

7 m² 多槽式 CPC 聚光集热装置性能研究

孟 鲤 朱跃钊 杨谋存 陈海军

(南京工业大学 机械与动力工程学院 江苏省过程强化与新能源装备技术重点实验室 江苏 南京 211816)

摘 要: 结合线性菲涅尔式和复合抛物面式聚光器(CPC)的优点,融合热管真空管集热和传热技术,将较宽的抛物槽式反射镜替换成狭窄的平面反射镜,在槽式集热装置的基础上研制了一套 7 m² 多槽式 CPC 聚光集热装置,分析了光学效率的影响因素,基于能量守恒原理,建立了集热器简化的光热转换模型,并进行了实验研究。结果表明,多槽式 CPC 聚光集热装置最大光学效率和集热效率分别可达 69.46% 和 50.58%,平均集热效率为 41.14%,真空管内导热油温度达 197 ℃,具有良好的聚光集热性能,适宜在太阳能中温集热领域应用。

关 键 词: 多槽式 CPC 聚光集热装置; 光学效率; 集热效率; 性能研究

中图分类号: TK513.1 文献标识码: A

引 言

与槽式聚光集热装置相比,线性反射式菲涅尔聚光集热装置可较好地克服能流密度不均匀、跟踪精度要求高等问题。但线性反射式菲涅尔聚光集热装置也存在一些不足,如为获得均匀且高能流密度的光斑,要求有较窄的镜面宽度和较多的镜面组数,为减小反射镜之间遮挡,要求镜组间距较大。

本研究在课题组前期研制的 CPC 以及槽式热管式集热器基础上^[1~2],设计了一种多槽式 CPC 聚光集热装置。该装置采用了较宽的抛物槽式反射镜代替狭窄的平面反射镜。由于抛物槽式反射镜具有较好的聚光作用,因此可以得到宽度较窄的光斑。同时,为降低装置对跟踪精度的要求,提高装置的聚光倍率和能量利用效率,采用 CPC 聚光器对来自槽式反射镜的反射光线进行二次聚光,以提高装置光学效率。分析该装置的光学效率和集热效率,并通过实验研究其光学和集热性能,为太阳能中温集热系统大规模应用提供基础。

1 多槽式 CPC 聚光集热装置

聚光系统光路原理图和集热系统流程简图分别如图 1 和图 2 所示。

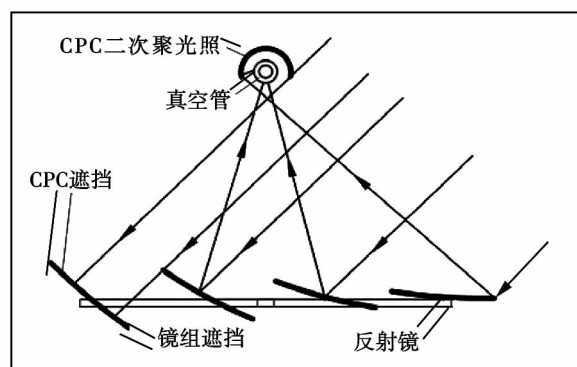


图 1 多槽式 CPC 聚光系统光路原理图

Fig. 1 Schematic drawing of the optical path of a multi-trough CPC light condensation system

2 系统效率分析

2.1 光学效率计算

影响多槽式 CPC 聚光集热装置光学效率的主要因素有抛物槽式反射镜面、CPC 反射面、真空管外管及涂层、镜面及 CPC 之间的相互遮挡损失、由于太阳方位角变化而引起的余弦损失以及太阳高度角变化而引起的端部损失等。因此,该装置的光学效率 η_{op} 可表示为:

$$\eta_{op} = \eta_{glass} \eta_{CPC} \tau_e \alpha_r \eta_r \eta_\theta \eta_{end} \quad (1)$$

式中: η_{glass} —槽式反射镜的反射率,装置采用低铁超白浮法玻璃为基材,取为 93%^[3]; η_{CPC} —CPC 反射面的反射率,镜面材料为不锈钢,反射率为 90%; τ_e —

