

文章编号:1001-9014(2006)03-0188-04

# 提高泡沫云对红外/毫米波复合制导干扰效果的实用途径研究

金良安<sup>1</sup>, 战希臣<sup>2</sup>, 付建国<sup>1</sup>, 郑振宇<sup>1</sup>, 石侃<sup>1</sup>

(1. 海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军航空工程学院管理系, 山东 烟台 264001)

**摘要:**为寻求提高特种泡沫云对 IR/MMW 复合制导干扰效果的实用途径,进行了专门的理论研究和实验分析.结果表明:在通常的毫米量级下,泡沫云中的气泡直径越小,对提高干扰效果越有利,因此设法使得所生成的气泡直径尽可能地小,即可有效提高其干扰效果,而这可以轻易地通过调节泡沫云专用施放装置的工作压力或者适当改变所用化学原料的配比来实现.这一研究结果,对泡沫云干扰技术的发展及其战术运用设计具有重要的价值.

**关键词:**散射;特种泡沫云;干扰试验;红外/毫米波复合制导

**中图分类号:**TN97 **文献标识码:**A

## AVENUE OF IMPROVING INTERFERENCE EFFECT AGAINST IR/MMW GUIDANCE BY SPECIAL FOAM SCREEN

JIN Liang-An<sup>1</sup>, ZHAN Xi-Chen<sup>2</sup>, FU Jian-Guo<sup>1</sup>, ZHENG Zhen-Yu<sup>1</sup>, SHI Kan<sup>1</sup>

(1. Navigation Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018 China;

2. Management Department, Naval Aeronautic Engineering Academy, Yantai 264001 China)

**Abstract:**The special foam screen (SFS) is a new multi-band interference technique. In order to improve its interference effect against IR and MMW guidance, the relevant theories and experiments were studied. The results indicate that the change of bubble's diameter of SFS will lead to the rapid change of the interference effect, and the smaller the bubble's diameter is, the better the interference effect will be. So to make SFS with smaller bubbles will improve the interference effect, and it can be realized by adjusting the working pressure of the equipment to discharge SFS or by changing the material formulations of SFS.

**Key words:**scattering;special foam screen (SFS);interference test;combined guidance by IR/MMW

### 引言

随着以 IR/MMW 复合制导为主的精确制导武器的不断普及,对多波段干扰技术的研究已日渐重视.通过撒布多种尺寸粒子对红外、毫米波干扰的非组合式多波段干扰技术,以及把干扰红外、雷达的两种不同技术组合起来的组合式多波段干扰技术,都是近来常见报道的此类技术<sup>[1,2]</sup>.然而,由于这些技术普遍存在着有效干扰时间过短、难以满足现代宽谱干扰需求、以及严重污染等不足,我们专门研究了基于特种泡沫云(SFS)的新型多波段干扰技术,简称干扰泡沫技术<sup>[3]</sup>.

研究表明,SFS 可以实现对激光、可见光(含电

视成像)、点源红外、成像红外、毫米波、厘米波等多种常用频段电磁波进行高效干扰<sup>[4,5]</sup>,体现出了深入研究的巨大价值.本文旨在通过对 IR 与 MMW 等电磁波在泡沫气泡中的传播理论研究和相应的实验分析,找出可以提高 SFS 对 IR/MMW 复合制导干扰效果的实用型途径,以便为 SFS 的高效使用提供基本依据和技术保障.

### 1 寻求实用途径的理论研究

#### 1.1 电磁波在气泡中的一般传播过程

当电磁波以入射角  $\theta$  传入气泡时,一般要形成两股波束:一是透射波(折射波);一是反射波.如图 1 所示,当入射波 1 传到气泡外界面时,成了反射波

收稿日期:2005-10-28,修回日期:2006-02-24

Received date: 2005-10-28, revised date: 2006-02-24

基金项目:国家自然科学基金(20176003)和“十五国防预研课题”(41101050403)

作者简介:金良安(1966-),男,浙江黄岩人,教授,博士,现为中国科学院大连化学物理研究所站博士后,主要从事军事防护等研究.

