

文章编号:1671-6833(2013)03-0055-04

# 有机朗肯循环回收烟气余热的可行性研究

马新灵<sup>1</sup>, 王 慧<sup>1,2</sup>, 魏新利<sup>1</sup>, 孟祥睿<sup>1</sup>, 杨凯旋<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南职业技术学院 机械电子工程系, 河南 郑州 450046)

**摘 要:** 计算了我国电站锅炉可回收的烟气余热量, 并对有机朗肯循环低温余热发电系统进行了热力分析. 以2台600 MW燃煤机组的排烟余热为热源、R245fa为工质, 确定了余热发电机组的最优运行参数和电力容量. 用RETScreen软件对该系统进行了投资收益和节能减排效益分析. 结果表明: 该余热机组发电量为47 502 MWh/a, 电力外销收入为1 900.1万元/a, 减排CO<sub>2</sub>量为42 419 t/a. 在初始投资成本6 500元/kW、财务负债比率65%的情况下, 投资简单偿还款期为2.5年, 股本回收仅需1.1年, 能源产出比为0.14元/kWh, 温室气体减排成本为291元/tCO<sub>2</sub>. 30年运行期内, 预计可累积现金4.31亿元.

**关键词:** 余热发电; 有机朗肯循环; 热力分析; 可行性研究

**中图分类号:** TK11\*5

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.03.014

## 0 引言

利用有机朗肯循环(ORC), 将低品位热能转化为电能, 既有助于解决能源问题, 又能避免常规能源利用过程中污染物的排放, 同时提高了能源的总利用率. 受到越来越多研究者的关注和重视<sup>[1-3]</sup>. 然而对于ORC系统的研究多限于理论上的基础研究, 如: C. SOMAYAJI<sup>[4]</sup>基于热力学定律对循环进行了热力分析和火用分析, Q. SYLVAIN等<sup>[5]</sup>和顾伟<sup>[6]</sup>对使用涡旋膨胀机的ORC系统进行了实验研究, 李艳等<sup>[7]</sup>对ORC系统的向心透平进行了设计和模拟研究. 对于该系统用于实际热能回收是否经济可行却鲜有报道. 笔者借助RETScreen软件, 对以R245fa为工质, 以回收2台600 MW燃煤锅炉的烟气余热为目标的系统, 进行了经济可行性研究.

## 1 电站锅炉烟气余热量的计算

根据2009年《中国电力行业年度发展报告》, 2008年6 000 kW及以上火电厂发电生产全年累计耗用原煤13.19亿t, 折合标准煤为9.4亿t, 约占能源消费总量的1/3. 可见, 火电厂是耗能大户, 而第一大耗能设备电站锅炉的设计排烟温度在120~140℃, 平均排烟温度在130℃.

依据GB/T 17719—2009《工业锅炉及火焰加热炉烟气余热资源量计算方法与利用导则》, 燃煤电站锅炉烟气余热量计算式为:

$$Q = BV_{py}(c_{py}t_{py} - 27.18)(1 - q_4). \quad (1)$$

式中:  $Q$ 为烟气余热量, kJ/a;  $B$ 为耗煤量, kg/a;  $V_{py}$ 为烟气体积, 9.5 m<sup>3</sup>/kg煤(过量空气系数1.2计算得到);  $t_{py}$ 为排烟温度, 130℃;  $c_{py}$ 为 $t_{py}$ 下烟气定压热容, 取1.37 kJ/(m<sup>3</sup>·℃);  $q_4$ 为未完全燃烧热损失, 取4%.

按6 000 kW及以上火电厂年耗用标煤量9.4亿t计, 带入公式(1), 得烟气余热量为12 994 × 10<sup>11</sup> kJ/a. 标准煤的低位发热量为29 270 kJ/kg, 则折合标准煤0.444亿t/a, 占年耗用标煤的4.7%. 若将上述余热回收一半, 则节约标准煤0.222亿t/a, 减排CO<sub>2</sub>0.58亿t/a. 以600 MW机组为例, 发电煤耗取0.30 kg/kWh, 则耗煤量为180 t/h. 锅炉烟气若从130℃降低到60℃, 130℃排烟余热为2.49 × 10<sup>8</sup> kJ/h, 60℃为9.08 × 10<sup>7</sup> kJ/h, 则回收的排烟余热为1.58 × 10<sup>8</sup> kJ/h.

