

文章编号: 1005-0329(2016)06-0017-07



# 涡旋型线对涡旋压缩机性能的影响

彭 斌<sup>1,2</sup> 朱兵国<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学温州泵阀工程研究院, 浙江温州 325105)

**摘 要:** 构成涡旋压缩机涡旋齿的型线有很多种, 不同型线的类型以及几何参数直接影响着涡旋压缩机的性能和结构尺寸。在现有涡旋型线几何理论的基础上, 对圆、线段和正四边形渐开线以及变半径圆渐开线和组合型线的几何特性进行了详细的探讨, 采用控制变量的方法, 对比分析了不同涡旋型线几何参数和结构参数之间的相互关系; 计算分析了圆渐开线和组合型线构成的动涡旋盘所受的气体力, 计算结果表明组合型线动涡旋盘所受的气体力波动较大, 研究得到的结果为涡旋压缩机的设计提供了一定的理论基础和应用参考。

**关键词:** 涡旋压缩机; 型线; 几何特性

中图分类号: TH4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1005-0329.2016.06.004

## Effect of Scroll Profiles on the Performance of Scroll Compressors

PENG Bin<sup>1,2</sup> ZHU Bing-guo<sup>1,2</sup>

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute, Lanzhou University of Technology, Wenzhou 325105, China)

**Abstract:** A number of geometrical curves have been used to form the wraps of scroll compressor, the type of scroll profiles and geometrical parameters have directly effect on the performance and structure size of scroll compressor. On the basis of geometrical theory of scroll wraps, the geometrical characteristic of involute of circle, line segment, square and variable radius have been discussed in detail. The control variate method is applied to analyse the relationship of geometrical parameters and structure parameters for different scroll profiles. Gas forces of involute of circle and hybrid profile are investigated. From the comparison results, it can be seen that the change of gas forces for hybrid profile is relatively big. The study results may be used for the development of scroll compressor.

**Key words:** scroll compressor; profiles; geometrical characteristic

### 1 前言

涡旋压缩机是继往复式压缩机、转子压缩机、螺杆压缩机后被誉为最先进的容积式压缩机。具有结构紧凑、容积效率高、可靠性高、噪声低、重量轻、运转平稳等诸多优点<sup>[1~6]</sup>, 目前已在制冷、空调、各种气体压缩、发动机增压及增压泵等领域得到广泛应用, 有着广阔的应用前景和市场。

涡旋型线的种类和几何参数不仅直接影响压缩腔容积和内容积比的大小, 而且影响涡旋压缩

机结构、力学、热力学、功耗、效率等重要参数及加工性能、磨损、寿命、噪声等重要技术指标。因此涡旋型线是涡旋压缩机结构设计和性能优化的基础和关键, 它是涡旋压缩机设计与开发的重点和难点, 受到了世界各国专利的保护和限制, 一直是国内外学者研究的热点。目前的涡旋型线可以分为两大类: (1) 等截面——主工作涡旋齿为等壁厚; (2) 变截面——主工作涡旋齿为非等壁厚。本文依据现有涡旋型线—圆、线段、正四边形(构成等壁厚涡旋齿)、变半径圆渐开线和组合型

收稿日期: 2015-12-01 修稿日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275226); 浙江省自然科学基金资助项目(LY12E05010)

线(构成非等壁厚涡旋齿)的几何理论,对上述各类涡旋型线的几何特性进行详细的对比分析,在吸气容积、涡旋盘最小直径、齿厚、容积比等一定的情况下比较各类型线的涡旋圈数、回转半径以及开始排气角等。同时,在齿高、齿厚、涡旋圈数一定的情况下比较吸气容积、容积比等几何参数和结构参数。最后对圆渐开线和组合型线所构成的动涡旋盘上所受的气体力分别进行计算分析。

## 2 涡旋压缩机理论型线

### 2.1 涡旋型线构成原则

要保证涡旋压缩机正常工作,涡旋型线的构成应符合如下原则:

(1) 对于动涡旋盘或静涡旋盘上位于压缩腔内的任一给定点,在静涡旋盘或动涡旋盘上,必须有一点且只有一点与之相啮合,并且内侧壁面上的点与外侧壁面上的点相啮合。

(2) 当涡旋型线上一对共轭点相啮合时,动、静涡旋盘涡旋型线特征几何中心之间的距离(回转半径)不随主轴转角变化而变化。这里的特征是指能够反映涡旋型线类型的几何形状,对于圆渐开线涡旋型线而言,是指基圆。

