

太阳能烟囱强化自然通风的研究现状

苏亚欣, 柳仲宝

东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620

摘要 自然通风是一种节能的被动式通风冷却技术, 其原理是在由温差引起的热压或风压的作用下驱动室内空间的空气自然流动, 与机械通风相比, 自然通风具有显著的节能优点。太阳能烟囱利用太阳辐射加热烟囱通道内的空气, 提高温差, 从而强化自然通风。本研究介绍了太阳能集热墙体(Trombe)式和倾斜集热板屋顶式两种典型太阳能烟囱的结构及其强化自然通风的基本原理。详细讨论了影响太阳能烟囱通风性能的主要因素, 并介绍国内外学者对太阳能烟囱的主要研究方法和相关研究成果。太阳能烟囱的高度和深度(玻璃盖板与集热墙的间距)影响烟囱内空气的温升以及空气的自然对流的流动特点, 从而影响了太阳能烟囱的自然通风流量。空气流量随着烟囱深度的增加而增加, 但烟囱深度超过一定值后空气流量不增反减。当烟囱的深高比超过 2.5 后, 烟囱出口端会出现逆流, 从而抑制了通风量的增加。集热墙的结构以及倾斜角度对太阳能烟囱自然通风效果的影响与地理位置和气候条件等因素有关。研究太阳能烟囱自然通风的理论方法包括基于能量平衡分析的模型和基于计算流体力学的数值模拟。分析了太阳能烟囱自然通风研究中需要改进的问题。

关键词 自然通风; 太阳能烟囱; 建筑节能

中图分类号 TK519

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.27.010

Research Status on Solar Chimney for Natural Ventilation Enhancement

SU Yaxin, LIU Zhongbao

School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract Natural ventilation is an energy efficient passive cooling technology and it uses wind or thermal buoyancy to deliver fresh air into the buildings in order to maintain a good indoor air quality. Comparing with mechanical ventilation, natural ventilation has obvious energy-saving advantages. Solar Chimney (SC) is a vertical or inclined channel that utilizes solar radiation to cause a temperature rise and density drop for the air flowing through the chimney, therefore enhances the natural ventilation. First, two types of typical solar chimney, namely, Trombe wall-type and inclined roof-type solar chimney, and their basic principle to enhance natural ventilation are briefly introduced. Then, the parameters that influence the performance of natural ventilation of the solar chimney are discussed in detail. The major methods and result are listed based on the review of the research works on solar chimney by different authors. The height and depth (the distance between the glass cover and absorber wall) of SC influence the natural convection flow process and the temperature rise of air in the SC channel and furthermore influence the ventilation rate of the SC strongly. The ventilation air i.e. the air flow rate increases with the increase of SC depth. The air flow rate decreases when the SC depth exceeds an optimal value. A reverse flow appears near the top of the SC channel when the ratio of SC depth to height is larger than 2.5 and the increase of natural ventilation rate is limited. The effect of the SC structure and its inclined angle on ventilation is related to the geographical location and climate conditions. The modeling of SC ventilation includes the mathematical modeling that is based on the energy conservation analysis on the heat transfer process of the air on the wall surfaces and the numerical simulation of the flow process that is based on Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Based on the literature review, the issues that need to be improved in solar chimney study are analyzed.

Keywords natural ventilation; solar chimney; building energy conservation

收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-09-01

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (11ZR1401000)

作者简介: 苏亚欣, 副教授, 研究方向为建筑节能与新能源利用、工程热物理, 电子信箱: suyx@dhu.edu.cn

0 引言

自然通风技术是一种节能和环境友好的被动式通风冷却技术,其原理是在由温差引起的热压或风压的作用下驱动室内空间的空气自然流动,满足室内空气调节的温度及一定舒适性的要求。与机械通风相比,自然通风具有显著的节能优点,在过渡季节以及气候温和地区具有广阔的应用前景,受到许多研究人员的注意,在各类建筑中都得到了应用^[1-2]。然而自然通风的驱动力,即热压与风压,与机械驱动力相比却较为微弱,因而在一定情况下自然通风的使用受到了限制。太阳能烟囱是一种利用太阳辐射能来强化自然通风的有效技术,近年来成为研究人员深为重视的研究热点。

