

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-163-12

太阳能光催化热电型 Trombe 墙综合性能分析

邓杰泓¹ 蔡阳^{1,2} 何建炜¹ 周泽宇¹ 赵福云³

(1. 暨南大学国际能源学院 珠海 519070;

2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510640;

3. 武汉大学动力与机械学院 武汉 430072)

【摘要】 为实现太阳能有序利用,提高太阳能利用效率,提出一种具有空气净化、热电发电、采暖通风等多功能的新型光催化热电 Trombe 墙。研究了在冬季供暖模式下,通过系统的发电、净化空气、供暖来减少建筑的能源负荷,探讨不同太阳辐射强度、不同流道高度和宽度对系统的性能影响并进行分析。结果表明:随着太阳辐射强度的增大,系统的总效率逐渐增大;随着流道高度的增大,系统的总效率逐渐减小;随着流道宽度的增大,系统的总效率逐渐增大;综合各条件,在太阳辐射强度为 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、流道高度为 1m、流道宽度为 0.06m 时,本系统的总效率达到最大值为 33.92%。本研究将对建筑墙体性能提升和污染物净化提供了理论和技术基础。

【关键词】 光催化; 温差发电; Trombe 墙; 性能分析

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Comprehensive Performance Analysis of Solar Photocatalytic Thermoelectric Trombe Wall

Deng Jiehong¹ Cai Yang^{1,2} He Jianwei¹ Zhou Zeyu¹ Zhao Fuyun³

(1. International Energy College, Jinan University, Zhuhai, 519070;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou, 510640;

3. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072)

【Abstract】 In order to realize the orderly utilization of solar energy and improve the utilization efficiency of solar energy, a novel photocatalytic thermoelectric Trombe wall with air purification, thermoelectric power generation, heating and ventilation was proposed. In this paper, the energy load of the building can be reduced through the system's power generation, air purification and heating under the winter heating mode. The influence of different solar radiation intensity and different flow channel height and width on the system performance is discussed and analyzed. The results show that with the increase of solar radiation intensity, the total efficiency of the system increases gradually. With the increase of the height of the flow channel, the total efficiency of the system decreases gradually. With the increase of channel width, the total efficiency of the system increases gradually. When the solar radiation intensity is $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, the channel height is 1 m, and the channel width is 0.06 m, the maximum efficiency of the system is 33.92%. This study will provide a theoretical and technical basis for building wall performance improvement and pollutant purification.

【Keywords】 Photocatalytic; thermoelectric power generation; Trombe wall; performance analysis

基金项目: 中国博士后科学基金 (2020M683189); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放基金 (2021ZA01); 广东省基础与应用基础研究基金联合基金青年基金项目 (2020A1515110598); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (21622417)

作者简介: 邓杰泓 (2002-), 男, 本科, E-mail: 2449526606@qq.com

通讯作者: 蔡阳 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为可持续能源与建筑环境, E-mail: thomascai301@163.com

收稿日期: 2022-10-24

0 引言

建筑能耗约占全球能源消耗的 40%^[1], 而人们对室内环境舒适性的需求可能会导致建筑能耗的继续增加。为了有效减少建筑能耗, 大量学者提出使用被动式围护结构, 利用太阳能来降低建筑的能源负荷。对已经建成的建筑的维护结构等实施节能改造的活动, 完成改造后的建筑节能率可以达到 65%^[2]。其中 Trombe 墙具有成本低、易与建筑立面结合、供热量大、提供新鲜空气等优点, 因此, 其可以降低建筑能耗, 减少建筑的能源负荷。

大量学者已经进行研究并将 Trombe 墙应用于建筑被动式采暖系统中。但传统 Trombe 墙的功能过于单一, 大大限制了其发展和应用。为了丰富传统 Trombe 墙的功能, 有学者将传统 Trombe 墙与光催化技术、热催化技术、光伏发电技术、热电发电技术相结合组成多功能型 Trombe 墙。刘珊珊等^[3]提出了一种零能耗光催化型 Trombe 墙系统, 实验结果表明, 其系统的空气平均集热效率为 26.7%, 与传统型 Trombe 墙相比下降 20%; 系统的甲醛降解效率为 20%~40%。Yu 等^[4]提出了热催化 Trombe 墙, 系统可以完全由太阳能驱动, 同时实现室内空气净化和空间供暖, 实验结果表明, 日空气热效率为 41.3%, 日新风总体积和甲醛总降解量为 249.2m³·m⁻² 和 208.4mg·m⁻²。吴双应等^[5]提出了光伏光催化型 Trombe 墙, 研究了室内外环境温度对 Trombe 墙的性能和功能的影响, 结果表明, 室外温度的升高和室内温度的降低能够提高系统性能。为提高对太阳光谱的利用效率, 实现同时利用光能和热能, Luo 等^[6]提出了光伏热电型 Trombe 墙, 对亚热带气候下的墙体性能进行数值研究, 从研究结果可以看出, 光伏热电型 Trombe 墙的节能率接近 480%, 其他城市每年可节约 29.19kWh·m⁻²~62.94kWh·m⁻² 的能量。此外, Cai 等^[7]探讨了光伏热电耦合系统性能, 实验结果表明, 光伏系统是造成光伏热电耦合系统损失的主要元件, 其损失可达到 70%以上。

有学者在研究建筑被动式采暖系统时, 通过优化 Trombe 墙的结构, 来达到系统更优的性能。Pourghorban 等^[8]提出了通过改进玻璃单元的规格来提高 Trombe 墙的效率的方案, 结果表明, 采用先进的玻璃装置的 Trombe 墙, 供暖时间缩短 48.8%, 舒适度改善 23.9%, 但平均增加了 22.7%

的冷却时间和 2.2%的过热时间。Islam 等^[9]研究出光伏系统与 Trombe 墙体系统 (PVTW) 的集成在建筑热负荷调节和电能生产方面是有效的。通过增加百叶窗, 可以调节空气流通量, 提供遮阳。通过在两种配置的气隙中安装一个带有最佳角度为 60° 的百叶窗, 可以系统地调节测试室内的温度。采用 PVTW 配置时, 百叶窗的最高温度比采用 TW 配置时低 4.7℃。Hernandez 等^[10]研究发现, 透过透明墙的热损失约占接收太阳辐射的 60%, 但系统仍能保持室内温度在 35℃以上。在墨西哥两个气候寒冷的城市最冷的日子里, 系统最大的能量储存大约是 109MJ, 最热的日子里大约是 70MJ, 在没有日照的时候, 由蓄热墙供应能量给室内的空气。

