



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Experiments of Chemical Engineering Principles

化工原理实验

邓文生 刘文芳 李弥异 谭璟 彭炯 王烨 © 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

化工原理实验

邓文生 刘文芳 李弥异 编著
谭璟 彭炯 王 烨

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (C I P) 数据

化工原理实验 / 邓文生等编著. -- 北京 : 北京理工大学出版社, 2022. 1

ISBN 978-7-5763-0898-3

I. ①化… II. ①邓… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 015455 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 6.25

字 数 / 125 千字

版 次 / 2022 年 1 月第 1 版 2022 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 36.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

本书是根据化工原理实验教学大纲及现有实验设备和操作流程编写的，可作为普通高等院校化学工程与工艺、能源化学工程、制药工程、生物工程、环境工程、过程装备与控制工程、应用化学和化学等专业化工原理实验课程的教材及参考用书。

本书将“工程教育专业认证”和“卓越工程师教育培养计划”的指标体系作为切入点，以此来编排化工原理实验教学的内容，通过制定全面、切实可行的实验前预习、实验中操作和实验后总结等若干环节的要求，培养学生实验操作能力、工程分析能力、实验设计能力和数据总结能力。

本书分为五部分：化工原理实验的教学目的和基本要求，实验数据的测量、误差及处理，化工原理演示实验、化工原理验证实验和附录。演示实验包括机械能转化演示实验、雷诺演示实验、流体流线演示实验。验证实验包括流体流动阻力测定实验、离心泵特性曲线测定实验、恒压过滤常数测定实验、空气-水蒸气套管换热实验、填料塔吸收传质系数测定实验、筛板式精馏塔实验、干燥特性曲线测定实验。

本书由邓文生主编，北京理工大学化工原理实验课程组的全体老师参与了讨论和编写。其中第1章由邓文生执笔，第2章由刘文芳执笔，第3章由邓文生、刘文芳、李弥异共同执笔，第4章由邓文生、刘文芳、李弥异、谭璟、彭炯、王焯共同执笔，附录由邓文生、刘文芳、李弥异共同执笔。

本书的编写工作还得到了北京理工大学化工原理课程组其他老师的帮助与支持，在此表示诚挚的谢意。本书在编写过程中参考了许多同类教材和专著，为免繁冗，除列出必要的参考书目外，国内出版的同类教材一般不再列出，在此一并表示感谢。在成书过程中，还得到了北京理工大学教务处的专题立项资金资助，特此致谢。

本书得以出版，是大家共同努力的结果。由于编者学识和经验有限，编写时间仓促，书中难免有欠妥之处，期待广大读者和同行批评指正，使本书日臻完善。

编 者
2021年9月

目 录

第 1 章 化工原理实验的教学目的和基本要求	(1)
1.1 化工原理实验的教学目的	(1)
1.2 化工原理实验的基本要求	(1)
1.3 化工原理实验室的安全	(2)
第 2 章 实验数据的测量、误差及处理	(7)
2.1 实验数据的测量	(7)
2.2 实验数据的误差	(8)
2.3 实验数据的处理	(9)
第 3 章 化工原理演示实验	(11)
实验一 机械能转化演示实验	(11)
实验二 雷诺演示实验	(15)
实验三 流体流线演示实验	(17)
第 4 章 化工原理验证实验	(20)
实验一 流体流动阻力测定实验	(20)
实验二 离心泵特性曲线测定实验	(27)
实验三 恒压过滤常数测定实验	(34)
实验四 空气-水蒸气套管换热实验	(40)
实验五 填料塔吸收传质系数测定实验	(46)
实验六 筛板式精馏塔实验	(53)
实验七 干燥特性曲线测定实验	(58)
附 录	(66)
附录 1 有关物料的物性数据	(66)
附录 2 奥式分析仪的使用方法	(67)
附录 3 阿贝折射仪的使用方法	(68)
附录 4 温度、压力、流量的测量	(70)
附录 5 实验报告的格式	(74)
附录 6 实验报告的实例	(77)
参考文献	(93)