太阳能烟囱的一个或多个壁面是由玻璃盖板构成的透明墙体,可以利用透过透明玻璃盖板的太阳辐射热增加烟囱内外温差从而增加浮力和热压,利用烟囱效应的抽吸作用使冷空气从建筑物的下部进入,热空气从建筑物上部排出,在建筑物内形成空气流动,增加室内通风量、改善通风效果,从而达到通风、除湿、降温、排除有害气体的目的。太阳能烟囱技术在欧美国家以及部分亚洲国家已经被广泛地应用于被动式太阳房,在建筑采暖、通风冷却等方面都表现出了较好的效果。太阳能烟囱的应用对于推动新能源与生态建筑一体化具有积极的意义。然而中国在有关太阳能烟囱的研究上处于起步阶段,对太阳能烟囱内部有限空间的对流换热过程尚未给出理论的研究结果,经验性的验证实验及计算机模拟技术尚有不足之处,因此本文将对太阳能烟囱性能的影响因素以及国内外学者对太阳能烟囱的一些研究方法进行综述,为太阳能烟囱的深入研究提供参考。

1 太阳能烟囱的基本形式

太阳能集热墙体是一种典型的太阳能烟囱的结构形式,1966年法国 Odeillo 太阳能研究所所长 Felix Trombe 博士发明的一种太阳能吸热壁的专利技术,并以 Trombe 墙命名,如图 1 所示。当太阳能烟囱布置于屋顶时,通常采用如图 2 所示的倾斜集热板屋顶式结构。研究人员对 Trombe 墙的传热和自然通风特性进行了广泛的研究^[3-8]。

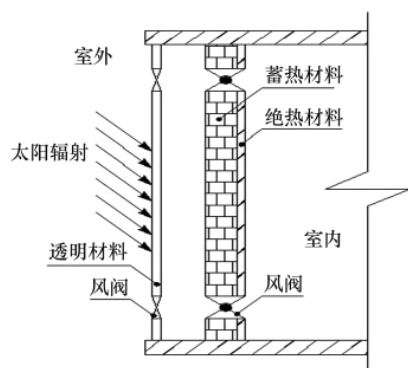


图 1 Trombe 墙体式结构
Fig. 1 Trombe wall-type solar chimney

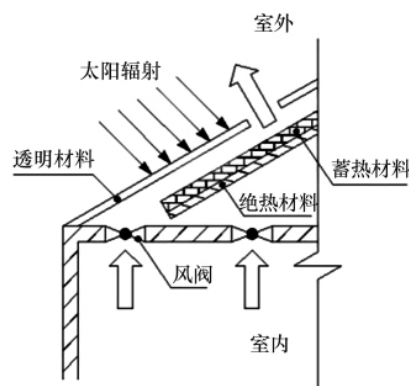


图 2 倾斜集热板屋顶式结构
Fig. 2 Inclined roof-type solar chimney

现以 Trombe 墙体式结构为例简述太阳能烟囱的工作原理,太阳辐射透过透明玻璃盖板进入烟囱通道后被蓄热材料吸收,加热通道内的空气,使之产生内外密度差,完成热压到风压的转换,驱动通道内空气向上流动。夏季时室内空气由集热墙下部进入太阳能烟囱通道,被吸收太阳辐射的集热墙加热温度升高、密度降低后从上部出口排出至室外,以此达到通风效果,如图 3 所示。冬季工作原理与夏季相同但运行工况相反,室外冷空气进入太阳能烟囱通道,经集热墙加热温度升高后,从集热墙上部入口进入室内,从而达到通风换气以及供暖的目的,如图 4 所示。

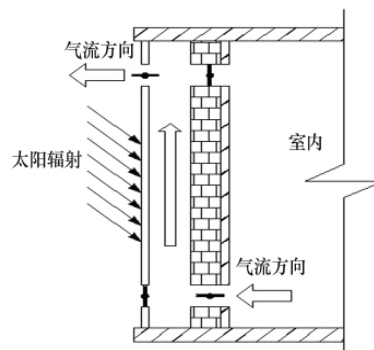


图 3 夏季 Trombe 墙冷却原理图
Fig. 3 Cooling principle scheme with Trombe wall in the summer

