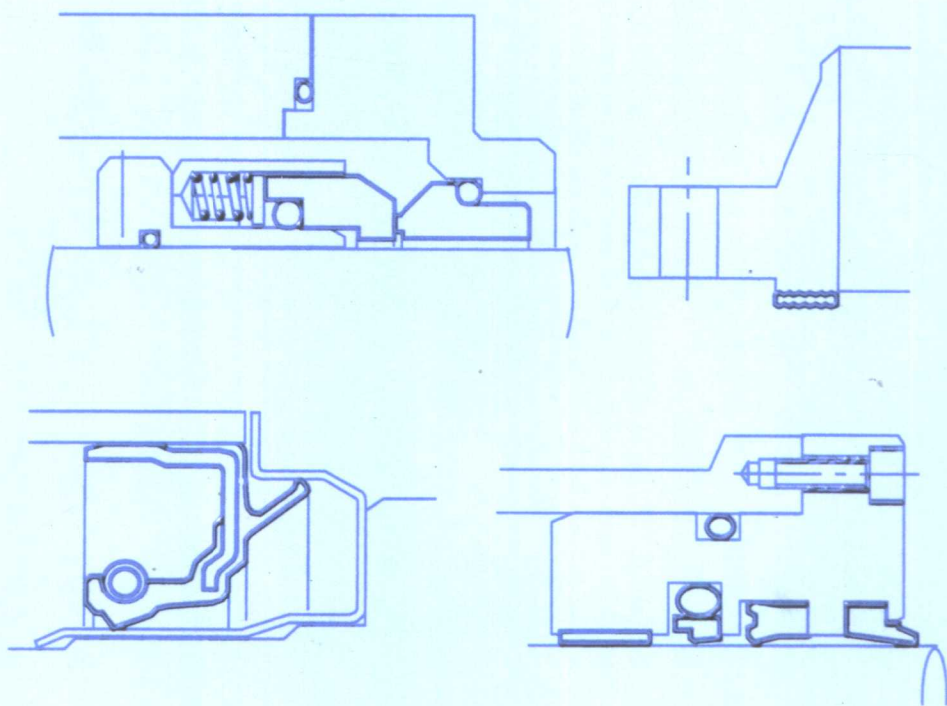


# 流体密封技术——原理与应用

Fluid Sealing Technology—  
principles and applications



(德) 海因茨 K. 米勒 著  
(英) 伯纳德 S. 纳乌  
程传庆 等译

著



机械工业出版社  
China Machine Press



# 流体密封技术

## —原理与应用

(德) 海因茨 K. 米勒 著  
(英) 伯纳德 S. 纳乌 著  
程传庆 译



机械工业出版社

《流体密封技术》清楚地描绘了科技发展动态,详细说明了各种流体密封装置的物理过程和工程考虑;分析了旋转、往复和静态系统,讨论了密封件设计的特性和材料,并附有具体使用实例;提供了评价设计公式和诸如泄漏量、摩擦力等参数;解释了密封中薄膜的流体动力学,强调了相对运动或静态接触的配合部件之间的泄漏量控制,描述了基本原理和密封设计之间的接口,以及更多方面。

本书由两位具有该领域几十年经验的专家著述,在流体密封和密封系统的设计、选型、开发以及应用方面,给用户、开发人员、研究人员和制造商提供帮助。

Fluid sealing technology principles and applications / Heinz K. Müller, Bernard S. Nau.

P. cm. - (Mechanical engineering: 117)

Includes bibliographical references and index.

ISBN 0 - 8247 - 9969 - 0

1. Sealing (Technology) I. Nau, B. S. (Bernard Stanley). II. Title. III. Series:

Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.): 117.

TJ246.M85 1998

621.8'85—dc21

98 - 4223

本书版权登记号:图字:01 - 2000 - 4384

### 图书在版编目 (CIP) 数据

流体密封技术:原理与应用/(德)米勒 (Müller, H.K.), (美)纳乌 (Nau, B.S.) 著;程传庆等译.—北京:机械工业出版社,2002.6

书名原文: Fluid Sealing Technology principles and applications

ISBN 7 - 111 - 10335 - 1

I. 流... II. ①米...②纳...③程... III. 流体-密封-技术  
IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 035130 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:沈红 张亚秋 版式设计:冉晓华 责任校对:张媛

封面设计:陈沛 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·10.5 印张·408 千字

0 001—4 000 册

定价:30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

在生物中，密封以各种形式实现，如隔膜、蝶形瓣膜或血的凝固等。这些机理都归类于静密封“技术”。但是，生物在进化过程中，虽然已发展出难以想象的复杂系统，却没有出现转子或液动活塞杆，即没有出现连续旋转或滑动的器官。这归因于生物进化不能演变成具有充分密封性的动态密封，而充分的密封性是营养和信号输送到被连接器官的前提。人们发明了滑动活塞，然后研制开发出各种复杂的旋转和往复式机械。在这一过程中，发明家经常意识到一个新问题，即尽管设计原理在理论上很成功，但由于密封问题不能在技术上或经济上得到解决而不能实现。