本文将传统 Trombe 墙与光催化技术结合, 考虑对太阳能全光谱的利用, 再与热电发电技术相结合, 提出了具有空气净化、热电发电、采暖通风等功能的光催化热电型 Trombe 墙。尽管热电发电效率比光伏低, 但热电材料处于实验室研发阶段, 热电材料的性能也在不断提升, 其在太阳能综合利用方面的潜力是可以预见的。利用集总参数法对该耦合模型进行数值模拟分析, 讨论不同太阳辐射强度、不同流道高度、不同流道宽度对系统运行性能和功能的影响。本研究可以进一步优化系统的结构, 增强其节能潜力, 并对建筑墙体性能提升和污染物净化提供了理论和技术基础。

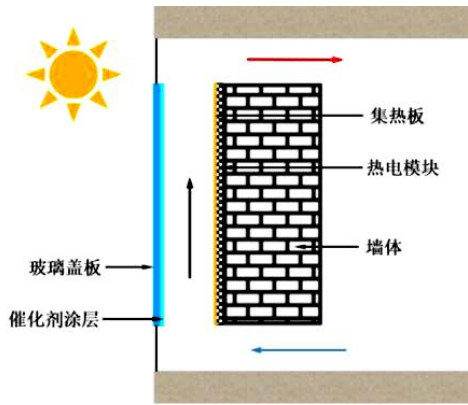
1 物理和数学模型

1.1 物理模型

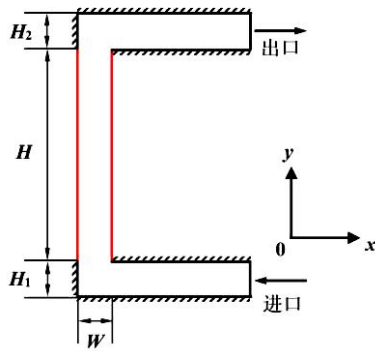
光催化热电型 Trombe 墙安装在建筑物朝南的墙壁上, 其物理模型如图 1 (a) 所示。其由五部分组成: 玻璃盖板、TiO₂ 催化剂涂层、空气流道、集热板、热电发电模块。当系统运行时, TiO₂ 涂层吸收太阳辐射中的紫外光, 用以光催化降解流道内空气中的甲醛, 而未被利用的可见光和红外光被集热板吸收。集热板将吸收到的太阳辐射, 以热能的形式使集热板温度上升, 一部分将集热板周围的空气加热, 使流道内空气产生一定的压强差, 形成自然对流, 让净化后的热空气通过流道出口进入室内, 达到采暖和净化空气的目的; 另一部分集热板作为热源为热电模块提供热流, 热电模块冷热端出现温差, 由塞贝克效应产生电流, 为建筑供电。

1.2 数学模型

基于图 1 的物理模型, 简化后的数学模型如图 1 (b)。整个系统模型的结构参数如表 1 所示。其中, 本文主要研究流道的高度、宽度以及太阳辐射强度对本系统运行性能的影响, 故流道高度 (玻璃盖板高度) 根据需要调整为 1m、1.4m、1.8m、2.2m、2.6m、3m; 流道间距和进出口高度根据需要调整为 0.02m、0.04m、0.05m、0.06m、0.08m、0.10m。



(a) 结构示意图



(b) 简化模型图

图 1 光催化热电型 Trombe 墙结构示意图及其简化模型图

Fig.1 Schematic diagram and simplified model of photocatalytic thermoelectric Trombe wall

表 1 几何参数

Table 1 Geometrical parameter

参数	描述	值
H	玻璃盖板高度	1 m
D	玻璃盖板宽度	0.5 m
W_g	玻璃盖板厚度	0.05 m
W_a	流道间距	0.05 m
H_1	流道进口高度	0.05 m
H_2	流道出口高度	0.05 m
W_p	集热板厚度	0.0005 m
W_w	墙体厚度	0.3 m

在模型建立的过程中, 为简化数值计算, 做以下假设:

- (1) Trombe 墙的所有表面都是粗糙表面和灰体表面^[11];
- (2) 模型中所需的物性参数皆为常数^[12];
- (3) TiO_2 涂层只吸收紫外光^[13];
- (4) 流道内的气体视为理想气体, 只参与对流换热^[12];
- (5) 热电模块均匀分布, 热电模块之间的空隙视为绝热。

1.2.1 能量平衡分析

对玻璃盖板, 室外环境空气在玻璃盖板外表面形成对流进行能量交换, 天空直接辐射到玻璃盖板进行能量交换, 流道内空气在玻璃盖板内表面形成对流进行能量交换, 集热板与玻璃盖板相互辐射进行能量交换, 玻璃盖板吸收太阳辐射, 其能量平衡方程为:

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dt} = h_{amb,g} A(T_{amb} - T_g) + h_{sky,g} A(T_{sky} - T_g) + h_{a,g} A(T_a - T_g) + h_{p,g} A(T_p - T_g) + \alpha_g G A \quad (1)$$

其中的参数由公式 (2)^[14]、公式 (3)^[15]、公式 (4)^[15]、公式 (5)^[16]、公式 (6)、公式 (7)、公式 (8)^[16] 计算:

$$T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (2)$$

$$h_{amb,g} = 5.7 + 3.8 u_{amb} \quad (3)$$

$$h_{sky,g} = \sigma \varepsilon_g (T_g^2 + T_{sky}^2)(T_g + T_{sky}) \quad (4)$$

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670 Ra^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}}, Ra < 10^9$$

$$Nu = \{0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}}\}^2, Ra > 10^9 \quad (5)$$

$$Ra = \frac{g \beta (T_g - T_a) H^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

$$h_{a,g} = \frac{Nu \lambda}{H} \quad (7)$$

$$h_{p,g} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_g^2)(T_p + T_g)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (8)$$

表 2 符号及意义

Table 2 Symbols and Meanings

符号	意义	单位
m	质量	kg
c	比热容	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
T	温度	K
A	面积	m^2
G	太阳辐射强度	$W \cdot m^{-2}$
h	换热系数	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
u	速度	$m \cdot s^{-1}$
σ	斯蒂芬玻尔兹曼常数	$5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
β	空气热膨胀系数	K^{-1}
ν	动力粘度	$m^2 \cdot s^{-1}$
α	热扩散系数	$m^2 \cdot s^{-1}$
H	高度	m
λ	导热系数	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	密度	$kg \cdot m^{-3}$
d	水力直径	m
V	体积	m^3
I	电流	A
C	甲醛浓度	ppb
h_m	传质系数	$m \cdot s$
D_{HCHO}	甲醛扩散系数	$18.6 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ ^[21]
k_{app}	反应系数	$m \cdot s^{-1}$
R	通用气体常数	
ε	发射率	
α_g	玻璃盖板吸收率	
α_p	集热板吸收率	
Pr	普朗特数	
Ra	瑞利数	
f	阻力系数	
x	流道截面纵横比	
τ	透射率	
N	数量	
Sh	舍伍德数	
Le	刘易斯数	
下标		
g	玻璃盖板	
amb	室外环境	
a	流道空气	
p	集热板	
sky	天空	
in	进口	
out	出口	
te	热电模块	
w	墙体	
$room$	室内空气	

