

新型太阳能集热器设计与测试研究

冯国会,王禹涵,黄凯良,梁 栋

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究太阳能热水技术,以原有板式集热器为研究对象对其结构进行分析、集热效率进行测试,从而研发一款廉价不易损坏的新型太阳能板式集热器,并对其集热效率、蓄热能力等进行测试与评估。方法 将成熟板式集热器进行拆解,分析其结构与工作原理,从而研发新型板式集热器,其主要技术特征为利用毛细管与水泥砂浆的优势互补;以水作为传热工质,通过测量集热器进出水口处水温,计算其集热效率等性能参数。结果 新型集热器的制作成本大幅下降,缩短了资金回收期,瞬时集热效率达到42%,在太阳辐射照度为 850 W/m^2 的情况下可将水加热至 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结论 利用毛细管增加工质与集热器的接触面积以及水泥砂浆的蓄热能力使得新型板式换热器的集热效率和集热时间得到提高,并且集热器制作成本的下降也对推广太阳能产业发展具有重要意义。

关键词 太阳能;板式集热器;集热效率;低成本

中图分类号 TK519

文献标志码 A

Study on Design and Test of a Novel Solar Collector

FENG Guohui, WANG Yuhan, HUANG Kailiang, LIANG Dong

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The thermal performance of original flat plate solar collector has been studied and tested. This paper was proposed to investigate a novel flat plate solar collector whose structure is more reliable and the price is more acceptable. The heat collection efficiency and heat storage capacity have been evaluated. The mature plate heat collector was disassembled and its structure and working principle were analyzed. The major technical feature was using the complementary advantages of capillary and cement. By measuring the water temperature at the inlet and outlet of the collector, the heat collection efficiency and other performance parameters were calculated. Using capillary to raise the contact area of working fluid and collector, so improve the performance of collector and extend the time of heat collecting. Based on theoretical analysis the production costs of this novel collector have slumped. The efficiency of collector reaches 42% and the water can be heated to

收稿日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51308352);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2013013);中国博士后科学基金项目(2015M581361)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事可再生能源综合利用方面研究。

43 ℃ under solar radiation 850W/m². The use of capillary tubes to increase the contact area between the working fluid and the collector and the heat storage capacity of the cement mortar makes the heat collection efficiency and heat collection time of the new plate heat exchangers to be improved, and the decrease of the production cost of the collectors also contributes to the promotion of the solar energy industry.

Key words: solar energy; the flat plate solar collector; thermal performance; low cost

自从我国颁布了大气十条、水十条环保条例,以建筑业为主的第二产业发展受限,若要保持国民经济在平稳中求增长的发展理念,那必然要研发一种新型的能源代替原有化石能源. 太阳能因为具有取之不尽、用之不竭、无环境污染等诸多优点而受到各国重视. 太阳能的开发利用中,太阳能热水技术是最成熟、实际应用最多且在经济上能与常规能源竞争的一种可再生能源利用技术^[1].

太阳能热水器的核心部件就是太阳能集热器. 太阳能集热器是用来吸收太阳辐射并使之转换为热能传递给热介质的装置. 常见的太阳能集热器有平板型、真空管型和槽式聚光型太阳能集热器. 其中,平板型太阳能集热器和真空管太阳能集热器使用比较广泛^[2]. 平板型太阳能集热器在我国市场的占有率还不足 15%,相比其在国外 90% 以上的市场占有率^[3],平板型太阳能集热器在国内仍然有巨大的市场空间. 真空管太阳能集热器虽然抗冻能力较好,但是真空管易破损,直接影响其使用寿命,而且易结垢、清洁困难等问题仍需解决. 槽式聚光型太阳能集热器的集热极限温度较高,适用于对水温要求较高的工程. 但其通过热对流散失的热量巨大,热惰性较差,受天气变化影响较为明显,致使其发展受到严重限制^[4-6]. 基于此,笔者设计了一种新型平板太阳能集热器,分析了在新型集热模式下,太阳能与毛细管网优势互补的可行性与效果,并在太阳能集热器设计完成后,在不同工况下进行测试分析,计算出设计产品的集热效率,蓄热能力等主要产品参数,并对其经济性做以分析,通过对比于真空管及槽式聚光型太阳能集热器. 可知平板太阳

能集热器具有承压性能好、与建筑一体化程度高、防结垢能力强、耐用、维修率低等优点,通过性能改进可以进一步减少其能量散射,提高太阳能的利用效率,减少铜材的使用,降低制作成本,使其具有更好的可推广性.

