

# 瓦式集热器光路传输优化设计及性能分析

张慈枝, 侯根富, 戴贵龙, 叶靖

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州, 350118)

**摘要:** 提出一种低倍瓦式聚光集热器, 对其瓦式抛物面聚集器的结构设计、工作原理、光路传输进行理论分析。同时, 基于数学推导和建模, 通过 MATLAB 软件, 理论模拟该集热器的几何特性、聚集性能等, 并分析影响因素, 对重要的设计参数进行优化研究。瓦式聚光集热器能将建筑屋顶空调节能与太阳能集热系统统一起来, 对低成本高效太阳能热利用技术具有重要的意义。

**关键词:** 低倍聚光; 太阳能聚集器; 瓦片形; 设计优化; 聚光性能

中图分类号: TU831.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)04-0358-06

## Optimization design and performance analysis of light path transmission for tile type heat collector

Zhang Cizhi, Hou Genfu, Dai Guilong, Ye Jing

(College of Eco-Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A low power tile type light-concentrating heat collector was proposed, the structure design, working principle, optical transmission of the tile type parabolic concentrator of the heat collector were analysed. Based on mathematical derivation and modelling, the geometric characteristics and aggregation performance of the collector were simulated via MATLAB software. The factors influencing the performance were analysed, and the key design parameters were optimized. The tile type heat collector is energy-saving, which can integrate building roof air-conditioning system and solar heat collecting system and can contribute to low cost and high efficiency solar heat utilization technology.

**Keywords:** low power light concentration; solar energy collector; tile shape; design optimization; concentration performance

目前建筑聚光集热器系统<sup>[1]</sup>中的太阳能聚集器<sup>[2-3]</sup>没有与屋顶瓦片的波浪形结构统一起来, 一般独立设计安装, 导致成本高, 热功率较小, 且抗风性能较差。而且, 夏季建筑屋顶被太阳暴晒, 热负荷大, 影响建筑能耗的同时, 还承担排泄雨水的功能。因此, 本文提出设计一种瓦片式太阳能聚集器, 优化屋顶结构, 降低屋顶对太阳辐射

能的吸收, 可以有效地降低建筑能耗中的空调能耗, 能将建筑屋顶空调节能与太阳能集热系统统一起来, 对建筑节能和新能源开发利用具有重要的意义。

近年来, 聚光型真空管集热器的光热传输性能研究受到国内外广泛关注<sup>[4-5]</sup>, 研究重点主要集中在聚集器光热传输性质、系统综合热效率等

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 福建省教育厅科研项目(JAT160319)

通讯作者: 戴贵龙(1983-), 男, 江西崇仁人, 讲师, 博士, 研究方向: 太阳能高效热利用。

方面。除非涅尔折射式聚集等少量研究分析外, 光热传输性质研究对抛物槽式或 CPC 聚光集热器的聚集特性和光热转换效率的模拟和实验研究较多, 但聚集太阳光束传输机理研究不够完善, 聚集性能优化模型相对简单。因此, 本文针对瓦式抛物面聚集器的几何特性、光路传输聚集性能进行理论研究, 为聚集器优化设计提供参考。

## 1 低倍瓦式抛物面聚光集热器的设计

研制的低倍瓦式集热器主要包括小型瓦式太阳能聚集器和玻璃真空集热管等。而小型瓦式太阳能聚集器是由多组相同反光板拼接形成, 相邻抛物弧面反光板链接成凹面状的瓦片式结构, 如图 1 所示。

