

文章编号: 1001-5078(2024)03-0346-09

· 激光器技术 ·

太赫兹波段下切比雪夫粒子散射特性研究

徐 怡^{1,3}, 王金虎^{1,2,4}, 金文雨^{1,2}, 丁江乔^{1,3}

- (1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 应急管理学院, 江苏 南京 210044; 3. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;
4. 中国科学院 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为探究太赫兹波段下沙尘粒子的散射特性, 本文采用离散偶极子近似方法对不同切比雪夫模型 (Chebyshev) 的沙尘粒子散射特性进行研究。分别计算 1.5 THz、2.524 THz、3.437 THz 频率下的切比雪夫粒子不同物理性质如粒子尺寸、粒子形状, 对其散射特性如后向散射截面 (C_{bak})、衰减截面 (C_{ext})、散射截面 (C_{sca})、单次散射反照率 (ω) 等的影响。结果表明: 同一波纹参数下, 1.5 THz 时粒子尺寸对 C_{ext} 和 C_{sca} 的影响较大; 2.524 THz 时粒子尺寸变化对 C_{bak} 影响较大; 同一频率下, 波形参数为 2~5 的粒子尺寸变化对各光学截面的影响较其他形状有明显不同; 三个频率下, 各波纹参数的粒子在有效半径大于 $10\mu\text{m}$ 时单次散射反照率都大于 0.95。

关键词: 切比雪夫粒子; 离散偶极子近似方法; 散射特性; 波纹参数

中图分类号: P401; O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.004

Study on the scattering characteristics of Chebyshev particles in the terahertz band

XU Yi^{1,3}, WANG Jing-hu^{1,2,4}, JIN Wen-yu^{1,2}, DING Jiang-qiao^{1,3}

- (1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Emergency Management, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China;
3. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China;
4. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, the discrete dipole approximation method is adopted to study the scattering characteristics of dust particles in different Chebyshev models in order to investigate the scattering characteristics of dust particles in the terahertz band. The effects of different physical properties such as particle size and particle shape on their scattering characteristics including backscatter section (C_{bak}), attenuation section (C_{ext}), scattering section (C_{sca}), single-scatter albedo (ω) for the frequencies of 1.5 THz, 2.524 THz, and 3.437 THz are calculated, respectively. The results show that under the same ripple parameters, the particle size at 1.5 THz has a greater effect on C_{ext} and C_{sca} ; the parti-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41905026); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20170945); 南京信息工程大学人才启动基金资助项目 (No. 2016t028); 中国博士后科学基金第 63 批面上资助项目 (No. 2018M631554); 江苏省 333 工程高层次人才培养资助 (第三层次) 资助。

作者简介: 徐 怡 (1997 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为大气粒子散射。E-mail: 1605517669@qq.com

通讯作者: 王金虎 (1987 -), 男, 博士, 教授, 研究方向为粒子散射理论计算与测量以及微波遥感。E-mail: goldtigerwang@nuist.edu.cn

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-24

cle size changes at 2.524 THz has a larger effect on C_{bak} . Under the same frequency, the particle size change of the waveform parameter of 2~5 has a significantly different effect on each optical cross-section compared with the other shapes. Under the three frequencies, particles of each ripple parameter with the effective radius larger than 10 μm when the single scattering albedo is greater than 0.95.

Keywords: Chebyshev particles; discrete dipole approximation method; scattering characteristics; ripple parameters

1 引言

沙尘气溶胶能通过吸收、散射等直接或间接效应对大气辐射平衡和气候产生显著影响^[1-3];对沙尘气溶胶单散射特性的研究,将提高卫星观测和反演的准确性^[4-5],并成为量化沙尘气溶胶辐射强迫特性的基础。由于太赫兹波的波长与大气气溶胶中沙尘粒子大小相近,也可通过对沙尘粒子散射特性分析来进一步探究太赫兹波在大气中的传输特性^[6]。以往沙尘粒子的光散射研究中,大多以球形,椭球形等作为粒子模型^[7],但实际生活中的沙尘粒子大多表面会呈现小规模的粗糙态,因此可用切比雪夫(Chebyshev)粒子作为沙尘粒子模型进行分析。

从1908年,单个、均匀的球形粒子散射的解析解被德国物理学家 Gustav Mie^[8]得出以来,有关粒子散射的研究不断取得重大进展,并且随着计算电磁方法能力的提高,针对 Chebyshev 粒子的研究也越来越多。Mishchenko^[9-10]研究了更接近实际雨滴形状的 Chebyshev 粒子和广义 Chebyshev 粒子的衰减特性;紧接着 Warren J. Wiscombe 和 Alberto Mugnai 分析了 Chebyshev 粒子的角散射模式的方法^[11]。王东琴等人对碳和硫酸铵质的 Chebyshev 形气溶胶的散射相函数变化进行了计算^[12];王旭等人在此前基础上,对碳和硫酸铵质的 Chebyshev 形气溶胶与平面波作用的消光效率因子和不对称因子随粒子尺寸参数变化进行仿真分析^[13];同年徐强等人对 Chebyshev 粒子的散射、消光及吸收效率因子随尺度参数的变化规律进行了分析^[14];胡碧君对椭球形粒子、柱状粒子、Chebyshev 粒子的偏振特性进行研究^[15];赵太飞等人对切比雪夫粒子的紫外光散射偏振特性研究进行仿真^[16];刘丽和 Michael I Mishchenko 在激光雷达波长下对 Chebyshev 烟霾粒子光谱依赖线性去极化和激光雷达比进行了分析^[17]。因此 Chebyshev 粒子的研究一直是众多学者关注的热点,而针对不同形状的切比雪夫沙尘粒子在太赫兹频段下的散射特性缺乏研究讨论。为此,

