

文章编号:0254-0096(2018)01-0001-07

散射占比对低倍CPC热性能影响的 对比实验研究

王健¹, 裴刚¹, 杨明¹, 李桂强¹, 汪云云², 李鹏程¹

(1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027; 2. 深圳大学光电工程学院, 深圳 518060)

摘要: 搭建聚光比分别为1.5、2.0和3.0的复合抛物面聚光器(CPC)对比实验系统,在集热器进口温度110℃条件下,对比实验研究散射辐照占总辐照比例(散射占比)对3种聚光比CPC系统集热性能的影响,并对我国不同地区典型辐照资源条件下CPC聚光集热的热性能进行分析。结果表明:散射占比对低倍CPC集热性能有明显影响,对于同一聚光比CPC, CPC热效率均随散射占比的降低而提高;对于不同聚光比CPC, 1.5×CPC在散射占比高时热效率最高, 3.0×CPC仅在散射占比低的晴天具有最高热效率。

关键词: 复合抛物面; 低倍CPC; 散射占比; 热效率

中图分类号: TK512

文献标识码: A

0 引言

低倍复合抛物面聚光器(CPC)由于可利用部分散射辐照、无需跟踪装置、结构简单以及成本低等优点得到了广泛关注。CPC的概念最早在1974年由Winston^[1]提出。进入21世纪以后,我国学者对CPC进行了广泛研究,葛新石等^[2]介绍了CPC的几何特性以及光学特性,刘灵芝等^[3]介绍了平板型和圆管型CPC的设计原理。近年来,一些学者也对CPC的光学效率和热效率等进行了理论和实验研究。文献[4,5]将折射材料与CPC内壁结构相结合,大大提升了新型CPC的光学效率;文献[6,7]建立了CPC集热器传热模型和对热效率进行理论计算,并基于实验数据进行了验证;文献[8]对有无盖板CPC集热器进行了热效率的对比研究。

然而,目前关于散射辐照对低倍CPC性能影响的分析缺乏详细研究。散射辐照是总辐照中重要组成部分,在多云和雾霾天气下,散射辐照会占据相当大比例。我国地域辽阔,辐照资源差异明显,同属太阳能资源丰富区的拉萨和银川^[9],其年平均散射辐照占总辐照比例(散射占比)分别为19.7%和

33.1%。散射占比的不同,低倍CPC的集热性能也会受到影响。本文根据能量平衡方程建立低倍CPC稳态传热数学模型,并搭建不同聚光比(1.5×、2.0×和3.0×)的CPC实验台,给定集热器进口温度为110℃,对这3种低倍CPC在不同散射占比情况下的集热性能进行实验测试,并对实验数据进行分析,其结果可为不同地区选择合适聚光比的CPC提供必要实验依据,最后将实验结果结合拉萨、昆明和广州3座城市进行分析。

1 系统性能参数

低倍CPC具有较大接收角,因而可接收相当一部分散射辐照,聚光比(concentration ratio)为C的CPC可接收有效辐照 I_0 为:

$$I_0 = I_n + \frac{I_d}{C} \quad (1)$$

式中, I_n ——CPC开口面直接辐照度, W/m^2 ; I_d ——CPC开口面散射辐照度, W/m^2 ; C ——CPC聚光比。

在稳态(或准稳态)条件下,集热器内传热工质得到的有用能与开口面总辐照的比值 η 为CPC集热器的效率^[10],表示为:

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51476159; 51408578); 东莞市引进创新科研团队计划(2014607101008)

通信作者: 裴刚(1975—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能利用及热泵与制冷方面的研究。peigang@ustc.edu.cn

$$\eta = \frac{Q_u}{AG} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{AG} \quad (2)$$

式中, \dot{m} ——工质质量流量, kg/s; c_p ——工质比热容, J/(kg·K); T_{in} 、 T_{out} ——集热器进出口温度, K; A ——集热器开口面积, m²; G ——CPC 开口面总辐照度, W/m²。

2 实 验

2.1 复合抛物面聚光器

CPC 主要由反射镜和接收器组成, CPC 反射镜采用高反射率的镜面铝制作而成, 镜面铝轻且易加工, 经分光光度计测量, 本实验中镜面铝对太阳光谱平均反射率为 0.886。通过对 1.56×、2.25×和 3.25×CPC 截取后得到实际聚光比为 1.5×、2.0×和 3.0×CPC, 截取前后高度如表 1 所示。

