

非跟踪低倍聚光热管式真空管集热器的实验研究*

朱艳青^{1,2,3,4}, 李注苓^{1,2,3}, 李育坚^{1,2,3}, 王雷雷^{1,2,3},
钟柳文^{1,2,3}, 史继富^{1,2,3†}, 徐刚^{1,2,3†}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 太阳能是一种取之不尽用之不竭的清洁能源, 但存在分散性强、能量密度低、不稳定等特点, 因此为了得到高能量密度和稳定的能量供应, 需要解决聚光和储能两大问题。针对这两个问题, 本文采用非跟踪低倍聚光的集热器和保温效果良好的储热油箱, 提出了一种非跟踪低倍聚光热管式真空管集热器; 基于几何光学原理, 模拟了热管式真空管和半圆聚光器的不同放置方式和位置的聚光效率, 制作了半圆形聚光热管式真空管集热器系统, 选择了合适的储热油箱并进行了保温效果的理论计算; 最后对该系统进行了集热性能测试实验。实验结果表明, 在半圆形聚光器的聚光下, 系统的瞬时效率截距为 0.66, 热损系数为 2.53 W/(m²·°C)。该系统完全能够满足人们的日常生活用热的需求, 具有良好的应用前景。

关键词: 热管式真空管; 集热器; 低倍聚光; 太阳能

中图分类号: TK519

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.04.010

Experimental Study on Non-Tracking Low Concentrating Heat-Pipe Evacuated Tubular Solar Collector

ZHU Yan-qing^{1,2,3,4}, LI Zhu-ling^{1,2,3}, LI Yu-jian^{1,2,3}, WANG Lei-lei^{1,2,3},
ZHONG Liu-wen^{1,2,3}, SHI Ji-fu^{1,2,3}, XU Gang^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Solar Energy is a clean and inexhaustible energy source, but it has disadvantages of strong dispersion, low energy density and instability. In order to obtain high energy density and stable energy supply, the problems of solar concentrator and energy storage should be solved. Using the non-tracking low concentrator and solar hot fluid tank with good heat preservation effect, the non-tracking low concentrating heat-pipe evacuated tubular solar collector was proposed. Based on the principle of geometrical optics, the light collecting efficiency of the system was simulated under different relative positions between the vacuum collector tubes with heat pipes and semicircle concentrator. The heat preservation effect of the solar hot fluid tank was calculated. Moreover, the collector system was made and the solar collecting performance was tested. The experimental results showed that the best instantaneous efficiency of the system was 0.66 and the coefficient of the thermal loss was 2.53 W/(m²·°C). The system can meet the needs of people's daily life and has good application prospects.

Key words: vacuum collector tube with heat pipe; solar collector; low concentrating; solar energy

0 引言

环境污染和能源危机是制约当今社会发展的两大因素, 发展和利用太阳能成为解决环境和能源问

题的有效措施之一, 其中太阳能光热利用中的太阳能热水器的发展和应用十分迅速。太阳能热水器由集热器与储热水箱组成, 核心部件为集热器, 目前主要分为平板式、全玻璃真空管式、热管式真空管

* 收稿日期: 2016-05-12 修订日期: 2016-06-03

基金项目: 广东省科技计划 (2014A010106018, 2013A011401011); 粤港合作项目 (2014B050505015); 广东省特支计划 (2014TQ01N610); 广东省太阳能光热先端材料工程技术研究中心建设项目 (2014B090904071); 广东省战略性新兴产业项目 (2011A032304003); 广州市珠江科技新星专项 (2014J2200078)

† 通信作者: 徐刚, E-mail: xugang@ms.giec.ac.cn; 史继富, E-mail: shijf@ms.giec.ac.cn

集热器。平板式集热器因具有机械强度高、导热性能好、价廉和安装方便等优点而得到广泛应用，在中国南方占有主要地位，但是其存在热损失较大、易腐蚀、不抗冻、较难防止夜间水的倒流等问题；全玻璃真空管集热器由于存在热损系数小、保温性能好、不易结冰、成本低廉等优点，在中国得到了推广和普及，但其存在不抗压、热转移系数小、结垢和炸管等问题；热管式真空管集热器^[1-7]具备平板式集热器良好的导热性、机械强度以及全玻璃真空管良好的集热和保温性能，另外，热管式真空管集热器还具有启动快、无热水倒流现象、防冻能力强等优点，是太阳能光热利用的理想选择。

