

细水雾在大气窗口波段的光谱与谱带辐射特性规律

杜永成, 杨立, 孙丰瑞

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 研究了细水雾在 3~5 μm 和 8~14 μm 这两个大气窗口波段的红外辐射特性规律。通过对光谱辐射特性规律的研究, 发现光谱散射系数与光谱吸收系数近似以 1/2 光谱消光系数为轴成对称关系, 并且随着细水雾均值粒径的增大, 对称关系趋于明显; 通过对谱带辐射特性规律的研究, 建立了细水雾在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段内谱带衰减系数的近似计算公式; 经过误差分析发现, 细水雾均值粒径大于 20 μm 时, 该近似公式可以保证三种谱带衰减系数的相对误差不超过 5%。

关键词: 细水雾; 红外辐射特性; 大气窗口; 光谱辐射; 谱带辐射

中图分类号: TN216; TJ99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1052-05

Spectral and bands radiation characteristics of water sprays in two infrared atmospheric windows

Du Yongcheng, Yang Li, Sun Fengrui

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The law of infrared spectral and bands radiation characteristics of water sprays in the atmospheric windows, 3–5 μm and 8–14 μm , was researched. Through the research on spectral radiation characteristics of water sprays, a kind of approximate symmetry relationship between spectral scattering coefficients and spectral absorption coefficients was discovered. The axis of symmetry is just the 1/2 of the spectral extinction coefficients. The symmetry relationship was found to be more obvious along with the increase of the average droplets radiuses. Though the research on the bands radiation characteristics in 3–5 μm and 8–14 μm of water sprays, a group of approximate formulas for calculating the bands attenuation coefficients including extinction, scattering and absorption were founded. It's proved by error analyzing that the method mentioned above can ensure the relative errors of the three bands attenuation coefficients be less than 5%.

Key words: water sprays; infrared radiation characteristics; atmospheric windows; spectral radiation; bands radiation

收稿日期: 2013-08-24; 修订日期: 2013-09-30

基金项目: 海军工程大学博士创新基金(HGBSJJ2013003); 海军工程大学知识产权专项基金(HGDSK2013G66)

作者简介: 杜永成(1985-), 男, 博士生, 主要从事目标红外辐射特性与抑制方面的研究。Email: dycheng@yeah.net

导师简介: 杨立(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事传热传质热流体学应用及量测方面的研究。

0 引言

红外制导技术大大提高了战术导弹的制导精度和作战时域,使得具有显著红外特征的水面舰船遭受到了严峻的红外制导威胁^[1]。舰船红外隐身技术正是伴随着红外制导技术发展起来的,各国兵工专家开展了多种舰船红外隐身技术研究^[2-4],利用细水雾对热辐射的强烈散射与吸收作用而设计的隐身技术已成为目前研究的热点和重点。红外探测器一般都选定在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个大气窗口作为信号相应波段,因此研究细水雾在这两个波段的红外辐射特性至关重要。

国内近 10 年来开始研究细水雾红外隐身技术,研究成果主要涉及到红外辐射在细水雾中透射率测试、水雾消光计算以及水雾隐身参数优化等基础理论和方法。如利用红外热像仪对细水雾遮蔽的目标进行热成像及红外测温,直观的反应了水雾遮蔽红外抑制技术的伪装效果^[5-6];数值计算方面,在 Mie 理论的基础上采用有限体积法研究了细水雾红外遮蔽中的辐射与导热耦合换热过程^[7]以及冷/热目标效应^[8],并对红外激光在细水雾中的传输衰减进行了特性分析^[9];此外,还研究了细水雾红外隐身的最佳消光粒径^[10-12]。但是公开发表的文献中未有关于细水雾在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的红外辐射特性规律研究,因此文中的研究目的旨在分析细水雾在上述波段中特殊的辐射特性规律,为红外隐身技术研究提供参考。

