



普通高等教育“十五”国家级规划教材

过程装备密封技术

第二版

蔡仁良 顾伯勤 宋鹏云 编著



化学工业出版社
教材出版中心

普通高等教育“十五”国家级规划教材

过程装备密封技术

第二版

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·

本书系统全面地介绍过程工业装置中流体静、动密封的主要内容和最新进展。本书共分5章，重点阐述密封的基本概念、流体密封理论，泄漏检测技术，以及过程设备和管道的垫片密封、胶密封，过程机械的填料密封、往复密封、机械密封、间隙密封、气液膜密封、迷宫密封、离心密封、螺旋密封、磁流体密封、全封闭密封等的密封机理、结构型式、密封特性、材料和选用等。此外，书末给出了常用国内密封标准目录、中英文术语对照等附录。

本书可用作高等院校高年级学生、研究生的教材，也可供从事密封设计、维护和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/蔡仁良, 顾伯勤, 宋鹏云编著.

2版. —北京: 化学工业出版社, 2006.5

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-5025-8725-X

I. 过… II. ①蔡…②顾…③宋… III. 化工过程-
化工设备-密封-技术-高等学校-教材 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 053037 号

普通高等教育“十五”国家级规划教材

过程装备密封技术

第二版

蔡仁良 顾伯勤 宋鹏云 编著

责任编辑: 程树珍

责任校对: 吴静

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行

教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 787mm×960mm 1/16 印张 17 $\frac{1}{4}$ 字数 373 千字

2006年5月第2版 2006年5月北京第3次印刷

ISBN 7-5025-8725-X

定价: 29.00 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

过程装备与控制工程学科的研究方向、趋势和前沿

——代序

人类的主要特点是能制造工具，富兰克林曾把人定义为制造工具的动物。通过制造和使用工具，人把自然物变成他的活动器官，从而延伸了他的肢体和感官。人们制造和使用工具，有目的、有计划地改造自然、变革自然，才有了名副其实的生产劳动。

现代人越来越依赖高度机械化、自动化和智能化的产业来创造财富，因此必然要创造出现代化的工业装备和控制系统来满足生产的需要。流程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济支柱产业之一，必然要求越来越高度机械化、自动化和智能化的过程装备与控制工程。如果说制造工具是原始人与动物区别的最主要标志，那么就可以说，现代过程装备与控制系统是现代人类文明的最主要标志。

工程是人类将现有状态改造成所需状态的实践活动，而工程科学是关于工程实践的科学基础。现代工程科学是自然科学和工程技术的桥梁。工程科学具有宽广的研究领域和学科分支，如机械工程科学、化学工程科学、材料工程科学、信息工程科学、控制工程科学、能源工程科学、冶金工程科学、建筑与土木工程科学、水利工程科学、采矿工程科学和电子/电气工程科学等。

现代过程装备与控制工程是工程科学的一个分支，严格地讲它并不能完全归属于上述任何一个研究领域或学科。它是机械、化学、电、能源、信息、材料工程乃至医学、系统学等学科的交叉学科，是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，也是生产需求牵引、工程科技发展的必然产物。显而易见，过程装备与控制工程学科具有强大的生命力和广阔的发展前景。

学科交叉、融合和用信息化改造传统的“化工设备与机械”学科产生了过程装备与控制工程学科。化工设备与机械专业是在建国初期向苏联学习在我国几所高校首先设立后发展起来的，半个世纪以来，毕业生几乎一直供不应求，为我国社会主义建设输送了大批优秀工程科技人才。1998年3月教育部应上届教学指导委员会建议正式批准建立了“过程装备与控制工程”学科。这一学科在美欧等国家本科和研究生专业目录上是没有的，在我国已有60多所高校开设这一专业，是适合我国国情，具有中国特色的一门新兴交叉学科。其主要特点如下。

(1) 过程装备：与生产工艺即加工流程性材料紧密结合，有其独特的过程单元设备和工程技术，如混合工程、反应工程、分离工程及其设备等，与一般机械设备完全不同，有其独特之处。

