

文章编号: 0253-2239(2009)11-3227-05

雷达波段内磁性吸波颗粒光散射特性分析

杨惊涛 蔡小舒 沈建琪

(上海理工大学颗粒与两相流测量技术研究所, 上海 200093)

摘要 针对目前在微波雷达隐身技术中广泛运用的吸波材料颗粒, 根据米氏(Mie)散射理论对磁性吸波颗粒在雷达波段内的光散射特性进行了数值模拟和计算分析。在 Mie 系数中引入磁导率变量, 分别计算了磁导率、折射率及颗粒粒径等参数对吸波颗粒光散射特性的影响; 同时对比分析了磁性与非磁性吸波颗粒的散射光强、散射系数、吸收系数等散射特性规律。数值计算结果表明, 颗粒磁特性的变化对其散射性能造成影响, 磁导率的增大将使颗粒的吸收性能增强而后向散射强度减弱, 有利于吸波颗粒雷达散射截面的减小, 同时磁导率变化对颗粒散射特性的影响受到复折射率的制约。

关键词 散射; 磁性颗粒散射特性; 磁导率; 吸波颗粒

中图分类号 O436.2; O482.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3227

Analysis of Scattering Properties for Magnetic Absorbing Particles at the Radar Wave Band

Yang Jingtao Cai Xiaoshu Shen Jianqi

(*Institute of Particle and Two Phase Flow Measurement, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract This paper analyzes the light-scattering properties of the widely-used nanometer or micrometer absorbing magnetic particles at radar wave band based on Mie scattering theory. The effects of the permeability, refractive index and particle sizes on the scattering characteristics are analyzed. The scattering characteristics including scattering intensity, absorption coefficient, scattering coefficient and etc. by magnetic and non-magnetic particles are also compared analytically as well as those by absorbent and transparent particles. Numerical results indicate that the permeability variation has influences on the scattering characteristics such as scattering intensity and absorption property. It is found that the absorption ability increases and back scattering characteristic decreases towards high permeability while its effect on the particles scattering characteristics is restricted simultaneously by the complex refractive index.

Key words scattering; scattering properties of magnetic particles; magnetic permeability; radar absorbing materials

1 引 言

米氏(Mie)散射理论是描述各向同性球形颗粒在单色平行光照射下的麦克斯韦(Maxwell)方程组的严格解析解^[1]。近年来, 在大气监测、超净测量及各类工业粉尘、微细材料检测等应用科学领域都涉及利用 Mie 散射理论研究超细微颗粒的光学特性^[2~14]。

Yamamoto G^[15] (1972 年) 及 Genack A Z^[16] (1991 年) 分别对具有吸收性的大气溶胶粒子及具有吸收性的金属材料颗粒物进行 Mie 散射分析, Kerker^[17] (1983 年) 发表了根据 Mie 理论分析具有磁特征的颗粒散射特性。然而, 前人在研究吸收性颗粒时, 并未把颗粒磁性特征对散射行为的影响考虑在内(相对磁导率

收稿日期: 2008-11-21; 收到修改稿日期: 2009-03-04

基金项目: 教育部博士学科点专项科研基金(20060252003)资助课题。

作者简介: 杨惊涛(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事颗粒光散射特性方面的研究。E-mail: jingtaoyu310@hotmail.com

导师简介: 蔡小舒(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事颗粒测量技术、两相流在线检测技术等方面的研究。

E-mail: usst_caixs@163.com

取为常量 1), 而 Kerker 也只对非吸收性的磁性颗粒散射进行了分析, 对于同时具有吸收性与磁性的颗粒散射研究目前未见有文献报道。在某些特殊场合, 如微波雷达隐身技术中广泛使用的铁氧体、羰基铁粉、超细磁性金属粉及纳米复合宽频材料等吸波材料^[18], 光通过这类吸波颗粒时, 除由介电损耗造成吸收外, 还由于颗粒具有较强的磁特性导致其散射特征与普通吸收性颗粒有明显的区别。因此, 对具有磁性及吸收性的微粒进行散射特性计算分析显得非常重要。

