



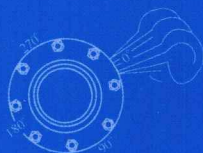
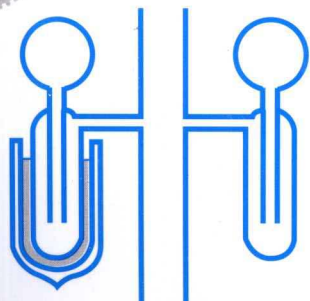
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

# 密封技术

第二版

MIFENG  
JISHU

魏龙 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 密封技术

第二版

魏 龙 主编

张红光 主审



化学工业出版社

·北京·

密封件是机械设备的重要零部件。本书从实用性出发,全面系统地介绍了工业常用密封技术的主要内容和最新进展,重点阐述了垫片密封、填料密封、机械密封、非接触型密封、注剂式带压密封等的基本概念、基本理论、结构形式、密封特性、材料、使用维护和故障处理等基本知识,并简要介绍了泄漏检测技术。

本书引用与密封技术相关的最新标准,内容新颖、文字简练、通俗易懂、实用性强。

本书可作为高等职业技术学院和中等职业技术学校的专业教材以及工程技术人员的培训教材,也可供从事密封设计、制造、维护、管理等工作的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

密封技术/魏龙主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2009.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-06735-7

I. 密… II. 魏… III. 密封-技术-高等学校-教材 IV. TB42

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第176316号

---

责任编辑:高钰

装帧设计:尹琳琳

责任校对:徐贞珍

---

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)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 $\frac{3}{4}$  字数339千字 2010年1月北京第2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:24.00元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

密封是与经济发展和环境保护密切相关的问题。发展和环境已成为当今经济社会的两大主题。在发展经济的同时,必须充分考虑对环境的影响,这已形成广泛的共识。随着对环境问题的日益重视、环境观念的日益深入人心,环境保护的法规不断加强和完善,与环境保护相关的技术和产业得到了迅速发展,并具有非常广阔的发展空间。理所当然,作为与环境保护直接有关的流体密封技术,已应用到各个领域,受到了世界各国的广泛重视。随着科学技术发展,密封技术得到长足的进步。密封技术的进步,不仅对环境保护起到了良好的促进作用,而且降低了企业的成本,节约了资源和能源,提高了企业的效益,促进了经济的发展。

《密封技术》教材是为化工装备技术、机电设备维修与管理、热能动力设备与应用、制冷与空调技术等专业学生掌握密封技术方面的知识和技能而编写的。自2004年出版以来,已多次印刷,受到不少读者和同行的支持和鼓励,并提供了宝贵意见。近年来,密封技术有了新的进展,国家和行业的相关标准大多也已更新。因此,在本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材再版时,基本上维持了原有的体系和结构,对内容进行了修改、更新和完善。

本次修订的主要内容如下。

1. 在每章后,增加了复习思考题。
2. 按国家和行业颁布的最新标准更新或修改了相关内容。
3. 在垫片密封一章中增加了垫片密封失效分析的内容。
4. 在填料密封一章中对软填料密封的改进措施和泵用软填料的安装进行了较大的修改,并增加了软填料保管的内容。
5. 在机械密封一章中对机械密封零件的检修进行了较大的修改,并增加了机械密封的失效分析方法、机械密封失效的诊断检查、根据密封端面磨损痕迹分析失效原因及安装、运转等引起的故障分析等内容。
6. 在非接触型密封一章中增加了螺旋密封的气吞现象和密封破坏现象的内容。
7. 对附录一常用密封标准目录进行了较大的修改。

本书配有电子课件,如有需要,发送邮件至 [cipedu@163.com](mailto:cipedu@163.com) 免费获取。

本书除适用于化工装备技术、机电设备维修与管理、热能动力设备与应用、制冷与空调技术等专业作为教材外,还可用于工程技术人员的培训教材,也可供从事密封设计、制造、维护、管理等工作的技术人员参考。

魏龙修订了绪论、第二、三、五、六章及附录,冯秀修订了第一章并编写了各章的复习思考题,杜存臣修订了第四章。全书由魏龙统稿,张红光主审。本书在修订过程中得到了孙见君、冯飞、蒋李斌、黄建等的大力帮助,在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的水平,疏漏和不妥之处在所难免,恳请广大师生和读者批评指正。

编者

2009年8月

# 第一版前言

过程工业中使用的机器设备普遍存在着泄漏问题。一个密封装置不可能不存在泄漏。事实证明,密封装置的泄漏只是或多或少,或重或轻而已。泄漏会造成能源的浪费、物料的流失、产品质量的下降、设备的损坏、环境的污染,从而损害工作人员的健康,甚至会酿成火灾、引起爆炸、造成停产、直接危及人身安全,带来巨大经济损失。密封件虽然不大,只是个零部件,但却能决定机器设备的安全性、可靠性和耐久性,特别是石油化工企业,处理的大多是具有腐蚀性或易燃、易爆和有毒介质,而且通常有较高的压力和温度,一旦泄漏,引起重大安全事故,造成的危害就更大。

