



教育“十二五”规划教材



# 化工原理实验



Experiments of Chemical Engineering Principles

卿大咏 主编



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



石油高等教育“十二五”规划教材

# 化工原理实验

卿大咏 主编



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/卿大咏主编. —东营:中国石油  
大学出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5636-4917-4

I. ①化… II. ①卿… 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(2015)第 202768 号

石油高等教育教材出版基金资助出版

书 名: 化工原理实验

作 者: 卿大咏

---

责任编辑: 高 颖(电话 0532—86983568)

封面设计: 赵志勇

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

印 刷 者: 青岛炜瑞印务有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 14.75 字数: 359 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

---

## 内容提要

---

本书是高等学校化学工程与技术学科及相关学科开设的化工原理课程的实验教学配套教材。全书分为5章,包括绪论、化工原理实验基础、实验数据采集与处理、化工常用测量仪表及软件基础、化工原理典型实验项目。

本书在编写过程中根据各高校化工原理实验教学装置基本原理及流程一致,但实验装置结构差异较大等实际情况,采用了重视实验原理讲解,突出实验方案实施过程,弱化实验操作具体步骤和方法,强化学生实验过程中的自主思维和动手能力。从实验方案设计到进入实验室完成实验操作这一过程,能够激发学生的创新思维,使他们体验获取实验数据的全过程,加深对化工原理主要典型操作单元及生产过程的认识和理解。

本书可作为高等院校开设的化工原理课程后续的化工原理实验课程的配套教材,也可作为有一定化学化工基础的相关专业人员熟悉化工操作单元过程,强化实践操作训练等的参考书。

---

# 前言

## PREFACE

化工原理实验是化工类专业及其他相关专业学生的一门专业基础课,是一门工程实践性很强的课程。化工原理实验对于学生加深和巩固在化工原理课程中学到的基本理论,强化对化工过程单元设备的认识和操作,提高工程技术实践能力,培养分析和解决工程实践问题的方法,提高从事科学研究和创新的能力等方面均具有重要的作用。

本书是西南石油大学化学化工学院多位从事化工原理实验教学的教师在教学实践过程中认真总结梳理,并结合国内外多所化工类高校采用的化工原理装置情况及当今化工行业特点,根据近年来的教学改革成果,为满足工程教育背景下化工行业人才需求,适应化工行业新技术发展编写而成的。

本书可作为化工、化学、环境、材料、生物、轻工类专业技术化工原理基础课的实验教材。本书编写过程中根据各高校化工原理实验教学装置基本原理及流程一致,但实验装置结构差异较大等实际情况,采用了重视实验原理讲解,突出实验方案实施过程,弱化实验操作具体步骤和方法,强化学生实验过程中的自主思维和动手能力。从实验方案设计到进入实验室完成实验操作这一过程,能够激发学生的创新思维,使他们体验获取实验数据的全过程,加深对化工原理主要典型操作单元及生产过程的认识和理解。本书的最终目的是培养与训练学生实验研究全过程的多种能力和素质,突出实验教学应具有的实践性和工程性;力求通过实验培养学生掌握综合运用理论知识解决实际问题 and 正确表达实验结果的方法;开拓学生的实验思路,帮助学生掌握新的实验技术和方法,增

强创新意识。

本书内容涉及面比较广,主要介绍化工原理实验的基本要求、实验相关基础知识、实验数据的采集与处理、化工常用测量仪表及软件基础,以及化工过程中的典型实验项目。本书在编写过程中兼顾国内各高校的多种实验装置的共性,力求重视共性,突出个性,做到概念清晰、层次分明、阐述简洁、操作易懂、利于自学。

全书共有5章,其中第2章化工原理实验基础、第3章实验数据采集与处理的第1节至第3节内容由刘莹编写,附录部分的附表1-3到附表1-21由王金玉编写,其余部分由卿大咏编写。全书由卿大咏统稿。

全国化工高教学会理事、西南石油大学“化工原理”省级精品课程建设负责人、化学化工学院教授委员会主任诸林教授对本书的编写给予了大力支持并对本书进行了审定。华东理工大学化工原理实验教学中心的张秋香老师对本书实验装置及流程部分的编写提出了很多宝贵意见。此外,本书的编写还得到了西南石油大学国家级化学化工实验教学示范中心的大力支持,多位教师为本书的编写及实验项目的试做等提供了帮助。在此,对他们一并表示衷心的感谢。

另外,本书编写过程中参考了国内外其他院校的有关教材,在此向这些教材的作者表示诚挚的谢意。本书被列为西南石油大学2014年度规划教材,在出版过程中也得到了中国石油大学出版社石油高等教育教材出版基金的资助,在此一并表示感谢。

