

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-705-06

间隙泄漏对微型涡旋制冷压缩机 流动及性能的影响

宋 硕 赵远扬

(青岛科技大学机电工程学院 青岛 266061)

【摘 要】 针对微型无油涡旋制冷压缩机的工作过程,建立了包含径向和轴向间隙的三维流动模型,通过 CFD 方法进行了数值模拟,分析了压缩机工作腔内部温度、压力的分布情况及流动特性,得到了冷凝温度、泄漏间隙对压缩机容积效率和等熵效率的影响规律。研究表明:固定轴向间隙为 $5\mu\text{m}$,径向间隙从 $5\mu\text{m}$ 变化到 $11\mu\text{m}$ 时,容积效率从 86.38% 下降到 75.11%,等熵效率从 67.78% 下降到 56.18%。固定间隙均为 $7\mu\text{m}$,冷凝温度由 50°C 变化到 55°C 的过程中,压缩机的容积效率从 75.35% 下降到 73.49%,等熵效率由 59.03% 下降到 56.79%。要使压缩机容积效率达到 80% 以上,应保证轴向间隙小于 $6\mu\text{m}$,径向间隙小于 $9\mu\text{m}$,为微型涡旋压缩机的设计提供参考。

【关键词】 微型涡旋压缩机; 间隙; CFD; 容积效率; 等熵效率

中图分类号 TH45 文献标识码 A

Effect of Leakage on Flow and Performance of Micro Refrigeration Scroll Compressor

Song Shuo Zhao Yuanyang

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, 266061)

【Abstract】 To solve the problems of the leakage in the working chamber of the micro scroll compressor, a three-dimensional fluid model with clearances is developed. By using the CFD method, the temperature distribution, pressure distribution and flow characteristics in the working chamber are analyzed. The influence of condensation temperature on the performance of the compressor is analyzed. By changing the radial and axial clearances, the change trends of volumetric efficiency and isentropic efficiencies with clearance are obtained. The results show that the volumetric efficiency and isentropic efficiency are decreased from 86.38% to 75.11% and the isentropic efficiency decreases from 67.78% to 56.18% when the radial clearance changes from $5\mu\text{m}$ to $11\mu\text{m}$ with a fixed axial clearance of $5\mu\text{m}$. The fixed clearance was all $7\mu\text{m}$ and the volumetric efficiency of the compressor decreased from 75.35% to 73.49% and the isentropic efficiency decreased from 59.03% to 56.79% during the change of condensing temperature from 50°C to 55°C . If you want the volumetric efficiency of the compressor to reach more than 80%, you should first ensure that the flank clearance is below $6\mu\text{m}$, and the radial clearance is controlled below $9\mu\text{m}$, so as to provide a reference for the design of micro scroll compressor.

【Keywords】 Micro scroll compressor; clearance; CFD; Volumetric efficiency; Isentropic efficiency

0 引言

涡旋压缩机作为一种容积式流体机械,具有体积小、重量轻和容积效率高等优点,已广泛应用于

制冷空调、医疗器械等领域^[1]。

近年来,随着微型制冷系统技术的发展,应用于微型制冷系统的微型压缩机也取得了一定突破。

基金项目: 山东省泰山学者计划 (tsqn201812073)

作者简介: 宋 硕 (1999.01-), 男, 硕士, E-mail: songshuo5632@163.com

通讯作者: 赵远扬 (1978.09-), 男, 博士, 教授, E-mail: yuanyangzhao@163.com

收稿日期: 2023-04-27

Zhong 等^[2-4]为调节人体微环境设计了微型制冷设备,其中压缩机部件均采用微型转子压缩机。为适应极端环境应用(月球探索任务),Murphy 等^[5]设计了以微型无油往复式压缩机为基础的探测车,为未来微型压缩机设计提供参考。涡旋压缩机具有用于微型制冷系统的潜力,但随着其小型化,间隙泄漏对涡旋压缩机的性能影响将显著增大,近年来很多学者针对涡旋压缩机的泄漏问题,对其流场分布和整机性能进行了相关研究。

