基于有限体积法和 SNBCK 模型的红外辐射特性计算

胡海洋 王 强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 耦合求解流场、组分浓度场、基于 SNBCK 模型的气体辐射传输/能量方程以求准确模拟飞行器排气系统气动热力及红外特性. 窄带模型参数由 HITEMP 逐线计算数据库计算得到. 通过 CO_2 4.3 μm 波段吸收率计算, 圆柱炉膛辐射换热特性计算两个算例验证了所采用程序求解辐射传输/能量方程的准确性. 最后计算了两种二元喷管的红外特性, 结果表明大宽高比二元喷管地面和空中状态红外辐射特性差异巨大.

关 键 词: 排气系统; 红外辐射; 统计窄带模型; 关联 k 模型

中图分类号: V 231

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)09-1121-04

Calculation of aircraft exhaust system infrared characteristics based on SNBCK model and finite volume method

Hu Haiyang Wang Qiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The coupled calculations for flow fluid field, species concentration field and gas radiation transfer/energy equations based on SNBCK model were employed to simulate accurately the aerothermodynamic and infrared characteristics of the aircraft exhaust system. The parameters of narrow-band model were evaluated by HITEMP line-by-line database. Two calculating cases, the computation of carbon dioxide absorptivity at 4.3 micron band and the radiation heat transfer evaluation of the cylindrical furnace, respectively proved the accuracy of using this method to calculate radiation transfer/energy equations. Finally, the infrared characteristics of two two-dimensional nozzles were calculated, and the results show the great differences of infrared characteristic for high width-height ratio 2-dimentional nozzle between ground and high altitude state.

Key words exhaust systems; infrared radiation; statistical narrow-band model; correlated-k model

描述气体吸收辐射特性的模型有很多. 除去计算量及其巨大的逐线计算模型[1], 目前计算气体辐射换热多采用宽带模型; 计算气体红外辐射信号多采用 SNB(Statistical Narrow-Band)模型[1], 计算谱带数 200~2000个; 模型参数流行采用由 HITEMP 数据库[2]计算得到的.

由于宽带/窄带模型的计算量仍然十分巨大, 近年来国内外文献多在其它物理场参数分布已知的情况下计算辐射传输/换热, 鲜有与其它物理场耦合求解的算例. 商用 CFD(Computational Fluid Dynamics)软件虽然可以做到将上述问题耦合求解, 但气体辐射模型多采用准确度较低的灰气体加权模型——除去计算量问题, 传统的宽带/窄带模型给出的是一定行程上气体的透射率, 而不是有限体积法 FVM(Finite Volume Method)[1]需要的气体吸收系数 k. 这一问题目前可由宽带/窄带关联 k 模型[3]解决.

本文采用有限体积法耦合求解流场 N-S 方程、组分输运方程, 基于 SNBCK(SNB Correlated-k)模型的气体辐射传输/能量方程以求准确地模拟不同宽高比的二元喷管的气动热力及红外特性.

收稿日期: 2008-09-01

作者简介: 胡海洋(1981-), 男, 辽宁沈阳人, 博士生, barbapapa@sjp.buaa.edu.cn

1 气体辐射模型

1.1 HITEMP数据库计算 SNB模型参数

谱带模型的原理是: 将气体在某一波数间隔 Δv(单位: cm^{-1})内的吸收谱线重新排列, 用数学函数拟合出其形状和位置分布规律, 从而 Δv内气体平均吸收率可求. 目前应用最广泛的 Malkmus指数-尾倒数线强分布 SNB模型的光谱吸收率计算公式[1]为

$$\alpha = 1.0 - \exp\left[-2\frac{\bar{b}_v}{\bar{d}_v}\left(\sqrt{1+\frac{\bar{k}_v}{\bar{b}_v}PxL\frac{T_{\mathrm{ref}}}{T}}-1\right)\right] \quad (1)$$

