



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

太阳能光电光热综合利用的发展

季 杰

中国科学技术大学

中国科学院

中科院太阳能光热综合利用研究示范中心 主任

国家‘863’先进能源技术领域

中国太阳能热利用专委会

中国太阳能热发电专委会

二级教授、博导

核心骨干特聘研究员

主任

主题专家

副主任

副主任

創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈
一九八八年五月題



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

1

太阳能热水系统

2

太阳能跨季节储热供暖系统

3

太阳能热发电系统

4

太阳能干燥系统

5

太阳能制冷系统

6

太阳能建筑一体化系统

7

太阳能光电光热复合系统

創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈
一九八八年五月題



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

1. 太阳能热水系统

选择性
涂层

结构优
化

焊接工
艺

北方应
用耐冻
结

真空玻
璃盖板

系统温
控和循
环

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈
題
一九八八年五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

1.1 真空玻璃平板集热

- ✓ 抑制对流热损，提高制热温度
- ✓ 瑞士TPV、深圳理大玻璃、扬州大学



創寰宇學府
育天下英才

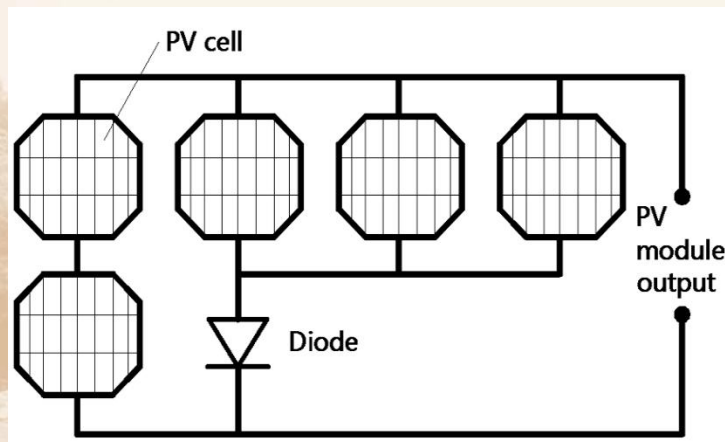
慈
八年五月
題



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

1.2 光伏直驱的太阳能集热系统



传统太阳能热水系统(SWHS):

- 辅助电源驱动交流泵
- ON/OFF 控制器
- 运行不稳定引发系统故障、泵寿命减少
- SWHS流量的提高依赖于可用太阳辐照

PV/直流泵耦合的 SWHS:

- 无控制器、温度传感器、辅助电源
- 太阳辐照为控制信号，同时驱动循环泵
- 更加简单、可靠、低成本

創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈
一九八八年



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China



創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈
一九八八年五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

2.1 罐式太阳能跨季节储热

Sunstore 4

Marstal

Supported by EU 7th
framework program

太阳能集热器: 15.000 m²

储热量: 75.000 m³

压缩机热泵(冷却): 1.0 MW

木屑锅炉: 4 MW

ORC: 0.75 MW



宇學府
卜英才
本濟慈
一九八八年五月
題



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

2.2 水池式太阳能跨季节储热



宇學府
下英才
嚴濟慈
一九八八年五月



2.3 地埋管式土壤蓄热太阳能跨季节储热

存储量: 75.000 m³
100 个钻孔 (25-50 m)



Braedstrup, Denmark





2.4 大面积太阳能平板集热器

设计要点:

- 集热器设计单块集热器面积为 $10-14\text{m}^2$ ，最大限度减少集热器相对表面积；
- 选用优质选择性涂层吸热板；
- 优化集热器的排管间距；
- 采用加厚底面、侧面保温层和超细玻纤面等措施减少热损失。



大面积集热器实物图

优点:

- 可应用于大规模跨季节储热系统；
- 减少了单位集热器面积的相对表面积，降低热损失；
- 双层中空盖板降低玻璃热损失；
- 超厚保温降低热损失；
- 安全可靠，不惧严寒，免维护、融雪化霜。

经过国家测试中心检测瞬时效率截距0.8，总热损失系数 $3.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，效率数值明显优于常规集热，非常适合北方寒冷地区采暖和生活热水使用（广东五星太阳能）



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

2.5 国内太阳能跨季节储热

太阳能的季节性不平衡是限制太阳能采暖系统在我国北方地区建筑采暖中规模应用的核心问题

上世纪七十年代末，欧洲和北美各国开始尝试推广太阳能跨季节储热技术，包括大型储热水箱、地下含水层储热、地埋管储热、人工水体储热等一系列技术均有一定数量的试验系统及示范工程建成。当前，太阳能跨季节蓄热供暖技术在我国还处于发展阶段。



矾山黄帝城跨季节水体储热塔式太阳能供热示范系统

矾山黄帝城太阳能跨季节储热示范项目：

- ✓ 首期将完成全部太阳能集热场，1个缓冲水体，1个10万 m^3 跨季节储热水体建设，2020年底实现供热；
- ✓ 2020-2021年采暖季达华建国酒店等建筑供热的太阳能保障率达100%；另外20万 m^3 跨季节储热水体将在第二阶段完成。



2.5 国内太阳能跨季节储热

由日出东方阿康桑马克承建的仲巴县县城太阳能集中供暖项目是西藏地区继山南市浪卡子县县城太阳能集中供暖工程后又一供暖示范型工程，建成后将成为**亚洲最大、世界海拔最高**的太阳能集中供暖工程。

	西藏浪卡子项目	西藏仲巴项目
施工时间	2018年4月至12月	2019年4月至11月
运营以来	2018年11月	2019年十一月
海拔	4,600米	4,700米
太阳场	22,000平方米	35,000平方米
平板集热器供应商	越南制造的 Arcon-Sunmark	越南制造的 Arcon-Sunmark
储热罐	15,000立方米的季节性存储	15,000立方米的季节性存储
储热罐	坑式蓄热	钢罐
供热面积	82,600平方米	118,000平方米
太阳分数	90%	> 90%
包括区域供热网络在内的太阳能系统总投资	1.2 亿元人民币 (1540万欧元)	最高1.73亿元人民币 (2230万欧元)
具体投资	701 EUR /m ²	637 EUR /平方米
备份系统	3兆瓦电锅炉	两台1.4兆瓦燃油锅炉和200千瓦光伏电池
供给温度	65°摄氏度	63°摄氏度
回水温度	35°摄氏度	38°摄氏度



西藏仲巴县太阳能供热工程



西藏山南市浪卡子项目



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3. 太阳能热发电系统

吸收器

蓄热方式与蓄热温度

工作介质

灰尘清理

成本

可靠性

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈題

一九八八年五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3.1 太阳能热发电

按聚光方式和镜面布置的不同，太阳能热发电主要包括槽式、线性菲涅尔式、塔式和碟式发电

- ✓ 2016 年，我国启动了首批20个太阳能热发电示范项目，总规模达1349MW
- ✓ 3个项目已于2018年年底建成投产，总装机量达200MW，占整批示范规模的14.8%

