

文章编号:1001-9014(2010)05-0342-05

## 雾状水幕降温衰减与水面目标红外隐身研究

陈中伟<sup>1,2</sup>, 梁新刚<sup>1</sup>, 张凌江<sup>2</sup>, 王虹斌<sup>2</sup>, 董正发<sup>3</sup>

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 海军装备研究院舰船所, 北京 100161;  
3. 北京北方方正软件技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了提高水面目标的红外隐身性能, 通过雾状水幕衰减计算, 分析了水雾衰减性能; 通过雾状水幕对复合平板的降温和遮蔽试验, 测量了施加水幕前后试验板红外线信号衰减程度、目标温度时间响应特性。计算和试验表明, 具有一定浓度的雾状水幕可以有效地衰减红外辐射的传输, 同时可以在短时间内迅速改变试验板的红外辐射特征。根据红外成像探测模型, 对水面目标应用雾状水幕前后的红外探测距离和成像距离的变化进行了分析。使用雾状水幕的水面目标红外发现距离降低了约 25%, 而红外成像距离降低了约 19%。结果表明雾状水幕是一种有效的红外隐身方法, 可在水面目标红外隐身方面推广应用。

**关键词:** 应用光学; 水幕试验; 水面目标; 红外衰减; 红外隐身  
**中图分类号:** TN216, TJ99 **文献标识码:** A

## INVESTIGATION OF SPRAY ON TEMPERATURE DROP AND INFRARED STEALTH OF WATER SURFACE OBJECT

CHEN Zhong-Wei<sup>1,2</sup>, LIANG Xin-Gang<sup>1</sup>, ZHANG Ling-Jiang<sup>2</sup>,  
Wang Hong-Bin<sup>2</sup>, DONG Zheng-Fa<sup>3</sup>

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Ship institute of NAA, Beijing 100161, China;  
3. Peking university founder technology college, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the infrared stealth of water surface object, the attenuation character of water spray on infrared radiation was numerically investigated. The infrared attenuation and temperature response of the composite test board were measured before and after the water sprayed. The numerical and experimental results show that water spray with a certain concentration can decrease infrared transmission efficiently and change the infrared radiation feature of the test board quickly. According to the detective model of infrared system, the detective distance and image distance were analyzed with and without water spray between infrared imager and water surface object. The analysis result demonstrates that the detective distance of water surface object decreases about 25% and image distance decreases about 19% after water spray system was turned on, which tells that water spray is an effective method for infrared stealth and it can be widely used in the infrared stealth of water surface object.

**Key words:** applied optics; water spray experiment; water surface object; infrared attenuation; infrared stealth

### 引言

随着红外成像探测技术的不断发展, 出现了以 AGM-65F 和 AGM-119A 为代表的红外成像制导反舰导弹, 使得水面目标面临的威胁与日俱增。而水面目标红外成像对抗手段的欠缺, 使得其比较容易被红外成像系统远距离探测和识别, 水上红外对抗的天平向攻击方严重倾斜。

1977 年 Williams<sup>[1]</sup> 对水和海水的红外光学常数

进行了测量研究。2004 年 Parent<sup>[2]</sup> 等人对光谱范围 1000 ~ 7000 cm<sup>-1</sup> 的雾状水幕遮蔽性能进行了试验研究。由上述研究可知, 无论是淡水还是海水对红外辐射均具有强烈的衰减作用。若利用淡(海)水形成具有一定遮蔽范围的雾状或膜状水幕, 通过其衰减和对目标表面的降温作用, 则可以降低目标红外辐射特征信号, 进而达到红外隐身的目的。

2006 年胡碧如<sup>[3]</sup> 对人造雾的红外遮蔽性进行了试验研究, 2007 年袁江涛<sup>[4]</sup> 对膜状水幕降温和红

收稿日期: 2009-07-21, 修回日期: 2010-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(60678052)

作者简介: 陈中伟(1973-), 男(蒙古族), 河北承德人, 工程师, 博士研究生, 主要从事目标红外辐射方面的研究, E-mail: Chenzw05@gmail.com.

