

石油化工卓越工程师规划教材（试用）

过程装备密封技术

石油化工卓越工程师规划教材编委会 组织编写

冯子明 主编

李宝彦 主审

Process Equipment Sealing Technology



中国石化出版社

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

石油化工卓越工程师规划教材(试用)

过程装备密封技术

石油化工卓越工程师规划教材编委会 组织编写

冯子明 主编

李宝彦 主审

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统而全面地介绍了过程装备中传统密封技术和新近出现的密封技术, 主要内容包括流体密封的理论基础、垫片密封、填料密封、胶密封、机械密封、非接触密封及泄漏检测技术。

本书可作为高等院校高年级学生、研究生的教材, 也可供从事密封设计、制造和维护管理工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程装备密封技术 / 冯子明主编. —北京: 中国石化出版社, 2015. 6
石油化工卓越工程师规划教材
ISBN 978-7-5114-3319-0

I. ①过… II. ①冯… III. ①化工过程-化工设备-密封-技术-高等学校-教材 IV. ①TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086910 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

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

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 443 千字
2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷
定价: 40.00 元

《石油化工卓越工程师规划教材》

编委会

委 员 (以姓氏笔画为序):

- 王文友 沈阳工业大学辽阳校区教授、化工装备学院院长
- 王金刚 西安石油大学教授、化工机械系主任
- 王宗明 中国石油大学(华东)副教授化工装备与控制工程系主任
- 王振波 中国石油大学(华东)教授、化工学院副院长
- 刘 伟 广东石油化工学院副教授、工业装备与控制工程系主任
- 刘康林 福州大学教授、过程装备与控制工程设计研究所所长
- 张 琳 常州大学教授、过程装备与控制工程系主任
- 张 颖 东北石油大学教授、过程装备与控制工程系主任
- 李 伟 东北石油大学教授、机械科学与工程学院副院长
- 李志安 沈阳化工大学教授
- 陈 兵 西安石油大学副教授、机械工程学院副院长
- 陈建义 中国石油大学(北京)教授
- 陈海峰 陕西科技大学教授、过程装备与控制工程系主任
- 范怡平 中国石油大学(北京)教授、过程装备与控制工程系主任
- 金有海 中国石油大学(华东)教授、教育部过装专业教学指导委员会委员
- 金志浩 沈阳化工大学教授、能源与动力工程学院院长
- 曹建树 北京石油化工学院副教授、机械工程学院副院长
- 戴 光 东北石油大学教授、教育部过装专业教学指导委员会委员
- 魏耀东 中国石油大学(北京)教授

前 言

现代过程装备与控制工程是工程学科的一个分支，是机械工程、化学工程、机电工程、能源技术、信息技术、材料工程等学科的交叉学科，在多个大学科发展的基础上交叉、融合而出现的新兴学科分支，其中密封问题又贯穿于整个现代过程装备中。随着现代工业技术的快速发展，在石油、化工、医药、冶金、能源等行业的过程装备中，密封占据着越来越重要的地位。

现代石油石化行业的工业工艺过程越来越复杂、机械设备运行条件越来越苛刻，生产系统或单元装置的安全性、可靠性和经济性很大程度上取决于密封的有效性。同时现代密封新技术的出现，普及率越来越高，为适应相关行业对大学毕业生的要求不断提高，有必要添加新的内容，以满足行业发展的需要，让卓越工程师一进入相关行业便能快速进入角色，为过程装备的密封提供技术指导。

本教材从理论性和实用性相结合出发，全面系统地介绍了过程工业常用密封技术的主要内容、基本概念及最新进展。重点阐述了流体密封的理论基础、垫片密封、填料密封、胶密封、机械密封、非接触密封及泄漏检测技术。并对密封技术的基本概念、理论、结构形式、密封特性、材料、使用维护和故障处理等方面进行论述。

本教材引用了与密封技术相关的最新标准规范，内容全面，取材新颖，叙述清楚，理论联系实际，突出实用特色。本书适合作为卓越工程师计划专业的教学用书，也可作为高等院校相关专业课程的教材，还可以作为其他高等院校科研人员及科研院所技术人员的实用参考书。

