

DOI: 10.7652/xjtuxb201403019

太阳能烟囱发电系统内传热问题的数值分析

郭朋华, 王元, 李景银
(西安交通大学流体机械及工程系, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示辐射换热、太阳辐照度以及涡轮压降对太阳能烟囱发电系统性能的影响规律,基于系统内部能量传递机制的理论分析,通过合理选择边界条件,在充分考虑各种气象因素影响下的系统内部多种热效应耦合的数值计算中引入了离散坐标辐射模型、太阳载荷模型及涡轮模型,以解决目前数值研究中物理模型及边界条件选择时需要明确的问题。以西班牙示范电站为原型,对太阳能烟囱发电系统内部的流动换热行为进行了详细的三维数值模拟,并将数值模拟数据与西班牙示范电站的实验数据进行了对比,二者具有良好的一致性。模拟结果表明:集热棚内的辐射换热对棚内温度分布有重要影响,在数值模拟中不能忽略,否则会导致系统内部换热行为完全背离真实的换热过程;集热棚覆盖层与外界环境对流、辐射换热造成的热量损失是系统内的主要热损失;涡轮压降对系统性能也会产生显著影响。

关键词: 太阳能烟囱;数值分析;辐射换热;集热棚效率;涡轮压降

中图分类号: O121.8;G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0102-06

Numerical Analysis of Heat Transfer in Solar Chimney Power Plant

GUO Penghua, WANG Yuan, LI Jingyin
(Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The research was conducted to investigate the influences of the radiation heat transfer, solar radiation and turbine pressure drop on the performance of a solar chimney power plant. The comprehensive 3D numerical simulations were carried out to examine the heat transfer process in a Spanish prototype. The heat losses in the system were considered in the numerical simulations incorporating the radiation model, solar load model and turbine model and the experimental data for the Spanish prototype were used to verify the simulations. The results show that the radiation heat transfer plays an important role in the heat transfer process inside the collector and the heat loss from the collector roof to the ambient is the major heat loss in the system. In addition, the collector efficiency decreases while the system efficiency gradually increases when the turbine pressure drop increases under the constant solar radiation condition.

Keywords: solar chimney; numerical analysis; radiation heat transfer; collector efficiency; turbine pressure drop

自 1982 年在西班牙 Manzanares 建成世界上第一座太阳能烟囱示范电站以来^[1],太阳能烟囱发电技术已成为太阳能大规模利用的研究热点之一,它

以空气为工质,无需水资源,在太阳能资源丰富、水资源匮乏的干旱、半干旱地区具有极其广阔的应用前景^[2-4]。

表 1 西班牙太阳能烟囱示范电站主要的参数			
参数	数值	参数	数值
集热棚平均半径/m	122.0	环境温度/K	302
集热棚平均高度/m	1.85	太阳辐射强度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	1 000
烟囱高度/m	194.6	设计温升/K	20
烟囱半径/m	5.08	设计功率/kW	50
涡轮效率	0.83		

究也得到类似的结论^[14],因此本文蓄热层厚度为 2 m。模型的网格划分在 Fluent 的前处理软件 Gambit 中完成,为了便于划分,将整个系统分为蓄热层、集热棚、烟囱及烟囱和集热棚之间的过渡转换段,且均采用结构化网格。转换段气流从水平方向变成竖直方向时,通流面积变化较大,该段气流的速度、压力及温度的梯度较大。涡轮安装在转换段,该区域为整个系统的核心,因此转换段的网格需进行加密处理,整个计算区域的网格划分见图 3,网格总数达 150 万,满足网格无关性要求。

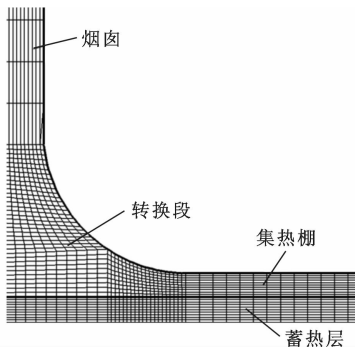


图 3 计算区域网格划分

2.2 计算模型和边界条件

由于集热棚顶通常使用半透明材料,而在 Fluent 提供的几种辐射模型中只有离散坐标辐射模型(DO)可以处理半透明壁面,可以提供灰带模型来计算非灰辐射,因此本文选择 DO 辐射模型来模拟集热棚内的辐射换热。