绝对避免泄漏是不可能实现的，这不仅因为物理问题，而且因为经济性问题。车道上到处存在的油污坑就是证明，这需要我们进一步研究。另一方面，在某些情况下，当泄漏物只是空气或水蒸气时，甚至较高的泄漏率也可能被视为无害的，并且是可忍受的。但是，不太有害的泄漏也可能需要很昂贵的措施来对泄漏流体进行抽空、排放和后处理。技术发展过程中，对各种机械运动中的轴、活塞和活塞杆的密封要求促使各种各样的密封系统的出现，这些密封系统体现了机械工程所有基本元件最大的多样性。从产量和营业额两方面支配密封市场的密封系统——旋转轴密封、液压密封和机械密封，在密封制造商和用户两方面都仍然存在许多问题。在现代技术发展进程中，不断升高的压力、温度和滑动速度的需求，尤其是动态密封可能成为设计者的绊脚石。有时失效的密封设计形式清楚地暴露出设计者不熟悉某一特定密封问题的已经证实有效的现代解决方案。

当密封失效时，后续成本可能很高。修理费用可能是失效密封价格的几百甚至几千倍。不幸的是，当选择密封并设计安装细节时，并没有注意到这一点。密封的突然失效可导致致命的大灾难。挑战者号航天飞机的惊人灾难暴露出与存在密封设计缺陷有关的危险。处理有毒或放射性流体的流程泵和压缩机的轴密封尤其关键。除了化工、石化或核电厂的修理和临时停机费用高外，在有毒素释放到环境情况下，这类密封的失效直接威胁着人类健康和生命。

流体密封技术——密封和密封系统的设计、制造和运行，建立在与流体力学同样多样的原理上，诸如润滑、摩擦、磨损、传热、材料性质和机械设计等。密封界面上的物理过程受以下因素支配：分子相互作用、密封端面的几何形状、合适的力平衡；导热、传热和相变；以及许多材料性质。有时这些因素的相互作用是如此复杂以致似乎没有希望通过直接的分析计算来可靠地预测密封的运行特

性。但是，期待工程师们提供一个可靠的解决方案，或论证不能满足现有技术水平所规定的要求的原因。在许多情况下，密封公司的专家知识是有帮助的，但原则上，深奥的知识受限于密封公司制造或销售的特殊密封。由于总体上流体密封技术的多样性，某一密封领域的专家经常缺乏其他领域的基本知识。对于产品可靠性，密封公司提供的关于特定应用中密封的运行特性的信息通常是慎重和尝试性的，并且规定用户有责任来验证实际工况下密封的可靠性。提供这类验证试验是昂贵的，特别是当它要求长期试验时。因此，设计人员应对现代流体密封技术精髓具有尽量广泛的知识。

本书考虑了密封的基本物理基础并阐述了所有密封类型、密封材料和密封应用的专门知识。本书提供的数学背景知识将使读者能够分辨公式的公理基础。这些公式允许人们评价与诸如泄漏量或摩擦力有关的参数的相对重要性。当然，本书不能替代密封制造商和用户之间的专业讨论，但它将能够使读者向密封制造商提出确定的和有针对性的问题。

本书精心设计以满足设计工程师、设备与维护工程师、项目工程师、绘图员、技术支持人员和技术营销人员的需要。本书将有助于满足现代工业的技术和经济需要的密封和密封系统的设计、选型及运行。

**海因茨 K. 米勒**  
**伯纳德 S. 纳乌**

## 译者的话

流体密封是重要的机械基础件，在国民经济的各个领域都有广泛应用，在设备运行中起重要作用。目前，随着我国机械、化工、石油、化肥、动力、原子能等工业以及航空航天技术的发展，密封变得越来越重要。因而对密封的设计人员、生产人员和运行保障人员提出了更高的要求。流体密封技术——密封和密封系统的设计、制造和运行建立在润滑、摩擦、磨损、传热、材料性质和机械设计等许多原理基础上。密封界面上的物理过程受分子相互作用、密封端面的几何形状、合适的力平衡；热传导和相变；以及许多材料性质支配。

本书考虑了密封的基本物理基础并阐述了所有密封类型、密封材料和密封应用的专门知识。本书提供的数学背景知识将使读者能够分辨公式的公理基础。本书内容全面，涉及流体密封的各种形式。书中很多经验公式和数据对密封用户非常实用，是密封维护人员的好帮手。

