

太阳能加热原油系统设计及热力学性能分析

林长华¹, 李 洋^{1,2}, 陈红伟¹, 钱伟强¹, 邓连军³

(1. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 恒泰艾普(盘锦)企业发展有限公司, 辽宁 盘锦 124000)

摘 要: 能源短缺和环境污染问题一直是世界所关注的热点。采用油、气、电加热原油, 不仅能耗高, 而且环境污染严重, 太阳能作为一种可持续发展的清洁能源, 已成为各国关注的焦点。为此, 设计了一套太阳能加热原油系统, 选择了安全且易获得的空气作为传热流体。太阳能加热原油系统由太阳能吸热器、蓄热器、原油换热器以及电热炉组成, 吸热器接收太阳辐射后温度上升, 空气经过吸热器获得高温, 高温空气进入换热器中加热原油。建立了用于太阳能加热原油系统热力学性能分析的数学模型, 并对模型进行了验证; 利用 Aspen Plus 软件对加热过程进行了热力学分析。结果表明, 压缩机和预热器是熵损较大的部件, 当压缩机的压比达到 2.7 时, 太阳能加热原油系统达到最佳状态; 在最佳状态下, 太阳能加热原油系统的热效率为 72.35%, 熵效率为 73.89%, 余热回收效率为 72.33%。

关键词: 太阳能; 原油; 热力学; 模拟; 性能分析

中图分类号: TE08; TK123

文献标志码: A

doi:10.12422/j.issn.1672-6952.2023.01.008

Design and Thermodynamic Performance Analysis of Solar Heating Crude Oil System

Lin Changhua¹, Li Yang^{1,2}, Chen Hongwei¹, Qian Weiqiang¹, Deng Lianjun³

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

3. LandOcean (Panjin) Enterprise Development Co., Ltd., Panjin Liaoning 124000, China)

Abstract: Energy shortage and environmental pollution have always been the focus of the world's attention. The use of oil, natural gas, and electricity to heat crude oil has high energy consumption and serious environmental pollution. Solar energy, as sustainable and clean energy, has become the focus of researchers from all over the world. Thus, a solar heating crude oil system was designed, and safe and easily available air was selected as the heat transfer fluid. The system consists of a solar receiver, a heat accumulator, a crude oil heat exchanger, and an electro-thermal furnace. The heat receiver receives solar radiation and the temperature rises. The air passes through the heat absorber to obtain high temperature, and the high temperature air enters the heat exchanger to heat the crude oil. A mathematical model for the analysis of the thermodynamic performance of the solar heating crude oil system was established, and the model was verified. Then, the Aspen Plus software was used to conduct thermodynamic analysis of the heating process. The results show that the compressor and the preheater are the components with large exergy loss. When the pressure ratio of the compressor is 2.7, the system reaches its best state. At this situation, the thermal efficiency is 72.35%, the exergy efficiency is 73.89%, and the waste heat recovery efficiency is 72.33%.

Keywords: Solar energy; Crude oil; Thermodynamics; Simulation; Performance analysis

目前, 能源与环境问题成为世界关注的热点, 成了很多危害^[1-2]。太阳能分布广泛, 清洁无污染, 以化石燃料为一次能源的能源利用方式给环境造 已经成为人类社会解决能源危机、寻找化石燃料替

收稿日期: 2022-03-22 修回日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52006094); 辽宁省教育厅科学研究项目(L20200045, L20200046); 抚顺市“抚顺英才计划”项目(FSYC202107007)。

作者简介: 林长华(1996-), 男, 硕士研究生, 从事油气采输中清洁能源利用方面的研究; E-mail: linchanghua0626@163.com。

通信联系人: 李洋(1991-), 男, 博士, 副教授, 从事油气储运智能检测、油气田开发、航天器热推进等研究; E-mail: liyang@lnpu.edu.cn。

代品、减少环境污染、缓解温室效应等问题的有效途径之一^[3-5]。重质原油在开采、集输以及处理过程中需要消耗大量能源,据相关统计,在油田生产中至少有 20% 的能耗用于原油的加热与处理,我国石油炼制工业所消耗的燃料油占燃料油总消耗量的 15%,环境污染和能耗问题日趋严重^[6]。