对于太阳辐射,以往的文献中通常将透射的太阳辐射以给定地面热流密度或者土壤内热源的方式来处理^[10,12,15]。本文采用 Fluent 提供的太阳能加载模型来模拟太阳辐射。该模型可根据太阳位置向量和照射参数将太阳辐射处理成射线,并应用于用户指定的边界上,然后通过进行面与面之间的遮蔽分析,来确定计算区域内被遮挡的部分,从而计算出入射太阳辐射在边界上产生的热流,该热流将加载到能量方程的源项。由于涡轮内的流场不是本文的

研究对象,所以采用 Fluent 提供的压降模型来模拟涡轮,该模型将涡轮视为一个无限薄的圆盘,通过涡轮的压降可指定为常数或者是通过涡轮气流速度的函数。

集热棚进口和烟囱出口采用压力边界条件,为了消除进、出口压差在系统内产生的自然对流,进、出口处的压力均设置为 0 Pa。在蓄热层的底面,温度不会随环境温度的日变化出现波动,此处设置为恒温边界条件;集热棚顶为对流和辐射换热边界条件,对天空的长波辐射可通过天空当量温度^[16]获得,即

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5}$$

(6)

太阳能烟囱发电系统的边界条件设置如表 2 所示。

表 2 太阳能烟囱发电系统的边界条件设置		
位置	类型	条件
蓄热层底部	壁面恒温	302 K
集热棚顶	壁面对流和辐射	$h=8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\epsilon=0.94$
烟囱表面	壁面绝热	$q_{\text{ch}}=0 \text{ W}/\text{m}^2$
集热棚进口	压力进口	$p_i=0 \text{ Pa}$, $T_s=302 \text{ K}$
烟囱出口	压力出口	$p_o=0 \text{ Pa}$
涡轮	风扇(内部表面边界)	Δp

3 结果与讨论

3.1 数值模型验证

由数值模拟得到的系统输出功率与西班牙示范电站的实验数据^[17]对比如图 4 所示。由图 4 可以看出,数值模拟结果与实验结果吻合较好。数值模拟得到的输出功率在总体上略高于实验结果,主要由两方面原因:其一,本文采用的是稳态数值模拟,在给定的太阳辐射条件下,集热棚覆盖层、棚内空气及地面蓄热层均已达到了该工况下的热平衡,而实际土壤存在热惯性,因此数值模拟的预测结果偏高;其二,实验电站的集热棚内存在大量的钢架支撑结构,其会产生一定的阻力损失,为了便于建模和计算,数值模拟中忽略了这些钢架结构的影响。综合分析,本文提出的数值模型完全适用于太阳能热气发电系统的模拟计算。

3.2 辐射换热对集热棚内温度分布的影响

在以往的太阳能烟囱发电系统的数值模拟研究中,集热棚被视为普通的日光温室,即忽略了棚内的辐射换热。实际的集热棚工作过程并不等同于一般的日光温室,集热棚中部的高大烟囱会使得集热棚

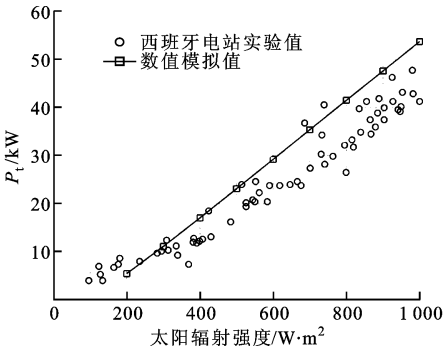


图 4 系统输出功率的数值模拟数据与实验数据对比

不再是一个密闭空间。在烟囱抽力的作用下,空气不断地从集热棚四周进入棚内,加热后的空气最终通过烟囱排放到大气中。因此,在太阳能烟囱发电系统中,集热棚覆盖层对地面长波辐射的阻隔作用成为集热棚实现加热功能的重要组成部分。根据传热学的基本理论,对于表面温度为几十摄氏度的表面散热,对流换热量与辐射换热量具有相同的数量级,必须同时予以考虑^[18]。