(3) 一对啮合点相啮合时,啮合点所在涡旋型线的切向相互平行,并且与通过涡旋型线特征几何中心之间连线的方向垂直。

### 2.2 涡旋型线构成判定

目前,关于涡旋型线构成判定主要有2种方法:几何判定法和数值判定法。

#### 2.2.1 几何判定法

几何判定法的实质在于:先假定某种曲线可以构成涡旋型线,并用它去构造涡旋压缩机的涡旋压缩腔,再根据涡旋型线构成条件,通过直观的图示予以判定。

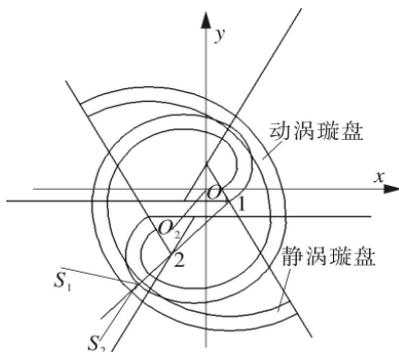


图1 正三角形渐开线构成的容积腔示意

(1) 奇数列正多边形渐开线。奇数列正多边形渐开线是指以边数为奇数但等边长的正多边形为特征形状构成的渐开线。若正多边形的边长为  $a$ , 则对应的节距  $p$  为  $na$ ,  $n$  表示正多边形的边数。图1表示假定边长为  $a$  的正三角形可以用作涡旋型线时,构成的涡旋压缩机压缩腔投影图。若以正三角形的几何中心(静涡旋盘的几何中心)为直角坐标系的中心,则点1的坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = a/2 \\ y_1 = -(\sqrt{3}/6)a \end{cases} \quad (1)$$

静涡旋盘中心  $O_1$  与动涡旋盘中心  $O_2$  的距离为  $R_{or}$ , 即主轴偏心距。 $O_1$  与  $O_2$  连线与  $x$  轴反方向夹角为  $\theta$ , 则点2的坐标为:

$$\begin{cases} x_2 = -R_{or} \cos\theta \\ y_2 = -R_{or} \sin\theta - a/6(3\sqrt{3} - 1) \end{cases} \quad (2)$$

若动静涡旋盘型线是啮合的,则在点1与点2连线的延长方向必有啮合点  $S$ , 即点  $S_1$  与  $S_2$  应该是重合的且与点  $S$  重合。因为点2与点  $S_1$  的距离为  $a$ , 点1与点  $S_2$  的距离为  $(3a - t)$ , 所以,只要能证明  $r$  为常数时,点1与点2的距离为  $(2a - t)$  即可。

点1至点2的距离为:

$$\overline{12} = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{1/2} \neq 2a - t \quad (3)$$

式中  $t$ ——涡旋型线壁厚

所以,点  $S_1$  与点  $S_2$  不重合,正三角形渐开线构成的型线不具有啮合性,不符合涡旋型线的构成原则,不能构成涡旋压缩机的型线。同理,可以判定正五边形、正七边形等奇数列正多边形渐开线,不能构成涡旋压缩机的基本型线。

(2) 偶数列正多边形渐开线。偶数列正多边形渐开线,是指以边数为偶数但等边长的正多边形为特征形状构成的渐开线。

图2表示假定边长为  $a$  的正四边形可以用作涡旋型线时,构成的涡旋压缩机压缩腔投影图。正四边形渐开线能否构成涡旋型线,要看渐开线的啮合性。图中  $S_1$  和  $S_2$  为啮合点,设静涡旋盘中心  $O_1$  与动涡旋盘中心  $O_2$  的距离为  $R_{or}$ , 即主轴偏心距,由于点  $O_1$ 、 $O_2$ 、点1与点2构成平行四边形,因此点1与点2的距离也为  $R_{or}$ 。点1与点  $S_1$  的距离为  $a$ , 而点2至点  $S_1$  的距离为  $(3a - t)$ , 则有:  $R_{or} = 2a - t = 0.5p - t$ 。所以点  $S_1$  是啮合的。同理,可以证明点  $S_2$  的啮合性。当主轴转角为任意角时,只要  $R_{or}$  为常数,仍然可以证明正四边形

渐开线位于压缩腔内的任一点的啮合性,所以说正四边形渐开线可以构成涡旋压缩机的基本型线。同理可以判断:其它偶数列正多边形渐开线,包括圆和线段2种渐开线,可以构成涡旋压缩机的涡旋型线。

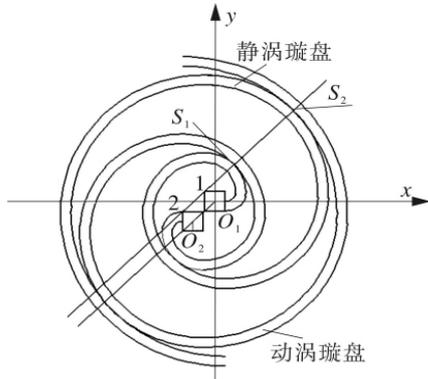


图2 正四边形渐开线构成的容积腔示意

2.2.2 数值判定法

数值计算机的原理与实质就是利用电子计算机,根据涡旋型线的构成条件编制判定程序,通过输入基本几何参数来进行判定的一种有效的方法。

3 等截面涡旋型线

图3(a)、(b)、(c)分别为圆、线段、正四边形渐开线。

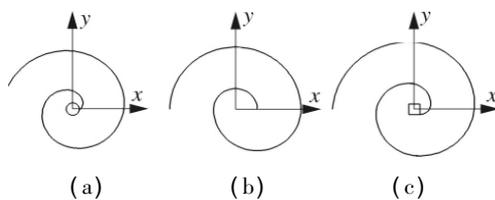


图3 圆、线段和正四边形渐开线

关于这3种渐开线的研究,其几何理论比较成熟,本文不再赘述。工作腔容积关系的表达式已给出<sup>[7-9]</sup>,这里只给出吸气容积的表达式。

圆渐开线:

$$V_{suc} = \pi P(P - 2t)h \left[ (2N - 1) - \frac{\theta_s}{\pi} \right] \quad (4)$$

