

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.016

# 油品储运伴热软化水太阳能预热系统应用\*

焦汉兵<sup>1</sup>, 周剑秋<sup>2\*</sup>, 邓坤军<sup>2</sup>, 张大鹏<sup>2</sup>, 叶志雄<sup>3</sup>

(1. 中国石化集团 安庆石化港贮部工艺组, 安徽 安庆 246000; 2. 南京工业大学  
机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009; 3. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为解决原油输送过程中易结蜡, 不易流动的问题, 利用太阳能代替部分传统能源对工业锅炉 24 h 给热, 提供伴热软化水, 实现了能源消耗的降低和环境保护。提出了油品储运伴热软化水太阳能预热系统, 该系统主要应用于场地受限、高热值、高能耗及高污染工业上, 具体表现为将太阳能高效集热装置、储热设备与工业锅炉进行结合改造, 为锅炉提供预热软水, 并且结合相变储热原理以满足出水温度达到工业要求, 保证锅炉太阳能集热器完整、连续地运行。在理论研究的基础上, 展开了大量的实验, 实验结果验证了该系统的可靠性。研究表明, 预热系统在日间日照充足时, 集热效率高, 相变蓄热器具有较好地蓄热和放热效果, 放热时间能持续 5 h~7 h 以上, 满足了原油输送过程对热水的需求。

**关键词:**太阳能; 预热系统; 相变蓄热; 节能环保

中图分类号: TK9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)11-1369-04

## Applications of solar preheating system for oil storage and transportation with thermal softened water

JIAO Han-bing<sup>1</sup>, ZHOU Jian-qiu<sup>2</sup>, DENG Kun-jun<sup>2</sup>, ZHANG Da-peng<sup>2</sup>, YE Zhi-xiong<sup>3</sup>

(1. Process Group of Anqing Petrochemical Storage Department, Sinopec Group, Anqing 246000, China;  
2. College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;  
3. Department of Mechanical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at keeping the flowability of crude oil transmission and avoiding wax precipitating, traditional energy can be replaced by solar energy to heat industrial boiler, which could provide the preheating softened water to industrial boiler and reduce the energy consumption and environmental pollution. The solar preheating system for oil storage and transportation with thermal softened water was proposed, which mainly applied to industry with limited space, high calorific value, high energy consumption and high pollution. The definite performance of the system was designed to renovate industrial boiler with the combination of solar collector and heat storage equipment to offer the preheating softened water. The latent heat storage theory was used to satisfy outlet water temperature reaching the industry requirement, and keep boiler solar collector running completely and continuously. On the basis of theoretical research, many experiments were done to test the reliability of the preheating system. The results indicate that the preheating system is of high heat collecting efficiency and the latent heat storage device is of great heat storage and rejecting in sunny day, which could persist heating more than 5~7 hours to supply the boiled water for industrial requirement.

**Key words:** solar power; preheating system; latent heat storage device; energy conservation and environment protection

收稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872087); 霍英东青年教师基金资助项目(101005); 湖北省优秀中青年人才资助项目(Q20111501)

作者简介: 焦汉兵(1966-), 男, 安徽安庆人, 主要从事给水、排水工程及节能材料开发等方面的研究. E-mail: jiaohb.aqsh@sinopec.com

通信联系人: 周剑秋, 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: yzjqcc@sohu.com

# 0 引 言

目前,日益紧迫的能源形势对开发新能源技术和进一步开发利用可再生能源提出了迫切要求。太阳能是地球上一切能量的主要来源,它是无穷无尽、无公害的清洁能源,也是 21 世纪以后人类可期待的最有希望的能源。利用太阳能技术加热重油以替代部分常规能源,在节能降耗及绿色环保方面具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

