

节能型热通道光伏幕墙热气流计算与实验研究*

陈海¹, 毛伙南², 王秋², 姜清海², 潘冬²,
隆志军², 郭金基¹, 陈峰³

(1. 中山大学工学院, 广东 广州 510275;
2. 中山盛兴股份有限公司, 广东 中山 528412;
3. 暨南大学信息技术研究所, 广东 广州 510075)

摘要: 分析了太阳能电池的转换效率受工作环境温度的影响变化规律。研究了双层幕墙在强迫通风及温差作用下所引起热气流流动状态和规律, 建立了相关的流场和温度场状态方程组, 并计算了双层玻璃幕墙夏季热气流对建筑和太阳能电池组件的降温性能。最后完成了节能型热通道光伏幕墙的一个实体模型试验, 并和计算结果加以对比分析。

关键词: 光伏与建筑一体化; 太阳能电池; 强迫通风; 转换效率

中图分类号: TP391.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)05-0039-05

Experiment Research and Calculation of the Hot Air Flow Inside the Energy-saving Photovoltaic Double Curtain Wall

CHEN Hai¹, MAO Huonan², WANG Qiu², JIANG Qinghai², PAN Dong²,
LONG Zhijun², GUO Jinji¹, CHEN Feng³

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Zhongshan Shengxing Curtain Wall Co., Ltd, Zhongshan 528412, China;
3. Information Technology Research Institute, Jinan University, Guangzhou 510075, China)

Abstract: The liquid status and rule on the effect of the mechanical ventilation and difference in temperature inside the double curtain wall are researched. And the consecutive and temperature field equations are constituted. In summer, the conversion efficiency of solar energy battery module about the working environment temperature was investigated. The building and photovoltaic battery module's temperature decrease performance by the hot air flow inside the double curtain wall are calculated. Finally, the physical model of energy-saving photovoltaic double curtain wall is tested and the calculated results are compared and analyzed.

Key words: building integrated photovoltaic; solar energy; mechanical ventilation; transfer efficiency

以太阳能为代表的可再生能源新技术应用前景广阔^[1], 其中光伏建筑一体化(BIPV)已经成为一种主要的光伏应用形式, 它可以有效地利用屋顶及外围护结构等建筑外表面^[2], 无需额外用地; 还可以缓解电力需求, 降低室内空调负荷, 改善室

内热环境等^[3]。但是太阳能光伏电池组件的发电效率并不高, 而且随着其工作环境温度的上升而下降^[4]。在太阳能电池与建筑相结合设计中, 应当尤为注意太阳能电池的通风降温设计, 以避免太阳能电池温度过高造成发电转换效率大幅降低。

* 收稿日期: 2010-12-29

基金项目: 建设部研究开发资助项目(06-K5-20)

作者简介: 陈海(1974年生), 男, 讲师; E-mail: chenhai@mail.sysu.edu.cn

文 [5] 对太阳辐射作用使太阳能电池与幕墙玻璃表面温度升高的问题进行了研究, 结果表明利用“烟囱效应”将通道内的热气流引导出建筑, 可以带走部分热量对建筑进行有效隔热。本文将光伏电池阵列与双层玻璃幕墙结合起来, 利用热气流通风有效降低太阳能电池板的工作温度, 进而保持太阳能电池较高的发电转换效率。本文还设计了实物模型试验, 对一段时间内的太阳辐照度和热通道气流温度、速度以及光伏电池组件表面温度、工作电压电流等变化进行测试, 对计算与实验结果进行对比分析。

1 太阳能光伏电池转换效率及温度特性

因为硅对光线不能做到 100% 的吸收, 存在一定的折射和反射; 而进入硅晶体的光能也会受到硅禁带宽度的限制, 有一部分变成热能损失掉了, 再加上电子-空穴对的复合损失和串、并联电阻的损失, 致使的光电转换效率进一步下降。一般来说硅型太阳能电池理论上最大光电转换效率为 22%, 但实际使用只能达到 10% ~ 18% 左右^[6]。

太阳能光伏电池的特性参数通常都是在标准测试条件下测出来的^[7] (即: 太阳能电池温度 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 光源辐照度为 1000 W/m^2 , 并具有 AM 1.5 太阳光谱辐照度分布条件), 而在实际工作状态下太阳能电池的发电效率比标准测试条件下的为低。太阳能电池工作温度、太阳辐射照度、组件光学损失和入射光谱变化等四个影响光伏电池组件实际工作性能因素中, 温度的影响在大多情况下是最为关键的, 所以对太阳能电池的散热性能进行分析和改善是很有必要的。

