

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512004

细水雾遮蔽红外辐射的蒙特卡洛模拟及透射场分析

张硕¹, 浦金云¹, 李东臻², 吴昌明³

(1 海军工程大学 动力工程学院, 武汉 430033)

(2 海装武汉局, 武汉 430064)

(3 海军 92196 部队, 山东 青岛 266001)

摘要: 基于蒙特卡洛法, 对水雾遮蔽热辐射衰减建立了光子状态序列的追踪模型. 利用该模型对水雾粒子的多重散射进行模拟, 分析了影响水雾消光性能的消光系数、水雾浓度、不对称因子等参数, 发现不对称因子也是影响水雾隐身性能的重要参数. 研究表明: 对于消光系数相同的介质, 不对称因子越小越有利于衰减目标热辐射强度, 而采用朗伯比尔定律则不能获得此结论; 在雾粒子半径远大于红外波长的情况下, 提高水雾的浓度并减小粒子半径可有效提高水雾的衰减作用.

关键词: 红外辐射; 透射场; 细水雾; 蒙特卡洛法; 不对称因子; 模拟

中图分类号: TN211

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0512004-5

Monte-Carlo Simulation for the Infrared Radiation Attenuation by Water Fogs and the Analysis for Transmission Field

ZHANG Shuo¹, PU Jin-yun¹, LI Dong-zhen², WU Chang-ming³

(1 College of Power Engineering, Naval University Of Engineering, Wuhan 430033, China)

(2 Wuhan Military Deputy Bureau of Naval Armament Department, Wuhan 430064, China)

(3 92196 Troops of PLA Navy, Qingdao, Shandong 266001, China)

Abstract: A photon tracking model for heat radiation attenuation with water fogs was established based on the Monte-Carlo Method. The parameters of the water fogs such as extinction coefficient, concentration and the asymmetry parameter were analyzed, all of which had impact on the extinction character, and it was found that the asymmetry parameter was also an important one. The research indicates that for the medium with the same extinction coefficient, the lower the value of the asymmetry parameter is, the more exquisitely the water fogs can build down the heat radiation, however one can't get the conclusion based on the Lambert-Beer's law; when the radiuses of the water fogs are much bigger than the infrared wavelength, the attenuation effect can be enhanced by increasing the mass concentration of the water fogs and decreasing the radiuses of the particles.

Key words: Infrared radiation; Transmission field; Water fogs; Monte-Carlo method; Asymmetry; Simulation

OCIS Codes: 120.7000;130.3060;130.4310;350.5610;010.3310

0 引言

细水雾在灭火、冷却技术中有着广泛用途^[1-2], 在激光通信领域也有大量研究^[3], 在舰船红外隐身领域因其对热辐射的吸收与散射作用而不断受到重视. 热辐射在水雾中的传输衰减计算一般都采用朗伯定律 (Lambert-Beer, LB), 对于光学厚度较小或远距离的

透射场该方法比较精确. 但由于 LB 是基于粒子单次散射的, 光学厚度大或测量点在透射辐射的近场时, 粒子间多重散射的影响非常显著, 此时应用 LB 将带来误差. 许波等^[4]采用 LB 模型计算了水雾的遮蔽性能; 陈中伟等^[5]进行了实验研究, 验证了雾状水幕对红外成像隐身的对抗效果; 杜永成等^[6]同样利用该模型分析了取得最佳消光作用的水雾粒子半径分布. 但这些

基金项目: 国防预研“十二五”预研基金 (No. 4010404010103) 资助

第一作者: 张硕 (1987-), 博士研究生, 主要研究方向为舰艇细水雾应用. Email: haitun44123@126.com

导师: 浦金云 (1961-), 教授, 博导, 主要研究方向为舰艇火灾及消防工程.

收稿日期: 2013-09-04; 录用日期: 2013-11-19

<http://www.photon.ac.cn>

研究多是基于雾粒子的单次散射,未充分考虑由多重散射带来的影响. A. Collin, P. Boulet 等^[7]学者采用离散坐标法对水雾衰减热辐射进行了计算; J. M. Buchlin^[8]研究了水平水雾和垂直水雾的红外衰减效果; S. Lechène^[9]分析了上喷/下喷水雾对红外遮蔽效果的影响. 这些成果对水雾遮蔽热辐射的研究具有重要的指导与参考意义. 但目前的研究多集中在消光系数以及水雾布置方面, 对水雾粒子的不对称因子和单次反照率研究不多.

