

·综述·

## 舰载多光谱液态烟幕干扰技术研究

于 群, 闵 江

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:** 论述了舰载烟幕无源干扰战术运用及技术性存在的问题基础上, 结合液态烟幕多波段无源干扰技术现状, 对水幕多光谱干扰技术和乳状液烟幕干扰技术与方法进行研究, 基于乳状液的物理性质和影响乳状液稳定性的因素, 提出乳状液烟幕多层结构干扰理论。将乳状液液滴多界面效应和乳状液液滴透射波的异向传播特性应用到液态烟幕干扰中, 提高新型液态烟幕对可见光、红外、毫米波宽波段的高效干扰。

**关键词:** 舰载烟幕; 液态烟幕; 乳状液; 无源干扰

中图分类号: TN972.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0001-05

## Research on Jamming Technology of Shipborne Multispectral Liquid Smoke Screen

YU Qun, MIN Jiang

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Based on the problems of shipborne smoke screen passive jamming tactics and technology, incorporated with the present situation of liquid smoke screen multi-band passive jamming technology, the water mist multispectral and emulsion smoke screen jamming technologies and methods are researched. According to the physical properties and the factors affecting the stability of emulsion, the emulsion smoke screen multilayer structure jamming theory is put forward. The emulsion droplet multi-interface effect and different directional propagation characteristics are applied to the liquid smoke screen jamming. The new type of liquid smoke screen can effectively interfere in the visible, infrared and millimeter-wave wide band.

**Key words:** shipborne smoke screen; liquid smoke screen; emulsion; passive jamming

现代光电技术的发展越来越迅速, 并且在军事领域中广泛应用, 光电系统大量装备部队, 并在侦察、制导和火控等领域广泛的应用, 严重的威胁了未来战争中的军用目标。舰载烟幕干扰是目前防御红外成像、激光制导、精确制导武器的重要手段之一。烟幕不仅对光信号有较大的吸收和散射作用, 对红外、可见光、毫米波等均有很强的消光效应和衰减效应。

无源干扰技术的战术运用问题与技术性能紧密相关, 战术上的要求包括多波段、长效性、高可靠性、无污染、低成本、快速性、施放效能可评估等。目前已有多波段无源干扰技术大多数的操作过程

复杂, 并且施放保障要求高, 尤其是在海上环境烟幕受水气象条件影响大。海上烟幕的布设是在舰艇上装备相应的烟幕器材、设施、物料等。在强对流等复杂的气象条件下, 无源烟幕实施干扰的过程中会受到严重影响, 甚至无法使用, 严重影响干扰效能。

针对舰载烟幕的瓶颈问题, 结合舰载烟幕的作战环境, 提出了舰载多光谱液态烟幕干扰技术, 在研究水幕多光谱干扰技术和乳状液烟幕多层结构干扰技术与方法基础上, 提出材料资源丰富和较高干扰效能的新型多层结构舰载烟幕, 对可见光、红外和雷达微波波段上具有良好的吸收与散射特性,

在空中形成由大量液态烟幕,完成宽频谱高效干扰对抗。

## 1 舰载多光谱液态烟幕干扰技术

### 1.1 液滴式水幕干扰机理

#### (1)水幕对电磁波衰减的影响因素

液滴式水幕是由液态水微粒与空气混合而成的一种不均匀的媒介,属于气溶胶体系,分散相是液态水,分散介质是空气。随着水幕在空中不断的扩散,由于环境因素的影响及蒸发、汽化等作用使水幕的粒径不断减小直到完全消失,在这不断变小的过程当中,粒径不同水幕液滴对微波产生不同的散射作用。烟幕的主要特征参数包括以下几个参数。

烟幕浓度:  $C_m$  为单位体积内烟幕微粒的质量。

$$C_m = \frac{m}{V} \quad (1)$$

其中,  $C_m$  为烟幕的质量浓度,单位为  $\text{g}/\text{m}^3$ ;  $m$  为烟幕的质量,单位为  $\text{g}$ ;  $V$  为烟幕体积,单位为  $\text{m}^3$ 。

