

泡沫对激光制导武器系统干扰效能分析

章文芳¹, 胡波¹, 宋伟², 傅从义²

(1. 电子工程学院软件测评中心, 安徽 合肥 230037; 2. 电子工程学院 203 教研室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 泡沫作为一种新兴的光电无源干扰手段, 对激光制导武器干扰作用明显。首先对泡沫干扰进行了介绍, 然后对激光制导武器系统的组成、制导原理进行了描述, 探讨了利用泡沫干扰激光制导武器系统的可行性。并根据泡沫干扰及激光制导武器系统探测目标的要求, 分别计算了激光制导武器系统的遮蔽面密度和泡沫两点间面密度, 通过两种面密度的比较, 对泡沫的干扰效能进行了分析。本文的研究结论对泡沫干扰效能评估及泡沫干扰战术的优化具有重要的意义。

关键词: 泡沫; 激光制导; 干扰效能

中图分类号: TN976 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.04.017

Foam's jamming effectiveness on laser guided weapon

ZHANG Wen-fang¹, HU Bo¹, SONG Wei², FU Cong-yi²

(1. Software Testing and Evaluation Center of Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2. 203 Teaching and Research Section of Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Foam is a new way of passive optic-electronic jamming. Its jamming effect on laser guided weapon system is obvious. In this paper foam jamming technology is summarized at first. Then the composition and working principle of laser guided weapon are introduced briefly. According to the requirements of target detection of laser guided weapon, the sheltered surface density of laser guided weapon and foam surface density between two points are calculated respectively. By comparing two surface density, jamming effectiveness of foam is analyzed. The conclusions of this paper have important value for foam jamming efficiency evaluation and optimization of foams jamming system.

Key words: foam; laser guidance; interference effectiveness

1 引言

激光制导武器由于具有精度高、威力大、价格低、抗电磁干扰能力强等特点, 使它成为世界上装备数量最多的一种精确打击武器, 它的大量装备对信息化战争中的军事目标构成严重的威胁。烟幕是一种传统的对抗激光制导武器的光电无源干扰手段, 但其存在遮蔽干扰波段过窄、悬空停留时间短、环保性能差, 易受地形和气象影响等缺点^[1-2], 急需寻求一种新的无源干扰手段。泡沫由于其独特的结构和物质构成, 使其具有环保性能好、使用方便灵活等优点^[3-4], 不仅对激光制导武器干扰作用明显, 还能较好解决长期困扰该研究领域材料的有效干扰时间短、遮蔽波段窄等难题, 其军事应用前景广阔。因

此, 如何对激光制导武器在泡沫干扰下的效能进行分析, 是光电无源对抗领域中急需解决的难题。

2 泡沫干扰概述

泡沫是由许多密集的小气泡堆积在一起, 气泡间只被极薄的一层液膜所隔开, 构成多面体气泡而堆积起来的。气泡外层的液膜厚度在几微米到几十纳米之间, 且具有不同的曲率半径, 对光线具有很强的反射、散射和吸收作用, 泡沫的衰减遮蔽机理与烟幕相类似^[5]。

泡沫的衰减遮蔽主要是指靠散射、反射和吸收

作者简介: 章文芳 (1986 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电系统建模与仿真。E-mail: zwf20110301@163.com

收稿日期: 2011-09-13; **修订日期:** 2011-09-30

作用来衰减电磁波辐射。构成泡沫液膜的表面活性剂分子、原子处于不断运动状态,其微粒所带的正负电荷的“重心”有不重合的特征,即产生偶极矩,故微粒本身可视为电偶极子,在电磁辐射场中将与周围电磁场发生相互作用,从而改变原电磁场辐射传输特性,使电磁辐射能量在原传输方向上形成衰减。另外从量子力学的观点来看,泡沫液膜内表面活性剂分子内的原子中的电子相对原子核运动,原子核的振动和原子核转动的能量都是量子化的,即每个原子和分子都存在一定数目的电子能级,振动能级和转动能级。同时每种原子、分子都有各自的振动频率,一些极性分子和易极化的分子都具有几种本征振动频率。当这些分子与其谐振频率相同的电磁辐射作用时,产生共振,从而吸收能量,使分子从较低的能级跃迁到较高的能级,即发生了选择性吸收。此外对于液膜表面上含有自由电子的泡沫,由于电磁辐射的激发引起自由电子运动的变化,也表现出对电磁辐射的连续吸收和较强反射特性,从而在原传输方向上形成衰减。激光本质上是电磁波,当电磁波传播到泡沫液膜表面上时,遇到表面活性剂分子、原子不断运动形成的电磁辐射场,与之发生相互作用后,在原传输方向上形成衰减。其衰减示意图如图 1 所示。

