太阳能热气流烟囱的实验和数值模拟

黄明华 陈磊 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, 西安 710049)

摘 要 本文搭建了一个小型太阳能热气流烟囱的实验台,测量了其在不同工况下壁面,空气温度,以及系统瞬时质量流 量。结果表明随着太阳辐射强度的增加壁面和空气的温度以及系统流量均提高。对所建实验台进行数值模拟,结果显示, 不考虑系统辐射,以输入功率换算的太阳辐照强度为边界条件模拟会高估系统壁面温度和流量,考虑了系统辐射后则能得 到与实验测量值相近的结果。

关键词 太阳能热气流烟囱;实验;数值模拟;辐射 **中图分类号**: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2017)01-0172-04

Experimental and Numerical Results of a Solar Chimney Prototype

HUANG Ming-Hua CHEN Lei TAO Wen-Quan

(Key Lab of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract A small solar chimney prototype was built. Temperatures of walls and air in the solar chimney and the system transient mass flow rate were measured under different solar radiation. Experimental results show that temperatures and the transient mass flow rate all increase with the solar radiation. Numerical simulation results of the prototype show that without considering the radiation losses, the wall temperatures and the mass flow rates with fixed heat flux boundary conditions provided from measurements are much higher than experimental results. However, with the consideration of the radiation losses the simulation results are close to experimental results. **Key words** solar chimney; experiment; numerical simulation; radiation

0 引 言

太阳能热气流烟囱的工作原理是太阳辐射透过 集热棚被地表吸收, 而地面辐射又被集热棚顶盖阻 隔,温室作用下加热集热棚内空气,空气受热密度变 小,在温室内外空气密度差和烟囱抽力的驱动下产 生上升气流推动集热棚出口或烟囱底部的风机从而 带动发电机发电。整个过程除了太阳能不需要辅助 能源,发电的过程中也不会产生任何对环境有污染 的排泄物。早几个世纪之前太阳能烟囱就用于房屋 通风。世界上第一个有记载的太阳能烟囱原型是由 Isidoro Cabanyes 在 1903 年建于西班 Cartagena^[1]。 世界上第一座太阳能烟囱发电站的设想是由德国科 学家 J. Schlaich 在二十世纪七十年代末提出,并在 1981 年由 J. Schlaich 和其团队设计和建造完成^[2]。 从 2003 年开始, 潘垣院士就在国内大力倡导太阳能 烟囱发电技术,指出在我国发展太阳能烟囱发电技 术对我国能源发展和生态环境有积极深远的影响^[3]。 可是直到如今这项技术无论在我国还是世界都没有

实现商业化。这主要是因为太阳能热气流烟囱要想 取得较好的经济效益通常需要巨大的建筑尺寸。只 有建造 100 MW 级的超大规模的商业电站才可能将 综合能量转换效率提高到 1%以上,烟囱的高度得超 过 700 m^[4]。这样建设成本和周期都非常大,需要十 分严谨的前期设计。CFD 数值模拟是对太阳能热气 流烟囱设计的主要手段。文献 [5],[6] 都运用数值模 拟的方法对太阳能热气流烟囱进行设计。但其模拟 设计过程中均不考虑辐射作用对系统的影响。本文 建立了一个小型太阳能烟囱室内实验台,采用在实 验台底面电加热来模拟太阳辐射。模拟测试不同太 阳辐照强度下的实验数据,并采用 ANSYS FLUENT 14.0 对其进行数值模拟,以验证数值模型。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。集热棚底部为四块并联 的电阻加热垫,每个加热垫阻值大约为 32 Ω,加热

基金项目:中国科学院重点部署项目

收稿日期: 2016-02-22; 修订日期: 2016-12-19

作者简介:黄明华 (1985-),女,博士研究生,主要从事太阳能光热和光伏发电实验和数值模拟研究. 通信作者:陶文铨,教授, wqtao@mail.xjtu.edu.cn

垫背面贴有 5 cm 厚的橡塑保温棉。集热棚顶盖和烟 囱材质为 1 cm 厚的机玻璃板。试验台尺寸见图 2, 集热棚半径为 130 cm,烟囱高 126 cm,集热棚进口 高度为 3.5 cm,集热棚出口高度为 10 cm,烟囱直径 为 8 cm。



