

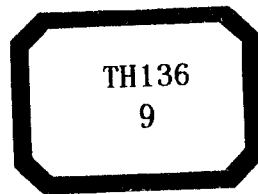
液压气动密封与泄漏防治

Yeyao Qidong Mifeng yu Xibou Fangzhi

黄迷梅 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





液压气动密封与泄漏防治

黄迷梅 编著



机械工业出版社

本书较为全面、深入地介绍了国内外常用液压气动密封装置的工作原理、使用性能、适用条件、安装和维护方法；介绍了近年来广泛使用的多种密封材料的性能特点。并从理论上说明了如何根据使用条件，合理地选用密封材料、密封型式，正确设计密封装置结构与装配。本书还以实例介绍了密封的设计方法，密封故障的现象、原因与解决措施，实用性较强。对密封的选择、设计与液压气动系统维护、液压气动泄漏的防治有一定的指导作用。可以作为液压密封件的使用者，液压气动元件和系统的设计、使用、维护人员的参考读物。书中还给出了 O 形密封圈、Y 形密封圈、组合式密封圈等常用密封件及其安装沟槽的形状、尺寸的最新国家标准，为设计人员提供了方便，也可让一般读者更详细的了解密封装置。本书对一般机械密封设计也有一定参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压气动密封与泄漏防治 / 黄迷梅编著. —北京: 机械工业出版社, 2003. 3

ISBN 7-111-11721-2

I. 液… II. 黄… III. ①液压装置—机械密封—研究
②气动元件—机械密封—研究 IV. TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 012074 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: 张秀恩

封面设计: 张 静 责任印制: 路 琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 11.25 印张·273 千字

0001—4000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本书购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

在现代工业的所有领域中，液压与气动技术都起着十分重要的作用。从工程机械、冶金机械、加工机械、农业机械、机器人到铁路车辆、汽车、船舶、飞机、航天设备，广泛使用了液压、气动的机械装置。而对于以压力流体作为能量传递介质的液压、气动系统来说，密封技术起着举足轻重的作用，是液压、气动系统性能得以保证的关键。

密封技术的历史极其久远，人类懂得利用水力就开始使用密封，最初的密封只是棉、麻等纤维的编织物。密封作为一个机械元素，是从 18 世纪蒸汽机的出现开始的，蒸汽机对密封技术提出了较高的要求，密封件成为机器中的一个关键零件。开始时的密封件只是切成带状或环状的皮革，后来逐步发展成为具有密封唇的皮碗。随着密封技术的进步，帕斯卡原理得以实用于工业技术，18 世纪末活塞式泵、缸以及柱塞式水压机出现了。进入 19 世纪，高精度机械加工成为可能，水压机的性能随之逐步提高；19 世纪末，由于石油炼制技术的发展，不耐腐蚀的水压机改为了使用润滑油液的油压机械。液压技术的发展不断对密封技术提出新的要求，随着合成橡胶的出现，皮制密封件让位于合成橡胶，皮革为多孔材料，为防止渗漏需作充填处理，将充填剂填入皮革组织内，就影响了密封件的成型；与之相反，合成橡胶加热、加压后有流动性，可加工成高精度、形状复杂的密封件，开始了现代密封技术的发展阶段。

密封既是许多机械设备中非常重要的问题，又是常常被人忽视的问题。长期困扰我国液压技术的油液泄漏问题，很大程度上是由于液压、气动元件和系统的设计、使用者对密封问题不够重视；对密封原理不甚了解，设计、选用、维护不当往往是造成泄漏的主要原因。由于工作关系，笔者接触了许多工科大学的在校生、毕业生，他们有的正在开始学习机械设计，有的已多年从事机械设计工作，面对密封设计都有些随意和盲目，可供参阅的书籍、文献也很欠缺。

液压系统的泄漏不仅造成巨大的经济损失，还严重污染环境；开展防漏治漏，正确使用和维护密封是降低生产成本，保护环境的一项很有意义的工作。同时，密封的设计与密封件的选择直接影响液压气动系统的多项性能，尤其是现代精密液压气动控制，其低速性能、响应、精度均与密封性能有密切关系，因此，密封件和密封装置的性能和可靠性成为衡量液压系统设计与制造质量的重要指标。

笔者长期从事液压传动与控制的教学、科研工作，并有多年研究聚四氟乙烯导轨和密封的经历，积累了一些密封理论、密封材料、各种密封件使用性能等与液压、气动密封技术相关的认识和体会。现将其整理成这本小册子，希望它能为在各个领域的同行，在工作中提供一些方便，为我国的液压、气动技术发展稍尽绵薄。

