油气混相回流泵送密封结构开启过程试验分析

李庆展¹,李双喜¹,郑 烧¹,钟剑锋²,李世聪¹,廖浩然¹

(1. 北京化工大学 流体密封技术研究中心,北京 100029;2. 中国航发湖南动力机械研究所,湖南株洲 412002)

摘要:为了揭示油气混相回流泵送密封(OG-RPS)结构开启过程的动态泄漏特性和开启特性,分别进行4种典型密封结构的开 启过程运转试验。测量记录密封开启过程的动态泄漏量,进行泄漏特性和开启特性对比分析。结果表明:OG-RPS的泄漏率变化分为 3个明显的阶段,分别对应密封结构开启过程的3种状态,通过泄漏率变化可有效监测密封结构开启过程。随着线速度的增大,密 封结构未开启时泄漏率逐渐增大,泄漏率为正值;密封结构不完全开启时泄漏率逐渐减小,泄漏率为正值;密封完全开启时泄漏率 逐渐减小,泄漏率为负值。槽数为12个、槽深为5μm和槽坝比为0.7的OG-RPS结构密封性能和开启性能最佳。研究成果为 OG-RPS的优化设计、理论分析验证及实际应用提供了基础,并建立了1种基于泄漏率监控密封结构开启过程的方法。

关键词:油气混相;密封;泄漏;开启过程;运转试验;航空发动机

中图分类号: V214.9 文献标识码:A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.05.005

Test Analysis on the Opening Process of Oil-gas Miscible Reflux Pumping Seal

LI Qing-zhan¹, LI Shuang-xi¹, ZHENG Rao¹, ZHONG Jian-feng², LI Shi-cong¹, LIAO Hao-ran¹

(1. Research Center of Fluid Sealing Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. AECC Hunan

Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic leakage characteristics and opening characteristics of the oil-gas miscible reflux pumping seal(OG-RPS)structure during the opening process, four typical seal structures were tested during the opening process. The dynamic leakage of seal opening process were measured and recorded and the leakage characteristics and opening characteristics were compared and analyzed. The results show that the leakage rate of the OG-RPS is divided into three obvious stages, which correspond to the three states of the opening process of the seal structure, and the opening process of the seal can be effectively monitored by the change of the leakage rate. With the increase of linear velocity, the leakage rate increases gradually when the seal structure is not opened, and the leakage rate is positive. When the seal structure is not fully opened, the leakage rate decreases gradually, and the leakage rate is positive. When the seal and opening of OG-RPS structure with 12 slots, 5µm depth and 0.7 ratio are optimum. A method of monitoring the opening process of seal structure is established based on leakage rate, which provides the basis for OG-RPS optimization design, theoretical analysis and practical application.

Key words: oil-gas miscibility; seal; leakage; opening process; operational test; aeroengine

0 引言

油气混相回流泵送密封是近些年国际上发展的 1种基于油气混相润滑技术,是以气体密封油液的新 型动压密封,适用于高转速和油气混相介质的工况, 实现气封液^[1]和零泄漏^[2-3]。OG-RPS 技术对航空发动 机、液体火箭发动机等重要设备^[4-5]上的密封结构有参 考和借鉴意义。目前,关于 OG-RPS 的研究偏少,其 他动压密封的研究成果可为之提供参考。在理论分析 方面,Faria等⁶⁰用有限元法分析结构参数对端面泄漏 率等稳态性能的影响;陈汇龙等¹⁰⁷采用空化模型¹⁰⁶模拟 内流场特性,研究工况参数对密封泄漏特性的影响; 郝木明等¹⁰⁹对泵出型螺旋槽机械密封端面间隙气液两 相流进行数值分析,发现液相介质会在密封结构端面 内径处发生少量泄漏。此外,众多学者还研究了密封

收稿日期:2019-05-14 **基金项目:**国家重点研发计划(2018YFB2000800)资助 作者简介:李庆展(1994),男,在读硕士研究生,主要研究方向为流体密封技术;E-mail:lqz925@foxmail.com。

引用格式:李庆展,李双喜,郑娆,等. 油气混相回流泵送密封开启过程试验分析[J].航空发动机,2020,46(5):22-27. LI Qingzhan, LI Shuangxi, ZHENG Rao, et al. Test analysis on the opening process of oil-gas miscible reflux pumping seal[J]. Aeroengine, 2020,46(5):22-27.

