

## 同步回转式压缩机滑片摩擦特性研究

杨骅, 屈宗长, 周慧, 俞炳丰

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 通过对新型同步回转式压缩机滑片的运动及受力分析,建立了其动力学模型,分析推导了滑片上各点摩擦力随主轴转角的变化关系及滑片上摩擦功耗的大小.在该模型基础上,对一台排量为 $96\text{ cm}^3/\text{r}$ 的同步回转式压缩机样机的滑片所受的摩擦力及摩擦功耗进行了分析计算,并与相同规格的旋叶式压缩机进行比较.结果表明:同步回转式压缩机滑片摩擦功耗主要发生在滑片与转子滑槽之间,占滑片总摩擦功耗的88.5%;样机的滑片摩擦功耗只有66.08 W,比同规格旋叶式压缩机的滑片总摩擦功耗降低85.1%;样机的总摩擦功耗约为218 W,比同规格旋叶式压缩机降低53.8%.研究结果表明,同步回转式压缩机在摩擦功耗方面表现出明显优势.

**关键词:** 同步回转式压缩机;滑片;摩擦力;摩擦功耗

**中图分类号:** TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0843-05

## Friction Characteristics of Sliding Vane for Synchronal Rotary Compressor

YANG Hua, QU Zongchang, ZHOU Hui, YU Bingfeng

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

**Abstract:** A dynamic model was established by analyzing the motion and the stress of the sliding vane for an innovative synchronal rotary compressor. The variation of the friction forces acting on the sliding vane with the rotation angle and the friction power loss of the sliding vane were deduced. On the basis of the dynamic model, the friction forces and the friction power loss of the sliding vane for a prototype with a capacity of  $96\text{ cm}^3/\text{r}$  were calculated and the calculation results were compared with a rotary vane compressor with the same capacity. The results show that the friction power loss between the sliding vane and the vane slot of the rotor is the main part of the vane friction power loss, i. e., 88.5% of the total. The vane friction power loss of the synchronal rotary compressor prototype is 66.08 W and decreases by 85.1% compared with that of the rotary vane compressor. The total friction power loss of the prototype is about 218 W and decreases by 53.8% compared with that of the rotary vane compressor.

**Keywords:** synchronal rotary compressor; sliding vane; friction force; friction power loss

目前,滑片式压缩机以其结构简单、体积小、运行平稳、零部件少等特点在小型空压机、汽车空调等领域得到了广泛应用,显示出较强的市场竞争性.然而,滑片式压缩机的主要缺点是滑片与气缸之间存在很高的相对运动速度,使得机械摩擦比较严重,产生了较大的磨损和能量损失,降低了其使用寿命和效率.近年来,各国学者围绕降低滑片磨损和机械摩

擦损失进行了不懈的努力,取得了一定的成果,滑片寿命已经能突破8 000 h,但是由于受到结构特点的影响,其摩擦损失一直得不到有效的降低,在一定程度上限制了滑片式压缩机的应用与发展<sup>[1-5]</sup>.

在现有滑片式压缩机结构基础上做进一步改进从而提高效率的空间已经不大,随着现代社会对压缩机能耗要求越来越高,有必要研究开发新结构压

缩机。同步回转式压缩机就是在这种背景下提出的一种新型旋转压缩机,目前已经对其进行了初步研究,并发表了相关文献<sup>[6-8]</sup>。与传统的旋转压缩机不同,同步回转式压缩机最大的特点是其转子通过滑片驱动气缸以同步回转式的方式运动,实现月牙形工作腔的容积变化,从而达到压缩气体的目的(图1)。从结构特点分析,同步回转式压缩机各运动副之间的相对运动速度较小,具有比传统旋转压缩机更低的机械摩擦损失,但是到目前为止还没有相关文献对其进行研究。本文根据同步回转式压缩机的结构特点,通过对其滑片运动和动力学的分析,建立了同步回转式压缩机滑片的动力学模型,在此基础上结合样机的结构及设计参数,求解了滑片上各处的摩擦力随主轴转角的变化情况以及摩擦功耗,并与同规格的旋叶式压缩机<sup>[9]</sup>(图2)进行了对比,证实了同步回转式压缩机具有摩擦功耗低的优点。

