

TB7

41

流 体 动 密 封

陈匡民 董宗玉 陈文梅 编

成都科技大学出版社

前 言

密封技术随着现代工业发展的需求将逐渐形成一门全新的学科，但高等工科院校化工机械及相近专业有关密封的教学内容甚少，显然与当前科学技术的飞速发展很不相适应。因此，我们从1980年起为化机专业开设了流体密封课程。考虑到涉及静密封的教材和参考书已比较多，所以本书只讨论动密封，且侧重于石油、化工机械中用量最多的填料密封及机械密封，其它动密封仅作简略介绍。

本书绪言、第一、六章由陈匡民编写，第二章由陈文梅编写，第三、四、五章由董宗玉编写，全书由陈匡民修订补充。

限于水平，不当之处，请读者批评指正。

编者

1990年2月

绪 言

密封装置是机器和设备的重要组成部分。凡是与流体接触的可拆卸的静设备，以及机器中将两个流体空间隔开并作相对运动（旋转或往复）的部件之间都存在着密封问题。通常，前者相对静止的结合面间的密封称为静密封；后者，相对运动的结合面间的密封称为动密封。

“密封”虽仅占据机器和设备的很小部分，但对其工作效率和可靠性能却有很大影响。尤其是化工机械，处理的流体大多为可燃、易爆、有毒及具腐蚀性的介质，如果密封失效介质外漏，不仅污染环境，还会导致火灾、爆炸、设备腐蚀以及人身安全等重大事故。

密封还直接关系到能源和物质的节约。例如在工业部门整个能源消耗中，各种动力机械与流体输送机械所占的比重最大，而这些机械由于内部和外部泄漏，往往容积效率损失达总功率的10%以上，小型机器甚至达到40%~50%。有些密封装置本身的摩擦功耗也不小，活塞环消耗的能量约占发动机全部摩擦损失的2/3，离心叶轮密封消耗功率达总的轴功率的1/3。因此，提高密封技术对降低能耗节约能源有重大作用。至于改进密封杜绝跑、冒、滴、漏，减少物料流失，则是明显的直接效益，例如过去炼油厂油泵普遍使用结构古老的压盖填料密封，每台泵年漏油量约10米³，后推广机械密封使年漏油量降低至0.1米³以下，若按1000台泵计，每年可节油近10000米³。如果各类流体机械都能很好地采用密封新技术，毫无疑问这项节约的效益是十分巨大的。

近20年来，密封技术随着生产的发展不断提高，密封理论、密封材料、密封实验技术等方面的研究工作都有很大进展。从工业生产对密封技术的需求的发展趋势来看，今后很有可能将逐步形成一门独立的“密封学”新学科。下表中列出的密封单项指标，可以粗略地反映当前密封技术的水平，它与50年代比较，几乎提高了十几倍。但是发生在如此狭小的密封间隙中的流体力学、摩擦磨损以及热变形、蒸发等

密封单项技术指标

项 目	动 密 封	静 密 封
压力(真空)	$1.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \sim 10^8 \text{MPa}$	$1.3 \times 10^{-7} \text{Pa}$ $\sim 10^4 \text{MPa}$
温 度	$-240 \sim 600^\circ\text{C}$	$-240 \sim 900^\circ\text{C}$
线 速 度	接触型 $< 150 \text{m/s}$	
泄 漏 量	0.1mg/h	
寿 命	10年	

物理、化学变化过程，要想全面而真实地将它们之间的关系和规律都在一个密封设计中体现出来是非常困难的。虽然现在有些密封理论的研究有相当精辟的分析，可是直接用于设计尚有较大距离。因此，目前大多数的密封设计还是依靠经验、统计分析或实验技术。

密封技术几乎涉及各个工业部门。不同工作环境的机械设备，对密封有着极不相同的要求，任何一类密封都不可能同时适应所有的工况。所以必须着重掌握各类密封的基本原理和正确设计方法，这样才能充分发挥各种密封的特点，才能有所创新、有所发展。

