余热高效回收的双效吸收式热泵实验研究与分析

徐震原¹, 毛洪财², 刘电收², 王如竹^{1*}

1. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240;

2. 双良节能股份有限公司, 江阴 214444

* 联系人, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn

2020-02-19 收稿, 2020-04-21 修回, 2020-04-21 接受, 2020-04-22 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFB0601200)资助

摘要 采用热泵进行工业余热回收具有良好的节能减排效应, 主要技术包括单效吸收式热泵和压缩式热泵. 单效吸收式热泵驱动能源品位低但效率也低, 压缩式热泵的效率虽高但驱动能源品位也高, 两种技术在降低驱动能源品位和提升效率之间没有中间选项, 无法满足日益复杂的余热回收需求. 针对以上问题, 本文研究了驱动能源品位和效率介于传统热泵技术之间的双效吸收式热泵, 通过模拟和实验分析了双效溴化锂吸收式热泵特性, 发现双效吸收式热泵在效率和降低与外热源间换热不可逆损失上具有显著优势. 针对不同余热回收热泵技术无法直观对比的问题, 本文进一步对余热回收供热的不同热泵技术进行了基于实验数据的多参数分析, 并得到如下结果: 单双效吸收式热泵比压缩式热泵的效率低但效率高, 代表了更低的不可逆损失; 双效吸收式热泵比压缩式热泵效率高且比单效吸收式热泵效率高, 余热品位提升有效性最高.

关键词 余热回收, 供热, 吸收式热泵, 压缩式热泵, 热力学

据调查, 我国工业流程中余热占总能耗的15%~40%, 其中在水泥、钢铁和玻璃等高能耗工业流程中, 低于150°C的余热占总余热的约50%^[1], 这些低品位余热的大量排放带来了严重能源浪费, 而这种低品位余热排放问题在美国和欧洲也广泛存在^[2,3]. 除了被广泛关注到的能源浪费问题外, 这些低品位热能的排放还会带来水资源浪费和空气污染问题. 以热电厂冷却为例, 朗肯循环的大量冷凝热往往需要通过大规模冷却塔进行排放, 而考虑到冷却装置的成本和冷却效率, 采用开式冷却塔通过水蒸发将余热排放到环境中是常规且有效的手段, 但需要消耗大量的水资源和冷却水循环泵功. 考虑到喷淋过程中的水损耗, 水的实际损耗将会高于仅仅用于排放热量所需的水损耗. 由于低品位余热体量巨大, 这些水资源浪费、泵功耗浪费和环境

污染问题会随着工业的进一步发展被放大, 造成不可忽视的影响.

回收余热并将其转换为有用能源是解决以上所述问题的有效途径, 然而工业流程冷凝热等余热温度过低, 将其转换为电能或冷量输出效率太低, 因此通过热泵将这部分低品位余热转换为高品位热量并用于供热或工业流程是较为有效的手段^[4]. 在热泵余热回收技术中, 可选的技术包括压缩式热泵、吸收式热泵、吸附式热泵和化学热泵, 其中吸附式热泵一般用于余热温度较低和体量较小的场合, 化学热泵一般用于温升需求高的场合且目前技术不够成熟, 压缩式热泵和吸收式热泵的使用在工业余热回收场景中较为常见^[5,6]. 电能驱动的压缩式热泵在余热回收中已经具有广泛应用, 以二氧化碳、氨、R410a和R134a为工质的热泵系统都

引用格式: 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. 科学通报, 2020, 65: 1618–1626

Xu Z Y, Mao H C, Liu D S, et al. Experimental study and analysis on double effect absorption heat pump for efficient waste heat recovery (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1618–1626, doi: 10.1360/TB-2020-0150

