

文章编号:1001-5078(2007)03-0262-04

# 纳米石墨烟幕对红外激光的消光特性研究

王红霞,刘代志,宋子彪  
(第二炮兵工程学院,陕西 西安 710025)

**摘要:**文中分析了纳米石墨作为烟幕干扰材料的吸波特性,在喷洒纳米石墨质量不同的情况下,利用烟幕箱测试了  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  两种波长激光透过率与时间的关系曲线,用滤膜称重法测量了纳米石墨烟幕在不同时间段的质量浓度,从而测得了纳米石墨对两种红外激光的平均质量消光系数,分别为  $1.2791\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  和  $1.0252\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,表明纳米石墨对红外激光具有显著的干扰效果。

**关键词:**纳米石墨;红外激光;烟幕;消光系数

**中图分类号:**TQ567.5;TN972<sup>+</sup>.4 **文献标识码:**A

## Study on Extinction Characteristic of Nano-graphite Smoke Screen to Infrared Laser

WANG Hong-xia, LIU Dai-zhi, SONG Zi-biao  
(Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Smoke is a simple and effectual means of laser passive interference. The wave absorption property of nano-graphite as interference material of smoke screen was analyzed. Under insufflating different mass of nan-graphite in a smoke chamber, the relation curves between transmission rate of  $1.06\mu\text{m}$  and  $10.6\mu\text{m}$  laser and time were tested, and with method of weighing dialyser the mass concentration was measured in different moments. So the average mass extinction coefficients of nano-graphite to  $1.06\mu\text{m}$  and  $10.6\mu\text{m}$  laser were calculated, which were  $1.2791\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$  and  $1.0252\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ . The experiment results showed nano-graphite had excellent interference capability to infrared laser.

**Key words:** nano-graphite; infrared laser; smoke screen; extinction coefficient

### 1 引言

激光对抗的研究在现代战争中具有十分重要的意义,而烟幕是简单有效的激光无源干扰手段之一,它通过对入射激光信号的散射和吸收,削弱其能量,以降低激光武器系统的效能<sup>[1-2]</sup>。但现有的常规烟幕剂多在可见光至近红外波段,实验证明在红外波段,随着入射波长的增加,常规烟幕的消光能力急剧减弱。而军用激光系统常用的是波长为  $1.06\mu\text{m}$  的短波红外激光和  $10.6\mu\text{m}$  的长波红外激光,为适应对抗多波段激光侦察和制导的需要,烟幕应具有宽波段的干扰能力。目前,人们大多采用将不同波段的发烟剂组合起来制成混合烟幕来实现以上目的。但由于材料各自性能和使用条件的限制,还没有完

全满足现代军事无源对抗的要求,需要寻找研究新的宽波段烟幕干扰材料。

纳米材料通常指尺寸在  $1\sim 100\text{nm}$  范围内的超细微粒,其独特的结构使其具有量子效应、小尺寸效应和表面效应,从而影响其光学吸收特性。研究表明<sup>[3]</sup>,纳米材料具有吸波性能好、吸波频带宽等优点,已经在涂层隐身材料中得到了应用,将纳米材料应用于烟幕干扰是多波段宽频谱烟幕发展的一个重要方向<sup>[4]</sup>。石墨是一种层状晶体,具有各向异性、

**基金项目:**国防预研基金项目。

**作者简介:**王红霞(1962-),女,硕士,教授,主要从事光电信息处理与光电对抗方面的研究。E-mail:redlightw@163.com

**收稿日期:**2006-09-04

导电性和稳定性好、质量轻等特性,粒径在微米量级的石墨在可见光和近红外波段具有较好的消光特性,人们对此已进行了较多的研究。本文利用烟幕箱测试了纳米石墨对  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  激光的消光特性,结果证明,纳米石墨对两种红外激光均具有显著的消光效果,在激光对抗、遮蔽隐身方面具有广阔的应用前景。

