

全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统优化分析

姚彬, 张欣

(中国石油化工股份有限公司西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830001)

摘要: 利用烟气多段换热和烟-水直接接触换热技术, 开发适用于燃气装置的低品位烟气余热回收系统, 并设计了全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统, 通过能流分析和变设计工况分析, 对系统进行工艺流程及设计参数的优化和夹点分析优化。结果表明: 优化后系统的性能系数(COP)和供热水温度均高于一般单效吸收式热泵系统, 尤其适用于燃气-蒸汽联合循环余热锅炉的烟气余热回收, 可实现热电联产, 供热成本低于一般燃气供热电站。但在实际应用中, 驱动热源的热能不足的问题尚未得到有效解决, 通过分析热泵节能运行模型特点, 并联运行吸收热泵可提高系统整体性能, 故采用电能和热能互补驱动的热功复合驱动热泵有望解决系统驱动热源不足的问题。

关键词: 烟气全热回收; 吸收式热泵; 系统优化; 运行模式

中图分类号: TK115 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.03.008

[引用本文格式] 姚彬, 张欣. 全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统优化分析[J]. 热能动力工程, 2025, 40(3): 63-72. YAO Bin, ZHANG Xin. Optimization analysis of absorption heat pump system driven by total condensate flue gas waste heat[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(3): 63-72.

Optimization Analysis of Absorption Heat Pump System Driven by Total Condensate Flue Gas Waste Heat

YAO Bin, ZHANG Xin

(Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Northwest Oilfield Branch, SINOPEC, Urumqi, China, Post Code: 830001)

Abstract: Utilizing flue gas multi-stage heat exchange and flue-water direct contact heat exchange technology, we developed a low-grade flue gas waste heat recovery system suitable for gas equipment, and designed a fully condensing flue gas waste heat-driven absorption heat pump system. Through energy flow analysis and variable design condition analysis, optimization of process flow and design parameters of the system and pinch point analysis and optimization were conducted. The results show that the coefficient of performance(COP) and heating water supply temperature of the optimized system are higher than those of the general single-effect absorption heat pump system. It is especially suitable for flue gas waste heat recovery of gas-steam combined cycle waste heat boilers, which can realize cogeneration of heat and power and make heating costs lower than that of ordinary gas heating power station. However, in practical applications, the problem of insufficient heat energy in driving heat sources has not been effectively solved. By analyzing the characteristics of the heat pump energy-saving operation model, parallel operation of absorption heat pumps can improve the overall performance of the system, and the heat-power composite driven heat pump using complementary electric and thermal energy is expected to solve the problem.

Key words: total heat recovery of flue gas, absorption heat pump, system optimization, operation mode

引 言

近年来,随着全球能源结构调整和清洁能源的推广,烟气余热利用成为提高能效的重要途径之一^[1]。吸收式热泵作为一种有效的余热回收利用设备,被广泛应用于区域集中供热和供冷领域^[2]。然而,在烟气余热利用中传统吸收式热泵存在一定局限性,尤其是在驱动热源和回收效率方面^[3]。

文献[4-5]提出了利用吸收式热泵回收燃气锅炉烟气冷凝热并结合烟-水直接接触换热提高余热回收效率。文献[6-10]对传统系统进行了节能分析和优化,但溶液循环放气问题仍限制了烟气温度的降低。文献[11]提出了利用空气预热器后烟气的新型系统。文献[12]开发了全开式吸收式热泵,提高回收效率。尽管上述研究重点集中于烟气余热回收工艺,但研究如何充分利用高温烟气热能作为驱动源,同时解决放气问题较少,因此在回收效率方面未能达到预期效果。

本研究旨在设计用于回收烟气全热的全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统。该系统利用烟气全凝多段式换热技术,通过高温烟气的显热余热驱动吸收式热泵回收低温烟气中的潜热和显热余热,实现烟气中潜热和显热的高效深度回收,提高燃气锅炉的能源综合利用率。此外,本文将通过能流分析及变设计工况分析方法,寻找最合适的工艺流程和运行模式,实现烟气余热的高效深度回收。相较于传统系统,全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统能够更直接地将烟气温度降至露点温度以下,具有更好的节能环保效果,并能简化系统,提高可靠性,节省设备和运行成本。

1 系统流程及成分分析

1.1 系统工艺流程及原理

图1为全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统。该系统利用烟气全热集中供热,采用烟-水直接接触换热,循环喷淋水回收低温烟气余热,高温烟气余热驱动吸收式热泵。通过能量梯级利用,提高能源利用效率,实现烟气“消白”^[2],并减少污染物排放。

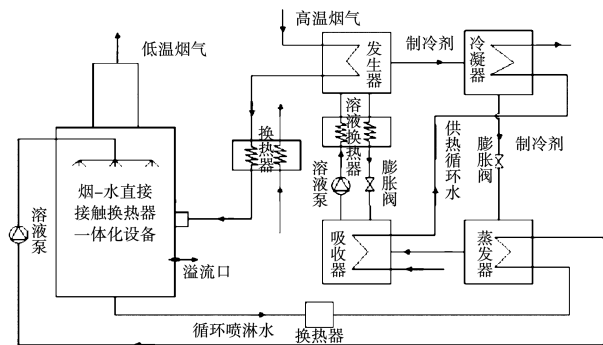


图1 全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统

Fig.1 Absorption heat pump system driven by waste heat from fully condensing flue gas

1.2 烟气成分分析及系统热力学参数

1.2.1 烟气成分分析

在标准状况下,1 m³天然气完全燃烧所需要的实际空气体积的计算式为:

$$V_k = \frac{\alpha}{21}(2V_{\text{CH}_4} + 3.5V_{\text{C}_2\text{H}_6} + 5V_{\text{C}_3\text{H}_8}) \quad (1)$$

