

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.006

CO₂ 气体冷却器性能测试实验台设计

杨二阳, 李征涛, 杨淑玲, 戎耀鹏, 韩 聪

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 为了对 CO₂ 气体冷却器进行系统全面的性能分析, 根据 CO₂ 制冷剂在亚临界区和超临界区的换热特性, 以第二制冷剂量热器法和水冷气体冷却法为理论基础, 结合企业实际测试需求研制了能够全面测试 CO₂ 气体冷却器性能的实验台。其可测试的换热量范围是 1.6 ~ 32.0 kW, 测量精度高。实际选用了 1 个气体冷却器做验证, 结果显示 2 种测量方法的偏差小于 4%, 满足企业验收标准。此实验台的设计可为相关性能测试实验台的研究提供借鉴。

关 键 词: CO₂ 气体冷却器; 性能测试台; 第二制冷剂量热器法; 水冷气体冷却法

中图分类号: TQ051.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2017)03-0025-05

Design of Carbon Dioxide Gas Cooler Test Laboratory

YANG Eryang, LI Zhengtao, YANG Shuling, RONG Yaopeng, HAN Cong

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to conduct systematic and comprehensive performance analysis of CO₂ gas cooler, according to the heat exchange characteristic of carbon dioxide refrigerant in subcritical and supercritical regions, based on the theories of second refrigerant calorimeter method and water-cooled gas cooling method, combined with the actual demands of enterprise, carbon dioxide gas cooler test laboratory which could do performance analysis comprehensively was designed. Its measuring range was 1.6 ~ 32.0 kW, and had higher testing accuracy. By testing a gas cooler, the results show that the deviation of two methods is less than 4%, meeting enterprise requirement. The testing laboratory also provides a reference for the development of relevant testing laboratories.

Keywords: CO₂ gas cooler; test laboratory; second refrigerant calorimeter; water-cooled gas cooling

近年来随着大批量氯氟烃(CFCs)等人工合成制冷剂的生产和使用,使得全球温室效应进一步加剧。《蒙特利尔议定书》及《京都议定书》都明确指出要限制温室气体的排放量,淘汰全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)较大的制冷剂,使人们有一个更好的生存环境。绿色环保型自然工质^[1]重新受到重视。前国际制冷学会主席 Gustav Lorenzen^[2]认为 CO₂ 是一种“无可取代的制冷工质”。从中国制冷空调行业环保低碳替代技术研讨会上了解到 2015 年以后氢氯氟烃(HCFCs)将加速淘汰,CO₂ 等低 GWP 制冷剂正加速迈向市场,这极大的推动了 CO₂ 制冷剂在制冷行业中的应用。

Neksa P 等人率先对超临界 CO₂ 热泵的微通道换热特性及压降进行了研究^[3]。文献[4]中 Fang 对超临界 CO₂ 在微通道起冷器中的单相传热特性及摩擦因数做了实验研究,并得出一些传热与摩擦阻力的关联式。Yoon SH 研究了管内径为 7.73 mm 的超临界气体冷却器,并利用实验拟合出经验换热关联式^[5]。上海交通大学制冷与低温研究所^[6]建立了 CO₂ 跨临界循环汽车空调装置的数学模型,分析了汽车空调装置的变工况特性,并对跨临界 CO₂ 汽车空调系统的性能进行了研究。天津大学^[7]先后对单级、双级加热形式的 CO₂ 跨临界循环热泵热水器进行了分析对比,对 CO₂ 跨临界膨胀机做了测试和特性分析。上海理工大学也

收稿日期:2016-12-05;修回日期:2017-01-24

第一作者简介:杨二阳(1989),男,河南修武人,硕士研究生,主要研究方向为制冷装置测试及其自动化。E-mail: yangeryang47@163.com

对 CO₂ 系统样机及实验台的搭建进入深入研究^[8-9]。杨俊兰等^[10]利用验证后的模型对 CO₂ 气体冷却器进行了优化设计,结果表明系统运行压力较高,压降较小,比较适合选择小管径和长管长。袁秋霞等^[11]优化设计了两种不同结构参数的热泵热水器用套管式气体冷却器。然而这些研究大都以自行设计的简单 CO₂ 制冷回路系统作为研究的平台,不能对所研究的气体冷却器进行系统全面的性能分析。笔者综合相关国内外研究用的实验台,并参照某企业的研发要求,设计了一套 CO₂ 气体冷却器性能测试实验台。

