

水雾热遮蔽过程的辐射与导热耦合换热

杜永成, 杨立, 彭友顺, 张士成
(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:人工水雾对热辐射有着强烈的散射和吸收,可用于火灾安全和红外隐身.将水雾视为吸收、发射、各向异性散射的非灰介质,考虑水雾自身辐射、多重散射和环境影响,利用 Mie 理论和谱带离散计算雾滴的辐射特性参数;将辐射传输方程(RTE)和能量守恒方程(ECE)耦合计算,建立红外辐射在水雾中的衰减模型.利用该模型计算了光谱半球透射率,通过与朗伯比尔定律作对比,反映了介质辐射、多重散射、辐射热流等因素会降低水雾遮蔽效率.

关键词:人工水雾;热遮蔽;耦合换热;红外隐身;有限体积法
中图分类号:TN216, TJ99 **文献标识码:**A

Coupled heat exchange of radiation and conduction of water sprays in the heat shielding process

DU Yong-Cheng, YANG Li, PENG You-Shun, ZHANG Shi-Cheng
(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Artificial sprays can be used in the fire safety and infrared stealth because that they can strongly attenuate the heat radiation through the scattering and absorbing effect. A model is established to calculate infrared radiation attenuated in the spray by coupling the radiation transfer equation and energy conservation equation. Taken the sprays as an absorbing, emitting, anisotropic scattering non-gray medium, the medium radiation, multiple scattering of the sprays, target radiation flux, and environment are taken into account. The radiative coefficients are calculated through Mie law and narrow bands approximation. The hemispherical spectral transmissivity is calculated with this model. By comparing with the Lambert-Beer's law, it was found that medium radiation, multiple scattering, and target radiation flux can weaken the spray shielding efficiency.

Key words: artificial spray; heat shielding; coupled heat transfer; infrared stealth; FVM
PACS: 42.25. Bs

引言

细水雾作为卤代烷的替代品在火灾安全中已有着广泛应用,其用于红外隐身目的的研究近年来也非常活跃.国内不少单位和学者对此进行了探索性研究,综合来看这些研究以实验为主,文献^[1-3]通过实验验证了水雾对热辐射的遮蔽效果;另一部分研究则采用朗伯比尔定律计算红外辐射对水雾的透射率,文献^[4-6]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;文献^[7]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;文献^[8]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,这些研究未就细水雾衰减红外辐射的过程进行深入计算,对换热过程的描述也只局限于辐射换热.

研究细水雾对红外大气窗口波段的衰减作用是一项复杂的计算.首先应该获取细水雾的尺度分布;其次由于不同波长下水雾粒子的消光系数不同,需将大气窗口波段采用窄谱带近似;再者水雾的整个换热过程涉及到目标热辐射的传递衰减、吸收性气

收稿日期:2011-10-14 修回日期:2012-11-26

Received date: 2011-10-14, revised date: 2012-11-26

基金项目:国防预研基金资助项目(1010502020202)

Foundation items: Supported by project of the National Defense Pre-Research Foundation of China (1010502020202)

作者简介(Biography): 杜永成(1985-),男,山东济南人,博士研究生,从事水雾热遮蔽技术的研究. E-mail: dyccyqq@126.com.

体和雾滴的热辐射与吸收、热传导、紊流扩散、热对流、雾滴蒸发等,这些换热现象在水雾的热遮蔽过程中都起着一定的作用^[9],因此研究各种现象的耦合作用是水雾热遮蔽理论计算的关键.本文以 Mie 散射与吸收理论为基础,将换热模型适当简化,采用有限体积法重点研究辐射与导热的耦合换热,对水雾衰减热辐射的过程进行了详细描述.

1 数理模型

水雾遮蔽系统如图 1 所示,首先对实际的换热过程做简化假设:设水雾形成矩形雾墙并分布均匀,雾滴和气体混合均匀,相互之间没有相对运动;热扩散过程只发生在 x 方向;忽略雾滴蒸发消耗的汽化潜热;忽略吸收性气体的辐射与吸收作用;认为水雾与空气的强迫对流换热热量很小而忽略.