1 新型平板集热器设计

整体新型板式集热器的构成由铸铁框架、高透光性玻璃盖板、水泥砂浆、毛细管网、保温材料等组成,其结构如图 1 所示,截面图如图 2 所示.

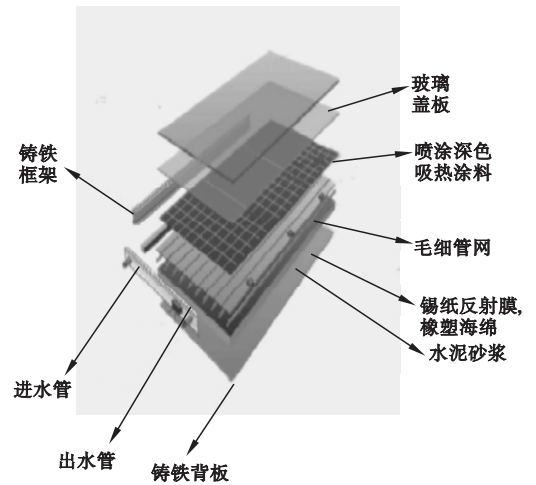


图 1 集热器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat collector structure

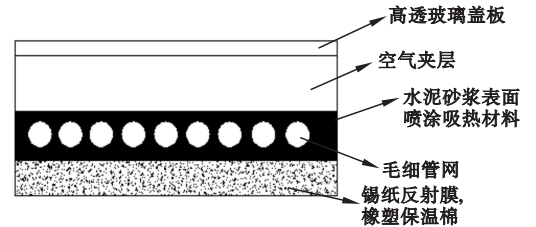


图 2 集热器截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heat collector section

笔者在集热器整体设计中采用毛细管与混凝土相混合,使得吸热板与传热工质的接触面积最大化的同时也利用混凝土本身的蓄热能力,延长集热板的供热时间.毛细管作为集热器的主要吸热设备重点考虑其本身在结构、材料、使用三方面的特点.在结构方面,毛细管网是分集水式设备,采用网状支管结构增加了换热面积,也是工质在换热过程中受热更加均匀,水力损失也相应减少;在材料方面,毛细管的主要材质一般为 PP - R 或 PE - RT,可热熔成型,便于加工连接管路,并且具有耐高温、耐高压、耐腐蚀等优势;在使用方面,毛细管轻薄自重小,柔软便于塑形安装且绿色环保无毒无害.这三方面的优势决定了毛细管网可以作为一种优质高效的换热器设备^[7].

笔者在集热器的设计中使用 U 型毛细管(见图3)代替了原有集热器普遍采用的 I 型流道设计,从而增加了工质在集热器中的流程,尽可能提升集热效率.采用毛细管作为集热器的主要吸热设备重点考虑到毛细管本身在结构特点、材料特点、使用特点三方面的优势.在结构特点方面,毛细管网是分集水式设备,采用网状支管结构增加了换热面积,也是工质在换热过程中受热更加均匀,水力损失也相应减少.在材料特点方面,毛细管的主要材质一般为 PP - R 或 PE - RT,可热熔成型,便于加工连接管路,并且具有耐高温、耐高压、耐腐蚀等优势.在使用方面,毛细管轻薄自重小,柔软便于塑形安装且绿色环保无毒无害.这三方面的优势决定了毛细管网可以作为一种优质高效的换热器设备.

