

引入螺旋槽制造误差的机械密封性能分析及优化

贾谦^{1,2}, 王建磊³, 崔展³, 杨建晨³, 袁小阳²

(1. 西安交通大学城市学院机械工程系, 710018, 西安; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 710048, 西安)

摘要: 在工程实际中液体火箭发动机涡轮泵的密封原件一般存在较大加工误差, 直接影响机体的安全。基于涡轮泵高参数机械密封设计和制造的一体化考虑, 分析了螺旋槽制造误差的来源, 将误差分为槽底圆半径误差、槽深误差、螺旋角误差和槽台宽比误差4种。建立了含制造误差的涡轮泵螺旋槽机械密封性能分析模型, 分析了制造误差对开启力、泄漏量、摩擦阻力矩和膜厚的影响, 从设计参数和制造参数两方面指出了进行性能优化的方法。研究表明: 引入槽深误差对密封性能影响最大, 当转速达35 000 r/min 并且误差在2 μm 时, 开启力和泄漏量分别相对于标准值增大了24.47%和36.82%, 摩擦力矩和膜厚分别增大了27.8%和37.4%。可通过设计参数和制造参数对密封性能进行优化, 减少误差的影响。考虑制造误差的计算模型增加了机械密封性能计算的精准性, 可为机械密封设计及制造参数优化提供参考。

关键词: 涡轮泵; 机械密封; 螺旋槽; 加工误差

中图分类号: TH136 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202011006 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0046-10



OSID 码

Performance Analysis and Optimization of Mechanical Seal with Spiral Groove Manufacturing Error

JIA Qian^{1,2}, WANG Jianlei³, CUI Zhan³, YANG Jianchen¹, YUAN Xiaoyang²

(1. Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University City College, Xi'an 710018, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Machinery and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In engineering practice, the sealing components of liquid rocket engine turbo pump generally have large machining errors, which directly affect the safety of the engine block. Based on the integration of design and manufacturing of high parameter mechanical seal for turbo pumps, the sources of manufacturing error of spiral groove are analyzed. The errors are divided into four categories: radius error of groove bottom, error of groove depth, error of helix angle and error of groove width ratio. A performance analysis model of turbo pump spiral groove mechanical seal with manufacturing error is established. The influence of manufacturing errors on opening force, leakage quantity, friction resistance moment and film thickness are analyzed. The method of performance optimization is considered from two aspects of design parameters and manufacturing parameters. The results show that the groove depth error has the greatest influence on the sealing performance. When the rotating speed reaches 35 000 r/min and the error is 2 μm , the opening force and leakage volume increase by 24.47% and 36.82%, respectively,

and the friction torque and film thickness increase by 27.8% and 37.4%, respectively. The sealing performance can be optimized by design parameters and manufacturing parameters to reduce the influence of error. The calculation model considering manufacturing error increases the accuracy of mechanical seal performance calculation, which can provide reference for mechanical seal design and manufacturing parameter optimization

Keywords: turbine pump; mechanical seal; spiral groove; machining error

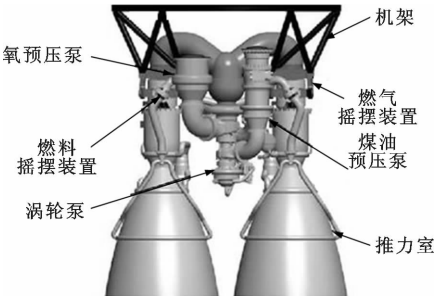
随着航天技术发展,发展新一代大推力、可重复利用的运载火箭具有重要的战略意义。例如,美国 Space X 公司的猎鹰 9 号重型火箭,不仅推力大、运行稳定,而且实现了对火箭的可重复利用,由此使得发射成本降低为原来的 1/10^[1-2]。涡轮泵作为液体火箭发动机的“心脏”,是实现可重复利用的关键,而机械密封作为涡轮泵的一个重要组件,直接影响涡轮泵的运行安全^[3]。螺旋槽密封作为一种非接触式机械密封,具有结构可靠、泄漏量低、适用范围广、寿命长等优点,是涡轮泵机械密封的一个重要发展方向^[3-4]。

高参数机械密封目前的主要设计思路是基于理论模型和试验测试结果,得到适用于特定工况下的优化结构参数。国内外很多学者均对螺旋槽机械密封的设计及性能分析展开了较为深入的研究。Glienicke 等对高压、高速下的螺旋槽进行了数值模拟和实验研究,结果表明高压、高速情况下,在密封端面形成稳定的全膜润滑以消除接触是可行的^[5]; Lebeck 考虑机械密封端面的波度、锥度和粗糙度,建立了机械密封泄漏模型^[6];张国渊等在密封副固体、被密封流体等热、流、固、力耦合的密封求解模型基础上,对机械密封关键结构参数进行了优化^[7];王建磊等通过试验和监测发现了低黏介质在温升后产生气相是造成低黏介质密封泄漏的主要原因之一^[8]。但是这些对机械密封的研究仍集中在结构优化及失效探讨,忽略了加工及安装对密封性能的后期的影响。

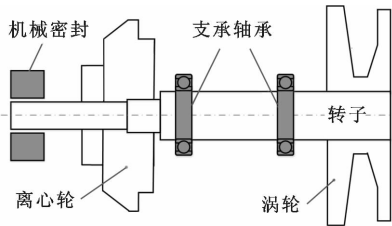
目前机械密封螺旋槽的制造主要依靠的是激光加工技术。激光加工具有精度高、热变形小、易于切割等特点,在工业生产中应用最为广泛^[9],但是由于激光技术的限制,仍会带来槽型加工误差,例如一般槽深误差仍在 1~2 μm 左右,这对于仅有数微米深度的浅槽加工而言是不可忽视的^[10]。本文考虑了制造方面的局限性,对螺旋槽的螺旋角、槽深、槽型位置等关键制造参数进行制造误差的分析,建立考虑槽型加工误差的机械密封性能分析模型,并对机械密封的性能进行了仿真和优化。

