
密封件使用手册

广廷洪 汪德涛 主编

机械工业出版社

密封件使用手册

广廷洪 汪德涛 主编

机械工业出版社

(京)新登字054号

内 容 简 介

本手册是为了满足机械、电子等工业部门及各工矿企业治理“三漏”（漏油、漏气、漏水）的需要而编写的工具书。书中对各类密封件的基础理论、密封结构、技术性能、数据和标准，密封件的选择、使用与安装作了较详细的介绍。

本书可供工矿企业和密封件生产、使用部门的工程技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

密封件使用手册/广廷洪, 汪德涛主编. —北京: 机械工业出版社,
1994.12
ISBN 7-111-04162-3

I. 密…
I. ①广… ②汪…
II. 密封件-手册
IV. TB42-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第00149号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑: 王正琼 版式设计: 冉晓华 责任校对: 肖新民
封面设计: 郭景云 责任印制: 王国光
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1994年12月第1版·1994年12月第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·31印张·2插页·965千字
0 001—2 900册
定价: 38.00元

前 言

密封件是机电产品中防止产品漏油、漏气、漏水以及外界环境介质和灰尘侵入的重要基础元件。正确选择、安装与使用密封件，对防止产品泄漏与由此而引起的环境污染，改善产品外观，提高产品效率与性能，节约能源与材料，防止设备失效，保障人身安全，都具有十分重要的意义。为了提高工程技术人员对密封技术的认识，由广州机床研究所组织八个单位有关专家编写了《密封件使用手册》，书中介绍了各类密封件的基础理论、技术数据、标准及使用使用方法等。全书共11章，编写分工如下：第1章广州机床研究所汪德涛，第2章北京第一机床厂林永腾，第3章广州机床研究所梁钜修，第4章沈阳第一机床厂杨玉粹及广州机床研究所广廷洪，第5章沈阳阀门研究所阚景波、崔玉莹，第6章沈阳阀门研究所戴焯，第7章天津机械密封研究所程建民，第8章北京化工学院朱毅征，第9章中国科学院电工研究所董增仁，第10章广州机床研究所骆玉琼，第11章青岛密封件工业公司王美香及广州机床研究所董武。本手册初稿曾多次作为机床工具及机械基础产品行业防治“三漏”基础知识培训教材，教材稿曾由广州机床研究所伦祖舜、刘明森及许宁等进行审核；经修改成书稿后，由合肥通用机械研究所石富江及广廷洪、汪德涛审阅。

本手册在编辑、出版过程中，曾得到机械工业部机床工具司及机械基础产品司及石化通用机械局的大力支持，在此一并感谢。

对本手册中不当之处，诚恳地希望读者批评指正。

编 者

1993年6月30日

ABA26/4 OP

目 录

1 绪论	1	2.7 使用O形圈应注意事项	62
1.1 密封件的分类	1	2.7.1 防切	62
1.2 密封的基础理论	6	2.7.2 防挤	62
1.2.1 引言	6	2.7.3 防拧扭	64
1.2.2 静密封的密封作用	6	2.7.4 防脏	64
1.2.3 动密封的密封作用	8	2.7.5 防干摩擦	64
1.3 密封的现状和发展趋向	12	2.7.6 防老化	65
参考文献	13	2.8 常用O形圈密封装置结构	
2 O形密封圈	14	的设计	66
2.1 概述	14	2.8.1 O形圈静密封结构	66
2.1.1 O形圈密封特点	14	2.8.2 O形圈往复动密封结构	66
2.1.2 O形圈使用方法分类	14	2.9 特殊O形圈密封装置的设计	
2.2 O形圈的工作条件	16	和使用	71
2.2.1 O形圈的材料	16	2.9.1 转动密封	71
2.2.2 O形圈的密封间隙	18	2.9.2 滑动密封	72
2.2.3 常用的O形圈工作条件	19	2.9.3 浮动密封	74
2.3 O形圈的密封机理	22	2.9.4 开关密封	74
2.3.1 O形圈用作压缩密封的基本		2.9.5 真空密封	75
作用	22	2.9.6 异形沟槽	78
2.3.2 O形圈用于往复运动压缩密		2.9.7 异形截面橡胶密封圈	80
封的作用	23	2.9.8 非橡胶O形圈	82
2.4 O形圈的密封性能	24	参考文献	84
2.4.1 泄漏量	24	3 唇形密封圈	86
2.4.2 摩擦和磨损	24	3.1 概述	86
2.4.3 使用寿命	25	3.1.1 特征	86
2.5 O形圈的规格标准	25	3.1.2 密封原理	87
2.5.1 O形圈标准概况和发展趋向	25	3.2 橡胶唇形密封圈的摩擦、	
2.5.2 设计选用O形圈标准规格的		磨损、泄漏和使用寿命	87
方法	27	3.2.1 摩擦	87
2.6 常用的O形圈密封装置沟槽		3.2.2 磨损	88
尺寸	46	3.2.3 泄漏	88
2.6.1 各国标准的O形圈沟槽尺寸	46	3.2.4 寿命	88
2.6.2 O形圈沟槽尺寸的一般计算		3.3 橡胶唇形密封圈性能及影响	
方法	60	因素	90
2.6.3 O形圈矩形沟槽密封的压缩量		3.3.1 压紧力	90
和压缩率的验算	61	3.3.2 摩擦与滑动速度	90