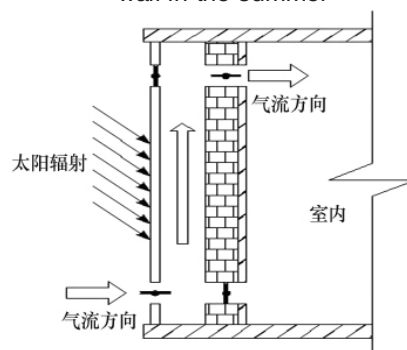


图 4 冬季 Trombe 墙供暖原理图
Fig. 4 Heating principle scheme with Trombe wall in the winter

2 太阳能烟囱自然通风性能的影响因素

太阳能烟囱内部竖直方向的空气由于存在温度差,产生了密度差,沿着烟囱墙面的竖直方向出现压力梯度,密度小的空气上升而产生自然对流,这种流动不消耗动力完全取决于温差是否存在,流动的强度则与温差的大小相关。因而随着太阳辐射强度的增加,烟囱进出口处的空气温差逐渐增加,使得诱导的空气流动加强。在目前的研究中,研究人员利用实验研究、理论解析以及模型模拟的方法,都已证明太阳能烟囱诱导的自然通风性能随着辐射强度的增加而提高^[9-12]。然而太阳辐射具有随机性及不确定性,难以控制,在影响太阳能烟囱通风特性的因素中除了辐射强度、室外风速、环境温度等不确定因素外,太阳能烟囱自身的结构特性是影响通风性能的一个重要因素。太阳能烟囱的结构可以人为地进行因地制宜的设计调整,具有可控性,因此本文主要综述太阳能烟囱的结构特性对通风性能的影响。

2.1 结构尺寸对性能的影响

太阳能烟囱的高度和深度(玻璃盖板与集热墙的间距)影响烟囱内空气被加热的程度以及空气自然对流的流动特点,从而影响了太阳能烟囱的自然通风流量。很多研究人员在实验室对太阳能烟囱小比例模型以及全尺寸的太阳能烟囱进行了实验研究,分析了高度和深度的影响。

在小比例实验模型研究中,Spencer等^[13]利用电解盐溶液产生的氢气泡模拟浮升力效果,研究了处于均匀热流密度下太阳能烟囱的通风性能,研究指出通风量随着烟囱深度的增加而增加,但当烟囱的深高比达到0.4时出口端就会出现逆流的现象,抑制了通风量的增加。端木祥玲^[14]同样利用氢气泡技术对太阳能烟囱强化通风做了基础性的实验研究,验证了进风口尺寸的增加可以减缓出口端产生回流的结论。另外,荆海薇^[9]与郝彩侠^[15]利用增设加热装置的气体模拟法,分别在烟囱的1个壁面受热与2个壁面受热的条件下,对竖直集热板式太阳能烟囱的通风性能进行了实验研究,给出了烟囱内部温度场和速度场随着热流密度变化的分布情况,指出在小比例模型实验条件下烟囱深高比为0.5时通风量最大。

Bouchair等^[16]在实验室条件下对太阳能烟囱进行全尺寸实验研究,其太阳能烟囱高度为2m,宽度为4m,深度在0.1—1.0m之间变化。实验结果表明,当深高比超过0.15时,烟囱内的空气质量流量开始降低,最佳深高比为0.1。Arce等^[17]在西班牙的Tabernas沙漠上搭建了一个深高比为0.1的全尺寸太阳能烟囱模型,对比理论模拟结果发现,环境风压及烟囱内部的温度梯度是影响烟囱内竖直方向压力梯度的主要因素,并根据实验数据修正了理论模型中用于计算质量流量的排气系数,建议排气系数 $C_d=0.52$ 。

虽然模型实验克服了原型实验的一些缺点,但从实验模型到实际工程的恰当过渡应该建立在反映规模尺度的流动和传热参数上。此外,烟囱进出风口的位置与周围环境的连接方式、内部热源的影响等诸多问题都要被考虑,因此,模型实验的结果难以用于工程设计。这也使得学者们重新审视太