将高效清洁的太阳能引入石油行业中,对降低原油生产成本、提高油田的经济效益、实现节能降耗和绿色环保有非常重要的意义^[7]。A. A. Mohamad^[8]设计了一种集储热和热转换装置于一体的太阳能热二极管中低温集热装置,并在巴基斯坦某炼油厂进行了试验。结果表明,采用太阳能热二极管技术后,可保持油品输送温度高于 60℃。J. Lasich 等^[9]将太阳能集热技术成功应用于阿曼、印度尼西亚等国家的原油管道,增加了原油输量,达到了管道伴热的效果,证实了太阳能加热系统的可行性。M. Abdibattayeva 等^[10]利用碟式太阳能集热器,通过实验的方法确定了输油管道的最佳输送参数,设计了一套太阳能加热原油系统,解决了将太阳能用于管道高压输油的问题,提高了管道的输油率 3%~50%。国内相关研究开展较晚,江苏油田采用太阳能辅助电加热技术后,井口原油温度达到 57~60℃,进站油温达到 50℃左右^[11];华北油田公司也在积极探索太阳能光热技术在油气田领域中应用的可行性,目前已在冀中、二连油区的一些边缘井站安装 30 多套太阳能加热装置^[12]。除上述报道外,大港油田、长庆油田等均开发了小规模太阳能热水系统,部分取代常规能源解决了油罐或管输的供热问题,结果表明节能效果显著^[13-14]。

为了降低原油黏度,提高原油管道的输送能力,利用具有高效光热转换效率的太阳能集热器进行聚光、集热,选择易获得的空气作为传热介质,结合蓄热、辅热装置,设计了一套可全天候服役的太阳能加热原油系统,并对其进行了热力学性能评价。结果表明,整体上拟建立的太阳能加热原油系统热效率、烟效率和余热回收效率都达到了 70% 以上,与现有同类系统相比,效能有较大幅度的提高^[15]。研究结果可为油田和油气集输领域的原油加热提供一定指导。

1 太阳能加热原油系统设计

以往的加热系统都是以水、导热油或其他介质加热原油^[16-19],这样的加热方式不仅结构单一、成本高、热效率低,而且介质在运输过程中易结垢、结焦,给系统运行造成很多安全隐患。因此,该加热系统选择易于获得且足够安全的空气作为传热介质,结

合太阳能集热技术、电制热技术和储能供热技术,在保证系统安全运行的前提下,既可以提高系统热效率,又可以实现全天候不间断地服役运行。

太阳能加热原油系统主要由集热、蓄热、供电、预热、热交换、辅助热源、计算机控制等 7 个子系统组成^[20],如图 1 所示。

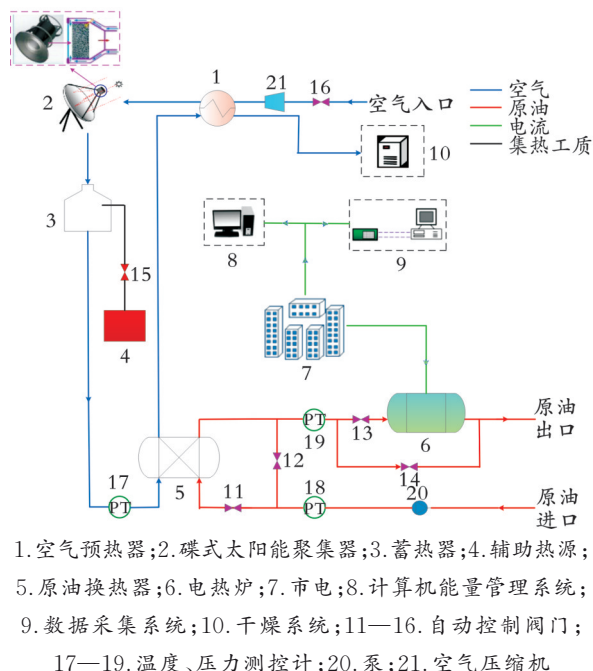


图 1 太阳能加热原油系统示意图

太阳能加热原油系统采用间接加热的方式,运用工业计算机过程控制算法,实现在各种外界环境变化(太阳辐射强度、原油流量、气温变化等)的情况下对原油加热的恒温控制,实现高度自动化、智能化的安全稳定运行,加热的具体流程如下。

