

烟幕对激光的干扰特性研究

刘本利,王红霞,竹有章,梁 栋,王连家,宋增吉
(第二炮兵工程学院,陕西 西安 710025)

摘 要:为了研究碳黑球形粒子和石墨球形粒子对 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的消光特性,基于 Mie 理论计算了粒子的消光系数,利用朗伯-比尔定律计算了透过率与烟幕厚度的关系。研究表明:碳黑粒子和石墨粒子都存在一个最佳粒径,使粒子对激光的消光性能达到最好,并且粒子半径较小时吸收起主要作用,粒子半径大时是散射和吸收两者共同作用;粒径在 $0.05\sim 0.16\ \mu\text{m}$ 范围内时,石墨粒子的消光性能好于碳黑粒子,其他区域内则是碳黑粒子的消光性能好;得到了粒径具有对数正态分布时透过率与烟幕厚度的关系曲线,对实际作战应用具有一定的参考价值。

关键词:烟幕;碳黑;石墨;激光;Mie 理论;朗伯-比尔定律

中图分类号:TN972⁺.1

文献标识码:A

Research on interference characteristics of smoke screen to laser

LIU Ben-li, WANG Hong-xia, ZHU You-zhang, LIANG Dong, WANG Lian-jia, SONG Zeng-ji
(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: For studying the extinction characteristics of black carbon and black lead sphere particles to the laser of $1.06\ \mu\text{m}$ and $10.6\ \mu\text{m}$ wavelength, extinction coefficient was calculated based on Mie theory, and the transmission rate vs smoke thickness was calculated by using Lambert-Beer theory. Results show that black carbon and black lead particles all have a optimal radius to make the extinction characteristics best. Absorption is dominant for small particles, Scattering and absorption work at the same time for large particles. Extinction characteristics of black lead sphere particles is better than that of black carbon during $0.05\sim 0.16\ \mu\text{m}$ wavelength. In other wavelength range, the extinction characteristics of black carbon smoke screen is better than that of black lead. The transmission rates vs smoke thickness was calculated under the condition of optimal radius. The conclusion is useful in practical field application.

Key words: smoke screen; black carbon; black lead; laser; Mie theory; Lambert-Beer theory

1 引言

激光具有高亮度、良好的单色性、方向性及相干性等特性,因此在很多科学领域都得到了广泛应用,尤其是在军事上的应用极大地推进了世界高技术侦察与精确制导武器的发展。其中用于精确制导的激光波长主要是 $1.06\ \mu\text{m}$ 的短波红外激光和 $10.6\ \mu\text{m}$ 的长波红外激光。激光制导武器的发展也带动了干扰激光烟幕技术的发展。烟幕作为当前对抗红外、激光制导武器的最有效手段之一,近年来受到了世界各国的高度重视^[1-3]。它通过对入射激光信号的散射和吸收,削弱其能量,以降低激光武器系统的效能,而研究烟幕粒子的消光性能,对改进和发展新型

烟幕技术具有现实的指导意义。同时,干扰效果依赖于烟幕的组成成分,材料选取的好坏对烟幕的干扰特性起着非常重要的作用。

Mie 散射理论是目前公认的一种极具发展前途的微粒测试技术,单分散系的 Mie 散射理论已经非常成熟^[4-5]。本文在 Mie 散射理论的基础上,对碳黑和石墨两种材料进行比较,分析它们的消光特性,旨在找出哪种材料在条件相同的情况下对激光的干扰效果更好,同时针对每一种材料,找出其干扰效果

作者简介:刘本利(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电对抗和光电信息处理。E-mail:william3504@sina.com.cn

收稿日期:2010-03-27;修订日期:2010-04-08

最好时的各参数。

2 基本理论

2.1 Mie 散射理论

对于规则的球形散射体,在入射到散射体上的电磁场的波长与散射体的线度可比拟时,散射体对电磁场的散射作用可以精确地用 Mie 散射理论处理。Mie 散射理论给出的球形粒子的消光效率因子 Q_{ext} 、散射效率因子 Q_{sca} 和吸收效率因子 Q_{abs} 的表达式如下:

