

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.06.014

# 多功能太阳炉光路聚集传输设计与实验测量

戴贵龙, 侯根富, 叶靖, 张慈枝

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 设计制造一种由抛物面聚集器、百叶窗和反射板组成的成本低、功率可调节多功能太阳炉装置。通过建立太阳炉光束聚集传输模型,对太阳炉的光热转换性能进行了理论分析和朗伯靶红外温度成像实验测量。结果表明该多功能太阳具有良好的太阳能聚集与调节特性,太阳光斑能流密度值随百叶窗叶片张角正弦变化。实验表明朗伯靶上太阳光斑中心处热平衡温度达到 140 ℃,光斑轮廓形状稳定。结论对太阳炉系统的研究发展提供重要参考依据。

**关键词:** 多功能太阳炉; 功率调节; 红外成像; 蒙特卡洛射线追踪法

**中图分类号:** O436

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2017)06-0577-05

## Design and experimental measurement of sunlight concentration and transmission of a multifunctional solar furnace

Dai Guilong, Hou Genfu, Ye Jing, Zhang Cizhi

(School of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A low-cost solar furnace with adjustable power was designed and developed, which consists of a parabolic concentrator, a shutter and a reflective plane. By establishing the model of sunlight's concentration and transmission of the solar furnace, its photothermal conversion performance received both theoretical analysis and experimental measurement with the infrared imaging method. Results show that this furnace has very good concentration and adjustment of solar energy, and the density of the focal spot's energy flow varies with the sine of the shutter's blade angle. The figure of the focal spot is quite steady and clear when the temperature of the concentrated solar flux spot is about 140℃. The conclusions are useable for the research and development of solar furnaces.

**Keywords:** multifunctional solar furnace; power adjustment; infrared imaging; MCRTM

太阳炉通过高倍聚集传输太阳光束获得高温,是一种重要的能源供给和热工性能试验平台,在材料制备<sup>[1]</sup>、材料高温性能测量<sup>[2]</sup>,太阳能热化学反应<sup>[3-4]</sup>、以及聚光光伏发电<sup>[5]</sup>等技术领域具有重要应用前景。根据工作方式,太阳炉有直射式和反射式两类。直射式太阳炉本质上是抛物面聚集器。反射式太阳炉由抛物面聚集器和平面

反射板组成,入射太阳光经平面反射板反射,沿平行于抛物面对称轴方向传输,最后被抛物面高倍汇聚<sup>[6]</sup>。

一般来说,太阳炉装置一旦建成,抛物面聚集器结构参数固化,系统的功率和热平衡温度等技术指标基本不能调节,限制了太阳炉的使用范围<sup>[7-10]</sup>。为满足不同的太阳能热工技术要求,由

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-10-01

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2017J01674); 福建工程学院科研发展基金(GY-Z15103)

通讯作者: 戴贵龙(1983-),男,江西崇仁人,副教授,博士,研究方向:太阳能聚光与高温热转换。

抛物面、百叶窗和反射板组成的输入功率可调节太阳炉得到国内外的广泛关注。

Hernandez 等<sup>[1]</sup>利用太阳炉试验平台,试验测量了金属氧化物的高温熔融特性。Oliveira 等<sup>[2]</sup>采用太阳炉试验平台,实验研究了碳化钨硬质合金的高温热稳定性。Gordon 等<sup>[3]</sup>在太阳炉上,研究分析了聚光光伏发电特性及纳米材料加工合成特性。Lee 等<sup>[11]</sup>采用 CCD 相机实验测量与计算模拟相结合的技术手段,测量分析了太阳炉焦平面的能流密度分布特性,但是缺少相关计算模型分析。

为降低技术成本和增加实验操作的灵活性,本文在分析太阳光路聚集传输的基础上,设计研制了一种结构简单、低成本多功能太阳炉实验平台。采用红外温度成像实验,验证了设计方案的可靠性。通过建立光路传输模型,计算分析了百叶窗叶片张角和非跟踪调节等因素对太阳光斑能流密度分布影响规律。

1 实验平台研制分析

多功能太阳炉主要由抛物面聚集器、焦平面、百叶窗和反射平板 4 部分组成。两端的聚集器和反射板安装在带万向轮、可自由移动的正方形底盘上。两个底盘通过横梁连接在一起,百叶窗和焦平面支架固定在横梁上,如图 1 所示。

