

·测试、试验与仿真·

基于Mie理论的导弹燃气羽流激光散射特性数值仿真

时文远, 王君光

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘要:应用Mie氏散射理论对导弹燃气羽流中典型粒子光散射特性进行了理论分析与数值模拟,得到了消光、散射系数和散射强度分布与粒子直径的关系。结果表明,导弹燃气羽流对激光有较强的散射作用,通过理论计算散射占总消光50%以上,并计算了典型导弹燃气羽流全向散射能量分布,为相关系统设计提供了理论支撑。

关键词: Mie 散射; 散射特性; 燃气羽流; 数值计算

中图分类号: O644.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0072-04

Numerical Simulation for Laser Scattering Characteristic of Missile Gas Plume Based on Mie Theory

SHI Wen-yuan, WANG Jun-guang

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Light scattering characteristics of missile gas plume typical particles are analyzed in theory and calculated numerically by using Mie's scattering theory, the relationship between the extinction, scattering coefficient, scattering intensity distribution and the particle diameter are obtained. The results show that the laser scattering effect of missile plume is obvious through theoretical calculations of scattering accounted for more than 50% of the total extinction. And typical missile gas plume omnidirectional scattering energy distribution is calculated, which provides theory support for related system design.

Key words: Mie scattering; scattering characteristics; gas plume; numerical calculation

随着战术导弹的迅速发展,对其发动机排出的燃气的光电性能提出了更高的要求,也就是排气及尾焰对电磁波的衰减应尽量小。因此战术导弹对固体推进剂提出了微烟或少烟的要求,这是现代化武器发展的必然趋势。围绕导弹燃气羽流电磁衰减特性,国内开展了大量理论及试验研究,文献[1]研究激光驾束制导武器燃气羽流的 $0.9\ \mu\text{m}$ 激光透过率,文献[2]研究了不同推进剂燃气羽流对近红外 $1\sim 3\ \mu\text{m}$,中波红外 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,激光工作波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 的透过率。

但上述研究一般基于导弹测控及隐身需求,重

点关注电磁信号衰减特性,而对于燃气羽流散射及吸收特性涉及不多。以低特征导弹燃气羽流成分分析出发,采用经典电磁理论对典型成分影响激光散射开展仿真,获得散射占总消光比例和散射能量分布,为激光受导弹燃气羽流散射能量分布提供了理论依据。

1 弹燃气羽流特性

根据AGARD(北约航空与航天咨询小组)的分类方法^[3],对推进剂烟雾透过率大于等于90%的定

收稿日期: 2016-06-16

作者简介: 时文远(1984-),男,山东临沂人,硕士,工程师,主要研究方向为光电工程与效能评估技术研究;王君光(1985-),男,吉林长春人,硕士,工程师,主要研究方向为光电工程与效能评估技术研究。

义为A级(微烟),推进剂烟雾透过率小于90%而大于等于70%的定义为B级(少烟),推进剂烟雾透过率小于70%的定义为C级(有烟)。固体推进剂配方中金属粉(铝、镁等)燃烧产生的金属氧化物^[4](如 Al_2O_3 、 MgO),另外其组分不完全燃烧产生的碳粒子,包覆层、隔热材料、长尾管材料及同燃气接触的其他任何有机材料热分解产生的碳粒子,它们的粒子大小随着燃烧室中滞留的时间而增大,它们在喷口处粒度变化仍很小(微米量级),因此对短波长电磁信号影响较大,典型的透过率测试曲线如图1所示。

