

文章编号:0253-4339(2013)02-0033-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.033

一种节能型活塞式制冷压缩机耐久实验系统研究

王 枫 米小珍

(大连交通大学现代轨道交通研究院 大连 116028)

摘 要 提出了一种节能型活塞式制冷压缩机耐久实验系统,该系统基于“不完全冷凝,气液混合”原理,将压缩机排气后产生的高温高压工质的一部分冷凝成液体,其余不进行冷凝而直接节流变成气体,然后气、液进行混合形成饱和气体进入压缩机吸气。分析了不完全冷凝条件下,所需冷凝的工质与非冷凝工质的质量流量关系以及冷凝器的换热量,结果表明只需少量工质被冷凝,即可以满足耐久实验工况要求,因此,选用较小功率的冷凝器就可以完成较大功率压缩机耐久性测试。最后,以某型号压缩机对系统进行测试,验证了系统的有效性及其可靠性。该系统结构简单,不仅节约能源消耗,而且可以降低实验系统成本,具有较高的经济性,可推广应用到其它压缩机类产品的耐久实验系统。

关键词 制冷压缩机;耐久实验;活塞式压缩机;可靠性

中图分类号:TH457,TB652

文献标识码:A

Study on an Energy-saving Durability Test System for Reciprocating Refrigeration Compressor

Wang Feng Mi Xiaozhen

(Modern Railway Transportation Research Institute, Dalian Jiaotong University, Dalian, 116028, China)

Abstract This paper proposes an energy-saving system which is used to test the reliability of reciprocating refrigeration compressor. This system is established based on the principle of condensing of the partial refrigerant with high temperature and high pressure. The condensed refrigerant and the uncondensed refrigerant are mixed into a saturated vapor entering the suction of the compressor. The refrigerant mass flow of the condensed and the uncondensed are calculated. The result indicates that only a small fraction of refrigerant is needed to be condensed and the selection of a condenser with small power can satisfy the experiment requirements. The proposed system is built and its availability is testified by carrying out the durability test of a reciprocating compressor, which shows this test system is featured with simple, energy-saving and low cost.

Keywords refrigeration compressor; durability test; reciprocating refrigeration compressor; reliability

产品可靠性是产品研发过程中一个重要考核指标,因此在产品研发的最后阶段,需要通过耐久实验来确定产品各参数的允许极限值与使用规范特性间的关系度,以检验产品设计、制造过程中存在的问题,确定产品的可靠性指标^[1]。对于活塞式制冷压缩机这类产品,其耐久实验目的是在规定的工况下对产品进行测试,获得产品可靠性参数。为了缩短研发周期,压缩机的耐久实验通常选择极限工况进行测试,即压缩机在超过正常负载条件下进行长时间连续运转以及频繁启动/停止运转^[2]。目前对压缩机耐久实验的研究多集中于实验结果的分析,对耐久实验系统的研究还比较少^[3-5]。在耐久实验的恶劣工况下,如果采用常规的性能实验台来进行测试,不仅影响实

验台的性能,而且也大大降低实验台的使用寿命,增加了产品的研发成本。不仅如此,由于耐久实验周期比较长,在此过程中的能源消耗也比较高。如果根据性能测试方法来搭建耐久实验系统^[6],则实验系统结构复杂,实施成本也比较高。因此,针对活塞式制冷压缩机耐久实验的要求及特点,论文提出一种低能耗、结构简单的耐久实验系统,该实验系统经济性好,同时具有较大的能量调节范围。经过测试,能够满足一定功率范围的产品测试要求,为活塞式制冷压缩机耐久实验系统的设计提供了一种可行的参考模式。

1 压缩机耐久实验要求

在压缩机产品研发流程中,通常完成性能测试后

基金项目:国家自然科学基金(51205035)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51205035).)

收稿日期:2012 年 4 月 27 日

才进入耐久实验阶段,经过耐久实验后的样机需要重新进行性能指标测试,并对样机各零部件的磨损进行检测。因此,在耐久实验过程中,对压缩机制冷量、功耗和 COP 不进行监测。

根据国家活塞式制冷压缩机标准要求,耐久实验主要是对压缩机部件机械性损坏和电器部件损坏进行考核,因此通常进行启动/停止实验和极限工况实验^[2],其实验装置简图如图 1 所示。启动/停止实验是通过在极限工况下对压缩机进行频繁的启动/停止运转,即压缩机运转时,当其吸排气压力达到设定的饱和压力值时,压缩机停机;此时均压阀(如图 1 所示)打开,吸气和排气压力进行均衡,当吸排气压力达到均衡时,压缩机又开始运转,重复上述过程启动、停止的过程,完成所规定的启动/停止次数,根据压缩机类型的不同,一般在几万到几十万次。

