

文章编号:1000-8055(2013)05-1119-06

某型飞机短舱辐射换热计算

吴 宇, 钟剑龙, 吕其明

(中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘 要: 针对某飞机地面慢车工况,进行了短舱内复合换热数值计算研究,分别运用球谐函数法、离散坐标法和蒙特卡洛法计算辐射换热.结果显示:不同计算方法所得结果总体上趋于一致,热辐射与自然对流的耦合作用明显.与单纯自然对流的计算结果相比,舱内温度显著升高,各区域温度值上升 7%~30%.考虑空气介质对不同波段热辐射的选择性吸收后,短舱内各计算点温度进一步上升.综合分析表明:地面条件下飞机短舱换热分析过程中热辐射的影响不可忽略.

关 键 词: 短舱; 热辐射; 球谐函数; 离散坐标; 蒙特卡洛; 数值计算

中图分类号: V23

文献标志码: A

Numerical investigation of thermal radiation in a nacelle

WU Yu, ZHONG Jian-long, LÜ Qi-ming

(The First Aircraft Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on computational fluid dynamics method, airplane in idle condition was studied in conjunction with heat transfer in a nacelle. And different radiation computation methods including spherical harmonics, discrete ordinate and Monte Carlo method were adopted to simulate thermal radiation. The result shows that coupling effect of radiation and convection is obvious. In addition, compared with the simulation result of pure convection, nacelle ambient temperature predicted by coupling way is 7%~30% higher. While selective absorption of air under infrared radiation is taken into account, the ambient temperature rises further. Thus the effect of thermal radiation should not be ignored to simulate nacelle heat transfer in ground condition.

Key words: nacelle; thermal radiation; spherical harmonics; discrete ordinate; Monte Carlo; numerical investigation

飞机短舱通风冷却系统的设计是飞机动力装置系统设计的重点和难点.在工程实践过程中,经常发现飞机处于地面状态时,短舱内温度实际测量值通常高于设计时的计算值.分析认为,飞机处于地面慢车及热浸泡状态时,短舱中的换热主要通过自然对流和热辐射方式进行,相比于空中飞行状态,通风量显著下降,各发动机附件处于最为严酷的高温工作环境.此时如果只考虑对流,而忽

略热辐射的影响,其计算值必然偏离较大,无法满足工程计算需求.

关于热辐射计算问题,目前国内外已进行了大量的研究^[1-6],Tan 等人^[4]首先提出射线追踪-节点分析法,并采用该方法研究了辐射与对流边界条件下单层非灰介质层内的瞬态耦合换热;季经纬等人^[5]对多种尺寸房间内的火焰与烟气层热辐射进行了计算.战乃岩等人^[6]对具有导热和表

收稿日期:2012-05-15

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.1119_022.html

作者简介:吴宇(1985-),男,湖南株洲人,工程师,硕士,主要从事飞机动力装置系统设计.

面辐射换热相互耦合的封闭腔内的自然对流进行了数值研究,表明在自然对流的封闭腔内,辐射换热比对流换热更占主导地位.然而针对发动机舱的热辐射与对流耦合换热计算还少有人涉及.本文通过计算流体动力学/红外辐射(CFD/IR)方法对某型飞机短舱内的热辐射特性进行数值研究,结合不同辐射计算模型,分析地面慢车状态时短舱内热辐射对温度场的影响.

1 研究对象

本文研究对象如图1所示,某型飞机短舱及其通风空间结构主要包含短舱、发动机壁面、发动机各附件和各系统管路.

