

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.04.003

基于新型工质热泵的烟气余热回收优化温度研究

Study on the optimal temperature for flue gas waste heat recovery of the heat pump with new working fluid

孙健, 秦宇, 王寅武, 吴可欣, 戈志华
SUN Jian, QIN Yu, WANG Yinwu, WU Kexin, GE Zhihua

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院 零碳能源建筑技术研究所, 北京 102206)
(Institute of Zero Carbon Energy Building Technology, School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 天然气锅炉排烟温度较高, 烟气中含有较多的水蒸气潜热, 具有显著的热量回收价值, 目前常采用新型工质电动热泵回收天然气烟气余热加热热网回水, 助力“双碳”目标的实现。为提升电动热泵的循环性能系数, 研究不同工况下新型工质电动热泵适配混合工质的性能, 对机组运行中 R134a+R245fa, R152a+R245fa, R227ea+R245fa, R134a+R142b, R152a+R142b, R227ea+R142b 共 6 种混合工质的循环性能进行计算分析。针对锅炉房实际运行参数, 对比冷凝器热水进出口温度为 50/65 °C, 蒸发器冷水进出口温度为 40/35 °C 及 40/30 °C 工况下各混合工质的热力学性能, 得出在该工况下 R134a+R245fa (摩尔分数比为 0.41:0.59) 为较佳工质。采用所筛选工质对烟气余热回收排烟温度进行优化, 分析了不同排烟温度的经济性, 对比余热回收收益及电动热泵运行成本, 揭示了烟气余热回收最优优化温度变化规律, 指导余热回收系统设计与应用。

关键词: “双碳”目标; 天然气锅炉; 排烟温度; 余热回收; 电动热泵; 混合工质

中图分类号: TK 11⁺ 文献标志码: A 文章编号: 2097-0706(2023)04-0019-07

Abstract: Since the flue gas emitted from natural gas boilers is of high temperature and contains high latent heat of steam, it is worthy to be reused. To pursuit the "dual carbon" target, the waste heat in natural gas boiler flue gas is recovered by electric heat pumps with new working fluids to rise the return water temperature. In order to improve the coefficient of performance of electric heat pumps, their performances under different working conditions are studied. Six types of mixed working fluids, R134a+R245fa, R152a+R245fa, R227ea+R245fa, R134a+R142b, R152a+R142b and R227ea+R142b, show different cycling properties. Under the actual operating condition of a boiler room, the thermodynamic properties of different mixed working fluids are compared when the inlet and outlet hot water temperatures of the condenser are 50/65 °C, and the inlet and outlet cold water temperatures of the evaporator are 40/35 °C or 40/30 °C. The conclusion is that the optimal working fluid under this working condition is the mixture of R134a and R245fa whose mole fractions are 0.41 and 0.59. The benefits of the waste heat recovery system and the costs of the heat pump with the optimized flue gas temperature and selected working fluid are analysed, and the variation law of the economy of waste flue gas recovery with flue gas temperature is obtained. The analysis is beneficial for the future design of waste heat recovery systems.

Keywords: dual carbon target; natural gas boiler; exhaust gas temperature; waste heat recovery; electric heat pump; mixed working fluid

0 引言

在我国北方“煤改气”政策的严格推动下, 天然气的消耗量与日俱增。2020年中国天然气消费总量达 3 280 亿 m³, 占总能源消费总量的 8.1%^[1]。天然气的主要成分是甲烷, 另有少量的乙烷、丙烷和丁烷等。燃烧产物主要是水与二氧化碳, 不会排放

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0104900); 国家自然科学基金项目(52090062); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020MS009)

National Key R&D Program of China (2019YFE0104900); National Natural Science Foundation of China (52090062); Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020MS009)

二氧化硫及小颗粒物,相比化石能源清洁得多,但其燃烧产物中的 CO_2 是加剧温室效应的主要气体。在此背景下,2020年9月,我国正式提出“双碳”目标。2020年在我国一次能源碳排放占碳排放总量的84.1%^[2]。为实现“双碳”目标,余热回收是一个重点关注方向,天然气锅炉排烟温度一般在80~150℃,这部分热量如果能够加以利用,不仅能使烟囱排出的烟气在外观上达到“消白”的效果,同时可提高锅炉运行的热效率^[3-4]。

天然气锅炉排出的烟气热量包括显热与水蒸气携带的潜热2部分,目前回收烟气余热的常规方法是在锅炉尾部增设烟气换热器和空气预热器,受热网回水温度及所需换热端差限制,无法将烟气温度降至露点以下,因此只能回收烟气中的显热部分,而烟气中包含余热较为丰富的水蒸气潜热未能得到回收。目前采用热泵技术回收烟气余热是主要的技术路线之一,而采用电动热泵回收天然气锅炉烟气余热会出现“大温升”和“高冷凝”的特点^[5],由于烟气排烟温度与冷水进出口温差较大,利用非共沸工质的温度滑移特性可以降低换热过程中的不可逆损失^[6],提升热泵的性能,更好地回收烟气余热。