1 螺旋槽机械密封使用背景及基本结构

涡轮泵工作在高速、高压、高温的苛刻工作环境下,其工作寿命很大程度上决定着火箭发动机的寿命^[11]。涡轮泵的主要功能是提高低压推进剂组元的压力,把推进剂输送到主推力室中生成燃气,并以较高速度从喷管中喷出而产生推力。目前,国内发展的大推力火箭发动机涡轮泵的最高转速可达 29 000 r/min,中小推力火箭发动机涡轮泵的最高转速可达 40 000 r/min。图 1 给出了作为本文研究背景的液体火箭发动机结构及涡轮泵转子系统组成。涡轮泵轴系工作于强振动及高转速工况下,所以螺旋槽机械密封的泄漏问题更值得重视^[12]。



(a) 火箭发动机结构



(b) 涡轮泵转子系统组成

图 1 液体火箭发动机结构及涡轮泵转子系统组成

对于液氢、液氧等易挥发介质,存在泄漏和混合爆燃的可能,因此密封性能是制约涡轮泵发展的一个重要因素。机械密封结构主要由转子、动环、静环以及波纹管 4 部分组成。本文研究的这种动环表面的螺旋槽为外螺旋槽结构,槽区所在部位一般正对于静环石墨部分,动环由波纹管等推力补偿机构连接,转子工作时弹簧推力给动环、静环间提供闭合

力,使之处于密封状态。

2 考虑螺旋槽制造误差的机械密封性能计算模型

2.1 机械密封螺旋槽的制造误差分析

目前加工螺旋槽的主要方法有激光标刻法、电火花加工法、电镀法、光刻法、喷砂法等^[13],其中激光技术具有精度高、耐磨等优点,应用最为广泛。激光标刻装置一般由计算机、激光头、工作台、水冷机及控制箱等组成。加工前绘制槽型二维图,同时对待加工材料表面进行预处理,保证工件端面的平面度和平行度。再对密封环安装定位,设置好加工参数后传输至数字信号处理系统。开始打标后系统读取数字信号并转化为电信号,带动振镜分别沿 x 、 y 轴转动,此时激光发射器聚焦光束从振镜反射到工件表面进行烧灼熔化并形成标记。一般标刻后工件表面粗糙度较高,需要通过光整处理才能实现较高的精度要求。

本文将引入槽底圆半径误差、槽深误差、螺旋角误差和槽台宽比误差等 4 项加工误差进行研究。

(1)槽底圆半径误差。槽底圆半径误差 δ_r 由总体定位误差 δ_1 和加工技术误差 δ_2 构成。 δ_1 由回转工作台精度以及人为操作不当等原因造成。装夹工件时基准点未能与激光坐标原点精准重合而造成的装夹误差,以及打标过程中系统自身的焦点定位误差,二者叠加后就获得了 δ_1 ,安装误差模型如图 2 所示, r_g 为螺旋槽底圆半径。

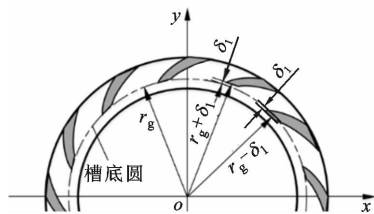


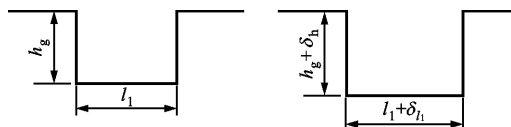
图 2 安装误差模型简图

虽然可经多次尝试将激光机功率、进给速度、重复打标次数等加工参数调至最佳范围,但依然无法彻底消除加工技术误差 δ_2 。考虑加工技术误差后实际槽底圆半径为

$$r'_g = r_g + \delta_1 + \delta_2 = r_g + \delta_r \quad (1)$$

(2)槽深误差。槽型尺寸主要包括槽区轮廓线和槽深两部分,如图 3 所示, h_g 为螺旋槽的深度, l_1 为槽区在动环外轮廓线上的弧长, δ_{l_1} 为 l_1 的误差。

槽深误差 δ_h 与槽底圆半径误差 δ_r 的成因相似,目前 δ_2 的最高精度一般只能控制在微米量级,因此



(a) 设计尺寸

(b) 加工尺寸

图 3 槽型误差模型简图

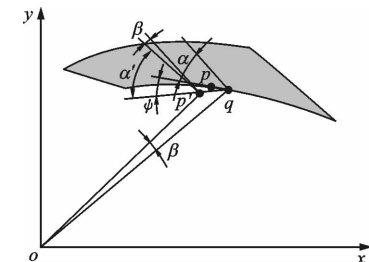
加工浅槽时 δ_h 对总体槽深尺寸影响尤为明显,引入 δ_h 后的槽深 h'_g 可由下式表示

$$h'_g = h_g + \delta_h \quad (2)$$

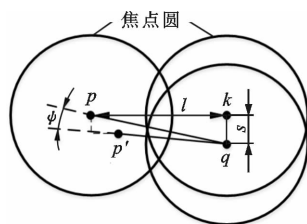
(3)螺旋角误差。螺旋槽的槽台边界曲线为对数螺旋线,其参数方程如下

$$r = r_g e^{\theta \tan \alpha} \quad (3)$$

式中: r 为对数螺旋线半径; α 为对数螺旋线的螺旋角; θ 为沿坐标轴的极位夹角。每条螺旋线由相邻两个不完全重合的打标圆组成,图 4 给出了螺旋角误差模型, l 为激光的填充间距, p 、 q 两点即为轮廓线上相邻两个焦点圆的圆心。



