

旋转式唇形密封圈开启特性研究

张树强, 陶 正, 陈 杰, 王 良, 赵伟刚

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为研究对唇形密封圈可重复使用至关重要的开启性能, 建立了唇形密封圈临界开启判据和仿真计算模型, 求解了临界开启转速。研究了弹簧紧箍力、唇口过盈量以及泵入口压力对临界开启转速的影响规律, 进行了唇形密封圈水运转试验。结果表明: 随着弹簧紧箍力的增加, 临界开启转速呈线性增加, 推荐弹簧紧箍力取值范围为 0.1~0.3 N/mm; 当唇口过盈量从 0.1 mm 增加到 0.8 mm 时, 临界开启转速增加量仅为 1%, 推荐唇口过盈量取值范围为 0.3~0.6 mm; 泵入口压力对临界开启转速影响较大, 当泵入口压力较高时, 可以通过减小弹簧紧箍力来降低临界开启转速; 泵入口压力从 0.4~0.75 MPa 变化时, 临界开启转速的理论研究结果与试验研究结果偏差范围为 2%~7.2%, 表明关于唇形密封圈开启转速的数值计算是正确的。

关键词: 旋转式唇形密封; 开启特性; 试验研究

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0052-06

Research on opening characteristics of rotary lip seals

ZHANG Shuqiang, TAO Zheng, CHEN Jie, WANG Liang, ZHAO Weigang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to research the opening behaviors of the rotary lip seals, which are vitally important for their repeated application, the critical opening criterion and numerical calculation model of the rotary lip seals were established to solve the critical opening rotary speed. The influences of spring hoop fastening force, interference magnitude of lip-opening and pump inlet pressure on the critical opening rotary speed were analyzed. The test of lip seals was performed in the medium of water. The results show that the critical opening rotary speed increases linearly with increase of spring hoop fastening force, thus the range of the recommendable value of spring hoop fastening force is 0.1~0.3 N/mm; when the interference magnitude of lip-opening increases from 0.1 mm to 0.8mm, the increment of the critical opening rotary speed is only increased by 1%, thus the range of the recommendable value of interference magnitude of lip-opening is 0.3~0.6 mm; the pump inlet pressure results in big influence on critical opening rotary speed, thus the spring hoop fastening force should be decreased to reduce the critical opening rotary speed when the pump inlet pressure is higher. The deviation range of the theoretical research and test results is 2%~7.2% when the pump inlet pressure changes in the range of 0.4~0.75 MPa.

Keywords: rotary lip seals; opening characteristic; experiment research

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2016-06-06

作者简介: 张树强 (1986—), 男, 硕士, 主要研究领域为流体密封技术

量 σ 时,唇口与密封壳体处于临界非接触状态,唇形密封圈临界开启。临界开启条件为

$$\delta_y(n_0)=\sigma \tag{1}$$

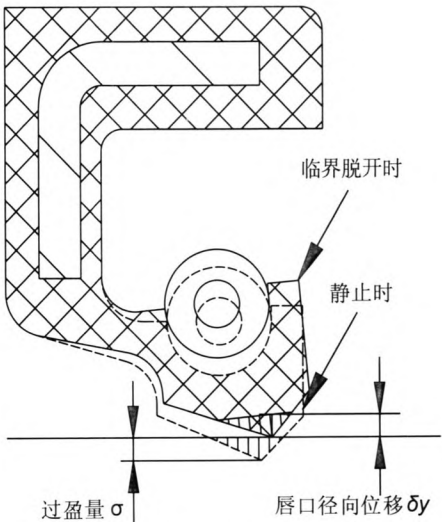


图 2 唇形密封圈临界开启示意图
Fig. 2 Schematic of lip seals critical opening

2.2 数值计算模型

根据唇形密封圈安装结构,采用 ANSYS 软件建立了其临界开启转速二维数值计算模型,如图 3 所示。其中在边界 A1~A8 加载流体压力 p (Pressure), A5 点加载弹簧紧箍力 F_s (Force),此外,整个唇形密封圈加载绕转轴旋转的角速度 ω (Rotational Velocity)。

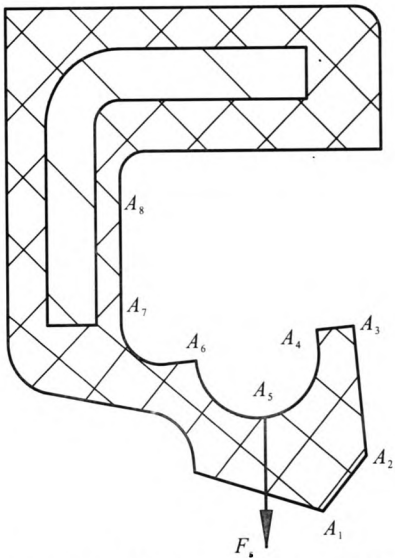


图 3 唇形密封圈脱开转速数值计算模型
Fig. 3 Numerical calculation model of lip seal separation rotary speed