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

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

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

其中,尺度参数 $\chi = 2\pi a/\lambda$; λ 为入射波波长; a 为粒子半径; a_n, b_n 为 Mie 氏系数,表达式如下:

$$a_n = \frac{\varphi_n(\chi) \varphi'_n(m\chi) - m \varphi'_n(\chi) \varphi_n(m\chi)}{\xi_n(\chi) \varphi'_n(m\chi) - m \xi'_n(\chi) \varphi_n(m\chi)} \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m \varphi_n(\chi) \varphi'_n(m\chi) - \varphi'_n(\chi) \varphi_n(m\chi)}{m \xi_n(\chi) \varphi'_n(m\chi) - \xi'_n(\chi) \varphi_n(m\chi)}$$

式中:

$$\varphi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} J_{n+1/2}(x) \quad (5)$$

$$\xi_n(x) = \sqrt{\frac{x\pi}{2}} H_{n+1/2}^{(2)}(x)$$

式(5)中, $J_{n+1/2}(x)$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}(x)$ 分别是半整数 Bessel 函数和第二类 Hankel 函数, m 为相对折射率,等于球的折射率与环境介质的折射率之比。在我们的研究中,颗粒被空气所包围,空气的折射率可以近似为 1。

在分析粒子的消光特性时,通常用质量消光系数表示烟幕的消光特性,因此我们引入质量消光系数 α_{ext} 、质量散射系数 α_{sca} 、质量吸收系数 α_{abs} ,它们与效率因子之间的关系为:

$$\alpha_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \cdot \pi a^2 / \rho V = 3Q_{\text{ext}} / 4\rho a \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{sca}} = Q_{\text{sca}} \cdot \pi a^2 / \rho V = 3Q_{\text{sca}} / 4\rho a \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{abs}} = \alpha_{\text{ext}} - \alpha_{\text{sca}} \quad (8)$$

其中, V 为粒子的体积; ρ 为粒子的质量密度。

2.2 朗伯-比尔定律

假设烟幕为一均匀介质,激光入射到一定颗粒浓度和厚度的烟幕之后,按照朗伯-比尔定律,透过率可以表示为^[6]:

$$T = \frac{I}{I_0} = \exp[-C_{\text{ext}}NL] \quad (9)$$

其中, I, I_0 分别为透射光强和入射光强; N 为烟幕的浓度; L 为烟幕的厚度; $C_{\text{ext}} = \alpha_{\text{ext}}\rho V$ 。

在实际中单一粒径烟幕是不存在的,粒径的大小都服从一定的分布,典型的有对数分布、正态分布、对数正态分布、威布尔分布和洛森-莱姆莱尔分布等。本文采用对数正数分布,其表达式为:

$$N(a) = \frac{1}{a\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-((\ln a - \mu)^2 / 2\sigma^2)} \quad (10)$$

其中, a 为烟幕粒子的半径; μ 为烟幕粒子对数的几何平均值; σ 为烟幕粒子对数的标准差。则烟幕粒子的平均消光截面 C_{ext} 可以表示为:

$$C_{\text{ext}} = \pi \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}} N(a) da \quad (11)$$

得到平均消光截面后,通过公式(9)就可以得到烟幕的透过率。

3 烟幕对激光的干扰特性分析

假设烟幕为单一均匀分散系。基本参数:波长为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时,碳黑粒子复折射率 $n = 1.8000 + 0.5000i$,石墨粒子复折射率 $n = 2.8378 + 1.4629i$; 波长为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 时,碳黑粒子复折射率 $n = 3.1020 + 1.3010i$,石墨粒子复折射率 $n = 5.2280 + 4.5180i$ 。碳黑粒子质量密度 $\rho = 1.86 \text{ g/cm}^3$,石墨粒子质量密度 $\rho = 2.10 \text{ g/cm}^3$ 。

当波长为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时,计算所得碳黑和石墨的质量消光系数、质量散射系数、质量吸收系数与粒径的关系如图 1 所示。

