

多分散细水雾遮蔽热辐射的高效计算方法

杜永成, 杨立, 谢志辉, 孙丰瑞

(海军工程大学船舶与动力学院热工教研室, 湖北武汉 430033)

摘要:建立了多分散细水雾 $0.8 \sim 20 \mu\text{m}$ 辐射特性参数数据库和谱带-灰体模型,并提出了采用数据库调用获取辐射特性参数、采用谱带-灰体模型处理细水雾非灰特性相结合的方法.通过将该方法计算的无量纲辐射热流与采用Mie理论和窄谱带模型计算的结果作对比,证明该方法准确可靠.通过精度分析和效率分析,证明所提方法既可保证精度在可接受的水平,又能使计算时间大幅缩减.

关键词:多分散细水雾;热遮蔽;辐射特性参数;谱带-灰体模型;数据库

中图分类号:TN216 文献标识码:A

Calculation of radiative heat shielding with polydisperse water sprays

DU Yong-Cheng, YANG Li, XIE Zhi-Hui, SUN Feng-Rui

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: A database of radiative properties of sprays covering the wavelength range of $0.8 \sim 20 \mu\text{m}$ and droplets radius range of $1 \sim 300 \mu\text{m}$ was constructed. A method of combining database calls for radiative properties acquisition and spectral bands-grey assumption model for processing the non-grey characteristics of sprays was proposed. The result for dimensionless radiative heat flux calculated with the method was compared with the results obtained by this method and got by Mie theory and spectral bands model with Monte Carlo method. It was found that the method of database calls combined with spectral bands-grey assumption model can not only guarantee the calculation accuracy at an acceptable level, but also reduce the CPU time significantly.

Key words: fine water sprays, radiative heat shielding, radiative properties, spectral bands-grey assumption model, database

PACS: 02.60.Cb, 44.40.+a

引言

《蒙特利尔协议》对哈龙灭火器的禁用催生了一系列新型灭火技术,其中细水雾技术因灭火效率高、绿色环保而得到广泛应用,国内外学者均对此开展了大量研究^[1].将细水雾当作一种屏障,依靠大量细小雾滴的散射与吸收作用来遮蔽衰减火焰、高温坚壁等的热辐射,用来保护工业设施和人体免遭伤害,已成为一种有效的安全防护手段^[2].近年来以法国 LEMTA 实验室为代表的研究团队对该问题进行了深入研究^[3-4].由于热辐射在细水雾中的传输涉及到辐射特性非灰、雾滴粒径非均一及多重散射等问题,精确的计算该过程往往比较费时,而与导热、对流、蒸发等传热传质过程相耦合时更是制约着

计算效率.

在可接受的精度范围内简化该过程一直是国内外研究的热点和重点.文献[5-6]采用索特均粒径将多分散细水雾等效成单分散系计算平均辐射特性参数;Viskanta 和 Godoy^[7-8]则各自采用光学参数比例缩放的方法使计算效率提高;Chylek 等^[9]采用了多项式近似法计算 Mie 系数;YU H. T. 等^[10]采用了几何光学近似的方法计算辐射特性参数;而文献[11]则对各向异性散射相函数进行近似处理,将前向散射视为有效透射辐射而将其它方向视为各向同性散射,从而简化了对内散射的计算.以上近似方法都或多或少存在误差,有时是工程计算中不希望出现的^[5-8].Shigenao 建立了辐射特性参数数据库(Radiative Parameters Database,

收稿日期:2013-05-27,修回日期:2014-06-04

Received date: 2013-05-27, revised date: 2014-06-04

基金项目:海军工程大学博士创新基金(HGBSJJ2013003);海军工程大学知识产权专项基金(HGDSK2013G66)

Foundation items: Supported by Doctor Innovation Fund of Naval University of Engineering(HGBSJJ2013003), IPR Special Fund(HGDSK2013G66)

作者简介(Biography):杜永成(1985-)男,山东济南人,博士研究生,主要从事目标红外辐射特性与抑制方面的研究. E-mail: dyceyqq@126.com

RPD)^[12],采用 RPD 调用的方法代替 Mie 计算获取辐射特性参数.该方法对于谱带模型是完全准确的,对于光谱模型也可以通过提高 RPD 的波长、粒径分辨率来提高精度.

