

分类号：  
学号：20232010004

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于严寒气候下的光伏集热蓄热墙体优化设计 研究—以石河子为例

|          |          |
|----------|----------|
| 学位申请人    | 刘江平      |
| 指导教师     | 李洁 副教授   |
| 申请学位门类级别 | 工学硕士     |
| 学科、专业名称  | 土木工程     |
| 研究方向     | 寒气绿色建筑   |
| 所在学院     | 水利建筑工程学院 |

中国·新疆·石河子  
2026年 5月

分类号：  
学号：20232010004

密级：  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕士学位论文



### 基于严寒气候下的光伏集热蓄热墙体优化设计 研究—以石河子为例

|        |          |
|--------|----------|
| 学位申请人  | 刘江平      |
| 指导教师   | 李洁 副教授   |
| 申请学位类别 | 工学硕士     |
| 专业名称   | 土木工程     |
| 研究领域   | 寒区绿色建筑   |
| 所在学院   | 水利建筑工程学院 |

中国·新疆·石河子  
2026年5月

**Research on Optimized Design of Photovoltaic Thermal Storage  
Wall in Severe Cold Climate: A Case Study of Shihezi**

A Dissertation Submitted to  
**Shihezi University**  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
**Master of Engineering**

By

Liu Jiangping  
(**Civil Engineering**)

Dissertation Supervisor: Prof. Li Jie

May, 2026

## 石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

### 学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：刘江平 时间：2016年8月20日

### 使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：刘江平  
导师签名：李庆

时间：2016年8月20日

时间：2016年8月20日

## 摘要

在我国“双碳”战略目标驱动下,建筑行业作为能源消耗与碳排放的主要来源,其节能降碳任务日趋紧迫。光伏集热蓄热墙体作为光伏光热建筑一体化(BIPV/T)技术的典型应用形式,将光伏组件与传统集热蓄热墙有机耦合,形成集采暖、通风与发电于一体的多功能围护结构,可有效提升村镇住宅能源自给能力,对降低运行能耗与削减碳排放具有重要意义。本文以严寒气候区的新疆石河子为研究区域,针对严寒地区村镇住宅供暖能耗高、能源利用率低的问题。将光伏组件与集热蓄热墙相结合,系统探究光伏组件位置及墙体构造参数对光伏集热蓄热墙电热综合性能的影响规律,旨在缓解严寒地区村镇住宅的高能耗与高排放问题,提升其能源利用率,降低建筑能耗与碳排放,为区域建筑低碳转型提供技术支撑。经过研究得到以下结果:

(1) 本文设计并搭建了光伏集热蓄热墙体与传统集热蓄热墙体的对比实验平台,以新疆石河子地区某村镇住宅为对象,选取最冷时段开展冬季工况实验。通过对比四种工况下墙体的热工与光电性能,结果表明:在相似的室外环境温度和太阳能辐射条件下,热工性能表现为:工况一<工况二<工况三<工况四;光电性能表现为:工况四<工况三<工况二<工况一。

(2) 利用数值模拟软件建立严寒地区光伏集热蓄热墙的数学模型与物理模型,完成网格划分、控制方程设定及边界条件定义,并通过实验数据验证了模型的准确性。基于验证模型,对不同工况进行了模拟分析。结果表明:工况二因光伏位置遮挡太阳辐射,空气间层得热量低,热工性能最差;工况四能有效吸收太阳辐射并利用光伏发电余热,性能最优。工况二、三、四的平均集热量分别为66.19J、87.11J、96.14J,平均能效率分别为23.7%、25.6%、26.1%,其中工况四的综合能效率最高。

(3) 利用模拟软件,基于工况四对光伏集热蓄热墙进行优化设计,建立不同墙体构造参数的物理模型,并进行模拟分析,并通过综合能效率来选择墙体的构造参数。研究结果表明:当空气间层厚度为120mm;空气间层高度为2700mm时;通风口直径为150mm时;相对高度为2000mm时光伏集热蓄热墙的热工性能最佳。墙体构造参数对光伏集热蓄热墙光电性能的影响较小。

(4) 对优化后的光伏集热蓄热墙进行评价分析,研究结果表明:优化前光伏集热蓄热墙的平均能效率为25.8%,平均焓效率为33.1%,优化后的光伏集热蓄热墙平均能效率为27.3%,平均焓效率为34.6%。优化后的光伏集热蓄热墙的综合性能明显优于优化前和传统集热蓄热墙。其对太阳能的综合利用效率更高,可以有效增强房间的保温性能,还可以通过光伏发电有效降低建筑的能耗和碳排放。