在流场分析方面,吴臻等^[6,7]采用基于弹簧光顺法和网格重划的 CFD 动网格技术,研究工作腔流场分布规律,通过模拟与试验结合的方式得到泄漏是导致流场分布不均的主要原因。肖根福等^[8,9]对涡旋压缩机内部动态流场进行分析,详细阐述了工作腔中旋涡的生成和运动现象。Peng 等^[10,11]建立了径向间隙泄漏模型,利用 Ansys 软件探究压缩机的变形和流场分布规律,重点考虑了气体力、温度载荷和惯性载荷对流场的影响。田素根等^[12,13]利用 CFD 方法对涡旋泵的内部流场进行三维模拟,重点分析了流场内的压力脉动现象。

随着仿真技术的进步,研究学者从不同角度展开了间隙泄漏对压缩机性能影响的相关研究。Zheng 等^[14]通过三维非稳态数值仿真,得到压缩机性能不会随着径向间隙增加呈现线性下降趋势,增加侧壁粗糙度可提高压缩机容积效率和等熵效率。Sun 等^[15,16]建立了含轴向间隙的瞬态流动模型,研究表明轴向间隙对 COP 和排气温度的影响大于径向间隙。Peng 等^[17,18]通过建立数学模型,定量分析了不同传热和间隙泄漏工况下压缩机工作过程的影响,得到相较切向泄漏,径向泄漏对质量流量的影响更大。Fanti^[19,20]等通过试验研究了压比变化时的过膨胀和欠膨胀现象,得到不同的径向间隙对涡旋膨胀机性能的影响。王建吉等^[21,22]基于等熵层流流动理论,得到了基圆半径、轴向间隙对泄漏量的变化规律并进一步对比了光滑密封、迷宫密封及组合密封的泄漏量。王训杰等^[23]利用 PumpLinx 软件,得到随着径向间隙的增大,动涡旋盘平均轴功率呈现非线性上升趋势。

以上研究为研究涡旋压缩机间隙泄漏的流动分析和性能影响提供了理论参考,但大部分文献未将径向间隙和轴向间隙综合考虑、系统地定量分析间隙泄漏对压缩机容积效率和等熵效率的影响,且

目前针对微型涡旋压缩机的研究较少。因此,本文首次针对微型涡旋压缩机,利用 CFD 方法建立带有径向间隙和轴向间隙的数值分析模型并进行瞬态模拟,分析其流场特性,分析间隙、冷凝温度等对压缩机容积效率、等熵效率等性能参数的影响规律,为微型涡旋制冷压缩机设计提供参考。

1 分析模型

1.1 物理模型

本文研究涡旋压缩机吸气容积为 2cm^3 的某微型涡旋压缩机,工质为制冷剂 R134a,型线为圆渐开线,图 1 为压缩机间隙示意图。涡旋压缩机流体域如图 2 所示,共被分割为四部分,分别为进气流体域、排气流体域、涡旋工作腔流体域及前后侧轴向间隙流体域,压缩机的具体结构参数如表 1 所示。

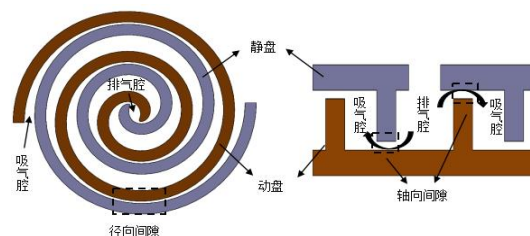


图 1 径向间隙及轴向间隙示意图

Fig.1 Radial clearance and axial clearance

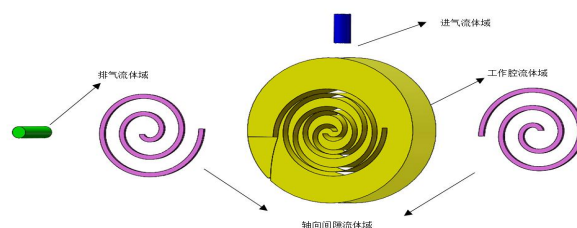


图 2 涡旋压缩机流体域示意图

Fig.2 Scroll compressor clearance and fluid domain diagram

表 1 微型涡旋压缩机结构参数

结构参数	数值
吸气容积 (cm^3)	2.0
基圆半径 (mm)	0.9549
涡圈壁厚 (mm)	1.5
涡圈节距 (mm)	6.0
涡圈高度 (mm)	8.842
渐开线最终展角 ($^\circ$)	1980
回转半径 (mm)	1.5

