

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.01.008

基于PV图的氦工质有阀线性压缩机实际循环

沙鑫权^{1,2}, 李 瑛¹, 刘少帅², 黄 琦^{2,3}, 丁 磊^{1,2*}, 蒋珍华²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为了探究氦工质有阀线性压缩机实际循环的吸气量,课题组对液氦温区JT制冷用线性压缩机PV图开展研究。采用理论与实验相结合的方法,分析了余隙容积、进排气阀处压力脉动对线性压缩机吸气量的影响;基于实验室现有 \varnothing 18 mm氦工质有阀线性压缩机,搭建有阀线性压缩机性能测试平台,通过进排气阀前的压力传感器获得压缩腔内动态压力变化,结合课题组LVDT活塞位移测试技术,得到实际工作状态下压缩腔内的PV图。与理论分析进行对比,结果表明理论循环与实际循环吸气量差异显著。该研究为氦工质有阀线性压缩机性能的提升提供设计思路。

关 键 词:有阀线性压缩机;PV图;理论循环;实际循环;余隙容积;压力脉动

中图分类号:TB652;TH45 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)01-0041-05

Actual Cycle of Helium Valved Linear Compressor Based on PV Diagram

SHA Xinquan^{1,2}, LI Ying¹, LIU Shaoshuai², HUANG Qi^{2,3}, DING Lei^{1,2*}, JIANG Zhenhua²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The studies on the PV diagram of a linear compressor for JT cryocooler at liquid helium temperature were carried out to analyze the actual cycle inspiratory volume of a helium valved linear compressor (VLC). The influences of pressure fluctuation caused by the suction and the exhaust valves and cylinder clearance volume on the inspiratory volume were analyzed by combining theories and experiments. Based on an existing VLC using ^4He with the piston diameter of 18 mm in our laboratory, a VLC performance test platform was built to obtain the changes of dynamic pressure in the compression chamber through the pressure sensor set before the suction and the exhaust valves. Combined with the LVDT piston displacement test technology, the changes of pressure (P) and volume (V) in the compression chamber were obtained under actual working conditions. Compared with the theoretical analysis, the result show that the inspiratory volume between the theoretical cycle and the actual cycle is significantly different. Furthermore, the study can provide a design idea for the performance improvement of ^4He VLC.

Keywords: VLC (valved linear compressor); PV diagram; theoretical cycle; actual cycle; clearance volume; pressure fluctuation

随着深空探测的需求不断增加,线性压缩机被公认为是空间小型低温制冷机用高效压缩机的一个主要发展方向^[1]。相比传统的往复式压缩机,线性压缩机没有曲柄转动机构,且是无油运行,可以获得更高的运行效率,是深低温节流制冷用压缩机高可靠、轻量化的

最佳选择。空间运用对能耗的苛刻条件,决定了制冷机更高的能耗标准,改进低温制冷用线性压缩机的性能成了研究重点。PV示功图是分析压缩机工作过程的基础,可以获得压缩机的热力学损失和活塞的运动情况,对压缩机运行的准确分析至关重要^{[2][1244]}。PV

收稿日期:2019-09-28;修回日期:2019-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51806231)。

第一作者简介:沙鑫权(1994),男,江苏靖江人,硕士研究生,主要研究方向为有阀线性压缩机。通信作者:丁磊(1990),男,江苏泰兴人,博士研究生,主要研究方向为空间用线性压缩机。E-mail:dinglei900221@126.com

