

试验研究

垃圾焚烧厂烟气低温余热发电利用

王济平,刘 强,李紫龙,蒋妮娜

(中电投远达环保工程有限公司,重庆,400011)

摘要:以某垃圾焚烧厂烟气为热源,设计了 ORC 余热发电系统,选择不同工质分析了该 ORC 余热发电系统的热力性能、经济性及节能减排效益,筛选了循环工质和 ORC 系统排烟温度,并计算了节约的标煤量和减少的二氧化碳、氮氧化物排放量,可为工程设计提供参考依据。

关键词:低温余热发电,ORC 系统,节能减排

中图分类号:TM617

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2016)01-0042-03

THE WASTE HEAT POWER GENERATION USE OF INCINERATION PLANT FLUE GAS

WANG Ji-ping, LIU Qiang, LI Zi-long, JIANG Ni-na

(CPI Yuanda Environmental-Protection Engineering Co. Ltd. Chongqing, 400022, China)

Abstract: Taking the incineration plant flue gas as a heat source, an ORC cogeneration system was designed. This paper analysis the thermodynamic properties, economy and energy saving benefits of the ORC cogeneration based on different working fluid. The best working fluid and the exhaust system temperature were obtained. The savings of standard coal and reduce the amount of carbon dioxide and nitrogen oxide emissions were calculated at last, which can provide a reference for engineering design.

Key words: Low temperature waste heat power generation, ORC systems, energy conservation

当前,全球性的能源危机、资源浪费及环境问题日益严重。前瞻产业研究院发布的《2015-2020 年中国余热发电行业市场前瞻与投资战略规划分析报告》显示:现阶段,我国一次能源利用率约为 30%,仅为日本的 1/2,比世界平均水平还要低 3 个百分点,存在着巨大的能源浪费。根据国家统计局统计:仅 2014 年全年,我国能源消费总量 42.6 亿吨标准煤,可回收利用的余热资源高达 4.35~17.12 亿吨标准煤,节能潜力十分巨大。余热利用成为当前节能减排的热点^[1]。

余热发电技术采用水或低沸点有机工质发电,是回收余热资源的一条有效新途径,已被广泛研究并开始应用于各种低品位能源发电领域^[2]。其

中,有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)采用低沸点有机工质发电,能够有效回收低温余热,受到业界的广泛关注。由于 ORC 循环在低品位热能利用方面具有独特优势和广阔应用前景,因此 ORC 工质筛选和循环参数优化也成为各国学者和科研机构的重要课题^[3-5]。

目前,垃圾焚烧厂烟囱入口烟气温度 150℃左右,直接排放造成大量的余热损失,本文根据深圳某垃圾焚烧厂烟气参数,在烟囱入口设置 ORC 余热发电系统,回收烟气余热,采用 R245fa、R600a、R601a 三种低沸点有机工质(三种工质的臭氧消耗潜能值均为零),分析了该 ORC 系统的热力性能、节能减排效益,筛选了 ORC 系统工质,并计算了 ORC 系统节约的标煤量、工程投资回报及减少的二氧化碳、氮氧化物排放量,可为工程设计提供参考依据。

收稿日期:2015-06-18

第一作者简介:王济平(1989-),男,四川泸州人,硕士,主要从事电厂烟气处理、节能减排技术开发与应用。

1 烟气余热利用 ORC 系统

图1和图2分别为系统设备配置及其对应的ORC循环 $T-s$ 图,如图所示,工质在蒸发器内定压吸热(4-1过程),然后在膨胀机内绝热做功(1-2过程),乏汽在冷凝器内定压放热(2-3过程),最后在工质泵内绝热压缩(3-4过程),再回到蒸发器,完成整个ORC动力循环。

(1) 1-2 为绝热做功过程

$$w_i = \eta_e (h_1 - h_2) \quad (1)$$

(2) 2-3 为定压放热过程

$$q_c = (h_2 - h_3) \quad (2)$$

(3) 3-4 为绝热压缩过程

$$w_p = (h_4 - h_3) \quad (3)$$

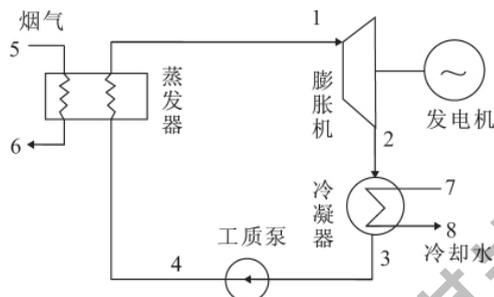


图1 ORC 余热发电系统

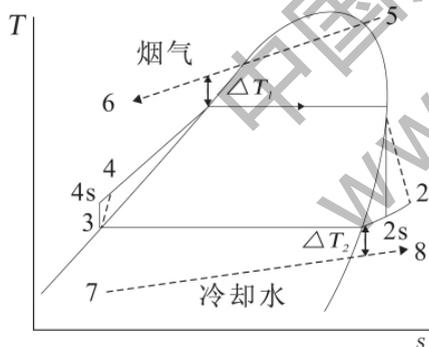


图2 ORC 循环 $T-s$

(4) 4-1 为定压吸热过程

$$q_e = (h_1 - h_4) \quad (4)$$

则系统输出的比净功:

$$w_{net} = w_i - w_p \quad (5)$$

系统的循环热效率:

$$\eta_{th} = w_{net} / q_e \quad (6)$$

式中, w_p, w_i 分别为比工质泵功和比膨胀机输出功 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), q_e, q_c 分别为比吸热量和比放热量 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), h_1, h_2, h_3, h_4 分别各状态点对应的比焓 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

可节约的标煤量 $M(\text{kg/a})^{[6-8]}$:

$$M = 3600 w_{net} T / \eta_{ep} Q_r \quad (7)$$

η_{ep} 为发电厂效率; Q_r 为标煤的低位发热量; kJ/kg ; T 为年运行时间, 取 8 000 h。

可减排的 CO_2 排放量 $E_{\text{CO}_2}(\text{kg/a})^{[6-8]}$:

$$E_{\text{CO}_2} = 3.67 M Q_r k \alpha_{\text{CO}_2} \quad (8)$$

式中, k 为燃料的碳排放系数, kg/MJ , 取 0.0247; α_{CO_2} 为碳氧化系数, 取 0.90。

可减排的 NO_x 排放量 $E_{\text{NO}_x}(\text{kg/a})^{[6-8]}$:

$$E_{\text{NO}_x} = M \beta_{\text{NO}_x} (1-f) \quad (9)$$

式中, β_{NO_x} 为 NO_x 排放系数, kg/t , 取 12.2; f 为电厂脱硝效率, 取 0.7。

表1 循环计算参数

项目	数值	项目	数值
烟气进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	150	蒸发器夹点温差 ΔT_1 / $^{\circ}\text{C}$	5
烟气体积流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	144947	冷凝器夹点温差 ΔT_2 / $^{\circ}\text{C}$	5
冷却水进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	膨胀机内效率 η_e	0.85
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	工质泵等熵效率	0.85

表2 工质参数数据^[6-8]

工质	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	GWP
R245fa	15.14	154.05	950
R600a	-11.75	134.66	20
R601a	27.83	187.2	20

备注: GWP-全球变暖潜数值

2 计算结果分析

图3为ORC系统净输出功率 w_{net} 随蒸发温度的变化关系。从图可见: ORC系统净输出功率 w_{net} 随蒸发温度的升高先增大后减小, 存在最大净输出功率。在选择的蒸发温度范围内, R600a、R245fa、R601a三种工质最大净输出功率分别约为 385 kW、365 kW、350 kW, 三种工质取得最大净输出功率时的蒸发温度分别为 100 $^{\circ}\text{C}$ 、95 $^{\circ}\text{C}$ 、90 $^{\circ}\text{C}$ 。根据表2数据分析可知: 工质的临界温度越低, 系统的净输出功率越大, 对应所需的蒸发温度越高。因此, 从获得较高的系统净输出功率的角度选取工质时, 应选择临界温度较小的工质。

图4为ORC系统热效率 η_{th} 随蒸发温度的变化关系。从图中可以看出: 循环热效率 η_{th} 随着蒸发温度的升高而增大, 在选择的蒸发温度范围内, 同一蒸发温度下, 工质的临界温度越低, 系统热效率越低。在相同的蒸发温度范围内, 工质 R245fa 的系统热效率由 8.64% 增大到 14.20%, 增幅为 64.35%; 工质 R600 的系统热效率由 8.50% 增大

