

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.03.002

太阳能烟囱在地下空间中的通风特性及优化

陈震寰¹, 姚丽萍¹, 邱周华²

(1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;

2. 重庆交通大学 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 建立无量纲模型对不同 Ra 下太阳能烟囱内部气体流动特性及出口质量流率规律进行数值分析, 提出结构优化方案以增大烟囱出口质量流率。研究表明, 随着 Ra 的增加, 烟囱内气体由完全出流逐渐转变为出口反向流特征, 出现反向流时 Ra 近似为 10^6 ; 分析烟囱出口质量流率得到, 出口处无量纲质量流率随 Ra 的增大而增大, 但反向流的出现会减小其增长率。出口反向流现象是影响太阳能烟囱强化通风效果的重要因素之一, 由此提出倾斜式优化通风结构。

关键词: 太阳能烟囱; 地下空间; 强化通风; 结构优化; 数值分析

中图分类号: TU962

文献标志码: A 文章编号: 1000-582X(2019)03-015-10

Ventilation characteristics and optimization of solar chimney in underground space

CHEN Zhenghuan¹, YAO Liping¹, QIU Zhouhua²

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P. R. China;

2. Southwestern Hydraulic Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: To investigate the effect of a solar chimney on the ventilation in a underground space, a dimensionless model was established in this work to numerically analyze internal airflow characteristics and outlet flow regularity of the solar chimney under different Rayleigh number (Ra). A structure optimization measure was proposed to increase the outlet mass flow rate of the chimney. The results indicated that with the increase of Ra , the airflow in the chimney changed from the state of a full outflow to a reverse flow, which occurred at the outlet of the chimney when Ra was approximately equal to 10^6 . It was also found that with the increase of Ra , the dimensionless mass flow rate at the outlet increased. But its growth rate decreased when the reverse flow emerged, implying that the reverse flow was one of the important factors affecting the ventilation effect of the underground space. Accordingly, a tilted optimal ventilation structure was put forward.

Keywords: solar chimney; underground space; enhanced ventilation; structural optimization; numerical analysis

收稿日期: 2018-4-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11402215); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA00010); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600523)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (11402215), Basic Research and Frontier Technology Research Program of Chongqing (cstc2015jcyjA00010) and Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1600523).

作者简介: 陈震寰(1994-), 男, 西南大学硕士研究生, 主要从事建筑的被动式通风设计, (E-mail) 413054270@qq.com。

姚丽萍(联系人), 女, 西南大学副教授, (E-mail) lpyao@swu.edu.cn。

国际隧道与地下空间协会指出,21 世纪是人类走向地下空间的世纪^[1]。地下空间是指在岩层或土层中天然形成或经人工开发形成的空间^[2],文中主要研究人工开发形成的“地下建筑空间”,如地下住宅、地下商场、地下车库等。地下空间长期处于封闭或者半封闭的状态,与太阳光线和自然空气基本上是隔离的^[3],因此,地下空间的空气质量十分糟糕,合理通风尤为重要。当前,地下空间大多采用机械通风,但能耗问题随之产生,违背了建筑与自然的和谐。自然通风不仅可提供健康舒适的室内环境,符合绿色建筑的发展趋势^[4-5],引入太阳能烟囱加强地下空间自然通风是一种极具潜力的方法。

太阳能烟囱是被动利用太阳能强化空间自然通风的装置。阳光透过烟囱玻璃板由吸热墙吸收,加热周边空气使之产生密度差,从而在烟囱内产生热浮力自然对流。太阳能烟囱根据结构形式可分为竖直式、倾斜式和 Trombe 墙体式,文中主要研究竖直式太阳能烟囱对地下空间的强化通风作用。目前,有关竖直式太阳能烟囱的研究已经取得了一些成果。Rodrigues^[6]报道了太阳能烟囱的研究重点应该在通风效果和热舒适性上取得平衡。Bansal^[7]将小尺寸太阳能烟囱应用于建筑通风,并调查了相应的通风效果。Arce^[8]搭建全尺寸实验台调查了太阳能烟囱的自然通风情况,得到温差和进出口压差是影响质量流率的主要因素。李安桂^[9]实验验证了太阳能烟囱速度边界层和温度边界层的现象,并得到烟囱通风量随烟囱宽度、热流密度的增大而增大的结论。Ryan^[10]进一步研究了太阳能烟囱几何参数、热流密度与通风量的关系并得到相应关系式。戴鹏^[11]实验研究了太阳能烟囱自然通风及排烟效果,得到太阳能烟囱的最优空腔间距。尽管实验研究最为直接有效,但其成本高、周期长,相比之下数值模拟研究成本低、周期短,在模型合理的条件下可获得较理想的结果,部分学者开展了相关的数值研究工作。Miyazaki^[12]数值模拟了太阳能烟囱加强单层建筑通风的工况,并考虑了热负荷的变化。薛宇峰^[13]得到直线渐缩式太阳能烟囱的通风效果要优于曲线渐缩式的结论。Khanal^[14]采用实验与数值模拟结合的方式研究了竖直式小尺寸太阳能烟囱的通风效果,并对烟囱结构进行了优化。Zavala-Guillén^[15]设计了双通道竖直式太阳能烟囱,并验证了该结构的实用性。此外,杨启容^[16]和赵福云^[17]研究了二维太阳能烟囱内的流动特性及相应的结构优化措施。

