

36

过程装备与控制工程丛书

过程装备密封技术

蔡仁良 顾伯勤 宋鹏云 编著

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程装备密封技术/蔡仁良,顾伯勤,宋鹏云编著.
北京:化学工业出版社,2002.5
(过程装备与控制工程丛书)
ISBN 7-5025-3768-6

I. 过… II. ①蔡…②顾…③宋… III. 化工过
程-化工设备-密封-技术 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 018383 号

过程装备与控制工程丛书

过程装备密封技术

蔡仁良 顾伯勤 宋鹏云 编著

责任编辑:程树珍

责任校对:陈静

封面设计:蒋艳君

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13½ 彩插 1 字数 333 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3768-6/TH·102

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

序

按照国际标准化组织 (ISO) 的认定, 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware)、软件产品 (software) 和流程性材料产品 (processed material) 以及服务产品 (service)。在 21 世纪初, 我国和世界上各主要发达国家都已经把“先进制造技术”列为自己国家优先发展的战略性高技术之一。通常, 先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”则是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与贮罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者的统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ① 过程原理与技术的创新; ② 成套装置流程技术的创新; ③ 过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④ 过程控制技术的创新。持续推进这些技术的创新, 就有可能把过程工业需要实现的最佳技术经济指标, 即高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 以确保该产业在国际上的竞争实力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调查研讨的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于 1998 年 3 月获得教育部的正式批准, 建立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向 21 世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分量,

淡化专业技术教学，从而较大幅度在减少总的授课时数，以加强学生自学、自由探讨和发展的空间，并有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向 21 世纪的迫切需要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，为了进一步拓宽高年级本科学生和研究生专业知识面，进一步加强理论与实际的联系，进而增强解决工程实际问题能力，我们又组织编写了这套“过程装备与控制工程”的专业丛书，以帮助学生能有机会更深入地了解专业技术领域的理论研究与技术发展的现状和趋势，力求使高校的课堂教学与社会工程实践能够更好地衔接起来。

这套丛书，既可作为选修课教材，也可作为毕业设计环节的教学参考书，还可供广大工程技术人员作为工程设计理论分析与实践的有力助手。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套丛书中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养。但是，由于我们目前对于教学改革的研究深度和认识水平都有限，在这套丛书中必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会

副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001 年 10 月于大连

前 言

在石油、化工、医药、食品、冶金、能源等工业部门的过程装备中，密封占据重要的地位。由于工艺过程复杂、机械设备运行条件苛刻，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。各种泄漏诱发的事故，直接关系到保护人类生态环境，保障人身安全健康，故密封技术作为一门新的学科，已应用到各个领域，越来越为人们所重视。

尽管随着现代工业的发展，密封技术得到长足的进步，密封种类繁多，应用范围广泛，但就其基本原理而言，可分成两大类，即接触式密封和非接触式密封。绝大部分静密封属于接触式密封，动密封既有接触又有非接触形式。对密封的最基本要求是将泄漏控制在允许的限度内，同时要求工作可靠、使用寿命长、制造维护容易、适应性广、经济性好。总之，优良的密封具有卓越的性能价格比。

密封技术不仅因其产品性能的好坏直接影响过程设备或机器的正常运行，而将其视为综合性工程学范畴，对提高生产过程或装置的整体密封水平有其特殊、重要意义。从学科角度，密封本身是一门涉及固体和流体力学、传热学、化学、材料学、摩擦学等多门科学的交叉学科，而从工程角度，它又涉及材料、设计、制造、检验、运行和管理等多个工程技术门类。因此，本书立足这一认识，针对过程装备的特点和结合工艺过程的应用，较精炼、系统论述各种流体密封装置的原理、结构特点、设计方法和选用原则，注重讲清其基础理论和设计原理，以及介绍密封控制的新技术。

全书由华东理工大学蔡仁良教授主编，并编写了第1章、第3章中3.1.1和3.1.2、第4章中4.1.1；第2章、第3章中3.1.3和3.2、第5章由南京化工大学顾伯勤教授执笔；第4章中4.1.2、4.1.3、4.1.4、4.2由云南理工大学宋鹏云教授执笔，华东理工大学吴东棣教授主审。

