

## 细水雾遮蔽红外辐射的数值分析

杜永成<sup>1</sup>, 杨立<sup>1</sup>, 张士成<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 镇江船艇学院 船艇训练大队, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 细水雾对热辐射有着强烈的散射和吸收, 可用于舰船等军事目标的红外隐身。将水雾视为吸收、发射、各向异性散射介质, 通过谱带离散处理水雾的非灰特性, 利用 Mie 氏理论计算离散谱带内的平均光学系数, 建立了 8~14  $\mu\text{m}$  红外辐射在细水雾中的传输模型, 并利用有限体积法进行了分析计算。研究发现, 采用均值粒径假设计算辐射透射率时会有一定误差, 应用数量矩均值粒径时 Sauter 粒径误差最小, 线性平均粒径误差最大; 水雾自身辐射与内散射对透射率的影响较大, 计算中应考虑; 提高水雾浓度, 减小均值粒径, 可有效抑制透射率。

**关键词:** 红外隐身; 水雾; 热辐射; 有限体积法; Mie 理论

**中图分类号:** TN216; TJ99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-1967-06

## Numerical analysis fine water sprays shielding infrared radiation

Du Yongcheng<sup>1</sup>, Yang Li<sup>1</sup>, Zhang Shicheng<sup>2</sup>

(1. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Boat Training Battalion, Zhenjiang Watercraft College, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** For strongly attenuating the heat radiation through scattering and absorbing effect, fine water sprays are used in military object infrared stealth. The 8-14  $\mu\text{m}$  infrared radiation attenuation model by water sprays was established, in which water sprays were treated as absorbing, emitting, and anisotropic scattering medium and non-grey properties were dealt with bands discretion method. The average optical parameters in the discrete spectral bands were got by Mie theory and the radiation transfer process was carried out with finite volume method. It is found that there would be some errors when the polydisperse sprays are treated as monodispersion. The errors resulting from Sauter radius is minimum, where as that from the linear average radius is maximum. The inner radiation and scatter of the sprays have biggest influence on the transmission, so it should be considered during calculations. For restraining the radiative transmission effectively, the measures of increasing the sprays concentration and decreasing the geometry average radiuses should be done.

**Key words:** infrared stealth; fine water sprays; heat radiation; finite volume method; Mie theory

收稿日期: 2012-12-05; 修订日期: 2013-01-03

基金项目: 国防预研基金(1010502020202); 海军工程大学博士创新基金

作者简介: 杜永成(1985-), 男, 博士生, 主要从事红外光谱隐身方面的研究。Email: dycheng@yeah.net

导师简介: 杨立(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事传热传质热流体学应用及量测方面的研究。Email: lyang39@hotmail.com

## 0 引言

红外制导技术在电磁环境下的现代战场上的应用越来越广泛,尤其在 8~14  $\mu\text{m}$  大气窗口波段上采用成像制导的方法对现代舰船构成了极大威胁<sup>[1-2]</sup>。细水雾早已在火灾安全中有着重要应用,但对于将水雾作为屏障达到消除红外特征、保护舰船免遭攻击的研究则较少。国内有部分学者基于指数衰减的朗伯比尔定律(Lambert-Beer, LB)做了探索性研究:许波等采用 LB 模型计算了水雾的遮蔽性能<sup>[3]</sup>;胡碧茹等进行了实验研究,验证了雾状水幕的红外成像隐身效果<sup>[4]</sup>;笔者利用 LB 模型分析了取得最佳消光作用的水雾粒子半径分布<sup>[5]</sup>。由于细水雾除了散射和吸收作用对 8~14  $\mu\text{m}$  红外波段产生衰减效果外,还会有雾滴辐射(称为自身辐射)及多重散射与前向散射(称为内散射)影响衰减效果,而上述研究成果均未涉及到自身辐射和内散射对透射率的影响。国外学者 A. Collin 等<sup>[6]</sup>在 2005 年采用离散坐标法、P. Boulet 等<sup>[7]</sup>采用蒙特卡罗法对水雾衰减热辐射进行了建模计算,考虑了水雾自身辐射与内散射,但这些研究都是针对火灾安全,目标温度一般在 1 000 K 以上,水雾温度一般低于 300 K;而水雾在红外成像隐身应用中,目标与水雾的温差一般在 60 K 以下,因此两者的研究工况完全不同。此外,在很多研究中都将水雾视作单分散系(即均一粒径),以简化光学参数的计算<sup>[8-9]</sup>。数量矩法(Number moment method)<sup>[10]</sup>在众多的均值粒径模式中应用较多。而采用均值粒径假设对计算精度有何影响、采用哪种均值粒径误差最小等都是值得研究的问题。基于以上研究现状,文中建立了 8~14  $\mu\text{m}$  波段水雾红外辐射遮蔽的有限体积法(FVM)模型,分析讨论了均值粒径假设、介质源项等对计算精度的影响,并分析了水雾体积分数、几何均值粒径等参数对透射率的影响。

