

Comparative Analysis on Film Pressure of Mechanical Seal Face in Changing Conditions

Hongguo Xu¹ Wen Luo²

1. Sichuan Kehong Oil and Gas Engineering Co., Ltd., Chongqing, 404100, China

2. Southwest Oil and gas Field Cost Center Luzhou cost station Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract

Based on the motion characteristics of mechanical seal faces under variable operating conditions, this study conducted comparative analysis of membrane pressure displacement under two scenarios: identical temperature/rotation speed with different medium pressures, and identical temperature/medium pressure with different rotation speeds. Results demonstrate that changes in medium pressure during operational variations significantly affect seal stability. The expanded boiling zone and intensified evaporation under variable conditions lead to greater fluctuations in membrane pressure. Both sealing fluid pressure and rotational speed are critical factors influencing face opening during variable operating modes. Medium pressure directly impacts the intensity of evaporation during pressure changes. Higher sealing medium pressure results in larger boiling zones, more intense evaporation, and greater membrane pressure variations. The combined effects of face opening/closing and dry friction induce seal tilting, which causes dynamic ring oscillation under dynamic pressure influence.

Keywords

mechanical seal; variable working condition; flash; end membrane pressure; rotational speed

变工况条件下机械密封端面膜压对比分析

徐红果¹ 罗雯²

1. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 中国·重庆 404100

2. 西南油气田造价中心泸州造价站, 中国·四川 泸州 646000

摘 要

根据变工况机械密封端面运动情况, 通过对相同温度相同转速不同介质压力、相同温度相同介质压力不同转速两种情况下端面抽空膜压压力位移对比分析, 结果表明, 工况变化时介质压力的变化是影响机械密封端面稳定性的重要因素。变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈, 端面膜压的变化幅度也越大; 密封流体的压力和转速是影响变工况条件下端面开启的重要因素。介质压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。密封介质的压力越高, 变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈, 端面膜压的变化幅度也越大。在端面开启、闭合以及出现的干摩擦的共同影响, 导致密封端面的倾斜, 在动压力的影响下密封动环发生振荡。

关键词

机械密封; 变工况; 闪蒸; 端面膜压; 转速

1 引言

机械密封的失效形式与密封的工作状态有关, 在变工况发生时, 端面间液膜发生闪蒸与否, 对密封的稳定性有很大影响, 端面间液膜因瞬时汽化发生闪蒸, 使端面间比压发生变化, 导致机械密封的工作处于不稳定状态。当变工况情况发生时, 密封腔压力急剧降低, 引起密封端面压力分布发生变化, 由于密封端面压力变化使密封相变半径变化, 使端面发生闪蒸, 从而把密封动环沿轴向推开。当密封腔压力恢复正常后, 如密封动环不能及时复位, 则密封开启失效。

【作者简介】徐红果(1986-), 男, 中国重庆人, 硕士, 工程师, 从事油气储运研究。

2 正常工况下机械密封端面状况

根据变工况机械密封理论, 机械密封在正常工作状况下, 根据其相变半径的不同, 存在三种不同的工作相态: 液相密封、汽相密封和汽液混相密封。其中汽液混相密封又可分为似液相密封和似汽相密封^[1]。其基本工作结构如图 1 所示。当 $r_b < r_1$ 时, 机械密封处于液相工作状态; 当 $r_b > r_2$ 时, 机械密封处于汽相工作状态; 当 $r_1 < r_b < r_2$ 时, 机械密封处于汽液混相密封。根据汽化半径 r_b 的不同, 当 r_b 比较接近密封面内径 r_1 时, 机械密封处于似液相密封; 当 r_b 比较接近密封面外径 r_2 时, 机械密封处于似汽相密封。

