

天然气处理厂余热利用研究

李尹建¹ 高兴¹ 曹瑛² 杜黎¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油工程建设有限公司北京设计分公司, 北京 100086

摘要: 能源是人类赖以生存和发展的重要基础,在能源消耗不断攀升而带来诸多社会和环境问题的现实背景下,节能减排已成为当今人类的共识。低品位余热利用作为节能减排中的重要部分,具有巨大的发展潜力。在天然气处理厂生产加工过程中,部分工艺气体由于增压会产生大量余热。正常工况下,余热被直接冷却,能量浪费巨大。为响应国家节能减排的政策需要,针对某天然气处理厂生产余热及用户的用热情况,对余热进行供热、厂区辅助生产及生活区冬季供暖、余热制冷及余热发电等多个利用手段进行逐一分析,找到余热利用最佳方法。在工程设计中,选择合理的余热利用方案,科学、有效地利用余热,不仅可以为生产企业带来收益,还能节省能耗,切实做到节能减排。

关键词: 余热利用; 换热; 供热; 供暖; 发电

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.017

Research on Waste Heat Utilization in Gas Treatment Plant

Li Yinjian¹, Gao Xing¹, Cao Ying², Du Li¹

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Beijing Company, Beijing, 100086, China

Abstract: Energy is an essential factor for developing social progress and human society. As a matter of fact, the energy conservation and emission reduction has become a consensus as it is facing social and environmental problems induced by increasing energy consumptions. As a significant component of energy technology, the low grade waste heat recovery technique has a great potential. In the process of production and processing of natural gas treatment plant, a large amount of waste heat will be generated due to boosting. Normally waste heat is directly cooled, which wastes enormous energy. In response to the national policy of energy saving and emission reduction, we aim at the analysis of the waste heat produced in the plant and the heat users, and analyze the various utilization means of waste heat such as heating, auxiliary production in the plant area, winter heating in the living area, waste heat refrigeration and waste heat power generation one by one, obtaining the best way for waste heat utilization. In the course of engineering, optimizing waste heat using strategy scientifically and effectively will not only make a profit to the plant enterprise but save energy consumption.

Keywords: Waste heat utilization; Heat transfer; Heat supply; Heating; Power generation

收稿日期:2019-03-11

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程项目“塔里木油田天然气乙烷回收工程”资助(S 2017112 E)

作者简介:李尹建(1984-),男,四川成都人,工程师,学士,主要从事热工设计工作。

0 前言

当前,我国经济发展进入新常态,能源需求刚性增加,资源环境问题仍是制约我国经济社会发展的瓶颈之一,节能减排依然形势严峻、任务艰巨。为确保实现《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》提出的节能减排约束性指标,余热利用是其重要的一种手段^[1-2]。

在天然气处理厂生产加工过程中,部分工艺气体增压后会产生大量余热,正常工况下,余热被直接冷却,能量浪费巨大。本文针对余热利用进行重点分析,提出了适用于这类工况余热利用的经济、有效途径^[3-6]。

1 概况

某天然气处理厂原料气经工艺处理后,外输压缩机工艺气出口温度夏季约 108 ℃,冬季约 95 ℃,而工艺气进行外输要求出站温度低于 40 ℃。按传统做法,压缩机后的工艺气直接进行冷却后外输,约 46 MW(夏季)/37 MW(冬季)热量作为废热直接散发到空气中。余热参数见表 1。

表 1 余热参数表

项目	外输气冷却前	外输气冷却后
气量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1.265×10^6	1.265×10^6
温度 / $^{\circ}\text{C}$	108(夏季)/95(冬季)	40
压力 /MPa	6.5(夏季)/7.0(冬季)	6.4(夏季)/6.9(冬季)

若将增压后天然气的热量通过介质换出,进行有效利用,同时降低外输气温度,将对天然气处理厂的节能有重要意义^[7]。

2 主要余热利用方案

天然气处理厂工艺复杂,用热用户较多,目前主要的余热利用方案有供热、供暖、余热制冷、余热发电等^[8-14]。

2.1 供热

某天然气处理厂天然气加工工艺中,用热设备工艺参数见表 2。

目前,天然气处理厂的余热通过换热可产生的热水供水温度夏季约 90 ℃、冬季约 80 ℃,不满足直接为工艺装置供热的条件。根据厂内热用户条件,脱乙烷塔底重沸器加热温度较低,且用热负荷恒定,可以作为潜在余热用户。为满足脱乙烷塔底重沸器的需要,拟将低品位余热热水(夏季约 90 ℃、冬季约 80 ℃)采用热泵进行温位提升,将热介质温度提升至 103 ℃后对脱乙烷塔重沸器进行供热。

