

热泵余热回收技术的研究与发展

山东建筑大学热能工程学院 张 鑫 张文科 侯 幸 高 翔

【摘要】余热利用是目前被认为优先研究的领域之一,热泵的余热利用不仅提高了能源利用率,还减少了对环境的热污染。本文首先总结了目前国内研究较充分的余热回收热泵系统形式,并根据冷凝热回收利用程度对热回收系统进行分类。其次,讨论了热回收技术在热泵机组中的应用,围绕双冷凝器、相变蓄热及两级复叠技术展开余热回收的分析,阐述了不同热回收的原理及特点。随后,针对螺杆热泵热回收系统进行了探讨,在不同制冷剂和不同冷凝温度条件下,揭示了油冷却器的余热回收效果。本文所叙述及分析的内容,有利于促进热泵行业余热回收技术的推广应用,实现节能环保的效益。

【关键词】热泵;余热回收;油冷却器;双冷凝器;相变蓄热;两级复叠

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX103046)

DOI 编码:10.16641/j.cnki.cn 11-3241/tk.2020.02.022

Research and Development of Waste Heat Recovery Technology of Heat Pump

School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University,
Zhang Xin, Zhang Wenke, Hou Xing, Gao Xiang

Abstract:The utilization of waste heat is one of the prior research areas, and the waste heat utilization of heat pump not only improves the energy utilization, but also reduces the heat pollution to the environment. This paper firstly summarizes the types of well-studied heat pump systems which employ waste heat recovery, and classifies the heat recovery systems according to the degree of effective utilization of condensation heat recovery. Next, the application of heat recovery technology in heat pump unit is discussed, double condensers, phase change thermal storage and Two-stage overlap techniques are analyzed for the waste heat recovery, and the principles and characteristics of different heat recoveries are described. Afterwards, the paper explores the significant knowledge for the heat recovery system of screw heat pump, and the waste heat recovery effect of oil cooler is revealed while different refrigerants and condensing temperatures are employed. The contents described and analyzed in this paper are beneficial to promote the application of waste heat recovery technology in heat pump industry, and realize the benefits of both energy saving and environmental protection

Keywords: heat pump;heat recovery;oil cooler;double condenser;phase change heat storage;two-stage overlap

1 引言

随着经济的快速发展及一次能源的不断减少，能源问题的严重性促使着节能技术的发展以提高现有能源的有效利用率。世界上约有43%~70%的能源主要以废热的形式损失，其中空调冷凝热在废热中占有很大的比重^[1]，“余热利用”成为国际制冷学界认为优先研究的领域之一^[2]。

当热泵在制冷工况下运行时，冷凝热量可以达到制冷量的1.16~1.25倍^[3]，大量的冷凝热通常通过水冷或风冷的方式排放到大气环境中，不仅浪费能源，也在一定程度上污染了环境。生活热水的能耗约占社会总能耗的3%~9%^[4]。若将冷凝热量进行回收用于生产生活热水，可以减少冷凝热对环境的热污染及减轻热岛效应，并节约能源从而提高热泵的综合效率。

目前，对热泵应用余热回收技术的研究主要包括以下若干方面：

(1) 热回收热泵机组性能的研究。如冷凝温度对制冷量、制热量和用热品质的影响等。

(2) 余热回收技术应用形式的研究。如双冷凝器热回收、相变蓄热热回收等。

(3) 对现有热泵机组进行热回收的改造，并对实际运行节能经济分析。

(4) 小型家用空调热回收系统的研究。

(5) 螺杆热泵机组热回收的研究。

本文将对热泵余热回收的分类及研究进行介绍和分析，揭示各种余热回收技术的工作原理及特点，并阐明热泵进行余热回收的意义，促进该技术的推广应用。

2 热回收技术的分类

根据冷凝热回收和利用程度，热回收方式可分为3种，即全部冷凝热回收(以下简称全热回收)、部分冷凝热回收和复合冷凝热回收^[5]。热泵的冷凝过程如图1所示，分为2~3过热段、3~4相变段和4~5过冷段三个部分^[6]，由于4~5过冷段热量少而且品质低，所以热回收一般不考虑过冷段。