正如本书原序中所说，它可以满足设计工程师、设备与维护工程师、项目工程师、绘图员、技术支持人员和技术营销人员的需要。

本书由中国机械装备集团合肥通用机械研究所程传庆副译审主译，合肥通用机械研究所张祖光副译审和河北海外工程总公司于福清同志参加了部分章节的翻译工作；合肥通用机械研究所李小瓿教授级高级工程师对全书进行了认真的技术校对。

由于译者水平有限，书中存在缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

2002年1月于合肥

# 目 录

前言

译者的话

第 1 章 流体密封技术介绍 .....	1
1.1 术语和概念 .....	1
1.2 聚合材料 .....	11
1.3 弹性体密封的密封机理 .....	27
1.4 不可压缩薄膜中的流动 .....	36
1.5 可压缩薄膜中的流动 .....	43
第 2 章 旋转密封：橡胶和塑料 .....	48
2.1 旋转唇形密封 .....	48
2.2 带压旋转唇形密封 .....	67
第 3 章 往复式密封 .....	74
3.1 液压密封 .....	74
3.2 气动密封 .....	104
3.3 活塞环 .....	112
第 4 章 柔性填料：旋转和往复用压缩填料 .....	126
4.1 介绍 .....	126
4.2 填料材料和密封环结构 .....	127
4.3 设计方面 .....	128
4.4 离心泵填料 .....	130
4.5 往复泵填料 .....	134
4.6 阀门填料 .....	135
第 5 章 机械密封 .....	137
5.1 机械密封原理 .....	137

---

5.2	机械密封形式 .....	173
5.3	机械密封端面材料 .....	185
<b>第 6 章</b>	<b>非接触型轴密封 .....</b>	<b>195</b>
6.1	液体用节流密封 .....	195
6.2	气体用间隙密封 .....	201
6.3	气膜密封 .....	209
6.4	离心式密封 .....	217
6.5	螺旋密封 .....	224
6.6	液体用抛油环和集液迷宫密封 .....	230
6.7	磁流体密封 .....	235
<b>第 7 章</b>	<b>静密封、波纹管 and 隔膜 .....</b>	<b>242</b>
7.1	封闭式密封 .....	242
7.2	垫片接头: 结构特性 .....	251
7.3	法兰连接用垫片 .....	259
7.4	静密封应用 .....	279
<b>附录</b>	<b>名词对照 .....</b>	<b>298</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>318</b>



# 第 1 章 流体密封技术介绍

## 1.1 术语和概念

### 1.1.1 密封问题

机器的运动部件之间密封的一般问题示意于图 1-1，并且可叙述为分享一共同边界的两个区域之间的流体交换的控制。在“动态”密封情形下，边界上有一个明显的相对滑动运动，该运动主要与边界平行。在“静态”密封情形下，基本不存在这种运动。动态密封的例子包括旋转机械密封、橡胶唇形密封、迷宫式密封和活塞环。静态密封包括垫片、金属 O 形圈和密封剂。

边界通常为圆柱形，例如，往复式或旋转式机器部件，如轴、活塞或活塞杆的一部分；但它也可以是一个平面环形端面。忽视结构、设计或公差考虑经常需要在静止和运动表面之间有一相对大的间隙，因而不借助辅助装置就不能执行密封功能。可通过为此引入附加部件，即“密封”使间隙减小到合适的尺寸。

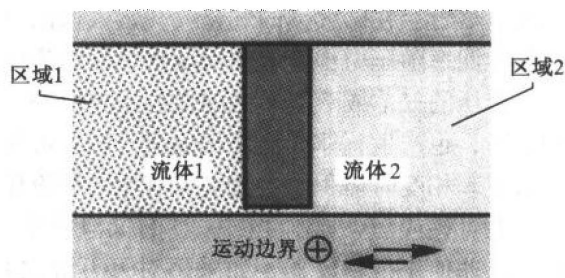


图 1-1 基本密封问题

通过间隙的流体流动可以由各种物理过程驱动，例如压力梯度、浓度梯度、温度梯度、速度梯度（包括黏性剪切力）、分子相互作用（粘附和凝聚）或诸如重力、惯性力等物体力或电磁力。

### 1.1.2 流动和泄漏

任何间隙，尽管很小，都允许流体分子在两个方向上有通道。因此，密封只是一个程度问题，它永远不是绝对的。术语“泄漏”和“密封”经常在口语上不严谨地使用着，但在严肃的工程中它们必须根据相应背景加以定义。泄漏通常被认为流体向外流过密封到被密封的机器的周围区域。但是，在某些情况下，泄漏可能是环境流体向内通过密封与机器内的流体混合并通过运动部件向内泵送。根据应用场合，由这种内漏引起的污染可能是可接受的，也可能是不可接受的。