阳能烟囱的研究方法,寻求可以准确描述太阳能烟囱结构尺寸影响通风性能的理论模型。

Bansal等^[10]在假设壁面处于均匀热流密度、沿着烟囱深度方向的空气温度在同一高度上相同的条件下,应用能量平衡的方法建立了太阳能烟囱的稳态数学模型,并对其通风性能进行研究,得到空气质量流量关于空气温度与烟囱结构尺寸的计算式: $\dot{m}=C_d\rho A_o\sqrt{2gH(T_i-T_r)}/\sqrt{(1+A_i/A_o)T_r}$,式中的排气系数 $C_d=0.57$, ρ 为空气密度, A_i 、 A_o 分别为通风口进口、出口面积, H 为烟囱高度, T_i 为空气温度, T_r 为室内温度。Bansal等^[18]、Aboulnaga^[19]在根据实验数据修正部分换热系数后,应用能量平衡的方法重新探讨了结构尺寸对烟囱性能的影响,结果表明,空气流量随着烟囱深度的增加而增加,但烟囱深度超过一定值后空气质量流量不增反减,该结论与上述的实验结果相似。然而经Awbi^[20]与Sandberg等^[21]的研究证明,早期的太阳能烟囱理论分析所得到的温度及速度的表达式一般只适用于深高比较小(一般低于或等于0.1)的太阳能烟囱,原因是深高比越大越容易引起烟囱出口端的空气回流,使得在计算出口压力损失以及沿程压力损失时误差较大。Chen等^[11]在对一个高1.5m、宽0.62m的太阳能烟囱内部气流流动状态及温度的测量分析中,发现Bansal等^[10]的理论模型研究普遍高估了空气质量流量,究其原因也是计算流动驱动力时出口端的压力损失被低估以及沿程损失被忽略。为了消除进出口压力损失及沿程压力损失对烟囱通风性能的影响,Ryan和Burek^[22]等建立了一个高2m的轻质太阳能烟囱实验台,将烟囱的高度、深度作为独立的参数进行研究,利用多元无因次分析法对实验数据进行耦合,得到烟囱高度(H)、深度(d)、辐射热量(q)作为独立参数与空气质量流量之间的关系式: $\dot{m}\propto q_w^{0.459}, \dot{m}\propto H^{0.600}, \dot{m}\propto d^{0.756}$ 。

然而目前的研究中依然没有给出太阳能烟囱高度、深度、宽度三者之间的优化关系,而辐射强度与结构尺寸的对对应关系也无人问津,为了避免太阳能烟囱在工程设计中受到这些因素的限制,在今后的研究中有必要对这些问题进行探索和分析。

2.2 结构形式对性能的影响

太阳能烟囱通常采用的结构形式包括Trombe墙式、倾斜集热板屋顶式以及竖直集热板屋顶式3种结构。从理论上讲,3种结构形式的太阳能烟囱强化自然通风的机理是相同的,即利用太阳辐射热增加烟囱内外温差从而增加浮力和热压。但是考虑到使用的地理位置、气候条件、安装成本以及建筑一体化等客观实际情况,使用何种结构的太阳能烟囱则要因地制宜的设计和研发。

Trombe墙式结构可以作为建筑围护结构的一部分,具有夏季降低热负荷、冬季减少室内热损失以及外形美观、占用空间少等优点,但同时具有影响室内开窗采光、墙体内部易产生回流等缺点。相比之下,竖直集热板屋顶式结构则不会影响房间的开窗布局,较小的局部压力损失使得通风性能良

好。Ramadan 等^[12]利用数值计算的方法研究了竖式太阳能烟囱的通风性能,研究指出在进口尺寸不变的情况下增加烟囱的深度可以提高室内的换气次数。而在 Mathur 等^[23]对竖式太阳能烟囱的实验研究中也给出了在辐射强度为 $700\text{W}/\text{m}^2$ 时, 27m^3 的房间换气次数为 5.6 次/h 的结论。李安桂等^[24]采用实验的手段测量了高度为 2m、宽度为 1m、空气通道深度变化范围在 0.4—1.2m 的竖直集热板屋顶式太阳能烟囱,探讨了在不同受热条件下自然通风的效果及原因。但竖直集热板屋顶结构的太阳能烟囱却受到了建筑空间以及外观突兀等因素的限制而没有得到很好的发展。倾斜集热板屋顶式结构则沿着屋顶的坡度进行安装设计,避免了空间及外观的制约,研究表明^[25],倾斜集热板屋顶式结构的太阳能烟囱内部的速度场分部均匀,通风效率也高于竖直集热板屋顶式。其中倾斜角度则是该结构中影响空气流量和集热效率的重要参数,多数学者对此进行了研究,Mathur 等^[26]利用实验的方法比较了 4 种不同结构形式的太阳能烟囱的通风特性,发现倾斜角度为 45° 时,太阳能烟囱诱导的通风量最大。Mathur 等^[27]又在纬度为 20° — 30° 的地区进一步对倾斜式结构的太阳能烟囱进行了实验研究,通过比较得出烟囱的倾斜角度为 45° 时比倾斜角度为 30° 及 60° 时多诱导 10% 的通风量。Ramadan 等^[28]在文献[12]的基础上应用数值模拟研究了烟囱的倾斜角度对房间换气次数及空气流动形态的影响,分析发现,纬度为 28.4° 时最佳的倾斜角度在 45° — 70° 之间。Harris 等^[29]利用计算流体力学(CFD)模拟技术对带有倾斜集热板屋顶式太阳能烟囱的建筑进行研究,研究证明,倾斜角度在 67.5° 时可以获得最佳的通风量,而且倾斜式结构的通风效率要比竖直集热板屋顶式的太阳能烟囱高出 11%。