鉴于编者学识有限,书中难免有不妥之处,衷心希望读者给予指教,以使本书日臻完善,不胜感激。



2015年7月

# 目 录

## CONTENTS

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第 1 章 绪 论 .....           | 1   |
| 1.1 化工原理实验目的与意义 .....     | 1   |
| 1.2 化工原理实验特点 .....        | 2   |
| 1.3 化工原理实验教学内容与方法 .....   | 3   |
| 1.4 化工原理实验基本要求 .....      | 3   |
| 1.5 化工原理实验基本安全知识 .....    | 6   |
| 第 2 章 化工原理实验基础 .....      | 13  |
| 2.1 化工原理实验研究方法 .....      | 13  |
| 2.2 化工原理实验设计方法 .....      | 27  |
| 2.3 化工原理实验流程设计 .....      | 35  |
| 第 3 章 实验数据采集与处理 .....     | 39  |
| 3.1 实验数据的测量 .....         | 39  |
| 3.2 实验数据的计算 .....         | 43  |
| 3.3 实验数据误差的表示和分类 .....    | 43  |
| 3.4 过失误差的判断与删除 .....      | 52  |
| 3.5 测量过程中的误差估算 .....      | 58  |
| 3.6 实验数据的处理方法 .....       | 63  |
| 3.7 复杂数值计算方法 .....        | 72  |
| 第 4 章 化工常用测量仪表及软件基础 ..... | 74  |
| 4.1 常见化工仪表简介 .....        | 74  |
| 4.2 化工生产及实验中常用管件和阀门 ..... | 100 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 4.3         | 化工生产及实验中常用分析检测仪器 .....    | 107        |
| 4.4         | 化工原理实验常用软件 .....          | 111        |
| <b>第5章</b>  | <b>化工原理典型实验项目 .....</b>   | <b>117</b> |
| 5.1         | 温度传感器的校正 .....            | 117        |
| 5.2         | 压力表及压力传感器的校验 .....        | 120        |
| 5.3         | 常用流量计的标定 .....            | 123        |
| 5.4         | 雷诺实验及雷诺数的测定 .....         | 128        |
| 5.5         | 离心泵特性曲线的测定 .....          | 132        |
| 5.6         | 流体流动阻力系数的测定 .....         | 140        |
| 5.7         | 恒压过滤装置的操作及过滤常数的测定 .....   | 145        |
| 5.8         | 对流传热系数的测定 .....           | 152        |
| 5.9         | 常见塔设备的流体力学实验 .....        | 157        |
| 5.10        | 填料吸收塔的操作及其传质系数的测定 .....   | 163        |
| 5.11        | 板式精馏塔的操作及其性能评定 .....      | 170        |
| 5.12        | 乙醇-正丙醇填料塔精馏操作 .....       | 179        |
| 5.13        | 液-液萃取实验 .....             | 182        |
| 5.14        | 洞道干燥装置操作及其干燥速率曲线的测定 ..... | 188        |
| 5.15        | 流化床干燥实验 .....             | 191        |
| 5.16        | 喷雾干燥实验 .....              | 194        |
| 5.17        | 膜分离实验 .....               | 197        |
| <b>附 录</b>  | <b>.....</b>              | <b>201</b> |
| 附录1         | 常用单位及标准数据 .....           | 201        |
| 附录2         | 部分实验项目原始数据记录表 .....       | 216        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>              | <b>229</b> |

# 第1章 绪 论

化工原理是研究化工生产过程中的工程问题的学科,化工原理课程是一门紧密联系化工生产实际、实践性很强的课程,是化学化工类专业及其相关专业学生必修的专业基础课。随着化工技术的发展,人们已经在化工计算机模拟计算、过程仿真、流程模拟软件技术等方面取得了长足的进步。然而人们在化工过程计算的开发中,仍然离不开基本原理的指导 and 基本规律的运用。化工原理实验是学习、掌握和运用化工原理必不可少的重要实践课程。与基础课实验不同的是,它具有典型的工程特点,每个实验相当于化工生产中的一个单元操作过程,通过实验建立一定的工程概念,各实验单元的工艺流程、操作条件和控制参数等都比较接近工业应用。学生在化工原理实验过程中能够更实际、更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段,并发现复杂的真实设备和工艺过程与描述这一过程的数学模型之间的关系,从而建立起一定的工程概念。因此,在实验教学的全过程中,学生在发现问题、分析问题、解决问题的能力 and 创新能力等方面都得到培养和提高,能够有效地帮助学生建立工程概念,为今后的学习、工作打下坚实的基础。

## 1.1 化工原理实验目的与意义

化工原理实验是配合化工原理课程理论教学设置的实验课,是教学中的重要实践环节和工程训练过程。学习和掌握化工原理的实验及其研究方法,是学生从理论学习到工程应用的一个重要的实践过程。化工原理实验教学的目的在于着重培养学生的实践能力和解决实际问题的能力,这种能力的培养是理论学习无法替代的。通过化工原理实验教学可以达到以下目的:

- (1) 学生在实践中进一步学习、掌握和运用所学的基础理论知识,加深对典型的已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和单元操作的理解,巩固和深化所学的理论知识。
- (2) 要求学生熟悉化工实验装置的结构与性能,掌握操作方法,了解化工仪器仪表的原理与结构,掌握连接方法、操作步骤及正确的读数方法。训练学生的实验基本技能,培养学生独立组织和完成实验的能力,为今后化工单元操作过程的能力培养奠定基础。
- (3) 锻炼学生运用所学理论、结合工程实际建立实验方法和测试手段及选择实验条件等的基本能力,培养学生分析问题和解决问题的能力,给学生提供一个理论联系实际的机会。
- (4) 通过实验数据的测量、计算分析和实验报告的编写等一系列任务,提高学生的实验数据处理能力和编写报告的能力,培养学生实事求是的科学态度和严谨认真的学习态度,以

及发现工程实际问题并解决问题的能力。

(5) 培养学生科学的思维方法和创新意识,培养学生实验过程中的合作意识和团队协作精神,提高学生的自身素质。

(6) 通过实验过程中各类仪表的操控、数据采集、分析处理,掌握各类测量、控制仪表的基本原理和使用方法,建立现代化工业生产中的各种测控理论,为今后遇到各种生产过程中的自动化控制和操作建立基本的概念和意识。

## 1.2 化工原理实验特点

化工原理实验是一门实践性和工程性很强的技术基础课程,该课程用自然科学的基本原理和工程实践的基本方法来解决化工生产过程及相关领域的工程实践问题。化工原理实验需要解决的是多因素、多变量、综合性、与工业生产及工程实际密切相关的问题。化工原理实验内容强调实践性和工程观念,并将能力和素质培养贯穿于实验课的全过程。围绕化工原理课程中最基本的理论,开设验证型和综合型实验,使学生掌握实验研究方法,训练其独立思考、发现问题、分析问题和解决问题的能力。该课程有以下显著的现实性和特殊性:

(1) 化工原理实验不同于一般的化学实验,它以化工生产过程中的实际生产单元为研究对象,以实际的实验装置为基础。实验者通过装置的操控认识基本的化工过程和掌握化工生产规律,通过对装置流程的熟悉、操作过程的合理设计、有序的实验操作得出可信的实验数据,并通过数据分析处理得出目标规律和结论。实验过程中除了需要具备化工原理基本理论知识外,还需要基本的物理指导以及化工机械设备、化工测量仪表及电工电子等方面的基本知识。因此,化工原理实验是一个多学科知识交叉综合的实践内容。

(2) 限于实验室场地和实验规模,化工原理实验装置和设备设计流程简单,各操作单元均是将化工生产中的实际单元过程简化成一个最为原始和初级的最小操作单元进行实验研究,易于学生掌握实验基本原理。但同时化工原理实验装置和设备已经脱离了化学实验的小型、微型玻璃器皿的单一反应过程的限制,与实际的化工设备相同或相似,每个实验本身也相当于化工生产中的一个基本操作过程或反应单元,所得到的结论对于化工单元操作的设备设计及过程操作条件的确定具有重要的指导意义。部分装置采用计算机在线数据采集与控制系统,引入先进的测试手段和数据处理技术,为学生建立现代化工业生产技术的基本概念提供帮助。化工原理实验的实验室长期开放,除用于完成实验教学基本内容外,也可对化工原理实验感兴趣的同学提供课外实践场所,培养学生的科研能力和创新精神。

(3) 化工原理实验与化工原理理论教学、化工设计、生产实习等教学环节相互衔接,构成一个有机的整体。化工原理实验通过观察某些基本化工过程中的实验现象(如液泛、流态化等),测定某些基本参数(如温度、压力、流量等),找出某些重要过程的规律(如管内流体的流动规律、流体通过颗粒床层的规律等),确定化工设备的性能(如离心泵的特性曲线、换热器的传热系数、过滤器的过滤常数、精馏塔的塔板效率、吸收塔的传质单元数等),建立化工操作单元的基本控制规律(如精馏过程中回流比的调控规律、萃取过程中的液系比例与萃取效果的关系等)。所以,化工原理实验是学生巩固化工基本原理、化工单元操作理论知识,学习与之相关的其他新知识的重要途径。

