文章编号: 1001-4543(2019)04-0279-05 DOI: 10.19570/j.cnki.jsspu.2019.04.006

光伏热电耦合器件中热电模块负载对整体性能的影响

张 佳, 吴子华, 谢华清, 王元元, 赵 诚, 翟 涵

(上海第二工业大学 环境与材料工程学院, 上海 201209)

摘 要: 搭建了包含恒温冷却装置的电学测试系统, 测量了热电模块 (TEG) 负载不同电阻值时耦合器件中光伏电池 (PV) 及 TEG 两部分各自的输出变化, 以探究负载电阻在光伏热电耦合系统整体工作状态中所起的作用。结果表明 TEG 负载不同电阻时, 不仅 TEG 输出性能受到影响, PV 及耦合器件整体输出性能也将随之发生变化。然而, 这种影响将随着光强的提升而逐渐降低。

关键词: 光伏热电耦合; 负载电阻; 光电转换效率

中图分类号: TK51 **文献标志码**: A

Effect of the Loading Resistance of Thermoelectric Generator on Photovoltaic-Thermoelectric Coupling System

ZHANG Jia, WU Zihua, XIE Huaqing, WANG Yuanyuan, ZHAO Cheng, ZHAI Han

(School of Environmental and Materials Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: An electrical test system including thermostatic cooling system is built to measure the output power of photovoltaic cell (PV) and thermoelectric generator (TEG) in the coupling system when connecting different loading resistance on (TEG), so as to explore the effect of loading resistance on the photovoltaic thermoelectric coupling system. Results show that not only the output power of TEG is affected, but also the PV and coupling system are changed when TEG loads with different resistance. However, the effect will gradually decrease with the increase of radiation.

Keywords: photovoltaic-thermolectric coupling system; loading resistance; photoelectric conversion efficiency

0 引言

能源短缺一直是制约国家经济和社会发展的主要问题, 然而传统化石能源储量有限, 并且化石能源燃烧过程中释放的化合物对大气环境会造成污染。在能源危机的背景下可持续能源研究的重要性日益凸显, 太阳能以其清洁无污染、储量丰富而备受关注 [1-2]。光伏热电是基于光生伏特效应, 将太阳能直接转化为电能的一种发电技术。然而, 光伏电池 (PV) 对太阳光谱的利用存在局限性, PV 实际只能将紫外光和可见光的部分光谱转换为电能, 红外光及其他部分的光谱全部转换为热能 [3-4]。转换的热能使得 PV 温度不断上升, 进而降低 PV 的性能 [5-6]。热电发电是近年来备受关注的新型发电技术, 它利用半导体材料的热电效应, 将热能直接转换为电能, 具有无污染、无需运动部件等优点 [7-8]。许多学者对 PV 与热电模块 (TEG) 耦合进行了探究。Deng

收稿日期: 2019-08-22

通信作者: 吴子华 (1978–), 男, 山东临沂人, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳技术在新能源材料中的应用。
E-mail: wuzihua@sspu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (51590902), 国家自然科学基金 (51876111, 51676117), 上海第二工业大学研究生项目基金 (EGD18YJ0018) 资助

