

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.01.004

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王衍,谢方伟,谢雪非,王英尧. 柱面气膜密封槽底导流织构性能提升及作用规律研究[J]. 西安理工大学学报, 2024,40(1):36-44.

WANG Yan, XIE Fangwei, XIE Xuefei, WANG Yingyao. Research on sealing performance improvement and functional rule of diversion texture at bottom of cylindrical gas film seal groove [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(1):36-44.

## 柱面气膜密封槽底导流织构性能提升及作用规律研究

王 衍<sup>1,2,3</sup>, 谢方伟<sup>1</sup>, 谢雪非<sup>3</sup>, 王英尧<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏 连云港 222005; 3. 江苏海洋大学 机械工程学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** 研究如何提升柱面气膜密封的稳定性对保证该类密封在高速、高压工况下的安全运行至关重要, 鉴于导流织构能够有效提升系统稳定性, 本文通过在柱面气膜密封槽底设置一定数量和造型的导流织构, 系统研究了不同工况下导流织构对柱面气膜密封性能的作用规律。结果表明: 导流织构对柱面气膜密封微尺度流场具有良好的导流作用, 最高压力及高压区面积都显著增大; 一定工况和泄漏条件下, 导流织构可以显著提升密封开启力; 有导流织构的柱面气膜密封还可以显著降低高速、高压工况下微尺度流场中的压力波动方差, 且转速越高, 抑扰效果越显著。

**关键词:** 柱面气膜密封; 导流织构; 密封性能; 性能提升; 作用规律

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)01-0036-09

### Research on sealing performance improvement and functional rule of diversion texture at bottom of cylindrical gas film seal groove

WANG Yan<sup>1,2,3</sup>, XIE Fangwei<sup>1</sup>, XIE Xuefei<sup>3</sup>, WANG Yingyao<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Institute of Marine Resources Development, Lianyungang 222005, China; 3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** Studying how to improve the stability of the cylindrical gas film seal is crucial to ensure the safe operation of such seals at a high speed and under high pressure working conditions. In view of the fact that the diversion texture can effectively improve the stability of the system, this paper design a certain number and shape of the diversion structure at the bottom of the cylindrical gas film seal groove, with the effect of the diversion structure on the sealing performance of the cylindrical gas film seal under different working conditions systematically studied. The results show that the diversion texture has a good diversion effect on the micro scale flow field of cylindrical gas film seal, and that the maximum pressure and high pressure area are significantly increased. Under certain working conditions and leakage conditions, the diversion texture can significantly improve the opening force, cylindrical gas film seal with diversion textures can signifi-

收稿日期: 2022-09-27; 网络首发日期: 2023-04-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20230424.1528.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275192, 52105187); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20191471); 中国博士后科学基金资助项目(2021M691328); 江苏省博士后科研资助计划项目(2021K333C); 江苏“六大人才高峰”资助项目(GDZB-076); 连云港市“521工程”项目; 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX2021-049, KYCX22-3389)

通信作者: 王衍, 男, 博士, 副教授, 研究方向为流体机械与密封技术。E-mail: qqwangyan2006@163.com

cantly reduce the variance of pressure fluctuation in micro scale flow field at a high speed and under high pressure working conditions; the higher the speed, the more significant the disturbance suppression effect.

**Key words:** cylindrical gas film seal; diversion texture; sealing performance; performance improvement; functional rule

柱面气膜密封最早可追溯到1994年美国国家航空航天局(NASA)<sup>[1]</sup>提出的一种弹性浮动式柔顺箔气膜密封结构形式,并首先运用在了航空发动机上。柱面气膜密封的微米级径向气膜不仅具有减震作用,在寿命和工作效率方面也有着迷宫、间隙、螺旋等密封形式无法企及的优势<sup>[2,3]</sup>。此外,柱面气膜密封不需要辅助密封圈,结构方面比其他密封形式更加简洁。目前,柱面气膜密封的典型结构包括柔顺箔密封、柔顺箔密封、混合浮动刷密封、薄叶板密封、带金属橡胶外环密封等类型。2004年,NASA对几种常见的柱面气膜密封结构和工作原理进行了总结,首次给出了不同界面柱面气膜密封的计算程序,并对不同槽型结构的气膜特性进行了分析,极大地促进了柱面气膜密封的发展<sup>[4]</sup>。2012年,Arghir等<sup>[5]</sup>基于柱面气膜密封在非线性振动下的稳定性判断规律,得到了不同工况参数对密封环运动轨迹的影响规律。2014年,Yurko等<sup>[6]</sup>采用浮环柱面气膜密封替换离心式压缩机原有传统浮环密封,结果显示,浮环柱面气膜密封具有更加优异的泄漏和密封性能。近年来,Mel'nik<sup>[7-9]</sup>等针对浮环密封的工作机制及其密封结构,并围绕诸多影响参数进行了深入研究,系统分析了工况和几何参数对径向力、泄漏率等密封性能的影响。

