

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.022

## 强化室内通风研究进展

刘黎飞, 罗会龙

(昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500)

**摘要:**首先解释了自然通风和强化室内通风。接着介绍了强化室内通风的主要结构形式,包括太阳能强化室内通风(太阳能通风墙、太阳能烟囱、太阳墙、太阳能通风屋顶、太阳能蓄能通风)、多元通风和通过改良设计强化室内通风,并对国内外专家和学者的主要研究进展进行阐述。最后指出目前强化室内通风在研究应用的一些不足之处和未来的研究方向。

**关键词:**自然通风;太阳能;强化室内通风;多元通风;改良

**中图分类号:**TU834.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0114-06

## Research progress of enhanced indoor ventilation

Liu Lifei, Luo Huilong

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China)

**Abstract:** Nature ventilation and enhanced indoor ventilation first been interpreted. Then we introduce the main structure of enhanced indoor ventilation, including solar energy enhanced indoor ventilation (Trombe wall, solar chimney, solar wall, solar ventilated roof and solar storage ventilation), multivariate ventilation and enhanced indoor ventilation with optimized design, and the main research progress of experts and scholars at home and abroad is described. At last some shortcomings and future research directions of enhanced indoor ventilation in research are pointed out.

**Key words:** nature ventilation; solar energy; enhanced indoor ventilation; multivariate ventilation; optimized

近年来,在能源枯竭、环境恶化的大环境下,科学家一方面正在不断的寻找新的替代能源,另一方面也在不断的加强节约能源方面的研究,对各种结构、系统进行优化研究,最大限度的利用有限资源创造更多的价值。

科技在进步,时代在发展,生活水平也相应地提高,人们对室内环境的要求也越来越高,室内环境的好坏由很多种因素决定,室内温度、湿度、污染物浓度等等,室内通风是改善室内环境给人舒适的室内感受的重要途径。自然通风是最节能的室内通风方式,但其可靠性和稳定性较差。为此,强化室内通风的研究吸引了众多研究人员的目光,太阳能强化室

内通风的研究最为显著,特别是对 Trombe 墙强化室内通风的研究,研究人员对 Trombe 墙进行了这样那样的改进优化,衍生出了许多新型的强化室内通风模型。另外,将自然通风和机械通风相结合的多元通风的研究也越来越热,毕竟自然通风所能达到的效果是有限的,为了满足某些特定的需求,机械通风是必不可少的,虽然相比纯自然通风会有能源消耗,但带来的收益也是可观的。

本文综合介绍了国内外关于太阳能强化室内通风的几种结构形式、多元通风、优化改良设计强化室内通风的研究现状,并提出不足之处和今后研究方向。

## 1 自然通风与强化室内通风

### 1.1 自然通风

不借助外界手段促使空气流动而进行的室内通风换气方式即自然通风,自然通风的首要条件是室内、外要存在压力差,现代建筑中一般利用热压和风压进行自然通风设计,如果建筑外墙上的窗孔两侧存在压力差  $\Delta P$ ,就会有空气流过该窗孔,空气流过窗孔时的阻力就等于  $\Delta P$ 。

$$\Delta P = \xi \frac{\nu^2}{2} \rho \quad (1)$$

式中:  $\Delta P$  为窗孔两侧的压力差, Pa;  $\nu$  为空气流过窗孔时的流速, m/s;  $\rho$  为空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\xi$  为窗孔的局部阻力系数。

式(1)可改写为

$$\nu = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi\rho}} = \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为窗孔的流量系数,  $\mu = \sqrt{\frac{1}{\xi}}$ ,  $\mu$  值的大小与窗孔的构造有关,一般小于 1。

通过窗孔的空气量为

$$Q = \nu F = \mu F \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3)$$

$$G = \rho Q = \mu F \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (4)$$

式中:  $F$  为窗孔的面积, m<sup>2</sup>;  $Q$  为空气体积换气量, m<sup>3</sup>/s;  $G$  为空气质量换气量, kg/s。

