



教育部高职高专规划教材

密封技术

魏 龙 主编
张红光 主审



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

- | | | |
|--------------------|-----|----|
| 工程制图 | 路大勇 | 主编 |
| 工程制图习题集 | 叶青玉 | 主编 |
| 化工制图 (化工工艺专业适用) | 董振珂 | 主编 |
| 化工制图习题集 (化工工艺专业适用) | 董振珂 | 主编 |
| 工程力学 | 吴玉亮 | 主编 |
| 机械设计基础 | 谭放鸣 | 主编 |
| 电工电子学 (非电专业适用) | 邓 允 | 主编 |
| 化工工艺基础 (非化工专业适用) | 王伟武 | 主编 |
| 机电工程专业英语 | 张黎明 | 主编 |
| 机械工程材料 | 高琪妹 | 主编 |
| 金工实训 | 张云新 | 主编 |
| 工程材料及其成型 | 曾宗福 | 主编 |
| 工程材料及其成型实验实训 | 曾宗福 | 主编 |
| 化工机器 | 张 涵 | 主编 |
| 化工设备 | 邢晓林 | 主编 |
| 化工机械制造技术 | 朱方鸣 | 主编 |
| 化工机械安装修理 | 张麦秋 | 主编 |
| 化工腐蚀与防护 | 张志宇 | 主编 |
| 过程装备管理 | 尹洪福 | 主编 |
| 过程检测与故障诊断 | 张碧波 | 主编 |
| ▶ 密封技术 | 魏 龙 | 主编 |

ISBN 7-5025-5718-0



9 787502 557188 >

ISBN 7-5025-5718-0/G · 1488 定价: 22.00元



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。以日本对汇集到的 1965~1975 年间化工、石化企业发生的 624 起事故为例，其中化工装置发生的事故为 210 起，占 33.7%，炼油装置发生的事故为 79 起，占 12.7%。而 210 起化工装置事故中表现为泄漏形式的为 115 起，占 55%；79 起炼油装置事故中表现为泄漏形式的为 54 起，占 68%。

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 3 000 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。

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之为穿漏。此时被密封流体在密封件两侧压力差 Δp 作用下通过宏观或微观的缝隙 h 泄漏，因此穿漏是单向泄漏。

(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 /°C	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	1.33×10^{-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	1.33×10^{-7}	98.07	-45~230	10	0.001~0.1	6个月~1年	液压缸
		唇形	1.33×10^{-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 ^①	—	—	3个月~1年	活塞及活塞杆密封
		旋转							6个月~1年
	胀圈 密封	往复	1.33×10^{-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	1.33×10^{-7}	7.85	-196~400 ^①	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	
气膜		—	1.96	不限	不限	—	—	航空发动机、透平压缩机	
迷宫密封		1.33×10^{-5}	19.61	600	不限	大	3年以上	蒸汽透平、燃气透平、活塞压缩机	
非 接 触 型	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	1.33×10^{-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
	油封 防尘								
	螺旋 密封	螺旋密封	1.33×10^{-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	1.33×10^{-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 $10\ 000 \times 10^{-6}$ 作为零逸出水平,而化工厂则对阀门和法兰规定为 500×10^{-6} , 机器(如泵,压缩机)为 $1\ 000 \times 10^{-6}$; 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 100×10^{-6} , 对泵和压缩机为 500×10^{-6} 。

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。

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漏出来，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

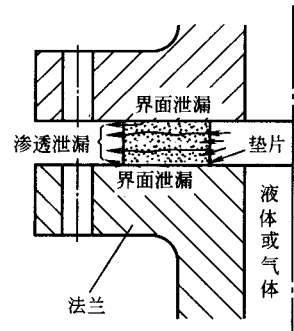


图 1-1 垫片泄漏形式

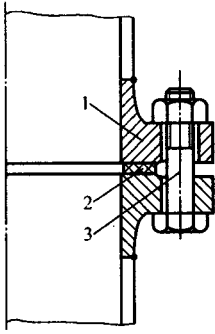


图 1-2 垫片-螺栓-法兰连接
1—法兰；2—垫片；3—螺栓螺母

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

中以突面、凹凸面、榫槽面最为常用。

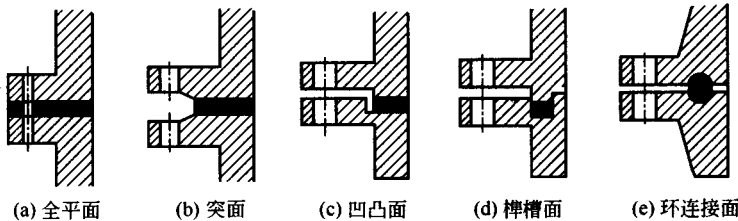


图 1-3 法兰密封面形式

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 $p_N \leq 2.5 \text{MPa}$ 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 $p_N \leq 6.4 \text{MPa}$ 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 p_N 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，但此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，以保证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。

