

纳米 TiN 烟幕干扰激光和红外性能研究

刘香翠,程翔,张良,郭建广,杜桂萍
(防化研究院,北京 102205)

摘要:在容积为 20 m^3 的烟幕箱中,测试了 30 g 纳米 TiN 形成的烟幕对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光、 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 激光、 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 红外及 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 红外的干扰性能,结果表明,纳米 TiN 烟幕对各波段红外辐射的遮蔽/干扰效果良好,质量消光系数均基本大于 $1\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,与常规材料的烟幕性能比较表明,纳米 TiN 烟幕消光性能好,是一种能有效干扰 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 激光测试系统及 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 红外热像仪的新型烟幕材料。

关键词:纳米 TiN; 烟幕; 干扰; 激光; 红外; 消光系数

中图分类号:E929.2 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.020

Jamming effect of nano-TiN smoke on laser and infrared

LIU Xiang-cui, CHENG Xiang, ZHANG Liang, GUO Jian-guang, DU Gui-ping
(Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract:In 20 m^3 smoke chamber, the jamming effects of 30 g nanometer crystalline titanium nitride (nano-TiN) smoke are tested. Tests are done not only to $1.06\text{ }\mu\text{m}$ and $10.6\text{ }\mu\text{m}$ laser but also to $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ and $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ IR. The experimental results show that nano-TiN smoke exhibits excellent extinction ability to broadband IR radiation and the mass extinction coefficients are all above $1\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$. Compared with the smoke performance of conventional materials (such as HC, RP, oil, graphite, carbon black), nano-TiN smoke possesses better obscuration capability. Therefore, it is a new obscurant material which can effectively jam the broadband IR devices including $1.06\text{ }\mu\text{m}$, $10.6\text{ }\mu\text{m}$, $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ and $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$.

Key words: nano-TiN; smoke; interference; laser; infrared; extinction coefficient

1 引言

激光制导和红外成像制导武器系统,以其制导精度高、抗干扰能力强而受到各国的普遍重视。而烟幕是对抗敌方精确制导武器攻击的一种快速、经济、高效的无源干扰手段,它是通过吸收和散射作用来改变电磁波在介质中的传输特性,以实施对敌方光电侦察、探测与制导武器系统的干扰,从而达到有效保护己方的目的。常规烟幕只对可见光($0.4\sim 0.76\text{ }\mu\text{m}$)有较好的衰减作用,对其他电磁波段的遮蔽基本无效^[1]。但现有的激光制导、红外成像制导武器系统已覆盖近红外($1\sim 3\text{ }\mu\text{m}$)、中红外($3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)、远红外($8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)波段,为有效对抗激光、红外成像侦察和制导的需要,提高烟幕作战效能,新

型烟幕干扰材料的开发应用成为烟幕技术发展的关键因素之一,引起了国内外研究人员的广泛重视。此时,纳米材料的飞速发展,为我们提供了新的选择。

氮化钛(TiN)是一种新型多功能金属陶瓷材料,具有高熔点、高硬度、耐磨损、耐腐蚀、导电和导热性良好、环境友好等优点,日益显示出广阔的应用前景^[2-4]。因此,TiN粉有望作为新型干扰材料应用于军事烟幕中,但普通微米级TiN粉由于密度较大,约 $5.43\sim 5.44\text{ g/cm}^3$,作为烟幕干扰材料成烟

作者简介:刘香翠(1977-),女,硕士,助理研究员,研究方向为军事化学与烟火技术。E-mail:liuxiangcui2001@yahoo.com.cn
收稿日期:2011-03-10;修订日期:2011-03-23

时,具有留空时间短的缺点。而纳米 TiN 极细小、非常轻,有研究表明,气溶胶的颗粒越大,下降越快,当粒子半径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下时,半径每减少一个数量级,其下降速率减少两个数量级^[1],所以本文选用纳米 TiN 作为新型烟幕干扰材料,测试分析了其对 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光测试系统, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 红外热像仪的遮蔽/干扰性能。