由上面公式可以看出,只要已知窗孔两侧的压力差  $\Delta P$  和窗孔的面积  $F$  就可以求得通过该窗孔的空气量  $G$ 。空气量  $G$  的大小是随着  $\Delta P$  的增大而增大的,自然通风产生  $\Delta P$  的原因为风压和热压<sup>[1]</sup>。

### 1.2 强化室内通风

室内通风即利用有目的的开口把风引入室内,促进室内空气的流动,达到对室内进行通风换气的目的。通过通风可以提高室内空气质量,改善室内热环境,导入新鲜空气,排除污浊的空气以及降低室内空气的污染物。强化室内通风即利用可以利用的手段来加强室内自然通风,起到更好的室内通风的效果,机械通风是最典型的强化室内通风的方式,此外还有其他形式,如太阳能强化室内通风、多元通风和改善建筑设计强化室内通风等。目前,太阳能强化室内通风的研究是热点。

## 2 太阳能强化室内通风的研究

### 2.1 太阳能通风墙

太阳能通风墙即一种利用太阳能进行通风的墙体,由法国太阳能实验室主任 Felix Trombe 教授首先提出,所以称之为 Trombe Wall(特朗勃墙),图 1 即为太阳能通风墙的工作原理。在房屋向阳侧距离外墙 10 cm 左右加装玻璃外墙,原先的外墙即做成特朗勃墙体,特朗勃墙体与玻璃外墙之间形成空气间层,用于空气流动,玻璃外墙和特朗勃墙上下都有开孔,用于气流通过,此外在特朗勃墙体的外侧还有一层可移动的绝热层,用于阻止热量的传递。

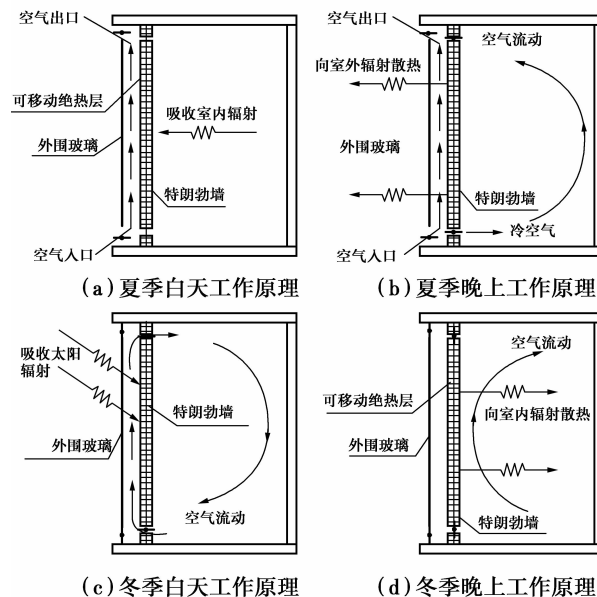


图 1 太阳能通风墙的工作原理

专家学者已经对其进出口控制、结构尺寸、绝热性能等方面进行了大量研究,国内现阶段对太阳能通风墙的研究主要集中在 PV-Trombe 方面,即将太阳能光伏技术与太阳能通风墙技术相结合。

Duan 等<sup>[2]</sup>对比了 2 种不同类型的 Trombe 壁的热性能,一种是紧贴在蓄热墙壁上,另外一种放置在双层玻璃盖板和蓄热墙壁之间。结果表明:表征该壁功率和火用效率的气流速率、空气温升等参数前者明显高于后者,提高 Trombe 壁有利于提高火用效率。He 等<sup>[3]</sup>提出了一种装有百叶窗的 Trombe 墙模型,并对其进行实验研究和数值模拟,对百叶窗设置不同的倾角,并控制不同的努希尔数和雷诺数。结果表明,小的百叶窗倾角有助于提高出口空气温度和太阳能热效率,增加雷诺数导致出口温度减小但能提高太阳能热效率,随着雷诺数

