



高等院校“十一五”规划教材

# 过程装备密封技术

GUOCHENG ZHUANGBEI MIFENG JISHU

郝木明 编著

中國石化出版社

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

## 内 容 提 要

本书系统全面地介绍过程装备中流体密封技术及其最新进展, 主要内容包括流体静密封、流体动密封的基本理论及基本知识以及不停车堵漏技术、泄漏检测技术等。

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、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 / 郝木明编著. —北京: 中国石化出版社, 2010. 3

高等院校“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-0325-4

I. ①过… II. ①郝… 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 (2010) 第 035278 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.cn](mailto:press@sinopec.com.cn)

北京科信印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

\*

787 × 1092 毫米 16 开本 18 印张 440 千字

2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

定价: 35.00 元

# 前 言

本书可作为过程装备与控制工程专业本科《过程装备密封技术》课程的指定教材及研究生《流体密封理论》课程的参考用书，旨在向学生介绍相关专业领域内常用的流体密封技术(包括流体静密封、流体动密封等)及其最新进展。通过课程的学习和有关密封实验，学生能够掌握流体密封技术的基本理论和基本知识，培养理论联系实际、提高分析与解决工程实际问题的能力，进而得以开拓视野，提高从事科学研究、工程开发及应用的能力。

本教材主要涉及以下几方面的内容：

① 流体密封的基本理论及基本知识：主要介绍流体密封的机理、密封类型及方法，简介密封流体力学和密封摩擦学的基本理论、基本知识和分析方法；

② 流体静密封的基本原理及知识：介绍垫片密封、法兰密封、高压密封、密封胶及胶黏剂等各种流体静密封技术的基本原理、基本类型、主要性能参数、设计计算方法及其应用；

③ 流体动密封的基本原理及知识：介绍流体动密封技术特别是软填料密封、接触式机械密封、非接触式机械密封(气膜密封、液膜密封等)、弹性体密封等接触式密封、浮环密封等非接触式密封、密闭式密封等密封形式的工作原理、技术特征和使用中存在的问题，为诸多流体动密封技术的正确选用、技术改造、故障分析和使用维护打下坚实的基础。

④ 不停车堵漏技术、泄漏检测技术：简单介绍不停车堵漏技术的基本原理和方法、泄漏检测技术等相关内容。

在充分吸收已有密封专著和书籍内容精华的基础上，本教材力求避免对现有书籍中涉及一般密封知识的简单再现，而以浅显易懂的文字叙述、直观明了的图表展示、源于实际的案例分析，把密封的有关理论、基本知识、密封技术等介绍给读者。该教材在满足通用性、准确性、全面性等基本要求的前提下，更加突出其实用性、先进性、创新性、启发性和指导性：

① 实用性。从机械设计人员和工程应用人员的实际需要出发，对相关内容及其结构框架和编排形式进行合理取舍，使读者方便快捷地查阅各种有用的数据和资料，能有效地指导具体的密封产品或密封系统的工程设计和应用。

② 先进性。在尽可能反映国内外先进的密封技术、密封产品和密封设计方法的基础上，引导设计人员采用现代密封设计理论和方法，不断提升研究开发人员和工程技术人员从事科研、技术开发设计及工业应用水平。

③ 创新性。不拘于现有书籍编写内容及编排方式的束缚，力争在内容取舍及完善、结构框架、编排形式诸多方面有一定的创新。

④ 启发性和指导性。由于密封介质、密封工艺条件和工作环境的日趋多样性、复杂性以及对密封产品性能要求日益特殊和苛刻，现有的密封技术、密封产品、密封标准、密封设计理论和方法是难以及时满足不断变化的要求的。本教材力争在内容上体现出一定的指导性和启发性，使读者能在一定程度上借助本书能开发设计出针对性和适用性好的密封产品和密封系统。

