

涡旋压缩机排气过程的三维数值模拟计算

冯健美, 屈宗长, 李心伟

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据涡旋压缩机实际排气过程的特点,通过对物理模型的合理简化,建立了描述排气过程的准静态三维湍流流动数值模拟计算模型,对排气一周内不同动盘转角时刻中心腔内的流动分布及通过排气孔的流动进行了详细的数值分析.数值计算结果表明,涡旋压缩机工作腔内存在大量环流,沿着轴向在靠近排气孔 0 ~ 10 mm (型线高度为 52 mm) 的范围内轴向速度很大,比同一截面内径向速度大一个数量级.从无量纲压力损失系数分布图得出,排气流动阻力损失主要集中在排气孔开启阶段,排气孔的开启特性对流动损失影响最为明显.在开设排气孔时应着重考虑孔的开启特性,纠正了目前开设排气孔面积越大越好的观点,为排气孔口的合理开设提供了理论依据.

关键词: 涡旋压缩机;排气孔;数值模拟

中图分类号: TH457;TB652 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1143 - 04

Three Dimensional Numerical Simulation of Discharge Flow in a Scroll Air Compressor

Feng Jianmei, Qu Zongchang, Li Xinwei

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

Abstract: Based on the characteristics of a discharge process in a scroll air compressor, the reasonable simplification of the actual physical model was conducted and the three-dimensional quasi-steady turbulent flow numerical simulation was performed. The numerical results show that complex vortex flow patterns exist in the discharge region throughout the entire axial extent of central chamber. Moreover the axial velocity component is very large at a small axial distance of 0 - 10 mm from the discharge port (when the height of the profile is 52 mm), and the axial velocity is greater than the radial velocity by an order of magnitude. On the basis of our numerical results, the dimensionless pressure loss coefficient was defined and the pressure loss at various crank angles after the onset of discharge was analyzed. It is shown that the discharge flow loss mainly occurs at the onset stage of discharge. The present result gives a new viewpoint that maximum area of discharge port is not always the best for designing the discharge port of a scroll compressor. The easier to open, the better the characteristic of discharge port is.

Key words: scroll air compressor; discharge port; numerical simulation

涡旋压缩机在正常运转过程中存在各种阻力损失,其中最大的阻力损失发生在排气孔处(排气流动损失大约占输入功率的 3%^[1]),尤其对于排气量比较大的情况更明显.要想进一步减小排气流动损失,详细了解通过排气孔的流动特性,分析其流场分布是非常必要的.鉴于此,本文对涡旋压缩机在一种齿

端修正情况下排气区域内的流动进行了三维数值模拟计算,揭示了排气过程中心腔内的和通过排气孔的重要流动特征,分析结果对探索引起排气损失的原因、改进排气孔的设计以及大排量涡旋压缩机的设计提供了重要的理论依据.

本文研究的涡旋空气压缩机排气量为 116 m³/

min, 齿端为对称圆弧修正, 排气孔形状为腰形, 涡圈的基本参数及齿型修正参数见表 1.

表 1 涡圈基本参数及修正参数

p/mm	h/mm	t/mm	θ/rad
28	52	415	31473
R/mm	r/mm	θ^3/rad	A/mm^2
161430.6	61931	221536.6	2471552

1 物理模型和数值计算方法

1.1 物理模型

当涡旋压缩机工作时, 工作腔内的流动应为三维非定常紊流流动, 但相对于排气平均流速来说, 动盘的运动速度很小, 如排气量为 $116 \text{ m}^3/\text{min}$ 的涡旋空气压缩机动盘的运动速度只有排气平均流速的 5% 左右, 因此可以忽略动涡盘运动速度的影响, 将涡旋压缩机在排气一周内的三维非定常紊流流动简化为不同转角位置下的准静态三维定常紊流流动, 不同转角位置的质量流率可以根据涡旋压缩机的容积变化规律求得. 图 1 为某一个动盘转角位置排气过程流动的物理模型.

