

DOI:10.11784/tdxbz201503036

电热冷联产光伏辐射板集热集冷性能优化

孙 勇¹, 王一平^{1,2}, 魏世超², 黄群武², 朱 丽^{1,2}, 崔 勇³

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 天津大学化工学院, 天津 300072;

3. 天津大学建筑设计研究院, 天津 300073)

摘要:建立了电热冷联产光伏辐射板(PV/R)组件三维计算流体力学模型,采用 Fluent 软件进行了夏季晴天工况下管间距和操作流量对组件集热集冷性能影响的模拟分析与优化,并探讨了 PV/R 组件的经济性和运行模式.集热模式下,PV/R 组件电池平均工作温度能控制到 50℃以下,增加流体流量、减小铜管间距有利于降低电池工作温度,但减小管间距不利于集热温度和集热效率的提高.集冷模式下,提高流体与环境之间温差能有效提升辐射制冷功率,流体与环境温差为 5~10℃时,辐射制冷功率达到 40~90 W/m².权衡集热和集冷性能,PV/R 组件优化管间距和适宜流量范围分别为 130 mm 和 180~240 L/h,对应的集热温度、集热效率和辐射制冷功率分别为 38~45℃、48%~52%和 50~60 W/m².

关键词:电热冷联产;光伏辐射板;辐射制冷;数值模拟

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2016)08-0823-07

Heating and Cooling Performance Optimization of Power, Heating and Cooling Poly-Generation Photovoltaic Radiant Panel

Sun Yong¹, Wang Yiping^{1,2}, Wei Shichao², Huang Qunwu², Zhu Li^{1,2}, Cui Yong³

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Tianjin University Research Institute of Architectural Design, Tianjin 300073, China)

Abstract: 3D computational fluid dynamics models of power, heating and cooling poly-generation photovoltaic radiant panel(PV/R) module were established, and influences of tube spacing and flow rate on heating and cooling performance of PV/R module in summer conditions were analyzed using Fluent. Economical and operation mode were discussed simultaneously. For heat-collecting mode, average working temperature of PV/R module can be controlled below 50℃ and the working temperature of solar cell decreases with raising flow rate and decreasing tube spacing, but decreasing tube spacing is not beneficial to increasing heat-collecting temperature and efficiency. For cooling mode, increasing inlet and ambient temperature difference can effectively improve radiant cooling rate, and its value can reach 40—90 W/m² when temperature difference is 5—10℃. Taking heating and cooling performance into consideration, recommended tube spacing and flow rate are 130 mm and 180—240 L/h respectively, the corresponding heat-collecting temperature and efficiency and radiant cooling rate being 38—45℃, 48%—52% and 50—60 W/m² respectively.

Keywords: power, heating and cooling poly-generation; photovoltaic radiant panel(PV/R); radiant cooling; numerical simulation

光伏电热联用系统(photovoltaic/thermal, PV/T)既能提高电池发电效率,又能提供与建筑用能匹配的

热量,已成为光伏建筑一体化研究的热点^[1].荷兰能源研究中心连续几年就 PV/T 的研究进展进行了综

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478297); 国家教育部与国家外国专家局高等学校学科创新引智计划资助项目(B13011).

作者简介: 孙 勇(1984—),男,博士,助理研究员, sunyong-1984@163.com.

通讯作者: 朱 丽, zly_tj@163.com.

网络出版时间: 2015-11-24. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20151124.0904.002.html>.

述,并提出了研究方向^[2].近 25 年间有 50 多项关于 PV/T 的科研项目^[3],许多创新的系统经过理论和实践的证明已经广泛应用于实际生活.

太空辐射制冷是直接利用可再生能源的制冷技术,借助于接近绝对零度宇宙空间,以宇宙空间或者高层大气作为冷源,地面物体以辐射方式将热量散失到太空中,不需要消耗任何能量就可以达到冷却地面物体的目的,这是完全以辐射方式将热量释放到宇宙空间的制冷方式^[4].

