



高等学校实验教材

高等学校“十三五”规划教材

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

张继国 程倩 编



化学工业出版社



化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

ISBN 978-7-122-35016-9



9 787122 350169 >

定价：32.00元



高等学校实验教材

高等学校“十三五”规划教材

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN

张继国 程倩 编



化学工业出版社

北京

《化工原理实验》内容主要包括：化工原理实验基础知识，化工自动化及常用仪表基础知识，管道、管件、阀门和流体输送装置简介，实验常用仪器操作，化工原理基础实验和计算机数据处理及应用，共6章。其中第5章化工原理基础实验主要围绕雷诺、伯努利方程、离心泵串并联、板式塔流体力学性能和填料塔流体力学性能5个演示实验，流体流动综合实验、离心泵与管路特性曲线测定实验、恒压过滤实验、传热综合实验、连续精馏实验、填料吸收实验、干燥实验、液液萃取实验和膜分离实验9个基本实验展开；每个实验包括实验目的、实验原理、实验装置与流程、实验步骤、实验注意事项、数据的记录和处理方法等。此外书后附有3个附录，列出常用物性数据表以供处理数据。

本书可作为高等院校化工、化学、材料、林业、轻工、环境等专业的实验教材，也可供相关专业的研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/张继国, 程倩编. —北京: 化学工业出版社, 2019.10

高等学校实验教材 高等学校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-35016-9

I. ①化… II. ①张…②程… 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 (2019) 第 162550 号

责任编辑: 马波 闫敏 杨菁

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 宋玮

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)

印刷: 三河市航远印刷有限公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数253千字 2019年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888

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: 32.00 元

版权所有 违者必究

前言

化工原理实验是配合化工原理课堂理论教学设置的实验课，是教学中的实践环节。该课程亦不同于基础课实验，具有典型的工程实际特点。实验都是按各单元操作原理设置的，其工艺流程、操作条件和参数变量，都比较接近于工业应用。研究问题的方法是用工程的观点去分析、观察和处理问题。实验结果可以直接用于或指导工程计算和设计。学习、掌握化工原理实验及其研究方法，是学生从理论学习到工程应用的一个重要实践过程。针对教学工作的需要并结合信息时代的发展需要，我们编写了这本《化工原理实验》，其主要特点如下：

1. 配合实践教学与实验所需，本书以实验基础知识为主线，详细介绍了实验过程中所需的研究方法、操作安全规程、数据记录方法等知识，以培养学生的多种能力和素质。

2. 引入化工自动化及常用仪表基础知识，借助综合实训环节，更好地培养学生的工程意识和理念，提高学生在工程实践中分析问题和解决问题的能力。

3. 实验内容紧扣教学培养目标，主要分演示实验和基本实验环节，其中基本实验环节里又涉及综合型设计实验，学生可根据实际需要选做，演示实验主要结合化工原理的基本知识设计，强化学生的理论知识，培养学生的创新能力。

4. 书中还设置了计算机数据处理及应用的内容，以适应现代化技术的要求，培养学生使用计算机软件对实验数据进行处理和物性分析的能力，进而提高学生在实验中应用计算机的能力。

5. 内容简明扼要，理论层次分明，针对性和通用性比较强。

本书以培养学生在实验过程中的工程实践意识为目标，力求提高学生分析问题和解决问题的能力，同时增强学生的归纳总结能力。本书内容主要包括：化工原理实验基础知识，化工自动化及常用仪表基础知识，管道、管件、阀门和流体输送装置简介，实验常用仪器操作，化工原理基础实验和计算机数据处理及应用。

本书第2章，第3章，第5章的5.1~5.3、5.6~5.9，第6章的6.3、6.4，附录由张继国编写；第1章，第4章，第5章的5.4、5.5、5.10~5.14，第6章的6.1、6.2由程倩编写。

由于时间仓促，作者水平有限，文中不妥之处，恳请指正。

编者

目录

1 化工原理实验基础知识	1
1.1 教学目标与要求	1
1.2 实验研究方法	4
1.3 实验操作规程与安全	6
1.4 实验数据记录及误差分析	10
1.5 实验数据的处理方法	16
2 化工自动化及常用仪表基础知识	26
2.1 检测仪表	26
2.2 显示仪表	38
2.3 自动控制仪表	41
2.4 执行器	41
2.5 简单控制系统	43
3 管道、管件、阀门和流体输送装置简介	44
3.1 管道	44
3.2 管件	45
3.3 阀门	47
3.4 流体输送装置	49
4 实验常用仪器操作	51
4.1 液体比重天平	51
4.2 电子天平	52
4.3 阿贝折光仪	54
4.4 变频器	57
4.5 显示以及控制仪表设置	59
4.6 紫外-可见分光光度计	59
5 化工原理基础实验	62
5.1 雷诺演示实验	62

