

FVM 结合 PDF 方法研究湍流射流 火焰中的辐射换热*

徐 晓¹, 陈义良¹, 刘林华², 王海峰¹

(1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230026)

(2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 为了考察湍流燃烧过程中的辐射换热效应, 用有限体积和概率密度函数输运方程求解相结合的方法模拟了湍流自由射流火焰中的辐射换热, 并对湍流辐射交互作用进行研究. 计算结果表明, 辐射换热作用将使火焰的温度有所降低; 湍流辐射交互作用使辐射换热有较大幅度的增强, 需要在辐射换热计算中予以考虑.

关键词: 有限体积法; 湍流辐射交互作用; 概率密度函数法; 层流火焰面模型

中图分类号: V231.2; TK121

文献标识码: A

0 引言

由于问题的复杂性, 燃烧的数值模拟中一般都忽略辐射热效应. 火焰和燃烧室内的燃烧, 燃烧区温度极高, 辐射换热是一种重要的换热方式; 燃烧过程中污染物的生成与温度场有紧密的联系. 温度场的准确模拟、燃烧污染物排放量的准确计算要求在燃烧问题中考虑辐射热效应.

工程实际中所涉及的燃烧过程绝大多数是湍流燃烧. 长期以来, 湍流和辐射被视为两种互不相关的现象, 辐射换热量以及辐射物性参数的计算直接建立在平均场的基础上. 但是已有的一些研究结果^[1,2]表明用平均场计算所得的辐射换热量与实际值存在着较大的偏差, 从这个意义上说, 对于湍流燃烧问题中辐射换热的数值模拟只有考虑湍流辐射交互作用 (TRI) 才有充分的意义^[3,4].

概率密度函数 (PDF) 方法由于可以准确求解非线性项而被广泛应用于湍流化学反应流问题中^[5]. Mazumder 和 Modest^[6] 首先将 PDF 引入到 TRI 的研究中, Li 和 Modest^[7] 又将求解速度-组分联合 PDF 方程法应用于甲烷/空气受限湍流扩散火焰的研究. 最近, 哈尔滨工业大学的刘林华^[8,9,10] 等人对湍流射流火焰中的湍流辐射脉动关联项作了一些模拟, 但总的说来, 国内对于湍流辐射问题的报道很少, 研究尚处于起步状态.

对于辐射换热问题, 解决的关键是辐射传递方程的求解. 求解辐射传递方程的有限体积

* 收稿日期: 2004-03-12

基金项目: 国家重点基础研究专项经费 (2001CB409603) 资助项目.

作者简介: 徐晓, 女, 1980 年生, 博士生. E-mail: xuxiao@mail. ustc. edu. cn

法(FVM)^[11],具有可确保辐射能量整体守恒、对不规则边界适应性强、易于将辐射计算与流场计算或燃烧计算相耦合、可方便处理各向异性散射的优点,从方法提出至今十多年来得到了广泛的应用和发展^[12~14].目前,国内有关采用 FVM 计算辐射问题的报道不多,仅哈尔滨工业大学有一些相关报道^[15~17].

本文将 PDF 和求解辐射传递方程的 FVM 相结合模拟了湍流射流火焰中的辐射换热,讨论了 TRI 对湍流燃烧过程中的辐射换热的影响.模拟中将高温反应过程与辐射换热过程进行了单向解耦,先采用求解 PDF 输运方程的方法模拟 TRI,之后采用有限体积法求解平均辐射传递方程.