现有研究中涉及竖直式太阳能烟囱强化地下空间自然通风的相关工作较少。华斌^[18]、马瑞华^[19]报道了太阳能烟囱强化地下车库通风的研究工作,结果表明,引入太阳能烟囱可以满足地下车库的通风要求,但在烟囱内的气体流动特性方面的研究不够深入。基于此,文中对竖直式太阳能烟囱强化地下空间的通风效果进行数值研究。

1 问题描述和数值公式

1.1 物理模型

文中建立了竖直式太阳能烟囱与地下空间结合的二维物理模型,如图 1 所示。图中位于左上角玻璃板与吸热墙相间的部分为烟囱,下方矩形部分为地下空间。烟囱吸热墙高度为 H_a ,吸热墙和玻璃板之间的宽度为 W_g ,宽高比 $A_s = W_g / H_a$,地下空间高度为 H ,地下空间宽度为 W ,地下空间进口高度为 D 。箭头表示气流进出模型的方向。参照相关建筑规范,选用的模型比例为: $A_s = 1/7$, $H/H_a = 1$, $H/W = 3/7$, $H/D = 20$ 。

为简化计算,对模型做了如下假设:

- 1) 模型内气体为不可压缩牛顿流体;
- 2) 气体自然对流采用 Boussinesq 假设;
- 3) 不考虑壁面的辐射和烟囱吸热墙的蓄热;
- 4) 模型内空气流动为层流流动。

1.2 基本控制方程

无量纲化的控制方程如下:

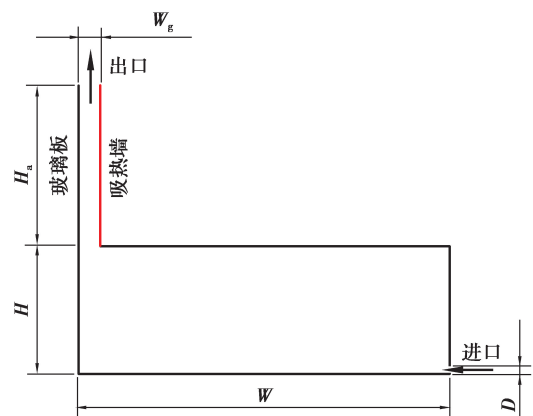


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + PaPr\theta \\ \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \end{array} \right.$$

其中,引入的无量纲参数如下: $Ra = g\beta H_a^3 \Delta t / \alpha \nu$; $Pr = \nu / \alpha$ 。

相关参数无量纲化,如表 1 所示。

表 1 无量纲化表格
Table 1 Dimensionless table

有量纲物理量	特征尺度	无量纲量
长度 $x, y/m$	H_a	$X = \frac{x}{H_a} Y = \frac{y}{H_a}$
速度 $u, v/(m \cdot s^{-1})$	$\frac{\alpha}{H_a}$	$U = \frac{u}{\left(\frac{\alpha}{H_a}\right)} V = \frac{v}{\left(\frac{\alpha}{H_a}\right)}$
压强 p/Pa	$\rho \left(\frac{\alpha}{H_a}\right)^2$	$P = \frac{p}{\rho \left(\frac{\alpha}{H_a}\right)^2}$
温度 T/K	$\Delta T = T_w - T_0$	$\theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}$
时间 t/s	$\frac{H_a^2}{\alpha}$	$\tau = t / \left(\frac{H_a^2}{\alpha}\right)$
质量流率 $q/(kg \cdot s^{-1})$	—	$Q = \rho' \int_0^s V dS$

其中, x, y 和 u, v 分别为水平、竖直方向的坐标(m)和速度(m/s); p 为压强,Pa; T 为温度,K; T_w, T_0 和 ΔT 分别表示吸热墙温度、环境温度和温度差; t 为时间,s;质量流率 q 为单位时间内通过太阳能烟囱出口截面的流体质量,kg/s,反映了烟囱的通风效果。以上各物理量的无量纲表达分别为 $X, Y, U, V, P, \theta, \tau$ 和 Q 。此外, g 为重力加速度, m^2/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; S 为烟囱出口面积, m^2 ; β 和 ν 分别为空气的热膨胀系数, $1/K$ 、热扩散系数, m^2/s ;和运动粘度, m^2/s 。

边界条件如下:

进口:压力入口,即 $P=0, \frac{\partial V}{\partial X}=0, \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial V}{\partial X}, \frac{\partial \theta}{\partial X}=0, \theta=0$ 。