第 1 章

化工原理实验的教学目的和基本要求

1.1 化工原理实验的教学目的

化工原理实验是在化工原理课程基础上开设的实践与训练类型课程,是化工、能源、制药、环境、生物工程、应用化学等专业教学计划中必不可少的内容。化工原理实验的研究内容和研究方法与化学、物理等基础学科有显著不同,具有明显的工程特点,注重对学生工程实践能力的全面培养。学习化工原理实验,深入理解化工设备、化工原理和研究方法,树立科学的工程观念,是学生从理论学习到工程应用的一个重要实践过程。因此化工原理实验教学的主要目的如下:

(1)在化工理论与实践相结合的过程中,验证化工单元操作的基本理论,强化学生对化工原理理论教学知识的理解和掌握。

(2)熟悉化工过程及其设备的原理、结构和性能,掌握其基本流程、操作方法;正确地选择设备和设计流程的能力;正确地选择和使用工程测试仪表的能力;培养学生分析和解决工程实践问题的能力。

(3)培养学生对化工实验现象敏锐的观察能力、正确获取实验数据的能力,根据实验现象和实验数据,运用所学知识分析、归纳实验信息的能力,从而具备从事科学研究的初步能力。

(4)培养学生对实验数据进行正确整理、分析和总结的能力,尤其是能够运用计算机软件处理实验数据的能力,能够用适当图表、简明文字组织实验报告的能力。

(5)培养学生合理地设计实验、规划实验的能力,独立思考的能力,工程创新的能力。

(6)培养学生实事求是的科学态度、严肃认真的工作态度和团结协作的工作作风。

1.2 化工原理实验的基本要求

实验开始前

(1)认真预习实验的相关内容,正确理解实验的目的、原理和要求。

(2)详细了解实验测量仪表的使用方法、实验设备的结构和实验流程。

(3)熟悉并制定实验操作步骤、数据测量和记录方案,准备好记录实验数据的表格。

(4)评估实验的预期结果,可能出现的故障和解决办法,做到心中有数,为安全、成功地

完成实验做好充分准备。

(5)规划好测量范围、测量点数目、测量点的疏密等。

(6)实验小组成员应该根据分工的不同,明确各自任务,以便实验过程中协同工作。

实验过程中

(1)设备启动前,必须先进行检查,调整设备处于启动状态,然后再进行通电、通水或送入蒸汽等启动操作。

(2)操作是动手动脑的重要过程,一定要严格按操作规程进行,实验操作要平稳、认真、细心。务必集中精神进行操作,认真细致地进行观察,积极深入地进行思考。

(3)实事求是地记录仪器、仪表上显示的数据、实验中观察到的现象,实验数据记录应仔细认真、整齐清楚,记错的数字应划掉,避免涂改的方法,容易造成误读或看不清。对于反常的现象,尽可能找出原因以便解决或给出合理的解释。实验中有异常现象时,应及时向指导教师报告。

(4)记录实验数据应是直接读取的原始数据,不是经过计算后再记录,例如 U 型压差计两端的液柱高度差,应分别读取并记录,不应仅记录液柱的差值。要注意保存原始数据,以便检查核对。

(5)对于稳定的操作过程,当改变操作条件后,需要等待达到新的稳定状态,才可以读取数据;对于连续的不稳定操作,要在实验前充分熟悉方法并规划好记录的位置或时刻等。

(6)根据测量仪表的精度,正确读取有效数字,注意培养自己严谨的科学作风,养成良好的习惯。

(7)实验结束,整理好原始数据,将实验设备、仪器和仪表等恢复原状,注意切断水电气,清扫卫生,经指导教师允许后方可离开实验室。

实验结束后

(1)实验完成后,应严肃认真地做好实验工作的总结(编写实验报告)。

(2)实验报告是对实验工作的全面总结,是一份技术文件,不仅是学生进行实践训练的重要组成部分,更是进行化工原理实验成绩评定的重要依据。

(3)实验报告必须写得简明、数据完整、结论明确,书写工整、行文通顺,有讨论、有分析,得出的公式或图线有明确的使用条件,实验报告的格式见附录 5,实验报告的实例见附录 6。