因限于作者水平和时间，书中谬误之处当在难免，恳请读者予以批评指正。

作 者
2002年1月

目 录

1 概论	1
1.1 过程装备的密封问题	1
1.2 泄漏与逸出	3
1.3 密封方式与分类	5
1.4 摩擦、磨损和密封	5
2 流体在密封间隙中的流动	8
2.1 引言	8
2.2 分子流	9
2.2.1 长泄漏通道中的分子流	9
2.2.2 小孔和短泄漏通道中的分子流	10
2.3 不可压缩流体的层流	10
2.3.1 雷诺数和雷诺方程	11
2.3.1.1 雷诺数和流动状态	11
2.3.1.2 压力梯度、速度分布和雷诺方程	12
2.3.2 二维流动	13
2.3.3 一维轴对称流动	14
2.3.3.1 圆管中的流动	14
2.3.3.2 平行圆板中的流动	16
2.3.3.3 圆环隙中的流动	16
2.3.4 轴线倾斜时圆环隙中的流动	18
2.3.5 流道出口处有障碍时的剪切流动	19
2.3.6 挤压引起的流动	19
2.4 可压缩流体的薄膜流动	20
2.4.1 亚音速气体的流动	20
2.4.2 音速气体的流动	21
3 过程设备和管道的静密封	24
3.1 垫片密封	24
3.1.1 前言	24
3.1.2 中低压设备和管道的垫片密封	26
3.1.2.1 法兰连接设计的一般考虑	26
3.1.2.2 法兰连接标准	27
3.1.2.3 垫片	30
3.1.2.4 螺栓载荷的计算	45
3.1.2.5 垫片密封设计新方法	48
3.1.3 高压设备的法兰连接	53

3.1.3.1	高压容器密封结构的特点与选用	53
3.1.3.2	典型高压容器密封结构的设计计算	57
3.1.3.3	高压管道的密封结构与选用	61
3.1.3.4	超高压容器的密封结构	62
3.2	胶密封	67
3.2.1	带压注剂密封技术	67
3.2.1.1	概述	67
3.2.1.2	密封剂的品种与性能	68
3.2.1.3	密封剂的选用	69
3.2.1.4	带压注剂堵漏的基本方法	70
3.2.1.5	带压堵漏的安全施工	74
3.2.2	带压粘接密封技术	75
3.2.2.1	密封胶的分类及其特性	75
3.2.2.2	密封胶的密封机理	78
3.2.2.3	密封胶的选用	79
3.2.2.4	密封胶的涂胶工艺	79
3.2.2.5	密封胶的使用注意事项	80
4	过程机械的动密封	82
4.1	接触密封	82
4.1.1	软填料密封	82
4.1.1.1	引言	82
4.1.1.2	软填料密封的原理	85
4.1.1.3	软填料密封结构的设计	89
4.1.1.4	填料的选择、安装和使用	91
4.1.2	往复密封	94
4.1.2.1	液压密封	94
4.1.2.2	气动密封	103
4.1.3	旋转轴唇形密封	107
4.1.3.1	无压旋转轴唇形密封	107
4.1.3.2	耐压旋转轴唇形密封	111
4.1.3.3	常用旋转轴唇形密封的结构与特征	114
4.1.4	机械密封	115
4.1.4.1	机械密封的基本原理	115
4.1.4.2	机械密封的分类	118
4.1.4.3	机械密封的设计	120
4.1.4.4	机械密封材料	128
4.1.4.5	机械密封循环保护系统	135
4.1.4.6	机械密封性能与试验	139
4.1.4.7	机械密封的选择与使用	143
4.1.4.8	机械密封的失效分析	146

4.2	非接触转轴密封	150
4.2.1	间隙密封	150
4.2.2	迷宫密封	154
4.2.3	气膜密封	157
4.2.4	液膜密封	160
4.2.5	离心密封	163
4.2.6	螺旋密封	166
4.2.7	停车密封	169
4.2.8	磁流体密封	171
4.2.9	全封闭密封	175
5	泄漏检测技术	178
5.1	引言	178
5.2	检漏方法的分类和特点	178
5.2.1	检漏方法的选择	178
5.2.2	检漏方法的分类	179
5.3	压力检漏法	180
5.3.1	水压法	180
5.3.2	压降法	181
5.3.3	听音法	182
5.3.4	超声波法	183
5.3.5	气泡检漏法	183
5.3.6	皂泡法	184
5.3.7	集漏孔隙增压法	185
5.3.8	氨气检漏法	186
5.3.9	卤素检漏法	188
5.3.10	放射性同位素法	189
5.3.11	氮质谱检漏仪吸嘴法	189
5.4	真空检漏法	191
5.4.1	静态升压法	191
5.4.2	液体涂敷法	192
5.4.3	放电管法	193
5.4.4	高频火花检漏器法	194
5.4.5	真空计法	194
5.4.6	卤素检漏法	195
5.4.7	氮质谱检漏法	195
附录 1	常用密封标准目录	196
附录 2	中英文术语对照	202
附录 3	常用单位及换算表	206
	参考文献	207