等 [9] 采用实验与理论模拟相结合的方式, 探究了光伏热电耦合器件 (PV-TE) 输出情况, 实验结果表明耦合器件产生的电能是纯 PV 的两倍。Park 等 [10] 通过实验研究了一种无损耦合, 结果表明当温差达到 15 ℃ 时耦合器件效率可达 30%。Pang 等 [11] 设计了光伏热电耦合的实验系统, 并搭载翅片散热器作为冷却装置。结果表明, 相同冷却条件下, PV-TE 降低了 8.29 ℃, 而纯 PV 降低 6.49 ℃, 耦合 TEG 有利于 PV 散热。殷二帅等 [12] 构建了 PV-TE 理论模型, 对耦合器件进行了热阻分析和优化。众多研究成果表明, PV 与 TEG 耦合使得 PV 产生的余热可以作为 TEG 的热源, 实现了能源的梯级利用。然而, PV 与 TEG 耦合的机制是较为复杂的。基于 PV 和 TEG 的工作原理, 它们对温度的要求不同, 高温会提升 TEG 的功率, 但会衰减 PV 的性能。因此, 热量是影响耦合系统整体性能的重要因素。有学者对 PV 与 TEG 的相互影响进行了探究。廖天军等 [13] 采用实验与理论相结合的方式对光伏热电耦合系统进行性能分析。他认为 PV 输出电流增大时, TEG 输出电流反而减小, 因为传递给 TEG 的热量减小。有学者对 PV 与 TEG 相互影响的原因进行了更详细的研究。Lin 等 [14] 构建外接负载电阻的耦合器件模型, 对负载电阻优化进行研究。结果表明, TEG 最优负载电阻随着入射光强的变化而变化。Wu 等 [15] 通过构建耦合器件理论模型, 研究了 TEG 对应的最优负载阻值。结果表明, 纯 TEG、耦合器件中 TEG 和耦合器件整体效率最高时所对应的最优负载电阻值均不同, 纯 TEG 的最优负载阻值不能作为耦合器件整体性能最优的负载阻值使用。Li 等 [16] 采用理论模拟研究了纯 TEG、耦合器件中 TEG 和耦合器件整体效率最高的 3 种情况所对应的最优负载电阻值随不同实验条件的变化, 提出了优化建议。然而, 他们的工作均基于理论模型的研究。TEG 负载不同电阻对耦合系统性能的影响还需通过实验进一步验证。本研究搭建了包含冷却装置的实验平台, 测量不同光强下 TEG 负载不同阻值时 PV、TEG 和耦合器件整体效率的变化, 以探究 TEG 负载不同阻值对耦合器件的影响。

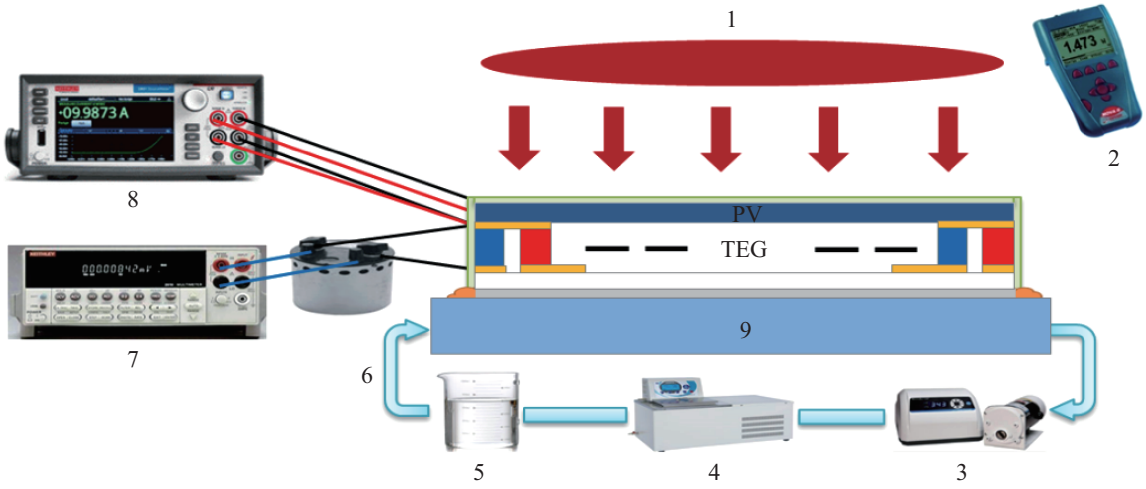
1 实验方法

PV-TE 由单晶硅 PV 及碲化铋 (Bi_2Te_3) TEG 组成, 然后将 PV 和 TEG 用乙烯 - 乙酸乙烯共聚物 (EVA) 材料封装成为 PV-TE。PV 和 TEG 的结构参数如表 1 所示。图 1 为 PV-TE 及测试系统示意图。在耦合器件运行过程中, 入射太阳光透过 EVA 材料照射到电池上, PV 将吸收的太阳光部分转化为电能, 其余转化为热能。转化的热能部分通过热传导和热辐射透过 EVA 材料传递给周围环境; 其余的热能传递给 TEG。传递给 TEG 的热能部分通过热电效应转化为电能, 其余部分同样通过热传导和热辐射散发到环境中。

