 个模型更高的检测精度和更好的泛化性能, 有利于提高生物材料活性检测的精度。

4.2 大气环境对生物材料消光特性的影响

4.2.1 风速对生物材料消光特性的影响

风速改变会导致烟幕的形状和质量浓度分布发生变化, 从而影响生物材料的消光特性。He 等^[21]分析了

不同风速下生物粒子的扩散规律,计算了生物粒子的有效红外消光面积。结果表明,初始状态下风速对烟幕扩散起着重要作用,适宜的大气风速环境对生物粒子的红外消光效果起着重要作用。李乐等^[22]发现,风速越大,地面粗糙度越高,生物材料的扩散速率越大。He 等^[23]研究了 2~4 级风速对生物材料消光特性的影响,对不同风速下的烟幕沉降扩散过程进行了数值模拟。结果表明:风速较小(1~2 m/s)时,烟幕粒子浓度

下降缓慢,红外有效消光面积逐渐增大;随着风速增大,烟幕的质量浓度下降迅速,有效消光面积迅速增大;当风速为 3~4 m/s 时,有效消光面积逐渐稳定,波动较小;当风速过大(5~6 m/s)时,烟幕粒子易向水平方向扩散,有效消光面积达到最大后逐渐减小,有效消光时间较短。图 12 显示了不同风速下烟幕的平均质量浓度、红外消光面积和红外消光面积变化率随时间的变化情况^[23]。

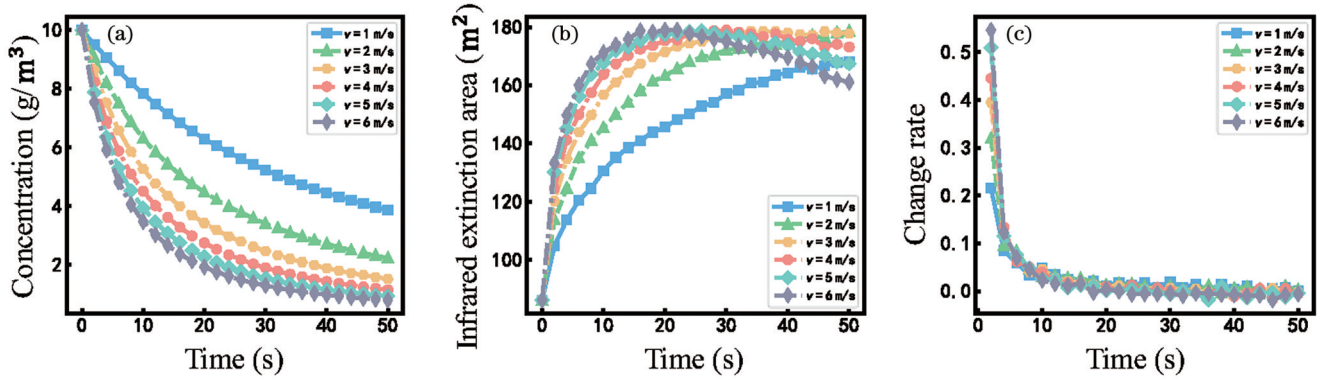


图 12 风速对烟幕的影响^[23]。(a)对平均质量浓度的影响;(b)对消光面积的影响;(c)对消光面积变化率的影响

Fig. 12 Effect of wind speed on smoke screens^[23]. (a) Effect on average mass concentration; (b) effect on extinction area; (c) effect on extinction area change rate

4.2.2 地面粗糙度对生物材料消光特性的影响

地面粗糙度是反映大气边界层下垫面形状的重要指标,会对气流和生物材料粒子的沉降扩散过程产生影响,从而影响生物材料的消光特性^[51]。He 等^[23]模拟了不同地形对应的地面粗糙度条件下烟幕质量浓度的分布情况,分析了地面粗糙度对生物材料消光特性的影响。结果表明:烟幕在平整地面或低覆盖度地区(如草地、牧场)释放时,平均质量浓度下降相对缓慢,红外

消光面积迅速增大,稳定一段时间后缓慢下降,有效消光时间较长;在复杂地形或高覆盖区域(如森林和覆盖率较高的城市地区)释放时,由于近地面气流的影响,烟幕扩散迅速,烟幕的平均质量浓度急剧下降后逐渐稳定,红外消光面积急剧增大,达到最大值后又迅速减小,有效消光时间较短。图 13 显示了不同地面粗糙度下烟幕粒子的平均质量浓度、红外消光面积和红外消光面积变化率随时间的变化情况^[23]。

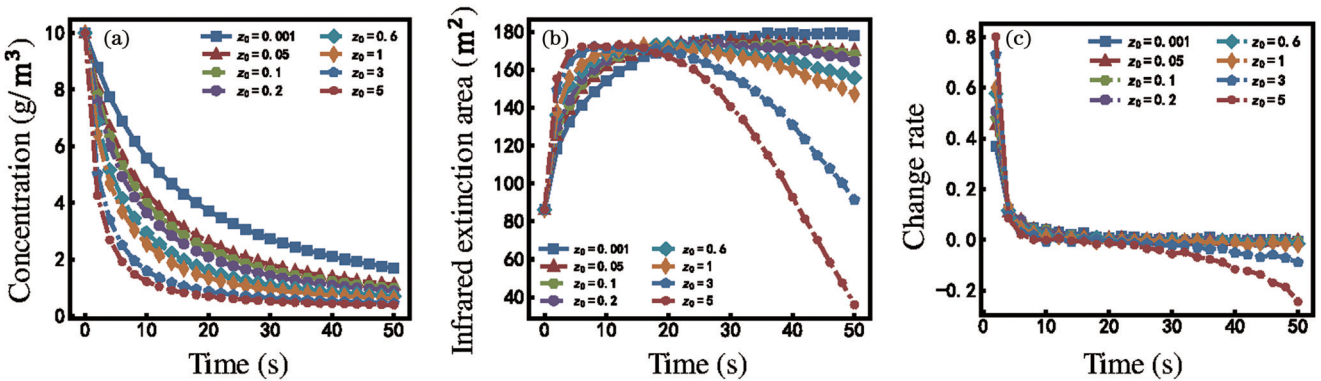


图 13 地面粗糙度对烟幕的影响^[23]。(a)对平均质量浓度的影响;(b)对消光面积的影响;(c)对消光面积变化率的影响

Fig. 13 Effect of ground roughness on smoke screens^[23]. (a) Effect on average mass fraction concentration; (b) effect on extinction area; (c) effect on extinction area change rate