国内对柱面气膜密封的研究起步较晚,2005年以来,北京航空航天大学、兰州理工大学、中国燃气涡轮研究院等机构相继开展了柱面气膜密封方面的研究。马纲等<sup>[10]</sup>运用数值模拟法求解了柱面气膜密封雷诺方程,得到了柱面气膜密封的稳态和准动态特性参数随压缩系数及气膜厚度的变化规律曲线图。赵亚飞等<sup>[11]</sup>采用多元线性回归法及MATLAB软件对柱面气膜密封进行了结构设计和参数优化,并通过Fluent软件验证了理论分析结果。丁雪兴等<sup>[12]</sup>运用Ph线性化方法求得了柱面气膜密封体压力的近似解析解,分析了槽数、槽深、转子偏心率等对气膜压力的影响规律;其团队<sup>[13-15]</sup>进一步提出了新型柱面气膜密封,并对新式密封的界面形状、变形等问题进行了详细研究,证实了介质压力的主导作用。陆俊杰<sup>[16]</sup>对不同型槽柱面气膜密封的润滑特性进行了理论和实验研究,详细阐述了新型柱面气膜密封的动静态特性变化、槽型优化规律以及滑移

流机制下的润滑特性。2022年,丁雪兴等<sup>[17]</sup>基于两相流混合(Mixture)模型,研究了柱面密封中气液两相介质流体动压密封的稳态性能,为揭示复杂两相润滑状态下的柱面流体动压密封性能提供了借鉴。

综上,柱面气膜密封实际面临的问题呈现多样化、复杂化特点,上述文献对这类密封的工况特性及结构参数的探讨已十分深入和详实,但就导流织构对该类密封微尺度流场的实际作用效果和规律仍缺乏进一步探讨。本文基于课题组前期的研究,围绕柱面气膜密封开启力、泄漏率、压力波动方差等稳定运行表征参数,探索如何通过合理设计导流织构来进一步提升柱面气膜密封的运行稳定性。

## 1 柱面气膜密封结构及工作原理

本文研究对象选择兰州理工大学丁雪兴教授团队近年来最新提出的新型柱面气膜密封结构,如图1所示。

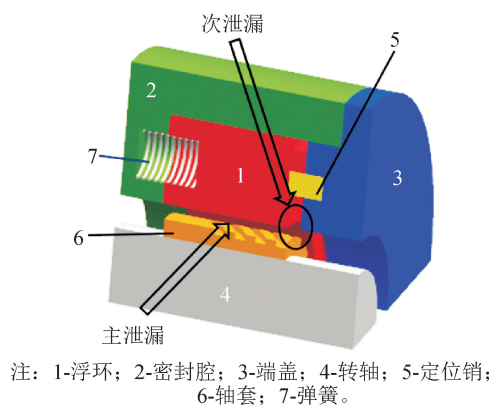


图1 柱面气膜密封几何结构

Fig. 1 Geometric structure of cylindrical gas film seal

新型柱面气膜密封主要由轴、浮环、轴套、密封座、定位销、压紧弹簧、端盖等结构组成。轴套槽型为螺旋槽,轴套与轴过盈配合随轴一同转动,轴套外圈的浮环安装在密封座内腔体中,在轴套和浮环之间就会存在一层气膜。随着转子带动轴套的转动,轴套上的螺旋槽结构和整个装置的偏心安装就会产生作用,外径侧的高压隔离气体在黏性剪切力的作用下泵入密封柱面之间,在动压效应和节流效应的共同作用下促使膜压增加,进而使开启力超过浮动

环上的摩擦力与重力之和,迫使密封界面始终处于稳定的非接触状态。当运转稳定时,在浮动环和轴套之间形成微米级气体润滑膜,介质被气膜阻隔于主泄漏通道中,从而实现密封功能。

## 2 导流织构研究现状

大量实验表明,将表面织构技术用于计算机、发动机、轴承等<sup>[18-21]</sup>各类设备中,可以显著改善和提升相应性能。2011年,Yuan等<sup>[22]</sup>对滑动表面的织构定向效应进行了实验研究,结果表明,织构纹理的垂直方向和平行方向布置对滑动表面的动力学性能、润滑性能都有重要影响。2016年,Slawomir等<sup>[23]</sup>对干气密封微槽道、微孔隙及表面织构进行了研究,结果表明,合理的设计和表面形貌将有助于提高密封稳定性。2017年,Ma等<sup>[24]</sup>研究了表面织构和表面粗糙度在流体和混合润滑条件下的共同作用效应,进一步证实了面向表面微织构进行合理重构和设计有助于微尺度间的流体流动。受上述研究启发,近年来课题组<sup>[25-27]</sup>通过对导流织构的科学设计,进一步提升了各类槽型干气密封的密封性能。基于此,本文继续探索将导流织构应用于柱面气膜密封后的使用效果。与端面型密封不同,本文研究的柱面气膜密封其螺旋槽沿轴向分布,且存在偏心影响,对其进行导流织构设计更加复杂,存在一定困难。

## 3 计算模型

### 3.1 基本假设

- 1) 密封副间气体为连续介质层流流动;
- 2) 流场内润滑层温度、黏度相等;
- 3) 气体分子与密封端面紧密吸附,无滑移产生;
- 4) 忽略密封副变形对介质流动的影响;
- 5) 忽略密封系统微幅振动对气膜的影响;
- 6) 不计气体的惯性力和体积力;
- 7) 轴向方向的介观气膜压力一致;
- 8) 密封副在运行过程中始终保持平行,除槽底面之外,其余表面理论光滑。

### 3.2 控制方程

雷诺方程是流体力学的基本方程,对柱面气膜密封的整体研究也起到了关键作用。基于以上假设,柱面气膜密封的控制方程可表达为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{Ph^3}{\mu T} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{Ph^3}{\mu T} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\omega \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{Ph}{T} \right) + 12 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Ph}{T} \right)$$

