

激光加工多孔气体端面密封的静压性能研究

秦浩^{1,2}, 彭旭东^{1,2}, 白少先^{1,2}, 盛颂恩^{1,2}, 李纪云²

(1. 浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032;

2. 浙江工业大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 采用有限元方法求解二维气体雷诺方程, 研究激光加工多孔端面气体润滑密封的静压性能. 主要分析了密封端面的微孔面积比 S_p 、开孔比、无量纲孔深和密封压力 P_0 对开启力增幅 P_{av} 、泄漏量 Q 、开漏比 E_k 、刚漏比 E_k 等密封性能参数的影响规律, 结果表明, 当 $S_p = 0.65$, $\lambda = 0.6$, $\beta = 3.0$ 时可确保密封在静压条件下具有优异的性能. 研究结果为密封的优化设计提供了依据.

关键词: 气体密封; 多孔端面; 静压性能; 有限元法

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2009)03-0205-05

激光加工表面纹理 (Laser Surface Textured, 简称 LST) 技术从上世纪 90 年代开始得到了迅速发展, 并在密封等基础件上得到应用. 激光加工多孔端面机械密封 (LST-MS) 的概念最早由以色列 Etsion 等^[1]于 1996 年提出, 这一概念有效地提高了密封的 μv 值, 降低了摩擦扭矩和端面温升. 目前, 对 LST-MS 的研究大多集中在液膜密封^[2-6], 仅有 Etsion 等^[7-8]采用有限差分法对气体 LST-MS 的性能进行了初步研究, 而国内在这方面的研究尚为空白. 有限差分方法的网格划分简单, 但是对曲线边界的适应性较差; 而有限元对于曲线边界适应性强, 能够更好地适用于 LST-MS 的结构. 因此, 本文采用有限元法研究气体 LST-MS 的静压性能, 同时提出端面微结构优化设计准则, 以期对气体 LST-MS 的设计和加工提供理论依据.

1 几何模型

图 1 所示为气体 LST-MS 的二维几何模型. 多孔均匀分布于密封端面上直径为 d_p 到 d_o 的区域, 沿径向呈辐射状分布 [见图 1(a)]. 基于微孔分布的周期性, 只需对端面上某一个孔列区域进行研究. 由于端面宽度相对端面直径较小, 因此可以忽略端面曲率的影响, 该孔列近似看作包含微孔的矩形, 其宽度和长度分别为 $2r$ 和 l , 如图 1(b) 所示.

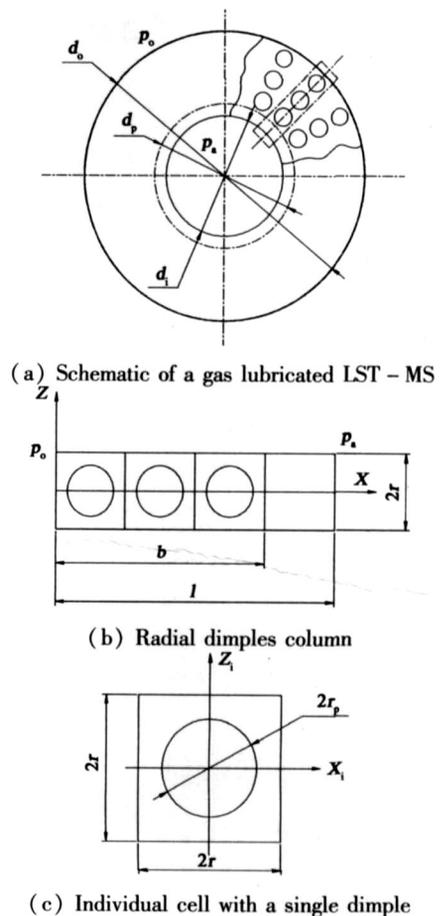


Fig 1 Geometry of a LST-MS micro surface structure

图 1 激光加工多孔机械密封几何模型

收稿日期: 2008-06-22; 修回日期: 2009-03-22; 联系人: 彭旭东, e-mail: xdpeng@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (50575152, 50775206, 50805130); 浙江省科技计划项目资助 (2008C21125).

作者简介: 彭旭东 (1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流体密封及高分子材料摩擦学的研究.