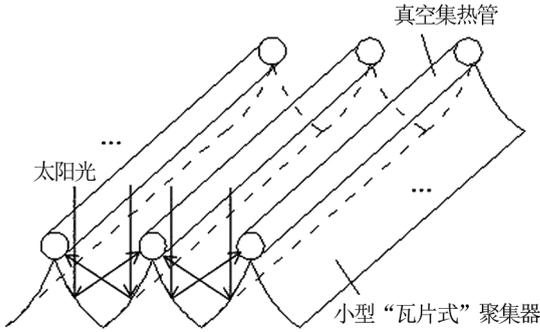


图 1 瓦式抛物面集热器结构示意图

Fig.1 Schematic of tile-type parabolic heat collector

### 1.1 光路设计与几何参数

如图 2 和图 3 所示, 反光板曲面弧线的设计基线为抛物线, 根据边缘角的不同分为两种情况<sup>[6]</sup>: I 类—边缘角  $\Psi_{rim} \leq \Psi_{rim1}$ ; II 类— $\Psi_{rim1} < \Psi_{rim} < 180^\circ$ 。真空集热管中心始终位于焦点  $P$ , 具体设计方法如下。

在直角坐标系  $xoy$  中, 抛物线方程为  $x^2 = 4fy$ , 开口宽度  $a$ , 焦距为  $f$ , 焦点为  $P$ 。不同边缘角时, 焦距表达式为:

$$f = \frac{a}{4} \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right) \quad (1)$$

抛物线高度:

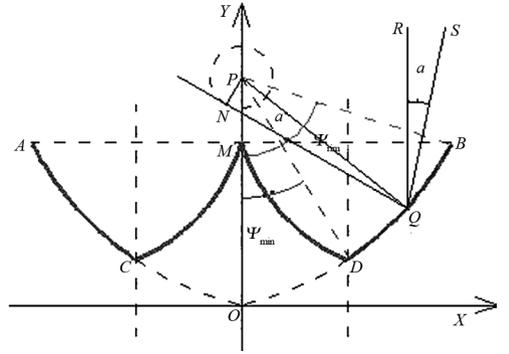
$$h = \frac{a}{4 \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right)} \quad (2)$$

当集热管相切开口  $AB$  采光面时, 集热管  $r = f - h$ ,

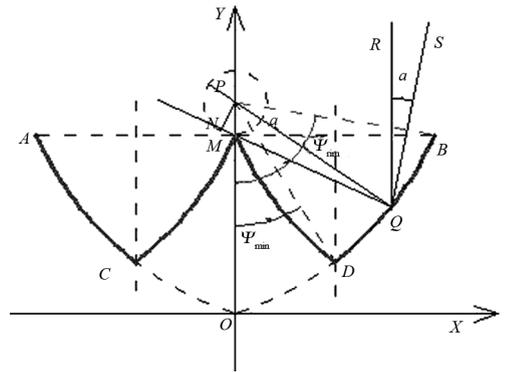
此时边缘角为:

$$\psi_{rim1} = \operatorname{arccot} \frac{r}{a'} \quad (3)$$

(1) 当抛物面开口宽度  $a = \text{const}$ , 边缘角  $\psi_{rim} < \psi_{rim1} < 90^\circ$  时。



(a) 边缘角  $\Psi_{rim} < \Psi_{rim1}$



(b) 边缘角  $\Psi_{rim} = \Psi_{rim1}$

图 2 光路设计 I 类原理示意图

Fig.2 Schematic of type I optical path design

如图 2 所示,  $B$  点坐标为  $(\frac{a}{2}, \frac{a^2}{16f})$ ,  $M$  是开口  $AB$  的中点, 再作线段  $AM$ 、 $MB$  的垂直平分线, 使之与抛物线相交于点  $C$ 、 $D$  点, 弧线  $AC$ 、 $BD$  关于垂直平分线对称得弧线  $MC$ 、 $MD$ 。弧线  $BD$  即为单块反光板曲面弧线, 单瓦片聚集器的开口宽度为  $a' = a/2$ , 聚集器高度为:

$$h' = y_B - y_D = 0.75h = \frac{3a}{16 \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right)} \quad (4)$$