槽式



青海中广核德令哈50MW
槽式太阳能热发电

塔式



鲁能海西州格尔木海西州
50MW塔式光热发电



首航节能敦煌100MW塔式
太阳能热发电

碟式



皇明太阳能碟式聚光系统

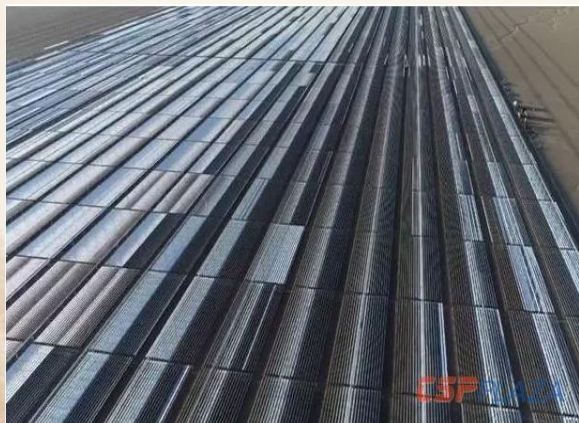


中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3.1 太阳能热发电

- ✓ 4个示范项目正加紧建设，计划最晚于2020年6月底前并网，总装机量为250MW。分别为：中国能建哈密50MW塔式太阳能热发电站、内蒙古乌拉特中旗100MW槽式太阳能热发电站、兰州大成敦煌50MW熔盐线性菲涅尔式太阳能热发电站、玉门鑫能50MW二次聚光塔式太阳能热发电站。



兰州大成敦煌50MW熔盐线性菲涅尔式太阳能热发电站



内蒙古乌拉特中旗100MW槽式太阳能热发电站



玉门鑫能50MW二次聚光塔式太阳能热发电站

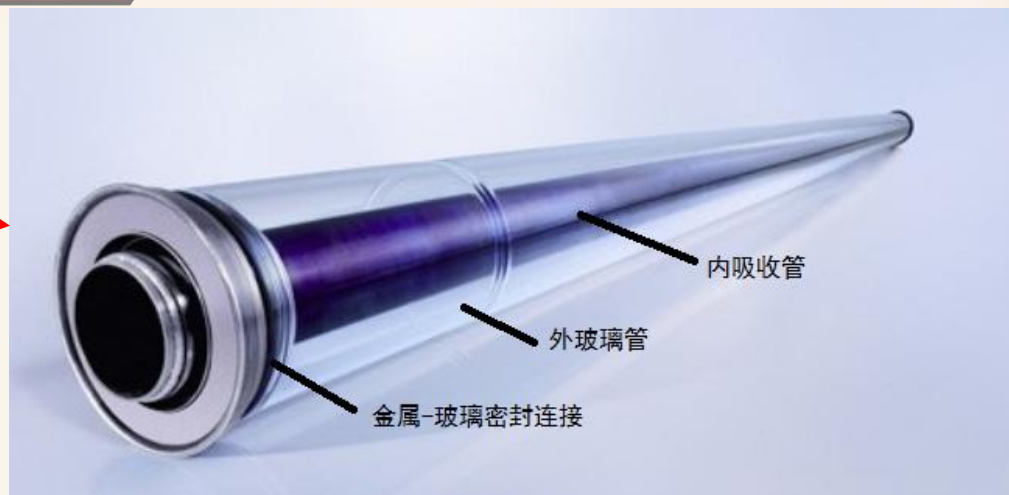
寰宇學府
天下英才
題
八八年五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3.2 槽式太阳能高温真空集热管



最核心部件：槽式太阳能高温真空集热管

集热温度：400-600℃



亟待解决的技术难题

集热管在高温集热下的巨量热量损失



发电效率、电站经济性严重降低，成为发展的拦路虎

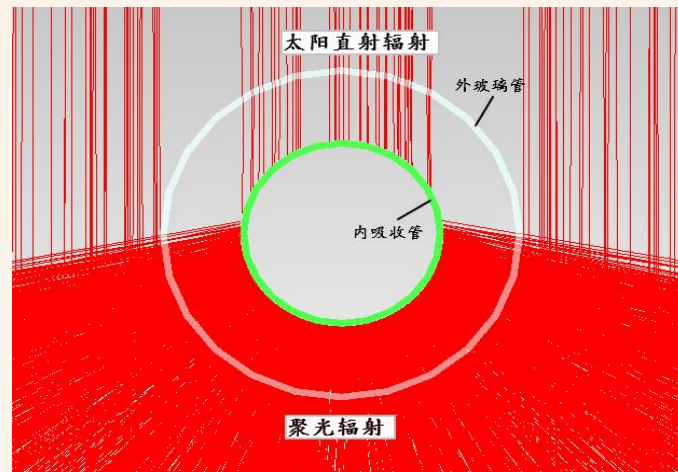
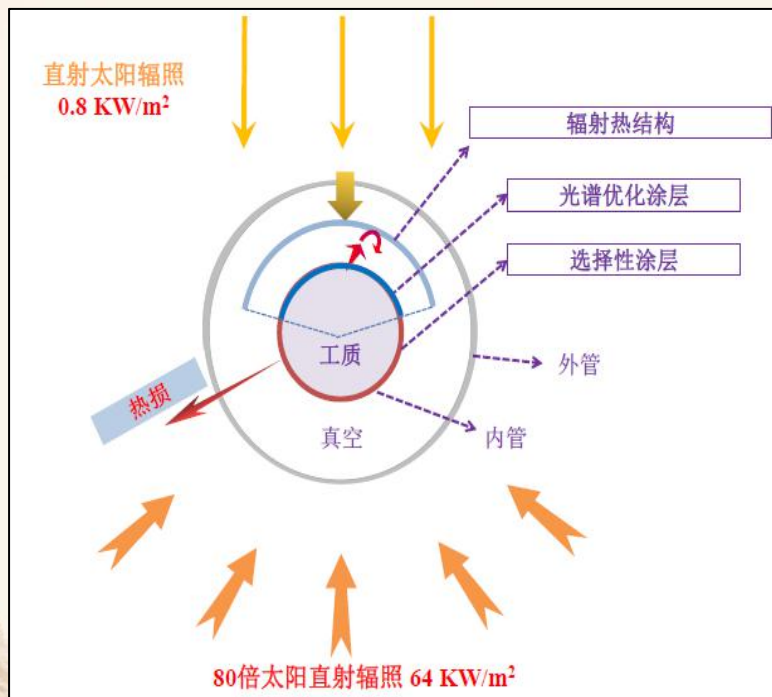
創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈
一九八八年五月題