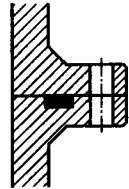


图 1-4 金属与金属接触

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。但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。

二、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。

① 橡胶板。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、回弹性好，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，失去回弹能力。

② 石棉。石棉材料有湿石棉和蓝石棉两种。湿石棉耐热、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℃ 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。

③ 石棉橡胶板。石棉橡胶板是由石棉、橡胶和填料经压制而成的。一般石棉纤维占 60%~85%。根据其配工艺、性能及用途不同，主要有高压石棉橡胶板、中、低压石棉橡胶板和耐油石棉橡胶板。

石棉橡胶板有适宜的强度、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。

④ 柔性石墨。柔性石墨是一种新颖的密封材料，良好的回弹性、柔软性、耐温性，在化工企业中得到迅速推广和应用。

⑤ 聚四氟乙烯（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，对金属法兰不粘着。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、填充聚四氟乙烯或膨胀聚四氟乙烯等。

(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，回弹性差、不适合高压、高温场合，所以结合金属材料强度高，回弹性好、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型的。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弹性。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。

① 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，可分为全包覆、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式异型垫片。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。

② 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。为了减少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、透镜形等等。

① 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。

② 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%。适宜于光滑密封面，压力 3.43MPa 的管道上使用。

③ 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°。其密封性能比平形密封垫好，压紧力也比平形垫小。


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适用范围见表 1-1、表 1-2 和表 1-3。

表 1-1 常用非金属软（平）垫片

类 型	适 用 条 件		
	最高温度/℃	最大压力/MPa	介 质
纸质垫片	100	0.1	燃料油、润滑油等
软木垫片	120	0.3	油、水、溶剂
天然橡胶	100	1.0	水、海水、空气、惰性气体、盐溶液、中等酸、碱等
丁腈橡胶(NBR)	100	1.0	石油产品、脂、水、盐溶液、空气、中等酸、碱、芳烃等
氯丁橡胶(CR)	100	1.0	水、盐溶液、空气、石油产品、脂、制冷剂、中等酸、碱等
丁苯橡胶(SBR)	100	1.0	水、盐溶液、饱和蒸气、空气、惰性气体、中等酸、碱等
乙丙橡胶(EPDM)	175	1.0	水、盐溶液、饱和蒸气、中等酸、碱等
硅橡胶(MQ)	230	1.0	水、脂、酸等
氟橡胶(FKM)	260	1.0	水、石油产品、酸等
石棉橡胶垫片	150	4.8	水、水蒸气、空气、惰性气体、盐溶液、油类、溶剂、中等酸、碱等
聚四氟乙烯垫片： 纯车削板 填充板 膨胀带 金属增强	260(限 150) 260 260(限 200) 260	10.0 8.3 9.5 17.2	强酸、碱、水、蒸气、溶剂、烃类等
柔性石墨垫片	650(蒸气) 450(氧化性介质) 2500(还原性、惰性介质)	5.0	酸(非强氧化性)、碱、蒸气、溶剂、油类等
无石棉橡胶垫片： 有机纤维增强 无机纤维增强	370(连续 205) 425(连续 290)	14	视黏接剂(SBR、NBR、CR、EPDM 等)而定

表 1-2 半金属垫片

类 型	断 面 形 状	使 用 条 件	
		最高温度/℃	最大压力/MPa
金属缠绕垫片 填充 PTFE： 有约束 无约束 填充柔性石墨： 蒸气介质 氧化性介质 填充白石棉纸 填充陶瓷(硅酸铝)		取金属带或非金属填充带材料的使用温度。下列温度是非金属材料使用温度 290 150 650 500 600 1090	42(有约束) 21(无约束)

续表

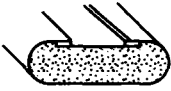






类 型	断 面 形 状	使 用 条 件	
		最高温度/℃	最大压力/MPa
金属包覆垫片： 内石棉板 内石墨板		400 500	6
金属包覆波形垫片： 内石棉板 内石墨板		400 500	4

