DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808152

# 高速动压密封的气液两相性能对比分析和试验

娆,李世聪,陈 李庆展,郑 炼, 李双喜

(北京化工大学 化工设备设计研究所,北京 100029)

要,为明确气相介质和液相介质分别对高速流体动压密封性能的影响,进行两种相态的密封性能对比分析与试验研究,分别建 立动压密封端面流体域的气相和液相数值分析模型,分析转速、压差、槽深、槽数、槽坝比等操作参数和端面结构参数对动压密封气相 和液相的泄漏量、开启力等性能的影响. 自主研制动压密封试验装置,进行变转速、变压差和密封端面磨损试验,得出了转速、压差等 操作参数对密封气相泄漏率、液相泄漏率和端面磨损率的影响.数值模拟和试验研究结果表明:相同的转速和压力时,液相密封开启 力和泄漏量都比气相密封更大:不同结构参数下,气相和液相密封开启力均有极大值,气相密封和液相密封开启力达到极大值的最优 结构参数有所不同,液相密封的最优槽坝比、最优槽数较气相密封小,液相密封开启转速较气相密封低,说明液相动压密封比气相动 压密封更容易开启:低速时密封端面磨损较严重,高速时密封端面几乎无磨损,动压密封更适合在高速工况下运行. 关键词:动压密封:气相密封:液相密封:密封性能:试验

中图分类号: TB42 文献标志码:A 文章编号: 0367-6234(2019)07-0070-06

## Comparative analysis and experiment on gas-phase and liquid-phase performance of high-speed hydrodynamic seal

LI Qingzhan, ZHENG Rao, LI Shicong, CHEN Lian, LI Shuangxi

(Chemical Equipment Design Institute, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, 100029, China)

Abstract: To clarify the effects of gas and liquid media on the performance of high-speed hydrodynamic seal, the comparison analysis and experimental research on the sealing performance of two phases were carried out. The numerical analysis models of gas and liquid phases in the end face fluid region of hydrodynamic seal were established. The effects of operating parameters such as rotational speed, pressure difference, groove depth, groove number, groove-dam ratio and end face structure parameters on gas and liquid leakage and opening force of hydrodynamic seal were analyzed. The test device of hydrodynamic seal was developed independently, and the tests of variable speed, pressure difference and seal face wear were carried out. The effects of operating parameters such as speed and pressure difference on gas leakage rate, liquid leakage rate and seal face wear rate were obtained. The results of numerical simulation and experiment show that the opening force and leakage of liquid seal are larger than those of gas seal at the same speed and pressure. Under different structural parameters, the opening forces of gas phase and liquid phase seal have maximum values. The optimal structural parameters are different for the gas and liquid phase seal when the opening forces reach maximum values. The optimum ratio of slot to dam and the number of optimal grooves in liquid phase seal are smaller than that in gas seal. The opening speed of liquid seal is lower than those of gas seal, indicating that liquid dynamic pressure seal is easier to open than gas dynamic pressure seal. Seal face wear is serious at low speed and almost no wear at high speed. Hydrodynamic seals are more suitable for high speed conditions.

Keywords: dynamic pressure seal; gas seal; liquid seal; sealing performance; experiment

随着动压密封在高速、气液两相工况下的应用 越来越广泛,需要明确气相介质和液相介质分别对 动压密封性能的影响. 在单相高速动压密封方面, 彭旭东<sup>[1-2]</sup>、陈汇龙<sup>[3]</sup>等分别对动压密封结构参数、 常规气体和液体对密封性能的影响进行研究,得出 优化的动压密封结构参数. 陈杰<sup>[4]</sup>等建立了液氧/ 煤油发动机螺旋槽端面密封的理论模型,通过仿真

通信作者: 李双喜, buctlsx@126.com.

模拟计算分析了端面结构参数对密封性能的影响. Zheng<sup>[5]</sup>提出了在涡轮轴上利用液膜密封实现零泄 漏,并进行了数值模拟与性能研究. 在气液两相动 压密封方面,Sedv<sup>[6]</sup>在干气密封的基础上进行了液 体介质密封的研究,并申请了专利. Salsant<sup>[7]</sup>采用有 限差分法表明螺旋动压槽结构具有良好的泵送能 力,Netzel<sup>[8]</sup>、Buck<sup>[9]</sup>等分别从概念、设计以及应用 等方面对液相动压密封进行了介绍. 刘欢欢[10]利用 Fluent 软件两相流和蒸发冷凝方法研究了低温及液 态易汽化介质端面密封性能. 赵伟刚等[11]、王彬