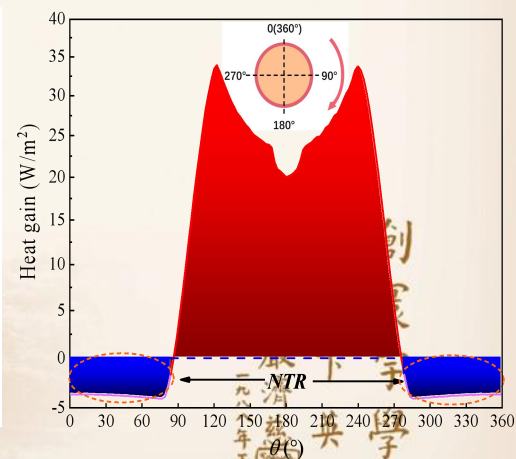
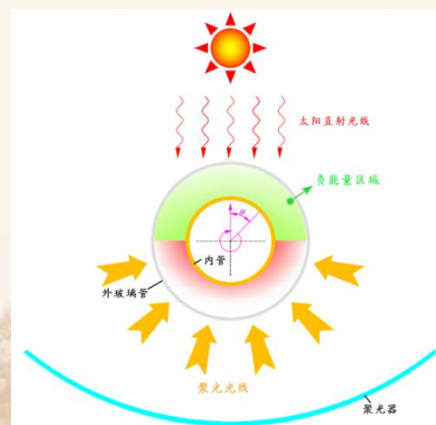
中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

➤ 新型高效槽式太阳能高温真空集热管



全新的周向结构辐照分析



光谱分析和集热管负能区优化方法

创新点:

- ✓ 采用辐射热结构设计和光谱涂层优化方法和技术
- ✓ 集热管性能得到突破性提升, 远超当前行业水平

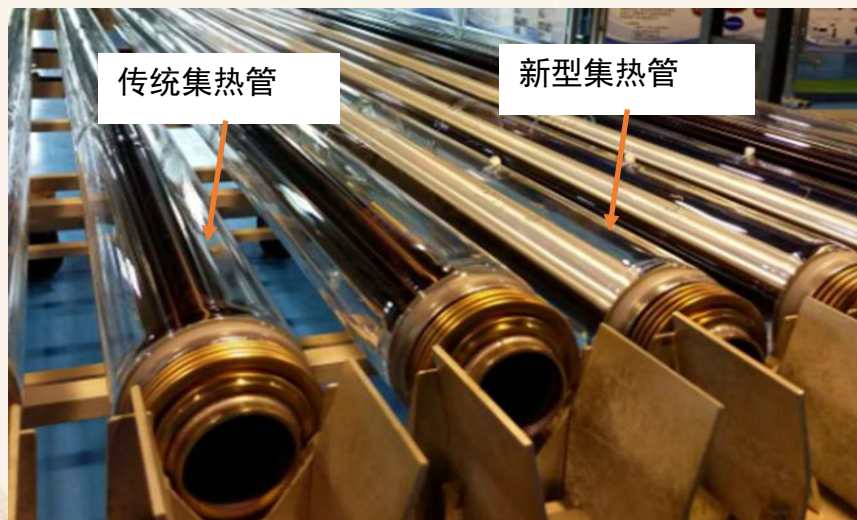


中国科学技术大学

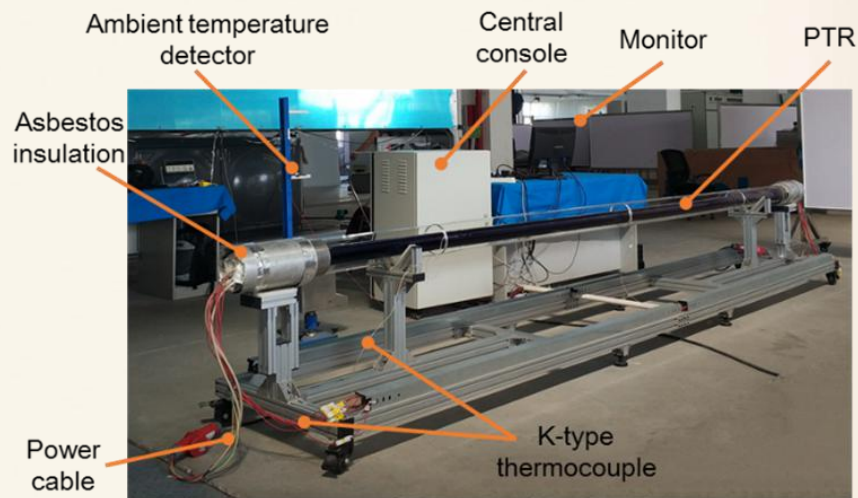
University of Science and Technology of China

➤ 实验测试平台

过去5年中，团队已完成6种类型集热管的试制和前期实验



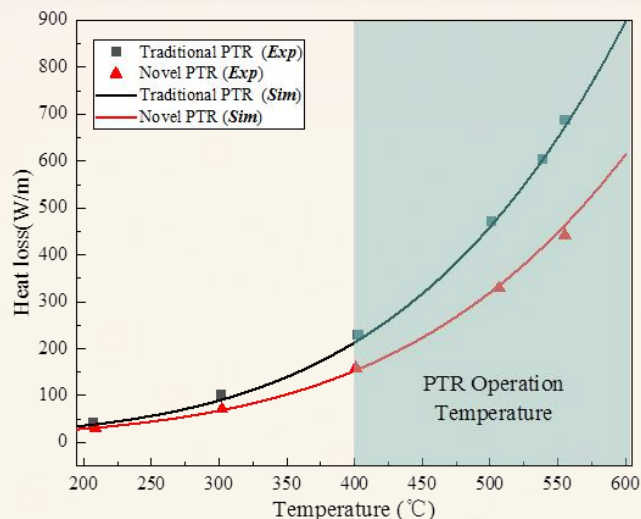
传统集热管和新型集热管



室内高温热损实验测试平台

在中科院太阳能光热中心（中科大）和中科院电工所延庆太阳能热发电基地分别完成多批次新型真空集热管实验测试。

創
寰
宇
學
府
育
天
下
英
才
題
年
五
月



热损实验测试结果

由实验数据可知，理论模型得到较好的验证且新型集热管的热损明显低于传统真空集热管。当温度为600℃时，新型集热管的热损可降低约41.0%；当辐照为1000W/m²~200W/m²，温度为600℃，光热转化效率可提升10.2%~42.0%。

集热管热损减少和效率提升预测

温度	热损减少	1000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²
300℃	41.1%	0.8%	1.0%	1.4%	2.1%	4.4%
400℃	40.7%	2.0%	2.5%	3.5%	5.5%	12.6%
500℃	41.1%	4.5%	5.8%	8.1%	13.7%	41.3%
600℃	41.0%	10.2%	13.7%	20.7%	42.0%	/
700℃	41.0%	26.3%	42.3%	77.7%	2700.0%	/