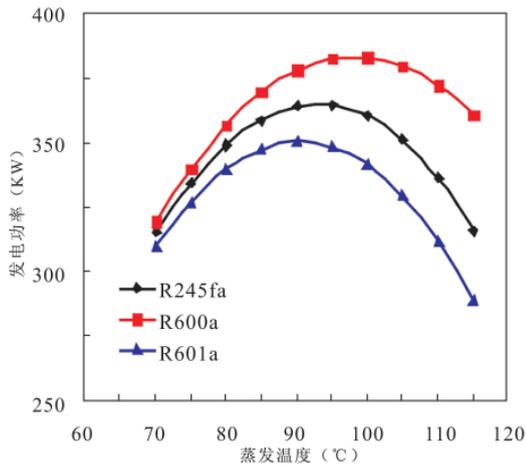


图3 发电功率随蒸发温度变化

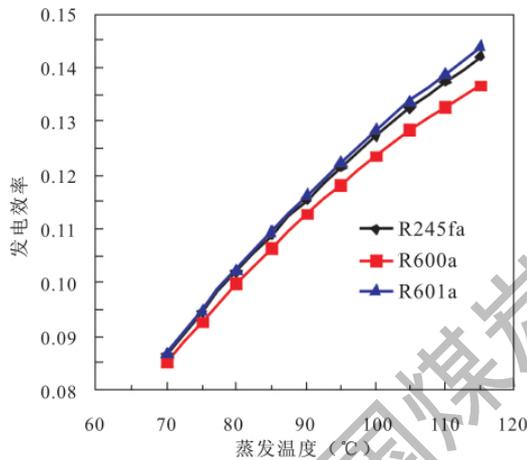


图4 发电效率随蒸发温度变化

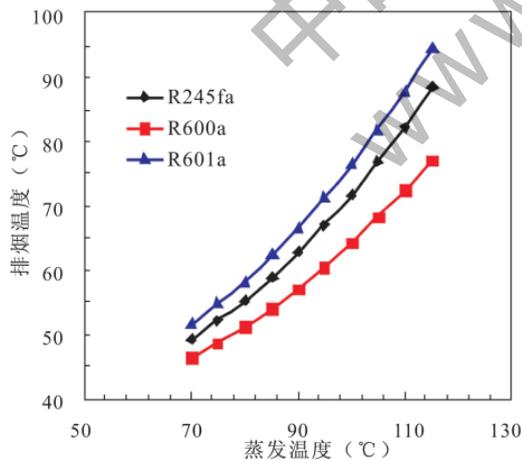


图5 排烟温度随蒸发温度的变化

到 13.66%，增幅为 60.71%；工质 R601a 的系统热效率由 8.68% 增大到 14.38%，增幅为 70.51%。

图 5 为 ORC 系统排烟温度随蒸发温度的变化关系。系统的排烟温度随蒸发温度的升高而升高，相同蒸发温度，工质的临界温度越低，系统排

烟温度越低。综合图 3~5，在 ORC 系统的蒸发温度 70℃~115℃ 范围内，系统净输出功 w_{net} 存在极大值，结合工质的环境影响潜能值，推荐采用 R600a 为工质，按蒸发温度 100℃ 设计 ORC 系统（此时排烟温度约 65℃），可获得 385 kW 左右的发电功率，年发电量约 3.1×10^6 kW·h，每年可实现节约标煤约 950 吨，减少二氧化碳排放约 2 250 吨，减少氮氧化物 NO_x 排放约 4 吨，节能减排效果显著。

ORC 工程造价按 2 万元/kW，新能源发电补贴 0.65 元/kW·h，煤炭采购价 800 元/t 计算，该 ORC 余热发电系统总投资约 770 万元，年发电收益约 200 万元，节约支出约 80 万元，工程静态回收周期约 3 年。

3 结论

本文根据深圳某垃圾焚烧厂烟气参数，设计了 ORC 余热发电系统，分析了该 ORC 系统的热力性能及节能减排效益。结果表明：当采用 R600a 为工质，按蒸发温度 100℃ 设计 ORC 系统（此时排烟温度约 65℃），可获得 385 kW 左右的发电功率，年发电量约 3.1×10^6 kW·h，每年可实现节约标煤约 950 吨，减少二氧化碳排放约 2 250 吨，减少氮氧化物 NO_x 排放约 4 吨，节能减排效果显著。

参考文献

- [1]王蕾.节能减排在雾霾治理中的应用[J].化工管理,2015,(6):217.
- [2]冯驯,徐建,王墨南等.有机朗肯循环系统回收低温余热的优势[J].节能技术,2010,28(5):387-391.
- [3]王志奇,夏小霞,周乃君.低温余热有机朗肯循环发电系统热经济性分析[J].工业加热,2013,42(3):33-36.
- [4]李连友,王璟,叶依林等.有机朗肯循环低温余热发电系统热力性能分析[J].节能,2011,30(11):57-60.
- [5]韩中合,杜燕,王智.有机朗肯循环低温余热回收系统的工质选择[J].化工进展,2014,(9):2279-2285.
- [6]Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, et al. Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles [J]. Energy, 2007, 32(7):1210-1221.
- [7]Guo Tao, Wang Huaixin, Zhang S. J. Selection of working fluids for a novel low-temperature geothermally-powered ORC based co-generation system[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52(6): 2384-2391.
- [8]Sun Jian, Li Wenhua. Operation optimization of an organic rankine cycle (ORC) heat recovery power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(11):2032-2041.