(1)在太阳辐射正常的情况下,利用太阳能集热器加热,此时蓄热器蓄热。打开自动控制阀门(阀门,下同)11、14 和 16,关闭阀门 12、13 和 15。空气经过空气压缩机 21 进入碟式太阳能聚光器 2 中,高倍聚光光斑落入集热接收器内被换热工质(空气)转化为热能,空气将热量带出后进入蓄热器 3,经放热/稳温后热空气进入原油换热器 5 中与原油进行换热,原油换热器出口空气进入空气预热器(预热器,下同)1 中预热新进入系统的冷空气。预热器出口的空气还带有一定的热量,可以供给干燥系统 10。原油和空气在换热器中充分换热后,经过温度、压力测控计 19 判断原油温度是否达到标准,若原油温度过高,则减小阀门 16 的开度,从而减少空气带入换热器中的热量,使原油温度降低;若温度过低,则可打开阀门 13,原油经过电热炉 6 继续加热,使其达到标准后再往外输送。

(2)在夜间或遇到阴雨天气时,利用蓄热器进

行加热,此时蓄热器放热。打开阀门 11、15 和 16,关闭阀门 12 和 13。由于蓄热器 3 释热能力有限,一方面通过电制热技术,将电能转换为热能,或利用辅助热源 4 为蓄热器补充热能;另一方面,利用正常太阳辐射条件下蓄热器中储存的热量,气体经过蓄热器后获得高温,进而通过换热持续加热原油。同样,若原油温度过高,则可减小阀门 16 的开度,使原油温度降低;若原油温度较低,则可打开阀门 13,利用电热炉对原油进一步加热。蓄热器对太阳能供给与需求在时间、数量上的不均衡问题具有很好的调节能力,并能缩短整个供热系统的启动时间,使之快速地运行起来,实现跨季节、跨昼夜的光热利用。该系统还设计了辅助热源,主要用于在紧急情况下对蓄热器进行加热,确保系统稳定持续运行。

(3)当环境极端恶劣时,太阳能集热器和蓄热器停止工作,主要利用市电对原油进行加热。关闭阀门 11、14、15 和 16,打开阀门 12 和 13,原油直接进入电热炉内利用市电进行加热。在太阳能正常的情况下,太阳能集热器可实现大部分甚至是全部的加热任务,但是在极端恶劣的气候条件下,为了保证采油站仍能正常工作,电热炉加热部分与市电供电系统串联,在其他加热方式不能满足加热要求时切入市电加热。

整个系统的流程控制、逻辑条件判断、数据存储等由计算机能量管理系统完成。被加热的原油流出时,系统判断原油温度是否符合生产要求,若符合生产要求则原油外输;若温度低于生产要求,则开启电热炉对原油进行加温,使原油在电热炉内二次加热,实现恒温控制,直到原油温度符合要求再外输。高度自动化以及智能化的加热方式,以及将光能和电能有效结合,使该系统安全、稳定、高效地运行,全方位提高系统的热效率。

2 太阳能加热原油系统热力学分析

2.1 模拟条件

太阳能加热原油系统采用碟式聚光技术,该形式的聚光技术比槽式和塔式的聚光效率高,聚光比一般为 500,欧美国家已经研制出聚光比为 1 200 的聚光器^[21]。因此,假设从多孔介质吸热器出来的气体温度已达到 1 300 K^[22],通过 Aspen Plus 软件对该系统的主要加热方式进行热力学分析。模拟时原油被视为虚拟组分(实沸点信息见表 1),空气压缩机的等熵效率和机械效率分别为 85.00% 和 90.00%,泵的效率为 80.00%,压缩机压比(压比,下

