

文章编号: 1001 - 9014(2010)01 - 0019 - 04

胶质气体泡沫对 IR / MMW 的干扰特性研究

金良安¹, 田恒斗¹, 战希臣², 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:为进一步发展特种干扰泡沫这一新型多波段无源干扰技术,研究了稳定性强、流动性好的胶质气体泡沫(CGA)对 IR/MMW 的干扰特性.实验表明,CGA 对 IR/MMW 的干扰能力可达普通干扰泡沫的十几倍.初步分析认为,由 CGA 气泡的半径小、液膜厚等结构特征产生的界面数优势和全反射优势,是保障 CGA 优良干扰特性的重要基础.研究结果可为干扰泡沫这一新技术的“涂覆型”使用提供一种更可行、高效的途径.

关键词:多波段干扰;特种干扰泡沫;胶质气体泡沫(CGA);干扰特性

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A

INTERFERENCE CHARACTERISTICS OF COLLOIDAL GAS AEROSOLS AGAINST IR/MMW

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

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

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

Abstract: The interference characteristics of colloidal gas aerosols (CGA) against IR/MMW were studied to further develop the special interference foam, i.e. a novel multi-band passive interfering technique. CGA is of strong stability and good fluidity. The experiment results show that CGA has much better interference ability against IR/MMW than ordinary interference foam. The theoretical analysis shows that CGA has more interfaces and total reflection advantage due to its structural characteristics such as the small radius of bubble and the thick liquid membrane. These advantages are the important basis of CGA's excellent interference characteristics according to the theoretical analysis. The study provides a more feasible and effective approach for the use of coating interference foams.

Key words: multi-band interference; special interference foam; colloidal gas aerosols (CGA); interference characteristic

引言

特种干扰泡沫是当前倍受重视的新型多波段无源干扰技术,可同时高效干扰激光、可见光(含电视成像)、点源红外、成像红外、毫米波、厘米波等各种常用频段电磁波,并且有效干扰时间长,残留物无污染.这些特性使得它有效地克服了现有主要多波段干扰技术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,充分显示了对其进行研究的巨大价值^[1-3].文献[4]、[5]经过较深入的理论和实验研究,得出可以通过调节施放装置的工作压力、改变化学原料配比等手段,来减小气泡直径、增加气泡液层厚度,从而提高了特种泡沫干扰性能.

本文针对气泡直径更小、流动性更好的胶质气体泡沫(CGA)对 IR/MMW 的干扰特性开展初步的实验和理论研究,以进一步提高特种干扰泡沫技术的多波段干扰性能,拓宽其应用范围,并降低使用成本,简化使用方法,为干扰泡沫这一新技术的“涂覆型”使用探索一种更可行、高效的新途径.

1 CGA 的结构及干扰特性

1.1 CGA 的结构特性

根据文献[6]和[7],CGA是由表面活性剂水溶液在高速搅拌($n > 5000$ r/min)下与气体混合生成的直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的微细气泡团.当前普遍认为 CGA 气泡的结构如图 1 所示.它由气相内核和一层包封气相的液膜层构成.液膜层有内外两个表面,均吸附

收稿日期: 2009 - 03 - 15, 修回日期: 2009 - 07 - 28

Received date: 2009 - 03 - 15, revised date: 2009 - 07 - 28

基金项目:国家自然科学基金(20176003)和国防预研课题(41101050403)

作者简介:金良安(1966-),男,浙江黄岩人,教授,主要从事舰船安全保障与防护技术研究. E-mail: jinliangan@163.com.

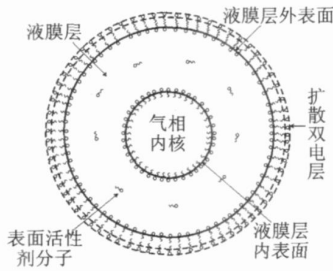


图1 CGA气泡的结构

Fig.1 Configuration of CGA bubble

了表面活性剂单分子层,它们的亲水基团朝向液层内,疏水基团朝外.在该液层与体相水之间的界面上,又分布表面活性剂分子,其亲水基团朝向体相水,疏水基团朝向液膜层,并有双电层存在.与一般泡沫相比,CGA的液层要厚得多,而且其独特的双电层结构使得CGA即使发生碰撞也难以聚并,因此CGA具有良好的聚结稳定性与动力稳定性.并且,CGA具有与水相似的流动性,可用管道对其进行输送,而不用担心其破裂.