1 湍流燃烧问题中的辐射换热

理论上,如果辐射换热是燃烧过程中一种比较重要的换热方式或者对燃烧温度场的模拟要求很高的计算精度,在能量方程中就应该包含辐射热源项.燃烧问题的辐射热源项可以理解为:燃烧产物中辐射参与性介质吸收、发射辐射能作用引起的单位体积燃烧产物的热量变化率.辐射源项的计算公式为:

$$S_{\text{radiation}} = -\nabla \cdot q^R = \int_0^\infty k_\eta \left(\int_{4\pi} I_\eta d\Omega - 4\pi I_{b\eta} \right) d\eta, \quad (1)$$

式中: q^R 表示辐射热通量, k_η 表示辐射介质的单色吸收系数, I_η 表示单色辐射强度, $I_{b\eta}$ 是黑体单色辐射强度.由(1)式可见,辐射热源项的求解以单色辐射强度 I_η 的确定为前提.辐射传递方程(RTE)是辐射强度的控制方程,对于吸收、发射性介质,辐射传递方程为:

$$(\mathbf{s} \cdot \nabla) I_\eta = k_\eta (I_{b\eta} - I_\eta). \quad (2)$$

对于非灰体介质,辐射物性参数和辐射能量随波长而变化,但我们可以用平均当量参数代替随波长变化的辐射物性参数,这时辐射传递方程中的所有参数均为全光谱的平均参数.本文引入工程中常用的普朗克平均吸收系数.根据最新的高温空气光谱数据库(HI-TEMP),普朗克平均吸收系数可以用公式:

$$k_p = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty k_\eta I_{b\eta} d\eta = \sum_l \frac{I_{b\eta l}}{I_b} S_l \quad (3)$$

计算.其中: η 为波数, S_l 为谱线 l 的积分强度.采用 Plank 平均吸收系数处理问题会牺牲一点精度,但却可以给问题带来极大并且也是必须的简化.

考虑湍流脉动的影响,并且用 Plank 平均吸收系数代替随波长变化的吸收系数,分别对(1)式和(2)式进行时间平均、并且应用湍流涡团光学薄假设^[18]得:

$$\langle S_{\text{radiation}} \rangle = -\nabla \cdot q^R = \int_{4\pi} \langle \langle k \rangle \langle I \rangle \rangle d\Omega - 4\pi \langle \langle k \rangle \langle I_b \rangle + \langle k' I'_b \rangle \rangle, \quad (4)$$

$$\mathbf{s} \cdot \nabla \langle I \rangle = \langle k \rangle \langle I_b \rangle + \langle k' I'_b \rangle - \langle k \rangle \langle I \rangle. \quad (5)$$

$\langle k' I'_b \rangle$ 是吸收系数和黑体辐射强度的脉动相关项.这一项是由于考虑温度以及辐射组分的浓度脉动而多出来的项,代表了通常所说的湍流辐射交互作用.

1.1 平均吸收系数及湍流辐射脉动关联项的求解

平均吸收系数 $\langle k \rangle$ 及湍流辐射交互作用项 $\langle k' I'_b \rangle$ 的求解都需要知道温度场和组分浓度场的详细信息,本文的计算中,温度场及组分浓度场由 PDF 输运方程和层流火焰面模型结合计算给出.关于 PDF 方程和层流火焰面模型相结合的求解方法可以参考文献^[19,20].在

层流火焰面模型的思想下,平均吸收系数和湍流辐射脉动关联项分别为:

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} k_n^* \quad (6)$$

$$\langle k'I'_b \rangle = \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} [k_n^* - \langle k \rangle][I_{b,n}^* - \langle I_b \rangle], k = 1, 2, 3, \dots, N_c. \quad (7)$$

(6)、(7)式中 N_c 为一个样本系统中的样本点个数, k_n^* 表示单个样本点的吸收系数, $I_{b,n}^*$ 为样本点的黑体辐射强度, $\langle k \rangle$ 、 $\langle I_b \rangle$ 分别为样本系统的平均吸收系数和平均黑体辐射强度.

1.2 辐射传递方程的有限体积法求解

轴对称坐标系下吸收、发射性参与介质的平均辐射传递方程为:

$$\frac{\xi}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \langle I \rangle) + \mu \frac{\partial \langle I \rangle}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \psi}(\eta \langle I \rangle) = \langle k \rangle \langle I_b \rangle + \langle k'I'_b \rangle - \langle k \rangle \langle I \rangle. \quad (8)$$

式(8)表明,柱坐标系下的辐射传递方程中出现了角分布项 $\frac{\partial}{\partial \psi}$. 角分布项的出现使得柱坐标系下辐射传递方程的求解与直角坐标系下的求解有较大的不同.