太阳能电池的温度特性是指太阳能电池工作环境和电池吸收光子后使自身温度升高对电池性能的影响, 主要反映在太阳电池的开路电压、短路电流、峰值功率等参数随温度的变化而变化上。转换效率 η 指受光照太阳电池的最大输出功率与入射到该太阳电池上的全部辐射功率的百分比

$$\eta = \frac{N_m}{N_{sr}} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中 N_{sr} 为太阳全部辐射功率 (入射到太阳电池板); $N_m = V_m \cdot I_m$, 即太阳能电池 $I-V$ 特性曲线上, 最大功率点 M 所对应的最大输出电压 V_m 和最佳工作电流 I_m 之积 (见图 1 所示)。

实际计算时, 转换效率 η 也可用积分方式表示^[8]

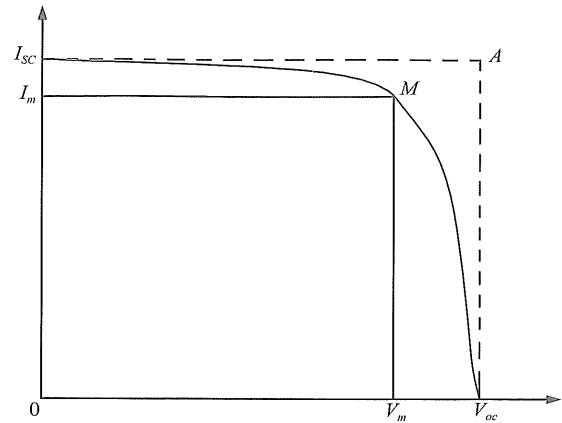


图 1 太阳能电池 $I-V$ 特性曲线

Fig. 1 The $I-V$ curve of solar energy battery

$$\eta = \frac{FF \cdot (AkT/q) \ln(I_{sc}/I_0 + 1) \cdot I_{sc}}{A_{all} \int_0^{\infty} F(\lambda) (hc/\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中 I_{sc} 为短路电流; V_{oc} 为开路电压; FF 为填充因子, 即最大输出功率与开路电压和短路电流乘积之比。

由式 (2) 可见, 太阳能电池只能将入射的太阳辐射中的一小部分能量转化为电能, 剩余的大部分能量都被转化为热量。太阳能电池的工作温度是由当地气象条件决定的, 日照使其温度上升, 一般都高于环境温度。晶体硅太阳能光伏电池工作在温度较高情况下, 开路电压 V_{oc} 随温度的升高而大幅下降, 短路电流 I_{sc} 随温度升高而上升, 电池的实际输出功率随温度的升高大幅下降, 转换效率 η 则随温度升高而下降, 致使太阳电池组件不能充分发挥最大性能 (见图 2 所示)。同时, 高温环境还能导致充电工作点的严重偏移, 易使系统充电不足而损坏。太阳能电池温度每升高 1°C , 其峰值功率损失率约为 0.35% ~ 0.45%, 因此工作在 20°C 条件下的硅型光伏电池输出功率要比工作在 70°C 时高 20% 左右^[9]。

此外, 在阳光跟踪自动控制条件下, 太阳能电池总是以最优角度朝向太阳, 会接受到更高密度的太阳辐射。为了保证太阳能电池仍然高效稳定地工作, 对太阳能电池进行适当的散热处理是十分必要的。自然通风降温可使太阳能电池工作温度降低, 有利于太阳能电池转换效率的提升^[10], 但对空间面积和结构牢固等要求较高, 不能大面积使用。其他研究降低太阳能电池工作温度的技术措施也有很多^[11], 但相对成本都较高, 客观上阻碍了光伏发电的广泛应用。

