

太阳能热气流系统内传热与流动的实验模拟

明廷臻¹ 刘伟¹ 熊宴斌¹ 管绪虎¹ 许国良¹ 潘垣²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 构建了小尺寸太阳能热气流发电的实验模型, 测定了系统的温度随时间和空间的分布, 测定了烟囱内的速度随时间的变化关系. 实验结果表明, 集热棚内温度分布和季节对系统传热与流动特性的影响符合理论分析结果, 而由于烟囱较薄, 散热较高, 在烟囱内的温度降低显著.

关键词 太阳能热气流发电; 集热棚; 烟囱

中图分类号: TK124; S152.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2008)04-0681-04

EXPERIMENTAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER AND FLOW IN THE SOLAR CHIMNEY SYSTEM

MING Ting-Zhen¹ LIU Wei¹ XIONG Yan-Bin¹ GUAN Xu-Hu¹ XU Guo-Liang¹ PAN Yuan²

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A small scale solar chimney system model has been set up, and the temperature distribution of the system with time and space, together with the velocity variation inside the chimney with time, has been measured. The experimental results show that the temperature distributions inside the collector and the effects of seasons on the heat transfer and flow characteristic of system show great agreement with the analysis, while the temperature decrease significantly inside the chimney as the chimney is very thin which causes very high heat loss.

Key words solar chimney power generation; collector; chimney

0 引言

目前国际上关于大规模太阳能热气流发电系统的实验研究未见报道, 其主要原因在于耗资太大. 要建设大型商用太阳能热气流发电系统需要政府和企业的联合支持^[1~3]. 1985年, Kulunk 构建了小规模太阳能热气流发电系统实验装置^[4]. 1997年, sherif 等^[5,6]在美国 Florida 大学的 Gainesville 建立了三个不同型式的太阳能热气流发电系统模型, 并作了关于集热棚内温度和速度分布的实验, 实验结果与其理论分析吻合较好.

本文介绍一种室内小型太阳能热气流系统实验装置. 与其他实验装置的主要区别在于: 顶棚不用透明材料, 而是采用隔热材料, 在集热棚底部采用加热器加热来代替太阳辐射. 测量系统内部的温度分布和速度分布, 比较不同季节的系统温升和速度变化, 比较烟囱内部空气的状态变化等, 将实验结果与已有理论分析进行对比.

1 实验装置

图 1 为太阳能热气流系统实验装置. 系统由集热棚、烟囱、加热板和地底隔热层组成. 烟囱材料为聚四氟乙烯, 高 2.5 m, 直径 106 mm, 壁厚 2 mm;

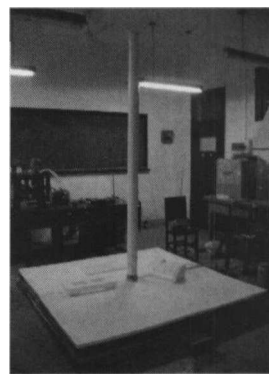


图 1 太阳能热气流系统实验装置

Fig.1 Experimental device of the solar chimney system

收稿日期: 2007-12-20; 修订日期: 2008-02-16

基金项目: 教育部重点基金资助项目 (No. 104127)

作者简介: 明廷臻 (1976-), 男, 湖北阳新人, 讲师, 博士, 主要从事新能源发电与节能技术研究.