经统计,在日常的机器设备使用和维修中,对于机泵几乎40%~50%的工作量是用于轴封的维修。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密封问题。

密封技术随着石油化工、热能与动力、轻工、原子能等工业和宇航技术的发展,变得越来越重要。正是由于密封的普遍性和重要性,近一个世纪来,已形成一门研究密封规律、密封装置设计和使用科学原理的新学科,称为“密封学”。密封在工程上也已发展成为一项专门的技术——密封技术。

密封技术课程的主要任务是使学生掌握有关常用密封技术的基本概念、基本理论和基本知识,以及密封故障的分析、密封件的安装、维修和改进。注重理论与实际相结合,着重培养学生分析和解决工厂实际问题的能力。为学生将来从事专业的常规技术和管理工作打好基础。

本书从实用性出发,全面系统地介绍了过程工业常用密封技术的主要内容和最新进展。重点阐述了垫片密封、填料密封、机械密封、非接触型密封、注剂式带压堵漏等的基本概念、基本理论、结构形式、密封特性、材料、使用维护和故障处理等基本知识,并简要介绍了泄漏检测技术。

本书引用与密封技术相关的最新标准,内容新颖、文字简练、通俗易懂、实用性强,可作为高等职业技术学院和中等职业技术学校的专业教材,以及工程技术人员的培训教材,亦可供从事密封设计、制造、维护、管理等工作的技术人员参考。

本书由魏龙、杜存臣、罗俊和隋博远共同编写。魏龙编写了绪论、第三章及附录,杜存臣编写了第四章,罗俊编写了第二章与第五章,隋博远编写了第一章与第六章。魏龙任主编。

张红光副教授在百忙中抽出时间,主审了本书,并为全书的修改提出了不少宝贵意见;本书在编写过程中得到了孙见君、王绍良、颜惠庚、朱方鸣、赵玉奇等的指导,编者所在学校也给予了大力支持,在此一并表示由衷的谢意。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2004年5月

# 目 录

绪论 .....	1
一、密封技术的重要性 .....	1
二、密封机理与方法 .....	1
三、密封的种类及其适用范围 .....	2
四、密封的主要指标和质量比较准则 .....	4
复习思考题 .....	5
<b>第一章 垫片密封 .....</b>	<b>6</b>
第一节 中低压设备和管道的垫片密封 .....	6
一、垫片密封的原理和结构 .....	6
二、垫片的种类及适用范围 .....	9
三、垫片的选择 .....	13
四、垫片的保管及安装技术 .....	15
五、垫片密封的失效分析 .....	17
第二节 高压设备的密封 .....	18
一、强制式密封 .....	19
二、自紧式密封 .....	21
三、高压管道密封 .....	24
复习思考题 .....	25
<b>第二章 填料密封 .....</b>	<b>26</b>
第一节 软填料密封 .....	26
一、基本结构及密封原理 .....	26
二、主要参数 .....	28
三、密封材料的选择 .....	31
四、软填料密封存在的问题与改进 .....	34
五、软填料密封的安装、使用与保管 .....	40
第二节 硬填料密封 .....	45
一、活塞环 .....	45
二、活塞杆填料密封 .....	51
三、无油润滑活塞环、支承环及填料 .....	55
第三节 成型填料密封及油封 .....	60
一、成型填料密封 .....	60
二、油封 .....	72
复习思考题 .....	76
<b>第三章 机械密封 .....</b>	<b>77</b>

第一节 机械密封的基本原理 .....	77
一、机械密封的基本结构、作用原理和特点 .....	77
二、机械密封的分类 .....	78
三、机械密封端面摩擦机理及摩擦状态 .....	83
四、机械密封的主要性能参数 .....	86
第二节 机械密封的主要零件及材料 .....	92
一、主要零件的结构形式 .....	92
二、主要零件尺寸确定 .....	96
三、机械密封常用材料及选择 .....	98
第三节 机械密封的典型结构与循环保护系统 .....	103
一、典型结构 .....	103
二、循环保护系统 .....	114
第四节 机械密封的选择、使用及维修 .....	119
一、机械密封的选择 .....	119
二、机械密封的保管 .....	122
三、机械密封的安装 .....	122
四、机械密封的运转 .....	125
五、机械密封的维修 .....	125
第五节 机械密封的失效及分析 .....	127
一、密封失效的定义及外部症状 .....	128
二、机械密封的失效形式 .....	129
三、机械密封的失效分析方法 .....	131
四、机械密封失效的诊断检查 .....	133
五、根据密封端面磨损痕迹分析失效原因 .....	135
六、安装、运转等引起的故障分析 .....	139
七、机械密封失效典型实例分析 .....	140
复习思考题 .....	145
<b>第四章 非接触型密封 .....</b>	<b>146</b>
第一节 间隙密封 .....	146
一、密封环 .....	146
二、套筒密封 .....	147
第二节 迷宫密封 .....	147
一、结构形式和工作原理 .....	147
二、主要尺寸参数及材料 .....	149
第三节 浮环密封 .....	150
一、工作原理及特点 .....	150
二、结构形式 .....	152
三、结构要求、尺寸、技术要求及材料 .....	153