已经得到过应用,且广泛适用于区域供热、清洗、工艺预热和食品加热等场景。由于受到工质和压缩机技术限制,压缩式热泵常见的热输出温度在 90°C 以下^[5,7]。相比压缩式热泵,热能驱动吸收式热泵的应用场合更多,尽管常见工质只有溴化锂水溶液和氨水溶液,但灵活的循环结构使它可以分别通过一类吸收式热泵和二类吸收式热泵达到增量型和升温型两种目的^[8],而压缩式热泵只有升温型一种功能。根据文献报道,一类吸收式热泵在电厂、金属加工^[9]、垃圾处理^[10]、木材处理^[11]等行业,二类吸收式热泵在造纸^[12]、化工^[13]、橡胶加工^[14]和纺织^[15]等行业均可以有效地回收余热。在我国北方清洁供热的需求推动下,已经有采用热泵回收 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 冷却水余热并进行供暖的相关工作^[16~18]。Xu等人^[19]研究了在兰州西固热电厂添加吸收式热泵进行余热回收供暖扩容的案例,在改造的系统中溴化锂吸收式热泵由汽轮机低压供暖抽汽驱动,吸收式热泵的蒸发过程回收电厂约 35°C 冷凝热并通过冷凝和吸收过程进行热输出,该热输出用于将供暖回水提升超过 80°C 再经过蒸汽加热后送回管网,该系统中每一份热输入可回收0.77份余热并输出1.77份有效热输出。Wang等人^[5]研究了在鞍钢采用R134a离心式压缩式热泵回收余热并用于供暖的案例,系统采用容量为9.1 MW的机组回收约 32.1°C 余热水的热量输出 62.8°C 的热水时达到了6.13的COP(coefficient of performance),并满足了约18万 m^2 的供暖需求。根据当地供暖价格核算,余热回收供暖在一个供暖季可以为企业节省约250万元的供暖费用。

总的来说,余热高效回收并进行供热主要是通过压缩式热泵或吸收式热泵将余热温度提升,二者的工

作原理和驱动能源品位均有所不同。如图1(a)所示,用于余热回收供热的一类吸收式热泵通过消耗量为 Q_H 的高温热源的驱动,回收量为 Q_L 的低温余热,并产生中温输出用于供热,其热输出量为 Q_H+Q_L 。吸收式热泵的优势在于驱动能源为品位较低的热能,但 $\text{COP}=[(Q_H+Q_L)/Q_H]$ 较低。如图1(b)所示,用于余热回收供热的压缩式热泵通过消耗量为 W 的高品位电能,回收量为 Q_L 的低温余热,并产生中温输出用于供热,其热输出量为 $W+Q_L$ 。压缩式热泵的优势在于 $\text{COP}=[(W+Q_L)/W]$ 高,但所需驱动能源是高品位的电力。

基于以上的分析可以看出,采用吸收式热泵和压缩式热泵进行余热回收供热时,驱动能源品位和效率方面的优势是互斥的,但这也符合热力学规律。如图2所示,如果将吸收式热泵进一步分为单效和双效吸收式热泵,那么单效吸收式热泵的驱动热源温度低于双效吸收式热泵,同样单效吸收式热泵的效率也低于双效吸收式热泵。基于这种分析,可以看出双效吸收式热泵属于单效吸收式热泵和压缩式热泵之间的折衷选项,并将为余热回收供暖提供更多的驱动能源品位与效率上的选择。此外,从以上分析还可以看出,不同循环在驱动能源品位和能量效率上具有不同优势,但针对不同热泵循环在余热回收供热场景下的分析还较少,因此很难评判不同技术的实际优势。当循环与工质和换热器结合起来形成具体的热泵机组后,实际性能又受到多方面因素的影响会继续偏离理论预测,给不同技术之间的对比带来更多困难。

为了对不同热泵技术在驱动能源品位和COP上的优劣势进行分析,目前还需要进行两方面的工作。一方面,可以在文献中找到关于单效吸收式热泵和压缩式

图1 (网络版彩色)用于余热回收供暖的热泵。(a)吸收式热泵;(b)压缩式热泵

Figure 1 (Color online) Heat pumps for waste heat recovery and heating supply. (a) Absorption heat pump; (b) compression heat pump

图2 (网络版彩色)不同热泵循环的驱动能源品位与COP
Figure 2 (Color online) Energy grade of driving source and COP for different heat pump cycles

热泵的余热回收供热案例,但通过双效吸收式热泵进行余热回收的实验研究还未见报道,缺乏相关实验研究;另一方面,采用热泵进行余热回收供热时,热泵性能与工况紧密相关,因此需要对不同热泵循环进行相似工况下基于输入能源品位的分析对比.本文针对以上问题开展了理论、模拟和实验相结合的研究,从双效吸收式热泵的模拟和实验研究开始,对比分析不同热泵技术在余热回收供热场景的优劣势.

1 余热回收的吸收式热泵性能分析

单效一类吸收式热泵是余热回收中常见的技术选项,其流程如图3(a)所示.高温热源驱动发生器中的发生过程产生高压制冷剂蒸汽和浓溶液,蒸发器中低压制冷剂蒸发吸收低温余热,而冷凝器中制冷剂蒸汽冷凝和吸收器中浓溶液吸收过程完成中间温度的热量输出.在如图3(b)所示的双效一类吸收式热泵中,高温热源驱动高压发生过程所产生的制冷剂蒸汽在高压冷凝过程释放

的热量并不直接用于输出,而是用于驱动低压力下的额外发生过程,一份热源可以驱动两次溶液的浓缩过程,因此被称为双效循环.