现在区别以下泄漏模式：

**扩散** 典型的气体或蒸气分子的尺寸小于一纳米 ( $10^{-9}\text{m}$ )，它可通过最小的工程间隙甚至机器壳体或密封部件上的孔隙扩散。甚至一个放置在大气中的真空玻璃球也会被穿透玻璃球壁的氦气充满。因此，当危险气体或蒸气的泄漏量要控制到一个很高的水平时，需要使用非常昂贵的密封系统。但是，当被密封的流体不产生环境有害物如压缩空气或蒸汽时，相对大的泄漏率是可以忍受的，并且可以使用低成本的密封系统。大多数工业应用界于这些极端情况之间。

扩散过程受浓度梯度驱动，因为随机的分子运动倾向于消除浓度差。

**对流** 密封的旋转部件引起的空气流动可使小的液滴通过密封间隙向外移动，特别是在非接触型密封中。同样，旋转部件可引起内向空气流动也可使小液滴通过密封间隙向内移动，从而将灰尘颗粒或液滴从环境输送到被密封的空间。对流泄漏量对密封间隙内和其周围的具体几何形状很敏感。

**压力流** 这是实际中最受关注的泄漏模式。压差引起的液相泄漏频繁地以滴出或流出的液体出现。对于无害的流体，当不存在液体泄漏时，密封系统在技术上定义为是不漏的。该定义中，密封的大气侧的一个薄的弯液面通常不被认为是泄漏，尽管存在向大气的气化（“蒸气逸出”）。当其他条件不变时，因压力流引起的泄漏率随压力梯度增加而增加，而随流体的黏度增加而减小。

带压的气体或蒸气的泄漏也与压差有关。当挥发性液体通过密封间隙而改变相态时，也产生气体或蒸气相泄漏。相变可能由于压力降低或摩擦加热或两者兼之造成。相变时体积的增大具有有用的节流作用，因而减小了质量流率。

在毒性或污染控制受到关注的低泄漏率下，气体或蒸气泄漏可能不被注意到，除非使用敏感仪器，如采用对百万分之几浓度敏感的烃检测仪来探测。目前，这类检测仪使用火焰电离传感器或导热传感器。

最近的一些泄漏控制规定（例如在美国）规定了密封附近的浓度范围，如“ $1 \times 10^{-4}$ ”，“ $1 \times 10^{-3}$ ”等。使用上述类型的检测仪进行测量。这类浓度测量值不是绝对的，因为：①检测仪不收集从密封逸出的全部泄漏物；②仪器的读数浓度取决于被吸入仪器的空气+蒸气的取样流率。当在密封周围安装一密闭罩时，截获全部泄漏物并根据浓度变化率来获得绝对测量值 ( $\text{g/s}$ )。

### 1.1.3 密封元件和功能

本章中，我们概括地讨论密封设计和功能以便说明如何将这些概念广泛应用于不同类型的密封。在以后的几章中，我们将详细说明密封的具体类型。

简单概念密封的主要元件示于图 1-2。有一个可运动的密封体 SB 和一个相对密封体运动的表面 MS。在这对密封面之间形成主密封面 P。P 上的密封面之间的间隙为“密封间隙”或“膜厚”。该间隙按一般工程标准很小，因此适用的测量单位是  $\mu\text{m}$ （即，微米： $0.001\text{mm}$  或  $10^{-6}\text{m}$ ）。

副密封界面 S 限制密封体和腔体 H 之间的泄漏量。闭合力  $F$  使主副密封界面上的间隙最小。定位装置 R 可防止因相对运动的摩擦引起的密封体滑动。在更复杂的密封系统中, S 实际由副密封体构成。

密封界面的状态取决于密封类型并规定了主密封界面的几何形状 (图 1-2):

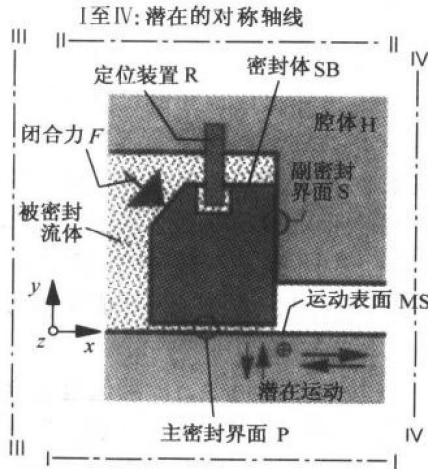


图 1-2 动态密封的部件 (示意)

轴线 (图 1-2)	密封类型	密封面几何形
I	轴密封	圆柱形
II	活塞密封	圆柱形
III	端面密封 (内压力)	平面形
IV	端面密封 (外压力)	平面形

