

文章编号:1000-8055(2012)10-2384-06

用 Tam-Ganesan 湍流模型研究排气系统 红外辐射特性

李喜喜, 额日其太

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过三维流场、介质的质量浓度场与辐射场耦合求解方法, 计算了 1 台有中心锥的轴对称喷管的空腔-喷流组合红外辐射特性。利用专门为自由剪切流动发展的 Tam-Ganesan 湍流模型, 有效提高排气系统红外辐射模拟精度。采用有限体积法(FVM)结合窄带模型(NBM)计算了排气系统在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段的辐射传输问题, 并考虑大气衰减作用。对比了采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 Tam-Ganesan 模型对排气系统核心区长度的影响, 以及由此引起的排气系统红外辐射特性的变化。通过与试验数据对比证明了该结果的准确性, 结果表明选择合适的湍流模型对计算排气系统红外辐射特性有重要的意义。

关 键 词: 湍流模型; 排气系统; 红外特性; 窄带模型; 有限体积法

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Numerical simulation of infrared radiation characteristic of exhaust system using Tam-Ganesan turbulence model

LI Xi-xi, Eriqitai

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The infrared signature in $3\sim 5\mu\text{m}$ band of an axisymmetric nozzle was calculated by a three-dimensional code to investigate the improvement of Tam-Ganesan turbulence model in the infrared radiation (IR) of aircraft exhaust system. The flow fields of nozzle were simulated by the finite volume method (FVM), coupled with the standard $k-\epsilon$ turbulence model and Tam-Ganesan model respectively. The infrared signature of the exhaust system was calculated by FVM in non-gray absorbing-emitting media coupled with narrow band model (NBM). The final infrared signature has considered the atmosphere effect. A standard $k-\epsilon$ model was also investigated by being compared with the Tam-Ganesan turbulence model. The Tam-Ganesan turbulence model provided improved mean flow and infrared radiation predictions related to the standard model. It is shown the application of the optimal turbulence model is vital to the calculation of infrared radiation characteristics of exhaust system.

Key words: turbulence model; exhaust system; infrared signature;
narrow band model; finite volume method

收稿日期:2012-05-18

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2384_032.html

作者简介:李喜喜(1984—),男,山西原平人,博士,主要从事飞行器排气系统气动和红外隐身一体化设计研究。

排气系统及尾喷流是飞行器红外辐射的重要来源,对其红外辐射特性进行计算预测对飞行器的红外隐身技术研究具有重要意义。国外从 20 世纪 70 年代起发展了计算飞行器排气系统红外辐射特性的方法,并开发了相应的软件^[1]。国内从 20 世纪 90 年代开始,徐南荣、朱谷君^[2]和额日其太、王强^[3],刘友宏^[4]以及吉洪湖等学者^[5]陆续对发动机排气系统红外辐射特性进行了细致的数值计算和分析。数值模拟因为具有成本低,周期短,可模拟参数及状态多等优点,被越来越多地应用到排气系统的红外辐射特性计算中^[6-7]。

对于复杂几何排气系统计算而言,大涡模拟难以满足实际应用,雷诺平均方法仍然是目前最通用的方法,所用的湍流模型也以两方程模型居多^[8-9]。但是采用标准 $k-\epsilon$ 模型家族模拟得到的喷流核心区比实际喷流核心区长,核心区下游流场衰减过快,流场模拟效果不佳^[8-10]。对于三维射流,Pope 认为涡拉伸会使涡破碎过程更快,湍能在不同尺度的涡间的传递增快,湍能耗散率增大,从而使核心区长度变短,并对此提出涡拉伸修正^[11]。对于可压缩流动,由于压缩性的影响,喷流核心区长度更短,Sarkar 等对此提出了可压缩修正^[12],将可压缩性的影响计入湍流模型。

