

文章编号:1001-5078(2007)09-0870-04

雾状油遮蔽性能研究

王甲寅, 时家明, 汪家春

(解放军电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:文章使用 Mie 散射理论, 对粒径服从对数正态分布的雾状柴油的质量消光系数及其在可见光(0.3~0.8 μm)、中/长波红外大气窗口(3~5 μm 和8~14 μm)的平均质量消光系数进行了计算。研究了粒径分布参数对雾状油遮蔽性能的影响, 结果表明当 r_0 与被遮蔽(波段)波长接近且 b_0 趋于 1 时, (波段平均)质量消光系数具有最大值。最后通过实验, 研究了冷凝型雾状油(柴油)在以上三个波段的遮蔽性能, 实验结果表明其对可见光具有较强的遮蔽作用, 对远红外的遮蔽作用最弱, 实验结果与理论分析相一致。

关键词:雾状油; 遮蔽; 质量消光系数; 烟幕

中图分类号: TN972+.4 **文献标识码:** A

Studying of the Extinction Characteristics of the Oil Fog

WANG Jia-yin, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun

(1. Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Hefei Institute of Electronic Engineering, Hefei 230037, China)

Abstract: In this paper, using the Mie scattering theory, the mass extinction coefficients and the band mean mass extinction coefficients of the oil fog with the lognormal distribution are calculated in visible-light band(0.3~0.8 μm) and the IR transmission windows(including 3~5 μm and 8~14 μm). With the study of the relation between the parameters of the particles distributions and the mass extinction coefficients (or the band mean mass extinction coefficients), the mass extinction coefficients or the band mean mass extinction coefficients are maximum when b_0 closes to 1 and r_0 is near to the extinction (wave band) wave-length. By the experiments, the extinct characteristics of the natural condensate oil (diesel oil) fog is studied. The results show that the natural condensate oil fog has the strongest extinct ability on visible-light band, and has the feeblest extinct ability on far IR band. The mean particle radius of the natural condensate oil fog approaches the wave length of the visible-light band. The experiment results are concordance with the theoretical analyzing.

Key words: oil fog; extinction characteristics; the mass extinction coefficients; smoking

1 引言

烟幕是现代战场上干扰光学制导、观瞄武器系统的常用手段。以油性液体为发烟剂形成的雾状油烟幕具有取材方便、使用成本低、对环境副作用小等优点而被广泛采用。例如目前外军已列装的发烟设备:美国的 XM49、XM56、XM58 型发烟机、法国的 SG-18 型发烟机等^[1-3], 均可以柴油为发烟剂, 长时间连续施放大面积雾状油烟幕。因此, 有必要深入研究雾状油的遮蔽性能。本文首先计算了粒径服从对数正态分布的雾状油的质量消光系数, 对比研

究了粒径分布参数对质量消光系数的影响, 并通过实验进一步研究了自然冷凝型雾状油在可见光、中/远红外波段上的遮蔽性能, 验证了理论分析结果, 为雾状油的正确使用和对抗提供了依据。

2 理论分析模型

烟幕的消光性能通常用质量消光系数来表征。质量消光系数指的是单位质量烟幕的消光截面, 它

作者简介:王甲寅(1974-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电对抗技术。E-mail: wangjiayin163@163.com

收稿日期:2006-12-31; **修订日期:**2007-04-11

是反映烟幕消光性能的一个重要参数。

考虑一个厚度为 L 的烟幕层,一束平行辐射照射并穿透之,如图 1 所示,根据 Lambert-Beer 定律^[4],则透射的辐射强度为:

$$I_t = I_0 \exp\left[-\int_0^L \beta(\lambda) dx\right] \quad (1)$$

式中, I_0 为入射辐射强度; I_t 是透射辐射强度; $\beta(\lambda)$ 为消光系数。

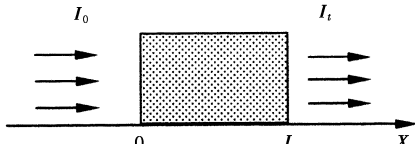


图1 一束平行辐射穿过厚度为 L 的烟雾层

当烟幕粒子尺寸不均匀时,有:

$$\beta(\lambda) = \int_0^\infty N \sigma_e(\lambda, r) n(r) dr \quad (2)$$

式中, $n(r)$ 和 N 分别为雾状油粒子半径的分布函数和粒子数密度; $\sigma_e(\lambda, r)$ 是指半径为 r 的粒子在波长为 λ 处的消光截面,近似认为雾状油粒子为球形,该截面可以由 Mie 散射理论求出^[5-6]。

