

集热棚对太阳能烟囱发电系统效率的影响

毛宏举^{1,2}, 李戡洪¹

(1.中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100038)

摘要: 采用计算流体动力学(CFD)方法对太阳能烟囱发电装置进行数值模拟, 得到装置内部的温度场、速度场、压力场等分布情况。对集热棚的各种几何和物理参数进行研究和分析。结果表明, 集热棚直径、太阳辐照强度、覆盖材料的透明度等诸多参数对系统效率有直接而重要的影响。

关键词: 太阳能烟囱; 计算流体动力学; 系统效率; 影响因素

中图分类号: TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2006)06-0006-04

Analyses on collector influence on efficiency of solar chimney power plant

MAO Hong-ju^{1,2}, LI Jian-hong¹

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: Some influence factors on efficiency in solar chimney power plant are studied by using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method in the paper. The temperature, velocity, pressure of the air are obtained. The study shows the diameter of chimney, solar radiation, transparency of the cover are the most important influence factors, The purpose is to deliver some advice for application and development of solar chimney generation system in future.

Key words: solar chimney; CFD; system efficiency; influence factor

0 引言

太阳能烟囱发电系统中, 太阳集热棚是一个巨大的空气加热器, 是获取太阳能的主要部分。它也是整个系统中占地面积最大, 占投资成本比例最高的部分。烟囱位于集热棚的中央, 它的作用是形成压差。空气涡轮机安装于烟囱底部, 由循环气流驱动。笔者已经对太阳能烟囱发电装置中烟囱对系统效率的各种影响因素进行了研究^[1], 分析结果表明烟囱高度和直径对系统效率影响最为显著, 其次是形状, 最后是烟囱内表面粗糙度和温度。作为整个太阳能烟囱发电系统研究的组成部分, 本文主要是对集热棚中影响系统效率的各种因素进行分析。

集热棚中影响系统效率的因素很多, 主要有

集热棚的几何尺寸(直径、离地高度、形状), 覆盖材料, 地面储热体的类型和当地太阳辐射条件等因素。本文采用 CFD 方法对整个发电装置的流场、温度场和压力场进行数值模拟, 分析集热棚中各参数对整个系统效率的影响。

1 物理模型

当阳光照射到集热棚的覆盖层时, 一部分太阳辐射被其表面反射或折射, 一部分被其吸收, 其余的则进入集热棚。进入集热棚的太阳辐射, 一部分被空气介质吸收, 其余的被地面吸收。与此同时, 地面以长波的形式向外界辐射能量。空气中 CO₂ 和水蒸气等成分吸收的太阳辐射量少得可以忽略不计, 空气与地面的热交换方式主要是以对流为主。覆盖材料能够很好地阻止地面向外界发

收稿日期: 2005-10-27。

作者简介: 毛宏举(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事太阳能利用技术研究。E-mail: maohj@ms.giec.ac.cn

出的长波辐射。所以,可以近似地认为进入集热棚内的太阳辐射全部被地面吸收。这些能量一部分用来加热空气,一部分能量传入地面以下或被其它类型的储热材料吸收储藏,当晚上或没有太阳辐射时,它就可以用来维持系统的连续运行。

一般情况下,距地面 6 m 深处的土壤温度在一年内的波动很小,可以代表当地的年平均温度。所以,本文将 6 m 深的土壤温度设定为常温边界条件。

太阳能烟囱发电装置的烟囱直径 16 m,高 200 m,假设环境温度为 301 K,当地重力加速度为 9.8 m/s^2 。计算过程中烟囱的各参数固定不变,集热棚的高度、直径等几何尺寸以及地面储热体的类型为可变量。由于分析的需要,改变一个参数时其它参数保持不变。

2 数学模型

太阳能烟囱发电装置整体是一个轴对称图形,建立二维轴对称的物理模型并进行网格划分,如图 1 所示。计算域的边界包括:压力入口 1;半透明壁面边界 2;恒温边界 3;对称旋转轴 4;烟囱绝热内壁 5;压力出口 6 和内部耦合边界 7。在计算过程中没有考虑空气涡轮机的影响。