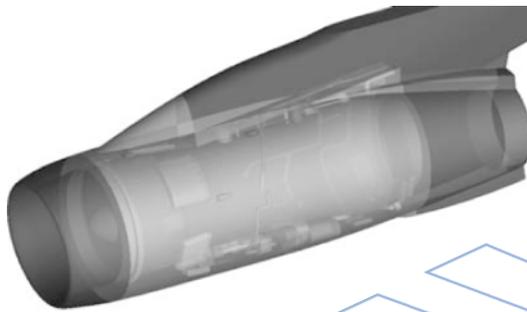


图1 短舱结构示意图
Fig. 1 Sketch of nacelle structure

地面慢车状态时,短舱冷却系统的工作原理如图2所示.短舱外空气由底部通风百叶窗进入短舱,受发动机热壁面的加热作用,形成自然对流,热空气在短舱上半部聚集.同时,空气升温膨胀,部分热空气通过百叶窗流向大气.

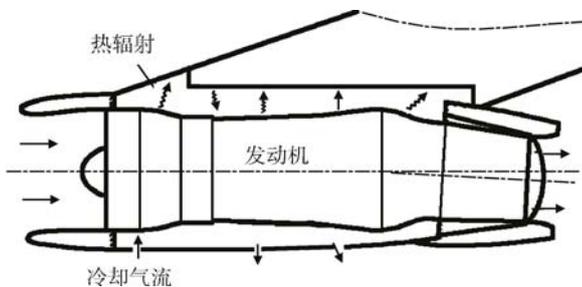


图2 短舱冷却系统的工作原理
Fig. 2 Principle of nacelle cooling system

为了简化计算,结合短舱换热分析的需求,对发动机舱结构作如下简化:①保留最主要热源壁面;②略去所有发动机附件及管路;③保留主要气流通路,如通气百叶窗.简化后的模型如图3所

示.为便于下文分析表述,将计算点及计算截面的位置加以标记编号.

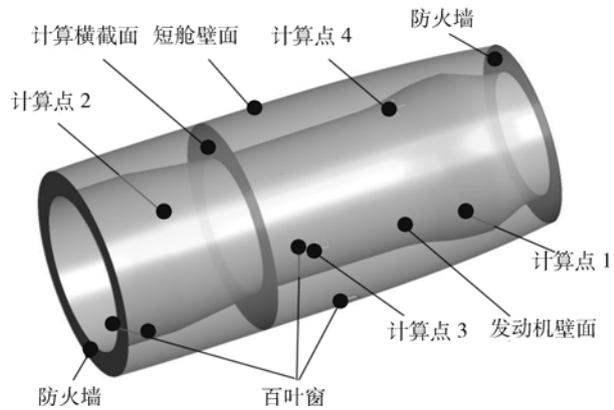


图3 计算模型及计算点/截面位置
Fig. 3 Computational model and location of calculational point/cross section

2 数学物理模型

数值计算采用三维定常的N-S方程来模拟流体动力学过程,湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型,近壁面采用标准壁面函数处理.

辐射换热计算基于辐射传递方程

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = -(\kappa_a + \kappa_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + \kappa_a I_b(\mathbf{r}) + \frac{\kappa_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}') d\Omega' \quad (1)$$

式(1)中 \mathbf{r} 为空间位置矢量, \mathbf{s} 为辐射传递方向单位矢量, \mathbf{s}' 为散射方向矢量, κ_a 和 κ_s 分别表示吸收系数和散射系数, I_b 为黑体辐射强度, Φ 为散射相函数.

辐射传递方程描述了辐射强度在位置空间和角度空间上的变化.其中辐射强度是一个多维变量的函数,难以获得理论解,多数情况下只能通过数值计算的途径进行近似求解.目前已发展起来的辐射传递方程数值求解方法主要分为两大类:一是基于射线跟踪的方法;二是基于微分形式辐射传递方程全局离散的方法.第一类方法一般需要通过跟踪光束传播轨迹来进行求解,如区域法、蒙特卡洛法和离散传递法.由于需要进行烦琐的光束传播轨迹计算,这类方法计算速度较慢,在与热流体问题中的其他过程进行耦合计算时,耗时很长.第二类方法的求解过程类似于一般偏微分方程的离散和求解,如离散坐标法、有限体积法、有限元法等.这类方法计算速度较快,适合与对流和导热过程耦合计算^[7-8].