透射系数:光透过烟幕后的光强与透过前的光强的比值称透射率。又称透射率或透射系数。按下式计算为

$$T_\lambda = \frac{I_t}{I_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $T_\lambda$  为透射率,单位为%;  $I_t$  为透过后光强,单位为  $\text{cd}$ ;  $I_0$  为透过前光强,单位为  $\text{cd}$ 。

未透过的光强与透过前的光强的比值称为衰减率( $\alpha$ ),其值为

$$\alpha = (1 - T_\lambda)\% \quad (3)$$

消光系数:是表征烟幕对可见光、红外、激光、微波等电磁辐射衰减的能力大小。消光是由于烟幕吸收和散射的共同作用结果。如下式

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{C_m L_t} \ln \frac{[I_t(\lambda)]}{[I_0(\lambda)]} \quad (4)$$

#### (2)水幕多光谱干扰机理

当电磁波透过水幕时,由于不同的波长,以及水幕颗粒的大小、形状、表面粗糙程度不同,电磁波透过水幕产生折射、反射、吸收和透射,从而降低军事目标被发现和识别的概率。

通过研究水幕在可见光波段与水幕液滴浓度、水幕液滴截面积、水幕中整体的含水量成反比,而与水幕液滴半径成正比。因此,当水幕液滴的半径

越小、浓度越大、含水量越高时,能见距离就越小,对目标的可见光隐身效果就越好。

水幕对红外传输的作用机理是当水分子被入射波辐射激发时,由低能级跃迁到高能级从而对电磁波产生吸收作用。水幕的吸收具有明显的选择性,其吸收带主要在  $0.76 \sim 6 \mu\text{m}$  波段之间。因此,水幕对目标辐射的近红外及中远红外都有衰减作用。水幕的散射作用也是降低目标红外特征信号的重要原因。

### 1.2 乳状液烟幕多层结构干扰机理

虽然水幕在可见光、近红外及中远红外有衰减作用,但在毫米波段衰减并不明显,为提高液态烟幕衰减效率和拓展干扰波段,现将乳状液通过液体雾化装置形成液体颗粒,在空中形成大面积乳状液水幕,形成乳状液干扰烟幕。

#### (1)乳状液液滴多界面效应

在乳状液液滴中,由于其特殊的组份和结构方式,由油和水等媒质构成的分界面。多种分界面使得电磁波透射锐减,从而保证了乳状液液滴对电磁波传播的优良干扰效果。按乳状液液滴构成的不同特征,界定了以下四类界面,如图1所示:第I类界面、第II类界面、第III类界面、第IV类界面。乳状液烟幕液滴的这四类界面特征及其所含有的特殊组份吸收与散射作用对电磁波的传播起到干扰作用。

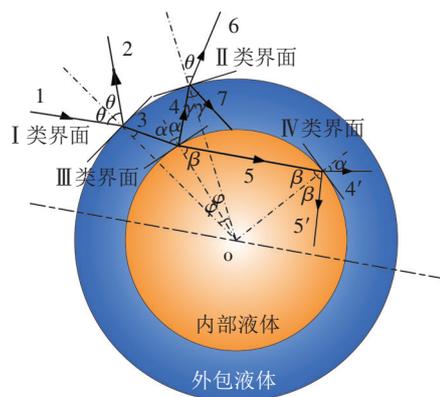


图1 乳状液烟幕液滴界面示意图

#### (2)乳状液液滴透射波的异向传播特性

电磁波在乳状液液滴传播,一是始终未经乳状液液滴内部,仅在外层液体中传播的电磁波所产生的透射波;二是来自于经过乳状液液滴内部液体后的电磁波所产生的透射波。如图2所示。

