

水雾红外隐身的冷/热目标效应

杜永成, 杨立, 张士成, 杨桢, 胡双喜

海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033

摘要 人工水雾对抗红外成像制导导弹时, 会因为蒸发对流强、辐射热流弱而使水雾形成冷目标; 也可能因为辐射热流过强、散热弱而形成热目标。为详细揭示该现象, 以 Mie 理论为基础, 通过辐射传递方程和能量守恒方程的耦合计算, 建立了水雾红外隐身产生冷目标或热目标效应的数学模型。应用蒙特卡洛法与本文算法作对比, 验证了模型的正确性; 将水雾视为吸收、发射、各向异性散射介质, 考虑水雾自身辐射、多重散射和各种换热过程, 比如辐射热流、两相流的热传导、热对流、紊流热扩散以及雾滴蒸发等, 反映了水雾热遮蔽所产生的冷/热目标效应。

关键词 人工水雾; 冷/热目标效应; 耦合换热; 红外隐身; 有限体积法

中图分类号: O482.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)08-2204-05

引言

细水雾作为卤代烷的替代品在火灾安全领域已有着较多的研究和应用。其实现途径主要有两种, 一是通过直接覆盖火焰达到灭火的目的, 于水军等已进行了大量研究^[1,2]; 二是通过形成雾状水幕遮蔽热辐射达到保护重要设备的目的, 国内研究较少, Berour 等^[3,4]做了很多有意义的工作。基于人工细水雾在火灾安全中的两种作用原理, 通过水雾遮蔽军事目标的红外辐射信号达到对抗红外成像制导导弹目的已成为导弹防御领域的重要研究方向。

国内对该领域的研究更多的是采用朗伯比尔定律计算红外辐射对水雾的透射率, 胡慧茹等^[5,6]通过实验验证了水雾对热辐射的遮蔽效果; 赵振维等^[7,8]从不同角度计算分析了水雾的遮蔽性能, 指出了其在水雾隐身领域的应用前景; 从北华等^[9]在 Mie 理论的基础上, 通过忽略水雾自身辐射并将散射方向简化进行了模拟研究; 陈中伟等^[10]计算证明了细水雾遮蔽热辐射存在较强的多重散射, 并用实验分析了细水雾的红外隐身作用。但总体讲, 这些研究都是将水雾介质做灰体假设, 对换热过程的描述也只局限于辐射换热。水雾红外隐身涉及到诸多换热过程, 比如两相流的层流导热、紊流热扩散、对流、雾滴蒸发等。尤其是蒸发作用, 当其换热强度大于辐射热流时, 很可能使水雾区域低于环境温度(称为冷目标效应); 当其强度低于辐射热流时, 则可能使水雾区域高于环境温度(称为热目标效应)。从已报道的工作看, 国

内缺乏该问题的研究, 国外由于涉及到军事技术, 报道较少, 本工作针对水雾红外隐身产生的两种效应展开研究。

1 数学模型

对细水雾形成的雾墙作假设: 水雾屏障为矩形且浓度分布均匀; 热扩散过程只发生在 X 方向。

热辐射在水雾中的衰减用辐射传输方程(RTE)描述^[11]

$$\frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega})}{ds} = -(\kappa_{a,\lambda} + \sigma_{s,\lambda})I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \kappa_{a,\lambda}I_{b,\lambda} + \frac{\sigma_{s,\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}')\phi_{\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')d\Omega' \quad (1)$$

其中 $\kappa_{a,\lambda}$ 表示两相流的吸收系数, 为雾滴吸收系数 $\kappa_{d,\lambda}$ 和吸收性气体的吸收系数 $\kappa_{g,\lambda}$ 之和

$$\kappa_{a,\lambda} = \kappa_{d,\lambda} + \kappa_{g,\lambda}, \kappa_{g,\lambda} = x_{CO_2}\kappa_{CO_2} + x_{H_2O}\kappa_{H_2O} \quad (2)$$

式中, κ_{CO_2} 和 κ_{H_2O} 分别表示 CO_2 和 H_2O 的吸收系数, x_{CO_2} 和 x_{H_2O} 分别表示 CO_2 和 H_2O 的体积分数

$$x_{H_2O} = \frac{Y}{\frac{x_{H_2O}}{x_{air}} + Y\left(\frac{x_{air} - x_{H_2O}}{x_{air}}\right)}, x_{CO_2} = 0.0003(1 - x_{H_2O}) \quad (3)$$