太阳光传输路径为外界入射太阳投到反射平板上、被水平反射,穿过百叶窗、进入聚集器、通过反射聚集汇聚在焦平面上。为改善聚光效果,聚集器、焦平面、百叶窗和反射平板的中心位置在同一水平线上,距离横梁的距离为  $H_1$ 。

位于吸热器和反射板之间的百叶窗,通过调节百叶窗叶片张角,控制聚集器的输入太阳功率及其转换温度,满足不同的太阳能热工性能技术要求。百叶窗叶片见图 1 放大部分,随着叶片张角  $q$  不断增加,百叶窗逐渐关闭。当  $\theta=0^\circ$  时,百叶窗全开,聚集器的输入太阳功率最大,转换温度最高;当  $\theta=90^\circ$  时,百叶窗闭合,聚集器的输入太阳功率为 0。

聚集器技术参数包括焦距  $f$  和口径  $r_c$ ,是决定太阳能炉系统汇聚功率和转换温度的核心部件。横梁长度一般包括聚集器焦距、百叶窗对反射平板没有阴影的最小距离、反射平板在  $z$  轴方向投影的一半等 3 部分。根据几何关系,通过推

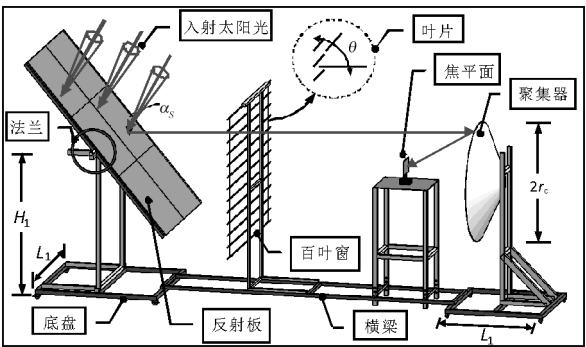


图 1 多功能太阳炉的结构方案  
Fig.1 Scheme of the multifunctional solar furnace

导,得横梁长度  $L$  的估算式为

$$L \geq f + \frac{r_c \left( 1 + \frac{\sin \alpha_s}{2} \right)}{\frac{\sin \alpha_s}{2} \cdot \tan \alpha_s} + \frac{r_c}{\frac{\tan \alpha_s}{2}} \quad (1)$$

式中,  $\alpha_s$  是太阳高度角(入射太阳光与水平面夹角)。

一般来说,  $\alpha_s$  取值大,  $L$  值就小,太阳炉操作比较方便,但是试验时间比较受限制;相反,  $\alpha_s$  取值小,  $L$  值就大,试验时间段长,但是太阳炉操作不够方便。根据中国的地理位置,以福州市为例(北纬  $26^\circ$ 、东经  $120^\circ$ ),  $\alpha_s$  设计值取  $50^\circ$  左右比较合适。

根据上述设计方案,通过各部件的设备定制和系统组装调试,获得了多功能太阳炉实验平台系统,户外实物照片如图 2 所示。

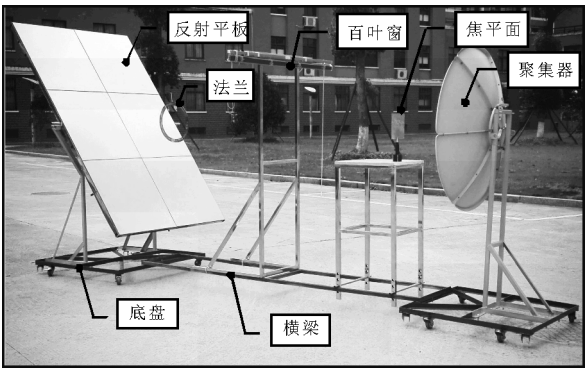


图 2 多功能太阳炉实物照片  
Fig.2 Photo of the multifunctional solar furnace

结合现有相关设备技术特点,综合考虑汇聚功率、温度和操作维护的方便性,反射平板、法兰片、百叶窗、聚集器、底盘和横梁等系统部件的加工材料、结构尺寸、技术特征和功能明细如表 1 所示。

表 1 多功能太阳炉部件尺寸与材料明细

Tab.1 Sizes and materials of the multifunctional solar furnace's parts

部件	尺寸/m	材质
反射板	高×宽=2.4×1.6	镀银玻璃镜
百叶窗	高×宽=2.0×1.6	塑料合金
聚集器	口径×焦距=1.5×0.6	不锈钢(厚 0.5 mm)
法兰	口径×宽度=0.5×0.05	铸铁