3个谱带模型参数: $\bar{k}_v$为 Δv内气体平均吸收系数, 101 325 $Pa^{-1}\cdot cm^{-1}$; $\bar{d}_v$为谱线平均间隔, cm^{-1}; $\bar{b}_v$为谱线平均半宽, cm^{-1}; L为光线在气体中的行程长度, cm; x为吸收气体在混合气体中的浓度; P, T分别为气体压力, Pa和温度, K. 根据HITEMP高分辨率大气吸收线参数数据库提供的气体谱线参数, 采用 Young的数值平均方法[2]可计算得到上述 3个谱带模型参数, 详见文献[2].

HITEMP数据库只提供了吸收气体谱线在空气中增宽的公式和相关数据库, 而本文计算气体为碳氢燃料的燃烧产物, 其各谱带的谱线平均半宽 $\bar{b}_v$计算式见文献[4].

篇幅所限只列出其部分结果. 表 1 H_2O的计算结果与文献[2]的结果完全吻合.

表 1 水蒸气 2.7μm波段 SNB模型参数

v/cm^{-1}	T = 500K		T = 1 000K	
	$\bar{k}_v$	$1/\bar{d}_v$	$\bar{k}_v$	$1/\bar{d}_v$
3 300	0.010 6	2.257 0	0.054 6	9.565 4
3 350	0.018 7	2.468 9	0.094 8	7.831 0
3 400	0.034 7	2.397 0	0.149 0	6.684 8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3 900	0.352 4	1.036 6	0.388 9	2.608 4
3 950	0.075 2	1.363 9	0.197 9	3.101 5

1.2 SNBCK模型基本原理

宽带/窄带模型给出的是一定行程上气体的吸收/透射率, 而有限体积法求解气体辐射传输/能量方程需要的是吸收系数 k. 为此出现了关联 k模型, 其思想是: 对于任意只依赖于吸收系数 k的辐射量 Φ_ν, 其在波数 ν上的积分可用在 k上的积分来代替:

$$\frac{1}{\nu_{\Delta\nu}}\int_{\Delta\nu}\Phi(k_\nu)\,\mathrm{d}\nu = \int_0^1\Phi(g^{-1})\,\mathrm{d}g \quad (2)$$

$g(k)$为 k的累积分布函数, 值域 0~1, 其表达式详见文献[3].

本文采用 4点 Gauss-Legendre积分对式(2)求解; 混合气体在同一谱带的吸收系数取各组分吸收系数之和. 文献[3]的计算结果显示, 上述两种近似处理方法对计算精度的影响很小.

2 辐射传输换热计算验证算例

有限体积法求解辐射强度的控制方程为

$$\int_{\Omega m}\left(\iint_S I_\nu^m(\boldsymbol{s}^m\cdot\boldsymbol{n})\,\mathrm{d}S\right)\mathrm{d}\Omega = \int_{\Omega m}\left(\iiint_V\left(\frac{E_{b,\nu}}{\pi}-k_\nu I_\nu^m\right)\mathrm{d}V\right)\mathrm{d}\Omega \quad (3)$$

式中, Ω为空间立体角; m为其序列号; $\boldsymbol{s}^m$为其方向单位向量; S为控制体 V的各组成面; $\boldsymbol{n}$为其外法向单位矢量; $E_{b,\nu}(T,\nu)$为黑体光谱辐射力, 由黑体辐射普朗克定律计算.

实际计算对式(3)只采用一阶精度离散, LUSGS预处理的 BI-CGSTAB算法[5]求解. 求出 I_ν^m后, 根据辐射能量方程[1]求出的辐射换热量, 其作为能量源项与流场 N-S方程耦合.