结构操作参数^[10-11]和结构参数^[12]对密封泄漏特性的影 响,将研究方向转向参数优化设计方面。陈汇龙等^[13] 以泄漏量为优化目标,利用响应面法对密封结构参数 进行优化设计,给出最优参数取值范围;丁雪兴等^[14] 对比分析 2 种不同槽型的液体上游泵送密封结构,通 过计算 2 种槽型的密封泄漏量,得出较优的槽型结 构;李欢等^[15]对油气两相动压密封结构端面结构参数 进行正交优化设计,得到稳态工况下的最优动压槽结 构参数。在试验研究方面,王晓彦等^[16]对中间开槽、双 列同向及双列反向 3 种槽型的密封结构进行不同工 况下的水介质试验,得到泄漏量与密封参数之间的关 系;李小芬等^[17]、李欢^[18]采用喷油试验验证了动压密封 在油气两相介质工况下应用的可行性。

上述研究主要集中在单相、稳态分析和优化设计 方面,对混相介质密封及其试验的研究偏少。本文针 对油气混相介质,研究4种典型结构的OG-RPS开 启过程的动态泄漏特性,基于动态泄漏特性分析密封 结构开启状态,揭示操作参数和结构参数对OG-RPS 结构开启过程的动态泄漏特性的影响规律,得出优选 的密封结构参数和动态泄漏率变化规律。

1 密封结构

1.1 结构说明

OG-RPS 结构如图 1 所示。动环和静环的接触部 分为密封端面,是介质泄漏的通道。密封腔内为高压 油气混相介质,密封腔外为低压空气。动环的密封结 构端面上开设螺旋槽,螺旋槽结构如图 2 所示。螺旋 槽的结构参数包括槽数、槽深和槽坝比(无量纲)。螺 旋槽采用激光加工,加工完成的 OG-RPS 动环密封 结构端面分为槽区、堰区和坝区。



1.2 密封参数

密封的具体结构参数及操作参数分别见表 1、2。

2 工作原理

OG-RPS 结构启动时,当密封结构动环转速逐渐

耒	1	结构参数
x		知何梦奴

衣 1 珀钩参数								
参数	端面外径 /mm		端面内径 /mm		平衡直径 /mm			
数值	84		71		73			
参数	槽数	数/个	槽深 / μm		槽坝比			
数值	8,12		5,10		0.7,0.8			
		表2 技	喿作参数					
工况	公舌	腔内压力 /	腔外压力 /	转速/	温度 /			
参数	开展	MPa	MPa	(r/min)	K			
数值	油气	0.03~0.07	0	0~2090	0 288			

提高时,动环密封结构端面螺旋槽区流体的黏性剪切 力逐渐增大,逐渐平衡密封结构端面内、外侧的压力 差,从而阻止密封介质从高压侧流向低压侧。当动环转 速足够高时,螺旋槽能将泄漏到低压侧的密封流体泵 送回高压侧(即回流泵送),同时流体受迫流动,在槽区 形成高压流体,形成密封结构运转的端面动压开启力,

迫使密封结构端面开启。 密封受力分析如图 3 所示。P₁为密封腔内压力, P₀为密封腔外压力。密封 端面的总闭合力 F_m 及总 开启力 F_m 为



$$F_{\rm TC} = F_{\rm S} + F_{\rm I} + F_{\rm C} \tag{1}$$

$$F_{\rm TC} = F_{\rm MO} + F_{\rm SOI} \tag{2}$$

式中:F_s为弹簧力和O形圈摩擦的综合作用力;F₁为 密封腔内压力对密封结构端面的闭合力;F₀为密封 结构腔外压力对密封结构端面的闭合力;F_{M0}为运转 时密封结构端面的动压开启力;F_{s0}为密封结构端面 的静压开启力。