在本书编写过程中，得到了东北石油大学机械科学与工程学院过程装备与控制系诸多老师的支持和帮助，特别感谢李宝彦教授对本书的特别关注和精心指导，提出许多有建设性的意见和见解；特别感谢中国石油大学郝木明教授的细心审阅和有益建议。本书的第1~7章由冯子明编写，第8章由张永功编写。李琦、张金东、顾慧彬、丁焕焕、赵向茹、方欣等参与了本书的整理、编排、绘图等工作，在此向他们一并表示感谢。

因作者经验和水平有限，书中定有谬误和不当之处，欢迎各位读者批评指正。

目 录

| | |
|-----------------------------|--------|
| 第 1 章 绪论 | (1) |
| 1.1 泄漏与密封 | (1) |
| 1.2 密封的基本方法 | (2) |
| 1.3 密封的分类 | (3) |
| 1.4 密封的选型 | (4) |
| 1.5 密封材料的一般要求 | (5) |
| 1.6 摩擦、磨损和润滑 | (6) |
| 1.7 密封技术发展的历史过程 | (7) |
| 1.8 密封技术的发展趋势 | (8) |
| 复习思考题 | (10) |
| 第 2 章 流体密封的理论基础 | (11) |
| 2.1 流体泄漏计算方法 | (11) |
| 2.2 密封简单模型中流体流动 | (13) |
| 2.2.1 缝隙流动 | (13) |
| 2.2.2 孔口与夹缝出流 | (24) |
| 2.2.3 转盘侧隙流动 | (24) |
| 2.3 密封摩擦学基础 | (25) |
| 2.3.1 摩擦表面状态及特征 | (26) |
| 2.3.2 摩擦状态、摩擦影响因素 | (27) |
| 2.3.3 磨损形式与特征 | (28) |
| 2.3.4 流体润滑与密封 | (33) |
| 复习思考题 | (36) |
| 第 3 章 垫片密封 | (37) |
| 3.1 中低压设备和管道的垫片密封 | (37) |
| 3.1.1 垫片密封的基本结构与工作原理 | (37) |
| 3.1.2 垫片的种类及适用范围 | (39) |
| 3.1.3 法兰密封面形式和加工要求 | (43) |
| 3.1.4 高温螺栓法兰连接系统防漏措施 | (45) |
| 3.1.5 影响垫片密封的因素与垫片的选择 | (46) |
| 3.1.6 垫片的保管及安装技术 | (49) |
| 3.1.7 垫片密封的失效分析 | (52) |

| | |
|-------------------------------|---------|
| 3.2 高压设备和管道的垫片密封 | (53) |
| 3.2.1 强制式密封 | (54) |
| 3.2.2 自紧式密封 | (55) |
| 3.2.3 高压管道密封 | (59) |
| 3.2.4 超高压容器的密封结构 | (60) |
| 复习思考题 | (63) |
| 第4章 胶密封 | (64) |
| 4.1 胶密封技术概述 | (64) |
| 4.1.1 密封胶的分类及其特性 | (64) |
| 4.1.2 密封胶的密封机理 | (67) |
| 4.1.3 密封胶的选用 | (68) |
| 4.1.4 密封胶的涂胶工艺 | (68) |
| 4.1.5 密封胶的使用注意事项 | (69) |
| 4.2 带压注剂密封技术 | (70) |
| 4.2.1 概述 | (70) |
| 4.2.2 密封剂的品种与性能 | (71) |
| 4.2.3 密封剂的选用 | (73) |
| 4.2.4 带压注剂堵漏的基本方法 | (73) |
| 4.2.5 带压堵漏的安全施工 | (77) |
| 复习思考题 | (79) |
| 第5章 填料密封 | (80) |
| 5.1 软填料密封 | (80) |
| 5.1.1 基本结构及密封原理 | (80) |
| 5.1.2 力的分布与计算 | (82) |
| 5.1.3 填料函的结构形式与主要结构尺寸 | (84) |
| 5.1.4 密封材料的选择 | (88) |
| 5.1.5 软填料密封的安装、拆卸、使用与保管 | (92) |
| 5.1.6 软填料密封存在的问题与改进 | (104) |
| 5.1.7 软填料密封常见故障及处理措施 | (108) |
| 5.2 成型填料及油封 | (109) |
| 5.2.1 成型填料 | (109) |
| 5.2.2 油封 | (125) |
| 5.3 硬填料密封 | (131) |
| 5.3.1 活塞环 | (132) |
| 5.3.2 活塞杆填料密封 | (137) |
| 5.3.3 无油润滑活塞环、支承环及填料 | (142) |
| 复习思考题 | (146) |