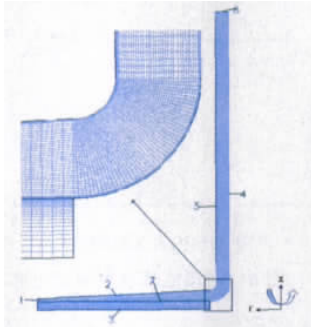


图 1 太阳能烟囱发电装置的边界条件及网格划分

湍流模型采用的是两方程的模型,并考虑了浮升力所产生的湍流的影响。对于不可压缩的牛顿流体,密度是温度的函数,当有日光照射时,由于集热棚内地面与空气存在温差,使得集热棚内的空气密度变得不均匀,于是集热棚内的空气在重力的作用下产生浮升力而开始流动,动力方程需要考虑浮升力的影响。因为整个流场中的温差和压力差很小,压力对密度的影响可以忽略不计,所以浮升力模型采用 Boussinesq 假设。即在控制方程中,除浮升力项中的密度随温度线性变化外,其它各项中的密度及其它物体都可以近似地按常

规物性处理。控制方程采用有限容积方法离散。N-S 方程求解应用 SIMPLEC 算法^[2]。在本算例中相对于 SIMPLE 算法可以加快计算的收敛速度。

所有方程采用分离隐式求解,网格划分上采用了局部(烟囱底部和壁面附近)加密的方法以保证计算的精确度,当最大残差小于 10^{-6} 时认为计算收敛。

3 结果分析

通过计算可以得出整个发电装置内部的温度场、速度场和压力场。本文主要讨论集热棚参数对系统效率的影响,下面分别对烟囱各参数的影响进行分析。由于涡轮机的发电量主要由空气流率和压降决定,所以在以下分析中主要是以空气流率和压降以及引起空气流动的温度变化来讨论。

3.1 集热棚直径影响分析

选取不同的集热棚直径(240 m, 480 m, 720 m)进行数值计算。分别得出烟囱底部($x=12 \text{ m}$ 处的水平截面,以下同)相对烟囱出口的平均压差(负压)和平均速度,如图 2 和 3 所示。

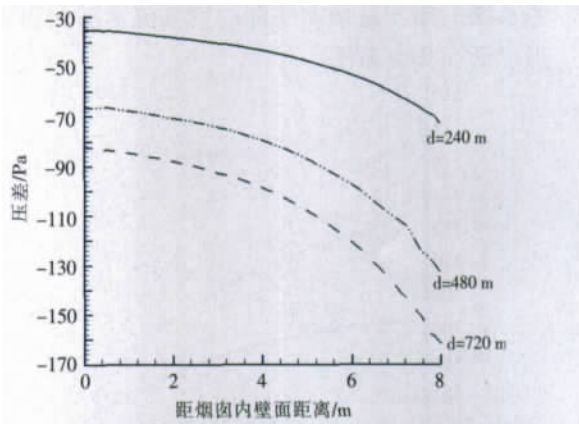


图 2 集热棚直径与产生压差的变化关系图

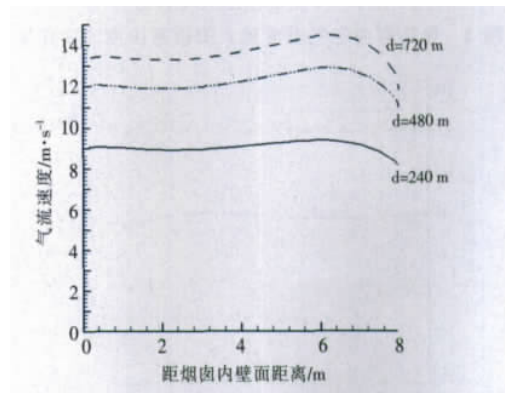


图 3 集热棚直径与烟囱底部速度关系图

从图 2 中可以看出集热棚直径对烟囱底部产

生的压差有显著影响,且随着集热棚直径的增大,在烟囱底部所产生的压差也随之明显增大。前文已经说过,烟囱底部安装的是压力级空气涡轮机,所以压差的增大,可以显著提高整个系统的发电量。从图2中还可以看出在烟囱底部的压力分布不是均匀的,从烟囱边缘到中心压差逐渐增大,这为空气涡轮机的设计和选型提供了依据。从图3中可以看出与图2中压差相对应的气流平均速度也是随集热棚直径的增大而显著增大的,而且,在同一水平面上速度分布也有同压差一样的特点。

3.2 太阳辐照强度、集热棚覆盖材料和地面黑度的影响分析

进入集热棚内的空气主要以对流热交换的方式被地面加热,地面的热量来源和大小主要由太阳的辐照强度、集热棚覆盖材料的透过率和地面的黑度3个因素决定,太阳辐射是系统运行的能量来源,覆盖材料是能量输入的门户,地面吸收是能量传递的媒介,三者缺一不可。图4是集热棚内离地面1m处空气温度随太阳辐照强度的变化关系图。图5是烟囱底部的空气流速随太阳辐照强度的变化关系图。

