

膜分离过程的优化 与控制方法研究

● 王 磊 编著



科学出版社

膜分离过程的优化 与控制方法研究

王 磊 编著



本书出版得到海南大学高水平学术著作出版资助项目库、

“十二五”国家科技支撑计划课题[2012BAA 10B03]

和国家自然科学基金项目[61463011]的资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了膜分离过程的优化与控制方法,是作者多年从事绿色过程优化与计算机控制系统等交叉学科研究成果的结晶。

全书共 9 章,包括绪论,气体膜分离过程两段流程的控制,气体膜分离过程中性能指标的软测量技术研究,气体膜分离过程单级流程性能参数预测研究,气体膜分离过程两级流程性能参数预测研究,气体膜分离过程多级流程性能参数在线预测研究,气体膜分离物料平衡过程的控制与优化,液体膜分离浓缩过程的控制,膜分离过程全集成优化控制系统设计等。每章内容都有相应的膜分离技术的创新应用背景。

本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可根据自己的需要选择学习。

本书可供从事生产过程自动化、材料与化工、计算机应用、电子与通信等领域的工程技术人员、科研人员及企业管理人员阅读,也可作为高等院校工业自动化、化学工程、电子通信、计算机应用等专业的本科生及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

膜分离过程的优化与控制方法研究/王磊编著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-044958-0

I. ①膜… II. ①王… III. ①膜-分离-化工过程-研究 IV. ①TQ028.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 129339 号

责任编辑:陈玉琢 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张:8 1/2

字数:168 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



王磊，出生于1966年5月，大连人，博士，高级工程师，博士生导师，1988年毕业于北京理工大学，2007年毕业于大连理工大学，获工学博士学位。2011年9月~2012年7月在清华大学化学工程系做教育部高等学校青年骨干教师访问学者。

曾在大连中德控制系统有限公司和中国科学院大连化学物理研究所长期从事计算机控制系统及膜分离过程优化的工程技术开发工作，主持承担国家与企业大中型项目30多项，总额达7000多万，经济效益和社会效益显著。现在海南大学进行交叉学科的研究，主要研究方向：绿色过程集成与优化控制系统、低碳节能技术及产业化、嵌入式系统与智能检测、传感器与信息材料等。

近年来主持了“十二五”国家科技支撑计划课题、国家自然科学基金和海南省自然科学基金等科研项目。已申请第一发明人专利12项，获发明专利1项，实用新型专利6项，已发表学术论文22篇。“火电厂计算机控制系统应用软件”获中国实用科技成果和大连市火炬项目计划（国家级），“气体膜分离技术在合成氨弛放气氢回收上的应用开发”获中国膜工业协会科学技术奖一等奖，“大型工件水基淬火介质研制”获国内领先科技成果鉴定、大连市科技进步奖三等奖和辽宁省瓦房店市科技进步奖一等奖。

前 言

膜分离现象在自然界中,特别是生物体内广泛而恒久地存在,它与生命起源密切相关,是一切生命活动的基础。膜分离原理的工业化应用是现代工业流体分离处理过程的最新研究内容之一。半个多世纪以来,膜分离完成了从实验室到大规模工业应用的转变,成为一项高效节能的新型分离技术,大概每十年就有一项新的膜分离过程在工业中得到应用。据统计,1990年世界膜及装置的市场总销售额达72.94亿美元,是1980年的5.5倍。中国膜工业协会根据近几年膜工业发展速度和经济建设需求分析预测:2015年,我国膜市场需求可望超过200亿元,将占世界总量的10%~15%。

在能源紧张、资源短缺、生态环境恶化的今天,膜分离技术本身具有的优越性能使得膜分离过程得到世界各国的普遍重视。产业界和科技界把膜分离过程视为21世纪工业技术改造中的一项极为重要的新技术。曾有专家指出:谁掌握了膜技术,谁就掌握了化学工业的明天。目前,膜分离技术已经形成了一个相当规模的工业技术体系,并且在能源、电子、石化、轻工、医药、环保和有色金属工业等领域起着重要作用,因而“膜工程技术”和“炼厂气氢回收”等被国家发展和改革委员会、科学技术部编入“当前优先发展的高技术产业化重点领域指南(2001年度版)”。在膜分离技术自身不断创新的同时,这项当今世界竞相发展的高新技术与其他层出不穷的新技术不断融合,也带来了举世瞩目的商机和科技成果。