Received date: 2009-07-21, revised date: 2010-07-16

水隐身效果进行了研究,2008 年侯文学<sup>[5]</sup>对水雾的红外衰减特性进行了理论分析和试验验证. 这些研究对水幕进行了多角度的理论和试验研究,但是对水面目标的红外隐身水幕衰减、降温试验和分析并未见报道. 所以,本文从试验研究出发,对水面目标典型结构(复合平板)进行水幕试验和分析,以期对未来的水上红外对抗平衡创造条件.

## 1 水幕红外衰减

水幕按照形式可以分为膜状水幕和雾状水幕. 膜状水幕将水形成连续膜状,在目标与红外探测器之间形成一层连续的衰减介质,通过对目标表面的降温和水膜的红外衰减的双重作用,达到隐身的目的. 雾状水幕则将水形成离散状的具有一定浓度的雾状水滴,在目标与红外探测器之间形成一层离散状态的衰减介质层,随着水滴沉降在隐身目标表面上,则形成一层膜状水幕. 与单一的膜状水幕相比,雾状水幕多了一层离散状态的衰减介质层,进一步增强了水幕的红外隐身效果. 同时,雾状水幕可以使用很少的水量,就可形成大面积水幕覆盖,这一点对于供水能力有限的隐身目标非常有利.

### 1.1 雾状水幕红外衰减计算方法

单色辐射传递方程<sup>[6]</sup>为:

$$I_{\lambda}(\tau_{\lambda}, \vec{s}) = I_{\lambda}(0) \exp(-\tau_{\lambda}) + \int_0^{\tau_{\lambda}} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}^*, \vec{s}) \exp[-(\tau_{\lambda} - \tau_{\lambda}^*)] d\tau_{\lambda}^* \quad (1)$$

其中:光学厚度  $\tau_{\lambda}(x) = \int_0^L \beta_{\lambda}(x) dx$ ;  $I_{\lambda}(0)$  为  $\tau_{\lambda} = 0$  处的光谱辐射强度;  $\beta_{\lambda}$  为衰减系数;  $S_{\lambda}(\tau_{\lambda}^*, \vec{s})$  为辐射源函数包含了发射源及空间各方向入射引起的散射源.

方程(1)表明经过介质层衰减后,所剩余的辐射强度与入射辐射强度的关系. 对于考虑多重散射因素在内的水雾衰减可以使用 Monte-Carlo (MC) 方法进行统计计算<sup>[6, 7]</sup>. 对于浓度较小的雾状水幕,如果红外辐射符合水雾独立散射的单散射假设,则方程(1)可以简化为布格尔 (Bouguer) 定律<sup>[6]</sup>,即:

$$I_{\lambda,L} = I_{\lambda,0} \exp(-\beta_{\lambda} L) \quad (2)$$

此时,衰减系数  $\beta_{\lambda}$  可以使用单散射方法 (SSM) 和单一平均直径方法 (SMDM) 计算<sup>[7]</sup>.

### 1.2 实际雾状水幕红外衰减计算

喷雾试验采用 Spraying Systems Co. 的 FF-12 喷头. 其粒径按照对数正态分布,几何平均直径  $D_g =$

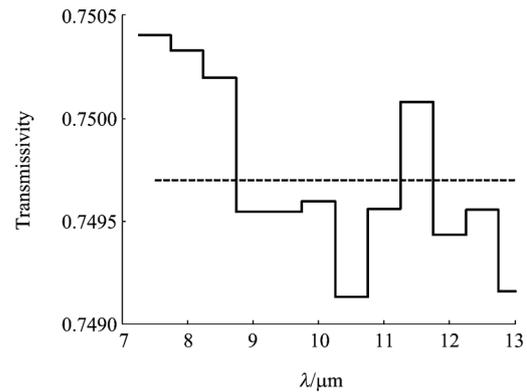


图1 水幕 7.5 ~ 13  $\mu\text{m}$  平均透过率 MC 计算结果  
Fig. 1 Transmissivity (7.5 ~ 13  $\mu\text{m}$ ) by MC

290  $\mu\text{m}$ 、几何偏差  $\sigma_g = 2.2$ , 水雾浓度为  $1.9 \times 10^5$  个/ $\text{m}^3$ , 该雾状水幕的平均面积直径  $D_s = 540 \mu\text{m}$ .

