

# 部分负荷工况下螺杆制冷压缩机特性试验研究

吴华根 彭学院 邢子文 束鹏程  
(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

**摘要:** 研究了采用不同工质时螺杆制冷压缩机在部分负荷工况下的性能特性。通过录取半封闭螺杆压缩机工作过程指示图( $p$ - $V$ 图), 获得了部分负荷下螺杆制冷压缩机的效率及其变化规律, 并根据部分负荷下压缩机内容积比的变化, 对这种变化规律进行了解释。随后对螺杆压缩机采用 R22、R134a、R404A、R407C 四种不同工质时, 在部分负荷工况下的性能变化规律进行了分析比较。研究表明: 随着负荷的降低, 压缩机的绝热效率和绝热指示效率都会有明显的下降, 但机组系统的性能系数  $P_{CO}$  会有明显的上升; 使用 R22 工质时机组的使用部分负荷值  $V_{APL}$  为最佳。

**关键词:** 部分负荷 螺杆制冷压缩机 性能特性  $p$ - $V$ 图 工质

**中图分类号:** TH455

## 0 前言

螺杆制冷压缩机广泛地应用于民用和商用楼房的中央空调系统、工业制冷、食品冷冻、冷藏以及交通工具制冷领域, 其应用正在逐步扩大, 具有很大的发展潜力。

螺杆制冷压缩机, 主要采用 R22 和 R717 作为制冷工质, 但是随着对环境保护方面的要求提高, R22 工质的使用逐渐被限制, 因此很多厂商都在寻找 R22 的替代工质。近期螺杆制冷压缩机中逐渐采用 R134a、R404A 以及 R407C 等工质作为替代 R22。不同的制冷工质有其各自的性能特性, 它们对螺杆制冷压缩机的性能也造成了较大的影响。

螺杆制冷压缩机作为制冷装置的核心部件, 对其性能研究已经相当深入<sup>[1~5]</sup>, 但是在部分负荷工况下, 特别是使用新的制冷工质时, 压缩机性能特性研究还不是很完善。压缩机性能特性的研究方法主要有理论研究和试验研究两种, 理论研究主要建立分析模型<sup>[3]</sup>, 但仍需要试验来验证。试验研究主要是通过测取压缩机的宏观性能及表示微观热力学过程的  $p$ - $V$  指示图进行研究<sup>[6]</sup>。在试验的基础上, 依靠实测的压缩机工作过程指示图, 系统研究了分别采用 R22、R134a、R404A 和 R407C 制冷工质时, 螺杆制冷压缩机在部分负荷工况下的性能特性, 并对机组系统采用这几种工质时的使用部分负荷值  $V_{APL}$  进行了分析, 同时研究了压缩机内容积比在负荷不同时的变化情况, 为螺杆制冷压缩机的合理设计以及使用, 提供了可靠

的试验数据。

## 1 试验装置及测试系统

试验所用的制冷装置为冷、热两用的螺杆式风冷热泵机组, 如图 1 所示, 其名义制冷量为 145 kW。机组系统中压缩机为一台双螺杆制冷压缩机, 设计转速为 2 950 r/min, 理论容积流量为 3.5 m<sup>3</sup>/min, 内容积比为 3.15, 阴、阳转子齿数分别为 6 齿和 5 齿, 直径为 109.8 mm 和 138.5 mm, 扭转角为 250° 和 300°。



图1 螺杆式风冷热泵冷热水机组

试验中, 录取螺杆制冷压缩机工作过程指示图的测试系统如图 2 所示。依靠安装在排气端阴转子齿槽根部的一个微型压力传感器, 测试了压缩机一个工作过程中从吸气中段到排气结束的压力变化过程, 得到  $p$ - $t$  图, 并通过几何关系  $\theta = \omega t$  和  $V = V(\theta)$  转换为  $p$ - $V$  图<sup>[5,6]</sup>。

