

内置格栅诱导通道的太阳能通风墙性能

雷勇刚, 顾元, 宋翀芳, 王飞

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 提出一种利用太阳能和风能实现室内自然通风的新型内置格栅诱导通道的太阳能通风墙模型, 通过三维数值模拟研究在不同室外风速和太阳辐射强度下结构参数对其通风性能的影响。结果表明, 内置格栅诱导通道可以有效利用室外风形成对太阳能通风墙主通道内气流的诱导作用而强化自然通风; 该太阳能通风墙通风量随格栅间距与格栅高度比值的增加先增大后减小, 存在最佳比值使通风量最大; 随着风诱导通道宽度与主通道宽度比值的增加, 不同室外风速下的通风量均呈先增大后减小的变化趋势。

关键词: 太阳能通风墙; 格栅; 诱导通道; 通风性能

中图分类号: TU834.1

文献标志码: A

Analysis on Performance of a Solar-induced Ventilation Wall with Build-in Grille Induced Channel

LEI Yonggang, GU Yuan, SONG Chongfang, WANG Fei

(School of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A new solar-induced ventilation wall with grille induced channel, which utilize solar energy and wind energy to cause indoor natural ventilation, was proposed. The effects of structural parameters on the ventilation performance of the new structure were studied at different outdoor wind speed and solar radiation intensity by three-dimensional computational fluid dynamics method. The results showed that the built-in grille induced channel can utilize the induction of outdoor wind in formation of main channel of solar-induced ventilation wall to strengthen natural ventilation. The mass flow rate of the new solar-induced ventilation wall firstly increases, and then decreases with the increase of the ratio of grille spacing to grille height, there is an optimum ratio for the maximum of mass flow rate. With the increase of the ratio of wind induced channel width to main channel width, the mass flow rate of the solar-induced ventilation wall under different outdoor wind speed firstly increases and then

decreases.

Key words: solar-induced ventilation wall; grille; induced channel; ventilation performance

面对能源危机和环境污染的双重挑战, 现今世界各国都在积极利用可再生能源来实现建筑节能。太阳能墙就是主要利用太阳能来强化室内自然通风从而实现室内降温或采暖需要的一种措施, 是建筑节能的一种有效途径, 受到国内外学者的重视, 成为绿色建筑研究的热点。太阳能墙是法国太阳能实验室主任 Trombe 教授^[1]最早提出和研究的, 称为 Trombe 墙, 当其应用于建筑向室外排风时, 也被称为太阳能烟囱。

国内外学者对太阳能墙开展了一定的研究, 在理论分析、试验研究和数值仿真方面取得了一定的成果。Bansal 等^[2]利用所提出的稳态数学模型研究了不同开口尺寸和太阳辐射下的太阳能烟囱通风性能。Gan^[3]通过计算流体力学方法研究了通风量随 Trombe 墙的高度、宽度、厚度、壁面温度以及太阳辐射照度的变化规律; Ong 等^[4]建立了稳态数学模型, 采用转置矩阵方法进行求解, 对墙壁处于均匀热流下的空气间隙和太阳辐射照度对性能的影响进行了研究; Ji 等^[5]提出了带光伏发电的 Trombe 墙, 并通过建立的二维数理模型对温度场和太阳能电池的电性能和建筑内得热进行了研究; 杨昭等^[6]采用耦合流固传热技术, 对改进的特朗勃墙进行热过程分析; Burek 和 Habeb^[7]对 Trombe 墙式太阳能烟囱的性能进行了模型试验, 获得了加热量和太阳能烟囱宽度对通风量的影响规律; 李安桂等^[8]用电热膜模拟太阳辐射, 对不同的太阳辐射强度和烟囱宽度条件下的通风量性能进行了试验研究; Zamora 和 Kaiser^[9]对 Trombe 墙结构进行了二维数值模拟, 采

收稿日期: 2016-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51106103)

第一作者: 雷勇刚(1976—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为建筑节能、强化传热和集中供热。E-mail: leiyonggang@tyut.edu.cn

用低雷诺数 $k-\omega$ 模型,而且考虑了室外风力的影响,空气层两侧墙面取均匀热流密度条件. Tan 和 Wong^[10]对新加坡地区的安装有太阳能烟囱通风系统的 3 层建筑进行了试验测试,对空气流速分布以及房间内的气流流动进行了分析. Deblois 等^[11]利用区域模型对屋顶式太阳能烟囱形成的自然通风性能进行了研究;Khanal 等^[12]通过数值模拟对普朗特数 $Pr < 1$ 情况下的垂直结构的太阳能通风墙的通风量和温度、速度分布进行了研究.

