

太阳能吸热器玻璃窗辐射与导热计算

封永亮 喻志强 李增耀 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 在太阳能塔式热发电空气吸热器工作过程中, 吸热器玻璃窗受到聚焦太阳光、环境以及吸热面(体)的复合辐射。本文采用改进蒙特卡罗法、有限容积法, 研究了太阳能空气吸热器石英玻璃窗半透明介质内部辐射与导热的耦合换热, 研究了不同厚度半透明介质石英玻璃窗在工作面处于不同第三类边界条件下的稳态温度分布。研究表明石英玻璃的厚度和内侧空气温度对石英玻璃窗内部最高温度以及温度分布有较大影响, 而表面传热系数对石英玻璃窗内部最高温度以及温度分布的影响相对较小。

关键词 太阳能热发电; 太阳能吸热器; 蒙特卡罗法; 有限容积法; 半透明介质
中图分类号: TK123 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)10-1737-04

Radiative and Conductive Heat Transfer Simulation of Window for Solar Receiver

FENG Yong-Liang YU Zhi-Qiang LI Zeng-Yao TAO Wen-Quan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract In a solar tower receiver system, window for solar receiver emits radiative energy and absorbs radiation from concentrated sunlight, ambient and itself. In this paper, the radiative heat transfer of a semitransparent quartz window for a solar receiver is simulated by modified Monte Carlo method and finite volume method (FVM). It is found that the maximum interior temperature and temperature profiles are very sensitive to the depth of window and the inside temperature of air. However, the convective heat transfer between window inner side and air has a minor effect on the maximum interior temperature and temperature profiles.

Key words solar thermal power plants; solar receiver; Monte Carlo method; finite volume method; semitransparent media

0 引言

太阳能热发电吸热器是实现聚光式太阳能热发电最为关键的核心部件之一, 它将反射镜反射、聚焦的太阳能吸收并转化为热能或化学能。吸热器的形式决定于聚光器的类型。按聚光方式, 太阳能热发电系统可大体分为线聚焦和面聚焦两种形式。线聚焦系统如槽式抛物面系统, 其反射镜是一个抛物面槽, 其聚光比大约为 $10 \sim 30$, 温度可达 400°C ; 面聚焦系统如塔式、碟式、复合抛物面 (CPC) 系统以及结合二次聚光镜的二次聚焦系统, 一次聚光聚光比可达 $50 \sim 1000$, 二次聚光聚光比可达 10000 , 吸热体温度可达 $500 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ ^[1,2]。

按辐射吸热面是否和空气直接接触, 大多数太阳能空气吸热器可分为直接辐射吸热器(容积式)和

间接辐射吸热器。早期的吸热器为开式(无玻璃窗), 其主要优点是结构简单。闭式(带玻璃窗)吸热器可有效地减小对流热和辐射热损失, 同时可实现承压循环。太阳能热发电系统的发电效率随集热温度的提高而提高, 而目前石英玻璃窗最高能承受 800°C 高温, 因此对石英玻璃窗内温度分布的研究显得尤为重要^[3~5]。

1 物理模型及模拟方法

太阳能热发电面聚光式(塔式或碟式)集热系统结构如图 1 所示, 为简化模型, 文中假定聚光系统反射面几何形状为理想旋转抛物面, 入射太阳光为锥角 $\theta = 16'$ 的近似平行直射光, 太阳光入射方向近似

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-09-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(973 项目)(No.2010CB227102)

作者简介: 封永亮(1985-), 男, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 主要从事数值传热研究。