和百叶窗倾角的增大,摩擦系数减小,并提出了传热和流动阻力的经验公式。Hu 等<sup>[4]</sup>则将其与加装分体式空调机的办公楼进行耦合,设置不同的倾角、空气间层宽度和不同的核心层材料进行实验。结果表明,间层宽度对冷负荷影响不大,而百叶窗倾角却影响显著,倾角越大,越能降低进入室内的热通量,从而可以降低室内所需冷负荷,另外,使用低密度的核心材料也能降低冷负荷。

苏亚欣等提出一种内置式 PV-Trombe 墙结构,并对其进行数值模拟,结果表明,夹层内气流的速度与温度通道宽度的方向变化很不均匀,光伏板表面存在一个空气温度和速度边界层,同时朱琦彬等<sup>[5-7]</sup>也对该内置式 PV-Trombe 墙结构进行了 CFD 模拟,得出该内置式 PV-Trombe 墙结构下室内平均温度以及空气流道内体积都较普通 PV-Trombe 房间和 Trombe 墙房间有所提高的结论。

## 2.2 太阳能烟囱

太阳能烟囱(solar chimney, SC)技术将烟囱技术与太阳能利用技术相结合,基于热压作用下的自然通风原理,以太阳辐射为动力促进空气流动,并转化太阳热能为动能,从而增大室内压头和排风量,达到强化室内通风的目的<sup>[8]</sup>。其工作原理与 Trombe 墙相似,常见的太阳能烟囱形式有墙体式结构、竖直集热板屋顶式结构、倾斜集热板屋顶式结构,另外还有墙壁屋顶式结构、辅助风塔通风式结构等<sup>[9]</sup>。

Khanal 等<sup>[10-11]</sup>对标准湍流作用下倾斜被动墙式太阳能烟囱强化自然通风的情况进行了模拟,施以不同的瑞利数和倾角,结果表明:随着被动墙体倾角的增加,湍流强度和动能都减小,并对理想条件下的独立模型和有外界影响下的连接模型进行对比分析,得出独立模型过度预测气体质量流量的结论,在瑞利数为  $1.36 \times 10^{14}$  时,二者质量流量差约为 10%。María JSL 等<sup>[12]</sup>对太阳能烟囱强化建筑通风进行了能量分析,并利用三维 CFD 模型对其进行数值模拟,详细解释了太阳能烟囱内部结构和参数对火用效率的影响,为以后深入研究奠定了基础。Somaye 等<sup>[13]</sup>研究了太阳能烟囱布局对建筑通风量的影响,太阳能烟囱在室内布局不同,通风量及其性能也不同,然后用 energyplus 软件对设置不同位置的太阳能烟囱进行模拟并在 Isfahan 进行实验研究,结果表明东南部位设置效果最佳。

国内许多专家学者也对太阳能烟囱技术进行了大量研究,曹露春等<sup>[14]</sup>对通风采光装置进行改造,形成了集热器式太阳能烟囱,并通过实验证实了太

阳能烟囱可以提高室内外的通风速度。井光娥等<sup>[15]</sup>采用 Fluent 软件对不同的太阳辐射强度下太阳能烟囱进行模拟,测试其在强化被动式太阳房自然通风时对室内热环境的影响,得出可以改善室内环境的目的。卢敬彦等<sup>[16]</sup>用试验法对太阳能烟囱的通风应用特性进行实验研究,并分析了其应用的综合效益,为太阳能烟囱技术在绿色建筑中的推广应用提供了理论依据。扈良英等<sup>[17]</sup>基于青岛地区的气候条件,利用竖直式太阳能烟囱,通过理论分析和 CFD 数值模拟方法研究了太阳能烟囱强化自然通风技术应用在教室中的可行性。段绍阳等<sup>[18]</sup>对组合式太阳能烟囱在风压和热压耦合作用下的自然通风性能进行了数值模拟,并在此基础上提出并研究了百叶结构的组合式太阳能烟囱。赵文博等<sup>[19]</sup>提出在竖直式太阳能烟囱中设置半圆柱形吸热墙的多通道太阳烟囱结构形式,并通过 fluent 数值模拟对其在不同情况下的通风特性进行研究。