5.2	伯努利方程演示实验	66
5.3	离心泵串、并联演示实验	70
5.4	板式塔流体力学性能演示实验	72
5.5	填料塔流体力学性能演示实验	74
5.6	流体流动综合实验	77
5.7	离心泵与管路特性曲线测定实验	82
5.8	恒压过滤实验	85
5.9	传热综合实验	89
5.10	连续精馏实验	94
5.11	填料吸收实验	100
5.12	干燥实验	105
5.13	液液萃取实验	110
5.14	膜分离实验	116
6	计算机数据处理及应用	121
6.1	用 Excel 处理实验数据	121
6.2	用 Origin 软件处理实验数据	131
6.3	用 1stOpt 处理实验数据	141
6.4	用 Aspen Plus 处理实验数据	146
附录		151
附录 1	水的物理性质	151
附录 2	干空气的物理性质	152
附录 3	苯甲酸-煤油-水物系萃取实验分配曲线数据	152
参考文献		154

1 化工原理实验基础知识

1.1 教学目标与要求

化工原理实验是一门以化工单元操作过程原理和设备为主要内容、以处理工程问题的实验研究方法为特色的工程实践课程。该课程是化工原理课程教学中的一个重要实践环节，与一般的化学实验相比，其不同之处在于它具有典型的工程实践特点，属于工程实验范畴，实验都是按各单元操作原理设置的，其工艺流程、操作条件和参数变量都比较接近于工业应用。此外，该课程研究问题的方法是用工程的观点去分析、观察和处理问题；实验结果可以直接用于或指导工程计算和设计。因此，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实践过程。

1.1.1 教学目标

通过化工原理实验教学，力求达到以下教学目标：

- ① 培养学生综合应用化工原理基础知识认知化工原理实验的基本原理和实验设备的正确操作顺序。通过对实验设备的认知及对流程的熟悉，培养学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。
- ② 培养学生设计实验、组织实验的能力，增强工程观念，掌握实验的研究方法；通过课堂讨论和提问等环节培养学生具有较强的语言表达能力和沟通交流能力。
- ③ 使学生通过实验基本操作的学习，理解和掌握化工设备及其各个仪表的基本原理、用途和正确的使用方法，并将其运用到复杂工程问题的适当表述之中。
- ④ 通过化工原理实验报告的书写，培养学生将所学理论知识与化工单元操作相结合，能够通过各种仪表的使用和对实验数据的正确采集，合理运用所学化工原理的经验公式对实验结果进行处理。通过对数据进行归纳，运用所学理论知识进行分析并给出合理的解释和结论，进而验证所学的理论知识。实验报告书写中实验数据的查找可培养学生撰写报告、设计文稿及共享信息的能力。
- ⑤ 通过实验培养学生良好的学风和工作作风，以严谨、科学、求实的精神对待科学实验与开发研究工作。

1.1.2 基本要求

- ① 准时进实验室，不得迟到或早退，不得无故缺课。

② 遵守课堂纪律, 严肃认真地进行实验。实验室不准吸烟, 不准打闹说笑或进行与实验无关的活动。

③ 对实验设备及仪器等在没弄清楚使用方法之前, 不得开动。与本实验无关的设备和仪表不要乱动。

④ 爱护实验设备、仪器仪表。注意节约使用水、电、气及药品。

⑤ 保持实验现场和设备的整洁, 禁止在设备、仪器和台桌等处乱写、乱画。衣物、书包不得挂在实验设备上, 应放在指定的地方。

⑥ 注意安全及防火。电动机开动前, 应观察电机及运转部件附近有无人员在工作。合上电闸时, 应慎防触电。注意电机有无怪声和严重发热现象。精馏实验附近不准动用明火。

⑦ 实验结束后, 应认真清扫现场, 并将实验设备、仪器等恢复到实验前状态, 经检查合格后可以离开实验室。

总之, 要严格遵守实验室的规章制度, 确保人身安全及设备的完好, 使实验教学正常进行。

1.1.3 实验各环节要求

化工原理实验包括课前预习、实验准备、实验操作、读数与记录和编写实验报告五个主要环节, 各个环节的具体要求如下。

1.1.3.1 课前预习

① 认真阅读实验教材和网络课堂上的多媒体课件, 明确实验的目的、原理及内容。

② 根据实验的内容、研究实验的方法及其理论依据, 分析实验应该测得哪些数据, 并根据所学理论知识预测实验数据的变化规律。

③ 认真对照网络在线课程上的实验装置, 熟悉设备装置的结构和流程, 仪表的种类、安装位置和使用方法。

④ 拟定实验方案, 掌握实验操作步骤、操作条件和设备的启动程序; 明确所测参数所用仪表、仪表盘上参数的单位及所测数据点如何分布等。

⑤ 在全面预习的基础上写出预习报告, 内容包括实验目的、实验原理、装置流程图、实验步骤和注意事项, 并列在实验室得到的全部原始数据、操作现象、观察项目的清单, 并画出便于记录的原始数据表格。