| | |
|----------------------|-------|
| 第 6 章 机械密封 | (148) |
| 6.1 机械密封的基本工作原理 | (148) |
| 6.1.1 概述 | (148) |
| 6.1.2 机械密封的基本结构、工作原理 | (148) |
| 6.1.3 力学分析 | (150) |
| 6.2 机械密封的基本类型 | (152) |
| 6.3 机械密封的设计 | (156) |
| 6.4 机械密封材料 | (165) |
| 6.5 机械密封的循环保护系统 | (173) |
| 6.5.1 冲洗 | (173) |
| 6.5.2 冷却 | (177) |
| 6.5.3 过滤 | (180) |
| 6.5.4 封液系统 | (183) |
| 6.6 机械密封性能与试验 | (189) |
| 6.7 机械密封的选择与使用 | (192) |
| 6.8 机械密封的失效分析 | (196) |
| 6.9 API 682 标准简介 | (200) |
| 复习思考题 | (201) |
| 第 7 章 非接触密封 | (202) |
| 7.1 间隙密封 | (202) |
| 7.2 迷宫密封 | (206) |
| 7.2.1 结构形式和工作原理 | (206) |
| 7.2.2 主要尺寸参数及材料 | (209) |
| 7.3 螺旋密封 | (210) |
| 7.3.1 螺旋密封的密封机理 | (210) |
| 7.3.2 螺旋密封方式、特点及应用 | (212) |
| 7.3.3 螺旋密封设计要点 | (212) |
| 7.4 迷宫螺旋密封 | (214) |
| 7.4.1 基本结构和工作原理 | (214) |
| 7.4.2 迷宫螺旋密封分析计算 | (214) |
| 7.5 气膜密封 | (217) |
| 7.6 液膜密封 | (225) |
| 7.7 离心密封 | (231) |
| 7.8 浮环密封 | (236) |
| 7.9 停车密封 | (243) |
| 7.10 磁流体密封 | (246) |
| 复习思考题 | (251) |

| | |
|---------------------------------|-------|
| 第 8 章 石油化工设备泄漏检测技术 | (252) |
| 8.1 引言 | (252) |
| 8.2 检漏方法的分类和特点 | (252) |
| 8.3 压力检漏法 | (255) |
| 8.3.1 水压法 | (255) |
| 8.3.2 压降法 | (255) |
| 8.3.3 听音法 | (257) |
| 8.3.4 超声波法 | (257) |
| 8.3.5 气泡检漏法 | (258) |
| 8.3.6 集漏空腔增压法 | (260) |
| 8.3.7 氨气检漏法 | (261) |
| 8.3.8 卤素检漏法 | (263) |
| 8.3.9 放射性同位素法 | (264) |
| 8.3.10 氨质谱检漏仪吸嘴法 | (264) |
| 8.3.11 蒸汽冷凝称重法 | (266) |
| 8.4 真空检漏法 | (267) |
| 8.4.1 静态升压法 | (267) |
| 8.4.2 液体涂覆法 | (267) |
| 8.4.3 放电管法 | (269) |
| 8.4.4 高频火花检漏器法 | (270) |
| 8.4.5 真空计法 | (270) |
| 8.4.6 卤素检漏法 | (271) |
| 8.4.7 氨质谱检漏法 | (271) |
| 8.5 其他检漏方法 | (271) |
| 8.5.1 荧光检漏法 | (271) |
| 8.5.2 半导体检漏法 | (272) |
| 8.5.3 示踪气体封入法 | (273) |
| 8.5.4 气瓶法 | (273) |
| 复习思考题 | (273) |
| 附录 常用国内密封标准目录 | (274) |
| 参考文献 | (282) |

