

“十三五”普通高等教育规划教材

化学工程核心课程 实验与设计

谢亚杰 主编 刘 丹 胡万鹏 副主编

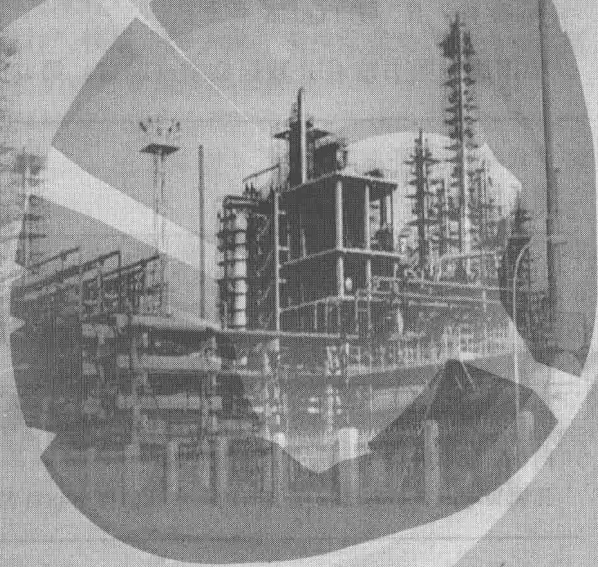


化学工业出版社

“十三五”普通高等教育规划教材

化学工程核心课程 实验与设计

谢亚杰 主编 刘 丹 胡万鹏 副主编



化学工业出版社

·北京·

《化学工程核心课程实验与设计》包括了七个模块,分别为化工原理实验与设计、化工热力学实验、化学反应工程实验、化工仪表及自动化实验、工程图学实训、化工设备机械基础课程设计、化工过程初步设计。每个模块均含有概述和实验(或实训或设计/与设计)两部分。其中,化工原理按照“化工原理实验与设计”模块以组合项目形式分成三部分,分别为基础实验、强化实验与课程设计。其他科目均属单一环节。本书的亮点是集七门化学工程核心课程实验、(课程)设计、实训内容于一体,以模块形式编序。各模块项目由易到难,多为相关课程具有代表性的实验或设计或实训项目。既简化了教师对实验、设计或实训教材的选择,又为学生使用提供了方便。同时,对化学工程与工艺专业以外的其他化工类专业而言,不具有统一平台的课程可以根据需要选择模块数及项目数;对于具有统一平台的化学工程核心课程(有相同的课程名称及代码、课程性质、学时数和相同教学大纲)来说,本书也为实施教师挂牌授课、学生选课等提供了前提条件。

《化学工程核心课程实验与设计》可作为化学工程与工艺、应用化学、生物工程、环境工程和制药工程等本科专业的化学工程基础课程实验、实训或课程设计的教材或教学参考书。也可作为从事轻化工程、染整工程等化工相关专业的技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程核心课程实验与设计/谢亚杰主编. —北京:化学工业出版社, 2017. 4

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-29123-3

I. ①化… II. ①谢… III. ①化学工程-化学实验-高等学校-教材 IV. ①TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 034583 号

责任编辑: 陆雄鹰 杨 菁 闫 敏

文字编辑: 林 丹

责任校对: 王素芹

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 238 千字 2017 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

前言

现代化工在近年来发展非常迅速,给人类的生活带来了极大的便利,对人类生活方式产生了深远影响。与此同时,它也对适应现代大化工发展所需要的工程技术人才提出了更高的要求。目前,许多高校在试行按大类招生,同时逐步实施在人才培养模式上的结构转变以适应这种新的需求。但是,由于历史原因造成相同课程有不同的课程性质、不同学时、甚至不同名称等问题,致使大类招生后无法统一教材,学生选课难,无法实施教师挂牌授课,部分课程缺少实践训练环节,影响人才培养质量的提升。

本书作为化学工程基础实践教材,在一定程度上弥补了上述缺陷。本书在原有实验讲义基础上,充实了七门核心课程即化工原理、化工热力学、化学反应工程、化工仪表及自动化、化工设计、工程图学、化工设备机械基础的实践环节和内容,特别是增设了多种类型的化工设计训练项目,为全面地指导与实施化学工程实验、实训与(课程)设计训练,提高学生工程实践能力提供了有力支撑。本书集七门核心课程实验、实训或(和)设计内容于一体,简化了教师对教材的选择,便于学生对化学工程基础实验、实训或课程设计教材的选择与使用。同时,在统一了课程平台(有相同课程名称、课程性质、学时数和教学大纲)前提下,为按大类招生后实施教师挂牌授课、学生选课等提供了可行条件。

本书内容根据化学工程知识结构的多学科性、学科体系的相对独立性、学科内容的复杂性、设备成本的高投入性与实验技术的可操作性等,结合编者的实际经验进行编写。

本书可作为化学工程与工艺、应用化学、生物工程、环境工程和制药工程等本科专业的化学工程基础课程实验、实训或课程设计的教材或教学参考书。也可作为从事轻化工程、染整工程等化工相关专业的技术人员和科研人员的参考用书。