四、封油系统	154
第四节 动力密封	156
一、离心密封	156
二、螺旋密封	161
三、停车密封	166
第五节 磁流体密封	169
一、磁流体	169
二、磁流体密封工作原理及特点	170
三、磁流体密封的应用	173
第六节 全封闭密封	174
一、全封闭密封的原理	174
二、密闭式机泵	174
三、隔膜传动	174
四、磁力传动	175
复习思考题	177
<b>第五章 注剂式带压密封</b>	<b>178</b>
第一节 基本原理和方法	179
一、基本原理	179
二、带压密封所用的注剂工器具	180
三、密封方法	180
第二节 密封注剂	184
一、密封注剂的品种与性能	184
二、密封注剂的选用	185
三、密封注剂的使用方法	186
第三节 带压密封的安全施工	186
一、施工中的受力影响	186
二、安全施工注意事项	187
复习思考题	187
<b>第六章 泄漏检测技术简介</b>	<b>188</b>
第一节 检漏方法的分类	188
一、检漏的概念	188
二、检漏方法的分类	188
第二节 常用的检漏方法及选择	188
一、常用的检漏方法	188
二、检漏方法的选择	192
复习思考题	193
<b>附录一 常用密封标准目录（中国）</b>	<b>194</b>



附录二 垫片密封常见故障、原因与纠正措施.....	202
附录三 填料密封常见故障、原因与纠正措施.....	203
附录四 机械密封常用材料性能及组合示例 .....	208
参考文献 .....	212

# 绪 论

## 一、密封技术的重要性

过程工业中使用的机器设备普遍设有密封装置，但存在着泄漏问题。事实证明，密封装置的泄漏只是或多或少，或重或轻而已。泄漏会造成能源的浪费、物料的流失、产品质量的下降、设备的损坏、环境的污染，从而损害工作人员的健康，甚至会酿成火灾、引起爆炸、造成停产、直接危及人身安全，带来巨大经济损失。密封件虽然不大，只是个零部件，但却能决定机器设备的安全性、可靠性和耐久性，特别是石油化工企业，处理的大多是具有腐蚀性或易燃、易爆和有毒介质，而且通常有较高的压力和温度，一旦泄漏，引起重大安全事故，造成的危害就更大。据国外报道，在化工和石油化工等大型流程企业中，发生事故的前十大原因中，泄漏引发的事故排在首位。日本炼油行业的燃烧爆炸事故调查结果表明，其灾难性事故 70% 以上是由于泄漏造成的。世界范围内，每年因密封意外失效导致的直接经济损失高达几十亿美元。

1984 年 12 月 3 日，美国联合碳化物公司设在印度的博帕尔农药厂异氰甲酸酯储罐发生泄漏，造成 3000 多人死亡，12.5 万人中毒，其中失明 5 万人，印度最高法院裁定由该公司赔偿损失 4.7 亿美元。1986 年 1 月 28 日，美国“挑战者”号航天飞机升空后不久爆炸，造成这场航天史上最大悲剧的主要原因是左侧火箭助推器连接处 O 形环密封圈失效引起的泄漏。就是这小小的密封圈，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。同年 4 月 26 日子夜，前苏联切尔诺贝利核电站 4 号核反应堆发生核泄漏事故，死 31 人，伤 300 人，使 20 多个欧洲国家，4 亿多人受放射性污染，核辐射的后患迄今未绝。

经统计，在日常的机器设备使用和维修中，对于机泵几乎 40%~50% 的工作量是用于轴封的维修。离心泵的维修费大约有 70% 是用于处理密封故障。在离心式压缩机失效原因中，润滑和密封系统的故障占 55%~60%，密封系统占机组价格的 20%~40%。美国的密封技术工作者认为，由于开发密封技术，仅汽轮机一项，每年节约能源费用三亿美元。全世界轴承年销售额为 90 多亿美元，其中 90% 的轴承都未达到设计寿命，而在轴承早期失效原因中，有 75% 是由于油封失效，仅此一项就花掉 60 多亿美元。

