

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-660-05

低压蒸汽余热发电应用研究

袁中原 陈 薇 胡 钦

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘 要】 基于工程热力学理论, 针对低压饱和蒸汽, 建立了蒸汽直接膨胀系统、ORC 余热发电系统、蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的计算模型, 研究了蒸汽压力和回水温度对三种系统净发电量和发电效率的影响。结果表明: 联合系统的净发电量最高; 三种系统的净发电量和发电效率均随蒸汽压力的升高而升高, 但 ORC 系统升高幅度较小; 直接膨胀系统的净发电量和发电效率随回水温度的升高而急剧下降, 其变化规律完全不同于另外两个系统。

【关键词】 低压饱和蒸汽; 余热发电; 净发电量; 发电效率

中图分类号 TM617 文献标识码 A

The Research on Cogeneration of Low-pressure Saturated Steam

Yuan Zhongyuan Chen Wei Hu Qin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Based on thermodynamics theory, the simulation method on three cogeneration of Low-pressure saturated steam, including steam expansion system, ORC system and cascade system were developed. The effect of steam pressure and cooling temperature on net power and power efficiency were investigated. The results show that the cascade system has the maximum net power. The net power and power efficiency increase with the steam pressure increase, and the increase degree of ORC system is lowest. The net power and power efficiency sharply decrease with the cooling temperature increase, which is different the others system.

【Keywords】 Low-pressure saturated steam; Cogeneration technology; net power; power efficiency

0 引言

在化工行业, 存在大量低压饱和蒸汽, 需要冷凝到特定的目标温度, 以满足生产工艺过程的要求。目前, 这些低压蒸汽通常采用空冷或水冷方式进行冷凝, 但空冷和水冷均属于耗能、耗水型冷却方式, 冷却过程中造成了大量能源的浪费, 同时间接造成环境污染。因此, 如何实现节能减排和降低能耗是解决我国能源问题和生态环境压力问题的重要途径^[1-3]。

低压饱和蒸汽中蕴含了压力能和热能, 可以通过余热发电的方式回收该部分能量。低压饱和蒸汽

余热发电系统主要包含三类: 蒸汽直接膨胀余热发电系统、有机朗肯循环 (ORC) 余热发电系统、蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统。蒸汽直接膨胀余热发电系统与传统的火力发电汽轮机系统较为类似, 其运行原理是蒸汽推动膨胀机做功发电。有机朗肯循环 (ORC) 余热发电系统可以利用热功转换原理, 将蒸汽中的一部分热能转化为电能, 同时, 将蒸汽冷凝为工艺要求的凝结水, ORC 余热发电系统可以实现低压蒸汽冷凝的同时输出电能, 具有良好的节能环保效果^[4-8]。

然而, 蒸汽直接膨胀余热发电系统和有机朗肯

基金项目: 四川省科技计划项目: 工业低温余热发电关键技术研究及成套装备应用示范 (2018GZ0160)

作者 (通讯作者) 简介: 袁中原 (1983.8-), 男, 博士, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-15

循环发电系统都有自身的缺点, 蒸汽直接膨胀余热发电系统中膨胀机出口乏汽中的大量潜热无法有效利用, 而 ORC 余热发电系统由于采用的是有机工质, 其临界点较低, 不适用于温度较高的热源。因此, 为了更好回收蒸汽中余热, 可以采用蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的方式。

本文针对某煤制油化工厂的低压饱和蒸汽, 依据热力学基本理论, 建立蒸汽直接膨胀系统、ORC 余热发电系统、蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的计算模型, 对上述三种蒸汽余热发电系统的工程应用进行分析。

1 系统简介

低压蒸汽品位较低, 适合采用蒸汽直接膨胀余热发电系统、有机朗肯循环 (ORC) 余热发电系统、以及蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统。本文针对某煤制油化工厂的低压饱和蒸汽, 分析上述三种蒸汽余热发电系统的工程应用。

1.1 直接膨胀系统

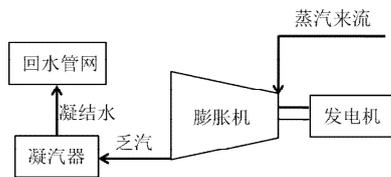


图 1 蒸汽直接膨胀余热发电系统

Fig.1 Steam Expansion System

蒸汽直接膨胀余热发电系统如图 1 所示, 运行原理为: (1) 来流的低压蒸汽送入膨胀机, 推动膨胀机做功发电, 同时, 低压蒸汽变为低温低压的乏汽; (2) 乏汽送入凝汽器被冷凝为目标温度的凝结水; (3) 凝液被排放至厂区回水管网。

