

# 近零能耗建筑光伏幕墙系统换热优化研究

程昱茜,吕雪,冯国会,黄凯良,王天雨

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 对近零能耗建筑光伏幕墙系统进行优化研究,改善系统的性能和提高热效率。**方法** 利用 FLUENT 软件对沈阳建筑大学近零能耗建筑光伏幕墙系统建模,从空腔厚度、出风口布置、室外温度等方面进行模拟。**结果** 通过模拟分析得出,光伏幕墙系统空腔厚度优化对系统热效率的影响较大,空腔厚度优化为 80 mm,与原模型相比换热效率提升了 4.1%,在此基础上将出风口宽×高优化为 350 mm×350 mm,换热效率可以进一步提升 0.6%;在双出风口的情况下,当两出风口间距不大于 PVT 集热器总长度一半时,风口布置越均匀,空腔内温度场分布越均匀;室外环境的模拟结果显示光伏幕墙系统工作的环境温度越高,换热效果越好。**结论** 对光伏幕墙系统的物理参数及工作环境进行优化,改善空腔内温度分布情况,可以有效地提升系统换热效率。

**关键词** PVT 集热器;光伏幕墙;空腔;换热效率;FLUENT

中图分类号 TK519

文献标志码 A

## Heat Exchange Optimization of Photovoltaic Curtain Wall System in Near Zero Energy Building

CHENG Yuqian, Lü Xue, FENG Guohui, HUANG Kailiang, WANG Tianyu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to improve the performance and the thermal efficiency of the system, the photovoltaic curtain wall system of near-zero energy building is optimized. The photovoltaic curtain wall system of near zero energy building on the campus of Shenyang Jianzhu University was simulated from the aspects of cavity thickness, air outlet, and outdoor temperature by FLUENT software. Simulation results show that the cavity thickness optimization has a greater influence on the thermal efficiency of photovoltaic curtain wall system. When the cavity thickness is 80 mm after optimization, the heat exchange efficiency is increased by 4.1% compared with the original model.

收稿日期:2022-05-13

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0100300);沈阳市科技计划项目(21-108-9-03)

作者简介:程昱茜(1997—),女,博士研究生,主要从事光伏建筑一体化等方面研究。

On this basis, the size of the air outlet is optimized to 350 mm × 350 mm, which can further improve the heat exchange by 0.6%. In the case of dual air outlets, when the distance between the two air outlets is not greater than half of the total length of the PVT collector, the more uniform the air outlets are arranged, the more uniform the temperature field distribution in the cavity. The simulation results of the outdoor environment show that the higher the ambient temperature of the photovoltaic curtain wall system, the better the heat exchange effect. Optimizing the physical parameters and working environment of the photovoltaic curtain wall system and improving the temperature distribution in the cavity can effectively improve the heat exchange efficiency of the system.

**Key words:** PVT collector; photovoltaic curtain wall; cavity; heat transfer efficiency; FLUENT

太阳能取之不尽、用之不竭,且无污染,但基于太阳光自身性质,对太阳能的利用需要克服其间歇性和分散性等特点<sup>[1]</sup>。太阳能与建筑的结合形式通常分为光伏和光热两大类,均在近些年得到了较好的发展<sup>[2]</sup>。据国际能源署预测,到2050年,全球光伏系统每年产能可以在全球总电力能源中占比16%<sup>[3]</sup>。

Kem 和 Russel 于1978年提出了PVT集热器的概念<sup>[4]</sup>。光伏热能(Photovoltaic thermal PVT)将太阳能光伏光热技术有效结合,达到1+1>2的效果<sup>[5]</sup>。光伏幕墙作为PVT集热器与建筑结合利用的有效形式,得到了广泛的关注和应用。在太阳能电池电子与空穴结合的过程中,由于释放的热会加热半导体,对太阳能电池发电过程起阻碍作用。有研究指出,光伏电池温度每上升1℃,它的光电转化效率就会随之降低0.5%<sup>[6]</sup>。通常采用在光伏背板后设置通风腔的办法,以对流换热的形式降低电池温度,同时将背板余热加以利用,更高效地利用太阳热能。集热器在应用过程中存在烟囱效应,空气受热压作用向上流动,从上部排出,且进出口高差越大,热压效应越明显。C. Lai 等<sup>[7]</sup>, X. Zheng 等<sup>[8]</sup>, N. Martín-Chivelet 等<sup>[9]</sup>均对光伏建筑一体化系统的通风换热性能进行了研究。J. Peng 等<sup>[10]</sup>进行了双层半透明立面光伏一体化建筑的通风模式对比研究,发现由于工作温度降低,通风模式下的能量输出优于浮力驱动通风模式下1.9%,优于不通风模式