近几十年来,虽然膜分离过程在理论及应用上都有了很大的发展,许多研究学者对其进行研究,但都集中在膜、膜材料和装置等方面,而对其过程控制研究较少,缺乏一本及时反映膜分离过程控制及其优化研究发展的专著。在这种形势下,作者基于多年从事绿色过程优化与计算机控制系统等交叉学科研究的成果,整理成本书,系统介绍了膜分离过程的优化与控制方法,可供从事生产过程自动化、材料与化工、计算机应用、电子与通信等领域的工程技术人员、科研人员及企业管理人员阅读,也可作为高等院校工业自动化、化学工程、电子通信、计算机应用等专业的本科生及研究生的参考书。全书共9章。

第1章绪论。介绍膜分离技术和过程控制技术的基本知识理论和发展情况,并在此基础上进一步研究膜分离过程的控制。

第2章气体膜分离过程两段流程的控制。在介绍膜分离过程两段流程的基础上,针对利用TBM中低压气体膜分离技术回收炼厂气中氢气的两段流程控制中原料气入膜温度难以实现稳定控制的问题,提出模糊自整定PID控制方法,进而实现包括水冷器出口温度、旋风分离器液位、原料气入膜压力及一段和二段渗透气压力和原料气入膜温度等多个回路的自动控制。通过在镇海炼化的应用表明,该工艺流程设计合理,控制系统安全可靠,并在DCS上开发了基于机理模型的气体膜分离过程模拟系统,为装置的优化操作提供指导,为TBM膜在炼油厂的推广应用提供了成功示范。

第3章气体膜分离过程中性能指标的软测量技术研究。在研究气体膜分离过程时发

现, 其性能指标的定量预测对膜的操作优化有重要指导作用, 基于软测量技术对气体膜分离过程中性能指标进行预测研究, 可以为先进控制(Advanced Process Control, APC)及优化控制的实施打下基础。针对气体膜分离过程重要性能参数难以在线检测问题, 建立基于 RBF 神经网络的气体膜分离过程 MIMO 软测量模型, 通过测量操作温度、原料气压力、渗透气压力、尾气压力、原料气流量和原料气氢浓度, 对质量指标渗透气氢浓度和经济目标氢气回收率进行定量预测。基于现场应用数据仿真表明, 该模型避免了机理模型的复杂性, 而且具有较高的精度, 为气体膜分离过程的先进控制及优化控制的实施奠定了建模基础。

第 4 章气体膜分离过程单级流程性能参数预测研究。基于气体膜分离过程单级流程, 对气体膜分离过程单级流程性能参数预测进行了研究。应用 PCA 方法对选择的气体膜分离过程辅助变量进行相关性分析, 并基于分析结果建立基于 PCA-RBFNN 的炼厂气氢回收膜分离过程单级流程软测量智能模型; 针对 PCA-RBFNN 模型应用时存在的局限性, 寻找一种较优的建模方法——LSSVM, 建立基于 PCA-LSSVM 的炼厂气氢回收膜分离过程单级流程软测量智能模型, 并分别用这两个模型对单级流程性能参数——渗透气氢浓度、渗透气流量和尾气氢浓度进行预测。

第 5 章气体膜分离过程两级流程性能参数预测研究。基于气体膜分离过程两级流程, 对其过程性能参数预测进行研究。针对不同的气体膜分离过程, 用不同的方法分别建立基于 PCA-LSSVM 的炼厂气氢回收膜分离过程两级流程和基于 BPNN 及 PSO-BPNN 的天然气脱 CO_2 膜分离过程两级流程智能软测量模型, 对相应过程的关键性能参数进行预测。

第 6 章气体膜分离过程多级流程性能参数在线预测研究。基于气体膜分离过程多级流程, 对气体膜分离过程多级流程性能参数在线预测进行研究。选用前面研究得到的较好方法 LSSVM, 基于在线实现方法——滑动窗口法, 分别建立基于 LSSVM 的炼厂气氢回收膜分离过程三级流程在线软测量智能模型和基于 LSSVM 的天然气脱 CO_2 膜分离过程两级流程在线软测量智能模型, 对相应的过程性能参数进行在线预测。

第 7 章气体膜分离物料平衡过程的控制与优化。在对气体膜分离原理及分离装置的运行特点进行深入研究基础上, 分析比较气体膜分离过程中原料气流量控制和渗透气流量控制的各种方案, 提出通过在尾气侧安装控制阀定量调节原料气流量和渗透气流量的控制原理及物料平衡的双重控制方法; 在保证系统稳定的基础上, 采用改进遗传算法(genetic algorithm, GA)实现氢气回收率的动态优化控制。该方法适用于所有气体膜分离过程中对处理气流量和渗透气流量的优化控制, 并成功应用于金陵石化从加氢裂化中高浓氢的提取和洛阳石油化工工程公司(洛阳石化)从连续重整中高浓氢的提取过程, 验证了本书所述控制方法的有效性。