使用 MC 方法计算 6m 厚的雾状水幕在 7.5 ~ 13  $\mu\text{m}$  的平均透过率为 0.7497 (如图 1 所示). 而如果按照独立散射假设使用 SSM 和 SMDM 方法计算结果分别为 0.5893 和 0.5930. 表明该雾状水幕存在较明显的多次散射.

## 2 红外探测距离

水面目标的红外隐身效果,从侦察角度考虑,可以使用红外成像系统探测距离进行衡量. 使用红外成像系统探测可视点源目标的远距离目标时,其探测距离可使用公式(4)进行计算<sup>[8]</sup>:

$$\Delta T_B e^{-\delta R_d} = \text{SNR}_{DT} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \text{NETD} \cdot R_d^2 / S \quad (4)$$

其中,  $\Delta T_B$  为目标与背景的辐射温差;  $R_d$  系统某种探测概率下的探测距离; 阈值信噪比  $\text{SNR}_{DT}$  为 2.25;  $\text{NETD}$  为系统的噪声等效温差;  $\alpha, \beta$  为探测器的瞬时视场角;  $S$  为目标的面积;  $\delta$  为目标与探测器之间的衰减系数. 公式(4)右侧可视作红外系统的点源探测能力.

当目标接近红外探测系统并能够形成图像时,根据文献<sup>[8]</sup>在某观察等级下的探测距离可使用公式(5)、(6)进行计算:

$$\Delta T = \Delta T_B \times \tau_a(R_i) \geq \text{MRTD}(f) \quad (5)$$

$$\frac{H}{n_e R_i} \geq \Delta \theta = \frac{1}{2f} \quad (6)$$

其中,  $R_i$  为系统某种分辨率下的成像作用距离;  $\Delta T$  为大气衰减后,目标与背景的视在温差;  $H$  为目标高度;  $n_e$  为不同观察等级要求时的目标等效条带数(半周期);  $f$  为空间频率 (1/mrad);  $\tau_a$  为大气透过率;  $\text{MRTD}$  为最小可辨温差 ( $K$ ).  $\text{MRTD}$  可参考文献

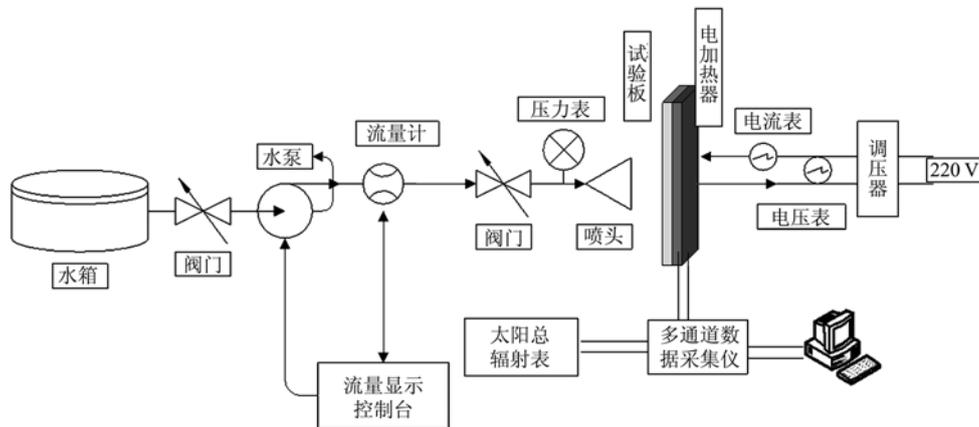


图2 试验系统图

Fig. 2 Sketch map of experiment system

[9,10]的方法的进行计算.

从上述模型中可以看到,在系统参数不变的条件下,目标与背景的等效黑体辐射温差  $\Delta T_b$  和透过率  $\tau_a$  直接影响探测距离和成像距离.减小透过率和目标与背景的等效黑体辐射温差就可以降低红外系统的探测距离和成像距离.

