

文章编号: 2095-2163(2022)09-0076-05

中图分类号: TK115

文献标志码: A

基于 Trnsys 冷热电联供系统性能研究

陈兴乐, 虞育杰, 朱纪云, 李 阳

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 本文基于 Trnsys 软件, 搭建了贵州某工业园区的天然气管冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)系统的仿真模型。通过对比额定工况下的仿真结果与设计工况的主要参数, 验证了模型的准确性, 为后续分析和优化奠定了基础。对额定工况下的循环进行热力学计算, 并根据计算结果分析了各循环设备的焓损失和焓效率。分析结果表明: 系统维持90%负荷率工作时, 可获得最高的焓效率。利用吸收式热泵排出的低温烟气制取生活热水, 可提高系统0.32%的焓效率。

关键词: Trnsys; 冷热电联供; 焓分析

Research on performance of combined cooling heating and power system based on Trnsys

CHEN Xingle, YU Yujie, ZHU Jiyun, LI Yang

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] In this paper, a simulation model of combined cooling heating and power (CCHP) system for natural gas in an industrial park in Guizhou province is built based on Trnsys software. By comparing the simulation results under rated working conditions with the main parameters of design conditions, the accuracy of the model is verified, which lays a foundation for subsequent analysis and optimization. Thermodynamics calculation is carried out for the cycle under rated working conditions, and exergetic loss and exergetic efficiency of each cycle equipment are analyzed according to the calculation results. The analysis results show that the highest exergetic efficiency can be obtained when the system works at 90% load rate. The exergetic efficiency of the system can be improved by 0.32% by making domestic hot water from the low temperature flue gas discharged by the absorption heat pump. Exergetic loss of electric compression heat pump is mainly concentrated in compressor and evaporator, while exergetic loss of flue gas double-effect absorption heat pump is mainly concentrated in high pressure generator.

[Key words] Trnsys; combined cooling heating and power; exergy analysis

0 引言

能源是人类赖以生存的基础和社会发展的动力, 随着世界经济的迅速发展, 人类对能源的需求激增, 导致能源紧缺和环境污染问题日益严重, 亟需将能源利用方式从传统粗放向集约转型。天然气管冷热电联供系统可以提高化石能源的综合利用效率, 减少环境污染, 同时提供电、冷、热等多种能源形式, 可实现“功热并供的梯级利用”, 符合国家可持续发展战略^[1-3]。

Trnsys 即为瞬时模拟仿真软件, 其基于模块化分析, 适用于大型复杂的热力系统, 对冷热电联产系统的模拟仿真有很好的适应性。能效分析作为体现天然气管冷热电联供系统优越性与指导工程项目决策的有力依据, 是 CCHP 推广应用的重要环节。基于

热力学第一定律的热平衡分析方法, 无法区分能量在品位上的不等价性, 具有一定的应用局限性^[4]。而基于热力学第二定律的焓分析法, 区分了电量、冷量、热量在焓分析法计及功和热与冷在热力学方面的不等价性, 评价的结果更加合理^[5]。杨博等人^[6]研究了闭式布雷顿循环 CCHP 系统设备的焓效率, 得到主要系统参数对焓效率的影响。陈永超^[7]对某一酒店 CCHP 系统进行焓分析, 考虑研究关注的计及系统运行参数和运行策略对焓效率的影响并进行优化。

本文采用 Trnsys 软件基于焓分析法, 对贵州某工业园区的冷热电联供系统额定工况下的循环进行了详细的焓分析, 所得结果可对天然气管冷热电联供系统的改进和优化提供一定的理论支持。

作者简介: 陈兴乐(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 分布式能源系统研究; 虞育杰(1986-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 能源清洁高效利用、综合能源技术; 朱纪云(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 能源清洁利用; 李 阳(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 能源清洁利用。