目前国内外学者针对热泵回收烟气余热以及高温热泵循环工质性能进行了许多研究工作。孔祥渠等^[7]提出一种基于吸收式热泵的烟气余热深度回收技术,充分回收烟气余热后可将烟气温度降至30℃,经工程实际检验后效果较好。韩伟^[8]对燃气锅炉采用热泵回收烟气余热进行计算,得出采用喷淋加热泵节能技术可增加采暖面积,经济性较高。张志钢等^[9]通过对中原某燃气供热锅炉进行分析计算得出将烟气排气温度降到30℃以下,锅炉热效率可达108%。别尔兰·贾纳依汗等^[10]对某吸收式热泵回收烟气余热项目进行计算,结果表明采用吸收式热泵回收烟气余热可提高锅炉的能源利用效率,降低单位供暖面积天然气耗量10%以上。孙健等^[11]对6种混合工质性能在高温电动热泵工作环境下进行研究,通过建模分析针对应用场景对循环性能进行优化分析。田富宽^[12]对中高温工况下R124, R152a, R245fa及其混合物R152a/R124和R152a/R245fa等几种工质进行计算分析,结果表明R152a/R124(质量比为30:70)性能更加优异。Yoshida等^[13]对4种纯工质和混合工质进行了理论分析和试验研究,试验结果表明R22/R142b的混合工质热力性能较好,是高温热泵循环的理想工质。何永宁等^[14]对比了R1234ze, R134a, R124, R142b等工质的热力性质,分析了几种工质在相同工况下的压比、

循环性能系数(COP)、压缩机排气量、排气温度等性能参数,结果表明R1234ze在系统运行过程中,其COP较高、压缩机排气温度低等优点。R124ze的全球变暖潜能值(GWP)较低,是高温热泵领域的潜在优秀工质。庄绪成等^[15]利用螺杆式高温热泵实验台,以混合工质R134a/R245fa(质量比为3:7)和纯工质R245fa为对象,研究了2种工质在高温工况下的循环性能,并进行对比分析。结果表明,混合工质R134a/R245fa的制热量较高,其COP较低。

为回收天然气烟气中水蒸气冷凝释放出的汽化潜热这部分热量,需将烟气温度降至55℃以下,针对所筛选天然气锅炉房实际运行参数,故选取蒸发温度为40~35℃,冷凝温度为45~55℃。在此工况下,对几种选定的纯工质与混合工质的COP、冷凝压力、单位容积制热量和排气温度进行分析对比,筛选出性能最优的工质组合并优化烟气排烟温度,进而指导该系统的设计与运行。

1 烟气回收机组理论模型

1.1 理论循环介绍

烟气回收机组循环流程如图1所示。

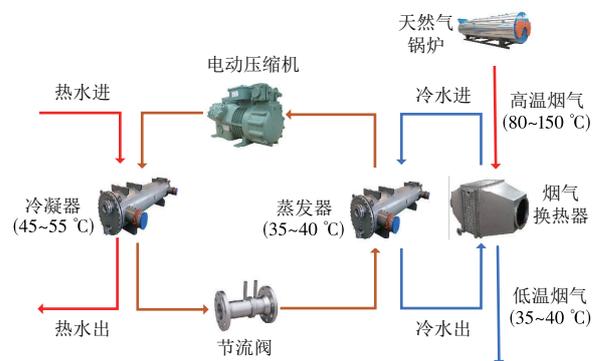


图1 烟气回收机组循环流程

Fig. 1 Circulation flow in a flue gas recovery unit

机组内部循环过程为:液态制冷剂在蒸发器内吸热气化后进入压缩机被压缩成高温高压气体;制冷剂气体进入冷凝器放热后变为低温高压液态制冷剂;液态制冷剂进入节流装置节流降压为低温低压液态制冷剂后进入蒸发器,进入下一个循环。