虽然现有文献已经对倾斜集热板屋顶式结构太阳能烟囱的最佳倾斜角度进行了大量的研究,但却没有给出结构尺寸与倾斜角度之间的优化关系,而且研究结果也较为凌乱,国内则更鲜有学者关注研究这些问题,因此在今后的研究中可以深入探索这些问题。

2.3 其他影响因素

集热墙的厚度是影响太阳能烟囱通风性能的一个重要因素,墙体的最佳厚度决定了墙体的蓄热能力,并保证墙体温度的波动范围符合要求。在其他条件不变的情况下,增加集热墙的厚度,相当于增加集热墙的热阻,减少集热墙的热损失,从而增加了通道中空气的浮升力和通风量。而当集热墙的室内侧有保温隔热层时,可视为集热墙的厚度是无穷大的,此时集热墙吸收的太阳辐射热量全部用来提供通道中空气的浮升力。Gan 等^[29]的研究表明,有内保温的集热墙可以使集热面的温度升高 9°C ,使通风量增加 19%。

3 太阳能烟囱的理论分析与模拟方法

3.1 基于能量平衡的传热理论分析

能量平衡分析方法是基于对太阳能烟囱的各组成部分的传热过程的分析,建立相关温度分布的数学模型,从而得

到烟囱内部空气的温度分布。太阳能烟囱的能量平衡关系包括:集热墙和玻璃盖板对太阳辐射的吸收及其内部的导热、烟囱内部空气与集热墙及玻璃盖板的自然对流换热以及集热墙与玻璃盖板之间的辐射换热。此外,由于集热墙和玻璃盖板厚度与其高度和宽度相比较薄,所以在集热墙和玻璃盖板内部的传热过程可视为大平板一维稳态导热,Ong 等^[30]则根据该平衡关系建立了预测太阳能烟囱内部空气温度的一维稳态数学模型。Bansal 等^[31]在修正了部分传热系数后也应用上述方法建立了集热墙、玻璃盖板和烟囱内的空气的平均温度的方程,计算结果与实验测量的结果误差在 10% 之内。翟晓强等^[32]应用能量平衡的方法研究了不同形式的太阳能烟囱内的自然通风的特点,并给出太阳能烟囱在生态建筑中的应用形式。陈会娟等^[33]应用能量平衡的方法探讨了 Trombe 墙式太阳能烟囱的通风特性,分析了结构尺寸、气象参数以及集热墙与玻璃盖板的物性参数对通风性能的影响。Afonso 等^[34]、文献[35]则利用能量平衡的方法建立了一维非稳态的传热模型,并应用有限差分法进行求解研究,分别讨论了传热系数随空气温度的变化情况以及自然通风效果在一天不同时间的变化情况。

目前,上述的研究模型通常忽略了玻璃盖板和集热墙的导热热阻,使得结果与实验数据具有一定的误差。此外,空气在太阳能烟囱通道内受热流动过程中,由于速度的变化必然会引起玻璃和墙体表面的局部对流换热系数发生变化,目前的研究模型中普遍采用经验公式来计算一个恒定的对流换热系数,这也是引起误差的一个因素同时也是进一步修正能量平衡法理论模型的研究方向。