出口:压力出口,即 $P=0, \frac{\partial U}{\partial Y}=0, \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial U}{\partial X}, \frac{\partial \theta}{\partial Y}=0, \theta=0$ 。

吸热墙:速度无滑移边界,即 $U=V=0$,温度 $\theta=1$ 。

其余所有墙体:速度无滑移边界,即 $U=V=0$,温度 $\theta=0$ 。

2 求解方法及网格描述

2.1 数值方法及参数选取

整个模型计算区域采用非均匀交错网格,并在进、出口以及墙体壁面处进行加密。数值计算选用基于

压力法的求解器进行离散,其中,对流项和扩散项选用二阶中心差分格式,压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法进行处理。除能量方程外所有方程收敛迭代残差取 $1e-6$, 能量方程取 $1e-8$ 。无量纲参数: $Ra = 10^4 \sim 10^9$ 。

2.2 网格有效性验证

模型各边界初始网格设置如图 2 所示,总网格量 Mesh1 为 500202。为了验证网格的收敛性,对初始网格进行加密,将模型各边网格量分别增大 1.5 倍和 2 倍,得到网格量 Mesh2 和 Mesh3。

选用研究范围内极限工况 $Ra = 10^9$ 。采用以上 3 种网格计算得到烟囱出口处无量纲速度分布,如图 3 所示,可以看出,分别采用 Mesh1、Mesh2 和 Mesh3 计算所得出口处无量纲速度分布几乎完全重合。网格量 Mesh1 可以满足计算精度要求,故选用该网格进行后续计算。

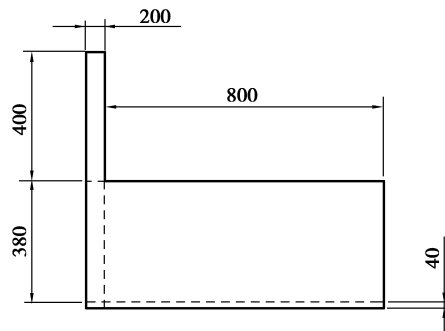


图 2 网格布置示意图

Fig. 2 Grid layout figure

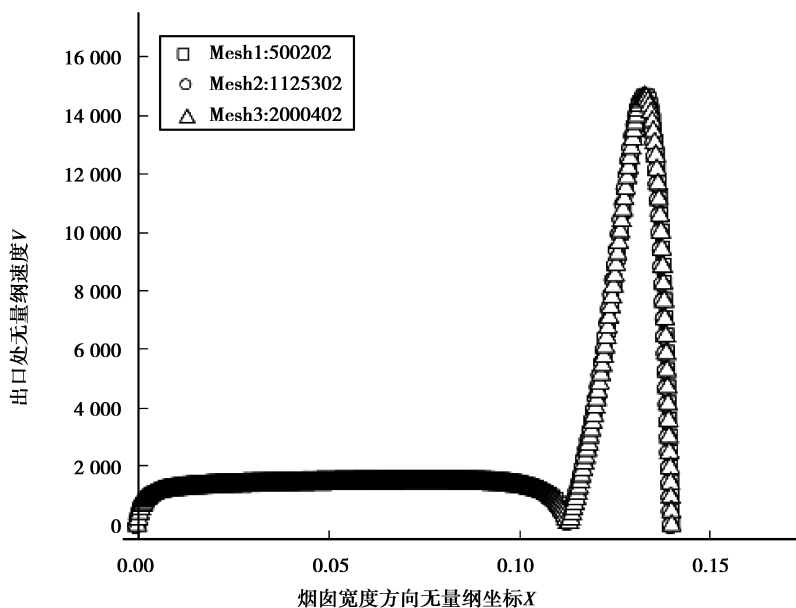


图 3 不同网格条件下烟囱出口处无量纲速度分布图

Fig. 3 Dimensionless velocity distribution at chimney outlet under different grid conditions

3 计算工况及结果分析

3.1 计算工况

由基本控制方程中浮力项的表示可知, Ra 是自然对流驱动力的主要来源之一。太阳能烟囱内部自然对流越强,对烟囱通风效果的影响就越大。 Ra 是太阳能烟囱通风效果的重要影响因素之一,文中主要分析了低 Ra 层流条件下太阳能烟囱强化地下空间自然通风特性, Ra 取值范围为 $10^4 \leq Ra \leq 10^8$, 主要工况如表 2 所示。