本书写作过程中，得到了笔者所在的北京联合大学机械工程学院许多师生的帮助，在此表示感谢。由于水平有限，加之成书十分仓促，肯定会有许多错漏之处，恳请读者批评指正。

黄迷梅

2002 年 11 月于北京

目 录

前言

第1章 概 述	1
1.1 液压、气动与密封	1
1.1.1 液压与气压传动	1
1.1.2 泄漏与密封的功用	2
1.2 液压、气动密封类型	2
1.2.1 动密封与静密封	2
1.2.2 成形填料密封	3
1.2.3 接触密封与非接触密封	3
1.2.4 辅助密封	4
1.3 对密封的基本要求	6
1.4 现状与发展	7
第2章 密封基础理论	8
2.1 密封机理	8
2.2 摩擦、磨损与润滑	8
2.2.1 润滑油膜	8
2.2.2 摩擦与速度	10
2.2.3 密封磨损和寿命	11
2.3 液压、气动工作介质的一般性质	12
2.3.1 常用工作性质	12
2.3.2 流体黏性	13
2.4 缝隙流动	14
2.5 逆问题理论	15
第3章 密封用材料	17
3.1 对密封材料的一般要求	17
3.2 密封材料的性能指标	17
3.2.1 耐油及耐化学品性能	17
3.2.2 机械、力学性质	19
3.2.3 耐热性	24
3.2.4 耐低温性能	25
3.2.5 老化与耐候性	26
3.2.6 透气性	26
3.3 常用密封材料及其性能	27
3.3.1 密封材料种类	27
3.3.2 橡胶	27

3.3.3	热塑性合成橡胶 (TPE)	32
3.3.4	合成树脂	33
3.3.5	夹织物橡胶	37
3.4	密封材料的选用	37
3.4.1	材料性能与密封性能的关系	37
3.4.2	密封材料的选用	37
第 4 章	O 形密封圈	40
4.1	概述	40
4.2	O 形密封圈的密封原理	40
4.2.1	用于静密封时的密封原理	40
4.2.2	用于往复运动密封时的密封原理	41
4.2.3	旋转运动用密封	42
4.3	O 形密封圈材料	43
4.4	O 形密封圈的设计	44
4.4.1	O 形圈密封的设计原则	44
4.4.2	O 形圈的设计	46
4.4.3	O 形密封圈密封沟槽设计	48
4.4.4	挡圈	53
4.5	O 形密封圈的主要失效原因及其防治措施	54
4.5.1	永久变形	54
4.5.2	间隙咬伤	56
4.5.3	扭曲现象	57
4.5.4	磨粒磨损现象	58
4.5.5	滑动表面对 O 形圈的影响	58
4.5.6	摩擦力与 O 形圈的应用	58
4.5.7	焦耳热效应	58
4.6	O 形密封圈的发展	59
4.6.1	对 O 形圈形状的改进	59
4.6.2	聚四氟乙烯 O 形密封圈	60
4.6.3	包封式 O 形密封圈	61
4.7	O 形圈的使用、安装与保管使用与维护注意事项	62
4.7.1	O 形圈的使用	62
4.7.2	O 形圈的安装	63
4.7.3	O 形圈的保管	63
4.7.4	O 形密封圈的故障和解决办法	63
第 5 章	唇形密封圈	65
5.1	概述	65
5.2	Y 形密封圈	66
5.2.1	密封原理	66
5.2.2	Y 形密封圈主要性能	68

5.2.3	Y形密封圈类型	69
5.2.4	Y形密封圈主要失效原因及其解决措施	84
5.2.5	Y形密封圈设计	87
5.2.6	Y形密封圈安装注意事项	87
5.3	蕾形密封圈	88
5.3.1	密封原理	88
5.3.2	特点	88
5.4	V形密封圈	89
5.4.1	密封原理	89
5.4.2	V形密封圈性能与使用	90
5.4.3	V形密封圈设计与安装	90
5.4.4	V _D 形橡胶密封圈	96
5.5	U形密封圈	97
5.6	L形与J形密封圈	98
第6章	组合式密封件	100
6.1	普通同轴密封圈	100
6.1.1	工作原理	100
6.1.2	性能特点	101
6.1.3	应用、设计、安装	101
6.1.4	同轴密封圈的其他形式	111
6.2	鼓形和山形密封圈	112
6.3	旋转格来圈	116
第7章	密封胶、密封带与密封垫	117
7.1	密封胶	117
7.1.1	密封胶的特点	117
7.1.2	密封胶的种类及特点	117
7.1.3	选用	121
7.2	密封带	121
7.3	密封垫	122
7.3.1	金属密封垫	122
7.3.2	非金属密封垫	122
7.3.3	组合密封垫圈	122
第8章	旋转轴用密封圈	123
8.1	作用与密封原理	123
8.2	油封的类型	124
8.3	油封的选择与设计	132
8.3.1	油封的选择	132
8.3.2	油封与轴的装配设计	133
8.4	油封的装配与保管(安装与使用)	134
8.5	油封泄漏量控制	135