1 CO₂ 气体冷却器介绍及其测试要求

1.1 CO₂ 气体冷却器

CO₂ 是一种环保型自然工质,安全、无毒且不可燃烧。由于 CO₂ 临界点温度(31.1℃)较低,要实现普通的蒸气制冷循环需要比 31.1℃ 更低环境介质来冷凝压缩机的高温排气。且由于在亚临界循环中冷凝阶段的相变过程较短,进而制冷量较小,制冷效率(coefficient of performance, COP)过低。故 CO₂ 制冷系统多采用跨临界循环。但 CO₂ 的三相点压力(0.52 MPa)较高,因此整个系统需要较高承压。而在跨临界制冷循环中,CO₂ 的吸热过程在亚临界区,主要靠制冷剂的蒸发潜热来完成;其放热过程在超临界区,不发生相变,依靠显热来完成,这时的热交换器叫做气体冷却器。

目前 CO₂ 气体冷却器主要有两种类型:一种是平行流微通道换热器,一般应用于汽车空调等;另一种是

水冷却方式的气体冷却器,主要有套管式及壳管式两种类型,常用于热泵热水器中。文中搭建的测试系统主要用于测试水冷却方式的气体冷却器,如图 1 所示,由两个管径不同的管子套在一起就构成同轴换热器,CO₂ 制冷剂走管程,冷却水走壳程,通过内管管壁将 CO₂ 制冷剂的热量传递给冷却水。这种换热器结构简单,换热效果好,耐高压,而且可以根据安装位置来变动换热器的形状,便于安装。

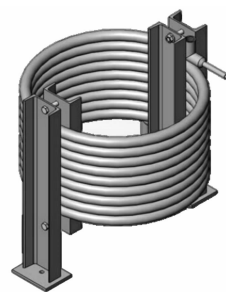


图 1 套管式气体冷却器

Figure 1 Tube gas cooler

1.2 气体冷却器测试要求

测试系统按照某企业测试要求,实验台适用于 CO₂ 水冷式气体冷却器,换热量范围是 1.6 ~ 32.0 kW,能研究油循环率(制冷剂液体内含油的质量分数)、蒸发压力、冷凝压力、节流阀制冷剂流量和冷却水流量开度等因素对气体冷却器性能的影响。其主要参数测量范围及控制精度要求如表 1 所示。

表 1 主要参数测量范围及控制精度要求

Table 1 Measurement range of main parameters and requirements of control precision

控制参数	气体冷却器 进气压力/MPa	压缩机吸气 压力/MPa	油循环率/%	制冷剂最大循环 量/(kg·h ⁻¹)	电子膨胀阀前 温度/℃	恒温水箱 温度/℃	恒温水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)
控制范围	8.0 ~ 15.0	2.0 ~ 6.0	0.5 ~ 5.0	600	25 ~ 80	10 ~ 60	0.5 ~ 3.6
控制精度	±0.03	±0.01	±0.05	—	±0.2	±0.5	±0.000 1

2 CO₂ 气体冷却器性能测试系统的设计

2.1 设计思路

实验台测试系统示意图如图 2 所示,设计原理以第二制冷剂热量热器法(R123)为主要测量方法,水冷却气体冷却法为辅助测量方法,两种测量方法比较后即可确认实验台是否达到企业验收标准。系统主要由被测气体冷却器制冷剂主回路和辅助回路、恒温水系统、其他辅助制冷剂系统及相应的数据采集控制设备组成。其中辅助制冷剂系统有抽真空用的真空泵,停机更换被测气体冷却器时用的压缩机 2、换热器 1 和储液器等。

