

一种新型余热回收高温热泵机组的性能研究

王凯, 曹锋, 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 对一种新型的余热回收高温热泵机组进行了性能实验研究. 机组主要由1台双螺杆制冷压缩机、1台冷凝器和蒸发器以及1个油冷却器组成. 重点研究了喷油温度对高温热泵机组性能的影响, 并拟合了排气温度随喷油温度变化的线性关系式. 实验结果表明, 这种新型的高温热泵机组能够达到稳定的出水温度85℃, 可以在较宽的高温工况范围内运行, 性能系数较高. 研究表明, 喷油温度和喷油量的选取是改进高温热泵机组性能的主要方法; 在冷凝温度高于70℃运行时, 最佳的油冷却温度应控制在45~65℃之间, 机组能效比最大可提高6.3%.

关键词: 余热回收; 高温热泵; 油冷却技术; 性能系数

中图分类号: TU833.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)10-1309-04

Development and Experimental Validation of High Temperature Heat Pump for Heat Recovery

WANG Kai, CAO Feng, XING Ziwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The performance of a high temperature heat pump unit for heat recovery is experimentally evaluated. The unit consists of a twin-screw refrigeration compressor, a condenser, an evaporator and oil cooler. The effect of the oil cooling on performance of the heat pump unit is theoretically analyzed. The effect of the oil injection temperature on performance is also evaluated. The discharge temperature linearly changes with the temperature of oil injection. Results show that the unit enables to stably get an outlet water with temperature 85℃ and works in a wide range of high temperature conditions with high coefficient of performance, and the keys to improving the high temperature heat pump unit often lie on the selection of oil cooling temperature and oil quantity. The best oil cooling temperature should be controlled between 45℃ and 65℃ when the condensing temperature is above 70℃, and the oil cooling can increase the heat capacity of the heat pump by 6.3%.

Keywords: heat recovery; high temperature heat pump; oil cooling; coefficient of performance

随着能源和环境问题的日益突出, 如何高效地使用能源、回收各种余热和减小对环境的污染是人们关注的焦点. 高温热泵就是一种用来解决能源和环境方面问题的非常有效的技术, 它利用30~50℃废水中的余热采用热泵循环来制取70~90℃的高温热水, 可以直接用于供暖和普通工业加热. 余热回收高温热泵机组就是采用余热回收的方式, 回收在

原油加热过程中含油污水的余热, 用来加热稠油外输, 起到了代替加热炉的作用. 由于现今所用的加热炉是采用燃烧重油、渣油或石油天然气来加热的, 这种能量利用方式实际是采用燃烧高品位能源来获得低品位热能, 有用能效率较低, 因此利用余热回收高温热泵对石油开采过程中油水分离产生的余热水进行热回收, 输出70~90℃的高温热水, 取代原油加

热炉对输油管道进行加热,降低原油的黏度,不仅可以提高能源的利用率,降低能耗,还可以限制污水的排放,减少热污染,更加环保.由于余热回收高温热泵有良好应用前景,因此已成为近年来国际上热泵研究的一个新方向.

目前,国内外学者对高温热泵机组的研究主要集中在开发合适的混合工质适应已有的热泵机组,使其达到高出水温度的要求.清华大学的刘南希等^[1]开发了一种综合性能较好的混合高温工质 HTR01,并将其应用到热泵机组中,使得机组最高出水温度达到了 85 °C.天津大学赵力等^[2]开发了两种用于高温热泵的混合工质,并且搭建了高温热泵机组实验台进行性能测试,机组的最高出水温度为 75 °C.南非的 Meyer^[3]利用 R22/R142b 的混合工质对已有的热泵性能进行实验,机组最高出水温度为 70 °C^[3].以上文献对混合工质研究较多,但对高温热泵机组的性能研究较少.本文采用的方法主要在高温热泵机组中增加油冷却器,以适应现在已有的单一工质的运行要求,提高热泵的出水温度,并重点研究了带有油冷却器的高温热泵机组的性能.

