

新型 CPC 热管式集热器的设计与模拟分析

张维薇, 朱跃钊, 蒋金柱, 钱 强

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘 要: 基于 CPC 型集热器的发展现状, 设计出新型 CPC 热管式集热器。介绍了该集热器的聚光面和接收器的结构设计计算过程, 并对集热器进行了集热分析。采用 MATLAB 建模仿真技术对该集热器进行建模和动态仿真来预测该新型 CPC 热管式集热器的运行情况, 得出新型 CPC 热管式集热器的有效输出能量、出口温度、瞬时集热效率的变化图。通过试验研究证实了新型 CPC 热管式集热器可以产生蒸汽, 可用于制冷, 尤其是热源品位要求较高的氨吸收式制冷, 同时还可用于汽轮机发电和太阳能海水淡化等场合。

关 键 词: CPC 集热器; 热管; 导热油; 结构设计; 传热分析; 仿真

中图分类号: TK172.4 文献标识码: A

引 言

太阳能作为一种巨大的、无污染的可再生能源, 已经越来越引起人们的普遍重视。在太阳能中温应用领域中, 由于非聚光集热器很难达到较高的温度, 而抛物面聚光器又需要复杂的跟踪系统, 并且价格昂贵, 因此复合抛物面聚光器(CPC)有着广泛的应用前景。CPC 热管式集热器是一种新型的太阳能集热装置, 它运用了真空技术和热管技术, 具有热损失少、热容量小、热二极管性及工作范围宽等显著优点。本文介绍的新型 CPC 热管式太阳能集热器, 对传统 CPC 热管式集热器进行了结构改进, 即在真空管内管和热管之间加入导热油^[1], 降低了传热热阻, 提高了传热效率。详细介绍了该集热器的设计计算过程, 并对集热器进行传热分析, 利用 MATLAB 软件进行建模和动态仿真, 以南京地区春分日、夏至日、秋分日和冬至日的气象条件为仿真条件, 得出新型 CPC 热管式集热器在这 4 天内的有效输出能量和出口温度的变化图, 同时也得出该集热器的瞬时集热效率变化图, 并通过试验进行了验证。

1 新型 CPC 热管式集热器的结构设计

图 1 为新型 CPC 热管式集热器单元结构, 它由聚光面和装在底部的接收器构成。聚光面是由两片槽状抛物面和渐开面组合而成。

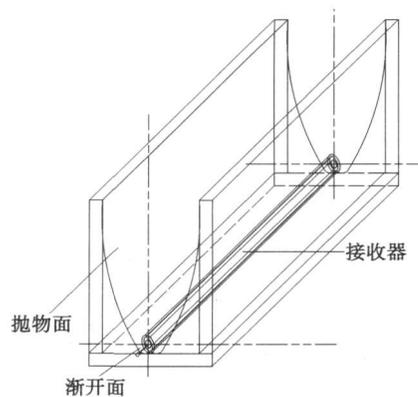


图 1 新型 CPC 热管式集热器结构

1.1 接收器设计方案

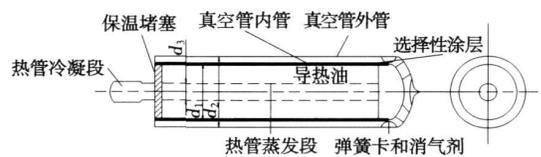


图 2 接收器结构示意图

接收器是一个热管式真空集热管, 结构和设计尺寸如图 2、表 1 所示。真空管为双层, 内管电镀特殊的选择性吸收涂层(AI-N/AI)作为吸热体, 能有效吸收太阳光线, 增加了集热管的光学效率。内外层之间抽成真空, 能有效防止热量通过对流方式散发出去, 内层管与热管之间充满导热油, 阳光照射或

收稿日期: 2008-05-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)基金资助项目(2008AA05Z207); 江苏省高技术研究基金资助项目(BG2007050)

作者简介: 张维薇(1984-)女, 安徽寿县人, 南京工业大学硕士研究生

反射到真空管选择性吸收涂层,产生热量后通过导热油将热量传导给热管,热管获得热量(同时含有真空管闷晒热量)后通过冷凝段将热量传给集热介质。加入导热油可以降低传热热阻,提高传热效率,且导热油具有一定的蓄热性,能使集热器产生更高的出口温度。

