

中等职业学校规划教材

HUAGONG DANYUAN
CAOZUO SHIYAN

化工单元操作实验

薛彩霞 主编 何小红 副主编



化学工业出版社

中等职业学校规划教材

HUAGONG DANYUAN
CAOZUO SHIYAN

化工单元操作实验

薛彩霞 主编 何小红 副主编



化学工业出版社

·北京·

化工单元操作实验是化工类各专业的必修实践性教学环节,本书按照中等职业学校化工类单元操作课程的要求进行编写,包括两部分内容:一是介绍实验的基础知识,包括化工实验室的安全知识、实验报告的写法、实验数据的记录与整理等,让学生在实验之前对工程实验有一个初步的认识;二是详细介绍了十二个实验内容,涵盖了流体流动与输送、传热、精馏、吸收、干燥等几个典型单元操作。每一个实验之后,通过“想一想、议一议”培养学生在操作过程中分析问题和解决问题的能力,给学生一定的空间,充分发挥他们的自主能动性,从而增强学习的兴趣。让学生充分体会从感性到理性,从认识到归纳的教学特点,获得更好的教学效果。

本书可作为中等职业学校化学工艺及相关专业的教材,也可作为相关企业培训的实验参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作实验/薛彩霞主编. —北京:化学工业出版社, 2010.5
中等职业学校规划教材
ISBN 978-7-122-08106-3

I. 化… II. 薛… III. 化工单元操作-实验-专业学校-教材 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 053991 号

责任编辑: 提 岩 蔡 毅
责任校对: 吴 静

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: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 4 字数 99 千字 2010 年 6 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: 10.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书为《化工单元操作》的实验教材，在编写过程中，按照化工专业教学标准，结合教学过程中的一些实际情况，突出以学生为主体，体现教学做一体化特色。

由于实验课程的特殊性，尽管各学校的实验设备都不尽相同，但原理都相同。针对这种情况，本书从实际出发，利用大多数学校现有的实验装置进行编写，使学生通过实验操作，熟悉基本的流程和操作步骤，让学生在参与实验的过程中产生互动，注重培养他们对理论知识的理解和应用能力，同时锻炼学生的动手能力及团队合作精神。

本书由陕西省石油化工学校薛彩霞任主编，何小红任副主编。其中，第二部分实验四由陕西工业技术学院张萍编写，其余由薛彩霞和何小红编写，全书由薛彩霞统稿。在编写过程中得到了陕西省石油化工学校文美乐、徐越、周瑞萍、闵鹏等各位老师的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 3 月

目 录

第一部分 实验基础知识	1
第一节 化工单元操作实验的目的与要求	1
一、化工单元操作实验的目的	1
二、化工单元操作实验的基本要求	1
第二节 化工单元操作实验的特点	2
第三节 实验误差与实验数据的记录	3
一、误差的概念	3
二、有效数字及运算规则	5
三、实验数据的记录	6
第四节 实验数据的处理与整理	7
一、实验数据的处理	7
二、实验数据的整理	8
第五节 实验报告的基本要求	9
第六节 化工单元操作实验的安全知识	10
一、化学药品	10
二、高压气瓶	10
三、安全用电	11
四、其他不安全因素	11
第二部分 实验内容	12
实验一 雷诺实验	12
实验二 流量测量与流量计的校核	15
实验三 柏努利方程实验	17
实验四 流体流动阻力的测定	19
实验五 离心泵特性曲线的测定	24
实验六 旋风分离器演示实验	26
实验七 过滤实验	28
实验八 列管换热器传热系数的测定	32
实验九 板式塔演示实验	36
实验十 精馏实验	39
实验十一 吸收实验	44
实验十二 干燥实验	50
附录	54
附录一 水的物理性质	54
附录二 干空气的物理性质 (101.3kPa)	56
附录三 常压下乙醇-水溶液平衡数据	57
参考文献	58

第一部分 实验基础知识



第一节 化工单元操作实验的目的与要求

一、化工单元操作实验的目的

化工单元操作是化工类各专业的一门专业基础课，与化工生产实际紧密相连，是一门实践性很强的课程。它不仅有完整的理论体系，而且有一些独特的实验方法。化工单元操作实验作为其理论教学中的一个重要的实践教学环节，是整个教学体系中的重要组成部分，是学生巩固理论知识，获取工程知识，培养团队协作能力的重要途径。因此，该实验教学环节在理论教学中的地位、作用及其意义是不容忽视的。