CPC 接收器主要有圆管型和平板型两种(以全玻璃真空管为接收器的圆管型和以平板为接收器的平板型), 本实验采用圆管型接收器。相比于平板型 CPC, 圆管型 CPC 底部呈渐开线形状, 落在渐开线上的光线最终能反射到圆管接收器上。接收器使用全玻璃真空管, 可有效减少因热传导和热对流而产生的热损, 玻璃管内部采用 U 型铜管和铝翅片相结合的布置方式, 以强化换热效果, 增加工质得热量。

表 1 CPC 截取前后高度以及截取后的开口宽度 (mm)

Table 1 The height before and after truncation and open width after truncation of CPC(mm)

聚光比	截取前高度	截取后高度	截取后开口宽度
1.5×	160.1	108.5	174.4
2.0×	346.5	141.6	232.5
3.0×	697.5	319.4	348.8

2.2 实验台

图 1 给出了本文 3 组 CPC 的实验装置图, 系统主要由 CPC 集热器、油箱、传热工质、油泵及数据采集系统组成。图 2 给出了 3 组 CPC 集热器实物图, 1.5×、2.0×和 3.0×CPC 集热器分别由 4、3、2 个反射槽组成, 每组 CPC 集热器不同真空管内的 U 型铜管采用串联连接方式, 这样开口面积均为 1.05 m²,

故 3 组 CPC 开口面总辐照相同。油箱呈圆柱形, 表层为不锈钢, 内层为聚氨酯保温材料, 容积为 30 L, 内置 1.6 kW 加热器。传热工质采用长城导热油 L-QC320, 储存在油箱 1 中。实验中采用 DN6-A 型智能液体涡轮流量计测其流速, 采用 T 型铜-康铜型热电偶测量 3 组 CPC 集热器进出口油温, 法向直射辐照和 CPC 倾斜面总辐照分别由 TBS-3 直射仪、TBQ-2 总辐照表采集, 所有流量、温度和辐照信号均由 LR8402-21 数据记录仪采集, 每隔 10 s 数据采集系统自动记录相应信息。

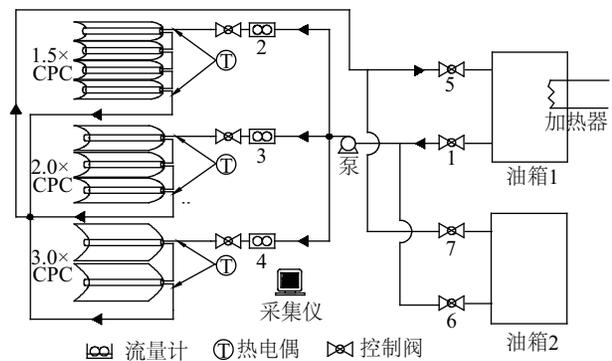


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

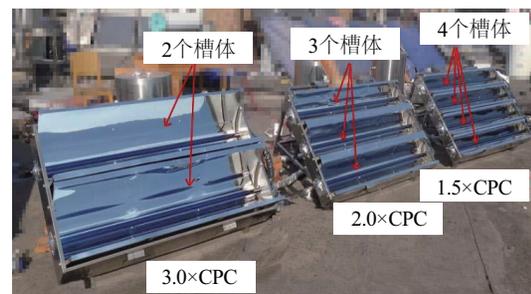


图 2 CPC 集热器实物图

Fig. 2 Photo of the CPC collectors

实验前, 打开阀门 1、2、3、4 和 5, 关闭阀门 6 和 7, 导热油通过油箱 1 内的加热器预热, 经过油泵驱动分流到 3 组 CPC 集热器, 通过调节阀 2、3 和 4, 使进入 3 组 CPC 集热器的流量相同, 待集热器入口温度达到 110 °C 时, 关闭加热器, 打开阀门 7, 关闭阀门 5, 开始实验, 油箱 1 中导热油经过集热器进入油箱 2。之后打开阀门 5 和 6, 关闭阀门 1 和 7, 导热油最终从油箱 2 回到油箱 1。

