

综述与论文

# 机械密封液膜汽化问题研究现状与进展

王 涛, 黄伟峰, 王玉明

(清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 端面液膜汽化现象对机械密封的工作性能具有重要影响, 是机械密封研究与应用的焦点问题之一。从物理机制、实验研究、理论研究 3 方面介绍了机械密封液膜汽化问题的研究现状: 阐释机械密封液膜汽化的物理机制及其可能造成的危害; 从早期的简单现象观察到后来稳态及瞬态的量化实验研究, 总结各阶段的技术与成果; 涵盖轴对称到全三维、稳态到瞬态、间断沸腾模型到连续沸腾模型的各种类型的数学模型和研究进展。在总结分析研究现状的基础上, 对未来两相密封的研究方向进行了展望。

**关键词:** 两相机械密封; 汽化; 稳定性

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.11.001

**中图分类号:** TH 117.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2012) 11-3375-08

## Research and progress of mechanical seals operating with vaporization transition

WANG Tao, HUANG Weifeng, WANG Yuming

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Vaporization transition between mechanical seal faces plays an important role in the operation performance of mechanical seals, which is one of key issues in mechanical seals research and applications. A review on mechanical seals operating with vaporization transition is introduced from the aspects of physical principle, experimental research and theoretical research, respectively. The physical principle and possible damages of film vaporization in mechanical seals are described. The progress from original phenomenon observation to quantitative experiments on steady and transient states and the major achievements are presented. Mathematical models and their development from 2-D axisymmetry models to 3-D models, from steady state to transient state and from discrete boiling models to continuous boiling models are summarized. Based on the above review, the research directions of two-phase mechanical seals are proposed.

**Key words:** two-phase mechanical seal; vaporization transition; stability

### 引 言

在轻烃泵、低温液化气泵、热水泵、热油泵等

极端工况或特殊介质的石油炼化装备中, 广泛存在着机械密封端面液膜汽化的现象<sup>[1-4]</sup>。机械密封在此状态下运行时, 可能发生多种失稳现象。这种汽

2012-03-27 收到初稿, 2012-04-23 收到修改稿。

**联系人:** 黄伟峰。第一作者: 王涛 (1986—), 男, 博士研究生。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51005131); 国家科技支撑计划项目 (2011BAF09B05); 国家重点基础研究发展计划项目 (2009CB724304)。

**Received date:** 2012-03-27.

**Corresponding author:** HUANG Weifeng, huangwf@thu.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (51005131), the National Key Technology R&D Program (2011BAF09B05) and the National Basic Research Program of China (2009CB724304).

化失稳是导致密封失效的主要原因之一<sup>[5-9]</sup>。

具有端面液膜汽化工况的机械密封, 又称为两相机械密封。国内外学者对两相机械密封已进行多年的理论与实验探索, 积累了较为丰富的研究成果。然而, 目前对该问题实现定量化的预测和分析仍存有较大困难<sup>[5,8]</sup>。在实际工程中, 依然采用经验和实验结合的方法进行产品设计, 缺乏完整的设计理论体系, 制约了机械密封适应高参数与复杂工况的能力, 重要设备的机械密封因液膜汽化导致失效的情况时有发生。以文献 [9] 中案例为例: 中石油吉林石化公司炼油厂关键设备联合芳烃装置热水泵, 4 年间共发生机械密封失效 67 次 (密封运行时间最短为 4 h, 最长也仅 3 个月), 失效原因就是端面液膜汽化导致密封端面发生严重磨损。

近年来, 我国石化装备的迅速发展给机泵设备和配套密封件的技术性能提出了越来越高的要求<sup>[10]</sup>。作为高性能机械密封设计的关键技术之一, 机械密封端面液膜汽化机理分析及相应的先进密封设计技术亟待深入研究。本文将从物理机制、实验研究、理论研究 3 方面, 依次论述机械密封液膜汽化问题研究中的重要成果和现状, 并在此基础上对未来研究提出展望, 为相关研究的开展提供参考和借鉴。

## 1 密封端面液膜汽化物理机制

机械密封是含有多组件的装置, 其典型结构如图 1 所示。为保证机械密封的稳定工作, 密封端面之间一般要求形成稳定的流体薄膜, 以提供适当的润滑, 避免干摩擦磨损。密封端面的开启载荷是由端面间的流体静压与流体动压作用提供的。倘若液膜遭到破坏, 比如液膜汽化, 将会导致端面表面微小体间的接触变得更加剧烈, 从而导致摩擦发热和磨损增加。因此, 由于润滑液的不稳定汽化而引起的界面膜的破坏, 是制约密封性能的重要因素, 需在机械密封温度设计中充分考虑。

### 1.1 端面液膜汽化的影响

当温度大于当地压力下的饱和温度时, 端面间的液体在相应位置会发生一定程度的汽化。在稳定的两相流体膜下, 许多密封能可靠地工作<sup>[11]</sup>。并且, 在密封低压侧, 有限程度的受控汽化可以增强流体静压承载能力, 并限制泄漏, 如图 2 所示。但是, 如果密封端面间液体汽化量明显增加, 会使汽液界面的位置向密封的高压侧移动, 从而导致间隙

