

TB42  
7132K

948515

# LIUTIDONGMIFENG

顾永泉 著

上册



# 流体动 密封

中国石化出版社

# 流体动密封

上册

顾永泉 著

中国石化出版社

(京)新登字048号

## 内 容 简 介

本书对流体动密封作了全面介绍。上册系统叙述机械端面密封的基本原理、典型结构、工作特性、性能参数和辅助措施,并对常见故障进行了分析。较深入地阐述了机械端面密封中对密封、摩擦和磨损的影响因素,并着重探讨不同摩擦状态和流体膜相态下密封特性、机械密封的温度问题、工作稳定性和可靠性问题,最后介绍机械密封的设计计算和材料选择依据。

本书可供石油、化工、石油化工及其它工业部门从事密封工作的工程技术人员阅读,也可供有关专业师生参考。

## 流 体 动 密 封

上 册

顾 永 泉 著

\*

中国石化出版社出版

振南排版厂排版

通县建新印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092毫米 16 开本 19印张 480 千字 印1701—5200

1990年1月北京第1版 1992年8月北京第2次印刷

ISBN 7-80043-066-9/TH·005 定价: 9.85元

# 序 言

流体密封包括流体动密封和流体静密封，这是流体机械和动力机械所不可缺少的零部件。虽然它在整台机器设备中不是很大的工作元件，但其作用对整台机器设备、整套装置，甚至对整个工厂的影响都很大，特别是在石油化工企业中，对安全生产，节省能耗和物料消耗，防止产品和大气污染和发展新技术、新设备，保证设备运转可靠、效率高、装置连续生产正常具有重大的意义。在石油化工企业中，所处理的流体大多数具有腐蚀性、可燃性、易爆性及毒性，一旦密封失效、介质外漏，不仅污染环境、影响人体健康和产品质量，而且往往会导致火灾、爆炸和人身伤亡等重大事故。

在日常的机器设备使用和维修中，对于机泵几乎40~50%的工作量是轴封。因此，为了使机器设备能在高效率下安全可靠地连续运转，必须重视发展密封技术和培养掌握流体密封技术的工程技术人员，专门从事这方面工作，解决生产上出现的有关流体密封问题。

密封技术随着石油化工、动力、轻工、原子能等工业和宇航技术的发展，变得愈来愈重要。特别是近年来，国内外密封技术与摩擦学这两门相互关连的新兴学科正在迅速发展。因此，有必要将大量的试验研究工作、发表的论文和报告内容、生产经验，结合理论，编写成书，供流体密封方面工程技术人员阅读和参考，更好地为祖国的建设服务。

本书分上、下两册介绍流体动密封的基本原理、密封理论、设计方法和使用知识。上册主要介绍目前工业中应用较广的机械端面密封的结构、原理、密封理论、摩擦、磨损、润滑的知识，并着重介绍机械端面密封不同摩擦状态和相态下工作特性及主要工作参数，密封的工作稳定性和工作可靠性、故障分析和环境控制。下册介绍常用几种其它型式的动密封内容。

本书是在中国石化总公司石油化工设备密封技术培训班讲义《流体动密封的基本原理及知识——机械端面密封》基础上改写，增添了机械密封的工作稳定性、工作可靠性、国内外新材料和结构等内容。由于水平有限，难免有些缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

84097/2

# 目 录

## 序言

<b>第一章 流体动密封概况</b> .....	1
第一节 概述.....	1
第二节 流体密封的机理、方法与分类.....	1
第三节 流体密封的主要指标和质量比较准则.....	5
第四节 密封技术所涉及的学科和知识.....	7
第五节 流体动密封技术的现状和发展趋势.....	8
<b>第二章 机械密封的基本结构及原理</b> .....	14
第一节 机械密封的基本构成及作用原理.....	14
第二节 机械密封的基本类型.....	15
第三节 机械密封的特点.....	19
<b>第三章 机械密封的密封理论</b> .....	21
第一节 流体润滑学说(成膜理论).....	21
第二节 边界润滑学说(流体交换流动理论).....	25
第三节 混合摩擦学说(热流体动力楔理论).....	26
第四节 表面张力学说.....	27
第五节 两相流润滑学说(汽蚀与相变学说).....	29
<b>第四章 机械密封的摩擦与摩擦特性</b> .....	31
第一节 摩擦状态与摩擦系数.....	31
第二节 摩擦系数的影响因素.....	35
第三节 摩擦特性.....	39
<b>第五章 机械密封的主要参数及特性</b> .....	41
第一节 几何参数.....	41
第二节 力学参数.....	42
第三节 性能参数.....	50
第四节 机械密封的特性.....	55
<b>第六章 机械密封的温度问题</b> .....	61
第一节 机械密封的热量平衡.....	61
第二节 机械密封的端面温度.....	63
第三节 机械密封的温度限制.....	65
第四节 机械密封的热计算及算例.....	66
<b>第七章 机械密封中的相变及汽相密封</b> .....	71
第一节 相变及相变模型.....	71
第二节 膜压系数和沸腾半径.....	72
第三节 各种相态密封的工作特性.....	76