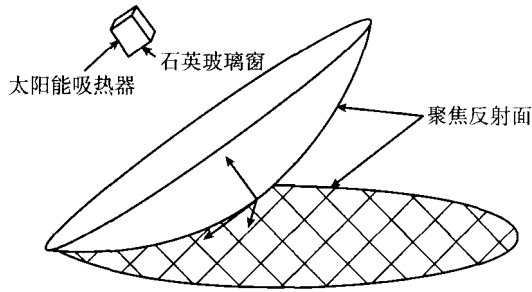


图 1 太阳能集热系统示意图
Fig. 1 Solar collector system

平行于太阳能聚光系统反射面对称轴，不计跟踪误差。太阳能吸热器位于聚光系统反射面的焦点处，石英玻璃窗安装在吸热器面向反射面侧的最前端。在工作过程中，石英玻璃窗受到聚焦太阳光、外部环境辐射以及吸热器内部发射的复杂的辐射条件下。太阳能吸热器石英玻璃窗内部的辐射传输是一个半透

明介质内部自身发射、吸收辐射以及半透明介质与环境、外部辐射源之间发射、吸收辐射的典型例子。

本文采用改进蒙特卡洛法 (MCM) 对光线在半透明介质内的发射、传递、吸收进行模拟。蒙特卡洛法是一种基于统计理论的随机模拟方法，可适应复杂的结构系统，在抽样数足够的条件下，能够很好地反映半透明介质内部以及聚光系统的光学特性。改进的 MCM 中，光束本身不携带能量，利用概率模型求辐射传递因子 RD ，然后将 RD 代入能量方程求解温度场。全辐射传递因子 RD (简称辐射传递因子) 的定义为，在一个换热系统中，由微元 i 辐射出去的能量被微元 j 吸收的份额^[6]。计算程序框图如图 2 所示。

采用一组矩形谱带来近似描述石英玻璃在 673~1073 K 下的吸收系数 $\kappa(m^{-1})$ ，表面反射率 ρ 及折射率 n 随波长 λ 的变化，见表 1^[6]。

