

特种泡沫云干扰效果退化现象的原因分析

金良安¹, 田恒斗¹, 战希臣², 徐玉明¹, 石侃¹

(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:特种泡沫云(SFS)是一种新型多波段无源干扰技术. 在通过增加其气泡液层厚度(d)以提高对 IR / MMW 复合制导干扰效果的实验研究过程中, 发现了干扰效果急剧下降的退化现象. 本文对这一现象进行了理论研究, 结果表明: SFS 优良干扰效果的前提是保证其气泡干扰的多界面效应, 而 d 超过一定限度(d_{\max})后必将使 SFS 的这一效应急剧退化, 从而成为“退化泡沫”. 文中还分析得出了 d_{\max} 约为气泡半径的 0.8882 倍, 实际应用中可以方便地通过控制施放条件来保证 d 不超过 d_{\max} . 这些结论有利于防止 SFS 干扰效果的退化, 对其作战使用直接具有重要的价值.

关键词: 散射; 多波段干扰; 特种泡沫云; 干扰效果退化原因; IR / MMW 复合制导

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A

MECHANISM OF INTERFERENCE EFFECT DEGRADATION OF SPECIAL FOAM SCREEN

JIN Liang-An¹, TIAN Heng-Dou¹, ZHAN Xi-Chen², XU Yu-Ming¹, SHI Kan¹

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

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

Abstract: Special foam screen (SFS) is a novel multi-band passive interference technique. During the processes of improving its interference effect against IR/MMW guidance by increasing the liquid-thickness of air bubbles (d), an abnormal phenomenon occurred so that the interference effect sharply declined. In order to solve this problem, the relevant phenomenon were studied. The results show that the air bubbles' multi-interface characteristic is the key factor for SFS to have high effective interference, and when d exceeds d_{\max} (the upper limit of d), the multi-interface characteristic will be severely abated and the SFS has become "degenerate SFS". The ratio of d_{\max} to air bubbles' radius was also calculated, and it is about 0.8882. By controlling easily the working condition of the equipment to discharge SFS, the d won't exceed the d_{\max} . These conclusions can offer the important basis for the tactics application of SFS.

Key words: scattering; multi-band interference; special foam screen (SFS); mechanism of interference effect degradation; combined guidance by IR and MMW

引言

特种泡沫云 (special foam screen, SFS) 是一种新型长效无污染多波段无源干扰技术, 通常仅是厘米量级厚度的 SFS 即可实现对激光、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, 有效干扰时间长达半小时以上, 并且残留物无污染^[1-3]. SFS 的这些特性表明了, 它可以有效克服传统的 NG19 多波段烟雾剂、Siby1 反舰导弹诱饵系统、微波红外复合箔

条以及美国专利 USP5092244、USP5682010、USP60170626 所述的成像化假目标等主要多波段干扰技术^[4-8] 普遍存在的有效干扰时间过短、难以满足现代宽谱干扰需求、对环境往往具有严重污染等明显不足, 同时也充分显示了对 SFS 进行研究的巨大价值.

文献[9]专门就如何进一步提高 SFS 对 IR/MMW 复合制导的干扰效果进行了较为深入的理论和实验研究, 得出了在通常的毫米量级下, 应使所生成的 SFS 中的气泡直径尽可能小的重要结论. 文献

[9]的理论分析同时指出了气泡液层厚度在不超过某一阈值的前提下应尽可能地大,但没有就这一阈值及相关问题进行深入的分析讨论.而在我们后来的实验研究中发现,气泡液层厚度超过某一阈值确实导致了SFS干扰效果急剧下降的现象,我们特把此时的SFS称为“退化泡沫”.

本文旨在通过分析SFS高效干扰的实现条件,确认“退化泡沫”的形成机理,从理论上深入分析气泡液层厚度的阈值问题,并探讨气泡液层厚度变化对干扰泡沫退化程度的影响,以便进一步完善SFS干扰性能的优化方法,为SFS在实战中的高效使用提供更为全面的重要依据.