表 1-3 金属垫片

类 型	断 面 形 状	使 用 条 件	
		最高温度/℃	最大压力/MPa
金属平垫片： 铝 碳钢 铜 镍基合金 铅： 有约束 无约束 蒙乃尔合金： 蒸汽工况 其他工况 银 不锈钢： 0Cr19Ni9(304) 0Cr17Ni12Mo2(316) 0Cr23Ni13(309S)		430 540 320 1 040 200 100 430 820 430 510 680 930	50
金属波形垫片： 铝 碳钢 铜 镍基合金 铅： 有约束 无约束 蒙乃尔合金： 蒸汽工况 其他工况 银 不锈钢： 0Cr19Ni9(304) 0Cr17Ni12Mo2(316) 0Cr23Ni13(309S)		430 540 320 1 040 200 100 430 820 430 510 680 930	7

续表

类 型	断 面 形 状	使 用 条 件	
		最高温度/℃	最大压力/MPa
金属齿形垫片： 铝 碳钢 铜 镍基合金 铅： 有约束 无约束 蒙乃尔合金： 蒸气工况 其他工况 银 不锈钢： 0Cr19Ni9(304) 0Cr17Ni12Mo2(316) 0Cr23Ni13(309S)		430 540 320 1 040 200 100 430 820 430 510 680 930	15
金属环形密封环(八角形或椭圆形环)： 铝 碳钢 铜 镍基合金 铅： 有约束 无约束 蒙乃尔合金： 蒸气工况 其他工况 银 不锈钢： 0Cr19Ni9(304) 0Cr17Ni12Mo2(316) 0Cr23Ni13(309S)		430 540 320 1 040 200 100 430 820 430 510 680 930	70
金属中空 O 形密封环		815	280

三、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。

在垫片的使用中，压力和温度二者是相互制约的，随着温度的升高，在设备运转一段时间后，垫片材料发生软化、蠕变、应力松弛现象，机械强度也会下降，密封的压力随之降低，反之亦然。

1. 垫片材料的选择

选择垫片材料要考虑以下因素。

(1) 考虑易挥发有机物的逸出要求。从健康和环境保护的角度出发，严格控制易挥发有机物的逸出，减少来自法兰接头的泄漏成为优先考虑的因素。因此，出现了多种密封性能更好的材料，包括无石棉材料的垫片。由于它们具有不同的性能和局限性，正确选择、安装、使用和维护这类垫片，以得到最佳的性能变得尤其重要。

(2) 密封介质。垫片应在全程工作条件下不受密封介质的影响，包括抗高温氧化性、抗化学腐蚀性、抗溶剂性、抗渗透性等，显然垫片材料对介质的化学耐蚀性是选择垫片的首要条件。

(3) 温度范围。所选用垫片应在最高和最低的工作温度下有合理的使用寿命。为了在工作条件下保持密封，垫片材料应能耐受蠕变，以降低垫片的应力松弛。室温下，大多数垫片材料没有大的蠕变，不影响密封性能，但随着温度的升高（超过 100℃）蠕变变得严重。因此最容易区分垫片质量的优劣是垫片在不同温度下的蠕变松弛性能。除了短期能耐受最高或最低的工作温度外，还应考虑允许连续工作温度的影响，通常该温度低于最高工作温度而高于最低工作温度。

(4) 工作压力。垫片必须能承受最大的工作压力。这种最大工作压力可能是试验压力，因为它可能是最大工作压力的 1.25~1.5 倍。对于非金属材料的垫片，在选择其最大工作压力的同时，要考虑垫片所能承受的最高工作温度，尤其如饱和水蒸气，因其蒸汽压力越高，其蒸汽的温度也越高。用于真空操作的垫片也需作特殊考虑，如一般真空可采用橡胶黏结纤维压缩垫片；对于较高真空可采用橡胶 O 形环或矩形模压密封条；对于很高真空，需采用特殊的密封材料和结构形式。