对于密度为 ρ 的油性发烟剂所形成的雾状油烟幕,其质量消光系数为:

$$\beta_m(\lambda) = \frac{\int_0^\infty \sigma_e(\lambda, r) n(r) dr}{\rho \int_0^\infty \frac{4\pi}{3} r^3 n(r) dr} \quad (3)$$

由于实际情况下,任何光电设备均工作在某一个波段,因此定义波段平均消光系数,它可以用来表征烟幕在特定波段内的消光性能,其表达式为^[5]:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

则波段平均质量消光系数为:

$$\bar{\beta}_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_m(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

通过自然冷凝形成的雾状油的粒径分布可以认为是对数正态分布^[7-8],即:

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r \ln b_0}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_0}{\ln b_0}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中, r_0 和 b_0 分别为雾状油粒径的均值和方差。

将式(3)和式(5)分别代入式(1),则单一波长的透射辐射强度和波段平均透射辐射强度分别如式(7)和式(8):

$$I_t = I_0 \exp\left[-\int_0^L M \beta_m(\lambda) dx\right] \quad (7)$$

$$I_t = I_0 \exp\left[-\int_0^L \bar{M} \bar{\beta}_m dx\right] \quad (8)$$

其中, M 为单位体积的空间内烟幕颗粒的总质量。可见, $\beta_m(\lambda)$ 和 $\bar{\beta}_m$ 越大,烟幕的衰减效果越好。

3 数值计算及分析

利用上述公式,运用 Matlab 语言编程,分别计

算了粒径服从对数正态分布的雾状油(以柴油为例)的质量消光系数,及其在可见光(0.3 ~ 0.8 μm)、中波红外(3 ~ 5 μm)和长波红外(8 ~ 14 μm)波段的平均质量消光系数,如图 2 ~ 5 所示。其中,图 2 为 r_0 一定时,雾状油的质量消光系数随波长的变化情况。图 3 ~ 5 分别为雾状油在可见光、中波红外和长波红外波段的平均质量消光系数与粒径的关系。计算时柴油的密度取为 0.89 g/cm^3 。