同)为 4,原油换热器和预热器的最小传热温差为 5 ℃^[23-24]。选择适用于原油模拟的 BK10 物性方法,收敛算法为 WEGSTEIN。太阳能加热原油系统主要加热方式流程图如图 2 所示。原油进油流量取 5 kg/s,空气进气流量取 10 kg/s,进口温度为 20 ℃。

表 1 原油的实沸点收率与 API 度

沸点范围/℃	收率/%	API/(°)
200~<225	4.19	33.2
225~<250	6.19	30.3
250~<275	8.98	27.7
275~<300	12.31	25.0
300~<325	15.62	24.1
325~<350	18.73	22.2
350~<375	23.18	19.9
375~<400	27.49	17.9
400~<425	32.35	17.2
425~<450	37.31	16.2
450~<475	43.72	15.2
475~<500	49.46	14.4

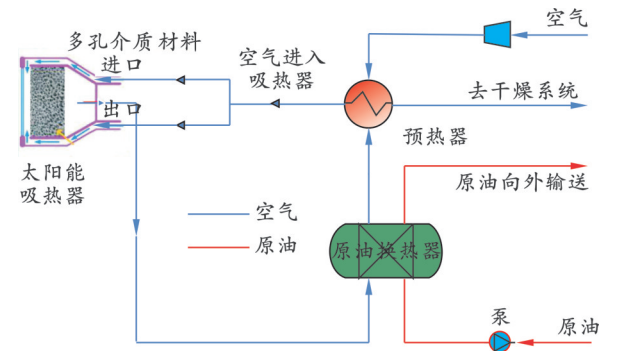


图 2 太阳能加热原油系统主要加热方式流程图

假设空气为由 N₂ 和 O₂ 组成的二元混合物,不考虑空气中的水蒸气、CO 等物质对系统热力过程造成的影响;不考虑空气在管路中流动的压力损失和系统中各设备及管路的散热损失;环境温度为 10 ℃,压力为 0.1 MPa;按静态模拟,不考虑时间对工况的影响^[25-26]。

2.2 热力学模型

采用焓分析的方法对该系统进行详细分析。焓分析时考虑有效能以及热力学的不可逆性等因素,可以找出太阳能加热原油系统中主要的焓损过程。系统评价指标包括热效率、焓效率和余热回收效率,各部分的数学模型如下^[27-29]。

系统的净输出功率定义:

$$W_{\text{net}} = Q_{\text{sol}} - W_{\text{Pump}} - W_{\text{Comp}} \quad (1)$$

式中, W_{net} 为净输出功率, kW; Q_{sol} 为吸收太阳能功率, kW; W_{Pump} 为泵耗功率, kW; W_{Comp} 为空气压缩机

耗功率, kW。

对稳态控制体, 忽略动能和势能, 焓平衡方程为:

$$\sum_j Ex_j^{\text{in}} + Ex_Q = \sum_j Ex_j^{\text{out}} + W_{\text{out}} + Ex_d \quad (2)$$

式中, Ex_j^{in} 为控制体进口流体的焓, kW; Ex_j^{out} 为控制体出口流体的焓, kW; W_{out} 为控制体输出功率, kW; Ex_d 为控制体内部焓损, kW; Ex_Q 为进入控制体的热量焓, kW。热量焓可以表示为:

$$Ex_Q = (1 - T_0/T) Q_{\text{sol}} \quad (3)$$

式中, T 为太阳能接收器的温度, °C; T_0 为环境温度, °C。

工质流体的物理焓 Ex_j^{phys} 为:

$$Ex_j^{\text{phys}} = m [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \quad (4)$$

式中, m 为某一流股的质量流量, kg/s; h_i 为某一流股的比焓, kJ/kg; s_i 为某一流股的比熵, kJ/(kg·K); h_0 为参考状态下的比焓, kJ/kg; s_0 为参考状态下的比熵, kJ/(kg·K)。