对于细水雾的光谱辐射特性,Keramida 等^[2,13-14]在计算中采用了灰体假设模型,虽然计算效率大幅提高,但 Consalvi 等^[13]证明该方法在光学厚度较大时的计算误差是无法接受的;Consalvi 提出的多波段灰体模型使得精度提高,但在水雾浓度 0.1 kg/m³、粒径 20 μm 时仍有 21.1% 误差.谱带模型是目前广泛采用的处理方法,在窄谱带近似的基础上可以取得与光谱模型非常接近的精度^[1,3,4];但谱带模型依然非常耗时,不适于大型 CFD 应用^[8].

本文的研究目的是建立红外波段 0.8 ~ 20 μm 在雾滴粒径谱 1 ~ 300 μm 的 RPD (由于 Mie 计算采用的是粒子半径,所以文中粒径指的是雾滴半径),使解 RTE 时省却反复的 Mie 计算过程;通过分析多分散细水雾热辐射衰减系数的非灰特性及特定波段的近似灰体特性,建立一种谱带模型与灰体模型相结合的辐射传输计算模型.

1 数学模型

假设细水雾为均匀分布、具有一定厚度和高度且横向无限扩展的矩形雾状幕(即只考虑热辐射在二维平面内的传输);忽略吸收性气体(H₂O、CO₂)对热辐射传输的影响;考虑雾滴吸收、各向异性散射、自身辐射以及内散射,则细水雾遮蔽热辐射的原理可用二维的辐射传递方程表示^[15]:

$$\frac{dI_{\lambda}(\vec{L},\vec{\Omega})}{ds} = -(k_{\text{abs},\lambda} + k_{\text{sca},\lambda})I_{\lambda}(\vec{L},\vec{\Omega}) + k_{\text{abs},\lambda}I_{b,\lambda} + \frac{k_{\text{sca},\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I_{\lambda}(\vec{L},\vec{\Omega}')\phi_{\lambda}(\vec{\Omega},\vec{\Omega}')d\Omega' \quad (1)$$

边界为透明条件,高温辐射源一侧的温度为 1 300 K,其余边界为冷边界 0 K;细水雾为边长 1 m 的矩形区域,如图 1 所示.

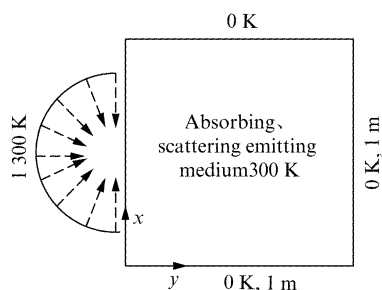


图 1 物理模型及坐标
Fig. 1 Physical model and coordinates

1.1 辐射特性参数数据库

式(1)中,细水雾的辐射特性参数主要包括三种光学系数 k_i (其中下标 i 代表消光“ext”、散射“sca”和吸收“abs”)和散射相函数 $\phi_{\lambda}(\vec{\Omega},\vec{\Omega}')$, k_i 是单位体积内所有雾滴光学截面 σ_i 的宏观表现,而 σ_i 是单个雾滴效率因子 Q_i 与投影面积的乘积, Q_i 、 σ_i 和 k_i 分别如式(2) ~ (4)所示:

$$\begin{cases} Q_{\text{ext}}(r,\lambda) = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \\ Q_{\text{sca}}(r,\lambda) = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [|a_n|^2 + |b_n|^2] \\ Q_{\text{abs}}(r,\lambda) = Q_{\text{ext}}(r,\lambda) - Q_{\text{sca}}(r,\lambda) \end{cases}, (2)$$

$$\sigma_i(r,\lambda) = \pi r^2 Q_i(r,\lambda) \quad , (3)$$

$$k_i(\lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} N_d \sigma_i(r,\lambda) n(r) dr \quad , (4)$$