因此，防止机器设备的泄漏对工业生产来说是必须解决的关键问题之一。正是由于密封的普遍性和重要性，近一个世纪来，已形成一门研究密封规律、密封装置设计和使用科学原理的新学科，称为“密封学”。密封在工程上也已发展成为一项专门的技术——密封技术。

## 二、密封机理与方法

能够防止或减少泄漏的装置一般称为密封。装置中起密封作用的零部件称为密封件。密封装置可以由几个零部件组成，也可以附带各种辅助系统，这里统称为密封装置。

### 1. 密封机理

所谓泄漏，就是流体通过密封面由一侧传递到另一侧。被密封的介质往往是以界面泄漏、渗漏或扩散的形式通过密封件泄漏的。

(1) 界面泄漏。通常将通过密封面间隙的泄漏称之为界面泄漏。此时被密封流体在密封件两侧压力差  $\Delta p$  作用下通过宏观或微观的缝隙  $h$  泄漏, 因此界面泄漏是单向泄漏。

(2) 渗漏。在密封件两侧压力差作用下, 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。

(3) 扩散。在浓度差的作用下, 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。介质通过密封件的扩散泄漏可分成三个阶段: 密封件吸收液(气)体; 介质通过密封件的扩散; 介质从密封件的另一侧析出。扩散过程是双向进行的, 扩散作用的介质泄漏量要比其他两类泄漏量小得多。

综上所述, 造成泄漏的原因, 一是密封连接处有间隙(包括宏观间隙或微观间隙); 二是密封连接处两侧存在压力差或浓度差。消除或减少任一因素都可以阻止或减少泄漏。就一般设备而言, 减小或消除间隙是阻止泄漏的主要途径。

## 2. 密封方法

密封装置所要解决的问题就是设法防止或减少泄漏, 方法有很多, 目前的密封方法大致可归纳为以下几种。

(1) 尽量减少设置密封的部位。这一点对处理易燃、有毒、强腐蚀介质尤为重要。例如, 当可以同时选择单级单吸和单级双吸离心泵输送上述物料时, 则宜用前者, 因为单吸离心泵比双吸离心泵少一处密封。

(2) 堵塞或隔离。静密封采用的各种密封垫、密封胶、胶黏剂就属于这一类。对于动密封, 泄漏主要发生在高低压相联通且具有相对运动的部位, 由于有相对运动, 则必然存在间隙。设法把间隙堵塞住, 即可做到防止或减少泄漏, 软填料密封属于这一类。隔离泄漏通道, 就是在泄漏通道中设置障碍, 使通道切断(泄漏亦被切断), 机械密封、油封等接触式密封都属于这一类。

(3) 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)。

(4) 增加泄漏通道中的阻力。流体在通道中作泄漏流动时, 会遇到阻力。阻力的大小与通道两端的压差、通道的长短、壁面的粗糙度以及通道中是否开槽(突然扩大、突然缩小)等有关。因此, 在同样的压差下, 可把通道加设很多齿, 或开各式沟槽, 以增加泄漏时流体的阻力, 从而阻止或减少泄漏。如迷宫密封、间隙密封等。

(5) 在通道中增设做功元件。因加设做功元件, 工作时做功元件对泄漏液造成反压力, 与引起泄漏的压差部分抵消或完全平衡(大小相等, 方向相反), 以阻止介质泄漏。离心密封、螺旋密封即属于这一类。

(6) 几种密封方法的组合。把两种或两种以上密封组合在一起来达到密封。例如填料-迷宫、螺旋-填料、迷宫-浮环密封等。

(7) 其他新型密封, 如磁流体密封, 封闭式密封、刷式密封、指尖密封等。

## 三、密封的种类及其适用范围

密封技术几乎涉及各个工业部门, 密封种类很多, 工作原理各不相同, 大致可分为两大类: 静密封和动密封。静密封是指两个相对静止的零件的接合面之间的密封, 如各种容器、设备和管道法兰接合面间的密封, 阀门的阀座、阀体以及各种机器的机壳接合面间的密封等; 动密封是指两个相对运动的零件的接合面之间的密封, 如阀门的阀杆与填料函, 泵、压