下3%,且在夏天工况下的提升空间更大。S. Preet 等<sup>[11]</sup>研究了光伏幕墙自然通风和强制通风两种模式对幕墙发电效率的影响情况,发现强制通风对功率提升有更大的帮助。Y. Wang 等<sup>[12]</sup>对建筑光伏组件与屋顶之间的通风流道进行了季节适应性研究,田玮<sup>[13]</sup>对光伏建筑一体化组件通风流道性能进行优化研究。其中,对适用于严寒地区的光伏系统研究较少,相关参数优化方案也尚不明确。

综上所述,笔者基于沈阳建筑大学近零能耗建筑PVT光伏幕墙系统利用FLUENT软件建立几何模型,通过改变空腔厚度、出风口尺寸、两出风口间距以及室外环境温度,进行模拟分析,对比其换热效率及空腔内温度分布,完成模型优化,为相关工程实践提供理论基础。

## 1 PVT集热器工作原理

PVT集热器与建筑结合主要方式为形成光伏幕墙,构成建筑外立面,同时为建筑供能。PVT集热器的基本外观结构如图1所示。

通常情况下,在PVT集热器电池的上方安装一到二层玻璃盖板,并在后面包裹一层保温材料,以降低PVT集热器的热损失<sup>[2]</sup>。在PVT集热器发展的过程中,通过选用透过率更高的玻璃盖板和更优质的选择性吸收涂层材料,进一步提高集热器的性能。有、无盖板的PVT空气集热器剖面图如图2所示。

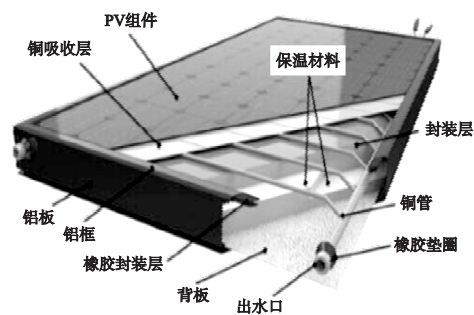


图 1 PVT 集热器基本结构

Fig. 1 Basic structure of the PVT collector

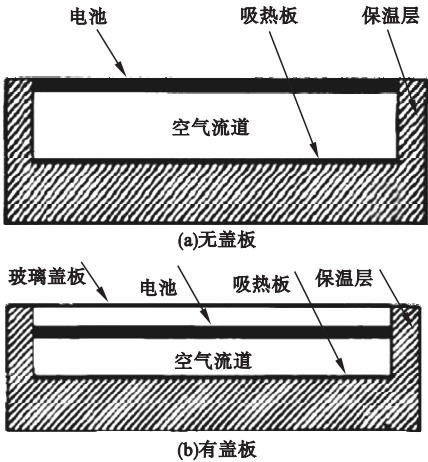


图 2 PVT 空气集热器剖面图

Fig. 2 The section of PVT air collector

光伏电池板选用单晶硅材质,由 16 块电池板组成,设置在近零能耗建筑南侧,与空气源热泵耦合构成建筑供能系统。当空腔内温度足够高时,空腔内空气与太阳能电池背板换热后流入空气源热泵机组,以利用太阳能光热作用为建筑供能。为保证光伏幕墙空腔换热效果,选择下送上出的气流模式,风口布置如图 3 所示。

2 光伏幕墙优化模型

研究模拟对象为位于沈阳建筑大学的近零能耗建筑,北纬 41°48',东经 123°25',属于严寒地区。该近零能耗建筑充分利用可再生能源,用更少的能量消耗提供舒适的室内环境,并满足绿色建筑的基本要求<sup>[14]</sup>。该建筑采用光伏幕墙耦合空气源热泵系统为建筑供能,以达到降低能量消耗的效果。



图 3 光伏幕墙风口布置

Fig. 3 Air outlet layout of the photovoltaic curtain wall

2.1 优化模型建立

采用 FLUENT 软件,建立光伏幕墙系统模型,以下送上出的基本气流换热形式为例,完成模型优化。集热器长×宽×高为 3 000 mm×6 400 mm×140 mm,风口宽×高为 250 mm×250 mm,送、出风口均位于光伏幕墙空腔背侧,送风口设置在空腔右下侧,出风口设置在左上侧,风口距离集热器两侧均为 200 mm。系统的几何模型如图 4 所示。