1.2 CGA的干扰特性

干扰泡沫中的气泡直径越小、气泡液层厚度越大,干扰的效果就越好^[4,5].而CGA自身固有的结构特性决定其气泡直径主要分布在10~100 μm 之间,远小于普通干扰泡沫毫米量级的气泡直径;并且,CGA气泡的液层比一般干扰泡沫气泡的液层厚得多.由此我们推测,CGA可能具有比普通干扰泡沫更为优良的干扰性能,毫米级厚度CGA的干扰效果,可能达到厘米量级厚度的普通干扰泡沫才能取得的效果.同时,CGA具有良好的稳定性与流动性,便于集中制备,由管道输送至被保护目标的合适部位分散布放,从而全面、快速地覆盖目标,达到高效的遮蔽作用.

显然,CGA的上述优良特性对研制新型的“涂覆型干扰泡沫”具有突出的优势.为此,进一步对CGA的干扰特性专门开展了相应的实验研究与初步的理论分析.

2 CGA干扰特性的实验研究

2.1 CGA的制备

采用北京六合安消防科技有限公司生产的LHA水成膜泡沫灭火剂(主要成分是阴离子表面活性剂)与水按体积比6:94混合,制成CGA的基液.

再将基液置于直径15cm、高度20cm的专用有机玻璃圆筒中(为提高CGA的制备效率,在其底部

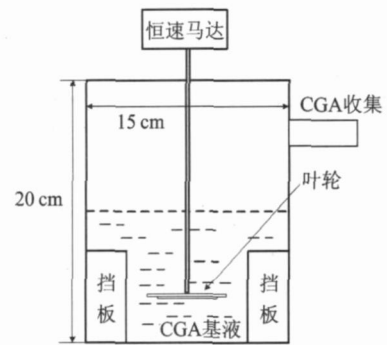


图2 CGA的制备示意图

Fig.2 Preparation of CGA

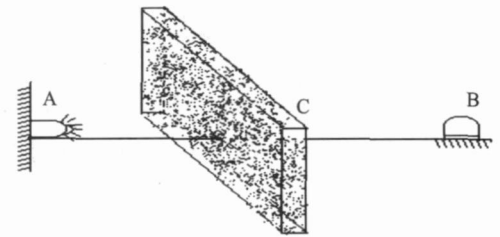


图3 干扰性能测试系统原理图

Fig.3 Principle of interference characteristic test system

装有四块挡板),由一转速恒定($n = 6000\text{r/min}$)的电动马达带动一叶轮搅拌基液生成CGA.在圆筒一侧上部开口处收集生成后溢出的CGA用于后续干扰性能测试,如图2所示.

2.2 干扰性能测试

采用与文献[4]相同的原理与方法进行测试,即利用某导弹技术阵地的综合测试系统,对CGA干扰R/MMW的性能进行了测试.如图3所示,该测试系统由制导部A和模拟目标B两部分组成,各部分均有相应的控制、检测等机构.其中A可演示红外和雷达制导功能;B可在三维空间自由移动;C为置于A、B中间的特制透明玻璃容器,用以盛放CGA,其在AB方向的厚度可调.

在无干扰(即C中无泡沫)的情况下,A可以始终对B进行稳定跟踪.而当C中充入CGA后,A对B的跟踪将受到干扰,定义A无法跟踪B时的最小CGA厚度为 H_{min} .显然, H_{min} 值越小,表明干扰效果越好.测试中,A的制导方式分别为点源红外(3~5 μm 、8~14 μm)、雷达(3mm、8mm波段).

2.3 实验结果与分析

实验测得,CGA针对不同频段、不同制导方式进行干扰的 H_{min} 值如表1所示.为便于比较,将文献[4]中得到的不同气泡直径的普通干扰泡沫干扰R/MMW的部分 H_{min} 值一并列入表1.由表中数据

表 1 不同干扰泡沫对不同制导方式干扰的 H_{min} 值 / cm
Table 1 H_{min} in different interference foam against IR / MMW guidance system / cm

干扰泡沫类型	制导方式			
	3~5 μ m 红外点源	8~14 μ m 红外点源	3mm 雷达	8mm 雷达
CGA	0.3~0.4	0.4~0.5	0.4~0.5	0.4~0.5
普通干扰泡沫 (直径 d/mm)	0.5	4~5	5~6	3~4
	1	6~7	8~9	5~6
	2	16~17	17~18	16~17

显见,相比于普通干扰泡沫,CGA 具有更为优良的干扰性能.与具有最佳干扰效果的 0.5mm 气泡直径的普通干扰泡沫相比,达到相同干扰效果,平均所需的 CGA 厚度仅为前者的十分之一左右.相对于其它气泡直径的普通干扰泡沫,CGA 的优势更为明显,这是由 CGA 气泡的结构特征决定的,其理论分析见后.