人类在将太阳能作为一种能源和动力加以利用方面已有 300 年的历史。真正将太阳能作为“近期急需的补充能源”及“未来能源结构的基础”则是近年来的事。近年来,太阳能科技突飞猛进,太阳能利用日新月异<sup>[3-4]</sup>。我国的太阳能热利用生产和使用已经成为全球第一,虽然大部分集中在光伏发电、太阳能电池及民用建筑太阳能热水器<sup>[5-8]</sup>等方面,但近年来在工业领域上的应用也逐渐全面开花,如太阳能在空调制冷、采暖、海水淡化、工业用热、农业烘干等领域的工程化、产业规模化都达到了一个新的高度,节能效果显著。

另一方面,我国正在向工业化国家迈进,在大力发展工业的同时又必须顾及社会和环境资源的约束,如何实现又快又好地发展是摆在我国面前的一个重大挑战<sup>[9]</sup>。石化行业是我国着力打造的支柱产业,石油和石化行业的一个共性问题凝点高、粘度大的原油在

输送过程中必须进行加热与保温,以保持原油的良好流动性,防止结蜡<sup>[10-11]</sup>。为保证原油 24 h 具有较好的流动性,石化企业通常采用工业锅炉 24 h 给热,极大消耗了煤和天然气资源,企业经济代价和社会环境代价非常沉重,因而这方面的节能减排工作刻不容缓。

在对石化设备和太阳能技术进行并行研究的基础上,本研究提出用太阳能替代部分常规能源来预热软水,以减少大量的能源消耗,主要研究太阳能光热技术在场地受限、高热值、高能耗及高污染工业上的应用。将太阳能高效集热装置、储热设备与工业锅炉进行结合改造,为锅炉提供预热软水,并且结合相变储热原理以满足出水温度达到工业要求,以保证锅炉太阳能集热器完整、连续运行。

## 1 工艺与设备

系统流程如图 1 所示。该太阳能预热锅炉软水系统由以下子系统组成:高效太阳能热水系统、太阳能高效蓄热系统(包括热水储罐及相变蓄热器)及空气源热泵系统。其中太阳热水系统由高效集热器阵列、循环泵和自动控制阀门等通过管道连接而成。而太阳能高效蓄热系统的构成主要包括高效保温热水储罐、石蜡相变蓄热装置、阀门及控制系统等。

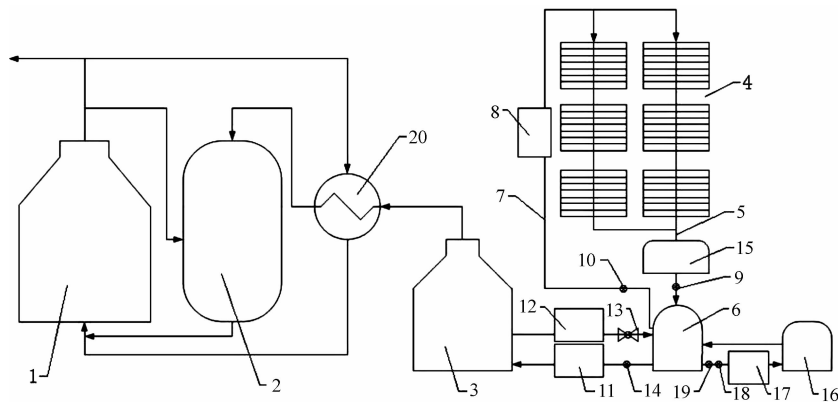


图 1 工艺流程图

- 1—锅炉;2—除氧设备;3—软水水箱;4—太阳能集热器;5—热水管;6—储热水箱;7—供水管;8—供水泵;9—热水温控器;10—供水温控器;11—出水泵;12—补水泵;13—液位计;14—出水温控器;15—相变储热器;16—空气源热泵;17—循环水泵;18—高温温控器;19—低温温控器;20—换热器

系统工作时,各子系统在与数据采集系统和自动控制系统的总体控制中协调工作。锅炉软水水箱中的软水首先通过储热水箱补水泵向储热水箱补水。其中储热水箱补水泵的开停由中央控制系统所控制。储热水箱中的软水进而通过太阳能系统温差循环水泵控制,输送到串联太阳能集热器阵列中进行加热。该温差强制循环系统通过设在相变蓄热器末端出口处的一