孔列内的每一个微孔均位于一个边长为 $2r$ 的正方形中部,各个正方形彼此连接.微孔半径均为 r_p [见图 1(c)],孔深为 h_p .微孔区域的面积密度 S_p 定义为微孔区面积与正方形面积的比值,即:

$$S_p = \frac{\pi r_p^2}{4r^2} \quad (1)$$

定义开孔比 为微孔区域所占面积与端面面积的比值,即 $=b/l$ [见图 1(b)];无量纲孔深 为微孔深度 h_p 与端面间气体厚度 c 的比值,即 $=h_p/c$

2 数学模型及求解

假设密封端面之间的流体为等温、层流、牛顿型流体,若忽略密封面的变形,则端面间压力分布可以通过气体雷诺方程求得:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

求解方程 (2) 的边界条件为强制性边界条件:

$$p(x=0, z) = p_o, \quad p(x=l, z) = p_a \quad (3)$$

和周期性边界条件:

$$p(x, z=r) = p(x, z=-r) \quad (4)$$

定义如下无量纲参量:

$$X = \frac{x}{l}, \quad Z = \frac{z}{r}, \quad H = \frac{h}{c}, \quad P = \frac{p - p_o}{p_a - p_o} \quad (5)$$

并对方程 (2) 进行无量纲化,得到:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\rho H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\rho H^3 \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 0 \quad (6)$$

方程 (6) 是一个非线性方程,若定义变量 $S = P^2$,则方程 (6) 可以转化为:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial S}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 \frac{\partial S}{\partial Z} \right) = 0 \quad (7)$$

方程 (7) 是一个关于 S 的线性方程,求解简便,由此通过求解方程 (7) 获得压力分布 P .

边界条件 (3) 和 (4) 转化为无量纲形式之后,再用 S 表示为如下形式:

$$S(X=0, Z) = P_o^2, \quad S(X=1, Z) = 1 \quad (8)$$

$$S(X, Z=1) = S(X, Z=-1) \quad (9)$$

为求解方程 (7),先采用伽辽金法对其进行离散,得到等效积分形式为^[9]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 \frac{\partial S}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 \frac{\partial S}{\partial Z} \right) \right] S d = 0 \quad (10)$$

其中 为求解区域.

经过分部积分,利用格林公式,方程 (10) 变为:

$$\left[H^3 \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial S}{\partial X} + H^3 \frac{\partial S}{\partial Z} \frac{\partial S}{\partial Z} \right] d = 0 \quad (11)$$

采用三角形单元对求解区域进行离散^[9],插值函数为:

$$S = \sum_{i=1}^3 N_i S_i \quad (12)$$

则由方程 (11) 得到以下形式的总体有限元方程:

$$\sum_{e=1}^n \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{ij}^e S_j = 0 \quad (13)$$

其中 A_{ij}^e 为单元刚度矩阵,具体形式为:

$$A_{ij}^e = H^3 \left[\frac{\partial v_j}{\partial x} \frac{\partial v_i}{\partial x} + \frac{\partial v_j}{\partial z} \frac{\partial v_i}{\partial z} \right] \quad (14)$$

方程组 (13) 是关于 S_j 的简单线性方程组,在解除边界条件后,采用高斯消元法即可求出 S_j ,进而求出无量纲压力 P_j .解除强制边界条件和周期性边界条件分别采用消行修正法和拉格朗日乘子法^[10].

3 计算结果与参数优化

气体 LST-MS 的主要性能参数及其定义如下:

开启力增幅 P_{av} 为:

$$P_{av} = \frac{100(P_{av} - P_{avps})}{P_{avps}} \quad (15)$$

其中 P_{av} 为 LST-MS 单位端面面积上的无量纲开启力, P_{avps} 为无微孔平面普通气体密封单位端面面积上的无量纲开启力.

气体密封要求具有较大的开启能力,以确保端面能够在启动过程中快速脱开并保持 $2.5 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 工作间隙,确保低磨损和低泄漏量.为综合衡量这种密封性能,本文提出开漏比 E 这一综合性能参数.

若 Q 为气体 LST-MS 单位端面面积无量纲泄漏量:

$$Q = -\frac{1}{X} \frac{\partial P}{\partial X} \quad (16)$$

定义 E 为气体 LST-MS 的开启力增幅与其泄漏量的比值:

$$E = \frac{P_{av}}{Q} \quad (17)$$

无量纲气体刚度 K 定义为:

$$K = -\frac{dP_{av}}{dH} \quad (18)$$

刚漏比 E_k 定义为:

$$E_k = \frac{K}{Q} \quad (19)$$

3.1 典型压力分布

$S_p = 0.65$, $= 0.7$, $P_o = 2$, $= 3.0$ 时,气体 LST-MS 的径向压力分布如图 2 所示,图 2 中还给出了无

微孔平面普通气体密封的径向压力分布作为比较.