(a) 螺旋角误差分析图



(b) 焦点定位误差简图

图 4 螺旋角误差模型简图

由图 4a 可以看出焦点定位误差与螺旋角误差的关系,相邻两点 p 、 q 的连线可以近似看作为对数螺旋线的切线,该切线与线段 op 的法线夹角即为螺旋角 α ,当 p 点由于焦点定位误差的原因而实际打标在 p' 处时,螺旋角随之变为 α' 。由于线段 $p'q$ 可近似看作以线段 op' 为半径所对应的圆弧,而 op' 长度远大于 $p'q$,因此 β 可忽略不计,根据图 4a 中几何关系可推导螺旋角误差为

$$\Delta \alpha = \alpha' - \alpha \approx \alpha' + \beta - \alpha = \phi \quad (4)$$

图 4b 所示为焦点定位误差简图, k 、 q 分别为沿 y 轴单向打标时相邻两个焦点圆的圆心, k 、 q 之间

的距离 s 可根据下式求得

$$s = \frac{v}{f} \quad (5)$$

式中: v 为填充速度; f 为脉冲频率。

螺旋角误差 $\Delta\alpha$ 可根据图 4b 中各焦点圆心的位置关系确定

$$\psi = \arctan\left(\frac{s}{l}\right) - \arctan\left(\frac{s - \delta_y}{l - \delta_x}\right) \quad (6)$$

其中 δ_x 、 δ_y 分别为激光沿 x 、 y 轴方向的定位误差。

(4)槽台宽比误差。图 5 给出了槽台宽比误差的示意图,动环端面上槽区和台区所占外圆轮廓线的长度之比即为槽台宽比 γ ,常用该段弧线所对应的角度之比表示,表达式如下

$$\gamma = \theta_1 / \theta_g \quad (7)$$

2.1 节分析过激光加工过程中槽型误差产生的原因,激光的定位精度、焦点范围、打标重复次数、功率等都是影响槽型加工精度的重要因素。当这些因素共同作用时会使密封环外轮廓槽区弧线的长度发生改变,产生槽型外轮廓线上的误差 δ_{l_1} 、 δ_{l_1} 对应的角度 $\Delta\theta$ 可由下式表示

$$\Delta\theta = \frac{\delta_{l_1}}{r_2} \quad (8)$$

将 $\Delta\theta$ 代入式(7)可得槽台宽比误差 $\Delta\gamma$ 的变化,槽台宽比误差 $\Delta\gamma$ 为 γ'_g 与 γ 的差值,图 5 给出了螺旋槽轮廓误差简图。

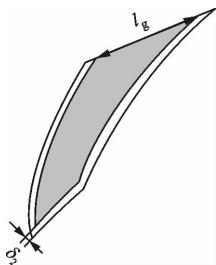


图 5 螺旋槽轮廓误差简图

螺旋槽在外轮廓线上产生的误差会增大槽区对应的角度,并且还会致使台区缩小相同的角度,引入误差后的槽区对应的角度 θ'_g 和槽台宽比 γ' 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \theta'_1 - \theta_1 &= \theta_g - \theta'_g = \Delta\theta \\ \gamma' &= \frac{\theta_1 + \Delta\theta}{\theta_g - \Delta\theta} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.2 考虑误差的机械密封性能计算模型

本文机械密封的性能参数主要包括开启力、泄漏量、摩擦阻力矩和膜厚。开启力是指当密封达到一定的工作转速后使接触的动环和静环脱开的流体

动压力,该力使机械密封摩擦副的动环和静环间形成非接触式的形式。图 6 给出了螺旋槽式机械密封动环端面的外螺旋槽结构图。螺旋槽密封的广义雷

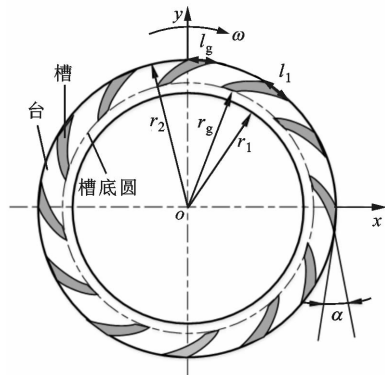


图 6 动环端面的外螺旋槽结构图

诺方程极坐标形式如下

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho r h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu r} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \frac{\omega r}{2} \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} + \rho r V \quad (10)$$

式中: h 为机械密封的动环和静环之间的密封间隙; ρ 为动环和静环之间润滑介质的密度; μ 为润滑介质的动力黏度; ω 为动环的角速度; V 为动环与静环之间的挤压速度; P 为液膜压力。取一个与静环表面相重合的参考平面,动静环平面距离为 h_0 时动环和静环之间的密封间隙可以由下式获得

$$h = h_0 - \varphi r \cos\theta - \phi r \sin\theta + h_g \quad (11)$$

式中: φ 为动环轴线与 z 轴的夹角在 yz 平面上的投影角; ϕ 为动环轴线与 z 轴的夹角在 xz 平面上的投影角。当动环上开有深度为 h_e 的螺旋槽时,非槽区中 h_g 为 0,槽区中 $h_g = h_e$ 。

图 7 给出了动静环理论分析模型。当液膜形成后,密封环端面的摩擦阻力矩可由下式求得

$$M_f = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{h \partial P}{2r \partial \theta} + \frac{r}{h} \right) r^2 dr d\theta \quad (12)$$

在压力梯度上积分可得密封泄漏量

$$Q = \int_0^{2\pi} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial r} r d\theta \quad (13)$$