缩机等的螺旋杆、旋转轴或往复杆与机体之间的密封等。

表 0-1 动密封的种类与适用范围

种类		真空(绝压) /MPa	压力(表 压)/MPa	工作温度 /℃	线速度 /(m/s)	泄漏率 /(mL/h)	使用期限	应用举例	
接 触 型	软填料密封	$1.33 \times 10^{-3}$	31.38	-240~600	20	10~1000	—	清水离心泵、柱 塞泵、阀杆密封	
	成型 填料	挤压型	$1.33 \times 10^{-7}$	98.07	-45~230	10	0.001~0.1	6个月~1年	液压缸
		唇形	$1.33 \times 10^{-9}$						
	橡胶 油封	油封	—	0.29	-30~150	12	0.1~10	3~6个月	轴承封油与防尘
		防尘油封							
	硬填料 密封	往复	—	294.2	-45~400 <sup>①</sup>	—	—	3个月~1年	活塞及活塞杆 密封
		旋转						6个月~1年	航空发动机主轴 承封油
	胀圈 密封	往复	$1.33 \times 10^{-3}$	300	—	12	0.2%~1% 吸气容积	3~6个月	汽油机、柴油机、 压缩机、液压缸、航 空发动机主轴承 封油
		旋转		0.2					
	机 械 密 封	普通型	$1.33 \times 10^{-7}$	7.85	-196~400 <sup>①</sup>	30	0.1~150	6个月~1年	化工、电厂、炼油 厂用离心泵
液膜		—	31.38	30~150	30~100	—	1年以上	大型泵、透平压 缩机	
			1.96	不限	不限	—		航空发动机、透 平压缩机	
气膜	—	1.96	不限	不限	不限	—	—		
迷宫密封		$1.33 \times 10^{-5}$	19.61	600	不限	大	3年以上	蒸汽透平、燃气 透平、活塞压缩机	
间 隙 密 封	液膜浮环	—	31.38	—	80	内漏<8300	1年以上	泵、化工透平	
	气体浮环		0.98	-30~150	70		1年左右	制氧机	
	套筒密封		980.7	-30~100	2			油泵,高压泵	
动 力 密 封	离 心 密 封	副叶轮	$1.33 \times 10^{-3}$	0.25	0~50	30	—	1年以上	矿浆泵
		甩油环	—	0	不限	不限	—	非易损件	轴承封油与防尘
	螺 旋 密 封	螺旋密封	$1.33 \times 10^{-3}$	2.45	-30~100	30	—	取决于轴 承寿命	轴承封油、鼓风 机封油
		螺旋迷 宫密封	—			70			锅炉给水泵辅助 密封
	其 他	磁流体 密封	$1.33 \times 10^{-13}$	4.12	-50~90	70	—	—	—
封闭式 密封									

① 凡使用橡胶件者,适用温度同成型填料。

静密封主要有垫片密封、直接接触密封和胶密封三大类。根据工作压力,静密封又可分为中低压静密封和高压静密封,中低压静密封常用材质较软、垫片较宽的垫密封,高压静密封则用材料较硬、接触宽度很窄的金属垫片。胶密封主要是指液体密封胶。

动密封根据运动件相对机体的运动方式分为往复密封和旋转密封两种基本类型。按密封件与其作相对运动的零部件是否接触,可分为接触型和非接触型密封两大类。一般说来,接触型密封可以消除间隙或使间隙为最小值,可达到很高的密封性,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。因受摩擦、磨损限制,接触型密封适用于密封面线速度较低场合;而非接触型密封的密封件不直接接触,因而无摩擦和

磨损，密封件工作寿命长，可适用于较高的线速度。各类动密封的大致适用范围如表 0-1 所示。

#### 四、密封的主要指标和质量比较准则

衡量密封性能好坏的主要指标是泄漏率、寿命和使用条件（压力  $p$ 、线速度  $v$ 、温度  $t$ ）。目前流体密封能达到的单项最高技术指标列于表 0-2 中。由此可以粗略地反映目前的密封技术水平。

表 0-2 流体密封的单项最高技术指标

项 目	动 密 封	静 密 封
压力(或真空) $p$	$10^{-10}$ mmHg~ $10^3$ MPa	$10^{-1}$ mmHg~ $10^4$ MPa
温度 $t$	-240~600℃	-240~900℃
周速 $v$	接触式密封<150m/s	—
泄漏率 $q$	0.1mL/h	—
寿命 $L$	10 年	—

