

文章编号: 0253-2239(2005)02-237-4

## 泡沫型干扰幕的光学衰减性能研究\*

金良安 王孝通 杨常清 付建国 李 博

(海军大连舰艇学院一系, 大连 116018)

**摘要:** 泡沫型干扰幕是为解决多波段干扰领域有关问题研究的新技术。利用专用导弹综合测试系统,对其光学衰减性能进行了测试。一般只需几到几十厘米厚的干扰幕即可使得基于可见光、红外、激光的导弹制导系统失效,表明它对光传播具有明显的衰减作用,可以满足不同温度下不同目标干扰光学侦察与制导的作战使用要求。研究结论可为泡沫型干扰幕的战术运用设计提供必要的理论基础和实验依据。

**关键词:** 物理光学; 光传播; 衰减; 泡沫型干扰幕; 性能测试

中图分类号: TN97 文献标识码: A

## Study on Optic Attenuation with Foam Interfering Screens

Jin Liangan Wang Xiaotong Yang Changqing Fu Jianguo Li Bo

(No.1 Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018)

**Abstract:** Foam interfering screens (FIS) is a new technique to solve the main problems of multi-band interfering techniques. The method to discharge FIS was given. Its optic attenuation performance was measured by the integration test system of guided missile. The result is that FIS with its size variable from 1 cm to 45 cm can make TV&IR-guided missiles invalid, and the diameter of air bladder in FIS is the only main factor to influence the attenuation effect. It shows that FIS could be effective to attenuate optical transmission in spotting and weapon guiding. And it can offer the theoretical and experimental basis for the tactics application of FIS.

**Key words:** physical optics; scattering; attenuation; foam interfering screens; performance measurement

### 1 引 言

同时可以高效干扰可见光、红外、激光和雷达的多波段(全波段)干扰技术,一直是军事科技研究中的热点和难点。虽然研究的投入很大,近来也相继出现了可燃组合型多波段遮蔽烟幕、Sibyl 组合型多波段反舰导弹诱饵系统、微波红外复合箔条和组合型多波段舰外干扰诱饵弹、不可燃组合型多波段遮蔽烟幕、成像化假目标等多种组合式多波段干扰技术<sup>[1~5]</sup>,以及通过撒布多种尺寸粒子来同时达到对可见光、红外、毫米波干扰的 NG19 多波段烟雾剂等非组合式多波段干扰技术<sup>[6]</sup>,但是长期困扰着研究人员的有效作用时间太短、难以实现真正意义上的多波段干扰等“瓶颈”问题<sup>[1]</sup> 仍然没有得到较好解决。为此,我们进行了旨在克服这些“瓶颈”问题的

泡沫型干扰幕课题的研究。本文拟就其对可见光、红外、激光的衰减性能进行实验和理论分析,直接为它的战术运用设计提供必要的理论基础和实验依据。

### 2 实 验

#### 2.1 泡沫型干扰幕的生成

根据文献<sup>[7]</sup>的研究结果,选用由  $\text{HSO}_3\text{Cl}$  和  $\text{SO}_3$  按一定比例混合而成的 S-4 液体发烟剂、150 目过筛并经特种包覆处理的  $\text{NaHCO}_3$  超细粉、铝等金属良导体的超细粉及专用发泡剂和泡沫稳定剂等多种添加剂为原料,通过专门研制的引射式施放装置<sup>[8]</sup>形成泡沫型干扰幕。形成过程大致如下:

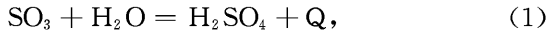
原料药品按特定方式混合施放后,具有强烈吸

\* 国家自然科学基金(20176003)和国防预研项目基金(41101050403)资助课题。

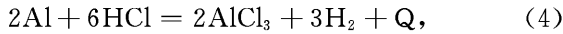
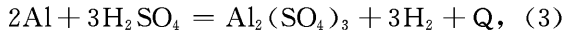
作者简介: 金良安(1966~),男,浙江黄岩人,副教授,博士,海军专业技术中校。毕业于大连理工大学化工学院,主要从事化机和军事防护研究工作。E-mail: liangan@mail.dlptt.ln.cn。