收稿日期: 2012 - 12 - 30; 修订日期: 2013 - 01 - 23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51276086); 国家自然科学基金项目(55105192); 江苏省政府建筑节能专项(苏财建[2008]284号)

作者简介: 孟鲤(1985 -),男,安徽寿县人,南京工业大学硕士研究生。

真空管玻璃外管的透过率,玻璃材料为高硼硅玻璃 3.3,其透射率为 93%; α_r —真空管内管上选择性涂层的吸收率,取 92%^[4]; η_s —有效镜面宽度与总镜面宽度 W 的比例, $\eta_s = 1 - W_s/W$;可通过实测镜面与镜面之间遮挡以及 CPC 与镜面之间遮挡的阴影宽度 W_s 来计算; η_θ —余弦效应,等于入射光线与镜面法线夹角的余弦值^[5]; η_{end} —集热管上光斑长度与总集热管长度的比值,可以实测集热管上光斑长度来计算;由于一天之内太阳高度角和方位角变化较大,故 η_s 、 η_θ 和 η_{end} 均应视为变量。

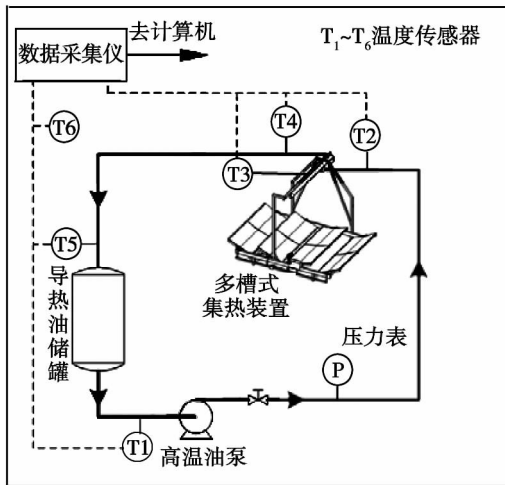


图 2 多槽式 CPC 集热系统流程简图

Fig. 2 Chart showing the flow path of a multi - trough CPC heat accumulation system

2.2 集热效率计算

热管真空管式集热器将接收到的有效太阳能转换为热能,其中一部分热量通过对流、辐射等形式变成热损失,而另外一部分热能通过热管内工质的相变传热传递给导热油包内的导热油。假设导热油的流量一定,且温度分布均匀,则单位时间内热管实际传递给导热油的热能 Q_u 可以通过油包进出口温差来计算:

$$Q_u = c_p \cdot m \cdot (T_4 - T_2) \quad (2)$$

式中: m —质量流量, kg/s; c_p —导热油的比热容, kJ/(kg · °C); T_2 、 T_4 —油包进出口温度, °C。

热管真空管式集热器的热损失与真空管内导热油温度、环境温度、热管性能以及真空管真空度等因素有关,可近似简化为^[6]:

$$q = K \cdot (T_{in} - T_0) \cdot A \quad (3)$$

式中: q —单位时间内通过真空管管壁损失的热量,

kW; T_{in} —真空管内导热油温度, °C; T_0 —环境温度, °C; A —真空管换热面积, m²; K —当量换热系数,按文献[6]实验结果,可取 0.22。

根据能量守恒原理,太阳能集热装置的热平衡方程为:

$$S_c I_b \eta_{op} = Q_u + q \quad (4)$$

式中: S_c —总的集热面积, m²; I_b —太阳直接辐射强度, W/m²。

由于太阳全辐射强度不仅记录了太阳的直接辐射强度,也记录了天空的散射辐射和地面的漫反射辐射。因此,本研究在计算集热器集热效率时,结合南京地区全辐射与直接辐射关系,利用式 $I_b = 0.55 I_a$,剔除了散射和漫反射对计算的影响^[7]。