吸热板采用喷涂选择性吸光材料且翻折角度为 45°,翻折长度 1.5 cm 的横向波纹钢板(见图4),代替原有常用的平板型吸热板.采用新型集热板在增加集热面积的同时,翻折角度也可以使阳光在吸热板表面发生多次反射,增强了吸热板对热量的收集.同时为增强波纹吸热板与毛细管之间的传热过程,

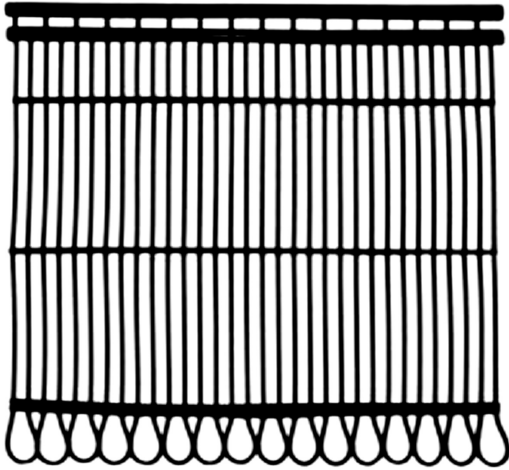


图3 毛细管网
Fig.3 Capillary network



图4 波纹吸热板
Fig.4 Corrugated heat collector

在波纹板与毛细管之间填充一层厚度约 10 mm,有着均匀传热作用的粘合材料,该材料由水泥、细沙、HTT - GT 型导热胶泥、高纯度石墨粉、抗裂砂浆和水以一定的比例混合而成.利用其增加集热器整体强度的同时也使毛细管与整个吸热板贴合更加紧密,增强接触导热.制作过程如图5所示.

集热器的热损失很大一部分来源于吸热板上下端温差较大,引起玻璃盖板与吸热板夹层之间空气流动形成对流散热.由于新型集热板的波纹处理,减缓了夹层间的空气流动.并且研究发现随夹层间距的变化,集热器

内自然对流换热热损失有所改变^[8],为降低自然对流换热热损失,最佳的空气夹层间距应为 3 cm,如图 6 所示.

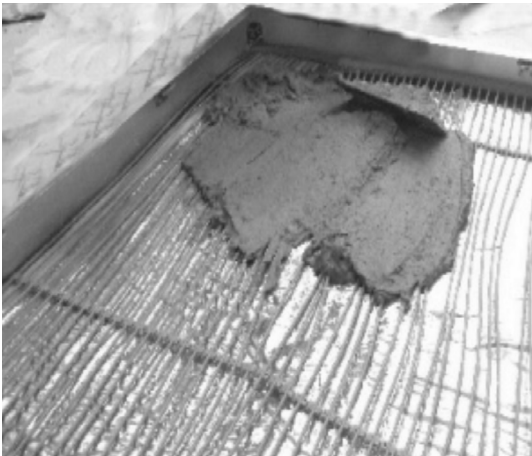


图 5 集热面制作过程

Fig. 5 Manufacturing process of heat collector



图 6 填充聚氨酯泡沫

Fig. 6 Filled polyurethane foam

在玻璃盖板的选择上,由于原有太阳能板式集热器均选择普通玻璃,而普通硅酸盐类玻璃含铁量较高,其阳光通过率仅为 0.75 ~ 0.78^[9],这严重限制了太阳能集热器的集热效率,影响集热器集热效果.

新型太阳能板式集热器的玻璃盖板选用 5 mm 高铁高透光钢化玻璃,并对其迎光侧进行喷砂处理.使迎光表面凹凸不平,当太阳光照射到玻璃表面时发生漫反射,减少阳光在玻璃表面形成反射所损失的能量,而内表

面则可以使透过玻璃后在集热板表面发生反射的光发生镜面反射,使光线得到二次反射后返回吸热板(见图 7).利用光线在集热器内发生多次反射增加集热器的集热效率.