为了研究辐射换热对模拟结果的影响,本文将考虑辐射换热前后的模拟结果进行了对比。以太阳辐射强度为 600 W/m^2 为例,考虑辐射换热前后的集热棚内温度分布如图 5 所示。由图 5 可以看出,

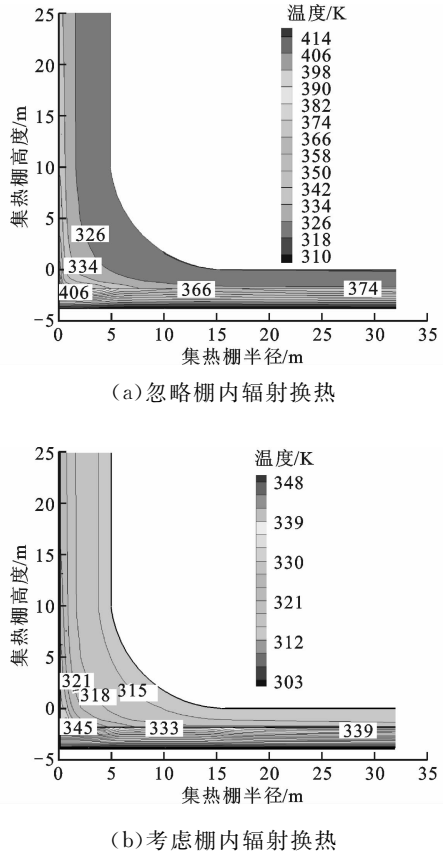


图 5 集热棚内的温度分布

未考虑辐射换热时,集热棚内的气流温度明显高于考虑辐射换热后的结果,尤其是地面温度,未考虑辐射换热时最高温度达到了 400 K ,在实际中显然是不可能的。Pastohr 等的数值研究认为,这种不自然的高温是由定常计算引起的^[10],而从图 5 的对比中可以看到这是数值模拟中地面辐射换热被忽略的结果。

太阳辐射强度为 600 W/m^2 时,考虑辐射换热前后集热棚顶的温度分布如图 6 所示。由图 6 可以看出,考虑辐射换热后,集热棚顶的温度明显高于未考虑辐射换热的情况。通过与图 5 对比可知,当忽略棚内辐射换热时,集热棚顶温度普遍低于棚内的空气温度。这是因为集热棚顶的热量主要来自棚内空气的对流换热和一小部分的太阳辐射。考虑辐射换热后,受地面辐射的影响,集热棚顶温度显然会高于棚内空气温度,此时集热棚顶不仅不会从棚内空气吸收热量,反而会将一部分热量传递给空气。

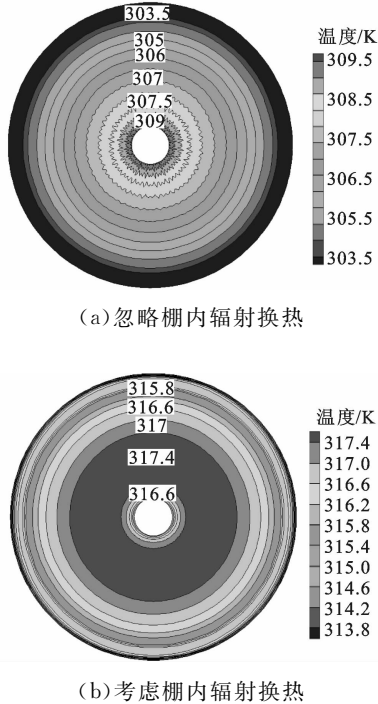


图 6 集热棚顶的温度分布

辐射换热对集热棚集热效率的影响如图 7 所示。由图 7 可以看出,当考虑棚内辐射换热时,在不同辐照强度下得到的集热棚集热效率均远远高于考虑辐射换热时的情况。西班牙示范电站的实验数据中,集热棚的集热效率均在 30% 左右,显然考虑辐射换热后的数值预测结果与实验结果更加吻合。这是因为忽略棚内辐射换热背离了实际传热过程而导致不正确的温度分布所致。由图 5 和图 6 还可以看

出,当未考虑地面与集热棚覆盖层之间的辐射换热时,地面温度过高,集热棚顶温度过低。在太阳能烟囱发电系统中,由于通过集热棚顶的热量损失远远大于通过地面的热量损失而忽略辐射换热,使得集热棚顶的热量损失会被大大低估,从而导致集热棚效率的预测值偏高。