为贯彻因材施教原则,使用本书时可根据专业特点、课程性质及实验学时数等具体情况从中选做部分项目。特别是“化工过程初步设计”模块,每个设计项目完成时间根据设计规模与参与人数的不同分别需要1~3周不等。使用时可根据实验条件及具体情况选做。

本书由谢亚杰担任主编,由刘丹、胡万鹏担任副主编。全书共分7个模块。具体编写成员及编写内容如下:模块1由陈树大(概述)、李以名(基础实验1、2、6,强化实验1、2,课程设计1)、刘丹(基础实验3,强化实验3、6,课程设计2)、李雷(基础实验4,强化实验4、5,课程设计3)、王娟(基础实验5,课程设计4)、周大鹏(课程设计5)等编写;模块2由谢亚杰编写;模块3由孙萍编写;模块4由沈红霞编写;模块5由屠晓华编写;模块6由江华生编写;模块7由胡万鹏编写。刘丹负责对全书的重复率检查及模块1部分的审稿、修改;谢亚杰负责模块2、3、4的审稿;胡万鹏负责模块5、6、7的审稿、修改。全书由谢亚杰统稿。

限于编者水平以及时间仓促,疏漏与不妥之处尚祈读者批评指正。

编者

目 录

模块1 化工原理实验与设计	1
1.1 概述	1
1.2 实验与设计部分	2
组合项目1 基础实验	2
实验1 液体流动阻力的测定	2
实验2 传热膜系数测定实验	5
实验3 吸收操作及氧解吸实验	8
实验4 精馏塔的操作及效率测定	13
实验5 雷诺演示实验	16
实验6 液体机械能转换实验	18
组合项目2 强化实验	20
实验1 离心泵特性曲线的测定	20
实验2 板框过滤机过滤常数测定	22
实验3 流化床干燥实验	25
实验4 萃取实验	30
实验5 温度、流量、压力校正实验	32
实验6 计算机数据采集与控制系统的使用	35
组合项目3 课程设计	39
设计1 筛板式精馏塔的设计任务书	39
设计2 填料吸收塔的设计任务书	40
设计3 列管式换热器的设计任务书	41
设计4 干燥器的设计任务书	51
设计5 化工管路设计与计算任务书	52
参考文献	53
模块2 化工热力学实验	55
2.1 概述	55
2.2 实验部分	56
实验1 二元系统气液平衡数据的测定	56
实验2 氨-水系统气液相平衡数据的测定	59
实验3 气相色谱法测定无限稀释活度系数	63
实验4 混合工质热力学性质计算	67
实验5 甲醇-水体系的泡点计算	77
实验6 液化石油气露点计算的程序设计	79

实验 7 环己烷-乙醇恒压气液平衡相图绘制	83
参考文献	87
模块 3 化学反应工程实验	88
3.1 概述	88
3.2 实验部分	88
实验 1 连续流动反应器中的返混测定	88
实验 2 鼓泡反应器中汽泡比表面及气含率的测定	91
实验 3 乙苯脱氢制苯乙烯	94
实验 4 均相反应过程多功能实验	97
实验 5 组合式反应器返混性能测试实验	99
实验 6 乙酸乙酯水解实验	101
参考文献	102
模块 4 化工仪表及自动化实验	104
4.1 概述	104
4.2 实验部分	104
实验 1 化工仪表认识实验	104
实验 2 单圈弹簧管压力表实验	106
实验 3 热电偶测温实验及热电偶标定	108
实验 4 水箱液位定值控制	111
参考文献	112
模块 5 工程图学实训	113
5.1 概述	113
5.2 实训部分	113
实训 1 绘图界面与基础知识的认识	113
实训 2 图形绘图命令	115
实训 3 图形编辑命令	117
实训 4 图层与块的认识与绘制	119
实训 5 尺寸的标注	120
实训 6 平面图形绘图示例	122
实训 7 综合练习一	123
实训 8 综合练习二	123
参考文献	124
模块 6 化工设备机械基础课程设计	125
6.1 概述	125
6.2 典型化工设备的机械设计	126
设计 1 塔设备的机械设计任务书	126
设计 2 夹套反应釜的机械设计任务书	127

设计 3 固定管板式换热器的设计任务书	129
设计 4 卧式储罐的机械设计任务书	130
参考文献	131
模块 7 化工过程初步设计	132
7.1 概述	132
7.2 化工过程初步设计	132
设计 1 丙烯酸氧化反应器设计任务书	132
设计 2 U 形管换热器设计任务书	134
设计 3 厂区布置设计任务书	136
设计 4 丙烷-丙烯热泵精馏过程模拟任务书	137
设计 5 气体吸收塔制作与性能测定	140
设计 6 化工过程初步训练任务书	141
参考文献	143
附录	145
附录 A 苯甲酸在水和煤油中的平衡浓度	145
附录 B 苯甲酸的测定——滴定法	145
附录 C 醋酸-水二元系统气液平衡数据的关联	146
附录 D 醋酸-水二元系统气液平衡数据	148
附录 E 纯物质的正常沸点、临界参数和偏心因子	148
附录 F 环己烷-乙醇溶液折射率-组成数据	149