式中: $R$ 为轴套外半径,mm; $\theta$ 为极坐标,rad; $P$ 为介质压力,MPa; $h$ 为膜厚, $\mu\text{m}$ ; $\mu$ 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $T$ 为气体温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $z$ 为轴向坐标,mm; $\omega$ 为转动角速度,rad/s; $t$ 为时间,s。

### 3.3 计算参数

柱面气膜密封计算参数如表1所示,主要包括决定密封结构的几何参数及运行工况的操作参数,操作参数主要包括主轴转速及介质压力。对部分参数的区间范围作了限定,需要在相对不变量的前提下进行系统研究。

表1 柱面气膜密封基本参数

Tab.1 Basic parameters of cylindrical gas film seal

变量	名称	取值
$R$	轴套外半径/mm	29.2
$h_g$	槽深/ $\mu\text{m}$	8
$B$	槽宽比	1
$n$	槽数/个	16
$L$	密封宽度/mm	40
$e$	轴套偏心率	0.7
$\alpha$	螺旋角/ $^{\circ}$	30
$L_c$	螺旋槽轴向长度/mm	26
$h$	膜厚/ $\mu\text{m}$	10、15、20、25、30
$D_n$	单槽导流织构数/个	15
$D_h$	导流织构深度/ $\mu\text{m}$	0.5、1、1.5、2
$D_b$	导流织构间宽比	1
$P$	介质压力/MPa	0.1~1
$N$	转速/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	10 000~50 000

## 4 仿真计算

### 4.1 几何建模

柱面气膜密封本身结构比较复杂,其轴向与径向实体尺寸差别巨大(差距约10 000倍),而且整个模型还存在偏心结构,槽深位置的气膜最薄处只有几个微米,带有导流织构的气膜结构就更加微小和复杂,使得考虑导流织构的密封几何建模难度较大。为此,首先采取把整个模型放大1 000倍的方法来建立几何模型,此方法虽然会大大增加建模软件的计算负载,但是在模型精度和控制几何体形变上能做到较好的优化;然后通过SolidWorks进行柱面气膜密封流场建模;最后以螺旋线为扫描路径,在螺旋槽槽区进行扫描切除,进而可以形成一定数量的微凸体状导流织构,其模型如图2(a)所示,织构参数定义如图2(b)所示,导流织构间宽比 $D_b = M/W$ 。



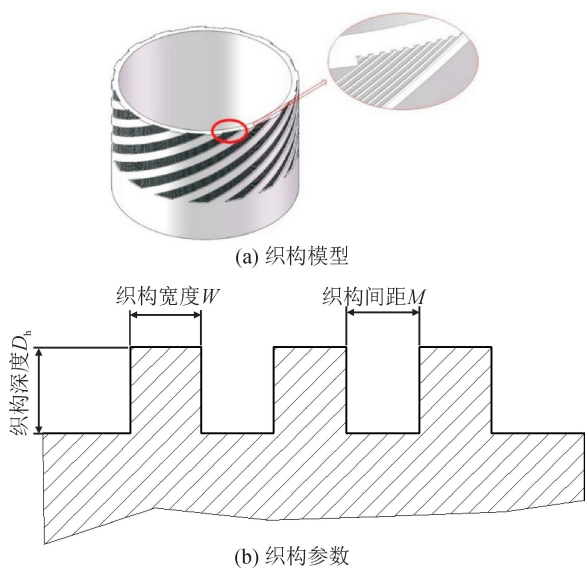


图2 导流织构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diversion texture

#### 4.2 网格划分及边界条件设置

ANSA(BETA CAE Systems 公司)作为当前最快捷的 CAE 前处理软件之一,凭借出色的网格划分手段、超高的精度识别能力以及快捷的操作方式,在处理柱面气膜密封这类对精度和网格质量要求较高的网格问题上有着 ICEM 无法企及的优势。鉴于此,本文采用 ANSA 进行网格划分可以大大提高导流织构复杂网格划分的成功率。首先进行模型检查,无误后对模型边界名称进行定义和网格切分,进而完成内部面的建立;然后使用 number 功能定义边线节点数量,用 map 功能划分四边形面网格;最后使用体网格命令将面网格拉伸成体网格,以此类推,即可完成所有体网格的生成。最终建立的导流织构网格模型如图 3 所示。

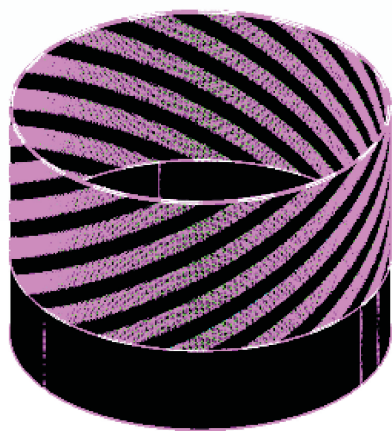
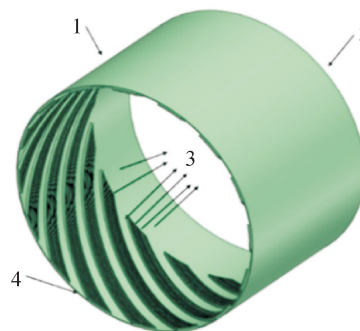


图3 气膜整体网格

Fig. 3 Gas film integral grid

根据实际工作情况可以确定,主轴按照逆时针

转动,轴套安装在主轴上,因此将轴套与气膜的接触面看成动环,设置 moving-wall 转速。浮动环与气膜的接触面设置为 static-wall,采用标准壁面条件,设置 inlet 为压力入口,outlet 设置为 0.1 MPa。流动模型选择层流(Laminar),求解方法采用 SIMPLC 算法,控制方程选择二阶迎风离散格式,开启监测窗口监测残差、泄漏率和开启力变化,并保持默认温度为 300 K 从 all-zones 进行标准初始化,具体设置如图 4 所示。