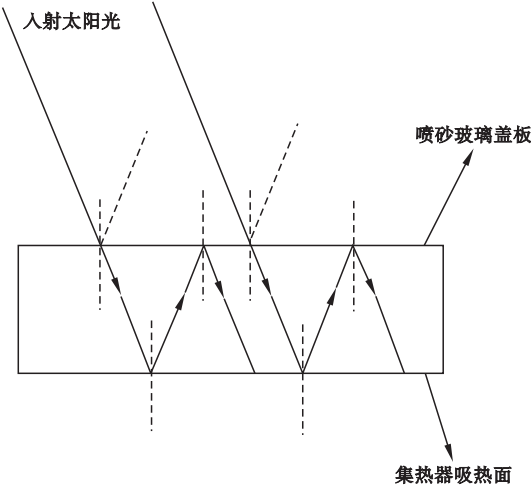


图 7 太阳光入射示意图

Fig. 7 Schematic diagram of solar light incidence

边框与玻璃之间留有一定的伸缩缝,防止因热胀冷缩导致的边框变形导致玻璃破损.采用玻璃胶以及和镶嵌式保温胶条,以此来保证集热器的密封性,防止热量散失的同时也提升了集热器的防水、防尘等级.笔者设计的新型太阳能板式集热器长宽厚约为 1 000 mm × 1 200 mm × 120 mm,质量约 55 kg,其具体结构外观如图 8 所示.



图 8 集热器整体外观

Fig. 8 The whole appearance of heat collector

2 主要测试仪器

本试验所用风速仪为天津气象仪器厂的型号为 EY3-2A 型电子微风仪,如图 9 所示. 电子微风仪是测量微风风速的精密测量仪器,仪器的集成程度高,使用简单方便,在气象参数和对系统的风环境的测量上应用广泛. 微风速单位差距小,测量精密,仪器本身轻巧方便,对气流组织的试验和风场管道的测试适用性高. 测量范围包括两种量程: $0.05 \sim 1 \text{ m/s}$ 、 $1 \sim 30 \text{ m/s}$;工作环境条件:温度在 $-10 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



图 9 EY3-2A 型电子微风仪

Fig. 9 EY3-2A type electronic wind instrument

本试验的温度测点布置选用进口德国贺利氏 PT100 热电阻,温度范围在 $-70 \sim 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$. 热电阻测量温度依据欧姆定律,当温度变化时,流过 PT100 的测试元件上电阻发生变化从而导致流经元件上的电压电流发生变化,通过对元件的电压和电流的测试换算成电阻大小,进而转化为温度. 温度记录采用 PHN 型无纸记录仪,该记录仪可快速显示过去的数据. PHN 无纸记录仪如图 10 所示.

太阳辐射测试采用台湾泰仕 TES1333R 太阳能辐射仪,如图 11 所示. 该仪器专业测量太阳辐射照度,使用长期可靠稳定的矽制光伏感测器,光谱响应范围 $400 \sim 1100 \text{ nm}$,测量范围 $0 \sim 2000 \text{ W/m}^2$.



图 10 PHN 无纸记录仪

Fig. 10 PHN paperless recorder



图 11 太阳能辐射仪

Fig. 11 Solar radiometer

3 测试数据分析

为分别测试新型集热器可将工质加热的极限温度以及集热器的集热效率,将整组试验分为循环流和直流两种工况:第一部分测试高效工质换热循环工况,测试过程中水箱中的水在装置中循环流动,没有外来工质的进入与流出,调节流量,对太阳能辐射和装置各测点温度进行测试;第二部分对直流工况做测试,在测试过程中向水箱内部通入恒定流量、恒定温度的冷却水,水箱内部的水通过毛细管热水集热装置后直接排出,不重新进入水箱参与循环,分别测试换热器进出口水温. 试验地点选在辽宁省沈阳市,位于东经

123.4°,北纬 41.8°. 全年四季分明,属北温带大陆性季风气候.

3.1 循环流工况

整组测试于 2015-09-26T09:30 开始进行,每隔 15 min 记录 1 次. 当日天气:晴,东北风一级;空气质量:良,循环流量为2.02 L/min. 测试具体数据(代表数据)如表 1 所示.

