

掺氢天然气干气密封启动特性研究

夏永波¹, 宦宣州², 李志刚¹, 李军¹

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安)

摘要: 为评估天然气掺氢对管线压缩机轴端干气密封性能的影响,提出一种考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型,分析了不同掺氢比下干气密封的静态特性和启动特性。首先,采用空气介质螺旋槽干气密封的气膜压力分布和开启力实验数据,验证了数值模型的可靠性;然后,针对 GE PCL800 机型天然气管线压缩机螺旋槽干气密封,分析了 4 种掺氢比(H_2 体积分数分别为 0、10%、20%、30%)和 5 种进口压力(4、6、8、10、12 MPa)对干气密封开启力、泄漏量和气膜刚度等静态特性的影响规律;最后,分析了 4 种掺氢比和 5 种进口压力下,转速、进口压力、平衡比和弹簧比压对干气密封启动特性的影响规律。研究表明:所提出的干气密封性能数值预测模型能够可靠预测高压差下干气密封出口阻塞效应及其对密封性能的影响;掺氢比对干气密封开启力、泄漏量和气膜刚度等密封静态特性影响较小;干气密封开启临界转速随掺氢比的增加而增大(掺氢比增加 30% 时,开启临界转速增大 8.51%~16.90%),因此天然气掺氢增大了干气密封的开启难度,需设计合适的平衡比和弹簧比压以保证干气密封顺利开启。该研究结果可为掺氢条件下天然气管线压缩机轴端干气密封的高效设计和可靠运行提供理论参考。

关键词: 干气密封;掺氢天然气;阻塞效应;启动特性

中图分类号: TH136 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403008 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0082-13

Study on Startup Characteristics of Dry Gas Seal with Hydrogen-Blended Natural Gas

XIA Yongbo¹, HUAN Xuanzhou², LI Zhigang, LI Jun¹

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: To evaluate the influence of hydrogen-blended natural gas on dry gas seal (DGS) at the shaft end of pipeline compressor, a numerical prediction model of DGS performance considering choked flow effect is proposed, as well as the static characteristics and the startup characteristics under different hydrogen-blended ratios are analyzed. Firstly, the reliability of the numerical model is verified by the experimental data of gas film pressure distribution and opening force of air medium spiral groove DGS. Then, aiming at the spiral groove DGS of GE PCL800 natural gas pipeline compressor, the effects of four hydrogen-blended ratios (volume fraction of H_2 of 0, 10%, 20% and 30%, respectively) and five inlet pressures (4, 6, 8, 10 and 12 MPa) on the static characteristics are analyzed. Finally, the effects of rotational speed, inlet pressure, balance ratio and

收稿日期: 2023-08-24。 作者简介: 夏永波(2000—),男,硕士生;李志刚(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52176042)。

网络出版时间: 2023-11-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231122.1716.002>

spring specific pressure on the startup characteristics are discussed. The results show that the prediction model can predict effectively the influence of choked flow on seal performance under high pressure difference. The hydrogen-blended ratio has little influence on the static characteristics, such as opening force, leakage and gas film stiffness. The critical opening speed (the opening critical speed increases 8.51%—16.90% when the hydrogen blended ratio increases 30%) of DGS increases with the increase of hydrogen-blended ratios and the opening difficulty increases after hydrogen-blending. In addition, choosing appropriate balance ratio and spring specific pressure is beneficial to the smooth opening of DGS. The research work can provide theoretical reference for the efficient design and reliable operation of DGS at the shaft end of natural gas pipeline compressor after hydrogen-blending.

Keywords: dry gas seal; hydrogen-blended natural gas; choked flow effect; startup characteristics

氢能作为一种高效、可再生的清洁能源,将成为加快能源低碳转型、助力实现“双碳”目标的重要力量^[1]。为降低管道维护及建设成本,借助已有的天然气管道输送天然气和氢气(H_2)的混合气体,是当下大规模、长途输送氢气的最佳方式。目前,国内已动工建设首条总长 258 km 的掺氢高压输气管道^[2]。长输管线压缩机输送的介质为易燃、易爆^[3]的天然气,工作压力高达 8 MPa 左右,掺氢后应避免大量管内混合气体泄漏至外界^[4]。作为管线压缩机的关键部件,干气密封(DGS)产生的泄漏量微小,并且具有安全稳定、低功耗、寿命长的特点,因此开展掺氢对干气密封性能影响的研究对确保掺氢天然气管线压缩机长期可靠运行具有重要意义。

近年来,大量学者对天然气管道掺氢输送技术开展了相关研究。刘方等^[5]测试了掺氢比(体积分数 $\varphi(H_2)$)为 0~10% 的天然气的燃烧特性,发现掺氢比低于 10% 的掺氢天然气能正常用于用气设备。Molnarne 等^[6]发现掺氢比达到 25% 以上时,爆炸极限范围明显扩大。此外,Haeseldonckx 等^[7]发现天然气掺氢后,增加了压缩机的运行转速,进而提高了对压缩机材料的要求。周静^[8]通过模拟掺氢比为 0~30% 压缩机的运行过程,指出较高的掺氢比会造成更大的能量损失,并在出口处引发回流及喘振现象。陈珂等^[9]研究了天然气掺氢比(0~20%)对离心压缩机气动性能和喘振边界的影响,发现掺氢后压缩机稳定工作范围减小。然而,关于掺氢天然气长距离管道输送的标准尚不完备,亟需开展掺氢比对天然气管线压缩机及其轴端干气密封影响的研究。

相关学者考虑实际气体效应,探究了多种工质的物性和组分对干气密封的影响。敖家佩等^[10]结合气体传感器阵列与信息融合技术,提出一种管道

天然气多组分浓度在线监测技术,该技术对天然气组分浓度在线监测精度最高可达 99%。孙雪剑等^[11]针对螺旋槽干气密封,探究了高压下天然气混合实际气体和理想气体的区别。宋鹏云^[12]考虑实际气体效应的影响,分析了氢气实际气体和理想气体在干气密封性能上的差异。沈伟^[13]分析了高压高速超临界 CO_2 (SCO_2) 干气密封的稳态特性,并考虑实际气体效应、惯性效应和实际流态对干气密封的影响规律。宋鹏云等^[14]借助 CFD 软件,研究了实际气体效应对螺旋槽干气密封性能的影响,发现压力低于 4.6 MPa 时,氢气、氮气和二氧化碳与理想气体差异较小。Ma 等^[15]以湿空气为工质,得到了气体在干气密封中凝结的条件和影响因素。袁韬等^[16]以 SCO_2 实际气体为工质,数值分析了 5 种螺旋槽深度和 4 种螺旋角对干气密封静态特性的影响。以上研究主要以二氧化碳、天然气、氢气等为研究对象,有待进一步明确天然气掺氢后对干气密封的影响。

科研人员对干气密封的研究集中在稳态特性和动态特性,关于启动特性的研究尚不充分,并且较少考虑阻塞效应的影响。李双喜等^[17]基于临界气膜厚度的假设,提出以开启临界转速作为分析干气密封启动特性的判据。彭旭东等^[18]基于雷诺方程,建立了 3 种型槽端面密封的动压启动特性分析模型,数值分析了密封压力、平衡比等密封参数对启动特性的影响规律。天然气管线压缩机干气密封工作压力高,密封介质处于阻塞状态,并且流道在密封出口处继续扩张。Johnson 等^[19]最先发现高速泵出式端面密封的阻塞现象。章聪等^[20]对比了阻塞和强制出口压力边界下干气密封的马赫数分布,结果表明两种边界在中上游区域无明显差别,但强制压力边界条件下出口马赫数达到 7.0,与实际相悖。

