

水包冰球包层粒子散射特性的研究

张晋源, 张成义, 郑改革

(南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 基于 Mie 散射和 Aden-Kerker 散射理论, 利用 Matlab 仿真模拟工具, 分析了水包冰球包层粒子在红外波段、太赫兹波段及毫米波段的散射特性。研究表明, 水包冰球包层粒子在这三个波段的散射能力与包层粒子的内外径比有很大关系, 水包冰球粒子的复折射率在三个波段随着频率的增大呈线性变化, 但在毫米波段的实部变化不大; 随着包层粒子的内外径比的不断增大, 其散射强度、散射参数在红外波段和太赫兹波段不断增大, 在毫米波段则减小。研究结论可对红外波、太赫兹和毫米波的气象应用以及相关检测技术提供参考。

关键词: 大气光学; 光散射; 包层粒子; Matlab 仿真

中图分类号: X831 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.017

Research on scattering characteristics of water-coated ice spheres particles

ZHANG Jin-yuan, ZHANG Cheng-yi, ZHENG Gai-ge

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In the ranges of infrared wave, terahertz wave and millimeter wave, the scattering characteristics of water-coated ice spheres particles are analyzed by Matlab software based on the theory of Mie scattering and Aden-Kerker scattering. Results show that the influence of the radius of the water-coated ice sphere particle on scattering ability is obvious; when increasing the frequency, the complex refractive index becomes higher, but the real part of the complex refractive index do not change in the millimeter wave range. In the ranges of infrared wave and terahertz wave, when increasing the ratios of inner and outer radius of water-coated ice sphere particle, scattering intensity and scattering parameters will also increase, but in the millimeter wave range they decreases. The results can provide a reference on the meteorological detection and related research.

Key words: atmospheric optics; optics scattering; coated particle; Matlab simulation

1 引言

近年来, 频繁出现的雾霾, 使大气户外检测的数据精度下降, 反馈的景物图像严重退化, 给道路的监测, 目标的跟踪与探测带来了极大的困难。因此, 对气溶胶雾霾颗粒散射特性的研究尤为重要。众所周知, 雾霾是由空气中的冰晶粒子, 吸湿性粒子在一定

湿度下表面附上一层水膜而形成的水包层粒子。大气中也有许多冰水混合云, 其中的冰晶粒子和液态水结合形成水膜包层粒子, 外层的水膜对粒子的散射特性有较大的影响, 如在大气检测和成像时, 太赫兹波雷达在雾霾颗粒和气溶胶粒子的散射影响下, 数据精度下降, 图像模糊; 在军事监测和截获方面,

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61203211) 资助。

作者简介: 张晋源 (1990 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光波的传输与散射等方面的研究。E-mail: 546624717@qq.com

通讯作者: 张成义 (1961 -), 博士, 教授, 主要从事光传输理论, 信息光学成像技术等方面工作。E-mail: dzcy1@163.com

收稿日期: 2015-08-31; **修订日期:** 2015-10-20

毫米波雷达受雾霾颗粒影响,成像质量变差,精度降低。因此,对水包冰层粒子的散射特性的研究是非常必要的。

高太长^[1]等人指出双层粒子衰减截面和散射截面与粒子尺度参数有关;刘蕾等人研究了大气双层球形颗粒的 Mie 散射计算方法,为降低实际运算的误差,选用了较合适的递推计算方法;Wang D S^[2]等研究了非球形多层粒子的散射特性;严赵军^[3]等人用离散纵标法对辐射传输进行了计算,得到了冰-水混合云在红外波段的反射函数和透射函数;Quirantes A^[4]等研究了随机取向的双层非球形粒子的散射特性,分析了多分散性对散射截面的影响。这些研究,大部分是针对包层粒子的微波和红外波散射,很少涉及太赫兹和毫米波波段的散射。

本文基于 Mie 散射^[5]和 Aden-Kerker 散射^[6]理论,研究水包冰球包层粒子(以下简称粒子)在红外波段,太赫兹波段^[7]和毫米波段的散射特性,通过 FDTD Solutions^[8]和 Matlab 仿真模拟,首先比较粒子在三个波段的复折射率特征,然后给出包层粒子的内外径比对不同波段的散射强度,散射效率,吸收效率,消光效率^[9]以及不对称因子的影响^[10]。