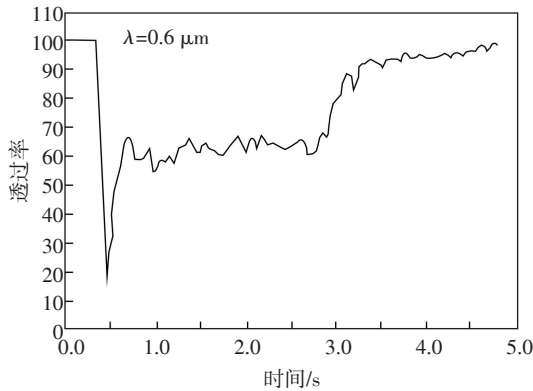


图1 固体推进剂烟雾测量典型曲线

另外,文献[1]对短波红外激光($1.06\ \mu\text{m}$)透过率也同时进行了测试,与图1中可见光波段透过特性基本一致。

2 Mie 散射理论基础

若散射体为均匀球体,如图2所示,照射光为线偏振平面波,振幅为 E ,光强为 I_0 ,沿 z 轴传播,其电场矢量沿 x 轴振动。散射体位于坐标原点 O , P 为观测点,散射光方向(OP 方向)与照射光方向(z 轴)所组成的平面称为散射面,照射光方向至散射光方向之间的夹角 θ 称为散射角,而 x 轴至 OP 在 xy 平面上投影线 OP' 之间的夹角 φ 称为极化角。观测点与散射体相距 r 。

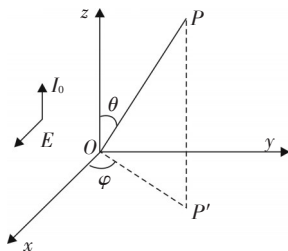


图2 粒子Mie散射图

根据经典Mie散射理论^[5-7],散射粒子的尺度参数为 $\alpha = 2\pi a/\lambda$,其中 a 为粒子半径,散射粒子相对周围介质折射率为 $m = m_1 + i \times m_2$ 。则散射光垂直于散射面和平行于散射面与散射角相关的两个振幅函数为

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (1)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \quad (2)$$

$$a_n = \frac{\Psi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - m \Psi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}{\xi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - m \xi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)} \quad (3)$$

$$b_n = \frac{\Psi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - \Psi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)}{m \xi_n(\alpha) \Psi'_n(m\alpha) - \xi'_n(\alpha) \Psi_n(m\alpha)} \quad (4)$$

$$\pi_n = \frac{P_n(\cos \theta)}{\sin \theta} \varphi \quad (5)$$

$$\tau_n = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos \theta) \quad (6)$$

以上式中,有

$$\Psi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} J_{n+1/2}(z) \quad (7)$$

$$\xi_n(z) = \left(\frac{z\pi}{2}\right)^{1/2} [J_{n+1/2}(z) - i \cdot Y_{n+1/2}(z)] \quad (8)$$

$$\Psi'_n(z) = \Psi_{n-1}(z) - \frac{n}{z} \Psi_n(z) \quad (9)$$

$$\xi'_n(z) = \xi_{n-1}(z) - \frac{n}{z} \xi_n(z) \quad (10)$$

$J_{n+1/2}(z)$ 和 $Y_{n+1/2}(z)$ 分别为半整数阶的第一类、第二类贝塞尔函数。 $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 为一阶 n 次第一类缔合勒让德函数; $P_n(\cos \theta)$ 为第一类勒让德函数。

散射相位函数是描述光经过粒子散射以后能量在空间分布的物理量,对于微粒散射特性研究具有重要意义,关于非偏振态下散射相位函数的表达式^[8]为

$$P(\theta) = \frac{|S_1|^2 + |S_2|^2}{\sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)} \quad (11)$$

3 计算结果与讨论

3.1 消光、散射系数

计算时碳粒子的复折射指数取 $1.65 - i \times 0.5^{[9]}$, Al_2O_3 粒子复折射率取 $1.6 - i \times 0.1^{[10]}$,入射激光波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 。图3为碳粒子消光、散射系数与粒子直径之间关系图。图4为 Al_2O_3 粒子消光、散射系数与粒子直径之间关系图。