*橙色区域为热损减少比例，粉色区域为不同温度和辐照条件下效率相对提升比例。蓝色框线区域为集热管工作工况。

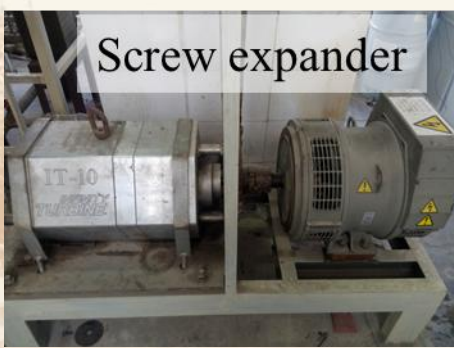
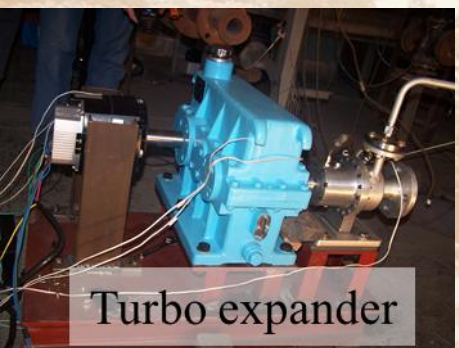
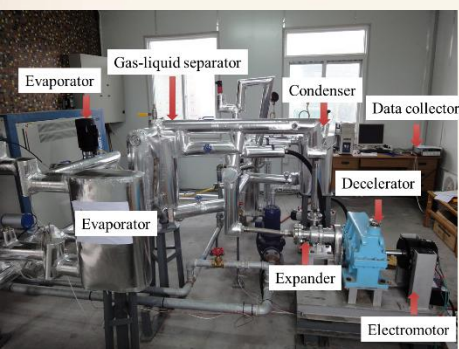


中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

3.3 太阳能低温有机工质朗肯循环发电

- 有机朗肯循环（ORC）可利用太阳能提供的中低温热源发电
- 系统采用了涡旋膨胀机、透平膨胀机和螺杆膨胀机
- 评估了系统在不同工质、冷凝温度、蒸发温度和质量流量等下的发电效率





中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

物料干燥特性
与供热的
匹配

4. 太阳能干燥系统

蓄热方式与蓄热温度

空气集热器

空气集热与热泵的耦合

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈題

一九八八年五月

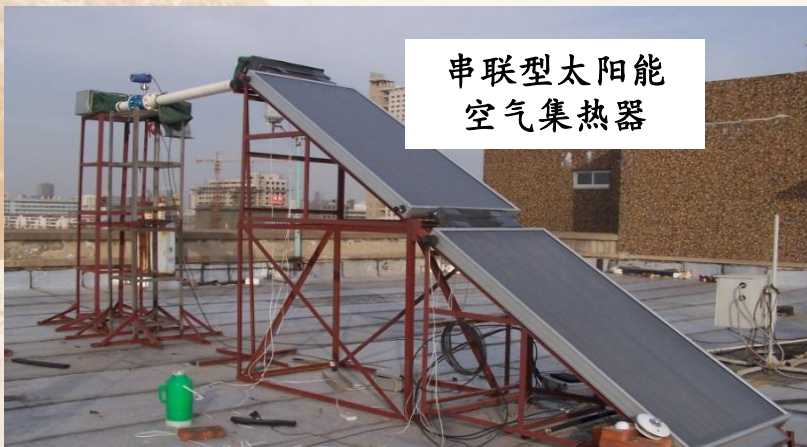


中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

4.1 太阳能空气集热试验台

- 按照ASHRAE标准设计
- 测试了瞬时效率、热损失系数和入射角修正系数
- 评估了新型太阳能空气集热器和串联型太阳能空气集热器的性能



串联型太阳能
空气集热器





中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

4.2 太阳能干燥 太阳能空气加热器与热泵的结合



面条



枸杞



烟叶



蟹壳



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

5. 太阳能制冷系统

吸收式
制冷

吸附式
制冷

喷射式
制冷

蓄热方
式与蓄
热温度

中温热
源

光伏空
调技术

光伏制冷技
术

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈題

一九八八年五月



5.1 太阳能吸收制冷

太阳能光热转换制冷是将太阳能转换成热能，再利用热能驱动制冷机制冷，主要有太阳能吸收式制冷系统、太阳能吸附式制冷系统和太阳能喷射式制冷系统。其中，技术最成熟、应用最多的是太阳能吸收式制冷。

● 太阳能吸收式制冷：

利用太阳集热器为吸收式制冷机提供其发生器所需要
的热媒水，最典型的为太阳能溴化锂吸收式制冷系统

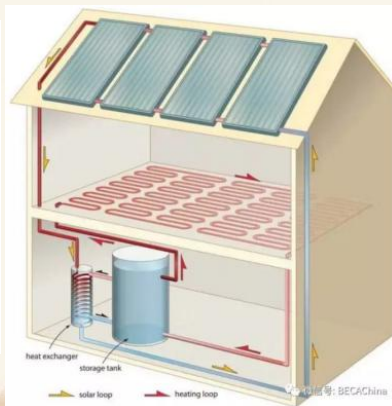
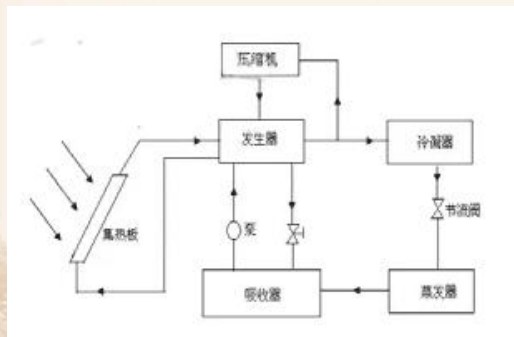


图 1 制冷机组设备间



图 2 太阳能集热器安装

单效、双效、三效吸收式制冷系统对比

类型	COP 标准	热源温度	集热器类型	热功率/kW	集热面积/m ²
单效	0.7	85	平板/真空管	1.43	7.48
双效	1.2	130	真空管/CPC	0.83	5.07
三效	1.7	220	聚光型	0.59	4.49