3.3.3 影响橡胶唇形密封圈密封性能的因素	91	4.8 各种旋转轴唇形密封圈标准	180
3.4 橡胶唇形密封圈的类型、特性及密封结构	94	4.8.1 旋转轴唇形密封圈结构尺寸系列国家标准(GB9877.1~9877.3—88)	180
3.4.1 V形密封圈	94	4.8.2 J形无骨架橡胶旋转轴唇形密封圈标准(HG4 338—66)	192
3.4.2 聚四氟乙烯和塑料V形密封圈	112	4.8.3 U形无骨架橡胶旋转轴唇形密封圈标准(HG4 339—66)	195
3.4.3 Y形密封圈	116	4.8.4 旋转轴唇形密封圈标准(JB/GQ 327—80)(G51—4)	200
3.4.4 蕾形密封圈	127	参考文献	208
3.4.5 U形密封圈	127	5 垫片密封	209
3.4.6 气动用唇形密封圈	132	5.1 概述	209
3.4.7 L形密封圈	134	5.1.1 垫片的种类与特性	209
3.4.8 J形密封圈	137	5.1.2 垫片的使用简例	211
3.5 鼓形和山形密封圈	140	5.2 垫片的材料选择	211
3.5.1 特点和适用条件	140	5.2.1 对垫片材料的要求	211
3.5.2 鼓形夹织物橡胶密封圈和山形橡胶密封圈标准	140	5.2.2 垫片常用的非金属材料性能规格	211
3.5.3 液压缸活塞用带支承环的密封沟槽型式、尺寸和公差(GB 6577—86)	144	5.2.3 垫片材料的选择	211
3.6 防尘密封圈	145	5.2.4 低温真空条件下的垫片材料	212
3.6.1 断面结构和材料	145	5.3 垫片密封原理与螺栓力计算	213
3.6.2 防尘密封圈的设计与安装	146	5.3.1 流体的渗漏与密封原理	213
参考文献	160	5.3.2 压紧比压和保证垫片密封的方法	213
4 旋转轴唇形密封圈	161	5.3.3 垫片系数	216
4.1 概述	161	5.3.4 垫片的宽度	216
4.2 旋转轴唇形密封圈的机理	161	5.3.5 垫片的厚度	218
4.3 旋转轴唇形密封圈的分类	162	5.3.6 螺栓力计算	219
4.4 旋转轴唇形密封圈的性能参数与结构参数	169	5.4 法兰	219
4.5 旋转轴唇形密封圈结构设计参数	171	5.4.1 法兰结构形式	219
4.5.1 断面几何形状及尺寸的确定	171	5.4.2 法兰密封面	220
4.5.2 弹簧的设计	173	5.4.3 法兰密封面的选择	221
4.5.3 旋转轴唇形密封圈金属骨架(加强环)的设计	175	5.5 垫片的结构特点及其标准尺寸	226
4.6 流体动力型旋转轴唇形密封圈	176	5.5.1 非金属软垫片	226
4.6.1 单向流体动力型旋转轴唇形密封圈	176	5.5.2 金属包平垫片和波形金属包垫片	231
4.6.2 双向流体动力型旋转轴唇形密封圈	176	5.5.3 垫片用O形橡胶密封圈	236
4.7 旋转轴唇形密封圈安装结构	177	5.5.4 聚四氟乙烯垫片、生料带及其包垫片	238

5.5.5 缠绕式垫片	239	参考文献	353
5.5.6 金属齿形垫片	243	7 机械密封	355
5.5.7 金属椭圆形和八角形垫片	245	7.1 概述	355
5.5.8 金属透镜式垫片	246	7.2 机械密封的结构与设计	355
5.5.9 金属锥面垫片和球面垫圈	249	7.2.1 机械密封的基本结构和工作原理	355
5.5.10 金属平垫片	252	7.2.2 机械密封的各种结构型式	356
5.5.11 柔性石墨垫片	256	7.2.3 机械密封的设计计算	359
5.5.12 金属空心O形圈	259	7.2.4 润滑、冲洗和冷却	361
5.6 垫片的选择与使用方法	261	7.3 机械密封的选型	363
5.6.1 垫片的选择与常用垫片的适用范围	261	7.4 机械密封的使用和维护	385
5.6.2 垫片的安装与使用	261	7.4.1 密封安装前的检查	385
参考文献	266	7.4.2 安装	387
6 填料密封	267	7.4.3 辅助设备和密封系统	388
6.1 概述	267	7.4.4 启动运行和停车	388
6.2 密封填料的种类	267	7.4.5 储存保护	397
6.2.1 软质密封填料	268	参考文献	398
6.2.2 软质密封填料及其应用	280	8 迷宫密封	399
6.2.3 半金属填料	285	8.1 概述	399
6.2.4 金属填料	285	8.2 迷宫密封的工作原理	400
6.3 填料密封的特征	285	8.2.1 流体在迷宫中的理想流动	400
6.3.1 填料密封使用条件	285	8.2.2 直通型迷宫的流动	401
6.3.2 填料密封机理	286	8.2.3 其它形式的迷宫内的流动	401
6.3.3 填料的材料	286	8.3 迷宫泄漏量的近似计算	402
6.3.4 填料的结构	287	8.4 临界压比与临界流量	403
6.3.5 填料的选型	288	8.5 流量系数	403
6.4 填料密封的结构设计	294	8.6 各种类型迷宫泄漏量的精确计算	406
6.4.1 填料宽度	294	8.6.1 理想迷宫泄漏量的计算	406
6.4.2 填料深度	298	8.6.2 直通型迷宫泄漏量的计算	407
6.4.3 填料的压紧力	300	8.6.3 错列型迷宫	407
6.4.4 填料应力松弛	302	8.6.4 组合型迷宫	408
6.4.5 填料压缩、回弹特性	302	8.6.5 偏离设计位置的错列型迷宫	408
6.5 填料密封结构与规格	304	8.6.6 临界状态的泄漏量	409
6.5.1 毛毡密封结构	304	8.6.7 与实验值的比较	409
6.5.2 防尘密封结构	307	8.7 径流式迷宫	409
6.5.3 填料密封结构	308	8.8 结构型式	410
6.5.4 电缆填料密封结构	336	8.9 迷宫密封系统	414
6.5.5 传话管路填料密封结构	344	参考文献	414
6.5.6 硬填料密封结构	345	9 磁流体密封	415
6.6 填料密封的安装使用	351	9.1 概述	415
6.6.1 填料密封的安装	351		
6.6.2 填料密封的维修	353		

