

文章编号: 1001-3806(2013)01-0089-04

泡沫对激光传输能量衰减的研究

胡 波¹ 章文芳² 宋 伟¹

(1. 电子工程学院 软件工程中心, 合肥 230037; 2. 中国人民解放军 73211 部队, 南京 211812)

摘要: 为了定量研究泡沫对激光传输的影响, 基于电波吸收、反射和散射特性对泡沫衰减遮蔽机理进行了分析。根据泡沫状态的不同, 将泡沫分为离散泡沫和粘连泡沫, 运用朗勃-比尔定律定量计算了离散泡沫的激光透过率及能量衰减, 运用几何光学和电磁波传播理论定量计算了粘连泡沫的激光透过率及能量衰减, 并利用 MATLAB 中仿真工具进行了数值仿真。结果表明, 泡沫对激光衰减作用明显, 且随着泡沫厚度的增加, 激光透过率逐渐减小, 与测得的实验值基本一致, 进一步验证了模型的合理性。

关键词: 激光技术; 泡沫; 激光; 透过率

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.022

Study on the energy attenuation of foam to laser

HU Bo¹, ZHANG Wen-fang², SONG Wei¹

(1. Software Engineering Center, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. 73211 Unit, Chinese People's Liberation Army, Nanjing 211812, China)

Abstract: In order to study effect of foam on laser transmission quantitatively, based on the absorption, reflection and scattering characteristics of electromagnetic wave, attenuation blanking mechanism of foam was analyzed. According to different foam condition, foam was divided into discrete foam and adhesive foam, and their transmission and energy attenuation were calculated quantitatively with Lambert-Beer law and theories of geometrical optics and electromagnetic wave propagation. The numerical simulation results based on MATLAB tool show that foam has obvious effect on laser attenuation, with increasing of foam thickness the transmission of laser is diminishing, and it is similar to experimental. The rationality of the model is proved further.

Key words: laser technique; foam; laser; transmission

引 言

随着激光技术的快速发展和在军事领域的广泛运用, 大量的激光制导武器装备部队, 对军事目标构成了严重的军事威胁。激光制导武器按照制导方式的不同, 可分为波束式、半主动寻的式、主动寻的式 3 种。其中, 半主动寻的式是激光制导武器普遍采用的制导方式, 即导引头与激光照射装置分开配置于两地。泡沫对激光具有较强的衰减特性, 可改变激光的光学传输特性, 使激光导引头不能接收或接收错误制导信息, 最终使激光制导武器无法发现或命中目标^[1]。泡沫作为一种新型的光电无源干扰手段, 可以有效地克服烟幕等传统干扰手段遮蔽干扰波段窄、悬空停留时间短等缺点^[2-3], 因此, 研究泡沫对激光传输的能量衰减具有重要的意义。

作者简介: 胡 波 (1968-) 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为军事运筹、软件工程。

E-mail: nub8705@126.com

收稿日期: 2012-05-10; 收到修改稿日期: 2012-05-25

1 泡沫衰减遮蔽机理分析

泡沫是由许多密集的小气泡堆积在一起, 气泡间只被极薄的一层液膜所隔开, 构成多面体气泡而堆积起来的。由于泡沫特殊的组分和结构方式, 使其对光线具有很强的吸收、反射和散射作用, 泡沫的衰减遮蔽机理与烟幕相类似。激光本质上是电磁波, 当电磁波传播到泡沫液膜表面上时, 遇到表面活性剂分子、原子不断运动形成的电磁辐射场, 与之发生相互作用后, 在原传输方向上形成衰减^[4]。其衰减示意图如图 1 所示。

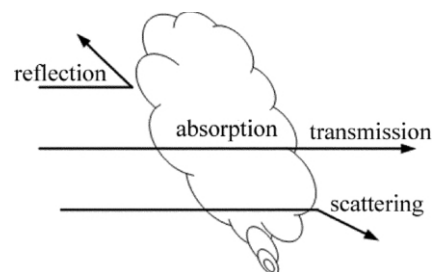


Fig. 1 Attenuation of laser through foam

2 泡沫的激光透过率及能量衰减值

气泡是构成泡沫的基本结构单元,按照状态的不同,可以将泡沫分为离散泡沫和粘连泡沫两种。构成离散泡沫的气泡彼此间相互独立,构成粘连泡沫的气泡粘连在一起形成一个整体。

2.1 离散泡沫的激光透过率及能量衰减值

激光光束通过离散泡沫的透过率可以用朗勃-比尔定律进行计算^[5-6],公式为:

$$\tau = \exp[-B(\lambda)CR] \quad (1)$$

式中 C 为离散泡沫浓度 R 为离散泡沫的厚度 $B(\lambda)$ 为泡沫的质量消光系数,当泡沫材料的配方、构成泡沫的气泡粒径、入射的光束波段确定时 $B(\lambda)$ 是一定值。但在实际情况中,离散泡沫浓度 C 不可能是均匀的,它应当是一个与坐标相关的函数 $C(x, y, z)$,因此,应当对这个函数沿特定的路径进行线积分。则:

$$\tau = \exp\left[-B(\lambda) \int_R C(x, y, z) dR\right] \quad (2)$$

离散泡沫在3维空间存在扩散过程,且扩散的模式和连续点源烟幕类似,其在3维空间扩散示意图如图2所示。

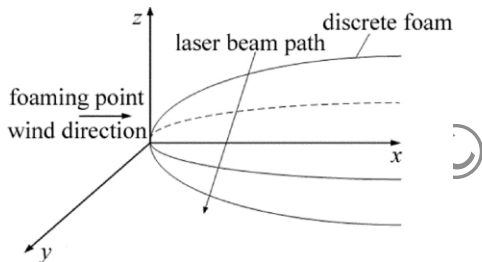


Fig. 2 Diagram for 3-D spatial diffusion of discrete foam

在图2中,坐标原点为发泡点的地面垂直投影点, x 轴与水平风向平行, z 轴与地面相垂直。假设地面无吸收和吸附作用,风向恒定,风速大于 1m/s ,地面水平均一,且离散泡沫本身是无沉降的被动成分,由“统计理论”及“梯度传送理论”导出以下高斯(正态)型浓度模式^[7]:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (3)$$

式中 $C(x, y, z, H)$ 为点 (x, y, z) 处的离散泡沫浓度,单位是 g/m^3 ; Q 为源强(离散泡沫的释放速率),单位是 g/s ; H 为离散泡沫有效高度,单位是 m , $H = \text{释放点高度 } H_0 + \text{离散泡沫抬升高度 } \Delta H$; u 为释放期间的平均风速,单位是 m/s ; σ_y, σ_z 为 y 方向和 z 方向的大气扩散方差,单位是 m :

$$\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1} \quad (4)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2} \quad (5)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为与大气稳定度及地形有关的参量。沿激光光束路径对离散泡沫浓度进行线积分:

$$\int_R C(x, y, z) dR = \int_{t_1}^{t_2} C(x(t), y(t), z(t)) \times \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt \quad (6)$$

式中 R 为离散泡沫厚度, $C(x, y, z)$ 为泡沫的浓度分布。设激光光束的入射点坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 出射点坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 则激光光束路径的直线公式为:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (7)$$

化简得:

$$y(x) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1 \quad (8)$$

$$z(x) = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + z_1 \quad (9)$$

将以上两式微分得:

$$y'(x) = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (10)$$

$$z'(x) = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

令 $x = t$, 将(3)式~(5)式和(7)式~(11)代入(6)式, 可得:

$$\int_R C(x, y, z) dR = \int_{x_1}^{x_2} a_1 x^{-(\alpha_1 + \alpha_2)} \times \exp(a_2 x^{2-2\alpha_1} + a_3 x^{1-2\alpha_1} + a_4 x^{-2\alpha_1}) \times [\exp(a_5 x^{2-2\alpha_2} + a_6 x^{1-2\alpha_2} + a_7 x^{-2\alpha_2}) + \exp(a_8 x^{2-2\alpha_2} + a_9 x^{1-2\alpha_2} + a_{10} x^{-2\alpha_2})] dx \quad (12)$$

式中 $a_1 \sim a_{10}$ 均为常数, 它们分别为:

$$a_1 = \frac{Q}{2\pi u \gamma_1 \gamma_2} \sqrt{1 + \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2 + \left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}\right)^2} \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{-1}{2\gamma_1^2} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)^2 \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{-(y_2 - y_1)(y_1 x_2 - y_2 x_1)}{\gamma_1 (x_2 - x_1)^2} \quad (15)$$

$$a_4 = \frac{-(y_1 x_2 - y_2 x_1)^2}{2\gamma_1 (x_2 - x_1)^2} \quad (16)$$

$$a_5 = a_8 = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}\right)^2 \quad (17)$$

$$a_6 = \frac{-(z_2 - z_1)(z_1 x_2 - z_2 x_1 - H)}{\gamma_1 (x_2 - x_1)^2} \quad (18)$$

$$a_7 = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_1 x_2 - z_2 x_1 - H}{x_2 - x_1}\right)^2 \quad (19)$$

$$a_9 = \frac{-(z_2 - z_1)(z_1 x_2 - z_2 x_1 + H)^2}{\gamma_1 (x_2 - x_1)^2} \quad (20)$$

$$a_{10} = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_1 x_2 - z_2 x_1}{x_2 - x_1} + H \right)^2 \quad (21)$$

