

·测试、试验与仿真·

## 基于 MATLAB 环境的激光烟幕干扰分析与研究

刘 鑫

(92941 部队 92 分队, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘要:** 简要概括了无源干扰中的烟幕干扰、以及烟幕的基本知识, 分析烟幕的产生、干扰原理, 详细介绍了烟幕粒子尺寸分布函数, 以及烟幕消光的比尔-朗伯定律。针对 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长的激光, 分析了石墨粒子对其消光特性, 仿真显示, 在粒子半径变化时, 质量消光系数的变化规律, 以及由石墨粒子及铜粉粒子组成的烟幕的透过率与烟幕厚度、烟幕浓度的变化规律。

**关键词:** 激光制导; 无源干扰; 烟幕干扰; 消光系数

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-01-0086-05

## Analysis and Research on Laser Smoke Jamming Based on MATLAB

LIU Xin

(92941 Army Unit of PLA, Huludao 125000, China)

**Abstract:** The smoke interference in passive interference and the basic knowledge of smoke are summarized. The generation and the jamming principle of smoke are analyzed. The distribution function of the smoke particle size and Bill Lambert law of smoke extinction are introduced. The extinction characteristic of the graphite particles to 1.06  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength laser is analyzed. Simulation results show the changing laws of mass extinction coefficient, the transmittance of smoke, which is composed of graphite and copper powder particles, smoke thickness and concentration as particles radius changing.

**Key words:** laser guidance; passive jamming; smoke jamming; extinction coefficient

烟幕在战场上主要用于遮蔽、迷盲、欺骗和识别。传统的遮蔽烟幕主要施放于友军阵地或友军阵地和敌军阵地之间, 降低敌军观察哨所的侦察能力, 便于友军安全地集结、机动和展开, 或为支援部队的救助及后勤供给、设施维修等提供掩护; 在现代武器战场上多通过利用不发光的材料来吸收和散射激光, 影响光电精确制导武器接收信号的传输, 降低对方的光电设备的效能和制导武器的精度<sup>[1]</sup>。主要有烟幕干扰、气球干扰、气溶胶干扰和假目标等。烟幕作为激光无源干扰手段, 使用的效果已被事实证明, 烟幕不仅可以使激光目标指示器的激光束或目标反射回来的激光束的能量严重衰减, 造成激光导引头接收能量不足, 无法进行正常

的制导功能, 还可以反射激光能量, 产生假目标, 诱骗导弹在烟幕前爆炸。

### 1 烟幕干扰原理

烟幕干扰技术<sup>[2]</sup>通过在空气中施放大量的气溶胶微粒, 以改变电磁波在介质中的传输特性, 从而可以有效地干扰和欺骗对方的光电系统和制导系统, 既能够达到隐藏真目标的目的, 又能显示出假的目标, 给对方造成干扰。

#### 1.1 烟幕粒子尺寸分布函数

烟幕粒子的分布并不是单一的, 而是遵从一定

的分布,粒子尺寸的分布函数有两种形式。分别为密度函数表示的微分分布和累积分布函数表示的积分分布。

常用的密度函数有两种,分别为数量密度函数和质量密度函数,对应的用  $p$  和  $q$  表示,是指在某一粒径处单位粒径区间内粒子数或质量数所占的百分比。常见的累积分布函数也有两种,分别为粒数积分分布函数和质量积分分布函数,对应的用  $F$  和  $G$  来表示,物理意义是累积筛下粒子数分数或质量分数。用于描述烟幕粒子的分布特征的分布函数主要有以下两种。

### (1) 正态分布。

尽管符合正态分布的烟幕是非常少的,但是它仍是各种分布的基础。微分分布的函数表达式为

$$p(d) = \frac{dF}{dd} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma} \exp\left(-\frac{d-d_1}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中,  $q(d)$  和  $p(d)$  的函数形式相同;  $d_1$  为算数平均直径。积分分布函数表达式是

$$F(d) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma} \int_0^d \exp\left(-\frac{d-d_1}{2\sigma^2}\right) dd \quad (2)$$

$G(d)$  的函数表达式和  $F(d)$  的函数表达式相同。

### (2) 对数正态分布

常用来描述烟幕、炸药或喷雾器等产生的粉尘或液滴。其微分分布表达式为

$$p(d) = \frac{1}{d(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_g} \exp\left(-\frac{(\ln d - d_g)^2}{2\sigma_g^2}\right) \quad (3)$$