(5) 法兰密封面粗糙度。法兰密封面粗糙度是影响密封性能的重要因素之一，但不同形式的垫片和应用场合，对粗糙度有不同的要求，应具体情况具体分析。

(6) 其他考虑。还有许多影响选择垫片材料和结构形式的因素如下。

① 循环载荷。若温度或压力存在频繁波动，则必须选择有足够的回弹能力的垫片。

② 振动。若管线有振动，则垫片必须能经受反复的高循环应力作用。

③ 污染介质。如密封介质是饮用水、血浆、药品、食品、啤酒等，要考虑垫片材料本身的化学物质是否会对介质造成污染，这时应采用符合食品和医药卫生要求的 PTFE 或橡胶等材料。

④ 磨损。某些含悬浮颗粒的介质会磨损垫片，导致缩短垫片的使用寿命。

⑤ 法兰腐蚀。某些金属（如奥氏体不锈钢）有应力腐蚀的倾向，应保证垫片材料不会引起各种腐蚀的超量杂质，如核电站不锈钢耐酸法兰用的柔性石墨垫片中的氯离子含量要求不超过 50ppm。

⑥ 安全性。如密封高度毒性的化学品，则要求垫片具有更大的安全性，如对缠绕垫片而言，则选用带外环形式，使之具有很高的抗吹出能力等；此外，对石油炼厂，还有防火的要求。

⑦ 经济性。虽然垫片材料相对比较便宜，但决定垫片的品质、类型和材料时，应计及

到泄漏造成的物物流失、停工损失以至发生重大破坏造成的经济后果，所以应综合考虑垫片的性能与价格比。

2. 垫片尺寸选择的一般原则

(1) 尽可能选择薄的垫片。垫片要求的厚度与其形式、材料、直径、密封面的加工状况和密封介质等有关。例如对大多数非金属垫片而言，随垫片厚度减少，其抵抗应力松弛的能力会增加；薄的垫片其周边暴露于密封介质的面积也少，沿垫片本体的渗漏也随之减少。为保证垫片必须填补法兰密封面的凹凸和起伏不平的要求，垫片的最小厚度取决于法兰表面的粗糙度、垫片的压缩性、垫片应力、法兰的偏转程度等。如果法兰是平行的，则对非金属平垫片，其最小厚度可由下式计算。

$$t_{\min} = 2 \times \text{法兰粗糙度的最大深度} \times 100 / C \quad (1-1)$$

式中 C ——给定垫片应力下的压缩率，%。

(2) 尽可能选择较窄的垫片。在同样的螺栓载荷下，垫片越窄，垫片应力就越高，密封压力也就越高；但垫片应不至于被压裂或压溃，同时要考虑具有必需的径向密封通道长度和足够的吹出抗力。一般的板状垫片通常可根据公称直径和公称压力选取，如图 1-5 所示，并按照实际法兰和使用情况做适当的修改，例如法兰密封面粗糙度低，或密封介质黏度低，则增加宽度。

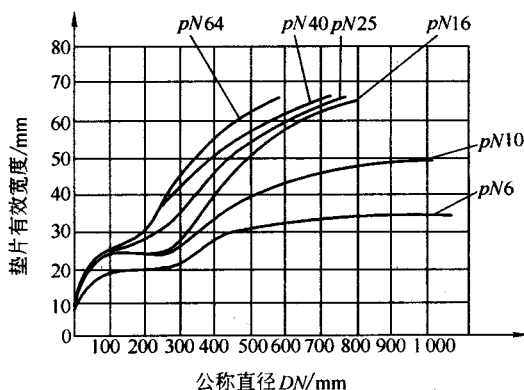


图 1-5 垫片宽度选择参考

(3) 不要让垫片内径伸进管道内；也没有必要过分增加垫片的外径。前者会导致管内介质冲刷垫片，不但污染介质，增加流动阻力，还会因垫片材料被介质浸胀而损坏压缩部分的垫片；后者会因受环境的腐蚀，同样损害垫片。对于密封面为突面或全平面的法兰，当垫片仅位于螺栓孔中心圆内时，通常出于安装定位的需要，将垫片外径（或外环外径）取为螺栓孔中心圆直径减去螺栓孔（或螺栓）直径。

四、垫片的保管及安装技术

1. 垫片的保管

除橡胶垫片外，其他各种垫片不允许弯折和在直径方向受挤压。垫片尽可能呈包装状态保管，不得淋雨或置于温度过高的地方，以防浸胀或老化。一般石棉橡胶板的贮存期限为两年，耐油石棉橡胶板贮存期限为一年半，并应存放在 $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 的室内，防止曝光照射而氧化。若石棉橡胶板长期置于 10°C 以下的环境中，还会产生不同程度的失弹、发脆等现象。