该系统通过热泵系统内蒸发器制取的冷水进入烟气换热器与高温烟气进行换热,将烟气温度降至合理温度。冷凝器内释放的热量用于预热热网回水,起到一定的节能作用。

1.2 热力学建模

本文对烟气余热回收机组进行热力学建模,采用工程方程求解软件EES^[16]与制冷剂物性查询软件REFPROP对机组中建立的设备能量平衡方程与

质量平衡方程进行求解,以获取各设备进出口状态参数。机组建模中,对热泵系统循环过程中的压缩、冷凝、节流膨胀和蒸发4个基本过程做出如下假设。

(1)工质的蒸发与冷凝均为等压过程^[17]。

(2)节流前后为等焓过程^[18]。

(3)忽略工质在相变过程以及管道流动过程中的热损失^[19]。

(4)机组循环效率设定为电机效率、机械效率和等熵效率的乘积。电机效率设为0.85,机械效率设为0.85,等熵效率设为0.90^[20]。

(5)蒸发器冷凝器中最小换热端差取3℃,过热过冷度取5℃^[21]。

系统循环中各部件热力学模型如下。

蒸发器能量守恒方程

$$Q_e = q_{ms}(t_{s1} - t_{s2})c_p = q_m(h_{e1} - h_{e3}), \quad (1)$$

式中: Q_e 为蒸发器热负荷,kW; q_{ms} 为循环冷水流量,kg/s; c_p 为水的比定压热容,kJ/(kg·K); t_{s1}, t_{s2} 为循环冷水进、出蒸发器口温度,℃; q_m 为混合工质流量,kg/s; h_{e1} 为混合工质过热状态比焓,kJ/kg; h_{e3} 为混合工质在冷凝器出口过冷状态比焓,kJ/kg。

蒸发温度设定为

$$t_e = (t_{e30} + t_{e0})/2, \quad (2)$$

式中: t_e 为蒸发温度,℃; t_{e30} 为蒸发器入口温度,℃; t_{e0} 为混合工质在蒸发压力下的露点温度,℃。

冷凝器能量守恒方程

$$Q_c = m(h_{c2} - h_{c3}) = q_{mw}(t_{w2} - t_{w1})c_p, \quad (3)$$

式中: Q_c 为冷凝器热负荷,kW; h_{c2} 为压缩机出口混合工质过热状态比焓,kJ/kg; q_{mw} 为制取热水流量,kg/s; t_{w1}, t_{w2} 为制取热水在冷凝器进、出口温度,℃。

冷凝温度设定为

$$t_c = (t_{lk} + t_{vk})/2, \quad (4)$$

式中: t_c 为冷凝温度,℃; t_{lk} 为混合工质在冷凝器出口饱和液态的温度,℃; t_{vk} 为混合工质在冷凝压力下的泡点温度,℃。

压缩机做功为

$$W = q_m(h_{c2} - h_{e1}), \quad (5)$$

式中: W 为压缩机的功耗,kW。

节流部件节流过程前后混合工质比焓不变

$$h_{c3k} = h_{e3}, \quad (6)$$

式中: h_{c3k} 为混合工质在冷凝器出口的过冷态比焓,kJ/kg。

烟气换热器能量守恒方程

$$Q_y = q_{m_y}c_{p_y}(t_{y1} - t_{y2}) = q_{m_s}c_p(t_{s1} - t_{s2}), \quad (7)$$

式中: Q_y 为烟气换热器热负荷,kW; q_{m_y} 为烟气流量,

kg/s; c_{p_y} 为烟气的比定压热容,kJ/(kg·K); t_{y1}, t_{y2} 为烟气换热器进、出口处烟气温度,℃;

系统单位容积制热量为

$$Q_v = Q_e/(q_m v), \quad (8)$$

式中: Q_v 为单位容积制热量,kJ/m³;v为蒸发器出口制冷剂蒸汽比体积,m³/kg。

压缩机压比为

$$e_p = p_c/p_e, \quad (9)$$

式中: e_p 为压缩机压比; p_c 为冷凝压力,kPa; p_e 为蒸发压力,kPa。

系统COP为

$$C_{OP} = Q_c/W. \quad (10)$$

2 循环最优混合工质筛选分析

按烟气回收进出口温度与热泵机组蒸发冷凝温度来选取适当的纯工质进行混合配比,混合工质组合有6种:R134a+R245fa, R152a+R245fa, R227ea+R245fa, R134a+R142b, R152a+R142b, R227ea+R142b。混合工质组合中纯工质的物性参数见表1。为了筛选最佳混合工质的组合及其配比,机组中热水侧一般为固定工况,将蒸发器冷水进/出口温度设定为40/35℃,40/30℃,冷凝器热水进出口温度固定为50/65℃来进行分析。

表1 纯工质基本物性参数

Table 1 Basic physical properties of the pure working fluids

物性参数	R134a	R152a	R245fa	R227ea	R142b
临界温度/℃	101.0	113.3	154.0	102.8	137.2
临界压力/MPa	4.1	4.5	3.7	3.0	4.1
分子量	102.0	66.1	134.0	170.0	100.5
汽化潜热(0℃)/(kJ·kg ⁻¹)	197.0	324.2	196.1	131.0	233.0
沸点/℃	-26.2	-25.0	15.1	-17.0	-10.0

