

游泳池太阳能加热系统设计与计算

王增福, 陈步亮, 张秀庭
(北京天瑞星有限公司, 北京 100029)

摘要: 文章选用 U 形铜管式太阳能集热器作为基本的太阳能光热转换单元, 针对一个标准的室内游泳池的恒温加热, 给出了游泳池太阳能加热系统的工程设计, 并且通过相关计算, 得到了优化的设计方案。

关键词: 太阳能; 集热器; 游泳池

中图分类号: TB21

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379 (2007) 04-0257-04

1 引言

随着太阳能利用的普及和深入, 大面积太阳能加热工程技术的应用在国外已逐步趋向成熟, 但在国内还是刚刚开始。北京天瑞星公司 (TRX) 与德国太阳能研究所 ISE 合作, 于 2005 年为上海地区成功地设计了一个大面积太阳能加热工程——游泳池太阳能加热系统。

太阳能加热系统的核心部件是太阳能集热器, 目前国内使用的太阳能集热器主要有平板集热器、全玻璃真空联集管式太阳能集热器、U 形铜管式太阳能集热器。平板集热器成本低, 运行可靠, 但是无法在冬季使用。全玻璃真空联集管式太阳能集热器可在全年使用, 但是可靠性差, 一只玻璃管破损则整个系统无法运行, 且维护费用高。U 形铜管式太阳能集热器的成本相对过高, 但其可靠性高且可在全年使用。上海的游泳池太阳能加热系统采用的是 U 形铜管式太阳能集热器^[1,2]。

2 太阳能加热系统

2.1 系统组成

游泳池太阳能加热系统一般包括太阳能集热器、蓄热水箱、换热器、控制器及管道、阀门、泵等零部件, 如图 1 所示。

其中, 核心部件是 U 形铜管式太阳能集热器。采用的是中德合作生产的“太空人”(SPACEMAN) 集热器, 其结构如图 2 所示, 主要由框架、集热管、顶部汇流盒、导热系统和反射板等 5 部分组成^[3]。表 1 为 TRX 太阳能集热器的主要技术参数。

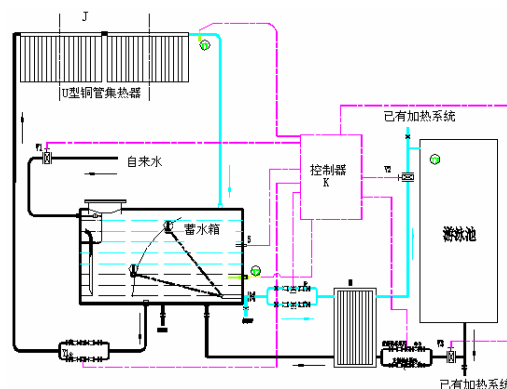


图 1 游泳池太阳能加热系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar heating system for swimming pool

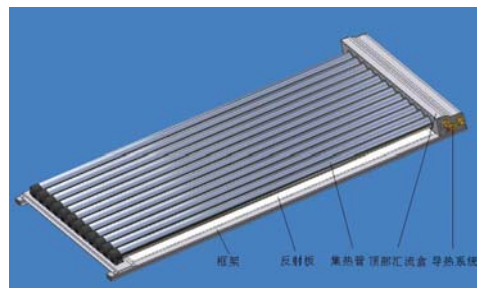


图 2 U 型铜管式太阳能集热器结构图

Fig.2 Structure of the U type solar collector

表 1 天瑞星 (TRX) 太阳能集热器技术参数
Table 1 Specifications of the TRX collector

产品型号	TRX-58×1800/12
真空管型号	Φ58 mm×1 800 mm
真空管数量	12 支
U 形铜管规格	Φ10 mm×0.6mm
保温材料	聚氨酯 (不含氟里昂)
反射板	氧化轧花铝板
流体类型	防冻液或软化水
连接头	G22 螺纹接头 英制 6 分管 (提供不锈钢波纹管连接器)

收稿日期: 2006-10-16; 修回日期: 2007-03-15

作者简介: 王增福 (1948-), 男, 高级工程师, 主要从事离子镀膜设备、工艺和太阳能应用方面的研究、开发及研制。
联系电话: (010) 68116401。

续表 1

流体容量	3.15 L
试验压力	1.176 MPa
使用压力	<0.588 MPa
日集热效率	>65%
采光面积	1.9 m ²
吸热面积	3.15 m ²
外形尺寸(长×宽×高)	1 990 mm×1 000 mm×170 mm
净重	4.7 kg
包装尺寸	2 030 mm×1 110 mm×185 mm
毛重	5.5 kg