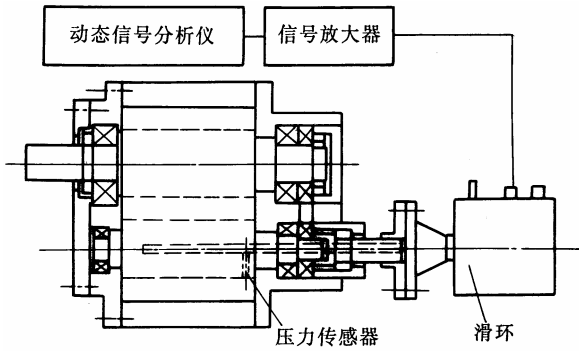


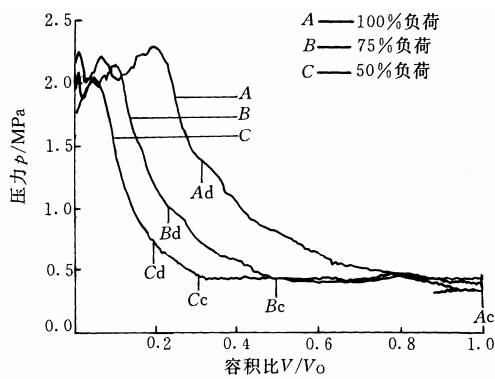
图2 指示图测试系统

## 2 试验结果及分析

为了研究螺杆制冷压缩机中采用 R22、R134a、R404A 和 R407C 等四种典型工质时的性能特性，特别是部分负荷时性能变化规律，试验对各种工质在 100% 负荷、75% 负荷和 50% 负荷下的机组热力性能进行了测试，并对压缩机  $p$ - $V$  图进行了录取及分析。

### 2.1 部分负荷下指示图分析

图 3 示出了在不同的负荷工况下，螺杆制冷压缩机在采用 R22 作为制冷工质时，基元容积内压力的变化情况，即  $p$ - $V$  指示图。

图3 部分负荷下  $p$ - $V$  指示图

下标 c 表示压缩开始点 下标 d 表示排气开始点

由图 3 可以看出，在部分负荷工况下，压缩过程的开始点延迟，这主要是由于滑阀移动后导致压缩腔与吸气腔联通，在压缩过程的开始之前，压缩腔内部分气体被压入吸气通道，使得压缩腔内气体压力无法上升。当压缩腔与滑阀组成封闭容积时，压缩腔内气体才进入正常的压缩，压力明显上升，此时压缩过程开始。从图 3 中可以看出，在部分负荷工况下，当吸气过程完成后，工作腔内压力还是有小幅度的上升，这是由于压缩机的固定滑阀块过长，导致腔内气体先有短过程的压缩，使得压力有了轻微上升，随后由于工作腔与吸气通道联通，使得压力又有了下降，恢复成吸气压力状态。从图中

也可以看出，当压缩腔与排气孔口联通后，压缩腔内气体有了陡然上升，这是由于排气腔内高压气体回灌入压缩腔造成压力的陡升。这种内压力比小于外压力比的结果，随负荷降低内容积比  $V_i$  变的更小，压缩机等容压缩更加严重。

另外，随着负荷的降低，压缩机排气压力有了下降，这是由于在部分负荷工况下系统流动阻力下降。但是压缩机吸气压力会有所上升，这主要是制冷系统的流动阻力减少了，导致压降降低，吸气压力有所上升。

图 4 给出了内容积比随着滑阀位移(负荷)变化关系。图 4 中尖点  $D$  为径向排气孔口与轴向排气孔口位置的重合点。从图 4 中看出，部分负荷下的内容积比要小于满负荷时的内容积比。当负荷开始降低或者说滑阀开始移动时，压缩机的内容积比值先会上升，当径向排气孔口与轴向排气孔口重合后，内容积比才会再逐渐下降，直至内容积比数值为 1。由图 3 和图 4 中都可以看出，随着负荷降低，压缩机径向排气孔口后移，直至与轴向排气孔口重合，此后压缩机排气过程的开始点都取决于轴向排气孔口位置，而不是径向排气孔口位置。从图 4 中看出，在 75% 负荷时，径向排气孔口还是控制着排气开始，而在 50% 负荷时，由于滑阀径向排气孔口已不起作用，而轴向排气孔口控制排气开始。