通讯作者: 虞育杰 Email: yuyujie@126.com

收稿日期: 2022-02-26

1 系统概述

贵州某工业园区天然气冷热电联供系统的额定工况下的热力系统主要由天然气内燃机发电机组发电、缸套水制取生活热水、烟气双效型溴化锂吸收式热泵和电压缩式热泵供冷/热四部分组成。

系统运行原理为: 天然气进入燃气内燃机内燃烧做功, 带动发电机发电, 发电功率首先满足园区内用电需求, 多余电量上主动配电网; 天然气在内燃机

中燃烧产生的高温烟气进入吸收式热泵, 驱动吸收式热泵制冷; 在燃气内燃机燃烧发电的过程中产生的高温缸套水, 可通过板式换热器与自来水换热, 向用户提供生活热水; 电压缩式热泵在本系统内的作用, 是在用电低谷期将电用于制冷并将能量用储能装置储存起来, 在用电高峰期时能让电压缩式热泵不工作, 蓄能罐补充冷量, 既减少了用电, 也能及时补充用户供冷的不足。系统结构如图 1 所示。

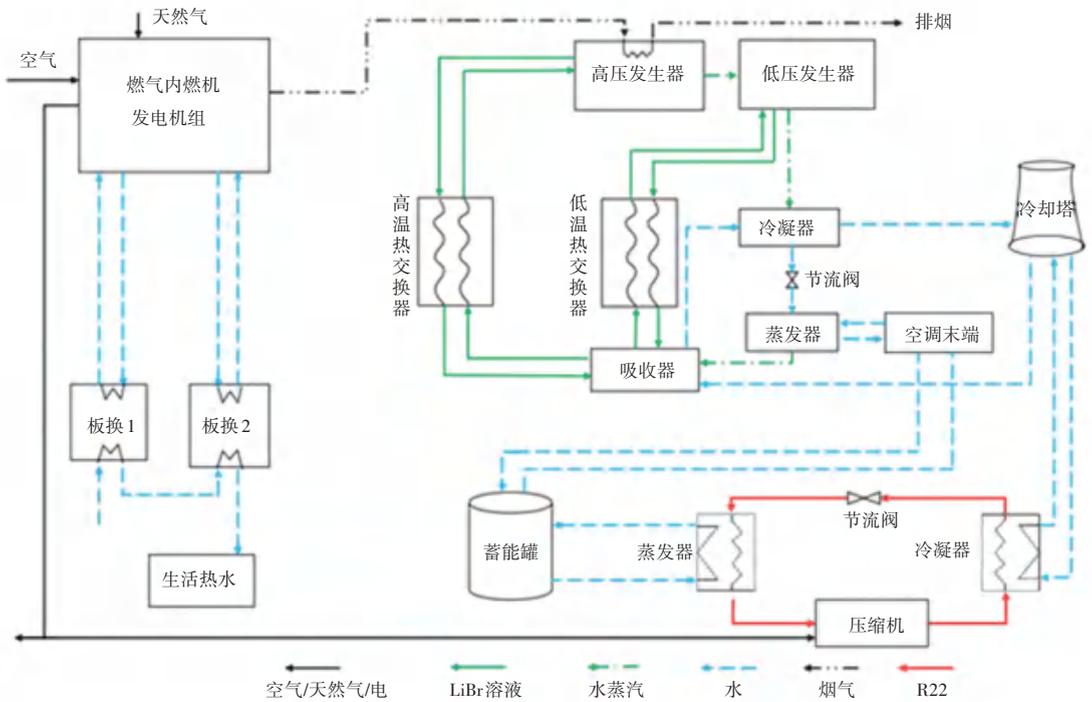


图 1 热力系统图

Fig. 1 Thermal flowchart

2 仿真模型及分析方法

2.1 仿真模型

搭建天然气 CCHP 系统的仿真模型, 需要调用 Trnsys 软件自带的基本设备模型。其中, 内燃机模型选用 Type907, 烟气或蒸汽型溴化锂吸收式热泵机组选用 Type676, 电压缩式热泵选用 Type666。搭建模型如图 2 所示。