有限体积法的基本思想是每个控制体积、每个控制立体角内辐射能量守恒,即流入流出控制容积的辐射能与控制体积、控制角度内产生的辐射能量平衡. 在这个思想下,将计算域离散为不重叠的控制体积 V_P , 将 4π 立体角离散为不重叠的控制立体角 Ω^{lm} . 若用 θ_l 、 ψ_m 分别表示极角和水平角,则控制立体角单元 $d\Omega^{lm}$ 可以表示为

$$d\Omega^{lm} = \int_{\theta_l - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_l + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_{\psi_m - \frac{\Delta\psi}{2}}^{\psi_m + \frac{\Delta\psi}{2}} \sin \theta \, d\psi d\theta. \quad (9)$$

如图 1 所示,在控制体积 V_P , 控制立体角 $d\Omega$ 内积分辐射传递方程(8),可以得到:

$$\sum_k \langle I_k^{lm} \rangle (s^{lm} \cdot \hat{n}_k) A_k - (A_n - A_s) (\Gamma_h \langle I_p^{lm} \rangle_{\theta_l, \psi_m + \frac{\Delta\psi}{2}} - \Gamma_q \langle I_p^{lm} \rangle_{\theta_l, \psi_m - \frac{\Delta\psi}{2}}) = (\langle k \rangle \langle I_b \rangle + \langle k'I'_b \rangle - \langle k \rangle \langle I_p^{lm} \rangle) V_p \Omega^{lm}. \quad (10)$$

s^{lm} 的表达式为

$$s^{lm} = \int_{\Omega^{lm}} \hat{s} \, d\Omega^{lm} = \int_{\theta_l - \frac{\Delta\theta}{2}}^{\theta_l + \frac{\Delta\theta}{2}} \int_{\psi_m - \frac{\Delta\psi}{2}}^{\psi_m + \frac{\Delta\psi}{2}} (\sin \theta \sin \psi \hat{e}_r + \sin \theta \cos \psi \hat{e}_z) \sin \theta \, d\theta d\psi. \quad (11)$$

(10)式中下标 k 表示控制容积的第 k 个表面.

参考图 1 所示的坐标系布置,角分布项的系数 Γ 为: $\Gamma_h = \Gamma_q = \cos \theta_l$. 本文假设计算域边界为室温下的黑体,因此边界条件可以写作

$$\langle I_w \rangle = \langle I_{bw} \rangle. \quad (12)$$

为了将控制体积中心处的辐射强度与其各表面上的辐射强度联系起来,可以假设两者之间存在某种关联,即构成某种空间差分格式

$$I_p^{lm} = f_z I_e^{lm} + (1 - f_z) I_w^{lm} = f_r I_n^{lm} + (1 - f_r) I_s^{lm} = f_\mu I_p^{(m+\frac{1}{2})} + (1 - f_\mu) I_p^{(m-\frac{1}{2})}. \quad (13)$$

本文采用阶梯格式,即认为 $f_z = f_r = f_\mu = 1.0$. 选定了差分格式以后,式(10)可以进一步

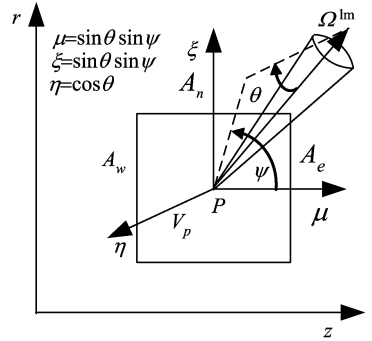


图 1 系统坐标系和局部坐标系
Fig. 1 Systemic coordinate and local coordinate for radiative transfer solution