烟气体积:

$$V_y = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

烟气体积分数 ϕ_i :

$$\phi_i = \frac{V_i}{V_y} \quad (3)$$

烟气各成分质量分数 λ_i :

$$\lambda_i = \frac{m_i}{m_y} \quad (4)$$

式中: α —过量空气系数; V_k —1 m³天然气完全燃烧所需的实际空气体积,m³; V_{CH_4} 、 $V_{\text{C}_2\text{H}_6}$ 、 $V_{\text{C}_3\text{H}_8}$ —1 m³天然气中CH₄、C₂H₆、C₃H₈完全燃烧所需的实际空气体积,m³; V_i —CO₂、N₂、O₂、H₂O等气体成分体积,m³; V_y —烟气体积,m³; m_i —某气体成分质量,kg; m_y —烟气质量,kg。

烟气中水的露点温度由烟气中水蒸气分压力决定,通过计算水蒸气分压力后,经查阅饱和湿空气表^[13]可以确定露点温度。

烟气中水的比焓 h :

$$h = h' m_{\text{H}_2\text{O}}^n + h'' m_{\text{H}_2\text{O}}^q \quad (5)$$

烟气总比焓 h_y :

$$h_y = h + h_{y_g} \quad (6)$$

式中: h' —饱和水比焓,kJ/kg; h'' —饱和蒸汽比焓,kJ/kg; $m_{\text{H}_2\text{O}}^n$ 、 $m_{\text{H}_2\text{O}}^q$ —水蒸气质量及凝结水质量,kg; h_{y_g} —干烟气比焓,kJ/kg。

1.2.2 系统热力参数

图2为系统热力循环示意图,其中1~10分别代表吸收器出口稀溶液、加压后吸收器出口稀溶液、预热后稀溶液经换热器、发生器出口浓溶液、经换热器降温后浓溶液、经膨胀阀降压后浓溶液、冷凝器制冷剂(汽)、冷凝器制冷剂(水)、经节流阀后制冷剂(水)、蒸发器制冷剂(汽)状态点;3g、6a、9'、9''分别代表稀溶液饱和状态、冷却浓溶液饱和状态、蒸发器制冷剂饱和液体、蒸发器制冷剂饱和水蒸气。吸收式热泵机组内的物性参数以0℃饱和水为基准。采用单效第一类溴化锂吸收式热泵,性能系数COP取值范围为1.6~1.8。设计工况:制热量为3.0 MW,供热循环水进口温度 t_{w1} 为30℃,出口温度 t_{w3} 为55℃,蒸发器进口水温 t_{p1} 为45℃,出口水温 t_{p2} 为30℃。

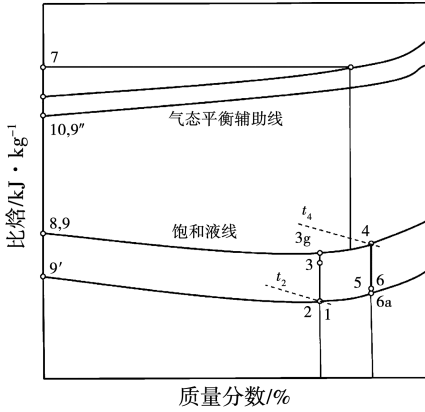


图2 系统热力循环示意图

Fig. 2 System thermodynamic cycle diagram

供热循环水循环流速:

$$f_w = \frac{Q_0}{h_{w3} - h_{w1}} \quad (7)$$

饱和水、饱和水蒸气比焓:

$$h' = 418.68 + 4.1868t \quad (8)$$

$$h'' = 418.68 + 2501 + 1.86t \quad (9)$$

溴化锂水溶液质量分数 X :

$$X = \sum_0^3 A_n t_1^n + t \sum_0^3 B_n t_1^n + t^2 \sum_0^3 C_n t_1^n + t^3 \sum_0^3 D_n t_1^n \quad (10)$$

式中: Q_0 —热泵制热量,MW; h_{w3} —冷凝器出口水比焓,kJ/kg; h_{w1} —循环水进口水比焓,kJ/kg; t —压强为 p 时,溴化锂溶液饱和温度,℃; t_1 —压强为 p 时,对应水的饱和温度或露点温度,℃; n —回归系数的阶数; A_n, B_n, C_n, D_n —平衡方程回归系数(适用范围, $X=0.4 \sim 0.65, t=10 \sim 130$ ℃)。

冷凝器热负荷 Q_c :

$$Q_c = f_w(h_{w3} - h_{w2})/1000 \quad (11)$$

发生器热负荷 Q_g :

$$Q_g = (f_4 \cdot h_4 + f_7 \cdot h_7 - f_3 \cdot h_3)/1000 \quad (12)$$

蒸发器热负荷 Q_e :

$$Q_e = (f_{10} \cdot h_{10} - f_9 \cdot h_9)/1000 \quad (13)$$

吸收器热负荷 Q_a :

$$Q_a = [f_6(h_6 - h_1) + f_{10}(h_{10} - h_1)]/1000 \quad (14)$$

溶液换热器热负荷 Q_{ry} :

$$Q_{ry} = f_4(h_4 - h_5)/1000 \quad (15)$$

式中: h_{w2} —吸收器出口水比焓,kJ/kg; f_w —循环水循环流速,kg/s; $h_6, h_1, h_{10}, h_9, h_4, h_7, h_3, h_5$ —热力循环中经膨胀阀降压后浓溶液、吸收器出口稀溶液、蒸发器制冷剂(汽)、经节流阀后制冷剂(水)、发生器出口浓溶液、冷凝器制冷剂(汽)、预热后稀溶液经换热器、经换热器降温后浓溶液等循环节点的比焓,kJ/kg; $f_4, f_7, f_3, f_{10}, f_9, f_6$ —热力循环的各循环节点的工质流速,kg/s。

2 系统能流分析

2.1 各换热部件结构性能参数计算

在本研究中,传热系数 k 和传热面积 A 的乘积 $A \cdot k$ 表示单位温差下的传热量。通常情况下,传热系数 k 变化不大,单位温差下的传热量越小表示换热部件所需的传热面积越小。

采用索柯洛夫公式计算传热平均温差,计算式如下:

