

# 红外辐射在水雾中衰减计算的修正方法研究

杜永成, 杨立, 张修峰, 吴猛猛

海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033

**摘要** 水雾系统对红外光谱有着强烈的衰减作用, 因此在军事目标的各种制导对抗中被予以高度的关注。以 Mie 散射理论为基础, 分析了粒子对红外光谱前向散射的聚集特性, 定义了近前向散射比, 并确定了在应用朗伯比尔定律时需修正的粒子尺度和散射半角的范围。通过大量计算发现, 单独将粒子尺度和散射半角的乘积作为独立变量计算的视消光系数不够精确。在中远红外波段, 前向散射附近的小角度内散射强度积分与粒子尺度和散射角都成正比, 若红外波长为定值, 则与粒子半径成正比。最后根据前向散射规律给出了两个不单独以  $x \cdot \theta$  为变量的经验计算公式, 使得对水雾消光的修正计算更加简便精确。

**关键词** 光散射; Mie 理论; 朗伯比尔定律; 近前向散射比; 修正因子

中图分类号: TN21 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)10-2632-04

## 引言

水雾对可见光、红外线、电磁波等波谱有着强烈的衰减作用, 因此在军事目标的各种制导对抗中被予以高度的关注。科研工作者在喷雾控制与粒径谱分析、Mie 散射与吸收理论、粒子场消光模型的计算以及获取最佳隐身效果的粒径谱分布等方面进行了大量的研究<sup>[6]</sup>, 其中粒子系的消光计算成为当前国内外研究的前沿。

对于粒子群光散射的分析计算, 国内外发展了很多方法, 如蒙特卡洛法 (MCM)<sup>[7]</sup>, 广义 Mie 散射理论 (GMM)<sup>[8]</sup>, 离散偶极子近似法 (DDA)<sup>[9]</sup> 等, 但这些方法多是用来描述雾场的散射特性, 并且各有其应用的局限性, 例如 GMM 法主要在聚集粒子群中应用, 并且不同的聚集模式有着不同的计算结果。长期以来红外光谱在粒子群中的衰减计算是在 Mie 理论的基础上利用朗伯比尔定律完成的。该定律在很多场合的应用中, 因为粒子前向散射的缘故需做出修正<sup>[10]</sup>, 但很多研究人员往往忽略了这点而直接应用该定理。文献[8]在进行粒径的反演运算时对粒子前向散射的影响进行了研究, 并采用了公式化的近似修正因子。本文研究发现该修正因子精确度不够高, 对于如大气气溶胶中的小粒子或者大气分子等, 由于粒子尺度很小使得散射过程接近瑞利散射, 此时朗伯比尔定律完全适用, 无需修正<sup>[11]</sup>。而对于如雨滴和人工水雾的雾滴等大粒子, 则因为前向散射强烈而应准确修正<sup>[12]</sup>。本文将通过精确计算给出更加准确的公式,

使得朗伯比尔定律能更加有效地运用于实际。

## 1 朗伯比尔定律的修正计算

粒子吸收与散射的示意如图 1 所示。

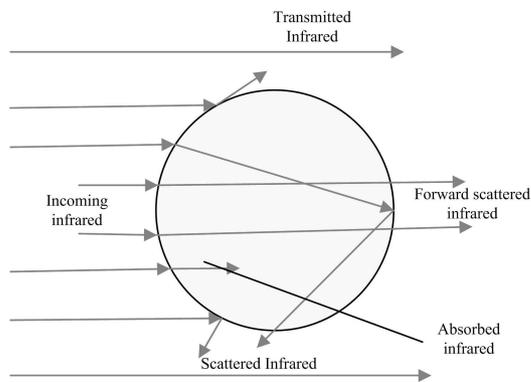


Fig 1 Extinction of the particle

应用朗伯比尔定律的计算结果与仪器测量结果相吻合的前提条件是测量仪器接收的散射通量近似为零。但这与实际不符, 因为大粒子有着强烈的前向散射并且聚集在  $\sigma$  附近很小的角度内<sup>[14]</sup>, 而测量仪器都有一定的入射孔径, 被认为散射衰减掉的辐射能有一部分进入了测量仪器, 这实际上是减弱了粒子场对热辐射的衰减。