4.2.3 湿度对生物材料消光特性的影响

生物材料因具有吸湿特性,易受湿度的影响,导致其粒径、折射率、密度等物理性质发生改变,从而改变其散射和吸收能力^[52]。随着相对湿度的增加,生物材料粒子的粒径增加,吸湿量增大,其含水率也随之增加,导致其复折射率虚部即吸收系数逐渐接

近于 0,实部逐渐减小,越来越接近纯水的折射率特性,因此生物材料对光的吸收能力逐渐减弱^[24]。王新宇等^[24]研究发现:在 0.2~14.0 μm 波段,处于 0~70% 相对湿度范围内的生物材料粒子的消光特性相对稳定,粒径和复折射率的变化对消光性能的影响几乎可以相互抵消;当相对湿度大于 70% 时,随着相对湿

度增加,相对于复折射率改变对生物材料消光性能的影响,原始粒径增大的影响更大,而且生物材料的消光性能随着相对湿度的增加而增大。因此,在释放生物材料时,需要充分考虑释放的自然环境和材

料的使用量等,使其消光性能达到要求。某种生物材料的复折射率和粒径随着相对湿度的变化情况如图 14 所示,其中图 14(c)是不同相对湿度下的粒径变化情况。

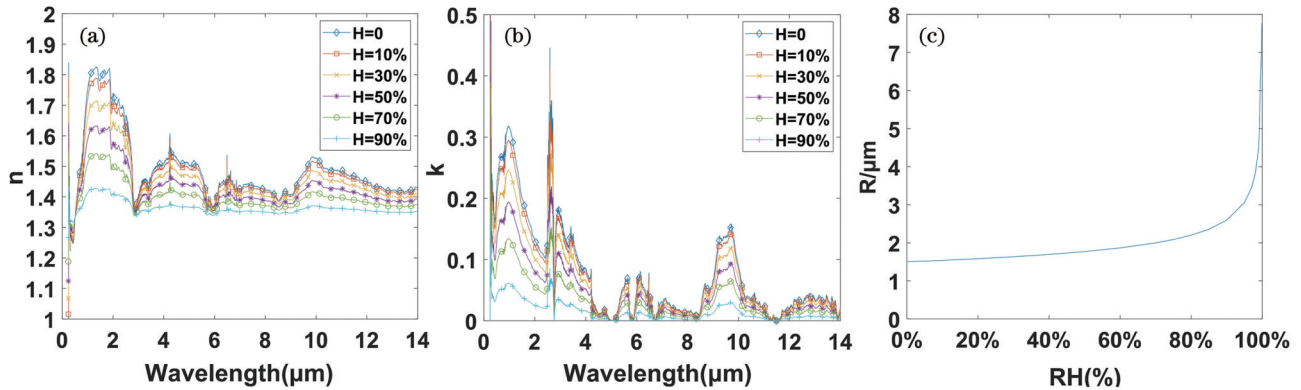


图 14 生物材料的吸湿增长模型^[24]。(a)(b)复折射率;(c)粒径

Fig. 14 Humidity growth model of biomaterials^[24]. (a)(b) Complex refractive index; (c) particle size

5 生物材料消光特性的测试方法

生物材料消光特性的计算方法为生物材料的电磁衰减研究提供了有益的参考,但生物材料的消光性能最终仍须通过试验验证进行确定。生物材料的性能测试主要分为静态测试和动态测试。

5.1 生物材料的静态测试

静态测试是使用胶带或压片装置对生物材料进行黏附或压片,通过扫描电子显微镜(SEM)或红外光谱仪,挑选出潜在的满足研究所需的有效生物材料,并利用公式与所测光谱推导计算,分析生物材料的消光性能。该测试适用于观测静止状态的生物粒子,并不适用于观测在大气中悬浮沉降的生物粒子。

静态测试包括扫描电子显微镜测试和红外光谱测试。

5.1.1 扫描电子显微镜测试

扫描电子显微镜测试:根据待测样品表面形态特征不同导致的高能电子束与样品相互作用所激发的信号强度的不同,采用扫描电子显微镜观察不同生物材料的微观形态,筛选出所需的生物粒子形态的微观结构特征^[53]。使用扫描电子显微镜进行测试的流程为:根据得到的样品形态图,结合凝聚模型,模拟不同形态凝聚粒子的空间结构,并根据 DDA 对生物材料的散射特性进行计算和仿真,分析不同生物材料的消光性能。图 15 是采用扫描电子显微镜拍摄的细胞成分和结构均不相同的生物单粒子的显微照片^[12]。

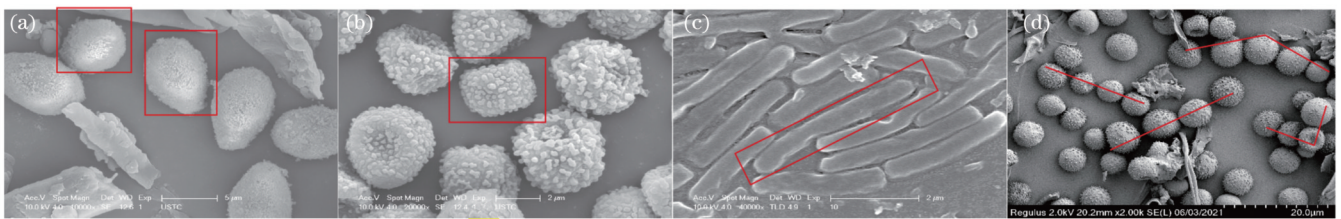


图 15 不同生物材料的显微照片^[12]。(a) AB0101;(b) AO0301;(c) LA0301;(d) BB0201

Fig. 15 SEM photos of different biomaterials^[12]. (a) AB0101; (b) AO0301; (c) LA0301; (d) BB0201