式中, Y 表示空气湿度; 计算 κ_{CO_2} 和 κ_{H_2O} 是很复杂的工作, 非本研究重点, 引用 Soufiani 等^[12]的研究成果(如图 1)。

雾滴吸收与散射系数采用 Mie 氏算法计算(如图 2)

$$\kappa_{d,\lambda} = N_d \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) Q_{abs} dr \quad (4)$$

收稿日期: 2012-02-22, 修订日期: 2012-05-20

基金项目: 国防预研基金项目(1010502020202)资助

作者简介: 杜永成, 1985 年生, 海军工程大学船舶与动力学院博士研究生 e-mail: dycheng@Yeah.net

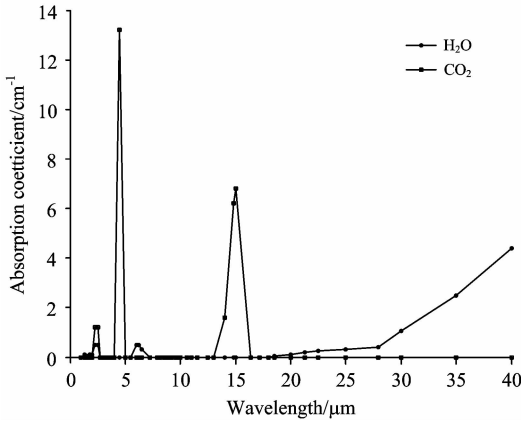


Fig. 1 Absorption coefficients of CO₂ and H₂O

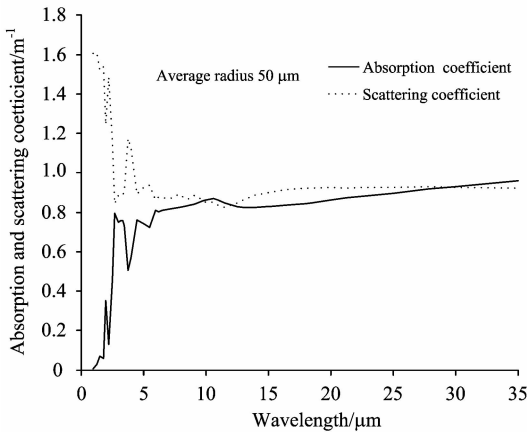


Fig. 2 Absorption and scattering coefficients of droplets

$$\sigma_{s,\lambda} = N_d \int_0^\infty \pi r^2 n(r) Q_{sca} dr \quad (5)$$

$\phi_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$ 表示单位控制体内的雾滴散射相函数

$$\phi_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') = \frac{1}{\sigma_{s,\lambda}} \int_0^\infty Q_{sca} \pi r^2 n(r) \phi(\chi, m) dr \quad (6)$$

$n(r)$ 表示服从对数正态分布的雾滴粒径

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r \ln \sigma_0}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2(\ln \sigma_0)^2}\right) \quad (7)$$

r_0 和 σ_0 分别表示平均粒径和标准间偏差, N_d 表示单位控制体内的雾滴数密度

$$N_d = \frac{f_v}{\int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 n(r) dr} \quad (8)$$

f_v 表示雾滴的体积分数

$$I_{b,\lambda} = \text{Plank}(T, \lambda) \quad (9)$$

边界采用透明边界条件:

被隐身目标一侧

$$I_\lambda(x=0, \cos\theta > 0) = I_\lambda(T_{\text{wall}}) + I_\lambda(T_0) \quad (10)$$

水雾的另一侧

$$I_\lambda(x=L, \cos\theta < 0) = I_\lambda(T_0) \quad (11)$$

式(10)和式(11)中 T_0 表示环境温度。

在 RTE 中涉及到水雾介质的温度分布, 这需要辐射传递方程与能量守恒方程联合求解。若考虑辐射热流、热传

导、紊流热扩散和蒸发换热, 则一维稳态、无内热源的能源守恒方程可表示为

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + N_d \bar{m} L_p \quad (12)$$