本文在 Mie 系数 a_n, b_n 中引入磁导率变量 μ_r 的基础上, 分析了磁性、吸收性颗粒的光散射特性。主要针对雷达波段内的磁性吸波颗粒, 对其散射特性参数随折射率、磁导率、颗粒粒径的变化规律进行计算分析; 同时, 对磁性与非磁性颗粒散射特性进行了对比分析。本文可为合理配比、选取吸波颗粒磁参数、介电常数等参数使其吸波性能最佳化提供参考。

2 磁性颗粒散射振幅函数 $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$ 及 Mie 系数 a_n, b_n

颗粒的散射强度是表征颗粒散射方向特性的物理量, 由垂直及平行于散射面的两个偏振分量组成, 是散射角 θ 的函数, 其振幅函数 $S_1(\theta), S_2(\theta)$ 为^[19, 20]

$$\begin{aligned} S_1(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \rho_n(\theta) + b_n \tau_n(\theta)] \\ S_2(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\theta) + b_n \rho_n(\theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 a_n 和 b_n 称为 Mie 系数, ρ_n 和 τ_n 是与散射角 θ 相关的勒让德(Legendre)函数。参考 Kerker 有关磁性颗粒光散射的论述^[17], 磁性颗粒 Mie 系数 a_n, b_n 表

达式为

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{\mu_r \psi_n(\alpha) \psi_n'(\beta) - m \psi_n'(\alpha) \psi_n(\beta)}{\mu_r \zeta_n^{(1)}(\alpha) \psi_n'(\beta) - m \zeta_n^{(1)'}(\alpha) \psi_n(\beta)} \\ b_n &= \frac{m \psi_n(\alpha) \psi_n'(\beta) - u_r \psi_n'(\alpha) \psi_n(\beta)}{m \zeta_n^{(1)}(\alpha) \psi_n'(\beta) - u_r \zeta_n^{(1)'}(\alpha) \psi_n(\beta)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\psi_n(z)$ 和 $\zeta_n(z)$ 为半整数阶贝塞尔(Bessel)函数和第二类汉克尔(Hankel)函数(z 可为 α 或 β), 是无因次粒径参数 $\alpha = \rho d/\lambda$ 和 $\beta = m\alpha$ 的函数; 相对折射率 m 用相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 表示: $m = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 。当颗粒在耗散介质中传播时, 折射率又可表示为 $m = n - j\eta$, 实部 n 表征介质颗粒的折射(散射)特性, 而虚部 η 表征介质颗粒的吸收(耗散)特性。

对于雷达吸波颗粒, 要取得隐身效果必须最大程度地减缩目标的雷达散射截面(RCS), 即要求颗粒对入射光的后向散射尽可能小。而颗粒的后向散射(即散射角 $\theta = 180^\circ$) 大小由(1)式中振幅函数 $S_1(\theta), S_2(\theta)$ 中的 Mie 系数 a_n, b_n 和 ρ_n, τ_n 决定, 由于存在 $\tau_n(180^\circ) = -\rho_n(180^\circ)$, 当(1)式颗粒的 Mie 系数 a_n, b_n 满足尽可能接近或者完全相等, 就存在最小的后向散射。通过计算 $\frac{\partial}{\partial \mu_r} |a_n + b_n|$ 并令其等于 0 可得出 $\mu_r = |m|$ 。由此, 可得出以下结论: 当颗粒的相对折射率和相对磁导率参数相等或相接近时, 颗粒的后向散射达到最小。

从(2)式可见, 磁性颗粒散射的计算相比较非磁性颗粒的情况只多了相对磁导率这个参数, 其它函数完全一致。因此可采用文献[21]提出的 Mie 散射数值改进方法, 引入 $A_n(\alpha), B_n(\alpha), L_n(\alpha)$ 和 $L_n(\beta)$ 等变量对 Mie 散射系数 a_n 和 b_n 进行重构, 可对(2)式做如下变形

