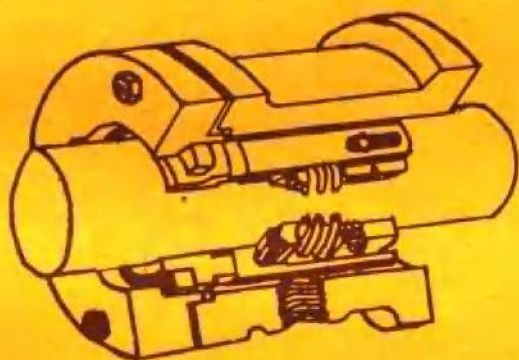


流体动密封

顾永泉



石油大学出版社

内 容 提 要

本书叙述流体动密封的基本原理、典型结构、设计原则、计算方法和材料选择与故障分析。第一篇为流体密封的理论基础,着重介绍密封的流体力学与摩擦学基本知识;第二篇为流体动密封的基本原理及基本知识,对现代工业中各种常用的动密封作了比较系统的介绍和分析,对近年来新发展的密封和密封技术以及各种密封使用中的主要问题和常见故障给予充分的注意。

本书可用作大专院校和继续工程教育的教材,也可供从事密封工作的技术人员设计、制造和使用参考。

流 体 动 密 封

顾永泉

*

石油大学出版社出版

新华书店发行

山东电子工业印刷厂印刷(淄博市周村)

*

开本850×1168 1/32 印张:16.75 字数:436.8千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7-5636-0100-7/TH·02

定价:3.94元

前 言

流体密封包括流体动密封和静密封，是机器、设备的重要组成部分，是流体动力机械中不可缺少的零部件。

密封技术虽然不是领先性技术，但往往却是决定性技术。在原子能发电站中的循环泵、高压聚乙烯的高压压缩机、铂重整装置的无油润滑压缩机、聚丙烯的反应釜等许多机器设备的方案就取决于密封技术。

密封件虽然不大，只是个零部件，但往往却能决定机器设备的安全性、可靠性和耐久性。其作用和对整台机器、整套装置，甚至整个工厂的影响很大。特别是在石油化工企业中，处理的流体大多数具有可燃性、腐蚀性、易爆及有毒的介质，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，往往会导致火灾、爆炸和人身伤亡等重大事故。

在日常的机器设备维修工作中，以机泵为例几乎50%的维修工作量是流体动密封。在许多国内外最近的调查报告中都说明石油化工机泵的维修工作主要是密封问题。

密封还直接关系到能源和物质的节约问题。比如在整个能源消耗中，各种流体动力机械占据的比重最大，由于这些机械的内部或外部泄漏，往往容积效率低且损失达总功率的10%以上，小型机器甚至达40~50%，有些密封装置的摩擦功率消耗也不小，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，重视机器设备的密封技术，加强密封的科学管理，可以提高设备效率、节省能耗、节省原材料、提高设备的可靠性、加强安全环境保护、避免人身伤亡和设备事故，促进新设备的开

发^[1]。重视设备的密封技术，加强密封的科学管理，就可以保证机器设备安全可靠地长时期正常运转，保证石油化工装置连续地正常生产，同时促进生产发展和科学技术进步。

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，因此国内外密封技术和润滑技术与密封学和摩擦学科一起在迅速发展，就有必要不断地总结这些技术和经验，介绍必要的理论知识和先进技术，编著这方面的图书，供从事流体密封工作的工程技术人员阅读，更好地为祖国的四化贡献力量。

本书承蒙中国石油化工总公司赖盛刚高级工程师审阅，中国石油及天然气总公司和石油大学校、系、教研室和出版社有关同志在出版本书中给予热情支持和帮助，作者在此一并表示感谢。

由于时间局促和水平所限，书中难免有错误或不当之处，敬请读者们提出宝贵的意见和指正。

顾永泉

一九八九年十二月

目 录

第一篇 流体密封的理论基础及基本知识

概 述	(1)
第一章 密封机理、方法及分类	(4)
第一节 密封机理	(4)
第二节 密封方法	(7)
第三节 密封的分类	(8)
第二章 密封流体力学基本知识	(12)
第一节 基本方程	(12)
第二节 密封简单模型中流体流动	(18)
一、缝隙流动	(18)
二、孔口与夹缝出流	(39)
三、转盘侧隙流动	(40)
四、喷管内等熵流动(变截面管流)	(44)
第三节 流动状态	(48)
一、有压流动与无压流动	(48)
二、层流与紊流	(48)
三、边界层流动	(49)
四、剪切流动	(51)
五、圆筒和圆柱间环形流动——泰勒旋涡流动	(53)
六、具有旋转流的压差流动	(56)
七、可压缩流动和阻塞(壅塞)概念	(58)
第三章 密封摩擦学基本知识	(61)
第一节 摩 擦	(61)