个测温点和储热水箱内软水热源端温控传感器之间的温差数据来控制循环泵的工作与否,使集热器的热水与保温水箱的水进行交换,往复多次,从而加热并保温储存。在太阳辐射量大约为 15.3 MJ/m<sup>2</sup>,环境温度为 8℃~12℃下,水箱中的热水在使用时可达 40℃~60℃。夜晚,太阳能集热阵列失去加热功能,这时由于相变蓄热器在白天存储了一部份热源,此时可以替

代太阳能阵列对软水进行加热,从而实现一天 24 h 的连续工作。

为了满足热水全天候的需求,相变蓄热器<sup>[12-13]</sup>在整个太阳能预热系统中起到了至关重要的作用。其结构如图 2 所示,该装置用水作为导热介质,由相变蓄热单元蓄热及放热盘管完成放热。热水由太阳能集热阵列出口进入蓄热装置中加热蓄热单元,首先靠近蓄热单元壁面处蓄热材料开始熔化,熔化层达到一定厚度时,因温度梯度及密度差的存在,液态中必产生自然对流效应,这使其传热能力大大增强。蓄热单元中的相变材料在某一温度下由固态变为液态,使热能转化为蓄热材料的潜热储存起来。当需要热能时,冷水通过相变蓄热装置中的放热盘管,由导热介质通过放热盘管对水加热,达到用户用热要求。而蓄热单元内靠近壁面的液体凝固,随着放热的进行,液相和固相界面渐渐远离壁面,最终,蓄热材料全部由液态变为固态。

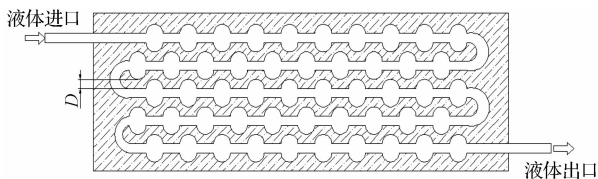


图 2 相变蓄热器结构示意图

本研究采用波纹管作为换热盘管,将相邻两排波纹管的波节互相错开。这样,除管内水流发生紊流以强化传热外,管外波节与直管之间、波节与波节斜线之间的距离保持在一个相对较薄的距离,且这些距离多方位的呈空间布局,有助于石蜡发生均匀相变和热传导。同时由于波节部位外和直管部位外传热效果有差异,导致不同部位石蜡温度有差异,这种空间部位的不同及不同温度将进一步强化液态石蜡的自然对流效应。同时也能多方位强化固态石蜡之间的热传导,从而克服其导热系数低的问题。

## 2 系统运行

该太阳能热水供应系统自 2012 年 11 月开始运行以来,基本运转正常,水质、水温和水量都符合生产工艺的要求,经济效益明显。软化水装置的处理水量和出水硬度都符合技术规范的要求。通过比较并联与串联太阳能热水系统性能的运行利弊,本研究采用串联方式。其优势在于即使是晴天都不需要其他的能量来补充完善该太阳能集热系统。

根据《民用建筑太阳能热水系统应用技术规范》,集热器出水温度为:

$$t_{\text{end}} = \frac{A_c J_T \eta_{cd} (1 - \eta_L)}{Q_w C_w f} + t_i \quad (1)$$

式中: $t_{\text{end}}$ —集热器出水温度; $A_c$ —直接系统集热器采光面积; $J_T$ —当地的年均日太阳辐射量; $\eta_{cd}$ —集热器年均热效率; $\eta_L$ —储水箱及管路的热损失率,根据标准规定,取 20% ~ 30%; $Q_w$ —日均用水量; $C_w$ —水的定压比热容; $f$ —太阳能保证率,考虑到太阳能不稳定的因素而制定的参数,取 0.36; $t_i$ —水的初始温度。