本文通过模拟与实测明确了适用于严寒气候地区村镇住宅的光伏组件布置位置及构造优化方案,研究成果为光伏集热蓄热墙技术在严寒地区的工程应用提供理论依据与技术参考,对该技术在村镇建筑中的推广实践具有现实指导意义。

**关键词:** 太阳能; 光伏组件; 光伏集热蓄热墙; 严寒地区; 村镇住宅

## Abstract

Driven by China's dual-carbon strategy, the building sector, as a major source of energy consumption and carbon emissions, faces increasingly urgent demands for energy conservation and carbon reduction. As a typical application of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) technology, the photovoltaic thermal wall integrates photovoltaic modules with traditional thermal storage walls to form a multifunctional envelope system that combines heating, ventilation, and power generation. This system can effectively enhance the energy self-sufficiency of rural residential buildings and plays a significant role in reducing operational energy consumption and carbon emissions. This study focuses on Shihezi in Xinjiang, a region with a severe cold climate, to address the issues of high heating energy consumption and low energy efficiency in rural residential buildings in such areas. By integrating photovoltaic modules with thermal storage walls, the study systematically investigates the influence of photovoltaic module placement and wall structural parameters on the electrical and thermal performance of the photovoltaic thermal wall. The aim is to mitigate the high energy consumption and high carbon emissions of rural residential buildings in severe cold regions, improve energy efficiency, and reduce building energy consumption and carbon emissions, thereby providing technical support for the low-carbon transformation of regional buildings. The research yields the following results:

(1) A comparative experimental platform for a photovoltaic thermal storage wall and a traditional thermal storage wall was designed and constructed. Taking a rural residence in Shihezi, Xinjiang, as the subject, winter experiments were conducted during the coldest period. By comparing the thermal and photovoltaic performance of the wall under four operating conditions, the results show that under similar outdoor ambient temperatures and solar radiation conditions, the thermal performance ranking is: Condition 1 < Condition 2 < Condition 3 < Condition 4; the photovoltaic performance ranking is: Condition 4 < Condition 3 < Condition 2 < Condition 1.

(2) A mathematical model and physical model of the photovoltaic thermal storage wall in the severe cold region were established using numerical simulation software. Mesh generation was completed, governing equations and boundary conditions were defined, and the model's accuracy was validated against experimental data. Based on the validated model, simulations and analyses for different operating conditions were conducted. The results indicate that Condition 2, due to the position of its photovoltaic modules blocking most of the solar radiation from entering the air gap, experiences a significant reduction in heat gain within the air gap, resulting in the poorest overall thermal performance. In contrast, Condition 4 not only effectively absorbs solar radiant heat but also utilizes the waste heat generated during photovoltaic power generation, demonstrating superior thermal performance. The average heat collection values for Conditions

2, 3, and 4 are 66.19 J, 87.11 J, and 96.14 J, respectively, with average energy efficiencies of 23.7%, 25.6%, and 26.1%, respectively. Condition 4 exhibits the highest overall energy efficiency.

(3) Using simulation software, an optimal design for the photovoltaic thermal storage wall based on Condition 4 was conducted. Physical models with different wall construction parameters were established and simulated, and the comprehensive energy efficiency was used to select the optimal construction parameters. The results show that the thermal performance of the photovoltaic thermal storage wall is optimal when the air gap thickness is 120 mm, the air gap height is 2700 mm, the ventilation opening diameter is 150 mm, and the relative height is 2000 mm. Wall construction parameters have a relatively minor influence on the photovoltaic performance of the wall.

(4) An evaluation and analysis of the optimized photovoltaic thermal storage wall were performed. The research results show that the average energy efficiency of the optimized wall increased to 27.3% from 25.8% before optimization, and the average exergy efficiency increased to 34.6% from 33.1%. The overall performance of the optimized photovoltaic thermal storage wall is significantly better than both the pre-optimized version and the traditional thermal storage wall. It demonstrates higher comprehensive utilization efficiency of solar energy, effectively enhancing the room's thermal insulation performance and reducing building energy consumption and carbon emissions through photovoltaic power generation.

Through simulation and measurement, this thesis clarifies the optimal photovoltaic module placement and construction parameters suitable for rural residences in severe cold regions. The research findings provide a theoretical basis and technical reference for the engineering application of photovoltaic thermal storage wall technology in severe cold regions and offer practical guidance for its promotion and implementation in rural buildings.

