

DOI: 10.7652/xjtuxb201502022

间隙对双螺杆制冷压缩机性能的影响

吴华根, 唐昊, 王养浩, 邢子文
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为清楚解析间隙对螺杆制冷压缩机性能的影响及提高压缩机性能, 针对双螺杆制冷压缩机中的啮合间隙和排气端面间隙对压缩机性能的影响程度进行了理论计算和实验研究, 结果表明: 在相同间隙值下, 啮合间隙对螺杆制冷压缩机的容积效率和绝热效率等的影响数倍于排气端面间隙的影响, 每增加 0.01 mm 的啮合间隙, 会减少 0.4% 左右的容积效率, 而每增加 0.01 mm 的排气端面间隙, 会减少 0.13% 左右的容积效率; 在较大啮合间隙工况下, 排气端面间隙的改变基本不影响压缩机的容积效率、绝热效率以及系统性能系数(COP)等, 但是同时增加啮合间隙和排气端面间隙, 会引起压缩机性能参数、制冷量及系统性能系数的下降。因此, 在螺杆制冷压缩机的设计中更应注重啮合间隙分布设计, 从而有效提高双螺杆制冷压缩机的性能。

关键词: 双螺杆压缩机; 啮合间隙; 排气端面间隙; 性能

中图分类号: TB456 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)02-0130-05

Clearance Effects on Performance of Twin Screw Refrigeration Compressor

WU Huagen, TANG Hao, WANG Yanghao, XING Ziwen
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of meshing clearance and discharge end clearance on the performance of twin screw refrigeration compressor are investigated theoretically and experimentally. The theoretical analysis shows that the influence of the meshing clearance on the volumetric efficiency and the adiabatic efficiency of compressor is several-fold greater than the discharge end clearance under the same gap value which is verified by the experimental measure data. The volumetric efficiency of compressor decreases by 0.4% for every 0.01 mm of increasing meshing clearance and drops 0.13% for 0.01 mm of increasing discharge end clearance. The experiments indicate that the change of the discharge end clearance value slightly affects the compressor performance, such as the volumetric efficiency, adiabatic efficiency and COP, when the meshing clearance increases greatly. Moreover, if the gap is enlarged, the volumetric efficiency, adiabatic efficiency, refrigeration capacity and COP all drop. Thus the meshing clearance ought to be paid more attention than the discharged end clearance in the design of twin screw refrigeration compressor.

Keywords: twin screw compressor; meshing clearance; discharged end clearance; performance

螺杆制冷压缩机作为冷水机组的主机已经被广泛应用于工业生产中, 如食品、医药、石化等行业。尤其是近年来, 随着节能减排要求的提高, 螺杆制冷

压缩机也应用于冰蓄冷、热泵系统等能效比要求较高的场合, 以达到国家节能的要求, 因此对螺杆制冷压缩机的性能要求也越来越高。

目前,对于提高双螺杆制冷压缩机的性能研究主要集中于如下几个方面。①在转子型线方面,主要集中于新型的转子型线设计方法,以利于寻求提高压缩机效率的转子型线。文献[1-2]采用转子型线的法线法结合解析包络法对转子型线的设计进行了研究,并且还利用量转子的任意啮合线重新生成转子型线,以期提高转子型线的性能。文献[3]对以啮合线为基础进而设计转子型线的方法进行了研究。文献[4]通过解析包络法开发的转子型线得到了广泛的工程应用,而且开发了一套螺杆压缩机设计软件。②对螺杆制冷压缩机工作过程特性的研究也是重要的一方面。文献[5-6]对螺杆制冷压缩机和空气压缩机的工作过程包括指示图的录取等都有深入的研究。文献[7]指出,螺杆压缩机中的喷油可有效改善泄漏和提高压缩过程中的热交换,从而提高压缩机效率和性能。文献[8]利用计算流体力学CFD技术对螺杆压缩机工作腔进行三维网格划分,进而计算工作腔在压缩过程中的压力和温度变化情况,为螺杆压缩机的工作过程中流场的深入研究提供了思路 and 基础。虽然对螺杆压缩机性能的研究中都认为泄漏是非常重要的影响因素之一,在研究中都考虑了它的影响,但泄漏影响性能的研究结果仍然鲜见发表。

