

doi: 10.12052/gdutxb.180010

旋转集热板式太阳能烟囱性能研究

吴成赫, 刘丽孺, 陈毅刚, 王璋元

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为了在不同太阳辐射强度下, 太阳能烟囱能发挥最大的通风性能, 本文提出了旋转集热板式太阳能烟囱模型; 用Fluent软件对其通风性能进行数值模拟, 研究两板底部宽度在100~300 mm、太阳辐射强度200~400 W/m²、集热板旋转角度0°~14°时的通风性能; 分析了烟囱内部温度场与速度场分布情况. 模拟结果显示, 在一定范围内, 增大集热板旋转角度、增大两板底部宽度以及提高太阳辐射强度均能有效提高太阳能烟囱的通风性能.

关键词: 旋转集热板; 太阳能烟囱; 性能研究; 数值模拟

中图分类号: TU834.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2018)05-0070-05

A Performance Study of Solar Chimney with Rotating Collector

Wu Cheng-he, Liu Li-ru, Chen Yi-gang, Wang Zhang-yuan

(School of Civil Engineering and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to attain the optimal ventilation performance for solar chimney under the different solar radiation intensity, a rotating collector plate solar chimney model is proposed and the fluent software is used to simulate its ventilation performance. The ventilation performance of the two plates with the bottom width of 100 mm-300 mm, the solar radiation intensity of 200-400 W/m² and the rotating angle of the collector plate at 0°-14° was studied. And the distribution of temperature and velocity field inside the chimney was analyzed. Simulation results show that the ventilation performance of solar chimney can be effectively improved by increasing the rotating angle of the collector plate, the bottom width of two plates and the radiation intensity within a certain range.

Key words: rotating collector; solar chimney; performance study; numerical simulation

由于太阳能烟囱能够强化热压作用下的建筑自然通风效果, 进而可以有效地降低建筑的空调能耗, 缓解日益紧张的建筑能源问题, 近年来, 成为研究的热点之一.

对于烟囱参数方面的研究, 文献[1-9]通过对太阳能烟囱的模拟研究, 发现增强辐射强度、增加太阳能烟囱高度、适当增大烟囱倾斜角度, 均可以提高通风效果. 为了提高传统太阳能烟囱通风性能, 很多人对烟囱结构形式进行优化, 并研究其特性, 杨启容等^[10-11]将竖向和斜向太阳能烟囱结合在一起构成组合烟囱, 研究发现增加竖向长度、烟囱宽度、太阳辐射强度以及室外风速, 均能提高烟囱的通风性能. 顾

元等^[12]提出一种新型屋顶式太阳能烟囱, 并对该烟囱百叶窗高度与烟囱高度比、挡风板高度与百叶窗高度比、通道宽度比对通风量的影响进行研究. Yonggang Lei^[13]从结构上对太阳能烟囱进行优化, 在太阳能烟囱中部设置多孔吸收板, 研究表明多孔吸收板能提高太阳能烟囱通风性能. 赵文博^[14]对多通道太阳能烟囱性能进行研究, 发现多通道太阳能烟囱性能明显优于传统太阳能烟囱.

从已有的研究来看, 人们主要针对辐射强度、烟囱整体倾斜角度、烟囱宽度等因素对太阳能烟囱通风性能进行研究, 也提出各种优化模型, 但都是固定烟囱, 缺乏灵活性. 本文针对目前研究现状, 提出旋

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2016A030313711); 广东工业大学大学生创新创业项目(xj201711845058); 广东工业大学研究生创新创业项目(2017YJSCX018)

作者简介: 吴成赫(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为建筑节能.

通信作者: 刘丽孺(1971-), 女, 教授, 工学博士, 主要研究方向为建筑节能、空调系统节能. E-mail: liruhongfu2006@126.com

转集热板式太阳能烟囱模型,该模型一方面可以根据太阳辐射强度调节集热板旋转角度来提升太阳能烟囱通风性能,另一方面可灵活与部分优化模型结合,效果将相得益彰.因此,本文运用计算流体力学模型(CFD)研究不同条件下该烟囱的通风性能,并对温度场以及速度场进行分析.