9.2 磁性流体	415	10.3.3 厌氧胶的分类	454
9.2.1 磁性流体的配制	415	10.3.4 厌氧胶的特性	455
9.2.2 磁性流体的性能	416	10.3.5 厌氧胶的固化机理	455
9.3 磁性流体密封应用	419	10.3.6 厌氧胶的组成	457
9.3.1 磁性流体密封原理	419	10.3.7 厌氧胶的应用范围	459
9.3.2 磁性流体密封的耐压能力	419	10.3.8 厌氧胶的测试技术	461
9.3.3 磁性流体密封的结构形式	420	10.4 密封带	462
9.3.4 磁性流体密封装置的优缺点	421	参考文献	463
9.4 磁流体密封的实际应用	421	11 密封材料	464
9.4.1 贮能飞轮真空密封	422	11.1 概述	464
9.4.2 超导交流同步发电机旋转 输氧磁性流体密封	422	11.2 橡胶材料	464
9.4.3 大型计算机磁盘驱动轴防 尘密封	422	11.2.1 橡胶材料的特性	464
9.4.4 反应釜搅拌器轴密封	422	11.2.2 常用橡胶密封材料	468
9.4.5 减速器防油漏密封	422	11.2.3 橡胶密封材料的性能测试	471
9.4.6 真空用磁性流体旋转密封	422	11.2.4 橡胶密封材料与介质的适应 性	475
参考文献	423	11.3 塑料	478
10 密封胶	424	11.3.1 特性	478
10.1 概述	424	11.3.2 聚氯乙烯	478
10.2 液态密封胶	424	11.3.3 聚酰胺、尼龙	478
10.2.1 液态密封胶的定义	424	11.3.4 聚四氟乙烯	479
10.2.2 液态密封胶的发展	424	11.4 纤维材料	481
10.2.3 液态密封胶的分类	424	11.4.1 植物纤维	480
10.2.4 液态密封胶的特性	425	11.4.2 动物纤维	480
10.2.5 液态密封胶的密封机理	425	11.4.3 矿物纤维	480
10.2.6 液态密封胶的组成	430	11.4.4 合成纤维	482
10.2.7 液态密封胶的配制及性能 规格	434	11.5 无机材料	483
10.2.8 液态密封胶的密封性能	439	11.5.1 石墨	483
10.2.9 液态密封胶的选择	443	11.5.2 陶瓷	485
10.2.10 液态密封胶的应用范围	445	11.6 金属材料	486
10.2.11 液态密封胶的性能测试	447	11.6.1 碳化钨硬质合金	487
10.3 厌氧性密封胶	450	11.6.2 青铜	487
10.3.1 厌氧胶的定义	450	11.6.3 铸铁	487
10.3.2 厌氧胶的发展	450	11.6.4 喷涂硬质合金	488
		参考文献	488

1 绪 论

在各种机械中,密封件是用来防止流体或固体微粒从零件相邻结合面间泄漏,以及防止外界杂质如灰尘、空气、水分等侵入装置。它是一种通用基础零件。正确选择、储存、安装与使用密封件;对防止机械产品的泄漏、失效及由此而引起的污染,提高产品效率与性能,节约能源,改善外观,都具有很大意义^[1]。

解决机械产品泄漏的基本方法有以下5种:

- (1) 减小密封部位内外的压差;
- (2) 在密封配合面保持一层润滑膜;
- (3) 消除引起泄漏的流体流动原因;
- (4) 增加泄漏部位流体流动的阻力;

(5) 将泄漏的流体引向无害的方向或使之流回贮槽。

此外,还常常采用将接合部位焊接、铆合、压合、折边等永久性防止流体泄漏的方法消除泄漏。

对密封件的基本要求如下:

- (1) 在一定的流速、压力和温度范围内具有良好的密封性能和耐介质性能;
- (2) 对于动密封,要求摩擦阻力及摩擦系数小,且稳定;
- (3) 工作寿命长,在工作过程中磨损少;磨损后,在一定程度上能自动补偿其磨损量;
- (4) 结构简单、紧凑,容易拆装,制造方

表1-1 某些机械产品对密封装置的要求

使用部门	工 作 参 数			密封介质	要求可靠程度	要求工作 时 间 (h)	使用特点	应 用 例
	压力 (MPa)	速度 (m/s)	$P \cdot v$					
一般机械制造业	0~0.4	2~10	3.5	无腐蚀性、温度0~35℃(水、油等)	中等,允许少量泄漏 (0.002g/h)	15000	可维修与更换	机床、减速器、电机
运输机械工业	0~1	5~10	8	无腐蚀性、温度-60~110℃(油、煤油)	中等,允许少量泄漏 (0.005g/h)	10000	许可定期维修更换	汽车、挖掘机、工程机械部件
化工与石油机械工业	0~45	10~150	50	有腐蚀性,温度-50~+200℃(酸、碱等) ^①	高,装在密闭腔内,允许有不明泄漏	5000 ^②	维修困难,只在维修时可以更换	泵、压缩机、反应器
航空工业	0~20	20~100	50	既有腐蚀性,也有无腐蚀性(油、燃料等)	极高,不许泄漏	1500		发动机部件、仪表
原子能工业	5~20	10~50	50	既有腐蚀性,也有无腐蚀性(水、蒸汽等)		1000		在机器使用中不能更换,有辐射作用
航天工业	0~20	20~300	100	腐蚀性(燃料)		100	不可能更换,在飞行条件下使用	泵、仪表

① 在某些场合下可达400℃,甚至650℃。

② 有时要求超过5000h。

便,价格低廉,并能保证互换性,符合标准化、系列化的要求。

表1-1是国外资料介绍的某些机械产品对密封装置的要求^[2,34]。

1.1 密封件的分类

密封件可分为静密封与动密封两大类。相对静

止的结合面之间的密封件称为静密封。相对运动的结合面之间的密封件称为动密封。按照运动的类型，动密封又可分为往复动密封及旋转动密封两类。也可按照接触形式分为非接触密封与接触密封。