式(2) ~ (4)中, a_n 、 b_n 为 Mie 系数,可由 Mie 氏理论计算^[1,15]; χ 为尺度参数,表示为 $\chi = 2\pi r/\lambda$, r 为雾滴半径; N_d 表示体积分数为 f_v 的水产生的雾滴数,即:

$$N_d = f_v / \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi r^3 n(r) dr \quad , (5)$$

式(5)中, $n(r)$ 为多分散细水雾的粒径谱分布函数.喷嘴雾化产生的雾滴因供水压力和喷嘴口径不同,粒径范围大致可在 1 ~ 300 μm,则采用对数正态分布函数描述的细水雾粒径谱为

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}rS} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2S^2}\right) \quad , (6)$$

其中, r_0 表示水雾几何平均粒径; S 表示水雾粒径对数标准偏差.粒径谱的最小值取为 1 μm,而最大值为由置信区间为 0.97 确定,即:

$$r_{\min} = 1, \quad r_{\max} = r_0 (\exp(S))^2 \quad . (7)$$

散射相函数采用基于不对称因子 g 的 H-G 相函数描述:

$$\phi_{\lambda}(\vec{\Omega}',\vec{\Omega}) \approx (1 - g^2) / [1 + g^2 - 2g \cos(\langle \vec{\Omega}',\vec{\Omega} \rangle)]^{\frac{3}{2}} \quad , (8)$$

$$\begin{aligned} \cos(\langle \vec{\Omega}',\vec{\Omega} \rangle) &= \cos(\theta') \cos(\theta) + \\ &(1 - \cos^2(\theta))^{\frac{1}{2}} (1 - \cos^2(\theta'))^{\frac{1}{2}} \cos(\varphi - \varphi') \end{aligned} \quad , (9)$$

其中, θ' 和 φ' 分别表示入射方向的天顶角和方位角, θ 和 φ 分别表示散射方向的天顶角和方位角.

用 Mie 理论计算式(4)和式(8)中红外辐射波长范围 0.8 ~ 20 μm 在半径范围 1 ~ 300 μm 雾滴的散射截面、吸收截面和不对称因子,粒径分辨率为 0.5 μm,波长根据文献[16]划分为 110 个谱带,并存储为数据库 $D_{\sigma_i}(\lambda, r)$ 和 $D_g(\lambda, r)$,如图 2 所示,以

供调用. 为避免大量重复进行 Mie 计算, 式(4)和式(8)中 σ_i 和 g 采用 RPD 调用的方法获得, 即

$$\sigma_i(\lambda, r) = D_{\sigma_i}(\lambda, r) \quad , \quad (10)$$

$$g(\lambda, r) = D_g(\lambda, r) \quad . \quad (11)$$

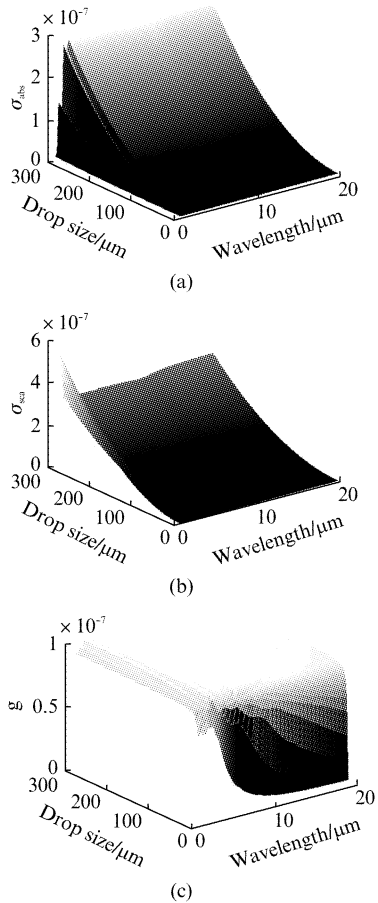


图2 细水雾辐射特性参数数据库(a)吸收截面, (b)散射截面, (c)不对称因子
Fig. 2 The radiative parameter database of fine sprays (a) absorption cross section, (b) scattering cross section, and (c) asymmetry