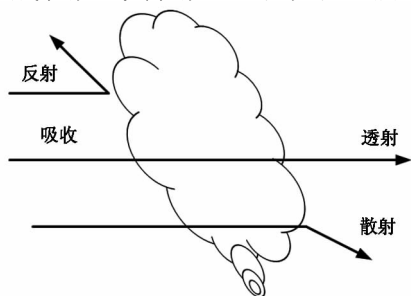


图 1 激光通过泡沫衰减示意图

3 泡沫干扰激光制导武器系统效能分析

3.1 激光制导武器系统简介

激光制导武器系统主要由激光制导炸弹、激光光斑跟踪器和激光目标指示器 3 部分组成,如图 2 所示^[6]。

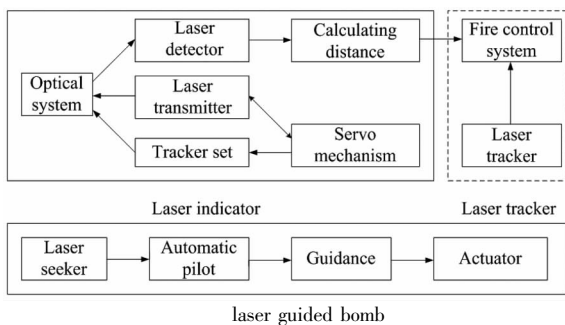


图 2 激光制导武器系统构成

激光导引头由光学系统、四象限管激光探测器、电子部件和机械部件等组成,如图 3 所示。

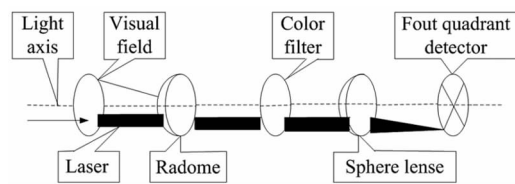


图 3 激光导引头的光学结构

其基本工作原理是将目标反射的激光能量经光学系统汇聚到焦平面附近的四象限管上,根据光斑和制导武器的相对位置,计算四象限管探测到光斑辐射能的大小,并比较其上光斑分布情况,如图 4 所示,输出目标视线角和空速角夹角用于控制舵偏侧,使激光制导武器按要求弹道飞行。

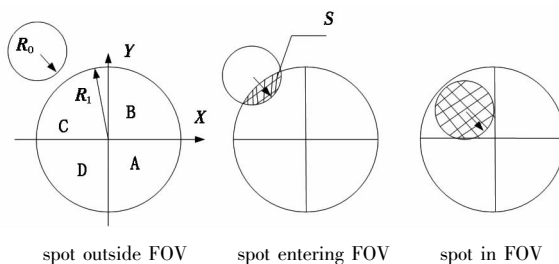


图 4 激光光斑在四象限管上位置

激光制导武器是以敏感到的特定编码的特定波长的激光回波信号为制导信息,目前的激光制导武器均为半主动方式,以美国的“宝石路”系列激光制导炸弹为典型代表。在激光制导武器使用时,首先需要弹外激光器照射目标,在目标上形成漫反射光,制导武器的激光导引头敏感目标上的漫反射激光,形成制导信息,随后按照一定的制导规律进行控制和制导^[7]。而泡沫主要是阻止和削弱这种光反射或以改变激光反射为目的,使激光导引头不能接收或接收错误制导信息。

