

激光加工多孔端面机械密封结构参数的协调优化*

李国栋** 雷兴
(兰州理工大学)

杜鹃
(中国电子工程设计院)

张鹏高 张静
(兰州理工大学)

摘要 通过建立激光加工多孔端面机械密封的理论分析模型,采用有限差分法求解雷诺方程,得到不同微孔结构参数下密封端面间的膜压分布,进而可以计算多目标优化方法构建的液膜刚度与泄漏量之比的协调函数,获得了最佳的微孔结构参数值。研究表明,当微孔深径比 ϵ 为 0.1069 和微孔密度 ρ 为 0.492 时,刚漏比最大。

关键词 机械密封 激光加工 端面微孔 刚漏比 协调优化

中图分类号 TQ51.21 **文献标识码** A **文章编号** 0254-6094(2009)06-0554-04

激光加工多孔端面机械密封(LSFMS)为一种新型的非接触密封装置,是以色列科学家 Etsion^[1]于 1996 年提出的密封技术。研究表明,在相同条件下,它与普通机械密封相比适用范围更广,端面升温或摩擦力矩却下降。到目前为止,关于 LSFMS 的理论研究还刚起步,且在工程实践中 LSFMS 并没发挥出它的最大优势,其原因主要是微孔几何结构参数选择不合理。为此,国内外学者对 LSFMS 的流动特性进行研究,一般采

用有限元方法^[2,3]和实验测量法^[4,5]来获得密封性能参数的影响规律及结构参数的优化范围,但以上仅利用单目标优化方法优化微孔结构参数。本文利用多目标优化方法构建了液膜刚度与泄漏量之比的协调函数,并对该目标函数进行了近似求解,获得了最佳的微孔几何结构参数值。

1 激光加工多孔端面机械密封理论模型的建立

1.1 几何模型

由激光加工密封面的几何形状如图 1 所示。

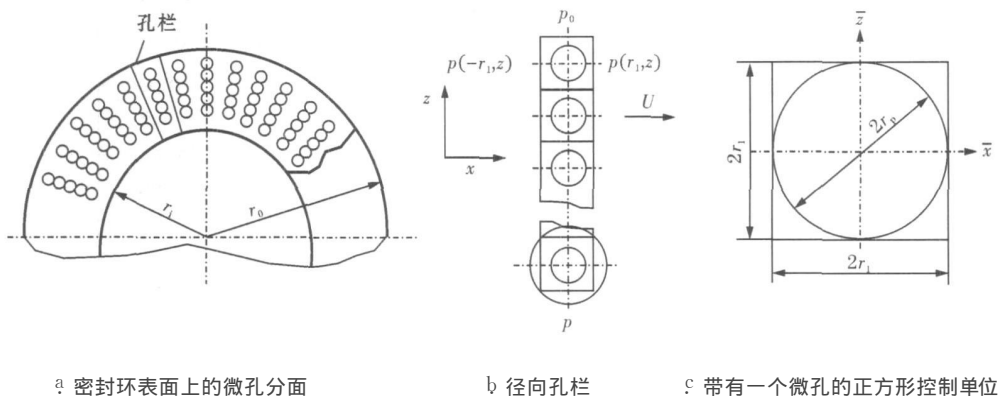


图 1 开孔密封表面几何结构简图

* 兰州理工大学科研发展基金资助项目 (BS06200901), 甘肃省自然科学基金资助项目 (3ZS061-A25-051)。

** 李国栋,男,1981年10月生,硕士研究生。甘肃省兰州市,730050。

微孔的半径为 r_f 呈放射状分布于环形密封表面, 每一组径向微孔称为一个孔栏, 如图 1 a 所示。由于密封环的宽度相对于半径很小, 可忽略曲率的影响, 因此, 认为孔栏的两个径向边界可相互平行; 由于孔栏内外周边圆弧的长度只是密封环周长的很小一部分, 所以可认为孔栏的内外周向边缘为直线; 再者, 微孔的直径在微米级, 这样孔栏的圆周方向尺寸远小于半径方向的尺寸, 因此, 每个扇形孔栏即可认为是微孔均匀分布的矩形孔栏, 如图 1 b 所示, 所建坐标系为 x 轴沿圆周方向, z 轴沿半径方向。