混合工质的COP是评价其在机组循环中的一个关键指标,COP越高代表该工质在机组中循环的性能越好,反之越差。如图2所示,添加纯工质R245fa的3组混合工质的COP均优于其余3组工质。COP较高的3组工质在摩尔分数为0.4附近达到最大值,其中R134a+R245fa组合表现最为优异,其COP最高达10.27。R152a+R245fa组合与R227ea+R245fa组合COP略低于R134a+R245fa,其COP最大值分别为9.15和7.95。相比对上述3种工质,添加工质R142b的3组混合工质COP均相对较低且随摩尔分数变化幅度不大。主要原因是R142b与被添加的几组工质沸点相近。R134a+R142b的COP比其余2组混合工质稍高,最高达6.72。R152a+R142b的组合COP达6.56。R227ea+

R142b组合的COP呈现随摩尔分数增加而下降的趋势,COP最高为6.18。

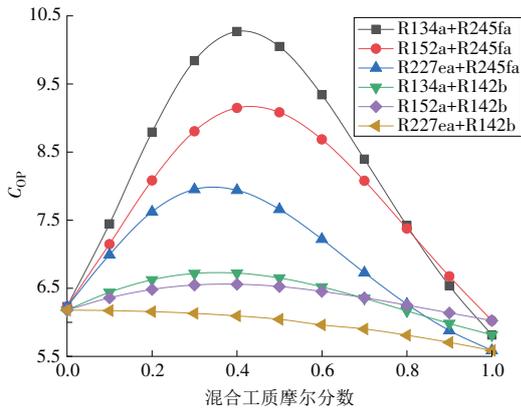


图 2 t_{sl}/t_{s2} 为 40/35 °C 时系统 C_{OP} 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 2 Variation of system C_{OP} with the mole fraction of mixed working medium when $t_{sl}/t_{s2}=40/35$ °C

当冷水进出口温度设置为 40/30 °C 时,混合工质 COP 随混合工质摩尔分数的变化如图 3 所示。由图 3 可见:混合工质的 COP 变化趋势与图 2 大体相同,随着冷水出口温度的下降,6 组混合工质的 COP 均呈现下降趋势;相较于添加 R142b 的 3 组混合工质,冷水出口温度变化时,添加 R245fa 的 3 组混合工质的 COP 变化更为显著。

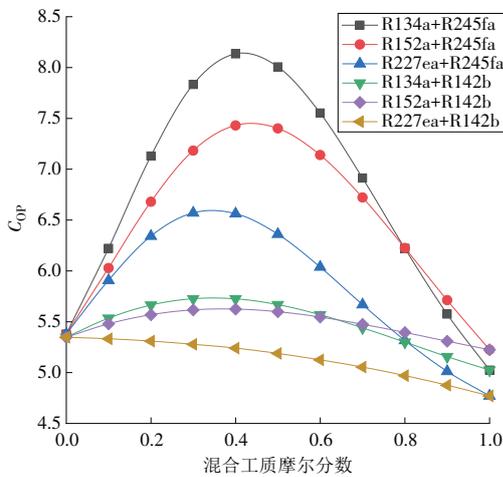


图 3 t_{sl}/t_{s2} 为 40/30 °C 时系统 C_{OP} 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 3 Variation of system C_{OP} with the mole fraction of mixed working medium when $t_{sl}/t_{s2}=40/30$ °C

各组混合工质的 Q_v 随摩尔分数的变化如图 4 所示, Q_v 越大,相同热负荷下所需混合工质流量越小,机组占地面积越小,初投资越小。R134a+R142b 组合的 Q_v 最大,R152a+R142b,R152a+R245fa,R134a+R245fa 的表现也不错,略低于 R134a+R142b;添加了 R134a,R152a 的几组混合工质 Q_v 都得到了提升;R227ea+R142b 与 R227ea+R245fa 的 Q_v 较低。如图 5 所示,随着热水出口温度的降低,各混合工质的 Q_v 变化趋势与图 4 相同,整体 Q_v 降低。

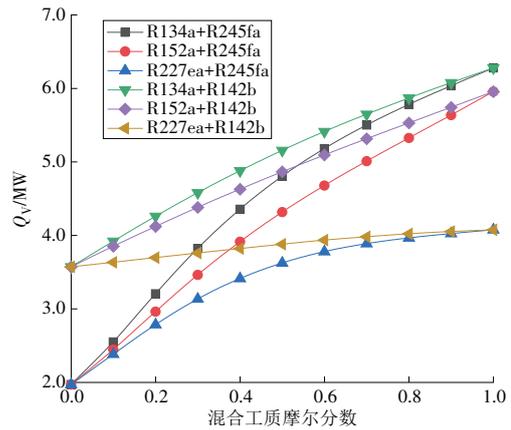


图 4 t_{sl}/t_{s2} 为 40/35 °C 时 Q_v 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 4 Variation of Q_v with the mole fraction of mixed working medium when $t_{sl}/t_{s2}=40/35$ °C