1 物理模型

本文的旋转集热板式太阳能烟囱模型如图1所示,该烟囱的高(AE)2 000 mm、长(AB)1 000 mm、宽(AD)100~300 mm.其中DHGC为集热板,集热板可绕其底部的旋转轴DC在旋转角 θ 为 $0^\circ \sim 14^\circ$ 的范围内旋转,集热板周围均为绝热玻璃,ABCD为烟囱进口,EFGH为烟囱出口.本文在室外气温为 27°C 进行模拟.

针对本文研究,对模型进行以下简化:(1)太阳能烟囱内部空气为不可压缩牛顿流体且其物性参数满足boussinesq假设;(2)太阳辐射强度为定值;(3)换热过程为稳态.

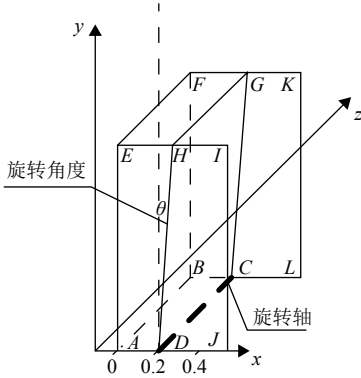


图1 旋转集热板式太阳能烟囱示意图

Fig.1 Schematic view of the rotary set hot plate solar chimney

2 数理模型

2.1 求解方法及控制方程

根据大量研究^[1, 10-12, 14]证实,太阳能烟囱内气体流动状态为湍流.本文所有模拟均采用Fluent求解器,该求解器使用有限体积法,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型湍流模型,运用Simple算法进行求解.

标准 $k-\varepsilon$ 模型三维稳态控制方程如下^[15].

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i \beta \rho (T - T_{amb}). \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]. \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k. \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (5)$$

其中, $x_{i,j}$ 为空间坐标; ρ 为空气密度; u_i, u_j 为 i, j 方向速度; μ 为动力黏度; μ_t 为湍动黏度; p 为压力; g_i 为重力加速度; β 为热膨胀系数; T 为温度; λ 为流体热传导系数; c_p 为比热容; σ_T 为湍流Prandtl数; k 为湍动能; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张贡献; S_k, S_ε 为源项; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为耗散率对应的Prandtl数; ε 为湍动耗散率; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数.

2.2 边界条件

该模拟对壁面采用热流密度形式进行处理,本文对集热板采用热流密度($200 \sim 400 \text{ W/m}^2$)近似处理,其值根据不同工况设置,集热板对面的玻璃盖板与烟囱两侧玻璃采用绝热壁面,烟囱进口设置为压力入口,出口设置为压力出口,相对压力均设置为0 Pa.

3 计算网格的确定

该模型由于结构简单,因此采用结构网格(见图2),为了提高结果的准确性,对模型边界层网格进行加密处理.为了避免网格数量对结果的影响,本文模拟了5套不同数量网格(分别为111 969、140 679、227 799、334 719、461 439)的通风量,结果如图3所示.可以看出,一定范围内,太阳能烟囱通风量随网格数增加而降低,但增加至334 719个网格时,通风量不再下降.根据不同网格数量的模拟结果,综合考虑计算机资源,选取334 719网格对各类工况进行模拟研究.

