

二氧化碳跨临界制冷压缩机性能测试实验教学平台设计

雷明镜¹, 张 华², 王 芳², 李征涛², 汪 静²

(上海理工大学 1. 能源动力工程国家级实验教学示范中心; 2. 制冷与低温研究所, 上海 200093)

摘 要: 设计并搭建了二氧化碳跨临界压缩机性能测试实验教学平台, 平台包括系统测试平台和压缩机制冷系统两大部分, 设计为多变量性能测试的综合实验台。对平台进行了热力学参数数据计算分析, 并以吸气过热度对压缩机性能影响为例做实验, 测试了该平台的运行性能。结果显示: 设计的实验台操作简单, 工况控制稳定性良好, 计算机直接显示实验曲线和结果。该平台的以上运行特性有利于用于制冷专业本科实验教学, 测试不同参数对压缩机及制冷循环性能的影响、掌握测试方法、对测试平台的熟练操作, 有助于学生深入理解理论课程和提高工程实践能力。

关键词: CO₂跨临界循环; 压缩机测试; 制冷系统

中图分类号: TB652 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1672-4305.2019.01.004

Design of performance test rig of trans-critical CO₂ refrigeration cycle compressors for experimental teaching

LEI Ming-jing¹, ZHANG Hua², WANG Fang², LI Zheng-tao², WANG Jing²

(1. National Teaching Demonstration Center of Energy and Power Engineering; 2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A performance test rig of trans-critical refrigeration cycle of carbon dioxide compressors for experimental teaching was designed and established. The test rig is designed for multi-variable factors performance testing, includes two parts: compressor refrigeration system and test platform. The thermal parameters were calculated, and the operation characteristics were tested taking the influences of intake temperatures on compressors as example. The results shows, the test rig is easy to operate, the condition control is accurate and the results and curves are showed directly by computer. These characteristics of the rig make it beneficial to experimental teaching for students major in refrigeration and the students can use it to test the influences of different factors on compressors and refrigeration cycle, master the testing methods and command the rig well, thus contribute to understanding of theory courses and improving engineering practice ability.

Key words: trans-critical CO₂ refrigeration cycle; compressor test rig; refrigeration system

二氧化碳作为良好的天然制冷剂,近年来以无

毒、高效、环保等优势得到人类关注^[1]。目前二氧化碳制冷技术已广泛应用于家用空调、汽车空调、低温冷冻藏机组、热泵热水机组等领域^[2-4]。二氧化碳跨临界制冷循环是最广泛利用的方式,其特点是:压缩机的吸气压力低于临界压力,蒸发温度低于临界温度处于亚临界区域,吸热换热过程主要依靠潜热,压缩机的排气压力高于临界压力,冷却换热依靠显热^[1-2]。

挪威科技大学^[5]、美国马里兰大学^[6]和普度大

基金项目: 上海理工大学教师教学发展研究项目 (CFTD18008Y); 上海理工大学“精品本科”教学改革项目-重点项目 (JG2016001004Z); 上海理工大学精细化教学研讨与培训项目 (JX2017001001Y); 上海理工大学教师教学发展研究项目 (CFTD17002Y)。

万方数据

学^[7]、德国布伦瑞克工业大学^[8]、西安交通大学^[9]、上海交通大学^[10]等高校和广东美芝及广州万宝等^[11]公司陆续研究并搭建开发 CO₂压缩机性能测试试验台,用于产品开发,但是对于应用于本科实验教学实验台的探讨上目前文献资料很少。上海理工大学能源与动力工程学院开发设计并搭建了教学用二氧化碳跨临界压缩机性能测试实验台,测试了吸气过热度对压缩机性能和机组稳定性的影响,并对其应用于实验教学进行了探讨。

1 二氧化碳跨临界制冷循环原理

在跨临界循环中,循环的吸热过程在亚临界条件下进行,依靠潜热完成换热,但循环的冷却过程依靠显热,这与亚临界状态下的冷凝完全不同^[12]。其制冷循环过程如图 1 所示,循环过程为 1→2→3→4→1,气体工质在压缩机中(1-2)升压至超临界压力,进入气体冷却器中,被冷却介质(空气或冷却水)所冷却(2-3)。之后经节流阀降压,节流后气体被冷却如图中的(3-4)过程,且部分气体液化,湿蒸汽进入蒸发器内汽化,吸收周围介质的热量(4-1)。