1.2 有机朗肯循环 (ORC) 系统

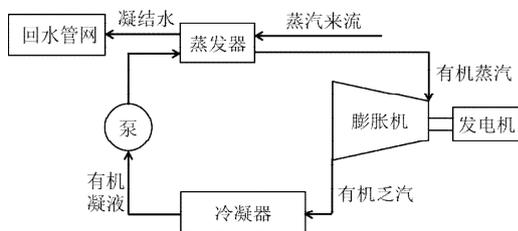


图 2 蒸汽有机朗肯循环 (ORC) 系统

Fig.2 Organic Rankine System for Steam

蒸汽有机朗肯循环 (ORC) 余热发电系统的原理图见图 2, 运行原理为: (1) 来流的蒸汽送入 ORC 系统蒸发器, 将系统中的有机工质加热为高

温高压的有机蒸汽, 同时, 蒸汽被凝结为目标温度的凝结水, 排放至厂区回水管网; (2) 蒸发器出口的有机蒸汽送入膨胀机, 推动膨胀机做功发电后, 变为低温低压的有机乏汽; (3) 有机乏汽送入冷凝器被冷凝为有机凝液, 经由泵送至蒸发器, 持续吸收来流蒸汽的热量。

1.3 联合系统

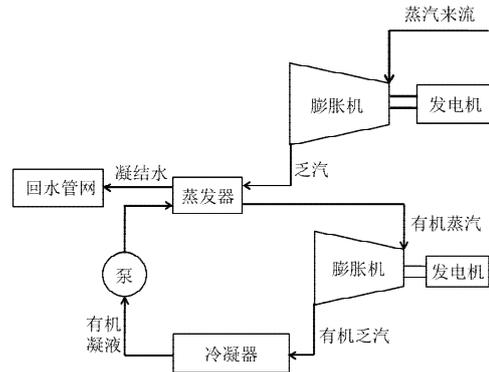


图 3 联合系统

Fig.3 Cascade System for Steam

蒸汽直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的原理图如图 3 所示, 运行原理为: (1) 来流的蒸汽送入膨胀机, 推动膨胀机做功发电, 同时, 蒸汽变为压力略高于大气压力的乏汽; (2) 蒸汽乏汽送入 ORC 系统蒸发器, 将系统中的有机工质加热为高温高压的有机蒸汽, 同时, 蒸汽乏汽被凝结为目标温度的凝结水, 排放至厂区回水管网; (3) 蒸发器出口的有机蒸汽送入膨胀机, 推动膨胀机做功发电后, 变为低温低压的有机乏汽; (4) 有机乏汽送入冷凝器被冷凝为有机凝液, 经由泵送至蒸发器, 持续吸收来流蒸汽的热量。

2 计算模型

采用热力学基本理论^[9], 分别建立低压蒸汽直接膨胀余热发电系统、ORC 余热发电系统、直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的计算模型。

2.1 直接膨胀系统计算模型

(1) 膨胀机

膨胀机为做功发电设备, 其发电量可采用下式计算:

$$E_s = m_s \cdot (h_{1,s} - h_{2,s}) / 3.6 \quad (1)$$

(2) 凝汽器

假定凝汽器采用蒸发式冷凝方式, 该设备包含有水泵和风机等耗电设备, 其耗电量可采用下式计

算:

$$E_{c,s} = k \cdot m_s \cdot (h_{2,s} - h_{3,s}) / 3.6 \quad (2)$$

(3) 净发电量

低压蒸汽直接膨胀余热发电系统的净发电量为:

$$E_{net,s} = E_s - E_{c,s} \quad (3)$$

式中, E_s 为蒸汽直接膨胀发电量, kW; m_s 为蒸汽流量, t/h; $h_{1,s}$ 为来流蒸汽的焓值, kJ/kg; $h_{2,s}$ 为膨胀机出口蒸汽的焓值, kJ/kg; $E_{c,s}$ 为蒸发式凝汽器耗电量, kW; k 为系数, 取 0.015; $h_{3,s}$ 为凝汽器出口凝结水的焓值, kJ/kg; $E_{net,s}$ 为蒸汽直接膨胀净发电量。