本教材参考了众多文献及密封著作的有关内容，对相关作者的辛勤劳动表示感谢。

因作者水平和能力有限，书中必有错误和不当之处，敬请读者不吝批评指教。

# 目 录

第1章 绪论 .....	( 1 )
1.1 流体密封概述 .....	( 1 )
1.1.1 密封学及相关知识 .....	( 1 )
1.1.2 泄漏及其减少措施 .....	( 3 )
1.1.3 流体密封技术 .....	( 4 )
1.2 流体密封在化工生产中的应用与地位 .....	( 4 )
1.2.1 流体密封设计要求 .....	( 4 )
1.2.2 密封管理的重要性 .....	( 5 )
1.3 流体密封技术的发展 .....	( 5 )
1.3.1 流体密封技术发展的历史过程 .....	( 5 )
1.3.2 流体密封技术的发展趋势 .....	( 7 )
第2章 流体密封的理论基础 .....	( 10 )
2.1 流体密封过程及密封方式 .....	( 10 )
2.1.1 泄漏及流体泄漏方式 .....	( 10 )
2.1.2 流体密封方法 .....	( 12 )
2.1.3 密封的分类 .....	( 13 )
2.2 密封流体力学基础 .....	( 14 )
2.2.1 基本方程 .....	( 14 )
2.2.2 密封简单模型中流体流动 .....	( 17 )
2.3 密封摩擦学基础 .....	( 29 )
2.3.1 摩擦表面状态及特征 .....	( 29 )
2.3.2 摩擦状态、摩擦影响因素 .....	( 31 )
2.3.3 磨损形式与特征 .....	( 32 )
2.3.4 流体润滑与密封 .....	( 36 )
第3章 流体静密封 .....	( 41 )
3.1 垫片密封 .....	( 41 )
3.1.1 垫片的密封结构及其工作原理 .....	( 41 )
3.1.2 垫片密封的种类及性能 .....	( 43 )
3.1.3 垫片的选择 .....	( 45 )
3.1.4 垫片的尺寸 .....	( 48 )
3.1.5 垫片泄漏的主要原因 .....	( 50 )
3.2 法兰密封 .....	( 50 )
3.2.1 法兰密封面型式及法兰密封面的加工 .....	( 51 )
3.2.2 法兰垫片的回弹性与特性参数 .....	( 53 )

3.2.3	法兰密封的工作机理及其影响因素 .....	( 57 )
3.2.4	中、低压法兰密封计算 .....	( 60 )
3.2.5	高温法兰防漏措施 .....	( 68 )
3.3	高压密封 .....	( 72 )
3.3.1	金属平垫密封 .....	( 72 )
3.3.2	双锥环密封 .....	( 73 )
3.3.3	C 形环密封 .....	( 76 )
3.3.4	金属 O 形环密封 .....	( 78 )
3.3.5	三角垫密封 .....	( 81 )
3.3.6	卡扎里、伍德密封 .....	( 82 )
3.3.7	楔形密封、透镜垫密封 .....	( 84 )
3.4	密封胶及胶黏剂 .....	( 85 )
3.4.1	密封胶的分类及其特性 .....	( 85 )
3.4.2	密封胶的密封机理 .....	( 88 )
3.4.3	密封胶品种牌号及其应用范围 .....	( 89 )
3.4.4	典型密封胶配方 .....	( 89 )
3.4.5	密封胶选用及其使用注意事项 .....	( 93 )
3.4.6	胶黏剂机理及使用原则 .....	( 95 )
<b>第 4 章</b>	<b>流体动密封 .....</b>	<b>( 97 )</b>
4.1	流体动密封技术简介 .....	( 97 )
4.2	接触式机械密封 .....	( 98 )
4.2.1	机械密封的发展进程及方向 .....	( 98 )
4.2.2	机械密封的结构、原理及特点 .....	( 99 )
4.2.3	机械密封的分析计算 .....	( 108 )
4.2.4	机械密封的设计 .....	( 118 )
4.2.5	机械密封典型结构及主要材料 .....	( 124 )
4.2.6	接触式机械密封存在的问题 .....	( 135 )
4.2.7	机械密封的故障现象、失效及措施 .....	( 136 )
4.3	非接触式机械密封 .....	( 144 )
4.3.1	气膜密封 .....	( 145 )
4.3.2	液膜密封 .....	( 153 )
4.4	径向接触式密封 .....	( 158 )
4.4.1	软填料密封 .....	( 158 )
4.4.2	硬填料密封 .....	( 172 )
4.4.3	成型填料密封 .....	( 182 )
4.4.4	油封 .....	( 194 )
4.4.5	防尘密封 .....	( 196 )
4.5	径向非接触式密封 .....	( 198 )
4.5.1	流体静压型(流阻型)密封 .....	( 198 )

