

文章编号: 0258-7025(2008)09-1415-04

基于激光透射模型的烟雾对可见光遮蔽能力分析

王英立 刘晓东 戴景民

(哈尔滨工业大学自动检测与过程控制系统研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 以烟雾遮蔽能力检测系统为平台,测试了常规烟幕黄磷在 $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$ 可见光波段的全遮蔽能力(TOP),并通过粒度分析仪测量了黄磷烟雾随时间变化的粒度改变。在假设磷烟雾粒子为单分散系球形粒子的前提下,基于激光透射模型建立了全遮蔽能力的理论计算模型,并进一步推导了不同粒度情况下具有吸收指数的黄磷烟雾的 TOP 值,所得到的计算结果与实验值相近。结果表明,中等湿度、室温条件下,黄磷成烟后 $10\sim 30\ \text{s}$ 内,粒径分布在 $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ 范围,并且随时间增加而减小, TOP 值随粒径变小有下降趋势。

关键词 物理光学; 粒度分布; 全遮蔽能力; 辐照度测量; 激光透射模型; 米氏(Mie)理论

中图分类号 O 436; TQ 567.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1415

Analysis of Smog Total Obscure Power on Visible Light Based on Laser Transmission Model

Wang Yingli Liu Xiaodong Dai Jingmin

(Department of Automation Measurement and Control Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Based on the smog full-screening detection system, the total obscure power of normal yellow phosphorus smog in $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$ visual band was measured, and the variation of the smog grain size with time was also measured with granulometry. According to laser transmission model, a total obscure power (TOP) theoretical calculation mode was established under the condition of single-decentralization spherical particle. With the mode, the TOP values of various grain size yellow phosphorus smog with absorption index were deduced, and the theoretical calculation results were agreement with the experimental results. According to the experimental results, under a middle humidity and room temperature, the particle diameters were about $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ and gradually decreased after forming the smoke for $10\sim 30\ \text{s}$, and the TOP values reduced with the diameter decrement.

Key words physical optics; particle size distribution; total obscure power; measurement of illumination; laser transmission model; Mie theory

1 引言

烟幕干扰是应用最为广泛的一种光电无源干扰方式,它通过在空中施放大量气溶胶微粒,以改变光辐射的大气传输特性,从而掩盖要保护的目标。由于烟幕的消光机制研究是烟幕技术发展的基础,国外(特别是美国)发展烟幕器材非常重视基础理论研究,而国内现代烟幕技术的研究起步较晚,对烟幕技术的研究工作主要建立在大量实验的基础上,烟幕

材料的选择缺乏理论指引,这在一定程度上限制了我国烟幕技术的发展^[1,2]。磷烟幕是目前很多国家装备的一种常规烟幕,对 $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$ 可见光波段具有显著的遮蔽效果。目前针对表征磷烟幕在可见光波段的遮蔽效果最常用的评估参数是“全遮蔽能力(TOP)”,它具有明确的物理概念、完整的测试方法和质量稳定的试验标定样品^[3]。但是影响磷烟幕遮蔽能力的因素非常复杂,粒径的变化就是一个

收稿日期:2007-10-12; 收到修改稿日期:2008-01-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50336010)资助课题。

作者简介:王英立(1973—),男,河北人,博士研究生,讲师,主要从事烟雾检测、自动化测试与控制方面的研究。

E-mail: wyl20411@hit.edu.cn

导师简介:戴景民(1963—),男,辽宁人,教授,博士生导师,主要从事辐射测温及热物性测试方面的研究。

E-mail: djm@hope.hit.edu.cn

相对主要的因素^[4~7],测试环境的湿度、温度以及时间和烟雾的沉降速度都会引起粒径分布的改变,进而影响 TOP 的测量结果。

同时,由于磷烟幕气溶胶粒子对入射电磁波的衰减主要是通过吸收和散射作用造成的,所以对于一定大小的磷烟幕粒子其消光能力可用米氏(Mie)散射理论中的消光系数来表征^[8,9]。因此本文基于激光透射模型建立 TOP 的数学模型,结合 Mie 散射理论计算磷烟幕球形粒子的消光系数的变化趋势分析 TOP。