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_{ax} - a\Delta t_M - b\Delta t_a \quad (16)$$

单位温差下传热量 $A \cdot k$ 为:

$$A \cdot k = 1000Q/\Delta t_{cp} \quad (17)$$

式中: Δt_{cp} —传热平均温差,℃; Δt_{ax} —冷热流体间的最大温差,℃; Δt_M —温差变化较小的流体进出口温差,℃; Δt_a —温差变化较大的流体进出口温差,℃; a, b —与换热器内部布置及流体相对流动方向相关的系数; Q —所求解换热部件的热负荷,MW。

2.2 系统能流分析

能流分析技术特别适合于复杂系统用能水平的理论分析,通过对能量转换、利用和回收环节进行评价,找出用能水平薄弱环节,提出有效的节能措施^[14]。在设计工况下,对吸收式热泵系统进行能流分析,考虑能流的质量流量 M 、介质比焓 h 和热交换功率 P ,所得能流图如图3所示,其中烟囱—水直接接触换热器简称为设备7。

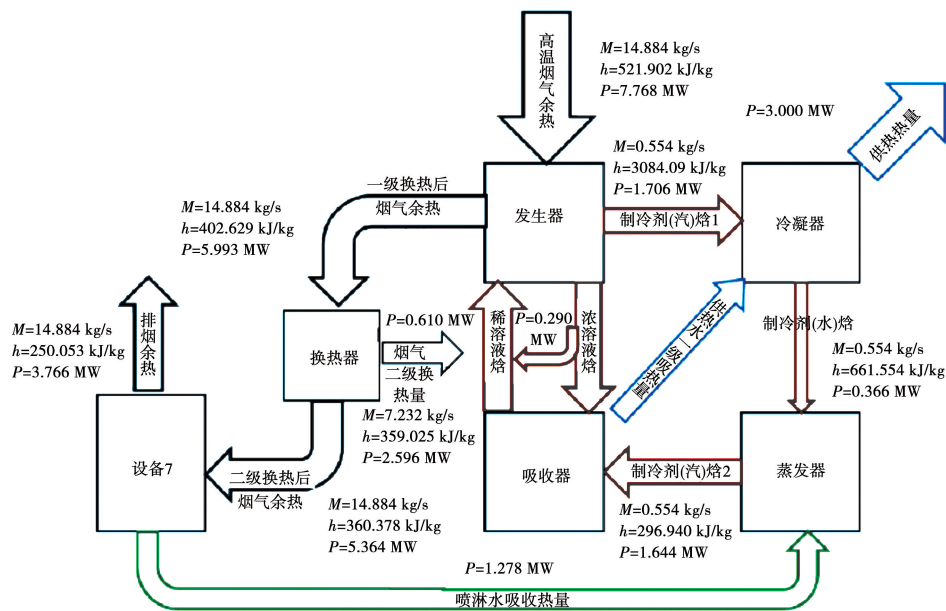


图 3 系统能流图

Fig.3 System energy flow diagram

通过分析各能流参数可以得出以下结论:系统的输入能源主要来自于烟气余热和泵功,其中泵功可以忽略;烟气二级换热器释放的热量未得到充分利用,可用于加热供热水的高温段;可用于驱动热源的热能不足,无法充分回收烟气余热,导致排烟温度较高。烟气余热未充分回收是主要问题,需增加驱动能源或使用其他辅助能源。

2.3 变设计工况对系统性能的影响

变设计工况分析的目的是探讨系统的应用范围和优化方向,改变关键的设计参数和系统工艺流程,观察其变化对系统的影响。

2.3.1 采用三段式换热

系统采用三段式换热实现能量的梯级利用,充分回收利用中温烟气余热。通过发生器出口的烟气直接通入设备 7 进行余热回收,观察三段式换热对系统的影响,结果表明,不采用三段式换热时排烟温度明显升高,烟气余热回收率仅为原来的 84.285%,余热回收效果不佳。可见,如果不使用换热器回收烟气余热量,而是直接通入设备 7,这部分热量就会被浪费掉。但采用三段式换热则要增加一个换热器,系统设备费用提高,系统也变得更加复杂,而且烟气第二段放热量的利用也有待探讨。

2.3.2 进口高温烟气温度

在保证其他无关设计参数不变的前提下,调整

进口高温烟气温度,观察其对烟气流量、烟气余热回收率和换热部件结构性能参数的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可知,高温烟气进口温度越高,达到额定功率所需的烟气流量越小,最终的排烟温度也越低,系统拥有更高的烟气余热回收率和更小的发生器传热面积,系统性能更佳。高温烟气进口温度低,能用作驱动热源的热能就少,系统可回收的低温烟气余热减少,导致排烟温度升高,系统的经济性较差,所以系统应该用于初排烟温度较高的燃气设备上,且温度最好在 200℃ 以上。

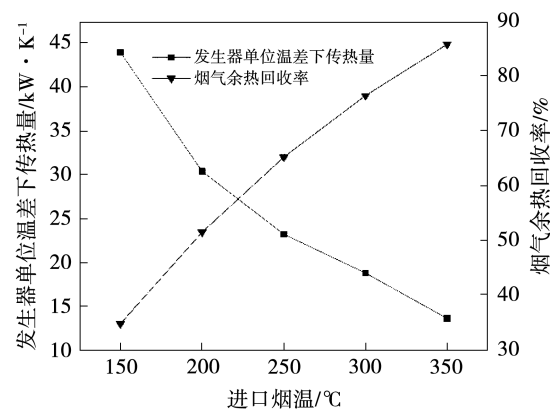


图 4 进口烟温对发生器单位温差下传热量的影响

Fig.4 Effect of inlet flue gas temperature on heat transfer amount per unit temperature difference of generator

2.3.3 溶液换热器热回收率

在保证其他无关设计参数不变的前提下,改变溶液换热器的热回收率,观察其对系统性能的影响,结果如图 5 所示。溶液换热器热回收率越高,泵的总耗功和系统的 COP 越大,系统性能更优。