表 1 循环流工况实测数据表
Table 1 Measured data of circulating flow condition

组别	实时温度/℃	实时太阳辐射 照度/(W·m ⁻²)	入口水温/℃	出口水温/℃
1	13	585	19.5	20.7
2	13	605	20.3	21.5
3	14	668	21.3	22.6
4	14	760	22.3	23.9
5	16	860	23.4	25.3
6	16	843	24.5	26.4
7	19	906	25.6	27.6
8	19	932	27.9	31.5
9	20	964	31.0	33.7
10	20	1 016	33.7	36.2
11	20	977	35.9	37.9
12	22	1 134	38.1	40.3
13	22	1 087	40.5	41.3
14	22	992	40.9	42.0
14	23	1 066	41.7	42.5
15	23	1 045	42.5	43.1
16	23	976	42.6	43.0

循环工况中水从毛细管网集热器流出后直接进入水箱,由于途径线程较短,保温做的得当,在过程中的热量损失可忽略不计. 换热器的进出口温度随时间变化如图 12 所示.

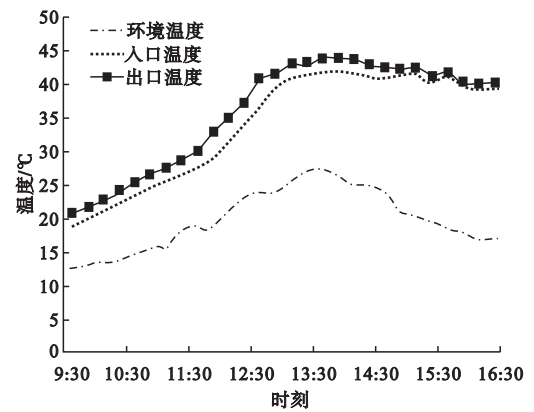


图 12 集热器进出口温度变化
Fig. 12 Inlet and outlet temperature of heat collector

对比一天之中各个时间段太阳能集热器的进出口温度,水箱中水的最高温度出现在 13:30 左右,集热器加热的极限温度在 43 ℃ 左右. 并可以看出在 14:30 以后,当环境温度有较大变化的情况下,集热器的出水温度并没有受到显著的影响,这说明整体装置具有较强的蓄热能力.

最高温度点出现在太阳辐射最高照度点后 0.5 h 左右,这是因为毛细管网换热装置本身覆盖橡塑保温棉,本身对太阳能转化的热能有续存作用. 在到达最高温度之后,冷却水水温会下降. 水温下降的主要原因一方面是由于太阳光照下降,光伏板受阳光照射产生的热量不足以平衡对流换热损失的热量,另一方面,虽然系统整体做保温措施,但是水里的热量还是会通过装置本身以及储热水箱,管材附件中散失到室外环境中. 而系统本身较高的出水温度可以直接当做生活热水去应用,也可以用作热泵系统生产热水的预热.

3.2 直流工况

该工况测试旨在测量恒定流量的冷却水通过太阳能毛细管网集热器所提高的温度,以此来确定太阳能集热器对太阳能光热转化的吸收效率. 测试过程中一直向水箱通入恒定流量的水,让水从太阳能换热器的入口进入,同时出口排到室外. 通过阀门调节控制排水流量,和水箱进水流量.

由于直流工况对太阳辐射强度要求较高,测试于 2015-10-03T11:30 开始进行,每隔 10 min 进行 1 次记录. 当日多云,空气质量良好. 直流流量达到 3.94 L/min. 测试具体数据(代表数据)如表 2 所示.

在直流工况下集热器的进出口水温以及环境温度变化如图 13 所示.