1.2 计算网格

对涡旋压缩机运动区域进行网格划分，得到高质量的六面体结构化网格。进出口区域和连接部分通过通用网格模板进行网格划分，生成高质量的六面体笛卡尔网格，随后通过与涡旋流体域建立交互面实现静止区域和工作腔之间的数据传递，压缩机网格及轴向间隙网格如图 3 所示。

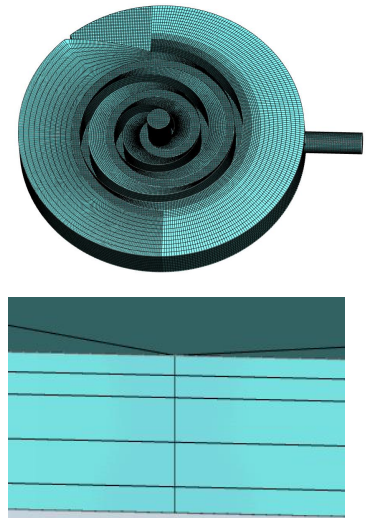


图 3 压缩机计算网格及轴向间隙网格

Fig.3 Compressor calculation grid and axial clearance grid

为了验证网格无关性，本文选取间隙为 7 μm 的流体域模型作为实例，将计算区域用不同的网格尺寸进行网格化。网格参数及计算结果如表 4 所示，当网格数为 48 万时，容积效率为 73.732%，继续增加网格数量，容积效率变化很小。因此，采用 48 万网格模型进行数值模拟。

表 2 网格独立性及计算时间

Table 2 Grid independence and calculation time			
网格数量	计算圈数	计算时间/h	容积效率/%
280000	10	22	72.467
370000	10	34	73.641
480000	10	40	73.732
690000	10	53	73.730

1.3 计算方法及边界条件

本文在进行三维瞬态数值模拟时，计算工质选用 R134a，通过 NIST 调取 R134a 物性参数，编写程序导入到仿真软件中，入口温度为 291.45K，压缩机转速设置为 4500r/min。涡旋压缩机在实际工作过程中转速很高，一直处于高速高温状态，因此

本文选用标准 k- ϵ 湍流模型来描述工作腔内的运动。边界条件均为压力进出口条件，其中进口压力 0.3772MPa，出口压力 1.4698MPa。空间插值格式采用一阶迎风格式，求解器选择压力求解器，压力速度耦合方程用 SIMPLEC 算法求解。由于气体在压缩腔中滞留的时间很短，因此将壁面条件设置为无滑移绝热壁面。

本文基于文献[16]中所述瞬态仿真方法进行模拟分析，其模型得到了实验验证，保证了数值模拟的准确性。

2 工作过程流场分析

2.1 压力场

涡旋压缩机一个工作周期压力分布情况如图 4 所示，由于吸气管道不是中心对称的，因此每一对工作腔的压力分布并不完全相同，但单个压缩腔内压力分布较均匀。啮合间隙附近区域相当于一个先渐缩后渐扩的通道，随着动涡盘运动，啮合点两侧工作腔压差也不断变化，且越靠近中心位置，相邻工作腔之间压差越大，使得工质由高压腔向低压腔泄漏。在齿高方向上，工作腔压力由中心向两端递减，压力分布较均匀。