3.2 影响泡沫干扰效能的因素

通过研究发现,影响泡沫干扰效能的因素除了泡沫自身的遮蔽性最主要的是泡沫的稳定性和自然条件。

3.2.1 泡沫的稳定性

泡沫的稳定性含义是指泡沫存在“寿命”的长短,换言之,是指生成泡沫的持久性。泡沫是一种亚稳态的体系,影响其稳定性的因素较为复杂,主要有以下两个方面。一是泡膜性质的影响。泡膜性质对泡沫稳定性的影响是从微观的角度进行研究,包括气泡溶液的表面张力、表面粘度、液相粘度、Gibbs 表面弹性和 Marangoni 效应、表面活性剂分子结构、液膜的表面电荷(分离压力)、表面活性剂的复配协

同作用七个方面的内容^[8-10]。二是宏观条件的影响。泡沫的稳定性除了受到泡膜性质的影响,还要受到宏观条件的制约。泡沫质量、压力和气泡大小分布、气体的溶解度和渗透率、溶液的 pH 值均对泡沫稳定性有影响^[11-12]。

3.2.2 自然条件的影响

影响泡沫干扰的因素除了泡沫自身的遮蔽性能、泡沫的稳定性之外,最主要的是受气象和地形的影响。泡沫的悬空停留时间、流动和形状受到气象和地形的严重影响,并因之发生显著变化。对其影响最大的气象因素是风和大气层的稳定度。此外,地形不仅左右局部气象,而且本身也直接影响泡沫的悬空停留时间、流动和形状。再者,气温、湿度、雾、降水等对泡沫的形状、浓度、持久性也有影响。

3.3 泡沫干扰激光制导武器系统效能分析模型

泡沫对激光制导武器系统干扰效能不仅要考虑泡沫自身的衰减遮蔽性能,同时还应考虑到环境和激光制导武器系统性能。本文研究是基于泡沫以连续点源的方式,以悬浮体的形式衰减目标反射的激光能量,其示意图如图 5 所示。

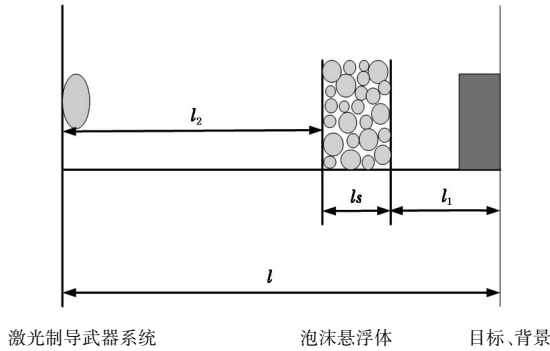


图 5 激光制导武器系统、泡沫悬浮体、目标背景之间的位置关系

3.3.1 激光制导武器系统遮蔽面密度的计算

根据文献[13],激光制导武器系统接收到的目标的回波功率 P_c 为:

$$P_c = \begin{cases} \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c}{\pi} \frac{P\varphi_1\tau_\alpha\tau_f}{\varphi R^2} & \text{目标面积小于光斑面积} \\ \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c}{\pi} \frac{P\tau_\alpha\tau_f}{R^2} & \text{目标面积大于光斑面积} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 为激光发射功率; ρ 为目标表面对激光反射系数; R 为目标与接收系统的距离; S_c 为接收系统光学系统的接收面积; φ 为光束发射立体角; φ_1 为目标表面积小于光斑面积时,发射系统相对于目标的立体角; τ_i 为发射系统激光的透过率; τ_e 为接收系

统激光的透过率; τ_α 为激光的大气透过率; $\tau_\alpha = \exp(-\sigma_e L)$, σ_e 为空气的消光系数; L 为光程,由于本文考虑的是激光制导炸弹,系统的接收端和发射端脱离,则 $L = R + R_1$, R_1 为目标与发射系统的距离。