收稿日期: 2003-12-24; 收到修改稿日期: 2004-04-28

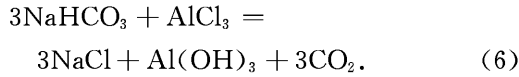
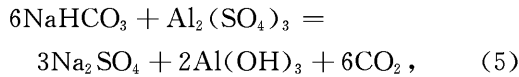
水性的 S-4 烟幕剂,迅速与空气中的水蒸气结合:



初始形成的是硫酸和盐酸微粒,进而凝结成硫酸和盐酸的雾状烟幕<sup>[9]</sup>。随着硫酸雾和盐酸雾继续吸收足够的水蒸气后,就会有部分酸雾与超细铝粉间的反应:



另一部分酸雾则将对  $\text{NaHCO}_3$  超细粉的包覆层进行腐蚀,并使被包覆的  $\text{NaHCO}_3$  细粉暴露,从而有如下反应:



经上述一系列反应,原雾状烟幕即转化成为大量泡沫连接成片的泡沫型干扰幕。它的颜色、温度、气泡内气体成分都可进行适当改变。气泡直径则容易通过施放压力的调节以及配方中添加剂成分的改变,将其控制在 0.5~5 mm 的范围内。

## 2.2 衰减性能的实验装置

为直接给这一新技术的战术运用设计提供基础,特利用了某导弹技术阵地的综合测试系统,对其光学衰减性能进行测试。该测试系统由导弹制导部(A)和模拟攻击目标(B)两大部分组成,各部分均有相应的控制、检测等机构。其中 A 可演示可见光、红外、激光和雷达制导功能;B 可在三维空间的一定范围内自由移动。如图 1 所示,A 和 B 呈对置分布,间距可调。C 为置于 A 和 B 中间的特制透明玻璃容器,它在 AB 方向的厚度可调(以 cm 为单位)。

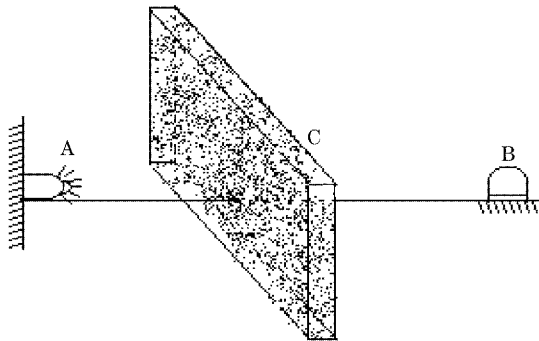


图 1 衰减效果测试原理图。A: 制导系统, B: 模拟攻击目标, C: 泡沫型干扰幕

Fig. 1 Attenuation measuring principle. A: Guidance system, B: simulation of target, C: foam interfering screens

实验时把生成的泡沫型干扰幕盛放于 C 中。

## 2.3 实验方法

在无干扰(即透明玻璃容器 C 中无干扰物)的情况下, A 将始终对 B 进行跟踪。而当 C 中充入泡沫型干扰物后, A 对 B 的跟踪将受到干扰。把使 A 无法跟踪 B 的最小干扰层厚度记为  $d_{\min}$ , 显然  $d_{\min}$  值越小越有利。实验中就以  $d_{\min}$  为指标, 分别测定: A 的制导方式分别为电视(可见光)、红外(3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$ )、激光(1.06  $\mu\text{m}$ )制导时, 泡沫不同气泡直径、不同颜色、不同温度以及气泡内充不同气体时的  $d_{\min}$  值。其中, 泡沫气泡直径采用高倍线度放大平均法进行测量。

## 3 实验结果

### 3.1 气泡不同平均直径时 $d_{\min}$ 的测定结果

调节施放装置的工作压力, 并改变配方中添加剂的成分和配比, 即可获得相对均一的由某一平均直径气泡形成的泡沫型干扰幕, 分别把它们充入到 C 中, 进行相应的  $d_{\min}$  测定, 结果如表 1 所示。

表 1 不同直径气泡对不同方式制导干扰的  $d_{\min}$  值(cm)  
Table 1  $d_{\min}$  (cm) in different bubble diameter interfering screens for different guidance methods

Bubble diameter $d$ / mm	Guidance methods			
	TV	3~5 mm IR	8~14 $\mu\text{m}$ IR	1.05 $\mu\text{m}$ laser
0.5	2~3	4~5	5~6	1~2
1	3~4	6~7	8~9	2~3
2	6~7	16~17	17~18	4~5
3	13~14	23~24	26~27	7~8
5	28~29	40~41	44~45	16~17

