

窄谱带模型在气体辐射中的应用

韦 伟¹, 翁春生², 白桥栋²

(1 江苏海事职业技术学院 船舶与机电工程系, 江苏 南京 211170)

2 南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

[摘要] 由于通常情况下视气体介质为透明, 所以气体辐射常常被忽略不计. 随着气体浓度的增加, 气体参与辐射的性能增强, 因此准确模拟燃烧中产生的气体辐射特性具有重要的现实意义. 在以往的气体辐射换热计算中, 均把实际气体假设为灰气体, 而使得其辐射特性与波长无关, 这大大简化了计算的复杂程度, 但同时也降低了计算的准确度. 研究了窄谱带模型在气体辐射中的运用, 根据气体介质的物理性质, 计算了对应各个波长段的辐射强度和穿透率, 并将计算结果绘制成曲线图, 说明研究细化到气体辐射过程中的每一个波长段. 另绘制温度值和烟灰微粒的体积分数改变后的曲线图, 并与改变之前的相对应的曲线图进行比较, 说明窄谱带模型应用的研究结果符合实际情况.

[关键词] 窄谱带模型, 辐射传热, 光谱吸收率, 光学厚度

[中图分类号] TK 16 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2006) 03-0036-04

The Application of Narrow Band Model in Gas Radiation

WEI Wei¹, WENG Chunsheng², BAI Qiaodong²

(1 Department of Shipping and Electromechanical Engineering Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211170, China)

2 School of Power Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Generally, we account the gas medium transparent, so gas radiation is always ignored. Along with the increase of gas consistency, gas is more and more concerned with the radiative heat transfer, so it is important to simulate gas radiation in combustion conditions. The practical gas was assumed as gray gas whose radiant characteristic was independent of its wavelength. This assumption can make the calculation easier, but less smart. The purpose of this dissertation is to study the application of narrow band model on gas radiation. The dissertation calculates the spectral intensity and transmittance along the wavelength using narrow band model according to the physical property. The dissertation plots curves according to the output parameter, illustrates the fine of the study. The dissertation also plots curves after changing the temperature or the volume fraction of soot, and compares with the one before changed, which indicates that the study of application of Narrow Band Model is in accordance with the practice.

Key words narrow band model, radiative heat transfer, spectral absorptivity, optical depth

0 引言

热辐射的吸收和发射是由于同时发生的振动能级跃迁和转动能级跃迁而产生的. 基本的振动—转动谱带出现在分子的基本振动频率上, 也就是说, 它是由相邻的振动能级的跃迁而产生的. 跨越 3 个振动能级的跃迁产生 1 次谐波带, 它的频率为分子基本振动频率的两倍. 其它谐波带的频率是基本频率的更高倍数. 一般来说, 谐波带要比基带弱得多.

在光谱中心位置的一根单一的光谱线, 它的性质完全由它的谱线力度和谱线半宽决定. 其中力度是指光谱强度或吸收系数的积分

$$S \equiv \int_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda \tag{1}$$

收稿日期: 2006-02-27

作者简介: 韦 伟 (1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事系统仿真的学习与研究. E-mail: jueye@126.com

通讯联系人: 翁春生 (1964-), 教授, 博士生导师, 主要从事工程热物理等方面的教学与研究. E-mail: weng@mail.njnu.edu.cn

式中, S 为谱线力度; α 为吸收系数; η 为波数. 谱线半宽是机械展宽方面的内容, 包括碰撞展宽和多普勒展宽. 尽管如此, 一个震动—转动谱带有许多在空间封闭的光谱线, 这些光谱线可能高度重叠. 由于相邻的光谱线的空间间隔紧密, 所以黑体方程在整个光谱范围内几乎不会有任何变化. 但是由于发射束来自介质的各个局部 (随它们的温度变化) 包括壁面 (该处气体透明, 发射束来自各个波长), 所以局部辐射强度被认为是光滑的. 又考虑了吸收和散射作用, 而使得光滑度增加. 因此, 总的吸收量和总的发射量表示为:

$$N_{\alpha} = \int_{I_{(b)}\eta} \left\{ \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\frac{\Delta\eta}{2}}^{\frac{\Delta\eta}{2}} \alpha_{\eta} d\eta \right\} d\eta \quad (2)$$

$$N_{\varepsilon} = \int_{I_{(b)}\eta} \left\{ \frac{1}{\Delta\eta} \int_{\frac{\Delta\eta}{2}}^{\frac{\Delta\eta}{2}} \left[1 - \exp\left\{ - \int \alpha_{\eta} ds \right\} \right] d\eta \right\} d\eta \quad (3)$$