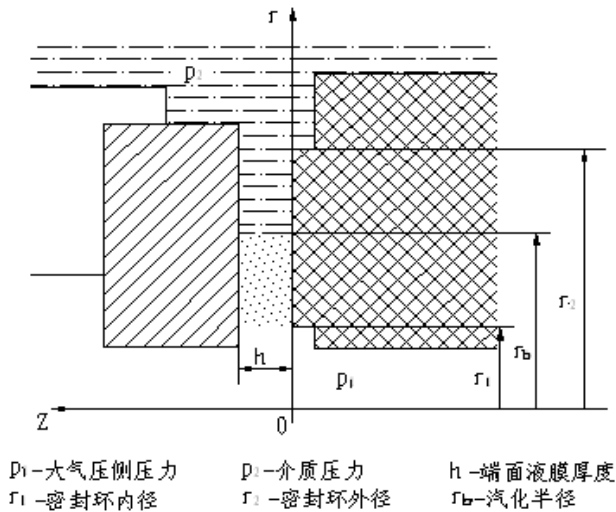


图 1 工况变化时机械密封端面物理模型

表 2 机械密封计算参数							
轴套外径	动环内径	动环外径	抽空后压力	介质粘度	汽化潜热	动环导热系数	静环导热系数
(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(kg.s/m ²)	(J/Kg)	(W/m.℃)	(W/m.℃)
70	72.80	80.80	0.03	1.0 × 10 ³	2260000	6.28	46.52

实验基本条件如表 3 所示：

表 3 实验条件				
密封介质	实验室温度 (℃)	大气压 (MPa)	电源	实验时间
水	18.5	0.101	220V 50Hz	2007.1.4

为了研究抽空瞬间机械密封端变化状况，本文测试了介质压力为 0.13MPa、0.23MPa，温度为 75℃、79℃、84℃，转速为 2611 r/min、2704 r/min、2811 r/min 下密封端面膜压的分布情况。为了尽量减小实验中液膜动压效应的影响在实验前对密封端面进行研磨，装配时严格控制密封端面的平行度以及密封端面也旋转轴的垂直度，在每次实验后都对密封端面进行了研磨，装配时都对密封端面的平行度进行了严格的校准。实验前首先让机械密封在 0.12MPa 的压力和转速为 1000 r/min 下跑合 1 小时并对实验的仪表和传感器进行标定。本次实验真空罐压力定为 0.03MPa（可以保证低于实验各测试温度的饱和蒸汽压）。

3.2 实验结果对比分析

3.2.1 同转速、同温度不同介质压力端面抽空膜压对比分析

本组实验对比了机械密封端面抽空瞬时到持续抽空后端面四点压力分布变化。

$$\rho \cdot \frac{p_2 - p_b + \frac{3\rho\omega^2}{20}(r_2 - r_b)}{\ln r_2 - \ln r_1} = \frac{(p_b^2 - p_1^2)}{2RT \ln(r_b/r_1)} \quad (1)$$

式中 p ——压力，MPa
 r ——端面半径，m

3 变工况条件下机械密封端面膜压实验

3.1 实验条件准备

本实验中，静环单独加工，为了测量端面膜压的分布以及发生闪蒸时候端面膜压的变化，考虑到过多的测量微孔将会影响端面粗糙度，进而影响实验的准确，所以在静环的径向不同位置处设置 4 个测点其分布如图 2 所示，测点位置见表 1：

由于受到密封端面结构尺寸的限制传感器不能够直接安置与密封端面处，本实验在不同半径处开 4 个直径 1mm 的引压孔，在密封腔体外设置压力传感器测量端面处的膜压，由于传感器距离测试端面距离很小且导压铜管的直径较大，因此可以忽略由此产生的压力损失。机械密封计算参数见表 2：

表 1 膜压传感器测点位置

序号	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
测点位置半 (mm)	37.56	38.92	39.70	40.08