4.5.2 流体动压型(动力反输型)密封 .....	(202)
4.6 组合式密封 .....	(208)
4.6.1 混合密封 .....	(208)
4.6.2 阻塞密封 .....	(212)
4.6.3 多级密封 .....	(216)
4.7 全封闭密封 .....	(217)
4.7.1 全封闭密封原理 .....	(217)
4.7.2 密闭式机泵 .....	(218)
4.7.3 隔膜传动 .....	(218)
4.7.4 磁力传动 .....	(219)
4.7.5 磁力轴承 .....	(220)
4.8 流体动密封辅助系统 .....	(223)
4.8.1 温度控制系统 .....	(224)
4.8.2 压力控制系统 .....	(232)
4.8.3 流体替代(阻塞)系统 .....	(234)
4.8.4 杂质清除系统 .....	(236)
4.8.5 API 682 标准 .....	(239)
<b>第5章 不停车堵漏技术及泄漏检测技术 .....</b>	<b>(255)</b>
5.1 不停车堵漏技术 .....	(255)
5.1.1 概述 .....	(255)
5.1.2 密封剂的品种与性能 .....	(256)
5.1.3 密封剂的选用 .....	(257)
5.1.4 不停车堵漏的基本方法 .....	(257)
5.1.5 不停车堵漏技术的应用 .....	(262)
5.1.6 带压堵漏的安全施工 .....	(262)
5.1.7 不停车堵漏技术的进展 .....	(263)
5.2 <del>泄漏检测技术</del> .....	(265)
5.2.1 概述 .....	(265)
5.2.2 检漏方法的分类和特点 .....	(265)
5.2.3 压力检漏法 .....	(268)
5.2.4 真空检漏法 .....	(275)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(279)</b>

# 第1章 绪 论

## 本章知识点

- 了解密封学及相关知识；
- 掌握泄漏的原因及密封方法；
- 熟悉流体密封设计的要求；
- 了解密封管理的重要性及密封技术的发展过程及其发展趋势。

## 1.1 流体密封概述

### 1.1.1 密封学及相关知识

密封学是一门新兴的工程技术学科，包括密封技术和密封科学，主要研究密封规律、密封装置设计和密封使用原理。由于密封学涉及流体力学、传热学、润滑理论、固体力学、结构力学、热力学、材料力学、化学、物理学、冶金学、动力学以及其他相关学科的理论 and 知识，所以既属于独立的科学分支，又是一门多学科交叉的边缘学科。图 1-1 所示为密封技术涉及的一些学科知识。

密封学必须借助其他学科如流体力学(fluid mechanics)、固体力学(solid mechanics)、热力学(thermodynamics)、传热传质(heat and mass transfer)、转子动力学(rotor dynamics)、黏