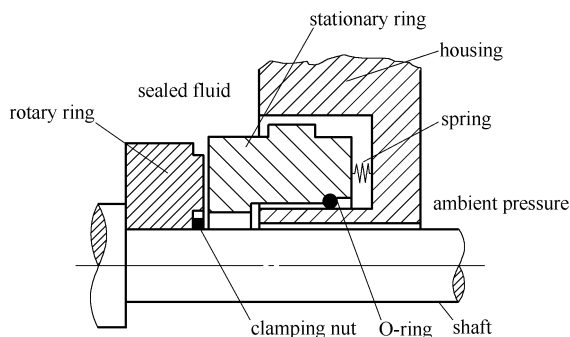


图 1 机械密封的基本结构

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical seal

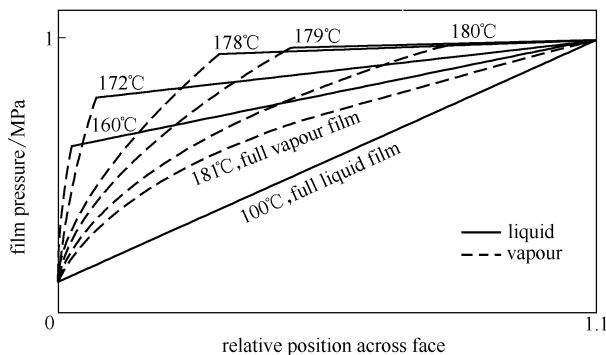


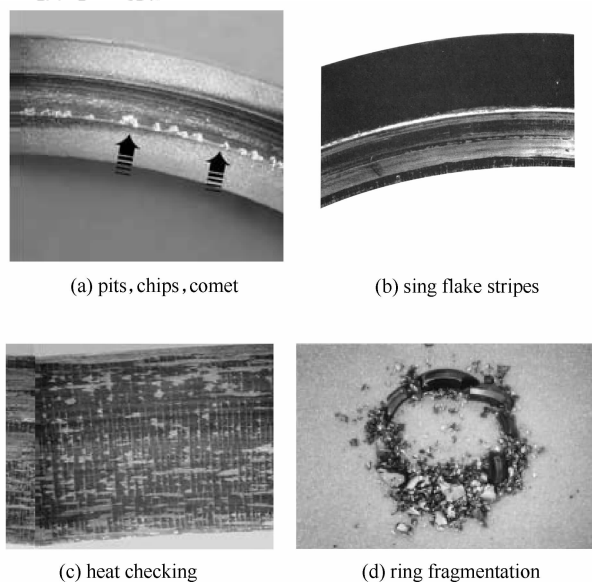
图 2 平行端面两相压力分布<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Pressure distribution in parallel face seal<sup>[12]</sup>

内液膜区域减小。由于这种变化以及黏度因温升而减小, 会使得润滑膜的承载能力减小, 密封端面间的混合润滑程度增加, 结果导致密封界面流体温度进一步升高, 密封开始产生不稳定汽化。在实际工况中, 这种变化过程可能是由密封工作条件的变化 (温度、压力、振动等) 或者流体性质的变化引起的。

### 1.2 端面液膜汽化造成的危害

在不稳定汽化工况下工作的密封, 会发出可见可闻的故障信号<sup>[13]</sup>。例如, 流体膜周期性的破裂和重新形成, 使蒸汽从端面低压侧喷逸, 即“气喷”现象 (puffing); 或发出刺耳的噼啪噪声, 即“间歇振荡开启”现象 (popping open)。这种情况会迅速导致端面损坏密封失效。如果密封环为脆性材料制造, 则密封端面破坏的特征是出现小的凹痕、彗尾和缺口 (向低压边), 如图 3(a) 所示; 或者, 端面在蒸汽状态工作, 发生干摩擦, 出现擦亮的伤痕或唱片状条纹般的同心圆纹理, 如图 3(b) 所示; 如果密封环为韧性材料制造, 则密封端面表现为热裂破坏, 如图 3(c) 所示, 这种热裂现象由密封端面上局部过大的热应力引起, 且与汽



(a) pits, chips, comet

(b) sing flake stripes

(c) heat checking

(d) ring fragmentation

图 3 液膜汽化引起的典型端面损坏形式<sup>[11,14]</sup>Fig. 3 Typical damages resulting from film vaporization<sup>[11,14]</sup>vaporization<sup>[11,14]</sup>