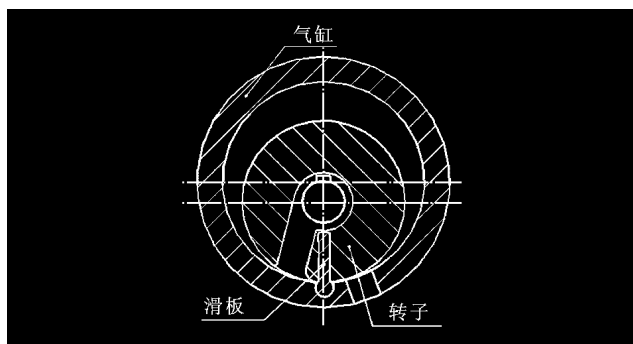


图1 同步回转式压缩机结构简图

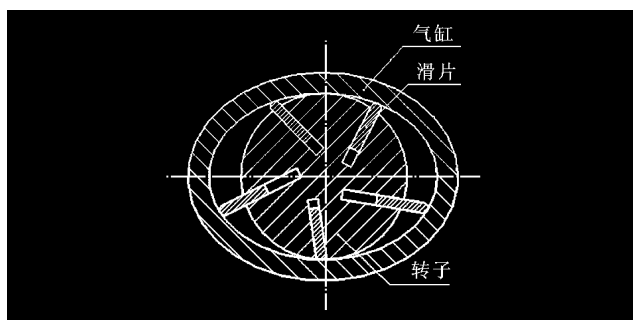


图2 旋叶式压缩机结构简图

## 1 滑片受力模型及分析

同步回转式压缩机的主要零部件有气缸、转子和滑片,其中滑片头部镶嵌在气缸上,而另一端置于转子滑槽中,将转子与气缸之间的月牙形工作腔隔为进气腔和排气腔两部分。当主轴带动转子旋转时,滑片在转子滑槽的约束力作用下一起做旋转运动,从而带动气缸做同步回转运动,实现整个工作过程。

与传统滑片式压缩机的滑片不同的是,同步回转式压缩机的滑片不仅起到了分隔工作腔的作用,还起到了传递功率带动气缸做同步回转运动的作用,其受力情况如图3所示,作用在其上的力包括以下3种。

(1)主动力:由于两侧工作腔压力不同而产生的气体压差力  $F_{SP}$ 、滑槽背压力  $F_{Sbp}$ 。

(2)惯性力:由牵连加速度引起的惯性力  $F_{Sc}$ ;由相对加速度引起的惯性力  $F_{Sr}$ ;由科氏加速度引起的惯性力  $F_{Sk}$ 。

(3)约束力及摩擦力:气缸对滑片头部的约束力  $F_{SCn}$  和  $F_{SCt}$ ;转子滑槽对滑片的支反力  $F_{Sr1}$  和  $F_{Sr2}$ ;转子滑槽与滑片之间的摩擦力  $F_{Srf1}$  和  $F_{Srf2}$ 。

在上述各力中,惯性力与滑片质量以及压缩机转速有关;气体力由压缩机进排气腔内压力以及相应作用面积决定,可以通过热力计算得到结果;转子滑槽槽口对滑片的作用力  $F_{Sr1}$  和滑槽对滑片尾部的作用力  $F_{Sr2}$  与滑片位置有关,为待求量。上述各力均为曲轴转角  $\theta$  的函数。由于滑片的重力以及工质和润滑油对滑片的黏滞阻力远远小于其所受的其他作用力,所以忽略这些力对滑片的影响。另外,假设滑片与转子滑槽之间的润滑状态良好,且在一转中其摩擦系数保持不变。