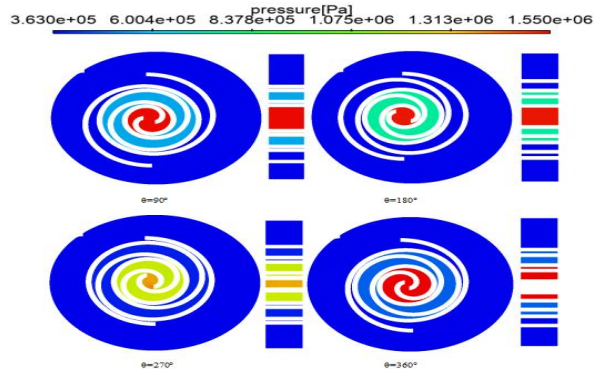


图 4 工作腔内压力分布

Fig.4 Pressure distribution

2.2 温度场

涡旋压缩机一个工作周期工作腔内的温度分布如图 5 所示，在涡旋压缩机运行过程中，气体被逐渐压缩，工作腔内工质温度随压力升高而增大。每一对工作腔温度分布不均匀，单个工作腔内同样存在温度的不均匀分布。在动静涡盘啮合间隙处，温度变化较大。这是因为在压缩机工作过程中，相邻工作腔之间始终存在压差。在压差作用下，高压腔内的高温工质向低压腔内泄漏，扰乱流场分布。

在轴向方向上,工作腔内温度分布也不均匀,对称压缩腔存在差异,但总体呈现由中心至两端温度逐渐降低的趋势。

从各腔压力和温度分布的情况对比可知,流体由高压腔向低压腔的泄漏对于压力场分布影响较小,对于温度场分布影响较大。

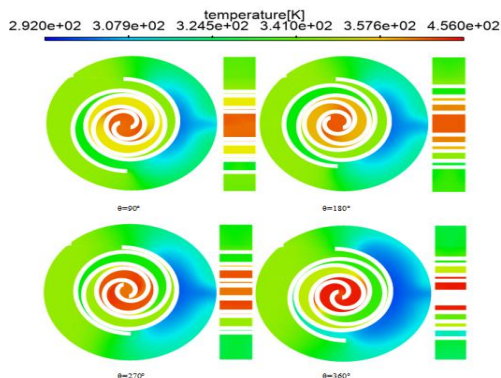
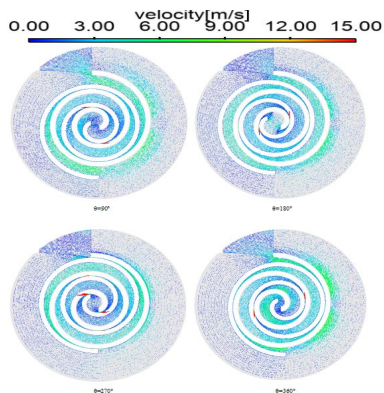


图 5 工作腔内温度分布

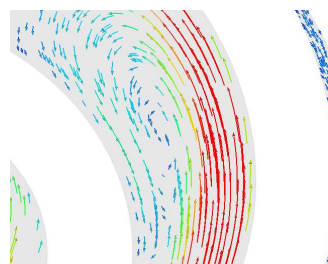
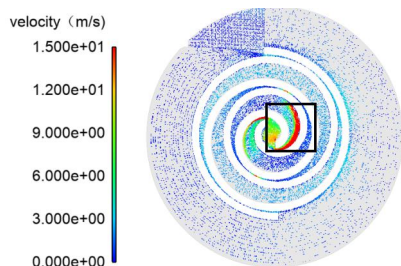
Fig.5 Temperature distribution

2.3 速度场

图 6 (a) 为压缩机工作腔 x-y 截面上不同转角时的速度分布。除径向间隙外,整个压缩腔内流体处于低速运动状态。为更好的显示出流场整体速度分布,设置速度上限为 15m/s,而流场内实际最大速度为工质在压缩过程中通过啮合间隙由高压侧向低压侧的泄漏速度,最高可达 217m/s。



