

文章编号:1004-1478(2011)02-0090-04

螺旋槽结构参数对干气密封开启力和气膜刚度的影响

刘亚莉, 张强, 赵丽丽, 董华东, 戚俊清

(郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:采用 ANSYS 软件参数化设计,在对螺旋槽干气密封端面流场进行数值计算的基础上,研究了螺旋槽结构参数对开启力和气膜刚度的影响.综合考虑较大的开启力和气膜刚度,计算结果表明,较适宜的动环结构参数为:螺旋槽数 $N_g = 15-17$ 个,螺旋角 $\alpha = 14^\circ \sim 20^\circ$,槽深 $H_g = 5 \mu\text{m}$,槽长坝长比 $\gamma = 0.625 \sim 0.705$,槽台宽比 $\delta = 1.2 \sim 1.5$.

关键词:螺旋槽;干气密封;开启力;气膜刚度

中图分类号:TH136 **文献标志码:**A

The influence of spiral groove's structure parameter on opening force and stiffness of the dry gas seals

LIU Ya-li, ZHANG Qiang, ZHAO Li-li, DONG Hua-dong, QI Jun-qing
(College of Material and Chem. Eng., Zhengzhou Univ. of Light Ind., Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Utilizing the ANSYS software parametric design, flow field analysis of gas film between the spiral groove dry gas seal was analyzed by numerical simulation. The influence of the structure parameters of spiral groove, on opening force and gas film stiffness was studied with comprehensive consideration of the larger open gas membrane stiffness, strength calculation results showed that acting-ring structure parameters is suitable; spiral slot number $N_g = 15 - 17$, spiral angle $\alpha = 14^\circ \sim 20^\circ$, groove depth employed by $H_g = 5 \mu\text{m}$, groove long dam longer than the $\gamma = 0.625 \sim 0.705$, wide than machine slot $\delta = 1.2 \sim 1.5$.

Key words: spiral groove; dry gas seals; opening force; gas film stiffness

0 引言

干气密封作为一种新型非接触式机械密封,具有泄漏量少、磨损小、寿命长、能耗低等特点,已广泛用于高速旋转机械.密封端面槽型有多种,其中螺旋槽式结构所产生的流体动压效应强,形成的气膜刚度大,密封的稳定性和可靠性更好^[1-2].干气

密封运行的稳定性主要取决于密封端面间气膜层的刚度和开启力.影响气膜刚度和开启力的因素主要是密封端面的结构参数和操作参数(转速、密封压压差、介质密度及黏度等).

近年来,国外干气密封技术的研究主要集中在槽型的开发上,工程应用广泛^[3-4].自1980年代国内有关科研院所开展流体润滑非接触密封研究以

收稿日期:2010-12-21

基金项目:河南省科技厅工业攻关项目(102102210137)

作者简介:刘亚莉(1964—),女,河北省唐山市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为干气密封.

来,干气密封技术进入了重要的研究阶段^[5].国内学者深入研究干气密封技术,取得了显著成果.郝木明等^[6]针对新型单列双向螺旋槽在高速高压极端工况下运行,采用FLUENT分析软件,得到一组最佳结构参数,为新型槽型开发奠定了理论基础.宋鹏云^[7]指出窄槽理论在用于干气密封研究时的局限性,提出了一套适用于干气密封微尺度流场的气膜压力控制方程.在逐渐成熟的理论研究基础之上,干气密封技术在工程领域的应用日趋广泛.

本文拟采用ANSYS软件的参数化设计,在一定操作条件下,通过数值计算研究密封端面结构参数(螺旋槽数 N_g ,螺旋角 α ,槽深 H_g ,槽长坝长比 γ ,槽台宽比 δ 等)对气膜流场的影响,以期求得气膜层的压力分布,进而求得端面开启力和气膜刚度.

1 螺旋槽数值计算

1.1 假设

密封端面气膜厚度为 μm 级,依据可压缩性流体在小间隙中流动的特点,做如下假设^[8-9]:

- 1) 气膜为连续气体流动,并符合牛顿黏性定律;
- 2) 密封端面光滑,忽略粗糙度对气膜流场的影响;
- 3) 气膜很薄,沿膜厚方向气体压力和密度不变;
- 4) 密封端面为刚性,忽略密封面变形的影响;
- 5) 密封在非接触下工作,气膜层温度变化很小,取气膜流场的黏度为定值;
- 6) 密封对中性好,在工作过程中,忽略系统扰动对气膜流场的影响.