8.6	旋转轴用防尘圈	137
第9章	密封装置的选用与设计	138
9.1	密封装置设计、选择要点	138
9.1.1	液压用工作压力	139
9.1.2	温度	139
9.1.3	运动速度	140
9.1.4	行程	140
9.1.5	工作频度	141
9.1.6	偏心、振动	141
9.1.7	摩擦副表面粗糙度	141
9.2	液压往复动密封设计	142
9.2.1	活塞、活塞杆密封	142
9.2.2	防尘圈	145
9.2.3	导向支承环	149
9.2.4	缓冲圈	150
9.2.5	挡圈	151
9.2.6	防污保护圈	151
9.2.7	液压缸密封选择、设计举例	151
9.3	气动密封设计	156
9.3.1	气动密封与液压密封的区别	156
9.3.2	气动密封设计原则	157
9.3.3	气动密封的使用条件与设计要点	159
第10章	液压、气动系统泄漏防治与密封装置的维护、保养	162
10.1	泄漏现状及损失	162
10.2	泄漏原因及解决措施	163
10.2.1	密封圈选用	163
10.2.2	密封圈的保存及密封装置的维护	164
10.2.3	密封安装	165
10.2.4	密封圈与沟槽的配合	166
10.3	常见密封故障及排除	167
参考文献	170

第1章 概述

1.1 液压、气动与密封

1.1.1 液压与气压传动

液压传动与气压传动是以有压流体为工作介质，进行能量传递与控制的一种传动型式。这门技术得到了迅速的发展和广泛应用，并已成为传动与自动控制系统中的一个重要组成部分。

液压传动以油液或水为工作介质，传递能量。传递动力大，运动平稳，控制方便，在现代工业的各个领域应用十分普遍。随着世界各国现代技术的不断发展，对液压与气压元件的结构和性能提出了更高的要求。目前各国提高液压元件质量的着重点是高压、大流量、微型化、集成化、低噪声和长寿命。

气压传动使用的工作介质为压缩空气。虽然气压传动的传递动力不大，运动也不如液压传动平稳，但由于空气的粘性小，气体传递过程中阻力小，不污染环境，因而气压传动可用于较远距离的传送及控制；气压传动速度快、反应灵敏、装置简单，便于实现复杂的程序控制，在流水线自动线的生产过程中广泛使用。近年来气压传动又在微型化、集成化、提高元件的可靠性及使用寿命方面有了长足的进展，其应用领域、使用数量增加很快。

液压、气动都是以流体的压力型式传递能量，必须保证具有密封工作腔，因此密封的作用对液压、气动元件与系统的正常工作至关重要。密封不良会引起液压或气动装置的泄漏，使设备失效、造成环境污染。由于液压与气动使用的流体性质不同，因此，它们对密封的要求与设计选用方法又各有其特点。密封的设计与密封件的选择直接影响液压气动系统的多项性能，尤其是现代精密液压、气动控制，其低速性能、响应、精度均与密封性能有密切关系。因此，密封和密封装置的可靠性和使用寿命就成为衡量液压、气动系统设计与制造质量的重要指标。

液压、气动技术的发展是与密封技术的进步密不可分的。密封理论、密封装置也随着相关技术的要求而发展。现代液压气动控制技术及其对密封的要求有下述特点。

1) 液压系统的高压化一直是液压技术的一个发展方向。可以说，提高系统压力的关键在于解决高压元件与系统的密封问题。

2) 液压控制系统，如伺服控制、比例控制系统，要求对输出力、输出位移、速度等控制有高精度、大范围的控制与调节性能。这不仅要求密封装置有优良的密封性，而且要求降低摩擦力，以减小机械摩擦造成的死区非线性，提高系统的反应速度。另外密封摩擦力，特别是动、静摩擦系数（动、静摩擦因数）之差是低速运动液压缸产生爬行现象的主要原因。

3) 世界性的环保与资源问题要求对控制液压传动工作介质的泄漏提出了更高要求。液压传动工作介质的泄漏不仅污染环境，而且是一笔很大的资源损失。国外提出了“无泄漏”要求，就是要最大限度地降低泄漏，直至完全不泄漏。这是对密封材料、密封元件、密封的

安装、使用与维护提出的新的更高要求。必须更全面、深入地研究密封机理,研究各种环境和使用条件对密封件性能的影响。

4) 气动元件与系统的迅速发展使气动密封件的用量越来越大。气动系统工作介质的泄漏虽不造成环境污染,在使用量很大的情况下,压力空气的泄漏是不容忽视的能量损失。与液压密封相比,气动密封有许多特殊性,气动密封研究要与气动技术发展相适应。