密封结构端面开启前

$$F_{\rm TC} \ge F_{\rm TO}$$
 (3)

$$F_{\rm TC} = F_{\rm TO} \tag{4}$$

3 试验装置

研制了1种新型试验装置,搭建试验系统,模拟 直升机发动机油气混相工况进行试验,密封试验装置 模型和试验台如图4、5所示。

为了保证试验的准确性,需要注意:(1)尽量减小 试验误差,尤其是安装误差;(2)控制弹簧压量保证弹 簧力的一致性;(3)保证联轴器的调整精度,避免振动





N1- 泄漏测量; N2- 进油口; N3- 进气口;

则量腔体;2-轴承和密封结构组 件;3-密封结构腔体;N1-泄漏测量;N2-进油口;N5-油气混相介质出口

图 4 OG-RPS 试验装置

图 5 OG-RPS 试验台

过于剧烈,干扰试验结果;(4)轴承必须选用高精密高 速轴承,保证试验过程中轴承不会失效,并且监测轴 承温度。本试验装置的创新性:(1)采用高速轴承将油 气混相介质充分混合;(2)泄漏测量腔体采用高强度 可视化工程塑料制成,便于观察油液泄漏情况和密封 结构运转情况。

N4- 压力测量

在试验前,N1 接泄漏采集测量装置,N4 接压力 传感器。试验时,N2 通入润滑油,N3 接入高压气,N5 为油气混相介质出口。由于密封结构的高速旋转,润 滑油和高压气在图 4 中的 3 腔中形成油气混相介质。 微小流量测量的准确性是试验成败的关键,本试验采 用自主研发的基于排水法和差压传感器的机械密封 微小流量泄漏量测量系统19 (如图 6 所示),测量相 应转速下的密封泄漏量,测量精度可达 1.692 µg/s。 密封泄漏量非常小,在试验中采用排水法测量,通过 将泄漏量测量转换为细长水管的高度测量,采用差压 传感器测量细长水管内的水位高度变化,计算得出密

封泄漏率。测量正值泄漏 量(气体外泄)时,关闭电 磁阀 SV1、SV4、SV6、SV7, 打开电磁阀 SV2、SV3、 SV5;测量负值泄漏量(大 气倒吸)时,关闭电磁阀 SV2、SV4、SV6, 打开电磁 阀 SV1、SV3、SV5、SV7。



运转试验对4种结构依次进行,具体见表3,其 余试验条件见表 1、2。试验分为静态气密封检测和运 转试验,在试验过程中分别改变密封腔内压力、转速、 槽深、槽数及槽坝比,测量 OG-RPS 结构开启过程的 动态泄漏量,得出 OG-RPS 结构开启过程的密封泄 漏特性。在运转试验前、后分别进行静态气密性检测, 对比分析 OG-RPS 结构运转开启过程对密封性能的 影响。

表 3 4 种典型密封结构

结构形式	槽数 / 个	槽深 / μm	槽坝比					
S1	12	5	0.7					
S2	8	5	0.7					
S3	12	10	0.7					
S4	12	5	0.8					

4 结果与分析

4.1 开启过程动态泄漏特性对比分析

试验时首先设置腔内压力为 0.03 MPa, 分别对 4 种典型密封结构进行运转试验,试验过程中通过增加 动环转速增加密封结构端面线速度,加速运转过程中 密封结构逐渐开启,测量密封开启过程的动态泄漏 量;改变腔内压力,重复上述操作。

试验结果如图7所示。密封结构端面开启过程 中,由于螺旋槽的回流泵 送作用,密封动态泄漏率 出现由正值到负值的变化 现象,泄漏率为正值时,密 封介质向腔外泄漏,泄漏率 为负值时,外部大气和密封 介质被泵送至密封腔内。

位周长动态泄漏量/(µg/s)

20

10

-1(

-20

-30

-40

-50



图 7 不同压力下的密封开启过程动态泄漏率

结合图 7 中(a)、(b)、(c)可知,不同压力运转试验 时的密封结构单位周长动态泄漏率变化趋势基本相 同,即随着密封端面平均线速度的增大,密封结构单位 周长动态泄漏率先增大再逐渐减小。以图 6(a)中 S4 曲 线为例具体说明密封结构的动态泄漏率变化趋势。单 位周长动态泄漏率的变化可分为3个明显的变化阶 段:(1)当动态泄漏率随速度增大而增大时,此时密封 结构端面未开启,密封结构端面处于接触摩擦状态; (2)当动态泄漏率达到极大值以后,泄漏率开始随速度 增大而减小,但数值仍为正值,此时密封的回流泵送作 用开始抵消密封介质向外泄漏,密封结构端面处于不