式中  $P$ ——圆渐开线节距

$t$ ——齿厚

$h$ ——齿高

$N$ ——涡旋圈数

$\theta_s$ ——吸气结束时主轴转过的角度

线段渐开线:

$$V_{suc} = \pi h(l - t) \left[ (4Nl - 3l - t) + \frac{\pi - \theta_s}{\pi} \times (4Nl - l - t) + \frac{\theta_s}{\pi} (4Nl - 5l - t) \right] \quad (5)$$

式中  $l$ ——线段长度

正四边形渐开线:

$$V_{suc} = \frac{\pi}{2} h \sum_{j=1}^4 \{ [4(N - 1) + j]b - t \}^2 - [4(N - 1) + j - 2]^2 b^2 \} \quad (6)$$

式中  $b$ ——正四边形的边长

式(6)只适用于涡旋圈数  $N$  为整数圈的情况,任意圈数吸气容积的表达式见文献[1]。

表1给出了以上3种型线的基本几何参数,并采用文献[1,7,8]的几何模型,计算了3种渐开线在  $N, t, h$  相等时,压缩腔容积的变化以及内容积比的变化,结果如图4和图5所示。

表1 3种类型渐开线  $N, t, h$  相等时基本几何参数

类型	$N$	$t$ (mm)	$h$ (mm)	$a/l/b$ (mm)	$V_{suc}$ ( $cm^3$ )	$e$
圆	3	3.93	20	5	232.095	3.815
线段	3	3.93	20	10	73.280	2.662
正四边形	3	3.93	20	10	375.752	2.816

注: $a$ :基圆半径; $e$ :内容积比。

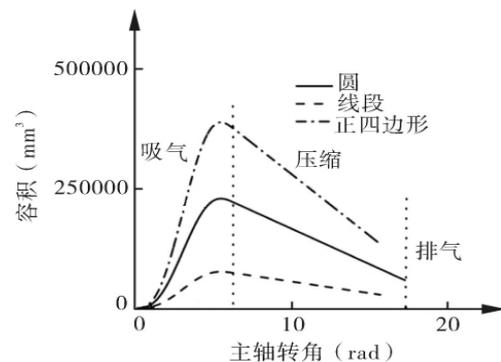


图4 压缩腔容积的变化

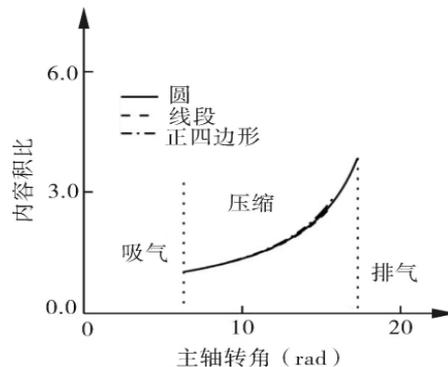


图5 内容积比的变化

从图4、图5和表1中可以看出,当3种渐开线的 $N$ 、 $t$ 、 $h$ 相等时,圆渐开线内容积比最大,正四边形渐开线吸气容积最大,线段渐开线吸气容积和内容积比介于二者之间。

确定涡旋型线几何参数的直接目的,在于满足涡旋压缩机的吸气容积和容积比要求。为了进一步比较圆、线段、正四边形3种渐开线对涡旋压缩机几何参数的影响,一些基本参数约定为: $h=20\text{mm}$ ,  $V_{suc}=90\text{cm}^3$ ,  $t=3.5\text{mm}$ ,  $\rho=30$ 。

把已经确定的基本参数 $h$ 、 $t$ 、 $e$ 和 $V_{suc}$ 代入文献[18]中容积计算表达式中,可得圆、线段、正四边形的特征参数 $a$ 、 $l$ 和 $b$ 。3种渐开线构成的涡旋型线的几何参数见表2。

表2 3种类型渐开线 $h$ 、 $t$ 、 $e$ 、 $V_{suc}$ 相等时基本几何参数

类型	$a/l/b$ (mm)	$N$	$\theta_d$ (rad)	$t$ (mm)	$h$ (mm)	$V_{suc}$ ( $\text{cm}^3$ )	$e$
圆	3.2546	3.104	3.9686	3.5	20	90	3
线段	9.15	4.058	1.57	3.5	20	90	3
正四边形	4.774	3.817	1.57	3.5	20	90	3

从表2可以看出,在满足相同吸气容积与容积比,且涡旋体壁厚与涡旋齿高相等的情况下,圆的渐开线需要的圈数最少,而线段渐开线需要的圈数最多,正四边形渐开线介于二者之间。不论哪一种型线,当吸气容积增大时,其特征参数与压缩腔数增大。对于圆渐开线,开始排气角随吸气容积的增大而减少。

