

高温气体辐射特性计算模型

尹雪梅, 刘林华

(哈尔滨工业大学 能源科学与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 高温气体辐射特性的准确计算在燃烧、红外探测等工程应用中具有重要意义。对国内外气体辐射特性研究现状进行了介绍, 分析了 3 类气体辐射特性计算方法的基本原理和主要特征, 着重介绍了新发展起来的全光谱 k 分布(FSK)模型。列表归纳总结了各辐射特性计算模型的适用条件、计算精度及计算速度。计算了平行平板间水蒸气和二氧化碳混合气体层壁面热流, 给出了各模型计算结果与逐线计算间的相对误差比较图。对不同情况下气体辐射特性计算方法的选择提出了建议, 针对现有模型的缺陷对今后的研究方向作了展望。

关键词: 气体辐射特性; 计算模型; k 分布模型

中图分类号: O434.11

文献标识码: A

引言

在许多碳氢化合物燃烧场合, 辐射热流的计算结果对燃烧性能和环境影响很大, 气体辐射也是一些非接触式光学气流诊断技术的基础, 对气体辐射进行准确计算在工程应用中具有重要意义。

工程应用中的气体辐射计算涉及 3 个不同层次的问题: (1) 准确地吸收气体光谱线数据; (2)

有效处理大量吸收气体光谱线的辐射特性计算模型; (3) 准确有效求解多维空间辐射传递方程的方法。目前还不能对工程中的辐射热传递进行精确和高效的计算, 原因在于: (1) 缺乏精确的气体辐射光谱数据, 由于高温实验难以实现, 现有数据库高温区的光谱数据大多是通过外推得到的, 其正确性有待进一步研究; (2) 缺乏灵活、有效的精确预测非灰介质辐射传递的计算模型。近几年许多学者从实验和理论方法两方面对气体辐射特性进行了研究。

Modest 等人用改进的点滴管设备, 测量了温度在 300 ~ 1 550 K 间 CO_2 以及温度在 600 ~ 1 500 K 间 H_2O 的所有重要谱带的中分辨率透射率^[1-3]。测量的数据与以前用旧点滴管设备测得的结果, 以及与 CDS 和 HITEMP 数据库做了比较^[4-5], 结果表明, 与高分辨率数据库差别很小(特别是高温区), 且总体上吻合很好, 为辐射计算提供了更准确的高温气体辐射特性数据。由于高温实验需要耗费大量的财力, 而且容易受实验设备的影响, 使实验的实施有一定的困难, 所以目前的研究主要集中在理论模型方面。

1 气体辐射特性计算方法原理及国内外发展现状

气体辐射特性计算方法根据计算波数间距大小基本上分成 3 类: (1) 逐线计算; (2) 谱带模型; (3) 总体模型。气体辐射谱线数量巨大, 对气体辐射计算造成很大困难, 所以工程上需要灵活、有效的辐射特性计算模型。

1.1 逐线计算(LBL)

气体分子在一定数目的振动—旋转谱带间吸收和发射辐射, 每个谱带又包含成千上万的谱线, 这些光谱线导致在整个谱上吸收系数随波数剧烈变化。由于气体辐射的非灰性, 其全波长或大尺度谱带辐射衰减将严重偏离 Beer 定律。逐线计算就是利用原子分子的量子力学原理与公式, 建立起光谱参数和气体辐射特性参数(如吸收系数、透射率等)之间的关系。在波数 η 处, 光谱吸收系数 κ_η 等于各个相互重叠谱线的线吸收系数 κ_{η_i} 的和, 即:

$$\kappa_\eta = \sum_i \kappa_{\eta_i} = \sum_i S_i F(\eta - \eta_{0_i}) \quad (1)$$

式中: κ_{η_i} —第 i 条谱线在波数 η 处的吸收系数; $F(\eta - \eta_{0_i})$ —第 i 条谱线的线形函数; η_{0_i} —第 i 条谱线中心处的波数; S_i —第 i 条谱线的谱线积分强度。

收稿日期: 2007-05-16; 修订日期: 2007-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50425619 50636010)

作者简介: 尹雪梅(1979-), 女, 四川资中人, 哈尔滨工业大学博士研究生。

逐线计算是准确的, 但需要分子气体每条谱线的详细光谱特性参数, 包括谱线位置、谱线强度、谱线半宽和谱线跃迁能级能量等。以 HITEMP 数据库为例, CO₂ 有 1 032 269 条谱线, H₂O 有 1 283 468 条谱线。由于其巨大的计算量, 一般只将逐线计算结果作为检验其它模型的准确度和有效性的基准解。