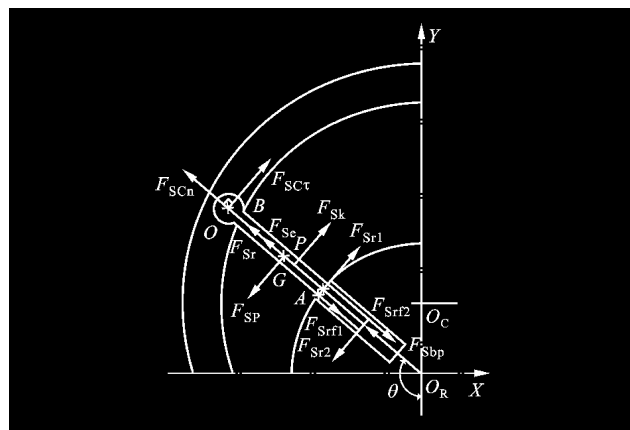


图3 滑片受力简图

根据达朗贝尔原理,得到滑片的受力方程组为

$$\begin{cases} F_{SCn} + F_{Sr} + F_{Sc} + F_{Sbp} - F_{Srf1} - F_{Srf2} = 0 \\ F_{SCt} + F_{Sk} + F_{Sr1} - F_{SP} - F_{Sr2} = 0 \\ F_{SP}l_{OP} + F_{Sr2}(l - r_s) + F_{Srf2} \frac{\delta}{2} - F_{Sk}l_{GO} - \\ F_{Sr1}l_{AO} - F_{Srf1} \frac{\delta}{2} = 0 \\ F_{Srf1} - fF_{Sr1} = 0 \\ F_{Srf2} - fF_{Sr2} = 0 \end{cases}$$

式中: $l$ 为滑片总长度; $r_s$ 为滑片头部圆头部分半径; $\delta$ 为滑片厚度; $f$ 为滑槽与滑片间的摩擦系数。

## 2 运动及摩擦分析

### 2.1 运动分析

同步回转式压缩机单个工作腔气体的吸入、压缩和排出是在两周内完成的,但是气体的吸入和压缩是在滑片两侧的工作腔内同时进行的,所以对整机而言仍是每转完成一个工作循环。新型旋叶式压

缩机为双工作腔滑片式压缩机,其主轴转过1周,各基元容积分别完成两次吸排气过程,所以其工作周期为 $180^\circ$ 。表1给出了同步回转式压缩机样机和用于比较的旋叶式压缩机样机的基本结构参数以及设计参数,可以看出双工作腔的旋叶式压缩机容积利用率比单工作腔的同步回转式压缩机高,在相同排量的情况下,旋叶式压缩机结构较为紧凑。

同步回转式压缩机和旋叶式压缩机的滑片在工作腔内的长度以及滑片相对于滑槽的运动速度如

表1 两种压缩机的基本参数

| 机型       | 转子直径<br>/mm | 气缸长轴长度<br>/mm | 滑片数 | 转子高度<br>/mm | 进气压力<br>/MPa | 排气压力<br>/MPa | 排气量<br>/ $\text{cm}^3 \cdot \text{r}^{-1}$ |
|----------|-------------|---------------|-----|-------------|--------------|--------------|--------------------------------------------|
| 同步回转式压缩机 | 86.9        | 100.0         | 1   | 50.0        | 0.3          | 1.45         | 96                                         |
| 旋叶式压缩机   | 50.2        | 67.1          | 5   | 38.4        | 0.3          | 1.45         | 96                                         |

图4、图5所示。由于结构上的差异,同步回转式压缩机的滑片在工作腔内的长度要大于旋叶式压缩机的滑片伸出长度(图4),这就意味着同步回转式压缩机的滑片上两侧工作腔的气体压差力的作用面积更大,而且由于同步回转式压缩机为单工作腔旋转压缩机,所以其两侧工作腔的气体压差要比旋叶式压缩机大。综合作用的结果是同步回转式压缩机滑片所受气体压差力要大于旋叶式压缩机,这对滑片的受力状况是不利的。图5为滑片与滑槽之间的相对运动速度,从图中可以看出,两者都是以正弦方式变化,但是旋叶式压缩机滑片与滑槽之间的相对运动速度幅值要大于同步回转式压缩机,且周期为同步回转式压缩机的一半,较高的相对运动速度相应地会带来较高的摩擦磨损,这是由于其结构特点及单、双工作腔的差异而引起的。