2.3 边界条件的确定

回复弹力 F_t 与橡胶体材质的物理性能以及唇形密封圈结构有关,数值计算时可根据所建立的模型自动确定,不用人为加载,其余边界条件确定如下:

1) 流体压力 p

唇形密封圈边界 $A_1 \sim A_8$ 加载的流体压力边界,其值等于泵入口压力 p_{in} 减去液封轮密封能力 Δp :

$$p=p_{in}-\Delta p \tag{2}$$

液封轮密封能力由下式计算:

$$\Delta p=\frac{1}{2}\rho\omega^2k\left(r_o^2-r_i^2\right) \tag{3}$$

式中: ρ 为燃料密度; ω 为转轴角速度; k 为增压系数,一般为 0.8~0.9; r_i 和 r_o 分别为液封轮叶片内外径。

2) 弹簧紧箍力 F_s

弹簧紧箍力 F_s 可以通过如图 4 所示的受力分析进行计算。

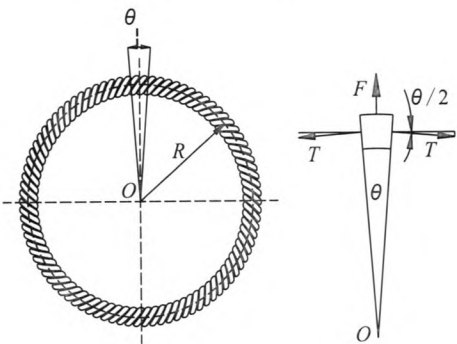


图 4 紧箍弹簧受力分析示意图
Fig. 4 Mechanics analysis of hoop fastening spring

图中 T 为弹簧张力, F 为唇形密封圈作用在弹簧上的反力。选取角度为 θ 的一部分弹簧进行受力分析,竖直方向受力平衡,有如下关系式:

$$F=2\cdot T\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{4}$$

当 θ 很小时, $\sin(\theta/2)\approx\theta/2$, 所以式(4)可以变为:

$$F=T\theta \tag{5}$$

所以唇形密封圈作用在弹簧单位长度上的力 f 为

$$f=\frac{F}{\text{弧长}}=\frac{T\theta}{R\theta}=\frac{T}{R}$$
 (6)

根据作用力与反作用力, 可求得唇形密封圈单位长度上的弹簧紧箍力 F_s :

$$F_s=f=\frac{T}{R}$$
 (7)

3) 转轴旋转角速度 ω

转轴角度速度可由转速 n 计算, 如下式:

$$\omega=\frac{2\pi\cdot n}{60}$$
 (8)

2.4 计算流程

唇形密封圈临界开启转速计算流程如图 5 所示。首先给定转轴速度 n , 加载全部的边界条件, 数值计算唇口径向位移 δ_r , 当唇口径向位移满足临界开启判据时, 给定的转速 n 即为唇形密封圈的临界开启转速。若不满足临界开启判据, 对给定的转速进行修正, 重新计算直到结束。

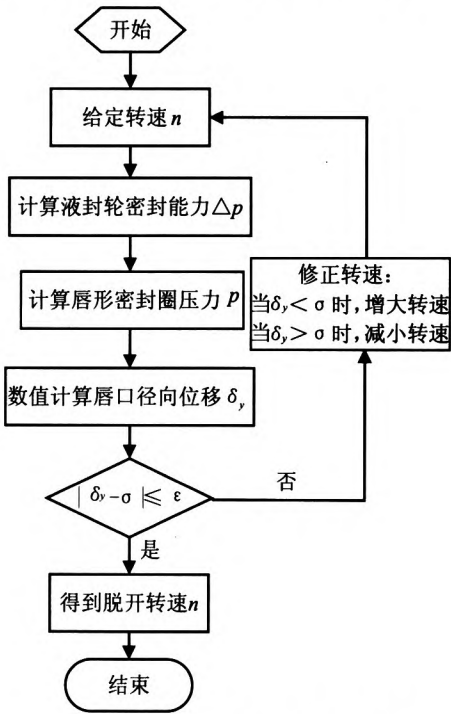


图 5 唇形密封圈开启转速数值计算流程

Fig. 5 Numerical calculation process for critical opening rotary speed of lip seal