化工单元操作实验教学的目的包括：

- (1) 通过实验加深对理论知识的理解，验证理论教学中所学的一些基本理论和基本规律；
- (2) 了解常用设备的结构、特点和操作方法；
- (3) 了解化工生产中常用的测量仪器、仪表的结构、工作原理、安装和使用方法，培养从事化工生产基本操作的能力；
- (4) 通过由浅入深、由简到繁多次实践，了解化工单元操作的基本方法，培养学生从事化工生产过程基本参数测定的能力，养成实事求是、尊重科学、严肃认真的工作作风；
- (5) 通过测量和整理分析实验结果、编写实验报告，培养学生利用所学理论知识认识问题、发现问题、解决问题的独立工作能力和文字表达能力。

二、化工单元操作实验的基本要求

1. 课前预习

- (1) 结合课本所学的理论知识，认真阅读实验教材上的内容，掌握教学目标及基本理论知识。
- (2) 掌握实验过程中所需要的某些设备的操作规程和安全注意事项。
- (3) 根据实验要求设计原始数据记录表和实验操作步骤。
- (4) 对照实验装置流程图，熟悉实验的装置、流程、控制点及数据测量点。
- (5) 根据预习内容写出预习报告，包括：实验目的、实验原理、原始实验数据记录表格等。

2. 实验操作

- (1) 进入实验室前，经考核达到预习要求，才允许进行实验操作。
- (2) 实验过程中要认真操作。对设备、测量仪表，一定要按照操作规程操作。发现仪器、设备有故障，要立即向老师报告。
- (3) 实验现象的观察一定要仔细，实验数据的测定要准确，数据记录要详尽、清楚，要

将测得的实验数据和观察到的实验现象及时记录下来，切忌弄虚作假。

(4) 要求学生在实验过程中勤动脑、勤思考，要善于发现问题、分析问题并解决问题。

(5) 实验结束后，将实验设备、仪器、仪表恢复原状，清理现场。然后将所记录的数据及现象交给老师审阅，经老师检查批准后方可离开。

3. 编写实验报告

实验报告是以实验数据为基础，将实验过程、现象、结果以文字的形式整理的一份技术文件。通常情况下，实验报告应包括以下几个方面：

- (1) 实验目的；
- (2) 实验原理；
- (3) 实验装置及流程；
- (4) 操作步骤；
- (5) 数据记录或实验结果描述；
- (6) 实验结果分析与讨论。



第二节

化工单元操作实验的特点

化工单元操作实验属于工程实验范畴，它不同于基础课程的实验。与一般化学实验相比，不同之处在于它具有工程特点。每个实验项目都相当于化工生产中的一个操作单元，通过实验能建立起一定的工程概念。同时，随着实验课的进行，会遇到大量的工程实际问题，对理工科学生来说，可以在实验过程中更实际、更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段，可以发现复杂的真实设备与工艺过程同描述这一过程的数学模型之间的关系，也可以认识到对于一个看起来似乎很复杂的过程，一经了解，可以只用最基本的原理来解释和描述。因此，它要求学生运用已学过的知识验证一些结论、结果和现象等，或综合运用已学过的理论知识设计实验或进行综合性的实验，目的是训练学生理论知识的运用能力、实验操作能力、仪器仪表的使用能力、实验数据的处理和分析能力。在实验课的全过程中，学生在思维方法和创新能力方面都将得到培养和提高。

具体来说，工程实验与基础课程实验的区别主要体现在以下几方面。

(1) 工程实验面对的常常是复杂的、有普遍实际意义的工程问题，学生所接触的是化工生产过程中将会遇到的一台台的设备、仪器、仪表等；而基础课程实验所面对的常常是简单的、基本的有的甚至是理想的，与生产实际有较大距离的基础科学问题，学生所接触的大多是一些玻璃仪器、器皿等。

(2) 基础课程采用的方法常常是经验的、理论的、严密的和精细的，通常以基础科学的基本原理、基本定理和定律为依据；而工程实验所采用的方法常常是模拟的、抽象的、千变万化的，通常以数学模型法和因次分析法为依据。

(3) 基础课程实验的主要目的在于验证已学的理论，内容较为单一；而工程实验的主要目的则在于学习分析和解决生产实际问题的方法和手段，实验内容复杂，常常涉及机械设备、数据测量、分析控制、操作控制等各方面的知识，综合要求较高。