2 光路聚集传输模型

建立直角坐标系  $o-xyz$ , 抛物面中心点位于坐标系原点  $o$ , 对称轴与  $z$  轴重合, 开口指向  $z$  轴正方向。则聚集器的描述方程为

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f}$$
 (2)

式中,  $f$  是抛物面的焦距, m。

焦平面在聚集器焦平面上, 表面方程为

$$z = f$$
 (3)

焦平面表面约束条件为

$$x^2 + y^2 \leq r_f^2$$
 (4)

式中,  $r_f$  是焦斑半径。

由于百叶窗叶片对入射到抛物面聚集器的太阳光有调控作用, 因此, 确定抛物面聚集器太阳光发射坐标模型十分关键。根据百叶窗口叶片的结构特性, 将太阳光束抽样表面设置在百叶窗右侧, 得到太阳光发射点抽样模型表达式为

$$\begin{cases} x = -r_c + h \cdot \text{int}(R_1 \cdot n_b) + h \cdot \sin \theta + \\ \quad R_2 \cdot h(1 - \sin \theta) \\ y = -r_c + 2R_3 \cdot r_c \\ z = l_b \end{cases}$$
 (5)

式中,  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  分别为 0-1 之间均匀分布的随机数。int 是取整函数。 $l_b$  是百叶窗到坐标原点的距离。 $n_b$  是百叶窗的叶片数, 有

$$n_b = \frac{2r_c}{h}$$
 (6)

式中,  $h$  是叶片宽度。

面型误差是聚集器镜面反射太阳光束实际方向与理想方向的偏差, 是聚集器曲面误差和非理想镜反射光学误差的一个综合指标, 包括镜面加工、安装、表面清洁和镜反射性能等因素。在射线踪迹蒙特卡洛法中 (MCRTM), 通过高斯分布概率模型计算天顶角和圆周角来表征聚集器面型误

差<sup>[12]</sup>, 有

$$\theta_{se} = \sqrt{(-2\sigma_{se}^2) \ln(1 - R_\theta)}, \varphi_{se} = 2\pi R_\varphi$$
 (7)

式中,  $R_\theta$  和  $R_\varphi$  分别是 0-1 之间均匀分布的随机数。 $\sigma_{se}$  是面型误差参数, mrad。对大多数聚集器,  $\sigma_{se}$  一般在 1.0~6.0 mrad 之间<sup>[12]</sup>。

采用 MCRTM 模拟分析太阳炉光路聚集特性, 具体实施过程见文献[13], 计算流程概述为:

- (a) 建立多功能太阳炉各个部件表面方程的数学描述及其约束条件;
- (b) 根据太阳光锥模型、确定太阳光束的发射方向和发射点;
- (c) 考虑面型误差, 对太阳光束进行追踪统计, 最后得 MCRTM 统计结果。

3 结果与分析

3.1 光路聚集传输可行性验证

通过户外实验测量, 验证太阳炉光路设计的可行性。实验时间下午 1 点左右, 实验期间太阳最大直射辐射 600~700 W/m<sup>2</sup> (有云, 辐射强度不稳定), 风速 3~5 m/s。通过设备组装和光路调试, 利用红外热像仪 (T650sc 型号), 在抛光的不锈钢板焦平面上捕获了太阳光斑红外温度图像, 如图 3 所示 (百叶窗叶片角度  $\theta$  最大时)。

从图 3 可以看出, 焦平面上光斑直径约 8.0 cm, 光斑中心区域能流密度大, 热转换温度高, 边缘区域能流密度小, 温度低, 符合抛物面聚集器高斯曲线能流密度分布特征。

由于不锈钢板的反射率比较大 (约 0.8), 且风速由比较高, 焦平面峰值温度不高, 热像仪指示峰值温度约 57.4 ℃, 通过换算<sup>[9]</sup>, 中心真实温度约 140 ℃。该实验结果验证了多功能太阳炉太阳聚集传输光路设计的可行性, 为多功能太阳炉的应用发展奠定了基础。