1.2 谱带模型

计算气体辐射热流时, 在一定谱带间隔内, 吸收系数的变化相对普朗克函数变化很快, 因此可将普朗克函数看作常数, 实际吸收系数用窄或宽谱带的平均值来代替, 从而得到窄谱带和宽谱带模型。窄谱带模型的波数间隔一般为 5 ~ 50 cm⁻¹, 而宽谱带模型则可包括整个振动-旋转谱带。

1.2.1 窄谱带模型

窄谱带模型就是将某波数间隔 Δη 内光谱线的排列、重叠性质与单条谱线的性质联系起来, 不需要详细了解每条谱线的形状、谱线强度和谱线位置, 而是假定谱线形状、强度和位置分布符合一定的规律, 并用数学函数形式表示。而公式中的谱带参数(平均吸收系数、谱线平均半宽和平均间隔)由实验数据拟合确定。用这种简化的模式可以表示出小光谱间隔 Δη 内的平均吸收系数及平均发射率和光谱参数的关系, 即:

$$\bar{\kappa}_\eta(\eta) = \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\eta-\Delta\eta/2}^{\eta+\Delta\eta/2} \kappa_\eta d\eta' \quad (2)$$

$$\bar{\epsilon}_\eta(\eta) = \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\eta-\Delta\eta/2}^{\eta+\Delta\eta/2} [1 - \exp(-\int_0^X \kappa_\eta dX)] d\eta' \quad (3)$$

式中: $\bar{\kappa}_\eta(\eta)$ —光谱间隔 Δη 内的平均吸收系数; X—行程长度; $\bar{\epsilon}_\eta(\eta)$ —光谱间隔 Δη 内的平均发

射率。

1.2.1.1 Elsasser 模型^[6]

Elsasser 模型是最简单的窄带模型, 该模型假设光谱线形为 Lorenz 线型, 具有相同的强度并均匀分布。Golden 将其发展到 Doppler 和 Voigt 线型, 适用于双原子分子和线性多原子分子气体。

1.2.1.2 统计窄谱带模型(SNB)^[6]

该类模型认为窄谱带上光谱线按一定的统计规律分布。标准统计模型认为所有的光谱线具有相同的强度。Goody 和 Godson (Malkmus 模型) 提出用概率密度分布函数来给出线强的变化。Goody 模型中谱线强度按指数规律分布, 由于其简便性, 它和窄带特性数据库相结合得到了广泛应用。Malkmus 模型的线强按指数尾倒数规律分布, 其在大气科学研究中应用广泛。对多原子分子气体 Malkmus 模型是较好的模型。当带宽为 25 cm⁻¹ 时 Malkmus 窄带模型和逐线计算的吸收率间的最大误差为 10%, 如果用最小二乘法从 HITRAN 92 逐线数据库得到模型参数, 在带宽为 10 cm⁻¹、气体压力大于 0.1 个大气压时, Malkmus 窄带模型的误差小于 1%。SNB 模型应用于非均匀气体时, 需要用 C-G 双参数标定近似^[9]。

董士奎等人在 300 ~ 3 000 K 的温度范围内^[7], 从 HITEMP 数据库得到光谱线资料, 采用 Young 提出的数值平均方法^[8], 计算了用于 Malkmus 模型的 CO₂ 在 15.4.3 和 2.7 μm 谱带的参数。

传统的窄带模型, 用穿透率描述辐射特性。一般情况下, 由穿透率反算得到的平均吸收系数是光学行程的函数, 故只能用穿透率计算气体的辐射穿透, 不适

用于任意的辐射传递方程求解方法, 且必须是黑体壁面包围的非散射介质, 用于非均匀介质时需要一些附加的近似假设。后来发展的 k 分布方法, 使该问题得到了改善。

1.2.1.3 统计窄谱带关联 k 分布模型(SNBCK)

在小的谱带间隔内普朗克函数基本不变, 则辐射强度和热流只受气体吸收系数影响。吸收系数数值在波数间隔很小的情况下多次相同, 每次都得到相同的辐射强度和热流。k 分布模型将吸收系数重新排列成平滑单调上升的函数, 对相同的吸收系数只需进行一次辐射强度计算。k 分布函数 f(k) 定义为:

$$f(k) = \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\Delta\eta} \delta(k - \kappa_\eta) d\eta \quad (4)$$

$$g(k) = \int_0^k f(k) dk \quad (5)$$

式中: δ(k - κ_η)—Dirac-delta 函数; g(k)—累积 k 分布函数, 代表值小于 k 的吸收系数所占的光谱分数。利用累积 k 分布函数, 平均穿透率 $\bar{\tau}_\eta(X)$ 可表示为:

$$\bar{\tau}_\eta(X) = \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\Delta\eta} e^{-\kappa_\eta X} d\eta = \int_0^\infty e^{-kX} f(k) dk = \int_0^1 e^{-k(g)X} dg \quad (6)$$

