

红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数测试研究

王玄玉^{1,2}, 潘功配¹

(1.南京理工大学 化工学院,江苏 南京 210094; 2.防化指挥工程学院 烟火技术实验室,北京 102205)

摘要: 论述了红磷烟幕的成烟过程与遮蔽特性。在烟幕试验柜中测试了红磷烟幕对两种入射功率 10.6 μm 激光的质量消光系数和红磷烟幕的粒度分布规律; 根据米氏散射理论计算了单个红磷烟幕粒子对 10.6 μm 激光的吸收效率因子、散射效率因子和消光效率因子。结果表明: 红磷烟幕对入射功率分别为 0.552、1.032 W 的 10.6 μm 激光的平均质量消光系数分别为 0.6027、0.5739 m^2/g 。成烟 5 min 时红磷烟幕粒子的平均直径为 2.47 μm 。研究表明, 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光作用以吸收效应为主, 其质量消光系数随浓度的增加而下降。同等条件下入射光的功率越大或空气的相对湿度越小, 则红磷烟幕的消光系数就越小。

关键词: 红磷; 烟幕; 10.6 μm 激光; 烟幕柜; 消光系数

中图分类号: TQ567.5 文献标识码: A 文章编号: 1007- 2276(2005) 06- 0636- 05

Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to 10.6 μm laser emission

WANG Xuan-yu^{1,2}, PAN Gong-pei¹

(1.Department of Chemistry, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2.Laboratory of Pyrotechnical Technology, Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: The forming process and screening characteristics of red phosphorus smoke were elaborated. The mass extinction coefficients and granularity distribution of red phosphorus smoke to 10.6 μm laser emission with two kinds of incident power were tested in a smoke to laser of chamber. The absorption efficiency factors, scattering efficiency factors and extinction efficiency factors of a single particle of red phosphorus smoke to laser of 10.6 μm were calculated according to Mie scattering theory in far-infrared band. By the experiments, the average extinction coefficient of red phosphorus smoke to 0.552 W is 0.6027 m^2/g and to 1.032 W is 0.5739 m^2/g . The average diameter of the smoke particles is 2.47 μm when the smoke formed 5 min. By the analysis, the extinction ability of red phosphorus smoke to 10.6 μm laser emission depends upon the absorption effect. The mass extinction coefficient decreases while the smoke concentration increases. Under the same condition, the extinction coefficient of the smoke to 10.6 μm laser emission will decrease when the power of incident laser emission increases or the air relative humidity decreases.

Key words: Red phosphorus; Smoke screen; 10.6 μm laser; Smoke chamber; Extinction coefficient

0 引言

二氧化碳激光器是常用的气体激光器,能提供波长为 10.6 μm 的强谱线,输出功率为瓦、数百瓦甚至更大量级^[1]。由于 10.6 μm 激光对战场烟雾有较好的穿透能力,能与 8~12 μm 波段内的热成像系统兼容并可共用接收光学系统和探测器,因而在军事上有着越来越多的应用。

激光在大气中传输时,能量会因空气密度的起伏、气溶胶粒子和大气湍流运动产生的不均匀性而发生吸收和散射,致使激光能量沿传播方向发生衰减^[2]。在一定的浓度条件下,激光的入射强度 I_0 与透过介质后的透射光强度 I 之比服从 Lambert-Beer 定律^[3,4]:

$$I/I_0 = e^{-M_c L} \quad (1)$$

式中 M_c 为介质对激光的质量消光系数, m^2/g ; C 为烟幕介质的浓度, g/m^3 ; L 为激光穿透介质的长度, m 。

根据公式(1),如果已知激光在烟幕介质中传输的距离,就可以通过实验测定激光在穿透介质前后功率的变化情况确定烟幕对该辐射的质量消光系数。在烟幕试验柜中进行的测试,通常 L 是已知的,经过搅拌后烟幕的浓度 C 可以认为是均匀分布的,于是可以根据公式(2)计算出烟幕对激光的质量消光系数:

$$M_c = \frac{1}{CL} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

红磷烟幕是目前很多国家装备的一种常规烟幕,其发烟过程是一个非常复杂而迅速的过程,通常可以划分为两个阶段:

(1) 燃烧反应阶段



(2) 吸湿成烟阶段

由于 H_3PO_4 吸水性很强,吸湿后能在很短的时间内形成正磷酸雾,所以红磷发烟剂反应的最终产物主要是具有不同结晶水的正磷酸粒子,通常记作 $4H_3PO_4 \cdot nH_2O$ 。当相对湿度大于 95% 时,此过程在若干

毫秒内即可完成,同时空气中水分的多少决定了 $4H_3PO_4 \cdot nH_2O$ 中 n 的大小,空气中水分越多, n 值就越大,相应的红磷烟幕的粒子直径就变得越大。

当吸湿成烟阶段完成后,磷烟液滴的组成沿半径处于一种准稳定状态,此时其主要成份的组成(主要是含水量)随时间而变化,从而使得磷烟的粒度、密度和光学性能都与空气的湿度有着密切的联系。所以,磷烟的消光性能是相对湿度和持续时间的函数。

红磷烟幕对可见光具有显著的遮蔽效果,实验表明,红磷发烟剂对可见光的遮蔽能力可以达到 $952.2 m^2/kg$ ^[5]。但红磷烟幕对 10.6 μm 激光的干扰效果却缺乏定量的实验数据。

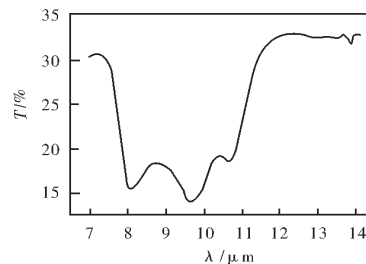


图 1 红磷烟幕红外透过光谱

Fig.1 Infrared transmission spectrum of red phosphorus smoke

由于红磷烟幕在 8~11 μm 波段内对红外具有明显的吸收作用^[6],如图 1 所示,因此本文利用烟幕试验柜进行红磷发烟试验并测试了红磷烟幕对二氧化碳激光器发射的 10.6 μm 红外激光的消光系数,研究结果对于立足于现有红磷发烟弹药实施烟幕遮蔽、干扰行动从而有效对抗远红外制导的激光武器或侦察系统具有现实意义。

1 实验部分

1.1 发烟剂

红磷发烟剂 20 g,平均分为 2 份,分别记作红磷发烟剂样品 A 和样品 B。

1.2 设备仪器

1.2.1 激光器

CY-40 型二氧化碳气体激光器,可连续或点动输

出波长为 10.6 μm 的激光,采用全光谱功率测量探头及数字显示器,支持计算机标准接口与 12 bit A/D 转换卡。

1.2.2 烟幕试验柜

自行设计的中型烟幕试验柜^[7]有效体积 5.58 m^3 ,最大光程 2.42 m。图 2 为利用烟幕试验柜测定红磷烟幕对激光消光系数的示意图。

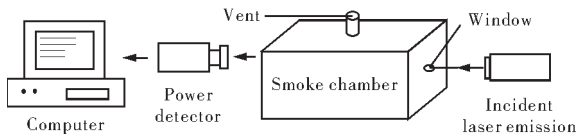


图 2 烟幕对激光的消光系数测定试验示意图

Fig.2 Sketch map of an experiment to test extinction coefficient of smoke screen to laser