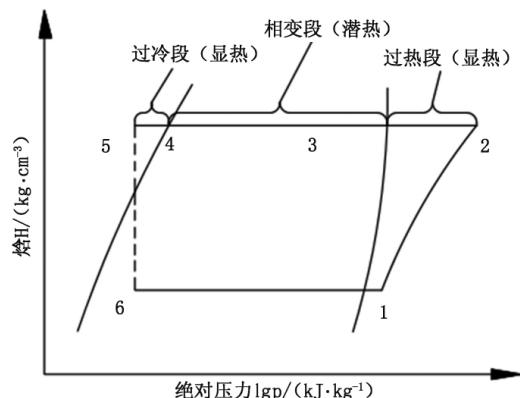


图1 制冷剂冷凝的三个阶段示意图

2.1 全部冷凝热回收

图2描述了传统全热回收空气源热泵机组的结构和工作流程，在已有机组的基础上，将全热回收器与风冷冷凝器并联^[7]，对全部的冷凝热进行热回收以加热冷水，即图1所展示的2~5全部热量，热回收量大；但热品质受制于冷凝温度且制取的热水温度低于冷凝温度。此外，机组的冷凝温度受到影响从而导致热泵运行工况的稳定性差。通过四通阀以及截止阀的开闭配合，该系统可以实现制冷、制热和热回收等多种运行模式。当制冷与热回收同时运行时最为经济。且热回收运行时，风机停止运行，因此噪声较低。

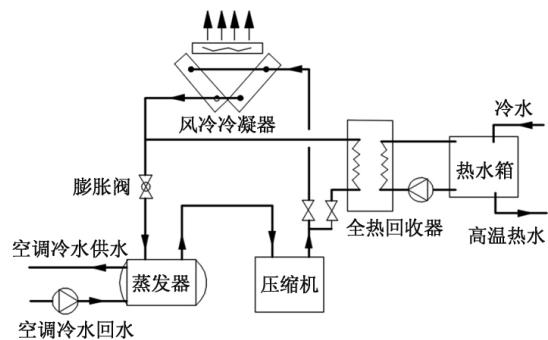


图2 全热回收机组示意图

2.2 部分冷凝热回收

如图3所示，部分冷凝热回收热泵机组是在压缩机出口到冷凝器入口之间串联一个热回收器以吸收冷凝热中的显热，即图1所

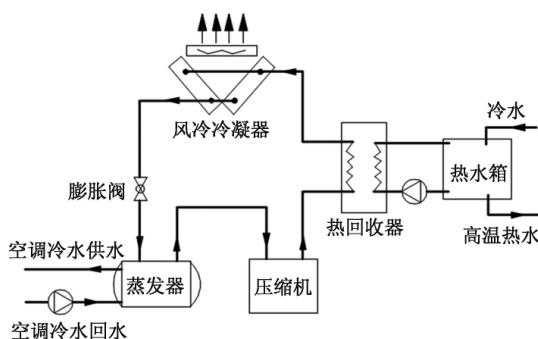


图 3 部分冷凝热回收机组示意图

展示的 2-3 部分的热量,用于加热生活热水。由于压缩机排气温度高,可以直接制取给排水专业要求的 55℃~60℃ 高温热水^[7],具有较高的热品质,但可回收的显热热量较少,约为制冷量的 15%^[8],因为热回收量有限,所以比重更大的冷凝潜热量被排放到了大气环境中。但是,部分冷凝热回收模式不影响相变段的冷凝热量,使得冷凝温度波动小,热泵可以保持良好的运行稳定性。