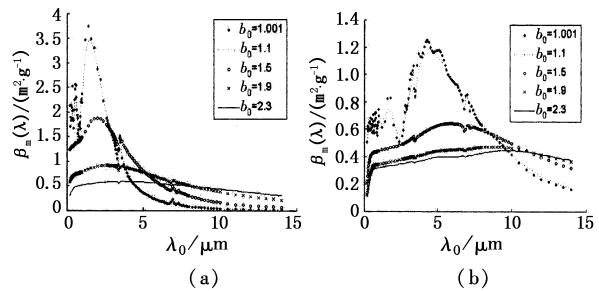


图2 雾状油的质量消光系数与波长的关系
(a) $r_0 = 1 \mu\text{m}$; (b) $r_0 = 3 \mu\text{m}$

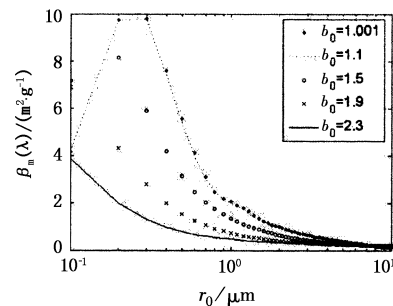


图3 不同粒径分布情况下雾状油的可见光波段平均质量消光系数

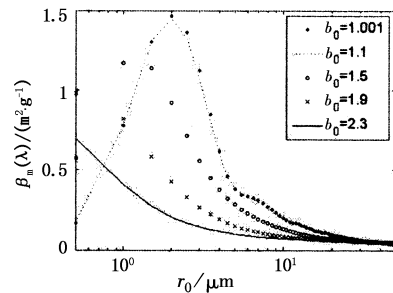


图4 不同粒径分布情况下雾状油的中红外波段平均质量消光系数

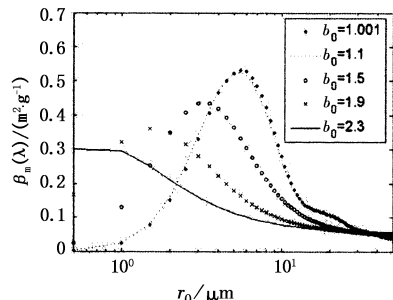


图5 不同粒径分布情况下雾状油远红外波段平均质量消光系数

从图2~5可以看出, b_0 的取值范围为 $(1, +\infty)$, b_0 分别等于 1.1 和 1.001 的两条曲线基本重合, 且最高峰值出现在 $b_0 = 1.001$ 的曲线上, 说明粒径分布越集中, (波段) 质量消光系数峰值越大。但是当分布集中到一定程度后, 进一步使粒径分布集中对提高其质量消光系数峰值的作用不大, 且此时(波段)质量消光系数变化曲线趋于稳定。

图2表明, 雾状油在 $0.3 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内具有不同程度的遮蔽作用。 r_0 一定时, 质量消光系数曲线随 b_0 的增加而变得平滑, 曲线的峰值下降; 对于相同的 b_0 值, 曲线峰值随 r_0 的增加而降低, 这一现象一方面说明粒径分布越集中, 越容易出现吸收峰, 表现为窄带吸收特性, 反之, 则在整个波段曲线越平滑, 表现为宽带吸收特性; 另一方面, 雾状油对短波长的吸收作用优于其他波长。同时可以看出, 随着 r_0 的增加, 峰值所对应的波长也相应增加, 该波长与 r_0 较为接近, 比如当 $r_0 = 3 \mu\text{m}$ 时, 质量消光系数峰值出现在 $4 \mu\text{m}$ 波长处(如图2(b)所示)。因此选取与被遮蔽波长较为接近的粒径可以得到较好的遮蔽效果。图3~5说明, 粒径服从对数正态分布时, 在 $0.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的平均质量消光系数曲线均为单峰曲线, 说明各波段内均存在最佳粒径分布, 使得质量消光系数最大, 此时 b_0 趋于 1 时, r_0 与相应波段的波长接近。相比之下, 对于以上三个波段, 当雾状油分别处于最佳粒径分布时, 其对可见光的遮蔽效果好于其他两个波段(对可见光波段的平均质量消光系数峰值为 $9.8 \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$), 对长波红外波段的遮蔽效果最差(对长波红外波段的平均质量消光系数峰值为 $0.54 \text{m}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$)。

4 实验研究

目前外军所装备的发烟机(如美国的 XM49、XM56、XM58 型发烟机、法国的 SG-18 型发烟机等)均采用加热柴油使其气化, 然后在空气中自然冷凝成为雾状油烟幕。为了研究该种烟幕的实际遮蔽性能, 我们进行了实验。实验场地布置如图6所示, 试验仪器主要包括: 自制的 SY-I 型液体烟幕发生器、AGEMA550 中红外热像仪、AGEMA590 长波红外热像仪、金属卤化物灯(5W)、WDS-3 光栅光谱仪、数码照相机、电热油汀, 发烟剂为 0#柴油。仪器布置如图6所示。

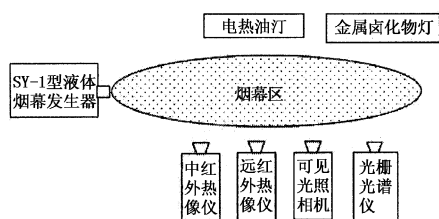


图6 雾状油烟幕遮蔽性能测试实验

实验时利用 SY-I 型液体烟幕发生器使 0#柴油在 350°C 恒温气化, 匀速喷射到空气中自然冷凝成为雾状油烟幕, 在目标正前方雾状油厚度约 50cm 。以电热油汀恒温在 65°C 为观察目标, 通过对比雾状油遮蔽前后油汀表观温度, 来判断其对红外波段的遮蔽性能, 通过光栅光谱仪所记录的金属卤化物灯的光谱辐射强度来判断可见光遮蔽性能。实验所得可见光光谱相对能量分布如图7所示, 红外热像仪观测图像如图8所示。在红外热像图中, 设置目标观察点 Sp01 和背景观察点 Sp02, 遮蔽前后所测中、长波红外波段的 Sp01 和 Sp02 点的温度如表1所示, 其中还列出了利用所测温度计算的相应波段的透过率。