其中, 左边表示辐射热流密度散度, 通过求解 RTE 计算

$$\frac{\partial q_{x,\lambda}}{\partial x} = k_{x,\lambda} \left[\sum_{m=1}^{N_d} \omega_m I_{x,\lambda}^m - 4\pi n_\lambda^2 I_{b,x,\lambda} \right] \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \sum_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\partial q_{x,\lambda}}{\partial x} \quad (14)$$

右边第一项表示热传导, $k(T)$ 为层流导热系数, 表示为^[4]

$$k(T) = aT + b, \quad a = 6 \times 10^{-5}, \quad b = 8.9 \times 10^{-3} \quad (15)$$

第二项表示紊流热扩散, k_t 为紊流导热系数, 表示为^[13]

$$k_t = C_t \tau_i \langle v'^2 \rangle \quad (16)$$

式中, C_t 为 0.3, τ_i 为紊流特征时间 $\tau_i = L/\langle v' \rangle$, L 为特征长度, 此处用水雾在 x 方向的厚度表示, $\langle v' \rangle$ 表示紊流脉动速度 $\langle v' \rangle = \zeta \cdot v$, ζ 表示脉动强度, 取为 20%, v 表示水雾气液两相流的整体速度。

第三项表示蒸发换热^[14]

$$\dot{m} = 4\pi r \left(\frac{k}{c_p} \right)_g \ln(1 + B_M) \quad (17)$$

$$B_M = \frac{Y_{\text{sat}} - Y_\infty}{1 - Y_{\text{sat}}} \quad (18)$$

式中, \dot{m} 表示单个液滴的蒸发速率, k 和 c_p 分别表示混合气体导热系数和定压比热容, L_p 表示液滴汽化潜热; Y 表示含湿量, 下标 sat 和 ∞ 分别表示饱和状态和自由空气状态。

边界为对流换热边界条件:

被隐身目标一侧

$$\left[k(T)_{x=0} + k_t \right] \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h(T_{x=0} - T_0) \quad (19)$$

水雾另一侧

$$-\left[k(T)_{x=L} + k_t \right] \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h(T_{x=L} - T_0) \quad (20)$$

其中 h 为对流换热系数, 可结合 Nu 数计算。

1.1 解算过程

求解过程按以下步骤进行:

(1) 由于目标辐射集中在中远红外, 将 1~40 μm 波段用窄谱带模型近似, 在每个谱带内不考虑折射率、吸收系数、散射系数的变化, 利用普朗克定律按单色辐射力积分计算其谱带平均辐射力;

(2) 采用有限体积法, 首先假设水雾的一种温度分布和某一谱带辐射强度分布, 通过数值迭代依次求出所有离散谱带的辐射热流密度散度并叠加求总的辐射热流值;

(3) 由于层流导热系数是温度的函数, 可根据已有的温度分布求出离散点的导热系数, 存为数组供调用;

(4) 将求出的辐射热流代入能量守恒方程, 调用已存储的导热系数, 采用有限体积法计算温度分布;

(5) 将温度分布重新代入 RTE, 重复计算辐射热流密度散度, 并计算新的温度分布, 直到达到足够精度。

1.2 算法验证

结合辐射传输方程与能量守恒方程计算出的辐射强度场充分考虑了介质的自身辐射、散射辐射与环境辐射的影响。

取 8~12 μm 谱带, 计算工况为目标 $T_{\text{wall}}=400\text{ K}$, 环境温度 $T_0=300\text{ K}$; 水雾服从对数正态分布, 平均粒径 50 μm , 标准偏差 1.5, 气液两相流的整体速度 $2.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 厚度 0.3 m, 对流换热系数 $10.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 温度为环境温度; 目标和环境的辐射黑度设为 0.9; 求解 RTE 和能量守恒方程时空网格为 200, 方向划分为 8×16 。采用蒙特卡洛法和朗伯比尔定律的计算结果与本耦合算法对比, 如图 3 所示。