极限工况实验通常分别选取在最大负载和最大压差工况下对压缩机进行连续运转测试,运转周期一般在几千个小时以上。由耐久实验要求可知,其实验系统主要为压缩机测试提供满足吸排气压力要求的运行环境。

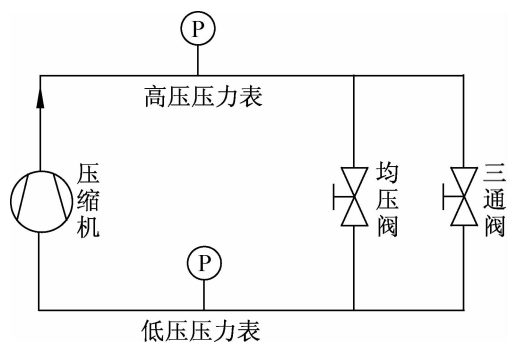


图 1 压缩机开停实验装置简图

Fig. 1 The experiment setup scheme of on-off test for compressor

2 实验系统原理

活塞式制冷压缩机的工作过程压焓图如图 2 所示,常规的制冷工作过程在压焓图上表示为 1-2-3-4-1,即工质经过压缩(1-2)、冷凝(2-3)、节流(3-4)、蒸发(4-1)、再压缩(1-2)这样的循环过程。

遵循 1-2-3-4-1 工作循环,假设被测压缩机的制冷量为 Q_{comp} ,系统无工质泄漏,则通过压缩机的工质的质量流量 $\dot{m}$ 可通过下式获得

$$\dot{m} = \frac{Q_{\text{comp}}}{(h_1 - h_4)} \quad (1)$$

冷凝器的换热负荷 Q_{cond}

$$Q_{\text{cond}} = \dot{m}(h_{2'} - h_4) \quad (2)$$

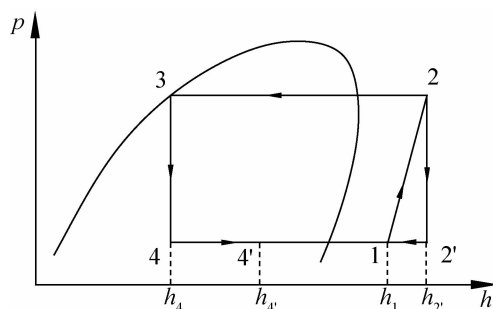


图 2 实验原理压焓图

Fig. 2 The pressure-enthalpy diagrams of test system

蒸发器的换热负荷 Q_{evap}

$$Q_{\text{evap}} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3)$$

由此可知,在常规制冷系统设计中,冷凝装置和蒸发装置的换热能力要与被测样机的制冷能力相匹配。考虑到实验周期和所消耗的能源因素,论文提出如下节能型耐久实验系统:基于压缩机排气后所产生的高温高压工质采用不完全冷凝原理,即,一部分工质经冷凝、节流后变成低温低压的液体,如图 2 中 1-2-3-4 所示;另一部分工质不经过冷凝,直接进行节流变成具有较高温度(此较高温度是相对于通过蒸发器后 4' 处的温度而言)的过饱和气体,如图 2 中 2-2' 所示。调整低温液体工质和高温气体工质的混合比例,使混合后的工质达到实验所要求的吸气饱和压力(如图 2 中 1 处所示),再进入压缩机吸气,便可进行下一个工作循环。

若已知流经压缩机工质的质量流量为 $\dot{m}$, 设需要冷凝为液体工质的质量流量为 $\dot{m}_l$, 不需要冷凝直接进行节流的气态工质质量流量为 $\dot{m}_g$, 则

$$\dot{m} = \dot{m}_l + \dot{m}_g \quad (4)$$

此时冷凝器的换热负荷为 Q'_{cond} , 则

$$Q'_{\text{cond}} = \dot{m}_l(h_{2'} - h_4) \quad (5)$$

由于采用气液混合,冷凝节流后的液体可以不完全蒸发成饱和气体,通过与气体混合后变成饱和气体,因此此时蒸发器的换热负荷 Q'_{evap} 表示为

$$Q'_{\text{evap}} = \dot{m}_l(h_{4'} - h_4) \quad (h_4 < h_{4'} < h_1) \quad (6)$$

