

# 石化装备 流体密封技术

SHIHUA ZHUANGBEI  
LIUTI MIFENG JISHU

王金刚 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# 石化装备流体密封技术

王金刚 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书共分6章,内容包括:绪论,流体密封的理论基础,静密封机理与结构,径向接触式动密封,接触式轴向端面机械密封,非接触型动密封,新型密封(螺旋密封、纳米磁流体密封)。主要从石化装备的静、动设备的基本理论、相关专业知识和分析密封结构模型、综合分析密封机理、最新发展、工程观念、设计创新等方面进行了论述。

本书可供从事石油化工过程装备、油气储运设备、运行管理工作的技术人员学习参考,也适用于高等院校过程装备与控制工程、油气储运工程等专业研究生、本科生作为教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

石化装备流体密封技术/王金刚主编. —北京:中国石化出版社,2007

ISBN 978-7-80229-380-9

I. 石… II. 王… III. 石油化工-化工设备-流体-密封 IV. TE9

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第105199号

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: [press@sinopec.com.cn](mailto:press@sinopec.com.cn)

金圣才文化发展有限公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米16开本15.25印张386千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

定价:38.00元

# 前 言

流体密封技术对于工业技术领域有着重要的意义，并一直是各方面专家和技术人员关注的问题。过程装备流体密封包括流体静密封和动密封，是机器、设备的重要组成部分，是流体动力机械和过程设备中不可缺少的零部件。密封技术往往是决定性技术。石化工业中，高压聚乙烯的高压压缩机，铂重整装置的无油润滑压缩机，超高压容器，聚乙烯的反应器等；在原子能发电站中的循环泵；石油钻采设备中的泥浆泵、注水泵、采油树等；许多机器设备的设计、结构方案都取决于密封技术。

密封件虽然只是个零部件，但往往却能决定设备的安全性、可靠性和耐久性，对整台机器、整套装置甚至整个工厂的影响很大。特别在石油化工企业中，处理的流体大多数是具有可燃性、腐蚀性、易燃及有毒的介质，一旦密封失效，介质外漏不仅污染环境，影响人体健康和产品质量，还往往导致火灾、爆炸和人身伤亡等重大事故。特别是在化工及石化等类企业中，密封点的数目非常大，一个中型的炼油厂，静密封点数达到一万个左右，而机泵的数量达数千台套。在日常的设备维护管理中，密封的维修量特别是机泵动密封的维修量是主要的工作。

密封还直接关系到能源和物质的节约问题。因此，重视设备机器的密封技术，加强密封的科学管理，可以提高设备效率，节省能耗，降低成本，提高设备的可靠性，保护环境，促进新装备的开发应用。重视设备的密封技术，可以保证机器设备长期、安全、可靠地正常运转，保证石油化工装置的连续正常生产，促进生产发展和效益提高。

密封技术随着石油化工、动力、轻工、原子能等工业和宇航技术的发展，变得愈来愈重要。因此国内外密封技术和密封学与润滑技术和摩擦学科一起在迅速发展着。

本书共分6章，由王金刚主编。其中，第1章、第5章、第6章由王金刚编写，第2章由周三平编写，第3章由范玉光编写，第4章由陈兵编写。本书的编著得到了西安石油大学的立项资助，在此对帮助我们的学校科研处和机械工程

学院的老师致以诚恳的感谢。

本书通过流体密封的理论基础将动密封、静密封联系在一起，并在静密封中引入了新的保证密封泄漏率的设计方法，形成了较系统、较新的体系；在流体动密封部分结合科研研究对波纹管机械密封及纳米磁流体密封技术作了比较详细的论述。

由于编者水平有限，书中难免有错误或不当之处，敬请读者批评指正。

**编 者**

# 目 录

第一章 绪论 .....	( 1 )	三、垫片密封设计方法和 计算 .....	( 91 )
第一节 流体密封概述 .....	( 1 )	四、高温法兰防漏设计 .....	( 99 )
第二节 流体密封设计要求 .....	( 2 )	第二节 高压与自紧密封设计 .....	( 102 )
第三节 静密封技术进展 .....	( 3 )	一、高压密封特点 .....	( 102 )
第四节 流体动密封技术进展 .....	( 9 )	二、金属平垫密封 .....	( 103 )
第五节 流体密封材料 .....	( 11 )	三、双锥环密封设计 .....	( 104 )
第六节 石化装备密封管理 .....	( 17 )	四、C 形环密封结构 .....	( 107 )
第二章 流体密封的理论基础 .....	( 20 )	五、金属 O 形环密封设计 .....	( 109 )
第一节 流体密封过程及密封 方法 .....	( 20 )	六、三角垫密封 .....	( 112 )
一、流体泄漏方式 .....	( 20 )	七、其他高压自紧密封 .....	( 114 )
二、流体密封方法 .....	( 22 )	第四节 密封胶及胶黏剂 .....	( 115 )
三、密封分类 .....	( 23 )	一、密封胶的分类及其特性 .....	( 115 )
第二节 密封流体力学基础 .....	( 23 )	二、密封胶的密封机理 .....	( 118 )
一、基本方程 .....	( 23 )	三、密封胶选用及其应用 .....	( 119 )
二、密封简单模型中流体流动 .....	( 28 )	四、胶黏剂与应用 .....	( 120 )
三、流体流动状态 .....	( 39 )	第四章 径向接触式动密封 .....	( 122 )
第三节 密封摩擦学基础 .....	( 42 )	第一节 填料函密封 .....	( 122 )
一、摩擦状态及特性 .....	( 42 )	一、密封结构及原理 .....	( 122 )
二、磨损形式与特性 .....	( 54 )	二、填料密封中力的分布与 计算 .....	( 123 )
三、流体润滑与动静压密封 .....	( 61 )	三、填料密封对材料的要求 .....	( 124 )
第三章 静密封机理与结构 .....	( 75 )	四、填料函的结构形式及 设计 .....	( 126 )
第一节 垫片密封概述 .....	( 75 )	五、填料密封的安装和使用 .....	( 129 )
一、垫片密封结构 .....	( 76 )	第二节 接触式弹性体密封 .....	( 130 )
二、垫片的种类和构造 .....	( 77 )	一、概述 .....	( 130 )
三、垫片的选用 .....	( 80 )	二、橡胶 O 形圈 .....	( 133 )
四、垫片的加工、保存及安装 技术 .....	( 84 )	三、橡胶唇形密封圈 .....	( 137 )
五、垫片泄漏的主要原因 .....	( 86 )	四、塑料密封圈 .....	( 140 )
第二节 强制垫片密封 .....	( 87 )	五、橡胶油封 .....	( 141 )
一、法兰密封面型式和加工 要求 .....	( 87 )	第三节 剖分型弹性环密封 .....	( 143 )
二、静密封机理 .....	( 89 )	一、硬填料 .....	( 143 )