(4)报告应在指定时间交给指导老师批阅。

1.3 化工原理实验室的安全

化工原理实验是一门实践性很强的专业基础课程,每一个实验相当于一个小型单元生产流程,电器、仪表和机械传动设备等组合为一体。学生们初进化工原理实验室进行实验,为保证人身安全、仪器设备的正常使用等,还应了解实验室的防火、用电、防爆和防毒等安全知识。

1. 化工实验注意事项

(1) 实验前要认真检查实验装置。熟悉装置的原理和结构;掌握连接方法与操作步骤;分清量程范围,掌握正确的读数方法。

(2) 设备启动前要先检查。泵、风机、压缩机、电机等转动设备,用手使其运转,从感觉及声音上判断有无异常;确定设备上阀门的开、关状态;确保安全措施,如防护罩、绝缘垫、隔热层等是否到位。

(3) 操作过程中要注意分工配合,严守自己的岗位,精心操作。关心和注意实验的进行,随时观察仪表指示值的变动,保证操作过程在稳定的条件下进行。产生不合规律的现象时要及时观察研究,分析原因,不要轻易错过。

(4) 操作过程中,如设备及仪表发生问题应立即停车,报告指导老师,不得自行处理。

(5) 实验结束时应先将有关的热源、水源、气源、仪表的阀门关闭,再切断电机电源。

(6) 化工实验要特别注意安全。实验前要搞清楚总水闸、电闸、气源阀门的位置和灭火器材的安放地点。

2. 化工实验安全知识

为了确保设备和人身安全,实验者必须具有最基本的安全知识,因为事故经常是由无知和粗心造成的。

1) 化学药品和气体

在化工原理实验中所接触的化学药品虽不如化学实验多,但在使用化学药品之前一定要了解该药品的性能,如毒性、腐蚀性、易燃性和易爆性等。

在化工原理实验中,精馏实验用到的试剂占了绝大部分,对于这类易燃、易爆、易挥发的化学药品,要注意实验室的通风,实验操作时,需戴上手套和口罩。

2) 高压钢瓶的使用

在化工原理实验中,另一类需要引起特别注意的物品就是装在高压钢瓶内的各种高压气体。化工原理实验中所用的高压气体有两大类,一类是具有刺激性气味的气体,如吸收实验中的氨、二氧化硫等,这类气体的泄漏一般容易被发觉;另一类是无色无味,但有毒或易燃、易爆的气体,如常作为色谱载气的氢气,室温下在空气中的爆炸范围为4%~75.2%(体积分数)。因此使用有毒或易燃、易爆气体时,系统一定要严密不漏气,尾气要导出室外,并注意室内通风。

高压钢瓶(又称气瓶)是一种贮存各种压缩气体或液化气体的高压容器。钢瓶的容积一般为40~60 L,最高工作压力为15 MPa,最低的也在0.6 MPa以上。瓶内压力很高,贮存的气体可能有毒或易燃、易爆,故使用气瓶时一定要掌握气瓶的构造特点和安全知识,以确保安全。

气瓶主要由筒体和瓶阀构成,其他附件还有保护瓶阀的安全帽,开启瓶阀的手轮,使运输过程避免震动的橡胶圈。另外,在使用时瓶阀出口还要连接减压阀和压力表。

标准高压气瓶是按国家标准制造的,并经有关部门严格检验方可使用。各种气瓶使用过程中,还必须经有关部门进行水压试验。经过检验合格的气瓶,在瓶肩上应用钢印打上

下列信息:制造厂家、制造日期、气瓶型号和编号、气瓶质量、气瓶容积、工作压力、水压试验压力、水压试验日期和下次试验日期。

各类钢瓶的表面都应涂上一定颜色的油漆,其目的不仅是防锈,主要是能从颜色上迅速辨别钢瓶中所贮存气体的种类,以免混淆。如氧气瓶为浅蓝色,氢气瓶为暗绿色,氮气、压缩空气、二氧化碳、二氧化硫等钢瓶为黑色,氦气瓶为棕色,氨气瓶为黄色,氯气瓶为草绿色,乙炔瓶为白色。

为了确保安全,在使用钢瓶时,一定要注意以下几点:

(1)当气瓶受到明火或阳光等热辐射作用时,气体因受热而膨胀,使瓶内压力增大,当压力超过工作压力时,就有可能发生爆炸。因此在钢瓶运输、保存和使用时,应远离热源(明火、暖气、炉子),并避免长期在日光下暴晒,尤其在夏天更应该注意。

(2)气瓶即使在温度不高的情况下受到猛烈撞击,或不小心被碰倒跌落,都有可能引起爆炸。因此,钢瓶在运输过程中,要轻搬轻放,避免跌落撞击,使用时要固定牢靠,防止碰倒,更不允许用铁锤、扳手等金属器具敲打钢瓶。

(3)瓶阀是钢瓶中的关键,必须保护好,否则会发生事故。

①若瓶内存放的是氧气、氢气、二氧化碳和二氧化硫等气体,瓶阀应用铜和钢制成。若瓶内存放的是氨气,则瓶阀必须用钢制成,以防腐蚀。

②使用钢瓶时,必须用专用的减压阀和压力表。尤其是氢气和氧气的减压阀不能互换,为了防止氢气和氧气两类气体的减压阀混用造成事故,氢气表和氧气表的表盘上都注明有氢气表和氧气表的字样。在氢气及其他可燃气体的瓶阀中,连接减压阀的连接管为左旋螺纹,而在氧气等不可燃烧气体瓶阀中,连接管为右旋螺纹。

③氧气瓶阀严禁接触油脂。高压氧气与油脂相遇,会引起燃烧,甚至会发生爆炸,因此切勿用带油污的手和扳手开关氧气瓶。

④要注意保护瓶阀。开关瓶阀时一定要搞清楚方向,缓慢转动,旋转方向错误和用力过猛会使螺纹受损,可能导致冲脱,造成重大事故。关闭瓶阀时,注意使气瓶不漏气即可,不要关得过紧。气瓶用完和搬运时,一定要盖上保护瓶阀的安全帽。

⑤瓶阀发生故障时,应立即报告指导教师,严禁擅自拆卸瓶阀上的任何零件。

(4)当钢瓶安装好减压阀和连接管后,每次使用前都要在瓶阀附近用肥皂水检查,确认不漏气才能使用。对于有毒或易燃、易爆气体的钢瓶,除了应保证严密不外漏,最好单独放置在远离化工原理实验室的小屋里。

(5)钢瓶中的气体不要全部用尽。一般钢瓶使用到压力为 0.5 MPa 时,应停止使用。因为压力过低会给充气带来不安全因素,当钢瓶内的压力与外界大气压力相同时,会造成空气的进入。危险气体在充气时极易因为上述原因发生爆炸事故,这类事故已经发生过多次。

(6)输送易燃易爆气体时,流速不能过快,在输出管路上应采取防静电措施。

(7)气瓶必须严格按期检验。

3) 防火知识

实验操作人员必须了解消防知识,实验室内应准备一定数量的消防器材,工作人员应

熟悉消防器材的存放位置和使用方法,绝不允许将消防器材移作他用。实验室常用的消防器材包括以下几种:

(1)火沙箱。沙子能隔断空气并降低火焰温度,进而灭火。易燃液体和其他不能用水灭火的危险品,着火时可用沙子扑灭。但沙中不能混有可燃性杂质,并且要保持干燥,因为潮湿的沙子遇火后因水分蒸发,会致使燃着的液体产生飞溅。沙箱因为存沙有限,所以只能扑灭局部小规模火源,对于大面积火源,沙箱因沙量太少而作用不大。

(2)石棉布、毛毡或湿布。适用于迅速扑灭火源面积不大的火灾,也是扑灭衣服着火的常用方法,其原理是隔绝空气达到灭火的目的。

(3)二氧化碳灭火器。当空气中含有12%~15%的二氧化碳时,燃烧即停止。二氧化碳灭火器钢筒内装有压缩的二氧化碳。使用时,旋开手阀,二氧化碳就能急剧喷出,使燃烧物与空气隔绝,同时降低空气中的含氧量。注意,使用二氧化碳灭火器时要防止现场人员窒息。