双效吸收式热泵中一份热源驱动的两次溶液浓缩使其具有更高的COP,但为了保证冷凝热可以驱动的额外发生过程,高压冷凝过程需要有足够高的温度,也就提升了对热源温度的需求.为了对单效和双效溴化锂吸收式热泵进行公平对比分析,本文首先进行了单双效吸收式热泵的模拟分析.

1.1 模型与假设

基于回收冷却流程的低品位余热进行供热的场景,将吸收式热泵的余热回收温度/蒸发温度设定为 30°C ,热输出温度/吸收终了温度/冷凝温度设定为 60°C .考虑到在采用大型吸收式热泵进行大体量余热回收时,溶液热回收器的成本占机组整体成本的比例很低,可以在经济性允许的情况下大幅度增加其换热面积以达到高效溶液热回收过程,因此在理论计算时考虑溶液热回收器的换热端温差较小,设定换热效率为0.9.除此之外,还根据文献[20~22]中吸收式循环的常用模拟方法进行了以下合理假设:(1)发生器、吸收器、冷凝器和蒸发器出口工质处于饱和状态;(2)泵功耗和节流损耗可以被忽略;(3)发生器到冷凝器的蒸汽流动没有压力降;(4)蒸发器到吸收器的蒸汽流动没有压力降.

基于以上假设,结合溴化锂水溶液和水的物性^[23]以及循环中发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和溶液热回收器中如式(1)~(3)的质量守恒、组分平衡和能量平衡,可以进行吸收式热泵循环的性能计算:

图3 (网络版彩色)余热回收的吸收式热泵. (a) 单效循环; (b) 双效循环
Figure 3 (Color online) Absorption heat pump for waste heat recovery. (a) Single effect cycle; (b) double effect cycle

$$\sum_i m_i = 0, \quad (1)$$

$$\sum_i m_i X_i = 0, \quad (2)$$

$$\sum_i m_i h_i + Q = 0, \quad (3)$$

其中, m_i 是进出部件每股流体的质量流量, X_i 是该股流体对应的浓度, h_i 是该股流体的焓值, Q 是该部件与外热源之间的换热功率. 在针对双效机组的计算过程中, 将以上控制方程分别应用于高压发生器、低压发生器、冷凝器、吸收器、蒸发器和两个溶液热回收器, 根据系统流程关联不同部件的状态点参数, 并采用预设温度边界条件通过Matlab进行编程求解, 最后求得COP:

$$\text{COP} = \left| \frac{Q_A + Q_C}{Q_G} \right|, \quad (4)$$

其中, Q_A 、 Q_C 和 Q_G 分别代表吸收器、冷凝器和发生器与外热源换热功率.

在对双效吸收式热泵循环的计算中, 涉及双效吸收式热泵的流程选择, 因为双效吸收式热泵循环在吸收器、低压发生器和高压发生器之间的工质流动可以采取串联流动, 也可以采取并联流动^[24]. 并联流动循环灵活性强, 且在循环性能优化方面有优势, 但同样控制会比较复杂. 考虑实际使用过程中串联流动循环的稳

定性优势更加重要, 在模拟计算中同样选取串联流程进行性能模拟. 串联流程如图3(b)所示, 吸收器中的溶液仅有一股, 且依次经过两个发生器.

1.2 单双效吸收式热泵循环性能对比

根据以上的模拟方法, 在30°C蒸发温度和60°C吸收/冷凝温度下计算了单效和双效溴化锂水吸收式热泵循环的性能. 如图4所示为两个循环在不同发生温度下的COP、浓度差、冷凝热占热输出比例和吸收热占热输出比例.

从图4(a)可以看出, 单效和双效吸收式热泵循环的发生温度范围分别在94.5~125°C和139.5~190°C, 同时获得1.48~1.81和1.92~2.47的COP. 如图4(b)所示为循环的浓度差, 当发生温度逐渐降低时, 吸收式热泵循环的浓度差减小, 当单效循环和双效循环的发生温度分别低于95和140°C后, 循环浓度差接近零, 导致效率急剧下降; 当发生温度逐渐上升时, 吸收式热泵循环的浓度差增加, 同时导致系统中浓溶液浓度上升, 并增加结晶风险. 单效循环发生温度高于123°C之后, 浓度差达到12.6%, 并存在结晶风险, 而双效循环则可以达到15.3%的浓度差且不存在结晶风险, 这是由于双效循环发生温度高, 导致吸收器入口溶液温度高, 从而可以降低结

