

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.011

双螺杆压缩机转子结构特性的数值模拟方法研究*

李托雷,王军利,雷 帅,任志贵,李庆庆,陆正午
(陕西理工大学 机械工程学院,陕西 汉中 723000)

摘要:针对双螺杆压缩机工作过程中存在的转子的结构特性问题,对螺杆转子的应力、变形耦合模拟方法,不同排气压力、不同转速对转子应力、变形的影响进行了研究。基于有限体积法求解了压缩机工作过程中产生的压力场,通过数值插值技术将得到的气动载荷作为外载荷加载在转子的结构网格上,建立了转子的真实受力模型,进一步求解了转子结构的静平衡方程,得到了转子的位移场和应力分布,并利用“L型大直径掩埋管道”对该研究方法进行了验证。研究表明:压缩机工作过程中产生的压力场对螺杆转子的最大变形和最大应力有较大的影响;且当转速/排气压力一定时,选择合适的排气压力/转速可以有效降低转子的最大变形和最大应力;该结果可为压缩机的结构设计、优化提供一定的理论参考。

关键词:压缩机;有限体积法;数值插值;气动载荷;静平衡方程

中图分类号:TH455

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1192-07

Numerical simulation method of rotor structure characteristics of twin-screw compressor rotor

LI Tuo-lei, WANG Jun-li, LEI Shuai, REN Zhi-gui, LI Qing-qing, LU Zheng-wu
(Mechanical Engineering College, Shanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Aiming at the problem of rotor structure characteristics in the working process of twin-screw compressor, a coupling simulation method of stress and deformation of screw rotor was designed, and the influence of different exhaust pressure and different rotating speed on rotor stress and deformation was studied. Based on finite volume method, the pressure field generated during the compressor operation was solved. Through the numerical interpolation technique, the aerodynamic load was applied to the structure grid of the rotor as the external load, and the real force model of rotor was established. The static equilibrium equation of the rotor structure was solved in the real stress model, and the displacement field and stress distribution of the rotor were obtained, and the research method in this paper was verified by “L-shaped large diameter buried pipeline”. The results indicate that the pressure field generated during the compressor operation has a great influence on the maximum deformation and maximum stress of the screw rotor, and when the speed/exhaust pressure is constant, the selection of appropriate exhaust pressure/rotational speed can effectively reduce the maximum deformation and maximum stress of the rotor. The research can provide some theoretical reference for the structure design and optimization of compressor.

Key words: compressor; finite volume method; numerical interpolation; aerodynamic load; static equilibrium equation

0 引言

双螺杆压缩机作为一种较新颖型压缩机,具有高

效节能、低噪声、易损件少、维护简单等诸多明显优势^[1-2]。因此,其在对气体要求较高的制药、食品以及医疗等行业应用广泛^[3]。

收稿日期:2020-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605270);陕西省科学技术厅重点项目(2017ZDXM-GY-138);陕西省自然科学基金项目(2018JM6084, 2019JQ-884);以及陕西省教育厅科研项目(19JK0172)联合资助

作者简介:李托雷(1995-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事机械振动及气动弹性方面的研究。E-mail:13892272136@163.com

通信联系人:王军利,男,副教授,硕士生导师。E-mail:wjl503@126.com

双螺杆压缩机通过阴阳转子的啮合实现气体的压缩。工作过程中,压缩机内流场受到结构、工作介质以及环境等多方面影响,导致其内流场十分复杂,产生较大的气动力。转子工作过程中受到离心力、气体力等各种载荷的共同作用,使转子容易发生疲劳和振动,加大了结构的危险性,降低了压缩机的工作效率^[4]。据工作现场统计,约 70% 以上的压缩机故障是转子发生的故障引起的。因此,要模拟转子的真实受力情况,必须考虑压缩机内流场产生的压力场对转子结构的影响^[5-7]。

