

〈材料与器件〉

鳞片石墨粒子红外消光性能数值计算

缪云坤¹, 刘海锋¹, 刘清海¹, 黎守云²

(1.防化研究院, 北京 102205; 2.防化军代局驻西宁地区军代室, 青海 西宁 810700)

摘要: 利用离散偶极子近似 (DDA) 方法计算了圆形鳞片石墨粒子对中远红外消光性能与波长、圆片直径和厚度等的关系, 结果表明, 片径 3~4 μm 的圆形鳞片石墨粒子 (厚度为直径的 1/10) 对中远红外的消光性能较好, 散射作用大于吸收作用, 圆片粒子的消光性能明显好于对应有效半径的球形粒子的消光性能, 圆片厚度越薄, 消光系数越大, 并逐渐趋于最大值。

关键词: 鳞片石墨; 红外消光性能; 离散偶极子近似 (DDA)

中图分类号: O436.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)03-0190-03

Numerical Calculation of Infrared Extinction Performances of Graphite Flakes

MIAO Yun-kun¹, LIU Hai-feng¹, LIU Qing-hai¹, LI Shou-yun²

(1. Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Military Representative Office of Chemical Defense in Xining, Xining 810700, China)

Abstract: The infrared extinction performances of round graphite flakes are calculated with discrete dipole approximation (DDA) method. Results show that the round flakes with diameter of 3-4 micrometers and thickness of one-tenth of diameter have better extinction performances in the middle and far infrared wavelengths, and that the extinction is mainly due to scattering. The round flakes have better extinction performances than spheres with the same effective radius. The thinner the thickness of round flakes, the bigger the extinction coefficient, and it will tend gradually to the maximum.

Key words: graphite flakes, infrared extinction performances, discrete dipole approximation (DDA)

0 引言

现代战场上, 烟幕是对抗敌方光电侦察观瞄和制导武器的有效手段, 其作用原理是电磁波由于烟幕粒子的散射和吸收作用被衰减, 扰乱工作在该波段光电设备的正常工作。烟幕粒子散射和吸收作用的大小反映了烟幕的干扰性能, 通常按球形粒子采用米氏理论对烟幕的消光性能进行理论估算, 由于实际烟幕粒子形状往往不是球形的, 计算结果会产生较大的误差。离散偶极子近似 (DDA) 方法是近些年发展起来的可以计算任何形状粒子及其凝聚体消光性能的计算方法, 国内一些学者采用 DDA 方法开展了相关研究工作^[1-13]。

鳞片石墨是一种有效的红外干扰烟幕材料^[14], 本文采用 DDA 方法对鳞片石墨粒子的红外消光性能进

行了数值计算, 为鳞片石墨烟幕材料的消光原理和应用研究提供理论指导。

1 离散偶极子近似 (DDA) 方法

DDA 方法原则上可以计算任意形状的单个粒子或多个粒子凝聚体对电磁波的散射性能, 该方法由 Purcell 和 Pennypacker^[15]1973 年首先提出, Draine 和 Goodman^[16-19]等进行了发展和完善, West 等^[20]进一步扩展到各向异性、不均匀和分形粒子, Draine 与 Flatau 编制了 DDA 计算 Fortran 开源程序, 目前版本为 DDSCAT 7.3^[21]。

DDA 方法是把粒子分割成有限个离散、相互作用的偶极子, 粒子对入射电磁场的作用是单个偶极子相互作用累加的结果。粒子大小用有效半径 a_{eff} 来描述, 它等于同体积球形粒子的半径:

收稿日期: 2014-10-24; 修订日期: 2014-12-17.

作者简介: 缪云坤 (1963-), 男, 江苏张家港人, 研究员, 硕士, 主要从事发烟剂及发烟装备的研究。

$$a_{\text{eff}} = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} = \left(\frac{3N}{4\pi} \right)^{1/3} d \quad (1)$$

式中: V 为粒子体积; N 为偶极子个数; d 为偶极子大小。

DDA 方法可以计算粒子的散射、吸收和消光效率因子(Q_s 、 Q_a 、 Q_e)等, 质量消光系数 $\alpha=3Q_s/(4\rho a_{\text{eff}})$, ρ 为粒子材料的密度, α 是表征粒子消光性能的重要参数。

利用 DDA 方法计算粒子消光性能时要注意离散偶极子数量 N 应满足以下条件:

$$N \geq \frac{4\pi}{3} |m|^3 (ka_{\text{eff}})^3 \quad (2)$$

式中: ka_{eff} 为粒径参数, $ka_{\text{eff}}=(2\pi/\lambda)a_{\text{eff}}$, λ 为入射波长; m 为粒子材料的复折射率。