### 3 雾状水幕红外衰减降温试验

#### 3.1 试验装置原理

试验板是多层复合结构.外表面为试验测量面,其后是电加热器,用来将试验板面加热到所需的温度,并在喷水时维持其加热功率(模拟恒定热流情况).电加热器由2层云母(起绝缘作用)、1层功率为  $1200\text{W}/\text{m}^2$  的镍铬电加热片组成.试验板采用防水处理,防止喷水时漏水及漏电.电功率的调节由与加热器串联的手动调压器完成.回路的电流由串在其中的电流表测得.温度由焊在集热板外表面的热电偶测得.温度模拟电信号的采集由 HP34970A 完成.该仪器进行 A/D 转换,将数字量传入计算机显示、处理及存储.电加热器温度由人工根据计算机的显示结果调节.试验板在 20min 内板面温度可从  $15^\circ\text{C}$  升到  $80^\circ\text{C}$ ,测温回路的测量误差不大于  $0.2^\circ\text{C}$ .

水路包括供水管路和控制系统,用以保证喷头入口所要求的流量和压力(见图2).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,可用手动方式调节变频器或阀门,使得水泵流量与试验要求相符.水路的测量误差不大于 1%.其它测量设备包括:水温度计、空气温度计、湿度计、QDF-3 热球式风速仪、ThermaCAM PM 525 红外热像仪等.

水幕试验所使用的红外热像仪波段范围为  $7.5$

$\sim 13\mu\text{m}$ ,其所示温度为目标辐射温度.由于试验板温度与试验周围环境温度比较接近,其反射周围环境的辐射应当考虑,故而本文采用目标辐射温度作为计量单位.

#### 3.2 典型试验结果

##### 3.2.1 红外衰减

水幕并没有直接喷洒到试验板上,而是在热像仪与试验板之间形成一层水雾.此时水流量  $44\text{L}/\text{min}$ ,水压力  $0.35\text{Mpa}$ ,水温  $10.2^\circ\text{C}$ .4 个水幕喷头为正方形布置,处于试验板和热像仪之间.

水幕施放前试验板的最高辐射温度  $41^\circ\text{C}$ ,最低  $35.4^\circ\text{C}$ ,试验板平均  $38.4^\circ\text{C}$ (见图3).经过这层水雾的衰减之后,试验板最高辐射温度  $21.9^\circ\text{C}$ ,最低  $18.2^\circ\text{C}$ ,试验板平均  $20.5^\circ\text{C}$ (见图4).此时采用的是四喷头水幕装置,前后两排  $7.5 \sim 13\mu\text{m}$  波段红外平均透过率为 0.751.

经试验验证, $7.5 \sim 13\mu\text{m}$  波段红外辐射在该浓度下的雾状水幕内,多次散射比较普遍.此时若按照独立散射的假设,利用 SSM 或 SMDM 的方法计算的

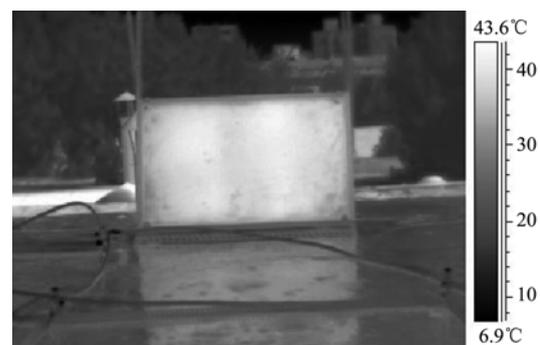


图3 无水幕的红外热像

Fig. 3 Infrared image of test board without spray



图4 水幕衰减后的红外热像  
Fig.4 Infrared image of test board with spray

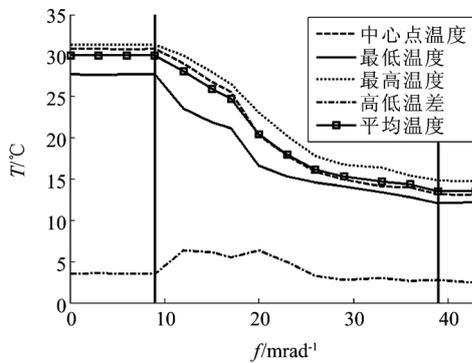


图5 水幕作用后试验板温度变化  
Fig.5 Temperature reponse after spray

雾状水幕平均透过率结果偏差较大, 而使用考虑多次散射作用的 MC 方法, 计算雾状水幕平均透过率与试验吻合较好。

### 3.2.2 试验板温度变化时间特性

水幕喷头位于试验板左侧约 2m 处(此时风向由左向右、风速 3m/s), 水幕开启前后试验板的温度变化如图 5 所示。试验板平均辐射温度从 30.0°C 降低到 13.6°C 只需要 30s。

