

机械设计师  
入门系列



JIXIE SHEJISHI  
RUMEN XILIE

# 密封设计入门



MIFENG SHEJI  
RUMEN

■ 吴晓铃 袁丽娟 编著



化学工业出版社

机械设计师  
入门系列



JIXIE SHEJISHI  
RUMEN XILIE

# 密封设计入门



MIFENG SHEJI  
RUMEN



■ 吴晓铃 袁丽娟 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

### 图书在版编目 (CIP) 数据

密封设计入门/吴晓铃, 袁丽娟编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 5  
(机械设计师入门系列)  
ISBN 978-7-122-16234-2

I. ①机… II. ①吴…②袁… III. ①机械密封-机械设计 IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 001796 号

---

责任编辑: 王 焯  
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 项 激  
装帧设计: 韩 飞

---

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: 北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{4}$  字数 367 千字 2013 年 6 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: 49.00 元

版权所有 违者必究



工业设备中使用的机器普遍存在着泄漏问题，泄漏会造成物料的流失、产品质量的下降、能源的浪费、设备的损坏和环境的污染，从而损害人员健康，甚至酿成火灾、爆炸等事故，危及人身安全，带来巨大经济损失。密封件虽然只是个零部件，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，处理的大多数是腐蚀性或易燃、易爆和有毒介质，而且通常具有较高的温度和压力，一旦泄漏，极易引起重大安全事故，造成的危害就更大。随着石油化工、热能和动力、轻工、原子能等工业和宇航技术的发展，密封技术也变得越来越重要。据统计，在日常的机器设备使用及维修中，对于机泵40%~50%的工作量是用于轴封的维修，因此，发展密封技术和培养掌握密封技术的工程技术人员来专门解决生产中出现的有关密封问题就显得尤为重要。

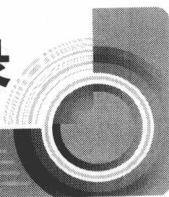
无论是经验老到的资深密封设计工程师，还是入行不久的初级密封设计人员，牢牢掌握密封设计的基础知识和基本理论是十分重要的。而有很多企业的设计人员对密封技术理论的理解和掌握十分有限，甚至在一些密封厂家设计部门，能够准确计算密封平衡比和端面比压等参数的设计师都寥寥无几，很多设计人员对这些问题的概念相当模糊。经验的积累固然重要，但是如果只知其然，而不知其所以然，要想成为一名出色的密封设计师是不可能的。

本书面向密封设计入门级读者的需求，主要任务是使读者了解有关密封技术的基本概念和基本理论，以及密封故障的分析，密封件的安装、维修和改进。书中注重理论和实际相结合，从实用性出发，全面系统介绍了工业生产中常用密封技术的主要内容和最新进展。重点阐述了填料密封、垫片密封、机械密封、非接触密封等基本概念、基本理论、结构形式、密封特性、材料、使用维护和故障处理等知识及泄漏检测技术，并通过实例展现了相关知识的应用。

本书由吴晓铃、袁丽娟编著。顾乐先、吕泮功、吴晓航、杨星原、杨勇波、陈渊、王长路、张元国、王琦、秦朝举、周锐、袁泽民、刘雪峰等同志为本书的编写提供了很多帮助，在此一并表示感谢。

由于编者的水平有限，书中难免出现不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者



<b>绪论</b> .....	<b>1</b>
0.1 密封的机理与方法 .....	1
0.2 密封的种类及其适用范围 .....	3
0.3 密封的主要性能指标和比较准则 .....	4
<b>第1章 垫片密封</b> .....	<b>6</b>
1.1 中低压设备和管道的垫片密封 .....	6
1.1.1 垫片密封的原理和结构 .....	6
1.1.2 垫片的种类及适用范围 .....	9
1.1.3 垫片的选择 .....	10
1.1.4 法兰密封设计方法 .....	15
1.1.5 垫片的保管及安装技术 .....	17
1.1.6 垫片密封的失效分析 .....	19
1.2 高压设备的密封 .....	21
1.2.1 强制式密封 .....	21
1.2.2 自紧式密封 .....	23
1.2.3 高压管道密封 .....	27
<b>第2章 填料密封</b> .....	<b>30</b>
2.1 毛毡密封 .....	30
2.2 软填料密封 .....	31
2.2.1 软填料密封的结构及密封原理 .....	31
2.2.2 软填料密封的主要参数 .....	33
2.2.3 软填料密封材料的选用 .....	36
2.2.4 软填料密封的问题与改进 .....	40
2.2.5 软填料密封的安装 .....	44
2.3 硬填料密封 .....	51
2.3.1 活塞环 .....	51
2.3.2 活塞杆填料密封 .....	56
2.3.3 无油润滑活塞环、支承环及填料 .....	61
2.4 成形填料密封 .....	65