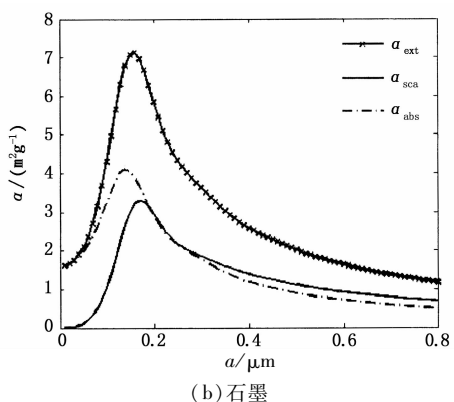
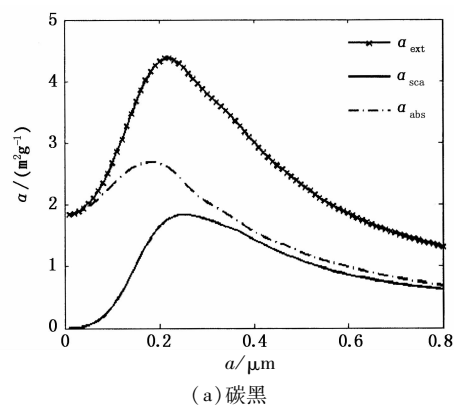


图 1 $1.06 \mu\text{m}$ 波长下质量消光系数与粒子半径的关系

Fig. 1 quality extinction coefficient vs particles radius at $1.06 \mu\text{m}$ wavelength

从图1中可以看出,波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 时,无论是碳黑粒子还是石墨粒子,在粒子半径由小到大变化的过程中,粒子的质量消光(散射、吸收)系数曲线均具有一个峰值。这表明对于给定入射波长的辐射,粒子有一最佳粒径,在这一粒径处,烟幕粒子对激光的消光性能最好,碳黑粒子的最佳粒径为 $0.22\text{ }\mu\text{m}$,石墨粒子的最佳粒径为 $0.16\text{ }\mu\text{m}$ 。图1还表明,烟幕粒子中微粒粒径较小时,消光作用以吸收为主,并且粒径越小,吸收效应所占比例越大,随着粒径的增大,散射在消光作用中的比例开始变大,消光是散射和吸收共同作用的结果。

当波长为 $\lambda = 10.6\text{ }\mu\text{m}$ 时,计算所得碳黑和石墨的质量消光系数、质量散射系数、质量吸收系数与粒径的关系如图2所示。

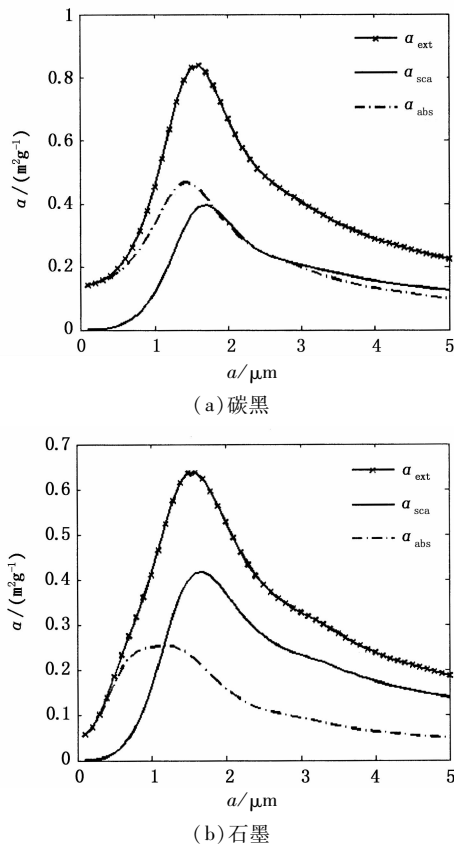


图2 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 波长下质量消光系数与粒子半径的关系
Fig. 2 quality extinction coefficient vs particles radius
at $10.6\text{ }\mu\text{m}$ wavelength

从图2中可以看出,波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 时和波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 时类似,在粒子半径变化时,存在一个最佳粒径使粒子对激光的消光性能最好,碳黑粒子和石墨粒子的最佳粒径都为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$,质量消光(散射、吸收)系数相对于 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 下的质量消光(散射、吸收)系数下降非常明显。从图2中还可以看出,碳黑粒子在粒径较小时消光作用主要以吸收为主,随着粒径的增大,散射在消光作用中的比例开始