模块1 化工原理实验与设计

1.1 概 述

化工原理课程是一门工程类技术基础课，其内容包括理论基础、工程基础和工程应用。课程的教学目的是，在化工生产过程的组织、基本理论及过程分析、设备原理及构造、工程设计方法以及单元过程操作运行情况诸方面对学生进行全面的综合训练，以达到培养学生相应的分析工程实际问题和解决工程实际问题的能力。化工原理课程设置由基础理论、课内实验、课程设计三部分内容构成，课内实验、课程设计是化工原理的实践环节内容。为了适应新常态、新形势、新局面下用人单位对化工及相关专业人才的需求，增强学生动手能力，提高分析和解决工程实际问题的能力，对化工原理实验与设计作相应调整 and 改革。

1.1.1 化工原理实验

化工原理实验课程是化工及其相关专业教学中一门实践性很强的技术基础课。在系统学习基本理论知识的同时，通过化工原理课程实验，逐步培养学生掌握一定的基本实验技能，熟悉化工生产实际中一些基本过程和设备的操作及控制方法等，从而提高学生分析和解决工程实际问题的能力。

为了方便不同专业学生按专业要求进行选择，结合理论课程的调整改革，本实验课程分为“基础实验”和“强化实验”两部分。“基础实验”包括：①液体流动阻力的测定：测定流体通过直管的摩擦阻力，测定阀门以及弯头等局部阻力；②传热膜系数测定实验：学习并掌握传热系数和对流传热系数的测定方法；③吸收操作及氧解吸实验：测定填料塔的流体力学性能；测定在一定条件下的气体体积传质系数；④精馏塔的操作及效率测定：精馏塔全塔效率及单板效率的测定；⑤雷诺演示实验：观察并验证雷诺数与流体流动类型的关系；⑥液体机械能转换实验：测定流体各种能量的相互转换，验证伯努利方程。“强化实验”包括：①离心泵特性曲线的测定：掌握离心泵在一定转速下特性曲线的测定方法；②板框过滤机过滤常数测定：掌握过滤方程式中的常数 K 、 q_e 及 θ_e 等的测定；③流化床干燥实验：测定在恒定干燥条件下物料的流化干燥速度曲线；④萃取实验：测定不同流量、转速等操作条件下的萃取效率；⑤温度、流量、压力校正实验：标定或校验温度、流量、压力；⑥计算机数据采集与控制系统的使用。

本模块所涉及的化工原理实验项目与实验装置见表 1-1 所示。

表 1-1 化工原理实验项目与实验装置

序 号	实验项目	实验设备	套(台)数
1	液体流动阻力的测定	流体阻力-离心泵联合装置	4
2	传热膜系数测定实验	套管传热实验装置	4
3	吸收操作及氧解吸实验	氧解吸实验装置	4
4	精馏塔的操作及效率测定	精馏实验装置	4
5	雷诺演示实验	雷诺实验演示装置	2
6	液体机械能转换实验	相关实验装置及配件	2
7	离心泵特性曲线的测定	流体阻力-离心泵联合装置	4
8	板框过滤机过滤常数测定	板框过滤装置	2
9	流化床干燥实验	流化床干燥实验装置	2
10	萃取实验	萃取实验装置	2
11	温度、流量、压力校正实验	相关实验装置及配件	2
12	计算机数据采集与控制系统的使	实验教学仿真软件	1

1.1.2 化工原理课程设计

化工原理课程设计是学生在具备了物理化学、化工原理、化工机械基础、计算技术（包括计算机应用基础、算法语言及其应用）等基础知识后，综合地应用这些知识完成以单元操作为主的一次设计实践教学环节。

通过课程设计，运用技术经济综合评价观点，树立正确的设计思想。了解化工设计的基本程序和方法，学会查阅资料、运用计算机优化设计和完成复杂运算，培养以简洁文字和图表表达设计结果的能力。

为了方便不同专业学生按专业要求进行选择，结合理论课程的调整改革，化工原理课程设计主要包括：①筛板式精馏塔的设计；②填料吸收塔的设计；③列管式换热器的设计；④干燥器的设计；⑤化工管路设计与计算。

设计内容主要包括：①接受设计任务；②工艺设计；③主体设备设计；④附属设备设计与选用；⑤设计说明书的编写等。

1.2 实验与设计部分

组合项目 1 基础实验

实验 1 液体流动阻力的测定

【实验目的】

掌握流体流动阻力的实验测定方法；学习液压计及流量计的使用方法；识别管路中的各个管件、阀门并了解其作用；掌握流体流经直管时的摩擦系数与雷诺数之间关系的测定方法；掌握突然扩大管局部阻力系数的测定方法。

【基本原理】

（1）摩擦系数的测定方法 直管的摩擦系数是雷诺数和管的相对粗糙度（ ϵ/d ）的函数，即 $\lambda=\Phi(Re, \epsilon/d)$ ，因此，在相对粗糙度一定的情况下， λ 与 Re 存在一定的关系。根据流体力学的基本理论，摩擦系数与阻力损失之间存在如下关系：

