

超高速机械密封副离子注入与摩擦学特性研究

郭军刚 胡丽国 郝小龙 王志峰 赵经明

(北京精密机电控制设备研究所,北京,100076)

摘要:超高速机械密封需满足 CZ-5 运载火箭伺服系统中涡轮泵可靠性及寿命指标要求。离子注入作为重要的金属材料表面改性技术,对有效改善机械密封副旋转环表面摩擦磨损特性至关重要。在对密封动环表面离子注入可行性研究的基础上,提出了对其密封副配对摩擦磨损特性进行综合验证的试验方案。通过选取常用典型石墨与旋转金属环副进行干磨条件下的试验测试,改变线速度、端面比压,使用摩擦磨损试验机对比分析了配对摩擦副的摩擦磨损特性,系统研究了载荷和转速对密封副配对摩擦系数的影响规律,揭示其密封摩擦学特性。通过机械密封在温度应力下的工作可靠性分析以及密封副整机稳态工作性能验证,为超高速涡轮泵的寿命与可靠性试验验证提供了一个合理的、高效费比的技术途径。

关键词:机械密封;离子注入;摩擦磨损;综合验证

中图分类号:V433 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)S-0027-06

Ion Implantation and Tribological Properties Based on Hyperspeed Mechanical-Seal Pair

GUO Jungang, HU Ligu, HAO Xiaolong, WANG Zhifeng, ZHAO Jingming

(Beijing Research Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing, 100076, China)

Abstract: The super-high speed turbo of the CZ-5 launch vehicle servo system has both reliability and life requirements. As an important metal surface modification technology, ion implantation is critical to effectively improving frictional wear characteristics of mechanical-seal swiveling ring. The integrated test plan is designed for an seal-pair frictional wear characteristics based ion-implantation seal swiveling ring feasibility. The frictional wear characteristics of typical graphite used in space field with steel pair are compared by universal friction and wear tester. Based on the effects of linear velocity, face pressure of hard ring on wear volume and friction coefficient are studied. Therefore, the comprehensive tribological properties of the friction pair are studied by the effect factor of load and speed, and the tribological properties will be disclosed. Through the reliability analysis of the mechanical seal pair under the temperature stress and the verification of the steady-state working performance of the seal pair, the application of these plans will offer a reasonable and high effectiveness-cost rate way for life and reliability compliance test of super high-speed turbopump.

Key words: mechanical-seal; ion implantation; frictional wear characteristics; integrated compliance

CZ-5 运载火箭航天推力矢量伺服系统中,超高速涡轮泵是产生高压介质的核心动力部件,机械密封作为其关键部件,一旦出现严重故障,将导致

伺服系统工作失效。涡轮泵工作过程中其轴系介于一、二阶临界转速之间,且伴随启停机、变压力、负载时变等特殊工况,轴系振动形态复杂,机械密

基金项目:国家自然科学基金-航天先进制造技术研究联合基金(U1737202)重点资助项目。

收稿日期:2019-04-09;**修订日期:**2019-06-20

通信作者:郭军刚,男,高级工程师,E-mail:beihang_1952@sina.com。

引用格式:郭军刚,胡丽国,郝小龙,等.超高速机械密封副离子注入与摩擦学特性研究[J].南京航空航天大学学报,2019,51(增刊):27-32. GUO Jungang, HU Ligu, HAO Xiaolong, et al. Ion Implantation and Tribological Properties Based on Hyperspeed Mechanical-Seal Pair[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 27-32.

封工作时采用航空液压油作为工作介质,其密封副端面温度可升达400℃甚至更高,因此机械密封所承受的负载工况极其恶劣,其设计一直是密封领域内高难课题。超高速机械密封石墨对高温合金摩擦副配对的特殊性及其工况的严酷性,加之相关基础理论和试验研究缺乏,目前主要依靠经验设计,导致了机械密封异常磨损和泄漏时有发生。本文主要从超高速机械密封的特殊工况入手,深入开展密封副离子注入特性与摩擦磨损机制等方面的研究,为高速涡轮泵机械密封的设计制造提供依据和支撑。