集热棚长和宽均为 2 m，顶棚为轻质隔热材料，隔热材料厚约 30 mm，棚四周开口和环境相连，高 55 mm；棚底部为钢板以利于更好地传热，钢板下部是一个封闭空间，其内均匀铺设 8 个并联的加热器，每个加热器的电阻约 60 Ω，加热封闭空间的底部是采用珍珠岩作为隔热材料的隔热层。

实验仪器：集热棚、烟囱和环境的温度测量均采用铜 - 康铜热电偶和惠普公司的 5 位半数字电压表；环境风速和烟囱内气流速度测量均采用德图公司的热线风速仪；采用自藕调压器设置电压模拟太阳辐射能。

2 实验测点布置

对于太阳能热气流发电系统，测量系统相对压力是其中一个重要方面，由于实验条件限制，而且微型系统的内外压力差较小，不易测得。因此，测量系统的温度分布和速度成为实验的重要目标。

测温点布置如图 2 所示。分别在集热棚内布置 9 个点，在烟囱上布置 4 个点。集热棚表面布置 1 个点，烟囱外壁面布置 1 个点，环境温度也布置 1 个点。总计 16 个点。

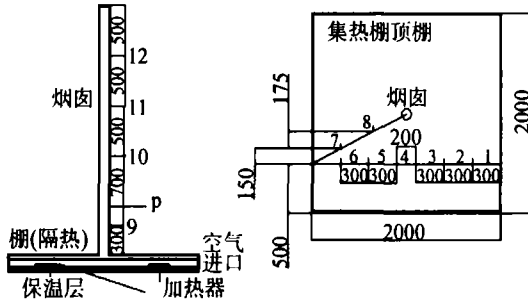


图 2 系统的测点布置 (mm)

Fig.2 Disposal of measurement points of the system (mm)

集热棚内布点的位置，横坐标从东到西，纵坐标从南到北：1(300, 500)，2(600, 500)，3(900, 500)，4(1100, 500)，5(1400, 500)，6(1700, 500)，7(1700, 650)，8(1400, 800)，9(1100, 950)。烟囱布点位置，从下到上：10(300)，11(1000)，12(1500)，13(2000)。烟囱外壁面布点 14；集热棚外壁面布点 15；环境温度布点 16。测速点位置：p(500)。所有测点单位均取 mm。

3 实验结果与分析

图 3 的测量条件如下：日期 2006 年 1 月 13 日，天气晴，气温 276 K 至 282 K，室内温度 285 K，室内速度 0.02 m/s，初始速度 0.28 m/s；早上 8: 45

分施加电压 80 V 并保持不变，折算得到集热棚底部向空气传递的热流密度为 213 W/m²。

图 4 的测量条件如下：日期 2006 年 1 月 22 日，天气晴转多云，气温 271 K 至 281 K，室内温度 281 K，室内速度 0.02 m/s，初始速度 0.15 m/s；早上 9: 20 分施加电压 120 V 并保持不变，折算得到集热棚底部向空气传递的热流密度为 480 W/m²。两图测量时间相隔达 9 d，主要是为防止前一天的测量影响后一天的环境和测量结果。

显然，从两天的测量结果可以看出，系统的启动速度很快。加热 1 h 后，烟囱进口处空气的最高温升分别达到 38 K 和 56 K。此后，各空间点处的温度升高比较平缓，系统基本上处于稳定状态。此外，比较图 3 和图 4 可以发现，热流密度对系统温度变化的影响十分显著，加热热流密度越高，温度变化越显著，各点状态变化越显著。