示功图是在给定的运行工况内一个周期的变化情况,反映出压缩机内压力和体积的变化关系,不同压比下,会呈现出不同的变化形式^[3]。目前,国内外专家、学者对制冷压缩机进行了大量的研究,技术上比较成熟。压缩机示功图作为常用的诊断手段,为压缩机的性能评价与改进提供了指导思路。Pichler K 等^[4-5]等利用 PV 图的形状检测技术获得往复式压缩机阀门的泄漏情况,同时使用了对数 PV 图进行分析,减少了负载控制引起的干扰。Wang F 等^[6]提出了一种基于示功图和支持向量机(SVM)的往复式空压机阀门故障诊断方法,并对 5 种不同形态的 PV 图进行了仿真验证。Wang J 等^[7]运用 SVM 的方法将 PV 图标准化处理,与实验获得的 PV 图进行对比,验证了方法的可行性。这些研究方法,从侧面反映了 PV 图对系统检测的重要性,也为分析 PV 图提供了新的方向。相比往复式压缩机,线性压缩机腔内 PV 的变化不易通过直接测量的方式获取。梁坤等^[8-9]通过活塞的动力学方程获得制冷用线性压缩机(采用 R134a 工质)腔内压力的变化,结合测量的位移变化,分析压缩机及整个制冷系统的运行状态。阀是压缩机最重要的部件之一,将阀片的动态变化与线性压缩机腔内 PV 变化同步研究^{[2][1247][10]},能很好地获得两者的耦合关系,对有阀线性压缩机的改进提供了研究思路。

国内外对往复式压缩机 PV 图都有一定的研究,但对线性压缩机 PV 图的研究比较少,特别是针对氨工质有阀线性压缩机 PV 变化的研究寥寥无几。由于氨工质有阀线性压缩机体积小,运行频率高等因素,使得直接测量压缩腔内 PV 变化十分困难。课题组通过在氨工质有阀线性压缩机进出口处与进排气阀之间布置一个动态压力传感器,实时获取压缩腔内压力信号,在压缩机两端布置一组位移传感器,通过计算得到压缩腔内的瞬时体积变化,最终获得氨工质有阀线性压缩机腔内的 PV 变化。课题组通过对实际 PV 示功图的分析,获得与理论循环吸气量的差异,为氨工质有阀线性压缩机后续的改进提供了设计思路。

1 氨工质有阀线性压缩机工作过程

针对氨工质有阀线性压缩机,其纯理论循环与往复式压缩机相同,不包括余隙容积,其工作过程只有吸气、排气和压缩 3 个过程。按照吸气状态,可获得氨工质有阀线性压缩机理论吸气量

$$V_s = V_p = s \cdot \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (1)$$

式中: V_p 为活塞扫气容积; s 为活塞行程; D 为活塞直径。

如果在纯理论循环中考虑余隙容积对吸气量的影响,作如下假设:①压缩过程视为等温过程;②无气体泄漏;③整个吸排气过程不计压力波动。当压缩腔内存在余隙容积 V_0 时,则理论吸气量 $V_s = V_{s1}$, 如图 1 所示。在排气过程中,压缩腔内的气体不能全部排出,因此,在吸气过程中,这部分残留的气体会首先经过一次膨胀过程,减少了气体的吸入量。理想的膨胀过程应满足:

$$P_3 V_0^m = P_4 (V_0 + \Delta V_1)^m \quad (2)$$

$$\text{其中: } \Delta V_1 = V_0 \left[\left(\frac{P_{dis}}{P_{suc}} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \quad (3)$$

则理论吸气量

$$V_s = V_{s1} = V_p - \Delta V_1 \quad (4)$$

式中: P_3 为 3 点的压力值,等于排气压力 P_{dis} ; V_0 为余隙容积; m 为多变膨胀指数; P_4 为 4 点的压力值,等于吸气压力 P_{suc} ; ΔV_1 为余隙膨胀导致的吸入气体减少量; V_{s1} 为考虑余隙的理论吸气量。

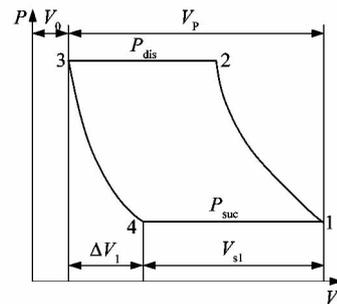


图 1 考虑余隙影响的理论循环
Figure 1 Theoretical cycle of considering clearance volume effect