可以看出,气体 LST-MS在高压侧的压力比无孔普通密封有明显的提高,LST-MS具有更好的开启特性.

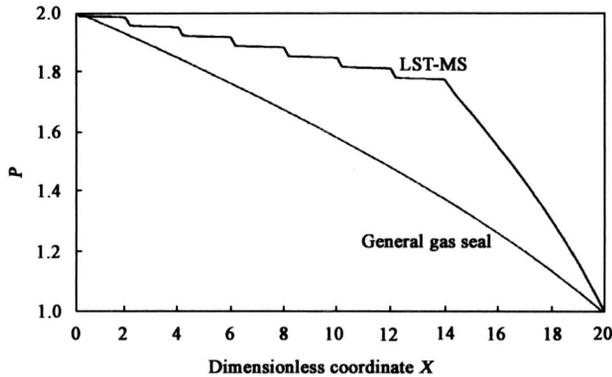


Fig 2 Typical Radial Pressure Distribution of LST-MS

图 2 LST-MS的径向压力分布

3.2 微孔面积比 S_p

图 3所示结果表明,若保持 $\epsilon = 0.7, P_0 = 2, \gamma = 3.0$ 不变,气体 LST-MS的开启力增幅、开漏比、刚漏比均随微孔面积比 S_p 的增大而增加.究其原因,开孔区域大则为气体提供的缓冲空间大,压力梯度在孔区减小,从而提高了密封的承载力.

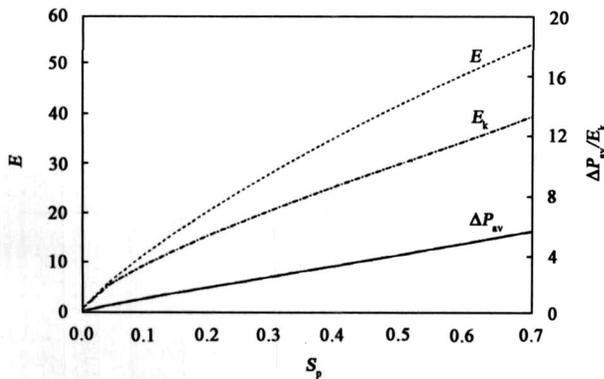


Fig 3 Effect of S_p on sealing parameters, P_{av}, E and E_k

图 3 S_p 对 P_{av}, E, E_k 的影响

可以预测,当微孔与其所在的正方形控制体相切即 $S_p = \sqrt{4} = 0.78$ 时,密封具有最大的开启力增幅、开漏比和刚漏比.然而,在实际应用中,微孔尺寸过大可能导致微孔之间流动的相互干涉,微孔过大也使得加工成本增大,综合考虑,以下对气体 LST-MS性能的研究中,面积密度选为 $S_p = 0.65$.

3.3 开孔比 和无量纲孔深

当 $S_p = 0.65, P_0 = 2$, 分别为 $0.5, 3.0$ 和 10.0

时,开孔比 对开启力增幅 P_{av} 的影响如图 4所示.

