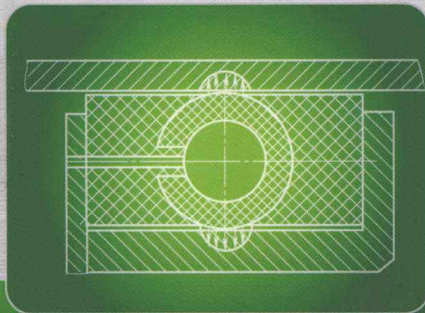
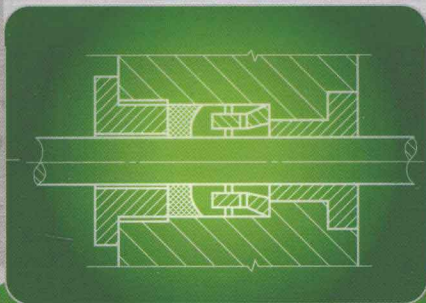
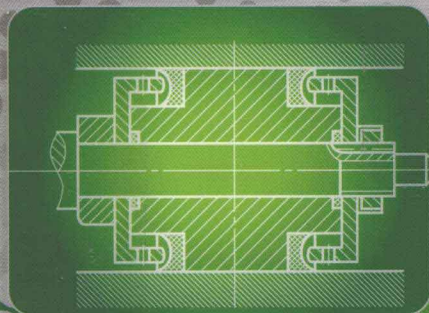


▶▶▶▶ YEYA MIFENG

液压密封

张绍九 等编著



化学工业出版社

YEYA MIFENG

液压密封

张绍九 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

液压密封/张绍九等编著. —北京: 化学工业出版社,
2012. 2

ISBN 978-7-122-12800-3

I. 液… II. 张… III. 液压技术-密封 IV. ①TH137②TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 231416 号

责任编辑: 黄 滢

责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 张绪瑞

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 499 千字 2012 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

液压技术既是一门古老的技术也是一门年轻的技术。作为传动技术，随着工作压力的提高，它可输出巨大的力和扭矩，即输出大的功率，它的功率-质量比不但优于机械传动也优于电力传动，液压马达的扭矩-惯量比一般为相当容量的电动机的 10~20 倍，功率-质量比为电动机的 15 倍；作为控制技术，随着控制理论及控制系统的发展，尤其近年来它与微电子、计算机广泛紧密的结合，显示出电液控制系统的高响应、高精确性能远优于机械控制，并不逊色于电气控制；它的工作介质是液压流体，改变其流向及流量就可以改变它的运动状态，可无级变速且范围广、运动平衡等，而且可方便布置。总之液压技术具有上述三方面的优越性，因此它广泛地应用于众多的工业部门，尤其是一些新兴的最现代化的技术及一些武器军工装备方面。它除应用于军舰、航天器、导弹、飞机、坦克、火炮、雷达跟踪之外，还广泛用于冶金、交通工具、建筑、矿山、工程机械、注塑机、压力机、剪板机、机床、起重机、水利启闭机及核能装置等设备，以及近代实验科学等方面。

由于液压技术的优越性及应用广泛性，它已成为工业现代化、多种设备自动化、军工、航天航空、海军舰艇中不可或缺的技术。既然液压技术如此重要，就应有高的可靠性，否则该项技术优越性不但得不到发挥，而且会导致灾难发生。而对液压技术可靠性来说密封起着举足轻重的作用，目前世界各国均高度重视密封技术的研究与应用。

密封，如果不良或失效，轻则导致液压工作介质的液体产生泄漏、液压设备效能降低而液压油泄漏增多，浪费资源，污染工作环境；重则产生灾难，机毁人亡。如 1986 年 1 月 28 日，美国“挑战者”号航天飞机仅因左侧火箭助推器连接处 O 形圈密封失效引起的泄漏，导致该飞机升空后不久爆炸。就是这小小的 O 形密封圈失效导致 7 名宇航员全部遇难，价值 12 亿美元的航天飞机也瞬间化为乌有。

液压系统中功能变弱甚至失效，效率降低，速度变慢，输出力或力矩降低，位移不足，控制不精确或控制不灵甚至失控等事故的发生有约 75% 以上是液压系统或液压元件泄漏所致，也就是说液压系统中的事故绝大部分因密封不良或密封失效所致。所以说：密封好坏是当今机械产品尤其是液压机械设备质量评定的重要标志之一。

对具有液压系统的机械装备，自设计开始到制造、装配、试验全过程，都应对密封全力关注。据笔者四五十年的工作经历观之：虽说有同仁重视密封，但忽视密封和尚未掌握密封技术的人也有。人们往往把主要精力放在液压系统或液压元件的设计与制造上，有多少人把精力投入到密封上呢？近几十年出版的液压系统及液压元件专业书籍不少，但液压密封专业书籍较少。笔者依据四五十年的工作经历并参阅一些书籍及期刊，编著了本书——《液压密封》，其目的是抛砖引玉，愿不久有更专业、理论更完整、实用性更强的液压密封方面的专业书籍不断涌现。

《液压密封》不是一本专业学术著作，因它没有详细阐明液压中各种密封理论，也没有进行严密的数理推演，但它是一本较实用的密封技术书，因它简略叙述了几种常见的密封机理或原理，并介绍了若干种密封件及密封装置、液压密封系统及具体密封位置的密封设计、液压缸密封结构设计示例，分析了密封失效的原因及应采取的防治措施。它对密封发展史及当今国内密封状况与展望也作了粗略介绍，尤其介绍了我国拥有自主知识产权的新的密封理论及产品。

本书由张绍九等编著，其中高佩川编著第五章，刘晓阳参与第二章编著，张文科参与第四章编著，其余均由张绍九编著并统稿，高佩川校阅全书。在此特别感谢南京工程学院张佩佩、季顺等七位同学参与文字打印及插图绘制工作。