(1) 框架

一般采用铝合金型材,外表做氧化处理保护,结构牢固,耐腐蚀性好。

(2) 顶部汇流盒

其外壳由铝合金型材密封咬合结构组成,内部有聚氨酯保温的进出水紫铜管道,两侧有进出水接口。其中每一个与外部连接的部位均采取很好的防水处理,同时对进出水管道有着足够的保温防冻功能。另外,总进出水的紫铜管道与伸进每一个集热管中的 U 形铜管经过特殊工艺处理,采用高银含量的银铜焊焊接,构成可以承受最大 1.176 MPa 压力的液体循环系统。

(3) 导热系统

U 形铜管及导热铝翼安装在真空集热管之内。导热铝翼与集热管的内管内壁紧密接触,形成良好的热导体;导热铝翼中央有圆形凹槽,与 U 形铜管精密配合在一起。在阳光的照射下,集热管的内壁温度可以达到 250 °C 以上,导热铝翼温度大约在 150~180 °C,U 形铜管的温度在 80~120 °C (当集热器构成了闭环压力系统后,由于饱和蒸汽压的温度点升高,U 形铜管内的水温可升到 100 °C 以上)。

(4) 反射板

一般采用压花铝板制作成漫反射板,对可见光的反射率可以达到 60%。但是根据不同地区冬季降雪量的大小以及风的强度等因素,设计者会考虑是否适合安装反射板。

(5) 集热管

“太空人”集热器所使用的全玻璃真空集热管^[4]一律采用天瑞星 (TRX) 公司自主开发生产的 Cu-N/Al 中温真空集热管。它与国内普遍

流行的 Al-N/Al 常温集热管相比较,集热效率提高 15%~25%。它主要有两种规格,一种是外径 47 mm,长度为 1 500 mm;一种是外径 58 mm,长度为 1 800 mm。一般每组集热器使用 12~30 支集热管。TRX 太阳能集热管的具体结构如图 3 所示。

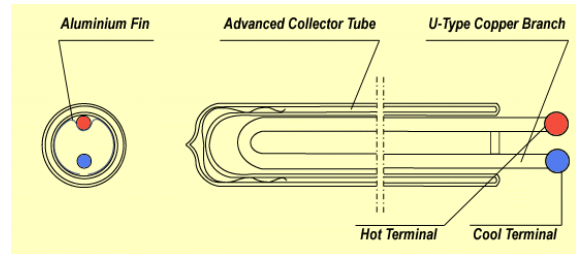


图 3 TRX 集热管的结构图

Fig.3 Configuration of the TRX vacuum tube

在集热管的内管外壁上镀了一层全干涉吸收膜和抗反射涂层,其膜层结构如图 4 所示。涂镀膜层使集热效率大大提高,再加上集热管的中间是真空夹层,真空度可以达到 10³ Pa 数量级,大大降低了热对流和热传导损失的热量。集热管技术指标如表 2 所示。

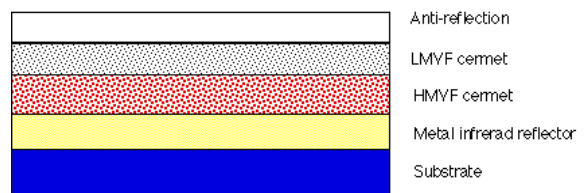


图 4 TRX 集热管的膜层结构

Fig.4 Diagram of the TRX selective coating

表 2 TRX 太阳能集热管的技术指标
Table 2 Specifications of the TRX vacuum tube

项目	指标
吸收率	$A \geq 94\%$ ($\text{am}=1.5$)
发射率	$E \leq 6\%$ ($150\text{ }^\circ\text{C}$)
夹层真空度	$V \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
排气温度	$T_a \geq 420\text{ }^\circ\text{C}$
退火温度	从 450~100 °C 逐步退火,以彻底消除玻璃残余引力
吸气剂得钡量	$W \geq 25 \text{ mg}$
膜层中温使用寿命	≥ 15 年

2.2 系统的工作原理

参见图 1 所示,系统主要部分除 6 台水泵(P1~P6,其中 P2、P4、P6 为备用泵)、1 个电磁阀(V1)、两个电动蝶阀(V2、V3)外,还有太阳能集热器(J)、蓄热水箱(R)、板式换热器(H)、中心控制器(K)、太阳能集热器温度探头(T1)、水箱温

度探头 (T2)、游泳池温度探头 (T3)、电接点压力表 (Y1、Y2)、水位探测器 (S) 及手动阀门等。系统的工作过程可以概括为以下 4 种工况。

(1) 太阳能集热系统采用温差循环控制 (控制系统 1)