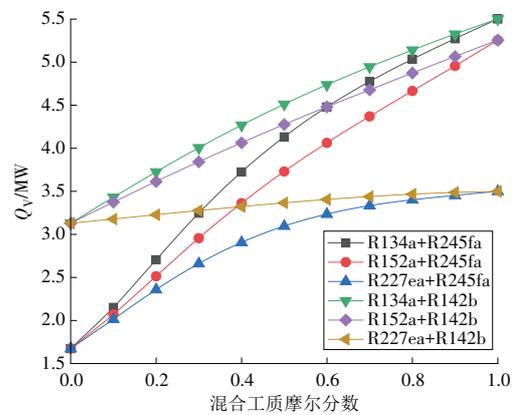


图 5 t_{sl}/t_{s2} 为 40/30 °C 时 Q_v 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 5 Variation of Q_v with the mole fraction of mixed working medium when $t_{sl}/t_{s2}=40/30$ °C

各组混合工质的 p_c 随混合工质摩尔分数变化趋势如图 6 所示,当混合工质摩尔分数小于 0.7 时,添加 R142b 的 3 组混合工质 p_c 高于添加 R245fa 的 3 组混合工质。各组混合工质的 p_c 均呈现上升趋势,最高为 R134a+R142b 组合,其 p_c 最大为 1.98 MPa,仍处于机组安全运行范围内。

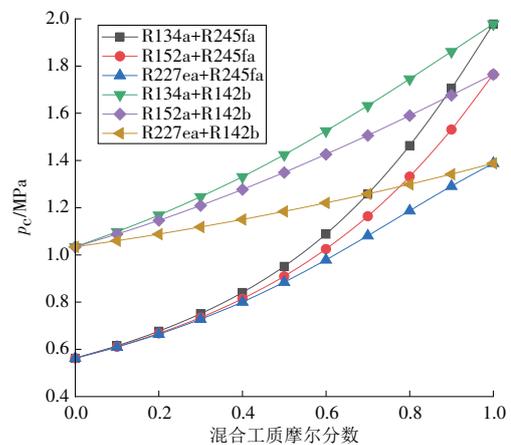


图 6 t_{sl}/t_{s2} 为 40/35 °C 时 p_c 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 6 Variation of p_c with the mole fraction of mixed working medium when $t_{sl}/t_{s2}=40/35$ °C

压缩机排气温度不宜过高,否则会产生许多安全问题,如压缩机过热、系统润滑油变质等,危害系统运行安全,影响压缩机使用寿命。各混合工质的压缩机排气温度随混合工质摩尔分数变化如图 7 所示。添加了 R152a 的 2 组混合工质排气温度呈上升趋势,最高温度出现在纯工质 R152a 时的 89 °C;添加了 R134a 的 2 组混合工质排气温度变化较稳定,维持在 80 °C 左右;添加了 R227ea 的 2 组工质排气温度呈现下降趋势,最低温度出现在纯工质 R227ea 时的 69 °C。上述 6 组混合工质的排气温度均满足压缩机安全运行要求。如图 8 所示,降低冷水出口温度后,混合工质排气温度变化趋势与上图相同,各混合工质的排气温度均有所上升。

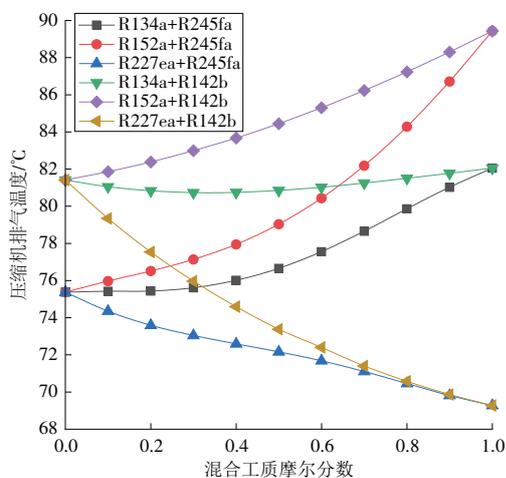


图 7 t_{s1}/t_{s2} 为 40/35 °C 时排气温度随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 7 Variation of flue gas temperature with the mole fraction of mixed working medium when $t_{s1}/t_{s2}=40/35$ °C