聚集器焦距为:

$$f' = f - 0.25h \quad (5)$$

此时, 边缘角  $\psi'_{rim} = \angle OPB = \psi_{rim}$ 。

显然,当集热管半径  $r$  选定,一方面,相同开口宽度  $a$  设计截取的聚光面  $BD$  时,原抛物线的边缘角  $\psi_{rim}$  越大,单瓦片聚集器的  $h'$  随之越大,焦距  $f'$  越小。另一方面,相同焦距  $f$  设计截取的聚光面  $BD$  时,边缘角  $\psi_{rim}$  越大,单瓦片聚集器的  $a'$ 、 $h'$  随之越大,焦距  $f'$  越小。

$Q$  点为抛物线上任一点,坐标为  $(x_0, x_0^2/4f)$ ,  $RQ$  垂直入射光线,其反射光线  $PQ$  经过焦点,入射光线  $SQ$  与主光轴的夹角  $\alpha$ ,其反射线  $QN$  与  $PQ$  夹角也为  $\alpha$ ,如图 2 和图 3,则反射光线与焦点的距离为<sup>[7]</sup>:

$$PN = PQ \times \sin \alpha = \left( f + \frac{x_0^2}{4f} \right) \times \sin \alpha \quad (6)$$

当  $x_0 = x_B$  时,  $PQ$  取最大值,  $PN$  也取得最大值,焦斑最大半径为:

$$r_{jmax} = PB \times \sin \alpha = \frac{a}{2 \sin \psi_{rim}} \times \sin \alpha \quad (7)$$

当  $x_0 = x_D$  时,  $PQ$  取最小值,  $PN$  也取得最小值,焦斑最小半径为:

$$r_{jmin} = PD \times \sin \alpha = \left( \frac{3a}{16} \cot \frac{\psi_{rim}}{2} + \frac{a}{8 \sin \psi_{rim}} \right) \times \sin \alpha \quad (8)$$

由此可知,当倾斜角  $\alpha$  一定时,焦斑最大、小半径随边缘角增大而减小,削弱散焦现象,聚光效果较好,集热管管径可选较小,因为只有集热管半径  $r \geq r_{jmax}$  时,单块反光板  $BD$  聚集所有反射光线都能达到集热管。

(2) 当抛物面开口宽度  $a = \text{const}$ , 边缘角  $\Psi_{rim} > \Psi_{rim1}$  时。

如图 3 所示,焦点  $P$  为圆心作半径为  $r$  的圆,

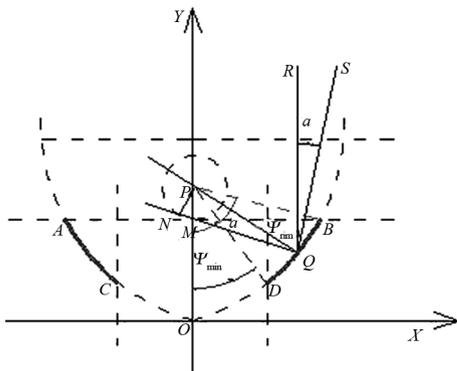


图 3 光路设计 II 类原理示意图

Fig.3 Schematic of type II optical path design

与  $y$  轴交于  $M$  点,从  $M$  点沿  $x$  轴方向作一直线,与抛物面相交于点  $B$ ,作线段  $MB$  的垂直平分线,使之与抛物线相交于点  $D$ 。弧线  $BD$  即为单块反光板曲面弧线。 $B$  点坐标为  $(2\sqrt{f(f-r)}, f-r)$ ,  $D$  点坐标为  $(\sqrt{f(f-r)}, (f-r)/4)$ ,同理设计方法得单块反光板曲面弧线  $BD$ ,但单瓦片聚集器的开口宽度为:

$$a' = 2\sqrt{f(f-r)} \quad (9)$$

聚集器高度为:

$$h' = y_B - y_D = 3(f-r)/4 \quad (10)$$

聚集器焦距为:

$$f' = f - y_D = (3f+r)/4 \quad (11)$$

而实际小型瓦片式聚集器的边缘角为:

$$\psi'_{rim} = \angle OPB = \text{arccot} \frac{r}{2\sqrt{f(f-r)}} \quad (12)$$

与光路设计 I 类的聚集器几何参数相比,影响 II 类的几何尺寸变化规律不一致。当集热管半径  $r$  选定,一方面,相同开口宽度  $a$  设计截取的聚光面  $BD$  时,原抛物线的边缘角  $\psi_{rim}$  越大,因为焦距  $f$  越小,所以单瓦片聚集器的  $a'$ 、 $h'$ 、 $f'$  随之越小,另一方面,相同焦距  $f$  设计截取的聚光面  $BD$  时,单瓦片聚集器的几何参数  $a'$ 、 $h'$ 、 $f'$  不随边缘角  $\psi_{rim}$  变化而改变。

同样,理论计算焦斑最大半径为:

$$r_{jmax} = \left( f + \frac{x_B^2}{4f} \right) \cdot \sin \alpha = (2f-r) \cdot \sin \alpha = \left[ \frac{a}{2} \cot \left( \frac{\psi_{rim}}{2} \right) - r \right] \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

焦斑最小半径为:

$$r_{jmin} = \left( f + \frac{x_D^2}{4f} \right) \cdot \sin \alpha = \frac{1}{4}(5f-r) \cdot \sin \alpha = \frac{1}{16} \left[ 5a \cot \left( \frac{\psi_{rim}}{2} \right) - r \right] \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

按光路设计 I 类方式设计,单瓦聚集器结构相对容易获得,相同开口宽度  $a$  的抛物线,截取获得反光板结构尺寸较大、用材浪费较少,光路传输较长。而光路设计 II 类方式需要截断去除除弧线  $AC$  和  $BC$  外所有抛物面,浪费结构材料,聚集反射面结构较小,可能因为接收太阳光束量过少、时间太短导致聚光效果差。因此,除了要考虑尽可能结构尺寸较小和用材较少的经济性外,还需对这两类方式聚集器的聚集性能进行比较分析。

## 1.2 两类光路设计聚集性能比较

聚光比<sup>[8]</sup>是描述聚光型集热器的聚光性能和焦斑温度的特征参数,几何聚光比是指聚光集热器的采光面积 $A_a$ 与接收器面积 $A_r$ 之比,即新型集热器的聚光比为:

$$C_G = \frac{A_a}{A_r} = \frac{a' \cdot L}{2\pi r \cdot L} = \frac{a'}{2\pi r} \quad (15)$$

式中, $L$ 为聚集器的长度。集热器几何尺寸的确 定是以实现最大聚光比 $C_{th}$ 为设计目标,因为在设计聚集器时为了使得所有反射光线都能达到集热管,考虑跟踪误差、太阳形状等,几何聚光比要尽可能小于 $C_{th}$ ,计算式为:

$$C_{th} = \frac{a'}{2\pi r_{jmax}} \quad (16)$$

而当边缘角 $\psi_{rim} \leq \psi_{rim1}$ 时,将式(9)代入得 I 类设计聚集器最大聚光比:

$$C_{th1} = \frac{a'}{2\pi r_{jmax}} = \frac{1}{2\pi \sin \alpha} \cdot \sin \psi_{rim} \quad (17)$$

当边缘角 $\psi_{rim1} < \psi_{rim} \leq 180^\circ$ 时,将式(9)代入得 II 类设计聚集器最大聚光比:

$$C_{th2} = \frac{1}{2\pi \sin \alpha} \cdot \frac{2\sqrt{f(f-r)}}{2f-r} = \frac{1}{2\pi \sin \alpha} \cdot \sin \psi'_{rim} \quad (18)$$