本文提出一种新型内置格栅诱导通道的太阳能通风墙,旨在有效利用风压和热压的诱导来强化太阳能通风墙的自然通风性能,重点研究不同室外风速和太阳辐射强度下格栅间距与格栅高度比值、风诱导通道宽度与主通道宽度比值对其通风性能的影响.

1 物理模型和工作原理

内置格栅诱导通道的太阳能通风墙的物理模型如图 1 所示,该结构安置于建筑南外墙上,由玻璃盖板、吸热板、无色透明挡风板和格栅窗组成,形成风诱导通道和主通道. 其工作原理为:置于建筑外墙的吸热板吸收透过玻璃盖板、格栅和挡风板的太阳辐射,通过对流方式加热主通道内空气,使得通道内空气密度变小,在浮升力的作用下流动;室外风通过格栅窗进入风诱导通道,在挡风板的作用下发生转向,在风诱导通道中向上流动,当以一定流速流出时,形成对主通道中空气的诱导作用,强化主通道中空气向上流动. 该结构在风能和太阳能的诱导作用下,促使室内空气进入太阳能通风墙内,从而实现建筑自

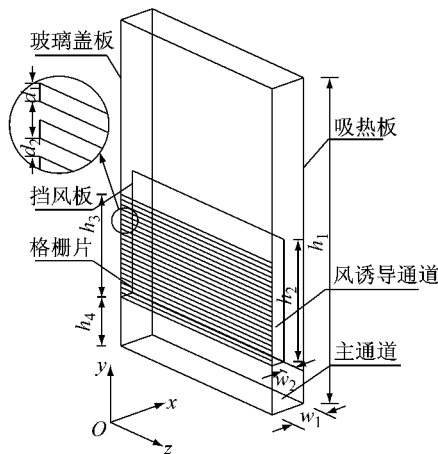


图 1 太阳能通风墙物理模型
Fig.1 Physical model of the solar-induced ventilation wall

然通风. 图 1 中,格栅高 $d_1=30$ mm,格栅间距为 d_2 ,主通道宽度 $w_1=200$ mm,风诱导通道宽度为 w_2 ,太阳能通风墙高度 $h_1=2\ 000$ mm,挡风板高度为 h_2 ,格栅窗高度为 h_3 ,距太阳能通风墙底部距离 $h_4=300$ mm.

2 计算区域

图 2 为内置格栅诱导通道的太阳能通风墙的计算区域,其出口与屋顶平齐,沿 PN 方向处于中间位置. 房间高度 $l_{MN}=3\ 000$ mm,长度 $l_{NJ}=3\ 000$ mm. 太阳能通风墙长度 $l_{QT}=1\ 000$ mm,格栅长 $1\ 000$ mm. 计算考虑了室外风场的影响,对不同尺寸的风场区域进行试算,直到计算得到的通风量数据之间的误差小于 5%,从而确定合理的计算区域. 计算区域尺寸为: $l_{AM}=2\ 000$ mm, $l_{IE}=1\ 000$ mm, $l_{AB}=8\ 000$ mm, $l_{AD}=2\ 400$ mm.