本实验分别于 2015 年 10 月 17 日、10 月 27 日和 10 月 31 日在安徽合肥(东经 117°17', 北纬

31°52')中国科学技术大学西区力学一楼楼顶完成,测试在集热器进口温度为 110 °C 条件下,3 种不同聚光比的低倍 CPC 集热器热效率。10 月 17 日集热器倾角为 42.0°,10 月 27 日和 10 月 31 日集热器倾角均为 45.0°,以保证正午时刻直射太阳光线能垂直入射到 CPC 开口面。实验中控制各组 CPC 流量 0.14 m³/h,进口温度(110±0.5)°C。本实验中 3 组低倍 CPC 集热器东西方向放置,开口朝南,因此 CPC 集热器在早晨和傍晚端头效应较为明显^[11],为尽量减小端头影响,实验测试时间选取在当日的 10:00~14:00。

3 CPC 集热器稳态传热模型

图 3 给出了 CPC 集热器的传热网络图。太阳光经 CPC 反射镜反射后到达真空管,透过外玻璃管被内玻璃管表面的选择性吸收涂层吸收转化为热量。热量一部分通过肋片传导给 U 型铜管,进而经对流换热给流体,另一部分通过外玻璃管与周围环境对流和辐射换热。为简化模型,对稳态运行的 CPC 集热管作以下假设:

- 1) 3 组 CPC 所处外界环境相同;
- 2) 真空玻璃管无能量吸收;
- 3) 忽略玻璃和选择性吸收涂层沿厚度方向上的温度差异;
- 4) 铝翅片与玻璃内接触良好,无传热热损。

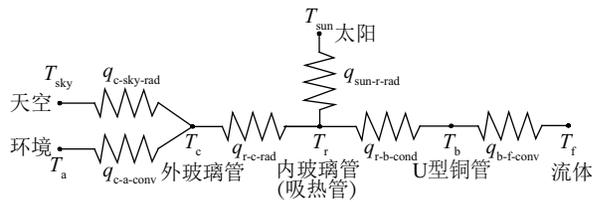


图 3 CPC 集热器的传热网络图

Fig. 3 Thermal network for the CPC collectors

根据上述假设,建立真空管的能量平衡方程^[12]:

$$q_{r-b-cond} = q_{b-f-conv} \quad (3)$$

$$q_{sun-r-rad} = q_{r-b-cond} + q_{r-c-rad} \quad (4)$$

$$q_{r-c-rad} = q_{c-a-conv} + q_{c-sky-rad} \quad (5)$$

$$q_{sun-r-rad} = 2\dot{m}c_p(T_f - T_{in}) + q_{c-a-conv} + q_{c-sky-rad} \quad (6)$$

式中, $q_{b-f-conv}$ ——U 型铜管与流体间的对流换热, W/m²; $q_{r-b-cond}$ ——内玻璃管与 U 型铜管通过铝翅片

的热传导, W/m²; $q_{sun-r-rad}$ ——吸热管得到的热量, W/m²; $q_{r-c-rad}$ ——吸热管与外层玻璃的辐射换热, W/m²; $q_{c-a-conv}$ 、 $q_{c-sky-rad}$ ——外玻璃管与环境的对流和辐射换热, W/m²; T_f ——流体特征温度, $T_f = (T_{out} + T_{in})/2$, K。

U 型铜管与流体间的对流换热:

$$q_{b-f-conv} = \pi D_b h_{b-f} (T_b - T_f) \quad (7)$$

式中, D_b ——铜管直径, m; h_{b-f} ——流体与铜管间的对流换热系数, W/(m²·K); T_b ——铜管温度, K。

内玻璃管与 U 型铜管通过铝翅片的热传导^[12]:

$$q_{r-b-cond} = \frac{k_{Al} D_b}{\xi_{Al}} (T_r - T_b) \quad (8)$$

式中, k_{Al} ——铝翅片导热系数, W/(m·K); ξ_{Al} ——铝翅片厚度, m; T_r ——内玻璃管温度, K。

吸热管吸收的热量:

$$q_{sun-r-rad} = I_U \eta_{op} = I_U \rho_m^n \tau_c \alpha_r \left(1 - \frac{g}{\pi D_r}\right) \frac{1}{1 - \rho_r \rho_c A_r / A_c} \quad (9)$$