注: 1-静环; 2-压力出口; 3-动环; 4-压力入口。

图4 边界条件

Fig. 4 Boundary conditions

#### 4.3 网格无关性分析及方法验证

网格数量越高,数值计算结果的准确度也越高,但是过多的网格数量会给计算机带来过量负载,大大延长计算时间。为综合考虑数值模拟结果的精度以及计算机的工作负载和时间,应进行必要的网格无关性分析。表 2 为导流织构柱面气膜密封的网格无关性计算结果。综合比较可以看出,293.8 万网格相较于 203.0 万网格在 X、Y 方向上的开启力、泄漏率都有一定提升,而 380.2 万网格相比于 293.8 万网格在 X、Y 方向上的开启力及泄漏率的变化则十分微小。因此,可以认为当网格数达到 290 万时计算结果已经稳定,故将其作为基准网格数量进行数值模拟计算。

表2 网格无关性对比

Tab. 2 Grid independence comparison

网格/万	开启力 $F/N$		泄漏率 $Q/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$
	X 向	Y 向	
203.0	418.98	623.54	2.61E-04
293.8	420.62	625.53	2.92E-04
380.2	420.80	625.54	2.99E-04

将计算结果与文献[28]进行对比,如表 3 所示,可以看出,本文方法所得的泄漏率与参考文献基本吻合,都是随着转速的增加呈上升趋势,且误差在 10%以内。由此可见,本文的研究方法是合理可行的。



表 3 仿真与文献对比结果

Tab. 3 Comparison between simulation and literature

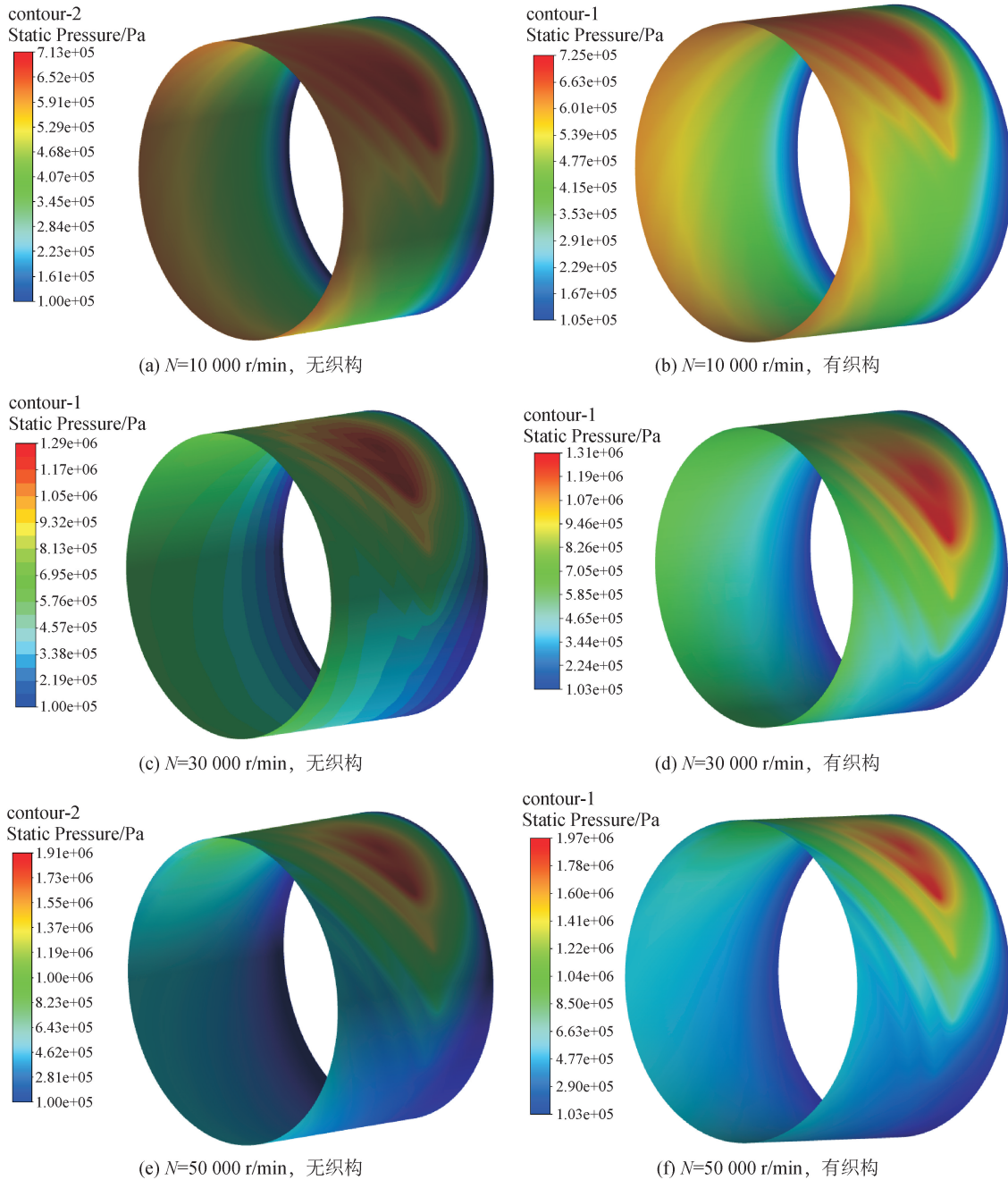
转速 $N/$ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	泄漏率 $Q/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$		
	仿真值	文献值 <sup>[28]</sup>	误差/%
10 000	1.33E-04	1.46E-04	-9.21
20 000	1.39E-04	1.49E-04	-6.46
30 000	1.48E-04	1.50E-04	-1.60
40 000	1.58E-04	1.52E-04	4.20