2 和透射波 3;透射波 3 传到气泡内界面时,又成了反射波 4 和透射波 5;反射波 4 传到气泡外界面时,又成了新的透射波 6 和反射波 7,同时透射波 5 传到气泡内界面时,又成了透射波 4'和反射波 5';然后 4'和 4, 5'和 5,6'和 6,7'和 7 等等都是相似的过程,如此不断延续,直到最后电磁波的能量完全耗尽为止.显然,消耗在气泡内的电磁波能量越多,SFS 的干扰效果就会越好.因此,为了提高 SFS 的干扰效果,应设法使更多的电磁波能量消耗在泡沫气泡内.

1.2 电磁波的全反射及其与 SFS 干扰效果的关系

根据电磁场理论,电磁波在媒质分界面实现全反射,须同时满足以下两个条件(条件中的  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  分别是媒质 1 和媒质 2 的介电常数):

第一,入射波自媒质 1 向媒质 2 斜入射,且  $\epsilon_1 < \epsilon_2$  . (1)

第二,入射角  $\theta_i$  必须等于或大于临界角  $\theta_c$ ,即  $\theta_i \geq \theta_c = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$  . (2)

显然,电磁波如被 SFS 中的泡沫液层界面反射,就可能无法传播到 SFS 的另一边.被泡沫液层界面反射的电磁波能量越多,SFS 的干扰效果也必然越好.特别是发生局限于液层内的连续全反射时,可使电磁波能量全部被液层吸收而达到更高效干扰的目的.因此,如能设法提高全反射的发生率,无疑是提高泡沫干扰效果非常有利的一种途径.

1.3 电磁波在理想气泡中发生全反射的可能性

电磁波在气泡中存在四种不同形式的反射<sup>[3]</sup>,它们发生全反射的可能性分析如下:

① 对于外凸界面,由于入射线与反射线都位于

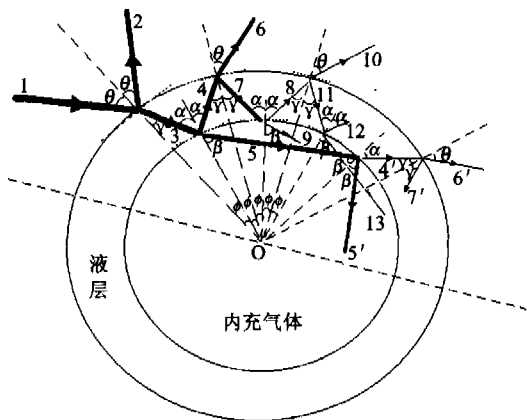


图 1 电磁波在气泡中传播的一般过程

Fig.1 Transmission process of electromagnetic-wave in air bubble

气泡外部空气中,折射线位于气泡的液层中,因此其入射电磁波是由气泡外部空气(媒质 1)传向气泡液层(媒质 2),此时  $\epsilon_1 \approx 1, \epsilon_2 \approx 80$ <sup>[3]</sup>,显然不满足  $\epsilon_2 < \epsilon_1$ ,因此外凸界面上不可能发生全反射.

② 对于外凹界面,由于入射线与反射线都位于气泡的液层中,而折射线位于气泡外部的空气中,故此时  $\epsilon_1 \approx 80, \epsilon_2 \approx 1$ ,满足全反射第一个条件  $\epsilon_2 < \epsilon_1$ ;但因其入射角等于  $\gamma$ ,而  $\gamma$  就是外凸界面上的折射角,显然不能大于或等于  $\theta_c$ ,因此无法满足全反射  $\theta_i \geq \theta_c$  的条件,故也不能发生全反射.

③ 对于内凹界面,由于入射线与反射线都位于气泡内部的气体中,而折射线则位于气泡的液层中,故此时  $\epsilon_1 \approx 1, \epsilon_2 \approx 80$ ,显然也不满足全反射的第一个条件  $\epsilon_2 < \epsilon_1$ ,因此也不可能发生全反射.

④ 对于内凸界面,入射线与反射线都位于气泡的液层中,而折射线则位于气泡内的气体中,故此时  $\epsilon_1 \approx 80, \epsilon_2 \approx 1$ ,显然满足  $\epsilon_2 < \epsilon_1$  这一条件.如再能满足  $\theta_i \geq \theta_c$ ,那么就将在气泡内凸界面上发生全反射,如图 2 所示.从后面的分析知道,只要满足一定的条件,就可使得  $\theta_i \geq \theta_c$ ,从而就可实现电磁波在内凸界面上发生全反射.显然,究竟应该满足什么样的条件,这是需要解决的关键问题.