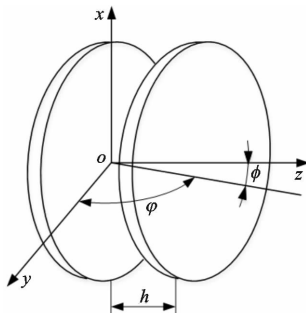


图 7 动静环理论分析模型

对液膜压力 P 求端面面积上的积分得开启力

$$F = \iint_{\Omega} P r dr d\theta \tag{14}$$

本文在机械密封性能计算模型的基础上引入了误差,图 8 给出了引入螺旋槽制造误差的机械密封计算流程,以液氧为密封介质计算涡轮增压中的密封性能变化。

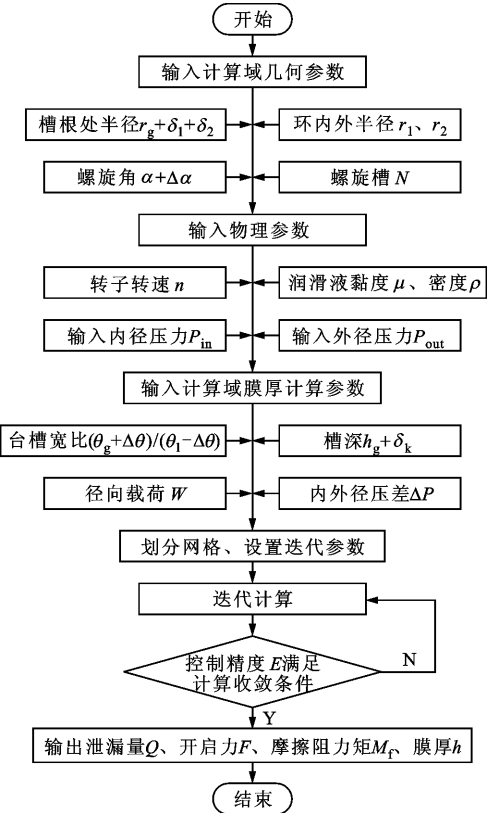


图 8 引入螺旋槽制造误差的机械密封计算流程

3 螺旋槽制造误差对机械密封性能的影响

本文选取了一组螺旋槽机械密封结构参数,如表 1 所示。将结构参数代入软件,可计算得到标准槽型下螺旋槽密封的泄漏量和开启力。再将引入误差的结构参数代入软件,计算即可得到误差对密封性能的影响。

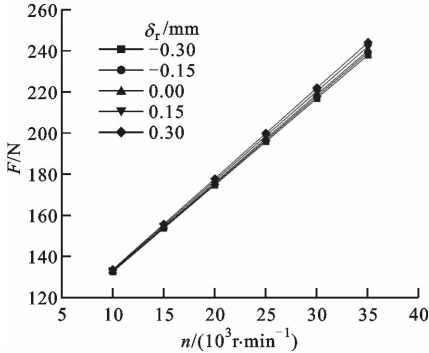
3.1 槽底圆半径误差对密封性能的影响

图 9a、9b 分别给出了转速变化下槽底圆半径误差在 $-0.3 \sim 0.3$ mm 范围内变化时对开启力和泄漏量的影响。随着误差增加,泄漏量和开启力与转速 n 成正比,但误差引起的开启力改变量较小, F 的最大改变量发生在转速最高时,较标准值增加了 1.59%,而泄漏量最大改变量较标准值增加了 16.05%。图 9c、9d 给出了槽底圆半径误差对摩擦

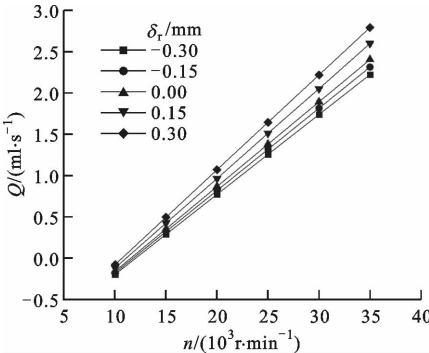
表 1 螺旋槽机械密封结构参数

参数	数值
动环外半径 r_2/mm	55
动环内半径 r_1/mm	44
密封面宽度 B'/mm	11
槽底圆半径 r_g/mm	49.5
槽台宽比 γ	0.5
螺旋角 $\alpha/(\text{^\circ})$	15
槽深 $h_g/\mu\text{m}$	5
槽数 N_g	15

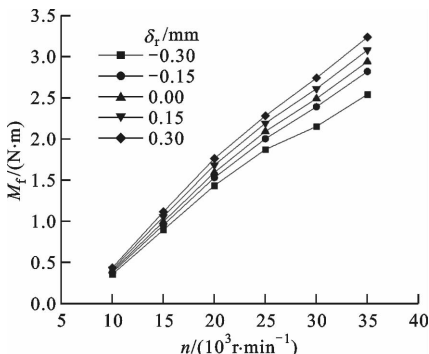
阻力矩和膜厚的影响,随着误差增大,摩擦阻力矩 M_f 与转速成正比, M_f 的最大值为 $3.25 \text{ N} \cdot \text{m}$,较标准值增加了 10.01%,而膜厚 h 随误差的增大先增



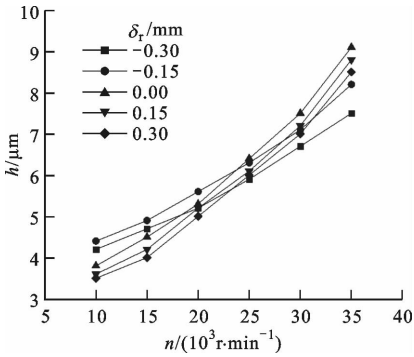
(a) 对开启力的影响



(b) 对泄漏量的影响



(c) 对摩擦阻力矩的影响



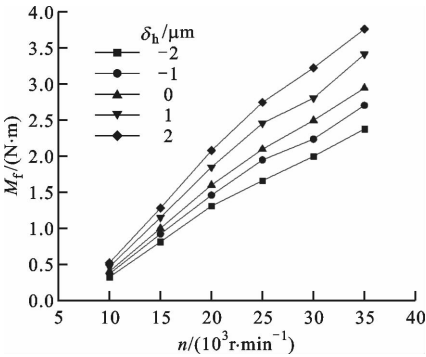
(d)对润滑膜厚度的影响

图 9 槽底圆半径误差对密封性能的影响

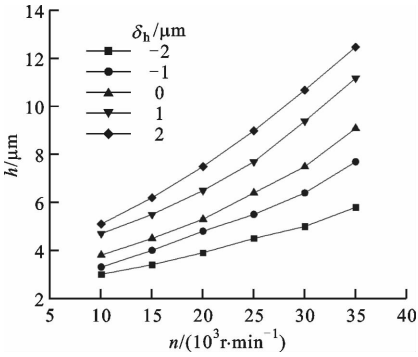
后减,误差在 -0.30 mm 时, h 达到最小值 $7.5\text{ }\mu\text{m}$, h 的减小量较标准值减少了 17.5% 。