式中: k(g)—累积 k 分布函数 g(k) 的反函数。

由于用吸收系数描述气体辐射特性, k 分布模型适用于任意的辐射传递方程求解方法。假设 k 分布是相互“关联”的, 即在非等温介质中, 累积 k 分布函数在相同位置的吸收系数是一一对应的。对温度处于 200 ~ 300 K 之间, 主要是压力变化的大气科学研究, 关联 k 分布假设得到很成功的应用。

Liu 等人应用了 SNBCK 模型研究了二维气体辐射问题^[9], 将

统计窄带模型 (SNB) 和 CK 思想结合, 通过反 Laplace 变化求 k 分布。累积分布函数反函数的计算耗费了整个计算过程中大部分的 CPU 时间。Liu 等人考虑了积分格式对 SNBCK 计算的影响, 发现: 7 点 Gauss-Lobatto 积分结果和 SNB 吻合很好; 4 点 Gauss-Legendre 积分和 7 点 Gauss-Lobatto 积分精度差不多, 但计算时间明显缩短; 对多维问题, 综合考虑精度和效率, 推荐用 2 点 Gauss-Legendre 积分。Liu 等人用 SNBCK 模型计算了三维空腔中 0.1 MPa 下非等温 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-N}_2$ 混合物沿射线方向的窄谱带强度^[19]。 CO_2 和 H_2O 重叠带用穿透率相乘的处理方法会增加很多计算时间, Liu 提出了非关联方法和 Malkmus 谱带近似方法。Malkmus 谱带近似方法为: 将混合物中两气体的 Malkmus 谱带模型结合组成一个 Malkmus 谱带模型, 其模型参数的计算有 3 种方法: Lacis 和 Oinas 法、光学薄法和最小二乘法。通过比较, 发现最小二乘法最准确。考虑精度和效率, 推荐用光学薄 Malkmus 谱带近似方法和非关联方法。

1.2.1.4 假想气体统计窄谱带模型 (SNBFG)

在远程探测中, 特别是含 H_2O 时, 由于温度对线强的影响主要在于 $\exp[-E''/(kT)]$ 因子中, 此时 C-G 近似和其它经典近似关系式都不能准确计算介质中不同点吸收线的线强对温度的依赖关系。针对这一问题, Soufiani 等人提出了和 Ludwig 在统计窄带模型中所用的多组方法相似的假想气体关联 k 方法模型 (SNBFG)^[11~12]。根据跃迁的低能级能量 E'' 将气体谱线分成 N 组, 认为温度对同种假想气体的影响

相同, 对每组假想气体分别用 SNB 和 C-G 近似, 并假设不同假想气体的光谱统计独立, 即非关联。每种假想气体辐射特性参数由 Malkmus 模型加 C-G 双参数标定近似得到。通过和 LBL 结果比较, 发现 SNBFG 对通过长路径的热气体发射情况计算比较准确。

1.2.2 宽谱带模型

宽谱带模型就是把整个振动旋转谱带分成许多小间隔 $\Delta\eta$, 然后按每个间隔内平均吸收系数大小重新排列。这样整个谱带外形形成一个光滑而有规律的曲线, 通过积分可得到谱带的总吸收率 A , 即:

$$A \equiv \int_{\text{band}} \epsilon_n d\eta = \int_0^\infty (1 - e^{-\kappa_n X}) d\eta \quad (7)$$

宽谱带模型主要包括箱带模型、指数宽谱带模型和宽带 k 模型等。

1.2.2.1 箱带模型

箱带模型是最简单的宽带模型。其将谱带用宽度为有效带宽的矩形箱带近似, 大大简化了计算。刘玉英用箱带模型计算了一维无限大平板间气体介质在均匀型、边界层型和抛物线型 3 种温度分布下的辐射热交换^[13]。箱带模型只适于双原子分子气体, 而且有效带宽不易确定。

1.2.2.2 指数宽谱带模型

从量子力学和一些光谱实验分析可知谱带远翼的线强按指数衰减。根据这一特征, Edwards 提出了指数宽谱带模型。指数宽谱带模型分平均吸收系数峰值在上限、下限及中心 3 种情况。董士奎等人将 Edwards 模型进一步简化^[14], 采用灰带假设 (认为在该模型确定的谱带宽度内光谱吸收系数不随波数变化) 得到了利于工程应用的拟合关系式。该关系

式可计算包括总压为 0.1 MPa, 分压为 0.0~0.1 MPa, 压力行程为 0.01~1.0 MPa·m, 温度在 300~2 500 K 范围内, 水蒸气的各个谱带辐射特性参数, 即谱带光谱吸收系数, 谱带上、下限波数。