μ ——介质粘度，kg·s/m²
 h ——端面间液膜厚度，m
 ω ——动环旋转角速度，rad/s

根据公式 (1) 可以算得在此工作条件下相变半径 r_b [2,3]，其中 $r_b < r_1$ ，即此时机械密封端面为全液相。

根据变工况下密封流体压力为 0.13MPa 时密封端面膜压变化中可以得到，在抽空前四测点膜压近似直线分布，抽空前机械密封端面间流体处于全液相。在抽空瞬间密封端面前外径压力骤降，测点 3、测点 4 两点的压力已经低于此温度下的饱和蒸汽压，测点 3、测点 4 处于汽相区，而测点 1、测点 2 压力变化很小，说明此处密封端面间的液膜没有发生相变仍然保持液相，经过理论计算得出相变半径为 $r_{b1} = 39.04\text{mm}$ 。持续抽空后在该区域的液膜发生闪蒸 [4]。通过以上分析可以得出，工况变化瞬时，液膜压力失稳，由于压力降低导致汽化半径瞬时增大。汽化半径的瞬时增大致使密封端面液膜瞬时闪蒸，其闪蒸压力大幅超过工况变化前端面膜压。当密封流体压力为 0.23MPa 时，端面膜压已经不再服从线性分布。在此工况下经理论计算所得相变半径为 $r_b = 38.32\text{mm}$ ，即此时机械密封端面处于汽液两相。在抽空瞬时，测点 1 压力有小幅下降，而在液相区 $r > r_{b1}$ 的测点压力降远大于汽相区。在持续抽空后，经理论计算可得抽空后的相变半径 $r_{b2} = 39.54\text{mm}$ ，抽空后 r_{b1} 、 r_{b2} 之间的液体瞬时汽化使得在闪蒸区压力骤升。

对比压力为 0.13MPa、0.23MPa 端面膜压的变化可以得到变工况前密封流体的压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。在介质温度、转速以及抽空压力相同的条件

下,密封介质的压力越高,变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈,端面膜压的变化幅度也越大。

3.2.2 相同温度、相同介质压力不同转速端面抽空压力位移对比分析

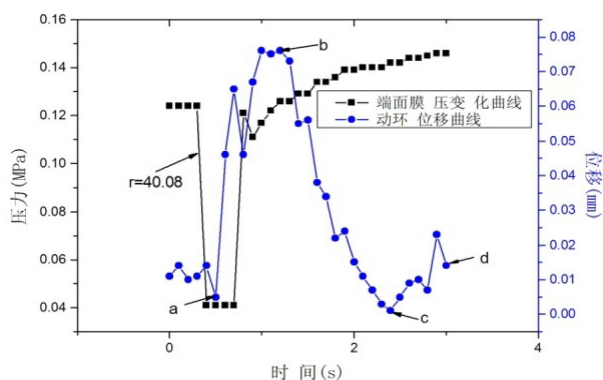


图 3 变工况下温度 79℃密封流体压力 0.13MPa、转速 2704r/min 压力位移关系图

在本组实验中分析了工况发生变化时,密封端面在相同密封流体温度、相同介质压力,不同转速条件下端面运动情况。

图 3 为温度 79℃密封流体压力 0.13MPa 转速 2704r/min 下,变工况发生时压力位移关系图。从图中可以看出,机械密封动环在变工开始到持续的过程中,密封动环的运动仍然分为三个阶段,即密封端面开启阶段、密封端面闭合阶段和密封动环的振荡阶段。在正常工况下膜厚为 9 微米左右,在抽空瞬时端面膜压降到 0.041MPa,此时动环位移向闭合方向运动了 7 个微米。随后由于端面液膜的闪蒸,端面开启力大于闭合端面开启并达到最大位移处。从图中可以看出动环位移的变化滞后与端面膜压的变化,这也说明动环位移的变化从动于端面膜压的变化。动环位移曲线的最高点 b 处的值为 0.76mm 为正常工况下膜厚的 80~90 倍,最低点位移为 0mm,在 c-d 段由于在端面开启和闭合以及出现的干摩擦的共同影响,导致密封端面的倾斜,在动压力的影响下密封动环发生振荡。

图 4 为转速 79℃密封流体压力 0.13MPa 转速 2966r/min 下,变工况发生时压力位移关系图。

$$T_{(r)} - T = \frac{\mu \omega^2 r^3}{2kh} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r_1}{r} \right)^{2n+4} \right] - \sum_{n=0}^{\infty} B_n \left[1 - \left(\frac{r}{r_2} \right)^{2n-3} \right] \right\} \quad (2)$$

其中:

$$A_n = \frac{1}{2(n+4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}, \quad B_n = \frac{1}{2(n-4)} \cdot \frac{[(2n)!]^2}{(n!)^4 \cdot 2^{4n}}$$