同步回转式压缩机在工作过程中滑片头部在气缸圆槽中做一定角度的摆动,其相对运动速度如图6所示。从图中可以看出,同步回转式压缩机的滑片头部与气缸相对运动速度非常小,其最大值小于 $0.16 \text{ m/s}$ ,而旋叶式压缩机的滑片头部与气缸之间的平均相对运动速度为 $6.15 \text{ m/s}$ ,远大于同步回转式压缩机相应的速度,同步回转式压缩机较小的相对运动速度意味着较低的磨损和摩擦功耗。

### 2.2 摩擦分析

旋转压缩机的摩擦功耗一般包括以下几个方面:滑片侧面与滑槽之间的摩擦功耗,滑片顶部与气缸之间的摩擦功耗,转子与气缸之间的摩擦功耗,主

轴与机架之间的摩擦功耗等。由于同步回转式压缩机的气缸与机架存在着相对运动,所以气缸与机架之间的轴承也存在摩擦功耗。在上述这些摩擦功耗中,滑片与滑槽以及气缸之间的摩擦功耗占主要部分,是本文的研究重点。

图7所示为滑片侧面与滑槽槽口的摩擦力随主轴转角 $\theta$ 的变化关系,图8所示为滑片尾部侧面与滑槽的摩擦力随主轴转角 $\theta$ 的变化关系,图9所示