3 CGA 干扰特性的理论分析

3.1 CGA 干扰的“界面数”优势分析

在干扰泡沫层内部,由于其特殊的结构方式,其中必然具有数量巨大的气液界面.在磁波穿透干扰泡沫层的过程中,必然要在这些界面之间发生复杂的散射、折射、反射甚至全反射等现象,而且界面数量越多,这样的现象就越复杂,最终导致能够穿透干扰泡沫层的电磁波能量被大大衰减,这称之为干扰泡沫对电磁波实施干扰的透射锐减作用.另一方面,对穿透干扰泡沫层的电磁波,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干扰泡沫层的厚度,势必加强了电磁波能量被衰减的程度,这称之为干扰泡沫对电磁波实施干扰的路径剧增作用.显然,构成干扰泡沫的气泡直径越小,单位厚度的干扰泡沫层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^[5].

与普通干扰泡沫毫米量级的气泡直径相比,CGA 的气泡直径分布在 10~100 μ m 间,因此 CGA 具有的界面数远大于同等厚度的普通干扰泡沫层具有的界面数.如假设 CGA 的平均气泡直径约为 50 μ m,则相对于前期实验中得到的具有最小气泡直径 0.5mm 的普通干扰泡沫层^[4],在沿电磁波传播方向的一个截面上,同等厚度的 CGA 具有的界面数即可达后者的 10 倍左右.而且,电磁波穿透干扰泡沫层时,基本无法沿原传播方向直线穿过.因此,若考虑到电磁波在干扰泡沫中气液界面间复杂的反射、

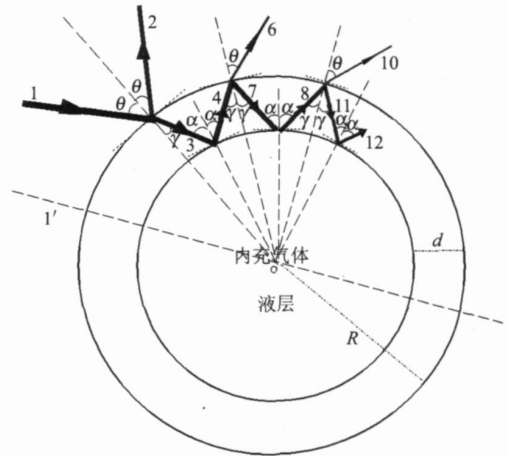


图 4 电磁波在气泡内的全反射

Fig 4 Total reflection of electromagnetic wave in air bubble

折射过程,则相同体积的 CGA 具有的有效界面数甚至达到普通干扰泡沫的上千倍. CGA 干扰的这一特性可称为 CGA 的“界面数”优势特性.显然,这一优势特性对 R 和 MMW 都是具备的.

3.2 CGA 干扰的“全反射”优势分析

(1) “全反射”的几何光学分析

文献 [4] 的研究得出,当电磁波在干扰泡沫中传播时,若在干扰泡沫气泡的液层中发生如图 4 所示的全反射现象,则会大幅提高干扰泡沫对电磁波的衰减能力.

进一步研究表明,电磁波最初射入气泡时的初始入射角 满足

$$\arcsin\left\{\frac{R-d}{R}\right\}, \quad (1)$$

就可以确保这一全反射现象的实现.显然,减小干扰泡沫气泡半径 R (外径) 或增加气泡液层厚度 d 都将减小式 (1) 右侧的值,从而增大电磁波射入干扰泡沫层时发生上述全反射现象的范围.因此,干扰泡沫中气泡尺度越小、气泡液层厚度越大,干扰效果越好.文献 [5] 从理论上进一步分析了气泡半径 R 与液层厚度 d 之间的相对关系对泡沫干扰性能的影响.研究表明,当气泡液层厚度 d 超过 0.8882R 时,会发生严重影响泡沫层干扰性能的退化现象.