该装置的瞬时集热效率和日平均集热效率分别可表示为:

$$\eta_e = Q_u / S_c I_b \quad (5)$$

$$\eta_a = \int_0^t \eta_e dt / t \quad (6)$$

式中: η_e —瞬时集热效率; η_a —日平均集热效率; t —集热时间, min。

3 实验方案

根据图 1 所示的设计思路,在南京工业大学江浦校区(东经 118.8°,北纬 32°)搭建了一套多槽式 CPC 聚光集热装置,如图 3 所示。该装置由 4 条槽式镜组组成,镜组间距为 950 mm,每条镜组由 2 块尺寸为 800 mm × 1 100 mm × 2 mm 的反射镜组成。该装置南北布置,东西跟踪,仰角为 16°。热管真空管式集热器主要参数如表 1 所示。导热介质是昆仑 SD 320 导热油。由于环境风速对集热器的集热效率和热损失影响较小^[8],且装置选用厚度为 30 mm 岩棉为保温材料,保温效果较好,因而在实验中忽略风速变化对结果所带来的不利影响。

表 1 集热器主要参数(mm)

Tab. 1 Main parameters of the heat collector(mm)

参数名称	数值
真空管外径	70
真空管内径	58
热管直径	32
热管长度	1 900

试验从 2012 年 5 月 18 日上午 9:00 开始进行,

通过 Agilent 34970A 型巡检仪和 K 型热电偶分别测试油包进出口、热管蒸发段温度, 采样时间间隔为 1 min; 同时, 每隔 10 min 测量一次反射镜上阴影宽度、集热管上光斑长度等以计算光学效率。太阳能辐射强度由 TBQ-2 总辐射仪测得, 用 TRM-2 太阳能测试记录仪采集数据, 采样间隔也为 10 min, 导热油流量为 0.05 kg/s。



图 3 多槽式 CPC 聚光集热装置外观图

Fig. 3 Drawing showing the appearance of the multi-trough CPC light condensation and heat accumulation device

4 结果和讨论

4.1 光学效率

图 4 为该装置 2012 年 5 月 18 日一天中真空管光斑长度和反射镜面阴影总宽度的实测结果, 图 5 为反射镜面的余弦效应以及装置总的光学效率。

从反射镜面阴影宽度的测量结果来看, 9:00 ~ 15:00 时间段内镜面之间已没有遮挡, 图 4 中给出的总阴影宽度实际上就是 CPC 二次聚光器所形成的阴影宽度。由于镜组之间存在间隙, 因此在一天中镜面上的阴影宽度有波动, 特别是在中午 12:00 时, CPC 所形成的阴影大部分落在镜组之间的间隙上, 此时镜面的遮挡最少。总的来说, 该装置由于遮挡导致的光学损失在 8% 以下。

图 4 也显示真空管上光斑长度一天变化很大, 尤其是在 10:00 之前和 14:00 之后, 光斑长度不足 1500 mm, 对应的光学损失大于 21%。这是造成该时段内总体光学效率较低的主要因素。但一般而言, 一天中较强的太阳辐射主要集中在 10:00 ~

14:00 时间段, 因此 10:00 之前和 14:00 之后的光学损失对平均光学效率的影响有限。另外, 分析表明集热管长度和焦距对端部损失影响显著, 增加聚光器和集热器的长度并减小焦距可显著提高该装置的光学效率。

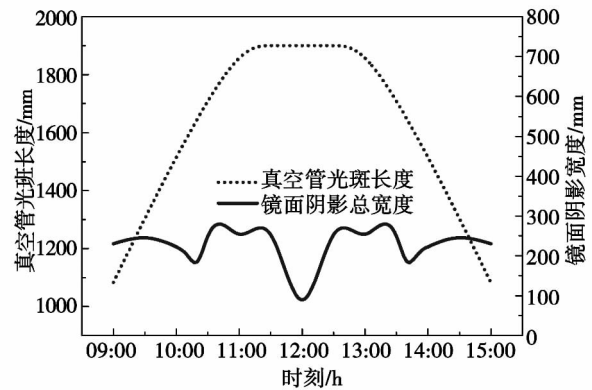


图 4 真空管光斑长度和镜面阴影总宽度

Fig. 4 Length of the facula of the vacuum tube and overall width of the shade of the mirror surface