限于编著者水平，书中疏漏之处在所难免，热情而真诚地希望广大读者予以指正、赐教，衷心致以感谢！

张绍九

目录

CONTENTS

第1章

概述 / 1

- 1.1 液压密封系统的重要性 / 4
- 1.2 液压密封原理 / 5
- 1.3 密封的分类 / 10
 - 1.3.1 以压力高低分类 / 10
 - 1.3.2 以密封偶合面之间有无相对运动分类 / 10
- 1.4 液压密封的性能及其基本要求和注意事项 / 14
 - 1.4.1 液压密封的性能 / 14
 - 1.4.2 对密封件及密封装置的基本要求 / 15
 - 1.4.3 注意事项 / 16
- 1.5 液压压力等级划分 / 17
- 1.6 液压密封技术发展回顾与展望 / 17

第2章

密封材料 / 32

- 2.1 密封材料的要求 / 32
- 2.2 密封材料性能介绍 / 33
 - 2.2.1 密封材料物理性能 / 33
 - 2.2.2 密封材料的化学性能 / 34
 - 2.2.3 密封材料的力学性能 / 37
 - 2.2.4 密封材料的工艺性 / 40
- 2.3 各种常见密封材料 / 41
 - 2.3.1 橡胶 / 42
 - 2.3.2 合成树脂 / 47
 - 2.3.3 纤维与皮革 / 50
 - 2.3.4 黑色金属 / 51
 - 2.3.5 有色金属 / 53
 - 2.3.6 其他材料 / 54
 - 2.3.7 液压密封材料的选用 / 55

第3章

液压密封及密封件 / 59

- 3.1 自封式压紧密封(挤压型密封) / 61
 - 3.1.1 自封式压紧密封原理与特点 / 61
 - 3.1.2 自封式压紧密封件分类及其材料 / 62
- 3.2 自封式自紧密封(唇形密封) / 85
 - 3.2.1 自封式自紧密封的原理与特点 / 86
 - 3.2.2 自封式自紧密封圈的分类 / 86
- 3.3 组合密封 / 120
 - 3.3.1 组合密封原理及其特点 / 120
 - 3.3.2 组合密封的分类 / 121
- 3.4 间隙密封 / 138
 - 3.4.1 间隙密封的工作原理 / 138
 - 3.4.2 间隙密封结构形式 / 140
 - 3.4.3 密封间隙 / 140
- 3.5 旋转密封 / 141
 - 3.5.1 旋转密封的作用原理及性能 / 141
 - 3.5.2 旋转密封装置(旋转密封圈)的种类、结构及材料 / 144
 - 3.5.3 旋转密封的要求 / 149
 - 3.5.4 旋转密封及轴的设计 / 151
- 3.6 挤压与嵌入密封 / 152
 - 3.6.1 密封工作原理 / 152
 - 3.6.2 挤紧与嵌入密封的分类 / 152
- 3.7 垫片密封 / 155
 - 3.7.1 垫片密封的工作原理 / 156
 - 3.7.2 垫片密封的结构与分类 / 156
- 3.8 胶液与胶带密封 / 161
 - 3.8.1 密封胶的密封工作原理及其特点 / 162
 - 3.8.2 密封胶种类 / 163
 - 3.8.3 密封胶的应用 / 174
 - 3.8.4 密封胶的密封工艺 / 174
 - 3.8.5 胶带密封 / 175
- 3.9 辅助密封件 / 175
 - 3.9.1 辅助密封的重要意义及作用 / 175
 - 3.9.2 辅助密封件的类型及其使用 / 176

第4章

密封件装配工艺 / 186

- 4.1 密封件的安装要求 / 186
- 4.2 轴密封件安装工艺 / 188
- 4.3 孔密封安装工艺 / 192

4.4 其他密封件安装工艺 / 196

第5章

密封失效原因及预防措施 / 199

- 5.1 液压密封失效的危害 / 199
- 5.2 液压密封失效的征兆 / 201
- 5.3 密封失效原因的分析与预防措施 / 202
- 5.4 常用密封件失效原因与预防措施 / 206
- 5.5 密封失效措施概览 / 210

第6章

液压密封设计及密封件、密封装置的选用 / 212

- 6.1 液压密封设计 / 212
 - 6.1.1 液压密封设计的关键 / 213
 - 6.1.2 液压系统中静（固定）密封设计 / 217
 - 6.1.3 液压系统中往复动密封设计 / 220
 - 6.1.4 液压中旋转动密封的设计 / 222
- 6.2 选用密封件或密封装置 / 222
 - 6.2.1 参照成功的密封结构选用密封件、密封装置 / 222
 - 6.2.2 依据工况及工作环境场所选择适合密封件及密封装置 / 222
- 6.3 液压密封结构示例 / 291

第7章

超高压液压密封 / 297

- 7.1 超高压密封 / 297
- 7.2 液压件的超高密封 / 298
- 7.3 液压管路系统超高压密封 / 300
- 7.4 超高压（超级高压）密封系统安全注意事项 / 302