以上对3种等截面型线的基本几何参数进行了分析与研究,下面将从涡旋压缩机的两种泄漏出发,比较分析3种型线构成的涡旋压缩机工作腔的泄漏线长度的变化。对于3种型线构成的压缩腔,通过径向间隙 $C_r$ 的切向气体泄漏线长度,都为涡旋高度 $h$ ,通过轴向间隙的径向气体泄漏线长度可由下式确定。

圆渐开线:

$$L = \frac{a}{2} \left( 2\pi N + \frac{1}{4} \right)^2 \quad (7)$$

线段渐开线:

第 $i$ 个压缩腔的泄漏线长度为:

$$L = \begin{cases} [(2i+1)l-t/2]2\theta + (3il-t/2)2(\pi-\theta) & 0 \leq \theta \leq \pi \\ (2il-t/2)2(\theta-\pi) + [(2i+1)l-t/2]2(2\pi-\theta) & \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad i \geq 2 \quad (8)$$

正四边形渐开线:

$$L = \sum \{ [(4i-1)b-t/2]t [(4i-2)b-t/2] + [(4i-3)b-t/2] + (4ib-t/2) \} - \pi/4(b-t/2) + A(N) \quad (9)$$

其中

$$A(N) = \begin{cases} (4M+1)b(N-M)\pi & 0 \leq N-M \leq 0.25 \\ [M(4N-4M-2) + 2N-1/4]\pi b & 0.25 \leq N-M \leq 0.5 \\ [M(4N-4M-3) + 3N-3/4]\pi b & 0.5 \leq N-M \leq 0.75 \\ [M(4N-4M-4) + 2N-1/4]\pi b & 0.75 \leq N-M \leq 1 \end{cases}$$

式中  $M$ ——圈数的取整函数  $\text{int}(N)$

从以上公式可以得出,当涡旋线高度、壁厚、内容积比及吸气容积相同时,正四边形渐开线涡旋压缩机轴向间隙的泄漏线长度最长,圆渐开线的最短。

## 4 变截面涡旋型线

### 4.1 变基圆半径渐开线

在变基圆半径渐开线的研究方面,K Tojo 首先研究并分析了它作为涡旋型线的可行性<sup>[10]</sup>。李雪琴等建立了变基圆半径渐开线的共轭啮合型线方程,对各种参数下的型线特点及几何形状进行了介绍<sup>[11]</sup>。王吉岱等对变基圆半径渐开线涡旋膨胀机进行了研究,根据涡旋机正常工作的原则,给出了变基圆半径渐开线作为涡旋型线所满足的条件,并推导出了型线方程和各个腔体的容积计算公式,但是其模型只考虑了加速指数为1的情况<sup>[12]</sup>。

#### 4.1.1 涡旋型线的表达式

变半径基圆渐开线如图6所示。传统的圆渐开线是由恒定基圆半径 $a$ 加上曲线上每一点的曲率半径 $K$ 组成,而变基圆半径渐开线与圆渐开线最大的区别是 $a$ 和 $K$ 都随着渐开角 $\varphi$ 变化。

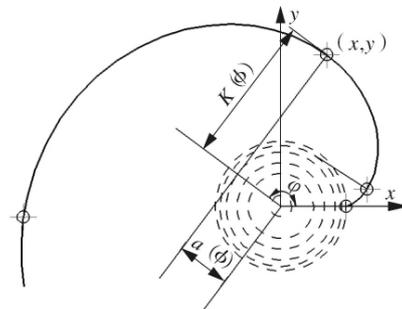


图6 变半径基圆渐开线

则图 6 所示的渐开线可以表示为:

$$\begin{cases} x = a(\varphi) \cos(\varphi) + K(\varphi) \sin(\varphi) \\ y = a(\varphi) \sin(\varphi) - K(\varphi) \cos(\varphi) \end{cases} \quad (10)$$

其中  $a(\varphi) = a_o + \delta_o \varphi^k$

$$K(\varphi) = \int_0^\varphi (a_o + \delta_o \varphi^k) d\varphi = a_o \varphi + \frac{\delta_o}{k+1} \varphi^{k+1}$$

式中  $k$ ——加速指数

$a_o, \delta_o$ ——基圆初始半径及相关系数

当  $\delta_o = 0$  时 型线为圆渐开线,若  $\delta_o > 0$  或  $\delta_o < 0$  则:

$$a_{ou}(\varphi) = a_o + \delta_o \varphi^k \quad (11)$$

$$K_{ou}(\varphi) = \int_0^\varphi (a_o + \delta_o \varphi^k) d\varphi = a_o \varphi + \frac{\delta_o}{k+1} \varphi^{k+1} \quad (12)$$

涡旋齿的壁厚随着渐开角的增大相应的增大或减小。图 7 分别表示  $\delta_o < 0, \delta_o = 0$  和  $\delta_o > 0$  的情形  $\delta_o < 0$  时,由于外外圈所受的气体力较小,内圈所受的气体力较大,增大内圈的壁厚显然可以增强涡旋齿的强度,从而提升涡旋压缩机运行的稳定性。实际应用模型中,涡旋压缩机的涡旋齿都是有 2 条渐开线组成(内壁和外壁),如图 8 所示,图中  $\alpha_{in}$  和  $\alpha_{ou}$  分别为内外壁线起始发生角。

