

# 单螺杆压缩机齿型的多圆柱包络原理

吴伟烽, 冯全科, 徐健

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 为提高单螺杆压缩机的耐磨与密封性能, 结合单螺杆压缩机多直线包络及单圆柱包络原理, 根据“多段啮合、分散磨损”提高星轮寿命的设计方法, 提出了单螺杆压缩机的多圆柱包络啮合副, 并给出其型线方程. 采用这种新型线能使啮合副中的啮合点在整个星轮齿面上均匀移动, 克服了国内外现有单螺杆压缩机啮合副星轮齿面上只有一条棱线接触、啮合副易磨损的致命缺陷. 这种啮合副能大幅减小星轮磨损, 提高单螺杆压缩机的寿命与容积效率, 增加机器的运行可靠性, 并且可采用铣削法加工, 加工效率高, 精度容易控制.

**关键词:** 单螺杆压缩机, 多圆柱包络, 啮合副

**中图分类号:** TH455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1271-04

## Principle of Multi-Column Envelope Couple of Single Screw Compressor

Wu Weifeng, Feng Quanke, Xu Jian

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

**Abstract:** Based on the multi-line and single-column envelope engaging couples of single screw compressors, a multi-column envelope engaging couple is proposed to improve the wearing-resistance property and sealing performance of the machine. The rotor groove flank of the present engaging couple is composed of multi-segment envelope surfaces, and the flank of star-wheel tooth of this engaging couple is composed of multi-cylindrical segments, which are in different dimensional orientations and with different diameters. The contacting area on the star-wheel tooth flank with the rotor groove flank moves uniformly in one revolution, which is rather different from the stationary contacting position of existing engaging couple profiles. The improved wear resistance and sealing performance of multi-column envelope couple profile would result in longer operation life and higher efficiency of the machine.

**Keywords:** single screw compressor; multi-column envelope; engaging couple

单螺杆压缩机技术<sup>[1]</sup>自20世纪60年代问世以来, 在欧美国家得到迅速发展, 特别是美国、日本等国的某些公司制造的单螺杆压缩机具有较好性能, 但是由于技术封锁等原因, 除专利外, 很少见到其他场合公开发表设计星轮和螺杆啮合型线设计及加工核心技术的资料<sup>[2]</sup>. 在国内, 也有多家制造厂在近20年中开发制造这种压缩机产品<sup>[3]</sup>, 但星轮磨损速度快, 机器容积效率低, 是单螺杆压缩机发展的主要技术障碍.

决定星轮磨损的关键因素是螺杆与星轮啮合副

的型线. 直线-直线包络面啮合副<sup>[4]</sup> (称为 Zimmern 第一类型线) 是最早被采用的啮合副, 其最大的缺点在于星轮齿面上的接触线是一条位置固定的直线, 星轮齿面上的其他部位始终不与螺杆齿面啮合, 容易磨损. 为此, Zimmern 又提出圆台(柱)-圆台(柱)包络面啮合副(称为 Zimmern 第二类型线)<sup>[5]</sup>. 这种型线在啮合过程中, 其接触部位是变化的, 但变化很小, 另外这种啮合副可采用铣削加工<sup>[6]</sup>, 可提高加工效率与精度. 为进一步提高单螺杆压缩机的性能, 国内学者曾提出2种改进型线, 即直线(二次)包络<sup>[7]</sup>

和圆台二次包络啮合副<sup>[7-8]</sup>,但二次包络啮合副的加工,特别是圆台二次包络啮合副的加工,由于精度以及星轮加工刀具等问题<sup>[9]</sup>,至今未见公开的技术方案.2005年,文献<sup>[10]</sup>提出多直线包络的单螺杆压缩机啮合副型面设计方法,其基本原理为多段啮合、分散磨损,通过多方位直线进刀加工螺杆,使星轮齿面多条特征线与螺杆槽面保持均等接触磨损的机会,从而提高机器的效率与寿命,但过多地增加特征线将使加工难度增大或者加工效率降低.

本文在多直线包络单螺杆压缩机设计方法“多段啮合、分散磨损”的基础上,首先分析了单圆柱包络型线的原理及工作特性,并据此提出单螺杆压缩机的多圆柱包络啮合副,以及主要参数的确定方法.