1 红外辐射特性的 Mie 计算

细水雾的红外辐射特性参数主要包括消光系数、散射系数和吸收系数,统称为光学衰减系数,文中用 $k_{\lambda,i}$ 表示光谱衰减系数, k_i 表示谱带衰减系数(下标代表消光“ext”、散射“sca”和吸收“abs”)。光学衰减系数是单位体积内所有雾滴光学截面 $\sigma_{\lambda,i}$ 的宏观表现,而 $\sigma_{\lambda,i}$ 是单个雾滴效率因子 $Q_{\lambda,i}$ 与投影面积 πr^2 的乘积。 $Q_{\lambda,i}$ 、 $\sigma_{\lambda,i}$ 和 $k_{\lambda,i}$ 可分别表示为公式(1)~(3)。

$$Q_{\lambda,\text{ext}}(r) = \frac{2}{\chi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1)$$

$$Q_{\lambda,\text{sca}}(r) = \frac{2}{\chi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n|^2 + |b_n|^2] \quad (1)$$

$$Q_{\lambda,\text{abs}}(r) = Q_{\lambda,\text{ext}}(r) - Q_{\lambda,\text{sca}}(r) \quad (2)$$

$$\sigma_{\lambda,i} = \pi r^2 Q_{\lambda,i}(r) \quad (2)$$

$$k_{\lambda,i} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} N_d \sigma_{\lambda,i}(r) n(r) dr \quad (3)$$

式中: a_n 、 b_n 为 Mie 系数,可由 Mie 氏理论计算^[13-14]; χ 为尺度参数,表示为 $\chi = 2\pi r \lambda$, r 为雾滴半径; N_d 表示体积分数为 f_v 的水产生的雾滴数,表示为:

$$N_d = \frac{3f_v}{4\pi \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr} \quad (4)$$

式中: f_v 为雾滴的体积分率; $n(r)$ 为多分散细水雾的粒径谱分布函数,采用对数正态分布函数描述时可表示为

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2S^2}\right) \quad (5)$$

式中: r_0 为水雾几何平均粒径; S 为水雾粒径对数标准偏差。

对于细水雾的谱带辐射特性,往往是出于简化计算的目的,用一个平均的谱带参数衡量所关注谱带的辐射特性,而这种平均参数一般是采用普朗克(Plank)平均法或罗斯兰(Rosseland)平均法获得^[15]:

$$\bar{R}_P = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{\lambda} I_{b,\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_{b,\lambda} d\lambda} \quad (6)$$

$$\bar{R}_R = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{\lambda} \frac{\partial I_{b,\lambda}}{\partial \lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\partial I_{b,\lambda}}{\partial \lambda} d\lambda} \quad (7)$$

式中: R_{λ} 为光谱辐射特性参数;下标“P”和“R”分代表普朗克平均法和罗斯兰平均法。

2 细水雾在窗口波段的辐射特性规律

2.1 光谱辐射特性规律

计算公式(3)中均值半径 50 μm、对数标准偏差 0.55、体积分率 1×10^{-4} 的细水雾在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段的光谱衰减系数,分别如图 1(a)、(b)所示。可以看出,细水雾在两个窗口波段的散射系数和吸收系数近似以 1/2 光谱消光系数为轴,具有近似对称

关系。

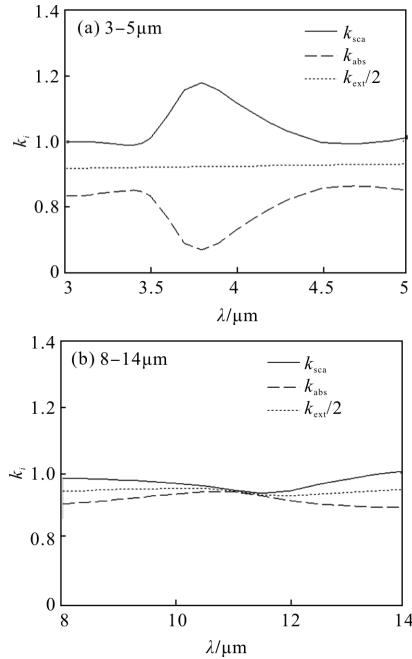


图 1 衰减系数随波长的变化规律

Fig.1 Changes of attenuation coefficients vs wavelength

由于消光系数为散射系数与吸收系数之和,那么 1/2 的光谱消光系数曲线的波动性可以反映散射系数与吸收系数的对称程度。若 1/2 光谱消光系数为恒定值,则说明散射系数与吸收系数完全对称,而 1/2 光谱消光系数的波动性越大,说明散射系数与吸收系数的对称性越差。文中用特定波段内 1/2 消光系数的标准偏差与其期望值之比 $\vartheta(r)$ 来定量描述散射系数与吸收系数的对称程度, $\vartheta(r)$ 越小说明对称性越好,而 $\vartheta(r)$ 越大则说明对称性越差。 $\vartheta(r)$ 表示为:

$$\vartheta(r) = \left[\frac{1}{4N_b} \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (k_r(\lambda) - \bar{k}_r)^2 \right]^{1/2} / \bar{k}_r \quad (8)$$