目 录

绪 言

第一章 密封技术的基本问题	(1)
一、泄漏与阻漏方式.....	(1)
二、密封技术与润滑.....	(2)
三、密封面的摩擦与磨损.....	(4)
四、密封设计的几个注意事项.....	(9)
五、动密封种类及其适用范围.....	(10)
第二章 流体力学基础	(15)
第一节 连续性方程	(15)
一、流体的连续介质模型.....	(15)
二、连续性方程.....	(19)
第二节 流体运动方程	(23)
一、无粘性流体运动方程.....	(23)
二、粘性流体运动方程.....	(28)
第三节 狭缝流动	(38)
一、狭缝中流体流速的分布.....	(38)
二、固定壁面间狭缝的出流.....	(41)
三、具有相对运动壁面间狭缝的出流.....	(42)

四、平行圆盘间的狭缝流动·····	(46)
第三章 填料密封 ·····	(51)
第一节 软填料密封 ·····	(51)
一、密封原理·····	(52)
二、软填料密封的设计计算·····	(52)
三、密封填料的选择·····	(57)
四、软填料密封存在的问题与改进·····	(60)
第二节 成型填料密封 ·····	(65)
一、成型填料类型及适用范围·····	(65)
二、O形密封圈及V形密封圈的工作特性·····	(69)
三、O形密封圈及V形密封圈的设计要点·····	(72)
四、使用成型填料密封应注意的问题·····	(79)
第三节 油封 ·····	(81)
一、油封的特点及类型·····	(82)
二、影响油封密封性能的主要因素·····	(85)
三、油封材质与型式的选择·····	(89)
第四节 硬填料密封 ·····	(90)
一、硬填料密封环的结构型式·····	(91)
二、分瓣环和锥形密封环的设计计算·····	(94)
三、压缩机用分瓣环和锥形环密封组·····	(98)
第四章 机械密封 ·····	(103)
第一节 工作原理及基本结构 ·····	(103)
一、工作原理及特点·····	(103)

二、基本结构类型.....	(105)
三、常用机械密封标准结构简介.....	(111)
第二节 密封特性与端面液膜承载能力.....	(119)
一、密封特性.....	(119)
二、端面液膜压力.....	(121)
第三节 机械密封设计计算.....	(126)
一、机械密封设计程序与结构选型.....	(126)
二、端面比压计算.....	(129)
三、 p_v 值与摩擦功率计算.....	(140)
四、泄漏量.....	(146)
五、零件设计.....	(151)
六、流体静压型与流体动压型机械密封.....	(164)
第四节 冷却、冲洗与安装使用.....	(167)
一、密封环的温度分布与热变形.....	(167)
二、冷却、冲洗方式与系统设计.....	(172)
三、机械密封的安装.....	(176)
四、机械密封的使用.....	(178)
第五节 特殊工况下机械密封的设计要点.....	(179)
一、高温与低温.....	(179)
二、高压与真空.....	(184)
三、高速.....	(188)
四、腐蚀性介质条件.....	(189)
五、含固体粒子介质条件.....	(190)

第五章 其它动密封	(196)
第一节 浮动环与固定环密封	(196)
一、浮动环密封的工作特点.....	(196)
二、浮动环密封结构类型及设计要点.....	(200)
三、浮动环密封的计算.....	(204)
四、固定环密封.....	(212)
第二节 迷宫密封	(215)
一、迷宫密封的结构型式.....	(216)
二、迷宫密封的原理与设计要点.....	(218)
三、迷宫密封的泄漏量计算.....	(220)
第三节 离心密封	(225)
一、离心密封的结构型式与特点.....	(225)
二、离心密封的减压能力.....	(228)
三、离心密封的功率消耗	
第四节 螺旋密封	(235)
一、螺旋粘滞密封与螺旋迷宫密封的工作原理及特点	(235)
二、螺旋粘滞密封的压差与功耗.....	(237)
三、螺旋迷宫密封的设计计算.....	(239)
第五节 停车密封	(241)
一、离心式停车密封.....	(243)
二、压力调节式停车密封.....	(244)