由上分析可知,正是这种基于“不完全冷凝,气液混合”原理的实验系统,有效的利用了高温高压工质的能量,由于 $\dot{m}_l < \dot{m}$, 因此 $Q'_{\text{cond}} < Q_{\text{cond}}, Q'_{\text{evap}} < Q_{\text{evap}}$, 使其冷凝器和蒸发器的选用比常规设计方法所需的减小,不仅起到节能的作用,而且降低了实验系统的总成本。

由能量守恒^[7]可知:

$$\dot{m}h_1 = \dot{m}_l h_4 + \dot{m}_g h_{2'} \quad (7)$$

由公式(4)和(7)可以求解出需要冷凝的质量流

量 $\dot{m}_l$ 和需要节流的质量流量为 $\dot{m}_g$ 分别为:

$$\dot{m}_g = \frac{h_1 - h_4}{h_{2'} - h_4} \dot{m} \quad (8)$$

$$\dot{m}_l = \frac{h_{2'} - h_1}{h_{2'} - h_4} \dot{m} \quad (9)$$

从图2可知 $(h_1 - h_4) > (h_{2'} - h_1)$, 因此不需要冷凝的工质 $\dot{m}_g$ 远大于需要冷凝工质 $\dot{m}_l$ (即 $\dot{m}_g > \dot{m}_l$)。这就说明对于一台待测的实验样机而言, 只有很少一部分高温高压工质需要冷凝, 因此, 选用很小功率的冷凝器就可以完成较大功率的压缩机耐久实验测试, 完全可以实现系统节能、低成本的目标。

3 实验系统装置

基于“不完全冷凝, 气液混合”原理的耐久实验台系统原理图如图3所示, 该实验系统包括气体控制

支路、液体控制支路、均压控制支路、喷液支路等。通过控制实验系统中均压控制支路的均压阀和启停控制阀就可以分别完成极限工况连续运转实验和启动/停止运转实验的测试, 即在进行连续运转实验时, 将启停控制阀和均压阀处于截止状态, 当进行启动/停止测试时, 使其处于连通状态。由于耐久实验不需要对压缩机进行制冷量、功耗、COP 的测试, 因此系统中省去了相关检测装置, 使得系统结构更加精简。

系统的液体控制支路(如图3所示)是主要由风冷冷凝器、干燥过滤器、视液镜、液体截止阀、液体控制阀、液体旁通阀、风冷蒸发器组成, 其中液体旁通阀所在的管路是为了提高系统液体流量的调节能力, 如果该支路具有足够的换热能力(比如管路有一定的长度), 还可以省去风冷蒸发器的使用, 使得系统结构更加简单。