## 1 圆柱包络啮合副分析

当单螺杆压缩机工作时,由螺杆带动星轮围绕各自轴线旋转.星轮齿侧面与螺杆齿槽侧面啮合,星轮齿顶面与螺杆齿槽底面啮合,此即单螺杆压缩机的啮合副.单圆柱包络啮合副的星轮齿侧面为圆柱面的一部分,与其啮合的螺槽面为:使该圆柱与螺杆按照单螺杆压缩机运动规律作相对运动时该圆柱面在螺杆上形成的包络面.

单螺杆压缩机的单圆柱包络啮合过程如图1所示.图中空白部分为齿槽,曲线边界为齿槽侧面,螺杆部分用剖面线表示,为清晰起见,星轮叶片未画剖面线.图中星轮叶片左右各有一圆(柱),其中右侧在各啮合位置(I、II、III)时,星轮叶片右侧圆心与接触点连线(实线)已画出.在不同的位置,圆柱面(星轮叶片侧面)不同点与螺杆齿槽侧面接触啮合.

对处于啮合状态的某一星轮叶片与螺槽,作一个垂直于星轮半径方向且平行于星轮轴线的圆柱形,并展成平面视图(下同),见图2.在星轮与螺杆啮合过程中(不同位置,见1)参与啮合的圆弧(柱)段(如图2角度 $\theta$ 所对应的弧线)为星轮叶片侧面的一部分,该部分弧长越长,则单位弧长所承担的啮合任务(角度)越少,星轮的摩擦状况越良好,压缩机寿命越长.反之,压缩机的寿命则短.

为使 $\theta$ 角所对应的弧长较长,需采用较大的圆柱直径 $d$ ,而圆柱直径受到螺槽加工时铣刀直径的限制(当铣刀直径过大时,将在加工螺槽某一侧面过程中干涉另一侧面),显然通过增加圆柱直径来增加圆柱啮合段弧长以提高啮合副性能是有限的.

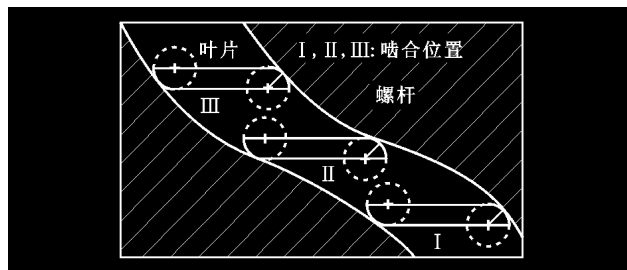


图1 单圆柱包络啮合过程

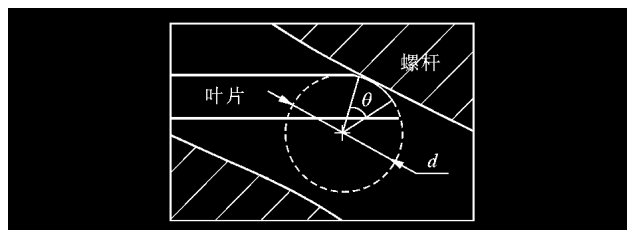


图2 单圆柱包络啮合副

## 2 多圆柱包络啮合副原理

根据“多直线包络”“多段啮合、分散磨损”的设计方法,若采用多段圆柱面作为星轮叶片侧面,则啮合段弧长由多段圆弧组成,可有效地增加啮合段弧长,分散啮合副的磨损,提高单螺杆压缩机的寿命及性能.这里暂时称这种啮合副为多圆柱包络啮合副.

### 2.1 啮合特性分析

多圆柱包络型线继承了 Zimmermann 型线的啮合原理.以 CP 型单螺杆压缩机的 3 段圆柱型线为例,对单螺杆星轮中一个叶片作一截面视图(见图3).

如图3所示,螺杆齿槽由不在同一位置的圆柱1、圆柱2和圆柱3所代表的铣刀铣削获得.在某截面I处(见图4),由3段圆柱面1、2和3组成了星轮叶片的侧面.因此,叶片在整个啮合过程中,圆柱1、圆柱2和圆柱3将会各自角度范围内分别与对应的齿槽侧面I、II和III啮合,如图4所示.