整理为

$$\langle I_p^{lm} \rangle = \frac{(\langle k \rangle \langle I_b \rangle + \langle k' I'_b \rangle V_p \Omega^{lm} + \sum_{k, in} \langle I_k^{lm} \rangle |s^{lm} \cdot \hat{n}_k| A_k - \Gamma_q \langle I^{(lm-\frac{1}{2})} \rangle)}{\langle k \rangle V_p \Omega^{lm} + \sum_{k, out} (s^{lm} \cdot \hat{n}_k) A_k - \Gamma_h} \quad (14)$$

至此,对于由(12)式和(14)式组成的方程组,可以采用逐步推进的方式进行扫描式求解。

2 计算结果及分析

本文对氢气/空气湍流射流火焰的辐射换热和甲烷/空气湍流射流火焰的辐射换热进行了计算. 由于计算时已经将计算域推进到距离主燃区较远处, 因此可以认为包容火焰的边界环境以及射流顶面都为室温下的黑体。

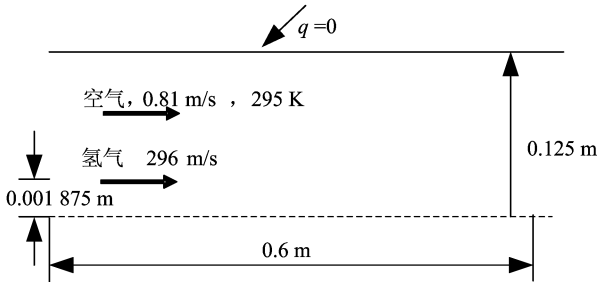


图 2 氢气/空气湍流射流计算域

Fig. 2 Computation domain of H₂/air jet flame

2.1 氢气/空气湍流射流火焰

氢气/空气湍流射流火焰中辐射组分只有水蒸气. 将计算域划分为 $N_z \times N_r = 160 \times 49$ 个网格, 将立体角划分为 $N_\theta \times N_\psi = 8 \times 12$ 个控制立体角单元。

图 3 给出了计算域内辐射热流密度散度 $\nabla \cdot q^R$ 的分布, $\nabla \cdot q^R$ 是表征辐射介质吸收、发射综合效应的物理量. 随着燃料射流的不断燃烧, 辐射介质温度越来越高, 其发射辐射项大于吸收项, 由于 TRI 的存在, 两项差值进一步加大, 表现为沿射流前进方向 $\nabla \cdot q^R$ 越来越大, 在火焰区内 $\nabla \cdot q^R$ 达到最大值. 由中心线沿半径方向向外, 火焰温度降低, 发射辐射项和吸收项两项差值减小, $\nabla \cdot q^R$ 值单调减小, 火焰区外的环境区, 可以认为 $\nabla \cdot q^R$ 的值为 0. 为了对 $\nabla \cdot q^R$ 有一个定量的概念, 图 4 给出了中心线上 $\nabla \cdot q^R$ 的轴向分布。