根据实验所需的参数,通过计算, $t_{\text{end}}$ 为 50 ℃,换热管根数为 1 000 根,为 20 组。在实际测量场地时发现可以安装 22 组太阳能集热模块,集热器明细如表 1 所示。为了满足晚上和阴雨天气的热量需求,本研究采用一台型号为 JTZ-3.0 的空气源热泵作为辅助热源。太阳能集热模块每组占地 2 200 mm × 3 800 mm,每台运行重量 200 kg,加上支架重量,每平方米载荷增加约 31 kg。本研究在 2012 年 11 月 22 日 ~ 12 月 6 日进行了油品储运伴热软化水太阳能预热系统的连续运行实验,中间经历晴天、雨天、多云和少云的天气。实验数据表明,在晴天和少云的天气下,太阳能集热阵列的温度白天(上午 9 点至下午 5 点)始终处于 40 ℃ ~ 80 ℃。其中根据 2012 年 11 月 27 日和 11 月 29 日的实验数据和天气条件,做出的实验数据分析如图 3、图 4 所示。这 2 天的系统执行工艺为:

- (1) 集热器与储热水箱温差循环,温度差 5 ℃;
- (2) 软水进水,根据储热水箱水位增补;
- (3) 热软水给水,根据储热水箱温度设定,设定标准为 60 ℃;
- (4) 空气能循环加热值,根据储热水箱温度低于 50 ℃启动;
- (5) 相变蓄能设备,根据集热器与储热水箱温度差充放能量,当集热器与储热水箱温度高于蓄能箱温度时开始蓄能,低于放能;
- (6) 相变材料特性,高于 58 ℃由固变为液态,低于 58 ℃由液态变为固态。

表 1 集热器明细表

型号	产热量 /(L · h <sup>-1</sup> )	额定功率 /kW	制热量 /kW	外形尺寸
TFS-SKR840 (S)B	840	12	36	1 400 × 660 × 1 460

从图 3、图 4 可以看出,上午有太阳的时候集热器内出水的温度会迅速上升,升温速度达到 11.5 ℃/h,相变蓄热器出口的水温也在上升,当下午无日照,太阳能集热器内的温度快速回落,相变蓄热器出口的水温也跟随其后回落,但是很短一段时间后,相变蓄热器内

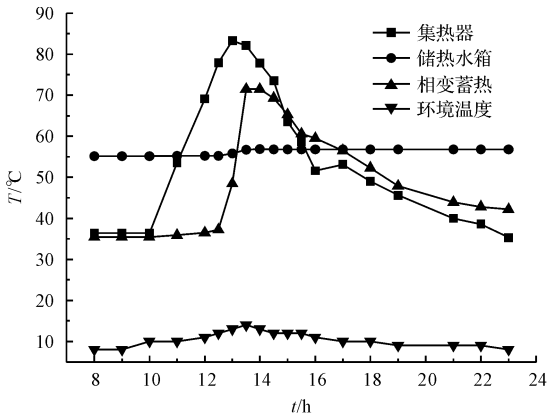


图 3 11 月 27 日太阳能阵列/储热水箱/蓄热器温度比较图

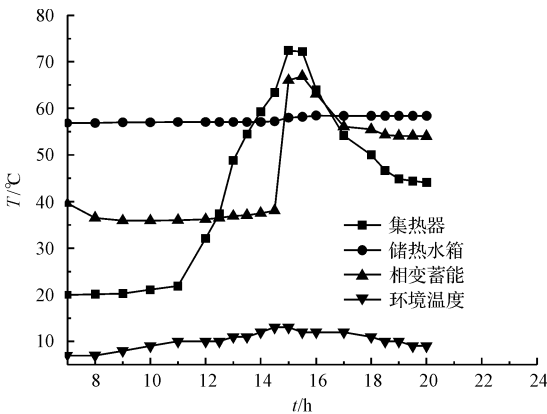


图 4 11 月 29 日太阳能阵列/储热水箱/蓄热器温度比较图

的水温反超太阳能集热器内的水温,表明在这一温度点位,相变蓄热器已由前面的蓄热过程转为放热。储热水箱内的水温在上午经历了小幅的升温,主要是由预先开启的空气源热泵贡献的,下午经过太阳能集热阵列加热后由于温升时间短且储热水箱水量较大,温升有限。下午集热阵列温度回落后,储热水箱内的水温基本保持不变,主要原因有两点:①太阳能集热阵列的温度与储热水箱内的水温之间很快就没有温差,甚至太阳能集热阵列的温度低于储热水箱内的水温及蓄热器出口的水温,导致两者之间停止循环;②储热水箱向软水箱提供热水的门槛温度略高(60℃),导致储热水箱与软水箱之间也停止了循环。