参考文献 / 304

第 1 章

CHAPTER 1

概述

当我们从商店买一瓶矿泉水或购一瓶酒时，瓶内装的无论是矿泉水还是酒，均为无压的液体，而瓶口总是有盖子，且盖内尚有弹性的纸或塑料的衬垫子，盖得严实。若购回的是啤酒，因啤酒易产生气泡并微带压力，有外溢趋势，所以此瓶需比前两种瓶子更结实些，其盖子所带的纸和塑料的垫子更具有弹性，盖子盖得更紧更严实了。其之所以需有带弹性的衬垫的盖子，是因为要防止液体溢出瓶外，同时也防止外界的尘埃、空气、水蒸气等杂物侵入瓶内，弄脏瓶内的液体而影响液体的品质。这样防止瓶内液体（包含气体）外泄和阻止外界尘埃、空气、异物等侵入瓶内的措施，可谓之密封。瓶盖与弹性垫子统称为密封装置，其中每个零件谓之密封件。像这样的例子在日常生活中虽不能说比比皆是，但差不多可说处处常见。密封普遍存在于人们生活之中，只是可能有些人还没有意识到而已。至于其他领域如交通行业、航天事业、工业等设备中处处都存在着密封，而密封的品质又影响这些行业、事业的发展。故人们认识、学习、研究、设计及应用密封，是非常有必要的。让密封技术与工业等各个领域的技术相应同步发展方能满足人类的需求和适应社会的发展。

在工业等各个领域中，无论是化工设备、冶金机械、建筑机械、工程机械、交通运输、车辆、船舶、军工兵器、导弹、水面舰艇、水下潜艇还是宇航太空飞行器等，均离不开密封产品及密封技术。若无相应的密封件及密封技术，则上述各类设备皆不可能充分发挥它们应有性能，有的往往还会因为密封性能不良、密封技术不过关而导致上述某些设备（装备）成废铁一堆，甚至造成无可挽回的灾难。如 1986 年 1 月 28 日，美国“挑战者”号航天飞机升空后不久爆炸，导致 7 名宇航员全部遇难，价值 12 亿美元的航天飞机瞬间化为乌有。其主要原因就是左侧火箭助推器连接处 O 形密封圈失效引起可燃液体泄漏，造成航天史上最大的悲剧。密封的主要作用就是减少或完全阻止泄漏，故在未深入讨论密封之前就应对泄漏有一定的认识与了解。

(1) 泄漏

所谓泄漏，简言之即液流体通过密封面的一侧流到或渗透到另一侧。在液压技术中的泄漏即在液压元件及管道等系统的密闭容腔内流动的液体或存放的液体通过间隙流越过界面或通过毛细管渗出界面的现象。

泄漏依据泄漏机理可分为界面泄漏、渗漏、扩散三种形式。在液压技术中，虽然不准有渗透、扩散（有时两相液体短时间扩散是存在的），但主要常说的泄漏则是界面泄漏。

① 界面泄漏 又谓之穿漏，即被密封的液流介质在压力差的作用下，通过密封面间隙产生单向泄漏。该种泄漏是液压中常见的主要泄漏，应予以防止。

② 渗漏 被密封的液流体介质在表面张力的作用下,通过毛细管产生单向泄漏,称之为渗漏。如油箱的焊缝致密性不足,就容易发生渗透漏油现象,管路接头因密封不良(如拧得不够紧)亦会出现渗漏现象。在液压技术中给予充分注意,是可以杜绝的。

③ 扩散 液流体在浓度差的作用下,不同浓度的液流体相互渗入对方,久之浓度较浓的变淡,而浓度较淡的液流体变浓,这种现象就叫扩散。它在液压技术中较少被人提到。

(2) 泄漏率

泄漏率即单位时间内的泄漏量。时间往往以小时(h)计,泄漏量以体积或质量计,流体的体积以毫升(mL)计,流体质量以克(g)计,故流体的泄漏率以 mL/h 或滴/h 或 g/h 表示。

依据泄漏量分,即根据泄漏流量(体积或质量)多少,分为零泄漏、无泄漏与泄漏三种。

① 零泄漏 泄漏量为零的理想情况谓之零泄漏,即泄漏率为零。需指出,所谓零泄漏是相对的,因为它与实际的测量技术和测量仪器精度有关,受目前测量技术水平与测量仪精度的限制,测不出来泄漏量,亦当为零泄漏。

② 无泄漏 单位时间内的泄漏量在规定的允许范围之内谓之无泄漏。规定允许泄漏量根据不同的机械设备有不同的规定,即使在同一台机械设备上,其不同部位允许泄漏量的规定也是不一样的。如有的泄漏率规定在 0.5‰ 以下,并无明显泄漏;橡胶油封的泄漏率为 0.02g/h,即 11h 漏一滴,1 滴油 $\approx$ 0.035mL(有的资料上以 1 滴 $\approx$ 0.03mL)。

③ 泄漏 泄漏率超过所规定允许泄漏率之极限,或超过无泄漏的泄漏谓之泄漏。也就是我们一般所指的液压中泄漏。在液压系统任何部位:管路、液压元辅件中都不允许出现超出规定泄漏量的流体介质泄漏。故管路、元辅件壳壁必须致密坚固,其接头、元辅件装配接触部位都必须有可靠的密封装置,保证不泄漏。

依照泄漏出的介质流向分内泄漏和外泄漏,见图 1.1 所示。

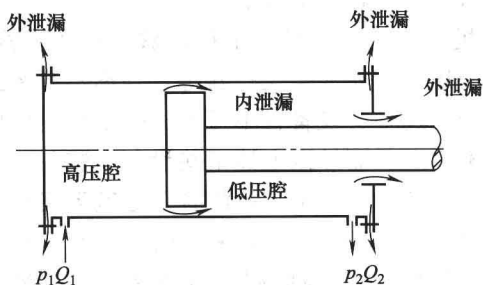


图 1.1 液压缸的泄漏

a. 内泄漏 是密封的容腔内流体介质从高压腔越过边界间隙向低压容腔泄漏。它将降低容积效率,降低规定的运行速度,降低工作能力,影响其正常工作。

b. 外泄漏 其流体介质从元件或液压系统的容腔流向元件或液压系统的外部,称之为外泄漏。外泄漏不但导致流体介质的浪费,而且污染环境,而这些外泄漏的流体介质大都属于可燃油类(防燃油与防燃液除外),有可能引发火灾等灾难。