式中, $\psi'_{rim}$ 为 II 类实际小型瓦片式聚集器的边缘角 $\angle OPB$ 。

显然,当倾斜角 $\alpha$ 一定时, $C_{th1}$ 随边缘角 $\psi_{rim}$ 的增大而增大,因为 $\psi'_{rim}$ 随边缘角 $\psi_{rim}$ 增大而减小,所以 $C_{th2}$ 随之而减小。因此,两种光路设计方式可以通过不同结构尺寸获得相同聚光效果,且新型聚集器存在其边缘角 $\psi'_{rim} = \psi_{rim1}$ 时,集热器的几何聚光比达到最大值为:

$$C_{th} = \frac{1}{2\pi \sin \alpha} \cdot \sin \psi_{rim1} \quad (19)$$

当集热管半径无限趋于 0 时, $\psi_{rim1}$ 无限趋于 $90^\circ$ ,其最大聚光比为:

$$C_{th} \approx \frac{1}{2\pi \sin \alpha} \quad (20)$$

## 2 聚光特性模拟与分析

### 2.1 聚光性能及影响因素

根据前述分析,不仅考虑聚集器的经济性,还需以实现最大聚光比为设计目标,最终确定光路设计对应低倍瓦式太阳能聚集器的面型结构如图

2(b)所示,易得瓦式集热器的实际聚光比为:

$$C_G = \frac{a}{4\pi r} = \frac{\sqrt{f(f-r)}}{\pi r} = \frac{f}{\pi r \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right)} \quad (21)$$

由式(21)可以看出,低倍瓦片式聚集器聚光性能的主要影响因素为焦距 $f$ 和集热管半径 $r$ ,家用太阳能热水器使用的太阳能真空管按照管径分为 37、47、58、70 mm 等,集热管管径取定某值情况下,聚光比随焦距 $f$ 变化曲线如图 4 所示。

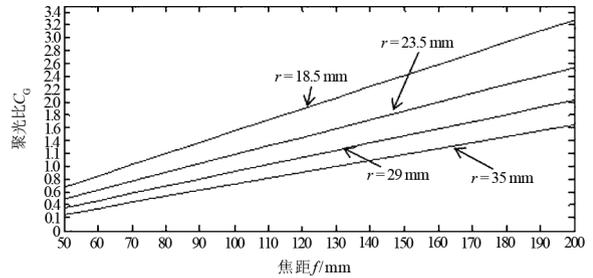


图 4 聚光比随焦距和管径的变化趋势

Fig.4 Variation of light concentration ratio with focal length and tube diameter

显然,焦距 $f$ 不变,集热管管径 $r$ 越小,聚光比 $C_G$ 相对越大。另外,管径 $r$ 不变,聚光比 $C_G$ 随焦距 $f$ 增大而增大。理论上,聚光比越大时聚集器的聚光集热性能越好,所以设计时应取较大 $f$ 和较小 $r$ ,但同时更需考虑设计的实用性、经济性等因素。结合实际情况,瓦片聚光板的焦距 $f$ 建议取 80~150 mm 之间更合理,接收器选择市场上最广泛使用的 $\varphi 47/58$ 玻璃真空管( $r = 23.5$  mm)。此刻聚光比为:

$$C_G = \frac{\sqrt{\frac{a}{4} \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right) \left[ \frac{a}{4} \cot\left(\frac{\psi_{rim}}{2}\right) - 23.5 \right]}}{\pi \times 23.5} \quad (22)$$

根据瓦式聚集器设计要求的边缘角为:

$$\psi'_{rim} = \arctan \frac{a}{2r} = \arctan \frac{2\sqrt{f(f-23.5)}}{23.5} \quad (23)$$

聚光比 $C_G$ 与边缘角 $\psi_{rim}$ 、入射光口宽度 $a$ 关系密切。若式(23)的焦距 $f$ 按建议 80~150 mm 中取,则边缘角 $\psi'_{rim}$ 取值范围为 $80.08^\circ \sim 85.12^\circ$ ,若是不按建议取值,边缘角 $\psi_{rim}$ 按所有可能 $54^\circ \sim 180^\circ$ ,则 $C_G$ 随 $\psi_{rim}$ 和 $a$ 的变化关系如图 5 所示。