第 1 章 绪 论

在石油化工、化工等过程工业的生产、加工、储存、运输等各个环节，常常伴随着“跑、冒、滴、漏”现象，同时这些泄漏的介质具有易燃、易爆、高温、高压、有毒、有害、腐蚀或放射性等危险性，是个“老、大、难”问题。泄漏是过程工业机械设备最常见的故障，据国外报道，泄漏事故为所有事故发生频率之首。过程工业中如容器、塔器、换热器、反应器、管道、管件、阀门等一旦发生泄漏，轻则造成能源和原材料的大量浪费、设备不能正常工作，重则导致设备报废、整个工厂或系统陷于瘫痪、人员伤亡和严重的环境污染。

据统计，在日常的机器设备维修中，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%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%。美国的密封专家认为，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。

1.1 泄漏与密封

1) 泄漏(leakage)

泄漏是指介质，如气体、液体、固体或它们的混合物，从有限空间内部跑到外部，或者其他介质从空间外部进入内部。单位时间内泄漏的介质质量称为泄漏率(leakage rate)。

泄漏的形式包括界面泄漏、渗漏和扩散。

(1) 界面泄漏

通常将通过密封面间隙的泄漏称为界面泄漏。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泄漏称为渗漏。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，造成泄漏的原因主要有两个方面：一是密封面上有间隙(包括宏观间隙或微观间隙)。这种间隙是由于机械加工的结果，在生产实际中表现为设计、制造、安装和维修过程中的失误以及工艺操作过程中存在的振动、冲刷、汽蚀等机械破坏，环境变化(温度、压力、转速及其波动)和介质的腐蚀使得密封面上必然的存在各种缺陷及形状、尺寸偏差。

二是密封面两侧有压力差、浓度差、温度差、速度差等。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(seal)

密封是防止流体或固体微粒从相邻结合面间泄漏，以及防止外界杂质如灰尘与水分等侵入机器设备内部。能起密封作用的零部件称密封件。较复杂的密封连接称为密封系统或密封装置。

在工程实践中，常用密封性或紧密性这个概念来评价密封连接的有效性。系统和设备的紧密性可以通过泄漏率的大小来评定。从物理意义上讲，并不存在绝对的紧密性。所谓紧密性应该像其他物理量一样，可以定量地加以衡量。

连接的紧密性一般是这样定义：在一定的操作条件下，连接的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率；或在规定的泄漏率指标下，连接能够承受特定的操作条件。满足上述条件的连接是紧密的，反之则认为是不紧密的。实际上连接的泄漏率大小是与检漏条件、检漏方法、检漏人员等密切相关的。不同的测试人员或采用不同的检漏方法、不同的检漏设备所得到的测试结果往往不一致。因而，对系统和设备的紧密性的较严格定义为：在某一特定的操作条件下，采用指定的、具有相应测试分辨率的检漏方法测得的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率。满足上述条件的系统和设备是紧密的，反之是不紧密的。

不同的工业部门对系统和设备的紧密性有不同的要求。例如，GB/T 4622.3—2007《缠绕式垫片技术条件》中所规定的四级泄漏率指标($1.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{s}$)可基本满足一般工业和某些石油化工企业装置的紧密性要求。对核能和某些重要的化工设备，其泄漏率则应控制在 $10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ 以下。而心脏起搏器所用同位素电池的泄漏率数量级约为 $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

泄漏率通常用体积流率、质量流率以及 pv 流率来表示，其常用的单位为 cm^3/s 、 g/s 、 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 等。

1.2 密封的基本方法

密封的本质在于阻止被密封的空间与周围介质之间的质量交换。密封的方法主要有下述几种。

1) 尽量减少密封部位的数量

在进行机器和设备设计时，在满足工作性能的前提下应尽可能减少设置密封部位。特别是对于那些处理易燃、易爆、有毒、强腐蚀性介质的容器和设备，更应少采用密封连接。例如用单级单吸泵和单级双吸泵输送上述化工物料时，宜选择前者，因为单吸泵比双吸泵少一处密封。

2) 堵塞或隔离泄漏通道

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(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(如缓冲气密封、氮气密封等)。

4) 增加泄漏通道中的流动阻力

介质通过泄漏通道流动时会遇到阻力。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。例如流动阻力与泄漏通道的长度成正比,与泄漏通道的当量半径的4次方(对于层流状态)或3次方(对于分子流状态)成反比。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) 采用永久性或半永久性连接

