第 27 卷第 3 期
2006 年 5 月

工 程 热 物 理 学 报
JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS

Vol.27, No.3
May, 2006

太阳能热气流电站系统研究

明廷臻 刘伟 许国良 范爱武

（华中科技大学能源与动力工程学院， 武汉 430074 ）

摘 要 由于现有模型不足以准确描述太阳能热气流发电系统的物理机制，本文提出一个更完善的数学模型去分析太阳能热气流电站系统的相对压力分布和系统抽力。模型中考虑了太阳辐射和系统尺寸参数对系统相对压力和系统抽力的影响。以西班牙试验电站为例进行数值模拟，探索系统尺寸参数和太阳辐射对系统相对压力和系统抽力的影响。数值计算结果与理论分析具有良好的一致性。

关键词 太阳能热气流电站；相对压力；抽力；数值模拟
中图分类号：TK124;S152.8 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-231X(2006)03-0505-03

A STUDY OF THE SOLAR CHIMNEY POWER PLANT SYSTEMS

MING Ting-Zhen LIU Wei XU Guo-Liang FAN Ai-Wu

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract As the existing models are insufficient to accurately describe the mechanism, a comprehensive model is advanced in this paper to evaluate the relative static pressure and driving force of the solar chimney power plant systems, in which the effects of various parameters on the relative static pressure and driving force have been further investigated. Using the solar chimney prototype in Spain as an example, the numerical studies are performed to explore the effect of the geometric modifications and solar radiation on relative static pressure and driving force of the system, which show reasonable agreement with the analytical model.

Key words solar chimney power plant system; relative static pressure; driving force; numerical simulation

1 前 言

太阳能热气流电站系统已成为太阳能利用领域的研究热点之一 [1~5]。对于给定规模的太阳能热气流电站，影响发电功率的重要因素包括太阳辐射、烟囱抽力和系统进出口流量等 [1]。一般认为，烟囱抽力仅受空气密度和烟囱高度的影响 [1,2] 而与其它因素无关。事实上，系统抽力和系统内的压力分布密切相关。Lodhi[2] 忽略了系统内压力的分析，仅给出简单的抽力计算公式，Gannon[3]、和 Padki[4] 等忽略了相关的研究工作。Pastohr[5] 等用数值模拟方法得到了集热棚内压力分布。但关于系统内外压力的相互关系，相对压力和抽力的关系等方面的研究，尚未见报道。本文对此进行分析，推导系统抽力表达式，并数值验证其影响因素。

2 系统相对静压力

定义 S 为系统内外相同高度的静压差，$S = p_i - p_o$，故 S 可视为相对静压。图 1 为烟囱内外的静压分布，则有：

$$\frac{dS_x}{dx} = \frac{dp_{i,x}}{dx} - \frac{dp_{o,x}}{dx} \tag{1}$$

烟囱内外满足如下关系式：

$$\frac{dp_{o,x}}{dx} = -\rho_o g \quad \frac{dp_{i,x}}{dx} = -\rho g$$

将上式代入 (1) 式，整理并沿高度积分，无回流条件下，认为烟囱出口与相同高度环境静压相等；且对小规模系统，忽略密度沿高度的变化，于是有：

$$S_0 = -(\rho_o - \rho)gH \tag{2}$$

收稿日期：2006-01-06；**修订日期**：2006-03-20
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，博士生，主要从事新能源与节能技术研究工作。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$S_x = -(\rho_o - \rho)g(H - x) \tag{3}$$

由 (2)、(3) 式可知，烟囱内相对压力与高度呈线性关系且处处为负值。其最小值出现在烟囱的底部。

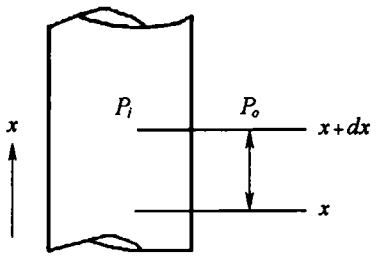

图 1 烟囱内外静压分布

3 系统抽力

由上述分析知，烟囱内外任意高度处均存在压力差，(2) 式即为烟囱底部和外界环境之间的压力差成为推动流体进入系统的原因，称为系统抽力，并以 Δp 表示。于是有：

$$\Delta p = |S_{\min}| = (\rho_o - \rho)gH \tag{4}$$

(4) 式与文献 [1, 2] 结果相同。但集热棚和烟囱半径及太阳辐射均会影响系统中的空气密度。

考虑稳态稳流和恒定的太阳辐射的太阳能热气流系统，将系统与环境的换热全部折算成系统内空气与地表的对流换热，于是：

$$-c_p\dot{m}\frac{dt}{dr} = 2\pi r h_{g,a}(t_g - t) = 2\pi r q$$

式中，$h_{g,a}$ 为地表与空气的折算对流换热系数，t_g 为地表温度，q 为太阳辐射。在集热棚内积分得：

$$T - T_0 = \frac{\pi q}{c_p\dot{m}}(R_{coll}^2 - r^2) \tag{5}$$

式中，R_{coll} 为集热棚半径。考虑 Boussinesq 假设，联立 (4)、(5) 式、伯努利方程和连续性方程得：

$$\Delta p = \left(\frac{g^2\rho_0^2\beta_0^2}{2c_p\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H}{r_{chim}^2}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot R_{coll}^{\frac{4}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