2 实 验

2.1 测试原理

全遮蔽能力的物理意义是:单位重量的发烟剂成烟后,对可见光产生的最大有效遮蔽面积,其数学表达式为

$$\text{TOP} = 1/(C_i L_i), \quad (1)$$

式中 C_i 为烟雾箱单位体积中发烟剂的用量,单位为 kg/m^3 , L_i 为人眼至光源的距离即光程,单位为 m 。

在实际测量时将光的透射率与人眼视觉对比度阈值进行对比,定义了 TOP 的表达式^[1]

$$\text{TOP} = \frac{1}{C_i L_i} \frac{\ln(E/E_0)}{\ln D^*}, \quad (2)$$

式中 E 为有烟状态时光源光线通过烟幕后的辐照度, E_0 为无烟状态时光源光线通过空气后的辐照度, $D^* = 0.0125$ 为人眼视觉对比度阈值,是通过对大量人眼和心理进行测试后取得的统计值,它的含义是目标和背景的光强对比度小于此值时,人眼观察不到目标,只有大于此值时,人眼才能观察到目标。一般来说,在测定 TOP 过程中,调整浓度 C_i 要比调整光程 L_i 麻烦得多。本文以改变光程 L_i 来寻找透射比 $T = E/E_0 = 0.0125$ 或接近值(0.0115 ~ 0.0136)所对应的 L_i ,再计算出 TOP 的数值。

2.2 实验装置

中型烟雾试验箱总体积 17 m^3 ,温度调整范围 $-20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度调整范围 $35\% \sim 95\%$,光程调整范围 $0.5 \sim 6 \text{ m}$,光程调整精度小于 2.5 mm 。

可见光全遮蔽能力检测系统包括照度测量部分(光源、数字照度计)、光源位置检测部分(旋转编码器、步进电机、电磁离合器)以及控制部分。美国 PSS 公司 Accusizer 780/DPS 粒度分析仪,测定粒径范围为 $0.25 \sim 400 \text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3 测试结果

烟雾全遮蔽能力检测系统的试验条件:烟剂用

量为每次试验用烟剂 5 g ,成分为黄磷,温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 80% ,光程调整范围为 $1 \sim 6 \text{ m}$,光程调整精度为 $\pm 2 \text{ mm}$,烟箱体积为 16.5 m^3 。测试结果如图 1 所示。

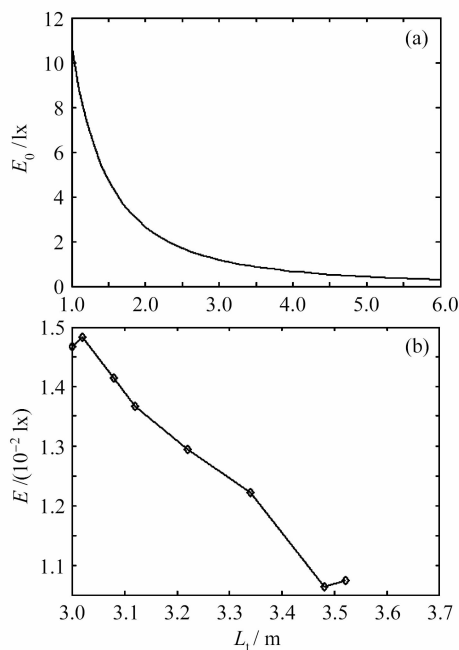


图 1 照度曲线。(a) 无烟;(b) 有烟

Fig. 1 Illumination curve. (a) no-smoke; (b) smoke

图 1(b)中,在光程 $L_i = 3.48 \text{ m}$ 处 $T = E/E_0 = 0.01217$ 最接近 0.0125 , $C_i = 3.03 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{m}^3$,代入(1)式得 $\text{TOP} = 948.3707 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。

通过改变光源电压,以获得不同照度值,再进行多次实验,得到多组 TOP 值,实验结果如表 1 所示。

表 1 TOP 测量结果

Table 1 Measurement results of TOP

Number	L_i / m	T	$\text{TOP} / (\text{m}^2/\text{kg})$
1	3.02	0.0127	1088.7
2	3.12	0.0125	1057.7
3	3.48	0.0121	955.0
4	3.08	0.0126	1069.6
5	3.02	0.0125	1093.5
6	3.34	0.0128	982.9
7	3.22	0.0126	1022.2
8	3.52	0.0125	938.3
9	3.00	0.0124	1102.9
Average of TOP			1034.6

粒度分析仪的测量,从磷烟雾均匀充满烟雾箱时刻起,分别经过 10 s , 20 s , 25 s , 30 s 自由沉降后粒子的直径分别为 $2.98 \text{ }\mu\text{m}$, $1.66 \text{ }\mu\text{m}$, $0.95 \text{ }\mu\text{m}$, $0.54 \text{ }\mu\text{m}$,可见随磷烟雾的沉降时间的延长,粒径呈下降趋势。

3 理论分析

设一束波长为 λ 的平行激光通过粒子系, 由于激光受到粒子的吸收和散射的共同作用, 光电接收器上接收的辐射能通量将减弱, 根据朗伯-比尔 (Lambert-Beer) 定律, 出射光强为

$$I = I_0 \exp \left[-\frac{\pi}{4} \int_{D_1}^{D_2} f(D) D^2 L Q_{\text{ex}}(x, m) dD \right], \quad (3)$$