由于密封间隙相对密封直径较小, 当讨论主密封界面中的流动时, 二维模型就够用了。图 1-2 示出了相应的直角坐标系。密封界面上的相对运动取决于如下密封配置:

运动	密封配置
$x$ 方向	活塞杆或活塞密封
$y$ 方向	轴密封

**辅助运动** 在  $y$  方向上, 即与密封界面垂直的方向上偶然的辅助运动可导致对密封产生严重的实际影响。具体地讲, 它可导致运动部件之间因轴窜动或偏心引起的偶然接触。为了使影响降低到最低, 密封体必须具有一个自由度来跟随辅助运动, 同时还应保持该副密封界面上的密封功能。

#### 1.1.4 主密封

现在更详细地考虑主密封。

在各种各样的密封系统中，密封间隙的形状和尺寸变化很大。膜厚范围从 $0.1\mu\text{m}$ 左右到 $1\text{mm}$ 。但是，绝对膜厚对被预见的泄漏率来说并不总是一个好的指标。根据密封的设计，小的间隙可能泄漏，而大的间隙可能在技术上是不漏的。进一步考虑它时，为了方便起见，可分开考虑两类密封：具有预定的固定间隙的密封和具有动态受控端面间隙的密封。

**预定密封间隙** 当泄漏通道被相对的强制定位的刚性表面界定时，就形成了预定密封间隙。该间隙的形式由相对位置和密封件的形状，例如由同心的圆柱形部件的直径差确定。这类密封的例子如节流套（具有一个可预测的流率）、迷宫和溅油收集器。固定间隙密封在长期使用期间具有最小的磨损，但泄漏率通常相对较高，且对间隙形成部件的相对偏心率敏感。固定衬套密封一般具有 $10\mu\text{m}$ 左右（ $0.01\text{mm}$ ）可实际获得的最小间隙。在迷宫式密封和溅油收集器中，间隙通常超过 $0.3\text{mm}$ 。当密封带压流体时，若密封设计成随压力增加膜厚自动减小，则泄漏量可显著降低。

**动态受控密封间隙** 在接触型密封中，泄漏通道完全被配合表面之间的整体接触封闭，至少只要密封端面为静止时，情况如此。但当它们开始相对滑动时，随着密封界面流体膜形成，各种因素导致密封表面稍微分开。这种动态流体膜厚通常为 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ ，即与密封表面的粗糙度和残余波度（不平度）相当。泄漏流体方向的膜尺寸比其厚度大很多，例如，在弹性体旋转唇形密封中大 $0.2\text{mm}$ ，在机械密封中大 $2\text{mm}$ 。因此，膜的宽高比是极其大的， $1000:1\sim 2000:1$ 。如果放大到英式足球场的尺寸，则膜厚只有 $5\sim 10\text{cm}$ 厚，这也就是表面的理想平面度偏差的高度。

给定这一微观尺寸比例，人们可能想知道这类流体流动是否可使用传统的流体动力学定律进行计算。但是由于油和水分子等不大于 $1\text{nm}$ 左右（ $0.001\mu\text{m}$ ），流体分子相对最薄的动态膜仍然很小。甚至在一个 $0.5\mu\text{m}$ 厚的膜中，在整个厚度之间仍可放置500个油分子。因此即使在这种很薄的膜中，流体连续性定律仍然适用。当更详细地讨论各种类型的密封时，将使用这一便利的结果。

只有当密封面膜厚在几个分子内时，才必须考虑边界相互作用，这就是表面化学作用支配的“边界润滑”状态。

对于固定间隙密封和动态间隙密封，1.4节说明了流量和膜压力分布的理论计算基础。但本节将引入两个重要概念：

**流体静压力** 压力 $p_1$ 下被密封的流体透过密封端面之间，形成与流体静压轴承的端面之间的膜类似的膜。当流体流向膜的外边缘时，流体静压力持续下降直到在外边缘达到环境压力 $p_2$ ，见图1-3。这一流体静压力分布的形状与流动方向上的膜外形有关，它可能是平行的、收敛的或扩散的。图1-3中示出了一任意形状。流体静压力的重要性是，通过支撑迫使密封端面接触的载荷的部分或全

部，它可以减小甚至消除密封端面之间的固体接触。

**流体动压力** 由于密封端面之间的膜的流体粘度，它被运动着的密封表面牵引着，就象流体动压轴承中一样（例如，普通颈轴承）。其结果是，流体压力在膜收敛的区域增加，从而使端面抬升分开，见图 1-4。例如，在机械密封和弹性体密封中，密封端面可被这样保持的流体动压膜分开。虽然密封端面在静止时接触，但由于流体动压作用，它们可在运动时分开。