## 5 结果与分析

### 5.1 有无导流织构性能对比

#### 5.1.1 转速的影响

图 5 为一定工况下,有无导流织构的柱面气膜密封流场压力云图随转速的变化规律。



注: $h=15 \mu\text{m}$ ,  $h_g=8 \mu\text{m}$ ,  $P=0.6 \text{ MPa}$ ,  $D_h=1 \mu\text{m}$ 。

图 5 不同转速下有无导流织构密封压力云图

Fig. 5 Sealing pressure nephogram with or without diversion texture at different speeds

从图 5 可以看出,随着转速的增加,柱面螺旋槽

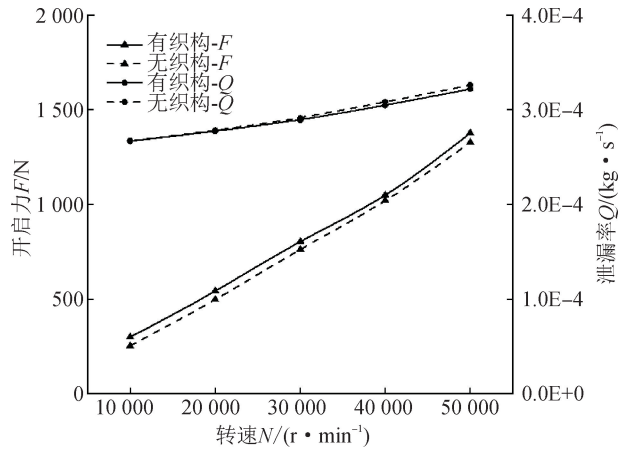
的高压富集区域不断向螺旋槽槽根区域集聚,位置

也在不断发生偏移,且伴随着转速的上升,最高压力也在不断增大;有织构柱面气膜密封在不同转速下的最高压力都大于无织构柱面气膜密封,说明导流织构的存在可以进一步提升柱面气膜密封流体流动的积聚效应,有利于增强微尺度流场的流体动压效果。

图 6 为有无织构柱面气膜密封的开启力和泄漏率随转速的变化规律。由图可以看出,随着转速的增大,有无织构的密封开启力和泄漏率都呈不断增大的趋势;有导流织构的柱面气膜密封的开启力整体高于无导流织构,而泄漏率整体略小于无导流织构。可见,转速对柱面气膜密封性能有较大影响,导流织构同时具有提升密封开启力、降低泄漏率的优良特性。究其原因,导流织构的存在可能进一步提升了气体沿圆柱面周向的流动,强化了气体于螺旋槽根部的气体集聚效应,进而提升了开启力;同时,可以引导更多的气体进入螺旋槽内,提升了阻流效率,从而一定程度降低了泄漏率。