## 2.3 太阳墙

太阳墙是在太阳能通风墙基础上的改进,由集热和气流输送 2 部分组成。即在原有太阳能通风墙的基础上,在顶部加装风机,把从太阳能墙 10 cm 左右的集热空腔里面的热空气通过风机抽走,然后以空调的形式输送到房间各部。

最初由加拿大 Conserva 公司研制<sup>[20]</sup>,既可用于夏季制冷,也可以用于冬季采暖。段双平等<sup>[21]</sup>采用理论分析方法,研究冬季随室内外温差和太阳辐射强度的变化,空气循环供热量、自然通风量、墙体导热供热量的变化规律。结果显示:利用控制变量法,当室内外温差不变时,自然通风量随太阳辐射强度的增大先减小后增大,而墙体导热供热量和空气循环供热量随太阳辐射强度的增大呈线性增大;当太阳辐射强度不变时,空气循环供热量和自然通风量随室内外温差的增大而线性增大,墙体导热供热量则受室内外温差的影响很小。王一鸣等<sup>[22]</sup>提出一种新型多孔太阳能采暖房,由多孔陶瓷构成,并对其采暖性能进行实验研究,结果表明具有很好的采暖效果和储热性能。

## 2.4 太阳能通风屋顶

太阳能通风屋顶由屋顶面板、中间空气间层和上部盖板组成,在间层主导风向方向设置风阀,用于冬夏季的开闭替换。另外根据不同的强化室内通风原理可以将屋顶面板进行开口设置。

Ababsa 等<sup>[23]</sup>建立了一个在屋顶瓦片下面设置空腔的强化室内通风散热的模型,并进行了理论推

导,然后用 CFD 进行数值模拟,得出其温度和气流速度和模型横截面有关,呈抛物线分布,另外还得出质量流量速率受很多因素的影响,为以后研究相关问题提供了帮助。Lei<sup>[24]</sup>则提出了一种配有穿孔吸热板的屋顶太阳能烟囱,并通过数值模拟和对比分析,在强化自然通风方面的确优于传统发屋顶太阳能烟囱,另外,本屋顶太阳能烟囱在达到最优化的同时对于具有较大倾斜角度和间隙宽度的屋顶太阳能烟囱更有效。

林会文等<sup>[25]</sup>建立了太阳能诱导式通风屋顶模型进行实验,通过实验数据说明了在新疆地区不加装通风屋顶的屋面向室内传递的热量为加装通风屋顶的屋面向室内传递热量的 2.5 倍,因此该通风屋顶对建筑节能的贡献很可观。

## 2.5 太阳能蓄能通风

太阳能资源有很大的不稳定性,白天阳光充足的时候很难做到充分利用,而晚上、阴天或者雨天的时候却用不了,因此利用相变储热材料在太阳能较富余的时候利用相变材料储存起来用于太阳能不足的时候,就是太阳能蓄能,再把这部分太阳能用来通风就是太阳能蓄能通风。

Lin 等<sup>[26]</sup>提出了一种用太阳能光伏集热器和相变材料集成的天花板通风系统,所提出的 PVT-PCM(太阳能光伏光热-相变材料)一体化通风系统可以显着提高被动建筑的室内热舒适度,还可以通过夜间天空辐射冷却来增强室内热舒适度。