1 超高速机械密封工作原理分析

1.1 原理与结构

某高速涡轮泵机械密封由动环、静环组件、密封壳体等组成,如图1所示,是靠一对垂直于轴做相对滑动的端面在流体压力和补偿机构的弹力作用下保持贴合并配以辅助密封而达到阻漏的轴封装置。其中动环、静环端面组成一对摩擦副,静环依靠液体压力和弹簧弹力使其端面始终贴合在动环上,并在端面上产生适当比压并保持一层液压膜从而达到动态运转工况下有效密封的目的。弹性元件产生压力,可使涡轮泵在不运转状态下保持端面贴合,保证密封介质不外漏,并防止杂质进入密封端面^[1]。

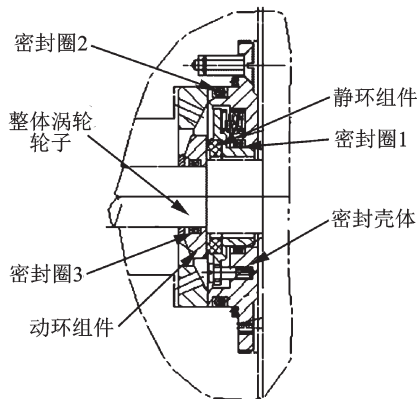


图1 机械密封副结构

Fig.1 Structure of mechanical-seal pair

1.2 机械密封副摩擦磨损

机械密封是燃气液压伺服系统中涡轮泵的关键部件,在高速、高压、振动复杂工况下,其可靠性和摩擦学特性对产品可靠运行至关重要。单端面平衡型接触式机械密封是国内高速涡轮泵实现气、液密封的主要形式之一,其工作性能不仅取决于密封件的结构设计,更与端面密封摩擦副配对材料的正确选择密切相关。其中摩擦副摩擦磨损特性是决定其密封性能优劣的重要指标,因此开展机械密

封端面摩擦副的摩擦磨损特性研究具有重要的实用价值。

2 机械密封副旋转环全方位离子注入

2.1 离子注入与沉积工艺技术原理

20世纪80年代末发展起来的等离子体浸没离子注入(Plasma immersion ion implantation,PIII)技术,其工作原理如图2所示,是直接将工件浸泡在等离子体中,然后在工件上加一负脉冲高压,工件周围形成了离子鞘层;在强电场作用下,离子从各个方向同时垂直注入工件的表面(图2(b));在注入过程中,由于离子不断被注入中心靶中,电子被排开,离子鞘层将不断扩展(图2(c))。由其原理可知,如果鞘层形状与工件的形状非常接近,离子将从各个方向同时垂直注入工件表面。因此,PIII技术克服了传统束线离子注入所固有的直射性限制,能够快速处理各种复杂形状的工件。

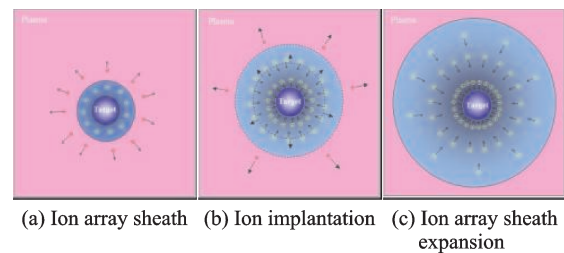


图2 全方位离子注入原理

Fig.2 Principle of PIII

在全方位离子注入与沉积中可以在真空室中同时产生金属与气体等离子体,如果施加在工件上电压幅值很高,可以实现金属与气体离子注入或离子轰击;如果电压比较低,可以实现金属或者化合物膜的沉积。通过控制高电压与低电压时间的比率,就可以实现在薄膜沉积过程中全方位的离子轰击,从而在复杂形状零件表面获得具有强膜基结合力、致密和均匀的化合物膜层^[2-3]。

2.2 全方位离子注入对材料性能改善

2.2.1 提高表面硬度

离子注入材料表面以后,由于离子注入产生的位错强化、固溶强化以及离子注入后所形成的化合物相等综合作用,材料表面的显微硬度HV会发生一定的变化。如图3所示,9Cr18钢经不同离子注入处理后表面的显微硬度有明显提高,采用Mo离子注入后的表面显微硬度可以提高将近70%。

