

研究论文

干式气体端面密封的开启特性

李双喜, 宋文博, 张秋翔, 蔡纪宁, 高金吉

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 鉴于干式气体密封启动过程的重要工程意义, 基于稳态分析方法研究了该种密封的开启特性。根据开启临界气膜厚度的假设, 提出了用于分析干式气体密封开启性能的判据——开启临界转速。研究了启动过程中, 气膜厚度、开启力、气膜刚度、泄漏量、摩擦扭矩和摩擦功耗等密封性能参数的变化规律。分析了操作参数和端面结构参数对开启性能的影响。研究表明, 启动过程中, 密封的特性参数在开启临界气膜厚度附近快速变化; 密封操作压力对开启临界转速有较大影响, 通过改变端面结构参数可以改变密封的开启临界转速, 改变开启性能。提供了一种用于分析密封开启性能的研究方法, 可辅助密封端面结构设计和指导启动和停车过程操作。

关键词: 干气密封; 开启过程; 开启性能判据

中图分类号: TH 136

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 03-0766-07

Opening characteristics of dry gas seal

LI Shuangxi, SONG Wenbo, ZHANG Qiuxiang, CAI Jining, Gao Jinji

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The behavior of the start up process of dry gas seal (DGS), which has great significance in engineering was studied based on the steady state analysis. With the hypothesis of critical gas film thickness, a criterion for expressing the opening behavior of DGS, namely the critical opening rotational speed (CORS), was proposed. Changes of the sealing parameters in the opening process, such as gas film thickness, opening force, film stiffness, leakage rate, frictional torque and frictional power consumption were investigated. Influences of operating and structural parameters on the opening behavior of DGS were analyzed. The results indicated that the sealing parameters changed remarkably near the opening critical film thickness in the start up process. CORS was greatly affected by sealing operating pressure, but it could be changed through structural parameter adjustment. By providing a method for analyzing the opening behavior of DGS, this work is helpful for the structural design of seal end faces and the guidance of the opening or closing operation.

Key words: dry gas seal; opening process; criterion of opening characteristics

引 言

非接触式干式气体密封(简称干气密封)是通过动压槽产生的动压效果, 推开两密封端面, 形成

气膜, 从而实现在非接触状态下运转^[1-2]。密封端面从接触到非接触的瞬间称为密封端面的“开启”, 反之, 称为密封端面的“关闭”。根据内外压差的不同, 只有转速超过某一临界值, 动压效果才能实

2010-07-02 收到初稿, 2010-10-20 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李双喜 (1977—), 男, 博士研究生, 讲师。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50635010)。

Received date: 2010-07-02.

Corresponding author: LI Shuangxi, buclsx@126.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50635010).

现, 这个临界转速即为密封端面推开时的“开启临界转速”(CORS)。密封端面推开的难易程度, 反映了该密封的启动和停车性能的好坏。如果密封端面在未开启状态下停留时间过长, 轻则可能使密封端面烧毁, 重则可能使密封环因抱死而碎裂, 均会导致密封失效。而干气密封由静止到工作转速或由工作转速到静止的启动和停车过程, 不可避免地均要经历密封端面开启前的低速阶段^[3]。干气密封的开启性能严重影响着密封的可靠性, 因此, 研究干气密封的启停性能具有重要的工程意义。由于启动与停车是完全相反的过程, 故本文只对启动过程的开启性能和各个密封参数进行了研究。

国内外对于干气密封的研究主要集中于密封的稳态特性和动态特性的研究^[4-6], 关于密封开启性能的研究较少。王和顺等^[7-9]研究了给定气膜厚度下干气密封的开启力并提出了端面脱开新结构。彭旭东等^[10]研究了激光加工多孔端面干气密封的临界静压开启特性。但密封启动过程中, 闭合力保持恒定, 气膜厚度随转速改变, 密封其他特性参数也随之变化。本文研究了干气密封实际启动情况时, 恒定闭合力变气膜厚度的密封开启特性, 引入开启临界转速来分析操作参数和端面结构参数对开启性能的影响。