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{\psi_n(\alpha)}{\zeta_n^{(1)}(\alpha)} \frac{\mu_r \psi_n'(\beta)/\psi_n(\beta) - m \psi_n'(\alpha)/\psi_n(\alpha)}{\mu_r \psi_n'(\beta)/\psi_n(\beta) - m \zeta_n^{(1)'}(\alpha)/\zeta_n^{(1)}(\alpha)} = A_n(\alpha) \frac{L_n(\beta) - \tilde{m} L_n(\alpha)}{L_n(\beta) - \tilde{m} B_n(\alpha)} \\ b_n &= \frac{\psi_n(\alpha)}{\zeta_n^{(1)}(\alpha)} \frac{m \psi_n'(\beta)/\psi_n(\beta) - \mu_r \psi_n'(\alpha)/\psi_n(\alpha)}{m \psi_n'(\beta)/\psi_n(\beta) - \mu_r \zeta_n^{(1)'}(\alpha)/\zeta_n^{(1)}(\alpha)} = A_n(\alpha) \frac{\tilde{m} L_n(\beta) - L_n(\alpha)}{\tilde{m} L_n(\beta) - B_n(\alpha)} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $A_n(\alpha) = \frac{\psi_n(\alpha)}{\zeta_n^{(1)}(\alpha)}, B_n(\alpha) = \frac{\zeta_n^{(1)'}(\alpha)}{\zeta_n^{(1)}(\alpha)}, L_n(\alpha) = \frac{\psi_n'(\alpha)}{\psi_n(\alpha)}, L_n(\beta) = \frac{\psi_n'(\beta)}{\psi_n(\beta)}, \tilde{m} = \frac{m}{\mu_r}$ 。由(1)式和(3)式, 即可得出散射光强、散射系数、消光系数和吸收系数等散射特性相关物理量。

3 磁性颗粒散射特性数值计算结果与讨论

通常吸波材料工作在厘米波段范围内(最为常见雷达工作频率为 1~30 GHz), 针对近年来吸波材料研究向高频(从厘米波段向毫米波段)方向延伸的特点, 本文选取 8 mm 波段的吸波颗粒进行散射特

性分析。

3.1 相对磁导率 μ_r 对散射光强的影响

首先分析较大及较小两种折射率情况下的微米吸波颗粒的散射光强特性,其中吸波颗粒的相对折射率分别取为 $m = 2.3 - i0.54$ 和 $m = 21.66 - i10.69$,选取自文献[18]中所给出的铁氧体、羰基铁粉等吸波颗粒在雷达工作频率为 90 GHz(即波长为 8 mm)时的相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 折算而得。对应该频率下,使 μ_r 在一定的范围内变化,计算分析吸波材料在颗粒具有磁性($\mu_r > 1.0$)及非磁性($\mu_r = 1.0$) 2 种情况下的散射光强分布特性。

图 1(a),(b)分别给出了折射率较小和较大两种情况下 8 μm 粒径吸波颗粒(颗粒无因次粒径参数为 $\alpha = 3.142 \times 10^{-3}$) 散射光强随散射角 θ 及相对磁导率 μ_r 的分布曲面。对比图 1 数值计算结果可得:雷达波段内的微米颗粒散射属于瑞利(Rayleigh) 散射。在非磁性颗粒($\mu_r = 1.0$) 时,无论是大折射率颗

粒还是小折射率颗粒,前后向散射光强呈对称分布,颗粒的前向散射和后向散射光强几乎相等。对于磁性颗粒,磁导率变化时,大折射率颗粒与小折射率颗粒呈现的散射规律并不相同。当磁导率 μ_r 从 1.0 逐渐增大到与颗粒复折射率模 $|m|$ 接近时,小折射率颗粒前向散射仅略微增强,而大折射率颗粒前向光强增强极为明显。同时,颗粒的后向散射随磁导率增大逐渐减弱,当 $\mu_r \approx |m|$ 时磁性颗粒后向散射达到最小。对于大折射率颗粒, μ_r 继续增大,颗粒的前后向散射都基本维持不变。而对于小折射率颗粒,当 μ_r 大于 $|m|$ 时,后向散射反而增强,而前向散射不出现太大变化。即无论是小折射率颗粒,还是大折射率颗粒,都存在使后向散射最小的磁导率 μ_r 。但对于大折射率颗粒,磁导率在相当大范围都使后向散射较小。在相同的复折射率和相同粒径下,磁性的颗粒后向散射光强均远弱于非磁性颗粒。