表 1 接收器设计尺寸 (mm)

	数值
真空管内管直径 d_1	47
真空管外管直径 d_2	58
热管直径 d_3	25
管长 l	2 000

1.2 聚光面设计方案

聚光面是对集热器的效果影响最大的部件,在介绍聚光面设计计算方案之前,先介绍集热器聚光面的型线图,如图 3 所示,投射在抛物线 AC 上且和阴影线 AB 平行的入射阳光也与抛物线轴平行。反射光聚焦于焦点 F(吸收管管顶),即图 3 中入射光线 1 射到抛物线面 M 点(MN 为抛物线在 M 点的法线),再反射到吸收管顶的 F 点被真空管内管吸收。入射光线 2 射到抛物线的 M 点时,入射角已增大,再反射到真空管内管上被吸收。随着入射角的增大,入射光线 3 在 M 点的反射光线投射在渐开线 AP 上的 G 点,再二次反射到真空管内管上。图 3 中收集阳光角度范围 $2\theta_A$,称为接收角(两条阴影线之间的夹角),而 θ_A 称半接收角。

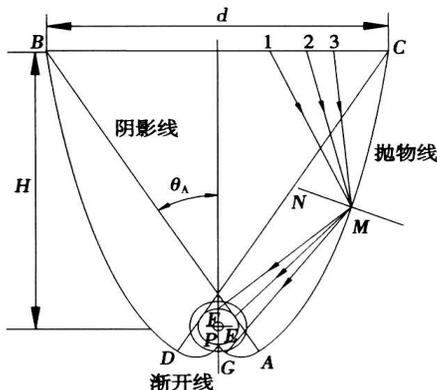


图 3 集热器聚光面型线图

现取中等几何聚光比 $C=5$ (聚光比表示聚光器对阳光的汇聚能力)求出半接收角 $\theta_A=11.5^\circ$

$$C = \frac{1}{\sin \theta_A}, r = d/2$$

反射面型线中的渐开线部分的设计公式为:

$$\begin{cases} X = r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \\ Y = -r(\varphi \sin \varphi + \cos \varphi) \end{cases} \quad (0 \leq \varphi \leq 90^\circ + \theta_A) \quad (1)$$

当 $(90^\circ + \theta_A \leq \varphi \leq 270^\circ + \theta_A)$ 时形面为抛物线的设计公式为:

$$\begin{cases} X = r(\sin \varphi - A^* \cos \varphi) \\ Y = -r(A^* \sin \varphi + \cos \varphi) \end{cases} \quad (90^\circ + \theta_A \leq \varphi \leq 270^\circ + \theta_A) \quad (2)$$

式中: $A^* = \frac{\pi/2 + \theta_A + \varphi - \cos(\varphi - \theta_A)}{1 + \sin(\varphi - \theta_A)}$ (3)

1.2.1 聚光面弧长

渐开线弧长为:

$$S_1 = \int_0^{101.5^\circ} \sqrt{(X')^2 + (Y')^2} d\varphi \quad (4)$$

抛物线弧长为:

$$S_2 = \int_{101.5^\circ}^{258.5^\circ} \sqrt{(X')^2 + (Y')^2} d\varphi \quad (5)$$

$$\begin{cases} X' = r(\cos \varphi - (A^*)' \cos \varphi + A^* \sin \varphi) \\ Y' = -r((A^*)' \sin \varphi + A^* \cos \varphi - \sin \varphi) \\ (A^*)' = 1 \frac{(\pi/2 + \theta_A + \varphi - \cos(\varphi - \theta_A)) \cos(\varphi - \theta_A)}{(1 + \sin(\varphi - \theta_A))^2} \end{cases} \quad (6)$$