1 理论基础

1.1 稳态分析方法

本文基于干气密封的稳态分析, 对其开启性能进行研究, 即假设密封的各个状态中密封是稳定的, 不受任何扰动, 达到平衡的受力状态。

描述密封端面间气膜压力的等温、常黏度理想气体的二维柱坐标稳态 Reynolds 方程为

$$\frac{\partial}{r^2\partial\theta}\left(h^3\frac{\partial p^2}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{r\partial r}\left(rh^3\frac{\partial p^2}{\partial r}\right)=12\mu\omega\frac{\partial(\rho h)}{\partial\theta}$$
 (1)

边界条件为:

强制性压力边界条件

$$r=r_i\text{时}, p=p_i, r=r_o\text{时}, p=p_o$$
 (2)

沿圆周方向的周期性压力条件

$$p(r,\theta)=p(r,\frac{2\pi}{N_g}+\theta)$$
 (3)

求解式(1)并同时考虑边界条件式(2)、式(3), 可以求解密封端面间的压力分布 $p^{[11-12]}$ 。利用求得的气膜压力 p 可以求得干气密封的气膜开启力、气膜刚度、泄漏量、摩擦扭矩和摩擦功耗等密封性能参数。

开启力

$$f_o=N_g\int_0^{2\pi/N_g}\int_{r_i}^{r_o}prdrd\theta$$
 (4)

气膜刚度

$$k_z=-\frac{df_o}{dh}$$
 (5)

泄漏量

$$q_i=-N_g\int_0^{2\pi/N_g}\int_{r_i}^{r_o}\frac{\rho h^3}{12\mu}\frac{dp}{dr}rdrd\theta$$
 (6)

摩擦扭矩

$$m_\theta=N_g\int_0^{2\pi/N_g}\int_{r_i}^{r_o}\left(\frac{\partial p}{r\partial\theta}\frac{h}{2}+\frac{\mu\omega r}{h}\right)r^2drd\theta$$
 (7)

摩擦功耗

$$\omega=m_\theta\omega$$
 (8)

1.2 几何参数与工作参数

本文的干气密封气膜模型的几何结构如图 1 所示, 几何参数与操作参数取值见表 1。

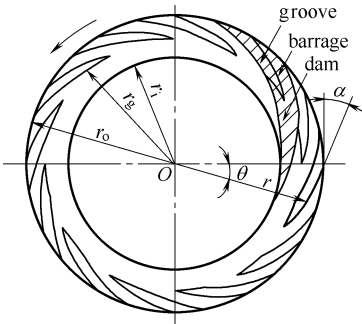


图 1 数学模型
Fig. 1 Mathematical model

表 1 几何参数与操作参数

Table 1 Geometric parameters and operational parameters			
Parameter	Value	Parameter	Value
r_i	71 mm	p_o	1.6 MPa
r_g	77 mm	p_i	0.1 MPa
r_o	90 mm	v	8000 r · min ⁻¹
r_b	75 mm	f_s	42 N
l	0.316	μ	1.79 × 10 ⁻⁶ Pa · s
α	20°	T	300 K
γ	0.5	R_{gas}	287 N · m · kg ⁻¹ · K ⁻¹
N_g	12	R_{a1}	0.2 μm
h_g	6 μm	R_{a2}	0.2 μm

1.3 闭合力

干气密封的闭合力由操作压力与作用面积的乘积构成的推力和弹簧力组成, 即

$$f_c=\pi(r_o^2-r_b^2)(p_i-p_o)+\pi(r_o^2-r_i^2)p_i+f_s=12666.2\text{N}$$
 (9)

1.4 开启临界气膜厚度

开启临界气膜厚度 h_c 在文献 [13-14] 中被称为“接触气膜厚度”，本文引用文献中对接触与非接触端面密封的判据：密封面的最小气膜厚度 $h_{\min}$ 等于或大于接触气膜厚度 h_c 时，端面分开，密封端面处于开启状态，否则是闭合状态。接触气膜厚度 h_c 等于密封端面表面粗糙度综合偏差 σ 的 3 倍，其中综合偏差为

$$\sigma = 1.25 \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2} \quad (10)$$