进排气阀本身是一种阻力元件,对压缩机吸气量有很大的影响。因此,在上述理论循环中,进一步考虑进排气阀的影响,分析在余隙容积、进排气阀压力脉动 2 个因素同时影响的情况下,线性压缩机吸气量的变化情况。由于阀片打开需要克服自身的惯性力及弹簧力,同时气体经过阀门会受到流动阻力的影响,从而导致吸排气过程中会存在压力损失、气流脉动等现象,使得最终吸气量 V_{s2} 相比 V_{s1} 又少了 ΔV_2 , 如图 2 所示。假设:压缩过程视为等温过程,即从 a 点到 1 点,满足理想气体状态方程:

$$(P_{suc} - \Delta P_1)(V_p + V_0) = P_{suc}(V_p + V_0 - \Delta V_2) \quad (5)$$

其中:

$$\Delta V_2 = \frac{(V_p + V_0) \Delta P_1}{P_{suc}} \quad (6)$$

则理论吸气量

$$V_s = V_{s2} = V_p - \Delta V_1 - \Delta V_2 \quad (7)$$

式中: ΔP_1 为存在压力波动时的理论吸气压力与不考虑压力波动时的吸气压力的差值; ΔV_2 为由于气体经过阀门导致的吸入气体减少量; V_{s2} 为考虑余隙、吸排气压力波动的理论吸气量。

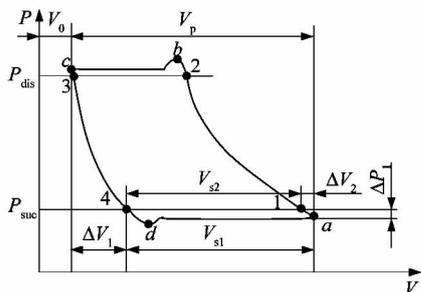


图 2 考虑余隙、吸排气压力波动影响的理论循环

Figure 2 Theoretical cycle of considering clearance volume and pressure fluctuation effects

余隙容积、进排气阀对氨工质有阀线性压缩机的吸气量影响显著。除此以外,吸气过程温度的变化等因素,也会造成吸气量的减少^[11]。

2 实验系统

2.1 氨工质有阀线性压缩机实验台

氨工质有阀线性压缩机,是在线性压缩机外设置一组进、排气阀。通过进排气阀片的作用,使得系统达到一定的压比,满足 JT(Joule-Thomson)节流制冷对压比的需求。为了获得氨工质有阀线性压缩机腔内 PV 的变化,搭建如图 3 所示的实验台。实验采用的氨工质线性压缩机由中国科学院上海技术物理研究所自主研发活塞直径为 18 mm 的动圈式压缩机,行程幅值为 4.5 mm。如图 4 所示的单向阀由进、排气阀组成,阀片采用簧片阀结构。

当活塞往两侧运动时,压缩腔内压力下降,在压差的作用下,吸气阀片打开,此时排气阀片是关闭的;在进入压缩过程,活塞往中间运动,当达到排气压力时,排气阀片打开,如此往复运动。

整个实验系统的流程结构框图如图 5 所示。压力信号、位移信号均通过多通道板卡采集,并同步到微机系统实时显示。通过对传感器的标定,可以在微机系统上反映真实的动态压力和实际位移变化量。

2.2 测量仪器的选择与布置

由于氨工质有阀线性压缩机本身体积小,腔内容积有限,很难直接在压缩腔内测量压力的变化。因此

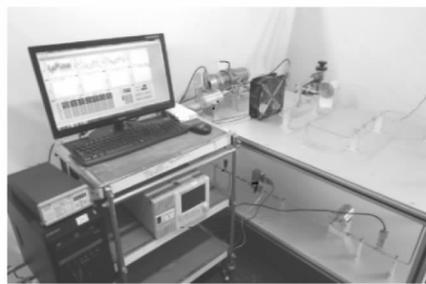
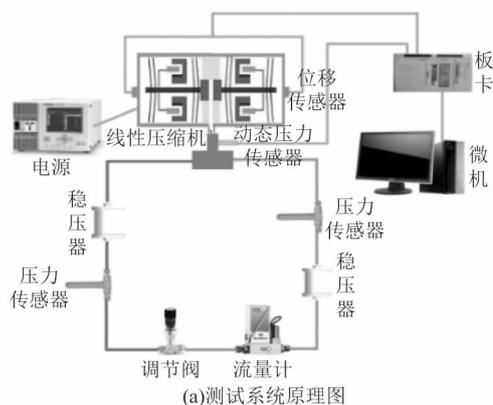