5.1.2 压力的影响

选择导流织构密封为研究对象进行变压力工况

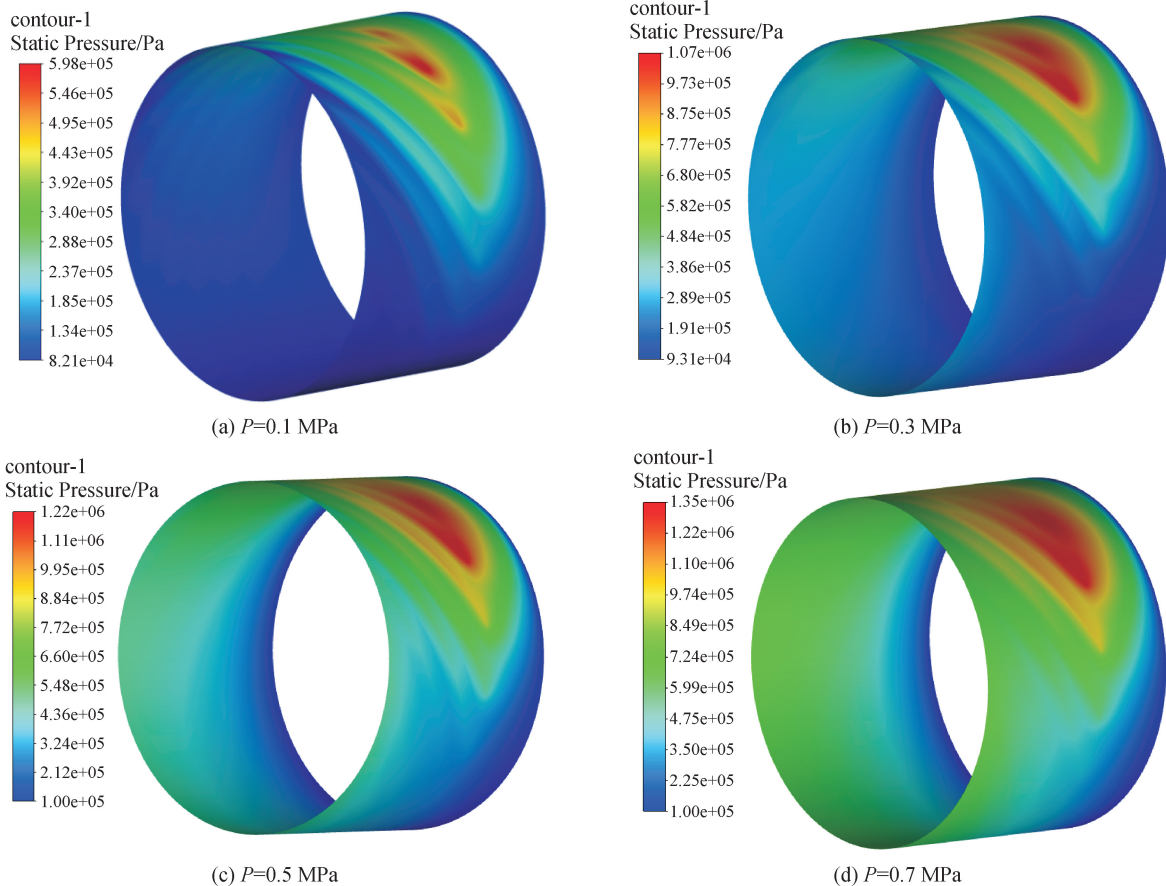


注:  $h=15 \mu\text{m}$ ,  $h_g=8 \mu\text{m}$ ,  $P=0.6 \text{ MPa}$ ,  $D_h=1 \mu\text{m}$ 。

图 6 转速对开启力和泄漏率的影响

Fig. 6 Influence of rotation speed on opening force and leakage rate

密封性能分析,如图 7 所示。从图中可以直观看出,在转速不变、只提升进口压力的情况下,最高压力区域仍位于螺旋槽尖端附近,高压区域面积及最高压力都呈显著增大趋势。



注:  $h=15 \mu\text{m}$ ,  $h_g=8 \mu\text{m}$ ,  $N=30\,000 \text{ r/min}$ ,  $D_h=1 \mu\text{m}$ 。

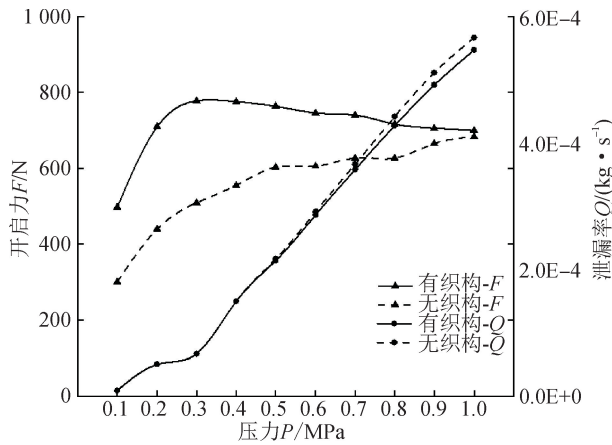
图 7 不同压力下导流织构密封压力云图

Fig. 7 Sealing pressure nephogram of diversion texture at different pressures

为进一步对比有无导流织构柱面气膜密封在不

同压力下的性能表现,绘制其开启力和泄漏率随压

力的变化曲线,如图 8 所示。由图可以看出,有无导流织构柱面气膜密封的泄漏率都随着压力的增大而增大,有导流织构柱面气膜密封的泄漏率略小,且随着压力的增大,泄漏率差值缓慢增大;有导流织构柱面气膜密封的开启力显著高于无导流织构,无导流织构柱面气膜密封的开启力随着压力的升高呈缓慢增大趋势,有导流织构柱面气膜密封的开启力随着压力的升高先迅速升高后缓慢降低。整体而言,不同压力下,导流织构的存在都有利于柱面气膜密封提升开启力、降低泄漏率。



注: $h=15\ \mu\text{m}$ ,  $h_g=8\ \mu\text{m}$ ,  $N=30\ 000\ \text{r/min}$ ,  $D_h=1\ \mu\text{m}$ 。

图 8 压力对开启力和泄漏率的影响

Fig. 8 Influence of pressure on opening force and leakage rate

## 5.2 导流织构柱面气膜密封性能分析

### 5.2.1 膜厚的影响

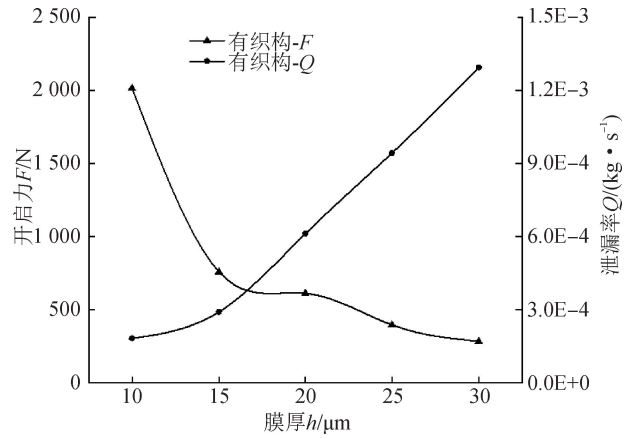
图 9 为膜厚对导流织构柱面气膜密封性能的影响,由图可以看出,随着密封膜厚的增大,泄漏率几乎呈线性趋势增加,开启力随着膜厚的增大迅速减小,与无织构柱面气膜密封的趋势一致。可见,减小密封膜厚可以高效增强动压效应及降低泄漏,但过小的密封膜厚不利于密封的稳定运行,所以需统筹考虑具体工况下的膜厚情况。