太阳能由于受天气、季节、地理纬度、昼夜等因素制约，具有间断性和不稳定的特点，因此对太阳能进行储存是必不可少的。太阳能热储存^[8-9]一般要求储热量大、储热时间长、温度波动范围小、热量损失小。目前，在太阳能应用中已经使用的储热材料包括水/水蒸气、导热油、熔融盐、陶瓷、混凝土等。液态显热储热材料因其同时也可作为换热液体实现热量的储存与运输，应用广泛，其中水的比热大、成本低，但由于其温度限制，主要应用在低温储热领域；导热油的使用温度一般可以达到 300 多度，因此可应用的温度范围较广，在各种太阳能热储存方式中技术比较成熟并得到普遍应用。

太阳辐射具有分散性强和能量密度低的特点，适合得到低温热源。为了提高太阳能热水器的出口温度，拓展太阳能的应用范围，引入了太阳能低倍聚光器。常见的低倍聚光器是复合抛物面聚光器^[10-14]和平面反射聚光器。复合抛物面聚光器具有接收半角大的优点，但是其制作工艺复杂，比较难以清洗；平面反射聚光器制作简单、易维护，但是其接收半角有限。半圆形聚光器的制作简单，且有一定的接收半角。

本文对半圆形聚光热管式真空管集热器进行了实验研究，对热管式真空管相对于半圆形聚光器的位置进行了优化设计，搭建了非跟踪低倍聚光热管式真空管集热器系统，并对该系统进行了集热效率测试。

1 热管式真空管的结构

热管式真空管主要由热管（包括蒸发段和冷凝段）、表面镀有选择性吸收涂层的金属平板翼片和玻

璃真空管等组成，其基本的结构如图 1 所示。玻璃管内为真空环境，平板翼片和热管通过超声焊接或激光焊接结合或嵌套在一起，金属平板翼片表面为高吸收率、低发射率的选择性吸收涂层。其工作过程为：平板翼片采集太阳光，将太阳能热量传递给热管，热管蒸发段吸收热量并传递到冷凝段，冷凝段再将太阳能热量传递给被加热的工质。

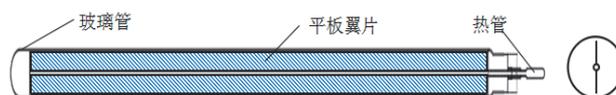


图 1 热管式真空管的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum collector tube with heat pipe

2 光学模拟

本文采用半圆形聚光器，为了更好地吸收太阳能，对热管式真空管放置方式和与半圆形聚光器相对位置进行了优化设计，如图 2 所示，两者轴向平行布置，热管式真空管中平板翼片与水平面之间的夹角为 α ，玻璃管底端与聚光器底部的距离为 d 。

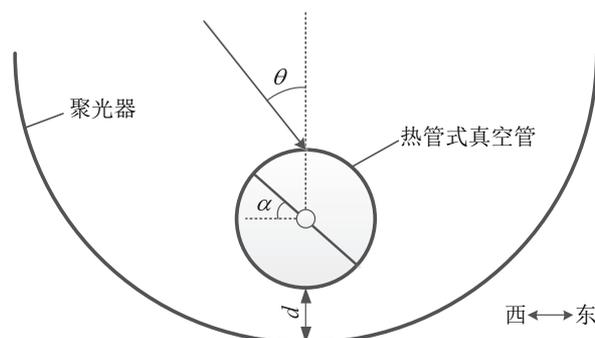


图 2 半圆形聚光器与热管式真空管相对位置的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the relative position between the semicircle concentrator and vacuum collector tube with heat pipe

在不同夹角 α 和距离 d 条件下，基于几何光学原理，利用 Tracepro 软件模拟半圆口径宽度内的光线到达平板翼片的效率，结果列于表 1，表中 θ 为太阳光入射角。从结果可以看出，平板翼片在 $\alpha = 0^\circ$ 水平放置时，无论是垂直入射还是斜入射，在不同距离 d 条件下，集光效率较低；平板翼片在 $\alpha = 45^\circ$ 倾斜放置时，从东西两个方向入射的集光效率不同；平板翼片在 $\alpha = 90^\circ$ 垂直放置、距离 $d = 2 \text{ mm}$ 时集光效果最好，且集光效率随入射角度的增大而减小。根据模拟结果，本文拟选用平板翼片 $\alpha = 90^\circ$ 垂直放置、距离 $d = 2 \text{ mm}$ 的条件来搭建系统。

表 1 不同条件下集光效率模拟结果

Table 1 The simulation results of light collection efficiency under different conditions