为尽可能提高太阳能综合利用效率,本课题组结合 PV/T 与太空辐射制冷技术,提出了新型电热冷联产光伏辐射板 (photovoltaic radiant panel, PV/R) 组件.在电池组件背面敷设流体通道,白天利用低温流体循环收集热量以降低电池温度,夜间利用辐射制冷为流道内流体降温.具有电热冷多功能的 PV/R 组件,通过与建筑一体化集成,采用一套可再生能源利用装置同时解决冷、热、电 3 种能量需求.新型 PV/R 组件具有良好的电热冷联产性能,在降低建筑能耗应用方面有很大吸引力.欧洲 2010 年太阳能十项全能竞赛中,天津大学参赛作品 Sunflower 太阳房使用了新型 PV/R 组件.在马德里夏季,测得组件工作温度可以维持在 30 ~ 50 °C 之间,发电效率提高 10% ~ 14%,集热效率为 45% 左右,制冷功率为 40 ~ 80 W/m²^[5].

但已有的研究^[6]仅是针对特定结构形式的 PV/R 组件的宏观性能测试,没有进行背面排管数目、管间距等结构参数的优化,以及流体流量、进口温度等操作参数对光伏辐射板性能影响的深入分析.为此,笔者使用数值模拟的方法,在合理假设基础上,建立了 PV/R 组件的三维计算流体力学模型.利用商业软件 Fluent,针对夏季晴朗天气条件,进行了 PV/R 组件不同操作工况和结构形式下集热和集冷性能的模拟研究与优化分析.

1 光伏辐射板组件模型

1.1 光伏辐射板组件结构

PV/R 组件由 PV 组件和辐射板两部分组成. PV 组件包括光伏玻璃、电池、电池背板结构;辐射板由铝板、铝型材、铜管构成,各层间由 EVA 胶层黏合,结构如图 1 所示.实验测试所用光伏组件(型号: CNPV-240M)尺寸为 1 600 mm × 1 000 mm × 12 mm,标准状况下(25 °C, 1 000 W/m²)光电转换效率为 16%,最大功率为 240.2 W、最大功率温度系数为 -0.40%/°C. 8 根铜管以间距 110 mm 均匀分布在

PV/R 组件背部.铝型材尺寸为 1 600 mm × 60 mm × 2 mm,背面为半圆形卡槽,用于固定铜管.铜管直径 10 mm,壁厚 0.3 mm,长 1 600 mm,嵌于铝型材卡槽内.为保证组件均匀的温度分布和较小的温差,铜管采用并联连接.

PV/R 组件三维计算流体力学建模过程中为简化模型、提高计算速度,做了如下合理假设:① 考虑组件具有对称结构,仅选取对称结构的一半进行建模和计算;② 考虑电池片之间排列紧密,可忽略电池片间隙,电池层按照整体建模;③ 考虑弧形划分网格复杂,卡槽的弧形过渡部分建模时简化为规则矩形.

为了研究铜管间距对组件性能的影响,分别建立了 100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm、150 mm 的不同管间距结构组件模型.

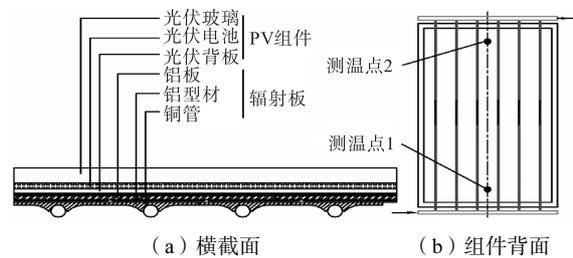


图 1 电热冷联产光伏辐射板(PV/R)组件的构造

Fig.1 Structure of power, heating and cooling poly-generation PV/R module

1.2 网格划分

采用六面体结构网格进行模型的网格划分.因模型长宽比较大,长度方向网络尺寸取 8 mm;宽度方向上,玻璃层取 1 mm,铜管及流体区取 0.5 mm,其他区域取 1 mm.

1.3 边界条件

PV/R 组件表面接收的太阳辐射能量,首先被组件表面玻璃盖板等材料反射、吸收,这部分能量约占 10%^[7];剩余能量被电池吸收转化为电能和热量. PV/R 组件工作温度范围约 35 ~ 55 °C,根据最大功率温度系数可计算出组件光电转换效率范围为 15.36% ~ 14.08%,如果忽略光电转换效率随温度的变化,假设其始终不变,则导致的电池集热量计算误差不超过 1.5%;因此为简化边界条件设置,模拟中组件光电转换效率假设恒定,取 15%.从而得出太阳辐射能量中被电池吸收转化为热量的比例为 75%.夏季天气晴朗时,太阳辐照度可以达到 1 000 W/m²,即 750 W/m² 的太阳辐射被 PV/R 组件吸收并转换成热量.