1.1.2 泄漏与密封的功用

在液压气动系统中,密封装置是用来防止液体或气体工作介质泄漏及外界气体、灰尘等侵入的装置。泄漏是指在液压、气动元件及系统的容腔内流动或暂存的流体,少量越过容腔边界,由高压侧向低压侧流出现象。泄漏的原因,一是零件结合面存在间隙;二是结合面两侧存在压差。

泄漏分内泄漏和外泄漏,内泄漏是工作介质从高压腔向低压腔的泄漏;外泄漏是工作介质从工作腔向元件和系统外部的泄漏。工作介质泄漏会引起液压、气动系统容积效率急剧下降,达不到所需的工作压力,使设备无法正常工作;外泄漏还会造成工作介质浪费和环境污染,油液泄漏有可能造成火灾。

外界水、气、尘埃等异物侵入液压、气动系统是系统发生故障的主要原因。空气侵入液压系统会降低油液弹性模量,降低系统性能;产生气蚀,引起液压系统振动、噪声;导致油液“乳化”变质,严重者产生大量泡沫。水侵入液压、气动系统会降低润滑性能,造成零件锈蚀。尘埃侵入会加剧密封件和摩擦副表面的磨损,甚至堵塞微小通道、卡死精密零件,造成系统故障。

产生泄漏的主要原因是组成液压、气动密封工作腔的各零件间有间隙,且间隙两侧存在压差。即间隙是主要的泄漏通道。对于气动密封和真空密封来说,除上述泄漏通道之外,还应注意在压差作用下,被密封的气体通过密封材料毛细管的渗漏。密封的作用就是封住结合面间隙,切断泄漏通道或增加泄漏通道中的阻力,以阻止泄漏。正确设计和使用密封件是液压设备正常运转的重要保证。

世界各国都十分重视密封问题,开展了许多研究,开发了多种密封材料和密封装置,密封技术也有了长足的发展。密封技术涉及流体力学、摩擦学、油膜及润滑理论、高分子材料、粘弹性力学、机械加工、传热学等许多学科。随着机械设备对密封要求的提高,密封技术已发展成为一门精密的学科。

1.2 液压、气动密封类型

密封用途广泛,出现的结构型式很多,仍在不断发展。从各种特征上理清密封的作用、特点、结构类型、工作状态与密封机理,便于深入了解以及正确设计和选用密封。

1.2.1 动密封与静密封

密封偶合面间最显著的区别是有无相对运动,静密封的密封偶合面间没有相对运动,动密封的密封偶合面有相对运动。这两种不同密封工作状态,对密封件的要求有许多区别。动密封除了要承受介质压力外,还必须耐受相对运动引起的摩擦、磨损;既要保证一定的密封,又要满足运动性能的各项要求。

静密封又可分为：平面密封（轴向密封）和圆柱密封（径向密封），泄漏间隙分别是轴向间隙和径向间隙；平面密封，根据介质压力作用于密封圈的內径还是外径，又有受内压与受外压（外流式和內流式）之分，介质分别从內向外或从外向內泄漏。图 1-1 为各种型式的静密封。在液压、气动元件系统中，液压元件各零件的接合面，管接头等处大量使用静密封。静密封方法很多，其中以 O 形密封圈应用最为广泛。使用和实验表明，静密封装置设计良好，就可保证具有绝对的密封性。

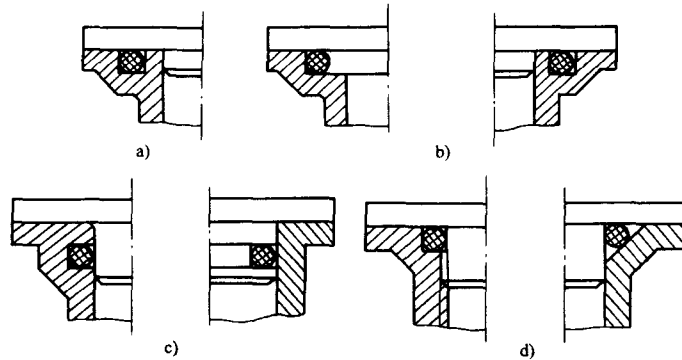


图 1-1 静密封

a) 受内压 b) 受外压 c) 受内压 d) 受内压

根据密封偶合面间是滑动还是旋转运动，动密封又分往复动密封与旋转动密封。往复动密封最为常见，如液压、气动缸中的活塞与缸筒之间的密封，活塞杆与缸盖以及滑阀的阀心与阀体之间的密封，这是一种最简单和通用性最广的动密封型式。本书将对这种密封型式作重点介绍。旋转动密封主要用于各类液压泵、液压马达的旋转轴上。