τ_f 为激光的泡沫透过率,因为激光发射系统发射的光束是往返两次穿过泡沫,则有: $\tau_f = \exp(-2\alpha_e C^L)$, α_e 为泡沫的质量消光系数, C^L 为泡沫的浓度沿特定路线的积分值,设接收系统的最小接收功率为 $P_{\min}$,若计算出 $P_c > P_{\min}$,则激光制导成功;若 $P_c < P_{\min}$,则激光制导失败。根据遮蔽面密度的定义^[14],将 $P_c = P_{\min}$ 和 $\tau_f = \exp(-2\alpha_e C^L)$ 带入式(1),表示泡沫刚好对目标形成遮蔽,求出的面密度就是遮蔽面密度,则式(1)可变化为:

$$P_{\min} = \begin{cases} \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c}{\pi} \frac{P\varphi_1\tau_\alpha \exp(-2\alpha_e C^L)}{\varphi R^2} & \text{目标面积小于光斑面积} \\ \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c}{\pi} \frac{P\tau_\alpha \exp(-2\alpha_e C^L)}{R^2} & \text{目标面积大于光斑面积} \end{cases} \quad (2)$$

化简可得激光制导武器系统的遮蔽面密度 M_b 为:

$$M_b = C^L = \begin{cases} \frac{1}{2\alpha_e} \ln \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c P\varphi_1\tau_\alpha}{P_{\min} \pi \varphi R^2} & \text{目标面积小于光斑面积} \\ \frac{1}{2\alpha_e} \ln \frac{\rho\tau_i\tau_e S_c P\tau_\alpha}{P_{\min} \pi R^2} & \text{目标面积大于光斑面积} \end{cases} \quad (3)$$

3.3.2 泡沫两点间面密度的计算

泡沫悬浮体以连续点源的方式在三维空间的扩散,如图 6 所示。

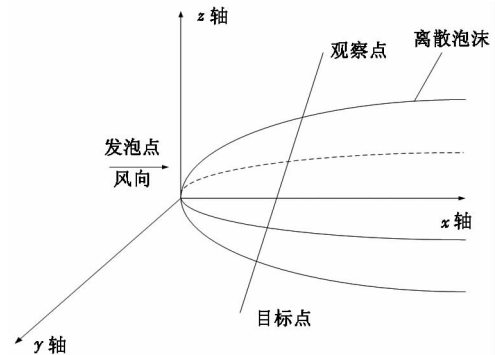


图 6 离散泡沫的三维空间扩散示意图

如图 6 所示,以发泡点的地面垂直投影点为坐标原点,以与水平风向平行的线为 x 轴,以与地面垂直的线为 z 轴,建立空间三维坐标系。假设地面无吸收和吸附作用,泡沫本身是无沉降的被动成分,地面对污染物的作用犹如一个全反射体,风速大于 1 m/s,风向恒定,地面水平均一,由“梯度传递理

论”及“统计理论”导出以下高斯(正态)型浓度模式:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (4)$$

式中, $C(x, y, z, H)$ 为点 (x, y, z) 处的泡沫浓度; Q 为源强(泡沫的释放速率); u 为释放期间的平均风速; H 为泡沫悬浮体的有效高度(m), $H =$ 释放点高度 H_0 + 泡沫悬浮体抬升高度 ΔH ; σ_y, σ_z 为 y 方向和 z 方向的大气扩散方差, 有:

$$\sigma_y = \gamma_1 x^{\alpha_1} \quad (5)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 x^{\alpha_2} \quad (6)$$

式中, $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为与大气稳定度及地形有关的参数。

根据面密度的定义, 沿目标点至观察点连线(观测线)对泡沫浓度进行线积分, 如图6所示, 即求出泡沫面密度, 以便计算目标点至观察点激光能量的衰减程度。

$$\int_{l_s} C(x, y, z) dl = \int_{t_1}^{t_2} C(x(t), y(t), z(t)) \cdot \sqrt{(x'(t))^2 + (y'(t))^2 + (z'(t))^2} dt \quad (7)$$

式中, l 为目标点至观察点连线; $C(x(t), y(t), z(t))$ 为泡沫的浓度分布。设观察点的坐标为 (x_1, y_1, z_1) , 目标点坐标为 (x_2, y_2, z_2) , 则观察点至目标点的直线 l 公式为:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} \quad (8)$$