式中, η_{op} ——CPC 光学效率; D_r ——内玻璃管直径, m; g ——内玻璃管到渐开线端点距离, $g = 5$ mm; α_r ——选择性吸收涂层的吸收率; τ_c ——外玻璃管的透过率; ρ_m 、 ρ_r 、 ρ_c ——镜面铝、内玻璃管和外玻璃管的反射率; n ——平均反射数, $n = 1 + 0.007C$ 。

吸热管与外层玻璃的辐射换热:

$$q_{r-c-rad} = \frac{\pi \sigma (T_r^4 - T_c^4)}{1/(\varepsilon_r D_r) + (1 - \varepsilon_c)/(\varepsilon_c D_c)} \quad (10)$$

式中, σ ——玻尔兹曼常数; T_c ——外玻璃管温度, K; ε_r 、 ε_c ——选择性吸收涂层和外玻璃管的发射率; D_r 、 D_c ——内玻璃管和外玻璃管直径, m。

外玻璃管与环境的对流和辐射换热:

$$q_{c-a-conv} = \pi D_c h_{c-a} (T_c - T_a) \quad (11)$$

$$q_{c-sky-rad} = \pi D_c \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (12)$$

式中, h_{c-a} ——外玻璃管与环境的对流换热系数, W/(m²·K); T_a 、 T_{sky} ——周围环境和天空的温度, K。

上述方程中,未知量 T_f 、 T_c 、 T_r 和 T_b 由式(3)和式(4)~式(6)联立求解,而后解得 T_{out} ,最终由式(2)求解得出热效率。

4 结果与分析

4.1 进出口温差变化分析

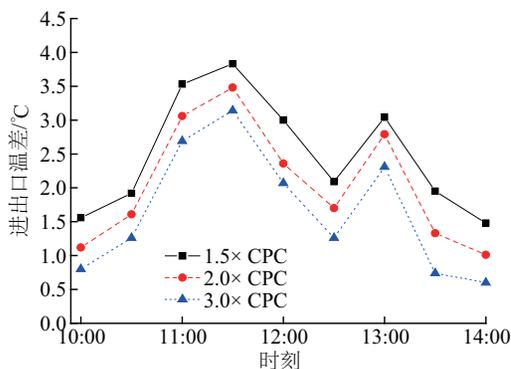
表 2 给出了 A(2015 年 10 月 31 日)、B(2015 年 10 月 17 日)和 C(2015 年 10 月 27 日)3 类辐照气象数据,数据包括测试当天 CPC 开口面总辐照、法向直射辐照以及环温。可看出 3 类平均散射占比明显不同。A 类为典型雾霾天气,当天直射辐照值明显偏低,平均散射占比高达 64.7%;B 类为多云天气,总辐照较好,均值为 805 W/m^2 ,平均散射占比为 32.5%;C 类为典型无污染的晴天,当天总辐照度均值达到 930 W/m^2 ,平均散射占比只有 13.8%。

表 2 辐照数据表

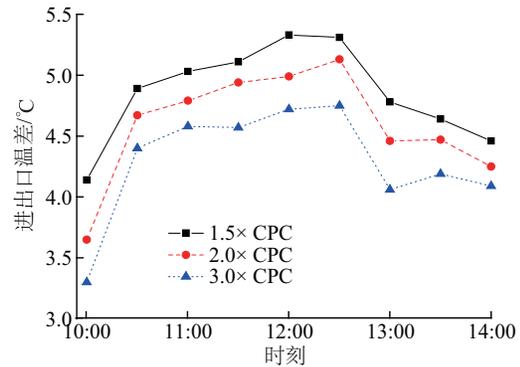
Table 2 Irradiation data

辐照类型	平均总辐照度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	平均直射辐照度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	平均环温/ $^{\circ}\text{C}$	平均散射占比/%
A类	604	213	17.3	64.7
B类	805	543	26.1	32.5
C类	930	802	18.9	13.8