由上述可知,无论是内泄漏还是外泄漏都是有害的。如上面谈到美国“挑战者”号航天飞机,因可燃液体泄漏导致机毁人亡的惨剧。故人们一定要努力设法制止,甚至杜绝各种装备的泄漏产生。

尤其是现在液压技术是通过有压液流体传递能量和控制信号,故它具有传动力大、运动平稳、控制方便等优点,所以它在工业等各个领域,无论传动还是自动化控制方面应用都十分普遍,而且它是通过有压液流体介质(大都为可燃的油液)工作的,这就要注意它的液流体泄漏。防止泄漏的最根本的措施,就是努力建立良好的密封保障。可以说,目前密封已成为保证现代工业等各个领域的装备高效、安全和长期有效运行必不可少的重要技术措施之一。

(3) 密封

它是切断一切泄漏的通道（间隙、毛细管等）或设法增加泄漏通道的阻力消除压差，阻止容腔内流体介质的泄漏，同时亦阻止外界任何尘埃、异物及液、气体进入容腔。

① 密封件 切断泄漏通道的器件，即与泄漏通道相接触的起密封作用的器件。

② 密封装置 以密封件为主，若干器件组成，也可能附带辅助密封件，实现密封的若干件组合，统称为密封装置。

③ 密封件与密封装置 它们不仅起到密封作用，而且是现代工业等领域中的节能、省耗、减排利环保，更是航天飞机、海洋舰船、深海潜艇、巨大功率的核动能装备和特大型地下施工盾构机及机器人等高新技术装备必不可少的重要基础件之一。

④ 密封有效性 它是指密封件或密封装置或其他密封形式的密封能力。若密封处的理想泄漏量为零，则该种密封件或密封装置或该种密封形式的密封有效性为最优，密封有效性常用密封度来衡量。

⑤ 密封度 它是指单位时间内流体介质的体积或质量的泄漏量。常以 mL/h 或 g/h 或滴/h 表示，实际上就是泄漏率，即以泄漏率来表示密封度。重要的工程设备常规定密封度允许值。如美国压力容器委员会（PVRC）依据泄漏率规定五个密封度级别：即 $T_1 \leq 2 \times 10^{-1} \text{mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_2 \leq 2 \times 10^{-3} \text{mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_3 \leq 2 \times 10^{-5} \text{mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_4 \leq 2 \times 10^{-7} \text{mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_5 \leq 2 \times 10^{-9} \text{mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ 。

对密封技术而言，笔者认为极其重要的液压系统其密封度应零泄漏，其余应为无泄漏。如它的静密封密封处的密封度应为零泄漏。动密封的密封处的密封度争取零泄漏，但很难达到，不过应要求为零泄漏。若国家或行业有规定，则按规定执行。

⑥ 密封系统 它是由若干密封件或若干密封装置或其他密封形式有机的组合，更严格地说：是由若干密封件或若干密封装置或若干其他密封形式装入液压元件内或装入液压系统接头后，形成实机有效密封功能的组合。

密封系统在整个液压系统中可以有不同的划分：如以整个液压系统中管路接头作为密封系统，或以液压系统中某个元件如液压缸单独划为一个密封系统。如图 1.2 以液压系统中元件与管道接头处密封作为密封系统。如图 1.3 则以液压系统中液压缸内部各处密封作为元件内部密封系统。

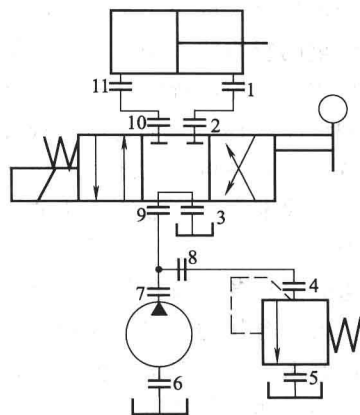


图 1.2 液压系统中元件、管接头密封系统

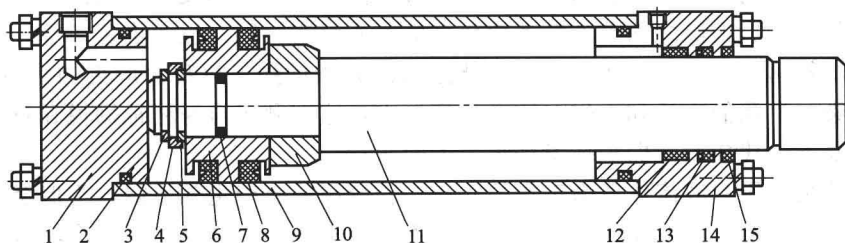


图 1.3 液压缸中密封系统

1—缸底；2,7—O 形密封圈；3—轴用挡圈；4—挡圈；5—卡键；6—活塞；8,13—Yx 形密封圈；9—缸体；10—缓冲柱塞；11—活塞杆；12—导向套；14—缸盖；15—防尘圈

(4) 液压密封系统使用与设计原则

① 组成密封系统的各处实机密封性能应有效,有效密封度应优良,即达到零泄漏或最低达到无泄漏。实机密封性能是指密封件或密封装置依规定安装在机件,经过一定总成后的密封性能。如孔用 Yx 及轴用 Yx 形密封圈的实机密封性能,若它们为液压缸的密封件,是指它按规定装在合格的机件沟槽内,待按液压缸依技术要求总成液压缸后的密封性,即谓实机密封性能。

② 整个密封系统应经济、安全、稳定可靠、寿命长、密封系统内各部位密封寿命应尽可能一致且长寿命。

③ 密封系统中任一处密封件或密封装置结构尽可能简单紧凑,装配工艺性好,维修更换方便。其机件有关密封因素(尺寸精度、沟槽深浅及形式、位置精度、表面粗糙度等)均应符合密封技术要求。