为了分析真核孢子和原核杆菌两大类微生物组成的生物材料的宽波段消光特性,赵欣颖等^[7]采用扫描电子显微镜观测了大气中常见的 6 种生物材料的微观结构形态。顾有林等^[16]采用扫描电子显微镜观测了生物材料灭活前后两种不同状态的显微形貌。李乐等^[54]使用扫描电子显微镜观测了实验室制备的三种生物材料的形态结构特征。Zhao 等^[36]使用扫描电子显微镜观察了生物材料的形态结构特征,发现凝聚粒子结构是生物材料的常见形态;同时,他们根据电镜显微照片分析了生物材料凝聚粒子的结构特征,并选用

CCA 模型进行模拟,计算了微生物凝聚粒子的透过率和散射特性等参数。

5.1.2 红外光谱测试

红外光谱测试:利用傅里叶变换红外光谱仪及其配备的附件采集样品的红外光谱,分析不同种质生物材料的红外光谱吸收特性,测量其反射率。红外光谱测试的工作流程为:使用模具压制生物样品材料压片,采用光谱仪及其附件扣除空气背景后,多次采集样品压片的红外光谱并取平均值;然后根据光谱分析生物材料的组分含量和结构特征等,并利用 K-K 关系计算

其复折射率,根据复折射率值采用 DDA 方法计算并分析生物材料的消光性能。

Wang 等^[34]利用傅里叶变换红外光谱仪及其配套的附件采集了 7 种生物材料的 FTIR 吸收光谱和反射光谱,观察了吸收峰的变化情况,分析了生物材料特征吸收峰处的物质组成,研究了不同材料的光波衰减特性。Gu 等^[31]利用光谱仪采集了 4 种生物材料的反射光谱,并采用常数外推法和指数外推法得到了全波段

的反射光谱,研究了光谱外推方法对生物材料复折射率的影响。Li 等^[40]使用压片机制作生物材料样品压片,然后采用傅里叶光谱仪及其显微镜配件,采集了生物材料在 2.5~15.0 μm 波段内的反射光谱,接着计算、分析了生物材料的复折射率和消光性能。图 16 是利用红外光谱仪获得的三种具有不同活性的生物材料的光谱图^[19],其中,图 16(d)~(i)是三种生物材料部分区间的一阶导数光谱。

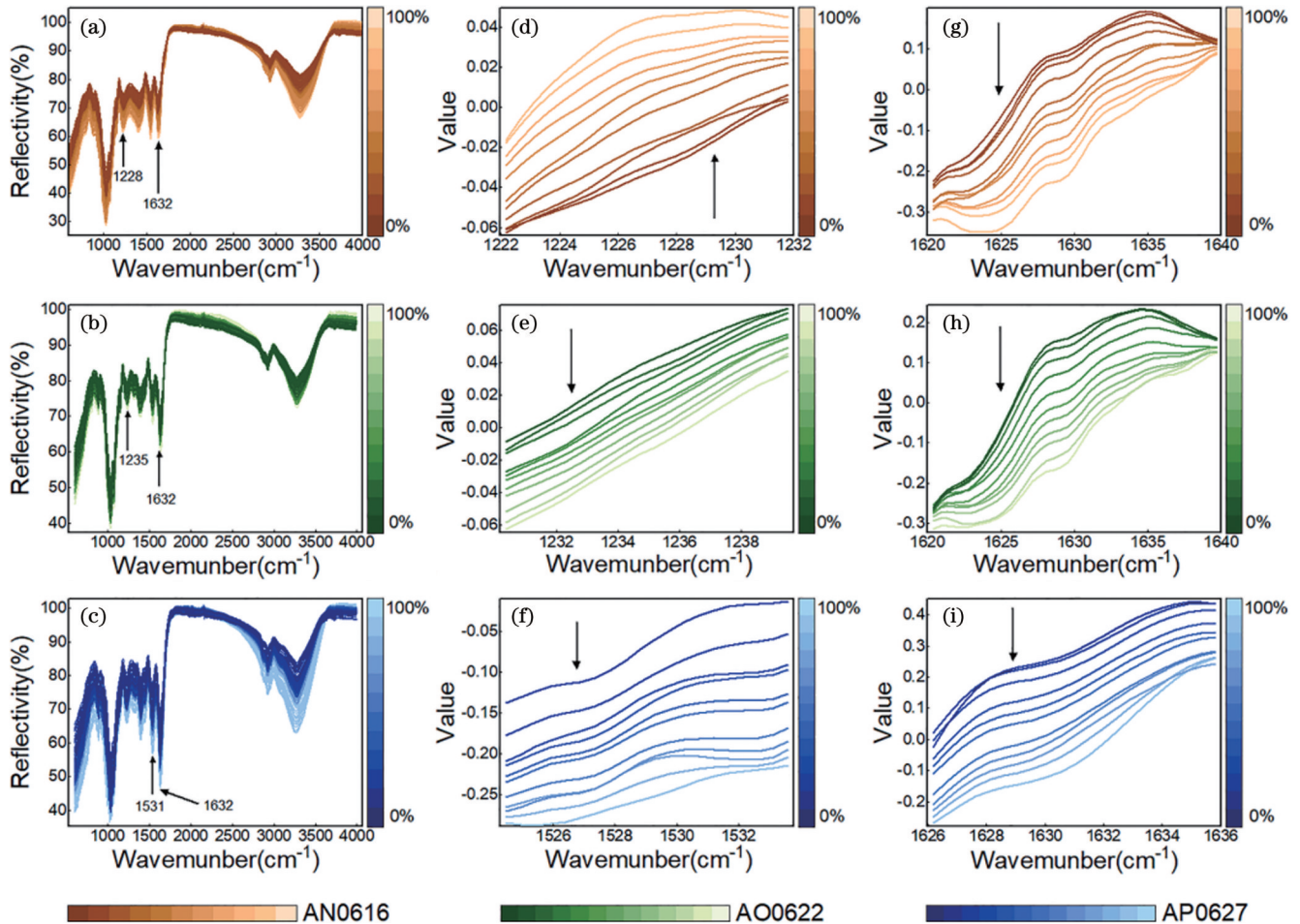


图 16 不同活性生物材料的红外光谱^[19]。(a) AN0616; (b) AO0622; (c) AP0627; (d)~(i)一阶导数光谱

Fig. 16 IR spectra of different active biomaterials^[19]. (a) AN0616; (b) AO0622; (c) AP0627; (d)~(i) the first derivative spectra