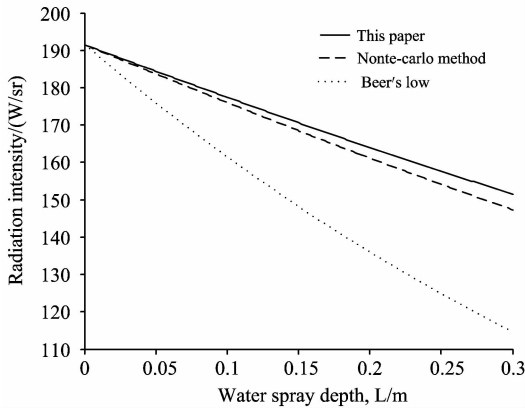


Fig. 3 Comparison of the radiation intensity in three methods

蒙特卡洛法可看作是较为精确的解, 但其在变物性参数的计算中难度很大^[10]; 而朗伯比尔定律是单纯的目标辐射衰减, 未考虑介质和环境的影响。由图 3 可见计算结果与蒙特卡洛法的计算结果较为吻合, 证明本算法是准确的; 由于没考虑水雾的自身辐射及多重散射, 朗伯比尔定律的计算结果与蒙特卡洛法相差较大, 说明在水雾衰减热辐射的计算中应充分考虑各种因素的影响。图 4 采用三维图显示了目标在

水雾遮蔽下各个方向的强度分布。

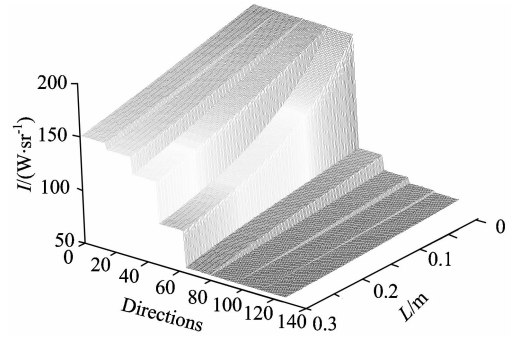


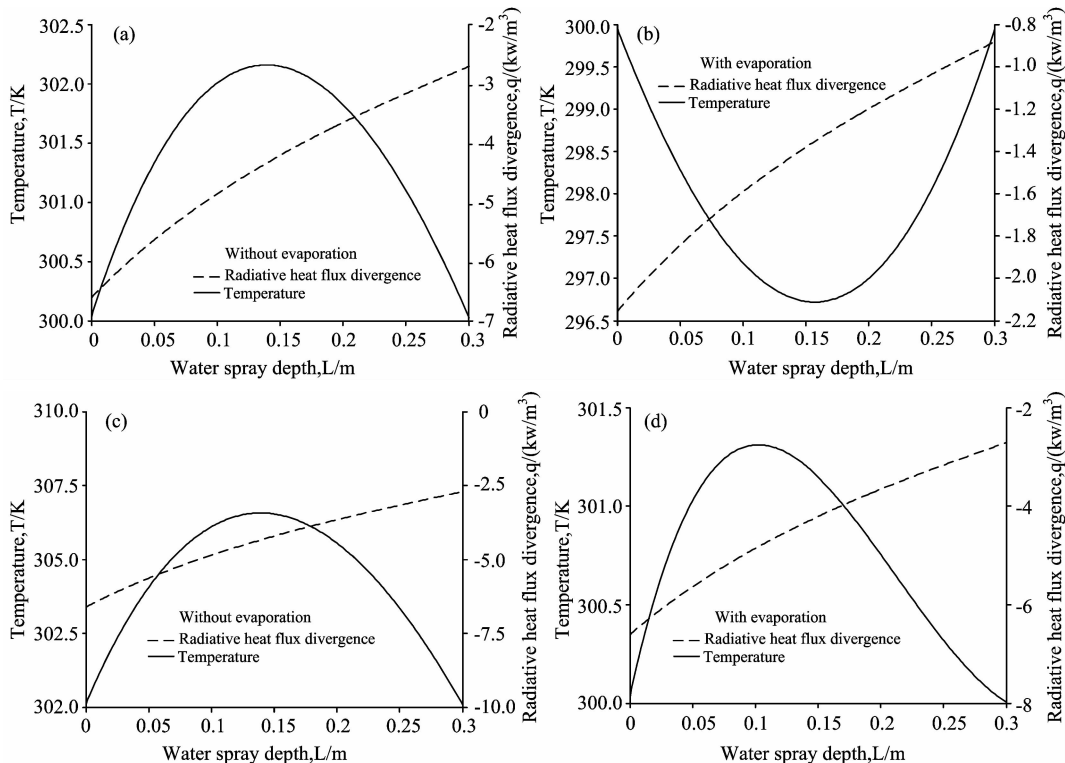
Fig. 4 Radiation intensity field with spray shielding