**Key words:** Solar energy; PV module; Photovoltaic thermal storage wall; Severe cold region; Rural residential building

# 目录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 摘要.....                          | I  |
| Abstract.....                    | II |
| 第 1 章 绪论.....                    | 1  |
| 1.1 研究背景.....                    | 1  |
| 1.1.1 国外研究现状.....                | 2  |
| 1.1.2 国内研究现状.....                | 5  |
| 1.1.3 文献评述.....                  | 8  |
| 1.2 研究目的及意义.....                 | 9  |
| 1.2.1 研究目的.....                  | 9  |
| 1.2.2 研究意义.....                  | 9  |
| 1.3 研究内容及方法.....                 | 9  |
| 1.3.1 研究内容.....                  | 9  |
| 1.3.2 研究方法.....                  | 10 |
| 1.4 主要创新点.....                   | 11 |
| 1.5 技术路线.....                    | 12 |
| 第 2 章 严寒地区光伏集热蓄热墙冬季热电性能试验研究..... | 13 |
| 2.1 墙体工作原理.....                  | 13 |
| 2.2 试验平台介绍.....                  | 14 |
| 2.3 试验方案介绍.....                  | 16 |
| 2.3.1 试验方案.....                  | 16 |
| 2.3.2 测点布置.....                  | 17 |
| 2.3.3 测试内容.....                  | 18 |
| 2.3.4 测试过程.....                  | 18 |
| 2.3.5 测试仪器.....                  | 19 |
| 2.4 性能评价.....                    | 21 |
| 2.5 数据分析与试验结果.....               | 22 |
| 2.5.1 工况一数据分析.....               | 22 |
| 2.5.2 工况二数据分析.....               | 25 |
| 2.5.3 工况三数据分析.....               | 28 |
| 2.5.4 工况四数据分析.....               | 30 |
| 2.6 本章小结.....                    | 34 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 3 章 严寒地区光伏集热蓄热墙模型建立及数值模拟 ..... | 36 |
| 3.1 Fluent 软件介绍 .....            | 36 |
| 3.2 模型建立 .....                   | 37 |
| 3.2.1 数学模型 .....                 | 37 |
| 3.2.2 湍流模型 .....                 | 38 |
| 3.2.3 辐射模型 .....                 | 38 |
| 3.2.4 物理模型与网格划分 .....            | 39 |
| 3.2.5 基本假设 .....                 | 40 |
| 3.3 计算参数设定 .....                 | 41 |
| 3.3.1 材料参数 .....                 | 41 |
| 3.3.2 边界条件 .....                 | 41 |
| 3.3.3 求解方法设置 .....               | 42 |
| 3.4 模型验证 .....                   | 43 |
| 3.5 本章小结 .....                   | 44 |
| 第 4 章 严寒地区光伏集热蓄热墙优化设计研究 .....    | 45 |
| 4.1 不同光伏位置对墙体性能影响 .....          | 45 |
| 4.1.1 模型温度场分析 .....              | 45 |
| 4.1.2 模型速度场—压力场分析 .....          | 47 |
| 4.1.3 综合性能分析 .....               | 49 |
| 4.2 空气间层厚度对墙体性能影响 .....          | 50 |
| 4.2.1 空气间层厚度对墙体光热性能影响 .....      | 50 |
| 4.2.2 空气间层厚度对墙体光电性能影响 .....      | 54 |
| 4.3 空气间层高度对墙体性能研究 .....          | 56 |
| 4.3.1 空气间层高度对墙体光热性能影响 .....      | 56 |
| 4.3.2 空气间层高度对墙体光电性能影响 .....      | 60 |
| 4.4 通风口直径对墙体性能影响 .....           | 61 |
| 4.4.1 通风口直径对墙体光热性能影响 .....       | 61 |
| 4.4.2 通风口直径对墙体光电性能影响 .....       | 65 |
| 4.5 通风口间距对墙体性能影响 .....           | 66 |
| 4.5.1 通风口相对高度对墙体光热性能影响 .....     | 66 |
| 4.5.2 通风口相对高度对墙体光电性能影响 .....     | 70 |
| 4.6 本章小结 .....                   | 72 |
| 第 5 章 严寒地区光伏集热蓄热墙性能评价分析 .....    | 73 |
| 5.1 模型建立 .....                   | 73 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 5.1.1 数学模型 .....              | 73 |
| 5.1.2 物理模型 .....              | 73 |
| 5.2 参数设定 .....                | 75 |
| 5.2.1 材料物性 .....              | 75 |
| 5.2.2 边界条件 .....              | 75 |
| 5.3 评价分析 .....                | 76 |
| 5.3.1 优化后光伏集热蓄热墙热环境模拟分析 ..... | 76 |
| 5.3.2 传统集热蓄热墙热环境模拟分析 .....    | 77 |
| 5.3.3 优化后的光伏集热蓄热墙性能评价分析 ..... | 78 |
| 5.4 本章小结 .....                | 82 |
| 第 6 章 结论与展望 .....             | 84 |
| 6.1 结论 .....                  | 84 |
| 6.2 展望 .....                  | 85 |
| 参考文献 .....                    | 86 |
| 致谢 .....                      | 91 |
| 作者简介 .....                    | 92 |