本文主要针对双螺杆制冷压缩机中的泄漏通道间隙对压缩机性能的影响程度进行研究和分析,定量地描述啮合间隙和排气端面间隙对压缩机容积效率、绝热效率等性能参数的影响,以为双螺杆制冷压缩机在间隙方面的优化设计提供可靠依据,提升螺杆压缩机的性能。

1 理论分析

双螺杆制冷压缩机中泄漏间隙主要有啮合间隙、端面间隙和齿顶间隙3种。啮合间隙主要影响的是接触线和泄漏三角形两类泄漏通道;端面间隙影响的是吸气端面和排气端面泄漏通道;齿顶间隙影响的是阴、阳转子的齿顶泄漏通道。双螺杆制冷压缩机运行过程中对工作腔喷油,受离心力影响,齿顶间隙中会有较多润滑油进行密封^[5],另外工作齿槽两侧的齿顶间隙同时承受着泄出和泄入的共同作用,且本文试验中不改变齿顶间隙,因此在理论分析中也不单独考虑齿顶间隙的影响。由于吸气端面间隙所处的压力基本为吸气压力,认为该处间隙对性能的影响较为微弱,仅在压缩开始阶段有所泄漏,因而也不考虑吸气端面的间隙影响。所以,本文主要

讨论啮合间隙和排气端面间隙对压缩机性能的影响。

本文建立的模型描述了制冷剂气体、油混合物通过啮合间隙和排气端面间隙时,对压缩机容积效率和绝热效率的影响,表达式如下

$$\begin{aligned} \dot{m}_g &= \alpha A u_g \rho_g \\ \dot{m}_o &= (1 - \alpha) A u_o \rho_o \\ u_g &= C(2(h_1 - h_2))^{1/2} \\ u_o &= u_g / S \\ S &= 0.4 + 0.6 \left(\left(\frac{\rho_o}{\rho_g} + 0.4 \frac{1-x}{x} \right) \left(1 + 0.4 \frac{1-x}{x} \right) \right)^{1/2} \\ \alpha &= \left(1 + \frac{\rho_o}{\rho_g} \frac{1-x}{x} \right)^{-1} \end{aligned}$$

式中: α 为空泡率; A 为泄漏间隙横截面积随转角的变化关系; S 为滑移系数; x 为气液质量比(干度); h_1 、 h_2 分别为泄漏通道两侧的气体焓; C 为流量系数。

利用双螺杆制冷压缩机工作过程的数学模型^[9],对LG20型的双螺杆氨制冷压缩机的工作过程进行理论研究,得到了啮合间隙(0.06 mm)和排气端面间隙(0.06 mm)对压缩机容积效率和绝热效率的影响程度,分别如图1和图2所示。

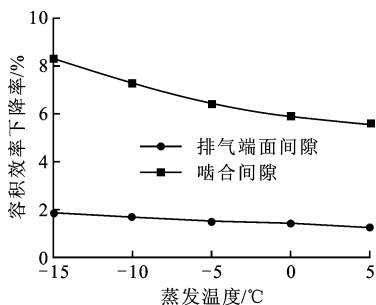


图1 间隙对容积效率的影响情况(冷凝温度为35℃)

从图1可以看出,随着蒸发温度的上升,即压缩机压力比的下降,啮合、排气端面间隙对容积效率的影响程度都在下降,下降趋势逐渐减小,这主要是压力差减小导致了泄漏量的减少造成的。另外,从图1中可以得知,啮合间隙对于容积效率的影响要远大于排气端面间隙的影响,约是排气端面间隙的4倍多。在冷凝温度为35℃、蒸发温度为5℃时,啮合间隙和排气端面间隙泄漏使压缩机的容积效率下降了6.8%。

图2所示为啮合间隙、排气端面间隙对压缩机绝热效率的影响程度。从图中可以看出,随着蒸发温度的下降,即压力比上升,两类间隙对绝热效率的影响上升,但是其增长率逐渐下降,而且其中啮合间隙对绝热效率的影响所占比重较大。在冷凝温度为35℃、蒸发温度为5℃时,啮合间隙和排气端面间隙