5.2 生物材料消光特性的动态测试

生物材料消光特性动态测试:在室内大型烟幕箱或室外试验场地释放生物材料形成烟幕,在动态条件下测试生物粒子的消光性能和漂浮性能,对静态测试下模拟的生物材料的消光性能进行验证。

5.2.1 烟幕箱测试

烟幕箱测试系统是一种用于生物材料复合消光性能测试的系统,主要由烟幕箱、喷洒系统、测试系统、浓度采样系统、排气系统和数据处理系统组成。其中辐射源主要由黑体和紫外汞灯等装置组成,测试系统由红外热像仪和紫外光功率计等装置组成。该系统的主要工作流程为:先用测试系统测量未喷洒任何生物材料的背景光功率信息,然后用喷洒系统向烟幕箱内喷

洒生物材料形成烟幕,再利用测试系统测量光波通过烟幕后的光功率变化情况,最后利用数据处理系统,根据浓度采样系统得出的生物材料浓度,计算生物材料的透过率,从而得出生物材料的消光特性^[32]。该测试系统的具体组成^[24]如图 17 所示。

顾有林等^[55]设计和制作了生物材料紫外、红外复合消光性能测试装置,并利用该装置测试了真菌 LZ0926 孢子的消光特性,得到了自制生物材料烟幕的紫外、红外波段平均透过率和平均质量消光系数。李乐等^[54]搭建了烟幕箱实验平台,并采用该平台对三种生物材料的动态质量消光系数进行了测试,测试结果表明:三种生物材料的红外波段消光性能优于常见的无机材料,而且其具有生产周期短、生产成

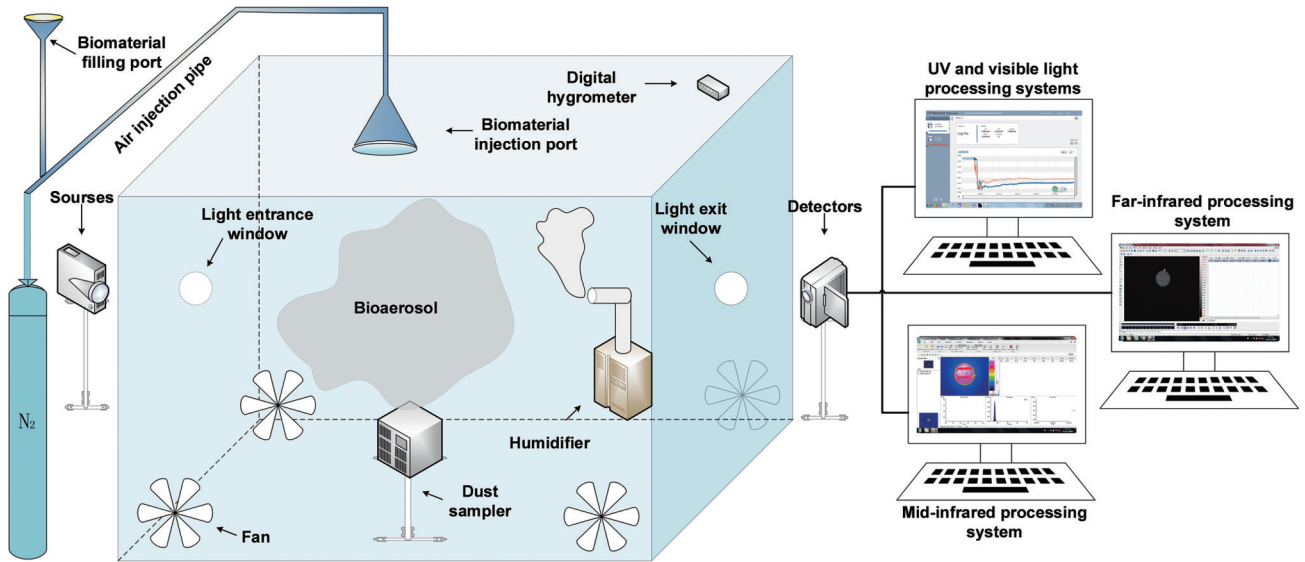


图 17 烟幕箱测试系统^[24]

Fig. 17 Smoke box test system^[24]

本低、生产过程无毒、对环境友好等优点,具有较广阔的应用前景。Gu 等^[25]搭建了烟幕箱测试系统,并采用该系统测量了真菌孢子和菌丝的透过率,然后根据朗伯-比尔定律得到了真菌孢子和菌丝的动态质量消光系数。结果表明,在 3~5 μm 范围内,微生物

孢子的消光性能始终优于菌丝。Wang 等^[24]利用烟幕箱测试了两种真菌材料的消光特性。Wang 等^[37]利用烟幕箱测试了 AN02 孢子组成的孔隙率相同(均为 0.8556)但结构不同的凝聚粒子的消光特性,如图 18 所示。

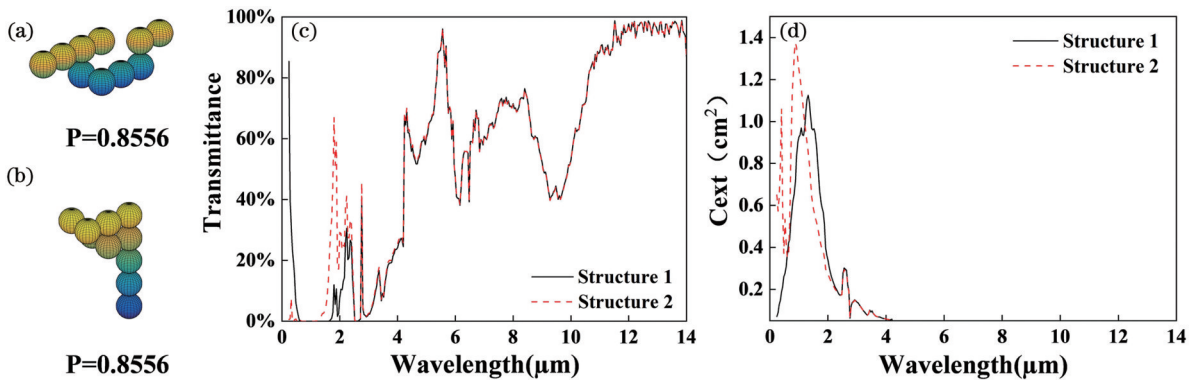


图 18 凝聚粒子的消光特性^[37]。(a)(b)凝聚粒子模型;(c)透过率;(d)消光截面

Fig. 18 Extinction properties of aggregated particles^[37]. (a)(b) Aggregated particles models; (c) transmittance; (d) extinction cross-section