2.2 ORC 系统计算模型

(1) 蒸发器

ORC 系统的有机工质在蒸发器内被来流蒸汽加热为高温高压的状态, 有机工质与来流蒸汽的热平衡关系为:

$$m_s (h_{1,s} - h_{4,s}) = m_{ORC} (h_{1,ORC} - h_{4,ORC}) \quad (4)$$

(2) 膨胀机

高温高压的有机工质推动膨胀机做功发电, 发电量可按下式计算:

$$E_{ORC} = m_{ORC} \cdot (h_{1,ORC} - h_{2,ORC}) / 3.6 \quad (5)$$

(3) 冷凝器

有机工质乏汽在冷凝器中被冷凝为有机凝液, 假定冷凝器采用蒸发式冷凝器, 该设备包含有水泵和风机等耗电设备, 其耗电量可采用下式计算:

$$E_{c,ORC} = k \cdot m_{ORC} \cdot (h_{2,ORC} - h_{3,ORC}) / 3.6 \quad (6)$$

(4) 工质泵

有机工质被工质泵从冷凝器输送至蒸发器, 该设备为耗电设备, 耗电量如下:

$$E_{p,ORC} = m_{ORC} \cdot (h_{3,ORC} - h_{4,ORC}) / 3.6 \quad (7)$$

(5) 净发电量

ORC 余热发电系统的净发电量为:

$$E_{net,ORC} = E_{ORC} - E_{c,ORC} - E_{p,ORC} \quad (8)$$

式中, $h_{4,s}$ 为蒸发器出口凝结水焓值, kJ/kg; m_{ORC} 为有机工质流量, t/h; $h_{1,ORC}$ 为蒸发器出口有机工质焓值, kJ/kg; $h_{4,ORC}$ 为蒸发器入口有机工质焓值, kJ/kg; E_{ORC} 为 ORC 膨胀机发电量, kW; $h_{2,ORC}$ 为 ORC 膨胀机出口有机工质焓值, kJ/kg; $E_{c,ORC}$ 为蒸发式冷凝器耗电量, kW; k 为系数, 取 0.015; $h_{3,ORC}$ 为冷凝器出口有机凝液的焓值, kJ/kg;

$E_{p,ORC}$ 为工质泵耗电量, kW; $h_{4,ORC}$ 为工质泵出口有机工质的焓值, kJ/kg; $E_{net,ORC}$ 为 ORC 余热发电系统净发电量。

2.3 联合系统计算模型

蒸汽直接膨胀系统联合 ORC 余热发电系统的运行过程中, 蒸汽膨胀机出口乏汽的压力略高于大气压力, 本文采用 0.105MPa。与上述两种余热发电系统计算模型的建立类似, 联合系统的净发电量为:

$$E_{net,U} = E_s - E_{ORC} - E_{c,ORC} - E_{p,ORC} \quad (9)$$

3 结果与讨论

采用建立的计算模型, 对三种余热发电系统的净发电量和发电效率进行计算, 分析来流蒸汽压力和回水温度对净发电量和发电效率的影响。

3.1 蒸汽压力的影响

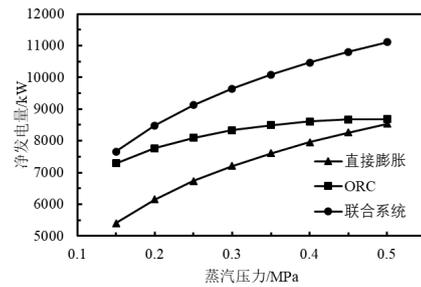


图 4 蒸汽压力对净发电量的影响

Fig.4 The effect of steam pressure on the net power

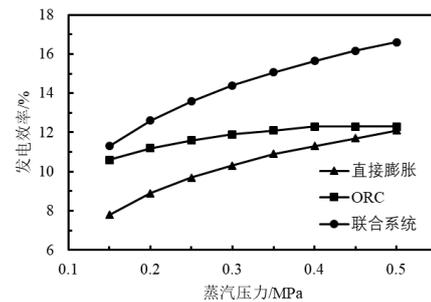


图 5 蒸汽压力对发电效率的影响

Fig.5 The effect of steam pressure on the power efficiency

以蒸汽流量 100t/h、回水温度 50℃ 的工况为例, 分析了蒸汽压力对三种余热发电系统净发电量和发电效率的影响, 分别如图 5 和图 6 所示。图中显示, 联合系统的净发电量和发电效率最高, 而且, 净发电量与发电效率随蒸汽压力的变化呈现较高的一致性。三种余热发电系统的净发电量和发电效率