化简得:

$$y(x) = \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}(x-x_1) + y_1 \quad (9)$$

$$z(x) = \frac{z_2-z_1}{x_2-x_1}(x-x_1) + z_1 \quad (10)$$

将以上两式微分得:

$$y'(x) = \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1} \quad (11)$$

$$z'(x) = \frac{z_2-z_1}{x_2-x_1} \quad (12)$$

令 $x=t$, 将式(4)~式(6)和式(8)~式(12)代入式(7)可得:

$$M = \int_{l_s} C(x, y, z) dl = \int_{x_1}^{x_2} a_1 x^{b_1} \exp(a_2 x^{b_2} + a_3 x^{b_3} + a_4 x^{b_4}) [\exp(a_5 x^{b_5} + a_6 x^{b_6} + a_7 x^{b_7}) + \exp(a_8 x^{b_8} + a_9 x^{b_9} + a_{10} x^{b_{10}})] dx \quad (13)$$

式中, $a_1 \sim a_{10}, b_1 \sim b_{10}$ 均为常数, 它们分别为:

$$a_1 = \frac{Q}{2\pi\mu\gamma_1\gamma_2} \sqrt{1 + (y'(x))^2 + (z'(x))^2} = \frac{Q}{2\pi\mu\gamma_1\gamma_2} \sqrt{1 + \left(\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\right)^2 + \left(\frac{z_2-z_1}{x_2-x_1}\right)^2} \quad (14)$$

$$a_2 = \frac{-1}{2\gamma_1^2} \left(\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\right)^2 \quad (15)$$

$$a_3 = \frac{-(y_2-y_1)(y_1x_2-y_2x_1)}{\gamma_1(x_2-x_1)^2} \quad (16)$$

$$a_4 = \frac{-(y_1x_2-y_2x_1)^2}{2\gamma_1(x_2-x_1)^2} \quad (17)$$

$$a_5 = a_8 = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_2-z_1}{x_2-x_1}\right)^2 \quad (18)$$

$$a_6 = \frac{-(z_2-z_1)(z_1x_2-z_2x_1-H)}{\gamma_1(x_2-x_1)^2} \quad (19)$$

$$a_7 = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_1x_2-z_2x_1}{x_2-x_1} - H\right)^2 \quad (20)$$

$$a_9 = \frac{-(z_2-z_1)(z_1x_2-z_2x_1+H)^2}{\gamma_1(x_2-x_1)^2} \quad (21)$$

$$a_{10} = \frac{-1}{2\gamma_2^2} \left(\frac{z_1x_2-z_2x_1}{x_2-x_1} + H\right)^2 \quad (22)$$

$$b_1 = -(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (23)$$

$$b_2 = 2 - 2\alpha_1 \quad (24)$$

$$b_3 = 1 - 2\alpha_1 \quad (25)$$

$$b_4 = -2\alpha_1 \quad (26)$$

$$b_5 = b_8 = 2 - 2\alpha_2 \quad (27)$$

$$b_6 = b_9 = 1 - 2\alpha_2 \quad (28)$$

$$b_7 = b_{10} = -2\alpha_2 \quad (29)$$

尽管泡沫的两点间面密度表达式(13)是一个比较复杂的积分式, 但是我们仍可以利用计算机进行求解。

将激光制导武器系统的遮蔽面密度和泡沫两点间面密度进行比较, 可以精确的对泡沫的干扰效能进行分析, 若 $M_b \leq M$, 则认为遮蔽成功; 反之, 若 $M_b > M$, 则认为遮蔽失败。

4 结束语

随着激光制导技术的飞速发展, 激光制导武器的速度越来越快、射程越来越远、精度越来越高, 对防空方的威胁也越来越大。针对这种情况, 世界各国都大力发展了多种防空武器和装备, 而泡沫干扰技术作为光电对抗技术的一个新兴的研究方向, 可以有效弥补烟幕等传统无源干扰手段的不足, 是众多防空手段中不可或缺的一种。通过对泡沫干扰效能进行分析, 可以为作战指挥员提供辅助决策, 有效提高目标的战场生存能力, 其在激光制导武器的对

