

# Study on Natural Ventilation in Buildings Using a Solar Chimney in Nanjing

Jianliu XU<sup>1,2</sup>, Weihua LIU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, P.R.China

<sup>2</sup> Nanjing University of Technology, Nanjing, P.R.China

Email: xujliu@yahoo.com.cn

**Abstract:** The study investigated the performance of solar chimney, which is integrated into a one-story building. A module was developed for and implemented in the Energy Plus program for the simulation and determination of the energy impact of thermal chimneys. The basic concepts, assumptions, and algorithms are implemented into the Energy Plus program to predict the performance of a solar chimney. The results showed that at Nanjing 45° is found to be optimum for obtaining maximum rate of ventilation and the rate of ventilation increases with increase of the ratio between height of absorber and gap between glass and absorber. This finding is in agreement with experimental results.

**Keywords:** solar chimney; natural ventilation; Energy Plus program

## 南京地区太阳能烟囱加强自然通风研究

许建柳<sup>1,2</sup>, 刘卫华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学, 南京, 中国, 210016

<sup>2</sup>南京工业大学, 南京, 中国, 210009

Email: xujliu@yahoo.com.cn

**摘要:** 针对单层建筑的太阳能烟囱加强自然通风, 基于能量守恒方程建立起影响太阳能烟囱性能的数学模型, 来模拟太阳能烟囱运行的实际效果, 并与实验进行对比。研究显示, 对于南京地区, 太阳能烟囱在设计倾斜角为 45° 下诱导通风量最大, 且通风量随集热器长度以及玻璃与集热器之间的距离增大而增大, 这与实验结果一致。

**关键词:** 太阳能烟囱; 自然通风; 能量守恒方程

### 1 引言

对于南京这样的夏季炎热地区, 利用太阳能烟囱来加强自然通风可以降低室内温度, 从而减少空调能耗。在设计太阳能烟囱时, 怎样在降低太阳能烟囱的造价同时提高房间的通风量, 是一个要考虑的问题。影响太阳能烟囱运行性能的因素很多, 烟囱的设计尺寸和倾斜角度是重要因素。Chen 等人<sup>[1]</sup>在烟囱宽长比1:15到2:5以及在各种热流量和倾斜角下对一个太阳能烟囱模型进行实验; Abounaga和Abdrabboh对一个为改善夜间通风的太阳能烟囱进行研究<sup>[2]</sup>, 得出, 在太阳能平均辐射率为850w/m<sup>2</sup>下太阳能烟囱诱导通风量为0.84m<sup>3</sup>/s; Bansal等人<sup>[3]</sup>通过对太阳能烟囱进行数值模拟。他们研究结果都表明, 对于1.5m长、200mm宽的烟囱, 在45°左右

倾斜角下通风量最大。以上研究都是在特定纬度和地区下得出的结果, 对于象南京这样夏热冬冷地区, 怎样通过改进太阳能烟囱设计来提高房间的自然通风量, 是具有实际意义的。

### 1 数学模型

为了预测太阳能烟囱实际运行效果, 可以通过建立数学模型来模拟。在建立数学模型之前先做如下几项假设:

- (1) 传热过程是一维稳态;
- (2) 烟囱内的流动是层流;
- (3) 烟囱进气温度等于周围环境温度;
- (4) 由于烟囱内空气流速慢, 摩擦力忽略不计。

针对玻璃、集热器、空气建立能量守恒方程。

### 1.1 针对烟囱玻璃的能量守恒方程

$$R_1 A_g + h_{wg} A_w (T_w - T_g) = h_g A_g (T_g - T_f) + U_1 A_g (T_g - T_a) \quad (1)$$

式中， $R_1$  为通过烟囱玻璃的太阳辐射得热， $w/m^2$ ； $A_g, A_w$  分别为烟囱玻璃面积、集热器面积， $m^2$ ； $h_{wg}$  为玻璃与集热器的辐射对流换热系数， $w/m^2.k$ ； $h_g$  为玻璃内侧的对流换热系数， $w/m^2.k$ ； $U_1$  为玻璃外侧的对流换热系数， $w/m^2.k$ ；

$T_w, T_g, T_f, T_a$  分别为集热器背面温度、玻璃表面温度、烟囱内空气温度、烟囱外空气温度， $k$ 。

### 1.2 针对烟囱内侧面的能量守恒方程

$$R_2 A_w = h_{wg} A_w (T_w - T_g) + h_w A_w (T_w - T_f) + U_b A_w (T_w - T_r) \quad (2)$$

式中， $R_2$  为集热器的太阳辐射得热， $w/m^2$ ； $U_b$  为集热器的对流换热系数， $w/m^2.k$ ； $T_r$  为房间内温度， $k$ 。

### 1.3 针对空气的能量守恒方程

$$q'' = h_w A_w (T_w - T_f) + h_g A_g (T_g - T_f) \quad (3)$$

$$q'' = m C_{f1} (T_{f2} - T_{f1}) \quad (4)$$

$$T_f = \gamma T_{f2} + (1 - \gamma) T_{f1} \quad (5)$$

$$q'' = \frac{m c_{f1} (T_f - T_r)}{\gamma} \quad (6)$$

式中， $q''$  为烟囱内空气得热量， $w$ ； $m$  为空气质量流量， $kg/s$ ； $c_{f1}$  为空气比热， $J/kg.k$ ； $T_{f2}$  为烟囱出口空气温度， $k$ ； $T_{f1}$  为烟囱进口空气温度， $k$ ； $\gamma$  为热空气权重，取 0.74