第 8 章液体膜分离浓缩过程的控制。针对液体膜分离浓缩过程采用纳滤随机清洗连续排料操作方式时常规 PID 不能有效跟踪原料罐液位的控制问题, 提出原料罐液位的选择性控制及以预测函数控制(predictive functional control, PFC)为监督层、常规 PID 为控制层的透明控制结构, 实现以常规 PID 为基础控制、以 PFC 为设定值给定的原料罐液位的跟踪控制。通过在谷神集团的大豆低聚糖浓缩过程应用实践表明, 所提出的优化策略稳定了操作过程, 改善了产品质量, 并提高了对工艺参数跟踪控制的精度, 使膜系统达到

废水处理同时回收高附加值产品的理想效果,有利于膜技术在环境保护及特种分离领域的推广应用。

第9章膜分离过程全集成优化控制系统设计。基于集成化思想研究和分析膜分离过程机理特性及工艺流程特点,运用智能化控制技术,分别针对不同的膜分离过程实现了优化控制策略,提出了膜分离过程全集成优化控制系统的总体设计思想和设计原则,确定了由基础控制级、先进控制级和优化协调级组成的三级结构;为保证渗透气氢浓度的质量指标,并实现氢气回收率的优化目标,提出了先进控制与实时优化的炼厂气氢回收过程全集成优化控制系统完整解决方案。

本书以“基础理论—技术方法—应用实践”为框架。本书的内容在今后研究基础上将不断更新,使得框架结构更加合理、清晰,并且会增加更多有关膜分离过程控制机理和基本原理的介绍及应用实例。希望通过本书的“抛砖引玉”,能有助于膜分离过程的优化与控制方法研究的发展,也希望本书的出版能为膜这一绿色技术从膜材料的选择制备、膜工艺的设计到膜分离过程优化目标的实现贡献一份力量,也希望其中的一些思想方法能为其他绿色过程集成优化研究提供借鉴!

本书的研究工作及成果得到了“十二五”国家科技支撑计划课题(项目编号:2012BAA10B03)和国家自然科学基金项目(项目编号:61463011)的资助,在此表示感谢。向支持和关心作者研究工作的所有单位和个人表示衷心的感谢,特别是作者曾工作过的大连中德控制系统有限公司、中国科学院大连化学物理研究所和现在工作的海南大学;感谢博士生导师大连理工大学邵诚教授和访学导师清华大学李继定教授,是这些理论与实践相结合的经历背景奠定了今天交叉学科的研究基础;感谢李桂香同学(作者的第一个硕士研究生),她在软测量智能建模方面的深入研究为本书顺利完成提供了帮助,并为后续研究奠定了基础,也为真空玻璃传热过程智能建模研究提供了有益的借鉴;感谢支持本书出版的海南大学高水平学术著作出版资助项目库和科学出版社。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请各位读者批评指正!

王 磊

2014年12月12日于海口

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 膜分离技术的发展和理想膜分离过程目标	1
1.1.1 膜分离技术的发展及应用瓶颈	1
1.1.2 膜分离过程控制的复杂性	4
1.1.3 膜分离过程控制技术的现状及存在的问题	5
1.1.4 理想膜分离过程的概念	6
1.2 过程控制技术的研究现状	6
1.2.1 控制理论与过程控制的发展	6
1.2.2 过程控制系统的发展	7
1.2.3 面向过程的集成优化控制技术	9
1.3 本书的意义	10
2 气体膜分离过程两段流程的控制	11
2.1 气体膜分离机理分析	12
2.1.1 气体膜分离原理	12
2.1.2 气体膜分离过程的数学模型	13
2.1.3 气体膜分离过程的影响因素	15
2.2 炼厂气氢回收装置的控制	17
2.2.1 两段工艺流程	18
2.2.2 基本控制回路	19
2.3 PID 参数整定	21
2.3.1 PID 参数整定原则	21
2.3.2 PID 参数整定方法	22
2.3.3 原料气入膜温度的模糊自整定 PID 控制	22
2.4 现场应用结果	24
2.4.1 控制系统稳定性	25
2.4.2 基于机理模型模拟的操作优化	26
2.5 本章小结	27
3 气体膜分离过程中性能指标的软测量技术研究	28