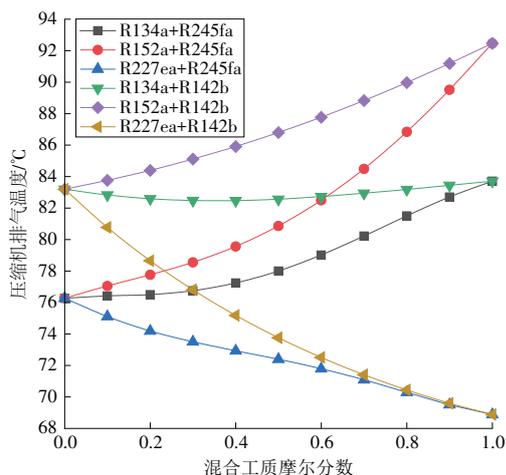


图 8 t_{s1}/t_{s2} 为 40/30 °C 时排气温度随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 8 Variation of flue gas temperature with the mole fraction of mixed working medium when $t_{s1}/t_{s2}=40/30$ °C

综合以上各参数随混合工质摩尔分数的变化,筛选出最优混合工质为 R134a+R245fa,其 COP 相较于其他混合工质最高,单位容积制热量较优异,冷凝压力与排气温度均在机组安全运行范围内。

为确定 R134a+R245fa 的最佳配比,根据各参数的变化规律,在冷水进出口温度为 40/35 °C,热水进出口温度为 50/65 °C 工况下细化混合工质的配比。在其余条件不变的情况下,确定最优混合工质 R134a+R245fa 的摩尔分数比为 0.41:0.59,如图 9 所示。

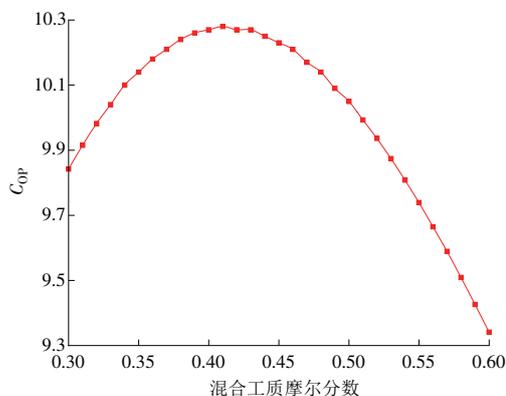


图 9 t_{s1}/t_{s2} 为 40/35 °C 时 C_{OP} 随混合工质摩尔分数的变化
Fig. 9 Variation of C_{OP} with the mole fraction of the mixed working medium when $t_{s1}/t_{s2}=40/35$ °C

3 排烟温度经济性分析

高温烟气通过烟气换热器降至一定温度后排出,但最经济的排烟温度目前尚无通用的评价方法。烟气排烟温度过高时,回收不到烟气中水蒸气蕴含的潜热部分,不能充分达到回收余热的目的;烟气排烟温度过低时,压缩机出力过高,机组整体的经济性不佳。本文采用不同的压缩机电价(0.5, 0.7, 0.9 元/(kW·h))以及不同的余热回收价格(40, 60, 80 元/GJ),通过计算压缩机电价与余热回收价格之间的利润来选择较为经济的烟气排烟温度。

如图 10 所示,当固定电价为 0.5 元/(kW·h)时,不同的余热回收价格下,出现最大利润点的烟气出口温度各不相同。余热回收价格越高,机组利润越大。

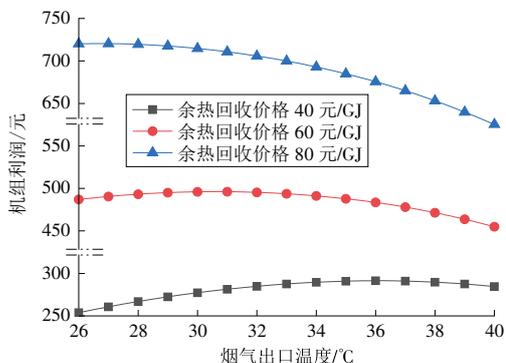


图 10 电价为 0.5 元/(kW·h) 时不同余热回收价格下机组利润随 t_{y2} 的变化
Fig. 10 Profit of the unit varying with t_{y2} at different waste heat recovery prices when electricity price is 0.5 yuan/(kW·h)

由表 2 可见,随着余热回收价格的提升,最佳排烟温度不断下降,主要是由于烟气排烟温度的下降使机组可以回收更多的余热,较低的电价与较高的余热回收价格促使最佳排烟温度不断下降。

表 2 不同余热回收价格下的最佳排烟温度与利润

Table 2 Optimal flue gas temperature and system profit varying with waste heat recovery price