表 2 用热设备工艺参数表

装置	工艺介质进 / 出温度 / $^{\circ}\text{C}$	单套装置热负荷 /kW	运行状态
脱乙烷塔重沸器	74 /83	7 955	全年连续运行
脱丁烷塔重沸器	158 /167	6 660	全年连续运行
脱丙烷塔重沸器	106 /107	1 066	间断运行 2 000 h/a
再生塔底重沸器	124 /125	8 700	连续运行
再生气加热器	25 ~ 115 /220	1 500	间歇运行

提升低温余热品位为厂区内其他装置供热主要工艺流程见图 1。

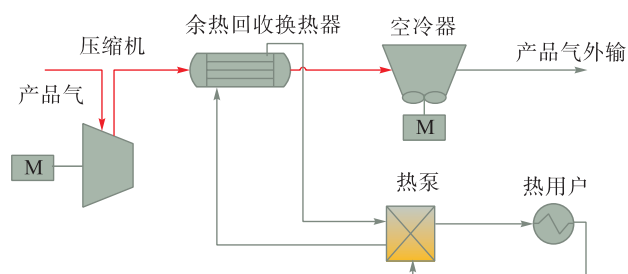


图 1 供热工艺流程图

但经过咨询各知名热泵生产企业,目前无论是采用离心机还是螺杆机,均无成熟设备可适用于此类温度工况。因此,采用热泵供热方案在该厂不可行。

2.2 供暖

2.2.1 工艺方案

1) 厂内建筑部分。某天然气处理厂原设有导热油-水供暖换热机组,提供供暖热水温度 95 ℃/70 ℃。现拟将采用余热热水将供暖回水温度从 70 ℃提升到 80 ℃,再将供暖水通过导热油换热,最终将供暖热水温度提升至 95 ℃进入原管网供热,达到降低导热油系统负荷,减少燃料气消耗目的。

2) 厂区周围居民及厂区附属公寓部分。厂区周围居民及厂区附属公寓供暖由当地区域能源站提供,该能源站采用燃气热水锅炉,为当地提供 95 ℃供暖热水,供暖回水温度 70 ℃。现拟将采用余热热水将供暖回水温度从 70 ℃提升到 80 ℃,再将供暖水通过燃气热水锅炉加热,最终将供暖热水温度提升至 95 ℃进入原管网供热,达到减少燃料气消耗目的。

低品位热能为厂区辅助生产及生活区冬季供暖工艺流程见图 2。

某天然气处理厂建筑、厂区周围居民及厂区附属公寓目前供暖负荷见表 3。

根据计算,天然气侧进口温度 95 ℃,出口温度 82 ℃,工艺余热换热器水侧供水温度 83 ℃,回水温度 61 ℃,总负荷换热负荷约 8 765 kW。厂区供暖二级换热

器供暖水侧水温度 80 ℃, 回水温度 65 ℃, 换热负荷 743.6 kW, 厂区导热油-水换热器需补充 495 kW 热量。区域能源站供暖二级换热器供暖水侧水温度 80 ℃, 回水温度 60 ℃, 换热负荷 8 091 kW, 能源站燃气热水锅炉需补充 6 009 kW 热量。