1.2.2.3 宽带 k 模型

将 k 分布方法应用到整个振动-旋转谱带, 就得到宽带 k 模型。Marin 等人提出了一种宽谱带吸收系数累积分布函数^[15], 并模拟了 CO_2 主要谱带的辐射。他们将 $g(k)$ 分 4 个区间, 用关联式来确定这些谱带的参数。 CO_2 谱带吸收系数计算结果与逐线计算、窄谱带模型和 Edwards 模型结果相吻合。聂宇宏等人用 Marin 提出的宽带关联 k 模型和重新排列吸收系数模型^[16], 计算了 H_2O 和 CO_2 吸收系数, 在吸收系数累积分布函数的计算中引入了修正宽带模型中计算带宽的方法。重新排列吸收系数模型可参见文献^[17]。

1.2.2.4 平滑谱带模型

Runstedler 等人提出了一种新的平滑吸收系数的方法^[18~19], 该方法将吸收系数重排后对平滑的曲线积分。与累积 k 方法不同, 平滑积分是在波数上积分。他们将该方法用于多元气体混合物时, 通过单一谱带内重叠线的处理方法类推, 单个平滑谱带吸收系数的简单相加得到混合物吸收光谱。平滑谱带模型所计算的气体总发射率和文献^[20]中的结果一致。

1.3 总体模型

热计算中通常只关心全波谱的辐射热流和它的分布, 可以用整体光谱辐射特性来直接计算整个热流。Hottel 整理相关的实验数据^[20], 绘制了 CO_2 和 H_2O 全光谱总发射率的线算图, 该线算图

表示了气体总发射率与气体分压、总压、行程长度和温度的关系。由于实验设备的限制,线算图中高温及大行程长度的发射率是由实验曲线外推得到的,误差较大。

另一经典总体模型是灰气体加权和模型(WSGG)^[6],它将非灰气体的辐射特性用几种等效灰气体代替。对每种灰气体单独进行传热计算,总热流由灰气体热流乘以适当的加权因子相加得到。由于其用吸收系数表示辐射特性,避免了谱带模型的缺陷,可以和任意辐射传递方程求解方法结合,所以在工程上应用广泛。其应用范围为:壁面和混合物中的粒子是灰体,且不考虑散射。由于灰气体的权是温度、压力和组分等的非线性函数,故确定起来很困难。Denison和Webb等人利用光谱数据库中相关的光谱线^[6],计算得到灰气体的加权因子,将WSGG模型发展到基于光谱线的灰气体加权和模型(SLW)。吸收分布函数模型(ADF)^[21]和SLW模型相似,只是它们权的计算不同。

1.3.1 基于谱线的灰气体加权和模型(SLW)

Solovjov等人提出用SLW模型处理多组分气体混合物光谱积分^[22]。除了直接和间接积分方法,还提出3种新的光谱积分方法:重叠、乘法及其混合方法,并用HITEMP光谱数据库计算SLW的光谱参数。用上述5种方法对等温均匀及温度和浓度阶跃变化的混合气体辐射换热进行计算,并和LBL比较,结果表明:重叠、乘法和两者混合方法比直接和间接方法明显省时。

1.3.2 假想气体吸收分布函数模型(ADFFG)

对非等温气体,用ADF不能准确描述辐射传递,原因在于介质中不同温度处的温度修正因子不同。Pierrot等人在ADF基础上^[23],根据分子跃迁的低能级能量将气体谱线分成N组,提出了一种新的气体辐射特性总体模型,即假想气体吸收分布函数模型(ADFFG),其思想和SNBFG接近。

ADFFG精度比ADF高,特别是热气体发射和冷气体吸收的辐射问题。对H₂O将能量分2级已足够,但对CO₂需要更多能级数目。ADFFG用吸收系数表示辐射特性,和所有辐射传递方程求解方法相容,但需要求解的方程个数是ADF的平方,并局限于壁面和粒子是灰体的情况。

1.3.3 全光谱k分布模型(FSK)

最近Modest提出了一种全新的全光谱k分布模型(FSK)^[9]。该方法可以和任意求解辐射传递方程的方法结合,只需对少量的光谱吸收系数进行数值积分,大大提高了计算效率。在全光谱关联k方法的限制条件(吸收系数遵循所谓的“标定近似”)内,该方法比较准确。其主要思想是引进普朗克函数加权k分布f(T, k),即:

$$f(T, k) = \frac{1}{I_b} \int_0^\infty I_{b\eta}(T) \delta \times (k - \kappa_\eta) d\eta \quad (8)$$