1 概 论

1.1 过程装备的密封问题

如在化学工业或石油化工中，从原料到成品，往往需要经过许多道加工手续（工序），这些加工手续或工序，称之为过程，所以这些工业也被称为过程工业。过程工业不仅指化学、炼油和石化等工业，医药工业、食品工业、动力工业、冶金工业等也在其范畴内。过程装备泛指实现这些过程工业的机器和设备，是进行生产过程的工具，是为过程工业服务的。在过程工业中，有的过程属于化学变化过程，有的过程是将物料进行物理处理的过程，其中绝大多数过程是在液相或气相中并在一定的压力和温度条件下进行的，因此大多数机器和设备本身以及它们之间的连接系统都存在一个流体（气体、液体或粉体）的密闭（封）性问题。设备或机器的工作流体可由内部向外界泄漏，或者与此相反，外界如空气等进入负压设备或机器内部，这就是过程装备经常遇到的密封（Sealing）问题。显然，除过程工业外，其他工业的机械设备中，也存在同样的流体密封问题。凡是在设备或机器中起密封作用的机件称为密封件（Seals），也简称密封，而较复杂的密封，如带各种辅助系统的，称为密封装置。密封或密封装置是过程装备中最广泛使用的零部件。机器设备若不能保证密封，因工作介质跑、冒、滴、漏引起物质流失和能量损耗，造成污染环境，生产不能正常运行，增加非计划维修和停工，甚至危及人体健康与生命安全。因此，密封装置的工作性能是评价机械产品品质的重要指标，也是决定工厂安全、经济生产的重要因素。

虽然任何工业都有密封问题，但化学和石油化学工业中的密封问题比其他工业更加突出，其表现出以下两大特征。① 广泛性。化工厂以设备、机器复杂和管道庞大而著称，据统计如一个大型石油化工厂中年产 30 万 t 乙烯的五套主要装置、六套配套装置和七个辅助车间的静密封点达 123 万多个。图 1-1 示意一般化工厂各类设备与机器的密封部位。因此，化工厂发生的各种事故中，泄漏是主要原因。据日本对汇集到的 1965~1975 年间化工厂发生的 624 例事故，其中化工装置为 210 件，占 34.4%，炼油装置为 79 件，占 12.7%；而 210 件化工装置中表现为泄漏形式的事故为 115 件，占了 55%；炼油装置中的 79 件事故中，泄漏事故 54 件，占了 68%。② 危害性。由于化工厂处理的很多流体是易燃、易爆、有毒或腐蚀性的，而且通常有压力和温度，一旦发生泄漏，其后果比单纯经济损失严重得多。如上述的化工装置 210 件事故中，其中发展为火灾、爆炸、中毒事故的 58 件，占 23%；而造成大气、水质污染的 31 件，占 15%。就发生的事故而言，如 1984 年 12 月 3 日印度博帕尔市农药厂异氰甲酸酯储罐发生泄漏，造成 2500 人死亡，12.5 万人中毒，其中失明 5 万人，至今世人记忆犹存；又如举世震惊的 1986 年 1 月 28 日美国航天飞机“挑战者”号升空一分钟因左侧火箭助推器密封环失效失事，机上七名宇航员无一生还；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。在经济方面的影响也可援引一例，据 1986 年全世界炼油工业维修花了 60 亿美元，其中用于转动设备中的轴封占了 69%，仅此一项用掉 5 亿美元。因此，密封对国计民生的作用怎样讲都不会过分。