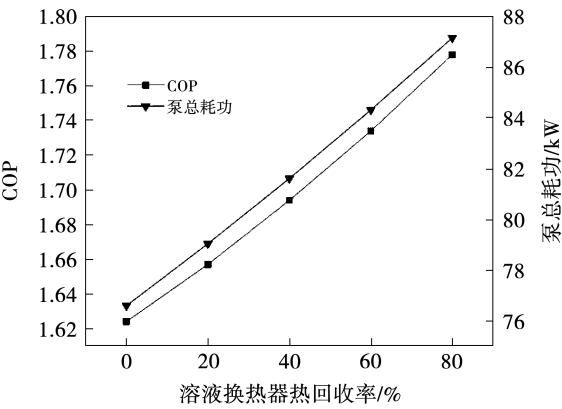


图 5 溶液换热器热回收率对 COP 和泵总耗功的影响

Fig.5 Effect of heat recovery rate of solution heat exchanger on COP and total pump power consumption

溶液换热器的热回收率与换热面积相关,影响其他部件性能。图 6 为不同溶液换热器热回收率对主要部件在单位温差下传热量的影响,如图所示过高的溶液换热器热回收率导致各换热部件在单位温差下的传热量增加,在相同的热负荷下,需要更大的传热面积,造成系统造价过高,所以溶液换热器热回收率的选取应该合理,不能过大。

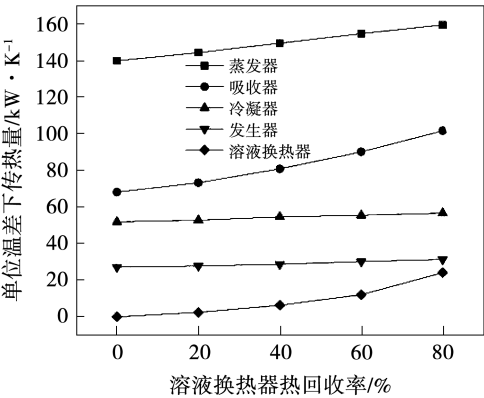


图 6 溶液换热器热回收率对传热量的影响

Fig.6 Effect of heat recovery rate of solution heat exchanger on heat transfer amount

2.3.4 循环喷淋水温变化

在保证其他无关设计参数不变的前提下,改变

设备 7 循环喷淋水出口温度,结果如图 7 所示。随着设备 7 出口温度降低,系统的 COP 减小,系统需要更大的蒸发器传热面积,系统性能变差。图 8 展示了不同喷淋水温差对各换热部件在单位温差下传热量的影响。喷淋水温差越大,蒸发器的单位温差传热量越高,其余部件变化不大,相同的热负荷下,传热面积更大,设备造价增加。因此保持温升 15 ℃ 有助于优化系统的传热性能同时控制设备成本和运行能耗。

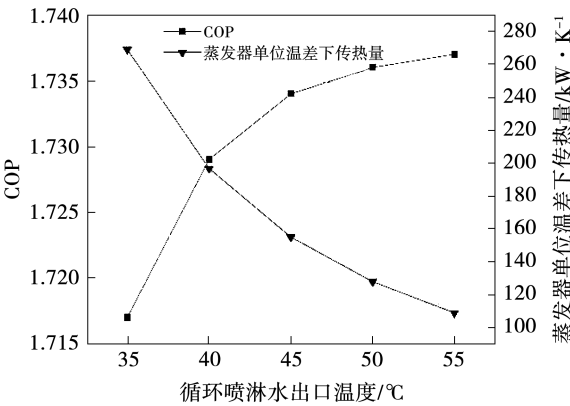


图 7 设备 7 循环喷淋水出口温度对 COP 和蒸发器单位温差下传热量的影响

Fig.7 Effect of circulating spray water temperature at outlet of equipment 7 on heat transfer amount per unit temperature difference between COP and evaporator

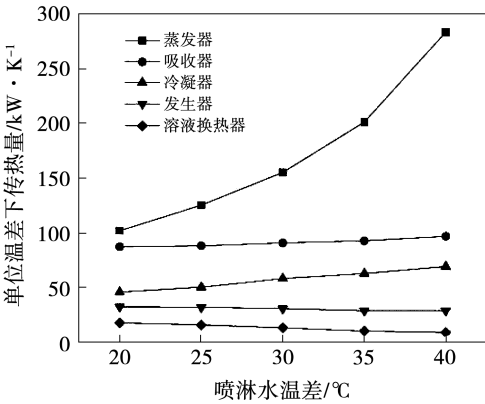


图 8 喷淋水温差对各换热部件单位温差下传热量的影响

Fig.8 Effect of spray water temperature difference on heat transfer amount per unit temperature difference of each heat exchange component

在其他参数不变的情况下,改变喷淋水温度观察其对系统性能的影响,结果如图 9 所示。随着喷淋水温度的降低,系统消耗泵功减小,但 COP 降低,

系统性能变差。在系统中,喷淋水温度决定了排烟温度的下降幅度,过高过低都会影响系统的性能。因此,定喷淋水温度比最终排烟温度低 10 ℃,且不低于 45 ℃。

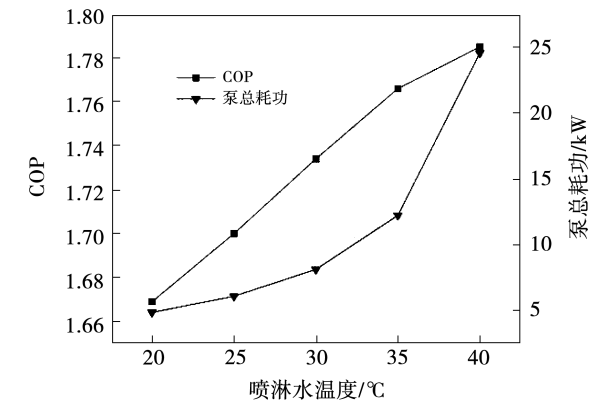


图 9 喷淋水温度对 COP 和泵总耗功的影响

Fig. 9 Effect of spray water temperature on COP and total pump power consumption

2.3.5 供热循环水温变化

本文研究的全凝烟气余热驱动吸收式热泵系统不适用于供热循环水进出口温度过高或过低的情况,溴化锂水溶液的质量分数过高或过低时均易形成结晶,这是使用第一类单效吸收式热泵所致。GBT 34620-2017 中明确规定,对于单效吸收式热泵,其使用侧热水出口温度范围为 50 ~ 90 ℃。在保证其他无关设计参数不变的前提下,改变供热循环水的温度范围,观察其对系统性能的影响,结果如图 10 所示,在适用范围内供热循环水进出口温度越低,系统性能越好。