(a) 一个周期内不同转角时的速度分布



(b) 转角为 310° 时的速度分布

图 6 压缩机工作腔速度分布

Fig.6 Speed Distribution

由图可得,在径向间隙处,速度方向由靠近中心的腔室指向远离中心的腔室,这是由于在压缩机运行过程中,高压腔内流体运动速度快,在压差作用下,流体会从高压腔向低压腔内泄漏,导致流动速度的急速增加。吸气过程结束、压缩过程开始时,间隙两侧压差增大,切向泄漏流逐渐明显,第一压缩腔内流体向第二压缩腔泄漏加剧,使得第二压缩腔内流体速度增大并逐渐达到最大值,如图 6 (b) 所示。此时低速流体仍沿动盘运动方向移动,高速流体流动方向与运动方向相反,两股流体相互碰撞,会在腔室中出现涡流。涡流的存在引起腔室和排气管道的气流扰动,导致压缩机功率损失,性能下降。

3 压缩机变工况性能分析

容积效率和等熵效率是表述制冷压缩机性能的两个关键指标,本文通过变工况模拟探究容积效率和等熵效率的变化趋势,分析压缩机性能的影响因素。容积效率定义为:

$$\eta_v = \frac{m_{ac}}{m_{id}} \quad (1)$$

式中: m_{ac} 是实际质量流量; m_{id} 是设计质量流量

等熵效率反映的是压缩机的工作过程与等熵过程的接近程度,定义为:

$$\eta_s = \frac{P_{is}}{P_{ad}} \quad (2)$$

式中: P_{is} 是实际压缩功; P_{ad} 是等熵过程功。

3.1 间隙的影响

泄漏间隙对微型涡旋制冷压缩机性能有重要影响,本文对不同轴向间隙和径向间隙的压缩机进行了 CFD 模拟,得到间隙对压缩机容积效率和等

熵效率的影响, 结果如图 7、8 所示。

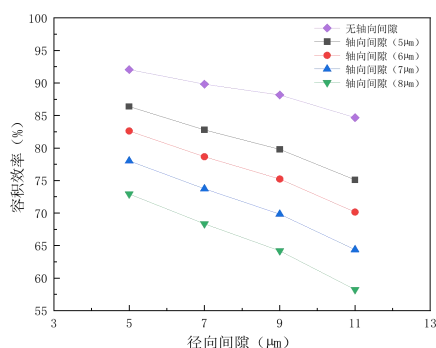


图 7 间隙对容积效率的影响

Fig.7 Effect of clearance on volumetric efficiency

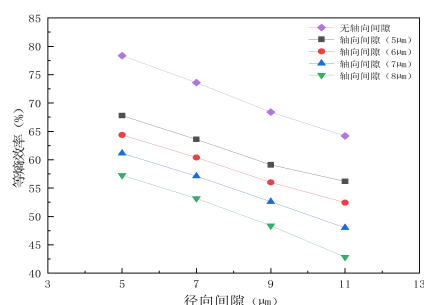


图 8 间隙对等熵效率的影响

Fig.8 Effect of gap on isentropic efficiency

当轴向间隙为 $5\mu\text{m}$, 径向间隙由 $5\mu\text{m}$ 逐步增加到 $11\mu\text{m}$ 的过程中, 压缩机的容积效率从 86.38% 下降到 75.11% , 等熵效率从 67.78% 下降到 56.18% 。此外, 固定轴向间隙不变, 径向间隙由 $5\mu\text{m}$ 逐步增加到 $9\mu\text{m}$ 的过程中, 容积效率下降趋势相对平缓。而当径向间隙由 $9\mu\text{m}$ 增加到 $11\mu\text{m}$ 时, 容积效率变化下降幅度变大, 相对前一个工况点, 容积效率最高下降 5.96% 。

由于涡旋压缩机在实际设计制造过程中可采用密封条等轴向密封机构, 降低轴向间隙的影响。在数值模拟中, 可将该情况简化为轴向间隙设置为 $0\mu\text{m}$ 。由图可知, 当轴向间隙为 $0\mu\text{m}$, 径向间隙由 $5\mu\text{m}$ 逐步增加到 $11\mu\text{m}$ 的过程中, 压缩机的容积效率从 92.06% 下降到 84.67% , 等熵效率从 78.35% 下降到 64.19% , 整体变化趋势与具有轴向间隙时基本一致。根据无轴向间隙与轴向间隙为 $5\mu\text{m}$ 时的数据对比可知, 随着径向间隙的增加, 二者容积效率之间的差值逐渐增大, 最大差值可达到 9.56% , 而等熵效率之间的差值逐渐减小, 最大差值为径向间隙为 $5\mu\text{m}$ 时, 可达 10.57% 。