(2) CGA “全反射”优势的量化表征

为分析方便,定义气泡液层厚度 d 与气泡半径 R 的比值为气泡结构性能参数,即 $\eta = d/R$,以此表征气泡半径与液层厚度等结构参数对泡沫层干扰性能的影响.于是,发生上述全反射现象的电磁波初始入射角 的范围是

$$\arcsin(1 - \frac{d}{2R}) \quad (2)$$

则在 $d < 0.8882R$ 的前提下, d 越大, 发生全反射的入射电磁波范围越广, 泡沫层的干扰效果越好。

测量一定 CGA 的体积 V , 在泡沫完全消失后测量所剩基液的体积 V_L , 即可得 CGA 的气含率

$$= \frac{V - V_L}{V} \times 100\% \quad (3)$$

根据气泡的结构特征, 显然有

$$V = 4R^3/3 \quad (4)$$

$$V_L = 4(R-d)^3/3 \quad (5)$$

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (3), 化简后得

$$= (1 - \frac{d}{R})^3 \quad (6)$$

在文中实验条件下, 测得 CGA 的气含率约为 65%。由此, 根据式 (6) 可得 CGA 的平均气泡结构性能参数 0.1338 代入式 (2) 得, 在 CGA 中发生全反射的电磁波初始入射角应满足以下条件

$$60.01^\circ < \theta < 90^\circ \quad (7)$$

而对于普通干扰泡沫, 若其配方不加复杂的特殊调配与施放控制, 则其气含率通常大于 95%。由此易知普通干扰泡沫的平均气泡结构性能参数 0.0170, 于是在普通干扰泡沫中发生全反射的电磁波初始入射角 θ 的范围为

$$79.5^\circ < \theta < 90^\circ \quad (8)$$

对比式 (7) 和 (8), CGA 对应的入射角 θ 的范围约为普通干扰泡沫的 3 倍。也就是, 当一束电磁波穿过 CGA 的过程中发生全反射的概率, 要远远大于在普通干扰泡沫中发生全反射的概率。这就使得 CGA 干扰具有明显的“全反射”优势特性。当然, 由于全反射是在气泡的液层内发生的, 对于红外, 特别是中、近红外, 从其波长与 CGA 气泡直径大小的关系来看, 这种全反射发生的可能性是完全存在的; 而对 MMW 波段, 由于其波长远远大于 CGA 气泡的直径, 全反射则可能不会发生。

CGA 对电磁波的干扰, 除了上述“全反射”和“界面数”两大方面的优势以外, 同时还可能因为其具有一种独特的“双电层”结构, 而对入射电磁波产生特殊的衰减作用, 在后续的研究中我们将对此专门进行深入的理论分析。

4 结论

CGA 具有良好的聚结稳定性与动力稳定性、与

水相似的流动性、可用管道输送而不会破裂等诸多优良特性, 且制备工艺简单、成本相对低廉。本文经实验测定表明, 相比于普通干扰泡沫, CGA 对 R / MMW 具有更为优良的干扰特性。利用简便的几何光学原理和方法初步分析得出, 由于 CGA 气泡的结构特征获得的“界面数”优势、“全反射”优势, 是 CGA 具有优良干扰特性的重要因素。研究得到的这些结果, 可为干扰泡沫的“涂覆型”使用提供一种更可行、高效的途径。有关 CGA 与各频段电磁波的具体作用机理, 以及立足于实际使用的 CGA 生成设备等问题, 都有待于后续深入研究。

REFERENCES

- [1] J N Liang-An, WANG Xiao-Tong, TONG You-Tang, *et al* New disturbing technique based on foam screen to R / 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] ZHAO Jun, PAN Gongpei, CHEN Xin A novel potential medium of broadband PPECM: aqueous foam [J]. *Infrared and Laser Engineering* (赵军, 潘功配, 陈昕. 一种新型宽波段无源光电干扰介质——水基泡沫. 红外与激光工程), 2007, 36 (3): 425—429.
- [3] 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): 47—49.
- [4] J N Liang-An, ZHAN Xi-Chen, FU Jian-Guo, *et al* The avenue of improving effect to interfere R / 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.
- [5] J N Liang-An, TIAN Heng-Dou, ZHAN Xi-Chen, *et al* The mechanism of interference effect degradation of special foam screen [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金良安, 田恒斗, 战希臣, 等. 特种泡沫云干扰效果退化现象的原因分析. 红外与毫米波学报), 2007, 26 (2): 133—136.
- [6] WANG Yun-dong, CHEN Min, XU Li-lian, *et al* Preparation and characteristics of colloidal liquid aphrons and colloidal gas aphrons [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)* (王运东, 陈敏, 徐丽莲, 等. 胶质液体和气体泡沫的制备及其性质的研究. 清华大学学报 (自然科学版)), 1998, 38 (6): 42—45.
- [7] WANG Xiao-yan, LU Li-jun Optimization of characteristics for colloidal gas aphrons [J]. *Environmental Science and Technology* (王晓燕, 刘莉君. 胶质气体泡沫 (CGA) 特性优化试验研究. 环境科学与技术), 2006, 29 (1): 37—39.