$\alpha / ^\circ$	d / mm	$\eta / \%$				
		$\theta = 0^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 45^\circ$
0	2	68	57	46	40	27
	10	60	63	46	34	27
	20	54	54	54	27	27
45	2	72	83(62)	81(55)	51(46)	31(20)
	10	67	70(61)	57(53)	53(46)	36(16)
	20	56	47(63)	52(52)	54(42)	45(17)
90	2	92	76	64	57	35
	10	76	68	63	54	37
	20	54	64	55	39	41

注: $\alpha = 45^\circ$ 时从东西两个方向斜入射时, 集光效率不同, 其中括号中的为西边方向斜入射。

3 储热油箱的选择

本文采用的不锈钢承压油箱, 内胆采用经过防腐处理的不锈钢材料。影响储热油箱保温效果的因素主要有保温材料的导热系数和保温层厚度。在相同厚度下材料导热系数越低保温效果越好; 对于同种材料, 保温层越厚保温效果越好, 但当厚度超过一定值后, 再加厚保温效果增加不明显。选用保温材料为聚氨酯, 其密度为 60 kg/m^3 , 导热系数为 $0.022 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ 。参考周志培等^[15]的太阳能储热油箱保温计算, 本文选用 500 mm 厚的聚氨酯保温层、 2 mm 厚的不锈钢外壳和 2 mm 厚的不锈钢内胆。

对于多层圆筒壁, 如图 3 所示, 其穿过各层的导热量的公式如下:

$$Q = \frac{2\pi L(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad (1)$$

其中, t_1 为储热油箱内部的温度, n 为圆筒壁的层数, t_n 为第 n 层的温度, λ 为导热系数, L 为油箱的高度。本文所用储热油箱高度为 1 m , 内胆半径为 0.2 m , 假设储热油箱内的温度为 110°C , 环境的温度为 20°C , 内部装有导热油 80 L , 不锈钢的导热系数为 $16.2 \text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$, 则计算出 Q 约为 10 W 。如果按照内外的温度不发生变化, 则经过 24 h 后, 损失的能量为 $240 \text{ W}\cdot\text{h}$ 。

根据公式 $Q = c_p m \Delta t$, 其中 c_p 为导热油的比热, 为 $2.5 \text{ kJ/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$, m 为导热油的质量, 计算可得经过 24 h 之后, 导热油的温度约降低 12°C 。

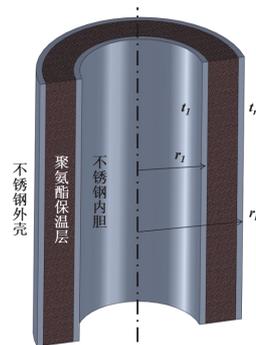


图 3 储热油箱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the solar hot fluid tank

4 性能测试试验

根据上述系统设计, 搭建了半圆形聚光热管式真空管集热器系统, 图 4 所示为系统的示意图。集热器的平板翼片采集太阳光, 将太阳能热量传递给热管, 热管蒸发段吸收热量并传递到冷凝段, 冷凝段再将太阳能热量传递给被加热的导热油, 导热油在循环泵的作用下, 输送到储热油箱, 如此循环, 将导热油加热到一定温度。

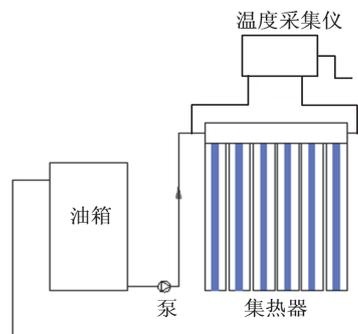


图 4 太阳能集热系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the solar collecting system

热管式真空管集热器由 6 根热管式真空管组成，其中，热管式真空管包括口径为 60 mm 的玻璃管和 58 mm 宽度平板翼片，分别配合直径 200 mm、长 1 700 mm 的 304 镜面不锈钢半圆反光曲面。集热系统实验装置如图 5，系统中所有的管道均有保温棉。实验用 80 L 容积的油箱，导热油密度为 820 kg/m³，比热为 2.5 kJ/(kg·℃)，循环体积流量为 2.4 L/min。本文旨在测试系统的瞬时效率和热损系数。