本文辐射换热计算将分别采用球谐函数法、离散坐标(DO)法和蒙特卡洛(Monte Carlo)法。为了考虑非灰体空气热辐射的影响,引入辐射灰带(gray-band)模型。

2.1 球谐函数法

球谐函数法是常用的求解辐射传输方程的近似方法,又称 PN 近似法,首先由 Jeans^[9] 在研究星际辐射传输时提出,后来 Modest^[10] 将其应用于三维辐射传热中。该方法的出发点是把辐射强度展开成为正交的球谐函数。工程上最为常用的 PN 近似法是 P1 近似,因为其数学上相对简单,并且对计算光学厚介质有较好的精度。

P1 近似在 CFD/IR 方法中的体现是 P1 模型。该模型对于辐射热流 q_r 的计算方程为

$$q_r = \frac{1}{3(\kappa_a + \kappa_s) - C\kappa_s} \nabla G \quad (2)$$

其中 C 为线性各相异性相位函数系数, G 为入射辐射,其输运方程为

$$-\nabla \cdot q_r = \kappa_a G - 4\kappa_a n^2 \sigma T^4 \quad (3)$$

其中 n 为折射率。将 $-\nabla \cdot q_r$ 作为能量源项代入能量方程,即辐射效应得以考虑。

2.2 蒙特卡洛法

对统计抽样实行射线跟踪计算及整理分析构成了蒙特卡洛算法^[11]。该方法没有倾向性地从计算机的计算结果中取大量抽样,给出了所要求精度的结果。跟踪一束光子,不允许分支;每次只跟踪一个统计选择的方向,计算吸收、散射和反射。多次重复此计算,所得计算结果便会接近实际情形^[12]。

飞机短舱内纯粹由热辐射引起的面元 A_j 的热流量 Q_{A_j} 可由下式^[13] 计算得到:

$$Q_{A_j} = \int_{A_j} \int_V \frac{\kappa_{a_i}}{\pi r^3} \exp(-\int_0^r \kappa_{a_i} r dr) \sigma T_{ge}^4 dV_i dA_j + \int_{A_j} \int_A \frac{\cos \eta_i \cos \eta_j}{\pi r^2} \exp(-\int_0^r \kappa_{a_i} r dr) \kappa'_{a_i} \sigma T_{se}^4 dA_i dA_j \quad (4)$$

式(4)中第一部分是全体辐射介质 V 与面元 A_j 间的辐射传热;第二部分是整个发动机壁面 A 与面元 A_j 间的辐射传热, η 为面元法线与辐射方向的夹角, r 为辐射源到壁面距离, κ'_a 为面元吸收系数,下标 i, j 为单元编号; ge 为体单元; se 为面单元。

2.3 离散坐标法

辐射传递方程的离散坐标法是 Chandrasek-

har^[14] 研究大气辐射问题时首先提出的,该方法由于适用范围广,并且在计算有散射的辐射问题方面优于其他方法,在传热工程中得以广泛应用。离散坐标法基于对辐射强度的方向变化进行离散,离散坐标模型求解的就是从有限个立体角发出的辐射传播方程,每个立体角对应直角坐标系下的固定方向 s ,每个方向求解一个辐射输运方程,如下式^[15] 所示:

$$\nabla \cdot [I(r, s) s] = -(\kappa_a + \kappa_s) I(r, s) + \kappa_s I_b(r) + \frac{\kappa_s}{4\pi} \left[\sum_l^{N\Omega} \omega^l I^l \Phi(\Omega_i, \Omega_s) \right] \quad (5)$$