对流道内的空气,流道内空气在玻璃盖板内表

面形成对流进行能量交换,流道内空气在集热板表面形成对流进行能量交换,流道进出口空气温度差形成的能量变换,其能量平衡方程为:

$$m_a c_a \frac{dT_a}{dt} = h_{g,a} A (T_g - T_a) + h_{p,a} A (T_p - T_a) - \rho_a u_a c_a A_a (T_{out} - T_{in}) \quad (9)$$

其中的参数由公式(10)^[17]、公式(11)^[18](层流)、公式(12)^[19](紊流)计算:

$$u_a = \sqrt{\frac{g\beta(T_{out} - T_{in})H}{f_{in}(\frac{A_a}{A_{in}})^2 + f_{out}(\frac{A_a}{A_{out}})^2 + f(\frac{H}{d})}} \quad (10)$$

$$f = 96Re^{-1}(1 - 1.20244x + 0.88119x^2 + 0.88819x^3 - 1.69812x^4 + 0.72366x^5) \quad (11)$$

$$f = 0.3164Re^{-0.25} \quad (12)$$

对集热板,玻璃盖板与集热板相互辐射进行能量交换,流道内空气在集热板表面形成对流进行能量交换,热电模块与集热板进行热传导,其能量平衡方程为:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h_{g,p} A (T_g - T_p) + h_{a,p} A (T_a - T_p) + \tau_g \alpha_p A G + h_{te,p} N A_{te} (T_{te} - T_p) \quad (13)$$

对墙体,室内环境与墙体进行能量交换,保持室内温度不变,热电模块与墙体进行热传导,其能量平衡方程为:

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = h_{amb,w} A (T_{room} - T_w) + h_{te,w} N A_{te} (T_{te} - T_w) \quad (14)$$

对热电模块,一端与集热板进行热传导,另一端与墙体进行热传导,其能量平衡方程为:

$$\rho_3 c_3 \frac{dT_{te}}{dt} = \frac{d}{dx} (\lambda_3 \frac{dT_{te}}{dx}) + r_3 \frac{I^2}{A_{te}^2} \quad (15)$$

$$\rho_j c_j \frac{dT_{te}}{dt} = \frac{d}{dx} (\lambda_j \frac{dT_{te}}{dx}), j = 1, 2, 4, 5$$

1.2.2 质量平衡分析

以甲醛为主要污染物进行分析,其反应过程主要与流道的流速、流道高度、流道宽度、对流传质系数以及催化反应速率等参数相关。空气中甲醛与催化剂表面进行对流传质,流道进出口甲醛浓度差形成的质量变换,其方程为:

$$V_a \frac{dC}{dt} = -u_a A_a (C_{out} - C_{in}) + h_m A (C_s - C) \quad (16)$$

其中的参数由公式(17)^[20]、公式(18)、公式(19)^[22]、公式(20)^[12]、公式(21)^[23]计算:

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{HCHO}}{d} \quad (17)$$

$$Sh = NuLe^{1/3} \quad (18)$$

$$C_s = \frac{C}{1 - k_{app} / h_m} \quad (19)$$

$$k_{app} = \frac{k'_{HCHO} G_{UV}^n e^{(-\frac{E_{HCHO}}{RT_s})} K'_{HCHO} e^{(-\frac{H_{HCHO}}{RT_s})}}{1 + K'_{HCHO} e^{(-\frac{H_{HCHO}}{RT_s})} C_s} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} n = 1, & \text{ 弱太阳辐射强度} \\ n = 0.2, & \text{ 中等太阳辐射强度} \\ n = 0, & \text{ 强太阳辐射强度} \end{aligned} \quad (21)$$

表 3 反应参数

Table 3 Response parameter

反应参数	数值
k'_{HCHO}	4800 ppb·m·s ⁻¹
K'_{HCHO}	51298 ppb ⁻¹
E_{HCHO}	19.020 J·mol ⁻¹
H_{HCHO}	-13.252 J·mol ⁻¹

1.2.3 性能评价参数

本文提出得热量 Q 的概念来评价光催化热电型 Trombe 墙的热性能。得热量 Q , 即室内空气在通过系统运行后获得的热量, 也即在冬季供暖模式下, 为维持室内恒定温度所减少的建筑能耗。因此, 得热量 Q 为:

$$Q = 3600(\rho_a u_a c_a A_a (T_{out} - T_{in}) + h_{amb,w} A (T_w - T_{room})) \quad (22)$$

从式 (22) 可以看出, 得热量 Q 表示的是一个小时内室内空气得到的热量, J·h⁻¹。

热效率 η_{th} 为:

$$\eta_{th} = \frac{3600 u_a A_a \rho_a c_a (T_{out} - T_{in})}{AG} \quad (23)$$

净化空气量 $CADR$ 为:

$$CADR = 3600 u_a A_a \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (24)$$

从式 (24) 可以看出, 净化空气量 $CADR$ 表示的每小时产生相对进口空气来讲已经清除掉 100% 的甲醛的空气, m³·h⁻¹。

等效降解效率 η_{HCHO} 为:

$$\eta_{HCHO} = \frac{P_{HCHO}}{AG} \quad (25)$$

Yu 等^[24]通过空气净化器的性能参数 $CADR$ 、

功率等, 计算出空气净化器输送等量净化后的空气所需要的电能, 以此来代替系统降解甲醛所消耗的能量。其中, 平均 10.8kJ 的电能能产生 1 m³ 的清洁空气量。

引入热电发电强度 Z 来评价光催化热电型 Trombe 墙的发电性能。

$$Z = \frac{P_e}{A} \quad (26)$$

由式 (26) 可以看出, 热电发电强度 Z 表示每平方米的发电功率, W·m⁻²。

发电效率 η_e 为:

$$\eta_e = \frac{P_e}{AG} \quad (27)$$

式中, P_e 为所有热电模块的发电功率, W。

总效率为:

$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{HCHO} + \eta_e \quad (28)$$

1.2.4 模型验证

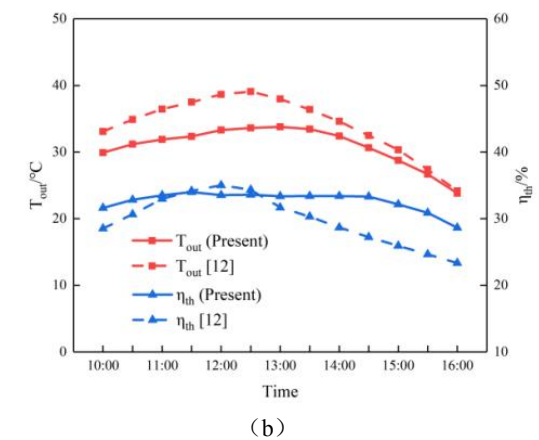
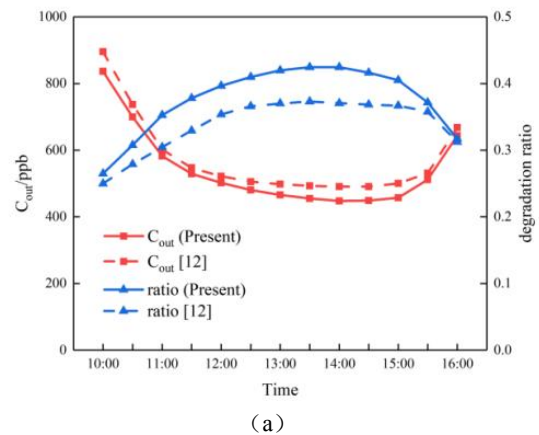