注：1mmHg=133.322Pa。

当出现流体泄漏时，常用“密封度”来比较或评价密封的有效性。密封度用被密封流体在单位时间内通过密封面的体积或质量的泄漏量（也有考虑单位密封周边或直径的），即泄漏率来表示。因此，往往将泄漏量为零，说成为“零泄漏”。虽然理论上静密封可能做到零泄漏，实际上要做到零泄漏不仅技术上特别困难，而且出于经济考虑，只是对非常昂贵、有毒、腐蚀或易燃易爆的流体才要求将泄漏量降低到最低限度。事实上，泄漏量为“零”只是相对某种测量泄漏仪器的极限灵敏度而言，不同的测量方法和仪器的灵敏度范围不同。“零”泄漏只是超越了仪器可分辨的最低泄漏量，即难以觉察出来的很微量的泄漏。因此密封度是一个相对的概念，保证机器设备没有泄漏应指密封装置能有效地满足设计或生产所允许（规定）的泄漏率，称为“允许泄漏率”。允许泄漏率应根据具体情况决定，没有统一的规定，例如国内对机械密封的允许液体泄漏率规定为：当轴（或轴套）外径大于 50mm 时，泄漏率不大于 5mL/h；当轴（或轴套）外径不大于 50mm 时，泄漏率不大于 3mL/h。有时出于按泄漏率大小对密封件进行质量评定的需要，例如对于法兰连接用的垫片密封，采用目测的分级准则如表 0-3 所示，它基本是定性的方法；而美国压力容器研究委员会（PVRC）则按质量泄漏率分为五个密封度级别，即  $T_1 \leq 2 \times 10^{-1}$  mg/(s·mm)， $T_2 \leq 2 \times 10^{-3}$  mg/(s·mm)， $T_3 \leq 2 \times 10^{-5}$  mg/(s·mm)， $T_4 \leq 2 \times 10^{-7}$  mg/(s·mm)， $T_5 \leq 2 \times 10^{-9}$  mg/(s·mm)。

表 0-3 泄漏的目测分级与定义

泄漏级别	定 义	泄漏级别	定 义
0	无泄漏迹象	4	形成滴珠且沿垫片周边以 5min 或更长时间滴漏 1 滴
1	可目视或手感湿气(冒汗),但没有形成滴珠		
2	局部有滴珠形成	5	以 5min 或更短时间滴漏 1 滴
3	沿整个垫片周边有滴珠形成	6	形成线状滴漏

注：1 滴液体的体积约为 0.05cm<sup>3</sup>，即形成 1cm<sup>3</sup> 大约需要 20 滴液体。

在化工厂中，还存在大量只凭听、看直觉不能发现的易挥发有机化合物从接头处“逸出”。因其泄漏量非常小，通常要用敏感的气体检漏仪，如有机蒸气分析仪测量逸出气体的

体积浓度，以百万分率表示。随着现代工业装置的大型化和国家或地区对环境保护要求更趋严格，一些工业发达国家已把控制“逸出”问题提到日程上，提出了“零逸出”的新概念，即将允许泄漏率控制到 $10^{-6}$ （体积分数）量级，例如目前美国炼油厂把 $10000 \times 10^{-6}$ 作为零逸出水平，而化工厂则对阀门和法兰规定为 $500 \times 10^{-6}$ ，机器（如泵，压缩机）为 $1000 \times 10^{-6}$ ；在美国某些地方新的规定将阀门、法兰、抽样系统和压力释放阀的逸出限制在 $100 \times 10^{-6}$ ，对泵和压缩机为 $500 \times 10^{-6}$ 。

### 复习思考题

- 0-1 什么是泄漏？
- 0-2 泄漏形式主要有哪几种？它们之间主要异同点是什么？
- 0-3 产生泄漏主要原因是什么？
- 0-4 简述目前密封的主要方法。
- 0-5 密封大致可以分为哪几类，它们定义分别是什么？
- 0-6 衡量密封性能好坏的主要指标有哪些？

# 第一章 垫片密封

垫片密封是过程工业装置中压力容器、工艺设备、动力机器和连接管道等可拆连接处最主要的静密封形式。它们所处的工况条件十分复杂，包含的流体介质范围相当广泛，防止液体或气体通过这些连接处泄漏出来，是工厂面对的最重要也是最困难的任务。虽然法兰连接接头与泵轴、阀杆、搅拌器等密封相比，其泄漏量不及它们大，但法兰连接接头的数量则比它们多得多，因此它们成为过程装备泄漏的主要来源。泄漏带来的环境污染、产品损失，使垫片密封的重要性不言而喻。由于它们通常采用螺栓法兰连接结构，因此装配时要将螺栓预紧到足以达到初步密封的要求，而精确地控制预紧水平恰恰是一个十分棘手的问题；其次，这一结构中的垫片更是一个受很多因素影响的密封元件。

垫片的应用范围极其广泛，垫片需要的预紧载荷也各不相同，如低压水泵薄法兰用的垫片需要的压紧载荷较低，而压力容器和管道法兰垫片，需要较大的压紧载荷和刚性较好的连接结构。对后者通常有标准可查，相对于特殊要求的垫片密封，没有标准的连接尺寸，如法兰厚度、螺栓尺寸、螺栓间距等，这就需要考虑专门的设计。

按照过程装备和管道所承受的压力的不同，垫片材料的结构、形式、要求也不尽相同，本章在内容安排上将分别介绍中低压（工作压力 $\leq 10\text{MPa}$ ）和高压设备与管道的垫片密封。