### 3.2 干扰幕不同颜色时 $d_{\min}$ 的测定结果

在泡沫型干扰幕的原材料中增加相应的调色剂, 即可获得不同颜色的干扰幕, 此时分别测得的  $d_{\min}$  结果如表 2 所示(对应的泡沫气泡平均直径一律为 0.5 mm)。

表 2 不同颜色泡沫对不同方式制导干扰的  $d_{\min}$  值(cm)  
Table 2  $d_{\min}$  (cm) in different color interfering screens for different guidance methods

Interfering screen colors	Guidance methods			
	TV	3~5 mm IR	8~14 $\mu\text{m}$ IR	1.05 $\mu\text{m}$ laser
White	2~3	4~5	5~6	1~2
Black	1~2	3~4	4~5	1~2
Blue	1~2	3~4	4~5	1~2
Red	1~2	3~4	5~6	1~2

### 3.3 干扰幕不同温度时 $d_{\min}$ 的测定结果

用不同温度的 S-4 液体发烟剂作为引射式施放装置的工作流体进行施放,即可获得不同温度的泡沫型干扰幕,此时分别测得的  $d_{\min}$  结果如表 3 所示(对应的泡沫气泡平均直径一律为 0.5 mm)。

表 3 不同温度泡沫对不同方式制导干扰的  $d_{\min}$  值 (cm)

Table 3  $d_{\min}$  (cm) in different temperature interfering screens for different guidance methods

Interfering screen temperature $t / ^\circ\text{C}$	Guidance methods			
	TV	3~5 mm IR	8~14 $\mu\text{m}$ IR	1.05 $\mu\text{m}$ laser
7	2~3	4~5	5~6	1~2
22	2~3	4~5	5~6	1~2
54	2~3	5~6	6~7	1~2

### 3.4 干扰幕气泡内充气不同时 $d_{\min}$ 的测定结果

按前述反应过程形成的泡沫型干扰幕,其气泡内充气主要是  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$  的混合气。如把原材料中的铝等金属活动性顺序表中的氢前金属超细粉去掉,即可获得气泡内不含  $\text{H}_2$  的泡沫型干扰幕,此时分别测得的  $d_{\min}$  结果如表 4 所示(对应的泡沫气泡平均直径一律为 0.5 mm)。

表 4 气泡内充不同气体对不同方式制导干扰的  $d_{\min}$  值 (cm)

Table 4  $d_{\min}$  (cm) in foam interfering screens filled with different gases for different guidance methods

Filled gases	Guidance methods			
	TV	3~5 mm IR	8~14 $\mu\text{m}$ IR	1.05 $\mu\text{m}$ laser
$\text{H}_2 + \text{CO}_2$	2~3	4~5	5~6	1~2
$\text{CO}_2$	2~3	3~4	4~5	1~2

## 4 实验结果分析

### 4.1 泡沫型干扰幕的光学衰减效果

从上述各表中的实验结果可以看出,所有  $d_{\min}$  值都很小,当气泡直径为 5 mm 时大约是几十厘米的量级,而当气泡直径为 0.5 mm 时则只是几厘米的量级。这表明了泡沫型干扰幕对红外、可见光、激光等光学传播具有明显的衰减作用。显然这是现有干扰技术很难实现的,如现有技术中对可见光具有最佳干扰效果的 S-4 烟幕,其  $d_{\min}$  值通常在十几米以上,至少要比泡沫型干扰幕的  $d_{\min}$  值大数十倍。

泡沫型干扰幕由于只需几到几十厘米厚的干扰层,就可以使得对应的导弹制导等光学系统失效,故在实战中按飘空方式的干扰幕使用时,只要施放数米厚 ( $d_{\min}$  值的多倍) 的干扰幕,就能以足够的成功系数,保证有效干扰敌方对我实施的基于可见光、激

光、红外(包括点源和成像)的侦察和制导。这是泡沫型干扰幕技术优越性的一个重要体现,加上它对雷达的干扰也有特效(已另外撰文介绍),因而被认为是一种真正意义上的多波段(全波段)干扰技术,而现有多波段干扰技术一般只对可见光、点源红外、成像红外、激光、雷达中的某两个有效。并且,泡沫型干扰幕的有效作用时间可达几十分钟甚至几十天(已经实验验证),这也是现有多波段干扰技术根本无法相比的,因为现有多波段干扰技术的有效作用时间一般只有数秒钟,最长的也只有 1 分钟左右。