二、活塞环 .....	(149)	第二节 浮环密封 .....	(208)
三、无油润滑密封件 .....	(152)	一、工作原理与特点 .....	(208)
<b>第五章 接触式轴向端面机械</b>		二、浮环类型及尺寸确定 .....	(209)
<b>密封</b> .....	(155)	三、浮环计算及材料 .....	(209)
<b>第一节 机械密封的构成原理及</b>		<b>第三节 密封封油系统</b> .....	(213)
<b>特性参数</b> .....	(155)	一、封油系统流程 .....	(214)
一、基本构成及作用原理 .....	(155)	二、主要参数确定 .....	(215)
二、机械密封基本类型 .....	(156)	三、封油系统用泵及管路 .....	(216)
三、主要参数及特性 .....	(158)	四、冷却器、过滤器及油气	
<b>第二节 机械密封中的主要</b>		<b>分离器</b> .....	(216)
<b>问题</b> .....	(170)	五、自控仪表 .....	(217)
一、端面温度问题 .....	(170)	<b>第四节 迷宫密封</b> .....	(218)
二、密封环的变形和热裂		一、工作原理及特点 .....	(218)
<b>问题</b> .....	(172)	二、类型与结构 .....	(219)
三、密封使用中的问题 .....	(177)	三、迷宫密封的计算 .....	(219)
<b>第三节 机械密封的典型结构及</b>		四、防尘迷宫密封 .....	(222)
<b>主要材料</b> .....	(181)	<b>第五节 螺旋密封</b> .....	(222)
一、典型结构 .....	(181)	一、工作原理与特点 .....	(222)
二、选择和使用中应注意的		二、类型与结构 .....	(223)
<b>问题</b> .....	(185)	三、螺旋密封计算 .....	(224)
三、主要材料 .....	(186)	<b>第六节 磁流体密封</b> .....	(226)
四、机械密封的故障现象及		一、磁流体 .....	(226)
<b>原因</b> .....	(193)	二、磁流体密封的结构和工作	
<b>第六章 非接触型动密封</b> .....	(195)	<b>原理</b> .....	(229)
<b>第一节 可控间隙端面机械</b>		三、提高磁流体密封能力的主要	
<b>密封</b> .....	(195)	<b>途径</b> .....	(230)
一、流体静、动压密封的结构和		四、磁流体密封与其他动密封	
<b>机理</b> .....	(195)	<b>形式的比较</b> .....	(231)
二、流体静压机械密封及其		<b>第七节 其他密封</b> .....	(232)
<b>计算</b> .....	(199)	一、钢球离心式停车密封 .....	(232)
三、流体动压机械密封及其		二、磁力传动 .....	(233)
<b>计算</b> .....	(201)	三、套筒密封 .....	(235)
四、脉动式密封 .....	(208)	<b>参考文献</b> .....	(237)

# 第一章 绪 论

## 第一节 流体密封概述

泄漏是一种常见的自然现象。所谓“泄漏”即物料从有限空间内部跑到外部，或者是其他物质由空间外部进入内部。这里所指的物料可以是气体、液体、固体或其他。

密封技术所要解决的即是防止或减少泄漏。造成泄漏的原因主要有下面两个因素，一是密封面上有间隙，二是密封面两侧有压力差或浓度差。消除或减轻任一因素，均可阻止或减少泄漏。减少泄漏的方法亦即密封的方法主要有下述几种：①减少密封部位数量；②增加流体流动阻力；③加入做功元件使流体反向流动；④抽走或注入密封介质。

流体密封包括流体静密封和动密封，是机器、设备的重要组成部分，是流体动力机械和过程设备中不可缺少的零部件。由于政府管理部门对安全日趋重视，而很大数量密封的存在，其泄漏对安全是一个严重的威胁；随着公众环保意识不断增强，特别是新的世纪以来，对大气污染、水污染以及自身健康的重视，已开始提出密封泄漏挥发物质逸出的控制，并逐步禁用含石棉的密封材料；而提高系统的经济效益，也要求密封产品有更高的可靠性和性能价格比。这些原因使提高流体密封技术对于大多数工业技术领域都有着重要的意义。

在石油化工、化工、动力、轻工、原子能等工业领域，大量的流程设备和运转机械均需要设置密封，以保证正常运行。密封技术或密封结构的设计有时决定机器设备的整体方案，如：石化工业的高压聚乙烯高压压缩机、超高压容器、聚乙烯反应器；石油钻采中的注水泵；原子能发电站中的循环泵。故而，密封技术虽然不是领先技术，但往往却是决定性技术。密封件虽然只是个零部件，但往往却能决定设备的安全性、可靠性和耐久性。特别对连续工作的石油、石化、化工企业，由于处理介质的特殊性，如有毒、易燃易爆等，一旦密封失效流体泄漏，将导致浪费原料、能源和污染环境，严重的可能导致火灾、爆炸和人身伤亡，并导致系统和工厂停产。

因此，重视机器设备的密封技术，加强密封的科学研究、技术开发和管理，可以提高设备效率，节省成本，保护环境，促进新装备的开发应用；保证机器设备安全、可靠、长期正常运转，保证石油化工装置的连续正常生产，促进生产发展和效益提高。