太阳能相变储热材料在中国很早就有研究<sup>[27]</sup>,现阶段的研究越来越多样化。卢军等<sup>[28-29]</sup>以昆明市气象参数为依托建立了太阳能蓄能通风的系统模型,理论分析了通风量、通风时长、相变材料和系统倾角之间的关系,考虑通风量和通风时长时得出系统最佳倾角应为  $45^\circ$ ,同时得出最佳相变材料为  $38^\circ\text{C}$  十四烷酰,并设计实验,以棕榈酸和月桂酸两种相变材料进行测试,得出棕榈酸效果优于月桂酸的结论,同时该系统能充分强化室内通风,在夏热冬冷地区节能效果显著。王源夏等<sup>[30]</sup>将 Trombe 墙体式太阳能烟囱技术与相变墙体材料相结合,对其提高室内舒适度和节能的目的进行研究。现今社会,汽车已经成了必不可少的交通工具,汽车数量还在日益增加,把太阳能蓄能通风技术应用到汽车空调中将是一个很有前景的研究方向,邱庆龄<sup>[31]</sup>系统的介绍了车用太阳能蓄能及通风空调系统的组成、特点及其优势,为车用太阳能蓄能及通风空调系统的发展提供了可能。

## 3 其他形式强化室内通风

### 3.1 多元通风

多元通风又叫混合通风,集成了自然通风和机械通风两种不同的通风方式,充分利用自然通风和机械通风的优点,在保持室内环境和热舒适条件下最大限度地减少耗能。多元通风的目的是在通风的同时保证了室内的空气品质,同时又提供一个舒适的室内环境。

Yang 等<sup>[32]</sup>提出了 stack-based 的混合通风方案,通过数值模拟对无量纲设计方法进行验证,结论表明对于多层建筑节能效果显著。Fu 等<sup>[33]</sup>选择 2 个不同的热舒适模型(预测平均投票(PMV)模型和自适应舒适标准(ACS)模型)对混合通风系统建筑的效率做了比较,结果表明:在温暖和稍微炎热的天,ACS 模型具有比 PMV 模型更高的效率和更大的舒适百分比,而在稍微凉爽的日子里,PMV 模型是一个可选的控制目标,即使系统很复杂。Li 等<sup>[34]</sup>运用 fluent 软件对不同太阳能烟囱辐射下的混合通风教室进行了数值模拟,结果表明,随着太阳辐射的增加而增加,通风量和上层空间的温度会增大,而工作面的温度会降低,这样有利于将热空气排除室外,但是一旦压力增大到一定程度,室内热空气将无法及时排除。

郭娟等<sup>[35]</sup>对多元通风进行了研究,设置 6 种典型的通风方式,运用 Fluent 软件对株洲地区某房间在过渡季节或夏季典型气象条件下的气流参数分布情况进行预测分析,得出在长江流域气候条件下多元通风系统具有很大优势的结论。刘皓等<sup>[36]</sup>以二氧化碳浓度作为室内空气质量的调控目标,以 CONTAMW 为研究工具对重庆地区混合通风下的调控策略进行了研究分析,为制定混合通风的相关标准、规范以及对相关技术产品研发提供参考。

### 3.2 通过改良设计进行强化室内通风

通过改良设计进行强化室内通风即通过对通风装置进行优化或者对建筑构造进行优化,达到更好的强化室内通风的目的。

吴淑霞等<sup>[37]</sup>以安装涵洞型通风器的空调房间为研究对象进行了实验研究,结果表明,利用通风器能有效降低室内污染物浓度,在一定程度上改善了室内空气品质。唐汝宁等<sup>[38]</sup>以内蒙古工业大学建筑馆为依托,充分利用通风口、金属孔板、可开启窗、通风竖井等对旧厂房进行强化室内通风设计,使室内通风设计达到生态、节能、环保的目的。

## 4 存在的问题及研究方向

### 4.1 存在的问题

无论是在理论、实验或是数值模拟上,国内外专家和学者已经对强化室内通风进行了大量的研究,研究成果丰硕,但这些研究大部分停留在实验室阶段,真正能够推广到社会上,对产品进行量化生产,为人们提供舒适生活环境、节约能源的少之又少,目前的研究还存在着一些不足:

1) 对太阳能强化室内通风的研究,大部分还是在研究太阳能通风墙以及太阳能烟囱,国内外学者对这 2 部分的研究已经有很多,但是一直没有实质性的、商业化的产品出来,很多只是作为试点或者典型的建筑用来参观和标榜。