考虑近前向散射修正后的消光系数称为视消光系数

收稿日期: 2009-12-28, 修订日期: 2010-03-26

基金项目: 国防预研基金项目(1010502020202)资助

作者简介: 杜永成, 1985年生, 海军工程大学船舶与动力学院硕士生, e-mail: dycheng@Yeah.net, dyccydaq@126.com

$\sigma_{\text{ext}}^{[9]}$ , 本文定义在  $0^\circ$  附近的小角度内前向散射与所有散射能量的比值为近前向散射比 (near forward scattering ratio, NFSR) 为

$$\omega = \frac{\sigma'_{\text{sca}}}{\sigma_{\text{sca}}} = \frac{2\lambda \int_0^\varphi \alpha(\theta) \sin\theta d\theta}{2\lambda \int_0^\pi \alpha(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (1)$$

$\sigma_{\text{sca}}$  为散射截面,  $\alpha(\theta)$  为角散射截面, 则视消光系数

$$\sigma_{\text{ext}} = (1 - \omega)\sigma_{\text{sca}} + \sigma_{\text{abs}} \quad (2)$$

红外光谱测量仪器的入射孔径一般很小, 故本文只考虑半角为  $0 \leq \theta \leq \varphi$  的前向散射对消光系数的影响。而 Mie 理论的适用条件是  $x \geq 1$ , 故在该定义式中粒子尺度的范围是  $x \geq 1$ 。

Deepak 和 Vaughan 在反演粒子半径谱分布时对粒子的消光系数进行了修正, 并定义了修正因子 (Correction Factor) [9]

$$R = \frac{\sigma_{\text{vsca}}}{\sigma_{\text{sca}}} = 1 - \frac{2\pi \int_0^\varphi \alpha(\theta) \sin\theta d\theta}{2\pi \int_0^\pi \alpha(\theta) \sin\theta d\theta} \quad (3)$$

其中  $\sigma_{\text{vsca}}$  为视散射系数, 则有

$$\omega = 1 - R \quad (4)$$

计算中 Deepak 和 Vaughan 采用了 Lord Rayleigh 于 1881 年提出的近似修正因子

$$R(x, \theta) = 0.5 [1 + J_0^2(x\theta) + J_1^2(x\theta)] \quad (5)$$

散射角  $\theta$  在计算中要转化为弧度值, 且  $x \geq 1, \theta \leq 1.5^\circ$ 。  $J_0$  和  $J_1$  为零阶和一阶的第一类贝塞尔函数, 可表示为

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(m+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{(m+2k)} \quad (6)$$

其中  $m$  取 0 和 1。该修正因子将两个变参量  $x$  和  $\theta$  在实际计算中作一个变量处理, 即  $p = x \cdot \theta$ , 这意味着该修正因子与两者的乘积相关。经过编程计算, 将该修正因子表示如图 2。该公式计算结果可表述为, 在  $p = x \cdot \theta$  变化范围较小时  $\omega$  随  $p$  值呈线性增大趋势; 在  $p = x \cdot \theta$  变化范围大时,  $\omega$  随  $p$  值的变化为高次多项式曲线, 并且斜率先增后减。

通过 Matlab 编程计算, 得到 NFSR 的理论精确值。图 3(a) 和图 3(b) 中计算的波长为  $3.5 \mu\text{m}$ , 相对应的曲线有着基本相同的值及变化规律。由图 3(a) 可见, 当粒子半径一定时,  $\omega$  随着前向散射角的增大而呈线性增大; 当半径 ( $r$ ) 依

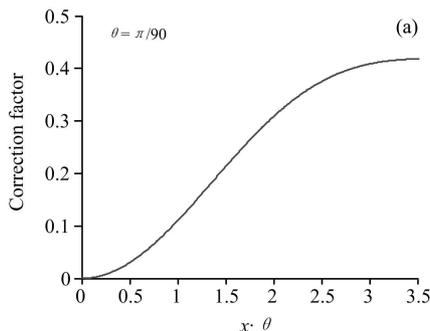


Fig 2(a) Change of the correction factor with the range of  $x\theta$  is big

次取 5, 10, 15,  $20 \mu\text{m}$ ,  $\omega$  值随着前向散射角线性增大的斜率依次变大。图 3b 显示, 当前向散射角取为定值时,  $\omega$  随着粒子半径的增大而基本呈线性增大; 当前向散射角  $\theta = 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ$  时,  $\omega$  随粒子半径的线性增大的斜率依次变大。两图变化规律是相同的, 这说明, 在前向散射附近的小角度内, NFSR 与粒子的线性尺度成正比, 与该散射角的大小成正比; 同时当辐射波长为定值时, NFSR 还与粒子半径成正比。