4 模型有效性

在太阳能烟囱自然通风领域,李安桂等^[16]对太阳能烟囱进行试验研究,在该实验中,太阳能烟囱长1 000 mm、高2 000 mm、宽400~1 200 mm,并对集热

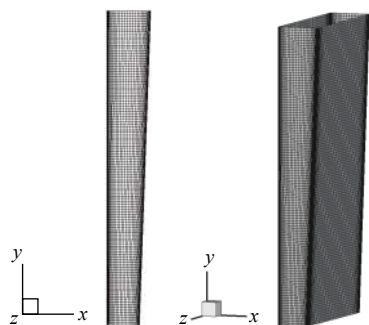


图2 模型的网格划分

Fig.2 Model of meshing

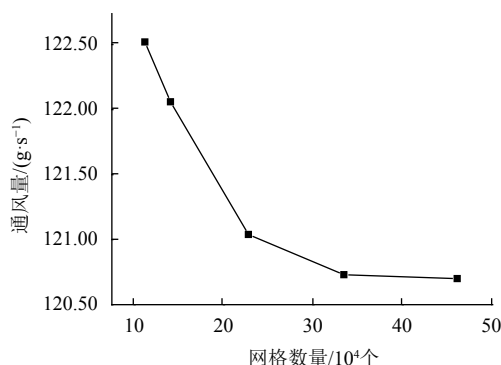


图3 网格独立性验证

Fig.3 The grid independence verification

壁面施加不同热流密度(200~400 W/m²). 为了确保模拟结果的可靠性,本文选取该实验宽为700 mm时进行模拟验证,数值模拟结果与李教授实验结果^[16]对比如图4所示. 由于实验与模拟存在一定误差,结果显示3种热流密度下的误差分别为13.12%、11.72%、12.86%,误差范围均在15%以内,且随着热流密度增加,通风量变化趋势一致. 因此,模拟结果与实验结果是吻合的,由此说明本数值模拟的有效性以及可靠性,可以用来对旋转集热板式太阳能烟囱的性能研究.

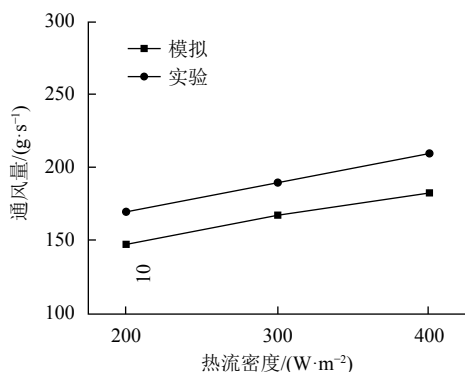


图4 实验与模拟结果对比

Fig.4 The comparison of the experiment date and the simulation data

5 计算结果与分析

5.1 集热板旋转角度与太阳辐射强度对通风性能的影响

根据模拟结果,两板底部宽度不同时,太阳能烟囱通风量随着集热板旋转角度变化规律相类似,本节选取两板底部宽度为100 mm时,旋转集热板式太阳能烟囱诱导通风量随着旋转角度变化而变化的情况(见图5)进行分析. 结果显示,在研究范围内,通风量随着集热板旋转角度的增大而增大,并逐步趋于稳定. 增大集热板旋转角度烟囱内部截面积增大,气流速度降低,烟囱内气体更充分地被集热板加热,因此通风量增大,但随着旋转角度的增大,速度降低幅度减小,因此增幅会随之减小.

另外,由图5不难发现,相同的旋转角度,太阳能烟囱通风量随着太阳辐射强度增大而增大,那是由于太阳辐射强度越大,烟囱内部气体从集热板上吸收更多的热量,增加了烟囱内外气体密度差,从而使得太阳能烟囱“烟囱效应”更加明显,因此能提高太阳能烟囱的通风性能.