采用焊接、钎焊或利用胶黏剂可形成永久性或半永久性连接。

7) 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。

8) 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。

1.3 密封的分类

密封包括相对静止结合面间的静密封和相对运动结合面间的动密封,根据密封结构的类型、密封机理、密封件形状和材料等,密封的分类见表1-1。

表 1-1 密封的分类

| 密 封 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-----------|-------|-----|------|-------|--------|----|------|------|-------|------|------|---------|------|------|-------|-------|--|--|
| 静密封 | | | | 动密封 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 垫密封 | | | 胶密封 | 填料密封 | 波纹管 | 接触型动密封 | | | | | | | 非接触型动密封 | | | | | | |
| 非金属密封垫 | 非金属、金属组合垫 | 金属密封垫 | | | 软填料密封 | 成型填料密封 | 油封 | 防尘密封 | 机械密封 | 硬填料密封 | 胀圈密封 | 迷宫密封 | 离心密封 | 浮环密封 | 螺旋密封 | 磁流体密封 | 全封闭密封 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

静密封主要有垫密封、胶密封和接触密封三大类。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。

动密封可以分为旋转密封和往复密封两种基本类型。按密封件与其作相对运动的零部件是否接触,可以分为接触式密封和非接触式密封。一般说来,接触式密封的密封性好,但受

摩擦磨损限制，适用于密封面线速度较低的情况。非接触式密封的密封性较差，适用于较高速度的情况。在接触式密封中，按密封件的接触位置又可分为圆周（径向）密封和端面（轴向）密封。端面密封又称为机械密封。

非接触动密封有迷宫密封和动力密封等。前者是利用流体在间隙内的节流效应限漏，泄漏量较大，通常用在级间密封等密封性要求不高的情况。动力密封有离心密封、浮环密封、螺旋密封等，是靠动力元件产生压头抵消密封两侧的压力差以克服泄漏，它有很高的密封性，但能耗大，且难以获得高压头。非接触式密封，由于密封面不直接接触，启动功率小，寿命长。如果设计得合理，泄漏量也不会太大。但这类密封是利用流体力学的平衡状态而工作的，如果运转条件发生变化，就会引起泄漏量很大的波动。而且市场上不能直接购到这类密封件，基本上都由用户自行设计。

1.4 密封的选型

对密封的基本要求是密封性好，安全可靠，寿命长，并应力求结构紧凑，系统简单，制造维修方便，成本低廉。大多数密封件是易损件，应保证互换性，实现标准化、系列化。

各种形式的密封，均有其特点和使用范围，设计密封时应先进行分析比较。表 1-2 列出了各种常用密封方法的特征。

表 1-2 常用密封类型的特征

| 密封类型 | 使用条件 | | 耐压性 | 耐高速性 | 耐热性 | 耐寒性 | 耐久性 | 用途 | 备注 |
|--------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-------------------|---------------------|
| | 往复运动 | 旋转运动 | | | | | | | |
| 填料密封 | 良 | 良 | 良 | 良 | 良 | 可 | 可 | 泵、水轮机、阀、高压釜 | 可用缠绕填料、编织填料或成型填料 |
| O 形圈密封 | 良 | 可 | 良 | 可-良 | 可-良 | 可 | 可 | 活塞密封 | 可广泛用作静密封，此时耐久性良好 |
| Y 形圈密封 | 优 | | 优 | 良 | 可-良 | 可 | 可 | 活塞密封 | 有时作静密封 |
| 机械密封 | | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 泵、水轮机、高压釜、压气机、搅拌机 | 可用不同的材料组合，包括金属波纹管密封 |
| 油封 | (可) | 优 | 可 | 优 | 可-良 | 可 | 可 | 轴承密封 | 轴承密封或与其他密封并用，防尘 |
| 分瓣滑环密封 | 可 | 良 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 水轮机、汽轮机 | 多用石墨作滑环 |
| 迷宫式密封 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 汽轮机、泵、压气机 | 往复用时，宜高速；低速不用 |
| 浮环密封 | 可 | 良 | 优 | 优 | 优 | 优 | 优 | 泵、压气机 | |
| 离心密封 | × | 优 | 良 | 良 | 良 | 良 | 优 | 泵 | |
| 螺旋密封 | × | 优 | 良 | 良 | 良 | 良 | 优 | 泵 | |
| 磁流体密封 | × | 优 | 可 | 优 | 良 | 优 | 优 | 压气机 | 只用气体介质 |