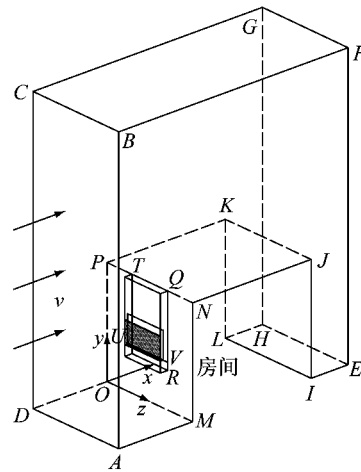


图 2 太阳能通风墙计算区域
Fig.2 Calculation region of the solar-induced ventilation wall

3 数学模型

3.1 控制方程和计算方法

三维稳态湍流控制方程如下. 连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

式中: u_i 为 x_i 方向上的平均速度分量, $m \cdot s^{-1}$; x_i 为坐标, $i=1,2,3$. 动量方程为

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - g_i \beta (T - T_\infty) \tag{2}$$

式中: u_j 为 x_j 方向上的平均速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; x_j 为坐标, $j=1, 2, 3$; ρ 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; P 为平均压力, Pa; ν_t 为紊流黏滞系数; ν 为层流黏滞系数; g_i 为 i 方向上的重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; β 为空气热膨胀系数, K^{-1} ; T 为平均温度, K; T_∞ 为参考点温度, K. 能量方程为

$$\frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

式中: Γ 为广义扩散系数. k 方程为

$$\frac{\partial(k u_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \epsilon + G_k \quad (4)$$

式中: k 为湍流脉动动能; ϵ 为流体脉动动能的耗散率; G_k 为湍流动能的产生项; σ_k 为经验值. ϵ 方程为

$$\frac{\partial(\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \epsilon) \quad (5)$$

式中: σ_ϵ 为经验值; C_1, C_2 为经验系数.

$$\Gamma = \frac{\nu}{\text{Pr}} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \quad (6)$$

式中: σ_t 为经验值.

$$G_k = \frac{\nu_t}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

计算考虑浮升力作用, 采用 Boussinesq 假设, 通过有限容积法对控制方程进行离散, 求解采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型, 采用 SIMPLE 算法实现速度与压力的耦合, 对流项的离散使用二阶迎风格式.

3.2 边界条件

如图 2 所示, 平面 ABCD 为速度入口边界条件, 速度取值 $1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 室外风垂直此平面进入; 平面 FGCB 和平面 EFGH 均为压力出口边界条件, 相对总压设为零; 平面 RVUS 为压力入口边界条件, 相对总压设为零; 平面 AMOD、平面 NJKP、平面 IJKL、平面 IEHL 为壁面边界条件, 平面 MNPO 除去平面 RVUS 的部分也为壁面边界条件; 平面 AMNJIEFB 和平面 DOPKLHGC 为对称边界条件.

计算域中所有固体壁面速度采用无滑移条件, 玻璃盖板和吸热板设置为定热流密度, 热流密度由太阳辐射和材料吸收率、透射率得出, 太阳辐射强度取 $400 \sim 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 考虑玻璃吸收率 $\alpha = 0.06$, 透射率 $\tau = 0.84$, 吸热板吸收率 $\alpha_1 = 0.95$, 室内外温度均设置为 306 K .

3.3 网格独立性考核

由于物理模型包括格栅、挡风板, 同时考虑风场区域, 其结构复杂, 所以采用非结构化网格与结构网

格组合的网格; 为保证模拟的准确性, 对格栅和通风墙内部区域进行局部加密, 局部计算网格如图 3 所示.

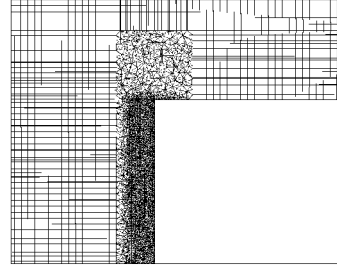


图 3 太阳能通风墙局部网格

Fig. 3 Local grid of the solar-induced ventilation wall

对网格独立性进行考核, 以保证计算结果准确且能节省计算资源. 建立了 5 套网格, 网格数分别为: 505 656, 670 383, 729 388, 817 336, 957 847. 对不同的网格数下的通风墙的通风量进行计算, 其结果如图 4, 通过比较, 直到相邻 2 套网格所计算的通风量数据偏差小于 1%, 综合考虑准确性和节省资源, 采用第 3 套网格进行数值模拟计算.