本文对余热回收高温热泵中的核心部件螺杆制冷压缩机进行了介绍,从理论上分析了油冷却对高温热泵机组性能的影响,并采用在系统中加入油冷却器的方法有效地降低了压缩机的排气温度,增加了机组的可靠性和能效比.实验结果表明:在加入油冷却器后高温热泵机组可以在出水温度为 85 °C 的工况下稳定运行,能效比较高,同时发现降低喷油温度可以提高机组在高温工况下的制热能效比.

1 油冷却对热泵机组性能影响的理论分析

在高温热泵机组中由于采用单一工质 R134a,在冷凝温度 75 °C 以上时,冷凝压力较高,压缩机排气压力可达 3 MPa 以上,压缩机的排气温度较高.排气温度在 120 °C 以上时会损坏压缩机,因此如何有效地降低压缩机的排气温度是高温热泵机组运行中的难点.本文采用油冷却的方法来降低压缩机的排气温度.喷油温度的高低直接影响压缩机的性能和热泵机组的性能.润滑油经过油冷却器冷却后喷入压缩机中,若油温低则压缩机的压缩过程更接近等温过程.从楔型润滑模型中阻力的计算式进行分析^[4]

$$F_x = \frac{2\mu ul}{h_{\max} - h_{\min}} \left(2\ln \frac{h_{\max}}{h_{\min}} - 3 \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max} + h_{\min}} \right) \quad (1)$$

式中: F_x 为阻力; μ 为油的黏度; u 为油滴的速度; l 为油膜的长度; $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ 分别为油膜高度的最大、最小值.从式(1)可以看到,若油温低,则油的黏度增加, F_x 变大,间隙中所形成的润滑油膜稳定,这对减少气体的泄漏量是有利的,并从微观上提高了压缩机的容积效率.但是,油温低、黏度大又会造成摩擦损耗增加,各种搅拌损失增加,进而造成压缩机的功耗增加,绝热效率下降.理论分析表明,在相同的喷油量和相同工况下,压缩机的容积效率随喷油温度的降低而增大,压缩机的功耗减小.不同的是,喷油量不同时,这种增大的幅度不同.总体来说,喷油温度低对压缩机容积效率的提高是有利的.因此,利用油冷却来降低压缩机的喷油温度,可以减小热泵机组的功率、降低压缩机的排气温度和提高机组的性能系数.

2 高温热泵实验装置

图 1 为余热回收高温热泵机组实验系统.本文实验系统包括高温热泵机组和水路系统.本文研究的高温热泵机组所采用的压缩机为台湾复盛的半封闭双螺杆制冷压缩机,排气量为 180 m³/h.机组名义制热量为 200 kW,设计出水温度为 85 °C.根据文献[5-7]中对于高温工质的理论计算与分析,机组采用 R134a 作为高温工质,相比使用混合工质可以有效地降低机组成本,提高运行可靠性.压缩机采用的润滑油为 Solest120 型润滑油.实验时在高温热泵机组中加入油冷却器,通过调节喷油温度来降低压缩机的排气温度.测试时在机组的各个测点均安装有压力和温度传感器,方便数据采集,其测量范围为:压力 0~4 MPa,精度 ±0.5%;温度 0~100 °C,精度 ±0.1 °C.测量的数据通过数据采集模块采集并存储到计算机中.

3 实验结果及分析

3.1 余热回收高温热泵机组的工况范围测试

在变蒸发温度和冷凝温度的情况下,测试了机组在出水温度为 70 °C 以上时的制热能效比、制热量 Q 、压缩机压缩比等性能参数,其典型的高温工况范围如表 1 所示,可以看出机组冷凝温度在 85 °C 时,仍然具有较高的能效比和制热量.同时,在大压缩比时,机组仍然具有较高的能效比和制热量.