变大,消光是散射和吸收共同作用的结果。石墨粒子在粒径较小时消光作用主要以吸收为主,当粒径大于 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 后,消光作用主要以散射为主。

为了比较两种粒子在同一波长下的消光特性,在 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 波长下将两种粒子的质量消光系数放在一幅图中,在 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 波长下将两种粒子的质量消光系数放在一幅图中,结果如图3所示。

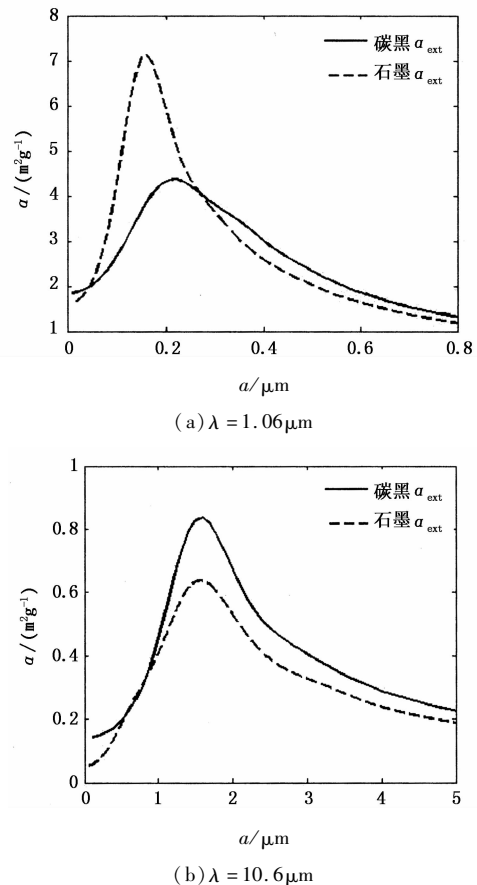


图3 不同波长下两种粒子质量消光系数的比较
Fig. 3 quality extinction coefficient vs particles radius
at different wavelength

从图3(a)中可以看出,在 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 波长下,当粒径在 $0.05\sim 0.16\text{ }\mu\text{m}$ 范围内时,石墨粒子的质量消光系数大于碳黑粒子的质量消光系数,其他位置石墨粒子的质量消光系数则小于碳黑粒子的质量消光系数。从图3(b)中可以看出,在 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 波长下两者的最佳粒径相等,上文已经得出最佳粒径为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$,并且石墨粒子的质量消光系数小于碳黑粒子的质量消光系数。

图4是根据公式(10),在烟幕颗粒浓度一定时,在粒径服从对数正态分布的条件下,得出的透过率与烟幕厚度的关系,其中波长为 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 时烟幕颗粒浓度 $N = 1.5 \times 10^{12}\text{ m}^{-3}$ 。波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 时烟幕颗粒浓度 $N = 4.5 \times 10^9\text{ m}^{-3}$ 。

