

一种回转式活塞压缩机的产品化设计及实验

雷 蓉, 欧阳新萍, 郭 震, 程哲铭

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 提出了一种新型双环结构的回转式活塞压缩机, 将常规往复活塞改为新型回转式活塞, 同时活塞的往复运动转变为回转运动. 在保持了往复活塞压缩机压缩比范围广、制造工艺简单等特点的同时借鉴一些回转式压缩机的优点, 消除了常规活塞式压缩机的活塞惯性力, 取消了常规活塞式压缩机的吸、排气阀, 提升了活塞式压缩机的应用优势. 设计了首款产品样机并进行了实验, 实验结果证实了回转式活塞压缩机工作原理的可行性, 排气压力达到了设计指标, 实际排气量则达到理论排气量的一半以上.

关键词: 回转式活塞压缩机; 压缩机设计; 压缩机实验

中图分类号: TK 437 **文献标志码:** A

Prototype Design and Test of a Rotary Piston Compressor

LEI Rong, OUYANG Xinping, GUO Zhen, CHENG Zheming

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A novel rotary piston compressor with double-loop structure was introduced, replacing the conventional reciprocating piston with novel rotary piston, and converting the reciprocating motion of piston into rotary motion. While maintaining the features of wide range of compression ratio and simple manufacturing process, some advantages of other types of compressors with different working mechanisms were also assimilated. The novel compressor with no suction valve and exhaust valve eliminates the conventional compressor piston's moving inertial force and upgrades its application field. The prototype of the novel compressor were designed and tested to verify the feasibility of the compressor working principle, and the test results show that the actual exhaust pressure meets the requirement of design specifications and the exhaust displacement reaches the value beyond the half of the theoretical one.

Key words: rotary piston compressor; compressor design; compressor test

容积型压缩机通常分为往复式和回转式. 由于目前往复式压缩机通常都是活塞式的, 故又称为活塞式压缩机. 往复式活塞压缩机由于存在往复运动的惯性力, 影响效率且转速较低、体积较大, 加上吸、

收稿日期: 2013-08-22

基金项目: 中央财政支持地方高校发展专项基金资助项目

第一作者: 雷 蓉(1989-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 新型压缩机研制. E-mail: lrong105@163.com

通讯作者: 欧阳新萍(1964-), 男, 副教授. 研究方向: 强化换热、新型压缩机研发. E-mail: xpoy@163.com

排气阀等易损件较多,在大容量场合逐渐被一些高效回转式压缩机取代,但由于其压比范围广、制造工艺简单等优势,仍有大量的应用市场。

往复式压缩机的研究重点主要集中在以下几点:a.动静部件配合间隙设计;b.气阀运动规律研究;c.密封剂润滑方式设计;d.曲轴连杆等相关技术研究.在产品设计上,应用压缩机热力学、动力学计算软件和压缩机工作过程模拟软件等来提高计算准确度.如 Maclaren 等^[1]、王丽等^[2]对阀片进行动态分析,从而对阀片结构设计及振动提供一定的理论参考;而戴晓洲等^[3]、翟晓宁^[4]、Aranrahob^[5]和蔡俊等^[6]则针对活塞密封环组进行热力计算,改进结构设计,降低磨损速率来提高压缩机性能系数;王彦青等^[7]开发的一种改进阈值函数可以有效减少平稳信号与非平稳信号中产生的振荡和恒定偏差的影响,鉴此,在今后对压缩机的研究中也可考虑将这种小波阈值去噪方法用于压缩机降噪优化分析中。

涡旋理论研究主要集中于:a.涡旋型线理论研究;b.型线结构优化改进;c.型线密封.如王焕然等^[8]、王军等^[9]、李文华等^[10]通过分析径向泄漏中流体相态建立一系列动量方程、连续方程、实际气体状态方程及过程方程,从而计算出临界密封间隙,最大化降低气体泄漏;而 Fushiki 等^[11]通过优化涡旋腔高低侧的柔性密封机构,进而改善涡旋齿受力情况,减少涡旋齿止推面的机械损失,从而提高压缩机运转性能;李连生等^[12]针对排气口阻塞所引起的气流脉动这一情况进行相关研究;相比于其他学者,Ittoh 等^[13]考虑了摩擦与传热的影响因素,采用余熵修正理论对边界点参数进行修正处理,计算出合理的涡旋型线端点位置。