化过程中流体膜破坏的周期有关；如果不稳定汽化在密封运转过程中持续发生，危害可能很严重，最终导致密封环体的破坏，如图 3(d) 所示。

### 1.3 液膜汽化与空化的区别

当液体在恒压下加热或在恒温下用静力或动力的方法减压，到达一定程度时，蒸汽空泡或充满气体与蒸汽的空泡开始出现或发育。在热力学领域，上述过程若由温度升高所引起称为“沸腾”，若由静压下降所引起称为“闪蒸”。如 1.2 节所述，两相机械密封端面流体膜由液相转变为汽相，是沸腾与闪蒸综合作用的结果，本文统称为“汽化”。液膜汽化的特征是，液体达到当地饱和状态，汽化区域延伸至液膜边缘，汽相连续不断地从液膜表面和内部沸腾界面逃逸，汽相与液相处于动平衡的状态<sup>[15]</sup>。

与汽化现象类似，若温度基本不变而因动压作用导致局部压力下降所引起的空穴或者空泡，则称为“空化”<sup>[16-17]</sup>。它有两种成因：第一种成因是液膜压力降低导致气体溶解度降低，从而气体从液膜中析出，形成气核，积聚并长大形成气泡；第二种成因是液膜局部压力低于其饱和蒸汽压力时，液膜汽化产生气泡。空化区域是包含于液膜内部的，汽相与液相有可能处于静态平衡，也有可能处于瞬态平衡。与汽化相别，空化中的两相之间不一定存在质量迁移的问题<sup>[15]</sup>。

综上所述，影响空化的主要因素是流体的局部压力变化，温度是次要因素，于是很多理论研究都将液体做等温假设展开<sup>[17]</sup>。影响汽化的主要因素是温度和压力，研究必须综合考虑液膜的温度分布与压力分布<sup>[8]</sup>。为了便于从字面上区别两者，这里把空化记作“气液两相”问题，而把汽化问题记作“汽液两相”问题。

## 2 实验研究

### 2.1 早期液膜汽化现象观察实验

早期有关两相机械密封的研究集中于对其端面的摩擦与润滑机理的定性观察。研究者通过设计多种直接或者间接的实验，观察端面液膜的状态，总结液膜发生汽化的条件。Denny<sup>[18]</sup>以丙酮作为密封介质，在实验中发现液膜汽化可以增大端面开启力。Summers-Smith<sup>[19]</sup>发现当温度升高导致液膜汽化时摩擦系数降低。Orcutt<sup>[20]</sup>把水加热到接近沸点，透过半透明的密封环观察密封间隙液膜汽化的现象。他们发现，当高压侧液体温度趋近沸点时，连接大气侧的区域形成明显的汽化同心环区域，随着温度升高，气相区域扩大，摩擦力降低，泄漏减小。

### 2.2 机械密封端面液膜汽化稳态实验

尽管两相机械密封具有较大的开启力、较小的摩擦系数与泄漏的优点，但在很多情况下端面液膜汽化问题却是造成机械密封失稳的主要原因之一。于是，有必要对端面液膜汽化的稳定工作极限做出深入的研究。

Lymer<sup>[21]</sup>以热水为介质讨论了平衡型平端面机械密封含有端面液膜汽化问题的稳态工作极限。他采用的实验方法是，在不同压力条件下，不断提高入口液体的温度，记录密封发生失稳的温度值（以气喷和泄漏持续增大现象来认定密封失稳），结果如图 4 所示。

Lebeck 等<sup>[22]</sup>采用了与 Lymer 类似的实验方法，区别在于他们采用测量密封环端面温度与摩擦扭矩相结合的方式定量记录密封失稳状态，部分实验结果如图 5 所示。随着入口流体温度升高，端面的温度缓慢降低，但当温度达到并高于  $T_{\text{sat}}$  后，密封环的温度突然大幅增加，实验中出现“气喷”的现象。

此后，Harrison 等<sup>[11]</sup>分别以蒸馏水、原油和油水混合物作为密封介质，采用监测密封扭矩和泄

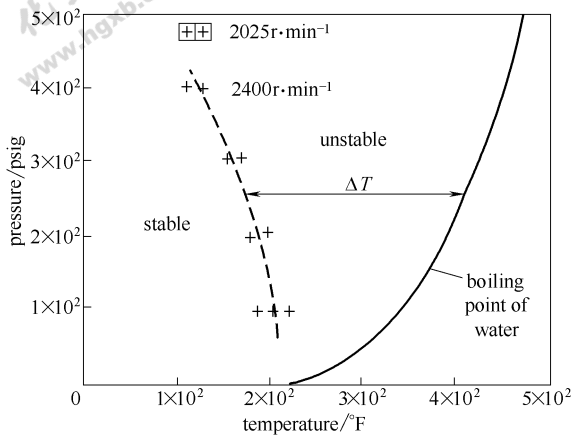


图 4 典型水润滑密封的稳定运行温度范围<sup>[21]</sup>

Fig. 4 Steady operation envelope of typical seal in water<sup>[21]</sup>

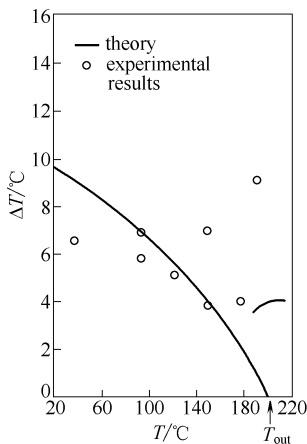


图 5 端面温升与流体温度的函数关系  
(平衡比  $B=0.75$ <sup>[22]</sup>)