收稿日期: 2018-08-30 作者简介:李庆展(1994—),男,硕士研究生

等<sup>[12]</sup>介绍了一种动静压混合液膜密封结构,利用 Fluent分析了操作参数以及主要结构参数对密封性 能的影响.李小芬<sup>[13]</sup>、李欢等<sup>[14]</sup>利用 Fluent 建立两 相动压密封流体模型,用正交优化法分析了密封性 能参数随槽形参数的变化,对高速气液两相动压密 封进行了性能研究,表明了气液两相润滑工况下采 用动压密封进行试验分析,提出开启力的大小要考 虑动压和端面闪蒸造成沸腾区压力的共同影响.

上述对高速流体动压密封的研究以理论研究居 多,试验偏少;以单相介质密封研究居多,两相介质 密封研究偏少.本文针对高速流体动压密封,对比 分析了操作参数和结构参数分别对气相和液相动压 密封性能的影响,并在理论分析的基础上进行了变 压差、变转速和端面磨损试验,用试验验证了理论分 析的正确性以及高速流体动压密封气相密封性能和 液相密封性能的区别.

1 结构工作原理

高速动压密封几何模型如图 1 所示. 高速动压 密封采用动环端面外侧开槽的非接触式密封结构.



1,8—轴套;2,7,10—密封垫;3—密封腔; 4—动环;5—波纹管静环组件;6—螺钉;9—轴

## 图1 高速动压密封结构

Fig.1 High-speed hydrodynamic seal structure diagram 密封运转时,高压介质将从密封环的外侧进入密 封端面动压槽区(见图2).进入动压槽区的介质由于 螺旋槽的存在会随着动压槽一起高速旋转.当流体运 动到螺旋槽根部 A 处时,流道变窄,流体在此处聚集, 产生高压区,密封端面会开启,形成动压密封.



图 2 高速动压密封原理 Fig.2 High-speed hydrodynamic seal principle diagram

2 分析模型

### 2.1 物理模型

高速动压密封物理模型如图 3 所示.



#### 图 3 高速动压密封物理模型

Fig.3 High-speed hydrodynamic seal physical model 螺旋槽的槽型曲线为对数螺旋线,表达式为

$$r = r_{\sigma} e^{\theta \tan \alpha}$$

式中: r<sub>g</sub>为槽根半径, θ为螺旋线转角, α为螺旋角. 密封的具体结构尺寸及操作参数分别如表 1 及表 2 所示.

表1 结构尺寸

Tab.1 Structure size

结构参数	外径/ mm	根径/mm	内径/mm	槽坝比	
参数值	39	32.4	29.6	0.7	
结构参数	槽宽比	螺旋角/(°)	槽数/个	槽深/μm	
参数值	0.5	20	12	5	
表 2 工况参数					
	Tab.2	Working par	ameters		
工况参数	介质	进口压力/ MPa	出口压力/ MPa	温度/K	
参数值	液氧	0.9	0.101 3	80	
	त्रेत्र होत् ।	-e1 -e	+++++		

 
 工況参数
 密度/ (kg・m<sup>-3</sup>)
 黏度/ (Pa・s)
 转速/ (r・min<sup>-1</sup>)

 参数值
 1 186.6
 2.54×10<sup>-4</sup>
 30 000

 由于高速动压密封几何模型呈中心对称和周期

出于高速动压密封几何模型至中心对称和周期 性分布,所以只选取一个周期作为计算区域进行分 析.周期性边界条件为:

$$\begin{cases}
\Phi(r,\theta_2,z) = \Phi(r,\theta_1,z) \\
\theta_2 = \theta_1 + 2\pi/n.
\end{cases}$$

### 2.2 计算流体域及网格划分

取密封端面间的流体域为研究对象,建立整个密封端面流体区域,通过 ANSYS Workbench 模块中的 ICEM 软件以液膜动静域交界平面为面源,采用 Sweep 划分方式,以四边形占优的网格类型进行网格 划分,再将面网格沿轴向拉伸成非结构六面体占优的 动、静域的体网格,流体域计算网格如图 4 所示.