近几年,美国艾斯本技术公司(Aspen)研发出全球最优异的微型制冷压缩机,体积仅有拳头大,而制冷量可达到 500 W,主要用于便携式制冷系统中.我国在整个压缩机行业新技术方面也取得一定的成果,深圳振华亚普精密机械有限公司自主研发的中压单螺杆压缩机新技术在一定程度上弥补了中国船用中压单螺杆方面的技术空白;华意压缩机股份有限公司研发出了全球首部超小型压缩机^[14],体积较行业压缩机缩小了 20%,质量减轻了 30%,产品性能处于国际水平。

本文所提出的一种回转式活塞压缩机,将活塞的往复运动改为回转运动,旨在借鉴一些回转式压缩机的优点,消除活塞惯性力,取消吸、排气阀,提升活塞式压缩机的应用优势.经过几年的研究,目前已

经制作出样机,并对样机进行了性能实验。

1 压缩机设计

1.1 基本结构和工作原理

压缩机的基本结构如图 1 所示.两个圆环形气缸相交组成一个双环形气缸.圆环形气缸的径向(直径方向)有一定宽度,轴向(气缸横截面的垂直方向)有一定长度,构成气缸空间.两个圆环形气缸交汇处空间连通,两个气缸内的活塞能交替地通过上下交汇处.左环活塞顺时针运动,右环活塞逆时针运动.如图 1 所示,当上交汇处被右环活塞占据时,左环活塞的运动形成左环气缸的压缩、排气过程;右环活塞的运动则形成右环气缸的吸气过程,气体从右吸气口进入气缸.随着活塞的旋转,同样可形成右环气缸的压缩、排气和左环气缸的吸气过程.该结构不用吸气阀,但在排气口处需要设置排气阀来控制排气压力。

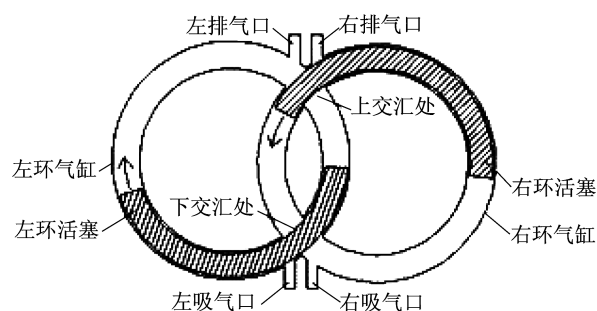


图 1 压缩机基本结构

Fig.1 Schematic diagram of basic structure of compressor

1.2 基本结构的改进

1.2.1 排气结构的改进

压缩机基本结构需设置排气阀.排气阀是易损件,且影响运行可靠性和效率.作为回转式的结构,可以借鉴螺杆压缩机的排气结构,去除排气阀.主要的设计思路是将图 1 所示的圆环气缸的径向排气口改为图 2 和图 3 所示的轴向排气口。

图 2 为活塞的结构,在活塞的圆环面上开有排气导通口.图 3 为轴向排气结构的示意图,在气缸轴向端面上开有排气口,图示为压缩过程即将结束的状态,当活塞由图示位置继续旋转、排气导通口与排气口重合时,气缸向外排气.这样的排气结构不需要排气阀。