## 第1章 绪论

### 1.1 研究背景

随着城镇化的加速和人们生活水平的提升，建筑领域的能源消费和碳排放也随之增加。建筑行业作为国民经济的支柱产业，为我国经济和社会发展做出重要贡献的同时，也存在着资源消耗大、污染排放高、建筑方式粗放等亟待解决的问题<sup>[1-5]</sup>。如表 1-1 所示，据中国建筑能源协会发布的《中国城乡建设领域碳排放研究报告 2025》<sup>[6]</sup>显示，2024 年，全国建筑业建造能耗总量为  $12.5 \times 10^9 \text{tce}$ 。2024 年，全国建筑业建造的碳排放总量为  $27.8 \times 10^9 \text{tCO}_2$ 。因而从减少污染，改善生态环境和立足国家资源储备等方面考虑，开发和利用安全、可靠、清洁的可再生能源进行建筑节能，已受到人们越来越多的关注。

表 1-1 2024 年全国建筑业建造能耗与碳排放总表

Table 1-1 Summary of National Construction Industry Energy Consumption and Carbon Emissions in 2024

| 指标          | 能耗/亿 tce | 碳排放/tCO <sub>2</sub> |
|-------------|----------|----------------------|
| 全国建筑业建造     | 12.5     | 27.8                 |
| 按过程分：建材     | 11.7     | 26.8                 |
| 施工          | 0.8      | 1.0                  |
| 按领域分：房屋建筑建造 | 8.0      | 18.1                 |
| 其中：建材       | 7.7      | 17.5                 |
| 施工          | 0.3      | 0.6                  |
| 土木工程建造      | 4.5      | 9.7                  |
| 其中：建材       | 4.0      | 9.3                  |
| 施工          | 0.5      | 0.4                  |

可再生能源包括太阳能、风能、水能、地热能和核能等，其中太阳能作为最常见的可再生能源之一，由于其可再生、丰富、环保、能源独立等特点<sup>[7-8]</sup>，可以很好满足人类对于绿色新能源在建筑领域的利用需求。新疆地区深居内陆，大部分地区为严寒地区，冬季严寒且漫长（冬季平均气温为 $-7.3^\circ\text{C}$ ），太阳辐射强，日照时间充足<sup>[9]</sup>。根据中国的太阳能资源总量等级标准，2022 年，新疆的大部分地区年水平面总辐射量超过  $1400 (\text{kW} \cdot \text{h}) / \text{m}^2$ ，属于太阳能资源非常丰富的区域<sup>[10]</sup>。目前，新疆建筑在太阳能的应用上主要采取了两种方式：其一是在建筑顶部安装太阳能光伏板，利用太阳能光伏发电技术，

将太阳能转化为电能用于日常生活,降低建筑能耗和碳排放,属于太阳能光电利用,具有清洁环保、经济节能等优点;其二是采用太阳能光热利用技术,这涵盖了在屋顶设置太阳能热水系统以及在房屋南墙建造集热蓄热墙等<sup>[11-13]</sup>。其中集热蓄热墙体是以太阳能为主要热源,调节室内热环境的建筑形式,具有构造简单,节能环保等优点<sup>[14]</sup>。新疆地区丰富的太阳能资源为光伏发电技术和集热蓄热墙体的应用提供了极好的条件。