2.3 复合冷凝热回收

复合冷凝热回收热泵机组,也被称之为两级全热回收机组^[7],结构及工作原理如图 4 所示。基于已有的热泵机组,设置两级串联的热回收器,靠近压缩机排气口的一级热回收器吸收显热,即图 1 所展示的 2-3 部分热量,可以制取高达 60℃ 的高温热水,远离压缩机的二级热回收器吸收潜热,即图 1 所展示的

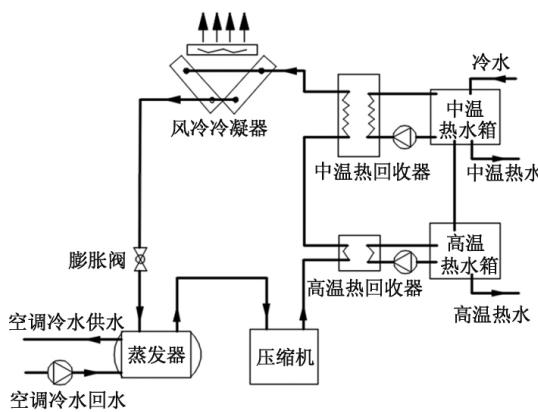


图 4 复合冷凝热回收机组示意图

3-4 部分热量,制取 41℃~48℃ 的中温热水;同时可以进行梯级利用,分段加热生活热水,但是制取的高温热水量受制于冷凝热的显热量。采用复合方式进行热回收,一方面可以控制中温热水温度,冷凝温度波动减小,克服了全热回收运行工况稳定性差的缺点;另一方面能分段回收全部的冷凝热量,克服了部分冷凝热回收中潜热量浪费的弊端。该技术的缺点是设置了两个热回收器导致初投资增大、系统线路复杂及运行可靠性降低。

3 热回收技术在热泵机组中的研究现状

目前,国内对现有热泵进行热回收改造的研究较多,出现多种热泵热回收系统,并对不同系统分析了其经济性和节能性,也对冷凝温度等因素对制热量、制热品质、热泵性能等方面的影响进行了实验和理论研究。但是,这些研究大多建立在热泵的夏季制冷工况下,而冬季制热工况下的余热回收研究较少。此外,螺杆热泵机组由于采用油冷却器等不同辅助设备,因此热回收技术的研究也略有不同。目前研究较充分的几种系统形式为以下几种:

3.1 双冷凝器热回收形式

双冷凝器热回收热泵机组是指在热泵机组中设置两个冷凝热交换器,根据两个冷凝热交换器的排列方式,又可以分为串联型和并联型。

图 3 为串联型的机构及工作原理,可以根据热回收器吸收全部冷凝热或部分冷凝热来关闭或开启冷凝器风机。在不需要生活热水时,也可以关闭热水水泵,开启冷凝器风机,正常制冷运行。但此运行模式有一个弊端,由于热水水泵关闭,热回收器内水温不断升高,并无限接近压缩机出口温度,水不断汽化,热回收器内压力不断升高,存在安全隐患。为了解决这个弊端,可以在压缩机出口和两个冷凝器之间加一旁通管。

在串联型的基础上加以改进可获得旁通

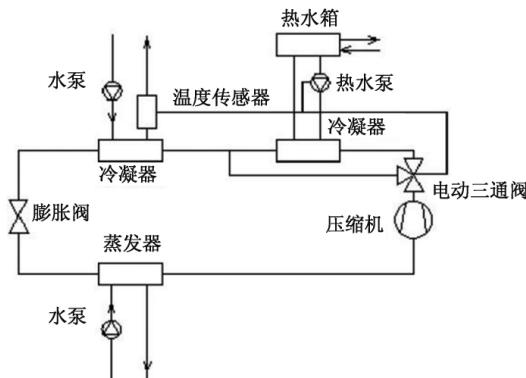


图 5 双冷凝器旁通型热回收系统

型(如图 5),在热回收器旁加一旁通控制装置^[9],通过旁通控制系统来改变压缩机出口的过热蒸汽进入热回收器的流量。这样可以实现过热蒸汽显热、过热蒸汽显热加部分潜热,直至全部冷凝热量的利用,是复合冷凝热回收中一种控制方便的应用形式。