(2) 控制工程：对过程装备及其系统的状态和工况进行监测、控制，以确保生产工艺有序稳定运行，提高过程装备的可靠度和功能可利用度。

(3) 过程装备与控制工程：是指机、电、仪一体化连续的复杂系统，它需要长周期稳定运行；并且系统中的各组成部分（机泵、过程单元设备、管道、阀、监测仪表、计算机系统）均互相关联、互相作用和互相制约，任何一点发生故障都会影响整个系统；又由于加工的过程材料有些易燃易爆、有毒或是加工要在高温、高压下进行，系统的安全性十分重要。

过程装备与控制工程的上述特点就决定了其学科研究的领域十分宽广，一是要以机电工程为主干，与工艺过程密切结合，创新单元工艺装备；二是与信息技术和知识工程密切结合，实现智能监控和机电一体化；三是不仅研究单一的设备和机器，而且更主要的是要研究与过程生产融为一体的机、电、仪连续复杂系统，在工程上就是要设计建造过程工业大型成套装备。因此，要密切关注其他学科的新的动向，博采众长、集成创新，把诸多学科最新研究成果之他山之石为我所用；同时要以现代系统论（Systemics）和耗散结构理论为指导，研究本学科过程装备与控制工程复杂系统独特的工程理论，不断创新和发展过程装备与控制工程学科是我们的重要研究方向。

我国科技部和国家自然科学基金委员会在本世纪初发表了《中国基础学科发展报告》，其中分析了世界工程科学研究的发展趋势和前沿，这也为过程装备与控制工程学科的发展指明了方向，值得借鉴和参考。

(1) 全生命周期的设计/制造正成为研究的重要发展趋势。由过去单纯考虑正常使用的设计，前后延伸到考虑建造、生产、使用、维修、废弃、回收和再利用在内的全生命周期的综合决策。

过程装备的监测与诊断工程、绿色再制造工程和装备的全寿命周期费用分析、安全和风险评估等正在流程工业开始得到应用。工程科技界已开始移植和借鉴现代医学与疾病作斗争的理论和方法，去研究过程装备故障自愈调控（Fault Self-recovering Regulation），探讨装备医工程（Plant Medical Engineering）理论。

(2) 工程科学的研究尺度向两极延伸。过程装备的大型化是多年发展方向，近年来又有向小型化集成化的趋势。

(3) 广泛的学科交叉、融合，推动了工程科学不断深入、不断精细化，同时也提出了更高的前沿科学问题，尤其是计算机科学和信息技术的发展冲击着每个工程科学领域，影响着学科的基础格局。过程装备与控制工程学科的发展也必须依靠学科交叉和信息化，改变传统的生产观念和模式，过程装备复杂系统的监控一体化和数字化是发展的必然趋势。

(4) 产品的个性化、多样化和标准化已经成为工程领域竞争力的标志，要求产品更精细、灵巧并满足特殊的功能要求。产品创新和功能扩展/强化是工程科学研究的首要目标，柔性制造和快速重组技术在大流程工业中也得到了重视。

(5) 先进工艺技术得到前所未有的广泛重视，如精密、高效、短流程、敏捷制造、虚拟制造等先进制造技术对机械、冶金、化工、石油等制造工业产生了重要影响。

(6) 可持续发展的战略思想渗透到工程科学的多个方面，表现了人类社会与自然相协调的发展趋势。制造工业和大型工程建设都面临着有限资源和破坏环境等迫切需要解决的难

题，从源头控制污染的绿色设计和制造系统为今后发展的主要趋势之一。

众所周知，过程工业是国民经济的支柱产业；是发展经济提高我国国际竞争力的不可缺少的基础；过程工业是提高人民生活水平的基础；过程工业是保障国家安全、打赢现代战争的重要支撑，没有过程工业就没有强大的国防；过程工业是实现经济、社会发展与自然相协调从而实现可持续发展的重要基础和手段。因而，过程装备与控制工程在发展国民经济的重要地位是显而易见的。

