

探究2种光电光热一体化(PV/T)系统在中国不同建筑气候带下的热电性能

白 羽¹, 张恰恰^{1,2}, 黄宏宇¹, 罗向龙², Christophe Menezo³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510650; 2. 广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006;

3. 法国萨瓦大学环境与过程优化实验室, Avenue du Lac Léman, F-73376 Le Bourget-du-Lac, 尚贝里)

摘 要: 为考察太阳能光伏/热(PV/T)集热技术在中国各建筑气候带下的性能,利用TRNSYS软件,建立基于家用太阳能热水系统的太阳能光电光热一体化系统,分别模拟以单晶硅(Mono-cSi)和碲化镉(CdTe)薄膜为光电采集模块的PV/T集热器在中国各建筑气候带下的性能。结果表明,在中国7种建筑气候区,单晶硅型PV/T具有更高的光电转换效率,然而,CdTe薄膜型PV/T集热器的光电转换效率较为稳定;并且,同一气候区域下,CdTe薄膜型的光热转换效率较单晶硅型高约10%。综合评估后发现,CdTe薄膜型PV/T系统气候适应性更强,具有更大的实际应用潜力。

关键词: 太阳能; 光电/光热; 单晶硅 Mono-cSi; 碲化镉; 薄膜电池

中图分类号: TK519

文献标识码: A

0 引 言

中国是太阳能资源丰富且建筑耗能大的国家,将太阳能与建筑相结合,对降低建筑能耗,提高可再生能源利用效率尤为重要。大量研究表明,太阳能光电转换效率约为10%~25%,光热利用效率最高可达约90%^[1]。20世纪70年代一种新型的集光伏电池与太阳能集热器于一体的光伏/光热集热器(photovoltaic/thermal, PV/T)被提出^[2],其工作原理为太阳光照射到PV/T集热器上,光伏组件吸收特定波段的太阳辐照转换为电能,其余大部分能量转换为热能后被集热器回收用以产生热水。显然PV/T集热器不仅能降低光伏组件的工作温度提高光电转换效率,还可对原本耗散到空气中的热能加以收集利用,有效提高了太阳能综合利用效率。尤其是在中国这类居住密度高且安装空间有限的国家,PV/T集热器与相互独立的光伏系统和太阳能热水系统相比可节省投资和占地面积,实现与建筑更好的结合。

近年来国内外学者针对PV/T集热器做了大量

的研究,如Bergene^[3]指出PV/T集热器的太阳能利用效率理论上可达60%~80%。季杰等^[4]根据不同季节的环境条件和建筑用能需求设计出一种多功能的PV/T集热器。文献[5]对PV/T集热墙应用于某宾馆时光伏和光热输出进行了模拟计算和比较分析。学者们采用理论分析或实验的方法探究PV/T集热器的整体性能。然而这些研究大多集中在PV/T集热器与建筑节能相结合,对PV/T集热器的类型及其在不同气候条件下的运行特性缺乏探讨。

从PV/T的构成来看,目前大多采用单晶硅或多晶硅太阳电池,晶硅电池的应用效率可达10%~18%^[6]。技术发展较快的薄膜太阳电池因其成本低、延展性好及可与建筑更好的结合使用等优点越来越被重视^[7]。特别是碲化镉(CdTe)薄膜电池因其光吸收系数高、结构简单、制造成本低正逐渐成为应用前景非常广阔的薄膜太阳电池。

中国南北地区气候差异很大,太阳辐射资源也不同。为分析PV/T集热器在中国不同建筑气候带下的性能,探究由Mono-cSi和CdTe薄膜型太

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 近零能耗太阳能建筑一体化国际联合研发平台的建设(2014B05052011); 近零能耗温湿度独立可控空调技术研发(2016201604030014)

通信作者: 白 羽(1980—),女,博士研究生,主要从事太阳能技术方面的研究。baiyu@ms.giec.ac.cn

阳电池构成的 2 种 PV/T 集热器的运行特性,对比分析影响系统热/电性能的主要因素。本文采用数值模拟的方法,通过 TRNSYS 软件建立太阳能光电/光热一体化系统及系统运行环境,为 PV/T 集热器在中国不同建筑气候带的实际应用提供理论参考。