<b>第四节</b>	汽相密封	77
<b>第八章</b>	机械密封摩擦副环的变形和热裂	79
<b>第一节</b>	密封环的变形	79
<b>第二节</b>	机械密封的热应力开裂(热裂)	84
<b>第九章</b>	机械密封的磨损	88
<b>第一节</b>	磨损的种类	88
<b>第二节</b>	影响磨损的因素	92
<b>第三节</b>	磨损率及磨损系数	94
<b>第四节</b>	失效分析	97
<b>第十章</b>	机械密封工作稳定性	100
<b>第一节</b>	密封面分离(开启失稳)	100
<b>第二节</b>	密封面倾斜(径向倾斜失稳)	104
<b>第三节</b>	密封面变形(形变失稳)	106
<b>第四节</b>	密封面热弹变形(热弹失稳)	109
<b>第五节</b>	机械密封的振动(动力失稳)	111
<b>第十一章</b>	机械密封工作的可靠性	118
<b>第一节</b>	可靠性特性及基本参数	118
<b>第二节</b>	失效类型	121
<b>第三节</b>	耐久性与寿命指标	122
<b>第四节</b>	常用分布函数及其特征	125
<b>第五节</b>	机械密封的可靠性数据的图估法	128
<b>第六节</b>	威布尔概率纸图估寿命的实例	132
<b>第七节</b>	机械密封系统的可靠性及分析	136
<b>第十二章</b>	机械密封的设计和计算	139
<b>第一节</b>	机械密封设计中应考虑的问题	139
<b>第二节</b>	机械密封的结构型式选择	140
<b>第三节</b>	设计计算	144
<b>第四节</b>	零部件设计计算	147
<b>第十三章</b>	机械密封的典型结构介绍	155
<b>第一节</b>	机泵用机械密封	155
<b>第二节</b>	化工设备用机械密封	168
<b>第三节</b>	组合式机械密封	169
<b>第十四章</b>	机械密封用材料	173
<b>第一节</b>	摩擦副材料	173
<b>第二节</b>	辅助密封圈材料	188
<b>第三节</b>	弹性元件及其它零件材料	190
<b>第四节</b>	机械密封用材料的选择	192
<b>第十五章</b>	机械密封的环境控制	194
<b>第一节</b>	温度控制系统	194
<b>第二节</b>	压力控制系统	202

第三节	杂质清除系统.....	205
第四节	流体替代(封液)系统.....	209
<b>第十六章</b>	<b>机械密封的故障、原因及分析</b> .....	<b>212</b>
第一节	故障种类及性质.....	212
第二节	故障分析.....	216
第三节	常见故障及症状.....	220
<b>附录</b>	.....	<b>227</b>
一	泵用机械密封标准.....	227
二	釜用机械密封标准(摘录).....	238
三	机械密封计算用图表.....	246
四	常用单位换算.....	255
五	机械密封的故障现象、原因、措施和标准.....	259
六	机械密封及泵站冷却器的校核性热计算.....	268
<b>参考文献</b>	.....	<b>285</b>

# 第一章 流体动密封概况

## 第一节 概 述

流体密封技术在现代流体工程中具有一定的重要性。在各项工业和科学技术发展中要不断提高生产技术水平，特别是在技术改造和设备改造与更新方面，必须对密封技术给予充分的重视。因为流体密封技术对提高机器效率（减少容积损失可提高机器的容积效率；减少摩擦损失可提高机器的机械效率；改变密封方式可提高机器或机组的效率；改变辅助系统方案可减少能耗，提高机组效率）、节省能耗、节约原材料，提高机器工作的可靠性，对安全和环境保护、对开发新能源和发展新技术起到一定的作用<sup>[1-13]</sup>，所以其意义不只限于阻止跑冒滴漏。随着工业生产和科学技术的发展，要不断提高流体密封的技术水平。

密封的功用是阻止泄漏。起密封作用的零部件称为密封件。放置密封件的部位称为密封箱或密封室。较复杂的密封，特别是带有辅助系统的，称为密封装置。静止部位的密封为静密封，有相对运动的部位的密封，称为动密封。常用的动密封是转轴和往复杆密封，简称轴封和杆封。

密封装置（或密封）是流体动力机械、工艺设备（包括压力容器）、液压设备、管道和阀门等的重要组成部分。其中流体均以各种不同形式泄漏（内漏、外漏或中间串漏；渗漏、穿漏或滴漏；漏水、漏气或漏油）。

对密封的基本要求是保证结合部分的密闭性、工作要可靠、使用寿命要长，并且力求密封装置的结构紧凑、系统简单、制造维修方便、成本低廉。由于大多数密封件为易损件，应保证它有互换性，以便实现通用化、标准化、系列化。

## 第二节 流体密封的机理、方法与分类

被密封的介质往往是以穿漏、渗透或扩散的形式而泄漏到密封连接处的彼侧。造成泄漏的原因是密封连接处存在间隙（包括宏观间隙或微观间隙），密封介质在压力差或浓度差的作用下通过间隙而泄漏。因此，要使连接处达到密封，必须减少密封连接处的间隙（密封面间隙和密封件本身的间隙）或消除间隙。通常靠密封力使密封面相互贴紧、接触甚至嵌合的密封称之为接触式密封；而密封面留有间隙使之互相不接触的密封称之为非接触式密封。