以串联型为基础,部分学者对广州市某医院建筑进行热回收改造,分析得出冷凝热中小部分显热可以直接利用,在夏季制冷运行时间较长时,尤其是广东、海南等南方省市地区,热回收机组的节能效果显著^[10]。此外,在㶲分析的基础上,制冷机组双冷凝器设计和冷凝热㶲差再分配的概念被提出来^[11],不仅解释了制冷机组㶲效率低的原因,而且在对某宾馆的制冷机组㶲分析的基础上进行了改造,实验表明改造后机组性能得到明显改善。

图 2 展示的则是并联型的信息,通过控制阀门对热泵机组热回收工况和正常运行工况进行切换,热回收器可以吸收全部的冷凝热加热生活热水,但冷凝温度受生活热水温度的影响,使运行工况稳定性差。

热回收热泵机组进行热回收用于加热生活热水,热水温度的变化对制冷系统的性能有异性的影响^[12,13]。随着出水温度的升高,热回收量下降,冷凝温度升高,制冷剂流量减小,压缩比增大,单位制冷剂功耗增大导致能效下降。若在热回收冷水机组优先采用并联

系统和热回收冷水机组旁流系统^[3],在制冷负荷变化时,确保热回收机组优先满负荷运行,控制冷凝器的进水温度,保证冷凝压力,则可以获得稳定的热回收水温。

双冷凝器热回收形式是热泵热回收应用研究最多的应用形式,此形式可以实现热泵机组一机多用:制冷、制热、制热水等;可以更好地适应负荷变化,并根据需要吸收冷凝热量,制取生活热水。而旁通型调节更为灵敏、便捷,也可以提高机组冬季的满负荷运转效率,将成为双冷凝器热回收装置的主流^[14],双冷凝器还易于实现现有热泵机组的热回收改造,为热回收技术在大中型热泵机组中提供了可用的应用形式,在我国南方夏季制冷运行时间长的地区,热回收机组的节能效果更加显著;双冷凝器热回收机组与高温热泵相结合,能够生产出高温热水用于供暖,适用于在原有机组上进行改造。

3.2 相变蓄热热回收形式

为了解决热泵热回收制取的生活热水的供需在时间和数量方面不匹配的矛盾,之前曾在原有机组的基础上增设蓄热水箱。但此种方式水箱体积较大,安装受限,不适用于小型家用空调。因此可以利用相变材料蓄热密度高,性能稳定,相变过程接近恒温等特点,对热量进行储存转移,不仅能够解决生活热水供需矛盾,也减小了相变蓄热箱体积,能够满足小型家用空调的热回收改造,提高了能源利用率。

相变蓄热热回收热泵系统,如图 6 所示,相变蓄热箱内装有相变材料,当热泵在夏季制冷工况下运行时,相变材料吸收全部冷凝显热和部分潜热进行储存,多余冷凝热量通过室外侧换热器排到大气环境中;当需要热水时,水泵将要加热的水输送到相变蓄热箱中与相变材料换热,制取生活热水。冬季相变蓄热系统可以提供 35℃~40℃左右的生活热水^[15],如果需要更高温度的热水,可以辅助电加热器或高温热泵进一步加热。该系统的供