④ 密封件的材质及结构形式应与工作介质、工作压力、工作速度及工作环境场所相适应。整个密封系统应满足全工况的全过程及工作环境场所。

1.1 液压密封系统的重要性

(1) 液压密封系统对其机械设备性能有重要影响,甚至有决定性的影响

若液压密封系统处于正常状态,即处于零泄漏或无泄漏工作状态:如果是万吨液压机,将会产生巨大的力,把厚厚的坚实钢板压成人们所需要的形状;如果是巨型起重机,将会吊起巨重的货物或大型设备;如果是一台液压伺服控制的现代的自动化程度很高的机械设备,它将按自动控制程序让这台自动化机械设备按时间准确输出所需要的力、速度、位移及按预定的程序进行;如果是一台现代化水平很高的液压压注机,它不但自动地生产塑料制品,结合光电技术它还可自动地显示出运动状态全过程。若它的液压密封系统不良,即其泄漏率超过允许的泄漏量,则液压系统的压力下降,流量减少。这将导致设备输出功率降低、运动速度变慢、液压控制信号变弱,对力、速度、位移、运动程序皆不能进行严格准确地控制。泄漏严重时上述各类设备均不能正常工作,甚至不能工作,全部瘫痪。随着现代科学技术的进步、人们合作的增多及互相竞争激烈、人们所能利用但却需要控制的功率日益增加以及对现代控制系统日益严格的要求和日益扩大探索新的领域快速增加,液压传动与控制系统因其优点而在上述这些领域日益占据重要的地位。由此可见液压密封件及其密封结构、密封技术的重要性毋庸置疑。

(2) 环保已成为世界性的呼求,在清洁的环境中生活与工作,是每个人自身的正常要求

我国近几十年的发展速度已超过西方资本主义国家上百年的发展,人民生活改善与水准提高之快更是惊人。但随之而来的是消耗较多的物质财富,同时也污染了环境。而人们的环保意识水平却较落后,只是近年来人们对环保认识有所增强。故我们应更加注意保护环境,让其不受污染,让我们生活和工作在洁净的环境中,这有利于自身精神愉悦和身心健康,更有利于儿童及下一代成长。保护环境是每个人的职责。

液压系统是以压力液流体作为工作的介质,若液压系统产生外泄漏,不但会弄脏机械设备及工作地点,有的液压油还带一定气味,令人精神不适。这样弄脏了工作场所,加之不适的气味,会大大影响到人们的工作情绪和身心健康,而且也影响工作效率;而液压系统一旦密封欠佳,将成为漏油之源,这与当今环保精神是违背的,不符合世界环保要求,也不符合我国环保政策。不但如此,随着国家对环境保护要求越来越严,人民环保意识日益增强,对

环境洁净要求越来越高,因此人们越来越要求液压系统不得泄漏液压油等液体来污染环境。因此人们对液压密封系统要求越来越严,越要求提高液压密封技术水平,越要求液压密封系统应日益趋向完善。这是摆在每一个液压工作者面前迫切必须完成的任务:努力学习,端正态度,脚踏实地地工作,改变我国目前液压密封落后的状况,提高密封水平,让我们的工作符合世界及国家对环保的要求,既利于本身,又利于同代人,更利于下一代成长,责任重大,奋起努力,搞好液压密封工作。

(3) 安全性

液压技术中所用液流介质除用难燃液压液外,基本为石油基液压油。石油基液压油是以润滑油为基料,精炼后按照需要加入适当的添加剂而成。该类液压油的润滑性能良好,但抗燃性较差。因此在液压密封系统如达不到液压系统的密封性能要求,在密封系统中任何一处产生外泄漏,都可能引起燃烧,导致火灾,对于液压油处于运输或储藏时,同样要防止外泄漏,以防火灾的发生。

(4) 密封系统应与液压技术相应发展,否则密封系统拖住液压技术及主机发展

随着人类需求增长及科学的进步,促进了工业技术迅速发展,对机械产品的性能要求日益增高,如功率质量比、控制灵敏度与准确性等。而液压技术就可以满足机械设备更复杂化及性能要求,液压系统日益高压化,无疑是功率质量比最优,控制准确与灵敏性高,则液压比例控制系统、液压数字控制系统、液压比例伺服系统、液压伺服控制系统均可满足。密封系统的发展基本要与主机同步,密封系统必须适应液压技术要求。必须充分注意合理设计与运用液压密封系统。其一,该密封系统的密封件及密封装置能经受起高压,而不被击穿,产生泄漏;其二,在上述各液压控制系统中的密封系统任一处密封的摩擦力要小,即摩擦因数要小,才能使这些控制系统受控制的器件运动灵活自如,方可达到控制的及时性、准确性、灵敏性。

(5) 人类要持续发展就必须节省资源

上面已经谈到液压技术所用的流体工作介质,主要是石油基液压油,而石油基液压油完全是由人类开采天然石油,后经多次提炼加添加剂而成的。若液压密封系统不良或不合格,或者虽合格但在使用中发生故障产生外泄漏,就白白浪费液压油。

综上所述,优良而合理的密封系统是液压技术中经济节能省耗、防止环境污染、避免灾害的技术保证,也是保证液压技术性能及液压技术发展的重要条件之一。故可知液压密封系统在液压技术中的重要性不言而喻。

1.2 液压密封原理

由上述可知泄漏有三种,即界面泄漏(穿漏)、渗漏及扩散。而在液压技术中无论是液压元件或是液压系统,渗漏与扩散不是泄漏的主要问题,稍加注意即可。如选择密封材料时注意它的致密性,注意接触面间间隙,注意液体界面之间浓度差别。也就是忽略渗漏、扩散是不可以的,用心注意即可。应当把界面泄漏当成主要问题。