因为叶片在不同位置(转动角度)时,齿槽压缩封闭体积内气体(流体)的压力不同,叶片受力状态不一样,所以叶片与齿槽侧面之间的摩擦状态在星轮不同的转角是不同的.据此,可以根据3个圆柱之间的相对位置以及各自直径的大小调整齿槽侧面I、II和III区域的大小及位置,提高啮合副的可靠性.

实际工程中由于加工精度、振动以及热胀冷缩等因素的影响,单螺杆压缩机啮合副在运行过程中必然有部分磨损,因此经轻微磨损后能否保持啮合

副的性能,也是衡量啮合副好坏的一个标准.如本文开头所述,单圆柱包络啮合副在这方面的性能要优于直线包络啮合副,具体请参见文献[5].相对于单圆柱包络啮合副,多圆柱包络啮合副相当于增大了星轮齿侧面的曲率,增加了啮合段的弧长度,减小了螺槽面与星轮齿侧面之间的侧隙,从而可提高单螺杆压缩机啮合副的密封性能,减少星轮齿侧的泄漏,如图 5 所示.

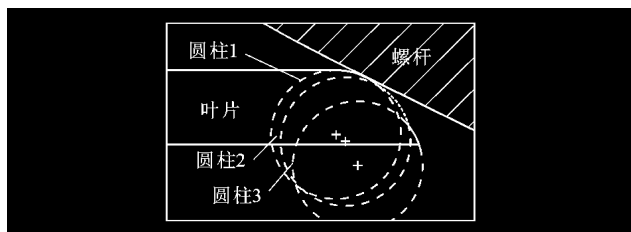


图 3 单螺杆压缩机的多圆柱啮合副啮合示意图

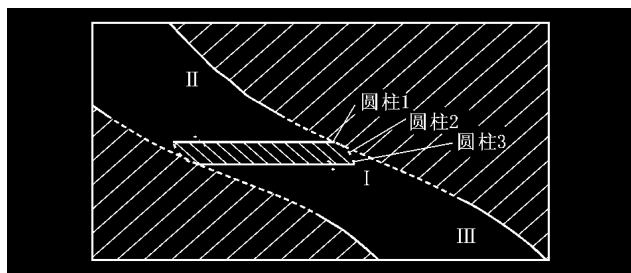


图 4 多圆柱分段(3 段)啮合示意图

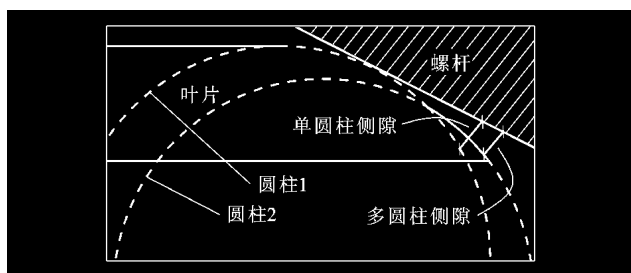


图 5 啮合副星轮齿侧与螺槽面侧隙

## 2.2 型线方程

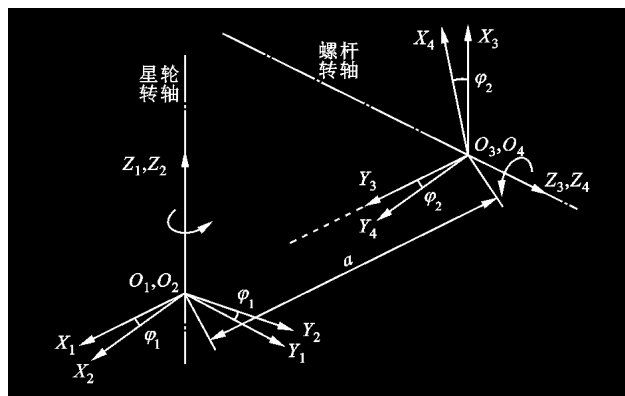
以 CP 型单螺杆压缩机为例,根据星轮与螺杆啮合位置关系,建立了图 6 所示的坐标系.在图 6a 中,坐标系 1 与 3(用下标 1、3 表示,下面以此类推)固结于地面,其中坐标系 1 的原点  $O_1$  在星轮轴与螺杆轴的垂足,  $Z_1$  轴与星轮轴重合,  $X_1$ 、 $Y_1$  轴按照右手螺旋规则布置.坐标系 3 的  $Z_3$  轴与螺杆轴线重合,原点  $O_3$  在螺杆轴与星轮轴的垂足,  $X_3$ 、 $Y_3$  轴按照右手螺旋规则布置.坐标系 2 固结于星轮,初始位置与坐标系 1 重合.坐标系 4 固结于螺杆,初始位置与坐标系 3 重合.根据星轮与螺杆之间的运动关