### 3 结束语

本研究提出了关于油品储运伴热软化水太阳能预热系统方案。在实验室测试结果的基础上,对开发的

油品储运伴热软化水太阳能预热系统进行连续运行,并且首次运用波纹管作为换热盘管的相变蓄热器进行运行,运行结果表明,该相变蓄热器具有较好地蓄热和放热效果,放热时间能持续 5 h~7 h 以上,满足工业对热水的需求。为促成系统加快循环供应热水,实验发现储热水箱内的放水水温应设定为 40℃ 持续放水。同时,空气源热泵的选择非常有必要。它的出现可以使太阳能集热阵列在上午温升阶段减少它的温升包袱(减小对储热水箱的供应量),从而使太阳能集热阵列的温升能够很快达到 80℃~90℃,进一步带动相变蓄热器产生高质量相变,为下午无日照的持续放热奠定很好的基础。发展和研究工业太阳能技术相关技术是今后主要的科学研究方向之一,太阳能光热技术和装置的工业化运用,也必将带动相关工业技术的发展,为其他方面科学技术和装置设备提供发展助力。

### 参考文献 (References) :

- [1] 苏润西. 太阳能海水淡化技术[J]. 海洋技术, 2002, 21(4): 27-32.
- [2] 李建海. 太阳能的开发与我国的可持续发展[J]. 兰州教育学院学报, 2003(3): 45-48.
- [3] 潘铭航, 苏秀蓉, 王正仕. 基于反激拓扑的高效率太阳能微型单级并网逆变器[J]. 机电工程, 2013, 30(4): 485-491.
- [4] 朱海龙, 吴开华, 赵伟杰. 模糊控制在太阳能自动灌溉系统中的应用[J]. 机电工程, 2012, 29(11): 1310-1313.
- [5] 吴卫熊, 何令祖. 太阳能光伏技术在广西水利应用推广前景分析[J]. 广西水利水电, 2012(2): 87-89.
- [6] 杨志勇. 当前国内外建筑中太阳能能源利用的现状分析[J]. 土木建筑学术文库, 2012, 16(1): 464-465.
- [7] 罗彤彤, 方志刚, 卢亚平, 等. 太阳能在工业生产中的应用[J]. 采矿技术, 2008, 8(3): 84-85.
- [8] 裴 坤, 孔晓玲, 段凤江, 等. 太阳能蒸汽热风干燥技术的研究[J]. 包装与食品机械, 2012(1): 10-13.
- [9] 张思锋, 张 颖. 对我国循环经济研究若干观点的述评[J]. 西安交通大学学报, 2002, 22(3): 25-29.
- [10] 赵 炜. 原油生产与运输过程中的结蜡问题[J]. 世界石油工业, 1995(12): 48-52.
- [11] 高长虹. 海洋石油管线结蜡规律的实验研究[J]. 钻采工艺, 2007(1): 111-113.
- [12] 王爱辉, 金苏敏. 太阳能空调蓄热水箱特性研究[J]. 流体机械, 2012, 40(3): 80-84.
- [13] 李小玲, 马贵阳. 太阳能相变蓄热系统在空调制冷中的应用研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2008, 28(4): 39-43.

[编辑: 洪炜娜]

### 本文引用格式:

焦汉兵, 周剑秋, 邓坤军, 等. 油品储运伴热软化水太阳能预热系统应用[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1369-1372.

JIAO Han-bing, ZHOU Jian-qiu, DENG Kun-jun, et al. Applications of solar preheating system for oil storage and transportation with thermal softened water [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11): 1369-1372.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>