(4)泡沫灭火器。实验室多用手提式泡沫灭火器,其外壳是薄钢板,内有一个玻璃胆,盛有硫酸铝,胆外装有碳酸氢钠溶液和发泡剂(甘草精)。灭火液由50份硫酸铝、50份碳酸氢钠及5份甘草精组成。使用时将灭火器倒置,马上有化学反应生成二氧化碳泡沫。泡沫黏附在燃烧热物表面上,形成与空气隔绝的薄层而达到灭火的目的。



手提式泡沫灭火器适用于扑灭实验室的一般火灾。可用于油类开始着火时的灭火,但不能直接用于扑灭电线和电气火灾,因为泡沫本身是导电的,会造成灭火人的触电事故,所以应切断电源后再灭火。

(5)四氯化碳灭火器。四氯化碳灭火器在钢筒内装有四氯化碳并压入0.7 MPa的空气,使筒内有一定压力。使用时将灭火器倒置,旋开手阀,即喷出四氯化碳。它是不燃的液体,其蒸气比空气重,能覆盖在燃烧物表面将空气隔绝而灭火。它适用于扑灭电气设备的火灾。因四氯化碳有毒,使用时要站在上风。室内灭火后应打开门窗通风,以免中毒。

(6)其他灭火器。干粉灭火器可扑灭易燃液体、气体、带电设备引起的火灾。1211灭火器适用于扑救油类、电器类、精密仪器等火灾。这类灭火器在一般实验室内使用不多,对大型及大量使用可燃物的实验场所应备用此类灭火器。

4) 实验室用电

化工原理实验中电气设备较多,某些设备的电负荷也较大。在接通电源之前,必须认真检查电器设备和电路是否符合规定要求,对于直流电设备应检查正、负极是否接对。必须搞清楚整套实验装置的启动和停车操作顺序,以及紧急停车的方法。注意安全要点极为重要,对电气设备必须采取安全措施。操作者必须严格遵守以下操作规定:

(1)实验之前必须了解总电闸的位置,以便出现用电事故及时切断各个电源。合闸动作要快,要合得牢。合闸后若发现异常声音或气味,应立即拉闸,进行检查。

(2)离开实验室前,必须把本实验室的总电闸拉下断电。发生停电情况,必须切断所有

的电闸,防止操作人员离开现场后,因突然供电而导致电气设备在无人监视下运行。

(3)带金属外壳的电气设备都应该保护接零,定期检查是否连接良好。导线的接头应紧密牢固。接触电阻要小。裸露的接头部分必须用绝缘胶布包好,或者用绝缘管套好。所有的电气设备在带电时不能用湿布擦拭,更不能有水落于其上。电气设备要保持干燥清洁。电气设备维修时必须停业作业。

(4)电源或电气设备上的保护熔断丝或保险管,都应按规定电流标准使用。严禁私自加粗保险丝或用铝丝代替。当保险丝熔断后,一定要查找原因,消除隐患,而后换上新的保险丝。

第 2 章

实验数据的测量、误差及处理

2.1 实验数据的测量

2.1.1 实验点的选择

在进行实验时,可以在一定范围内任意改变的变量称为实验控制变量,比如温度、压力、流量等。在以流量或者雷诺数作为自变量的实验中,流量是主要的控制变量。一般情况下,都希望实验数据能够均匀分布。在可调节范围一定时,应该取多少组数据是一个问题。按照对实验数据进行回归处理的要求,实验数据应不少于回归模型中回归系数的个数的 5~10 倍,在实验时还应留有一定的余地(可能会剔除异常数据)。

例如,若用二次曲线拟合离心泵的扬程与流量之间的对应关系,则回归模型中有三个待定参数(回归系数),有效实验数据应不少于 15 组。先调节阀全开获得离心泵的最大流量,取流量间隔 $\Delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{N}$ 进行调节,得到 $N + 1$ 组数据。在此例中, N 应取 16 或 17。

在拟合时需要先取对数的场合,最好是对直接控制变量的对数进行平均分割。例如,强制对流传热的准数关系式或直管中的摩擦因子与雷诺数之间的关系,雷诺数中除流速外,其他参数如密度、黏度相对恒定或变化不大,取流量间隔 $\Delta \ln Q = \frac{\ln Q_{\max} - \ln Q_{\min}}{N}$ 进行调节比较适宜。