式中: I_b、I_{bη}—总的黑体辐射强度和光谱黑体辐射强度。

FSK模型进一步发展到多尺度全光谱关联k分布模型(MSF-SCK)和多组全光谱关联k分布模型(MGF-SCK)^[6]。MSF-SCK模型根据气体种类和气体跃迁低态能级能量分组,和假想气体思想类似。对温度和摩尔分数变化的非均匀气体混合物,只需少量的低态能级分组,该方法就得到较

准确的计算结果。但MSF-SCK模型中最优参考状态的选择以及能级的分区,有待进一步研究。MGF-SCK模型根据吸收系数与温度和局部压力的关系将光谱位置分M组,并分别计算关联k分布,当M≤32就可以获得和LBL计算相同的精度。对非均匀气体,若考虑大的温度范围,需要建立大量的光谱组。MGF-SCK模型中有关总体压力变化对吸收系数的影响,以及混合物、非灰边界和散射问题的处理都需要进一步研究。

Modest等人在HITEMP和CDS-1000光谱数据库基础上建立了H₂O和CO₂的窄带k分布数据库^[24],提出了一种基于窄谱带计算k分布的方法。系统地讨论了k分布数据的产生、存储优化和插值方法。该数据库使非均匀气体混合物窄谱带、局部光谱和全光谱的k分布容易得到。为了简化工程热传递问题,Modest等人在光谱数据库CDS-1000基础上^[25~26],提出了一种简单的CO₂全光谱k分布关系式。在HITEMP数据库的基础上,得到了H₂O全光谱吸收系数和累积k分布函数的工程应用关系式,并用一维介质的总发射率和热流计算验证了关系式的准确性。

表1给出了近几年来发展的气体辐射特性计算模型比较。表中用穿透率表示辐射特性的模型,只能用射线踪迹法求解辐射传递方程,适用于黑体壁面所包围的非散射介质。用吸收系数表示辐射特性的模型,可和任意辐射传递方程的求解方法结合使用。而总体模型由于失去了光谱的详细资料,所以受限于壁面和粒子为灰体的情况。

表 1 辐射特性计算方法比较

计算模型	参考文献	气体	计算条件	计算精度与速度	特性参数	光谱数据库
SNBFG	[11]	H ₂ O	非均匀非等温单气体	精度高, 速度很慢	穿透率	HITRAN 92
SNB	[6]	CO ₂	等温均匀单气体	精度高, 速度慢	穿透率	HITRAN 92
SNBCK	[9~10]	H ₂ O, CO ₂	非均匀非等温单气体, 非等温混合物	精度高, 速度较慢	吸收系数	HITRAN 92
EWB	[7]	H ₂ O	等温均匀单气体	精度较差, 速度较快	穿透率	—
Smooth band	[18]	CO ₂	等温均匀单气体	精度较差, 速度较快	吸收系数	—
WSGG	[6]	CO ₂ , H ₂ O, Soot	等温均匀含粒子混合物	精度差, 速度快	吸收系数	—
ADFG	[23]	CO ₂ , H ₂ O	非等温非均匀单气体	精度一般, 速度较慢	吸收系数	EM2C
SLW	[22]	CO ₂ , H ₂ O, CO, Soot	均匀等温或非均匀非等温含粒子混合物	精度较差, 速度快	吸收系数	HITEMP
FSCK 和 FSK	[6]	CO ₂ , H ₂ O	均匀非等温混合物	精度一般, 速度快	吸收系数	HITEMP
MSFSK	[6]	CO ₂ , H ₂ O	非均匀非等温混合物	精度一般, 速度较快	吸收系数	HITEMP CDS
MGFSK	[6]	CO ₂ , H ₂ O	非均匀非等温单气体	精度较高, 速度较快	吸收系数	HITEMP

为了对各模型的精度有一个直观的认识, 下面考察两黑体平板间压力为 0.1 MPa 的 H₂O + CO₂ + N₂ 混合气体层。H₂O 和 CO₂ 气体的分压分别为: $x_{H_2O} = 0.0155$ MPa, $x_{CO_2} = 0.0116$ MPa。温度是抛物线分布, 即:

$$T(z) = 4(T_w - T_c) \times \left(\frac{z - \frac{1}{2}}{L} \right)^2 + T_c$$

其中: $z = L/2$ 处的温度 $T_c = 2500$ K, 壁面温度 $T_w = 500$ K。

图 1 和图 2 给出了各种模型的壁面热流计算结果与逐线计算间的相对误差, 即: $(q_{model} - q_{lbl}) \times 100\% / q_{lbl}$ 。图 1 是窄带模型的计算结果, 图 2 是总体模型的计算结果。本文计算时各种模型参数从 HITRAN 2004 数据库获得, FSK 模型参考温度取容积平均温度。图中 ADF、WSGG 和 SLW 模型的计算结果取自文献 [27], 其模型参数从 EM2C 数据库获得。从图 1 可以看出窄带模型误差较小, 基本在 3% 以内, 但窄带带模型的计算量远远大于总体模型。图 2 中总体模型误差都比较大, 但计算速度快适合工程计算。FSK 误差在 15% 以内,