2 数值计算结果与分析

利用 DDA 方法计算鳞片石墨粒子对红外辐射的消光性能, 鳞片石墨的几何形状可近似为圆片形, 计算时选择针对各向异性材料的粒子几何形状参数 UNIAXICYL, 复折射率取自 Draine^[22] (2003), 选择 2 个入射波极化方向, 取其平均值作为计算结果, 通过选择粒子旋转参数计算粒子所有空间取向平均的消光性能。

2.1 消光性能与入射波长的关系

计算直径 5 μm、厚 0.5 μm 的石墨圆片粒子对中远红外辐射的消光性能, 结果如图 1 所示。从图中可以看出, 散射作用大于吸收作用, 消光系数随波长增长缓慢增加。

2.2 消光性能与石墨圆片直径的关系

计算不同直径的石墨圆片粒子 (厚度取直径的

1/10) 对 4 μm 和 10 μm 红外辐射的消光性能, 结果如图 2 和图 3, 对应有效粒径的球形粒子的消光系数如图 4。从图中可以看出, 消光效率因子随直径增加迅速增加, 随后基本保持不变。片径 1~2 μm 的粒子对 4 μm 红外辐射的消光系数最大, 片径 3~4 μm 的粒子对 10 μm 红外辐射的消光系数最大, 综合考虑对中远红外辐射的消光性能, 片径 3~4 μm 的粒子对中远红外的消光性能较好。圆片粒子的消光性能明显好于对应有效粒径的球形粒子的消光性能。片径大于 3 μm 时, 对 10 μm 红外辐射的散射作用大于吸收作用, 片径大于 1.5 μm 时, 对 4 μm 红外辐射的散射作用大于吸收作用。

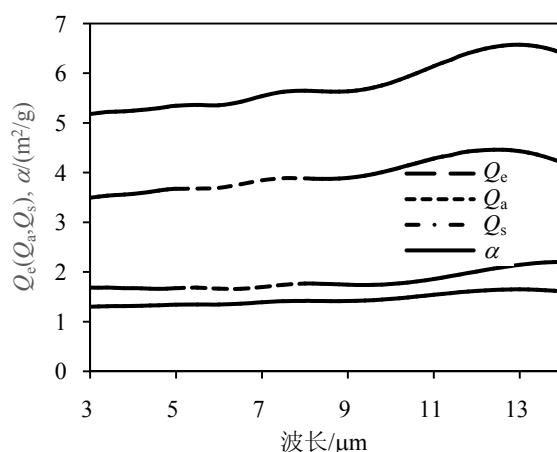


图 1 效率因子和消光系数与波长的关系曲线

Fig.1 Relationship between efficiency factor, extinction coefficient and wavelength

2.3 消光性能与石墨圆片厚度的关系

计算不同厚度直径为 5 μm 石墨圆片粒子对 4 μm 和 10 μm 红外辐射的消光性能, 结果如图 5 和图 6。

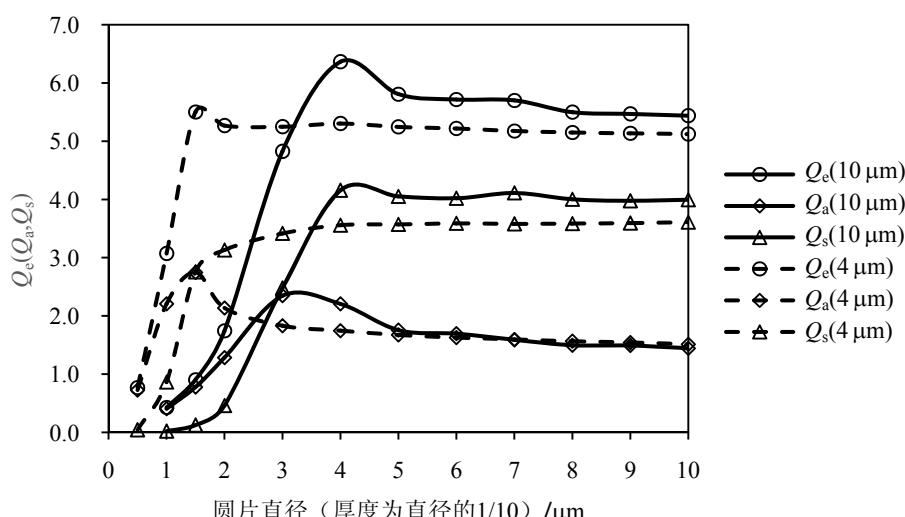


图 2 消光效率因子与石墨圆片直径的关系曲线

Fig.2 Relationship between extinction(scattering, absorption) efficiency factor and diameter of round graphite flake