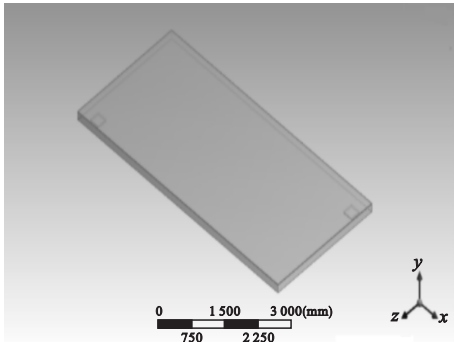


图 4 优化系统几何模型

Fig. 4 Geometric model of optimized system

模拟使用工况为冬季工况,根据沈阳地区历史气象数据,冬季白天室外平均温度设定为 - 5℃,室外风速为 3 m/s,代入式(1)<sup>[15]</sup>,计算得出集热器外壁换热系数为 17.1 W/(m<sup>2</sup>·K)。

$$h_{out} = 5.7 + 3.8v_{out} \tag{1}$$

式中:  $h_{out}$  为外壁面对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $v_{out}$  为室外风速, m/s。

在模型设置过程中,认定 PVT 集热器系统为恒定热源且处于准稳态。模拟边界条件

设置如下:PVT 集热器空腔进风口设置为质量流量入口,根据风机选型,设定入口流量为 2 800 m<sup>3</sup>/h,即质量流率为 1.003 kg/s;初始表压设置为 101 325 Pa,出风口设定为自由出流边界。PVT 集热器设定为恒定热源,辐射强度为 450 W/m<sup>2</sup>。集热器空腔除光伏背板侧外,其余界面均设置为绝热条件;考虑集热器外壁存在自然对流,并与空腔内空气对流换热,流体与集热板的换热面设置为耦合边界。

模拟的初始条件为:集热器外表面温度等于室外空气温度,空腔内空气温度与室内空气温度相等。PVT 集热器为恒定热源,厚度为 200 mm,Energy 项初始根据辐射温度设置为 22 500 W/m<sup>3</sup>。初始化选择从系统的速度入口开始,使用 patch 面板设定空腔初始温度为 283 K。

利用 Mesh 对几何模型进行网格划分,总体网格划分和局部网格划分情况如图 5 所示。开启能量方程模型、RNG *k-ε* 模型和 DO(Discrete Ordinates) 辐射模型,进行系统换热过程模拟。

PVT 集热系统从太阳能获得的热量计算如下:

$$Q_s = \dot{m} C_p (T_o - T_a). \tag{2}$$

$$\dot{m} = \rho V. \tag{3}$$

式中: $\dot{m}$  为热空气质量流量,kg/h; $V$  为空气体积流量,m<sup>3</sup>/h; $\rho$  为空气密度,kg/m<sup>3</sup>; $C_p$  为空气比热容,J/(K·kg); $T_o$  为 PVT 系统出口温度,K; $T_a$  为环境温度,K。

系统的瞬时热效率  $\eta_s$  计算公式:

$$\eta_s = \frac{Q_s}{SA_s}. \tag{4}$$

式中: $S$  为太阳辐射强度,W/m<sup>2</sup>; $A_s$  为 PVT 系统集热面积,m<sup>2</sup>。

2.2 模拟结果分析

从集热器物性参数和外界环境两方面进行优化模拟研究。在物性参数方面,对集热器空腔厚度、出风口尺寸及双出风口情况下出风口间距进行优化,在外界环境方面对集热器工作外界环境温度进行研究。模拟结果从集热器换热效率及空腔内温度场分布两方面进行分析,完成对 PVT 集热器的优化研究。

2.2.1 空腔厚度优化

优化模型初始空腔厚度为 140 mm,使用 Fluent 软件进行减小空腔厚度的模拟,空腔进、出风口宽×高均设置为 250 mm×250 mm,为右下进左上出的空气流向。以 20 mm 为步长,设定空腔厚度分别为 140 mm,120 mm,100 mm,80 mm,60 mm 的 5 种情况,分别进行模拟。空腔内温度云图选择空腔中心截面,即分别为  $Y = 0.07$  m, $Y = 0.06$  m, $Y = 0.05$  m, $Y = 0.04$  m 和  $Y = 0.03$  m 的截面,温度场模拟云图如图 6 所示。