3.2 槽深误差对密封性能的影响

槽深误差对密封性能的影响如图 10 所示。图 10a、10b 给出了槽深误差在 $-2\sim2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内变化时对机械密封的开启力和泄漏量的影响。槽深误差增加时,开启力和泄漏量随转速成正比增大。当转速达 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 并且槽深误差为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时开启力和泄漏量出现最大值,开启力和泄漏量分别较标准值增加了 24.47% 和 36.82% 。图 10c 为槽深误差对机械密封摩擦阻力矩的影响,由图中可以看出,摩擦阻力矩随着槽深误差在 $-2\sim2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内变化时,转速越大摩擦阻力矩也越大。摩擦阻力矩最大



(c)对摩擦阻力矩的影响



(d)对润滑膜厚度的影响

图 10 槽深误差对密封性能的影响

值为 $3.77\text{ N}\cdot\text{m}$,较标准值增加了 27.8% ,可见槽深对 M_f 有较大影响。图 10d 为槽深误差下密封膜厚随转速变化的曲线,可以看出膜厚也随着误差增大,最大膜厚出现在最高转速和最大误差处,即在 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 、槽深误差为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,最大膜厚为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$,较标准值增加了 37.4% 。

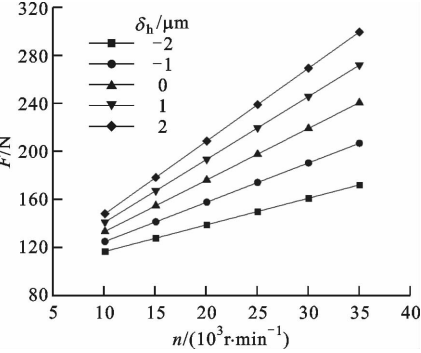
3.3 螺旋角误差对密封性能的影响

由 2.1 节中螺旋角误差分析可知,螺旋角变化与具体加工参数有关,本文根据表 2 所示的激光加工参数,得到了螺旋角误差变化范围在 $-1.005^\circ\sim0.981\text{ }^\circ$ 之间。

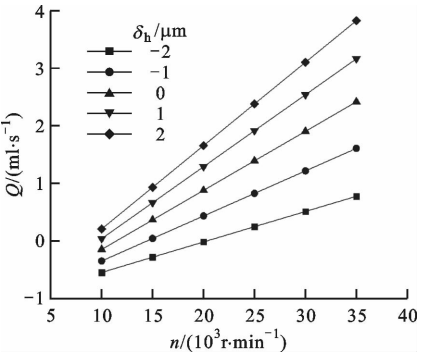
表 2 激光加工参数

参数	数值
填充间距 $l/\mu\text{m}$	20
扫描速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	800
重复频率 f/kHz	60
功率 P_0/W	10
标刻次数 N	1
焦点直径 $d_f/\mu\text{m}$	5

本文将螺旋角误差分成 -1.0° 、 -0.5° 、 0° 、 0.5° 、 1.0° 共 5 组数据计算其对应的开启力、泄漏量、摩擦阻力矩和润滑膜厚度,如图 11 所示。从图



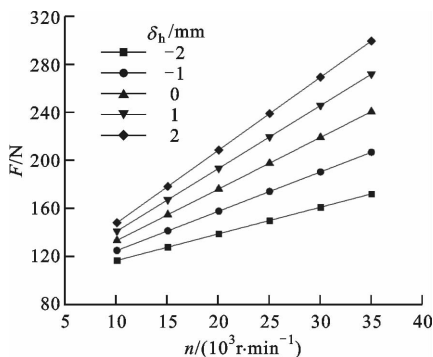
(a)对开启力的影响



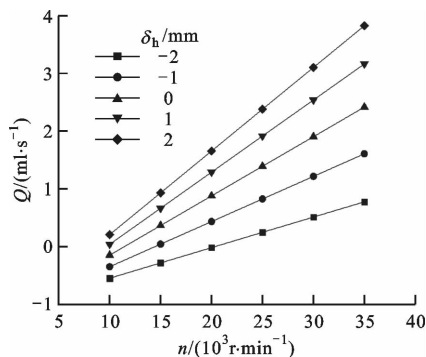
(b)对泄漏量的影响

11a、11b可知,随着螺旋角误差在 $-1.0^{\circ}\sim 1.0^{\circ}$ 之间变化时,开启力和泄漏量也随之增大。随着转速增加,制造误差导致的计算值与标准值的偏差逐渐变大,螺旋角制造误差引起的机械密封开启力在 $-102.4\sim 97.1\text{ N}$ 之间波动,泄漏量在 $-0.2208\sim 0.1931\text{ ml/s}$ 之间波动。机械密封开启力和泄漏量最大取值仍出现在转速最大处,开启力和泄漏量的最大变化量分别较标准值增加了4.25%和9.11%。