从图中可以看出,在测试的开始阶段集热器的进出口水温相差 4 ℃ 左右,是由于测试于 11:30 开始,之前太阳能集热器已经蓄积了一部分热量,所以集热器表面温度较高,对水温的提升也较大. 随着时间的推移,集热

表2 直流工况实测数据表

Table 2 Measured data of direct current condition

组别	实时温度/℃	实时太阳辐射 照度/(W·m ⁻²)	入口水 温/℃	出口水 温/℃
1	17	820	17.5	21.6
2	17	852	17.5	20.7
3	18	925	17.3	19.2
4	19	970	17.1	18.9
5	19	460	15.9	17.2
6	19	377	15.7	16.5
7	19	660	15.3	16.7
8	20	840	15.2	16.6
9	20	870	15.3	16.7
10	20	760	15.8	17.0
11	21	906	15.6	16.7
12	21	965	15.8	17.1
13	21	935	16.0	17.3
14	23	1 130	16.2	17.7
15	23	987	16.0	17.4

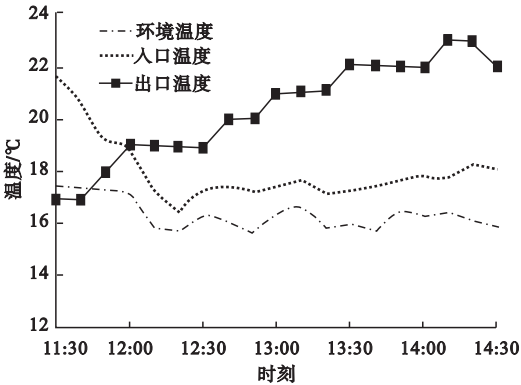


图13 集热器进出口温度变化

Fig. 13 Inlet and outlet temperature of heat collector
器进出水口的温差趋于恒定,温差保持在
1.5℃左右.

3.3 集热效率计算

现使用的国际太阳能集热器测试标准均采用稳态法来评价太阳集热器性能,但稳态法对试验条件要求很高,在室外试验的环境下很难达到测试要求.而已有的动态测试方法虽然使测试可在实际多变天气条件下进行,但对其他输入变量,如流经集热器的流

量、集热器入口温度等的限制依然存在.因此采用瞬时的稳态集热效率进行计算.

集热器在加热水的工况下使水温升高的那部分热量即为有效热量,则集热器的瞬时热效率 h 定义为一段时间内有效得热占太阳辐射总量的比例^[10-15]:

$$h = \frac{\int_{t_1}^{t_2} m \times c_m \, dt}{\int_{t_1}^{t_2} R \times A \, dt} \tag{1}$$

式中: m 为被加热水的质量; c_m 为工质的比热容; t_2 为出口处工质温度; t_1 为入口处工质温度; R 为太阳辐射强度; A 为集热器面积.对此积分式进行化简^[16-17],可得到太阳能集热器的效率计算式:

$$h = \frac{1\,000 \times G \times c_m \times (t_2 - t_1)}{R \times A} \tag{2}$$

式中: G 为工质流量.

结合所测数据代表值(见表1、表2),可以得到新型板式集热器的集热效率在循环工况下能达到28.3%,在直流工况下能达到43.1%.通过集热器在循环流工况下和直流工况下的效率对比可以发现直流工况下的集热效率远远大于循环流工况.主要原因是直流工况下采用更大流量,使得冷却水的流速增加,工质与壁面之间的对流换热效果增强,吸收散热器表面的热量增加,导致冷却水的热量增加随着冷却水流量的增加.而在循环流工况下是为了得到集热器的极限加热温度,采用小流量可以延长工质与吸热面的接触导热时间,便于工质的温度提升.

4 经济性分析

判断太阳能集热器优劣应包括热性能和经济性能两个重要指标.而太阳能集热器的经济效益应该包括社会效益和用户经济效益两方面.从长远发展以及国家政策来看,消费能源应从化石能源向可再生能源方向转移,太阳能的利用可有效减少原有化石燃料的应用,节省化学能的消耗,具有广阔的发展前景,具有良好的社会效益.用户经济效益的

大小体现在所消耗量和所得量的比例上. 当对比的两种技术方案的所得量均相同时, 则所消耗量较少的方案即为经济效果最好的最佳方案. 技术方案的消耗量中, 包括工程初投资和年经常维护费用两部分.