Tam 和 Thies 在标准 $k-\epsilon$ 模型的基础上,加入了 Pope 涡拉伸修正和 Sarkar 可压缩修正,通过重新校准,得到 1 套新的针对自由剪切流动的经验常数,并将其用于中低温轴对称和非轴对称喷流的模拟中,结果显示其在核心区长度和核心区下游流场变化趋势上预测效果较好^[10]。对于高温喷流,喷流与外场冷气流之间存在很大的密度梯度,横跨剪切层的大密度梯度会引发强烈的开尔文-亥姆霍兹不稳定性,从而加强了剪切层的掺混。剪切层掺混的加强进一步增强湍流强度,减小喷流核心区长度^[13]。Georgiadis 和 Tom 等人引入密度梯度对高温喷流湍流扩散的影响,扩展了 Tam-Thies 模型对高温喷流流场的预测能力^[8,13]。准确的流场、温度场和浓度场是精确计算排气系统红外辐射特性的基础。在公开发表的文献中,排气系统红外辐射特性计算大部分基于 $k-\epsilon$ 模型家族^[1-6]。标准 $k-\epsilon$ 模型能否胜任排气系统红外辐射特性的模拟,修正后的 Tam-Ganesan 模型能否提高排气系统红外辐射特性计算精度尚无定论。

本文利用由三维耦合程序 FICC 得到的温度场、压力场和介质的质量浓度场对排气系统空腔

与喷流组合红外辐射特性进行了三维数值模拟,采用有限体积法离散辐射传输方程,并以 HITEMP 数据库为基础利用窄带模型(NBM)计算了排气系统空腔及喷流混合气体(H_2O 和 CO_2) 在 $3\sim 5\mu m$ 波段的辐射特性参数。同时通过大气透过率及背景辐射软件包 LOWTRAN7 得到特定条件下的大气光谱透过率,计算经过大气衰减后的排气系统空腔-喷流组合红外辐射特性。

1 湍流模型

1.1 标准 $k-\epsilon$ 湍流模型

本文采用的标准 $k-\epsilon$ 模型是在 Jones-Laundder 模型^[14]的基础上加入 Sarkar 可压缩修正^[12]构成的,模型方程如下:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \epsilon_s)}{Dt} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon_s}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon_s^2}{k} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_s}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

湍流黏度表达式为

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon_s} \quad (3)$$

对于 Sarkar 可压缩修正,经过修正的湍动能耗散率如下:

$$\epsilon = \epsilon_s (1 + \alpha Ma_t^2) \quad (4)$$

Ma_t 为湍流马赫数,表达式如下:

$$Ma_t^2 = \frac{2k}{a^2} \quad (5)$$

其中 a 为当地声速。相关经验系数如下:

$$\begin{aligned} C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \\ C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \alpha = 1.0. \end{aligned}$$

根据文献^[13]的建议,湍流普朗特数 Pr 值取 0.7,能量方程中 $\sigma_t = 0.85$ 。

1.2 Tam-Ganesan 湍流模型

标准 $k-\epsilon$ 模型的经验常数主要是在室温下利用湍流边界层和平面混合层校准得到的,这些常数并不适用于射流等自由剪切流动。Tam 和 Ganesan 在专门为自由剪切流动校准的 Tam-Thies 模型的基础上,引入针对高温喷流的密度修正,得到了 Tam-Ganesan 模型^[13]。模型方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho k)}{Dt} = \\ \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{D(\rho \epsilon_s)}{Dt} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon_s}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - (C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 3} \chi) \rho \frac{\epsilon_s^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_s}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

其中 Pope 涡拉升项表达式为

$$\chi = \omega_{ij} \omega_{jk} S_{ki} \quad (8)$$

式中

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \frac{k}{\epsilon_s} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \frac{k}{\epsilon_s} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

其中 μ_{eff} 为有效湍流黏度, 包括密度梯度引发的空间不稳定性对总湍流黏度的贡献, 表达式如下:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu_p \quad (11)$$

其中 μ_t 由式(3)得出; μ_p 为高温下喷流密度梯度对总湍流黏度的贡献, 由不稳定性理论导出, 表达式如下:

$$\mu_p = \begin{cases} C_\rho \frac{k^{7/2}}{\epsilon^2} \frac{|(\nabla \rho) \cdot (\nabla u)|}{|\nabla u|} & (\nabla \rho) \cdot (\nabla u) < 0 \\ 0 & (\nabla \rho) \cdot (\nabla u) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Tam-Ganesan 模型针对自由剪切流动重新校准的经验常数如下:

$$C_\mu = 0.0874, C_\rho = 0.035, \sigma_k = 0.324,$$

$$\sigma_\epsilon = 0.377, C_{\epsilon 1} = 1.4, C_{\epsilon 2} = 2.02,$$

$$C_{\epsilon 3} = 0.822, \alpha = 0.518, \gamma \sigma_t = Pr = 0.422$$

γ 为气体绝热常数。

与标准 $k-\epsilon$ 模型相比, Tam-Ganesan 模型的 σ_k 和 σ_ϵ 要小得多。此外, Tam-Ganesan 模型还计入了密度梯度对总湍流黏度的贡献, 使该模型的湍能扩散较标准 $k-\epsilon$ 模型有所增强。