2.2.2 抗磨损

近年来,笔者采用气体离子注入、金属离子注入以及金属+气体离子混合注入的方法对9Cr18

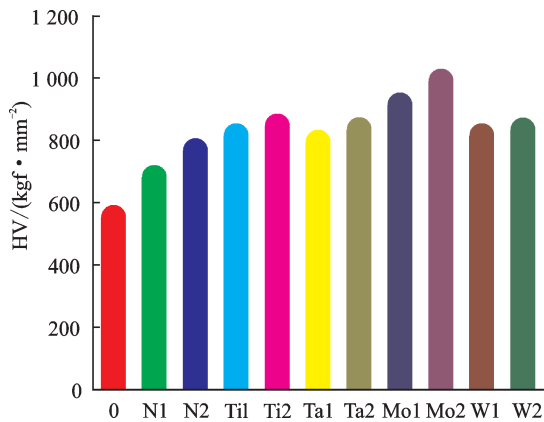


图3 9Cr18 钢经不同离子注入处理后表面的显微硬度

Fig.3 Microhardness of 9Cr18 by difference ion implantation

等材料进行了PIII处理,并对处理后的样品进行了测试结果。图4为9Cr18试样摩擦特性曲线的测试结果,试样采用的处理工艺分别为N离子注入、Ta离子注入和Ti+C离子注入。

从图4可以看出,这3种工艺对摩擦系数 f 的影响基本上是相似的,均从处理前的0.9降至0.2左右。但是改性层的磨透圈数不一样,采用气体离子注入时改性层在1500转时已完全磨透,采用金属离子注入时改性层的磨透圈数为2300转,但是金属+气体离子混合注入的方法获得的改性层在3000转时仍然没有磨透,表明采用金属+气体离子混合注入的方法对轴承材料的改性效果最为明显,这主要是由于这种方法在材料表面合成了一些高硬度和高抗磨的强化相。

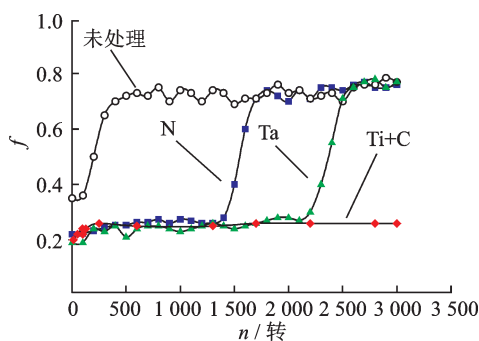


图4 经PIII处理后的9Cr18试样摩擦特性曲线

Fig.4 Frictional characteristic of 9Cr18 by PIII

2.3 机械密封旋转环离子注入与沉积

机械动密封部件主要由浸渍石墨构成的静环和运转速度高达15万转/分的高温合金动环组成。由于浸渍石墨的磨损速率要比动环高得多,工作过程中石墨静环磨损0.7 mm后密封即宣告失效,因此要求石墨环表面的磨损速率降低到原来的20%左右^[4]。如果将石墨静环与高温合金动环之间的

摩擦系数降低到原来的0.15以下,将使摩擦产生的热量与原有结构基本相同,从而能够保证在密封系统结构不变的情况下保持密封的可靠性。从材料角度将石墨静环与动环之间的磨损速率和摩擦系数降低到原来值以下难度很大,因此采用先进的表面离子注入氮技术对动环进行表面强化处理,将石墨静环与动环之间的磨损速率降低到原来的 $0.1 \times 10^{-13} \text{ m}^{-3}/(\text{N}\cdot\text{m})$ 以下和摩擦系数降低到0.15以下,极大提高了动密封工作的稳定性和可靠性^[5]。图5为离子注入氮动环。

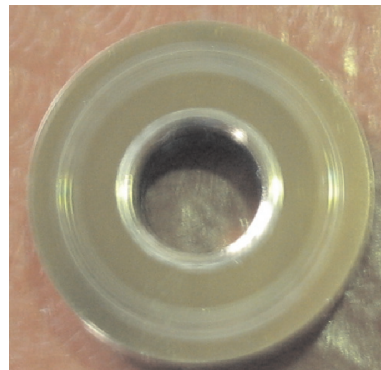


图5 离子注入氮动环

Fig.5 Rotating seal ring by ion implantation

经大量试验验证,离子注入氮动环可以满足某型超高速涡轮泵机械动密封使用要求。在产品装配调试过程中,产品调试合格率高于原型动环的装配合格率。同类工况条件下,机械动密封工作可靠性有所提高。