3.1	神经网络软测量技术	28
3.1.1	软测量技术	29
3.1.2	神经网络软测量技术	29
3.2	RBF 神经网络建模	30
3.2.1	主导变量和辅助变量的选择	30
3.2.2	数据采集和处理	30
3.2.3	RBF 神经网络的建模	31
3.3	仿真实验	32
3.3.1	炼厂气氢回收装置的工艺流程	32
3.3.2	样本的选择	33
3.3.3	RBF 神经网络模型的训练与校验	33
3.4	结果与讨论	36
3.5	软测量模型的在线校正	36
3.6	本章小结	37
4	气体膜分离过程单级流程性能参数预测研究	38
4.1	引言	38
4.2	炼厂气氢回收膜分离过程单级流程	38
4.3	过程建模变量确定	39
4.4	数据采集处理和主元分析	39
4.5	RBFNN 智能建模与过程性能参数预测	41
4.5.1	RBFNN 智能建模	41
4.5.2	过程性能参数预测	43
4.6	LSSVM 智能建模与过程性能参数预测	45
4.6.1	LSSVM 智能建模	45
4.6.2	过程性能参数预测	48
4.7	本章小结	49
5	气体膜分离过程两级流程性能参数预测研究	51
5.1	引言	51
5.2	基于 PCA-LSSVM 的气体膜分离过程性能参数预测	51
5.2.1	炼厂气氢回收过程两级流程	51
5.2.2	过程建模变量确定	52
5.2.3	数据采集处理与主元分析	52
5.2.4	LSSVM 智能建模	53
5.2.5	过程性能参数预测	54
5.3	基于 PSO-BPNN 的气体膜分离过程性能参数预测	56

5.3.1 天然气脱 CO ₂ 过程两级流程	56
5.3.2 过程变量确定与数据采集处理	57
5.3.3 BPNN 智能建模与过程性能参数预测	58
5.3.4 PSO-BPNN 建模与过程性能参数预测	58
5.4 本章小结	62
6 气体膜分离过程多级流程性能参数在线预测研究	63
6.1 引言	63
6.2 基于 LSSVM 的炼厂气氢回收过程性能参数在线预测	63
6.2.1 炼厂气氢回收过程三级流程	63
6.2.2 过程变量选择和数据采集处理	64
6.2.3 在线模型的建立与校验	64
6.2.4 过程性能参数预测	65
6.3 基于 LSSVM 的天然气脱 CO ₂ 过程性能参数在线预测	68
6.3.1 在线模型的建立与校验	68
6.3.2 过程性能参数在线预测	69
6.4 本章小结	71
7 气体膜分离物料平衡过程的控制与优化	73
7.1 气体膜分离过程的关键控制参数	74
7.2 物料平衡控制点的比较	76
7.3 物料平衡的控制	78
7.3.1 原料气流量的自动控制	78
7.3.2 渗透气流量的自动控制	78
7.3.3 物料平衡的控制方向	78
7.3.4 物料平衡的双重控制	79
7.4 物料平衡过程优化控制	80
7.4.1 过程优化与遗传算法	81
7.4.2 物料平衡过程优化控制算法	82
7.5 现场应用结果	84
7.6 本章小结	86
8 液体膜分离浓缩过程的控制	87
8.1 影响反渗透和纳滤膜性能的因素	87
8.2 浓缩过程的工艺流程	88
8.2.1 定时清洗间歇排料浓缩工艺流程及循环程序	89
8.2.2 随机清洗连续排料浓缩工艺流程及控制时序	90

8.3 大豆低聚糖随机清洗连续排料浓缩工艺流程的控制	92
8.3.1 排料量的 SCC 二级控制	92
8.3.2 原料罐液位的选择性控制及 PFC 预测函数控制	93
8.3.3 大豆低聚糖浓缩过程先进控制系统	97
8.4 现场应用结果	100
8.4.1 现场数据	100
8.4.2 控制效果	100
8.5 本章小结	101
9 膜分离过程全集成优化控制系统设计	103
9.1 膜分离过程优化控制的意义	103
9.2 膜分离过程全集成优化控制的基本思想	103
9.3 膜分离过程全集成优化控制系统的设计原则	105
9.4 膜分离过程全集成优化控制系统的功能设计	105
9.4.1 膜分离过程全集成优化控制的目标	105
9.4.2 膜分离过程全集成优化控制系统的总体结构	106
9.4.3 炼厂气氢回收过程全集成优化控制系统	107
9.5 现场应用结果	111
9.5.1 现场数据	111
9.5.2 技术经济分析	112
9.6 本章小结	112
结论	113
参考文献	115
附录 膜分离性能预测	120
名词索引	122

1 绪 论

1.1 膜分离技术的发展和理想膜分离过程目标

1.1.1 膜分离技术的发展及应用瓶颈

膜是一种具有特殊选择性分离功能的无机或高分子材料，它能把流体分隔成不相通的两个部分，使其中的一种或几种物质能透过，而将其他物质分离出来。膜分离技术是指以压力差、浓度差或电位差等为推动力，依靠膜的选择渗透作用对不同的气体或液体原料进行分离、纯化与浓缩，如图 1.1 所示。