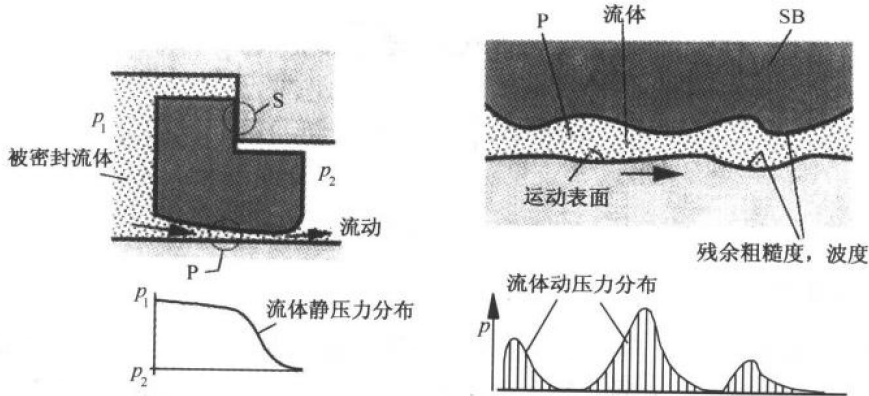


图 1-3 不均匀密封间隙  
中的流体静压力

图 1-4 因运动的不平行表面  
(例如因残余波度或粗糙度引起)  
之间的剪切流引起的密封间隙  
中的流体动压力分布

在具有低模量端面的密封中，流体膜压力（流体静压力加流体动压力）造成的弹性挠曲也起着重要作用。挠曲的形状改变膜压力，从而改变挠曲等！膜的形状和膜压力相互调整以找到相互相容的组合。这将在后一章里进一步考虑。

**追随性、惯性和缓冲** 密封上可能存在足以使静止的密封端面之间的间隙闭合的载荷，运动中的密封有可能不能够追随快速的间隙波动，例如因结构振动、轴窜动或表面形状误差导致的波动等。在这种情形下，密封间隙至少局部增加。这一特性受密封体的惯性力和膜的形状或外部缓冲力的影响；此外，对于聚合体材料，材料的粘弹性可导致移位后表面恢复中的相滞后。

当追随不理想时，随着膜厚增加，流体可能被吸入，当膜变薄时，被挤出。由于膜几何形状的不对称，流体的这种进出可能处在不同方向，导致流体通过密封的净输送。这一呼吸或泵送作用可能实际导致流体在外部施加的压力梯度下流动，该作用称为逆向泵送。当在密封的两边，例如在潜没式设备中，该作用可能特别麻烦。

**影响密封功能的因素** 图 1-5 汇总了影响密封面的一些因素。应当注意的是，被密封流体的物理、化学性能与密封自身的性质和部件的运动细节同样重

要。膜的形成、泄漏、摩擦和磨损的定量方面将在论及具体密封类型时讨论。

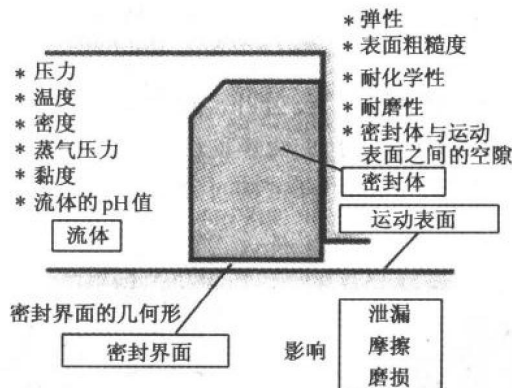


图 1-5 影响密封性能的一些因素

### 1.1.5 副密封

在许多密封中，除了通过主密封间隙的泄漏通道外，还有一个或多个二次泄漏通道。为了控制这类泄漏，装入副密封元件，例如各种类型的副密封环、波纹管或隔膜等（见图 1-6）。在控制泄漏时，这些元件还必须调节二次运动、主密封自适应周期或瞬间轴位移时其微小的运动、热膨胀效应等。接触型副密封的滑动表面可被称作副密封的滑动表面。



图 1-6 副密封概念举例

### 1.1.6 闭合力

**预载荷** 具有动态受控密封间隙的密封必须紧密追随对磨面，对磨面要经常克服密封体的惯性力和副密封上的摩擦力而工作（见上面）。因此预载荷对确保与流体压力无关的主密封面上的密封是必要的。通常，总的比压（= 闭合力 ÷ 密封界面面积）不应小于被密封的流体压力。副密封可能需要一个单独预载荷。图 1-2 中， $F$  表示的闭合力作为组合的合力。