式中 T ——被密封液体进入密封面前的体积平均温度;

k ——两固体表面导热率的平均值;

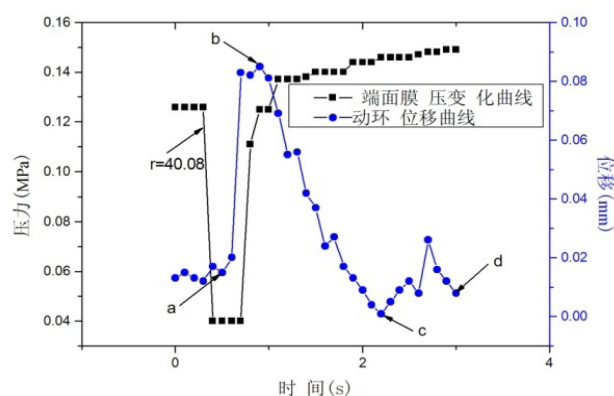


图 4 变工况下转速 79℃密封流体压力 0.13MPa、转速 2966r/min 压力位移关系图

在图中密封动环由于端面发生闪蒸开启的最大位移为 0.85mm,与 2704r/min 条件下相比,由于转速的增加密封动环开启的最大位移大约增大 10 微米,可以看出转速也是影响变工况条件下端面开启的因素之一,转速越高端面闪蒸越剧烈。根据公式 (2) 可知,密封端面的温升与动环角速度的平方成正比,端面温度影响密封端面的相变半径同时也影响闪蒸压力的大小,端面温度越高,变工况发生时液膜的闪蒸压力越大,因此开启力也越大、动环开启的最大位移也越大,符合变工况密封理论。

3.2.3 图像数据分析

在对变工况条件下机械密封端面运动实验研究上,本论文在国内首次应用了可视化技术。记录了变工况发生时,密封端面闪蒸的全过程,得到更为直观的图像数据。直接证明了在变工况(抽空)条件下,机械密封端面必将发生闪蒸。图 5 为经过图像处理后的闪蒸过程图:

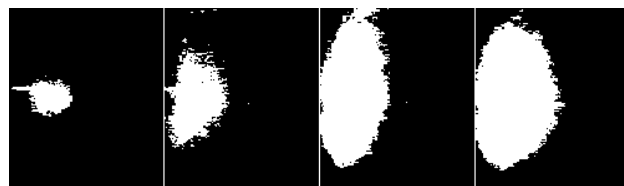


图 5 密封端面闪蒸图

从图中可以看出在端面开始抽空时密封端面附近液体开始汽化,随着抽空的持续,液膜的闪蒸逐渐剧烈。

4 结语

工况变化瞬时,液膜压力失稳,汽化半径的瞬时增大致使密封端面液膜瞬时闪蒸,其闪蒸压力大幅超过工况变化前端面膜压。端面膜压的剧烈变化导致端面失稳,密封端面开启失效。

介质压力对工况变化后闪蒸的剧烈程度有直接的影响。密封介质的压力越高,变工况后沸腾区越大闪蒸越剧烈,端面膜压的变化幅度也越大。在端面开启、闭合以及出现的干

摩擦的共同影响,导致密封端面的倾斜,在动压力的影响下密封动环发生振荡。

转速和温度也是影响变工况条件下端面开启的因素。转速越高端面闪蒸越剧烈;端面温度影响密封端面的相变半径同时也影响闪蒸压力的大小,端面温度的增大导致液膜的闪蒸压力增大,因此开启力也越大、动环开启的最大位移也越大。

参考文献

- [1] 刘录,董守平等.变工况机械密封端面运动实验分析[J],润滑与密封,2006,11:116-118
- [2] 刘令勋,刘英贵.动态密封设计技术,中国标准出版社.1993
- [3] Summers-Smith JD. Mechanical Seal Practice for Improved Performance, MEP, 1988
- [4] 刘录,张学忠.变工况条件下机械密封端面稳定性实验研究[J].润滑与密封.2009,4:64-66