1 特种泡沫云干扰的多界面效应

1.1 气泡中的四类界面

气泡是构成特种泡沫云的基本结构单元.通常情况下,一个独立气泡由其外部气体、气泡液层和气泡内充气三部分构成(参见图1),因此每个气泡均具有内外两个气-液界面.根据电磁波传播理论,当电磁波以入射角 θ 传到气泡界面时,它一般要形成两股波束:一是透射波(折射波);一是反射波.根据入射波、反射波、折射波与媒质的相对位置关系,可将特种泡沫云中气泡的界面分成以下4类(如图1所示).

I类界面:入射线与反射线都位于泡沫气泡外部的空气中,而折射线则位于泡沫气泡的液层中,如图1中的人射线1、反射线2与折射线3所在的界面.这类界面可叫做“外凸界面”.

II类界面:入射线与反射线都位于泡沫气泡的液层中,而折射线则位于泡沫气泡外部的空气中,如

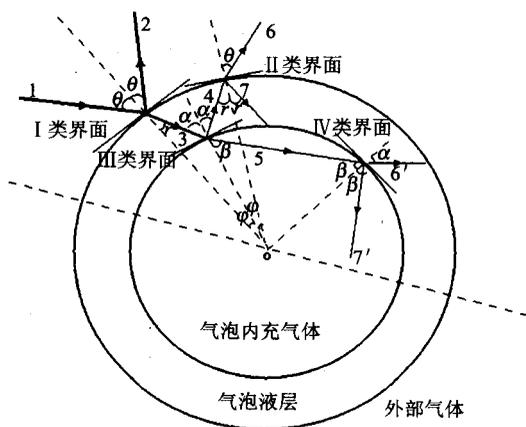


图1 气泡中的4类界面示意图

Fig.1 Four type interface in air bubble

图1中的人射线4、反射线7与折射线6所在的界面.这类界面可叫做“外凹界面”.

III类界面:入射线与反射线都位于泡沫气泡的液层中,而折射线则位于泡沫气泡内部的气体中,如图1中的人射线3、反射线4与折射线5所在的界面.这类界面可叫做“内凸界面”.

IV类界面:入射线与反射线都位于泡沫气泡内部的气体中,而折射线则位于泡沫气泡的液层中,如图1中的人射线5、反射线7'与折射线6'所在的界面.这类界面可叫做“内凹界面”.

1.2 特种泡沫云干扰效果与气泡界面的关系

通常电磁波在单一媒质中传播其能量衰减是相对较慢的,而遇到两种媒质界面时,在其分界面上将有一部分电磁能量被反射回来,形成反射波;另一部分电磁能量可能透过分界面,折射到另一媒质里并继续传播,形成透射波.即有:

$$\text{入射能} = \text{反射能} + \text{透射能}$$

对于媒质后面的电磁波接收机而言,被媒质分界面反射部分的电磁波,是已经损失掉的,不能再被接收机接收.只有折射部分中的透射波,才可能被接收机接收.因此,这样的媒质界面越多,带来的损失也就越大,对干扰的实施也越有利.

显然,在特种泡沫云中,由于其特殊的结构方式,其中必然具有数量巨大,由液态水和气体这2种媒质构成的上述4类气液界面.电磁波传到特种泡沫云内时,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^[9]的现象,而且气泡数量越多,这样的现象就越复杂,最终导致能够穿透特种泡沫云的电磁波大为减少,这是特种泡沫云对电磁波实施干扰的透射锐减作用.另一方面,假如存在穿透到特种泡沫云另一侧的电磁波,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,已远远大于特种泡沫云的厚度,势必加重电磁波能量被吸收、反射、散射的程度,这是特种泡沫云对电磁波实施干扰的路径剧增作用.显然,气泡直径越小,单位厚度的特种泡沫云中的界面数也就越多,其透射锐减和路径剧增作用都将越明显,干扰效果也就越好.特种泡沫云干扰的这一特性,特称为多界面效应.

可见,提高特种泡沫云中气泡界面的利用率,强化其干扰的多界面效应,是保证特种泡沫云优良干扰效果的一个重要前提条件.

