

# 油田采出水热泵应用技术研究

樊梦芳 刘亮德 李 云

中国石油工程建设有限公司华北分公司, 河北 任丘 062552

**摘 要:**油田站场采出水存在大量 40 ~ 60 ℃ 的低温余热,为响应国家“节能减排”的号召,考虑对油田采出水余热进行回收利用,但油田采出水余热不能利用直接换热方式将原油加热到 65 ℃ 以上,需要采用热泵提升温度。结合油田站场具体的工程技术条件,通过对压缩式热泵和吸收式热泵进行技术和经济分析,得出两种热泵技术及经济方案比选的研究结果。研究结果表明,可以通过热泵提取油田采出水余热对原油进行加热,取代加热炉,但需要根据具体的边界条件,确定应用的热泵类型。

**关键词:**油田采出水余热;热泵应用;技术路线;经济效益

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.03.017

## Research on heat pump technology application on oil field produced water

FAN Mengfang, LIU Liangde, LI Yun

CPECC North China Branch, Renqiu, Hebei, 062552, China

**Abstract:** There is a large amount of low temperature waste heat of 40 ~ 60 ℃ in oil field site stations. In response to the country wide call for “Energy Conservation and Emission Reduction” initiative, it is considered to recycle the waste heat recovered from oil field produced water. However, the waste heat from oil field produced water cannot heat the crude oil to above 65 ℃ via direct heat transfer. Therefore, heat pumps are needed to raise the temperature. Taking into consideration the site specific conditions and engineering technology of the station, the research conclusions of compression heat pump and absorption heat pump option selection in terms of technical and economic aspects can be drawn through the technical and economic analysis of these two types heat pumps. To conclude, it is feasible to replace the heat furnace in oil field site station with heat pump. This paper could be used as a reference for the engineering design of heat pumps.

**Keywords:** Waste heat from oil field produced water; Heat pump application; Technical route; Economic benefits

## 0 前言

根据国务院印发《“十三五”节能减排综合工作方

案》要求,实施工业能效赶超行动,在重点耗能行业全面推行能效对标;工业能源利用效率和清洁化水平显著提高,大型工业企业单位增加值能耗比 2015 年降低 18%

收稿日期:2020-08-28

基金项目:中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司“第三采油厂采出水余热利用项目”(FS17476)

作者简介:樊梦芳(1970-),女,河北廊坊人,高级工程师,硕士,主要从事热工、燃气方面研究与设计。E-mail:392257212@qq.com

以上,特别指出石油石化、化工等重点耗能行业能源利用效率达到或接近世界先进水平<sup>[1]</sup>。

根据国家政策的要求,要实现能源消费总量和强度“双控”目标,应力争从源头上减少污染物排放,倒逼经济发展方式转变<sup>[2]</sup>。2018年,某石油企业率先响应国家号召,根据自身站场资源和用热状况及热泵高效节能特性,结合其在清洁能源利用<sup>[3]</sup>、高效温度转换<sup>[4]</sup>、工业余热回收<sup>[5]</sup>、油田余热回收<sup>[6]</sup>等领域的研究成果,尝试进行热泵技术的工程应用研究,采用热泵替代加热炉,实现节能降耗。本文结合具体的工程技术条件,对某转油站吸收式热泵和压缩式热泵的技术经济方案进行了研究和现场实验,取得了良好的社会和经济效益。

## 1 热泵机组

### 1.1 热泵的制热性能系数及影响因素分析

热泵的经济性以消耗单位功得到的供热量即制热性能系数<sup>[7]</sup>来衡量<sup>[8]</sup>,是热泵所实现的制热量和输入功率的比值。在相同工况下,比值越大说明热泵效率越高、越节能。