在光照条件下, 当集热器内水温 T_1 比水箱温度 T_2 高 $7\sim 8^\circ\text{C}$ 时, 控制器打开循环泵 P1, 强制水箱内温度较低的冷水进入集热器, 集热器内温度较高的水被顶入水箱内; 当两者温差小于 $2\sim 3^\circ\text{C}$ 时, 控制器将关闭水泵。如此使太阳能集热器与水箱间不同温度的水形成循环, 使水箱内的水温逐渐升高把能量存储起来。

(2) 游泳池换热系统采用定温循环控制 (控制系统 2)

由于散热等原因, 游泳池的水温一直在缓慢下降。当游泳池水的温度 T_3 低于 27°C 时, 控制器打开水泵 P3、P5, 这时水箱里面温度较高的热水和游泳池里面温度较低的冷水就在泵的作用下流过板式换热器 H, 这样就可以提高游泳池里面的水温; 当水温 T_3 达到 28°C 时, 控制器就关闭水泵, 换热循环停止。

(3) 补冷水

随着系统的运行, 水箱里面的水逐渐挥发;

并且如果用户在夏季供应洗浴热水, 为了保证系统的正常运行, 需要及时补充冷水。当水箱里面的水位低于水位探测器的下限时, 控制器打开电磁阀 V1 向水箱里面补充冷水; 当水位达到上限时关闭电磁阀 V1, 停止补水。

(4) 常规加热能源循环

对于本系统的常规加热能源, 当太阳能加热系统不能提供足够多的能量时, 控制器就会产生一个信号通知用户需要开启常规加热能源来补充能量, 并且关闭电动蝶阀 V2、V3, 让常规加热能源独立运行。

3 游泳池太阳能加热系统设计及计算^[2,5,6]

3.1 用户要求

游泳池面积: $21.5\text{ m}\times 50\text{ m}+50\text{ m}^2=1\,125\text{ m}^2$;

游泳池蓄水量: $1\,400\,000\text{ kg}$;

水温要求: 冬季 28°C , 平均日降温 2.7°C 。

3.2 集热参数计算

(1) 全年太阳能总辐射能流

根据上海地区地理气候参数, 计算出上海地区全年太阳能总辐射能流为 $4\,580\text{ MJ/m}^2$ 。

本系统在上海地区的运行计算参数表 3。

表 3 本系统在上海地区的运行计算参数

Table 3 Calculated results of the solar heating operated in Shanghai

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水平面月平均辐照量 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	274.3	365.5	483.7	563.6	668.9	661.4	561.0	520.9	496.2	381.9	276.1	236.2
太阳能加热系统的月得热量/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	178.2	237.6	314.4	366.3	434.8	429.9	364.6	338.6	322.5	248.2	179.5	153.5
太阳能加热系统日平均热量/ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$	8.914	11.88	15.72	18.32	21.74	21.5	18.23	16.93	16.12	12.41	8.976	7.678
太阳能补充能量与游泳池每天损失能量的比值/%	70.0	93.3	124	144	171	169	143	133	127	97.5	70.5	60.3
太阳能加热系统按月设计集热器面积/ m^2	1775	1332	1006	864	728	736.3	868	934.8	981.3	1275	176.2	2061

注: (1) 太阳能加热系统的月得热量(MJ/m^2)是水平面月平均辐照量(MJ/m^2)乘以集热器光-热转换效率而来的, 本系统选择的集热器光-热转换效率为 65%。(2) 游泳池每天损失的能量为 $15\,826.86\text{ MJ}$ 。

(2) 游泳池耗热量和太阳能集热器的热量计算

游泳池耗热量包括水面蒸发损失、水面传导损失、池底和池壁传导损失、管道和设备损失的热量。

每天游泳池平均降温 2.7°C , 由此可得每天游泳池平均损失热量 $Q_{\text{耗}}$ 为

$$Q_{\text{耗}}=M_G\times C_W\times\Delta T=15\,826.86\text{ MJ},$$

式中: M_G 为游泳池中水的总质量, kg ; C_W 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ΔT 为池内每日的自然降温量, $^\circ\text{C}$ 。