本文选用太赫兹波在大气环境传输时的三个典型的大气窗口频率(1.5 THz、2.524 THz、3.437 THz),利用 DDA 算法完成不同频率,不同波纹参数以及尺寸大小对切比雪夫沙尘粒子散射特性的影响。

2 理论介绍

2.1 衰减截面、散射截面、吸收截面以及单次散射反照率

衰减截面 C_{ext} 、散射截面 C_{sca} 和吸收截面 C_{abs} 可以表示为^[18]:

$$C_{\text{ext}} = \frac{4\pi}{k} \text{Im} \left[\frac{\bar{E}_0}{E_0} \cdot \bar{F}(\hat{n}^{\text{sca}}, \hat{n}^{\text{inc}}) \right] \quad (1)$$

$$C_{\text{sca}} = \int_0^{4\pi} \left| \bar{F}(\hat{n}^{\text{sca}}, \hat{n}^{\text{inc}}) \cdot \frac{\bar{E}_0}{E_0} \right|^2 d\Omega \quad (2)$$

$$C_{\text{abs}} = C_{\text{ext}} - C_{\text{sca}} \quad (3)$$

其中, $d\Omega$ 为微元立体角, $\left| \bar{F}(\hat{n}^{\text{sca}}, \hat{n}^{\text{inc}}) \cdot \frac{\bar{E}_0}{E_0} \right|$ 为

微分散射截面, \hat{n}^{sca} 表示方向单位立体角内的散射能量分布。通常定义相函数表示散射能量的角度分布:

$$\Phi = \frac{1}{C_{\text{ext}}} \left| \bar{F}(\hat{n}^{\text{sca}}, \hat{n}^{\text{inc}}) \cdot \frac{\bar{E}_0}{E_0} \right| \quad (4)$$

表示从 \hat{n}^{inc} 方向单位立体角入射的单位强度的辐射能量被散射到 \hat{n}^{sca} 方向单位立体角内的能量大小。

单次散射反照率:

$$\omega = \frac{C_{\text{sca}}}{C_{\text{ext}}} \leq 1 \quad (5)$$

单次散射反照率的意义上是电磁波被散射而不是吸收的概率^[18],因此,当 $\omega = 1$ 时表示电磁波全部被粒子散射^[19]。

2.2 离散偶极子近似法(DDA)

Purcell 和 Pennypacker 于 1973 年将 DDA 这种数值近似方法提出,随着 Draine 等人的不断努力和改进,它的功能得到极大拓宽。该算法能够有效地处理复杂的物理特性(如任意形状、非均匀和各向异性)粒子的散射问题^[20]。DDA 算法旨在通过构

建有限个离散的、相互作用的小偶极子阵列来模拟现实中粒子,且两者要有相同的离散关系,以便将真实物体的特性与计算机仿真结果进行比较,以获得更精确的结果。

假设某一粒子在 DDA 方法中被视为偶极子阵列,而一个偶极子代表一个立方体的散射特征,即粒子是由 N 个离散的小立方体组成的。进行理论计算时,小立方体的大小和入射波的波长必须满足以下不等式:

$$|m| kd \leq 1 \quad (6)$$

式中, m 代表粒子的复折射指数; $k = (2\pi/\gamma)$ 为入射波波数; d 则是指小立方体的边长,又称为偶极子间距。当 $|m| kd$ 的值与 1 相比越小时,理论计算结果就越准确。

目标粒子的体积可由下式计算:

$$V = \frac{4\pi R_e^3}{3} = Nd^3 \quad (7)$$

其中, R_e 为粒子的等效半径,球形粒子的半径即为等效半径,而非球形粒子的等效半径是由同体积球形粒子的半径决定。在计算中偶极子个数有要求如下:

$$N \geq \frac{4}{3}\pi(kR_e)^3 |m|^3 \quad (8)$$

根据上述公式,当粒子尺寸保持不变的情况下,随着偶极子间距的减少,偶极子的数量也会增加,从而使得计算结果更加准确,但同时也会增加计算时间。

3 切比雪夫粒子

3.1 切比雪夫粒子模型构建

切比雪夫粒子是一种半径按 n 阶切比雪夫多项式变形的球形物体,它们的形变可以通过以下公式来描述:

$$r(\theta) = r_0 [1 + \xi \cos(n\theta)] \quad (9)$$

式中, r_0 是原球体半径; ξ 代表形变参数; n 是切比雪夫多项式阶数。只有 n 大于或等于 2 时,切比雪夫粒子表面才会产生一些凹陷,并且伴随 n 的线性增长,粒子的外围也会产生一些细微的波纹,因此 n 也被称之为波纹参数;对于粒子周边波纹状粗糙表面的形成是由形变参数 ξ 绝对值的增加而导致。

针对形变参数 $\xi = 0.2$ (下文若无特殊说明形变参数均为 0.2),波纹参数分别为 $n = 2 \sim 10$ 的切

比雪夫粒子进行仿真。粒子模型图如图 1(a) 所示,粒子中心处于坐标系原点,旋转轴为 Z 轴,入射光从 X 轴正向射入。将该切比雪夫粒子进行网格剖分,偶极子个数 N 均取在 10000 左右,则该切比雪夫粒子的离散偶极子坐标阵列如图 1(b) 所示。