3 机械密封副材料摩擦学特性

针对伺服系统高速泵机械密封用典型石墨材料,系统地测试其力学、热学特性,并模拟涡轮泵机械密封实际运行工况,在确保机械密封端面PV值的试验值不低于实际运行数值的原则下,开展石墨和高温合金配对摩擦磨损实验研究,揭示典型密封端面配副材料的摩擦磨损特性;基于获得的材料力学与热学特性及摩擦磨损特性,进而研究并提出影响密封性和耐磨性的主要因素,揭示端面摩擦副界面接触应力、摩擦剪应力和摩擦热对端面摩擦磨损的作用机理。

3.1 试验工况设计

本文主要的研究对象是机械密封摩擦副金属动环和石墨静环,密封副所用材料动环为9Cr18,静环为浸树脂石墨,在摩擦磨损试验中模拟涡轮泵机械密封实际运行工况,开展高温合金和石墨的配对摩擦磨损试验研究。以不同浸渍石墨和渗氮9Cr18配对,其中石墨为销且静止不动,9Cr18渗氮

圆盘是试验转盘;采用UMT-II摩擦磨损试验机进行石墨材料的摩擦学特性试验研究。摩擦磨损试验机采集的工况参数为转速和载荷,为了便于与涡轮泵机械密封实际运行工况相对照,换算为等效的线速度和压力。本次摩擦磨损试验分别选取4个转速值和4个载荷值进行正交试验,如表1所示。

表1 试验工况参数

Tab. 1 Parameter of test condition

端面载荷/ N	端面压力/ MPa	转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	平均线速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
60	0.092	100	0.482
120	0.185	200	0.963
240	0.369	500	2.409
300	0.461	800	3.854

3.2 密封副材料摩擦磨损研究

以高温合金和碳石墨等常用密封副材料为研究对象,系统研究特殊工况下端面材料摩擦磨损特性的影响规律,建立磨损预测模型和分析方法,揭示密封副端面磨损的机理与机制。

3.2.1 载荷对摩擦系数的影响

根据试验结果可以研究载荷 F 对密封端面摩擦系数的影响规律。在油润滑介质下,上试样材料为进口浸锑石墨,下试样材料为合金钢38CrMoAl,在不同转速条件下,摩擦系数随载荷的变化曲线如图6所示。

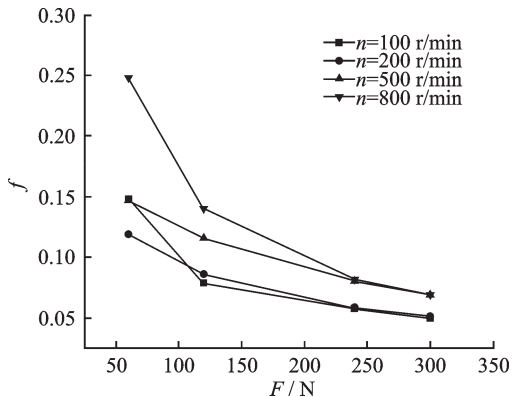


图6 摩擦系数随载荷的变化曲线

Fig.6 Curves of friction coefficient vs load

由图6可以看出,随着载荷的增大,密封环间摩擦系数逐渐减小。分析原因可能是:在密封端面间存在稳定流体膜时,流体膜的承载能力稳定,载荷增大,而密封环间的摩擦扭矩变化不大,从而导致摩擦系数减小。

