

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-285-07

基于有机朗肯循环的低品位工业烟气余热优化利用研究——以夹江县某建陶厂为例

李悦 蒋福建 余南阳

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 基于四川省夹江县建陶类企业余热资源调研结果,分析了有机朗肯循环系统对建陶类企业低温烟气余热利用效果,并利用 Aspen Plus 流程模拟软件,研究了系统工质、蒸发压力及过热度对系统热效率、烟损失、净功、年度净收益及 CO₂ 减排量的影响,最终通过综合评价指标,得出在建陶类烟气余热不同温度段下,有机朗肯循环的最佳参数。

【关键词】 烟气余热; 有机朗肯循环; 综合评价

中图分类号 TK09 文献标识码 A

Research on the Waste Heat Optimal Utilization of Low-grade Industrial Flue Gas Based on Organic Rankine Cycle——A Case Study of a Ceramic Factory in Jiajiang County

Li Yue Jiang Fujian Yu Nanyang

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

【Abstract】 Based on the research results of waste heat resources of ceramic construction enterprises in Jiajiang County, Sichuan Province, the effect of organic Rankine cycle system on the utilization of low-temperature flue gas waste heat of ceramic construction enterprises was analyzed. Using Aspen Plus process simulation software, the influence of system working fluid, evaporation pressure and superheat on system thermal efficiency, exergy loss, net power, annual net income and CO₂ emission reduction was studied. Finally, through the comprehensive evaluation index, the best parameters of the organic Rankine cycle under different temperature sections of the waste heat of building ceramics flue gas are obtained.

【Keywords】 Waste Heat of Flue Gas; Organic Rankine Cycle; Comprehensive Evaluation

基金项目: 国家重点研发计划: “高污染散发类工业建筑环境保障与节能关键技术研究—工业建筑围护结构节能与低品位热能利用技术研究”(2018YFC0705306)

作者简介: 李悦(1992.12-),女,在读硕士研究生, E-mail: liyuemiao@foxmail.com

通讯作者: 余南阳(1961.02-),男,博士,教授, E-mail: rhinos@126.com

收稿日期: 2021-08-11

0 引言

随着我国现代化工业技术高速发展,能源形势日趋严峻,做好节能减排工作已经成为全社会的共识。我国工业余热资源丰富,广泛存在于工业各行业生产过程中,余热资源约占其燃料消耗总量的17%~67%,其中可回收率达60%,余热利用率提升空间大,节能潜力巨大,工业余热回收利用又被

认为是一种“新能源”,近年来成为推进我国节能减排工作的重要内容⁰。在建陶类企业中,陶瓷烧成过程中的窑炉排烟热损失占窑炉总输入热量的百分之二十五到百分之三十五⁰,因此烟气余热回收对建陶类企业的节能减排具有重要意义。而在低品位余热利用方面,有机朗肯循环发电系统因其具有结构简单、循环热效率高、蒸发压力和冷凝压力

较低、环境友好和负荷适应能力强等优点，已成为低品位余热资源的主要利用方式之一^[3]。本文以夹江某典型建陶厂为例，对其余热资源进行调研，并对不同余热温度段有机朗肯循环的最佳运行参数进行分析。

1 建陶类企业烟气调研情况

对四川省夹江县建陶类企业进行调研，夹江地区主要陶瓷厂生产工艺差别不大，在废水方面做到了循环利用，基本没有废水产出；在蒸汽方面，只有在对瓷砖进行喷水降温时产生少量蒸汽，温度区间较低且量极少，并无回收利用的必要；在固体余热方面，虽然烧成砖在出窑时仍有 200~300℃ 的温度，但这一部分低温余热难以直接回收，且为满足实际生产过程中的质量与产量的综合需求，已使用喷淋水或风冷形式进行冷却，极大地牺牲了余热品位，回收难度大、收益低，因此在陶瓷厂余热方面，主要可利用的余热载体为烟气。

建陶类企业生产线工艺主要分为浆料处理及储备、砖坯干燥（干燥窑）、砖坯烧成及砖坯冷却。砖坯烧成主要通过烧成窑将天然气分段燃烧，以提供不同的烧成温度。烧成窑分为预热带、烧成带和冷却带三个阶段，温度在 300~1200℃ 不等，产生烟气由抽热风机抽出排到干燥窑。干燥窑中利用烧成窑中的烟气余热，将含有水分的常温砖坯进行排水干燥，窑内温度保持在 270℃~300℃ 之间，最终烟气从干燥窑排出，进入脱硫塔。