当进行 CO₂ 气体冷却器性能测试时,压缩机出口处的 CO₂ 制冷剂从 1 点经油分离器后到达 2 点,然后 CO₂ 制冷剂分成两路:一路为辅助回路,经气体冷却器,3 点,干燥过滤器,4 点,视液镜,5 点,电子膨胀阀,6 点,量热器 2,到达 7 点;另一路为主回路,经换热器,8 点,电加热器,9 点,10 点,被测气体冷却器,11 点,油取样器,12 点,过滤器,13 点,电子膨胀阀,14 点,量热器 1,到达 7 点,与另一路制冷剂混合后经气液分离器到达 0 点,被压缩吸入后重新压缩到达 1 点,进入下一个循环。

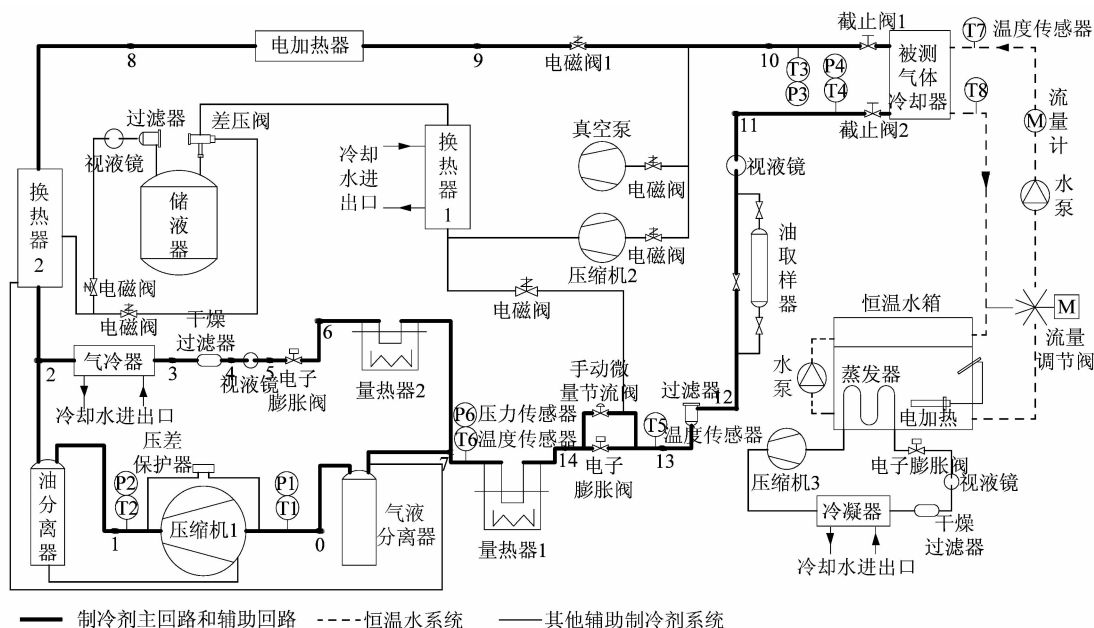
图2 CO₂气体冷却器性能测试系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of CO₂ gas cooler testing system

2.2 实验台主要零部件选型

压缩机 1 选用意大利 Dorin 公司的半封闭活塞式 CO₂ 专用压缩机,其额定输入功率为 4 kW。量热器为定制产品,设计耐压 20 MPa,其蒸发盘管总换热面积为 0.94 m²,材质为 316 无缝不锈钢管 $\Phi 12$ mm,壁厚 1.5 mm,绕制 21 层($\Phi 500$ mm)。第二制冷剂 R123 设计压力 0.5 MPa,平均蒸发温度约 48 ℃。电加热器的额定加热功率为 15 kW。油分离器选用 CO₂ 滤网过滤式高效油分离器,外套采用 6 mm 厚 304SS 不锈钢制成。测试压力可达 29 MPa,有效容积为 220 cm³。气液分离器有效设计容积为 3 L,设计耐压为 10 MPa。电子膨胀阀选用 Fujikin 的 AR2000 系列电子阀,手动微量节流阀选用 Swagelok 31 系列计量阀。恒温水系统中,冷水机组选用设计水流量为 3 m³/h,选用爱默生高准 F 系列科里奥利质量流量计,精度为 $\pm 0.01\%$ 。PLC 选用欧姆龙的 CP1L 型号,触摸屏选用步科 MT4523T 型。数据采集仪选用日本恒河 MX100 (30chn),自带 PC 软件。数字功率计选用恒河 WT230/232C,基本精度 0.1%,带有 RS232 串行借口。温度传感器选用日本千野 PT100 铂电阻,测量精度为 ± 0.05 ℃。温度传感器选用 M-System 的 M3LR 型号。压力传感器选用罗斯蒙特 3051T 型绝对压力变送器,量程分别有 10,20 MPa,精度为 $\pm 0.04\%$ 。调功器选用固特的三相调功器,最大功率为 20 kW。