1.2 谱带-灰体模型

计算水雾体积分数 f_v 为 1×10^{-4} , S 为 0.55, r_0 分别为 10, 30, 50 和 100 μm 的细水雾光学系数值, 如图 3 所示. 由图 3 可知, 散射系数和吸收系数的光谱依赖性随着波长的增大而降低, 0.8 ~ 2.7 μm 散射系数和吸收系数的变化最剧烈, 2.7 ~ 5.9 μm 次之, 而 5.9 ~ 20 μm 变化幅度最小. 所谓谱带-灰体模型 (Spectral Bands-Grey Assumption Model, SGM), 即在辐射特性参数变化剧烈的波段内采用谱带模型 (Spectral Bands Model, SBM), 而在变化较小的波段内采用灰体假设模型 (Grey Assumption Model, GAM). 将 0.8 ~ 2.7 μm 波段的辐射传输计算采用 SBM, 而

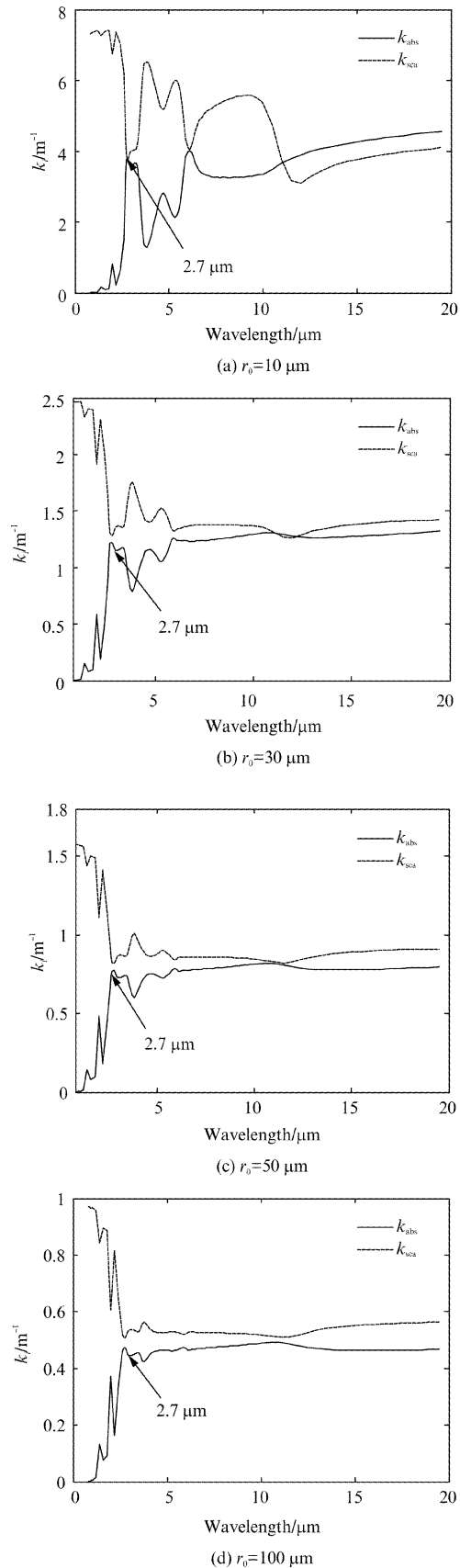


图3 四种均值粒径下细水雾的光学系数随波长的变化
Fig. 3 Optical coefficients as a function of wavelength for four average radiuses

2.7 ~ 20 μm 波段采用 GAM, 则式(1)在 SGM 中可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega})}{d\vec{s}} = -k_{\text{ext}, \lambda} I_{\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega}) + k_{\text{abs}, \lambda} I_{b, \lambda} + \\ \frac{k_{\text{sca}, \lambda}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I_{\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega}') \phi_{\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad \lambda < 2.7 \\ \frac{dI_{\Delta\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega})}{d\vec{s}} = -\bar{k}_{\text{ext}, \Delta\lambda} I_{\Delta\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega}) + \bar{k}_{\text{abs}, \Delta\lambda} I_{b, \Delta\lambda} + \\ \frac{\bar{k}_{\text{sca}, \Delta\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I_{\Delta\lambda}(\vec{L}, \vec{\Omega}') \bar{\phi}_{\Delta\lambda}(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad \lambda \geq 2.7 \end{array} \right. \quad (12)$$