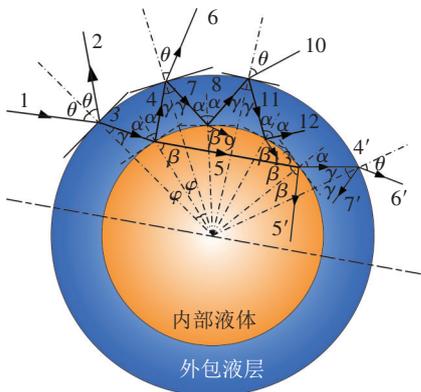


图2 电磁波在乳状液滴中传播示意图

电磁波在乳状液液滴一系列复杂的气-液、液-液界面中,发生了复杂的反射与折射过程,这就必然使得电磁波被反射、散射的份额大大增加,使得透射电磁波的份额大幅减少,原来传播方向上能量减少,加上乳状液液滴透射波的入射异向性,更使得与初始入射波传播方向完全相同的入射同向透射波的份额更少,大量的乳状液液滴密集的分布在空间中,使得电磁波传播的路径更加复杂。同时,乳状液烟幕不同的液相材料对电磁波也有强烈的吸收衰减作用,这使得电磁波能量大大降低,从而提高乳状液烟幕的干扰效果。

## 2 乳状液烟幕干扰技术与方法研究

### 2.1 乳状液烟幕乳化作用

形成乳状液烟幕的液体材料(乳状液)是一个多相分散体系,其中至少有一种液体以液珠的形式均匀地分散于另一个和它不相混溶的液体之中,液珠的直径一般大于 $0.1\ \mu\text{m}$ 。很少乳状液的液珠直径小于 $0.25\ \mu\text{m}$ ,最大的比比值约高100倍。即使在同一个乳状液中,液珠的直径也相差很大。在其他条件相同时,在一个乳化液中,小半径的液珠越多,乳状液的稳定性越大。

乳状液是由两种不相混合的液体,如水和油所组成的两相体系,即由一种液体以球状微粒分散于另一种液体中所组成的体系,分散成小球状的液体称为分散相或内相;包围在外面的液体称为连续相或外相。当油是分散相,水是连续相时称为水包油(油/水或O/W)型乳状液;反之,当水是分散相,油是

连续相时,称为油包水(水/油或W/O)型乳状液。

### 2.2 乳状液烟幕的物理性质

一般多项分散体系的分散相与分散介质的折射率不同,光照射在分散质点上可以发生折射、反射、散射等现象。当液珠直径远大于入射光的波长时,主要发生光的反射(也可能有折射、吸收),体系表现为不透明状。当液珠直径远小于入射光波长时,则光可以完全透过,体系表现为透明状。当液珠直径稍小于入射光波长时,则有光的散射现象发生,体系呈半透明状。

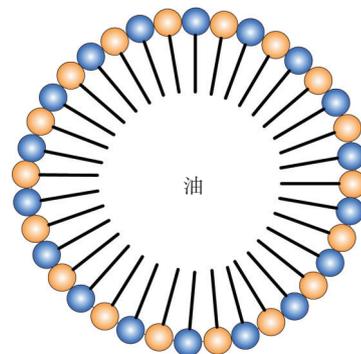
### 2.3 影响乳状液烟幕稳定性的因素

#### (1)界面张力

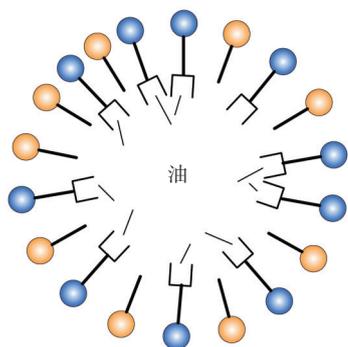
为了得到乳状液烟幕的液体材料,就要把一种液体高度分散于另一种液体中,这就大大地增加了体系的界面积,也就是要对体系做功,增加体系的总能量,这部分能量以界面能的形式保存于体系中,这是一种非自发过程。

#### (2)界面膜的强度

在油-水体系中加入乳化剂,在降低界面张力的同时,根据Gibbs吸附定理,乳化剂(表面活性剂)必然在界面发生吸附,形成界面膜,此界面膜有一定强度,对分散相液珠有保护作用,使其在相互碰撞时不易聚结。如加入阴离子型表面活性剂做乳化剂时,乳化剂分子的亲油基一端吸附在油滴微粒表面,而亲水基一端深入水中,并在油滴表面定向排列形成一层亲水性分子膜,使油-水界面张力降低,并且减少了油滴之间的相互吸引力,防止油滴聚集后重新分为两层。如图3所示。