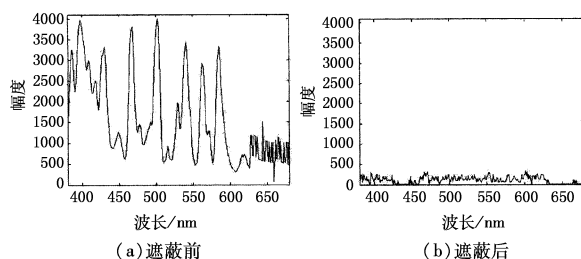


图7 遮蔽前后金属卤化物灯的可见光波段相对能量光谱分布

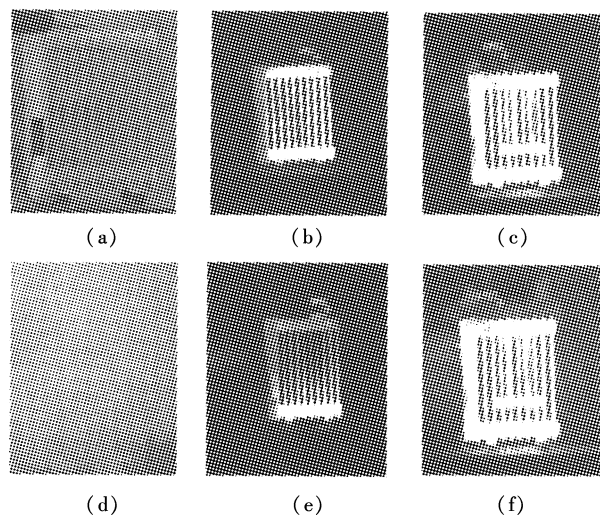


图8 雾状油遮蔽前后电热油汀的可见光及中波、长波红外图像
(a)、(b)、(c)分别为遮蔽前可见光、中波红外、长波红外图像
(d)、(e)、(f)分别为遮蔽后可见光、中波红外、长波红外图像

表1 遮蔽前后中波、长波红外波段
观察点温度及透过率

项目	中波红外波段		长波红外波段	
	Sp01/ $^\circ\text{C}$	Sp02/ $^\circ\text{C}$	Sp01/ $^\circ\text{C}$	Sp02/ $^\circ\text{C}$
遮蔽前温度	63.0	15.5	54.5	13.4
遮蔽后温度	18.9	14.8	52.1	13.7
透过率/%	48.2		88.6	

由图7可以计算出实验中雾状油对可见光的透过率小于5%, 结合表1中所计算的红外波段的透

过率数据可以看出,一定质量浓度的冷凝型雾状油对可见光波段的遮蔽作用好于红外波段,对长波红外波段的遮蔽作用最弱。造成这一现象的主要原因是,自然冷凝型雾状油的粒径较小,与可见光波段波长接近,且粒径较为一致,实验结果与理论分析结果相一致。

从图8中可以更加明显地看到雾状油(柴油)烟幕在不同波段的遮蔽能力。遮蔽后电热油汀在可见光图像中人为无法辨认,遮蔽效果较好;中红外图像中的遮蔽区域温度明显变暗,观察点 Sp01 的温度由 63.0℃ 降低到 18.9℃,说明雾状油对中红外辐射产生了较强的衰减;长波红外波段的红外图像基本保持不变,观察点 Sp01 的温度仅变化了 2.4℃,说明其受到雾状油的遮蔽衰减影响较小。

5 结论

通过理论分析计算知道,满足一定粒径分布的雾状油具有可见光、中波红外及长波红外遮蔽作用,各波段的遮蔽性能与其粒径分布参数紧密联系。实验表明,以 0# 柴油为发烟剂所形成的冷凝型雾状油烟幕对可见光具有很好的遮蔽性能,对中红外波段具有一定的遮蔽作用,而对于长波红外波段的遮蔽作用最弱。由此可以看出,如果希望达到较好的多

波段遮蔽效果,在使用雾状油(柴油)的同时,还必须使用其他类型的烟幕作为辅助,以形成具有宽波段遮蔽能力的组合烟幕。同时,在对抗冷凝型雾状油(柴油)烟幕时,可以使光电对抗设备工作在长波红外波段。