图 2 模型验证

Fig.2 Model validation

本文使用 MATLAB 对公式 (1)、公式 (9)、

公式 (13)、公式 (14)、公式 (15)、公式 (16) 进行迭代求解，其中验证过程中所使用的工况与 Yu 等^[12]的实验模型一致，本模型的数值计算结果与 Yu 等的实验结果进行比较验证，由图 2 (a) 和图 2 (b) 可以看出，计算结果与实验结果具有相同的变化趋势，Trombe 墙的出口温度 T_{out} 、热效率 η_{th} 、出口浓度 C_{out} 、降解率 $ratio$ 的平均相对误差分别约为 8.8%、8.9%、5.7%、9.7%，可以认为使用本模型进行数值求解是可靠的。

2 结果分析与讨论

为实现太阳能全光谱的利用，研究光催化热电型 Trombe 墙的节能潜力，讨论了不同太阳辐射强度、不同流道高度、不同流道宽度下系统的热性能、空气净化性能以及热电发电性能。综合考虑不同建筑物墙体的参数，本文讨论的流道高度在 1m 到 3m 之间，流道宽度在 0.02m 到 0.10m 之间。考虑

一天 24 小时太阳辐射强度不同，本文讨论的太阳辐射强度在 $100W \cdot m^{-2}$ 到 $800W \cdot m^{-2}$ 。在本文的研究中，以下参数不变：室内甲醛浓度和入口甲醛浓度为 900ppb，室内温度和入口温度为 $25^{\circ}C$ ，室外温度为 $0^{\circ}C$ ，室外环境风速为 $1m \cdot s^{-1}$ ，热电发电模块数量为 $200 \text{个} \cdot m^{-2}$ 。同时，考虑到催化剂涂层会降低玻璃盖板透光率，因此本文在初始化设定时已经加入催化剂涂层的影响因素，将玻璃盖板透光率设定为 Yu 等通过实验测定的催化剂涂层玻璃的透光率 0.75^[12]。

2.1 流道的高度 H 和宽度 W 的影响

在本节中，保持太阳辐射强度为 $800W \cdot m^{-2}$ ，研究了流道高度 H 从 1m 增加到 3m、流道宽度 W 从 0.02m 增加到 0.10m 时的光催化热电型 Trombe 墙的热性能、空气净化性能和热电发电性能，模拟结果如图 3 所示。