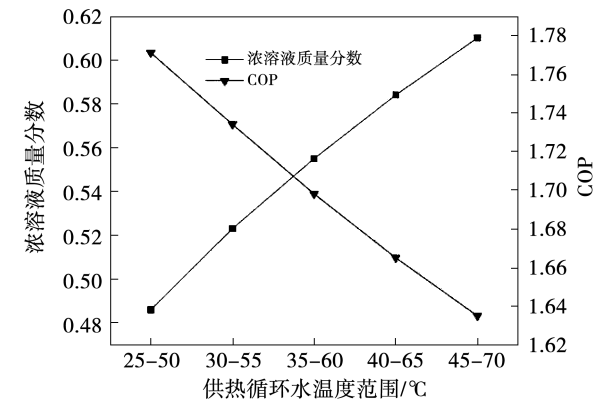


图 10 供热循环水温度范围对浓溶液质量分数和 COP 的影响

Fig. 10 Effect of heating circulating water temperature range on concentrated solution mass fraction and COP

图 11 展示了不同供热循环水温度对各换热部件在单位温差下传热量的影响。如图所示,随着供热循环水温度范围的升高,发生器和溶液换热器的单位温差下传热量升高,蒸发器、冷凝器和吸收器降低,对总传热面积影响不大。

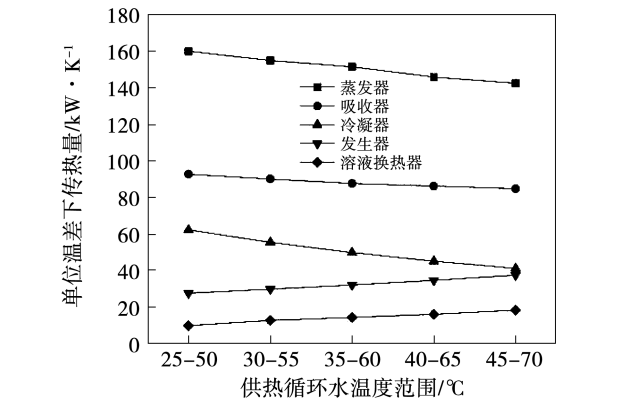


图 11 供热循环水温度对各换热部件单位温差下传热量的影响

Fig. 11 Effect of heating circulating water temperature on heat transfer amount per unit temperature difference of each heat exchange component

2.3.6 放气系数

第一类单效吸收式热泵的放气系数范围通常为 0.03 ~ 0.06^[15],在这个范围内保证其他无关设计参数不变的前提下,改变溶液的放气系数(0.03 ~ 0.06)即增大浓溶液的质量分数,结果如图 12 所示。在设定范围内,随着放气系数的增加,系统的 COP 增大,系统性能变好,但最终排烟温度先减小后增加,在放气系数为 0.05 时存在最低值。

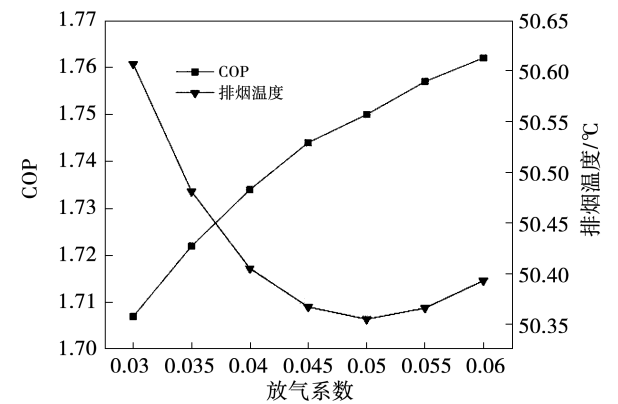


图 12 放气系数对 COP 和排烟温度的影响

Fig. 12 Effect of exhaust coefficient on COP and exhaust gas temperature

图 13 展示了不同放气系数对各换热部件在单位温差下传热量的影响。如图所示,随着放气系数增加,发生器和冷凝器的单位温差下传热量基本不变,蒸发器的单位温差下传热量增加,而吸收器和溶液换热器单位温差下传热量减小,总体来说放气系数变化对整体结构影响不大,但是溶液换热器在单位温差下传热量减小有利于提高溶液换热器的热回收率。

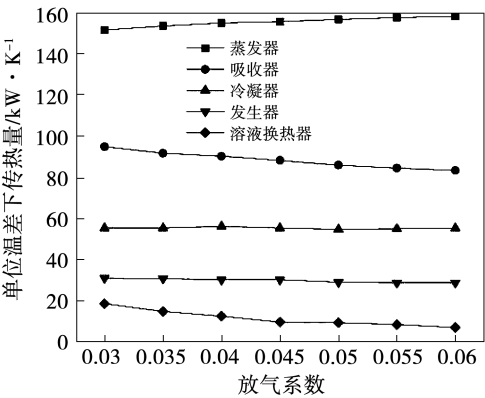


图 13 放气系数对各换热部件单位温差下传热量的影响
Fig. 13 Effect of exhaust coefficient on heat transfer amount per unit temperature difference of each heat exchange component