Zhao 等^[56]利用烟幕箱测试系统对不同生物材料进行了实验,结果显示,三种生物材料(AN、AO 和 BB 孢子)在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的红外消光性能优于二氧化硅、铜、铁和红磷粉末。Zhao 等^[36]先采用 CCA 模型模拟生物材料凝聚粒子的结构,然后利用 DDA 法计算生物材料凝聚粒子的单次散射消光参数,并采用蒙特卡罗方法模拟生物材料凝聚粒子群的透过率,最后通过烟幕箱试验对构建的微生物凝聚粒子计算模型的可靠性进行验证。结果显示,生物材料凝聚粒子群的红外透过率随着入射波长的增加而增加。

5.2.2 外场测试

在外场测试过程中,使用红外和高速摄像机记录测试过程。试验场地须选择平坦的室外地面。图 19 为

室外环境测试站点的具体布局,其中烟幕生成装置放置在红外辐射源和观测仪器中间的弹架上^[57]。

He 等^[57]利用烟幕仿真模型和室外环境测试两种方式,模拟了爆炸烟幕的释放过程,计算了不同装药结构和装药比下烟幕的爆炸半径和颗粒密度分布,分析了烟幕红外消光面积在不同条件下的变化规律。研究结果表明:随着装药比增大,挡板数量增加,烟幕的爆炸半径增大,颗粒密度分布更加均匀,有利于获得更大的红外消光面积,消光性能更好。图 20 是风速为 3 m/s 时红外摄像机捕捉到的烟幕图像。

He 等^[23]提出了一种计算烟幕红外消光性能的方法。他们先采用湍流模型和烟幕浓度方程相结合的方式,对烟幕的沉降和扩散进行数值模拟研究,分析不同

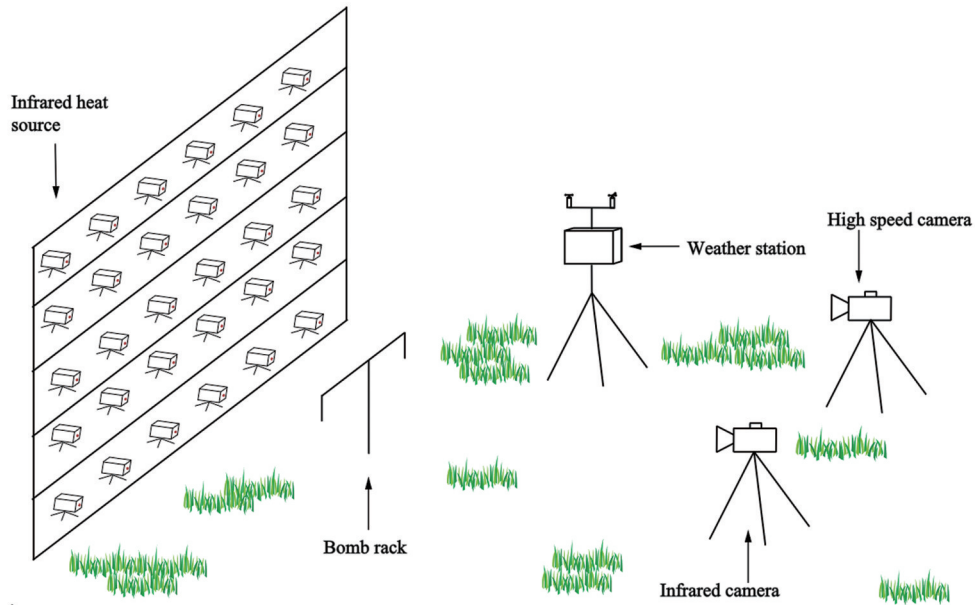
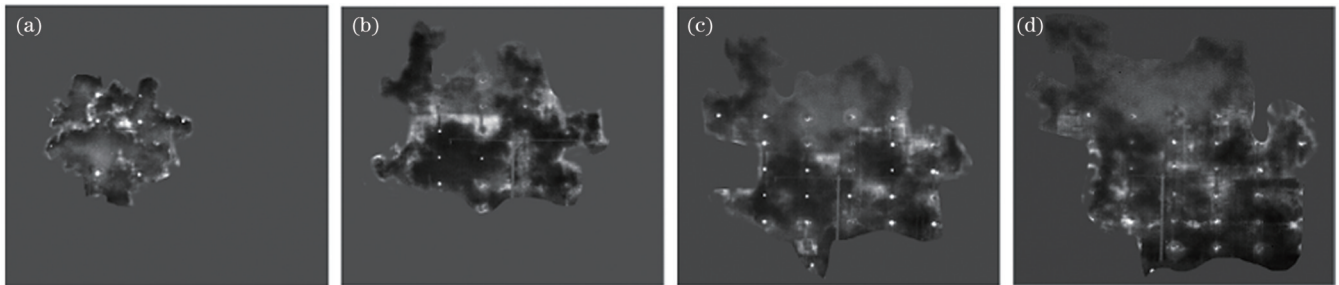


图 19 室外环境测试示意图

Fig. 19 Field test diagram

图 20 不同时刻室外环境下红外摄像机捕捉到的烟幕图像^[23]。(a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s; (d) 30 sFig. 20 Smoke screen images captured by infrared camera in outdoor field test at different time^[23]. (a) 0 s; (b) 10 s; (c) 20 s; (d) 30 s

风速和地面粗糙度下烟幕的形状和质量浓度分布;接着,结合朗伯-比尔定律计算了不同条件下烟幕的红外消光面积,并分析了不同条件下烟幕消光性能的变化规律;最后通过室外环境测试,验证了数值模拟结果的准确性。任何消光材料的消光特性都与环境息息相关。环境差异会影响生物材料的使用方法和用量等,通过选择适当的生成方式和材料用量等可以保证在不同的环境下得到满足要求的消光性能。

6 总结与展望

近年来,生物材料在光波衰减和试验测试技术等方面取得了一定进展,但具有复杂空间结构的随机取向粒子体系模拟,风速、温度和材料结构特性等因素的多元分析,以及消光特性试验数据的标准采集等仍面临一些挑战。