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-1)$$

式中 h_f ——阻力损失, J/N;

Δp ——压强差, Pa;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

l ——管段长度, m;

d ——管径, m;

u ——流速, m/s;

λ ——摩擦系数。

流体在水平均匀直管中作稳态流动时, 由截面 1 流动到截面 2 时的阻力损失体现在压强的降低, 两截面之间管段的压强差 ($P_1 - P_2$) 可采用 U 形压差计测量, 故可以计算出 h_f 。用涡轮流量计测定流体通过已知管段的流量, 在已知管径的情况下, 流速 u 可以通过体积流量来计算, Re 可由流体的密度 ρ 、黏度 μ 等计算。因此, 对于每一组测得的数据可以分别计算出对应的 λ 和 Re 。

(2) 局部阻力系数的测定 根据局部阻力系数的定义:

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (1-2)$$

式中 ζ ——局部阻力系数。

实验时, 测定流体经过管件时的阻力损失 h_f 及流体通过管路的流速 u , 其中阻力损失 h_f 可采用机械能衡算方程由压差计读数求出, 再由上式计算局部阻力系数。在测定阻力损失时, 测压孔不宜选在管件附近, 这是由于很难准确测定紧靠管件处的压强差。测压孔一般开设在距管件一定距离的管子上, 测得的阻力损失包括管件和直管两个部分, 因此, 在计算管件阻力损失时应扣除直管部分的阻力损失。

【装置和流程】

见图 1-1。

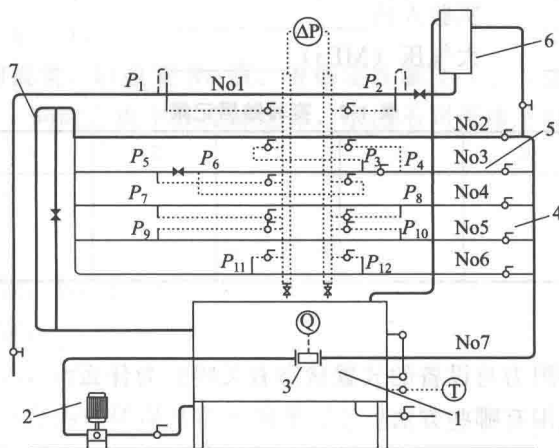


图 1-1 流体阻力实验装置流程图

1—水箱; 2—离心泵; 3—孔板流量计; 4—管路切换阀; 5—测量管路; 6—稳流罐;

7—流量调节阀; $P_1 \sim P_{12}$ —各管路的测压点; No1~No7—层流管、截止阀、

球阀、光滑管、镀锌钢管、突扩管、主管等测定管路和管件

【操作要点】

- ① 启动离心泵，打开被测管线上的开关阀及面板上与其相应的切换阀，关闭其他的开关阀和切换阀，保证测压点一一对应。
- ② 排净系统中的气体以便使液体能够连续流动。需排净设备以及测压管线中的气体，观察 U 形压差计中两液面是否水平，如两液面水平表明系统中的气体已经排净。
- ③ 测定光滑管和粗糙管的摩擦阻力。先将流量从小慢慢调到大，并观察 U 形压差计中两液面差，当液面差达到最大，待数据稳定后记录第 1 组数据，即此时的液体流量和压差。然后，将流量从大调到小，每相差 $0.3\text{m}^3/\text{h}$ 左右测 1 组数据。充分利用面板量程测取 10 组数据，然后调节流量由小到大再测取几组数据，以检查数据的重复性（不记录数据）。测定突然扩大管、球阀和截止阀的局部阻力时，各测取 3 组数据，测量方法和步骤与测量光滑管和粗糙管时相同。注意：在记录整个实验的第 1 组数据时需记录一次液体温度，记录最后 1 组数据时再记录一次液体温度。
- ④ 测完一根管的数据后，应将流量调节阀关闭，观察压差计的两液面是否水平，水平时才能更换另一条管路，否则全部数据无效。应了解各种阀门的特点，掌握阀门的使用方法，注意阀门的切换，同时注意关严阀门，以防止内漏。

【报告要求】

- ① 说明本实验的目的、原理、装置及步骤。
- ② 记录实验数据。
- ③ 在双对数坐标纸上绘出湍流时 $\lambda-Re$ 关系曲线。
- ④ 将光滑管的 $\lambda-Re$ 关系与 Blasius 公式进行比较。
- ⑤ 计算局部阻力系数 ζ 。
- ⑥ 实验结果讨论。
- ⑦ 思考题。

【原始数据记录表】

见表 1-2。

日期_____ 实验人员_____
室温（℃）_____ 大气压（MPa）_____

表 1-2 实验数据记录

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
水温								
流量								
压降								

【讨论题】

- ① 测定的直管摩擦阻力与设备的放置状态有关吗？为什么？
- ② 增加雷诺数的范围有哪些方法？
- ③ 以水为工作流体测定的 $\lambda-Re$ 关系曲线能否用于计算空气在管内的流体阻力？为什么？
- ④ U 形压差计上装设的平衡阀有何作用？在什么情况下它是开着的，在什么情况下它是关闭着的？