## 1 辐射传递模型

首先假设目标为无限扩展、温度分布均匀的面源,细水雾为具有一定厚度的无限大雾状幕并且浓度分布均匀,因此热辐射在细水雾中的传输问题可以简化为一维。当考虑雾滴散射与吸收、雾滴自身辐射以及内散射时,细水雾遮蔽红外辐射的原理可用

一维辐射传递方程表示:

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

若不考虑雾滴自身辐射和内散射,公式(1)可简化为 Lambert-Beer 定律:

$$I_{\lambda,L} = I_{\lambda,L_0} \exp(-(\kappa_a + \sigma_s)L) \quad (2)$$

式中: $\kappa_{a,\lambda}$ 、 $\sigma_{s,\lambda}$  为光谱吸收系数和散射系数; $\phi_{\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$  为散射相函数,可用勒让德多项式近似为  $1 + \text{acos}\theta\text{cos}\theta'$ 。

边界都为透明边界条件,被隐身目标一侧:

$$I_{\lambda}(x=0, \cos\theta>0) = I_{\lambda}(T_{\text{wall}}) + I_{\lambda}(T_0) \quad (3)$$

水雾的另一侧:

$$I_{\lambda}(x=L, \cos\theta<0) = I_{\lambda}(T_0) \quad (4)$$

对细水雾的非灰特性采用谱带离散的方法处理。将 8~14  $\mu\text{m}$  大气窗口波段离散成 2/cm 宽的谱带,在每个谱带内不考虑波长和复折射率的变化,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,再采用 Mie 氏理论分别计算细水雾在各个谱带内的吸收因子  $Q_{\text{abs}}$ 、散射因子  $Q_{\text{scat}}$ 、消光因子  $Q_{\text{ext}}$  和不对称因子  $g$ ,如图1(a)~1(d)所示。

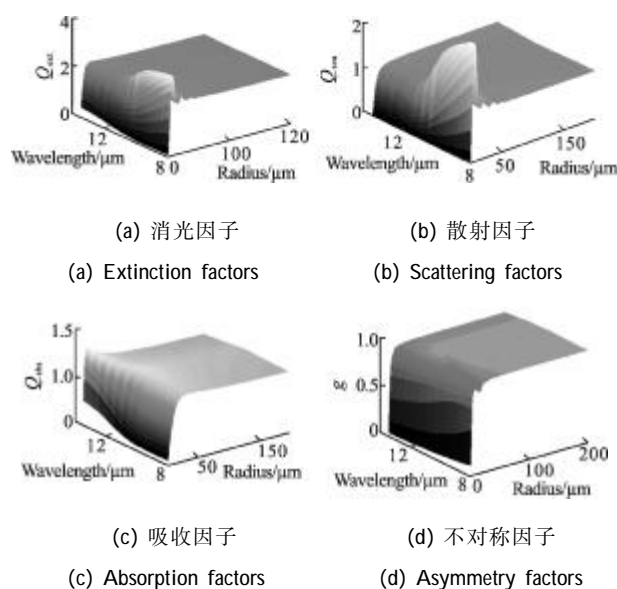


图 1 细水雾参数

Fig.1 Parameters of fine water sprays

若细水雾按多分散系处理,其吸收系数和散射系数则要根据水雾浓度和粒径分布计算:

$$\begin{cases} \kappa_{d,\lambda} = N_d \int_0^\infty \pi r^2 n(r) Q_{abs,\lambda} dr \\ \sigma_{s,\lambda} = N_d \int_0^\infty \pi r^2 n(r) Q_{sca,\lambda} dr \\ \phi_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') = \left( \int_0^\infty Q_{sca,\lambda} \pi r^2 n(r) \phi(\chi, m) dr \right) / \sigma_{s,\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $N_d$  为水雾雾滴的数密度。可表示为:

$$N_d = f_v / \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 n(r) dr \quad (6)$$