2 烟幕箱实验

2.1 实验材料

用于本文实验研究的纳米 TiN 样品,性能参数如表 1 所示,透射电子显微镜照片(TEM)如图 1 所示。

表 1 纳米 TiN 性能参数

纯度/%	平均粒径/ /nm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	松装密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	外观颜色	形状
> 99	20	80	0.08	黑色	球形

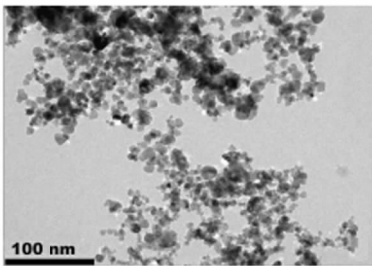
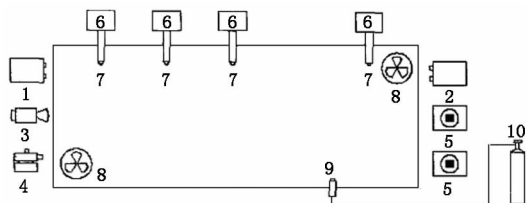


图 1 纳米 TiN 的 TEM 照片

2.2 主要实验仪器

$20\ \text{m}^3$ ($6.1\ \text{m} \times 2.0\ \text{m} \times 1.8\ \text{m}$) 烟幕箱实验系统:包括称量设备、喷撒装置、搅拌装置、采样系统等。

激光双波长测试系统:输出波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ (平均输出功率 $40\ \text{mW}$) 和 $10.6\ \mu\text{m}$ (平均输出功率 $7\ \text{W}$),信号处理系统直接显示透过率,每秒采集一个数据; $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外热像仪:光谱响应范围为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$; $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 红外热像仪:光谱响应范围为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$;黑体靶标:靶标的作用是提供一个恒定温差($30\ \text{C}$)的红外热辐射源,其红外辐射经烟幕箱,被热像仪接收后,在显示器上形成靶标的不同灰度红外热图像。图 2 为烟幕测试装置示意图。



1, 2 - 激光双波长测试系统; 3 - $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外热像仪; 4 - $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 红外热像仪; 5 - 黑体靶标; 6 - 抽气泵; 7 - 质量浓度采样头; 8 - 搅拌风扇; 9 - 喷撒装置; 10 - 压缩空气瓶

图 2 烟幕测试装置示意图

2.3 实验方法

在 $20\ \text{m}^3$ 烟幕箱实验室中,当激光测试系统和红外热像仪调试好后,首先采集激光本底透过率;实验开始时,高压旋流喷撒装置在 $1\ \text{s}$ 之内将 $30\ \text{g}$ 纳米 TiN 快速喷撒到烟幕箱中,喷撒结束时,启动烟幕箱内对角处的两台轴流风扇,对所形成的烟幕搅拌 $20\ \text{s}$,以确保整个烟幕箱内的烟幕处于均匀状态;同时,采集激光穿过烟幕后的功率衰减数据、对施放烟幕前后黑体靶标的红外热像进行录像、启动烟幕质量浓度采样装置进行浓度采样,采样时间为 $1\ \text{min}$,间隔 $1\ \text{min}$,共采样三次。测试结束后,打开烟幕箱门,启动排烟装置,将烟幕箱内的残余烟幕粒子抽空,再进行下一次测量。

3 实验结果与讨论

3.1 透过率

3.1.1 激光透过率

由于烟幕粒子对入射激光的散射和吸收作用,使入射激光能量衰减。利用探测器和激光器,通过测试烟幕施放前后激光器的信号强度,经计算即可得出烟幕对激光的透过率。此烟幕的透过率即可反映出烟幕对激光的衰减效果。其测试步骤为:

(1) 烟幕施放前,利用探测器测定背景(烟幕箱中大气)对激光源衰减后的信号强度 I_0 ;

(2) 烟幕施放后,利用探测器测定烟幕和背景(烟幕箱中大气)对激光源总衰减后的信号强度 I 。

则纳米 TiN 形成的烟幕对激光的透过率为:

$$T = I/I_0 \quad (1)$$

式中, T 为透过率; I_0, I 的意义同前。

$1.06\ \mu\text{m}$ 激光和 $10.6\ \mu\text{m}$ 激光的信号处理系统直接显示透过率数据,对该数据可作图如图 3、图 4 所示。