积分分布表示为

$$F(d) = \frac{1}{d(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_g} \int_0^{\ln d} \exp\left(-\frac{(\ln d - d_g)^2}{2\sigma_g^2}\right) d(\ln d) \quad (4)$$

以上式子中的  $d_g$  是密度函数取的中间值时所对应的对数粒子的直径;  $\sigma_g$  是  $\ln d$  的对数标准差。

## 1.2 烟幕消光的比尔-朗伯定律

不同的烟幕具有不同的光学特性,首先反映在折射率上,折射率  $n$  的定义是真空中光速  $C$  与在烟幕质粒中的光速  $V_p$  之比,随波长稍有变化,对于非吸收性物质

$$n = C/V_p \quad (5)$$

称为绝对折射率,显然此值总是大于1。对于具有吸收性的物质,一般具有明显的电导率,其折射

率表示成复数<sup>[3]</sup>,有下式

$$n = n_r - in_i \quad (6)$$

式中,  $n_r$ 、 $n_i$  分别表示复折射指数的实部和虚部。在两相系统中的粒子,常用相对折射率,可定义为在悬浮介质中等光速  $V_m$  与在烟幕中质粒的光速之比

$$n = \frac{V_m}{V_p} = \frac{n_m}{n_p} \quad (7)$$

式中,  $n_m$ 、 $n_p$  分别为质粒和介质的绝对折射率。由于空气的绝对折射率  $n=1.00029$ ,  $\lambda=0.589\mu\text{m}$  实际上与在真空中相差无几,故对大气烟幕质粒,其绝对折射指数与相对折射指数相同。辐射在介质传输时,因与介质相互作用而受到削弱。设强度为  $I(\lambda)$  的光辐射,通过厚度为  $dy$  的介质后,其强度变化  $I(\lambda) = dI(\lambda)$ ,则有

$$dI(\lambda) = -I(\lambda)\sigma_e(\lambda,y)dy \quad (8)$$

其中,  $\sigma_e(\lambda,y)$  为介质的线性消光系数,求解此方程得

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\int_{y_1}^{y_2} \sigma_e(\lambda,y)dy\right] \quad (9)$$

式中,  $y_1$  和  $y_2$  为相距为  $L$  的两横向坐标,若介质均匀(浓度、粒度相同),则式(6)可写成

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\sigma_e(\lambda)L] \quad (10)$$

式中,  $I_0$ 、 $I(\lambda)$  分别表示入射光强和透射光强;  $\sigma_e(\lambda)$  为烟幕的质量消光系数;  $\lambda$  为辐射波长;  $N$  为烟幕的颗粒浓度;  $L$  为烟幕的厚度。

式(10)称为烟幕消光的比尔-朗伯定律,是辐射传输和遥感应用的一个基本定律。消光系数  $\sigma_e$  的量纲为  $[L^{-1}]$ ,前者用于透射率研究,后者用于遥感,成为体积效果系数。指数中的  $\sigma_e(\lambda)L = \tau(\lambda)$  称为介质的光学厚度。  $\tau \ll 1$  时,称为光学薄层。在推导比尔定律时实际上已假定吸收截面与入射辐射强度和吸收介质浓度无关,质粒之间彼此独立的散射<sup>[4]</sup>。

实验证明,当光被透明溶液中溶解的物质所吸收或被烟幕中的物质所吸收时  $\sigma_e$  与浓度  $c$  成正比,有下式

$$\sigma_e = \alpha_e c \quad (11)$$

式(11)中的新常数  $\alpha_e$  称为质量消光系数。辐射在大气烟幕中传输引起的消光,通过烟幕的散射与吸收,分别用散射系数  $\alpha_s$  和吸收系数  $\alpha_a$  表示它们的性能。它们与消光系数的关系为  $\alpha_e = \alpha_s + \alpha_a$ 。将  $\alpha_e$  的表达式代入式(10)中得

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha_c(\lambda)cL] \quad (12)$$