2) 太阳墙、太阳能通风屋顶、太阳能蓄能通风的研究还处于初级阶段,越来越多的国内学者正在这些方面努力,有很多研究成果出来,包括不同形式的结合等等,但是缺少进行经济性、实用性的分析,好多只是停留在局部气候环境下,缺少大范围的环境分析,并以环境为依托进行全国各地的研究。

3) 多元通风方面大部分研究的是利用软件模拟仿真,没有实际进行实验研究,这就过于理想化,软件模拟代替不了实验研究,因此在实验研究方面需要有所加强。

### 4.2 研究方向

通过上述对目前研究现状的阐述以及对不足之处的分析,为加强室内通风的研究,为人们提供舒适的生活环境,笔者认为应加强以下几方面的研究:

1) 太阳能通风墙和太阳能烟囱技术已经趋于饱和,在太阳能强化室内通风方面应该加强对太阳能通风屋顶、太阳能墙、太阳能蓄能通风的研究,尤其是太阳能蓄能通风,各种不同的蓄能材料千差万别,如何能完美的与太阳能相结合是一个挑战。

2) 将不同的太阳能应用技术应用于强化室内通风,如太阳能热管换热技术、太阳能微通道换热技术等,并加强多元通风的研究,侧重于优化和节能。

3) 建立各地的室内通风室外环境库(主要包括各地典型气候、各种影响室内通风的因素,如室外风速、风向、温湿度、太阳能辐射强度等),为以后强化室内通风的研究做好基础性工作。

4) 现阶段用于模拟仿真主要是用 CFD 软件进行模拟仿真,常用的软件主要有 ANSYS、fluent 等,没有专门的室内通风模拟计算、设计的软件,因此可以开发一款专门应对室内通风研究的软件,包含模

拟计算、设计评价、方案对比等功能。

## 5 结语

在能源短缺、节约和保护环境的大环境下,利用天然能源强化室内通风的研究变得越来越热,其中就有太阳能强化室内通风的研究,太阳能的协同作用主要用来强化自然通风,国内外专家的研究已经有很多<sup>[39]</sup>。机械通风耗能较多,无论是在房间通风、粮食储存或者矿井通风等方面,大部分机械通风的研究主要目的是为了节约成本,减少能源的消耗。将以上二者结合起来的多元通风研究也越来越多。但是各方面的研究还存在着这样那样的不足之处,有待于进一步的深入研究。

### 参考文献:

- [1] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] DUAN S P, JING C J, ZHAO Z Q. Energy and exergy analysis of different Trombe walls [J]. Energy and Buildings, 2016(126): 517-523.
- [3] HE W, HONG X Q, WU X L, et al. Thermal and hydraulic analysis on a novel Trombe wall with venetian blind structure [J]. Energy and Buildings, 2016(123): 50-58.
- [4] HU Z T, HE W, HONG X Q, et al. Numerical analysis on the cooling performance of a ventilated Trombe wall combined with venetian blinds in an office building [J]. Energy and Buildings, 2016 (126): 14-27.
- [5] 朱琦彬, 苏亚欣. 内置式 PV-Trombe 墙对室内通风特性的影响[J]. 建筑热能通风空调, 2015(5): 80-82, 90.
- [6] 雷菲宁, 苏亚欣, 徐小炜. 宽度对内置式 PV-Trombe 墙内通风与换热影响的数值研究[J]. 太阳能学报, 2015 (7): 1710-1716.
- [7] 徐小炜, 苏亚欣. 内置式 PV-Trombe 墙自然通风的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014(5): 23-28.
- [8] 左璐, 郑源, 周建华, 等. 太阳能强化烟囱技术在强化室内自然通风中的研究进展[J]. 暖通空调, 2008(10): 41-47.
- [9] JYOTIRMAY N K, BANSAL S M, et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation [J]. Solar Energy, 2006(80): 927-935.
- [10] KHANAL R, LEI C. A numerical investigation of buoyancy induced turbulent air flow in an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation [J]. Energy and Buildings, 2015(93): 217-226.
- [11] KHANAL R, LEI C. An experimental investigation of