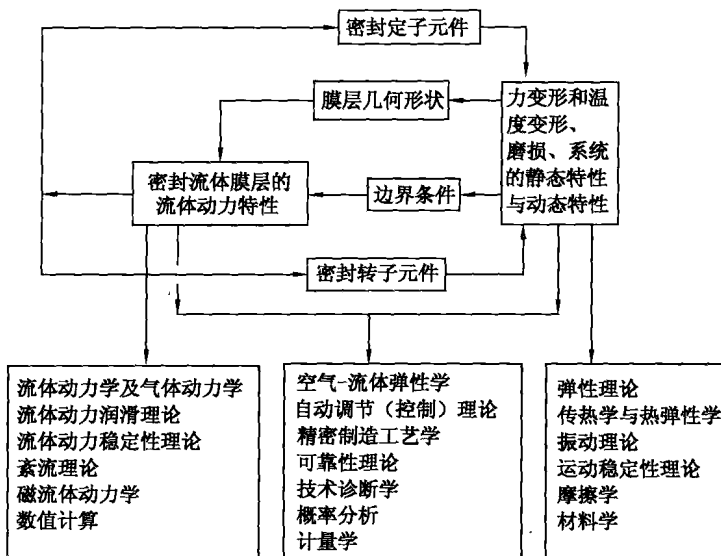


图 1-1 密封技术涉及的学科知识



弹性理论 (viscoelasticity)、振动理论 (vibration theory)、摩擦学 (tribology)、物理与化学 (physics & chemistry)、测量与控制 (monitoring & control) 等理论以及优化设计 (optimization design)、可靠性分析 (reliability analysis)、故障诊断 (fault diagnosis)、现代数值计算方法 (numerical calculation methods)、工程分析软件 (engineering analysis software)、机械 CAD 设计软件 (mechanical CAD) 等去分析研究密封的问题。

以先进的气膜密封(即气体润滑非接触式机械密封或干气密封, Dry Gas Seal, 如图 1-2 所示)为例:

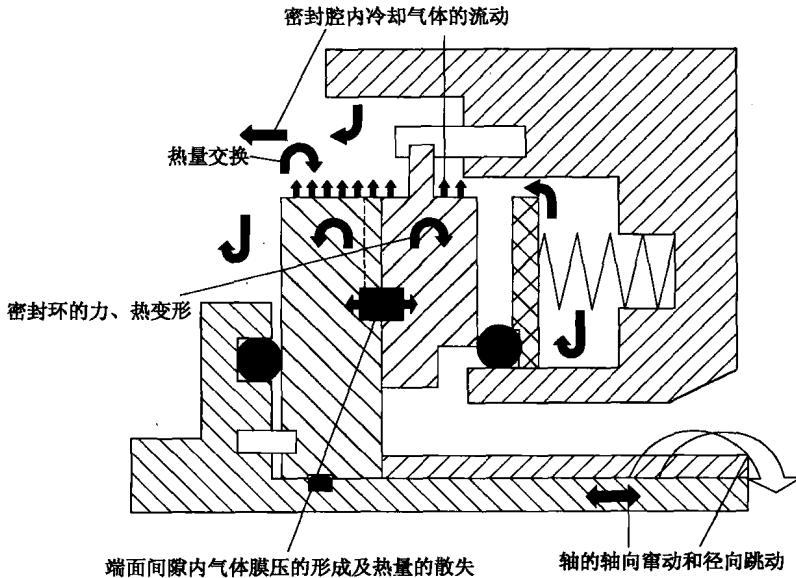


图 1-2 气膜密封的系统性分析

- ① 针对特定的工艺条件, 选择合理的密封材料——物理、化学、材料学等;
- ② 密封元件特别是动静环在力、温度的作用下的强度、变形及其控制措施——热力学、传热学、弹性力学等;
- ③ 密封端面之间气体流动状态、压力分布及热量交换——流体力学、热力学及传热学等;
- ④ 密封及周边环境温度场分布和密封热变形分析——摩擦学、流体力学、热力学及传热学等;
- ⑤ 密封环端面流体动压槽的优化设计及加工——优化设计理论、特种精密加工技术等;
- ⑥ 密封动态稳定性分析、密封-转子-轴承系统动力学特性分析——振动理论、气体动力学、转子动力学等;
- ⑦ 密封性能测试和产品出厂实验——测控理论及技术、动态仿真、试验技术等;
- ⑧ 密封气体压力、流量的控制及密封运行状态的实时监控——测量及控制理论和技术等;
- ⑨ 密封的失效分析——故障诊断学及技术等。