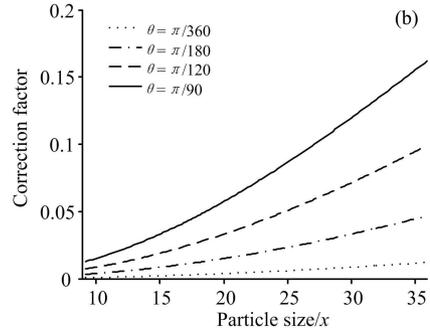


Fig 2(b) Change of the correction factor with the range of  $x\theta$  is small

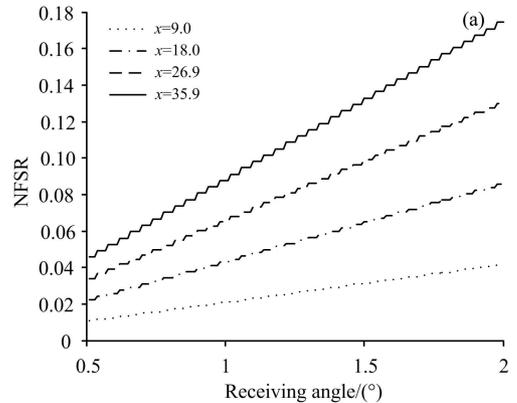


Fig 3(a) Change of  $\omega$  along with scattering angle when  $r = 5, 10, 15, 20 \mu\text{m}$

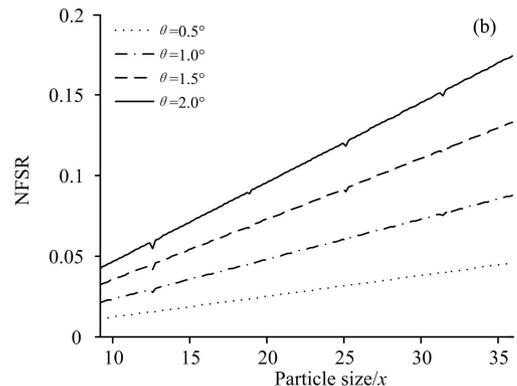


Fig 3(b) Change of  $\omega$  along with particle size when  $\theta = 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ$

对比图 2(b) 和图 3(b), 在相同的粒子尺度参数和散射角的情况下, 两者虽表现出近似的变化规律, 但所得数值有

一定差别, Deepak 和 Vaughan 所用修正因子在  $p$  值较小或较大时所得结果与本文精确计算的 NFSR 有一定误差。为了更加准确方便地计算视消光系数, 根据图 3(a) 和图 3(b) 的变化规律, 利用 Matlab 拟合出两个计算 NFSR 的公式。分别用散射角  $\theta$  的函数  $f_1(\theta)$  和  $f_2(\theta)$  作为线性函数  $\omega$  的斜率和初相, 以粒子尺度  $x$  为自变量, 即:  $\omega = f_1(\theta)x + f_2(\theta)$ ; 同时也可以利用粒子尺度  $x$  的函数  $g_1(x)$  和  $g_2(x)$  作为线性函数的斜率和初相, 以小散射角  $\theta$  为自变量, 即:  $\omega = g_1(x)\theta + g_2(x)$ , 而在计算中发现,  $f_1(\theta)$ ,  $f_2(\theta)$ ,  $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$  都是简单的线性函数, 如下

$$\begin{cases} f_1(\theta) = 2.4 \times 10^{-3}\theta + 5 \times 10^{-5} \\ f_2(\theta) = -1.1 \times 10^{-3}\theta \\ g_1(x) = 2.4 \times 10^{-3}x - 1.5 \times 10^{-3} \\ g_2(x) = 4.7 \times 10^{-5}x + 2.5 \times 10^{-5} \end{cases} \quad (7)$$