- an inclined passive wall solar chimney for natural ventilation [J]. *Solar Energy*, 2014(107): 461-474.
- [12] MARÍA JSL, ANA MBM, ANTONIO JGT, et al. Numerical simulation and exergetic analysis of building ventilation solar chimneys [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015(96): 1-11.
- [13] SOMAYE A, MARYAM F, RIMA F, et al. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2016 (123): 71-78.
- [14] 曹露春, 张志军. 太阳能强化烟囱技术在通风采光装置中的应用研究[J]. *重庆建筑*, 2013(4): 34-35.
- [15] 井光娥, 周艳, 李庆领. 太阳能烟囱热压强化自然通风对室内热环境的影响[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2013(1): 66-70, 75.
- [16] 卢敬彦. 太阳能通风技术实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [17] 扈良英. 太阳能烟囱强化教室自然通风研究[D]. 山东青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [18] 段绍阳. 组合式太阳能烟囱通风性能数值研究及其优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [19] 赵文博. 多通道竖式太阳能烟囱通风性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [20] HOLLICK J C. Unglazed solar wall air heaters [J]. *Renewable*, 2004(5): 415-421.
- [21] 段双平, 敬成君, 雷肖苗. 太阳墙冬季供热特性[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2014(7): 938-942.
- [22] 王一鸣, 杨昆, 刘伟, 等. 一种新型的多孔太阳墙采暖房[J]. *工程热物理学报*, 2012(3): 501-504.
- [23] ABABSA D, BOUGOUL S. Numerical study of natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain [J]. *Energy Procedia*, 2012 (18): 974-982.
- [24] 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.
- [25] 林会文, 王荣, 任杰, 等. 太阳能诱导式通风屋顶模型的研究[J]. *科技视界*, 2016, 12: 93-94.
- [26] LIN W Y, MA Z J, SOHEL M I, et al. Development and evaluation of a ceiling ventilation system enhanced by solar photovoltaic thermal collectors and phase change materials [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014(88): 218-230.
- [27] 唐钰成, 郑瑞佩, 郭俐聪. 太阳能相变储热材料[J]. *化工进展*, 1985(1): 23-26.
- [28] 卢军, 赵娟, 黄光勤, 等. 太阳能蓄能通风系统理论模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(3): 110-116.
- [29] 陈士凌, 卢军, 李永财. 太阳能相变蓄能通风系统实验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33 (2): 97-100, 111.
- [30] 王源霞. 太阳能通风结合相变墙体在夏热冬暖地区的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [31] 邱庆龄. 车用太阳能蓄能及通风空调系统设计研究[J]. *科技创新导报*, 2013, 24: 51-52.
- [32] YANG D, LI P. Dimensionless design approach, applicability and energy performance of stack-based hybrid ventilation for multi-story buildings [J]. *Energy*, 2015(93): 128-140.
- [33] FU X Z, WU D X. Comparison of the efficiency of building hybrid ventilation systems with different thermal comfort models [J]. *Energy Procedia*, 2015 (78): 2820-2825.
- [34] LI J, LI D Y. The study on numerical simulation of classrooms using hybrid ventilation under different solar chimney radiation [J]. *Procedia Engineering*, 2015 (121): 1083-1088.
- [35] 郭娟, 王汉青. 基于 Fluent 的多元通风系统数值模拟分析[J]. *流体机械*, 2013(5): 29-33.
- [36] 刘皓. 重庆地区住宅建筑混合通风调控策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [37] 吴淑霞. 居住建筑用自然通风器技术研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [38] 唐汝宁, 马卿. 高校旧厂房改造工程中的自然通风设计[J]. *暖通空调*, 2011(4): 42-45, 62.
- [39] 刘雨曦, 谢玲, 罗刚. 太阳能强化自然通风的研究现状与问题探讨[J]. *土木建筑与环境工程*, 2011, 33 (Sup1): 134-138.

(编辑 薛婧媛)