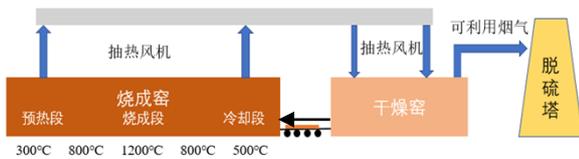


图 1 陶瓷砖坯烧成过程

Fig.1 Ceramic tile firing process

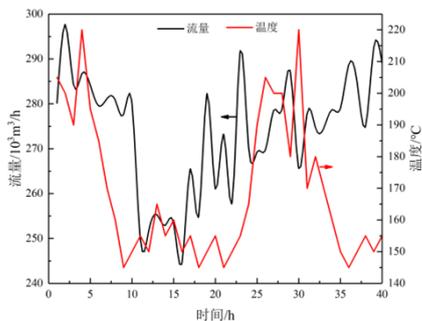


图 2 干燥窑出口烟气温度及流量

Fig.2 Temperature and flow rate of flue gas at the outlet of drying kiln

在整个生产过程中，烟气从窑炉中被引出进入干燥窑，对原料进行干燥，这部分烟气虽然得到了直接利用，但排放时依然有较高温度，根据调研，干燥窑出口烟气温度及流量如图 2 所示。

对于夹江县陶瓷企业现有的工艺设备，在余热回收方面，可利用烟气温度范围 150~200℃，流量为 $2.75 \times 10^5 \text{m}^3/\text{h}$ ，根据 **Error! Reference source not found.** 的划分标准属于低品位余热^[4]，忽略烟气杂质影响，假设烟气中仅含有氧气、氮气及水蒸气，利用 Aspen Plus 软件对 ORC 发电系统进行烟气余热利用过程模拟。

表 1 余热品位划分标准

Table 1 Waste heat grade classification standard

等级	气体	液体	固体
高品位	300℃ 以上	200℃ 以上	700℃ 以上
中品位	200~300℃	95~200℃	400~700℃
低品位	200℃ 以下	100℃ 以下	400℃ 以下

2 有机朗肯循环系统

2.1 系统热力学模型

有机朗肯循环系统由蒸发器、冷凝器、膨胀机和工质泵组成。工质在蒸发器中吸收热量由液态变为气态，推动膨胀机旋转后，在膨胀机做功的乏气进入冷凝器中经冷却水冷却后重新变为液体，最后由工质泵打入蒸发器，完成一个循环，工质循环的过程如图 3 所示。

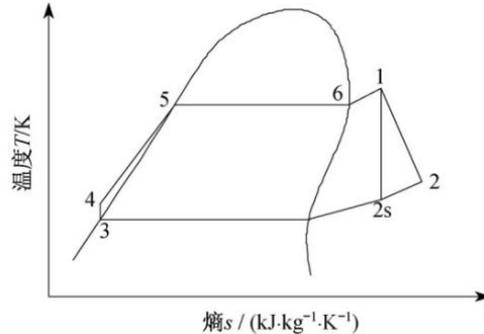


图 3 有机朗肯循环系统温熵图

Fig.3 Temperature and Entropy Diagram of Organic Rankine Cycle System

等压吸热过程（4-5-6-1）有机工质在蒸发器中吸收热源热量，温度升高并蒸发，吸收热量为：

$$Q_e = m(h_1 - h_4) \quad (1)$$

等熵膨胀过程 (1-2s), 在膨胀机中工质对外做功为:

$$W_{T'} = m(h_1 - h_{2s}) \quad (2)$$

等压放热过程 (2s-3), 由膨胀机排出的工质蒸汽进入冷凝器经由冷却水冷凝为液态, 工质放出热量为:

$$Q_c = m(h_{2s} - h_3) \quad (3)$$

等熵压缩过程 (3-4), 由冷凝器排出的液态工质通过工质泵加压送至蒸发器, 外界对工质做功为:

$$W_p = m(h_4 - h_3) \quad (4)$$

因此, 循环的热效率为:

$$\eta_1 = \frac{W_{T'} - W_p}{Q_e} \quad (5)$$

系统净功为:

$$W_{net} = W_{T'} \times \eta_e - W_p \quad (6)$$

2.2 Aspen Plus 建模

为了评估系统性能, 本文利用 Aspen Plus 软件对系统进行模拟, 物性方法选择 PENG-ROB, 收敛方法选择 Wegstein 法, 具体模型如 **Error! Reference source not found.**所示, 其中, 蒸发器由 B1 与 B2 两个换热器组成, B3 为冷凝器, B5 为膨胀机, B4 为工质泵, 该股 IN 为烟气入口, 该股 OUT 为烟气出口, 1 为断裂物流, 其他参数设置如 **Error! Reference source not found.**所示。最后通过输出功、热效率、焓损失、年度净收益 (ANI) 及 CO₂ 减排量五种指标对系统进行评价。