1.2.2 活塞周向端面的型线设计

压缩机基本结构的活塞周向端面是一个平直

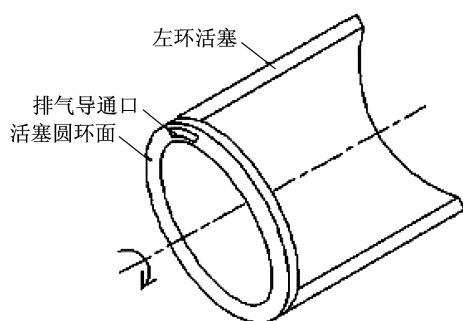


图2 活塞结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of piston structure

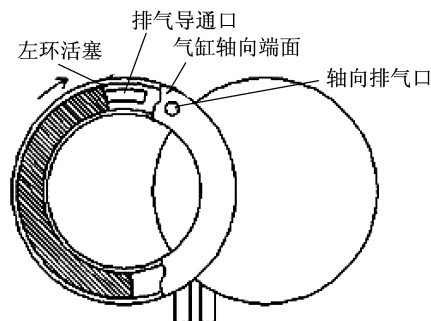


图3 轴向排气结构

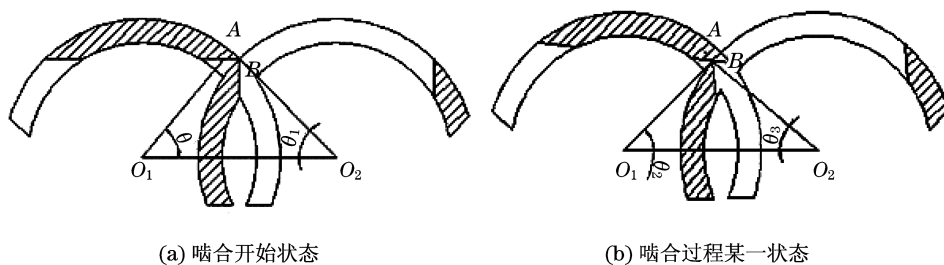
Fig.3 Schematic diagram of axial exhaust port structure

面,且与弧面的切线垂直.这样的端面在两个活塞交汇时会形成较大的余隙容积.为减少余隙容积,左右两个气缸的活塞周向端面在交汇处应尽量啮合,因此,要改进活塞周向端面形状.端面啮合状态如图4所示,图4(a)为啮合开始状态,右环活塞端点与左缸活塞端点啮合;图4(b)为啮合过程某一状态,此时,右环活塞端面上B点与左环活塞端面上A点啮合.其中,A点为左环活塞端面型线上的任一点,所处圆弧半径为 r ,图4(a)中其角度为 θ ,图4(b)中其

角度为 θ_2 ;而B点为右环活塞端面型线上的端点,所处圆弧半径为 R ,即为活塞外径,图4(a)中其角度为 $\theta_1 = 45^\circ$,图4(b)中其角度为 θ_3 ;为了便于计算,将A点位置其圆弧半径 r 与活塞外径 R 的比值定义为 φ ,由于在啮合运转过程中,左右活塞为同步异向运转,因此

$$\theta - \theta_2 = \theta_1 - \theta_3 \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{r}{R} \quad (2)$$



(a) 啮合开始状态

(b) 啮合过程某一状态

图4 活塞周向端面啮合示意图

Fig.4 Schematic diagram of piston circumferential face meshing

推导得转子端面型线方程为

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{4} \frac{1}{\varphi} + \varphi - \frac{1}{4} \varphi^3 \right) + \frac{1}{4} (1 - \varphi^2) \sqrt{3 - \frac{1}{2} \left(\varphi^2 + \frac{1}{\varphi^2} \right)} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{4} \frac{1}{\varphi} + \varphi - \frac{1}{4} \varphi^3 \right) - \frac{1}{4} (1 - \varphi^2) \sqrt{3 - \frac{1}{2} \left(\varphi^2 + \frac{1}{\varphi^2} \right)} \quad (4)$$

1.2.3 活塞数量

压缩机基本结构中,左右气缸各有一个活塞,一个运转周期左右气缸各向外排气一次.考虑到活塞运转时将产生较大的离心力,实际设计如图5所示,一个运转周期左右气缸各向外排气两次.