图 3 有阀线性压缩机 PV 测试系统
Figure 3 PV test system of VLC

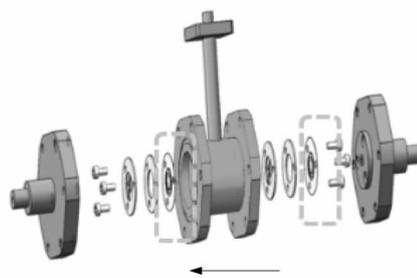


图 4 单向阀结构
Figure 4 Structure of check valve

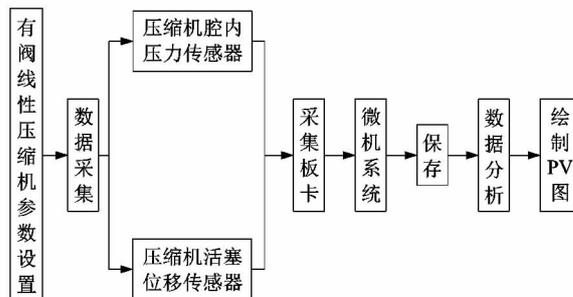


图 5 实验系统流程
Figure 5 Flow chart of experimental system

在实验中,将动态压力传感器安装在线性压缩机进出口处,尽可能地减少余隙容积。由于压缩腔内压力一直处于动态变化的过程中,故课题组采用恩德福克公

司生产的动态压力传感器,量程为0~3 447.5 kPa,精度等级为0.2%。测试传感器安装位置如图6所示。

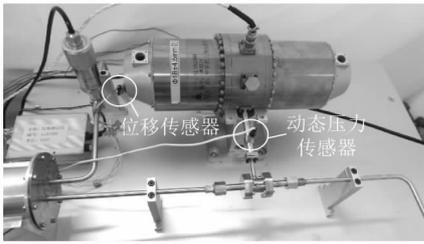


图6 测试传感器安装位置

Figure 6 Instrument installation location

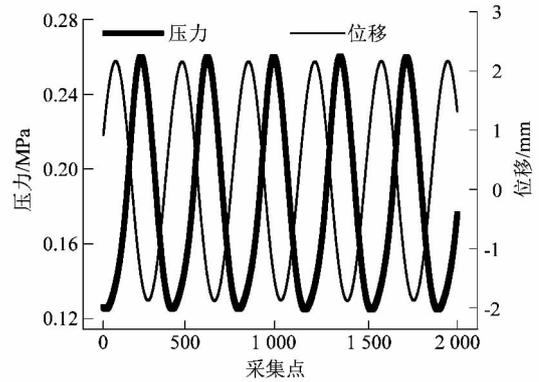
PV图的采集不仅需要实时采集压缩腔内的压力信号,而且需要对不同时刻下压缩腔内变化的容积进行测量。实验系统采用中国科学院上海技术物理研究所自主研发的位移传感器,将位移传感器线圈分别安装在氨工质有阀线性压缩机机壳两侧,并用橡皮圈固定。压缩腔内的容积通过活塞扫气量进行计算,余隙容积由实际测量获得。