PV/R 组件表面与空气进行对流传热,因此模型壁面为对流传热边界,风速不超过 4 m/s 条件下,壁

面的对流传热系数与风速关系为 $h_s = 5.7 + 3.8 v'$ ，其中 v' 为空气流速。

根据实验天气条件，集热模式取环境温度为 35 °C，流体进口温度为 25 °C，风速为 1 m/s。集冷模式假设夜间晴朗，环境温度为 28 °C，风速为 3 m/s。

1.4 控制方程

环境条件变化不大的情况下，组件可认为处于稳态运行。因此，本文采用稳态计算方法研究了不同结构组件在特定环境条件和操作条件下的性能。

组件传热过程中包括 3 种传热方式：固体和流体内部的热传导，空气与壁面的对流传热，以及流体与固体界面的流固耦合传热。各流量下雷诺数 Re 均小于 2 000，因此管内为稳态层流流动。

连续性方程

$$\text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\text{div}(\rho u \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \partial p / \partial x \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho v \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \partial p / \partial y - \rho g \sin \theta \quad (3)$$

$$\text{div}(\rho w \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \partial p / \partial z - \rho g \cos \theta \quad (4)$$

能量方程

$$\text{div}(\rho h \mathbf{v}) = \text{div}(k \text{grad} T) \quad (5)$$

傅里叶热传导方程

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (6)$$

式中： ρ 为流体密度； \mathbf{v} 为流体速度； u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量； μ 为流体动力黏度； p 为作用在流体上的总压； h 为流体焓值； T 为流体温度； k 为流体导热率； k_s 为固体导热率； θ 为组件相对地面的倾斜角。

1.5 解算方法

采用有限体积法进行离散化，离散格式为一阶迎风，采用 Simple 算法耦合速度与压力。模型求解时，首先计算流动方程，当速度场收敛后，再选择能量方式，对流动方程和能量方式进行同时求解。计算过程中，当连续性方程、能量方程和动量方程的计算残差分别小于 10^{-3} 、 10^{-6} 和 10^{-6} 时，认为已收敛，求解过程结束。

1.6 模型验证

根据 2014 年 5 月 23 日凌晨和中午一段时间内气象条件分别进行 PV/R 组件集热与集冷模式下的模拟计算，将模拟得到的流体出口温度和组件背板平均温度与实验测得的数据对比验证。实验的气象条件如图 2 所示，集热模式在白天进行，当天环境温度稳定在 34 °C 左右，露点温度 22 °C 左右，风速 2 ~

4 m/s，总辐照度约为 900 ~ 750 W/m²；集冷模式在夜间进行，当晚环境温度为 28 °C 左右，露点温度 23 °C 左右，风速在 0 ~ 2 m/s。在两段时范围内，气象条件基本保持稳定，可认为组件为稳态运行。

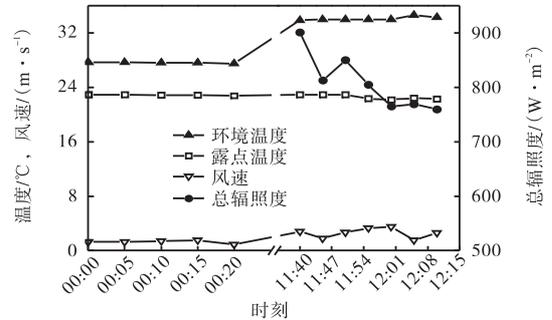
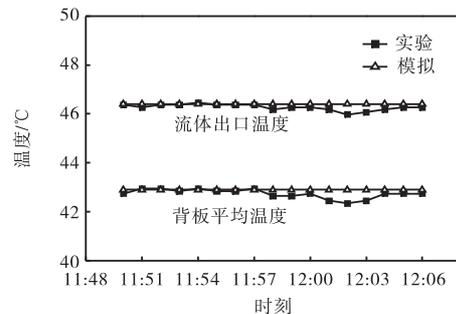