1.1.3.2 实验准备

① 进入实验室后, 小组成员根据自己预习报告的程度与实验室实验装置进行对照, 掌握设备的流程、结构、测量仪表的原理和操作注意事项, 熟悉实验操作步骤。对实验预期的结果、可能发生的故障和排除方法, 作一些初步的分析和估计。

② 实验开始前, 小组成员应进行适当的分工, 明确要求, 以便实验中协调工作。

③ 实验设备启动前需按教材进行检查, 看能否正常转动, 各设备、管路中的阀门是否开、闭正常; 流程是否设置合理; 调整设备进入启动状态, 然后再进行送电、送水或蒸汽等启动操作。

1.1.3.3 实验操作

① 设备的启动与操作, 应按教材说明的程序逐项进行, 对压力、流量、电压等变量的调节和控制要缓慢进行, 防止剧烈波动。

② 在实验过程中, 应全神贯注地精心操作, 详细观察所发生的各种现象, 例如物料的流动状态等, 这将有助于对过程的分析理解。出现不符合规律的现象时应注意观察, 并研

究和分析原因，不要轻易放过任何操作细节。

③ 操作过程中应随时观察仪表指示值的变动，随时调节，确保操作过程在稳定条件下进行。设备和仪表有异常情况时，应立刻按停车步骤，并报告指导教师，了解产生问题的原因。

④ 做完实验后，要对实验记录进行初步检查，查看实验记录的规律性，有无遗漏或记错，一经发现应及时补正。实验记录应请指导教师检查，同意后再停止实验。

⑤ 停车前应先关闭气源、水源、电源，然后切断总电源，并将各阀门恢复至实验前所处的位置（开或关）。

1.1.3.4 读数与记录

① 待设备各部分运转正常，操作稳定后才能读取数据。如何判断是否已达稳定？一般是两次测定的读数应相同或十分相近。对于稳定的操作过程，在改变操作条件后，一定要等待过程达到新的稳定状态，方可读取数据，以排除因仪表滞后导致读数不准确；对于连续的非稳态操作，要在实验前充分熟悉，并计划好记录的位置或时刻等，如过滤实验中滤液体积 V 和过滤时间 t 等。

② 同一操作条件下至少应读取两次数据，而且只有当两次读数相近时再改变操作条件。

③ 记录数据应是原始数据的直接读取，不要经过运算后再记录。例如秒表读数 1 分 38 秒，就应记为 1'38"，不要记为 98"。又如 U 形压差计两臂液柱高差，应分别读数记录，不应只读取或记录液柱的差值，或只读取一侧液柱的变化乘 2 倍。

④ 根据测量仪表的精度，正确读取有效数字，最后一位是带有读数误差的估计值，在测量时应进行估计，便于对系统进行合理的误差分析。例如 1/10℃ 分度的温度计，读数为 22.24℃ 时，其有效数字为四位，可靠值为三位。

碰到有些参数在读数的过程中波动较大时，首先要设法减少其波动，在波动不能完全消除的情况下，可取波动的最高点与最低点两个数据，然后取平均值；在波动不很大时可取一次波动的高低点之间的中间值作为估计值。

⑤ 对待实验数据应持科学态度，不要凭主观臆测修改记录数据，也不要随意舍弃数据。对可疑数据，除有明显原因，如读错、误记等情况使数据不正常可以舍弃之外，一般应在数据处理时再检查处理。

⑥ 记录数据应注意书写清楚，字迹工整。记错的数字应划掉重写，不要涂改，以免造成误差或看不清，特别要注意仪表上的计量单位，保存原始数据，以便检查核对。

1.1.3.5 编写实验报告

实验结束后应及时处理实验记录，并按实验要求认真完成报告的整理编写工作。实验报告是实验工作的总结，编写实验报告也是对学生工作能力的培养，因此要求学生独立完成。

实验报告应包括以下内容。

① 实验时间、报告人（专业和班级）、同组者姓名等。

② 实验名称。

③ 实验目的或任务。简明扼要地说明为什么要进行实验，实验要解决什么问题。

④ 实验的基本原理。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、公式及据此推算的重要结果。要求准确、充分。