(4) 基础课程所采用的实验装置，通常都是精密的，与实际生产装置完全不同的小型实验仪器及设备；而工程实验装置所采用的基本都是模拟的，与生产实际装置相关，有一定规模的专用实验设备。

(5) 基础课程实验的内容简单、目的明确,实验占用的时间少,需要记录、分析及处理的数据也少,对实验结果影响的因素也不多,且对实验装置的流程及操作无过高要求;而工程实验涉及的范围广、内容复杂、实验过程中的变化因素多,所以占用时间长、需记录整理的数据量大,对实验结果的影响因素复杂。工程实验不仅与实验方法、使用的物料有关,而且与实验装置的结构、流程、操作程序及控制条件等因素均有关系。

通过化工单元操作实验,不仅要学习一般工程实验的基本方法,学会处理一般的工程问题,更重要的是要学会化工单元过程的基本操作,了解各种操作参数变化对化工过程的影响,熟悉化工单元操作中各种非正常操作产生的原因及处理方法,培养学生分析问题和解决问题的能力。



第三节

实验误差与实验数据的记录

一、误差的概念

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,以及人对实验现象的判断、测量仪器、测量方法等原因,使实验测量值与真值之间总是存在一定的差异,而测量本身几次测取数据也可能不完全一致,在数值上的这种差异即为误差。为了提高实验的精度,减少实验测量值与真值之间的差值,需要对实验误差进行分析、判断。

1. 真值与平均值

真值是一个理想的概念,但对某一物理量进行无限多次测量,倘若不存在系统误差的情况下,它们的平均值非常接近于这一物理量的真值。在实验中,一个待测物理量的真值通常是客观存在但无法知道的,由于实验误差的难以避免,故真值一般不能直接观测。因此,在实验科学中定义:无限多次的观测值的平均值为真值。由于实验工作中观测的次数总是有限的,由此得出的平均值只能近似于真值,故这个平均值有时也称为最佳值。

化工单元操作实验中,处理实验数据常用的平均值有下列几种。

设 x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_n 为各次的测量值, n 代表测定次数,则:

(1) 算术平均值
$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

(2) 均方根平均值
$$x_m = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}}$$

(3) 几何平均值
$$x_m = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n}$$

(4) 对数平均值
$$\bar{x} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}}$$

使用不同的方法求取的平均值,并不都是最佳值,平均值计算方法的选择,取决于一组观测值的分布类型。一般情况下,观测值的分布属于正态类型,即正态分布,这种类型的最佳值是算术平均值。因此,选用算术平均值作为最佳值的场合是最为广泛的。

2. 误差的来源与分类

(1) 误差的来源 误差的来源大致有以下四种。

① 仪器误差源。在实验研究中,需要测定某些值如温度、流量、压力等,要想使得这些测量值准确,所用测量仪表的准确性无疑是第一位的。但是测量仪表本身总是有一定的误差,并且当它们经过长期使用后,会造成一定的磨损,性能发生变化,也会产生较大的误

差。因此，仪表本身的误差就必然会对实验测量值引入相当的误差。

② 环境误差源。实验测定时，由于各种环境因素的变化，如气温、气压、湿度、含尘量、震动、照明度等都有可能对测量仪器或被测对象产生一定的影响，这种影响必然使测量结果引入误差。

③ 方法误差源。指实验方法不合理或测定值的数据处理不合理而对实验结果造成的误差。实验方法不合理包括：被测量的实验测定方法不妥当；选择的测量仪表或化学分析试剂不合格；实验操作不正确，实验条件设计不佳等。数据方法处理不正确包括：计算方法选择不当或推导不正确；计算工具不理想；计算方法欠佳等。

④ 主观误差源。实验测定者主观上的因素也会成为误差的来源。如习惯性偏高或偏低；习惯性或不经心的动作迟缓；情绪不佳或走神；人为操作错误或数据记录错误。最严重的是对待科学实验不负责任而造成的重大失误。

(2) 误差的分类 实验误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。

① 系统误差。凡实验测定值全部偏高或全部偏低，或按某一确定的趋势变化的误差，称为系统误差。系统误差一般来自仪器误差源或方法误差源，它是先于实验存在的固有误差，因此，无法采用实验的方法加以消除。除了方向与数值均已确定的系统误差可在数值处理时加以弥补外，一般的系统误差均难以估计，因此，在实验中应尽量消除系统误差。

