

冰箱压缩机P-V图测试方法及应用研究

张书宁 赵文钊 程中甫
(广东珠海格力电器股份有限公司 广东珠海 519070)

摘要: 随着冰箱节能要求的不断提升,冰箱厂家对于压缩机能效有了更高的要求。压缩机厂家不断优化自身设计,以配合市场需求。P-V图是评价压缩机能耗分布,查找压缩机优化方向的重要方式之一。本文主要讲述冰箱压缩机P-V图测试方法及其在压缩机优化中的应用。

关键词: 冰箱压缩机; P-V图; 指示效率

The testing method and application of P-V diagram on the refrigerator compressor

ZHANG Shuning ZHAO Wenzhao CHENG Zhongfu
(Gree Electric Appliances Inc. of Zhuhai Zhuhai 519070)

Abstract: In answer to energy-saving requirements, refrigerator compressor manufacturers are in great need of improving efficiency of compressor. Compressor manufacturers keep optimizing the compressor in order to meet the market. P-V diagram is one of important ways to optimize the efficiency of compressor and analysis the distribution of the energy consumption of the compressor. This page is mainly about the testing method and application of P-V diagram on the refrigerator compressor.

Keywords: Refrigerator compressor; P-V (Pressure-Volume) diagram; Compressor indicated power

1 压缩机功耗情况概述

压缩机气缸内进行的实际过程是相当复杂的,目前通常使用压缩机P-V图来研究整个循环过程和各个工作过程的做功情况。压缩机P-V图是由压缩机气缸内部气体压力和气缸内部容积绘制而成。P-V图是评价压缩机能耗分布,查找压缩机优化方向的重要方式之一。

1.1 压缩机运行功耗分布

压缩机运行功耗包括以下几项,见图1所示。

1.2 压缩机理论循环和实际循环P-V图对比

压缩机理论循环P-V图和压缩机实际循环P-V图如图2所示,其中a-b-c-d为压缩机理论循环P-V图,1-2-3-4为压缩机实际循环P-V图。

压缩机的理论循环包括进气过程d-a线,压缩过程a-b线,排气过程b-c线。吸气,压缩、排气为一个循环,曲轴旋转一周,完成一个理论压缩循环。理论压缩的假设为:

(1) 气缸内气体全部排出。

(2) 进气、排气过程中,压力温度都不变。

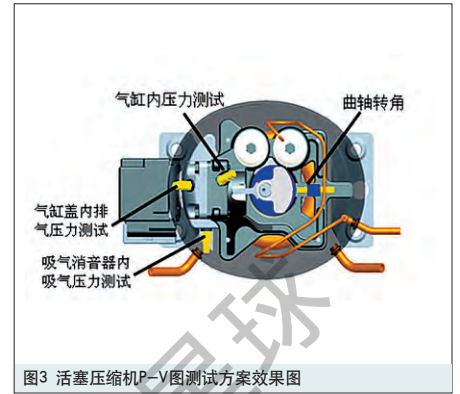
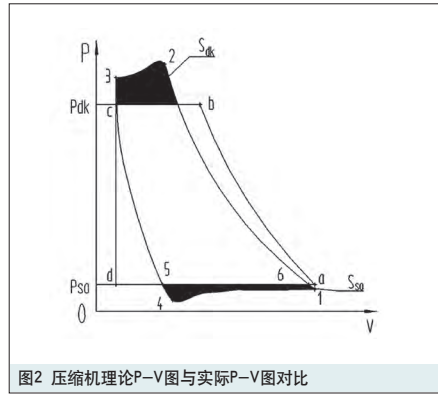
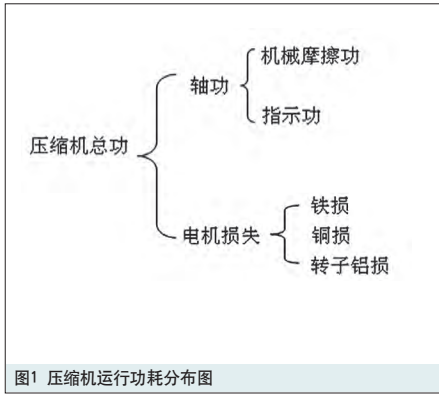
(3) 压缩过程指数一定。