另外, 在密封的分析设计过程中, 必然应用到多种现代数值计算模拟方法、工程分析软件、机械 CAD 设计软件等。

### 1.1.2 泄漏及其减少措施

#### (1) 泄漏

泄漏是一种普遍存在的自然现象,所谓“泄漏”即物料(气体、液体、固体或其他)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。

造成泄漏的原因主要有两个方面:

一是密封面上有间隙。这种间隙是由于机械加工方法存在问题,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。

#### (2) 泄漏减少措施

消除或减轻任一以上因素,均可减少泄漏。密封技术所要解决的就是防止或减少泄漏,减少泄漏的方法亦即密封的方法主要有下述几种:

- ① 减少泄漏部位数量;
- 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。

工程实际中,当出现泄漏时,“紧密度”(Tightness)这一概念常用于比较或评价密封的有效性。紧密度用被密封流体在单位时间内通过接合面的体积或质量的泄漏量(也还有考虑单位密封周边或直径),即“泄漏率”(Leak rate)来表示。因此,往往将泄漏量为零说成是“零泄漏(Zero Leakage)”。但事实上,泄漏定量为“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。因此,紧密度是一个相对的概念。保证机器设备没有泄漏应指密封或密封装置能有效地满足设计或生产所允许的泄漏率,称“允许泄漏率”,其单位为  $\text{ml}(\text{mg})/\text{s}$  或  $\text{ml}(\text{mg})/(\text{s} \cdot \text{mm})$ 。允许泄漏率应根据具体情况决定,没有统一的规则可循,例如国内对机械密封的允许液体泄漏率规定为:当轴径大于  $50\text{mm}$  时,泄漏率不大于  $5\text{ml}/\text{h}$ ,相当于  $0.1 \text{ ml}/(\text{h} \cdot \text{mm})$ ;当轴径小于  $50\text{mm}$  时,泄漏率不大于  $3\text{ml}/\text{h}$ ,相当于  $0.06 \text{ ml}/(\text{h} \cdot \text{mm})$ 。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 1-1 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  $T_1 \leq 2 \times 10^{-1} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ,  $T_2 \leq 2 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ,  $T_3 \leq 2 \times 10^{-5} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ,  $T_4 \leq 2 \times 10^{-7} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ,  $T_5 \leq 2 \times 10^{-9} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ 。如以  $150\text{mm}$  外径的垫片为例,  $T_1$  相当于氮气的体积泄漏率为  $24\text{cm}^3/\text{s}$ 。

表 1-1 泄漏的分级与定义

泄漏级别	定义	泄漏级别	定义
0	无泄漏现象	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	5	以 5min 或更短时间滴漏 1 滴
2	局部有滴珠形成	6	形成流线状滴漏
3	沿整个垫片周边有滴珠形成		

注: 1 滴液体的体积约为  $0.05\text{cm}^3$ , 即形成  $1\text{cm}^3$  大约需要 20 滴液体。

### 1.1.3 流体密封技术

流体密封系统中起密封作用的零部件称之为密封件，放置密封件的部位是密封箱或密封室。较复杂的密封特别是带有辅助系统的称为密封装置。流体密封包括流体静密封和动密封，没有相对运动或相对静止的接合面间的密封为静密封，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；而彼此有相对运动的接合面间的密封称为动密封，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，还有螺旋运动件和摆动件的密封。密封装置是机器、设备的重要组成部分，是流体动力机械、过程设备、工艺设备(包括压力容器)、液压设备、管道和阀门等部件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；随着公众环保意识的不断增强，特别是新世纪以来，人们对大气污染、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，也要求密封产品具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。