## 2 烟幕干扰原理

一般来说,烟幕对入射激光束能量的衰减是通过粒子吸收和散射共同作用的结果。

烟幕对激光的衰减依赖于烟幕的组分。理论分析表明,当烟幕粒子的尺寸和激光波长相匹配时,能产生较强的散射。烟幕对光的散射作用从宏观来说,是由反射、折射和衍射等原因造成的;从微观来说,散射是烟幕粒子内原子、分子从入射光波中获取能量,被诱导极化形成偶极子,形成次生波源,向四周辐射出和入射波长一样的光波。散射的作用不改变入射光波的总能量,只是减弱了在原传播方向上的能量。吸收衰减是由于烟幕粒子原子、分子内部各种运动能量是量子化的,即存在电子能级、振动能级和转动能级,当入射激光与烟幕粒子分子相互作用时,如果光子能量与相应能级差相当,则分子吸收能量从较低能级跃迁到较高的能级,产生选择性吸收。另外,光波的电矢量还使烟幕粒子中的分子原子获得能量而作受迫振动,当受迫振动的原子分子与其它原子或分子发生碰撞时,振动能量转变为平动能,使分子热运动加剧,该部分光能转变为热能。

对纳米材料而言,由于粒径较小,表面原子所占比例增大,大大强化了材料的活性,界面原子与内层原子不同,缺少近邻配位,悬挂键较多,使得界面容易极化,同时处于非对称的力场中,电子能谱会发生变化,导致吸收峰变宽;另外,与常规材料相比,由于量子效应,使费米能级附近的电子能级由准连续变为分立的能级,产生新的吸收通道。将纳米石墨作为烟幕干扰材料,不仅在宽波段内具有强吸收的特性,而且由于粒径小、重量轻,悬浮时间长,能在较长时间内形成对入射激光信号的有效遮蔽。

烟幕对激光的散射和吸收衰减总体上称为消光,消光性能常用质量消光系数  $\alpha(\text{m}^2/\text{g})$  描述,其定义为单位质量烟幕粒子的消光截面,材料的消光系数越大,说明衰减效果越好。设入射激光束强度为  $I_0$ ,透过烟幕以后的光强为  $I$ ,根据 Lambert-Beer 定律,则有:

$$T = \frac{I}{I_0} = I_0 \exp(-\alpha C_m L) \quad (1)$$

式中,  $T$  为透过率;  $C_m$  为烟幕质量密度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $L$  为光程,  $\text{m}$ 。上式说明,在烟幕浓度和厚度一定的情况下,对一定强度的入射激光,透过率由消光系数  $\alpha$  决定,所以,  $\alpha$  是评价烟幕消光性能的基本依据。根据公式(1),消光系数的计算公式为:

$$\alpha = \frac{1}{C_m L} \ln \frac{1}{T} \quad (2)$$

因此,根据烟幕的质量密度和厚度,通过测量激光的透过率,就可以获得烟幕材料的消光系数。一般来说,消光系数与烟幕粒子和入射波长有关,若粒子尺度远小于波长,散射作用较弱,衰减主要由粒子吸收产生;当粒子尺度与波长相当或大于波长时,消光是粒子吸收和散射共同作用的结果。以往的烟箱测试表明<sup>[5-9]</sup>,常规的 HC 和红磷烟幕在  $8 \sim 14\mu\text{m}$  长波红外波段的消光系数小于  $0.1\text{m}^2/\text{g}$ ,消光不明显;改进的红磷烟幕,对  $10.6\mu\text{m}$  的长波红外激光,消光系数约为  $0.5 \sim 0.6\text{m}^2/\text{g}$ ;微米量级的常规石墨粉对  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  的激光,消光系数为  $0.6\text{m}^2/\text{g}$  和  $0.7\text{m}^2/\text{g}$ ,消光效果一般。本文利用烟箱测试表明,纳米石墨烟幕对  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$  两种波长的红外激光消光性能明显优于以上常规发烟剂。