详细分类可参看图1-1。除了图中所示分类外，近年来还出现了不少复合式及组合式密封；在机械密封中还可细分为许多类型，图中未详细列举。

图1-2至图1-14是各种密封件的装配图。

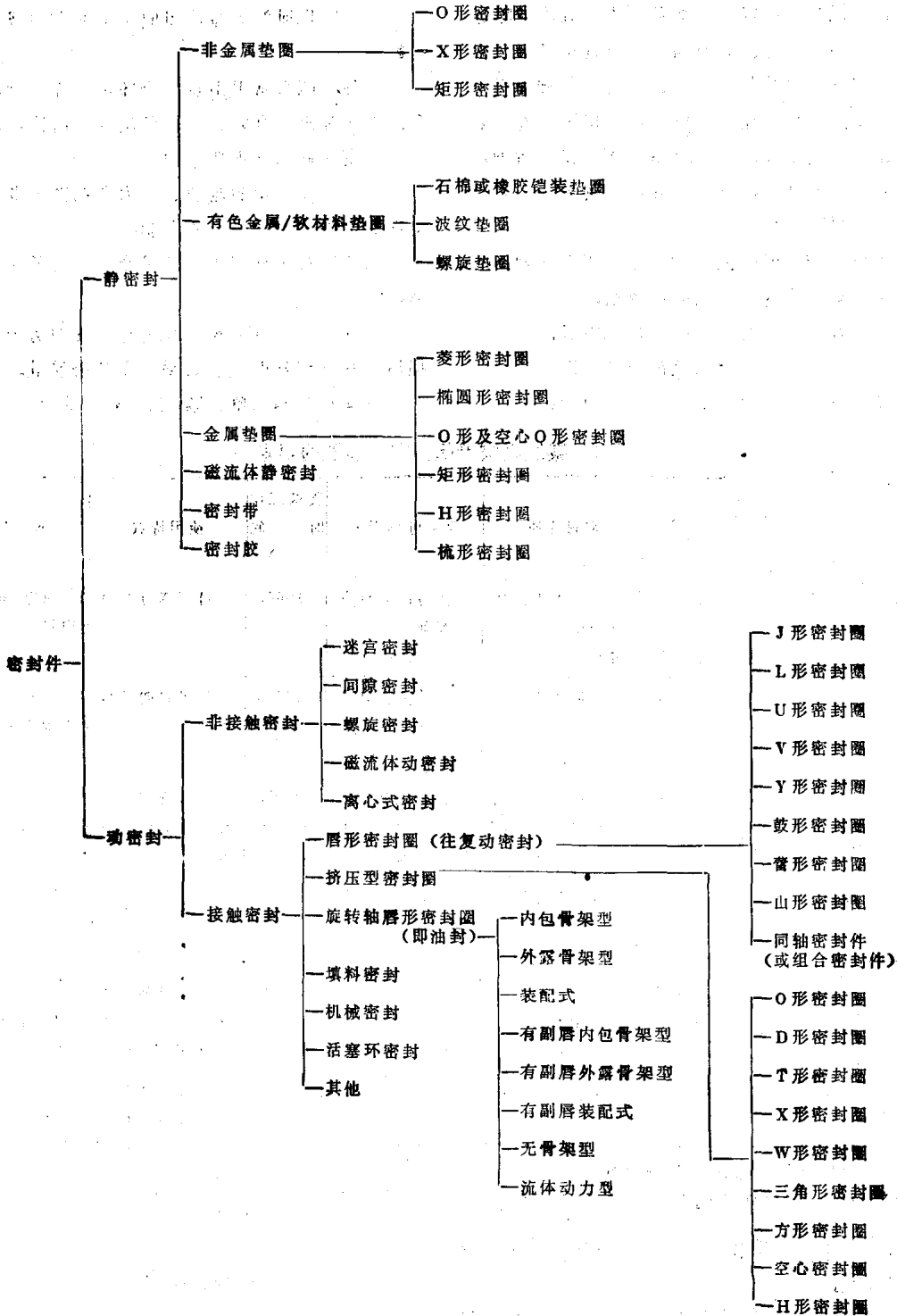


图1-1 密封件的分类

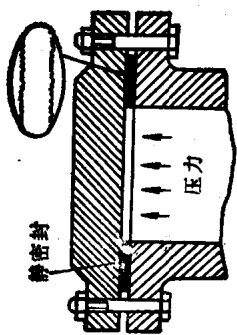


图1-2 静密封

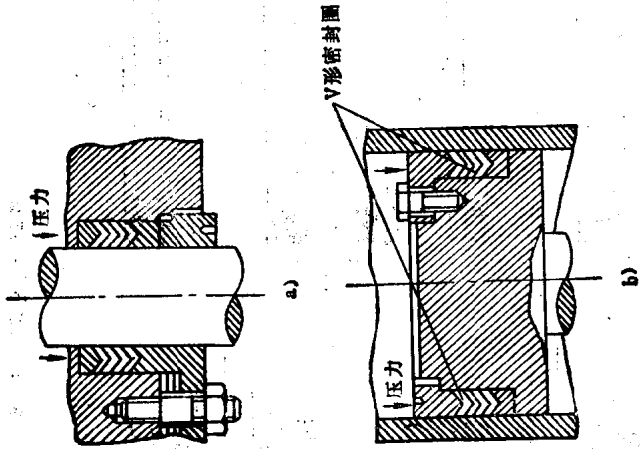
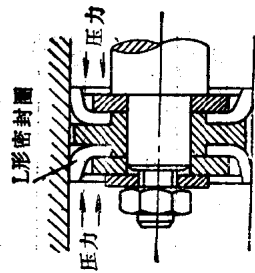
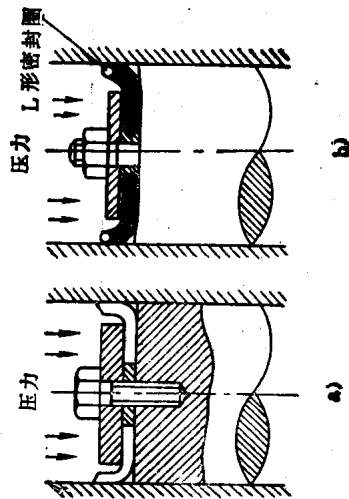


图1-4 V形密封圈



c)