此外,新疆农村人口约占全区总人口的 40.76%<sup>[15]</sup>。在石河子地区,这一特征表现为农村住宅多散落于城镇外围,整体布局呈现集聚度低、分布零散的特点。受经济与技术条件制约,大多数村镇住宅难以接入集中供暖系统,冬季采暖高度依赖原煤、秸秆等传统燃料。这不仅造成大量直接碳排放,也使农村建筑用能结构长期陷入高碳锁定的困境。光伏集热蓄热墙体是光伏光热技术的典型应用形式之一,融合了光伏发电与集热蓄热双重功能<sup>[16]</sup>。光伏电池组件仅能将所吸收太阳能的约 20%转化为电能,其余能量大多转化为热能,导致组件温度升高、发电效率下降<sup>[17]</sup>。将光伏组件与集热蓄热墙体集成,一方面可通过冷却光伏组件提升其发电效率,另一方面可有效利用余热提高系统整体能效,同时增强墙体对太阳能的吸收与蓄热能力。

综上所述,本研究聚焦于石河子严寒气候区,立足于当地富集的太阳能资源,探索光伏光热建筑一体化技术的应用路径。光伏集热蓄热墙体技术作为该路径的应用形式之一,将光伏发电系统与集热蓄热墙体结合,利用太阳能为村镇住宅同时提供清洁电力与供暖服务。该技术在实现冬季供暖的同时,可有效降低对煤炭、秸秆等传统采暖燃料的依赖,改善室内热环境质量,提升居住舒适度,为农村住宅节能降碳与能源结构绿色转型提供了可行方案。其实现对推动“双碳”目标在严寒地区的落地实施具有积极意义,也为村镇住宅推广清洁低碳用能模式提供了理论支撑与实践路径。该技术不仅有利于优化农村能源消费结构、推进清洁取暖进程,亦为当地建筑节能与低碳发展提供了技术基础,对提升居民生活品质、促进区域可持续发展具有深远影响

### 1.1.1 国外研究现状

#### (1) 集热蓄热墙体国外研究现状

集热蓄热墙是利用阳光照射到外面有玻璃罩的蓄热墙体上,加热玻璃盖板和厚墙外表面之间的夹层空气,通过热压作用使空气流入室内向室内进行供热。早在 20 世纪 50 年代法国科学家奥德罗太阳能研究所所长 Felix Trombe 博士<sup>[18-20]</sup>提出了 Trombe 墙(被动式太阳能集热蓄热外墙构造系统),它依靠墙体独特的构造设计,无机械动力、传统无能源消耗,仅仅依靠被动式收集太阳能为建筑供暖。太阳辐射透过玻璃盖板照射到集热蓄热墙体表面并被墙体吸收,加热通道内的空气使之产生内外密度差,完成热压到风压的转化,驱动通道空气向上流。冬季时室内冷空气进行空气流道内,经集热墙体加热温

度升高后,从集热蓄热墙体上部进入室内,以达到供暖的目的。而夏季时室内空气由集热蓄热墙体下部进行空气流道内,集热墙体吸收太阳辐射后温度升高,加热内部空气,诱导空气自下而上流动,进而从上部出口排出至室内,以此达到通风效果。对此各国学者从不同地区的气候特点和墙体构造等方面对集热蓄热墙性能的影响展开了大量的研究。

### ①地区气候对集热蓄热墙体性能的影响

N.Simoes 等<sup>[21]</sup>针对地中海气候特性对 Trombe 能耗的影响进行了研究,通过使用 Energyplus 和 Designbuilder 等软件进行模拟,结果表明 Trombe 可以显著减少能耗,在冬季可以帮助减少 20%以上的供暖能耗需求。Boulebbina 等<sup>[22]</sup>使用 Trombe 建造了一个被动式太阳房原型,并在阿尔及利亚进行测试,以当地传统材料进行建造,以椰枣树干制成新型生物基材料作为被动式太阳房的绝缘材料,并利用 Fluent 进行数值模拟,结果表明被动式太阳房最佳方位为东南 160°,椰枣树的热性能与建筑物常用的绝缘材料接近,另一方面土坯墙被动式太阳房供暖系统的热效率为 50%,明显高于石墙的 30.7%。