于是

$$h_c = 3\sigma = 3.75 \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2} \quad (11)$$

将表 1 中两密封端面的表面粗糙度 R_{a1} 、 R_{a2} [15] 代入式 (11) 可以求得临界气膜厚度 $h_c = 1.06 \mu\text{m}$ 。

1.5 开启临界转速

干气密封启动过程中随着转速的提高，动压效果增加，开启力增加，开启力从小于闭合力直到等于闭合力，此时密封端面开启，气膜厚度为开启临界气膜厚度 h_c ，转速即为开启临界转速。求解开启临界转速的方法为，设定气膜厚度为开启临界气膜厚度 h_c ，求解式 (1) 得到气膜压力分布，进而求得气膜开启力。然后以转速 v 为自变量，以开启力与恒定闭合力的差值为目标函数进行一维搜索，直到该差值达到收敛精度为止，此时的转速即为开启临界转速 v_c 。

开启临界转速的提出，可用于比较干气密封不同端面结构“开启”难易程度的判据。利用该判据可对不同的密封端面结构参数的开启性能进行对比分析，提供一种用于评定密封端面结构开启性能的衡量依据。开启临界转速越大，说明密封端面越难推开，开启性能就越差，反之，就越好。开启临界转速不仅可以作为开启性能判据，还可以用于指导启动和停车过程，如启动过程应将转速快速提升至开启临界转速以上等。求得了开启临界转速就可以避免因密封端面在未推开状态下运转时间过长而导致密封失效。

2 启动过程密封特性研究

干气密封启动过程中，密封端面开启前开启力小于闭合力，端面开启并达到平衡状态后开启力便始终等于闭合力。随着转速的继续提升，动压效果逐渐加强，为了保持开启力不变，气膜厚度随之发

生变化，故启动过程实际是气膜厚度及开启力等密封性能参数随转速变化的函数关系，而非其他密封参数随气膜厚度的变化关系。本文的模拟过程为给定实际工作干气密封的闭合力，求解转速从零到工作转速下的实际工作膜厚，同时求得此过程中干气密封的性能特性参数。以往的研究方法只能用于研究密封参数随气膜厚度或转速的变化趋势，气膜厚度和转速是相互独立的，不能找出速度与气膜厚度的函数关系，也就不能真正地模拟启动过程气膜厚度随转速的变化规律。本文对螺旋槽干气密封启动过程进行了模拟，并且绘制了启动过程中 v - h_o 、 v - f_o 、 v - k_z 、 v - q_i 、 v - m_θ 、 v - w 等的关系曲线。

2.1 气膜厚度

如图 2 所示，当工作转速低于开启临界转速（图中 $595 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ）时，密封端面并未推开，开启力小于闭合力，假设此时气膜厚度等于开启临界气膜厚度。随着转速的增加，气膜厚度逐渐增加，速度较低时，气膜厚度增加较快，速度高时，气膜厚度增加变缓。当到达工作转速后，对应的气膜厚度即为正常工作时的气膜厚度。由图 2 可见，在开启临界转速附近气膜厚度变化较快。

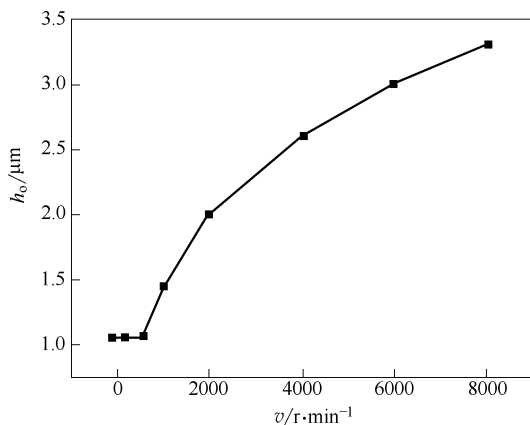


图 2 启动过程气膜厚度

Fig. 2 Film thickness during start up process

2.2 开启力

如图 3 所示，当工作转速低于开启临界转速时，随着转速的增加，动压效果急剧增加，开启力也急剧增加，直至转速达到开启临界转速后，密封端面打开，开启力等于闭合力，呈水平线。

