

# 太阳能建筑一体化光伏幕墙冷却散热集成系统分析

祝向群

阜阳职业技术学院, 安徽 阜阳 236031

**摘要:** 随着低碳节能理念在全球建筑领域的广泛推行, 太阳能建筑一体化光伏幕墙 (Building Integrated Photovoltaics, BIPV) 逐渐成为关注的焦点, 该技术兼具环保与多功能特性, 展现出广阔的发展前景。然而, 运行中的光伏幕墙常因散热问题影响了光电转化效率, 这一短板限制了该技术潜力的充分发挥。为此, 本文聚焦于冷却散热集成系统的设计思路, 从光伏幕墙的关键散热节点、设计方法到优化方案进行分析, 并结合实际案例探讨这一系统在改善光伏幕墙性能方面的应用价值与发展前景。

**关键词:** 太阳能; 光伏幕墙; 冷却散热集成系统

## Analysis of Integrated Cooling and Heat Dissipation System of Photovoltaic Curtain Wall Integrated with Solar Energy Building

Zhu,Xiangqun

Fuyang Institute of Technology, Fuyang, Anhui, 523808, China

**Abstract:** With the widespread implementation of the concept of low-carbon and energy-saving in the global building field, building integrated photovoltaic curtain walls (BIPV) have gradually become the focus of attention. This technology has both environmental protection and multi-functional characteristics, showing broad development prospects. However, the photovoltaic curtain wall in operation often affects the photoelectric conversion efficiency due to heat dissipation, which limits the full play of the potential of this technology. Therefore, this paper focuses on the design idea of cooling and heat dissipation integrated system, analyzes the key heat dissipation nodes, design methods and optimization schemes of photovoltaic curtain wall, and discusses the application value and development prospect of this system in improving the performance of photovoltaic curtain wall with practical cases.

**Keywords:** Solar energy; Photovoltaic curtain wall; Integrated cooling and heat dissipation system

DOI: 10.62639/sspis33.20240104

光伏建筑一体化 (BIPV) 技术是建筑行业应对碳中和目标的一大重要举措, 该技术将光伏发电组件与建筑围护结构相结合, 在发电的同时还能提供隔热、遮阳等功能。然而, 光伏组件在运行中会将部分太阳能转化为热能, 导致温度过高, 进而降低光电的转化效率, 形成所谓的“温度瓶颈”。研究表明<sup>[1]</sup>, 光伏组件温度每升高1℃, 光电转化效率降低约0.5%。因此, 如何有效降低光伏幕墙表面与背部温度, 是当下提高BIPV系统效率的重要课题。

### 一、光伏幕墙散热问题分析

#### (一) 散热不足

光伏组件在工作过程中会吸收大量太阳辐射, 尤其是在夏季或高辐射区域, 组件温度可达到60-70℃, 显著影响发电效率。同时, 长时间的高温运行可能加速光伏组件的老化, 降低其使用寿命。此外, 未有效散热的热量会通过幕墙传导至室内, 增加建筑的冷却负荷, 进一步削弱节能效果。

#### (二) 冷却技术存在局限性

目前, 针对光伏幕墙的冷却技术主要包括自

然通风、强制风冷和液冷系统。然而, 这些技术普遍存在以下问题:

- 自然通风散热效果有限, 尤其在风速较低或幕墙设计阻碍气流的情况下;
- 强制风冷成本较高, 且需要额外能源, 可能导致节能收益抵消;
- 液冷系统复杂性高, 安装与维护成本较大, 适用范围有限<sup>[2]</sup>。

因此, 开发一种经济高效、易于集成的冷却散热系统, 对BIPV技术的推广具有重要意义。

### 二、冷却散热集成系统的设计思路

#### (一) 优化利用烟囱效应

在光伏幕墙背面设计倾斜的空气通道, 并在上下部设置穿孔铝板, 可以利用空气密度差异形成的自然烟囱效应, 将组件背部产生的热量迅速排出, 这种方式可以有效缓解光伏组件因过热导致光电转化效率下降的问题, 降低建筑围护结构的热负荷。

实际研究表明, 烟囱效应在特定条件下表现出较为显著的散热能力, 在相关实验中, 监测系统对不同室外环境下的热参数进行了监测, 结果

(稿件编号: IS-24-4-1033)