2.1 CO_2 4.3μm波段吸收率计算

图 1为 CO_2 4.3μm波段吸收率 FVM-SNBCK模型计算结果与式(1)计算结果及 Ludwig的试验数据[6]对比. 计算条件: P = 15 900 Pa, T = 1 200K、行程长度 L = 15.05 cm、CO_2浓度 100%、有限体积法一维计算网格数 10. 可以看出, 前两者结果几乎完全一致, 与试验数据的差异来源于计算谱带较宽和对谱线平均半宽的近似求解.

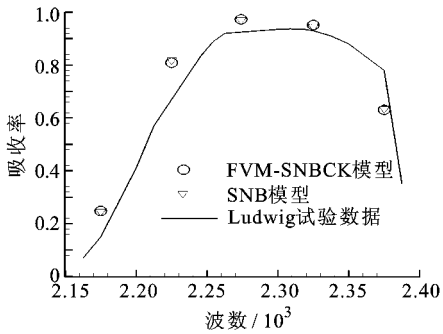


图 1 CO_2 4.3μm波段吸收率 FVM-SNBCK模型, SNB模型计算结果与实验数据对比

2.2 圆柱炉膛炉壁辐射换热特性数值计算

炉膛为长 6m, 直径 2m的封闭圆柱体, 炉壁为温度 500K的黑体. 炉膛内气体温度分布[7]见图 2.

目前商用 CFD软件求解辐射传输方程时无法处理对称面[7], 必须补全整个求解域. 本文所用计算程序将其视作镜面(遵循镜面反射定律)

处理.

本算例计算网格非常粗糙,求解辐射传输方程的空间立体角分辨率也仅为 10×10,但壁面辐射换热量计算结果与理论解[7]能够很好吻合(见图 3),说明上述处理辐射对称面的方法是准确有效的.

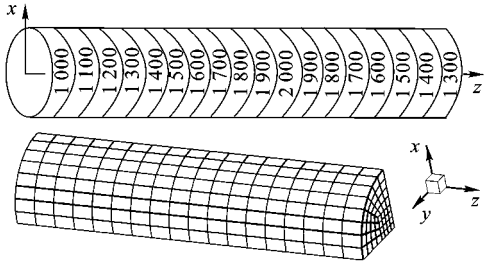


图 2　炉膛气体温度分布和计算网格

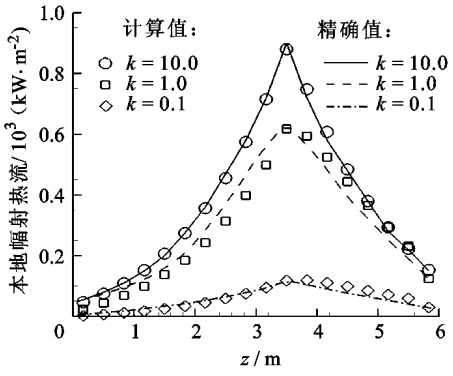


图 3　不同气体吸收系数下炉膛壁面辐射换热计算结果与理论解对比

3　二元喷管红外辐射特性计算

本节计算的两个二元收缩喷管出口面积相同,出口宽高比分别为 10∶1和 2∶1.计算网格总数 61万(两个对称面切出 1/4计算域),见图 4.喷管外壁为带过渡圆角的收缩形面.

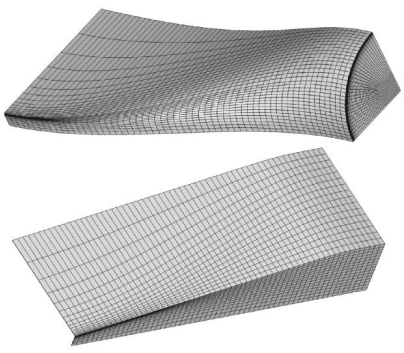


图 4　二元喷管内(上)外(下)壁面计算网格(W/H = 10.0)

喷管内壁圆转方形面由超椭圆方程构造.出口宽高比为 10的内壁形面构造方程(喷管轴向坐标为 z,轴截面长轴为 x、短轴为 y、面积为 S):

$$\left(\frac{x}{a}\right)^{\beta}+\left(\frac{y}{b}\right)^{\beta}=1.0 \tag{4}$$