图4 (网络版彩色)单效吸收式热泵与双效吸收式热泵在不同发生温度下的性能对比. (a) COP; (b) 浓度差; (c) 冷凝热占热输出的比例; (d) 吸收热占热输出的比例

Figure 4 (Color online) Performance comparison between single effect and double effect absorption heat pumps under different generation temperatures. (a) COP; (b) concentration glide; (c) percentage of condensation heat in heat output; (d) percentage of absorption heat in heat output

晶风险,并可以在更大浓度差工况下正常工作。

如图4(c)和(d)所示,内部循环结构的差异也反映在对外热输出中冷凝热和吸收热的比例上,其中单效循环的冷凝热和吸收热占热输出比例分别为~48%和~52%,双效循环的冷凝热和吸收热占热输出比例分别为~31%和~69%。由于双效循环的部分冷凝热在循环内部回收并用于驱动低压发生过程,因此对外热输出中冷凝热的比例较低,而这种输出模式在实际应用中是更具优势的。其理由如下:冷凝热输出过程是一个不带温度滑移的热输出过程,吸收热输出则带有温度滑移,而水被加热升温的过程同样带有温度滑移,因此通过吸收热进行热输出时,工质温度变化会比冷凝热输出过程更贴近被加热水温度变化,从而降低传热过程不可逆损失;当吸收热比例升高时,系统热输出的总体换热不可逆损失就可以降低,从而提升整体效率。另外,较低的冷凝热占比会降低系统冷凝/发生压力,这对发生过程是有促进作用的。

通过以上对比可以发现,与单效吸收式热泵相比,双效吸收式热泵除了可以在高驱动温度下达到更高的COP以外,还具有结晶风险小和吸收热输出比例高等优势,对提升余热回收供热的稳定性和整体效率具有帮助。

2 双效吸收式热泵的实验测试与分析

从上一节的分析可以看出双效吸收式热泵具有多方面优势,但目前对于双效吸收式热泵的实验研究较少,在进行不同余热回收技术对比时缺乏有效可靠数据的支撑,因此本文还针对余热回收供热的工况进行了双效溴化锂水吸收式热泵的实验研究。

2.1 双效溴化锂吸收式热泵

根据如图3(b)所示的流程加工了蒸汽驱动型双效吸收式热泵,机组外观如图5所示。该吸收式热泵采用溴化锂水溶液作为工质对,在发生器、吸收器、冷凝器和蒸发器等关键部件采用管壳式降膜换热设计以保证高效小温差换热,同时增加溶液热回收器的换热面积并优化换热流程以达到在大温度滑移工况下的高效溶液热回收过程。由于以上加工方式属于溴化锂吸收式热泵中的常规技术,在此不再进行展开。

由于驱动热源蒸汽压力较高,在蒸汽经过冷凝释放热量给发生器之后仍然具有较高的温度,因此为了提升对热源的利用程度,还可以对冷凝水的热量加以利用。

图5 (网络版彩色)双效溴化锂水吸收式热泵机组
Figure 5 (Color online) Double effect LiBr-water absorption heat pump

考虑到该因素,在机组设计中添加了凝水热回收装置,将凝水热量用于溶液预热。机组的具体设计参数如下:驱动热源为表压0.6 MPa、饱和温度为165℃的蒸汽,机组回收温度为36℃余热水中的余热并将其降低为30℃,同时机组热输出用于将45℃的热水加热到60℃以供热。机组制热量设计为3489 kW,因此蒸汽消耗量约为2.08 t/h,余热水流量为303 t/h,热水流量为200 t/h。此外,机组的长、宽、高分别为5110、2740和3400 mm。

2.2 机组性能测试与分析

在完成上述双效溴化锂水吸收式热泵机组加工调试后,对机组进行了详细的性能测试。测试过程中采用蒸汽锅炉模拟驱动热源并采用稳压阀调节蒸汽压力,采用燃气加热产生模拟余热热水,并采用冷却装置平衡机组的热输出。在测试过程中分别进行了标准工况的测试和变工况的测试。