式中，r_{chim} 为烟囱半径。由 (6) 式可以看出：系统抽力不仅与烟囱高度有关，还与集热棚半径、烟囱半径、太阳辐射及空气初、终态有关。

4 计算结果与分析

以西班牙电站模型 [1] 为基础建立物理模型，相应的控制方程及模型常数参见文献 [6]，边界条件为：系统进出口取压力进出口，且 S=0 Pa；通过热平衡得到顶棚与地表的温度分布，并以此为顶棚和地表的温度边界；烟囱壁面采用绝热边界。数值模拟在 Fluent6.0 中进行，通过改变系统尺寸和太阳辐射分析各参数对系统相对压力和系统抽力的影响。

图 2 为模拟西班牙模型得到的轴截面压力场。整个系统的相对压力均小于 0，在烟囱底部，系统相对压力最小。

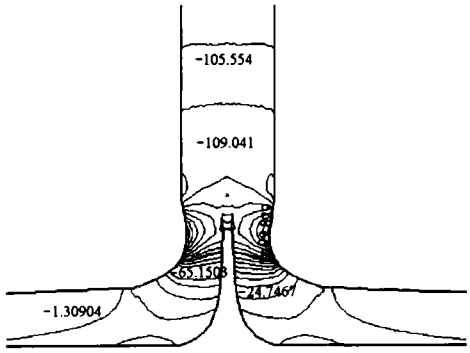

图 2 系统相对压力分布

由图 2 可见，系统的相对压力为负值，说明系统内的压力比系统外相同高度处的压力小，由于系统内相对压力处处为负值，故可认为系统相当于一个负压系统，而烟囱充当一个负压管的作用。此外，在烟囱底部系统内的相对压力最小，因此要想充分利用系统的热气流转换成轴流式透平的动能，并最终转换成电能，必须将轴流式风力透平布置在此处，即放置在相对压力较小，梯度较大的位置。图 2 结果与前文分析一致且给出了放置透平的最佳位置。

图 3~4 为相同烟囱高度不同集热棚半径的太阳能热气流电站系统的相对压力分布，图 3 中 $R = 120$ m 曲线及图 4 中 $H = 200$ m 曲线表示的均为西班牙试验电站模型相对压力分布，图 3 中 $0 < H < 10$ m 之间的分布为集热棚内的相对压力值。从图 3 中可以看出，系统的最小相对压力值位于烟囱的底部且

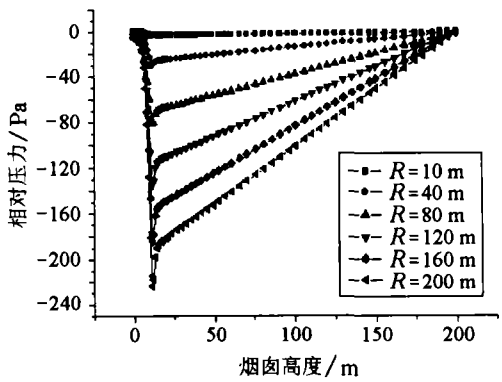

图 3 集热棚半径对系统相对压力的影响

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

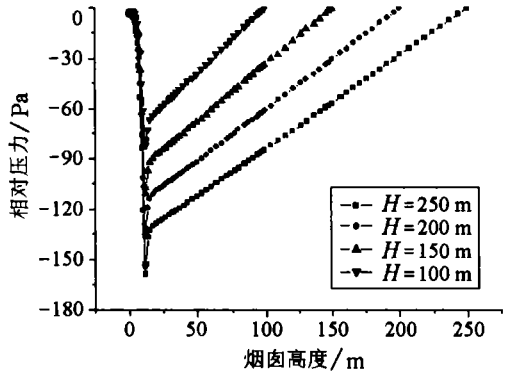

图 4　烟囱高度对系统相对压力的影响

随集热棚半径的增大而减小。当集热棚半径为 200 m 时，最小相对压力值低于 −220 Pa。而图 4 中可以看出，相对压力值随烟囱高度的增加而增大，这是由于积分的结果，与式 (3) 相符合。