密封学是一门新学科，是研究密封规律、密封装置设计和使用科学原理的学科。密封学包括密封技术和密封科学，是一门多学科交叉性的边缘学科。它涉及到流体力学、传热学、润滑理论、固体力学与结构力学、热力学、材料科学、化学、物理学、冶金学、动力学以及其他学科理论。图 1-1 所示为密封技术涉及到的某些学科知识。以机械密封或浮环密封为例，要解决这些密封问题，就要考虑定子和转子元件由于受力和温度作用产生的变形以及振动、磨损对流体膜的流体动力特性的影响。也就是说要从流体动力学、弹性理论、传热学、摩擦学和振动理论等方面去研究分析密封的问题。这是从事密封技术的工程技术人员应该具备的理论基础和基本知识。

密封的功能是阻止泄漏。起密封作用的零部件称之为密封件。放置密封件的部位称为密封箱或密封室。较复杂的密封，特别是带有辅助系统的，称为密封装置。静止部位的密封称



为静密封；有相对运动部位的密封称为动密封。常用的动密封是旋转轴和往复杆的密封，简称轴封和杆封。此外，还有用于螺旋运动件和摆动件的密封。

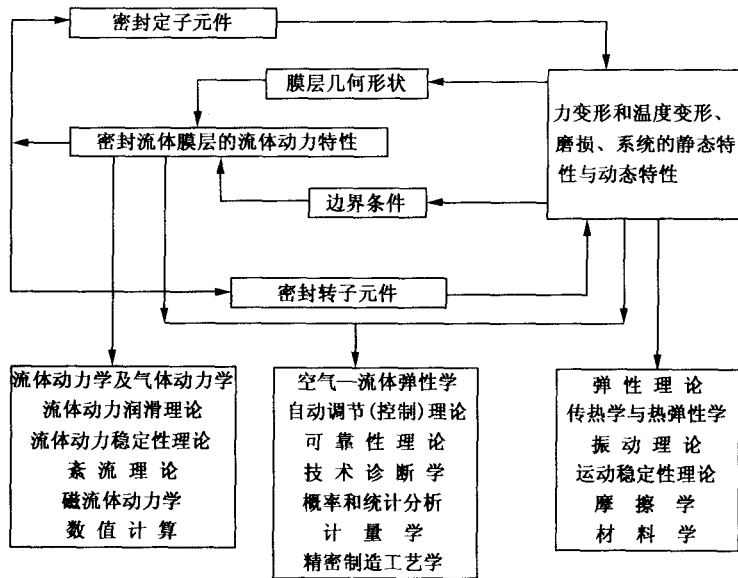


图 1-1 密封技术涉及到的学科知识

## 第二节 流体密封设计要求

为了适应工艺设备的更新、技术的改造以及确保现有生产装置长时间安全运转及减少非计划停产，泄漏量小、可靠性高、寿命长和适应性广的流体密封一直是工业界广泛关注并希望解决的技术问题。

工程和对密封的要求主要有以下几个方面：

(1) 密封可靠、泄漏少。石化、化工生产的物料大多为有毒、易燃、易爆物质，发生泄漏不但造成经济损失，而且还会引起人身中毒、污染环境等，因此要求密封件的密封需可靠、泄漏量少且可确定。

(2) 密封件要有一定的使用寿命。为了保证生产连续进行和降低成本，密封件必须有一定的使用寿命，一般使用期至少应保持一个生产周期(一年以上)。

(3) 耐腐蚀性。石化、化工生产中大多为腐蚀介质，腐蚀会减少使用寿命、降低密封件表面的加工精度和密封性能，因此密封件一定要耐介质的腐蚀。

(4) 安装调整方便。就目前企业维修人员技术水平而言这一点更为重要，有时往往由于维修人员不熟悉新技术而未能达到预期效果。

(5) 密封件品种多样，便于选取。为满足工业生产对密封的多种要求，应有多种结构、多种材料的密封或多种密封组合的组合式密封结构。

(6) 价格便宜。任何密封件，低廉的价格容易在生产中推广应用。由于大多数密封件为易损件，故应保证它有互换性，实现零件的通用化、标准化和系列化。

新世纪以来，社会和公众对密封的要求进一步提高。例如，20 世纪 70 年代末美国对一

般工业的指标泄漏率是  $10^{-3} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$ 。PVRC 推荐的暂定法兰连接密封准则中确定  $2 \times 10^{-3} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$  为标准级。而国内 70 年代末石化、化工企业对设备、管道等静密封的年泄漏要求规定泄漏点在 0.5‰ 以下且无明显泄漏，这和国外对泄漏率要求有较大差距。进入 80 年代，在工业生产大规模发展的同时，对环境质量的要求也越来越高，75% 来自阀门、泵和法兰的易挥发物在一年中的体积和重量就不能忽视了。因此一些工业发达国家，把对易挥发物逸出的控制提到日程上。美国环保局(EPA)在 1990 年发布了“空气净化法”(Clean Air Act)，其中：①把 200 种化学品列入控制对象；②对泵、阀门和法兰密封制订了易挥发物逸出量的限制规定。对泵、阀还规定分三个阶段实施，详见表 1-1。

表 1-1 EPA 对易挥发物逸出量的规定

装 置	执行阶段	逸出量/ppm	LDAR*	QIP**
泵	I	<10000	需要	需要
	II	<5000	需要	需要
	III	<1000 对高聚物单体 <2000	需要	
阀	I	<10000	需要	需要
	II	<500	需要	需要
	III	<20% 阀门 >500	需要	
法兰		<500	需要	