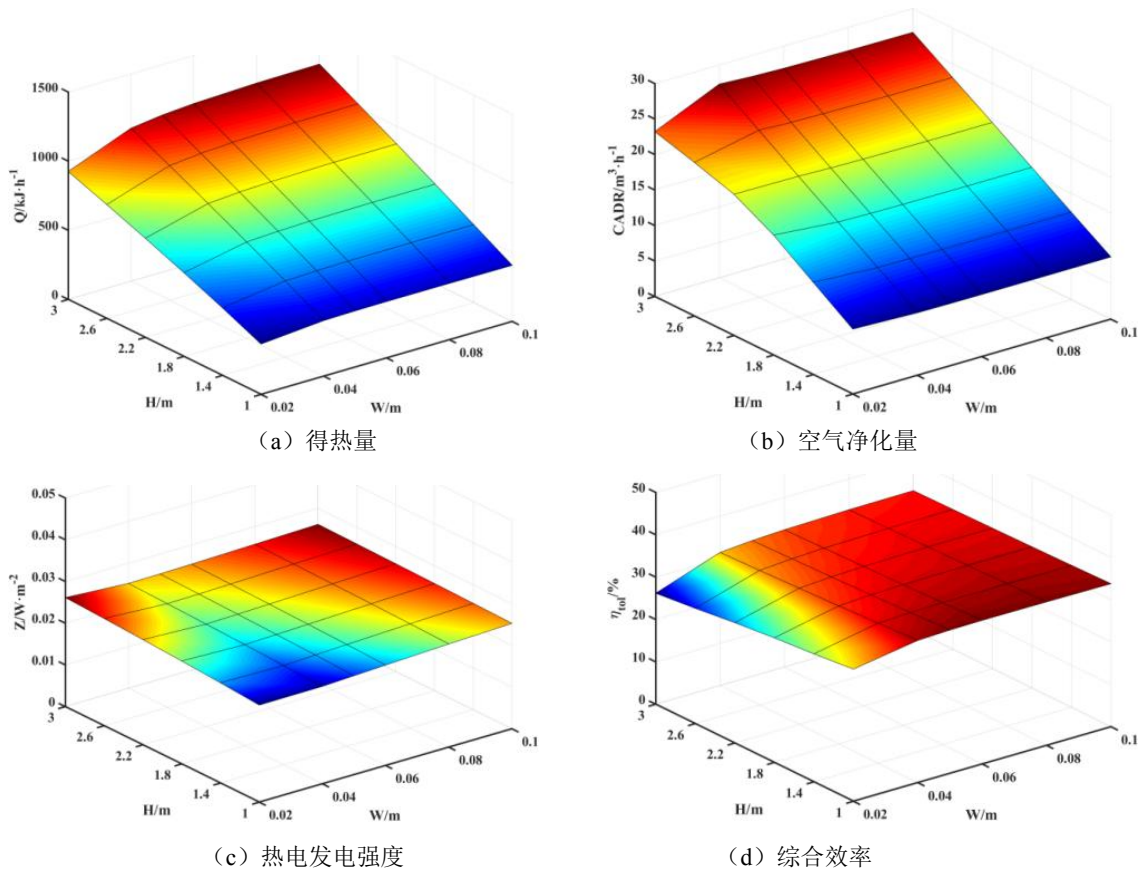


图 3 流道高度和宽度对系统性能的影响

Fig.3 Influence of channel height and width on system performance

图 3 (a) 为得热量 Q 随流道高度 H 和流道宽度 W 的变化情况。当流道内空气吸收热量，温度

上升，形成热压差，空气从底部向上流动，形成自然对流。随着 H 的增大， Q 呈上升趋势，流道高

度越高, 空气在流道内停留时间越长, 与集热板换热时间越长, 到达出口时的温度就越高, 进而得热量越大; 随着 W 的增大, Q 呈上升趋势, 当流道宽度为 0.02m 时, 整体流道截面积较小, 导致流速较快, 空气在流道内停留时间较短, 换热时间短, 得热量小。在 $H=1\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Q 从 $364.33\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $406.29\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 11.52%; 而当 $H=3\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Q 从 $925.51\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $1175.24\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 26.98%。其中, 在 $H=1\text{m}$, $W=0.02\text{m}$ 时, Q 达到最小值为 $364.33\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$; 在 $H=3\text{m}$, $W=0.10\text{m}$ 时, Q 达到最大值为 $1175.24\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 3 (b) 为空气净化量 $CADR$ 随流道高度 H 和流道宽度 W 的变化情况。随着 H 的增大, $CADR$ 呈上升趋势, 流道高度越高, 对应出口温度越高, 流道内空气流速越快, 虽然空气停留时间短, 甲醛降解略低, 但总体空气净化量大; 当 H 为 1m 到 2.2m 时, 随着 W 的增大, $CADR$ 呈下降趋势, 而当 H 为 2.6~3m 时, $CADR$ 呈上升趋势。在 $H=1\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, $CADR$ 从 $9.15\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 下降到 $8.77\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 减少了 4.14%; 而当 $H=3\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, $CADR$ 从 $23.23\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $26.68\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 14.84%。其中, 在 $H=1\text{m}$, $W=0.08\text{m}$ 时, $CADR$ 达到最小值为 $8.76\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; 在 $H=3\text{m}$, $W=0.04\text{m}$ 时, $CADR$ 达到最大值为 $27.30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

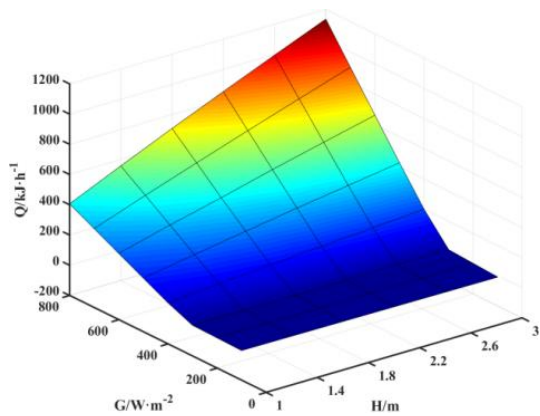
图 3 (c) 为热电发电强度 Z 随流道高度 H 和流道宽度 W 的变化情况。随着 H 的增大, Z 呈上升趋势, 流道高度越高, 集热板温度越高, 热电模块冷热端温差越大, 发电强度越大; 当 H 为 1m 时,

随着 W 的增大, Z 呈上升趋势, 而当 H 为 1.4m 到 3m 时, Z 先下降后上升, 当流道宽度为 0.02m 时, 流速较快, 集热板被空气带走的热量少, 热电模块冷热端温差大, 发电强度大。在 $H=1\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Z 从 $0.0233\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 上升到 $0.0253\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 增加了 8.72%; 在 $H=3\text{m}$ 的情况下, $W=0.04\text{m}$ 时, Z 最小为 $0.0252\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.02\text{m}$ 时 Z 取得最大值为 $0.0261\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 增加了 3.88%。其中, 在 $H=1\text{m}$, $W=0.02\text{m}$ 时, Z 达到最小值为 $0.0233\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; 在 $H=3\text{m}$, $W=0.02\text{m}$ 时, Z 达到最大值为 $0.0261\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

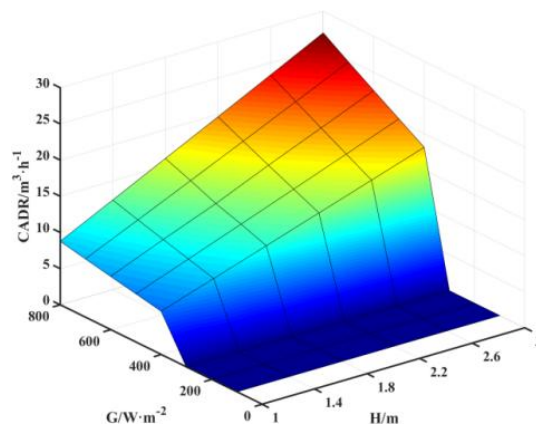
图 3 (d) 为系统总效率 η_{tot} 随流道高度 H 和流道宽度 W 的变化情况。随着 H 的增大, η_{tot} 呈下降趋势, 流道高度越高, 得热量增长速度跟不上太阳能的增长速度, 热效率就会越小, 而热效率占总效率的绝大部分, 总效率也越小; 随着 W 的增大, η_{tot} 整体上呈上升趋势, 流道宽度为 0.02m 时, 热效率较小, 总效率较小。在 $H=1\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, η_{tot} 从 31.19% 上升到 33.77%, 增加了 8.30%; 在 $H=3\text{m}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, 而 η_{tot} 从 26.20% 上升到 32.84%, 增加了 25.34%。其中, 在 $H=3\text{m}$, $W=0.02\text{m}$ 时, η_{tot} 达到最小值为 26.20%; 在 $H=1\text{m}$, $W=0.06\text{m}$ 时, η_{tot} 达到最大值为 33.92%。

2.2 太阳辐射强度 G 和流道高度 H 的影响

在本节中, 保持流道宽度为 0.05m, 研究了太阳辐射强度 G 从 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、流道高度 H 从 1m 增加到 3m 时的光催化热电型 Trombe 墙的热性能、空气净化性能和热电发电性能, 模拟结果如图 4 所示。



(a) 得热量



(b) 空气净化量

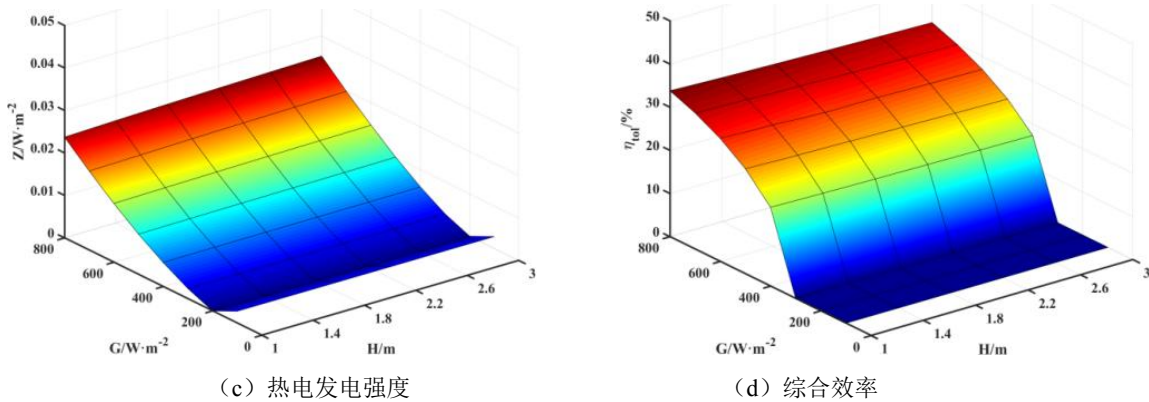


图 4 太阳辐射强度和流道高度对系统性能的影响

Fig.4 Influence of solar radiation intensity and channel height on system performance