Fig. 5  $\Delta T$  as a function of temperature  
(balance ratio  $B=0.75$ <sup>[22]</sup>)

漏腔背压的方法，研究了机械密封端面液膜汽化现象。他们发现，Lymer 的工作极限曲线仅适用于平端面机械密封，且密封介质具有确定的饱和状态极限曲线；对于端面开有深槽的机械密封，即使超过 Lymer 提出的工作极限，也没有发生明显的液膜汽化现象。

### 2.3 机械密封端面液膜汽化瞬态实验

在稳态实验研究的基础上，研究者对两相机械密封的瞬态行为展开了深入的实验研究。研究发现，两相机械密封的瞬态行为具有典型的周期性特征。Nau<sup>[12]</sup>对典型的“气喷”现象采用定量化的实验手段展开研究。当流体介质接近沸点时，在实验现场可以听到端面碰撞发出的爆鸣声，同时端面扭矩测量仪器显示出以数秒为周期的摩擦力矩连续波动，汽化的介质发生断续泄漏。这种失稳现象并

非一直持续，而是以数十秒为周期反复出现。Rhodes 等<sup>[23]</sup>研究了在模拟停电工况下的压水堆核主泵机械密封的工作性能。研究表明，端面液膜发生汽化现象，机械密封可能存在两个稳定工作的平衡膜厚。

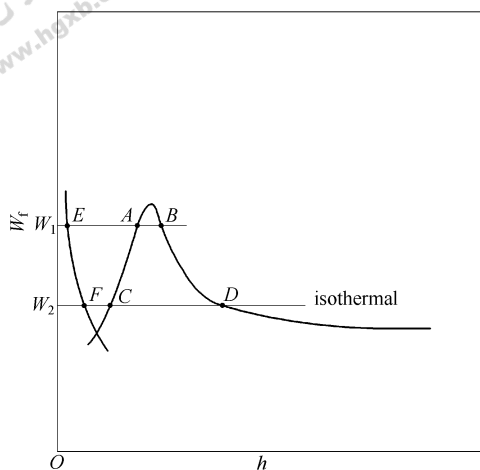
综上所述，早期的实验研究主要集中于端面液膜汽化的产生条件的确认与汽化现象的观察，得到了液膜汽化具有增大开启力，减小摩擦的特点。后续的实验研究则聚焦于密封端面温度与扭矩等物理量的测量，并对液膜汽化造成的动力学现象做定量观测。这些实验结果为相关理论研究的开展提供了基础。

## 3 理论研究

### 3.1 二维间断沸腾稳态模型

以早期实验现象为基础，Hughes<sup>[24]</sup>最早针对机械密封液膜汽化现象建立了简单的理论预测模型。他假设密封泄漏率极小，忽略液膜内部对流换热效应，则认为在液膜的某一确定位置发生汽化，由此建立了间断沸腾轴对称模型。基于此模型所做的分析表明，密封存在两个平衡膜厚，其中在较大的膜厚下密封可以稳定工作，而在较小的膜厚下则是非稳定的。Hughes 等<sup>[25]</sup>采用等温与绝热两类理想热边界条件发展了上述模型，对理想气体假设进行了放松。研究的结论是：当泄漏率小时，等温模型准确，当泄漏率大时，绝热模型更准确；在稳定性分析上，两种模型都得到了与上述类似的双平衡膜厚结果，如图 6 所示。另外，单相稳定运行的收敛间隙端面也有可能发生失稳的现象，但汽化相变可以降低其泄漏率。Beatty 等<sup>[26]</sup>基于绝热模型考虑了在大泄漏率（绝热湍流状态）条件下的端面液膜汽化问题。Basu 等<sup>[27]</sup>基于等温模型考虑了流体离心力的惯性作用。两者的研究结果与 Hughes 的双平衡膜厚结果类似。Lau 等<sup>[28]</sup>总结上述研究成果，提出了适用于工程计算的简化模型，所得结果与间断沸腾模型预测结果接近，并证明较小的端面锥度变化会引起两相机械密封性能的巨大变化。

以间断沸腾轴对称模型为基础，Lebeck<sup>[29]</sup>以密封环的实际几何形状建立分析模型，考虑了粗糙度接触的因素，发现液膜汽化可以产生更大的开启力，而且当流体温度接近沸点时泄漏率增大，这为“气喷”现象给出了原理性解释。Ruan 等<sup>[30]</sup>综合考虑了热流固耦合因素，建立了含有粗糙峰接触的