图 1 实验装置 Fig. 1 Experimental device of the solar chimney



Fig. 2 Dimensions of the solar chimney

实验仪器有:中低压气体质量流量计,数字功率计,接触调压器,铜-康铜T型热电偶,温度计, 吉时利 2700 系列数据采集系统。试验中太阳辐照强 度转化为输入功率,由数字功率计来调节并用接触 调压器控制加热垫输入电压。加热垫,有机玻璃,集 热棚进口和烟囱内空气温度由T型热电偶测量并传 输到数据采集仪中。

对太阳能热气流烟囱的实验研究主要是了解其 流动与传热情况,就需要对其内部压力场,速度场 和温度场进行研究。但是由于实验台尺寸小,系统 内部压力变化不大,速度分布不均匀,这两个参数 均不好测量,故实验中选择对其温度场和系统流量 进行测量。

流量计探针位于烟囱 73.5 cm 处测量此处质量 流量。温度计用来测量环境温度。烟囱进出口位置各 布置一个 T型热电偶, 玻璃内表面和外表面分别均 匀布置 4 个测点, 集热棚进口也均匀布置 4 个测点 用来测量进口空气温度, 每个加热垫均匀布置 7 个 热电偶, 共计 42 个 T型热电偶测点。

2 实验结果与分析

利用功率计调节输入电功率来模拟太阳辐照, 表1显示通过太阳辐照强度换算得到的每块加热垫 输入功率。

化 - 人们相应国及三州区的相入为平	表:	1	太阳辐照强度与对应的输入功	率
--------------------	----	---	---------------	---

Table 1 Solar radiations and corresponding input powers

1	
太阳辐照强度/Wm ⁻²	输入功率/W
200	265.46
300	398.20
400	530.93
500	663.66
600	796.39

实验测量是在门窗关闭的封闭室内进行,每天 同一时间进行测量,环境温度均在 22°C 左右。每组 实验进行约 3 h,系统进入相对稳定阶段,各壁面温 度值基本保持不变,流量计测得系统瞬时流量会出 现小幅度反复。图 3 为模拟太阳辐照 200 W/m²、300 W/m²、400 W/m²、500 W/m²、和 600 W/m²下流 动基本稳定后测得的加热垫,有机玻璃内外表面的 温度的平均值。由图 3 可以看出随着太阳辐照的增强





加热垫和有机玻璃内外表面的平均温度逐渐增高。 图 4 为集热棚进口与烟囱进口空气温差,随着太阳 辐照的加强温差也逐渐增大。200 W/m² 下空气温度 升高约 7°C,600 W/m² 下空气温度升高约 22°C。图 5 为稳定时间段内某一时刻流量计所测瞬时质量流 量。太阳辐照加强系统流量也逐渐加强。



图 4 集热棚内空气温升随太阳辐照强度变化

Fig. 4 Variations of temperature rise in the collector with the solar radiation



Fig. 5 Variations of mass flow rate with the solar radiation

3 数值模拟方法

由于太阳能烟囱内的流动是浮升力驱动的自然 对流,需用 Rayleigh 数判断其流态,见公式(1):

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3\rho}{\mu\alpha} \tag{1}$$

其中, ΔT 是系统内最大温差,*L* 是特征长度,分 别取集热棚平均高度和烟囱直径, β 是热膨胀系数。 通过对在 200 W/m², 300 W/m², 400 W/m², 500 W/m²,600 W/m² 太阳辐照下的实验数据进行计算, 得到集热棚内和烟囱中的 Rayleigh 数均小于 10¹⁰, 故认为流动为层流。可认为太阳能烟囱内的空气流 动是二维轴对称流动, 控制方程可表示为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \left(\rho u\right)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \left(r\rho v\right)}{\partial r} = 0 \tag{2}$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u u)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v u)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \beta (T - T_{\infty}) + \frac{\partial (\mu u)}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial (\mu u)}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) r \frac{\partial u}{\partial r} \right]$$
(3)
$$\frac{\partial (\rho u v)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v v)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial (\mu u)}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial (\mu u)}{\partial r} \left[(\mu + \mu_t) r \frac{\partial v}{\partial r} \right] - (\mu + \mu_t) \frac{v}{r^2}$$

能量方程:

$$\frac{\partial \left(\rho uT\right)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial \left(r\rho vT\right)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}\right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}\right) r \frac{\partial T}{\partial r} \right]$$
(5)