## 4 水面目标应用雾状水幕后红外探测距离变化分析

以 10.2°C 水温模拟水面目标所处水面背景温度, 以试验板的温度从 30.0°C 降低到 13.6°C 模拟实施水幕后目标表面温度变化, 在水面目标侧面正对红外探测器状态下, 计算使用水幕前后的红外成像探测性能。本文中水面目标侧面尺寸简化为一长 110m、高 10m 的矩形。水面发射率为 0.984<sup>[11]</sup>。按照 7.5~13μm 波段辐射温度与真实温度的辐射出射度相等, 可计算水面背景辐射温度为 9.3°C。此时目标与背景辐射温差从喷水前 20.7°C 缩小到喷水后

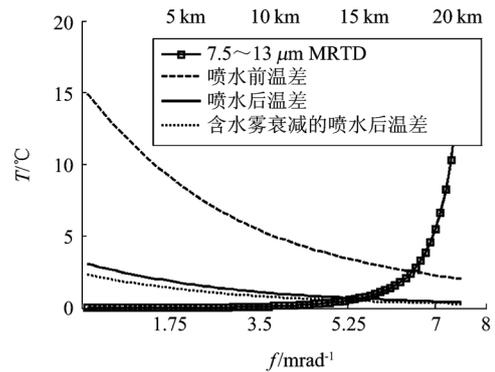


图6 红外成像距离解算图  
Fig.6 Infrared image distance

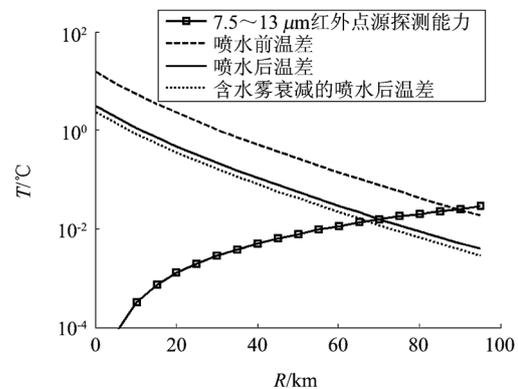


图7 红外探测距离解算图  
Fig.7 Infrared detection distance

4.3°C。红外热像仪参数设为:  $NETD = 0.1K$ ,  $D_0 = 100mm$ , 热成像仪像素  $d = 30\mu m$ , 焦距 240mm。在气象距离  $R_p = 10km$  时, 利用前文提到的模型可计算得出 7.5~13μm 下的水面目标红外探测距离和成像距离的变化(见图 6、7)。

图 6、7 是红外成像系统成像距离和探测距离的解算图, 其中红外成像距离利用 MRTD 进行表征, 而红外探测距离利用“红外点源探测能力”进行表征。水面目标在使用水幕后, 红外系统成像距离由 18.674km 下降到 15.639km, 下降 16.2% (见图 6); 而探测的距离则由 88.934km 下降到 69.772km, 下降了 21.5% (见图 7)。当考虑因水雾对红外辐射传输带来的衰减时, 使用雾状水幕后探测距为 66.404km, 下降 25.3%; 成像距离为 15.003km, 下降了 19.6%。使用雾状水幕对水面目标进行降温 and 遮蔽, 可以有效降低红外成像系统作用距离, 是一种较为理想的红外对抗手段。

## 5 结论

利用 FF-12 喷头形成的水雾内, 多次散射比较

普遍. 此时利用 SSM 或 SMDM 的方法计算的雾状水幕平均透过率结果偏差较大, 而应当使用考虑多次散射作用的 MC 方法进行计算.