25

完全开启的过渡阶段,密封结构端面容易发生碰摩; (3)随着线速度继续增大,回流泵送作用越来越强,并 完全抵消密封介质向外泄漏,密封泄漏率由正值向负 值变化,泄漏率继续减小,此时密封结构完全开启,密 封结构端面处于非接触运转状态。密封动态泄漏率变 化的3个阶段分别对应密封开启过程的3个状态:未 开启状态(State 1)、不完全开启状态(State 2)和完全开 启状态(State 3),通过密封动态泄漏率的变化可有效 监控密封结构的开启状态。

4.2 基于动态泄漏特性的开启特性对比分析

基于 OG-RPS 结构动态泄漏特性,分析 4 种结构 的 OG-RPS 开启特性。为方便分析, 定义 Vsu 为 OG-RPS 开始开启时的端面平均线速度;Vss 为 OG-RPS 完全开启时的端面平均线速度; ΔV 为 State 2 阶段的端面平均线速度跨度,以图 7(a)中 S4 曲线为例

$$\Delta V = V_{S3} - V_{S1} \tag{5}$$

 ΔV 数值越大,OG-RPS 结构跨越 State 2 越困 难,OG-RPS 越容易发生碰摩,进而导致密封失效; Vsa 数值越大,OG-RPS 结构完全开启越困难;Vsu 数 值越大,OG-RPS 结构开始开启越困难。而 OG-RPS 结构开启越困难,OG-RPS 结构越容易发生摩擦磨损 甚至导致密封失效,在实际应用中更希望密封端面容 易开启,即 V_{st} 、 V_{st} 和 ΔV 的数值越小越好。回流泵 送动压密封的开启困难程度与密封结构端面的开启 力大小有关,开启力越大,密封结构端面越容易开启, 而密封结构端面螺旋槽的结构决定了密封结构端面 开启力的大小。

OG-RPS 结构开启线速度变化如图 8 所示。从图 8(a)中可见,OG-RPS 结构开始开启时的端面平均线 速度随压力增大而增大,4种典型密封结构开始开启 时的端面平均线速度从大到小依次是:S2、S4、S3、S1, 其中 S1 开始开启时的端面平均线速度约为 S2 的 24.73%~24.99%,约为 S3 的 50%~53.03%,约为 S4 的 32.76%~41.26%。从图 8(b)中可见, OG-RPS 结构完 全开启时的端面平均线速度随压力增大而增大,4种 典型密封结构完全开启时的端面平均线速度从大到 小依次是:S2、S4、S3、S1, 其中S1 完全开启时的端面 平均线速度约为 S2 的 26.97%~28.26%, 约为 S3 的 56.38%~63.01%,约为 S4 的 45.23%~48.99%。从从图 8(c)中可见, ΔV 随压力增大基本不变, 4 种典型结 构的 ΔV 从大到小依次是:S2、S4、S3、S1,其中 S1 的

ΔV约为S2的28.57%~31.90%,约为S3的66.67% ~73.11%,约为 S4 的 55.08%~58.61%。由此可以得出 在4种典型密封结构中,S1的结构参数能有效降低 密封结构的开启速度和开启难度,即槽数为12个的

OG-RPS 结构的开启性能 比槽数为8个的更好,槽 深为 5 μm 的 OG-RPS 结 面平均线速) 构的开启性能比槽深为10 μm的更好, 槽坝比为 0.7 的 OG-RPS 结构的开启性 能比槽坝比为 0.8 的更好。 40 端面平均线速度/(m/s) 30 60

50

40

30

20





基于以上关于 OG-RPS 结构动态开启特性对比 分析可得,密封的优选结构参数是槽数为12个,槽深 为 5 μm, 槽坝比为 0.7, 此时密封端面的流体剪切力 最大,密封端面开启力最大,密封的开启难度最小。

4.3 摩擦磨损情况对比分析

通过编程设置试验的载荷步和时间步,每种结构 累计运转时间为 15600 s。通过密封结构运转前后的 静态气密性检测对比和运转前后的动环、静环表面质 量对比判断密封结构的摩擦磨损情况。在试验运转 前,在0.03~0.07 MPa范围内改变腔内压力,分别测