标准工况的测试与设计工况相近,并采用了第三方认证机构进行测试,遵循GB/T 34620-2017标准规定进行制热量、消耗电功率和加热源消耗量的测试。如公式(5)~(8)所示,在测试过程中通过测试蒸汽的消耗量 m_s 、蒸汽比焓 h_{s1} 和凝结水比焓 h_{s2} 计算机组的热输入 Q_{in} ,通过测量热水进出口温差 Δt_h 、流量 m_h 和比热 c_p 计算热泵的制热量 Q_{out} ,通过测量余热水进出口温差 Δt_w 、流量 m_w 和比热 c_p 计算热泵的余热回收量 Q_{rec} ,通过热输入 Q_{in} 、泵功耗 W 和制热量 Q_{out} 计算热泵实测COP_{exp},并通过三个功率校验热平衡。

$$Q_{in} = m_s(h_{s1} - h_{s2}), \quad (5)$$

$$Q_{\text{out}} = c_p m_h \Delta t_h, \quad (6)$$

$$Q_{\text{rec}} = c_p m_w \Delta t_w, \quad (7)$$

$$\text{COP}_{\text{exp}} = Q_{\text{out}} / (Q_{\text{in}} + W). \quad (8)$$

测试结果如表1所示。在蒸汽压力为0.6 MPa的工况下, 该机组可以将平均温度为36.17°C的余热水温度降低至29.33°C并回收其中的余热, 并将平均温度为44.83°C的热水加热到60.08°C。在消耗了2112 kg/h的蒸汽(凝水温度114.33°C)和5.64 kW电力后, 机组可以输出3517.20 kW的热量并获得2.62的COP。尽管对于机组在非设计工况的运行参数也进行了测试, 但考虑本文目的在于取得双效吸收式热泵的实际运行性能并服务于不同热能技术的对比, 相关结果不再进行展开讨论。

为了对比模拟计算和实验结果, 考虑在热源端、热输出端和余热回收端的换热温差分别为5、3和3°C。根据前述模型在160°C发生温度、63°C冷凝/吸收终了温度和27°C蒸发温度下对双效溴化锂水吸收式热泵循环性能进行了模拟, 得到理论COP为2.23。该工况下的理论COP比实验COP低的原因包括: 首先, 机组实际运行过程中, 热水依次被吸收过程和冷凝过程串联加热, 从而保证吸收过程在更低的温度区间进行工作; 其次, 吸收过程的热输出是带有温度滑移的, 为了达到60°C的输出温度, 只需要吸收起始温度超过60°C即可, 而吸收终了温度只需要比热水进口温度高即可完成整个换热过程, 这也变相地降低了对于吸收终了温度的需求; 此外, 在实际设计过程中, 由于采用了较大面积的溶液热回收器, 可以显著提升该换热器的有效率。考虑以上因素, 重新在160°C发生温度、63°C冷凝温度、48°C吸收终了温度、27°C蒸发温度和0.99溶液热回收器有效性下对双效溴化锂水吸收式热泵循环性能进行了模拟, 得到理论COP为2.55, 与实验值的误差为2.7%。以上对比分析不但验证了模型的有效性, 也证明了机组设计的有效性。

表1 双效溴化锂吸收式热泵机组测试结果

Table 1 Testing results of the double effect LiBr-water absorption heat pump

测试量	结果	测试量	结果
蒸汽压力	0.6 MPa	余热进口温度	36.17°C
蒸汽流量	2112 kg/h	余热出口温度	29.33°C
热水进口温度	44.83°C	制热量	3517.20 kW
热水出口温度	60.08°C	COP	2.62

3 技术路径对比

在取得了有效可靠的双效吸收式热泵性能参数后, 本文还将通过不同技术路径的对比, 进行余热回收供热中不同技术方案的有效性和优劣势分析。

3.1 相同热源下与ORC+压缩热泵的对比

首先对比的是同样采用0.6 MPa蒸汽热源回收~35°C余热并提供60°C热输出的两种不同方案: 方案1是双效吸收式热泵, 方案2是有机朗肯循环ORC驱动压缩式热泵。考虑到输入能源和输出能源品位一样, 此处的对比可以采用综合COP进行评判。根据文献[25]中的数据, 采用压力为0.6 MPa、饱和温度为165°C的蒸汽驱动ORC的热电转换效率为0.16, 而采用高效大型离心压缩式热泵将~35°C余热提升至60°C进行热输出的实验COP为6.13^[5], 因此ORC驱动压缩式热泵的综合COP为0.98, 远低于双效吸收式热泵在同样工况下的效率。

3.2 与单效吸收热泵和压缩热泵的对比

如前所述, 不同热泵技术所需要的驱动能源品位是不一样的, 此外, 余热回收供热的工况也不一样, 如果对这些技术进行对比, 就需要将输入能源和热输出品位考虑进去^[26,27]。本文选取了已发表的热泵高效回收工业余热用于供热的实验数据, 结合本文实验数据, 并通过效率分析对比不同热泵技术。

案例1: 采用165°C蒸汽驱动单效溴化锂吸收式热泵, 回收生物质电厂50°C烟气中水蒸气冷凝热, 并提供95°C的热输出用于供热, 达到1.6的实测COP^[9]。