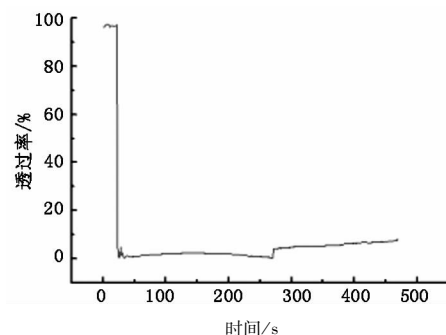


图 3 纳米 TiN 烟幕对 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光的透过率曲线

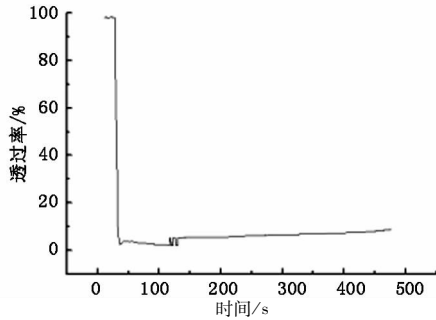


图4 纳米TiN烟幕对10.6 μm激光的透过率曲线

3.1.2 红外透过率

在没有烟幕干扰的情况下,靶标辐射的红外热能经烟幕箱,被热像仪接收后,在显示器上出现清晰的靶标红外热图像(如图5(a)所示)。施放纳米TiN烟幕后,由于其对靶标红外辐射能量的吸收和散射作用,使得热像仪接收到的靶标热图发生变化,图像从清晰变得模糊直至从显示器上完全消失(如图5(b)所示),说明靶标的热图像被烟幕粒子完全遮蔽了。随着时间的推移,由于烟幕粒子的凝并、沉降等作用的影响,烟幕浓度逐渐降低,干扰作用减弱,显示器上靶标的热图像又逐渐显现出来(如图5(c)所示)。所以可通过显示器直观方便地观察到烟幕对靶标热图像的遮蔽情况,来评估烟幕对热像仪的干扰效果。

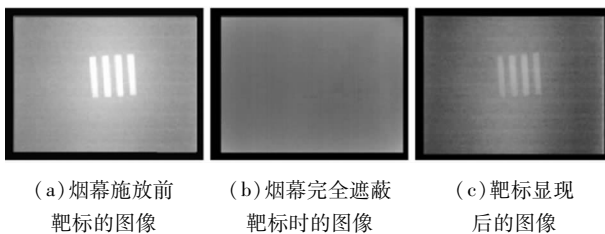


图5 纳米TiN烟幕对靶标红外图像的遮蔽

此外,还可利用红外热像仪,通过对烟幕施放前后靶标辐射亮度进行测量,经计算即可得出烟幕的红外光谱透过率,此透过率即可反映出烟幕对靶标辐射源的遮蔽效果。

3~5 μm和8~12 μm红外透过率的计算方法为:通过相应软件显示录制好的图像,编制程序对连续显示的图像进行处理,处理后的结果即是烟幕透过率的值,按公式(2)计算:

$$T = \frac{h_0(t) - h_1(t)}{h_0 - h_1} \quad (2)$$

式中, T 为烟幕透过率; $h_0(t)$ 为施放烟幕后靶标随时间 t 变化的灰度值; $h_1(t)$ 为施放烟幕后背景(烟幕箱中大气)随时间 t 变化的灰度值; h_0 为施放烟幕前靶标的灰度值; h_1 为施放烟幕前背景(烟幕箱中大气)的灰度值。计算过程中,每帧图像作为一幅灰度图,靶标各部分的透过率算术平均值作为该时