### 5.2.2 织构深度的影响

图 10 为织构深度对导流织构柱面气膜密封性能的影响,可以看出,织构深度的变化几乎对泄漏率没有影响,开启力随织构深度的增大呈缓慢降低趋势。结合激光加工技术,建议织构深度的取值以  $D_h=0.5$  为宜,这样就可以获得较低的泄漏及较高的动压特性。

## 5.3 压力波动方差分析

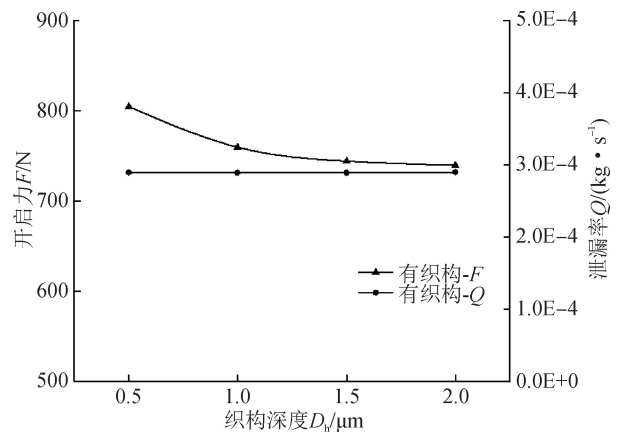
压力波动方差可以表征流场中压力的波动大小,为对比两种密封压力场的动态波动特点,对有无导流织构柱面气膜密封进行瞬态流场计算,如图 11 所示。



注: $h_g=8\ \mu\text{m}$ ,  $P=0.6\ \text{MPa}$ ,  $N=30\ 000\ \text{r/min}$ ,  $D_h=1\ \mu\text{m}$ 。

图 9 膜厚对开启力和泄漏率的影响

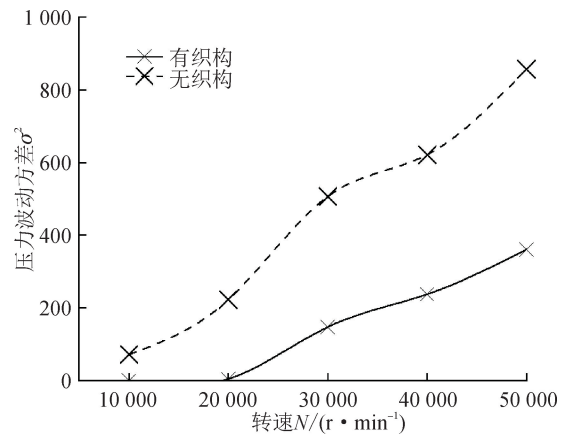
Fig. 9 Influence of film thickness on opening force and leakage rate



注: $h=15\ \mu\text{m}$ ,  $h_g=8\ \mu\text{m}$ ,  $P=0.6\ \text{MPa}$ ,  $N=30\ 000\ \text{r/min}$ 。

图 10 织构深度对开启力和泄漏率的影响

Fig. 10 Influence of texture depth on opening force and leakage rate



注: $h=15\ \mu\text{m}$ ,  $h_g=8\ \mu\text{m}$ ,  $P=0.6\ \text{MPa}$ ,  $D_h=1\ \mu\text{m}$ 。

图 11 有无导流织构的压力波动方差对比

Fig. 11 Comparison of pressure fluctuation variance with and without diversion texture



由图 11 可以看出,有导流织构的柱面气膜密封在不同转速下的压力波动方差较无导流织构有显著降低,且转速越高,压力波动方差降低越显著。结果表明,导流织构的存在不仅具有提升开启力的作用,还具有显著的抑制压力波动的效果。