蒙特卡洛法 (Monte Carlo Method, MCM) 是一种概率统计算法, 在辐射传输方程的数值解中已有广泛应用, P. Boulet 等^[10]采用 MCM 对水雾遮蔽热辐射进行了建模计算, 使得在考虑水雾多重散射的情况下计算变得简单. 本文利用 MCM 在考虑多重散射的基础上研究了不对称因子和单次反照率对细水雾消光的影响, 分析了热辐射强度对细水雾透射场的变化规律.

1 透射场模型

水雾对热辐射的衰减依靠单个粒子的散射与吸收作用. 当水雾介质密度增大时, 粒子间多重散射增强, 经过多次散射的光子会对透射场产生影响, 如图 1 所示. D 点经散射后逸出了探测器的视场, E 点被直接吸收, 热辐射的这两种衰减方式可通过 LB 体现; A_1 点经 B, C 两次散射后依然进入探测器, 形成了对 A_1 辐射强度的增加; A_2 点经一次散射后, 由于发生前向散射, 也被探测器捕捉, 形成有效透射, 而这两种方式则不能通过 LB 体现.

对于透射远场, 在特定方向上由于辐射体与探测器形成的视场角 $\Theta \rightarrow 0$, 多重散射及前向散射的影响可忽略不计. 由以上分析可见, 水雾介质的多重散射及粒子的前向散射会对透射近场产生影响, 计算中需要考虑.

根据图 1, 将透射率 T_r 定义为探测器镜头接收到的直接透射到光子数 (N_{tr}) 与散射光子数 (N_s) 之和与目标发射的光子数 (N_e) 之比为

$$T_r = \frac{N_{tr} + N_s}{N_e} \quad (1)$$

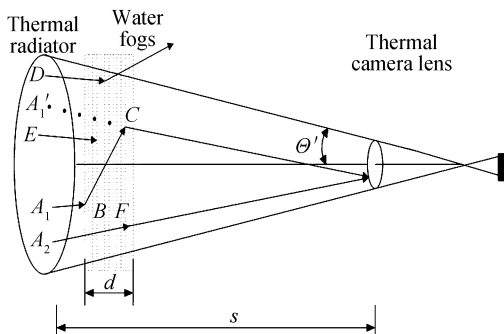


图 1 探测透射辐射示意图

Fig. 1 Diagram for detection of transmission radiation

2 蒙特卡洛光子追踪模型

MCM 模型将辐射输运方程转为概率模型, 将热辐射抽象成大量独立光子, 通过一系列随机数 ξ 追踪其轨迹, 以此来描述传输介质对辐射的影响^[11-14].

光子在介质内的随机步长为

$$l = \frac{-\ln(1-\xi_1)}{k_{ext}} \quad (2)$$

式中, k_{ext} 为消光系数. 光子散射方向的散射角和方位角可表示为

$$\begin{cases} \cos\theta = \frac{1}{2g} [1 + g^2 - (\frac{1-g^2}{2g\xi_2 + 1-g})^2] \\ \varphi = 2\pi\xi_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 g 为不对称因子. 当光子入射到粒子时, 决定是否发生散射的概率用随机数与反照率 a 的关系为

$$\begin{cases} \text{random}(\xi_4) > a, \text{发生吸收事件} \\ \text{random}(\xi_4) < a, \text{发生散射事件} \end{cases} \quad (4)$$

光子由位置 n 散射到 $n+1$, 可通过建立过渡坐标系, 采用几何坐标变换法可将新的散射方向余弦转变到绝对坐标系中, 则光子在每个位置的坐标可表示为^[15]

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + LU_{n+1} \\ y_{n+1} = y_n + LV_{n+1} \\ z_{n+1} = z_n + LW_{n+1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, U, V, W 的物理意义分别为散射光子在绝对坐标系中 x, y, z 坐标轴的方向余弦, 即

$$\begin{cases} U_{n+1} = \frac{\sin\theta_n}{\sqrt{1-W_n^2}} (U_n W_n \cos\varphi_n - V_n \sin\varphi_n) + U_n \cos\theta_n \\ V_{n+1} = \frac{\sin\theta_n}{\sqrt{1-W_n^2}} (V_n W_n \cos\varphi_n + U_n \sin\varphi_n) + V_n \cos\theta_n \\ W_{n+1} = -\sin\theta_n \cos\varphi_n \sqrt{1-W_n^2} + W_n \cos\theta_n \end{cases} \quad (6)$$

对于平行于 z 轴入射的光子, 若光子发生散射前平行于 z 轴运动, 则上面坐标转换公式须替换为

$$\begin{cases} U(n+1) = \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ V(n+1) = \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ W(n+1) = \text{sign}(W(n)) \cos(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

光子接收器的空间坐标为

$$x'^2 + y'^2 \leq r_d^2, z = z' \quad (8)$$

式中 r_d 为探测器入射孔径; 由光子的出射点及相对于绝对坐标系的方向余弦可得到空间直线为

$$\frac{x - x_{k,p,i}}{U_i} = \frac{y - y_{k,p,i}}{V_i} = \frac{z - z_{k,p,i}}{W_i} \quad (9)$$

式中 z 为已知值, 则可得到 x', y' 值. 若 x', y' 值落入接收器的坐标区域内则认为有效.