刻的透过率。

30 g 纳米TiN喷入烟幕箱形成烟幕,测得其对1.06 μm激光、10.6 μm激光、3~5 μm红外及8~12 μm红外透过率随时间的变化关系分别如图3、图4、图6、图7所示。从这些图中可以看出,各波段透过率随着纳米TiN的喷撒急剧下降,测量数据表明,在纳米TiN喷撒开始10 s之内,透过率均下降到小于1%;随着时间的推移,透过率变化比较平稳,但总体呈上升趋势。这主要是因为纳米TiN喷入烟幕箱后,由于其对红外辐射的吸收和散射作用,使得烟幕透过率下降非常迅速,但是随着时间的推移,由于纳米TiN逐渐沉降下来,烟幕浓度降低,对红外辐射的衰减作用减弱,从而使得烟幕透过率上升。总体来说,纳米TiN烟幕对各波段红外辐射的透过率变化趋势与图5保持一致。

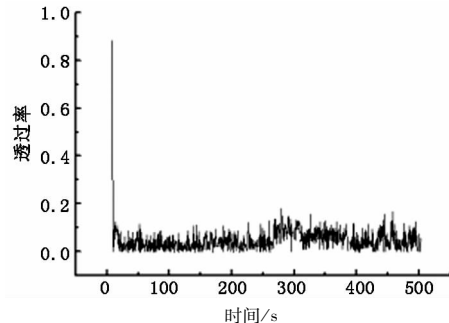


图6 纳米TiN烟幕对3~5 μm红外的透过率曲线

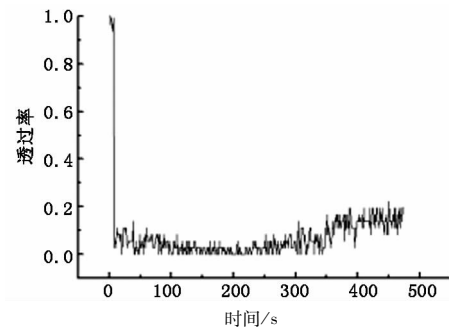


图7 纳米TiN烟幕对8~12 μm红外的透过率曲线

3.2 消光系数

烟幕对电磁辐射的吸收和散射衰减总体上称为消光,消光系数是评定烟幕对电磁辐射消光性能的基本依据,它的数值越大,说明衰减效果越好^[1]。

根据 Lambert-Beer 定律,则有:

$$T = \exp(-\alpha C_m L) \quad (3)$$

式中, T 为透过率; C_m 为烟幕质量浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; L 为光程,m。式(3)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 α 决定,所以, α 是评价烟幕消光性能的基本依据。根据公式(3),消光系数的计算公式为:

$$\alpha = \frac{1}{C_m L} \ln \frac{1}{T} \quad (4)$$

因此,根据烟幕的质量浓度、透过率和光程 ($L=6.1\text{ m}$),可以计算发烟剂的质量消光系数。

通过在已称重的滤纸上采集一定体积的烟幕粒子,即可测得烟幕在采样时间段内的平均质量浓度,再对采样时间段的透过率取平均值,代入式(4)便得到不同时间段的质量消光系数,如表2所示。烟

幕质量浓度 C_m 按式(5)计算:

$$C_m = \frac{w - w_1}{v} = \frac{w - w_1}{Q \cdot t} \quad (5)$$

式中, w_1 为空白滤纸质量; w 为采样后的滤纸质量; v 为采样体积; Q 为采样流量 ($40\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$); t 为采样时间 (1 min)。

表2 纳米 TiN 对各波段红外辐射的干扰特性

采样时段 /min	平均质量浓度 $C_m / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	1.06 μm		10.6 μm		3~5 μm		8~12 μm	
		透过率 $T/\%$	消光系数 $\alpha / (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	透过率 $T/\%$	消光系数 $\alpha / (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	透过率 $T/\%$	消光系数 $\alpha / (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	透过率 $T/\%$	消光系数 $\alpha / (\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
0.5~1.5	0.767	0.873	1.013	1.202	0.945	1.727	0.868	0.908	1.005
2.5~3.5	0.403	2.003	1.591	3.955	1.314	3.539	1.359	2.035	1.584
4.5~5.5	0.264	4.710	1.897	5.157	1.841	4.769	1.890	3.934	2.009

从表2可以看出,纳米 TiN 形成的烟幕对各波段红外辐射的质量消光系数基本大于 $1\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,明显高于文献[5]~[10]中常规 HC、红磷、雾油、石墨、炭黑等材料所形成烟幕的质量消光系数(如表3所示)。这主要是因为纳米 TiN 比表面积大,表面的原子比例高,悬挂的化学键多,这增大了纳米 TiN 的活性,使其对电磁波的吸收非常显著,消光性能良好。