目前，流体密封的密封方法大致可归纳如下：

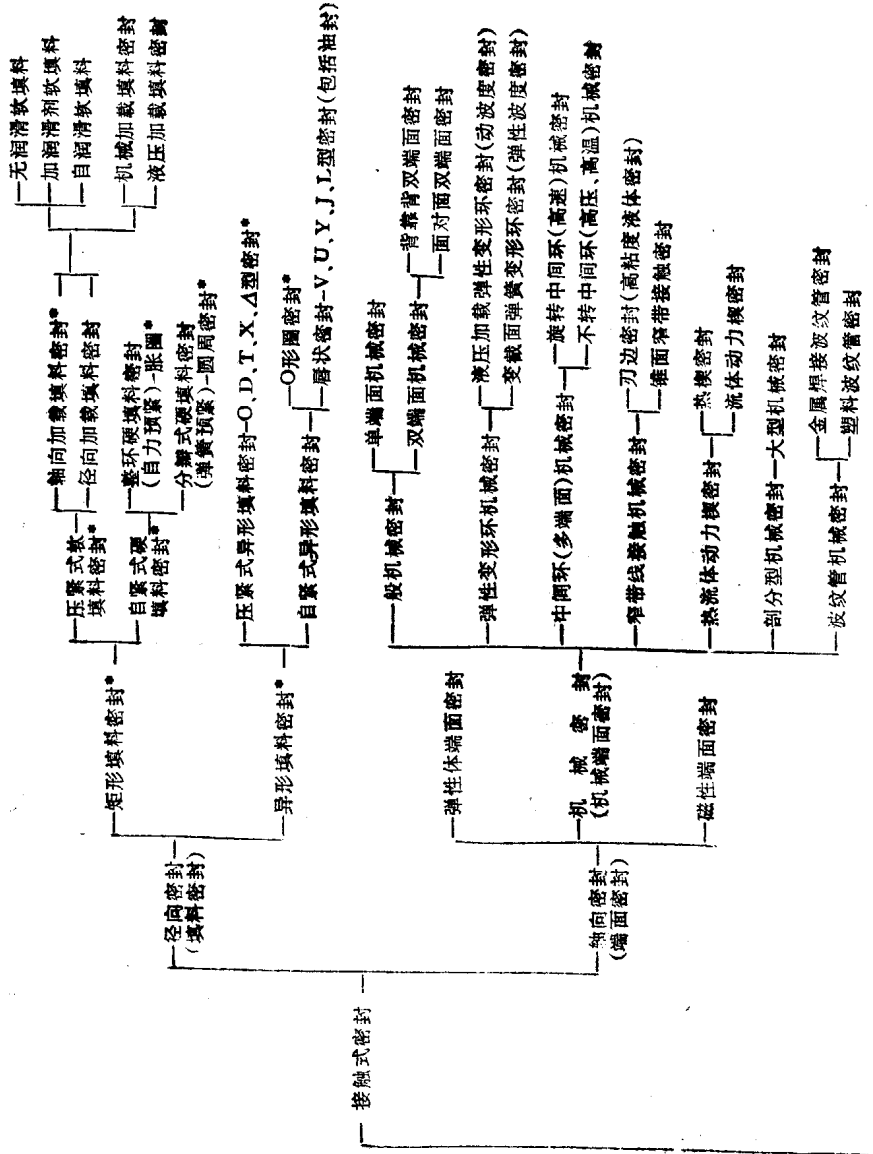
### 1. 全封闭或部分封闭

将机器或设备用机壳或机罩全部密闭或部分密闭住。例如，密闭式泵、密闭式压缩机、屏蔽泵、磁力偶合器驱动的泵和搅拌机等就是应用了全部封闭的密封方法。这种全封闭式机泵的特点就是无轴封箱或密封室。减少密封箱（或密封室）数目的方法，就是部分封闭的密封方法。例如，立式筒袋泵、砍头泵就采用这种密封方法。