表 1 PV 和 TEG 的参数

Tab. 1 Parameters of PV and TEG

组件	参数	数值
PV (标准测试条件 25 ℃, 1 kW/m^2)	尺寸/(mm × mm)	37.5 × 37.5
	高度/mm	0.3
	光电转换效率 (η_{PV})/%	20
	开路电压 (U_{OC})/V	0.645
	短路电流 (I_{SC})/A	9.446
	填充因子 (FF)/%	80.36
TEG (标准测试条件 25 ℃, 1 kW/m^2)	材料类型	Bi_2Te_3
	热端尺寸/(mm × mm)	40 × 40
	冷端尺寸/(mm × mm)	40 × 40
	高度/mm	3.8
	P-N 结数量	127



1 — 模拟太阳光源, 2 — 光强计, 3 — 蠕动泵, 4 — 恒温浴槽, 5 — 循环水,
6 — 负载电阻, 7 — Keithley2000, 8 — Keithley2450, 9 — 散热模块

图 1　PV-TE 及测试系统搭建示意图

Fig. 1　Schematic diagram of PV-TE system and test system

恒温冷却系统由铜制散热模块、恒温浴槽、蠕动泵组成。散热模块与耦合器件底部使用导热系数为 4.2 W/(m^2·K) 的导热胶粘接, 以增强 TEG 的散热 [17-18]。本研究在恒温浴槽 20 ℃ 的冷却条件下进行。使用光强计 OPHIR NOVA II 测量入射光强。PV 与 Keithley 万用表连接, 测量伏安特性 (I-V) 曲线。为避免引线电阻对测量精度产生影响, 使用四线法 [19], 并计算最大功率 (P_{max})、FF 及光电转换效率 (η)。TEG 与定值电阻串联, 电阻两端并联 Keithley2002 万用表测量负载电阻分配得到的电压, 并计算输出功率和 η 以评估性能。标准电阻购买自上海澄洋仪器仪表有限公司, 以 $R_{TE\text{-}S}$ 表示。TEG 在其内阻与外阻相等或相近时 TEG 输出功率最大 [20-21]。已知 TEG 内阻值为 2 Ω。因此本研究中 TEG 分别负载 2、5 和 10 Ω 定值电阻, 标记为 R_{L1}、R_{L2}、R_{L3}。实验条件设置 200 和 300 mW/cm^2 两种辐照强度, 标记为 G_1 和 G_2。

PV 和 TEG 输出功率分别由下式计算:

$$(P_{PV})_{max} = (I_{PV})_{max} \cdot (U_{PV})_{max} \tag{1}$$

$$P_{TE} = (U_{TE})^2 / R_{TE\text{-}S} \tag{2}$$

式中: $(P_{PV})_{max}$ 为 PV 的最大输出功率, mW; $(I_{PV})_{max}$ 为 PV 的最大输出电流, A; $(U_{PV})_{max}$ 为 PV 最大输出电压, V; P_{TE} 为 TEG 的输出功率, mW; U_{TE} 为 TEG 的输出电压, V; $R_{TE\text{-}S}$ 为 TEG 外电路的负载电阻, Ω。

PV 的 FF 由下式计算可得:

$$FF = \frac{(P_{PV})_{max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \tag{3}$$

式中: FF 为 PV 的填充因子, U_{OC} 为 PV 的开路电压, V; I_{SC} 为 PV 的短路电流, A。

耦合器件总输出功率由下式计算:

$$P = (P_{PV})_{max} + P_{TE} \tag{4}$$

耦合器件总光电转换效率由下式计算:

$$\eta_{PV\text{-}TE} = \eta_{PV} + \eta_{TE} = \frac{(P_{PV})_{max} + P_{TE}}{G \cdot A} \tag{5}$$