2.3.7 烟气性质

在保证其他无关设计参数不变的前提下,调整过量空气系数,改变燃气设备烟气性质,观察其对系统的影响,结果如图 14 所示。较大的过量空气系数有利于提高烟气余热回收率,降低露点温度。理论上,系统也适用于回收燃煤电厂的烟气余热,可将排烟温度降至约 30 ℃,但存在腐蚀和传热面积过大的问题,因此系统主要用于回收燃气设备的烟气余热。

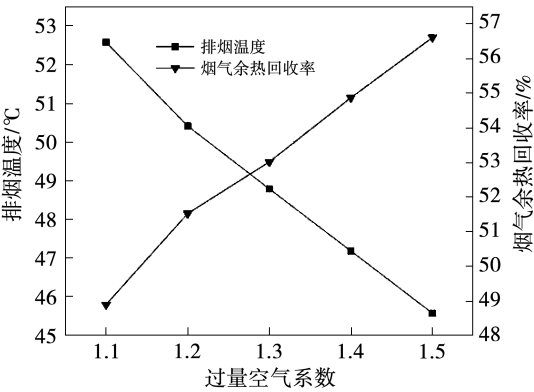


图 14 过量空气系数对排烟温度和烟气余热回收率的影响
Fig. 14 Effect of excess air coefficient on exhaust gas temperature and flue gas waste heat recovery rate

基于上述分析,系统工艺流程及设计参数优化方案为:利用烟气余热给供热循环水进行三段式加热,放气系数为 0.05,溶液换热器热回收率取 80%,喷淋水温比最终排烟温度低 10 ℃,且不高于 45 ℃,循环喷淋水出设备 7 温度比初始温度高 15 ℃。维持其余设计工况,优化后系统的性能和结构性能参数如表 1 所示。

表 1 系统工艺流程及设计优化后参数

Tab. 1 System process flow and parameters

after design optimization

参 数	数 值
发生器出口烟气温度 $t_{y2}/^{\circ}\text{C}$	87.144
发生器出口烟比焓 $h_{y2}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	395.227
烟囱排烟温度 $t_{y4}/^{\circ}\text{C}$	49.345
排烟比焓 $h_{y4}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	241.143
吸收器出口水温 $t_{w2}/^{\circ}\text{C}$	41.785
冷凝器出口水温 $t_{w4}/^{\circ}\text{C}$	51.647
冷凝器出口水比焓 $h_{w4}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	216.237
热泵机组制热功率 Q/MW	3.000
性能系数 COP	1.767
烟气余热回收率 $\eta_i/\%$	53.795

由表 1 可知,优化后各换热部件所需传热面积整体变化在可接受的范围内,烟气余热回收率和 COP 均提高,系统性能明显提升,达到了优化目的。图 15 展示了不同供热水温度范围对系统优化前后性能的影响。

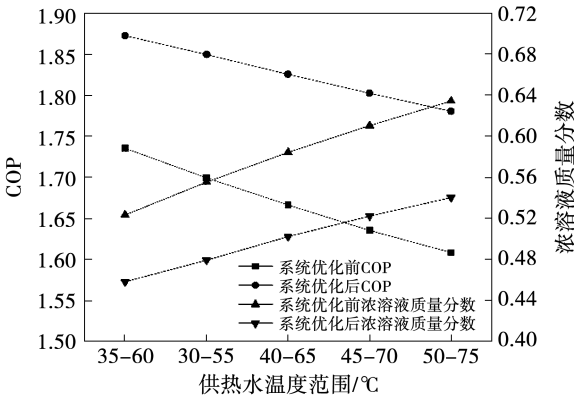


图 15 供热水温度范围对系统优化前后性能的影响
Fig. 15 Effect of heating water supply temperature range on system performance before and after optimization

如图所示,改变供热水温度范围后,系统的 COP 和烟气余热回收率均优于优化前,同时所需的溴化锂浓溶液质量分数也更低。

2.4 夹点分析

第二类优化可实现能量品位的利用,即利用夹点技术对热泵系统的换热工艺过程进行夹点分析,寻找出其中用能薄弱环节并进行优化。

基于前文的系统工艺流程及设计参数优化方案,吸收式热泵机组的循环流程如图 16 所示。

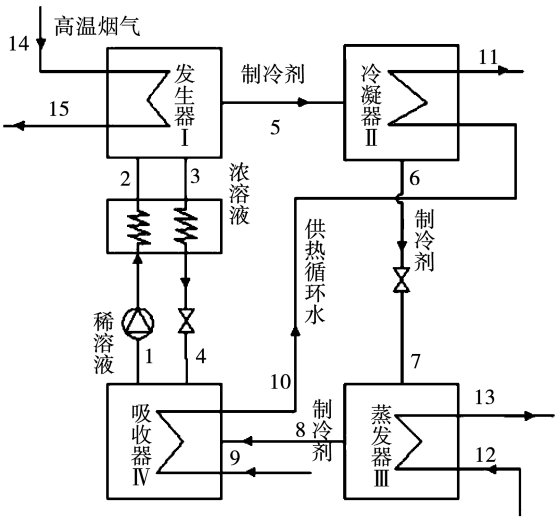


图 16 吸收式热泵机组循环流程图

Fig. 16 Cycle flowchart of absorption heat pump unit

其中 1~14 表示吸收式热泵机组循环流程中的各设备间的介质状态点。通过夹点分析得到最小夹点温差 $\Delta t_{\min}$ 为 20℃,最小公用工程加热负荷为 1 518.952 kW,最小公用工程冷却负荷为 1 526.552 kW。基于此,对吸收式热泵的换热网络进行优化分析,在发生器出口浓溶液 H_4 和吸收器出口稀溶液 C_3 之间添加换热器 E_1 , C_3 升温所需热量由外界公用加热工程提供。在 C_3 和 H_4 之间增加换热器 E_2 , H_4 降温所需冷量由公用冷却工程提供。最终优化后的换热网络由图 17 所示。