表3 常规材料形成的烟幕对各波段电磁辐射的消光系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)

	1.06	3~5 μm	10.6 μm	8~12 μm
HC ^[5]	-	0.1~0.3	-	≈ 0.1
雾油 ^[6]	-	-	0.1664	-
红磷 ^[7-8]	-	-	<0.7	-
石墨 ^[9]	0.67	-	-	0.70
炭黑 ^[10]	-	0.83	-	0.62

另外从表2中还可以看出,不同时段不同浓度下测得的同一波段的质量消光系数有所差别,且随着时间延长,基本呈上升趋势。这主要是因为,纳米 TiN 刚开始喷入烟幕箱时,烟幕的粒子浓度很大,此后随着时间的推移,烟幕的粒子浓度有了较大幅度的降低,但由于测试材料优良的遮蔽/干扰性能,其形成的烟幕的透过率变化并不明显,对激光测试系统及红外热像仪仍保持较好的遮蔽/干扰效果。对上述结论,下面我们从事理分析和实验数据拟合处理两个方面进行详细说明。

(1) 理论分析

为详细考察实验过程中消光系数的影响因素和变化规律,我们对公式(4)进行一次展开,并求全导数可得:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{C_m L} \left(\underbrace{\frac{\ln T}{C_m} \frac{dC_m}{dt}}_1 - \underbrace{\frac{1}{T} \frac{dT}{dt}}_2 \right) \quad (6)$$

显然,消光系数的升降变化主要取决于公式(6)中,其全导数 $d\alpha/dt$ 的正负变化。在 $0 \sim 5\text{ min}$ 的实验阶段里,由于 T 较小, dC_m, dT 量级上较大的差异,致使分量1为正且大于分量2,从而通过公式(4)、(6)计算得到消光系数均呈增长趋势。

(2) 实验数据拟合处理

为证实上述理论分析,我们对实验数据进行了拟合处理。首先,我们选取最具代表性的 $3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段的平均质量浓度和透过率数据,进行了数据拟合,获得 C_m, T 的拟合函数,如图8、图9所示。然后,利用拟合函数和公式(4)、(6),计算了消光系数及其各个分量的贡献,如图10所示。由图10可知,由 C_m, T 的拟合函数带入公式(4)计算得到的质量消光系数数据和实验数据在数量上和变化趋势上相一致;在测试时间段内,透过率变化极其微小,对消光系数的贡献很小,从而质量消光系数几乎完全受质量浓度变化的影响,所以,在透过率变化不明显的情况下,按照公式(4),质量消光系数随着质量浓度的降低呈上升的趋势。这也和实验数据相一致。