随着平板间间距增大迅速减小。

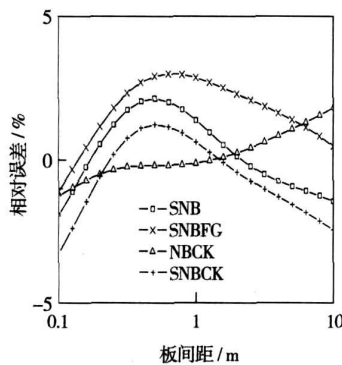


图 1 窄谱带模型计算的壁面热流图

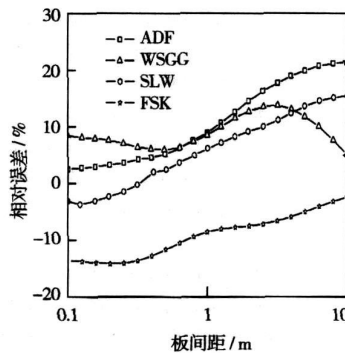


图 2 总体模型计算的壁面热流图

2 气体辐射存在问题及气体辐射特性计算方法选择

气体辐射问题主要在于: 气

体非灰吸收、沿辐射传递路径温度浓度压力不均匀、混合物中不同气体吸收带的重叠、气体与粒子混合吸收等。从前面的介绍可以看出这几年的研究热点主要集中在: 光谱积分方法、非等温浓度非均匀、含散射粒子气体混合物问题处理方法。

对不同的工程应用有不同的要求, 如燃烧室传热计算需要整个光谱的积分量, 而火箭尾喷焰的红外信号探测, 则仅需要某些局部谱带的辐射量, 所以不能说某一方法就优于其它方法。针对某些特定的辐射问题, 给出气体辐射特性计算方法选择的若干建议:

(1) 对需要整个光谱积分的辐射计算, 如燃烧室辐射换热计算, 综合考虑计算精度和效率建议采用 FSK 模型。因其用吸收系数表示辐射特性的模型, 可以和任意辐射传递方程的求解方法结合使用。由于光谱重排失去了光谱的详细资料, 所以受限于壁面和粒子为灰体的情况。对非等温介质, 由于波数范围太大, k 关联失效, 会导致较大的误差。另外还有一些缺点: 其一混合物全

光谱 k 分布不能从预先计算的单种气体全光谱 k 分布直接得到;其二含非灰粒子(如烟灰)混合物的 k 分布不能从只有气体的全光谱 k 分布得到。针对以上问题, Modest 等人提出了两种解决方法^[28]:一是混合气体全光谱 k 分布从单种气体窄带 k 分布数据库得到;二是气体和非灰散射粒子混合物的 k 分布从相同的窄带 k 分布数据库得到。

(2) 对仅需要某些局部谱带的辐射量,如火箭尾喷焰的红外信号探测,高温气体发射的辐射通过长的冷路径情况,由于其对精度的要求高,故建议采用 SNBFG 模型。一般采用 3~5 种假想气体就能获得较高的精度,但因其用穿射率描述辐射特性,不能适用于任意选择辐射传递方程求解的方法,且用于非均匀介质时需要一些附加的近似假设。

(3) 处理混合物问题时,建议采用非关联(乘法)方法,混合物中粒子可以处理成混合物中的一种气体。详细处理方法可参考文献[10, 22]。

3 结 语

随着航天技术的发展,火箭尾焰探测、红外目标的捕捉等都使遥感技术变得越来越重要,对气体辐射特性计算的要求越来越高,为此哈工大辐射课题组对气体辐射特性进行了大量的研究^[7, 14]。

考虑计算速度和精度,宽带模型是比较好的选择,但指数宽谱带模型(EWB)是将小波数间隔内的平均吸收系数重新排列后得到的近似关系式,且因其用谱带总吸收率表示辐射特性,存在和 SNBFG 模型相同的问题。现有

的宽谱带 k 分布模型基本都是建立在指数宽谱带模型基础上,并做了一些假设,使其精度和适用性受到限制。气体辐射特性计算只占整个辐射计算的小部分,所以应尽可能地提高其计算效率及与辐射传递方程求解方法的兼容性。从高温气体数据库直接得到模型参数,将普朗克加权 k 分布函数思想应用于宽谱带,建立准确快速并能与任意辐射传递方程求解方法相容的宽带 k 分布模型是今后气体辐射特性计算方法发展的重点。

参 考 文 献:

[1] MODEST M F, BHARADWAJ S P. Medium resolution transmission measurements of CO₂ at high temperature [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 73: 329-338.