式中:  $f_v$  表示水雾的体积分数。

水雾粒径的尺寸采用对数正态分布函数描述:

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

式中:  $r_0$  为水雾几何平均粒径;  $\sigma$  为水雾粒径几何标准偏差。

若为了简化计算, 可选取适当的均一粒径将细水雾按单分散系处理。常用的平均粒径可由数量矩法表示:

$$r_{ab} = \left[ \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^a n(r) dr}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^b n(r) dr} \right]^{1/(a-b)} \quad (8)$$

式中:  $r_{ab}$  为雾滴平均粒径,  $a$  和  $b$  为常数, 其值由具体平均粒径而定,  $a+b$  称为平均粒径的阶数。  $a$  和  $b$  取不同值时可获得不同的平均粒径:  $r_{32}$  表示 Sauter 平均粒径,  $r_{31}$  表示容积-长度平均粒径,  $r_{30}$  表示体积平均粒径,  $r_{21}$  表示表面-长度平均粒径,  $r_{20}$  表示面积平均粒径,  $r_{10}$  表示线性平均粒径。

采用均一粒径模式时, 公式(5)可简化为:

$$\begin{cases} \kappa_{d,\lambda} = N_d \pi r_{ab}^2 Q_{abs,\lambda} \\ \sigma_{s,\lambda} = N_d \pi r_{ab}^2 Q_{sca,\lambda} \\ \phi_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') = Q_{sca,\lambda} \pi r_{ab}^2 \phi_\lambda(\chi, m) / \sigma_{s,\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

当所取粒径范围覆盖水雾体积分数的 99% 时可获得公式(8)中的  $r_{max}$  和  $r_{min}$ <sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} r_{max} = r_0 \exp[3S^2 + 4\sqrt{2} S] \\ r_{min} = r_0 \exp[3S^2 - 4\sqrt{2} S] \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $S = \ln \sigma$ 。

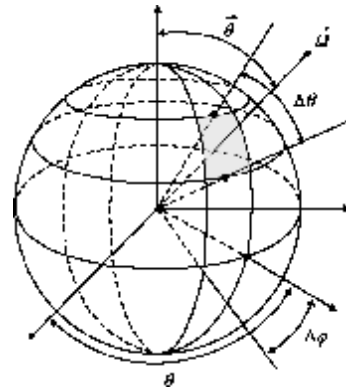
定义 8~14  $\mu\text{m}$  谱段透射率为:

$$T_{8-14} = \frac{\int_{\cos\theta>0} \int_{\lambda=8\mu\text{m}}^{\lambda=14\mu\text{m}} I_{\lambda,L} \cdot \cos\theta \cdot d\lambda \cdot d\Omega}{\int_{\cos\theta>0} \int_{\lambda=8\mu\text{m}}^{\lambda=14\mu\text{m}} I_{\lambda,0} \cdot \cos\theta \cdot d\lambda \cdot d\Omega} \quad (11)$$

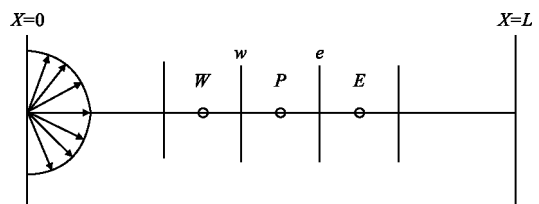
## 2 有限体积法模型

有限体积法的基本思想是要求在每个控制体积及控制角内辐射能量守恒, 因此将整个计算区域进行角度离散和空间离散, 如图 2 所示。在谱带模型下, 将控制体积  $V_p$  和控制立体角  $\Omega^m$  内对公式(1)离散积分, 可得:

$$\begin{aligned} \int_{\Delta\Omega^m} \int_{\Delta V} \left( \frac{dI^m}{ds} + (\kappa_a + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \Omega^m) \right) dV d\Omega^m = \\ \int_{\Delta\Omega^m} \int_{\Delta V} \left[ \kappa_a \left( \frac{\sigma T^4(\vec{r})}{\pi} \right) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(\vec{r}, \Omega') \cdot \right. \\ \left. \phi(\Omega^m, \Omega') d\Omega' \right] dV d\Omega^m \quad (12) \end{aligned}$$