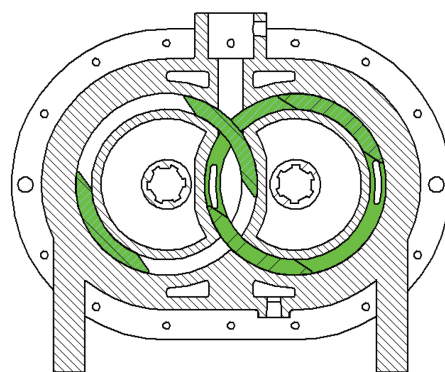


图5 活塞的布置示意图

Fig.5 Schematic layout of piston

1.2.4 润滑方式

润滑方式采用压差方式润滑,由活塞运转过程

中产生的进出口流体压力差驱动润滑油的循环. 润滑油主要润滑活塞、轴承、驱动齿轮等, 同时在气缸内还起到密封作用.

1.2.5 样机的一些设计参数

样机设计为小排量、低压的空气压缩机, 设计目标: 吸气压力为大气压, 排气压力为 0.25 ~ 0.30 MPa, 转子转速为 1 450 r/min, 排气量为 0.10~0.15 m³/min. 根据设计目标, 压缩机样机设计的一些关键参数: 活塞外径为 58 mm, 内径为 48 mm, 轴向长度为 33 mm, 理论排气量为 0.13 m³/min. 气缸的尺寸根据活塞的尺寸相应确定, 气缸与活塞间隙配合. 样机设计的外形图如图 6 所示.

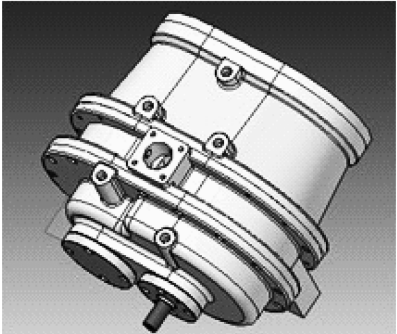


图 6 压缩机样机的设计外形图
Fig.6 Outline design diagram of compressor prototype

2 压缩机样机实验

因前述压缩机处于开发阶段, 定义其工作介质

为空气, 又称其为空气压缩机. 根据 GB/T 15487 - 1995 规定, 空气压缩机排气量的测定主要可采用喷嘴法和充罐法^[15]. 本样机的测试采用喷嘴法, 样机的测试实验台如图 7 所示.



图 7 样机测试实验台
Fig.7 Prototype test laboratory bench

未计及冷凝水的压缩机容积流量计算公式为^[15]

$$Q_0 = 1\,129 \times 10^{-11} c d^2 T_{x1} \sqrt{\frac{\Delta p}{p_s T_t}} \tag{5}$$

$$\eta = \frac{Q_0}{Q} \tag{6}$$

式中, Q 为设计空气压缩机理论排气量; Q_0 为空气压缩机排气量; Δp 为喷嘴前后压差; p_s 为吸气压力; T_{x1} 为空气压缩机吸气的绝对温度; T_t 为喷嘴前气体的绝对温度; c 为喷嘴系数; d 为喷嘴直径.

测试数据如表 1 所示.

表 1 设计工况及测试数据
Tab.1 Parameter design and test data

大气压力 p_0/kPa	喷嘴前后压差 $\Delta p/\text{kPa}$	吸气温度 T_{x1}/K	理论排气量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	喷嘴直径 d/mm	喷嘴 系数 C	喷嘴前气体 温度 T_0/K	实际排气量 $Q_0/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	平均容积效率
	220.66	297.85				296.15	61.98	
100.42	216.73	297.55	136.17	4.741 4 mm	0.952	295.65	61.42	45%
	209.87	297.65				295.80	60.43	

3 结 论

- a. 理论和实验表明, 本文所阐述的回转式活塞压缩机的工作原理是可行的.
- b. 排气压力达到了设计指标, 实际排气量达到理论排气量的 45%.
- c. 压缩机样机的实际排气量偏小, 但作为首款样机达到了预期的效果.

d. 改进方案: 在样机的设计时, 为了能确保样机的安全运转, 活塞与气缸的间隙留得比较大, 轴向配合间隙设计为 0.10~0.15 mm, 径向配合间隙设计为 0.075~0.120 mm, 这样设计会造成气体较大的泄漏, 降低实际排气量. 理论计算表明, 轴向和径向间隙减少约 1/3, 气体泄漏量将大大降低, 且不影响实际运行. 另外, 气缸进气口和活塞排气口的改进也能提高容积效率.