6.1 结构模拟精确化

目前,针对烟幕或气溶胶粒子消光特性的研究多数采用球形粒子,但大气环境中生成的气溶胶粒子或烟幕介质,如黑碳、沙尘和生物粒子等,均具有非球形结构。观察生物材料的扫描电镜图可以发现生物凝聚

粒子的单体普遍是不规则的非球形,呈现为近似于柱状、椭球状、饼状等不规则形态,部分材料表面有较为明显的棘突结构。因此,为了更精确地表征生物材料的消光特性,研究构建各种非典型不规则生物粒子的随机取向凝聚模型,模拟不同形状生物粒子的空间结构,开展不同形状生物粒子消光特性理论计算与试验研究是未来的重要发展趋势。

6.2 影响因素多元化

研究生物材料的消光性能需要考虑材料自身属性与外界环境造成的影响。一方面,目前研究中考虑的生物材料消光特性的环境影响因素通常较为单一恒定,如在外场测试中只模拟恒定的几种风速对生物材料消光特性的影响。但在实际情况下,风场中的风速和风向是瞬时变化的,而风速和风向的改变会导致湍流的变化,进而影响生物材料的凝聚和沉降扩散特性,从而影响其消光特性。另一方面,在生物材料消光特性的分析过程中易忽略粒子本身的特性。不同的生物粒子具有不同的相对湿度、活性和结构等,从而具有不同的消光特性。例如,具有亲水蛋白结构的粒子更容易吸湿增长,当相对湿度在 70% 以上时,粒径增加,导

致其消光能力随之增强。因此,在材料制备、储存和释放过程中,通过加强相应的有机官能团性能或添加其他材料成分来实现生物材料的改性和优化,并考虑瞬时变化的风场、温度和气压等因素对生物材料消光特性的影响,是未来生物材料的研究重点。

6.3 测试手段标准化

目前针对生物材料消光性能的静态与动态测试都存在可重复性差、成本高、数据采集量大等问题。在动态测试中,测试环境及测量方法的不同均会导致试验数据存在差异。在室外试验场地开展的动态试验对大气微尺度数据的准确测量和实时记录要求更高,难度更大,基于大量试验进行性能评价效费比低,对比分析不易。因此,为了增加生物材料消光性能测试的可重复性,提高性能评价的效费比,在研究中应明确性能测试试验与评价标准,开展标准化外场试验场地的建设以及开发相应试验数据标准化处理软件,实现试验数据的标准化采集与分析,这将是未来生物材料的一大研究热点。

参 考 文 献

- [1] Xu C Y, Zha B T, Bao J Q, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of ammonium chloride smoke particles in confined spaces[J]. Defence Technology, 2022, 18(7): 1269-1280.
- [2] Baranwal N, Mahulika S P. Review of infrared signature suppression systems using optical blocking method[J]. Defence Technology, 2019, 15(3): 432-439.
- [3] 顾有林, 陆卫, 方佳节, 等. 人工制备红外消光材料及其消光性能研究进展(特约)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 20201018.
Gu Y L, Lu W, Fang J J, et al. Research progress on artificially prepared infrared extinction materials and their extinction properties (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20201018.
- [4] 王玄玉. 抗红外烟幕材料及消光性能研究进展(特约)[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 20201019.
Wang X Y. Development of anti-infrared smoke material and its extinction performance(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20201019.
- [5] Hu Y H, Zhao X Y, Gu Y L, et al. Significant broadband extinction abilities of bioaerosols[J]. Science China Materials, 2019, 62(7): 1033-1045.
- [6] 孙杜娟, 胡以华, 顾有林, 等. 微生物远红外波段复折射率测定及模型构建[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 094218.
Sun D J, Hu Y H, Gu Y L, et al. Determination and model construction of microbes' complex refractive index in far infrared band[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094218.
- [7] 赵欣颖, 胡以华, 顾有林, 等. 真核微生物与原核微生物气溶胶 0.25~15 μm 光学特性[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 1017004.
Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Optical properties of eukaryotic and prokaryotic microbial aerosols in the 0.25–15 μm band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 1017004.
- [8] Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Analysis of optical properties of bio-smoke materials in the 0.25–14 μm band[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(3): 034201.
- [9] Huang B K, Hu Y H, Gu Y L, et al. Influences of artificial biological particles structures on far-infrared extinction performance [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10605: 106051M.
- [10] 黄宝锟, 胡以华, 顾有林, 等. 人工制备生物颗粒结构对宽波段消光性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0321002.
Huang B K, Hu Y H, Gu Y L, et al. Influences of artificial biological particles structures on broadband extinction performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0321002.
- [11] 黄宝锟, 胡以华, 顾有林, 等. 人工制备生物消光材料空气动力学特性[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0204005.
Huang B K, Hu Y H, Gu Y L, et al. Aerodynamic property of artificial biological extinction material[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(2): 0204005.
- [12] Ding W Y, Gu Y L, Hu Y H, et al. Optimized shape and structure of artificial bioparticles to enhance the optical extinction properties[J]. Optical Engineering, 2022, 61(9): 095109.
- [13] Ding W Y, Gu Y L, Hu Y H, et al. Study of infrared optical properties of polydisperse aggregated bioparticles based on optimized BCCA model[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12556: 125561H.
- [14] 陆卫, 顾有林, 方佳节, 等. 多分散生物凝聚粒子 10.6 μm 激光消光性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401019.
Lu W, Gu Y L, Fang J J, et al. 10.6 μm laser extinction performance of polydisperse biological aggregate particles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401019.
- [15] Ding W Y, Gu Y L, Hu Y H, et al. Ballistic cluster-cluster aggregation model optimization[J]. AIP Advances, 2023, 13(3): 035017.
- [16] 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.
Gu Y L, Wang C, Yang L, et al. Infrared extinction before and after *Aspergillus niger* spores inactivation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 36-41.
- [17] Gu Y L, Hu Y H, Zhao X Y, et al. Discrimination of viable and dead microbial materials with Fourier transform infrared spectroscopy in 3–5 micrometers[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15842-15850.
- [18] Cao H, Gu Y L, Chen G L, et al. Discrimination of dead and viable biological spore based on the convolutional neural network [J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12558: 125580K.
- [19] Cao H, Gu Y L, Fang J J, et al. Application of stacking ensemble learning model in quantitative analysis of biomaterial activity[J]. Microchemical Journal, 2022, 183: 108075.
- [20] Cao H, Gu Y L, Hu Y H, et al. Mid-infrared spectroscopy coupled with chemometrics for quantitative determination of biomaterial activity[J]. Optik, 2023, 281: 170854.
- [21] He H H, Gu Y L, Fang J J, et al. Numerical simulation of wind speed impact on infrared extinction area in the aerosol diffusion[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12343: 1234327.
- [22] 李乐, 胡以华, 王泉, 等. 生物消光材料的扩散特性[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0621001.
Li L, Hu Y H, Wang X, et al. Diffusion characteristics of biological extinction material[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0621001.
- [23] He H H, Gu Y L, Hu Y H, et al. Analysis of infrared extinction performance of the smoke screen in the field[J]. Optical Engineering, 2022, 61(10): 105110.
- [24] Wang X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Effects of relative humidity on the broadband extinction performance of bioaerosol[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 23801-23813.
- [25] Gu Y L, Hu Y H, Zhao X Y, et al. Combined analysis of static and dynamic extinction characteristics of microbial spores and mycelia as a mid-infrared extinction material[J]. Optik, 2019, 176: 535-541.
- [26] Grosse P, Offermann V. Analysis of reflectance data using the Kramers-Kronig relations[J]. Applied Physics A, 1991, 52(2): 138-144.
- [27] Booi H C, Thoon G P J M. Generalization of Kramers-Kronig transforms and some approximations of relations between viscoelastic quantities[J]. Rheologica Acta, 1982, 21(1): 15-24.