(a) 控制角  
(a) Control angle



(b) 控制体积  
(b) Control volume

图 2 空间离散与角度离散

Fig.2 Discretion of space and angle

根据多重积分的散度定理, 并采用阶梯格式(或称作迎风格式), 公式(12)可写为:

$$a_p^m I_p^m = a_w^m I_w^m + a_e^m I_e^m + b_p^m \quad (13)$$

采用高斯-赛德尔迭代法计算, 收敛条件为:

$$\max(|I_p^m - I_p^{m,old}| / I_p^m) \leq 10^{-6} \quad (14)$$

### 3 水雾对目标的遮蔽计算与分析

为验证文中模型与计算程序的准确性,采用蒙特卡罗法计算相同条件的问题,如图 3 所示。由图可见,采用文中模型的计算结果与采用蒙特卡罗法计算的结果接近,证明所建模型与所编计算程序准确可靠。

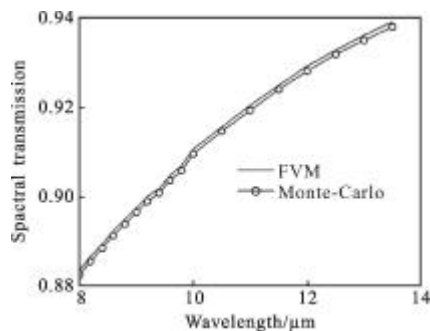


图 3 模型验证

Fig.3 Model verification

#### 3.1 粒径假设对计算的影响

大多情况下,研究者都是对水雾的多分散特性作单一粒径假设,这样可使计算得以简化,但计算精度往往会降低,而且平均粒径模式选取不当时会产生较大的误差。图 4 和图 5 中,横坐标 0~6 分别表示  $r_{ln}$ (表示对数正太分布)、 $r_{32}$ 、 $r_{31}$ 、 $r_{30}$ 、 $r_{21}$ 、 $r_{20}$ 、 $r_{10}$ ,目标温度  $T=320\text{ K}$ ,水雾温度  $T_0=300\text{ K}$ ,水雾体积分数  $f_v=10^{-4}$ 。由图 4 可见,服从对数正态分布的多分散系数模式计算的透射率最大,单分散系数模式计算的辐射透过率往往偏低,Sauter 平均粒径是最为接近多分散系计算结果的粒径假设模式,而线性平均粒径计算的透射率最小。

将多分散系的计算结果视为精确值,定义计算误差  $\varepsilon_r$ :

$$\varepsilon_r = |(T_{8-14, r_{ln}} - T_{8-14, r_{in}})| / T_{8-14, r_{ln}} \quad (15)$$

由图 5 可见,采用 Sauter 均值粒径计算误差最小,而采用线性平均粒径误差最大。同时,由图 4、图 5 中的四条曲线可见,采用均值粒径的计算精度随着粒径几何标准偏差对数值的增大而降低。

由以上分析可知,在计算量不大的情况下应尽量采用多分散粒径模式;如要简化计算量应选择 Sauter 平均粒径;而当水雾破碎相对均匀(即  $S$  较小)时采用 Sauter 粒径作为均值粒径计算不会造成较大误差。