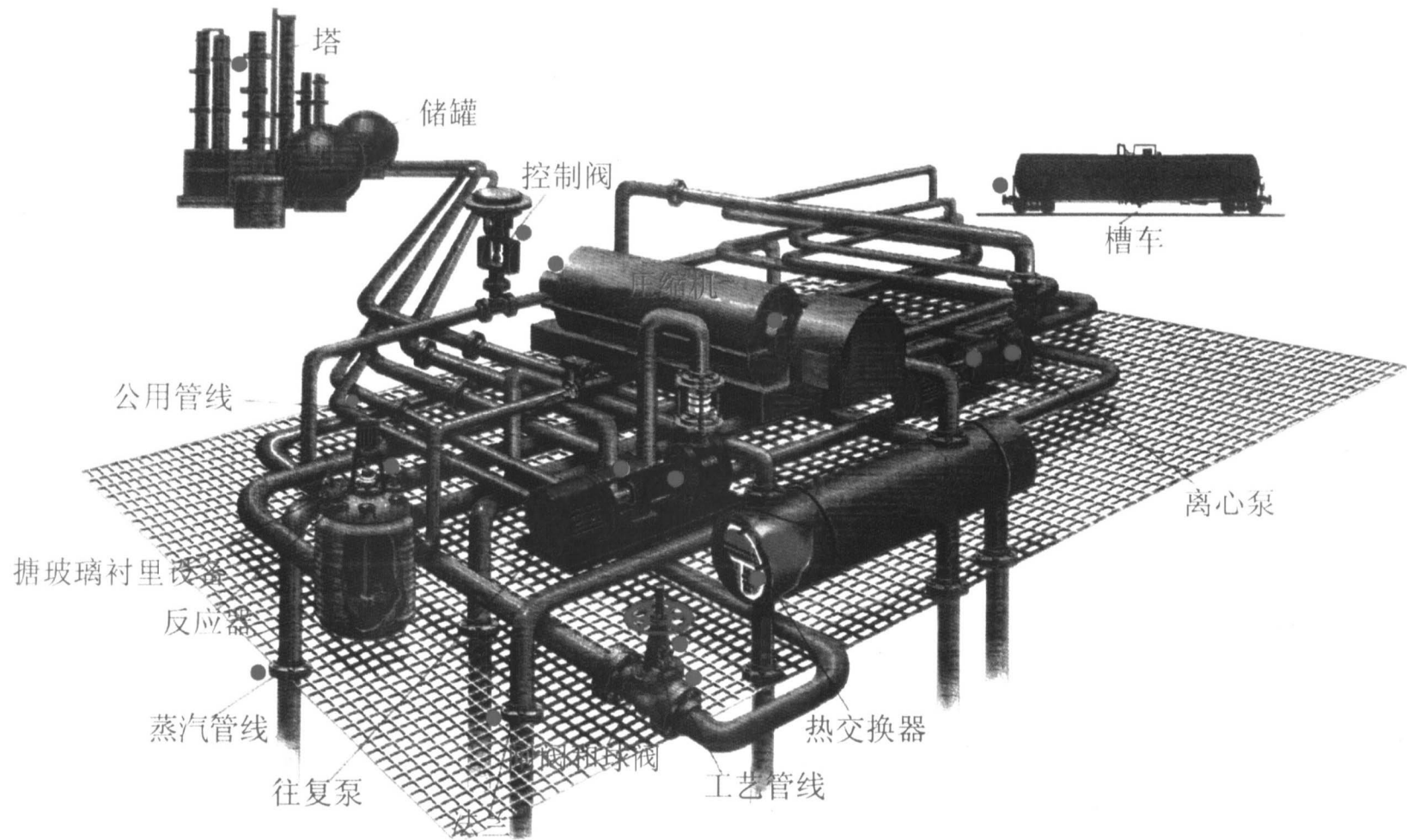


图 1-1 化工厂设备与机器的密封

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，密封装置设计和应用科学原理的新学科，称为“密封学”。由于它还涉及众多的其他学科，如流体力学、传热学、固体力学、材料学、摩擦学等，所以它既是独立的学科分支，又是交叉的边缘科学。

过程装置发生泄漏的主要原因表现在以下几方面。

设计方面——如设备或机器的连接部位包括密封件、连接件和辅助装置等的型式、结构或材料选择不当等引起泄漏失效。

制造安装方面——如设备或机器制造过程中存在渗漏性缺陷，特别是化工生产中的大部分设备是用焊接制造的，焊接过程中形成的各种裂纹、气孔等缺陷。

使用方面——如安装配合不当，化学介质对密封的腐蚀、摩擦副端面的磨损，辅助密封件的损坏、工作温度和压力的波动，机械振动或冲击，密封材料的高温退化或蠕变疲劳，以及错误操作等引起泄漏。

过程装备密封应满足的基本要求是密封性能好、使用寿命长、工作可靠性高，此外要求密封结构紧凑、辅助系统简单、制造维修方便、生产成本低廉。总之，追求性能价格比高。

1.2 泄漏与逸出

如图 1-2 所示，两个隔离的区域 1 和区域 2 分别包含同种或不同种的流体 1 和流体 2，但它们具有共同的边界，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，如法兰密封面即是。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。“密封”意味控制这两个区域之间流体的相互交换，使界面处“没有泄漏”现象。由于结构、设计或机械加工的原因，在机械设备上无论相对静止或运动的接合面之间往往存在一定的间隙（即上述的界面），泄漏通常是工作流体由机器设备的内部通过这一间隙向外部流出；但是在某些情况下，周围环境的流体却通过该间隙流向机器设备的内部，如负压、真空设备等。上述的“没有泄漏”从量的意义上指泄漏减小到一定的限度。因此，用于工程时简单地对泄漏和没有泄漏做定性描述是不够的，必须进一步做出定量的评价。