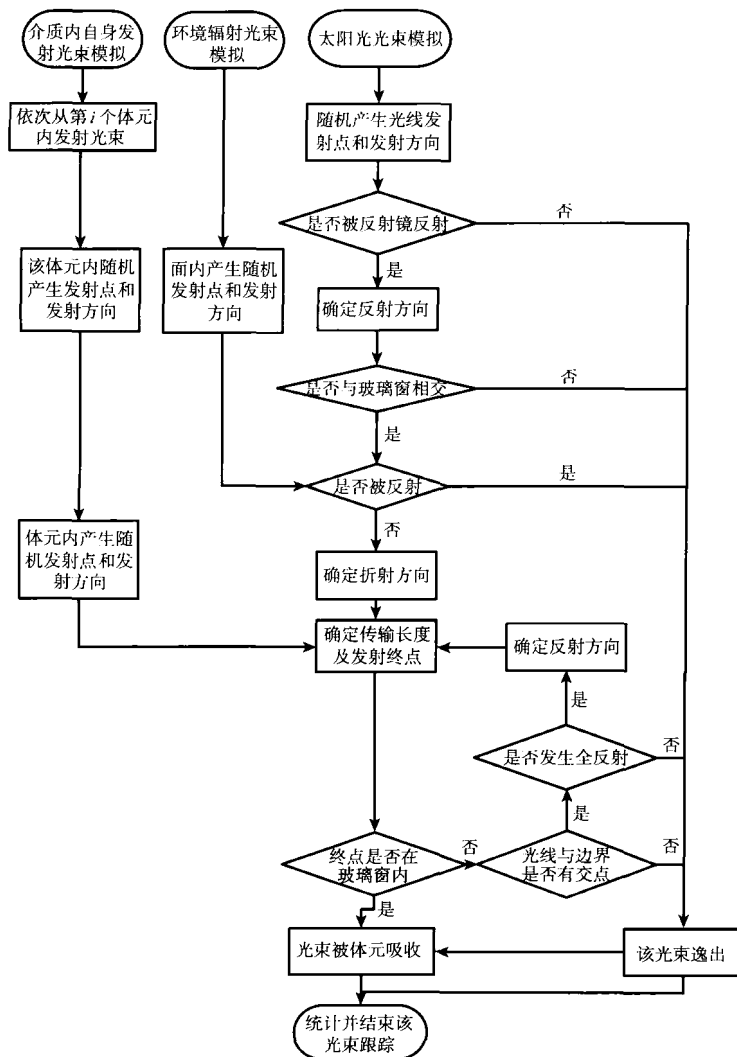


图 2 MCM 流程图
Fig. 2 Flowchart for MCM

表 1 石英玻璃光学特性

Table 1 Optical properties of quartz glass

k	$\lambda_k/\mu\text{m}$	n_k	$\rho_{1,k} = \rho_{2,k}$	$k\kappa/\text{m}^{-1}$
1	0.40~2.65	1.45	0.03	1
2	2.65~2.90	1.434	0.03	1000
3	2.90~4.2	1.42	0.03	5
4	4.2~7.00	1.35	0.05	5000
5	7.00~11.0	1.3	0.05	5000
6	11.0~20.0	1.3	0.07	5000

2 能量方程及边界条件

考虑三维半透明石英玻璃平板, 其直角坐标系下稳态导热控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi_r = 0 \quad (1)$$

$$\phi_r = \phi_{\text{sun}} + \phi_{A1} + \phi_{A2} + \phi_{\text{pt}} \quad (2)$$

式中, λ 为导热系数 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), ϕ_r 为辐射产生的源项 (W/m^3). ϕ_{sun} , ϕ_{A1} , ϕ_{A2} , ϕ_{pt} 依次为太阳光、大气环境、吸热体发射和玻璃内部发射辐射源项。

$$\phi_{\text{sun}} = \sum_{p=1}^{NP} RD_{p,(\text{sun} \rightarrow i,j,k)} \frac{S_{\text{sun}}}{V_{i,j,k}} \cdot B_{p,T_{\text{sun}}} \cdot I_{\text{sun}} \quad (3)$$

$$\phi_{A1} = \varepsilon\sigma \sum_{p=1}^{NP} RD_{p,(A1 \rightarrow i,j,k)} \cdot \frac{S_{A1}}{V_{i,j,k}} (B_{p,T_{A1}} \cdot T_{A1}^4 - B_{p,T_{i,j,k}} \cdot T_{i,j,k}^4) \quad (4)$$

$$\phi_{A2} = \varepsilon\sigma \sum_{p=1}^{NP} RD_{p,(A2 \rightarrow i,j,k)} \cdot \frac{S_{A2}}{V_{i,j,k}} (B_{p,T_{A2}} \cdot T_{A2}^4 - B_{p,T_{i,j,k}} \cdot T_{i,j,k}^4) \quad (5)$$

$$\phi_{\text{pt}} = \sigma \sum_{p=1}^{NP} 4\kappa_p \cdot ng_p^2 \cdot RD_{p,(ii,jj,kk \rightarrow i,j,k)} \cdot \frac{V_{ii,jj,kk}}{V_{i,j,k}} (B_{p,T_{ii,jj,kk}} \cdot T_{ii,jj,kk}^4 - B_{p,T_{i,j,k}} \cdot T_{i,j,k}^4) \quad (6)$$

T_{A1} 为当量环境辐射温度, $T_{A1} = \sqrt[4]{\varepsilon T_0^4}$, 即将发射率为 ε 的环境气体温度折算为黑体辐射的温度。 T_0 为环境气体温度, 文中取 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 1$ 。

T_{A2} 为石英玻璃窗内吸热体表面温度。直接式(容积式)辐射吸热器吸热介质内最高温度在吸热体内部, 进口表面温度低于最高温度, $T_{A2} = 600^\circ\text{C}$; 间接式辐射吸热器最高温度出现在入射表面, $T_{A2} = 1000^\circ\text{C}$ 。

本文取太阳能集热系统平均聚光比 $C=314$ 。石英玻璃长、宽皆为 10 cm, 厚度为 2~10 mm, 计算网格取 $10 \times 10 \times 10$, 采用内节点法。上下表面为第三类边界条件, 左右及前后表面为绝热条件, 导热