2.4.1	成形填料类型及适用范围	66
2.4.2	O形圈的工作特性、结构及使用	68
2.4.3	橡胶唇形密封圈的工作特性及使用	74
2.4.4	塑料密封圈及皮革密封圈	80
2.5	油封	81
2.5.1	油封的基本结构及工作原理	81
2.5.2	油封的特点及类型	82
2.5.3	油封的主要性能参数	83
2.5.4	油封的使用	83

### **第3章 机械密封** ..... 87

3.1	机械密封的原理	87
3.1.1	机械密封的概念、结构、原理和特点	87
3.1.2	机械密封的分类	88
3.1.3	机械密封端面摩擦机理及摩擦状态	94
3.1.4	机械密封的主要性能参数	113
3.2	机械密封的主要零件及材料	119
3.2.1	主要零件的结构形式	119
3.2.2	主要零件尺寸确定	123
3.2.3	机械密封常用材料及选择	125
3.3	机械密封的典型结构与循环保护系统	130
3.3.1	典型结构	130
3.3.2	循环保护系统	140
3.4	机械密封的选择、使用及维修	145
3.4.1	机械密封的选择	146
3.4.2	机械密封的保管	148
3.4.3	机械密封的安装	149
3.4.4	机械密封的运转	151
3.4.5	机械密封的维修	151
3.5	机械密封的失效及分析	154
3.5.1	密封失效的定义及外部症状	154
3.5.2	机械密封的失效形式	155
3.5.3	机械密封的失效分析方法	157
3.5.4	机械密封失效的诊断检查	159
3.5.5	根据密封端面磨损痕迹分析失效原因	161
3.5.6	安装、运转等引起的故障分析	164
3.5.7	机械密封失效典型实例	166
3.5.8	机械密封故障处理实例	170

### **第4章 密封胶及胶黏剂** ..... 178

4.1	密封胶及胶黏剂的特点及应用	178
-----	---------------	-----

4.2	密封胶的种类及选用 .....	178
4.3	胶黏剂使用原则 .....	181

## **第5章 非接触型密封 .....** **182**

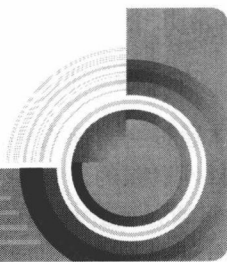
5.1	间隙密封 .....	182
5.1.1	密封环 .....	182
5.1.2	套筒密封 .....	183
5.2	浮环密封 .....	183
5.2.1	工作原理及特点 .....	183
5.2.2	结构形式 .....	185
5.2.3	结构要求、尺寸、技术要求及材料 .....	186
5.2.4	封油系统 .....	187
5.3	迷宫密封 .....	189
5.3.1	结构形式和工作原理 .....	189
5.3.2	主要尺寸参数及材料 .....	191
5.4	动力密封 .....	192
5.4.1	离心密封 .....	192
5.4.2	螺旋密封 .....	197
5.4.3	停车密封 .....	201
5.5	磁流体密封 .....	204
5.5.1	磁流体 .....	204
5.5.2	磁流体密封工作原理及特点 .....	206
5.5.3	磁流体密封的应用 .....	208
5.6	全封闭密封 .....	209
5.6.1	全封闭密封的原理 .....	209
5.6.2	密闭式机泵 .....	210
5.6.3	隔膜传动 .....	210
5.6.4	磁力传动 .....	211