令 $A = \int_R C(x, y, z) dR$ 则离散泡沫的激光透过率为:

$$\tau = \exp[-B(\lambda)A] \quad (22)$$

离散泡沫对激光的能量衰减值 D 可用下式进行计算:

$$D = 10 \lg \tau = 10 \lg \exp[-B(\lambda)A] \quad (23)$$

2.2 粘连泡沫的激光透过率及能量衰减值

粘连泡沫云浓度不便于直接进行求解,无法对其沿特定路线进行积分求出透过率。由于构成粘连泡沫云的气泡直径一般在 2mm ~ 1cm 之间^[8],对于激光光束而言,其波长一般在微米级,可用几何光学和电磁波传播理论计算激光在通过粘连泡沫云时的透过率。

气泡是构成粘连泡沫云的基本结构单元。通常状况下,一个独立气泡由其外部气体、气泡液层和气泡内充气体三部分构成,因此,每个气泡均具有内外两个气-液界面^[9]。激光在气泡中的传播过程及在 4 类界面上的反射和折射情况如图 3 所示。其中 θ 表示激光通过第 1 类界面(外凸界面)的入射角, α 表示激光通过第 3 类界面(内凸界面)的入射角, β 表示激光通过第 4 类界面(内凹界面)的入射角, γ 表示激光通过第 2 类界面(外凹界面)的入射角。

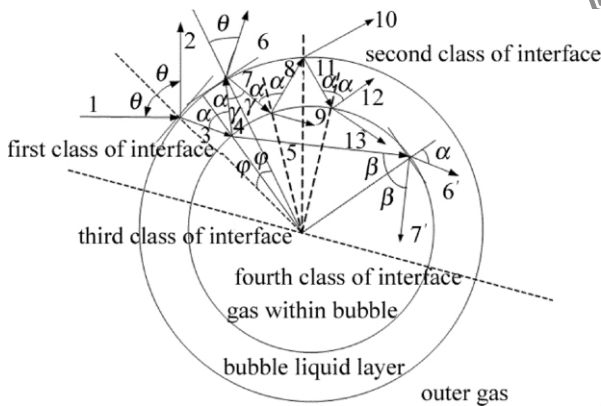


Fig. 3 Laser propagation in the bubble

由于气泡的粒径远大于激光光束宽度,因此,当激光穿过粘连泡沫云液膜时,可将激光透射点的内外界面近似等效为平行平面^[10],如图 4 所示,其中 θ_1, θ_2 分别表示激光通过 n_1 界面的入射角和折射角, θ_3, θ_4 分别表示激光通过 n_3 界面的入射角和折射角。

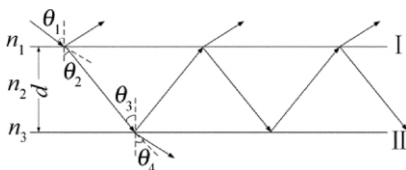


Fig. 4 Laser transmission of double-layer interface

激光在通过双层界面时的透过率:

$$\tau_1 = \frac{r_1^2 + 2r_1r_2\cos 2\delta + r_2^2}{1 + 2r_1r_2\cos 2\delta + r_1^2r_2^2} \quad (24)$$

式中 r_1 为 n_1 和 n_2 界面反射率; r_2 为 n_2 和 n_3 界面反射率; 2δ 为相邻两相干光束的相位差。

根据参考文献[10]可知,粘连泡沫云对激光的衰减比较复杂,可运用电磁场的边界条件及多层薄膜的矩阵分析方法来处理。设第 m 层膜由膜向大气方向正向传播的电场矢量为 E_{m+1}^+ ,第 m 层膜由膜向大气方向反向传播的电场矢量为 E_{m+1}^- ,第 1 层膜边界由大气向膜方向正向传播的电场矢量为 E_0^+ ,第 1 层膜边界由大气向膜方向反向传播的电场矢量为 E_0^- ,则 m 层粘连泡沫云的透过率为:

$$\tau_m = \frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} = \prod_{i=1}^{m+1} t_i \quad (25)$$

式中, $\prod_{i=1}^{m+1} t_i = t_1 t_2 \dots t_{m+1}$, t_i 为第 i 层膜界面上的菲涅耳系数。

a_{11} 可以由下式求得:

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{m+1} t_i \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ r_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\delta_1} & r_2 e^{i\delta_1} \\ r_2 e^{-i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} e^{i\delta_m} & r_{m+1} e^{i\delta_m} \\ r_{m+1} e^{-i\delta_m} & e^{-i\delta_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ 0 \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{m+1} t_i \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中 δ_i 为激光通过第 i 层膜后产生的相位差。 m 层粘连泡沫云对激光的能量衰减值 D_m 为:

$$D_m = 10 \lg \tau_m = 10 \lg \prod_{i=1}^{m+1} \frac{t_i}{a_{11}} \quad (27)$$

2.3 仿真分析

针对同一种泡沫配方,泡沫的源强为 100g/s,风速为 5m/s,入射的激光光束为 1.06 μ m 不考虑大气对激光传输的衰减作用,利用 MATLAB 仿真工具对不同粒径下的泡沫厚度与激光透过率之间的关系进行研究。

假设构成泡沫的气泡粒径分别为 4mm,6mm,9mm,此时对应泡沫的质量消光系数分别约为 0.73m²/g,0.66m²/g,0.50m²/g,根据透过率计算模型,计算泡沫厚度与激光透过率的关系,其数值计算结果如图 5、图 6 所示。

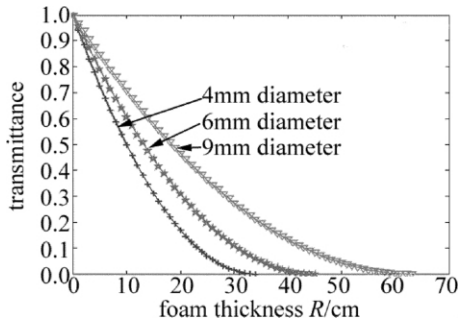


Fig. 5 Relationship between discrete foam thickness and transmittance

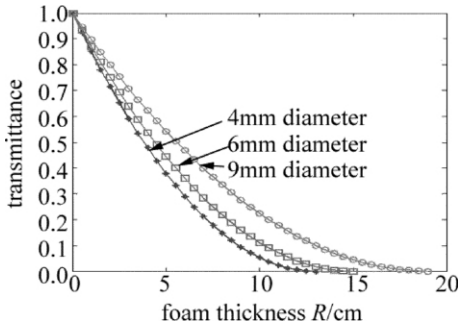


Fig. 6 Relationship between adhesive foam thickness and transmittance

从图5、图6可知,泡沫对激光的衰减作用明显,当构成泡沫的气泡粒径为6mm时,厚度仅为15cm的粘连泡沫激光透过率几乎为0,厚度为45cm的离散泡沫激光透过率几乎为0;当构成泡沫的气泡粒径减小时,泡沫对激光的衰减作用增强,这是因为气泡尺寸越小,单位体积内的气泡数量越多,泡沫的质量消光系数越大,对激光的衰减作用越明显;仿真的结果与测得的实验值基本吻合。

3 结束语

从吸收、反射和散射角度对泡沫衰减遮蔽机理进行了分析,根据泡沫状态的不同,将泡沫分为离散泡沫

和粘连泡沫,分别建立泡沫两种状态下的透过率和能量衰减计算模型,最后,利用MATLAB仿真工具对建立的模型进行了仿真分析,结果表明,泡沫对激光衰减作用明显。

参考文献

- [1] SHEN T, SONG J Sh. Study on the simulation of smoke screen counterworks laser guided weapon [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(1): 210-213 (in Chinese).
- [2] ZHAO J, PAN G P, CHEN X. Novel medium of broadband PPECM: aqueous foam [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 425-429 (in Chinese).
- [3] ZHAO J, ZHANG T H, WEI J R, et al. Aqueous foam for photoelectric confrontation [J]. Journal of Chemical Defense, 2008(4): 34-37 (in Chinese).
- [4] WANG F. Study on the high stability aqueous foam formulation and application in cover and camouflage [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006: 33-34 (in Chinese).
- [5] REN L N, LIU H T, SHEN L. Study of the energy attenuation of smoke screen to infrared laser [J]. Infrared Technology, 2007, 29(11): 638-640 (in Chinese).
- [6] ZHANG W, SHI J M, WANG J Ch. Study on 1.06 μ m and 10.6 μ m laser attenuation performance of foam [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 293-296 (in Chinese).
- [7] YAO L J, GAO J L, XIAO K T. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 74-76 (in Chinese).
- [8] WEI F. Study on extinction performance and suspension technology of foam [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011: 32-36 (in Chinese).
- [9] XIE Ch S, WANG M Q, JIN L A. Theoretic and experimental investigation on improving the interference effect for the guided missile by special foam cloud [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(3): 10-13 (in Chinese).
- [10] ZHAO J. Study of extinction performance and explore for mechanism of aqueous foam [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011: 75-78 (in Chinese).