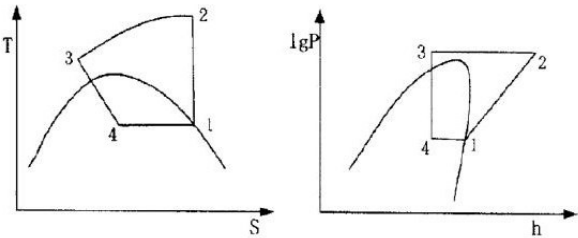


图 1 跨临界制冷循环的 T-S 图和 lgP-h 图

2 实验教学平台设计

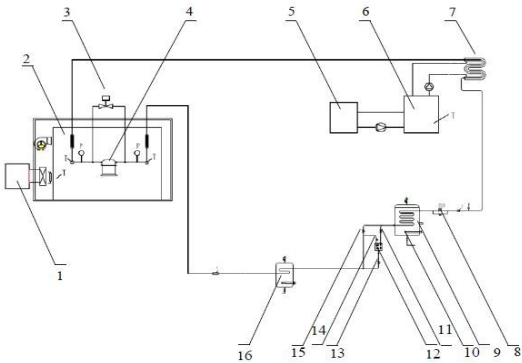
2.1 试验设备

该平台设计为多变量性能测试的综合实验台。试验设备由系统测试平台和压缩机制冷系统两大部分组成。CO₂跨临界制冷循环压缩机性能测试实验实物图和装备流程图分别见图 2 和图 3。



图 2 CO₂跨临界制冷循环压缩机性能测试装备流程图

压缩机制冷系统主要包括:被测试压缩机,环境



1-环境箱压缩冷凝机组 2-环境箱 3-平衡阀 4-被测 CO₂压缩机 5-气体冷却器(用水进行冷却) 6-换热水箱 7-气体冷却器(套管换热器) 8-电子膨胀阀 9-吸气量热器 10-电加热器 11-入口阀 12-气液分离器 13-截止阀 14-出口阀 15-旁通阀 16-过热量热器

图 3 CO₂跨临界制冷循环压缩机性能测试实验实物图

箱,气体冷却器,恒温水箱,吸气量热桶,过热量热桶,气液分离器,启动阀,调节阀,压力传感器,铂电阻,系统管路等。制冷工质 CO₂经过压缩机 4 压缩后进入气体冷却器 7(套管式换热器),其中套管式换热器中的冷水由冷水机组 5 提供给换热水箱 6,换热水箱再提供给套管换热器冷水,经过冷却的 CO₂通过电子膨胀阀 8 后,进入吸气量热桶 9,从吸气量热桶出来的 CO₂经过气液分离器 12 后,经出口阀 14 再进入过热量热器 16 进行过热,最后回到压缩机 4 吸气口。其中环境箱温度控制压缩机所要求的环境温度,换热水箱温度控制节流阀前温度,电子膨胀阀控制高低压力。

系统测试控制平台通过对所有的压力、温度、电参数进行实时检测,经过 PLC 程序处理,控制压缩机测试制冷系统中相关的阀门动作,实现自动控制要求;压缩机制冷系统为平台实现功能的执行主体。调节参数和动作机构见表 1。系统测试控制平台主要包括有:功率计,UT 表,MX100,触摸屏,PLC 控制模块,调功器,测试电脑,电流互感器,通讯模块,电源开关等元器件。

表 1 调节参数和动作机构

调节参数	动作机构
吸气压力	调节量热器 9 内电加热 10
吸气温度	调节过热器 16 电加热
排气压力	调节电子膨胀阀 8
膨胀阀前温度	电动控制阀调节器冷气冷却水流量
压缩机环境温度	调节被测压缩机环境箱内电加热和制冷机组
压缩机电压	调节变频稳压电源输出



2.2 热力学参数计算分析

参考文献[12]对热力学参数计算分析。实验测得的制冷剂制冷流量按式(1)计算,其中 q_{ml} 和 q_{mt} 分别为液体制冷剂质量流量和制冷剂总质量流量, t_a 和 t_r 分别为环境平均温度和制冷剂平均饱和温度, h_{g2} 、 h_{g2} 和 h_{g3} 分别为进入冷凝之路膨胀阀的制冷剂比焓、进入气体冷却器的制冷剂蒸汽比焓和离开气体冷却器的制冷剂蒸汽比焓, F_1 为漏热系数:

$$q_{mt} = q_{ml} \left[1 + \frac{(h_{g3} - h_{g2}) - \frac{F_1(t_a - t_r)}{q_{ml}}}{h_{g2} - h_{g3}} \right] \quad (1)$$