使用雾状水幕后, 通过降温衰减作用, 使得试验板的红外辐射大幅降低. 若利用背景水形成雾状水幕, 经计算可以有效降低红外成像系统探测/成像的距离. 背景水雾状水幕来源丰富、红外衰减效果好、费用低廉, 使得其成为水面目标对抗红外威胁有效的方法.

### REFERENCES

- [1] Williams D. The Optical constants of water and sea water in the infrared[R]. ADA034071. Kansas, Kansas State University, 1977: 1—18.
- [2] Parent G, Boulet P, Gauthier S, *et al.* Experimental investigation of radiation transmission through a water spray[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006, **97**(1): 126—141.
- [3] HU Bi-Ru, WU Wen-Jian, DAI Meng-Yan, *et al.* Study on property of infrared obscuring of artificial fog[J]. *J. Infrared Millin. Waves*(胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等. 人造雾的红外遮蔽性能试验研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2): 131—134.
- [4] YUAN Jiang-tao, YANG Li, CHEN Xuan, *et al.* Study on application of subcooling films in infrared stealth technology [J]. *OPTICAL TECHNIQUE*(袁江涛, 杨立, 陈翔, 等. 过冷降膜在红外隐身中的应用研究. *光学技术*), 2007(3): 468—470.
- [5] HOU Wen-xue. Research on shading attenuation characteristics of IR spectrum by water fog[J]. *Electro-Optic Technology Application*(侯文学. 水雾对红外光谱遮蔽衰减特性研究. *光电技术应用*), 2008, **23**(5): 25—28.
- [6] TAN He-ping. *Numerical calculation of infrared radiation and transmission*[M]. Haerbin: HIT Press, (谈和平. *红外辐射特性与传输的数值计算*. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 2006: 121.
- [7] CHEN Zhong-Wei, LIANG Xin-Gang, XU Xiang-Hua, *et al.* Infrared attenuation analysis of lognormal distribution water mist in the atmosphere windows[C]. Beijing: *Proceedings of SPIE*, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009, 2009, **7383**: 37—1 ~ 37—10.
- [8] ZHANG Jing-xian. *Image Technology of Gleam and Infrared* [M]. Beijing: BIT Press(张敬贤. *微光与红外成像技术*. 北京: 北京理工大学出版社), 1995. 252
- [9] WANG Juan, YANG Chun-ping, WU Jian. MRTD calculation of thermal imaging system using MATLAB [J]. *Optics&Optoelectronic Technology*(王娟, 杨春平, 吴健. 热成像系统性能参数 MRTD 的编程计算. *光学与光电技术*), 2003(5): 56—58.
- [10] WANG Ji-Hui, JIN Wei-Qi, WANG Xia, *et al.* Performance evaluation of thermal imaging systems based on MRTD channel width[J]. *J. Infrared Millin. Waves*(王吉晖, 金伟其, 王霞, 等. 基于 MRTD 信道宽度的热成像系统性能评价理论研究. *红外与毫米波学报*), 2007, (26): 256—260.
- [11] Konda M. Measurement of the Sea Surface Emissivity[J]. *Journal of Oceanograph*. 1994, (50): 17—30.
- [8] DUAN L H, LIU A P, CHEN S L, *et al.* Relation between microstructure and laser damage threshold of ZrO<sub>2</sub> films [J]. *International Journal of Modern Physics B*. 2005, **19**: 585—587.
- [9] MA P, CHEN SL, HU JP, *et al.* Studies on the Microstructure and laser damage threshold of ZrO<sub>2</sub> thin films deposited at different parameters[J]. *ACTA OPTICA SINICA* (马平, 陈松林, 胡建平, 等. 不同沉积参量下 ZrO<sub>2</sub> 薄膜的微结构和激光损伤阈值, *光学学报*), 2005, **25**(7): 994—998.
- [10] RICHARD A house II, JERRY R Bettis, ARTHUR H Guenther. Surface roughness and laser damage threshold [J]. *IEEE Journal of quantumelectronics*, 1977, **5**: 361—363.

(上接 336 页)