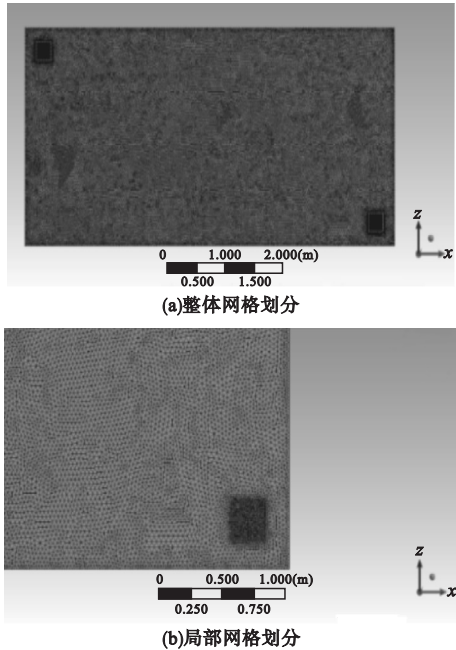
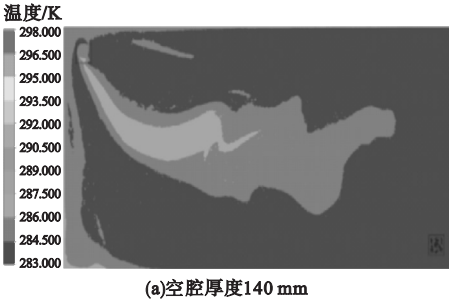


图5 优化模型网格划分



(a)空腔厚度140 mm

Fig. 5 Optimized model mesh division



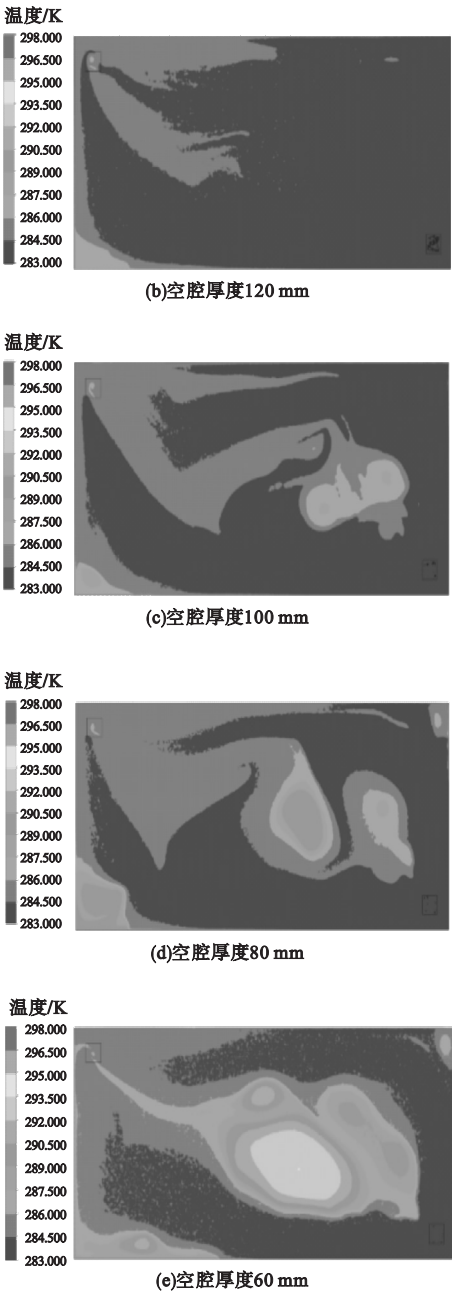


图6 不同空腔厚度下空腔中心截面温度场分布  
Fig. 6 Temperature field distribution of the cavity center cross-section at different cavity thicknesses

从图6可以看出,空腔厚度较大的时候空腔内温度均匀偏低,换热效果较差,出口温度偏低,因此系统热效率不高,在空腔厚度为140 mm的情况下只有22.88%。随着空腔厚度减小,空腔内温度升高,换热逐渐充分,热效率提高。但由于总风量不变,空腔变窄

的同时会造成空气流速增加,因此会出现“死区”现象,即换热不充分的现象(见图6(e))。

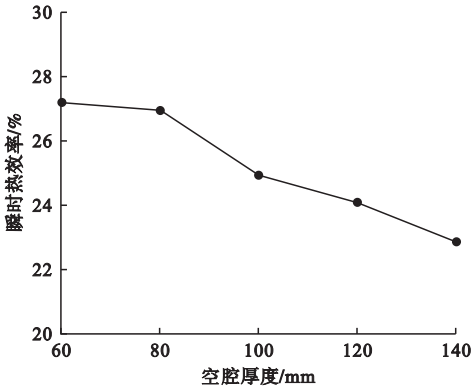


图7 变空腔厚度热效率曲线

Fig. 7 The thermal efficiency of the system with different cavity thickness

图7为空腔厚度变化时系统热效率的变化趋势,可以看出,当空腔厚度为60 mm时,热效率虽然对比厚度80 mm的情况有0.23%的上升,但是空腔内换热效果较差,形成热量聚集,并出现较为严重的局部换热不均匀现象;当空腔厚度为80 mm时系统热效率可以达到26.98%,对比空腔厚度100 mm的情况有2.03%的提升,且空腔内换热较为充分。因此对比几组的空腔温度场和换热效率,最终确定优化后空腔厚度为80 mm,与原模型相比,换热效率提升了4.1%。