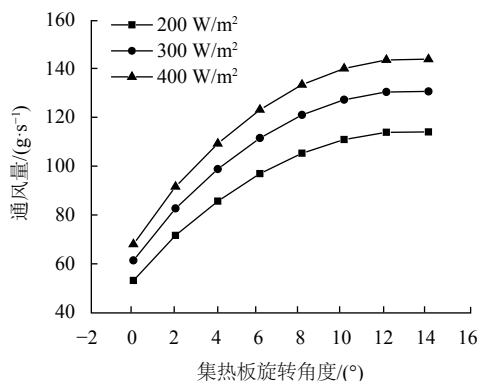


图5 自然通风量随集热板旋转角度的变化关系

Fig.5 Variations of mass flow rate with Rotation Angle of collector plate

5.2 两板底部宽度对通风性能的影响

由于不同辐射强度时,旋转集热板式太阳能烟囱在不同旋转角度时诱导通风量随着两板底部宽度的变化规律类似,图6选取了太阳辐射强度为200 W/m²进行分析,可以看出,旋转集热板式太阳能烟囱通风性能随着两板底部宽度增大而增强,那是因为太阳能烟囱底部宽度增大,使得太阳能烟囱内部气体总得热量增加,但是当集热板旋转角度越大,曲线斜率越小,说明在研究范围内,两板底部宽度对通风量的强化作用随着集热板旋转角度的增大而削弱,当旋

转角度达到12°时,增加两板底部宽度对太阳能烟囱通风性能提升不大。

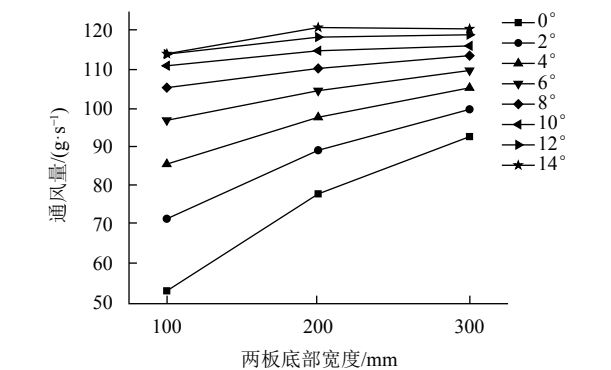


图6 自然通风量随两板底部宽度的变化关系

Fig.6 Variations of mass flow rate with the width of the bottom of two plates

5.3 速度场分析

对于旋转集热板式太阳能烟囱,其不同工况时速度场与温度场分布相似,本节选取典型工况进行分析。

图7描述了两板底部宽度为300 mm、旋转角度为12°时,不同太阳辐射强度下太阳能烟囱在高1.5 m处速度分布,从图7可看出,由于黏性力的作用,靠近壁面处存在很薄的边界层,壁面的速度为0 m/s,远离壁面位置,速度趋向平缓。随着太阳强度增大,太阳能烟囱内部气流速度也随之增大,原因是太阳辐射强度增大,烟囱内空气的得热量增大,温度升高引起密度降低,使得烟囱内外密度差愈加明显,从而提高太阳能烟囱的通风量,引起内部气体流速增大。

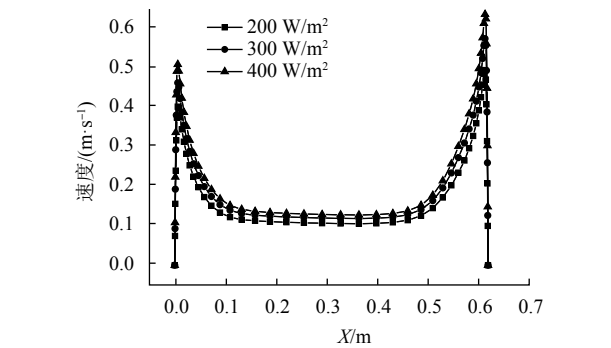


图7 不同太阳辐射强度时速度在高1.5 m截面处沿太阳能烟囱宽度方向变化

Fig.7 Variations of velocity at a height of 1.5 m along the width of the solar chimney in different solar radiation intensity