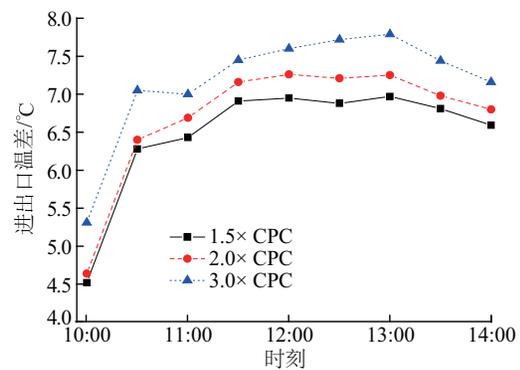
图 4 分别为 3 类辐照条件下 3 组 CPC 在不同时刻的进出口温差,A、B 和 C 类平均散射占比依次降低,为 64.7%、32.5%和 13.8%。通过图 4 中 A B 两类可以发现,1.5×CPC 各时刻进出口温差最大,2.0×CPC 次之,3.0×CPC 最小,且三者之间进出口温差的差距随着散射占比的降低而减小,原因在于由式(1)知 3 组 CPC 可接收辐照的差距随着散射占比的降低而减小,故进出口温差越接近。从 4 图中 C 类可看出,在 C 类散射辐照条件下,



a. A类(平均散射占比64.7%)



b. B类(平均散射占比32.5%)



c. C类(平均散射占比13.8%)

图 4 CPC 进出口温差

Fig. 4 Inlet and outlet temperature difference of CPC

3.0×CPC 全天进出口温差已经超过 2.0×和 1.5×CPC,这是由于实验中可接收辐照和热损综合作用引起的,一方面由式(1)知当天散射占比很低,三者可接收辐照基本一致;另一方面,由于 1.5×CPC、2.0×CPC 和 3.0×CPC 集热管分别由 4、3、2 个 U 型铜管串联而成,故 1.5×CPC 管路热损最大,3.0×CPC 管路热损最小,从而导致 3.0×CPC 进出口温差最大。

4.2 热效率模拟分析

根据前述 CPC 稳态传热模型和实验数据,对 3 组 CPC 在集热器进口温度为 110°C 时的热效率进行了数值计算。表 3 给出了实验期间全天热效率的实验值、模拟值及相对误差。可以看出,数值计算结果与实验结果能基本吻合,且模拟值略大于实验值。3 组 CPC 的相对误差都在 5%,其中 1.5×CPC 相对误差最大,在 C 类辐照条件下达到 6.80%,这是因为 1.5×CPC 是 4 根 U 型铜管串联,管路热损最高,误差最大。

表3 全天热效率及相对误差

Table 3 Daily thermal efficiency and relative error

辐照类型	日平均热效率/%						相对误差/%		
	实验值			模拟值			1.5×	2.0×	3.0×
	1.5×	2.0×	3.0×	1.5×	2.0×	3.0×			
A类	35.5	27.5	21.0	37.4	28.7	22.0	5.35	4.36	4.76
B类	48.0	45.7	43.6	50.2	47.6	45.3	4.58	4.15	3.90
C类	51.5	52.2	54.0	55.0	55.1	55.7	6.80	5.56	3.15

4.3 热效率随散射占比变化分析

图5进一步分析了在不同散射占比下3组CPC集热器的热效率,通过散射占比和热效率的实验散点图,线性拟合得出了3组CPC在110℃进口温度下热效率与散射占比的关系。可看出,当散射占比大于60%时,1.5×CPC效率最高,但3组CPC效率均低于40%;3组CPC效率在散射占比降低到20%的过程中逐渐升高至50%,且趋于一致;当散射占比小于20%时,3.0×CPC热效率达到最高。原因在于散射占比高时,由式(1)知3组CPC可接收辐照低,导致相应的进出口温差低,效率偏低;在可接收辐照和热损的综合作用下,3组CPC效率差距随散射占比的降低而减小。

表4给出了3组CPC热效率与散射占比的拟合线方程,结合图5可看出,1.5×CPC与2.0×CPC、3.0×CPC以及2.0×CPC与3.0×CPC的热效率拟合线相交点的横坐标分别为0.183、0.205和0.229,这说明当总辐照中散射占比大于20.5%时,1.5×CPC具有最高热效率;当散射辐照比例小于20.5%时,较高聚光比的3.0×CPC表现出最高热效率。同时也说明了在散射占比高的地区,为了充分利用散射