2 粒子的复折射率

基于 Mie 散射和 Aden-Kerker 散射理论,以横坐标表示频率,纵坐标表示复折射率虚部,取温度分别为 173 K、193 K、213 K、253 K。图 1 给出粒子在红外波段的 10 ~ 20 μm 的复折射率虚部随频率的变化特性,图 2 给出粒子在太赫兹波段的 35 ~ 40 μm 的复折射率虚部随频率的变化特性,图 3 给出粒子在毫米波的 1 ~ 10 mm 波段复折射率虚部随频率的变化特性,为了明确起见,将图形做了适当的放大处理。

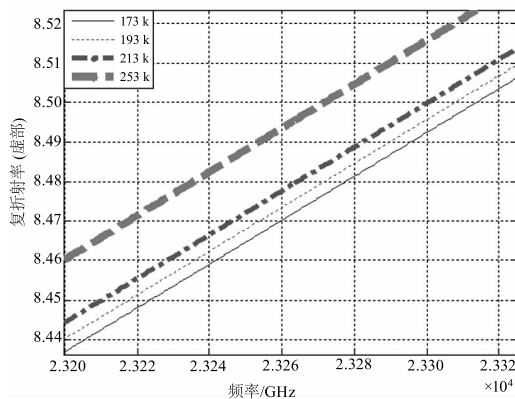


图1 红外波段的复折射率虚部

Fig. 1 The complex refractive index in infrared wave

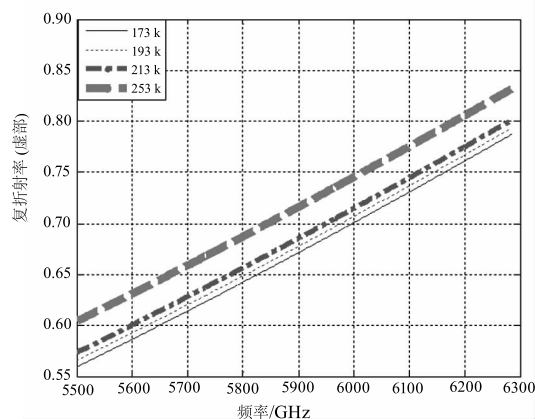


图2 太赫兹段的复折射率虚部

Fig. 2 The imaginary part of complex refractive index in THz wave

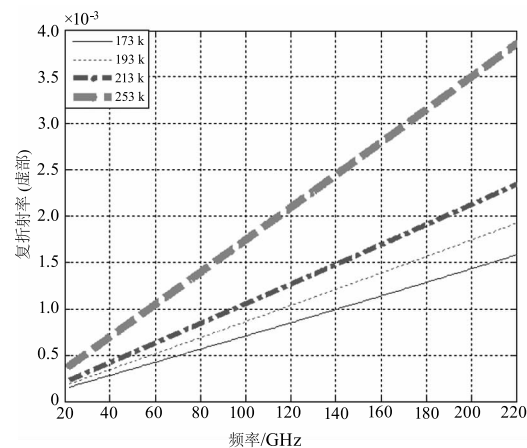


图3 毫米波段的复折射率虚部

Fig. 3 The imaginary part of complex refractive index in millimeter wave

由上述模拟结果可以看出,当温度一定时,粒子的复折射率虚部与频率成线性关系,而频率一定时,温度越高,虚部越大;随着频率增大,粒子的吸收不断增大;在毫米波段,随着温度的升高,复折射率虚部随频率的变化更快。用同样的方法可得出复折射率实部的变化规律,由于篇幅原因,此处从略。

3 粒子的散射强度

取粒子的粒径分别为 1.6 μm , 5.6 μm , 160 μm , 尺度参数为 1, 图 4 给出了在 10 μm 的红外波段,当粒子内外径比为 $a/b = \frac{1}{10}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1$ 的散射强度图。

由图 4 可知,粒子的内核和包层的复折射率分别为 $m_1 = 8.02 + 7.82i$, $m_2 = 1.67 + 0.025i$ 时,随着 a/b 的不断增大,包层粒子在红外波段的后向散射强度不断增加,当 $a/b = 2/3$ 时,前向、后向达到均衡,当 $a/b > 2/3$ 时,前向散射小于后向散射。