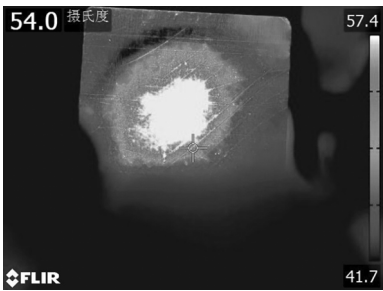


图 3 太阳炉焦斑红外温度图像

Fig.3 Infrared imaging of the solar furnace's focal spot

3.2 聚集光斑的偏移特性分析

间歇手动调整太阳炉,间歇期间由于太阳运动,入射太阳光发生偏转,聚集光斑位置会发生相应的偏移,偏移量与间歇调整时间相关,太阳光偏转角度与间歇时间的相对关系见文献[6]。为便于分析,采用数值模拟结果分析间歇时间对太阳炉光斑偏移和变形的影响,如图 4 所示(模拟条件:面型误差取 2.5 mrad,抽样光束数为  $10^8$ )。

其中 4(a) 是精确跟踪时光斑位置,4(b) 是间歇时间为 1 min(太阳光偏转角 1.5 mrad)光斑

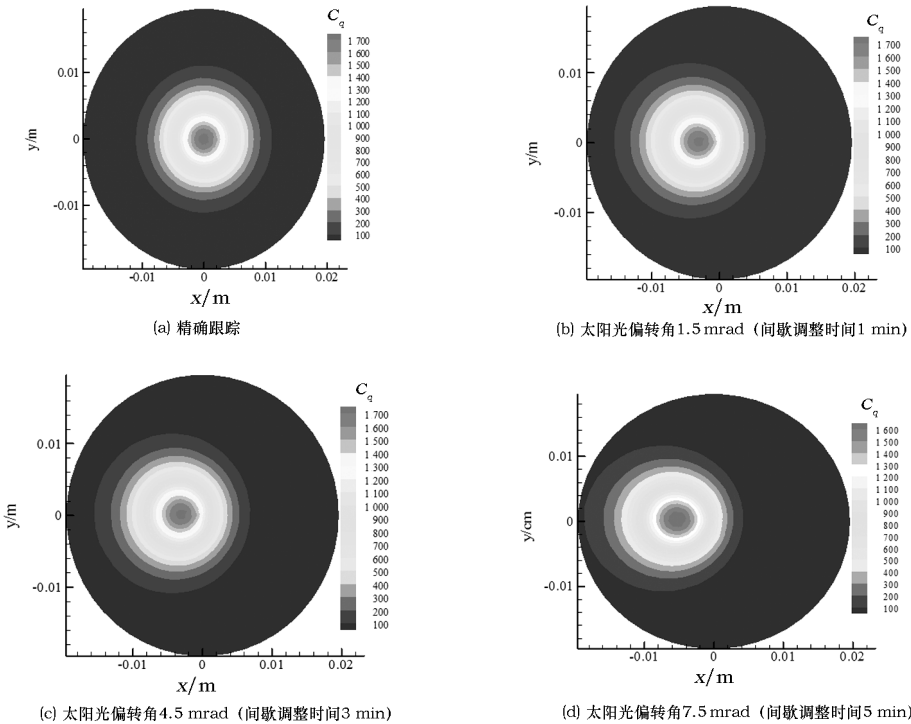


图 4 间歇调整时间对光斑的偏移影响

Fig.4 Influences of intermission time on the displacement of the focal spot

位置,4(c) 是间歇时间为 3 min(太阳光偏转角 4.5 mrad)光斑位置,4(d) 是间歇时间为 5 min(太阳光偏转角 7.5 mrad)光斑位置。图 4 中参数  $C_q$  为能流聚光比,是聚集能流密度与入射太阳能流密度的比值。

从图 4 可以看出,随着间歇调整时间延长,太阳光偏转角增加,聚集光斑的位置偏移量越来越大,光斑轮廓变形越明显。当间歇调整时间由 1 min 增加到 5 min 时,光斑中心位置偏移量(离焦平面中心位置)由 1 cm 增加到 5 cm,间歇时间(min)近似等于光斑中心位置偏移值(cm)。因此实验时需要跟踪实验工况要求确定间歇时间,

一般间歇时间在 2~3 min 左右比较合适,操作可行性好,同时光斑偏移量也比较适中。

3.3 聚集能流的调节特性分析

通过调节百叶窗叶片张角  $\theta$ ,能够控制聚集器的输入太阳功率,实现太阳能聚集功率的可调节特性, $\theta$  越小聚集器的输入太阳功率越大(见图 1), $\theta$  对焦平面能流聚光比分布的影响如图 5 所示。