Fig.4 Fluid domain computing grid

#### 2.3 基本假设

为了便于分析,针对动压密封端面流体膜的实际特点,对密封端面间流体膜做了如下合理的假设:

1)密封动静环表面为理想光滑表面;

2)密封端面间流体的流动为层流;

3)流体流动过程中温度、黏度、密度和压力沿 膜厚方向恒定不变;

4)忽略流体的惯性力和流体的体积力;

5)由于沿流体厚度 *z* 方向的尺度相对 *x*,*y* 方向 要小得多,因此速度梯度只考虑 *∂u/ ∂z* 和 *∂v/ ∂z*, 忽 略其他速度梯度.

## 2.4 模拟设置

依照高速动压密封实际工作状态设置的连续相 边界条件和离散相边界条件如表 3 所示.

表 3 边界设置

Tab.3	Boundary settings		
位置	类型		
密封外径侧	压力入口		
密封内径侧	压力出口		
与动环接触的壁面	旋转壁面		
与静环接触的壁面	静止壁面		

压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法,压力插值采 用二阶精度格式,迭代精度设置为 1.0×10<sup>6</sup>.

计算得到压力场分布云图如图 5 所示,由图 5 可知端面非槽区压力从端面外径高压侧向内径低压 侧递减,槽区压力由端面外径侧向内径侧递增,最大 压力值出现在螺旋槽根部;槽区产生了明显的动压 效应.



图 5 端面压力分布云图

 $Fig. 5 \quad Face \ pressure \ distribution \ cloud \ map$ 

3 稳态性能分析

## 3.1 工况参数对高速动压密封性能的影响

3.1.1 转速

端面开启力和泄漏量随转速变化曲线如图 6 所 示. 由图 6 可看出,介质为气相和液相时,密封端面 开启力和泄漏量都随转速的增加而增加. 由于液相 介质的密度和黏度比气相介质大,所以液相开启力 和泄漏量都比气相大. 由于开启力和泄漏量与压力 呈正相关关系,所以高压下的开启力和泄漏量更大.



Fig.6 Influence of speed on sealing performance

3.1.2 压差

端面开启力和泄漏量随压差变化曲线如图7所示.



Fig.7 Influence of pressure difference on sealing performance

由图 7 可知介质为气相和液相时,压差越大,密封 端面开启力和泄漏量越大,高转速时开启力和泄漏量 更大,这是因为转速越高动压效果越强.由于液相介质 的密度和黏度比气相介质大,所以液相开启力和泄漏 量都较气相大,且液相开启力增大趋势更明显.

## 3.2 结构参数对高速动压密封性能的影响

3.2.1 槽深

由图 8 可得,介质为气相和液相时,开启力都随槽 深增大先增大后减小,高转速时开启力较大.槽深在5~ 8 μm时,开启力有最大值,说明槽深过深或过浅都对 密封开启不利.介质为气相和液相时,泄漏量随槽深的 变化趋势有所不同,这是由于介质物性和槽数区间造 成的.介质为气相时,泄漏量先随槽深增大而增大,而 后增大趋势逐渐变平缓;介质为液相时,泄漏量随槽深 增大近似线性增大,高转速时泄漏量较大.



Fig.8 Influence of groove depth on sealing performance 3.2.2 槽数

由图9可得,介质为气相和液相时,开启力都随 槽数增大先增大后减小,两者开启力达到极大值的 槽数不同,且液相开启力较气相大,这是由于液相介 质黏度较大造成的.气相和液相泄漏量随槽数增大 趋势有所不同,由于气相介质黏度小,所以比液相介 质更容易泄漏.实际情况中密封面所开槽数受到结 构限制和槽堰比影响,无法随意增加,实际加工中需 具体情况具体对待.此处分析得出槽数范围在6~15 个时,密封开启力较大,泄漏量较小.



Fig.9 Influence of number of grooves on sealing performance 3.2.3 槽坝比

由图 10 可知,当介质为气相和液相时,开启力都随 着槽坝比的增加先变大后变小,两者开启力达到极大值 的槽坝比不同,液相介质开启力达到极大值的槽坝比比 气相小,且液相开启力较气相大,这是由于液相介质黏度 较大造成的. 气相介质泄漏量随槽坝比变化趋势与液相 介质有所不同,介质为气相时,泄漏量先增大后减小再增 大,介质为液相时,泄漏量随槽坝比增大而增大. 槽坝比 为0.65~0.75 时,密封开启力较大,泄漏量较小.



Fig.10 Influence of groove and dam ratio on sealing performance

## 4 试验验证

对高速动压密封进行变压差试验和变转速试 验,测量动压密封泄漏量和磨损量,验证高速动压密 封性能,同时通过磨损测量判断密封开启性能.