### ②墙体构造对集热蓄热墙体的影响

Ahmed 等<sup>[23]</sup>通过对 Trombe 墙壁面的传热过程和气流进行了数值模拟,并结合试验验证模型的准确。研究分析了埃及亚历山大典型冬季日一周的实测数据,并利用数值模拟以确定 Trombe 墙在增强热舒适性方面的最佳设计。结果表明,数值模拟得出的最佳 Trombe 墙,其高度为 1.7m,厚度为 0.3m,通风口深度为 0.22m,该模型可提高 38.19%的热舒适性。Zhu 等<sup>[24]</sup>利用 ANSYS 软件对直接受益式太阳房和附加阳光间式太阳房进行模拟,结果表明,附加阳光间可以取得更佳的效果。Zhou 等<sup>[25]</sup>提出一种将水墙与传统 Trombe 相结合的复合式 Trombe,并建立了不同类型 Trombe 壁面的流体计算动力模型,研究不同类型 Trombe 壁面的流动和热性能。结果表明,复合式 Trombe 的热效率比传统 Trombe 墙热效率高 3.3%,在夜间,复合式 Trombe 墙可以更好地减少建筑物的热损失。在阴天,复合式 Trombe 效率比传统的 Trombe 墙提高了 7.2%。

## (2) 光伏光热技术国外研究现状

自从美国贝尔实验室 1954 年制造出世界上第一块硅基太阳能电池以来,太阳能的光电利用开始进入人们的视野。目前,我国光伏产业发展迅速,空前繁荣。根据国家能源局数据,截至 2023 年 12 月底,全国太阳能发电累计装机容量达 6.1 亿千瓦。而 2023 年,光伏新增装机容量达到 216.88GW,同比增长 148%,创历史新高<sup>[26]</sup>。然而,即使光伏产量庞大,光伏发电技术日益成熟,光伏电池对太阳能的转化效率依旧不高,即使转化效率最好的砷化镓光伏电池,它的转化率也才达到 27%<sup>[27]</sup>。1978 年, Kern 和 Russell 等<sup>[28]</sup>为了进一步提高太阳能光伏板对太阳能的充分利用,在光伏组件发电的同时,将光伏组件工作产生的大量热能进行充分利用,提出光伏光热综合利用的概念。至此各国学者针对光伏光热技术(简称 PV/T)的组件及光伏光热建筑一体化系统性能及结构,从理

论、模拟、实验等方面展开了大量研究。

Atilgan 等<sup>[29]</sup>为 PV/T 系统设计了多孔材料的冷却系统, 并利用 Ansys Fluent 软件对不同性能多孔材料的使用进行了研究。结果表明, 随着管道所用多孔的孔隙密度和孔隙率的降低, 出水口温度升高, 在 0.3L/min 的低流速下, 与不含多孔材料的管道相比, 热效率提高了 118%。Zhang<sup>[30]</sup>等对微通道平板热管 BIPV/T 系统的性能进行研究, 结果表明, 在辐射 300W/m<sup>2</sup>、水流 600L/h 的条件下, 系统平均效率最高可达 50.4% (热效率 45.9%, 电效率 4.5%)。Ya 等<sup>[31-32]</sup>提出新型双冷凝器热管 PV/T 系统, 建立了系统的传热极限数学模型, 并分析了运行温度、倾角、尺寸等对系统传热的影响。Zhao 等<sup>[33]</sup>都对真空双层玻璃和单层玻璃的 PV/T 系统进行了研究, 结果表明, 真空玻璃能显著减少 PV/T 系统的热损失, 并且, 真空玻璃盖板 PV/T 系统的热效率更高。Zai 等<sup>[34]</sup>研究了一种新型的真空管 PV/T 系统, 该系统具有插入式 PV 组件和热管, 结果表明, 该系统可以很好地降低光伏电池温度, 提高 PV/T 系统的热效率和电效率。Sajid Abbas 等<sup>[35]</sup>研究了 PV/T 系统和太阳能集热器与太阳能热泵组合系统的经济评价和年度能源性能, 结果表明, 混合系统的电效率为 14.08, 热效率为 60.12%, 其投资回收期为 5.2 年。