图 4 (a) 为得热量 Q 随太阳辐射强度 G 和流道高度 H 的变化情况。随着 G 的增大, Q 呈上升趋势, 太阳光照强度越大, 集热板表面的温度越高, 流道内空气的温度也就越高, 得热量越大; 随着 H 的增大, 当 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Q 小于 0 且呈下降趋势, 即 H 越大, 维持室内温度为 25°C 需要提供更多的热量, 当 G 为 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Q 呈上升趋势, 流道高度越高, 空气在流道内停留时间越长, 与集热板换热时间越长, 到达出口时的温度就越高, 进而得热量越大。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, Q 从 $-3.16\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 下降到 $-9.47\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 减少了 200%; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, Q 从 $406.49\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $1136.47\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 179.58%。其中, 在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $H=3\text{m}$ 时, Q 达到最小值为 $-9.47\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $H=3\text{m}$ 时, Q 达到最大值为 $1136.47\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 4 (b) 为净化空气量 $CADR$ 随太阳辐射强度 G 和流道高度 H 的变化情况。随着 G 的增大, $CADR$ 呈上升趋势, 太阳辐射强度越大, 出口温度越高, 流道内流速越快, 空气净化量越大; 随着 H 的增大, $CADR$ 呈上升趋势, 流道高度越高, 对应出口温度越高, 流道内空气流速越快, 虽然空气停留时间短, 甲醛降解略低, 但总体空气净化量大。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, $CADR$ 为 0, 此时系统不向室内送风; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, $CADR$ 从 $8.78\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $27.04\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 207.91%。其中, 在 G 为 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, $CADR$ 都为 0; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $H=3\text{m}$ 时, $CADR$ 达到最大值为

$27.04\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 4 (c) 为热电发电强度 Z 随太阳辐射强度 G 和流道高度 H 的变化情况。随着 G 的增大, Z 先下降后上升, 太阳辐射强度为 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 集热板一端的温度较低, 热电模块产生反向电流, 太阳辐射强度越大, 热电模块冷热端温差越大, 产生的正向电流越大, 发电强度越大; 当 G 为 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 随着 H 的增大, Z 不变, 当 G 为 $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Z 呈上升趋势, 流道高度越高, 集热板温度越高, 热电模块冷热端温差越大, 发电强度越大。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, Z 为 $0.0028\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 增量为 0; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, Z 从 $0.0237\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 上升到 $0.0252\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 增加了 6.32%。其中, 在 $G=200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 Z 达到最小值为 $4.72\times 10^{-6}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $H=3\text{m}$ 时, Z 达到最大值为 $0.0252\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

图 4 (d) 为系统总效率 η_{tot} 随太阳辐射强度 G 和流道高度 H 的变化情况。随着 G 的增大, η_{tot} 总体上呈上升趋势, 太阳辐射强度越大, 得热量越大, 热效率越高, 总效率也越高; 随着 H 的增大, η_{tot} 总体上呈下降趋势, 流道高度越高, 得热量增长速度跟不上太阳能的增长速度, 热效率就会越小, 而热效率占总效率的绝大部分, 总效率也越小。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, η_{tot} 为 0.00278% , 增量为 0; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 H 从 1m 变化到 3m 时, η_{tot} 从 33.83% 下降到 32.05% , 减少了 5.25%。其中, 在 $G=200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, η_{tot} 达到最小值为 0.00236% ; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $H=1\text{m}$ 时, η_{tot} 达到最大值为 33.83% 。

2.3 太阳辐射强度 G 和流道宽度 W 的影响

在本节中, 保持流道高度为 1m, 研究了太阳辐射强度 G 从 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、流道宽

度 W 从 0.02m 增加到 0.10m 时的光催化热电型 Trombe 墙的热性能、空气净化性能和热电发电性能, 模拟结果如图 5 所示。

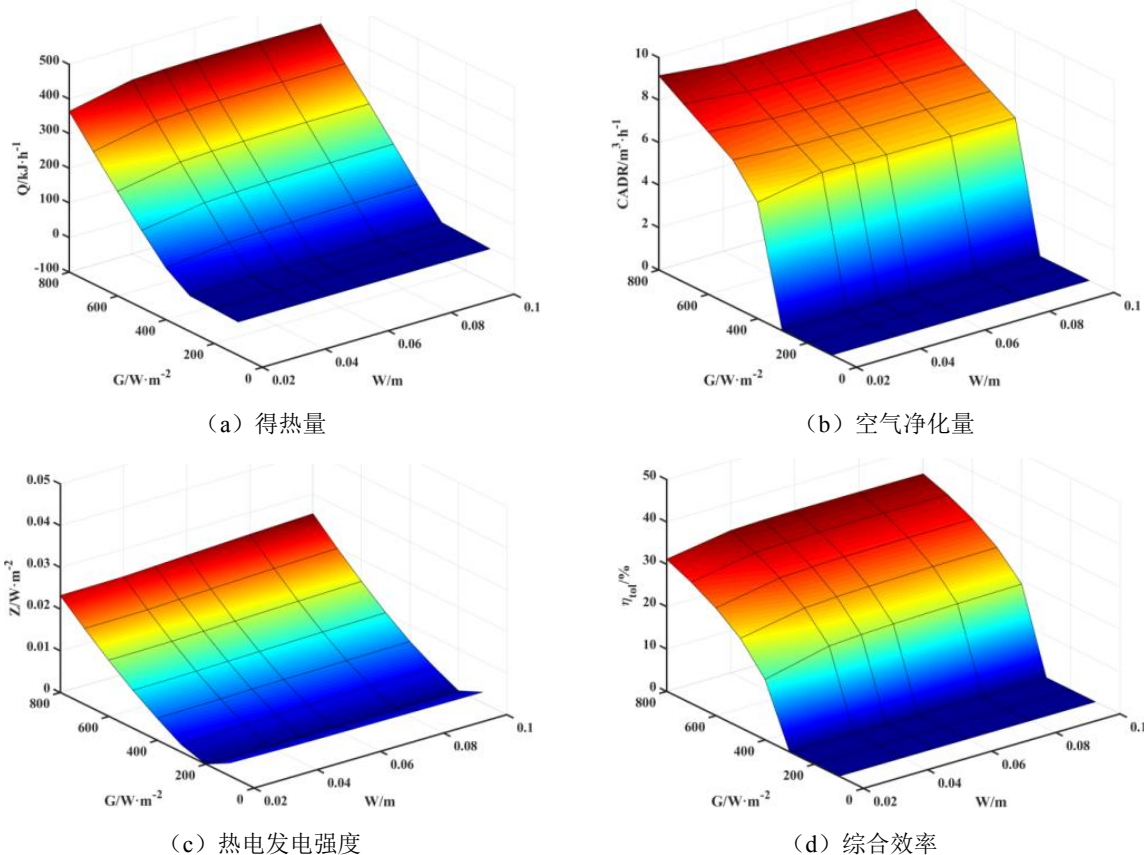


图 5 太阳辐射强度和流道宽度对系统性能的影响

Fig.5 Influence of solar radiation intensity and channel width on system performance