## 3 烟箱实验

### 3.1 材料

纳米石墨:粒径分布在  $20 \sim 100\text{nm}$  范围内。

### 3.2 主要实验仪器

烟幕箱:体积为  $20\text{m}^3$ ,光程为  $6.1\text{m}$ ,内置搅拌风扇两个。

滤膜浓度采样系统:为使质量采样浓度具有代表性,在烟箱测试光路不同位置上设置了两个采样泵同时进行采样,采样泵流量为  $40\text{L}/\text{min}$ ,用滤膜称重法测量悬浮颗粒的质量浓度。

双波长激光测试系统:输出波长  $1.06\mu\text{m}$  和  $10.6\mu\text{m}$ ,信号处理系统直接显示透过率,每秒钟采集一个数据。

### 3.3 实验方法

为了获得较为真实的纳米石墨激光消光系数,分别称取质量为  $20\text{g}$  和  $30\text{g}$  的材料进行实验,并经多次质量浓度采样,对不同浓度下得到的消光系数求平均,作为最终的消光系数。

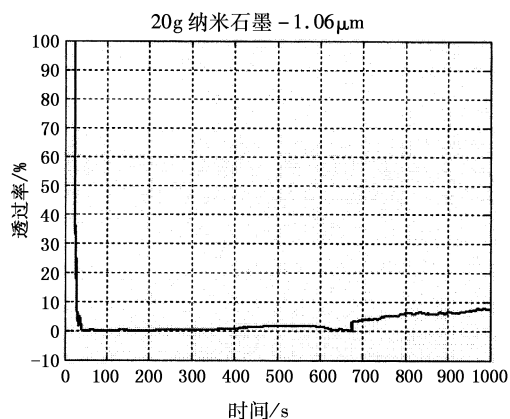
激光发射器和接收系统调试好后,首先采集本底透过率,然后用高压气流将纳米石墨粉快速喷洒到烟幕箱中,为了使材料在箱中分散均匀,开动风扇搅拌  $20\text{s}$  后停止,同时采集激光穿过烟幕后

的功率数据,风扇搅拌停止 1min 后,启动烟雾浓度采样装置开始浓度采样,采样时间为 1min,共采样 3 次,间隔为 2min。测试结束后,打开烟箱门,启动排烟装置,将箱中烟幕排尽,再进行下一次测量。

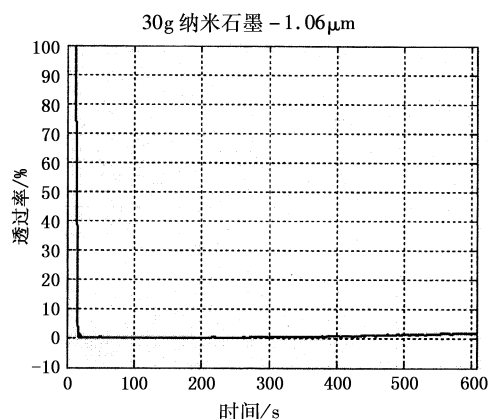
#### 4 实验结果与讨论

##### 3.1 激光透过率

在喷洒材料质量不同的情况下,测得的激光透过率随时间的变化关系如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出,透过率随着烟幕的喷洒急剧下降,测量数据表明,在 10~16s 内,透过率均由 100% 下降到小于 1%;随着时间的推移,透过率变换比较平稳;纳米石墨对 1.06 $\mu\text{m}$  激光的衰减略好于对 10.6 $\mu\text{m}$  激光的衰减。