烟幕试验柜沿激光光路的透明窗体采用 25 mm \times 3 mm 的双平面砷化镓透镜进行密封。

1.2.3 浓度采样器

FC-IV 型粉尘采样器,最大双道流量 35 dm^3/min 可调,采用超细纤维膜采样。

1.2.4 粒度仪

辽宁丹东百特仪器有限公司生产的 BT-9300H 型激光粒度分布仪,粒度范围 0.1~340 μm 。

1.2.5 天平

梅特勒托利多仪器(上海)有限公司生产的 AE200 万分之一天平。

1.3 测试方法

(1) 在烟幕试验柜的一端窗口外安装 10.6 μm 二氧化碳激光器,对应的另一端安装激光功率计并连接至电脑,如图 2 所示。

(2) 将 10 g 发烟剂用坩埚盛放并置于中型烟幕试验柜中,接好电点火用导线。

(3) 密封烟幕试验柜各个工作窗口。

(4) 调节并记录烟幕试验柜内温度和湿度。

(5) 将激光功率调至 0.5 W 后连续输出 90 s 激光并采集本底功率数据。

(6) 启动点火装置进行发烟,等发烟剂完全燃烧并低速搅拌 1 min 后,同步采集烟幕浓度和激光穿透烟幕后的功率数据。改变湿度条件可以测试消光系数

随湿度的变化曲线。

(7) 启动排风装置排除少量烟幕使烟幕浓度降低,待烟幕浓度稳定后再次测量烟幕浓度和激光穿透烟幕后的功率数据。

(8) 重复步骤(7)。成烟 5 min 时采集烟幕粒子样品并进行粒度分析。

(9) 试验完成后关闭激光机,并排空烟幕试验柜。

将激光功率调至 1.0 W 后,重复步骤(2)~(9)操作。

1.4 试验结果

设入射激光的功率为 P_0 , 探测器接收到的激光功率为 P , 由于

$$\frac{I_0}{I} = \frac{P_0}{P} \quad (3)$$

所以

$$M_c = \frac{1}{CL} \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (4)$$

表 1 为红磷烟幕对入射功率分别为 0.522、1.032 W 的 10.6 μm 激光的消光系数测试结果,图 3 为样品 B(入射功率为 1.032 W)试验时的入射激光随时间变化曲线,图 4 为样品 B 第二次采样时采集的激光功率随时间变化曲线。通过对样品 A 和 B 三次采样获得的消光系数进行算术平均可得到红磷烟幕对相应入射功率的 10.6 μm 激光的平均消光系数。

表 1 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数测试结果
Tab.1 Testing results of extinction coefficient of red phosphorus smoke to laser of 10.6 μm

Temperature: 24		Air relative humidity: 70%			
Sample	P_0/W	No	P/W	$C/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$M_c/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
A	0.522	1	0.059	1.547	0.5824
		2	0.092	1.186	0.6037
		3	0.256	0.475	0.6221
B	1.032	1	0.125	1.573	0.5547
		2	0.381	0.713	0.5776
		3	0.478	0.539	0.5894

平均消光系数 \bar{M}_c 分别为:

$$\text{样品 A} \quad \bar{M}_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 M_{ci} = (0.5824 + 0.6037 +$$

0.6221) /3=0.6027 m²/g

样品 B $\bar{M}_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 M_{ci} = (0.5547+0.5776+$
 $0.5894) /3=0.5739 \text{ m}^2/\text{g}$

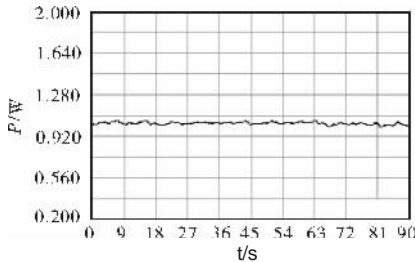


图3 样品 B 本底曲线

Fig.3 Background curve of sample B

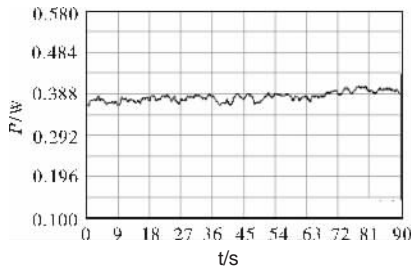


图 4 样品B 二次采样曲线

Fig.4 Second curve of sample B

表 2 红磷烟幕粒径分布测试结果

Tab.2 Testing results of granularity distribution of RP smoke

No	D ₁₀ / μm	D ₅₀ / μm	D ₉₀ / μm
1	1.57	2.51	3.63
2	1.69	2.50	3.47
3	1.45	2.39	3.52
4	1.52	2.48	3.58