1.3 计算分析

假定目标温度为 400 K, 水雾与背景同温度 300 K, 环境饱和湿度为 0.011 6 (kg 水/kg 干空气), 计算中取环境湿度为 0.009 8, 即相对湿度 84.7%。若计算中不考虑蒸发散热, 水雾区域温度超过背景温度约 2.2 $^{\circ}\text{C}$, 此时水雾产生热目标效应, 如图 5(a); 若考虑蒸发作用, 水雾区域最低温度则低于背景温度 3.2 $^{\circ}\text{C}$, 形成了冷目标效应, 如图 5(b)。由此可见, 蒸发散热量大于目标 400 K 时的辐射热流, 实际应用中应采取反馈控制。

当目标温度为 500 K 时, 考虑蒸发和不考虑蒸发两种计算工况, 水雾区域都形成了热目标效应, 但考虑蒸发时水雾区域的最高温升不超过 1.4 $^{\circ}\text{C}$, 如图 5(c), 而不考虑蒸发时, 最高温升则达到 6.5 $^{\circ}\text{C}$, 如图 5(d)。说明目标辐射热流大于导热、对流换热、紊流热扩散和蒸发的散热量, 实际应用中, 应加大喷雾量, 降低目标辐射特征。

当环境湿度降低时, 蒸发作用会增强, 取目标温度 500



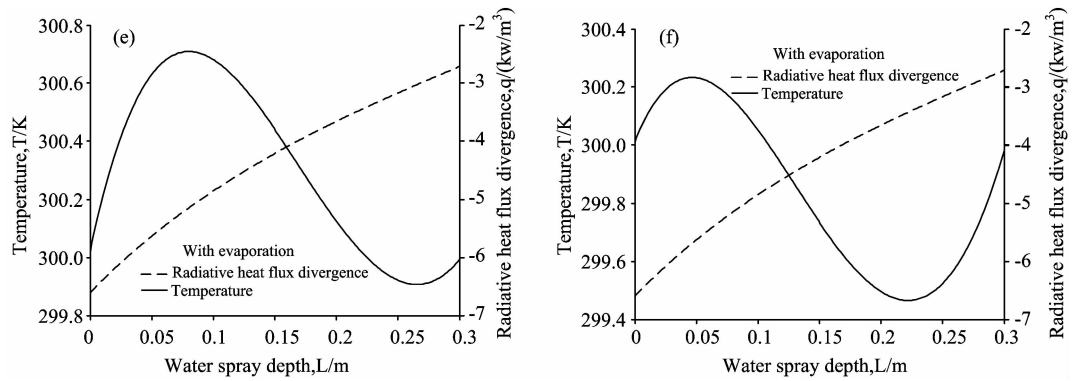


Fig. 5 Distribution of the temperature and radiation heat flux with and without calculation of evaporation

K, 相对湿度 82.7% 和 80.7% 两种工况计算。在两种工况计算条件下, 水雾区域形成了冷热目标同时存在的情况。靠近目标一侧的温度高于背景温度, 而另一侧则低于背景温度。但图 5(e) 中热目标明显, 而图 5(f) 中冷目标明显。由于辐射热流近似成线性递减的变化规律, 近目标侧辐射热流大于蒸发散热, 使得水雾温度升高; 远目标侧辐射热流小于蒸发散热, 使得水雾温度降低。而图 5(f) 中由于空气湿度较小, 蒸发作用强, 因而冷目标效应要明显。

综上所述, 在应用水雾对舰船进行红外隐身时, 应综合考虑各种换热作用。当水雾温度高于背景温度形成热目标时, 应加大喷雾量; 当水雾温度低于背景温度形成冷目标时, 应通过反馈调节, 减小喷雾量。两种调节控制的最终目的都是为了减小目标及其覆盖在目标上的水雾与背景的温度对比, 以减小红外成像制导导弹的锁定范围, 提高舰艇生命力。