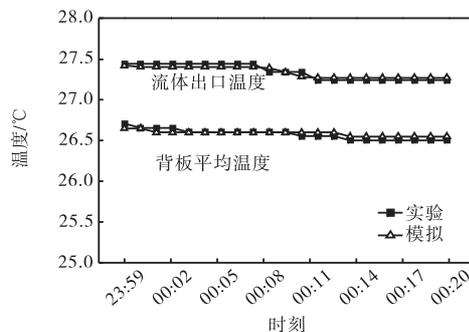
图 2 集热集冷实验的气象条件

Fig.2 Climate conditions of heating and cooling performance test

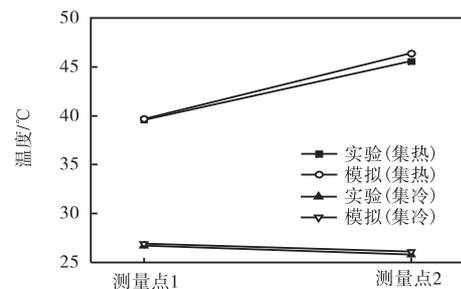
图 3 为集热与集冷模式下流体出口温度和组件



(a) 集热模式



(b) 集冷模式



(c) 轴向测温点

图 3 模拟结果与实测温度对比

Fig.3 Comparisons between predicted and measured temperatures

背板平均温度以及组件背板轴向测温点的模拟与实验结果对比。由图 3(a)和 3(b)可看出在测试时间段内,集热模式下,流体出口温度在 46~47 °C 之间,组件背板温度在 43 °C 左右。集冷模式下,流体出口温度在 27.5 °C 左右,组件背板温度约为 26.5 °C,模拟的温度变化趋势与实测变化情况比较一致;由图 3(c)可看出测温点 1 和 2 的模拟结果与实验数据最大温度偏差不超过 1 °C,基本吻合。说明采用数值模拟方法进行稳定条件下 PV/R 组件夏季工况集热集冷性能研究是可靠的。

2 集热模式结果分析与讨论

在环境温度和流体进口温度稳定的状态下,对 6 个管间距 (100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm、150 mm) 组件在 9 组流量 (40 L/h、60 L/h、80 L/h、100 L/h、120 L/h、150 L/h、180 L/h、240 L/h、320 L/h) 下的集热性能进行了模拟。

2.1 流量对组件集热性能的影响

2.1.1 集热效率

PV/R 组件的集热效率 η_t 定义为流体流过铜管吸收的热量与组件表面接收的太阳辐照之比,即

$$\eta_t = \frac{cq_m(t_{out} - t_{in})}{S\alpha} \quad (7)$$

式中: c 、 q_m 分别为流体的比热容和质量流量; t_{out} 和 t_{in} 分别为铜管的出口和进口温度; S 为到达组件表面的太阳辐照; α 为组件上表面的吸收率。

不同管间距组件在不同流量下的集热效率如图 4 所示。40~150 L/h 范围内,集热效率增幅较大,升高约 10%~15%;超过 180 L/h 后增幅较小,从 240 L/h 增加到 320 L/h,集热效率升高约 2%。间距每增加 10 mm,集热效率升高 3%~4%。流量 180 L/h 时,100 mm 间距组件集热效率为 42.2%,150 mm 间

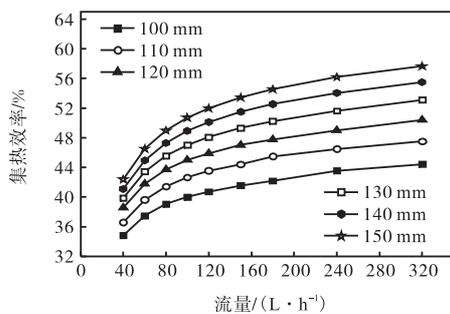


图 4 不同流量下不同管间距 PV/R 组件集热效率

Fig.4 Thermal efficiency of PV/R module under different tube spacings and flow rates

距组件集热效率升高到 54.6%,可见适当增大管间距有利于提高组件集热效率。

2.1.2 集热温度

如图 5 所示,PV/R 组件的集热温度随流量增大而降低,且流量越大降低幅度越缓慢。当流量为 40 L/h 时,流体温度最高,为 48~53 °C 之间;流量增加到 120 L/h,流体温度为 39~43 °C,温度降低 9 °C;流量为 320 L/h,流体温度为 35~38 °C,温度降低 5 °C 左右。流量小时,流体集热过高,微小流量变化易引起流体集热温度较大变化,通过调节流量控制温度难度较大;但流量过大时,流量变化对温度影响较小,但对能耗影响较大,因此应结合组件其他性能分析,对流量进行优化。