- [28] Bohren C F, Huffman D R. Classical theories of optical constants [M]//Absorption and scattering of light by small particles. New York: Wiley, 2007: 226-267.
- [29] Segal-Rosenheimer M, Linker R. Impact of the non-measured infrared spectral range of the imaginary refractive index on the derivation of the real refractive index using the Kramers-Kronig transform[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(13): 1147-1161.
- [30] 李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 梨花粉红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.
Li L, Hu Y H, Gu Y L, et al. Measurement and analysis of complex refractive index of pear in pink outer band[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(1): 89-92.
- [31] Gu Y L, Hu Y H, Zhao X Y, et al. Determination of infrared complex refractive index of microbial materials[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 217: 305-314.
- [32] Chen X, Hu Y H, Gu Y L, et al. Analysis of compounding and broadband extinction properties of novel bioaerosols[J]. Photonics, 2023, 10(4): 357.
- [33] 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.
Sun D J, Hu Y H, Gu Y L, et al. Preparation and performance testing of metallic biologic particles[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 555-558.
- [34] Wang P, Liu H X, Zhao Y Z, et al. Electromagnetic attenuation characteristics of microbial materials in the infrared band[J]. Applied Spectroscopy, 2016, 70(9): 1456-1463.
- [35] Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. The effect of water content of microbial material on the extinction performance of infrared band [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10826: 1082610.
- [36] Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. The infrared spectral transmittance of *Aspergillus niger* spore aggregated particle swarm [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9678: 967817.
- [37] Wang X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Analysis of factors affecting the broadband extinction performance of bioaerosol[J]. Optik, 2020, 201: 163527.
- [38] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1973, 186: 705-714.
- [39] 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.
Li L, Hu Y H, Gu Y L, et al. Infrared extinction performance of *Aspergillus niger* spores[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2175-2179.
- [40] Li L, Hu Y H, Gu Y L, et al. Measurement and analysis on optical characteristics of *Aspergillus oryzae* spores in infrared band [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9677: 96772H.
- [41] Chen G L, Gu Y L, Hu Y H, et al. Research progress of biological extinction materials[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12617: 126172R.
- [42] 顾有林, 张熙, 胡以华, 等. 气溶胶粒子凝聚模型研究进展(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 20230243.
Gu Y L, Zhang X, Hu Y H, et al. Research progress of aerosol particle aggregation model(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(6): 20230243.
- [43] Li L, Hu Y H, Gu Y L, et al. Infrared extinction performance of randomly oriented microbial-clustered agglomerate materials[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(11): 2555-2562.
- [44] 陈曦, 胡以华, 顾有林, 等. 生物凝聚粒子远红外波段消光特性 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0704002.
Chen X, Hu Y H, Gu Y L, et al. Extinction characteristics of biological aggregated particles in the far infrared band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 0704002.
- [45] 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.
Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Transmittance of laser in the microorganism aggregated particle swarm[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0616001.
- [46] Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Aggregation-driven reductions in the mass extinction coefficient of bioaerosols[J]. Optik, 2019, 184: 115-120.
- [47] Chen X, Hu Y H, Gu Y L, et al. Extinction characteristics of biological aggregated particles with different porosity in the far infrared band[M]//Frontier Research and Innovation in Optoelectronics Technology and Industry. [S.l.]: CRC Press, 2018: 71-76.
- [48] Wang X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. Comparison of two agglomerated particle simulation models for extinction performance calculation of bioaerosol[C]//International Photonics and OptoElectronics Meeting 2019 (OFDA, OEDI, ISST, PE, LST, TSA), November 11-14, 2019 Wuhan, China. Washington, DC: OSA, 2019: JW4A.25.
- [49] 胡以华, 黄宝锷, 顾有林, 等. 生物颗粒远红外波段平均消光效率因子模型构建[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1004003.
Hu Y H, Huang B K, Gu Y L, et al. Model construction of biological particles' average extinction efficiency factor in far infrared band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1004003.
- [50] 陈曦, 胡以华, 顾有林, 等. 生物消光材料大气悬浮沉降特性[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 0521003.
Chen X, Hu Y H, Gu Y L, et al. Atmospheric suspension settling characteristics of biological extinction material[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 0521003.
- [51] 顾有林, 陈国龙, 胡以华, 等. 气溶胶沉降扩散研究进展(特邀) [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(7): 20220313.
Gu Y L, Chen G L, Hu Y H, et al. Research progress on the deposition and diffusion of aerosols (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 20220313.
- [52] Tang I N, Munkelwitz H R. Water activities, densities, and refractive indices of aqueous sulfates and sodium nitrate droplets of atmospheric importance[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(D9): 18801-18808.
- [53] Browning N D, Chisholm M F, Pennycook S J. Atomic-resolution chemical analysis using a scanning transmission electron microscope [J]. Nature, 1993, 366(6451): 143-146.
- [54] 李乐, 胡以华, 顾有林, 等. 生物材料红外波段消光性能分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(11): 3430-3434.
Li L, Hu Y H, Gu Y L, et al. Infrared extinction performance of biological materials[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(11): 3430-3434.
- [55] 顾有林, 曹光华, 胡以华, 等. 生物材料紫外红外复合消光性能测试[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0321003.
Gu Y L, Cao G H, Hu Y H, et al. Measurement of ultraviolet and infrared composite extinction performance of biological materials [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0321003.
- [56] Zhao X Y, Hu Y H, Gu Y L, et al. A comparison of infrared extinction performances of bioaerosols and traditional smoke materials[J]. Optik, 2019, 181: 293-300.
- [57] He H H, Gu Y L, Fang J J, et al. Analysis of factors influencing infrared extinction area of explosive smokescreen[J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11818.