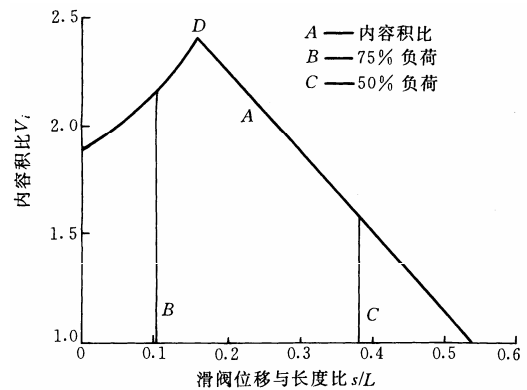


图4 内容积比随滑阀位移(负荷)变化图

$s$ ——滑阀位移量  $L$ ——滑阀长度

从图 3 看出，压力曲线所围成的表示压缩机指示功率的面积随着负荷降低也逐渐减少，通过对其进行积分，可以得到压缩机的指示功率。通过实测的电动机功率，得到压缩机轴功率以及理论的压缩机绝热功率，进一步得到表示压缩机内部工作过程完善程度的绝热指示效率，以及表示压缩机能量利用完善程度的绝热效率。以 R22 为工质时部分负荷下压缩机功率、效率分别如图 5、图 6 所示。

从图 6 可以看出，随着压缩机负荷的降低，螺杆制冷压缩机的绝热效率和绝热指示效率有了明显

的下降，这主要是在部分负荷工况下，压缩机的内、外压力比的不等，因等容压缩造成的功耗损失增加，从而导致了压缩机的效率下降。

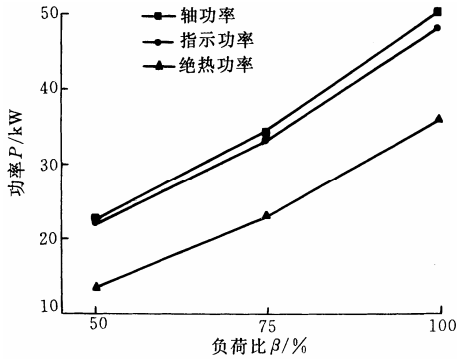


图 5 部分负荷下压缩机功率

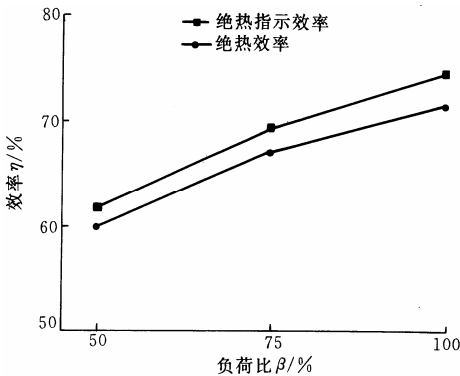


图 6 部分负荷下压缩机效率

### 2.2 部分负荷下机组系统宏观性能分析

从上面对螺杆制冷压缩机的工作过程的微观热力学性能分析得知，在 75% 和 50% 负荷工况下，压缩机的绝热效率以及绝热指示效率都有所下降。但机组的宏观性能测试结果发现，在部分负荷工况下，机组系统的性能系数  $P_{CO}$  却得到了较大的提高，如图 7 所示。这主要是因为相对于满负荷工况，部分负荷工况时，机组系统的质量流量减少，系统联接管道及换热器内的流动阻力减少，使得制冷量的下降速度要低于压缩机功率的下降速度，从而导致了机组系统性能系数  $P_{CO}$  的上升。以机组采用 R22 工质为例，从图 8 可知，相对于 100% 负荷，75% 负荷下压缩机功率下降为 32.10%，50% 负荷下压缩机功率下降为 54.61%；从图 9 可知，相对于 100% 负荷，75% 负荷下压缩机制冷量下降为 25.74%，50% 负荷下压缩机制冷量下降为 40.52%。