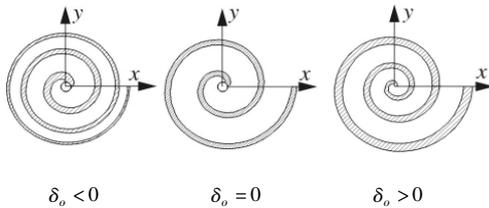


图 7 变半径基圆渐开线涡旋齿

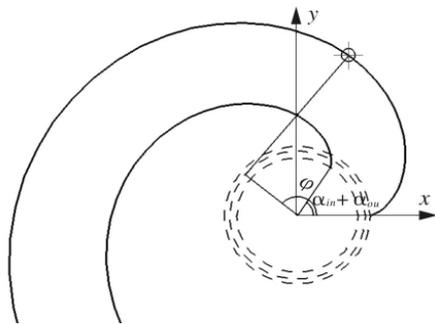


图 8 变半径基圆渐开线内外壁线

则静涡旋体的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_{f_{ou}} = a_{ou}(\varphi) \cos(\varphi) + K_{ou}(\varphi) \sin(\varphi) \\ y_{f_{ou}} = a_{ou}(\varphi) \sin(\varphi) - K_{ou}(\varphi) \cos(\varphi) \\ x_{f_{in}} = a_{in}(\varphi) \cos(\varphi + \pi) + K_{in}(\varphi) \sin(\varphi + \pi) \\ y_{f_{in}} = a_{in}(\varphi) \sin(\varphi + \pi) - K_{in}(\varphi) \cos(\varphi + \pi) \end{cases} \quad (13)$$

式中  $f$ ——下标 静涡旋盘

$ou, in$ ——下标 外壁和内壁线

其中  $a_{in}(\varphi) = a_o + \delta_o \varphi^k$

$$K_{in}(\varphi) = a_o [\varphi + (\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou})] + \frac{\delta_o}{k+1} [\varphi^{k+1} + (-1)^{k+2} (\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou})^{k+1}]$$

#### 4.1.2 回转半径及容积表达式

根据涡旋型线的啮合特性及涡旋压缩机的工作原理,文献[10]推导出了变基圆半径涡旋型线的转动半径  $R_{or}$ :

$$R_{or} = a_o (\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou}) + \frac{\delta_o}{k+1} (-1)^{k+2} \times (\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou})^{k+1} \quad (14)$$

并分别讨论了  $k = 0, 1, 2$  以及  $k$  为非整数的各种情况。当  $k = 1, \alpha_{in} = \alpha_{ou} = \alpha$  时,对称腔容积的表达式为:

$$V(\varphi) = - (h/6) \pi (\pi - 2\alpha) [-2a_o + (\pi - 2\alpha) \delta_o] \times \{ -6a_o (\pi + 2\alpha - 2\varphi) + \delta_o [5\pi^2 + 12\pi(\alpha - \varphi) + 6(\varphi^2 - 2\alpha^2)] \} \quad (15)$$

$$\frac{dV(\varphi)}{d\varphi} = - (h/6) \pi (\pi - 2\alpha) [-2a_o + (\pi - 2\alpha) \delta_o] \times [12a_o + \delta_o (-12\pi + 12\varphi)] \quad (16)$$

$$\begin{cases} V_{suc} = V(\varphi_E) \\ V_{dis} = V(\varphi_D) \end{cases} \quad (17)$$

#### 4.1.3 几何参数分析与讨论

为了分析与讨论的方便,本文取  $k = 1, \alpha_{in} = \alpha_{ou} = \alpha$ 。表 3 为变基圆半径渐开线的 4 种组合 ( $a_o, \delta_o$  和  $\alpha$  的取值不同)  $C_1, C_2, C_3, C_4$  与圆渐开线 ( $C_o$ ) 几何参数对比分析的结果。

表 3  $V_{suc}, e, D_m$  保持一定时,圆、半径基圆渐开线对比分析结果

设计参数	$C_o$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
$\varphi_E$ (rad)	17.055	17.055	17.055	17.055	17.055
$\alpha$ (rad)	0.785	0.733	0.785	0.810	0.846
$a_o$ (mm)	2	2.1	2.2	2.3	2.4
$a_o/\delta_o$	-	-143	-177	-107	-90
$h$ (mm)	6	5.3	5.2	5	4.86
$V_{suc}$ (cm <sup>3</sup> )	7000	7000	7000	7000	7000
$V_{dis}$ (cm <sup>3</sup> )	2800	2800	2800	2800	2800
$e$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
$R_{or}$ (mm)	$\pi$	3.5	3.5	3.5	3.5
$D_m$ (mm)	83	83	83	83	83