⑤ 实验装置流程示意图。简要画出实验装置流程示意图，测试点的位置及主要设备、仪表的名称。标出设备、仪器仪表及调节阀等的标号，在流程图的下面写出图名及标号相对应的设备、仪表的名称。

⑥ 实验操作的主要步骤或注意事项。根据实际操作程序划分为几个步骤，并在前面加上序数词以供操作时参考；对于容易引起危险、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，应在注意事项中注明，以引起注意。

⑦ 原始记录表格。

⑧ 实验数据的整理。实验数据的整理就是把实验数据通过归纳、计算等方法整理出一定关系（或结论）的过程，包括实验数据的处理过程和实验结果的分析与讨论。数据处理过程一般以某一原始数据为例，把各项计算过程列出，以说明数据整理表中的结果是如何得到的。

⑨ 数据整理表或作图。数据整理是实验报告的重点内容之一，要求将实验数据整理、加工成图或表格的形式。数据整理应根据有效数字的运算规则进行。一般来讲，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，使其容易显示数据的变化规律及各参数的相关性。为了更直观地表达变量间的相互关系，有时采用作图法，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。

⑩ 实验结果的分析与讨论。实验结果的分析与讨论十分重要，是实验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。主要包含：

- 从理论上对实验所得结果进行分析和解释，说明其必然性；
- 对实验中的异常现象进行分析讨论，说明影响实验的主要因素；
- 分析误差的大小和原因，并指出改进的途径；
- 将实验结果与前人和他人的结果对比，说明结果的异同，并解释这种异同；
- 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等。

⑪ 思考题。对课本涉及的思考题作回答或者课上老师提出的问题作出回答。

实验报告应力求简明，分析说理清楚，文字书写工整，正确使用标点符号。图表要整齐地放在适当位置，报告要装订成册。报告应在指定时间交指导教师批阅。

1.2 实验研究方法

工程实验不同于基础课程的实验，后者采用的方法是理论的、严密的，研究的对象通常是简单的、基本的甚至是理想的，而工程实验面对的是复杂的实验问题和工程问题，对象不同，实验研究方法也不一样。工程实验的难度在于变量多、涉及的物料千变万化以及设备大小悬殊。化工原理在发展过程中形成的研究方法有直接实验法、因次分析法和数学模型法三种。

1.2.1 直接实验法

直接实验法是解决工程实际问题最基本的方法。一般是指对特定的工程问题，进行直接实验测定，所得到的结果也较为可靠，但它往往只用在条件相同的情况，具有较大的局限性。例如过滤某种物料时，已知滤浆的浓度，在某一恒压条件下，直接进行过滤实验，测定过滤时间和所得滤液量，并根据过滤时间和所得滤液量两者之间的关系，可以作出该物料在某一压力下的过滤曲线。如果滤浆浓度改变或过滤压力改变，所得过滤曲线也将随之改变。

对一个多变量影响的工程问题，为研究过程的规律，往往采用网格法规划实验，即依次固定其他变量，改变某一变量来测定目标值。例如影响流体阻力的主要因素有：管径 d 、管长 l 、平均流速 u 、流体密度 ρ 、流体黏度 μ 及管壁粗糙度 ϵ ，变量数为 6，如果每个变量改变条件次数为 10 次，则需要做 10^6 次实验，涉及变量越多，所需实验次数将会剧增，因此

实验需要在一定的理论指导下进行,以减少工作量,并使得到的结果具有一定的普遍性。

1.2.2 因次分析法

因次分析法所依据的基本理论是因次一致性原则和白金汉 (Buckingham) 的 π 定理。因次一致性原则是:凡是根据基本的物理规律导出的物理量方程,其中各项的因次必然相同。白金汉的 π 定理是:用因次分析所得到的独立的因次数群个数,等于变量数与基本因次数之差。

因次分析法是将多变量函数整理为简单的无因次数群的函数,然后通过实验归纳整理出算图或特征数关系式,从而大大减少实验工作量,同时也容易将实验结果应用到工程计算和设计中。

使用因次分析法时应明确因次与单位是不同的,是指物理量的种类,而单位是比较同一类别物理量大小所采用的标准,比如:力可以用牛顿、公斤、磅来表示,但单位的种类同属质量类。

因次有两类:一类是基本因次,它们是彼此独立的,不能相互导出;另一类是导出因次,由基本因次导出。例如在力学领域内基本因次有三个,通常为长度 $[L]$ 、时间 $[\theta]$ 、质量 $[M]$,其他力学物理量的因次都可以由这三个因次导出,并可写成幂指数乘积的形式。