将上式代入化简后得积分方程为:

$$S_1 = \int_0^{101.5^\circ} \sqrt{2} r \frac{\pi/2 + \theta_A + \varphi - \cos(\varphi - \theta_A)}{(1 + \sin(\varphi - \theta_A))^{3/2}} d\varphi \quad (7)$$

$$S_2 = \int_{101.5^\circ}^{258.5^\circ} \sqrt{2} r \frac{\pi/2 + \theta_A + \varphi - \cos(\varphi - \theta_A)}{(1 + \sin(\varphi - \theta_A))^{3/2}} d\varphi \quad (8)$$

利用 MATLAB 编程进行计算,得:

$$S_1 = 62.35 \text{ mm}, S_2 = 1 597.51 \text{ mm}$$

聚光面的反光面积 $S_r = 2(S_1 + S_2)L$ 代入数据,得:

$$S_r = 6.64 \text{ m}^2$$

1.2.2 槽深和孔径宽度

令 $\varphi = 258.5^\circ; \theta_A = 11.5^\circ; r = d/2 = 47/2 \text{ mm}$ 可得出:

$$A^* = 83.91; X = 370.12 \text{ mm}; Y = 1 937 \text{ mm}$$

则孔径宽度 $d' = 2 \times 370.12 = 740.24 \text{ mm};$

槽深 $H = 1 937 \text{ mm}.$

1.2.3 实际聚光比

$$C = \frac{\text{孔径面积}}{\text{吸收面积}} = \frac{740.24L}{47\pi L} = 5.015 \approx 5 \quad (9)$$

由于聚光板的上部分聚光效果较差,实际应用时适当截取上面的低效部分,可以减少用材降低成本,使性价比提高。综合考虑系统效率和它的经济性,选择截取比为 $2/3 \sim 1/2$ 比较理想,所以取集热器的高度为 $1 200 \text{ mm}$,根据抛物线参数方程可以求

得 $\varphi = 252.631^\circ$, 再将 $\varphi = 252.631^\circ$ 代入抛物线方程求得截取后的孔径宽度 $d = 707.12 \text{ mm}$ 。

则截短后的抛物线聚光面的弧长为:

$$S_2 = \int_{101.5}^{252.631} \sqrt{2r} \frac{\pi/2 + \theta_A + \varphi - \cos(\varphi - \theta_A)}{(1 + \sin(\varphi - \theta_A))^{3/2}} d\varphi \quad (10)$$

利用 MATLAB 进行计算, 得: $S_2 = 1\,089.61 \text{ mm}$;

则截短后的聚光面的面积为: 4.61 m^2 ;

截短后集热器的开口口径 d 为: 707.12 mm ;

单个槽聚光器孔径的等效集热面积为:

$$S_A = Ld = 2 \times 0.707\,12 = 1.414 \text{ m}^2 \quad (11)$$

截短后的实际聚光比为:

$$C = \frac{\text{截短后孔径面积}}{\text{吸收面面积}} = \frac{707.12L}{47\pi L} \approx 4.79 \quad (12)$$

通过以上计算看出, 截短后不影响 CPC 集热器的接收角, 但是聚光比从 5 降到 4.79, 高度由原来的 $1\,937 \text{ mm}$ 降到 $1\,200 \text{ mm}$, 反射面积由原来的 6.64 m^2 降到 4.61 m^2 , 节省了聚光面的材料。

2 新型 CPC 热管式集热器集热过程分析

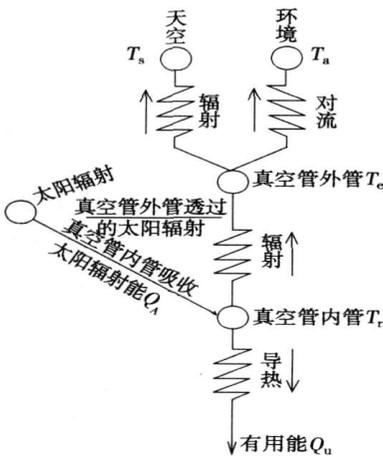


图 4 集热器的传热路径示意图

太阳光一部分直接穿过真空管外管汇聚到真空管内管表面涂层上, 一部分照射到聚光面上, 聚光面再把太阳光经过一次或多次反射透过真空管外管汇聚到真空管内管表面涂层上。真空管内管与热管间通过导热油传导热量。热管的蒸发段吸收热量后, 其内部工质受热蒸发, 将热量传递到热管冷凝段, 再将冷凝段的热量传递给水夹套中的工质(水), 而蒸汽此时冷凝为液体, 依靠重力沿热管内壁面流回热管蒸发段。通过这一过程的不断重复, 就加热了集热器水夹套中的水, 同时集热器不可避免的向周围散发热量损失。图 4 表明太阳辐射能的利用和损失