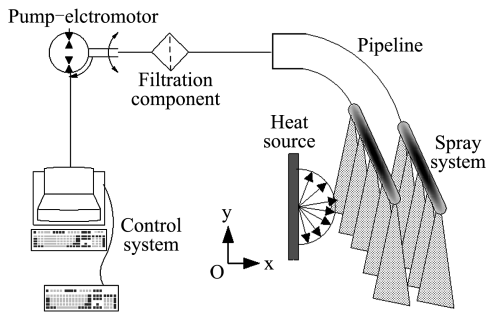


图 1 水雾遮蔽热辐射简图

Fig. 1 Shielding of heat radiation with sprays

热辐射在水雾中的衰减用辐射传输方程描述^[10]:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega})}{d's} = & -(\kappa_{a,\lambda} + \sigma_{s,\lambda})I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \\ & + \kappa_{a,\lambda} \left(\frac{\sigma T^4(\vec{r})}{\pi} \right) + \frac{\sigma_{s,\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I_{\lambda} \\ & (\vec{r}, \vec{\Omega}') \varphi_{\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega'. \quad (1) \end{aligned}$$

边界采用透明边界条件:

被隐身目标一侧:

$$I_{\lambda}(x=0, \cos\theta > 0) = I_{\lambda}(T_{wall}) + I_{\lambda}(T_0), \quad (2)$$

水雾的另一侧:

$$I_{\lambda}(x=L, \cos\theta < 0) = I_{\lambda}(T_0), \quad (3)$$

式(2)、(3)中 T_0 表示环境温度.

光谱透射采用半球透射率,可用下式表示:

$$T_{\lambda} = \frac{\int_{\cos\theta > 0} I_{\lambda}(x=L, \vec{\Omega}) \cos\theta d\Omega}{\int_{\cos\theta > 0} I_{\lambda}(x=0, \vec{\Omega}) \cos\theta d\Omega}. \quad (4)$$

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、热传导和紊流热扩散,则一维稳态、无内热源的能量守恒方程可表示为:

$$\frac{\partial q_r}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0, \quad (5)$$

式(5)中,第一项表示辐射热流密度散度,通过求解 RTE 计算;第二项表示热传导, $k(T)$ 为层流导热系数,表示为^[11] $k(T) = aT + b$, $a = 6 \times 10^{-5}$, $b = 8.9 \times 10^{-3}$;第三项表示紊流热扩散, k_t 为紊流导热系数,表示为^[12] $k_t = C_t \tau_t \langle v'^2 \rangle$, C_t 为 0.3, τ_t 为紊流特征时间 $\tau_t = L / \langle v' \rangle$, 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.

边界为自然对流换热边界条件:

被隐身目标一侧:

$$[k(T)_{x=0} + k_t] \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h(T_{x=0} - T_0), \quad (6)$$

水雾另一侧:

$$-[k(T)_{x=L} + k_t] \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h(T_{x=L} - T_0), \quad (7)$$

其中 h 对流换热系数.

2 数值求解及分析

2.1 非灰介质的处理

根据已有的雾滴负折射率将目标辐射进行谱带离散(如图 2(a)),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辐射力.采用 Mie 散射与吸收理论分别计算细水雾在各个谱带内的吸收截面和散射截面(如图 2(b)),再根据水雾浓度计算其吸收系数、散射系数和相函数:

$$\begin{cases} k_{d,\lambda} = N_d \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) Q_{abs} dr \\ \sigma_{s,\lambda} = N_d \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) Q_{scat} dr \\ \phi_{\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') = \frac{1}{\sigma_{s,\lambda}} \int_0^{\infty} \pi r^2 n(r) \phi(\chi, m) dr \end{cases}. \quad (8)$$

将各个谱带的辐射热流密度散度叠加计算总的辐射热流量:

$$\frac{\partial q_{x,\lambda}}{\partial x} = k_{x,\lambda} \left[\sum_{m=1}^{N_d} \omega_m I_{m,x,\lambda}^m - 4\pi n_{\lambda}^2 I_{b,x,\lambda} \right], \quad (9)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = \sum_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{\partial q_{x,\lambda}}{\partial x}. \quad (10)$$

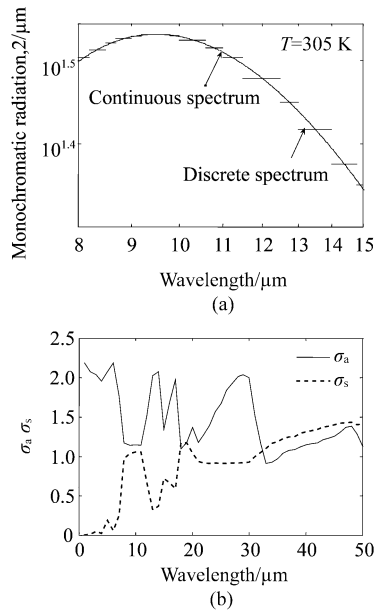


图2 (a)8~14 μm 的红外辐射的谱带模型图, (b)窄谱带内的平均光学参数

Fig. 2 (a) Continuum and narrow band models of Infrared radiation in 8 ~ 14 μm , (b) Average optic parameters in narrow bands