## 第一节 中低压设备和管道的垫片密封

### 一、垫片密封的原理和结构

垫片是一种夹持在两个独立连接件之间的材料或材料的组合，其作用是在预定的使用寿命内，保持两个连接件间的密封。垫片必须能够密封结合面，使密封介质不渗透和不被密封介质腐蚀，并能经受温度和压力等的作用。

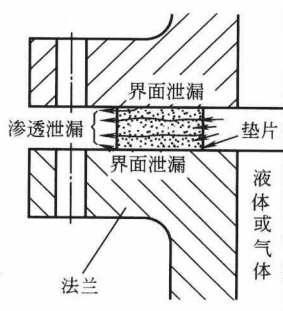


图 1-1 垫片泄漏形式

就垫片密封而言，通常密封流体在垫片结合处的泄漏情况如图 1-1 所示。

一是两连接表面（即密封面），从机械加工的微观纹理来看存在粗糙度和变形，它们与垫片之间总是存在泄漏通道，由此产生的流体泄漏称为界面泄漏，其泄漏量占总泄漏量的 80%~90%。

二是对非金属材料而言，从材料的微观结构来看，本身存在微小缝隙或细微的毛细管，具有一定压力的流体自然容易通过它们渗透出来，此称为渗透泄漏，它占总泄漏量的 10%~20%。

当夹紧垫片的总载荷因各种原因减少到几乎等于作用在连接件端部的流体静压力，导致了密封面的分离。这时若增加密封面的压力，则对于机械完整性很差的垫片，如操作期间材

料发生劣化，则沿垫片径向作用的流体压力会将其撕裂，引起密封流体的大量泄漏，此被称为吹出泄漏，它属于一种事故性泄漏。

对于渗透泄漏通常可采用不同材料的复合或机械组合形成不渗透性结构，或者使用较大的夹紧力使材料更加密实，减少以至消除泄漏；而对于界面泄漏和事故性泄漏与垫片材料的性质、接头的机械特征、密封面的性质与状态、密封流体的特性以及紧固件夹紧程度有关。它们也是解决垫片密封设计、安装、使用以及失效分析等问题的关键。

### 1. 垫片密封的原理

垫片密封是靠外力压紧密封垫片，使其本身发生弹性或塑性变形，以填满密封面上的微观凹凸不平来实现密封。也就是利用密封面上的比压使介质通过密封面的阻力大于密封面两侧的介质压力差来实现密封。它包括初始密封和工作密封两部分。

(1) 初始密封。即垫片用于对两个连接件密封面产生初始装配密封和保持工作密封。在理论上，如果密封面完全光滑、平行，并有足够的刚度，它们可直接用紧固件夹持在一起，不用垫片即可达到密封的目的（即直接接触密封）。但在实际生产中，连接件的两个密封面上存在粗糙度，也不是绝对平行的，刚度也是有限的，加上紧固件的韧性不同及分散排列，因此垫片接受的载荷是不均匀的，为弥补不均匀的载荷和相应变形，在两连接密封面间插入一垫片，使之适应密封面的不规则性，以达到密封的目的。显然，产生初始密封的基本要求是使垫片压缩，在密封面间产生足够的压紧力，即垫片预紧应力（也称初始密封比压），以阻止介质通过垫片本身的渗漏，同时保证垫片对连接件有较大的适应性，即垫片压缩后产生弹性或塑性变形，能够填塞密封面的变形及其表面粗糙而出现的微观凹凸不平，以堵塞介质泄漏的通道。

(2) 工作密封。当初始垫片应力加在垫片上之后，它必须在装置的设计寿命内保持足够的压紧应力，以维持允许的密封度。因为当接头受到流体压力作用时，密封面将被迫发生分离，此时要求垫片能释放出足够的弹性应变能，以弥补这一分离量，并且留下足以保持密封所需要的工作（残留）垫片应力。此外，这一弹性应变能还要补偿装置在长期运行过程中，任何可能发生的垫片应力的松弛。因为各种垫片材料在长期的应力作用下，都会发生不同程度的应力降低。此外，接头不均匀的热变形，例如连接件与紧固件材料的不同，热膨胀系数不同，引起各自的热膨胀量不同，导致垫片应力的降低或升高；或者紧固件因受热引起应力松弛而减少作用在密封垫片上应力等。

综上所述，任何形式的垫片密封，首先要在连接件的密封面与垫片表面之间产生一种垫片预紧力，其大小与装配垫片时的“预紧压缩量”以及垫片材料的弹性模量等有关，而其分布状况与垫片截面的几何形状有关。从理论上说，垫片预紧应力愈大，垫片中贮存的弹性应变能也愈大，因而可用于补偿分离或松弛的余地也就愈大，当然要以密封材料本身最大弹性变形能力为极限。就实际使用而言，垫片预紧应力的合理取值取决于密封材料与结构、密封要求、环境因素、使用寿命及经济性等。