漏热量标定按 GB/T5773-2004 中 5.8.2 规定的标定方法执行。热平衡建立后,每隔 1h 测量气体冷却器表面温度一次,直至连续四次温度值波动不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。 F_1 为漏热系数按式(2)计算, Φ_i 为第二制冷剂量热器的热损失,外界传入为正,一般为压缩机制冷量的 5%。

$$F_1 = \frac{\Phi_i}{t_r - t_a} \quad (2)$$

确定工况实测制冷量按式(3)计算,其中 Φ_{0a} 为压缩机实测制冷量, v_{ga} 和 v_{gl} 分别为进入压缩机的制冷剂蒸汽的实际比容和规定基本试验工况相对应的进入压缩机时制冷剂蒸汽的比容, h_{g1} 和 h_{f1} 分别为规定基本试验工况下进入压缩机的制冷剂蒸汽比焓和规定基本试验工况膨胀前制冷剂比焓:

$$\Phi_{0a} = q_{mt} \frac{v_{ga}}{v_{gl}} (h_{g1} - h_{f1}) \quad (3)$$

制冷性能指标按式(4)计算,其中 ε 为制冷系数, Φ_0 为压缩机的制冷量, P 为输入功率, n 和 n_a 分别为压缩机的名义转速和实测转速, f 和 f_a 分别为压缩机的名义频率和实测频率:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_0}{P}, \Phi_0 = \Phi_{0a} \frac{n}{n_a}, \Phi_0 = \Phi_{0a} \frac{f}{f_a} \quad (4)$$

压缩机的容积效率 η_v 按式(5)计算,其中 V_{sw} 为压缩机理论输气量:

$$\eta_v = \left(q_{mt} * \frac{v_{ga}}{V_{sw}} \right) \frac{f}{f_a} \text{ 或} \quad (5)$$

$$\eta_v = (q_{mt} * v_{ga} / V_{sw}) \frac{n}{n_a}$$

压缩机的等熵效率 η_s 按式(6)计算,其中 h_{gt} 和 h_{ga} 分别为规定基本试验工况经等熵压缩后排气压力下的制冷剂理论比焓和规定基本试验工况进入压缩机的制冷剂理论比焓:

$$\eta_s = (q_{mt} * (h_{gt} - h_{ga}) / P) \frac{f}{f_a} \text{ 或}$$

$$\eta_s = (q_{mt} * h_{gt} - h_{ga} / P) \frac{n}{n_a} \quad (6)$$

第二制冷剂量热器法测量蒸发制冷量 Q_0 ,当系统处于平衡时,其中 N_h 为量热器加热功率:

$$Q_0 = N_h + \Phi_i \quad (7)$$

此方法测得的制冷剂流量式(8),其中 h_1 和 h_4 分别为蒸发器出口和进口制冷剂比焓:

$$q_{mt} = \frac{Q_0}{h_1 - h_4} \quad (8)$$

3 实验分析

3.1 实验工况

试验被测二氧化碳压缩机型号 QXBTR - B032E030,在这里选取某个参数对压缩机性能和循环性能的影响为例进行讨论实验平台的特性,即以测试吸气过热度为 $5 \sim 20^\circ\text{C}$ 时的压缩机运行特性为例。参考国标 GB/T 29030-2012 规定的压缩机工况,选取高蒸发温度跨临界循环工况,具体参数如表 2 所示。

表 2 跨临界 CO₂ 压缩机测试试验工况参数

项目	参数
压缩机机箱温度	20℃
辅助水箱温度	20℃
吸气压力	4500kPa
排气压力	10000kPa
蒸发温度	10℃
冷凝温度	31℃
节流阀前温度	22℃

3.2 测试平台实验步骤

实验操作步骤如图 4。计算机开机,打开“测试程序”,点击进入“测试工况”,设置工况参数。然后打开测试系统平台的触摸屏,轻触“试验设备测试”按钮进入“压缩机测试”页面,按照设备开启操作顺序依次轻触如下按钮启动相应工况控制

设备:“控制柜上电”→“开启软件”→“设置工况参数”→“冷却塔风机”→“冷却塔水泵”→“环境箱风机”→“环境箱加热”→“环境箱冷机”→“水箱循环水泵”→“水箱加热”→“水箱冷机”→“冷凝水泵”→“被测压缩机”→“吸气量热桶”→“过热量热桶”。