在采用 GAM 的波段内, 辐射特性参数采用 Planck 平均法计算平均值:

$$\bar{R} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_b(T_{\text{medium}}, \lambda) R(\lambda, r) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_b(T_{\text{medium}}, \lambda) d\lambda}, \quad (13)$$

式中, R 表示辐射特性参数和散射相函数。

根据辐射特性参数的获取方法与雾滴非灰辐射的处理模式, 建立 5 种对比模型, 如表 1 所示。

表 1 五种对比模型

Table 1 Comparison of five models

Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Mie + SBM	RPD + SBM	Mie + GAM	RPD + GAM	RPD + SGM

将在窄谱带模型下采用蒙特卡罗法 (Monte Carlo Method, MCM) 和 Mie 理论计算的无量纲辐射热流 q_0^* 作为准确值, 定义模型 1 ~ 5 计算结果的相对误差为:

$$\varepsilon = \frac{|q_0^* - q_m^*|}{q_0^*}, \quad (14)$$

其中, q_m^* 为模型 1 ~ 5 计算的无量纲辐射热流。

2 计算与分析

采用有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 对式(1)求数值解, 空间网格为 15×15 , 方向网格为 10×20 ; 采用高斯-赛德尔法迭代计算, 收敛条件为: $\max(|I_p^i - I_p^{\text{old}}|/I_p^i) \leq 10^{-6}$; 在 Matlab 上编程计算, 运行机器为 Intel(R) Core(TM)2 T6575 CPU, 主频 2.1 GHz。

2.1 模型验证

利用所建模型 1 ~ 5 计算细水雾区域 $y=1$ 的无量纲热流 (图 1 所示), 并与 MCM 采用窄谱带模型和 Mie 理论所得计算结果作对比, 如图 4(a)、(b) 所示。Model 1 与 Model 2 都采用了谱带模型, 两者的结果完全重合, 并且与 MCM 的计算结果基本重合; 而 Model 3 与 Model 4 都是采用了灰体模型, 两者的

结果也是完全相同, 但与 MCM 参考值有较大差异; Model 5 采用了 SGM, 与参考值差异很小, 这说明本文所建模型及所编写的计算程序是准确可靠的。图 4(a)、(b) 同时说明 RPD 调用与 Mie 理论计算所得结果的精度是相同的, 即 Model 1 和 Model 2 精度相同, 而 Model 3 和 Model 4 精度相同。

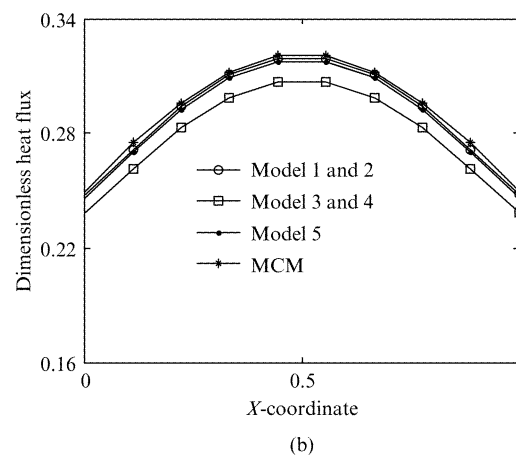
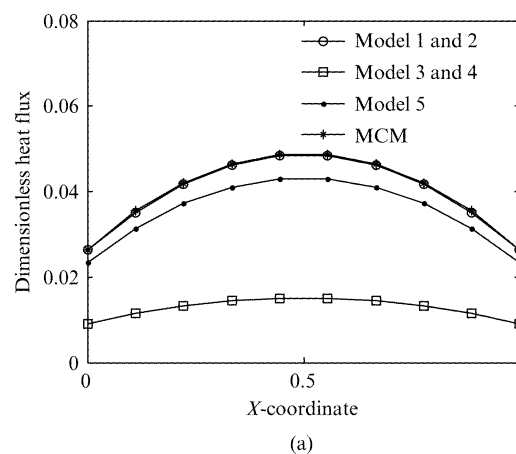