图1-3 L形密封圈

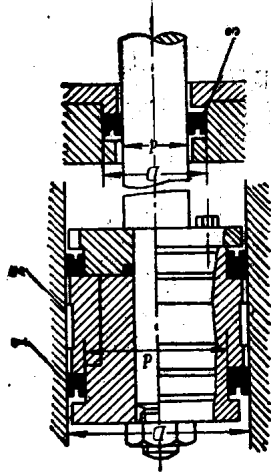


图1-6 U形密封圈及抗磨损垫圈
1—KY形密封圈 2—O形密封圈
3—U形密封圈

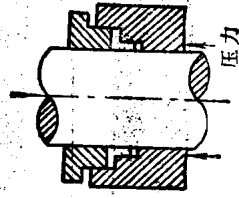


图1-7 J形密封圈

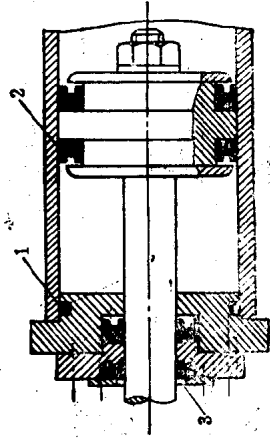


图1-5 U形密封圈
1—O形密封圈 2—U形密封圈
3—防半圈

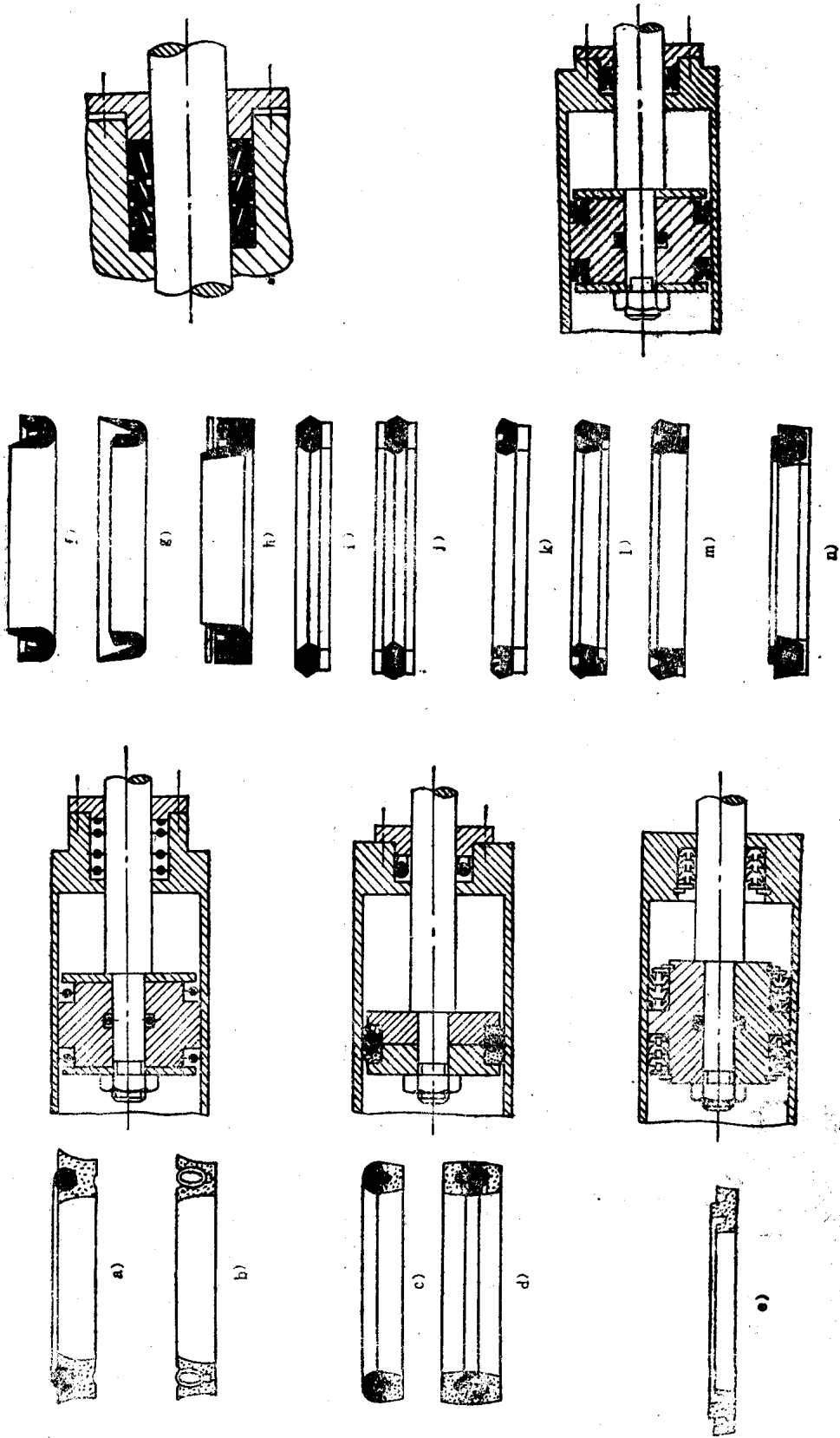
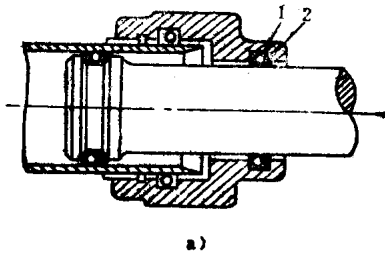
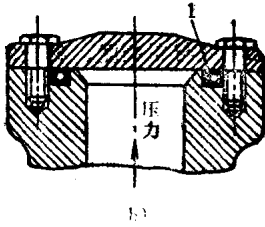


图 1-8 特殊形状密封图



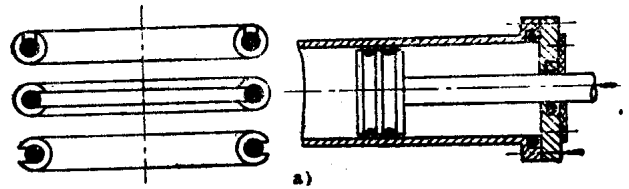
a)



b)