2.3 气膜刚度

如图 4 所示，气膜刚度随转速的增加先急剧增加再缓慢地有少许的降低。在 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 前，

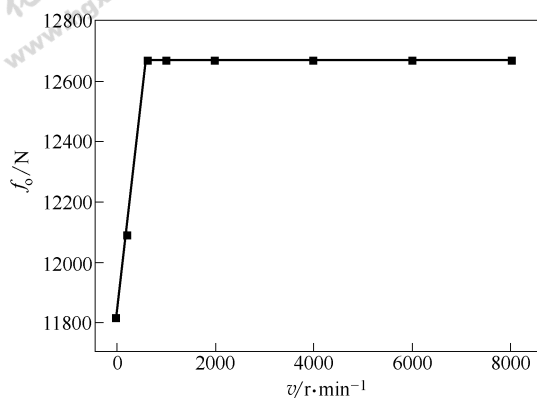


图3 启动过程开启力

Fig. 3 Opening force during start up process

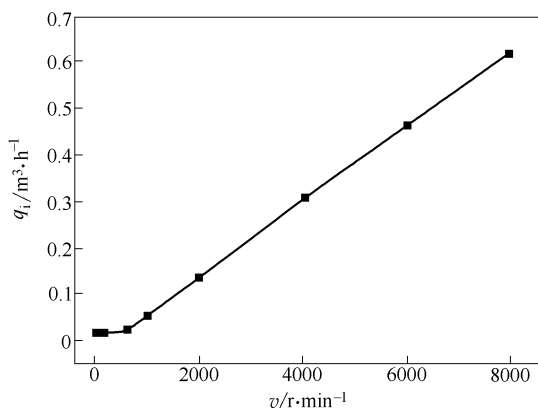


图5 启动过程泄漏量

Fig. 5 Leakage rate during start up process

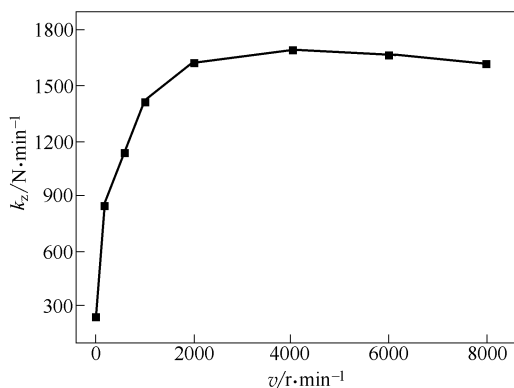


图4 启动过程气膜刚度

Fig. 4 Film stiffness during start up process

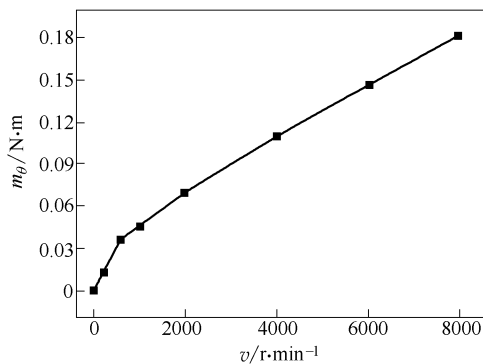


图6 启动过程摩擦扭矩

Fig. 6 Frictional torque during start up process

气膜刚度因动压效果强而迅速增加。之后由于气膜厚度增加抵消了部分动压效果，曲线趋于平稳，刚度几乎不再变化，在 $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时达到最大值，转速进一步升高，气膜刚度几乎不变。

2.4 泄漏量

如图5所示，当工作转速低于开启临界转速时，气膜厚度不变，因而泄漏量几乎是不变的。转速达到并超过开启临界转速后，气膜厚度开始增加，泄漏量随转速的增加而增加。

2.5 摩擦扭矩

本文所分析的摩擦扭矩仅为气体与密封端面之间的摩擦所产生的扭矩，不包括两密封端面间因固体接触而产生的摩擦扭矩。如图6所示，摩擦扭矩在临界转速前后均随着转速的增加而呈线性增加。在开启临界转速之前，由于气膜厚度不变而转速增加，因而摩擦扭矩增加较快；在临界转速之后气膜厚度开始增加，因此增加较慢。