一、摩擦面的特性	(61)
二、摩擦状态、摩擦影响因素与摩擦特性	(78)
第二节 磨 损	(97)
一、磨损的主要形式及其转化	(97)
二、磨损的基本规律及影响磨损的诸因素	(107)
三、磨损特性	(113)
第三节 润滑与密封	(115)
一、流体动压效应与流体动压密封	(117)
二、流体静压效应与流体静压密封	(126)
三、弹性流体动力润滑与弹性流体动力密封	(134)
四、混合润滑与固体润滑	(146)

第二篇 流体动密封的基本原理及知识

第四章 轴向端面机械密封	(153)
第一节 机械密封的构成、机理、主要参数及特性	(153)
一、基本构成及作用原理	(153)
二、基本类型	(156)
三、主要参数及特性	(159)
第二节 机械密封中的主要问题	(189)
一、端面温度问题	(190)
二、摩擦副环的变形和热裂问题	(194)
三、使用中的问题	(204)
第三节 机械密封的典型结构及主要材料	(215)
一、典型结构	(215)
二、选择和使用中应注意的问题	(223)
三、主要材料	(225)
第四节 可控间隙机械密封	(247)
一、流体静、动压密封的结构和机理	(247)

二、流体静压机械密封及其计算	(254)
三、流体动压机械密封及其计算	(268)
四、脉动式密封	(285)
第五节 机械密封的故障现象、原因及措施	(287)
第五章 径向接触式密封	(302)
第一节 填塞型软填料密封	(302)
一、基本结构及作用原理	(302)
二、主要参数及其计算	(305)
三、典型结构及要求	(310)
四、材料选择及使用中应注意的问题	(320)
第二节 挤压型弹性体密封	(327)
一、O形环的基本结构及作用原理	(328)
二、O形环的主要参数的计算与选取	(334)
三、结构型式及特点	(341)
四、使用中应注意的问题	(345)
第三节 挠曲型弹性体密封	(350)
一、油封	(350)
二、唇状密封	(366)
第四节 分割型弹性环密封	(373)
一、开口环(活塞环)	(373)
二、分瓣环	(386)
第六章 径向非接触式密封	(394)
第一节 流体静压(流阻)型缝隙密封	(394)
一、间隙密封	(395)
二、迷宫密封	(402)
第二节 流体动压(反输)型密封	(417)
一、螺旋密封	(418)
二、迷宫螺旋密封	(430)
三、叶轮密封	(442)

四、动液封	(456)
第七章 组合式密封	(460)
第一节 混合密封	(460)
一、浮环密封的静力计算	(461)
二、浮环密封的动力计算	(468)
三、浮环密封的结构	(472)
第二节 阻塞密封	(478)
一、铁磁流体	(479)
二、铁磁流体密封	(484)
第三节 多级密封	(493)
一、接触式-接触式组合的多级密封	(493)
二、非接触式-非接触式组合的多级密封	(495)
三、非接触式-接触式组合的多级密封	(496)
第八章 封闭式密封及辅助系统	(497)
第一节 密闭式机泵	(497)
第二节 密闭传动	(498)
第三节 隔膜传动	(502)
第四节 磁力轴承	(503)
一、基本结构和作用原理	(503)
二、特点和性能	(505)
三、电子控制系统的组成	(507)
第五节 辅助系统	(509)
一、温度控制系统	(509)
二、压力控制系统	(520)
三、杂质清除系统	(523)
参考文献	(526)

第一篇 流体密封的理论基础及基本知识

概 述

密封学是一门新学科，是研究密封规律、密封装置设计和应用科学原理的学科^[2]。在流体密封的研究中，如同在工程学科的每个分支中一样，人们必须借助于许多其它学科，涉及到流体力学、传热学、润滑理论、固体力学与结构力学、热力学、化学、物理学、冶金学、动力学以及其它领域^[3]。密封学包括密封技术和密封科学，是一门多学科交叉性的边缘学科。要解决密封技术问题，涉及到许多学科知识。图 1-1 所示为密封技术涉及到的某些学科知识。以机械密封或浮环密封为例，要解决这些密封问题，就要考虑定子和转子元件由于受力和温度作用产生的变形以及振动、磨损对流体膜的流体动力特性的影响。也就是说要从流体动力学、弹性理论、传热学、摩擦学和振动理论等方面去研究分析密封的问题。从事密封技术的工程技术人员应该具备这些理论基础和基本知识。