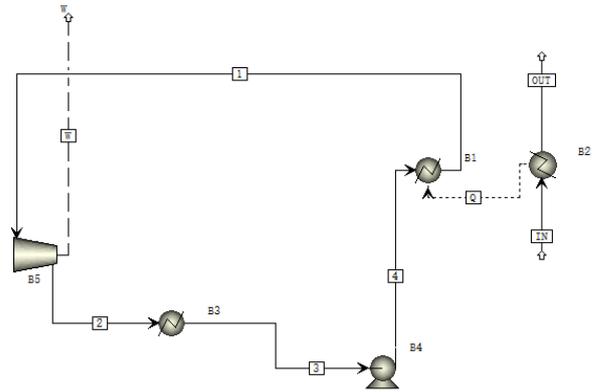


图 4 Aspen Plus 模拟有机朗肯循环系统图

Fig.4 Aspen Plus simulated organic Rankine cycle system diagram

表 2 系统参数设置范围

Table 2 System parameter setting range

系统参数	取值范围
烟气入口温度/°C	150~200
烟气流量/m ³ ·h ⁻¹	275000
蒸发器夹点温差/°C	15~80
蒸发压力/MPa	0.5~3.5
过热度/°C	0~15
冷凝温度/°C	30
冷却水进/出口温度/°C	25/35
环境温度/°C	25
膨胀机等熵效率	0.9
泵等熵效率	0.92

有机朗肯循环中, 影响循环性能的参数很多, 本文主要通过输出功、热效率、焓损失、年度净收益 (ANI) 及 CO₂ 减排量五种指标, 研究系统工质、夹点温差、蒸发压力、过热度对系统的影响。有机朗肯循环的工质有以下几点要求: 回收效果好, 余热回收效率高; 传热性能好, 换热系数大; 饱和压力水平适中; 来源丰富获取成本低; 稳定性好, 无毒害, 环境友好。基于以上条件以及现有文献推荐工质, 本文选择 R227ea、R245fa、R236ea 及 R123 四种工质^[10], 其相关物性参数如表 3 所示。

表 3 有机工质物性参数

Table 3 Physical parameters of organic working fluid

工质	临界压力	临界温度	标准沸点/ ODP 值
----	------	------	-------------

	/MPa	/°C	°C	
R227ea	2.925	101.75	-16.34	0
R245fa	3.651	154.01	15.14	0
R236ea	3.502	139.29	6.19	0
R123	3.662	183.681	27.823	0.012

3 研究结果与分析

在其他条件一定的前提下，夹点温差主要影响系统 ANI，如图 5 所示，工质 R227ea、R236ea 和 R245fa 在热源温度 160°C，蒸发压力 2MPa 时，同一工质夹点温差越高，系统经济性越差，因此在同一蒸发压力下，应尽可能减小系统夹点温差。

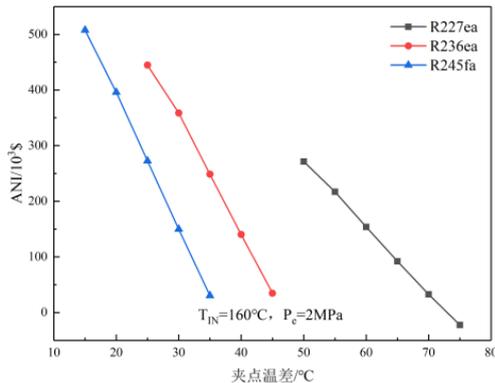


图 5 夹点温差对系统 ANI 影响

Fig.5 The influence of the temperature difference of the pinch point on the ANI of the system