3.2 冷凝温度对热泵机组性能的影响

为了研究变工况时热泵机组性能参数随着冷凝温度的变化情况,在蒸发温度为 25~40 °C、冷凝温

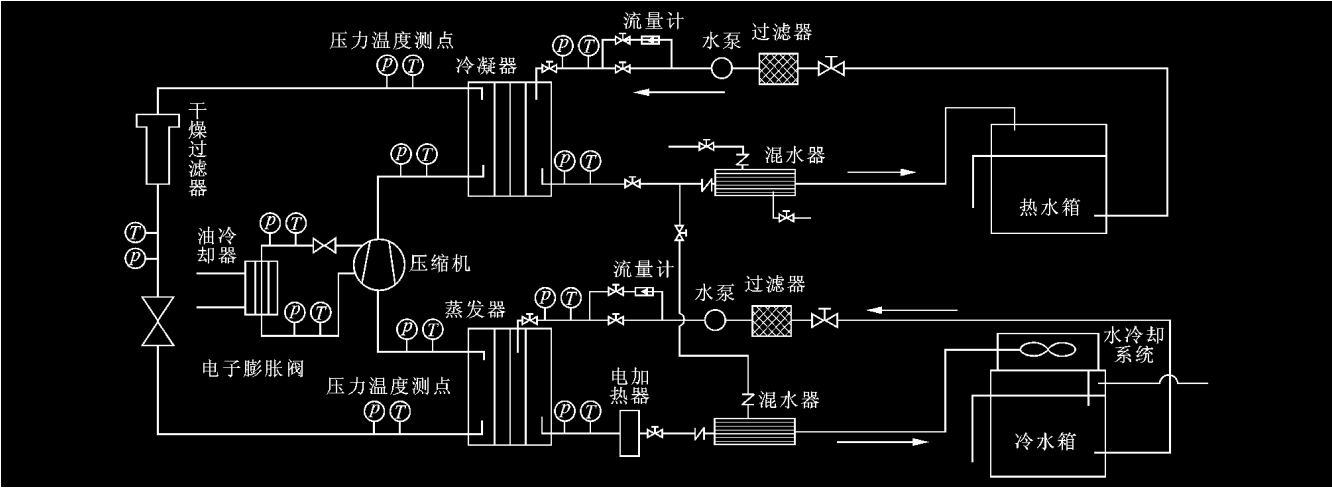


图 1 余热回收高温热泵机组实验系统图

表 1 高温热泵机组变工况范围测试

冷凝温度/℃	蒸发温度/℃	压缩比	排气温度/℃	制热能效比
70	30	6.44	94	3.29
70	35	5.68	96	3.31
75	30	6.90	98	2.79
75	35	5.90	101	2.85
80	30	7.82	107	2.65
80	35	6.84	108	2.71
85	35	7.41	109	2.51

度为 55~85 ℃ 的工况下对热泵机组的能效比、制热量以及机组功率进行了实验研究. 图 2 为冷凝温度变化时机组制热能效比的变化情况. 由图 2 可以看出, 机组能效比随着冷凝温度的升高而降低, 冷凝温度每升高 5 ℃, 机组的能效比约减少 11.43%. 图 3 为冷凝温度变化时压缩机输入功率的变化情况. 可以看出, 输入功率随着冷凝温度的升高而升高, 冷凝温度每升高 5 ℃, 压缩机输入功率约增加 9.90%.

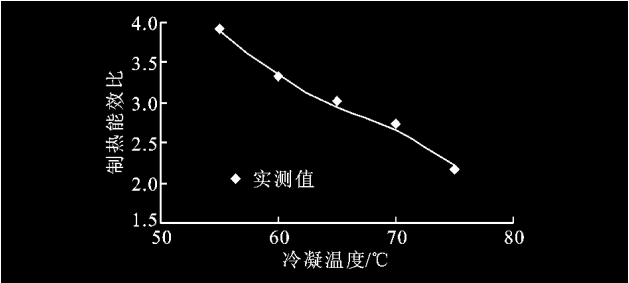


图 2 制热能效比随冷凝温度的变化曲线

通过对比分析可以看出, 在冷凝温度升高后, 机组的制热量和能效比都有呈线性下降的趋势, 这是因为当冷凝温度很高时, 机组中压缩机的压缩比和排气温度较高, 压缩腔中气体的泄露量增大, 压缩机的效率降低, 功率增大. 另一方面, 由于压缩机功率增大, 电机的温度较高, 制冷剂气体进入压缩腔吸气