图 1-7 预加载概念举例

为了确保这些功能，甚至当流体压力提供附加载荷时，密封中也必须设计一预载荷，见图 1-7。为此，机械密封装备了压缩弹簧（图 1-7a）或起着弹簧作用的波纹管。弹性体密封（图 1-7b）可通过尺寸过盈和密封自身的弹性变形的组合作用来预加载。压盖（“填料箱”）中的软填料环被轴向预压缩并依靠泊松效应来产生横向膨胀，并因此产生作用于密封界面的闭合力。

**压力载荷** 为了允许预载荷保持合理低值，密封经常这样来设计，即用流体压力补充预载荷并始终保持比压高于密封压力。自动密封的这一原理很有效，尤其在高的流体压力下。

图 1-8 示出了比压的这一基于流体的元件如何可以通过改变密封的几何形状得到控制。当有效流体加载面积  $A_1$  相对密封界面面积  $A$  减小时，比压变的更小。比率  $k = A_1/A$  为自动密封的面积比或平衡比，如机械密封。比压可通过径向调节机械密封中副密封的位置确定。它确定了有效流体加载面积  $A_1$  的值。

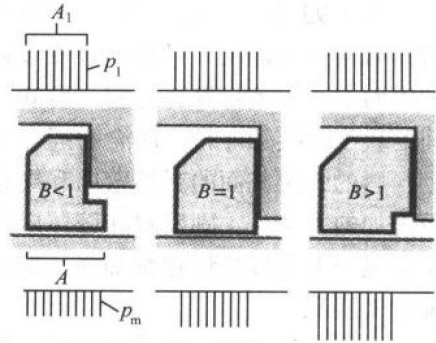


图 1-8 通过改变压力面积比  $B = A_1/A$  来控制作用于密封界面的比载荷  $p_m$  (示意)

### 1.1.7 扭矩传递

扭矩通过密封的旋转和静止部件从旋转轴传递到静密封腔。因此，密封的静止部件必须防止旋转。同样，旋转组件必须设计成允许驱动扭矩传递到主密封端面而对副密封上的运动自由没有干涉。为此，应选择一个定位装置，如密封的旋转和静止部件中的销槽。在机械密封中，有时依靠弹性体部件的摩擦力或预载弹簧的扭转刚度。

### 1.1.8 基本概念的实施

在实际的密封系统中，上面说明的和图 1-2 中的基本元件的单个功能以许多不同方式实现。图 1-9 示出了根据后面几章说明的实例。他们都具有一个密封体 SB、一个运动表面 MS、一个主密封界面 P、一个副密封界面 S 和必要时一个定位（扭矩传递）装置 R。

图 1-9a 中的简单的活塞环密封很类似图 1-2 中的概念密封。外撑的活塞环产生其自身的预载荷力，且凹槽中的气体压力作用于周边（图 1-8 中的  $A_1$ ），自动地补充预载荷来使主密封间隙闭合。副密封界面位于活塞环和凹槽的侧壁之间。

图 1-9b 中的弹性体 O 形圈通过尺寸过盈配合安装在腔体凹槽中，O 形圈截面比凹槽大。因此，预载荷通过弹性变形来产生。副密封通过与凹槽侧壁的联系

来形成，流体压力自动加载。当在主密封界面上存在滑动（轴向或旋转）时，动态密封间隙可能形成。

图 1-9c 中的同轴密封的本身由具有初始轴过盈配合的一增强 PTFE 环组成。闭合力通过弹性体夹紧环施加的预载荷增加，夹紧环也起着副密封作用。同轴密封对活塞杆的滑动再次产生动态密封界面。

图 1-9d 中的弹性体旋转轴密封的密封唇通过初始尺寸过盈配合安装在轴的表面上。主密封界面为密封唇和轴之间的狭窄的接触环带。闭合力通过承接密封唇的骨架截面的弹性弯曲和夹紧弹簧施加的力产生。副密封和腔体中的定位通过一 L 形弹性体包敷加强环的热套配合来实现。

在图 1-9e 的浮动衬套密封中，因刚性密封环和轴的直径差引起的间隙形成主密封界面。销子防止密封环相对腔体旋转。弹簧对衬套预压缩到腔体的一端，由此对 O 形圈副密封施加闭合力。

图 1-9f 中的机械密封（径向端面密封）是一个更复杂的密封系统。旋转环（SB1）通过弹簧预压缩并靠销子驱动以便与靠防转销保持的静止环（SB2）一起形成动态密封界面。本例中两个环都有作为副密封的弹性体 O 形圈。这样一来，机械密封中的动态密封界面就在两个相对复杂的组件之间形成。