1.4 电磁波在气泡内凸界面全反射的实现

为在内凸界面实现所需的全反射,必须设法满足上述第二个条件  $\theta_i \geq \theta_c$ .结合图 1 分析如下.

第一步:临界角  $\theta_c$  的确定:

$$\theta_c = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \arcsin \sqrt{\frac{1}{80}} \quad (3)$$

第二步:最小入射角  $\theta_i$ (图 1 中为  $\alpha$ )的求解.

据图 1,入射电磁波由气泡液层(媒质 1)传向

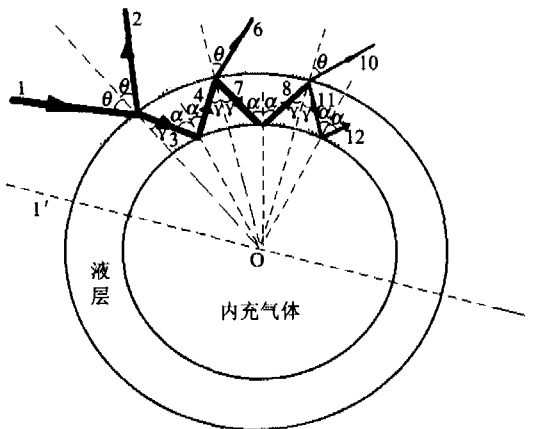


图 2 电磁波在气泡内凸界面上的全反射

Fig.2 Holophote of electromagnetic-wave in air bubble

气层(媒质 2), 如图中的折射波 3 传到内凸界面时, 其入射角为  $\alpha$ , 从图中各角度之间的关系可得

$$\alpha = \gamma + \varphi, \quad (4)$$

其中,  $\gamma$  可由图 1 中的入射波 1、反射波 2、折射波 3 之间的关系, 根据折射定律由下式求出(式中的  $\varepsilon_1 \approx 1$  为空气的,  $\varepsilon_2 \approx 80$  为液层的)

$$\gamma = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin\theta\right), \quad (5)$$

而  $\alpha$  则可由下式直接求出

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R}{R-d} \sin\gamma\right), \quad (6)$$

式中,  $R$  为气泡外径(半径),  $d$  为气泡液层厚度。

式(6)描述了  $\alpha$  与  $\gamma$  的数学关系, 但未考虑当液层厚度  $d$  到达一定程度后, 折射波不会与内界面相交, 而是直接传播到液层与空气相交的内凹界面上。在该情况下, 气泡的作用相当于普通水珠, 或者说气泡的干扰已退化成为水珠的干扰。因此, 为满足全反射的发生条件, 气泡液层的最大厚度为:

$$d_{\max} = R(1 - \sin\gamma_{\max}), \quad (7)$$

其中,  $\gamma_{\max}$  是电磁波由空气传至气泡液层可达到的最大折射角, 它可由空气和气泡液层这两种媒质的介电常数求出。

综合式(5)、(6), 得

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R}{R-d} \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin\theta\right), \quad (8)$$

此处  $\varepsilon_1 \approx 1$  为空气的,  $\varepsilon_2 \approx 80$  为气泡液层的。

第三步: 最小初始入射角(图 1 中的  $\theta$ ) 的求解。

由式(3)和(8), 令  $\alpha = \theta_c$ , 于是有

$$\frac{R}{R-d} \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin\theta = \sqrt{\frac{1}{80}}, \quad (9)$$

把  $\varepsilon_1 \approx 1, \varepsilon_2 \approx 80$  代入上式, 可得

$$\sin\theta = \frac{R-d}{R}, \quad (10)$$

于是

$$\theta = \arcsin\sqrt{\frac{R}{R-d}}, \quad (11)$$

因此, 只要电磁波最初进入气泡时的初始入射角不小于上式的计算值, 就可以确保泡沫气泡液层内部(内凸界面)电磁波全反射的实现。

### 1.5 电磁波在理想气泡中全反射发生率的提高

应用于侦察、制导领域的电磁波传播至 SFS 时, 通常可近似看成平行波束。因此, 虽无法保证所有入射电磁波进入 SFS 气泡的最小初始入射角都满足式(11)的条件, 但通过可行的途径, 可使更多