动态年计算费用法就是对参与比较的各个方案的初投资和经常维护费用这两项性质不同的费用, 利用投资效果系数这个折算比率, 将初投资折算成在使用期内的年折算费用, 然后二者相加, 计算出一个称为“年计算费用”的数值, 然后取年计算费用中最小的技术方案作为最件方案.

根据年计算费用法的基本概念, 利用动态分析法进行技术经济分析, 其经济模型为^[18-20]:

$$Z = \theta_g \times K + C = \frac{i \times (i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \times K + C. \quad (3)$$

式中: Z 为年计算费用; K 为初投资; i 为利率; n 为生产期(这里取集热器的寿命); C 为年经营费用; θ_g 为资金回收系数.

《建筑给水排水设计规范》(GB50015—2010)中提出有自备热水供应和沐浴设备的住宅的每人每日的最高日用水量定额为 40 ~ 80 L, 取其最小值 40 L. 按每户人数为 3 人, 热水器的进水温度和出水温度分别为 20 °C、45 °C 计算.

$$Q = c_p \times m \times (t_2 - t_1). \quad (4)$$

式中: Q 为热量; c_p 为水的定压比热容; m 为用水量; t_1 为水的初始温度; t_2 为水的终止温度.

由式(4)计算出每户用生活热水日均热负荷为 12 600 kJ.

辽宁地区民用电价 0.5 元/(kW·h), 普通电热水器、真空管式集热器、新型板式集热器价格按市场平均价格: 1 000 元、2 500 元、1 500 元计算. 默认真空管式集热器能满足每日所需用水量, 新型板式集热器每日提供热水 100 L, 其余部分由电加热作为辅助热源.

该新型集热器制作工艺简单, 制作材料廉价易得, 整套集热器制作成本较低. 相比于真空管式集热器, 制作成本可缩减 1/2 以上. 忽略利率项, 经过计算与普通电加热热水器相比, 真空管集热器的资金回收期为 857 d, 新型板式集热器的资金回收期为 343 d. 可见该新型板式集热器资金回收期更短, 具有更好的用户经济效益.

5 结 论

(1) 在循环流工况太阳辐射照度平均值 850 W/m² 的情况下, 新型板式集热器可加热热水的极限温度在 43 °C 左右.

(2) 在直流工况下, 新型太阳能集热器的瞬时集热效率为 42%. 并且在太阳辐射照度发生变化的情况下, 能持续提供相同热量, 具有一定蓄热能力.

(3) 该新型集热器具有良好的社会效益与经济效益, 资金回收期为 343 d, 与真空管集热器相比, 缩短资金回收时间.

参考文献

- [1] 朱冬生, 徐婷, 蒋翔, 等. 太阳能集热器研究进展[J]. 电源技术, 2012(10): 1582 - 1584.
(ZHU Dongsheng, XU Ting, JIANG Xiang, et al. Research progress on solar energy collector[J]. Chinese journal of power sources, 2012(10): 1582 - 1584.)
- [2] 吕世焱, 魏斯胜, 徐广强. 太阳能集热器在建筑结合中的应用[J]. 节能与环保, 2010(8): 50 - 51.
(Lü Shiyan, WEI Sisheng, XU Guangqiang. Application of solar energy collector in constructions[J]. Energy conversation and environment protection, 2010(8): 50 - 51.)
- [3] 魏生贤, 李明, 季旭, 等. 太阳能平板集热器件纵横比与板间距优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 184 - 189.
(WEI Shengxiang, LI Ming, JI Xu, et al. Aspect ratio and spacing optimization of a solar flat-plate collector unit[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2012, 28(14): 184 - 189.)
- [4] 张涛, 韩吉田, 闫素英, 等. 太阳能真空管的热性能分析与测试[J]. 山东大学学报工学版,