图1-9 O形密封圈

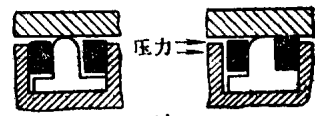
1—O形密封圈 2—挡圈



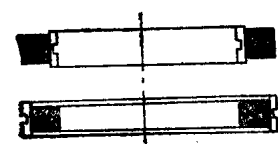
a)



b)



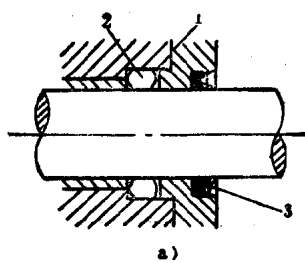
c)



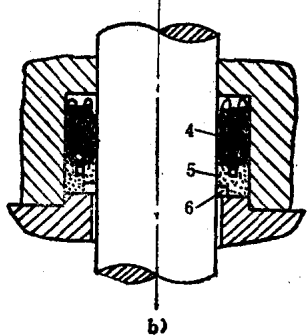
d)

图1-11 特殊形状压缩密封圈

1—T形密封圈 2—挡圈(合成树脂)



a)



b)

图1-10 用于高压的动密封

1—尼龙挡圈 2—高压密封圈
3—橡胶刮油环 4—橡胶密封圈
5—夹布橡胶密封圈 6—挡圈

注：适用压力：最高70MPa；
适用温度：-40~+100℃

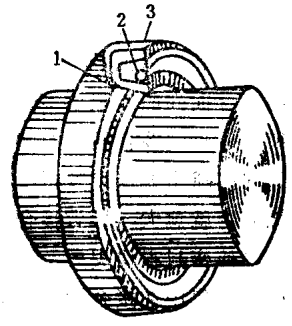


图1-12 旋转轴唇形密封圈

1—密封唇 2—弹簧 3—骨架

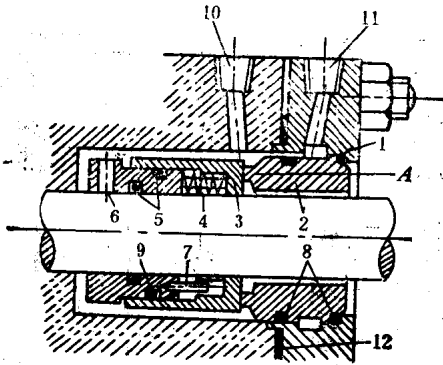


图1-13 机械密封

- 1—密封盖 2—静环 3—动环 4—弹簧 5—O形圈
- 6—固定螺钉 7—传动销 8—O形圈 9—挡块 10—冲洗孔
- 11—冷却水出入口 12—静密封(垫片)

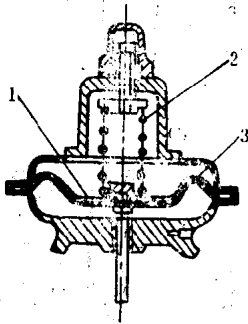


图1-14 薄膜密封

- 1—压板 2—弹簧 3—薄膜

1.2 密封的基础理论

1.2.1 引言

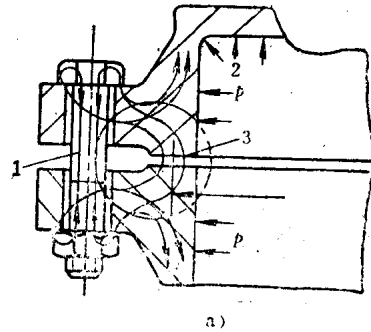
对于不同类型的密封,其作用机理也有所不同。静密封是依靠封闭接合面间的间隙以实现密封作用。动密封不能单纯依靠封闭接合面间的间隙实现密封,因为接合面间的间隙密封得愈紧密,对偶表面相对运动时的摩擦阻力就愈大,导致接合面发热,影响润滑膜的形成,使密封很快失效。因此,对动密封作用机理的研究,集中在接合面间形成与保持流体膜的机理方面,这样既可保持密封,又不致于有过大的摩擦阻力。随着近代流体润滑理论、弹性力学、有限元法以及实验应力分析技术的发展,动密封作用机理的研究已经取得了较大的进展^[3,4]。

1.2.2 静密封的密封作用

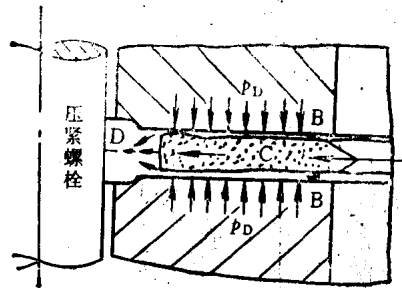
对于静密封,不需要考虑摩擦与磨损,在设计合理,制造质量符合要求的情况下,可以长时期无泄漏。对于接触密封,当安装密封件以后,作用于接触面上的密封力(接触力)与机械载荷、流体压力作用下的内压力、重力产生的静载荷以及热载荷等有密切关系。对于渗透性材料,如多孔质材料、皮革、麻、纸、石棉等,应考虑渗漏的影响。机械载荷包括螺栓的紧固力及弹性体产生弹性变形而在接触面产生的初始应力等^[5]。

此外密封面加工精度与粗糙度、材料的性质等也对密封性能有一定影响。

图1-15是用螺栓紧固的密封垫圈受力及泄漏情况简图。由图可知,在考虑密封垫圈的密封作用时需要考虑以下因素^[6];



a)



b)

图1-15 密封垫圈受力及泄漏情况

a) 密封垫圈受力情况 b) 泄漏情况

1—螺栓力 2—内压力(即流体压力作用下垫圈处的载荷)

3—密封力

P_D —密封比压 B—密封表面附近的泄漏通道 D—泄漏

(1) 密封表面的泄漏。其泄漏量是由垫圈的材料性质、配合表面的加工精度(如平直度等)与粗糙度和压紧程度决定的。使用橡胶和软金属等类材料,用较小的压紧力就可以完全压紧,从而阻止流体的泄漏;对于较硬的金属垫圈,有时使用较大的

压紧力仍不能完全压紧，以致密封性差，但如降低表面粗糙度，增加表面真实接触面积，用较小的压紧力也可以改善密封性能。此外，垫圈材料的强度也与密封性能有关，强度越高，在加压时垫圈表面在相同的载荷下所产生的变形越小。