#### 1.1.1 压缩式热泵

压缩式热泵的蒸发器从低品位余热吸收热量,冷凝器向用户供应高温位热量<sup>[9]</sup>。根据能量守恒定律和热力学第二定律,不考虑压缩机的散热,热泵制热功率等于从低品位余热吸收的热量与输入功率之和,可见制热性能系数值恒大于1。热泵制热性能系数计算公式见式(1)<sup>[10]</sup>:

$$COP = (P + Q_c) / P = 1 + Q_c / P \quad (1)$$

式中: $COP$ 为热泵制热性能系数; $P$ 为输入功率,kW; $Q_c$ 为从低品位余热吸收的热量,kW。

影响热泵制热性能系数的因素包括:冷凝器出水温度(制取热水供水温度) $T_1$ 、进水温度(制取热水回水温度) $T_2$ 、蒸发器出水温度(余热热源回水温度) $T_3$ 、进水温度(余热热源供水温度) $T_4$ 。冷凝器出水温度与蒸发器进水温度温差尽量合理<sup>[11]</sup>,这样,有利于提高热泵制热性能系数,但起到决定作用的是冷凝器出水温度和蒸发器出水温度,计算公式见式(2)<sup>[12]</sup>。

$$COP = 12.50341 - 0.23785T_1 - 0.33136T_3 + 0.005759T_1T_3 + 0.001502T_1^2 + 0.001825T_3^2 \quad (2)$$

式中: $T_1$ 为制取热水供水温度,℃; $T_3$ 为余热热源回水温度,℃。

#### 1.1.2 吸收式热泵

吸收式热泵分为增热型吸收式热泵(即第一类吸收式热泵)和升温型吸收式热泵(即第二类吸收式热泵)<sup>[13]</sup>,考虑到油田站场的安全间距<sup>[14]</sup>,一般采用第一

类吸收式热泵。按照供热循环又可分为单效型吸收式热泵和双效型吸收式热泵<sup>[15]</sup>。第一类吸收式热泵制热性能系数大于1,单效型吸收式热泵制热性能系数一般为1.5~1.8<sup>[16]</sup>。计算公式见式(3)<sup>[10]</sup>:

$$COP = Q / Q_{\lambda} \quad (3)$$

式中: $Q$ 为制取的热量,kW; $Q_{\lambda}$ 为输入驱动热量,kW。

影响吸收式热泵制热性能系数的主要因素是发生器温度、冷凝器温度、蒸发器温度以及吸收器温度,它们与余热热源供/回水温度和制取热水供/回水温度相互影响。在制取热水条件和驱动热源条件相同时,余热热源回水温度越低,则热泵制热性能系数越低。同理,利用相同的余热热源条件和驱动热源条件,要制取热水供水温度越高,则热泵制热性能系数越低。制取热水供水温度对热泵的影响大于余热热源回水温度对热泵的影响<sup>[17]</sup>。

### 1.2 热泵系统组成

油田采出水余热利用热泵系统包括热泵、中间换热系统、循环供热系统、补水定压系统、软化水处理系统<sup>[18]</sup>。

1) 热泵:热泵分为压缩式热泵和吸收式热泵(指第一类吸收式热泵,下同),见图1~2。压缩式热泵包括压缩机、蒸发器、冷凝器、阀组、仪表及管路;吸收式热泵由吸收器、发生器、蒸发器、冷凝器、阀组、仪表及管路等组成<sup>[19]</sup>。两种热泵均可实现热负荷自动调节等功能。



图1 压缩式热泵照片

Fig. 1 Compression heat pump

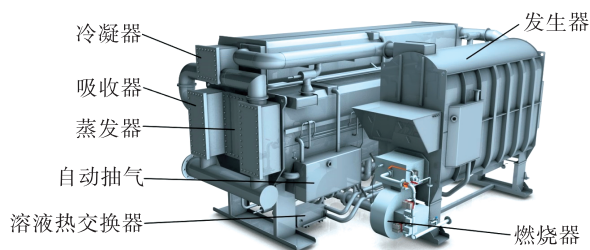


图2 吸收式热泵照片

Fig. 2 Calorie-type absorption heat pump

2) 中间换热系统:包括换热器、中介水循环泵、过滤器、阀组、仪表及管路,换热器宜采用结构简单、维修清洗方便的板式换热器。

3) 循环供热系统:包括循环水泵、除污器、用热单元、仪表及管路,循环水泵选用普通清水离心泵。

4) 补水定压系统:包括补水泵(高架水箱)、阀组、仪表及管路,补水泵电机宜采用变频调速电机。

5) 软化水处理系统:包括软化水箱和软化水装置。原水经钠离子交换器去除  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,防止大面积产生水垢。