图 6 开启力与膜厚变化的关系<sup>[25]</sup>Fig. 6 Open force vs film thickness<sup>[25]</sup>

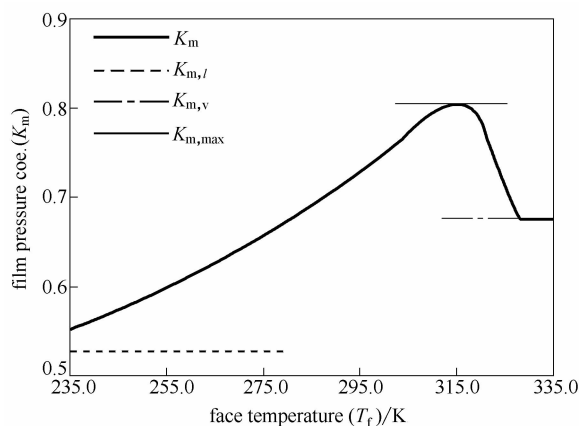
两相混合润滑模型，发现液膜汽化条件下端面温度变化较小，沸腾半径随着流体温度升高而逐渐扩大，泄漏率随着温度升高下降。这些结果都与上述实验观测结果一致。

Gu<sup>[31]</sup>把流体膜按相态特征分为 4 类：全液相、全汽相、似液相和似汽相。其中，全液相和全汽相密封工作稳定，似液相似稳定，唯有似汽相不稳定。对于各相态的密封，当端面温度  $T_f$  已知时，可采用  $K_m-T_f$  ( $K_m$  为膜压系数) 曲线或  $\alpha_{mR}-T_R$  ( $\alpha_{mR}$  为气相体积比， $T_R$  为温度比) 曲线来判断端面间流体的相态及密封的稳定性<sup>[32]</sup>。彭旭东等<sup>[33-35]</sup>以间断沸腾模型为基础，先后研究了多种单组分介质问题、多组分问题，以及考虑了机械密封端面粗糙度、锥度和流体惯性的问题，建立了混合摩擦工况下的机械密封模型。综合以上研究成果，Peng 等<sup>[36]</sup>提出以求解膜压系数  $K_m$  来判断端面相态的方法，如图 7 所示。对于已知热物理性质的密封介质，该方法可以明确判断平端面密封的稳定性。在此基础上，Peng 等<sup>[37]</sup>又进一步提出了在线监测液膜汽化稳定性的技术。

### 3.2 二维间断沸腾瞬态模型

上述稳态模型只能对机械密封的稳定性做出定性的判断，为了深入揭示端面液膜汽化工况下的机械密封的失稳机理，需要发展瞬态分析模型。

Yasuna 等<sup>[38]</sup>考虑了压膜效应与热瞬态效应，建立了两相机械密封瞬态模型，发现在平衡位置给出一定的轴向扰动，两相机械密封具有阻尼瞬态响应特性。Salant 等<sup>[39]</sup>基于间断沸腾模型建立了包含端面热变形因素的两相机械密封的动力学分析模

图 7 丙烷介质密封相态稳定性判据<sup>[36]</sup>Fig. 7 Criteria for phase stability for propane seal in  $K_m-T_f$  curve<sup>[36]</sup>

型。研究发现，即使具有正刚度的平衡膜厚，在较大扰动量情况下也会发生失稳现象。该模型采用传热学中的集总参数法简化计算了密封环导热问题，忽略热惯性的影响，导致振荡周期极短——只有几毫秒，这与 Nau<sup>[12]</sup>的实验结果不符。Blasbalg 等<sup>[40]</sup>基于 Salant 等<sup>[39]</sup>的动力学模型，进一步综合考虑了密封环热弹变形耦合、粗糙度接触与流体膜挤压效应。其研究发现，当密封间隙沿流动方向为收敛形状及流体膜刚度是正值时，密封才能达到稳定状态，否则密封将发生如“间歇振荡开启”(popping open)或“振荡运动”(oscillatory motion)的失稳状况。文中采用圆柱翅片瞬态导热理论对密封环建立导热模型，考虑了热惯性的影响，因此计算结果更接近实际观测的瞬态行为——以秒为振荡周期，如图 8 所示。

### 3.3 二维连续沸腾模型

二维间断沸腾模型只适用于泄漏率很小的极端工况，即端面膜厚与表面粗糙度同一量级的情况。对于膜厚较大的非接触式机械密封的液膜汽化问题，间断沸腾模型的误差较大。针对这一问题，Yasuna 等<sup>[41]</sup>建立了连续沸腾轴对称模型，讨论温度变化与对流效应对密封稳定性和泄漏率的影响。研究表明，在泄漏率较小的情况下，流体膜温度也存在变化，但由于温度变化的绝对值不大，故仍可用等温间断沸腾模型近似；当泄漏率较大时，流体膜温度变化剧烈，间断沸腾模型不再适用。基于上述连续沸腾模型，Yasuna 等<sup>[42]</sup>综合考虑在湍流条件下对流效应、热惯性效应和挤压效应，得到密封“双稳态”运行特征：如图 9 所示，在给定运行条