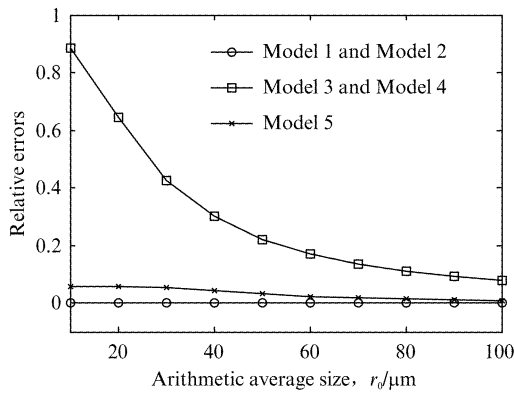
图 4 模型验证 (a) $r_0 = 10 \mu\text{m}$ (b) $r_0 = 100 \mu\text{m}$

Fig. 4 Model validation (a) $r_0 = 10 \mu\text{m}$ (b) $r_0 = 100 \mu\text{m}$

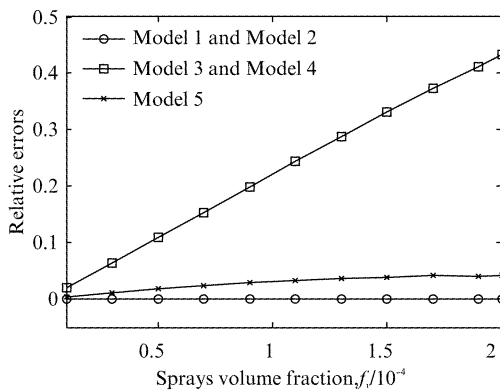
2.2 精度与效率分析

根据式(14)计算 5 种模型的相对误差, 如图 5 所示。图 5(a) 的计算条件为水雾体积分数为定值 1×10^{-4} , 几何均值半径为自变量, 范围为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$; 图 5(b) 的计算条件为雾滴几何均值半径设为定值 $50 \mu\text{m}$, 水雾体积分数为自变量, 范围为 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$; 两图中雾滴的对数标准偏差 S 都设为 0.55。图 5(a)、(b) 显示, 采用 SBM 的 Model 1 与 Model 2 的相对误差接近为 0, 随粒径无变化; 采用 GAM 的 Model 3 和 Model 4 误差最大, 随粒径的增大呈降低的趋势, 随体积分数的增大呈增大的趋势; 而 Model 5 的误差同样随粒径的增大而降低, 随体

积分数的增大而增大,但在粒径范围和体积分数范围内误差不超过 5%. Model 3 和 Model 4 在雾滴粒径较小或体积分数较大时的相对误差甚至是不能接受的,如在 r_0 为 $10 \mu\text{m}$ 、 f_v 为 1×10^{-4} 时,误差高达 90%;在 r_0 为 $50 \mu\text{m}$ 、 f_v 为 2×10^{-4} 时,误差达到 43%;在图 5 (a) 所示粒径变化范围内,Model 3 和 Model 4 的最小误差也达到 10%.



(a)



(b)

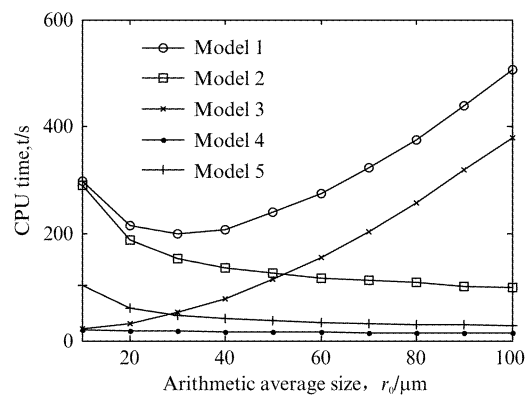
图 5 五种模型的相对误差变化 (a) 随算数均值粒径的变化, (b) 随水雾体积分数的变化