2.2.2 出风口尺寸优化

模型进、出风口均位于空腔背侧,宽×高为250 mm×250 mm的正方形风口。模拟增大空腔出风口尺寸,在进风口尺寸不变的情况下,将出风口宽×高增加为350 mm×350 mm,450 mm×450 mm,550 mm×550 mm和650 mm×650 mm,模拟过程依然保持总风量不变,此时空腔厚度按照之前的优化结果定为80 mm。增大出风口面积的同时,依然保持正方形风口,来消除风口形状变量的影响。按照80 mm空腔厚度,截面依然选取在Y=0.04 m处,其温度分布云图见图8。

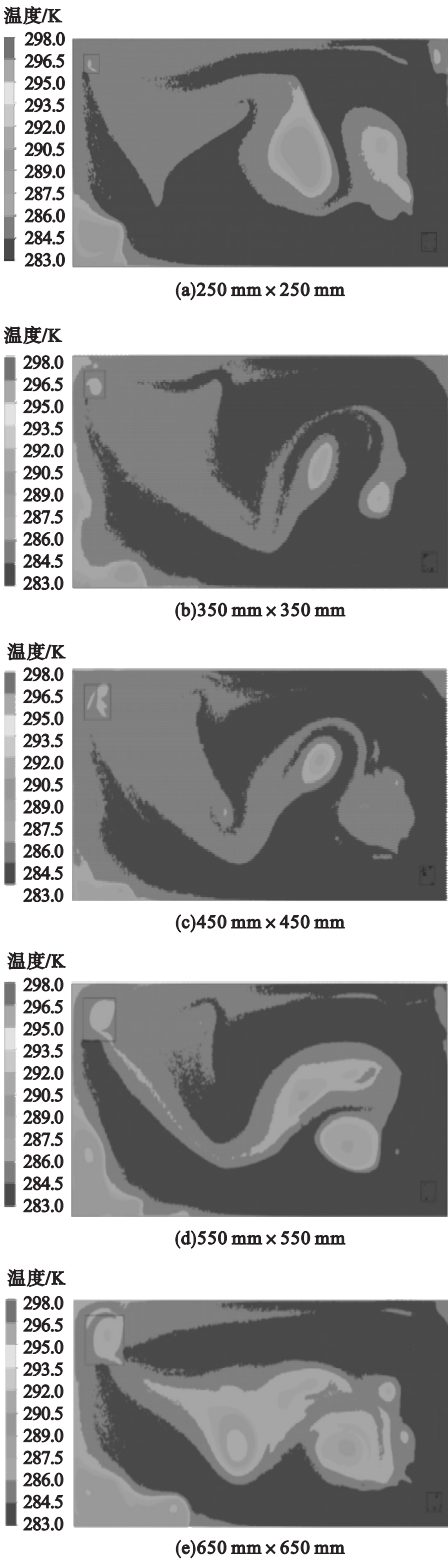


图8 不同变出风口尺寸下截面温度场分布

Fig.8 Temperature field distribution at variable air outlet size

图9是在改变出风口尺寸的情况下,系统热效率的变化曲线。可以看出,在出风口尺寸增大的过程中,系统热效率总体上呈现出上升的趋势。根据图8的温度云图,对比其他情况,在出风口为边长350~450 mm正方形的阶段,空腔内换热效果良好,局部温度不均匀现象减弱。根据热效率图像,当出风口宽×高为350 mm×350 mm时,其出风口温度为285.43 K,系统热效率较高,可以达到27.58%;而当出风口宽×高增加到450 mm×450 mm时,出风口平均温度有所降低,只有285.31 K,热效率为25.60%。因此,综合考虑选择优化出风口宽×高为350 mm×350 mm,此时,系统的换热效率可以进一步提升0.6%。

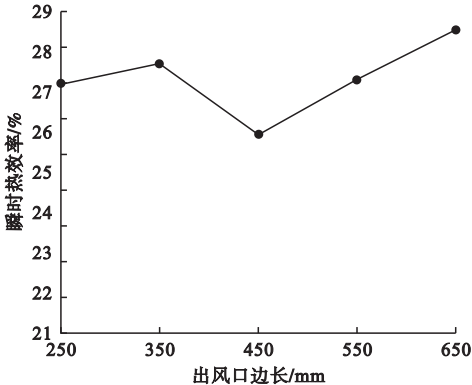


图9 变出风口边长热效率曲线

Fig.9 The thermal efficiency of the system with variable air outlet size

2.2.3 双出风口间距优化

随着出风口面积的增加,总体的换热效率呈现上升的趋势,因此考虑双出风口对空腔换热过程的影响。在原有右下送左上出的送、出风口模式的基础上,出风口右侧增加一个出风口,两个出风口宽×高均为250 mm×250 mm。调整两出风口间距,比较得出风口的较佳布置方式。