在压缩机流场研究方面,国外学者进行了大量研究。KOVACEVIC A 等人^[8]通过针对商用 CFD 求解器开发独立的接口程序,对双螺杆压缩机内流场进行了数值模拟,改进了在具有较强压力梯度的复杂域中的解决方案。JOHN B 等人^[9]通过滑移网格技术,对螺杆压缩机内部流场进行了模拟仿真,解决了长期以来块状网格适应难的问题。RANE S 等人^[10]采用 CFD 动网格技术,对制冷螺杆空压机与往复式压缩机的压缩膨胀过程进行了对比,发现流场网格重构法可真实反映网格随时间的变化规律,其仿真结果也更贴近实际。

在压缩机流固耦合方面,KOVACEVIC A 等人^[11]通过 CCM 求解器,研究了螺杆压缩机内流场对螺杆转子的变形问题,结果表明,压缩机产生的压力场使阴阳转子啮合间隙变大,导致泄露量增大,以及转子在压力载荷下阴转子的变形比阳转子的变形更大;但其在仿真过程中,由于软件的局限性,没有较多地分析压缩机压力场对转子结构的影响。LEE H 等人^[12]通过 CFX 和 ANSYS 软件对离心式压缩机进行了流固耦合分析,得到了耦合情况下,叶片尖端及叶轮变形对离心式压缩机性能的影响规律。

在螺杆压缩机研究方面,国内学者也进行了大量研究。赵宁等人^[13]利用 Ansys 软件中的 APDL,将螺杆转子连续变化的螺旋面压力作了离散处理,分析了螺杆转子的动态特性。CAO F 等人^[14]对双螺杆压缩机工作腔内的压力分布进行了研究,建立了能详细描述双螺杆压缩机工作腔内压力分布状态的数学模型,并且通过实验获得了腔体内压力的分布状态,得到了实际工作过程中双螺杆压缩机的受力情况。王小明等人^[15]利用 Workbench 软件,对螺杆转子的各个接触槽段进行了气体压力的加载,解决了长期以来对螺杆转子受力变形简化精度过低的问题。吴慧媛等人^[16]通过 Fluent 软件对双螺杆压缩机的内部流场进行了数值模拟,得到了压缩机工作过程中产生的压力场分布趋势。

在转子流固耦合方面,魏静等人^[17]采用流固耦合理论,通过求解双螺杆捏合机内部流体和双螺杆转子

固体耦合方程,得到了双螺杆捏合机内流场对转子结构特性的影响规律。

目前对双螺杆压缩机转子结构所进行的研究,转子受力主要通过对各接触槽进行气体压力加载,和简化转子数学模型求解得到,没有对压缩机转子受力进行精确求解,导致压缩机转子结构求解的误差较大。

笔者主要采用有限体积法,准确模拟压缩机工作过程中转子的真实受力情况,通过数值插值技术将气动力加载在转子的结构网格上,求解转子结构的静平衡方程,分析压缩机产生的压力场对转子结构特性的影响。

1 计算方法

笔者基于松耦合的单向稳态流固耦合计算方法,通过 N-S 控制方程求解压缩机内流场,流场计算收敛后,得到压缩机的压力场;并利用数值插值技术将压力场加载到转子结构网格节点上,然后求解转子结构的静平衡方程,得到转子的位移场,进而求得应力分布。

具体流程如图 1 所示。

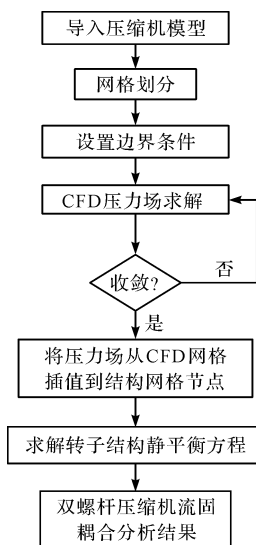


图 1 流固耦合流程图

1.1 流场求解技术

考虑到双螺杆压缩机内部流场是一个典型的三维非稳态流场,流动边界随着螺杆的转动发生周期性变化,会引起螺杆压缩机的流场参数在一定范围内产生波动^[18],因此,待压缩机工作一段时间后,将压缩机内流场作为准瞬态分析,对其进行流固耦合数值模拟。