1.2 计算方程

ANSYS 软件的计算基础为 N-S 方程,由以上假设条件及气体连续性方程,其柱坐标下的形式为^[10]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{ph^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rph^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\omega r}{2} \left(\frac{\partial(ph)}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

其中, p 为端面流场任一点处压力/Pa; h 为流体膜厚度/m; ω 为动环旋转角速度/(rad·s⁻¹); μ 为流体黏度/(Pa·s); r, θ 为柱坐标变量/m,rad.

由方程①求出密封端面间气膜的压力分布.

1.3 螺旋槽端面几何模型

密封端面结构尺寸如图1所示,其中槽型为对数螺旋线型,密封环外半径 $R_o = 81.5 \text{ cm}$,内半径 $R_i = 60.5 \text{ cm}$,密封气体压力 $P_o = 0.8 \text{ MPa}$,内径处为常压,转速为 $n = 500 \text{ rad/s}$,密封介质为293 K空气.

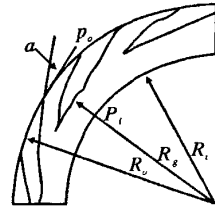


图1 螺旋槽密封端面结构示意图

1.4 端面开启力的计算

端面开启力是密封环端面间气膜在密封面上作用力的总和.对方程①通过有限元计算得到端面间气膜的压力分布,将每个单元上的压力求和,即可得到整个密封端面上的开启力

$$F_0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{i,j} \cdot dr \cdot d\theta \cdot r(j) \quad (2)$$

其中, m, n 分别为周向和径向的节点数; $P_{i,j}$ 为端面上任意节点处的气膜压力; dr 为沿径向步长; $d\theta$ 为沿周向步长; $r(j)$ 为节点所在的半径.

1.5 气膜刚度的计算

气膜刚度 K_z 是密封抵抗压力变化的能力.由方程①和②求出在气膜层厚度 h_o 及 $h_o + \Delta h$ 下的开启力 F_{h_o} 和 $F_{h_o + \Delta h}$,气膜刚度为^[11]

$$K_z = - \frac{F_{h_o + \Delta h} - F_{h_o}}{\Delta h}$$

2 结果与讨论

2.1 螺旋槽数 N_g 对 F_o 和 K_z 的影响

图2为螺旋槽数 N_g 对开启力 F_o 和气膜刚度 K_z 的影响.图中表明:1)开启力 F_o 随 N_g 的增多而线性增加,达到一定临界点(图中 $N_g = 17$ 时)后增加趋于平缓.这是由于压入槽内的气体量随槽数的增加而增加,产生的流体动压效应增强.而当槽数过多时,流场分析表明槽区内的高压范围和峰值均减小,且与台区的压力梯度减小,致使开启力变化趋缓,这与文献[12]报道的研究结果吻合.2) N_g 对气膜刚度 K_z 的影响相对较小,在 $N_g = 15$ 时气膜刚

度最大。

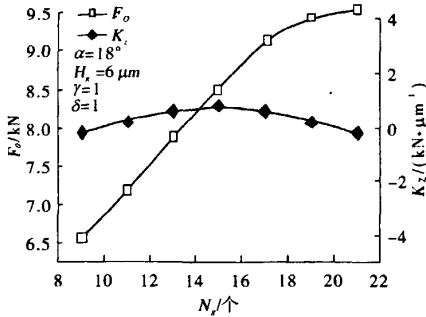


图2 N_g 对 F_o 和 K_z 的影响

需要指出的是:上述开启力的临界点和刚度最大值的相应螺旋槽数是在一定操作条件下得出的,不同操作条件(转速、密封压差、密封介质等)其数值有所不同。

2.2 螺旋角 α 对 F_o 和 K_z 的影响

螺旋角 α 对开启力 F_o 和气膜刚度 K_z 的影响如图3所示。由图可见:开启力 F_o 和气膜刚度 K_z 的峰值出现在不同的螺旋角处(图中分别为 14° 和 20°)，而偏离峰值后则骤降。因此在干气密封设计时,应根据操作条件和应用场合计算和选择螺旋角度。如要求装置启动频繁的场所,为及时开启而减小动、静环的摩擦,应以开启力最大为依据确定螺旋角;而对要求长期运转的装置,可以气膜刚度最大为依据确定螺旋角,以保证密封运行的稳定性和可靠性。

