

天然气变频涡旋压缩机的密封研究

彭斌¹ 李超² 刘振全²

(1. 兰州理工大学机电工程学院 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学石油化工学院 甘肃兰州 730050)

摘要: 根据天然气变频涡旋压缩机的自身结构特点, 重点分析了端面、结合面、间隙、径向和切向泄漏, 提出了一套相应的密封方法, 并在变频涡旋压缩机试验台上对样机进行了 400 h 测试, 对采集的数据进行了分析。结果表明: 该套密封方法能很好地密封天然气, 保证了天然气变频涡旋压缩机的可靠性, 进而为变频涡旋压缩机在天然气压缩中的广泛应用提供了理论和试验依据。

关键词: 变频涡旋压缩机; 泄漏; 密封; 天然气; 测试

中图分类号: TH45 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0150 (2005) 6-107-4

The Seal Investigation of Natural Gas Invert Scroll Compressor

Peng Bin¹ Li Chao² Liu Zhenquan²

(1. College of Mechano-electronic Engineering Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China;

2. College of Petrochemical Tech., Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract The leakage at end face, conjoint surface, clearance and other radial and tangential leakage was analyzed according to the structural characteristic of the invert scroll compressor of natural gas. A set of sealing methods was proposed. The prototype was tested on the experimental platform for 400 hours and the gathered data were analyzed. The result indicates that this sealing method can well realize natural gas sealing, can guarantee the reliability of the nature gas invert scroll compressor. It offers a theoretical and experimental basis for the wide application of invert scroll compressor in the natural gas compression.

Keywords invert scroll compressor; leakage; sealing; natural gas; test

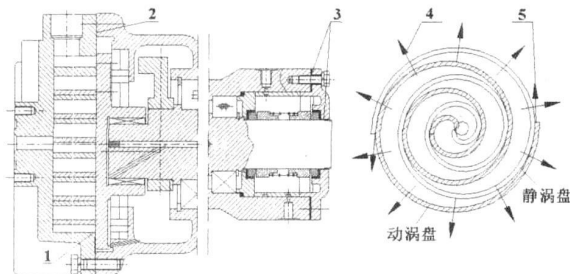
涡旋压缩机是一种结构简单、高效、省材、高可靠性、振动和噪声小的新型容积式压缩机, 目前已广泛应用于制冷、空调、各种气体压缩、发动机增压以及增压泵等。变频涡旋压缩机是在定速涡旋压缩机的基础上开发而成的, 其具有与结构相对应的涡旋压缩机所固有的优点以及变频调速的优点。当其用于天然气压缩时, 由于介质的特殊性, 要求绝对不能有外泄漏, 同时由于内泄漏影响着整机效率, 所以应尽量减小它的内泄漏, 变频涡旋压缩机的结构决定了其特殊的泄漏通道, 为了开发安全高效的天然气变频涡旋压缩机, 本文从变频压缩机的结构特点出发, 主要分析了端面、结合面、间隙、径向和切向的泄漏特点, 并相应地确定了密封方法和结构形式, 妥善解决了内泄漏和外泄漏问题, 并对样机在变频涡旋压缩机试验台上进行了试验, 取得了满意的效果, 为变频涡旋压缩机的广泛应用提供了技术支持^[1, 2]。

1 天然气变频涡旋压缩机的泄漏分析

收稿日期: 2005-02-18

作者简介: 彭斌 (1976-), 男, 博士研究生, 主要从事容积式压缩机的研究。E-mail: pengb2000@163.com.

在天然气变频涡旋压缩机 (卧式) 中, 如图 1 所示, 气体的主要泄漏形式有: 动、静涡盘结合面的端面泄漏、静涡盘与支架体的结合面泄漏、曲轴与压盖的间隙泄漏、通过轴向间隙的径向泄漏和径向间隙的切向泄漏。



1. 动静涡盘的端面泄漏 2. 静盘与支架体的端面泄漏 3. 曲轴与支架体的间隙泄漏 4. 径向泄漏 5. 切向泄漏

图 1 天然气变频涡旋压缩机的泄漏通道

1.1 端面泄漏

动、静涡旋盘结合面的端面泄漏是由于动涡旋盘处于浮动状态而造成的, 在刚启动时由于背压腔处于常压, 动涡盘受到轴向气体力的作用而离开静涡盘, 端面泄漏严重, 随着背压腔气体压力的升高,