### 2. 填塞或阻塞

利用密封件堵塞泄漏处（例如静密封的密封垫、密封圈、密封环和填缝敛合和动密封的





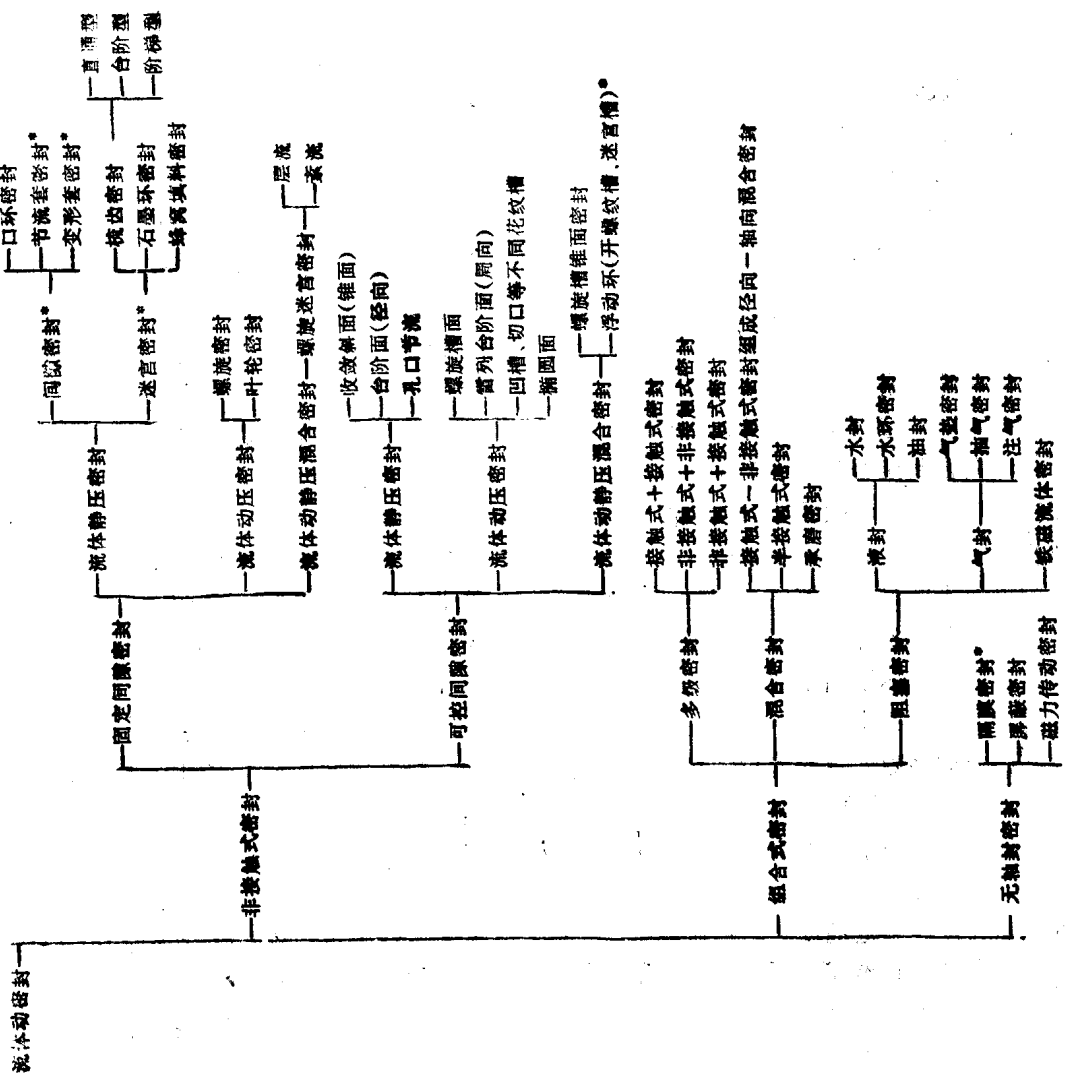


图1-1 流体动密封的种类 (带 \* 者包括往复动密封) (1-9)

填料密封等)或利用流体阻塞液密封流体(例如气封、水封、水环密封、铁磁流体密封等)。

### 3. 分隔与间隔

利用密封件将泄漏处和外界分隔开(例如隔膜密封、机械密封等)或利用气体或液体作为中间密封流体(例如气垫密封、中间有封液的双端面机械密封等)。

### 4. 引出或注入

将泄漏流体引回吸入室或通常为低压的吸入侧(例如抽气密封、抽射器密封等)或将对被密封流体无害的密封流体注入密封室,阻止被密封流体的泄漏(例如缓冲气密封、氮气密封等)。

### 5. 流阻或反压

利用密封件的狭窄间隙或曲折途径造成密封所需要的流动阻力(例如间隙密封、迷宫密封等)或利用密封件对泄漏流体造成反压,使之部分平衡或完全平衡,达到密封作用。

### 6. 贴合或粘合

利用研合密封面本身的加工质量使密封面贴合(例如,气缸中分面密封等)或利用密封剂(例如密封胶、密封膏等)使密封面粘合来达到密封。

### 7. 几种密封方法的组合

利用上述几种密封方法和密封件组合在一起来达到密封(例如,填料密封与水封,螺旋密封与机械密封,迷宫密封与抽气密封,机械密封与浮环密封组合成一组密封)。

流体静密封几乎都属于接触式密封(只有气柜水封等例外)。流体动密封既有接触式又有非接触式,还有组合式密封。根据密封方法和结构原理的特点,流体动密封(图1-1)又可分为径向密封(柱面或环形密封)和轴向密封(端面密封)。径向密封是两圆柱面或环形面之间径向间隙的密封,阻止流体沿着与运动件轴线平行方向的泄漏;轴向密封是平面、锥面或球面间端面间隙(轴向间隙)的密封,阻止流体朝着半径方向泄漏。同样也存在着径向密封与轴向密封组合的混合型密封(例如,浮环密封、分瓣密封等)。

接触式密封可以消除间隙或使间隙为最小值,可达到很高的密闭性,但是需要花费额外的功耗来克服摩擦,而且密封面会发热和磨损。接触式径向密封都是采用填料径向接触而方法不同的填料来密封,如填塞型密封、挤压型密封、挠曲型密封、分隔型密封和薄膜型密封。接触式轴向密封都是采用密封环端面接触而方法不同的端面密封,如机械端面密封、磁性端面密封、弹性体端面密封。

非接触式密封的密封件不直接接触,因之无摩擦和磨损,密封件工作寿命长。非接触径向密封大都是径向间隙固定的密封(固定间隙密封),而非接触轴向密封的端面间隙是可以调整的和控制的(可控间隙密封)。这些密封又可分为流体静压型密封和流体动压型密封。同时也存在着流体动、静压混合型密封(例如螺旋-迷宫密封等)。流体静压型密封的间隙未消除掉,而是减小间隙,产生流动阻力来达到有限的密封,故又称之为流阻型密封。流体动压型密封的密封件产生一定的反压,将泄漏流体挤回密封室来达到密封,故又称之为反压型密封。这种密封消耗功率并使密封件和流体被加热。尽管非接触式密封不像接触式密封有大量功率消耗在密封本身,但是通过缝隙泄漏流体消耗功率和密封件在流体中的搅拌消耗功率也会影响机器和设备的能耗与物料消耗。