3 实验原理与方法

由于 CO_2 制冷剂在超临界区域被冷却时有明显的温度滑移,且温度和压力各自独立,因此用压缩机的转速来调节被测气体冷却器的制冷剂进口压力;用电加热器来准确控制进口温度;用流量调节阀来调节供水流量,控制被测气体冷却器出口的温度;用电子膨胀阀来调节被测气体冷却器出口的压力。当测量参数稳定后,两种测量被测气体冷却器的计算公式如下:

1) 第二制冷剂热量器法

$$q_{mX} = \frac{\Phi_i + \eta_1 (t_a - t_s)}{h_{g6} - h_{g5}},$$

$$\Phi_{\mathfrak{a}X} = q_{\mathfrak{m}X} (h_{\mathfrak{g}3} - h_{\mathfrak{g}4}) \circ$$

式中: Φ_{ax} —第二制冷剂量热器法测得的实验制冷量, W;

q_{mX} —第二制冷剂量热器法测得的实验制冷剂质量流量, kg/h;

Φ_i —输入量热器的电加热量, W;

 η_1 —量热器的漏热系数, $\text{W}/^\circ\text{C}$;

t_0 —量热器的平均环境温度,℃;

t_s —第二制冷剂压力对应的饱和温度,℃;

 h_{g6} —量热器出口制冷剂气体比焓, kJ/kg;
$$h_{g5}$$
—电子膨胀阀前制冷剂比焓, kJ/kg;

h_{a3} —被测气体冷却器进口的制冷剂比焓, kJ/kg;

h_4 —被测气体冷却器出口的制冷剂比焓, kJ/kg。

2) 水冷气体冷却法

$$\Phi_{aY} = c(t_8 - t_7)q_{mc} + \eta_2(t_r - t_a)。$$

式中: Φ_{aY} —水冷气体冷却法测出得到的实验制冷量, W;

c —恒温箱中水的比热容, J/(kg·℃);

t_8 —被测气体冷却器恒温水侧出水口温度,℃;

t_7 —被测气体冷却器恒温水侧进水口温度,℃;

q_{mc} —恒温水供水质量流量, kg/s;

η_2 —气体冷却器的漏热系数, W/℃;

t_r —实验时气体冷却器中制冷剂的平均温度,℃。

两种测量方法的偏差 Δ 为

$$\Delta = \frac{2 \times (\Phi_{aX} - \Phi_{aY})}{\Phi_{aX} + \Phi_{aY}} \times 100\%。$$

本文选用一个同轴套管式 CO₂ 气体冷却器进行验证实验, 其基本参数如表 2 所示。总换热面积为 1 m², 由内管为光管, 外管为内螺纹管, 共 10 圈 $\Phi 600$ mm 的环形结构构成。在表 3 所示实验工况下整个实验台稳定运行 30 min 后, 各参数在允许波动范围内稳定后即可记录实验数据, 每 5 min 记录一组数据, 共 4 组。

表 2 CO₂ 气体冷却器基本参数Table 2 Basic parameters of CO₂ gas cooler

流通通道	介质	管径/mm	材质	设计压降/kPa	换热面积/m ²	外形直径/mm	设计压力/MPa
内管	CO ₂	18	304 无缝不锈钢	0.06	1	600	23
外管	恒温水	38	碳钢	0.08	1	600	1