动涡盘逐渐靠向静涡盘,动、静涡盘间形成的油膜有密封和承压作用。

1.2 结合面泄漏

静涡旋盘与支架体的结合面泄漏是由于结合表面微观的不平度,加之固体垫片在螺栓拧紧后,受到冲击振动、温度、压力、介质等作用,使垫片受剪、螺栓伸长或松动,长期下去固体垫片就会失去弹性,丧失密封作用而导致泄漏。

1.3 间隙泄漏

曲轴与压盖的间隙泄漏是由于两者的配合造成的,背压腔中的天然气沿着主轴承、轴瓦进入支架体后部,通过曲轴与压盖的间隙泄漏到大气中,这样不但增加了环境的危险性,而且破坏了涡旋压缩机的轴向平衡。

1.4 径向泄漏

径向泄漏是由动涡盘涡圈顶端与静涡盘盘底以及静涡盘涡圈顶端与动涡盘盘底之间的轴向间隙在压差的作用下而引起的工质泄漏。引起轴向间隙的因素很多,比如涡盘涡圈高度的加工误差,动涡盘和静涡盘的安装精度,涡旋齿的磨损和变形,压缩机运行过程中轴承承受压力的不一致以及防自转机构不能完全控制动涡盘的自转等。在动涡盘背面引入压缩气体来平衡轴向力的结构中,气体力的变化也会导致轴向间隙发生变化,再加上倾覆力矩和升、降速对涡盘的作用,使得轴向间隙呈现不均匀性。相对来说,轴向间隙的泄漏线长度比径向间隙的泄漏线长度大得多,因此阻止通过轴向间隙的径向泄漏对提高整机性能有着重要的作用,这些因素就使得轴向间隙的分析十分困难,一般工程应用都假定轴向间隙均匀相等而且为一个固定值。对于天然气变频涡旋压缩机,需要在动、静涡盘的涡旋齿顶部开设密封槽,把由自润滑材料制成的密封条放置于密封槽中来密封通过轴向间隙的径向泄漏。

1.5 切向泄漏

切向泄漏是由动、静涡盘的内外侧型线之间存在的径向间隙在压差的作用下引起的工质泄漏。涡旋压缩机的径向间隙是由两部分引起的,一部分是由于加工误差、装配精度偏差以及各运动部件的磨损而形成的静态间隙;另一部分是在涡旋压缩机运行过程中轴承的油膜承压不均匀或十字环的加工误差所引起的动态间隙。动态间隙在压缩机的运行过程中是瞬息万变的,对于静态间隙,由于其形成是与动涡盘和静涡盘啮合点的状态有关,啮合点是由它们相互运动而形成的,随着转角的不同,形成啮合点的型线壁面也是不同的,所以静态间隙也是随

着转角的不同而变化的。随转角变化的静态间隙与动态间隙的不确定性的耦合,使得具体理论分析径向间隙十分困难,目前几乎所有涡旋压缩机在分析切向泄漏时都认为径向间隙恒定。这 5 个泄漏通道是天然气变频涡旋压缩机的主要泄漏形式,静涡盘与支架体的结合面泄漏、曲轴与压盖的间隙泄漏属于外泄漏,动、静涡盘结合面的端面泄漏、通过轴向间隙的径向泄漏和径向间隙的切向泄漏属于内泄漏。外泄漏影响着天然气变频涡旋压缩机的可靠性,内泄漏则影响着变频涡旋压缩机的工作性能,所以对于内、外泄漏的密封同等重要^[3~5]。

2 天然气变频涡旋压缩机的密封

在天然气变频涡旋压缩机中,静涡盘与支架体结合面的密封是静密封,动、静涡盘结合面的密封、曲轴与压盖的间隙密封、涡旋齿的径向密封和切向密封属于动密封。针对这 5 种泄漏形式的特点,分别采取了相应的措施,改进了传统的密封方法,取得了不错的效果。