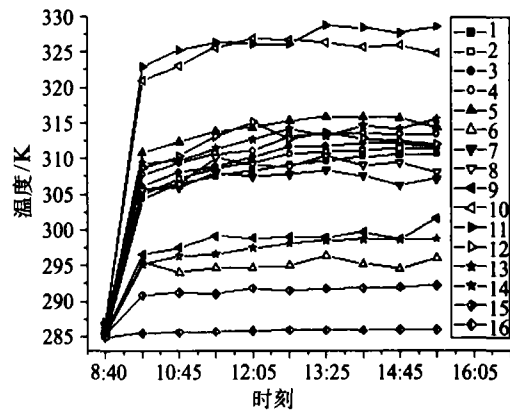


图 3 2006 年 1 月 13 日测量的温度随时间变化

Fig.3 Variations of temperature with time on Jan.13, 2006

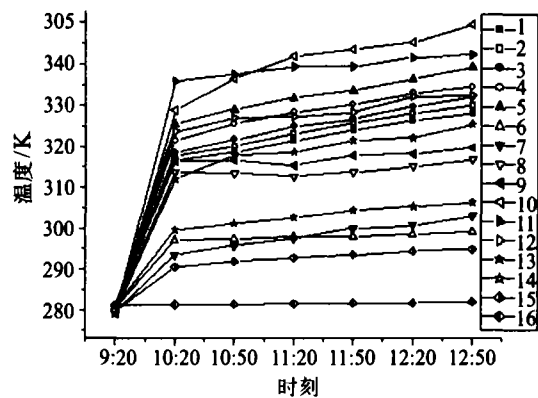


图 4 2006 年 1 月 22 日测量的温度随时间变化

Fig.4 Variations of temperature with time on Jan.22, 2006

2006 年 5 月 27 日的测量条件如下：天气晴，气温 23~32℃，室内温度 26.1℃ (299.25 K)，室内

速度 0.08 m/s，烟囱初始温度 300.05 K，初始速度 0.08 m/s；早上 6:30 分施加电压模拟正弦变化的太阳辐射，施加电压和折算得到的集热棚底部向空气传递的热流密度如图 5 所示。施加电压从早上 6:30 开始，到晚上 6:30 结束。实验结果见图 6 所示。

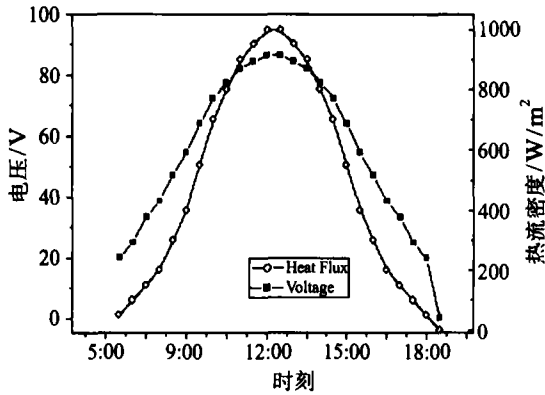


图 5 2006 年 5 月 27 日加载的电压及折算出的热流密度
Fig.5 Voltage loaded on the system and converted heat flux on May.27, 2006

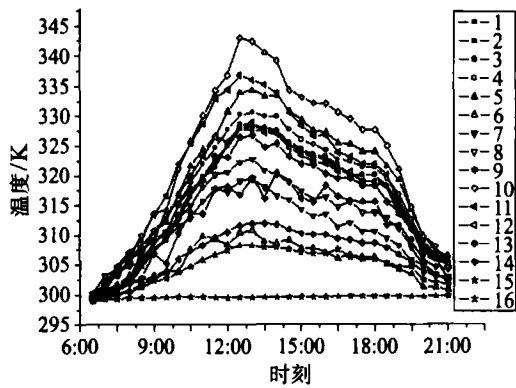


图 6 2006 年 5 月 27 日温度随时间变化

Fig.6 Variations of temperature with time on May 27, 2006

显然，从图中可以看出，系统内各点的温度成正弦曲线变化。最高温升可达 43 K，12:00 热流密度最大，但测得最高温升时间为 12:30。这说明系统有较短时间的滞后影响。这一点与前文的非稳态计算结果非常相似。由于系统不存在土壤或沙石蓄热层，只有一个加热器所在的封闭空间，因此系统的滞后效应不明显。