注：1 ppm =  $10^{-6}$ 。

\* 泄漏检测与维护。

\*\* 质量改进计划。

### 第三节 静密封技术进展

静密封，即结合面处彼此无相对运动的密封，就一座中等规模的石油化工厂来看，其静密封点就达数万个，被密封之介质品种繁多，且以易燃易爆、有腐蚀性或毒性的危险介质居多。密封一旦失效，不仅会造成浪费，而且还污染环境，甚至造成人身伤亡及财产损失，因此对其机理和元件的研究具有十分重要的意义。静密封是人类社会很早就使用的，如食品酿造中酒桶等的密封等。但一直到工业革命(18 世纪末)后蒸汽的利用对蒸汽机和锅炉压力容器的要求才使其得到快速的发展，化学工业和石化工业等的发展进一步加快了静密封的技术进步。现在的静密封技术已能解决大部分静密封问题，压力由真空到 300MPa，温度由  $-180 \sim 1200^\circ\text{C}$ ，直径到 12m。但是，由于静密封技术的影响因素十分复杂，理论研究很难，而实验成本高，因此静密封的重要性能指标——泄漏率仍不能定量确定，可靠性仍不能满足工程要求。

国外，在 20 世纪 70 年代后，为从根本上解决静密封的可靠性问题和石棉代用问题，开始了一系列国际合作研究，特别是美国机械工程师协会(ASME)下的压力容器委员会(PVRC)组织的垫片性能系列实验。现在该系列研究已取得相当的成果，初步确定了新的密封设计方法和准则。前十几年里，国内围绕静密封研究方面也做了大量工作，一些高校和科研院所相继成立了研究机构，开展了众多的研究开发工作，一大批使用密封件的石化企业也投入了大量的人力物力，一些密封件生产厂相继建立，各种密封新材料不断涌现出来，现已形成科研、生产和使用相结合的开发体系，为扭转七八十年代普遍存在的跑、冒、滴、漏

现象发挥着积极作用。目前,在产品品种和应用上有了较大进步。

近年来,国际上静密封技术有了重大的进展,并在不断发展,有关流体密封的各种技术会议有不少文献报导静密封问题,美国压力容器研究委员会(PVRC)螺栓法兰连接分会持续二十多年的研究工作有了重大的进展,新的密封理论、密封产品与材料、密封结构和方法不断涌现。垫片密封是静密封的主要形式,当前对这种密封方式的主要研究课题是:

- (1) 密封特性及泄漏量的影响因素;
- (2) 材料的环境响应(高温、蒸汽、空气、长时间);
- (3) 垫片设计参数;
- (4) 性能试验标准和评价方法;
- (5) 石棉材料的代用、筛选及耐火评定;
- (6) 对易挥发物逸出的控制;
- (7) 螺栓的交互作用及预紧方法;
- (8) 螺栓—垫片—法兰组合体的系统分析。

#### 1. 设计方法的新突破

长期以来,ASME 锅炉与压力容器规范中的设计规则以及 Rosshina 和 Markl 推荐的垫片设计参数广泛用于螺栓法兰连接的设计。这些称为  $m$  与  $y$  的系数已用了半个世纪,通常也能满足工业上的要求,但其致命缺点是它们未经实验验证,又因为缺乏标准的试验方法因而不能扩大到新的产品和材料中;此外 ASME 规范的系数不考虑泄漏率,显然也是不科学的;因此需要找到一种设计方法既考虑泄漏率又把连接的密封性作为设计准则。为了解决这些问题,由 PVRC 在 20 世纪 70 年代和其他技术协会开始进行了一系列研究项目,并已完成了室温垫片试验(ROTT),根据试验结果提出了新的设计试验方法。美国机械工程师学会(ASME)专题工作组(SWG)正在作进一步补充。此外,美国材料试验学会(ASTM)的一个课题组也在评定 PVRC 提出的垫片密封试验方法,并开始新一轮试验,以起草一个标准使制造厂能够向用户提供新的或改进的垫片系数。这些工作一旦完成,将出现两个重要变化:①新的密封设计的非规定性附录将出现在 ASME - VIII - 1 中,它与现在的附录 1 同时有效并最终替代它,它包括新的垫片常数( $G_b$ 、 $a$  和  $G_s$ ),载荷设计公式也将相应变动;②颁布执行新的 ASTM 垫片试验标准,并可用它来确定垫片常数。这些变化将使设计人员可以使用上真正经过垫片制造厂或供应商按照新的标准验证的垫片常数。

值得指出的是新的垫片常数及方法与传统 ASME 规范方法不同。后者不考虑垫片连接的密封性,而主要用来确定设计螺栓载荷或者用来证明按应力准则法兰尺寸可以满足设计要求。所以密封设计成功与否仅取决于  $m$  和  $y$  的精确与适合程度,而恰恰这些数值是有疑问的。新的设计方法中的设计参数来自标准试验方法得到的泄漏率数据,因此它考虑了螺栓连接设计的密封要求,即要求先计算垫片达到和保持相应于一定密封度等级的泄漏率必须的最小预紧和操作时的密封性参数,然后通过一连串与垫片常数有关的公式计算垫片达到和保持这样的泄漏水平所必需的最小垫片应力,从而确定螺栓载荷及尺寸,显然这种做法是科学合理的。

#### 2. 预紧控制的新方法

垫片应力主要来自螺栓预紧力,但实际上静密封结构是一对法兰、螺栓、垫片(和其他零件)组成的非线性静不定系统,因此对这样一个系统而言,在装配阶段螺栓力不可能全部转化为垫片应力;在操作阶段也不能一成不变。螺栓力的这种变化受许多因素支配,包括预紧工具与方法,温度、压力与循环,螺栓的蠕变,垫片的蠕变松弛等。其中均匀一致、足够

的螺栓预紧力是达到长期可靠密封的一个重要因素，但在装配中要做到这一点非常困难。还有许多因素影响螺栓预紧力，如拧紧工具、操作人员及控制的精确性、短时松弛及零件质量等，使得螺栓力相当分散。

而且即使用扭矩扳手，由于螺母与螺纹、支承面之间的摩擦系数不同，螺栓预紧力都有一个很大的分散带（ $\pm 50\%$ ）。此外由于各螺栓之间的弹性作用，即使均匀施加扭矩，各个螺栓力最终也相差很大。因此多年来，新的拧紧工具、程序及控制方法不断出现，如扭矩-转角控制法；拉伸控制的特殊螺栓；超声波控制螺栓伸长；用计算机控制把螺栓拉伸至屈服；一次同时上紧所有螺栓等。利用这些装置与方法，螺栓预紧力的分散度最小可控制在 $\pm 1\%$ 以内。