珠海市虹达路南屏科技工业园：

✓ 太阳能集热器安装总面积240m²，
供冷面积600m²



中国科学技术大学

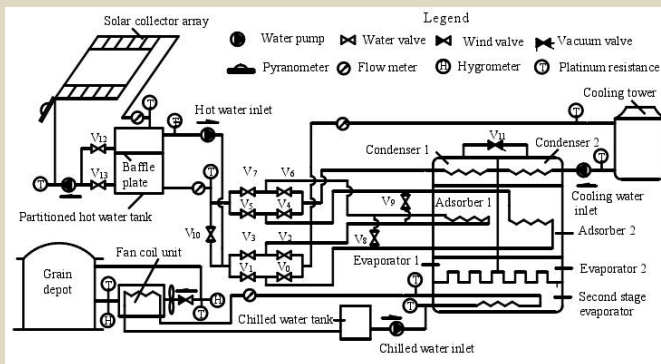
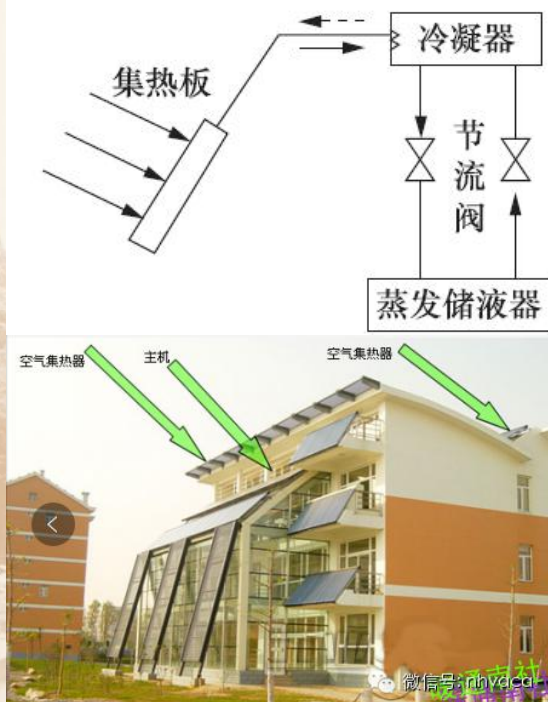
University of Science and Technology of China

5.2 太阳能吸附制冷

● 太阳能吸附式制冷：

利用吸附床中的固体吸附剂对制冷剂周期性吸附、解吸附过程实现制冷循环，活性炭-甲醇工质对经常被用于太阳能制冷机

特点是结构简单、一次投资少、使用寿命长、无结晶等，但该技术还很不成熟。主要问题在于固体吸附剂为多孔介质，导热性能低，因而吸附和解吸所需时间长，制冷功率小，制冷性能系数COP值偏低。



太阳能制冷低温稻谷储藏系统



SWAC-10型吸附式制冷机组

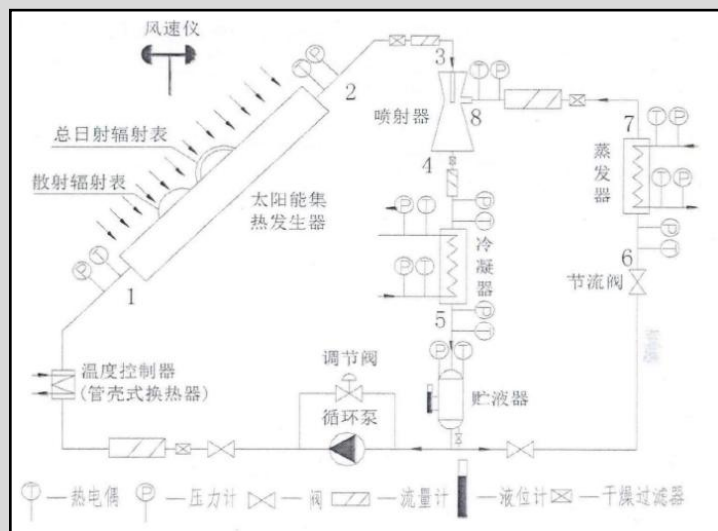
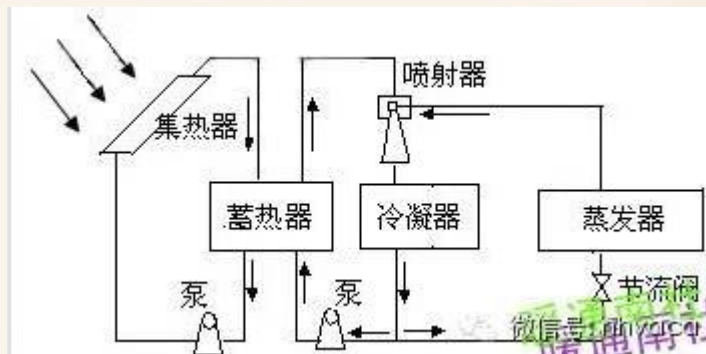