系统输入焓 Ex_{inp} 定义为:

$$Ex_{\text{inp}} = Ex_Q + W_{\text{pump}} + W_{\text{comp}} \quad (5)$$

焓损率是用来描述系统中某部件的焓损在整个系统总焓损的占比, 其表达式为:

$$\xi = \sum Ex_{d,i} / \sum Ex_d \quad (6)$$

式中, $\sum Ex_{d,i}$ 为系统中某个部件的焓损, kW; $\sum Ex_d$ 为系统的总焓损, kW。通过焓损可以找出系统焓损比例较大的一些部件, 从而改进相应部件的结构参数等, 以提高系统效率。

整个系统的焓效率为:

$$\eta_{\text{ex}} = Ex_Q / Ex_{\text{inp}} \quad (7)$$

系统的热效率定义为:

$$\eta_{\text{th}} = W_{\text{net}} / Q_{\text{sol}} \quad (8)$$

气体在换热器中加热原油后进入预热器中预热冷空气, 从预热器出来的气体还带有一定的热量, 其占系统总输入能量的数值即为系统余热回收效率:

$$\eta_r = Q_u / Q_{\text{sol}} \quad (9)$$

式中, Q_u 为系统未被利用的能量, kW。

焓效率用来表征系统各个部件的可逆性能, 各部件的焓损及焓效率计算公式见表 2^[27-29]。

表 2 各部件焓效率及焓损计算公式

部件名称	焓损	焓效率
压缩机和泵	$Ex_{\text{loss}} = \sum_j Ex_j^{\text{out}} - \sum_j Ex_j^{\text{in}} - W_i$	$\eta_{\text{ex}} = (\sum_j Ex_j^{\text{out}} - \sum_j Ex_j^{\text{in}}) / W_i$
预热器和换热器	$Ex_{\text{loss}} = \sum_j Ex_{j,h}^{\text{in}} + \sum_j Ex_{j,c}^{\text{in}} - \sum_j Ex_{j,h}^{\text{out}} + \sum_j Ex_{j,c}^{\text{out}}$	$\eta_{\text{ex}} = (\sum_j Ex_{j,h}^{\text{out}} - \sum_j Ex_{j,c}^{\text{in}}) / (\sum_j Ex_{j,h}^{\text{in}} - \sum_j Ex_{j,h}^{\text{out}})$
太阳能吸热器	$Ex_{\text{loss}} = \sum_j Ex_j^{\text{in}} - \sum_j Ex_j^{\text{out}} - Ex_Q$	$\eta_{\text{ex}} = (\sum_j Ex_j^{\text{out}} - \sum_j Ex_j^{\text{in}}) / Ex_Q$

注: W_i 为控制体所消耗的功; $Ex_{j,h}^{\text{in}}$ 、 $Ex_{j,c}^{\text{in}}$ 分别为热流体与冷流体进口的焓; $Ex_{j,h}^{\text{out}}$ 、 $Ex_{j,c}^{\text{out}}$ 分别为热流体与冷流体出口的焓。

2.3 模型验证

为了证明所建立的热力学评价模型的可靠性, 利用文献[30]中的模型与本文模型的结果进行了对比, 结果见表 3。计算时采用的所有参数均与文献模拟条件一致。由于文献[30]中未给出余热回收效率, 因此只对系统热效率和焓效率进行对比验证。由表 3 可以看出, 本文计算结果与文献[30]的计算结果相对误差的最大值仅为 1.96%。因此, 可以认为本文建立的热力学评价模型是可靠的。

表 3 模型的验证结果

模型	热效率/%	焓效率/%
本文	86.43	84.96
文献[30]	84.74	84.58
相对误差/%	1.96	0.45

2.4 模拟结果分析

利用 Aspen Plus 软件对加热系统进行模拟, 通

过软件中自带的模块, 设置合适的参数, 可以方便地模拟系统整体的运行状态。当太阳能集热器的最高温度一定时, 影响系统效率的主要因素就是压比, 因此主要分析压比对系统效能的影响。