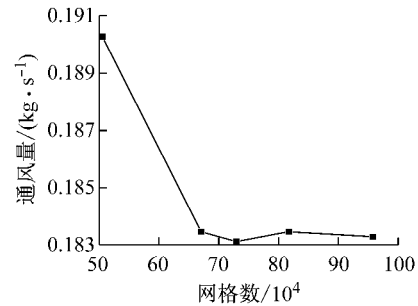


图 4 网格独立性考核

Fig. 4 The grid independence test and verify

4 模型有效性验证

为验证本文模型和计算方法的可靠性, 对文献 [7] 试验条件下太阳能通风墙诱导通风进行数值模拟, 数值模拟结果与试验结果的对比如图 5 所示. 试验条件下的太阳能通风墙由 2 块侧板和 1 块吸热板、1 块玻璃盖板组成, 高度为 $1 025 \text{ mm}$, 长度为 925 mm , 宽度为 $40 \sim 110 \text{ mm}$, 热流密度为 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 结果表明, 数值模拟的太阳能烟囱通风量随着烟囱宽度的增大而增加, 与试验结果的趋势一致, 且 2 种结果的偏差小于 15%, 数值模拟结果与试验结果吻合, 充分说明本文计算方法的可靠性.

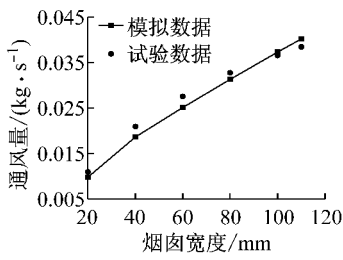


图 5 模拟结果与试验数据对比

Fig.5 The comparison of the experiment date and the simulation date

5 计算结果与分析

5.1 太阳能通风墙局部流场

图 6 是太阳能通风墙局部流场图,取挡风板高度与格栅窗高度比值 h_2/h_3 分别为 0,1,2,风诱导通道宽度与主通道宽度比值 $w_2/w_1=0.375$,格栅间距与格栅高度比值 $d_2/d_1=1$,太阳辐射强度 $I=600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,室外风速 $v=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

从图中可以看出,当 $h_2/h_3=0$ 时,即没有挡风板,室外风直接流进主通道,由于主通道底部静压小,室外风一部分沿着吸热板向上流,一部分向下流,而热压诱导的向上气流不足以抵消沿吸热板向下流动的气流,使部分室外风直接回灌至房间内;当 $h_2/h_3=1$ 时,即挡风板与格栅窗等高,室外风流入风诱导通道,由于挡风板的阻挡,气流大致向上流动,很好地诱导主通道向上流动的气流,此时烟囱内气流组织较均匀;当 $h_2/h_3=2$ 时,即挡风板 2 倍高于格栅窗,由于此时风诱导通道高度过高,室外风诱导主通道内气流的距离变短,风压诱导作用减弱,使烟囱通风量较 $h_2/h_3=1$ 时有所减弱,此时烟囱内气流组织均匀.

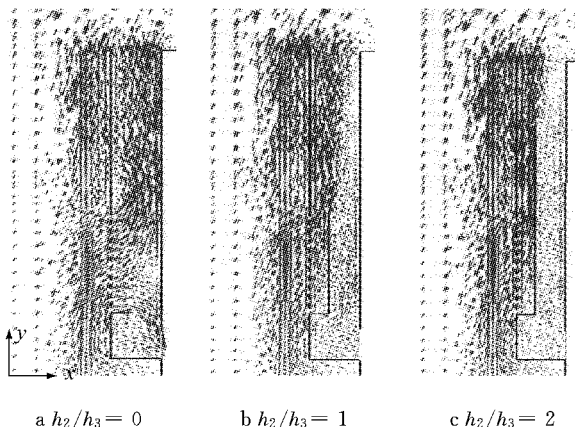


图 6 $z=1200 \text{ mm}$ 时局部流场

Fig.6 Local air flow pattern when $z=1200 \text{ mm}$

5.2 格栅间距与格栅高度比对通风量影响

在不同 d_2/d_1 下,太阳能通风墙的通风量(Q)随 v 的变化如图 7 所示, Q 随 I 的变化如图 8 所示.其中, d_2/d_1 的范围为 $0 \sim 2$, $h_2/h_3=1$, $w_2/w_1=0.375$.