3.1 烟囱内温度和速度随时间的变化

图 7 至图 8 分别为测得的烟囱内温度和速度随时间的变化曲线。显然，当热流密度为 213 W/m² 时，烟囱内的最大速度仅为 1.7 m/s 左右，而当热流密度为 480 W/m² 时，烟囱内的最大速度可达 2.9

m/s。实验表明在稳定的热流密度条件下，冬天测得的烟囱内的温升和速度比夏天烟囱内的温升和速度都要大，实验结果与理论分析结果 [7] 相符。

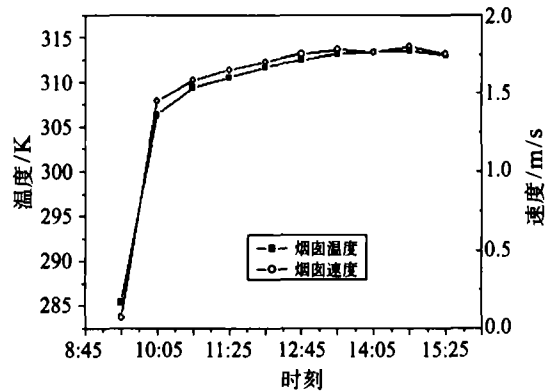


图 7 2006 年 1 月 13 日烟囱出口参数随时间变化
Fig.7 Variations of chimney outlet parameters with time on Jan.13, 2006

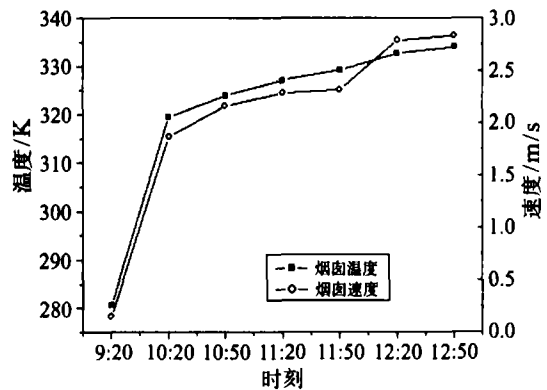


图 8 2006 年 1 月 22 日烟囱出口参数随时间变化
Fig.8 Variations of chimney outlet parameters with time on Jan. 22, 2006

由图 9 知，当集热棚底部热流密度呈正弦曲线变化时，烟囱内的温升和速度也呈正弦曲线变化。系统也是在 12:30 时烟囱速度达到最大值 2.0 m/s。

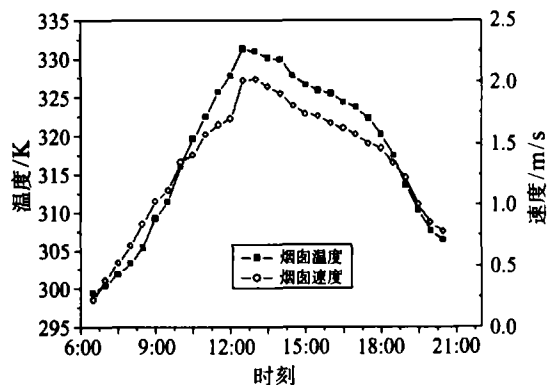


图 9 2006 年 5 月 27 日烟囱出口参数随时间变化
Fig.9 Variations of chimney outlet parameters with time on May 27, 2006

显然,在较长时间高热流密度情况下(达到峰值前热流密度大于 500 W/m^2 的加热时间超过两小时),这个速度远小于冬天值,其差别主要在于当环境温度较高时,加热空气,相同温升条件下,空气的密度变化较小,引起的系统浮升力较小,从而流体速度较小.因此,在加热条件相同时,冬天系统的效果较夏天的效果要好.

3.2 集热棚和烟囱内温度分布

从图 10、11 中可以看出,烟囱内的温度沿烟囱高度方向是逐渐减小的.考虑到烟囱的壁面比较薄,系统内外的温度差较大,散热损失较大,因此,整个烟囱内的温度变化比较显著,不应视为绝热,这一点与理论分析^[7]不同.其主要原因在于,理论分析结果^[7]主要是考虑到实际烟囱的厚度较大,热阻

较大,散热损失较小,而本文实验装置的烟囱与大型系统的烟囱存在较大的差别,因此需要根据实际情况进行分析.