量在不同压力下的密封结 构静态泄漏量;改变结构 形式,重复上述步骤,得出 态泄漏率随压力的变化趋 势。在运转试验结束后,再 次进行静态气密性检测。 试验得到压力对密封静态 泄漏率的影响如图9所示。



从图中可见,不同结构的密封静态泄漏率变化趋 势相同,都随压力增大而增大;密封"跑合"效果明显, "跑合"后摩擦副接触更加紧密,密封运转后静态泄漏 率较运转前的偏小;对比分析 S1 和 S2 可得,槽数为 12 个的 OG-RPS 比槽数为 8 个的泄漏率小;对比分 析 S1 和 S3 可得,槽深为 5 μm 的 OG-RPS 的泄漏率 比槽深为 10 μm 的小;对比分析 S1 和 S4 可得,槽坝 比为 0.7 的 OG-RPS 的泄漏率比槽坝比为 0.8 的小。 S3 和 S4 运转前后静态泄漏率相差较大的原因是:S3 槽深较深、S4 槽坝比较大,导致运转后槽内储油较 多,在一定程度上能够阻止气体泄漏。

从宏观上看,4种密封结构的动环、静环密封端面 几乎无磨损,试验后密封端面质量较好,如图10所示。



采用光学表面形貌仪将试验前后动静环同一位 置放大 50 倍观察其微观形貌,运转后 4 种密封结构 的动环、静环密封结构端面上存在油渍,但是无明显 的磨损情况,如图 11 所示。

综合密封结构运转前后气密性检测对比结果和 运转前后的动环、静环表面质量和微观形貌对比结果 可知,在运转试验后密封结构端面无明显磨损情况, 动、静环密封结构端面磨合较好,4种典型密封结构 结构的试验都取得了成功。



5 结论

(1)在4种典型结构参数下的运转试验都取得了 成功,但密封性能和开启性能有所不同;

(2)OG-RPS的泄漏率变化分为3个明显的阶段, 分别对应密封结构开启过程的3个状态,通过泄漏率 变化可有效监测密封结构开启过程;

(3)随着密封端面平均线速度的增大,在密封结构未开启状态时密封泄漏量逐渐增大,泄漏量为正值;在密封结构不完全开启状态时密封泄漏量逐渐减小,泄漏量为正值;在密封结构完全开启状态时密封 泄漏量逐渐减小,泄漏量为负值;

(4)基于 OG-RPS 的泄漏特性和开启特性分析, 槽数为 12 个、槽深为 5 μm、槽坝比为 0.7 的结构参数 能有效降低密封结构的泄漏率、开启速度和开启难度。

参考文献:

[1] 宋鹏云,丁志浩. 螺旋槽泵出型干气密封端面气膜压力近似解析计 算[J]. 润滑与密封,2011,36(4):1-3.

SONG Pengyun, DING Zhihao. An approximate analytical method of the gas film pressure of the outward pumping spiral groove dry gas seals[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(4):1-3. (in Chinese) [2]张伟政,于宗洋,丁雪兴,等.上游泵送机械密封液膜流场近似解析 计算[J].应用力学学报,2015,32(4):45-48.
ZHANG Weizheng,YU Zongyang,DING Xuexing, et al. Approximate analytical calculation of liquid film flow field on upstream pumping

mechanical seal [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2015,32
(4):45-48. (in Chinese)

[3] 李贵勇,郝木明,闫明强,等. 螺旋槽上游泵送机械密封密封特性数 值计算[J]. 润滑与密封, 2010,35(9):56-59.

LI Guiyong, HAO Muming, YAN Mingqiang, et al. Numerical computations of the seal performance of upstream pumping mechanical seals with spiral grooves [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(9):56–59. (in Chinese)

[4] 历虹,白少先.低压螺旋槽上游泵送气体端面密封零泄漏特性[J].润 滑与密封,2017,42(3):59-64,101.