2.1.2 数据的读取

在读取数据时,应注意仪表指示的量程、分度单位等,按正确的方法读取数据。实验数据的测量有直接测量和间接测量两种方法。

直接测量值的有效数字的位数取决于测量仪器的精度。测量时,一般有效数字的位数可保留到测量仪器的最小刻度后一位,即估读一位。例如,压力表的最小分度值为 0.01 MPa 时,其有效数字可取至小数点后三位,如 0.126 MPa;U 形管压差计的刻度最小分度值通常为 0.1 cm,那么读数时应向后估读一位,如 5.35 cm。

在实验过程中,有些物理量难以直接测量时,可采用间接测量法测量,例如干燥实验中

毛毡的外表面积。通过间接测量得到的有效数字的位数和与其相关的直接测量的有效数字有关,其取舍方法服从有效数字的计算规则。

2.1.3 有效数字

在实验中,无论是直接测量还是间接测量的数据,用几位有效数字表示都是一项很重要的事。经常可见到同学们在列出数据时,小数点后跟着一长串数字。这是因为很多同学认为,小数点后面的数字越多数据就越准确,或者运算结果保留的位数越多就越准确,其实这是错误的想法。应该注意两点:①数据中小数点的位置在前或在后仅与所用的测量单位有关;②测量或计算得到的结果不可能也不应该超越仪器仪表所允许的准确度范围。

在数据计算过程中,所得数据的位数会超过有效数字的位数,此时需要将多余的位数舍去,其运算规则如下:

(1)在加减法运算中,各数所保留的小数点后的位数,与各数中小数点后的位数最少的相一致。

(2)在乘除法运算中,各数所保留的位数以原来各数中有效数字位数最少的那个数为准,所得结果的有效数字位数也应与原来各数中位数最少的那个数相同。

(3)在对数计算中,所取对数位数与真数有效数字相同。

2.2 实验数据的误差

2.2.1 误差的表示方式

由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人为因素等,实验测得的数据和被测量的真值之间不可避免地存在着差异,称为测量误差。

在分析实验测量误差时,一般用理论真值、相对真值(例如更精确的测量方法测得的值)或平均值代替真值。在化工领域中,常用的平均值有算术平均值、均方根平均值、几何平均值和对数平均值等。采用哪种方法计算平均值取决于一组测量值的分布类型。其中,算术平均值最为常用。

测量误差的表示方式有绝对误差和相对误差。测量误差的绝对值称为绝对误差,其值越大,表示测量的精确度越低;反之,则表示测量的精确度越高。要想提高测量的精确度,就必须从各方面寻找有效措施来减小测量误差。绝对误差与真值的比值,称为相对误差,常用百分数来表示。

2.2.2 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,可将误差分为系统误差、随机误差和过失误差(或称粗大误差)。

系统误差是指在一定条件下对同一物理量进行多次测量时,误差的数值保持恒定,

或按照某种已知函数规律变化。主要来源有：①测量仪器的精度不能满足要求或仪器存在零点偏差等；②由近似的测量方法测量或利用简化的计算公式进行计算；③温度、湿度、压力等外界因素；④测量人员的习惯对测量过程引起的误差等。在测量时，应尽力消除系统误差的影响，对于难以消除的系统误差，应设法确定或估计其大小，从测量结果中予以消除。

随机误差又称偶然误差，是由一些测量中的随机性因素造成的。在相同条件下多次进行测量，其数值大小、正负是不确定的。原因可能是实验者对仪器最小分度值估读很难每次严格相同，仪器的某些活动部件所指示的测量结果很难每次完全相同，有些实验条件实际上无法完全按人们所要求的条件控制。这一类误差可通过改进仪器和测量技术，提高实验操作的熟练程度来减小，但不可能完全避免。