图 5 显示该聚光集热装置在 10:00 ~ 14:00 时间段内的余弦效应大于 93%, 即余弦效应引起的光学损失低于 7%; 该时间段内装置总的光学效率大于 50%, 最大达 69.46%。

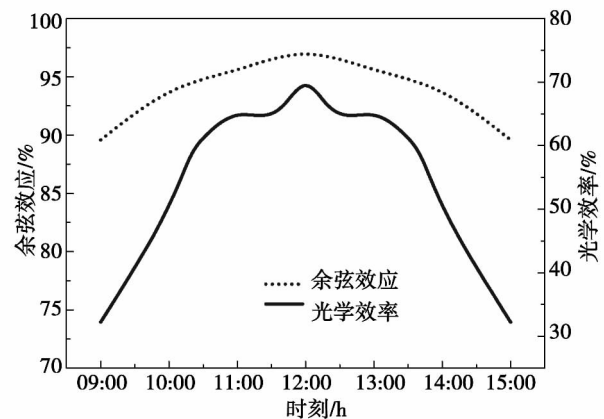


图 5 反射镜面余弦效应和光学效率

Fig. 5 Cosine effect and optical efficiency of the reflecting mirror

4.2 集热效率

图 6 为 5 月 18 日的太阳全辐射和转化后的直接辐射强度随时间的变化关系。图中辐射强度在下午 13:20 ~ 13:40 之间有明显的降低是因为天空中云层增厚的缘故。

图 7 为集热装置真空管内各测点温度随时间的变化关系。其中 9:00 ~ 10:00 之间为装置的启动时段,集热系统温度变化速率较大,在约 13:10 时真空管中导热油温度达 197 °C,油包出口温度达 105 °C,在 13:10 ~ 15:00 时段内温度始终稳定在 100 °C 左右。初始时,出口和进口的温差并不大,这主要是因为导热油携带的热能在循环过程中对管道和集热器进行加热,存在有沿程热量损失。

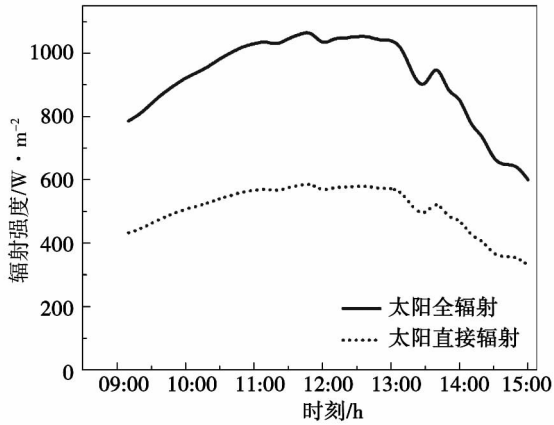


图 6 太阳光照辐射强度
Fig. 6 Solar radiation intensity

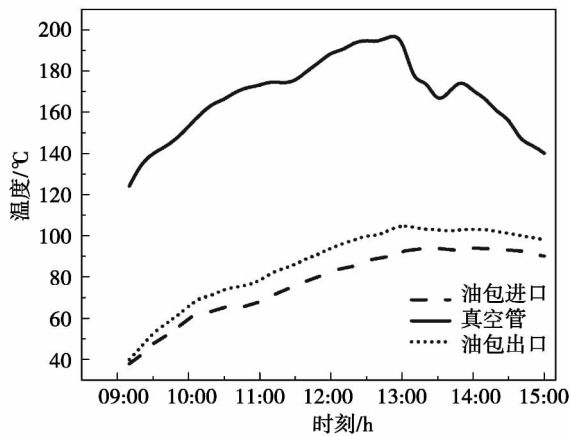


图 7 集热包内各测点温度
Fig. 7 Temperatures at various measuring points inside the heat accumulation bag