表 2 为样品 B 成烟 5 min 后红磷烟幕的粒度分布测试结果。根据表 2 可求得本次试验所形成的红磷烟幕的平均中值直径 \bar{D}_{50} :

$$\bar{D}_{50} = (2.51+2.50+2.39+2.48) /4=2.47 \mu\text{m}$$

据此可以根据米氏理论计算出单个红磷烟幕粒子对光辐射的散射效率因子 Q_{sc} 、吸收效率因子 Q_{AB} 和消光效率因子 Q_{EX} ^[9], 结果如表 3 所示, 其中 m_r 、 m_i 分别代表复折射率的实部和虚部^[9]。

表 3 单个红磷烟幕粒子的消光效率因子计算结果

Tab.3 Calculated results of extinction factors of single particle of RP smoke

/ μm	m_r	m_i	$Q_{sc}/ \mu\text{m}$	$Q_{AB}/ \mu\text{m}$	$Q_{EX}/ \mu\text{m}$
8.6	1.397	0.465	0.065	0.154	0.219
9.6	1.479	0.690	0.083	0.178	0.261
10.6	1.712	0.690	0.081	0.179	0.260
11.6	1.890	0.338	0.043	0.131	0.174
12.6	1.795	0.296	0.031	0.111	0.142

2 结 论

(1) 在实验条件下(温度 24 , 相对湿度 70%), 红磷烟幕对入射功率分别为 0.552、1.032 W 的 10.6 μm 的激光的平均消光系数分别为 0.6027 和 0.5739 m²/g, 表明红磷烟幕对该波段红外激光具有明显的削弱作用。

(2) 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数随浓度的增加呈下降趋势, 如图 5 所示。

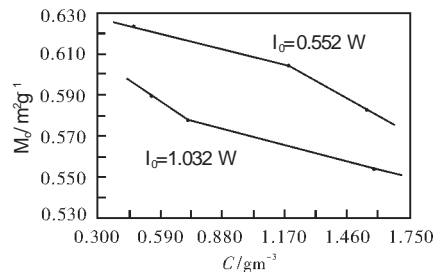


图 5 消光系数随浓度变化曲线

Fig.5 Curve of extinction coefficient varied with the concentration of red phosphorus smoke

(3) 红磷烟幕对 10.6 μm 激光的消光系数- 浓度曲线随激光入射功率的增加而向下漂移, 表明同等条件下入射激光的功率越大则烟幕的消光系数越小。

(4) 在 70% 的湿度条件下, 红磷烟幕粒子的平均直径(成烟 5 min 时) 为 2.47 μm, 与 10.6 μm 的波长相比小了许多, 根据表 3 中的数据可知, 此时烟幕粒子的吸收效率因子明显大于散射效率因子, 因此红磷烟幕对激光辐射的衰减主要是吸收作用。但由于红磷烟幕与湿度关系密切, 所以如果湿度增加, 则红磷烟幕对激光的散射作用将随着烟幕粒子直径的增加而得到加强, 湿度越大红磷烟幕对 10.6 μm 的消光系

数越大,如图 6 所示。

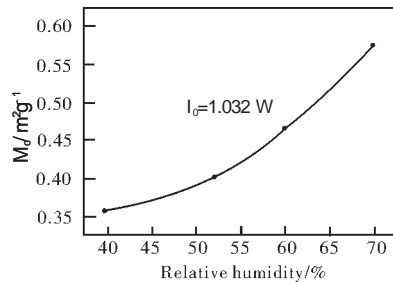


图 6 消光系数随湿度变化曲线

Fig.6 Curve of extinction coefficient varied with air relative humidity

参考文献:

- [1] ZHOU Shu-quan. The Basis of Measuring Infrared Radiation[M]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University Press(周书途.红外辐射测量基础.上海:上海交通大学出版社),1991.24- 25.
- [2] XU Xiao-jun,LU Qi-sheng, SHU Bo-hong, et al. Back-scattering model and experiment of laser illuminating[J].Infrared and Laser Engineering(许晓军,陆启生,舒柏宏,等.激光照明的大气后向散射理论模型和试验研究.红外与激光工程), 2001,30(1):60- 64.
- [3] CHEN Hai-ping. The Basis of Smoke Screen Technology [M]. Beijing: Weapons Industry Press(陈海平.烟幕技术基础.北京:兵器工业出版社),2002.78- 79.
- [4] PAN Gong-pei, YANG Shuo. Principles of Pyrotechnics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press(潘公配,杨硕.烟火学.北京:北京理工大学出版社),1997.126- 127.
- [5] LI Cheng-jun, XU Ming. Testing the screening performance of smoke agent according to the screening effect of the smoke[J]. Journal of East China Institute of Technology(李澄俊,徐铭.根据烟雾的遮蔽效应测定发烟剂的遮蔽能力.华东工学院学报), 1989(1):13- 17.
- [6] ZHOU Zun-ning, PAN Gong-pei, LI Yi. Experimental research of the influence of adding RP on smoke characteristics of modified HC[J].Energetic Materials(周遵宁,潘功配,李毅.赤磷对改进型 HC 发烟剂烟幕性能影响的试验研究.含能材料),2002,10(3):128- 131.
- [7] CHEN Hai-ping, WANG Xuan-yu, AN Gang. The design and application of 2.4 x1.5 x1.3 m³ smoke chamber [J]. Journal of Chemical Defence(陈海平,王玄玉,安刚.2.4 x1.5 x1.3 m³ 烟幕柜的设计及应用.防化学报),1999(4):34- 38.
- [8] Earl J McCartney; PAN Nai-xian, MAO Jie-tai, WANG Yong-sheng, et al. Optics of the Atmosphere-Scattering by Molecules and Particles[M].Beijing: Science Press(McCartney E J; 潘乃先,毛节泰,王永生,等.大气光学分子和粒子散射.北京:科学出版社),1988.228- 268.
- [9] CHEN Zuo-ru, SONG Jing-pu, LUO Yun-hua, et al. A study on far-infrared obscuring characteristics of phosphorus-derived smoke [J]. Infrared Technology(陈作如,宋敬埔,罗蕴华,等.磷烟的远红外遮蔽特性研究.红外技术),1993,15(1):41- 44.
- [10] JIANG Pan-lin, LI Jia-xiang. Threaten environment of electronic attack to military space-based system[J].Space Electronic Warfare(蒋盘林,李加祥.军事空间系统面临的电子攻击威胁环境.航天电子对抗), 2003, 19(1):1- 5.
- [11] GUAN Xiao-xian, PIAO Xian-qing, SUN Jing,et al. Research on soft-killing tactical laser weapon and its mechanism[J].Infrared and Laser Engineering(关效贤,朴贤卿,孙晶,等.软杀伤战术激光武器及作用机理的研究.红外与激光工程), 2004, 33(2): 118- 120.
- [12] ZHU Wei-gang, HOU Guo-jiang, PEI Shi-bing. Application of space-based lasers constellations for ballistic missile defense[J]. Infrared and Laser Engineering(朱卫纲,侯国江,裴世兵.空间激光武器网在弹道导弹防御中的应用.红外与激光工程), 2004, 33(2):121- 124.
- [13] QI Sheng-li,LU Zhan-kun. The status and development trend of space electronic warfare technique[J].Electronic Warfare(齐胜利,卢占坤.空间电子对抗技术的现状及发展趋势.电子对抗), 2003, 26(4):6- 9.
- [14] Collings P J,Patel J S.Handbook of Liquid Crystal Research[M]. UK: Oxford Univ Press, 1997.115- 130.
- [15] Potasek M, Kim S J.Nonlinear transmission of laser radiation for eye and sensor protection[J].Nonlinear Phys And Mat,2000, 9 : 343- 364.
- [16] Khoo I C, Wood M V, Shih M Y, et al. Extremely nonlinear photosensitive liquid crystals for image sensing and sensor protection[J].Optics Express, 1999, 4(11) : 432- 442.

(上接第 635 页)