(4) 气缸无泄漏。

理论循环指示功为a-b-c-d围成面积 S_{th} 。

压缩机的实际循环工作过程包括吸气过程4-1、压缩过程1-2、排气过程2-3、膨胀过程3-4共四个阶段。

吸气过程4-1,吸入的气体一方面因流动阻力而降低压力,另一方面与所接触的壁面以及余



隙容积中的气体进行热交换，使吸气终止时缸内气体压力与1点吸气腔的压力接近或相同。

压缩过程1-2，在压缩过程中气体与气缸壁面换热，在压缩过程的前期气体温度低于壁面温度，气体吸热，在压缩过程的后期气体温度高于壁面温度，气体放热，当压力达到 P_{dk} 时由于排气阀片的弹簧力作用并不马上开始排气，而是继续压缩到2点才开始排气。

排气过程2-3，在排气过程中，由于气体要克服流动阻力，因此排气终了3点的压力要高于排气腔c点的压力。

膨胀过程3-4，在排气终了时，由于余隙容积的存在，一部分高压气体仍然留在气缸内，当活塞向回运动时吸气阀并不打开，余隙气体由于容积的增加开始膨胀，并且与气缸壁面开始换热，压力逐渐降低，一直降低到5点，由于吸气阀片的弹簧力作用，气缸内气体压力继续降低到4点，膨胀过程才结束，吸气过程开始。

实际循环指示功为1-2-3-4围成的面积 S_i 。

1.3 压缩机各功耗计算

压缩机内部功耗关系如下，其中 P_{ei} 由压缩机性能测试台测得， η_{mo} 由电机性能实验台测得，其余各功率和效率均由以下公式计算得出。

$$P_{ei} = P_{ds} + P_e$$

$$P_e = P_m + P_i$$

$$P_i = S_i \times f$$

$$P_{th} = S_{th} \times f$$

$$\eta = \eta_{mo} \eta_m \eta_i \eta_v$$

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_e}$$

$$\eta_i = \frac{P_{th}}{P_i} = \eta_v \eta_i$$

$$\eta_i = \frac{S_{th}}{S_i}$$

$$\eta_v = \frac{m_c}{m_{th}}$$

式中：

P_{ei} ——压缩机总功耗；

P_{ds} ——电机损耗；

P_e ——压缩机轴功；

P_m ——压缩机机械损失；

P_i ——压缩机实际循环功耗；

P_{th} ——压缩机理论循环功耗；

m_c ——压缩机实测质量流量；

m_{th} ——压缩机理论质量流量；

η ——压缩机总效率；

η_{mo} ——电机效率；

η_m ——机械效率；

η_i ——压缩机指示效率；

η_v ——压缩机容积效率；

η_t ——图示效率；

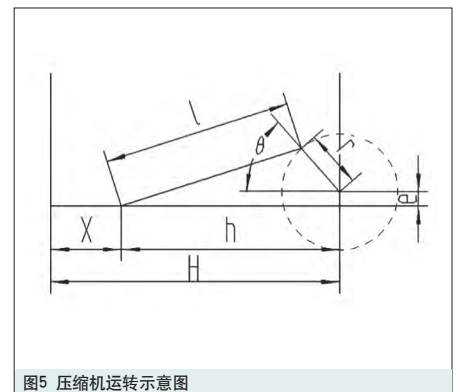
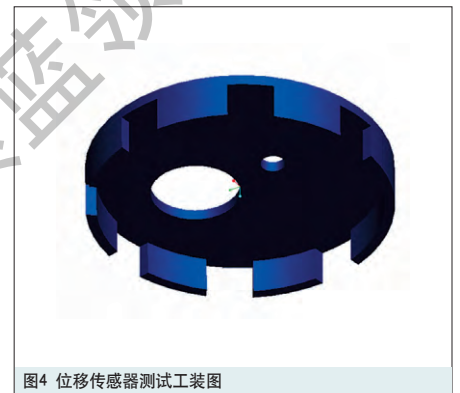
f ——压缩机运行频率；

S_{dk} ——压缩机排气损失功耗；

S_{so} ——压缩机吸气损失功耗。

2 P-V图测试方法

为测得压缩机P-V图，在气缸内部布置静态压力传感器，测试气缸内部压力，在曲轴上固定位移测试工装，位移传感器对准位移测试工装，记录曲轴转角，计算出气缸内容积。传感器