2 数值模拟方法

2.1 流场计算方法

耦合程序 FICC 采用经过两重网格加速的 LU-SGS(lower-upper symmettiffic-gauss-seidel) 隐式时间推进的有限体积法^[15], 控制方程选用三维强守恒形式的雷诺平均 Navier-Stokes 方程。对流通量采用二阶精度 Roe 格式求解, Minmod 限值器保证二阶精度插值具有 TVD(total variation diminishing)性质。扩散通量采用可以克服边界层奇偶不耦合问题的中心差分格式求解^[15]。喷管入口采用压力进口边界条件; 外流远场采用无反射边界条件; 内外壁面采用无滑移边界条件和增强

型壁面函数。

Tam-Ganesan 模型的经验系数是针对自由剪切流动专门校正的, 对于喷管内部的流动并不适用。利用 Tam-Ganesan 模型计算排气系统物理场时, 喷管出口截面上游部分采用经过 Sarkar 修正的标准 $k-\epsilon$ 模型, 喷管出口下游的自由剪切流动分别采用 Tam-Ganesan 模型。

2.2 红外辐射强度计算方法

喷流的温度场以及参与性介质的浓度场由上述方法求出。辐射计算时不需要过于细密的网格, 可以直接采用流场计算多重网格中粗网格上的值^[7], 通过喷流的对称性将整个喷流的网格、温度场、质量浓度场构建出来, 在此基础上计算喷流红外辐射特性。

辐射在吸收—发射性介质中沿某一方向的单色辐射传输方程式可表示为

$$\frac{dL_\eta^m(s)}{ds} = k_\eta(s) [J_\eta(s) - L_\eta^m(s)] \quad (13)$$

上标 m 表示第 m 个立体角, 下标 η 表示第 η 个波数段, $\frac{dL_\eta^m(s)}{ds}$ 表示沿 r^m 方向的单色辐射亮度在 ds 路径上的变化率; $k_\eta(s)$ 表示位置 s 处的单色吸收系数, 通过 HITEMP 数据库结合 Young 数值平均法计算; $J_\eta(s)$ 为源函数, 表示位置 s 处的气体发射的单色辐亮度; $L_\eta^m(s)$ 表示位置 s 处气体吸收的单色辐亮度。

本文采用有限体积法对辐射传输方程进行离散。图 1 给出了空间离散下某个控制体的示意图; 图 2 为立体角离散示意图, θ 为天顶角, ϕ 为方位角, 天顶角与方位角均匀离散。