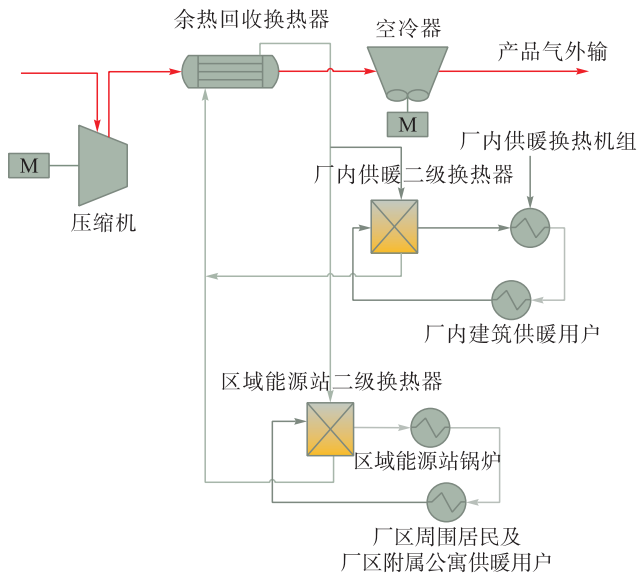


图2 余热供暖工艺流程图

表3 供暖负荷统计表

区域	用热方式	供热负荷/kW	用热特点
厂内建筑部分	建筑供暖	1 245.2	冬季连续
厂区周围居民及厂区附属公寓部分	建筑供暖	17 910.0	冬季连续

2.2.2 主要设备

低品位热能为辅助生产及生活区冬季供暖主要增加设备见表4。

表4 余热供暖主要设备表

区域	设备	规格	数量/台	备注
厂内工艺部分	余热回收换热器	换热负荷 8 800 kW	1	—
	余热热水循环泵	流量 350 m ³ /h 扬程 40 m	2	1用1备
	补水泵	流量 10 m ³ /h 扬程 30 m	2	1用1备
厂内建筑部分	厂区供暖二级换热器	换热负荷 800 kW	1	—
厂区周围居民及厂区附属公寓部分	区域能源站供暖二级换热器	换热负荷 8 200 kW	1	—

2.2.3 能耗及技术经济指标

某天然气处理厂供暖季为 150 d, 燃料气低热值为 33 450 kJ/m³, 余热供暖节约能耗见表5, 余热供暖技术经济指标见表6。

表5 余热供暖节约能耗表

设备	余热负荷/kW	节约燃料气量/(m ³ ·h ⁻¹)	年节约燃料气量/(m ³ ·a ⁻¹)
厂区供暖二级换热器	743.6	80	288 000
区域能源站供暖二级换热器	8 091.0	870	3 132 000

表6 余热供暖技术经济指标表

项目	技术经济指标	备注
增加电消耗量/(kW·h·a ⁻¹)	175 560	—
增加电费/万元	12.6	单价 0.72 元/kW·h
减少天然气消耗量/(m ³ ·a ⁻¹)	3 420 000	—
节省燃料气费/万元	413.8	单价 1.21 元/m ³
一次性投资增加/万元	620	—
年节省运行费用/万元	401.2	—
10年节省运行费用折现/万元	2 692.1	6.710 1 价值系数
15年节省运行费用折现/万元	3 434.1	8.559 5 价值系数
一次性投资增加量与10年节省运行费用/万元	2 072.1	节省
一次性投资增加量与15年节省运行费用/万元	2 814.1	节省

从表6可看出, 采用余热供暖系统一次性投资增加约 620 万元, 但运行费用每年将节约 401.2 万元, 一次性投资增加量与 10 年节省运行费用折现后可节省 2 692.1 万元, 一次性投资增加量与 15 年节省运行费用折现后可节省 3 434.1 万元。

综上, 低品位热能为厂区辅助生产及生活区冬季供暖可以节能减排, 减少运行费用, 余热利用效果明显。

2.3 余热制冷

某天然气处理厂在生产工艺工程中需要冷冻水对工艺介质及设备进行冷却降温, 另厂内建筑的空调系统制冷所需冷冻水负荷见表7。

表7 冷冻水负荷统计表

项目	负荷/kW
工艺装置冷却负荷	13 184
建筑空调系统冷却负荷	3 000

该厂原工艺装置设置风冷制冷机组供冷系统 1 套, 为全厂提供冷冻水, 建筑空调系统另设置风冷制冷机组提供空调冷冻水。

现拟采用余热溴化锂机组, 利用工艺过程中余热制备冷冻水, 为工艺装置及建筑空调系统提供冷冻水^[15-18]。

2.3.1 工艺方案

根据各余热型溴化锂机组生产制造商的技术参数, 余热型溴化锂机组可用的余热热水水温需高于 70 ℃, 低

于此温度,机组效率将显著下降。由于制冷负荷主要在夏季运行使用,根据该厂工艺余热情况,可通过工艺余热换热器,产生 90 °C 余热热水,回水温度 70 °C,余热负荷 25 700 kW。

根据冷冻水负荷统计,全厂制冷负荷共计 16 184 kW。余热型溴化锂机组选型为 2 × 8 100 kW。机组制备 7 °C 冷冻水,送至各用冷点,回水温度 12 °C。另余热型溴化锂机组需设置循环水系统 1 套,循环水供水温度 38 °C,回水温度 32 °C,循环水冷却负荷约 40 000 kW。余热热水消耗约 24 000 kW,目前余热负荷满足需求。