其中  $\theta$  为角度值。该公式以  $p = x \cdot \theta$  中的一个变量作为  $\omega$  函数的自变量, 另一个变量作为修正变量, 比单独以  $p$  作为自变量更科学, 提高了计算的准确度。

在利用朗伯比尔定律计算红外光谱在水雾中传输时, 则应写为

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^L n(r) \sigma_{\text{abs}}(\lambda, r) dr dL\right] +$$

$$I_0 \exp\left[-\int_0^L n(r) (1 - \omega) \sigma_{\text{scat}}(\lambda, r) dr dL\right] \quad (r \geq \lambda) \quad (8)$$

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^L n(r) \sigma_{\text{ext}}(\lambda, r) dr dL\right] \quad (r \geq \lambda) \quad (9)$$

将不做修正的消光系数、采用 Deepak 和 Vaughan 所提方法计算的视消光系数以及用本文所提方法所得的结果与精确值作对比如表 1。从表中数据看到, 消光系数不做修正时误差很大, 并且粒子尺度和散射半角越大误差越大; Deepak 和 Vaughan 所用修正因子与本文所给公式计算的视消光系数做比较, 本文更准确, 当  $x = 20$ ,  $\theta = 2.0^\circ$  时, 前者的误差已达 2.16%, 而本文给出的经验公式误差小于 0.1%。本文的方法简单实用, 且计算结果准确。

Table 1 Comparison between calculated  $\sigma_{\text{ext}}$  in three methods and  $\sigma_{\text{ext}}$

extinction coefficient / $\lambda = 5$	$\sigma_{\text{ext}} \times 1.0 \text{e}+ 004$	$\sigma_{\text{ext}}(\text{Deepak's}) \times 1.0 \text{e}+ 004$	$\sigma_{\text{ext}}(\text{fitting}) \times 1.0 \text{e}+ 004$	$\sigma_{\text{ext}}(\text{exact}) \times 1.0 \text{e}+ 004$
$r = 5, \theta = 0.5^\circ$	0.0291	0.0291	0.0291	0.0290
$r = 20, \theta = 1.0^\circ$	0.2946	0.2945	0.2929	0.2928
$r = 50, \theta = 1.5^\circ$	1.6693	1.6614	1.6370	1.6364
$r = 100, \theta = 2.0^\circ$	6.5314	6.3327	6.2028	6.1989

## 2 总 结

单独用  $p = x \cdot \theta$  做变量可以近似修正消光系数, 但不够精确。在前向散射  $0^\circ$  附近的小角度内散射强度积分与粒子尺

度和散射角都成正比, 当波长一定时, 与粒子半径成正比。本文利用 Matlab 计算拟合了更加准确的 NFSR 经验公式。本文研究成果对红外成像与量测, 激光通信与制导, 红外光谱的烟雾衰减等具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Mariana Ilie, Jearr Christophe Kneip, Simone Mattei et al. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45: 405.
- [2] Gouesbet G. Optics Communications, 2006, 266: 704.
- [3] SU Ming xu, CAI Xiaoshu, HUANG Chur yan, et al(苏明旭, 蔡小舒, 黄春燕, 等). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2004, 25(4): 1.
- [4] LI Li, GAO Zhi yun, WANG Xiar wu, et al(李 丽, 高稚允, 王霞露, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2004, 33(6): 562.
- [5] YE Yur xia, FAN Dian yuan(叶云霞, 范滇元). Acta Optica Sinica(光学学报), 2007, 27(5): 951.
- [6] YUAN Jiang tao, YANG Li, XIE Jun(袁江涛, 杨 立, 谢 骏). Optical Technique(光学技术), 2007, 32(3): 459.
- [7] Wang L H, Jacques S L, Zheng L Q. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 1995, 47(2): 131.
- [8] Xu Yulin. Applied Optics, 1995, 34: 4573.
- [9] Draine BT, Flatau P J. Journal of the Optical Society of America, 1994, 11(4): 1491.
- [10] Adarsh Deepak, Vaughan O H. Applied Optics, 1978, 17(3): 374.
- [11] YIN Hong(尹 宏). Atmospheric Radiation Foundation(大气辐射学基础). Beijing: Meteorological Press(北京: 气象出版社), 1993. 68.
- [12] LU Zheng yong(卢正永). Introduction to Aerosol Science(气溶胶科学引论). Beijing: Atomic Energy Press(北京: 原子能出版社), 2000. 12.
- [13] LI Wei, YANG Ke cheng, XIA Min, et al(李 薇, 杨克成, 夏 珉, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(4): 799.