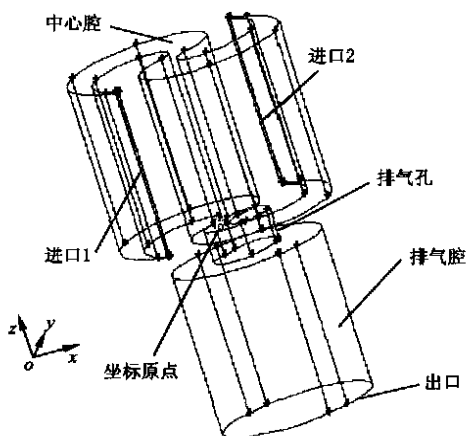


图 1 三维计算区域示意图

1.2 数值计算方法

涡旋压缩机排气阶段中心腔及排气区域内的流动一般均为湍流状态, 湍流流动采用标准 $k-\epsilon$ 模型描述. 计算采用有限容积法离散微分方程组, 压力和速度的耦合采用 SIMPLE 算法^[2]来实现. 在近壁区, 由于 $k-\epsilon$ 方程的应用受到限制, 采用改进的壁面函数法^[3]来处理. 对流项采用高阶的二阶迎风格式离散, 扩散项采用中心差分格式离散, 具体的离散

方法详见文献[4]. 根据计算区域几何形状的特点, 整个计算区域不同地方的几何尺寸相差甚远, 本文采用块结构化网格生成方法^[5], 将计算区域分成几个子区域, 各个子区域分别采用适体坐标方法^[6]生成结构化网格. 在具体的实施方面, 比较了几种疏密程度不同的计算网格, 当数值解在不同疏密网格上的差异很小时, 认为其解是与网格无关的独立解, 并以密网格中较疏的一套网格作为计算网格, 因为再加密已经没有意义. 由于所研究的不同动盘排气转角时刻的计算区域都各不相同, 所以需要分别生成网格. 计算边界条件处理如下 1

(1) 进口边界: 计算区域 2 个进口质量流量相等, 且每个进口的质量流量为该转角时刻瞬时质量流量的一半.

(2) 出口边界: 为使计算易于收敛, 出口取在距离排气孔 $10H$ 处 (H 为排气孔的高度), 给定出口压力为设计排气压力.

(3) 壁面条件: 壁面采用无滑移条件, 近壁区采用上述改进的壁面函数法处理.

2 计算结果分析

本文定义 θ_0 为动盘排气转角, 在排气时刻, 即 $\theta = \theta_0$ (θ_0 为排气角) 时, 取 $\theta_0 = 0^\circ$, 从排气时刻起到排气结束, 即动盘旋转一周, θ_0 的范围为 $0 \sim 2\pi$. 根据定义, 比如从排气时刻起动盘转过 45° 时, 则 $\theta_0 = 45^\circ$, 其他以此类推. 文中为叙述方便, 规定在 $z = 0 \text{ mm}$ 处为排气孔入口处, 称为静盘底部, 沿着 z 轴向上, 在 $z = h$ (h 为型线高度) 处为静盘顶部.

分析了从排气开始时刻起, 动盘排气转角 θ_0 分别为 $45^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 三个典型角度下中心腔内及排气孔区域内的流动情况, 给出了轴向不同截面内的速度矢量分布及沿着轴向的三维速度场分布.

2.1 $\theta_0 = 45^\circ$ 时刻

图 2 给出了此时刻中心腔及排气区域内轴向不同截面内的速度矢量分布. 从图 2 可以看出, 流体从两侧切向流入中心腔, 沿着涡盘内壁面向中心区域流动, 由于撞击到动盘或静盘齿端发生转向进而流向中心区域. 在中心区域内, 从两侧流入的流体方向相反, 流经由动静盘齿端所形成的狭窄区域, 由于惯性的作用, 流体继续向前流动, 在靠近涡盘齿端附近两股相反方向的流体形成了旋涡, 并且在中心腔后部涡盘外侧壁面附近也形成了小尺度的旋涡. 另外, 从中心腔内 3 个轴向位置截面上的速度矢量分布对比来看, 可以发现在轴向不同位置截面内都存在旋

涡流动,且轴向不同位置旋涡的尺度、位置和数量不同.