## 1.2 流体密封在化工生产中的应用与地位

### 1.2.1 流体密封设计要求

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设置密封，以保证其正常运行。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。因此，工程实际和生产生活对密封提出了下列要求：

#### (1) 密封性、安全性高

炼油、化工等生产领域的物料大多为有毒、易燃、易爆物质，发生泄漏不但会造成经济损失，而且还会引起人身中毒、污染环境甚至重大安全生产事故等，因此要求密封泄漏量甚至无泄漏，实现安全生产的要求。

#### (2) 可靠性高、使用寿命长

为了保证炼油、化工生产的连续进行，密封件必须具有一定的使用寿命，一般使用期至少应保持一个生产周期。

#### (3) 耐腐蚀性

炼油、化工生产中的介质大都具有腐蚀性，密封件应有一定的耐介质腐蚀的能力。

#### (4) 安装调整方便

如在炼油化工企业机泵上采用集装式机械密封产品，不仅可以缩短设备检修周期，提高生产效率，还可避免更换密封过程中人为因素造成的密封损坏。

#### (5) 密封件品种多样、适应性强

为满足炼油、化工生产工艺条件的多样性以及不同工况条件对密封的多种要求，应有多种结构的密封或多种密封形式相结合的组合式密封结构。

#### (6) 经济性

成本低、能耗和运行费用少、使用维修方便，即性价比高。

### 1.2.2 密封管理的重要性

密封管理是工业生产的重要组成部分，尤其是在化工生产过程中，其重要性主要表现在：

#### (1) 提高装置运转周期

加强密封管理，尽可能的减少或限制泄漏，保持设备状态良好，可有效地提高装置的运转率。生产实践证明，加强密封管理，严格的按照规章制度进行操作，同样的设备装置，大修周期可以延长至三~五年，运转率显著提高，大大增加企业的经济效益。

#### (2) 降低消耗、节约能源

加强密封管理，可以减少水、电、气、油及物料的消耗，提高装置生产的经济效益。

#### (3) 减少污染

化工生产过程中产生的泄漏，是恶化操作环境、造成污染的一个主要方面，既严重威胁工人的身体健康，又严重影响生产。

#### (4) 是实现安全生产的基本保证

据日本对石油化工联合企业灾害事故的统计，在过程装置发生的全部786起事故中，由于泄漏引起的多达332起，占事故总数的42%。而发生泄漏事故所带来的损失是惨重的，如1985年12月14日19时58分，国内某电解化工厂聚氯乙烯车间聚合釜单体泄漏，导致车间爆炸，使两层厂房夷为平地，造成5人死亡，1人重伤，6人轻伤，直接损失12.06万；1984年12月3日，发生在印度博帕尔市美国联合碳化物公司农药厂的异氰酸钾毒气泄漏，造成2500余人死亡，12.5万人中毒，其中失明5万人；举世震惊的1986年1月28日美国航天飞机“挑战者”号升空不到2min因左侧火箭助推器密封环失效失事，机上7名宇航员无一生还；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。

故此，流体密封技术虽非领先技术，但在某些特殊领域往往是决定性技术。密封件虽然只是个零部件，但却能决定设备的安全性、可靠性和稳定性；还能起到环境保护，节约能源、物质以及提高经济效益的作用，也是保证安全生产的重要措施之一，特别是对连续运行的石油、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、能源并污染环境，严重的可能导致火灾、爆炸和人身伤亡，使系统和工厂停产，损失惨重。因此，应重视流体密封对国计民生的重要作用。

## 1.3 流体密封技术的发展

### 1.3.1 流体密封技术发展的历史过程

流体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二百多年，其发展大致经历了四个阶段：

#### (1) 流体密封技术产生与发展的初级阶段(1900年以前)

十九世纪以前，因生产发展的需要，各种密封技术不断出现和发展：十七世纪，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；十九世纪末(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) 流体密封理论的发展和产品涌现阶段(1901 ~ 1960 年)