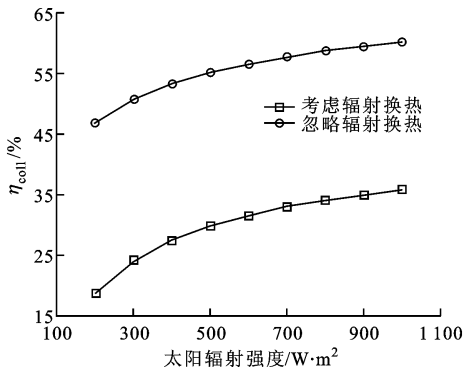
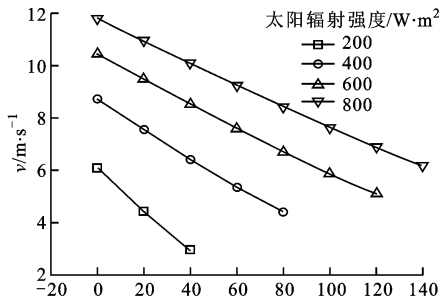


图 7 辐射换热对集热棚的集热效率的影响

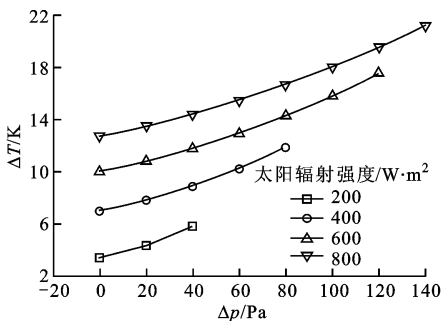
3.3 涡轮压降对系统性能的影响

利用 Fluent 软件的压降模型可以为涡轮指定一系列的压降,以此研究压降对系统性能的影响。本文模拟中给定的涡轮压降间隔为 20 Pa,太阳辐射强度分别设定为 200、400、600、800 W/m²。

不同太阳辐射下涡轮压降对烟囱入口处气流速度和温升的影响如图 8 所示。由图 8 可以看出:当太阳辐射强度不变时,随着涡轮压降的增加,涡轮对



(a) 对速度的影响



(b) 对温升的影响

图 8 涡轮压降对烟囱入口处气流速度和温升的影响

气流的阻塞效应增强,系统需要更大的抽力来推动涡轮做功,因此气流速度逐渐降低;随着气流速度的降低,气流在集热棚内停留的时间延长,吸收的热量更多,因此温升逐渐增大。由图 8 还可看出,当涡轮压降恒定时,随着太阳辐射强度的增加,系统的入射能量增加,气流速度和温升均显著增大。

当太阳辐射强度为 600 W/m² 时,改变涡轮压降可以得到集热棚内的热损失,如图 9 所示。由图 9 可以看到,不论何种压降,通过集热棚顶的热损失总是远远大于通过地面的热损失。当涡轮压降逐渐增大时,通过集热棚顶和通过地面的热损失均逐渐增加。这是因为当涡轮压降增大时,涡轮对气流的阻碍效应增强,系统流量减小,集热棚内空气温度升高,集热棚内、外温差增大,从而导致热损失增加。因此,集热棚覆盖采用双层玻璃会大大降低集热棚顶的热损失,提高集热棚的集热效率。

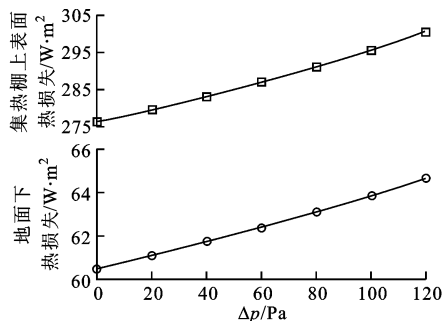


图 9 不同涡轮压降下集热棚的热损失

太阳辐射强度为 600 W/m² 时,改变涡轮压降后的系统性能如图 10 所示。随着涡轮压降的增加,系统各部分的热损失增大,集热棚的集热效率逐渐下降。但是,由于涡轮压降增加会引起流量减小,使得通过烟囱出口的动能损失大大降低,因此系统总效率逐渐上升,在压降为 120 Pa 时达到最大值。继续增大涡轮压降,烟囱产生的抽力部分用来驱动涡轮