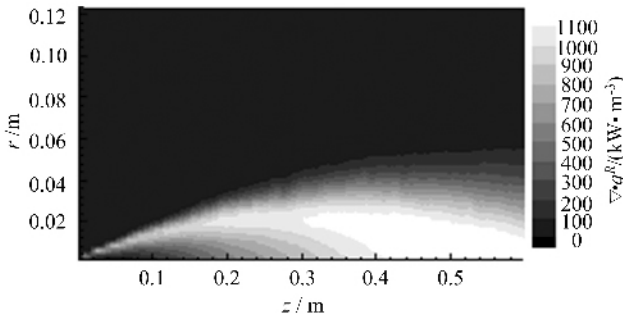


图 3 氢气/空气射流火焰 $\nabla \cdot q^R$ 等值云图

Fig. 3 Contours of $\nabla \cdot q^R$ of H₂/air jet flame

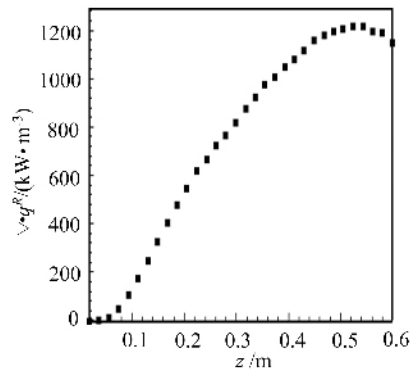


图 4 氢气/空气射流火焰中心线上 $\nabla \cdot q^R$ 的分布

Fig. 4 $\nabla \cdot q^R$ of the centerline in H₂/air jet flame

为了进一步考察 TRI 对辐射换热的影响,图 5 给出了火焰区两个截面上 $\nabla \cdot q^R$ 和直接由平均场计算(忽略 TRI)所得的 $\nabla \cdot \bar{q}^R$ 两者的对比值图,为了有一个更好的感性认识,也同时给出了两者的相对变化量 $\sigma = \frac{\nabla \cdot q^R - \nabla \cdot \bar{q}^R}{\nabla \cdot \bar{q}^R}$. 由图 5 可以看出 $\nabla \cdot \bar{q}^R$ 的值小于 $\nabla \cdot q^R$, 两项差值($\nabla \cdot q^R - \nabla \cdot \bar{q}^R$)体现了 TRI 的影响. 并且,对于湍流燃烧问题,有理由相信^[21]:火焰内辐射组分越多、辐射换热作用越强、火焰长度尺度 L_{flame} 越大,即火焰的光学厚度

$$\tau = \langle k \rangle L_{\text{flame}} \quad (15)$$

越大,TRI 对辐射换热的影响也将越大. 为了验证这个结论,下面,我们还对甲烷/空气湍流射流燃烧也进行了计算.

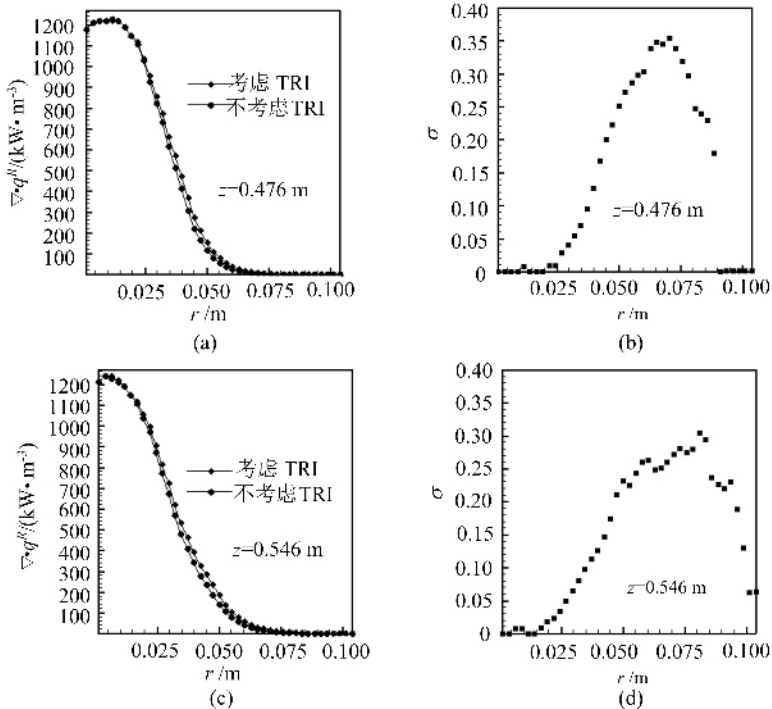


图 5 考虑 TRI 和不考虑 TRI 的 $\nabla \cdot q^R$ 的对比和方差

Fig. 5 $\nabla \cdot q^R$ with and without TRI

对整个计算域进行积分计算, $\iiint_V \nabla \cdot q^R dV$ 为 0.384 kW, 而 $\iiint_V \nabla \cdot \bar{q}^R dV$ 的值为 0.359 kW, TRI 使辐射换热增加了 7.06%.