把 (6) 代入 (3) 式得

$$h_g A_g T_g - \left( \frac{h_g A_g + h_w A_w + m c_{f1}}{\gamma} \right) T_f + h_w A_w T_w = - \left( \frac{m c_{f1}}{\gamma} \right) T_r \quad (7)$$

$$m = c_d \rho_{f1} A_2 \sqrt{\frac{2 g L_s \sin \theta (T_f - T_r)}{(1 + A_r^2) T_r}} \quad (8)$$

式中， $c_d$  为烟囱进口空气流量系数，取 0.57<sup>[4]</sup>； $\rho_{f1}$  为空气密度， $kg/m^3$ ； $A_2$  为烟囱出口横断面积， $m^2$ ； $L_s$  为烟囱长度， $m$ ； $\theta$  为烟囱倾斜角，度。

$$V_2 = \frac{m}{\rho_{f1} A_2} \quad (9)$$

式中， $V_2$  为烟囱出口空气流速， $m/s$ 。

## 2 实验验证

为了验证数学模型是否可靠，对一个装有太阳能烟囱的尺寸为  $2m \times 1m \times 1m$  的模型小房间进行对比实验，如图 1 所示。小房间围护结构采用 2.5cm 厚的 EPS 塑料进行绝热保温。太阳能烟囱的集热器采用 1mm 厚涂有黑色油漆的铝箔制作，集热器背面采用 5cm 厚 EPS 塑料进行绝热。集热器对面是一块 4mm 厚的玻璃盖，集热器与玻璃盖间距为 0.4m，烟囱进出口的横断面尺寸均为  $0.4m \times 1m$ 。

在整个试验过程中，在集热器表面、玻璃盖内外表面、烟囱内、房间及周围都布置了热电偶温度计，温度计精度为  $0.1^\circ C$ 。为了测量烟囱空气流量，在烟囱内布置了风速仪，风速仪精度为  $0.01m/s$ 。为了测量集热器太阳辐射得热量，采用最小值能测量  $15w/m^2$  太阳辐射计来测量太阳辐射率。为了测得集热器太阳辐射得热量，太阳辐射计倾斜角与太阳能烟囱倾斜角相同。

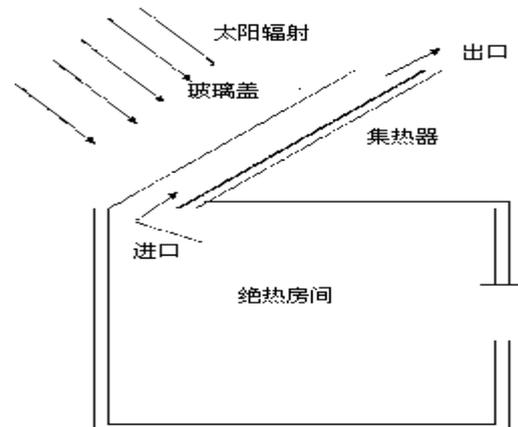


Figure 1. experimental set-up for investing performance of solar chimney

图 1 太阳能烟囱试验台

## 3 数学模型计算

为了与实验进行比较，烟囱基本计算参数与实验参数相同。实验时间选在 7 月的 12 日的 10:00 到 17:00；烟囱的玻璃透射系数取 0.85，集热器的吸收系数取 0.9；为了研究南京地区在太阳能烟囱不同倾斜角下房间的自然通风量，倾斜角分别取  $60^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $30^\circ$ 。

### 4. 结果及分析

针对太阳能烟囱集热器表面温度、玻璃表面温度、烟囱内空气温度进行计算，并与实验结果进行对比，其结果见图 2

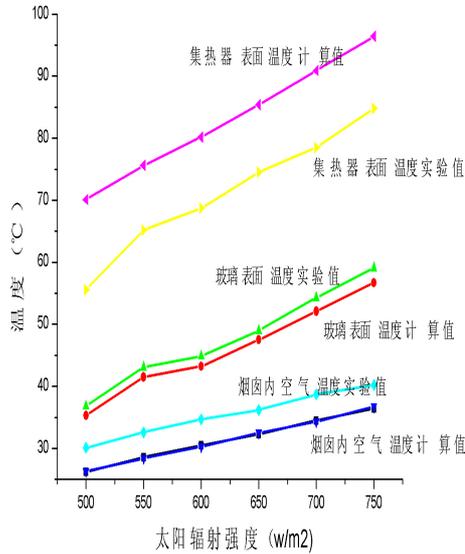


Figure2. Experimental and theoretical results for inclined chimney(45° inclination).

图 2. 45° 倾斜角太阳能烟囱各部位温度.