实验 2 传热膜系数测定实验

【实验目的】

掌握传热膜系数 α 及传热系数 K 的测定方法；掌握圆形直管中作强制湍流传热时，对流传热系数准数关联式的推导方法；通过实验，加深对传热理论的理解，提高研究和解决传热实际问题的能力。

【基本原理】

对流传热的核心问题是求算传热膜系数，当流体无相变化时，对流传热特征关系式的形式为：

$$Nu = A Re^m Pr^n Gr^p$$

对于强制湍流而言， Gr 数可以忽略，即

$$Nu = A Re^m Pr^n$$

其中：

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

本实验中可采用图解法或最小二乘法计算上述准数关系式中的指数 m ， n 和系数 A 。

用图解法对多变量方程进行关联时，要对不同变量 Re 和 Pr 分别回归。本实验中流体被加热，可取 $n=0.4$ （被冷却时， $n=0.3$ ）。此时，对上式方程两边取对数，得到直线方程为：

$$\lg \frac{Nu}{Pr^{0.4}} = \lg A + m \lg Re$$

$$(\text{即 } y = mx + b, y = \lg \frac{Nu}{Pr^{0.4}}, x = \lg Re, b = \lg A)$$

在双对数坐标中作图，求出直线斜率，即为方程的指数 m 。在直线上任取一点函数值代入方程中，则可得到系数 A ，但图解法具有人为因素的干扰，误差相对较大。而采用最小二乘法回归，可以得到最佳关联结果。采用计算机辅助手段，对多变量方程进行一次回归，就能同时得到 A 、 m 、 n 。

实验中改变空气的流量，以改变 Re 值。根据定性温度（空气进，出口温度的算术平均值）计算对应的 Pr 值。同时，由牛顿冷却定律，求出不同流速下的传热膜系数值，进而求得 Nu 值。

牛顿冷却定律：

$$Q = \alpha A \Delta t_m$$

式中 α ——传热膜系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

Q ——传热量， W ；

A ——总传热面积， m^2 ；

Δt_m ——管壁温度与管内流体温度的对数平均温差， $^\circ C$ 。

传热量由下式求得：

$$Q = W c_p (t_2 - t_1) / 3600 = \rho V_s c_p (t_2 - t_1) / 3600$$

式中 W ——质量流量， kg/h ；

c_p ——流体的比定压热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$

t_1, t_2 ——流体进、出口温度, $^{\circ}\text{C}$;
 ρ ——定性温度下流体密度, kg/m^3 ;
 V_s ——流体体积流量, m^3/h 。

空气的流体流量由孔板流量计测量得到, 其流量 V_s 与孔板流量计压降 Δp 的关系为:

$$V_s = 26.2 \Delta p^{0.54}$$

式中 Δp ——孔板流量计压降, kPa ;

V_s ——空气流量, m^3/h 。

【实验装置】

(1) 设备说明 本实验中, 空气走内管, 蒸汽走环隙 (玻璃管)。内管材质为黄铜管, 其内径为 0.020m , 有效长度为 1.25m 。空气进、出口温度和管壁温度分别采用铂电阻 (Pt100) 和热电偶测定。测定空气进、出口温度的铂电阻应置于进、出管的管中心。测量管壁温度时, 采用一支铂电阻和一支热电偶分别固定在管外壁两端。孔板流量计的压差由压差传感器测得。

实验中使用的蒸汽发生器由不锈钢材料制成, 装有玻璃液位计, 加热功率为 1.5kW , 并具有超温安全控制系统。风机采用 XGB 型漩涡气泵, 最大压力为 17.50kPa , 最大流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。

(2) 采集系统说明

① 压力传感器 本实验装置采用 ASCOM5320 型压力传感器, 其测量范围为 $0\sim 20\text{kPa}$ 。

② 显示仪表 实验中所有温度和压差等参数均可由人工智能仪表直接读取, 并实现数据的在线采集与控制。测量点分别为: 孔板压降、进口温度、出口温度和两个壁温。

(3) 流程说明 图 1-2 为本实验装置流程图。风机输送冷空气, 经过孔板流量计计量后, 进入换热器内管 (铜管), 并与套管环隙中的水蒸气换热。空气被加热后, 排入大气。可通过空气流量调节阀调节空气的流量。蒸汽由蒸汽发生器上升进入套管环隙, 与内管中冷空气换热后冷凝, 再由回流管回到蒸汽发生器。采用放气阀门用于排放不冷凝性气体。在铜