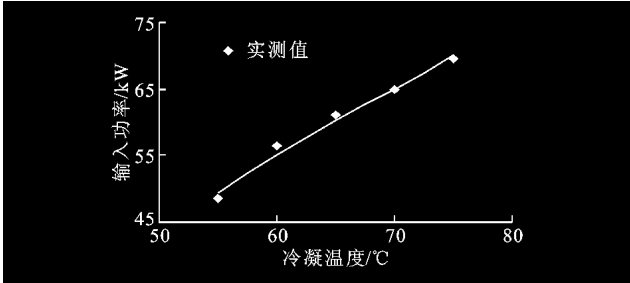


图 3 压缩机输入功率随冷凝温度的变化曲线

口时温度升高, 吸气过热度增大, 造成吸气比容增大, 容积效率下降.

3.3 油冷却后喷油温度对机组性能的影响

从表 1 可以看到, 高温热泵中压缩机的排气温度随着冷凝温度和压缩比的增大而升高. 排气温度过高对于压缩机有不利的影响, 因此在高温热泵中必须有效地控制压缩机的排气温度. 为此, 对高温热泵中压缩机的排气温度与喷油温度的内在联系进行了实验研究与分析, 图 4 为实验测得的喷油温度与排气温度的变化曲线, 并且近似拟合出了线性关系

$$\Delta T_d = 0.112T_{oil} - 11.4 \tag{2}$$

式中: ΔT_d 为高温热泵机组中压缩机排气温度的变化量(℃); T_{oil} 为喷油的温度(℃).

根据式(2)可以预测出所需要的喷油温度, 进一步可以算出所需喷油量的大小.

喷油冷却降低了排气温度, 但由于排气温度的降低会造成冷凝焓差减少, 两项综合, 还是降低了热泵机组的制热量. 随着冷凝温度的升高, 喷油冷却对制热量的影响增大, 图 5 为油冷却温度对机组制热量的影响($\Delta Q/Q$ 为机组制热量变化的百分比), 当油冷却温度为 45 ℃ 时, 制热量的最大降幅可达 2.5%. 油冷却也会造成热泵机组功耗下降, 相比较而言, 下降幅度不大. 图 6 为不同冷凝温度下喷油冷

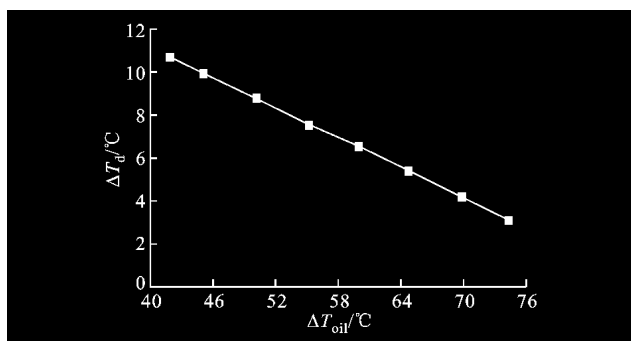


图4 喷油温度与排气温度的关系曲线

却对机组功耗的影响($\Delta W/W$ 为机组输入功率变化的百分比). 油冷却对功耗的影响也是随着冷凝温度的升高而增大, 当油冷却温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 最大降幅近 5.5% , 但油冷却对制热能效比的影响还是比较显著的, 特别是在高冷凝温度下, 制热能效比最高升幅达 6.3% , 能效比的升高幅度同样随着冷凝温度的升高而增大.