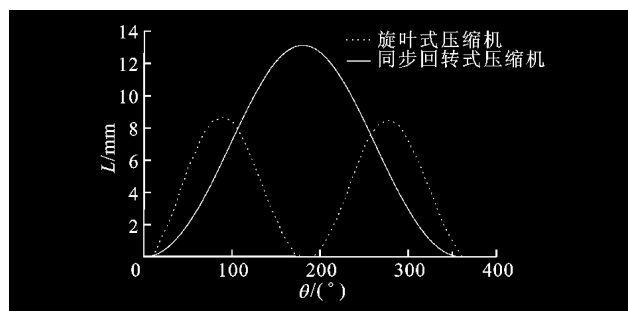


图4 滑片伸出滑槽的长度随主轴转角的变化

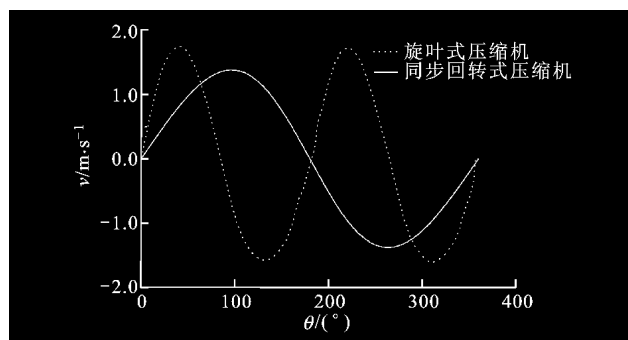


图5 滑片相对滑槽的运动速度随主轴转角的变化

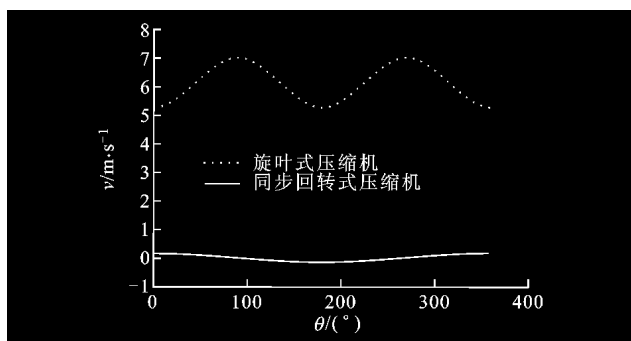


图6 滑片头部相对运动速度随主轴转角的变化

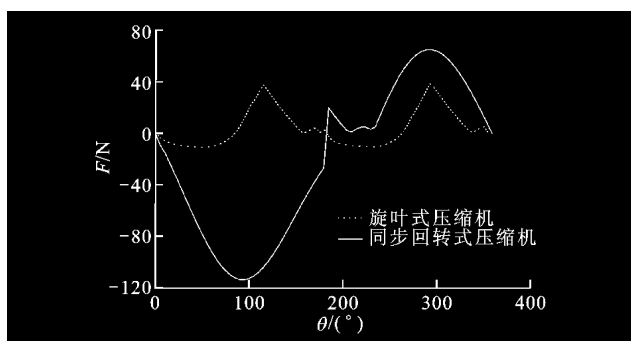


图7 滑片与槽口的摩擦力随主轴转角的变化

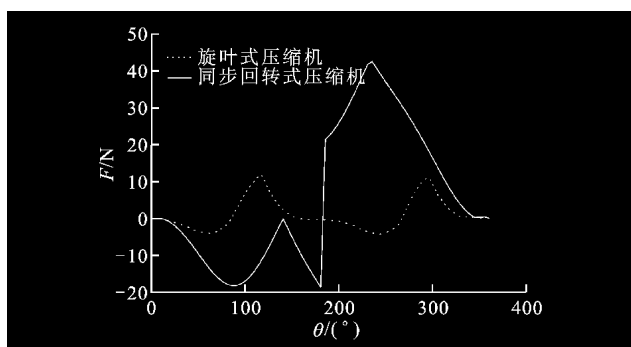


图8 滑片尾部与滑槽的摩擦力随主轴转角的变化

为滑片头部与气缸的摩擦力随主轴转角 $\theta$ 的变化关系.从图中可以看出,就单个滑片而言,同步回转式压缩机的滑片所受的摩擦力要远大于单个旋叶式压缩机滑片所受的相应的摩擦力,但是滑片的摩擦功耗不仅与作用在滑片上的摩擦力大小有关,还受到相对运动速度和滑片数量的影响,其消耗的整体摩擦功率需要综合考虑上述因素.

表2给出了同步回转式压缩机和旋叶式压缩机的滑片侧面以及头部的最大摩擦力和摩擦功耗的比

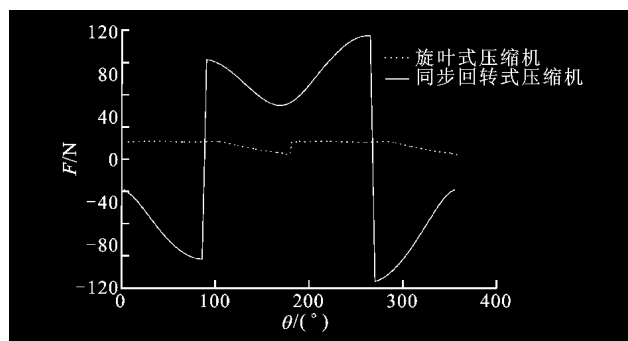


图9 滑片头部与气缸的摩擦力随主轴转角的变化

较.从表中可以看出,同步回转式压缩机滑片处的摩擦功耗主要集中在滑片侧面与滑槽之间的摩擦功耗上,头部摩擦功耗只占到滑片总摩擦功耗的11.5%,而旋叶式压缩机滑片头部与气缸内壁间的摩擦功耗占总摩擦功耗的83%.与此相反的是,同步回转式压缩机的滑片头部最大摩擦力却远大于旋叶式压缩机滑片头部最大摩擦力,这是由于同步回转式压缩机滑片头部相对运动速度很小而旋叶式压缩机滑片头部具有较高的相对运动速度.以表1所示的压缩机为例,旋叶式压缩机单个滑片总摩擦功耗约为88.67 W,而同步回转式压缩机滑片总摩擦功耗只有66.08 W,比旋叶式压缩机单个滑片的摩擦功耗降低了25.5%,比旋叶式压缩机滑片总摩擦功耗降低了85.1%.同步回转式压缩机的总摩擦功耗约为218 W,而同排量的旋叶式压缩机的摩擦功耗约为472 W,同步回转式压缩机的摩擦功耗比旋叶式压缩机的摩擦功耗降低了53.8%,大大提高了压缩机的机械效率.