5.3 太阳能喷射式制冷

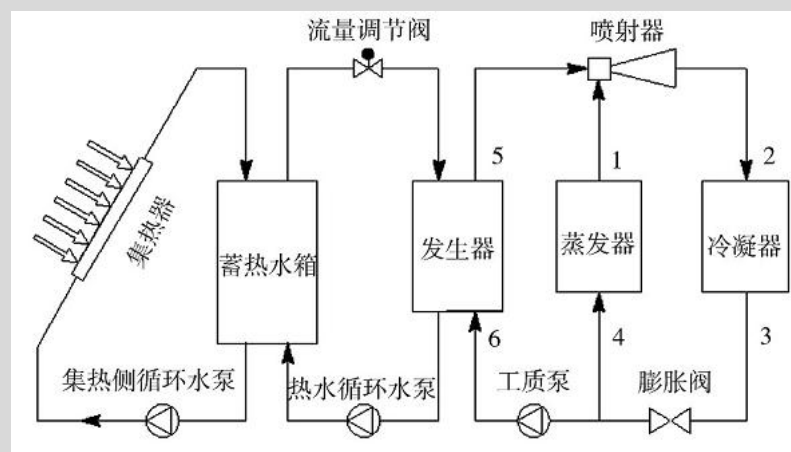
● 太阳能喷射式制冷：

制冷剂在换热器中被来自热源（太阳能集热器）的热媒加热，在换热器中吸热并汽化、增压，产生饱和制冷剂蒸汽

结构简单、运行稳定、可靠性好，缺点是制冷的性能系数，即 COP 较低



直接蒸发式太阳能喷射制冷系统



蓄热型太阳能喷射制冷系统

✓ 夏季典型气候条件下，制冷机可一天工作 7-10h，制冷功率 5.72-7.59k W



5.4 并网型光伏制冷

格力光伏直驱变频多联机有纯空调、纯光伏发电、光伏空调、光伏空调及系统发电、光伏空调及系统用电五种运行模式

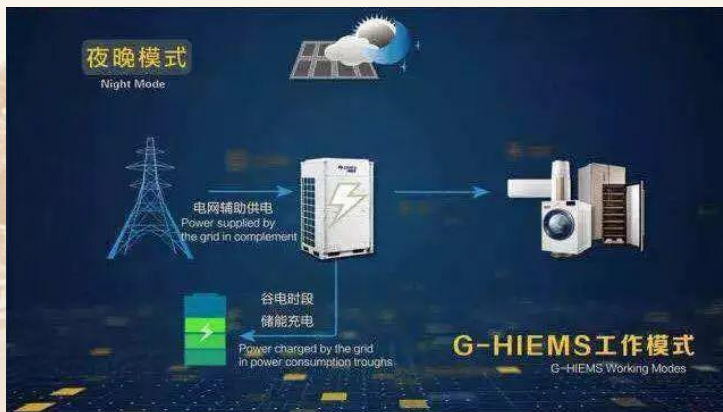
格力光伏空调系统应用场合



午后天气晴朗、阳光明媚，光伏系统发电能完全满足所有用电需求，实现“零电费”。



阴天时期，可根据峰谷时段，智能调度优先使用电网供电或储能供电，光伏系统提供辅助发电。



夜晚，光伏发电系统不发电，电网辅助供电，储能设备在谷时段时充电。

創
寰
宇
學
府
育
天
下
真
才
題
五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

5.4 并网型光伏制冷



江西省水利厅办公楼改造

光伏系统装机容量: 62kWp



珠海东澳岛南沙湾酒店

光伏系统装机容量: 185.13kWp



天津建物街小学

光伏系统装机容量: 82.5kWp

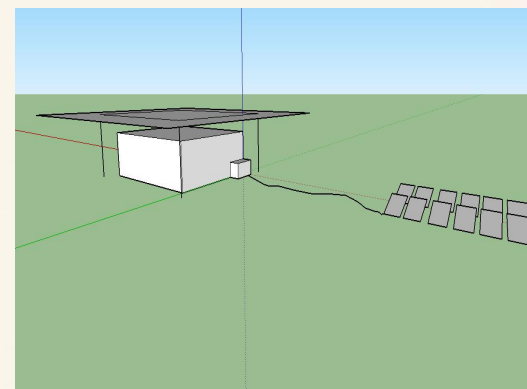


马来西亚古晋AEON商场

光伏系统装机容量: 586.96 kWp

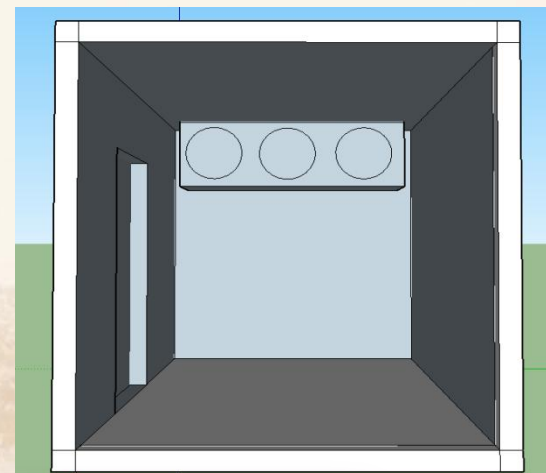
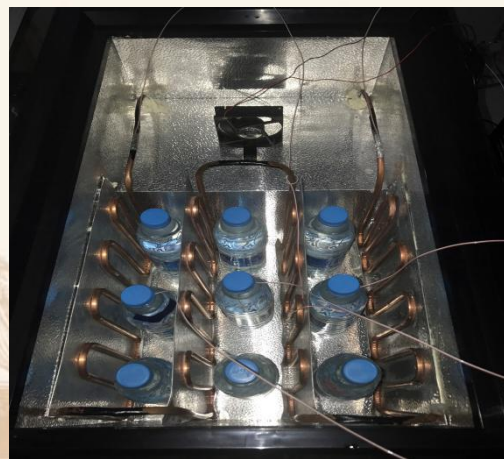


5.5 离网型光伏制冰



可移动PV/直接耦合压缩机式制冰机

PV冷藏室



离网条件下，由于人们室外活动对制冷需求的增加，提出了PV制冰机并设计了PV冷藏室保鲜



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

5.6 离网型太阳能光伏直驱制冷空调技术

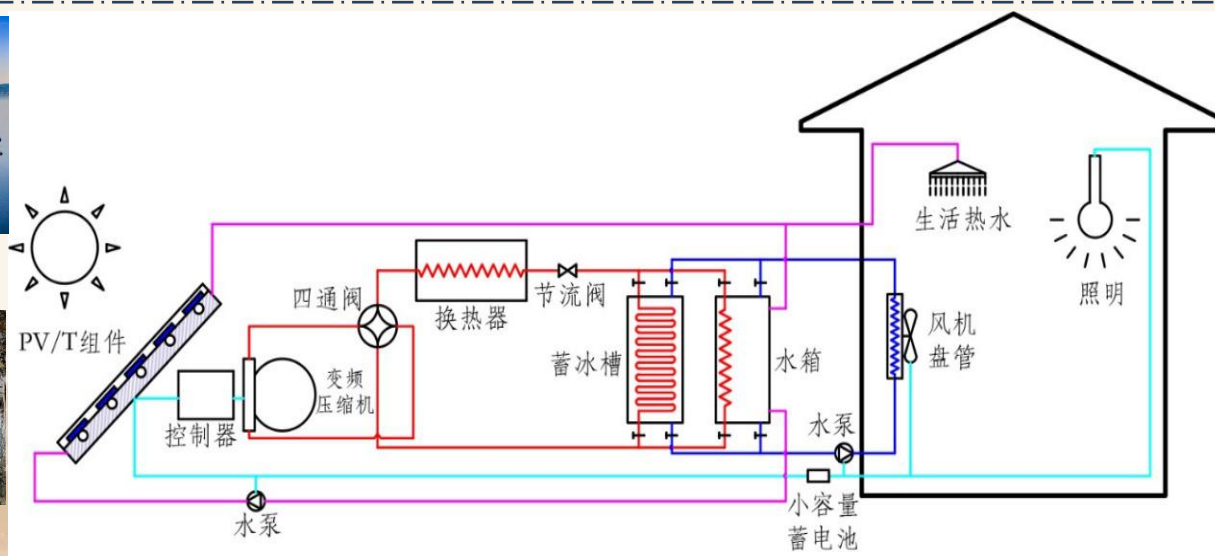
- 基于太阳辐照强度、光伏发电量与空调负荷之间良好匹配关系，创新提出**光伏直驱变频空调制冷**的概念，实现太阳能的高效转换利用
- 通过将**光伏直驱变频空调制冷技术**、**太阳能光伏光热复合系统(PV/T)**以及**冰蓄冷空调技术**结合，形成**离网型PV/T驱动的供电供热供冷系统**（PV/T driven hybrid system for power, heating and cooling, PV/T-PHC），构建高效、可靠及清洁的分布式可再生能源系统