(4) 实验教学过程中的部分实验报告一般要求学生采用小论文形式撰写,这是提高学

生文献查阅能力、写作能力、综合应用知识能力和科研能力的一个重要手段,可为工程设计、毕业设计(论文)及今后工作所需的科学研究和科学论文的撰写打下基础。

## 1.3 化工原理实验教学内容与方法

### 1.3.1 化工原理实验教学内容

化工原理实验教学内容包括实验基础理论教学、计算机仿真实验和单元操作实验三部分。实验基础理论教学主要讲述化工原理实验的目的、要求和方法;化工原理实验的特点;化工原理实验的研究方法;实验数据的误差分析;实验数据的处理方法;与化工原理实验有关的计算机数据采集与控制基本知识等。计算机仿真实验包括仿真实训(离心泵单元、换热器单元、精馏塔单元等)、数据处理和实验测评等内容。单元操作实验内容包括流体流动阻力测定、离心泵特性曲线测定、对流给热系数测定、恒压过滤常数测定、填料吸收塔传质系数测定、板式精馏塔操作及性能评价、干燥速率曲线测定、液-液萃取、多功能膜分离、流态化及流化干燥等基本单元项目。

### 1.3.2 化工原理实验教学方法

化工原理实验工程性、实践性较强,许多问题需事先考虑、分析,并做好必要的准备,因此必须在实验前进行现场预习和仿真实验。化工原理实验室一般实行开放式管理,学生实验前可预约实验时间和进入实验室熟悉装置设备,在规定的时间内完成实验项目操作后独立完成实验报告。另外,实验室一般长期开放,学生可反复多次地进行实验操作练习,加深对实验操作基本规律和实验研究方法的掌握。

化工原理实验教学一般采用学生为主体、教师主导的教学模式,学生根据实验目的及要求 and 装置设计实验方案,在教师保障实验过程安全的情况下,进入实验室进行实验装置的操作和获取实验数据、观察实验现象。学生通过实验的全程参与和体验获取知识和技能,教师全程给予必要的指导和答疑辅导。

## 1.4 化工原理实验基本要求

化工原理实验教学通常包括如下几个教学环节:自学实验理论课、预习实验项目并撰写预习报告、实验前提问、实验操作、撰写实验报告、实验考核。为了突出对学生“能力”和“素质”的培养,使学生建立工程概念和意识,整个实验过程中必须坚持启发式、讨论式、研究式、交互式的教学方法,突出学生的自主作用,克服教师单纯传授知识、包办代替的做法,以及学生依赖教师的被动学习习惯。一定要坚持教师合理指导,学生协作自主完成实验的基本原则。

一般情况下,该实验课程教学过程中以随机学生小组(每组2~4人为宜)为单位分工协作完成实验操作,各学生独立进行实验数据处理及实验结论分析,共同探讨实验过程中遇到的各种问题。

### 1.4.1 实验预习

预习工作是一切实验课程的必要前提。鉴于化工原理实验的特殊性,更要在实验之前进行认真的预习,了解和熟悉单元操作设备、流程、测控点、安全要点等问题。化工实验装置流程复杂,配套仪器仪表较多,操作步骤必须规范。要顺利完成每个实验,必须认真做好课前预习。预习应包括以下内容:

(1) 认真阅读实验教材有关内容,掌握实验要求、实验原理、实验步骤及所需测量的参数。熟悉实验所用测量仪表的使用方法,掌握其操作过程及安全注意事项。

(2) 在不操作设备的情况下提前进入实验室,对照具体实验装置,熟悉装置结构、流程和测量仪表,掌握操作规程,确定测试点和控制点位置、所测参数项目、单位及数据点的分布等。

(3) 完成实验预习报告,内容包括实验目的、原理、流程、操作步骤和注意事项等。准备好原始数据记录表格,并标明各参数的单位。

(4) 对实验预期的结果、可能发生的故障和排除方法做初步的分析和估计。例如,设备的哪些部分或操作中的哪个步骤可能会产生危险,应如何避免,以保证实验过程中人身和设备安全。预习报告经指导教师检查通过后方可进行实验。

(5) 一般以2~4人为一个小组,实验前进行适当分工,明确要求,以便实验过程中协调工作,共同完成实验操作内容。

### 1.4.2 实验操作

实验操作是实验教学的核心环节,学生通过实验操作才能了解和领会单元操作装置、设备及实验流程,了解如何实现过程的优化,分析各种正常状态和非正常现象产生的原因,并研究可能采取的操控措施;学生通过实验操作才能真正建立工程概念并掌握化工单元操作的基本规律及化工生产中各类问题的研究处理方法。实验操作中应该注意:

(1) 实验操作是动手动脑的重要过程,进入实验室前应高度注意实验安全,自觉接受实验室安全教育,进入实验室后一定要严格按照操作规程进行;应设计好测量范围、测量点数目和测量点的布局、疏密等,并做好实验过程中的时间安排等。