从图中可以看出,随着圆片厚度变薄,消光系数增加,并逐渐趋于最大值。厚度大于0.15 μm时,散射作用大于吸收作用。

3 结论

本文采用离散偶极子近似(DDA)方法计算了圆

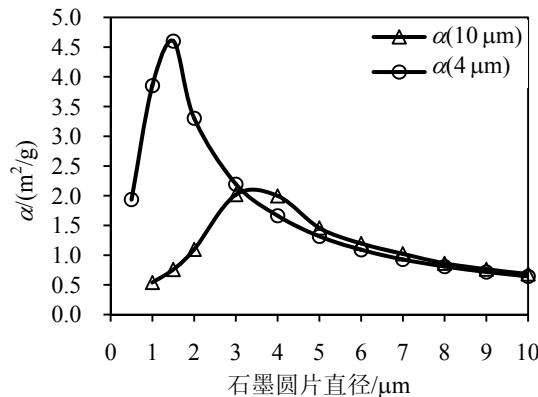


图3 消光系数与石墨圆片直径的关系曲线

Fig.3 Relationship between extinction coefficient and diameter of round graphite flake

形鳞片石墨粒子对红外辐射的消光性能,结果表明:
①片径3~4 μm的圆形鳞片石墨粒子(厚度为直径的1/10)对中远红外的消光性能较好,散射作用大于吸收作用;②圆形鳞片石墨粒子的消光性能明显好于对应有效半径的球形粒子的消光性能;③圆片厚度越薄,消光系数越大,并逐渐趋于最大值。

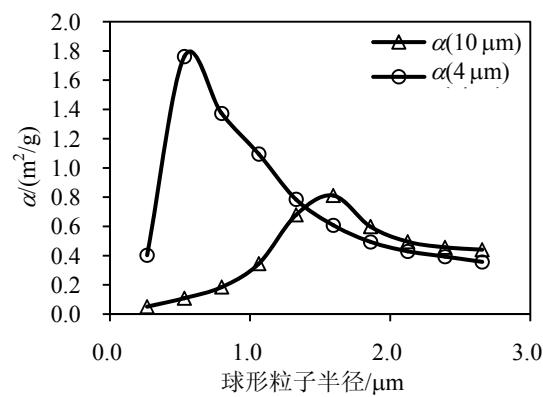


图4 对应有效半径的球形粒子的消光系数

Fig.4 Extinction coefficient of sphere with effective radius

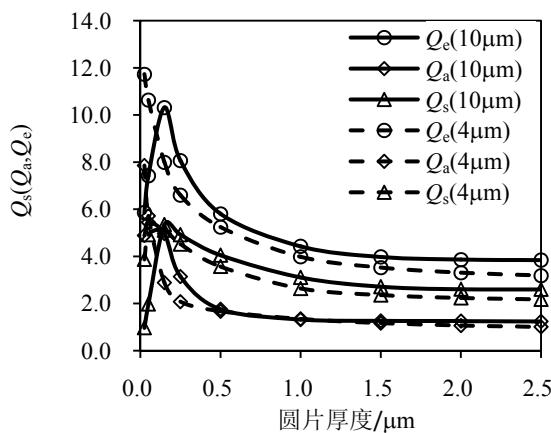


图5 消光效率因子与石墨圆片厚度的关系曲线

Fig.5 Relationship between extinction(scattering, absorption) efficiency factor and thickness of round graphite flake

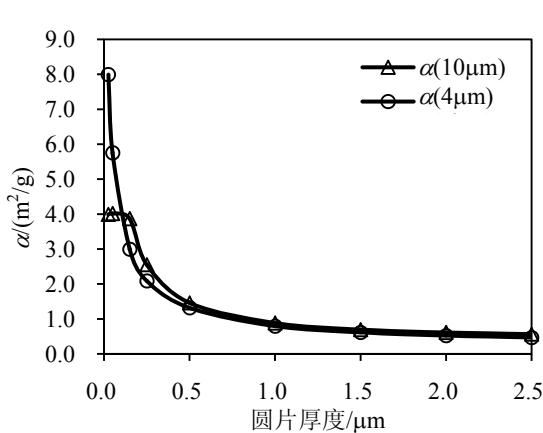


图6 消光系数与石墨圆片厚度的关系曲线

Fig.6 Relationship between extinction coefficient and thickness of round graphite flake

参考文献:

- [1] 李秀燕,杨志林,周海光.金纳米球吸收光谱特性研究[J].漳州师范学院学报:自然科学版,2004,17(2): 31-34.
- [2] 乔利锋,张永明,谢启源,等.火灾烟颗粒的分形结构形状模拟与光散射计算[J].物理学报,2007,56(11): 6736-6741.
- [3] 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.
- [4] 类成新,张化福,刘汉法.随机分布烟幕凝聚粒子对激光的消光特性研究[J].红外技术,2009,31(9): 528-531.
- [5] 王丽.DDA在粒子散射特性研究中的应用[D].西安:西安电子科技大学,2009.