### 3. 性能研究的新领域

1974年以来的三十多年，在静密封研究领域中最富成果的是对垫片性能的深入研究。国际上这一成就主要来自PVRC、CETIM(法国机械工业技术中心)、BHRG、CEN等研究机构；在对垫片的室温性能进行了广泛研究以后，现在重点已转移到对它们的高温性能上。在高温或热循环下，加上氧化介质或化学、石油化工流体作用，垫片及螺栓发生蠕变和(或)松弛、垫片材质发生蜕变(氧化或热分解)等对连接密封性能的影响比在室温下显著得多，高温下短期看不出的泄漏，在经过一段时间后往往会发生泄漏，这涉及到温度-应力-时间的作用。在1982年，PVRC开始启动垫片高温性能研究，当时得到了四个国家十四个团体的响应，其预期目标是：①探讨螺栓连接在高温下的密封机理；②确定引起高温泄漏的诸因素及它们之间的关系；③提出一种能减少法兰高温泄漏的设计方法。1985年又出于代替石棉的需要，MTI(美国化学工业技术学会)又联合PVRC开展对非石棉垫片材料高温性能的研究工作，以确定一种评价非石棉垫片材料长期力学性能与密封性能的试验方法，至今已进行了多种试验：①模拟燃烧筛选试验；②高温时效拉伸/筛选试验；③热态密封试验；④时效松弛泄漏试验；⑤模拟燃烧密封性试验。这些方法正提供给生产厂及用户用于筛选和评定高温垫片。PVRC目前正在从事的螺栓法兰连接的研究课题范围相当广泛，见表1-2所示。

表 1-2 PVRC 螺栓法兰连接的研究课题

螺栓法兰连接研究	垫片试验与高温连接性能研究	法兰参数研究
高温垫片试验	柔性石墨筛选试验	法兰适用范围和设计参数的研究
蒸汽泄漏试验的相互关系	柔性石墨板的氧化作用	外部载荷对法兰泄漏和应力的影响
新的ASME垫片系数	长期空气和蒸汽筛选试验	外部载荷法兰的中间试验
具有全平面垫片的大直径	垫片逸出试验	24"~150"法兰系统有限元分析
螺栓法兰连接	垫片试验停顿时间的影响	

### 4. 当前国外静密封技术发展的重要趋向

#### 1) 易挥发物逸出控制的新要求

对静密封的要求仍然是减少泄漏，提高可靠性，延长使用周期，减少停车损失。过去对一般场合密封的评价，以眼不见滴漏就认为是无泄漏了，但实际上不但有一眼就看出的泄漏，还有光凭肉眼不易看见的气体或蒸汽泄漏。肉眼不能发觉的很小的泄漏，今天已被称为易挥发物的逸出(Fugitive Emission)。过去虽然许多企业因注重环境保护对泄漏提出过定量要求，并采取某些检漏方法进行监测。由于经济与技术方面的问题，除一些军事工业、核工业、宇航部门外，对密封的要求仍停留在比较低的水平。例如美国对一般工业的泄漏率指标是 $10^{-3} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$ 。PVRC推荐的暂定法兰连接密封准则中确定 $2 \times 10^{-3} \text{ mg/s} \cdot \text{mm}$ 为标准

级。进入 20 世纪 80 年代,在工业生产大规模发展的同时,对环境质量的要求也越来越高,来自阀门、泵和法兰的易挥发物已不能忽视。因此一些工业发达国家,已把对易挥发物逸出的控制提到日程上。美国环保局(EPA)在“空气净化法”(Clean Air Act)中,一方面把 200 种化学品列入控制对象;另一方面针对泵、阀门和法兰的密封制订了易挥发物逸出量的限制规定。对泵、阀的规定分三个阶段实施密封改进计划,要求最终将易挥发物逸出量控制在几百 ppm( $1\text{ppm} = 10^{-6}$ )以内。因此,国外有些密封件制造厂家已经把其达到这些控制规定的产品作为市场竞争的拳头产品,而研究部门也把注意力转向了这一方面。

## 2) 非石棉材料的新崛起

过去二十年里由于减少和禁用石棉及含石棉的制品,在密封材料领域中最显著的变化是传统的压缩石棉纤维制成的密封材料逐渐被其他非石棉无机或有机合成的材料替代。

自 1906 年英国发现首例涉及石棉肺沉积病例,继而发现石棉是肺癌、间皮瘤等的病因之一,在这之后的近一个世纪以来,国外一方面越来越严格地规定石棉粉尘的安全浓度,从早期的小于  $100\text{f}/\text{cc} \cdot \text{y}$  下降到目前多数国家对温石棉小于  $50\text{f}/\text{cc} \cdot \text{y}$ 、对兰石棉小于  $10\text{f}/\text{cc} \cdot \text{y}$ 。另一方面从 70 年代起,一些工业发达国家如美国及部分北欧国家先后制定了禁止或限制生产和使用石棉及含石棉制品的法令,因此选用代石棉材料已成为密封材料的转折点。经过 20 多年的发展。研究开发现已表现出两个主要方向:

一是各种类似石棉组成的替代物应运而生,仅就各种无机或有机合成纤维为增强材料与不同弹性体黏结压延而成的垫片板材而言,已开发的包括无机纤维、有机纤维、碳/石墨纤维等增强的橡胶基复合材料,在广泛范围内替代了石棉橡胶板。因为石棉具有很好的耐化学腐蚀、抗热、阻燃、加工容易、成本低等独特的性能,目前还没有一种代用品可以完全排斥石棉。而且新材料也不能断言无危险,所以很多非石棉材料是限制在一个特定的范围使用。今后从工艺及制备方法上开发性能更好的非石棉密封材料仍是主攻方向。