从图 7 可以看出，在使用其他三种制冷工质时，机组系统性能系数  $P_{CO}$  随着负荷的降低都有较明显的升高。其中，R134a 工质可以带给机组较高的性能系数  $P_{CO}$ ，R407C 次之，R404A 则为最差。由图 8 可以看出，R404A 和 R407C 工质相对于 R22 工质给压缩机带来了更大的功率消耗，而 R134a 工质给

压缩机带来的功耗要小的多。由图 9 可知，不同的制冷工质在不同负荷下对于机组的制冷量影响是比较明显的，其中以 R134a 的使用引起了制冷量的大幅下降，R404A 工质次之，而 R407C 工质与 R22 工质的制冷量最为接近。从以上的分析可知对于已有的制冷装置来说，R407C 将会是 R22 的最佳替代工质。

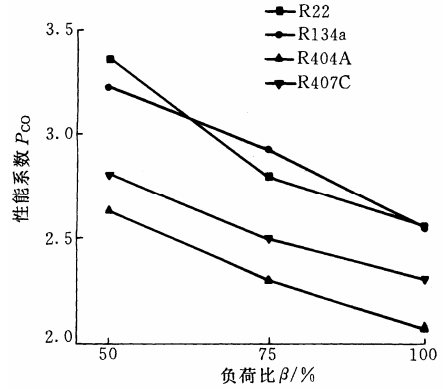


图 7 不同工质不同负荷时  $P_{CO}$  测试结果

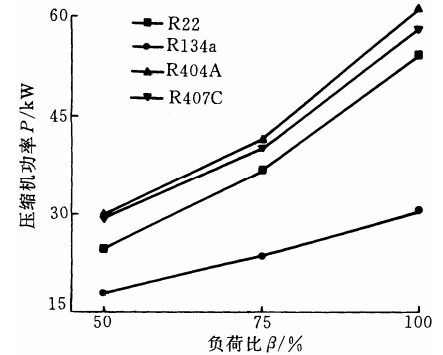


图 8 不同工质不同负荷时压缩机功率测试结果

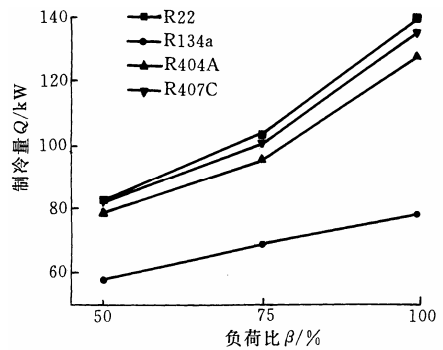


图 9 不同工质不同负荷时机组制冷量测试结果

### 2.3 使用部分负荷值的分析

通过以上的分析得知，压缩机在部分负荷下运行虽然压缩机的效率降低，但是机组系统性能系数  $P_{CO}$  提高。下面将进一步分析机组系统的部分负荷性能参数——使用部分负荷值  $V_{APL}$ 。

根据 ARI550-1992 标准给出的部分负荷值  $V_{APL}$  计算公式<sup>[7]</sup>

$$V_{APL} = 0.17A + 0.39B + 0.33C + 0.11D$$

- 式中 A——100%负荷工况点时的  $P_{CO}$   
 B——75%负荷工况点时的  $P_{CO}$   
 C——50%负荷工况点时的  $P_{CO}$   
 D——25%负荷工况点时的  $P_{CO}$

图 10 给出了螺杆制冷压缩机在采用 R22、R134a、R404A 和 R407C 工质时, 机组系统的使用部分负荷值  $V_{APL}$  及其与 100% 负荷时性能系数  $P_{CO}$  的比较。从该图中可以看出, 机组系统的部分负荷性能要比满负荷性能要高。另外, 不同的工质对于机组系统的使用部分负荷值的影响是不同的, 其中采用 R22 时机组系统的使用部分负荷值最高, R134a 次之, R404A 最差。