欲要解决液压中泄漏尤其界面泄漏,则必须清楚知道液压密封原理,运用这些液压密封原理去解决实际问题,方可显示出液压在传动与控制方面的技术优势。密封原理随密封结构形式与类型不同而不同。

(1) 密封类型

① 垫片密封 该种密封可以说是最直观、最简单的一种类型。它是在两连接件密封面

之间垫上所需形式的垫片，金属的或非金属的，或金属与非金属的组合垫片，然后通过螺钉或螺栓或螺母拧紧，受拧紧力的作用使垫片产生弹塑性变形，充填密封面上微观凹凸不平，从而达到密封防止泄漏的目的。实际是利用密封面的比压使液流体工作介质通过密封面的阻力大于密封面两侧压力差，加之密封面上微形凹坑被垫片弹塑性变形物所填满，故能阻碍液流体外流而阻止泄漏，达到密封有效作用。

② 密封胶密封 两个偶合面尤其是硬质偶合面，即使施外力也不易让两密封面贴合严密，难达到阻止有压液流体泄漏。而用密封胶刮涂或压注等方法，将密封胶涂在要紧压的两个面上，靠密封胶的浸润性填满密封面微观凹凸不平处，形成一层薄膜，就起到有效的密封作用，阻止泄漏。

③ 研合面密封 它是靠精度研配偶合的密封面，其偶合面的粗糙度 $0.11\mu\text{m} < Ra < 2\mu\text{m}$ (最大值亦应小于 $5\mu\text{m}$)。施外力使经过精密配研面贴紧，防止泄漏，保障密封。

④ 球堵密封 它是常用的一种密封类型。选与工艺孔名义尺寸相同的标准钢球组合件压入孔内，目前球堵尺寸为 $\phi 4 \sim 16$ ，利用钢球紧压入孔中。其钢球硬度、尺寸精确，粗糙度很低，利用孔内钢球挤压孔，而孔壁膨胀，界面紧贴，阻止有压流体泄漏而保障密封。

⑤ 挤压密封 常见的密封圈有 O 形圈、X 形圈、方形圈、D 形圈等，在液流体无压力或低压力时，靠这些密封圈在沟槽内，与其他机件相配时预先被挤压，产生压紧力，工作时又靠液流体介质压力挤压密封圈，使其变形径向增大，封闭密封间隙阻止泄漏，达到密封。

⑥ 唇形密封 靠唇形与密封面过盈配合，可密封住无压力或微压力的液流体。工作时液流体介质压力增高，此压力对唇边有径向力作用。密封件产生弹性变形，使唇边更贴紧密封面，堵住泄漏间隙，以达到密封目的。它比挤压密封有更显著的自紧密封作用。

⑦ 螺旋密封 它是在相配的偶合件之中轴或相配的壳体内表面上，其中一件切出螺旋槽而构成的，螺旋起类似螺杆泵的作用，输送黏性流体以阻止所要密封的系统流体，从而起密封作用。

加工于壳体上的螺旋槽 被密封的液体

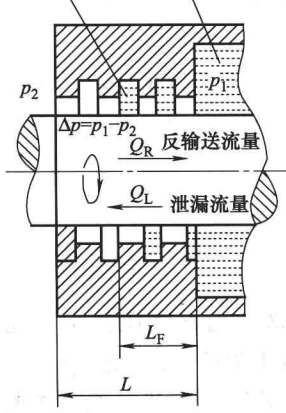


图 1.4 螺旋密封的基本原理

螺旋密封的基本原理如图 1.4 所示。令被密封的流体与外界的压差为 Δp ，而压差 Δp 引起的泄漏量为 Q_L ，螺旋槽反输送的液体流量为 Q_R ，若 $Q_R < Q_L$ ，则泄漏量为 $Q_{\text{泄}} = Q_L - Q_R$ ，若 $Q_R > Q_L$ ，则泄漏量 $Q_{\text{泄}} = Q_L - Q_R < 0$ 。而我们希望 $Q_{\text{泄}} = 0$ 。由图 1.4 可知零泄漏可能位于某长度，设 L_F 处。它常用于减速器高速输出轴密封，低速高压泵轴密封。这种螺旋密封属于动力密封。应注意：当低速或停止转动，它将失去密封能力，应辅助设置停车密封装置。

⑧ 间隙密封 它是最简单的一种非接触密封，也可以说是一种无密封件的密封。它是利用偶合面之间微小间隙，当液流体流过微小间隙，流动的液体将会受到阻力，产生压力损失，而间隙将起到节流作用，利用间隙内的流体节流效应限制泄漏的原理进行密封。

此外，还有螺纹密封、胀圈密封、活塞环密封、油封密封等类型密封，其密封原理就不一一介绍了。上面介绍的垫密封、胶密封、球堵密封都是静密封，因它们的偶合件密封面无相对运动；而挤压型、唇形自紧密封、间隙密封都是动密封，因它们的密封面之间均有相对运动。虽然静密封与动密封不同，密封结构形式及密封类型各异，但它们亦有共性，即都使

密封容腔内的液流体介质不得泄漏。故也必存在适合它们的液压密封原理。

(2) 液压密封原理

用致密的,具有一定机械强度、弹力、硬度、柔性等性能的材质,充填偶合件之间,隔离、切断液流体的流动通道;或者增加液流的阻力,消除界面之间压差;或者增设做功元件,泄漏液流导回源腔。利用这些液压密封原理,防止液压元件或液压系统的液体泄漏。