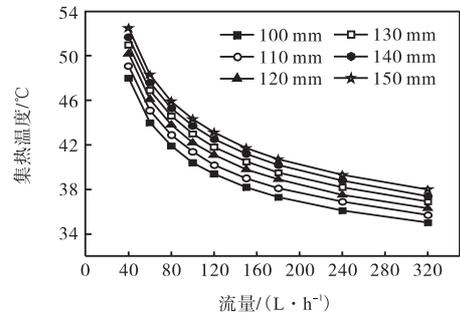


图 5 集热温度变化

Fig.5 Variation in heat-collecting temperature

2.1.3 电池平均工作温度

传统 PV 组件流量以及不同管间距 PV/R 组件流量 40~320 L/h 下的平均工作温度如图 6 所示。可以看出传统 PV 组件因背板无散热措施,仅靠空气对流散热组件的平均工作温度高达 74 °C,而 PV/R 组件因背面辐射板中流体的强制对流传热,电池平均工作温度均不超过 54 °C,与传统 PV 组件相比降低了至少 20 °C,因此减少管间距有利于降低 PV/R 组件电池平均工作温度。因此较大流量下,不适合采用流量调节的方法实现电池工作温度降低。

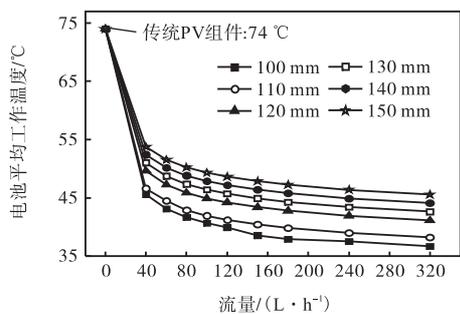


图 6 PV/R 组件的电池平均工作温度

Fig.6 Solar cell average working temperature of PV/R module

为控制电池工作温度不高于 50 °C，100 mm、120 mm 和 150 mm 管间距组件的最小流量应分别不低于 40 L/h、80 L/h 和 120 L/h。

不同工作温度下 PV/R 组件理论光电转换效率如图 7 所示。传统 PV 组件 74 °C 下效率为 12.86%。而 PV/R 组件如果工作温度控制在 45 ~ 55 °C，则效率能达到 14.72% ~ 14.08%，与传统 PV 组件相比提高了 9.5% ~ 14.4%；如果工作温度控制到 35 °C，则效率能达到 15.36%，提高比例为 19.4%。因此，因工作温度的大幅降低，PV/R 组件与传统 PV 组件相比，其光电转换效率能够提高 10% 以上。

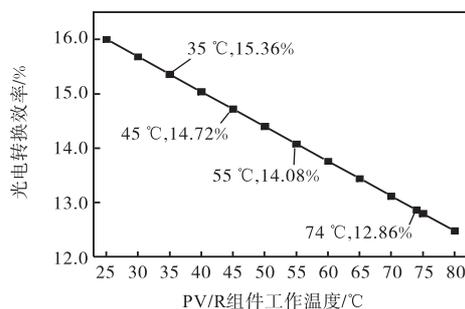


图 7 不同工作温度下 PV/R 组件的理论光电转换效率
Fig.7 Sunlight to electricity efficiency of PV/R module under different working temperatures

2.2 管间距对组件温度性能的影响

2.2.1 电池温度分布

图 8 给出了 120 L/h 流量下不同管间距的 PV/R 组件的电池层温度分布。可以看出管间距越小电池层横向上的温度分布越不均匀，管间距 100 mm 和 110 mm 组件在横向上两边缘温度偏高，达到了 60 °C，这是因为管间距太小，导致组件边缘距离铜管较远，因此边缘温度明显高于铜管覆盖区域主体温度。随管间距增大到 120 mm 以上，电池层的温度均匀性越好。温度分布不均匀将导致组件发电效率降低。因