系,当坐标系 2 绕  $Z_2$  轴转动的角度为  $\varphi_1$  时,坐标系 4 绕  $Z_4$  轴转动的角度为  $\varphi_2$ ,则

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{\omega_b}{\omega_a} = p \quad (1)$$

式中:  $p$  为星轮与螺杆的齿数比, CP 型单螺杆压缩机通常  $p$  为 11<sup>[1]</sup>;  $\omega_a$ 、 $\omega_b$  分别为星轮与螺杆转动的角速度.图 6 中  $a$  为星轮与螺杆的中心距.

取多圆柱包络啮合副中任一圆柱进行分析,设该圆柱为  $i$ ,其位置如图 6b 所示.



(a) 坐标系

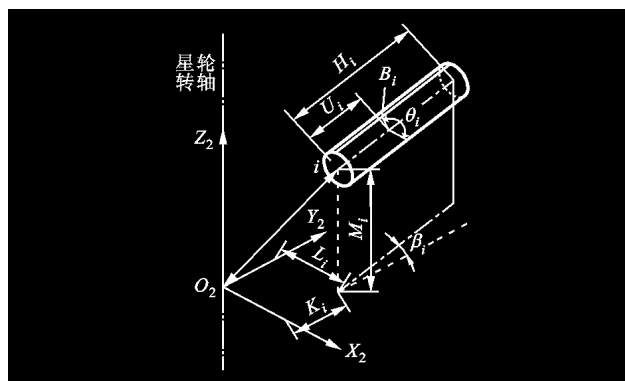
(b) 圆柱  $i$  位置示意图

图 6 CP 型单螺杆压缩机啮合副坐标系

根据坐标变换原理可推得,当星轮转角为  $\varphi_1$ 、螺杆转角为  $\varphi_2$  时,圆柱  $i$  上圆柱高度为  $u_i$  处与螺杆齿槽面的接触点  $B_i$  的角度

$$\theta_i = \begin{cases} \arctan\left(-\frac{A_i}{C_i}\right) & \text{叶片右侧} \\ \pi + \arctan\left(-\frac{A_i}{C_i}\right) & \text{叶片左侧} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$A_i \cos \theta_i + C_i \sin \theta_i = 0$$

$$A_i = L_i \sin \beta_i - K_i \cos \beta_i - p \cos(\beta_i + \varphi_1) M_i - u_i$$

$$C_i = p[-u_i \sin(\beta_i + \varphi_1) + L_i \cos \varphi_1 - K_i \sin \varphi_1 + a]$$

可得圆柱  $i$  在螺杆上的包络面为

$$\left. \begin{aligned} x_{i4} &= \left( L_i - u_i \sin \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \cos \beta_i \right) \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \\ &\quad \left( M_i + \frac{d_i}{2} \sin \theta_i \right) \cos \varphi_2 + a \sin \varphi_2 - \\ &\quad \left( K_i + u_i \cos \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \sin \beta_i \right) \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \\ y_{i4} &= \left( L_i - u_i \sin \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \cos \beta_i \right) \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \\ &\quad \left( M_i + \frac{d_i}{2} \sin \theta_i \right) \sin \varphi_2 + a \cos \varphi_2 - \\ &\quad \left( K_i + u_i \cos \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \sin \beta_i \right) \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \\ z_{i4} &= \left( L_i - u_i \sin \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \cos \beta_i \right) \sin \varphi_1 + \\ &\quad \left( K_i + u_i \cos \beta_i + \frac{d_i}{2} \cos \theta_i \sin \beta_i \right) \cos \varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $0 \leq u_i \leq H_i$ ;  $\theta_i$  由式(2)确定;  $(x_{i4}, y_{i4}, z_{i4})$  表示圆柱  $i$  在坐标系 4 中包络面上各点的坐标. 将  $\varphi_1$  值代入式(2), 可得圆柱  $i$  上对应的瞬时接触线方程. 在确定各段啮合角度范围后, 根据式(2)、式(3)对多圆柱参数进行计算. 通常, 当  $\varphi_1 \in (\varphi_a, \varphi_b)$  时, 星轮齿与螺杆开始啮合,  $(\varphi_a, \varphi_b)$  则由星轮与螺杆的直径、中心距以及齿长确定. 可根据啮合要求(例如等角度或者等弧长啮合), 确定各圆柱段的啮合角度范围角  $\varphi_i$ . 当  $\varphi_1 \in (\varphi_a, \varphi_1)$  时, 螺杆与圆柱段 I 啮合, 当  $\varphi_1 \in (\varphi_1, \varphi_{II})$  时, 螺杆与圆柱段 II 啮合, 依此类推.