1 理论模型的应用

辐射通量差可以表示为:

$$- \cdot q_r = 4\pi a_i \bar{i}_i - 4\pi a_p \bar{i}_b \quad (4)$$

式中, 普朗克黑体强度 \bar{i}_b 和普朗克平均吸收系数 a_p 在该流场的局部条件下是可以给定的. 入射平均强度 \bar{i}_i 和入射平均吸收系数 a_i 的确定是有待解决的较为复杂的问题, 因为要确定其中任何一个量都需要掌握温度场和边界条件等大量相关数据. 窄谱带模型为解决入射平场强度计算中的二重积分提供了一种有效的方法.

具体涉及到的光谱辐射量 $N_{\omega}(\omega, T)$ 是由辐射的入射点沿着辐射线计算得来的. 假设 l 为沿路径的长度, L 为总的路径长度, 那么

$$N_{\omega} = - \int_0^L \left(\frac{d\tau(l, \omega)}{dl} \right) dl \quad (5)$$

因为在谱带模型的计算中定义辐射量覆盖以 ω 为中心的多个波数间隔, 所以穿透率取平均值. 穿透率 τ 不仅仅是关于物理量 l 的函数, 同时还与气体性质中的温度、压强等有关, 因此定义为:

$$\tau(l, \omega) = \exp[- \delta(l, \omega)] \quad (6)$$

式中, 光学厚度 δ 是所有发射谱线光学厚度的总和

$$\delta(l, \omega) = \sum_i \delta(l, \omega, i) \quad (7)$$

可见, 光学厚度的计算是求穿透率和辐射量的关键所在. 本文采用单线组模型 (single lines group model SLG) 进行计算.

在单线组模型中, 所有的辐射谱线在同一个光谱间隔中. 每条谱线的力度 S (谱线的吸收系数沿波数的积分) 和 Curtis-Godsin 近似值没有大的区别. 因此 Curtis-Godsin 近似值可以被应用为单谱线的参数. 而在多线组模型 (multiple lines group model MLG) 中光谱间隔中的光谱线被分为若干组, 每个组的光谱线有着相同的谱线强度, 而不同组的光谱线有着不相同的谱线强度. 在这种模型中 Curtis-Godsin 近似值被应用于各组谱线, 此时的发射率为各组发射率的乘积.

2 计算结果及分析

根据以上理论分析, 编写 Fortran 语言程序, 得到各种情况下光谱强度随波长变化曲线.

辐射的气体介质等温均匀时, 辐射强度和穿透率随波长的变化规律分别反映在图 1 和图 2 中. 两图中, 波动强烈处都是在 $11 \sim 15.5 \mu\text{m}$ 段. 辐射最强, 辐射穿透率最大, 接近 1.0 即辐射在通过气体介质时既没有被吸收, 也没有被散射掉. 当波长趋于 $20 \mu\text{m}$ 时, 穿透率最小, 接近 0.0 即辐射在通过气体介质时, 几乎被全部吸收.

辐射的气体介质非等温时, 辐射强度和穿透率随波长的变化规律分别反映在图 3 和图 4 中. 图中 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内, 辐射强度和穿透率变化幅度都较大. $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内, 辐射强度呈下降趋势, 而穿透率呈上升趋势; 当波长趋于 $100 \mu\text{m}$ 时, 辐射强度最小, 接近 0.0 穿透率最大, 接近 1.0 两图中所呈现的规律一致, 即波长较大时气体介质对辐射几乎是透明的.