表 2 计算工况

Table 2 Calculation condition

计算参量	Ra	H_a	W_g	H	W	D
无量纲值	$10^4 \sim 10^8$	1	0.14	1	2.33	0.05

3.2 计算结果分析

3.2.1 计算结果

1) Ra 对烟囱内部气体流动特性的影响

研究了 $Ra = 10^4$ 、 10^5 、 10^6 、 10^7 和 10^8 时太阳能烟囱内部流场。图 4 描述了 $Ra = 10^4$ 、 10^5 、 10^6 和 10^7 时,太阳能烟囱强化地下空间对流通风模型内部气体的流线图。当 Ra 为 10^4 和 10^5 时,如图 4(a)和图 4(b)所示,气体在烟囱出口处为完全出流状态,吸热墙附近未形成明显速度边界层,此时,烟囱内传热形式以热传导为主。当 Ra 增加至 10^6 时,如图 4(c)所示,烟囱出口处出现了反向流,此时,为一个过渡阶段。进一步增加 Ra 至 10^7 ,如图 4(d)所示,烟囱出口处出现明显的反向流,并且在吸热墙附近形成速度边界层,此时,烟囱内传热形式以对流换热为主。

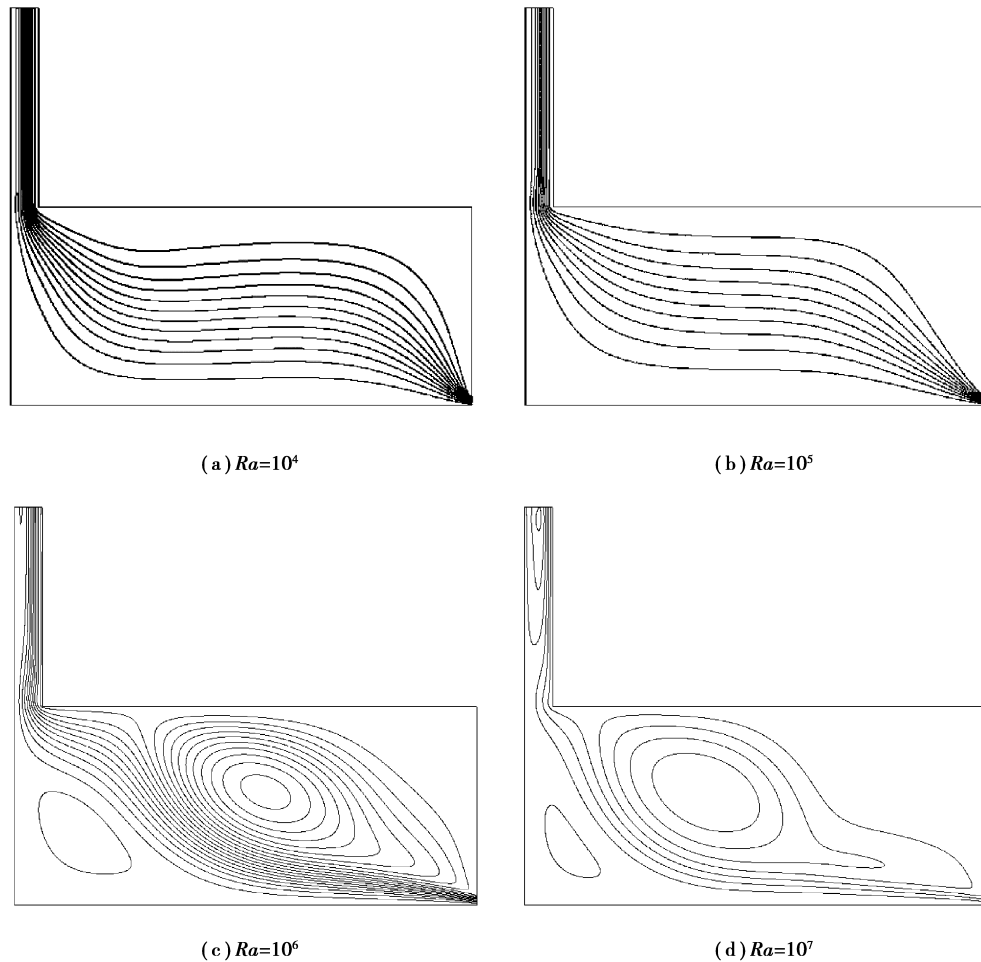


图 4 不同 Ra 条件下模型内部的流线图

Fig. 4 Streamline inside the model under different Rayleigh number

研究表明,随着 Ra 的增加,太阳能烟囱内气体在出口处由完全出流向出口反向流的流动特征转变,与此同时,吸热墙侧也逐渐由无边界层特性向出现明显的边界层演化。

$Ra = 10^5$ 、 10^6 、 10^7 和 10^8 时,模型内部的温度等值线也得到描述,如图 5 所示。从图 5(a)可以看出, $Ra = 10^5$ 时,烟囱内温度等值线几乎覆盖了整个烟囱。当 Ra 增至 10^6 和 10^7 时温度边界层逐渐形成,如图 5(b)和图 5(c)所示,此阶段对应烟囱内反向流的形成阶段。当 Ra 增至 10^8 时,如图 5(d)所示,烟囱内形成明显温度边界层。结果表明, Ra 越大,烟囱吸热墙附近的温度边界层越明显。