Thomas 等^[21]和 Bai 等^[22]通过编程的方法,考虑了阻塞效应对干气密封的影响,结果显示当压力超过 2 MPa 时,出口马赫数达到 1.37,会发生阻塞现象。Xu 等^[23]考虑了实际气体效应和阻塞效应的影响,发现阻塞效应会增大开启力,降低泄漏量,并降低密封间隙内的流体温度。由此可见,目前考虑阻塞效应的干气密封启动特性的研究较少,并且主要采用编程方法。

本文提出一种考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型,采用实验数据验证了数值预测模型的可靠性,并选择商业软件 ANSYS CFX,以掺氢天然气为密封工质,分析了 4 种掺氢比(0、10%、20%、30%)和 5 种进口压力(4、6、8、10、12 MPa)对干气密封静态特性的影响规律,以及 4 种掺氢比和 5 种进口压力下,转速、进口压力、平衡比和弹簧比压对干气密封启动特性的影响规律,以期对掺氢条件下天然气管线压缩机轴端干气密封的高效设计和可靠运行提供理论参考。

1 考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型

1.1 数值预测模型

干气密封结构主要由静环、与转子相连的动环和联结部件(波纹管、弹簧等)组成,在动环端面均匀加工若干动压槽。设 r_i 、 r_o 、 r_b 、 r_g 分别为内径、外径、平衡半径、槽根径, h_f 、 h_g 分别为气膜厚度、槽深,干气密封结构如图 1 所示。运行时,高压的密封工质被泵入两密封端面之间,在流经收敛的间隙被压缩产生流体动压力,迫使静环和动环分离,并形成一层极薄的气膜(厚度为 2.5~10 μm),从而阻滞了工质向低压侧的流动,起到极好的密封效果。

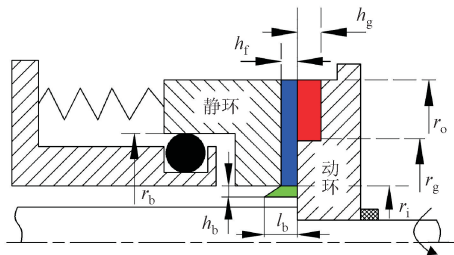


图 1 干气密封结构

Fig. 1 The structure of dry gas seal

针对高速、高压差下干气密封间隙内流体的流动,一旦流体速度增加至当地声速,会在密封出口产生阻塞现象,并通过密封出口与外界环境的压力差

克服流动摩擦。图 2 给出了一种考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型(沿轴向放大 1 000 倍),在主密封出口处增加出口扩张段,以预测主密封出口流道扩张对密封性能的影响,密封工质由坝区进入出口扩张段后继续膨胀,压力逐渐降低至外界环境压力。根据转轴和密封环内径之间的可用径向距离,出口扩张段的径向长度(h_b)取主密封径向长度的 2.3%~4.6%^[24];为避免工质在出口扩张段内剧烈膨胀,轴向宽度(l_b)取气膜厚度的 2 倍。

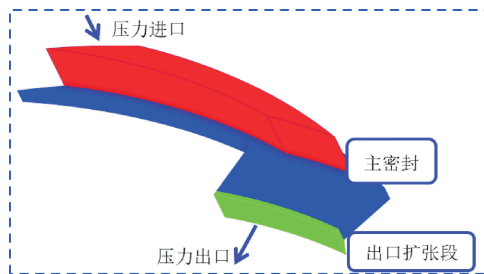


图 2 数值预测模型

Fig. 2 Numerical predictive model

1.2 流动状态判据

Brunetiere 等^[25]将流动系数(k)作为判断密封端面气膜流动状态的依据。流动系数(k)的定义为

$$k = \sqrt{\left(\frac{Re_c}{1\,600}\right)^2 + \left(\frac{Re_p}{2\,300}\right)^2} \quad (1)$$

式中: Re_c 和 Re_p 为周向 Couette 流动雷诺数和径向 Poiseuille 流动雷诺数,定义式分别为

$$Re_c = \frac{\rho \omega r h}{\mu} \quad (2)$$

$$Re_p = \frac{\rho V_r h}{\mu} \quad (3)$$

其中, ρ 为气体的密度, ω 为转速, r 为极径, h 为气膜厚度, V_r 为径向流速, μ 为气体黏度。

当流动系数 $k > 1$ 时,流动状态为湍流;当流动系数 $k < 0.5625$ 时,流动状态为层流;当流动系数 $0.5625 \leq k \leq 1$ 时,流动状态为过渡流。

1.3 网格无关性验证

为了验证数值预测模型的准确性,本文选取 Gabriel^[26]以空气为密封工质的干气密封实验数据,计算模型和边界条件见图 3。针对流动系数最小的工况,由式(2)(3)得到 $Re_c = 1\,612$ 、 $Re_p = 1\,532$,流动系数 $k = 1.21 > 1$,因此所计算的工况均处于湍流状态,并采用 SST 湍流模型^[16]分析干气密封的流动特性。

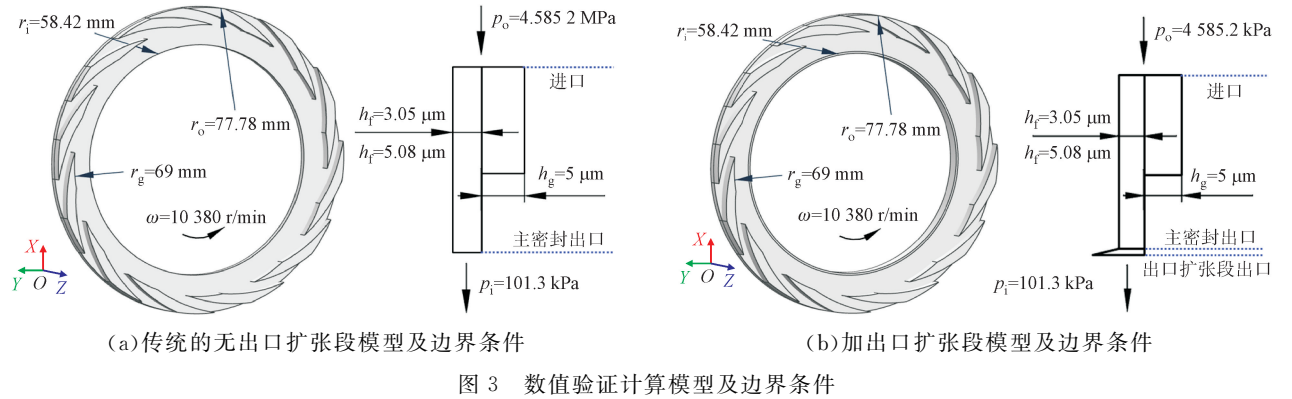


Fig. 3 Computational models and boundary conditions for numerical validation

采用 22 万、56 万、88 万、136 万和 198 万共 5 套网格节点数量进行网格无关性验证,与气膜厚度为 3.05 μm 时不同网格节点数量的开启力和泄漏量进行比较,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,当网格节点数量由 136 万增至 198 万后,开启力变化幅度小于 0.1%,泄漏量变化幅度小于 0.5%,满足网格无关性要求。综合考虑计算资源消耗和结果精度,本文计算采用 136 万网格节点数量。