### 3 结 论

(1) 本文对单圆柱啮合副的原理及工作特性进行了讨论, 发现其星轮叶片侧面圆柱啮合段弧长受铣刀直径限制, 从而影响单螺杆压缩机耐磨与密封性能的提高.

(2) 结合单螺杆压缩机多直线包络及单圆柱包络原理, 根据“多段啮合、分散磨损”提高星轮寿命的设计方法, 提出了单螺杆压缩机的多圆柱包络啮合副, 给出了多圆柱包络啮合副的型线方程.

(3) 多圆柱包络啮合副以多段圆柱分段啮合, 分散磨损, 其耐磨与密封性能优于现有啮合副, 从而可提高单螺杆压缩机的寿命与容积效率.

(4) 考虑到圆柱包络可采用铣刀加工的优点, 多圆柱包络啮合副的加工亦采用铣削法, 易实现且精度容易控制.

### 参考文献:

- [1] Zimmern B, Ganshyam C. Design and operating characteristics of the Zimmern single screw compressor [C] // Compressor Technology Conference. Indiana, USA: Printing Service (Marti Hatke-Oteham), Purdue University, 1972: 96-99.
- [2] 郑雷飞, 夏振鹏. 我国单螺杆压缩机的发展历程与进展 [J]. 压缩机技术, 2006, 196(2): 44-47.  
Zheng Leifei, Xia Zhenpeng. Development and progress of single screw compressor in China [J]. Compressor Technology, 2006, 196(2): 44-47.
- [3] 郁永章. 容积式压缩机技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 645.
- [4] Zimmern B. Compressors and expansion machines of the single worm type: USA, 3945778[P]. 1976-05-23.
- [5] Zimmern B. Rotary injection worm and worm wheel with specific tooth type: USA, 3932077[P]. 1976-01-13.
- [6] Jensen D. A new single screw compressor design that enables a new manufacturing process [C] // Compressor Technology Conference. Indiana, USA: Printing Services (Marti Hatke Oteham), Purdue University, 1998: 601-606.
- [7] 金光熹. 单螺杆压缩机型线和流体动力润滑研究 [J]. 西安交通大学学报, 1982, 16(2): 75-82.  
Jin Guangxi. Profile and lubrication research of single screw compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1982, 16(2): 75-82.
- [8] 金光熹, 汤炎. 单螺杆压缩机啮合副型线研究的新进展 [J]. 西安交通大学学报, 1985, 19(6): 1-9.  
Jin Guangxi, Tang Yan. Recent advances in the profile study of the engagement pair of a single screw compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1985, 19(6): 1-9.
- [9] 查世梁, 查谦, 方宜荣. 单螺杆压缩机的现状 [J]. 压缩机技术, 1994, 126(4): 47-48.  
Zha Shiliang, Zha Qian, Fang Yirong. Present status of the single screw compressor [J]. Compressor Technology, 1994, 126(4): 47-48.
- [10] 冯全科, 郭蓓, 赵付, 等. 多直线包络的单螺杆压缩机啮合副型面设计方法 [J]. 压缩机技术, 2005, 191(3): 1-6.  
Feng Quanke, Guo Bei, Zhao Chun, et al. A design method of engaging couple profile of single screw compressors enveloped by multi-straight lines [J]. Compressor Technology, 2005, 191(3): 1-6.

(编辑 王焕雪)