1.5 密封材料的一般要求

密封材料应满足密封功能的要求。由于被密封的介质不同,以及设备的工作条件不同,要求密封材料具有不同的适用性。对密封材料的要求一般是:

- ① 材料致密性好,不易泄漏介质;
- ② 有适当的机械强度和硬度;
- ③ 压缩性和回弹性好,永久变形小;
- ④ 高温下不软化、不分解,低温下不硬化、不脆裂;
- ⑤ 抗腐蚀性能好,在酸、碱、油等介质中能长期工作,其体积和硬度变化小,且不黏附在金属表面上;
- ⑥ 摩擦系数小,耐磨性好;
- ⑦ 具有与密封面接合的柔软性;
- ⑧ 耐老化性好,经久耐用;
- ⑨ 加工制造方便,价格便宜,取材容易。

显然,任何一种材料要完全满足上述要求是不可能的,但具有优异密封性能的材料能够满足上述大部分要求。橡胶是最常用的密封材料。除橡胶外,适合于作密封材料的还有石墨带、聚四氟乙烯以及各种密封胶等。见表1-3。

表 1-3 密封材料种类和用途

| 类 别 | 材 料 | 用 途 |
|------|-------|---------------------------|
| 液体 | 高分子材料 | 液体密封胶、厌氧胶、热熔密封胶 |
| 纤维 | 植物纤维 | 棉、麻、纸、软木 |
| | 动物纤维 | 毛、毡、皮革 |
| | 矿物纤维 | 石棉 |
| | 人造纤维 | 有机合成纤维、玻璃纤维、碳纤维、陶瓷纤维 |
| 弹塑性体 | 橡胶 | 合成橡胶、天然橡胶 |
| | 塑料 | 氟塑料、尼龙、聚乙烯、酚醛塑料、氯化塑料、聚苯硫醚 |
| | 密封胶 | 液体密封胶、厌氧胶 |
| 无机材料 | 柔性石墨 | 天然石墨 |
| | 碳石墨 | 焙烧炭、电化石墨 |
| | 工程陶瓷 | 氧化铝瓷、滑石瓷、金属陶瓷、氧化硅、膨化铬 |
| 金属 | 有色金属 | 铜、铝、铅、锌、锡及其合金 |
| | 黑色金属 | 碳钢、铸铁、不锈钢、堆焊合金、喷涂粉末 |
| | 硬质合金 | 钨钴硬质合金、钨钴钛硬质合金 |
| | 贵金属 | 金、银、铂钼 |

1.6 摩擦、磨损和润滑

在动密封中，两个相对运动的接触表面，由于机械加工的结果，必然存在各种几何形状和尺寸的误差，因此两表面的接触是不连续的，而且是不均匀的，实际接触面积只是表面宏观接触面积(名义面积)的很小的一部分。当存在压差时，密封介质就会通过其间隙产生泄漏。一旦两表面作相对运动时，必然伴随着摩擦，而摩擦会导致摩擦副零件的生热和磨损，这是引起泄漏和密封件损坏的主要原因。对动密封而言，允许一定量的泄漏，往往是移走摩擦热，改善密封面润滑，减少摩擦副磨损所必需的。由此可见，动密封的使用过程是摩擦副的摩擦、磨损与密封之间的动态平衡过程，决定了机器的使用寿命。显然，摩擦、磨损和密封中的一切问题都与固体的表面性质和密封摩擦面相对运动时的摩擦状态有关。与滑动轴承类似，任何摩擦状况与摩擦副的润滑状况有关，而后者往往决定密封特性。因此，动密封更关注的是摩擦副的表面润滑状态。按摩擦副之间流体膜厚度，润滑分为无润滑(固体摩擦)、边界润滑、薄膜润滑和流体润滑状态，它们分别对应干摩擦、边界摩擦，混合摩擦和流体摩擦状态。如果在某种程度上允许流体介质泄漏，就可以使密封处于功率消耗低，磨损极其轻微的流体润滑状态。这种状态的密封泄漏量与流体膜厚度有关，膜厚越厚，泄漏越多。为了减少泄漏，边界润滑就成为获得极薄流体膜的最佳选择，但是边界润滑对载荷、温度、速度变化等特别敏感。这些因素的变化往往会使边界润滑变成或有剧烈磨损的固体摩擦或有过量泄漏的流体润滑状态。密封处在何种润滑状况，与具体的工况有关。