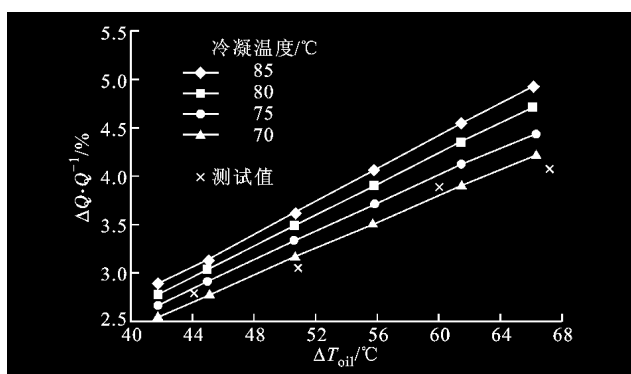


图5 油冷却温度对机组制热量的影响

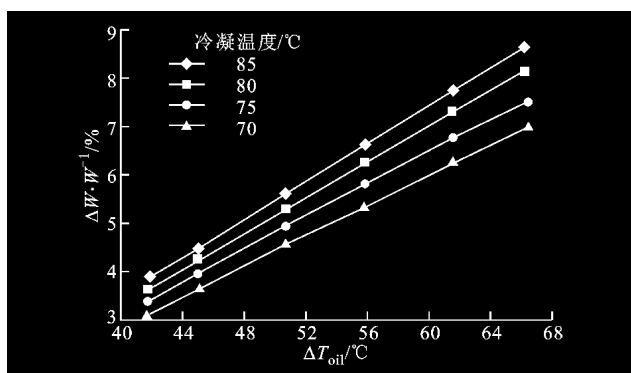


图6 油冷却温度对机组功率的影响

综合分析油冷却的影响可以看出, 在高冷凝温度下, 喷油冷却使压缩机排气温度的降低幅度比较大, 同时机组的制热量与功率减小. 由于制热量减小的幅度较小, 功率的减小幅度较大, 二者的比值增大, 因此机组的能效比提高.

4 结 论

(1) 本文依据楔形润滑模型, 从理论上分析了高

温热泵机组中油冷却器的喷油温度对压缩机和热泵机组性能的影响, 并通过实验验证了在高温热泵中加入油冷却器后可以有效地将压缩机的排气温度控制在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 使得压缩机能够正常运行.

(2) 本文研制的余热回收高温热泵机组能够在高温工况下运行, 并且可以在冷凝温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的较宽范围工作, 能效比达 2.5, 机组性能稳定, 性能系数较高.

(3) 利用喷油冷却可以降低压缩机的排气温度与润滑油的温度, 同时可以提高机组的能效比. 当油冷却温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 能效比升幅达 6.3% .

(4) 设计高效的油冷却器与选取合理的喷油温度和喷油量, 是余热回收高温热泵机组达到高的能效比的主要方法.

参考文献:

- [1] LIU Nanxi, SHI Lin, HAN Lizhong, et al. Moderately high temperature water source heat pumps using a near-azeotropic refrigerant mixture [J]. Applied Energy, 2005, 80(3): 435-447.
- [2] GAO Pan, ZHAO Li. Investigation on incomplete condensation of non-azeotropic working fluids in high temperature heat pumps [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(4): 1884-1893.
- [3] LIEBENBERG L, MEYER J P. Potential of the azeotropic mixtures R22/R142b in high temperature heat pump water heaters with capacity modulation [J]. ASHRAE Trans, 1998, 104(1): 418-429.
- [4] 林强. 转速和喷油参数对单螺杆压缩机性能的影响 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 1990.
- [5] BOBBO S, FEDELE L, SCATTOLINI M, et al. Isothermal VLE measurements for the binary mixtures HFC-134a + HFC-245fa and HFC-600a + HFC-245fa [J]. Fluid Phase Equilibria, 2001, 185(5): 255-264.
- [6] 张亚立, 张吉礼, 孙德兴. 三种中高温工质热力性质分析 [J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 123-125.
ZHANG Yali, ZHANG Rongli, SUN Dexing. Analysis on thermodynamic performances of three middle and high temperature refrigerants [J]. HV & AC, 2005, 35(5): 123-125.
- [7] 王凯, 吴勇, 曹锋, 等. 中高温水源热泵工质的研究与分析 [J]. 制冷与空调, 2007, 7(3): 62-65.
WANG Kai, WU Yong, Cao Feng, et al. Analysis and selection on the refrigerants for the moderate and high temperature water-source heat pump [J]. Refrigeration and Air conditioning, 2007, 7(3): 62-65.

(编辑 刘杨 王焕雪)