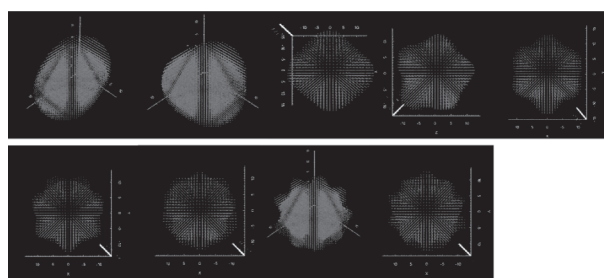
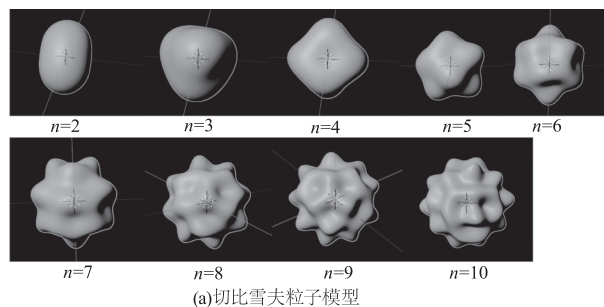


图 1 不同波纹参数的切比雪夫粒子位置示意图
Fig. 1 Schematic representation of the Chebyshev particle positions with different ripple parameters

图 1(a) 中,粒子模型分别代表波纹参数为 2 ~ 10 的切比雪夫粒子。图 1(b) 中,分别从主视图、侧视图、俯视图的角度来展现不同波纹参数下的偶极子排布。模型图中的坐标轴即 DDA 中的目标框架,给出的粒子模型在 DDA 实验室坐标系中 $a_1 = (1, 0, 0)$; $a_2 = (0, 1, 0)$, 即 a_1 和 x 轴重合, a_2 和 y 轴重合。

3.2 沙尘粒子的几何特性和介电特性

由于沙尘粒子显著的非球形几何特性,其形状可从相对规则到高度不规则,因此在光散射计算中可选用切比雪夫粒子进行近似仿真分析。对于满足 DDA 算法条件下(见式(6)),以及参考毛乌素沙漠、塔克拉玛干沙漠和甘肃沙的沙尘在距地面 18 ~ 20 cm 处的沙尘粒径拟合数据^[21],选取沙尘粒径为 0.01 ~ 100 μm 的粒子作为模型。在 1 THz ~ 4 THz 太赫兹波段,单个沙尘粒子的散射特性主要由粒子的尺寸参数及形状决定^[22]。因此本文选用 1.5 THz、2.524 THz 和 3.437 THz 这三个典型大气传输窗

口为例对切比雪夫沙尘粒子的散射特性进行分析。此时沙尘性粒子的复折射率拟合值如表 1 所示^[22]。

表 1 大气窗口下沙尘性粒子的复折射率拟合值

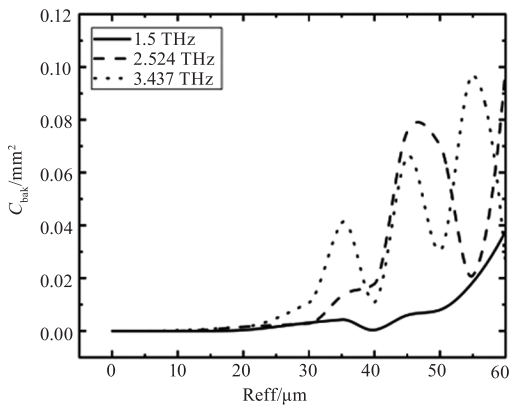
Tab. 1 List of complex refractive index of sand dust corresponds to the atmosphere window in the terahertzband obtained using cubic spline data interpolation

频率/THz	复折射率/m
1.5	2.3008 + 0.00133i
2.524	2.3179 + 0.0014i
3.437	2.3366 + 0.0032i

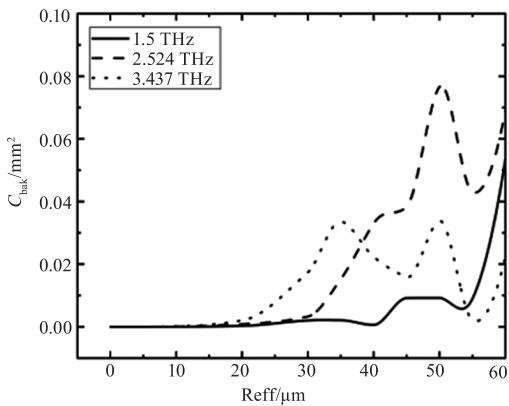
4 仿真结果分析

4.1 同形状不同频率

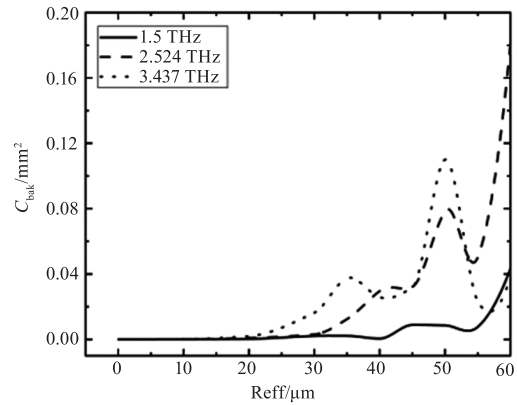
如图 2(a) ~ (c) 分别对应波纹参数 n 为 2、5、8 的切比雪夫粒子后向散射截面对比图; R_{eff} (μm) 为粒子有效半径; C_{bak} (mm^2) 为后向散射截面。图 3 和 4 分别对应波纹参数 n 为 3、6、9 的衰减截面 C_{ext} (mm^2) 和 n 为 4、7、10 的散射截面 C_{sca} (mm^2) 波形图。