根据式(2) ~ 式(3),分别计算了热管实际传递给导热油的热量以及真空管的热损失,如图 8 所示。在 10:00 ~ 14:00 之间,集热功率大于 0.81 kW,最高达 1.76 kW。在 14:00 点后,随着太阳辐射强度下降,集热功率变化也逐渐降低,但仍能稳定保持在 1 kW 以上,表明多槽式 CPC 聚光集热装置可有效

的将太阳光反射到集热器上,且能在太阳辐射强度显著下降时,利用真空管中导热油的蓄热功能,可有效的避免集热包内导热油温度迅速下降。

根据式(5) ~ 式(6),图 9 计算 10:00 ~ 14:00 时间段内的瞬时集热效率,并和瞬时光学效率进行了比较。计算表明该装置的瞬时集热效率最高为 50.58%,平均集热效率为 41.14%。从图 9 还可以看出,集热效率和理想的光学效率仍有约 30% 的差距,该差距和热管传热能力以及真空管热损失等有关,进一步工作拟开展热管、真空管以及多槽式 CPC 聚光器的匹配研究。

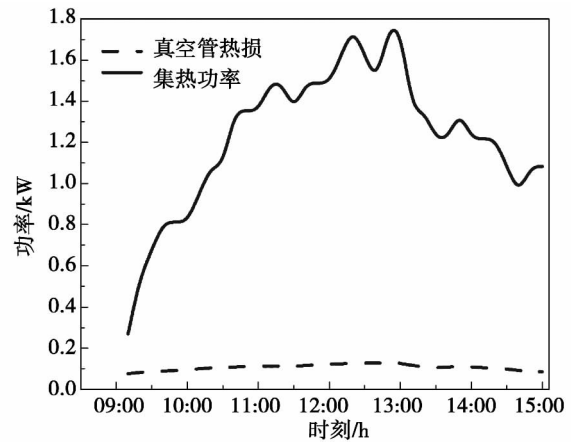


图 8 集热功率和真空管热损失
Fig. 8 Heat accumulation power and heat loss of the vacuum tube

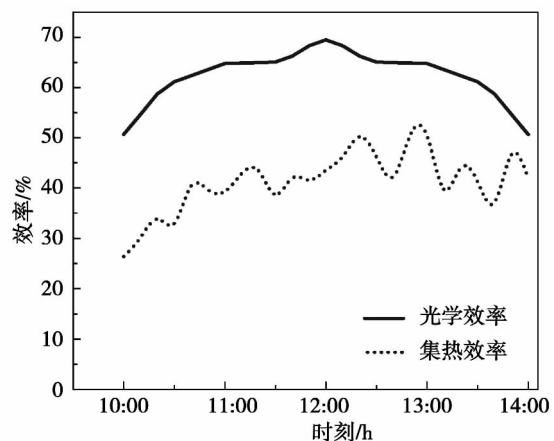


图 9 集热器集热效率及其与光学效率比较
Fig. 9 Comparison of the heat accumulation efficiency and optical efficiency of the heat collector

5 结 论

多槽式 CPC 聚光集热装置, 融合了热管真空管集热和传热技术, 同时将较宽的抛物槽式反射镜替换成狭窄的平面反射镜, 具有成本低廉、聚光性能优良等特点, 本研究建立了该装置的光学和集热效率计算模型, 对多模式 CPC 聚光集热装置进行了实验研究, 通过实验结果及分析, 得出结论:

(1) 多槽式 CPC 聚光集热装置瞬时光学效率最高达 69.46%, 其中端部损失对于长度较短和焦距较大的集热器影响较大。

(2) 多槽式 CPC 聚光集热装置在 10:00 ~ 14:00 时间段内集热功率可维持在 0.81 ~ 1.76 kW 之间; 最大集热效率达 50.58%, 平均集热效率为 41.14%; 真空管内导热油温度最高可达 197 °C, 具有较好的聚光集热性能, 在空调制冷及工业中温集热领域具有广阔前景。