(2) 进行实验前,应仔细检查实验装置及仪器仪表是否完好,对电动机、风机、泵的运转设备必须进行检查;对各种阀门,尤其是一些回路阀或旁路阀,应仔细检查其开启情况,该打开的要打开,该关闭的要关闭。准备完毕后,方可进行操作。

(3) 实验进行过程中,操作要平稳、认真、细心。仔细观察实验现象并详细记录在记录本上;认真测定实验数据并记录在规定的表格内;判断数据的合理性,必要时进行重复实验,培养严谨的科学作风。实验中各组员轮换工作,在保证质量的前提下,使每位组员获得全面的训练。实验过程中应密切注意仪表示数的变化,及时调节,使整个过程在规定的条件下进行;实验条件改变后,不能急于测量记录,由于化工过程的稳定需要一定时间,而且仪表也常存在滞后现象,因此一定要在过程稳定后方可取样或读取数据。

(4) 实验过程中切忌只顾埋头操作和读数,忽略了对过程中现象的观察。实验现象往往与过程的内在机理、规律密切相关,如塔设备操作中塔板上两相接触状态与效率的关系,必须通过不断观察实际现象和读取仪表示数才能合理调节和维持塔的稳定操作。自觉培养

勤于观察、善于观察的习惯,这是科研工作者和工程技术人员必备的素质。

(5) 实验中出现异常现象或者数据有明显误差时,应在数据记录表中如实注明。小组成员应与教师一起认真讨论,研究异常现象发生的原因,及时发现问题、解决问题或者对现象作出合理的分析、解释。发现装置、设备等的异常现象时,要在确保安全的前提下及时停车,确保人员安全和装置安全,及时排除故障后方可继续进行实验。

(6) 实验过程中要认真记录好实验现象,准确完成拟定好的原始数据记录表格,要保证数据可靠、清楚、完整,必须真实地反映仪表的准确度,一般要记录至仪表上最小分度以下一位数;数据记录后应及时复核,以免读错或写错;所测物理量的名称、符号、单位也应注明,很多实验还需要记录实验当时的环境条件(温度、气压、相对湿度等)。

(7) 实验结束后,整理好原始数据,对数据进行初步检查,查看数据的规律性以及是否有遗漏或错误,一旦发现应及时补正。实验记录应请指导教师检查,同意后再停止实验,并将实验设备和仪表恢复到实验前的状态,切断电源,打扫卫生,经教师允许后方可离开实验室。

### 1.4.3 实验报告编写

按照一定的格式和要求,表达实验过程和结果的文字材料称为实验报告。实验报告是对实验工作本身和实验工作对象进行评价的主要依据,也是书写科技论文和制订科技工作计划的重要依据和参考资料。实验报告是实验工作的全面总结和系统概括,是实验工作不可缺少的一个环节。写实验报告的过程就是对所测取的数据加以处理,对所观察的现象加以分析,从中找出客观规律和内在联系的过程。如果做了实验而不撰写报告,就等于有始无终,半途而废。因此,进行实验并认真写出实验报告,是未来科研工作者必不可少的基础训练。学生在校期间学会将所做的实验写成一份完整的实验报告,也可认为是一种正式科技论文书写的训练。化工原理实验课程通过要求学生规范完成实验报告,有效强化学生书写科技论文的意识,训练学生综合分析、概括问题的能力。

实验报告是对实验的全面总结,是对实验结果进行评估的技术文件。实验报告应简单明了、数据完整、结论明确,有讨论与分析,得出的公式或图线有明确的使用条件。编写实验报告的能力需要通过严格训练来提高,以便为今后写好研究报告和科技论文打下基础。实验报告是实验者本人对实验过程的描述和实验结果的分析讨论,一定要避免通过抄写实验讲义的内容完成实验报告。实验报告应包括以下内容:

(1) 实验名称。每篇实验报告都应有名称,又称标题,列在报告的最前面。实验名称应简洁、鲜明、准确。简洁,就是字数要尽量少;鲜明,就是让人一目了然;准确,就是能恰当反映实验的内容。如“流体流动阻力测定”“干燥速率曲线测定”等。

(2) 实验时间、报告人、同组人等与实验过程及实验数据真实性印证信息相关的基本信息等。

(3) 实验目的。简明扼要地说明为什么要进行这个实验,本实验要解决什么问题。常常是列出几条主要的实验目的,尤其是要结合实验预习情况表达出该实验过程中需要解决的问题,以便在实验过程中去寻求问题的答案。