的入射电磁波满足这一条件。

不难分析, 设法使得由式(11)求出的  $\theta$  角变小, 就可能会有更多的人射电磁波在气泡液层内发生特定的全反射, 从而就可提高所需全反射的发生率。那么, 如何才能通过可行的途径, 使得  $\theta$  角变小呢? 这是最终关心的问题。下面对此进行探讨。

#### 1) 气泡直径大小对全反射发生率的影响

由式(11),  $\theta$  随  $\frac{R}{R-d}$  值的变小而变小。不妨令

$$f(R, d) = \frac{R}{R-d}, \quad (12)$$

假定  $d$  保持不变, 对上式求  $R$  的偏导数, 得

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{R - (R-d)}{R^2} = \frac{d}{R^2}. \quad (13)$$

对于气泡, 必有  $R > d > 0$ , 故  $\frac{\partial f}{\partial R} > 0$ , 所以  $f(R, d)$  是关于  $R$  的递增函数, 因此要使得  $f(R, d)$  值变小, 就应使  $R$  值变小, 即: 为提高全反射发生率, 气泡越小越好。

#### 2) 气泡液层厚度对全反射发生率的影响

假定  $R$  保持不变, 对式(12)求  $d$  的偏导数, 得

$$\frac{\partial f}{\partial R} = \frac{-1}{R}. \quad (14)$$

对于气泡, 必有  $R > 0$ , 故  $\frac{\partial f}{\partial R} < 0$ , 所以  $f(R, d)$  是关于  $d$  的递减函数, 因此要使  $f(R, d)$  的值变小, 就应使  $d$  的值变大, 即: 为提高全反射发生率, 气泡液层的厚度, 在满足式(7)的条件下, 越大越好。

#### 3) 提高干扰泡沫液层全反射发生率的措施

综上所述, 要提高入射电磁波在 SFC 气泡液层中全反射的发生率, 可以通过两条可行的途径: 一是使得气泡的直径越小越好; 二是使得气泡的液层厚度在满足  $d < d_{\max}$  的条件下, 越大越好。气泡的直径越小, 液层越厚, SFC 的干扰效果都将越佳。

相对气泡液层厚度的控制而言, 气泡直径大小的控制更便于通过 SFS 专用施放装置工作条件的改变来实现。因此, 在实际使用中可以通过控制气泡直径的大小来达到提高 SFS 干扰效果的目的。

## 2 提高 SFS 干扰效果实用途径的实验分析

### 2.1 基于导弹专用测试系统的干扰实验装置

为检验 SFS 对 IR/MMW 复合制导的干扰效果, 特设计了基于“× 导弹技术阵地综合测试系统”的干扰效果测试装置。其测试原理如图 3 所示, 图中 A 为制导部, B 为模拟攻击目标, C 为盛放于特制透明

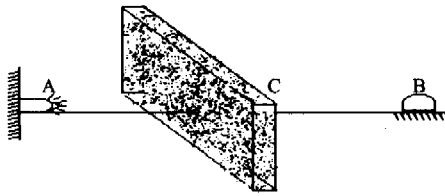


图3 SFS对IR/MMW制导系统干扰性能测试原理

Fig.3 Principle to test interference effect of SFS against IR/MMW system

玻璃容器中的干扰泡沫。

测试装置中的主要实验设备与仪器如下:

① 某导弹技术阵地综合测试系统. 参看图3, 它由A、B两大部分组成. 其中, A可演示导弹采用的 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 大气窗口红外点源系统和3mm、8mm雷达系统制导的功能; B可模拟适于这些制导武器攻击的目标, 目标可在三维空间一定范围内自由运动. A和B呈对置分布, 间距可调。

② 特制透明敞口玻璃容器. 就是图3中的C, 用于盛放SFS, 以便于测试, 其A、B方向的厚度可调(调节时以厘米为单位). 每次测试实验时, 要把生成的特种干扰泡沫盛放于C中。