经BNC接头使压缩机内外电路联接，使得压力传感器信号可以传输到压缩机外部，再经过电荷放大器转换后，接入数据采集卡的模拟信号输入端，通过测量软件LABVIEW实现数据的测量、显示和存贮，取得的数据经过分析处理形成P-V图。

2.1 压力测试方法

气缸座压缩腔内压力测试方法是将压力传感器探头连接在气缸座顶部螺纹孔中，监测活塞

起止点位置气体压力(如图3),传感器密封垫圈起密封作用。在气缸座缸头表面贴热电偶,用于修正温度对传感器的影响。

在此试验中,同时测试了气缸盖内排气压力和消音消音器吸气压力(如图3),为以后建立活塞压缩机数学模型和性能仿真提供参数。

排气压力测试位置是在气缸盖内部,靠近排气孔和升程限位器位置。气缸盖增加圆孔,压力传感器工装安装在气缸盖圆孔内,压力传感器通过螺纹与工装固定,连接在气缸盖上。在气缸盖内布置热电偶,用于修正温度对传感器的影响。

吸气压力测试是在吸气消音器内部。吸气消音器增加圆孔,压力传感器工装固定在吸气消音器上,压力传感器通过螺纹与工装固定,连接在消音器上。在吸气消音器内布置热电偶,用于修正温度对传感器的影响。

2.2 压缩腔内容积测试方法

压缩腔内容积由曲轴转角计算得出。位移传感器安装在曲轴平衡块上的位移传感器测试工装(见图4)锯齿上,根据监测的位移,计算出曲轴转角,压缩机运转示意图见图5。

压缩腔内容积计算公式:

$$V = X \cdot \frac{1}{4} \pi D^2$$

表1 压缩机国标测试工况

冷凝温度/℃	蒸发温度/℃	过冷温度/℃	吸气温度/℃	环境温度/℃
54.4±0.3	-23.3±0.2	32.2±0.3	32.2±0.3	32.2±1

表2 压缩机各效率值

容积效率 η_v	63.60%
图示效率 η_t	113.15%
机械效率 η_m	89.83%
电机效率 η_{mo}	88.16%
指示效率 η_i	71.97%
吸气损失占指示功率比	4.3%
排气损失占指示功率比	7.73%
轴效率 η_a	64.65%
总效率 η	64.49%

表3 改进后压缩机各效率值

容积效率 η_v	65.20%
图示效率 η_t	117.10%
机械效率 η_m	89.54%
电机效率 η_{mo}	87.90%
指示效率 η_i	76.10%
吸气损失占指示功率比	4.15%
排气损失占指示功率比	3.96%
轴效率 η_a	68.19%
总效率 η	70.20%

$$X = H - h$$

$$H = \sqrt{(1+r)^2 - e^2}$$

$$h = \sqrt{I^2 - (r \sin \theta + e)^2} + r \cos \theta$$

$$\left(0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

$$h = \sqrt{I^2 - [r \sin(\pi - \theta) + e]^2} - r \cos(\pi - \theta)$$

$$\left(\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi\right)$$

$$h = \sqrt{I^2 - [e - r \sin(\theta - \pi)]^2} - r \cos(\theta - \pi)$$

$$\left(\pi \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}\right)$$

$$h = \sqrt{I^2 - [e - r \sin(2\pi - \theta)]^2} + r \cos(2\pi - \theta)$$

$$\left(\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi\right)$$

式中:

V——压缩机容积;

X——活塞距上止点距离;

D——压缩机缸孔内径;

H——活塞上止点距轴孔中心线距离;

h——活塞距轴孔中心线距离;

l——连杆节距;

r——曲轴偏心量;

e——缸孔与轴孔偏心距;

θ ——曲轴曲柄与缸孔中心线夹角。

2.3 测试设备

活塞压缩机P-V测试中需用到的设备包括压力传感器、位移传感器、插头接套、高绝缘低噪声连接电缆、延长电缆、ICAM工业型电荷放大器、电荷控制器、串口电缆、BNC接头、数据采集卡、电脑、压缩机、冰箱压缩机性能测试台、单电机性能测试台。

测试中用到的静态压力传感器型号为kulite公司XTL-142B-190。

测试中用到的位移传感器型号为AEC公司AEC-55系列PU-05型号电涡流位移传感器。测试中,传感器需要注意的事项如下:

(1) 位移传感器被侧面表面粗糙度Ra应不超过 $0.8 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。本试验中位移测试工装表

面粗糙度为Ra0.8。

(2) 传感器探头产生的磁场范围是一定的,在被测体表面形成的涡流场也是一定的。因此如果被测体太薄,将会造成电涡流作用不够,使传感器灵敏度下降,一般厚度大于0.1mm以上的钢等导磁材料及厚度大于0.6mm以上的铜、铝等弱导磁材料,其灵敏度不会受其厚度的影响。位移传感器工装的厚度为1.5mm,材料为铝合金。

(3) 安装探头时,应考虑传感器的线性测量范围和被测间隙的变化量。此次使用的位移传感器,其测试量程为0~2mm。测试过程中,传感器探头据位移传感器工装1mm。

3 P-V样机测试

在压缩机性能台测试P-V样机的制冷量、功率。测试工况为冰箱压缩机国标工况,见表1。

通过压力传感器测得压缩腔内压力、气缸盖内排气压力、吸气消音器内吸气压力,通过位移传感器测得曲轴转角,计算出压缩腔内容积,得出同一时间压力和容积的关系值,整理出压缩机P-V图,如图6所示。

压缩机实际循环消耗功和压缩机理论循环消耗功计算方法:

压缩机实际循环消耗功是P-V图(图6)中曲线1围成区域面积,压缩机理论循环消耗功是P-V图(图6)中曲线2围成区域面积,此面积采用梯形数值积分计算得出。

$$S = \frac{1}{2} \sum [(P_n + P_{n+1}) \times (V_{n+1} - V_n)]$$

其中, P_n 是位移传感器第n个采集点对应的气缸内部压力, V_n 是位移传感器第n个采集点对应的气体容积。

计算红色区域面积,得出 S_{in} 。计算蓝色区域面积得出 S_e 。利用本文1.3中的公式计算出各功率和效率,数据见表2。

从理论与实际P-V图对比和各效率计算值可以得出以下结论:

(1) 排气阀片存在轻微的颤振情况;

(2) 压缩机排气损失功耗占指示功的比值偏大,排气损失相对严重。

为解决上述问题,对排气阀片结构进行调

整, 改变排气阀片的弹性系数, 改进的压缩机P-V图见图7, 压缩机各效率值见表3。

从压缩机各效率计算结果和P-V图得出:

(1) 改进后的排气阀片明显减小阀片颤振, 避免排气阀片位置出现回流情况, 有利于提高压缩机制冷量和提高阀片寿命;

(2) 优化后的阀片结构使压缩机排气损失减小, 压缩循环功耗降低, 压缩机整机效率提升。

4 结论

通过此P-V测试方法测试分析压缩机P-V图, 为研发高效压缩机提供方向, 缩短研发周期。并且, 此P-V测试方法, 为建立有效的活塞压缩机数学模型提供准确的边界条件, 为活塞压缩机性能仿真提供校核作用。