3 计算结果及分析

3.1 临界开启转速计算

橡胶是一种超弹材料, 不同种类的橡胶具有

不同应力应变本构模型。本文计算时选定 ANSYS 材料库中与唇形密封圈橡胶材料相近的材料本构模型, 其余主要计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculated parameters of lip seal	
参 数	数 值
燃料泵入口压力 p_w/MPa	0.4
唇口装配过盈量 σ/mm	0.6
单位长度上的弹簧紧箍力 $F_s/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.1
燃料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	830

在表 1 所示的计算参数下, 数值求解了唇形密封圈临界开启转速, 其值为 8 998 r/min, 此时唇形密封圈唇口径向变形量为 0.601 mm, 等于其装配过盈量 0.6 mm, 唇形密封圈临界开启, 唇口与密封壳体处于非接触状态。随着转轴速度继续上升, 唇口径向变形量越大, 开启间隙越大。

3.2 弹簧紧箍力对临界开启转速的影响

选取燃料泵入口压力 0.4 MPa, 唇口过盈量 0.6 mm, 研究了弹簧紧箍力对唇形密封圈临界开启转速的影响规律, 如图 6 所示。

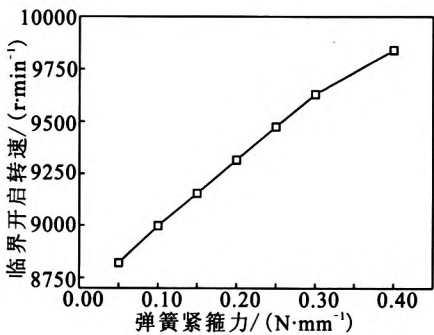


图 6 弹簧紧箍力对临界开启转速的影响

Fig. 6 Influence of spring hoop fastening force on critical opening rotary speed

由图可知, 随着弹簧紧箍力的增加, 唇形密封圈临界开启转速呈线性增加。弹簧紧箍力的选

取应该适当:紧箍力过小,唇形密封圈静态密封性不好,发动机停机时也不利于唇口的闭合;紧箍力过大,虽然有利于提高唇形密封圈静态气密性,但是会导致临界开启转速过高,不利于脱开。泵入口压力较高时,弹簧紧箍力的选取不能过高,一般情况下弹簧紧箍力的选取范围为0.1~0.3 N/mm。

3.3 唇口过盈量对临界开启转速的影响

选取燃料泵入口压力0.4 MPa,弹簧紧箍力0.1 N/mm,研究了唇口过盈量对唇形密封圈临界开启转速的影响规律,如图7所示。

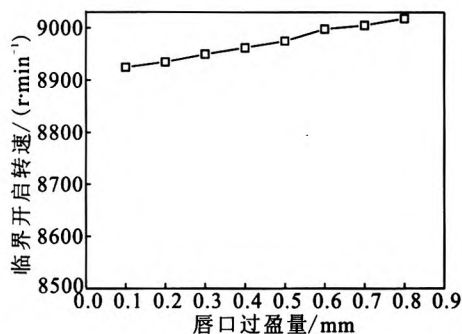


图7 唇口过盈量对临界开启转速的影响

Fig. 7 Influence of lip-opening interference magnitude on critical opening rotary speed

由图可知,当唇形密封圈唇口过盈量从0.1 mm增加到0.8 mm时,临界脱开转速从8 925 r/min增加到9 018 r/min,增加量仅为1%,可知唇口过盈量对临界开启转速影响较小。唇口过盈量也应适当选取:过盈量过小,唇形密封圈静态密封性不好;过盈量过大,唇形密封圈开启前摩擦功耗大,加剧唇口磨损,影响多次使用。推荐唇形密封圈唇口过盈量选用范围为0.3~0.6 mm。

3.4 泵入口压力对临界开启转速的影响

选取唇口过盈量0.6 mm,弹簧紧箍力0.1 N/mm,研究了泵入口压力对唇形密封圈临界开启转速的影响规律,如图8所示。

由图可知,当泵入口压力从0.2 MPa增加到0.8 MPa时,临界开启转速从5 635 r/min增加到13 375 r/min,增加量为137.3%,可知泵入口压力对临界开启转速影响较大。