过失误差是由测量过程中的疏忽大意造成的，如读数错误、记录错误或操作失败。这类误差往往很大，应在整理数据时将相应的数据予以剔除。

2.3 实验数据的处理

实验数据的处理是将实验测得的一系列数据经过计算整理后，用最适宜的方式表达出来。数据处理的主要内容包括：实验数据的辨识和判断；列表及作图；回归计算及误差分析等。

2.3.1 实验数据的辨识和判断

通常先把实验数据标在坐标纸上或者输入电脑作出散点图，初步观察是否有明显异常的数据。如果有，应予以剔除，否则会严重影响数据拟合的质量，无法反映实验变量之间的真实的规律性。除此之外，还应该认真分析出现异常的原因，并且在实验报告中进行说明。而对于有规律的波动，则应谨慎处理。例如，重量传感器或者鼓风机的周期性波动导致干燥速率曲线在数据比较密集时表现出较大的波动，这种波动的振幅通常接近且具有周期性，此时可采用拟合处理或者降低数据的采集频率，对数据进行压缩。

2.3.2 列表及作图

实验数据的初步整理是列表，包括原始数据记录表、整理计算数据表。原始数据记录表是根据实验内容设计的，必须在实验正式开始之前列出表格。整理数据表应简明扼要，只表达主要物理量的计算结果。列表时应注意：①表头列出物理量名称、符号和计量单位；②注意有效数字的位数；③物理量的数值较大或较小时，建议用科学计数法来表示；④表格应按顺序编号，并给出表题；⑤同一个表格尽量不要跨页，必须跨页时，在后页上要注明“续表××”。

图示法的优点是直观清晰、便于比较。作图时，首先应合理选择坐标系。化工中常用的坐标系为直角坐标系、半对数坐标系和对数坐标系。当实验中遇到的函数关系为直线关

系 $y = a + bx$ 时,选用直角坐标系;当其中一个变量在所研究的范围内发生了几个数量级的变化,而另一个变化较小时(例如流量计标定实验中孔流系数和雷诺数的关系),或者需要将某种函数(如指数函数 $y = ae^{bx}$)变换为线性函数时,建议用半对数坐标系;当所研究的函数和自变量在数值上均变化了几个数量级(如直管中的摩擦因子和雷诺数的关系),或者需要变换某种非线性关系(如幂函数关系 $y = ax^b$)为线性关系时,采用双对数坐标。

作图时,一般以自变量为横轴,因变量为纵轴,横轴与纵轴的读数是否从 0 开始,视具体情况而定。坐标分度应该与实验数据的有效数字位数相匹配,并且方便读出数据点的坐标值,还要充分利用作图区域,合理布局。坐标轴上必须标明该坐标所代表的变量的名称、符号及所用的单位。图必须有图号和图名,必要时还应有图注。

2.3.3 回归计算及误差分析

当需要对数据结果以数学方程式的形式表示时,还需要在散点图的基础上进行回归计算,通常由电脑软件完成,但需要在进行回归之前选定回归模型。选择的的原则是:既要求形式简单、所含常数较少,同时又希望能准确地表达实验数据之间的关系。在实践过程中,在保证必要的准确度的前提下,通常尽可能选择简单的线性关系的形式。为了简化数据处理,对于一些非线性函数关系,可采用适当的转换,化成线性关系。例如强制对流传热的准数关系式,可通过公式两边取对数,把待求的幂函数关系式转变为线性方程。

对于验证性的实验内容,回归模型通常已经明确。但是在实验教学的实践当中,有些同学还是会经常犯一些低级的错误。主要原因是缺少独立和认真的思考,没有养成在理解的基础上再进行理性处理的好习惯。例如,测量液体在直管内流动时摩擦因子与雷诺数之间的关系实验中,在层流区域和湍流区域遵循不同的规律。因此,在雷诺数小于 2 000 的范围内,应该选择适合于层流的回归模型;对于雷诺数大于 2 000(包括过渡流阶段)的部分,采用适合湍流的回归模型。在填料塔的流体力学性能测定实验中,在喷淋量恒定时,逐步加大气体流量,直到产生液泛。由于液泛前后的填料塔压降与空塔气速之间的关系遵循不同的规律,因此在对数据进行处理时,应该以液泛点为界,分两段处理。干燥实验中,实验结果比较明确地显示出恒速干燥阶段和降速干燥阶段,数据处理理应分段进行拟合,如果把干燥速率随干基含水率的变化拟合成为一条抛物线形状的曲线,就是错误的。