每个孔位于假想的边长为 $2f \times 2f$ 控制单元的中央, 如图 1 c 所示, 图中 x 和 z 为以微孔中心为原点的局部坐标轴, 则有:

$$f = \frac{r_f}{2} \left(\frac{\pi}{\varphi} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中 φ ——微孔的面积密度, $\varphi = \pi r_f^2 / (4f^2)$ 。

1.2 控制方程

基本假设:

a 两密封面不直接接触, 其间存在液膜, 且液膜厚度 h_0 保持不变;

$$\begin{cases} h = h_0 & x^2 + z^2 \geq f^2 \\ h = h_0 + \sqrt{\left(\frac{h_0}{2} + \frac{r_f^2}{2h_0}\right)^2 - (x^2 + z^2)} - \left(\frac{r_f^2}{2h_0} - \frac{h_0}{2}\right) & x^2 + z^2 < f^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 h_0 ——微孔的深度。

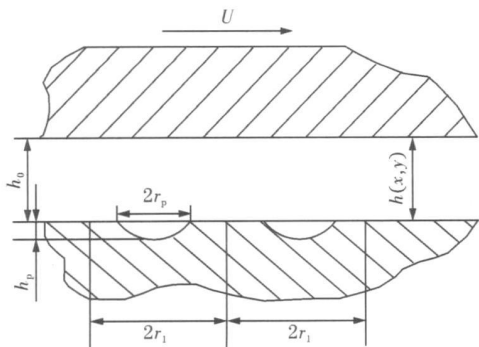


图 2 密封面膜厚与微孔的几何尺寸

1.3 边界条件

式 (2) 在孔栏上有两组边界条件。一组在密封环的内外边界, 其边界条件为:

$$\begin{cases} P(x=0, z=0) = P_1 = P_a \\ P(x=2f, z=f-r_f) = P_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 P_1 ——环境压力。

- b 在沿润滑膜厚度方向上, 不考虑压力 P 的变化;
- c 密封流体为牛顿型流体, 其粘度 μ 保持不变;
- d 不考虑密封面曲率影响。

因此, 可认为密封面间的相对滑动速度 U 保持定值, 且为密封面平均半径处的切向速度。

由以上假设可知, 密封面上的压力分布沿周向按孔栏周期性分布, 因此一个孔栏上的压力分布即可代表整个密封面上的压力分布。

根据流体动力润滑理论^[6], 液膜的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

式中 μ ——液体的动力粘度, Pa·s;

U ——密封动环的平均切向速度, m/s;

h ——密封面间的液膜厚度, m。

密封端面可分为微孔区和非孔区, 液膜厚度分布如图 1 c 和图 2 所示。对于微孔区内任意一点 (x, z) , 有 $r^2 = x^2 + z^2$, 膜厚恒为 h_0 ; 微孔区的膜厚是局部坐标 x 和 z 的函数, 即:

另一组边界条件在孔栏的两个径向边界上, 对应直径处的压力分别相等, 且具有相同的变化规律, 即:

$$\begin{cases} P(x=-f, z) = P(x=f, z) \\ \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=-f, z} = \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=f, z} \end{cases} \quad (5)$$

1.4 无量纲化

为方便求解方程, 对变量进行无量纲化。定义无量纲坐标 X 和 Z , 无量纲局部坐标 x 和 z , 无量纲局部膜厚 H 和无量纲压力 P 分别为:

$$X = \frac{x}{f}, \quad Z = \frac{z}{f}, \quad X = \frac{x}{f}, \quad Z = \frac{z}{f}, \quad H = \frac{h}{h_0}, \quad P = \frac{P}{P_a} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (2), R 方程的无量纲形式:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = \frac{\lambda}{\delta} \frac{\partial H}{\partial X} \quad (7)$$

式中 λ ——无量纲密封参数, $\lambda = 3\mu U / (2f \times P_a)$;

δ —无量纲密封间隙 (膜厚), $\delta = h_0 / (2\varphi)$ (25)。

$$\begin{cases} H(\bar{X}, \bar{Z}) = 1 & \bar{X}^2 + \bar{Z}^2 \geq 1 \\ H(\bar{X}, \bar{Z}) = 1 + \left[\left(\frac{\epsilon}{2\delta} + \frac{1}{8\epsilon\delta} \right)^2 - \frac{1}{4\delta} (\bar{X}^2 + \bar{Z}^2) \right]^{1/2} - \left(\frac{1}{8\epsilon\delta} - \frac{\epsilon}{2\delta} \right) & \bar{X}^2 + \bar{Z}^2 < 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中 ϵ —微孔深径比, $\epsilon = h_0 / (2\varphi)$ 。