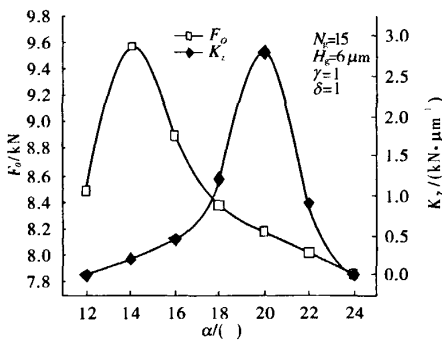


图3 α 对 F_o 和 K_z 的影响

2.3 槽深 H_g 对 F_o 和 K_z 的影响

密封端面气膜平均工作间隙是指动、静环间的气膜厚度与螺旋槽深度的平均值,其值过小容易使密封处于混合摩擦状态,造成密封面的磨损或烧毁;其值太大则会削弱气膜抵抗外界的干扰能力,密封性能降低^[13]。开槽深度 H_g 不仅影响气膜平均

工作间隙,而且影响槽内流场特性,图4为螺旋槽深度 H_g 对开启力 F_o 和气膜刚度 K_z 的影响。由图可见,在 $H_g = 5 \mu\text{m}$ 时开启力和气膜刚度几乎同时达到最大值,表明在一定的操作条件下,开槽深度对密封性能的影响有最佳值。

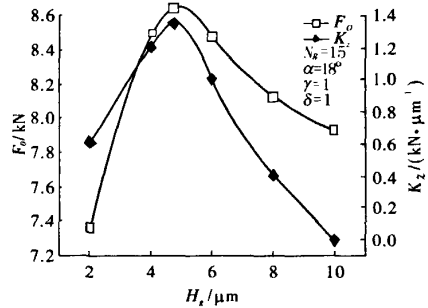


图4 H_g 对 F_o 和 K_z 的影响

2.4 槽长坝长比 γ 对 F_o 和 K_z 的影响

槽长坝长比 γ 是槽区及坝区所占比例的反映, γ 值越大则螺旋槽越长,槽区所占的面积越大。图5为 γ 对 F_o 和 K_z 的影响。由图可见,开启力 F_o 和气膜刚度 K_z 分别在 $\gamma = 0.625$ 和 $\gamma = 0.705$ 时出现最大值,2个峰值的 γ 相差并不大。

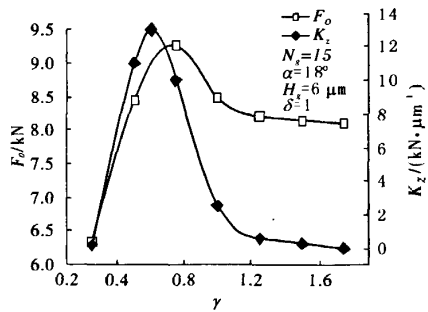


图5 γ 对 F_o 和 K_z 的影响

2.5 槽台宽比 δ 对 F_o 和 K_z 的影响

槽台宽比 δ 是密封外径处槽区与台区弧长之比, δ 值越大则槽区面积越大。研究表明,槽内流体压力远高于台区及坝区压力,特别是螺旋槽内的压力峰值和高压区的范围对气膜层的刚度大小起主要作用^[14]。但密封台不仅可起到阻止流体圆周方向的泄漏、具有一定的承载能力,而且其尺寸影响螺旋槽内的压力峰值的大小、高压区的范围和槽台区的压力梯度。

图6为 δ 对 F_o 和 K_z 的影响关系。图中表明:1)开启力 F_o 随 δ 增加而线性增加,达到一定值(图

中 $\delta = 1.2$ 时)后增加趋于平缓; 2) 在 $\delta = 1.5$ 时气膜刚度达到最大, 表明在一定的操作条件下, 槽台宽比存在最佳值。