为了能更清楚地看出轴向速度在不同位置截面上的分布,图 3 给出了此时刻中心腔内的三维速度矢量分布.从图 3 可以看出,只有在靠近静盘底部排气孔口附近的截面内有沿着轴向的速度,且在此范围内轴向速度远远大于截面内其他 2 个方向的速度,大约离开静盘底部 10 mm 左右(型线高度为 52 mm),到轴向中间截面已基本没有轴向速度.沿着轴向的速度主要分布在排气孔周围中心区域内 1 在远离排气孔的地方,即中心腔的后侧几乎没有轴向速度.从三维速度场分布还可以看出,在中心区域排气孔附近,气体几乎是垂直向下从排气孔流出的.

从图 2、图 3 还可以看出,轴向中间截面上的速度矢量分布可以大概反应整个中心腔内轴向截面上的流动特征.因此,对其他不同排气转角位置,只给出轴向中间截面上的速度矢量场.

212 $\theta_0 = 90^\circ$ 时刻

图 4 为此时刻中心腔内轴向中间截面上的速度矢量分布.与图 2 比较可以看出,随着排气孔的逐渐打开,中心腔内轴向截面上的速度分布有明显的变

化.在该时刻,由于动盘齿端对排气孔的遮盖程度减小,中心区域由很狭窄的通道逐渐变大,所以与前时刻相比,在轴向截面内形成的旋涡范围变大,并且 2 个大尺度旋涡都靠向中心区域,有发展成一个大旋涡的趋势,而且与前时刻相比,速度明显减小.

213 $\theta_0 = 180^\circ$ 时刻

图 5 为此时刻中心腔内轴向中间截面上的速度矢量分布.此时排气孔面积已全部打开,从图中可以看出,截面内的速度矢量分布由在中心腔齿端部位附近形成的 2 个旋涡发展成在中心区域的一个大尺度旋涡.这是因为此时排气孔已全部打开,动盘齿端对排气孔没有遮盖,中心区域不再是狭窄的细缝,由两侧流入的流体在涡圈齿端部位由于惯性继续向前流动,两股相反方向的流体在中心区域形成旋涡,并且在两侧涡圈齿端部位也形成了小尺度的旋涡.