对压缩机的绝热效率的影响程度为 9.48%。

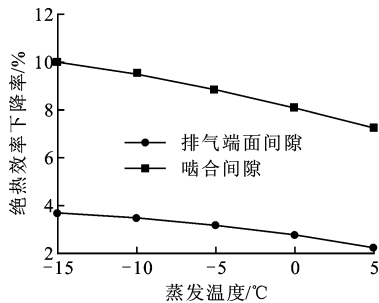


图 2 间隙对绝热效率的影响情况 (冷凝温度为 35℃)

压缩机容积效率和绝热效率随着啮合间隙和排气端面间隙的变化情况如图 3 所示。从图中可以看出,随着间隙的增加,压缩机的容积效率和绝热效率基本呈线性下降。理论计算表明,每增加 0.01 mm 的间隙,由啮合间隙导致的容积效率下降平均为 0.368%,而由排气端面间隙导致的下降为 0.132%。

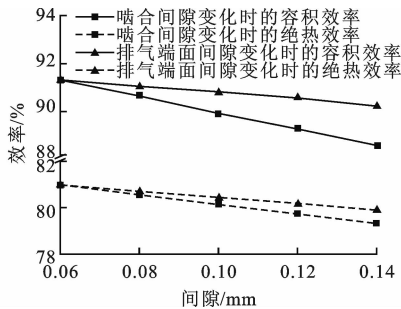


图 3 效率随间隙变化的情况

从上述理论分析可以看出,啮合间隙对于压缩机容积效率的影响是排气端面间隙的 3~4 倍,而对绝热效率的影响是排气端面间隙的 2~3 倍,由此可以看出,啮合间隙对于压缩机的性能影响更为重要。

2 实验及结果分析

按照国家标准 GB/T 5773—2004《容积式制冷剂压缩机性能试验方法》以及 GB/T 19410—2003《螺杆式制冷剂压缩机》,在蒸发温度为 5℃ 和冷凝温度为 35℃ 的工况下,对 LG20 型氨螺杆制冷压缩机性能与间隙的关系,以及改变油温时压缩机性能的变化情况进行了试验研究。

间隙分布情况分别如下。

A: 啮合间隙为 0.06 mm, 排气端面间隙为 0.06 mm。

B: 啮合间隙为 0.06 mm, 排气端面间隙为 0.12 mm。

C: 啮合间隙为 0.14 mm, 排气端面间隙为 0.06 mm。

D: 啮合间隙为 0.14 mm, 排气端面间隙为 0.14 mm。

2.1 排气端面间隙对性能的影响

当排气端面间隙分别为 0.06 mm 和 0.12 mm 时,压缩机的性能测试结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,当啮合间隙较小(0.06 mm)时,随着排气端面间隙的增加,其容积效率和绝热效率都有所下降,但下降值较小,验证了理论研究所得,排气端面间隙对效率影响的权重较小。随着排气端面间隙的增加,压缩机的制冷量下降了 0.83%,这是压缩机泄漏增大、排气量减少的缘故,同时压缩机的轴功率会有所上升,这是因为从排气端面泄漏的气体有部分仍然回到了转子的压缩腔进行重复压缩所致。制冷量和功率的这种变化,导致系统性能系数下降了 1.55%。

从表 1 中可以看出,在 A 间隙分布情况下,因压缩机间隙泄漏造成的容积效率下降为 8.8%,而图 1 所示因啮合间隙和排气端面间隙引起的容积效率下降为 6.8%,从而说明了理论分析的准确性。

2.2 啮合间隙对性能的影响

啮合间隙对于压缩机性能的影响如表 2 所示,排气端面间隙不变为 0.06 mm,啮合间隙从 0.06 mm 增加至 0.14 mm。

从表 2 可以得出,当啮合间隙增加时,由于泄漏面积的扩大,导致压缩机的容积效率下降了 3.2%,平均下来相当于每增加 0.01 mm 的啮合间隙,容积效率下降 0.4%。从表 1 可知,每增加 0.01 mm 的排气端面间隙,容积效率只下降 0.13%。由此可见,在此工况下,啮合间隙对于容积效率的影响程度大概是排气端面间隙的 3 倍,因此在压缩机设计的时候,更应关注啮合间隙分布,以利于螺杆压缩机效率