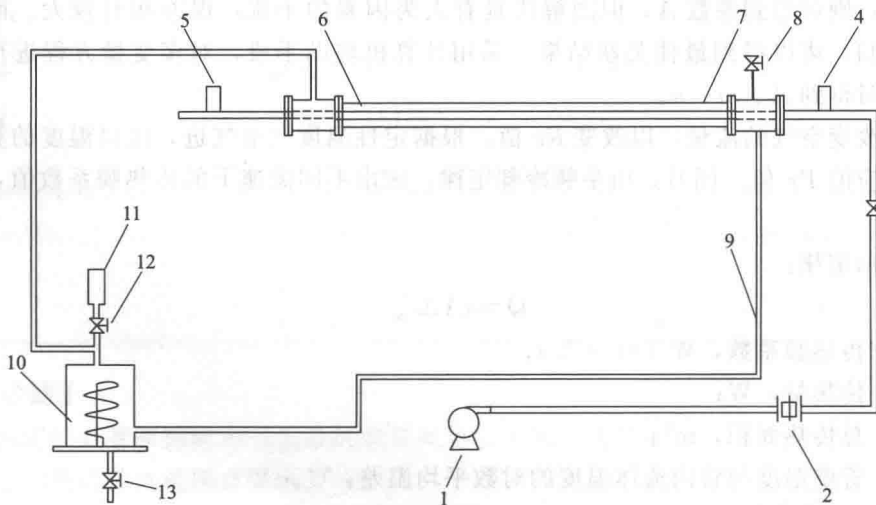


图 1-2 套管传热膜系数测定实验流程图

- 1—风机; 2—孔板流量计; 3—空气流量调节阀; 4—空气进口测温点; 5—空气出口测温点;
6—水蒸气进口壁温; 7—水蒸气出口壁温; 8—不凝气体放空阀; 9—冷凝水回流管;
10—蒸汽发生器; 11—补水漏斗; 12—补水阀; 13—排水阀

管之前设有一定长度的稳定段，用于消除端效应。铜管两端用塑料管与管路相连，用于消除热效应。

【实验操作】

- ① 实验开始前，首先熟悉配电箱上各按钮与设备的对应关系，以便正确开启按钮。
- ② 检查蒸汽发生器中的水位，使其保持在水灌高度的 $1/2 \sim 2/3$ 。
- ③ 打开总电源开关（红色按钮熄灭，绿色按钮亮，以下相同）。
- ④ 实验开始时，关闭蒸汽发生器补水阀，启动风机，并接通蒸汽发生器的加热电源，打开放气阀。
- ⑤ 将空气流量控制在某一定值，待仪表数值稳定后，记录数据，改变空气流量（8~10 次），重复实验，记录数据。
- ⑥ 实验结束后，先停蒸汽发生器电源，再停风机，清理现场。

注意：

- ① 实验前，务必使发生器液位高度合适。因为液位过高，则水会溢出蒸汽套管；过低，则可能烧毁加热器。
- ② 调节空气流量调节阀时，为保证空气处于湍流流动状态，孔板压差计读数不应从 0 开始，最低不小于 0.1kPa。实验中要合理取点，以保证数据点均匀。
- ③ 调节空气流量调节阀后，应待读数稳定后再读取数据。

【报告要求】

- ① 说明本实验的目的、原理、装置及步骤。
- ② 记录实验数据。
- ③ 在双对数坐标系中绘出 $Nu/Pr^{0.4}-Re$ 的关联曲线。
- ④ 整理出流体在圆形管道内做强制湍流时传热膜系数的半经验关联式。
- ⑤ 将通过实验测量得到的半经验关联式与公认的关联式进行对比，并分析原因。
- ⑥ 实验结果讨论。
- ⑦ 思考题。

【原始数据记录表】

见表 1-3。

日期 _____ 实验人员 _____
 室温（℃） _____ 大气压（MPa） _____

表 1-3 实验数据记录

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8
空气入口温度								
空气出口温度								
空气入口壁温								
空气出口壁温								
孔板压降								

【讨论题】

- ① 本实验中管壁温度应接近蒸汽温度还是空气温度？为什么？
- ② 管内空气流速对传热膜系数有何影响？当空气流速增大时，空气离开热交换器时的

温度将升高还是降低？为什么？

- ③ 如果采用不同压强的蒸汽进行实验，对 α 的关联有无影响？
- ④ 试估算空气一侧的热阻占总热阻的百分比。
- ⑤ 本实验可采取哪些强化传热措施？

实验3 吸收操作及氧解吸实验

【实验目的】

- ① 了解填料塔的基本结构、吸收装置的基本流程及操作方法。
- ② 观察填料塔流体力学状况，测定压降与气速的关系曲线，掌握液泛规律。
- ③ 掌握液相体积总传质系数 $K_x a$ 的测定方法并分析影响因素。
- ④ 学习气液连续接触式填料塔，利用传质速率方程处理传质问题的方法。

【实验原理】

本装置先利用吸收柱使水吸收纯氧形成富氧水（并流操作），然后送入解吸塔顶，再利用空气进行解吸。实验中需要测定不同液量和气量下的解吸总传质系数 $K_x a$ ，从而得出液量和气量对总传质系数的影响规律，同时对4种不同填料的传质效果及流体力学性能进行比较分析。