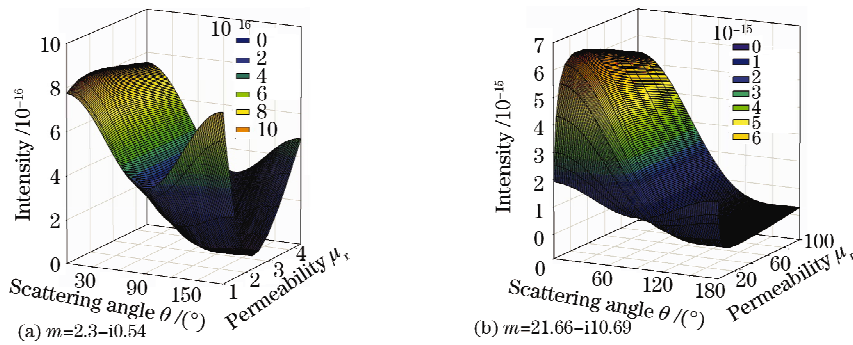


图 1 8 μm ($\alpha = 3.142 \times 10^{-3}$) 吸波颗粒散射强度 $I(\theta, \mu_r)$ 三维图

Fig. 1 3D plot of total intensity (I) as a function of the scattering angle (θ) and permeability (μ_r) for 8 μm absorbing particle at the 8 mm wave band

图 2 给出了粒径为 800 nm 和 100 μm 的吸波颗粒的散射分布情况(对应无因次粒径参数为 $\alpha = 3.142 \times 10^{-4}$ 和 $\alpha = 3.92710^{-2}$ 。可以看出:具有相

同折射率的吸波颗粒,散射光强随磁导率的变化趋势与图 1 的情况类似。对多组不同复折射率 m (m 分别取为: $1.33 - j0.05, 1.57 - j0.56, 3.56 - j0.87,$

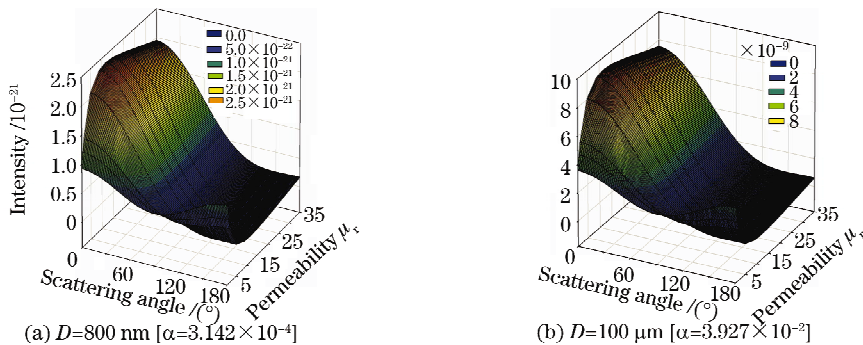


图 2 不同粒径吸波颗粒散射强度 $I(\theta, \mu_r)$ 三维图

Fig. 2 3D plot of total intensity (I) as a function of the scattering angle (θ) and permeability (μ_r) for different sizes absorbing particle of $m = 11.87 - j0.56$ at the 8 mm wave band

11.87-j0.56, 41.66-j5.89 等)、不同粒径颗粒的散射特性计算表明,磁性颗粒散射光强随磁导率分布的变化趋势均与图 1、图 2 中的结果一致。这说明在瑞利散射区域,散射分布与磁导率的依赖关系存在相同规律。