当热源温度在 150~200°C 之间变化时，不同的热源温度及蒸发压力需匹配不同的夹点温差，过小的夹点温差可能无法达到系统要求，图 6 以工质 R245fa 为例，给出了各夹点温差下系统对应的最高 ANI，可以看出，当夹点温差小于 25°C 时，系统 ANI 对夹点温差增大而增大；当夹点温差大于 25°C 时，系统 ANI 对夹点温差增大而减小，系统在夹点温差 25°C 时达到最优值。

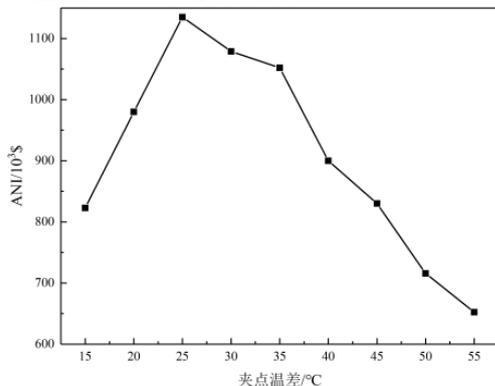


图 6 工质 R245fa 的夹点温差对系统 ANI 的影响

Fig.6 The influence of the temperature difference of the pinch point of the working fluid R245fa on the ANI of the system

工质蒸发压力与蒸发温度一一对应，一般情况下，工质蒸发温度随蒸发压力升高而增大，表 4 给出了工质在不同压力下蒸发温度。

表 4 不同压力下工质蒸发温度/°C

Table 4 Evaporating temperature of working fluid under different pressure/°C

蒸发压力/MPa	1	1.5	2	2.5	3	3.5
R245fa	89.8	107.9	121.8	133.3	143.1	151.6
R227ea	—	—	83.5	94.1	—	—

续表 5 不同压力下工质蒸发温度/°C

蒸发压力/MPa	1	1.5	2	2.5	3	3.5
R236ea	80.0	97.8	111.5	122.8	132.4	139.0
R123	111.2	131.6	147.3	160.3	171.4	180.9

图 7~8 显示了热源温度 160°C 时，在不同蒸发压力下四种工质系统热效率和 ANI 变化，四种工质的热效率均随蒸发压力增大而增大，但其增速随蒸发压力增大而减缓：以工质 R245fa 为例，蒸发压力由 1MPa 增加到 1.5MPa 时，系统热效率增加 1.66%，增幅为 17.2%；蒸发压力由 2.5MPa 增加到 3MPa 时，系统热效率增加 0.3%，增幅仅为 2.4%。

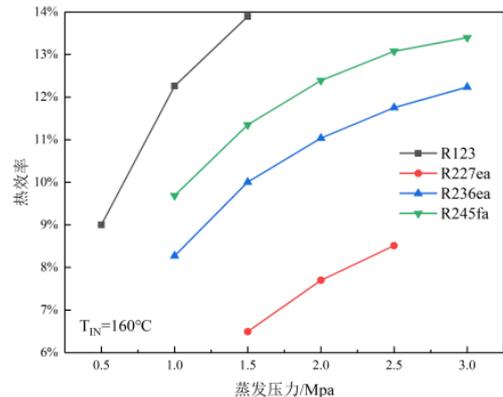


图 7 蒸发压力对系统热效率影响

Fig.7 The influence of evaporation pressure on the thermal efficiency of the system

对于系统 ANI，工质为 R123 和 R245fa 时，系统 ANI 随着蒸发压力的增大先增大后减小，存在一个最大值，工质 R123 的最大值出现在蒸发压力 1MPa 处，而工质 R245fa 的最大值出现在蒸发压力 2MPa 处；工质为 R236ea 和 R227ea 时，系统 ANI