## 2 有机朗肯循环的热力分析

有机朗肯循环与常规的蒸汽朗肯循环的区别在于前者采用低沸点有机物作为工质. 该循环由蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵组成. 工质在蒸

收稿日期: 2012-11-25; 修订日期: 2013-01-20

基金项目: 河南省重点科技攻关计划项目(122102210041); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A480722)

作者简介: 马新灵(1977-), 女, 河南南阳人, 郑州大学讲师, 博士研究生, 主要从事低温余热利用方面的研究, E-mail: xinlingma@zzu.edu.cn.

发器中从低温热源吸收热量产生有机蒸气,推动膨胀机旋转,带动发电机发电,在膨胀机做完功的乏气进入冷凝器冷却为液体,由工质泵打入蒸发器,完成一个循环.图 1 为系统的温熵图,循环过程为 1-2-3-4-5-6-1,包括蒸发器中的做功等压吸热过程(4-5-6-1),膨胀机中的做功膨胀过程(1-2),冷凝器中的等压放热过程(2-3),工质泵中的压缩升压过程(3-4)<sup>[8]</sup>.

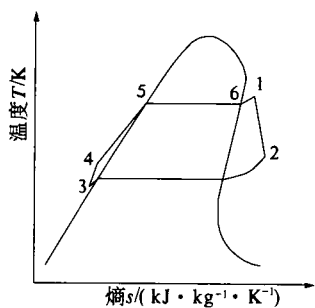


图 1 干工质的 ORC 系统的温 - 熵图  
Fig. 1 T-s diagram of ORC system for dry fluid

则循环的热效率为

$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{w_t - w_p}{h_1 - h_4} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \quad (2)$$

式中,  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$  分别为各状态点的比焓值, kJ/kg.

3 运行参数和发电容量的确定

3.1 运行参数的确定

在给定热源温度、冷源温度等条件下,工质的蒸发温度和冷凝温度对循环输出功及循环效率有较大的影响.严家騄<sup>[9]</sup>以单位质量热流体的最大发电量为依据,确定了系统的最佳冷凝温度和最佳蒸发温度.公式如下:

A. 最佳冷凝温度

$$T_{2\text{opt}} = T_0 + \delta t'' + \Delta t' = T_0 + \delta t'' + \lambda \sqrt{\frac{(T_0 + \delta t'')gH''}{c''_{\text{pm}}\eta''_{\text{p}}\eta''_{\text{EM}}\eta_{\text{T}}\eta_{\text{M}}\eta_{\text{C}}}} \quad (3)$$

B. 最佳蒸发温度

$$T_{1\text{opt}} = \xi \sqrt{\frac{(T_{\text{hl}} - \delta t')T_2(\eta_{\text{M}}\eta_{\text{C}} + \beta)}{\eta_{\text{M}}\eta_{\text{C}} - \beta\left(\frac{1}{\eta_{\text{T}}} - 1\right)}} \quad (4)$$

式中:  $T_0$ 、 $T_{\text{hl}}$ 、 $T_2$  分别为冷却水温度、热流体温度、有机工质的冷凝温度, K;  $\delta t'$ 、 $\delta t''$  分别为蒸发器、冷凝器内的传热温差, K;  $\eta_{\text{T}}$ 、 $\eta_{\text{M}}$  为膨胀机的等熵效率和机械效率;  $\eta_{\text{C}}$  为发电机效率;  $H''$  为冷却水泵的扬程, m;  $\eta''_{\text{p}}$ 、 $\eta''_{\text{EM}}$  为冷却水泵的效率和机电效率;  $c''_{\text{pm}}$  为冷却水的比热, kJ/(kg·K);  $\xi$  和  $\lambda$  为修正系数.