图 4 实验设备操作界面流程图

3.3 实验结果

实验结果见表 3,可见随着吸气过热度的增加,制冷剂流量、压缩机功率和制冷量均有降低趋势,而制冷系数和等熵效率先增加后减少、且在过热度为 15℃ 时循环性能最高。

表 3 吸气过热度对跨临界 CO₂ 压缩机性能影响

吸气过热度 (℃)	制冷剂流量 (kg/h)	制冷量 (W)	制冷系数	压缩机功率 (W)	等熵效率
5	65.34	3436.91	4.38	783.30	0.73
10	63.85	3426.43	4.42	775.21	0.75
15	60.07	3410.19	4.49	758.99	0.79
20	59.21	3325.03	4.44	748.88	0.78

3.4 测试平台稳定性

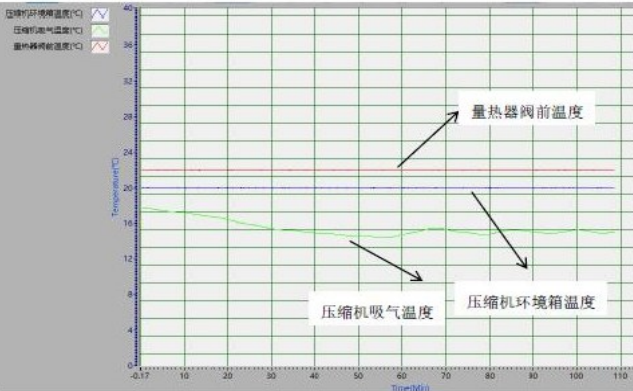
跨临界二氧化碳压缩机性能测试平台稳定时需满足吸气压力、排气压力波动不超过 1%。图 5 为在一定工况压力和温度波动稳定时,选择了三个典型的温度,即吸气量热桶器阀前温度、压缩机环境箱温度和压缩机吸气温度,作为机组稳定性评价指标。从图 5 中可以看出,吸气量热桶阀前温度和压缩机

环境箱温度控制比较精确,而压缩机的吸气温度调节控制呈周期波动变化,即过热度为 5℃、10℃、15℃ 和 20℃ 时的周期为 15min、20min、22min 和 22min,平均吸气温度为设定值,控制稳定性良好。

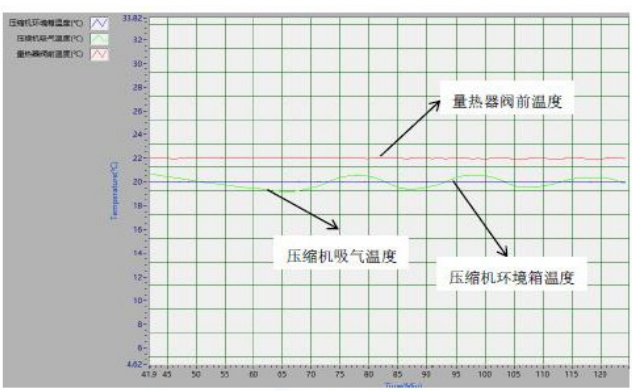
4 本科实验教学

压缩机性能测试是压缩机研发设计和投入应用的必经之路,测试不同参数对压缩机和压缩制冷循环性能的影响、掌握测试方法、对测试平台的熟练操作有助于学生深入理解“压缩机原理”和“制冷原理”等理论课程和提高工程实践能力,为之后的学习和工作打下基础。开发的 CO₂ 跨临界压缩机性能测试实验台在操作上相对简单,工况参数稳定性良好,数据计算过程明确,计算机直接显示实验曲线和结果,这些特点对开展本科实验教学是非常有利的。