③ 干扰泡沫生成装置, 是专门研制的引射式施放系统. 它所生成的干扰泡沫气泡直径, 可通过相应的调节, 在0.5mm~5mm的范围内进行控制。

## 2.2 $d_{\min}$ 的含义及其测定方法

检测时, 在无干扰(即特制透明敞口玻璃容器C中无泡沫干扰物)的情况下, 随着目标B的自由运动, 导弹制导部A显然将始终对B进行跟踪. 而当C中充入干扰物后, A对B的跟踪将受到干扰. 特把使A无法跟踪B的最小干扰物厚度记为 $d_{\min}$ 。

显然,  $d_{\min}$ 值越小, 越有利于干扰. 测试中就以它作为指标, 分别测定: A的制导方式分别为3~5 $\mu\text{m}$ 、8~14 $\mu\text{m}$ 点源红外和3mm、8mm雷达时, SFC不同气泡直径时的 $d_{\min}$ 值。

## 2.3 实验结果

通过调节专用引射式施放装置的工作压力, 或者适当改变所用化学原料的配比, 或者同时采用这两种方法, 都可获得相对均一的, 由某一平均直径气泡形成的特种干扰泡沫, 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。

## 2.4 实验结果分析

表1结果表明: 气泡直径的变化将会导致 $d_{\min}$ 值的急剧变化. 如气泡直径为0.5mm时各 $d_{\min}$ 值都仅为5cm左右; 而当气泡直径为5mm时, 对应的

表1 泡沫不同气泡直径对不同制导方式干扰的 $d_{\min}$ 值/cm

Table 1  $d_{\min}$  in different bubble diameter of SFS for IR/MMW guidance system/cm

气泡直径 r/mm	制导方式			
	3~5 $\mu\text{m}$ 红外点源	8~14 $\mu\text{m}$ 红外点源	3mm 雷达	8mm 雷达
0.5	4~5	5~6	3~4	3~4
1	6~7	8~9	5~6	5~6
2	16~17	17~18	16~17	16~17
3	23~24	26~27	21~22	22~23
5	40~41	44~45	35~36	36~37

$d_{\min}$ 值则都增至35~45cm左右. 由此可见, 干扰效果随着气泡直径的减小而大幅提高, 气泡直径越小对提高干扰效果越有利. 这一实验结果与前面理论研究的结果显然完全一致。

## 3 结束语

通过理论和实验研究, 找到了一种可以提高泡沫云对IR/MMW复合制导干扰效果的实用型途径. 在通常的毫米量级下, 设法使得泡沫云中的气泡直径越小, 对提高干扰效果越有利. 而在实际使用过程中, 只要调节专用引射式施放装置的工作压力, 或者适当改变所用化学原料的配比, 都可实现气泡直径变小的目标. 这一研究结论, 对干扰泡沫技术的发展及其战术运用设计, 都具有重要的价值。

## REFERENCES

- [1] QIAO Xiao-Jing, WANG Chang-Fu, REN Hui. New passive disturbing techniques [J]. *Initiators & Pyrotechnics* (乔小晶, 王长福, 任慧. 新概念无源干扰技术. 火工品), 2001(1): 13—15.
- [2] GUAN Hua, PAN Gong-Pei, JIANG Li. Study on Attenuation with Distending Graphite to 3, 8 MMW [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (关华, 潘功配, 姜力. 膨胀石墨对3mm, 8mm波衰减性能研究. 红外与毫米波学报) 2004, 23(1): 33—37.
- [3] JIN Liang-An. Study on theory and experimental tests of special interfering foam [D]. Ph. D. Thesis. Dalian Naval Academy (金良安. 干扰泡沫的生成理论与特性实验研究. 海军大连舰艇学院博士学位论文), 2004.
- [4] JIN Liang-An, WANG Xiao-Tong, TONG You-Tang, et al. New disturbing technique based on foam screen to IR/MMW guidance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金良安, 王孝通, 童幼堂, 等. 基于特种泡沫云的红外/毫米波复合制导干扰技术研究. 红外与毫米波学报) 2004, 23(6): 413—417.
- [5] Jin Liang-An, Wang Xiao-Tong, Yang Chang-Qing, et al. Study on Optic Attenuation with Foam Interfering Screens [J]. *Acta Optica Sinica* (金良安, 王孝通, 杨常清, 等. 泡沫型干扰幕的光学衰减性能研究. 光学学报), 2005, 25(2): 237—240.