1 PV/T 模拟系统设计

PV/T 集热系统的数值仿真模拟在瞬态模拟平台 TRNSYS 上实现^[8]。系统中主要运用了天气数据采集模块,PV/T 组件及水箱模块。采用 Mono-cSi 和 CdTe 薄膜太阳能电池的 PV/T 集热器和水箱自编模型已添加到现有的组件库中,上述模型已在前人的研究中通过实验得到可靠验证^[9],其他组件可从 TRNSYS 自带的模块库中直接调用。Mono-cSi 和 CdTe 薄膜 PV/T 系统的模拟数据均建立在以 1 年为周期的情况下,使用典型气象年数据 (typical meteorological year data, TMY) 提供的中国不同城市的天气数据。每个建筑气候带选取 1 个城市代表该区域的气候条件。

PV/T 模拟系统结构图如图 1 所示。该系统为双回路循环系统,太阳能回路包括 PV/T 集热器和内置于水箱的蛇形管换热器,太阳能回路利用水泵进行强制循环。水箱内部设置一个距离其底部 0.55 m 位置的辅助电加热器,当水箱输出水温达不到设定的供水温度时,辅助加热器自动启动。

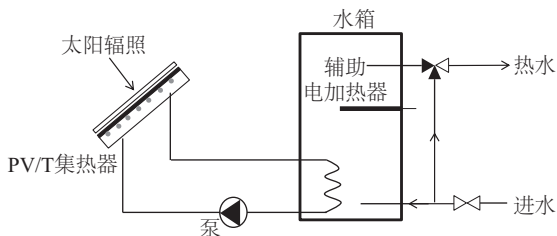


图1 PV/T集热器系统结构图
Fig. 1 Schematic of PV/T collector system

根据国际能源机构 SHC (Solar Heating and Cooling Programme) 的相关内容配置负载文件^[10]设定 PV/T 模拟系统的水箱日消耗水量为 200 L,系统运行过程中为用户端提供热水的温度为 45 ℃。PV/T 集热器模型的主要参数可分为 3 大部分——透光面板、太阳能电池及热吸收层,参数设置见表 1,相关参数均参考已商业化的产品数据。

表1 PV/T模块主要参数			
Table 1 Mainly simulation parameters of PV/T module			
分类	参数	Mono-cSi PV/T	CdTe 薄膜 PV/T
透光 面板	玻璃厚度/m	0.0032	0.004
	玻璃的透光率/%	0.91	0.90
	热容量/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	840	840
	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2500	2500
太阳 电池	太阳能电池的长度/m	0.156	1.2
	太阳能电池的宽度/m	0.156	0.6
	厚度/m	0.0002	0.000018
	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	148	4.2
	透光率/%	0.91	0.95
	太阳能电池参考 光电转换效率/%	18	14
	填充因子	0.76	0.72
	模块发电功率/W	200	85
吸热板	模块长度/m	1.476	1.205
	模块宽度/m	0.671	0.66
	厚度/m	0.0015	0.0012
	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2700	2700
	换热管数量	18	18
	隔热层厚度/m	0.05	0.068
	绝缘层导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.04	0.036

水循环系统及其他参数列于表 2。通过系统运行后产生的数据,计算出相关性能数据。

表2 水循环系统及其他参数			
Table 2 Mainly simulation parameters of water system			
集热器 面积/ m^2	辅助加热器 功率/kW	供水 温度/ $^{\circ}\text{C}$	质量流量/ $\text{L} \cdot (\text{h} \cdot \text{m}^2)^{-1}$
5	3	45	50

2 2 种 PV/T 系统在不同建筑气候带的性能比较

2.1 PV/T 系统性能评价标准

基于 PV/T 光电光热一体化系统输出既有电能又有热能,本文选择从 4 个指标来评价^[11]:光电转换效率、光热转换效率、PV/T 集热器热电综合效率、系统太阳能贡献率。

光电转换效率的计算式为:

$$Eff_{-PV} = \frac{E_e}{A_c \cdot G} \quad (1)$$

式中, E_e ——集热器输出的电能, kWh; A_c ——集热器面积, 5 m^2 ; G ——入射太阳辐照量, W/m^2 。

光热转换效率计算公式为:

$$Eff_{-thermal} = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} \quad (2)$$