根据密封件与密封面的接触关系，往复动密封又可分为孔用密封（或称外径密封）与轴用密封（或称内径密封）。孔用密封的密封件与孔有相对运动，轴用密封的密封件与轴有相对运动。图 1-2 为最典型的往复动密封。

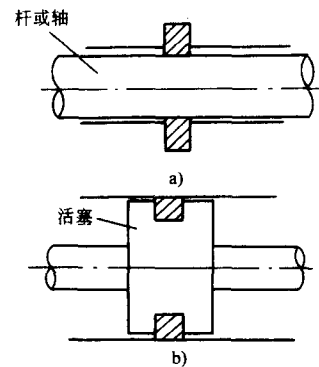


图 1-2 往复动密封

a) 轴用密封 b) 孔用密封

1.2.2 成形填料密封

按密封用件的形状、型式，密封分为成形填料密封和胶密封、带密封、填料密封。成型填料密封泛指用橡胶、塑料等材料压模成形的环状密封圈，如 O 形密封圈、Y 形密封圈等。其结构简单紧凑、品种规格多、工作参数范围广、使用方便，是液压系统中使用最多的一种密封型式。既用于静密封也用于动密封。胶密封是在结构复杂且不利施工的间隙涂膏状液态密封胶，带密封是在管接头等处缠绕橡塑薄膜，堵塞接触面的不规则缝隙；填料密封是以固态软质材料堵塞泄漏通道的密封方法，用于动密封。这是一种古老的密封方式，现在液压、气动中已不太使用，但在离心泵、压缩机、制冷机等设备的往复运动轴上仍有很好的使用。

1.2.3 接触密封与非接触密封

动密封根据密封偶合面的接触型式分为接触型与非接触型密封。接触型密封靠密封件在

强制压力作用下，贴在密封面上。密封面与密封件之间处于仅有一层极薄的油膜隔开的摩擦接触状态。这种密封方式密封性好，但受摩擦、磨损条件限制，密封面相对速度不能太高。液压、气动中的大多数往复动密封都属于这种情况。接触式密封又分为压缩型密封和压力赋能型密封。压缩型密封靠挤压装在填料箱中的密封填料，使其沿径向扩张，紧压在轴或孔上实现密封。压力赋能型密封是一种有自封能力的密封，成形填料密封圈中的 O 形圈、Y 形圈等属于这种密封。它们的工作原理是将密封圈装入沟槽中，并施以一个预压力，当密封件在一个方向受到密封介质的压力作用后，密封件进一步变形，接触压力增加，以适应被密封介质压力的增加，保证密封。

压力赋能密封有挤压型和唇形两大类，其代表形式，挤压型是 O 形密封圈，唇形是 Y 形密封圈，密封机理有所区别，本书后面将详细介绍。

非接触式密封是一种间隙密封，由于密封偶合面间没有接触和摩擦。这种密封摩擦、磨损小，起动功率低，寿命长，但密封性较差。非接触式密封主要用于各类液压泵密封工作腔的密封和液压阀内的密封，用于防止内泄漏。非接触密封有迷宫密封，动力密封等多种型式，液压元件中常用到迷宫密封，利用流体间隙内的节流效应限制泄漏。非接触密封靠合理设计密封腔压力与密封面的尺寸获得流体力学的平衡状态，不涉及密封件。本书后面不介绍这类密封。

1.2.4 辅助密封

按密封件在密封装置中所起的作用，又有辅助密封与主要密封之分。主密封件起主要密封作用，辅助密封的作用是保护主密封件不受损坏，延长密封件的使用寿命，提高其各项密封性能。图 1-3 所示为液压缸典型密封设计示例，除上述的往复动密封之外，图中还使用了以下几种辅助密封。

1. 防尘圈

防尘圈的作用是防止外界的尘埃、流体飞溅、焊渣飞溅及雨、雪、泥水等异物侵入机器内，污染工作介质，导致液压元件损坏，并排除活塞杆上的杂质，以保护活塞杆密封件、导向环和支承环等免受这些杂质的磨损和侵蚀；同时，封住往复动密封的少量泄漏油，不使其污染环境。

2. 挡圈

挡圈的作用是防止材料较软的橡胶密封圈被挤入密封间隙而损坏。

3. 导向支承环

导向支承环（如图 1-3 中零件 3）在液压缸起摩擦、导向作用，防止液压缸烧结，使运动平稳。

4. 缓冲圈

缓冲圈（如图 1-3 中零件 4）又称减压圈。用于高压液压缸中，设于密封装置的高压侧，可以避免高压或压力峰等冲击压力直接作用于活塞或活塞杆密封装置上，以保护密封圈。