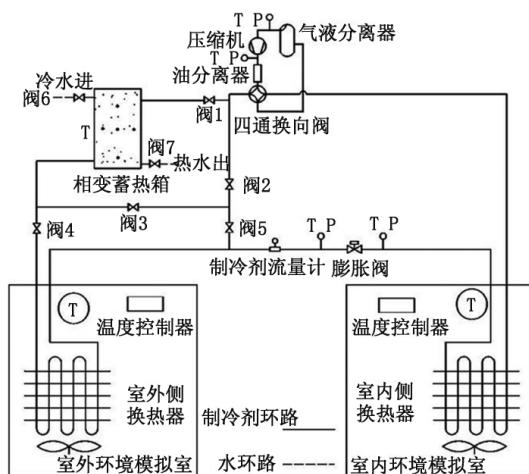


图 6 相变蓄热热回收热泵系统

热可与制冷、蓄热同时运行而不互相影响，热水的制取与热泵的运行工况无关，制取的热水不仅可以用于生活热水，也可以用于供暖，适用于江苏等冬季大气相对湿度大、空气源热泵需要频繁除霜的地区使用。

相变蓄热系统吸排气压力受冷凝温度和蒸发温度影响较水蓄热系统小，同时压缩机输入功率值受相变材料温度变化影响较水蓄热系统小且系统运行更加平稳^[16]。但相变蓄热系统对蓄热装置的传热效率要求较高，相变材料的传热和储能效率对系统性能也有至关重要的影响，若传热效果差，蓄热放热周期增长，影响系统性能。水蓄热系统水温加热到要求后，如果不及时利用，水温会慢慢下降，而相变蓄热材料吸收热量后，温度基本不变，只要热量充足，利用水泵能够不断从相变材料中吸取热量，生活热水温度波动很小^[17]。

相变蓄热系统对蓄热装置的传热效率要求较高，相变材料的传热和储能效率对系统性能也有至关重要的影响。若传热效果差，蓄热放热周期增长，影响系统性能，且由于相变材料导热率较低，使得相变蓄热技术在实际应用领域受到较大限制。目前，除了研究新型相变蓄热材料，大多数研究都放在了如何提高蓄热装置的换热效率，通过改变蓄热装置

的结构形式，如增加翅片等，或加入金属粉的材料来提高蓄热装置的换热效率。相变材料在有无泡沫铜的相变蓄热箱内，相变材料的相变过程呈现出不同的情况^[18]。对于带翅片的相变蓄热箱，有研究表明翅片的导热系数以及翅片的厚度对储热速率影响不大，但翅片间距是最主要的因素^[19]。

3.3 两级复叠热回收热泵系统

两级复叠热回收系统是在原有热泵机组上，把二级热泵的蒸发器并联到一级热泵的回路上。在一级热泵制冷循环时，通过二级热泵制热循环，把需要加热的水加热到50℃^[20]，如图7所示。当两级热泵同时运行时，可以通过控制冷却塔风机的启停来控制冷却水回水温度，设定冷却水的回水温度为32℃，控制精度设定为±1℃。当冷却水回水温度波动大于控制精度设定温度时，冷却塔风机进行相应启停，冷却塔风机运行状况如表1所示。

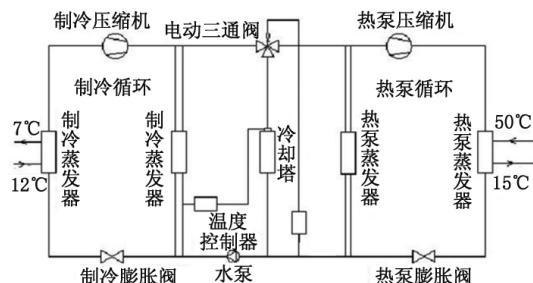


图 7 两级复叠热回收热泵系统

表 1 冷却塔风机运行状态

冷却水回水温度 $t_h/^\circ\text{C}$	冷却塔风机
$t_h > 33$	开启
$t_h < 31$	关闭

通过电动三通阀控制冷却塔的冷却水流量和热泵蒸发器的流量比例，使热泵的蒸发器出水温度低于32℃，以保证冷水机组的正常运行。当冷却水温度降低到低于设定的温度下限一定差值，或二级热泵出水温度高于