式中, Q_u ——吸热量, W。

对于热能来说, 电能是一种高品位的能量。因此 PV/T 集热器产生的电能可利用式(5)换算成等量的热量 Q_e :

$$Q_e = \frac{E_e}{\eta} \quad (3)$$

式中, η ——常规火力发电厂中热能转的效率, 一般 η 取 0.38。

PV/T 集热器热电综合效率在式(3)考虑了热能的数量和品位的基础上, 兼顾 PV/T 系统将吸收到的太阳能转化为电能和热能的能力。

计算公式为:

$$Eff_{-total} = \frac{Q_e + Q_u}{A_c \cdot G} \quad (4)$$

系统太阳能贡献率是指单位面积 PV/T 集热器吸收的热量与把水箱内的水加热至指定输出温度所需能量之比, 表达式为:

$$Eff_{-PT} = \frac{Q_u}{Q_u + Q_{aux} + Q_g} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{PVT,o} - T_{PVT,i})}{m \cdot c_p \cdot (T_{PVT,o} - T_{PVT,i}) + m \cdot c_p \cdot (T_o - T_{PVT,o})} \quad (5)$$

式中, Q_{aux} ——辅助加热器提供的热量, W; Q_g ——管路损失热量, W; $T_{PVT,o}$ 、 $T_{PVT,i}$ ——PV/T 集热器内流体的出口和进口温度, K; m ——流体的质量流率, kg/s; c_p ——流体的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_o ——终端指定出水温度, 45°C 。

根据电子学理论, 太阳电池的等效电路如图 2 所示。

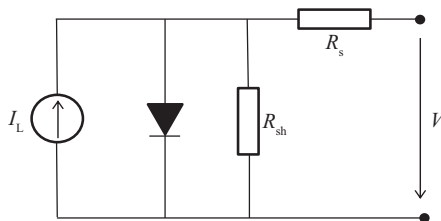


图2 太阳电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of solar cell

使用不同光伏组件的 PV/T 系统的光伏电池效率与太阳辐射及温度的函数关系是不同的。单晶硅和 CdTe 薄膜型光伏电池光电转换效率与太阳辐射及温度的函数关系如式(6)和式(7)所示:

$$P = IV = \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1 \right) \right] V \quad (6)$$

$$P = IV = \left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right] V \quad (7)$$

式中, I_{sc} ——短路电流, A; I_L ——光生电流, A; I_0 ——反向饱和电流, A; q ——电子电荷, $1.6 \times 10^{19} \text{ C}$; k ——玻耳兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T ——绝对温度, K; A ——二极管因子; R_s ——串联电阻, W; R_{sh} ——并联电阻, W。

自编 PV/T 模块所采用的光电转换效率计算过程为^[12]:

$$PV_{eff} = PV_{eff,ref} \cdot (1 - \beta \cdot (T_{PV} - T_{PV,ref})) \cdot \gamma \cdot f_{s2} \quad (8)$$

式中, $PV_{eff,ref}$ ——光伏组件参考光电转换效率, %; β ——温度系数, %/K; T_{PV} ——光伏组件温度, $^\circ\text{C}$; $T_{PV,ref}$ ——标准测试环境下光伏组件温度, 25°C ; γ ——电池盖板的透过系数; f_{s2} ——填充因子。

2.2 中国的建筑气候带

中国幅员辽阔, 不同地区气候差异巨大。基于环境温度、湿度、太阳辐射量和风速 4 个主要的气候因素, 将中国分为 7 个建筑气候带, 其主要气候特征列于表 3^[13]。每个区域有其独特的气候, 以及最适合应用在该地区所在环境条件的 PV/T 集热器。每个建筑气候带选取 1 个城市代表该区域的气候特点, 以评估和比较使用不同光伏电池的 PV/T 集热器的性能, 它们分别为:

- 1) 齐齐哈尔(北纬 47.3° , 东经 123.9°), I 区;
- 2) 北京(北纬 39.9° , 东经 116.3°), II 区;
- 3) 上海(北纬 31.2° , 东经 121.4°), III 区;
- 4) 海口(北纬 20.0° , 东经 110.3°), IV 区;
- 5) 昆明(北纬 25.4° , 东经 102.8°), V 区;
- 6) 拉萨(北纬 29.4° , 东经 91.1°), VI 区;
- 7) 喀什(北纬 39.3° , 东经 75.6°), VII 区。