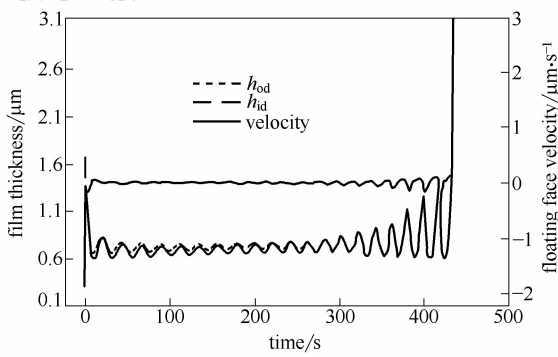


图 8 液膜汽化造成的端面振荡失稳<sup>[32]</sup>

Fig. 8 Seal oscillating and popping open resulting from film vaporization<sup>[32]</sup>

$h_{od}$ —film thicknesses of outside radius;  
 $h_{id}$ —film thickness of inside radius;  
 velocity—floating face velocity

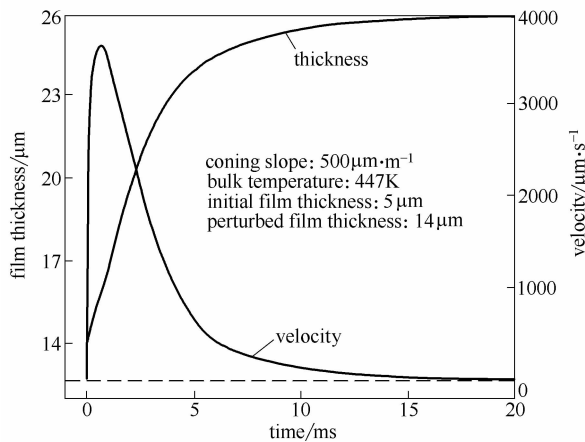


图 9 湍流工况锥度密封稳定响应-开启扰动<sup>[42]</sup>

Fig. 9 Stable transient response for tapered seal with turbulent flow-opening perturbation<sup>[42]</sup>

件下，初始的稳定平衡膜厚  $5\ \mu\text{m}$  在受到一定程度的扰动后，经过约  $20\ \text{ms}$  的响应过程，达到大小为  $26\ \mu\text{m}$  的新的平衡膜厚，这种现象与 Rhodes 等<sup>[23]</sup> 关于核主泵断电时的机械密封实验现象一致。

### 3.4 三维间断沸腾模型

在有端面偏摆及端面有开槽等情况下，上述轴对称型的二维沸腾模型不再适用。Etsion 等<sup>[43]</sup> 基于间断沸腾假设建立了三维流热耦合分析模型，讨论密封环偏转对端面液膜汽化半径的影响。其结论是，液膜汽化不利于密封的角刚度，即使密封环存在中等程度的偏转，沸腾间断面仍可以认为是对称的。后续，Etsion 等<sup>[44]</sup> 探讨了密封环偏转产生的动压效应对沸腾半径分布的影响，发现较大的沸腾半径造成液相有效宽度变窄，从而削弱了动压效

应，当 Sommerfeld 数小于  $0.2$  时，可忽略环偏转产生的动压效应对两相机械密封性能的影响。

综上所述，机械密封液膜汽化问题的理论研究可分为二维与三维，稳态与瞬态，间断沸腾模型与连续沸腾模型等类型，经历着由简单到复杂的发展过程。但到目前为止，已有的研究还是主要集中于二维轴对称问题的分析，关于三维模型的研究还很少，且已有的模型是基于稳态、间断沸腾假设的。

## 4 结 语

机械密封端面液膜汽化现象是端面压力降低与液膜剪切升温共同作用的结果。液膜汽化造成润滑油膜破裂，端面直接接触发生干摩擦或振荡，损坏端面。严重失稳机械密封会发出刺耳的鸣叫和泄漏率异常等现象，通过监测密封环摩擦扭矩、端面温度和泄漏腔背压等参数，可以探测到两相机械密封早期失稳状态。基于这些工厂经验与实验研究，先后建立了间断沸腾模型和连续沸腾模型，初步揭示了两相机械密封失稳的机理。

然而，关于端面液膜汽化问题不论在理论模型、实验研究和工程应用方面都远未成熟和完善。基于完善的理论和实验研究设计两相密封，避免液膜汽化造成的密封失效，甚至利用受控汽化提高密封的某些性能等，是具有重要工程价值和理论意义的。根据目前的研究状况，以下 4 个方面的深入研究有待进一步开展。

(1) 精确的实验测量技术。已有的液膜汽化测量手段主要采用的是间接测量方式，如热电偶测端面温度、力传感器测摩擦扭矩等，对于液膜发生汽化的过程和流场缺乏直接定量的观测，局限了对机械密封液膜汽化问题的深入认识。借鉴微通道两相流的一些实验技术，如高速摄影技术等，对液膜汽化过程展开全面细致地观测，有助于推进两相机械密封的基础研究。