2.1 静密封

对于静涡盘与支架体结合面的密封,在原来固体垫片的基础上,添加了新型的液态密封胶,液态密封胶也称液态垫圈,是一种液体状态的新型高分子静密封材料,它与固体垫片不同之处在于它具有流动性,可以充满结合面之间的凹陷和缝隙,消除泄漏,因而是一种较理想的静密封材料。采用液态密封胶,可以降低静涡盘与支架体结合面的加工精度,允许提高一些表面粗糙度,对提高劳动生产率、降低成本和节约能源都有明显的效果,它与固体垫片相比具有以下特点:

(1) 表面特点:固体垫片无论如何压紧,也不能完全填满结合面上的凹凸不平部位,因此在密封面总存在间隙,而液态密封胶却能将其全部凹陷填平,具有良好的表面密封效果;

(2) 粘附特点:液态密封胶呈液态状,有一定的粘性,对结合面有良好的粘附效果,能保证与所有基面各点粘附在一起,有效防止界面泄漏;

(3) 薄膜特点:处于结合面间的液态密封胶被螺纹紧固后,液态密封胶形成的膜层几乎与间隙一样薄,一般只要间隙足够小,就能保证有良好的密封效果;

(4) 容积变化和流动:固体垫片的防泄漏作用是靠压缩产生的弹性变形,而液态密封胶是在受压和拉伸时,容积发生流动变形,不存在固体垫片的压缩变形,从而也就没有压缩疲劳、弹性破坏和应力松弛等现象,而且它总是与连接界面粘附着,所

以能防止界面泄漏。

采用新型的密封胶对结合面密封后，解决了变频涡旋压缩机长时间运转后端面泄漏的问题^[6]。

2.2 动密封

2.2.1 动、静涡盘结合面的密封

涡旋压缩机运转过程中，动、静涡盘结合面的受力如图 2 (a) 所示，下侧部分动涡盘轴向力平衡方程为：

$$\frac{F_b}{2} = \frac{F_a}{2} + F_M + F'_c \quad (1)$$

式中： F_b 为背压腔气体力； F_a 为轴向气体力； F_M 为倾覆力矩的等效力； F'_c 为下侧动涡盘端面接触力。

上侧部分动涡盘轴向力平衡方程为：

$$\frac{F_b}{2} = \frac{F_a}{2} - F_M + F''_c \quad (2)$$

式中： F''_c 为上侧动涡盘端面接触力。

从方程 (1) 和 (2) 可看出，倾覆力矩造成了上下两端的受力不同，这样就增加了密封的难度。作者在此基础上改进了涡旋盘的结构，如图 2 (b) 所示，改进结构的倾覆力矩大大减小， F_M 的值随着 H 变化，改进的结构最终可以达到零倾覆力矩的状态，这时 $F'_c = F''_c$ ，这样就改善了端面的受力情况，增加了密封的可靠性。在涡旋压缩机运转过程中，其气体轴向力、径向力、倾覆力矩、涡旋盘端面间隙和接触力等均随转角周期性变化，但背压力的变化幅度不大，这样就会影响密封性能，同时造成背压机构的功率损失。根据改进的模型对背压从理论和实际两个方面进行了优化，以损失功率作为目标函数，采用遗传算法得到了最佳的背压腔压力，很好地实现了动、静涡盘结合面的密封。

2.2.2 间隙密封

间隙泄漏属于外泄漏，必须实现绝对密封。对于间隙密封，采用了改进的机械密封机构，如图 3 所示，在改进的机械密封中，天然气的可能泄漏途径有 5 种，见图 3 中 A、B、C、D、E，其中泄漏通道 A、D、E 分别是支架体与轴承挡圈、压盖与静止件、压盖与支架体和套筒之间的密封，三者均属静密封；通道 C 是旋转件与曲轴之间的密封，当端面磨损时，它能沿轴向作微小的移动，实现两端的自动补偿，通道 C 的密封实际上也是一个相对静密封。静密封元件最常用的有 O 形橡胶圈或 V 形聚

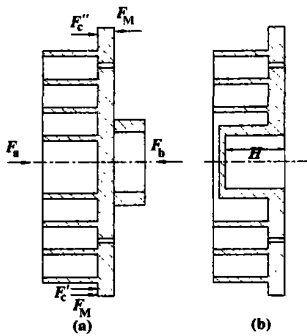
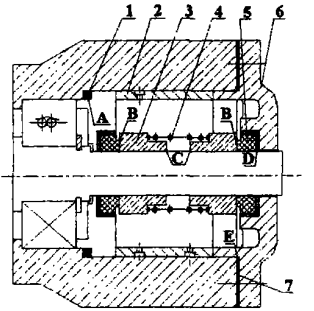