式中: $k_r(\lambda)$ 为均值粒径为 r 的细水雾在窄谱带模型下的光谱消光系数; \bar{k}_r 为 $k_r(\lambda)$ 的数学期望; N_b 为谱带数; λ_{\max} 和 λ_{\min} 分别为波段的最大和最小波长。

由图 2(a)、(b)可见,在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内,散射系数与吸收系数的对称性随着均值粒径的增大而趋于明显,且 3~5 μm 波段的对称性要略好于 8~14 μm 波段。当均值粒径大于 20 μm 时, $\vartheta(r)$ 小于 0.05,说明细水雾在两个大气窗口波段的消光系数具有明显的灰体特性。

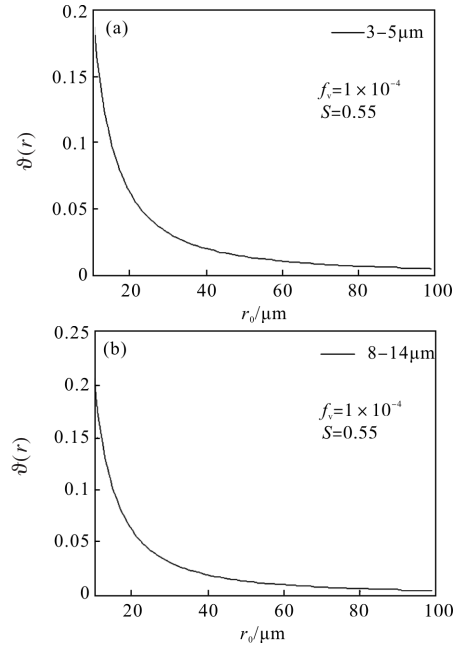


图 2 消光系数波动性随粒径的变化规律

Fig.2 Changes of volatility of extinction coefficients vs droplet radiuses

2.2 谱带辐射特性规律

根据参考文献[14],将 3~5 μm 和 8~14 μm 波段分别进行窄谱带近似,3~5 μm 划分为 26 个谱带(谱带宽度不等),8~14 μm 划分为 19 个谱带(谱带宽度不等)。计算 3~5 μm 26 个谱带中心波长光学截面 σ_{λ_i} 随雾滴半径的变化规律,并绘制在同一个图中,如图 3(a)、

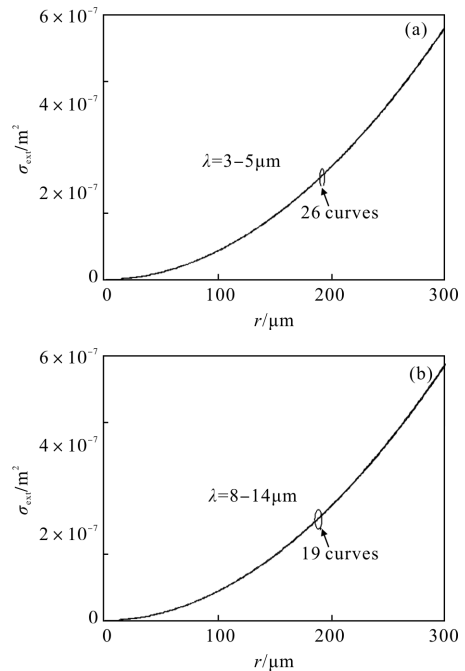


图 3 消光截面随粒径的变化规律

Fig.3 Changes of extinction cross section vs droplet radiuses

4(a)、5(a)所示。可以看出, 26 条曲线基本重合。对 8~14 μm 波段进行相同的操作, 如图 3(b)、4(b)、5(b)所示, 三图体现了与 3~5 μm 波段相同的变化规律, 19 条曲线基本重合。假如用一条拟合的曲线代表每个窄谱带内光学截面随粒径的变化, 则由公式(3)可知,