由于 $\iiint_V \nabla \cdot q^R dV$ 为正值, 因此, 辐射换热作用将使火焰温度降低, 而 TRI 的存在将使火焰温度降得更多. 综上所述可以得出结论: 湍流燃烧问题中不考虑辐射换热作用将使计算所得的温度值偏高. 采用传统的直接由平均场计算辐射换热的做法, 虽然比完全忽略辐射换热作用计算温度场得到的结果要好, 但是计算所得的温度仍然偏高.

2.2 甲烷/空气湍流射流火焰

甲烷/空气湍流射流火焰中辐射组分有水蒸气、甲烷、二氧化碳及一氧化碳, 与氢气/空

气射流火焰不同的是,该火焰有值班火焰,具体的几何结构如图 6 所示. 模拟过程将计算域

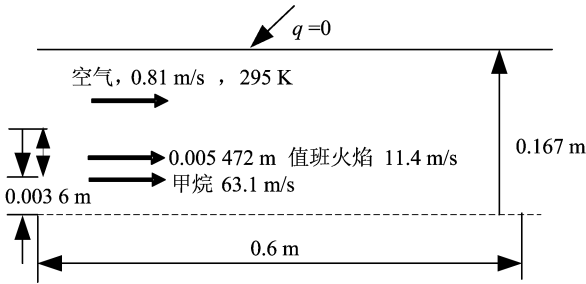


图 6 甲烷/空气湍流射流计算域

Fig. 6 Computation domain of CH₄/air jet flame

划分为 $N_z \times N_r = 130 \times 149$ 个网格, 将立体角划分为 $N_\theta \times N_\phi = 8 \times 12$ 个控制立体角单元.

甲烷/空气湍流射流火焰的长度尺度小于氢气/空气湍流射流火焰,但是辐射组分有四种,因此综合来说,前者的光学厚度大于后者,即 $\tau_{\text{CH}_4} > \tau_{\text{H}_2}$. 由图 7、图 8 可见甲烷/空气湍流射流火焰的 $\nabla \cdot q^R$ 在量级上大于氢气/空气湍流射流火焰,但是两者的 $\nabla \cdot q^R$

分布规律完全一致.