案例2: 采用电力驱动大型离心式R134a压缩式热泵, 回收钢厂32.1°C余热水的热量, 并提供62.8°C的热输出用于供热, 达到6.13的实测COP。

本文: 采用165°C饱和温度的蒸汽驱动双效溴化锂吸收式热泵, 回收36.17°C余热水的热量, 并提供60.08°C的热输出用于供热, 达到2.62的实测COP。

在分析对比时, 采用公式(9)通过考虑驱动能量、回收热量和输出热量的分析循环效率 η_e 。但这种分析主要计算循环损失并表征不可逆损失比例, 对于余热回收有效性的分析有局限。考虑到余热回收场景中COP表达仅考虑驱动能量和输出热量, 本文还借鉴了吸收式制冷的分析^[27], 采用公式(10)的性能系数 R_c 分析输入驱动和输出之间的比例, 从而判断不同热泵技术对于余热回收的有效性。由于该分析是基于供热场景,

表2 不同热泵技术进行余热回收供热的对比

Table 2 Comparison of different heat pumps for waste heat recovery and heating supply

热泵	ε_{in}	ε_{out}	ε_{rec}	COP	η_e	R_e
单效吸收式热泵	0.377	0.258	0.155	1.6	0.880	1.096
双效吸收式热泵	0.377	0.180	0.105	2.62	0.863	1.253
压缩式热泵	1	0.187	0.105	6.13	0.744	1.146

环境温度设定为0°C.

$$\eta_e = \frac{E_{out}}{E_{in} + E_{rec}} = \frac{COP \varepsilon_{out}}{\varepsilon_{in} + (1 - COP) \varepsilon_{rec}}, \quad (9)$$

$$R_e = \frac{E_{out}}{E_{in}} = COP \frac{\varepsilon_{out}}{\varepsilon_{in}}, \quad (10)$$

其中, E_{in} 、 E_{out} 和 E_{rec} 分别为输入能源、输出热量和回收热量的, ε_{in} 、 ε_{out} 和 ε_{rec} 分别为输入能源、输出热量和回收热量的系数. 根据以上几个案例所提供的数据, 计算结果如表2所示.

一方面, 从表2可以看出, 采用单效吸收式热泵和双效吸收式热泵的COP虽然不如压缩式热泵高, 但由于采用了低品位热源进行驱动, 其循环效率 η_e 比压缩式热泵高出不少. 当压缩式热泵案例的COP提升到8.0时, 才能够达到与双效吸收式热泵案例相同的效率, 但这在目前的技术手段下是无法实现的, 也说明吸收式热泵技术在用于余热回收供热场景时系统内部不可逆损失少, 效率具有显著优势. 另一方面, 在仅考虑驱动能量和输入热量的情况下, 双效吸收式热泵的性能系数 R_e 要高于压缩式热泵和单效吸收式热泵. 当单效吸收式热泵案例和压缩式热泵案例中的COP分别提升到1.83和6.72时, 才能与双效吸收式热泵具有相似的性能系数 R_e . 但这两个COP对于单效吸收式热泵和压缩式热泵也是很难达到的, 也说明了在进行余热回收供热时双效吸收式热泵可以消耗更少的高品位能源从而提升余热品位.

4 讨论与结论

采用热泵技术回收低品位余热并进行供热具有环

保节能效应, 而且可以解决我国北方面临的清洁供暖需求. 当前可以使用的余热回收热泵技术主要包括单效吸收式热泵和压缩式热泵, 但这两种技术分别有其优劣势. 单效吸收式热泵采用低品位的热能作为驱动能源, 但受热力学循环所限, 其效率较低; 压缩式热泵效率高, 但其驱动能源为高品位的电能. 这种降低驱动能源品位和提升效率上的矛盾就带来了两个问题: 是否有在降低驱动能源品位和提升效率上的折衷选项, 而这些不同的技术选项在用于余热回收供热时有效性如何. 基于以上问题, 本文研究了在驱动能源品位和效率上处于单效吸收式热泵和压缩式热泵之间的双效吸收式热泵, 并对三种技术在用于余热回收供热场景的性能进行了分析对比, 结论如下:

(1) 双效溴化锂水吸收式热泵在以表压0.6 MPa蒸汽驱动时, 可以回收温度为36.17°C余热水的热量, 输出热量并用于产生60.08°C的热水, 同时达到2.62的实测COP; 双效吸收式热泵除了比单效吸收式热泵效率高以外, 其高吸收热输出比例还可以有效降低与外热源间换热的不可逆损失, 有助于双效吸收式热泵实现高效稳定的余热回收.