## 2 技术经济研究

### 2.1 工程技术条件

#### 2.1.1 供热负荷

某转油站经过站场优化简化,由输送合格原油改为输送低含水油,停用站内电脱水器,站外单井实现单管集输,工艺供热负荷减少。冬季工艺用热负荷为 1 294 kW,采暖用热负荷为 120 kW,共计 1 414 kW;夏季工艺用热负荷为 1 035 kW;制取热水的供/回水温度为 75/60 °C。

#### 2.1.2 油田采出水量及采出水温度

表 1 为 2018 年某转油站采出水参数统计,平均采出水量为 1 517 m<sup>3</sup>/d,2019 年前 4 个月平均采出水量为 1 455 m<sup>3</sup>/d,因老井恢复及生产井含水上升情况,2019 年 4 月以后,采出水水量可达到平均值 1 517 m<sup>3</sup>/d,采出水温度 48 °C。

表 1 2018 年某转油站采出水参数统计表

Tab. 1 Parametric statistics of produced water in 2018

| 月份 | 采出水量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 采出水温度/°C |
|----|-----------------------------------------|----------|
| 1  | 1 384                                   | 47.6     |
| 2  | 1 403                                   | 47.6     |
| 3  | 1 445                                   | 47.7     |
| 4  | 1 502                                   | 48.1     |
| 5  | 1 532                                   | 48.1     |
| 6  | 1 514                                   | 48.2     |
| 7  | 1 520                                   | 48.3     |
| 8  | 1 662                                   | 48.4     |
| 9  | 1 640                                   | 48.3     |
| 10 | 1 551                                   | 48.2     |
| 11 | 1 532                                   | 48.0     |
| 12 | 1 520                                   | 47.9     |

#### 2.1.3 油田采出水组分

油田采出水一般含有  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等离子,表 2 为某转油站采出水组分。

表 2 某转油站采出水组分表

Tab. 2 Components of produced water

mg/L

| 组分                       | 含量                |
|--------------------------|-------------------|
| $\text{Mg}^{2+}$         | 45.1              |
| $\text{Ca}^{2+}$         | 327.0             |
| $\text{Cl}^-$            | $1.3 \times 10^4$ |
| $\text{SO}_4^{2-}$       | <2.0              |
| $\text{HCO}_3^-$         | 1 144.0           |
| $\text{CO}_3^{2-}$       | <0.6              |
| 矿化度                      | $2.3 \times 10^4$ |
| 总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计) | 1 001.0           |
| 总碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计) | 937.9             |
| 游离 $\text{CO}_2$         | 98.5              |
| 硫化物(以 $\text{S}^{2-}$ 计) | 8.2               |
| $\text{Fe}^{2+}$         | 5.4               |
| $\text{Ba}^{2+}$         | 36.5              |

#### 2.1.4 加热炉及其燃料

该转油站内无伴生气,原设有 3 台 2 330 kW 燃气加热炉,站场通过工艺优化简化后,目前仅运行 1 台加热炉,气源来自当地燃气公司市政管网。

### 2.2 技术方案

#### 2.2.1 方案一

压缩式热泵:48 °C 采出水热源供水自注水罐经提升泵送至换热器换热,温度降至 31 °C 后,输至过滤装置。中介水经采出水换热器换热后,温度由 27 °C 升至 45 °C,再进入 1 500 kW 压缩式热泵机组蒸发器。热泵机组冷凝器将制取热水回水温度由 60 °C 提升至 75 °C,成为制取热水供水输送至工艺换热器和建筑单体散热器,将原油加热到 65 °C 以上和为建筑单体供暖。压缩式热泵系统工艺流程见图 3<sup>[20]</sup>。