(4) 实验的理论依据(实验原理)。简要说明实验所依据的基本原理,包括实验涉及的主要概念、实验依据的重要定律和公式及据此推算的重要结果。要求书写准确、充分,同时

又要简要地概括,不能整篇抄写实验讲义和参考书籍。

(5) 实验装置示意图和主要设备、仪表的名称。要将实验装置简单地画出,标出设备、仪器仪表及调节阀等的标号,并标出测试点的位置,在流程图的下面写出图名及与标号相对应的设备仪器等的名称。尤其是要重点标出实验的装置流程图,通过实验流程图的绘制掌握实验过程中物料流向,强化实验操作顺序。

(6) 实验操作方法和安全要点。根据实际操作程序,按时间的先后划分为几个步骤,以使条理更为清晰。实验步骤的划分一般多以改变某一组因素(参数)作为一个步骤。对于操作过程的说明,要简单明了,实时反映实验过程。对于整个实验过程的安全要点要在操作程序中特别标出,容易引起危险、损坏仪器仪表或设备以及一些对实验结果影响比较大的操作,一般在注意事项里给予特别突出的标示提醒,以引起实验者的注意。

(7) 数据记录。实验数据是实验过程中从测量仪表所读取的数值。要根据仪表的准确度决定实验数据的有效数字位数。读取数据的方法要正确,记录数据要准确。实验数据一般都是先记在原始数据记录表中,但当数据较多时,此表格宜作为附录放在报告的后面。

(8) 数据整理表或图及计算过程举例。这部分是实验报告的重点内容之一,要求把实验数据整理、加工成表格或图的形式。数据整理时应根据有效数字的运算规则进行。一般将主要的中间计算值和最后计算结果列在数据整理表格中。表格要精心设计,使其易于显示数据的变化规律及各参数的相关性。有时为了更直观地表达变量间的相互关系,采用作图法,即用相对应的各组数据确定出若干坐标点,然后依点画出相关曲线。数据整理表或图要按照第3章介绍的列表法和图示法的要求去做。实验数据不经重复实验不得修改,更不得伪造数据。计算过程举例是以某一组原始数据为例,把各项的计算过程列出,从而说明数据整理表或图中的结果是如何得到的。小组各成员应约定采用不同组别的实验数据进行举例,不要重复。实验数据的处理过程应该使用必要的现代办公软件辅助实验数据处理,如实验数据曲线图一般用 Origin 软件或 Excel 软件等处理,不再使用坐标纸作图处理。

(9) 实验结果的分析与讨论。这部分十分重要,是实验报告编写者理论水平的具体体现,也是对实验方法和结果进行的综合分析研究。讨论范围应只限于与本实验有关的内容。讨论的内容包括:从理论上对实验所得结果进行分析和解释,说明其必然性;分析误差的大小和产生的原因,以及如何提高测量准确度;本实验结果在生产实践中的价值和意义;由实验结果提出进一步的研究方向或对实验方法及装置提出改进建议;尤其是对实验过程中异常现象的分析与讨论等内容。

(10) 实验结论。结论是根据实验结果所得出的最后判断。得出的结论要从实际出发,要有理论根据,对实际生产及工业过程有指导意义。

实验报告必须书写工整、语句通顺、数据完全、结论明确,图形和图表的绘制必须使用直尺或曲线板。一般建议实验报告采用学校统一印制的实验报告纸编写整理或用计算机编辑整理并向指导教师递交电子稿和打印稿件。

## 1.5 化工原理实验基本安全知识

化工原理实验是一门实践性很强的基础课程,也是一门重要的工程训练课程,实验过程

中难免接触到易燃、易爆、有腐蚀性或毒性的物质,同时各装置涉及高温、高压、低温、真空环境、高速转动等操作条件,实验室涉及大功率用电、高电压用电等用电设施安全,以及各类测量、测控仪表等的操作安全,各类阀门等的合理控制等,这些均属于实验室安全操作范畴,均应作为实验者必须掌握的实验安全必备知识。

### 1.5.1 安全意识的形成

安全意识的培养和形成是实验参与者必须高度重视的长期过程,只有实验者自行重视安全,强化实验室安全操作的基本概念,学会基本的安全操作规程,才能在保护好自己的同时不伤害他人。安全意识的形成必须要求实验者坚持“不伤害自己、不伤害他人、不被他人伤害”的“三不伤害”原则,主动接受安全教育,在进入实验室前认真预判该实验室的安全风险,确保形成良好的安全预案,对可能发生的危险做好安全应急措施。同时,实验组织者和管理者应该加强对实验参与者的安全教育,坚持实验参与者不接受安全教育和培训不能参与实验的基本原则,也教育参与者在认为自己安全教育未到位或认为实验过程对自身安全有不可避免的潜在危险时可以拒绝参与实验的基本意识。通过良好的安全意识教育,促进实验者安全意识的形成,为培养未来合格的工业生产一线建设者奠定基础。