### (3) 光伏集热蓄热墙体国外研究现状

国外光伏集热蓄热墙体的研究主要针对冷却方式对光伏集热蓄热墙体性能的影响: Abdullah 等<sup>[36-37]</sup>研究了无冷却、空气冷却、水冷却和空气与水冷却等四种方式对光伏 Trombe 系统性能的影响。结果表明, 水冷却的效果优于其他几种方式, 整体效率最高为 51.40%。并研究了多尘天气条件对 PV-Trombe 墙光电性能的影响。Li 等<sup>[38-39]</sup>在光伏 Trombe 基础上提出了一种多功能 BIPV/T 墙体系统, 分为空气模式和热水模式, 适用于采暖季和非采暖季, 并进行了试验测试和性能分析。建立的数学模型显示: 热水模式下, 系统日平均效率为 7.6%, 热效率为 47%; 空气模式下, 电效率为 12.5%。在北京、合肥、西宁三个城市, 年平均效率分别为 11.2%、10.6%、12.1%, 并能满足这些城市分别 79.1%、66.8%、60.4% 的热水能源需求。Kun 等<sup>[40]</sup>对混合式光伏-水/空气太阳墙系统进行了对冬季、夏季和过渡季的光电和光热性能分析, 并与传统单一系统进行了经济对比分析。结果表明: 夏季采用热水模式, 系统平均电效率为 7.8%, 总热效率为 52.3%, 光热全天综合利用效率为 63.4%; 冬季采用空气模式, 系统平均电效率为 15.3%, 热效率为 23.9%; 过渡季, 混合模式下, 系统平均电效率为 11.6%, 水箱平均温升 25.2℃。Cheng 等<sup>[41]</sup>提出结合相变材料的新 PV-Trombe 墙体系统, 研究了相变材料改善夏季 PV-Trombe 墙过热的问題。Somil Yadav 等<sup>[42]</sup>通过建立数学模型分析了严寒气候下, 半透明光伏 Trombe 墙和不透明光伏 Trombe 的热电性能和舒适性。结果表明: 不透明光伏 Trombe 墙的光伏电池温度高于半光伏 Trombe 墙, 导致效率和电效率较低; 半透明光伏 Trombe 墙的 TLL 值明显高于不透明光伏 Trombe 墙, 表明半透明光伏 Trombe 墙的室内舒适度水平低于不透明光伏 Trombe 墙。Roberto 等<sup>[43]</sup>对 PV-Trombe 提出一种基于无量纲参数太阳能复

合比的简化经验方法, 对其进行初步评估和设计。最后确定了安装 PV-Trombe 墙的建筑在采暖应用中所需提供的辅助能量。

## 1.1.2 国内研究现状

### (1) 集热蓄热墙体国内研究现状

#### ①气候对集热蓄热墙体性能的影响

侯羽遥等<sup>[44]</sup>通过选取四川省阿坝藏族羌族自治州阿坝县四洼乡的典型民居, 对其室内外温湿度、壁面温度及太阳辐射强度进行现场测试, 并结合 APMV 指标对其冬季室内热环境现状进行评价。在此基础上采用建筑模拟软件 Eergyplus 结合正交试验分析了 Trombe 不同结构参数对室内热环境的影响程度, 并提出了最适宜于该地区民居的 Trombe 结构参数组合, 分析其对于川西北安多藏式民居冬季室内热环境的改善程度及节能效果。结果表明, 使用 Trombe 墙优化后的典型民居室内月平均温度可提升 16.05℃, APMV 平均提高了 1.10, 节能率为 68.94%; 使用西北安多藏式民居室内热环境最优的 Trombe 参数组合为: Trombe 墙南向面积比、玻璃和垂直墙面的夹角、通风口高度、蓄热墙厚度、蓄热墙材料及空气间层厚度分别为 100%、10°、500mm、400mm、夯土墙、100mm。李博帆等<sup>[45]</sup>以长春地区农村住宅为研究对象, 建立典型的农村住宅模型, 并利用 Ecotect 软件模拟分析了不同玻璃材质、南北墙窗墙比、附加阳光间进深和不同建筑墙体材料对建筑模型能耗的影响。结果表明, 不同的玻璃材料对建筑能耗影响显著, 南北墙窗墙比增加, 建筑能耗增加, 且同一窗墙比情况下, 南墙能耗低于北墙能耗, 附加阳光间进深增加能耗也增加。为长春地区典型农村被动式太阳房建筑的优化策略和设计方案提供了理论依据。李一峰等<sup>[46]</sup>以新疆库尔勒一栋自建房为研究对象, 将其改造成附加阳光间式被动式太阳房, 并利用太阳房特性评价指标和能耗模拟对其进行评价, 结果表明改造后的建筑保温性能提高, 冬季能耗降低, 为被动式太阳房在新疆地区的推广提供理论依据。