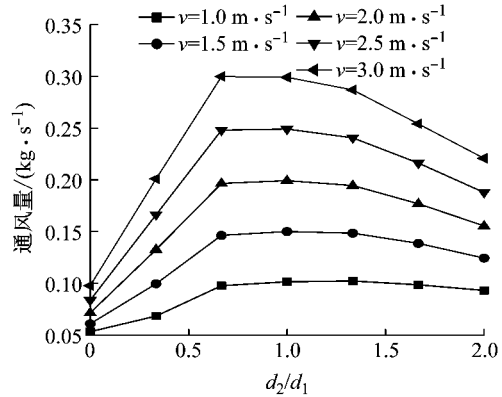


图 7 $I=600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时通风量随 d_2/d_1 的变化

Fig.7 Variations of mass flow rate with d_2/d_1 when solar radiation intensity is $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

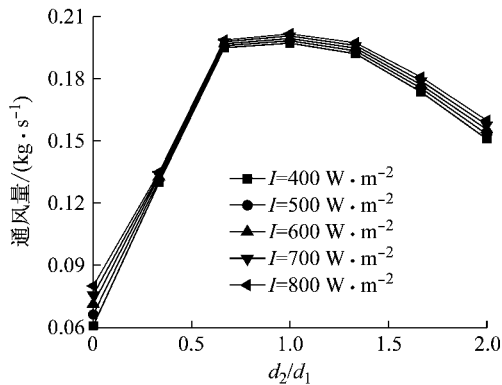


图 8 $v=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时通风量随 d_2/d_1 的变化

Fig.8 Variations of mass flow rate with d_2/d_1 when outdoor wind speed is $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

从图 7 和图 8 可以看出,随着 d_2/d_1 的增加,通风量先增后减.当室外风速 $v=1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Q 在 $d_2/d_1=1.33$ 附近达到最大;当室外风速 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq v \leq 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Q 在 $d_2/d_1=1$ 附近达到最大;当室外风速 $v=3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, Q 在 $d_2/d_1=0.67$ 附近达到最大.其原因为:随 d_2/d_1 增大,即格栅间距 d_2 增大,一方面,风诱导通道的进风量增大,可以使室外风对主通道的风压诱导作用增强;另一方面,风诱导通道中的室外风对主通道内气流的诱导距离变短使风压诱导作用减弱,因此其通风量的增减取决于 2 种作用的强弱.如室外风速 $v=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 d_2/d_1 从零增加到 1 时,格栅间距增大使

风压诱导作用增强,而诱导距离变短对风压诱导作用有减弱效果,但增强的作用大于减弱的作用,从而使得通风量增大; d_2/d_1 从 1 增加到 2 时,诱导距离减小对风压诱导的减弱作用占主导地位,使得通风量的变化发生逆转,其通风量随 d_2/d_1 的增大而减小. 在相同 d_2/d_1 下,室外风速 v 从 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,通风量最大增加 207.2%;当 $v=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 太阳辐射强度 I 从 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,通风量最大增加 31.3%. 此外,在 d_2/d_1 值从 1 增至 2 时,通风量持续减小,并且减小的幅度与室外风速成正比,如 $v=1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, d_2/d_1 值从 1 增至 2,其通风量降低了 17.1%; $v=3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, d_2/d_1 值从 1 增至 2,其通风量降低了 26.2%.

5.3 风诱导通道宽度与主通道宽度比对通风量影响

在不同 w_2/w_1 下,太阳能通风墙的 Q 随 v 的变化如图 9 所示, Q 随 I 的变化如图 10 所示. 其中, w_2/w_1 的范围为 $0 \sim 1$, $h_2/h_3=1$, $d_2/d_1=1$.