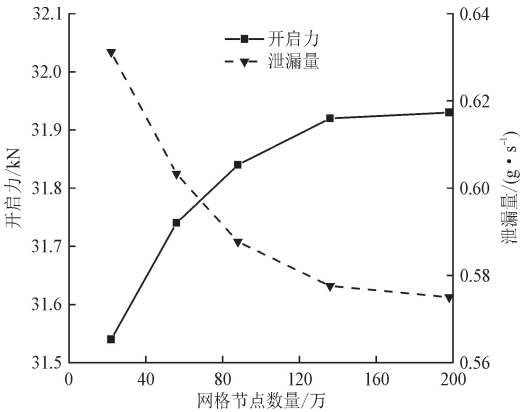


图 4 网格无关性验证 ($h_i=3.05\ \mu\text{m}$)

Fig. 4 Verification of grid independence ($h_i=3.05\ \mu\text{m}$)

1.4 模型验证

为了对所提出的考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型进行考核验证,采用传统的无出口扩张段模型、加出口扩张段即考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型计算两种气膜厚度(3.05、5.08 μm)

下的压力分布和开启力,并与文献[26]的实验结果(气膜厚度为 3.05、5.08 时,槽根最大压力分别为 4.83、4.13 MPa,开启力分别为 33.17、29.57 kN)进行比较。图 5 给出了两种气膜厚度下,沿径向方向的周向平均压力分布曲线。可以看出,在两种气膜厚度下,相较于传统的无出口扩张段模型,加出口扩张段模型的计算结果和实验值更吻合,并且阻塞效应对密封压力的影响主要体现在坝区。表 1 给出了两种气膜厚度的槽根处压力峰值和开启力及其与实验值的误差。可以看出,在两种气膜厚度下,加出口扩张段模型的计算结果与实验值更接近,槽根最大压力误差为 1.94%,开启力最大误差为 3.77%。

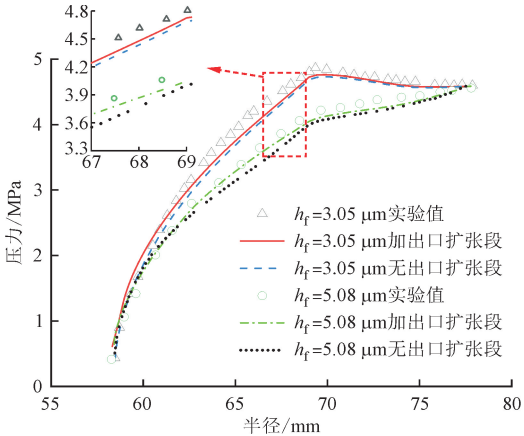


图 5 两种气膜厚度的压力分布对比

Fig. 5 Comparison of pressure distribution of two gas film thicknesses

表 1 模型验证结果

Table 1 Results of model verification

气膜厚度/ μm	位置	槽根最大压力/MPa	压力误差/%	开启力/kN	开启力误差/%
3.05	无出口扩张段	4.73	2.07	31.45	5.19
3.05	出口扩张段	4.77	1.24	31.92	3.77
5.08	无出口扩张段	3.99	3.39	28.46	3.75
5.08	出口扩张段	4.05	1.94	28.80	2.60

图 6 为传统的无出口扩张段模型和加出口扩张段模型所得到的阻塞工况下干气密封端面气体的马赫数分布。可以看出,在两种气膜厚度下,传统的无出口扩张段模型密封出口施加强制压力边界条件,出口马赫数分别达到 1.33 和 1.82,产生了阻塞现象,并且气膜厚度为 $5.08\text{ }\mu\text{m}$ 时,密封出口的马赫数更大,阻塞现象更明显。加出口扩张段即考虑了阻塞效应,两种气膜厚度下主密封出口的马赫数分别达到 0.5 和 0.8。主密封出口不再是传统的强制压力边界条件,而是在出口扩张段出口施加压力边界条件,工质在主密封出口的压力梯度减小,马赫数增幅也减小,保证了主密封出口的流速低于当地声速。此外,主密封出口压力高于外界环境压力,工质能够在出口扩张段内进一步膨胀,压力逐渐降低至外界环境压力,考虑了主密封出口流道扩张对密封性能的影响,在出口扩张段马赫数分别增加至 0.73 和 1.3,并且在出口扩张段内的马赫数增幅取决于主密封出口和外界环境的压力差。因此,相较于传统的无出口扩张段模型,本文提出的考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型能够预测阻塞效应对密封工质流动的影响,更符合实际流动。

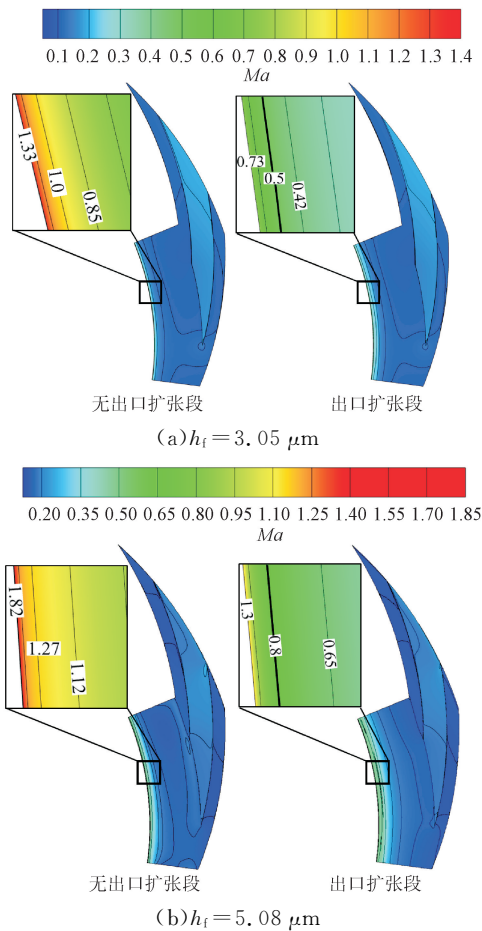


图 6 两种气膜厚度下的马赫数分布
Fig. 6 Mach number distribution of two gas film thicknesses

2 天然气管线压缩机轴端干气密封结构

2.1 干气密封几何结构

基于文献[27]中 GE PCL800 机型天然气管线压缩机一级干气密封,建立了图 7 所示的考虑阻塞效应的干气密封性能数值预测模型(沿轴向放大 1 000 倍)。表 2 列出了 PCL800 机型压缩机配置的干气密封端面槽型参数。其中出口扩张段的径向长度取为主密封径向长度的 4.0%,出口扩张段的轴向宽度取为气膜厚度的 2 倍。干气密封在动环端面上沿周向均匀开有 24 个动压槽,因此计算域选取整周流体域的 1/24,周向两个侧面采用旋转周期边界。干气密封的动压槽采用对数螺旋槽,螺旋槽型线为

$$r = r_g e^{\theta \tan \alpha} \quad (4)$$

式中: r 为极径; r_g 为螺旋槽根径; θ 为极角; α 为螺旋角。

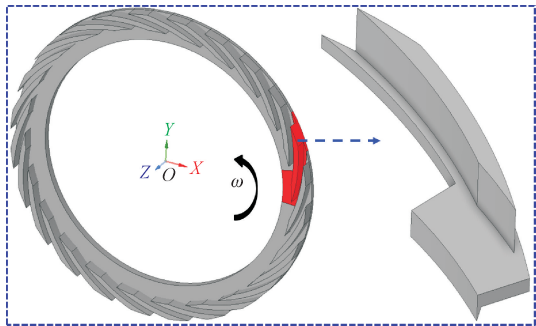


图 7 干气密封三维计算模型
Fig. 7 Three-dimensional calculation model of DGS

表 2 干气密封端面几何参数^[27]
Table 2 Geometry parameters of DGS^[27]