**作者简介:** 祝向群 (1977-10), 男, 民族, 汉族; 籍贯: 安徽省安庆市; 学历, 硕士研究生; 职称, 副教授; 研究方向, 绿色建筑。  
**基金项目:** 安徽省高校重点自然科学基金项目: “BIPV (光伏建筑一体化技术) 在绿色建筑中的应用与能效” (项目编号 2023AH052425)。

表明, 特定尺寸的自然通风通道能够产生足够的温差, 从而增强“太阳能烟囱”效应。该设计方案有效地冷却了光伏包层, 同时也减少了温度相关的效率损失, 使系统发电量增加。

为了进一步优化烟囱效应的散热能力, 可以利用CFD(计算流体力学)建模来预测空气通道中的风速和流向, 对通道的倾角、宽度以及穿孔铝板的位置和孔径进行合理调整<sup>[3]</sup>。例如, 湖南中建大厦光伏幕墙系统在背面安装了通风通道, 并采用上下穿孔的设计方案。监测数据显示, 这种设计使光伏组件的温度平均下降了4°C至5°C, 发电效率提升了约4%。而在临港顶科实验大楼项目中, 利用CFD模拟优化设计了双层通道结构, 同时结合季节调节功能, 夏季排热、冬季引热的双重作用显著提升了光伏系统的整体性能, 年均节能率超过12%。

为了进一步强化通风散热效果, 还可以结合使用烟囱效应与其他技术手段, 一些研究提出, 利用光伏光热(PV/T)技术, 将组件产生的热量集中到风井中, 再以热空气驱动自然通风。实验表明, 这种设计能在降低温度的同时, 将余热用于地下空间通风与加热, 提升了整体能源利用率<sup>[4]</sup>。

### (二) 主动通风与热回收结合

光伏幕墙系统在运行过程中, 主动通风与热回收结合的策略是一种兼顾效率与节能的设计理念。夏季高温时, 系统依靠主动风机增强空气流动, 将组件背部产生的热空气快速排出室外, 从而降低光伏组件的工作温度, 并减少建筑围护结构的热负荷。

另一方面, 冬季寒冷气候时, 热量管理的重点将转向回收利用。此时, 通道模式可以切换, 将光伏幕墙背部集聚的热空气引入室内, 用于空间采暖。这种模式下, 光伏幕墙不仅需要承担发电任务, 还兼顾了供暖功能, 实现了能源的高效利用。在一些工程案例中, 采用了这种智能控制切换通风通道模式, 根据季节和室内需求动态调整空气流向, 在提升室内热舒适度的同时, 降低采暖设备的能耗。

实际研究表明, 这种“发电与供暖”双效模式在多种应用场景中表现出显著优势, 部分实验项目结合主动风机和热回收技术, 通过智能调控系统实时监测室内外温度与风速, 确保热空气在不同季节得到高效处理<sup>[5]</sup>。夏季时, 排出的热空气能够通过设置排风口的合理布局避免局部高温区域的形成; 而在冬季, 热空气的回收则为建筑提供了稳定的新风热源, 使能源利用率大幅提高。

结合主动通风的设计还可以配合智能化监测设备进一步优化系统性能。例如, 某些项目依靠布置传感器网络实时采集风速、温度等数据, 主动调节风机运行频率, 使系统在节约能源的同时提供最佳效果。这一设计有效平衡了风机运行的能耗与建筑的热管理需求, 为光伏幕墙在不同气候条件下的应用提供了强大的适应能力。

### (三) 液冷与相变材料辅助散热

为解决光伏幕墙在高温环境下散热效率不

足的问题, 液冷系统和相变材料(Phase Change Materials, PCM)提供了有效的技术手段。这两种方法各有特点, 且在实际应用中可以相辅相成, 进一步优化散热效果。

液冷系统依靠冷却液在管道中的循环流动, 高效地带走光伏组件背面的多余热量, 从而显著降低组件温度, 十分适用于那些高辐射、高温的环境。在工程实践中, 液冷技术表现出较高的散热能力, 对于组件的运行温度也具有很好的稳定作用, 从而提高光电转化效率。

此外, 还可以在组件背面安装相变材料, 利用其吸收热量时的潜热效应, 在高温环境下将温度峰值控制在较低范围内。白天, 当光伏组件产生大量热量时, PCM吸收热量并转化为潜热, 维持较低的组件表面温度。夜间, PCM将储存的热量逐渐释放到周围环境中, 实现热量的再次分散<sup>[6]</sup>。这种“白天吸热、夜间散热”的动态调节机制, 有效地减少了白天散热系统的负荷。