没有出现拐点, 其大小均随蒸发压力增大而增大, 但随着蒸发压力的增大, 其增速减缓。

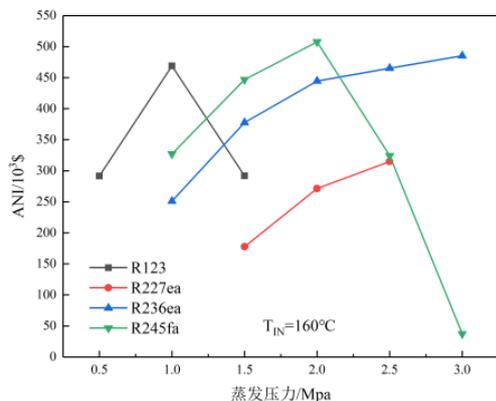


图 8 蒸发压力对系统 ANI 影响

Fig.8 Effect of evaporation pressure on system ANI

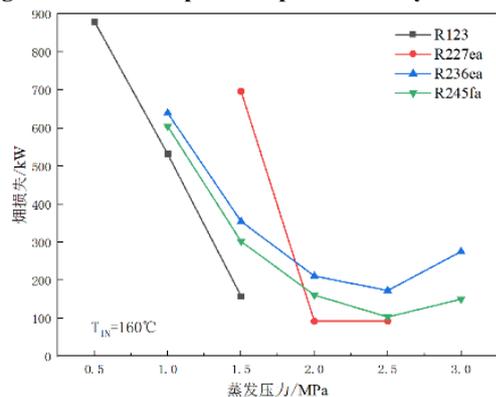


图 9 蒸发压力对系统焓损失影响

Fig.9 Influence of evaporation pressure on system exergy loss

由图 9 可知, 工质为 R227ea、R236ea 和 R245fa 时, 系统焓损失随着蒸发压力的增大先减小后增大, 存在一个最小值, 工质 R227ea 的最小值出现在蒸发压力 2MPa 处, 工质 R236ea 和 R245fa 最小值出现在蒸发压力 2.5MPa 处; 工质为 R123 时, 系统焓损失没有出现拐点, 其大小均随蒸发压力增大而减小。

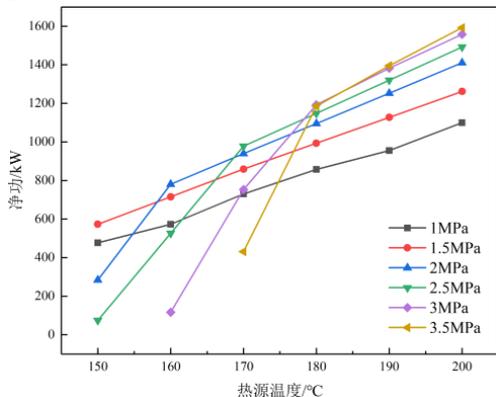


图 10 不同热源温度下蒸发压力对系统净功影响

Fig.10 The influence of evaporation pressure on the net

power of the system under different heat source temperatures

系统做功能力受工质流量及工质蒸汽温度双因素影响, 不同工质在不同热源条件下需要具体分析计算。图 10 以工质 R245fa 为例, 表明蒸发压力在不同热源温度下对系统的影响: 低蒸发压力的系统, 系统净功随热源温度的变化幅度明显低于高蒸发压力的系统, 且以最高膨胀机做功为指标, 不同热源温度系统的最佳蒸发压力不同, 在热源温度低于 160°C 时, 1MPa 的蒸发压力下, 系统做功较高; 热源温度高于 190°C 时, 3.5MPa 的蒸发压力下, 系统做功较高。工质流量与蒸发压力呈负相关, 而蒸发温度则与蒸发压力呈正相关, 二者都对膨胀机做功有着直接影响, 且影响程度与热源温度相关, 因此若以系统做功作为优化指标, 不同热源温度应对应不同的蒸发压力。

过热度主要影响工质进入膨胀机的温度, 在蒸发压力一定的情况下, 过热度越高, 同一工质进入膨胀机的蒸汽温度越高, 单位流量下工质蒸汽做功能力越强。但工质过热度受蒸发器夹点温差以及热源流体温度制约。

以工质 R245fa 为例, 在热源温度为 180°C, 蒸发压力 3MPa 以及夹点温差为 20°C 时, 模拟了不同过热度对系统性能的影响, 结果如图 11~14 所示。当系统蒸发压力 2MPa 时, 在同一蒸发压力下, 过热度的增加对系统热效率和焓损失有正面影响: 热效率随过热度增加有所增加, 但增幅随过热度增加而减缓, 且过热度对热效率整体影响有限, 过热度由 0 增加到 16°C 时, 增长率仅 1.81%; 焓损失随过热度的增加有所减小, 过热度由 0 增加到 16°C 时, 焓损失减少了 23.09%。同时, 过热度的增加对系统净功和 ANI 有负面影响, 过热度由 0 增加到 16°C 时, 其净功和 ANI 分别减小了 20.82% 和 19.37%。