第六节	磁流体密封	(244)
一、	磁流体密封的原理与结构	(245)
二、	磁流体的种类与性质	(246)
三、	磁流体密封的特性	(247)
第七节	全封闭密封	(249)
一、	全封闭密封的特点及适用范围	(249)
二、	全封闭密封的类型	(251)
第六章	密封材料	(253)
第一节	密封材料的选择原则	(253)
一、	密封工作特点对材料的要求	(253)
二、	密封材料的耐磨性及其评定方法	(255)
三、	密封材料的耐蚀性及其评定	(256)
四、	密封材料的耐热冲击性能	(259)
五、	密封摩擦副的组对规律	(261)
六、	密封材料的种类及用途	(265)
第二节	碳—石墨	(266)
一、	抗磨碳—石墨的种类与制备	(267)
二、	碳—石墨性能及选用	(269)
三、	膨胀石墨及碳纤维密封材料	(276)
第三节	金属的碳化物及工程陶瓷	(278)
一、	碳化钨硬质合金及钢结硬质合金	(279)
二、	工程陶瓷	(282)

三、表面复盖层材料.....	(287)
第四节 高分子聚合物.....	(291)
一、橡胶.....	(291)
二、聚四氟乙烯.....	(300)
三、其它工程塑料.....	(307)
第五节 金属与合金.....	(313)
一、耐磨性.....	(314)
二、耐蚀性.....	(316)
主要参考文献.....	(322)

第一章 密封技术的基本问题

一、泄漏与阻漏方式

工作着的密封面通常相隔一定间隙或隔着一层薄薄的流体膜（厚度为几微米至十几微米），更多的情况是两个面直接接触。无论密封面接触或不接触，流体受压差的作用沿密封面流出现象称为泄漏，其流量就是泄漏量，被密封的流体称为对象流体，也叫密封流体。

严格地说，泄漏是由于密封附近存在静压力和动压力分布，使流体从高压区往低压区流动引起的。如果与流体接触的固体表面（密封面）上各点的速度不等，亦即存在流速分布时，流体因为固体表面的速度差也会引起流动。此时，只要作出由于上述的压力分布以及固体表面速度差引起的流动矢量和，就可以得到总的流动情况。

此外，还有因毛细管作用而产生的渗漏。不过这种渗漏除了采用毛毡、皮革之类具有渗透性的材料或在密封附近有灰尘积聚的情况外，一般都可以不考虑。

显然，密封的目的就是运用一定的方法阻止或控制密封部位（包括密封面及其附近部分）由于压力分布及固体表面速度差引起的流动，将通过密封面的对象流体，亦即泄漏量限制到允许范围之内。

阻止或控制流体流动（即阻漏）的方法有：

(1)降低引起流动的推动力； (2)增大阻止流动的能

量，从流体本身的流动来说是增加能量损失，它包括力学能量损失、界面摩擦损失、流体摩擦损失、热力学能量损失等等；（3）控制流动方向（变有害方向为无害方向）；（4）切断流道；（5）其它。

所有的密封方式都是利用其中一种或几种方法。选择密封时，要想直接从众多的密封类型中选出合适的具体密封结构是非常困难的。即使是熟练的密封工作者往往也会选错，但是针对给定的用途和条件，如果能够追溯到上述阻漏方式的根源进行综合的分析，然后再确定具体的结构，就可以大大地避免徒劳与失败。这是密封技术极为重要的基本观点。

二、密封技术与润滑

所谓密封技术就是考察密封面的弹性变形、塑性变形、热变形、相对位移（间隙的产生或增大、减小）、摩擦、磨损、温升，以及通过两个面之间的流体的粘性、流速、压力分布、流量、蒸发、能量损失等的变化规律和相互关系，并在此基础上研制合适的密封材料，开发有效实用的密封（包括制造与正确使用）等方面的一门应用技术。

显然，密封技术所涉及的基本内容均属于润滑技术的范畴。实际上，润滑技术的水平的确也直接影响着密封的性能和寿命。譬如接触型密封，为了降低动力消耗，提高密封寿命，就必须设法减少摩擦，防止发热、烧损、咬焊等异常磨损，而要做到这一点完全取决于密封面润滑状况的改善。

支配密封面润滑效果的，无疑是润滑膜的形成状态以及这层润滑膜夹在中间所进行的摩擦运动。密封面润滑膜形成情况归纳起来有：

(1)由自然形成的流体膜实现润滑的密封 接触型密封即属于这种情况,如前面曾经提及的,由于压力分布和固体表面的速度差的作用,在密封面及其附近产生流体的流动,正因为这种流动促使密封面上形成流体膜,这层流体膜就担负着润滑的功能。