在原出风口右侧增加一个同样尺寸的出风口对空腔内换热有较好的改善作用(见图10)。但由于在原出风口右侧新增一个出风口,部分空气未进行完全换热就已经流出空

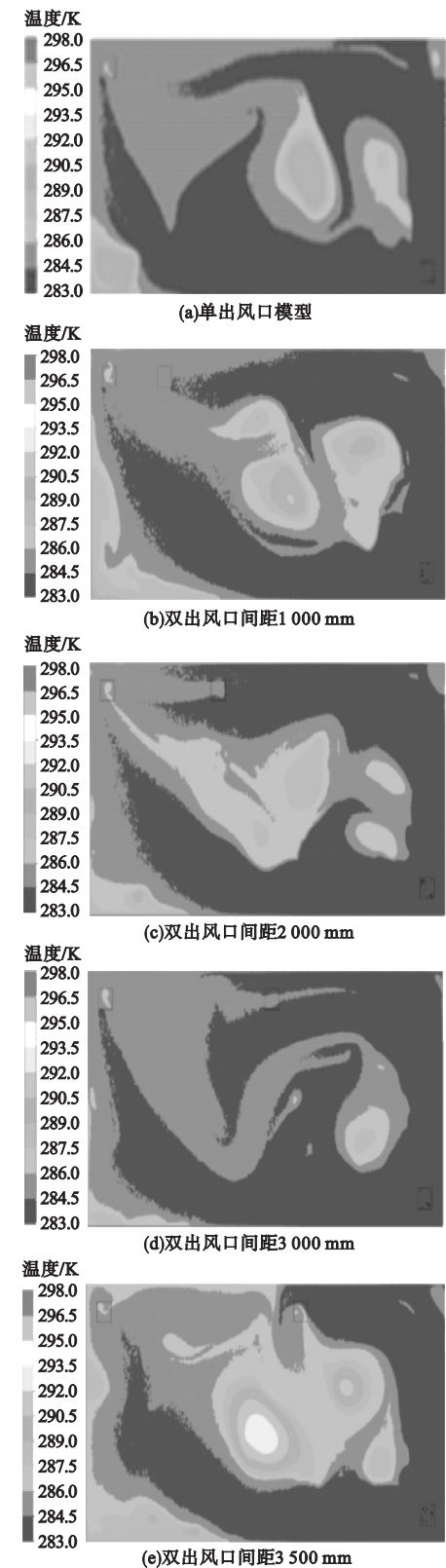


图 10 改变出风口间距  $Y=0.04$  m 处温度场分布

Fig. 10 Temperature field distribution on the  $Y=0.04$  m cross section at different air outlets spacing distance

腔。因此在增加出风口间距的同时,系统换热效率呈下降趋势(见图 11)。随着出风口间距的增加,直到增加到 3 000 mm,空腔内温度分布趋于均匀。PVT 集热器总长度为 6 400 mm,当两风口间距大于集热器总长度的一半,如图 10(e)所示。间距增大到 3 500 mm 时,空腔内“死区”现象再次严重。可以得出,当两出风口间距不大于 PVT 集热器总长度一半时,风口布置越均匀,空腔内温度场分布越均匀。

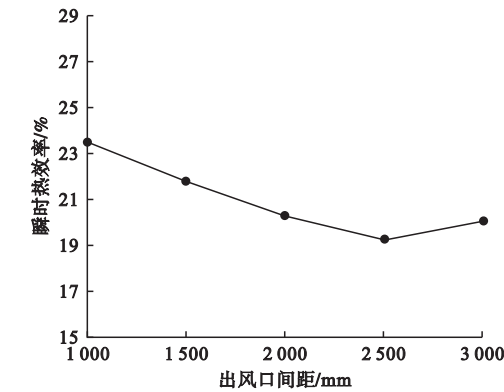
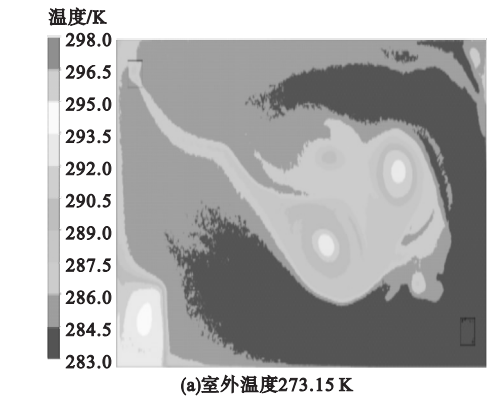