为了验证软件建立的联供系统模型的准确性, 获取额定工况下的仿真数据与设计数据进行对比。系统在额定工况下的稳态仿真结果与设计工况参数基本匹配。其主要参数的相对误差在 2% 以内, 说明在 Trnsys 中设备模型的精度达到仿真要求。仿真

工况与设计工况主要参数对比情况见表 1。

表 1 仿真工况与设计工况参数

Tab. 1 Parameters of simulation condition and design operating condition

参数	设计工况	稳态仿真	误差/%
发电量/kW	500.0	498.00	-0.40
排烟温度/°C	520.0	520.40	0.08
自来水温度/°C	15.0	15.00	0.00
生活热水温度/°C	60.0	60.90	1.50
中冷水出口温度/°C	45.0	45.01	0.02
缸套水出口温度/°C	87.0	87.61	0.70
冷却水出口温度/°C	32.0	32.10	0.31
冷媒水出口温度/°C	7.0	7.10	1.43

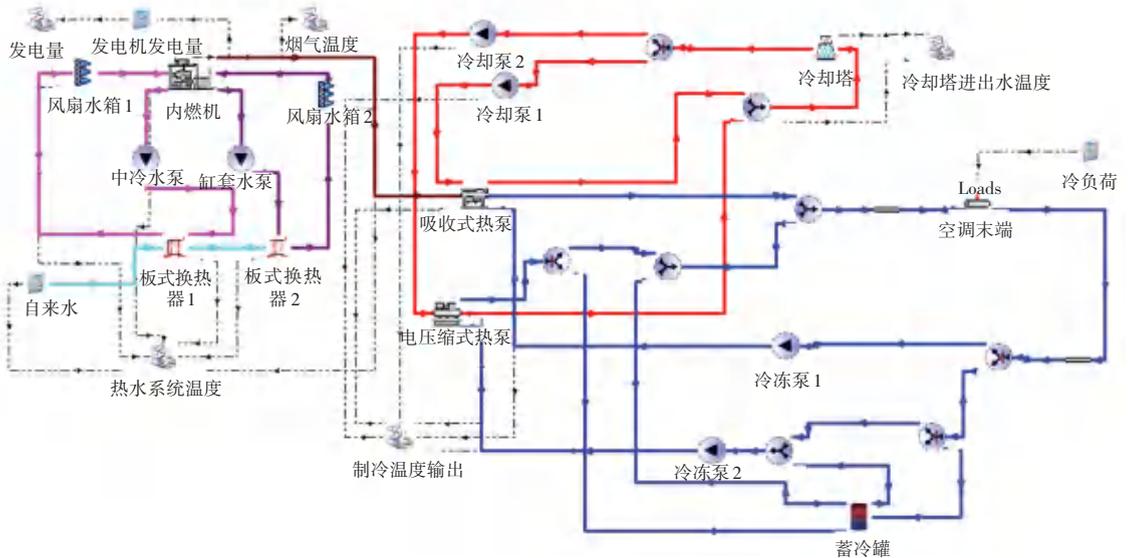


图2 仿真系统图

Fig. 2 Simulation system diagram

2.2 焓分析方法

焓是指在环境条件下某种能量可以转化有用功的最大值。在实际转换过程中,不可避免地会有一些可用功将转化为不可用功,称为焓损失^[8]。焓效率是指收益焓与代价焓的比值,反映焓的利用程度。系统中将各部件假设为稳定开口系,其比焓和焓效率计算公式为:

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

$$\eta = E_a/E_p \quad (2)$$

其中, h 、 h_0 分别为系统内的流体和参考状态下流体的比焓 (kJ/kg), s 、 s_0 分别为系统内流体和参考状态下流体的熵 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), E_a 、 E_p 为收益焓和代价焓 (kW)。