其中 ω^l 为积分系数, $\Phi(\Omega_i, \Omega_s)$ 为离散后的散射项函数。

工程实践中,某些情况下还需要考虑玻璃、空气一类的非灰体辐射,灰带模型因为其简单便捷,常用于工程的非灰体辐射模拟,该方法的基本思路是:把整个辐射光谱带分成 n 个独立的波带,辐射传递方程在所有的波长范围内对波长进行积分,这样就得到关于 $I_\lambda \Delta \lambda$ 的输运方程。辐射热量包含在每一个波带 $\Delta \lambda$ 内,在整个波长范围内进行求和,得到方向 s 和位置 r 的总辐射强度 $I(r, s)$ 为

$$I(r, s) = \sum_k I_{\lambda k}(r, s) \Delta \lambda_k \quad (6)$$

3 计算结果及分析

根据上述描述,本文计算工况选取地面热天慢车状态,环境温度 40°C ,飞机地面静止,发动机慢车转速状态。短舱壁面、防火墙及发动机壁面均为无滑移固壁边界,根据慢车状态发动机壁面温度试验结果,设定发动机壁面温度。通风百叶窗设为压力出口边界。

本文以软件 Fluent 6.3 为平台进行流体/热辐射耦合计算,并选用不同辐射模型进行短舱热辐射计算,计算方案设计如表 1 所示。

表 1 热辐射计算方案

Table 1 Thermal radiation calculation schemes

方案序号	热辐射模型
1	Radiation off (不考虑热辐射)
2	P1
3	DO
4	Monte Carlo
5	DO+gray-band

若不进行热辐射的计算,该问题即单纯的自然对流问题,其计算横截面的速度矢量如图 4 所示,气流在短舱内形成环流,即发动机壁面附近空气受热上升,至短舱顶部开始向两侧扩散,促使相对较“重”的冷空气向短舱底部流动.空气流速在数值上不超过 0.2 m/s ,流速趋缓,表明热驱动力偏弱.

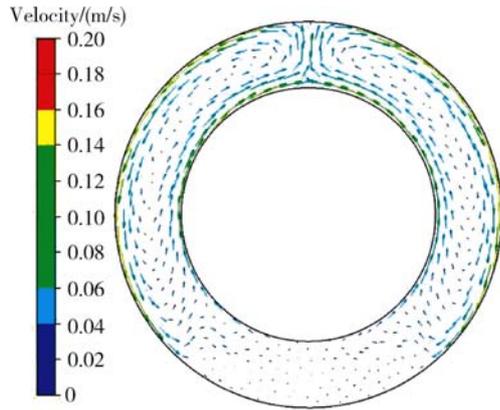


图 4 计算横截面切向速度矢量

Fig. 4 Tangential velocity vector of calculational cross section

进行热辐射计算时,各壁面根据材料属性设定黑度值,空气介质不考虑辐射散射,即 $\kappa_c = 0$.

分析图 5、图 6 的计算结果发现:单纯考虑自然对流的情况下,短舱内温度场呈现明显分层现象,并且温差显著,达到 30°C 左右.在发动机轴向上,发动机壁面温度呈递增趋势,其短舱内温度场也表现出同样的趋势,即后段温度高于前段.

加入辐射模型后,热辐射对温度分布有显著的影响,主要表现为温度场趋向均匀,短舱上下空间温度差异变小,下半部的温度明显上升,这一特性在 Monte Carlo 模型的计算结果上表现最为明显.这主要是因为发动机壁面发射的热辐射对短舱壁面有非接触的换热,使短舱壁面温度升高,短舱底部与临近的空气介质进行对流换热,起到加热气体的作用.而不考虑辐射时,只有发动机壁面与短舱内空气进行对流换热,故总换热量被明显低估(如图 5、图 6 所示).

方案 5 进一步考虑空气介质对固定波段红外辐射的吸收作用,计算所得温度分布见图 7.

方案 5 和方案 4 的计算结果相比,计算所得场内各点温度均有明显上升,这表明,考虑了空气介质对热辐射的吸收作用后,高温部件对非接热的空气进行直接加热,使系统总换热量增加.