参考文献:

- [1] Elkins Rush E, Kohl, R H. Proceedings of the smoke/obscurants [C]//Symposium 5, Volume 2, ADA104761, 1981, Harry Diamond Laboratories, Adelphi, Maryland.
- [2] XM56 type classifid-A new era of large area obscuration begins [C]//Army R D&A, March-April, 1995.
- [3] Smoke generating system [Z]. Mlcroturbo France, 1991.
- [4] 时家明, 路远. 红外对抗原理 [M]. 北京: 解放军出版社, 2002; 232 - 234.
- [5] 江长荫. 均匀圆球对平面波的散射 [J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 65 - 88.
- [6] H C van de Hulst. Light scattering by small particles [M]. New York: Dover Publications, 1981; 114 - 164.
- [7] Pollok D, Accetta J, Shumaker D L. The infrared & electro-optical systems handbook [M]. Countermeasure System Vol. 7 Mic-Michigan; Environment Research Institute, 1993.
- [8] 卢正永. 气溶胶科学引论 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000; 12 - 14.
- [9] Li C, Subramanian S, Neutron Irradiation Effects in GaN-based blue LEDs [J]. Trans. Nucl. Sci., 2003, 50(6): 1998 - 2002.
- [10] Hu X W, Karmarkar A P, Jun B, et al. Proton-irradiation effects on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. Trans. Nucl. Sci., 2003, 50: 1791 - 1796.
- [11] Cai S J, Tang Y S, Li R, et al. Annealing behavior of a proton irradiated Al_xGa_{1-x}N/GaN high electron mobility transistor grown by MBE [J]. Trans. Electron. Devices, 2000, 47: 304 - 307.
- [12] Goodman S A, Auret F D, et al. Radiation induced defects in MOVPE grown n-GaN [J]. Mater. Sci. Eng., 2000, B71: 100 - 103.
- [13] Legodi M J, Hullavarad S S, Goodman S A, et al. Defect characterization by DLTS of AlGaIn UV Schottky photodetectors [J]. Phys. B, 2001, 308 - 310: 1189 - 1192.
- [14] Wang C W. Neutron irradiation effects on visible-blind Au/GaN Schottky barrier detectors grown on Si(111) [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(9): 1568 - 1570.
- [15] Wang C W. Neutron irradiation effect on radio-frequency magnetron-sputtered GaN thin films and Au/GaN Schottky diodes [J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 2002, 20(5): 1821 - 1826.
- [16] Choelhywi B, Gerald L. Low-temperature preparation of GaN-SiO₂ interfaces with low defect density I. Two-step remote plasma-assisted oxidation-deposition process [J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 2004, 22(6): 2402 - 2410.

(上接第 869 页)

致谢: 中国科学院半导体所赵德刚副研究员为本文提供了 AlGaIn 材料, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Shmidt N M, Davydov D V, Emtsev V V, et al. Effect of annealing on defects in as-grown and γ -ray irradiated n-GaN layers [J]. Phys. Stat. Sol. (b), 1999, 216: 533 - 536.
- [2] Wang C W, Soong B S, Chen J Y, et al. Effects of gamma-ray irradiation on the microstructural and luminescent properties of radio-frequency magnetron-sputtered GaN thin films [J]. J. Appl. Phys. 2000, 88(11): 6355 - 6358.
- [3] Goodman S A, Auret F D, Koschnick F K, et al. Radiation induced defects in MOVPE grown n-GaN [J]. Mater. Sci. Eng., 2000, B71: 100 - 103.
- [4] Umana-Membreno G A, Dell J M, Hessler T P, et al. ⁶⁰Co gamma-irradiation-induced defects in n-GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(23): 4354 - 4356.
- [5] Umana-Membreno G A, Dell J M, Parish G, et al. ⁶⁰Co-Gamma Irradiation Effects on n-GaN Schottky Diodes [J]. IEEE, Trans. Electron. Devices, 2003, 50(12): 2326 - 2334.
- [6] Hogsed M R, Yeo Y K, Ahoujja M, et al. Radiation-induced electron traps in Al_{0.14}Ga_{0.86}N by 1MeV electron radiation [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 261906 - 261908.