5. 防污保护圈

防污保护圈（如图 1-3 中零件 7）是缸体内部的防尘圈，它的作用是阻止工作介质中的杂质接触密封圈或导向支承环，以免它们被杂质划伤。

许多新型密封方案，常将起密封作用的密封圈与各种辅助密封压合在一起，形成组合式密封或一个完善的密封装置。

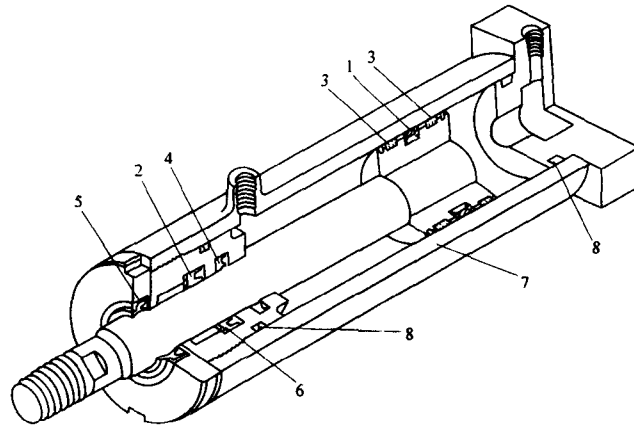


图 1-3 液压缸往复动密封

- 1—活塞密封（孔用密封） 2—活塞杆密封（轴用密封） 3—导向支承环 4—缓冲圈
5—防尘圈 6—挡圈 7—防污保护圈 8—静密封

此外还可按被密封介质的不同将密封分为液压密封和气压密封；按密封件材料的不同分为金属密封或橡胶密封，按介质工作压力的不同，分为高压、低压密封或真空密封，等等。液压、气动常用密封件列于表 1-1。

表 1-1 液压、气动密封件类型

分类		主要密封件	
静密封	非金属静密封	O形橡胶密封圈	
		橡胶垫片	
	橡胶金属组合密封	组合密封垫圈	
	金属静密封	金属垫圈	
	液态密封胶	空心金属O形密封圈	
		密封胶	
动密封	非接触式密封、间隙密封		利用间隙、迷宫、阻尼等
	接触式密封	自封式挤压型密封	O形橡胶密封圈
			同轴密封圈
			异形密封圈
			其他
		唇形密封（自封式自紧型密封）	Y形密封圈
			V形密封圈
			组合式U形密封圈
			蕾形和复合唇形密封圈
			带支承环组合双向密封圈
			其他
活塞环	金属活塞环		
旋转轴油封	油封		
液压缸导向支承件	导向支承件		
液压缸防尘圈	防尘圈		
其他	其他		

随着液压、气动对密封要求的不断提高,新型密封还在不断出现,本书将介绍具有代表性的典型密封方法。许多新结构是在这些基本方法之上改进、发展起来的。

1.3 对密封的基本要求

密封的功能是阻止泄漏,有效阻止泄漏是对密封装置的首要要求。密封性反映对泄漏的控制水平。对运动密封而言,摩擦力是一个与运动质量有关的重要因素。而密封和摩擦总是互相制约。一般地说提高密封性会带来摩擦力的增加,摩擦力增加直接导致运动能力与质量的降低;并且摩擦力会加速密封的磨损。摩擦力还可能成为低压系统负载的主要内容。密封的耐压能力反映了可以密封的工作介质的最高压力,是液压气动密封的重要指标。

对密封的基本要求可以归纳为

- 1) 密封性能。
- 2) 摩擦性能。
- 3) 耐压性能。
- 4) 寿命。
- 5) 安装性能。
- 6) 经济性。

上述密封性能、摩擦性能、耐压性能是独立的性能,这三项性能的组合就得到了密封件的综合性能;综合性能的保持时间,就是密封件的使用寿命;实际设计中安装性能与经济性也应作为一项重要的性能指标。

密封综合性能不仅与密封件本身的性能有关,而且还与密封件的多项使用条件有关,所以考察密封性能,既要看密封件或密封件组合本身的性能,称为单体性能,还要看密封件装入液压、气动元件内以后的实际密封性能,称为实机密封性能。

密封件单体性能有以下几项:

1. 摩擦力

摩擦力是与运动性能有关的特性,运动用密封的摩擦力分为静摩擦力(始动摩擦力)和动摩擦力(滑动摩擦)两种。摩擦力受滑动表面的粗糙度、滑动速度以及工作压力、密封润滑状态、放置时间等诸多因素的影响,容易产生很大的变化。摩擦力计算比较困难,应由实验得到。静摩擦力受多种因素影响,测量误差较大,测量值只能作为参考。与之相比,动摩擦力能获得较稳定的,有重要性的测量值。