2 结 论

将辐射传递方程与能量守恒方程耦合计算, 对水雾遮蔽

热辐射进行数学建模, 研究结论如下:

(1) 通过与蒙特卡洛法的计算比较, 证明采用耦合算法对辐射场的数值解是正确的。该模型充分考虑了水雾的粒子尺寸分布、粒子间多重散射的相互影响、水雾的自身辐射、散射辐射、不同换热过程的耦合作用, 计算结果更加可信;

(2) 采用该模型可有效计算水雾遮蔽区域的辐射热流密度分布、温度分布、辐射强度分布。通过耦合计算发现, 当目标温度高而水雾的散热能力低于辐射热流时, 会使水雾区域形成热目标; 相反, 当水雾的蒸发等过程散热能力强时, 由有可能使得水雾区域成为冷目标;

(3) 在用人造水雾进行红外成像隐身时, 要根据空气湿度选择合适的水雾浓度, 使得蒸发散热量大致等于隐身目标的辐射热流。

References

- [1] YU Shui-jun, YU Ming-gao, LI Xi-ling, et al(于水军, 余明高, 李喜玲, 等). Journal of Combustion Science and Technology(燃烧科学与技术), 2008, 14(3): 205.
- [2] YU Ming-gao, AN An, YOU Hao, et al(余明高, 安 安, 游 浩, 等). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2011, 36(3): 417.
- [3] Berour N, Lacroix D, Boulet P, et al. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2004, 86: 9.
- [4] Boulet P, Collin A, Parent G. Fire Safety Journal, 2006, 41: 15.
- [5] HU Bi-ru, WU Wen-jian, DAI Meng-yan, et al(胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2006, 25(2): 131.
- [6] CHEN Bing, LI Cheng-jun(陈 兵, 李澄俊). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2008, 35(3): 48.
- [7] ZHAO Zhen-wei, WU Zhen-sen(赵振维, 吴振森). Journal of Xidian University(西安电子科技大学学报), 2002, 29(2): 2536.
- [8] XU Bo, SHI Jia-ming, WANG Jia-chun, et al(许 波, 时家明, 汪家春, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2005, 34(1): 38.
- [9] CONG Bei-hua, CAI Zhi-gang, CHEN Lü-yi, et al(丛北华, 蔡志刚, 陈吕义, 等). China Safety Science Journal(中国安全科学学报), 2005, 15(12): 69.
- [10] CHEN Zhong-wei, LIANG Xin-gang, ZHANG Ling-jiang, et al(陈中伟, 梁新刚, 张凌江, 等). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2010, 29(5): 342.
- [11] TAN He-ping, XIA Xin-lin, LIU Lin-hua(谈和平, 夏新林, 刘林华). Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer—Calculating Thermal Radiation(红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学). Harbin: Harbin Institute of Technology Press

(哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社), 2006.

- [12] Anouar Soufiani, Jean Taine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(4): 989.
- [13] Rokni M, Sunden B. *Numerical Heat Transfer Part A*, 1996, 30: 321.
- [14] Beck J C, Watkins A P. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, 24: 242.

Cool/Hot Target Effect of the Water Fog Infrared Stealth

DU Yong-cheng, YANG Li, ZHANG Shi-cheng, YANG Zhen, HU Shuang-xi
College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract Artificial spray fog will come into being cool target because of the strong evaporation and convection but weak radiation heat flux, when it is used for defence of infrared imaging guided missile. Also, when it is the contrary condition, the water fog will come into being hot target. In order to open out the phenomenon particularly, a math model which can account for the cool/hot effect produced by water fog shielding the thermal radiation is established by coupling the calculation of radiation transfer equation and energy conversation equation, based on the Mie theory. This model is proved to be accurate in comparison with the Monte-Carlo method and Lambert-Beer' law. The water fog is seemed as absorbing, emitting and anisotropic scattering medium, and the medium radiation, multiple scattering, target radiation flux, and environment influence such as the conductivity, convection turbulent heat diffusion and evaporation is calculated. The phenomenon of cool/hot target effect can be shown in detail with this model.

Keywords Artificial spray; Cool/hot target effect; Coupled heat transfer; Infrared stealth; FVM

(Received Feb. 22, 2012; accepted May 20, 2012)