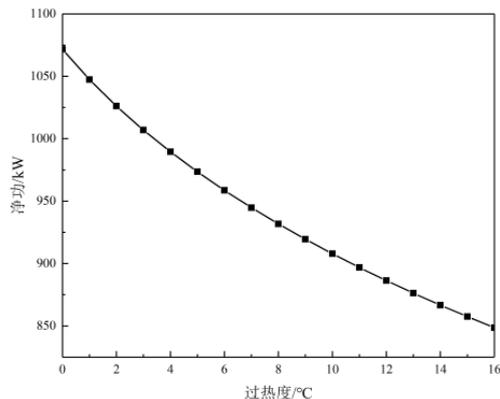


图 11 过热度对系统净功影响

Fig.11 The influence of superheat on the net power of the system

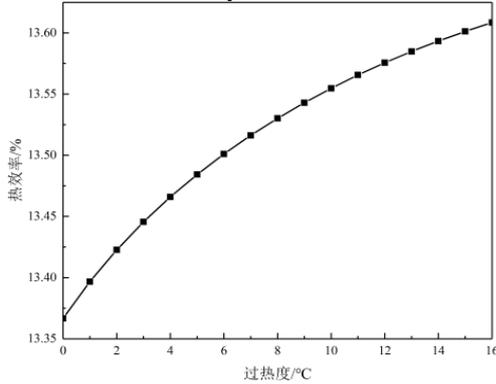


图 12 过热度对系统热效率影响

Fig.12 The effect of superheat on the thermal efficiency of the system

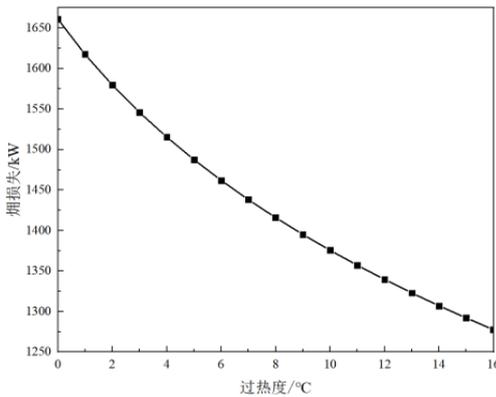


图 13 过热度对系统焓损失影响

Fig.13 The effect of superheat on system exergy loss

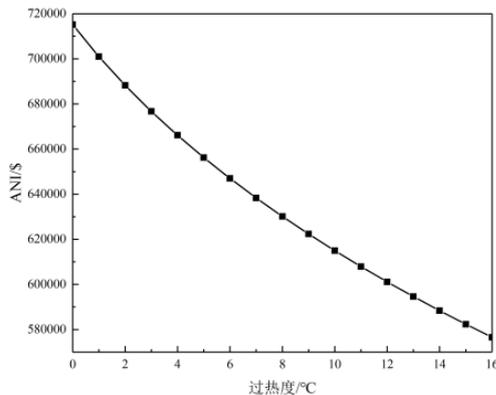


图 14 过热度对系统 ANI 影响

Fig.14 The effect of superheat on the system ANI

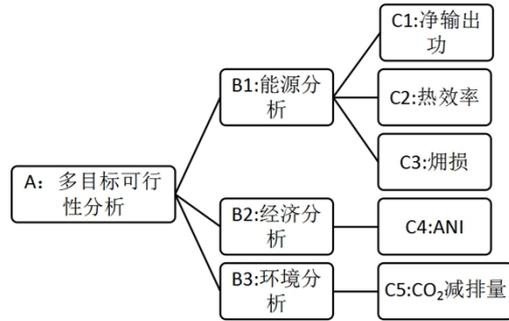


图 15 评价层次结构图

Fig.15 Evaluation hierarchy diagram

根据以上分析，基于不同的评价指标，系统有不同的参数选择，因此本文提出基于层次分析法的综合评价方法，层次结构如图 15 所示。

对于准则层权重系数，本文参考文献[10]，根据表 6 进行计算。

表 6 准则层权重系数

Table 5 Criterion-level weight coefficient

准则	B1	B2	B3
权重系数	0.345	0.367	0.288

对于指标的权重，要先将各指标均一化，再根据其均一化指标分级取值，均一化指标 x 具体计算公式如下：

$$x_i = \begin{cases} \frac{X_i}{X_{iopt}}, X_i \in (C_1, C_2, C_4, C_5) \\ \frac{X_{iopt}}{X_i}, X_i \in (C_3) \end{cases} \quad (7)$$