Fig. 5 Varieties of relative errors of five models (a) versus arithmetic average size, and (b) versus sprays volume fraction

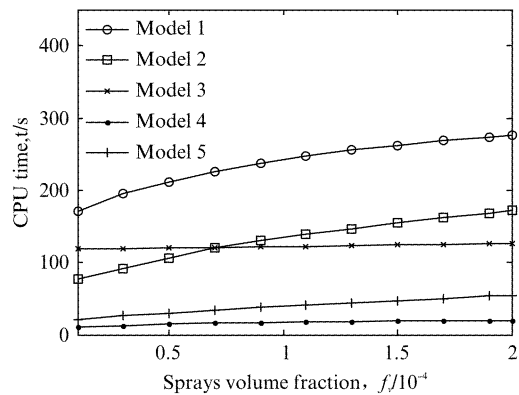
在图 5(a)、(b) 的自变量变化范围内,无论是粒径均值减小还是体积分数增大,都导致了光学厚度的增大,结合 Model 3 和 Model 4 相对误差的变化趋势,可知 GAM 的相对误差与水雾的光学厚度正相关,这也符合文献 [13] 的结论. 而 SGM 的相对误差虽然也与水雾的光学厚度正相关,但受影响不大,其精度水平是可接受的.

在图 5(a)、(b) 的计算条件下,Model 1~5 的计算耗时,表示为图 6(a)、(b). 依据两图定性分析可见,Model 1 的计算耗时最大,Model 4 的计算耗时最

小,而 Model 5 的计算耗时接近 Model 4; Model 1 和 Model 3 的计算耗时随均值粒径的增大而增大,但 Model 1 的计算耗时有一个最小值,出现在粒径均值 $30 \mu\text{m}$ 左右; Model 2、Model 4 和 Model 5 的计算耗时随均值粒径的增大而减小,但 Model 4 的变化趋势并不明显; Model 1~5 的计算耗时都随水雾体积分数的增大而增大,但 Model 1 和 Model 2 的变化趋势明显, Model 3 和 Model 4 的变化趋势不明显, Model 5 的变化趋势介于以上两种趋势之间.



(a)



(b)

图 6 五种模型的计算时间变化 (a) 随算数均值粒径的变化, (b) 随水雾体积分数的变化

Fig. 6 Varieties of calculation time of five models (a) for different arithmetic average size, and (b) different sprays volume fraction

随着 r_0 增大 Mie 计算过程耗时会显著增多,这主要是因为 Mie 系数 a_n 、 b_n 是一组无穷级数,其收敛项数 n_{\max} 是根据尺度参数 $\chi = 2\pi r/\lambda$ 确定的,即 $n_{\max} = \chi + 4\chi^{1/3} + 2$,因此当粒径增大时, Mie 计算的项数是近似线性增加的;同时本文针对的是多分散细水雾,根据式 (7) 可知, r_0 增大使得粒径范围增大, Mie 计算量增加,这可以解释图 6(a) 中 Model 1 和 Model 3 计算耗时的增加. 图 6(a) 中 Model 2 不

涉及到 Mie 计算,同时随着 r_0 增大光学厚度降低,而图 6(b)中 Model 1 和 Model 2 获取辐射特性参数的时间为恒定值,同时随着水雾体积分数的增大光学厚度增大,因此两图中三条曲线计算耗时的变化与 Mie 计算无关,说明当采用 SBM 时,计算耗时与光学厚度正相关.而图 6(a)中 Model 4 和图 6(b)中 Model 3 和 Model 4 的计算耗时变化幅度很小,说明 GAM 对光学厚度的变化不敏感,这也解释了图 6(a)中 Model 1 随粒径增大在 $30 \mu\text{m}$ 处出现一个计算耗时极小值,而 Model 3 呈现单调增大的现象.