(a) 20g 纳米石墨



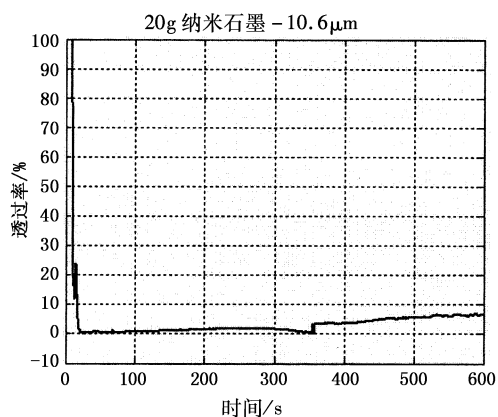
(b) 30g 纳米石墨

图 1 烟箱中 1.06 $\mu\text{m}$  激光透过率曲线

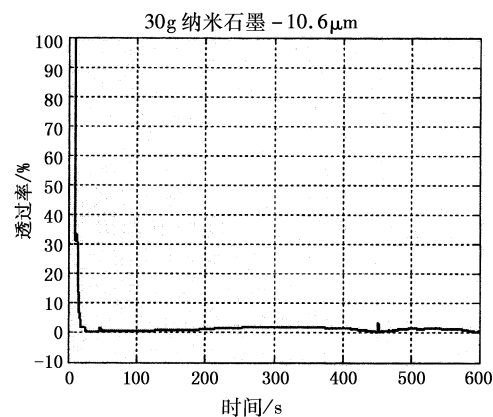
Fig. 1 transparency of 1.06 $\mu\text{m}$  laser in smoke box

##### 4.2 质量消光系数

烟幕粒子的质量消光系数是表征其遮蔽能力的重要参数,根据公式(2),烟箱中光程为  $L = 6.1\text{m}$ ,则可根据烟幕质量浓度和对应的平均透过率,得到  $\alpha$  的值。



(a) 20g 纳米石墨



(b) 30g 纳米石墨

图 2 烟箱中 10.6 $\mu\text{m}$  激光透过率曲线

Fig. 2 transparency of 10.6 $\mu\text{m}$  laser in smoke box

通过对采样前后的滤膜进行称重,根据式(3)计算烟幕质量浓度:

$$C_m = \frac{m_2 - m_1}{Q} \quad (3)$$

式中,  $m_2$  为采样后滤膜质量;  $m_1$  为采样前滤膜质量;  $Q$  为采样流量。对两个采样泵得到的质量浓度求平均可得某时间段内的平均质量浓度。

根据采样时间的设定,对采样时的激光透过率求出平均值,代入式(2)计算出该浓度时的质量消光系数。表 1 是纳米石墨烟幕对 1.06 $\mu\text{m}$  激光质量消光系数测量结果,表 2 是对 10.6 $\mu\text{m}$  激光质量消光系数测量结果。

表 1 纳米石墨烟幕对 1.06 $\mu\text{m}$  激光的消光系数测试结果

Tab. 1 Test results of extinction coefficient of nanometer graphite smoke to 1.06 $\mu\text{m}$  laser

|                                           |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $C_m / \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$      | 0.7673 | 0.6771 | 0.5060 | 1.102  | 0.6825 | 0.5215 |
| $T / \%$                                  | 0.2346 | 0.6572 | 1.7526 | 0.037  | 0.3916 | 1.379  |
| $\alpha / \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | 1.2942 | 1.2168 | 1.3102 | 1.1754 | 1.3313 | 1.3466 |

表2 纳米石墨烟幕对 10.6 $\mu\text{m}$  激光的消光系数测试结果

Tab.2 Test results of extinction coefficient of nanometer graphite smoke to 10.6 $\mu\text{m}$  laser

|                                         |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $C_m/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$      | 0.7673 | 0.6771 | 0.5060 | 0.8783 | 0.6403 | 0.548  |
| T/%                                     | 1.1801 | 1.9709 | 6.0251 | 0.5254 | 1.7427 | 1.1917 |
| $\alpha/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.9489 | 0.9508 | 0.9101 | 0.9797 | 1.0369 | 1.3252 |