2.2 解算过程

求解过程按以下步骤进行:

(1) 求解过程采用有限体积法, 首先假设水雾的一种温度分布和某一谱带辐射强度分布, 通过数值迭代求出辐射热流密度散度, 再依次求出所有离散谱带的辐射热流密度散度并叠加求整个波段的辐射热流值;

(2) 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;

(3) 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;

(4) 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.

2.3 算法验证与计算分析

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 ~ 8.2 μm 谱带, 计算工况为目标 $T_{\text{wall}} = 350\text{ K}$, 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 2.5, 气液两相流的整体速度 2.4 m/s, 厚度 0.3 m, 对流换热

系数 $10\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, 温度为环境温度; 目标和环境的辐射黑度设为 0.9, 并视为灰体; 求解 RTE 和 ECE 时空间网格 30, 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文的耦合算法对比, 如图 3 所示.

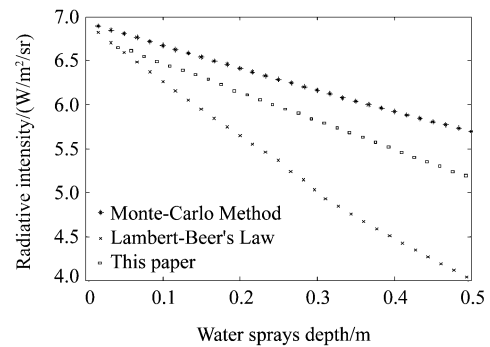


图3 三种方法所得辐射强度对比

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], 且时间耗费较多, 因此往往用作其它方法的验证对比; 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 可见本文计算结果与蒙特卡洛法的计算结果较为吻合, 证明本文算法是准确的; 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.

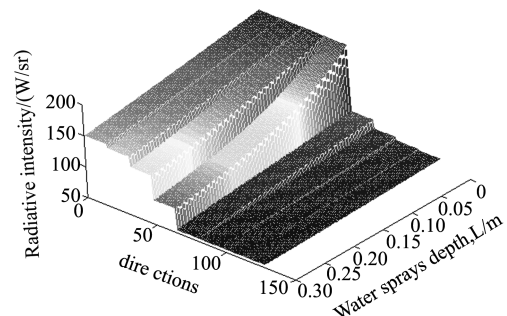


图4 水雾遮蔽下的辐射强度场

Fig. 4 Radiation intensity field with spray shielding

通过辐射传递方程与能量守恒方程的耦合计算得出了水雾的温度场. 在假定水雾与环境同温度前提下, 由于辐射热流、热传导和紊流热扩散的影响, 使得水雾的温度略高于环境温度. 由图 5 可见, 目标

温度为 350 K 时产生的热流密度值很小接近于 0, 其对水雾的温度场的影响也很小; 而随着目标温度的升高热流密度值增大, 对雾场的影响也变大; 在 1 700 K 时热流密度值最高达到了 26 kW/m^3 , 水雾最高温升为 1.16 K. 根据现代红外探测器的识别精度, 目标覆盖物与环境 1.16 K 的温差已足以被识别, 因此研究辐射与导热的耦合换热有着重要的实际意义.

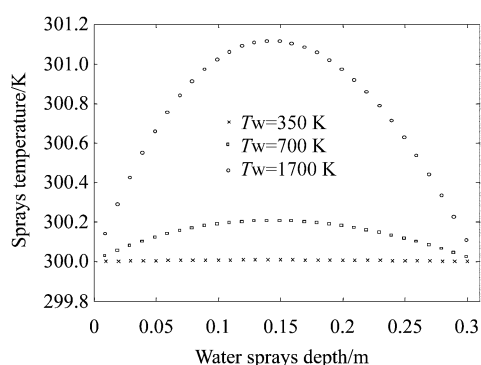


图 5 不同目标温度下热流密度散度随水雾厚度的变化

Fig.5 Heat flux density divergence as a function of spray with different target temperature

根据公式(4)定义的光谱半球透过率, 将本文算法与 Lambert-Beer 定律的计算结果作比较. 在水雾厚度为 0.3 m 时, 本文算法的所得结果随着温度的升高光谱透过率变大, 而 Lambert-Beer 定律的计算结果则基本不变. 分析原因, 主要是随着目标温度的升高, 目标辐射热流对水雾的温度场影响变大, 使得水雾温度升高, 从而水雾自身辐射作用增强.