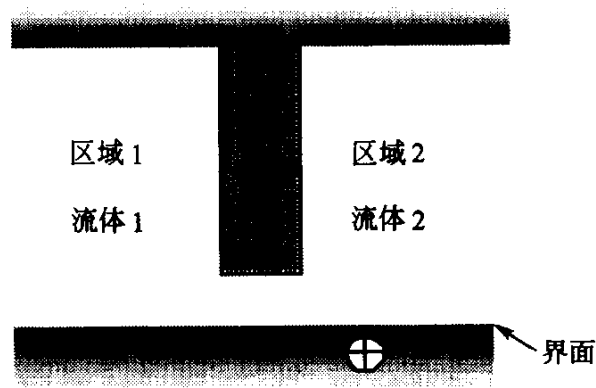


图 1-2 密封的定义

当出现流体泄漏时，“密封度 (Tightness)”这一概念常用于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接（配）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的），即泄漏率 (Leak rate) 来表示。因此，往往将泄漏量为零，说成为“零泄漏 (Zero Leakage)”。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。“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或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“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 50mm 时，

泄漏率不大于 5ml/h, 相当于 0.1ml/(h·mm); 当轴径小于 50mm 时, 泄漏率不大于 3ml/h, 相当于 0.06ml/(h·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 150mm 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^[23]

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。	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 0.05cm^3 , 即形成 1cm^3 大约需要 20 滴液体。

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 (Volatile Organic Compounds, VOC's) 从接头处“逸出 (Emission)”。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, 即 ‘ppm (V)’[●] 表示 (可转换为上述的气体质量泄漏率^[10])。例如一个典型的有机合成化工厂, 有超过 3500 连接部件因含有或接触 5% 的挥发性有害空气污染物而成为逸出点。从这些点逸出的 VOC's 大量是有毒性或爆炸危险性的, 有些与空气中的氧化氮反应生成臭氧, 以致污染环境, 危害公众健康。

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。如美国在 1965 年为了保护公众健康通过了“净化空气法” (Clean Air Act), 1970 年为了进一步保护公众健康, 通过“净化空气法”的修正法案制订了大气质量国家标准。该标准限制臭氧、二氧化氮、二氧化硫、烃、一氧化碳、铅、汞、铍、氯乙烯、石棉等。1977 年对“净化空气法”又进行了修改, 以保证高空气质量要求的实施。1990 年 11 月 15 日“净化空气法”再度修订, 提出了四个主要目标: ① 2000 年前 189 种化学品减少 90% 的逸出; ② 消除市区烟雾; ③ 减少酸雨; ④ 保护同温层的臭氧消耗。189 种化学品中包含 149 种合成有机化工厂的典型反应中间物或产物的挥发性有机化学品。1991 年 3 月 6 日环境保护署 (EPA) 颁布了“净化空气法”新的修正条款通告, 它要求对工业装置进行逸出控制, 且用于气体、蒸气和轻液体的连接件的逸出量必须在 $500 \text{ppm} (\text{V})$ [●] 以下, 对重液体, $500 \text{ppm} (\text{V})$ [●] 的逸出量限制立即达到。如超过这些限制, 则必须在五天内改正。德国也制订了净化空气法规 (TA—Luft), 它们都对挥发物的允许逸出量做出了规定。因此, 与定义“零泄漏”一样, 提出了“零逸出 (Zero Emission)”的新概念, 即将最低允许泄漏率控制到这种 $\text{ppm} (\text{V})$ [●] 量级, 例如目前美国炼油厂把 $10000 \text{ppm} (\text{V})$ [●] 作为零逸出水平, 而化工厂则对阀门和法兰规定为 $500 \text{ppm} (\text{V})$ [●], 回转设备 (如泵、压缩机) 为 $1000 \text{ppm} (\text{V})$ [●]; 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 $100 \text{ppm} (\text{V})$ [●], 对泵和压缩机为 $500 \text{ppm} (\text{V})$ [●]。