余热制冷为工艺装置及建筑空调系统提供冷却水工艺流程见图 3。

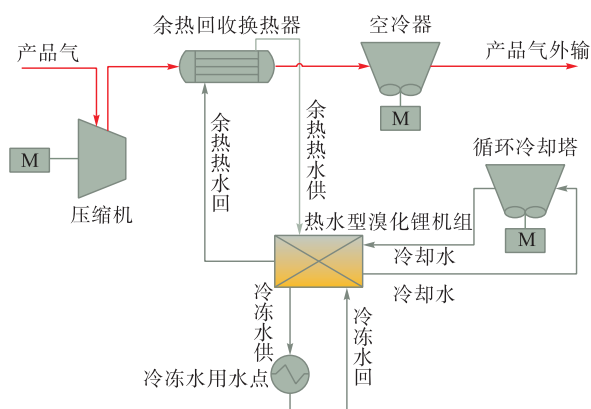


图 3 余热制冷系统工艺流程图

2.3.2 主要设备

余热制冷为工艺装置及建筑空调系统提供冷冻水主要增加设备见表 8。

表 8 余热制冷系统增加主要设备表

设备	规格	数量/台	备注
余热回收换热器	换热负荷 24 000 kW	1	—
余热热水循环泵	流量 600 m ³ /h 扬程 40 m	3	2 用 1 备
补水泵	流量 30 m ³ /h 扬程 30 m	2	1 用 1 备
热水型溴化锂机组	制冷负荷 8 100 kW	2	—
循环冷却塔	冷却负荷 40 000 kW	1	—
循环冷却水泵	流量 2 000 m ³ /h 扬程 30 m	4	3 用 1 备

2.3.3 能耗及技术经济指标

采用余热利用制冷与原风冷制冷机制冷方案做经济对比,见表 9。

从表 9 可看出,余热制冷为工艺装置及建筑空调系统提供冷冻水一次性投资增加约 1 736 万元,但运行费用每年将节约 534 万元,一次性投资增加量与 10 年运行费用折现后可节约 1 847.2 万元,一次性投资增加量与 15 年运行费用折现后可节约 2 834.8 万元。

表 9 余热制冷与风冷制冷方案技术经济指标表

项目	经济指标		备注
	余热风冷制冷方案	风冷制冷机方案	
设备投资 /万元	4 297	2 561	—
电消耗量 /(kW · h · a ⁻¹)	668.0 × 10 ⁴	1 909.6 × 10 ⁴	—
电耗费 /万元	481	1 375	单价 0.72 元 /kW · h
水消耗量 /(m ³ · a ⁻¹)	720 000	—	—
水耗费 /万元	360	—	单价 5 元 /m ³
一次性投资 /万元	4 297	2 561	—
年运行费用 /万元	841	1 375	—
10 年运行费用折现 /万元	5 643.2	9 226.4	6.710 1 价值系数
15 年运行费用折现 /万元	7 198.5	11 769.3	8.559 5 价值系数
一次性投资与 10 年运行费用 /万元	9 940.2	11 787.4	—
一次性投资与 15 年运行费用 /万元	11 495.5	14 330.3	—

综上,余热制冷为工艺装置及建筑空调系统提供冷冻水方案可减少运行费用,余热利用效果明显。

2.4 余热发电

2.4.1 工艺方案

利用余热发电是目前余热利用的新方向。其主要工艺为采用有机朗肯循环,工作时有机工质在蒸发器内

吸收低温余热,工质蒸发汽化后进入膨胀机做功,膨胀机带动发电机发电,膨胀后乏汽被冷凝后形成液体由工质泵送入蒸发器吸热完成循环^[19]。

以某天然气处理厂为例,夏季工况下外输压缩气增压后温度约 108 °C,可通过工艺余热换热器,产生 90 °C 余热热水,回水温度 70 °C,余热负荷约 12 500 kW。

采用有机朗肯循环,有机工质选择 R 245 fa,蒸发器产生的 70 °C /2.6 MPa 高温高压工质经膨胀机后产生 40 °C /1.4 MPa 低温低压气态工质,再经空冷器冷凝成液态,最终通过工质循环泵增压后送至蒸发器加热生成高温高压工质,如此循环^[20]。根据核算,可发电功率约 400 kW,此时发电效率约 3%。