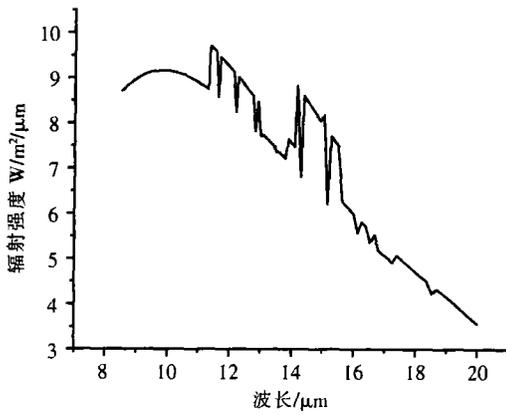


图 1 气体介质等温均匀时光谱强度分布

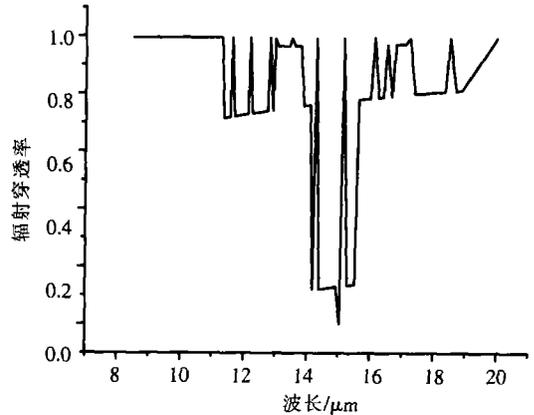


图 2 气体介质等温均匀时穿透率分布

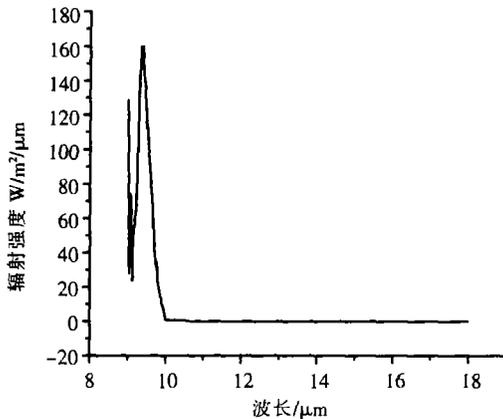


图 3 气体介质非等温均匀时光谱强度分布

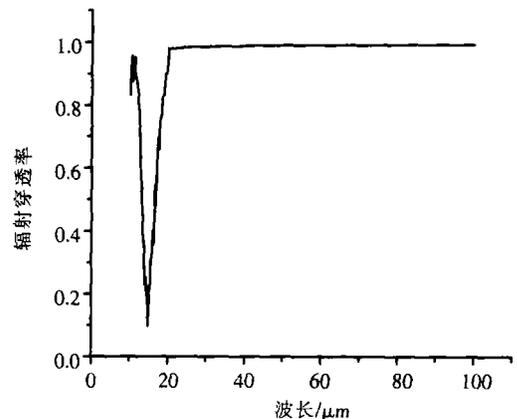


图 4 气体介质非等温均匀时穿透率分布

为了更好的对计算结果进行分析,将第一种情况,即气体介质等温均匀时的各温度在允许范围内增加一倍.经过程序运行得到总定向辐射能通量为温度改变前的 12.7 倍.这符合温度越高,气体辐射能力越强的规律.此时辐射强度和穿透率随波长的变化规律分别反映在图 5 和图 6 中.

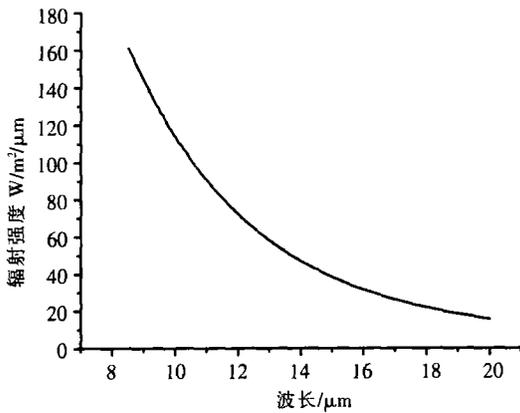


图 5 气体介质等温均匀时改变温度后光谱强度分布

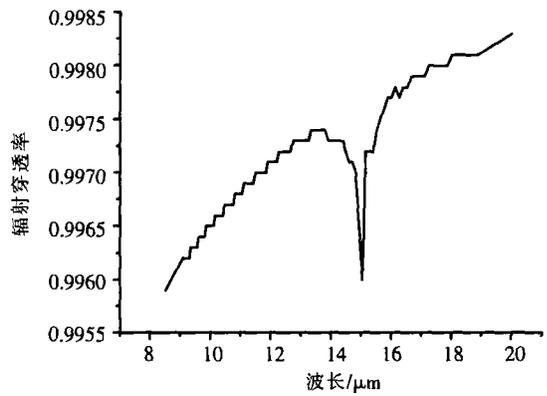


图 6 气体介质等温均匀时改变温度后穿透率分布

与图 (1) 和图 (2) 相比,图 (7) 和图 (8) 中辐射强度随波长增加而减弱与辐射穿透率随着波长的增加而增强的相对应规律,因温度升高而更为显著了.