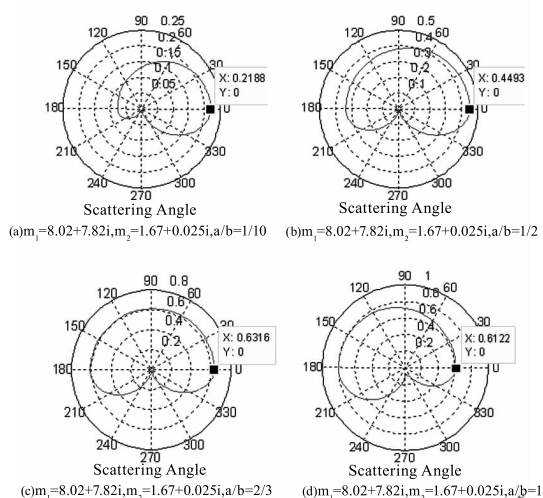


图4 红外波段的散射强度曲线

Fig. 4 The scattering intensity curves in infrared wave

图5给出了位于 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的太赫兹波段,当粒子内外径比为 $a/b = \frac{1}{10}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1$ 的散射强度图。

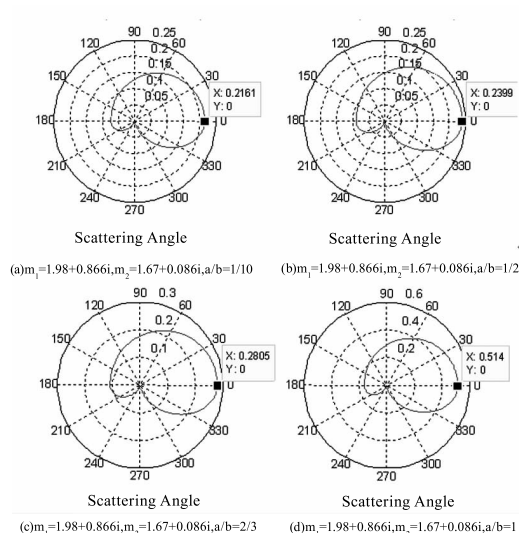


图5 太赫兹波段的散射强度曲线

Fig. 5 The scattering intensity curves in THz wave

由图5可以看出,当粒子的内核和包层的复折射率分别为 $m_1 = 1.98 + 0.866i$, $m_2 = 1.67 + 0.086i$ 时,位于散射角 0° 附近散射强度最大,随着内外径比(a/b)的不断增大,粒子在太赫兹波段的前向散射不断增加,而后向散射强度变化比较复杂,但总体趋势仍是增大;在内外径比(a/b)不断增大的过程中,前向散射始终大于后向散射。

图6研究了位于 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 的毫米波段,当粒子内外径比为 $a/b = \frac{1}{10}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1$ 的散射强度图。

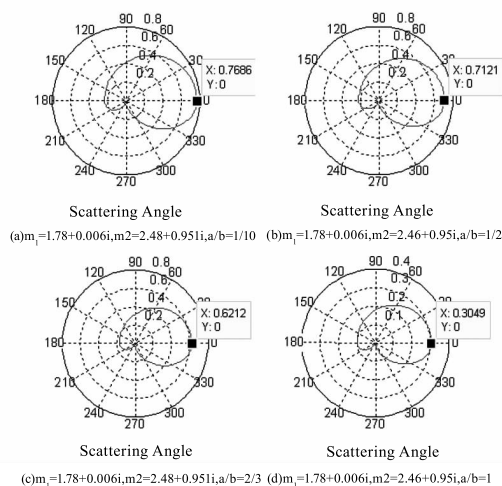


图6 在毫米波段的散射强度曲线

Fig. 6 The scattering intensity curves in millimeter wave

由图6可以看出,当粒子的内核和包层的复折射率分别为 $m_1 = 1.78 + 0.006i$, $m_2 = 2.46 + 0.951i$ 时,与前面两个波段不同,粒子在毫米波段的散射强度是随着 a/b 的不断增大而减小的,其后向散射也在减小;仍是前向散射大于后向散射。

由上可知,随着内外径比不断增加,包层粒子在红外波段的前向散射强度先变大后变小,后向散射逐渐变大;其在太赫兹波段的散射强度则不断变大;而粒子在毫米波段的散射强度则不断减小,在这三个波段粒子的前向散射基本都大于后向散射。

4 粒子的其他散射参数

仍取粒子的粒径分别为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$, $5.6\text{ }\mu\text{m}$, $160\text{ }\mu\text{m}$,尺度参数为1,图7给出了在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的红外波段,内外径的比位于 $0 \sim 1$ 区间的粒子的衰减效率因子(Q_{ext})、散射效率因子(Q_{sca})、吸收效率因子(Q_{abs})、后向散射系数(Q_b)、不对称因子($\cos\theta$)等参数随内外径比(a/b)的变化曲线。