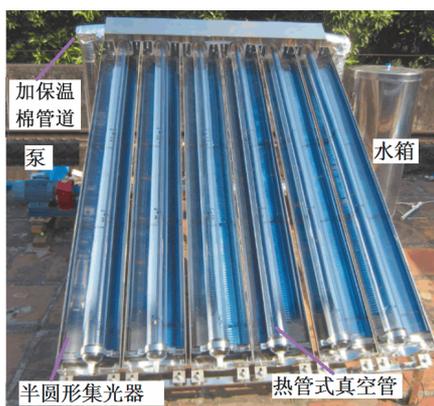


图 5 太阳能集热系统实验装置
Fig. 5 Experimental device of the solar collecting system

太阳能集热系统的瞬时集热效率计算公式^[16-18]为：

$$\eta = \frac{c_p m (t_{i+1} - t_i)}{A(H_{i+1} - H_i)} \quad (2)$$

$$I = \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta\tau} \quad (3)$$

式中， η 为瞬时效率， m 为储热油箱中油的质量， c_p 为油的比热， t 为储热油箱内的油温， A 为集热器的采光面积， H 是曝辐量， I 为平均太阳辐射强度， $\Delta\tau$ 为时间间隔，脚标 i 与 $i+1$ 表示前后两个时刻。

系统的测试方法^[19-22]如下：辐射传感器以及 PC-2 太阳辐射记录仪用来记录太阳光的光强，其中辐射传感器放置在与集热系统倾斜角度相同的平面上；多路温度采集仪一路用于测量环境温度，另一路放在集热器的入口处，用于测量导热油的入口温度；半圆形聚光热管式真空管集热器朝正南放置，与水平面的夹角为 35°。测试广州冬季某一天 10:30 ~ 15:00 的集热效率情况，当天全天蓝天无云，无持续风向，风力 ≤ 3 级。测试结果列于表 2，太阳能集热系统的瞬时集热效率曲线如图 6 所示。另外，测试次日将集热器盖住不让其接收太阳光，只测试油箱内的温度，测得第二天 15:00 油箱内的温度约为 95℃，即经过 24 h 后水温下降约 17.6℃，此结果略高于理论计算的结果。这是由于理论计算假设的温度是恒温，而实际储热油箱内部和周围环境的温度均是变化的，尤其是夜间周围的环境低于 20℃，因此实际下降的温度略高于理论计算的结果。

表 2 太阳能集热系统瞬时集热效率测试数据

Table 2 The instantaneous thermal efficiencies of solar collecting system

Number	$I / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$T_a / \text{℃}$	$T_{in} / \text{℃}$	η	$(T_{in} - T_a) / I$
1	716	27.0	60.8	0.5363	0.0472
2	744	27.0	65.6	0.5271	0.0519
3	761	27.1	70.4	0.5153	0.0569
4	793	27.0	75.3	0.5048	0.0609
5	797	27.0	80.0	0.4818	0.0665
6	782	27.0	84.5	0.4701	0.0735
7	788	27.1	89.0	0.4666	0.0786
8	837	27.0	93.7	0.4588	0.0797
9	805	27.1	98.0	0.4364	0.0881
10	779	27.0	102.0	0.4195	0.0963
11	736	27.1	105.6	0.3996	0.1067
12	752	27.2	109.1	0.3802	0.1089
13	800	27.1	112.7	0.3676	0.1070
14	750	27.1	116.0	0.3595	0.1185

注：表中 I 为平均太阳辐射强度， T_a 为环境温度， T_{in} 为入口温度， η 为系统的瞬时效率。

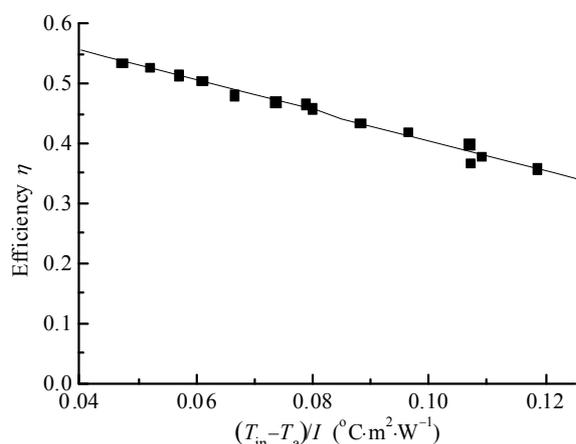


图 6 太阳能集热系统瞬时效率曲线

Fig. 6 The efficient curve of the solar collecting system

线性拟合得到的瞬时效率方程:

$$\eta = 0.66 - 2.53 \frac{(T_{in} - T_a)}{I} \quad (4)$$

拟合得到的线性方程截距为 0.66, 热损系数为 $2.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。与采用 CPC 作为聚光元件的热管式真空集热器的效率 0.632 相比^[22], 本系统的效率较高, 系统的集热性能较好。从图 6 可以看出, 当光强稳定在一定范围内, 随着入口温度与环境温度差值增大, 效率降低。热损系数为整个系统的热损失系数, 包括管路、油箱、接口等的热损失, 因此系统的保温性能, 尤其是管与管连接处的保温有待进一步提高。另外, 半圆形聚光器的反射率的进一步改善对系统效率的提高也至关重要。