的情况, 太阳能集热器在运行时实际吸收的太阳能为 Q_A , 其中一部分转变成集热器的有效利用能 Q_u , 一部分变成热损失 Q_L , 故集热器的能量损失多少直接影响系统的整体性能。

在分析集热器内部的传热过程时, 为避免次要因素造成的繁琐, 作如下假设: (1)忽略真空管内、外管沿周边温度分布的不均匀; (2)忽略玻璃管厚度及沿厚度方向上的温度差异; (3)由于真空管内外管间抽成高真空, 所以对流和导热损失可以忽略不计; (4)可以认为天空是一个在等效天空温度下发射长波辐射的黑体; (5)真空管总热损系数以在一定温度范围内为常数。

做了以上假设后就可以列出新型 CPC 热管式集热器的能量平衡方程为:

$$Q_A = Q_u + Q_L \quad (13)$$

式中: Q_A —单位时间内真空管内管吸收到的太阳辐射能; Q_u —单位时间内集热器的有效输出能量; Q_L —单位时间内集热器的热损失。

由能量平衡方程可得^[9]:

$$Q_u = F\eta_{op}I_iS_A - FU_tA_r(T_i - T_a) \quad (14)$$

这部分热量传给水夹套中的工质, 使其温度升高:

$$Q_u = mC_p(T_{io} - T_i) \quad (15)$$

式中: I_i —单位有效集热面积的太阳辐射量; F —集热器的效率因子, 0.964; η_{op} —集热器的光学效率, 0.632; S_A —集热器等效集热面积, 1.414 m^2 ; A_r —热管真空管内管的面积, $1.73 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; U_t —集热器的总热损失系数, $0.768\,75 \text{ W/m}^2$; m —水夹套中水的质量, 4.5 kg ; C_p —水的定压比热容, $4.196\,8 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°C)}$; T_a —室外天气温度; T_i —水夹套里水的平均温度; T_{io} —集热器的出口温度。

3 新型 CPC 热管式集热器的建模与仿真分析

利用 MATLAB 软件为建模平台, 对太阳辐射强度、新型 CPC 热管式集热器的有用输出能量、出口温度进行动态仿真。

仿真条件: 南京地区, 纬度 W 为 32° , 春分日、夏至日、秋分日和冬至日的赤纬角 c 分别为 -0.404° 、 23.45° 、 -1.009° 、 -23.44° , 集热器倾角 q 为 32.4° 、 8.55° 、 33° 、 55° , 晴天, 大气情况为正常 ($p = 0.75$), 面向正南方向放置 ($\gamma = 0$)。

3.1 仿真模型

模型如图 5、图 6 所示, 其中图 5 中的 clock 为时

钟模块, 主要作用是将仿真运行的时间作为函数模块 solar 的输入, Solar Radiation Function 是利用太阳辐射强度的常规计算公式编写的 M 文件。图 6 是根据能量平衡方程建立的模型, 其中 out1 表示太阳辐射强度的子系统模块, q_u 和 T_{fo} 是输出模块。