### 4.2 泡沫型干扰幕衰减效果的影响因素

表 1 结果表明泡沫型干扰幕中气泡直径的变化将会导致  $d_{\min}$  值的急剧变化,而表 2、表 3、表 4 的结果则表明了干扰幕颜色、温度和气泡内充气成分对  $d_{\min}$  值也有影响,但它们的影响程度远不如气泡直径变化的影响。因此,气泡直径是影响泡沫型干扰幕光学衰减性能的决定性因素。气泡直径越小,对提高光学衰减性能越有利,也就是对提高干扰效果越有利,这是泡沫型干扰幕战术运用设计中应该重视的问题。

泡沫型干扰幕的温度对衰减性能的影响不明显,这保证了它完全可以满足不同纬度地区不同季节的使用,无论是在高热的南方夏季,还是在高寒的北方冬季,都可以使用。

泡沫型干扰幕的颜色、气泡内充气成分对衰减性能的影响都不明显,这又保证了可以完全根据作战使用需求来设计干扰幕的颜色和内充气成分,如需作为海上舰船的覆盖物方式使用时,可设计成海蓝色的干扰幕;作为飘空方式的干扰幕时,则可使其内充气体中多些有利于飘浮的  $\text{H}_2$ 。

## 5 泡沫型干扰幕的光学衰减理论分析

### 5.1 泡沫型干扰幕媒质的介质特性

经检测<sup>[10]</sup>,泡沫型干扰幕液层的电导率  $\sigma$  约为 4 s/m,相对介电常量  $\epsilon_r$  约为 80。而红外、可见光的频率  $f$  为 300~769000 GHz(注  $\omega = 2\pi f$ )。于是,计算可得泡沫型干扰幕液层的  $\sigma/(\omega\epsilon)$  比值相应为 0.003~1.17 $\times 10^{-6}$ ,可见都远远小于 1。因此根据电磁场理论,泡沫型干扰幕液层相对于可见光、红外的传播而言,都呈现为理想介质,这是它对可见光、红外传播具有明显衰减作用的基础<sup>[11]</sup>。

### 5.2 泡沫型干扰幕对光线传播的散射效率

显然,单独的理想气泡表面可看成是球面,而在

泡沫型干扰幕中,因大量气泡的聚接挤压,各气泡表面成了不规则的曲面。根据光学传播理论,一束平行光线传播至球面或曲面,其反射光线必然是发散的,结果使得沿原方向传播的光线大大减少,并且表面曲率越大,即气泡直径越小,这样的发散程度就越重,对提高衰减效果也就越有利,这与本文实验结果完全一致。

### 5.3 泡沫型干扰幕对光线传播的多界面效应<sup>[10]</sup>

在一个理想气泡幕中,都存在着外凸、外凹、内凸、内凹等多种界面。光线传到泡沫型干扰幕内,必然要在这些复杂的界面之间传播,发生复杂的散射、折射、反射甚至全反射的现象,而且气泡数量越多,这种现象就越复杂,最终导致能够穿透泡沫型干扰幕的光线大为减少,这是泡沫型干扰幕对光线传播的透射锐减效应。另一方面,假如存在穿透到干扰幕另一侧的光线,因其经历了如此复杂的散射、折射、反射甚至全反射,使得其实际传播的距离,已远远大于干扰幕的厚度,势必加重光能量被吸收、反射、散射的程度,这是泡沫型干扰幕对传播光线的路径剧增效应。显然,气泡直径越小,单位厚度泡沫型干扰幕内发生的透射锐减效应和路径剧增效应都将越明显,对提高衰减效果也越有利,这与本文实验结果也是一致的。