优化后的吸收式热泵系统换热网络中的换热器 E_1 、 E_2 相当于溶液换热器,其最佳热回收率约为 82%。

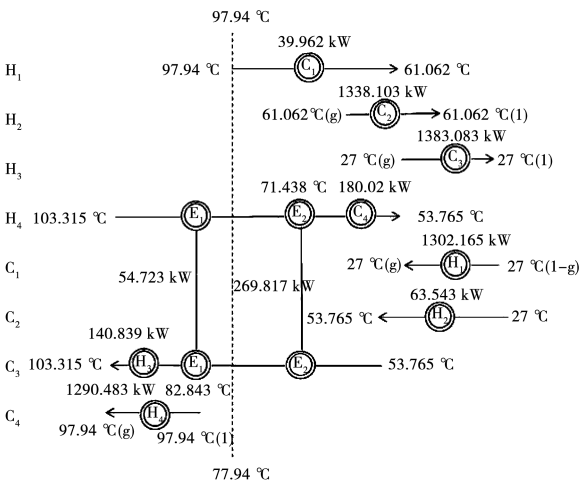


图 17 优化后的换热网络

Fig. 17 Optimized heat exchange network

2.5 系统实际应用分析与热泵节能运行模式探讨

2.5.1 系统的实际应用分析

目前,大型燃气-蒸汽联合循环发电机组采用三压再热式余热锅炉,排烟温度约 90℃。单压余热锅炉排烟温度一般在 160~200℃ 之间,具有较大节能潜力^[16]。回收后的烟气余热可用于发电和供热,实现热电联产,成本低于一般燃气供热电站。

燃气锅炉排烟温度通常为 150~250℃,温度高可导致效率下降^[17],需要充分回收烟气余热。吸收式热泵和直接接触式换热技术相结合的烟气全热回收系统应用广泛^[18-19]。本系统热经济性好,优化了热量利用结构,排烟温度适中,降低了排烟成本。改造设备以提高烟气温度和热泵系统的 COP 是解决主要问题的关键。

2.5.2 热泵节能运行模式探讨

目前,学者们对吸收式热泵在电厂中的节能分析和性能优化进行了广泛研究^[20-24]。然而,受限于放气范围,无法大范围降低烟气温度。吸收式热泵主要包括单效、回热型、多效、多级和复合吸收式热泵^[25]。回热型吸收式热泵适用于制冷,不适用于系统,多效和多级吸收式热泵因需高品位热源不适用于该系统^[26]。仅单效和复合吸收式热泵适用于系统,其中,单效适用于并联运行^[27],复合热功驱动性能优于单效热泵^[28]。

3 结 论

(1) 能流分析表明系统有改进空间,主要挑战是烟气余热回收不充分。提升驱动能源或引入辅助能源是最佳解决途径。综合考虑系统性能及经济性,应根据实际情况选择溶液换热器热回收率、高温烟气进口温度和循环喷淋水出口温度。三段式换热提高了热回收率,但增加了成本和复杂度,烟气第二段放热量的利用仍需探讨。

(2) 对于燃气设备,较大的过量空气系数有利于烟气余热回收。系统理论上适用于燃煤电厂的余热回收,但在实际应用中存在腐蚀和传热面积较大的问题,仅适用于燃气设备。

(3) 系统适用于燃气-蒸汽联合循环余热锅炉,可实现热电联产,具有供热成本低和梯级热量利用的优势,但应用中存在驱动热源能量不足的问题,可通过改造设备或提高热泵 COP 来解决。在各种吸收式热泵中,只有单效和复合热泵适用于该系统,回热型和多效、多级吸收式热泵不适用。并联运行吸收式热泵可提高系统性能,而复合热功驱动热泵性能优于单效热泵。

参考文献:

[1] 张若瑜,王海超,李祥立,等. 热电厂烟气和循环冷却水余热利用技术途径[J]. 煤气与热力,2019,39(3):1-5,11,42.
ZHANG Ruoyu, WANG Haichao, LI Xiangli, et al. Technical approaches of waste heat utilization for thermal power plant flue gas and circulating cooling water[J]. Gas and Heat, 2019, 39(3): 1-5, 11, 42.

[2] 张俊博,金 旭,刘忠彦,等. 吸收式热泵余热回收先进技术综述[J]. 发电技术,2020,41(3):269-279.
ZHANG Junbo, JIN Xu, LIU Zhongyan, et al. Review on advanced technology for waste heat recovery of absorption heat pump[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 269-279.

[3] 孙皓天. 双级溴化锂吸收式热泵系统性能分析及优化[D]. 吉林:东北电力大学,2024.
SUN Haotian. Performance analysis and optimization of two stage lithium bromide absorption heat pump system[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2024.

[4] 付 林,田贯三,隋 军,等. 吸收式热泵在燃气采暖冷凝热回收中的应用[J]. 太阳能学报,2003,24(5):620-624.
FU Lin, TIAN Guansan, SUI Jun, et al. Combining absorption heat pump with gas boiler for exhaust condensating heat recovery in district heating system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2003, 24(5):

620-624.

[5] 付 林,孙 健,张世钢. 利用吸收式热泵回收烟气余热的集中供热系统[P]. 中国:CN201120133195.9,2025-02-21.
FU Lin, SUN Jian, ZHANG Shigang. Central heating system using absorption heat pump to recover flue gas waste heat[P]. China: CN201120133195.9, 2025-02-21.

[6] 杨燕燕. 单效溴化锂吸收式制冷机组性能研究及其应用[D]. 大连:大连理工大学,2013.
YANG Yanyan. Performance research and application of single-effect lithium bromide absorption refrigeration unit[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[7] 何梦渊,李永生,潘 涛,等. 基于吸收式热泵的锅炉烟气余热回收工艺系统性能研究[J]. 石油与天然气化工,2019,48(1):115-119.
HE Mengyuan, LI Yongsheng, PAN Tao, et al. Investigation on the system performance of waste heat recovery for boiler flue gas based on absorption heat pump[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(1): 115-119.

[8] 赵玺灵,付 林,张世钢. 吸收式热泵等效循环模型及性能优化[J]. 太阳能学报,2010,31(9):1173-1179.
ZHAO Xiling, FU Lin, ZHANG Shigang. Thermodynamics model and performance optimization of absorption heat pump[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1173-1179.