余热发电工艺流程图见图 4。

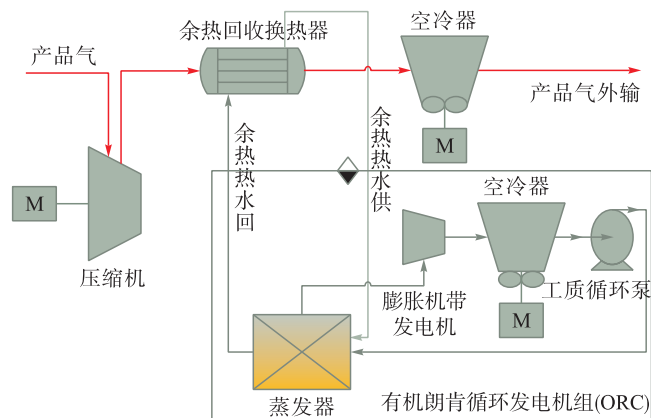


图 4 余热发电工艺流程图

2.4.2 主要设备

余热发电主要增加设备清单见表 10。

表 10 余热发电主要增加设备清单表

设备	规格	数量/台	备注
余热回收换热器	换热负荷 12 500 kW	1	—
余热热水循环泵	流量 600 m ³ /h 扬程 40 m	2	1 用 1 备
补水泵	流量 30 m ³ /h 扬程 30 m	2	1 用 1 备
有机朗肯循环发电机组(ORC)	发电功率 400 kW	1	—

2.4.3 能耗及技术经济指标

余热发电主要技术经济指标见表 11。

表 11 余热发电技术经济指标表

项目	经济指标	备注
发电量/(kW·h·a ⁻¹)	3 200 000	—
发电收益/万元	230	单价 0.72 元/kW·h
一次性投资增加/万元	1 000	—
10 年发电收益折现/万元	1 543.3	6.710 1 价值系数
15 年发电收益折现/万元	1 968.7	8.559 5 价值系数
一次性投资增加量与 10 年发电收益/万元	543.3	—
一次性投资增加量与 15 年发电收益/万元	968.7	—

根据表 11 的经济指标,余热发电初期投资将增加约 1 000 万元,但每年发电用于生产后,可为天然气处理厂实现发电收益 230 万元,折算一次性投资增加量与 10 年发电收益折现后可盈利 543.3 万元,一次性投资增加量与 15 年发电收益折现后可盈利 968.7 万元。

3 结论

天然气处理厂中余热利用,直接影响全厂的能耗。有效利用余热,可为工厂带来较大的经济利益。文中叙述的是在石油天然气上游处理厂设计工程中目前较常见的几种余热利用方案,可以看出,每一种余热利用方案,均可以直接或者间接地为生产企业带来收益,节省能耗。

工程设计中,可以选用合理的余热利用方案,科学、有效地利用余热,切实做到石油天然气生产企业的节能减排。

参考文献:

- [1] 张新敬,谭春青,隋军,等.我国工业节能现状调研和对策[J].中国能源,2008,30(11):32-38.
Zhang Xinjing, Tan Chunqing, Sui Jun, et al. Investigation of the Present Status of Industry Energy Conservation and Countermeasures in China [J]. Energy of China, 2008, 30 (11): 32-38.
- [2] 陈由旺,余绩庆,林冉,等.油气田节能技术发展现状与展望[J].中外能源,2009,14(9):88-94.
Chen Youwang, Yu Jiqing, Lin Ran, et al. Development and Prospects for Energy Saving Technologies in Oilfield [J]. Sino-Global Energy, 2009, 14 (9): 88-94.
- [3] 李维,尹述平.石油化工企业装置余热的综合开发利用[J].节能,2000,19(8):19-20.
Li Wei, Yin Shuping. Comprehensive Utilization of Remaining Heat in Petrochemical Device [J]. Energy Conservation, 2000, 19 (8): 19-20.
- [4] 宋文华.余热利用系统的优化分析[J].节能技术,1989(3):10-13.
Song Wenhua. Optimization Analysis of Waste Heat Utilization System [J]. Energy Conservation Technology, 1989 (3): 10-13.
- [5] Bell L E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems [J]. Science, 321 (5895): 1457-1461.
- [6] 钱伯章.世界能源消费现状和可再生能源发展趋势(上)[J].节能与环保,2006(3):8-11.
Qian Bozhang. Present Status of World Energy Consumption