研究不同 Ra 下烟囱内部的气体流动得到结论如下:随 Ra 增加,太阳能烟囱出口处气体流动逐渐由完全出流向出口反向流特征转变,与此同时,吸热墙侧也逐渐形成明显速度边界层和温度边界层。

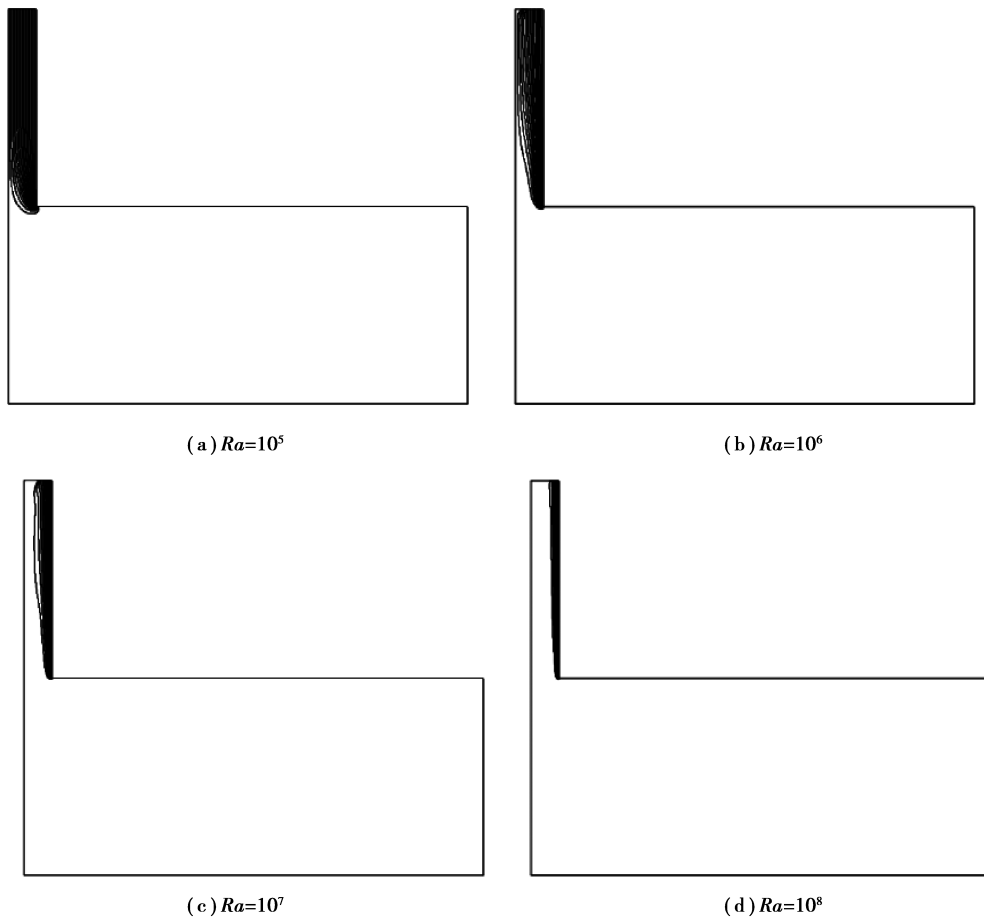
图 5 不同 Ra 下模型内部温度等值线图

Fig. 5 Temperature contours inside the model under different Rayleigh number

2) Ra 对烟囱出口质量流率的影响

为了进一步研究竖直式太阳能烟囱对地下空间通风效果的影响,接下来主要分析不同 Ra 下烟囱出口质量流率的规律及其影响因素。

图 6 描述了烟囱出口处无量纲质量流率随 Ra ($10^4 \sim 10^8$) 变化的规律。从图中可以看出,烟囱出口处无量纲质量流率呈持续增长趋势,但是,在 $Ra = 10^6$ 之后,曲线增长速度逐渐变缓。表 3 给出了烟囱出口处无量纲质量流率增长率(增长率 $Z = \frac{B-A}{A} \times 100\%$, 其中, Z 为增长率, A 为增长前的数值, B 为增长后的数值)的变化情况。分析可知, $Ra = 10^4 \sim 10^6$ 时出口处无量纲质量流率迅速增长且增长率均超过 100%。当 Ra 达到 10^6 之后,质量流率的增长率由 280% 降至 72.6%。随着 Ra 的进一步增加($Ra = 10^6 \sim 10^8$),烟囱出口处无量纲质量流率的增长率进一步降低。结果表明,太阳能烟囱出口质量流率随 Ra 的增加而增大,但在 Ra 增至 10^6 之后,其增长率逐渐下降。