在热流体为电厂烟气, 温度  $T_{\text{hl}} = 130\text{ }^{\circ}\text{C} = 403\text{ K}$ , 冷却水温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293\text{ K}$  的条件下, 取  $\delta t' = 5\text{ K}$ ,  $\delta t'' = 3\text{ K}$ ,  $\eta_{\text{T}} = 0.78$ ,  $\eta_{\text{M}} = 0.98$ ,  $\eta_{\text{C}} = 0.92$ ,  $\eta''_{\text{p}} = 0.9$ ,  $\eta''_{\text{EM}} = 0.9$ ,  $H'' = 20\text{ m}$ , 忽略修正系数的影响, 由式(3)和(4)得系统最佳冷凝温度和最佳蒸发温度分别为  $27.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $75.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

以 R245fa 这种干性有机物作为工质, 研究表明: 蒸发器和冷凝器出口的工质为饱和状态时, 系统的性能最优, 即热效率最高<sup>[4]</sup>. 由 REFPROP. 7 知 R245fa 在最佳冷凝温度和最佳蒸发温度对应的饱和状态参数如表 1 所示.

表 1 R245fa 饱和状态的参数  
Tab. 1 Saturation parameters of R245fa

温度 $t$ / $^{\circ}\text{C}$	压力 $p$ /MPa	液体焓 $h$ / (kJ·kg <sup>-1</sup> )	气体焓 $h$ / (kJ·kg <sup>-1</sup> )
27.9	0.166	236.77	425.92
75.96	0.712	304.49	461.02

为保证进入膨胀机的工质为气态, 选取膨胀机入口参数为  $0.712\text{ MPa}$ 、 $76.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 结合上述参数, 取膨胀机、工质泵的等熵效率分别为 78% 和 90%, 得到图 2 中各状态点的参数, 如表 2 所示.

将上述各状态点的焓值代入公式(2), 计算得该循环的热效率为 9.14%.

表 2 循环各点的状态参数

Tab. 2 State parameters of various points of the cycle

状态点	温度 $t$ / $^{\circ}\text{C}$	压力 $p$ / MPa	焓值 $h$ / (kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	76.5	0.712	461.62
2	43.85	0.166	440.67
3	27.9	0.166	236.77
4	28.11	0.712	237.21

取蒸发器的换热效率  $\eta_{\text{R}}$  为 95%, 系统的管道效率  $\eta_{\text{p}}$  为 98%, 则整个机组的发电效率:

$$\eta = \eta_{\text{R}}\eta_{\text{p}}\eta_{\text{cycle}}\eta_{\text{M}}\eta_{\text{C}} = 95\% \times 98\% \times 9.14\% \times 98\% \times 95\% = 7.92\%.$$

3.2 有机朗肯循环发电容量的确定

3.2.1 余热发电容量的计算

由运行参数可知: 蒸发器中 R245fa 的入口温度为  $28.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 出口温度为  $76.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 烟气的入口温度为  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 出口温度取  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

火电厂一般同时建造 2 台 600 MW 机组. 2 台机组回收的余热为:  $3.16 \times 10^8\text{ kJ/h}$ .

能量守恒: 烟气余热  $\times \eta =$  发电量, 即

$$Q\eta = 3\text{ }600P_{\text{e}}, \quad (5)$$

所以, 小时发电量:

$$P_e = \frac{Q\eta}{3600} = \frac{3.16 \times 10^8 \times 10^{-3} \text{ MJ/h} \times 7.92\%}{3600 \text{ s/h}} = 6.952 \text{ MW}.$$

即该余热机组的发电功率为 6.952 MW.

### 3.2.2 余热回收后火电厂的效率

如前所述,标准煤的低位发热量为 29 270 kJ/kg, 600 MW 机组每小时耗煤量为 180 t/h,则烟气余热回收前的电厂效率为

$$\eta_{ep} = \frac{3600P_e}{Bq_{net}} = \frac{3600 \text{ s/h} \times 600 \text{ MW}}{180 \text{ t/h} \times 29270 \text{ kJ/kg}} = 41.00\%.$$

余热回收后电厂的综合效率为

$$\eta'_{ep} = \frac{3600P'_e}{Bq_{net}} = \frac{3600 \text{ s/h} \times (1200 + 6.952) \text{ MW}}{2 \times 180 \text{ t/h} \times 29270 \text{ kJ/kg}} = 41.24\%.$$

与原机组相比,能量利用率提高了 0.24%.

## 4 基于 RETScreen 的经济可行性分析

烟气余热发电在技术上可行,但要将其投入实际运行,还要考虑投入产出比、投资收益等问题.利用 RETScreen 软件,对其经济性进行分析.