① 静密封 静密封是用致密的且具有一定机械强度、足够的弹性(如合成橡胶)、一定的硬度(如紫铜硬度较低,钢球硬度高)等性能的材质以一定的结构充填于偶合密封面之间。该材料的形体受力变形,紧贴在密封面上,并因弹塑性变形挤入填满密封面上微凹坑,因回弹力作用非常有力、严密地堵塞所有可能的泄漏通道,就可能形成事实上零泄漏。

② 动密封 动密封较静密封复杂得多,其密封面之间有相对运动,因而它就有摩擦、磨损,要降低摩擦磨损,它们之间就应当存在润滑油膜。

往复运动的动密封,密封件与密封面有相对滑动,因它们位于液压油液体中,因此密封件与密封面就有可能有润滑的油膜,如图 1.5 (a) 在表面张力作用下,油膜外侧边缘形成一个曲面,如图 1.5 (b) 所示,压力与密封间隙成反比,即

$$p = 2\delta/h$$

式中 δ ——表面张力系数;

p ——介质压力;

h ——密封间隙。

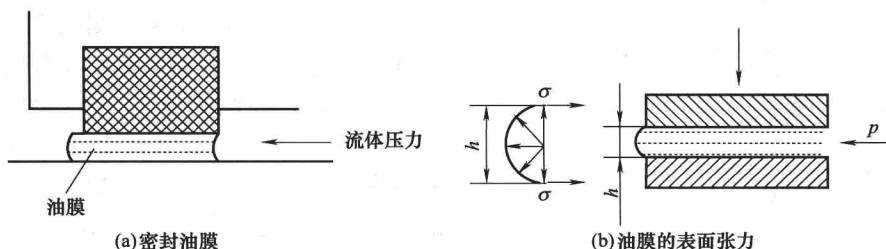


图 1.5 密封与润滑油膜

依靠这层油膜的表面张力,润滑剂保持在一定的位置上,形成一道密封屏障。实际上就封住流体流动通道而阻止泄漏;它是理想的密封摩擦状态,亦称为油膜润滑状态。如果这层油膜的厚度太薄,若厚度与被密封表面凹凸不平的粗糙度相当,密封件就会直接与坚硬的凸面接触,产生较大的摩擦和较快的磨损。这种状态称之为边界润滑状态。若油膜太厚,表面张力不足以抵抗油液的压力,油膜外缘的弯曲液将受损,引起泄漏,即产生内泄漏。

这种油膜厚度受很多因素影响,如偶合面相对速度、密封件与偶合面的摩擦力、流体的黏度,表面接触应力,表面的粗糙度等。

一般说来,若油膜厚度小于 $0.25\mu\text{m}$, 则间隙之间的润滑油膜可能受到破坏。摩擦因数和相对速度、油膜厚度之间关系如图 1.6 所示。

随着相对速度增加,油液运动的动力使油膜厚度增加,其厚度可达 $0.25 \sim 2.5\mu\text{m}$, 形成油膜润滑,摩擦力迅速降低。随着相对速度增加,黏性摩擦力亦增大,如图 1.6 所示。当然,无论设计者还是使用者都希望处于图中曲线最低部分。

尽管油膜厚度受许多因素影响,很难找出油膜

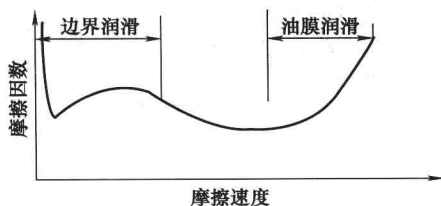


图 1.6 运动速度与摩擦的关系

厚度综合各种因素的计算公式。但实验表明：当表面粗糙度过低，即表面光洁度太高时，表面粗糙度波峰高小于 $0.11\mu\text{m}$ ，则不易形成油膜。而理想的粗糙度值 $Ra0.16\sim0.40\mu\text{m}$ ，亦可提高到 $Ra0.25\sim0.63\mu\text{m}$ ，则动密封中密封件的密封面之间油膜厚度在 $0.25\sim2.5\mu\text{m}$ 为宜。

摩擦不但影响油膜厚度，而且也影响其他方面。对于动密封摩擦是无法避免的，因为密封面与密封面必然存在相对运动，有相对运动就会产生摩擦。摩擦给密封件带来磨损，破坏密封件，降低了密封件的有效密封性，实际就缩短了密封件使用寿命，同时摩擦热又会导致橡胶材料等密封件加速老化，会导致它提前失效，即缩短密封件的使用期限，同时摩擦热会明显降低摩擦部位液压油的黏度，黏度降低直接导致泄漏量增加，破坏润滑油膜，反之又加剧密封件的磨损，同时摩擦亦是有害的负荷，对液压缸来说就降低了它的输出力，增加液压缸最低启动压力。液压缸在低速运行时，往往因为摩擦力的存在，而产生爬行现象。摩擦有这么多的影响，就应当注意减少因密封所带来摩擦的影响。可是摩擦又与多种因素有关，如与润滑液、摩擦表面粗糙度、材料、相对运动速度、流体介质的压力等。弄清这些关系，就可以减少摩擦影响，提高密封质量延长有效密封时间。如无润滑液干摩擦副的干摩擦因数可以达到有润滑液摩擦因数的 10 倍，摩擦副表面粗糙度低（光洁度高）就可以减轻摩擦，从而也就降低密封件磨损。如以三种不同方法加工典型的同结构尺寸的液压缸，在 25MPa 压力做十万次工作循环试验，测试密封磨损与表面粗糙度的关系，假设以无明显磨损为零，磨损失效为 10，在此间分 10 个摩擦等级，如图 1.7，此外，偶合面（密封表面）粗糙度不但影响着磨损，同时影响泄漏量，泄漏量与表面粗糙度、相对速度关系见图 1.8。图 1.7 与图 1.8 充分说明合适的粗糙度对密封寿命与动密封的泄漏量都有较大的影响。