压比对太阳能加热原油系统评价指标的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出, 随着压比的增大, 太阳能加热原油系统热效率和焓效率逐渐减小, 这主要是因为随着压比的增大, 压缩机出口的空气温度也在逐渐升高, 当太阳能集热器的最高温度一定时, 其所吸收的太阳能热量就会减少; 余热回收效率随着压比的增大不断升高, 这是因为从压缩机流出的空气携带的热量传给未被利用的空气中的热量在不断增加, 因此系统的余热回收效率随着压比的增大不断升高。系统热效率减小的同时余热回收效率增加, 这正是系统热能利用的规律所在, 即未在上个系统中利用的能量还能在下个系统中继续被利用, 达到能量的高效使用, 减少有效能的损失。进一步观察

可以看出,当压比为2.7左右时,余热回收效率、系统热效率和烟效率同时达到一个较高值,该压比即为系统的最佳压比,此时系统的热效率为72.35%,烟效率为73.89%,余热回收效率为72.33%。

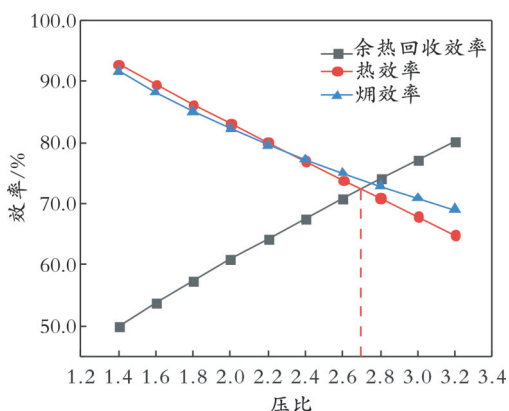


图3 压比对太阳能加热原油系统评价指标的影响

压比对太阳能加热原油系统各部件烟损率的影响如图4所示。由图4可以看出,压缩机的烟损率随着压比的增大不断增大,这是因为随着压比的增大,压缩机的耗功也在不断增加,因此太阳能加热原油系统主要的烟损来自压缩机;其次,烟损率变化较大的部件为预热器。据此可以得出,若要进一步提高太阳能加热原油系统的效率,则需要降低压缩机和预热器的烟损。经计算可知,当压比从1.4提高到3.2时,太阳能加热原油系统总烟损从2 324.77 kW增加到3 723.50 kW。由图4还可以看出,集热器和换热器的烟损率随着压比的增大逐渐减小,但减幅较小,且集热器烟损率减小的幅度较换热器大,而泵的烟损率保持不变。因此,提高集热器效率,优化换热器结构,减少换热器的烟损,也是提高太阳能加热原油系统效率的关键。

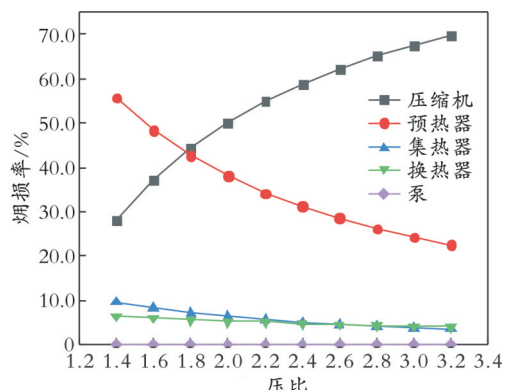


图4 压比对太阳能加热原油系统各部件烟损率的影响

压比对太阳能加热原油系统各部件烟效率的影响如图5所示。由图5可以看出,随着压比的增大,预热器烟效率的升高幅度较大,压缩机和集热器的烟效率有较小幅度的升高,而换热器和泵的烟效率基本保持不变。预热器的烟效率随着压比的

增大而较大幅度增加的原因:在压比增大的同时,其出口烟也在增加,而预热器为压缩机的下一个部件,因此其烟效率随着压比的增大而较大幅度地升高。由图5还可以看出,压比的变化对换热器和泵的烟效率并没有影响,其原因是泵的进出口流体的烟位于另一条管路上,不受压比的影响,换热器进出口流体的烟受其影响也较小。集热器、压缩机和预热器的烟效率都在69.00%以上,说明该部分的能量得到了高效利用;换热器和泵的烟效率分别为19.80%和26.85%左右,说明该部分有效能的利用率较低,尤其是换热器,其有效能的利用率最低。