3 计算分析

设定入射波长为 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, 水雾粒子均匀分布.

为保证 MCM 的稳定性,每次试验 10^7 个光子.通过改变粒子半径来获取不同的粒子尺度参数并计算每种粒径下不对称因子 g ,消光因子 Q_{ext} ,单次反照率 a ;体积分数 $C_v = 4N\pi r^3/3$,衰减系数 $k_{\text{ext}} = N\sigma_{\text{ext}} = NQ_{\text{ext}}\pi r^2$,通过记录光子的历史坐标(如图 2)分析热辐射的透射规律.

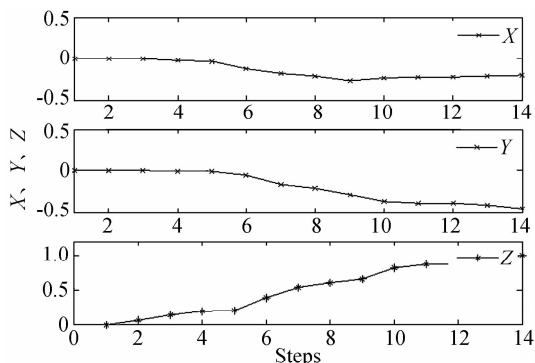


图 2 单个光子的历史坐标

Fig. 2 The historical coordinates of a single photon

3.1 MCM 与 LB 在透射远场的比较

透射辐射的远场基本不受多重散射及粒子近前向散射的影响,因此 MCM 与 LB 应具有相同的结果.取粒子半径为 $r = 5\mu\text{m}$ 和 $r = 30\mu\text{m}$,体积分数 $C_v = 1 \times 10^{-5}$,对比计算如图 3 所示.两种方法对透射率的计算结果基本相同,说明本文建立的 MCM 模型及所编制的程序是准确可靠的.

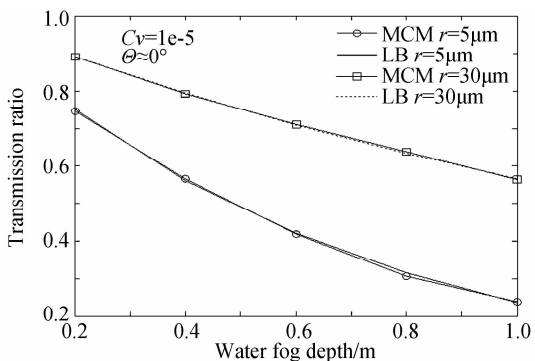


图 3 MCM 与 LB 透射率计算的一致性

Fig. 3 The T_r coherence between MCM and LB

3.2 MCM 与 LB 在透射近场的比较

在透射辐射的近场,由于辐射体与探测器距离较近,两者形成的视场角较大.在多重散射的作用下,发生散射的光子亦可能进入探测器光学镜头的视场范围,从而引起另外一个辐射点强度的增加.但在按 LB 方法计算时,这个光子被认为衰减掉,这样的计算结果就与实际测量产生了误差,与按多重散射的计算结果不一致,如图 4.

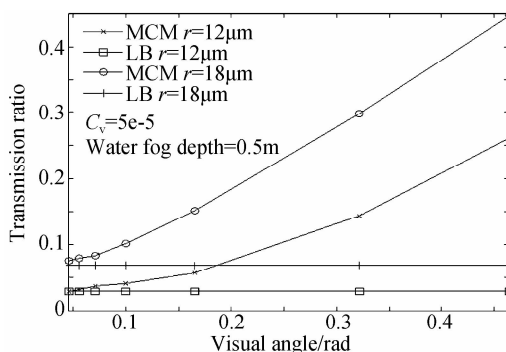


图 4 热辐射透射近场 MCM 与 LB 的计算差异

Fig. 4 The difference between MCM and LB for heat radiation transmission in near field

图 4 的计算条件为水雾体积分数 $C_v = 5 \times 10^{-5}$,水雾厚度为 0.5 m,水雾粒子半径分别取为 $12\mu\text{m}$ 和 $18\mu\text{m}$.通过比较可见,随着探测点与辐射体所成视场角的逐渐增大,MCM 计算的透射率相对于 LB 的结果差值逐渐变大;按 MCM 计算的透过率要大于按 LB 计算的结果;当视场角弧度值 $\theta < 0.05$ 时,两者基本相同,说明在上述条件下,只有当视场角 $\theta < 0.05$ 时透过率可按 LB 计算.