密封的功能是阻止泄漏。起密封作用的零部件称之为密封件。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；有相对运动部位的密封，称为动密封。常用的动密封是旋转轴和往复杆的密封，简称轴封和杆封。此外，还有作螺旋运动件和摆动件的密封。

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部分。其中流体均以各种不同形式的泄漏(包括内漏、外漏或中间串漏；渗漏、穿漏或滴

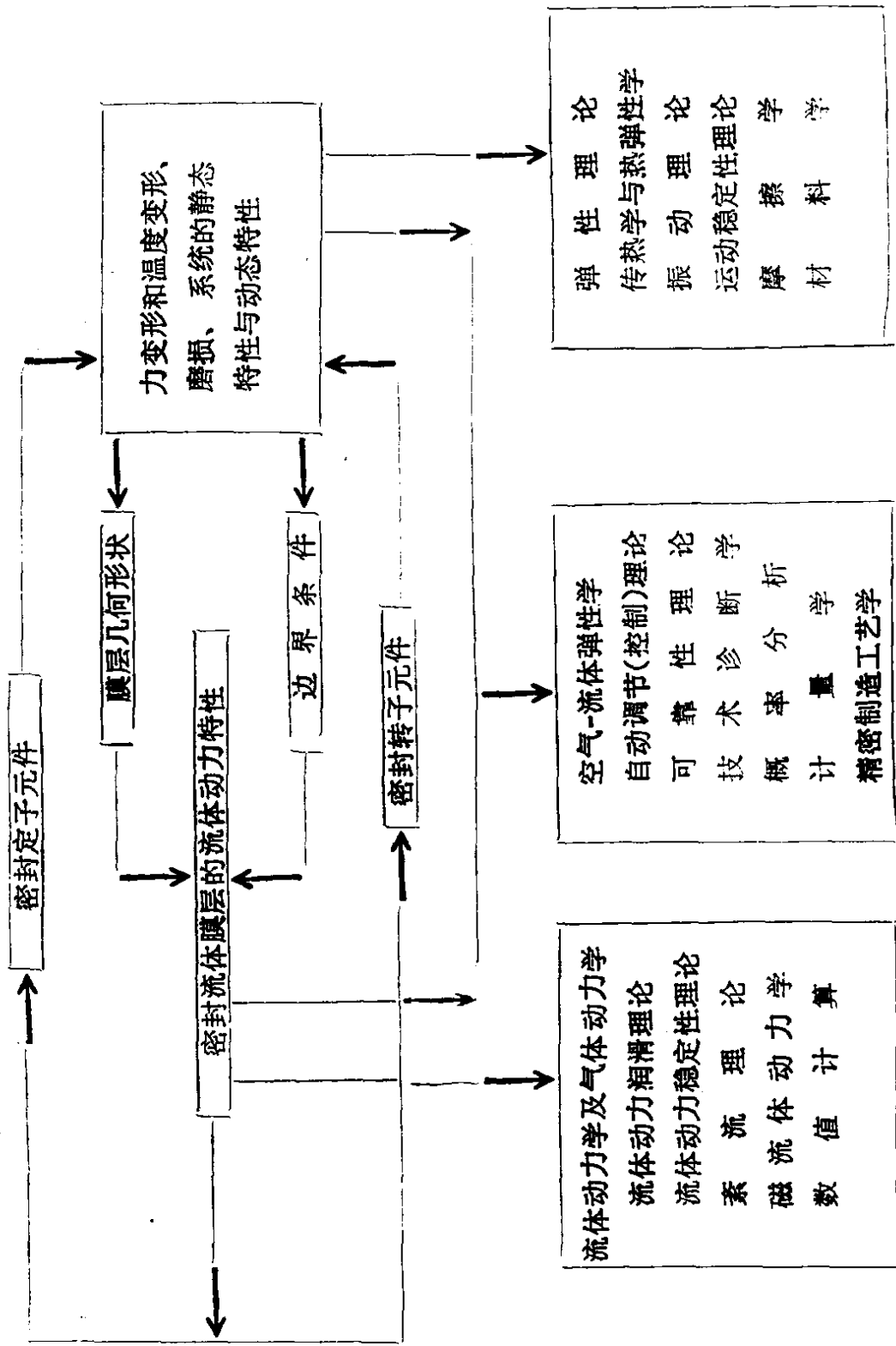


图1-1 密封技术涉及到的学科知识

漏；漏水、漏油或漏气)。

对密封的基本要求是保证结合部分的密闭性、工作可靠、使用寿命长，而且密封装置要求是结构紧凑、系统简单、制造维修使用方便，成本低廉。由于大多数密封件为易损件，故应保证它有互换性，实现零件的通用化、标准化和系列化。