压缩机内流场中,流体的连续性方程、动量守恒方程及能量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D(\rho U)}{Dt} = \rho F - \nabla p + \mu \Delta U \quad (2)$$

$$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt} = \Phi + \lambda \Delta T + \rho q \quad (3)$$

式中: U —速度矢量; p —流体压力; μ —流体的动力粘度; c_p —流体的比热容; ρ —流体密度; λ —导热系数; F —作用在流体上的质量力; q —流体所吸收的热量; T —流体温度; Φ —能量耗散函数。

1.2 结构求解技术

笔者将流场得到的气动载荷作为外载荷,得到结构动力学方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f \quad (4)$$

式中: M, C, K, u, f —结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、位移矢量以及外部载荷。

考虑到静气动载荷作为外载荷下,结构形变缓慢,可以忽略变形速度和加速度对系统的影响,因此,其动力学方程可简化为:

$$Ku = f \quad (5)$$

通过求解式(5),即可得到结构的位移场以及应力分布情况。

2 方法验证

为了验证该流固耦合计算方法的准确性,笔者以 L 型大直径掩埋管道为研究对象^[19],对流场压力作用下的管道变形进行了计算。

管道的几何模型以及内部流域进行网格划分,如图 2 所示。

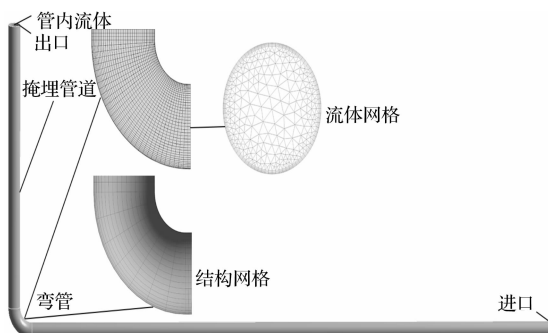


图 2 掩埋管道

计算过程中:

湍流模型选用标准的和 SIMPLEC 求解算法;流体入口设置为压力入口,压力值为 1.6 MPa,入口温度为 140 ℃,出口设置为质量流出口,固体壁面采用无滑移边界条件;管道内部工作介质为水,管子材料为 Q235B;进行流固耦合求解时,将管子的出入口设置为无位移约束。

数值模拟结果与实验数据的对比结果如表 1 所示。

表 1 数值模拟结果与实验数据对比

检测参数	实验结果	数值模拟结果	误差/%
流体入口速度/(m·s ⁻¹)	4.13	4.08	1.21
流体入口温度/K	412.50	413.00	0.1
流体出口温度/K	411.60	412.76	0.2
流体入口压力/Pa	1 590 300	1 591 681	0.1
流体出口压力/Pa	1 580 310	1 583 906	0.2

由表 1 可见:掩埋管道的流体入口速度、入口压力、入口温度、出口压力以及出口温度的模拟结果与实验中提供的数据误差控制在 2% 以内,由此证明,笔者提出的流场计算方法是可靠的。

通过计算,可得到压力载荷下管道的结果云图,如图 3 所示。



图 3 压力载荷下管道变形

由图 3 可知:

在压力载荷作用下,管道的变形分布情况与文献中压力载荷作用下的变形趋势相同;笔者计算管道的最大变形量为 144.99 mm,文献中的管道的最大变形量为 143.6 mm,误差在 0.9% 内。