#### ②墙体构造对集热蓄热墙的影响

黑赏罡等<sup>[47]</sup>利用 CFD 模拟软件, 建立了集热蓄热墙式被动式太阳房的传热模型, 深入研究了集热蓄热墙外表面冬季集热特性、通风口及室内温度场和风速场分布特性、墙体尺寸参数以及墙体表面构造对集热蓄热墙系统热环境的影响。并在此基础上提出提高集热效率的墙体尺寸优化方案和增设百叶帘的改造方案, 通过模拟与传统集热蓄热墙的效果进行了对比分析, 为改造现有被动式太阳房进行现场试验提供了理论基础。此外为验证新型百叶集热墙系统的集热效率, 对一栋既有集热蓄热墙式被动式太阳房进行局部改造, 并与传统集热蓄热墙的房间和普通房间进行试验对比, 分析该墙体的集热性能, 为既有建筑的被动式改造提供了实例参考。刘艳峰等<sup>[48]</sup>采用周期反应系数法研究结构参

数和被动房传热量之间的定量关系,并结合结构参数,提出附加阳光间型被动房热负荷简化计算新方法。结果表明,阳光间传热量受公用墙体构造变化影响较大,内门传热量与公用墙体热阻呈正相关,墙体传热量与墙体热阻呈负相关,同类围护结构下不同参数组合下公用墙导热量与阳光间空气温度变化规律趋势一致,进而提出附加阳光间导热变化系数和温度变化系数,并以此建立了关键结构参数与传热量之间的多元回归模型。

## (2) 光伏光热技术国内研究现状

王博飞等<sup>[49]</sup>建立水冷型 PV/T 热水系统模型并搭建实验平台,从发电量和集热量以及水泵耗电量进行考虑,模拟计算流量变化对系统性能的影响。结果表明,存在最佳流量值使得水冷型 PV/T 系统效率最大,最佳流量值大小与太阳辐射值为正系数线性关系。王岗等<sup>[50]</sup>提出一种基于微热阵列的空冷式 PV/T 系统,通过对典型工况下系统性能进行研究,结果表明,典型工况下系统日均电效率为 11.79%。热效率为 24.75%,综合效率为 55.78%,系统综合效率与太阳辐射、环境温度及风速呈正相关。杜涛等<sup>[51]</sup>提出一种空气/水双冷型 PV/T 一体化组件,搭建了 2 套测试平台展开 PV/T 组件的空冷、水冷、空气-水复合冷却实验,研究不同工作模式下的性能表现。结果表明,3 种工作模式下的组件综合效率分别为 76.05%、74.51%、84.83%,其吸热板温度较无工质冷却模块分别可降低 19.08、27.58 和 35.16℃。彭浩等<sup>[52]</sup>以无玻璃盖板管板式 PV/T 组件为研究对象,采用 Trnsys 软件仿真和试验测试相结合的方法,从发电角度确定吸热板厚度、换热管数量及换热管管径;从成本角度提出适用于不同效率组件、不同光资源区域工况下的最佳设计参数。胡紫林等<sup>[53]</sup>为探究 PV/T 系统热电性能受不同集热参数的影响,并解决流体反向加热光伏电池造成系统集热量损耗和发电量减少的问题,建立了 PV/T 系统三维瞬态数学模型,开发了一种新型集热控制系统,用于实时监控水箱和监控流程盖板集水量,分析了集热管、排布方式、水箱容量、集热目标温度对 PV/T 系统温度、热电效率、集热量和发电量的影响。纪培栋等<sup>[54]</sup>对平板集热器经典的 Hottel-Whillier 模型进行修正以适用于 PV/T 集热器,并采用实验数据对修正的 PV/T 集热器仿真模拟进行验证。利用验证后的 PV/T 集热器仿真模型,研究吸热板厚度和导热系数、吸热管间距和内径、保温层厚度、光伏组件功率等结构参数对集热器的热效率、发电效率和总效率的影响,然后基于敏感性分析法确定管板式 PV/T 集热器的关键结构参数。贺斌、陈红兵和何迪等<sup>[55-56]</sup>通过建立各种算法预测模型对 PV/T 系统的热、电性能进行预测,有助于优化控制,提高综合效率为太阳能 PV/T 热电联供系统控制研究提供了参考。

## (3) 光伏集热蓄热墙体国内研究现状

### ① 光伏位置对光伏集热蓄热墙体性能的影响

季杰等<sup>[57-59]</sup>针对 Trombe 墙的缺点,以及 Trombe 墙只能得到低品位的热能而太阳能电池转化效率低的这一性质,提出在传统集热蓄热墙玻璃盖板背面贴上深蓝色多晶硅光伏电池,在达到美观的同时还能实现房屋的发电,以及给室内供暖保温的效果,即光伏