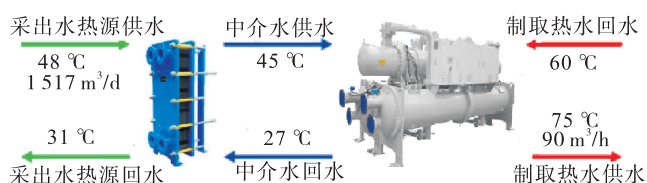


图 3 压缩式热泵工艺流程简图

Fig. 3 Brief flowchart of compression heat pump process

#### 2.2.2 方案二

吸收式热泵:以天然气燃烧产生的热能为驱动源时,在发生器内加热溴化锂稀溶液产生水蒸气,水蒸气进入冷凝器放出热量,冷凝成液体后进入蒸发器,在蒸发器低温、低压环境下吸收 45 °C 中介水的热量蒸发,这部分低温、低压蒸汽进入吸收器被浓溴化锂溶液吸收,放出热量将制取热水回水温度由 60 °C 提升至 75 °C,成为制取热水供水输送至工艺换热器和建筑单体散热器,将原油加热到 65 °C 以上和为建筑单体供暖。稀释后的溴化锂溶液再进入发生器开始下一个循环。吸收式热泵系统工艺流程见图 4<sup>[20]</sup>。

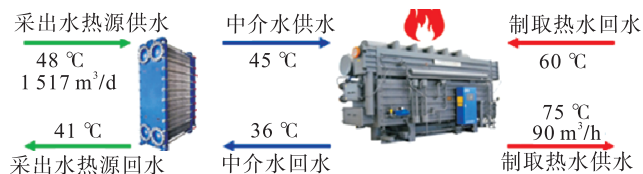


图 4 吸收式热泵工艺流程简图

Fig. 4 Brief flow chart of absorption heat pump process

表 3 方案比选表

Tab. 3 Scheme comparison

| 方案                    | 建设投资 / 万元 | 工程费用 / 万元 | 运行费用 / 万元 | 费用现值 (10 年) / 万元 | 优点                              | 缺点                                              |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| 方案一: 压缩式热泵 (1 500 kW) | 485. 26   | 406. 36   | 186. 14   | 1 638. 90        | 投资低, 费用现值低, 运行费用低、制热性能系数高, 节能明显 | 用电量较大                                           |
| 方案二: 吸收式热泵 (1 500 kW) | 595. 69   | 500. 83   | 302. 49   | 2 525. 69        | 用电量小                            | 投资高、费用现值高, 运行费用高, 受气源限制, 制热性能系数低, 余热利用较少, 节能不明显 |

### 3 实施效果分析

某转油站压缩式热泵及其配套工艺于 2019 年 10 月开始建设, 12 月 2 日正式投运, 根据 2019 年 12 月 10

表 4 热泵监测数据表

Tab. 4 Monitoring data of heat pump

| 监测时间        | 采出水热源<br>供水温度 /℃ | 采出水热源<br>回水温度 /℃ | 采出水量 /<br>制取热水<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )<br>回水温度 /℃ | 制取热水<br>供水温度 /℃ | 热水量 /<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 供热量 /<br>kW | 用电功率 /<br>kW | 制热性<br>能系数 |       |
|-------------|------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|-------------|--------------|------------|-------|
| 2019- 12-10 | 48. 5            | 34. 2            | 66. 1                                                           | 62. 3           | 74. 8                                       | 95          | 1 385. 42    | 282. 65    | 4. 90 |
| 2019- 12-25 | 48. 2            | 34. 1            | 66. 5                                                           | 62. 5           | 75. 5                                       | 92          | 1 395. 33    | 301. 41    | 4. 63 |
| 2020- 01-10 | 48. 2            | 34. 0            | 65. 1                                                           | 62. 8           | 75. 4                                       | 94          | 1 381. 80    | 303. 31    | 4. 56 |
| 2020- 01-22 | 48. 1            | 33. 7            | 65. 5                                                           | 61. 9           | 74. 9                                       | 93          | 1 410. 50    | 310. 10    | 4. 55 |
| 2020- 02-14 | 48. 5            | 34. 3            | 65. 9                                                           | 62. 1           | 75. 1                                       | 92          | 1 395. 33    | 303. 59    | 4. 60 |
| 2020- 02-30 | 48. 2            | 34. 4            | 66. 2                                                           | 62. 4           | 74. 5                                       | 94          | 1 326. 97    | 261. 15    | 5. 08 |