- [6] 类成新,刘汉法,张化福.随机取向烟尘团簇粒子的光学截面的数值计算[J].原子与分子物理学报,2010,27(1): 183-186.
- [7] 王红霞,马进,周战荣,等.随机取向纳米石墨椭球粒子的红外消光特性[J].光散射学报,2010,22(4): 339-343.
- [8] 王红霞,竹有章,马进,等.纳米石墨凝聚粒子红外消光特性研究[J].功能材料,2011,42(4): 616-623.
- [9] 刘亚峰,黄朝军,娄本浊.红外波段气溶胶粒子光学特性的数值计算[J].红外与激光工程,2012,41(6): 1605-1609.
- [10] 郭艳芳.金属纳米颗粒光学性质的离散偶极近似计算[D].济南:山东大学信息科学与工程学院,2012.

(下转第223页)

4 总结

STSS 系统的主要任务是配合高轨卫星探测到的助推段信息, 对自由段的弹道导弹进行探测跟踪。对于 STSS 工作模式的相关研究大都停留在定性描述的阶段, 其工作方式鲜有人进行具体的分析和验证。本文通过对卫星工作时在轨模式、搜索模式、探测角度、探测距离等的合理计算和推断, 对不同射程的弹道导弹进行观测、跟踪, 得出其具体工作方式、参数和性能。并且对对地扫描和临边扫描工作方式分别进行分析, 将对地覆盖和空间覆盖的优劣进行了比较, 针对弹道导弹目标进行仿真, 结果说明对地扫描利于助推段探测预警, 临边扫描利于对自由段探测跟踪。在今后的研究中, 对处于发展阶段的 STSS, 其参数会进一步确定和细化, 将来可根据更加准确的参数值进行更加深入的研究。

参考文献:

[1] 余二永, 徐学文. STSS 星座空间覆盖性能分析方法研究[J]. 计算机仿

真, 2010, 27(6): 103-106.

- [2] 续志明, 吴翊, 易东云, 等. 中低轨红外预警星座基于自由段跟踪的单星覆盖性能[J]. 上海航天, 2011(1): 7-11, 27.
- [3] 刘兴, 梁维泰, 赵敏. 一体化空天防御系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 张倩, 赵砚, 徐梅. 卫星星座的空域覆盖性能计算模型[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(1): 6-10.
- [5] 王永刚, 刘玉文. 军事卫星及应用概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 熊武一, 周家法, 卓名信, 等. 军事大辞海(上)[M]. 北京: 长城出版社, 2000.
- [7] 汤绍勋. 天基预警低轨星座星载传感器资源管理与预警探测任务调度问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
- [8] 红外低轨星座凝视传感器的空间覆盖性能分析[J]. 宇航学报, 2011, 32(1): 123-128.
- [9] 毛艺帆, 张多林, 王路. 美国 SBIRS-HEO 卫星预警能力分析[J]. 红外技术, 2014, 36(6): 467-470.

(上接第 192 页)

- [11] 黄朝军, 吴振森, 刘亚锋. 复合气溶胶粒子光学特性的数值计算[J]. 原子与分子物理学报, 2012, 29(6): 1077-1081.
- [12] 黄朝军. 分形烟尘簇团粒子的消光特性研究[J]. 原子与分子物理学报, 2013, 30(1): 143-148.
- [13] 黄朝军, 刘亚锋. 随机取向气溶胶凝聚粒子光学特性研究[J]. 原子与分子物理学报, 2013, 30(5): 833-837.
- [14] U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center (ECBC). Carbon Fiber Obscurant: Enhancing Warfighter Effectiveness While Meeting Environmental Regulations[R]. Aberdeen Proving Ground: ECBC, 2006.
- [15] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains[J]. *Astrophys. J.*, 1973, 186: 705-714.
- [16] Draine B T, Goodman J J. Beyond clausius-mossotti: Wave propagation on a polarizable point lattice and the discrete dipole approximation[J]. *Astrophys. J.*, 1993, 405: 685-697.
- [17] Goodman J J, Draine B T, Flatau P J. Application of fast-Fourier-transform techniques to the discrete-dipole approximation[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(15): 1198-1200.
- [18] Draine B T. The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains[J]. *Astrophys. J.*, 1988, 333: 848-872.
- [19] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for scattering calculations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1994, 11: 1491-1499.
- [20] West R A. Optical properties of aggregate particles whose outer diameter is comparable to the wavelength[J]. *Applied Optics*, 1991, 30 (36): 5316-5324.
- [21] Draine B T, Flatau, P J. DDSCAT 7.3(CP)[EB/OL]. <http://code.google.com/p/ddscat/>.
- [22] Draine B T. Scattering by interstellar dust grains. I. optical and ultraviolet[J]. *Astrophys. J.*, 2003, 598: 1017-1025.