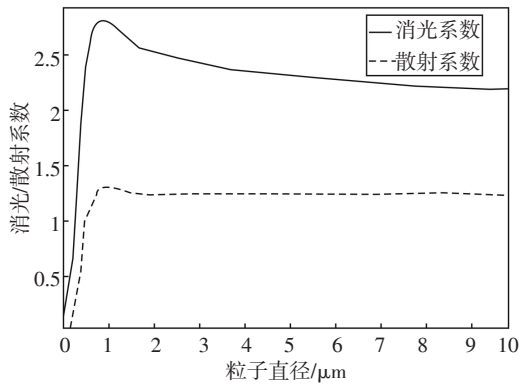


图3 碳粒子消光、散射系数与粒径之间关系

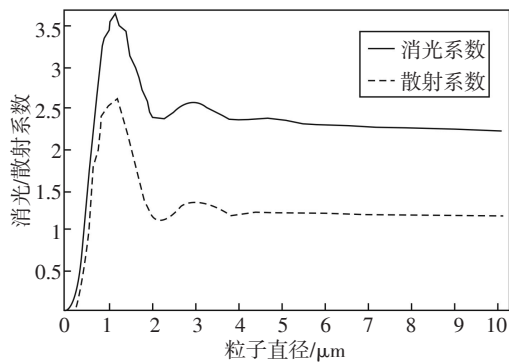


图4 Al₂O₃粒子消光、散射系数与粒径之间关系

两种粒子消光、散射系数变化趋势一致,在直径 1 μm 附近达到消光、散射系数极大值,随着粒子直径增大消光系数缓慢降低,而散射系数基本保持不变。通过图3可以看出,散射占总消光比例基本一致,均为 50%左右。与碳粒子相比 Al₂O₃粒子这一比例变化明显,在粒子直径较小时(小于 1 μm),散射占总消光比例较高,这主要是由于 Al₂O₃粒子复折射率虚部相对较小,粒子吸收作用不明显造成的。通过上述分析可以看出,以碳粒子和 Al₂O₃粒子为代表的导弹尾流对激光散射作用明显,通过理论计算,散射占总消光 50%以上,这给相关系统设计提供了理论依据。

3.2 散射强度分布

为了研究激光经粒子散射后强度分布情况,需进一步研究粒子散射相函数。不同粒径碳粒子、Al₂O₃粒子经 1.06 μm 激光散射后相函数分布如图 5、图 6 所示。

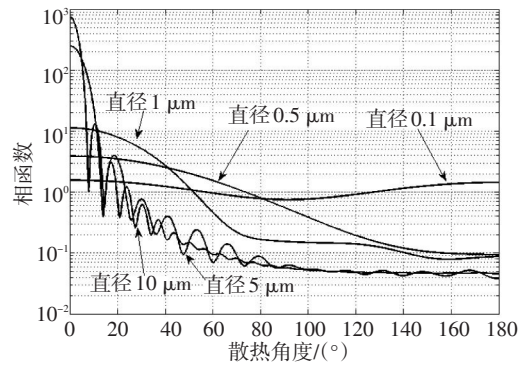


图5 碳粒子散射相函数分布图

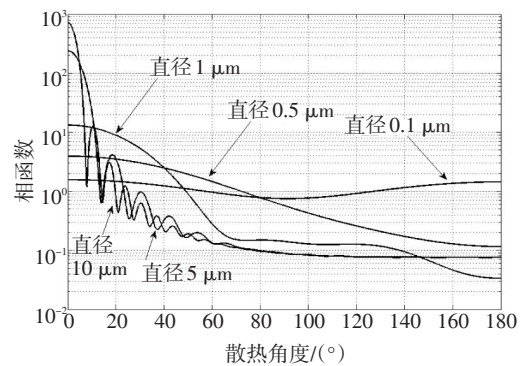


图6 Al₂O₃粒子散射相函数分布图

整体来看,两种粒子散射相函数分布一致,随着粒径增大,呈现前向散射增加,后向散射减小的特点,因此散射光能量集中度快速增加。0.1 μm 粒径前向散射与后向散射强度基本相当,而 10 μm 粒径前向散射比后向散射高约 4 个量级。从测量、干扰角度看,小粒径粒子的后向、侧向散射是影响对导弹尾流进行激光测量及借助尾流进行干扰的主要因素。