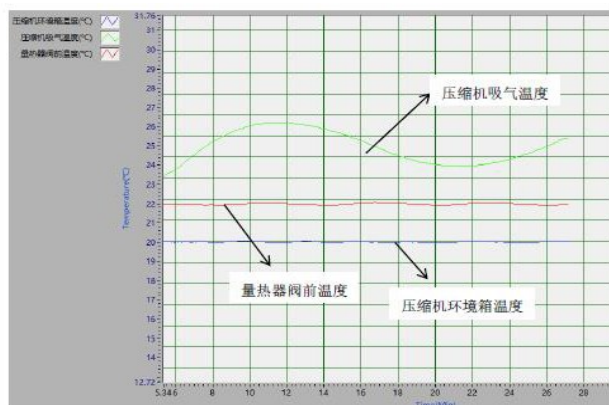
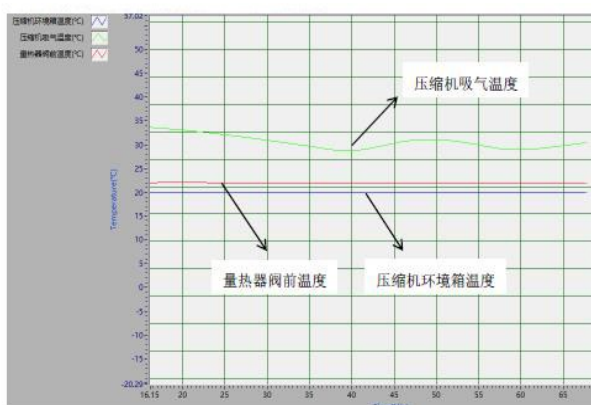
基于以上特点,开发的 CO₂ 跨临界压缩机性能测试实验教学平台已应用于 2013 级和 2014 级约 200 名本科制冷专业学生的实验教学。进行的实验项目包括 CO₂ 跨临界压缩机性能测试实验、多变量制冷循环性能测试实验等,该平台是一个综合实验台,具有很好的扩展性,丰富了制冷专业实验教学内容,提高专业实验教学质量 and 水平。



万方数据 (a) $\Delta t = 5^{\circ}\text{C}$



(b) $\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$

(c) $\Delta t = 15^{\circ}\text{C}$ (d) $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$ 图5 吸气过热度为 $5^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 稳定运行时计算机界面各温度参数波动图

5 结论

(1) 设计了二氧化碳跨临界压缩机性能测试实验教学平台,平台系包括统测试平台和压缩机制冷系统两大部分,进行了热力学参数数据计算分析。

(2) 以吸气过热度对压缩机性能影响为例做实验,测试了该平台的运行性能。结果显示:设计的实验台操作简单,计算机直接显示实验曲线和结果,工况控制稳定性良好。

(3) 基于设计平台的运行特性,将该平台用于制冷专业本科实验教学,加深学生对理论知识的理解,提高学生工程实践能力,提高专业实验教学质量 and 水平。

参考文献(References):

- [1] 王如竹,丁国良.最新制冷技术[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] Lorentzen G, P Gustav, B Jostein, et al. Method of high-side pressure regulation in trans-critical vapor compression cycle device [P]. International patent publication WO1990007683A1, 1993-04-01.
- [3] 陈江平,穆景阳,陈芝久.二氧化碳汽车空调系统应用研究进展[J].低温与特气,2001,19(2):1-5.
- [4] Farivar F, Tatiana M. Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines[J]. International journal of refrigeration, 2014, 38(2): 128-139.
- [5] Fagerli B E. Development and experiences with a hermetic CO_2 compressor[C]. School of Mechanical Engineering, Purdue University. International compressor engineering conference. Purdue, USA: Purdue e-pubs, 1996, 229-234.

- [6] Hwang Y H, Celik A, Radermacher R. Performance of CO_2 cycles with a two-stage compressor[C]. School of Mechanical Engineering, Purdue University. International refrigeration and air conditioning conference, Purdue, USA: Purdue e-pubs, 2004, 694.
- [7] Christen T, Hubacher B, Bertsch S S, et al. Experimental performance of prototype carbon dioxide compressors[C]. School of Mechanical Engineering, Purdue University. International compressor engineering conference. Purdue, USA: Purdue e-pubs, 2006, 1730.
- [8] Forsterling S, Tegethoff W, Kohler J. Theoretical and experimental investigation on carbon dioxide compressors for mobile air conditioning systems and transport refrigeration[C]. School of Mechanical Engineering, Purdue University. International refrigeration and air conditioning conference, Purdue, USA: Purdue e-pubs, 2002, 585.
- [9] 杨军,陆平,张利,等.新型全封闭旋转式 CO_2 压缩机的开发及性能测试[J].上海交通大学学报,2008,42(3):426-429.
- [10] 曾韩松,杨炳,春,郭蓓等.跨临界 CO_2 滑片膨胀机的研究与开发[J].制冷与空调,2007,7(4):56-58.
- [11] 高联斌,李征涛,陈亿喆,等. CO_2 跨临界循环压缩机性能试验台的研制探讨[J].低温工程,2014(1):31-36.
- [12] 丁国良,黄冬平.二氧化碳制冷技术[M].北京:化学工业出版社,2007.

收稿日期:2017-10-16

修改日期:2018-03-05

作者简介:雷明镜(1989-),女,河南商丘人,硕士,助理实验师,主要研究方向为能源动力实验教学、制冷压缩机测试和热泵热水系统等。