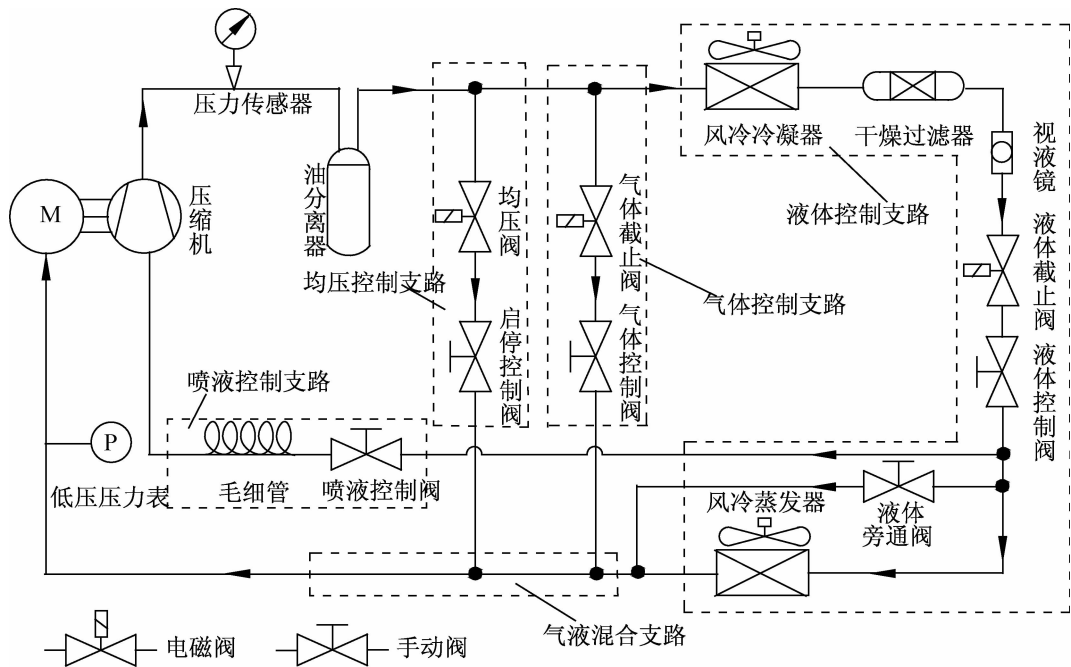


图3 耐久实验台系统原理图

Fig. 3 The principle scheme of the testing system

系统的气体控制支路(如图3所示)主要由气体截止阀、气体控制阀组成。在进行极限工况连续运转测试时, 系统中的均压控制支路还可以调整作为气体控制的旁通, 提高了系统气体流量的调节能力。

该实验系统选用的风冷冷凝器和风冷蒸发器均置于室外, 一方面可以降低实验所需的室内空间要求, 另一方面也可避免当整个系统均处于室内时, 由冷凝器和蒸发器工作时所带来的热量集聚在室内, 导致室温升高, 必须通过额外通风装置才能保持实验环境温度所带来的问题。为了提高系统对室外环境温度变化的适应性, 在压缩机排气处设有压力传感器,

在风冷冷凝器上增设变频风扇, 这样当压力传感器所测得压力值偏离实验要求时, 通过控制冷凝器风扇的转速, 来调节冷凝器的换热效率, 确保系统稳定运转。

为了增强系统安全性, 保护压缩机避免液击, 系统设有气体截止阀和液体截止阀。因为在实验系统停机瞬间, 驻留在管路中的液体有可能进入吸气管内, 再次开机时如果这些液体进入压缩机吸气腔, 则有可能产生液击, 使压缩机受损。实验系统中的截止阀和均压阀均采用电磁式, 即随着系统启/停自动响应, 使得系统可以在停机瞬间快速响应, 提高了系统的可靠性。所有的控制阀均采用手工控制, 其目的—

是使系统的调节更灵活,另一方面降低了系统成本。

当进行极限工况测试时,启停控制阀处于截止状态(根据需要,也可以打开作为气路旁通),气体和液体截止阀打开。经过油分离器后的高温高压的气态工质(即图 2 中 2 处的工质)分别进入系统的气体控制支路和液体控制支路:1)一部分高温高压的气态工质不经过冷凝器,直接进入气体控制支路,经过气体截止阀和气体控制阀后节流变成具有较高温度(此较高温度是相对于通过风冷蒸发器后的温度而言)的过饱和气体(即图 2 中 2-2'所示过程)。2)另一部分高温高压的气态工质进入液体控制支路,经风冷冷凝器冷凝、液体截止阀和液体控制阀后节流变成低温低压的液体(即图 2 中 2-3-4 所示过程)。此时

由气体控制支路产生的过饱和气体和由液体控制支路产生的液体进入气液混合支路,进行混合(即图 2 中 4-1 和 2'-1 所示的过程)。通过调节液体控制阀和气体控制阀分别实现对气体和液体工质流量的控制,使气、液工质混合后达到实验所要求的饱和气体(即图 2 中 1 处的工质),进入压缩机吸气,开始下一个工作循环。当进行最大压差工况的测试时,为了保证在较低蒸发温度的条件下安全运行,需要将压缩机的排气温度控制在合理范围内,系统的喷液控制阀打开,对压缩机吸气进行喷液^[8]。

当进行启动/停止实验时,启停控制阀处于常开状态,均压阀随压缩机的启停自动响应。

被测样机置于室内,环境温度保持在 30 ~ 33℃。

表 1 不同实验方案换热计算参数表
Tab. 1 The data of heat exchange calculation in different testing system

实验方案	冷凝装置			蒸发装置		
	被冷凝的质量 流量/(kg/h)	冷凝器换 热负荷/kW	所选冷凝器 功率/kW	被蒸发的质 量流量/(kg/h)	蒸发器换热 负荷/kW	所选蒸发器 功率/kW
完全冷凝实验方案	2977. 4	149. 58	33	2977. 4	110	33
不完全冷凝实验方案	781. 79	39. 2	8. 82	781. 79	28. 94	8. 82
节能		约 73%			约 73%	

4 系统验证

研究以某型号 30kW 活塞式压缩机为实验样机,以其最大轴工的极限工况进行测试分析。实验条件:压缩机功率 30kW,工质 R22,最大轴工工况(冷凝温度 63℃,蒸发温度 0℃), $h_1 = 418.5\text{kJ/kg}$, $h_2' = 466\text{kJ/kg}$, $h_4 = 285.1\text{kJ/kg}$,此时压缩机的制冷量是 110kW。