图 11 变双出风口间距热效率曲线

Fig. 11 The thermal efficiency curve of the system with different spacing distances of dual air outlets

2. 2. 4 室外环境温度

光伏幕墙运行地点位于严寒地区,冬季室外平均温度较低,因此考虑室外环境温度对幕墙换热效果的影响。模拟选用单出风口模型,空腔厚度 80 mm,风口宽  $\times$  高为 250 mm  $\times$  250 mm。在  $Y=0.04$  m 处的模拟温度云图如图 12 所示。



(a)室外温度273.15 K

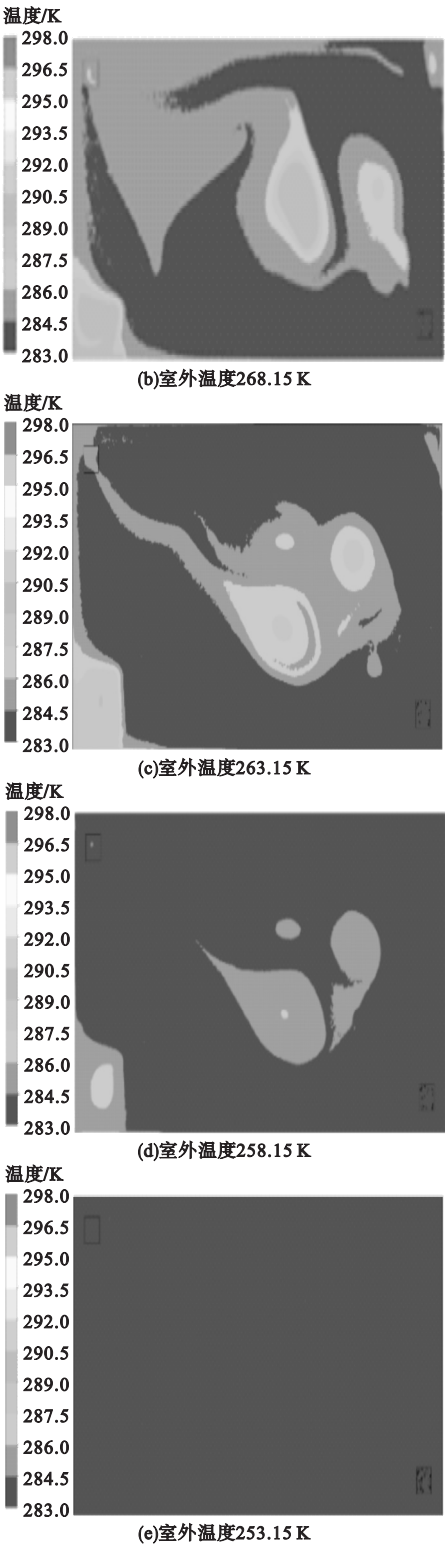


图 12 改变室外环境温度  $Y=0.04\text{ m}$  处温度场分布

Fig. 12 Temperature field distribution on the  $Y=0.04\text{ m}$  cross section under the different ambient temperature

图 12 展示了在  $-20\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  内五种室外温度下幕墙内部温度分布,可以看出,随着室外温度的下降,空腔内温度上升量逐渐减小。图 13 为不同室外温度下空腔的换热效率,可以得出换热效率的下降与室外温度的下降几乎成正比,当室外温度只有  $253.15\text{ K}$  时,光伏幕墙换热效率下降到  $2.34\%$ 。因此,在光伏幕墙系统运行的过程中,室外温度对系统换热效率有很大的影响,室外温度每下降  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,系统瞬时热效率平均下降  $8\%$  左右。

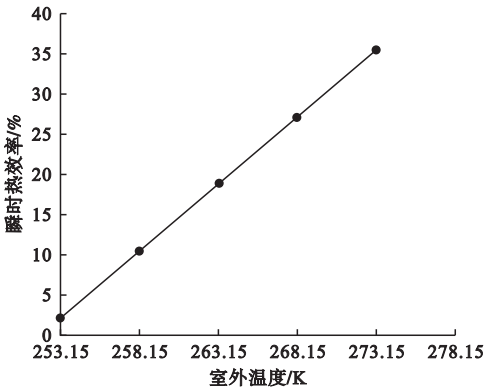


图 13 变室外温度条件下热效率曲线

Fig. 13 The thermal efficiency curve of the system at the different ambient temperature