流体动密封按其运动方式来分有旋转(件)密封、往复(件)密封和螺旋(件)密封。

表1-1中列出各种动密封及其适用的运动方式。

表1-1 动密封与运动方式

密封的型式			旋转	往复	螺旋
接 触 式 密 封	填塞型密封	矩形填料	○	○	○
	挤压型密封	○形环	△	○	△
		D、X、△形环	○	○	○
	挠曲型密封	唇状密封(V、U、J、L、Y型)	△	○	△
		油封	○	—	—
	分割型密封	开口环	○	○	—
		分瓣环	—	—	—
	薄膜型密封	隔膜	—	○	—
		波纹管	—	—	—
	端面型密封	机械密封	○	—	—
环形密封		—	—	—	
非 接 触 式 密 封	固定间隙流阻型密封	间隙密封(套筒密封)	○	○	—
		迷宫密封(蜂窝密封、梳齿)	—	—	—
	固定间隙反压型密封	螺旋密封	○	—	—
		离心密封、叶轮密封	—	—	—
	可控间隙型密封	机械密封	○	—	—
流体阻塞型密封	水封、气封、油封、铁磁流体密封	○	○	—	

注：还有组合密封和全封闭密封，这里不一一列举。表中○表示合适；△表示可用；—表示不用。

### 第三节 流体密封的主要指标和质量比较准则

衡量流体密封性能好坏的主要技术指标是泄漏量、寿命和使用条件（压力  $p$ 、周速  $V$ 、温度  $T$ ）。目前流体密封能达到的单项最高技术指标列于表1-2中。由此可以粗略地反映目前的密封技术水平。但在密封的设计和使用时，还必须考虑各项经济指标，如基建费（密封件、辅助系统等）和维护费（能耗、原材料消耗、阻塞流体消耗、易损件和维修费用等）。

表1-2 流体密封的单项技术指标

项 目	动 密 封	静 密 封
压力(或真空) $p$	$10^{-10}$ mmHg~ $10^4$ kgf/cm <sup>2</sup>	$10^{-4}$ mmHg~ $10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>
温 度 $T$	-240~+600℃	-240~+900℃
周 速 $V$	接触式密封<150m/s	—
泄 漏 量 $q$	0.1ml/h	—
寿 命 $t$	10年	—

流体密封的密闭性是重要指标，通常用密封的泄漏量来表示。泄漏量目前按包含几何尺寸  $(d、l、e)$  和工况参数  $(\mu、V、p)$  的经验公式和理论公式来确定。在评定流体密封的

密闭性等级时，有的按密封周边B (dm) 除每千秒内的泄漏量q为比泄漏量

$$\bar{q} = \frac{q}{B} \quad \text{ml/dm} \cdot \text{ks}$$

对于活塞杆密封（杆封）也有用面积F (m<sup>2</sup>) 除泄漏量V (ml) 为比泄漏量的

$$\bar{V} = \frac{V}{F} \quad \text{ml/m}^2$$

对于扩散泄漏，用扩散量q<sub>d</sub> (ml/ks) 除面积F (dm<sup>2</sup>) 为比泄漏量 $\bar{q}_d = \frac{q_d}{F} \quad \text{ml/dm}^2 \cdot \text{ks}$

通常取旋转密封的轴径d=φ30mm在15分钟内测定的比泄漏量 $\bar{q}$ 。取往复杆密封的杆径d=φ30mm在冲程l=100mm，冲次为n=100内测定得出比泄漏量 $\bar{V}$ 。根据数学统计处理，对各类密封用比泄漏量来比较密闭性，确定表1-3所示的几个等级。各类密封按密闭程度的分布

表1-3 流体密封的密闭性等级和比泄漏量 $\bar{q}$ (ml/ks·dm)或 $\bar{q}_d$ (ml/dm<sup>2</sup>·ks)或 $\bar{V}$ (ml/m<sup>2</sup>)

等级	比泄漏量	直观质量评定准则	典型密封
0-0	<10 <sup>-5</sup>	绝对密封	金属波纹管密封
0-1	1×10 <sup>-5</sup> ~1×10 <sup>-4</sup>		聚合物薄膜密封
1-1	1×10 <sup>-4</sup> ~5×10 <sup>-4</sup>	肉眼看不见冒汗	薄膜密封(通过橡胶扩散泄漏)
1-2	5×10 <sup>-4</sup> ~2.5×10 <sup>-3</sup>		弹性体静密封
2-1	2.5×10 <sup>-3</sup> ~1×10 <sup>-2</sup>	不成滴状的泄漏	繁重工况下的静密封 弹性体活塞杆密封(往复密封)
2-2	1×10 <sup>-2</sup> ~5×10 <sup>-2</sup>		挠曲型密封
3-1	5×10 <sup>-2</sup> ~2.5×10 <sup>-2</sup>	有滴漏	繁重工况下的往复密封, 挠曲型密封, 端面密封
3-2	0.25~1.00		挠曲型密封, 端面密封
4-1	1~5	滴状泄漏	端面密封, 填塞型密封(往复反转轴密封)
4-2	5~25		非接触式旋转密封与往复密封
5	.25~100	线状泄漏	非接触式密封
6	>100		