太阳能加热系统日平均得热量(MJ/m^2)是按

照每个月份 20 个晴天日计算，夏季也按照这个数据计算，本系统主要使用在冬季。

(3) 集热面积计算

根据表 3，可看出太阳能加热系统按月计算所需集热器面积的示意图（见图 5）。

根据北美地区同类工程的经验及德国关于游泳池工程的计算软件计算得出集热器集热面积的最优化值为 1400 m^2 。根据现有的屋顶面积，可以安装 672 组 SPACEMAN 集热模块。该集热模块每组的采光面积为 1.85 m^2 ，总面积为 2 m^2 。则本集热系统的总面积为 1344 m^2 ，总采光面积为 1243.2 m^2 ，略小于最优化值。

3.3 蓄热水箱设计

按照国家标准[5]，冬季集热器产水量为 $50\sim 60\text{ kg/m}^2$ （水温 $45\text{ }^\circ\text{C}$ ），则水箱的计算容积为： $1243.2\text{ m}^2\times 50\text{ kg/m}^2=62805\text{ kg}$ 。故设计容量为 70t。考虑到接触面承重问题，水箱须放置在地面或地下的设备间。

3.4 辅助加热能源设计

考虑到太阳能加热系统在日光辐照不足和雨雪天气时的运行，需要辅助加热能源补充。现有游泳池已经有一套加热装置，出于成本考虑，本系统不再进行辅助能源的设计。

3.5 平板换热器的确定

本系统需要用平板换热器来进行水箱与游泳池之间的热量传递。换热器的选择按照循环流量 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 、换热器进出口温度分别为 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 进行计算，得到板式换热器的面积应为 26 m^2 。

3.6 系统安全性能设计

(1) 防雷击

太阳能加热系统放置在已有屋顶之上，一般认为已处于建筑物避雷保护范围之内，不另作防雷避雷措施。

(2) 抗风设计

本太阳能热水器安装在室外部分根据国标要求设计，具有可靠抗风措施，可经受不低于 11 级风的负载。

(3) 防雨雪及冰雹设计

本系统全玻璃真空管采用 3.3 高硅硼玻璃制作，可以经受从 2.0m 高处落下的 150g 钢珠撞击而无破损，也可以承受从 0.5m 高度自由落体的 $\phi 30\text{ mm}$ 大小的钢球撞击而无破损，完全可以满足在上海地区的使用条件。同时本系统所有集热器及附近进气口和进出水口都进行密封处理，在雨雪条件下不产生渗漏，符合国家室外太阳能设备防雨雪、冰雹的技术要求。

(4) 系统管道保温防冻设计

上海地区冬季平均气温在 $7.3\text{ }^\circ\text{C}$ ，为此系统管道仅作简易保温处理，即可满足防冻要求。

(5) 屋顶承重及最大点压强设计

在长、宽方向上每 2m 放置一个 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的水泥支撑墩，最大压强为 400 kg/m^2 ，现有的房顶可以承受。

4 结论

本系统方案经过了德国太阳能工程研究所（ISE）专家的评审，在上海地区的实际应用证明满足用户要求。系统具有节能、经济、安全可靠的优化设计特点。

(1) 节能性：冬季平均节省 60% 以上的现有能耗，夏季每天提供 40t 以上的生活热水；

(2) 经济性：2 年可收回全部工程投资；

(3) 安全性：采用高安全性的 U 形铜管集热器作为集热组件，即使真空玻璃管破碎也不会影响整

个系统的正常运行；

(4) 可靠性：控制系统采用工业 PLC 自动控制；所有热水循环泵采用双路备份系统。

参考文献 (References)

- [1] GB/T18713—2002, 太阳热水系统设计、安装及工程验收技术规范[S] [GB/T18713—2002, Solar water heating system: design, installation and engineering acceptance[S]]
- [2] ISO/TR 12596: 1995, 太阳能游泳池加热设计和安装指南[S][ISO/TR 12596:1995, Solar heating-swimming-pool heating systems-dimension, design and installation guidelines[S]]
- [3] G B / T 1 7 5 8 1 — 1 9 9 8 , 真 空 管 太 阳 集 热 器 [S] [G B / T 1 7 5 8 1 — 1998, Solar vacuum tube collector[S]]
- [4] G B / T 1 7 0 4 9 — 1 9 9 7 , 全 玻 璃 真 空 太 阳 集 热 管 [S] [G B / T17049—1997, All-glass evacuated solar collector tubes[S]]
- [5] CECS 14: 2002, 游泳池和水上游泳池给水排水设计规程[S] [CECS 14: 2002, Specification for design of water supply and drainage for swimming and amusement pools[S]]
- [6] G B 5 0 0 1 5 — 2 0 0 3 . 建 筑 给 水 排 水 设 计 规 范 [S] [G B 5 0 0 1 5 — 2003, Design of building water supply and drainage[S]]