参数	数值
内径 r_i/mm	105.5
外径 r_o/mm	130
螺旋槽根径 r_g/mm	117.015
槽堰比 γ	0.50
槽坝比 ξ	0.53
槽数 n	24
槽深 $h_g/\mu\text{m}$	10
气膜厚度 $h_f/\mu\text{m}$	2.5
螺旋角 $\alpha/(\text{ }^\circ)$	15

2.2 网格划分及边界条件设置

如图 8 所示,采用商业软件 ICEM CFD 对干气密封计算域生成三维多块结构化网格,并在主密封进口、动压槽根部和出口扩张段的出口采用网格局部加密方式以准确捕捉密封工质的流动特性,所生成的六面体结构化网格沿轴向设置 22~30 个节点。

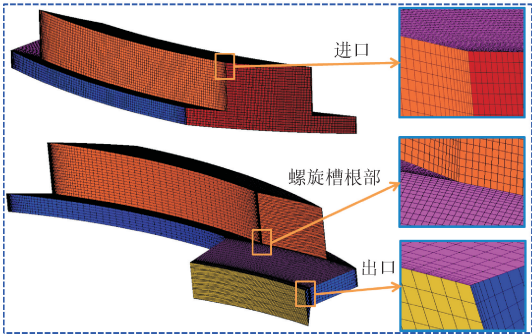


图 8 干气密封三维计算网格

Fig. 8 Three-dimensional calculation grid of DGS

针对本文流动系数最小的工况,由式(2)(3)得到 $Re_c = 341$ 、 $Re_p = 1787$,流动系数 $k = 0.81$,因此所计算的工况处于过渡流或湍流状态。本文采用 SST 湍流模型进行干气密封特性分析。

干气密封的边界条件设置如图 9 所示。计算域整体设置为旋转域,沿周向两侧设置为旋转周期交界面,进口设置为压力进口边界条件,出口设置为压力出口边界条件,与静环接触的壁面设置为静止壁面,与动环接触的壁面设置为旋转壁面。表 3 给出了干气密封的运行条件,其中干气密封的进口压力(表压)在 4~12 MPa(若无特别指出,进口压力均为 8 MPa)。天然气的气体组分见表 4,掺入氢气的体积分数在 0~30% 范围内,采用 RK 实际气体模型预测密封工质的实际气体行为。

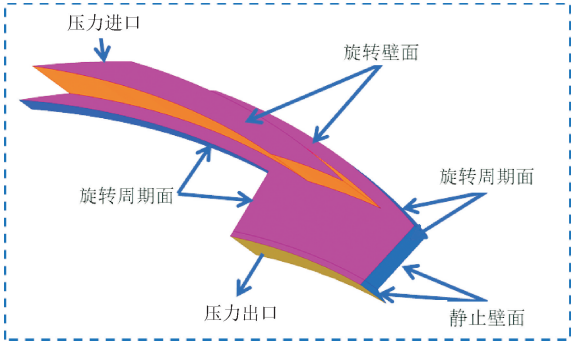


图 9 干气密封边界条件设置

Fig. 9 Boundary conditions of DGS

表 3 干气密封运行条件

Table 3 Operating conditions of DGS

参数	数值或属性
进口压力(表压) p_o /MPa	4~12
出口压力(表压) p_i /MPa	0.15
温度 T_o /℃	70
转速 n /(r · min ⁻¹)	6 405
密封工质	天然气(掺 H ₂ 体积分数为 0~30%)

表 4 天然气气体组分^[28]

Table 4 The gas composition of natural gas^[28]

体积分数/%				
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	CO ₂
97.058	0.152	0.010	0.706	2.074

在得到稳态计算结果后,可以得到干气密封的泄漏量。泄漏量(Q)是评价干气密封性能是否满足工程要求的重要参数之一,定义式为

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} \rho V_r r d\theta dr \quad (5)$$

开启力(F_o)是决定干气密封能否顺利开启和能否稳定运行的重要参数之一,定义式为

$$F_o = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_o} p r d\theta dr \quad (6)$$

式中: p 为压力。

静态气膜刚度(K_s)表征了干气密封在特定气膜厚度下运行时的稳定性,定义式为

$$K_s = - \frac{\partial F_o}{\partial h_i} \quad (7)$$

2.3 开启临界工况

在实际应用中,由于密封端面表面粗糙度、端面平衡度误差等因素的影响,密封端面形成很多大小不一的微凸体。在干气密封启动过程前期,与转子相连的动环转速较低,干气密封动压效应较弱,所产生的开启力小于闭合力,密封端面的微凸体相互接触磨损,密封副处于混合润滑状态。随着运行转速不断增大,动压效应逐渐增强,当开启力增大至与闭合力相平衡时,干气密封处于开启临界状态,密封端面上相互接触的微凸体由接触状态脱离至非接触状态,密封副转变为由流体膜完全隔开的全膜润滑状态。随着转速继续提升,动压效果不断加强,气膜厚度逐渐增大,始终保持开启力与闭合力相等,以维持干气密封稳定运行。干气密封处于开启临界状态时,密封端面间的开启力可看作与某一微小膜厚产生的开启力相当。因此,开启临界膜厚可作为判断密封端面是否开启的依据:当气膜厚度小于开启临界膜厚时,密封端面相互接触,处于闭合状态;反之,密封端面处于开启状态。开启临界膜厚(h_c)取密封副表面粗糙度标准差的 3 倍^[29],计算公式为

$$h_c = 3\sigma_s = 3 \times 1.25 \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2} \quad (8)$$

式中: σ_s 为密封副表面粗糙度标准差; R_{a1} 、 R_{a2} 分别为静环、动环表面粗糙度。

动环采用无压烧结碳化硅材料,静环采用表面喷

有耐磨涂层的碳化硅材料^[27],表 5 给出了干气密封的结构参数。将静、动环表面粗糙度 R_{a1} 、 R_{a2} ^[17,30] 代入式(8),可计算出开启临界膜厚 $h_c = 1.06\ \mu\text{m}$ 。

表 5 干气密封结构参数

Table 5 Structural parameters of DGS	
参数	数值
静环表面粗糙度 $R_{a1}/\mu\text{m}$	0.2
动环表面粗糙度 $R_{a2}/\mu\text{m}$	0.2
弹簧力/N	13.8
弹簧数量	12
平衡比 B	0.85

在干气密封达到开启临界状态时,密封端面相互脱离,接触力为 0。在开启临界工况下,气膜厚度为开启临界膜厚,开启力和闭合力平衡时对应的转速为开启临界转速 (n_c),用来表征干气密封动压开启的难易程度。闭合力(F_c) 定义为流体压力和弹簧件沿轴向作用在密封副的载荷之和,表达式为

$$F_c = \pi(r_o^2 - r_i^2)[(1 - B)p_i + Bp_o + p_{sp}] \quad (9)$$

式中: p_o 、 p_i 分别为进、出口压力; p_{sp} 为弹簧比压。

3 结果与分析

3.1 掺氢天然气干气密封静态特性

3.1.1 掺氢天然气密度和黏度随压力的变化

为研究压力变化对掺氢天然气物性的影响规律,图 10 给出了 70 ℃ 条件下掺氢天然气的密度和黏度随压力的变化曲线,掺氢天然气的物性数据来自物性数据库 NIST REFPROP。从图 10 可以看出,随着压力的增加,掺氢天然气的密度和黏度均增加,并且掺氢比越大,偏离纯天然气工况的程度越大。在相同压力下,由于天然气的相对分子质量大于氢气,因此掺氢后密度和黏度会下降,且掺氢比越高,下降程度越大。