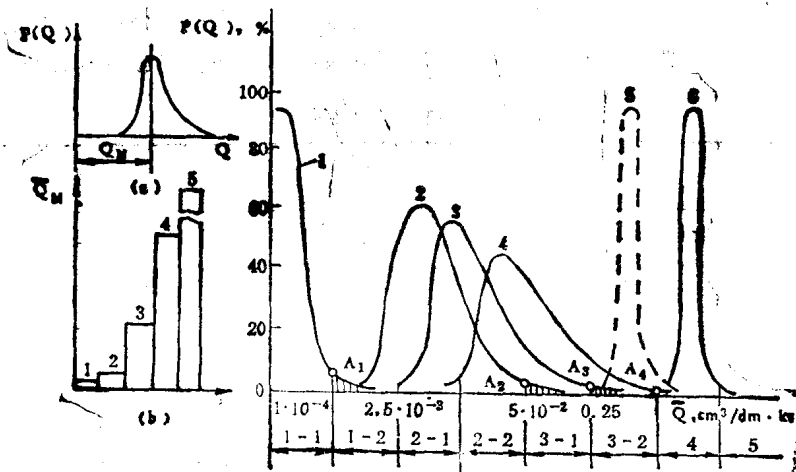


图1-2 按密闭性程度 (a, b) 和等级 (c) 的密封分布曲线<sup>[1-3]</sup>

1—静密封, 2—往复密封, 3—挠曲型旋转密封, 4—端面型旋转密封, 5, 6—非接触式旋转密封

情况和密闭性等级示于图1-2中。非接触式密封的分布符合正态分布为对称曲线，而其它密封的分布均为最高点偏向低限的非对称曲线。这种规律是由于制造时力争达到泄漏量最小的结果。在曲线上A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>及A<sub>4</sub>点的右边带阴影线部分的密封在验收交货试验中予以报废或返修。

表中列出与比泄漏量相应的等级，同时还列出相应的直观质量评定准则和典型的密封。因为有时定量评定有困难和不可能，所以表中列出的直观质量评定准则可供实际使用时参考<sup>[1-3]</sup>。

#### 第四节 密封技术所涉及的学科和知识

密封技术与其它工程学科分支一样，它所涉及到的问题较广泛，必须借助于许多其它学科和领域的知识与经验，才能合理解决工程上的密封问题和进一步开发密封技术。

密封技术涉及到流体力学、传热学、润滑理论、固体力学和结构力学、热力学、化学、物理、冶金学、动力学以及其它领域，密封问题就是由这些相互有关的作用叠加起来的。要解决密封问题，首先要单独地分析每项作用，然后再综合评定整体作用。图1-3所示为具有流体膜密封所涉及到的某些学科知识，例如机械密封或浮环密封，密封的静、动环（定子与转子元件）由于受力和受热就会产生变形、磨损、振动，就会影响流体膜的流体动力特性。这就要求从弹性理论、传热学、摩擦学和振动理论等方面，还要从自动控制理论、可靠性理论、技术诊断学等方面去研究、分析密封问题。此外，流体膜特性反过来又去影响静、动环，就要从流体动力学、气体动力学、润滑理论等方面去研究和分析密封问题。

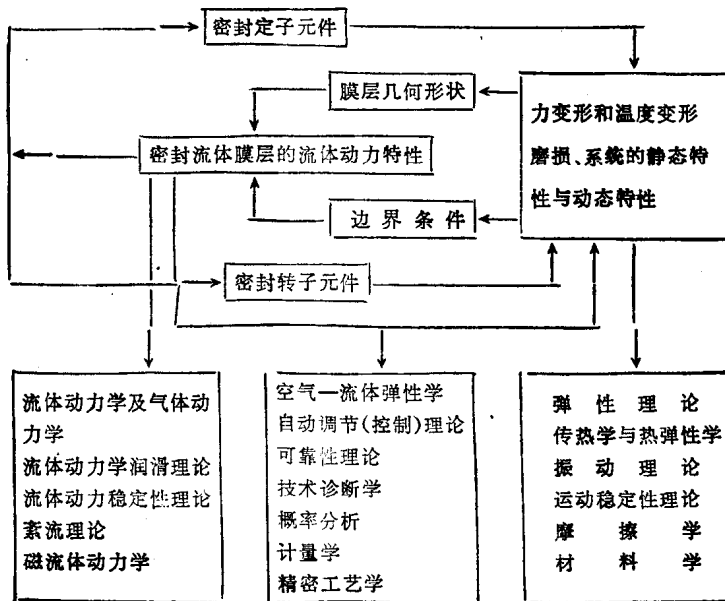


图1-3 密封技术涉及的某些学科知识<sup>[1-4]</sup>

为此，从事密封技术的工程技术人员必须具备这些方面的基本知识和经验，才能更好地为解决本单位的密封问题，不断发展密封技术和丰富这方面的经验。

## 第五节 流体动密封技术的现状和发展趋势

流体动密封的发展与流体机械的发展分不开。由于各种流体机械的介质、压力、温度和流量不断增加，对流体密封的要求也不断提高。一方面密封的压力、周速、温度决定了它的重要性，另一方面随着参数和条件的要求提高，这些机械对密封的密闭性和可靠性的要求更加严格。此外，材料和机械制造水平的提高，也不断地促使密封技术的发展。