天然气 CCHP 系统中包含多个设备,各设备内流体的物性变化较为复杂,因此在模拟计算前做以下假设:

- (1) 系统处于热平衡和稳定流动状态。
- (2) 忽略各设备进出口工质的动能和位能。
- (3) 忽略热损失、阻力损失、压力损失及泵功。

本文以 298.15 K 和 0.1 MPa 为环境参考温度和参考压力,设定该状态为焓分析的基准。水和水蒸气的物性参数和 LiBr 溶液的物性参数分别由 LiBr 溶液焓熵经验公式^[9] 和 IAPWS-IF97 公式^[10] 计算得到。

3 结果分析

3.1 缸套水制取生活热水的焓分析

发电机组在额定工况下的设计参数见表 2,以

此为基础对缸套水制取生活热水进行焓分析计算。发电机组发电后产生的中冷水和高温缸套水,在换热器 1 和换热器 2 中加热自来水制取生活热水。经过计算后可得,换热器 1、2 的焓效率分别为 31.44% 和 24.85%。换热器 1 的焓效率比换热器 2 焓效率高,主要是因为换热器 2 的换热温差大于换热器 1,以致产生了更多的焓损。

表 2 发电机组设计参数

Tab. 2 Design parameters of the generator set

参数	数值
额定发电量/ kW	500
天然气流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	0.03
排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	520
高温缸套水输入/出温度/ $^{\circ}\text{C}$	78/85
高温缸套水流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	7.08
中冷水输入/出温度/ $^{\circ}\text{C}$	37/45
中冷水水流量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	3.72
生活热水供/回水温度/ $^{\circ}\text{C}$	60/15

3.2 电压式热泵焓分析

电压式热泵供冷工况焓损系数见表 3,电压式热泵各部件焓损如图 3 所示。从表 3 和图 3 可以看出:在额定供冷工况下,电压式热泵的焓效率为 17.71%。各部分焓损失由大到小依次为:压缩机、循环水、冷凝器、蒸发器、节流阀。其中,焓损最大的设备是压缩机,焓损系数为 26.93%。分析焓损较大的原因,主要是在压缩过程中,机械摩擦和非等熵压缩过程增加了制冷剂的熵值,因此可选用压缩效率、机械效率高的压缩机来降低焓损。电压式热泵节流阀处的焓损小,这是因为工质流经节流阀时的温降和压降都较小。在供冷工况下,循环水在

冷凝器中吸热,可认为循环水带走了电压缩式热泵的热量焓,产生了焓损。

表 3 电压缩式热泵供冷工况焓损系数

Tab. 3 Exergic loss coefficients in cooling condition of the electric compression heat pump

参数	计算结果/kW	焓损系数/%
压缩机功率	52.00	—
压缩机焓损	14.00	26.93
节流阀焓损	8.65	16.63
蒸发器焓损	2.77	5.33
循环水焓损	8.26	15.88
总焓损	42.79	82.30
冷冻水输出焓	9.21	—