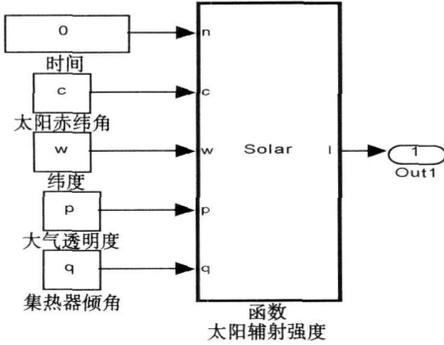


图 5 太阳辐射强度模型

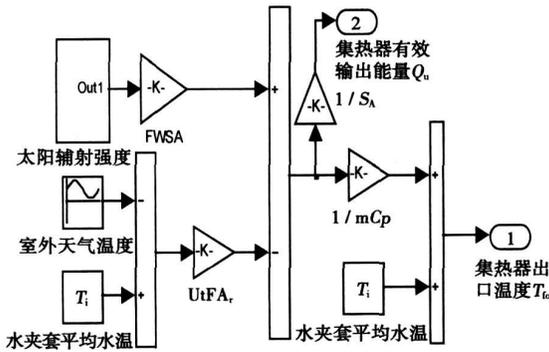


图 6 集热器有效输出能量和出口温度模型

3.2 仿真结果

仿真结果可得出 4 天内太阳辐射强度、集热器有效输出能量、出口温度的变化图。同时也得出该集热器瞬时集热效率变化图。

根据图 7 分析可知, 上述 4 天内太阳辐射强度在日照时间内为正值, 并且先增大后减小, 在中午 12 时取得最大值, 其变化曲线符合正态分布, 具有对称性, 且春分日和秋分日的变化曲线基本重合。

根据图 8 分析可知, 上述 4 天内集热器的有效输出能量随太阳辐射强度的变化而变化, 在中午 12 时取得最大值, 其变化曲线也符合正态分布, 具有对称性, 且春分日和秋分日的变化曲线基本重合。

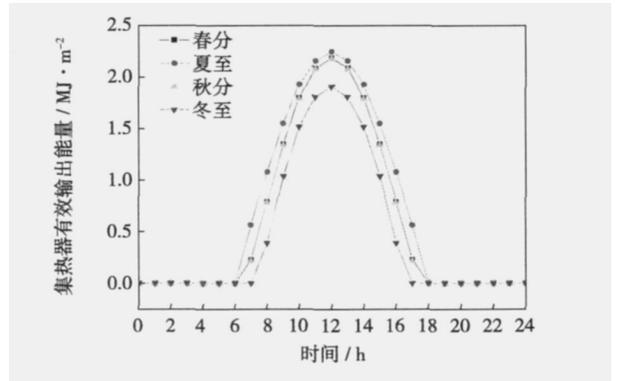


图 8 集热器有效输出能量变化图

根据图 9 分析可知, 上述四天内集热器的出口温度均随集热器的有效输出能量的变化而变化, 在中午 12 时取得最大值。最大值分别为: 春分日 179 °C、夏至日 191 °C、秋分日 179 °C、冬至日 151 °C。并且有 7 h 以上时间的出口温度可以达到 100 °C 以上, 所以集热器在这 4 天内都可以产生蒸汽。