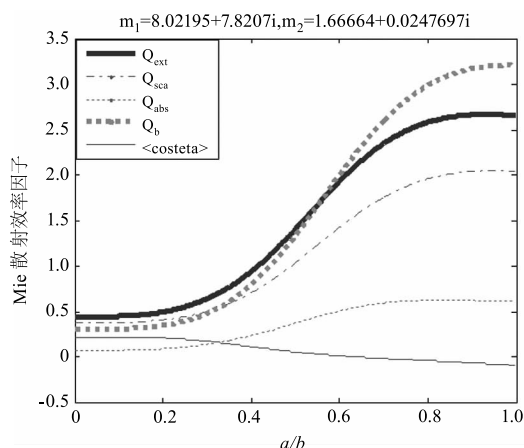


图7 红外波段的散射参数

Fig. 7 Scattering parameters in infrared wave

由图7可以看出,在 $a/b < 0.35$ 时,上述参量随着 a/b 的增加基本不变;当 $0.35 < a/b < 0.8$ 时, $Q_{\text{ext}}, Q_{\text{sca}}, Q_{\text{b}}$ 都是迅速增加的, Q_{abs} 则缓慢增加,而 $\langle \cos\theta \rangle$ 则是缓慢减小。在 $0.8 < a/b < 1$ 区间,衰减、吸收、后向散射系数、散射效率因子基本达到饱和,而不对称因子则仍缓慢减小。这样,可预知,在 $a/b < 0.35$ 时,粒子相态的变化对其散射影响不大,散射参数特性和纯水球接近,在 $0.35 < a/b < 0.8$ 区间,相态的变化使其散射参数不断增加,在 $a/b > 0.8$ 时,其散射参数特性和纯冰球接近。

图8同样给出了在 $35 \mu\text{m}$ 的太赫兹波段,内外径的比位于 $0 < a/b < 1$ 区间内的粒子散射参数随内外径比(a/b)增加而变化的曲线。

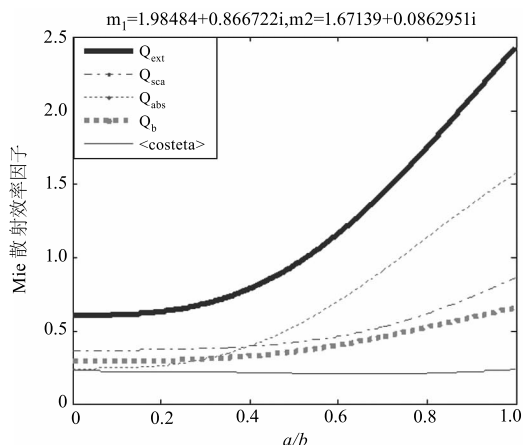


图8 太赫兹波段的散射参数

Fig. 8 Scattering parameters in THZ wave

由图8可以看出,在 $0 < a/b < 0.4$ 时,粒子散射参数变化不大,但是在 $0.4 < a/b < 1$ 时,衰减、吸收效率因子迅速增加,这说明在包层粒子的 $0.4 < a/b < 1$ 时对太赫兹波吸收和衰减不断增大,在相态变为冰时达到最大值,而在 $0 < a/b < 0.4$ 时,粒子的相态变化对其散射影响不大,可以看成纯水球。散射效率因子和后向散射因子则在 a/b 大于0.5时开始增加,说明包层粒子对太赫兹波的散射是在冰水比例为1:1时才开始有明显的增加。

图9给出了在 $1000 \mu\text{m}$ 的毫米波段,内外径的比位于 $0 < a/b < 1$ 区间的粒子散射参数随内外径比(a/b)增加而变化的曲线。

由图9可知在 $0 < a/b < 0.25$ 之前粒子的散射参数都是基本不变的,但是在 $a/b > 0.25$ 后,衰减,

吸收效率因子开始减小,吸收效率因子直至减小到0。在 $a/b > 0.4$ 之后,散射系数和后向散射系数开始减小,而不对称因子基本没有变化。由此,我们可以得出在 $a/b < 0.25$ 时,粒子相态的变化对其散射影响不大,可以当纯水球研究,但当 $a/b > 0.25$ 时,其散射参数减小,相态的变化开始影响粒子的散射,使粒子在毫米波段的散射参数减小,吸收系数甚至趋于0,直至其相态变成为冰态。