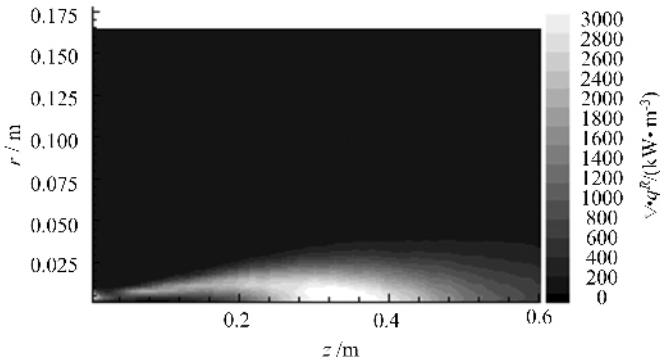


图 7 甲烷/空气湍流射流火焰中 $\nabla \cdot q^R$ 的等值云图

Fig. 7 Contours of $\nabla \cdot q^R$ of CH₄/air jet flame

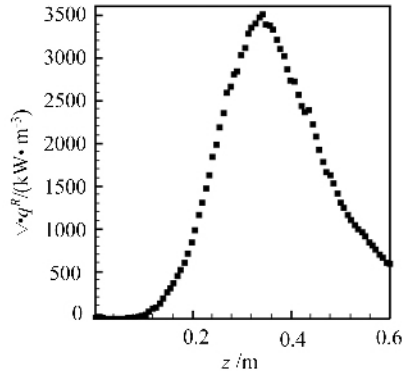


图 8 甲烷/空气火焰中心线上 $\nabla \cdot q^R$ 沿轴

Fig. 8 $\nabla \cdot q^R$ of the centerline in CH₄/air flame

相对氢气/空气湍流射流火焰,甲烷/空气湍流射流火焰中 TRI 对辐射换热的影响更为显著. 由图 9 可见,火焰区各个截面上, $\nabla \cdot q^R$ 和 $\nabla \cdot q^R$ 两者在数量上的差别相比较于氢气/空气湍流射流火焰更大. 对整个计算域进行积分计算, $\iiint_V \nabla \cdot q^R dV$ 为 0.302 kW, 而 $\iiint_V \nabla \cdot q^R dV$ 的值为 0.264 kW, TRI 使辐射换热率增加了 14.6%. 这个结论验证了前面我们所给处的光学厚度越大,湍流辐射交互作用越显著的结论.

3 结论

本文是采用 PDF 模拟高温反应流中辐射换热问题的先期工作. 应用 PDF 法模拟了湍流射流火焰中的 TRI,应用 FVM 求解了平均辐射传递方程. 计算结果表明辐射换热作用会使湍流射流火焰温度有所降低. 并且,因燃料而异, TRI 对辐射换热有不同程度的影响,在

辐射换热计算中应该给予考虑.

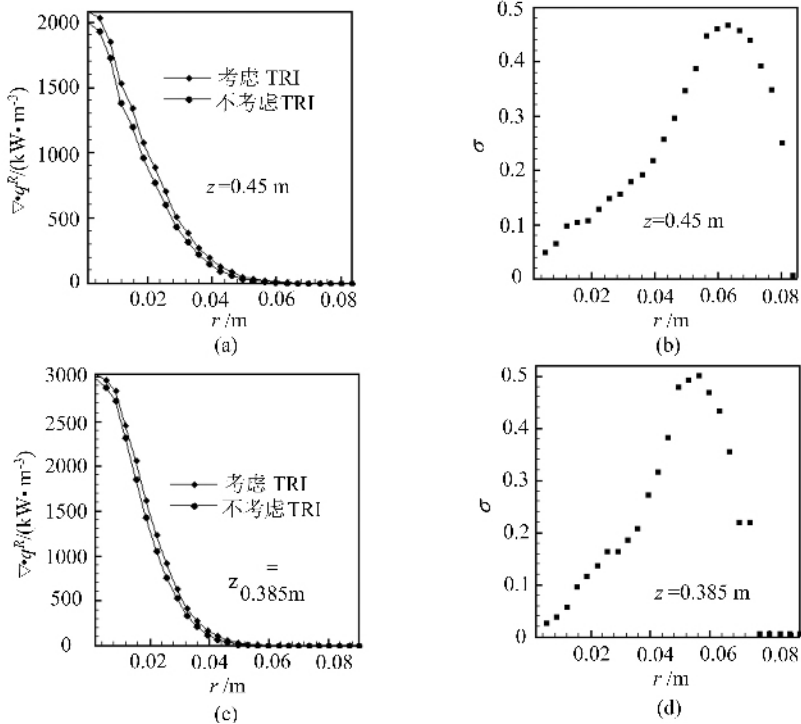


图 9 考虑 TRI 和不考虑 TRI 辐射热通量对比和方差

Fig. 9 $\nabla \cdot q^R$ with and without TRI

参 考 文 献

[1] Viskanta R, Menguc M P. Radiation heat transfer in combustion systems [J]. Prog. Energy Combust. Sci., 1987, 13: 97-160.

[2] Kabashnikov V P, Kmit G I. Influence of turbulent fluctuations on thermal radiations on thermal radiation [J]. J Appl. Spectrosc., 1994, 87; 2 745-2 750.

[3] Song T H, Viskanta R. Interaction of radiation with turbulence; application to a combustion system [J]. J Thermophysics., 1987, 1: 56-62.