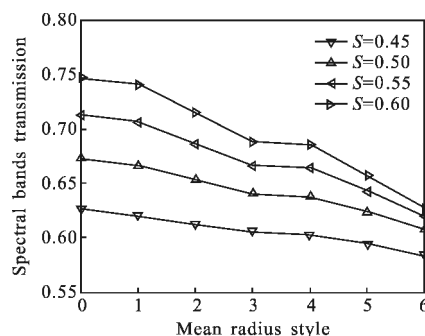


图 4 不同粒径假设下的谱带透射率

Fig.4 Spectral bands transmission for different radius assumption

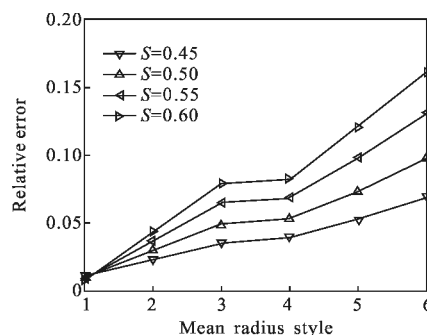


图 5 均值粒径假设的谱带透射率误差

Fig.5 Spectral bands transmission errors for different radius assumption

#### 3.2 消光因素对计算的影响

水雾红外隐身的实际透射率应考虑雾滴的散射与吸收作用、雾滴自身辐射和内散射。散射与吸收起到消光作用,自身辐射与内散射则起到了增强辐射的作用。图 6(a)~(d)中,水雾温度  $T_0=300$  保持不变,曲线 A 考虑了全部因素,曲线 B 考虑了消光作用与自身辐射的影响,曲线 C 考虑了消光作用与内散射的影响,曲线 D 只考虑了消光作用。由图 6 中曲线 D 分别作对比可见,若不考虑雾滴自身辐射和内散射(即根据 Lambert-Beer 定律计算),在雾滴体积分数相同而目标热源温度不同时,透射率的计算结果是相同的;但对比曲线 A 可见,当考虑自身辐射和内散射时将导致辐射透射率有不同比率提高。尤其是在水雾体积分数较大而目标与环境的温度相差不大时,如图 6(c)( $f_v=1 \times 10^{-4}$ ,  $T_r=320\text{ K}$ ,  $\Delta T=20\text{ K}$ )所示,将曲线 A 作为精确值,则曲线 D 的平均误差达到 47%,而这种误差随着目标温度的增高、雾滴体积分数的减小而降低,如图 6(b)( $f_v=1 \times 10^{-5}$ ,  $T_r=360\text{ K}$ ,  $\Delta T=60\text{ K}$ )误差为 5.97%。

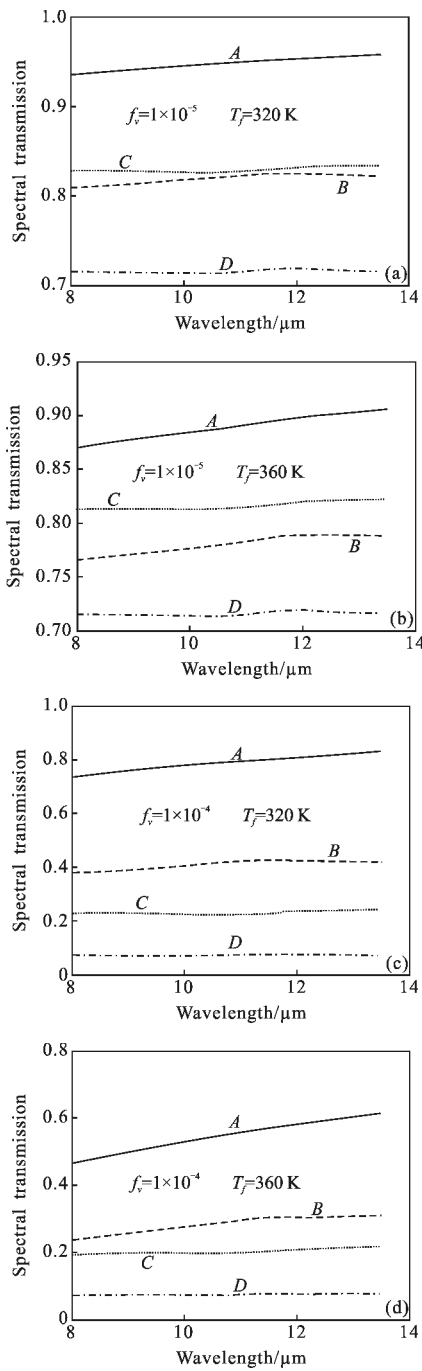


图 6 不同条件下的光谱透射率  
Fig.6 Spectral transmission under different conditions

结合公式(1)并由以上分析可知,当水雾温度与目标温度相差不大时应考虑水雾自身辐射的影响;由于内散射主要受到散射系数及散射相函数的影响,同时由勒让德近似式可知相函数取决于不对称因子,而普通水雾颗粒由于尺度参数较大,其不对称因子一般在 0.95~1 之间,如图 1(d)所示,使得入射辐射产生的散射主要集中在入射传输方向上,因此

应考虑内散射的影响。

### 3.3 水雾条件对红外隐身的影响

水雾浓度和雾滴微细程度决定着对红外辐射的衰减效果。由图 7 和图 8 可见,8~14 μm 红外辐射透射率随着水雾体积分数呈指数衰减的规律,而随着几何均值粒径呈对数递增的趋势。由此可见,减小单位水雾厚度上辐射透射率的方法是提高水雾的体积分数,并尽可能减小几何均值粒径,使得水雾尽可能的细密。但在实际应用中,水雾细密会导致体积分数下降;而体积分数增大则很难获取细密的水雾。因此,这既是一个数学优化问题,又是一个产品设计问题。