抗领域具有广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] Zhao Jun, Zhang Taihuang, Wei Junrong. Aqueous foam for photoelectric confrontation [J]. Journal of Chemical Defense, 2008, (4): 34-37. (in Chinese)
赵军, 张太晃, 卫俊荣. 光电对抗用水基泡沫[J]. 防化学报, 2008, (4): 34-37.
- [2] Liang Liu, Xu Ying, Jin Fengnian. Summarization of smoke screen jamming technology [J]. Modern Defense Technology, 2007, 35(4): 22-26. (in Chinese)
梁柳, 徐迎, 金丰年. 烟幕干扰技术综述[J]. 现代防御技术, 2007, 35(4): 22-26.
- [3] Zhang Wei, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Study on 1.06 μm and 10.6 μm laser attenuation performance of foam [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 293-296. (in Chinese)
张玮, 时家明, 汪家春, 等. 泡沫悬浮体对 1.06 μm 和 10.6 μm 激光的消光性能研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 293-296.
- [4] Zhao Jun, Pan Gongpei, Guan Hua, et al. Study on middle and far-infrared attenuation performance of foams [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(5): 394-397. (in Chinese)
赵军, 潘功配, 关华, 等. 泡沫的中远红外消光性能研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(5): 394-397.
- [5] Wang Feng. Study on the high stability aqueous foam formulation and its applications in cover and camouflage [D]. Nanjing: Nanjing university of Science and Technology, 2006: 33-34. (in Chinese)
王凤. 高稳定性水基泡沫配方及其在遮蔽伪装应用中的研究[D]. 南京: 南京理工大学. 2006: 33-34.
- [6] Hu Zhaohui, Luo Jixun, Wang Yi, et al. Laser guide bomb combat efficiency in smoke jamming [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 322-326. (in Chinese)
胡朝晖, 罗继勋, 王邑, 等. 烟幕干扰下激光制导炸弹作战效能分析[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 322-326.
- [7] Shen Tao, Song Jianshe. Study on simulation of smoke screen counterworks laser guided weapon [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(1): 210-213. (in Chinese)
沈涛, 宋建社. 烟幕对抗激光制导武器的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 210-213.
- [8] Sun Jiejing, Lin Yongjie. Discussion of foam stability [J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 1995, (3): 6-9. (in Chinese)
孙杰景, 刘永杰. 泡沫稳定性的探讨[J]. 山东建材学院学报, 1995, (3): 6-9.
- [9] Qu Yanping, Du Hegui, Ge Lijun. Effects of surface viscosity on foam stability [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2002, 24(4): 283-286. (in Chinese)
曲彦平, 杜鹤桂, 葛利俊. 表面粘度对泡沫稳定性的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(4): 283-286.
- [10] Zhao Feng, Zhu Hong. Study of relationship between the stabilization of foam and the surface dilational modulus [J]. Journal of Lianyungang College of Chemical Technology, 2001, 14(3): 16-17. (in Chinese)
赵丰, 朱红. 表面膨胀弹性模数与泡沫稳定性关系的研究[J]. 连云港化工高等学校学报, 2001, 14(3): 16-17.
- [11] Tang Jinku. Review on influence factors and measurement techniques of foam stability [J]. Chemical Defense on Ships, 2008, (4): 1-8. (in Chinese)
唐金库. 泡沫稳定性影响因素及性能评价技术综述[J]. 舰船防化, 2008, (4): 1-8.
- [12] Hu Shiqiang, Liu Jianyi, Wang Xinyu, et al. Foam stability and PV performance under high-temperature and high-pressure conditions [J]. Nature Gas Ind, 2007, 27(6): 106-108. (in Chinese)
胡世强, 刘建仪, 王新裕, 等. 高温高压下泡沫稳定性和 PV 性能的研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 106-108.
- [13] Shao Guopei. The method of calculation of electronic confrontation tactics [M]. Beijing: PLA Press, 2011: 177-179. (in Chinese)
邵国培. 电子对抗战术计算方法[M]. 北京: 解放军出版社, 2011: 177-179.
- [14] Yao lujiu, Gao junling, Xiao Kaitao. Theory and testing technique of smoke [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004, (1): 42-43. (in Chinese)
姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004, (1): 42-43.