注:  $D_m$  涡旋盘的最小直径。

$D_m$  的近似值可由下式表示<sup>[13]</sup>:

$$D_m = 2 [a_o (\varphi_E + \alpha) + \delta_o / 2 (\varphi_E + \alpha)^2 + R_{or}] \quad (18)$$

从表中可以看出,当  $C_1, C_2, C_3, C_4$  和  $C_o$  的吸气容积  $V_{suc}$ 、容积比  $e$ 、 $D_m$  保持一定时,  $C_1 - C_4$  涡旋齿的高度  $h$  相比  $C_o$  从减少 11.67% 变化到减少 19%。在相同的吸气容积  $V_{suc}$  和容积比  $e$  下涡旋齿高的减小无疑是涡旋压缩机设计中一个有效的改进方法,这是由于涡旋压缩机在正常工作时,相邻腔体之间存在压差使得在涡旋齿上产生了气体力,这些气体力会在涡旋齿上产生弯矩,导致齿的微小变形,从而增大泄漏减小容积效率和机械效率,显然更小的齿高能使涡旋压缩机运行的更稳定。另外,从加工精度方面来说,涡旋齿高度的减小有利于保证涡旋齿的垂直度。

表 4 为当吸气容积  $V_{suc}$ 、容积比  $e$ 、齿高  $h$  相同的情况下,其它几何参数的比较结果,表中  $C_5$  和  $C_6$  依然表示 2 种参数不同的变基圆半径渐开线,在满足上述条件下,我们发现变基圆半径渐开线比圆渐开线具有更小的涡旋盘直径  $D_m$ 。因此,在相同的吸气容积  $V_{suc}$ 、容积比  $e$  和齿高  $h$  的条件下,更加紧凑的结构使得涡旋压缩机的设计更加灵活。

表 4  $V_{suc}$ 、 $e$ 、 $h$  相同时圆、半径基圆渐开线对比分析结果

类型	$C_o$	$C_5$	$C_6$
$\varphi_E$ (rad)	17.055	16.655	16.025
$\alpha$ (rad)	0.785	0.785	0.805
$a_o$ (mm)	2	2.1	2.2
$a_o/\delta_o$	-	-100	-71
$h$ (mm)	6	6	6
$V_{suc}$ (cm <sup>3</sup> )	7000	7000	7000
$V_{dis}$ (cm <sup>3</sup> )	2800	2800	2800
$e$	2.5	2.5	2.5
$R_{or}$ (mm)	$\pi$	3.3	3.4
$D_m$ (mm)	83	73	72

### 4.2 组合型线

组合型线以各种常用型线和通用型线为基础构成变截面型线,对型线进行组合使用,以发挥不同型线的优势。J W Bush 等首先提出了由渐开线、高次曲线、圆弧组合构成的涡旋型线<sup>[14]</sup>;其后刘振全对变截面涡旋压缩机的型线进行了详细的探讨<sup>[15]</sup>;彭斌等建立了由基圆渐开线-高次曲线-线段渐开线组合而成的变截面涡旋压缩机的几何模型和摩擦损失模型<sup>[16]</sup>。目前常见的组合型线主要有:基圆渐开线-高次曲线-圆弧、基圆渐

开线-高次曲线-基圆渐开线、基圆渐开线-圆弧-基圆渐开线等。

图 9 为由基圆渐开线-高次曲线-圆弧组成的涡旋型线示意,  $ab$  为圆弧修正曲线;  $ac$  和  $bd$  为圆渐开线;  $de$  和  $ef$  为高次曲线;  $eg$  和  $fh$  为圆弧曲线。

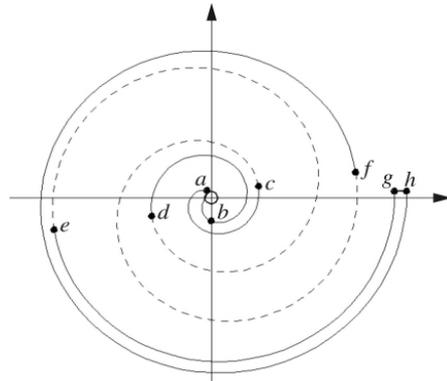


图 9 组合型线涡旋型线

图 10 为圆渐开线和图 9 所示的组合型线在吸气容积  $V_{suc}$  和涡旋齿高  $h$  相等的情况下计算得到的二者从吸气开始到压缩终了时容积的变化曲线,基本几何参数见表 5。

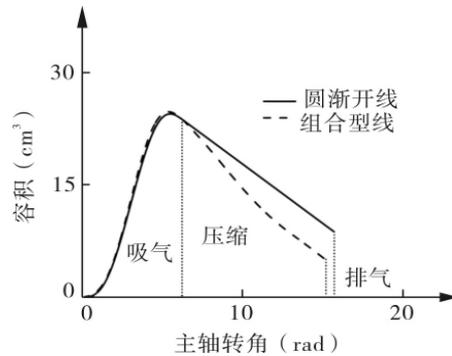


图 10 圆渐开线和组合型线容积变化曲线

表 5 型线基本几何参数

类型	$a$ (mm)	$t$ (mm)	$R_{or}$ (mm)	$h$ (mm)	$V_{suc}$ (cm <sup>3</sup> )	$V_{dis}$ (cm <sup>3</sup> )	$e$
圆渐开线	2	3.14	3.14	20	23.616	8.73993	$e$
组合型线	2.3	-	2.5	20	23.616	5.01472	4.7