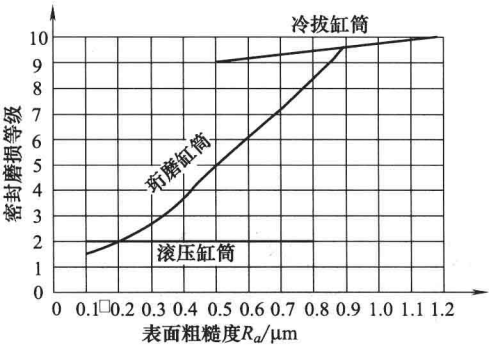
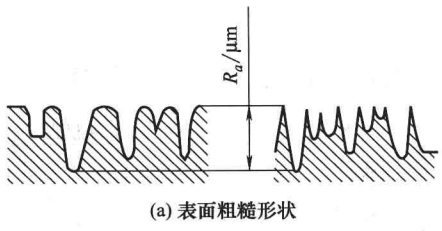


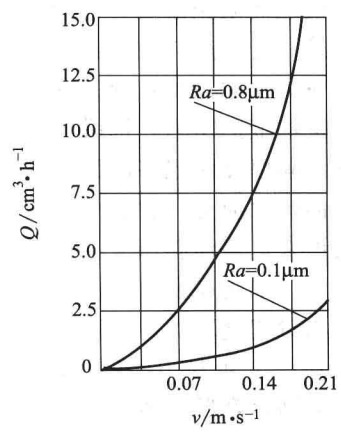
图 1.7 表面粗糙度与磨损的关系

密封的泄漏量都有较大的影响。

摩擦磨损还与组成摩擦副材料的摩擦因数有关，见表 1.1。



(a) 表面粗糙形状



(b) 泄漏量与粗糙度和运动速度的关系

图 1.8 表面粗糙度形状、粗糙度、泄漏量、运动速度的关系

表 1.1 常用摩擦副材料的摩擦因数

摩擦副材料	摩擦因数		摩擦副材料	摩擦因数	
	无润滑剂	有润滑剂		无润滑剂	有润滑剂
钢-钢	0.15 ^①	0.1~0.12 ^①	黄铜-硬橡胶	0.25	
	0.1	0.05~0.1	黄铜-钢	0.3	0.02
钢-软钢	0.2	0.1~0.2	青铜-黄铜	0.16	
钢-不淬火的 T8 钢	0.15	0.03	青铜-青铜	0.15~0.2	0.04~0.1
钢-铸铁	0.2~0.3 ^①	0.05~0.15	青铜-钢	0.16	
	0.16~0.18		青铜-夹布胶木	0.23	
钢-黄铜	0.19	0.03	青铜-树脂	0.21	
钢-青铜	0.15~0.18	0.1~0.15 ^①	青铜-硬橡胶	0.36	
		0.07	青铜-石板	0.33	
钢-铝	0.17	0.02	铝-黄铜	0.27	0.2
钢-轴承合金	0.2	0.04	铝-青铜	0.22	
钢-夹布胶布	0.22		铝-钢	0.3	0.2
钢-冰	0.027 ^①		铝-夹布胶木	0.26	
	0.014		硅铝合金-夹布胶木	0.34	
石棉基材料-铸铁或钢	0.25~0.4	0.08~0.12	硅铝合金-树脂	0.28	
皮革-铸铁或钢	0.3~0.5	0.12~0.15	硅铝合金-硬橡胶	0.25	
硬木-铸铁或钢	0.2~0.35	0.12~0.16	硅铝合金-石板	0.26	
软木-铸铁或钢	0.3~0.5	0.15~0.25	钢-粉末冶金材料	0.35~0.55 ^①	0.1 ^①
毛毡-铸铁或钢	0.22	0.18	木材-木材	0.4~0.6 ^①	0.1 ^①
软钢-铸铁	0.2	0.05~0.15		0.2~0.5	0.07~0.1
	0.18		0.5~0.8 ^①		
软钢-青铜	0.2	0.07~0.15	麻绳-木材	0.5	
	0.18			45 钢淬火-聚甲醛	0.46
铸铁-铸铁	0.15	0.15~0.16 ^①	45 钢淬火-聚碳酸酯	0.3	0.03
		0.07~0.12	45 钢淬火-尼龙 9 (加 3%MoS ₂ 填充料)	0.57	0.02
铸铁-青铜	0.28 ^①	0.16 ^①	45 钢淬火-尼龙 9 (加 30%玻璃纤维填充料)	0.48	0.023
	0.15~0.21	0.07~0.15	45 钢淬火-尼龙 1010 (加 30%玻璃纤维填充料)	0.089	
铸铁-皮革	0.55 ^①	0.15 ^①	45 钢淬火-尼龙 1010 (加 40%玻璃纤维填充料)	0.07	
	0.28	0.12	45 钢淬火-氯化聚醚	0.35	0.034
铸铁-橡胶	0.8	0.5	45 钢淬火-苯乙烯- 丁二烯-丙烯腈共聚物	0.35~0.46	0.018
皮革-木材	0.4~0.5 ^①				
	0.03~0.05				
铜-铜	0.2				
黄铜-黄铜	0.17	0.02			

① 静摩擦因数。

注：表中未注明者均为滑动摩擦因数。

一般来说石油基液压油较其他液流体介质更具润滑性，在同等条件下，易形成润滑油膜；液流体压力越高，在同等条件下，摩擦副面的摩擦力大，磨损较快。

(3) 密封过程

密封过程一般分为四个阶段或四个区，见图 1.9。

① 亚密封阶段（区）当液压系统启动工作，压力在较低范围内工作时，此时液压油通