2.6 摩擦功耗

摩擦功耗同摩擦扭矩，仅为气体与密封端面间的摩擦功耗。如图7所示，摩擦功耗随转速的增加而呈抛物线状增加。

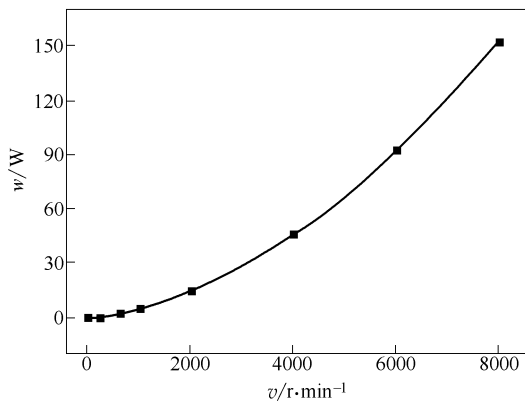


图7 启动过程摩擦功耗

Fig. 7 Frictional power consumption during start up process

3 密封参数对开启性能的影响

3.1 操作参数

图 8 为不同操作压力下的开启临界转速的变化规律, 图 9 为不同操作压力所对应的闭合力下的开启临界转速。由图可知, 随着操作压力和闭合力的增加, 开启临界转速几乎呈线性增加。这是因为操作压力或闭合力越大, 开启时所需要的开启力越大, 则所需动压越大, 开启临界转速越高。所以启动时, 可以采用降低操作压力, 降低闭合力的方法, 以减小开启临界转速, 方便开启。

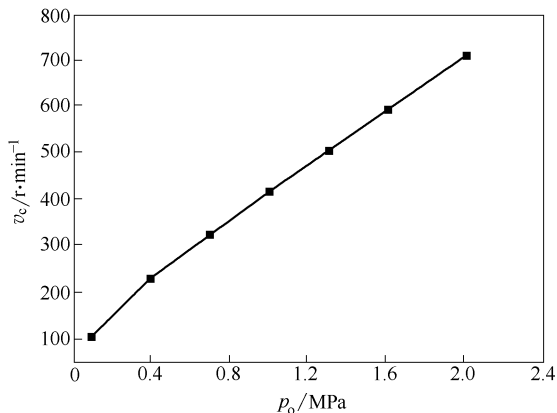


图 8 不同操作压力下的开启临界转速

Fig. 8 CORS with different pressure

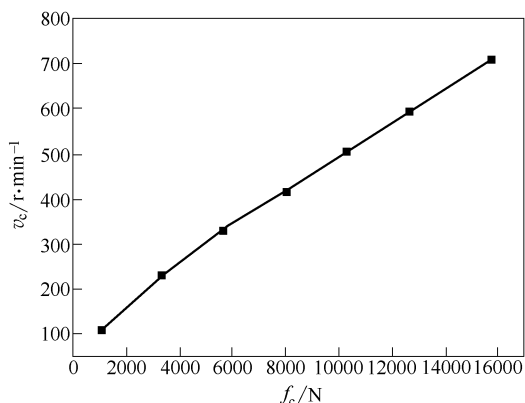


图 9 不同闭合力下的开启临界转速

Fig. 9 CORS with different closing force

3.2 结构参数

3.2.1 锥度 如图 10 所示, 密封端面在不同锥度下的开启临界转速随着锥度的增加而减小, 说明开启性能随着锥度的增加而提高。当锥度达到 0.01° 时, 转速为零时便可以推开。这是因为随着端面锥度的增加, 密封环外侧气体更容易进入端面, 密封的静压效应增加, 所需动压小, 开启临界转速降