图 5 (a) 为得热量 Q 随太阳辐射强度 G 和流道宽度 W 的变化情况。随着 G 的增大, Q 呈上升趋势, 太阳光照强度越大, 集热板表面的温度越高, 流道内空气的温度也就越高, 得热量越大; 随着 W 的增大, Q 呈上升趋势, 当流道宽度为 0.02m 时, 整体流道截面积较小, 导致流速较快, 空气在流道内停留时间较短, 换热时间短, 得热量小。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Q 从 $-3.44\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $-2.98\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 13.31%; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Q 从 $364.33\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $406.29\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, 增加了 11.52%。其中, 在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.02\text{m}$ 时, Q 达到最小值为 $-3.44\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.06\text{m}$ 时, Q 达到最大值为 $408.09\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 5 (b) 为净化空气量 $CADR$ 随太阳辐射强度 G 和流道宽度 W 的变化情况。随着 G 的增大, $CADR$ 呈上升趋势, 太阳辐射强度越大, 出口温度越高, 流道内流速越快, 空气净化量越大; 当 G 为 $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 随着 W 的增大, $CADR$ 先上升后下降, 当 G 为 $500\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, $CADR$ 先下降后上升。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, $CADR$ 为 0; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, $CADR$ 从 $9.15\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 下降到 $8.77\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 减少了 4.14%。其中, 在 G 为 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, $CADR$ 都为 0; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.02\text{m}$ 时, $CADR$ 达到最大值为 $9.15\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

图 5 (c) 为热电发电强度 Z 随太阳辐射强度 G 和流道宽度 W 的变化情况。随着 G 的增大, Z 先下降后上升; 当 G 为 $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 随着 W 的增大,

Z 呈下降趋势, 当 G 为 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Z 呈上升趋势。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Z 从 $0.0032\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 下降到 $0.0026\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 减少了 18.42% ; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, Z 从 $0.0233\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 上升到 $0.0253\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 增加了 8.72% 。其中, 在 $G=200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.04\text{m}$ 时, Z 达到最小值为 $9.11\times 10^{-7}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.10\text{m}$ 时, Z 达到最大值为 $0.0253\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

图 5 (d) 为系统总效率 η_{tol} 随太阳辐射强度 G 和流道宽度 W 的变化情况。随着 G 的增大, η_{tol} 总体上呈上升趋势, 太阳辐射强度越大, 得热量越大, 热效率越高, 总效率也越高; 随着 W 的增大, η_{tol} 总体上呈上升趋势, 流道宽度为 0.02m 时, 热效率较小, 总效率较小。在 $G=100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, η_{tol} 从 0.00315% 下降到 0.00257% , 减少了 18.41% ; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的情况下, 当 W 从 0.02m 变化到 0.10m 时, η_{tol} 从 31.19% 上升到 33.77% , 增加了 8.30% 。其中, 在 $G=200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.04\text{m}$ 时, η_{tol} 达到最小值为 0.000000455% ; 在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $W=0.10\text{m}$ 时, η_{tol} 达到最大值为 33.77% 。

2.4 光催化热电型 Trombe 墙综合节能分析

在本节中, 保持流道高度为 1m , 流道宽度为 0.05m , 讨论太阳辐射强度为 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $600\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时光催化热电型 Trombe 墙不同性能对太阳能的利用效率。为更好地评价系统对太阳能的利用效率, 用常用空调产生等量制热量所消耗的电能, 代替系统的得热量, 制热效率设为 90% ; 用空气净化器输送等量净化后的空气所需要的电能, 以此来代替系统降解甲醛所消耗的能量; 热电模块产生的电能则直接计算。用公式 (29) ~ (32) 计算:

每小时接收的太阳能为:

$$W_G = 3600AG \quad (29)$$

得热量的等效电能为:

$$W_Q = \frac{Q}{0.9} \quad (30)$$

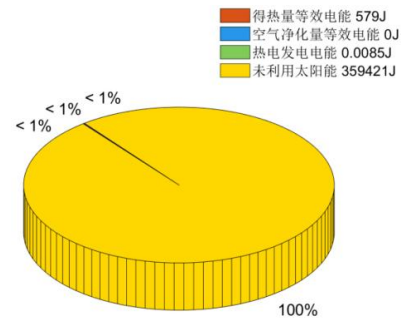
产生同等清洁空气量所消耗的电能:

$$W_{CADR} = 3600P_{HCHO} \quad (31)$$

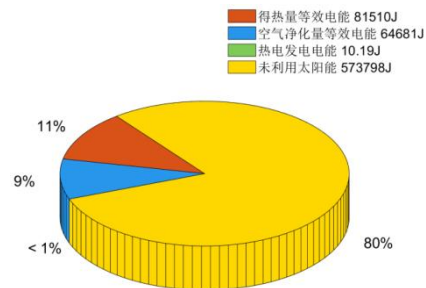
热电模块发电产生的电能为:

$$W_E = 3600P_e \quad (32)$$

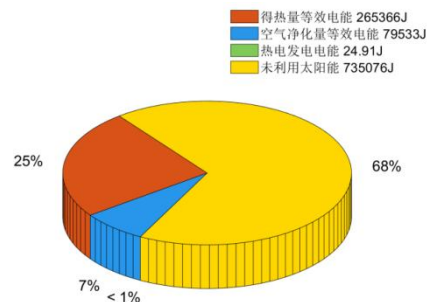
由图 6 可以看出, 在 G 为 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 系统的总等效电能小于 1% , 未利用的太阳能接近 100% ; 当 G 为 $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 到 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 系统的总等效电能呈上升趋势, 在太阳辐射强度为 $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 系统节约的等效电能约为 144kJ , 能量转换效率约为 20% ; 在太阳辐射强度为 $600\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 系统节约的等效电能约为 345.6kJ , 能量转化效率为 32% ; 在太阳辐射强度为 $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 系统节约的等效电能约为 547.2kJ , 能量转化效率为 38% 。其中, 得热量的等效电能所占比例最大, 其次是产生同等清洁空气量的等效电能, 热电发电的电能最小, 由于热电发电所产生的能量数量级较小, 所以在图中无法直接表现出来。