由以上分析可知，对于静密封，应考虑密封比压、螺栓力对渗漏的影响。

当密封垫圈压紧后，在垫圈单位面积上所受压力 P_D 为

$$P_D = \frac{F_D}{A} \quad (1-1)$$

式中 A ——垫圈受力面积 (m^2)；

F_D ——初始密封力 (N)；

P_D ——初始密封比压 (Pa)。

严格地说，接触面积 A 应为真实接触面积，通常可以用名义接触面积 (m^2) 来计算。

对于圆环形密封圈

$$P_D = \frac{F_D}{A} = \frac{F_D}{\frac{\pi}{4}(D_1 - D_2)^2} = \frac{4F_D}{\pi(D_1 - D_2)^2} \quad (1-2)$$

式中 D_1 ——垫圈外径 (m)；

D_2 ——垫圈内径 (m)。

当流体内部压力 P 作用于垫圈上时，所产生的作用力 F_p 为

$$F_p = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right)^2 P = \frac{\pi}{4} D_0^2 P \quad (1-3)$$

式中 D_0 ——垫圈平均直径， $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}$ 。

F_p 与 F_D 的方向相反，使垫圈上所受压力减少，此时的比压 P_D 称为有效密封比压。为使密封垫圈在流体压力作用下保持密封，通常在设计时规定极限密封比压值，此极限密封比压是将初始密封比压加上一定的预紧压力，使垫圈在流体压力作用下仍能保持密封的可靠性。

在工作状态下，有效密封比压与流体内压力有一定关系，通常以即将开始泄漏时的平均有效密封比压 P_0 与内压 P 的比值表示垫圈密封的特性系数，

称为垫片系数 m ，即

$$m = \frac{P_0}{P} \quad (1-4)$$

有时还将螺栓压紧力 F_p 与流体内压产生的作用力 F_p 之比作为密封系数 f ，即

$$f = \frac{F_p}{F_p} \quad (1-5)$$

垫片系数和密封系数与垫片的种类、尺寸、流体内压、温度以及密封表面状况有关，在一些手册或标准规范中常作为常数推荐使用^[6]。

图1-16是密封力与内压力间的定性关系。B点以前为非线性关系，BC为线性关系。当 F_D 逐渐增加时，密封的内压力逐渐增加，在达到极限比压力 F_c 以后 (B点) 如再放松到 F_c 以下，则所能密封的内压力按虚线变化。例如密封力为 F_1 时 (A点)，可密封内压力为 P_1 ，如果一次压紧到 F_c 以上 (超过B点)，而后再放松到 F_c 以下，则密封内压力就沿OB虚线回到 F_1 (相当于D点)，这时密封内压力为 P_2 。根据这一原理，在垫圈预紧时，应该使初始密封力达到与极限比压相当的极限比压以上，使用时才较为安全。

关于螺栓预紧力的计算，可参看第5章有关内容。

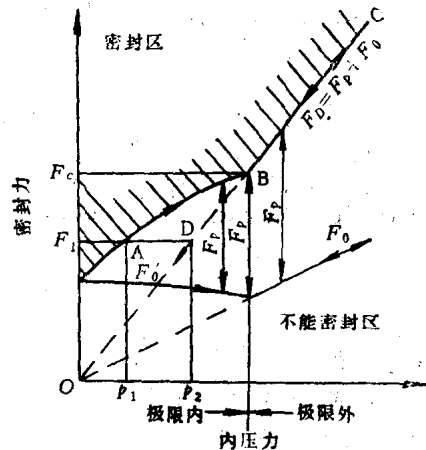


图1-16 密封力与内压力的关系
 F_c —极限比压力 F_D —初始密封力
 F_0 —操作时密封力

(2) 静止面的泄漏与渗流，静止接触面间流体的层流流动，在有关流体力学的书籍中均有论述，现举例简述如下。

8 1 绪论

图1-17为平行表面间间隙中的液体流动。对于矩形缝隙(图1-17 a) 泄漏量为^[8]：

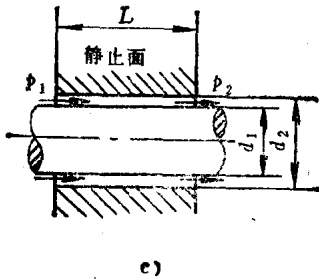
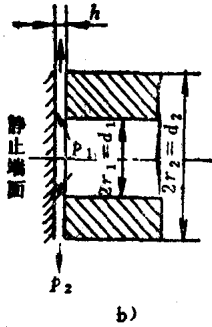
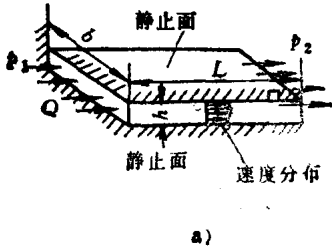


图1-17 平行表面间间隙中的流动

a) 矩形缝隙 b) 圆环形缝隙 c) 同心柱面间的缝隙

$$Q = \frac{bh^3 \Delta p}{12\eta L} \quad (1-6)$$

式中 Q —— 泄漏量 (cm^3/s);
 h —— 缝隙高度 (cm);
 η —— 动力粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);
 Δp —— 进出口间的压差 (Pa);
 L —— 缝隙长度 (cm);
 b —— 缝隙宽度 (cm)。

对于圆环形缝隙(图1-17 b) 泄漏量为:

$$Q = \frac{\pi h^3 \Delta p}{6\eta \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1-7)$$

式中 d_1 —— 圆环或圆柱体内径 (cm), $d_1 = 2r_1$;
 d_2 —— 圆环或圆柱体外径 (cm), $d_2 = 2r_2$;
 其余符号同式 (1-6)。

对于同心圆柱面间的缝隙(图1-17 c), 泄漏量为:

$$Q = \frac{\pi r_1 h^3 \Delta p}{6\eta L} \quad (1-8)$$

式中 $h = \frac{d_2 - d_1}{2}$;

其余符号同式 (1-6)。

对于毛细管中的泄漏量为:

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128\eta L} \quad (1-9)$$

式中 d —— 毛细管直径 (cm);