# Study on the Correctional Method for the Attenuation Calculation of Infrared Radiation in the Water Fogs

DU Yong-cheng, YANG Li, ZHANG Xiu-feng, WU Meng-meng

College of Boats and Ships and Dynamic Force, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

**Abstract** Water fogs system can mightily attenuate the infrared spectrum, so more and more attention has been paid to this problem in military. Based on the Mie theory, the collective characteristic of the particles forward scattering was analyzed. The near forward scattering ratio was defined, also the particle size and scattering DBC case were confirmed when the Lambert-Beer law was applied. A mass of calculation revealed that the visual extinction coefficient calculated with the combined parameter  $p = x \cdot \theta$  was not accurate, and that the near forward scattering ratio was in direct proportion to both the particle size and scattering angle in the band of middle and far infrared. When the infrared wavelength was fixed, the near forward scattering ratio was in direct proportion to the particle radius. Finally, according to the law of forward scattering, two experiential functions whose variables were not only the  $p = x \cdot \theta$  were given, by which the correction calculation for light extinction was made easy and exact.

**Keywords** Light scattering; Mie theory; Lambert Beer's law; Near forward scattering ratio; Correction factor

(Received Dec. 28, 2009; accepted Mar. 26, 2010)

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

## 《冶金分析》2011 年征订启事

国内统一刊号: CN11-2030/T F

国际标准刊号: ISSN1000-7571

国际 CODEN: YEFEET

邮发代号: 82-157

国外代号: 1579M

京海工商广字第 8024 号

作为冶金领域中权威的分析技术专业期刊,《冶金分析》的办刊宗旨是为广大冶金分析测试工作者搭建学术交流平台。《冶金分析》由中国钢研科技集团有限公司(钢铁研究总院)和中国金属学会合办,国际钢铁工业分析委员会(ICASI)支持。自 1981 年创刊以来,《冶金分析》以高度的创新精神和严谨的科学态度,动态反映冶金领域分析测试新技术、新方法、先进经验,报导研究成果,发表综述文章,并介绍国内外冶金分析动态等。适合于冶金、矿山、石油、化工、机械、地质、环保、商检等部门技术人员和大专院校师生参考。《冶金分析》是中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库的核心库期刊、全国中文核心期刊、美国“CA”千种表中国化工类核心期刊,90 年代初期就为美国工程索引 EI 数据库收录,并为中国期刊网、万方数据库网等国内知名数据库所收录。

多年来《冶金分析》的影响因子等重要学术评价指标在冶金工程技术类及分析测试技术类期刊中一直居于前列。据 2007 年 10 月发布的《中国学术期刊综合引证年度报告》,本刊 2006 年度影响因子为 1.041,分别在“冶金工程技术类”、“分析测试技术类”统计源期刊中均名列第二。

为了加强国际间学术交流,促进冶金分析测试技术发展,在国际钢铁工业分析委员会(ICASI)的支持下,一批国外知名专家担任本刊编委。本刊将致力于以最快的速度及时发表国内外的最新研究成果。

《冶金分析》为月刊,大 16 开,单期页码为 80 页,定价 15.00 元,全年 12 期,180.00 元。全国各地邮局发行,如有漏订的单位和读者,请直接与编辑部联系。

欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

地址: 北京海淀区学院南路 76 号 邮编: 100081

网址: <http://journal.yejifenxi.cn> 电话/传真: 010-62182398/8330/1064

e-mail: [yjfx@analysis.org.cn](mailto:yjfx@analysis.org.cn); [yjfx@chinajournal.net.cn](mailto:yjfx@chinajournal.net.cn)