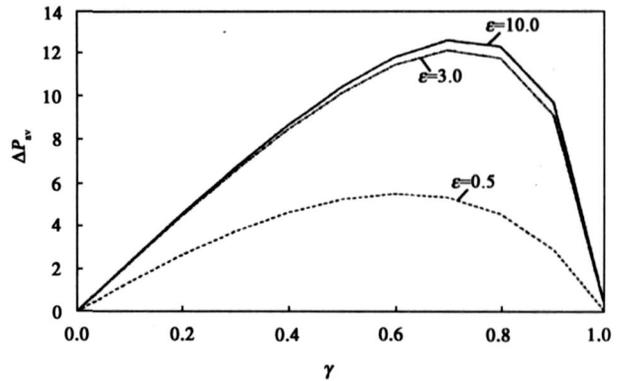


Fig 4 P_{av} vs γ for different values of ϵ

图 4 不同 ϵ 值下 ΔP_{av} 曲线

结果表明,当 γ 值保持不变时, P_{av} 值随着 ϵ 的增大先增大后减小,并且分别在 $\gamma = 0.6$ ($\epsilon = 0.5$) 和 $\gamma = 0.7$ ($\epsilon = 3.0$ 和 $\epsilon = 10.0$) 时获得最大值,密封具有最大静压承载力;在相同 γ 值下, P_{av} 值随着 ϵ 值的增大而增大.结果还表明,当 γ 从 0.5 升至 3.0 时, P_{av} 值由 5.35 增加到 12.15 , ϵ 的变化对 P_{av} 影响较明显;而当 γ 从 5.0 升至 10.0 时, P_{av} 值由 12.15 增加到 12.82 ,升幅仅 5.5% .这说明当 γ 值增大到一定值时若再增加则对 P_{av} 产生的影响非常有限,而且 γ 值过大也会增加加工成本.

3.4 无量纲密封压力 P_0

当 $S_p = 0.65, \gamma = 0.7$, 分别为 $0.5, 3.0$ 和 10.0 时, P_0 对开启力增幅 P_{av} 值的影响如图 5所示.结

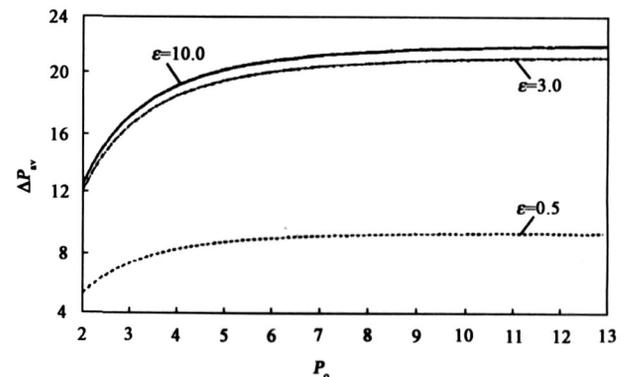


Fig 5 P_{av} vs P_0 for different values of ϵ

图 5 不同 ϵ 值下 $P_0 - P_{av}$ 曲线

果表明,对于不同的 ϵ 值,当 P_0 较低 ($P_0 < 5$) 时, P_{av} 随着 P_0 的增大而增大,此时微孔起到了缓冲密封高压侧压降的作用;若 P_0 值继续增大 ($P_0 > 5$), 则 P_{av} 的增长趋于平缓并倾向饱和,这是因为在介

质压力较高条件下微孔的缓冲能力已经得到了完全的利用.同时可以看出,当 $\gamma > 3.0$ 时 对开启力增幅的影响已经很小,可以忽略.

3.5 泄漏量

当 $S_p = 0.65, P_o = 2$, 分别为 0.5, 3.0 和 10.0 时,开孔比 γ 对泄漏量 Q 的影响如图 6 所示.结果表明,在给定无量纲孔深 ϵ 值的条件下,密封的泄漏量随着 γ 值的增大而增大,这是较大 γ 值使端面低压侧压力梯度变大的缘故.类似地,在给定 γ 值时, ϵ 值的增大同样提高了低压侧的压力梯度,因此导致密封的泄漏量随之增大;且当 $\gamma > 3$ 时,泄漏量受其影响的程度已经非常小.