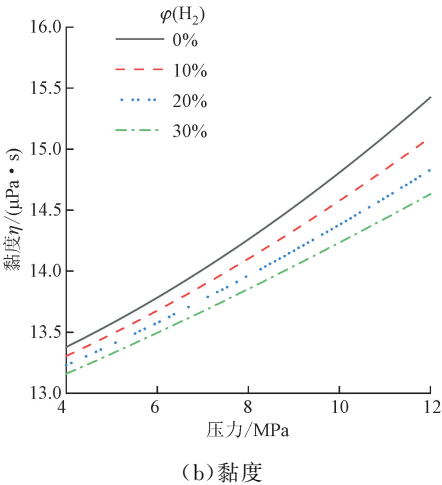
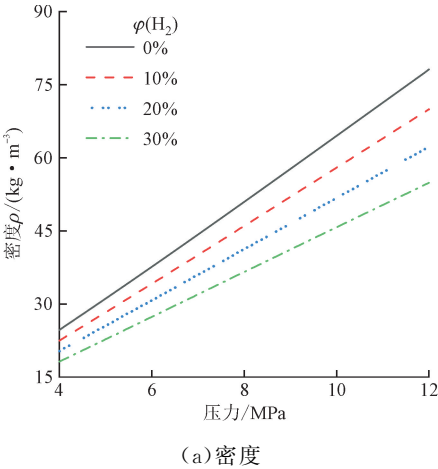
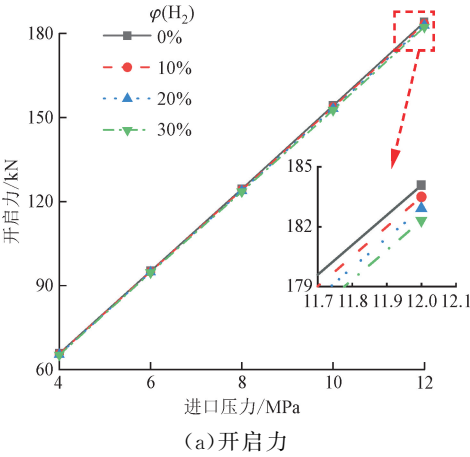


图 10 掺氢天然气密度和黏度随压力的变化
Fig. 10 Variation of density and viscosity of hydrogen-blended natural gas with pressure

3.1.2 开启力和泄漏量随进口压力的变化

开启力和泄漏量随进口压力的变化如图 11 所示。可以看出,4 种掺氢比工况下开启力和泄漏量都随着进口压力的增加而增加。当进口压力增加时,密封端面的膜压更高,开启力相应增加,泵入密封内的气体量更多,导致泄漏量增加,并且掺氢比越高,开启力和泄漏量偏离纯天然气工况的程度越大。在相同的进口压力下,掺氢降低了掺氢天然气的密度,泵入的气体量下降,黏度下降减弱了剪切作用,动压效应减小,共同导致干气密封内的膜压更低,开启力相应下降,但掺氢比对开启力的影响程度较小,开启力仅降低了 0.80%~0.96%。此外,掺氢天然气黏度的下降减小了密封端面的气体流动阻力,增加了泵入的气体量,但掺氢后混合气体密度的下降直接减小了工质流量,且密度的影响占主导作用,密度和黏度的共同作用导致天然气掺氢后泄漏量降低了 19.03%~24.87%。



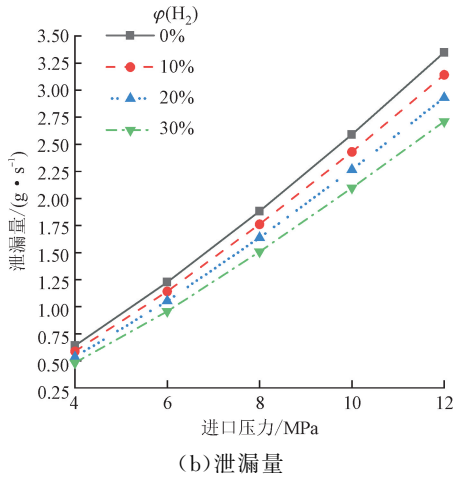
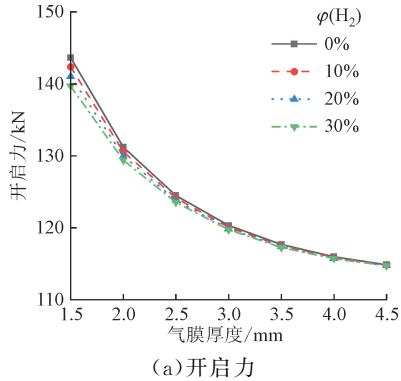


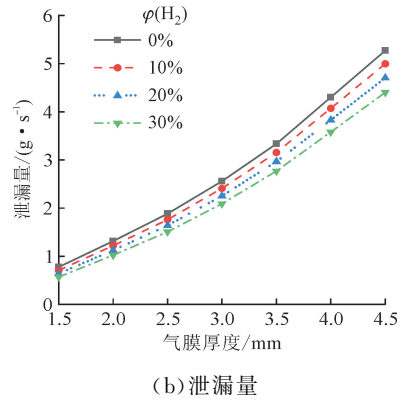
图 11 开启力和泄漏量随进口压力的变化
Fig. 11 Variation of opening force and leakage rate with inlet pressure

3.1.3 开启力、泄漏量和气膜刚度随气膜厚度的变化

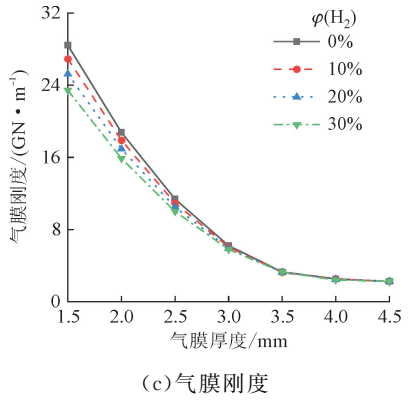
掺氢比对于干气密封开启力、泄漏量和气膜刚度的影响随气膜厚度的变化规律如图 12 和图 13 所示。由图 12 可知,在进口压力 8 MPa 下,随着气膜厚度由 1.5 μm 增加至 4.5 μm ,开启力逐渐下降,泄漏量增加,气膜刚度下降。在转速一定时,气膜厚度的增加会降低干气密封的静压效应,使膜压较低,进而导致开启力下降;气膜厚度的增加使进气有效面积增大,导致气体量增大,泄漏量增加;过大的气膜厚度会减弱工质的剪切作用,导致静态气膜刚度下降。此外,掺氢后混合气体的密度和黏度下降,共同导致干气密封内膜压降低,开启力相应下降;掺氢后混合气体密度的下降直接减小了泵入干气密封的工质流量,且密度对泄漏量的影响占主导作用,密度和黏度的共同作用导致泄漏量降低;掺氢后气体黏度的下降减弱了剪切作用,使气膜刚度下降。由图 13 可知,与进口压力 8 MPa 相比,压力为 12 MPa 时开启力、泄漏量和气膜刚度更大,但掺氢比对于干气密封开启力、泄漏量和气膜刚度的影响规律一致。掺氢比导致开启力下降了 0.13%~2.74%,泄漏量下降了 16.51%~26.72%,气膜刚度下降了 13.19%~17.52%。可见,掺氢比对于干气密封静态特性影响较小。