## **第6章 泄漏检测技术 .....** **213**

6.1	泄漏检测的基本概念 .....	213
6.2	检漏分类及方法 .....	213
6.3	检漏方法的选择 .....	217

## **参考文献 .....** **219**

# 绪论



工业生产中使用的机器设备普遍设有密封装置，但普遍存在着泄漏问题，事实证明，密封装置的泄漏只是多或少、重或轻的区别而已。泄漏会造成能源的浪费、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、有毒介质，而且通常有较高的压力和温度，一旦泄漏，可能引起重大安全事故，造成的危害就更大。据国外报道，在化工和石油化工等大型企业中，发生事故的原因中，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酸酯储罐发生泄漏，造成 3000 多人死亡，12.5 万人中毒，其中 5 万人失明，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 4 亿多人受放射性污染，核辐射的后患迄今未绝，这些事件都充分证明了密封的重要性。

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 3 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。

## 0.1 密封的机理与方法

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

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穿漏、渗漏或扩散的形式通过密封件泄漏的。

① 穿漏。通常将通过密封面间隙的泄漏称为穿漏，如图 0-1 所示。此时被密封流体在密封件两侧压力差作用下通过宏观或微观的缝隙泄漏，因此穿漏是单向泄漏。

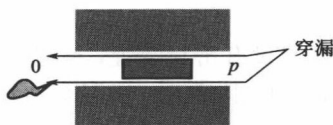


图 0-1 穿漏

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为渗漏，如图 0-2 所示。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，如图 0-3 所示。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；介质通过密封件扩散；介质从密封件的另一侧析出。扩散的过程是双向进行的，扩散作用的介质泄漏量要比其他两类泄漏量小得多。

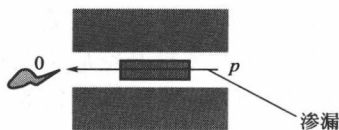


图 0-2 渗漏

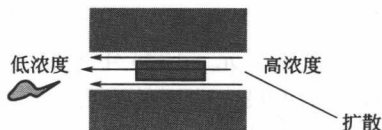


图 0-3 扩散

综上所述，造成泄漏的原因，一是密封连接处有间隙；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连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 分隔或间隔。利用密封件将泄漏点与外界分隔开或利用气体或液体作为中间密封流体。如隔膜密封、机械密封、气垫密封、中间有封液的双端面机械密封等。

④ 贴合或黏合。利用研合密封面本身的加工质量使密封面贴合或利用密封剂使密封面

黏合达到密封的目的，如汽缸中剖分面的密封、密封胶、密封膏等。

⑤ 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变形（如垫片密封、软填料密封等），形成固定的结合达到密封，如垫片密封、软填料密封等。

⑥ 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。

⑦ 增加泄漏通道中的阻力。流体在通道中做泄漏流动时，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。

⑧ 在通道中增设做功元件。因增设做功元件，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，以阻止介质泄漏。离心密封、螺旋密封即属于这一类。

⑨ 几种密封方法的组合。把两种或两种以上密封方法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。

⑩ 其他新型密封方式，如磁流体密封，封闭式密封、指尖密封、刷式密封等。

## 0.2 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。

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、较宽的垫片，高压静密封则用材质较硬、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。按密封件与其做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的情况。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。

表 0-1 动密封的种类和适用范围

种类	真空(绝压) /MPa	压力 (表压) /MPa	工作温度 /°C	线速度 /m·s <sup>-1</sup>	泄漏率 /mL·h <sup>-1</sup>	适用期限	应用举例
接触型 软填料密封	1.33×10 <sup>-3</sup>	31.38	-240~600	20	10~1000	—	清水离心泵、柱塞泵、阀杆密封



续表

种类		真空(绝压) /MPa	压力 (表压) /MPa	工作温度 /℃	线速度 /m·s <sup>-1</sup>	泄漏率 /mL·h <sup>-1</sup>	适用期限	应用举例	
接触型	成形填料	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	—	—	—	
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	
非接触型	离心密封	副叶轮	$1.33 \times 10^{-3}$	0.25	0~5	30	1年以上	矿浆泵	
		甩油环	油封	—	0	不限	不限	非易损件	轴承封油与防尘
			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
其他	磁流体密封	$1.33 \times 10^{-3}$	4.12	-50~90	70	—	—	—	
封闭式密封									