(a) 波纹参数为 2 时



(b) 波纹参数为 5 时



(c) 波纹参数为 8 时

图 2 三种波纹参数下的后向散射截面

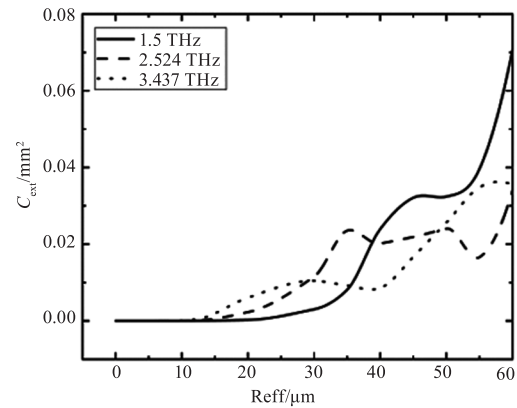
Fig. 2 Backscatter cross-section under three ripple parameters

4.1.1 后向散射截面

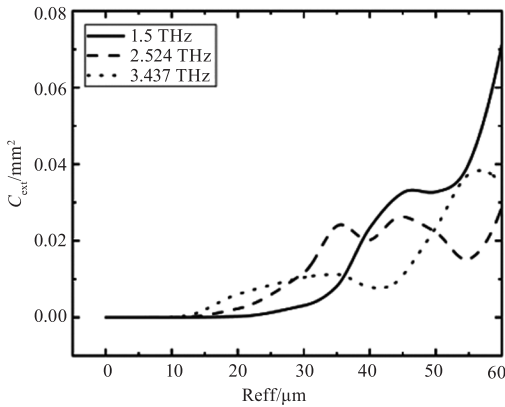
图 2 的结果表明, $n = 2, 5, 8$ 的切比雪夫沙尘粒子的后向散射截面存在一个相同规律, 都是随着有效半径的增大呈波动增大趋势, 且当波纹参数为 2 时, 振荡较密集; 有效半径小于 $20 \mu\text{m}$ 左右时, 这三种粒子在三个频率下的后向散射截面高度重合; 但同一波纹参数在不同频率的差异比较显著, 整体上后向散射截面在 2.524 THz 时的数值及增长幅度较大, 可见, 2.524 THz 时后向散射截面对粒子尺寸变化较为敏感。

4.1.2 衰减截面

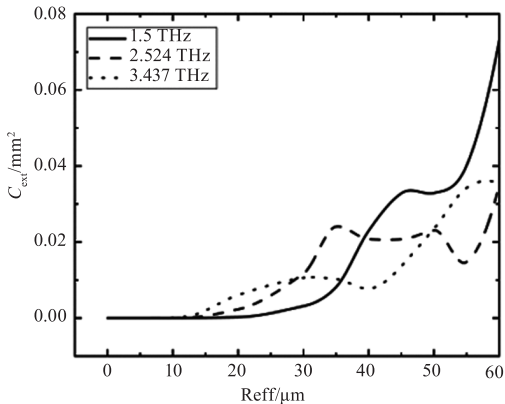
图 3 的结果表明, $n = 3, 6, 9$ 的切比雪夫沙尘粒子的 C_{ext} 同样随着有效半径的增大呈现增长趋势且三种粒子的波形和数值均十分相似; 在等效半径小于 $12 \mu\text{m}$ 左右时, 三个频率下的 C_{ext} 在数值上几乎重合; 但同一形状下, 不同频率时的增幅有着明显差异, 发现在 1.5 THz 时 C_{ext} 对粒子尺寸变化较为敏感。



(a) 波纹参数为 3 时



(b)波形参数为6时



(c)波形参数为9时

图3 三种波纹参数下的衰减截面

Fig. 3 Attenuation cross section under the three ripple parameters

4.1.3 散射截面

图4的结果表明, $n = 4, 7, 10$ 的切比雪夫沙尘粒子的 C_{sca} 整体波形与 C_{ext} 的十分相似, 可初步说明切比雪夫沙尘粒子的吸收作用很弱; 在等效半径小于 $12 \mu\text{m}$ 左右时, 三个频率下的 C_{sca} 在数值上几乎重合; 同时依然是 1.5 THz 频率下的敏感度最高。

4.2 同频率不同形状

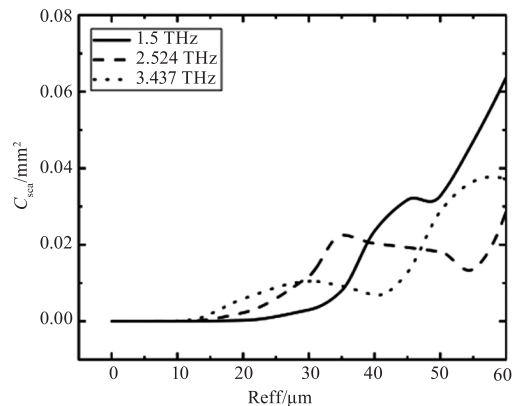
为探讨形状对切比雪夫沙尘粒子散射特性的影响, 分别在 1.5 THz 、 2.524 THz 和 3.437 THz 下针对波纹参数为 $1 \sim 10$ 的切比雪夫沙尘粒子的三个光学截面以及单次散射反照率随有效半径的变化进行计算分析。