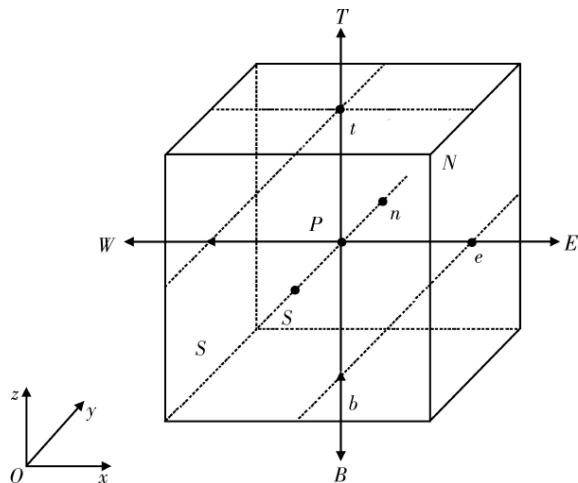


图 1 空间离散方式

Fig. 1 Schematic of three-dimensional control volume

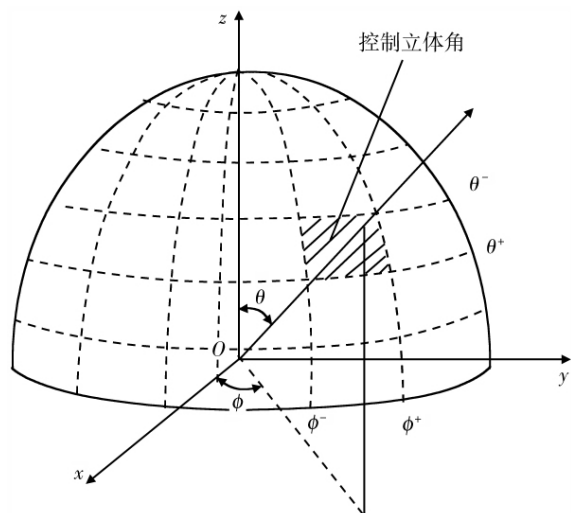


图 2 立体角离散方式

Fig. 2 Typical control angle

3 算例验证及讨论

3.1 湍流模型对喷流核心区长度的影响

本例计算对象为兰利研究中心的声学参考喷管(acoustic reference nozzle, ARN)^[16],采用的计算网格与文献[8]一致(见图 3)。喷管入口总压为 138 090.51 Pa,入口总温为 554.04 K,环境压力为 101 325 Pa,外流马赫数为 0.01,其它相关参数见文献[16]。

由于 Tam-Ganesan 模型只适用于自由剪切流动,本文使用 Tam-Ganesan 模型计算排气系统物理场时,喷管出口截面上游采用经过 Sarkar 修正的标准 $k-\epsilon$ 模型,下游采用 Tam-Ganesan 模型。

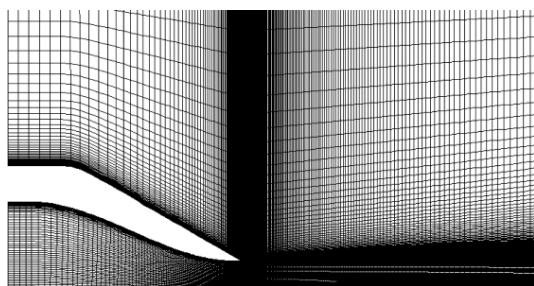


图 3 ARN 计算网格

Fig. 3 Computational grid of ARN

图 4 所示为喷流中心线上轴向速度分布,沿中心线坐标和轴向速度分别用喷管出口直径和喷管出口轴向速度无量纲化。从图中可以看出:与标准 $k-\epsilon$ 模型相比,专为自由剪切流动发展的 Tam-Ganesan 模型有效地缩短了喷流核心区长度,使数值模拟结果与试验数据^[16]更接近,得到了更好

的流场计算结果,为红外辐射特性的准确计算打下基础。

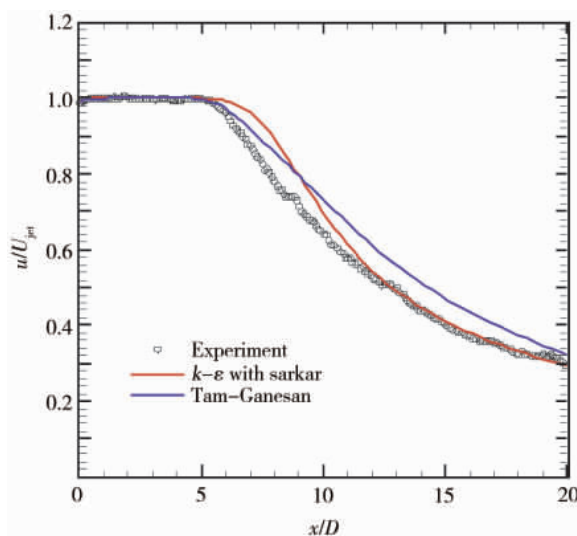


图 4 喷流中心线速度分布(单位:mm)

Fig. 4 Centerline velocity decay (unit:mm)

3.2 湍流模型对空腔-喷流组合红外特性的影响

采用三维耦合程序 FICC 计算了 1 台单涵道有中心锥的模型收敛喷管(如图 5 所示)在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的红外辐射特性,出口直径为 72.15 mm,入口总温为 810 K,入口总压为 11 000 Pa,环境压力为 101 325 Pa,温度为 300 K,壁面发射率为 0.8。