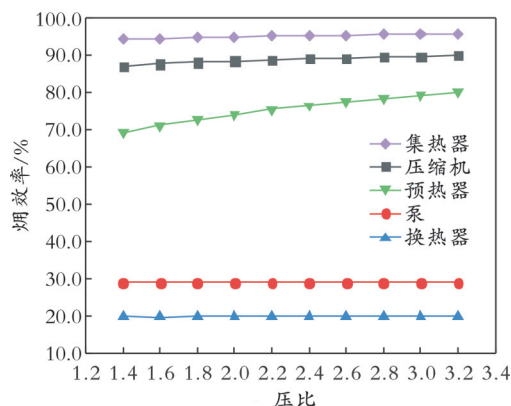


图5 压比对太阳能加热原油系统各部件烟效率的影响

最佳压比下有/无预热器时太阳能加热原油系统的热效率、烟效率和余热回收效率如图6所示。

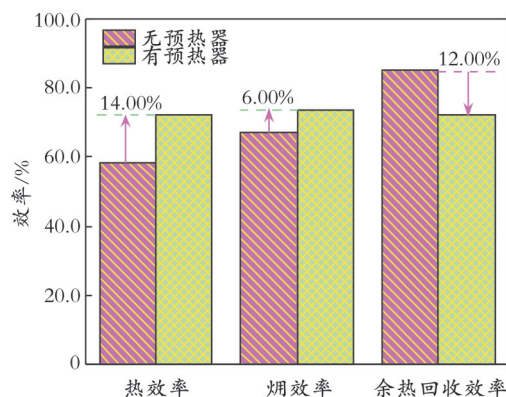


图6 最佳压比下有/无预热器时太阳能加热原油系统的热效率、烟效率和余热回收效率

由图6可以看出,有预热器时太阳能加热原油系统的热效率和烟效率明显高于无预热器的太阳能加热原油系统,热效率和烟效率分别提高了14.00%和6.00%左右,这是因为原油升温幅度一定时,无预热器的太阳能加热原油系统需要输入更多的能量;在无预热器的太阳能加热原油系统中,由于流出原油换热器的气体不再预热新进入系统的冷空气,故从换热器流出的气体热量较高,余热回收效率也较大。因此,太阳能加热原油系统设置

预热器是十分必要的。

3 结 论

(1)随着压比的升高,太阳能加热原油系统的热效率和烟效率逐渐减小,余热回收效率逐渐增大;当压比为 2.7 时,系统达到最优状态,此时系统的热效率为 72.35%,烟效率为 73.89%,余热回收效率为 72.33%。