(2) 在单效吸收式热泵、双效吸收式热泵和压缩式热泵用于余热回收供热的场景时, 尽管压缩式热泵具有更高的效率, 但不可逆损失比例更高, 导致压缩式热泵相对吸收式热泵的COP高, 但效率低.

(3) 通过对比性能系数(输出/驱动)可以发现, 双效吸收式热泵的余热品位提升有效性高于压缩式热泵, 而单效吸收式热泵最低, 这主要是因为双效吸收式热泵兼具低不可逆损失和高效率的优势.

参考文献

- 1 Lu H, Price L, Zhang Q. Capturing the invisible resource: Analysis of waste heat potential in Chinese industry. *Appl Energy*, 2016, 161: 497–511
- 2 Johnson I, Choate W T, Davidson A. Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in the US Industry. Technical Report, BCS, Inc., Laurel, MD, United States. 2008, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- 3 Papapetrou M, Kosmadakis G, Cipollina A, et al. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. *Appl Therm Eng*, 2018, 138: 207–216

- 4 Xu Z Y, Wang R Z, Yang C. Perspectives for low-temperature waste heat recovery. [Energy](#), 2019, 176: 1037–1043
- 5 Wang R Z, Xu Z Y, Hu B, et al. Heat pumps for efficient low grade heat uses: From concept to application. *Therm Sci Eng*, 2019, 27: 1–15
- 6 Wang R Z, Wang L W, Cai J, et al. Research status and trends on industrial heat pump and network utilization of waste heat (in Chinese). *J Refrig*, 2017, 38: 1–10 [王如竹, 王丽伟, 蔡军, 等. 工业余热热泵及余热网络化利用的研究现状与发展趋势. *制冷学报*, 2017, 38: 1–10]
- 7 Zhang J, Zhang H H, He Y L, et al. A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China. [Appl Energy](#), 2016, 178: 800–825
- 8 Xu Z, Wang R. Absorption heat pump for waste heat reuse: Current states and future development. [Front Energy](#), 2017, 11: 414–436
- 9 Centre I H P. Application of Industrial Heat Pumps. IEA Heat Pump Programme Annex 35, 2014
- 10 Keil C, Plura S, Radspieler M, et al. Application of customized absorption heat pumps for utilization of low-grade heat sources. [Appl Therm Eng](#), 2008, 28: 2070–2076
- 11 Le Lostec B, Galanis N, Baribeault J, et al. Wood chip drying with an absorption heat pump. [Energy](#), 2008, 33: 500–512
- 12 Costa A, Bakhtiari B, Schuster S, et al. Integration of absorption heat pumps in a Kraft pulp process for enhanced energy efficiency. [Energy](#), 2009, 34: 254–260
- 13 Aly G, Abrahamsson K, Jernqvist Å. Application of absorption heat transformers for energy conservation in the oleochemical industry. [Int J Energy Res](#), 1993, 17: 571–582
- 14 Ma X, Chen J, Li S, et al. Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant. [Appl Therm Eng](#), 2003, 23: 797–806
- 15 Horuz I, Kurt B. Absorption heat transformers and an industrial application. [Renew Energy](#), 2010, 35: 2175–2181
- 16 Sun Z L, Fu L, Zhang S G, et al. Experimental study of flue gas latent heat recovery via absorption heat pump (in Chinese). *Acta Energ Solar Sin*, 2008, 29: 13–17 [孙作亮, 付林, 张世钢, 等. 吸收式热泵回收烟气冷凝热的实验研究. *太阳能学报*, 2008, 29: 13–17]
- 17 Li Y, Chen G H, Zhang S Y, et al. Research on flue gas waste heat recovery system in gas-steam combined cycle power plant (in Chinese). *J HV&AC*, 2017, 47: 86–90 [李岩, 陈改辉, 张淑彦, 等. 燃气-蒸汽联合循环电厂烟气余热回收系统研究. *暖通空调*, 2017, 47: 86–90]
- 18 Zhou C B, Yu C, Guo D, et al. The experimental study on waste heat recovery from circulating water in thermal power plant using large absorption heat pump (in Chinese). *Mort Electr Power*, 2013, 30: 37–40 [周崇波, 俞聪, 郭栋, 等. 大型吸收式热泵应用于火电厂回收余热供热的试验研究. *现代电力*, 2013, 30: 37–40]
- 19 Xu Z Y, Mao H C, Liu D S, et al. Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps. [Energy](#), 2018, 165: 1097–1105
- 20 Wang J, Zheng D. Performance of one and a half-effect absorption cooling cycle of H₂O/LiBr system. [Energy Conv Manag](#), 2009, 50: 3087–3095
- 21 Hong D L, Chen G M, Tang L M, et al. Simulation research on an EAX (Evaporator-Absorber-Exchange) absorption refrigeration cycle. [Energy](#), 2011, 36: 94–98
- 22 Kim D S, Infante Ferreira C A. Air-cooled LiBr–water absorption chillers for solar air conditioning in extremely hot weathers. [Energy Conv Manag](#), 2009, 50: 1018–1025
- 23 Pátek J, Klomfar J. A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr–H₂O solutions from 273 to 500 K over full composition range. [Int J Refrig](#), 2006, 29: 566–578
- 24 Kang Y T, Kunugi Y, Kashiwagi T. Review of advanced absorption cycles: Performance improvement and temperature lift enhancement. [Int J Refrig](#), 2000, 23: 388–401
- 25 Chen X, Wang R Z. An efficient ammonia-water power cycle in low temperature waste heat application (in Chinese). *CIESC J*, 2016, 67: 3536–3544 [陈昕, 王如竹. 一种低温余热高效利用的氨水动力循环. *化工学报*, 2016, 67: 3536–3544]
- 26 Wang Y, Liu Y, Liu X, et al. Advanced exergy and exergoeconomic analyses of a cascade absorption heat transformer for the recovery of low grade waste heat. [Energy Conv Manag](#), 2020, 205: 112392
- 27 Gebreslassie B H, Medrano M, Boer D. Exergy analysis of multi-effect water–LiBr absorption systems: From half to triple effect. [Renew Energy](#), 2010, 35: 1773–1782