因此,可以证明笔者采用的流固耦合方法是可靠的,可用于压缩机压力场与结构耦合问题的求解。

3 数值模型和网格生成

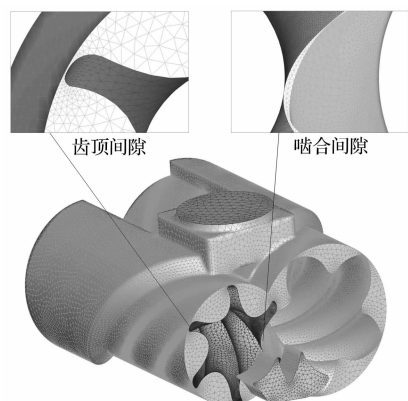
笔者计算的螺杆参数如表 2 所示。

表 2 双螺杆压缩机螺杆转子设计参数

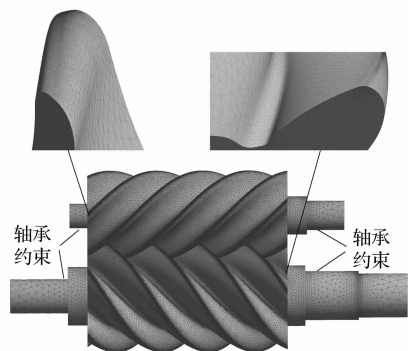
参数名称	数值
阳转子外圆/mm	115.88
阴转子外圆/mm	92.66
螺旋角	42.011
螺旋升角	47.989
轴长/mm	225
中心距/mm	82

根据双螺杆压缩机的工作原理,通过螺杆转子的啮合,可实现气体的吸入—压缩—排放 3 个过程。

笔者通过对压缩机的内流场和螺杆转子进行网格划分,得到了压缩机的有限元模型,如图 4 所示。



(a) 流场网格



(b) 结构网格

图 4 有限元模型

由图 4 可知:

压缩机阴阳转子存在大量曲面;因此,笔者采用四面体单元划分压缩机的内流场与结构模型,并且通过歪斜度检查流场模型,避免在流场求解过程中出现负体积,导致求解失败的情况出现。

网格划分后,压缩机内流场网格节点数 513 667 个,单元数 2 464 345 个;螺杆转子网格节点数 1 132 567 个,单元数 1 013 471 个。

4 求解设置与结果分析

压缩机吸气孔设置为压力进口 (pressure inlet);排气孔设置为压力出口 (pressure outlet)。阴阳转子的边界条件设置为旋转壁面,运动方式为绝对速度运动。

流体控制方程采用时均形式的微分方程,湍流模型采用双方程 Realizable 模型,通过 SIMPLEC 算法进行求解,最终质量和能量的残差控制在数量级,保证结果收敛。

压缩机机壳材料采用灰铸铁 HT200,螺杆材料选用综合强度较强的 40Cr。结构求解时,转子轴承位置添加轴承约束,排气孔轴承的轴肩进行位移约束,保留轴向转动自由度,实现转子一端固定一端可以游动,通过数值插值技术将压力场作为转子外载荷进行求解。

排气压力为 0.4 MPa 下的气动载荷如图 5 所示。

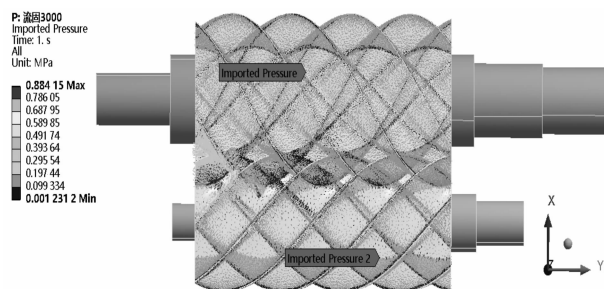
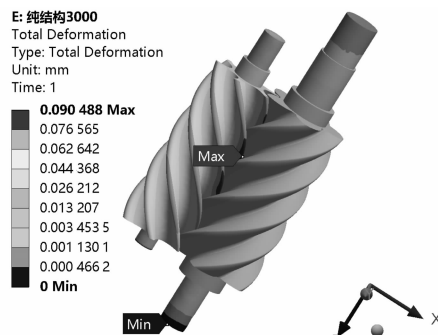