3.3 不对称因子和单次反照率对透射近场的影响

采用 LB 计算的水雾透射率取决于消光截面 σ_{ext} ,粒径分布 $n(r)$,体积分数 C_v 和水雾厚度 d ;而采用 MCM 仿真时透射率则还同时受不对称因子 g 和单次反照率 a 等参数的影响.将计算条件设定为:消光系数和光学厚度不变,恒取为 $k_{\text{ext}} = 3.2289, d = 0.5\text{ m}$,探测距离 $s = 3\text{ m}$.由于粒子半径不同,使得粒子对 $10.6\mu\text{m}$ 波长的消光因子 Q_{ext} 、不对称因子 g 和单次反照率 a 等参数不同.通过改变介质的体积分数 C_v ,使得不同粒径下消光系数相同.基于以上条件计算得到了 MCM 与 LB 的对比曲线,如图 5.

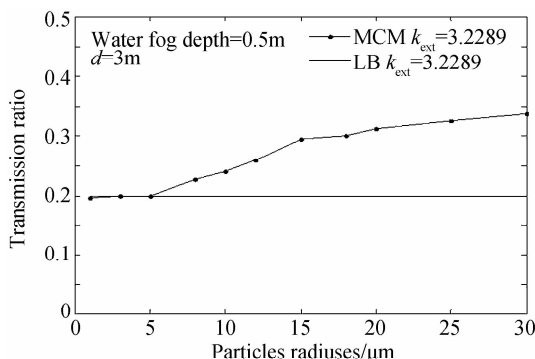


图 5 水雾消光系数、光学厚度为定值时透射率随粒径变化

Fig. 5 The transmission as a function of particles radiuses with constant extinction efficiency and optics depth

在消光系数相同的条件下, LB 对任何粒径计算的结果相同; 而 MCM 则在不同粒径下透过率不同, 基本呈现透过率随着粒径增大而增大的趋势. 由于 MCM 的随机步长 l 取决于水雾的消光系数 k_{ext} , 故不同粒径下 l 遵循相同的控制条件, 这样影响 MCM 对不同粒径产生不同透过率的因素只有粒子的不对称因子 g 和单次反照率 a .

由 Mie 理论计算可知, 对特定波长, g 和 a 近似与粒子半径成正相关的关系. 图 5 中 MCM 的计算结果显示透过率基本与粒子半径成正相关的关系, 可见在水雾消光系数一定的条件下, 如要获得对热辐射更好的衰减效果, 需选择对特定波长有更小 g 和 a 的粒子半径. 从 Mie 理论的角度分析, 当 g 趋于 0 时, 散射均匀分布在 4π 空间, 多重散射对透射方向的贡献将趋于 0; 而粒子的吸收是一种完全的消光作用, 吸收作用占优(即散射作用变弱), 则多重散射对透射率的贡献亦变小.

3.4 最佳消光半径

k_{ext} 取决于消光截面 σ_{ext} 、粒径分布 $n(r)$ 和体积浓度 C_v , 在 r 远大于 λ 时, 由于 Q_{ext} 近似为恒定值 2, 所以 σ_{ext} 可写为: $\sigma_{\text{ext}} = 2\pi r^2$. 一般喷雾技术制成的水雾粒径都较大, 由此可认为 k_{ext} 与粒子的光学性质无关, 只与水雾自身几何特性相关; 若粒径均匀, 则数密度 $N = 3C_v / (4\pi r^3)$, 可得 $k_{\text{ext}} = 3C_v / (2r)$. 因此为提高 k_{ext} , 我们要做的是提高水雾的体积浓度 C_v , 减小雾滴均值粒径 r , 使水雾尽量细密.

而当粒径 r 趋于 λ 时, 由于 g 和 a 变化的斜率增大, 透过率需另加分析. 如图 6 所示, 在不同水雾体积浓度下, 对 $10.6\mu\text{m}$ 波长产生最佳消光效果的粒子半径为 $r = 7\mu\text{m}$ 左右, 这是在 g 、 a 和 Q_{ext} 综合作用的结果.