(a) 紧密排列混合膜



(b)非紧密排列混合膜

图3 阴离子表面活性剂在油-水界面上形成界面膜

### (3)界面电荷的影响

大部分稳定的烟幕液体材料中的液滴都带有电荷,界面电荷的来源有三个,即电离、吸附和摩擦接触。乳状液珠表面由于上述原因而带有一定量的界面电荷,在带电的油珠周围还会有反离子呈扩散的状态分布,形成扩散双电层,如图4所示。

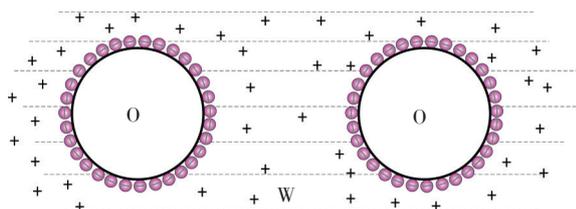


图4 O/W形乳状液中油珠表面带点示意图

由于这些电荷的存在,一方面,由于液珠表面所带电荷符号相同,故当液珠相互接近时相互排斥,从而防止液珠聚结,提高了乳状液的稳定性。另一方面,界面电荷密度越大,就表示界面膜分子排列的越紧密,于是界面膜强度也将越大,从而提高了液珠的稳定性。

### (4)黏度的影响

烟幕液体材料连续相的黏度越大,则分散相液珠的运动速度越慢越稳定,因此许多能溶于连续相的高分子物质常被用作增稠剂,以提高烟幕液体材料的稳定性。

### (5)多重乳状液烟幕材料

多重乳状液烟幕材料是一种O/W型和W/O型乳液共存的复合体系。它可能是油滴里含有一个或多个水滴,这种含有水滴的油滴被悬浮在水相中

形成乳状液,这样的体系称为水/油/水(W/O/W)型乳状液。含有油滴的水滴被悬浮于油相中所形成的乳状液则构成油/水/油(O/W/O)型乳状液。

多重乳状液烟幕材料液滴的性质很大程度上取决于第一种乳状液(如W/O)的液滴大小和稳定性。根据液滴油相的性质将W/O/W型多重乳状液分成三种主要类型如图5所示。

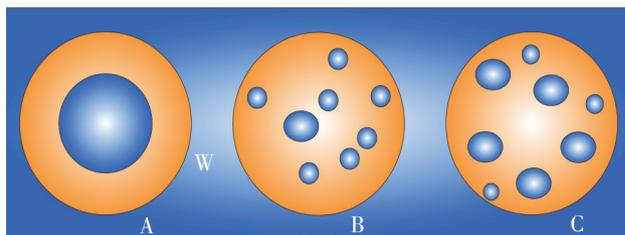


图5 多重乳状液液滴分类

A型是包含一个内W/O型的液滴,相当于油相包覆的微囊,水滴体积很大,占据了油滴的大部分体积。B型含有一些小的、彼此分离的内水相液滴(平均直径约 $2\mu\text{m}$ )。C型含有很多彼此接近的内水相液滴。对于给定的体系,三种类型的多重乳状液都存在,它取决于体系所用表面活性剂的性质,一般是一种类型占优势。实际应用中根据不同的需求配置不同乳状液烟幕液体材料。

## 3 乳状液烟幕干扰实验设计

### 3.1 乳状液烟幕实现装置

将乳状液液体材料通过专门引射式释放系统释放到空气中形成乳状液烟幕。释放系统的工作过程如图6所示的工作流程。

水泵包括管路和控制系统,用以保证喷头入口所要求的流量和压力。水流过流量计后,控制台上将能显示出水的瞬时和累积流量,可用手动或自动方式调节变频器或阀门,使得水泵流量与要求相符。