式中， x_i 为第 i 个指标的均一化指标； X_i 为第 i 个指标值； X_{iopt} 为所有候选方案中第 i 个指标的最优值。

将指标进行均一化处理之后，按照均一化结果，将不同指标值平均分为五级，并按照分级数值生成判断矩阵，计算准则层的权重。

根据准则层权重及指标层权重相乘，得到各准则在系统内的总权重。

根据均一化指标值及其系统总权重，建立系统的可行性判断指标 (Feasibility Level, FL)，其定义式为：

$$FL(X) = \sum_{i=1}^n (x_i, w_i), n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

式中， w_i 为第 i 个指标的系统总权重。

根据以上计算方式，可以得到不同热源温度下

较优的工质及其相关参数选择结果如表 6~7 所示。

表 7 有机朗肯循环系统参数选择

Table 6 Parameter selection of organic Rankine cycle system

热源温度/°C	工质	夹点温差/°C	过热度/°C	烟气出口温度/°C	工质流量/kg/h	蒸发压力/MPa
150	R123	15	0	110.3	23.1	1
160	R236ea	15	6	110.0	24.6	2
170	R236ea	15	11	110.7	33.	3
180	R236ea	25	17	110.3	37.8	3
190	R245fa	20	12	110.9	36.4	3.5
200	R245fa	25	18	110.3	39.8	3.5

表 8 最优 FL 下的有机朗肯循环系统相关指标

Table 7 Related Indexes of Organic Rankine Cycle System under Optimal FL

热源温度/°C	净功/kW	热效率	系统烟损/kW	ANI/\$	CO ₂ 减排量(年)/10 ³ t
150	613.92	12.26%	863.71	377245	6.02
160	780.76	12.27%	1181.81	507830	7.66
170	917.15	12.23%	1527.64	616031	9.00
180	1081.41	12.27%	1923.06	743080	10.61
190	1394.98	13.93%	2159.50	979909	13.68
200	1592.35	14.01%	2598.47	1135035	15.62

4 结论

本文基于四川省夹江县建陶类企业余热资源调研结果,通过有机朗肯循环系统对其烟气余热进行利用,并根据 Aspen Plus 流程模拟软件对其进行模拟,得到以下结论:

(1) 通过调研,夹江县建陶类企业具有大量以烟气为载体的余热资源,可利用温度为 150~200°C,流量为 275000m³/h,属低品位余热。

(2) 夹点温差主要影响系统经济性,为达到更高的经济性,不同工质存在其最优的夹点温差。

(3) 在蒸发压力方面,更高的蒸发压力可使系统达到更高的热效率,但对于系统经济性,则存在一个最佳蒸发压力使系统有更高的经济性,且对于系统输出功,不同的热源温度对应的系统最佳蒸发压力不同。

(4) 在过热度方面,在相同的蒸发压力下,过热度的升高使热效率小范围内增加,烟损失减少,但系统净功和经济性都减小。

(5) 基于不同的热源温度,有机朗肯循环系统应选择不同的工质及运行参数,使系统性能达到最佳。

参考文献:

- [1] 连红奎,李艳,束光阳子,等.我国工业余热回收利用技术综述[J].节能技术,2011,29(2):123-128,133.
- [2] 张任平,刘江.陶瓷窑炉排烟余热驱动有机朗肯循环性能分析[J].陶瓷学报,2018,39(5):601-606.
- [3] Liu Q, Duan YY, Yang Z. Performance analyses of geothermal organic Rankine cycle with selected hydrocarbon working fluids[J]. Energy, 2013,63(15): 123-132.
- [4] 国家发展和改革委员会,住房城乡建设部.余热暖民工程实施方案[EB/OL].2015年10月
- [5] 徐建,董奥,陶莉,等.利用低品位热能的有机物朗肯循环的工质选择[J].节能技术,2011,29(3):204-210.
- [6] 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,2014,33(9):2279-2285.
- [7] Wang Z Q, Zhou N J, Guo J, et al. Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine Cycle using low temperature waste heat[J]. Energy, 2012,40(1): 107-115.
- [8] Chanche B F, Papadakis G, Lambrinos G, et al. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2009,29(11,12):

- 2468-2476.
- [9] Lakew A A, Bolland O. Working fluids for low-temperature heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(10):1262-1268.
- [10] 蒋润花, 李洪强, 尹辉斌, 等. 冷热电联供系统多目标评估与运行策略研究[J]. 工程热物理学报, 2019,40(5): 1016-1024.