(2)在太阳能加热原油系统中,压缩机和预热器

的烟损较大,换热器的烟效率最低。若要进一步提高太阳能加热原油系统的性能,则应采取措施降低压缩机和预热器的烟损或提高换热器的有效能利用率。

(3)与无预热器的太阳能加热原油系统相比,有预热器的太阳能加热原油系统的热效率和烟效率分别提高了 14.00% 和 6.00% 左右。从提高能量利用效率的角度考虑,预热器的设置是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] Chepeliev M, van der Mensbrughe D. Global fossil-fuel subsidy reform and paris agreement[J]. Energy Economics, 2020, 85: 104598.
- [2] Mahmoudab M, Ramadan M, Nahera S, et al. The impacts of different heating systems on the environment: A review[J]. The Science of the Total Environment, 2021, 766(25): 142625.
- [3] 廖仁杰, 李淑兰. 太阳能利用现状与发展前景[J]. 应用能源技术, 2007(5): 28-33.
- [4] Lewis N S. Toward cost-effective solar energy use[J]. Science, 2007, 315(5813): 798-801.
- [5] 刘东, 于海童, 杨震, 等. 超薄膜吸收器在太阳能光解水制氢中的应用[J]. 化工学报, 2015, 66(S1): 297-301.
- [6] Liu X Y, Chen D J, Zhang W J, et al. An assessment of the energy-saving potential in China's petroleum refining industry from a technical perspective[J]. Energy, 2013, 59: 38-49.
- [7] 王岗, 全贞花, 赵耀华, 等. 太阳能-热泵复合供能系统[J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2132-2139.
- [8] Mohamad A A. Integrated solar collector-storage tank system with thermal diode[J]. Solar Energy, 1997, 61(3): 211-218.
- [9] Lasich J, Kaila N. Helitherm - solar power throughput enhancement and heat tracing for heavy oil pipelines [C]//SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium. Margarita Island: [s.n.], 2001.
- [10] Abdibattayeva M, Bissenov K, Askarova G, et al. Transport of heavy oil by applying of solar energy[J]. Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 2021, 25(1): 879-893.
- [11] 孟凤果, 滑洁, 潘蒙. 原油集输系统太阳能集热器电辅加热的智能控制[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(3): 11-12.
- [12] 盖超. 热泵技术在辽河油田中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2011(1): 121.
- [13] 单朝玉, 胡强. 稠油加温用上太阳能[J]. 中国石油石化, 2008(13): 79.
- [14] 李建馨, 刘大勇, 李登金, 等. 太阳能加温技术在原油生产中的应用[J]. 资源节约与环保, 2008, 24(3): 42-43.
- [15] Khalid A, Ibrahim D. Analysis and assessment of using an integrated solar energy based system in crude oil refinery[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 159: 113799.
- [16] 李武平, 武玉双, 李小永, 等. 太阳能光电一体化技术在原油加热系统中的应用[J]. 石油石化节能, 2021, 11(3): 13-16.
- [17] 郝芸, 吕少华, 李慧, 等. 太阳能光伏光热系统在原油集输中的应用研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2020, 5(3): 69-72.
- [18] 刘宏亮, 李静静, 高中显, 等. 油田集输站场槽式聚焦太阳能加热技术研究与应用[J]. 石油石化节能, 2019, 9(10): 20-22.
- [19] 王学生, 王如竹, 吴静怡, 等. 太阳能加热输送原油系统应用研究[J]. 油气储运, 2004, 23(7): 41-45.
- [20] 付在国, 高欢, 张涛, 等. 太阳能加热原油储运系统热负荷匹配计算[J]. 油气储运, 2019, 38(11): 1306-1310.
- [21] 陈海飞, 徐贤, 陆莉莹, 等. 一种高倍聚光型太阳能蓄热器的设计研究[J]. 能源工程, 2019(4): 35-38.
- [22] Meng X L, Xia X L, Zhang S D, et al. Coupled heat transfer performance of a high temperature cup shaped porous absorber[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 110: 327-337.
- [23] Schwarzboezl P, Buck R, Sugarmen C, et al. Solar gas turbine systems: Design, cost and perspectives[J]. Solar Energy, 2006, 80(10): 1231-1240.
- [24] Peng S, Hong H, Jin H G, et al. An integrated solar thermal power system using intercooled gas turbine and Kalina cycle[J]. Energy, 2012, 44(1): 732-740.
- [25] 朱瑞, 徐玉杰, 李斌, 等. 太阳能蓄热式压缩空气储能系统特性分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1536-1544.
- [26] 薛久明, 刘道平, 杨亮. 基于不同压力下的 Einstein 制冷循环系统性能分析[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 101-106.
- [27] Regulagadda P, Dincer I, Naterer G F. Exergy analysis of a thermal power plant with measured boiler and turbine losses[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(8-9): 970-976.
- [28] 王宇波, 全贞花, 靖赫然, 等. 多能互补协同蓄能系统热力学分析与运行优化[J]. 化工学报, 2021, 72(5): 2474-2483.
- [29] 张丽, 王文武, 张智恩, 等. 一种天然气液化和 CO₂ 捕集相结合的余热回收发电系统[J]. 化工学报, 2019, 70(1): 261-270.
- [30] 杨天锋. 太阳能高温集热储热燃气轮机发电系统构建及关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (编辑 宋锦玉)