图8为在太阳辐射400 W/m²、集热板旋转角度为12°条件下,两板底部宽度不同时,太阳能烟囱在

1.5 m处沿水平方向的速度分布情况。由图可看出,两板底部宽度越小,在1.5 m处的横截面积也越小,尽管通风量小,但太阳能烟囱内部气体流速依然相对比较大。

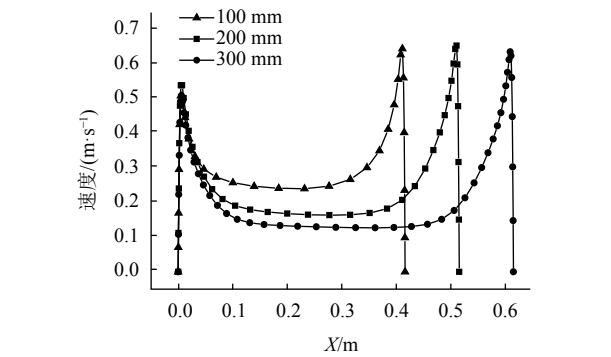


图8 两板底部宽度不同时速度在高1.5 m截面处沿太阳能烟囱宽度方向变化

Fig.8 Variations of velocity at a height of 1.5 m along the width of the solar chimney in different bottom width of the two plates

图9描述了在太阳辐射400 W/m²、两板底部宽度为100 mm条件下,集热板旋转角度改变时,太阳能烟囱在1.5 m处沿水平方向的速度分布情况。由图可看出,增大旋转角度,太阳能烟囱在高1.5 m处截面随之增大,从而导致太阳能烟囱内部气体流速减小。

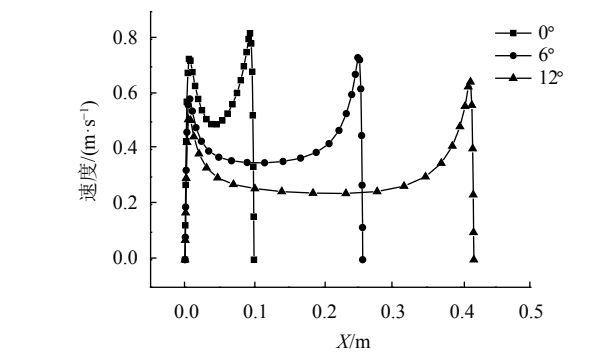


图9 集热板旋转角度不同时速度在高1.5 m截面处沿太阳能烟囱宽度方向变化

Fig.9 Variations of velocity at a height of 1.5 m along the width of the solar chimney in different hot plate rotation angle

5.4 温度场分析

图10描述了在太阳辐射400 w/m²、集热板旋转角度为12°条件下,两板底部宽度不同时,太阳能烟囱在1.5 m处沿水平方向的温度分布情况。由图可知,其变化趋势与速度场一样,靠近平板区域存在很薄的边界层,远离平板的区域温度几乎不变,另外,增大两板宽度,并没有引起中心区域温度下降,中心区

域温度没有显著变化,使得烟囱内部气体总得热量增大,太阳能烟囱通风量增大,从而提升太阳能烟囱的通风性能。

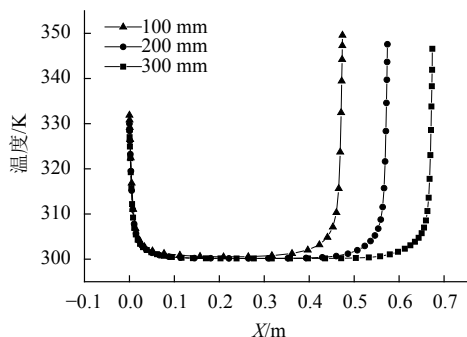


图10 两板不同底部宽度时温度在高1.5 m截面处沿太阳能烟囱宽度方向变化

Fig.10 Variations of temperature at a height of 1.5 m along the width of the solar chimney in different hot plate rotation angle

6 结论

本文通过对旋转集热板式太阳能烟囱的性能分析,得到以下结论:

(1) 在研究范围内,增大集热板旋转角度、增加两板底部宽度、增强太阳辐射强度,均可提高旋转集热板式太阳能烟囱的通风量,特别对于两板底部宽度较小时,提升效果最明显。根据一天内太阳辐射强度调整集热板旋转角度,可有效提高通风性能。