3.2 基于计算流体力学的数值模拟方法

与实验方法相比,CFD 的方法可以精确计算局部对流换热系数和局部气流的流动特点,因此可以详细地给出自然通风的温度场和流场等的分布规律。Ben 等^[36]较早地采用 CFD 方法模拟了二维层流流动条件下太阳能烟囱内部空气的流场和温度场,给出了努谢尔数 Nu 与瑞利数 Ra 、热性能之间的函数关系,指出进出口温差与 Ra 数是影响热传递的两个重要参数。Rodrigues 等^[37]则采用 $k-\varepsilon$ 方程模拟了二维湍流流动条件下太阳能烟囱内部空气的流场和温度场,分析了 Gr 数以及 Nu 数对通风性能的影响。Bacharoudis 等^[38]对一侧墙壁绝热、一侧墙壁处于某一热流下的太阳能烟囱进行了二维稳态 CFD 模拟研究,并对 6 种湍流模型进行对比分析,结果认为,Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型可以较好地描述边界层内的流动,模拟结果与实验数据吻合较好。

Gan 等^[39]则应用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对 Trombe 墙的自然通风特性进行了三维模拟,研究表明,通风量随集热墙温度、高度、宽度、深度以及太阳辐射强度的变化而改变,并建议增加集热墙的厚度减少热损失以提高集热效率。此外,赵平歌^[40]采用零方程模型及 Mitflow 程序求解太阳能烟囱模型中的三维温度场和速度场。孙猛等^[41]选择带有浮力修正的 $k-\varepsilon$ 湍流模型并结合 Phoenix 3.2 程序完成了对太阳能烟囱通风性能

的三维模拟。王丽萍^[42]则针对不同结构形式的太阳能烟囱分别选用标准 $k-\varepsilon$ 模型以及 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对自然通风进行模拟, 建议对三维模型进行模拟时采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型结合非平衡壁面函数法可获得较为准确的解。杨昭等^[43]采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟了三维湍流流动条件下 Trombe 墙内传热过程及通道内空气的流动情况。这些研究结果对太阳能烟囱的结构优化设计提供了参考。

CFD 模拟也为详细地研究烟囱内空气的流动、换热与墙体内部的导热过程的耦合提供了研究手段。Bilgen^[44]对竖式通风墙内的导热及通道内的自然对流的耦合传热进行了研究, 得到了努谢尔数 Nu 与瑞利数 Ra 、普朗特数 Pr 、墙体导热系数 k_r 之间的函数关系式, 即 $Nu=0.18Ra^{1/4}(l/H)^{1/3}k_r^{-1/100}$, 研究发现, 墙体的导热系数对自然对流的影响是不可忽视的, 因此对集热墙采取保温绝热措施将有助于提高烟囱的通风性能。Nouanegue 等^[45]则对竖直空腔内的辐射、导热及自然对流的耦合传热进行了研究, 同样利用有限容积法对守恒方程进行离散求解, 分析了 Nu 数、 Ra 数及无量纲长度等控制参数对空气体积流量的影响, 给出了在高 Ra 数条件下, 空气体积流量与墙体表面发射率、墙体导热率以及 Nu 数之间的函数关系, 探讨了结构尺寸对 Nu 数的影响情况。何云等^[46]利用直接数值模拟法 (DNS) 对太阳能烟囱内自然对流和传热的控制参数 Ra 数以及结构参数进行分析, 证明了在恒定太阳辐射强度下, 太阳能烟囱进、出口尺寸的设计以及壁面温度受 Ra 数大小的影响。这些研究结果对于深刻掌握太阳能烟囱内的流动特点以及流动与传热过程的相互作用提供了参考, 也为进一步的优化太阳能烟囱的设计提供了基础数据。

4 结论

太阳能烟囱是一种强化自然通风的有效手段, 其通风性能受烟囱结构形式、气象参数、太阳辐射强度以及墙体等的物性参数的影响, 对烟囱结构的优化设计有利于提高烟囱的通风效果。对太阳能烟囱的研究方法包括实验测试以及理论研究与模拟。其中基于能量平衡的理论模型由于忽略了玻璃盖板和集热墙的导热热阻, 使得结果与实验数据具有一定的误差。计算流体力学是模拟太阳能烟囱自然通风特性的有效手段。而如何让太阳能烟囱真正的成为一项能改善建筑热环境、有效降低空调耗能、同时能够创造绿色建筑的技术, 还有待科研人员对其进行深入的定量与定性的理论研究, 使其广泛地应用于实际工程中。