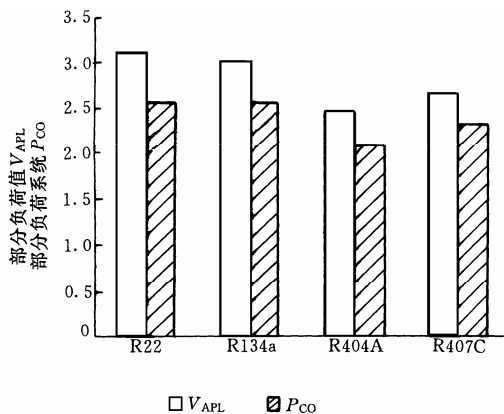


图 10 不同工质时  $V_{APL}$  与  $P_{CO}$ (100% 负荷) 比较

### 3 结论

通过成功录取螺杆制冷压缩机部分负荷工况下的  $p$ - $V$  图, 分析了部分负荷下的压缩机的效率, 发现在部分负荷工况下, 螺杆压缩机的绝热效率、绝热指示效率会有所降低, 但机组系统性能系数  $P_{CO}$  更会有大幅提高, 而且随着负荷的降低, 压缩机内容积比上升, 直到径向滑阀排气孔口位置与轴向排气孔口位置重合, 随后, 内容积比又开始下降, 到降为 1 为止, 但是部分负荷下的内容积比都小于满负荷下的值。同时分析了不同工质在部分负荷工况下对螺杆压缩机的性能影响, 研究表明: 螺杆制冷压缩机在使用任何一种工质时, 机组的部分负荷性能都要比满负荷的要优越, 其中以使用 R22 时机组系统的使用部分负荷值  $V_{APL}$  为最佳。

### 参 考 文 献

- Tang Y, Fleming J S. Obtaining the optimum geometrical parameters of a refrigeration helical screw compressor. In: 11th International Compressor Engineering Conference at Purdue University, Lafayette, Indiana, USA, 1992: 221~227
- Miyoshi K. Analysis of screw compressor performance based on indicated diagrams. In: 11th International Compressor Engineering Conference at Purdue University, Lafayette, Indiana, USA, 1992: 259~268
- Fleming J S, Tang Y, Cook G. Twin helical screw compressor. Part 2: a mathematical model of the working process. Journal of Mechanical Engineering Science, 1998, 212(A5): 369~380
- 邢子文, 彭学院, 束鹏程. 螺杆压缩机设计计算软件的研究与开发. 西安交通大学学报, 1999, 33(11): 31~34
- 邢子文. 螺杆压缩机—理论、设计及应用. 北京: 机械工业出版社, 2000
- Peng X, Xing Z, Cui T, et al. Analysis of the working process in an oil-flooded screw compressor by means of an indicator diagram. Journal of Power and Energy, 2002, 216(A6): 465~470
- 中国制冷空调工业协会等. 美国空调与制冷学会标准. 北京: 机械工业出版社, 2000

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF SCREW REFRIGERATION COMPRESSOR UNDER PART LOAD CONDITIONS

Wu Huagen Peng Xueyuan Xing Ziwen  
 Shu Pengcheng

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

**Abstract:** The performance characteristics of twin-screw refrigeration compressor using various refrigerants under part load conditions are investigated by experimental research. At first, based on the recorded  $p$ - $V$  indicator diagrams, the various efficiencies of twin-screw refrigeration compressor under part load conditions are analyzed. Then, the effects of four kinds of refrigerant, R22, R134a, R404A and R407C, on compressor performance are presented. As the compressor load falls down, it is shown that the built-in volume ratio is decreased compared to that under full load condition and hence the adiabatic efficiency and adiabatic indicated efficiency of compressor are decreased. However, the  $P_{CO}$  coefficient of performance  $P_{CO}$  of refrigeration system is improved. By comparing the application part load values  $V_{APL}$  of system, R22 is found to be the best refrigerant with regard to part load operations among the four refrigerants.

**Key words:** Part load Screw refrigeration compressor  
 Performance characteristics  
 $p$ - $V$  indicator diagram Refrigerant

作者简介: 吴华根, 男, 1977 年出生, 博士研究生。主要研究方向为双螺杆压缩机性能研究。

E-mail: hgwu@mail.xjtu.edu.cn