通过图 5(a)、(b)和图 6(a)、(b)的对比分析可见,Model 5 的计算结果接近精确值,误差小于 5%;计算效率要好于 Model 1~3,接近效率最高的 Model 4. RPD 调用有效地解决了在细水雾遮蔽热辐射过程中大量的 Mie 计算,而 SGM 在保证精度的前提下有效降低了细水雾光谱依赖性所产生的大量计算耗时.所以采用 RPD 调用并结合 SGM 计算细水雾对热辐射的遮蔽衰减,既能保证精度又能大幅节省计算时间.

3 结论

为了提高细水雾遮蔽热辐射的计算效率,建立了均值粒径 $1 \sim 300 \mu\text{m}$ 的雾滴颗粒系在 $0.8 \sim 20 \mu\text{m}$ 波段内的辐射特性参数数据库,并通过分析辐射特性参数的变化规律建立了谱带-灰体模型及另外 4 种对比模型.通过与蒙特卡洛法的计算结果作对比,验证了模型的准确性.通过对所建 5 种模型的对比分析,获得了以下结论:

(1) 采用 RPD 调用既可以实现与 Mie 理论计算相同的精度,又可以使计算效率大幅提高;

(2) 细水雾在 $0.8 \sim 20 \mu\text{m}$ 波段辐射特性的波动随波长的增大而降低,而在 $0.8 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 波段变化最剧烈,本文基于此建立了 SGM;

(3) SGM 具有较高的精度,在本文计算工况下相对误差小于 5%;再结合 RPD 调用,既能保证计算精度在可接受的水平,又使得计算时间大幅缩减,因此本方法适用于大型多场耦合计算,具有很好的工程应用价值.

References

[1] Dembélé S, Delmas A, Sacadura J F, et al. A method for modeling the mitigation of hazardous fire thermal radiation

- by water sprays [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1997, **119** (4): 746–753.
- [2] Keramida E P, Karayannis A N, Boudouvis A G, et al. Numerical modeling of radiant heat attenuation through water mist [J]. *Combust Sci Technol*, 2000, **159**: 351–371.
- [3] Lechêne S, Acem Z, Parent G, et al. Radiative shielding by water mist: comparisons between downward, upward and impacting injection of droplets [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, **369**: 012027.
- [4] Lechêne S, Acem Z, Parent G, et al. Upward vs downward injection of droplets for the optimization of a radiative shield [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**(9–10): 1689–1697.
- [5] Jones A, Nolan P F. Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression [J]. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1995, **8**(1): 17–22.
- [6] Tratnig A, Brenn G. Drop size spectra in sprays from pressure-swirl atomizers [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, **36**: 349–363.
- [7] Godoy W F, DesJardin P E. Efficient transmission calculations for polydisperse water sprays using spectral scaling [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2007, **108**: 440–453.
- [8] Viskanta R, Tseng C C. Spectral radiation characteristics of water sprays [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2007, **11**(1): 113–125.
- [9] Chylek P, Damiano P, Kalyaniwalla N, et al. Radiative properties of water clouds: simple approximations [J]. *Atmos Res*, 1995, **35**: 139–156.
- [10] Yu H T, Shen J Q, Wei Y H, et al. Geometrical optics approximation for light scattering by absorbing spherical particles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, **110**: 1178–1189.
- [11] Hostikka S, McGrattan K. Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays [J]. *Fire Safety Journal*, 2006, **41**: 76–86.
- [12] Maruyama S, Nakai H, Sakurai A, et al. Evaluation method for radiative heat transfer in polydisperse water droplets [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, **109**: 1–15.
- [13] Consalvi J L, Portiere B, Lorand J C, et al. On the use of gray assumption for modeling thermal radiation through water sprays [J]. *Numerical Heat Transfer Part A*, 2003, **44**: 505–519.
- [14] Prasad K, Li C, Kailsanuth K, et al. Numerical modeling of water mist suppression of methane-air diffusion flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, **132**: 325–364.
- [15] 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[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社). 2006.
- [16] YIN Hong. *Atmospheric radiation science* [M]. Bei Jing: Meteorological Press (尹宏. 大气辐射学[M]. 北京: 气象出版社). 1993.