式中: η_{PV} 代表 PV 光电转换效率; η_{TE} 为 TEG 热电转化效率; G 为入射光强, A 为 PV 面积。

在测量过程中, TEG 的电压数据均于耦合器件运行至稳态时采集, 且每秒记录一次。为保证实验数据的准确性, TEG 的电压数据均记录 40 次然后取平均值, PV 的 I-V 曲线均扫描 10 次然后取平均值。所有实验均在室内环境为自然对流条件下进行。

2　结果与讨论

2.1　PV 的 I-V 曲线随 TEG 负载电阻值变化

图 2 比较了不同光强下耦合器件中 PV 的 I-V 曲线随 TEG 外接负载电阻值变化。G_1 下, TEG 外电路负载 R_{L2} 电阻时, I_{SC} 最高, 为 0.40 A, 较电路负载为 R_{L1} 时增长了 2.65%, 较外电路负载 R_{L3} 时增长了 3.12%。G_2 下, TEG 电路负载不同阻值时对 PV 的输出几乎没有影响。两种光强下 TEG 负载不同电阻对 U_{OC} 均无影响, 均为 0.61 V。

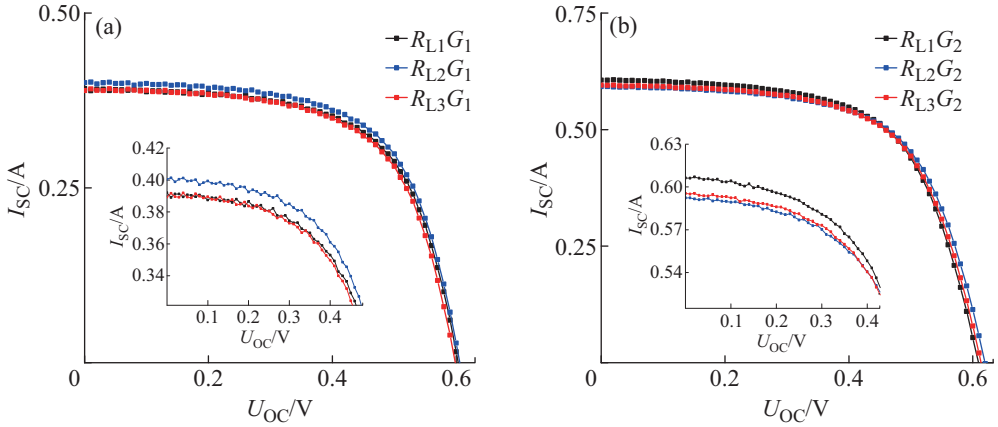


图 2 (a) G_1、(b) G_2 下 PV-TE 中 PV 的 I-V 曲线随 TEG 负载电阻值变化

Fig. 2 (a) G_1 (b) G_2 I-V curve of PV in PV-TE system varies with load resistance of TEG

2.2 PV 的 P_{max} 及 FF 随 TEG 负载电阻值变化

图 3 比较了在不同光强下 PV-TE 中 PV 的 P_{max} 和 FF 随 TEG 负载阻值的变化。TEG 负载不同电阻值时, PV 的 P_{max} 和 FF 基本相同, 几乎不产生影响。例如 G_1 下, 相比 R_{L3} 电阻负载 R_{L2} 阻值使得 PV 的 FF 仅提升 0.48%。

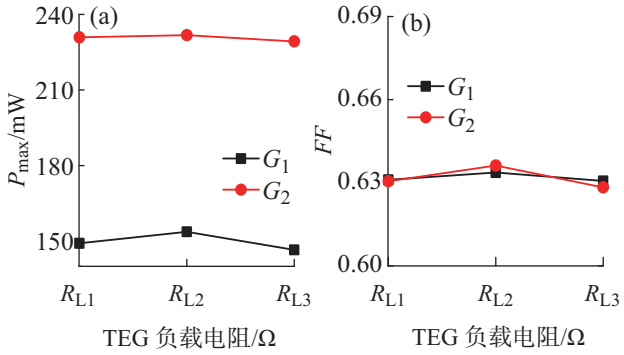


图 3 PV-TE 中 PV 的 (a) P_{max}、(b) FF 随 TEG 负载阻值变化

Fig. 3 (a) P_{max} (b) FF of PV in PV-TE system varies with load resistance of TEG