2. 耐磨性

耐磨性是对密封寿命影响很大的特性,与摩擦性能一样,它受多种因素影响。特别是气动用密封,润滑状态较差,耐磨性成为寿命的主要指标。对用合成橡胶或合成树脂制成的密封而言,根据材料的耐磨性基本可以评价密封件的耐磨性。但不一定完全与密封实际使用中的结果一致,因为使用中还有许多影响磨损的因素。所以说对密封件制品的耐磨性评价,以密封在元件中实机使用时的耐磨性更有意义。

3. 耐偏心性

在动密封中,由于元件密封耦合面的配合公差,会产生间隙。这一间隙在偏载荷和振动的情况下,会造成轴偏心,影响密封性能。为此,密封件对这样的偏心也必须保证足够的补偿性能。另外,低温时由于合成橡胶制密封件的弹性降低,导致对偏心的跟随补偿能力降低,

温度越低这种现象越严重，所以耐偏心性还可反映低温时的密封性能。

4. 接触应力

密封件靠一定的接触应力保证密封，密封件在变形条件下必须保证足够的弹性力。接触应力决定油膜形状，对密封性能和摩擦、运动性能都有参考价值。

密封件实机性能应该考察：

1. 密封性能

密封性能是密封件与密封装置最重要的要求。密封圈处的泄漏量是衡量密封性能的指标。影响密封性能的不仅是密封件，而是各种密封安装后，与密封偶合面各种要素组合后的整个密封装置。

2. 耐偏心性

这里是考虑了实际间隙跳动以后，并施以一定偏心载荷的耐偏心性。

3. 摩擦力（最低工作压力）

实际应用中的摩擦力大小是用最低工作压力来评价的。对往复动密封而言，启动摩擦力大于动摩擦力，较为复杂，并且影响启动性能。用最低启动工作压力衡量密封摩擦力具有实际意义。所以，对于动密封一般是给定最低工作压力。

4. 综合性能

综合性能要求密封装置在指定的工作条件下，满足上述各项性能要求，并工作一定时间，所以这一指标同时反映了密封装置的寿命。

对于上述各项性能的要求，许多国家都制定了相应的实验标准。

1.4 现状与发展

密封技术随着液压、气动技术的发展正在迅速发展，密封件的品种越来越多，新型的密封材料将不断出现和应用；随着近代流体润滑理论，弹性力学，有限元法以及实验分析技术的发展，密封理论日臻成熟、完善。机械、化工、冶金、宇航等工业部门的泵、管、阀中高温、高压、强腐蚀等苛刻工况条件下的密封难题，也一一被克服。今后，密封装置将在结构和型式方面，普遍向低摩擦、轻型、高效、长寿的组合型密封装置和无油润滑密封方向发展；为了满足不同工况的使用条件，将由常用的一级密封或一种型式密封，逐步发展为接触式密封和非接触式密封组合的各种多级密封。

第 2 章 密封基础理论

2.1 密封机理

液压气动密封的一般原理是，在零件配合间隙之间设置一道有足够强度的密封件。密封件须有足够的弹性，以能够嵌入和填满被密封面上的任一凹凸不平处，同时还要保持足够的刚度以防止在介质的高压作用下被挤入表面间隙内。弹性密封体经压缩加载而变形，维持接触应力，紧贴在被密封面上，并挤入密封面的所有微观凹坑。密封介质压力小于弹性体对表面的接触压力，泄漏就不能形成。液压气动密封使用的橡胶密封圈靠安装时与被密封面的配合有一个过盈量而获得变形和接触压力。接触压力与密封圈的变形量和材料的弹性模量有关。对于静密封来说，只要密封材料本身不因过度受压损坏而丧失工作能力，就可以实现绝对的密封。动密封的情况则要复杂得多。对于动密封来说，在保证密封的同时还应考虑其他性能，这两项要求相互制约，综合平衡两者的关系就成为动密封设计的主要内容。

在运动中接触压力使密封件与滑移表面产生摩擦，接触压力大则摩擦大。摩擦、磨损是导致密封破坏的主要原因，并且影响运动质量。所以动密封的性能不仅包括密封，还要考虑摩擦、磨损与润滑。

2.2 摩擦、磨损与润滑

摩擦和磨损是接触型动密封必然存在的问题。摩擦对于动密封的不利影响是多方面的。

- 1) 摩擦作为一种负荷，降低了气缸的输出力，增大了缸的最低启动压力。
- 2) 摩擦引起精度控制元件如伺服液压缸、伺服滑阀的死区与滞环。
- 3) 摩擦影响液压缸的低速性能，是产生液压缸低速爬行的主要原因。
- 4) 摩擦、磨损损坏密封件，降低密封件寿命。
- 5) 摩擦热降低润滑液的粘度，粘度的降低直接导致泄漏增加，同时破坏润滑油膜，加剧密封件磨损。
- 6) 摩擦热引起导热性甚差的橡胶密封材料加速老化，出现龟裂而失效。