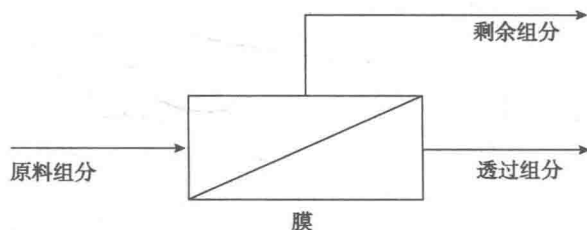


图 1.1 膜分离技术

选择适当的膜分离过程，可以代替蒸馏蒸发、真空过滤、浓缩抽提、离子交换等多种传统的分离与过滤方法，解决目前某些产品在工业生产过程中应用传统工艺无法解决的能耗高、质量差、收率低、污染重等难题^[1,2]。

近 30 年来，作为一项新型的分离、浓缩、提纯、净化及促进传递的技术，膜分离过程不断得到研究开发，应用领域也不断得到拓宽，一些新的膜分离技术不断涌现，如渗透汽化、膜蒸馏、支撑液膜、膜萃取、膜生物反应器、控制释放膜、仿生膜、生物膜等。同时，传统的膜分离过程也更加成熟，进一步得到工业化、产业化、市场化，如反渗透(RO)、纳滤(NF)、超滤(UF)、微滤(MF)、渗析(D)、电渗析(ED)、气体分离(GS)等^[3,4]。各种膜技术应用范围如图 1.2 所示。

各种膜分离过程具有不同的机理，适用于不同的对象和要求^[5]。

(1) 反渗透(RO)。反渗透是利用反渗透膜选择性地只能透过溶剂(通常是水)的性质，对溶液施加压力，克服溶剂的渗透压，使溶剂通过反渗透膜从溶液中分离出来的过程。

(2) 纳滤(NF)。纳滤膜的分离机理与反渗透类似，是从反渗透技术中独立出来的分离技术。纳滤膜的孔径为纳米级，介于反渗透膜和超滤膜之间，因此称为纳滤。

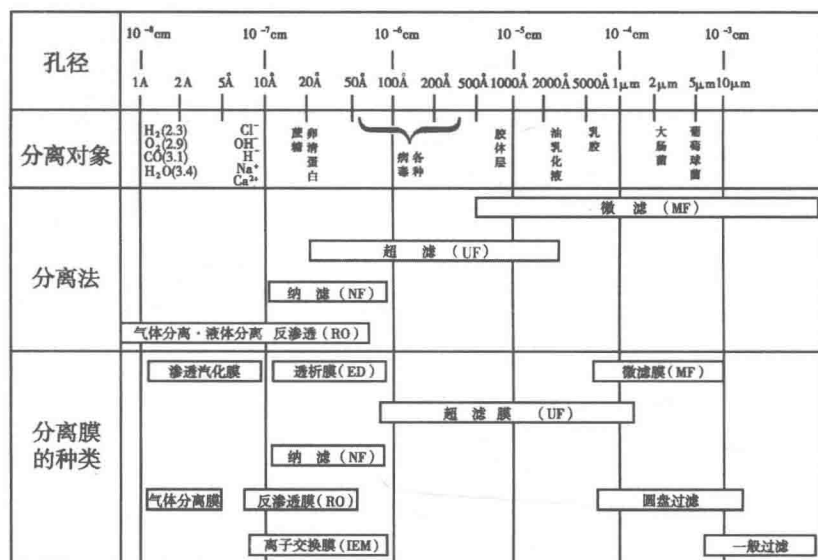


图 1.2 各种膜技术应用范围

(3) 超滤(UF)。应用孔径为 10~200Å 的超滤膜过滤含有大分子或微细粒子的溶液，使大分子或微细粒子从溶液中分离的过程。

(4) 微滤(MF)。微滤与超滤的基本原理相同，它是利用孔径大于 0.02μm 直到 10μm 的多孔膜来过滤。

(5) 渗析(D)。渗析是最早发现、研究和应用的一种膜分离过程，它是利用多孔膜两侧溶液的浓度差使溶质从浓度高的一侧通过膜孔扩散到浓度低的一侧从而得到分离的过程。

(6) 电渗析(ED)。电渗析是基于离子交换膜能选择性地使阴离子或阳离子通过的性质，在直流电场的作用下使阴阳离子分别透过相应的膜以达到从溶液中分离电解质的目的，目前主要用于水溶液中除去电解质(如盐水的淡化等)、电解质与非电解质的分离和膜电解等。