施放时,经压缩加压的乳化液烟幕液态材料是工作流体,由其他添加剂按适当比例均匀混合而成的混合物料,则为引射流体,引射流体与工作流体经引射器自动混合均匀后,由喷雾嘴喷向空中,形成烟幕。

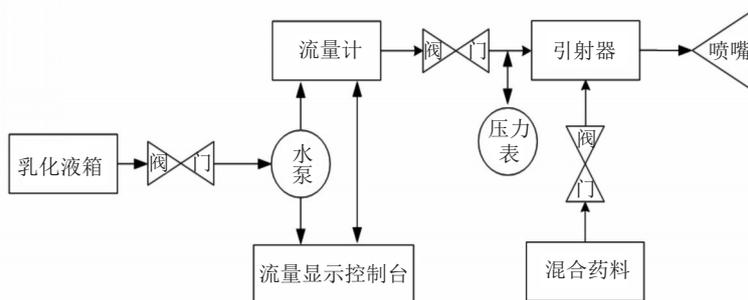


图6 施放系统的工作流程图

### 3.2 乳状液烟幕实现装置

在实验室条件下通过如图7所示的测试条件对乳状液烟幕进行测量。

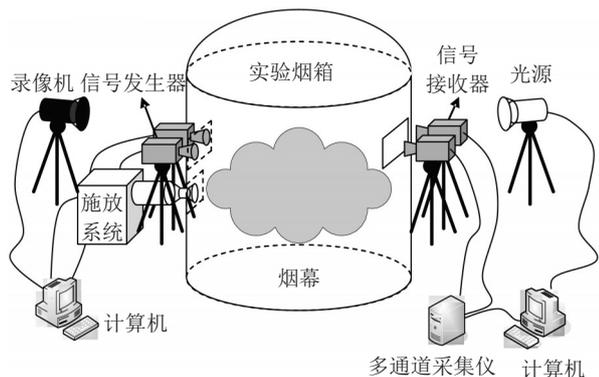


图7 实验室烟箱测试示意图

包括高速录像机、光源、信号发生器、信号接收器、施放系统、计算机、多通道采集仪、烟幕箱。

通过实验室对乳状液烟幕样品进行测量,得到的分别在可见光、中波红外、长波红外及3 mm、8 mm波段的测量结果。乳状液烟幕样品在烟箱实验中可见光、中波红外、长波光红外的干扰效能如表1所示。

表1 乳状液烟幕样品可见光、中波红外、长波红外的干扰效能

密度/g·m <sup>3</sup>	波段		
	可见光/%	中波红外/%	长波红外/%
0.9	93	94	93
0.7	88	90	88
0.5	82	84	81

假设遮蔽率为80%,消光系数 $\alpha(\lambda)=1.8\text{ m}^2/\text{g}$ ,不同厚度时,则需要乳状液烟幕材料的浓度如图8。

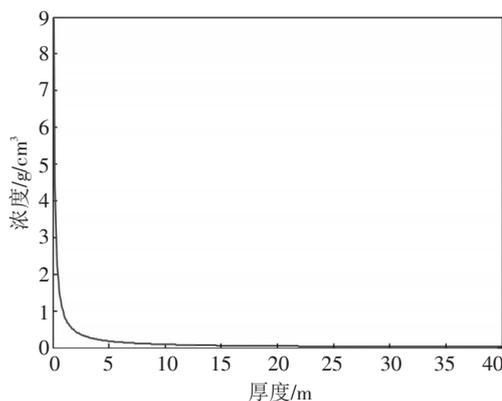


图8 乳状液烟幕材料的浓度随厚度变化

由仿真分析可知,随着乳状液烟幕厚度的增加,所需要乳状液烟幕的浓度大幅度减少,所以在考虑实际应用时在厚度充分的情况下可适当的减小乳状液烟幕浓度。乳状液烟幕样品3 mm波、8 mm波的衰减如表2所示。

表2 乳状液烟幕样品3mm波、8mm波的衰减(dB)

密度 g/m <sup>3</sup>	波段	
	3 mm	8 mm
0.9	12.5	11.3
0.7	10.3	9.5
0.5	8.6	7.4

通过仿真和实验数据的测量,乳状液烟幕样品在可见光波段的消光系数比传统的烟幕材料(例如黄磷、赤磷、FS、HC、葱等)略小,在中波红外、长波红

(下转第34页)

2008,6(1):33-36.