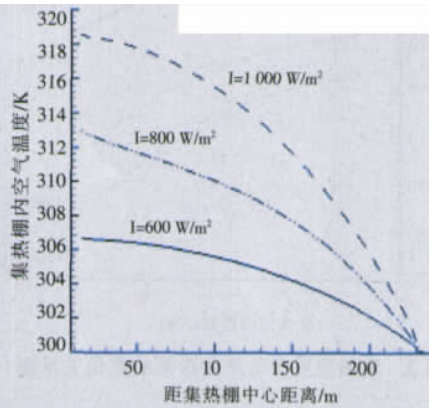


图4 集热棚内空气温度随太阳辐照强度的变化关系图

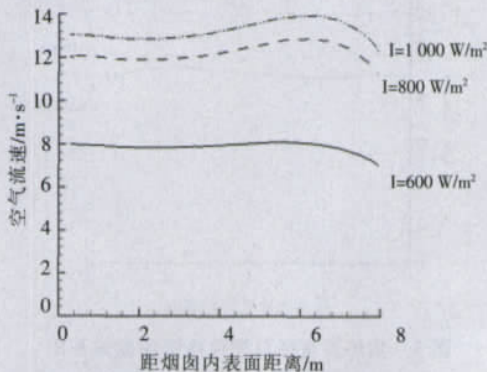


图5 烟囱底部空气流速随太阳辐照强度的变化关系图

从图4、图5中可以很清楚地看出:随着太阳辐照强度的增加,集热棚内空气温度和烟囱底部空气流速都有明显的增加,这无疑会使整个系统的发电效率明显增加。同理,集热棚覆盖材料透明度的提高和地面黑度的增加也都会使系统的发电效率有所增加,只是影响效果不会像太阳辐照这么明显而已。所以实际工程应选择在太阳能资源丰富的地区,另外,在满足强度的基础上覆盖材料的透明度越高越好,地面的黑度也应尽量的高。

3.3 地面、壁面粗糙度的影响

对此影响考虑了3种情况:整个发电装置内部气流经过的地方均光滑(全部光滑);整个发电装置内部气流经过的地方均粗糙,粗糙常数为0.5,绝对粗糙度为0.06m(全部粗糙);除集热棚下面的地面是粗糙的以外,其它壁面全是光滑的,粗糙常数为0.5,绝对粗糙度为0.06m(部分粗糙)。因为地面和其它壁面的粗糙程度会对气流的速度有一定的影响,所以可以预知表面的粗糙度越大,对气体流动的阻碍作用越大,然而,结果却不是如此(图6、图7)。