### 5.4 泡沫型干扰幕对光线传播的综合衰减表征

泡沫型干扰幕由于透射锐减效应和路径剧增效应的多界面效应,使得它对光线传播具有明显的衰减作用。显然,与光线在其它媒质中传播的情况相似,入射光线的能量也随在泡沫型干扰幕中的传播距离按指数规律衰减,即符合著名的布格定律

$$P_{\lambda}(X) = P_{\lambda 0} \exp(-\beta_{\lambda} X)$$

式中  $X$  为光线在泡沫型干扰幕中的传播距离,  $P_{\lambda 0}$ 、 $P_{\lambda}(X)$  分别为当  $x = 0$  和  $x = X$  时的光线能量;  $\beta_{\lambda}$  为综合衰减系数,它与媒质材料的种类、性质、温度等有关,也与光波的波长( $\lambda$ ) 等参量有关。

显然,只要确定上式中的综合衰减系数  $\beta_{\lambda}$ , 即可定量表征光线在泡沫型干扰幕中传播时的综合衰减作用。为此,本文专门对其进行了测定,结果为:当气泡直径均值分别为 0.5 mm、2 mm、5 mm 时,对可见光传播的  $\beta_{\lambda}$  相应为 0.85、0.36、0.081;对大气窗口红外传播的  $\beta_{\lambda}$  则分别为 0.67、0.17、0.069。

## 6 结 论

本文通过对泡沫型干扰幕在泡沫不同气泡直

径、不同颜色、不同温度以及气泡内充不同气体时,对电视(可见光)、红外(3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$ )、激光(1.06  $\mu\text{m}$ ) 制导的最小有效干扰幕层厚度  $d_{\text{min}}$  值的测定,发现了它对光学传播具有明显的衰减作用,可以解决多波段(全波段)干扰领域存在的几个主要问题,可以满足不同温度下不同目标的作战使用要求。按传统的飘空方式使用时,仅施放数米厚的干扰幕,即能以足够的安全系数确保成功干扰敌方实施的基于可见光、激光、红外(包括点源和成像)的侦察和制导。这种基于泡沫的干扰方法,无疑为实现高效率的多波段干扰提供了新的途径,但其衰减机理等有关问题仍有待于进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Qiao Xiaojing, Wang Changfu, Ren Hui. New concept for passive interfering technologies [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001, (1): 47~49 (in Chinese)  
乔小晶, 王长福, 任 慧. 新概念无源干扰技术 [J]. *火工品*, 2001, (1): 47~49
- 2 Hao Taiji. Smoke chemicals of disturbing IR [J]. *Special Ammunition*, 1991, (1): 24~28 (in Chinese)
- 3 R. D. Giglia. Radar and infrared-detectable structural simulation decoy. *US Patent* 5092244, 1992. 5
- 4 Embury Jr. Method for creating a one way visible screening smoke. *US Patent* 5682010, 1997
- 5 Stevens, Ward C. Metal-coated substrate articles responsive to electromagnetic radiation and method for making and using the same. *US Patent* 60170626, 2000
- 6 U Krone Uwe. Pyrotechnic smoke generator for camouflage purpose. *DE* 4337071
- 7 Jin Liang'an, Yang Changqing, Wang Xiaotong *et al.*. Clean-up methods for the acid mist pollution from S-4 smoke screen [J]. *Acta Scientia Circumstantiae*, 2003, 23(6): 831~833 (in Chinese)  
金良安, 杨常清, 王孝通 等. 军用 S-4 烟幕酸雾污染的清除 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 831~833
- 8 Jin Liang'an, Wang Xiaotong, Liu Xuewu *et al.*. Study on the special phenomenon of designing and managing ejectors [J]. *Chin. J. Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 155~158 (in Chinese)  
金良安, 王孝通, 刘学武 等. 喷射器设计与使用管理中的一种特殊现象研究 [J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 155~158
- 9 Zhang Guiping. *Smoke Screen in Modern War* [M]. Beijing: PLA Press, 1998. 70~83 (in Chinese)  
张桂平. 现代战争的烟幕使用 [M]. 北京: 解放军出版社, 1998. 70~83
- 10 Jin Liang'an. *Experimental Study on Optic Attenuation with Foam Interfering Screens* [D]. Dalian Naval Academy, 2004 (in Chinese)  
金良安. 干扰泡沫的生成理论与干扰特性实验研究 [D]. 海军大连舰艇学院, 2004
- 11 Wang Jiali, Zhu Manzuo, Lu Hongming. *Electromagnetic Field & Electromagnetic Wave* [M]. Xi'an: Xi'an Electronics University Press, 2002. 165~169 (in Chinese)  
王家礼, 朱满座, 路宏敏. 电磁场与电磁波 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 165~169