动密封件与密封面之间的摩擦力与构成密封的许多因素有关，如材料、流体和流体压力、温度、摩擦速度、表面粗糙度等，十分复杂。

2.2.1 润滑油膜

对于几乎所有类型动密封来说，密封件的润滑对于其密封性能与寿命均起决定作用（只有滑动面的材料为聚四氟乙烯时除外）。为了保证动密封良好的运动特性和一定的使用寿命，密封件应该设计成在充分润滑的条件下工作。如图 2-1 所示，密封件“浮”在润滑油膜上。在表面张力作用下，油膜外侧边缘形成一个曲面，如图 2-2 所示，压力与密封面间隙成反比：

$$p=2\sigma/h$$

式中 σ ——表面张力（系数）；

p ——介质压力；

h ——密封面间隙。

依靠油膜的表面张力，润滑剂保持在一定位置上，形成一道密封屏障。这是一种理想的密封摩擦状态，称为油膜润滑状态。

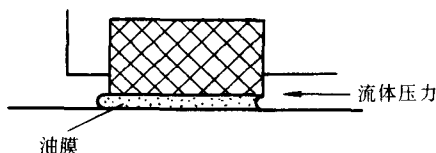


图 2-1 密封油膜

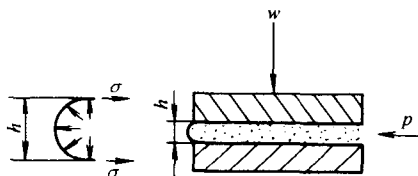


图 2-2 油膜的表面张力

这层油膜的厚度如果太薄，其厚度与被密封表面的凹凸不平尺寸相当，密封件就会直接与坚硬的凸面接触，（如图 2-3 所示），产生较大的摩擦和较快的密封磨损。这种状态称为边界润滑状态。如果油膜太厚表面张力不足以抵抗油压力，油膜外缘的弯曲液面将遭到破坏，引起泄漏。

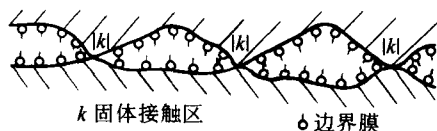


图 2-3 边界摩擦状态示意图

在运动状态下，油膜不是稳定不变的，油膜厚度随摩擦偶合面的相对速度、流体粘度、接触面压力等许多因素影响而改变。动密封设计的任务就是综合平衡这些因素，保持合理的油膜厚度，在保证必要的密封的同时，限制摩擦阻力。

静止时，润滑油膜在接触压力的作用下，被挤压成厚度很小（ $0.25\mu\text{m}$ 以下）的薄膜。此时间隙之间的油膜不是完整的，处于边界润滑状态。材料较软的密封件还有可能嵌入密封表面的微小凹槽之中，出现粘着现象。结果是产生很大的启动摩擦力。

随着相对运动速度的增加，油液运动产生的动力使油膜厚度增加（可达 $0.25\sim 2.5\mu\text{m}$ ），形成油膜润滑，摩擦力迅速降低。随着速度进一步增加，摩擦力可能再一次加大，这是因为粘性摩擦力随速度而增加。因此，此时摩擦力的增加与润滑液的粘度以及密封面形状等因素有关。图 2-4 是运动速度与摩擦的关系曲线。

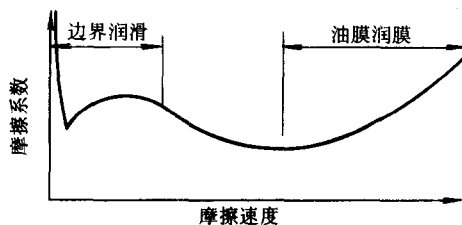


图 2-4 运动速度与摩擦的关系

在往复动密封中，如往复运动活塞杆的密封，杆的外伸部分带着一层油膜，这表明密封面存在油膜润滑，这是正常的也是期望的。这层油膜在活塞杆返回行程中又被带进密封。但是，如图 2-5 所示，活塞杆往复行程时，表面油膜厚度是不等的，造成一种流体“输运”引起的泄漏，所以往复动密封不能保证绝对不泄漏。

往复动密封的泄漏量可用下式计算：

$$\Delta q = \pi d l (h_1 - h_2)$$

式中 Δq ——往复运动一个循环的泄漏体积；

d ——运动件直径；