4.2.1 三个光学截面

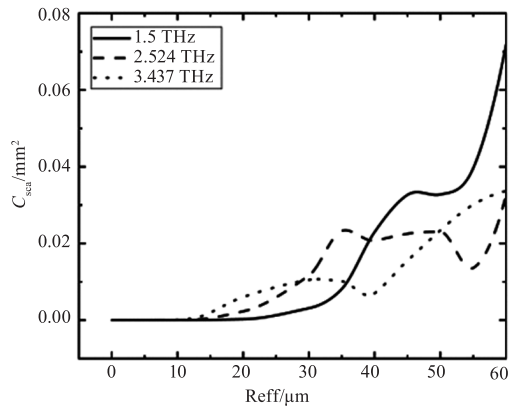
图5为 1.5 THz 、 2.524 THz 和 3.437 THz 频率下, 对应的波纹参数 n 为 $1 \sim 10$ 的切比雪夫粒子的后向散射截面 C_{bak} 。图7~9为对应的衰减截面 C_{ext} 、散射截面 C_{sca} 、单次散射反照率 ω 。

由图5、6和7的图(a)可知, 当频率为 1.5 THz 时, C_{ext} 以及 C_{sca} 都呈现先增大后减小再增大的波动趋势, 在小于 $20 \mu\text{m}$ 左右时, 数值上几乎相同。且

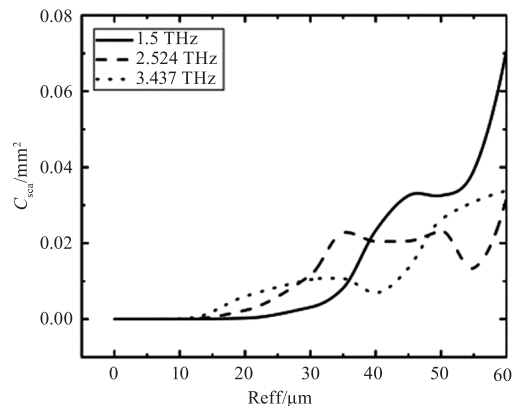
在 $80 \mu\text{m}$ 左右时, 对应波纹参数为2的 C_{ext} 以及 C_{sca} 最大值 0.108 , 但并非其他9个形状的波峰处, 可见波纹参数为2的切比雪夫粒子在 C_{ext} 以及 C_{sca} 的变化与其他形状的变化规律不同; 对于 C_{bak} , 各形状的波形变化整体呈现陡增趋势, 且小于 $25 \mu\text{m}$ 左右时波形完全重合, 在波纹参数为2和4的这两个切比雪夫粒子的波形与其他形状的变化有差异, 可见这两个形状的切比雪夫沙尘粒子的形状变化对 1.5 THz 下的 C_{bak} 有着特别的影响。



(a)波形参数为4时



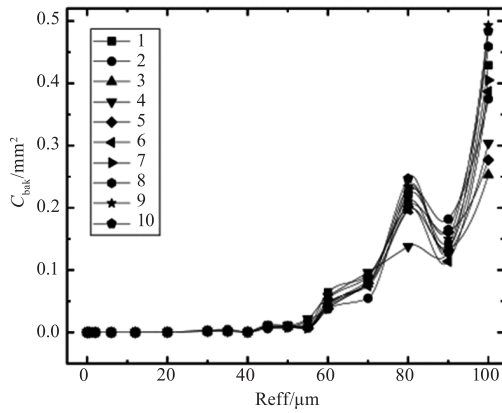
(b)波形参数为7时



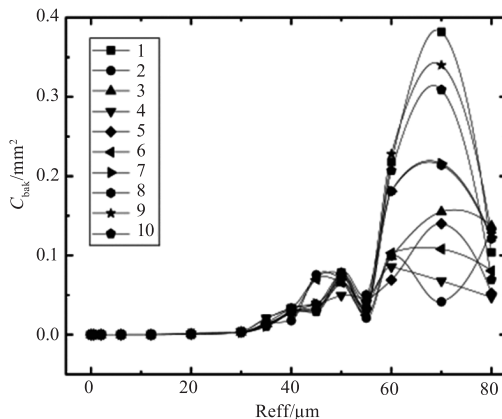
(c)波形参数为10时

图4 三种波纹参数下的散射截面

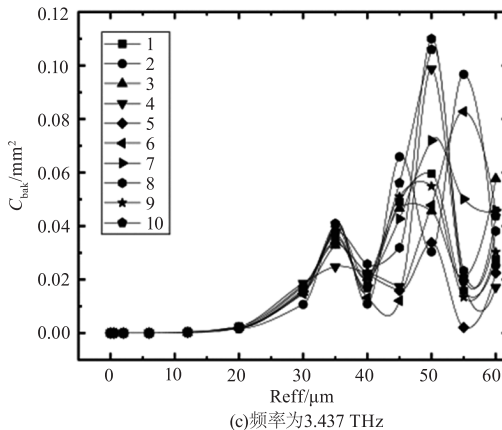
Fig. 4 Scatter cross-section under the three ripple parameters