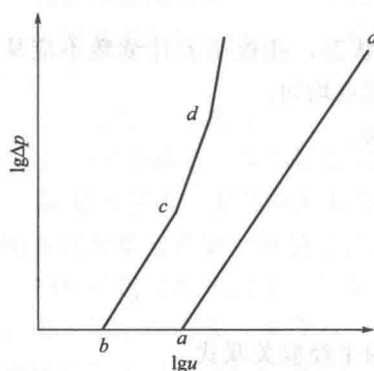


图1-3 填料层压降与空塔
气速关系示意图

(1) 填料塔流体力学特性 气体通过干填料层时，流体流动引起的压降和湍流流动引起的压降规律一致。图1-3为填料层压降与空塔气速关系示意图。在双对数坐标系中，将压降对气速作图可得一斜率为1.8~2的直线（图中 aa' ）。当有喷淋量时，在低气速下（ c 点以前）压降正比于气速的1.8~2次幂，但大于相同气速下干填料的压降（图中 bc 段）。随着气速的增大，出现载点（图中 c 点），持液量开始增大，压降-空塔气速线

向上弯曲，斜率变大（图中 cd 段）。到达液泛点（图中 d 点）后，在气速几乎不变的情况下，压降急剧上升。

(2) 传质实验 填料塔与板式塔气液两相接触情况不同。在填料塔中，两相传质主要在填料有效湿表面上进行，需要计算完成一定吸收任务所需的填料高度，其计算方法分为传质单元数法和等板高度法。

本实验是对富氧水进行解吸，如图1-4所示。由于富氧水浓度很低，可以认为气液两相平衡关系服从亨利定律，即平衡线为直线，操作线也为直线，因此可以用对数平均浓度差计算填料层传质平均推动力。整理得到相应的传质速率方程为：

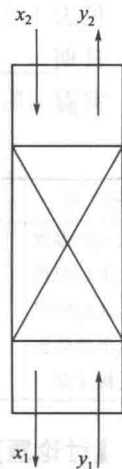


图1-4 富氧
水解吸实验

$$\begin{aligned} G_A &= K_x a V_P \Delta x_m \\ \text{即} \quad K_x a &= G_A / V_P \Delta x_m \end{aligned}$$

$$\text{式中, } \Delta x_m = \frac{(x_2 - x_{e2}) - (x_1 - x_{e1})}{\ln \left[\frac{(x_2 - x_{e2})}{(x_1 - x_{e1})} \right]}, \quad G_A = L(x_2 - x_1), \quad V_P = Z\Omega.$$

相关填料层高度的基本计算式为：

$$Z = \frac{L}{K_x a \Omega} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} = H_{OL} N_{OL} \quad \text{即 } H_{OL} = Z / N_{OL}$$

$$\text{其中 } N_{OL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{x_e - x} = \frac{x_1 - x_2}{\Delta x_m}, \quad H_{OL} = \frac{L}{K_x a \Omega}$$

式中 G_A ——单位时间内氧的解吸量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;

$K_x a$ ——液相体积总传质系数, $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$;

V_P ——填料层体积, m^3 ;

Δx_m ——液相对数平均浓度差;

x_e ——与塔内气相 y 平衡的摩尔分数 (塔顶与塔底间任意处);

x_2 ——液相进塔时的摩尔分数 (塔顶);

x_{e2} ——与出塔气相 y_1 平衡的摩尔分数 (塔顶);

x_1 ——液相出塔的摩尔分数 (塔底);

x_{e1} ——与进塔气相 y_2 平衡的摩尔分数 (塔底);

Z ——填料层高度, m ;

Ω ——塔截面积, m^2 ;

L ——解吸液流量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;

H_{OL} ——以液相为推动力的总传质单元高度, m ;

N_{OL} ——以液相为推动力的总传质单元数。

由于氧气为难溶气体, 在水中的溶解度很小, 因此传质阻力几乎全部集中于液膜中, 即 $K_x = k_x$ 。由于属液膜控制过程, 所以要提高总传质系数 $K_x a$, 应增大液相的湍动程度即增大喷淋量。

在 y - x 图中, 解吸过程的操作线在平衡线下方, 本实验中是一条平行于横坐标的水平线 (因氧在水中浓度很小)。

在本实验的计算过程中, 气液相浓度的单位采用摩尔分数表示, 而不采用摩尔比, 这是由于在 y - x 图中, 平衡线为直线, 操作线也是直线, 计算相对比较简单。

【实验装置及流程】

(1) 实验装置 如图 1-5 所示。

(2) 工艺流程简述 由氧气钢瓶供给的氧气经减压阀 2 进入氧气缓冲罐 4, 稳压在 0.04~0.05 MPa 范围内, 为确保安全, 缓冲罐上装有安全阀 6, 通过阀 7 调节氧气流量, 并经转子流量计 8 计量, 再进入吸收塔 9 中, 与水并流吸收。含富氧水经管道在解吸塔的顶部喷淋。由风机 13 供给的空气经缓冲罐 14, 利用阀 16 调节流量, 经转子流量计 17 计量, 再通入解吸塔底部解吸富氧水, 解吸后的尾气从塔顶排出, 贫氧水从塔底经平衡罐 19 排出。自来水经调节阀 10, 由转子流量计 17 计量后进入吸收柱。因气体流量与气体状态有关, 故每个气体流量计前均装有表压计和温度计。空气流量计前装有计前表压计 23。为了测量填料层压降, 解吸塔装有压差计 22。为了采集入口水样, 在解吸塔入口设有入口采出阀 12, 出口水样由塔底排液平衡罐上的采出阀 20 取样。