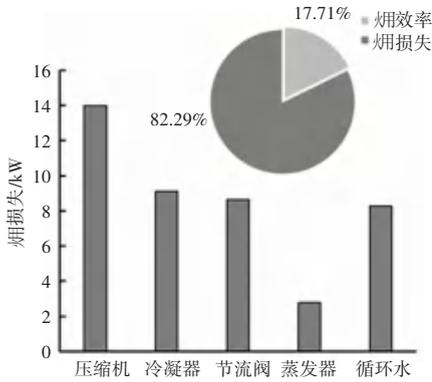


图 3 电压缩式热泵各部件焓损

Fig. 3 Exergic loss of all components in the electric compression heat pump

3.3 烟气双效型吸收式热泵焓分析

吸收式热泵焓损系数见表 4。吸收式热泵各部件焓损系数如图 4 所示。由表 4 和图 4 中可以看出:在额定工况下,烟气双效型吸收式热泵供冷的焓效率为 13.23%,吸收式热泵的各组件焓损失由大到小依次为:高压发生器、循环水、吸收器、低压发生器、高温热交换器、冷凝器、蒸发器、低温热交换器、节流阀。高压发生器是吸收式热泵焓损失最大的部分,焓损系数为 30.32%,其主要原因是高压发生器存在高温烟气加热溴化锂溶液的过程,且换热温差较大。其次是循环水,主要原因是在供冷工况下用于冷却的循环水的流量较大带走了大量的热。吸收器焓损失较大的原因一方面与溴化锂溶液的性质有关,一方面由于吸收过程会放出热量,产生外部焓损所致。

3.4 负荷率对系统焓效率的影响

为反映系统负荷率对系统焓效率的影响,在已搭建好的 Trnsys 模型中设定负荷率分别为:工况 1 负荷率 100%、工况 2 负荷率 90%、工况 3 负荷率

70%、工况 4 负荷率 50%,对这 4 种工况分别进行模拟仿真,并计算不同负荷率下的系统焓效率。其中,天然气消耗量为各个工况的实际测量值,燃料比焓取天然气的低位发热值 45 546.066 kJ/kg。研究得到的焓效率随负荷率的变化曲线如图 5 所示。

表 4 吸收式热泵焓损系数

Tab. 4 Exergic loss coefficients in absorption heat pump

参数	计算结果/kW	焓损系数/%
烟气输入焓	205.41	—
高压发生器焓损	62.28	30.32
循环水焓损	30.20	14.71
吸收器焓损	20.10	9.79
低压发生器焓损	18.67	9.10
蒸发器焓损	8.08	3.94
冷凝器焓损	12.69	6.18
高温热交换器焓损	16.79	8.18
低温热交换器焓损	7.47	3.64
节流阀焓损	1.96	0.95
总焓损	178.24	86.77
冷冻水输出焓	27.17	—

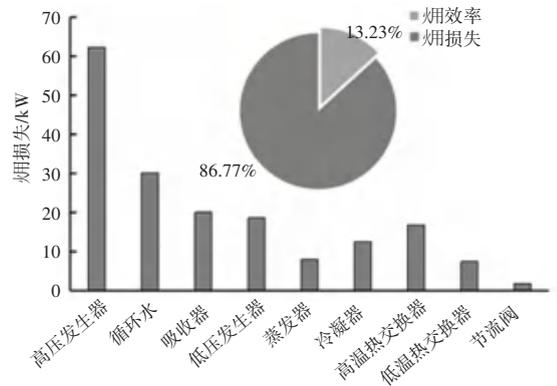


图 4 吸收式热泵各部件焓损

Fig. 4 Exergic loss of all components in the absorption heat pump

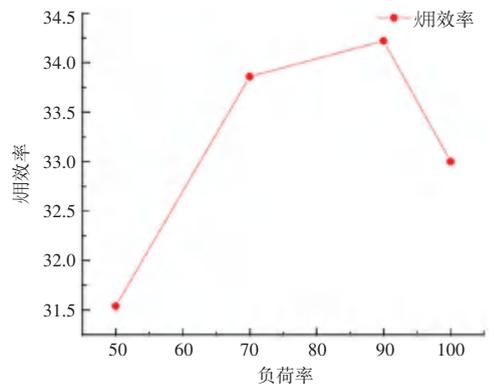


图 5 焓效率随负荷率变化

Fig. 5 The variation of exergic efficiency with the load rate

系统焓效率计算公式为:

$$\eta = (W + E_c + E_h) / E_f \quad (3)$$

其中, W 为系统的发电量; E_c 为系统输出的冷量焓; E_h 为系统输出的热量焓; E_f 为系统输入的燃料焓。

通过图5可以看出,系统焓效率是当负荷率在90%左右达到最大值;在50%~70%区间增长明显,负荷率提高20%,焓效率增加2.35%;在70%~90%区间增长放缓;负荷率提高20%,焓效率只增加0.36%;负荷率在90%~100%区间焓效率随着负荷率的增长而降低,负荷率增加10%,焓效率降低1.22%。