比较的结果表明,在同样的吸气容积  $V_{suc}$  和齿高  $h$  下,组合型线较圆渐开线有大的容积比,这就说明圆渐开线要想实现大的容积比必须通过增大圈数来实现,增大圈数会增加泄漏线的长度,从而对涡旋压缩机的容积效率有一定影响,另外增大圈数还影响涡旋压缩机的结构尺寸。组合型线的长度和圈数小、泄漏线短、气体压缩过程短,并且组合型线较宽的壁厚也有利于阻止被压缩气体

的泄漏。但是,组合型线增加了腔室之间的压差,加工和测量比较困难。

图 11 为圆渐开线和组合型线构成的动涡旋盘上气体力的变化曲线,组合型线动盘上气体力的变化为<sup>[17,18]</sup>:

轴向气体力:

$$F_a = \begin{cases} p_0 S_0 + 2p_1 S_1 + 2p_2 S_2 + p_3 S_3 & 0 \leq \theta \leq \theta^* \\ p_0 S_0 + 2p_1 S_1 + p_3 S_3 & \theta^* \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

切向气体力:

$$F_t = \begin{cases} h(L_1 + L'_1 + R_{or})(p_1 - p_0) + h(L_2 + L'_2 + R_{or}) \times (p_2 - p_1) + h(L_3 + L'_3 + R_{or})(p_3 - p_2) & 0 \leq \theta \leq \theta^* \\ h(L_1 + L'_1 + R_{or})(p_1 - p_0) + h(L_3 + L'_3 + R_{or})(p_3 - p_2) & \theta^* \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (20)$$

径向气体力:

$$F_r = 2ah(p_3 - p_0) \quad (21)$$

式中  $h$ ——齿高

$p$   $S$   $L$ ——压力、工作腔面积和切向力的作用线长

0 1 2 3——下标,吸气腔、第一压缩腔、第二压缩腔以及中心压缩腔

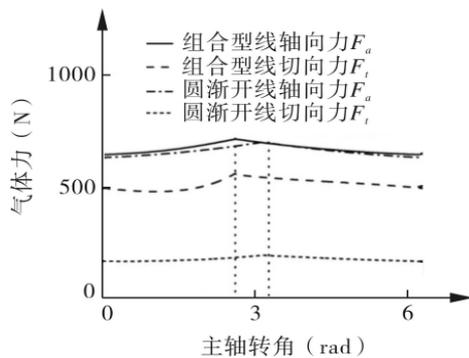


图 11 圆渐开线和组合型线动盘气体力变化曲线

从图中可以看出,组合型线动涡旋盘上所受的力比圆渐开线波动大。

### 5 结论

(1) 在满足相同吸气容积与容积比,且涡旋体壁厚与涡旋齿高相等的情况下,圆渐开线需要的圈数最少,而线段渐开线需要的圈数最多,正四边形渐开线介于二者之间;并且圆渐开具有最小的泄漏线长度,正四边形的泄漏线长度最大。

(2) 与基圆渐开线相比,当吸气容积  $V_{suc}$ 、容积比  $e$  和涡旋盘最小直径  $D_m$  保持不变时,变基圆半径渐开线构成的涡旋齿齿高减小 19%,更小的齿高有利于涡旋压缩机运行更加稳定,并且可以减小加工误差;变半径基圆渐开线还有更加紧凑的结构,这使得涡旋盘的设计比较灵活。

(3) 以基圆渐开线-高次曲线-圆弧的组合型线为例,与基圆渐开线相比,在满足吸气容积  $V_{suc}$  和齿高  $h$  相等的情况下,组合型线的压缩比为 4.7 远大于圆渐开线的 2.7 且组合型线回转半径略小于圆渐开线。

(4) 分别计算了圆渐开线和组合型线构成的动涡旋盘上的气体力,得出组合型线气体力波动比圆渐开线大。

### 参考文献

- [1] 李连生. 涡旋压缩机[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [2] 吴业正,李红旗,张华,等. 制冷压缩机[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [3] 刘振全. 涡旋式流体机械与涡旋压缩机[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [4] 李超,张官正,刘兴旺,等. 涡旋压缩机径向迷宫密封迷宫槽的优化研究[J]. 流体机械, 2014, 42(11): 8-12.
- [5] 汤俊雄,惠虎,王辰. 沿海一高耸塔器顺风向风振动响应研究[J]. 压力容器, 2015, 32(6): 13-18.
- [6] 来敏华. 前汽封汽流涡动间歇性振动分析和对策[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(4): 63-65.
- [7] Wang B, Li X, Shi W. A general geometrical model of scroll compressors based on discretionary initial angles of involute[J]. Int. J. Refrig, 2005, 28(2): 958-966.
- [8] 李连生. 线段渐开线涡旋压缩机的几何理论[J]. 流体机械, 1994, 11(3): 337-340.
- [9] Halm N P. Mathematical model of scroll compressor [D]. Master Thesis, Purdue University, 1997.
- [10] Tojo K. New wrap profile for scroll type machine [C]. Proceeding of 19th International Congress of Refrigeration, Hague, The Netherlands, 1995(3a): 515-521.
- [11] 李雪琴,王君. 涡旋压缩机的变半径基圆渐开线型线研究[J]. 压缩机技术, 2011(4): 1-3.
- [12] 王吉岱,张臻臻. 变基圆半径渐开线涡旋膨胀机的研究[J]. 流体机械, 2014, 42(6): 33-36.
- [13] Yangguang Liu. Study on involute of circle with variable radius in a scroll compressor [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45: 1520-1536.