同样,为了更好的对计算结果进行分析,将第二种情况下,即气体介质非等温时的烟灰微粒体积分数在允许范围内减为原来的 1/10 经过程序运行得到总定向辐射能通量不到改变前的 15%,这与烟灰微粒能够增强气体辐射能力的实际情况一致.辐射强度和穿透率随波长的变化规律分别反映在图 (7) 和图 (8) 中,与图 (3) 和 (4) 相比,曲线变化趋势基本一致.同样是在 10~20 μm 波长段,曲线的变化幅度较大;20~100 μm 段,曲线趋于平缓.所反映的辐射强度的变化规律与所反映的穿透率的变化规律相一致,符合实际情况.

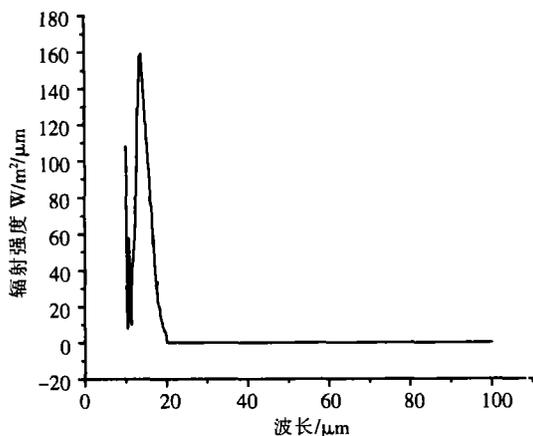


图7 非等温均匀时改变烟灰微粒体积分数后光谱强度随波长的分布

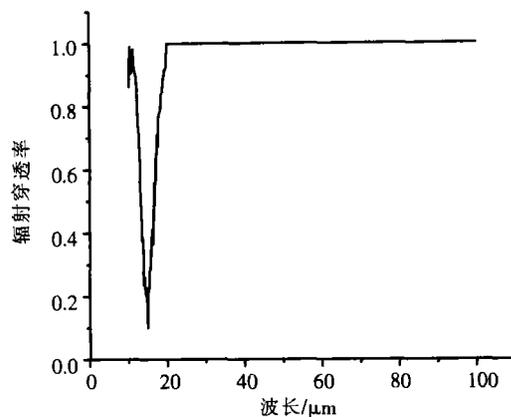


图8 非等温均匀时改变烟灰微粒体积分数后穿透率随波长的分布

3 结语

气体的辐射强度及穿透率等特性是随其波长的变化而变化的,并且受温度和煤烟微粒等因素的影响.通过窄谱带模型,可以细致地模拟出其变化的程度,直观地反映温度等因素改变对气体的辐射强度及穿透率的影响.

[参考文献] (References)

- [1] [美]斯帕罗 E M,塞斯 R D,著.顾传保,张学学,译.辐射传热[M].北京:高等教育出版社,1982
SPARROW E M, SETH, TRANSLATED R D. Radiation Heat Transfer[M]. Translated by Gu Chuanbao and Zhang Xuexue
Beijing Higher Education Press, 1982 (in Chinese)
- [2] [美]R. R.赖歇.燃烧技术手册.北京:石油工业出版社,1982
REICHEL R R. Burning Technical Manual[M]. Beijing Petroleum Industry Press 1982 (in Chinese)
- [3] BHATTA CHARJEE S, GROSSHANDLER W. Effect of radiative heat transfer on combustion chamber flows[J]. Comb Flame 1989, 77: 347-358
- [4] VITKN E I. Engineering procedure for calculating the transfer of the selective radiation of molecular gases[J]. Int J Heat and Mass Transfer 2000, 43: 2029-2045
- [5] KM O J, SONG T H. Data base of WSGGM-based spectral model for radiation properties of combustion products[J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2000, 64: 379-394
- [6] GROSSHANDLER W, NGUYEN H. Application of the total transmittance nonhomogeneous radiation model to methane combustion[J]. J Heat Transfer 1985, 107: 445-450

[责任编辑:刘 健]