新中国成立以来，特别是改革开放以来，中国的制造业得到蓬勃发展。中国的制造业和装备制造业的工业增加值已居世界第四位，仅次于美国、日本和德国。但中国制造业的劳动生产率远低于发达国家，约为美国的 5.76%、日本的 5.35%、德国的 7.32%。其中最主要原因是技术创新能力十分薄弱，基本上停留在仿制，实现国产化的低层次阶段。从 20 世纪 70 年代末，中国大规模、全方位地引进国外技术和进口国外设备，但没做好引进技术装备的消化、吸收和创新，没有同时加快装备制造业的发展，因此，步入引进一落后一再引进的怪圈。以石油化工设备为例，20 年来，化肥生产企业先后共引进 31 套合成氨装置、26 套尿素装置、47 套磷复肥装置，总计耗资 48 亿美元；乙烯生产企业先后引进 18 套乙烯装置，总计耗资 200 亿美元。因此，要振兴我国的装备制造业，必须变“国际引进型”为“自主集成创新型”，这是历史赋予我们过程装备与控制工程教育和科技工作者的历史重任。过程装备与控制工程学科的发展不仅仅要发表 EI、SCI 文章，而且要十分重视发明专利和标准，也要重视工程实践，实现产、学、研相结合。这样才能为结束我国过程装备“出不去，挡不住”的局面做出应有的贡献。

过程装备与控制工程是应用科学和工程技术，这一学科的发展会立竿见影，直接促进国民经济的发展。过程装备的现代化也会促进机械工程、材料工程、热能动力工程、化学工程、电子/电气工程、信息工程等工程技术的发展。我们不能只看到过程装备与控制工程是一个新兴的学科，是博采诸多自然科学学科的成果而综合集成的一项工程科学技术，而忽略了反过来的一面，一个反馈作用，也就是过程装备与控制工程学科也应对自然科学的发展做出应有的贡献。

实际上，早在 18 世纪末期，自然科学的研究就超出了自然界，从而包括了整个世界，即自然界和人工自然物。过程装备与控制工程属人工自然物，它也理所当然是自然科学研究的对象之一。工程科学能把过程装备与控制工程在工程实践中的宝贵经验和初步理论精练成具有普遍意义的规律，这些工程科学的规律就可能含有自然科学里现在没有的东西。所以对工程科学研究的成果即工程理论加以分析，再加以提高就可能成为自然科学的一部分。钱学森先生曾提出：“工程控制论的内容就是完全从实际自动控制技术总结出来的，没有设计和运用控制系统的经验，决不会有工程控制论。也可以说工程控制论在自然科学中是没有它的祖先的。”因此对现代过程装备与工程的研究也有可能创造出新的工程理论，为自然科学的发展做出贡献。

过程装备与控制工程学科的发展历史地落在我们这一代人的肩上，任重道远。我们深信，经过一代又一代人的努力奋斗，过程装备与控制工程这一新兴学科一定会兴旺发达，不

但会为国民经济的发展建功立业，而且会为自然科学的发展做出应有的贡献。

高质量的精品教材是培养高素质人才的重要基础，因此编写面向 21 世纪的迫切需要的过程装备与控制工程“十五”规划教材，是学科建设的重要内容。遵照教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》，以邓小平理论为指导，全面贯彻国家的教育方针和科教兴国战略，面向现代化、面向世界、面向未来，充分发挥高等学校在教材建设中的主体作用，在有关教师 and 教学指导委员会委员的共同努力下，过程装备与控制工程的“十五”规划教材陆续与广大师生和工程科技界读者见面了。这套教材力求反映近年来教学改革成果，适应多样化的教学需要；在选择教材内容和编写体系时注意体现素质教育和创新能力及实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。在此向所有为这些教材问世付出辛勤劳动的人们表示诚挚的敬意。

教材的建设往往滞后于教学改革的实践，教材的内容很难包含最新的科研成果，这套教材还要在教学和教改实践中不断丰富和完善；由于对教学改革研究深度和认识水平都有限，在这套书中有不妥之处在所难免。为此，恳请广大读者予以批评指正。