## 6 结 论

本文通过 Fluent 数值模拟,对定向导流织构柱面气膜密封的性能进行了研究。

1) 在柱面气膜密封槽底增设导流织构,可以有效提升微尺度流场中流体的集聚效应,不同压力和转速下,显著增大了槽底最高压力及高压区面积。

2) 在维持一定泄漏的情况下,定向导流织构进一步增强了柱面气膜密封的动压性能,促使平均开启力显著提高。

3) 导流织构的存在,对抑制流场中的压力波动有显著效果,可大幅降低密封运行中微尺度流场的压力波动方差,进一步提升了柱面气膜密封高速工况下的运行稳定性。

### 参考文献:

- [1] MUNSON J, STEINETZ B M. Specific fuel consumption and increased thrust performance benefits possible with advanced seal technology[R]. Indianapolis: NASA Lewis Research Center, 1994.
- [2] LI Guoqing, ZHANG Qian, HUANG Enliang, et al. Leakage performance of floating ring seal in cold/hot state for aero-engine[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(9): 2085-2094.
- [3] LI Zhigang, FANG Zhi, LI Jun. Numerical investigation on the leakage and rotordynamic characteristics for three types of annular gas seals in wet gas conditions [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(3): 032504.1-032504.16.
- [4] LIANG A D, WALOWIT J, SHAPIRO W, et al. Numerical, analytical, experimental study of fluid dynamic forces in seals, Volume 3 [J]. NASA/CR, 2004, 3: 213199.
- [5] ARGHIR M, NGUYEN M H, TONON D, et al. Analytic modeling of floating ring annular seals[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(5): 052507-052515.
- [6] YURKO V, MARTSYNKOVSKYY V. Influence of changing the end floating seal dynamic characteristics on the centrifugal compressor vibration state[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 630: 356-364.
- [7] MEL'NIK V A. Calculation of the characteristics of seals with floating rings[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2013, 49(7-8): 542-548.
- [8] MEL'NIK V A. Factors influencing leakage of medium in a slotted shaft seal. Part 2. Effect of shaft rotation [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2015, 51(5-6): 342-347.
- [9] MEL'NIK V A. Calculation of the radial force in the groove seal of a rotor with stationary or rotating shaft [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2016, 52(1-2): 40-46.
- [10] 马纲,何军,栗秀花,等. 柱面气膜密封动力特性系数的数值计算[J]. 机械工程学报,2013,49(5):55-62. MA Gang, HE Jun, LI Xiuhua, et al. Numerical calculation of dynamic coefficients for gas film cylinderseal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 55-62.
- [11] 赵亚飞,李晓明. 基于多元线性回归的柱面气膜密封跑道优化设计[J]. 燃气涡轮实验与研究,2014,27(4):31-34,47. ZHAO Yafei, LI Xiaoming. Optimum design of the rotor of cylindrical gas seal based on the multivariate linear regression method[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2014, 27(4): 31-34, 47.
- [12] 丁雪兴,贺振泓,张伟政,等. 柱面螺旋槽干气密封微尺度流动场稳态近似计算[J]. 应用力学学报,2018,35(1):99-105,230. DING Xuexing, HE Zhenhong, ZHANG Weizheng, et al. Approximate calculation of steady micro-scale flow of cylindrical spiral groove dry gas seal[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(1): 99-105, 230.
- [13] 丁雪兴,张大鹏,唐大全,等. 新型柱面气膜密封的设计与试验[J]. 甘肃科学学报,2019,31(2):97-101. DING Xuexing, ZHANG Dapeng, TANG Daquan, et al. Design and test of new column surface gas film seal [J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31(2): 97-101.
- [14] 俞树荣,丁俊华,王世鹏,等. 柱面密封气膜动压效应模拟及试验[J]. 化工学报,2020,71(7):3220-3228. YU Shurong, DING Junhua, WANG Shipeng, et al. Simulation and analysis of dynamic pressure effect of gas film on cylinder seal[J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 3220-3228.
- [15] 丁雪兴,王晶晶,张伟政,等. 高压高转速螺旋槽干气密封浮环变形研究[J]. 润滑与密封,2019,44(11):1-6,22. DING Xuexing, WANG Jingjing, ZHANG Weizheng, et al. Research on deformation of spiral groove dry gas seal floating ring at high pressure and high speed[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(11): 1-6, 22.
- [16] 陆俊杰. 新型浮动式柱面微槽气膜密封的动力润滑特

- 性研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
- LU Junjie. Study on dynamic lubrication characteristics of a new floating cylindrical groove gas film seal[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [17] 丁雪兴,刘红,王世鹏,等. 柱面螺旋槽气液两相流体动压密封稳态性能研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(2): 22-29.
- DING Xuexing, LIU Hong, WANG Shipeng, et al. Study on steady state performance of gas-liquid two-phase fluid dynamic pressure seal in spiral groove of cylinder[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(2): 22-29.
- [18] TALA-IGHIL N, FILLON M, MASPEYROT P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing[J]. Tribology International, 2011, 44(3): 211-219.
- [19] IBATAN T, UDDIN M S, CHOWDHURY M A K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 272: 102-120.
- [20] SHINDE A, PAWAR P, GAIKWAD S, et al. Numerical analysis of deterministic micro-textures on the performance of hydrodynamic journal bearing[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5999-6008.
- [21] GROPPER D, WANG L, HARVEY T J. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: a review of modeling techniques and key findings[J]. Tribology International, 2016, 94: 509-529.
- [22] YUAN Sihuan, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J]. Tribology International, 2011, 44(9): 1047-1054.
- [23] SLAWOMIR B, ANDRIY V Z. A parametric and dynamic analysis of non-contacting gas face seals with modified surfaces[J]. Tribology International, 2016, 94: 126-137.
- [24] MA Chenbo, DUAN Yanjun, YU Bo, et al. The comprehensive effect of surface texture and roughness under hydrodynamic and mixed lubrication conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J. Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(10): 1307-1319.
- [25] WANG Yan, SUN Jianjun, HU Qiong, et al. Orientation effect of orderly roughness micro-structure on spiral groove dry gas seal[J]. Tribology International, 2018, 126: 97-105.
- [26] 胡琼,王衍,戴嵘,等. 基于有序微造型的圆弧线槽干气密封性能分析[J]. 化工学报, 2019, 70(3): 1006-1015.
- HU Qiong, WANG Yan, DAI Rong, et al. Performance study of arc groove dry gas seal based on orderly micro-structure[J]. CIESC Journal, 2019, 70(3): 1006-1015.
- [27] 胡琼,朱敏俊,王衍,等. 具径向有序微造型的枞树型槽干气密封性能分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 153-160.
- HU Qiong, ZHU Minjun, WANG Yan, et al. Performance analysis of fir tree-groove dry gas seal with radial orderly micro-structure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 153-160.
- [28] 王晶晶. 螺旋槽柱面气膜密封微间隙气膜流场分析及密封环热力耦合研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- WANG Jingjing. Analysis of gas membrane flow field in spiral groove cylindrical seal and study on thermodynamic coupling of sealing ring[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

(责任编辑 周 蓓)