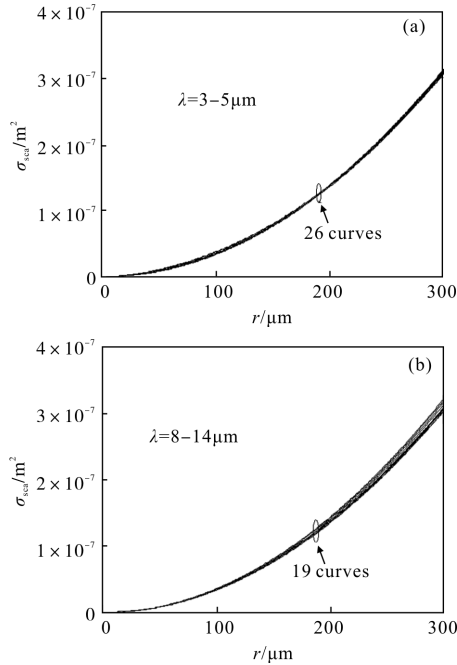


图 4 散射截面随粒径的变化规律

Fig.4 Changes of scattering cross section vs droplet radiuses

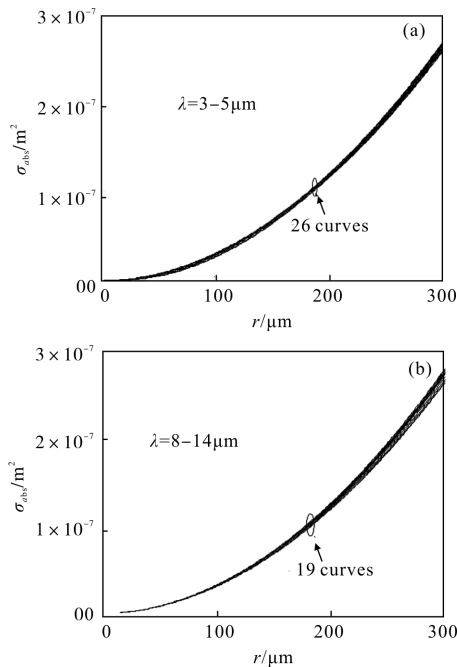


图 5 吸收截面随粒径的变化规律

Fig.5 Changes of absorption cross section vs droplet radiuses

在 3~5 μm 和 8~14 μm 波段内的谱带光学衰减系数与细水雾的辐射特性无关, 只与几何特征参数有关, 包括均值粒径、对数标准偏差和体积分数。

根据图 3~5 中的曲线规律, 将两个大气窗口波段的光学截面曲线进行基于最小二乘的多项式拟合, 所得函数如下:

$$\begin{cases} \sigma_{3-5,ext}(r) = 6.323r^2 + 18.82r - 176 \\ \sigma_{3-5,sca}(r) = 3.397r^2 + 11.01r + 316.6 \\ \sigma_{3-5,abs}(r) = 2.926r^2 + 7.808r - 492.6 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma_{8-14,ext}(r) = 6.36r^2 + 31.35r - 333.8 \\ \sigma_{8-14,sca}(r) = 3.395r^2 + 4.366r - 6.961 \\ \sigma_{8-14,abs}(r) = 2.924r^2 + 26.98r - 326.8 \end{cases} \quad (10)$$

公式(3)中的 $\sigma_{\lambda,i}$ 采用公式(9)与(10)代替, 则两个波段的衰减系数可以表示为:

$$\begin{cases} k_{3-5,i} = N_d \int_{r_{min}}^{r_{max}} \sigma_{3-5,i}(r)n(r)dr \\ k_{8-14,i} = N_d \int_{r_{min}}^{r_{max}} \sigma_{8-14,i}(r)n(r)dr \end{cases} \quad (11)$$

由公式(11)可知, 在获得细水雾几何特征参数的前提下, 可以不进行 Mie 计算而获取谱带衰减系数。

用相对误差 $\varepsilon_{r_{o,i}}$ 评价其准确性:

$$\varepsilon_{r_{o,i}} = \frac{|k_{f,i} - k_{M,i}|}{k_{M,i}} \quad (12)$$

式中: $k_{f,i}$ 为拟合方法计算的谱带光学衰减系数; $k_{M,i}$ 为 Mie 理论计算的结果。

相对误差的计算结果如图 6(a)、(b)所示。由图可知, 在 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段内, 随着均值粒径的增大, 文中方法所得三种光学衰减系数的相对误差迅速减小; 当细水雾的均值粒径大于 20 μm 时, 两个波段内三种光学衰减系数的相对误差均小于 5%, 当大于 30 μm 时, 三种光学衰减系数的相对误差保持在小于 1.5% 的范围内波动; 当小于 20 μm 时, 文中方法计算结果的相对误差较大, 3~5 μm 波段的吸收系数和散射系数为 10 μm 时, 相对误差分别达到了 80% 和 20%, 8~14 μm 波段的这两个值分别为 11.6% 和 9%, 说明文中方法适合计算均值粒径较大的细水雾光学衰减系数, 同时也说明对 8~14 μm 波段的计算结果准确性更高。