本文采用商业 CFD 软件 ANSYS FLUENT 14.0 对所建实验模型进行稳态数值模拟。网格均分划分, 并对其进行独立性验证,最后取网格数目为13248单 元。集热棚进口为压力进口边界,烟囱出口为压力出 口边界,玻璃顶盖和烟囱壁面采用对流边界,由于封 闭环境内风速微小,参照文献 [7],对流换热系数取 3 W·m⁻²·K⁻¹。加热垫边界采用模拟太阳辐照输入的 热流密度作为边界条件进行模拟。考虑本实验中集 热棚的材料为有机玻璃其红外线的透射率约为 0.5, 故加热垫发射的红外辐射约一半通过集热棚损失到 环境中去,在数值模拟中编写 UDF 考虑这一部分的 辐射损失。

4 模拟结果与分析

模拟结果发现烟囱出口处有回流使出口流量在 一定范围内出现振荡。这与实验结果也基本一致。 对比考虑辐射和不考虑辐射的模拟结果和实验数据, 图 6 可以看出考虑辐射后系统质量流量与实验数据 较为接近,而不考虑辐射的模拟结果远远大于实验 测量值。图 7 为两种模拟条件下加热垫温度和测量 值的比较,可以发现不考虑辐射时模拟值远远高于 测量值,且随着太阳辐照强度的增加模拟值与测量 值的差距越来远大。由图 6 和图 7 可以看出在太阳 能热气流烟囱的数值模拟中考虑系统的辐射损失更 为合理,而且太阳辐射越强系统辐射损失越大,就 更需考虑辐射损失。



图 6 系统质量流量模拟值与测量值的比较 Fig. 6 Comparison between numerical results and measured

results on mass flow rate



Fig. 7 Comparison between numerical results and measured results on heater temperature

目前针对太阳能热气流烟囱发电的数值模拟中 多不考虑系统辐射损失,由以上的模拟和实验结果 对比可以看出不考虑辐射会造成对太阳能热气流烟 囱系统流量,底面温度的过高估计,从而过高估计 系统发电水平。在本实验中有机玻璃对红外线有较 高的透射率,造成集热棚底面的热辐射相当大部分 损失到环境中,实际中通常选用普通玻璃作为作集 热棚建设用料,虽然普通玻璃没有有机玻璃那么高的红外线透过率,但是普通玻璃有很高的红外线吸 收率,同样造成一部分集热棚底面热辐射通过环境 与玻璃对流换热损失到环境中。

5 结 论

本文对室内搭建的小型太阳能热气流烟囱实验 台以底面电加热形式模拟太阳辐照并进行了实验测 定。得到不同模拟太阳辐照下集热棚底部和集热棚 顶盖的平均温度,环境、集热棚进口和烟囱进出口 的空气温度。并用 ANSYS FLUENT14.0 对所建试 验台进行数值模拟,发现考虑系统辐射的模拟结果 与实验结果接近,而不考虑系统辐射的模拟结果比 实验结果高很多。说明用 CFD 预测太阳能热气流烟 囱的传热与流动情况时,如果以底面受到的辐照强 度作为边界条件而不考虑系统内辐射损失会造成对 系统性能的过高估计,而且太阳辐照越强损失到环 境中的辐射损失越大,产生的误差就会越大。

参考文献

- Hurtado F J, Kaiser A S, Zamora B. Evaluation of the Influence of Soil Thermal Inertia on the Performance of a Solar Chimney Power Plant [J]. Energy, 2012, 47(1): 213-224
- [2] Haaf W. Solar Chimneys. Part II: Preliminary Test Results From the Manzanares Pilot Plant [J]. International Journal of Sustainable Energy, 1984, 2: 141–161
- [3] 潘垣, 辜承林, 周理兵, 等. 太阳能热气流发电及其对我国能 源与环境的深远影响 [J]. 世界科技研究与发展, 2003, 25(4): 7-12

Pan Yuan, Gu Cheng-Lin, Zhou Li-Bing, et al. The Generation of Electricity by Solur Hot Hir-flows And Its Effect on China's Energy Sources and Environment [J]. World Sci-tech R & D, 2003, 25(4): 7–12

- [4] 周新平. 基于西部太阳能烟囱热气流发电及应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
 Zhou Xin-Ping. Research on SCPS and its application in Western China [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005
- [5] Xu G, Ming T, 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
- [6] Ming T, Richter R K, Meng F, et al. Chimney Shape Numerical Study for Solar Chimney Power Generating Systems [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(4): 310-322
- [7] Bernardes M A S, von Backström T W, Kröger D G. Critical Evaluation of Heat Transfer Coefficients Applicable to Solar Chimney Power Plant Collectors [C]// Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V). Springer Berlin Heidelberg, 2009: 1706–1713