表 3 出口质量流率增长率

Table 3 Outlet mass flow rate growth rate

Ra	出口质量流率	出口质量流率增长率/%
10^4	0.64	—
10^5	5.26	722
10^6	20.0	280

续表3

Ra	出口质量流率	出口质量流率增长率/%
10^7	34.52	72.6
10^8	39.56	14.6

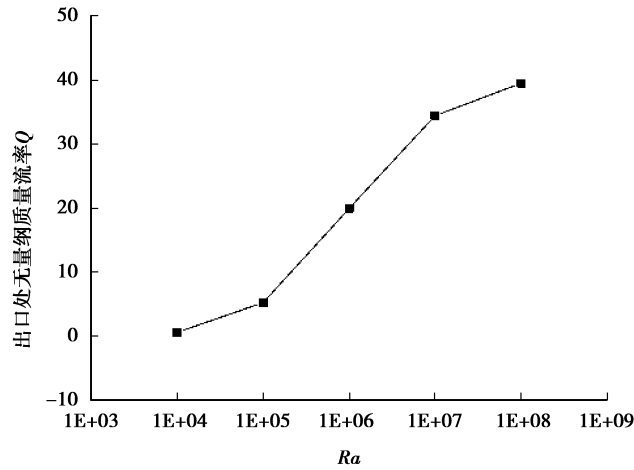


图 6 出口处质量流率随 Ra 变化图

Fig. 6 Variation of outlet mass flow rate under Rayleigh number

3.2.2 结果分析

结合不同 Ra 条件下烟囱内部气体流动特性和烟囱出口质量流率规律,当 Ra 增至 10^6 时,烟囱出口处开始出现反向流特性,如图 4(c)所示;而烟囱出口处无量纲质量流率的增长率在此时开始降低。由此可以推论,烟囱出口反向流的出现是影响出口质量流率增长率降低的主要原因。为了明确这一影响因素,接下来将进一步分析烟囱出口质量流率及其内部反向流的关系。

为了描述反向流,用烟囱内纵向负速度区域的最大纵向长度表征反向流深度。图 7 为 $Ra = 10^7$ 时,烟囱内反向流深度示意图,图中所示白色部分为纵向负速度区域,故在该工况下烟囱内存在明显反向流,且反向流深度(d/H_a)为 0.78。

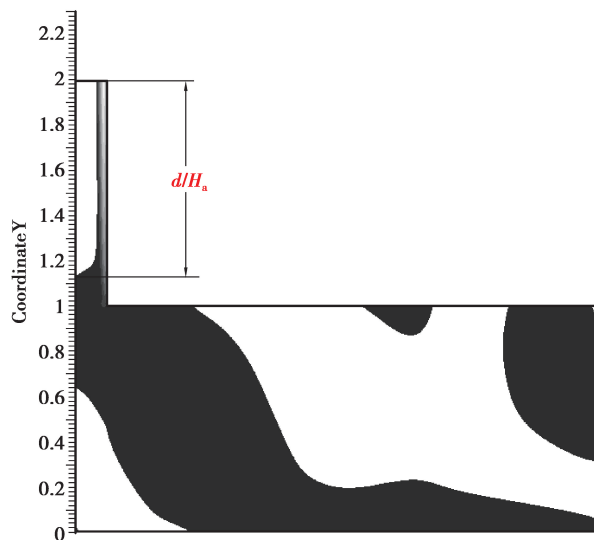


图 7 $Ra = 10^7$ 时反向流深度示意图

Fig. 7 Reverse flow depth figure

图 8 为烟囱内反向流深度随着 Ra 变化曲线图。从图中可以看出, Ra 在 10^5 及以下时反向流深度为 0; $Ra=10^6$ 时反向流已经出现, 随着 Ra 进一步增加, 反向流深度逐渐增加。由图 6、表 3 结合分析得到, 当 $Ra=10^6$ 时, 反向流出现, 且烟囱出口处无量纲质量流率的增长率减小。反向流深度反映了反向流对整个模型气体流动的影响程度, Ra 越大其对出口处无量纲质量流率增长率的影响程度也越大。