表 3 测试 CO₂ 气体冷却器时系统的实验工况

Table 3 Experimental conditions of system

压缩机排气 压力/MPa	压缩机吸气 压力/MPa	压缩机吸气 温度/℃	膨胀阀前 温度/℃	气体冷却器制冷剂侧		气体冷却器冷却水侧	
				进口压力/MPa	进口温度/℃	进水温度/℃	出水温度/℃
11.0	3.5	10.0	35.0	11.5	109.0	18.0	22.5

具体测试实验方法如下:

1) 安装被测气体冷却器。系统抽真空后缓慢打开储液器中的截止阀并适当调节压差阀, 使适量的 CO₂ 气体制冷剂进入系统。具体制冷剂的循环量参考文献[12]。

2) 打开辅助设备, 确保恒温水系统循环, 冷却水流动, 各仪表数据采集正常。

3) 启动 CO₂ 制冷压缩机 1, 调节电加热器、量热器、电子膨胀阀开度、流量调节阀等使系统各测量参数达到实验工况并稳定。

4) 待实验测试完毕后, 保存数据。通过控制柜的

触摸屏关闭实验台。系统先关闭电子膨胀阀和电加热器, 约 1 min 后压缩机 1 停止, 量热器停止加热, 各冷却水及恒温水系统停止运行, 整个系统结束运行。

5) 制冷剂回收。拆下被测气体冷却器, 以备下一个气体冷却器的实验。回收过程: 打开换热器 1 侧的冷却水, 关闭被测气体冷却器出口截止阀 1 和电磁阀 1, 打开压缩机 2 使制冷剂进入储液器中, 当真空度达到要求后关闭入口截止阀 2, 关闭压缩机 2 及冷却水, 拆下气体冷却器, 回收过程结束。

4 实验结果及分析

测得实验结果如表 4、表 5 所示。

表 4 CO₂ 气体冷却器测量记录表Table 4 Measurement record for CO₂ gas cooler

时间/ min	量热器 1			CO ₂ 制冷剂侧				恒温水侧		
	电加热 功率/W	出口压 力/MPa	出口温 度/℃	进口压 力/MPa	进口温 度/℃	出口压 力/MPa	阀前温 度/℃	进水温 度/℃	出水温 度/℃	水流量/ (kg·h ⁻¹)
5	1 321.2	3.537	0.3	11.484	108.9	11.483	35.0	17.9	22.4	663.6
10	1 318.9	3.535	0.4	11.483	108.7	11.482	35.1	18.1	22.7	671.2
15	1 305.6	3.536	0.2	11.486	109.3	11.485	35.1	18.0	22.6	676.0
20	1 311.4	3.534	0.3	11.484	108.8	11.483	35.0	18.2	22.4	662.7
平均	1 314.3	3.536	0.3	11.484	108.9	11.483	35.0	18.1	22.5	668.4

表5 计算结果表
Table 5 Calculation results

时间/ min	第二制冷剂热量器法		水冷气体冷却法	两种测量 方法的偏 差 $\Delta/\%$
	制冷剂质量流量 $q_{mX}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	实验制冷 量 Φ_{aX}/W	实验制冷 量 Φ_{aY}/W	
5	58.7	2 689.8	2 631.3	2.20
10	58.4	2 663.4	2 609.7	2.04
15	59.2	2 697.5	2 648.9	1.82
20	57.9	2 674.1	2 627.3	1.77
平均	58.6	2 681.2	2 629.3	1.95

通过对计算结果的分析,两种测量方法制冷量的平均值分别为2 681.2和2 629.3 W,偏差小于4%,实验台各参数控制合理,满足测试精度。可以认为此实验用的CO₂气体冷却器在这一工况下的实际换热量为2 655.2 W,为两种测量方法测得的算数平均值。对于其他工况和其他性质的实验,都是基于系统正常运行作为前提的,这里不再一一叙述。