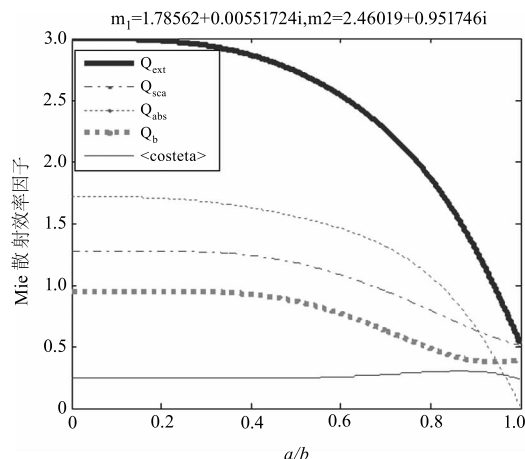


图9 毫米波段的散射参数

Fig. 9 Scattering parameters in millimeter wave

5 结论

本文根据 Mie 散射和 Aden-Kerker 散射理论,用 FDTD Solutions 和 Matlab 仿真模拟了水包冰球包层粒子在红外波段、太赫兹波段以及毫米波段的散射特性,结果研究表明:

(1) 当温度一定时,粒子的复折射率虚部与频率成线性关系,而频率一定时,温度越高,虚部越大;随着频率增大,粒子的吸收不断增大;在毫米波段,随着温度的升高,复折射率虚部随频率的变化更快。

(2) 随着内外径比不断增加,包层粒子在红外波段的前向散射强度先变大后变小,后向散射逐渐变大;其在太赫兹波段的散射强度则不断变大;而粒子在毫米波段的散射强度则不断减小,在这三个波段粒子的前向散射基本都大于后向散射。

(3) 水包冰球包层粒子在三个波段的散射参数在其相态变化初期改变较小,可以当成水球来研究。随着冰比例的不断增加,其散射参数在红外波段和太赫兹波段迅速变大,但是在毫米波段则迅速减小。总体来说,水包冰球包层粒子的相态变化对其散射特性还是有很大影响的,相较于纯冰球和纯水球来

说,还是有显著差异的。

参考文献:

- [1] GAO Taichang, LIU Xichuan, LIU Lei, et al. Discussion on electromagnetic scattering characteristics of ice-water two-phases particles in atmosphere [J]. Progress In Geophysics, 2013, 28(1): 0071 - 0082. (in Chinese)
高太长, 刘西川, 刘磊, 等. 大气中冰水两相粒子的电磁散射特性研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 0071 - 0082.
- [2] Wang D S, Barber P W. Scattering by inhomogeneous nonspherical objects [J]. Applied Optics, 1979, 18(8): 1190 - 1197.
- [3] YAN Zhaojun, HAN Fangfang, YI Fan, et al. Study on Ice-water mixed cloud radiation properties [J]. Infrared Technology, 2013, 35(1): 56 - 60. (in Chinese)
严赵军, 韩芳芳, 易凡, 等. 冰水混合云红外辐射传输特性研究 [J]. 红外技术, 2013, 35(1): 56 - 60.
- [4] Quirantes A, Delgado AV. Scattering cross sections of randomly oriented spheroids [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 70(3): 261 - 272.
- [5] ZHOU Xiuyi, TAO Shanchang, YAO Keya. Advanced atmospheric physics [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991. (in Chinese)
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [6] Aden A L, Kerker M. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres [J]. Appl Phys, 1951, 22: 1242 - 1246.
- [7] ZHANG Chengyi, WEI Banghai, ZHENG Gaige, et al. Study on the characteristics of the THz wave scattering in the troposphere [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2): 204 - 208. (in Chinese)
张成义, 魏邦海, 郑改革, 等. 对流层太赫兹波散射特性研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 204 - 208.
- [8] Liebe H J, Hufford G A, Manabe T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1991, 12(7): 659 - 667.
- [9] LI Ziyi, WANG Xinke, ZHANG Ping, et al. Simulation of sandstorm conditions of terahertz radiation transmission of [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 921 - 924. (in Chinese)
李字晔, 王新柯, 张平, 等. 模拟沙尘暴条件下的太赫兹辐射传输研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 921 - 924.
- [10] ZHANG Heyong, REN Deming, ZHAO Weijiang, et al. Research of scattering phase function of spheric particle under polarized state [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(9): 70 - 75. (in Chinese)
张合勇, 任德明, 赵卫疆, 等. 偏振状态下球形粒子的散射相位函数研究 [J]. 光电工程, 2008, 35(9): 70 - 75.