其中

$$S=0.009529+0.002887\cdot\left[\sin\left(\pi\frac{z-0.1669}{0.3338}\right)+1.0\right]$$

$$a=0.09587+0.03300\cdot\left[\sin\left(\pi\frac{z-0.1669}{0.3338}\right)+1.0\right]$$

$$c=1.0+0.2071\left[\sin\left(\pi\frac{z-0.1669}{0.3338}\right)+1.0\right]$$

$$\beta=\ln 2/\ln(\sqrt{2}/c)$$

$$b=Sa\left[4\int_0^a(a^{\beta}-t^{\beta})^{1/\beta}\mathrm{d}t\right]^{-1}$$

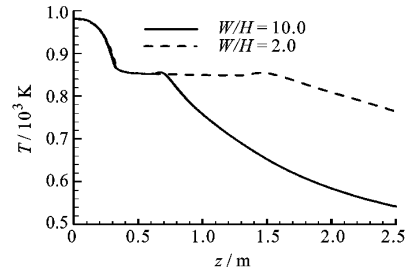
计算条件为:喷管进口涡扇发动机涵道比 0.6,内涵空气 91.4%与燃油(C_8H_{16})反应生成 H_2O、CO_2;落压比为 1.9,进口总温 1 000K;外流环境为地面、飞行 Ma = 0.6,喷管材料表面发射率为 0.9.

湍流模型为 RNG k-ε模型.图 5、图 6可以看出,大宽高比的二元喷管喷流长度要短得多.

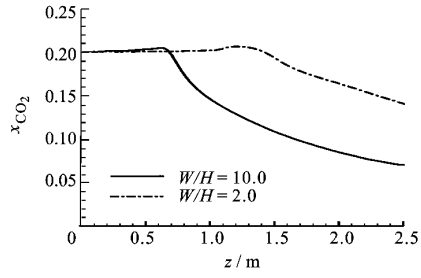


注:图上半部分喷管出口 W/H = 2.0,
图下半部分喷管出口 W/H = 10.0.

图 5　二元喷管 x-z对称面流场 Ma分布



a　中心线温度 T



b　CO_2质量分数 x_{CO_2}

图 6　二元喷管喷流 T和 x_{CO_2}分布

图 7表明,气体越接近壁面受粘性影响速度越低温度越高,向周围低温气体辐射的能量越大,净辐射换热 W (单位: m^3)损失也就越大.

图 8为 y-z 对称面喷管辐射亮度分布对比,图中的辐射方向为平行 y 轴指向天空 (上方). 图 9为方位角 0°时喷管辐射信号随高低角变化 (图 9a)和高低角 18°时喷管辐射信号随方位角变化 (图 9b)曲线. 图 10的计算工况为 20 000m 高空,其他条件与图 9相同.

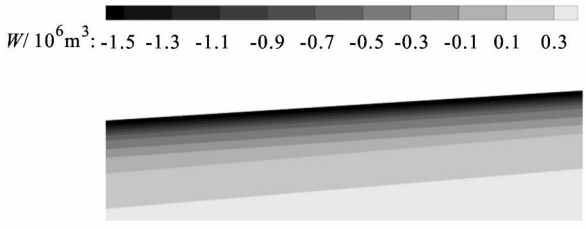
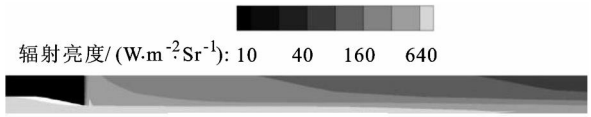