- [7] 江友平,梁晶.色散光纤在X波段光控相控阵雷达技术中的应用[J].舰船电子对抗,2012,35(2):47-49.
- [8] 严济鸿.宽带相控阵雷达波束控制技术[D].西安:电子科技大学,2011.
- [9] 蒋国锋.光控相控阵天线的关键技术[J].现代雷达,

2014,36(8):57-59.

- [10] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [11] Madziar K M, Dawidczyk J. Modelling of the dispersion coefficient for the optical beamforming for phased array antennas[J]. SPIE, 2006.

(上接第5页)

外波段比传统烟幕大得多。说明乳状液烟幕对可见光、中波红外、长波红外都具有良好的干扰效果。同时对雷达波段(3mm波和8mm波)乳状液烟幕相对传统烟幕也具有良好的衰减效果,扩展了干扰波段。

## 4 结 论

提出具有多层结构的乳状液烟幕,通过对液态烟幕多光谱干扰技术和乳状液烟幕干扰理论的研究,从其技术原理、实现方法和初步实验结果,都可看出该技术具有一定的有效性。即可同时高效干扰可见光、红外、雷达波段,适应烟幕向绿色环保、环境适应性好、宽波段干扰的发展趋势。为舰载烟幕的施放及干扰的实现提出切实可行的方法,以充分发挥现代液态烟幕在未来海战中的作用。

## 参考文献

- [1] 周刚,过海峰.遮蔽型烟幕作战使用效能评估[J].红外

与激光工程,2007,9(36):449-453.

- [2] 王甲寅,吕相银.水雾在舰艇防御光学制导导弹中的应用[J].舰船电子对抗,2004,27(2):15-23.
- [3] 高凯,沈卫东,宋思洪,等.水雾多光谱隐身实验研究[J].光电技术应用,2004,74(1):35-38.
- [4] 王培义,徐宝财,王军.表面活性剂——合成性能应用[M].2版.北京:化学工业出版社,2012.
- [5] 金良安,王孝通,付建国,等.泡沫型干扰幕及其多波段干扰特性研究[J].兵工学报,2006(3):248-251.
- [6] Giglia R D. Radar, infrared-detectable structural simulation decoy[P]. USP, 5092244. 1992-5.
- [7] Embury Jr. Method for creating a one way visible screening smoke[P]. USP, 5682010. 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] 白玉栋,吴涛.烟幕干扰下红外成像制导导弹的作战效能分析[J].红外,2013,34(5):39-41.
- [10] 谭伟,何友金,毛剑英.烟幕干扰效能评估系统设计[J].光电技术应用,2010,25(5):65-69.

(上接第19页)

- [11] Chen H L, Wen X W, Zhang J, et al. Ultrafast formation of interlayer hot excitons in atomically thin MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructures[J]. Nature Communication, 2016, 7: 12512.
- [12] Chen K, Gallaher J K, Barker A J, et al. Transient grating photoluminescence spectroscopy: an ultrafast method of gating broadband spectra[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5: 1732-1737.
- [13] Zhao L, Luis P L, Farztdinov V, et al. Femtosecond fluorescence spectroscopy by upconversion with tilted gate pulses[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2005,

7: 1716-1725.

- [14] Chen K, Barker A J, Reish M E, et al. Broadband ultrafast photoluminescence spectroscopy resolves charge photogeneration via delocalized hot excitons in polymer:fullerene photovoltaic blends[J]. Journal of American Chemistry Society, 2013, 135: 18502-18512.
- [15] Takeda A J, Nakajimma K, Kurita S, et al. Time-resolved luminescence spectroscopy by the optical Kerr-gate method applicable to ultrafast relaxation processes[J]. Physical Review B, 2000, 62: 10083.