式(12)所反映的即是“朗伯-比尔”定律,它成立的条件是粒子对光的吸收与散射不受周围粒子的影响。这一条件只有当浓度小到一定的数值(光谱透过率约大于等于5%)时才成立。 $Q_a$ 为烟幕粒子的吸收效率因子, $Q_s$ 为烟幕粒子的散射效率因子,与 $Q_e$ 烟幕的衰减效率因子三者的关系为

$$Q_e = Q_a + Q_s \quad (13)$$

## 2 烟幕对激光的干扰分析

### 2.1 石墨的质量消光系数

在分析粒子对激光的消光特性时,通常使用质量消光系数进行分析,即质量消光系数 $k_e$ 、质量散射系数 $k_s$ 和质量吸收系数 $k_a$ ,当粒子半径为 $\lambda$ 时,三者的关系为<sup>[5]</sup>

$$k_e = \frac{3Q_e}{4\rho\lambda} \quad (14)$$

$$k_s = \frac{3Q_s}{4\rho\lambda} \quad (15)$$

$$k_a = k_e - k_s \quad (16)$$

其中的 $\lambda$ 为粒子的半径; $\rho$ 为粒子的质量密度。

在仿真的过程中使用到的参数如表1所示。

表1 石墨复折射率参数

物质	$\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时的 复折射率	$\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 时的 复折射率	粒子质量密度 $\rho$ / $\text{g/cm}^3$
石墨	2.84-1.46i	5.23-4.52i	2.10

当波长为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 时,通过MATLAB软件仿真得到的石墨质量消光系数和粒子半径的关系如图1所示。

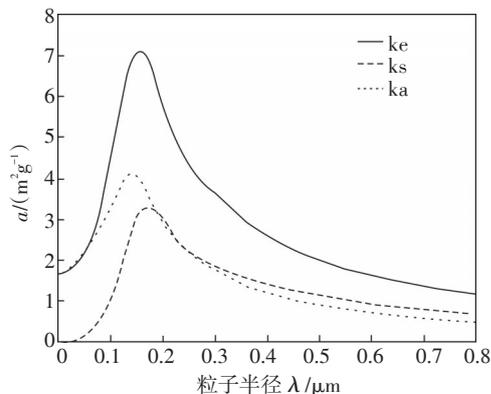


图1  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  时石墨的质量消光系数与粒子半径的关系

由图1看得出,石墨的质量消光系数在随着粒子半径逐渐增大的过程中,曲线有一个峰值,峰值的存在说明了当入射光的波长一定的情况下,烟幕粒子存在一个最佳粒子半径,在该粒子半径处烟幕对激光的消光作用最为强烈,石墨粒子的最佳粒子半径约为 $0.23 \mu\text{m}$ ,同时,在粒子半径未到各自的最佳粒子半径时,吸收作用占的比例要大于散射作用所占的比例;超过最佳粒子半径后,吸收和散射作用所占的比例大致相同。

当波长为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 时,通过MATLAB软件仿真得到的石墨质量消光系数和粒子半径的关系如图2所示。

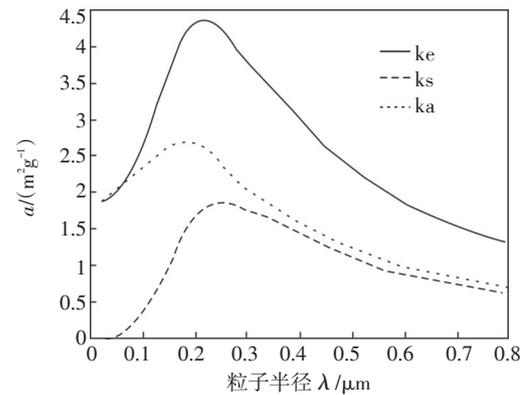


图2  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  时石墨的质量消光系数与粒子半径的关系

由图2可以看出,当波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 时石墨的质量消光系数与粒子半径的关系曲线和波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时的曲线的大体变化是一致的,同样存在一个峰值,即存在一个最佳粒子半径对激光的消光作用最强,但是此时石墨的质量消光系数的峰值在 $1.6 \mu\text{m}$ 左右,相对比波长为 $1.06 \mu\text{m}$ ,此时烟幕粒子的三个系数都要小很多。同样,在粒子半径未到各自的最佳粒子半径时,吸收作用占的比例要大于散射作用所占的比例;超过最佳粒子半径后,对于石墨粒子,散射作用所占的比例开始超过吸收作用所占的比例。

### 2.2 烟幕粒子透过率仿真分析

在实际中,均匀单一粒子半径的烟幕是不存在的<sup>[6]</sup>,粒径的大小服从对数正态分布,根据式(3)和式(4)得烟幕的粒径分布为

$$N(\lambda) = \frac{1}{\lambda(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_g} e^{-\frac{(\ln\lambda - \lambda_g)^2}{2\sigma_g^2}} \quad (17)$$

式(17)中的 $\lambda$ 为粒子半径是式(3)中的 $d$ 的一半; $\lambda_g$ 是烟幕粒子对数的平均值; $\sigma_g$ 是烟幕粒子对数的标准差。