从雷达吸波的角度考虑,为满足隐身材料的阻抗匹配特性和衰减特性,即要求入射光在吸波颗粒表面尽可能少地反射而被颗粒最大限度吸收而迅速衰减。对应于图 1 和图 2,颗粒前向散射的增强及后向散射的减弱有利于入射光被颗粒吸收,满足阻抗匹配特性从而有效减缩目标雷达散射截面。

当颗粒的磁特性与介电常数满足 $\mu_r = |m|$ 时,

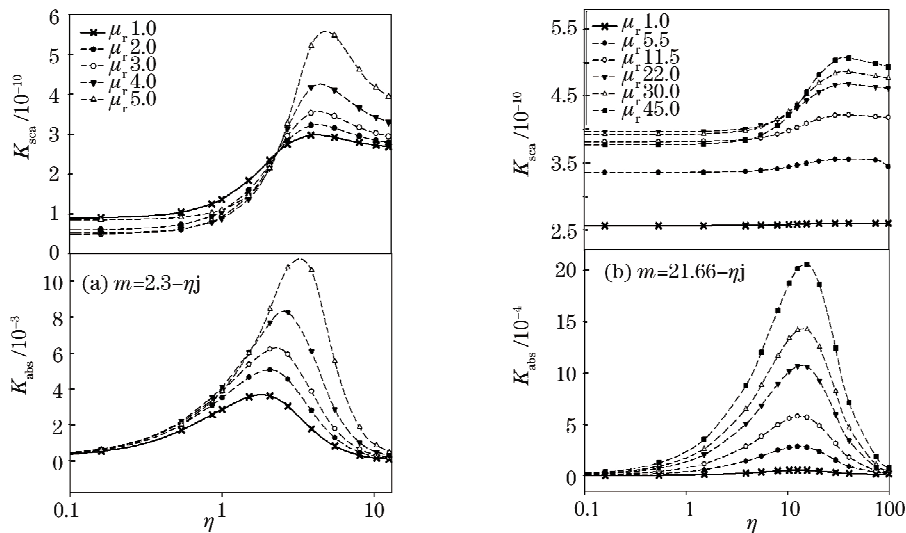


图 3 $K_{\text{sca}}, K_{\text{abs}}$ 随磁导率 μ_r 及折射率虚部 η 的变化曲线

Fig. 3 Curves of scattering coefficient (K_{sca}) and absorption coefficient (K_{abs}) as a function of the image part of the refractive index (η) and permeability (μ_r) for 8 μm magnetic and non-magnetic particle at the 8 mm wave band

由图 3 可以看出:磁性颗粒吸收系数的大小与相对折射率虚部有关,当折射率虚部相对实部较小时,吸收随折射率虚部的增大而增强;但当折射率虚部相对实部较大时,即吸波颗粒具有良导体的性质时,吸收性能反而随折射率虚部 η 的增大而逐渐减弱;吸收系数 K_{abs} 最大值出现在折射率虚部变化到实部附近($\eta \approx n$);吸波颗粒的吸收性能随磁导率增大而增强,且磁性颗粒($\mu_r > 1.0$)的吸收性能均强于非磁性情况($\mu_r = 1.0$);

对于吸波颗粒的散射系数 K_{sca} ,当折射率虚部相对实部较小时,散射系数随折射率虚部的增大变化不大;但当折射率虚部相对实部较大时,磁性颗粒散射性能出现振荡,且小折射率颗粒振荡较为明显。大折射率颗粒折射率虚部的变化基本不对非磁性颗粒散射系数有影响,对磁性颗粒的影响也较小。

参照图 1,选取多组不同复折射率 m 不同粒径

吸波颗粒能实现阻抗完全匹配(即入射光在颗粒表面无反射而完全被颗粒吸收)。由本文理论部分,当磁导率与折射率满足 $\mu_r = |m|$ 时,吸波颗粒的后向散射达到最小。以上两个条件从本质上来说,具有一致性。表明图 1 和图 2 给出的散射光强随磁导率变化特性符合吸波颗粒在雷达波段内的散射规律。