相较于径向间隙, 轴向间隙对微型涡旋压缩机容积效率和等熵效率的影响更大, 这是因为压缩机的轴向间隙的泄漏通道比径向间隙泄漏通道长。从计算结果看, 在相同工况条件下, 要使压缩机容积效率达到 80% 以上, 应保证轴向间隙小于 $6\mu\text{m}$, 径向间隙小于 $9\mu\text{m}$ 。

3.2 冷凝温度的影响

为了研究冷凝温度对压缩机性能的影响, 设置吸气温度为 18.3°C , 吸气压力为 0.3772MPa , 将径向间隙和轴向间隙设为定值 ($7\mu\text{m}$), 压缩机容积效率和等熵效率随冷凝温度的变化趋势如图 9 所示。

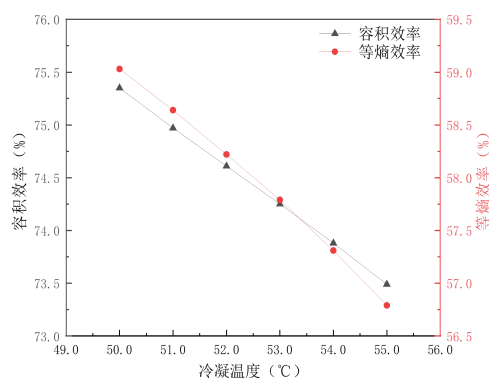


图 9 冷凝温度对压缩机容积效率和等熵效率的影响

Fig.9 Effect of condensing temperature on the volumetric efficiency and isentropic efficiency of compressors

由图可知, 涡旋压缩机的容积效率和等熵效率均随冷凝温度的升高而降低。在冷凝温度由 50°C 逐渐增加到 55°C 的过程中, 压缩机的容积效率从 75.35% 下降到 73.49% , 等熵效率由 59.03% 下降到 56.79% , 二者变化趋势基本相同。这是因为冷凝温度影响的是压缩机的排气压力, 冷凝温度越高, 压缩机背压增大, 外压比增大。当冷凝温度较低时, 压缩机间隙两侧的压差较小, 此时工质由高压腔向低压腔的泄漏量少, 因此压缩机的容积效率和等熵效率较高。随着冷凝温度的升高, 增加了间隙两侧压力差, 泄漏量增多, 使得压缩机容积效率和等熵效率逐步降低。

4 结论

间隙泄漏是影响微型涡旋制冷压缩机的主要因素, 本文利用 CFD 数值方法, 分析了 R134a 微型涡旋制冷压缩机的内部三维流场, 分析了冷凝温度、径向间隙和轴向间隙对压缩机容积效率、等熵

效率的影响规律, 得到如下主要结论:

(1) 随着间隙的增大, 压缩机容积效率和等熵效率呈现下降趋势, 固定轴向间隙为 $5\mu\text{m}$, 当径向间隙从 $5\mu\text{m}$ 变化到 $11\mu\text{m}$ 时, 容积效率从 86.38% 下降到 75.11%, 等熵效率从 67.78% 下降到 56.18%。针对本文压缩机规格, 若想使压缩机容积效率达到 80% 以上, 应首先保证轴向间隙在 $6\mu\text{m}$ 以下, 并将径向间隙控制在 $9\mu\text{m}$ 以下。

(2) 根据无轴向间隙与轴向间隙为 $5\mu\text{m}$ 时的数据对比可知, 随着径向间隙的增加, 二者容积效率之间的差值逐渐增大, 最大差值可达到 9.56%, 而等熵效率之间的差值逐渐减小, 最大差值为径向间隙为 $5\mu\text{m}$ 时, 可达 10.57%。相较于径向间隙, 轴向间隙对微型涡旋压缩机容积效率和等熵效率的影响更大。