图 5 气动载荷加载

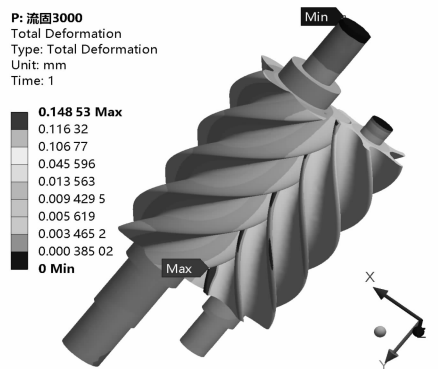
啮合部分压力最高达到 0.884 15 MPa。

4.1 螺杆转子的变形、应力分析

当转子转速为 3 000 r/min 时,在纯扭矩和流固耦合下,螺杆转子的变形和应力云图如图 6 所示。



(a) 纯扭矩变形云图



(b) 流固耦合变形云图



(c) 流固耦合应力云图



(d) 纯扭矩应力云图

图 6 阴阳转子变形和应力云图

图 6(a) 是螺杆转子在纯扭矩下变形云图, 螺杆转子的最大变形发生在啮合区的阴转子齿顶部, 最大变形量达到 0.090 488 mm。

图 6(b) 是排气压力为 0.4 MPa 下螺杆转子在气动载荷和纯扭矩耦合条件下的变形云图, 螺杆转子的最大变形发生在啮合区的阴转子齿顶部, 最大变形量达到 0.148 53 mm, 是转子纯扭矩变形的 1.64 倍。

通过对比可以发现: 压缩机工作过程中螺杆转子啮合区发生较大变形, 最大变形位于阴转子齿顶, 由齿顶沿螺旋线扩散; 最小变形发生在阳转子非驱动端的轴末端, 耦合情况下比纯扭矩情况下的变形明显增大。

图 6(c) 是螺杆转子在纯扭矩条件下的应力云图, 螺杆转子的最大应力发生阴阳转子的啮合区, 最大应力为 262.29 MPa。

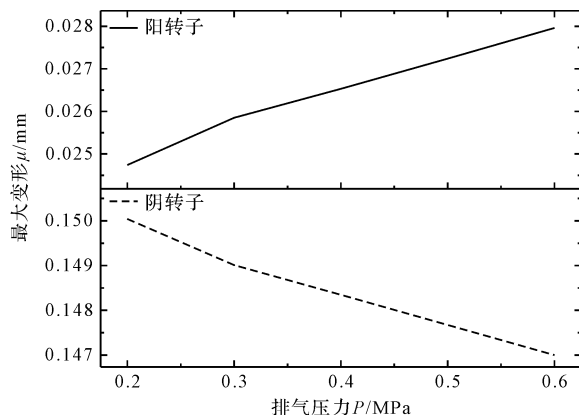
图 6(d) 是排气压力为 0.4 MPa 下螺杆转子在气动载荷和纯扭矩耦合条件下的应力云图, 最大应力发生在转子的啮合区, 沿啮合部分向周围扩散, 最大应力为 388.76 MPa, 是纯扭矩下最大应力的 1.48 倍; 最小变形发生在阳转子齿上, 且阴转子非驱动端的轴端产生较大的应力集中。

4.2 不同排气压力对转子结构的影响规律

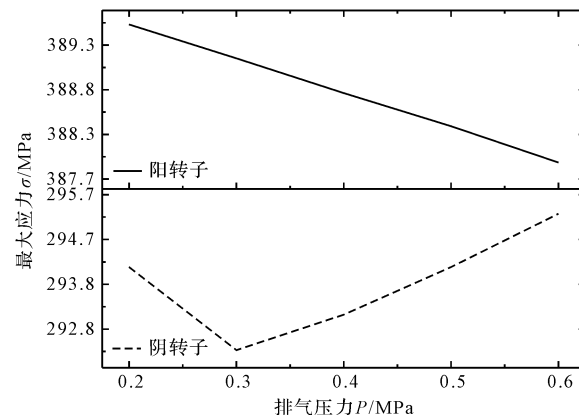
当转子转速为 3 000 r/min 时, 不同排气压力下转子的变形和应力规律如图 7 所示。