研究表明, 烟囱出口反向流的出现降低了太阳能烟囱强化自然通风效率。因此, 抑制反向流的出现可提高出口质量流率, 是增强室内通风效果的有效途径。

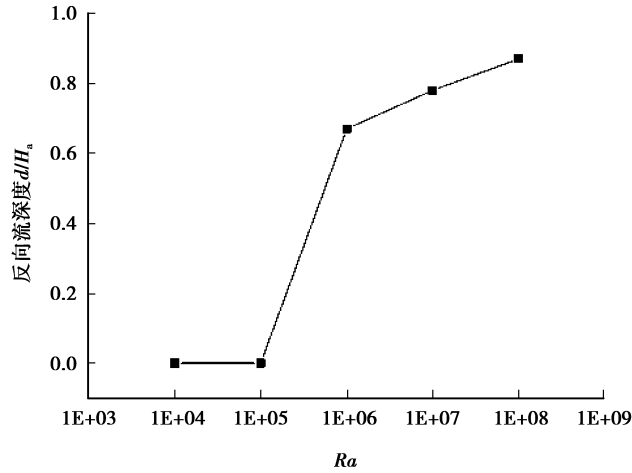


图 8 反向流深度随 Ra 变化图

Fig. 8 Variation of Reverse flow depth with Rayleigh number

3.2.3 太阳能烟囱结构优化效果分析

优化烟囱结构抑制反向流的出现可加强太阳能烟囱对地下空间的通风效果。针对 $Ra=10^8$ 的工况, 文中提出太阳能烟囱结构优化方案如下: 将太阳能烟囱玻璃板向吸热墙侧倾斜, 减小烟囱出口口径以避免烟囱出口反向流的出现。

分析了 $Ra=10^8$ 时, 以上工况下原模型出口处无量纲速度的分布情况, 如图 9 所示。从图中可以看出, 烟囱出口处反向流分布宽度约为 0.1。原模型烟囱宽度 $W_g=0.14$, 为避免烟囱出口处反向流的出现, 优化后的烟囱出口宽度 $W'_g=W_g-0.1=0.04$ 。优化后的模型如图 10 所示。

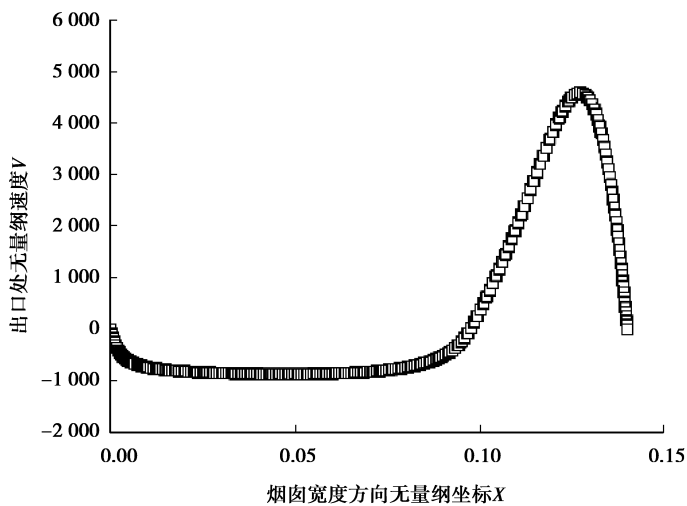


图 9 出口处无量纲速度分布图

Fig. 9 Outlet dimensionless velocity distribution

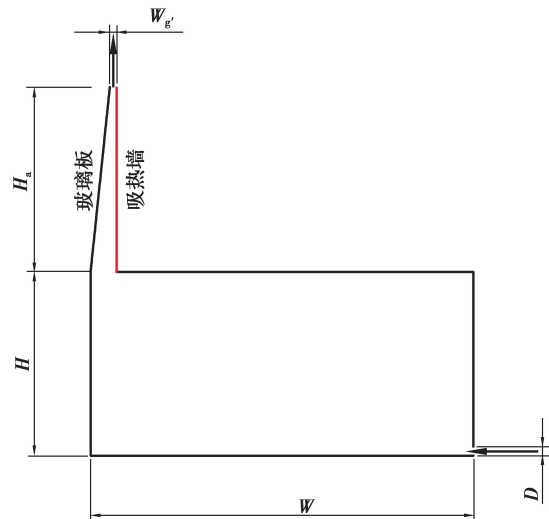


图 10 优化后模型

Fig. 10 Optimized model

采用优化后的模型,计算得到模型流线图如图 11 所示。可以看出,优化后的烟囱内未出现反向流现象。优化后模型出口处无量纲质量流率为 106.71,比原模型提高了 169.74%。结果表明:倾斜式优化通风结构可有效避免反向流的出现,极大地加强了竖直式太阳能烟囱对于地下空间的通风效果。

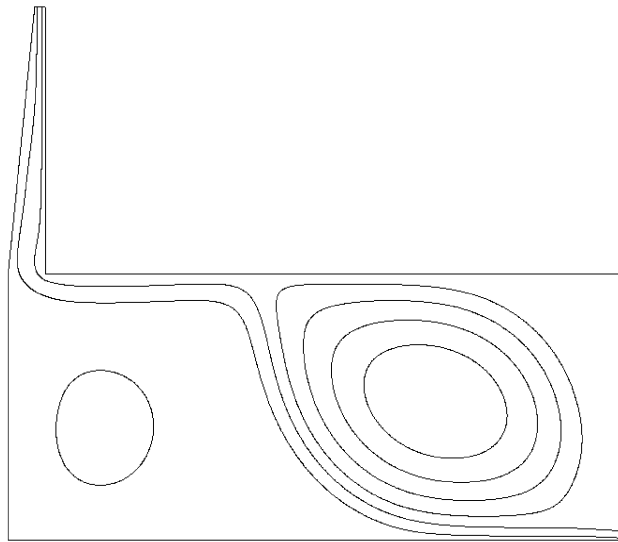


图 11 优化模型流线图

Fig. 11 The streamline of optimized model

4 结 论

为了研究竖直式太阳能烟囱对地下空间的自然通风效果,文中分析了不同 Ra 下烟囱内的气体对流特性及出口质量流率规律。

1) 烟囱内气体随着 Ra 增加由完全出流向出口反向流的特征转变,且 $Ra = 10^6$ 时,出口处开始出现反向流,吸热墙附近形成边界层;