214 压力损失系数分布

为了定量地表征排气过程的流动阻力损失,定义无量纲压力损失系数为

$$= \frac{p - p_d}{p_d}$$

式中: p 为中心腔内平均压力; p_d 为设计的排气压力 1

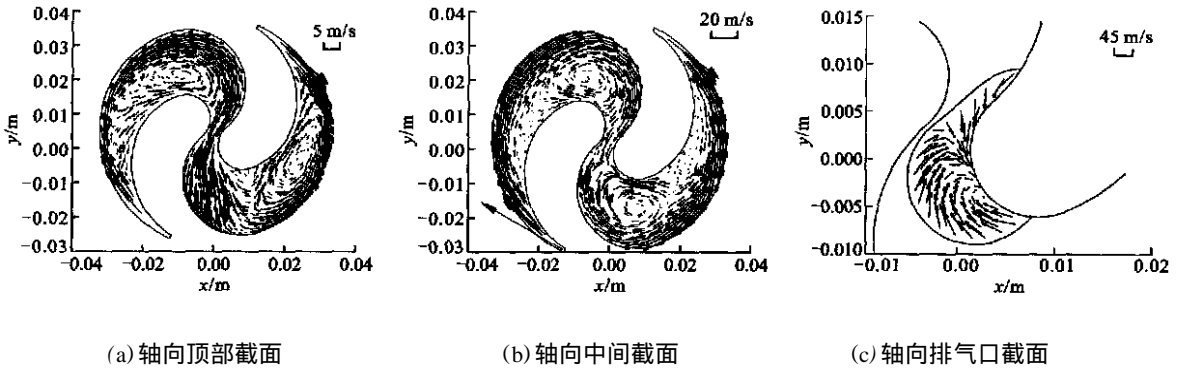


图 2 轴向不同截面上的速度矢量分布

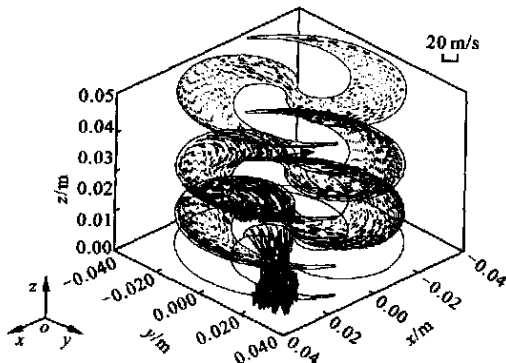


图 3 三维速度矢量分布

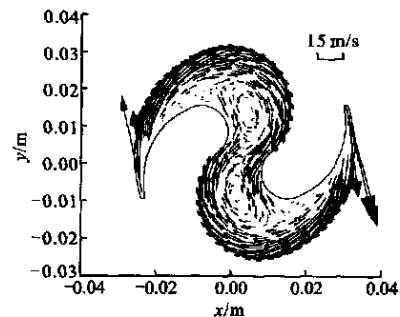


图 4 $\theta_0 = 90^\circ$ 时速度矢量分布

图6给出了排气一周内的无量纲压力损失系数分布规律.从图中可以看出,压力损失系数在动盘排气转角 θ_0 为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内很大,随着排气孔的逐渐打开,压力损失系数迅速减小.图中充分说明排气流动阻力损失主要集中在排气孔开启阶段,在排气孔全部打开时,流动损失很小.

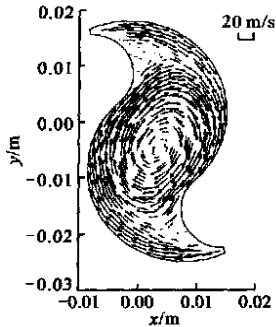


图5 $\theta = 180^\circ$ 时速度矢量分布

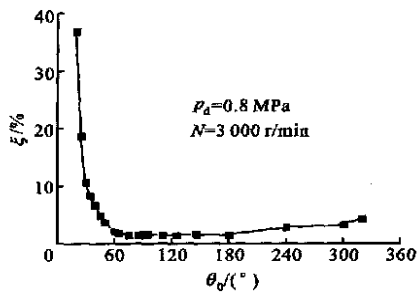


图6 无量纲压力损失系数分布

从图6可以进一步得出,由于排气损失主要在排气孔开启阶段,所以在开设排气孔时,应着重考虑孔的开启特性,孔越容易打开越好,而不是一味追求最大的排气孔面积.

3 结论

对涡旋式空气压缩机排气过程的流动进行了三

维湍流数值模拟计算,给出了排气一周内不同动盘排气转角时刻中心腔内的流动分布、不同轴向截面内的速度矢量分布及三维速度矢量分布.数值计算结果指出,涡旋压缩机中心腔内存在大量环流,沿着轴向在靠近排气孔范围内轴向速度很大,比同一截面内径向速度大一个数量级.从无量纲压力损失系数分布图可以得知,压力损失在动盘排气转角 θ_0 为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内很大,表明排气流动损失主要集中在排气孔开启阶段,在排气孔全部打开时,流动损失很小.因此,在开设排气孔时,应着重考虑孔的开启特性,而不要一味追求大的排气孔面积.

参考文献:

- [1] Hirano T. Development of high efficiency scroll compressor for heat pump air conditioners [J]. Tech Rev, 1989, 26(3):190 - 198.
- [2] Patankar S V, Spalding D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1972, 15(11): 1787 - 1806.
- [3] 王运良,徐忠,苗永森. 使用不同壁面函数法对紊流流场计算结果的影响 [J]. 流体工程, 1993, 21(12): 26 - 29.
- [4] 陶文铨. 数值传热学 [M] 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [5] 陶文铨. 计算传热学近代进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] Thompson J F, Warsi Z U A, Mastin C W. Numerical grid generation, foundation and application [M]. New York: North Holland Press, 1985.

(编辑 王焕雪)