2 “退化泡沫”的形成机理研究

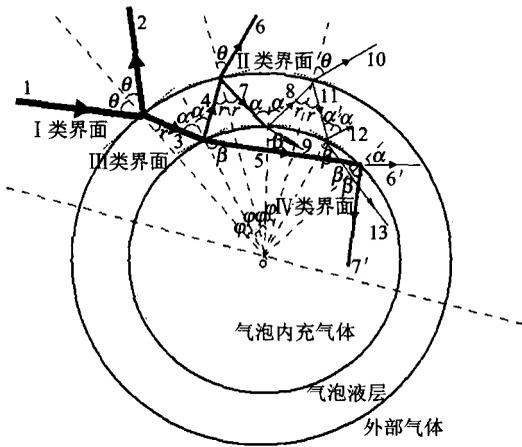


图2 电磁波在一般气泡中的传播过程
Fig.2 Transmission process of electromagnetic-wave in air bubble

2.1 电磁波在正常气泡中的传播过程

如图2所示,当入射波1传到气泡外凸界面时,成了反射波2和透射波3;透射波3传到气泡内凸界面时,又成了反射波4和透射波5;反射波4传到气泡外凹界面时,又成了新的透射波6和反射波7,同时透射波5传到气泡内凹界面时,又成了透射波6'和反射波7';然后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,在气泡界面上发生的反射与折射次数越多,气泡界面的利用率就越高,气泡损耗的电磁波能量也就越多,SFS的干扰效果就会越好.

2.2 “退化泡沫”的形成本质

实验研究中,在气泡直径一定的情况下,为提高特种泡沫云的干扰效果,需通过调整其原料的化学配方和系统工作压力,以使气泡液层的厚度 d 尽可能大.

然而,当气泡液层厚度超过一定值(d_{max})后,将会出现如图3所示的情况:其中的折射波3从气泡的液层内直接传到II类界面(外凹界面),进而形成透射波4继续向前传播.此时,由于折射电磁波3根本没有与气泡内部的气-液界面发生作用,因而明显降低了气泡中气-液界面的利用率.尽管此时的气泡从其结构特征上看仍然为气泡,但从其对入射电磁波1的干扰作用来看,显然已退化成为类似水珠或液滴的干扰作用了.由大量此类气泡形成的泡沫云,可相应地称之为“退化泡沫”.

2.3 “退化泡沫”的定量表征

结合图3分析可知,气泡液层厚度 d 越小、折射角 γ 越小,其发生退化现象的概率越小,则求得当 γ

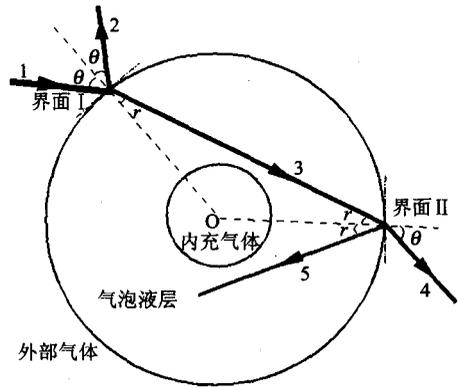


图3 “退化泡沫”本质示意图
Fig.3 Degeneration of SFS

取最大值 γ_{max} 时,在发生退化的临界点对应的液层最大厚度 d_{max} (即气泡液层厚度阈值),则只要使产生的气泡液层厚度 $d < d_{max}$,不管电磁波1如何入射均不会发生退化现象.

图3中折射角 γ 可由折射定律求得

$$\gamma = \arcsin\left(\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin\theta\right) \quad (1)$$

式(1)中, ϵ_1 、 ϵ_2 分别为空气和气泡液层的介电常数.对于特种泡沫云, $\epsilon_1 \approx 1$ 、 $\epsilon_2 \approx 80$. 则求得对应 θ 取极大值 90° 时

$$\gamma_{max} = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1}{80}}\right) \quad (2)$$

结合图3易得,气泡液层厚度阈值 d_{max} 为

$$d_{max} = R(1 - \sin\gamma_{max}) \quad (3)$$

其中, R 为气泡半径.

根据式(2)可得, $\sin(\gamma_{max}) = (1/80)^{1/2} \approx 0.1118$,代入式(3),即可得

$$d_{max} \approx 0.8882 R \quad (4)$$

2.4 气泡液层厚度与退化程度的关系

结合图3分析:

① 当特种泡沫云气泡液层厚度 $d \leq d_{max}$ 时,不管电磁波1以任何角度 θ 入射,折射电磁波3都将与气泡内部的气-液界面相交而发生界面作用,于是就不会发生退化现象.