第一章 密封机理、方法及分类

第一节 密封机理

被密封的流体以下列三种形式通过密封件泄漏：穿漏、渗透和扩散。

一、穿漏

通常将流体通过密封面间隙的泄漏称之为穿漏。此时被密封流体在压力差 Δp 作用下通过宏观或微观的缝隙 h 泄漏，因此穿漏是单向泄漏。

对于密封来说，其最重要的性能是密封性。泄漏量是衡量密封装置密封性的主要指标，通常用体积泄漏量 Q 或重量泄漏量 G 来表示。允许泄漏量按达到所需的工作可靠性和寿命的条件来确定。通过尺寸宽 B 、高 h 和长 l 的缝隙，平行平面缝隙内单位周边的液体泄漏量为

$$\bar{Q} = \psi \Delta p h^3 / \mu l \quad (1-1)$$

式中 $\psi = 0.1 \sim 0.2$ ——无因次形状系数；

μ ——流体动力粘度。

在雷诺数 Re 超过临界雷诺数 Re_{cr} 时，流体泄漏由层流转变为紊流状态，此时单位宽度体积泄漏量为

$$\bar{Q}_T = Q/B = \psi_T h \sqrt{\Delta p / \rho} \quad (1-2)$$

式中 $\psi_T = f(Re, h, \dots)$ ——紊流时无因次形状系数，在紊流自模区几乎等于常数；

ρ ——流体密度。

对于气体来说，通常采用单位宽度重量泄漏量

$$\bar{G} = G/B = \psi \Delta p h \cdot \bar{\rho} / \mu l \quad (1-3)$$

式中 $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2 = G/Q = 0.5(p_1 + p_2)M/(RT)$ ——气体平均密度；

M, R, T, p_1 及 p_2 ——分别为气体的分子量、气体常数、温度和缝隙进出口气体压力。

上式也可写成

$$\bar{G} = \frac{Mh^3}{24l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{\mu RT} \quad (1-3a)$$

二、渗漏

在压力差 Δp 作用下，被密封流体通过密封件材料的毛细管的泄漏称之为渗漏。因此，渗漏也是单向分子泄漏流动。通过半径为 r 的毛细管或接触面毛细通道的气体重量泄漏量为

$$G = \frac{8\pi}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \frac{r^3}{l} \Delta p \quad (1-4)$$

三、扩散

在浓度差 Δc 的作用下，被密封介质通过密封间隙或密封材料的毛细管产生的物质传递，叫做扩散。介质通过隔板的扩散泄漏可分成三个阶段：(1) 密封件吸收液(气)体——吸附（吸附系数 α_1 ）；(2) 介质通过隔板的扩散（扩散系数 D ）；(3) 介质从密封件的另一侧析出（解吸系数 α_2 ）。根据菲克(Fick)第一定律，在稳定过程中重量泄漏量 G_s 和体积泄漏量 Q_s 分别与浓度梯度 $dc/dx \approx \Delta c/l$ 成正比

$$G_s = \psi_s \cdot dc/dx \cdot S \approx \psi_s S \Delta c / l, \quad (1-5)$$

$$Q_s = \psi_s \cdot q_p / l, \quad (1-5a)$$

式中 $\psi_s = \left(\frac{1}{\alpha_1 l} + \frac{1}{D} + \frac{1}{\alpha_2 l} \right)^{-1}$ ——渗透系数；