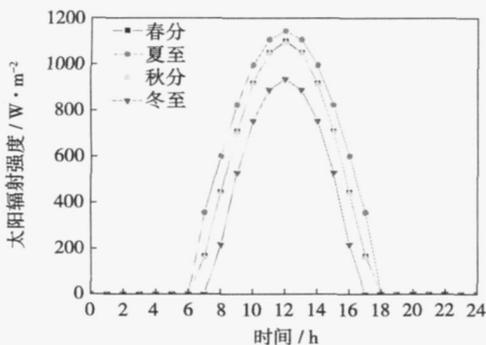


图 7 太阳辐射强度变化图

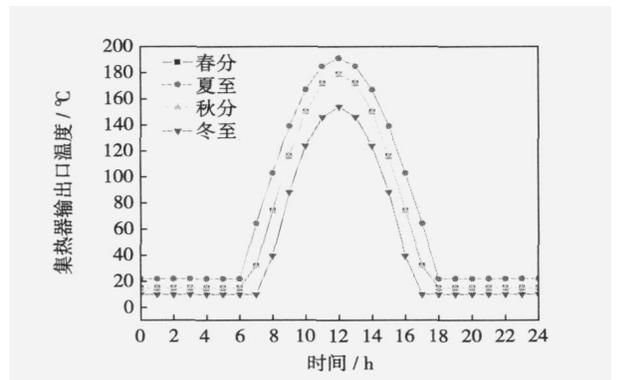


图 9 集热器出口温度变化图

根据图 10 分析可知, 在集热器进、出口流体温差相同时, 集热器瞬时集热效率随辐射强度增大而增大; 在辐射强度相同时, 集热器瞬时集热效率随流

根据所建立的模型, 利用能量平衡方程和上述 4 天的气象条件对模型中的模块进行参数设定, 由

体温差增大而减小。

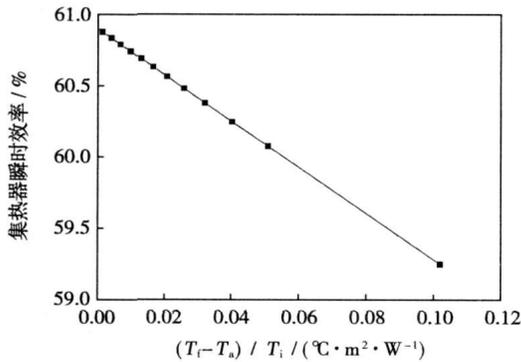


图 10 集热器瞬时集热效率变化图

4 试验研究

试验于 2008 年 6 月份在室外自然阳光下进行。在试验期间, 用玻璃转子流量计控制并测量介质(水)流量, 流量控制在 4.5 L/h; 用镍铬-康铜热电偶测定集热器各部分的温度, 并用安捷伦 34 970 型数据采集仪自动读取集热器水夹套进、出口温度、热管蒸发段各点温度、导热油温度及环境温度, 在水夹套出口处安装一个压力表用来读取集热器出口蒸汽的压力值; 用 PC-2T 太阳辐射标准观测站系统测试并记录室外太阳辐照度。在对整个集热器进行试验前, 曾对不带有 CPC 聚光面的单根有导热油的热管真空管进行了试验, 得出其出口温度最高值可达到 145 °C 左右。对整个集热器进行试验时, 由于上午时间段内太阳强度不断增大, 水夹套出口温度不断升高, 而下午太阳辐射强度不断减小, 水夹套出口温度则不断降低, 且从 12:00 ~ 14:00 集热器出口的蒸汽压力最大值可达到 1.26 MPa。同时将该集热器和传统肋片型 CPC 热管式集热器进行了对比试验, 得出该新型 CPC 热管式集热器的集热效率比传统肋片型至少高出 8%。

5 结论

(1) 根据 CPC 热管式集热器结构设计要求计算出新型 CPC 热管式集热器聚光面的外形尺寸和接收器的结构尺寸。传统 CPC 热管式集热器真空管内管与热管间通过肋片传导热量, 而新型 CPC 热管式集热器是利用导热油进行热量传导的, 导热油的导热性能非常好, 又具有蓄热性, 不仅能降低集热器的传热热阻, 还能产生更高的出口温度。

(2) 利用 MATLAB 软件对太阳辐射强度、新型 CPC 热管式集热器有效输出能量、出口温度进行建模和动态仿真, 得出该集热器的有效输出能量和出口温度的仿真结果。以南京地区春分日、夏至日、秋分日和冬至日的气象条件为模拟条件, 得出集热器在这 4 天的有效输出能量和出口温度的变化图, 同时也得出该集热器的瞬时集热效率曲线图。可看出集热器在春分日到冬至日这个时间段内有 7 h 以上时间的出口温度可以达到 100 °C 以上, 能产生蒸汽。并通过试验研究证实了该新型 CPC 热管式集热器可用于制冷, 尤其是热源品位要求较高的氨吸收式制冷, 同时还用于汽轮机发电和太阳能海水淡化等场合。

参考文献:

- [1] 朱跃钊, 蒋金柱. 槽式聚光型热管式太阳能锅炉装置 [P]. 中国: 200610040139.4, 2007.11.14.
- [2] 张晓东. 复合抛物面型集热器性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [3] 赵玉兰, 张红, 战栋栋, 等. CPC 热管式真空管集热器开发及其传热分析 [J]. 石油化工设备, 2006, 35(4): 28-30.
- [4] 黄忠霖, 周向明. 控制系统 MATLAB 仿真及仿真实训 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 田琦, 张于峰, 李新宇, 等. 空调用太阳能集热器实用性分析 [J]. 暖通空调, 2005, 32(5): 89-92.
- [6] 李颖, 朱伯立, 张威. Simulink 动态系统建模与仿真 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [7] 郑飞, 李安定. 一种新型复合抛物面聚光器 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 663-665.
- [8] SOTERIS A, KALOGIROU A. Solar thermal collectors and applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004(10): 231-295.
- [9] 刘凯波. 太阳能热水系统工程计算机辅助设计系统的研究开发 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.
- [10] 袁胜利, 杨从明. 用于发电的太阳能聚光热管集热器 [J]. 节能, 2002(8): 14-17.
- [11] OOMMEN R, AYARAMAN S. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses oversized reflector [J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42: 1379-1399.
- [12] 张红, 庄骏. 热管技术及其工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [14] 何粹年, 蒋富林, 葛洪川, 等. 热管式真空管集热器的热性能研究 [J]. 太阳能学报, 1994, 1(15): 73-82.
- [15] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.

(编辑 韩 锋)

YANG Ling (Beijing Energy-Net Distribution Energy Technology Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100035) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 391 ~ 394

On the basis of the thermal balance equations for heaters at various stages, through a strict mathematical deduction, presented was a constant power equation for the second loop thermodynamic system of a pressurized water reactor-based nuclear power plant based on matrixes. The rules for filling out the matrixes were expounded in detail and the physical meanings of various matrixes, pinpointed. The equation in question considers in a comprehensive way the structural features of the second loop thermodynamic system and auxiliary steam and water systems. Under the condition of a constant power output, the equation can be used to obtain at the first attempt the steam consumption rate and the amounts of steam bled at various stages, demonstrating its strong versatility. Its applications feature a simple, accurate and quick process. The authors have verified the accuracy of the equation through the analysis of a 900 MW power plant calculation case. **Key words:** thermal power engineering, thermodynamic system, second loop, matrix method, constant power

新型 CPC 热管式集热器的设计与模拟分析 = **Design and Simulation Analysis of a Novel CPC Heat-pipe Heat Collector** [刊, 汉] / ZHANG Wei-wei, ZHU Yue-zhao, JIAN Jin-zhu, QIAN Qiang (College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 395 ~ 399

On the basis of the present development status of CPC type heat collectors, a novel one of the same type was designed. In addition, the light accumulating surface of the collector and the calculation process for the structural design of the receiver were described along with a heat collection analysis of the heat collector. Matlab modeling-simulation technology was adopted for the modeling and dynamic simulation of the collector to predict its operating conditions and a chart showing the change of the effective output energy, outlet temperature and transient heat collection efficiency of the collector was obtained. Through an experimental study, it is verified that the collector can be used for producing steam and refrigeration, especially ammonia absorption type refrigeration, which requires a relatively high standard of heat sources. In the meanwhile, it can also be used for steam-turbine power generation units and solar energy-based sea water demineralization plants etc. **Key words:** CPC heat collector, heat pipe, oil for heat conduction, structural design, heat transfer analysis, simulation

炉排式垃圾焚烧炉的结渣特性研究 = **A Study of the Slagging Characteristics of a Grate Type Solid Waste Incinerator** [刊, 汉] / YU Hai-miao, WANG Gui-ying, CHEN De-zhen, GENG Cui-jie (Thermal Energy and Environmental Engineering Research Institute, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 400 ~ 404

To gain a better understanding of the slagging characteristics and slag formation mechanism of a grate type solid waste incinerator, the authors have chosen a typical in-furnace slag chunk for research purposes. Through a X-ray diffraction (XRD) phase analysis, as well as a scanning electronic microscope and energy spectrum analysis, the in-furnace slagging characteristics were studied. In addition, thermochemical equilibrium reaction calculation results were compared with test ones. It has been found that the presence of eutectic phase with a low melting point formed by calcium compounds resulting from reactions among CaO, Al₂O₃/MgO/ZnO and SiO₂ etc. constitutes the main cause of ash and slag formation. Si and Ca distribution tendencies inside the slag chunk are almost completely identical and Fe is locally enriched while Na and K play a dominant role in the formation of an initial layer. **Key words:** solid waste incineration, slagging, X-ray diffraction (XRD) phase analysis, equilibrium calculation, energy spectrum analysis