海岛



偏远地区



城市社区



军营哨所

空调制冷：夏季PV/T输出电力驱动变频压缩机制取冷量，采用冰蓄冷储存冷量，利用蓄冰代替蓄电

生活热水： PV/T输出热量储存在水箱中，用于提供生活热水

采暖： 冬季PV/T输出电力驱动变频压缩机制取热量，储存在水箱中，用于供暖

照明： PV/T输出的部分电力储存在小容量蓄电池中，为照明供电



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

5.6 离网型太阳能光伏直驱制冷空调技术



創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈題
一九八八年五月

SHOT ON MI MIX 2S
AI DUAL CAMERA



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

6. 太阳能 建筑一体化系统

光伏建
筑一体
化

光热建
筑一体
化

光伏光
热催化
建筑一
体化

光伏光
热建筑
一体化

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈
一九八八年五月



6.1 PV-Trombe墙



- PV-Trombe墙主要解决了传统PV墙在夏季的过热问题，被动采暖时，再利用了PV向室内传递的热量。
- 热虹吸作用下驱动空气流动，设计时需考虑空气间隙和通风口。





中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

6.2 太阳能光伏通风窗技术

芜湖：某建筑热、电、照明性能的实验研究



CdTe 光伏通风窗

主要实验参数：

- CdTe 光伏玻璃: 3.15m(宽)*1.2m(高)
- 空气层厚度: 0.07 m
- CdTe覆盖率: 0.8
- CdTe 光伏效率: 10%(STC)
- 房间: 3.15m(宽)*3.3m*(长) *2.8m(高)

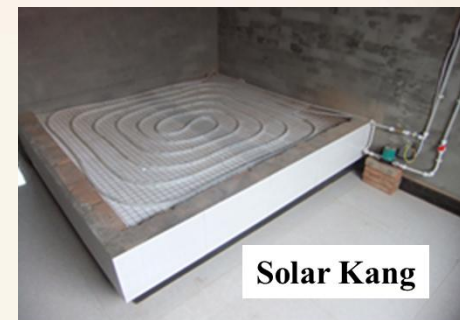
創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈題



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

6.3 复合式太阳能炕采暖



Solar Kang



Passive solar air heater

为满足中国华北地区的采暖需求，同时减少传统火炕的污染，提出了一个包含太阳能炕和太阳能空气加热系统的新型加热系统，太阳能空气加热系统满足了居民的日常供热需求，太阳能炕白天储存太阳能，为晚上提供了舒适的睡眠环境

育創
才府
題

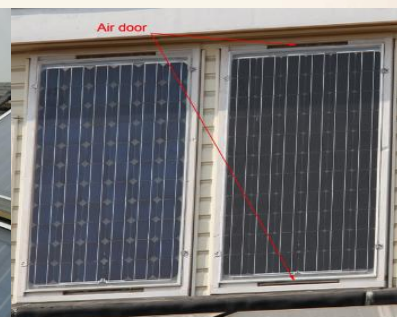


中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

6.4 太阳能光伏光热建筑一体化

- ✓ 为研究并提高太阳能与建筑的一体化程度，构建了一个包含新型太阳能系统的太阳能示范建筑。
- ✓ 评估了太阳能、主被动加热系统、PV/T系统、太阳能冷却系统、太阳能水加热系统及室内热环境的性能。





6.5 带有甲醛热催化的PV/T墙

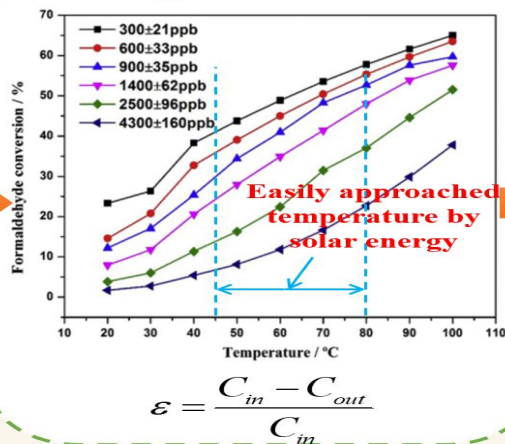
- ✓ 热催化PV/T墙：复合PV/T墙和热催化技术的结合
- ✓ 热催化剂的选取与制备：MnO_x-CeO₂ (过渡金属氧化物)

Preparation

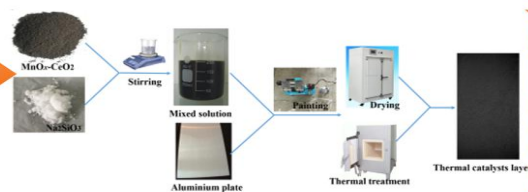


Samples

Activity measurement

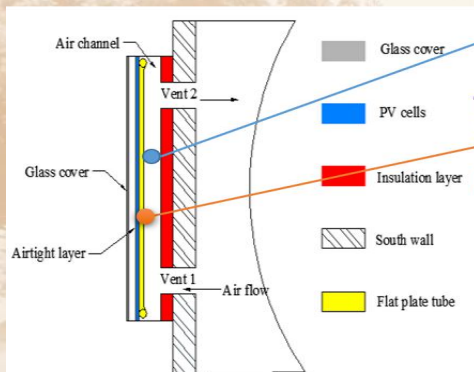


Preparation of thermal catalytic module

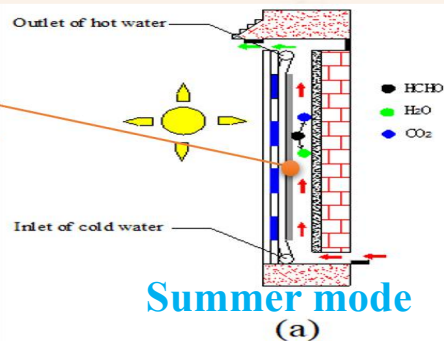


Method of spray coating

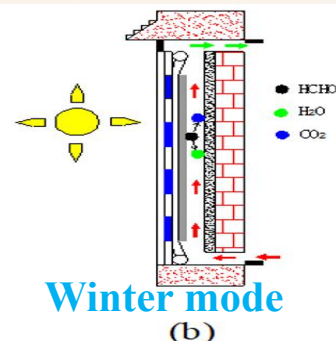
The generated heat in the air channel can drive the thermal catalytic of formaldehyde