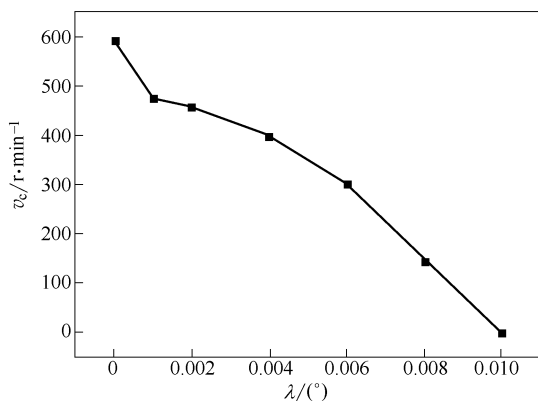


图 10 不同锥度下的开启临界转速

Fig. 10 CORS with different taper

低, 端面容易开启。但是, 当密封端面锥度过大, 容易导致密封端面的接触, 因此并非锥度越大越好。本文建议锥度不宜超过 0.08° , 在 $0.04^\circ \sim 0.08^\circ$ 范围内较好。

3.2.2 坝宽比 如图 11 所示, 开启临界转速随着坝宽比的增加而增加, 说明开启性能随着坝宽比的增加而降低。由于坝宽比直接决定动压槽面积的大小, 坝宽比越大则动压槽区越小, 动压效果越差, 开启临界转速就越大。因此坝宽比对开启性能的影响非常大, 坝宽比从 $0.2 \sim 0.8$, 开启临界转速可以从 $319 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 变化到 $7845 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。坝宽比在 0.6 以上时, 开启性能急剧恶化。而坝宽比过小会导致泄漏量的增加, 对于本文的结构参数, 建议选取坝宽比在 $0.2 \sim 0.4$ 之间为宜, 这样可以将开启临界转速控制在 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下。

3.2.3 动压槽深 如图 12 所示, 密封端面在不同动压槽深下的开启临界转速随动压槽深的增大而先减小再缓慢增大, 在动压槽深为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 时具有最佳的动压效果, 从而获得最优开启性能。

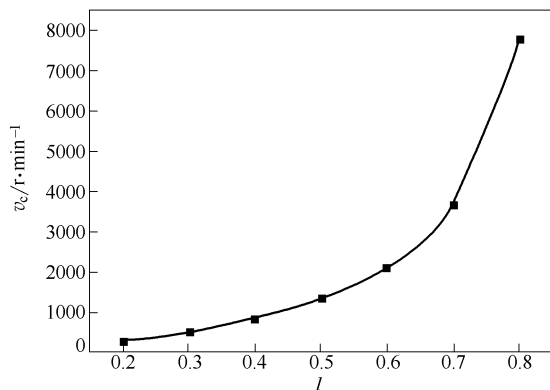


图 11 不同坝宽比下的开启临界转速

Fig. 11 CORS with different breadth rate of dam zone

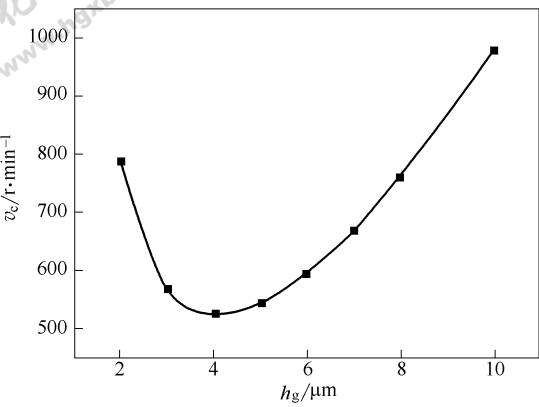


图 12 不同槽深下的开启临界转速
Fig. 12 CORS with different groove depth

3.2.4 动压槽数 如图 13 所示，密封端面在不同动压槽数下的开启临界转速随着动压槽数的增加而减小，说明其开启性能随着动压槽数的增加而提高。随着动压槽数的增加，密封产生的动压效果增加，开启临界转速下降，开启性能增加，如在槽数小于 12 时，增加动压槽数可以明显地提高开启性能。当槽数增加到一定程度时，增加槽数所产生的动压效果减弱，如大于 12 时，增加动压槽数对继续提高开启性能来说并不明显。由于增加螺旋槽数既增加加工成本，又减小非开槽区的密封面面积，从而增加泄漏量。因此，一般情况下宜采用 10~18 个动压槽，以获得较大的开启性能、较小的加工成本。