此外,实验结果还表明,不同时刻从集热棚边缘至烟囱底部流体流动方向空气的温度是不断升高的,越靠近集热棚内部的点温度越高.

4 结 论

对小尺寸太阳能热气流系统进行了实验模拟研究,测量了热流密度恒定以及呈正弦曲线变化时系统的温度、速度变化以及集热棚、烟囱内的温度变化.实验结果表明:

(1) 冬天系统的温升和速度均较夏天的温升和速度要高,与已有的理论分析结果相符;

(2) 集热棚内的沿边缘至中心处的温度逐渐增加,这一点与理论分析相符;但烟囱内温度沿高度方向温度变化显著,故不可以将空气在烟囱内的流动视为绝热过程,这一点不同于大型太阳能热气流发电系统的烟囱散热特性,主要是由于实验装置中的烟囱壁面较薄、传热热阻较小,散热较大所致.

参 考 文 献

- [1] Schlaich J. The Solar Chimney. Edition Axel Menges. Stuttgart, 1995
- [2] Haaf H, Friedrich K, Mayer G, et al. Solar Chimneys, Part a: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *Int. J. of Solar Energy*, 1983, 2: 3-20
- [3] Haaf H. Solar Chimneys, Part b: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant. *Int. J. of Solar Energy*, 1984, 2: 141
- [4] Kulunk H. A Prototype Solar Convection Chimney Operated Under Izmit Conditions. In: Veziroglu TN, Editors. *Proc. 7th MICAES (Proceedings of the 7th Miami International Conference on Alternative Energy Sources)*, 1985. 162
- [5] Pasumarthi N, Sherif SA. Performance of a Demonstration Solar Chimney Model For Power Generation. In: *Proceedings of the 35th Heat Transfer and Fluid, Sacramento, CA, USA. 1997. 203-240*
- [6] Pasumarthi N, Sherif SA. Experimental and Theoretical Performance of a Demonstration Solar Chimney Model-Part II: Experimental and Theoretical Results and Economic Analysis. *International Journal of Energy Research* 1998, 22: 443-461
- [7] Gannon AJ, Backstrom TWV. Solar Chimney Cycle Analysis with System Loss and Solar Collector Performance. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2000, 122: 133-137

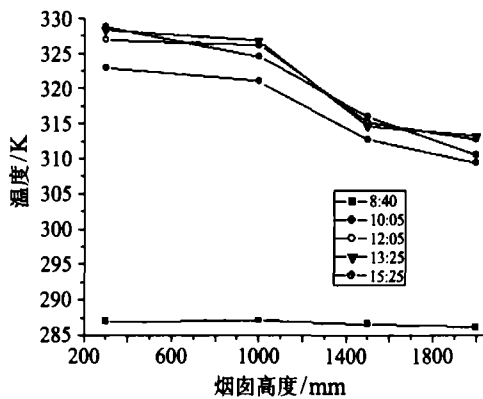


图 10 2006 年 1 月 13 日烟囱内温度变化

Fig.10 Variation of temperature in the chimney on Jan. 13, 2006

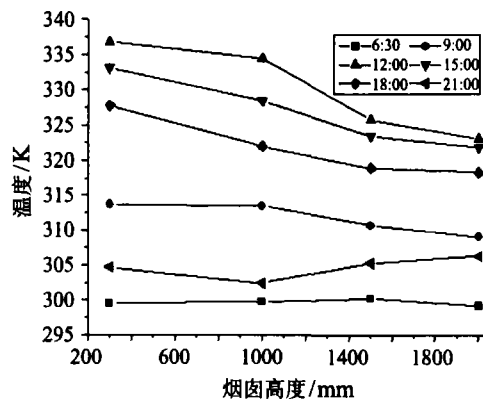


图 11 2006 年 5 月 27 日烟囱内温度变化

Fig.11 Variation of temperature in the chimney on May 27, 2006