- 2014,44(4):76-83.
(ZHANG Tao, HAN Jitian, YAN Suying, et al. The analysis and testing of thermal performance on solar evacuated tube[J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2014,44(4):76-83.)
- [5] HU Chaofa, LI Jia. Experimental study on the start up performance of flat plate pulsating heat pipe[J]. Journal of thermal science, 2011(2): 150-154.
- [6] 彭运吉. 平板型太阳能集热器的研究进展[J]. 能源与节能, 2011(8): 5-7.
(PENG Yunji. Research progress of flat-plate solar collector[J]. Energy and energy conservation, 2011(8): 5-7.)
- [7] SUN Wei, HE Wei. Influence of channel depth on the performance of solar air heaters[J]. Energy, 2010, 35: 4201-4207
- [8] HUSSEIN H M S. Theoretical and experimental investigation of wickless heat pipes flat plate solar[J]. Collector with cross flow heat exchanger energy conversion & management, 2007(48): 1266-1272.
- [9] 胡小芳, 高文峰, 刘滔, 等. 平板型太阳能集热器的热损失分析[J]. 太阳能, 2015(8): 31-34, 61.
(HU Xiaofang, GAO Wenfeng, LIU Tao, et al. Thermal loss analysis of flat plate solar collector[J]. Solar energy, 2015(8): 31-34, 61.)
- [10] 季杰, 马进伟, 孙炜, 等. 一种新型双效太阳能平板集热器的光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(10): 1470-1474.
(JI Jie, MA Jinwei, SUN Wei, et al. Study of thermal performance of a novel dual-function flat plate solar collector[J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(10): 1470-1474.)
- [11] 刘建波. 太阳能集热器热性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
(LIU Jianbo. A research for the thermal performance of solar collector [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014)
- [12] 孔伟强, BENGT P, 李兴, 等. 一种新型太阳能集热器动态测试方法及试验验证[J]. 科学技术与工程, 2013(14): 3867-3872.
(KONG Weiqiang, BENGT P, LI Xing, et al. A new dynamic test method and experimental verification for solar collectors[J]. Science technology and engineering, 2013(14): 3867-3872.)
- [13] 东朝阳, 张明智, 耿士敏. 抛物槽式集热器热效率研究[J]. 节能, 2012(7): 28-32.
(DONG Chaoyang, ZHANG Mingzhi, GENG Shimin. Research on heat efficiently of solar parabolic trough collectors[J]. Energy conservation, 2012(7): 28-32.)
- [14] 李博佳. 新型太阳能空气集热器性能及其在村镇建筑中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
(LI Bojia. Performance and applications of novel solar air collectors for rural buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [15] 刘铭. 民用建筑太阳能热利用系统节能效益分析[D]. 北京: 清华大学, 2012.
(LIU Ming. Research on benefit analysis of solar thermal utilization system in civil buildings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.)
- [16] 李俊贤, 王辉涛, 王华, 等. 蛇形管平板式太阳能集热器的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2011(7): 1441-1446.
(LI Junxian, WANG Huitao, WANG Hua, et al. Experimental analysis of serpentine-flow flat-plate solar collector[J]. Science technology and engineering, 2011(7): 1441-1446.)
- [17] 丁刚, 左然, 张旭鹏, 等. 平板式太阳能空气集热器流道改进的试验研究和数值模拟[J]. 可再生能源, 2011(2): 12-15.
(DING Gang, ZUO Ran, ZHANG Xupeng, et al. Experimental investigation and numerical simulation on improvement of flat-plate solar air collector flow channels[J]. Renewable energy resource, 2011(2): 12-15.)
- [18] 李安桂, 石金凤, 杨乐辉, 等. 村镇住宅建筑太阳能供热系统术经济分析[J]. 太阳能学报, 2010(12): 1615-1621.
(LI Angui, SHI Jinfeng, YANG Lehui, et al. The technical and economic analysis of solar utilization system in residential buildings [J]. Acta energiae solaris sinica, 2010(12): 1615-1621.)
- [19] YANG Yongping, CUI Yinghong. Research on solar aided coal-fired power generation system and performance analysis[J]. Science in China, 2011, (8): 1211-1221.
- [20] 陈晓明. 南方住宅太阳能热水器的技术经济性分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
(CHEN Xiaoming. Techno-economic analysis of residential solar water heaters in south of China [D]. Hengyang: University of South China, 2013.)