(7) 气体膜分离(GS)。气体膜分离是利用气体组分在膜内溶解和扩散性能的不同，即渗透速率的不同来实现分离的技术。

(8) 渗透汽化(PV)。渗透汽化也称渗透蒸发，它是利用膜对液体混合物中组分的溶解和扩散性能的不同来实现分离的新型膜分离过程。

(9) 其他膜分离过程。用作分离膜的材料包括广泛的天然和人工合成的有机高分子材料和无机材料。目前，实用的有机高分子膜材料有：纤维素酯类、聚砜类、聚酰胺类及其他材料。纤维素酯类材料在膜材料中占主要地位。

膜的微观结构主要是指膜的形态、膜的结晶态和膜的分子态结构上的厚度、孔径大小和膜的孔隙率等。图 1.3 为电子扫描显微镜下某种微滤膜的显示图。

膜分离设备的核心部分是膜组件，即按一定技术要求将膜组装在一起的组合构件。

(1) 板框式膜组件。板框式膜组件使用平板式膜，这类膜器件的结构与常用的板框压滤机类似，由导流板、膜、支承板交替重叠组成。

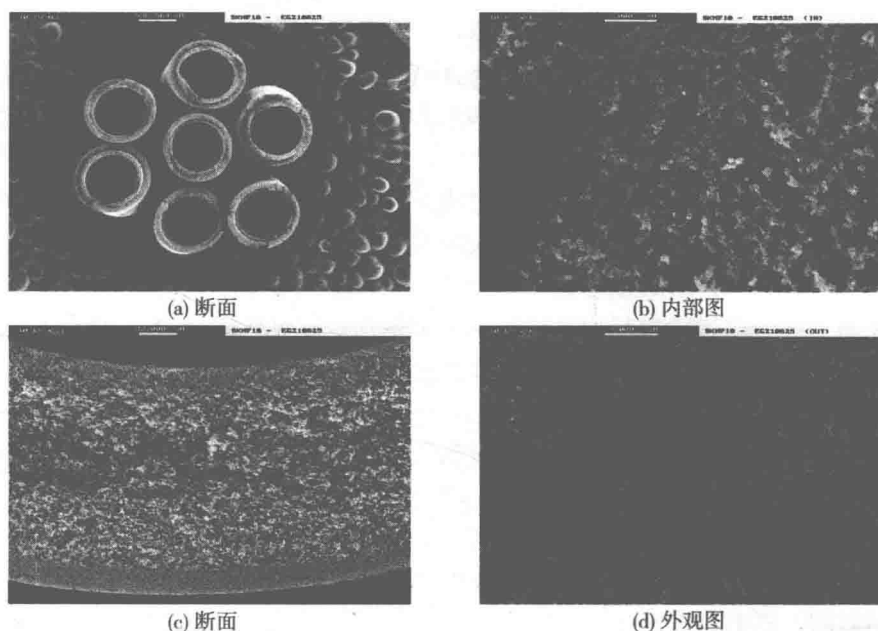


图 1.3 电子扫描显微镜下某种微滤膜的显示图

(2) 卷式膜组件。卷式膜组件也是用平板膜制成的，其结构与螺旋板式换热器类似。

(3) 管式膜组件。管式膜组件由管式膜制成，它的结构原理与管式换热器类似，管内与管外分别走料液与透过液。管式膜的排列形式有列管、排管或盘管等，分为外压和内压两种。

(4) 中空纤维膜组件。中空纤维膜组件的结构与管式膜类似，即将管式膜由中空纤维膜代替。

与传统的化工分离方法，如过滤、蒸发、蒸馏、萃取、深冷等过程相比较，各种膜分离过程的共同特点是：

- ① 工艺流程简单，占地面积小，经济性好，操作维修方便，开停车灵活；
- ② 一般无相变，动力及传动设备少，能耗较低，分离系数较大，应用范围广；
- ③ 不需外界加入其他物质，无“三废”，无二次污染，不会对环境造成危害；
- ④ 系统放大简单，适应性强，可以大规模集成，无放大效应；
- ⑤ 常温下进行，适合热敏性物质和生物制品分离；
- ⑥ 分离与浓缩同时进行，便于回收有价值物质。

膜分离技术成功的应用离不开分离系统工艺流程设计及优化，通过对流程进行合理的设计和优化，可以拓宽膜分离技术的应用领域并提高膜分离技术的经济性^[6]。

1982 年，中国科学院大连化学物理研究所研制的高性能中空纤维氮氢膜分离装置成功用于合成氨厂从弛放气中回收氢气。朱葆琳、蒋国良、陆文军、曹义鸣、贺高红、王海等对流程设计及优化进行了一定的研究和探讨，还在工程实践中不断设计新的流程形式，并对流程进行优化，以确定最佳流程^[7-10]。