① 凡使用橡胶件者, 适用温度同成形填料。

### 0.3 密封的主要性能指标和比较准则

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。

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确定，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  $T_1 \leq 2 \times 10^{-1} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_2 \leq 2 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_3 \leq 2 \times 10^{-5} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_4 \leq 2 \times 10^{-7} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ， $T_5 \leq 2 \times 10^{-9} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ 。

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 $p$	$10^{-10} \text{ mmHg} \sim 10^3 \text{ MPa}$	$10^{-1} \text{ mmHg} \sim 10^4 \text{ MPa}$
温度 $t$	$-240 \sim 600^\circ\text{C}$	$-240 \sim 900^\circ\text{C}$
线速度 $v$	接触式密封 $< 150 \text{ m/s}$	—
泄漏率 $q$	0.1 mL/h	—
寿命 $L$	10年	—

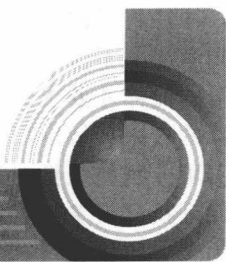
注：1mmHg=133.322Pa。

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

在化工厂中，还存在大量只凭听、看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（体积分数），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  $500 \times 10^{-6}$ 。

# 第1章 垫片密封



垫片密封是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，其泄漏量不太大，但法兰连接接头的数量多，因此成为工业装备主要泄漏点。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，因此装配时要把螺栓预紧到足以达到初步密封的要求，而精确地控制预紧恰恰是一个十分棘手的问题。因此，这一结构中的垫片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，这就需要考虑专门进行设计。按照装备和管道所承受的压力不同，垫片材料的结构、形式、要求也不尽相同，本章将分别介绍中低压（工作压力不超过 10MPa）和高压设备与管道的垫片密封。

## 1.1 中低压设备和管道的垫片密封

### 1.1.1 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。

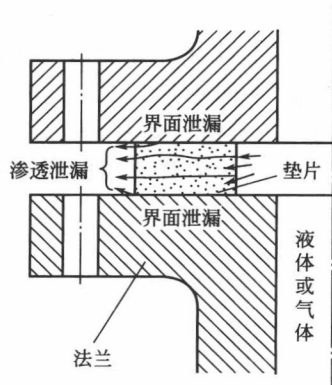


图 1-1 垫片泄漏形式

就垫片密封而言，通常密封流体在垫片接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和变形，这使得连接面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，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，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，减少以致消除泄漏；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。这些因素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不平，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，因此垫片承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，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，能够堵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的应力等。

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垫片预

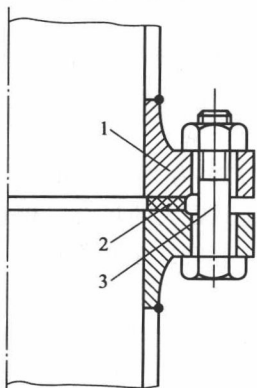


图 1-2 垫片-螺栓-法兰连接  
1—法兰；2—垫片；  
3—螺栓、螺母

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，垫片预紧力愈大，垫片中储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的性能外，还取决于密封系统的刚度和变形、接合面的表面粗糙度和平行度、紧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采用图 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。

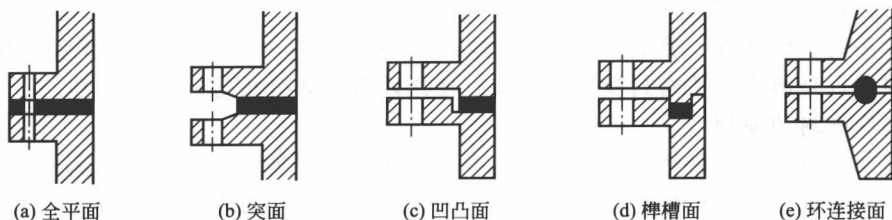


图 1-3 法兰密封面形式

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缘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、宽为0.8mm、深为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地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面和一凸面两法兰相配而成,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,采用该种密封面时,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。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,垫片不会被挤出,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在波动、介质渗透性大的场合,允许使用的最大公称压力为70MPa。梯形槽材料的硬度值比垫圈材料硬度值高30~40HB。