(2) 更加完善和准确的理论研究模型。二维间断沸腾模型已实现基于热流固耦合技术的全过程分析，对接触式两相机械密封的一些典型的行为给出了解释。连续沸腾模型尚未实现热流固耦合分析，在这方面可以进一步丰富。已有的二维模型只能对轴向自由度的动力学特性进行分析，工程中两相机械密封的失稳现象也伴随复杂的振动情况，Etsion 等<sup>[43]</sup> 的研究已表明液膜汽化对密封环角向自由度的动力学行为有显著的影响。因此，建立两相机械

密封的三维分析模型, 实现完整的动力学分析有重要意义。

(3) 深入的多组分介质研究。密封介质往往是多组分的, 各组分的热物性参数存在差异。在密封间隙流动过程中, 各组分汽化规律不同会引起热力学耦合效应, 易导致液膜性质变异的问题 (如焦化、结晶等), 对密封端面造成损伤, 进而影响机械密封正常稳定运行。目前多组分介质问题液膜汽化研究的相关的理论和实验研究都还比较匮乏, 亟待深入开展。

(4) 控制液膜汽化的新技术。对于两相机械密封, 传统的液膜汽化控制技术包括提高密封介质压力、降低密封介质温度和增加冲洗量等。新发展起来的端面开槽技术和可控密封技术, 从端面和密封结构设计的角度提供了控制液膜汽化的新途径。结合这些新技术, 经过合理的设计, 有望降低两相密封对辅助系统的要求、提高两相密封的工作可靠性和寿命、增强两相密封对苛刻工况和特殊使用环境等的适应能力等, 从而提升两相密封的综合性能。

## References

- [1] Young Lionel A, Key B, Philipps R, Svendsen S. Mechanical seals with laser machined wavy SiC faces for high duty boiler circulation and feedwater applications [J]. *Lubrication Engineering*, 2003, **59** (4): 30-39
- [2] Shapiro W, Walowit J, Jones H F. Analysis of spiral-groove face seals for liquid oxygen [J]. *ASLE Transactions*, 1984, **27** (3): 177-188
- [3] Sun Jianjun (孙见君), Gu Boqin (顾伯勤), Wei Long (魏龙), Feng Xiu (冯秀), Liu Qihe (刘其和). Predicting seal life for contact mechanical seals [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (12): 3095-3100
- [4] Houte de Lange J A M. Sealing of volatile liquids//The 14th International Conference on Fluid Sealing [C]. Firenze, Italy, 1994: 323-337
- [5] Gu Yongquan (顾永泉). Practical Technology of Mechanical Seals (机械密封实用技术)[M]. Beijing: China Machine Press, 2009
- [6] Gao Yi (高焱). Analysis of failure of mechanical seal used for liquid hydrocarbon and improvements [J]. *Process Equipment and Piping* (化工设备与管道), 2010, **47** (3): 31-33
- [7] Yang Limin (杨立民), Chen Wei (陈伟). Application of the high-temperature pump mechanical seal in refinery [J]. *Process Equipment and Piping* (化工设备与管道), 2011, **48** (4): 26-33
- [8] Lebeck A O. Principles and Design of Mechanical Face Seals [M]. New Jersey: Wiley-Interscience Publication, 1991
- [9] Zhang Wei (张伟), Tan Zhi (谭志), Xue Lanzhuo (薛兰苗). Fault analysis on seal of feed pump for boiler and its countermeasures [J]. *Science and Technology in Chemical Industry* (化工科技), 2011, **19** (1): 43-46
- [10] China Mechanical Engineering Association (中国机械工程学会). Chinese Mechanical Engineering Technology Roadmap (中国机械工程路线图)[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011
- [11] Harrison D, Watkins R. Evaluation of Forties Main Oil Line Pump Seals//The 10th International Conference on Fluid Sealing [C]. Innsbruck, Austria, 1982: 1-16
- [12] Nau B S. Research in mechanical seals [J]. *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 1990, **204** (6): 349-376
- [13] Summer-Smith J D. Practical Mechanical Seals (实用机械密封)[M]. Shen Xihua (沈锡华), trans. Beijing: China Machine Press, 1993
- [14] Nau B S. Mechanical seal face materials [J]. *Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology*, 1997, **211** (3): 165-183
- [15] Nau B S. Observations and analysis of mechanical seal film characteristics [J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1980, **102** (3): 341-349
- [16] Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. Cavitation [M]. Columbus: McGraw-Hill Book Company, 1970
- [17] Braun M J, Hannon W M. Cavitation formation and modeling for fluid film bearings: a review [J]. *Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology*, 2011, **224** (9): 839-861
- [18] Denny D F. Some measurements of fluid pressures between plane parallel thrust surfaces with special reference to the balancing of radial face seals [J]. *Wear*, 1961, **4** (1): 64-83
- [19] Summers-Smith J D. Laboratory investigation of the performance of a radial-face seal//Proc. 1st International Conference on Fluid Sealing; paper D5 (BHRA, Cranfield)[C]. 1961
- [20] Orcutt F K, An investigation of the operation and failure of mechanical face seals//4th International Conference on Fluid Sealing [C]. Philadelphia, ASLE, 1969
- [21] Lymer A. An engineering approach to the selection and application of mechanical seals//4th International Conference on Fluid Sealing [C]. Pennsylvania, FICFS Preprint, 1969
- [22] Lebeck A O, Chiou B C. Two phase mechanical face seal operation; experimental and theoretical observations//Proceedings of the 11th Annual Turbomachinery Symposium [C]. 1982: 181-188
- [23] Rhodes D B, Hill R C, Wensel R G. Reactor coolant pump shaft seal stability during station blackout; U. S. Nuclear Regulatory Commission Report [R]. NUREG/CR-4821, 1987
- [24] Hughes W F. Phase change in liquid face seals [J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1978, **100** (1): 74-80
- [25] Hughes W F, Chao N H. Phase change in liquid face seals (II): Isothermal and adiabatic bounds with real fluids [J]. *Journal Lubrication Technology*, 1980, **102** (3): 350-