3.2 相对磁导率 μ_r 对散射、吸收性能的影响

仍考虑 8 mm 波段具有较大及较小折射率情况的吸波颗粒,分析相对磁导率和相对折射率 m 对颗粒散射、吸收性能影响。图 3(a),(b) 分别表示吸波颗粒在不同磁导率时散射系数、吸收系数随折射率虚部的变化曲线。

吸波颗粒进行散射特性分析,可得以下结论:在 Rayleigh 散射范围内,磁性颗粒吸收系数和散射系数随复折射率虚部的变化趋势与图 3 相似,即吸收系数在 $\eta \approx n$ 时存在最大值。比较吸收系数和散射系数,可以看出散射系数在数量级上远小于吸收系数。由于消光系数为散射系数和吸收系数之和。因此,消光系数随折射率、磁导率的变化规律取决于吸收系数。由此可以得出结论,当颗粒复折射率的实部与虚部接近时,对入射辐射的吸收最大。

4 结 论

本文根据 Mie 散射理论,在考虑颗粒的磁性特征对散射特性影响的基础上,分析了雷达波段内的微米级吸波颗粒的光散射特性。得出以下结论:

1) 磁特性对颗粒散射光强造成影响,在一定的变化范围内 ($1.0 \leq \mu_r \leq |m|$),颗粒前向散射光强

随磁导率的增大而增强,后向散射逐渐减弱,有利于入射光更多地进入颗粒内部被吸收耗损,从而有效减小雷达散射截面;磁导率增大对颗粒散射光强的影响受复折射率 m 的制约。当 $\mu_r = |m|$ 时后向散射光强达到最小值,考虑到实际选取吸波材料时,要使物性参数满足 $\mu_r = |m|$ 并不容易,故只能使 μ_r 与 $|m|$ 尽可能接近。或选择较大复折射率,相对磁导率也较大的材料。

2) 折射率虚部对吸波颗粒的吸收性能造成影响,在一定的范围内($1.0 \leq \eta < n$),折射率虚部的增大有利于增强颗粒的吸收性能,而对颗粒散射性能的影响较小;同时,折射率虚部的增大对颗粒吸收性能的影响受到复折射率实部的制约。当 $\eta \approx n$ 时,吸收性能达到最佳,折射率虚部继续增大,吸收性能反而随折射率虚部 η 的增大而逐渐减弱。由于散射系数远小于吸收系数,颗粒的消光系数随折射率变化的规律取决于吸收系数。