(a)频率为1.5 THz



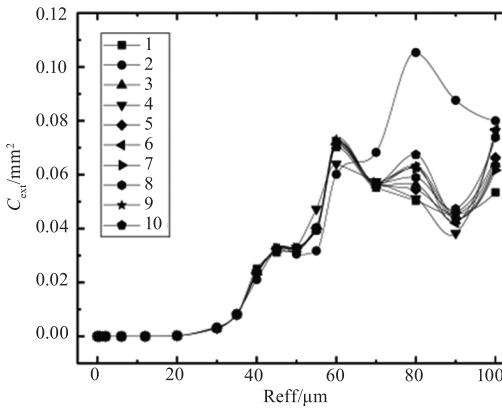
(b)频率为2.524 THz



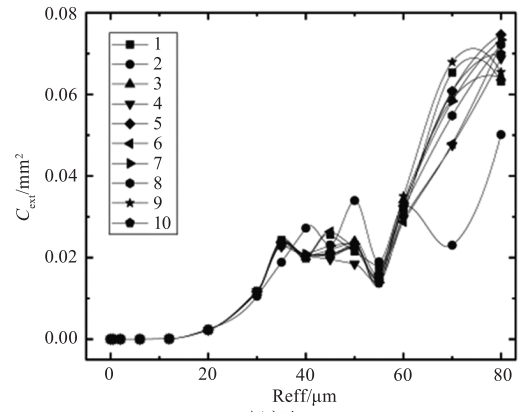
(c)频率为3.437 THz

图5 三个频率下的后向散射截面

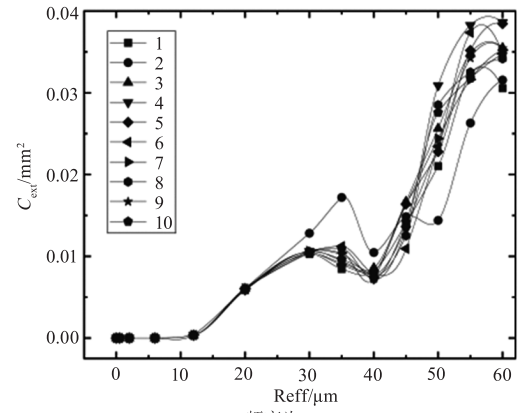
Fig. 5 Backscatter cross-section at three frequencies