密封试验台结构图如图 11 所示. 运转试验前 进行气密性检测,确保静压无泄漏后进行运转试验. 试验时 N1 处通油气润滑轴承, N2 处通入带压介 质, N4 处接压力表, N5 处接泄漏采集测量装置. 气 体泄漏量测量采用排水法(泄漏量非常小时)和流 量计法;液体泄漏量采用实验室自主研发的基于差 压传感器的高精度液体流量测量装置进行测量.



N5 N4 N3

1—高速变频电机;2—高速双膜片联轴器;3—密封试验装置; N1—油气润滑进口;N2—介质进口;N3—油气润滑出口; N4—介质出口、压力表接口;N5—泄漏收集测量口

图 11 动压密封试验装置结构

Fig.11 Hydrodynamic seal test device structure diagram 4.1 变压差试验

调节 N2 处进口压力以改变密封腔压力,使腔 压在 0.1~1.0 MPa 依次增大,保持转速不变,测量密 封泄漏量.如图 12 所示,泄漏量数值模拟值与试验 值的变化规律基本相同,都随着压差的增大逐渐增 大.介质为气相时,泄漏量在压力为 0.4 MPa 时增大 趋势变快,此时试验值与理论值误差变大,最大误差 <25%(泄漏量太小,测量存在较大误差);介质为液 相时,试验值略大于理论值,最大误差<10%,在可接 受范围内,证明液相密封性能分析是可信的.



Fig.12 Influence of pressure difference on leakage rate

#### 4.2 变转速试验

调节 N2 处进口压力,使腔压分别为 0.6、0.9 MPa, 转速在 1 000 ~24 000 r/min 依次增大,结果见图 13.



Fig.13 Influence of rotational speed on leakage

由图 13 可知,泄漏量数值模拟值与试验值的变化 规律基本相同,都随着转速的增大逐渐增大,且高压差 时,泄漏量更大.在转速为 18 000 ~22 000 r/min试验 时,试验值略>理论值,高速电机振动较为剧烈,泄漏量 突然增大,转速超过 22 000 r/min 时,泄漏量有下降趋 势,说明振动对密封不利.介质为气相时,最大误差< 44%(泄漏量太小,测量存在较大误差);介质为液相 时,最大误差<13%,在可接受范围内,证明密封性能分 析是可信的.

#### 4.3 磨损量测量

试验前,利用光学电镜测量密封静环端面凸台高度;试验时,保持压力不变,在4000~24000 r/min范围内依次改变密封转速,使密封分别在规定转速下运转300 s;试验后再次测量密封静环端面凸台高度,计算密封磨损率,试验结果见图14.



Fig.14 Influence of rotational speed on wear rate

由图 14 可得,气相和液相试验的磨损率基本相同.液相时,磨损率先随转速增大而增大,然后在8 000~12 000 r/min 范围内突然降低,转速超过12 000 r/min后磨损率基本不变,说明液相密封开启转速在 8 000~12 000 r/min,12 000 r/min以后液相密封端面完全开启;气相时,磨损率先随转速增大而增大,然后在 10 000~14 000 r/min 范围内突然降低,转速超过 14 000 r/min 后磨损率基本不变,说明气相密封开启转速在 10 000~14 000 r/min 之间,140 00 r/min 以后气相密封端面完全开启.低速时密封端面未脱开,密封磨损较严重,高速时密封端面脱开,密封几乎无磨损,且液相时的密封较气相时的密封更容易开启.

5 结 论

 1) 气相和液相动压密封在分析和试验研究中均能 实现端面开启,气相密封完全开启转速为
 14 000 r/min,液相密封完全开启转速为 12 000 r/min.

2)相同的转速和压力时,由于液相介质的密度 和黏度比气相大,液相密封开启力和泄漏量都比气 相密封的开启力和泄漏量更大.

3)不同结构参数下,气相和液相密封开启力均 有最大值;气体密封和液相密封的最优结构参数有 所不同,液相密封的最优槽数、最优槽坝比较气相密 封的小,设计时应该针对介质相态选择最优结构 参数.

4)液相密封开启转速较气相密封开启转速低, 液相动压密封比气相动压密封容易开启;低速时密 封端面未开启,密封磨损较严重,高速时密封端面开 启,密封几乎无磨损,高速对动压密封有利.