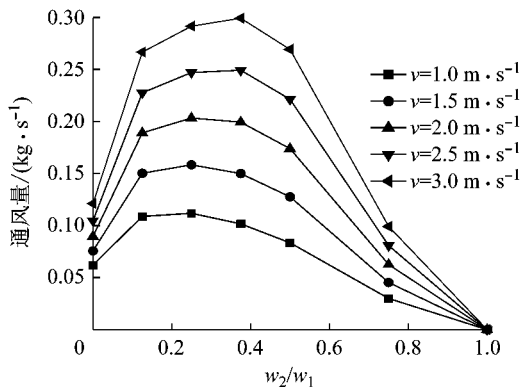


图 9 $I=600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时通风量随 w_2/w_1 的变化

Fig.9 Variations of mass flow rate with w_2/w_1 when solar radiation intensity is $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

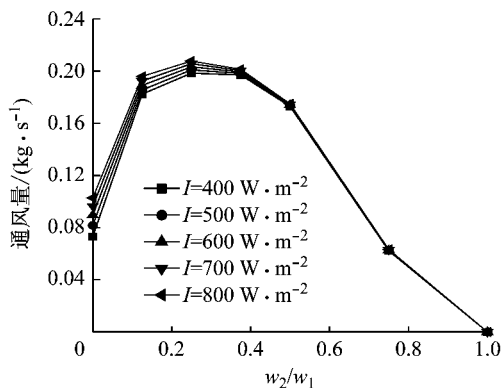


图 10 $v=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时通风量随 w_2/w_1 的变化

Fig.10 Variations of mass flow rate with w_2/w_1 when outdoor wind speed is $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

从图 9 可以看出,随着 w_2/w_1 值的增加, Q 均呈现先增大后减小的变化趋势,但不同室外风速最大通风量出现的 w_2/w_1 值不同,如室外风速 $v=1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $w_2/w_1=0.250$ 时通风量最大,而室外风速 $v=3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $w_2/w_1=0.375$ 时通风量最大. 风诱导通道宽度增加,一方面增强了室外风对主通道的风压诱导作用,但同时使得主通道变窄,增加了主通道的阻力. 计算结果表明:当室外风速在 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或者更小时,在 w_2/w_1 从零增加 0.250 时,室外风压诱导对通风量的增强作用占主导地位,使得通风量增加;在 w_2/w_1 从 0.250 增加到 1.000 时,主通道变窄而阻力增大的作用占主导地位,从而使得通风量减小. 当室外风速大于 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 w_2/w_1 从零增加 0.375 时,室外风压诱导对通风量的增强作用占主导地位,使其通风量增加,在 w_2/w_1 值从 0.375 增加到 1.000 时,主通道变窄而阻力增大的作用占主导地位,使得通风量减小. 当 $w_2/w_1=0$ 时,即风诱导通道宽度为零,此时为无内置诱导通道的传统太阳能通风墙,结果表明:太阳辐射强度为 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $w_2/w_1 < 0.500$ 时,新型内置格栅诱导通道的太阳能通风墙的通风量均高于传统太阳能通风墙,且室外风速越大,通风量增长幅度越大,最大可增加 171.0%.

如图 10 所示,随着 w_2/w_1 的增加,通风量先增后减,最大通风量出现在 w_2/w_1 值为 0.250 附近,不同热流密度下 Q 随 w_2/w_1 的变化趋势相同,说明室外风速是影响 Q 随 w_2/w_1 的变化趋势的主因. 在 $w_2/w_1 < 0.500$ 时,通风量随太阳辐射的增大而增大,太阳辐射强度 I 从 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增至 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 通风量最大可以增加 40.4%; 在 $w_2/w_1 \geq 0.500$ 时,通风量受太阳辐射强度影响较小,通风量趋于相等,此时室外风速占主导地位. 对比图 9 可以看出,室外风速对通风量影响较大,在相同 w_2/w_1 值时,室外风速 v 从 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其通风量最大可以增加 231.6%.

6 结论

提出一种内置格栅诱导通道的太阳能通风墙,通过三维数值模拟研究了该太阳能通风墙在不同结构参数和操作参数下的通风性能,主要结论如下:

(1) 新型内置格栅诱导通道的太阳能通风墙能有效利用太阳能和风能作用来增强自然通风效果,

(下转第 1968 页)