除了上述的密封面形式外,还有配用O形环、透镜垫等特殊形式的密封面,如图1-4所

示。它在单面法兰上开一环形凹槽，内装垫片，螺栓预紧后，两法兰直接接触。这种结构的主要特点是将垫片压缩到预定厚度后，继续追加螺栓载荷直至两法兰面直接接触。所以当存在介质压力和温度波动时，垫片上的密封载荷不发生变化，以使接头保持在最佳的泄漏控制点，同时螺栓也不承受循环载荷，减少了发生疲劳或松脱的危险。显然，它还减少了法兰的转角。

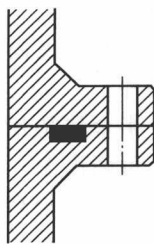


图 1-4 金属与金属接触

对于任何一种法兰密封面，其表面粗糙度是影响密封性能的重要因素之一。在各种法兰标准中虽然对其密封面的粗糙度有要求，但因垫片种类繁多，对粗糙度的要求不同，无法做出统一规定。因此应根据所用垫片的不同，提出不同的要求，具体可查相关标准。

法兰密封面在机械加工后，表面的切削纹路对密封也有一定的影响，通常有同心圆和螺旋形线两种。显然前者对密封是有利的，但不容易做到。绝不允许有横跨内外的径向划痕，以免形成直接泄漏的通道。

## 1.1.2 垫片的种类及适用范围

### (1) 垫片的种类

垫片的种类多种多样，按其构造的主体材料分为非金属、半金属和金属垫片三大类。

① 非金属垫片。非金属垫片质地柔软、耐腐蚀、价格便宜，但耐温和耐压性能差。多用于常温和中温的中、低压容器或管道的法兰密封。

非金属垫片包括橡胶垫、石棉垫、石棉橡胶垫、柔性石墨垫和聚四氟乙烯垫等。

a. 橡胶垫。制作橡胶板垫片的主要材料有天然橡胶、丁腈橡胶、氯丁橡胶等，另外，氟橡胶等特种橡胶也开始应用。橡胶因具有组织致密、质地柔软、回复性好、容易剪切成各种形状，且便宜、易购等特点而被广泛使用于容器和管道密封中。但它不耐高压，容易在矿物油中溶解和膨胀，且不耐腐蚀，在高温下容易老化，失去回复能力。

b. 石棉垫。石棉材料有温石棉和蓝石棉两种。温石棉耐热、耐碱性好，抗拉强度高，耐酸性能较差，大多数石棉橡胶板由它制造；蓝石棉不仅耐热性能好，而且耐酸性能也好，故多被用于制造耐酸石棉橡胶板。石棉板正常使用温度在  $550^{\circ}\text{C}$  以下。直径较大的低压容器可使用石棉带或石棉绳。在使用石棉绳时，通常浸渍水玻璃。酸、碱、溶剂等介质也可用此类垫片。

c. 石棉橡胶垫。石棉橡胶垫是由石棉纤维、橡胶和填料经压制而成的。一般石棉纤维占  $60\% \sim 85\%$ 。根据其配比工艺、性能及用途不同，主要有高压石棉橡胶垫，中、低压石棉橡胶垫和耐油石棉橡胶垫。石棉橡胶垫有适宜的强度、弹性、柔软性、耐热性等性能，用它制作垫片，既方便又便宜，因此在化工企业中，尤其是在中小型化工企业中得到广泛应用。

d. 柔性石墨垫。柔性石墨是一种新颖的密封材料，具有良好的回复性、柔软性、耐温性，在化工企业中得到迅速推广和应用。

e. 聚四氟乙烯垫（简称 PTFE）。聚四氟乙烯以其耐化学性、耐热性、耐寒性、耐油性优越于现在任何塑料而有“塑料之王”之称，它不易老化，不燃烧，吸水性近乎为零。其组织致密，分子结构无极性，用作垫片，接触面可做到平整光滑，对金属法兰不黏着。除受熔融碱金属及含氟元素气体的侵蚀外，它能耐多种酸、碱、盐、油脂类溶液介质的腐蚀。