表 1 排气端面间隙对性能的影响

间隙分布	容积效率/%	绝热效率/%	性能系数	轴功率/kW	制冷量/kW
A	91.2	78.4	6.47	199.645	1 291.757
B	90.4	77.2	6.37	201.085	1 281.024
增幅/%	-0.8	-1.2	-1.55	0.72	-0.83

表 2 啮合间隙对性能的影响

间隙分布	容积效率/%	绝热效率/%	性能系数	轴功率/kW	制冷量/kW
A	91.2	78.4	6.47	199.645	1 291.757
C	88.0	76.5	6.31	197.480	1 246.933
增幅/%	-3.2	-1.9	-2.47	-1.08	-3.47

的提升。压缩机的绝热效率也随着啮合间隙的增加而有所下降,略大于表 1 中排气端面间隙的增加引起的对绝热效率的影响程度。

随着啮合间隙的增加,压缩机的功率有所下降,这主要是由于通过啮合间隙泄漏的制冷剂气体直接进入了吸气齿槽,因此参与压缩的制冷剂气体质量流量下降,从而导致了功率的轻微下降。由于质量流量的下降,导致了压缩机制冷量的较大幅度的下

降,达到了 3.47%,从而使系统性能系数也有了 2.47%的降幅。从表 1 和表 2 可知,啮合间隙增加导致性能系数下降的影响要大于排气端面间隙。

为了更加清楚了解啮合间隙的影响,本文还针对在大啮合间隙下改变排气端面间隙时压缩机的性能参数进行了测试,测试结果如表 3 所示。啮合间隙为 0.14 mm,排气端面间隙分别为 0.06 mm 和 0.14 mm。

表 3 大啮合间隙对性能的影响

间隙分布	容积效率/%	绝热效率/%	性能系数	轴功率/kW	制冷量/kW
C	88.0	76.5	6.31	197.480	1 246.933
D	88.1	76.3	6.30	197.978	1 247.373
增幅/%	0.1	-0.2	-0.16	0.25	0.03

从表 3 中得知,当啮合间隙较大(0.14 mm)时,排气端面间隙的变化(从 0.06 mm 增为 0.14 mm)对压缩机的整体性能的影响都十分微弱,可见对于螺杆制冷压缩机而言,啮合间隙的影响权重要大于排气端面间隙的影响权重。

从 4 种间隙分布的理论分析和实验结果比较来看:压缩机容积和绝热效率的实验值和计算值的最大误差为 3.68%,而增加单位间隙导致容积效率下降幅度的计算值和实验值的最大误差为 8%,从而可以看出理论计算值与实验测试结果吻合较好,验证了其准确性。

2.3 不同啮合间隙下油温对性能的影响

在不同喷油温度下,不同的啮合间隙对于压缩机性能的影响如图 4 所示。

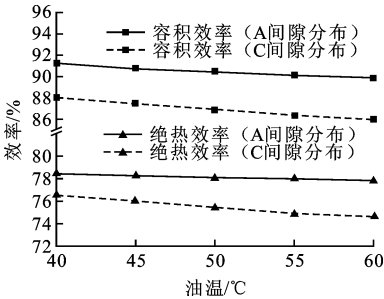


图 4 喷油温度对效率的影响

随着啮合间隙的增加,压缩机的绝热效率和容积效率都有所下降;随着喷油温度的升高,压缩机的容积效率和绝热效率都随之降低。这是因为当喷油

的温度升高时,油的黏性下降,因而在泄漏间隙处气体的密封性能会降低,导致泄漏增加,而且温度升高引起了油和制冷剂气体间的换热作用(即油的冷却作用)下降,进一步影响了绝热效率。在大啮合间隙下,随着喷油温度的升高,压缩机效率的下降速度要略微高于小啮合间隙时的情况。