表 5 热泵投产前、后运行成本对比表

Tab. 5 Operation cost comparison of heat pump before and after putting into operation

| 热泵运行状态 | 燃气量 / (10⁴ m³ · a⁻¹) | 燃气价格 / (元 · m⁻³) | 耗电量 / (10⁴ kW · h) | 电价 / (元 · kW⁻¹ · h⁻¹) | 运行成本 / 万元 |
|--------|----------------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------|
| 投产前    | 91. 8                | 3. 6             | 4. 5               | 0. 82                 | 334. 17   |
| 投产后    | 3. 9                 | 3. 6             | 183                | 0. 82                 | 164. 10   |

由表 3 和表 5 可知, 某转油站压缩式热泵及其配套工程建设投资为 485. 26 万元, 每年经济效益为 170. 07 万元, 投资回收期约 4. 3 a。

### 4 结论

1) 油田采出水一般含有  $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^{-}$ 、 $HCO_3^{-}$ 、 $CO_3^{2-}$  等离子, 考虑腐蚀和结垢, 建议增加中间换热系统, 以保证热泵机组的使用寿命。

2) 采出水热源回水温度越低, 制取热水供水温度越

### 2. 3 方案比选

根据以上两种技术方案的工程量、工程投资, 同时结合运行费用, 对两种技术方案进行比选, 具体内容见表 3。

综合比较, 考虑初投资及运行情况, 推荐方案一, 即采用 1 台 1 500 kW 压缩式热泵。

日—2020 年 02 月 30 日监测数据, 运行时制热性能系数在 4. 55 ~ 5. 08 之间。热泵监测数据见表 4, 热泵投产前、后运行成本对比见表 5。

高, 热泵的制热性能系数越低。在工程应用中, 合理利用采出水余热热源, 并非采出水热源回水温度越低越好。

3) 选用何种热泵机组, 与项目工程投资, 以及当地燃气价格和电价有很大关系, 应根据具体情况具体分析。

#### 参考文献:

- [1] 国务院. “十三五”节能减排综合工作方案: 国发[2016]74 号 [EB/OL]. (2017- 01- 05) [2020- 08-26]. [http://www.gov.cn/jzhengce/content/2017-01/05/content\\_5156789.htm](http://www.gov.cn/jzhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm).