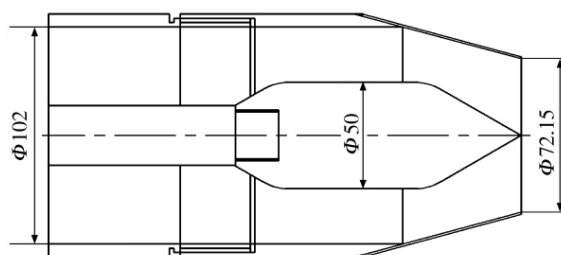


图 5 模型喷管结构示意图(单位:mm)

Fig. 5 Nozzle geometry configuration (unit:mm)

流场计算网格(如图 6 所示)为 75 万,为保证计算精度,贴近喷管内壁的网格单元中心点 $y^+ < 5$ 。辐射场计算网格(如图 7 所示)由流场网格的粗化网格对称得到,网格数为 1.4 万。根据文献[17],立体角划分方式($N_\theta \times N_\psi$)采用 8×16 。

图 8 为探测器所处位置和角度示意图,探测器与喷管轴线的夹角为探测角 θ ,即角度离散中的天顶角。探测器在距喷管出口 5 m 的位置上。

图 9 给出了考虑大气衰减影响时喷流计算分别采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 Tam-Ganesan 模型得到的

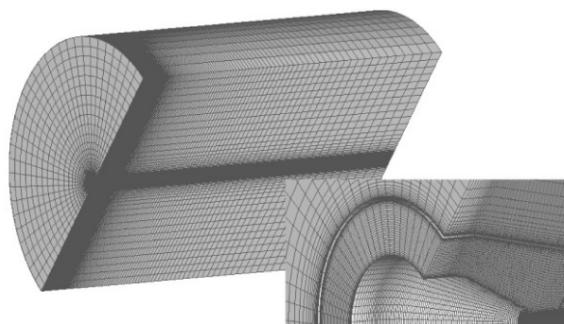


图 6 流场计算网格

Fig. 6 Flow field computational grid

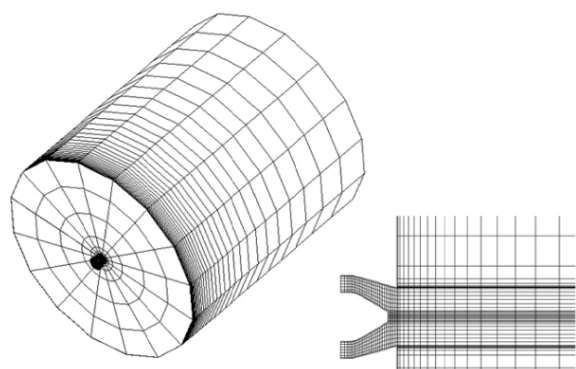


图 7 辐射场计算网格

Fig. 7 Infrared radiation computational grid

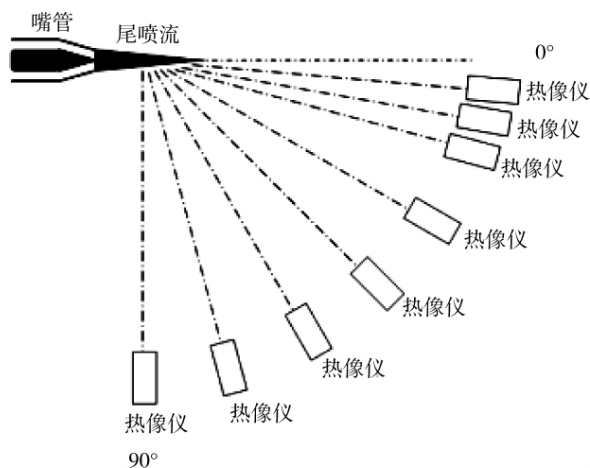


图 8 探测器位置示意图

Fig. 8 Infrared radiation detection points

计算结果与试验值的比较. 其中 I_0 表示辐射强度试验值, I_1 和 I_2 分别表示喷流计算采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 Tam-Ganesan 模型得到的辐射强度. 如图所示, 喷流计算采用标准 $k-\epsilon$ 模型得到的辐射强度明显大于试验值, 最大相对误差达到了 64.1%; 采用 Tam-Ganesan 模型计算喷流时得到的辐射强度相比于标准 $k-\epsilon$ 模型有明显的改善, 与试验

结果也更为接近, 其最大相对误差小于 11.5%.