(a)频率为1.5 THz



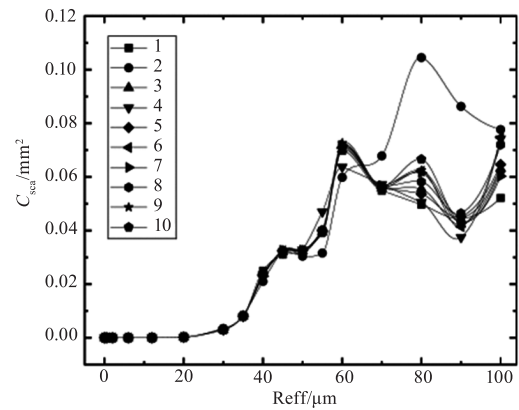
(b)频率为2.524 THz



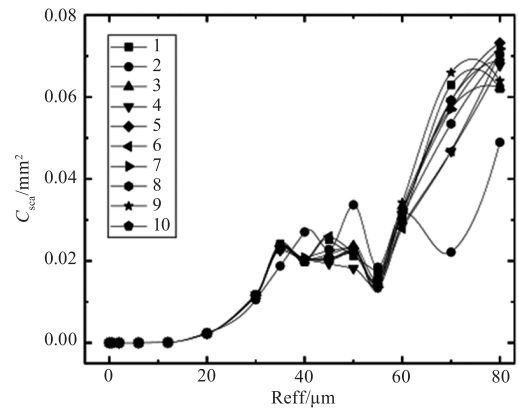
(c)频率为3.437 THz

图6 三个频率下的衰减截面

Fig. 6 Attenuation section at three frequencies



(a)频率为1.5 THz



(b)频率为2.524 THz

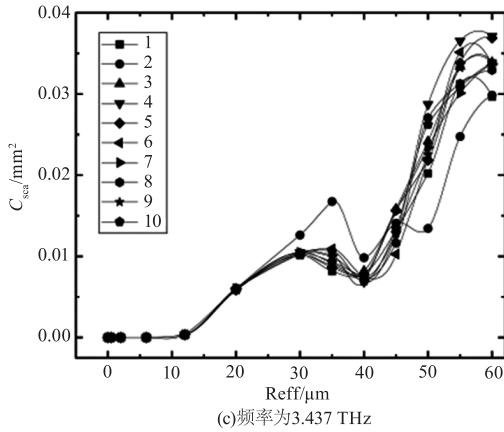


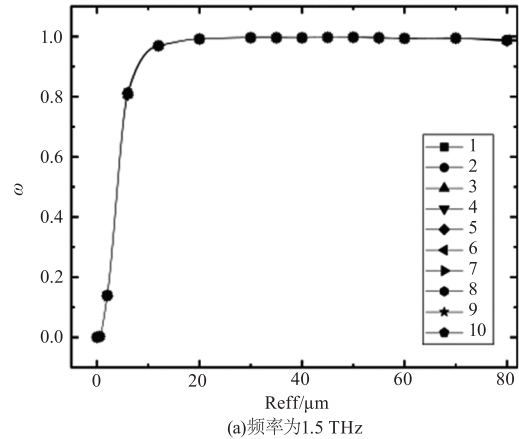
图7 三个频率下的散射截面

Fig. 7 Scattering cross-section at three frequencies

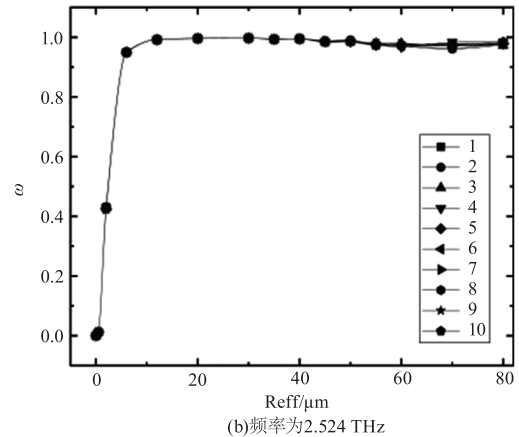
对比图6和7的(b)、(c)可知,在2.524 THz以及3.437 THz时,波形整体均呈现随有效半径增大而增大的趋势,在有效半径小于20 μm 左右时高度重合;且形状的改变对切比雪夫沙尘粒子的 C_{ext} 以及 C_{sca} 的影响不大,即除波纹参数为2的粒子外其他不同波纹参数粒子所对应的波形十分相似,可见波纹参数为2的粒子需要特别研究。对于图5的(b)、(c)而言在2.524 THz以及3.437 THz时,其波纹参数的改变对 C_{bak} 的影响较大,均在有效半径小于20 μm 左右时重合,波形变化趋势虽大致相似,但数值差异较大。在2.524 THz时,波形呈现整体先增大再减小的波动趋势,且波纹参数为2~5的粒子波动幅度较小;在3.437 THz时,各形状的波形均随粒子等效半径的增大开始振荡且振荡相对密集,波形差异也更明显。由此说明波纹参数为2~5的切比雪夫沙尘粒子形状对散射特性的影响。

4.2.2 单次散射反照率

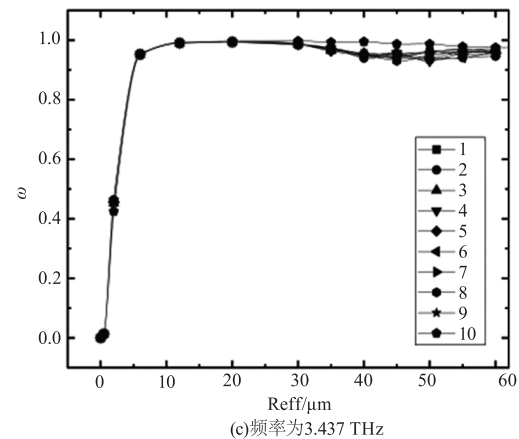
由消光、散射和吸收三者间满足的代数关系式(见式(3)),可得出吸收截面数值,同时由于衰减截面和吸收截面的比值可以得出单次散射反照率 ω 的结果,如图8。在三个频率下均呈现先骤增再趋于平缓,并在1.5 THz和2.524 THz时最终趋于常数0.98左右,在3.437 THz时趋于0.95左右,切比雪夫沙尘粒子对太赫兹波散射反照率都比较高($\omega > 0.95$),说明散射远强于吸收,消光主要是散射作用导致的结果。且当频率越高 ω 随等效半径增大而波动越明显,不同波纹参数之间的波形差异也逐渐明显。在三个频率下 ω 的第一个峰值分别出现在有效半径为12 μm ,8 μm ,以及6 μm 附近,所以 ω 峰值所对应的有效半径与频率成反比。



(a)频率为1.5 THz



(b)频率为2.524 THz



(c)频率为3.437 THz

图8 三个频率下的单次散射反照率

Fig. 8 Single scatter albedo at three frequencies

5 结论

由于沙尘暴对太赫兹波的传输衰减与单个沙尘粒子的散射特性有关,且沙尘粒子具有特殊的几何特性,因此针对切比雪夫沙尘粒子在太赫兹波段下的散射特性的研究具有十分重要的意义。本文基于不同波纹参数的切比雪夫粒子,运用DDA算法计算了1.5 THz、2.524 THz和3.437 THz频率下的切比雪夫沙尘粒子的散射特性。所得出的结论如下:

(1)在同一波纹参数下后向散射截面、衰减截

面、散射截面均呈现随有效半径增大而增大的趋势。在三个频率下后向散射截面会在有效半径小于 $20\ \mu\text{m}$ 左右时出现波形上的重合,衰减截面、散射截面的重合区域发生在小于 $12\ \mu\text{m}$ 左右时,由此可见粒子尺寸参数较小时,在这三个太赫兹频段下,对切比雪夫沙尘粒子的后向散射截面、衰减截面、散射截面影响较小。1.5 THz 时衰减截面、散射截面对粒子尺寸变化较敏感;2.524 THz 时后向散射截面对粒子尺寸变化较敏感。

(2)在同一频段下,波纹参数为 $2\sim 5$ 的切比雪夫沙尘粒子的波形与其他波纹参数的波形有着较为明显的差异,且波纹参数越大波形的差异性越小。由此可见,波纹参数对切比雪夫沙尘粒子散射特性存在影响,且特别注意波纹参数为 2 时的切比雪夫沙尘粒子的散射特性变化,因为它的差异最大。