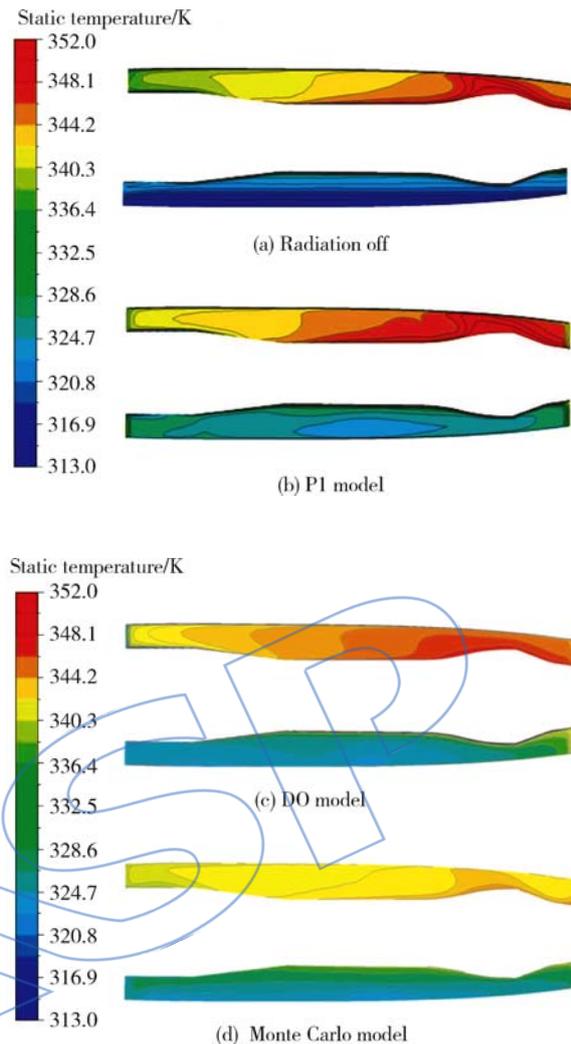


图 5 不同辐射模型的对称面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution on symmetric surface with different radiation models

对发动机壁面的换热量进行积分统计,方案 1~方案 5 辐射换热量与总换热量的比值分别为 0% , 69% , 62% , 74% , 80% .这表明,地面慢车状态,发动机壁面的热量主要通过热辐射形式交换,短舱壁面及其中间管件的热量很大一部分将来自热辐射.

图 8 采用线图显示了不同辐射模型计算的辐射强度.

可以看到,DO 模型所得计算点的辐射强度在空间上具有差异性,而 Monte Carlo 模型所得结果在空间上具有高度一致性,这是因为 Monte Carlo 法对辐射强度采用了空间加权平均的方法.考虑了介质对辐射的吸收作用后,空间计算点的辐射强度相比于 DO 模型计算结果,表现为在纵坐标方向上的平移,说明了气体介质对辐射的吸收作用明显.