Summary for “余热高效回收的双效吸收式热泵实验研究与分析”

Experimental study and analysis on double effect absorption heat pump for efficient waste heat recovery

Zhenyuan Xu¹, Hongcai Mao², Dianshou Liu² & Ruzhu Wang^{1*}

¹ Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

² Shuangliang Eco-Energy Systems Co., Ltd., Jiangyin 214444, China

* Corresponding author, E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn

A large amount of industrial energy consumption is dissipated as waste heat in China. In order to dissipate the waste heat efficiently, evaporative cooling is widely used, which induces energy waste, water waste and emission issues. Industrial waste heat recovery with heat pump is an effective solution for such problems, and is becoming more and more important under the strict emission control and energy consumption policy. Currently, the major technologies for waste heat recovering heat pump include single effect absorption heat pump and compression heat pump. However, low grade of driven energy and high efficiency are two conflicting factors, which cannot be satisfied at once. Single effect absorption heat pump is driven by low grade energy but its coefficient of performance (COP) is also low, while compression heat pump has high COP but also needs high grade energy as driven force. Currently, there is no technical compromise between single effect absorption heat pump and compression heat pump regarding the conflict between driven energy grade and efficiency, which is not enough for the ever growing need for waste heat recovery. To address these issues, double effect absorption heat pump is studied, which serves as a compromise between two popular heat pump technologies. Modeling and experimental studies are both carried out for the double effect LiBr-water absorption heat pump. Modeling results show that double effect LiBr-water absorption heat pump could get COP of 1.92~2.47, which is higher than the 1.48~1.81 COP of single effect absorption heat pump. However, high generation temperature of 139.5~190°C is also necessary. Besides, the ratio of absorption heat output to overall heat output in double effect absorption heat pump is higher, which is beneficial to fit the external heat source with temperature glide and reduce the irreversible losses. This will increase the overall performance of double effect absorption heat pump for waste heat recovery. The theoretical study is followed by an experimental study of the double effect absorption heat pump. A double effect absorption heat pump unit with rated heating capacity of 3489 kW was designed, manufactured and tested. Testing results showed that the heat pump achieved heat output temperature of 68.08°C, COP of 2.62 and heating output of 3517.20 kW when driven by 0.6 MPa steam and 36.17°C waste hot water. As more technical options are available for waste heat recovering heat pump, their comparison to each other is also necessary to get the advantage and disadvantage. In this case, this paper further compared the single effect absorption heat pump, double effect absorption heat pump and compression heat pump under the scenario of waste heat recovery for domestic heating supply. Experimental results were used and multiple evaluating parameters including COP, exergy efficiency and exergy rate were analyzed, which shows the conclusions as follows. Absorption heat pumps have the lower COP but higher exergy efficiency than compression heat pump, due to the less internal irreversible loss. Double effect absorption heat pump has higher exergy rate than compression heat pump and higher COP than single effect absorption heat pump, which makes it superior for waste heat upgrading.

waste heat recovery, heating supply, absorption heat pump, compression heat pump, thermodynamics

doi: [10.1360/TB-2020-0150](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0150)