[9] ZEBBAR D, KHERRIS S, ZEBBA S, et al. Thermodynamic optimization of an absorption heat transformer[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(5): 1393-1401.

[10] JEONG S, KANG B H, KARNGT S W. Dynamic simulation of an absorption heat pump for recovering low grade waste heat[J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18: 1-12.

[11] 邱丽霞,郝艳红. 电厂低温热与吸收式热泵耦合供热系统研究[J]. 热力发电,2015,44(10):20-24.
QIU Lixia, HAO Yanhong. Power plant heating system integrating low temperature heat and absorption heat pumps[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(10): 20-24.

[12] 杨 波,江 亿,付 林,等. 用于烟气全热回收的全开式吸收式热泵[J]. 东南大学学报(自然科学版),2018,48(5):789-793.
YANG Bo, JIANG Yi, FU Lin, et al. Fully-open absorption heat pump for total heat recovery of flue gas[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2018, 48(5): 789-793.

[13] 沈维道,童钧耕. 工程热力学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社,2016.
SHEN Weidao, TONG Jungeng. Engineering thermodynamics (Fifth edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.

[14] 武八镇,赵学展,岳 峰,等. 基于能流分析的油田注汽锅炉节能技术的开发与应用[J]. 中国石化节能,2020,10(1):33-39.

- WU Bazhen, ZHAO Xuezhao, YUE Feng, et al. Development and application of energy saving technology for oilfield steam injection boiler based on energy flow analysis[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2020, 10(1): 33–39.
- [15] 杨双博. 溴化锂吸收式热泵传热系数的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- YANG Shuangbo. Study of heat transfer coefficients of LiBr absorption heat pump[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [16] 全庆华, 袁益超, 刘聿拯, 等. 燃气-蒸汽联合循环余热锅炉技术研究现状[J]. 能源研究与信息, 2009, 22(4): 208–213.
- TONG Qinghua, YUAN Yichao, LIU Yuzheng, et al. Status quo of HRSG for the combined gas-steam cycle[J]. Energy Research and Information, 2009, 22(4): 208–213.
- [17] 于文娟, 张 虎. 燃气供热锅炉房节能技术分析[J]. 技术探索, 2020(16): 125.
- YU Wenjuan, ZHANG Hu. Analysis of energy-saving technology of gas heating boiler room[J]. Technology Exploration, 2020(16): 125.
- [18] 陈江涛, 负 英, 彭 丹, 等. 城市燃气锅炉房供热能力和余热利用[J]. 能源研究与管理, 2020(2): 105–107.
- CHEN Jiangtao, YUN Ying, PENG Dan, et al. Heat supply capacity and waste heat utilization of urban natural-gas fired boiler[J]. Energy Research and Management, 2020(2): 105–107.
- [19] 阮 磊, 李新义, 侯志平, 等. 横流喷淋技术在燃气吸收式热泵机组烟气余热回收中的应用分析[J]. 区域供热, 2022(6): 94–98, 105.
- RUAN Lei, LI Xinyi, HOU Zhiping, et al. Application analysis of cross-flow spray technology in flue gas waste heat recovery of gas-fired absorption heat pump units[J]. District Heating, 2022(6): 94–98, 105.
- [20] 谭 宏, 王书辉, 苏世铭, 等. 火电机组循环水余热利用中吸收式热泵性能仿真[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(7): 139–141.
- TAN Hong, WANG Shuhui, SU Shiming, et al. Performance simulation of absorption heat pump in utilization of circulating water waste heat of thermal power units[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(7): 139–141.
- [21] 刘亿鑫, 李怀宗, 牟中华. 利用循环水余热加热凝结水的改造方法及分析[J]. 电站系统工程, 2022, 38(2): 43–45.
- LIU Yixin, LI Huaizong, MU Zhonghua. Feasibility study on heating condensed water using waste heat of circulating water[J]. Power System Engineering, 2022, 38(2): 43–45.
- [22] 赵 宁. 吸收式热泵在热力系统中应用的经济性分析[J]. 华北电力技术, 2012(2): 30–31.
- ZHAO Ning. Economic analysis on application of absorption heat pump in thermodynamic system[J]. North China Electric Power, 2012(2): 30–31.
- [23] 徐震原, 毛洪财, 刘电收, 等. 余热高效回收的双效吸收式热泵实验研究与分析[J]. 科学通报, 2020, 65(16): 1618–1626.
- XU Zhenyuan, MAO Hongcai, LIU Dianshou, et al. Experimental study and analysis on double effect absorption heat pump for efficient waste heat recovery[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16): 1618–1626.
- [24] 纪 强, 韩宗伟, 张孝顺, 等. 吸收式热泵研究进展及应用现状[J]. 暖通空调, 2020, 50(10): 14–23.
- JI Qiang, HAN Zongwei, ZHANG Xiaoshun, et al. Research progress and application status of absorption heat pumps[J]. Journal of HV & AC, 2020, 50(10): 14–23.
- [25] 洪文鹏, 何建军. 回收电厂余热的新型吸收式热泵系统[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(3): 67–73.
- HONG Wenpeng, HE Jianjun. The new absorption heat pump system to reclaim waste heat in power plant[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(3): 67–73.
- [26] 张 昌, 史 琳. 热泵技术与应用(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- ZHANG Chang, SHI Lin. Heat pump technology and application (Third edition)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [27] 黄国华, 林乐晖, 于忠森. 第一类溴化锂吸收式热泵机组的现场应用研究[J]. 机电信息, 2017(16): 70–74.
- HUANG Guohua, LIN Lehui, YU Zhongsen. Field application research on the first type of lithium bromide absorption heat pump unit[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(16): 70–74.
- [28] 王 康. 热功复合驱动热泵循环性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- WANG Kang. Performance study of absorption/mechanical hybrid heat pump cycle[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

(王治红 编辑)