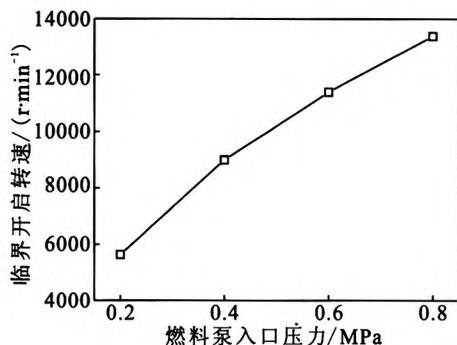


图8 泵入口压力对临界开启转速的影响

Fig. 8 Influence of pump inlet pressure on critical opening rotary speed

4 试验研究

对唇形密封圈进行了水运转试验,以研究其开启性能。通过同步测量唇形密封圈的泄漏量和转轴速度,就可测得唇形密封圈的临界开启转速。在不同泵入口压力下,试验研究了唇形密封圈水运转临界开启转速,并与数值计算结果进行了对比分析,如图9所示。由图可知,泵入口压力从0.4~0.75 MPa变化时,临界开启转速理论研究与试验研究结果偏差范围为2%~7.2%,此偏差可以接受,表明本文关于唇形密封圈开启转速数值计算模型的建立是正确的,能够指导密封的实际设计。

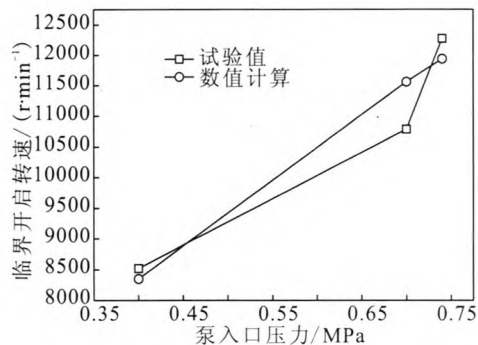


图9 理论计算和试验数据对比

Fig. 9 Contrast of theoretically-calculated result and experiment data

5 结论

建立了液体火箭发动机用唇形密封圈开启转速数值计算模型，提出了临界开启判据并进行了相关的水运转试验研究。主要结论为：随着弹簧紧箍力增加，唇形密封圈临界开启转速呈线性增加；泵入口压力较高时，弹簧紧箍力的选取不能过高，一般情况下弹簧紧箍力的选取范围为 0.1~0.3 N/mm；唇口过盈量对临界开启转速影响较小，推荐唇形密封圈唇口过盈量选用范围为 0.3~0.6 mm；泵入口压力对临界开启转速影响较大。

参考文献：

[1] 顾永泉. 机械密封实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社,

2007.

[2] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
[3] 吴庄俊, 赵良举, 杜长春, 等. 结构参数对径向唇形密封圈密封性能的影响研究[J]. 合肥工业大学学报, 2012, 35 (11): 1451-1455, 1581.
[4] 李建国, 丁玉梅, 杨卫民, 等. 油封动态密封机制的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 96-98.
[5] 蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云. 过程装备密封技术[M]. 北京: 化学出版社, 2010.
[6] 张佳佳, 赵良举, 杜长春, 等. 唇形油封结构参数对摩擦面温度的影响[J]. 合肥工业大学学报, 2011, 34(10): 1470-1473.

(编辑：陈红霞)

(上接第 38 页)

如一次试验有 40 个发动机参数且含 3 段发动机工作时间，根据大量实测统计，工作效率可以从原来的约 6 小时/人次降低到约 3 分钟/人次，工作效率可以提高近百倍。该系统可将振动极大值获得的准确率提高到 100%，保证了试验数据的可靠性。通过对三维瀑布图子系统进行算例验证，得出该子系统不仅彻底解决了三维瀑布图单色显示数据效果欠佳的问题，而且可对三维数据灵活进行分析，如谱线切片分析。此外，对得到的振动突频数据建立数据管理系统，可为事后比对分析历史试验数据提供很好的解决方案。更为重要的是，在每次试验结束后，快速统计算法可帮助数据分析人员快速准确地获得发动机参试部位的振动数据，对发动机的性能评估及故障诊断提供极其重要的参考。

参考文献：

[1] 埃克尔. Java 编程思想[M]. 陈昊鹏, 译. 北京: 机械工业

出版社, 2007.

[2] SCOTT M. Effective C++[M]. 候捷, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
[3] 严蔚敏. 数据结构: C 语言版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
[4] THOMAS H C, CHARLES E L. 算法导论[M]. 殷建平, 徐云, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
[5] ROBERT S. 算法[M]. 谢路云, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
[6] DAVE S, GRAHAM S. OpenGL 编程指南[M]. 王锐 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
[7] 肖嵩, 杜建超. 计算机图形学原理及应用[M]. 西安: 西电电子科技大学出版社, 2014.
[8] 邹恒明. 算法之道[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
[9] 莫顿. Oracle SQL 高级编程[M]. 朱浩波, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
[10] 林智扬, 范明翔, 陈锦辉. 深入浅出 JAVA Swing 程序设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
[11] 吴建军, 黄强, 程玉强. 液体火箭发动机故障检测诊断理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

(编辑：陈红霞)