燃气羽流中粒度测试典型数据如图 7 所示。

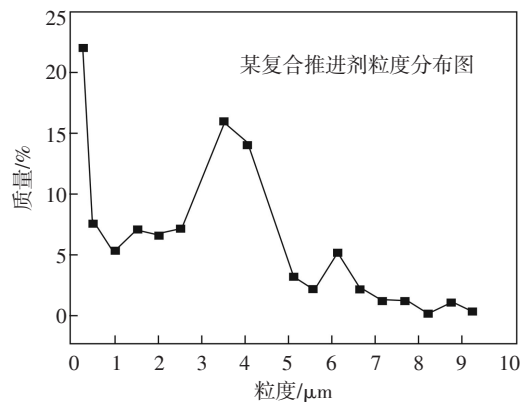


图7 燃气羽流中粒子粒度测试典型数据

利用粒度与质量关系,假设粒子均为规则球型散射体,定量计算推进剂尾流中粒子数量,根据粒子数量及单粒子能量分布,忽略二次散射,计算尾流粒子混合体整体散射能量分布(相对值),如图8所示。

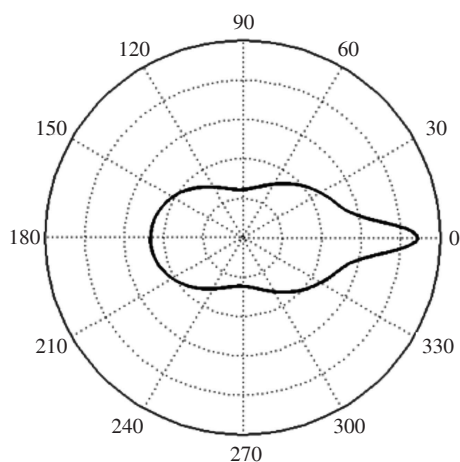


图8 典型复合推进剂全向散射能量分布图

通过上图可以看出,典型复合推进剂全向散射图呈现类“纺锤型”,前向散射强度约为后向散射两倍,后向散射约为侧向散射(90° , 270°)的两倍。这主要是由于推进剂尾流中小粒径粒子数多,占比权重重大,因此整体散射形状与小粒径全向散射相关度大;又由于大粒径粒子散射能量主要分布在前向方向,叠加后前向散射强度出现明显增加。

4 结论

根据Mie散射理论,研究典型复合推进剂尾流

典型粒子对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光散射特性。结果表明,(1)以碳粒子和 Al_2O_3 粒子为代表的导弹尾流对激光散射作用明显,通过理论计算散射占总消光50%以上,并且碳粒子比 Al_2O_3 粒子散射作用要大;(2)小粒径粒子的后向、侧向散射是影响对导弹尾流进行激光测量及借助尾流进行干扰的主要因素;(3)结合典型导弹尾焰消光与全向散射能量分布可定量计算不同方向散射数值。

参考文献

- [1] 杨立波.装药排气羽流激光透过率研究[J]. 火炸药学报, 2006,29(6):45-47.
- [2] 郭颜红.少烟推进剂在空空导弹发动机上的应用[J]. 航空兵器,2007(2):51-54.
- [3] 孙美.固体推进剂排气羽流特征信号分类[J]. 飞航导弹, 2008(2):52-54.
- [4] 李上文,赵风起,徐司雨.低特征信号固体推进剂技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [5] 赵宏鹏,姚梅,李华,等. $1.06\ \mu\text{m}$ 激光大气散射模型研究[J]. 光电技术应用,2009,24(2):6-9.
- [6] 陈晓斯,樊祥,程玉宝,等. 单脉冲激光散射探测研究[J]. 光电技术应用,2013,28(1):12-15.
- [7] 程玉宝,杨希伟. Mie散射因子的计算方法及其应用[J]. 光电技术应用,2005,20(5):12-14.
- [8] 张合勇.球形粒子Mie散射参量的Matlab改进算法[J]. 光散射学报,2008,20(2):102-110.
- [9] 刘亚峰.红外波段气溶胶粒子光学特性的数值模拟[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1605-1609.
- [10] 殷金英,刘林华.氧化铝粒子光学常数的尺度效应[J]. 工程热物理学报,2007,28(2):301-303.

本刊声明

《光电技术应用》期刊因主办单位搬迁,从2016年4月9日起通信地址变更为天津市空港经济区纬五道9号,邮编为300308。编辑部电话:022-59067938。投稿邮箱为aoc-cetc@vip.163.com。特此声明。

《光电技术应用》编辑部