[4] Hall R J, Vranos A. Efficient calculations of gas radiation from turbulent flame [J]. Int. J Heat Mass Transfer., 1994, 87; 2745-2750.

[5] Dopazo C. Recent development in PDF methods, In Turbulent Reacting Flow [M]. San Diego, 1994.

[6] Mazumder S, Modest M F. A PDF approach to modeling turbulence-radiation interactions in nonluminous flames [J]. Int. J Heat Mass Transfer., 1998, 42: 971-991.

[7] LI G, Modest M F. Application of methods in the investigation of turbulence radiation interactions [J]. J Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, 2002, 73: 461-472.

[8] LIU L H, XU X., CHEN Y L, WANG H F. Fluctuating characteristics of radiative source term in hydrogen turbulent jet diffusion flames [J]. J Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, 2004, 87: 193-201.

[9] LIU L H, XU X, CHEN Y L. On the shape of presume probability density function for the modelling of turbulence radiation interaction [J]. J Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, 2004, 87: 311-323.

- [10] 徐晓,刘林华,陈义良,王海峰. 氢气扩散火焰中辐射源项湍流脉动特征的 PDF 模拟[J]. 计算物理, 2004, 21:3, 346-350.
- [11] Raithby G D, Chui E H. A finite- volume method for predicting a radiant heat transfer in enclosures with participating media [J]. ASME J Heat Transfer, 1990, 112: 410-415.
- [12] Moder J P, Chai J C, Lee H S. Nonaxisymmetric radiative transfer in cylindrical enclosures [J]. Num. Heat Transfer, Part B, 1996, 30: 437-452.
- [13] Bake S W, Kim T Y. Transient cooling of a cylindrical medium in the rarefied cold environment [J]. Int. J Heat and Mass Transfer, 1997, 92:1 501-1 508.
- [14] Bake S W, Kim M Y, Kim J S. Nonorthogonal finite-volume solutions of radiative heat transfer in a three- dimensional enclosure [J]. Num. Heat Transfer, Part B, 1998, 34: 419-437.
- [15] 贺志宏,刘林华,谈和平. 炉内辐射换热过程的有限体积法[J]. 动力工程, 1999, 19: 4, 265-268.
- [16] 郝金波,阮立明,谈和平,贺志宏. 有限体积法求解散射性介质辐射传递及耦合换热[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34:2, 161-165.
- [17] 贺志宏,刘林华,谈和平. 有限体积法解多场耦合下散射性非灰介质的辐射换热 [J]. 化工学报, 2001, 52:5, 434-39.
- [18] Kabashnikov V P. Thermal radiation in turbulent flows-temperature fluctuations [J]. Heat Transfer-Soviet Research, 1985, 17: 6, 116-125.
- [19] Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion [J]. Prog. Energy Combust. Sci., 1984, 10: 319-339.
- [20] 王海峰,陈义良,蔡晓丹,李艺. 湍流射流扩散火焰的层流火焰面模拟 [J]. 推进技术, 2003, 24:1, 58-62.
- [21] LI G, Modest M F. Application of composition PDF methods in the investigation of turbulence-radiation interactions [J]. J Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, 2002, 73: 461-472.

The Combination of FV and PDF Method for Radiation Heat Transfer in Turbulent Jet Diffusion Flames

XU Xiao, CHEN Yi-liang, LIU Lin-hua, WANG Hai-feng

(1. Department of Thermal Science, USTC, Hefei 230026, China)

(2. School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to gain an understanding of the influence of heat radiation in the turbulent combustion process, the combination of finite-volume method and PDF method is used to simulate the radiation heat transfer in turbulent jet diffusion flames. The PDF method is applied to simulate the interactions between turbulence and radiation. The finite-volume method is responsible for the solution to the averaged radiation transfer equation. Based on the simulation results, the flames become colder because of radiation heat transfer and TRI do play an important role in the process of radiation. It is suggested that TRI should be taken into account when considering heat radiation problems.

Key words: finite-volume method; turbulence-radiation interactions; probability-density function; flamelet