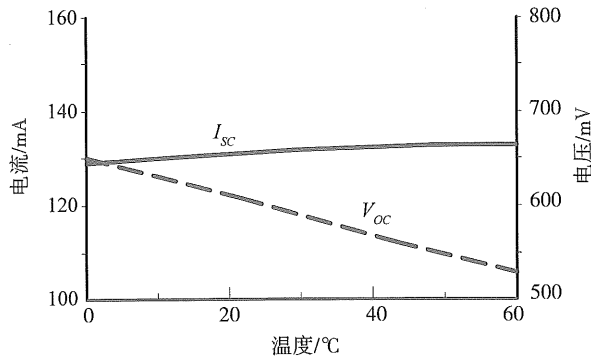


图 2 晶硅太阳能电池组件温度特性曲线
Fig. 2 Crystalline silicon solar cells temperature curve

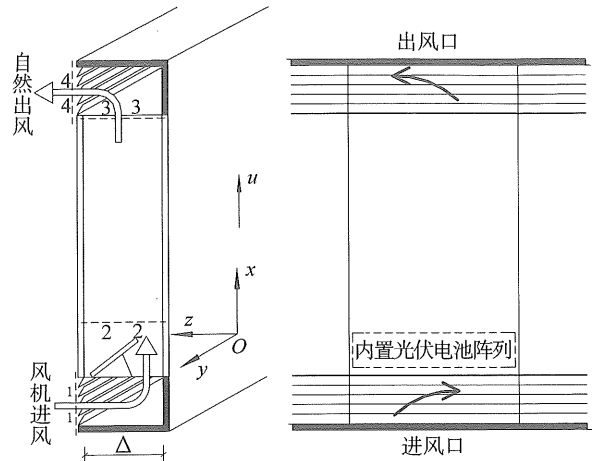


图 3 双层玻璃幕墙示意图
Fig. 3 The sketch of double curtain wall structure

2 热通道光伏幕墙的热气流计算

本文将光伏电池阵列与双层玻璃幕墙结合起来，将太阳能电池安装在双层玻璃之间的热通道内，既最大限度利用建筑外墙，不占面积；还有利于牢固安全，便于安装；更能利用热气流通风有效降低太阳能电池的工作温度，维持太阳能电池较高的光电转换效率。

在太阳辐射作用下，双层玻璃幕墙热通道内空气受热质量力驱动下产生自然流动能产生“烟囱效应”，再加上安装的风机机械送（或抽）风作用，将大为增加热通道气流的流量，更能有效地发挥双层幕墙隔热降温的作用。这种流动状态称为强迫送风，与文 [12] 只考虑单由质量力产生的自然流动有所不同。本文重新写出在太阳辐射照度作用下，处于强迫送风状态的双层玻璃幕墙热气流所应满足的方程。

双层玻璃幕墙一般外层为夹胶玻璃，内层为中空玻璃，通道间距为 Δ 远小于宽度及高度，选取的坐标系 $Oxyz$ （结构如图 3 所示）。热气流是稳定，低速（小于 90 m/s），不可压缩的，忽略黏性力影响，可看作理想流体。进入通道后气流在 z 向速度变化小，沿 y 方向流动是次要的，只有 x 方向流动是主要的。因而热气流流动可以看作一维流动。此时，通道内气流速度仅以 u 表示，应满足连续性方程、N-S 动量方程及温度场（ z 向）变化方程。

设风机源压力为 P_a ，风量为 Q_a ，已知进风口面积后可得出 1-1 截面的气流速度 u_1 及压力 P_1 。

1-1 至 2-2 截面热气流应满足贝努里能量方程

$$P_a = P_1 + \alpha \rho_1 \cdot \frac{u_1^2}{2} = P_2 + \alpha \cdot \rho_2 \cdot \frac{u_2^2}{2} (1 + \zeta_1) \quad (3)$$

式中 P_i 、 u_i 、 ρ_i 分别为气流在 $i-i$ 截面的压力、速度和气流的密度； ζ_1 为气流在入口段的局部阻力损失以及增加太阳能电池板后对气流的阻力影响系数； α 为动能修正系数。

2-2 至 3-3 截面通道内热气流应满足如下方程

$$\text{连续性方程: } \rho_i \frac{du}{dx} = 0 \quad (4)$$

$$\text{动量方程: } u \frac{du}{dx} = \bar{x} - \frac{1}{\rho_i} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (5)$$

$$\text{温度场方程: } u \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

式中 P 为通道内气流的压力； T 为通道内气流的温度； \bar{x} 为单位质量力在 x 向的投影。由玻璃受太阳热辐射使气流热膨胀（密度差）而产生。

3-3 至 4-4 截面热气流应满足贝努里能量方程

$$P_3 + \alpha \cdot \rho_3 \cdot \frac{u_3^2}{2} = P_4 + \alpha \cdot \rho_4 \cdot \frac{u_4^2}{2} (1 + \zeta_3) \quad (7)$$

式中 ζ_3 为气流在出口段局部阻力损失系数。

双层玻璃幕墙热气流流动要满足偏微分方程组，质量力 \bar{x} 与温度差和 x 的函数关系，同时还要满足进出风口段的贝努里能量方程，方程组是耦合的，并且是非线性的，要精确求解非常困难。用有限分析法将耦合偏微分方程解耦，先局部得到解析解，再通过单元段间速度、温度、流量及压力连续条件化为全局数值解，计算出通道内各截面热气流的速度与温度值，进而了解太阳能电池工作环境温度及通风降温效果。