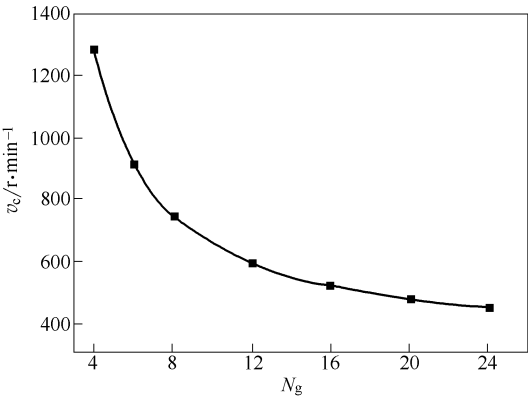


图 13 不同槽数下的开启临界转速
Fig. 13 CORS with different groove number

3.2.5 螺旋角 如图 14 所示，密封端面在不同螺旋角下的开启临界转速随螺旋角增大而先减小再增大，螺旋角为 10°~20°时干气密封具有较好的开启性能。

本文分析得到的较优的结构参数在工程中得到

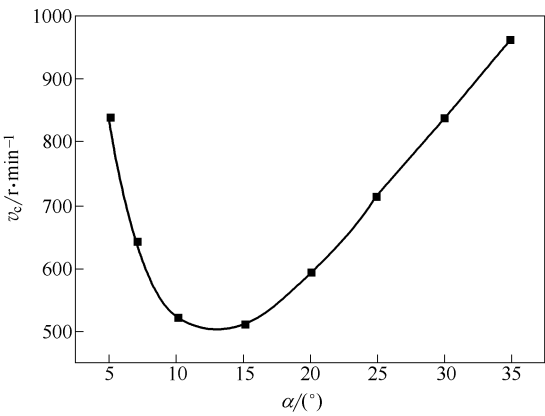


图 14 不同螺旋角下的开启临界转速
Fig. 14 CORS with different spiral angle

表 2 端面结构参数对比

Table 2 Comparison of structural parameters			
Structural parameter	Recommended parameters in this paper	Parameters of DGS for test from Ref. [11]	Parameters of DGS for ethylene compressors of rubber plant
λ	0.04°—0.08°	0°	0.05°
l	0.2—0.4	0.49	0.29
h_g	3—6 μm	5.3/4 μm	5 μm
N_g	10—18	12	12
α	10°—20°	15°	15°

了验证，表 2 给出了本文所推荐的具有较好开启性能的干气密封的端面结构参数，并给出文献 [11] 实验分析中的参数和某橡胶厂乙烯压缩机采用的参数。

4 结 论

- (1) 干气密封开启过程中，在开启临界转速附近，密封的特性参数快速变化，运行时应注意不要长时间停留在此工作点附近。
- (2) 操作压力对开启临界转速影响较大，为了保证密封可靠开启，可以考虑密封开启时，采用较小的操作压力。
- (3) 不同的密封端面结构参数对密封开启临界转速的影响不同，设计密封端面结构时应综合考虑端面结构参数对密封稳定运行性能和开启性能的影响。

符 号 说 明

f_c, f_o, f_s ——分别为闭合力、开启力、弹簧力，N
 h ——气膜厚度， μm
 h_c ——开启临界气膜厚度， μm

h_g ——动压槽深, μm

h_o ——无槽区气膜厚度, μm

k_z ——气膜刚度, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$

l ——坝宽比 $\left(l = \frac{r_g - r_i}{r_o - r_i}\right)$

m_θ ——摩擦扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

N_g ——动压槽数

p ——密封端面间压力, MPa

p_i, p_o ——分别为密封端面内、外侧压力, MPa

q_i ——泄漏量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

R_{a1}, R_{a2} ——分别为两密封表面粗糙度, μm

R_{gas} ——气体常数, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

r ——径向坐标, mm

r_b ——平衡半径, mm

r_g ——动压槽底半径, mm

r_i, r_o ——分别为端面内、外径, mm

T ——温度, K

v ——转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

v_c ——开启临界转速, $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

w ——摩擦功耗, W

α ——螺旋角, $(^\circ)$

γ ——槽宽比 (槽区宽度/槽宽和堰宽)