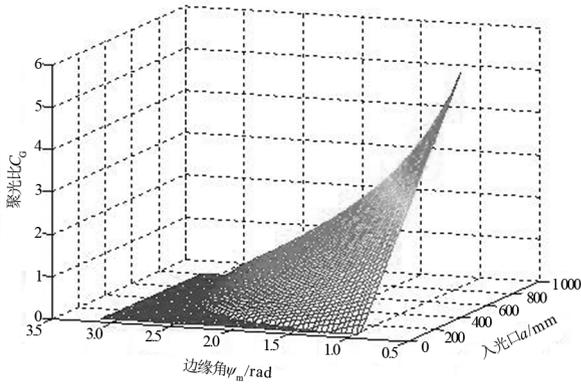


图 5 聚光比  $C_G$  随边缘角  $\psi_{rim}$  和入光口  $a$  的变化

Fig.5 Variation of light concentration (focusing ratio)  $C_G$  with edge angle  $\psi_{rim}$  light entry opening

## 2.2 参数优化分析

瓦式聚集器除了追求较大聚光比,以达到优良的聚集性能,但实际运用中考虑到装置的用材经济性及占地面积,开口宽度、焦距和高度都是重要的性能指标,也对装置安装、稳定性等有极大影响。而该聚集器的设计几何基本参数为:

$$\begin{cases} a' = \frac{a}{2} = 2\sqrt{f(f-r)} \\ f' = f - y_D = \frac{3f+r}{4} \\ h' = 0.75(f-r) \\ \psi'_{rim} = \arctan\left(\frac{2\sqrt{f(f-r)}}{r}\right) \end{cases} \quad (24)$$

根据相对光孔<sup>[9]</sup>定义易得  $a' = nf$ , 又有式(15)可得:

$$r = \frac{x_B}{2\pi C_G} = \frac{nf}{2\pi C_G} \quad (25)$$

将式(25)代入式(24),即瓦式聚集器的焦距为:

$$f' = \frac{f}{4} \left( 3 + \frac{n}{2\pi C_G} \right) \quad (26)$$

瓦式聚集器的高度为:

$$h' = \frac{3}{4}f \left( 1 - \frac{n}{2\pi C_G} \right) \quad (27)$$

由此可知,新型聚集器结构参数  $f'$ 、 $h'$  与原抛物线的焦距  $f$ 、相对光孔  $n$  及新型聚集器所需聚光比  $C_G$  有关。假定焦距  $f = \text{const}$  (80~150 mm), 基于软件 MATLAB, 针对各项设计参数进行数值模拟, 分析影响因素是无量纲, 使结论更具普遍性, 结果如图 6 和图 7 所示。

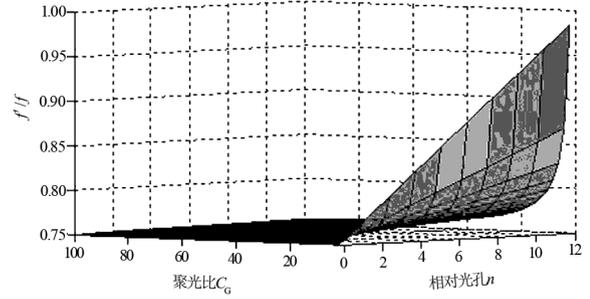


图 6 焦距  $f'$  随相对光孔  $n$  和聚光比  $C_G$  的变化

Fig.6 Variation of focal length  $f'$  with the relative aperture and light concentration ratio

设计聚集器时追求较大聚光比, 焦距  $f'$  越接近最小值  $0.75f$ , 吸热管径取较小, 聚光性能较好。而在所需求聚光比较小会有所变化, 相对光孔  $n$  越大, 聚集器开口宽度  $a'$  增大, 吸热管管径就需选择较大, 焦距  $f'$  就会稍微增大, 但仍不超过原抛物线焦距  $f$ 。