在此阶段,相继发明了液体燃料发动机、汽车运输、航空飞机,后来又陆续发展石油化工、原子能和宇宙机械制造,促使流体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  $Ra$  达到 0.2 ~ 0.05。

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流体密封理论、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) 流体密封学的形成和发展阶段(1961 ~ 1990 年)

密封发展动力: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(Thermo-hydrodynamic Mechanical Seal)、干气密封(Dry Gas Seal)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。1996 年以前我国机械部和中国石化都分别定期举行有关流体密封的学术会议。

密封引发的灾难性典型事故:1986 年, O 形密封圈失效导致美国挑战号宇宙飞船爆炸,引起全世界的关注(NASA 下设专门的 Glenn Research Centre)。

## (4) 发展密封学、提高密封技术阶段(1991 年 ~)

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(Zero-leakage Mechanical Seal)、零逸出密封(Zero-mission Mechanical Seal)、上游泵送机械密封(Upstream Pumping Mechanical Seal)、非接触式机械密封(Non-contacting Mechanical Seals)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及

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 $P_0V$ 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。

### 1.3.2 流体密封技术的发展趋势

随着现代工业的迅速发展，流体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 $27 \sim 28\text{MPa}$ ，耐热温度要求达到 $600^\circ\text{C}$ ，这都需要密封等设备能够耐高温高压。流体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(结构是先导，材料是基础，工艺是保证)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 $pV$ 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(如疤痕、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，确立密封的几何参数和弹簧压力，依此计算出端面接触压力 $p_c$ 、线速度 $v$ 、摩擦功耗、摩擦热、冲洗液量，并确定相应的辅助系统；计算机辅助设计主要局限于密封零部件的绘制。

理论性专家系统设计：先进的理论性专家系统设计则是以计算机为工具，根据具体的工艺条件，采用完善的专业数据库和软件，对密封进行性能分析、动态仿真、结构优化、参数化设计，尽可能在设计阶段使密封的使用性能达到最优，实现设计的合理准确和快捷高效，满足密封的规模化和专业化生产的需要。

#### (3) 密封使用范围不断拓宽

工业领域方面：在石化、石油、化工、造纸、汽车、船舶、家电、机械制造、冶金、矿业开采、原子能工业、航空航天、军工、电力、给排水系统、污水处理、生物制药、食品加工等重要工业领域密封技术都可应用并不断拓展。

机械设备方面：机械密封不仅机泵阀采用，而且工艺设备(如反应釜、转盘塔、搅拌

机、离心机等)都采用。

工况参数方面:逐渐扩展到高压、高速、高 $pV$ 值、高温、低温、高真空等方面。

#### (4) 重视密封系统的开发、应用和维护

过去只局限于单独密封件的开发、设计、使用和维护,而现今已经发展到重视整个密封系统(包括密封件和密封辅助系统),而且已制订了新的转子泵用密封系统标准(API 682“离心泵与转子泵的轴封系统”标准)并不断完善。

#### (5) 注意安全和环境保护、倡导节能减排

过去只注意眼睛可视的“泄漏(Leakage)”,例如,20世纪70年代末美国一般工业的指标泄漏率(密封或密封装置能有效满足设计或生产所允许的泄漏率)是 $10^{-3} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ ,PVRC推荐的暂定法兰连接密封准则中确定 $2 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{s} \cdot \text{mm})$ 为标准级;但过去不注意眼睛看不见的易挥发物的气相“逸出”;现在发展到要求既控制液体的泄漏量又控制易挥发物的逸出量,也就是说从要求“零泄漏”发展到要求“零逸出(Zero Emission)”。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1-2。

表 1-2 EPA 对易挥发物逸出量的规定

装置	执行阶段逸出	逸出量/ppm	LDAR <sup>①</sup>	QIP <sup>②</sup>
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	<1000	需要	需要
	II	<500	需要	需要
	III	>500	需要	
法兰		<500	需要	