● $\text{ppm} (\text{V}) = 10^{-6}$ (体积分数)。

1.3 密封方式与分类

密封有静密封和动密封之分，没有相对运动或相对静止的接合面间的密封称为静密封，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则称为动密封，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。密封可以用各种方法加以分类，如按照密封元件的加载方式、作用原理、结构型式、材料和应用场合等。静密封主要有无垫密封、垫片密封和胶密封三大类，其中垫片密封根据结构材料不同分为非金属垫片密封、半金属垫片密封和金属垫片密封。根据工作压力静密封又可分为中低压密封和高压密封，如用于中低压容器、设备或管道的静密封通常使用非金属垫片或半金属垫片，而高压容器或设备的静密封一般用金属垫片。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。根据密封面有否间隙分为接触型和非接触型密封两大类。一般说来，接触型密封的泄漏量小，但摩擦磨损较大，适用于密封面线速度较低的场合；与此相反，非接触型密封泄漏量较大、结构较复杂，用在高参数的场合或用作多级密封的前置密封。接触型密封包括软填料密封、成型填料密封、往复或旋转唇形密封、活塞环密封、接触式机械密封等。非接触型密封包括非接触式机械密封、迷宫密封、螺旋密封、间隙密封、磁流体密封等。因此，过程装备常用密封的分类见图 1-3。

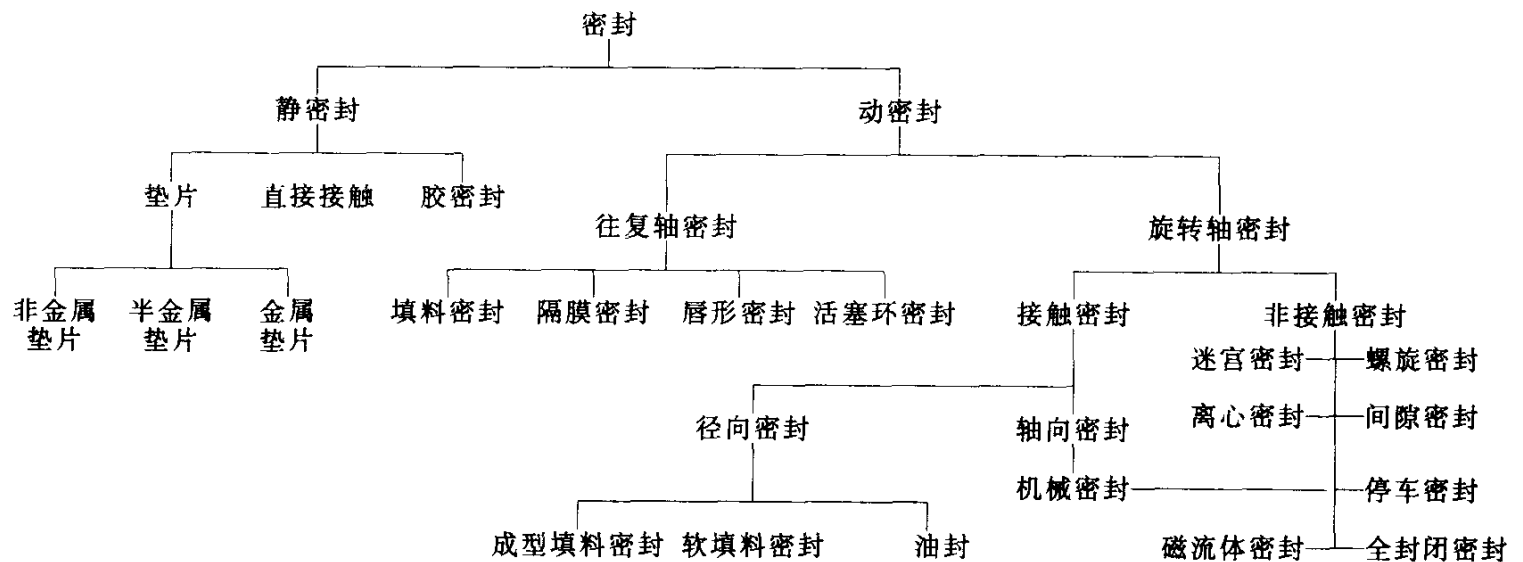


图 1-3 过程装备密封的分类

上述分类方法从密封方法角度来看，要阻止流体在机器设备接合面处发生泄漏有许多方法，而主要的几种方法如下：① 接合表面的精密配合，这种方法在于通过精细机械加工最大限度地减小接合表面的微观粗糙度，达到接合表面轮廓的密切吻合而实现密封，如无垫密封、接触式机械密封等；② 接合的两表面中，若一侧表面材料较软，或在两接合表面之间加入一容易变形的弹性或塑性元件，则在一定的压紧应力下实现接合表面微观粗糙度轮廓之间或其分别与外加元件之间的紧密吻合，如垫片密封、填料密封等；③ 利用流体动压或静压力或磁场等作用，在接合间隙处形成阻碍流体泄漏的阻力，使泄漏量减少，如非接触式机械密封、浮环密封、迷宫密封、螺旋密封、磁流体密封等。此外，利用各种方法的特点，设计出组合式密封结构，如填料-机械密封、浮杯-机械密封，迷宫-机械密封等。