### 1.5.2 实验室消防安全知识

化工原理实验室涉及易燃溶剂,实验过程中需要采用大功率加热等装置,有易发生火灾事故的风险,因此实验操作人员必须掌握相关消防知识,确保实验安全。实验室内应准备一定数量的消防器材,实验人员应熟悉消防器材的存放位置和使用方法,决不允许将消防器材挪作他用。同时要定期加强实验室消防器材的质量检查和跟踪,及时更换到期的灭火器材,定期维护各类消防应急设施。实验室常用的消防器材包括以下几种:

(1) 灭火毯。或称消防被、灭火被、防火毯、消防毯、阻燃毯、逃生毯,是由玻璃纤维等材料经过特殊处理编织而成的织物,能起到隔离热源及火焰的作用,可用于扑灭小范围液体容器着火或者小面积可以覆盖的火源,也可在发生火灾时由现场人员披覆在身上逃生。灭火毯是一种质地非常柔软的消防器具,在火灾初始阶段能以最快速度隔氧灭火,控制灾情蔓延,还可以作为及时逃生用的防护物品,只要将毯子裹于全身,由于毯子本身具有防火、隔热的特性,在逃生过程中人的身体就能得到很好的保护。化工原理实验过程中涉及易燃液体的实验室、局部存在高温的实验室应该备一些灭火毯用于预防。

(2) 消防沙箱。易燃液体和其他不能用水灭火的危险品着火可用沙子来扑灭。沙子能隔绝空气并起到降温作用,达到灭火的目的。但沙中不能混有可燃性杂物,并且要干燥。潮湿的沙子遇火后因水分蒸发,易使燃着的液体飞溅反而发生次生危险。另外,沙子也可作为一些弱挥发性化学试剂倾覆后的覆盖暂处剂,如浓酸泄漏等的处置。但沙箱中存沙有限,实验室内又不能存放过多沙箱,故这种灭火工具只能扑灭局部小规模的火源。对于大面积火源,因沙量太少而作用不大。此外,还可用其他不燃性固体粉末灭火。

(3) 干粉灭火器。该灭火器筒内充装磷酸铵盐干粉和作为驱动力的氮气,使用时先拔掉保险销(有的是拉起拉环),再按下压把,干粉即可喷出。干粉灭火器适宜扑救固体易燃物(A类)、易燃液体及可融化固体(B类)、易燃气体(C类)和带电器具的初起火灾,但不得用于扑救轻金属材料火灾。使用时应注意:灭火时要接近火焰根部喷射;干粉喷射时间短,喷

射前要选择好喷射目标;由于干粉容易飘散,不宜逆风喷射。

(4) 泡沫灭火器。实验室多用手提式泡沫灭火器。它的外壳用薄钢板制成,内有一个玻璃胆,其中盛有硫酸铝,胆外装有碳酸氢钠溶液和发泡剂(甘草精)。灭火液由 50 份硫酸铝和 50 份碳酸氢钠及 5 份甘草精组成。使用时将灭火器倒置震荡后,可立即发生化学反应生成含二氧化碳的泡沫。此泡沫黏附在燃烧物表面上,通过在燃烧物表面形成与空气隔绝的薄层而达到灭火目的。该类灭火器适用于扑灭实验室中发生的一般火灾,在油类着火开始时可以使用,但不能扑灭电线和电器设备火灾,因为泡沫本身是导电的,这样容易造成扑火人触电。

(5) 二氧化碳灭火器。此类灭火器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,同时降低空气中氧气的含量。当空气中含有 12%~15% 的二氧化碳时,燃烧就会停止。该类灭火器是实验室较为良好的灭火器,具有灭火的同时不会造成现场其他设施、设备污损的特点,非常适合扑灭实验室的初期火灾。但是该类灭火器大量释放的二氧化碳会造成现场氧气浓度下降,燃烧物不完全燃烧生成一氧化碳等有害气体,故使用该类灭火器时必须有效防止现场人员窒息。

(6) 消防烟雾探头等消防报警设施。实验室一般应配备必要的烟雾探头设施、可燃气体泄漏报警装置。这些装置应与自动报警、应急控制装置联动,通过良好的技术手段减少事故发生。

实验人员除了要熟悉上述各种消防应急器材的使用方法,还应掌握必要的火灾逃生知识和快速脱险技能,确保在实验过程中发生不可控火灾时快速逃生,保证生命安全。

### 1.5.3 实验室用电安全知识

化工原理实验中的电器设备较多,如“传热实验装置”“干燥速率曲线的测定”“精馏实验”等装置和设备用电负荷较大,电压较高,大多使用 380 V 三相交流电源供电。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;必须弄清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。注意安全用电极为重要,对电器设备必须采取安全措施,操作者必须严格遵守下列操作规定:

(1) 进行实验之前必须了解室内总电源开关与各装置分电源开关的位置,以便出现用电故障时及时切断电源。

(2) 接触或操作电器设备时,手必须干燥。所有的电器设备在带电时不能用湿布或带有腐蚀性的洗涤剂擦拭,更不能使水落于其上。不能用试电笔去试 380 V 的高压电。使用万用电表对电路检查时必须按正确的操作进行。

(3) 电器设备维修时必须停电作业,如部分电路故障需要维修、临时处理时,一定要切断全部电源后再进行操作,维修完毕一定要确保设备电路正常后才能有序通电试验。

(4) 启动电动机前先确保电动机能够正常旋转,启动电源后立即查看电动机是否已转动,转向是否为正常旋转方向,若不转动或反向转动应立即切断电源,否则电动机很容易被烧毁。若设备使用三相电源,一般实验室应推荐使用空气开关或交流接触器开关,采用低压控制高压的方式进行电源控制。

(5) 电源或电器设备上的保护熔断丝或保险管都应按规定电流标准使用,不能任意加大电流,更不允许用铜丝或铝丝代替。原则上各装置应配置匹配负荷的空气隔离开关和漏

电保护开关。

(6) 若电器设备是电热器,在向它通电之前一定要弄清进行电加热所需要的前提条件是否已经具备。比如在精馏塔实验中,在接通塔釜电热器之前,必须弄清釜内液面是否符合要求,塔顶冷凝器的冷却水是否已经打开。在干燥实验中,在接通空气预热器的电热器之前,应先打开空气鼓风机。对于可调节加热功率的装置,一定要先用小功率加热,再缓慢调节加热功率实现合理的加热方式。另外电热器不能直接放在木制实验台上使用,必须用隔热材料作垫架,以防引起火灾。对于内热式加热装置,如用电热管对液体加热的装置,实验结束后不能立即卸掉加热液体,应待被加热液体冷却到常温或用其低温液体置换,确保加热管冷却后才能排空加热器内的全部液体。

(7) 所有电器设备的金属外壳应接上地线,并定期检查是否连接良好;实验室内各实验装置之间的金属外壳必须通过等电位连接。

(8) 导线的接头应紧密牢固,裸露的部分必须用绝缘胶布包好,或者用塑料绝缘管套好;实验室不允许使用裸露的金属导线供电,不能使用绝缘层老化的电线供电;对于大功率电器的电源线应该定期更换,确保绝缘层质量可靠。

(9) 在电源开关与电器设备之间设有电压调节器或电流调节器,其作用是调节电器设备的用电情况。在这种情况下,接通电源开关之前一定要先检查电压或电流调节器当前所处的状态,并将它置于“零位”状态,否则,在接通电源开关时电器设备会在较大功率下运行,这样有可能造成电器设备的损坏。

(10) 在实验过程中,如果发生停电现象,必须切断电源,以防操作人员离开现场后因突然供电而导致电器设备在无人监控下运行。

#### 1.5.4 危险品安全使用知识

为了确保设备和人身安全,从事化工原理实验的人员必须具备以下危险品安全知识:实验室常用的危险化学品必须合理分类存放;对不同的危险化学品,在为扑救火灾而选择灭火剂时,必须针对化学品的性质进行选用,否则不仅不能取得预期效果,反而会引起其他危险。如化工原理的精馏实验可能会用到乙醇、正丙醇、苯、甲苯等化学品,吸收实验可能会用到丙酮、氨气等化学品,其中就包含了危险化学品。这些危险化学品大致可分为以下几种类型:

(1) 易燃品。易燃品是指易燃的液体、液体混合物或含有固体物质的液体或易燃固体等。易燃品在实验室内易挥发和燃烧,达到一定浓度时遇明火就会着火。若在密闭容器内着火,甚至会造成容器因超压而破裂、爆炸。易燃液体的蒸气密度一般比空气大,当它们在空气中挥发时,常常在低处或地面漂浮。因此,在距离存放这类液体处相当远的地方也可能着火,着火后容易蔓延并回传,引燃容器中的液体。所以使用这类物品时,必须严禁明火、远离电热器或其他热源,更不能同其他危险品放在一起,以免引起更大危害。

化工原理精馏实验中会涉及有机溶液加热,其蒸气在空气中达到一定浓度时,就能与空气(实际上是氧气)构成爆炸性的混合气体。这种混合气体若遇到明火会发生闪燃爆炸。在实验室中如果认真严格地按照规程操作,是不会有危险的。因为构成爆炸应具备可燃物在空气中的浓度在爆炸极限范围内和有明火存在两个基本条件。因此,防止爆炸的方法就是使可燃物在空气中的浓度在爆炸极限以外,同时杜绝明火在该类场所的存在。故在实验过程中必须保证精馏装置严密、不漏气,保证实验室通风良好,并禁止在室内使用