[2] BHARADWAJ S P, MODEST M F. Medium resolution transmission measurements of CO₂ at high temperature-an update [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2007, 103: 146-155.

[3] BHARADWAJ S P, MODEST M F. Medium resolution transmission measurements of water vapor at high temperature [J]. ASME J Heat Transfer, 2006, 108: 374-381.

[4] TASHKUN S A, PEREVALOV V I, TEF-FO J L. CDSD-1000 the high-temperature carbon dioxide spectroscopic databank [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2003, 82: 165-196.

[5] ROTHMAN L S, CAMY P C, FLAUD J M, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database 2000 [EB/OL]. proceeding on line <http://www.hitran.com>.

[6] MODEST M F. Radiative heat transfer [M]. New York: McGraw-Hill Press, 2002.

[7] 董士奎, 余其铮, 刘林华, 等. 一种新的 CO₂ 高温辐射特性窄谱带模型参数计算方法 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22: 177-180.

[8] YOUNG S J. Non-isothermal band model theory [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1976, 18: 1-28.

[9] LIU F, SMALLWOOD G J, GULDER O L. Application of the statistical narrow-band correlated- k method to low-resolution spectral intensity and radiative heat transfer calculations-effects of the quadrature scheme [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43: 3119-3135.

[10] LIU F, SMALLWOOD G J, GULDER O L. Application of the statistical narrow-band correlated- k method to non-gray gas radiation in CO₂-H₂O mixtures: approximate treatment of overlapping bands [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2001, 68: 401-417.

[11] SOUFIANI A, ANDRE F, TAINE J. A fictitious-gas based statistical narrow-band model for IR long-range sensing of H₂O at high temperature [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 73: 339-347.

[12] LUDWIG C B. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. NASA Technical report, SP-3080, 1973.

[13] 刘玉英, 张欣欣. 箱带模型结合 DOM 在非灰气体辐射换热计算中的应用 [J]. 热科学与技术, 2003, 12(2): 336-341.

[14] 董士奎, 刘林华, 谈和平, 等. 水蒸气非灰辐射光谱吸收系数 [J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7: 256-260.

[15] MARIN O, BUCKIUS R O. A simplified wide band model of the cumulative distribution function for carbon dioxide [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41: 3881-3897.

[16] 聂宇宏, 陈海耿. 气体辐射宽带关联 k 模型的修正算法 [J]. 计算物理, 2002, 19: 439-442.

[17] LEE P Y C, HOLLANDS K G T, RAITHBY G D. Reordering the absorption coefficient within the wide band for prediction gaseous radiant exchange [J]. ASME J Heat Transfer, 1996, 118: 394-400.

[18] RUNSTEDTLER A, HOLLANDS K G T. Modeling of gaseous radiant exchange with the smooth (reordered) band model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 1653-1660.

[19] RUNSTEDTLER A, HOLLANDS K G T. Modeling of band overlap in gas mixtures with the smoothed (re-ordered) band model [J]. Journal of Quantitative

- Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 73: 375-384.
- [20] HOTTEL H C, SAROFIM A F. Radiative Transfer[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1967.
- [21] RIVIERE P, SOUFIANI A, PERRIN M Y, et al. Air mixture radiative property modeling in the temperature range 10 000 ~ 40 000 K[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1996, 56: 29-45.
- [22] SOLOVJOV V P, WEBB B W. SLW modeling of radiative transfer in multi-component gas mixtures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2000, 65: 655-672.
- [23] PIERROT L, RIVIERE P, SOUFIANI A, et al. A fictitious-gas-based absorption distribution function global model for radiative transfer in hot gases[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1999, 62: 609-624.
- [24] WANG A, MODEST M F. High-accuracy, compact database of narrow-band k -distributions for water vapor and carbon dioxide[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 93: 245-261.
- [25] MODEST M F, MEHTA R S. Full spectrum k -distribution correlations for CO₂ from the CSD-1000 spectroscopic databank[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2487-2491.
- [26] MODEST M F, SINGH V. Engineering correlations for full spectrum k -distribution of H₂O from the HITEMP spectroscopic databank[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 93: 263-271.
- [27] PIERROT L, SOUFIANI A, TAINE J. Accuracy of narrow-band and global models for radiative transfer in H₂O, CO₂ and H₂O-CO₂ mixtures at high temperature[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1999, 62: 523-548.
- [28] MODEST M F, RIAZZI R J. Assembly of full-spectrum k -distributions from a narrow-band database; effects of mixing gases, gases and non-gray absorbing particles, and mixtures with non-gray scatterers in non-gray enclosures[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 90: 169-189.