L —— 毛细管长度 (cm)。

其余符号同式 (1-6)。

对于可渗透材料, 通常可看成是材料基体中存在着若干个毛细孔道, 从这些毛细孔道中泄漏的流体总量, 就是渗透的流体总量。如通过填加填充剂将材料基体中的毛细孔道阻塞, 就可以减少渗透量。

1.2.3 动密封的密封作用

自60年代至今, 已有不少学者的论文从各个不同角度探讨动密封的密封作用, 例如表面张力理论、波度理论、边界润滑理论、混相流动理论、吸引作用 (pumping) 以及弹性流体润滑理论、高-焦耳效应等, 现简介如下。

(1) 表面张力理论。早在1950年, A. Brkich 首次提出了“表面张力理论”^[9], 即通过在密封的外周形成的液柱弯曲液面 (meniscus) 的表面张力作用实现稳定的密封(图1-18)。1957年 E. T. Jagger 发现^[10], 当在密封的空气侧引入另一种液体时, 在密封外周所维持的压差消失, 消除了气-液界面, 导致严重泄漏。实际上, 由于密封表面不可能是完全平坦的平面, 运转时密封的弹性变形、热变形以及外界振动等, 使液柱的弯曲液面发生变化, 失去表面张力的作用。因此, 只考虑表面张力一项因素, 不足以说明密封作用, 但表面张力确实对密封作用有影响, 例如在比较平行的平坦而光滑的表面以及在间隙的端头, 都不能忽视表面张力的作用。

(2) 边界润滑理论。E. Mayer 等用边界润

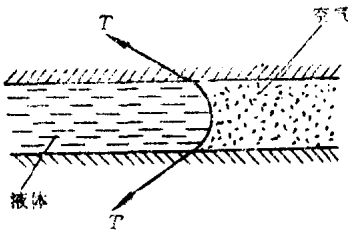


图1-18 表面张力的作用

滑理论^[11,12]来说明密封失效机理。他以端面滑环密封界面的摩擦学系统说明,在载荷作用下表面轮廓最大高度和密封间隙的不同是滑环密封磨损机理不同的原因。在混合摩擦与边界摩擦工况下,配合表面在无润滑或部分分离的状况下运动,产生粘附磨损、微观犁沟及化学反应等,导致密封失效,特别是在密封件的载荷增加与滑动速度降低时,常会发生这种情况。Л. А. Конляков在分析密封件的摩擦时,分析了不同工况下的摩擦系数^[34]。在边界润滑工况下,摩擦系数 f ,可由下式计算:

$$f_r = A_r p^{-2/3} v^{-0.4} \mu^{-1/6}$$

式中 A_r ——与橡胶材料、表面粗糙度、工作介质中表面活性成分、配对材料有关的系数;

p ——压力;

v ——速度;

μ ——工作介质的粘度。

在压力大于30MPa时,橡胶密封件将在边界润滑或无润滑工况下工作。普通端面密封一般也是在边界润滑工况下工作。这时,按边界润滑理论考虑密封,泄漏量较低。但很多学者则认为往复动密封及油封往往在流体动压润滑工况下实现密封,仅在部分工况下处于边界润滑状态。边界润滑理论虽然不能作为普遍性密封机理,但在考虑密封机理时,对可能发生的边界润滑工况必须予以注意。

(3) 吸引作用。又称泵吸作用,由日本荒井芳男提出并已经过试验验证。它是由偏心轴旋转和油膜粘度产生的单向动力波所引起的,由这种吸引效应产生的负压,使油封唇口紧紧抱住轴,对轴有较好的追随性,从而形成完整的密封平衡状态,起着重要的密封作用^[13]。美国的J. Findlay则认为^[8],由于轴孔配合的同心率偏差与配合表面的加工造成的几何偏差(或称为棱角),所产生的波度之间的相角不同而在理论上表现为向内吸引(回流)或向外吸引(流出)。他假设,在轴孔的配合

间隙中完全充满流体膜的情况下,流体膜承受的密封压力与轴孔配合偏心量的函数关系为:

$$p_p = \frac{3\eta\omega(R_2 - R_1)e}{2.45h^2} \quad (1-10)$$

式中 p_p ——密封的压力(Pa);

η ——动力粘度(Pa·s)

ω ——角速度(s^{-1});

e ——偏心距(cm);

R_2, R_1 ——半径(cm);

h ——膜厚(cm)。

由式(1-10)可见,密封的压力与偏心距成正比,与膜厚的平方成反比。回流时,在波度为 $e = 0.817$ 时偏心距最小。

还有一些学者探讨了弹性变形、气蚀、离心力以及摩擦表面的精加工方法及表面粗糙度等因素的影响。目前利用粘性吸引作用机理设计的流体动力密封或回流密封,已在生产中应用^[14-16]。

(4) 流体动压润滑理论。许多学者发现,在动密封的交变行程中,在唇口与密封表面间有一层油膜,使摩擦系数下降。60年代以后,随着流体动压润滑理论的发展,奥地利的H. Blok在1963年认为密封面的润滑问题可设想为滑动轴承流体动压润滑的逆问题,即假设已知压力分布,然后应用雷诺方程来计算油膜厚度、速度分布、剪切应力、泄漏量与摩擦力。1961与1962年,德国的C. M. Lang与H. K. Müller先后提出了题为“液压工作缸的接触密封的研究”与“运动的机械零件弹性密封环的润滑膜形成、摩擦与泄漏损失”的论文^[17-19],提出了密封挤压力最大时($dp/dx = 0$)的油膜厚度计算式。

图1-19为密封环唇口与杆表面间的间隙中的油膜厚度与压力分布情况。

按照雷诺方程

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta V \frac{h(x) - h^*}{h^3(x)} \quad (1-11)$$

可得:

$$\left[\frac{(h^*)^2}{\eta V} \left(\frac{dp}{dx} \right) \right] \left(\frac{h(x)}{h^*} \right)^3 - 6 \left(\frac{h(x)}{h^*} \right) + 6 = 0 \quad (1-12)$$

$$\text{或} \quad KH^3 - 6H + 6 = 0 \quad (1-13)$$