3.6 开漏比 E

当 $S_p = 0.65, P_o = 2$, 分别为 0.5, 3.0 和 10.0 时,图 7 示出了开孔比 γ 对开漏比 E 的影响.结果

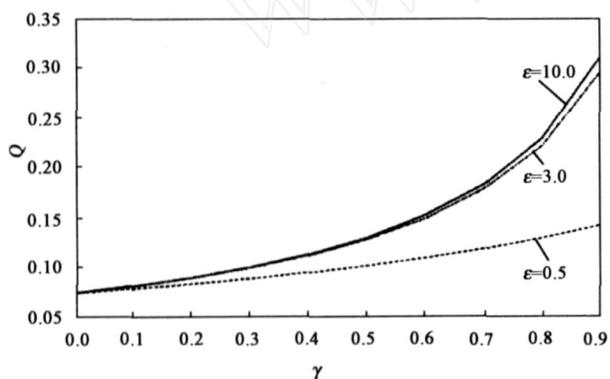


Fig. 6 Q vs γ for different values of ϵ

图 6 不同 ϵ 值下的 $\gamma - Q$ 曲线

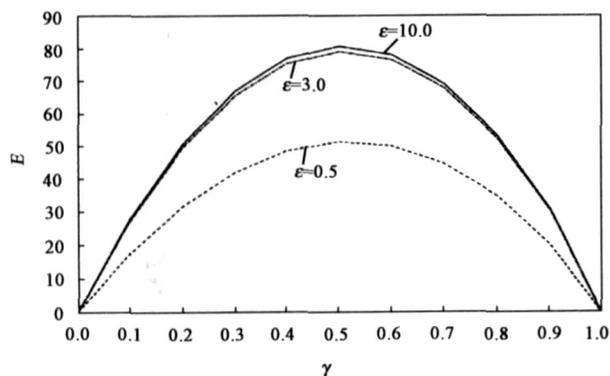


Fig. 7 E vs γ for different values of ϵ

图 7 不同 ϵ 值下的 $\gamma - E$ 曲线

表明, E 值随 γ 值的增大先增大后减小,并在 $\gamma = 0.5$ 附近出现最大值;当给定 γ 值时, E 值随 ϵ 值的增大而增大,且当 $\epsilon > 3$ 时, E 值的增幅变得非常小,此时通过增加微孔深度来提高 E 值或密封的开启性

能效果已经不明显.

3.7 刚漏比 E_k

当 $S_p = 0.65, P_o = 2$, 分别为 0.5 和 0.7 时 (分别对应最大开漏比 E 和最大开启力增幅 P_{av}),无量纲孔深 ϵ 对刚漏比 E_k 的影响如图 8 所示.

结果表明: E_k 值随着 ϵ 的增大先陡升后快速下降,之后当 $3 < \epsilon < 8$ 时呈缓慢下降,当 $\epsilon > 8$ 时 E_k 变化非常平缓.最大刚漏比 $(E_k)_{max}$ 均出现在 ϵ 为 0.5~0.6 范围内,而且当密封端面产生磨损导致 ϵ 值减小时, E_k 值将急剧下降,而且这种下降趋势将因端面磨损不可逆转而最终导致密封失稳甚至失效.因此,尽管 ϵ 为 0.5~0.6 时能够获得 $(E_k)_{max}$, 但不利于密封的长期稳定运行.为确保气体 LST-MS 的工作可靠性与稳定性以及对磨损的自适应能力,即密封性能对 ϵ 值变化的非极端敏感性,同时确保密封具有较高的刚漏比 E_k , 选择 ϵ_{max} 为 3.0 比较合适,这也与图 4 至图 7 所表明的结果比较吻合.

$S_p = 0.65, P_o = 2, \gamma = 3.0$ 时,开孔比 γ 对刚漏比 E_k 的影响如图 9 所示.刚漏比 E_k 随着开孔比 γ 的增加,先增大后减小,并且在 $\gamma = 0.7$ 时获得最大