3 结 论

本文对啮合间隙和排气端面间隙对双螺杆制冷压缩机的性能影响进行了理论和实验研究,发现啮合间隙对压缩机性能影响高于排气端面间隙的影响,而且每增加 0.01 mm 啮合间隙会导致理论计算和实验测试的容积效率减少率分别为 0.368%和 0.4%,而增加 0.01 mm 排气端面间隙引起的容积效率下降分别为 0.132%和 0.13%。在大啮合间隙下,排气端面间隙的改变几乎不影响压缩机的性能。因此,要提高螺杆压缩机的性能,更应关注啮合间隙的分布,在满足因受热、受力产生变形的基础上,应尽量减小啮合间隙。

参考文献:

[1] WU Yuren, FONG Zhanghua. Rotor profile design for the twin-screw compressor based on the normal-rack generation method [J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 1-4.
[2] WU Yuren, FONG Zhanghua. Improved rotor profi-

- ling based on the arbitrary sealing line for twin-screw compressors [J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(6): 695-711.
- [3] ZAYTSEV D, INFANTE FERREIRA C A. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 744-755.
- [4] 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 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(11): 31-34.
- XING Ziwen, PENG Xueyuan, SHU Pengcheng. Software package for design of twin screw compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(11): 31-34.
- [5] 邢子文, 吴华根, 束鹏程. 螺杆压缩机设计理论与关键技术 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 755-763.
- XING Ziwen, WU Huagen, SHU Pengcheng. Research and development on design theory and key technology of screw compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 755-763.
- [6] 邢子文. 螺杆压缩机: 理论、设计及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 117-132.
- [7] SESHIAH N, GHOSH S K, SAHOO R K, et al. Mathematical modeling of the working cycle of oil injected rotary twin screw compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 145-155.
- [8] RANE S, KOVACEVIC A, STOSIC N, et al. Deforming grid generation and CFD analysis of variable geometry screw compressors [J]. Computers & Fluids, 2014, 99: 124-141.
- [9] CHEN Wenqing, XING Ziwen, TANG Hao, et al. Theoretical and experimental investigation on the performance of screw refrigeration compressor under part-load conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(4): 1141-1150.

(编辑 杜秀杰)

(上接第73页)

- [9] ABUMANSOOR O, BOUKERCHE A. A secure cooperative approach for nonline-of-sight location verification in VANET [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(1): 275-285.
- [10] PARKER R, VALAEE S. Vehicular node localization using received-signal-strength indicator [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3371-3380.
- [11] BAI F, ELBATT T, HOLLAN G. Towards characterizing and classifying communication-based automotive applications from a wireless networking perspective [C]// Proceedings of the IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-25.
- [12] OSBORNE M J, RUBINSTEIN A. A course in game theory [M]. 1st ed. Cambridge, USA: MIT Press, 1994.
- [13] University College London. OpenStreetMap [EB/OL]. (2014-03-09)[2014-05-20]. <http://www.openstreetmap.org>.

(编辑 武红江)

(上接第92页)

- corona discharges [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 75-94.
- [17] BRUNT R J V, HERRON J T. Plasma chemical model for decomposition of SF₆ in a negative glow corona discharge [J]. Physica Scripta, 1994(T53): 9-29.
- [18] SAUERS I. By-product formation in spark breakdown of SF₆/O₂ mixture [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1988, 8(2): 247-262.
- [19] 朱培怡, 王海增, 郭鲁钢. 氧化镁强化浓海水吸收低浓度二氧化硫的实验研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 3(2): 306-310.
- ZHU Peiyi, WANG Haizeng, GUO Lugang. Experimental study on removal dioxide sulfur by using concentrated brine [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(2): 306-310.
- [20] WANG Yuanyuan, JI Shengchang, LI Jinyu, et al. Investigations on discharge and decomposition characteristics of SF₆ under various experimental conditions [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1952-1959.
- [21] 唐炬, 陈长杰, 刘帆, 等. 局部放电下 SF₆ 分解组分检测与绝缘缺陷编码识别 [J]. 电网技术, 2011, 35(1): 110-116.
- TANG Ju, CHEN Changjie, LIU Fan, et al. Detection of constituents from SF₆ decomposition under partial discharge and recognition of insulation defect coding [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 110-116.

(编辑 杜秀杰)