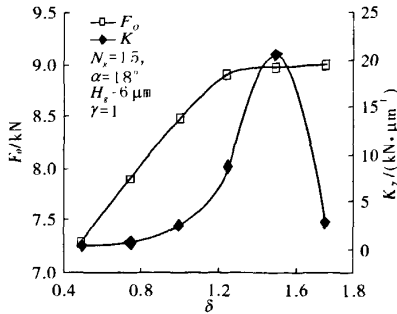


图6 δ 对 F_o 和 K_z 的影响

3 结论

1) 槽数越多端面开启力越大, 但达到一定临界点, 对密封性能的影响并不显著。2) 开启力和气膜刚度的最大值出现在不同的螺旋角处, 因此在干气密封设计时, 应根据操作条件和应用场合计算和选择适宜的螺旋角度。3) 在某一螺旋槽深度下, 开启力和气膜刚度几乎同时达到最大值, 表明在一定的操作条件下, 开槽深度具有最佳值。4) 槽长坝长比和槽台宽比反映了槽区面积的比例, 在一定的操作条件下, 其数值均存在着最优比例或适宜的范围。

参考文献:

[1] 南小妮, 周昆颖. CFD 软件对螺旋槽干气密封的模拟[J]. 化工设备与管道, 2005(4): 59.

- [2] 曹登峰, 宋鹏云. 螺旋槽气体端面密封动力学研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(5): 183.
- [3] Bloch H P. Consider dry gas seals for centrifugal compressors[J]. Hydrocarbon Proc, 2005, 84(1): 9.
- [4] Aimone R J, Forsthoffer W E, Salzmann R M. Dry gas seal systems—Part 2: Best practices for design and selection, which can help prevent failures[J]. Turboma Chinery Int, 2007, 48(2): 24.
- [5] 郝木明, 胡丹梅, 杨宝亮. 泵用零逸出非接触式机械密封[J]. 流体机械, 2002, 30(9): 13.
- [6] 郝木明, 冷晓静. 单列双向螺旋槽干气密封主要结构参数对性能的影响[J]. 润滑与密封, 2010, 34(12): 60.
- [7] 宋鹏云. 螺旋槽干气密封端面气膜压力计算方法讨论[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7): 7.
- [8] 陈伯贤. 流体润滑理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [9] 张鹤顺, 陆思聪. 弹性流体动力润滑及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [10] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [11] 冯向忠, 彭旭东. 螺旋槽干式气体端面密封的刚度和泄漏量研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005(2): 88.
- [12] 李建中. 低速螺旋槽气体端面密封性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2003.
- [13] 蒋小文, 顾伯勤. 螺旋槽干气密封端面间气膜特性[J]. 化工学报, 2005(8): 1419.
- [14] 刘亚莉, 戚俊清, 冯士伟, 等. 螺旋槽干气密封端面流场分析[J]. 流体机械, 2008(3): 29.

螺旋槽结构参数对干气密封开启力和气膜刚度的影响

作者: [刘亚莉](#), [张强](#), [赵丽丽](#), [董华东](#), [戚俊清](#), [LIU Ya-li](#), [ZHANG Qiang](#), [ZHAO Li-li](#),
[DONG Hua-dong](#), [QI Jun-qing](#)
作者单位: [郑州轻工业学院, 材料与化学工程学院, 河南, 郑州, 450002](#)
刊名: [郑州轻工业学院学报\(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY OF LIGHT INDUSTRY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2011, 26(2)
被引用次数: 2次

参考文献(14条)