2.3 光伏热电耦合系统中 η 随 TEG 负载电阻值变化

图 4 比较了在不同光强下 PV-TE 中 η_{PV}、η_{TE} 和 $\eta_{PV\text{-}TE}$ 随 TEG 负载阻值变化。与 PV 的 P_{max} 和 FF 的变化趋势相同, G_1 下 TEG 负载 R_{L2}, PV 效率最高, 为 5.45%; 相比负载 R_{L3} 提升了 5.46%。G_2 下 TEG 负载不同电阻对 PV 几乎没有影响。如图 4(b) 所示, 当外电路负载与内阻相等时 (R_{L1}), η_{TE} 最高。G_2 下, η_{TE} 为 0.27%。光强增大后, η_{TE} 随负载阻值的降低而提高, 与 Li 等 [16] 模拟研究结果一致。如图 4(c) 所示, $\eta_{PV\text{-}TE}$ 在 TEG 负载 R_{L1} 时最高。G_2 下, 耦合器件的 $\eta_{PV\text{-}TE}$ 为 5.74%。虽然 PV 在 TEG 负载 R_{L2} 时输出较好, 但负载 R_{L1} 时 TEG 较高的输出足以弥补微小差距。

PV 输出特性受 TEG 负载电阻影响可能是由于 PV-TE 工作过程中, PV 和 TEG 之间的热量传递产生的相互影响。TEG 负载不同电阻值改变了 TEG 的电能输出, 引起热端温度发生变化。热端温度的

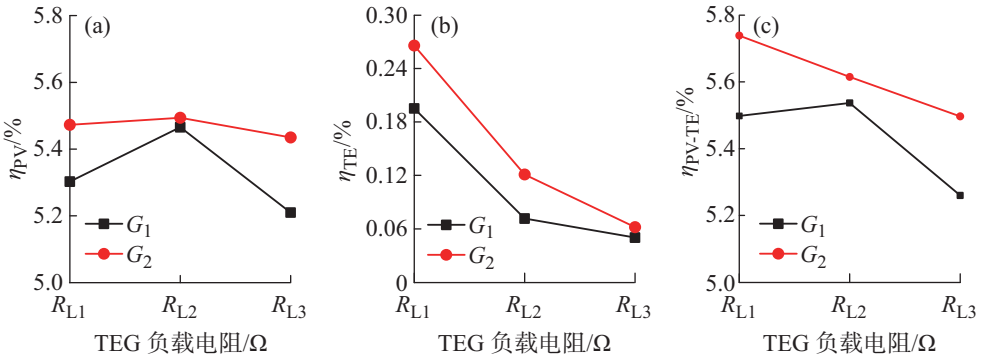


图 4 PV-TE 中 (a) η_{PV}、(b) η_{TE}、(c) $\eta_{PV\text{-}TE}$ 随 TEG 负载阻值变化

Fig. 4 In the PV-TE (a) η_{PV} (b) η_{TE} (c) $\eta_{PV\text{-}TE}$ varies with the loading resistance of TEG

变化可能利于提高 TEG 输出, 但对 PV 性能产生消极影响, 因电池自身温度是影响 PV 性能的重要因素。热电冷端保持恒定温度时, PV 产生的余热又会引起 TEG 冷热两端温差的变化。TEG 依赖温差发电, 进而影响到耦合器件整体电能和热能的输出占比。然而, 这种相互影响是十分有限的。随着光强的提高, TEG 负载不同电阻值不影响耦合器件整体性能。相对地, 入射光强和温度是影响 PV 输出特性的重要因素, 对耦合器件整体输出的影响更显著。