图 1-9g 中的填料箱密封由若干个轴向压缩的弹塑性环（填料环）组成。这些环通过横向膨胀（泊松效应）桥接腔体和轴之间的空间以便分别在轴和腔体上形成主副密封界面。

图 1-9h 中的迷宫密封中，密封环经常被弹簧定在中心以限制叶片与对磨面接触时的接触应力。迷宫叶片和凹槽与轴一起形成动态密封界面。迷宫基体和腔体之间的端面接触代表副密封。

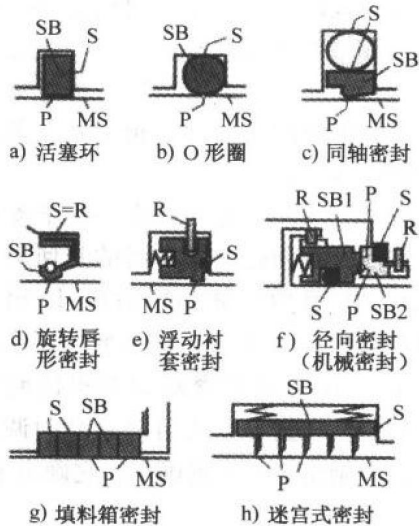


图 1-9 几种类型密封的等价部件（示意）  
SB—密封体；P—主密封界面；S—副密封界面；R—定位装置；MS—运动表面  
（轴、活塞杆、活塞）

### 1.1.9 密封模式

考虑到经济因素，我们经常需要结构简单、成本低的密封系统，根据应用场合，允许在某一可接受的范围存在泄漏。动态密封总是存在某种程度的泄漏。更



有效的密封可以是更复杂、更昂贵的密封系统，如采用多级密封来实现。原则上，可区分以下密封模式：

**被动密封** 它依靠一个预定间隙或动态受控的一个“被动”密封件的流阻。根据应用场合，这种密封件可能具有足够的泄漏流阻力，如图 1-10 所示。它只是一个节流装置，且泄漏率  $m_L$  尽管小，却是有限的。泄漏率是可预测的，它受压差和相对运动支配。由于压力降和/或摩擦生热，液体可能在密封间隙中气化，在这种情况下可能不存在液相泄漏。

**主动密封** 在主动密封中，密封界面上的相对旋转运动主动地产生向被密封的腔体的内向流，如图 1-11 所示。因此，密封起着泵的作用，而泵的流量  $m_R$  取决于密封端面上结合的特殊部件。往复式应用场合存在不同的情形，因为活塞密封和活塞杆密封在交替冲程上具有向内泵送的内在能力。对于一般的主动密封，泵送机理可能取决于离心力和/或黏性剪切流以及几何形状。

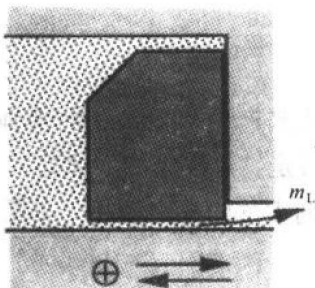


图 1-10 被动密封原理：衬套和轴之间预定间隙，泄漏率  $m_L$

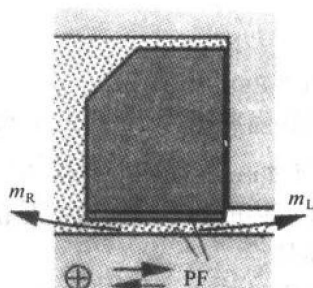


图 1-11 主动密封原理：被泵送回流量  $m_R$  对抗泄漏率  $m_L$ ，PF 为产生泵送的表面形态

主动泵送特性可在设计制造密封时就具有，或者可在使用中靠变形和/或磨损形成。在最佳条件下，这种内向泵送可防止泄漏。但是，稳定的平衡条件 ( $m_L = m_R$ ) 只有当密封不同流体相 (液体至气体) 时才可实现。不同的流体相由于相似相的流体之间发生混合和扩散引起。当内外流体均为液体时，总是存在液体甚至对抗较高压力被向内泵送的可能。

**隔离密封系统** 图 1-12 为具有两个串联的动态密封间隙系统的示意图。这两个间隙被盛装可能是液体或气体的隔离流体的腔体分开。

两个密封不必为相同类型，并且通常两个密封也不一样。例如，内密封可能为机

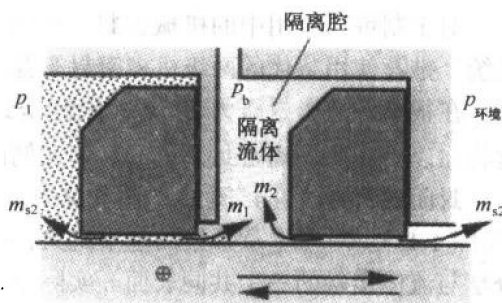


图 1-12 具有隔离流体的双端面密封原理