(3)而对单次散射反照率而言,在三个频率下的数值都很高,接近于 1,再次说明了,沙尘粒子的消光主要是散射作用导致。且当有效半径小于 $10\ \mu\text{m}$ 左右左右时, ω 随粒子半径增大而陡增。在频率越高且粒子尺寸越大时,不同形状的切比雪夫沙尘粒子间的差异也逐渐显现。

本文研究结果对太赫兹波技术在大气环境监测、风沙探测等相关领域中的应用均有一定参考价值。

参考文献:

- [1] Tian L. Research on the direct radiation effect of dust aerosol by satellite remote sensing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021. (in Chinese)
田林. 卫星遥感沙尘气溶胶直接辐射效应研究[D]. 南京信息工程大学, 2021.
- [2] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D16): 18015 - 18027.
- [3] Yi B, Hsu CN, Yang P, et al. Radiative transfer simulation of dust-like aerosols: uncertainties from particle shape and refractive index[J]. Journal of Aerosol Science, 2011, 42: 631 - 644.
- [4] Huang J, Wang T, Wang W, et al. Climate effects of dust aerosols over east asian arid and semiarid regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119: 11398 - 11416.
- [5] Xu F, van Harten G, Diner D J, et al. Coupled retrieval of aerosol properties and land surface reflection using the airborne multiangle spectro polarimetric imager[J]. Journal of Geophysical Research, 2017, 122(13): 7004 - 7026.
- [6] Xu Wenzong, Zhong Kai, Mei Jialin, et al. THz wave attenuation characteristics in sand and dust[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 523 - 527. (in Chinese)
许文忠, 钟凯, 梅嘉林, 等. 太赫兹波在沙尘中衰减特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 523 - 527.
- [7] Ruan L M, Qi H, Wang S G, et al. Analysis of the radiative properties of non-spherical particles by discrete dipole approximation method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 413 - 418. (in Chinese)
阮立明, 齐宏, 王圣刚. 采用 DDA 方法分析非球形粒子辐射特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 413 - 418.
- [8] Zhao K H, Zhao X H. Optics (Volume 2) [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 251 ~ 254. (in Chinese)
赵凯华, 钟锡华. 光学(下册)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 251 ~ 254.
- [9] M I Mishchenko. Extinction of light by randomly-oriented non-spherical grains [J]. Astrophys Space, SCI, 1990, 164: 1 - 13.
- [10] M I Mishchenko, A A Lacis. Morphology-dependent resonances of nearly spherical particles in random orientation [J]. Appl. Opt, 2003, 42: 5551 - 5556.
- [11] Li Liu, Michael I Mishchenko. Spectrally dependent linear depolarization and lidar ratios for nonspherical smoke aerosols[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2020, 248: 106953.
- [12] Wang Dongqin. Study on the scattering characteristics of major pollutant particles in high concentration aerosols such as gray haze [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
王东琴. 灰霾等高浓度气溶胶中主要污染物粒子散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [13] Wang Xu. Scattering characteristics of plane waves/beams by atmospheric aerosol particles [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
王旭. 大气气溶胶粒子对平面波/波束的散射特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [14] Xu Qiang, Wang Dongqin, Wang Xu, et al. Calculation and

- analysis of simple non-spherical particle scattering characteristics of atmospheric haze by T-matrix method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1-7. (in Chinese)
- 徐强,王东琴,王旭,等. 应用T矩阵法对大气灰霾简单非球形粒子散射特性的计算与分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1-7.
- [15] Hu BiJun. Simulation study on polarization transmission characteristics of non-spherical particles based on T matrix[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- 胡碧君. 基于T矩阵的非球形粒子偏振传输特性仿真研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [16] Zhao Taifei, Wang Chan, Len Yuxin, et al. Study on ultraviolet light scattering polarization characteristics of Chebyshev haze particles[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2149-2156. (in Chinese)
- 赵太飞,王婵,冷昱欣,等. 切比雪夫雾霾粒子的紫外光散射偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2149-2156.
- [17] Warren J. Wiscombe, Alberto Mugnai. Scattering from nonspherical chebyshev particles 2: means of angular scattering patterns [J]. *Applied Optics*. 1988. vol. 27 (12): 2405.
- [18] Tricoli U. Electromagnetic scattering with the GDT-matrix method; an application to irregular ice particles in cirrus [D]. Heidelberg: Combined Faculties of the Natural Sciences and Mathematics of the Ruperto-Carola-University of Heidelberg, 2015.
- [19] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. John Wiley & Sons, 2008.
- [20] Sato K, Okamoto H. Characterization of Ze and LDR of nonspherical and inhomogeneous ice particles for 95 GHz cloud radar: its implication to microphysical retrievals [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D22).
- [21] Dong Q S. Physical characteristics of the sand and dust in different deserts of China [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, 12(1): 15-25. (in Chinese)
- 董庆生. 我国典型沙区中沙尘的物理特性[J]. *电波科学学报*, 1997, 12(1): 15-25.
- [22] Wang Jiajie, Zhang Ming, Shi Yiwen, et al. Study on scattering and transmission characteristics of terahertz waves in weak sand and dust environment [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6): 802-808. (in Chinese)
- 汪加洁,张明,史怡雯,等. 弱沙尘环境中太赫兹波的散射与传输特性研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(6): 802-808.