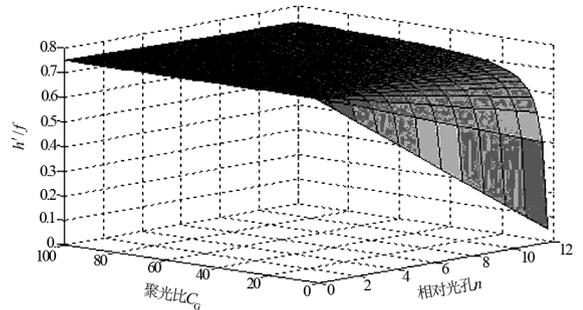


图 7 高度  $h'$  随焦距  $f$  和聚光比  $C_G$  的变化

Fig.7 Variation of height  $h'$  with focal length  $f$  and light concentration ratio

同理, 设计聚集器时追求较大聚光比, 高度  $h'$  越接近最大值  $0.75f$ , 几乎不受相对光孔  $n$  的影响, 而在所需求聚光比较小时, 相对光孔  $n$  越大, 聚集器开口宽度  $a'$  较大, 高度  $h'$  反而降低, 缩短太阳光传输路径, 但不宜过小, 否则聚光效果差。

## 3 结论

根据波浪形屋顶瓦片, 设计一种即可排泄雨水, 又可高效利用太阳能, 还可以降低顶层室内空调能耗的多功能低倍瓦片式太阳能聚集器, 对其结构设计、工作原理、光路传输设计进行了理论分析。同时, 基于理论数学模型, 通过 MATLAB 软件, 理论模拟该集热器的几何特性、聚集性能等,

并分析影响因素,进行优化重要的设计参数。结果表明:

(1)两种光路设计方式可以通过不同结构尺寸获得相同聚光效果,且新型瓦式聚集器存在其边缘角 $\psi'_{\text{rim}} = \psi_{\text{rim1}}$ 时,集热器的几何聚光比达到最大值,最终确定光路设计对应低倍瓦式太阳能聚集器的面型结构如图2(b)所示。

(2)瓦式聚集器的基本性能参数都与 $a$ 、 $f(\psi_{\text{rim}})$ 、及 $r$ 等几何参数有关。设计时追求较大聚光比,同时更需考虑设计的经济实用性等因素,

应取较大 $f$ 和较小 $r$ , $f$ 建议取80~150 mm之间更合理,则边缘角 $\psi'_{\text{rim}}$ 取值范围为80.08°~85.12°。

(3)聚集器采取非跟踪或低精度跟踪(低倍聚光)形式,集热器尽量水平布置,保证有效太阳聚光聚集利用率高。考虑太阳能余弦效应、太阳形状等,吸热单元反射镜面的最佳开口宽度为 $a' \approx 2f$ ,再依据 $f$ 的建议取值、吸热器管径 $r = 23.5$  mm制作聚集器,则实际聚光比 $C_c$ 可达范围为3以内,相当于低倍CPC。

## 参考文献:

- [1] 洪晓强.新型太阳能光热技术在住宅建筑中的应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
- [2] 谭小琴.非跟踪式太阳能聚集技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [3] 熊亚选,吴玉庭,马重芳,等.槽式太阳能聚光集热技术[J].太阳能,2009(6):21-26.
- [4] Wang F, Cheng Z, Tan J, et al. Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017,79:1314-1328.
- [5] Wang F, Lai Q, Han H, et al. Parabolic trough receiver with corrugated tube for improving heat transfer and thermal deformation characteristics[J]. Applied Energy, 2016,164:411-424.
- [6] 李换兵,郑秋榕,崔凝.抛物面槽式太阳能集热器性能分析[J].应用能源技术,2015(9):32-37.
- [7] 徐涛.槽式太阳能抛物面集热器光学性能研究[D].天津:天津大学,2009.
- [8] 薛晓迪,郑宏飞,陶涛,等.一种新型多曲面复合槽式太阳能集热器的理论分析[J].太阳能学报,2011,32(6):843-848.
- [9] 姚远,陈颖,廉永旺,等.小型槽式太阳能集热器优化设计与试验研究[J].可再生能源,2016,34(6):791-796.

(特约编辑:黄家瑜)