图 5 为太阳辐射和集热棚半径对系统抽力的影响。当太阳辐射不变时，随着集热棚半径的增大，接受太阳辐射能的面积增大，系统内的空气吸热量增大，温度升高较大，密度减小，因此，系统相对压力增大，导致系统抽力相应增大。相似地，当集热棚半径不变，而太阳辐射增大时，进入烟囱中的空气密度减小，系统抽力也增大。计算结果与式 (6) 相符。

图 6 为烟囱高度对系统抽力的影响。显然，烟囱越高，系统抽力越大，计算结果与文献 [2] 相吻合且与式 (6) 相符。

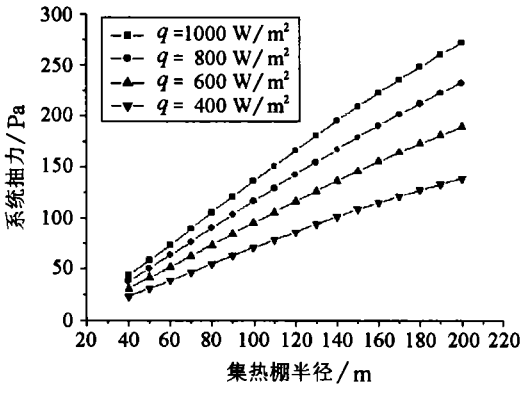

图 5　集热棚半径对系统抽力的影响

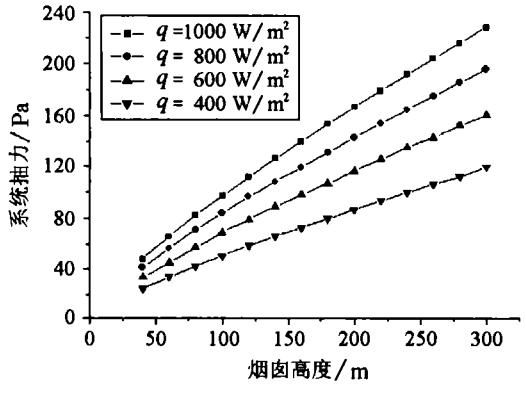

图 6　烟囱高度对系统抽力的影响

此外，图 7 还显示了烟囱半径对系统抽力的影响，当太阳辐射保持恒定时，烟囱半径的增加将导致质量流量的增加，同时使烟囱进口密度增加，因此系统抽力随之会出现略微的减小。计算结果与式 (6) 相符。

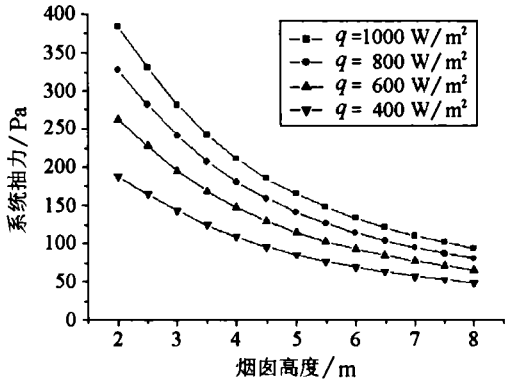

图 7　烟囱半径对系统抽力的影响

4 结　论

本文对太阳能热气流发电系统内的相对压力和系统抽力进行分析。研究结果表明：在整个系统内，其相对压力均为负值，且在烟囱底部相对压力最小；系统抽力是相对压力最小值的绝对值，烟囱高度和半径，集热棚半径以及太阳辐射是系统抽力的重要影响因子；烟囱高度增加，烟囱半径减小，集热棚半径增加，太阳辐射增加均可以使系统抽力增加。理论分析和数值计算结果具有良好的一致性。

参　考　文　献

[1] Haaf H, Friedrich K, Mayer G, et al. Solar Chimneys. International Journal of Solar Energy, 1983, 2(1): 3–20

[2] Lodhi MAK. Application of Helio-Aero-Gravity Concept in Producing Energy and Suppressing Pollution. Energy Conversion & Management. 1999, 40(4): 407–421

[3] Gannon AJ, Backstrom TWV. Solar Chimney Cycle Analysis with System Loss and Solar Collector Performance. Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122(3): 133–137

[4] Padki MM, Sherif SA. On a Simple Analytical Model for Solar Chimneys. International Journal of Energy Research, 1999, 23(4): 345–349

[5] Pastohr H, Kornadt O, Gurlebeck K. Numerical and Analytical Calculations of the Temperature and Flow Field in the Upwind Power Plant. International Journal of Energy Research, 2004, 28(6): 495–510

[6] 陶文铨. 数值传热学. 第二版. 西安交通大学出版社, 2001. 347–376

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net