进一步研究工作, 可通过聚光器参数优化以及热管、真空管与聚光器的合理匹配, 提高系统的光学效率和集热效率。

致谢: 感谢实验室廖传华教授、博士生马婷婷和王银峰以及硕士生孙伟等人在实验装置搭建以及测试中所提供的帮助。

参考文献:

- [1] 张维薇, 朱跃钊, 蒋金柱, 等. 新型 CPC 热管式集热器的设计与模拟分析[J]. 热能动力工程, 2009, 24(3): 395-399.
ZHANG Wei-wei, ZHU Yue-zhao, JIANG Jin-zhu, et al. Design and simulation analysis of a novel CPC heat-pipe heat collector [J]. Journal of Engineering For Thermal Energy and Power, 2009, 24(3): 395-399.
- [2] 徐吉富, 朱跃钊, 蒋金柱, 等. 太阳能真空管热管式集热管温度场及流场分析[J]. 流体机械, 2009, 37(2): 61-64.
XU Ji-fu, ZHU Yue-zhao, JIANG Jin-zhu, et al. Temperature and flow field analysis of a solar energy vacuum tube heat pipe type heat accumulation tube [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(2): 61-64.
- [3] 何 斌. 一维聚光拉引成型槽式抛物镜 [P]. 中国: CN201852983U, 2011.
HE Bin. One-dimensional light condensation parabolic mirror taken shape by pulling and drawing [P]. China: CN201852983U, 2011.
- [4] 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.

- ZHAO Yu-lan, ZHANG Hong, ZHAN Dong-dong, et al. Study of the heat collection efficiency of a CPC heat pipe type vacuum tube heat collector [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(9): 1022-1025.
- [5] 杨 宾. 槽式太阳能直接蒸汽热发电系统性能分析与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
YANG Bin. Performance analysis and experimental study of a trough type solar energy direct steam thermal power generation system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [6] 赵惠忠, 张 敏, 刘震炎, 等. 太阳能集热真空管热损失的试验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(10): 1063-1068.
ZHAO Hui-zhong, ZHANG Min, LIU Zhen-yan, et al. Experimental study of the heat loss of a solar energy heat collection vacuum tube [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(10): 1063-1068.
- [7] 刘 赟. 热管型槽式太阳能集热器的开发与研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2009.
LIU Yun. Development and study of a heat pipe type solar energy heat collector [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2009.
- [8] 熊亚选, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能聚光集热器热性能数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(3): 495-498.
XIONG Ya-xuan, WU Yu-ting, MA Chong-fang, et al. Numerical study of the thermal performance of a trough type solar energy light condensation heat collector [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 495-498.

(丛 敏 编辑)

• 书 讯 •

密封原理、应用与维护

《密封原理、应用与维护》一书经机械工业出版社最新出版。

本书结合实例, 系统地介绍了现代密封技术原理及使用维护方法。

全书共分 7 章。其中第 1 章是密封技术概论; 第 2、3、4、5 章分别介绍垫片密封、填料密封、机械密封及非接触类密封的选择、安装、维护、修理改进技术方法; 第 6 章介绍注剂、粘接及焊接带压堵漏技术。第 7 章介绍设备泄漏的检测、监测和综合治理的方法。

words: thermodynamics ,obliquely-finned tube ,CaCO₃ ,crystal precipitation-caused foul

生物质气化燃气低位热值影响因素的试验研究 = **Experimental Study of the Factors Influencing the Low Heating Value of a Biomass Gasified Fuel Gas** [刊 汉]JI Heng-song ,WANG Qian ,CHENG Shan ,et al(College of Energy Source and Power Engineering ,Jiangsu University ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 201013) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . - 529 ~ 534