注:1ppm=1mg/kg。①泄漏检测与维护;②质量改进计划。

鉴于现阶段对密封的要求,应大力推广应用无危害性泄漏的非接触式气膜密封和液膜密封产品,在能够满足环保要求的前提下,可极大提高流体机械运行的可靠性和经济性,实现以人为本的健康、安全、环保和经济的现代化生产的理念。

#### (6) 密封可靠性不断提高

在石油化工方面,为了延长工艺装置的检修周期和装置的操作周期,要求机械密封的工作寿命由1年延长到2年,国外由2年延长到3年甚至5年(API 682中作了明确规定)。

#### (7) 开发出适应性强的“个性化”实用密封技术和产品

不仅要求不断研制出高性能新的密封产品,更重要的是要根据具体的工况条件研制开发出针对性很强的密封技术和产品,并使其得到实际应用。

#### (8) 重视技术培训和咨询服务

涉及对企业内部员工的技术培训和对现场安装、使用和维护维修人员的技术性咨询服务两个方面。



思考

1. 你所能想到的工业生产以及生活中的密封技术的应用有哪些?
2. 泄漏的原因是什么, 如何防止泄漏?
3. 流体密封设计有什么要求?
4. 结合实际说一下密封管理的重要性。



## 第2章 流体密封的理论基础

### 本章知识点

- 掌握流体泄漏的机理、密封的基本方法和流体密封的基本类型；
- 了解密封流体力学基本方程，特别是流体润滑基本方程的物理意义；
- 分析密封简单模型中流体流动的特点；
- 了解密封摩擦学理论中摩擦、磨损与润滑的基本知识。

### 2.1 流体密封过程及密封方式

#### 2.1.1 泄漏及流体泄漏方式

如图 2-1 所示，两个隔离的区域 1 和 2 分别包含同种或不同种的流体 I 和 II，但两者具有共同的边界，这些边界可以是圆柱形的，例如往复机械或旋转机械中的轴、活塞或阀杆等，也可以是环形平端面如法兰密封面。若两个区域存在压力差、浓度差、温度差、速度差等，流体就会通过这一界面而泄漏。

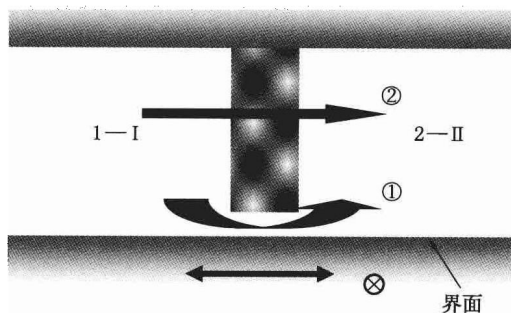


图 2-1 泄漏机理

“密封”则意味控制这两个区域之间流体相互交换，使界面处“没有泄漏”现象。

对于流体密封来说，其最重要的性能是密封性，泄漏量是衡量密封装置密封性的主要指标，通常用体积泄漏流量  $Q$  或质量泄漏流量  $G$

来表示。工程上一般给出一个最大允许泄漏量，其值按达到所需的工作可靠要求（与流体性质有关）和寿命的条件来确定。

被密封的流体泄漏方式主要有以下三种：穿漏、渗透和扩散。

#### (1) 穿漏

通常将流体通过密封面间隙的泄漏称之为穿漏（如图 2-1①所示）。此时被密封流体在压力差  $\Delta p$  (MPa) 作用下通过宏观或微观的缝隙  $h$  (m) 泄漏。穿漏是单向泄漏，其动力是压力差  $\Delta p$ 。

对于理想模型，通过尺寸宽  $B$ 、高  $h$  和长  $z$  的平行平面缝隙穿漏时，在层流时单位周边液体体积泄漏量为：

$$\bar{Q} = \psi \Delta p h^3 / \mu l \quad (2-1)$$

式中  $\psi$ ——无因次形状系数， $\psi = 0.1 \sim 0.2$ ；

$\mu$ ——液体动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。