(2) 沿着烟囱宽度方向,所有工况下速度均存在很薄的边界层,中心区域温度与速度平缓,增大太阳辐射强度、缩短两板宽度、减少集热板旋转角度,均会提高太阳能烟囱中心区域的速度。

(3) 旋转集热板式太阳能烟囱温度沿宽度方向先降低后上升,靠近板的位置存在很薄的边界层,但中心区域变化平缓,增大烟囱两板底部宽度,中心区域温度变化并不大。

参考文献:

- [1] 张华扬.倾斜式太阳能烟囱强化热压自然通风的特性研究[D].成都:西南交通大学机械工程学院,2016.
- [2] IMRAN A A, JALIL J M, AHMED S T. Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney [J]. *Renewable Energy*, 2015, 78: 236-244.
- [3] 扈良英.太阳能烟囱强化教室自然通风研究[D].青岛:青岛理工大学环境与市政工程学院,2014.
- [4] 苏亚欣,柳仲宝.太阳能烟囱自然通风的一维稳态模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33(5): 102-107.
- SU Y X, LIU Z B. One dimensional steady model for natur-

- al ventilation of solar chimney [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, 33(5): 102-107.
- [5] 宣永梅,马柱柱,黄翔.新疆地区太阳能烟囱复合蒸发冷却通风降温系统[J]. *流体机械*, 2013, 41(10): 69-72.
- XUAN Y M, MA Z Z, HUANG X. Hybrid solar chimney and evaporative cooling system used in Xinjiang [J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(10): 69-72.
- [6] OOSTHUIZEN P H. Evaluation of the use of solar assisted buoyancy driven natural ventilation of smaller theatres in Canada [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 29: 355-360.
- [7] 张宇雯,雷勇刚,宋翀芳.室内热源与太阳辐射耦合作用下的太阳能烟囱通风性能研究[J]. *可再生能源*, 2017, 35(9): 1304-1309.
- ZHANG Y W, LEI Y G, SONG C F. Ventilation performance of a solar chimney under the coupling action of indoor heat source and solar radiation [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(9): 1304-1309.
- [8] MAIA C B, FERREIRA A G, VALLE R M, *et al.* Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney [J]. *Computers & Fluids*, 2009, 38: 625-636.
- [9] 薛宇峰.太阳能烟囱对工业厂房自然通风影响的数值研究[D].上海:东华大学环境科学与工程学院,2010.
- [10] 杨启容,杜威,张金翠.建筑一体化太阳能烟囱的通风性能研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7): 873-878.
- YANG Q R, DU W, ZHANG J C. Research on ventilation performance of a series solar chimney integrated with a building [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(7): 873-878.
- [11] 段绍阳,雷勇刚.组合式太阳能烟囱通风性能数值模拟研究[J]. *科技通报*, 2016, 32(3): 157-161.
- DUAN S Y, LEI Y G. Research on ventilation characteristic of combined solar chimney [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2016, 32(3): 157-161.
- [12] 顾元,雷勇刚,王飞.新型屋顶式太阳能烟囱通风性能的模拟研究[J]. *热能动力工程*, 2016, 31(6): 98-104.
- GU Y, LEI Y G, WANG F. Numerical investigation on ventilation performance of a new roof solar chimney [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2016, 31(6): 98-104.
- [13] LEI Y G, ZHANG Y W, WANG F, *et al.* Enhancement of natural ventilation of a novel roof solar chimney with perforated absorber plate for building energy conservation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 653-661.
- [14] 赵文博.多通道竖直式太阳能烟囱通风性能研究[D].太原:太原理工大学环境科学与工程学院,2012.
- [15] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [16] 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): 460-464.
- LI A G, HAO C X, ZHANG H P. Experimental study on solar chimney for natural ventilation [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(4): 460-464.