根据比尔-朗伯定律式(12),透过率的表达式可以表示为

$$T = \frac{I_0(\lambda)}{I_\lambda} = e^{-\pi c L \int_0^\infty (Q_a + Q_s) N(\lambda) \lambda dy} \quad (18)$$

式中, $c$ 为烟幕的浓度; $\lambda$ 为烟幕粒子的半径(单位为 $\mu\text{m}$ ); $L$ 为烟幕的厚度(单位为 $\text{m}$ )。

将式(17)代入式(18)得到

$$T = \exp(-\pi c L \int_0^\infty (Q_a + Q_s) \frac{1}{\lambda(2\pi)^{\frac{1}{2}}\sigma_g} \cdot e^{-\frac{(\ln\lambda - \lambda_g)^2}{2\sigma_g^2}} \lambda dy) \quad (19)$$

通过MATLAB仿真,得到的透过率随各个参量变化的曲线如图3~图5所示。同时进行对应的分析。

图3为烟幕浓度的正态分布函数。

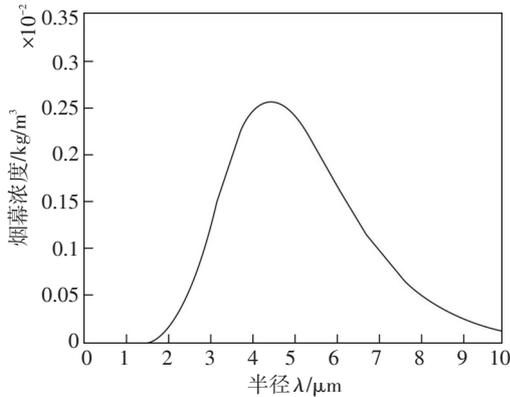


图3 烟幕粒子的正态分布函数

从图3中可以看出,烟幕浓度取最高值时,粒子的半径取值约为 $4.5 \mu\text{m}$ 。以此为中心,左右对称。从该位置向两端逐渐减小。

图4为石墨以及铜粉两种烟幕粒子波长一定时烟幕浓度和透过率关系的仿真曲线。

从图中可以看出,烟幕浓度越大,透过率越小,从而干扰效果越强。当烟幕浓度一定时,石墨粒子设置的干扰效果要优于铜粉粒子组成的烟幕的干扰效果。因此,要达到一定的干扰效果,保证烟幕的浓度是必须的,但是也要考虑到设置烟幕选择的

材质。

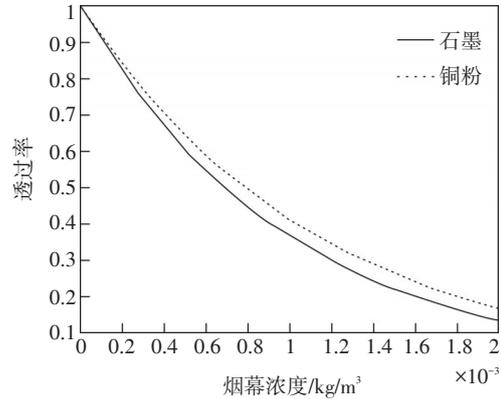


图4 等波长时烟幕浓度与透过率的关系

图5为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 时烟幕厚度与透过率的关系。

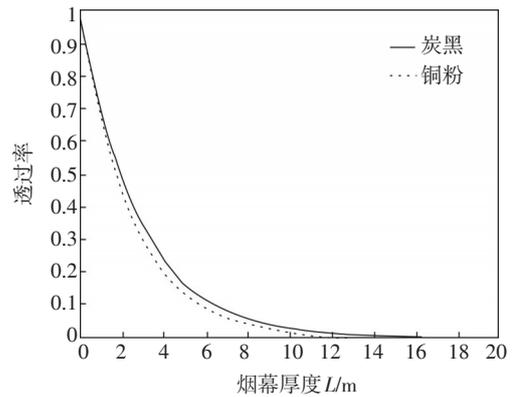


图5 烟幕厚度与透过率的关系

随着烟幕厚度的增加,无论是石墨还是铜粉,其透过率均在减小,且铜粉烟幕的透过率要比石墨烟幕的透过率的变化相对平缓一些。透过率越小,说明烟幕的干扰效果越好。同样可以看出,在烟幕厚度相同的条件下,石墨粒子组成的烟幕的遮蔽效果要好于铜粉组成的烟幕。因此,要达到预定的干扰效果,烟幕的厚度必须有保证,除此之外,还应考虑到烟幕弹的发射水平及环境等因素。