由图 7(a) 可知: 随着排气压力的增大, 阳转子的最大变形逐渐增大, 阴转子的最大变形逐渐减小, 阴转子最大变形减小幅度明显大于阳转子最大变形上升的幅度。这说明阴转子受排气压力的影响较大。

由图 7(b) 可知: 随着排气压力的增大, 阳转子的最大应力逐渐减小, 阴转子的最大应力先减小后增大, 在 0.3 MPa 是应力最小。这说明当转速一定时, 选用合适的排气压力工况可以减小转子的最大变形和最大应力。



(a) 最大变形与排气压力关系图



(b) 最大应力与排气压力关系图

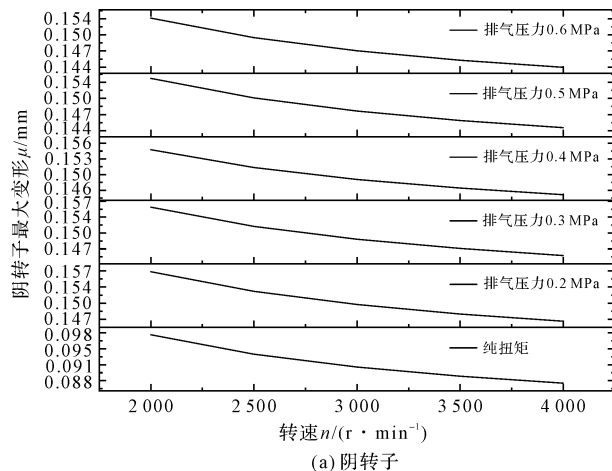
图 7 不同排气压力下最大变形和应力的变化规律

4.3 不同转速对转子结构的影响规律

不同排气压力下, 压缩机螺杆转子随转速的变形规律如图 8 所示。

由图 8 可知: 螺杆转子在纯扭矩和耦合条件下工作, 阴转子的最大变形随着转速的增大逐渐减小, 阳转子的最大变形随转速的增大逐渐增大。因此, 选择合适的转速, 可以减小螺杆转子的最大变形。