Thermal catalysts are coated on the aluminum plate



Summer mode



Winter mode



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

7、太阳能 光电光热 复合系统

吸热底
板类型

结构优
化

焊接工
艺

热应力

光伏电
池外置
和内置

不同光
伏电池
类型

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈題

一九八八年五月



7.1 光伏热水器

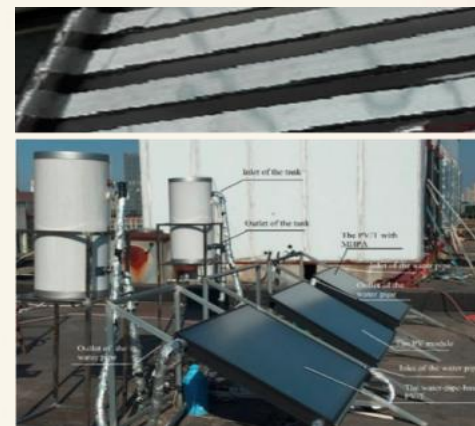
➤ 研发出了多种太阳能PV/T热水模块



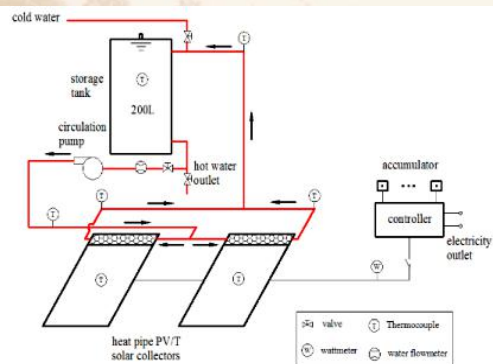
整板型管板式PV/T



整板型管板式PV/T示范



微通道热管PV/T示范



热管式PV/T系统原理图



两种环路热管PV/T



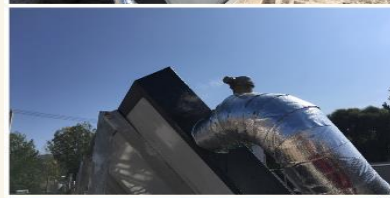
真空玻璃盖板及真空玻璃盖板PV/T



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

7.2 PV/T 系统应用



創
寰
宇
學
府



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

7.3 聚光砷化镓发电供热研究



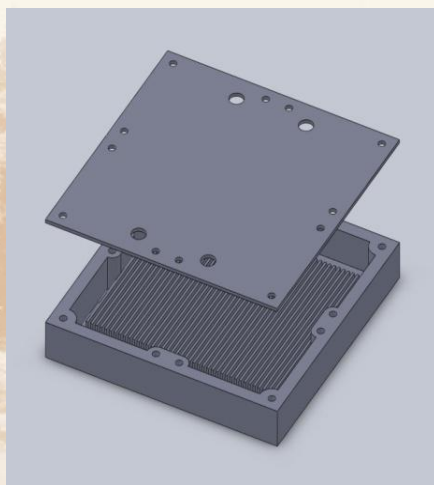
碟式聚光砷化镓发电系统



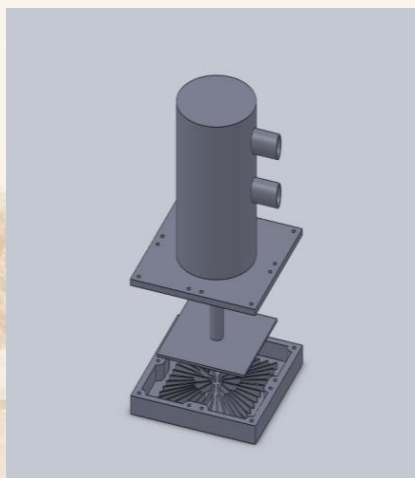
聚光砷化镓发电系统



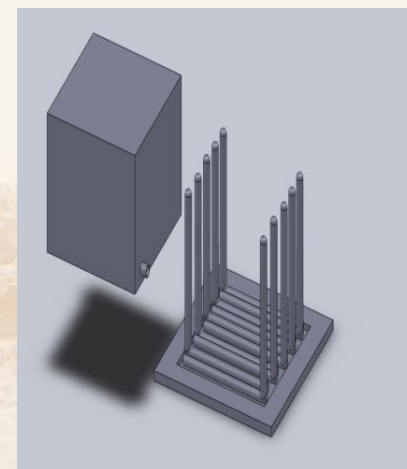
菲涅尔式聚光砷化镓发电系统



槽式冷却器



冷空气发生器



热管式冷却器

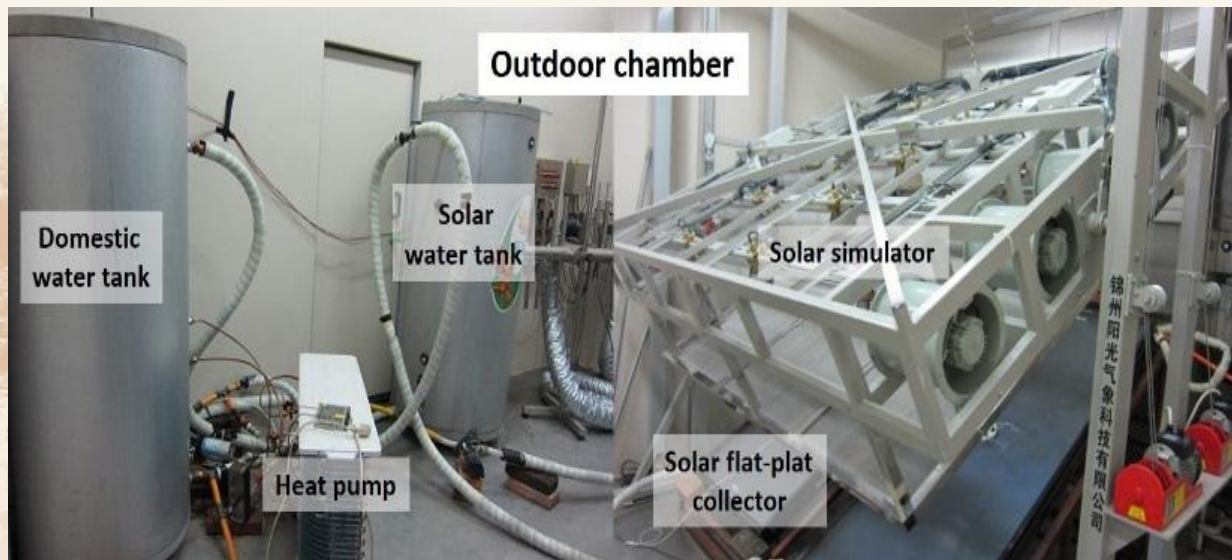
創
寰
宇
學
府
育
天
下
英
才



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

7.4 太阳能光伏直接膨胀热泵



創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈題
一九八八年五月



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

结束语

太阳能利用目标

- 低成本、高效率、高可靠、长寿命

太阳能利用原则

- 因地制宜

太阳能研究方法

- 材料-工艺-系统

太阳能大规模应用途径

- 产学研结合+政府支持

創寰宇學府
育天下英才
嚴濟慈題
一九八八年五月



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

祝贺广东省太阳能 协会成立20周年 谢谢!

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈題

一九八八年五月