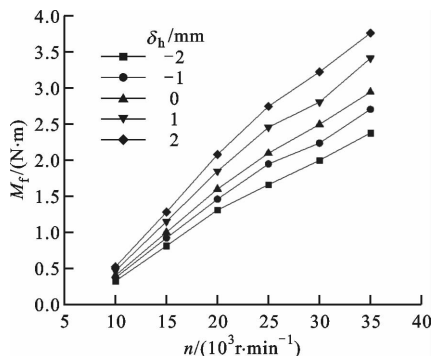
图11c为螺旋角制造误差对机械密封摩擦阻力矩的影响,图中可以看出摩擦阻力矩随着螺旋角制造误差在 $-1.0^{\circ}\sim 1.0^{\circ}$ 范围内逐渐增大,转速越高摩擦阻力矩也越大。摩擦阻力矩最大值为 $3.18\text{ N}\cdot\text{m}$,较标准值增加了7.8%。图11d为螺旋角制造误差对机械密封膜厚的影响,图中可以看出膜厚也随



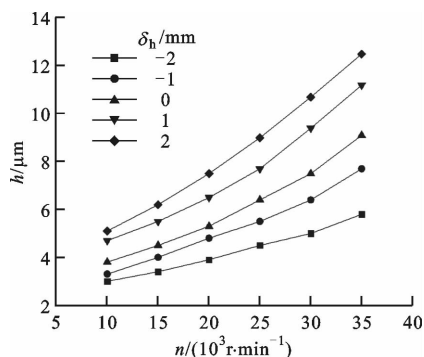
(a)对开启力的影响



(b)对泄漏量的影响



(c)对摩擦阻力矩的影响



(d)对润滑膜厚度的影响

图11 螺旋角误差对密封性能的影响

着误差增大,最大膜厚出现在最高转速和最大误差处,即在 35000 r/min 、螺旋角制造误差为 1.0° 时,最大膜厚达 $9.8\text{ }\mu\text{m}$,较标准值增加了7.69%。综合以上分析可知,螺旋角的制造误差对机械密封性能的影响不大,从设计角度来讲可忽略不计。

3.4 螺旋槽制造误差对密封性能影响的综合分析

除了上述3种螺旋槽制造误差会对性能产生影响外,还有一种槽台宽比误差,本文针对槽台宽比误差进行的密封性能仿真分析表明,这种制造误差对密封性能的影响极小,可以忽略不计。因此,综合槽底圆半径误差、槽深误差及螺旋角误差对机械密封性能的影响分析可以得出如下结论:

对于开启力,3种制造误差带来的影响分别较标准值增加了1.59%、24.47%和4.25%,槽深误差对开启力的影响不可忽略。

对于泄漏量,3种制造误差带来的影响分别较标准值增加了16.05%、36.82%和9.11%,可见槽底圆半径和槽深误差对泄漏量的影响显著,尤其以槽深误差造成的影响最大。

对于摩擦阻力矩,3种制造误差带来的影响分别较标准值增加了10.01%、27.8%和7.8%,可见槽深误差对摩擦阻力矩的影响最大,而槽底圆半径和螺旋角对摩擦阻力矩影响相对较小。

对于润滑膜膜厚,3种制造误差带来的影响分别较标准值增加了17.5%、37.4%和7.69%,可见槽底圆半径和槽深误差对膜厚的影响更加显著,依然是以槽深误差造成的影响最大。

由以上分析可以看出,槽底圆半径误差和螺旋角误差对泄漏量的影响较明显,最大泄漏量较标准值增加了16.05%和9.11%,而槽深误差引起的最大泄漏量较标准值增加了36.82%,开启力的最大值较标准值增加了24.47%,同时摩擦阻力矩和膜厚的最大值较标准值增加了27.8%和37.4%,因此密

封对槽深误差的反应最为敏感。

根据本文分析发现槽深误差带来的密封性能影响巨大且不可忽视,究其原因可从以下两个方面解释:一方面在激光加工槽深时的误差为微米量级,与 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的槽深处在同一量级,并且在槽深 $3\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ 的小区间内,槽深变化引起的液体动压效应尤为明显^[14-15],直接影响了液体压力的变化,从而使开启力、摩擦力矩等参数发生明显改变;另一方面火箭发动机涡轮泵转速较高,较高的转速同样增强了液体的流动,使动压效应更加明显,因此槽深变化下泄漏量和开启力变化剧烈。图 12 给出了转速为 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 、槽深在 $3\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ 范围内时机械密封泄漏量和开启力的变化情况,图中可以看出,高转速下虽然泄漏量和开启力变化大,但是增量稳定,并呈线性关系。

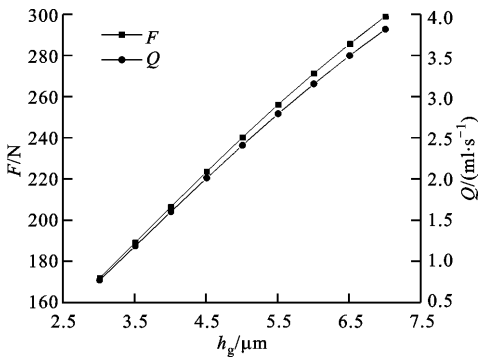


图 12 转速为 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 不同槽深时的开启力和泄漏量

4 考虑螺旋槽制造误差的机械密封性能优化

螺旋槽的制造误差难以根除,并且以槽深误差对密封的性能影响最大。本节将重点研究通过改变设计参数和控制制造参数以减小槽深误差给机械密封性能带来的影响。

4.1 通过改变设计参数的性能优化

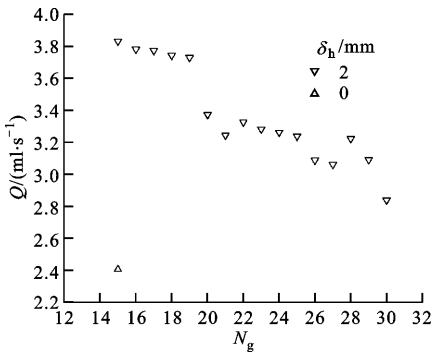
高速下槽深误差对机械密封性能影响明显,并且对泄漏量和膜厚的影响最大。开启力、摩擦阻力矩可以通过改变波纹管刚度或者摩擦副表面形貌等手段进行调节,对开启力而言,波纹管系统结构会自动产生补偿力平衡。膜厚和泄漏量相关,由前面的槽深影响分析可知,泄漏量随着槽深增大而成正比增大,为考虑密封安全问题,须将控制润滑介质泄漏作为首要目标,因此本部分主要进行泄漏量的优化。