- State Council. Comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction during the 13th five-year plan: GF [2016] No. 74. [EB/OL]. (2017-01-05) [2020-08-26] [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content\\_5156789.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm).
- [2] 田智宇. 把节能减排作为供给侧改革重要抓手[N]. 中国能源报, 2017-02-13(019).
- TIAN Zhiyu. Taking energy conservation and emission reduction as an important starting point of supply side reform [N]. China Energy News, 2017-02-13 (019).
- [3] XUE Yifeng, TIAN Hezhong, YAN Jing, et al. Temporal trends and spatial variation characteristics of primary air pollutants emissions from coal-fired industrial boiler in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 213: 717-726.
- [4] 付林, 李岩, 张世钢, 等. 吸收式换热的概念与应用[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 136-140.
- FU Lin, LI Yan, ZHANG Shigang, et al. Concept and application of absorption heat transfer [J]. Building Science, 2010, 26 (10): 136-140.
- [5] XU Zhenyuan, MAO Hongcai, LIU Dianshou. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps [J]. Energy, 2018, 165: 1097-1105.
- [6] 李永利, 张志文. 油田采出污水低温热能的有效利用途径[J]. 石油规划设计, 2011, 22(6): 44-46.
- LI Yongli, ZHANG Zhiwen. Effective utilization of low temperature heat energy from oilfield produced sewage [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2011, 22 (6): 44-46.
- [7] 亚太建设科技信息研究院有限公司, 中国建筑设计研究院有限公司. 供暖通风与空气调节术语标准: GB/T 50155—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Asia Pacific Institute of Construction Technology Information Co., Ltd., China Architectural Design Institute Co., Ltd. Standard for terminology of heating, ventilation and air conditioning: GB/T 50155—2015 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.
- [8] 廉乐明, 李力能, 吴家正, 等. 工程热力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 208-209.
- LIAN Leming, LI Lineng, WU Jiazheng, et al. Engineering thermodynamics [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000. 208-209.
- [9] 张永贵, 李东明, 项新耀. 压缩式热泵循环热力学分析与评价方法[J]. 油田地面工程, 1995, 14(5): 2-4.
- ZHANG Yonggui, LI Dongming, XIANG Xinyao. Thermodynamic analysis and evaluation method of compression heat pump cycle [J]. Oilfield Surface Engineering, 1995, 14 (5): 2-4.
- [10] 张永贵. 热泵定义的拓展及其焓效率表达式的改进[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 99-100.
- ZHANG Yonggui. Discussion on development of heat pump definition and improvement of an exergy efficiency formula [J]. Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2002, 32 (1): 99-100.
- [11] Cube H L, Steimle F. 热泵的理论与实践[M]. 王子介, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 36-39.
- CUBE H L, STEIMLE F. Heat pump theory and practice [M]. WANG Zijie, trans. Beijing: China Construction Industry Press, 1986: 36-39.
- [12] 李震. 海水源热泵区域供热供冷系统3E评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- LI Zhen. Economy-Energy-Environment (3E) assessment for district heating and cooling system with seawater source heat pump [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [13] 王汝金, 张秀平, 贾磊, 等. 第一、第二类溴化锂吸收式热泵机组标准解析[J]. 制冷与空调, 2018, 18(11): 64-68.
- WANG Rujin, ZHANG Xiuping, JIA Lei, et al. Interpretation of the categories I & II lithium bromide absorption heat pump unit standard [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2018, 18 (11): 64-68.
- [14] 中国石油天然气股份有限公司规划总院. 石油天然气工程设计防火规范: GB 50183—2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- China National Petroleum Corporation Planning Institute. Code for fire protection design of petroleum and natural gas engineering: GB 50183—2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [15] 陈东, 谢继红. 热泵技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- CHEN Dong, XIE Jihong. Heat pump technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [16] 黄国华, 林乐晖, 于忠森. 第一类溴化锂吸收式热泵机组的现场应用研究[J]. 机电信息, 2017(16): 70-74.
- HUANG Guohua, LIN Lehui, YU Zhongsen. Field application of the first type lithium bromide absorption heat pump unit [J]. Mechanical and Electromechanical Information, 2017 (16): 70-74.
- [17] 孔唯一. 基于生物质燃烧的烟气型吸收式热泵供热技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- KONG Weiyi. Research on heating technology of flue gas absorption heat pump based on biomass combustion [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [18] 刘清源, 祖贺川, 王婧, 等. 吸收式水源热泵技术在油田联合站的应用[J]. 石油石化节能, 2018, 8(7): 24-26.
- LIU Qingyuan, ZU Hechuan, WANG Qiang, et al. Application of absorption water source heat pump technology in oilfield combined station [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2018, 8 (7): 24-26.
- [19] 谢继红. 热泵技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- XIE Jihong. Technical manual of heat pump [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [20] 周彦勇, 李文婷, 董静. 应用热泵技术回收联合站污水余热研究[J]. 石油石化节能, 2017, 7(11): 10-12.
- ZHOU Yanyong, LI Wenting, DONG Jing. Applying heat pump technology to recycle waste heat of combined station [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2017, 7 (11): 10-12.