流体动密封近年来在结构型式、材料和辅助措施方面有了发展并进一步沿着这些方面发展。

### 一、接触式密封

#### 1. 径向填料密封

近年来在径向填料密封中，克服了过去普通软填料的缺点，出现了与普通软填料密封轴向加载方式不同的径向加载的软填料密封（机械加载和液压加载）。图1-4所示为注入润滑脂径向加载的软填料密封。英国弗兰克雪博克斯（Flexibox）公司已经有系列产品，其泄漏量较接近机械密封<sup>[1-5]</sup>。柔性石墨的 $p_c V$ 值达 $250 \text{kgf/cm}^2 \cdot \text{m/s}^{[1-6,7]}$ 。此外，软填料密封中先后应用了浸四氟乙烯的石棉填料、含石墨氟树脂纤维填料、碳纤维填料等用骨架材料和填充材料制成的编织材料。

在径向唇状密封中出现了如图1-5所示的弹性体套筒与螺旋槽面接触的唇状密封，其密封压力（单级）可达 $50 \text{kgf/cm}^2$ <sup>[1-8]</sup>。近十年来唇状密封的趋向是降低价格，采用四氟乙烯唇边代替卡箍弹簧和金属加强筋，利用螺旋槽唇面及其表面张力作用（如Spiroseal），采用散热措施。

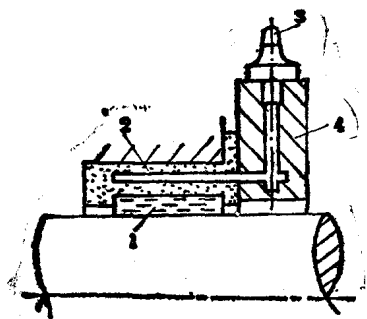


图1-4 径向加载填料密封 (Radpack)  
1—填料；2—弹性套；3—加油嘴；4—格丝

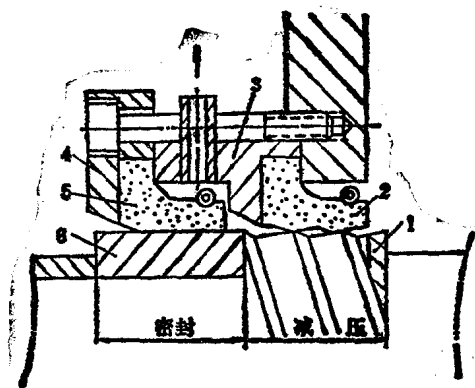


图1-5 弹性体套筒与螺旋槽面接触的唇状密封 (Liquidyne)

1—槽面轴套；2—固定弹性体套筒；3—支承环；  
4—夹持环；5—弹性体套筒；6—平面轴套

在软填料密封中也出现了一种轴向加载、轴向变形的软填料密封，改变过去轴向加载、径向变形的传统性软填料密封的结构，无底套压盖内填料内环与叶轮轴肩之间加金属密封环片，其端面与填料接触，成为一种端面填料密封（图1-6），结果比压、功耗下降，寿命延长<sup>[1-9]</sup>。

#### 2. 轴向机械密封

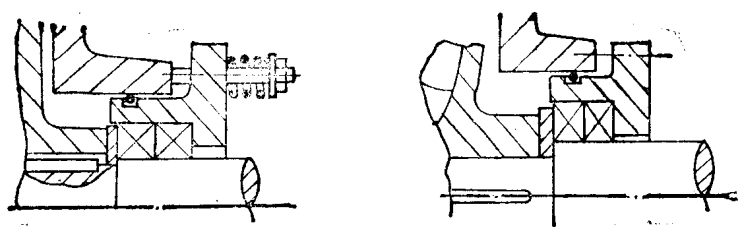


图1-6 端面填料密封

在机械密封中，一部分仍用接触式密封，一部分已发展成非接触式密封。近年来，机械密封在结构型式方面，先后出现了改善密封面润滑条件的热流体动力楔密封、弹性变形环波度机械密封(图1-7,8)<sup>〔1-10〕</sup>和中间环密封。高速、高温和轻烃泵轴密封大多数采用金属波纹管密封，后两种轴封还采用蒸汽背冷、保证轴封稳定工作。高速下用中间环密封相对地降低密封环端面周速，高压下用中间环，其两面受压匀称，以减少压力变形。最近出现密封面很窄的波纹管密封，由于密封面似刀刃，称为刃边密封(图1-9)，其接触面积小、密封性好、温度变形与压力变形的影响不大、冷却特性好、适用于高粘性液体和强腐蚀性液体(塑料、橡胶原液)<sup>〔1-12〕</sup>。对于大直径机械密封做成剖分型密封。