参考文献 (References)

- [1] Fordham M. Natural ventilation [J]. *Renewable Energy*, 2000, 9(1-2): 17-37.
- [2] 万鑫, 苏亚欣. 现代建筑中自然通风技术的应用 [J]. *建筑节能*, 2007, 35(9): 9-12.
- [3] Smolec W, Thomas A. Theoretical and experimental investigations of heat transfer in a Trombe wall [J]. *Energy Conversion and Management*, 1993, 34(5): 385-400.
- [4] Tarazi N K. Model of a Trombe wall [J]. *Renewable Energy*, 1991, 1(3-4): 533-541.
- [5] Ji E, Yi H, He W, et al. PV-Trombe wall design for buildings in composite climates [J]. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 2007, 129(4): 431-437.
- [6] Chel A, Nayak J K, Kaushik G. Energy conservation in honey storage building using Trombe wall [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(9): 1643-1650.
- [7] Chen B, Chen X, Ding Y H, et al. Shading effects on the winter thermal performance of the Trombe wall air gap: An experimental study in Dalian [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(12): 1961-1971.
- [8] Jaber S, Ajib S. Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(9): 1891-1898.
- [9] 荆海薇. 太阳能烟囱自然通风效果实验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [10] Bansal N K, Mathur R, Bhandari M S. Solar chimney for enhanced stack ventilation [J]. *Building and Environment*, 1993, 28(3): 73-77.
- [11] Chen Z D, Bandopadhyay P, Halldorsson J, et al. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux [J]. *Building and Environment*, 2003, 38(7): 893-906.
- [12] Ramadan B, Nader S A K. An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation [J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(5): 865-873.
- [13] Spencer S, Chen Z D, Li Y, et al. Experimental investigation of a solar chimney natural ventilation system [C]. *Proceedings of Room Vent 2000, Seventh International Conference on Air Distribution in Rooms*. Reading, UK, 2000: 813-818.
- [14] 端木祥玲. 利用太阳能烟囱强化建筑物自然通风的基础研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [15] 郝彩侠. 太阳能烟囱自然通风效果实验研究与设计方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [16] Bouchair A. Solar chimney for promoting cooling ventilation in Southern Algeria [J]. *Building Services Engineering Research and Technology*, 1994, 15(2): 81-93.
- [17] Arce J, Imenez M J, Guzman J D. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(29): 28-34.
- [18] Bansal N K, Mathur R, Bhandari M S. A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings [J]. *Building and Environment*, 1994, 29(4): 495-500.
- [19] Aboulnaga M M. A roof solar chimney assisted by cooling cavity for natural ventilation in buildings in hot arid climates: An energy conservation approach in Al-Ain city [J]. *Renewable Energy*, 1998, 14(3): 57-63.
- [20] Awbi H B. Design consideration for natural ventilated buildings [J]. *Renewable Energy*, 1994, 5(10): 81-90.
- [21] Sandberg M, Moshfegh B. Ventilated solar roof airflow and heat transfer