其二是随着非石棉材料的开发,可供选择的产品越来越多。但是目前有关它们的耐火性以及诸如密封性、失重、蠕变松弛、拉伸强度等的信息很少。还急需有标准试验方法来证明、比较与评价它们。因此 PVRC、美国化学工业材料技术学会(MTI)等研究机构从 1985 年起先后对非石棉垫片材料的长期性能及操作安全性等的试验方案、方法及装置进行了一系列研究。1993 年德国 MPA 和法国 CETIM 也提出了一个“螺栓法兰连接用非石棉垫片材料”的三年计划,有包括美、德、法、比利时、瑞士等二十二个团体参加。Marchand、Derenne、Bazergui 等建立了基于失重的时效参数( $A_p$ )与非石棉垫片长期性能的关系,以及热持久曲线图借此估计给定操作温度下的预期工作寿命或一定使用寿命下的最大操作温度。

## 5. 产品结构的新变革

柔性石墨自 20 世纪 60 年代问世以来,因其优良的密封效果备受人们青睐且发展迅速。尤其在上述淘汰石棉的技术需要下,在许多场合可以把其作为石棉代用品而获得了广泛应用。国外在开发以柔性石墨为基体的密封垫片方面有以下两个特点:

(1) 国外石墨资源不足、生产性污染严重、价格相对较高等都促使其开发不少新结构、新工艺和新产品,以适应各种特定需要。由于仅用非石棉纤维代替石棉作为增强材料制成的密封材料在某些方面还有欠缺,特别是耐化学腐蚀、耐高温性、抗蠕变松弛性不及传统的石棉材料,因此柔性石墨以其优异的耐化学腐蚀( $0 \sim 14\text{pH}$ )、耐辐照、耐高低温 [ $-240 \sim 650^\circ\text{C}$ (非氧化性介质)]可以填补其空缺。而单纯的柔性石墨材料存在机械强度不高(加黏剂耐温性下降)、不耐氧化( $<400 \sim 500^\circ\text{C}$ )等缺点。当前国外应用比较广泛的以柔性石墨为

基体的垫片品种有四类：金属箔(或冲孔板)增强石墨垫、覆石墨箔金属齿形垫、金属缠绕石墨垫和金属环加强纯石墨垫。

(2) 对复合结构的设计特征以及石墨材料本身材质方面进行更深入的研究。因为有以下两方面因素对石墨复合垫的使用性能有重要影响。

① 加工因素。对柔性石墨的基本要求是有适宜的晶体结构与高的纯度。其结构及相应的力学性能主要受原材料品质、化学处理、热处理和压成石墨箔的生产参数等影响，柔性石墨的纯度对密封性能、机械性能和抗腐蚀性能都有较大影响。

② 使用因素。影响石墨垫片密封性能的重要因素是预紧与操作时的垫片应力，适当高的垫片应力会使泄漏减少几个数量级。由于垫片应力受给定法兰强度及规定尺寸的螺栓所限，增加垫片应力仅可能从改进垫片本身的结构，即采用金属增强的办法来达到。影响金属/石墨复合板的因素很多，主要有：金属板的材质与型式(箔、冲孔、丝网)；石墨品质与制造工艺(密度、含杂质量、黏结剂)；垫片宽度、直径；法兰密封面粗糙度、宽度；使用温度、垫片应力以及流体性质等。

法国机械工业技术中心(CETIM)流体密封部 Birembant、Ledauphin 比较系统研究了法国工业中应用的金属增强石墨垫的机械与密封性能，试验垫片取自法、德、英、澳大利亚、美、日等国，最高试验温度为 450℃，试验压力为 40bar(He 气)；垫片应力分别取 35MPa 和 50MPa；两种典型尺寸(PN40DN40, PN40DN200)。试验结果表明金属增强石墨垫片的密封性比纯石墨好，但金属增强的方式对密封性能没有特别影响，在 450℃下若垫片应力保持不变，对密封性影响也不大。高温下，蠕变均低于其他垫片，大多数垫片在泄漏之前有较大的卸载。此外，石墨的密度高，泄漏率小。

性能结构较好几种石墨垫片有：①金属环加强的纯石墨垫(Lattygraf Reflex)，起源于法国专为核电站开发的一种垫片。这种垫片的工作原理是基于在任何条件下，必须保持法兰与垫片之间的金属互相接触，因此设计时要仔细计算石墨高度(体积)、金属的表面粗糙度、垫片比压(与石墨密度、流体压力、温度、法兰等有关)。该垫片具有较低的压缩载荷、回弹性大、重现性好、对压力温度的波动不敏感，在同样条件下比金属缠绕垫密封性好等优点。②用金属箔加强的石墨垫片过去采用黏结剂将石墨与金属贴合。现在已有不用黏结剂而直接与金属箔贴合的工艺，使这种垫片可经受更高温(不耐高温的金属板除外)。③传统缠绕垫的设计是根据施加足够大小的载荷使垫片压缩到它的最佳厚度，但对于压力等级较低的法兰，由于垫片应力受到小尺寸螺栓及数量以及法兰本身刚度的限制，则很难达到这一要求。因此 Cary Briggs 和 Autoinc Serrant 提出一种低应力密封的新概念——LS 垫片。LS 基于修改传统的缠绕垫，使最初压缩阶段仅产生石墨与法兰密封面接触，以便允许在较低螺栓应力下达到最佳压缩厚度，因此预紧力减少(约二分之一)、密封性提高(相差 1 个数量级)、可靠性也增加(经受高温作用不漏)。

(3) 改性聚四氟乙烯密封材料的新发展。聚四氟乙烯(PTFE)因化学稳定性好、摩擦系数低、温度范围广(-240~260℃)、无沾黏性、无污染等优点，使其成为密封材料中的另一种广泛应用的材料。但作为密封材料，其蠕变大、回弹性差成为 PTFE 的致命伤。曾经一度改用包覆方式代替 PTFE，这在理论上应无问题，但实际上仍有加工不易、表面瓢曲或包覆层遭损伤而造成介质侵蚀等问题，因此只能通过改性或填充的方法使 PTFE 性能得到改善，如早年推出的膨胀四氟密封带，即是改性产品之一。但尚存在两个问题：一是由于工艺原因，填充材料难以分散均匀，造成温度的各向异性及不均匀点，不能减少蠕变；二是因传