根据每个城市所处的地理位置和当地气候条件, 将所选取的 7 个城市分为 3 组。

第 1 组: 齐齐哈尔和北京, 位于中国的北方, 常年平均室外温度低于其他所选城市。

第 2 组:上海和海口,位于中国的东南部,太阳辐射量少于北方,湿度较大。

第 3 组:昆明,拉萨和喀什,位于中国的西部,太阳辐射量较多,昼夜温差大。

表3 中国不同建筑气候带的主要气候特征

Table 3 Main climate characteristics of climate zones in China

地区	冬季	夏季	年均温度变化范围/℃	t_{as}/h	$G_{bz}/W \cdot m^{-2}$
I 区	非常长并且极冷	短暂,凉爽	30~50	2100~3100	140~200
II 区	长且冷	热,平原潮湿,高原凉爽	26~34	2000~2800	150~190
III 区	冷且湿	闷热	*	1000~2400	110~160
IV 区	几乎无冬季	炎热并且非常潮湿	*	1500~2600	130~170
V 区	温暖	凉爽	12~20	1200~2600	140~200
VI 区	干冷	几乎无夏季	16~30	1600~3600	180~260
VII 区	很长并且寒冷	*	30~40	3600~3400	170~230

注: t_{as} —每年平均日照时数; G_{bz} —年平均太阳总辐射量;“*”—所在地区特点不明显。

3 结果分析与讨论

从模拟结果可发现,太阳辐射量是 PV/T 系统吸热量的主要决定因素。表 4 和表 5 是 CdTe 薄膜和单晶硅型 PV/T 系统在不同地区的模拟结果。对

比表 6 可以看出,CdTe 薄膜型 PV/T 系统太阳能贡献率在 69.44%~91.47%之间,光热转换效率变化范围在 28.38%~40.47%,相比较于单晶硅型 PV/T 而言,同一地区的热性能大约高出 10%,优势非常明显。

表4 CdTe 薄膜型 PV/T 系统模拟结果数据表一(kWh)

Table 4 Simulation data table 1 of CdTe thin-film PV/T system(kWh)

分组	城市	太阳辐照量	发电量	吸热量	有用能	辅助热量
第1组	齐齐哈尔	9214.80	1003.14	3373.68	6013.54	646.87
	北京	7207.32	801.34	2738.95	4847.74	970.41
第2组	上海	6728.05	745.88	2543.74	4506.58	1111.05
	海口	6957.68	757.11	2815.65	4808.05	954.96
第3组	昆明	8698.66	1067.55	2468.80	5278.14	1086.44
	拉萨	10884.73	1125.40	4059.08	7020.65	378.54
	喀什	9975.35	1028.86	3803.76	6511.29	545.14

表5 Mono-cSi 型 PV/T 系统模拟结果数据表一(kWh)

Table 5 Simulation data table 1 of monocrystalline silicon PV/T system(kWh)

分组	城市	太阳辐照量	发电量	吸热量	有用能	辅助热量
第1组	齐齐哈尔	9214.80	1341.55	2476.72	6007.11	1124.34
	北京	7207.32	1056.29	2050.43	4830.15	1376.56
第2组	上海	6728.05	984.36	1899.09	4489.51	1479.74
	海口	6957.68	999.56	2206.06	4836.48	1250.65
第3组	昆明	8698.66	1243.47	2519.60	5791.89	1073.93
	拉萨	10884.73	1529.30	3124.09	7148.55	723.23
	喀什	9975.35	1396.64	2940.24	6615.61	848.54

表6 Monoc-Si和CdTe薄膜型PV/T系统模拟结果数据表二(%)
Table 6 Simulation data table 2 of monocrystalline silicon and CdTe thin-film PV/T system(%)