3 实际循环

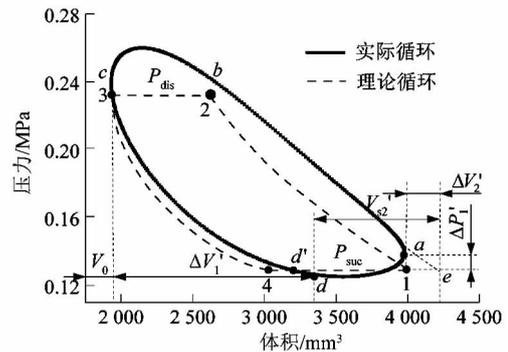
3.1 实验结果

课题组针对氨工质有阀线性压缩机,进行了扫气量的研究。线性压缩机的运行频率为40 Hz,在活塞行程为4 mm,平衡位置为0 mm时,系统以15 kHz的采集频率对信号进行数据采集,获得氨工质有阀线性压缩机腔内压力变化与活塞位移变化之间的关系图,如图7(a)所示;从采集的数据中,选取一个往复周期内的压力、位移数据,并绘制如图7(b)所示的实际循环PV图,理论循环图由计算获得。

在纯理论循环中,线性压缩机内并不存在余隙容积,但是在实际运行过程中,氨工质有阀线性压缩机内部必定会存在一定的余隙容积,以解决运动部件的磨损、部分零部件的热膨胀等问题;同时,在线性压缩机的装配过程中,也需要一定的余隙容积满足工艺需要。从图7(b)中可以看出,氨工质有阀线性压缩机实际工作过程由压缩、排气、膨胀和吸气4个过程组成。从排气压力线起点上方一状态点开始,排气阀片打开,线性压缩机腔内压力持续上升,直到阀片完全打开,此时压力达到最高点,约0.26 MPa;腔内压力接着出现下降的过程,在到达排气压力线终点前,排气阀关闭。由于余隙容积的存在,残留的氨工质气体进入膨胀过程,活塞往背压腔运动,线性压缩机腔内气体压力下降,体积增大。当运行到吸气压力下方时,膨胀过程结束,吸气阀片打开,随着吸气体积的增大,吸气阀片升程增大,



(a)压力和位移的变化情况



(b)实际循环PV图

图7 压缩机实际工作循环图

Figure 7 Actual working cycle of VLC

线性压缩机腔内气体压降变缓,达到最低压力,约0.125 MPa。从a点开始,吸气阀关闭,循环进入压缩过程。

当考虑余隙时,理论循环中吸气阀在4点打开,开始进气;实际上,余隙容积 V_0 内的氨工质气体会首先膨胀至 d' 点,由于弹簧力的作用,氨工质气体会继续膨胀至 d 点,使得实际吸气量减少 $\Delta V'_1$ 。由于温度的不稳定性及压力的变化,导致等温膨胀系数很难确定。按3点的等温膨胀系数,取吸排气压力 P_s 和 P_d ,由公式(3)计算近似余隙膨胀容积有:

$$\Delta V'_1 = V_0 \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] = 1\ 589.78\ \text{mm}^3。$$

理论循环中,吸气阀在1点关闭。实际循环中,由于在吸气管路中发生较强烈的压力脉动,PV图中出现一段体积增大,压力增大的过程。吸气阀在a点才关闭,此时进气量损失 $\Delta V'_2$ 为负值,吸气容积增大,实际进气体积为 V'_{s2} 。由理论模型计算增加的进气体积有(e点为b-a延长线与4-1延长线的交点):

$$|\Delta V'_2| = \frac{(V_p + V_0)(\Delta P'_1 + P_{suc})}{P_{suc}} - (V_p + V_0) = 301.5\ \text{mm}^3。$$

则线性压缩机实际进气量

$$V'_s = V'_{s2} = V_p - \Delta V'_1 + |\Delta V'_2| = 749.47 \text{ mm}^3。$$

3.2 差异分析

由于氨工质物理性质的特殊性以及采用的单向阀的结构形式,使实际循环的示功图呈现如图 7(b)所示的形状,与理论循环存在差异。从图 7(b)中可以看出,吸气过程比排气过程更长,这是因为氨工质密度的不同,导致吸气过程的体积流量比排气过程的体积流量更大。在膨胀过程中,压缩腔内的压力下降得比理论过程来得慢,因为在实际循环中,可能存在排气阀泄漏,排出的高压气体会通过排气阀回流到线性压缩机的工作腔体内。对比 2 个循环的压缩过程,出现较大偏差,可能是因为产生的压缩热没有及时被耗散,即采用的风冷冷却方式效果不明显。