在对数据处理完毕后,可对最终结果作简单的误差分析,例如在传热实验中对努赛尔特准数和雷诺数的关系回归计算之后,得到一条直线,可将直线的斜率作为测量值,将经验值 0.8 作为真值,计算绝对误差和相对误差,并对产生误差的原因进行分析。

第 3 章

化工原理演示实验

实验一 机械能转化演示实验

一、实验目的

- (1) 观测动压头、静压头、位压头随管径、位置、流量的变化情况,验证连续性方程和伯努利方程;
- (2) 定量考察流体流经收缩、扩大管段时,流体流速与管径关系;
- (3) 定量考察流体流经直管段时,流体阻力与流量关系;
- (4) 定性观察流体流经节流件、弯头的压损情况。

二、基本原理

化工生产中,流体的输送多在密闭的管道中进行,因此研究流体在管内的流动是化学工程中一个重要课题。任何运动的流体,仍然遵守质量守恒定律和能量守恒定律,这是研究流体力学性质的基本出发点。

1) 连续性方程

对于流体在管内稳定流动时的质量守恒形式表现为如下的连续性方程:

$$\rho_1 \iint_1 v dA = \rho_2 \iint_2 v dA \quad (3-1)$$

根据平均流速的定义,

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (3-2)$$

即

$$m_1 = m_2 \quad (3-3)$$

而对均质、不可压缩流体, $\rho_1 = \rho_2 = \text{常数}$,则式(3-2)变为

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 \quad (3-4)$$

对均质、不可压缩流体,平均流速与流通截面积成反比,即面积越大,流速越小;反之,面积越小,流速越大。

对圆管, $A = \pi d^2 / 4$, d 为直径,于是式(3-4)可转化为

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 \quad (3-5)$$

2) 机械能衡算方程

运动的流体除了遵循质量守恒定律以外,还应满足能量守恒定律,依此,在工程上可进一步得到十分重要的机械能衡算方程。

对于均质、不可压缩流体,在管路内稳定流动时,其机械能衡算方程(以单位质量流体为基准)为

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_f \quad (3-6)$$

上式中,各项均具有高度的量纲, z 为位头, $u^2/(2g)$ 为动压头(速度头), $p/(\rho g)$ 称为静压头(压力头), h_e 为外加压头, h_f 为压头损失。

针对上述机械能衡算方程的讨论:

(1) 理想流体的伯努利方程。

无黏性的即没有黏性摩擦损失的流体称为理想流体,对于理想流体, $h_f=0$,若此时又无外加功,则机械能衡算方程变为:

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \quad (3-7)$$

式(3-7)为理想流体的伯努利方程。该式表明,理想流体在流动过程中,总机械能保持不变。

(2) 若流体静止,则 $u=0$, $h_e=0$, $h_f=0$, 于是机械能衡算方程变为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (3-8)$$

式(3-8)即为流体静力学方程,可见流体静止状态是流体流动的一种特殊形式。

3) 管内流动分析

按照流体流动时的流速以及其他与流动有关的物理量(例如压力、密度)是否随时间而变化,可将流体的流动分成两类:稳定流动和不稳定流动。连续生产过程中的流体流动,多可视为稳定流动,在开工或停工阶段,则属于不稳定流动。

流体流动有两种不同形态,即层流和湍流,这一现象最早是由雷诺(Reynolds)于1883年首先发现的。流体做层流流动时,其流体质点做平行于管轴的直线运动,且在径向无脉动;流体做湍流流动时,其流体质点除沿管轴方向做向前运动外,还在径向做脉动,从而在宏观上显示出紊乱地向各个方向做不规则的运动。

流体流动型态可用雷诺数(Re)来判断,这是一个无因次数群,故其值不会因采用不同的单位制而不同。但应当注意,数群中各物理量必须采用同一单位制。若流体在圆管内流动,则雷诺数可用下式表示:

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (3-9)$$

式中: Re ——雷诺数,无因次;

d ——管子内径,m;

u ——流体在管内的平均流速,m/s;