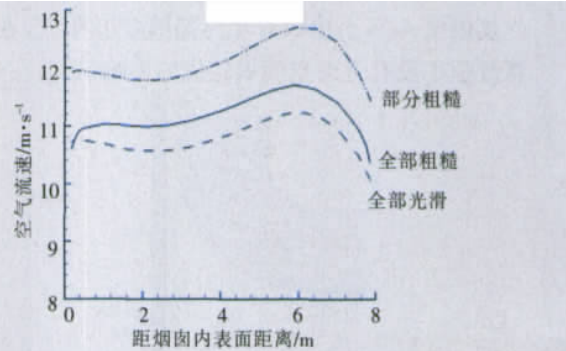


图6 烟囱底部空气流速分布图

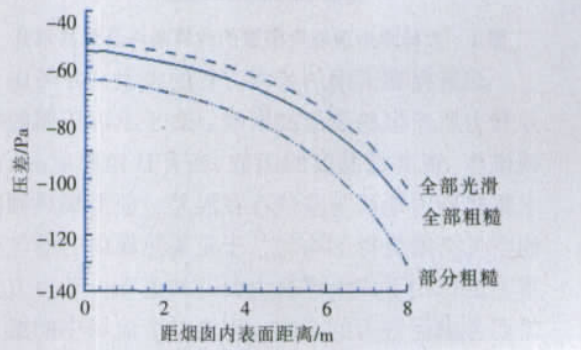


图7 烟囱底部压差沿半径分布图

图6、图7显示,烟囱底部表面光滑的空气流速反而最小,部分粗糙的速度最高;烟囱底部表面光滑的压差也是最小,烟囱底部部分粗糙的产生

的压差最大。这说明全部光滑的烟囱发电系统的发电效率最低，而地面有适当的粗糙度的可以提高系统的发电效率。

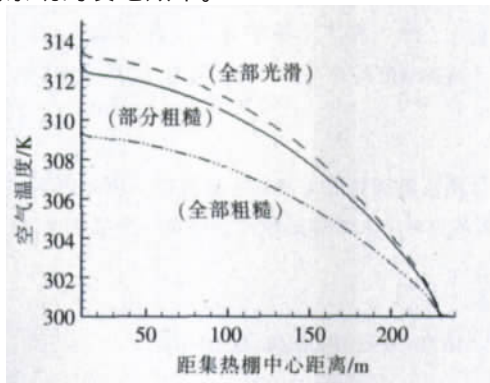


图 8 集热棚内空气温度分布图

从图 8 中可以看出空气经过集热棚的过程中，完全粗糙的温升最高，部分粗糙的次之，完全光滑的最低。这是因为粗糙的地面增大了空气与地面的换热面积，增强了换热效果，而其它部分表面粗糙会阻碍空气的流动。所以在实际工程中，集热棚下的地面或是其它储热体表面不是越光滑越好，而是应该在平整的基础上有适当的粗糙度，其它部分则是越光滑越好。

3.4 集热棚的高度和倾斜度

考虑到太阳辐射的入射角度和便于雨水的流下，集热棚要从中央向边缘倾斜。另外，从人员操作和维修方便考虑，棚顶与地面间距通常为 2-8 m。本文中集热棚中央与烟囱底部连接处离地高度为 8 m，选取了集热棚边缘离地高度为 0.5, 1, 2 和 4 m 进行比较分析。结果，4 种情况下烟囱底部的空气流速和产生的压差几乎没有差别，可见进口的高度在一个相当大的范围内对系统都不会有太大的影响。但在实际工程中为了减小外界风对系统的影响以及产生回流现象(图 9)，应尽量避免入口高度太高。为了人员进出方便，集热棚进口高度为 2 m 左右是比较合适的。

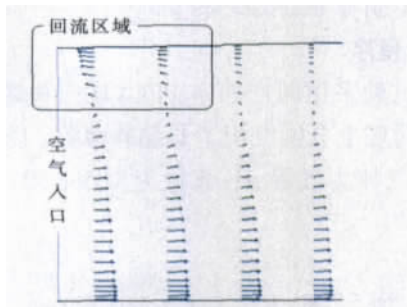


图 9 空气入口处产生的回流现象

3.5 储热系统

太阳能具有间歇性和不稳定性特点。为了使发电装置能持续、稳定地工作，储热系统的设计是一个关键环节。从太阳能烟囱发电装置的结构特点和经济要求考虑，宜采用显热蓄热。储热可以分为天然的土壤蓄热和人为铺设的储热材料蓄热。土壤具有单位储热量小，散热慢的缺点，为了增强蓄热效果，提高换热性能，可人为地铺设储热材料(如铺设水管)。水的比热容[4.2 kJ/(kg·K)]是土壤比热容[0.75-0.80 kJ/(kg·K)]的 5-6 倍，显热蓄热能力远大于土壤，且水管与水之间的传热也远高于表层土壤与深层土壤间的传热^[2]。这种简单、经济的方法可以显著提高蓄热和换热能力。

4 结论

集热棚直径对烟囱底部产生的压差和空气流率有显著影响，且随着集热棚直径的增大，产生于烟囱底部的压差和空气流率明显增大。所以集热棚直径是影响系统效率的最直接和最重要的因素。

太阳的辐照强度、集热棚覆盖材料的透过率和地面的黑度 3 个因素中，太阳辐射是系统运行的能量来源，覆盖材料是能量输入的门户，地面吸收是能量传递的媒介，这三者缺一不可。实际工程要尽量使这个能量通道畅通。

在实际工程中，集热棚下的地面或其它储热体表面不是越光滑越好，而是应该在平整的基础上有适当的粗糙度，其它部分则是越光滑越好。

空气进口的高度在一个相当大的范围内对系统都不会有太大的影响。但在实际工程中为了减小外界风对系统的影响以及产生回流现象，应尽量避免入口高度太高，同时要考虑到人员进出方便。

参考文献:

- [1] 毛宏举, 李戡洪. 太阳能烟囱发电中烟囱对系统效率影响因素分析[J]. 可再生能源, 2006(5): 12-15.
- [2] 龙新峰. 太阳能烟囱式热力发电技术进展[J]. 广东电力, 2004, 17(1): 1-5.