分组	城市	单晶硅型PV/T系统				CdTe薄膜型PV/T系统			
		光电转换效率	光热转换效率	系统太阳能热贡献率	PV/T集热器热电综合效率	光电转换效率	光热转换效率	系统太阳能热贡献率	PV/T集热器热电综合效率
第1组	齐齐哈尔	14.56	26.88	68.78	65.19	10.89	36.61	83.91	65.26
	北京	14.67	28.47	59.83	67.07	11.12	38.00	73.84	67.26
第2组	上海	14.63	28.23	56.21	66.73	11.09	37.81	69.60	66.98
	海口	14.37	31.71	63.82	69.51	10.88	40.47	74.67	69.10
第3组	昆明	14.29	28.97	70.11	66.58	12.29	28.38	69.44	60.68
	拉萨	14.05	28.70	81.20	65.68	10.34	37.29	91.47	64.50
	喀什	14.00	29.48	77.60	66.32	10.31	38.13	87.46	65.27

对比这2种PV/T系统在3组城市的光电转换效率之间的差别时,图3展示了2种类型的PV/T系统在所有地区的光电转换效率全年变化情况。从图3可看出,虽然单晶硅PV/T系统的全年的光电转换效率在13.5%~15.5%之间,高出同一地区同时段约3.5%,但是相对于CdTe薄膜而言其变化范

围很大,输出效率不够稳定,受温度影响波动较大,在温度较高的时间段内,光电转换效率有明显下降。并且,在每一个城市,CdTe薄膜PV/T的光电转换效率波动范围均明显小于单晶硅型,这种情况在受冷空气影响较大的第1组地区和长期温度较高湿度较大的第2组地区更加明显。CdTe薄膜PV/T表现出了CdTe作为一种薄膜光伏材料相对于单晶硅而言,其光电转换效率并没有随着温度的升高或下降有明显波动的优势,特别是在严寒炎热和潮湿的环境中,凸显了其良好温度不敏感性。

在光电转换和光热利用方面,单晶硅型PV/T系统和CdTe薄膜型都有各自明显优势,然而在考察系统综合效率时,因要同时考虑多种计算因素,得到的结果则是2种类型的PV/T系统差别较小,数值均在约65%。

4 结 论

通过对单晶硅和CdTe薄膜型PV/T系统在不同地区的热性能、电性能及综合性能的数值模拟分析,可获得以下结论:

1)在两个系统的综合效率非常接近的情况下,虽然单晶硅型PV/T的光电转换效率要高于碲化镉薄膜型;但其波动范围大,稳定性不如CdTe薄膜型PV/T,同时其热性能要优于单晶硅型PVT系统。

2)在所考察的地区发现单晶硅型和CdTe薄膜型PV/T集热器在光电转换和光热利用方面各有优势。但是,由于CdTe薄膜对温度敏感度较低的特性,在特殊环境中表现出的性能较单晶硅型PV/T

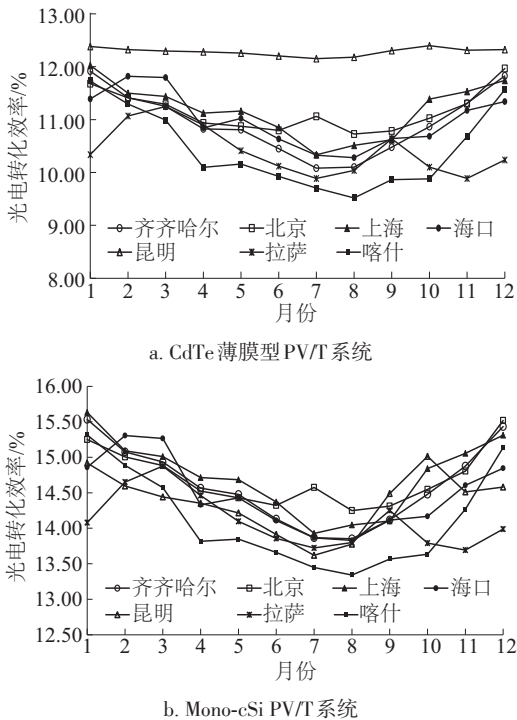


图3 CdTe薄膜型PV/T系统和Mono-cSi PV/T系统的光电转换效率在各地全年变化图

Fig. 3 Photoelectric conversion efficiency of CdTe thin-film and monocrystalline silicon PV/T system in different climate zone

更稳定。并且,单晶硅型 PV/T 集热器光电部分因易受水汽腐蚀,光电性能和使用寿命都会受到影响。随着薄膜电池技术的发展,CdTe 薄膜光伏电池的成本也在逐渐降低,所以综合考虑本文认为 CdTe 薄膜型 PV/T 集热器具有更好的实际产业化应用优势和前景。