聚四氟乙烯垫片包括纯聚四氟乙烯垫片、填充聚四氟乙烯垫片或膨胀聚四氟乙烯垫片等。

② 半金属垫片（又称金属复合垫片）。非金属材料虽具有很好的柔软性、压缩性和螺栓





载荷低等优点，但它的主要缺点是强度不高，回复性差，不适合高压、高温场合，所以结合金属材料强度高、回复性好、经受得起高温的特点，形成将两者组合结构的垫片，即为半金属垫片。

半金属垫片是用不同材料的金属薄板把非金属材料包裹起来压制成形的。金属材料在外层，可耐高温；非金属材料在内层，使垫片具有良好的弹性和回复性。这样组合后的垫片可满足高温和较高压力的使用要求。

半金属垫片主要有金属包覆垫片、金属缠绕垫片、金属波纹复合垫片、金属齿形复合垫片等。

a. 金属包覆垫片（金属包垫）。该垫片以非金属为芯材、外包厚度为 0.25~0.5mm 的金属薄板。按包覆状态，可分为全覆盖、半包覆、波形包覆、双层包覆等。

金属薄板根据材料的弹塑性、耐热性、耐蚀性选取，主要有铜、镀锌铁皮、不锈钢、钛、蒙乃尔合金等。使用较多的是铜、镀锌铁皮和不锈钢。

作为金属包垫的芯材，耐热性是主要考核指标。一般采用石棉板或低橡胶石棉板、耐高温性能好的碳纤维或瓷质纤维及柔性石墨板材等。

金属包垫的另一特点是能制成各种异形垫片，可以满足各种热交换器管箱和非圆形压力容器密封的需要，而其他复合垫片却不能。

b. 金属缠绕垫片。金属缠绕垫片是由薄金属波形带与石棉或柔性石墨等非金属材料交替绕成螺旋状，将金属带的始末端点焊接制成。国外也称作螺旋垫片。

③ 金属垫片。在高温高压及载荷循环频繁等苛刻操作条件下，各种金属材料仍是密封垫片的首选材料，常用的材料有铜、铝、低碳钢、不锈钢、铬镍合金钢、钛、蒙乃尔合金等。为了减小螺栓载荷和保证结构紧凑，除了金属平垫尽量采用窄宽度外，各种具有线接触特征的环垫结构则是其优选的形式。

金属垫片的截面形状有平形、波形、齿形、八角形、透镜形等。

a. 平形金属垫片。平形金属垫片使用时分宽垫片和窄垫片两种。宽垫片因预紧力要求大，易引起螺栓和法兰变形，压力超过 1.96MPa 时在光滑面的法兰上很少使用。窄垫片容易预紧，可在压力 6.27~9.8MPa 的管道上使用。

b. 波形金属垫片。波形金属垫片的金属板厚度一般为 0.25~0.8mm。垫片厚度一般为波长的 40%~50%。适宜于在光滑密封面、压力 3.43MPa 的管道上使用。

c. 齿形金属垫。齿形金属垫多用于 6.27~9.8MPa 的管道上。齿顶距约 1.5mm，齿顶、齿根角均为 90°。其密封性能比平形金属垫好，压紧力也比平形金属垫小。

## (2) 各种垫片的适用范围

各种非金属垫片、金属垫片及半金属垫片，由于其结构不同，性能不同，承载的温度和压力不同，所适用的工作范围也不同。在选择和使用垫片时，要充分考虑其特点和使用场合的不同。各种非金属垫片、半金属垫片及金属垫片的使用条件见表 1-1~表 1-3。

### 1.1.3 垫片的选择

垫片的选择应根据工作系统的温度、压力以及被密封介质种类、化学性能（如腐蚀性、毒性、易燃易爆性、污染性等）、物理性能（密度、黏度等）和密封面的形状等综合考虑。一般要求垫片材料不污染工作介质、具有良好的变形能力和回弹力；垫片的耐用温度应大于操作温度；要有一定的机械强度和适当的柔软性；在工作温度下不易变质硬化或软化。同时，应考虑介质的放射性、热应力以及外力等对法兰变形的附加影响；检修更换垫片是否容易；垫片现场加工是否可能；经济性以及材料来源等。