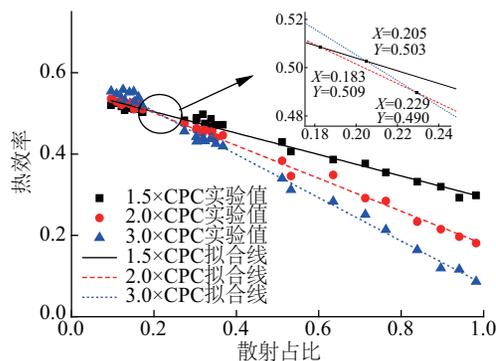


图5 110℃集热时CPC热效率与散射占比的关系

Fig. 5 Relationship between thermal efficiency and proportion of diffuse irradiation at 110℃

表4 热效率与散射占比拟合线

Table 4 The fitting line of thermal efficiency and proportion of diffuse irradiation

聚光比	拟合线(X为横坐标,Y为纵坐标)
1.5×	$Y = -0.263X + 0.557$
2.0×	$Y = -0.403X + 0.582$
3.0×	$Y = -0.532X + 0.612$

辐照,选择低倍聚光比的CPC(如1.5×CPC)较为合理,而在直射辐照资源丰富的地区,选择较高倍聚光比的CPC(如3.0×CPC)可更好发挥其集热效率优势。

4.4 不同地区热效率分析

根据Energyplus气象数据,选取拉萨、昆明和广州3座散射占比不同的城市,列举了其总辐照、散射辐照和直射辐照的典型年辐照量以及平均散射占比,如表5所示。

表5 不同城市年辐照量

Table 5 Irradiation of different cities in a whole year

城市	总辐照量/ kWh·m ⁻²	散射辐照量/ kWh·m ⁻²	直射辐照量/ kWh·m ⁻²	平均散射 占比/%
拉萨	2004.3	395.2	2010.2	19.7
昆明	1510.4	686.0	1096.1	45.4
广州	1118.6	725.3	568.2	64.8

根据各城市典型气象日的平均散射占比,以及图5所得热效率与散射占比的拟合线进行分析,其结果如表6所示。可看出,从气象数据库中选出的各城市典型日当天散射占比和全年平均散射占比相近,在散射占比低的拉萨,3组低倍CPC当天热效率相近,但3.0×CPC热效率达到最高;而在散射占比高的广州,1.5×CPC当天表现出最高热效率,为38.6%。

表6 不同城市典型日热效率对比

Table 6 thermal efficiency of different cities in a typical day

城市	典型日	当天散射 占比/%	热效率/%		
			1.5×	2.0×	3.0×
拉萨	3月09日	19.6	50.5	50.3	50.7
昆明	3月17日	45.8	43.6	39.7	36.8
广州	3月05日	64.8	38.6	32.1	26.7

4 结 论

本文搭建了聚光比分别为 1.5、2.0 和 3.0 的圆管型 CPC 实验台,对集热器进口温度为 110℃ 时,3 组低倍 CPC 在不同散射占比辐照条件下的进出口温差以及热效率进行了实验与模拟对比分析,结论如下:

1)对于同一聚光比 CPC,1.5×、2.0×和 3.0×CPC 热效率均随散射占比的降低而提高,在散射占比为 20%时,3 组 CPC 热效率均达到 50%。

2)对于不同聚光比 CPC,当散射占比大于 20.5%时,较低倍聚光比的 1.5×CPC 具有最高热效率;当散射占比低于 20.5%时,较高倍聚光比的 3.0×CPC 表现出最高热效率。

3)在散射占比低的拉萨,3 组低倍 CPC 在典型日当天热效率相近,但 3.0×CPC 热效率最高;而在散射占比高的广州,1.5×CPC 具有最高热效率。因此在低散射辐照地区,较高倍聚光比的 CPC 具有优势;而在高散射辐照地区,则是较低倍聚光比的 CPC 更合适。

[参考文献]