3 实验研究及参数测定

节能型热通道光伏幕墙的特点是外侧玻璃幕墙上下两端设有进出风口, 内外两层玻璃之间形成一个相对封闭的热通道, 在进风口段安装由阳光自动追踪器控制的移动式太阳能电池板, 在进(出)风口安装风机, 由太阳能电池直接供电可进行强迫送(抽)风。这样的设计既可以节省投资成本, 改善建筑内部及太阳能电池表面的微气候环境, 提高建筑内部环境舒适度及维持较高的太阳能电池转换效率, 同时还不妨碍玻璃幕墙的外观效果, 满足现代建筑的设计需要。

本文设计了实物模型试验, 对一段时间内的太阳辐射照度作用下双层玻璃幕墙热通道内气流速度、温度以及太阳能电池组件相关参数变化进行测定。选择广州地区夏季不同太阳时辐射照度下, 开启双层玻璃幕墙的进出风口, 进行双层玻璃幕墙受“烟囱效应”和风机强迫送风组合作用下产生热气流模型试验, 观察热气流速度和温度场变化以及太阳能电池工作性能状态。实测幕墙接受的太阳辐射照度, 入口、通道截面及出口处热气流的速度和温度, 以及太阳能电池电压、电流及功率等相关参数, 进一步分析太阳能电池转换效率与热通道气流温度变化之间的关系。

实验选择单进风单出风模型(结构如图4所示)的几何尺寸为: $\Delta = 0.4 \text{ m}$, $b = 1.2 \text{ m}$, $h = 2.5 \text{ m}$ 。广州地区夏(秋)季太阳时: 15, 朝向 W(S): I (W/m^2), 由国家标准 GBJ19-87(2001年版)确定。由于天气闷热, 室外平均气温由平

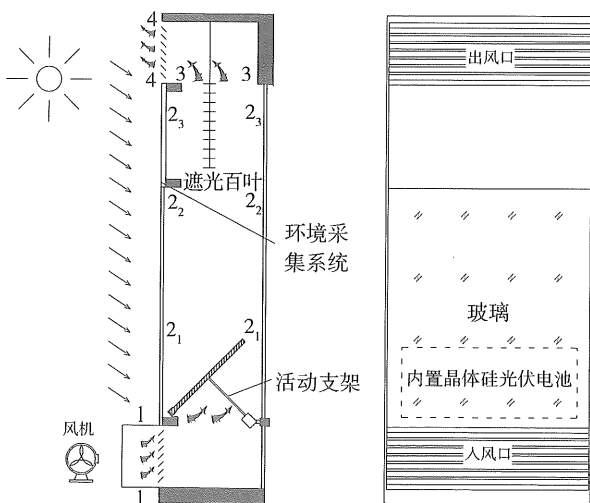


图4 热通道光伏幕墙试验模型示意图

Fig. 4 The sketch of experiment model

均值 $31.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 加上最高温幅值计算。进风口设置直流离心风机送风 $P_e = 0.92 \text{ Pa}$, 速度 $u_0 = 0.22 \text{ m/s}$, 源压 $P_0 = P_e + \frac{\rho \cdot u_0^2}{2}$, 风机功率为 $2 \times 15 \text{ W}$, 用有限分析法将非线性偏微分方程解耦, 计算出双层幕墙热气流速度和温度与实验测出相应截面的速度和温度值比较, 结果见表1。

有限单元划分可以根据需要确定, 为了与实验值对比作如下划分: 截面1-1至2-2为第1单元; 截面2-2至3-3分为3单元; 截面3-3至4-4为第5单元。经过计算结果如下:

外层玻璃表温: $38.93 \text{ }^\circ\text{C}$,

内层玻璃外表温: $35.74 \text{ }^\circ\text{C}$,

夹道内最高平均温度: $37.56 \text{ }^\circ\text{C}$,

通道入口气流速度 u_1 : 0.354 m/s ,

热气流带走流量 Q : $550.631 \text{ m}^3/\text{h}$,

热效率 k : 28.36% 。

计算出各截面热气流的速度和温度与实验值对照, 列于表1。

表1 计算结果与实验值对照

Table 1 The experiment and calculation comparison

截面	计算值	实验值	计算值	实验值
	$u_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_i/^\circ\text{C}$	$t_i/^\circ\text{C}$
1-1	0.332	0.34	35.50	35.50
2 ₁ -2 ₁	0.171	0.18	35.67	36.07
2 ₂ -2 ₂	0.217	0.24	35.92	36.53
2 ₃ -2 ₃	0.263	0.28	36.29	37.04
3-3	0.332	0.35	37.07	37.43
4-4	0.354	0.37	37.73	38.05