(下转第 60 页)

快,其次为二体堆码;在制冷系统运行前期,箱体温度下降速度较快,且四体堆码的温度点下降至设定温度的时间最早,箱体内温度稳定状况较好,且各个堆货方式的温度都是在一定范围内波动。这主要是由于堆码方式对流场有较大影响,货物之间缝隙的改变,可以改变流场的分布情况,增加流体与货物的热对流效果,从而使得货物区的温度有所降低。四体堆码形式中,由于货物堆放是对称分布,且货物之间有纵向与横向间隙,使得冷流体在箱体内形成了纵向与横向循环流动,因此四体堆码方式优于其它2种堆码方式。

#### 4 结论

(1)冷藏集装箱内堆码方式对温度场有较大影响,货物之间缝隙的改变,可以改变流场的分布情况,增加流体与货物的热对流效果,从而使得货物区的温度有所降低。四体堆码在各个截面上中点的温度变化速度最快,其堆码方式优于其它两种堆码方式。

(2)冷藏集装箱内不同截面上温度点变化速度不同;在同一截面上,各温度点在前期温度变化速率快,后期温度变化速度减慢。

#### 参考文献

- [1] 王惠林. 简述集装箱和集装箱船[J]. 中国新技术新产品, 2012(12):110-113.
- [2] 谢如鹤,刘广海. 冷藏运输装备发展现状分析及发展趋势研究[J]. 广西轻工业, 2009(8):122-123.
- [3] 李锦,谢如鹤. 冷藏运输装备技术研究进展[J]. 流

体机械, 2014, 42(5):82-87.

- [4] 李锦,谢如鹤. 冷藏车厢内温度波动特性分析[J]. 流体机械, 2014, 42(1):63-67.
- [5] 单明康,张文福,王向英. 刚性和柔性储液罐简化模型仿真分析[J]. 压力容器, 2014, 31(1):27-33.
- [6] 张钟,江潮. 食品冷冻技术的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(1):65-68.
- [7] 粘君来. 我国冷链物流发展现状及策略研究[J]. 现代商贸工业, 2010(21):19-22.
- [8] 汪希刚. 我国食品冷链中的食品安全现状及展望[J]. 食品研究与开发, 2006(8):25-27.
- [9] 李绍荣. 从货运现代化看铁路冷藏运输工具的发展[J]. 铁道车辆, 2002, 40(12):12-13.
- [10] Ersin Alptekin, Mehmet Akif Eazn. Flow and heat transfer characteristics an empty refrigerated container [J]. Progress in Energy and the Environment, 2014, 62(1):641-652.
- [11] Rodríguez-Bermejoa N, Barreirob P, Roblaa J I, et al. Thermal study of a transport container [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2):517-527.
- [12] 翁卫兵,房殿军,李强,等. 冷藏运输车辆温度场均匀性控制研究[J]. 农业机械学报, 2013, 45(1):228-234.
- [13] 张明春,肖燕红. 热电偶测温原理及应用[J]. 攀枝花科技与信息, 2009(3):12-14.
- [14] 童敏明,田丰,柴艳莉. 一种热电偶式新型风速检测仪[J]. 仪表技术与传感器, 2004(8):22-25.

作者简介:田津津(1978-),女,实验师,主要从事冷藏集装箱优化设计方面的研究,通讯地址:300134 天津市天津商业大学机械工程学院制冷系, E-mail: zhangzhe@tjcu.deu.cn.

#### (上接第23页)

- [14] Bush J W, Beagle W P, Housmen M E. Maximizing scroll compressor displacement using generalized wrap geometry [C]. Proceeding of the international compressor engineering conference at Purdue, USA, 1994:205-210.
- [15] 刘振全,张川. 变截面涡旋压缩机型线的研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(4):61-64.
- [16] 彭斌,孙迎,张力. 变截面涡旋压缩机几何模型及摩擦损失模型[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(3):

34-38.

- [17] 孙迎. 变截面涡旋压缩机数学模型的研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2012.
- [18] 刘涛,任冠林,柳会敏,等. 组合型线涡旋压缩机的动力学模型[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(19):5055-5057.

作者简介:彭斌(1976-),男,教授,硕士生导师,主要从事涡旋机械、低温余热发电的研究,通讯地址:730050 甘肃兰州市兰州理工大学机电工程学院, E-mail:13919835339@qq.com.