### 4.1 成本核算的依据

ORC 余热发电与水泥炉窑的纯低温余热发电技术类似,因此该项目的成本核算以 2009 年中材国际公司为水泥厂做的容量为 9 MW 的余热发电工程中的投资情况为依据<sup>[10]</sup>.

### 4.2 回收烟气余热发电的经济可行性分析

#### 4.2.1 建立能源模型

余热机组的额定发电量为 6.952 MW. 机组年利用率按 78% 计,折算成满负荷发电小时数为 6 833 h,则年发电量为 47 502 MWh. 利用的是烟气余热,燃料费和热耗都为 0. 上网电价取 400 元/MWh,则年电力外销收入为 1 900.1 万元.

#### 4.2.2 成本分析

项目成本包括三部分:初始投资成本、年度成本和周期性成本.

水泥厂 9 MW 余热发电的投资成本为 5 000 元/kW. 考虑到有机工质价格昂贵,膨胀机不能采用轴流透平,但冷却塔、循环水系统等可以与原有系统共用. 取该投资成本为 6 500 元/kW,则初始成本为 6 500 元/kW  $\times$  6 952 kW  $\times 10^{-4}$  = 4 519 万元.

该项目不消耗燃料,则年度运行成本主要指劳动力成本和零件费. 水泥厂发电机组定员 22 人<sup>[10]</sup>,本机组所处位置就是电厂,部分人员无需重复配置,因此人员按 16 人计. 每人年收入 5 万元,则劳动力成本为 80 万元. 零件费取 25 万元,

则二者合计年度运行成本为 105 万元.

周期性成本主要是大修费用. 项目寿命 30 年,3 年大修一次,每次按 100 万元计.

### 4.2.3 减排量分析

减排量是指与常规燃煤发电相比引用该技术少排放的 CO<sub>2</sub> 量. 中国燃煤发电温室气体排放因子为 0.893 tCO<sub>2</sub>/MWh,加上传输和分配损失(取 5%),实际排放因子为 0.940 tCO<sub>2</sub>/MWh. 而该项目不消耗燃料,仅有传输和分配损失(仍取 5%)引起的温室气体排放,则年减排 CO<sub>2</sub> 量为

$$47502 \text{ MWh} \times 0.940 \text{ t/MWh} - 47502 \text{ MWh} \times 5\% \times 0.940 \text{ t/MWh} = 42419 \text{ t}.$$

该减排量折合吸收 CO<sub>2</sub> 的森林面积达 3 901 公顷,折算为未消耗的汽油 1 823 万升,数量惊人.

### 4.2.4 财务分析

财务参数包括能源成本上升速率、通货膨胀率、折现率、项目寿命期. 结合中国实际情况,上述参数分别取:5%、4%、12%、30 a.

财务负债比率取 65%,即初始投资成本 4 519 万元中,项目贷款债务 2 937 万元,自筹股本金 1 582 万元. 负债期 15 年,债务利率取 9%,则债务偿还为 364 万元/a.

根据上述财务参数,得到经济可行性分析如下:股本回报率为 89.9%,股本回收 1.1 a;净现值 0.99 亿元,年周期结余 1 234 千万元/a;收益与成本比率 7.29,能源产出比 0.14 元/kWh,温室气体减排成本 291 元/tCO<sub>2</sub>.

项目寿命期的 30 年,累计现金流量如图 3 所示. 由图 3 可知,自筹的股本金用 1.1 a 即可回收. 30 年运行期累计现金达 4.31 亿元.

目前火电成本为 0.3 元/kWh,太阳能光伏发电为 1.5 元/kWh,太阳能热发电为 1 元/kWh,风力发电为 0.6 元/kWh. 而本项目能源产出比为 0.14 元/kWh,远远低于其他发电技术成本.