参 考 文 献

- 1 Wang Naining, Cai Xiaoshu, Zheng Gang. *Optical Particle Sizing and Its Application* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. 128~141
王乃宁,蔡小舒,郑刚. 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京:原子能出版社,2000. 128~141
- 2 Su Mingxu, Ren Kuangfang, Grehan G *et al.*. The affect of light multiple scattering on particle sizing by using light extinction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 696~699
苏明旭,任宽芳, Grehan G 等. 光复散射对消光法粒径测量的影响:复散射模型与数值模拟[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 696~699
- 3 Shen Jianqi, Cai Xiaoshu, Wang Naining. The influence of the inputted refractive index of the small-angle forward scattering laser particle sizer [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **26**(4): 312~316
沈建琪,蔡小舒,王乃宁. 小角前向散射激光测粒仪中折射率对测量结果的影响[J]. 中国激光, 1999, **26**(4): 312~316
- 4 Liu Lei, Wang Huarui, Yu Bin *et al.*. Calculation of light scattering by coated spheres [J]. *China Powder Science and Technology*, 2008, **14**(1): 11~15
刘蕾,王华睿,于彬等. 双层球形颗粒的光散射计算[J]. 中国粉体技术, 2008, **14**(1): 11~15
- 5 Xu Feng, Cai Xiaoshu, Shen Jiaqi. Geometric approximation of light scattering in arbitrary diffraction regime for absorbing particles; application in laser particle sizing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1464~1469
徐峰,蔡小舒,沈嘉祺. 米氏理论的近似及在粒度测量中的应用[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1464~1469
- 6 Shen Jianqi, Wang Naining. A discussion on results influenced by the position of the detector in the small-angle forward scattering laser particle sizer [J]. *University of Shanghai for Science and Technology*, 1998, **20**(1): 30~34
沈建琪,王乃宁. 小角前向散射测粒仪光电探测元件的对中问题[J]. 上海理工大学学报, 1998, **20**(1): 30~34
- 7 Li Junfeng, Ding Yuewei, Xu Feng *et al.*. Influences of layered structure of particle on scattering characteristics and laser particle sizing [J]. *China Powder Science and Technology*, 2004, **10**(2): 1~3
李俊峰,丁岳伟,徐峰等. 颗粒层状结构对散射特性及激光粒度测量的影响[J]. 中国粉体技术, 2004, **10**(2): 1~3
- 8 Cai Xiaoshu, Zheng Gang, Wang Naining. A new method to determine automatically the measurable range of the light extinction particle sizing technique [J]. *University of Shanghai for Science and Technology*, 1998, (1): 83~89
蔡小舒,卫敬明,郑刚等. 光全散射测粒方法的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 1998, (1): 83~89
- 9 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Theoretical analysis and numerical calculation of transmitted light Intensity of light scattering from nano-particle random scatterers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 951~956
叶云霞,范滇元. 光通过纳米颗粒随机散射体透射光强的计算及分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 951~956
- 10 Shi Shengwei, Wang Jiangan, Jiang Xingzhou *et al.*. Analysis of scattering phase function and backscattering signal characteristic of bubble films in ship wake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1861~1866
石晟玮,王吉安,蒋兴舟等. 舰船尾流气泡层散射相位函数及其后向散射信号特性分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1861~1866
- 11 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai *et al.*. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1429~1435
周雯,曹文熙,李彩等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1429~1435
- 12 Shi Lijuan, Han Xiang'e, Li Renxian. Debye series of gaussian beam scattering by a multi-layered sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1513~1519
施丽娟,韩香娥,李仁先. 多层球对高斯波束散射的德拜级数研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1513~1519
- 13 Ye Yuxia, Fan Dianyuan. Incoherent radiation of amplifying random media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 364~370
叶云霞,范滇元. 增益随机散射介质中的非相干辐射[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 364~370
- 14 Liu Yanlei, Yuan Libo. Characteristic of compound two-ring combined rayleigh backscattering fiber optic rotation sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1208~1214
刘艳磊,苑立波. 双环形腔复合瑞利后向散射式光纤转动传感特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1208~1214
- 15 G. Yamamoto, M. Tanaka. Increase of global albedo due to air pollution [J]. *Atoms. Sci.*, 1972, **29**(8): 1405~1412
- 16 N. Garcia, A. Z. Genack. Anomalous photon diffusion at the threshold of the anderson localization transition [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**: 1850~1853
- 17 M. Kerker, D. S. Wang, C. L. Giles. Electromagnetic scattering by magnetic spheres [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(6): 765~767
- 18 Wang Xiangyuan, Sheng Yubao, Qiu Zhiqiang. The dependence of ϵ and μ of microwave absorbing material on the percentage volume of its constituent [J]. *Journal of Nanjing University (Nature Science Edition)*, 1992, **28**(4): 551~554
王相元,盛玉宝,邢志强. 吸波材料电磁参量与吸收剂百分体积关系[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1992, **28**(4): 551~554
- 19 V. D. Hulst, H. C. *Light Scattering by Small Particles* [M]. John Wiley & Sons; New York, 1957
- 20 M. Kerker. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation* [M]. New York: Academic Press, 1956. 104~1279
- 21 Shen Jianqi, Liu lei. An improved algorithm of classical Mie scattering calculation [J]. *China Powder Science and Technology*, 2005, **11**(4): 1~5
沈建琪,刘蕾. 经典 Mie 散射的数值计算方法改进[J]. 中国粉体技术, 2005, **11**(4): 1~5