(下转第 66 页)

- incident and refracted rays in a birefringent plate[J]. Journal of OPTICS A: Pure, 2006, 8(3): 295 - 299.
- [6] 裴芳芳, 陈西园. 光在光轴取向任意条件下的晶体表面透射率[J]. 光学技术, 2009, 35(2): 180 - 185.
- [7] 万玲玉, 谷巍, 班卫华. 光波 p 分量在单轴晶体表面反射和折射的相位特性[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1481 - 1486.
- [8] 宋哲, 郝林岗, 吴宁, 等. 光轴取向任意时单轴晶体内表面上的双折射[J]. 辽宁师范大学学报, 2013, 36(2): 168 - 173.
- [9] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. New York: Pergamon Press, 1975.
- [11] 叶玉堂, 饶建珍, 肖峻, 等. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] 杨婷, 景红梅, 刘大禾. 光在单轴晶体上的反射 - 透射研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 158 - 162.
- (编辑: 丁红艺)

(上接第 60 页)

参考文献:

- [1] Maclaren E T, 汪庆真. 用分析方法改进往复式压缩机气阀设计[J]. 压缩机技术, 1977(3): 9 - 17.
- [2] 王丽, 刘振全, 胡淞城. 动态气体力对往复式压缩机气阀运动规律影响的研究[J]. 甘肃科技, 2009, 25(3): 55 - 57.
- [3] 戴晓洲, 应洪山, 范吉全, 等. 迷宫式活塞压缩机迷宫密封及结构分析[J]. 化工机械, 2000, 27(2): 101 - 104.
- [4] 翟晓宁. 迷宫密封活塞式压缩机热力动力计算程序开发及应用[J]. 化工设备与防腐蚀, 2006(6): 20 - 22.
- [5] Aranrahob B M. 活塞式压缩机密封环可靠性的评定比较[J]. 压缩机技术, 1980(2): 20 - 22.
- [6] 蔡俊, 王宏光. 转子临界转速实验与计算的对比分析[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(5): 471 - 475.
- [7] 王彦青, 魏连鑫. 一种改进的小波阈值去噪方法[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(4): 405 - 408.
- [8] 王焕然, 周雷, 金光熹. 涡旋压缩机密封间隙的量化研究[J]. 压缩机技术, 1997(5): 17 - 20.
- [9] 王军, 王宜义. 涡旋压缩机径向间隙的泄漏[J]. 流体工程, 1989(10): 49 - 53.
- [10] 李文华, 褚红艳. 涡旋压缩机泄漏模型的建立与分析[J]. 压缩机技术, 2007(6): 8 - 10.
- [11] Fushiki T, Sano F, Ikeda K, et al. Development of scroll compressor with new compliant mechanism[C] // International Compressor Engineering Conference, West Lafayette: Purdue University, 2002: 1576 - 1582.
- [12] 李连生, 束鹏程, 黄炯, 等. 涡旋式压缩机排气系统气流脉动现象研究[J]. 应用力学学报, 1997, 14(3): 84 - 89.
- [13] Itoh T, Fujitani M, Takeda K. Investigation of discharge flow pulsation in scroll compressor[C] // Process of 1994 ICEC, West Lafayette: Purdue University, 1994: 683 - 688.
- [14] 章根国. 单级中压单螺杆空压机核心技术突破[J]. 压缩机技术, 2012(3): 69 - 71.
- [15] 国家技术监督局. 容积式压缩机流量测量方法(GB/T 15487 - 1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- (编辑: 石 瑛)