(a) 开启力

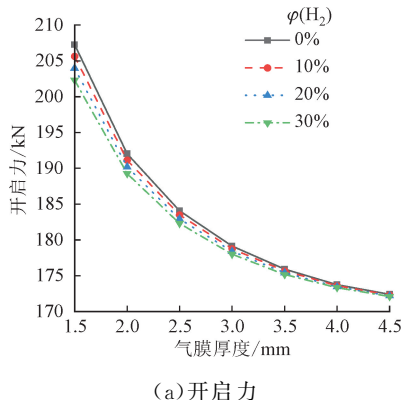


(b) 泄漏量

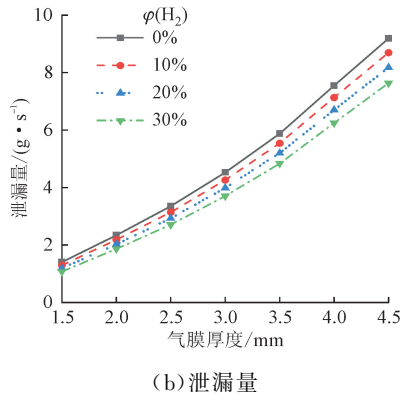


(c) 气膜刚度

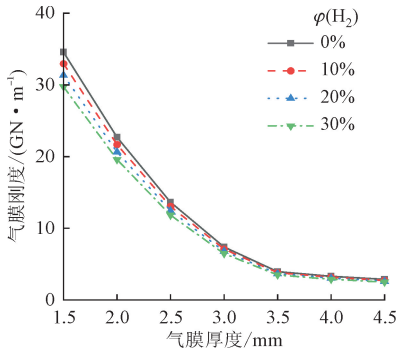
图 12 $p_0=8\text{ MPa}$ 时开启力、泄漏量和气膜刚度随气膜厚度的变化
Fig. 12 Variation of opening force, leakage rate and gas film stiffness with gas film thickness when $p_0=8\text{ MPa}$



(a) 开启力



(b) 泄漏量



(c)气膜刚度

图 13 $p_o=12$ MPa 时开启力、泄漏量和气膜刚度随气膜厚度的变化

Fig. 13 Variation of opening force, leakage rate and gas film stiffness with gas film thickness when $p_o=12$ MPa

为了更直观地观测结果,图 14 给出了两种进口压力下密封端面的气膜压力分布。由于动压槽的动压效应,气膜压力在动压槽根部达到最大,在坝区迅速下降,并在出口扩张段出口处压力梯度最大。在 8 MPa 和 12 MPa 进口压力下,主密封出口压力分别降至 1.0 MPa 和 1.5 MPa,考虑阻塞效应后,12 MPa 进口压力下的主密封出口压力更高。图 15 给出了两种进口压力下密封端面的马赫数分布。从图中可知,在 8 MPa 和 12 MPa 进口压力下,主密封出口马赫数分别达到 0.47 和 0.7,并且工质能够在出口扩张段内继续膨胀,压力逐渐降低至外界环境压力,马赫数进一步增加。相较于 8 MPa 进口压力,12 MPa 压力下密封端面内的马赫数更高,阻塞现象更明显,在出口扩张段出口处速度梯度最大,马赫数达到最高。

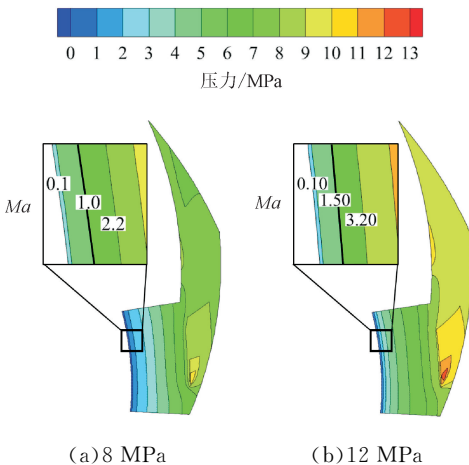
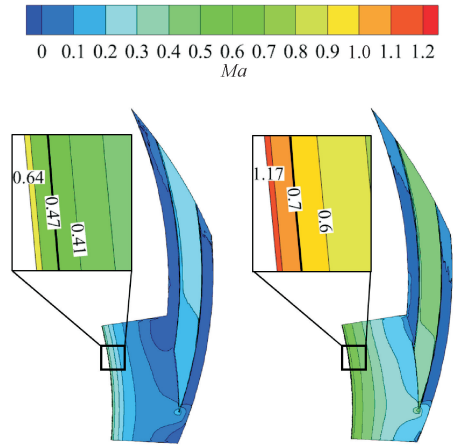


图 14 两种进口压力下的压力分布

Fig. 14 Pressure distribution of two inlet pressures



(a)8 MPa

(b)12 MPa

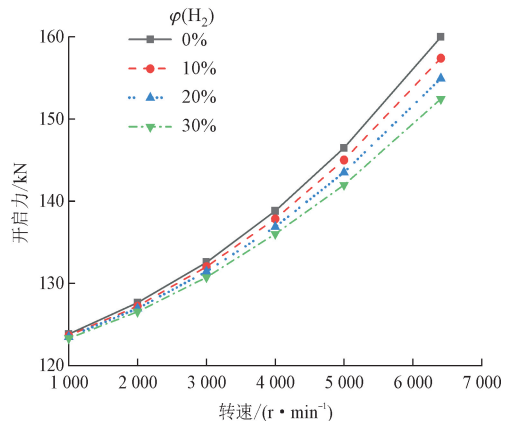
图 15 两种进口压力下的马赫数分布

Fig. 15 Mach number distribution of two inlet pressures

3.2 掺氢天然气干气密封启动特性

3.2.1 开启力和泄漏量随转速的变化

在开启临界工况下,干气密封的平衡膜厚为开启临界膜厚,开启力和泄漏量随转速的变化规律如图 16 所示。由图可知,在转速逐渐增加至工作转速 6 405 r/min 的过程中,开启力和泄漏量持续增加,这是由于转速的增加直接增强了动压效应,单位时间泵入密封的气体量增大,使气膜压力增大,导致开启力和泄漏量增加。另外,在相同转速下,掺氢比越高的工况气膜压力更低,开启力低于纯天然气工况。掺氢天然气黏度的下降导致气体流动阻力减小,增加了泵入的气体量;但掺氢后混合气体的密度下降,在相同的流通面积下,直接导致泵入干气密封内的工质流量下降,且密度的影响占主导作用,密度和黏度的共同作用导致天然气掺氢后泄漏量降低。