### 3 结 论

本文通过对同步回转式压缩机的关键零部件滑片的受力及摩擦分析,并与相同规格的旋叶式压缩机进行比较,得出了以下结论.

(1)与旋叶式压缩机滑片头部摩擦功耗占摩擦功耗的主要部分不同,同步回转式压缩机滑片头部摩擦功耗很小,只占到滑片总摩擦功耗的11.5%,而滑片侧面与滑槽的摩擦功耗占滑片摩擦功耗的主要部分.滑片头部的磨损往往是造成旋转式压缩机

表2 滑片最大摩擦力及摩擦功耗比较

| 机型       | 最大槽口<br>摩擦力/N | 最大滑片尾<br>部摩擦力/N | 侧面摩擦<br>功耗/W | 最大头部<br>摩擦力/N | 头部摩擦<br>功耗/W |
|----------|---------------|-----------------|--------------|---------------|--------------|
| 同步回转式压缩机 | 156.34        | 41.99           | 58.51        | 114.71        | 7.57         |
| 旋叶式压缩机   | 38.29         | 11.65           | 15.03        | 16.98         | 73.64        |

失效的主要因素,因此同步回转式压缩机的可靠性较一般的滑片式压缩机和旋叶式压缩机高。

(2)同步回转式压缩机滑片摩擦功耗较新近发展起来的旋叶式压缩机滑片总摩擦功耗降低了85.1%,整机摩擦功耗比旋叶式压缩机降低了53.8%。其主要原因是同步回转式压缩机减小了运动副间的相对运动速度,相对运动速度的降低不仅可以降低摩擦功耗,同时还能有效地减小零部件的磨损,提高压缩机的使用寿命。

(3)同步回转式压缩机滑片伸出滑槽的长度较旋叶式压缩机大,且受力状况比旋叶式压缩机滑片差,有必要对其做深入的强度以及疲劳的理论探索和实验研究,以进一步提高同步回转式压缩机的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 马国远,李红旗. 旋转压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 马国远,彦启森,郁永章. 双层滑片回转运动机构的动力特性分析[J]. 中国机械工程,2001,12(7):743-746.  
MA Guoyuan, YAN Qisen, YU Yongzhang. Dynamic characteristics of double-decked vane mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2001,12(7):743-746.
- [3] HOON C S. Tribological characteristics of various surface coatings for rotary compressor vane[J]. Wear, 1998,221(2):77-85.
- [4] LEE Y Z, OH S D. Friction and wear of the rotary compressor vane-roller surfaces for several sliding conditions[J]. Wear, 2003,255(7/12):1168-1173.
- [5] OH S D, KIM J W, LEE Y Z. Friction and wear characteristics of TiN coated vane for the rotary compressor in a R410A refrigerant[J]. Tribology Transactions, 2004,47(1):29-33.
- [6] 屈宗长. 同步回转式压缩机的几何理论[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7):731-733.  
QU Zongchang. Geometric theory for a synchronal rotary compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003,37(7):731-733.
- [7] 周慧,屈宗长,冯健美,等. 同步回转式压缩机滑片运动分析[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9):982-984.  
ZHOU Hui, QU Zongchang, FENG Jianmei, et al. Sliding vane kinetic characteristics analysis for a synchronal rotary compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 982-984.
- [8] 周慧,屈宗长,俞炳丰,等. 同步回转式空气压缩机泄露研究[J]. 中国机械工程, 2007,18(2):205-208.  
ZHOU Hui, QU Zongchang, YU Bingfeng, et al. Research on leakage in synchronal rotary air compressor[J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(2):205-208.
- [9] 郭蓓,李连生,束鹏程. 旋叶式压缩机的动力特性[J]. 西安交通大学学报, 1999,33(7):37-40.  
GUO Bei, LI Liansheng, SHU Pengcheng. Dynamic characteristic of rotary vane compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(7): 37-40.

(编辑 荆树蓉)