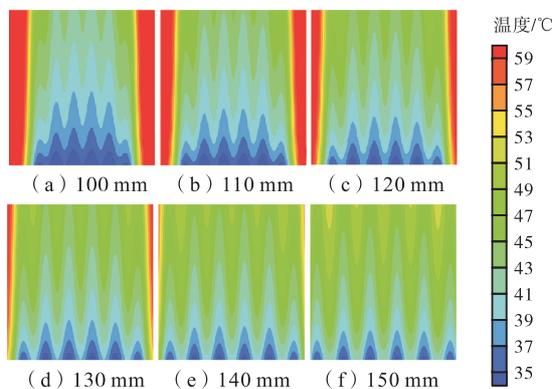


图 8 不同管间距 PV/R 组件的电池层温度分布
Fig.8 Solar cell layer temperature distributions of PV/R module with different tube spacings

此从提高组件发电效率角度考虑，应适当增加铜管管间距。

2.2.2 电池轴向温差

如图 9 所示，电池轴向温差随流量增大而减小。同一流量下，管间距每增大 10 mm，电池温度上升 2 °C 左右，轴向温差增大。当流量小于 120 L/h 时，不同管间距组件轴向温差均超过 10 °C。为保证轴向温差不超过 10 °C，100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm 和 150 mm 管间距组件的流量应分别不低于 100 L/h、120 L/h、140 L/h、180 L/h、240 L/h 和 280 L/h。

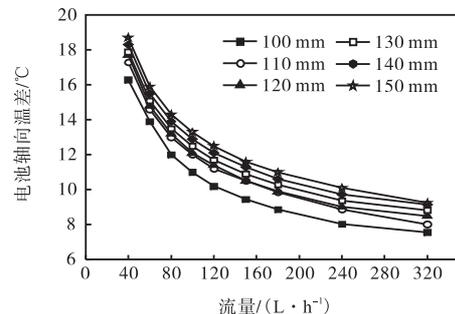


图 9 PV/R 组件的电池轴向温差
Fig.9 Solar cell axial temperature difference of PV/R module

3 集冷模式结果分析与讨论

辐射制冷效果受环境条件影响严重，环境温度、相对湿度、云层厚度等任何因素的改变都会引起辐射散热量发生重大变化。为探究最优的组件结构和操作条件，选取稳定且良好的环境条件作为计算条件。

由集热模式结果的分析可知，铜管间距太大时，电池温度、集热温度和温差都较高，电池温度分布波动性强，与小间距组件相比性能较差。Etzion 等^[8]提出，为提高辐射制冷性能，辐射板背板铜管排布间距应该尽量小，理想的辐射板背板铜管应紧密排布。所以，集冷模式取 100 ~ 130 mm 间距组件为研究对象。

3.1 流量对辐射制冷性能的影响

不同流量下不同间距组件的辐射制冷功率如图 10 所示。在 40 ~ 180 L/h 流量范围内，辐射制冷功率随流量增加快速增大，100 mm 管间距组件制冷功率从 53.1 W/m² 增加到 67.0 W/m²，升高 26%；130 mm 管间距组件制冷功率从 46.4 W/m² 升高到 56.2 W/m²，升高 21%。流量大于 240 L/h 后，组件辐射制冷功率随流量增加趋势逐渐趋缓；流量从 240 L/h 增加到 320 L/h，不同管间距组件的辐射制冷

功率增加均不超过 5 W/m^2 , 低于小流量下的增幅. 所以, 为提高辐射制冷功率应尽量增加流体流量, 但流量应不高于 240 L/h .

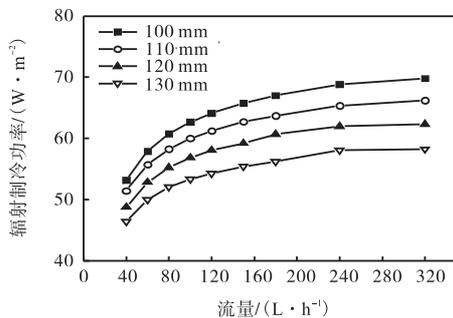


图 10 不同流量下 PV/R 组件的辐射制冷功率

Fig.10 Radiant cooling rate of PV/R module under different flow rates

3.2 流体进口温度对辐射制冷性能的影响

如图 11 所示, 当进口温度低于或接近环境温度时, 不同结构组件的辐射制冷功率均不足 20 W/m^2 . 与环境温差为 $5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 辐射制冷功率约为 $40 \sim 90 \text{ W/m}^2$; 与环境温差达到 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 辐射制冷功率提高到 $130 \sim 140 \text{ W/m}^2$. 随流体进口温度与环境温差的增大, 不同结构组件的辐射制冷功率均显著提升, 这是因为提高进口温度, 组件整体温度上升, 增加了辐射换热温差. 为保证 PV/R 组件具有较高的辐射制冷功率, 辐射制冷时流体温度应高于环境温度 $5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