现设某个物理量的导出因次为 Q : $[Q]=[M^a L^b \theta^c]$,式中 a 、 b 、 c 为常数。如果基本因次的指数均为零,这个物理量称为无因次数(或无因次数群),如反映流体流动状态的雷诺数就是无因次数群。

1.2.3 数学模型法

1.2.3.1 数学模型法主要步骤

数学模型法是在对研究的问题有充分认识的基础上,按以下主要步骤进行。

① 将复杂问题作合理又不过于失真的简化,提出一个近似实际过程又易于用数学方程式描述的物理模型;

② 对所得到的物理模型进行数学描述即建立数学模型,然后确定该方程的初始条件和边界条件,求解方程。

③ 通过实验对数学模型的合理性进行检验并测定模型参数。

1.2.3.2 数学模型法举例说明

以求取流体通过固定床的压降为例。固定床中颗粒间的空隙形成许多可供流体通过的细小通道,这些通道是曲折而又互相交联的,同时,这些通道的截面大小和形状又是很不规则的,流体通过如此复杂的通道时的压降自然很难进行理论计算,但我们可以用数学模型法来解决。

(1) 物理模型 流体通过颗粒层的流动多呈爬流状态,单位体积床层所具有的表面积对流动阻力有决定性作用。为解决压降问题,可在保证单位体积表面积相等的前提下,将颗粒层内的实际流动过程作如下大幅度的简化,使之可以用数学方程式加以描述。

将床层中的不规则通道简化成长度为 L_e 的一组平行细管,并规定:

① 细管的全部内表面积等于床层颗粒的全部表面积;

② 细管的全部流动空间等于颗粒床层的空隙容积。

根据上述假定,可求得这些虚拟细管的当量直径 d_e 。

$$d_e = \frac{4 \times \text{通道的截面积}}{\text{润湿周边}} \quad (1-1)$$

分子、分母同乘 L_e ，则有

$$d_e = \frac{4 \times \text{床层的流动空间}}{\text{细管的全部内表面积}} \quad (1-2)$$

以 1m^3 床层体积为基准，则床层的流动空间为 ϵ ，每 1m^3 床层的颗粒表面积即为床层比表面积 α_B ，因此

$$d_e = \frac{4\epsilon}{\alpha_B} = \frac{4\epsilon}{\alpha(1-\epsilon)} \quad (1-3)$$

式中 α_B ——床层比表面积， m^2/m^3 ；

α ——颗粒的比表面积， m^2/m^3 ；

ϵ ——床层空隙率。

按此简化的物理模型，流体通过固定床的压降即可等同于流体通过一组当量直径为 d_e 、长度为 L_e 的细管的压降。

(2) 数学模型 上述简化的物理模型，已将流体通过具有复杂几何边界床层的压降简化为通过均匀圆管的压降。对此，可用现有的理论作如下数学描述

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho} = \lambda \frac{L_e}{d_e} \times \frac{u_1^2}{2} \quad (1-4)$$

式中， u_1 为流体在细管内的流速。 u_1 可取实际填充床中颗粒空隙间的流速，它与空床流速（表观流速） u 的关系为

$$u = \epsilon u_1 \quad (1-5)$$

将式(1-3)、式(1-5)代入式(1-4)得

$$\frac{\Delta p}{L} = \left(\lambda \frac{L_e}{8L} \right) \frac{(1-\epsilon)\alpha}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (1-6)$$

细管长度 L_e 与实际长度 L 不等，但可以认为 L_e 与实际床层高度 L 成正比，即 $\frac{L_e}{L} = \text{常数}$ ，并将其并入摩擦系数中，于是

$$\frac{\Delta p}{L} = \lambda' \frac{(1-\epsilon)\alpha}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (1-7)$$