② 当 $d = R$ 时,气泡从物理结构上已经完全成为了水珠或液滴,气泡内部的气-液界面消失,也就不再存在折射电磁波3与气泡内部气-液界面发生界面作用的问题了,于是,不管电磁波1以任何角度 θ 入射,都将发生退化现象,成为完全退化.

③ 当 $d_{max} < d < R$ 时,结合①和②的分析,显然将会有部分入射电磁波发生退化现象.根据图3不

难求入射电磁波发生退化的临界入射角 θ_c 为

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{R-d}{R} \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}\right), \quad (5)$$

即,入射角 θ 在区间 $(\theta_c, \pi/2)$ 范围内的电磁波均发生退化,进一步整理式(5)得

$$\theta_c = \arcsin\left[8.94\left(1 - \frac{d}{R}\right)\right], \quad (6)$$

由此显见,在 R 为一常量的情况下, θ 是关于变量 d ($d \in (0, 8882R, R)$) 的单调递减函数. 因此, d 越大, θ_c 越小,则发生退化的入射电磁波范围越广,当 d 趋于极限 $d=R$ 时,得 $\theta_c=0$,则所有电磁波均产生退化,即②中讨论的情况.

研究中,我们利用高倍线度放大平均法,比较精确的测量了气泡半径 R 和液层厚度 d . 对比发现,实测特种泡沫云出现明显退化时的 d 值要略大于前述理论推导得出的 d_{\max} ,分析其原因应是:在 d 略大于理论值 d_{\max} ,即发生弱退化时,在某一气泡内形成退化干扰的电磁波传入下一气泡极可能不再形成退化干扰,由此特种泡沫云整体上不表现出明显的退化特征.这也从另一个角度说明了特种泡沫云气泡对电磁波具有的良好衰减效果.

3 结语

本文通过对特种泡沫云优良干扰效果的实现条件进行较为深入的理论研究,发现并证实了保证特种泡沫云干扰效果的多界面效应;进而找到了在通过增加气泡液层厚度来提高特种泡沫云对 IR/MMW 复合制导干扰效果的过程中产生“退化泡沫”的原因;定量分析了气泡液层厚度参数 d 对“退化泡沫”形成的影响,特别是得到了气泡液层厚度阈值 d_{\max} 的定量表述.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,并适当改变所用化学原料的配比,便可轻松达到控制气泡液层厚度 d 的目的.因此,本文的研究成果,完善了提高特种泡沫云干扰效果的实用技术途径,可以有效防止特种泡沫云干扰效果的退化,对特种泡沫云干扰技术的发展及其作战使用,都具有重要的价值.

当然,在我们的初步分析中,采用了几何光学的原理和方法,可以较好地解释对红外、可见光干扰退化的原因,但对毫米波、厘米波等波段进行干扰时,泡沫云整体的大尺度效应可能是很重要的因素,因此对它们退化干扰机理的分析还需进一步的深入;其次,泡沫中大量气泡的 R 和 d 具有不一致性,研究定量关系时,其统计平均和离散性是需考虑的重要方面,这也有待以后进一步深入研究.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] JIN Liang-An, WANG Xiao-Tong, FU Jian-Guo, et al. Experimental study on microwave attenuation with special foam cloud[J]. *Journal of Microwaves* (金良安,王孝通,付建国,等.特种泡沫云干扰微波的实验研究.微波学报), 2004, 20(4):93—96.
- [4] 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, 24(1):13—15.
- [5] HAO Tai-Ji. Smoke chemicals of disturbing IR[J]. *Special ammunition* (郝太吉.国外抗红外发烟剂.特种弹药), 1991, 13(1):24—28.
- [6] Giglia R D. Radar and infrared-detectable structural simulation decoy [P]. USP5092244, 1992, 5.
- [7] Embury Jr. Method for creating a one way visible screening smoke [P]. USP5682010, 1997.
- [8] Stevens, Ward C. Metal-coated substrate articles responsive to electro-magnetic radiation and method for making and using the same [P]. USP 60170626, 2000.
- [9] JIN Liang-An, ZHAN Xi-Chen, FU Jian-Guo, et al. The avenue of improving effect to interfere IR/MMW guidance by special foam screen [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金良安,战希臣,付建国,等.提高泡沫云对红外与毫米波复合制导干扰效果的实用途径研究.红外与毫米波学报), 2006, 25(3):188—191.