50℃一定差值时,关闭二级热泵,以保证一级热泵制冷工况正常运行。一级热泵制冷正常运行,冷却水温度一般为30℃~38℃,属于低品位热能,而一般酒店、宾馆需要的热水温度在55℃~60℃,所以不能直接使用,需要二级热泵进行升温。

高效升温专用型水源热泵,比较适合在现有的空调冷却水系统中进行改造,控制也较容易实现^[21]。日本已经研制出高效升温专用型热泵,其在热源温度35℃,出水温度65℃时的供热系数达到8.0,这为我国的产品开发提供了良好借鉴。

两级复叠热回收系统可以与复叠式热泵相结合,通过计算进行合理的设计,选择合适的一级热泵压缩机和二级热泵压缩机以及其他部件,使其能够满足一级热泵制冷,二级热泵热回收制取热水,适用于冬季甚至过渡季时,有全年性冷负荷的大型建筑;还可以进行两级压缩,实现低温运行,降低排气温度,减小压缩比,提高制热能效比和运行可靠性,适用于我国严寒和寒冷地区。

4 螺杆热泵热回收系统

螺杆压缩机具有结构紧凑、零部件少、运行平稳、对湿压缩不敏感等优点,可广泛应用于制冷空调等工艺流程中。螺杆制冷压缩机由于喷油,使热泵机组的性能大大改善。喷油不仅可以降低压缩机的排气温度,还起到螺

杆转子间密封,润滑压缩机的零件和运动副,以及降低压缩机噪音的作用,因此目前所使用的螺杆制冷压缩机多为喷油式。但喷油式螺杆压缩机喷油量较大,所以必须增设油处理设备。

工业螺杆制冷机组主要由螺杆压缩机、油分离器、油冷却器、冷凝器、储液器、蒸发器等组成,其原理图如图8所示。除冷凝器外,油冷却器也带有大量余热。随制冷剂进入油分离器的润滑油温度几乎与压缩机排气温度一致,排气温度通常为80℃左右,油温过高,不仅不利于润滑油与制冷剂的分离,粘度偏低,密封性变差,还会加速润滑油的碳化。所以需要油冷却器将润滑油温度降低,但也不宜过低,油温过低,粘度增大,增加搅动损失功率,一般控制喷油的温度在40℃左右。

参照文献中的方法^[6],用某螺杆压缩机选型软件选取一半封闭螺杆压缩机^[22],选取R22、R134a和R407a三种制冷剂,分别在蒸发温度 t_e 为-10℃和冷凝温度 t_c 为45℃、50℃和55℃下,压缩机出口温度为80℃,过热度为10K,过冷度为5K的条件下计算,计算结果如表2。假设润滑油在原有油冷却器内最终冷却到40℃,忽略润滑油的密度变化,可用式(1)计算出实际油冷负荷。

$$Q_{\omega} = \frac{Q_o(80-40)}{80-t_o} \quad (1)$$

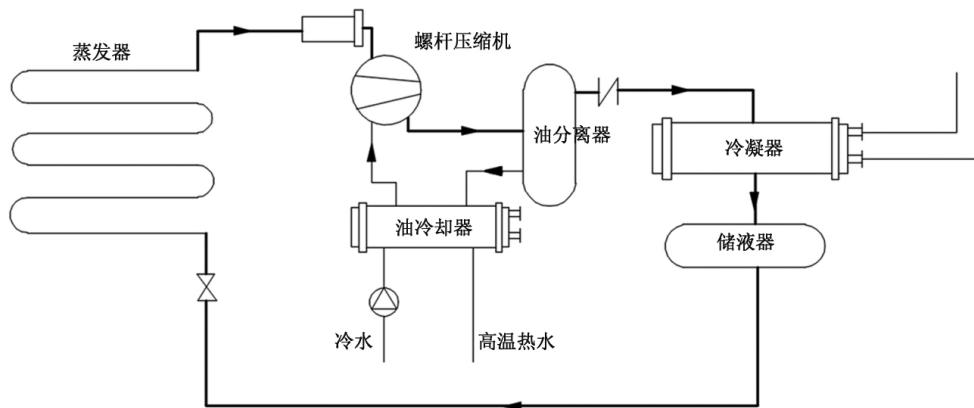


图8 工业螺杆制冷机组原理图

用式(2)计算出油冷实际负荷占总热量的比值。

$$\frac{Q_{ao}}{Q_c + P} \quad (2)$$

式中: t_c —冷凝温度,℃;