实际工程中, 液冷系统与PCM相结合的方案逐渐受到关注, 相关研究显示, 该组合策略能够实现更均衡的温度控制效果。液冷与相变材料的结合, 不仅在技术上具有创新性, 还展现了极高的应用价值, 这一双重散热策略能够适应多种气候条件, 为光伏幕墙的高效运行提供有力保障, 同时延长了系统的使用寿命。

## 三、系统性能分析与优化建议

### (一) 温度与发电效率的关联分析

相关实验数据表明, 光伏组件的冷却效果直接决定其发电性能。以晶硅组件为例, 在烟囱效应与主动通风系统配合下, 表面温度可降低8-10°C, 光电转化效率提升显著。

### (二) 优化建议

#### 1. 通风路径设计

在通风路径设计中, 畅通的通风通道是优化散热性能的核心, 而通道的合理布局和风速的有效控制则是设计成功的关键要素。要想加强通风通道的畅通性, 首先要需要充分考虑建筑结构方面的限制, 避免因安装设备或其他建筑构件导致的气流阻塞现象。在设计光伏幕墙背部的通风路径时, 应综合考虑建筑的整体形态和风环境特点, 合理设置通道宽度和倾角, 减小气流紊乱和阻力, 这样也方便后续通道的维护和清洁。在此基础上加入CFD(计算流体力学)技术, 模拟气流在通道内的流动情况, 并预测可能存在的紊流区域。此外, 该技术还可以调整通道倾角、宽度及入口和出口的布局, 使气流在通道内的速度分布更加均匀, 大幅提高散热效率。

例如, 倾角过大可能导致气流速度下降, 降低通风效果; 而倾角过小则可能引起气流分布不均, 使散热区域局限于局部位置, 必须精确计算出倾角。此外, 通道的入口和出口位置也需要根据建筑朝向和外部风环境合理选取, 充分地利用自然风的优势, 引入气流后再迅速将其排出。对

在实际工程中, 设计阶段应充分结合项目所

在区域的气候特点, 利用CFD模型进行多次迭代优化, 找出最佳的通道参数组合。在一些项目中, 利用CFD模拟发现, 通道入口略微扩大有助于减少气流进入时的压损, 而出口方向适度调整可显著增强排气效果。与此同时, 设计中还应关注风速对通道内热空气排出的影响, 过高的风速可能导致气流湍流加剧, 影响散热均匀性; 风速过低将导致无法有效带走热量。因此, 必须合理控制好风速区间, 保持气流稳定性和足够的热交换时间, 实现高效散热。总体而言, 通风路径的优化设计需要从整体建筑布局、具体工程条件到精细化的数值模拟多方面入手, 结合实践经验和科学计算, 为光伏幕墙的高效运行提供可靠保障。

### 2. 智能调控系统

在智能调控系统的设计中, 引入传感器与智能控制模块是提升光伏幕墙散热性能的重要手段, 而这种智能化调节的核心在于实时性和精准性。首先, 应科学规划温度、湿度和风速等传感器的布局, 在组件背部安装温度传感器, 准确捕捉局部热量变化, 而在通风通道的入口和出口布置风速传感器, 用于实时监测气流的动态特性, 这些数据为控制系统的调整提供了基础信息。

为了应对季节变化和条件波动, 需结合监测数据自动分析智能控制模块, 比如, 夏季高温时, 系统可以优先启动主动风机, 增强空气流动, 将高温区域的热量迅速排出, 而在冬季低温条件下, 模块则可以切换散热模式, 将组件产生的热量引导至室内, 为建筑采暖提供辅助支持。这样的调节逻辑不仅需要基于固定阈值, 还应融入动态调节算法, 考虑日照强度、外部风速及建筑内部需求的综合因素, 使散热模式更具适应性和节能性。

针对这种复杂的需求, 智能控制系统的算法设计应采用基于机器学习或预测性控制的方法, 能够预判环境条件的变化趋势, 并提前调整系统的运行参数, 避免滞后响应带来的效率损失。在一些高温地区或风速多变的环境下, 智能调控系统可以优先设置多级响应机制, 逐步提升散热强度, 更好地应对突发的温度上升。切换散热模式时, 不应单纯依赖传感器数据直接触发模式, 而应结合区域的气候特征和建筑使用习惯, 制定分时段、分功能的动态调控策略。例如, 白天加强通风模式以降低组件温度, 夜间则切换至热量回收模式, 将多余热量释放或引入室内使用。