(a)开启力

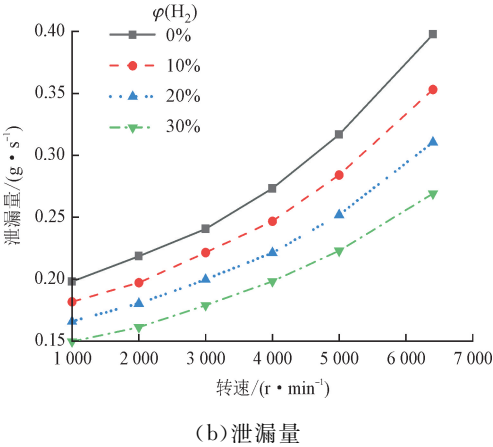


图 16 开启力和泄漏量随转速的变化

Fig. 16 Variation of opening force and leakage rate with rotating speed

3.2.2 开启临界转速随进口压力的变化

开启临界转速随进口压力的变化如图 17 所示。在 4 种掺氢比工况下，开启临界转速随进口压力的增加逐渐减小。这是因为随进口压力增加，静压效应较强，静压开启力增幅大于闭合力增幅，所需的动压开启力下降，开启临界转速相应下降。此外，掺氢条件下的开启临界转速高于相同进口压力下纯天然气工况，掺氢后导致开启临界转速增加 8.51%~16.90%，并且在高压下掺氢比对开启临界转速的影响更大。这是由于在相同压力下，掺氢比越高，气膜压力越低，开启力越小，开启时所需转速越高。可见，掺氢后增大了干气密封的开启难度。

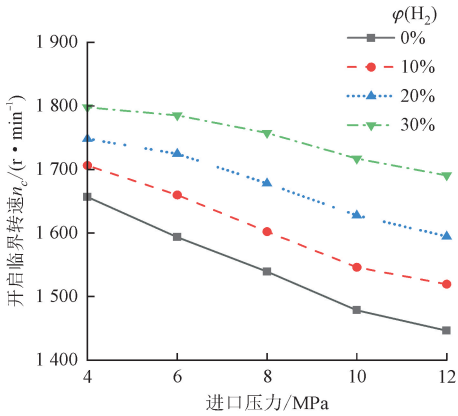


图 17 开启临界转速随进口压力的变化

Fig. 17 Variation of opening critical speed with inlet pressure

3.2.3 闭合力 and 开启临界转速随平衡比的变化

平衡比 B (又称载荷系数) 定义为密封载荷的有效作用面积与密封端面面积之比，表达式为

$$B = (r_o^2 - r_b^2) / (r_o^2 - r_i^2) \quad (10)$$

闭合力 and 开启临界转速随平衡比的变化如图 18 所示。可以看出，闭合力随着平衡比的增加线性增加，是由于在保证内外径不变的前提下，减小平衡半径会增大密封载荷的有效作用面积，使闭合力相应增加。另外，随着平衡比的增加，开启临界转速呈增加趋势，因为增加平衡比对静压开启力没有影响，只能通过增加转速，进而增加动压开启力以平衡增加的闭合力，而且掺氢比越高，开启力越小，所需的开启临界转速越大。因此，设计合适的平衡比，有利于减小干气密封的开启临界转速，从而降低开启难度。

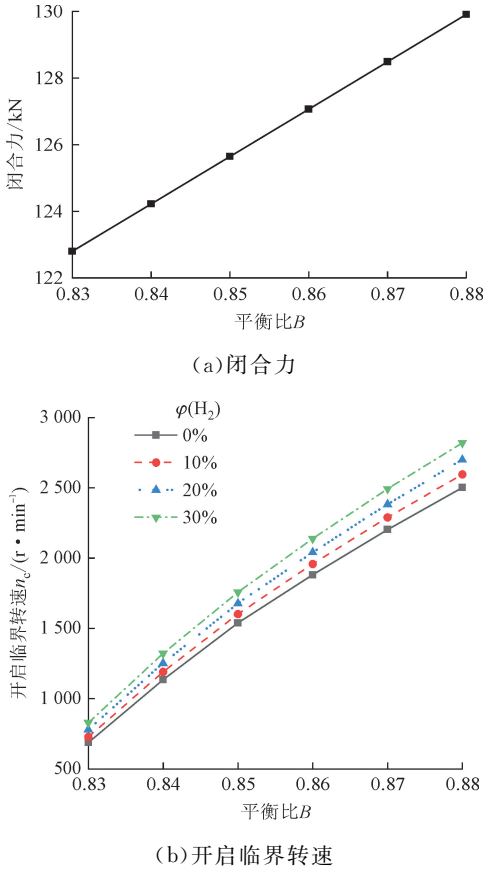
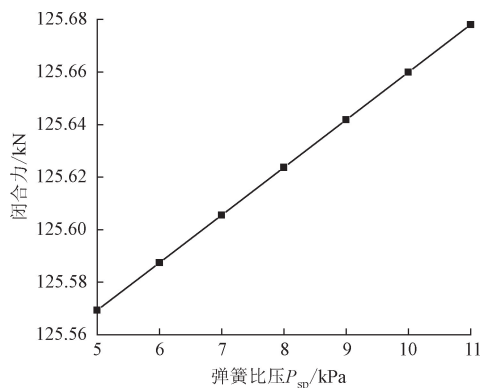


图 18 闭合力 and 开启临界转速随平衡比的变化

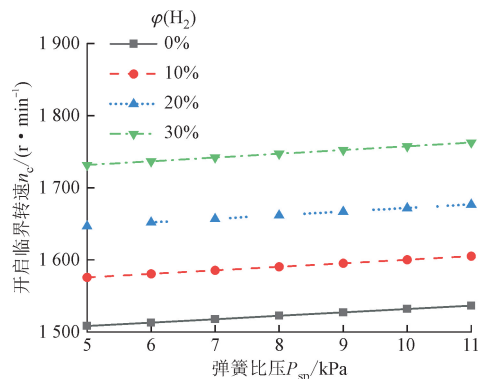
Fig. 18 Variation of closing force and opening critical speed with balance ratio

3.2.4 闭合力 and 开启临界转速随弹簧比压的变化

图 19 给出了闭合力 and 开启临界转速随弹簧比压的变化规律。弹簧比压直接体现弹簧作用在静环上的外载荷大小，在流体压力和密封尺寸不变时，闭合力随着弹簧比压的增加线性增加。由于弹簧比压不能改变静压开启力，因此增加弹簧比压时，只能通过增加动压开启力以平衡闭合力，而且掺氢比越高，所需的开启临界转速越大。因此，设计合适的弹簧比压，有助于保证干气密封顺利开启。



(a) 闭合力



(b) 开启临界转速

图 19 闭合力和开启临界转速随弹簧比压的变化

Fig. 19 Variation of closing force and opening critical speed with spring specific pressure

4 结 论

(1) 本文提出的干气密封性能数值预测模型能够可靠预测高压差下干气密封出口阻塞效应。高压差下考虑阻塞效应后,主密封出口的压力增加,开启力相应增大。

(2) 随着进口压力增加,开启力和泄漏量增加,阻塞现象更明显。掺氢比对干气密封开启力、泄漏量和气膜刚度等密封静态特性影响较小。

(3) 当转速增加至一定值时,密封端面才能相互脱离;干气密封开启临界转速随掺氢比的增加而增大(掺氢比增加 30% 时,开启临界转速可增大 8.51%~16.90%),因此天然气掺氢增大了干气密封的开启难度;此外,需设计合适的平衡比和弹簧比压以保证干气密封顺利开启。

参考文献:

[1] 司起步, 邱硕, 毕胜山, 等. 碳强度和水资源约束下 2030 年中国西北五省能源供给规划研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 31-42.