此时,通过密封面的流量就是泄漏量。如果可能的话应该尽量将它控制到最小值。但是至少应该保证密封面润滑所必须的流量,其结果这个流量就成为必要的泄漏量。如果机械设备在功能上不允许有这么多的泄漏量时,那么只好反过来考虑,也就是说将密封面的润滑量,控制在机械设备功能所允许的泄漏量范围内。在这种情况下,就得依赖于以选择密封面材料为主的润滑技术的进展,谋求达到防止摩擦磨损等目的。

(2)依靠人为形成的润滑膜实现润滑的密封 自然形成润滑膜的润滑流体肯定是密封对象流体本身,而这里提供密封面润滑的流体,可以是对象流体,也可以是外加密封液。譬如,填料密封为了强化润滑而注入不同于对象流体的润滑剂;机械密封为了润滑和清洗密封面引入冲洗液等都是具体例子。

强制润滑与自然润滑,从润滑形态来说基本上是一样的,区别仅是以不同的方式提供密封面润滑的流体量,并且不存在泄漏量等于“密封面润滑必须的流量”的关系,泄漏量和润滑量是彼此独立的两个参量,对泄漏和润滑可以用不同的方式分别处理,因此在具体措施上就有更大的自由度,这就为处理环境恶劣、条件苛刻的情况开辟新的途径。

此外,为了调节密封面的温度而采取的多种冷却措施,

虽然不一定能直接形成润滑膜，但对于改善密封面的润滑状态是极为有利的。

(3)依靠固体润滑膜实现润滑的密封 在干摩擦密封面中，所谓固体润滑膜并不具有明确的概念，实际上不管有膜还是没有膜，从本质上看，和润滑中的干摩擦问题是一回事。

在干摩擦的情况下，对象流体当然是气体。同样道理，通过密封面的对象流体的流量就等于泄漏量。不过这里通过密封面的对象流体，对密封面的润滑原则上是毫无帮助的，因而防止摩擦、磨损得全部依赖于固体润滑膜的特性和干摩擦的动态。严格地说，因为摩擦、磨损是在对象流体（这里限于气体）的环境中发生的，所以对象流体的分子在摩擦面上的吸附，对密封面的摩擦、磨损具有重大影响。

对于非接触式密封，因为两个面彼此不接触，也就不存在密封面的润滑问题。通过密封部分的对象流体的流量就是泄漏量，不过这个泄漏量与润滑却毫无关系。另外，切断内外部流通方式的密封，如象屏蔽电机传动、隔膜密封等等，都没有润滑问题，只要机构设计得好可以得到完全密封，对象流体的泄漏量等于零。

三、密封面的摩擦与磨损

接触型密封的摩擦状态与滑动轴承有类似的规律，在运行过程中各种摩擦工况，即干摩擦、边界摩擦、流体摩擦以及混合摩擦（包括半干摩擦和半流体摩擦）都可能出现。但对于大多数密封来说，总是力图获得边界摩擦工况，此时既无干摩擦下的剧烈磨损，又避免了流体摩擦时的过多泄漏量。

在边界摩擦情况下，密封界面存在着一层与介质性质不同的薄膜。这层薄膜通常在0.1微米以下，并具有良好的润滑性能，称为边界膜。它可能是由于物理吸附或化学吸附形成的吸附膜，也可能是化学反应产生的反应膜。如果是吸附膜，吸附在金属表面的极性分子形成定向排列的分子栅，当分子层吸附膜达到饱和状态，极性分子紧密排列，分子间的内聚力使吸附膜具有一定的承载能力，有效地防止两摩擦表面直接接触，降低了摩擦系数，起到了良好的润滑作用。当边界膜是反应膜时，由于摩擦主要发生在这个熔点高、剪切强度低的反应膜内，避免了金属表面直接接触，也能使摩擦系数降低。