教育部高等学校机械学科教学指导委员会副主任委员
过程装备与控制工程专业教学指导分委员会主任委员

北京化工大学 教授

中国工程院 院士

高吉吉

2003 年 5 月 于北京

第二版前言

由于近年来随着人们保护环境意识的增强,以及对过程装置安全性要求的提高,特别是有效降低工艺介质的泄漏量和控制易发挥有机化合物的逸散水平,使得密封技术在各个工程领域显得越发重要,并在新材料、新结构、新工艺、新方法等方面有了长足的进步。自本书第一版发行以来,受到不少读者和同行的支持和鼓励,并提供了宝贵意见。因此,在本书作为国家级“十五”规划教材再版时,对本书进行了修订和增补。

编写第二版时仍保留第一版基础性、系统性、现代性和工程性的特色,即结合过程工业特点,系统地阐述常用的各种密封型式、结构特点、基本原理、设计方法和工程应用,以满足本科生、研究生拓宽专业知识领域、加强基本技能训练,培养创新综合能力的教学参考需要。作者在编写本版时,努力反映新的密封技术进展,如对近年来备受青睐的欧洲标准化组织新的法兰设计方法,以及随计算机技术迅速发展起来的有限元数值方法作了简要的介绍;根据工程实际的需要,补充了法兰螺栓的选用及其转矩的计算、垫片的安装和密封失效,增加了超高压容器的组合式密封结构、活塞和活塞杆密封、O形圈密封、气膜(干气)密封的结构型式,长距离输送管道的泄漏检测与定位等内容,并对附录重新进行了修订,使本书内容更趋完整、新颖、系统和实用。因此,本书将更好地满足从事密封教学、设计、制造、维护和管理等各类人员的工作需要。

修订工作由初版的相关章节的编者分别负责,由蔡仁良教授统编。限于编者的学识和水平,仍不免存在欠缺和不足之处,恳请广大读者对本书提出宝贵意见。

编者

2005年8月

第一版前言

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、4.3由昆明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，书中谬误之处在所难免，恳请读者予以批评指正。

作者

2002年1月

第一版序

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, 在广泛调研研讨的基础上, 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，从而较大幅度地减少总的授课时数，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们的专业知识面，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

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	7
2 流体在密封间隙中的流动	9
2.1 引言	9
2.2 分子流	10
2.2.1 长泄漏通道中的分子流	10
2.2.2 小孔和短泄漏通道中的分子流	11
2.3 不可压缩流体的层流	12
2.3.1 雷诺数和雷诺方程	12
2.3.1.1 雷诺数和流动状态	12
2.3.1.2 压力梯度、速度分布和雷诺方程	13
2.3.2 二维流动	15
2.3.3 一维轴对称流动	16
2.3.3.1 圆管中的流动	16
2.3.3.2 平行圆板中的流动	18
2.3.3.3 圆环隙中的流动	18
2.3.4 轴线倾斜时圆环隙中的流动	21
2.3.5 流道出口处有障碍时的剪切流动	21
2.3.6 挤压引起的流动	22
2.4 可压缩流体的薄膜流动	22
2.4.1 亚声速气体的流动	23
2.4.2 声速气体的流动	24
3 过程设备和管道的静密封	27
3.1 垫片密封	27
3.1.1 前言	27
3.1.2 中低压设备和管道的垫片密封	30
3.1.2.1 法兰连接设计的一般考虑	30
3.1.2.2 法兰连接标准	31