方程采用控制容积积分法离散^[7]。算法组织大体如下: 1) MCM 结合谱带模型计算太阳光发射面、环境辐射、吸热体发射辐射及石英玻璃内部发射辐射的辐射传递因子 RD ; 2) 利用辐射传递因子、介质温度分布计算辐射源项; 3) 根据辐射源项和边界条件, 用控制容积积分法计算介质内部温度场; 4) 重复步骤 2) 和步骤 3) 直到收敛。

3 模拟结果和分析

太阳能热发电吸热器在不同的形式以及不同的工作状况下, 处于不同的辐射边界条件和热流边界条件。计算中考虑了内侧空气温度 T_{f2} 取 1000°C 、 800°C 、 600°C 、 400°C 、 200°C 、 20°C , 内侧表面传热系数 $h_2 = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 外侧空气温度取环境温度, 外侧表面传热系数在计算中考虑了 h_1 取 5、10、20、50、100 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

在相同的边界条件下, 对比石英玻璃窗厚度分别为 2 mm、4 mm、8 mm、10 mm。玻璃窗内部温度随着厚度增加显著增大; 在石英玻璃较薄时, 玻璃窗内部最高温度位于受太阳辐射侧; 随着玻璃厚度增大, 最高温度点逐渐向内部移动。厚度为 10 mm 时, 最高温度基本位于石英玻璃窗中心。如图 3、4 所示。

直接辐射式(容积式)吸热器 ($T_{A2} = 600^\circ\text{C}$) 石英玻璃内部温度分布和石英玻璃内部最高温度 T_{max} 与内侧空气温度 T_{f2} 和外侧表面传热系数 h_1 关系如图 3、5 所示。间接辐射式吸热器 ($T_{A2} = 1000^\circ\text{C}$) 石英玻璃内部截面温度分布和石英玻璃内部最高温度 T_{max} 与内侧空气温度 T_{f2} 和外侧表面传热系数 h_1 关系如图 4、6 所示(温度分布图单位为 K)。

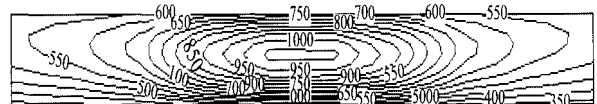


图 3 直接辐射式吸热器玻璃内部温度分布 ($T_{f2} = 673 \text{ K}$, $h_1 = 100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)

Fig. 3 Temperature distribution in window for directly-irradiated solar receiver

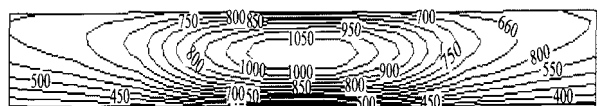


图 4 间接辐射式吸热器玻璃内部温度分布 ($T_{f2} = 673 \text{ K}$, $h_1 = 100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)

Fig. 4 Temperature distribution in window for indirectly-irradiated solar receiver

对比图 3、图 5 和图 4、图 6 可知, 由于间接辐射式吸热器吸热体外表面温度高于直接辐射式(容积式)吸热器, 石英玻璃介质内部最高温度相应高 30~50°C。

如图 3、4 所示, 面聚焦式太阳能吸热器石英玻璃窗介质内部温度分布为中间温度高, 温度梯度大, 四周温度低, 温度梯度小。由图 5、图 6 可知, 石英玻璃外侧表面传热系数增大时, 石英玻璃介质内部