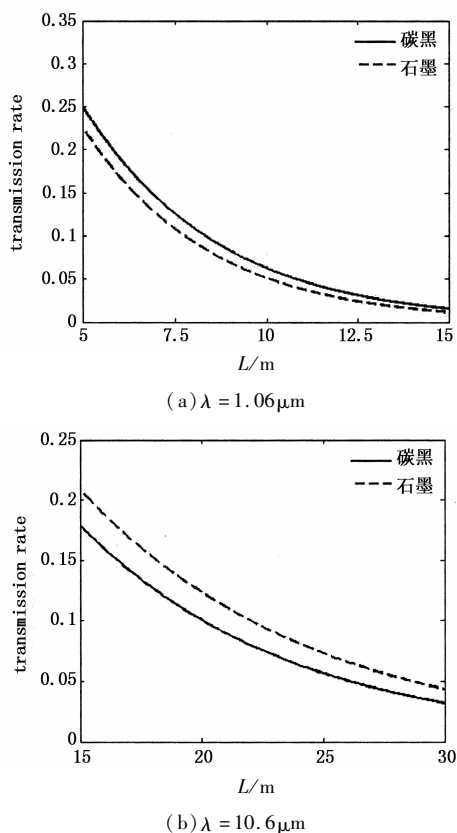


图4 烟幕透过率与烟幕厚度的关系

Fig.4 transmission rate of smoke screen vs smoke thickness

从图4(a)中可以看出,在 $1.06 \mu m$ 波长下要使烟幕起到干扰激光武器的作用,使激光的透过率在15%以下,则由碳黑粒子组成烟幕的厚度要在7 m以上,石墨粒子组成烟幕的厚度要在6.5 m以上,同时可以看出石墨粒子组成烟幕的透过率要小于碳黑,说明在最佳粒径条件下石墨的干扰效果更好。从图4(b)中可以看出,在 $10.6 \mu m$ 波长下要使激光的透过率在15%以下,碳黑粒子组成烟幕的厚度要在17 m以上,石墨粒子组成烟幕的厚度要在18 m以上,同时可以看出碳黑粒子组成烟幕的透过率要小于石墨,说明在最佳粒径条件下碳黑的干扰效果更好。

4 结 论

本文基于 Mie 散射理论,针对常用波长为 $1.06 \mu m$ 和 $10.6 \mu m$ 的激光,分析了碳黑粒子和石墨粒子对其的消光特性,给出了在粒径变化时质量消光(散射、吸收)系数的变化规律,以及由两种粒子组成烟幕的透过率。通过分析可以得出结论如下:两种粒子都存在一个最佳粒径,使粒子消光性能最好,波长为 $1.06 \mu m$ 时,碳黑粒子的最佳粒径为 $0.22 \mu m$,石墨粒子的最佳粒径为 $0.16 \mu m$,波长为 $10.6 \mu m$ 时碳黑粒子和石墨粒子的最佳粒径都为

$1.6 \mu m$;粒径在 $0.05 \sim 0.16 \mu m$ 范围内时,石墨粒子的质量消光系数大于碳黑粒子的质量消光系数,此时石墨粒子的消光性能要比碳黑好,在其他区域内则相反;在粒子半径较小时,两种粒子的消光作用都是以吸收为主,随着粒子半径增大,散射作用越来越明显,此时两者共同对消光产生作用;在烟幕粒子服从对数分布的条件下,计算了烟幕透过率小于15%时各粒子组成烟幕所需的厚度。文中计算结果只作为一种参考,在作战应用中要根据客观条件和实际情况选择使用哪种烟幕,以达到最好的干扰效果。

参考文献:

- [1] Liu Xiangcui, Zheng Weiping. Study on extinction characteristic of nano-fe powders smoke screen to $1.06 \mu m$ and $10.6 \mu m$ laser [J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (9): 913-915. (in Chinese)
刘香翠, 郑卫平. 纳米铁粉烟幕对 $1.06 \mu m$ 和 $10.6 \mu m$ 激光的消光特性研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 913-915.
- [2] Zhang Zhongnan, Ma Qidong, Jin Zhao. Application of smoke screen on countering IR and laser guided weapons [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35 (3): 17-20. (in Chinese)
张中南, 马其东, 金钊. 烟幕在对抗红外与激光制导武器中的应用[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 17-20.
- [3] Jiang Yaoting, Yang Jie, Zhou Xiaosong. Developing status quo of laser interference technique [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 35(5): 387-390. (in Chinese)
蒋耀庭, 杨杰, 周晓松. 激光干扰技术及发展现状[J]. 红外与激光工程, 2001, 35(5): 387-390.
- [4] Sun Guozheng, Sun Qiang, Ren Zhibin. Analysis of the radius of microsphere particles based on mie scattering theory [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34 (4): 495-498. (in Chinese)
孙国正, 孙强, 任智斌. 基于 Mie 散射理论的微球体颗粒半径分析 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34 (4): 495-498.
- [5] J A Lock. Improved gaussian beam-scattering algorithm [J]. Appl. Opt., 1995, 34 (3): 559-570.
- [6] Wang Hongxia, Liu Daizhi, Song Zibiao. Study on extinction characteristic of nano-graphite smoke screen to infrared laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (3): 262-265. (in Chinese)
王红霞, 刘代志, 宋子彪. 纳米石墨烟幕对红外激光的消光特性研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (3): 262-265.