当目标温度设为定值 350 K 而水雾厚度变化时, 两种方法的计算结果都显示随着水雾厚度的增大光谱透过率减小, 但本文算法的结果大于后者的结果. 由于散射作用是一种不完全的消光作用, 尤其是前向散射甚至可以作为有效的透射辐射, 因此有不少研究是专门针对该问题的. 文献[8]将基于多重散射的蒙特卡洛法与基于单次散射的单一平均粒径法和单散射法所得结果作比较, 显示了多重散射使得水雾的热遮蔽效率降低. 本文模型的计算不仅考虑了多重散射, 还考虑了水雾自身辐射和环境的影响, 更有实际意义.

3 结论

将辐射传递方程与能量守恒方程耦合计算, 将细小水雾视为非灰介质, 据此对水雾遮蔽热辐射进行

数学建模, 研究结论如下:

表 1 光谱半球透过率的比较

Table 1 Comparison of hemispherical spectral transmissivity

Water sprays depth: 0.3m			Target temperature: 350 K		
Temperature/K	Coupled method	Lambert-Beer	Depth/cm	Coupled method	Lambert-Beer
350	0.528 8	0.600 0	30	0.528 8	0.600 0
700	0.564 0	0.599 5	60	0.469 6	0.361 2
1 700	0.588 2	0.599 3	100	0.306 2	0.182 2

(1) 首先通过与蒙特卡洛法的计算比较, 证明本文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、环境影响以及不同波段之间消光系数包括散射系数和吸收系数的不同, 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, 当目标温度与环境温度相差不大时, 辐射热流对水雾的温度场影响不大; 但随着目标温度的升高水雾温度上升明显, 并足以影响其隐身效果; 而不考虑辐射与导热耦合换热时将不能反映该现象;

(3) 利用该模型计算光谱半球透过率, 发现辐射热流对水雾的增温作用、水雾的自身辐射和多重散射都影响着水雾的热遮蔽效果;

(4) 考虑有水雾蒸发、对流换热的能量守恒方程与 RTE 耦合计算将是下一步的研究.

REFERENCES

- [1] Hu Bi-ru, Wu Wen-jian, Dai Meng-yan, et. al. Study on property of infrared obscure of artificial fog[J]. *J. Infrared Millim. 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.
- [2] Chen Bing, Li Cheng-jun. Analysis and attenuation experiments of water vapor on infrared radiation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, (陈兵, 李澄俊. 水雾的红外衰减性能实验与分析. *光电工程*) 2008, **35**(3):48-52.
- [3] Lu Hui, Wang Xiang-wei, Lv Xu-liang, et. al. Analysis of thermal IR camouflage performance of water fog[J]. *Infrared Technology*, (卢辉, 王向伟, 吕绪良, 等. 水雾的热红外伪装性能分析. *红外技术*) 2009, **31**(11):645-648.
- [4] Zhao Zhen-wei, Wu Zhen-sen. Method for determining fog drop size distribution and fog attenuation at infrared wavelength [J]. *Journal of Xidian University*, (赵振维, 吴振森. 确定雾滴谱的方法和雾的红外辐射衰减特性. *西安电子科技大学学报*) 2002, **29**(2):253-256.
- [5] Hu Bi-ru, Wu Wen-jian, Dai Meng-yan, et. al. Study on micro - physical characteristic and electromagnetic obscure of (下转第 79 页)

phase information [D]. The University of Western Australia, 1996.

- [14] KOVESI P. Image features from phase congruency[J]. *Videre: A Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3): 1-26.

- [15] ZHANG H, FRITTS J, GOLDMAN S. An entropy-based objective evaluation method for image segmentation[C]. Proc. SPIE-Storage and Retrieval Methods and Applications for Multimedia, 2004.