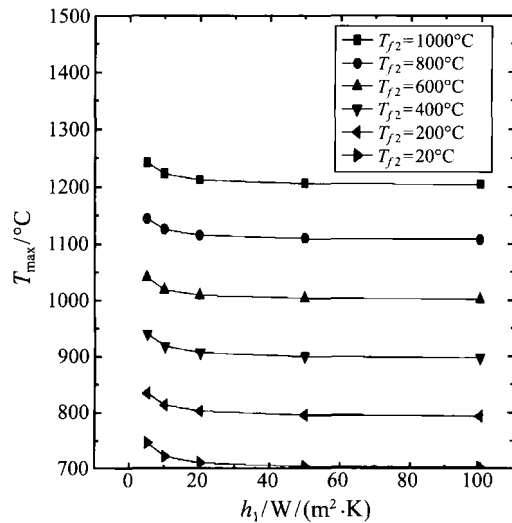


图 5 直接式吸热器玻璃内部最高温度分析

Fig. 5 Effect of convective heat transfer coefficient on maximum temperature in window for directly-irradiated solar receiver

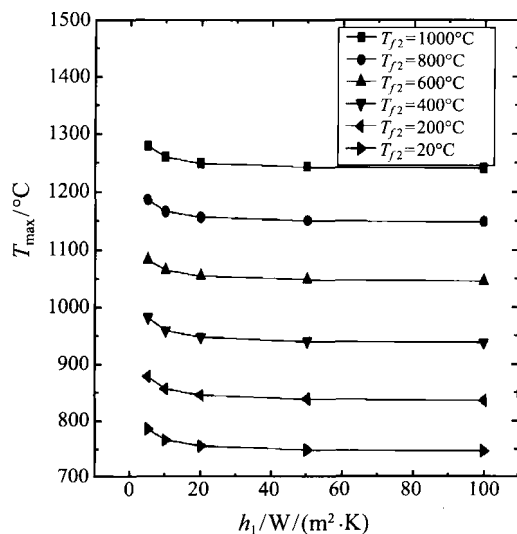


图 6 间接式吸热器玻璃内部最高温度分析

Fig. 6 Effect of convective heat transfer coefficient on maximum temperature in window for indirectly-irradiated solar receiver

最高温度降低, 但仅在表面传热系数较小时效果明显。同时, 降低石英玻璃内侧空气温度可有效地降低玻璃内部最高温度, 因而, 对于容积式吸热器合理布置空气进口可大大降低玻璃内部最高温度。但即使石英玻璃内侧温度为 200°C 时, 石英玻璃内部最高温度仍在 800°C 以上。

4 结 论

本文采用蒙特卡罗射线跟踪、控制容积法结合谱带模型, 研究了三维半透明介质石英玻璃窗内部稳态温度分布, 得出如下结论:

- 1) 间接辐射式吸热器石英玻璃内部温度高于直接辐射式(容积式)吸热器。
- 2) 增大石英玻璃外侧表面传热系数对降低玻璃内部温度效果不是很明显。
- 3) 降低石英玻璃内侧空气温度可有效的降低玻璃内部温度。
- 4) 随着石英玻璃窗的厚度增大, 玻璃内部最高温度显著增大, 并且最高温度出现的位置从受太阳辐射侧逐渐向内部转移。

参 考 文 献

- [1] Kribus A, Doron P, Runin R, et al. A Multistage Solar Receiver: the Route to High Temperature [J]. Solar Energy, 1999, 67: 3-11
- [2] Karni J, Kribus A, Rubin R, et al. The "Porcupine": a Novel High-Flux Absorber for Volumetric Solar Receivers [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120: 85-95
- [3] Pitz R-Paal, Hoffschmidt B, Bohmer M, et al. Experimental and Numerical Evaluation of the Performance and Flow Stability of Different Types of Open Volumetric Absorbers Under Non-Homogeneous Irradiation [J]. Solar Energy, 1997, 60: 135-150
- [4] Röger M, Fänder P, Buck R. Multiple Air-Jet Window Cooling for High-Temperature Pressurized Volumetric Receivers: Testing, Evaluation, and Modelling [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 128: 265-274
- [5] Röger R, Buck H, Müller-Steinhagen. Numerical and Experimental Investigation of a Multiple Air Jet Cooling System for Application in a Solar Thermal Receiver [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2005, 127: 863-876
- [6] 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. The Numerical Calculation for Infrared Radiation Characteristics and Transmission [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001