1998 年，王海以合成氨弛放气膜法氢回收过程工艺流程设计及优化为研究对象，从

理论上分析了传统流程设计中存在的问题,设计了新的流程形式,并对流程进行了优化,确定了最佳流程形式和流程设计^[36],并在此基础上,完善了单级无压缩机流程设计计算模型和计算方法,对流程设计及优化的基本方法和原则以及流程经济性评估进行了初步探索。

但在工艺流程设计完成后,膜分离过程的性能下降及控制水平低等问题就成为严重阻碍其应用效果、使用寿命或更大规模应用的主要瓶颈。

在膜分离过程中,膜的性能会逐渐降低,其原因主要是浓差极化和膜污染。浓差极化是膜表面局部浓度增加引起边界层流体阻力增加,导致传质推动力下降的现象。这种影响具有可逆性,可通过降低料液浓度或改善膜面附近料液侧的流体力学条件,如提高流速、采用湍流促进器和设计合理的流道结构等方法来减小。膜污染是指料液中的微粒、胶体粒子或溶质分子由于与膜之间存在物理化学作用而在膜表面及膜孔中沉积,使膜孔堵塞或变小,膜阻增大,膜的渗透速率下降的现象。膜污染往往具有不可逆性,如膜孔堵塞、溶质在膜孔内的吸附、膜面凝胶层的形成等。膜污染严重时将使膜分离过程无法正常进行,必须对污染膜进行清洗,以确保膜分离过程的正常运行。但频繁的清洗将耗费大量的时间,影响正常操作。

不仅液体分离膜存在污染问题,有些气体分离膜也同样存在,但是这个问题在特殊分离领域尤为突出。由此引出的对膜分离过程工艺条件进行优化控制的研究已成为尚待攻关的课题之一^[11]。

对膜分离过程工艺条件进行优化控制,首先是选择有利于控制膜污染的操作条件,即选择适当的操作温度、流速及操作压力等可减少膜污染,强化膜分离过程;对膜分离过程工艺条件进行优化控制还可充分发挥膜分离技术优势,从而创造更大经济效益和社会效益。

无论在学术上还是工业化应用当中,反渗透、纳滤、超滤、微滤、渗析、电渗析、气体膜分离、渗透汽化等课题的研究都将是重中之重。本书将针对工程中气体分离膜的炼厂气氢回收过程、液体分离膜的反渗透和纳滤大豆低聚糖浓缩过程进行优化控制的研究。

1.1.2 膜分离过程控制的复杂性

如下主要干扰作用,会使得膜分离过程运行不稳定,进而影响膜分离技术的经济效益^[12]。

(1) 原料组成的变化。膜分离过程是对一定的原料进行分离,原料性质的改变会严重影响分离的目标,而对膜材料有害的物质则必须通过前处理除去。由于前处理对膜分离过程至关重要,所以以往的控制回路主要是围绕前处理进行。

(2) 原料负荷的变化。膜分离过程一般有一定的操作弹性,但如果超过范围,就应该进行相应操作,以确保达到期望的分离性能。因此,膜分离过程的操作指导是非常必要的。

(3) 与前后装置的连接调度。膜分离过程已成为流程工业中一个相对独立的单元,由于前后连接调度等原因,往往要求膜分离过程的运行作相应的调整,以满足整个生产

过程的物料平衡。

(4) 膜分离器性能的衰减。由于膜材料自身或者原料, 或者前处理的原因, 膜分离器的性能会随时间推移逐渐衰减, 如果能及时了解或预测膜分离器的性能参数, 对膜分离过程的优化具有重要的意义。

(5) 控制系统的失灵。自动化控制系统是监督、管理、控制膜分离过程的关键, 其软硬件的可靠性以及操作员的误操作, 都会给膜分离过程带来扰动, 甚至损害。

除具有上述一般工业生产过程的特点外, 膜分离过程还有如下特殊性:

(1) 由于造价或技术原因, 重要的膜性能指标(如产品质量的参数)无法在线测量, 只能通过取样分析才能获得;

(2) 由于取样化验分析等原因, 膜分离过程存在着各种时滞, 使过程难于控制;

(3) 随着运行操作点不同, 膜分离过程特性会不一样, 即具有非线性的特性;

(4) 膜分离过程的输入和输出之间的关系通常是很复杂的, 各变量之间具有很强的耦合性。

1.1.3 膜分离过程控制技术的现状及存在的问题

膜分离装置的控制系统对膜分离过程安全、稳定地运行起着非常重要的作用, 所以国外的膜分离装置均根据具体控制要求采用当时先进流行的控制系统, 即集散控制系统(DCS)、可编程控制器(PLC)、现场总线控制系统(FCS)均有应用。