Progress on Extinction Properties of Biomaterials

Gu Youlin^{1,2,3*}, Zhang Xi^{1,3}, Hu Yihua^{1,2,3}, Meng Fanhao^{1,3}, Chen Guolong^{1,3}, Ding Wanying^{1,3},
Wang Siyu^{1,3}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China;

²Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China;

³National University of Defense Technology, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract

Significance In recent years, laser and infrared detection technology has been rapidly developed. The material preparation, generation method, extinction performance test, and effect evaluation of multi-band smoke screens have garnered widespread attention. Traditional inorganic extinction materials, such as metal powder, red phosphorus, and expanded graphite, often possess drawbacks such as a narrow extinction band, high costs, combustibility, difficulty in degradation, a single release method, and environmental harm. Consequently, environmentally friendly extinction materials characterized by a broad extinction band, long duration, low preparation cost, pollution-free, and non-combustibility emerge as research hotspots both domestically and internationally.

Artificially controlled biomaterials, such as spores or hyphae, represent a new type of smoke screens medium, distinct from traditional inorganic extinction materials. Once released into the air, these biomaterials form smoke screens, altering light transmission properties through absorption and scattering. Hence, biomaterials can diminish the detection capabilities of visible, laser, and infrared detection systems and equipment, making them suitable for the photoelectric protection of critical targets or facilities. Biomaterials aggregated particles systems formed from tiny biological particles due to static electricity, collision, or adhesion, possess complex spatial structures and random orientations.

There is a significant progress in researching the extinction properties of biomaterials. Biomaterials can be prepared with attributes such as controllable morphology, cost-efficiency, ease of batch preparation, high impedance, environmental friendliness, and non-toxicity. Researchers have constructed structure models of spherical particles, typical non-spherical particles, monodisperse aggregated particles, and polydisperse aggregated particles and have analyzed their static extinction properties. Additionally, the dynamic extinction properties of biomaterials have been examined under varying wind speeds, surface roughnesses, and relative humidities. Regarding the differential extinction properties of viable and dead biomaterials, the activity ratio of biomaterials can be qualitatively determined. Although many advances have occurred, challenges persist in the simulation, testing, and enhancement of biomaterials' extinction characteristics. Thus, outlining current research on the extinction characteristics of biomaterials becomes essential, paving the way for future developments in safer and more eco-friendly broadband smoke screen materials.

Progress First, the extinction characteristics of biomaterials are introduced, with absorption and scattering attributes based on the characteristics of complex refractive index. The calculation flowchart for the extinction characteristics of biomaterials is presented (Fig. 5), and characterization methods for different biomaterial structures are summarized. These structures include spherical single particles, typical non-spherical single particles, monodisperse aggregated particles, and polydisperse aggregated particles. Although the extinction properties are primarily determined by the composition and structural parameters of biomaterials (as shown in Fig. 6 and Fig. 9), other influential factors are examined. These factors are represented by biomaterial activity (Fig. 10), wind speed (Fig. 12), ground roughness (Fig. 13), and relative humidity (Fig. 14). Subsequently, static and dynamic testing methods for biomaterials are listed. In the static methods, the scanning electron microscope (SEM) test (Fig. 15) and infrared spectroscopy test (Fig. 16) are featured, while in the dynamic methods, the smoke box test (Fig. 17) and field test (Fig. 19) are included. In conclusion, emerging trends such as precise simulations of intricate spatial structures, analyses of factors influencing extinction characteristics, and standardization of extinction characteristics testing are emphasized.

Conclusions and Prospects In recent years, significant advancements have been observed in the study of extinction characteristics and test techniques of biomaterials. However, certain challenges persist that require attention in the forthcoming research, including the simulation of randomly oriented aggregation for biological particles, the multivariate analysis of dynamic extinction properties of biomaterials, and the standardization of extinction performance testing. Initially, given that biological particles generally possess irregular shapes and biological particle aggregations exhibit complex and variable structures, only a model accounting for the randomly oriented aggregation of these irregular particles can accurately represent the spatial structure of aggregated biological particles, ensuring precise calculations of the biomaterials' extinction properties. At this juncture, due to the absence of an established model for randomly oriented aggregation of irregular particles, simulations are restricted to particles with regular shapes. Furthermore, a comprehensive consideration of factors, such as wind speed, temperature, and atmospheric stability, becomes imperative, surpassing the simplicity of previous analyses affecting the extinction properties of biomaterials. Additionally, addressing issues of a low effectiveness-cost ratio and limited repeatability by standardizing the collection and analysis of experimental data

emerges as a crucial research direction. Anticipated improvements for the near future include the development of a randomly oriented aggregation model for diverse irregular biological particles, enabling the study of extinction characteristics for non-spherical biological materials. There is also the need for accurate simulations and predictions of sedimentation diffusion of aggregated particles under varied meteorological conditions. This would involve the consideration of multiple influencing factors, the enhancement of specific organic groups performance and the integration of other material components to bolster biomaterial performance. Lastly, the establishment of clear evaluation tests and criteria for the extinction performance of biomaterials is crucial, ensuring experimental data are gathered and analyzed following a relatively consistent standard.

Key words materials; smoke screens; extinction properties; aggregated particles; complex refractive index