余热回收价格/(元·GJ ⁻¹)	最佳排烟温度/°C	机组利润/(元·h ⁻¹)
40	36	291
60	31	496
80	26	720

如图 11 所示,当余热回收价格固定为 60 元/GJ 时,不同电价下所确定的排烟温度各不相同。

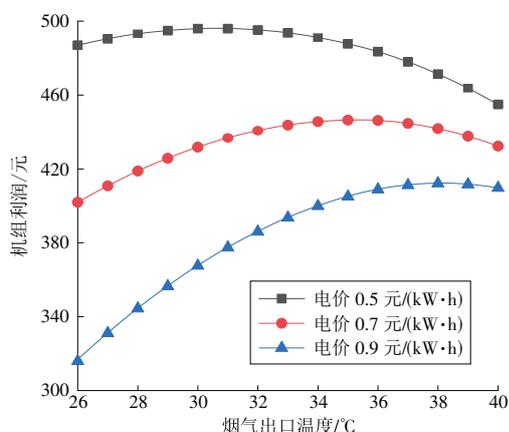


图 11 余热回收价格为 60 元/GJ 时不同电价下机组利润随 t_2 的变化

Fig. 11 Profit of the unit varying with t_2 at different electricity prices when waste heat recovery price is 60 yuan/GJ

由表 3 可见,随着电价的提升,机组的最佳排烟温度逐渐升高,此时排烟温度降低会导致压缩机出力迅速提升,电费急剧增加,机组利润下降。

表 3 不同电价下的最佳排烟温度与机组利润

Table 3 Optimal flue gas temperature and system profit varying with electricity price

电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	最佳排烟温度/°C	机组利润/(元·h ⁻¹)
0.5	31	496
0.7	35	446
0.9	38	412

综上所述,烟气最佳排烟温度与余热回收价格正相关,与电价负相关,不同机组应根据电价与余热回收价格灵活选择排烟温度,保证机组利润最大化。

4 结论

本文研究了新型工质电动热泵机组回收天然气锅炉烟气余热系统,针对所筛选新型工质及应用场景进行了烟气排烟温度经济性分析,得出了不同工况下较佳的排烟温度变化规律。

(1)在冷水进出口温度为 40/35 °C、热水进出口温度为 50/65 °C 工况下,R134a+R245fa(摩尔分数比为 0.41:0.59)为最佳工质组合。

(2)在冷水进出口温度为 40/35 °C、热水进出口温度为 50/65 °C 工况下,机组循环达到最优状态,COP 为 10.27,单位容积制热量为 4 356 kW,冷凝压力为 0.84 MPa,排气温度为 76 °C,均符合机组安全运行要求。

(3)当固定电价为 0.5 元/(kW·h)时,余热回收价格为 80 元/GJ 时机组达到最大利润 720 元/h,此时排烟温度最低为 26 °C。最佳排烟温度与余热回收价格成反比。

(4)当固定余热回收价格为 60 元/GJ 时,电价为 0.5 元/(kW·h)时机组达到最大利润 496 元/h,此时排烟温度最低为 31 °C。最佳排烟温度与电价成正比。

本文提出的烟气回收机组可将烟气温度降至露点以下,充分回收烟气的显热与潜热;最优化天然气锅炉排烟温度可使余热回收机组的经济效益最大化,实现能源的高效利用、减少碳排放。

参考文献:

- [1]周守为,朱军龙,单彤文,等.中国天然气及 LNG 产业的发展现状及展望[J].中国海上油气,2022,34(1):1-8.
ZHOU Shouwei, ZHU Junlong, SHAN Tongwen, et al. Development status and outlook of natural gas and LNG industry in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1):1-8.
- [2]毛俊杰,邵小芳.电力行业对“双碳”目标的贡献、问题及对策探讨[J].电力勘测设计,2022(5):60-66.
MAO Junjie, GAO Xiaofang. Discussion on the potential contribution, problems and countermeasures of the power industry to the "dual carbon" goal[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(5):60-66.
- [3]刁培滨,徐静静,余莉,等.燃气分布式能源站余热深度利用技术方案研究[J].华电技术,2019,41(12):37-40.
DIAO Peibin, XU Jingjing, YU Li, et al. Technical schemes for waste heat deep utilization in gas distributed energy stations [J]. Huadian Technology, 2019, 41(12):37-40.
- [4]余莉,徐静静,马兰芳,等.综合能源服务项目新增热泵系统的案例分析[J].综合智慧能源,2022,44(1):72-79.
YU Li, XU Jingjing, MA Lanfang, et al. Case study on the integrated energy service project with newly installed heat pumps [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1):72-79.