θ ——周向坐标, rad

λ ——密封面锥度, $(^\circ)$

μ ——气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

σ ——综合偏差, μm

ω ——角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

References

- [1] Peng Xudong (彭旭东), Wang Yuming (王玉明), Huang Xing (黄兴), Li Kun (李鲲). State-of-the-art and future development of sealing technology [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals* (液压气动与密封), 2009 (4): 4-11
- [2] Wang Yuming (王玉明), Yang Huixia (杨惠霞), Jiang Nan (姜南). Fluid sealing technology [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals* (液压气动与密封), 2004 (3): 1-5
- [3] Hou Lishan (侯立山), Sun Tie (孙铁). Fault analysis and countermeasure for dry gas seal [J]. *Compressor Technology* (压缩机技术), 2006 (2): 34-35, 43
- [4] Bo Ruan. Numerical modeling of dynamic sealing behaviors of spiral groove gas face seals [J]. *Journal of Tribology*,

2002, **124** (1): 186-195

- [5] Brad A Miller, Itzhak Green. Semi-analytical dynamic analysis of spiral-grooved mechanical gas face seals [J]. *Journal of Tribology*, 2003, **125** (2): 403-413
- [6] Sébastien Thomas, Noël Brunetière, Bernard Tournerie. Numerical modeling of high pressure gas face seals [J]. *Journal of Tribology*, 2006, **128** (2): 396-405
- [7] Wang Heshun (王和顺), Chen Cichang (陈次昌), Huang Zepei (黄泽沛), Wang Xinlin (王新霖). The proposal and research on dry gas seal face opening [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics* (液压与气动), 2004 (10): 44-46
- [8] Wang Heshun (王和顺), Chen Cichang (陈次昌), Huang Zepei (黄泽沛), Wang Xinlin (王新霖). Research on dry gas seal face opening technique [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique* (组合机床与自动化加工技术), 2005 (1): 53-54, 57
- [9] Wang Heshun (王和顺), Chen Cichang (陈次昌), Huang Zepei (黄泽沛), Wang Xinlin (王新霖). Research on start-up process of dry gas seal [J]. *Lubrication Engineering* (润滑与密封), 2006 (1): 14-16, 19
- [10] Peng Xudong (彭旭东), Liang Shike (梁世克), Bai Shaoxian (白少先), Meng Xiangkai (孟祥铠), Sheng Song'en (盛颂恩). Critical opening characteristics of a laser surface texture hydrostatic gas mechanical seal [J]. *Lubrication Engineering* (润滑与密封), 2010, **35** (3): 1-4, 33
- [11] Liu Yuchuan (刘雨川). Behavior of gas film face seal [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999
- [12] Jiang Xiaowen (蒋小文), Gu Boqin (顾伯勤). Characteristic of gas film between spiral groove dry gas seal faces [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (8): 1419-1425
- [13] Gu Yongquan (顾永泉). Just-lift-off phenomena and lift-off characteristics of mechanical face seals [J]. *Petrochemical Equipment* (石油化工设备), 2003, **32** (4): 26-29
- [14] Gu Yongquan (顾永泉). Mechanical Face Seal (机械端面密封) [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1994: 204-205
- [15] Peng Xudong (彭旭东), Li Jiyun (李纪云), Sheng Song'en (盛颂恩), Yin Xiaoni (尹晓妮), Bai Shaoxian (白少先). Effect of surface roughness on performance prediction and geometric optimization of a spiral-groove face seal [J]. *Tribology* (摩擦学学报), 2007, **27** (6): 567-572