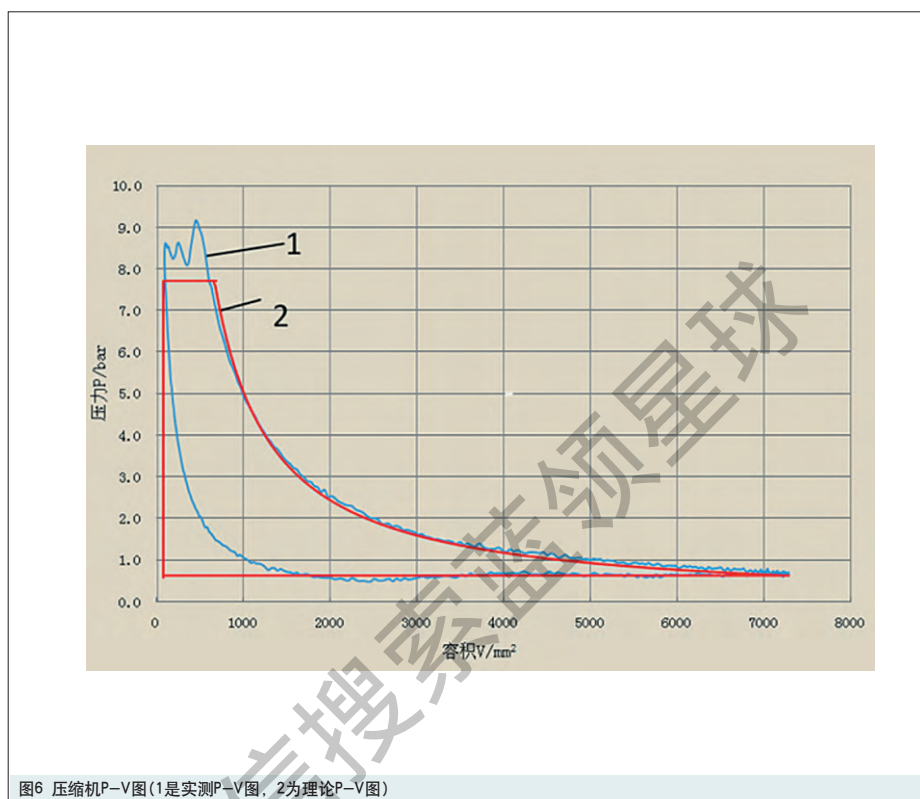


图6 压缩机P-V图(1是实测P-V图, 2为理论P-V图)

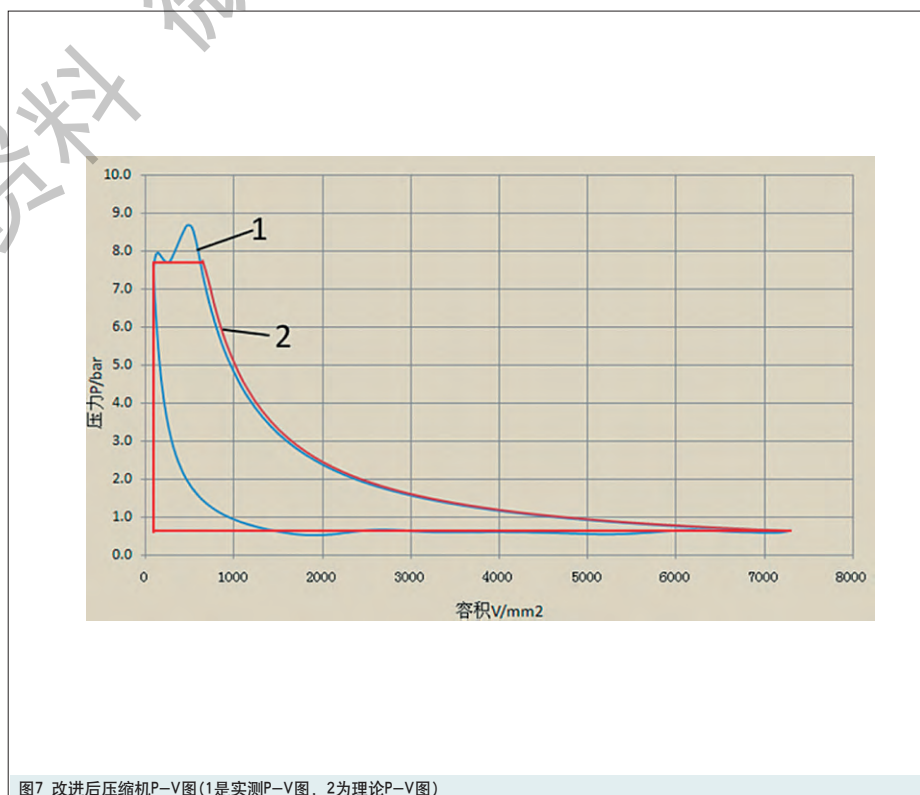


图7 改进后压缩机P-V图(1是实测P-V图, 2为理论P-V图)

参考文献

- [1] 吴业正, 李红旗, 张华等. 制冷压缩机, 机械工业出版社, 2010
- [2] Marcelo Alexandre REAL, Eduardo A. G. PEREIRA 等, 《Using PV Diagram Synchronized With the Valve Functioning to Increase the Efficiency on the Reciprocating Hermetic Compressors》, 普度论文, 2010年
- [3] 曹玉波, 邢万坤, 黄河清等. 《活塞压缩机性能实时测试系统应用研究》, 压缩机技术, 2005年
- [4] J. Rigola, C.D. Pérez-Segarra, G. Raush 等, 《Experimental Studies of Hermetic Reciprocating Compressors With Special Emphasis On PV Diagram》, 普度论文, 2002年