## 参考文献

 彭旭东,江锦波,白少先,等.中低压干气密封螺旋槽结构参数优 化[J].化工学报,2014,65(11):4536
 PENG Xudongdong, JIANG Jinbo, BAI Shaoxian, et al. Structural

parameter optimization of spiral groove dry gas seal under low or medium pressure [J]. CIESC Journal, 2014,65(11):4536. DOI:10. 3969/j.issn.0438-1157.2014.11.046

- [2] 彭旭东,刘坤,白少先,等.典型螺旋槽端面干式气体密封动压开 启性能[J].化工学报,2013,64(1):326
  PENG Xudong, LIU Kun, BAI Shaoxian, et al. Dynamic opening characteristics of dry gas seals with typical types of spiral grooves
  [J]. CIESC Journal, 2013,64 (1): 326. DOI: 10.3969/j.issn. 0438-1157.2013.01.037
- [3] 陈汇龙,李同,任坤腾,等.端面变形对液体动压型机械密封液膜 瞬态特性的影响[J].化工学报,2017,68(4):1533 CHEN Huilong, LI Tong, REN Kunteng, et al. Influence of end face deformation on transient characteristics of fluid film in hydrodynamic mechanical seal [J]. CIESC Journal, 2017, 68 (4):1533.

DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20161387

- [4] 陈杰,李建克,王少鹏.低温非接触式端面密封参数优化与试验 验证[J].火箭推进,2013,39(4):56
  CHEN Jie, LI Jianke, WANG Shaopeng. Parameter optimization and experimental verification of non-contacting end-face seals in cryogenic condition[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 56.DOI:10.3969/j.issn.1672-9374.2013.04.011.
- [5] ZHENG Y. Numerical simulation and characteristics analysis of the turbine shaft end spiral groove mechanical seal[C]// Yuan.International Conference on Digital Manufacturing & Automation. Hefei: IEEE, 2012:558
- [6] SEDY J. High pressure upstream pumping seal combination: U S-4290 611[ P]. 1981-09-22
- [7] SALSANT R F, HOMILLER S J. The effect of shallow groove patters on mechanical seal leakage[J]. Tribology transation, 1992, 35(1): 142
- [8] NETZEL J P. Seal technology, a control for industrial pollution[J]. Lubrication Engineering, 1990, 46(04):483
- [9] BUCK G S, VOLDEN D. Upstream pumping: A newconcept in mechanical sealing technology[J]. Lubrication Engineering, 1990, 46(4):213
- [10]刘欢欢. 低温及液态易汽化介质端面密封性能研究[D]. 北京: 北京化工大学,2014
   LIU Huanhuan. Study on performance of end face seals used in the condition of low temperature and easily vaporized liquid media[D].
   Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014
- [11]赵伟刚,张树强,陈杰,等.液氧泵用动静压混合式密封关键技术研究[J].润滑与密封,2017,42(1):111
  ZHAO Weigang, ZHANG Shuqiang, CHEN Jie, et al. Key technologies of dynamic-hydrostatic hybrid seals used in liquid oxygen pump
  [J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(1):111. DOI: 10.3969/j. issn.0254-0150.2017.01.019
- [12] 王彬,郝木明.新型动静压混合润滑机械密封流场数值研究[J]. 润滑与密封,2009,34(7):62
  WANG Bin, HAO Muming. Numerical study on flow field of new type hydrostatic dynamic hybrid lubrication seal [J]. Lubrication Engineering, 2009,34(7): 62. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150. 2009.07.015
- [13]李小芬,蔡纪宁,张秋翔,等.低液气比混合润滑下的动压密封 性能分析[J].润滑与密封,2016,41(4):40

LI Xiaofen, CAI Jining, ZHANG Qiuxiang, et al. Analysis on hydrodynamic sealing performance under low liquid-gas ratio mixed lubrication [J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(4):40. DOI:10. 3969/j.issn.0254-0150.2016.04.008

[14]李欢,李双喜,李小芬,等.油气两相动压密封端面结构多参数正 交优化及试验研究[J].北京化工大学学报(自然科学版), 2017,44(1):76

LI Huan, LI Shuangxi, LI Xiaofen, et al. Multi-parameter optimization and orthogonal experimental study of a two-phase oil and gas dynamic pressure seal structure [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2017,44 (1):76

[15] 刘录.变工况时气液两相机械密封端面动压实验分析[J].石油 机械,2002,30(8):11

LIU Lu. Test analysis of dynamic pressure on the end surfaces of mechanical seals for gas-liquid phases under varied working conditions [J] CPM , 2002, 30(8): 11.DOI: 10.3969/j.issn.1001-4578.2002.08.004