式中

$$\lambda' = \frac{\lambda}{8} \times \frac{L_e}{L}$$

式(1-7)即为流体通过固定床压降的数学模型，其中包括一个未知的待定系数 λ' 。 λ' 称为模型参数，就其物理意义而言，也可称为固定床的流动摩擦系数。

(3) 模型的检验和模型参数的估值 上述床层的简化处理只是一种假定，其有效性必须经过实验检验，其中的模型参数 λ' 亦必须由实验测定。

1.3 实验操作规程与安全

1.3.1 实验室安全操作规范

1.3.1.1 启动前的检查

设备启动前必须进行检查。

① 泵、风机、压缩机和电机等转动设备，用手使其运转，从感觉及声响上判别有无异常；检查润滑油位是否正常。

② 设备上各阀门的开、关状态。

③ 接入设备仪表的开、关状态。

④ 拥有的安全措施，如防护罩、绝缘垫、隔热层等。

1.3.1.2 仪器仪表

① 进入实验室后，首先必须清楚总电闸、分电闸所在位置，并能正确开启。

② 使用仪器时，应注意仪表的规格，所用规格应满足实验的要求（如交流或直流电表、规格等），在使用时还要注意读数是否有连续性等。

③ 实验时不要随意接触连接处；不得随意拉拖电线；电动机、搅拌器转动时，勿使衣服、头发和手等卷入。

④ 实验结束后，应先关闭仪器，再关闭总电闸。

⑤ 电器设备维修时应停电作业。

⑥ 对使用高压电、大电流的实验，至少要有 2~3 人进行操作。

1.3.1.3 高压钢瓶

① 领用高压钢瓶（尤其是可燃、有毒的气体）时应先通过感官和其他方法检查有无泄漏，可用皂液（氧气瓶不可用）等方法查漏。若有泄漏不得使用。若使用中发生泄漏，应先关闭阀门，再请专业人员处理。

② 开启或关闭气阀应该缓慢进行，以保护稳压阀和仪表。操作者应侧对气体出口处，在减压阀与钢瓶接口处无泄漏的情况下，应首先打开钢瓶阀，然后调节减压阀。关气时应先关闭钢瓶阀，放净减压阀中余气，再松开减压阀。

③ 钢瓶内气体不得用尽，压力达到 1.5MPa 时应调换新钢瓶。

④ 搬运或存放钢瓶时，瓶顶稳压阀应带保护帽，以防碰坏阀嘴。

⑤ 钢瓶放置应稳固，勿使之受震坠地。

⑥ 禁止把钢瓶放在热源附近，应距热源 80cm 以外，钢瓶温度不得超过 50℃。

⑦ 可燃性气体（如氢气、液化石油气等）钢瓶附近严禁明火。

1.3.1.4 化学药品

一切药品瓶上都应粘贴标签；使用化学药品后应盖好塞子并把药品放回原处；用牛角勺取固体药品或用量筒量取液体药品时，必须擦洗干净。在天平上称量固体药品时，应少取药品，并逐渐加到天平托盘上，以免浪费。特别注意以下几类化学药品的使用。

(1) 腐蚀性化学药品

① 强酸对皮肤有腐蚀作用，且会损坏衣物，应特别小心。稀释硫酸时不可把水注入酸中，只能在搅拌下将浓硫酸慢慢地倒入水中。

② 量取浓酸或类似液体时，只能用量筒，不能用移液管量取。

③ 盛酸瓶用完后，应立即用水将盛酸瓶冲洗干净。

④ 若酸溅到了身体的某个部位，应用大量水冲洗。

⑤ 浓氨水及浓硝酸启盖时应特别小心，最好用布或纸覆盖后再启盖。如在炎热的夏天必须先用冷水冷却。

⑥ 氢氧化钠、氢氧化钾、碳酸钠、碳酸钾等碱性试剂的储存，不可用玻璃塞，只能用橡皮塞或软木塞。

(2) 有毒化学药品

- ① 大多数有机化合物有毒且易燃、易爆、易挥发，所以要注意实验室的通风。
- ② 使用有毒的化学药品或在操作中可能产生有毒气体的实验，必须在通风橱内进行。
- ③ 金属汞是一种剧毒的物质，吸入蒸气会中毒。若长期吸入汞蒸气，可溶性的汞化合物会产生严重的急性中毒，故使用汞时不能把汞外溅。如在化工原理实验中，压差计中的汞不能有外溅，水银温度计使用时要小心，如若不小心外溅，要及时收集起来，实在无法收集的要用硫黄或者氯化铁溶液覆盖。

(3) 危险化学品

- ① 易燃和易爆的化学药品应储存在远离建筑物的地方，储存室内要备有灭火装置。
- ② 易燃液体在实验室内只能用瓶装且不得超过 1L，否则就应当用金属容器类盛装；使用时周围不得有明火。
- ③ 蒸馏易燃液体时，最好不要用火直接加热，装料不得超过 2/3，加热不可太快，避免局部过热。
- ④ 易燃物质如乙醇、苯、甲苯、乙醚、丙酮等在实验桌上临时使用或暂时放在桌上的，都不能超过 500mL，并且应远离电炉和一切热源。
- ⑤ 在明火附近不得用可燃性热溶剂来清洗仪器，应用没有自燃危险的清洗剂来洗涤，或移到没有明火的地方去洗涤。
- ⑥ 乙醚长期存放后，常会含过氧化物，故蒸馏乙醚时不能完全蒸干，应剩余 1/5 体积的乙醚，以避免爆炸。