课题组主要研究余隙容积及阀门压力波动对氨工质有阀线性压缩机吸气量的影响。评判理论循环吸气量 V_s 与实际循环吸气量 V_a 的差异,通常使用进气系数 λ_s 表示,即

$$\lambda_s = \frac{V_a}{V_s} = 86.83\%。 \quad (8)$$

相比于往复式压缩机,氨工质有阀线性压缩机的进气系数会比较低,主要的影响因素是余隙系数 λ_v 与压力系数 λ_p 。温度系数 λ_T 同样会影响吸气量,相对来说对吸气量的影响较小。且有

$$\lambda_s = \lambda_v \lambda_p \lambda_T。 \quad (9)$$

针对余隙容积及阀门压力波动的影响,后续将对阀门内置及改进阀门形式进行研究,同时考虑温度的影响,以提高压缩机性能,降低压缩机能耗。

4 结语

氨工质有阀线性压缩机已经成为空间 JT 制冷用压缩机的发展趋势。PV 图对线性压缩机的运行状态研究和性能改进具有一定的指导意义。课题组针对现有氨工质有阀线性压缩机吸气量进行了相关研究,主要分析余隙容积、阀门压力脉动对线性压缩机吸气量的影响,理论循环与实际循环的差异,为氨工质有阀线

性压缩机提供了改进思路。

参考文献:

- [1] 张立钦,邹慧明,徐洪波,等. 小型制冷装置用线性压缩机的研究及应用[J]. 压缩机技术,2008(5):1.
- [2] 甘宏伟,金华强,顾江萍,等. P-V 图和阀片运动图在冰箱压缩机性能评价中的应用[J]. 中国机械工程,2019,30(10):1244 - 1249.
- [3] LIANG Kun. Analysis of oil-free linear compressor operated at high pressure ratios for household refrigeration[J]. Energy,2018,151:324 - 331.
- [4] PICHLER K, LUGHOFFER E, PICHLER M, et al. Detecting cracks in reciprocating compressor valves using pattern recognition in the pV diagram[J]. Pattern Analysis and Applications,2015,18(2):461 - 472.
- [5] PICHLER K, LUGHOFFER E, PICHLER M, et al. Detecting broken reciprocating compressor valves in the PV diagram[C]//2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong, NSW, Australia; IEEE, 2013: 1625 - 1630.
- [6] WANG Fengtao, SONG Lutao, ZHANG Liang, et al. Fault diagnosis for reciprocating air compressor valve using pV indicator diagram and SVM [C]//2010 Third International Symposium on Information Science and Engineering. Shanghai; IEEE,2010: 255 - 258.
- [7] WANG Jindong, GAO Yiqi, ZHAO Haiyang, et al. Sectional normalization and recognition on the PV-diagram of reciprocating compressor[J]. Journal of Measurements in Engineering, 2015, 3(2):35 - 41.
- [8] LIANG Kun, STONE R, DADD M, et al. A novel linear electromagnetic-drive oil-free refrigeration compressor using R134a [J]. International Journal of Refrigeration,2014,40:450 - 459.
- [9] LIANG Kun, STONE R, HANCOCK W, et al. Comparison between a crank-drive reciprocating compressor and a novel oil-free linear compressor[J]. International Journal of Refrigeration,2014,45:25 - 34.
- [10] REAL M A, PEREIRA E A G. Using PV diagram synchronized with the valve functioning to increase the efficiency on the reciprocating hermetic compressors [C]//2010 International Compressor Engineering Conference. Purdue; Purdue University,2010:1 - 8.
- [11] 林梅. 活塞式压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,1987:46 - 52.