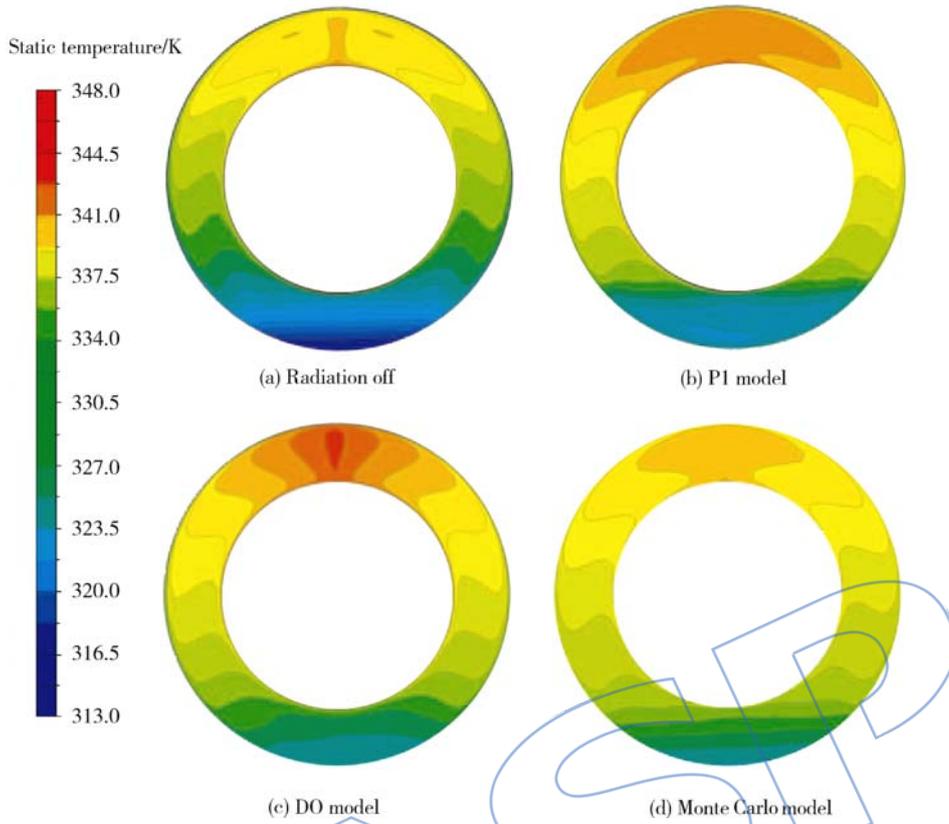


图 6 不同辐射模型的计算截面温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on calculational cross section with different radiation models

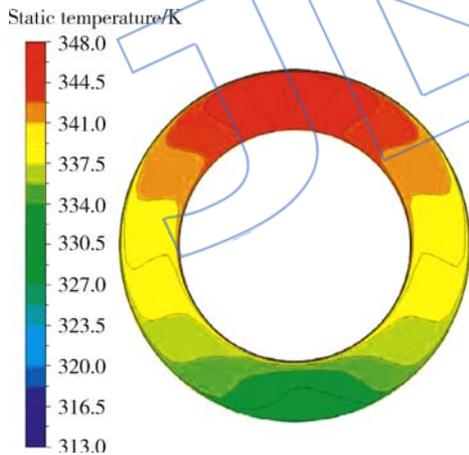


图 7 方案 5 的计算截面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on calculational cross section with computing scheme 5

对比不同方案计算所得的温度,如图 9 所示,相比于方案 1 不加辐射模型的计算结果,考虑热辐射的影响后,各计算点的温度都有所上升,上升幅度为 7%~30%. 在计算点 1,方案 5 与方案 1 的温度差别最大,达到了 16℃,温度升高约 30%. 计算点 1 和计算点 3 的实验测试值也在一定程度上证实了热辐射效应的显著影响.

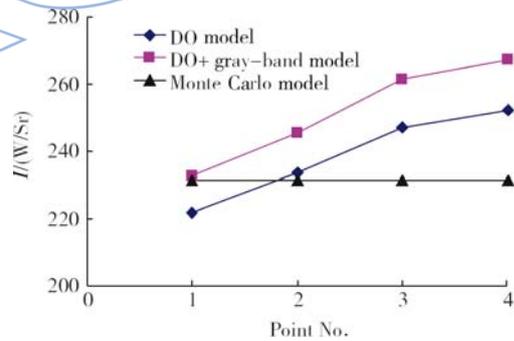


图 8 计算点辐射强度

Fig. 8 Radiation intensity of calculation point

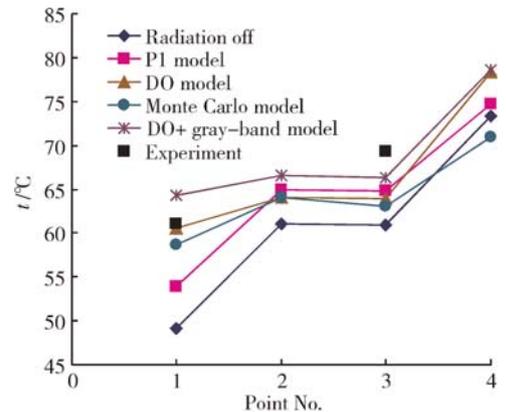


图 9 计算点温度

Fig. 9 Temperature of calculation point

4 结 论

本文应用CFD/IR方法模拟了热天地面慢车状态下短舱内的温度场和流场. 研究结果表明:

1) 在地面热天慢车状态下,短舱内自然对流和热辐射的耦合作用显著,热辐射的影响不可忽略,辐射换热占总换热量的一半以上.