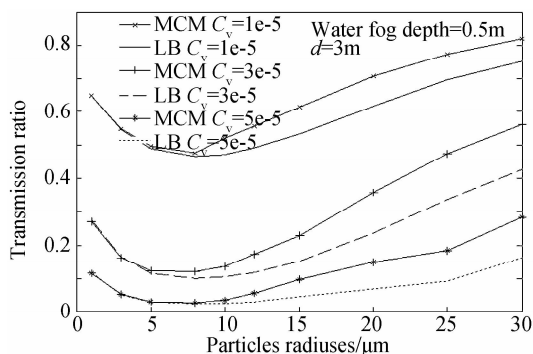


图 6 水雾 C_v 为定值时的最佳消光半径

Fig. 6 The optimal extinction radius with invariable C_v of the water fogs

4 结论

研究表明, 在高浓度的介质中由于多重散射和粒子前向散射的作用, 细水雾的消光作用被弱化; 在消光

系数和光学厚度为定值的情况下, 对特定热辐射波长具有较小不对称因子 g 和单次反照率 a 小的细水雾可加剧对热辐射的衰减作用; 当水雾体积分数确定, r 远大于 λ 的情况下, 可通过减小雾滴半径来提高消光系数 k_{ext} , 以增大衰减作用; 而当 r 趋近于 λ 时, 则有一个最佳的消光半径, 对于 $10.6\mu\text{m}$ 辐射波长, 最佳消光粒径约为 $7\mu\text{m}$.

参考文献

- [1] WANG Ya-qing, LIU Ming-hou, LIU Dong, *et al.* Effect of test surface temperature on the non-boiling heat transfer performance in spray cooling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(1):115-120.
王亚青, 刘明侯, 刘东, 等. 喷雾冷却中散热面温度对无沸腾区换热特性的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1):115-120.
- [2] XIN Hui, ZHOU Zhi-fu, WANG Guo-xiang, *et al.* Evaporation characteristics of single R404a droplet in laser treatment of PWS in conjunction with cryogen spray cooling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(10):2691-2695.
辛慧, 周致富, 王国祥, 等. 激光手术喷雾冷却中 R404a 液滴的蒸发特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10):2691-2695.
- [3] GUO Jing, ZHANG He, WANG Xiao-feng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532nm and 1064nm through rain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1):1-7.
郭靖, 张合, 王晓峰. 降雨对 532nm 和 1064nm 激光传输的衰减特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1):1-7.
- [4] 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*, 2005, **34**(1), 38-41.
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.
- [5] 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]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, **29**(5):342-346.
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.
- [6] DU Yong-cheng, YANG Li. Study on optimal extinction radius of water fog particles based on phase function and extinction factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8):2459-2463.
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.
- [7] COLLIN A, OULET P, LACROIX D. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005(**92**): 85-110.
- [8] MARIE B. Thermal Shielding by Water Spray Curtain [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005 (**18**):423-432.
- [9] LECHENE S, ACEM Z, PARENT G. Upward vs downward injection of droplets for the optimization of a radiative shield [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, (**54**): 1689-1697.
- [10] BOULET P, COLLIN A, PARENT G, *et al.* Monte Carlo simulation of radiation shielding by water curtains [C]. *Computational Thermal Radiation in Participating Media II*, 2006: 5-15.
- [11] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算- 计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [12] LEI Cheng-xin, ZHANG Hua-fu, LIU Han-fa. Study of

- extinction characteristics of solar radiation by soot aerosols [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, **30**(12):3373-3377.
类成新,张化福,刘汉法. 烟煤气溶胶粒子对太阳辐射的消光特性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(12):3373-3377.
- [13] ZHAO Guo-yan, CHANG Hai-ping, JIN Feng, *et al.* The determination of radiation spectrum based on monte-carlo method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, **30**(3):471-474.
赵国艳,常海萍,金峰,等. 基于蒙特卡洛方法的辐射光谱的计算[J]. 工程热物理学报, 2009, **30**(3):471-474.
- [14] MA Chang-qun, TANG Zhen-fang, ZHANG Jie, *et al.* Monte carlo simulation of light multiple scattering in polymers [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2007, **24**(4):457-462.
马常群,唐振方,张杰,等. 聚合物中多重散射传导的 Monte Carlo 数值模拟[J]. 计算物理, 2007, **24**(4): 457-462.
- [15] MARIANA I, JEAN-CHISTOPHE K, SIMONE M, *et al.* Laser beam scattering effects in non-absorbent inhomogeneous polymers [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007(**45**):405-412.