一般来说，有摩擦就会引起磨损，磨损必然降低了密封性能，缩短机器的使用寿命。由于磨损受很多因素的影响，例如摩擦副的材料、变形，表面粗糙度以及温度、压力和润滑条件等，所以其过程及现象十分复杂。磨损是一个多阶段的过程，是时间的函数，故磨损与密封寿命有直接关系。当密封摩擦面处在磨合阶段，在此期间内摩擦、磨损和摩擦热都变化较大，然后较快进入稳定的磨损阶段，这时磨损速度最小并几乎保持不变，也即是密封的正常工作阶段，最后是剧烈磨损阶段，由于表面受到损坏，表面温度升高，加上材料力学性能的变化使磨损量急剧增大，最终导致泄漏量超过了允许值。对于不同的密封结构和运行条件，密封摩擦副的磨损规律也不是一样的，因此磨损影响密封的过程也不尽相同。磨损形式有多种，包括粘着磨损、磨料磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损和微动磨损等，较严重的磨损形式是磨料磨损，即由外来的硬固体颗粒进入密封表面使材料产生切削或划伤，或者由于流体带走固体颗粒的冲刷作用，从而导致正常泄漏状态遭到破坏。此外，摩擦材料与周围介质发生化学或电化学反应的腐蚀磨损也是密封中常见的磨损形式。

因此，为了延长密封的使用寿命，减少动力和材料的消耗，降低维修费用，需要采取各种有效的减摩和抗磨措施，例如应用减摩与耐磨材料，采用表面耐磨处理技术改善材料的表面性能，如提高密封摩擦副材料的硬度等，采取冷却、润滑、冲洗等辅助系统，以及采用设计合理的非接触密封等。

1.7 密封技术发展的历史过程

密封技术的发展已有几千年的历史,但与机械制造有关的历史只有200多年,其发展大致经历了四个阶段:

1) 密封技术产生与发展的初级阶段(1900年以前)

19世纪以前,因生产发展的需要,各种密封技术不断出现和发展:早在15世纪,Leonard Da Vinci就应用有弹性的材料为当时的提水机制作了“密封件”。这种“密封件”一直被沿用到1700年左右的阿基米德时代,那时的提水机内又被加入了一种皮制的衬垫,即密封件。17世纪,泵和液压传动一出现,就产生了软填料密封、皮碗密封和垫片密封;19世纪末(1882年),首次在蒸汽机上使用编织软填料;1885年,在英国出现了第一个机械密封专利;1900年,首次在汽轮机上采用迷宫密封(梳齿密封)。

2) 密封理论的发展和产品涌现阶段(1901~1960年)

汽车、航海、石油化工、核工业和航空航天业的发展,促使密封技术的发展进入了跃进阶段。

密封形式方面:1900年机械密封用于轴封,弹性体密封、磁流体密封、石棉密封、油封、天然橡胶O形圈、螺旋密封、叶轮密封(非接触式密封)相继问世并得以应用;此间,发明了适用于相对高压的平衡型机械密封和高速的中间环机械密封。

密封材料方面:PTFE、石墨、硬质合金和陶瓷;碳化硅、硅化石墨等新型高性能复合材料问世并成功应用。

加工技术方面:密封表面的表面粗糙度 R_a 达到0.2~0.5。

有关的研究机构:1944年,美国的ASLE组织成立;1947年以后,英国的BHRA(流体力学研究学会)、美国的ASME组织、日本的JSLE组织陆续成立,专业的研究团队、学者和研究人员从事密封理论、密封技术的研究开发工作。

专业密封生产厂家:美国的Chesterton公司、Sealol公司、Dula公司、Borgwama公司,英国的John Crane公司、Flexibox公司,德国有Burgmann公司,日本有Eagle公司、Pillar公司成立并研制开发和生产各种密封技术和产品。