3 结　论

本研究搭建了包含恒温冷却装置的电学测试系统, 测量了不同光强下 TEG 负载不同电阻值时对 PV、TEG 和耦合器件整体的输出影响。结果表明, TEG 负载不同电阻值对 PV 及耦合器件整体输出仅在较低光强具有一定的影响, 且十分有限。相对地, 入射光强对 PV 的输出影响更为显著。对于光伏热电耦合系统的外电路设计, 负载电阻应遵循各自的最佳匹配电阻值以获得较高的输出功率。本文工作为 PV-TE 的外电路优化设计进行了有益探索。

参考文献:

[1] SHARMA V K, COLANGELO A, SPAGNA G. Photovoltaic technology: Basic concepts, sizing of a stand-alone photovoltaic system for domestic applications and preliminary economic analysis [J]. Energy Conversion & Management, 1995, 36(3): 161-174.

[2] THIRUGNANASAMBANDAM M, INIYAN S, GOIC R. A review of solar thermal technologies [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 312-322.

[3] CRABTREE G W, LEWIS N S. Solar energy conversion [J]. Physics Today, 2007, 60(3): 37-42.

[4] 刘扬, 廖胜明, 饶政华. 光伏 - 光热复合装置内流动与传热的数值研究 [J]. 可再生能源, 2012, 30(8): 5-9.

[5] 杨涛, 韩玉阁, 谭洪, 等. 热光伏发电系统水冷散热特性研究 [J]. 热能动力工程, 2011, 26(4): 461-465.

[6] 翟涵, 谢华清, 吴子华, 等. 温度对单晶硅电池光电转化效率的影响 [J]. 硅酸盐学报,2018, 46(5): 638-642.

[7] HE W, ZHANG G, ZHANG X X, et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler [J]. Applied Energy, 2015, 143: 1-25.

[8] LI G Q, JI J, ZHANG G, et al. Performance analysis on a novel micro-channel heat pipe evacuated tube solar collector-incorporated thermoelectric generation [J]. International Journal of Energy Research, 2016,40(15): 2117-2127.

[9] DENG Y, ZHU W, WANG Y, et al. Enhanced performance of solar-driven photovoltaic-thermoelectric hybrid system in an integrated design [J]. Solar Energy, 2013, 88: 182-191.

[10] PARK K T, SHIN S M, TAZEBAY A S, et al. Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices [J]. Scientific Reports, 2013, 3(7): 2123.

[11] PANG W, LIU Y, SHAO S Q, et al. Empirical study on thermal performance through separating impacts from a hybrid PV/TE system design integrating heat sink [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2015, 60: 9-12.

[12] 殷二帅, 李强. 光伏热电耦合系统热阻分析及优化 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(4): 828-0833.

[13] 廖天军, 杨智敏, 林比宏. 光伏 - 温差热电混合发电模块的性能特性 [J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 97-100.

[14] LIN J, LIAO T J, LIN B H. Performance analysis and load matching of a photovoltaic–thermoelectric hybrid system [J]. Energy Conversion & Management, 2015,105: 891-899.

[15] WU Y Y, WU S Y, XIAO L. Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 93: 151-159.

[16] LI G Q, ZHOU K, SONG Z Y, et al. Inconsistent phenomenon of thermoelectric load resistance for photovoltaic–thermoelectric module [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 161: 155-161.

[17] PRASHER R. Thermal interface materials: Historical perspective, status, and future directions [J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(8): 1571-1586.

[18] MCNAMARA A J, JOSHI Y, ZHANG Z M M. Thermal resistance of thermal conductive adhesive anchored carbon nanotubes interface material [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015, 96: 221-226.

[19] 罗博文, 叶晨, 汤祥虎. 微小电阻的测量及提高精度的方法 [J]. 测控技术, 2018, 37(3): 94-97.

[20] HE W, ZHANG G, LI G Q, et al. Analysis and discussion on the impact of non-uniform input heat flux on thermoelectric generator array [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 98: 268-274.

[21] LI G Q, FENG W, JIN Y, et al. Discussion on the solar concentrating thermoelectric generation using micro-channel heat pipe array [J]. Heat & Mass Transfer, 2017, 53(11): 3249-3256.