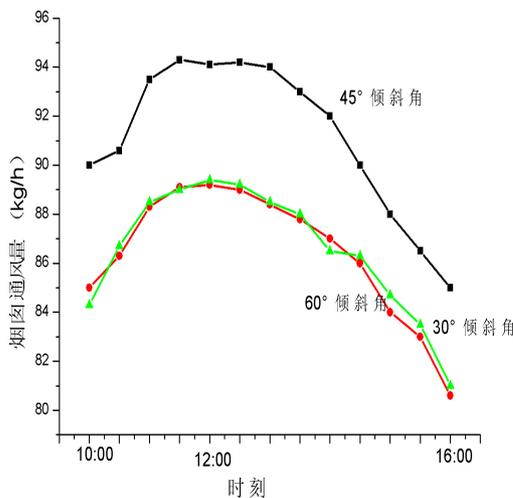


Figure 3. Mass flow rate at A.

图 3. A 情况下太阳能烟囱诱导通风量.

从图 2 中可以看出，数学模型计算结果与实验结果基本吻合。

为了研究南京地区建筑物各种外形尺寸的太阳能烟囱在不同倾斜角下的运行效果，选取 3 种尺寸的太阳能烟囱进行研究：

- A: 烟囱长为 0.1m, 玻璃盖与集热器距离为 0.1m;
- B: 烟囱长为 0.15m, 玻璃盖与集热器距离为

0.15m;

C: 烟囱长为 0.3m, 玻璃盖与集热器距离为 0.3m。

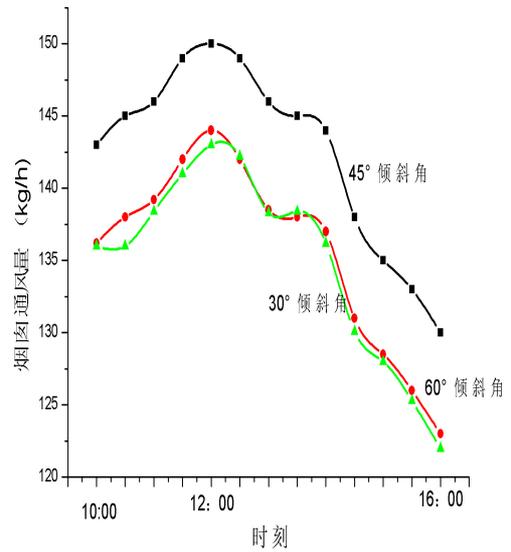


Figure 4. Mass flow rate at B

图 4 B 情况下太阳能烟囱诱导通风量

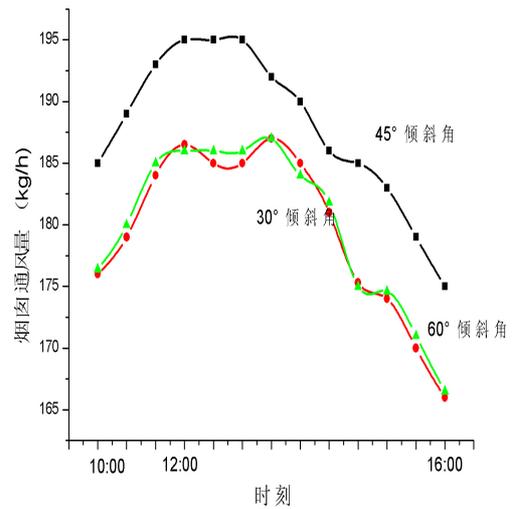


Figure 5. Mass flow rate at C

图 5 C 情况下太阳能烟囱诱导通风量

其结果如图 3、图 4、图 5。

从图 3、图 4、图 5 中可以看出，无论烟囱哪种外形尺寸，45° 倾斜角下烟囱诱导通风量最大，最大值均出现在中午 12:00 这一时刻，中午 12:00 是太阳辐射强度最大时刻。60° 倾斜角与 30° 倾斜角烟囱诱导通风量差不多。另外无论何种烟囱倾斜角，诱导通风量随烟囱尺寸增大而增大。

### 5. 结论

对于南京地区，建筑物采用太阳能烟囱来诱导通

风，烟囱最佳倾斜角应取  $45^\circ$ ，这时太阳能烟囱诱导通风量值最大；太阳能烟囱诱导通风量也与烟囱尺寸有关，烟囱尺寸越大，诱导通风量值也越大，综合建筑物自然通风效果和经济成本，太阳能烟囱的尺寸应该根据建筑物所需自然通风量大小来进行选取。

## References (参考文献)

- [1] Z.D.Chen,P.Bandopadhyaya,J.Halldorssonb,C.Byrjalsenb,D.Heiselbergb,Y.Lic.An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat Flux .Building and Environment,38(2003),893~906.
- [2] M.M.Aboulnaga, S.N.Abdrabboh, Improving night ventilation into low -rise building in hot-arid climates exploring a combined wall-solar chimney. Renewable Energy,19(2000),47~54.
- [3] N.K.Bansal, R.Mthur, M.S.Bhandari. Solar Chimney for enhanced stack ventilation. Building and Environment,28(1993),373~377.
- [4] K.T.Andrson. Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy Trans.ASHRAE,101(2)(1995)1103 ~ 1117.