1.3.1.5 火灾预防

- ① 在火焰、电加热器或其他热源附近严禁放置易燃物，实验完毕，立即关闭所有热源。
- ② 灼热的物品不能直接放在实验台上。倾倒或使用易燃物时，附近不得有明火。
- ③ 在蒸发、蒸馏或加热回流易燃液体过程中，实验人员绝对不许擅自离开。不许用明火直接加热，应根据沸点高低分别用水浴、沙浴或油浴加热，并注意室内通风。
- ④ 如不慎将易燃物质倾倒在实验室台或地面上，应迅速切断附近的电炉、喷灯等加热源，并用毛巾或抹布将流出的易燃液体吸干，室内立即通风、换气。身上或手上若粘上易燃物时，应立即清洗干净，不得靠近火源。

1.3.2 环保操作规范

- ① 处理废液、废物时，一般要戴上防护眼镜和橡皮手套，有时要穿防毒服装。处理有刺激性和挥发性废液时，要戴上防毒面具且在通风橱内进行。
- ② 接触过有毒物质的器皿、滤纸等要收集后集中处理。
- ③ 废液应根据物质性质的不同分别集中在废液桶内，贴上标签，以便处理。在集中废液时要注意，有些废液不可以混合，如过氧化物和有机物，盐酸等挥发性酸与不挥发性酸，铵盐及挥发性胺与碱等。
- ④ 实验室内严禁吃食品，离开实验室前要洗手，如面部或身体被污染必须清洗。
- ⑤ 实验室内必须采用通风、排毒、隔离等安全环保防范措施。

1.3.3 安全事故处理

在实验操作过程中，难免发生危险事故，如火灾、触电、中毒及其他意外事故，为了及时防止事故进一步扩大，在紧急情况下，应立即采取果断有效的措施。

① 首次进入实验室，应该首先了解医疗箱的存放位置，以便出现事故时容易找到。

② 划伤。如果是玻璃仪器划伤，应先取出玻璃碎片，然后涂抹红药水并进行包扎。

③ 烧伤。如果是碰到加热仪器烫伤，切勿用水冲洗，轻伤涂抹烫伤药膏，重伤涂药膏后应立即送医院治疗。如果是被酸或者碱灼伤，应立即用大量水冲洗，然后相应地用饱和碳酸氢钠溶液或2%乙酸溶液冲洗，最后再用水冲洗。严重时要消毒，拭干后涂以烫伤油膏。

④ 酸或碱溅入眼内。酸或碱溅入眼内，应立即用大量水冲洗（每个实验室都配有洗眼装置，要求学生能熟练操作），然后相应地用1%碳酸氢钠溶液或硼酸溶液冲洗，最后再用水冲洗。

⑤ 吸入刺激性或有毒气体。吸入刺激性或有毒气体应立即到室外呼吸新鲜空气。如有昏迷休克、虚脱或呼吸机能不全者，可人工呼吸，可能时给予氧气和浓茶、咖啡。

⑥ 毒物进入口内。

a. 腐蚀性毒物。对于强酸或强碱，先饮用大量水，然后相应服用氢氧化铝膏、鸡蛋白或醋、酸果汁，再给以牛奶灌注。

b. 刺激剂及神经性毒物。先给以适量牛奶或鸡蛋白使之立即冲淡缓和，再给以15%~25%硫酸铜溶液内服，并用手指深入咽喉部促使呕吐，然后立即送往医院。

⑦ 触电。

a. 应立即拉下电闸，切断电源，使触电者脱离电源，或戴上橡皮手套，穿上胶底鞋或踏干燥木板绝缘后再将触电者从电源上拉开。

b. 强触电者移至适当地方，解开衣服，必要时进行人工呼吸及心脏按摩，并立即找医生处理。

1.3.4 化工单元的安全操作

在化工原理实验中，涉及各种化工单元操作，如流体输送、过滤、传热、蒸馏、萃取、吸收和干燥等，这些单元操作中涉及加热、蒸发、蒸馏等操作，也涉及泵、换热器、塔等设备的操作，这些单元操作因其自身的特点或操作条件的影响存在不安全因素，为保证化工单元操作过程的安全性，学生应掌握其安全操作规程。

(1) 加热的安全操作 温度是化工过程中常见的控制指标之一。加热操作是提高温度的重要手段，温度过高或升温速度过快，容易损坏设备，严重的会引起反应失控，发生冲料、燃烧或爆炸，所以操作的关键是按生产规定严格地控制温度范围和升温速度。化工装置加热方法一般为蒸汽加热、热水加热、载热体加热以及电加热等。