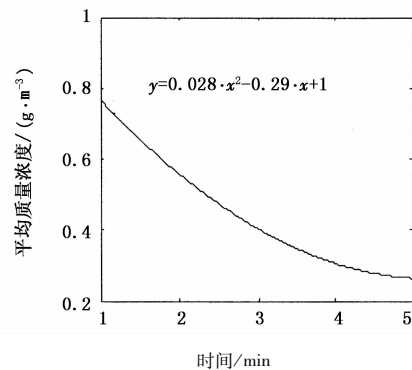


图8 平均质量浓度拟合曲线

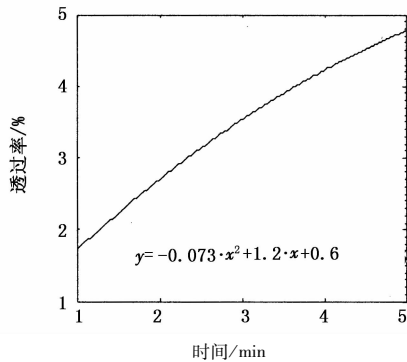


图9 透过率拟合曲线

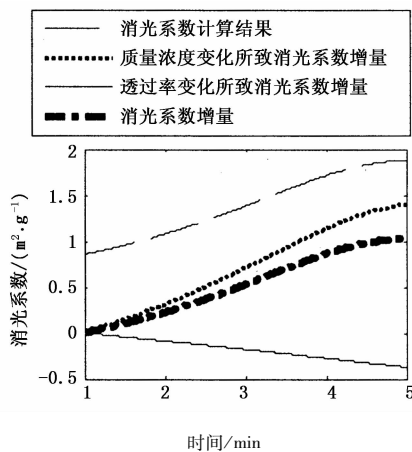


图10 质量消光系数计算结果

因此,在今后的实验中,为充分发挥实验材料优良的遮蔽/干扰性能,可相应降低材料的喷撒量、延长测试时间、增加采样次数,从而获得更为准确可靠的实验结果。

4 结论

烟幕箱测试结果表明,纳米 TiN 形成的烟幕,对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光、 $10.6 \mu\text{m}$ 激光、 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外及 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外的质量消光系数基本大于 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。理论分析和实验数据拟合处理结果表明,在测试时间段内,由于透过率变化极其微小,对消光系数的贡献很小,从而质量消光系数随着质量浓度的降低呈上升的趋势。但总体来说,纳米 TiN 作为一种新型烟幕干扰材料,对各波段红外辐射消光性能良好,在激光、红外对抗及隐身遮蔽方面将具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Pan Gongpei, Yang Shuo. Principles of pyrotechnics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997. (in Chinese)
潘功配,杨硕.烟火学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [2] Kong Xiangpeng, Zhao Yu, Zhang Linxiang, et al. Research development of nanometer TiN powders material [J]. Materials Review, 2010, 24 (z1): 110 - 113. (in Chinese)
孔祥鹏,赵煜,张林香,等.氮化钛纳米粉体材料的研究进展[J].材料导报,2010,24(z1):110-113.
- [3] Zhang Bing, Cao Chuanbao, Li Guobao, et al. Synthesis of nanopowders of titanium nitride by in-situ nitridation of titanium oxide [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2004, 33(4): 613 - 617.
- [4] Liu Meiyang, You Wansheng, Lei Zhibin, et al. Synthesis of TiN nanocrystals with high specific surface area by hydrazide sol-gel method [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2006, 27(8): 1488 - 1491. (in Chinese)
刘美英,由万胜,雷志斌,等.肼溶胶-凝胶法制备高比表面积纳米氮化钛粉体的研究[J].高等学校化学学报,2006,27(8):1488-1491.
- [5] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. New type of anti-infrared smoke agent based upon halogenated organic compound [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2005, 13(3): 173 - 178. (in Chinese)
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] An Gang, Wang Xuanyu, Yu Shikui, et al. Study of oil smoke-screen in anti $10.6 \mu\text{m}$ laser performance [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(3): 266 - 267. (in Chinese)
安刚,王玄玉,余世魁,等.雾油烟幕干扰 $10.6 \mu\text{m}$ 激光性能研究[J].激光与红外,2007,37(3):266-267.
- [7] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. Study of the extinction ability of several kinds of smoke screen to CO_2 laser emission [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(2): 144 - 146. (in Chinese)
王玄玉,潘功配.几种烟幕对 CO_2 激光的衰减性能研究[J].激光与红外,2006,36(2):144-146.
- [8] Wang Xuanyu, Pan Gongpei. Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to $10.6 \mu\text{m}$ laser emission [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(6): 636 - 640. (in Chinese)
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.
- [9] Ren Hui, Jiao Qingjie, Cui Qingzhong. Research on $\text{CuCl}_2 \cdot \text{FeCl}_3 \cdot \text{GIC}$ used as aerosol material to interfere military apparatus in the range of infrared and MMW [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(5): 7 - 10. (in Chinese)
任慧,焦清介,崔庆忠.烟幕剂 $\text{CuCl}_2 \cdot \text{FeCl}_3 \cdot \text{GIC}$ 干扰电磁波性能研究[J].兵器材料科学与工程,2005,28(5):7-10.
- [10] Owrutsky J C, Steinhurst D A, Ladouceur H D, et al. Obscurants for infrared countermeasures III [R]. ADA387724, 2001, 9.