统的加工方法(模压—烧结)难以做出大张薄板,给垫片加工带来不便。近年来 Gore 公司又推出膨胀聚四氟乙烯密封板(1.22m × 1.42m),不用任何黏结剂或填充材料,而其压缩性能大(40%)、耐高温(315℃),比纯四氟蠕变松弛率低(32.8%/100℃ · 22h),且切割安装方便,需要的垫片应力小。

## 6. 国内静密封技术开发研究状况

### 1) 静密封技术研究

20 世纪 80 年代初,原石油部设计管理局相继组织过全国性动静密封调查,针对当时石化行业的密封状况,提出了推进密封技术发展的若干建议,如密封结构设计、新材料开发以及加强研究工作等。在这之后,国内密封技术在性能研究、新结构、新材料开发、密封件标准化等方面均取得了很多进展。

目前国内法兰垫片使用 ASME 规范旧  $m$ 、 $y$  系数方法,但 ASME 规范采用的密封参数  $m$ 、 $y$  值是不可靠的,其密封设计方法和垫片密封性能试验方法本身都存在一定的局限性。我国在这方面也做了大量的工作,国内研究单位特别是高等院校进行了大量的试验研究,取得了可喜的成绩。如石油大学承担的法兰垫片密封参数及新型结构的研究,其常温垫片密封试验装置,包括微机数据采集与控制系统已接近国际先进水平。国内提出的密封设计方法、试验方法和紧密性准则已发展到实用阶段。除了在理论研究方面之外,在实用技术、发展各种形式的垫片和新材料方面也做了许多工作。主要的方面有:

(1) 金属缠绕垫片——膨胀石墨缠绕垫片不仅具有石棉缠绕垫的优点,且避免了高温下石棉脱结晶水而老化,存在“毛细”现象进而导致渗漏的缺点。况且石棉的“毛细纤维”侵入人的呼吸道,对人体极为有害。目前我国不仅有马口铁、低碳钢、不锈钢的膨胀石墨缠绕垫,还研制成了钛材、蒙乃尔合金等材料分别缠绕膨胀石墨与聚四氟乙烯的垫片,解决了高温和腐蚀性部位的密封问题。最近又出现了纯膨胀石墨缠绕垫,其性能优于金属缠绕垫,且结构简单、易于生产、成本低。

(2) 金属包覆垫片。以往国内无专业厂生产,多用手工或模具制作,质量难以保证,密封效果欠佳。现在国内密封件厂已采用自行研制的滚压机生产包覆垫片,可加工  $\phi 300 \sim 4000\text{mm}$  的异形和波形垫片,尤其适合制造大直径垫片和多管程换热器用垫片。其加工的垫片尺寸精度高、外观质量好、密封性能良好,达到了国外同类产品的技术水平。

(3) 增强垫片——膨胀石墨是一种新型的密封材料,其具有足够的弹性、柔软性、自润滑性和不渗透性,但其强度低是其弱点。为此而出现了在原有各种垫片的两表面再复合膨胀石墨的垫片,极大地提高了密封性。为了运输、使用和安装方便,又相继出现了以金属网或冲成鱼鳞片状的薄板,再两面复合膨胀石墨的垫片,取得了满意的密封效果。不但可用于石油化工,且用作汽车发动机的汽缸垫片已获成功。

(4) 膨胀聚四氟乙烯(PTFE)不仅保留了 PTFE 原有的优良性能,如化学稳定性好、摩擦系数低和不老化等特点,并且还扩大了使用温度范围,提高了抗拉强度,同时还具有一些新的特性,如多孔性、透气性、疏水性和极高的韧性等。根据其制造工艺和添加剂的不同,可制成法兰密封胶带(代垫片)、阀杆填料和 GFO 纤维泵用填料。其中密封胶带强度高、密封性好,尤其是对损伤或异形法兰密封的适应性强、施工简便,其经济性较好。

(5) 常用垫片性能的试验研究。这方面过去一直是薄弱环节,近年来才有所加强。如石油大学在参考美国 ASTM F586—79 标准和美国压力容器研究委员会(PVRC)推荐之 A、B 试验方法的基础上,对缠绕式、耐油石棉橡胶、金属包覆、纯的和带骨架的膨胀石墨、八角和

金属椭圆等形式的垫片进行了研究,取得了大量试验数据,标绘了各种特性曲线。在此基础上,指出了各种垫片的结构尺寸、使用范围、制造要求及其密封参数值,推荐了法兰连接密封设计的新方法以及石化装置法兰连接的紧密性准则。

## 2) 垫片新标准的制订

垫片标准或其技术条件是制造和选用垫片的依据,但较长时间其制订工作未受到重视,以致使我国的垫片标准很落后。在20世纪90年代以后,这方面工作得到了加强,国家技术监督局发布的垫片标准已基本包含了常用的垫片系列,如JB 4704—92《非金属软垫片》、JB 4705—92《缠绕垫片》、JB 4706—92《金属包垫片》。GB 150—98《钢制压力容器》中也包含了八角垫、椭圆垫、双锥环垫等的标准。

## 3) 垫片材料和垫片生产

(1) 以石棉为基体的密封材料 这种材料仍在大量使用,但其制成成品性能因生产厂的不同而有很大差异。

(2) 膨胀石墨 这是近年来开发的新一代密封材料,国内已开发了以其为基础的系列产品。

(3) 金属包覆垫片 其性能随制造方法的改进而有较大改善。采用滚压成形法及包覆材料拼接处氩弧焊,使产品垫片表面平整,转角处过渡圆滑,且对形状复杂或特大直径规格的垫片,也可用滚压成形生产。但由于金属包覆垫密封面硬度高,与其他软垫片相比,其密封性能差一些,不过对泄漏率要求不高的低压或中压液体介质的密封,如一般中高温油品的密封,已能满足要求。