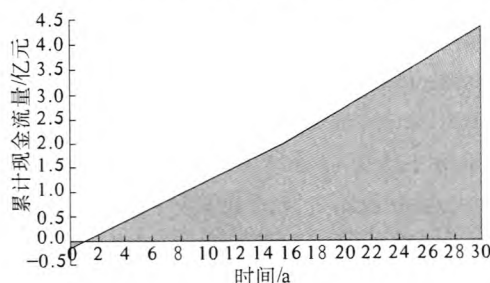


图2 6.952 MW 余热发电机组 30 年累积的现金流量  
Fig.2 Cumulative cash flows graph for 6.952MW waste heat unit in the 30 years

## 5 结论

以电站锅炉烟气余热为热源, R245fa 为工质, 对有机朗肯循环低温余热发电系统进行经济可行性分析, 得到以下结论:

(1) 根据 2009 年统计的数据, 计算可得全国可回收利用的电站锅炉烟气余热, 折合成标准煤约为 0.222 亿 t/a, 可减排 CO<sub>2</sub> 0.58 亿 t/a.

(2) 以 R245fa 为工质, 回收 2 台 600 MW 电站锅炉的烟气余热, 余热机组的发电效率为 7.92%, 发电容量为 6.952 MW. 余热回收利用后, 电厂的净能量利用率提高了 0.24%.

(3) 该余热机组年发电量为 47 502 MWh, 年电力外销收入为 1 900.1 万元, 年减排 CO<sub>2</sub> 量为 42 419 t, 温室气体减排成本 291 元/tCO<sub>2</sub>.

(4) 在初始投资成本 6 500 元/kW、财务负债比率 65% 的情况下, 项目自筹的股本金 1 582 万元用 1.1 a 的时间即可回收, 第二年项目已开始盈利. 该项目的能源产出比仅为 0.14 元/kWh, 在 30 a 运行期内, 可累积现金流量 4.31 亿元.

## 参考文献:

- [1] KALYAN K S, PEDRO J M, SUNDAR R K. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle [J]. *Energy*. 2010, 35 (6): 2387 - 2399.
- [2] FLORIAN H, DIETER B. Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation [J]. *Applied Thermal Engineering*. 2010, 30 (11/12): 1326 - 1332.
- [3] 王华, 王辉涛. 低温余热发电有机朗肯循环技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] SOMAYAJI C. First and second law analysis of Organic Rankine Cycle [D]. Mississippi State University, 2008.
- [5] SYLVAIN Q, VINCENT L, JEAN L. Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander [J]. *Applied Energy*, 2010, 87 (4): 1260 - 1268.
- [6] 顾伟. 低品位热能有机物朗肯动力循环机理研究和实验验证 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2009.
- [7] 李艳, 连红奎, 顾春伟. 有机朗肯循环系统及其透平设计研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31 (12): 2014 - 2018.
- [8] 马新灵, 孟祥睿, 魏新利. 有机朗肯循环的热力分析 [J]. *郑州大学学报: 工学版*. 2011, 32 (4): 12 - 15.
- [9] 严家騄. 低温热能发电方案中选择工质和确定参数的热力学原则和计算式 [J]. *工程热物理学报*. 1982, 3 (1): 1 - 7.
- [10] 张峰, 李骏, 齐红军, 等. 安徽中广源水泥有限公司 5000t/d 熟料生产线纯低温余热发电技改工程方案设计 [R]. 南京: 中材国际有限公司, 2009.

## Feasibility Study of Recovery Waste Heat of Flue Gas Using Organic Rankine Cycle

MA Xin-ling<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>, WEI Xin-li<sup>1</sup>, MENG Xiang-rui<sup>1</sup>, YANG Kai-xuan<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Mechanical and Electronic Engineering Department, Henan Polytechnic College, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Flue gas waste heat of utility boiler was calculated. Based on flue gas as heat source and R245fa as working fluid, thermodynamic analysis was carried out to waste heat power generation, and the optimal operation parameters and generating capacity were determined. RETScreen was applied to analyse the investment income and benefit analysis of energy saving and emission reduction. The results show that generating capacity of waste heat unit is 47,502 MWh/a, the emission reductions of CO<sub>2</sub> is 42,419 t/a. Under the condition of initial investment costs 6,500 RMB/kW and debt ratio 65%, equity payback only needs 1.1 years, energy production cost is 0.14 RMB/kWh, GHG reduction cost is 291 RMB/tCO<sub>2</sub>. During operation period of 30 years, the cumulative cash is expected to be 431 million RMB.

**Key words:** waste heat power generation; organic Rankine cycle; thermodynamic analysis; feasibility study