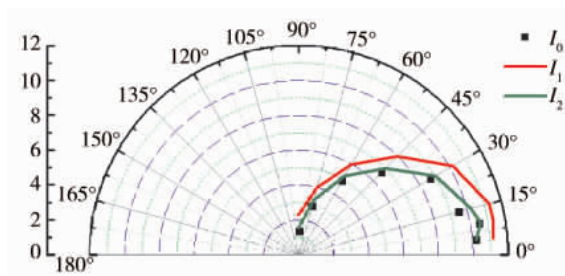


图 9 辐射强度分布对比图(单位: W/sr)

Fig. 9 Comparison of calculation and test values
(unit: W/sr)

表 1 中分别列出了喷流计算采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 Tam-Ganesan 模型时得到的计算结果的相对误差. ϵ_1, ϵ_2 分别表示 I_1, I_2 的相对误差, 即 $\epsilon_{1,2} = (I_{1,2} - I_0)/I_0$, $\epsilon_{12} = \epsilon_1 - \epsilon_2$. 从表中可以看出随着探测角度的增大 ϵ_1, ϵ_2 逐渐增大. 这是因为随着探测角的增大, 空腔辐射所占比重减小, 喷流辐射所占比重增大. 如果喷流核心区模拟结果偏长, 则会导致喷流辐射偏大, 所以在较大探测角处产生较大的误差. 与标准 $k-\epsilon$ 模型相比, 专门针对自由剪切流动发展的 Tam-Ganesan 模型在喷流辐射预报方面表现优秀. 当探测角为 90° 时, 空腔辐射所占比重最小, 喷流辐射所占比重最大, 此时 Tam-Ganesan 模型与试验值相对误差小于 11.5%, 而标准 $k-\epsilon$ 模型计算误差高达 64%, 误差为 Tam-Ganesan 模型的近 6 倍.

表 1 不同湍流模型误差对比

Table 1 Error comparison for different turbulence models

$\theta/$ ($^\circ$)	$I_0/$ (W/sr)	$I_1/$ (W/sr)	$I_2/$ (W/sr)	$\epsilon_1/$ %	$\epsilon_2/$ %	$\epsilon_{12}/$ %
5	10.2	11.20	10.22	9.8	0.2	9.6
10	10.5	11.33	10.58	7.9	0.8	7.1
15	9.5	11.30	10.22	18.9	7.5	11.4
30	8.7	10.19	9.04	17.1	3.9	13.2
45	6.7	7.98	7.01	19.1	4.6	14.5
60	4.9	5.97	5.21	21.7	6.4	15.4
75	2.9	3.99	3.21	37.4	10.8	26.6
90	1.4	2.29	1.56	64.1	11.4	52.8

4 结 论

本文采用经过 Sarkar 可压缩修正的标准 $k-\epsilon$

模型和专门针对自由剪切流动发展的 Tam-Ganesan 模型,利用三维耦合程序 FICC 计算了排气系统的流场、温度场及质量浓度场,以此为基础采用有限体积法研究了排气系统 $3\sim 5\mu\text{m}$ 波段红外辐射特性,并与相关试验值进行对比,证实了与标准 $k-\epsilon$ 模型相比 Tam-Ganesan 模型能够提高排气系统尤其是喷流的红外辐射特性计算精度。

1) Tam-Ganesan 模型的经验常数针对自由剪切流动专门校准,并通过总湍流黏度计入高温状态下密度梯度对湍能扩散的贡献,其湍能扩散与标准 $k-\epsilon$ 模型相比明显增强,有效地缩短了喷流核心区长度,使数值模拟结果与试验数据更接近,得到了更好的流场计算结果,为红外辐射特性的准确计算奠定基础。

2) 采用 Tam-Ganesan 模型计算喷流时得到的排气系统空腔—喷流组合红外辐射强度与试验结果更为接近,其最大相对误差小于 11.5%,相比于标准 $k-\epsilon$ 模型 64.1% 的最大误差改善明显。