5 结语

通过对CO₂气体冷却器实际测试性能需求出发,为企业成功研制了一套全面研究水冷式气体冷却器的实验台,并对其进行了全面的调试,为验证测量可靠性,选取了一款套管式气体冷却器做了性能测试。两种换热量测量方法的实际偏差小于4%,满足企业验收标准,也为其他相关公司的相关研究提供了新的案例,并且能够为国内关于CO₂制冷剂用零部件的研发提供借鉴。

参考文献:

- [1] 李连生. 制冷剂替代技术研究进展及发展趋势[J]. 制冷学报, 2004,32(6):53-58.
- [2] LORENTZEN G. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCF predicament [J]. International journal of refrigeration, 1995, 18(3):190-197.
- [3] NEKSA P, REKSTAD H, ZAKERI G R, et al. CO₂-heat pump water heater: characteristics, system design and experimental results [J]. International journal of refrigeration, 1998, 21(3):172-179.
- [4] YANG Junlan, MA Yitai, LI Minxia, et al. Exergy analysis of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with an expander [J]. Energy, 2005, 30(7):1162-1175.
- [5] YOON S H, KIM J H, HWANG Y W, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics during the in-tube cooling process of carbon dioxide in the supercritical region [J]. International journal of refrigeration, 2003, 26(8):857-864.
- [6] 丁国良, 黄冬平, 张春路, 等. 跨临界二氧化碳汽车空调稳态仿真 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3):272-274.
- [7] 管海清, 马一太, 杨俊兰, 等. 集成管箱型管壳式换热器的设计分析 [J]. 压力容器, 2003, 20(9):17-21.
- [8] 吕静, 徐峰, 王金雨, 等. 二氧化碳套管式气体冷却器换热性能的实验研究 [J]. 制冷学报, 2014, 35(4):67-72.
- [9] 解苗苗, 关欣, 党相兵, 等. CO₂气体冷却器的设计及实验研究 [J]. 化学工程, 2014, 42(11):56-60.
- [10] 俊兰, 马一太, 冯刚, 等. CO₂气体冷却器的性能模拟与优化计算 [J]. 流体机械, 2010, 38(6):62-66.
- [11] 袁秋霞, 马一太, 张子坤, 等. CO₂水源热泵热水机气体冷却器的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(10):1797-1802.
- [12] 刘业凤, 朱洪亮, 张峰, 等. CO₂热泵热水器充注量确定及系统实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(1):49-56.

(上接第24页)

参考文献:

- [1] 杨铜, 郑魁敬. 基于 Windows XP + RTX 的 PC 数控软件关键技术 [J]. 制造技术与机床, 2011(1):61-64.
- [2] KAMALZADEH A, KRKORMAZ K. Accurate tracking controller design for highspeed drives [J]. International journal of machine tools and manufacture, 2007, 47(9):1393-1400.
- [3] OKWUDIRE C, ALTINTAS Y. Minimum tracking error control of flexible ball screw drives using a discrete time sliding mode controller [J]. ASME journal of dynamic systems, measurement, and control, 2009, 131(5):48-56.
- [4] 李雷. 西门子数控机床轮廓误差及参数调整补偿 [J]. 科技创业家, 2013(3):33-36.
- [5] 叶佩青, 赵慎良. 微小直线条的连续插补控制算法研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(15):1354-1356.

- [6] YE Baisheng, ZHANG Liqiang. Research on high-speed linking algorithm of continuous small blocks [J]. Key engineering materials, 2016, 693:1611-1617.
- [7] 叶百胜, 张立强. 小线段 S 型加减速方式高速衔接算法研究 [J]. 轻工机械, 2016, 34(3):34-37.
- [8] HE Jun, YOU Youpeng, CHEN Hao, et al. An interpolator for continuous short-segments based on space arc transition [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2010, 31(5):1086-1092.
- [9] 王宇晗, 肖凌剑, 曾水生, 等. 小线段高速加工速度衔接数学模型 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(6):901-904.
- [10] 陈友东, 王田苗, 魏洪兴, 等. 数控系统的直线和 S 形加减速研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(15):1600-1604.
- [11] 周凯. PC 数控原理、系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.