LI Hong, BAI Shaoxian. Performance of zero–leakage upstream pumping gas spiral groove face seals operating at low pressure[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(3): 59-64, 101. (in Chinese)

- [5] Andersson P, Koskinen J, Varjus S, et al. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces[J]. Wear, 2007, 262(3-4): 369-379.
- [6] Faria M T, Miranda W M. Pressure dam influence on the performance of gas face seals[J]. Tribology International, 2012, 47:134–141.
- [7] 陈汇龙,刘玉辉,刘彤,等基于动网格的上游泵送机械密封性能参数分析[J].排灌机械工程学报,2012,30(5):583-587.
 CHEN Huilong,LIU Yuhui,LIU Tong, et al. Analyzing performance parameters of up-stream pumping mechanical seals based on dynamic

mesh technique [J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2012, 30(5):583–587. (in Chinese)

- [8] Bruneti è re, Tournerie B. Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime[J]. Tribology International, 2012, 49:80–89.
- [9] 郝木明,蔡厚振,刘维滨,等.泵出型螺旋槽机械密封端面间隙气液 两相流动数值分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39 (6):129-137.

HAO Muming, CAI Houzheng, LIU Weibin, et al. Numerical analysis on gas-liquid two-phase flow of outward pumping spiral-grooved mechanical seal clearance [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015, 39 (6):129-137. (in Chinese)

- [10] LI Ying, SONG Pengyun, XU Hengjie. Performance analyses of the spiral groove dry gas seal with inner annular groove [J]. Applied Mechanical and Materials, 2013, 420:51 – 55.
- [11] WANG Qiang, CHEN Hui Long, LIU Tong, et al. Research on performance of upstream pumping mechanical seal with different deep spiral groove[J]. Earth and Environmental Science, 2012, 15:072019.
- [12] BAI Shaoxian, MA Chunhong, PENG Xudong, et al. Thermoelastohy

drodynamic behavior of gas spiral groove face seals operating at high pressure and speed[J]. Journal of Tribology, 2015, 137(2):021502.

- [13] 陈汇龙,刘金凤,任坤腾,等.基于响应面法的上游泵送机械密封优化[J].排灌机械工程学报,2016,34(3):232-237.
 CHEN Huilong,LIU Jinfeng,REN Kunteng,et al. Optimization of upstream pumping mechanical seal based on response surface method
 [J].Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering,2016,34
- (3): 232-237. (in Chinese)
 [14] 丁雪兴,陆俊杰,张伟政,等.上游泵送机械密封两种优化槽形及性能的对比[J].兰州理工大学学报,2015,41(6):74-78.
 DING Xuexing,LU Junjie,ZHANG Weizheng, et al. Comparison between two optimized groove configurations and their performances for upstream pumping mechanical seal [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(6):74-78. (in Chinese)
- [15] 李欢,李双喜,李小芬,等.油气两相动压密封端面结构多参数正交 优化及试验研究 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2017,44 (1):76-84.

LI Huan, LI Shuangxi, LI Xiaofen, et al. Multiparameter optimization and orthogonal experimental study of a two-phase oil and gas dynamic pressure seal structure [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2017, 44 (1):76-84. (in Chinese)

[16] 王晓彦,余婕,汤东妹.不同槽型上游泵送机械密封性能比较[J].石 油化工设备,2013,42(2):19-22.

WANG Xiaoyan, YU Jie, TANG Dongmei. Performance comparisons of different grooves of upstream pumping mechanical seal[J]. Petrochemical Equipment, 2013, 42 (2): 19–22. (in Chinese)

[17] 李小芬,蔡纪宁,张秋翔,等.低液气比混合润滑下的动压密封性能 分析[J].润滑与密封,2016,41(4):40-44,81.

LI Xiaofen, CAI Jining, ZHANG Qiuxiang, et al. Analysis on hydrodynamic sealing performance under low liquid-gas ratio mixed lubrication [J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(4):40-44, 81. (in Chinese)

[18] 李欢. 油气两相回流泵送密封的性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学,2017.

LI Huan. Performance study of oil-gas two-phase backflow pumping seal [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)

[19] 李双喜, 王梁, 蔡纪宁, 等. 一种机械密封泄漏率在线监控系统: 中国 201610007336.X [P].2016-03-23.

LI Shuangxi, WANG Liang, CAI Jining, et al. An on-line monitoring system for leakage rate of mechanical seals; China 201610007336.X [P].2016-03-23. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)