5 结 论

本文在优化设计热管式真空管放置方式和与半圆形聚光器相对位置的基础上, 制作了半圆形聚光热管式真空管集热器系统, 选择合适的储热油箱并进行保温效果的理论计算, 最后对该系统进行了集热性能测试实验。实验结果表明, 在半圆形聚光器的聚光下, 系统的瞬时效率截距为 0.66, 热损系数为 $2.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。该系统完全可以满足人们对中低温日常生活用热的需求, 具有良好的实际应用价值。

参考文献:

[1] 季杰. 太阳能光热低温利用发展与研究[J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 7-31. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2013.01.002.

[2] 王军, 张耀明, 孙利国, 等. 聚光类太阳能热发电中的热管式真空集热管[J]. 太阳能, 2007(6): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2007.06.006.

[3] 谷伟, 张耀明, 余雷, 等. 热管式真空集热管的研制与应用[J]. 太阳能, 2009(9): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2009.09.008.

[4] 周小波, 蒋富林, 孙伟. 热管式真空太阳能集热管及其应用[J]. 太阳能, 2011(16): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2011.16.021.

[5] 王雷雷. 热管式太阳能真空集热管关键技术与系统集成研究[D]. 广州: 中国科学院广州能源研究所, 2014.

[6] 王雷雷, 史继富, 李育坚, 等. 热管的真空钎焊工艺及其在真空集热管上的应用[J]. 真空, 2014: 51(1): 68-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0322.2014.01.029.

[7] 丁祥, 林文贤, 许玲, 等. 热管式真空集热管及其太阳能集热器的研究与应用[J]. 云南师范大学学报, 2011, 31(4): 41-49. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9793.2011.04.009.

[8] 葛志伟, 叶峰, LASFARGUES M, 等. 中高温储热材料的研究现状与展望[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(2): 89-102.

[9] 刘馨, 冯国会, 黄凯良. 太阳能空气集热器和相变储能墙复合采暖系统分析[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(6): 632-637. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.06.012.

[10] 许雪松. CPC 型热管式真空集热器的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2004.

[11] GOUTHAMRAJ K, RANI K J, SATYANARAYANA G. Design and analysis of rooftop linear Fresnel reflector solar concentrator[J]. International journal of engineering and innovative technology, 2013, 2(11): 66-69.

[12] 余雷, 王军, 张耀明. 内聚光 CPC 热管式真空集热管的光学效率分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1392-1397.

[13] 朱婷婷, 刁彦华, 赵耀华, 等. 平板微热管阵列-CPC 太阳能空气集热器集热特性[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(11): 2471-2476.

[14] 袁航, 张红, 许辉, 等. CPC 内聚光式热管集热管温度特性研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(10): 253-256.

[15] 周志培, 孙保民. 太阳能储热水箱保温计算[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 52-55. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2322.2009.05.012.

[16] 宋爱国. 平板式与真空管式太阳热水器瞬时效率实验曲线分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9398.2000.03.006.

[17] 王志峰, 王德芳. 家用太阳热水器热性能试验方法及标准探讨[J]. 太阳能学报, 2000, 21(3): 248-252. DOI: 10.3321/j.issn.0254-0096.2000.03.005.

[18] 赵玉兰, 张红, 战栋栋, 等. CPC 热管式真空管集热器的集热效率研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(9): 1022-1025. DOI: 10.3321/j.issn.0254-0096.2007.09.017.

[19] 李戩洪, 江晴. 一种高效平板太阳能集热器试验研究[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 131-135. DOI: 10.3321/j.issn.0254-0096.2001.02.003.

[20] 朱艳青, 李育坚, 王雷雷, 等. 线性菲涅尔反射式太阳能集热系统的设计与试验研究[J]. 新能源进展, 2014,

- 2(2): 117-121. DOI: 0.3969/j.issn.2095-560X.2014.02.006.
- [21] 刘继者. 热管平板式太阳能集热器和太阳能热水系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [22] 王亮亮. 太阳能热水器、集热器热性能测试系统设计及应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.

作者简介:

朱艳青(1983-), 女, 在职博士, 助理研究员, 主要从事聚

光太阳能利用技术的研究与开发。

史继富(1982-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事热管式真空集热管的研究与开发。

徐刚(1970-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院广州能源所非碳能源研究中心首席科学家, 中国科学院“百人计划”项目引进人才, 主要从事太阳能光热、光电纳米复合材料的研究与开发。