从化工安全技术角度出发，加热过程的安全技术要点如下：

① 采用水蒸气或热水加热时，应定期检查蒸汽夹套和管道的耐压强度，并应装设压力计和安全阀，与水会发生反应的物料，不宜采用水蒸气或热水加热。

② 为了提高电感加热设备的安全可靠程度，可采用较大截面的导线，以防过负荷，采用防潮、防腐蚀、耐高温的绝缘材料，增加绝缘层厚度，增加绝缘保护层等措施。电感线圈应密封起来，防止与可燃物接触。

③ 电加热器的电炉丝与被加热设备的器壁之间应有良好的绝缘，以防短路引起电火花，将器壁击穿，使设备内的易燃物质或漏出的气体和蒸汽发生燃烧或爆炸。在加热或烘干易燃物质或受热会发出可燃气体或蒸汽的物质时，应采用封闭式电加热器。电加热器不能安放在易燃物质附近。导线的负荷能力应能满足加热器的要求，应采用插头向插座上连接方式，工

业上用的电加热器,在任何情况下都要设置单独的电路,并安装适合的熔断器。

④ 在采用直接用火加热工艺过程时,加热炉门与加热设备间应用砖墙完全隔离,避免厂房内存在明火。加热锅内残渣应经常清除以免局部过热引起锅底破裂。

(2) 蒸馏的安全操作

① 在常压蒸馏中应注意易燃液体的蒸馏热源不能采用明火,而采用水蒸气或过热水蒸气加热。蒸馏腐蚀性液体时,应防止塔壁、塔盘腐蚀,造成易燃液体或蒸汽逸出,遇明火或灼热的炉壁而产生燃烧。蒸馏自燃点很低的液体,应注意蒸馏系统的密闭,防止因高温泄漏遇空气自燃。对于高温的蒸馏系统,应防止冷却水突然漏入塔内,这将会使水迅速汽化,塔内压力突然升高而将物料冲出或发生爆炸。启动前后应将塔内和蒸汽管道的冷凝水放空,然后使用。在常压蒸馏过程中,还应注意防止管道、阀门被凝固点较高的物质凝结堵塞,导致塔内压力升高而引起爆炸。油焦和残渣应经常清除。冷凝系统的冷却水或冷冻盐水不能中断,否则未冷凝的易燃蒸气逸出使局部吸收系统温度增高,或窜出遇明火而引燃。

② 真空蒸馏(减压蒸馏)是一种比较安全的蒸馏方法。对于沸点较高、在高温下蒸馏时能引起分解、爆炸和聚合的物质,采用真空蒸馏较为合适。如硝基甲苯在高温下分解爆炸,苯乙烯在高温下易聚合,类似这类物质的蒸馏必须采用真空蒸馏的方法以降低流体的沸点,从而降低蒸馏的温度,确保安全。

1.4 实验数据记录及误差分析

实验中,由于实验方法和实验设备的不完善,周围环境的影响,以及人的观察力、测量仪器、测量方法等限制,实验观测值和真值之间总是存在一定的差异。人们常用绝对误差、相对误差或有效数字来说明一个观测值的准确度。

为了评定实验数据的精确性或误差,认清误差的来源及其影响,需要对实验的误差进行分析和讨论,由此可以判定哪些因素是影响实验精确度的主要方面,从而在以后实验中进一步改进实验方案,缩小实验观测值和真值之间的差值,提高实验的精确性。

1.4.1 误差的基本概念

测量就是用实验的方法,将被测量物理量与所选用作为标准的同类量进行比较,从而确定被测物理量的大小。

1.4.1.1 真值与平均值

真值是待测物理量客观存在的确定值,又叫理论值或定义值。严格来讲,由于测量仪器、测定方法、环境、人的观察力、测量的程序等都不可能是完善无缺的,故真值是无法测得的,是一个理想值。科学实验中真值的定义是:设在测量中观察的次数为无限多,则根据误差分布定律、正负误差出现的概率相等,故将各观测值相加,加以平均,在无系统误差情况下,可能获得极近于真值的数值。故“真值”在现实中是指观察次数无限多时,所求得平均值(或是写入文献手册中所谓的“公认值”)。然而对工程实验而言,观察的次数都是有限的,故用有限观察次数求出的平均值,只能是近似真值,或称为最佳值。一般我们称这一最佳值为平均值。常用的平均值有下列几种。

(1) 算术平均值 这种平均值最常用。凡测量值的分布服从正态分布时,用最小二乘法原理可以证明:在一组等精度的测量中,算术平均值为最佳值或最可信赖值。