### 2.3 温度对烟幕透过率影响分析

烟幕在扩散的过程中,由于受外界风场的影响,使得烟幕中各部分的温度不同。具体来说,距离发烟点近的部分烟团温度高,辐射亮度值大;距离发烟点远的部分烟团温度低,辐射亮度值小。同

样,在烟幕内部,由于温度高的部分浮力大,上升速度快;而与之相反,温度低的部分浮力小,上升速度慢。因此由于烟幕中温度的差异,会影响烟幕的透过率以及扩散行为。由于烟幕内部温度变化规律复杂,采用式(20)所示的方程来描述烟幕粒子的温度衰减过程<sup>[7]</sup>。

$$T(t) = (T_0 - T_e)e^{-ct} + T_e \quad (20)$$

式中,  $T(t)$  是  $t$  时刻烟幕粒子的温度;  $T_0$  是烟幕粒子的初始温度;  $T_e$  是环境温度;  $c$  是温度衰减的控制系数。对于烟幕粒子,温度越高,所受浮力就越大,上升就越快。式(21)表示温度对浮力的影响。

$$f = H(T(t) - T_e) \quad (21)$$

式中,  $f$  是  $t$  时刻粒子受到的上升力;  $T(t)$  为  $t$  时刻的粒子温度;  $T_e$  为环境温度;  $H$  为上升力的控制系数。

令烟幕粒子初始温度  $T_0$  为 40 °C, 环境温度  $T_e$  为 20 °C, 温度衰减系数  $c$  为 0.005, 量化范围设为 160~240, 计算得到的烟幕温度量化变化范围随时间变化曲线如图 6 所示。

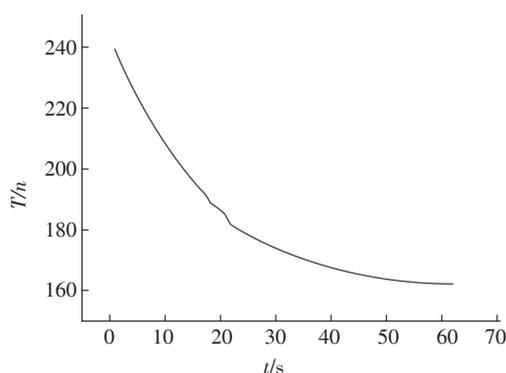


图 6 烟雾粒子温度时间变化曲线图

由图 6 可见,随着烟幕的扩散,烟幕粒子温度量化值逐渐降低,最终接近环境温度量化值。

### 3 结论

烟幕作为重要的无源干扰手段,不仅是用来对抗导弹或侦察设备强有力的手段,而且是和平时用来干扰卫星、无人机等高空侦察的好办法,所以烟幕干扰的发展不可限量。针对 1.06 μm 和 10.6 μm 波长的激光,分析了石墨粒子对其消光特性,仿真显示了粒子半径发生变化时粒子的质量消光系数的变化规律。然后又讨论了烟幕的透过率与烟幕厚度、烟幕浓度及粒子半径的变化规律,以及温度对烟幕透过率的影响。得出了一般情况下在波长取 1.06 μm 和 10.6 μm 时,石墨粒子组成的烟幕的干扰效果规律,通过石墨和铜粉的仿真比较,进一步分析了透过率与烟幕浓度、厚度的关系。该结果可以作为一种参考,在实际应用中,为达到最好的干扰效果,还要考虑到客观条件和实际情况等因素。

### 参考文献

- [1] 王瑞凤,肖波,吴伟东.激光制导武器的干扰方法研究[J]. 红外与激光工程,2007,369(增刊):312-315.
- [2] 马锐.激光制导武器的发展分析[J]. 红外与激光工程,2008,37(增刊):266-268.
- [3] 苏世明,徐锦,刘珍阳,等.激光制导武器的发展现状[J]. 红外与激光工程,2006,35(增刊):41-47.
- [4] 李晓峰,周昕,卢熙,等.激光在烟雾中传输特性的数值模拟分析[J]. 激光技术,34(3):381-384.
- [5] 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等.烟幕理论与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004,38-51.
- [6] 胡中华,陈家璧,刘雅.光在雨中传输的研究[J]. 大学物理,2007,26(7):34-39.
- [7] 张芹,吴慧中,张健.基于粒子系统的建模方法研究[J]. 计算机科学,2003,30(8):144-14.