(4) 膨胀石墨缠绕垫片 它是随膨胀石墨板材的开发应运而生的垫片,其质量一度较好,受到用户的欢迎。其生产质量对密封性能影响很大。

(5) 带骨架的膨胀石墨增强垫片 这是一种结构简单、密封性能较好的垫片,其泄漏率约为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$  mg/s,可用于中低压液体或气体介质的密封,并可根据需要冲压成复杂的形状,其使用范围可与石棉橡胶板垫片媲美。从国内垫片生产情况看,最大的问题是产品质量不能保证,严重影响了密封性能。

# 第四节 流体动密封技术进展

流体动密封分为接触式、非接触式、组合式和封闭式四大类。按密封件和使用特点,常用的有:机械密封(轴向端面)、填料密封(径向环缝)、迷宫密封(固定间隙)、组合密封(浮环、铁磁流体密封)、动压密封(螺旋、叶轮密封)、封闭式机泵。

## 1. 机械密封

在动密封中机械密封用量占总量的80%以上,因此对其基本理论的研究极为重要。机械端面密封(Mechanical Face Seal)是一种轴向端面密封,简称机械密封,又称端面密封,是常用的旋转轴密封,特别是在石油化工装置的机泵设备中应用更加普遍。

1885年英国最早出现第一个机械密封专利,直到1900年才开始用于轴承密封。1908年有几个汽轮机密封,改进为轴可移动的密封环密封。1913年出现在汽轮机上使用双端面机械密封的英国专利。1919年出现单端面机械密封。1920年以前小型家用冷冻压缩机和汽车上水泵的轴封采用了机械密封。1930年用于内燃机水泵轴封。1940年采用了机械密封在一定程度上解决了轻烃泵密封问题。自1940年起主要是改进密封面材料,出现了陶瓷、石墨、



硬质合金密封,同时加工技术使表面粗糙度值降低,从而使机械密封的使用参数有了提高。1945年在结构上出现了平衡型密封、中间环密封和其他专利的机械密封,并在石油化工机泵中使用,将 $pV$ 值提高到 $80\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ 。1957年世界上制造出第一套金属焊接波纹管机械密封。1962~1963年出现了高参数的热流体动力楔密封以及各种非接触式流体静压密封和流体动压密封。此时机械密封在美国已得到普及和推广,并应用到石油和化学工业中。前苏联和欧洲国家相继开始广泛应用,50年代将机械密封用于炼油厂的离心油泵轴封。我国兰州炼油厂在建厂时离心油泵使用机械密封,60年代初开始自制并推广应用机械密封。其他炼油厂也逐渐推广并做了改进。目前炼油厂工艺装置机泵中有85%以上采用机械密封。化工和其他行业也推广使用机械密封。现在我国有了机械密封标准、系列产品、专业制造厂和研究单位。

机械密封的目前水平是单级密封压力从 $10^{-3}\text{Pa}$ (真空)到 $35\text{MPa}$ 范围内可以安全使用;使用温度范围也在不断扩大,最高达 $1000^\circ\text{C}$ ,而低温深冷也工作可靠,机器的转速可高达 $50000\text{r/min}$ , $pV$ 值达 $1000\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ 。由此可见,其适用范围相当广泛。

机械密封端面流体膜的相态变化,往往是造成其工作不稳定的主要原因之一。特别是石油化工设备用机械密封在汽液两相密封时尤其突出。对烷基化、催化裂化和铂重整等装置的轻烃泵,将非平衡型改成平衡型密封。根据不同情况增设不同冲洗装置,使寿命由几十天提高到一个周期或其以上。

炼油厂高温热油泵( $350\sim 400^\circ\text{C}$ )机械密封,其寿命达一个周期以上的成功经验(以减底泵为例)有:GX改进型机械密封,动静环均为YG6,不打冲洗;双端面机械密封;高温低失弹集装式波纹管机械密封;膨胀石墨填料;不打冲洗的填充聚四氟乙烯碗形密封等。可见同样工况能采用不同密封结构完成密封,但值得指出的是,有些经验移植到其他单位并不一定完全适用,其原因是缺乏基础理论数据,不能保证可靠的设计。

## 2. 其他动密封

迷宫-螺旋密封可用于含坚硬颗粒、有腐蚀性介质的泵轴密封,它由单螺旋的黏滞密封发展到与介质黏性关系不大并带停车机构的密封。它具有结构简单、没有零件接触、磨损小和寿命长等优点。还可进一步发展成为迷宫-螺旋泵。

高速旋转机械(离心气压机)的轴封,常用办法是用迷宫密封、液体浮环和液体机械密封。前者泄漏量大,后者需要一套复杂的供油系统,还存在着寿命短、封油污染等问题。60年代出现了气体润滑的非接触式机械密封,其后又出现了气体润滑的浮环密封,且对此进行了结构优化和性能试验,试验说明,它可以代替对数螺旋线槽。圆弧槽比螺旋槽制造和绘图都方便。

磁力传动密封泵是没有轴封结构和无泄漏的新型密封技术。它通过隔离套将泵轴与动力轴隔开而不直连,由泵轴与动力轴上的永磁体来传递动力与力矩,也省去了联轴器,使动密封变成了静密封。这对输送特殊介质,尤其是有毒介质会更安全。这一技术已在某些石化企业的 $55\text{kW}$ 丙烷泵上应用成功。但也存在着问题,即磁体价格昂贵,泵内轴承的润滑与介质的润滑性和腐蚀性有关。

填料密封在工业应用中还占有一定比例,其主要用于阀杆、搅拌釜和往复机械的轴封。当前所用填料的品种和规格多种多样,但主要还是采用传统的方法,即单一材料一圈一圈地装填与拆卸。整个填料受力极不均匀,装卸不便,有时极为困难。为此已开发采用不同材料组合、受力均匀的集装式填料。这对填料密封而言,是一个突破性的变革,很有发展前途和