2) 烟囱出口处无量纲质量流率随着 Ra 增大而增大,但反向流出现后,出口处无量纲质量流率的增长率随着 Ra 增大而减小,即反向流是影响太阳能烟囱通风效果的主要因素;

3) 为强化太阳能烟囱对地下空间的通风换气效果,提出倾斜式优化通风结构。通过对比结构优化前后的结果,得到优化后的结构可抑制烟囱出口反向流的出现,有效强化地下空间的通风效果。

参考文献:

- [1] 陈易.城市地下空间室内设计[M].上海:同济大学出版社,2015.
CHEN Yi. Interior design of urban underground space[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.(in Chinese)
- [2] 童林旭.地下建筑学[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
TONG Linxu. Underground architecture[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 陈君萍.地下车库排风量的计算和污染物扩散过程模拟[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
CHEN Junping. Calculation of the exhaust volume of an underground garage and simulation on pollutant dispersion process [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.(in Chinese)
- [4] 李楠,李百战,沈艳,等.住宅建筑自然通风对室内热环境的影响[J].重庆大学学报(自然科学版),2009,32(7):736-742.
LI Nan, LI Baizhan, SHENG Yan, et al. Impacts of natural ventilation on indoor thermal environment for residential housing[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2009, 32(7): 736-742.(in Chinese)
- [5] 景星蓉,张健,林勇.绿色生态住宅小区的开发与建设[J].重庆大学学报(自然科学版),2003,26(6):105-108.
JING Xingrong, ZHANG Jian, LIN Yong. Development and build of green ecological residential quarter[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2003, 26(6): 105-108.(in Chinese)
- [6] Rodrigues A M, Canha da Piedade A, Lahellec A, et al. Modelling natural convection in a heated vertical channel for room

- ventilation[J]. *Building and Environment*, 2000, 35(5): 455-469.
- [7] Bansal N K, Mathur J, Mathur S, et al. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(10): 1302-1308.
- [8] Arce J, Jiménez M J, Guzmán J D, et al. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(12): 2928-2934.
- [9] 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 Angui, HAO Caixia, ZHANG Haiping. Experimental study on solar chimney for natural ventilation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(4): 460-464. (in Chinese)
- [10] 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(9): 1676-1684.
- [11] 戴鹏. 太阳能烟囱建筑自然通风与自然排烟性能的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
DAI Peng. Experimental study on natural ventilation and smoke exhaust performance of solar chimney buildings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [12] Miyazaki T, Akisawa A, Kashiwagi T. The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(7): 987-1010.
- [13] 薛宇峰, 苏亚欣. 太阳能烟囱结构对通风效果影响的数值研究[J]. *暖通空调*, 2011, 41(10): 79-83.
XUE Yufeng, SU Yaxin. Numerical study on impacts of solar chimney structure on ventilation effects[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2011, 41(10): 79-83. (in Chinese)
- [14] Khanal R, Lei C W. Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney[J]. *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2783-2794.
- [15] Zavala Guillén I, Xamán J, Hernández Pérez I, et al. Numerical study of the optimum width of 2a diurnal double air-channel solar chimney[J]. *Energy*, 2018, 147: 403-417.
- [16] 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 Qirong, DU Wei, ZHANG Jincui. Study on ventilation performance of building integrated solar chimney[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(7): 873-878.
- [17] 赵福云, 任秀宏, 胡江涛, 等. 太阳能烟囱通风特性及其强化[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(5): 714-719.
ZHAO Fuyun, REN Xiuhong, HU Jiangtao, et al. Ventilation performance of solar chimney and its reinforcement[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(5): 714-719. (in Chinese)
- [18] 华斌. 太阳能烟囱与诱导通风相结合应用于地下车库通风的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
HUA Bin. Study on application of solar chimney and induced ventilation in underground garage ventilation[D]. Nanjin: Nanjing normal University, 2013. (in Chinese)
- [19] 马瑞华, 秦堃, 刘黔蜀. 太阳能烟囱在地下车库中强化自然通风的数值模拟[J]. *制冷与空调*, 2016, 30(3): 321-324.
MA Ruihua, QIN Kun, LIU Qianshu. Numerical study of enhanced natural ventilation of solar chimney in underground garage[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2016, 30(3): 321-324. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)