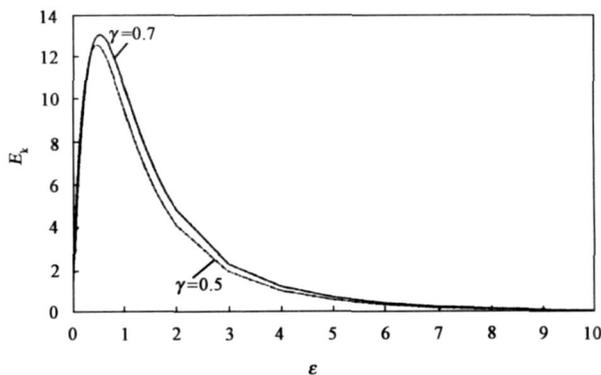


Fig. 8 E_k vs ϵ for different values of γ

图 8 不同 γ 值下的 $\epsilon - E_k$ 曲线

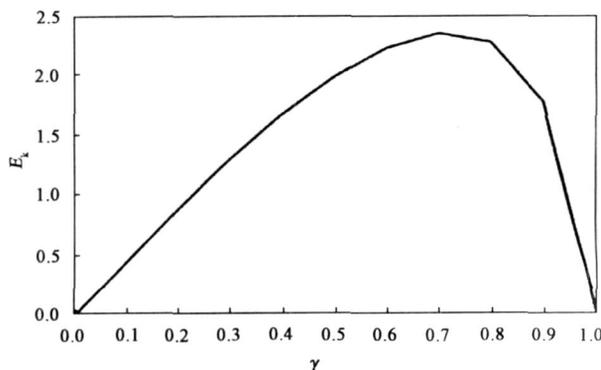


Fig. 9 E_k varies with γ

图 9 $\gamma - E_k$ 曲线

值.此时,从图 4和图 8可以看出,当取 $\alpha = 0.7$, $\beta = 3.0$ 时,LST-MS仍然具有较大的开启力增幅 P_{av} 和开漏比 E .因此,对于气体 LST-MS来说,为确保其具有优异的综合密封性能和较低的加工成本,建议选择 $S_p = 0.65$, $\alpha = 0.6$, $\beta = 3.0$

4 结论

a 开启力增幅 P_{av} 、开漏比 E 和刚漏比 E_k 的大小均随微孔面积比 S_p 的增大而增大,且均随开孔比 α 的增大先上升后减小,当 $S_p = 0.65$, $\alpha = 0.6$, $\beta = 3.0$ 时可确保密封在静压条件下具有优异的性能比.

b 对 LST-MS微孔几何参数进行优化,一般以密封具有最大刚漏比为优化目标,与此同时,还应综合考虑密封的加工成本.

参考文献:

- [1] Etsion I, Burstein L. A model for mechanical seals with regular microsurface structure [J]. Tribology Trans, 1996, 39 (2): 677 - 683.
- [2] Etsion I. State of the art in laser surface texturing[J]. ASME J of Tribology, 2005, 127(1): 248 - 253.
- [3] Ryk G, Kligeman Y, Etsion I, et al. Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston - ring friction reduction[J]. Tribology Trans, 2005, 48(4): 583 - 588.
- [4] 于新奇,刘红美,蔡仁良. 激光加工多孔端面非接触机械密封的性能研究 [J]. 流体机械, 2005, 33(1): 20 - 24.
Yu X Q, Liu H M, Cai R L. Study on sealing performance of mechanical seals with a laser textured face [J]. Fluid Machinery, 2005, 33(1): 20 - 24.
- [5] 彭旭东,杜东波,李纪云. 不同型面微孔对激光加工多孔端面机械密封性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 367 - 371.
Peng X D, Du D B, Li J Y. Effect of different section profile micro - pores on seal performance of a laser surface textured mechanical seal Tribology, 2006, 26(4): 367 - 371.
- [6] 彭旭东,杜东波,盛颂恩,等. 端面微形体对液体润滑机械密封性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2007, 27(4): 352 - 356.
Peng X D, Du D B, Sheng S E, et al. Effect of face asperity geometry on performance of a liquid lubricated face seal[J]. Tribology, 2007, 27(4): 352 - 356.
- [7] Feldman Y, Kligeman Y, Etsion I. A hydrostatic laser surface textured gas seal[J]. Tribology Letters, 2006, 22(1): 21 - 28.
- [8] Feldman Y, Kligeman Y, Etsion I. Stiffness and Efficiency optimization of a hydrostatic laser surface textured gas seal[J]. ASME Journal of Tribology, 2007, 129(2): 407 - 410.
- [9] Zienkiewicz O C, Taylor K L. The Finite Element Method Vol 1, 5th Edition[M]. Butterworth Heinemann, 2000.
- [10] 李开泰,黄艾香,黄庆怀. 有限元法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

Study on Static Performance of a Gas - Lubricated Laser Surface Textured Mechanical Seal

Q IN Hao^{1,2}, PENG Xu - dong^{1,2}, BA I Shao - xian², SHENG Song - en^{1,2}, LI J i - yun²

(1. The MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacturing and Automation,

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A gas - lubricated laser surface textured mechanical seal (LST - MS) is the most recently developed gas seal having good performance. However, little attention has been paid on the theory of design. In this paper, finite element method was used to resolve the Reynolds equation to get gas film pressure distribution, and then the sealing performance under the condition of static pressure, of a LST - MS varied with working and geometric parameters was analyzed. The results showed that a gas lubricated LST - MS will operate excellently under the condition of area density $S_p = 0.65$, texture portion $\alpha = 0.6$ and dimensionless micro - pore depth $\beta = 3.0$.

Key words: mechanical face seal, gas lubrication, surface texturing, finite element analysis

Author: PENG Xu - dong, male, born in 1964, Ph.D., Professor, e - mail: xdpeng@126.com