式中 I_0 为入射光强, L 为平均光线行程长度, D 为粒子直径, $f(D)$ 为该粒径下的粒子数, $Q_{\text{ex}}(x, m)$ 为粒子的消光因子, $x = \pi D / \lambda$ 为粒子尺度参数, m 为复折射率, $m = m_r - im_i$, m_r 为散射实部, m_i 为吸收虚部。利用辐照度 E 和 E_0 分别代替光强 I 和 I_0 , (3) 式经整理可以得到

$$\ln \frac{E}{E_0} = -\frac{\pi}{4} \int_{D_1}^{D_2} f(D) D^2 L Q_{\text{ex}}(x, m) dD, \quad (4)$$

从(4)式可见激光透射模型中出射光强与入射光强的比值即透射比, 可以通过粒子系的粒径分布和复折射率等相关参数计算获得。

结合测量原理, 不同粒度情况下只要计算出可见光波段内的平均透射比为 0.125 时所对应的距离 L_i , 将所得数据代入(2)式就可以得到相应粒度所对应的 TOP 数值。

在频率间隔 $\Delta\nu$ 内的平均透射比为

$$\bar{T} = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} [e^{-\alpha(x, m) \rho L}] d\nu, \quad (5)$$

式中

$$\alpha(x, m) = \pi \int_0^\infty Q_{\text{ex}}(x, m) N(D) r dr, \quad (6)$$

$N(D)$ 为烟幕微粒的尺度分布, 一般采用对数正态分布形式

$$N(D) = \frac{a}{\sqrt{8\pi}} (\ln \sigma)^{-1} \exp \left\{ -\left[\frac{\ln(D/2r_g)}{2 \ln \sigma} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

r_g 为粒子的几何平均半径, σ 为粒子半径的标准差, a 为拟合参数。根据实验结果, 假设黄磷烟幕粒子为相当规则的球形粒子, 其面平均直径分布在 $0.54 \sim 2.98 \mu\text{m}$, 考虑 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 的可见波段, 则线性尺寸参数 x 对应的边界值为 $4.46 \sim 49.2$, 因此可用 Mie 散射理论精确求解单个黄磷烟幕粒子对该波段的消光系数 $Q_{\text{ex}}(x, m)$, 进而通过(5)式求得 L_i 。若给定烟幕粒子的复折射率 $m = m_r - im_i$, 则

$$Q_{\text{ex}}(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (8)$$

式中 a_n, b_n 分别为反映电场振荡和磁场振荡对散射影响的 Mie 散射参数^[8,9]。

在理论计算过程中, Mie 理论计算的 Q_{ex} 结果, 受粒度分布、复折射率以及入射光波长的影响, 在相同的分散系中, 可以认为粒子有相同的粒度分布和复折射率。如果将这些影响因素合并为尺度因子 $2x|m-1|$, 则可以计算出 Q_{ex} 随尺度因子的变化规律, 如图 2 所示。可见, 吸收指数 $m_i = 0$ 时, Q_{ex} 随着 $2x|m-1|$ 的加大作阻尼振荡, 并随 $2x|m-1|$ 的加大趋近于 2。

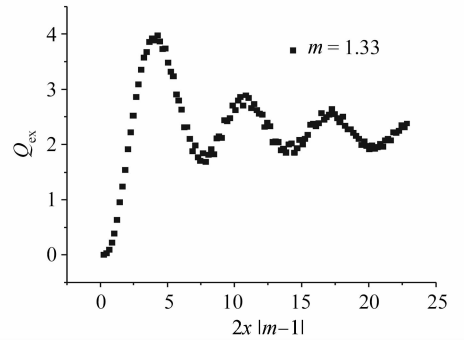


图 2 Mie 衰减因子与尺度参数的关系

Fig. 2 Relation of Mie attenuation and scale parameters

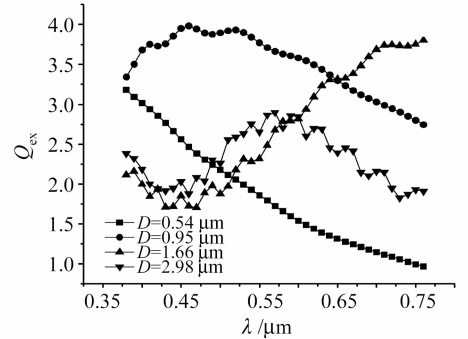


图 3 $m = 1.33$ 条件下不同粒度的衰减因子曲线

Fig. 3 Attenuation curve of various particle size at $m = 1.33$

为了便于计算假设磷烟雾粒子为均一系模型的球形粒子, 根据粒径测量结果, 磷烟雾粒子直径分别取 $0.54 \mu\text{m}$, $0.95 \mu\text{m}$, $1.66 \mu\text{m}$ 和 $2.98 \mu\text{m}$ 。计算过程中, 为了获得复折射率的变化对计算结果的影响, 首先选取 $m = 1.33$ 代入(8)式进行计算, 介质衰减因子的变化如图 3 所示, 然利用文献[10]中给出的磷烟雾复折射率进行计算, 结果如图 4 所示。