- 359
- [26] Beatty P A, Hughes W F. Turbulent two-phase flow in face shaft seals [J]. *ASLE Transactions*, 1986, **109** (1): 91-99
- [27] Basu P, Hughes W F. Centrifugal inertia effects in two-phase face seal films [J]. *ASLE Transactions*, 1987, **30** (9): 177-186
- [28] Lau S Y, Hughes W F, Basu P, Beatty P A. A simplified model for two phase face seal design [J]. *Tribology Transactions*, 1990, **33** (3): 315-324
- [29] Lebeck A O. A mixed friction hydrostatic face seal model with phase change [J]. *Trans. ASME, J. Lubric. Technol.*, 1980, **102** (2): 133-138
- [30] Ruan B, Salant R F, Green I. A mixed lubrication model of liquid/gas mechanical face seals [J]. *Tribology Transactions*, 1997, **40** (4): 647-657
- [31] Gu Yongquan. Identification of phase states and phase state stability of process pump mechanical face seal//Proc. of 12th ICFS [C]. Brighton UK, 1989
- [32] Gu Yongquan (顾永泉). Vapor phase volume fraction and fluid film pressure coefficient of mechanical face seals [J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science* (石油大学学报: 自然科学版), 1994, **18** (2): 52-57
- [33] Peng Xudong (彭旭东), Gu Yongquan (顾永泉). Calculation of performance of mechanical seals for single component fluid [J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science* (石油大学学报: 自然科学版), 1993, **17** (5): 76-85
- [34] Peng Xudong (彭旭东), Gu Yongquan (顾永泉). Program for calculating performance of a mechanical seal of multicomponent hydrocarbon mixtures [J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science* (石油大学学报: 自然科学版), 1994, **18** (1): 45-49
- [35] Peng Xudong (彭旭东), Gu Yongquan (顾永泉). The effects of coning face and fluid inertia on the performance of mechanical face seals at various phase states [J]. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science* (石油大学学报: 自然科学版), 1990, **14** (3): 62-70
- [36] Peng X D, Xie Y B, Gu Y Q. Evaluation of mechanical face seals operating with hydrocarbon mixtures [J]. *Tribology International*, 2003, **36** (3): 199-204
- [37] Peng X D, Xie Y B, Gu Y Q. Simpler method for volatile medium pump mechanical seals [J]. *Proc. IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2006, **220** (7): 643-647
- [38] Yasuna J A, Hughes W F. Squeeze film dynamics of two-phase seals [J]. *Journal of Tribology*, 1992, **114** (2): 236-247
- [39] Salant R F, Blasbalg D A. Dynamic behavior of two-phase mechanical seals [J]. *Tribology Transactions*, 1991, **34** (1): 122-130
- [40] Blasbalg D A, Salant R F. Numerical study of two-phase mechanical seal stability [J]. *Tribology Transactions*, 1995, **38** (4): 791-800
- [41] Yasuna J A, Hughes W F. A continuous boiling model for face seals [J]. *Journal of Tribology*, 1990, **112** (2): 266-274
- [42] Yasuna J A, Hughes W F. Squeeze film dynamics of two-phase seals: turbulent-flow [J]. *Journal of Tribology*, 1994, **116** (2): 479-488
- [43] Etsion I, Pascovici M D. Phase change in a misaligned mechanical face seal [J]. *Journal of Tribology*, 1996, **118** (1): 109-116
- [44] Etsion I, Pascovici M D, Burstein L. The boiling interface in a misaligned two-phase mechanical seal [J]. *Journal of Tribology*, 1997, **119** (2): 265-271