图 7 二元喷管内壁边界层气体辐射换热量分布

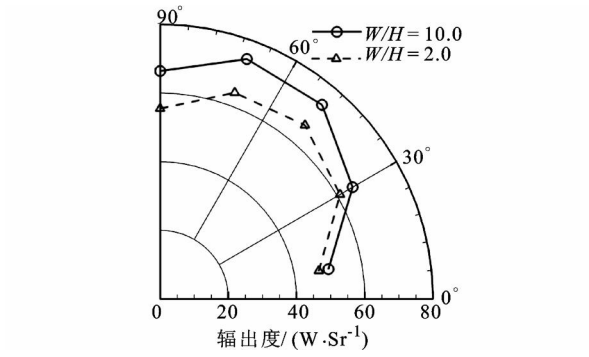


a 喷管出口 $W/H = 2.0$

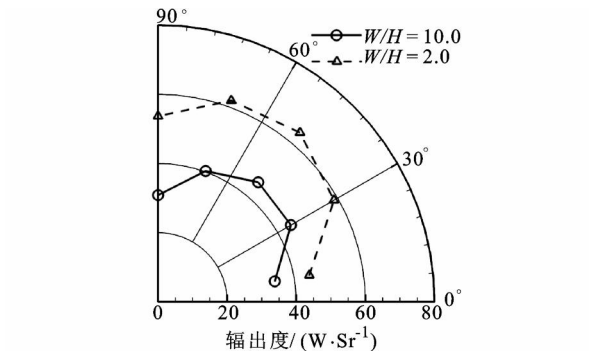


b 喷管出口 $W/H = 10.0$

图 8 二元喷管 y-z 对称面辐射亮度分布对比



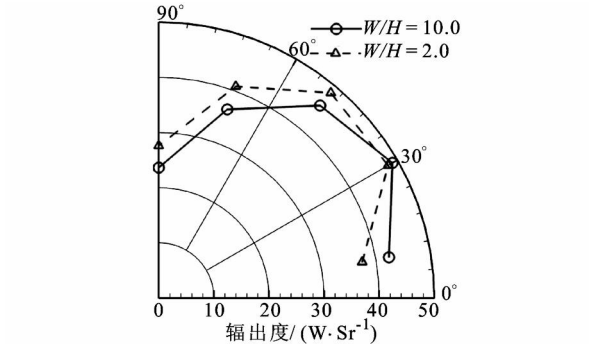
a 辐出度随探测高低角变化



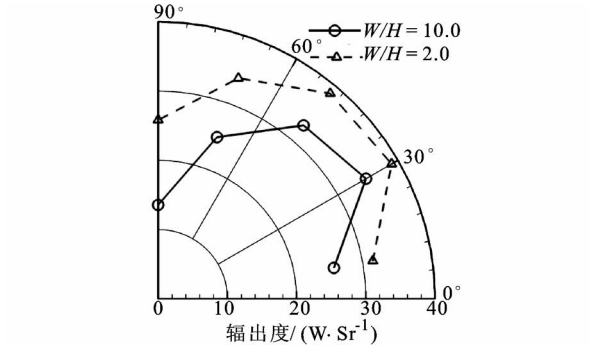
b 辐出度随探测方位角变化

图 9 地面巡航状态下二元喷管喷流辐出度分布

对比图 8~图 10可得到结论:地面状态下,二元喷管喷流为光学厚介质. 大宽高比二元喷管的喷流长度虽然明显缩短,垂直地面方向辐射强度沿喷流方向衰减也更快,但由于其喷流在 x-z 平面 (平行地面)的宽度大得多,垂直地面方向的总辐射信号相比小宽高比二元喷管并无改善;方位角越大、高低角越小,辐射信号改善越明显. 高空状态下,由于气体稀薄,二元喷管喷流为光学薄介质,总的辐射信号更多取决于喷流体积,增大喷管出口宽高比对几乎所有方位的红外信号都有改善.



a 辐出度随探测高低角变化



b 辐出度随探测方位角变化

图 10 空中状态下二元喷管喷流辐出度分布

4 结 论

由 HITEMP数据库计算 SNBCK 模型参数,有限体积法求解辐射传输方程所得到的辐射传输、换热计算结果与实验数据 /理论解吻合较好. 该算法易于与其他物理场耦合求解复杂工程问题.