3 结 论

- (1) 优化后空腔厚度设定为  $80\text{ mm}$ ,热效率与原模型相比提升  $4.1\%$ ;在此基础上将出风口宽  $\times$  高优化为  $350\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ ,系统热效率进一步提升  $0.6\%$ 。比较而言,空腔厚度优化对系统热效率的影响较大。
- (2) 双出风口的情况下,当两出风口间距不大于 PVT 集热器总长度一半时,风口布置越均匀,空腔内温度场分布越均匀。
- (3) 室外温度变化时,平均室外温度每下降  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,瞬时热效率下降约  $8\%$ 。因此室外环境温度越高,系统的换热效果越好。

参考文献

[1] 冯国会,王禹涵,黄凯良,等. 新型太阳能集热器设计与测试研究[J]. 沈阳建筑大学学报



- (自然科学版),2017,33(2):354-362.  
(FENG Guohui, WANG Yuhua, HUANG Kailiang, et al. Study on design and test of a novel solar collector [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2017, 33 (2):354-362. )
- [2] 王宝群,姚强,宋菁,等. 光伏/光热(PVT)系统概况与评价[J]. 太阳能学报,2009,30(2):193-200.  
(WANG Baoqun, YAO Qiang, SONG Qiang, et al. Photovoltaic-thermal (PVT) systems and their evaluation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2009, 30(2):193-200. )
- [3] 于佳禾,许盛之,韩树伟,等. 太阳能电池与光伏组件的温度特性及其影响因素的分析[J]. 太阳能,2018(3):29-36.  
(YU Jiahe, XU Shengzhi, HAN Shuwei, et al. Analysis of temperature characteristics and influence factors of solar cells and PV modules [J]. Solar energy, 2018(3):29-36. )
- [4] 王宝群,姚强,宋菁,等. 太阳能光伏/光热集热器设计与性能研究[J]. 燃气轮机技术,2009,22(1):66-72.  
(WANG Baoqun, YAO Qiang, SONG Qiang, et al. Design and performance research on photovoltaic-thermal (PVT) collectors [J]. Gas turbine technology, 2009, 22(1):66-72. )
- [5] 梁子伟,简林桦,闫金州,等. PV/T集热器优化设计及实验[J]. 化工进展,2016,35(5):1326-1331.  
(LIANG Ziwei, JIAN Linhua, YAN Jinzhou, et al. Optimization design and experimental study on collector of photovoltaic/thermal [J]. Chemical industry and engineering progress, 2016, 35(5):1326-1331. )
- [6] 秦红,沈辉,张仁元,等. 温度对太阳能电池效率的影响及改善方法分析[C]//第8届全国光伏会议论文集. 北京:中国轻工业出版社,2004:612-616.  
(QIN Hong, SHEN Hui, ZHANG Renyuan, et al. Influence of temperature on solar cell efficiency and analysis of improvement methods [C]//Proceedings of the 8th National Photovoltaic Conference. Beijing: China light industry press. 2004:612-616. )
- [7] LAI C, HOKOI S. Experimental and numerical studies on the thermal performance of ventilated BIPV curtain walls [J]. Indoor and built environment, 2017, 26(9):1243-1256.
- [8] ZHENG X, LI W. Facade ventilation design of new building photovoltaic curtain wall in cold city [C]//2015 International conference on automation, mechanical control and computational engineering. Atlantis Press, 2015:797-802.
- [9] MARTIN-CHIVELET N, GUTIERREZ J C, ALONSO-ABELLA M, et al. Building retrofit with photovoltaics: Construction and performance of a BIPV ventilated façade [J]. Energies, 2018, 11(7):1719.
- [10] PENG J, LU L, YANG H, et al. Comparative study of the thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic façade under different ventilation modes [J]. Applied energy, 2015, 138:572-583.
- [11] PREET S, SHARMA M K, MATHUR J, et al. Performance evaluation of photovoltaic double-skin facade with forced ventilation in the composite climate [J]. Journal of building engineering, 2020, 32:101733.
- [12] WANG Y, TIAN W, REN J, et al. Influence of a building's integrated-photovoltaics on heating and cooling loads [J]. Applied energy, 2006, 83(9):989-1003.
- [13] 田玮. 光伏建筑的性能优化及其与城市微气候的相互影响[D]. 天津:天津大学,2006.  
(TIAN Wei. Performance optimization of building integrated photovoltaics and its interaction with urban microclimate [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. )
- [14] 冯国会,徐小龙,王悦,等. 以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6):1069-1077.  
(FENG Guohui, XU Xiaolong, WANG Yue, et al. Sensitivity analysis of nearly zero energy buildings envelope design parameters based on energy consumption [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2018, 34 (6):1069-1077. )
- [15] 郭振武. 建筑一体化太阳能光伏组件的通风散热分析[J]. 华东电力, 2012, 40(12):2216-2219.  
(WU Zhenwu. Ventilation and heat dissipation of construction integration PV modules [J]. East China electric power, 2012, 40(12):2216-2219. )
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)