最后, 系统还可结合数据可视化技术, 将实时运行状态和历史运行数据呈现给用户或建筑管理者, 为设备维护和策略优化提供依据。智能调控系统的设计不仅要求技术先进, 还需要与具体场景密切结合, 基于实践经验与数据反馈不断优化, 才能实现光伏幕墙在不同气候条件下的高效、稳定运行。

### 3. 材料选择

表现出明显的优势。例如, 铝合金因其导热系数较高且重量较轻, 常被选作光伏组件支架的主要材料。而在高温或湿度较大的地区, 可以引入镁铝合金或具有导热涂层的高强度钢材, 满足抗腐蚀的需求。其次, 封装材料的选择也关系着

系统的整体热管理表现, 光伏组件封装层的热阻系数是影响热量传导效率的核心因素之一。EVA(乙烯-醋酸乙烯共聚物)是一种常见的封装材料, 虽然价格较低, 但其导热性能相对较弱, 在高温长期暴露下可能出现老化问题。相比之下, 具有高导热性的PVB(聚乙烯醇缩丁醛)夹层玻璃或特种硅胶因其出色的热稳定性和抗紫外线能力, 在实际应用中能显著提升热量的传导效率, 同时延长系统寿命。

在支架材料和封装材料的组合应用中, 应关注两者的热膨胀系数匹配问题, 避免因热胀冷缩产生应力集中, 从而影响系统的长期性能。例如, 在高寒地区或温差较大的区域, 采用热膨胀系数相近的铝合金支架与双层夹胶玻璃封装可以有效减少因温度变化引起的材料变形, 从而提高系统的稳定性。另一需要重视的方面是, 材料表面的处理工艺直接影响系统的散热效率和耐久性能。研究表明, 为支架表面增加阳极氧化层或热导涂层可以有效减少热量在组件中的积聚, 增强散热效果, 而对于封装层, 采用低反射涂层可在减少光能损耗的同时改善热能的散逸效果。

在选择材料时还应结合实际工程的经济性与可持续性要求。尽管一些高性能材料价格较高, 但其较长的使用寿命和低维护成本往往能在全生命周期内体现出更优的性价比。例如, 对于需要长期运行且维护困难的光伏幕墙项目, 应尽量选择高耐候性和抗老化性能强的材料, 这样可以降低后期的维护频率和成本。

## 四、结束语

综合来看, 太阳能建筑一体化光伏幕墙的冷却散热集成系统是提升BIPV技术效能的重要支撑。无论是烟囱效应的巧妙运用, 还是主动通风与热回收模式的结合, 再到液冷技术与相变材料的应用, 这些研究与实践都为解决光伏幕墙散热效率不足的问题提供了多样化的思路。在未来发展中, 技术创新需更加贴合实际需求, 理论分析与实践反馈需相互融合, 使冷却散热系统的设计更加完善。更重要的是, 需要回归整体视角, 关注建筑环境、区域气候与资源禀赋之间的关联, 从这些细微但关键的环节入手, 推动光伏建筑真正实现效能与可持续性的统一。

### 参考文献:

- [1] 弋理, 袁春林, 张国昊, 等. 光伏建筑一体化光伏幕墙体系与经济性研究[J]. 工程造价管理, 2024, 35(3):28-33.
- [2] 吴兆鹤. 关于太阳能光伏建筑一体化中光伏幕墙设计研究[J]. 科学与信息化, 2019(8):2.
- [3] 吴兆鹤. 关于太阳能光伏建筑一体化中光伏幕墙设计研究[J]. 科学与信息化, 2019(8):2.
- [4] 陈重东. 光伏玻璃幕墙与建筑一体化设计研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(18).
- [5] 傅伊珺. 建筑光伏幕墙系统热电特性与综合利用研究[D]. 中国建筑科学研究院, 2023.
- [6] 阮祥林. 行业融合 共创未来 第二届光伏建筑一体化高峰论坛暨《光伏幕墙应用指南》标准编制研讨会在河北召开[J]. 中国建筑金属结构, 2019(10):2.