2) 热辐射效应主要表现在对温度分布及温度值的影响,相比于没有考虑热辐射时,温度分布更为均匀,温度值均有不同程度上升.

3) 气体介质对红外波长辐射的吸收作用明显,在短舱温度场的预测过程中需要进行考虑.

参考文献:

- [1] Larson D W, Viskanta R. Transient combined laminar free convection and radiation in a rectangular enclosure[J]. *J Fluid Mech*, 1976, 78(1): 65-85.
- [2] Lauriat G. Combined radiation-convection in gray fluids enclosed in vertical cavities[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1982, 104(4): 609-615.
- [3] Lauriat G. Numerical study of interaction of natural convection with radiation in non-gray gases in a narrow vertical cavity [C] // *Proceedings of Seventh International Heat Transfer Conference*. San Francisco, California, US: 1982: 153-157.
- [4] Tan H P, Lallemand M. Transient radiative-conductive heat transfer in flat glasses submitted to temperature, flux and mixed boundary conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(5): 795-810.
- [5] 季经纬, 李全峰, 陈金林, 等. 火焰与烟气层热辐射的实验与蒙特卡洛法模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(1): 53-56.
JI Jingwei, LI Quanfeng, CHEN Jinlin, et al. Experiments and Monte-Carlo simulation of heat radiation flux from flame and hot smoke layers[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*. 2008, 37(1): 53-56. (in Chinese)
- [6] 战乃岩, 杨莱, 徐沛巍. 封闭腔导热辐射与自然对流耦合换热的数值研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(9): 1052-1060.
ZHAN Naiyan, YANG Mo, XU Peiwei. A two-dimensional study on natural convection and heat transfer in the enclosure with heat transfer and radiation coupled in natural convection[J]. *Sci China: Tech Sci*, 2010, 40(9): 1052-1060. (in Chinese)
- [7] 刘林华, 赵军明, 谈和平. 辐射传递方程数值模拟的有限元和谱元法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] 谈和平, 刘林华, 易红亮, 等. 计算热辐射学的进展[J]. *科学通报*, 2009, 54(18): 2627-2637.
TAN Heping, LIU Linhua, YI Hongliang, et al. Recent progress in computational thermal radiative transfer[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, 54(18): 2627-2637. (in Chinese)
- [9] Jeans J H. The equations of radiative transfer of energy [J]. *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, 1917, 78: 28-36.
- [10] Modest M F. The modified differential approximation for radiative transfer in general three-dimensional media[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1989, 3(3): 283-488.
- [11] Howell J R. Application of Monte Carlo to heat transfer problems[M] // *Advance in heat transfer*. New York: Academic Press, 1968: 1-54.
- [12] 罗森诺 W M. 传热学基础手册: 下册[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 436-441.
- [13] 严兆天, 沈季胜, 刘震涛, 等. 用蒙特卡洛法计算柴油机缸内多元热辐射[J]. *内燃机学报*, 2000, 18(2): 133-136.
YAN Zhaoda, SHEN Jisheng, LIU Zhentao, et al. Calculation of the radiation heat transfer in cylinder of diesel engine by the Monte-Carlo method [J]. *Transactions of CSICE*, 2000, 18(2): 133-136. (in Chinese)
- [14] Chandrasekhar S. Radiative transfer [M]. New York: Dover Publications Inc., 1960.
- [15] 谈和平, 夏新林, 刘新华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算: 计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 174-176.