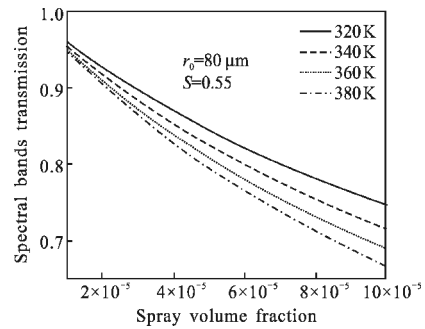


图 7 不同水雾体积分数下的谱段透射率  
Fig.7 Bands transmission as a function of sprays volume fraction

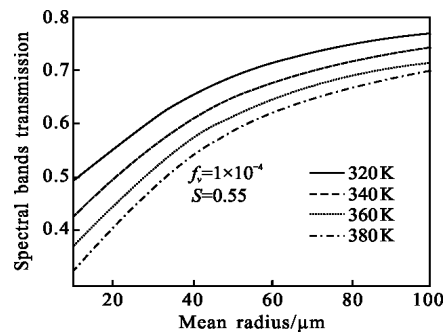


图 8 不同均值粒径下的谱段透射率  
Fig.8 Spectral bands transmission as a function of the average radius

## 4 结 论

文中基于有限体积法和 Mie 氏理论建立了水雾红外成像隐身模型,并对计算辐射透射率的影响因素(如粒径假设、水雾源项、体积分数、几何均值粒径等)进行了分析,所得结论如下。

(1) 水雾是多分散系,计算消光参数应采用实际

的粒径分布;工程应用中采用数量矩法将水雾按均一粒径处理,往往会导致计算所得的透射率小于精确值;而在所有的数量矩法粒径中,Sauter 粒径误差最小。

(2) 由于细水雾浓度大,雾滴温度与目标热源温度相差不多,导致辐射传输中水雾自身辐射与内散射对透射率的影响很大,计算中应充分考虑这两个因素。

(3) 在单位水雾厚度上,提高水雾体积分数、降低几何均值粒径可以有效地抑制辐射透射率,但在实际应用中,提高体积分数与降低几何均值粒径是相互矛盾的,因此这个问题有待于优化研究。

#### 参考文献:

- [1] Chen Zhongwei, Liang Xingang, Zhang Lingjiang, et al. Investigation of spray on temperature drop and infrared stealth of water surface object [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(5): 342-346. (in Chinese)  
陈中伟, 梁新刚, 张凌江, 等. 雾状水幕降温衰减与水面目标红外隐身研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(5): 342-346.
- [2] Li Dongzhen, Yang Li, Chen Xuan, et al. Simulation and analysis on the dynamic infrared characteristics of ship composite materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 413-417. (in Chinese)  
李东臻, 杨立, 陈翻, 等. 舰船复合材料动态红外特征模拟与分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 413-417.
- [3] Xu Bo, Shi Jiaming, Wang Jiachun, et al. Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (1): 38-41. (in Chinese)  
许波, 时家明, 汪家春, 等. 水雾遮蔽性能的计算与分析 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 38-41.
- [4] Hu Biru, Wu We njian, Dai Mengyan, et al. Study on property of infrared obscure of artificial fog [J]. *J Infrared Millin Waves*, 2006, 25(2): 131-134. (in Chinese)  
胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等. 人造雾的红外遮蔽性能试验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(2): 131-134.
- [5] Du Yongcheng, Yang Li. Study on optimal extinction radius of water fog particles based on phase function and extinction factor [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, 30 (8): 2459-2463. (in Chinese)  
杜永成, 杨立. 基于相函数和消光因子的水雾粒子最佳消光半径研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2459-2463.
- [6] Collin A, Boulet P, Lacroix D, et al. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 92: 85-110.
- [7] Boulet P, Collin A, Parent G, et al. Monte Carlo simulation of radiation shielding by water curtains [J]. *Computational Thermal Radiation in Participating Media II*, 2006: 5-7.
- [8] Maqua C, Castanet G, Grisch F, et al. Monodisperse droplet heating and evaporation: Experimental study and modeling [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51: 3932-3945.
- [9] Castanet G, Lebouche' M, Lemoine F, et al. Heat and mass transfer of combusting monodisperse droplets in a linear stream [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 3261-3275.
- [10] Beck J C, Watkins A P. The droplet number moments approach to spray modelling: The development of heat and mass transfer sub-models [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 24: 242-259.
- [11] Godoy William F, Desjardin Paul E. Efficient transmission calculations for polydisperse water sprays using spectral scaling[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2007, 108: 440-453.