不同排气压力下, 压缩机螺杆转子随转速的应力规律如图 9 所示。



(a) 阴转子

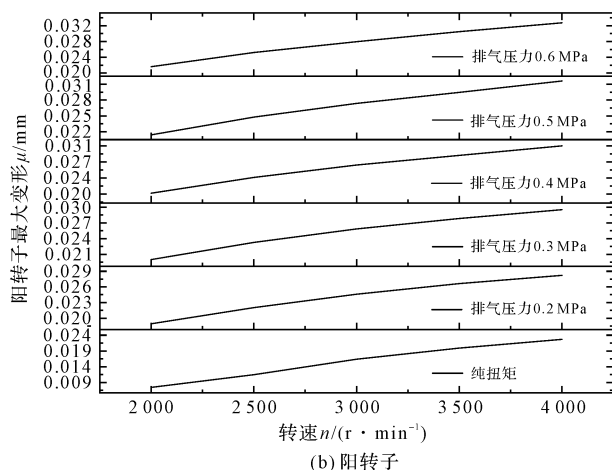


图 8 不同转速下螺杆转子的变形规律

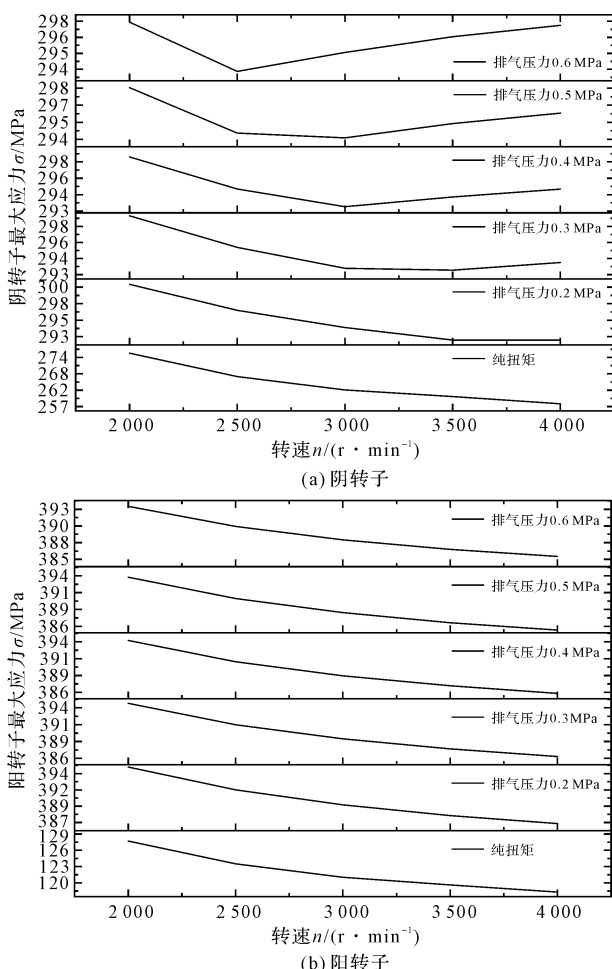


图 9 不同转速下螺杆转子的应力规律

由图 9 可知:

在纯扭矩条件下,阴转子的最大应力随着转速的

增大逐渐减小。在耦合条件下时,排气压力为 0.2 MPa 时转子的最大压力随转速的增大逐渐减小;随着排气压力的增大,阴转子的最大应力随转速的增大先减小后增大,且排气压力越大,阴转子最大应力的最小值对应的转速就越低;纯扭矩与耦合条件下,阳转子的最大应力都随转速的增大逐渐减小。

因此,通过选择合适的转速可以减小螺杆转子最大应力。

5 结束语

笔者基于 CFD/CSD 流固耦合方法,分析了双螺杆压缩机产生的压力场对转子结构特性的影响,通过求解三维可压缩 N-S 方程及结构运动方程,得到了流固耦合情况下,螺杆转子的变形和应力分布情况,并分析了耦合情况下,不同排气压力和不同转速对转子结构特性的影响,得到以下结论:

(1) 通过分析压力场和扭矩耦合对转子结构的影响结果表明:变形是纯扭矩工作条件下的 1.64 倍,应力是纯扭矩工作条件下的 1.48 倍;

(2) 研究了不同排气压力和不同转速对螺杆转子的变形和应力影响,结果表明:当转速/排气压力一定时,选择合适的排气压力/转速可以降低螺杆转子的最大应力和最大变形;

(3) 对螺杆转子进行结构设计时,必须将压缩机工作过程中产生的气动力作为转子的负载进行设计,以保证螺杆转子满足强度和刚度要求。

参考文献 (References):

- [1] 严天宏,梁嘉麟,李青. 压缩机的现状、发展及新型技术展望[J]. 压缩机技术, 2011(1): 52-58.
- [2] 李玉斌,谢利昌,初琦,等. 压缩机市场发展分析[J]. 制冷技术, 2019, 39(S1): 8-39.
- [3] 郭耀君,谢晶,朱世新,等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.
- [4] 邢子文. 螺杆压缩机: 理论、设计及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 徐洪森. 离心压缩机振动故障分析与处理[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 机械工程学院, 2009.
- [6] 刘晓帆. 离心式空气压缩机故障诊断系统关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 机电工程学院, 2019.

(下转第 1209 页)

本文引用格式:

李托雷,王军利,雷帅,等. 双螺杆压缩机转子结构特性的数值模拟方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(10): 1192-1197, 1209.

LI Tuo-lei, WANG Jun-li, LEI Shuai, et al. Numerical simulation method of rotor structure characteristics of twin-screw compressor rotor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(10): 1192-1197, 1209.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>