1. 南小妮, 周昆颖, 张秋翔, 蔡纪宁 [CFD软件对螺旋槽干气密封的模拟](#)[期刊论文]-[化工设备与管道](#) 2005(4)
2. 曹登峰, 宋鹏云, 李伟, 赵越 [螺旋槽气体端面密封动力学研究进展](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2006(5)
3. [Hydrocarbon Processing Group](#) [Consider dry gas seals for centrifugal compressors](#)[外文期刊] 2005(1)
4. R. J. AIMONE; W. E. FORSTHOFFER; R. M. SALZMANN [Dry gas seal systems - part 2: BEST PRACTICES FOR DESIGN AND SELECTION, WHICH CAN HELP PREVENT FAILURES](#)[外文期刊] 2007(2)
5. 郝木明, 胡丹梅, 杨宝亮 [泵用零逸出非接触式机械密封](#)[期刊论文]-[流体机械](#) 2002(9)
6. 郝木明, 冷晓静 [单列双向螺旋槽干气密封主要结构参数对性能的影响](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2009(12)
7. 宋鹏云 [螺旋槽干气密封端面气膜压力计算方法讨论](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#) 2009(7)
8. 陈伯贤 [流体润滑理论及其应用](#) 1991
9. 张鹏顺; 陆思聪 [弹性流体动力润滑及其应用](#) 1995
10. 顾永泉 [机械密封实用技术](#) 2001
11. 冯向忠, 彭旭东 [螺旋槽干式气体端面密封的刚度和泄漏量研究](#)[期刊论文]-[石油大学学报\(自然科学版\)](#) 2005(2)
12. 李建中 [低速螺旋槽气体端面密封性能研究](#)[学位论文] 2003
13. 蒋小文, 顾伯勤 [螺旋槽干气密封端面间气膜特性](#)[期刊论文]-[化工学报](#) 2005(8)
14. 刘亚莉, 戚俊清, 冯士伟, 彭春江 [螺旋槽干气密封端面流场分析](#)[期刊论文]-[流体机械](#) 2008(3)

本文读者也读过(9条)

1. 田英男. [TIAN Ying-nan](#) [干气密封在高黏度重质油离心泵上的应用](#)[期刊论文]-[中国氯碱](#)2006(10)
2. 王安静. 洪先志 [低速搅拌器干气密封的设计及应用](#)[会议论文]-2010
3. 李双喜. 宋文博, 张秋翔, 蔡纪宁, 高金吉. [LI Shuangxi. SONG Wenbo. ZHANG Qiuxiang. CAI Jining. Gao Jinji](#) [干式气体端面密封的开启特性](#)[期刊论文]-[化工学报](#)2011, 62(3)
4. 王和顺. 董霖. 黄泽沛. 张车宁. 陈次昌. [Wang Heshun. Dong Lin. Huang Zepei. Zhang Chening. Chen Cichang](#) [静压干气密封端面流场数值模拟](#)[期刊论文]-[排灌机械](#)工程学报2011, 29(2)
5. 赵越. 宋鹏云 [气体端面密封技术研究进展](#)[会议论文]-2004
6. 王玉华. 姜大任 [螺旋槽干气密封和双向槽干气密封的简要比较](#)[期刊论文]-[风机技术](#)2008(2)
7. 李涛子. 张秋翔. 蔡纪宁. 李双喜 [T型槽干气密封稳态特性的有限元分析](#)[期刊论文]-[北京化工大学学报\(自然科学版\)](#)2003, 30(2)
8. 扈中平. 李双喜. 蔡纪宁. 张秋翔. [Hu Zhongping. Li Shuangxi. Cai Jining. Zhang Qiuxiang](#) [自加压式动静压混合式气体润滑密封的性能分析](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#)2011, 36(4)
9. 宋鹏云. [Song Pengyun](#) [氢气实际气体对螺旋槽干气密封性能的影响](#)[期刊论文]-[润滑与密封](#)2010, 35(8)

引证文献(2条)

1. 董华东, 戚俊清, 许培援, 刘亚莉, 蔡立芳, 吴磊 双列燕尾槽干气密封端面流场的数值模拟[期刊论文]-润滑与密封
2012(05)
2. 吴波, 陈志, 李建明, 蒋琳, 刘廷超 基于 CFD 正交试验的螺旋槽干气密封性能仿真研究[期刊论文]-流体机械
2014(01)

引用本文格式：刘亚莉, 张强, 赵丽丽, 董华东, 戚俊清, LIU Ya-li, ZHANG Qiang, ZHAO Li-li, DONG Hua-dong, QI Jun-qing 螺旋槽结构参数对干气密封开启力和气膜刚度的影响[期刊论文]-郑州轻工业学院学报(自然科学版)
2011(2)