本文设计要求泄漏量 Q 不超出同工况下标准槽深泄漏量的 15% ,膜厚控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内。从前

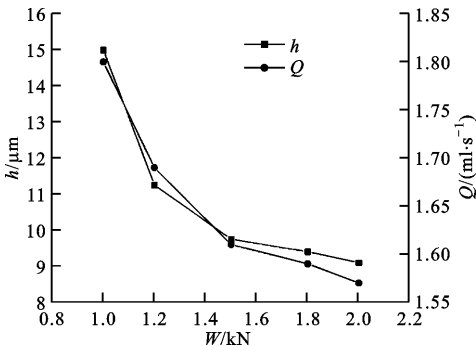
面的分析可知,泄漏量和膜厚最大值都发生在转速最大处,因此只需对最大转速下的槽深误差影响做出优化调整。影响机械密封性能的设计参数除了尺寸参数外,还有螺旋槽数 N_g 、密封端面载荷 W 以及内外径压差 ΔP 等,其中螺旋槽数对泄漏量的影响最为明显。另外,本文密封的内外径压差取值较小,均在 1 MPa 内,因此优化参数可以选择螺旋槽数和端面载荷。

图 13a 给出了转速为 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 、槽深误差存在时,螺旋槽数对泄漏量的影响。图中可以看出, N_g 在 $15\sim 30$ 范围内变化, N_g 泄漏量越小; N_g 在 $22\sim 28$ 区间内变化时存在极小值点 27,此时泄漏量减小至 3.06 ml/s ,约为标准值的 1.25 倍。一般加工螺旋槽数过多不仅增加工作量,又易产生误差,因此设计槽数不宜过多, N_g 选 27 为宜。

图 13b 给出了槽数为 27、转速为 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 时,增加端面载荷对密封指标的影响。从图 13b 中可以看出,随着密封端面载荷的增加,润滑膜膜厚 h 和泄漏量 Q 都逐渐递减。载荷在 1 kN 时泄漏量减小至 2.7 ml/s ,约为标准泄漏量的 1.15 倍,符合泄漏量控制要求。当载荷达 1.5 kN 时,膜厚减小至约 $10\text{ }\mu\text{m}$,密封总体达到优化设计要求。除此之外,适当增加波纹管刚度,微调槽底圆半径也可以在一



(a)槽数对密封性能的影响



(b)转速在 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 下的 Q 、 h 随载荷的变化

图 13 变参数下密封优化控制计算图

定程度上降低泄漏量等密封指标。

4.2 通过控制制造参数的性能优化

本文采用从槽深误差源头解决问题的优化方法,激光加工与一般数控加工一样,减小加工量、增加加工次数,可在一定程度上增加制造的精度。本文螺旋槽加工可以通过以下方法控制槽深的加工精度。

通过试验记录不同加工参数下激光对 9Cr18 材料的打标深度,确定适合的参数范围;利用重复打标将加工精细化,一至两次标刻成型的槽深一般误差较大,可适当增加标刻次数,每打标一次后通过金相

显微镜检测加工深度,适时调整参数;通过试验确定最佳加工路线后,误差即可控制在 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 以内,此时若统计的槽深始终大于(小于)设计尺寸时,可减少(增加)一次打标,或根据 4.1 节的优化方法适当调整其他参数抵消槽深误差的影响。

利用 DW 5600 半导体泵浦固体激光打标机做了 4 组不同打标参数下的实验。本试验以标刻机重复标刻次数 N 为变量,研究打标次数与加工后螺旋槽槽深 h_g 的关系。通过对试加工的结果进行对比和检测,选择如表 4 所示的加工路线,表 4 中数据从左到右依次按照加工前后顺序排列。

表 4 试验激光加工参数

重复标刻数 N	电流/A	频率/kHz	进给速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
2	22,22	5,5	40,40
3	18,18,14	5,5,10	50,50,250
4	18,14,14,12	5,10,10,10	50,250,250,300
5	18,12,12,12,12	5,10,10,10,10	50,250,250,250,300

在表 4 中 $N=2$ 时的电流为激光标刻机的最大电流 22A。图 14 给出了通过金相显微镜检测和统计后的实验数据图,由图可见,重复打标次数越多,槽深误差和离散程度越小,以 $5\text{ }\mu\text{m}$ 标准槽深为均值计算离散度,发现通过两次加工后的槽深最大误差为 $2.43\text{ }\mu\text{m}$,方差为 $1.85\text{ }\mu\text{m}$,而当标刻次数为 5 时,最大槽深误差仅为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,方差为 $0.44\text{ }\mu\text{m}$ 。

其中 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 表示不同参数下的单次标刻槽深; $n_1, n_2, \dots, n_n$ 表示 $h_1, h_2, \dots, h_n$ 对应的重复打标次数。

当多次打标时,将高电流、低频率、低速度的加工参数作为首次打标参数,低电流、高频率、高速度的加工参数作为最后一次打标参数。

5 结 论

本文的研究对象是火箭发动机涡轮泵机械密封,针对密封动环端面螺旋槽制造误差对性能的影响进行研究,得到如下结论:

(1)分析了机械密封螺旋槽制造误差来源,将误差分为槽底圆半径误差 δ_r 、槽深误差 δ_h 、螺旋角误差 $\Delta\alpha$ 和槽台宽比误差 $\Delta\gamma$ 4 类,建立了考虑螺旋槽制造误差的机械密封性能分析模型,性能分析指标为开启力 F 、泄漏量 Q 、阻力矩 M_f 和膜厚 h 。