3) 当喷流的辐射比重很大时,标准 $k-\epsilon$ 模型由于计算得到的射流核心区过长,将不能胜任红外辐射特性模拟。此时,选择专门为高温自由剪切流动发展、校准的 Tam-Ganesan 模型可得到与试验值较为接近的模拟结果。

总之,湍流模型的选择对于研究排气系统红外辐射特性有较大影响。

参考文献:

- [1] Segalman I, Semerjian H. Turbine engine infrared signature program[R]. AD-A028659, 1976.
- [2] 徐南荣, 朱谷君. 热空腔——喷气流的组合辐射[J]. 航空动力学报, 1995, 10(3): 295-298.
XU Nanrong, ZHU Gujun. Thermal cavity-plume combination radiation[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(3): 295-298. (in Chinese)
- [3] 额日其太, 王强, 陈渭鹏. 两种涡扇发动机排气系统红外辐射特性的比较[J]. 推进技术, 2003, 24(4): 334-367.
Eriqitai, WANG Qiang, CHEN Weipeng. Comparative investigation of the infrared characteristics for two exhaust systems of a turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(4): 334-367. (in Chinese)
- [4] 刘友宏, 邵万仁, 张锦秀. 发动机排气系统及尾喷流的流场和红外特征数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 591-597.
LIU Youhong, SHAO Wanren, ZHANG Jinxiu. Numerical simulation of flowfield and infrared characteristics of an aeroengine exhaust system and its plume[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 591-597. (in Chinese)
- [5] 黄伟, 吉洪湖, 斯仁, 等. 涡扇发动机排气系统红外特征[J]. 推进技术, 2010, 31(6): 745-772.
HUANG Wei, JI Honghu, SI Ren, et al. Infrared characteristics calculating of turbofan engine exhaust system[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(6): 745-772. (in Chinese)
- [6] 王伟臣, 李世鹏, 张峤, 等. 火箭发动机羽流红外特性计算方法研究[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 423-427.
WANG Weichen, LI Shipeng, Zhang Qiao, et al. Research on the calculation method of infrared signature of rocket motor exhaust plume[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 423-427. (in Chinese)
- [7] 朱希娟, 额日其太, 李家军, 等. 微射流强化混合对喷流红外辐射特性的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(4): 483-491.
Zhu Xijuan, Eriqitai, Li Jiajun, et al. Effect of micro-jets mixing enhancement on infrared radiation of plume[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(4): 483-491. (in Chinese)
- [8] Georgiadis N J, Yoder D A, Engblom W A. Evaluation of modified two-equation turbulence models for jet flow predictions[R]. AIAA-2006-490, 2006.
- [9] Nicholas J G, James R D. Navier-Stokes analysis methods for turbulent jet flows with application to aircraft exhaust nozzles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2006, 42(5/6): 377-418.
- [10] Thies A T, Tam C K W. Computation of turbulent axisymmetric and noaxisymmetric jet flows using the $k-\epsilon$ model[J]. AIAA Journal, 1996, 34(2): 309-316.
- [11] Pope S B. An explanation of the turbulent round jet/plane jet anomaly[J]. AIAA Journal, 1978, 16(3): 279-281.
- [12] Sarkar S, Lakshmanan B. Application of a reynolds stress turbulence model to the compressible shear layer[J]. AIAA Journal, 1991, 29(5): 743-749.
- [13] Tam C K W, Ganesan A. Modified $k-\epsilon$ turbulence model for calculating hot jet mean flow and noise[J]. AIAA Journal, 2004, 42(1): 26-34.
- [14] Jones W P, Launder B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1972, 15(2): 301-314.
- [15] 胡海洋, 王强. 跨声速条件下轴对称收敛扩管内外流场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1041-1046.
HU Haiyang, WANG Qiang. Numerical study on combination flow field of axisymmetric convergent-divergent nozzle under transonic and supersonic conditions[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1041-1046. (in Chinese)
- [16] Bridges J E, Wernet M P. Measurements of the aeroacoustic sound in hot jets[R]. AIAA-2003-3130, 2003.
- [17] ZHU Xijuan, Eriqitai, Li Xixi, et al. Infrared radiation simulation of exhaust system by coupling FVM with narrow band k-distribution[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 25-32.