无量纲边界条件形式为:

$$\begin{cases} P(\bar{X}, \bar{Z}=0) = P_i / P_a = 1 \\ P(\bar{X}, \bar{Z} = \frac{\delta - r_i}{\varphi}) = P_0 / P_a \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P(\bar{X} = \frac{r}{\varphi}, \bar{Z}) = P(\bar{X} = -\frac{r}{\varphi}, \bar{Z}) \\ \frac{\partial P}{\partial \bar{X}}(\bar{X} = \frac{r}{\varphi}, \bar{Z}) = \frac{\partial P}{\partial \bar{X}}(\bar{X} = -\frac{r}{\varphi}, \bar{Z}) \end{cases} \quad (10)$$

采用有限差分法求解无量纲形式的雷诺方程, 利用 MATLAB程序可以得到控制单元上的压力分布, 进而计算多目标优化方法构建的液膜刚度与泄漏量之比的协调函数。

2 多目标协调优化微孔结构参数

2.1 多目标协调函数——刚漏比的解析式

液膜推力:

$$F = 2\pi \int_{r_i}^r \rho P dr \quad (11)$$

无量纲化:

$$\bar{F} = F / \pi r_i^2 P_a = 2 \int_1^{\zeta_0} \zeta P d\zeta \quad (12)$$

泄漏量:

$$Q = \frac{\pi \zeta_0 P_a h_0}{6\mu} \frac{\partial P}{\partial \bar{X}} \quad (13)$$

无量纲泄漏量:

$$\bar{Q} = Q \frac{P_a h_0}{\mu} = \frac{\pi \zeta_0}{6} \frac{\partial P}{\partial \bar{X}} \quad (14)$$

刚漏比:

$$T = \frac{\bar{F}}{\bar{Q}} = 12 \int_1^{\zeta_0} \zeta P d\zeta / \pi \zeta_0 \frac{\partial P}{\partial \bar{X}} \quad (15)$$

2.2 优化参数的实例分析

选择下列一组密封环端面结构参数和工况参数进行计算: 内径 $r_i = 10.8\text{mm}$, 外径 $r_o = 13.5\text{mm}$, 介质压力 (外压) $P_0 = 0.60795\text{MPa}$, 环境压力 (内压) $P_a = P_i = 0.1013\text{MPa}$, 流体粘度 $\mu = 0.015\text{Pa}\cdot\text{s}$, 转速 $n = 3000\text{r/min}$, 微孔深径比 $\epsilon = 0.1$, 微孔密度 $s_p = 0.4$, 微孔半径 $r_p = 50\mu\text{m}$, 微孔深度 $h_p = 10\mu\text{m}$ 。

通过软件 Matlab对式 (15)进行近似计算, 获

无量纲局部膜厚 H 为无量纲局部坐标 \bar{X} 和 \bar{Z} 的函数, 有如下形式:

得了刚漏比 T 与微孔深径比 ϵ 、微孔密度 s_p 的三维关系曲面图 (图 3)。从图 3中可看出, 刚漏比 T 具有峰值, 且最大值应在 $\epsilon = 0.1 \sim 0.2$, $s_p = 0.4 \sim 0.5$ 的范围内。为了获得精确的最佳值, 又分别求出了刚漏比 T 与微孔深径比 ϵ 、刚漏比 T 与微孔密度 s_p 的二维关系图 (图 4、5)。从图 4、5中可知, 刚漏比 T 最大时, 最佳的微孔深径比 $\epsilon_{opt} = 0.1019$, 最佳的微孔密度 $s_{p,opt} = 0.492$ 。