SI Qibu, QIU Shuo, BI Shengshan, et al. Energy supply planning of the five northwest provinces in 2030 under carbon intensity and water resource constraints [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 31-42.

[2] 氢云链. 全长 258 km! 国内首条掺氢高压输气管道工程开工 [J]. 上海节能, 2023(3): 361.

QING Yunlian. Total length 258 km! The first hydrogen-doped high-pressure gas pipeline project in China started [J]. Shanghai Energy Saving, 2023(3): 361.

[3] 耿卅捷, 潘禾吉田, 杨欢, 等. 燃气轮机天然气掺氢燃烧及排放特性数值模拟研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(12): 1-11.

GENG Sajie, PAN Hejitian, YANG Huan, et al. Numerical study on influence of H2 blending on combustion and emission characteristics of gas turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(12): 1-11.

[4] ZHU Jianlu, PAN Jun, ZHANG Yixiang, et al. Leakage and diffusion behavior of a buried pipeline of hydrogen-blended natural gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(30): 11592-11610.

[5] 刘方, 杨宏伟, 韩银杉, 等. 天然气掺氢比对终端用气设备使用性能的影响 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(2): 174-178.

LIU Fang, YANG Hongwei, HAN Yinshan, et al. Effect of hydrogen-blending ratio of natural gas on performance of terminal gas equipment [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(2): 174-178.

[6] MOLNARNE M, SCHROEDER V. Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 1-5.

[7] HAESELDONCKX D, D'HAESELEER W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10/11): 1381-1386.

[8] 周静. 天然气管线掺混氢气的特性分析 [D]. 抚顺: 辽宁石油化工大学, 2020.

[9] 陈珂, 王硕琨, 杜文海, 等. 天然气管道掺氢输送对离心压缩机气动性能的影响 [J]. 油气储运, 2023, 42(4): 398-406.

CHEN Ke, WANG Shuokun, DU Wenhai, et al. Influence of hydrogen-blended natural gas via pipeline transportation on aerodynamic performance of centrifugal compressor [J]. Oil & Gas Storage and Transport-

- tation, 2023, 42(4): 398-406.
- [10] 敖家佩, 邱海峰, 贾唐浩, 等. 管道天然气多组分浓度在线监测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 170-176.
- AO Jiapei, QIU Haifeng, JIA Tanghao, et al. A real-time monitoring method of components and concentrations of pipeline natural gas [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 170-176.
- [11] 孙雪剑, 宋鹏云. 输送天然气离心式压缩机干气密封性能分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(1): 55-62.
- SUN Xuejian, SONG Pengyun. Analysis on performance of dry gas seal in centrifugal compressor for transporting natural gas [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1): 55-62.
- [12] 宋鹏云. 氢气实际气体对螺旋槽干气密封性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(8): 1-3.
- SONG Pengyun. Effects of the real-gas characteristics of the hydrogen on the performance of the spiral groove dry gas seal [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(8): 1-3.
- [13] 沈伟. 高参数干气密封的惯性与湍流效应影响分析与型槽设计 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [14] 宋鹏云, 产文, 毛文元, 等. 实际气体效应对螺旋槽干气密封性能影响的数值分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 874-881.
- SONG Pengyun, CHAN Wen, MAO Wenyuan, et al. Numerical analysis on effect of real gas on spiral groove dry gas seal performance [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(10): 874-881.
- [15] MA Ailin, SONG Pengyun. The liquid condensation conditions in the dry gas seal system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 752-753: 199-204.
- [16] 袁韬, 李志刚, 李军, 等. 螺旋槽结构对 SCO_2 压气机轴端干气密封性能影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11): 37-45.
- YUAN Tao, LI Zhigang, LI Jun, et al. Effect of spiral structure on the shaft end dry gas seal performance for supercritical carbon dioxide compressors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(11): 37-45.
- [17] 李双喜, 宋文博, 张秋翔, 等. 干式气体端面密封的开启特性 [J]. 化工学报, 2011, 62(3): 766-772.
- LI Shuangxi, SONG Wenbo, ZHANG Qiuxiang, et al. Opening characteristics of dry gas seal [J]. CIESC Journal, 2011, 62(3): 766-772.
- [18] 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): 326-333.
- 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): 326-333.
- [19] JOHNSON R L, LUDWIG L P, ZUK J. Compressible flow across shaft face seals [C]//Fifth International Conference on Fluid Sealing. Coventry, England: BHRA, 1971: H6.
- [20] 章聪, 彭旭东, 江锦波, 等. 实际气体、阻塞和湍流效应对超临界 CO_2 干气密封性能的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7563-7573.
- ZHANG Cong, PENG Xudong, JIANG Jinbo, et al. Influence of real gas, choked flow, and turbulence effect on performance of supercritical CO_2 dry gas seals [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7563-7573.
- [21] THOMAS S, BRUNETIÈRE N, TOURNERIE B. Numerical modelling of high pressure gas face seals [J]. Journal of Tribology, 2006, 128(2): 396-405.
- [22] BAI Shaoxian, MA Chunhong, PENG Xudong, et al. Thermoelastohydrodynamic behavior of gas spiral groove face seals operating at high pressure and speed [J]. Journal of Tribology, 2015, 137(2): 021502.
- [23] XU Hengjie, SONG Pengyun, MAO Wenyuan, et al. The performance of spiral groove dry gas seal under choked flow condition considering the real gas effect [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part J Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(4): 554-566.
- [24] OJILE J O. Numerical modelling of bidirectional dry gas face seals [D]. Cranfield: Cranfield University, 2009.
- [25] BRUNETIÈRE N, TOURNERIE B, FRÈNE J. Influence of fluid flow regime on performances of non-contacting liquid face seals [J]. Journal of Tribology, 2002, 124(3): 515-523.
- [26] GABRIEL R P. Fundamentals of spiral groove non-contacting face seals [J]. Lubrication Engineering, 1994, 50(3): 215-224.
- [27] 沈登海, 刘小明, 王泽平, 等. 管道天然气离心压缩机干气密封国产化研制 [J]. 石油化工设备技术, 2020, 41(2): 39-46.
- SHEN Denghai, LIU Xiaoming, WANG Zeping, et al. Domestic development of dry gas seal for pipeline

- natural gas centrifugal compressor [J]. Petrochemical Equipment Technology, 2020, 41(2): 39-46.
- [28] 王鹏, 杨放, 孙东亮, 等. 基于预估校正思想的离心压缩机性能换算 [J]. 科学通报, 2018, 63(5): 571-578.
- WANG Peng, YANG Fang, SUN Dongliang, et al. Performance conversion of centrifugal compressors based on predictor corrector method [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(5): 571-578.
- [29] 顾永泉. 机械端面密封的密封面顶开现象和升举特性 [J]. 石油化工设备, 2003, 32(4): 26-29.
- GU Yongquan. Just-lift-off phenomena and lift-off characteristics of mechanical face seals [J]. Petrochemical Equipment, 2003, 32(4): 26-29.
- [30] 彭旭东, 李纪云, 盛颂恩, 等. 表面粗糙度对螺旋槽干式气体端面密封性能预测与结构优化的影响 [J]. 摩擦学学报, 2007, 27(6): 567-572.
- PENG Xudong, LI Jiyun, SHENG Songen, et al. Effect of surface roughness on performance prediction and geometric optimization of a spiral-groove face seal [J]. Tribology, 2007, 27(6): 567-572.
- (编辑 亢列梅)