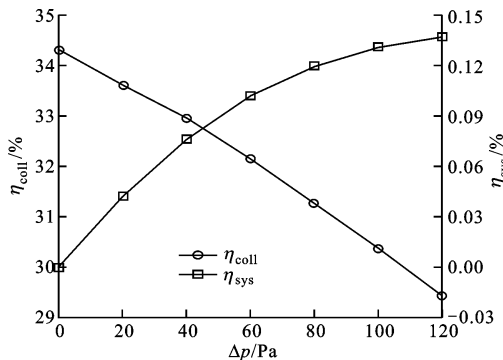


图 10 不同涡轮压降下的系统性能

轮,但剩余部分并不足以克服系统内的流动损失。

4 结 论

本文建立了太阳能烟囱发电系统的数值模型,并对其内部的传热问题进行了数值模拟。结果表明,集热棚内的辐射换热是其内部传热过程的重要组成部分,不能忽略,否则会导致集热棚内温度分布背离实际的温度分布。涡轮压降对系统性能也有重要影响,随着涡轮压降的增大,烟囱内的气流温升逐渐增大,集热棚内的热损失逐渐增大,集热棚效率下降。由于烟囱内气流速度减小,出口的余速损失减小,系统效率逐渐提高。此外,对集热棚内的热损失分析发现,通过集热棚顶表面的对流换热及长波辐射的损失是系统内的主要热损失。

参考文献:

- [1] HAAF W, FRIEDRICH K, MAYR G, et al. Solar chimneys: part I Principle and construction of the pilot plant in Manzanares [J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 1983, 2(1): 3-20.
- [2] 代彦军, 黄海宾, 王如竹. 太阳能热风发电技术应用于宁夏地区的研究 [J]. *太阳能学报*, 2003, 24(3): 408-412.
DAI Yanjun, HUANG Haibin, WANG Ruzi. Utilization of solar chimney power plant into Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2003, 24(3): 408-412.
- [3] SALAH L, AMOR B, TOUFIK C. Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1): 470-477.
- [4] ZHOU X P, WANG F, FAN J, et al. Performance of solar chimney power plant in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(8): 2249-2255.
- [5] 张楚华. 大型太阳能烟囱发电站热力计算与分析 [J]. *可再生能源杂志*, 2007, 25(2): 3-6.
ZHANG Chuhua. Thermodynamic analysis and calculation of large-scale solar chimney electricity generation plant [J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(2): 3-6.
- [6] PASUMARTHI N, SHERIF S A. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model: part I Mathematical model development [J]. *International Journal of Energy Research*, 1998, 22(3): 277-288.

- [7] BERNARDES M A D, VOß A, WEINREBE G. Thermal and technical analyses of solar chimneys [J]. *Solar Energy*, 2003, 75(6): 511-524.
- [8] ZHOU X P, YANG J K, XIAO B, et al. Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(10): 1637-1644.
- [9] LI J Y, GUO P H, WANG Y. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines [J]. *Renewable Energy*, 2012, 47: 21-28.
- [10] PASTOHR H, KORNADT O, GURLEBECK K. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant [J]. *International Journal of Energy Research*, 2004, 28(6): 495-510.
- [11] MING T Z, LIU W, XU G L, et al. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(5): 897-905.
- [12] XU G L, MING T Z, PAN Y, et al. Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2): 876-883.
- [13] HAAF W. Solar chimneys: part II Preliminary test results from the Manzanares pilot plant [J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 1984, 2(2): 141-161.
- [14] PRETORIUS J P, KRÖGER D G. Solar chimney power plant performance [J]. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2006, 128(3): 302-311.
- [15] LI J Y, GUO P H, WANG Y. Preliminary investigation of a novel solar and wind energy extraction system [J]. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy*, 2012; 226(A1): 73-85.
- [16] SWINBANK W C. Long-wave radiation from clear skies [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1963, 89(381): 339-348.
- [17] SCHLAICH J, BERGERMANN R, SCHIEL W, et al. Design of commercial solar updraft tower systems: utilization of solar induced convective flows for power generation [J]. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(1): 117-124.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

(编辑 苗凌)