(编辑 伟)

诊断技术

锅炉和汽轮机设备工作失灵自动化分析模块的组成和特性

《Энергетика》2006 年 10 ~ 12 月号报道了火力发电厂锅炉和汽轮机设备故障诊断和分析模块的组成和特性。

为了实现燃烧天然气—重油汽包锅炉工作失灵自动化分析系统,通常要求针对锅炉空气—烟气通道、锅炉水汽通道、给水通道和燃料供给系统测量 120 ~ 150 个模拟信号和 120 ~ 130 个离散信号。列出了锅炉设备工作失灵的组成及其功能。

为了实现汽轮机装置工作失灵的自动化分析,通常要求针对汽轮机组、润滑系统、再生系统、冷凝器、调节系统和余热利用系统测量 250 ~ 280 个模拟信号和 180 ~ 200 个离散信号。列出了汽轮机设备工作失灵的组成及其功能。

诊断报告通常包含下列信息:

- °故障形式及其特性;
- °故障原因和其过程;
- °排除故障及其控制方案;
- °新工况中最重要的参数检查结果。

上述各诊断模块的组成预定用于足够通用形式的热动力设备及其连接系统。在火力发电站工艺系统中出现新的部件,例如连接到汽轮机部分的燃气轮机前置结构、汽轮机给水泵等时,应该重新审定诊断模块的组成。

(吉桂明 供稿)

高温气体辐射特性计算模型=A Survey of Models for the Calculation of Radiation Characteristics of High-temperature Gases[刊, 汉]/YIN Xue-mei, LIU Lin-hua (College of Energy Science and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 473 ~ 479

An accurate calculation of radiation characteristics of high-temperature gases is of major significance in such engineering applications as combustion and infrared detection etc. The current research results of gas radiation characteristics both at home and abroad are described. The fundamental theory and main features of the methods for calculating the radiation characteristics of three kinds of gases are analyzed with the emphasis on the newly developed full-spectrum k-distribution (FSK) model. Summarized and tabulated are the applicable conditions, calculation accuracy and speed of various models for the calculation of radiation characteristics. The authors have calculated the wall surface heat flux in the steam and carbon dioxide mixed gas layer between two parallel plates and presented a chart comparing the relative-error difference between the calculation results of various models and those of a line-by-line calculation. The selection of proper methods for the calculation of radiation characteristics of gases under different conditions is proposed and in the light of the shortcomings of the current models, the future research trend also forecasted. **Key words:** gas radiation characteristics, computational model, k-distribution model

缝隙位置对空心静叶去水性能影响的试验研究= Experimental Study of the Effect of Suction Slot Location on Water Removal Performance of Hollow Stationary Blades[刊, 汉]/WANG Xin-jun, LU Cheng (National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering, Turbomachinery Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), LIU Jian-cheng, ZHANG Jun-bo (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 480 ~ 483

On the slot suction test rig of a humid-air plane-cascade, an experimental study was conducted of the water removal performance of the suction slots on hollow stationary blades of a steam turbine. The test conditions are given as follows: the air humidity at the cascade inlet, 7.94%; water droplet diameter, between 1.5 to 150 μm , airflow velocity at the cascade outlet, 170 m/s; width of the suction slot, 1.0 mm, angle of the suction slot 45° with the suction slots being located at the suction and pressure side of the stationary blades respectively. The test results show that with an increase in relative location of the suction slots, the water quantity sucked through the slots will increase and under a same suction pressure difference, the water quantity sucked through a unit length of a slot on the concave surface of a stationary blade is greater than that on the convex surface. The suction slots close to the water outlet on the concave side of a stationary blade enjoy an optimum water-removal performance. Furthermore, with an increase of the suction pressure difference, the water quantity sucked through the slots will also increase accordingly. **Key words:** steam turbine blade, hollow stationary blade, suction slot location, suction pressure difference, water quantity sucked

导叶预旋角对叶轮/扩压器相干的影响=A Study of the Effect of Inlet Guide Vane (IGV) Prewhirl Angles on Impeller/Diffuser Interaction[刊, 汉]/ZHOU Li, CAI Yuan-hu (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072), XI Guang (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(5). — 484 ~ 489

Under different inlet-guide-vane (IGV) prewhirl angles and by using an unsteady approach, a numerical simulation was conducted of the unsteady interactions among the following three components: IGV, impeller and diffuser, moreover, a comparison with the test results was performed. Studied was the effect of IGV prewhirl angles on the flow and unsteadiness inside the impeller and diffuser. Meanwhile, the mechanism of interactions among the above-mentioned three moving and stationary components was also explored. The results show that the calculation results are in good agreement with the test ones. At a same flow rate, the wake flow of the IGV and the unsteady function of a large-sized vortex cluster will