由图 3, 4 可见, 具有吸收指数的黄磷烟雾在粒径较大的情况下, 衰减因子随波长变化接近线性, 随波长的增加有上升趋势, 通过不同粒径分布的 Q_{ex} 相比较, 随着时间的增加, 由于颗粒的沉降和凝聚, TOP 值会减小。根据 Q_{ex} 的计算结果, 采用对数正态分布的形式利用(8)式进行计算, 当粒径分别为

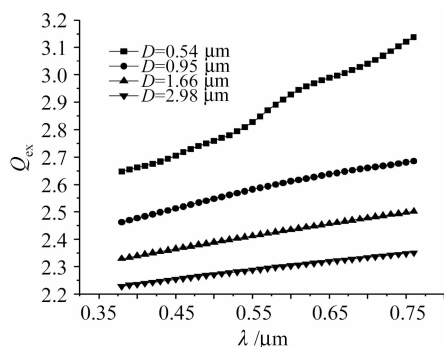


图4 磷烟幕复折射率条件下不同粒度的衰减因子曲线

Fig. 4 Attenuation curve of various particle size on phosphorus smog complex refractive index

2.98 μm , 1.66 μm , 0.95 μm , 0.54 μm 时, 对应的 TOP 值的结果分别为 1600.1 m^2/kg , 940.6 m^2/kg , 575.4 m^2/kg , 363.3 m^2/kg , 因此, TOP 值的平均值为 869.85 m^2/kg 。

4 结 论

通过实验和理论分析可以得出: 1) 烟雾的全遮蔽能力的具体检测数值与烟雾形成环境的温度、湿度以及形成时间有关, 而这些参数可以归结为烟雾粒度的改变对 TOP 的影响, 在一定的时间内, 黄磷 TOP 值随着黄磷的粒径减小而减小; 2) 基于激光透射模型, 结合 Mie 理论和实际测量数据, 可在理论上计算不同粒度情况下烟雾的消光系数, 进一步计算某种波段下该烟雾的平均透射率, 最终得到在一定波长范围内的 TOP 值; 3) 测量了可见光波段内黄磷烟雾的 TOP 值, 并通过理论计算, 分析了不同粒度情况下黄磷烟雾在可见光波段内全遮蔽能力的变化趋势。计算结果与实验值相近。

参 考 文 献

- Li Shixiang. Optoelectronic Countermeasure Technology[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2000. 153~199
李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000. 153~199
- O. I. Sindom. Computations of the Absorption Coefficient of a Dispersion of Clusterseomparison of Computed Data with Experimental for Small Clusters [R]. AD-A213370;285~294
- Li Chengjun. Obscuring power of smoking composition use for visible light and infrared wave[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001, (2):8~10
李澄俊. 统一表征发烟剂对可见光和红外的遮蔽能力[J]. *火工品*, 2001, (2):8~10
- Hu Jing, Yang Zongkai, Yang Daiqin. Smoke particles' recognition and Monte Carlo simulation of laser scattering characters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):950~954
胡静, 杨宗凯, 杨代琴. 烟雾粒子的识别及其激光散射特性的蒙特卡罗模拟[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):950~954
- Li Xuebin, Xu Qingshan, Hu Huanling. New method to deduce imaginary part of refractive index of aerosol with double-scattering angles laser optical particle counter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):391~394
李学彬, 徐青山, 胡欢陵. 双散射角光学粒子计数器测量气溶胶折射率的新方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):391~394
- Han Yiping, Du Yungang. Electromagnetic scattering for a non-spherical aerosols with arbitrary shaped beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):630~633
韩一平, 杜云刚. 非球形大气粒子对任意波束的电磁散射特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):630~633
- Zhou Liuzhu, Gu Xuejun, Zhu Yuan *et al.*. Investigation of individual aerosol particles detection efficiency and matrix assisted laser desorption/ionization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):97~101
周留柱, 顾学军, 朱元等. 气溶胶单粒子的检测效率与基质辅助激光解吸电离研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):97~101
- Tan Heping. Numerical Calculation of IR Radiation Feature and Atmospheric Transmission-Calculation of Hot Radiation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. 105~135
谈和平. 红外辐射特性与传输的数值计算-计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 105~135
- Yiping Han, Zhensen Wu. Scattering of a spheroidal particle illuminated by a Gaussian beam [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(15):2501~2509
- M. E. Milham, D. H. Anderson, R. H. Frickel. Infrared optical properties of phosphorus-derived smoke [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14):2501