In the light of the fact that the low heating value of a biomass gasified fuel gas is influenced by multiple factors ,such as gasification temperature ,steam/biomass mass ratio(referred to as mass ratio for short) and equivalent ratio etc. and these factors are interacted ,the orthogonally designed test method was used to study the sensitivity extent of the three dominant factors influencing the low heating value of the biomass gasified fuel gas and the test results were analyzed by using the range and variance analytic method to obtain the significance relationship influencing the lower heating value of the fuel gas and the optimum factor combination level. The test results show that in the range of the test conditions ,the priority order of various factors and their interaction influencing the lower heating value is as follows: equivalent ratio > gasification temperature > mass ratio > interaction of the mass ratio and equivalent ratio > interaction of the gasification temperature and equivalent ratio ,among them ,equivalent ratio ,gasification temperature and mass ratio have a particularly remarkable influence on the lower heating value of the fuel gas. The version optimized for preparing the fuel gas from the gasification of biomass through an analysis of the interaction is given as follows: gasification temperature 750 °C ,mass ratio 0. 75 and equivalent ratio 0. 25. Under such conditions ,the lower heating value of the fuel gas will be the highest(6. 530 MJ/m³) . **Key words:** biomass ,gasification ,low heating value ,influencing factor ,orthogonal test

7 m² 多槽式 CPC 聚光集热装置性能研究 = **Performance Study of a 7 m² Multi-trough Type CPC(Compound Parabolic Collector) Light Concentration and Heat Collector** [刊 汉]MENG Li ,ZHU Yue-zhao ,YANG Mou-cun ,et al(Jiangsu Provincial Key Laboratory on Process Enhancement and New Energy Source Equipment Technology ,College of Mechanical and Power Engineering ,Nanjing University of Technology ,Nanjing ,China ,Post Code: 211816) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . - 535 ~ 539

To combine the merits of the linear Fresnel type and compound parabolic collector and fuse with the heat pipe vacuum tube heat accumulation and heat transfer technologies ,developed was a 7 m² multi-trough type CPC(Compound

Parabolic Collector) light concentration and heat collector based on the trough type heat accumulation device with the factors influencing the optic efficiency being analyzed. Based on the energy conservation theory ,a simplified light-heat transformation model for the collector was established and an experimental study was performed. It has been found that the maximal optic efficiency and heat accumulation efficiency of the multi-trough type CPC light concentration and heat collector can hit 69.46% and 50.58% respectively ,the average heat accumulation efficiency being 41.14% and the heat conduction oil temperature inside the vacuum tubes being 197 °C. The collector has a good light concentration and heat accumulation performance ,applicable for solar energy medium temperature heat accumulation domains. **Key words:** multi-trough type CPC light concentration and heat collector ,optic efficiency , heat accumulation efficiency ,performance study

一种定压运行 AA-CAES 的系统效率分析 = **Analysis of the Efficiency of a AA-CAES System Operating at a Constant Pressure** [刊 ,汉] GUO Huan ,XU Jian ,CHEN Hai-sheng ,et al(Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5) . -540 ~ 546

In the light of such problems as the dependence of the traditional CAES(compressed air energy storage) systems on fossil fuels and a large off-design operation range and a low efficiency of the AA-CAES(advanced adiabatic compressed air energy storage) systems when they are operating at sliding pressures ,analyzed in a comprehensive way was the thermal performance of an AA-CAES system operating at a constant pressure and established were each unit modules of and a thermodynamic model for the system. By making use of the software MATLAB ,a numerical simulation was performed with the characteristics governing the influence of the efficiency of the heat exchangers ,total pressure ratio ,number of stages and pressure ratio distribution of the compressor on the efficiency of the system being revealed. The authors have arrived at a conclusion from an analysis that when the efficiency of the heat exchangers equals to 0.7 ,0.8 and 0.9 respectively ,the efficiency of the system assumes a different variation tendency with the total pressure and number of stages. When the total pressure ratio is constant ,the efficiency of the system exhibits a different variation tendency with the efficiency of the heat exchangers and number of stages. When the efficiency of the heat exchangers ,total pressure ratio and number of stages are constant ,the pressure ratio distribution basically has no influence on the efficiency of the system and there exists an optimum efficiency matching relationship among various parameters of the system. **Key words:** compressed air energy storage ,adiabatic compressed air energy storage ,system modeling ,constant pressure operation ,efficiency analysis