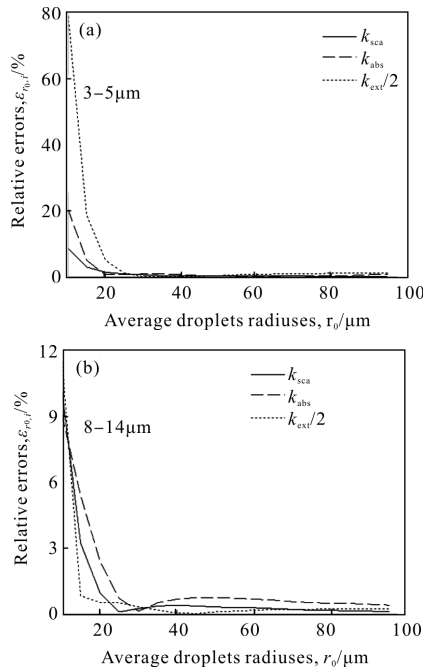


图 6 相对误差随均值粒径的变化规律

Fig.6 Changes of relative errors vs average droplets radiuses

4 结 论

在 Mie 理论的基础上,研究了细水雾在大气红外窗口波段的光谱与谱带辐射特性规律,所得结论如下:

(1) 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段内,光谱散射系数与光谱吸收系数近似以 $1/2$ 光谱消光系数为轴成对称关系,光谱散射系数与光谱吸收系数的对称性随着均值粒径的增大而趋于明显;

(2) 细水雾在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 两个波段内谱带衰减系数的近似计算公式适合计算均值粒径较大的细水雾谱带衰减系数,当细水雾均值粒径大于 $20\ \mu\text{m}$ 时,可以保证三种谱带衰减系数的相对误差不超过 5%;同时对 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的计算结果准确性更高。

参 考 文 献:

[1] Ye Yutang, Liu Shuang. Infrared and Low-light Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

[2] Peng Youshun, Yang Li, Du Yongcheng, et al. Application of subcooling films in temperature field and infrared stealth technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (10): 2572-2577. (in Chinese)

[3] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. Red phosphorus smoke usage

characteristics and optimal extinction diameter to emissions of infrared laser [J]. *Acta Aamamentarii*, 2007, 28(9): 1138-1143. (in Chinese)

- [4] Huang Wei, Ji Honghu, Si Ren, et al. Investigation of infrared suppression of exhaust system by reducing surface temperature and emissivity [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(4): 550-556. (in Chinese)
- [5] Hu Biru, Wu Wenjian, Dai Mengyan, et al. Study on property of infrared obscure of artificial fog [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2006, 25(2): 131-134. (in Chinese)
- [6] Chen Zhongwei, Liang Xingang, Zhang Lingjiang, et al. Investigation of spray on temperature drop and infrared stealth of water surface object [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(5): 342-346. (in Chinese)
- [7] Du Yongcheng, Yang Li, Peng Youshun, et al. Coupled heat exchange of radiation and conduction of water sprays in the heat shielding process [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(1): 40-43. (in Chinese)
- [8] Du Yongcheng, Yang Li, Zhang Shicheng, et al. Cool/hot target effect of the water fog infrared stealth [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (8): 2204-2208. (in Chinese)
- [9] Du Yongcheng, Yang Li. Attenuation characters of laser used for guided weapons in fine water sprays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40 (4): 04020051-04020056. (in Chinese)
- [10] Yuan Jiangtao, Yang Li, Xie Jun, et al. Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory [J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 459-461. (in Chinese)
- [11] Wang Xiying, Qi Hong, Wang Qingqing, et al. Numerical simulation of infrared stealth diameter of water fog particles based on the MDA method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(8): 1389-1393. (in Chinese)
- [12] Du Yongcheng, Yang Li. Study on optimal extinction radius of water fog particles based on phase function and extinction factor [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30 (8): 2459-2463. (in Chinese)
- [13] Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua. Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer—Calculating Thermal Radiation [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [14] Yin Hong. Atmospheric Radiation Science [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993. (in Chinese)
- [15] Consalvi J L, Portiere B, Lorand J C, et al. On the use of gray assumption for modeling thermal radiation through water sprays [J]. *Numerical Heat Transfer Part A*, 2003, 44: 505-519.