t_e —蒸发温度,℃;

t_o —油冷出口温度,℃;

Q_c —制冷量,kW;

Q_h —冷凝负荷,kW;

Q_o —油冷负荷,kW;

Q_{ao} —实际油冷负荷,kW;

P —输入功率,kW。

分析表2可知,在不同制冷剂下,实际油冷负荷占总热量的比值都在0.15以上。在R407a制冷剂,冷凝温度为55℃时,实际油冷负荷占制冷量的比值高达0.43,若将这部分热量利用起来,可以大大提高机组的能源利用率;只考虑回收油冷余热的情况下,机组cop从1.38增大到1.97,节能效果显著。本次计算设定的出口温度为80℃,而压缩机出油温度无限接近压缩机出口温度,热品质较之冷凝潜热更好,可直接用于供暖热水。

随着大型的民用和商用建筑以及集中供

暖项目的发展,对大型空气源热泵进行探讨的意义显著,且风冷热泵机组市场广阔,螺杆压缩机作为风冷热泵的主力机型,更应加大对螺杆式风冷热泵的余热回收的研究,尤其是对油冷却器高品位热回收的研究。综合考虑螺杆压缩机的排气温度、喷油温度及喷油量,设计合理的热回收器结构,使大型空气源热泵可以更好的应用于集中供暖项目中。

5 结论

制冷供热系统在能源消耗中占比非常大,对他们的余热进行回收,利用热泵冷凝废热量制取生活热水,不仅提高了能源的利用率,减少了对外界大气环境的热污染,还节省了大量用于加热生活热水的一次能源。

国内对于冷凝热热回收利用技术的研究虽然起步晚,但发展迅速。不断优化双冷凝器热回收热泵的性能,提出旁通型双冷凝器热回收形式,可以更精确、便捷地进行全热回收,推动了大中型热泵系统的余热回收。发展相变蓄热技术在热泵热回收中的应用,提高余热利用率,为小型家用空调器的余热回收提供了可行的应用形式。发展中高温热泵,提出两级复叠式热回收热泵系统。油冷却器内

表2 螺杆压缩机选型计算

制冷剂	冷凝温度 $t_c/^\circ\text{C}$	蒸发温度 $t_e/^\circ\text{C}$	制冷量 Q_c/kW	冷凝负荷 Q_h/kW	输入功率 P/kW	油冷负荷 Q_o/kW	油冷出口 温度 $t_o/^\circ\text{C}$	实际油冷负荷 Q_{ao}/kW	$\frac{Q_{ao}}{Q_c + P}$
R22	45	-10	91.2	115.0	40.4	16.58	51.5	23.27	0.17
	50	-10	84.7	106.2	44.5	22.9	43.2	24.89	0.19
	55	-10	77.6	96.6	49.1	30.1	34.5	26.46	0.21
R134a	45	-10	58.0	82.3	26.4	2.07	76.1	21.23	0.25
	50	-10	53.7	76.6	29.3	6.45	68.7	22.83	0.27
	55	-10	49.4	70.6	32.6	11.36	61.4	24.43	0.29
R407a	45	-10	88.1	120.5	41.6	9.24	66.0	26.4	0.20
	50	-10	80.1	109.4	46.3	17.08	56	28.466	0.23
	55	-10	71.4	97.0	51.7	26.1	45.9	30.6	0.25