率均随蒸汽压力的升高而升高,这是由于可利用能量和能量品位均随蒸汽温度的升高而升高。从图中可以看出,ORC 余热发电系统的净发电量与发电效率,随蒸发压力升高的增长幅度逐渐变缓,当蒸汽压力低于 0.5MPa 时,ORC 余热发电系统的净发电量高于直接膨胀系统的发电量,但从图中可以预见,当蒸汽压力高于 0.5MPa 时,直接膨胀系统的发电量将高于 ORC 余热发电系统,直接膨胀系统更适用于来流蒸汽压力较高的工况。

3.2 回水温度的影响

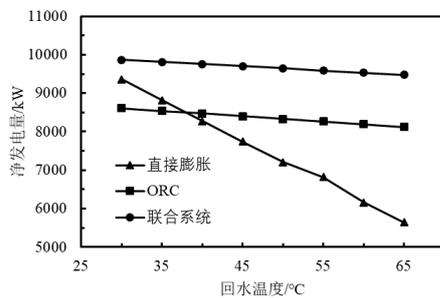


图 6 回水温度对净发电量的影响

Fig.6 The effect of cooling temperature on the net power

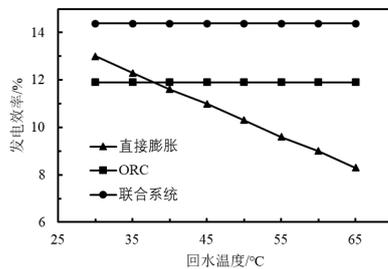


图 7 回水温度对发电效率的影响

Fig.7 The effect of cooling temperature on the power efficiency

以来流蒸汽压力 0.3MPa、流量 100t/h 的工况为例,分析了回水温度对三种余热发电系统净发电量和发电效率的影响。从图 5 和图 6 可以看出,联合系统的净发电量和发电效率最高。图中显示,随着回水温度的升高,蒸汽直接膨胀系统的净发电量和净发电效率呈急剧下降的状态,这是由于随着回水温度的升高,蒸汽膨胀机出口乏汽的压力的升高,导致可用来发电的蒸汽能量降低。从图 6 和图 7 中可以看出,ORC 余热发电系统和联合系统的发电效率与回水温度无关,该现象可以由卡诺定理来解释,二者的净发电量随回水温度的升高而缓慢下降,这是由于回水温度的升高导致可利用能量降低,而且降低幅度较小。

4 结论

本文针对某煤制油化工厂的低压饱和蒸汽,建立了蒸汽直接膨胀余热发电系统、ORC 余热发电系统、直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的计算模型,分析了来流蒸汽压力和回水温度对三种系统净发电量和发电效率的影响,得到了以下几点结论:

(1) 直接膨胀联合 ORC 余热发电系统的净发电量和发电效率最高。

(2) 三种余热发电系统净发电量和发电效率均随来流蒸汽压力的升高而升高,但 ORC 余热发电系统的升高幅度较小。

(3) ORC 系统与联合系统的发电效率与回水温度无关,但净发电量随回水温度的升高略有下降。

(4) 蒸汽直接膨胀系统的净发电量和发电效率随回水温度的升高而急剧降低。

参考文献:

- [1] 连红奎,李艳,束光阳,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术,2011,29(2):123-128.
- [2] 周耘,王康,陈思明.工业余热利用现状及技术展望[J].科技情报开发与经济,2010,20(23):162-164.
- [3] 余斌.我国工业余热回收利用空间广阔[J].中国建材资讯,2015,(4):6-7.
- [4] Sylvain Quoilin, Martijn Van DenBroek, et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,22:168-186.
- [5] Junjiang Bao, Li Zhao. A review of working fluid and expanders elections for organic Rankine cycle[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,24: 325-342.
- [6] Tao Chen, Weilin Zhuge, Yangjun Zhang, et al. A novel cascade organic Rankine cycle (ORC) system for waste heat recovery of truck diesel engines[J]. Energy Conversion and Management, 2017,138:210-223.
- [7] Denny Budisulistyo, Susan Krumdieck. A novel design methodology for waste heat recovery systems using organic Rankine cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2017,142:1-12.
- [8] Antti Uusitalo, Juha Honkatukia, Teemu Turunen-Saaresti. Evaluation of a small-scale waste heat recovery organic Rankine cycle [J]. Applied Energy, 2017,192: 146-158.
- [9] 沈维道,童钧耕.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,2007.