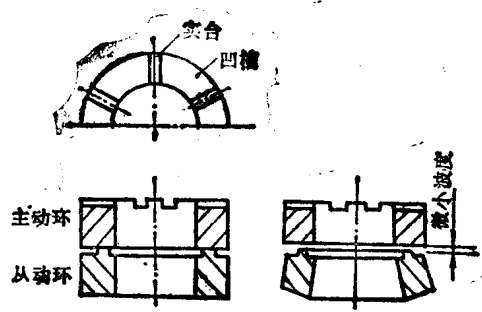


图1-7 弹性机械密封〔1-10〕

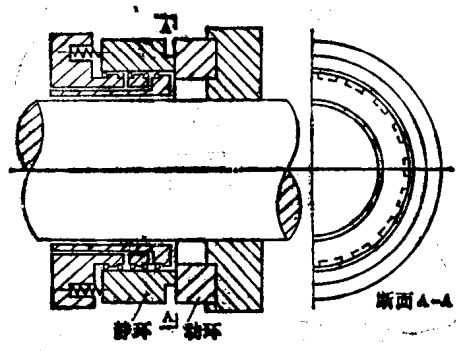


图1-8 动波度机械密封〔1-10〕

接触式机械密封对材料的要求是：(1) 具有较低的摩擦系数；(2) 具有低的磨损率；(3) 具有高的硬度；(4) 对于腐蚀介质应具有化学稳定性；(5) 具有非渗透性；(6) 具有较高的耐热冲击系数。

碳化硅和硅化石墨(化学蒸汽反应的碳化硅)具有高的化学稳定性、高的导热系数、低的摩擦系数、小的膨胀系数和很高的耐热性与强度。它们是机械密封摩擦时的良好材料。碳化硅与石墨组合摩擦的 $p \cdot V$ 值很高(图1-10)<sup>〔1-13〕</sup>。最近出现了耐腐蚀的碳化钨(WC-Ni-Cr-Mo)，可用于pH值为2的介质<sup>〔1-14〕</sup>。它比WC-Co碳化钨耐腐蚀和耐磨。浸铜的碳化钨具有高耐磨性和抗摩性<sup>〔1-15〕</sup>。这些材料的性能和制造方法详见第十四章表14-10。

## 二、非接触式密封

### 1. 固定间隙的非接触式密封

在固定间隙的非接触式密封中，为了减少泄漏量，出现了间隙较小的蜂窝填料密封与石墨环等密封，逐步趋于接触式密封，故称之为承磨密封(Abradable seal)。蜂窝密封(图1-11)





图1-9 刃边波纹管机械密封

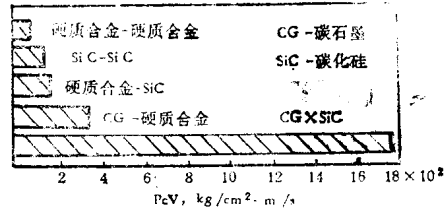


图1-10 碳石墨-碳化硅的 $P_c V$ 值

不仅间隙小，而且迷宫密封数目也多，其性能优于一般迷宫密封<sup>[1-16]</sup>。

## 2. 可控间隙的非接触式密封

由于固定间隙密封的间隙不可调节，往往热膨胀差会使泄漏量增大或发生接触摩擦的故障。为了克服这些缺点，发展了可控间隙的非接触式密封。在流体静压密封中出现了收敛锥面型、径向台阶型和孔口节流型密封（图1-12）。在流体动压密封中出现了螺旋槽面型、周向台阶（雷列台阶）型、椭圆面型和切口等不同花纹槽面型密封（图1-13）。在流体静动压混合密封（Hybrid）中有螺旋锥面型密封、开螺纹槽或迷宫槽的浮动环密封（图1-14,15）。这些密封有用作泵的前置密封、主密封，也有用作燃气轮机的气膜密封和高压泵的液膜密封。

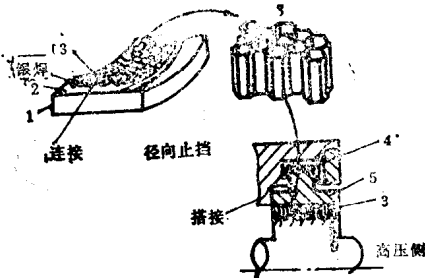


图1-11 承磨密封 (Abradable seal)

1—本体；2—银焊加强环；3—蜂窝；4—波形弹簧；5—剖分环

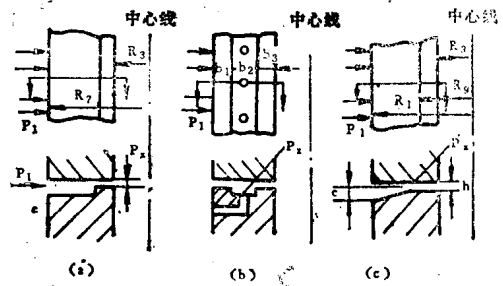


图1-12 流体静压型非接触式密封

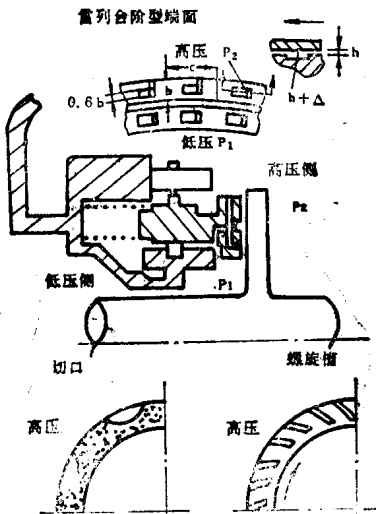


图1-13 流体动压型非接触式密封

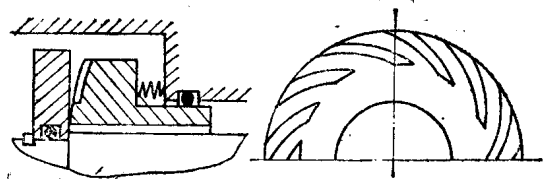


图1-14 流体静动压混合型密封 (Hybrid)