3.1.2.3	垫片	35
3.1.2.4	螺栓及其选用	50
3.1.2.5	螺栓载荷的计算	50
3.1.2.6	螺栓转矩的计算	53
3.1.2.7	垫片密封设计新方法	56
3.1.2.8	垫片的安装和密封失效	63
3.1.3	高压设备和管道的垫片密封	65
3.1.3.1	高压容器密封结构的特点与选用	65
3.1.3.2	典型高压容器密封结构的设计计算	69
3.1.3.3	高压管道的密封结构与选用	73
3.1.3.4	超高压容器的密封结构	75
3.2	胶密封	82
3.2.1	带压注剂密封技术	82
3.2.1.1	概述	82
3.2.1.2	密封剂的品种与性能	83
3.2.1.3	密封剂的选用	84
3.2.1.4	带压注剂堵漏的基本方法	85
3.2.1.5	带压堵漏的安全施工	90
3.2.2	带压粘接密封技术	91
3.2.2.1	密封胶的分类及其特性	91
3.2.2.2	密封胶的密封机理	95
3.2.2.3	密封胶的选用	96
3.2.2.4	密封胶的涂胶工艺	96
3.2.2.5	密封胶的使用注意事项	97
4	过程机械的动密封	98
4.1	接触密封	98
4.1.1	软填料密封	98
4.1.1.1	引言	98
4.1.1.2	软填料密封的原理	102
4.1.1.3	软填料密封结构的设计	107
4.1.1.4	填料的选择、安装和使用	109
4.1.2	往复轴密封	112
4.1.2.1	液压密封	112
4.1.2.2	气动密封	121
4.1.2.3	活塞和活塞杆密封	125
4.1.3	旋转轴弹性体密封	135

4.1.3.1	唇形密封	135
4.1.3.2	O形圈密封	143
4.1.4	机械密封	146
4.1.4.1	机械密封的基本原理	146
4.1.4.2	机械密封的分类	149
4.1.4.3	机械密封的设计	149
4.1.4.4	机械密封材料	160
4.1.4.5	机械密封循环保护系统	168
4.1.4.6	机械密封性能与试验	173
4.1.4.7	机械密封的选择与使用	176
4.1.4.8	机械密封的失效分析	180
4.2	非接触转轴密封	184
4.2.1	间隙密封	184
4.2.2	迷宫密封	189
4.2.3	气膜密封	191
4.2.4	液膜密封	196
4.2.5	离心密封	200
4.2.6	螺旋密封	204
4.2.7	停车密封	206
4.2.8	磁流体密封	208
4.3	全封闭密封	213
5	泄漏检测技术	217
5.1	引言	217
5.2	检漏方法的分类和特点	217
5.2.1	检漏方法的选择	217
5.2.2	检漏方法的分类	218
5.2.2.1	压力检漏法	218
5.2.2.2	真空检漏法	219
5.2.2.3	其他检漏法	219
5.3	压力检漏法	220
5.3.1	水压法	220
5.3.2	压降法	220
5.3.3	听音法	222
5.3.4	超声波法	223
5.3.5	气泡检漏法	223
5.3.5.1	打气检漏法	223

5.3.5.2	皂泡法	225
5.3.5.3	外真空法	225
5.3.5.4	热槽法	225
5.3.6	集漏空腔增压法	225
5.3.7	氨气检漏法	227
5.3.8	卤素检漏法	229
5.3.9	放射性同位素法	230
5.3.10	氮质谱检漏仪吸嘴法	230
5.3.11	蒸汽冷凝称重法	232
5.4	真空检漏法	233
5.4.1	静态升压法	233
5.4.2	液体涂敷法	233
5.4.3	放电管法	235
5.4.4	高频火花检漏器法	236
5.4.5	真空计法	236
5.4.6	卤素检漏法	237
5.4.7	氮质谱检漏法	237
5.5	其他检漏方法	237
5.5.1	荧光检漏法	237
5.5.2	半导体检漏法	238
5.5.3	示踪气体封入法	239
5.5.4	气瓶法	239
5.6	长距离流体输送管道泄漏检测与定位技术	239
5.6.1	基于模型的方法	240
5.6.2	基于信号处理的方法	241
5.6.2.1	声学方法	241
5.6.2.2	压力点分析法	241
5.6.2.3	流量平衡法	243
5.6.3	基于知识的方法	243
附录 1	常用密封标准目录 (中国)	245
附录 2	中英文术语对照	251
附录 3	常用单位及换算表	256
参考文献	257

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，据统计一个大型石油化工厂中年产 30 万吨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 件事故，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