(3) 涡旋压缩机的容积效率和等熵效率均随冷凝温度的升高而降低。取间隙均为 $7\mu\text{m}$ 的工况进行模拟, 在冷凝温度由 50°C 逐渐增加到 55°C 的过程中, 压缩机的容积效率从 75.35% 下降到 73.49%, 等熵效率由 59.03% 下降到 56.79%。

参考文献:

- [1] 田素根, 王春, 赵远扬. 涡旋压缩机技术研究进展与发展趋势[J]. 制冷与空调, 2021, 21(3): 72-77.
- [2] Zhong Xiaohui, Gou Yujun, Wu Yuting, et al. Development and experimental study of a miniature vapor compression refrigeration equipment [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008.
- [3] He Jing, Wu Yuting, Chen Xia, et al. Experimental study of a miniature vapor compression refrigeration system with two heat sink evaporators connected in series or in parallel [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 49: 28-35.
- [4] Yuan Weixing, Yang Bo, Yang Yufei, et al. Development and experimental study of the characteristics of a prototype miniature vapor compression refrigerator [J]. Applied Energy, 2015, 143: 47-57.
- [5] Daniel L M, Michael S K. Miniature Oil-less Reciprocating Compressor for High-Lift, High-Temperature Heat Pump Applications[C]. International Compressor Engineering Conference (pp. 2681), 2021.
- [6] 吴臻, 冯治国, 苏亚锋. 圆渐开线型线的涡旋压缩机内部流场模拟分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(12): 1840-1846.
- [7] 李超, 杨紫娟, 丁凯, 等. 涡旋压缩腔径向泄漏对内部流场影响的分析[J]. 流体机械, 2016, 44(1): 14-18.
- [8] 肖根福, 刘国平, 王俊亭, 等. 动网格在涡旋压缩机三维流场数值模拟中的应用[J]. 流体机械, 2014, 42(1): 25-29.
- [9] 肖根福, 刘国平, 王俊亭, 等. 基于动网格的涡+旋压缩机内部流场数值模拟[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 146-149.
- [10] Peng Bin, Li Yaohong, Zhao Shengxian. Analyses of Deformation and Stress of Oil-free Scroll Compressor Scroll [J]. Iop Conference, 2017, 274.
- [11] Ullah H, Peng Bin, Bocko J, et al. Stress and Deformation Analysis of Oil-Free Air Scroll Compressor [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1877(1): 012004(10pp).
- [12] 田素根, 赵远扬, 李连生. 涡旋液泵内部流动与压力脉动的数值模拟[J]. 液压与气动, 2021, 45(9): 145-150.
- [13] 田素根, 谢晓煜, 赵远扬. 不同工况下涡旋泵空化与性能的数值模拟[J]. 液压与气动, 2022, 46(2): 138-144.
- [14] Zheng Siyu, Wei Mingshan, Hu Chenxing, et al. Flow characteristics of tangential leakage in a scroll compressor for automobile heat pump with CO_2 [J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(5): 971-983.
- [15] Sun Shuaihui, Wu Kai, Guo Pengcheng, et al. Analysis of the three-dimensional transient flow in a scroll refrigeration compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1086-1094.
- [16] Sun Shuaihui, Wang Xianwen, Guo Pengcheng, et al. Numerical analysis of the transient leakage flow in axial clearance of a scroll refrigeration compressor[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering, 2019: 1989-1996.
- [17] Peng Bin, Vincent L, Jin Wuyin. Heat Transfer and Leakage Analysis for R410A Refrigeration Scroll Compressor[C]. proceedings of the International Conference on Mechanical Design, 2017.
- [18] Peng Bin, Zhao Shengxian, Li Yaohong. Thermodynamic Model and Experimental Study of Oil-free Scroll Compressor[J]. Journal of Physics Conference Series, 2017, 916(1): 012048.

(下转第 717 页)