本研究将继续从提高转换效率、稳定性和气候适应性、降低成本等方面对太阳能 PV/T 器件及其与建筑的结合方式开展进一步的工作。

致 谢:本文研究内容受广东省科技计划项目《近零能耗太阳能建筑一体化国际联合研发平台的建设》支持,特此表示感谢。

[参考文献]

- [1] 郭 超. 多功能太阳能光伏光热集热器的理论及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [1] Guo Chao. Numerical and experimental study of tri-functional photovoltaic/thermal collector[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [2] Kern E C, Russell M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems[A]. Presented at 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C], Washington, DC, 1978.
- [3] Bergene T, Lovik O. Model calculations on a flat plate solar heat collector with integrated solar cells[J]. Solar Energy, 1995, 55(6): 453—462.
- [4] 季 杰, 程洪波, 何 伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 170—173.
- [4] Ji Jie, Cheng Hongbo, He wei, et al. Experimental study on a hybrid photovoltaic/thermal solar system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(2): 170—173.
- [5] Chow T T, Hand J W, Strachan P A. Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2035—2049.
- [6] 周 涛, 陆晓东, 张 明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势[J]. 激光与光电, 2013, (3): 1—9.
- [6] Zhou Tao, Lu Xiaodong, Zhang Ming, et al. Crystalline silicon solar-cell development status and trends[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, (3): 1—9.
- [7] 章 诗, 王小平, 王丽军, 等. 薄膜太阳能电池的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(5): 126—130.
- [7] Zhang Shi, Wang Xiaoping, Wang Lijun, et al. Research progress in thin-film solar cells[J]. Material Review, 2010, 24(5): 126—130.
- [8] SEL, 2006. TRNSYS: A Transient simulation program, vers. 16.1[M]. Alphascript Publishing, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, 2006.
- [9] Chow Tintai, Yu Bai, Dong Zhaoting. Selection between single-phase and two-phase evacuated-tube solar water heaters in different climate zones of China[J]. Solar Energy, 2013, 98: 265—574.
- [10] Bergene T, Lovvik O M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells[J]. Solar Energy, 1995, 55(6): 453—462.
- [11] Garg H P, Adhikari R S. Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: Steady-state simulation[J]. Renewable Energy, 1997, 11(3): 363—385.
- [12] Bai Yu, Chow Tin-Tai, Menezo C, et al. Analysis of a hybrid PV/thermal solar-assisted heat pump system for sports center water heating application[J]. International Journal of Photoenergy, DOI: 10.1155/2012/265838.
- [13] Chow Tin-Tai, Bai Yu, Dong Zhaoting. Selection between single-phase and two-phase evacuated-tube solar water heaters in different climate zones of China[J]. Solar Energy, 2013, 98: 265—574.

THERMAL AND ELECTRICAL PERFORMANCE EVALUATION OF TWO PV/T COLLECTORS IN DIFFERENT CLIMATE ZONES IN CHINA

Bai Yu¹, Zhang Qiaqia^{1,2}, Huang Hongyu¹, Luo Xianglong², Christophe Menezo³

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;*

2. *College of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;*

3. *LOCIE UMR CNRS 5271-Polytech Annecy-Chambery, Scientific Campus, Savoie Technolac, Comté de Shangberry, Avenue du Lac Léman, F-73376 Le Bourget-du-Lac, France)*

Abstract: A domestic hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar hot water system was studied numerical by using TRNSYS software. Two different PV/T collectors employed the monocrystalline silicon (Mono-cSi) and CdTe thin-film modules were analyzed respectively on the respects of electric and thermal performance in in different climate zones in China. Results show that in all regions, although the electric conversion efficiency of Mono-cSi PV/T is higher than CdTe thin-film type, but CdTe thin-film PV/T collector presented better volatile stability because of its lower sensibility to the ambient temperature change; Meanwhile the thermal efficiency of CdTe thin-film PV/T collector has 10% advantages than Monoc-Si type. On considering both the energy performance and manufacturing process of the two type PV/T collectors, it is concluded that CdTe thin-film PV/T collector would have more widely application for building energy conversation if the cost of fabrication can be reduced significantly.

Keywords: solar energy; photovoltaic/thermal; monocrystalline silicon; cadmium telluride; thin-film