- [5]孙健,刘靖宇,戈志华,等.基于三元混合工质高温压缩式热泵循环性能研究[J].工程热物理学报,2020,41(5):1043-1049.
SUN Jian, LIU Jingyu, GE Zhihua, et al. Study on Cycle performance of ternary mixed working fluid in high temperature heat pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(5): 1043-1049.
- [6]孙健,董小波,戈志华,等.余热回收型高温热泵非共沸工质循环性能研究[J].工程热物理学报,2019,40(9):1949-1957.
SUN Jian, DONG Xiaobo, GE Zhihua, et al. Study on cycle performance of non-azeotropic mixed working fluid in high temperature heat pump for heat recovery [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(9): 1949-1957.
- [7]孔祥渠,孙振国,韩毅.吸收式热泵技术在燃气供热厂烟气余热深度回收中的应用[J].区域供热,2018(3):43-46.
- [8]韩伟.应用热泵进一步回收低温烟气余热的经济性分析[J].工业锅炉,2018(1):42-48.
HAN Wei. Analysis of application of heat pump in heat recovering of low temperature flue gas [J]. Industrial Boiler, 2018(1): 42-48.
- [9]张志钢,潘瑛.天然气锅炉烟气余热回收与效率[J].山西财经大学学报,2013,35(S1):187.
- [10]别尔兰·贾纳依汗,叶尔太·热旦.基于吸收式热泵的烟气余热深度回收技术[J].石油和化工设备,2017,20(7):111-113.
- [11]孙健,马世财,霍成,等.烟气余热回收高温电动热泵混合工质性能研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):120-126.
SUN Jian, MA Shicai, HUO Cheng, et al. Study on performance of high temperature electric heat pump mixture for flue gas waste heat recovery [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(2): 120-126.
- [12]田富宽.中高温热泵混合工质实验研究[D].北京:华北电力大学,2018.
TIAN Fukuan. Experimental study on mixed mass of medium and high temperature heat pump [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [13]YOSHIDA Y, NAKATANI K, ARITA K, et al. Experimental research of high-temperature composition changeable circuit using alternative mixture [J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating & Air Conditioning Engineers, 1990, 7(3): 225-234.
- [14]何永宁,夏源,金磊,等.制冷剂R1234ze在高温热泵中应用的对比研究[J].流体机械,2014,42(3):62-66.
HE Yongning, XIA Yuan, JIN Lei, et al. Investigation on application of refrigerant R1234ze in high-temperature heat pump [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(3): 62-66.
- [15]庄绪成,郭健翔,孙晋飞,等.R134a/R245fa对比R245fa高温热泵循环性能实验研究[J].青岛理工大学学报,2020,41(4):81-86.
ZHUANG Xucheng, GUO Jianxiang, SUN Jinfei, et al. Experimental research on cyclic performance of high temperature heat pump with R134a/R245fa in comparison with R245fa [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(4): 81-86.
- [16]KLEIN S, NELLIS G. Thermodynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [17]杨金文.以R245fa为工质的高温水源热泵样机研制及实验研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.
YANG Jinwen. Development and experimental study of high temperature water source heat pump prototype with R245fa as the working fluid [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [18]孙维栋,张娅玲,孔祥敏,等.R1234yf/R134a/R152a用作汽车空调制冷剂的可行性分析[J].节能,2022,41(3):60-64.
SUN Weidong, ZHANG Yaling, KONG Xiangmin, et al. Feasibility analysis of using R1234yf/R134a/R152a as refrigerant for vehicle air-conditioning [J]. Energy Conservation, 2022, 41(3): 60-64.
- [19]杞卓玲,贾力,党超.R134a/R245fa非共沸混合工质流动沸腾液膜蒸发特性研究[J].工程热物理学报,2021,42(12):3265-3273.
QI Zhuoling, JIA Li, DANG Chao. The investigation for liquid film evaporation characteristics of zeotropic mixtures R134a/R245fa [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(12): 3265-3273.
- [20]丁德锋,陈武,郑超瑜,等.R1234ze/R32混合工质冷藏集装箱循环性能分析[J].集美大学学报(自然科学版),2022,27(1):70-76.
DING Defeng, CHEN Wu, ZHENG Chaoyu, et al. Performance evaluation of reefer container using refrigerant blends R1234ze/R32 [J]. Journal of Jimei University (Natural Science Edition), 2022, 27(1): 70-76.
- [21]邵阳.加过冷装置的以R245fa为工质的中高温热泵实验研究[D].天津:天津商业大学,2020.
SHAO Yang. Study of medium and high temperature heat pump with R245fa as the working mass by adding subcooling device [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2020.

(本文责编:刘芳)

收稿日期:2022-08-03;修回日期:2022-08-30
上网日期:2023-02-27;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

孙健(1985),男,副教授,硕士生导师,博士,从事工业及民用领域新型热泵技术研发和应用方面的研究,s@ncepu.edu.cn。