- [1] Winston R. Principles of solar concentrators of a novel design[J]. Solar Energy, 1974, 16(2): 89—95.
- [2] 葛新石,叶宏.复合抛物面聚光器(CPC)特性[J].太阳能,2001,(4): 20—21.
- [2] Ge Xinshi, Ye Hong. The characteristic of CPC [J]. Solar Energy, 2001, (4): 20—21.
- [3] 刘灵芝,李戡洪.复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究[J].能源技术,2006,27(2): 52—56.
- [3] Liu Lingzhi, Li Jihong. The optical performance of compound parabolic concentrators (CPC) [J]. Energy Technology, 2006, 27(2): 52—56.
- [4] Li Guiqiang, Pei Gang, Su Yuehong, et al. Design and investigation of a novel lens-walled compound parabolic

concentrator with air gap[J]. Applied Energy, 2014, 125: 21—27.

- [5] Li Guiqiang, Pei Gang, Su Yuehong, et al. Experiment and simulation study on the flux distribution of lens-walled compound parabolic concentrator compared with mirror compound parabolic concentrator[J]. Energy, 2013, 58: 398—403.
- [6] Li Xian, Dai Yanjun, Li Yong, et al. Performance investigation on a novel single-pass evacuated tube with a symmetrical compound parabolic concentrator[J]. Solar Energy, 2013, 98: 275—289.
- [7] Santos- González I, Ortega N, Gómez V H, et al. Development and experimental investigation of a compound parabolic concentrator[J]. International Journal of Energy Research, 2012, 36(12): 1151—1160.
- [8] 高宏宇,王辉涛,王华,等.复合抛物面太阳能集热器热性能分析[J].动力工程学报,2012,32(6): 476—480.
- [8] Gao Hongyu, Wang Huitao, Wang Hua, et al. An analysis on thermal performance of CPC solar collectors [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(6): 476—480.
- [9] 闫云飞,张智恩,张力,等.太阳能利用技术及其应用[J].太阳能学报,2012,33(增刊): 47—56.
- [9] Yan Yunfei, Zhang Zhien, Zhang Li, et al. Application and utilization technology of solar energy [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2012, 33(Sup): 47—56.
- [10] 孙健,王艳香,施明恒.复合抛物面聚光太阳能PV/T系统的实验研究[J].太阳能学报,2012,33(1): 86—90.
- [10] Sun Jian, Wang Yanxiang, Shi Mingheng. Experimental study on a CPC concentrating solar PV/T system [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2012, 33(1): 86—90.
- [11] 徐立,李鑫,原郭丰,等.太阳位置对抛物面槽式太阳能集热器运行影响[J].工程热物理学报,2013,34(12): 2359—2362.
- [11] Xu Li, Li Xin, Yuan Guofeng, et al. The influence of solar position upon the running parabolic trough solar collector system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 2359—2362.
- [12] Li Xian, Dai Yanjun, Li Yong, et al. Comparative study on two novel intermediate temperature CPC solar collectors with the U-shape evacuated tubular absorber [J]. Solar Energy, 2013, 93: 220—234.

COMPARATIVE EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE OF LOW CONCENTRATION RATIO CPC COLLECTORS IN DIFFERENT PROPORTIONS OF DIFFUSE IRRADIATION

Wang Jian¹, Pei Gang¹, Yang Ming¹, Li Guiqiang¹, Wang Yunyun², Li Pengcheng¹

(1. *Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*

2. *College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

Abstract: A compound parabolic concentrator (CPC) collector experiment system is set up. Collector performance of three kinds of different concentration ratio is tested in different proportions of diffuse irradiation at the inlet temperature of 110 °C. In addition, the thermal performance of CPC in different cities is analyzed under typical irradiation conditions. It indicates that the proportion of diffuse irradiation has a significant effect on the performance of CPC collectors. The thermal efficiency of the same concentration ratio CPC increases as the proportion of diffuse irradiation declines. What's more, The CPC with concentration ratio of 1.5 has the highest thermal efficiency in a high proportion of diffuse irradiation, and the CPC with concentration ratio of 3.0 has the highest thermal efficiency in a sunny day with low proportion of diffuse irradiation.

Keywords: compound parabolic; low concentration ratio CPC; the proportion of diffuse irradiation; thermal efficiency