### 2. 垫片密封的结构

典型的垫片密封结构，一般由连接件、垫片和紧固件等组成。垫片工作正常或失效与否，除了取决于设计选用的垫片本身性能外，还取决于密封系统的刚度和变形、结合面的粗糙度和不平行度、紧

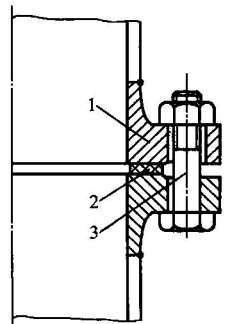


图 1-2 垫片-螺栓-法兰连接  
1—法兰；2—垫片；  
3—螺栓螺母



固载荷的大小和均匀性等。

中低压设备和管道的垫片密封主要是如图 1-2 所示的法兰连接密封，其连接件和紧固件主要是法兰和连接螺栓、螺母等。法兰密封面的形式、大小与垫片的形式、使用场合及工作条件有关。常用的法兰密封面形式有全平面、突面、凹凸面、榫槽面和环连接面（或称梯形槽）等几种，如图 1-3 所示。其中以突面、凹凸面、榫槽面最为常用。

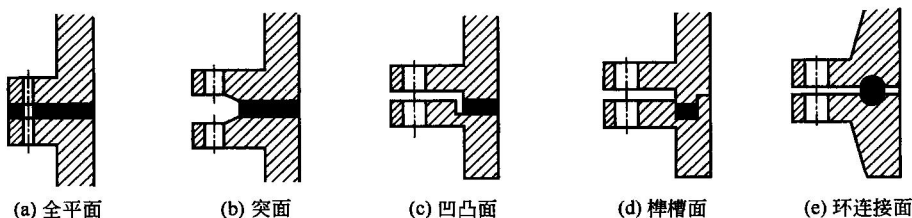


图 1-3 法兰密封面形式

对全平面的法兰，垫片覆盖了整个法兰密封面，由于垫片与法兰的接触面积较大，给定的螺栓载荷下垫片上的压缩应力较低，因此全平面法兰适用于柔软材料垫片或铸铁、搪瓷、塑料等低压法兰的场合。

对于突面法兰，尽管为了定位需要垫片的外径通常延伸到与螺栓接触，但起密封作用的仅是螺栓圆以内法兰凸面与垫片接触的部分，因此相对同样螺栓载荷下的全平面法兰而言，它能产生较高的垫片应力，适用于较硬垫片材料和较高压力的场合。突面结构简单、加工方便、装拆容易，且便于进行防腐衬里。压紧面可做成平滑的，也可以在压紧面上开 2~4 条，宽×深为 0.8mm×0.4mm，截面为三角形的周向沟槽。这种带沟槽的突面能较为有效的防止非金属垫片被挤出压紧面，因而适用范围更广。一般完全平滑的突面适用于公称压力  $PN \leq 2.5 \text{MPa}$  场合，带沟槽后容器法兰可用至 6.4MPa，管法兰甚至可用至 25~42MPa，但随公称压力的提高，适用的公称直径相应减小。各种非金属垫片，包覆垫，金属包垫，缠绕式垫片等均可用于该密封面。

凹凸形密封面法兰是由一凹和一凸两法兰相配而成，垫片放于凹面内。其优点是安装时易于对中，能有效地防止垫片被挤出，并使垫片免于遭受吹出。其密封性能好于突面密封面，可适用于  $PN \leq 6.4 \text{MPa}$  的容器法兰和管法兰。但对于操作温度高，密封口直径大的设备，使用该种密封面时，垫片仍有被挤出的可能，此时可采用榫槽面法兰或带有两道止口的凹凸面法兰等加以解决。各种非金属垫片，包覆垫，金属包垫，缠绕式垫片，金属波形垫，金属平垫，金属齿形垫等适用于该密封面。

榫槽形密封面法兰比凹凸形密封面法兰的密封面更窄，它是由一榫面和一槽面相配合而成的，垫片置于槽内。由于垫片较窄，压紧面积小，且因受到槽面的阻挡，垫片不会挤出压紧面，受介质冲刷和腐蚀的倾向少，安装时也易于对中，垫片受力均匀，密封可靠。可用于高压、易燃、易爆和有毒介质等对密封要求严格的场合，当公称压力  $PN$  为 20MPa 时，可用于公称直径  $DN$  为 800mm 的场合。当压力更低时，则可用于直径范围更大的场合，但该种密封面的加工和更换垫片比较困难。金属或非金属平垫，金属包垫，缠绕式垫片都适用于该种密封结构。

环连接面法兰是与椭圆形或八角形的金属垫片配合使用的。它是靠梯形槽的内外锥面和金属垫片形成线接触而达到密封的，具有一定的自紧作用，密封可靠。适用于压力和温度存