(上接 39 页)

REFERENCES

- [1] LI Qi, CHI Xin, SHAN Ji-xin, et al. Terahertz Absorption characteristics of polytetrafluoroethylene [J]. *Chinese J. Laser*. (李琦, 迟欣, 单纪鑫, 等. 聚四氟乙烯材料的太赫兹特性. *中国激光*). 2008, 35(5): 756-759.
- [2] ZHANG Cun-Lin, Zhang Yan, Zhao Gao-Zhong, et al. *Terahertz sensing and imaging* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, (张存林, 张岩, 赵国忠, 等. *太赫兹感测与成像*. 北京: 国防出版社). 2008: 140-159.
- [3] LI Qi, CHI Xin, SHAN Ji-xin, et al. Controlling Software Design for THz Imaging System Based on Far-infrared Laser Source [J]. *LASER & INFRARED*. (李琦, 迟欣, 单纪鑫, 等. 基于远红外激光源的太赫兹透射成像系统设计. *激光与红外*). 2008, 38(9): 925-928.
- [4] GE Xin-Hao, LV Mo, ZHONG Hua, et al. Terahertz wave reflection imaging system based on backward wave oscillator and its application [J]. *J. Infrared. Millim. Waves*, (葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用. *红外与毫米波学报*). 2010, 29(1): 15-18.
- [5] LI Qi, XUE Kai, LI HUI-Yu, et al. Advances in research of terahertz radar cross section measurements. [J] *Laser &*

Optoelectronics Progress. (李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展. *激光与光电学进展*). 2012, (6): 5-12.

- [6] McGowan R W, Cheville A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory & Techn*, 2000, 48(3): 417-418.
- [7] YANG Yang, YAO Jian-Quan, SONG Yue-Kun, et al. The radar scattering cross section of different wave band for spherical targets. [J]. *LASER & INFRARED*. (杨洋, 姚建铨, 宋玉坤, 等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面. *激光与红外*). 2011, 41(5): 552-556.
- [8] YANG Yang, YAO Jian-Quan, TANG Shi-Xing, et al. The influence of the rough surface on radar target scattering cross section [J]. *LASER & INFRARED*. (杨洋, 姚建铨, 唐世星, 等. 粗糙表面对雷达目标散射截面的影响. *激光与红外*). 2011, 41(7): 800-803.
- [9] YANG Yang, WANG Xiao-Ou, CHENG Li-Xue. Experimental study of target scattering characteristic of lidar for 1.06 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*. (杨洋, 王晓鸥, 陈历学, 等. 1.06 激光雷达目标散射特性的实验研究. *红外与激光工程*). 2000, 29(3): 52-59.

(上接 43 页)

artificial fog [J]. *Infrared Technology*, (胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等. 人造雾的微生物特征与光电遮蔽性能研究. *红外技术*) 2005, 27(5): 367-370.

- [6] Xu Bo, Shi Jia-ming, Wang Jia-chun, et al. Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, (许波, 时家明, 汪家春, 等. 水雾遮蔽性能的计算与分析. *红外与激光工程*) 2005, 34(1): 38-41.
- [7] Cong Bei-hua, Cai Zhi-Gang, Chen Lv-Yi, et al. Simulated study of blocking flame radiant heat by water mist [J]. *China Safety Science Journal*, (丛北华, 蔡志刚, 陈吕义, 等. 细水雾阻隔火焰热辐射的模拟研究. *中国安全科学学报*) 2005, 15(12): 69-74.
- [8] Chen Zhong-wei, Liang Xin-gang, Zhang Ling-jiang, et al. Investigation of spray on temperature drop and infrared stealth of water surface object [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (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. *红外与毫米波学报*), 2010, 29(5): 342-346.
- [9] Berour N, Lacroix D, Boulet P, et al. Radiative and conductive heat transfer in a non-grey semitransparent medium

[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 2004, 86: 9-30.

- [10] Tan He-ping, Xia Xin-lin, Liu Lin-hua. *Numerical Calculation on Infrared Radiative Properties and Transfer-Calculating Thermal Radiation* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, (谈和平, 夏新林, 刘林华. *红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学*. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 2006.
- [11] Boulet P, Collin A, Parent G. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source [J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41: 15-30.
- [12] Rokni, M. Sunden B. Numerical investigation of turbulent forced convection in ducts with rectangular and trapezoidal cross-section area by using different turbulence models [J]. *Numerical Heat Transfer Part A*, 1996, 30: 321-346.
- [13] Li Li, Gao Zhi-yun, Wang Xia, et al. Effects of forward-scattering of fog on range-gated imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李丽, 高稚允, 王霞, 等. 雾的前向散射对距离选通成像系统的影响. *红外与激光工程*) 2004, 33(6): 562-566.