本文计算了由硅型太阳能电池发电供应风机强迫送风热气流的气流速度和温度值, 并与实验值对比, 两者基本一致。

一方面, 本实验模型在双层幕墙进风口段装备有晶体硅太阳能电池阵列, 采光面积为 $1040 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 实测入射到电池板上的平均太阳总辐射 $769 \text{ W}/\text{m}^2$, 表面温度 $35 \sim 37 \text{ }^\circ\text{C}$ 平均 $36 \text{ }^\circ\text{C}$, 在此工作温度下实测电池 I_m 为 5.01 A , 电压 V_m 为 12.45 V , 得到输出功率 N_m 为 62.37 W , 平均转换效率 η 为 12.99% 。

另一方面, 我们还设计一块由同样面积、同一材质晶体硅太阳能电池组成的光伏幕墙直接放置于建筑外立面上。在同一太阳辐射照度下, 由于没有强迫送风产生热气流进行散热, 太阳能电池表面温度较高。实测该太阳能电池板表面温度为 $57 \sim$

63 ℃, 平均 59 ℃, 实测电流 I_m 为 5.02 A, 电压 V_m 为 11.34 V, 得到输出功率 N_m 为 56.93 W, 平均转换效率 η 为 11.86%。

对比上述两者, 热通道内设置晶体硅太阳能电池时转换效率提高了约 10%, 说明通道热气流既可隔热降温, 保持室内舒适环境; 还能使太阳能光伏电池稳定、高效地工作。

4 小结及展望

综上所述, 在太阳能电池与建筑相结合设计中, 应当注意通风降温问题, 以避免温度过高造成发电转换效率大幅降低^[13]。本文提出了双层玻璃幕墙热通道气流隔热和太阳能电池降温相结合的一体化设计方案。它不仅可以积极调节阳光辐射, 改善建筑内部环境卫生; 还能主动利用空气流动散热, 起到节约能源的作用。本文还设计了实物模型试验, 对一段时间内的太阳辐照度和热通道气流温度以及太阳能电池组件和户外环境温度变化进行测试, 通过理论计算结果和模型测试数据的对比分析, 从而为进一步优化节能型热通道光伏幕墙设计方案及智能控制系统研发提供一定的依据。

在双层幕墙内、外侧设置太阳光辐射照度、气流风速及表面温度传感器自动采集多项环境参数, 使用微型智能控制系统自动控制通道内太阳能电池板的角度变化和上部遮光百叶的开启状态, 还可组合构成智能幕墙系统, 而光伏电池阵列正好提供了整个系统的动力保障, 不再需要城市电网支持, 如果大面积使用还可以并网发电, 带来更大的社会效益^[14], 有力推动我国光伏产业的可持续发展。

参考文献:

[1] 中国可再生能源发展项目办公室. 中国光伏产业发展

研究报告[R]. 北京: 中国可再生能源发展项目办公室, 2004.

- [2] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 李芳, 沈辉, 许家瑞, 等. 光伏建筑一体化的现状与发展[J]. 电源技术, 2007, 31(8): 659-662.
- [4] 赵富鑫, 魏彦章. 太阳电池及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [5] 陈海, 姜清海, 郭金基, 等. 太阳辐射作用下双层玻璃幕墙热通道的节能计算与实验研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, 45(6): 35-39.
- [6] 黄汉云. 太阳能光伏发电应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [7] 中国标准出版社. 电池标准汇编(太阳能电池卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [8] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [9] WOYTE A, NIJS J, RONNIE R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: Literature review and field test results[J]. Solar Energy, 2003(74): 217.
- [10] 赵军, 秦娜, 段征强. 太阳电池及光伏热(PV/T)结构的实验研究[J]. 太阳能学报. 2009, 30(3): 327-331.
- [11] LU Lin, YANG Hongxing, BURNETT John. Investigation on wind potential on Hong Kong islands-an analysis of wind power and wind turbine characteristics[J]. Renewable Energy, 2002, 27(4): 1-12.
- [12] 陈海, 姜清海, 郭金基, 等. 双层通风幕墙热气流有限分析计算方法的研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(1): 34-37.
- [13] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓英, 等. 太阳能光伏发电及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 张耀明. 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景[J]. 新能源与新材料, 2007, 1: 1-6.