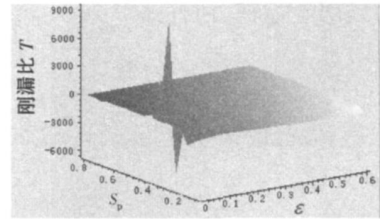


图3 刚漏比 T 与微孔深径比 ϵ 、微孔密度 s_p 的关系曲面图

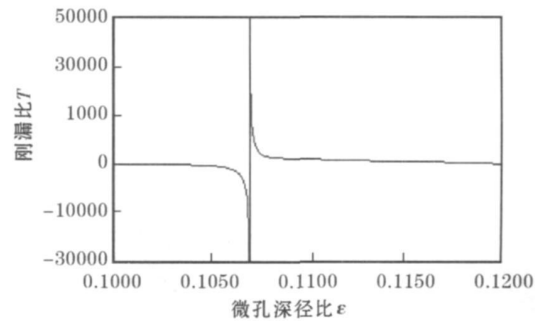


图4 刚漏比 T 与微孔深径比 ϵ 的关系曲线

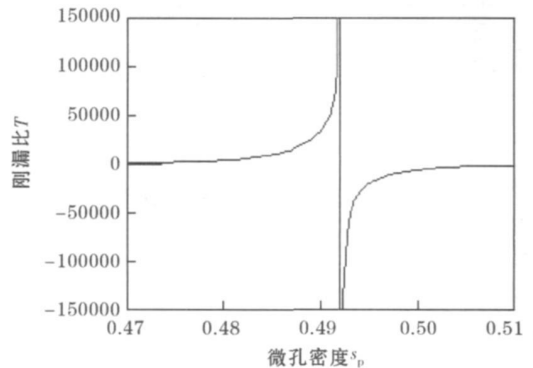


图5 刚漏比 T 与微孔密度 s_p 的关系曲线

3 结论

3.1 通过对多目标优化方法建立的液膜刚度与泄漏量之比的协调函数进行计算可知,存在最佳的微孔几何结构参数值,使刚漏比最大。本例优化的数据为:最佳的微孔深径比 $\epsilon_{opt}=0.1069$,最佳的微孔密度 $\delta_{opt}=0.492$ 。

3.2 所得的刚漏比协调函数是一无量纲式,具有普遍适用性。利用该式可获得不同工艺操作条件下的最佳微孔几何结构参数值,为激光加工多孔端面机械密封的工程优化设计提供了可靠的理论依据。

Regular Microsurface Structure. Tribology Trans 1996 39 (3): 677~683

- 2 杜东坡,彭旭东.微孔参数对激光加工多孔端面机械密封性能的影响.润滑与密封,2006(4):42~44
- 3 杜东坡,骆建国,胡滨等.激光加工多孔端面机械密封的理论研究.流体机械,2006 34(5):12~14
- 4 于新奇,彭培英,王振辉等.激光加工多孔密封端面的摩擦性能试验研究.润滑与密封,2006(8):34~37
- 5 于新奇.激光加工多孔端面机械密封的性能研究:[博士学位论文].上海:华东理工大学,2004
- 6 杨沛然.流体润滑数值分析.北京:国防工业出版社,1998

参 考 文 献

(收稿日期:2009-05-31)

1 Etsion I, Burstein L. A Model for Mechanical Seals with

Trade-Off Optimization for the Geometry Parameters of the Mechanical Seals with Laser-Texture Micro-Pore Surfaces

LIGUODONG¹, DING XUENING¹, DU JUAN¹, ZHANG PENGGAO¹, ZHANG JING

¹ Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China

² China Electronic Engineering Design Institute, Beijing 100840, China

Abstract The film pressure distribution between the seal surfaces under various micro-pore geometry parameters was obtained from a solution of Reynolds equation using finite difference method through the foundation of the theoretical analysis model of the mechanical seals with a laser-textured micro-pore surface. The trade-off function of the ratio of the fluid film rigidity constructed of multi-objective optimum method of spillage could be further calculated to obtain the optimum micro-pore geometry parameter. The research shows that the rigidity to spillage ratio T is maximum when the ratio of pore depth to pore diameter ϵ is 0.1069 and the micro-pore density δ is 0.492.

Keywords Mechanical Seal; Laser Texturing; Micro-Pore of Surface; Rigidity to Spillage Ratio; Trade-Off Optimization

(Continued from Page 538)

Abstract Based on the pressure characteristics of the bag filters at initial filter stage, an experimental analysis was made by selecting high density polyethylene powder for investigating the influences of the filter velocity and the concentration of polyethylene powder at the inlet on the pressure drop of the filter bags. The result shows that there is a significant rising trend in the pressure drop of the filter bags at initial filter stage, the increase of the pressure drop is mainly because of the residual pressure drop. The polyethylene powder kept in the filter bags changed the structure of the flow channel inside filter materials, and induced the continuous rise of the residual pressure drop in the filter bags. The increases of the filter velocity and the concentration of polyethylene powder at the inlet can greatly increase the residual pressure drop. A computational model of the total pressure drop of the filter bags was proposed by analyzing the components of the pressure drop.

Keywords Bag Filter; Filter Bag; Pressure Drop; Residual Pressure Drop