余热量大,且热品质高,对螺杆式热泵的热回收有待完善,尤其是油冷却器的余热回收。

随着我国“煤改电”的继续推行,热泵的使用更加普及。在热泵余热回收改造中,应用研究较充分的技术,不仅经济效益好,还能节约能源,减少热污染。但节能空间还很大,需要更加深入的研究冷凝热回收技术,比如热回收热泵机组系统的整体优化匹配,变频技术在热回收热泵机组中的研究,冬季供暖工况下余热回收的研究等。随着热泵余热回收技术的不断进步,节能环保的经济效益和社会效益将更加突出,进一步促进空调行业的快速发展。

参考文献

- [1]朱国辉.热回收空调机组系统分析研究[J].制冷与空调(四川),2008(06):73–76.
- [2]谢如鹤,刘广海.国际制冷学会关于制冷领域应优先研究的问题列表[J].制冷学报,2006(03):59–62.
- [3]林晓丽.全热回收型冷水机组的应用[J].暖通空调,2011,41(05):67–71.
- [4]张帅.部分热回收风冷热泵机组的性能分析和实验研究[D].南昌大学,2015.
- [5]陈华,周楚,史德福.不同冷凝热回收方式下热泵空调动态特性的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2015,36(05):1239–1246.
- [6]刘群生,徐卫星,张冰,时阳.工业螺杆制冷系统的全热回收[J].低温与超导,2016,44(06):81–86.
- [7]唐毅,杨仕超,林昌元.3 种空气源热泵热回收机组的比较[J].暖通空调,2014,44(05):92–96.
- [8]常先问,屈国伦,曾庆钱,刘芳毅.夏热冬暖地区星级酒店空调冷凝热回收系统 [J]. 暖通空调, 2012,42(06):30–33+126.
- [9]周光辉,余娜,张震,王慧.空调冷凝热热回收技术研究现状及发展趋势 [J].低温与超导,2008(10):65–68+81.
- [10]郑就.冷水机组的显热热回收计算及效益分析 [J].制冷与空调,2008(S1):163–165.
- [11]龚光彩,常世钧,马扬,曾巍,林鑫.蒸汽压缩式水冷制冷机的双冷凝器热回收技术 [J].建筑热能通风空调,2005(01):6–12.
- [12]丁燕,刘东,宋子彦,蒋丹丹,彭艳梅.热回收型空气源热泵机组性能的实验研究 [J].建筑热能通风空调,2008,27(06):1–4+9.
- [13]段理华,周玲.风冷螺杆热泵全热回收机组应用分析 [J].建筑热能通风空调,2008(02):92–94.
- [14]谢大明,蔡觉先,郭丽婷.双冷凝器热回收技术研究现状及展望 [J].能源与环境,2015(06):28–29.
- [15]刘红娟,顾兆林,令彤彤.冷凝排热-相变蓄热热回收空调系统的实验研究 [J]. 制冷学报,2005(01):1–4.
- [16]陈华,任喜悦,谭凯中,王恒.带相变蓄热小型热泵冷凝热回收性能实验研究 [J].热科学与技术, 2014,13(04):304–309.
- [17]范学慧,李爱民.相变蓄热式空调冷凝热回收系统探讨 [J].农业技术与装备,2019(01):10–11.
- [18]杨亚星.泡沫金属对相变蓄热箱强化换热特性研究 [D].天津商业大学,2018.
- [19]凌空,封永亮,陶文铨.带环状翅片管式相变储热器的数值模拟 [J].工程热物理学报,2012,33(08):1407–1410.
- [20]尹应德,张泠,兰丽,顾登峰.余热回收型热泵在空调整能改造中的应用 [J]. 节能与环保,2004(10):29–31.
- [21]余颖俊,王梦云.空调冷凝热的回收利用 [J].工程设计 CAD 与智能建筑,2000(08):1–4.
- [22]<https://www.bitzer.de/cn/zh/服务/Software/软件/>