(a) $G=200\text{W}/\text{m}^2$



(b) $G=400\text{W}/\text{m}^2$



(c) $G=600\text{W}/\text{m}^2$

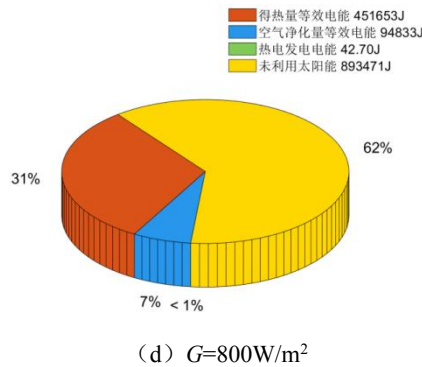


图 6 等效能量及比例

Fig.6 Equivalent energy and proportion

3 结论

本文建立了光催化热电型 Trombe 墙性能分析的稳态集总模型, 因系统的得热量较大, 其主要在冬季条件下运行, 以此降低建筑的热负荷。研究了不同太阳辐射强度、不同流道高度和宽度下光催化热电型 Trombe 墙的热性能、空气净化性能和热电发电性能。主要结论如下:

(1) 随着太阳辐射强度 G 的增大, 光催化热电型 Trombe 墙的得热量 Q 呈上升趋势, 空气净化量 $CADR$ 呈上升趋势, 热电发电强度 Z 先下降后上升, 总效率 η_{tol} 呈上升趋势。其中, Q 最大可以达到 $1136.47\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, $CADR$ 最大可以达到 $27.04\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, Z 最大可以达到 $0.0253\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 在总效率 η_{tol} 达到最大值 33.92% 时, $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2) 随着流道高度 H 的增大, 光催化热电型 Trombe 墙的得热量 Q 总体呈上升趋势, 空气净化量 $CADR$ 呈上升趋势, 热电发电强度 Z 呈上升趋势, 总效率 η_{tol} 呈下降趋势。其中, Q 最大可以达到 $1175.24\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, $CADR$ 最大可以达到 $27.30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, Z 最大可以达到 $0.0261\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 在总效率 η_{tol} 达到最大值 33.92% 时, $H=1\text{m}$ 。

(3) 随着流道宽度 W 的增大, 光催化热电型 Trombe 墙的得热量 Q 呈上升趋势, 除去 $W=0.02\text{m}$ 外, 空气净化量 $CADR$ 总体上变化较小, 热电发电强度 Z 无明显变化规律, 总效率 η_{tol} 呈上升趋势。其中, Q 最大可以达到 $1175.24\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$, $CADR$ 最大可以达到 $27.30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, Z 最大可以达到 $0.0261\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 在总效率 η_{tol} 达到最大值 33.92% 时, $W=0.06\text{m}$ 。

(4) 随着太阳辐射强度 G 的增大, 系统的等

效电能呈上升趋势。其中在 $G=800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 能量转换效率约为 38%, 每小时可节约等效电能约为 547.2kJ。

参考文献:

- [1] Xing Y, Hewitt N, Griffiths P. Zero carbon buildings refurbishment--A Hierarchical pathway[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(6):3229-3236.
- [2] 崔少华,付素娟.被动式低能耗建筑节能技术在既有居住建筑节能改造中的应用[J].建设科技,2017,11(7):29-31.
- [3] 刘珊珊,何伟,余本东,等.光催化氧化技术在 Trombe 墙采暖模式中的应用[J].建筑节能,2018,46(8):58-64.
- [4] Yu B D, He W, Li N S, et al. Experimental and numerical performance analysis of a TC-Trombe wall[J]. Applied Energy, 2017,206:70-82.
- [5] 吴双应,邱毅,肖兰.室内外环境温度对光伏光催化型 Trombe 墙性能和功能的影响[J].东北电力大学学报,2021,41(1):31-40.
- [6] Luo Y Q, Zhang L, Liu Z B, et al. Numerical evaluation on energy saving potential of a solar photovoltaic thermoelectric radiant wall system in cooling dominant climates[J]. Energy, 2018,142:384-399.
- [7] Cai Y, Wang L, Wang W W, et al. Solar energy harvesting potential of a photovoltaic-thermoelectric cooling and power generation system: Bidirectional modeling and performance optimization[J]. Journal of Cleaner Production. 2020,254:120-150.
- [8] Pourghorban A, Asoodeh H. The impacts of advanced glazing units on annual performance of the Trombe wall systems in cold climates[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022,51:101983.
- [9] Islam K, Irshad K, Zahir M H, et al. Numerical and experimental study on the performance of a Photovoltaic Trombe wall system with Venetian blinds[J]. Energy, 2021,218:119542.
- [10] Hernández-López I, Xamán J, Chávez Y, et al. Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico[J]. Energy, 2016,109: 512-524.
- [11] Wu S Y, Wang T, Xiao L, et al. Effect of cooling channel position on heat transfer characteristics and

- thermoelectric performance of air-cooled PV/T system[J]. *Solar Energy*, 2019,180:489-500.
- [12] Yu B D, Hou J X, He W, et al. Study on a high-performance photocatalytic-Trombe wall system for space heating and air purification[J]. *Applied Energy*, 2018,226:365-380.
- [13] Yu B D, He W, Li N S, et al. Thermal catalytic oxidation performance study of SWTCO system for the degradation of indoor formaldehyde: kinetics and feasibility analysis[J]. *Building and Environment*, 2016,108:183-193.
- [14] Swinbank W C. Long-wave radiation from clear skies[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1963,89(381):339-348.
- [15] Duffie J A, Beckman W A. *Solar Engineering of Thermal Processes*[M]. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- [16] Bergman T L, Lavine A S. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*[M]. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2017.
- [17] He W, Hu Z T, Luo B Q, et al. The thermal behavior of Trombe wall system with venetian blind: An experimental and numerical study[J]. *Energy and Buildings*, 2015,104:395-404.
- [18] Spiga M, Morino G L. A symmetric solution for velocity profile in laminar flow through rectangular ducts[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1994,21(4):469-475.
- [19] Sun W, Ji J, Luo C L, et al. Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south facade design[J]. *Applied Energy*, 2011,88(1):224-231.
- [20] Fernández-hernández F, Cejudo-lópez J M, Domínguez-muñoz F, et al. A new desiccant channel to be integrated in building facades[J]. *Energy and Buildings*, 2015,86:318-327.
- [21] Yang R, Zhang Y P, Zhao R Y. An improved model for analyzing the performance of photocatalytic oxidation reactors in removing volatile organic compounds and its application[J]. *Air Repair*, 2004,54(12):1516-1524.
- [22] Verbruggen S W, Lenaerts S, Denys S. Analytic versus CFD approach for kinetic modeling of gas phase photocatalysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015,262:1-8.
- [23] Ching W H, Leung M, Leung D Y C. Solar photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde by sol-gel TiO₂ thin film for enhancement of indoor air quality[J]. *Solar Energy*, 2004,77(2):129-135.
- [24] Yu B D, Jiang Q Y, He W, et al. Performance study on a novel hybrid solar gradient utilization system for combined photocatalytic oxidation technology and photovoltaic/thermal technology[J]. *Applied Energy*, 2018,215:699-716.