膜分离装置投入工业化运行已有几十年, 经过大规模推广应用, 给使用膜技术的企业带来了实实在在的经济效益和社会效益, 并成为化工单元的重要组成部分。但是, 目前国内膜分离装置控制系统的设计大多仅停留在常规电 III 型仪表水平, 虽然初期成本相对较低, 而工业环境对控制系统的要求已从 DCS/PLC 向更先进、控制效率更高的 FCS 方向变革性发展。从长远来看, 传统设计越来越不能满足控制系统发挥其优化工艺集成、应用先进技术、提升客户价值等方面特点的要求; 膜分离装置与控制系统应协同结合, 而不应落后于工业环境。随着国内市场国际化, 膜技术公司与国外企业竞争的焦点不仅在膜产品的性能/价格上, 还在控制系统的水平及效率上, 如果我们的膜分离装置控制系统继续在原有水平上停滞不前, 在与国外企业竞争时便处于落后状态, 更难于获得优势。

膜分离过程控制存在的问题主要表现在如下三个方面:

(1) 理念上不重视控制系统的作用, 把提高自控水平单纯理解为增加成本。在竞争时, 为了降低造价, 盲目降低自控水平, 如减少检测仪表、将自动阀门改为手动阀门、将计算机控制改为现场手动或常规仪表控制等。

(2) 控制技术功能未充分发挥。大多数膜分离过程的控制系统都以手动操作方式为主, 或者采用 PLC 主要对电气设备的控制, 有的虽采用了 DCS, 但也只是简单地用集中操作方式替代了现场操作方式, 自动投入率很低, 没有智能控制。

(3) 知识上不了解先进的控制方法。实际上, 从某种角度看, 只要工艺能提出控制要求, 一般控制都能实现。目前, 膜分离过程的控制系统都是只对前处理进行的单回路控制, 显然无法适应这个多变量、非线性、强耦合过程的全局协调。

1.1.4 理想膜分离过程的概念

理想膜分离过程是指满足一定的工业化应用分离目标(技术上可行)的经济性最佳的膜分离过程。如图 1.4 所示,理想膜分离过程需要进行长期的、多方面的、深入的研究和实践检验的反复努力才能实现,应由三个相对独立的局部构成。其中,膜技术的发展是实现理想膜分离过程的基础,工艺流程的优化是实现理想膜分离过程的前提,优化控制技术是实现理想膜分离过程的保证^[13-16]。

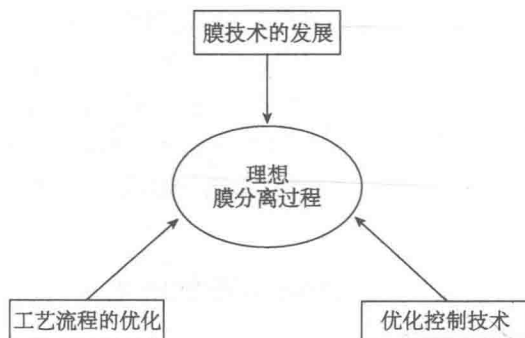


图 1.4 理想膜分离过程的实现

为实现理想膜分离过程的目标,迫切要求膜技术与控制技术的结合,工艺设计应考虑到优化控制的可实现性,控制设计也应满足膜的机理要求。从过程控制的角度,理想膜分离过程就是以较大的处理量、较高的产品回收率、较好的产品质量和较低的消耗,收到最好的生产效果和最高的经济效益为控制目标的使膜分离过程达到一种最优化状态的控制方法以及自动化新技术。本书就是针对各种新的膜分离过程的具体问题,将优化控制技术有效融入膜分离过程优化控制研究的总体框架。这是本书的创新内涵。

本书将面向气体和液体膜分离过程两方面有代表性的新的应用工程,从控制技术结合的角度,以膜分离过程优化控制为研究对象,以全集成优化控制为指导思想,对膜分离过程的优化与控制方法展开研究。其中,对气体膜分离过程侧重于新的工艺过程的先进控制方法和实时优化协调方面的研究,对液体膜分离过程则侧重于新的工艺过程的优化控制策略方面的研究。

1.2 过程控制技术的研究现状

1.2.1 控制理论与过程控制的发展

被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”的控制理论大体经历了经典控制理论、现代控制理论和人工智能控制理论(或称知识工程)三个阶段^[17]。

控制理论的发展初期,是以反馈原理为基础的自动调节原理。第二次世界大战后,完善了控制理论的发展,并形成了以传递函数为基础的经典控制理论,它主要在频率域