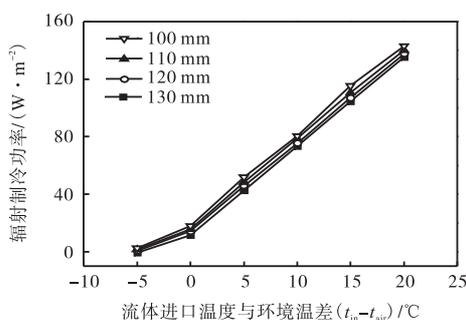


图 11 不同流体进口温度与环境温差下 PV/R 组件辐射制冷功率

Fig.11 Radiant cooling rate of PV/R module under different inlet and ambient temperature differences

4 PV/R 组件管间距与流量优化分析

电能是比热能品位高的能源, 新型 PV/R 组件以提高电能为主要目的, 集热过程是为了降低电池温度, 提高发电效率. 因此, 结合上文分析, 为控制 PV/R 组件平均工作温度不超过 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、轴向温差不得超过 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 同时权衡组件的集热效率和制冷功率, 根

据模拟结果建议 PV/R 组件的优化管间距取 130 mm , 该管间距下的适宜流量范围为 $180 \sim 240 \text{ L/h}$. 表 1 给出了优化管间距和流量下 PV/R 组件的集热集冷性能.

表 1 优化管间距和流量下 PV/R 组件的集热集冷性能
Tab.1 Heating and cooling performance of PV/R module under optimized tube spacing and flow rate

管间距/mm	流量范围/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均工作 温度/ $^\circ\text{C}$	集热温 度/ $^\circ\text{C}$	集热效 率/%	制冷功率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
130	180 ~ 240	45 ~ 48	38 ~ 45	48 ~ 52	50 ~ 60

5 PV/R 组件经济性分析及运行模式分析

5.1 PV/R 组件经济性分析

PV/R 组件直接在传统光伏生产线上完成, 无需任何附加工艺^[5], 因此与增加的加工成本相比, 增加的材料成本是影响 PV/R 组件经济性的主要因素. 与传统 PV 组件相比, PV/R 组件增加了铜管、铝板、铝型材、EVA 以及其他(导热胶、接口管件等)等材料. 以本文中组件为例, 表 2 给出了增加的材料成本, 可以看出每块 PV/R 组件增加的材料总成本约 $319 \sim 377 \text{ 元}$, 折算成单位面积约为 $200 \sim 235 \text{ 元/m}^2$, 如果大规模生产, 则增加的成本会进一步降低. 最大功率为 240.2 W 的 PV 组件市场价格约为 $960 \sim 1200 \text{ 元}$, 相比 PV 组件, PV/R 组件成本增加约 $15\% \sim 20\%$, 但由单一发电功能提升为电热冷联产功能. 因此, PV/R 组件作为一种新型的可再生能源综合利用产品, 具有很好的经济性和推广价值.

表 2 PV/R 组件增加的材料成本(以尺寸 $1600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 组件为例)

Tab.2 Added material cost of PV/R module (module dimension of $1600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$)

材料	数量	单价	成本/元	总成本/元
铜管	2.5 ~ 3.0 kg	59 元/kg	148 ~ 177	319 ~ 377
铝板和铝型材	4.0 ~ 5.0 kg	29 元/kg	116 ~ 145	
EVA	2.55 m^2	9.8 元/ m^2	25	
其他	—	—	30	

5.2 PV/R 组件运行模式分析

普通 PV/T 组件集热温度一般为 $40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[9-11], 而 PV/R 组件集热是为了降低电池温度、提高发电效率, 因此夏季工况下集热温度约 $38 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$, 冬季工况下随环境温度的降低, 集热温度更低, 不满足直接供热水或采暖温度要求; 夏季辐射制冷时, 为保证组件具有较高制冷功率, 流体温度高出环境温度 $5 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 所收集低温流体也不适合直接制冷. 但 PV/R 组