- and Developing Trend of Renewable Sources of Energy [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2006 (3): 8-11.
- [7] 邓元媛,周吉日,姚宁,等. 工业企业余热和废热利用研究[J]. 建筑节能,2013,41(9):21-23.
Deng Yuanyuan, Zhou Jiri, Yao Ning, et al. Recovery of Industrial Waste Heat [J]. Building Energy Efficiency, 2013, 41 (9): 21-23.
- [8] Khaliq A, Kumar R, Dincer I. Exergy Analysis of an Industrial Waste Heat Recovery Based Cogeneration Cycle for Combined Production of Power and Refrigeration [J]. Energy Resources Technology, 2009, 131 (2): 022402-022410.
- [9] 曹鲁峰. 余热利用系统的最优化研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2004,22(2):16-17.
Cao Lufeng. The Most Excellent Surplus-Heating Utilized System [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2004, 22 (2): 16-17.
- [10] 陈妍. 废水余热利用技术建筑区域适应研究[D]. 天津:天津大学,2014.
Chen Yan. The Adaptation Research on Community of an Exhaust Heat Recovery System Using Wastewater as a Heat Source [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [11] 邓胜祥,周子民. 某厂乏汽余热利用与冷凝水回收新方法研究[C]//中国金属学会能源与热工分会. 2006 全国能源与热工学术年会论文集. 张家界:中国金属学会, 2006:4.
Deng Shengxiang, Zhou Jiemin. Research on a Novel Using and Reclaiming Method of Superfluous Heat of Used-steam and Condensed Water [C]//Energy and Thermal Engineering Branch of the Chinese Society for Metals. Proceedings of 2006 National Annual Conference on Energy and Thermal Engineering. Zhangjiajie: China Metal Society, 2006: 4.
- [12] 贾相贵,姜成敏,祁锦臻. 利用烘干余热采暖潜力大[J]. 中国设备管理,1995(9):30.
Jia Xianggui, Jiang Chengmin, Qi Jinzhen. Great Potential of Using Dry Waste Heat for Heating [J]. China Plant Engineering, 1995 (9): 30.
- [13] 耿建安,李华玉. 油田热污水余热利用的可行性分析及尝试[J]. 制冷与空调,2004,4(2):67-70.
Geng Jianan, Li Huayu. Viability Analysis and Trial of Heat Recovery of Hot Wastewater in the Oilfield [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2004,4 (2): 67-70.
- [14] 刘浩. 多能互补与余热梯级利用的冷热电联产系统集成[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
Liu Hao. Combined Cooling Heating and Power Cogeneration Systems Integrated with Solar Thermochemical Process and Technologies for Cascade Utilization of Waste Heat [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [15] 阮雪华,辛月,张宁,等. 利用烟气废热的LiBr制冷液化粗CO₂节能新工艺[J]. 化工进展,2018,37(5):1985-1991.
Ruan Xuehua, Xin Yue, Zhang Ning, et al. Low-grade Heat Utilization and CO₂ Liquefaction Process Based on LiBr Absorption Refrigeration [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37 (5): 1985-1991.
- [16] Kalinowski P, Hwang Y, Radermacher R, et al. Application of Waste Heat Powered Absorption Refrigeration System to the LNG Recovery Process [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32 (4): 687-694.
- [17] 杨猛,董辉,杜涛. 钢铁企业余热吸收制冷[J]. 节能,2009,28(9):39-42.
Yang Meng, Dong Hui, Du Tao. Iron and Steel Enterprise Using Waste Heat Absorption Refrigeration [J]. Energy Conservation, 2009, 28 (9): 39-42.
- [18] 朱家贤,卢玫. 热电冷三联产系统中制冷废热利用的研究[J]. 动力工程学报,2013,33(7):567-571.
Zhu Jiaxian, Lu Mei. Study on Recovery of Waste Heat from CCHP Systems [J]. Journal of Chinese Society Power Engineering, 2013, 33 (7): 567-571.
- [19] 冯永华,徐文忠,孙始财. 火电厂循环冷却水废热回收利用问题研究[J]. 节能,2007,26(3):17-19.
Feng Yonghua, Xu Wenzhong, Sun Shicai. Research on the Waste Heat Utilization of Circulating Cooling Water in Power Plant [J]. Energy Conservation, 2007, 26 (3): 17-19.
- [20] Popli S, Rodgers P, Evely V. Gas Turbine Efficiency Enhancement Using Waste Heat Powered Absorption Chillers in the Oil and Gas Industry [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50 (1): 918-931.