- investigation[J]. *Renewable Energy*, 1998, 15(2): 87-92.
- [22] Ryan D, Burek S A M. Experimental study of the influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater[J]. *Solar Energy*, 2010, 84(16): 76-84.
- [23] Mathur J, Bansal N K, Mathur S. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(8): 927-935.
- [24] 李安桂, 郝彩侠, 张海平. 太阳能烟囱强化自然通风实验研究 [J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 60-64.
Li Angui, Hao Caixia, Zhang Haiping. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2009, 30(4): 60-64.
- [25] Harris D J, Helwiq N. Solar chimney and building ventilation [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(2): 135-146.
- [26] Mathur J, Anupma, Mathur S. Experimental investigation on four different types of solar chimney[J]. *Advances in Energy Research*, 2006, 12(6): 151-156.
- [27] Mathur J, Mathur S. Summer performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation [J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38 (10): 1156-1163.
- [28] Ramadan B, Nader S A K. Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(2): 190-196.
- [29] Gan G H, Riffat S B. A numerical study of solar chimney for natural ventilation of building with heat recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18(12): 1171-1187.
- [30] Ong K S, Chow C C. Performance of a solar chimney [J]. *Solar Energy*, 2003, 74(1): 1-17.
- [31] Bansal N K, Mathur J, Mathur S. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(10): 1302-1308.
- [32] 翟晓强, 王如竹. 太阳能强化自然通风理论分析及其在生态建筑中的应用[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 568-570.
Zhai Xiaoqiang, Wang Ruzhu. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(4): 568-570.
- [33] 陈会娟, 陈滨. 特朗贝墙体冬季集热性能的计算及预测[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(2): 1-6.
Chen Huijuan, Chen Bin. *Building Energy and Environment*, 2006, 25 (2): 1-6.
- [34] Afonso C, Oliveira A. Solar chimneys: Simulation and experiment [J]. *Energy and Buildings*, 2000, 32(1): 71-79.
- [35] Mari-Herrero J, Heras-Celemin M R. Dynamic physical model for a solar chimney[J]. *Solar Energy*, 2007, 81(5): 614-622.
- [36] Ben R, Bilgen E. Natural convection and conduction in Trombe wall system[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(4-5): 1237-1248.
- [37] Rodrigues A M, Canha A, Lahellec A. Modeling natural convection in a heated vertical channel for room ventilation [J]. *Building and Environment*, 2000, 35(5): 455-469.
- [38] Bacharoudis E, Vrachopoulos M G, Kou M K. Study of the natural convection phenomena inside a wall solar chimney with one wall adiabatic and one wall under a heat flux [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(13): 2266-2275.
- [39] Gan G H. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings[J]. *Energy and Buildings*, 1998, 27(1): 37-43.
- [40] 赵平歌. 太阳能烟囱增强热压自然通风的计算研究 [J]. 西安工业学院学报, 2004, 24(2): 181-184.
Zhao Pingge. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2004, 24 (2): 181-184.
- [41] 孙猛, 刘靖, 雷兢. 太阳能烟囱强化自然通风的数值模拟 [J]. 建筑科学, 2006, 22(6): 26-29.
Sun Meng, Liu Jing, Lei Jing. *Building Science*, 2006, 22(6): 26-29.
- [42] 王丽萍. 太阳能烟囱提高室内热压通风效果的数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
Wang Liping. A numerical study of solar chimney for enhanced stack ventilation in buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [43] 杨昭, 徐晓丽. 太阳墙热特性分析 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(10): 1091-1096.
Yang Zhao, Xu Xiaoli. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2007, 28 (10): 1091-1096.
- [44] Bilgen E. Conjugate heat transfer by conduction and natural convection on a heated vertical wall[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(2-3): 334-339.
- [45] Nouanegue H, Muftuoglu A, Bilgen E. Conjugate heat transfer by natural convection, conduction and radiation in open cavities [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(25-26): 6054-6062.
- [46] 何云, 刘滔, 林文贤. 太阳能烟囱内温度场分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 174-178.
He Yun, Liu Tao, Lin Wenxian. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(14): 174-178.

(责任编辑 岳臣)

· 科学共同体介绍 ·

中国矿物岩石地球化学学会

中国矿物岩石地球化学学会 (Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry) 由侯德封、涂光炽等于 1963 年发起, 1965 年经中国科协同意筹备, 1978 年 10 月正式成立。第一、二、三届理事会理事长为涂光炽, 第四、五届理事会理事长为欧阳自远, 第六届理事会理事长为刘丛强。

中国矿物岩石地球化学学会是中国矿物学、岩石学、地球化学等相关学科领域科技工

作者及科研机构 and 学术团体自愿组成、依法注册的全国性、公益性、学术性社会团体, 是中国科学技术协会的重要组成部分。

中国矿物岩石地球化学学会目前有会员 6000 余名。下设新矿物及矿物命名、矿物物理矿物结构、矿物岩石材料等 22 个专业委员会及 3 个工作委员会。1981 年加入国际矿物学协会 (IMA)。

中国矿物岩石地球化学学会主办《矿物学

报》、《岩石学报》、《地球化学》、*Chinese Journal of Geochemistry*、《矿物岩石地球化学通报》、《古地理学报》等专业期刊, 设立侯德封矿物岩石地球化学青年科学家奖。

2009 年 4 月 20—26 日, 中国矿物岩石地球化学学会召开第七次全国会员代表大会, 选举刘丛强任第七届理事会理事长, 李世杰任秘书长。

(责任编辑 陈广仁)