(2)通过计算获得了螺旋槽制造误差影响下机械密封的开启力和泄漏量等性能变化,发现了误差对于泄漏量的影响较之开启力更加敏感,且槽深误差最为显著,特别是转速为 $35\text{ }000\text{ r/min}$ 、槽深误差为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,受误差影响开启力和泄漏量分别增大了 24.47% 和 36.82% ,摩擦阻力矩和膜厚分别增大了 27.8% 和 37.4% 。

(3)研究了螺旋槽制造误差影响下性能的优化方法,通过设计参数和制造参数对密封性能进行了优化,优化后可极大减少误差造成的影响。

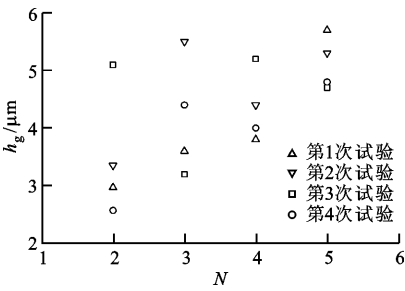


图 14 不同打标次数下槽深变化图

由以上分析可以知道,由于选取仪器最大电流,两次打标成型的螺旋槽激光能量不稳定而出现 4 次检测结果偏差较大。通过增加标刻次数,适时调整激光的加工参数,将加工精细化是有利于提高槽深精度的。

试验证明电流越小、进给速度越快、频率越高时单次加工的槽深越小。槽深 h_g 为多次标刻槽深的累加,即

$$h_g = h_1n_1 + h_2n_2 + \dots + h_nn_n \tag{15}$$

参考文献:

- [1] 杨先碧. 第一款可重复利用的火箭 [J]. 科技潮, 2013 (2): 68-69.
- [2] 凯文·布利斯. SpaceX 计划明年开始使用可重复利用火箭 [J]. 科技创业, 2014(Z2): 38.
- [3] 张琛. 火箭发动机涡轮泵机械密封的磨损机理及性能优化 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 1-2.
- [4] 王晓虎. 极端工况机械密封的结构设计和摩擦学性能试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 9-10.
- [5] GLIENICKE J, LAUNERT A, SCHLUNS H, et al. Non-contacting gas lubricated face seals for high $p \cdot v$ values; N95-13609 [R]. Cleveland, OH, USA: NASA Lewis Research Center, 1993: 367-379.
- [6] LEBECK A O. Hydrodynamic lubrication in wavy contacting face seals; a two dimensional model [J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1981, 103 (4): 578-586.
- [7] 张国渊, 陈国忠, 赵伟刚, 等. 高速低温动静结合型机械密封结构优化及运转试验 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(5): 1093-1102.
ZHANG Guoyuan, CHEN Guozhong, ZHAO Weigang, et al. Optimization and test of parameters of the cryogenic hydrodynamic mechanical seal [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5): 1093-1102.
- [8] 王建磊, 张琛, 王晓虎, 等. N_2O_4 环境下液体火箭发动机涡轮泵机械密封浸渍石墨的磨损机理研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 119-127.
WANG Jianlei, ZHANG Chen, WANG Xiaohu, et al. Wear mechanism of liquid rocket engine turbopump mechanical seal graphite surface in the N_2O_4 environment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 119-127.
- [9] 毛文元, 宋鹏云, 邓强国, 等. 干气密封螺旋槽的激光加工工艺研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 253-262.
MAO Wenyuan, SONG Pengyun, DENG Qiangguo, et al. Research on laser processing technology of spiral groove for dry gas seal [J]. Advanced Engineering Science, 2018, 50(5): 253-262.
- [10] 戴伟. 一种用高能激光加工干气密封螺旋槽的方法 [J]. 石油化工设备, 2013, 42(4): 45-48.
- DAI Wei. A split lip seal method by high energy laser [J]. Petro-Chemical Equipment, 2013, 42(4): 45-48.
- [11] 邓晨, 薛薇, 郑孟伟, 等. 大推力氢氧补燃循环发动机故障仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 48-53.
- DENG Chen, XUE Wei, ZHENG Mengwei, et al. Fault simulation for heavy-lift LH2/LOX staged combustion cycle engine [J]. Computer Measure and Control, 2019, 27(11): 48-53.
- [12] 贾谦, 董光能, 赵伟刚, 等. 腐蚀下浸渍石墨材料的摩擦磨损特性研究 [J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2013, 28(3): 21-26.
- JIA Qian, DONG Guangneng, ZHAO Weigang, et al. Study on friction and wear characteristics of impregnated graphite materials under corrosion [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 28(3): 21-26.
- [13] 毛文元, 宋鹏云, 邓强国, 等. 机械密封流体动压槽加工工艺技术研究进展 [J]. 润滑与密封, 2017, 42 (11): 124-136.
- MAO Wenyuan, SONG Pengyun, DENG Qiangguo, et al. A review on the study of the groove etched process for the hydrodynamic mechanical seals [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(11): 124-136.
- [14] 宋鹏云. 螺旋槽机械密封性能影响因素的解析法分析 [J]. 石油机械, 2001(2): 18-22.
- SONG Pengyun. Analytical analysis of influencing factors of spiral groove mechanical seal performance [J]. Petroleum Machinery, 2001(2): 18-22.
- [15] 袁韬, 李志刚, 李军, 等. 螺旋槽结构对超临界 CO_2 压气机轴端干气密封性能影响的数值研究 [J/OL]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11) (2020-07-07) [2020-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200707.1339.002.html>.
- YUAN Tao, LI Zhigang, LI Jun, et al. Effects of spiral structure on the shaft end dry gas seal performance for supercritical carbon dioxide compressor [J/OL]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(11) (2020-07-07) [2020-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200707.1339.002.html>.

(编辑 武红江)