采用 9070 型测氧仪测得两水样的液相氧浓度。

(3) 实验装置说明

① 实验仪器: 吸收塔及解吸塔设备、9070 型测氧仪

② 吸收解析塔参数: 解析塔径 $\phi = 0.1\text{m}$, 吸收塔径 $\phi = 0.032\text{m}$, 填料高度 0.8m (陶瓷拉西环、星形填料和金属波纹丝网填料) 和 0.83m (金属 θ 环)。填料数据如表 1-4 所示。

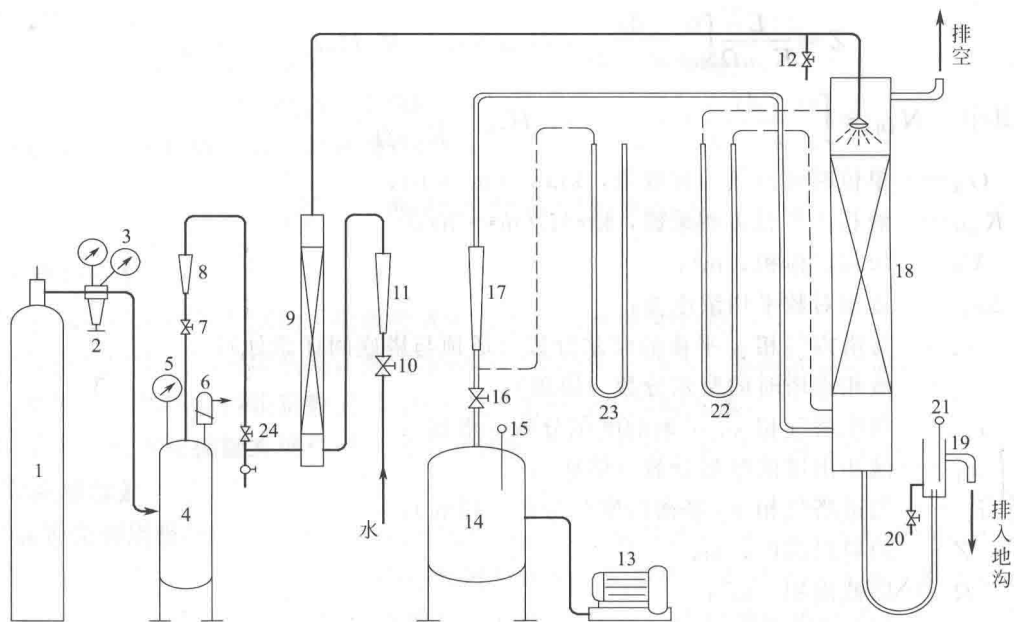


图 1-5 氧气吸收与解吸实验装置和流程图

1—氧气钢瓶；2—减压阀；3、5—压力表；4—氧气缓冲罐；6—安全阀；7—氧气流量调节阀；8—转子流量计；
 9—吸收塔；10—水流量调节阀；11—水转子流量计；12—富氧水采出阀；13—风机；14—空气缓冲罐；
 15—温度计；16—空气流量调节阀；17—空气转子流量计；18—解吸塔；19—平衡罐；
 20—贫氧水采出阀；21—温度计；22—压差计；23—流量计前表压计；24—防水倒灌阀

表 1-4 填料数据

陶瓷拉西环	金属 θ 环	金属波纹丝网填料	星形填料(塑料)
$(12 \times 12 \times 1.3) \text{ mm}$ $a_1 = 403 \text{ m}^2/\text{m}^3$ $\epsilon = 0.764 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $a_1/\epsilon = 903 \text{ m}^2/\text{m}^3$	$(10 \times 10 \times 0.1) \text{ mm}$ $a_1 = 540 \text{ m}^2/\text{m}^3$ $\epsilon = 0.97 \text{ m}^3/\text{m}^3$	CY 型 $a_1 = 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ $\epsilon = 0.85 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$(15 \times 8.5 \times 0.3) \text{ mm}$ $a_1 = 850 \text{ m}^2/\text{m}^3$

注：ε—孔隙率； a_1 —比表面积。

【实验操作】

(1) 流体力学性能测定

① 测定干填料压降

- 首先吹干塔内填料。
- 改变空气流量，测定填料塔压降，测取 6~8 组数据。

② 测定湿填料压降

- 测定前进行预液泛，使填料表面充分润湿。
- 使水固定在某一喷淋量下，改变空气流量，测定填料塔压降，测取 8~10 组数据。
- 当接近液泛时，进塔气体的增加量不能过大。缓慢增加气体流量，使液泛现象平稳变化。流量调好后，待各参数稳定后，读取数据。注意观察液泛后填料层压降在气速几乎不变的情况下明显上升的这一显著特点。气量不易过大，以免出现冲破和冲泡填料的现象。

③ 注意：空气流量调节阀要缓慢开启和关闭，以免撞破玻璃管。

(2) 传质实验