存在吸附膜的稳定边界润滑情况下，摩擦系数几乎不受载荷及速度的影响，但当达到临界PV值时，亦即速度一定，逐步增加载荷（或载荷一定，逐步加大速度），当载荷（或速度）加大到某一数值后，达到边界膜强度的极限值。此时，边界膜破裂，摩擦面直接接触，致使密封面温度突然上升，摩擦系数和磨损量急剧增大。

此外，当摩擦表面温度达到某一临界值时，会使边界膜失向、软化或融化，吸附膜发生脱吸，摩擦系数将迅速增大，所以对密封面的冷却，常常是保证润滑膜稳定存在的重要途径之一。

密封在具体的工作条件下究竟处于何种工况，通常以密封准数（也就是滑动轴承中的轴承特性值）作为判断依据。密封准数的大小可以根据密封的具体工作条件和要求，人为地予以控制，各种接触式密封在给定条件下都能找到一个密封准数的临界值，超过这个临界值，密封即处于流体摩擦状

态；小于该临界值，则由半流体摩擦逐步向边界摩擦过渡。

由于相对滑动和流动的摩擦，物体表面逐渐产生损耗的现象称为磨损，磨损是摩擦的必然结果。在作密封设计分析和维修工作中遇到磨损时，应该根据磨损的破坏特征逐一弄清属于哪一种或主要是哪一种类型的磨损，也即找出影响磨损的主要因素，然后采取对策。因为不同的磨损类型具有不同的特征和磨损结果，相应地采取的防止方法和工艺措施也必然有所区别。如果毫无依据的盲目摸索，往往徒劳无益，甚至搞错。密封工作过程中各种磨损现象都会遇到，而最常见的磨损类型主要有：

1. 正常磨损（连续磨损） 在设计规定的许用极限内的磨损称为正常磨损。这种磨损一般在初始阶段，由于新的摩擦表面具有一定的粗糙度，真实接触面积小，磨损比较快，这就是所谓“跑合阶段”。随后表面逐渐磨平，真实接触面积增大，逐步进入正常的稳定磨损阶段。摩擦面的磨损轻微、且缓慢稳定。

正常磨损不是有害的磨损，其许用极限值根据机器的工作条件、设计及维护等方面综合分析确定。

2. 粘着磨损 在真实接触点上，由于固相焊接，接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面的现象，叫做粘着磨损。发生固相焊接的时候，真实接触点上的温度可能超过也可能不超过材料的熔点，实际上除了低熔点金属外，大多数并不超过熔点。此时，往往是在真实接触点处，产生很高的应力，接触面出现塑性流动，同时由于接触压力大到使两个摩擦面的原子之间达到相互作用的距离而发生固相焊接。一般互溶性大的材料所组成的摩擦副（相同金属或晶格类

型、晶格常数、电子密度、电化学性能相近的金属)，粘着倾向大。如果粘着部位的材料强度低于摩擦副的材料强度，那么在滑动力的作用下，将沿界面剪断，磨损轻微。反之，就会形成材料从一个表面转移到另一个表面。继续摩擦时，一部分材料脱落成为游离的磨屑，这就是粘着磨损的机理。

粘着磨损的体积磨损量 V ，与滑动距离 L 、法向载荷 N 成正比，与较软材料的屈服极限 P_0 （或硬度 H_B ）成反比，可用下式表示：

$$V = \frac{KNL}{3P_0} = K' \frac{NL}{H_B}$$

式中 K 与 K' ——磨损系数，与真实接触点的剪切转移概率、摩擦副材料等因素有关。

根据实验， K 值的粗略值如下：

大气中，同种金属组对	$K \approx 10^{-3}$
异种金属组对	$K \approx 10^{-4}$
金属—非金属组对	$K \approx 10^{-6}$
边界润滑时	$K \approx 10^{-8}$

从这些粗略的数据可以看出，当两种相同的材料组合，在同一工作条件下，边界润滑的磨损量几乎只有干摩擦的万分之一。这说明了在粘着磨损中，即使边界润滑膜的存在对降低摩擦系数效果不甚明显，但对减轻磨损却起着重要的作用。

防止粘着磨损的办法，有避免出现干摩擦、降低法向载荷 N 以及减小 K 值等，而后者可以说是关键。要降低 K 值，主要依赖于正确选择摩擦副材料和合理的组对。