3) 密封学的形成和发展阶段(1961~1990年)

随着石油化工、天然气输送、热电、宇航、核电站等领域向纵深发展的客观需要,现代计算机技术发展和应用,促进了密封技术的迅速发展和提高。

新型密封结构:在流体动压润滑理论和流体静压润滑理论指导下,各种密封技术向着深度发展,出现了高参数和新结构的接触式和非接触式密封以及满足各种要求的组合密封和封闭式密封。热流体动压机械密封、气膜密封的问世,使机械密封技术实现了质的飞跃。

密封标准:API 610、API 682、DIN 24960、GB/T 6556—1994等国内外密封标准相继制订实施并指导工程开发设计和应用。

密封材料:碳素纤维、膨胀石墨、芳纶纤维的出现,使软填料密封技术得以提升。

密封学术会议: BHRA从1961年到2006年召开了17届国际流体密封会议。此间,国际摩擦学会成立;密封机理的微观研究侧重机器的可靠性研究。国外学者提出“密封学”这

一词汇并形成一门新的工程技术学科。ASLE 每年举行年会；原东欧经互会曾每年举行密封学术会议。我国机械部和中国石化都分别定期举行有关密封的学术会议。

4) 发展密封学、提高密封技术阶段(1991 年至今)

新型密封涌现：在这一阶段大量新型密封技术不断涌现，反映在密封新概念、新结构、新方法、新技术、新工艺和新材料等方面，如零泄漏机械密封、零逸出密封、上游泵送机械密封、非接触式机械密封的出现打破了普通非接触式密封总是泄漏的传统概念。

复合材料：是密封材料发展的一个趋势。

密封标准：API 610、API 682 等标准的进一步完善，使机械密封及其辅助系统的设计、使用及维护趋于规范。

密封系统工程设计：由简易的经验性设计向基于系统分析的专家性设计转变。

密封技术：向高参数(v 、 p 、 T)、高真空、超低温、高性能(干运转、无泄漏、无油润滑、含颗粒介质密封)和高水平(高 p_v 值、剖分式、监控密封、集装式密封)和组合密封方向发展。

迫切解决的问题：密封的失效机理、失效分析和失效监控，能够对密封的运行状态进行监控和寿命加以预测。

1.8 密封技术的发展趋势

随着现代工业的迅速发展，密封的使用环境正在发生深刻的变化，对其工况要求更加苛刻，操作条件正向高速、高压、高温、低温、高真空、大尺寸、微尺寸方向发展。以石油化工为例，石化用机泵的发展方向是大型化、高速化、机电一体化，泵产品成套化、标准化、系列化和通用化，多品种、性能广、寿命长及可靠性高。使机泵用密封向大型化和专业化方向发展，特别是适用高压、高速透平，高温、低温和超低温泵，高速泵，耐腐蚀泵，输送黏稠介质和带固体颗粒介质泵的密封技术和产品发展很快。电力、冶金等行业设备正向着大型化、高度自动化、智能化、节能和绿色环保的方向发展，对于高温、高压密封要求越来越高。比如发电设备，压力要求能承受 27~28MPa，耐热温度要求达到 600℃，这都需要密封等设备能够耐高温高压。密封技术的发展主要表现在以下几方面：

1) 密封理论、技术和产品不断创新

基于“健康、安全、环保、节能”理念的密封新技术、新概念、新结构、新材料、新工艺和新标准不断涌现：

- ① 高参数(如高压、高速、高温、大直径)；
- ② 高性能(如干运转、零泄漏、无油润滑、密封浆液、高含固体颗粒)；
- ③ 高可靠性和高水平(如高 p_v 值、大型剖分式、状态监控)密封产品大量研制；
- ④ 密封失效机理(如疤疤、热裂、空化-汽蚀、橡胶密封圈泡胀和老化、气膜密封的悬滞等)、失效分析(如可靠性和失效概率)、密封系统失效专家诊断系统及失效监控技术(如流体膜、摩擦状态和相变)的研究和应用。

2) 密封设计由简易的经验性设计向理论性专家系统设计转变

经验性设计：以机械密封为例，传统的设计方法是根据经验性知识，确立密封的几何参