从图 5 可看出,随着  $\theta$  增加,光斑半径不变,但是能流聚光比显著下降。当  $\theta$  由 30° 增加到 60° 时,峰值能流聚光比由 3 880 减小到 1 022。进一步的分析表明,能流聚光比与输入太阳功率



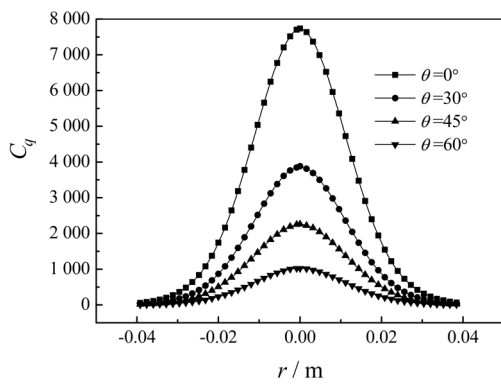


图5 百叶窗张角 $\theta$ 对焦平面能流聚光比的影响

Fig.5 Influence of shutter blade angle  $\theta$  on the concentration ratio of the energy flow of the focal plane

成比例,即  $C_q(r, \theta) = C_q(r, 0) \times (1.0 - \sin \theta)$ , 其中  $(1.0 - \sin \theta)$  即为透光率(百叶窗通光面积与总面积之比)。通过图5曲线对比可发现,由于 $\theta$ 成比例改变能流密度分布大小,对能流密度分布轮廓几乎没有影响,这为太阳炉的热工实验提供了良好的能流稳定性。

## 参考文献:

- [1] Hernandez D, Olalde G, Bonnier G, et al. Evaluation of the application of a solar furnace to study the suitability of metal oxides to be used as secondary reference points in the range 2000~3000°C[J]. Measurement, 2003, 34(2): 101-109.
- [2] Oliveira F A C, Fernandes J C, Badie J M, et al. High meta-stability of tungsten sub-carbide  $W_2C$  formed from tungsten/carbon powder mixture during eruptive heating in a solar furnace[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2007, 25(1): 101-106.
- [3] Gordon J M, Babai D, Feuermann D. A high-irradiance solar furnace for photovoltaic characterization and nanomaterial synthesis[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95(3): 951-956.
- [4] 陈飞, 李明, 季旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 111-115.
- [5] 许成木, 李明, 季旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 53-59.
- [6] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 470-480.
- [7] Johnston G. Focal region measurements of the 20 m<sup>2</sup> tiled dish at the Australian National University[J]. Solar Energy, 1998, 63(2): 117-124.
- [8] Shuai Yong, Xia Xinlin, Tan Heping. Numerical study of radiation characteristics in a dish solar collector system[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(2): 021001-1~8.
- [9] 刘颖, 戴景民, 朗治国, 等. 旋转抛物面聚光器焦面能流密度分布的有限元分析[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1775-1778.
- [10] 王云峰, 季杰, 何伟, 等. 抛物碟式太阳能聚光器的聚光特性分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 206-213.
- [11] Lee H, Chai K, Kim J, et al. Optical performance evaluation of a solar furnace by measuring the highly concentrated solar flux[J]. Energy, 2013, 66: 63-69.
- [12] Buie D. The effective size of the solar cone for solar concentrating systems[J]. Solar Energy, 2003, 74(5): 417-427.
- [13] 戴贵龙, 郭永辉. 一种大聚光比聚集太阳能流密度分布的红外反射测量法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 125-130.

## 4 结论

基于几何光学原理,设计研制了一套功率可调节太阳炉,采用红外温度成像和光路传输模拟方法对太阳炉的光路聚集传输性能进行了研究分析。通过研究,得到以下主要结论:

1) 太阳炉光热转换性能主要由聚集器决定,该太阳炉光斑直径约 8.0 cm,在抛光不锈钢朗伯靶上光斑最高温度约 140 ℃。

2) 本太阳炉光斑偏移距离(cm)与间歇调整时间(min)数值近似相等。一般来说 2~3 min 调整一次比较合适。

3) 光斑能流密度值与百叶窗叶片张角正弦成比例,但是光斑能流密度分布轮廓基本稳定,不受百叶窗叶片张角影响。

总的来说,该太阳炉具有较好的功率调节和能流密度分布轮廓稳定的特性,可有效满足不同的太阳能热工实验技术要求,具有重要的应用潜力。