S, l ——隔板面积和厚度；

q_p ——膨胀程度，根据膨胀的运动学曲线 $q(t)$ 确定的密封

表1-1 流体密封的密封性等级和单位泄漏量

级 别	比 泄 漏 量 ^①		目测定性 评定准则	典型密封 型式
	单位长度 $\bar{Q}, \text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{s}$	单位面积 $\bar{V}, \text{cm}^3/\text{m}^2$		
0-0 0-1	$<1 \times 10^{-5}$ $>1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	— —	绝对密封	金属波纹管密封 聚合物隔膜密封
1-1 1-2	$>1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ $>5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$	— $<1 \times 10^{-3}$	微弱嗅觉肉眼 看不到冒汗	橡胶隔膜及软管 弹性体静密封
2-1 2-2	$>5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$ $>5 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-1}$	$>1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}$ $>1 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-1}$	不成滴状的渗漏	繁重工况静密封 弹性体往复复密封及旋转密封
3-1 3-2	$>5 \times 10^{-1} \sim 2.5$ $>2.5 \sim 10$	$>2 \times 10^{-1} \sim 1$ $>1 \sim 5$	滴状渗漏	繁重工况往复复密封及旋转密封(唇状 密封、端面密封、软填料密封)
4-1	$>10 \sim 50$	$>5 \sim 50$	滴状泄漏	旋转端面密封 软填料往复复密封及旋转密封
4-2	$>50 \sim 5 \times 10^2$	—	频繁滴漏	间隙-补偿的往复密封及旋转密封
5 6	$>5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ $>1 \times 10^3$	—	连续泄漏	非接触式往复密封及旋转密封

① 对于气体介质: 用 \bar{G} 代替 \bar{Q} , 单位为 $\text{mg}/\text{m}\cdot\text{s}$, 用 \bar{G} 代替 \bar{Q} , 单位为 $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。

件材料中介质的相对含量。

扩散过程是双向进行的。扩散作用的介质泄漏量要比其它两类泄漏量小得多。

密封接触面的扩散渗透的泄漏量 G_K 中引入与表面粗糙度 Rz 几何相等的接触区高度(因此 $S \equiv BRz$), 空隙率 $K_1 l$ ($K_1 < 1$)和系数 $\psi_K = K\psi_s$ 。于是密封接触面扩散的重量泄漏量为

$$G_K = K\psi_s \Delta c BRz / (K_1 l) \quad (1-6)$$

$$Q_K = G_K / \rho = K\psi_s q_p / (K_1 l) \quad (1-6a)$$

接触面扩散的泄漏量与密封的周边成正比。由于扩散泄漏量小, 一般可以忽略, 但是在密封压差极小和密封氢、氮离子等高渗透性物质以及剧毒、放射性物质时扩散泄漏不容忽视。

表1-1中列出各种流体密封的密封性等级和单位泄漏量。从表中还可以看到各种密封的目测泄漏(密封)的定性评定准则, 可供实际判断使用^[5]。

第二节 密封方法

流体密封的密封方法大致可以归纳如下:

一、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。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。立式筒袋泵、砍头泵就采用了这种方法。

二、填塞或阻塞

利用密封件填塞泄漏点(例如静密封的密封垫、密封圈、密封环和填缝敛合与动密封的软填料密封等)或利用流体阻塞被密封流体(例如气封、水封、水环密封、铁磁流体密封等)。

三、分隔或间隔

利用密封件将泄漏点与外界分隔开(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)。

四、引出或注入

将泄漏流体引出回到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流体注入密封室以阻止被密封流体的泄漏(例如,缓冲气密封、氮气密封等)。

五、流阻或反输

利用密封件狭窄间隙或曲折途径造成密封所需要的流动阻力(例如缝隙密封、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,将流体反输回上游,以达到密封的目的。

六、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(例如气缸中剖分面的密封等)或利用密封剂(例如密封胶、密封膏等)使密封面粘合达到密封的目的。

七、焊合或压合

利用焊接或钎接的方法将泄漏点堵塞或加压使接触处微观不平处变形(如垫片密封、软填料密封等),形成固定的结合达到密封。

八、几种密封方法的组合

利用以上两种或几种密封方法和密封件组合在一起来达到密封(例如,软填料密封与水封、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结合组成一组密封)。

第三节 密封的分类

流体动密封主要可以分成接触式、非接触式、组合式和封闭

式四大类密封。

接触式密封的密封面接触，可以消除间隙或使间隙为最小值，达到很高的密闭性。由于密封面接触，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。

非接触式密封的密封件不直接接触，因之无机械摩擦和磨损，密封件工作寿命长。

组合式密封可以兼有接触式和非接触式密封的优点，来满足难度较高的高参数密封的要求，但由于结构复杂，故一般密封不采用。

封闭式密封是近年来发展很快的密封装置，常用于密封介质易爆、易燃和剧毒的场合。

流体密封可以细分许多型式的密封。根据使用特点、密封件用途、机构的特点、基本结构指标和具体结构，可以将流体密封分成类、型、组、分組和形式(表 1-2)。其中各项为：

类别：接触式、非接触式、组合式、封闭式。

型式：径向密封、轴向密封；固定间隙、可控间隙；多级、混合、阻塞式；密闭传动、隔膜传动、密闭式机器和磁力轴承。

组别：(按密封件特点)。

分組别：(按密封性能特点)。

形式：(按结构标志特点)。