3.2.2 转速对摩擦系数的影响

根据试验结果可以研究转速 v 对密封端面摩擦系数的影响规律。在油润滑介质下,上试样材料为国产浸锑石墨,下试样材料为合金钢

38CrMoAl,在不同载荷条件下,摩擦系数随转速的变化曲线如图7所示。

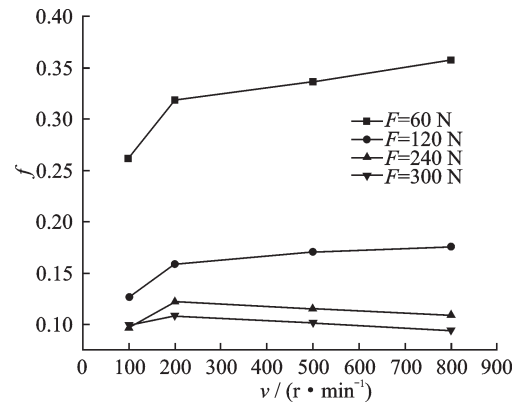


图7 摩擦系数随转速的变化曲线

Fig.7 Curves of friction coefficient vs speed

由图7可以看出,当载荷较小时,随着转速的增大,摩擦系数逐渐增大,当载荷较高时,摩擦系数基本趋于稳定。分析原因可能是:当载荷较小时,密封端面间形成的流体膜尚不稳定,摩擦系数变化较大;而载荷较高时,形成了稳定的流体膜,摩擦系数基本保持稳定。

干态下,相对转速对软质材料配对副的摩擦学特性有着重要影响;对于浸渍树脂石墨材料,提高转速能够促进石墨转移层形成,改善润滑状态;浸金属石墨的磨损机制由粘着磨损转变为磨粒磨损,摩擦系数反而增加。

4 机械密封可靠性与试验验证

4.1 密封副产品寿命分布模型

为了评估贮存试验中静环组件及涡轮泵的寿命,需要建立寿命-应力模型,将失效率或者寿命与给定的应力联系起来,这样就可以用加速试验中得到的度量来推断常温下的贮存寿命。根据国内外的研究结果,诸如静环组件之类的机械产品的寿命与温度应力之间的关系可用Arrhenius方程来描述^[6-7]。

工程上较多地采用Weibull分布来分析失效的模式和区域。Weibull分布包含了寿命曲线中早期失效、偶然失效和耗损失效3种形态,机械密封的失效规律也服从Weibull分布,如式(1)。通常,机电产品的寿命分布可用指数分布、威布尔分布或对数正态分布进行描述。其中威布尔分布应用最广泛。本文加速贮存试验中首先假定静环组件的贮存寿命服从两参数Weibull分布^[8-9]。对于威布尔分布,其密度函数为

$$f(t) = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (1)$$

式中:参数 β 称为Weibull分布的形状参数;参数 η 称为尺度参数,又称为Weibull分布特征寿命。在加速贮存寿命下,各温度应力下威布尔分布的参数可采用最大似然估计法进行。根据所获得的试验数据,通过逆矩估计或极大似然估计法得到静环组件分布参数 β 和 η ^[10]。

4.2 高速机械密封整机试验系统可靠性模拟

如图8所示,试验装置主要由高速驱动电主轴、油润滑系统及试验台本体3部分组成。试验台转子采用电主轴直接驱动来模拟考核机械动密封的工作寿命与长时稳定运转可靠性。涡轮轴承腔润滑油由专门的润滑泵站(含叶轮泵)提供,润滑油选用12号航空液压油。在振动台上按如图9所示的功率谱激励高速旋转轴系的振动试验是完全可行的。

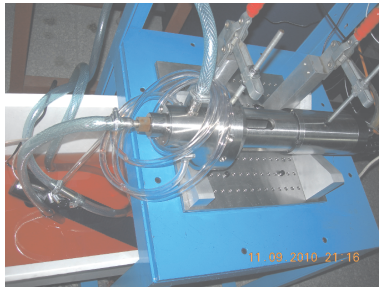


图8 试验系统构成图

Fig.8 Structure of testing system

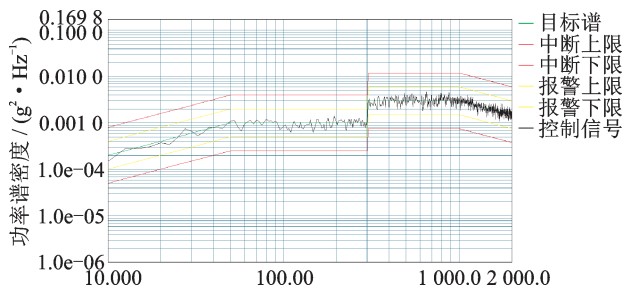


图9 轴系40 000 r/min激振功率谱

Fig.9 Excitation power spectrum of 40 000 r/min

试验流程如下:

(1)在60 000 r/min条件下,高压大流量供油条件下,搅油损耗偏大,电机电流高达15 A。

(2)调整供油条件后在72 000 r/min、78 000 r/min可正常运行,电机电流6 A。

(3)调整供油管道调节阀门前压力到1.5 MPa,回油管道有油气混合回流,运行到90 000 r/min,保持1 min。

(4)条件同上,90 000 r/min,保持运行5 min。

如图10所示,现场高速拖动试验表明:

(1)试验器可以在80 000~90 000 r/min稳定运行。

(2)机械密封单次稳定运行时间达到20 min,且具备进行单次连续运行更长时间试验条件。

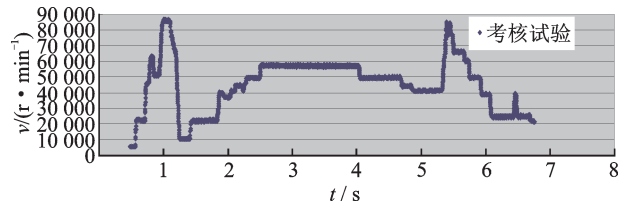


图10 试验转速变化图

Fig.10 Change of axial test speed

5 结 论

机械密封作为超高速涡轮泵的核心部件其安全运行具有重要意义。全方位离子注入与沉积技术可为机械密封副旋转环表面强化处理提供可靠的技术支持,可有效提高旋转环性能和使用寿命,进一步提高密封动环和石墨静环的摩擦磨损性能。

超高速高温工况下,超高速涡轮泵机械密封端面的异常磨损失效与摩擦副的材料特性密切相关,通过揭示密封副材料特性与端面摩擦磨损间的关联规律和本质,有助于阐释特殊工况下机械密封的失效规律,为密封副材料的配副选择提供重要的依据。利用超高速机械动密封试验系统通过大量的试验研究超高速机械密封在不同温度下频繁启停、长时运转来验证机械密封的可靠性与工作寿命,整机系统设计合理,满足技术指标要求,为提高伺服系统机械密封工作可靠性、降低其贮存维护工作量提供理论依据和技术支撑。

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, 2002.
 - [2] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIMC S B, et al. Sealing in turbo-machinery [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 313-349.
 - [3] GREEN I. Robustness of modeling of out-of-service gas mechanical face seal; 2006 NASA Seal/Secondary Air System Workshop[R]. [S.l.]: NASA, 2016: 289-323.
 - [4] 王超. 机械密封可靠性工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
 - [5] ZHANG U, ZHAO W. Design and experimental study on the controllable high-speed spiral groove face seals[J]. Tribology Letters, 2014, 53(2): 497-509.
 - [6] 陈汇龙, 王强, 李雯瑜, 等. 基于 Fluent 的螺旋槽上游泵送机械密封三维微间隙流场数值模拟[J]. 润滑与密封, 2012, 37(2): 16-19.
- CHEN Huilong, WANG Qiang, LI Wenyu, et al.

- Numerical simulation of 3-D flow in upstream pumping mechanical seals with spiral grooves based on Fluent[J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(2): 16-19.
- [7] 顾东升,孙见君,马晨波,等.基于数值模拟的自泵送机械密封正交试验[J]. *化工学报*, 2015, 66(7): 2464-2473.
- GU Dongsheng, SUN Jianjun, MA Chenbo, et al. Orthogonal test of self-pumping mechanical seals based on numerical simulation [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(7): 2464-2473.
- [8] 产文,宋鹏云,毛文元,等.螺旋槽干气密封端面气膜温度场的数值分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(5): 422-428.
- CHAN Wen, SONG Pengyun, MAO Wenyuan, et al. Numerical analysis of temperature field of gas film in spiral groove dry gas seal [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(5): 422-428.
- [9] 彭旭东,王玉明,黄兴,等.密封技术的现状与发展趋势[J]. *液压气动与密封*, 2009, 29(4): 4-11.
- PENG Xudong, WANG Yuming, HUANG Xing, et al. State-of-the-art and future development of sealing technology [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2009, 29(4): 4-11.
- [10] HU X P, SONG P Y. Theoretic analysis of the effect of real gas on the performance of the T-groove and radial groove dry gas seal [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 271: 1218-1223.

(编辑:胥橙庭)