从以上两个表中可以看出,不同时刻不同浓度下测得的同一波长的质量消光系数有差别。这是因为烟幕对激光的散射和吸收与材料自身特性有关。由于粒子的自然沉降,不同时刻,同一种烟幕中留空粒子的形状、大小、分布均不同,故导致质量消光系数随着烟幕的时空变化而变化。对其求平均可得纳米石墨烟幕对 1.06 $\mu\text{m}$  和 10.6 $\mu\text{m}$  激光的平均质量消光系数分别为:

$$\bar{\alpha}_{1.06} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \alpha_{i1.06} = 1.2791 (\text{m}^2/\text{g})$$

$$\bar{\alpha}_{10.6} = \frac{1}{6} \left( \sum_{i=1}^6 \alpha_{i10.6} \right) = 1.0252 (\text{m}^2/\text{g})$$

测试结果表明,纳米石墨对短波红外激光和长波红外激光的质量消光系数都大于  $1\text{m}^2/\text{g}$ ,具有显著的红外消光效果,消光能力优于磷烟和微粉石墨。

#### 4.3 沉降速度

烟幕的悬浮特性与沉降速度有关,通过对沉降速度的计算,可得知烟幕的悬浮特性。悬浮性好的烟幕其有效干扰时间就越长。烟幕沉降速度  $V_d$  的计算公式为:

$$V_d = \frac{H}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{C_1(t_1)}{C_2(t_2)} \quad (4)$$

式中, $H$  表示烟幕高度( $H=1.8\text{m}$ ); $C_1(t_1)$  表示  $t_1$  时的烟幕质量浓度; $C_2(t_2)$  表示  $t_2$  时的烟幕质量浓度。

经计算得纳米石墨粒子的平均沉降速度为  $2.7264 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ,具有较好的悬浮特性。

#### 5 结论

纳米石墨具有粒径小、比表面积大、吸波性能好的特点,作为烟幕材料悬浮时间长,在短波红外和长波红外均具有良好的消光性能。烟箱测试表明,纳米石墨对 1.06 $\mu\text{m}$  和 10.6 $\mu\text{m}$  激光的质量消光系数分别为  $1.2791\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1.0252\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ,优于常规石墨和磷烟的红外消光性能,是一种良好的抗红外激光干扰剂材料。

#### 参考文献:

- [1] 陈丽,李涛,李青. 烟幕对激光制导武器的影响[J]. 战术导弹技术,2004,(4):66-67.
- [2] 张洪斌,苏五星,张祥军,等. 激光无源干扰技术及其研究[J]. 红外,2005,(7):13-17.
- [3] 张立德,牟季美. 纳米材料学[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1994.
- [4] 陈蕾蕾,叶家明,凌永顺. 纳米材料与电子对抗[J]. 光电对抗与无源干扰,1999,(1):23-27.
- [5] 王玄玉,潘功配. HC 基新型抗红外发烟剂研究[J]. 含能材料,2005,13(3):173-178.
- [6] 刘庚冉,黄顺祥,胡非,等. 红磷烟幕的红外消光作用[J]. 应用化学,2005,22(7):709-714.
- [7] 王玄玉,潘功配. 红磷烟幕对 10.6 $\mu\text{m}$  激光的消光系数测试研究[J]. 红外与激光工程,2005,34(6):636-640.
- [8] 任慧,焦清介,崔庆忠. 烟幕剂  $\text{CuCl}_2\text{-FeCl}_3\text{-GIC}$  干扰电磁波性能研究[J]. 兵器材料科学与工程,2005,28(5):7-10.
- [9] J C Owruksy, D A Steinhurst, H D Ladouceur, et al. Obscurants for infrared countermeasures III [R]. ADA387724, March 9, 2001.

### 本刊变更电话号码

自 2007 年 2 月开始,本刊编辑部电话由分机号改为直拨号码。

变更后编辑部电话:(010)84321112