件的集热和集冷流体是热泵的理想热源和冷源,二者结合有利于提高热泵能效比^[5,12],因此 PV/R 组件适合与热泵集成,构成基于 PV/R 组件的多源热泵系统,用于建筑采暖制冷。如果从系统全年运行性能最优角度考虑,与热泵集成的基础上耦合跨季节蓄能,通过夏热冬用和冬冷夏用,可实现进一步节能。考虑建筑用能特性,进行基于 PV/R 组件的多源热泵系统运行模式研究与优化是实现 PV/R 组件技术与建筑一体化的关键,将在下一步研究中深入开展。

6 结 论

本文建立了 PV/R 组件的三维计算流体力学模型,采用 Fluent 软件进行了夏季晴天工况下管间距和操作流量对组件白天集热、夜间集冷性能影响的模拟分析与优化,同时分析了 PV/R 组件的经济性和运行模式,结论如下。

(1) 集热模式下, PV/R 组件电池工作温度能控制到 50 °C 以下,与传统 PV 组件相比降低 20 °C 以上,光电转换效率提高 10% 以上;增加流体流量、减小铜管间距有利于降低电池工作温度,但减小管间距不利于集热温度和集热效率的提高。

(2) 集冷模式下,减小铜管间距、增大流体流量可增加组件辐射制冷功率;提高流体与环境之间温差能有效提升辐射制冷功率,流体与环境温差为 5 ~ 10 °C 时,辐射制冷功率达到 40 ~ 90 W/m²。

(3) 权衡集热和集冷性能, PV/R 组件的优化管间距和适宜流量范围为 130 mm 和 180 ~ 240 L/h,对应的集热温度、集热效率和辐射制冷功率分别为 38 ~ 45 °C、48% ~ 52% 和 50 ~ 60 W/m²。

(4) PV/R 组件相比 PV 组件成本增加约 15% ~ 20%; PV/R 组件集热、集冷温度不适合建筑直接供热或制冷,但与热泵集成有利于提高热泵能效比;基于 PV/R 组件的热泵系统运行模式研究与优化将在下一步工作中深入开展。

参考文献:

- [1] Chow T T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(2): 365-379.
- [2] Zondag H A, Van Helden W G J, Bakker M. PVT Roadmap: A European guide for the development and market introduction of PVT technology[C]//20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona, Spain, 2005.
- [3] Hansen J, Sorensen H, Bystrom J, et al. Market, modeling, testing and demonstration in the framework of IEA SHC task 35 on PV/thermal solar systems[C]//22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Milan, Italy, 2007: 3-7.
- [4] 洪国同. 空间辐射制冷技术的应用与发展[J]. *低温工程*, 1995(4): 49-57.
Hong Guotong. Applications and development of space radiant cooling[J]. *Cryogenics*, 1995(4): 49-57(in Chinese).
- [5] 尹宝泉. 绿色建筑多功能能源系统集成机理研究[D]. 天津: 天津大学建筑学院, 2013.
Yin Baoquan. Research on Integrated Mechanism of Multi-Functional Energy System of Green Buildings [D]. Tianjin: School of Architecture, Tianjin University, 2013(in Chinese).
- [6] 尹宝泉, 王一平, 朱 丽. 电热冷联产硅基薄膜光伏辐射板组件的性能研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(6): 1028-1033.
Yin Baoquan, Wang Yiping, Zhu Li. Cooling, heating and power performance of silicon-based film PV radiant panel modules[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(6): 1028-1033(in Chinese).
- [7] Van Helden W G J, Van Zolingen R J CH, Zondag H A. PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2004, 12: 415-426.
- [8] Etzion Y, Erell E. Thermal storage mass in radiative cooling system[J]. *Building and Environment*, 1991, 26(4): 389-394.
- [9] Zhang Xingxing, Zhao Xudong, Xu Jihua, et al. Characterization of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe heat pump water heating system[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 1229-1245.
- [10] Pei Gang, Fu Huide, Zhang Tao, et al. A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system[J]. *Solar Energy*, 2011, 85(5): 911-921.
- [11] Mishra R K, Tiwari G N. Energy matrices analyses of hybrid photovoltaic thermal (HPVT) water collector with different PV technology[J]. *Solar Energy*, 2013, 91: 161-173.
- [12] Wu Shuangying, Zhang Qiaoling, Xiao Lan, et al. A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12): 3558-3567.

(责任编辑: 田 军)