图 2 动涡盘轴向受力分析

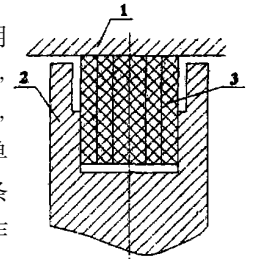
四氟乙烯圈，而作为补偿的旋转件、静止件和辅助密封则采用兼备弹性功能的橡胶、聚四氟乙烯材料等，B 通道是旋转件与静止件的端面彼此作相对滑动的密封，它是机械密封装置中的主密封，也是决定此机械密封性能和寿命的关键所在，通过保证密封端面的加工精度、平面度和表面粗糙度来实现天然气的密封。



1. 辅助密封 2. 套筒 3. 转动件 4. 弹簧 5. 静止件 6. 压盖 7. 辅助密封 2
A、B、C、D、E. 泄漏通道
图 3 机械密封结构

2.2.3 涡旋齿的轴向密封

涡旋齿顶的轴向间隙产生径向泄漏。轴向密封采用在涡旋槽底部垫钢制耐磨板，在涡旋齿顶开槽嵌入密封条，以多根密封条代替原来的单根密封条，通过多根密封条组合来防止径向泄漏。工作时密封条高出涡旋齿顶部一定距离，在密封条与槽底间保持一定的轴向间隙是非常重要的。为了保证密封效果，



1. 静涡盘 2. 动涡盘
3. 密封条
图 4 轴向密封结构

采用专门的装配工艺使密封元件与另一涡盘的底表面能够紧密地接触；考虑到密封条热膨胀和轴向力的影响，在槽上开有一小台阶，可防止密封条沉降，如图 4 所示，将高压气体引入密封条下部而将其托起，以增强密封效果。密封条兼有密封和润滑两种功能：每根密封条相互独立，自由靠向涡旋槽底部的耐磨钢板，多根密封条对径向泄漏的气体会产生迷宫密封效果；多根密封条之间的润滑油还有润滑的作用，并进一步加强了轴向的密封效果。密封条是一种浮动密封，一方面可以弥补动静盘高度上的加工误差；另一方面工作时，当密封条端面被磨损以后，可以沿轴向方向自动补偿，以保证其端面与耐磨片贴紧，而且压缩机工作的时间越长，这些贴紧的相对运动面配合越好，密封效果也就越好。密封条工作环境具有高压差、高速和高温的特点，密封条材料需要导热性好、耐磨、摩擦因数小、机械强度高、性能稳定。通过对聚四氟乙烯（塑料王）、聚醚醚酮（PEEK）和聚醚砜（PES）3 种材料分别进行共混、填充、纤维复合等增强改性方法，可得到耐热、耐磨损、抗疲劳和抗

冲击的复合材料, 进而得到性能优异的密封条。

2.2.4 涡旋齿的径向密封

径向间隙产生的切向泄漏属于内泄漏, 对于径向密封主要靠控制动、静涡盘的间隙来实现。根据啮合理论动、静涡盘的最小间隙应该为零, 但在实际应用中为防止动、静涡盘的

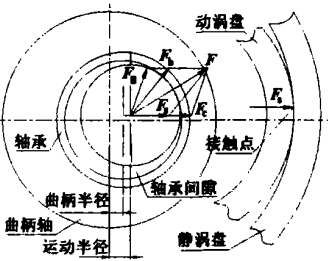


图 5 径向密封结构

摩擦, 并考虑加工精度的要求, 实际的动、静涡盘间隙不为零, 通过喷射润滑油在涡旋齿表面形成一层油膜, 利用形成的油膜来密封切向泄漏。用以防止气体切向泄漏的径向密封机构精度是影响径向间隙的主要因素之一, 用曲轴作为驱动机构, 曲柄销的径向间隙值决定了两涡旋体间的接触情况。如图 5 所示, 径向密封机构中作用力的关系为:

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_c \quad (3)$$

式中: F —合力; F_g —压缩腔内气体压力的总和; F_c —动涡盘的离心力。

$$\vec{F} = \vec{F}_b + \vec{F}_s \quad (4)$$

式中: F_b —合力在轴承的分力; F_s —合力在静盘的分力 (涡盘间的径向密封力)。

这些力的大小因曲柄径向间隙值而改变, F_s 太小就会增加泄漏, 降低密封效果, 进而影响涡旋压缩机效率; F_s 太大就会增加摩擦损失、加剧涡旋压缩机温度的升高, 从而造成功率和可靠性的降低。由于加工和安装误差的存在以及运行过程中的热变形导致各啮合线不可能同时接触, 致使切向泄漏增加。涡盘中心部位的温度最高, 热变形产生的间隙最大, 同时中心部位各工作腔压差也最大, 因而导致中心部位工作腔泄漏尤其严重, 通过对涡旋盘的 P_{ro}/E 建模, 调入 Ansys 进行变形分析, 得到涡盘的变形规律, 根据变形规律, 借助曲柄间隙的选择和调整, 使泄漏损失与摩擦损失之和为最小, 得到优化的最佳曲柄径向间隙, 进而实现径向密封^[7,8]。

3 试验

根据天然气变频涡旋压缩机的性能测试要求, 搭建了天然气压缩机系统试验台, 开发了变频涡旋压缩机的测试与数据采集分析系统, 在试验台上对采用相应密封机构和方法的变频涡旋压缩机样机进行了测试, 并对采集的数据进行了详细的分析, 获得了有关天然气变频涡旋压缩机运转的详细情况, 如表 1 所示。数据分析结果显示试验数据和理论数据符合的不错, 同时高质量地完成了系统 400 h 测试, 表明采用的密封机

构和方法是行之有效的, 保证了天然气变频涡旋压缩机的安全可靠, 完全满足了设计要求, 进而为变频涡旋压缩机在天然气压缩中的应用提供了理论和试验依据。

表 1 天然气变频涡旋压缩机性能测试

转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	排气压 力 (试验) /MPa	排气压 力 (理论) /MPa	流量 (试验) / ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	流量 (理论) / ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	功率 (试验) / /kW	功率 (理论) / /kW
1 800	0.44	0.45	0.48	0.5	2.48	2.3
2 500	0.567	0.58	0.68	0.7	3.41	3.39
3 000	0.66	0.67	0.87	0.88	4.25	4.21
3 400	0.73	0.75	0.98	1	4.74	4.737

4 结论

通过对变频涡旋压缩机各主要泄漏通道特点的分析, 提出了相应的密封方法和机构, 并应用于天然气变频涡旋压缩机, 在压缩机试验台上对样机进行了性能测试。测试结果表明采用的密封方法取得了理想的密封效果, 保证了天然气变频涡旋压缩机系统运转的安全性, 为天然气变频涡旋压缩机的广泛应用提供了技术支持。

参考文献

- [1] 李连生. 涡旋压缩机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.126~158.
- [2] 李超, 赵荣珍, 刘振全, 等. 涡旋式空气压缩机润滑系统的研究 [J]. 润滑与密封, 2004 (4): 104~105.
Li Chao Zhao Rongzhen Liu Zhenquan et al. Study on the Lubricating System of Scroll Air Compressor [J]. Lubrication Engineering 2004 (4): 104~105.
- [3] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.226~238.
- [4] 郁永章. 容积式压缩机技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.308~327.
- [5] 刘振全, 杜桂荣. 涡旋压缩机理论机构模型 [J]. 机械工程学报, 1999, 35 (2): 38~41.
Liu Zhenquan Du Guirong. Mechanical Model of Scroll Compressor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 1999, 35 (2): 38~41.
- [6] 张太强. 防治压缩机泄漏新技术 [J]. 压缩机技术, 2004 (1): 37~38.
Zhang Taiqiang. A New Way to Prevent Compressor's Leakage [J]. Compressor Technology, 2004 (1): 37~38.
- [7] 杜桂荣, 刘振全. 涡旋压缩机机构模型及径向随变调节原理 [J]. 制冷学报, 1997 (2): 1~7.
Du Guirong Liu Zhenquan. Mechanical Model of Scroll Compressor and Theoretical Analysis [J]. Journal of Refrigeration 1997 (2): 1~7.
- [8] 熊则男, 乔宗亮. 回转式压缩机与泵 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.224~225.