系统的负荷率对排烟温度影响较大,燃气内燃机的排烟温度和流量与系统负荷率呈正相关。适合的烟气流量和烟气进口温度,可以使得吸收式热泵获得最大的效率^[11]。因此,该系统焓效率并未随着负荷率的增加而增加,在90%负荷率左右时焓效率达到最高且较为合理。

3.5 回收低温烟气对系统焓效率的影响

在额定工况下,燃气内燃机排出的烟气温度约为520℃,经吸收式热泵回收利用后,排出的烟气温度约为150℃,这一部分烟气可用于加热生活热水,以提高系统的焓效率。根据内燃机厂家提供的设备参数,在额定工况下系统的烟气流量为2576 kg/h,忽略烟气在换热过程中的质量损失。利用低温烟气制取生活热水的换热公式为:

$$Q = m_{\text{烟}} c_{\text{烟}} \Delta t_{\text{烟}} = m_{\text{水}} c_{\text{水}} \Delta t_{\text{水}} \quad (4)$$

其中, Q 为换热量(kW); m 为质量流量(kg/s); c 为定压比热容,烟气取1.134 kJ/(kg·K),水取4.19 kJ/(kg·K); Δt 为换热前后温差。

经计算低温烟气每秒可加热0.559 kg的15℃自来水至60℃,可回收4.465 kW的焓,提高系统0.32%的焓效率。

4 结束语

本文采用Trnsys软件基于焓分析法对贵州某工

业园区的CCHP系统在额定工况下的性能进行了研究,经试验分析结论如下:

(1) 在该CCHP系统中,烟气双效吸收式热泵在额定工况下焓损失最大的设备是高压发生器,可采用温度适合的烟气来加热溴化锂溶液或提高高压发生器中的压力,以提高溴化锂溶液温度,减小换热温差以降低系统焓损。

(2) 保持系统维持在90%左右的负荷率,可提高系统的焓效率。

(3) 如果利用吸收式热泵排出的低温烟气制取生活热水,可回收4.465 kW的焓,提高系统0.32%的焓效率。

参考文献

- [1] 胡荣,马杰,李振坤,等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术,2017,41(02): 418-425.
- [2] 金红光. 能的梯级利用与总能系统[J]. 科学通报,2017,62(23):2589-2593.
- [3] 王志贺,刘元园,唐沂媛,等. 考虑二氧化碳排放的冷热电联供系统的容量配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(08):104-110.
- [4] 郭艳飞,吴强,程林,等. 基于焓效率的综合能源系统能效分析模型[J]. 可再生能源,2017,35(09):1387-1394.
- [5] 张凯真,柳善建,刘亚亚,等. 冷热电联供系统运行策略及优化控制研究进展[J]. 新能源进展,2019,7(02):168-175.
- [6] 杨博,陈林根,戈延林,等. 闭式内可逆回热布雷顿热电冷联产装置焓分析[J]. 热力透平,2014,43(02): 134-138.
- [7] 陈永超. 酒店冷热电联供系统(火用)分析及优化研究[D]. 济南:山东建筑大学,2020.
- [8] 王菲,沈胜强. 新型太阳能双喷射制冷系统的可用能效率分析[J]. 化工学报,2009,60(03): 553-559.
- [9] 陶玉灵. 烟气驱动的热管废热溴化锂制冷机的计算机模拟[D]. 南京:南京工业大学,2003.
- [10] WAGNER W, COOPER J R, DITTMANN A, et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam[J]. Journal of Engineering Gas Turbines Power, 2000,122(1): 150-184.
- [11] 郑剑娇,郭培军,隋军,等. 烟气型吸收式制冷机的变工况特性研究[J]. 工程热物理学报,2012,33(08): 1275-1278.