1.4 摩擦、磨损和密封

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中间隙产生泄漏。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须的。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。石渡秀男等人，根据轴承润滑理论和对机械密封进行实验后，得出如下的密封准数 G 与摩擦系数 f 的关系^[13]

$$f = \psi G^m = \psi (\eta v b / W)^m \quad (1-1)$$

式中 ψ ——密封特性数，由密封型式决定；

η ——密封流体的动力粘度；

v ——端面的平均线速度；

b ——端面宽度；

W ——端面的总载荷；

m ——指数，与动密封型式有关，如旋转端面密封 $m = 1/2$ 。

图 1-4 为机械密封 $f-G$ 特性，如图所示，密封准数 G 的大小区别了密封的润滑状态， G 值越大，表示越容易形成液膜，如图中的 $G \geq 1 \times 10^{-6}$ 时有较厚的液膜，因此存在临界

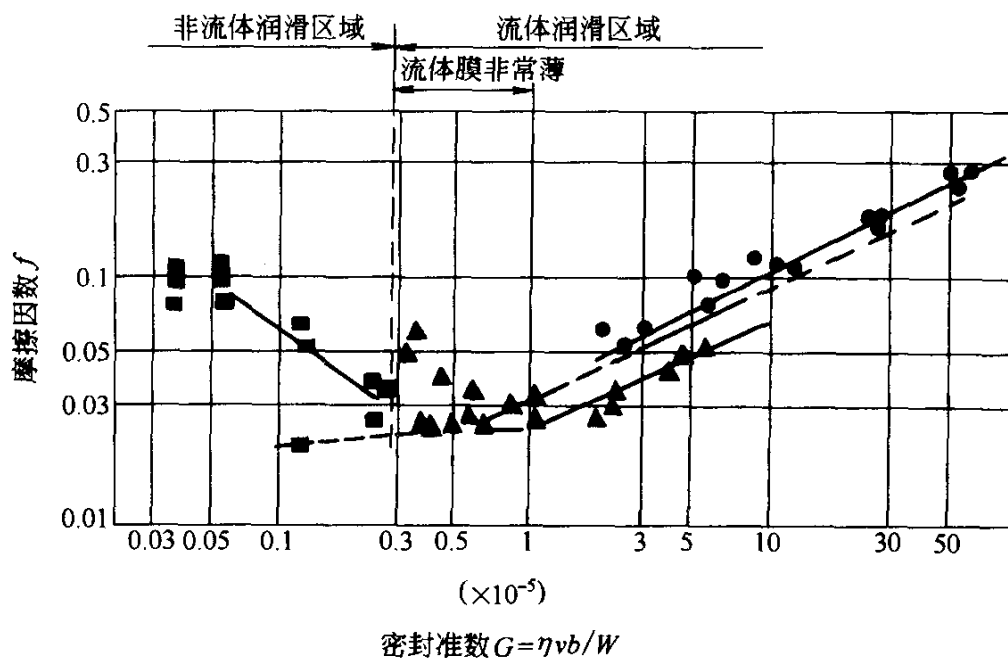


图 1-4 机械密封 $f-G$ 特性

●—机油；▲—锭子油；■—水

值，超过这一临界值，即进入流体润滑状态，反之形成非流体润滑状态。对于一定的结构、尺寸和材料组合， ψ 有一个临界值 ψ_c ，当 $\psi > \psi_c$ 时，处于密封状态；当 $\psi < \psi_c$ ，则泄漏发生。因此，通过考察 f - G 特性可决定密封与泄漏的临界值。

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，即由外来硬的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。

2 流体在密封间隙中的流动

2.1 引言

在流体密封中，许多性能都取决于流体流过密封（面）间隙的流动状态和流动阻力，而这些间隙通常又很小，例如浮动套密封的间隙约 $10\mu\text{m}$ ；机械密封端面间存在的液体膜层小于 $1\mu\text{m}$ 。因此，在研究和解决流体密封问题时，需要具备在这些很小密封间隙中流动流体的流体力学方面的一些知识，这也是本章的目的所在。