由公式(1)可知其质量流量 $\dot{m}$ 为 2977.4kg/h,由公式(9)可知需要冷凝的质量流量 $\dot{m}_l$ 为 781.79kg/h,不需要冷凝直接进行节流的气态工质质量流量为 $\dot{m}_g$ 为 2195.61kg/h,完全冷凝与不完全冷凝实验方案所对应的换热器的换热负荷计算值参见表 1。由此可见,仅大约有 26% 的工质需要进行冷凝,所需的冷凝器为 8.82kW,远小于 100% 工质进行冷凝时选用的 33kW 冷凝器,节约能量高达 73%。在系统初始运行时,分别调整气体和液体控制阀,使系统达到实验所要求的工况,之后由压力传感器根据排气压力的变化自动调整冷凝器风扇转速,使系统处于平稳的运行状态。该实验系统连续运转 1000h 后,系统各部分均处于良好状态,不仅完成了对样机的最大极限工况耐久实验的测试,也验证了系统的有效

性及可靠性。

5 结论

论文提出了一种节能型活塞式制冷压缩机耐久实验系统,该系统基于“不完全冷凝,气液混合”原理,对排气后产生的高温高压工质的一部分进行冷凝节流,从而获得低温低压的液体,另一部分不需要冷凝直接进行节流变成饱和的气体,调整气体和液体的质量流量比例使其混合后满足实验要求的工况。基于此理论,只有较少一部分工质需要进行冷凝,因此选用较小功率的冷凝器和蒸发器即可满足实验要求,不仅降低了实验过程中的能源消耗,也提高了系统的经济性。气体和液体流量的调节支路分别配有旁通支路,提高了系统的调节能力。系统流量调节阀均采用手动调节,既降低了系统成本,又增加了系统调节的灵活性。通过对某型号压缩机最大轴工的极限工况测试,系统的适用性及可靠性得以验证。该系统节约能耗、结构简单、成本低,可以推广应用于其他压缩机的耐久实验测试。

参考文献

[1] 金光熹, 杨绍侃. 压缩机可靠性技术讲座之六-可靠性

- 试验[J]. 流体机械, 1986(3):36-43. (Jin Guangxi, Yang Shaokan. The reliability of compressor[J]. Fluid machinery, 1986(3):36-43.)
- [2] 全国冷冻设备标准化技术委员会. GB/T 10079—2001 活塞式单级制冷压缩机[S]. 北京:中国标准出版社, 2001.
- [3] 李奇, 孙溯焄, 谭跃进. CZS-100/15 型高压空气压缩机可靠性试验研究[J]. 流体机械, 2002, 30(8):4-5. (Li Qi, Sun Suxun, Tan Yuejin. Reliability Test on CZS-100/15 High Pressure Air Compressor[J]. Fluid machinery, 2002, 30(8):4-5.)
- [4] 熊文华, 吴景华. 冰箱压缩机可靠性评价及试验分析[J]. 家电科技, 2005(12):50-53. (Xiong Wenhua, Wu Jinghua. Evaluation and Testing Analysis about Refrigerator Compressor Reliability [J]. China Appliance Technology, 2005(12):50-53.)
- [5] 周德馨, 陶分兴. 研发过程空调压缩机可靠性的评价与验证试验[J]. 家电科技, 2005(3):49-50. (Zhou Dexin, Tao Fenxing. The Evaluating and Validating Tests for Air-conditioner Compressor during Research and Design Process[J]. China Appliance Technology, 2005(3):49-50.)
- [6] 中华人民共和国机械工业部. GB5773—86 容积式制冷压缩机性能试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 1990.
- [7] 吴业正, 韩宝琦. 制冷原理及设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2005.
- [8] 王枫, 郭强, 李连生. 半封闭活塞式制冷压缩机喷液的研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(5):29-33. (Wang Feng, Guo Qiang, Li Liansheng. Study on Liquid Refrigerant Injection of Semi-hermetic Reciprocating Refrigeration Compressor[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(5):29-33.)

作者简介

王枫, 女(1974—), 博士, 高级工程师, 大连交通大学, (0411) 84109806, E-mail: maplekingdl@126.com。研究方向: 制冷压缩机性能提高的研究, 气阀系统优化设计。

About the author

Wang Feng (1974—), female, Ph. D., senior engineer, Dalian Jiaotong University, (0411) 84109806, E-mail: maplekingdl@126.com. Research fields: Research on the performance improvement of refrigeration compressors and the optimization of valve system.