有限体积法求解辐射传输方程时,将辐射对称面视作镜面处理,不影响计算结果;同时可大大降低求解所需内存和与之耦合的其它物理场的求解计算量.

地面巡航状态下,增大二元喷管的宽高比可明显降低其在大方位角、小高低角方向的红外信号;高空巡航状态下,该措施对二元喷管几乎所有方位的红外信号都有改善.

(下转第 **1138**页)

度/载荷共同作用下的裂纹扩展概率模型.这为对工作在高温环境下的工程实际结构进行概率损伤容限评估奠定了基础.

参考文献 (References)

[1] Yang J N, Manning S D. A simple second order approximation for stochastic crack growth analysis [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 53(5): 677-686

[2] 张建宇, 费斌军. 以裂纹长度为参量的疲劳裂纹扩展随机模型[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(3): 302-305
Zhang Jianyu, Fei Binjun. Stochastic model of fatigue crack growth under random loads [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(3): 302-305(in Chinese)

[3] Walz G, Riesch-Oppermann H. Probabilistic fracture mechanics assessment of flaws in turbine disks including quality assurance procedures [J]. Structural Safety, 2006, 28: 273-288

[4] Bader A J, O'Donnell M P, Dean D W. Use of the R5 volume 4/5 procedures to assess creep-fatigue crack growth in a 316 L(N) cracked plate at 650℃ [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80: 481-488

[5] Landes J D. An analysis of creep deformation parameters(Part I: background) [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71: 2449-2461

[6] 张建宇, 费斌军. 疲劳裂纹扩展随机过程相关参数的估计[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(3): 308-310
Zhang Jianyu, Fei Binjun. Correlative parameter estimated method in random process of fatigue crack propagation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(3): 308-310(in Chinese)

(责任编辑: 刘登敏)

(上接第 1124页)

参考文献 (References)

[1] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006
Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, et al. Numerical calculation of infrared radiative properties and transfer [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006(in Chinese)

[2] 董士奎, 谈和平, 余其铮, 等. 300~3000K水蒸气红外辐射谱带模型参数[J]. 热能动力工程, 2001, 16(91): 33-38
Dong Shikui, Tan Heping, Yu Qizheng, et al. Infrared radiative spectral band-model parameters for water vapor in the 300~3000K temperature range [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(91): 33-38

[3] Liu F, Smallwood G J, Gulder O L, et al. Application of the statistical narrow-band correlated-k method to low-resolution spectral intensity and radiative heat transfer calculation—effects of the quadrature scheme[J]. Heat and Mass Transfer, 2000, 43: 3119-3135

[4] Soufiani A, Taine J. High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H_2O, CO_2 and CO and correlated-k model for H_2O and CO_2 [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(4): 987-991

[5] 杨忠超, 刘应清, 刘涌江. 基于EBE策略求解流场问题的有限元方程解法研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(1): 120-127
Yang Zhongchao, Liu Yingqing, Liu Yongjiang. The finite element equation solution method study based on EBE strategy for fluid field problem [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21(1): 120-127(in Chinese)

[6] 董士奎, 余其铮, 刘林华, 等. 一种新的CO_2高温辐射特性窄谱带模型参数的计算方法[J]. 工程热物理学报, 2001, 22: 177-180
Dong Shikui, Yu Qizheng, Liu Linhua, et al. A new method of calculating high temperature radiative property parameters of narrow-band model for CO_2 [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22: 177-180

[7] Chui P, Hughes M J. Implementation of the finite volume method for calculation radiative transfer in pulverized fuel flame[J]. Combustion Science and Technology, 1993, 92: 225-242

(责任编辑: 张 嵘)