流体在狭窄间隙中的流动主要表现为分子流和粘性流，对气体介质来说，其流动特征可以用克努森数 Kn 来描述，即

$$Kn = \frac{\lambda}{r} \quad (2-1)$$

式中 r ——泄漏通道当量半径， $r = 2A/H$ ，m；

λ ——气体分子的平均自由程，m；

A ——流道的截面积， m^2 ；

H ——包围流道截面积 A 的周界，m。

当 $Kn < 0.01$ 时，气体分子的平均自由程远小于泄漏通道的特征尺寸，气体分子间的相互碰撞远远多于气体分子与流道壁面之间的碰撞，因而气体分子间的相互碰撞决定了流动的性质。此时，在平均自由程范围内，气体的温度、密度、流速等性质并不会发生明显改变，因而可以把气体看成是连续介质，即粘性流体，而相应的流动称之为粘性流动，它可以用流体动力学的基本理论加于描述和分析。

当 $Kn > 1$ 时，气体分子的平均自由程大于泄漏通道的特征尺寸，流动阻力主要来自气体分子与流道壁面之间的相互碰撞。此时的流动分析主要是确定流道壁面对分子自由运动的限制效应这样一个几何问题。由于分子间的碰撞很少，各分子的运动可以认为是相互独立的。这种克努森数较大时的流动称之为自由分子流或简称分子流。

当 $0.01 < Kn < 1$ 时，气体分子的平均自由程与泄漏通道的特征尺寸具有相同的数量级，其流动特性与气体分子间的相互碰撞以及气体分子与流道壁面之间的碰撞均有关，气体传递处于过渡流区域，此时对流动的分析为半经验的。本章对该流动状态不进行详细讨论，读者可参阅文献 [1~3]。

粘性流动又可区分为不可压缩流体的粘性流动和可压缩流体的粘性流动两类。通常气体的可压缩性要大于液体，但在流动分析中要判别流体是否可压缩，不能仅仅看流体是气体或是液体，而必须根据流体流动过程中密度变化的大小来决定。通常当流体密度的相对变化（相对于初始密度）的绝对值小于 5% 时，无论该流体是气体或是液体，都可把它作为不可压缩流体来处理。所以，当气体的流速不超过其声速的 0.3 倍时，可以把它看成是不可压缩流体。对密封间隙中不可压缩流体的粘性流动可用雷诺方程描述，而对可压缩流体的粘性流动则可依据雷诺方程并结合气体动力学的一般理论加于分析。

2.2 分子流

2.2.1 长泄漏通道中的分子流

克努森提出了解决分子流流动问题的基本理论并用实验作了验证。对于长度为 L 、流道横截面积为 A 、流道横截面周界为 H 的任意横截面形状的泄漏通道，当其长度与横截面当量半径之比 $L/r > 100$ 时，流过该流道的 pV 流率 Q_{pV} 为

$$Q_{pV} = \frac{4}{3} \frac{v_a}{\int_0^L \frac{H}{A^2} dL} (p_1 - p_2) \quad (2-2)$$

式中 L ——泄漏通道长度，m；

p_1 、 p_2 ——流道入口和出口处的压力，Pa；

Q_{pV} —— pV 流率， $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；

v_a ——气体分子的平均速度， m/s 。

v_a 可由下式计算

$$v_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2-3)$$

式中 R ——通用气体常数， $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；

T ——气体温度，K；

M ——气体分子质量， kg/kmol 。

将式 (2-3) 代入式 (2-2) 得到

$$Q_{pV} = \frac{4}{3} \frac{1}{\int_0^L \frac{H}{A^2} dL} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} (p_1 - p_2) \quad (2-4)$$

对于一个半径为 r 的均匀横截面的长管

$$\int_0^L \frac{H}{A^2} dL = \int_0^L \frac{2\pi r}{(\pi r^2)^2} dL = \frac{2L}{\pi r^3} \quad (2-5)$$

将式(2-5)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀圆形横截面长管的分子流流率为

$$Q_{pV} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-6)$$

对于一个边长分别为 a 和 b 的均匀矩形横截面的长管

$$\int_0^L \frac{H}{A^2} dL = \int_0^L \frac{2(a+b)}{a^2 b^2} dL = \frac{2(a+b)}{a^2 b^2} L \quad (2-7)$$

将式(2-7)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀矩形横截面长管的分子流流率为

$$Q_{pV} = \frac{4}{3} \frac{a^2 b^2}{(a+b)L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (2-8)$$

对于一个长、短半轴分别为 a 和 b 的均匀椭圆形横截面的长管

$$\int_0^L \frac{H}{A^2} dL = \int_0^L \frac{2\pi \sqrt{(a^2 + b^2)}/2}{(\pi ab)^2} dL = \frac{2 \sqrt{(a^2 + b^2)}/2}{\pi a^2 b^2} L \quad (2-9)$$

将式(2-9)代入式(2-4)则可得到气体流过均匀椭圆形横截面长管的分子流流率为