② 随机误差。实验时，当各点测定的误差或在同一条件下多次测定的误差变得时大时小、时正时负、无法预见时，这种误差称为随机误差。由于随机误差存在统计规律，所以它可以用统计的方法加以表达和计算。

③ 粗大误差。粗大误差又称疏忽误差。这是由于测试操作人员不慎造成的一种误差，其大小远远超过系统误差和随机误差范围，严重歪曲测量结果，在实验数据处理时应该舍去。造成粗大误差的原因往往是操作人员对仪器不熟悉，因而使用不当。工作条件突然变化也可能导致粗大误差。

(3) 误差的表达 误差的表达为：绝对误差、相对误差和引用误差。

① 绝对误差。绝对误差是指测量值与真值之差的绝对值，可以表示为：

$$\Delta = |X_{\text{测}} - X_{\text{真}}| \quad (1-1)$$

式中 Δ ——绝对误差；

$X_{\text{测}}$ ——测量值，是检测仪表的指示值；

$X_{\text{真}}$ ——真值，被测量应有的数值。

真值是某值的客观实际值。一般来说，真值是未知的，因此，误差的确切值也是未知的。有些值在确定的条件下成为真值或在相对意义上来说是真值。

② 相对误差。绝对误差与真值之比称为相对误差，通常用百分数表示。即

$$\epsilon = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \times 100\% = \frac{\Delta}{X_{\text{真}}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 ϵ ——相对误差。

当绝对误差较小时，测量值接近于真值，则：

$$\epsilon = \frac{\text{绝对误差}}{\text{测量值}} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差常用百分数来表示。例如在两次长度测量中，第一次被测物长度的真值是 1m，测量值为 1.01m，则绝对误差为 $\Delta = 1.01 - 1 = 0.01\text{m}$ ，相对误差为 $\epsilon = \frac{0.01}{1} \times 100\% = 1\%$ ；第二次被测物长度的真值是 100m，测量值为 100.01m，则绝对误差为 $\Delta = 100.01 - 100 = 0.01\text{m}$ ，相对误差为 $\epsilon = \frac{0.01}{100} \times 100\% = 0.01\%$ 。由此可见，两次测量若以绝对误差比较，则

完全相同；而以相对误差比较，第二次仅是第一次的 1%。可见，第二次测量精度是第一次的 100 倍。

③ 引用误差。引用误差是绝对误差与仪表量程的百分比，而最大引用误差是量程范围内各点中最大绝对误差的值与仪表量程的百分比。

$$\text{引用误差} = \frac{\text{最大绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% \quad (1-4)$$

平时所用的仪表的精度等级为 0.1 级、0.5 级、2.5 级等，如 0.5 级即为：

$$\frac{\text{最大绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% = 0.5\%$$

因此，要估计 0.5 级精度仪表最大可能读数误差即为：

$$\text{最大绝对误差} = \text{仪表量程} \times 0.5\%$$

在仪表实际使用时，在刻度点附近的示值误差的精度并不一样，若设 M 为仪表的满量程值， p 为仪表的精度， m 为测量点的刻度值， ϵ 为相对误差，则有：

$$\epsilon = \frac{Mp}{m} \quad (1-5)$$

可见，当 $m=M$ 时， $\epsilon=p$ ，即仪表满量程时的相对误差即为仪表的精度，即引用误差。当 $m<M$ 时，相对误差增大，示值精度降低。综合仪表使用的精确性和安全性，一般应尽可能使测量值位于仪表满刻度的 $2/3$ 为好。

3. 误差分析和处理

实验过程误差的存在是不可避免的，但要使测量结果正确，应尽量减少误差的影响。首先要分析出现误差的原因，然后逐一克服，就能在一定程度上减少误差。一般有如下处理方法。

(1) 从引起误差的根源入手进行分析和处理，这是从根本上消除误差的方法。

测量人员首先应熟悉测量设备，尽量选用仪表元件的质量和装配工艺符合要求的仪表；尽量使测量的环境条件充分满足仪表的使用条件，认真操作，严格调试，采用合理的测试方法等。

(2) 在测量结果中加入修正值进行处理。

由于仪器、仪表结构本身固有的缺陷，造成一定的误差存在。这就需预先用标准仪器确定测量仪表的修正值（修正值等于修正的测量结果的绝对误差，但正、负号相反），将实际测量得的值加上相应的修正值，即可得到正确的测量结果，对各种外界影响因素（温度、湿度、频率、电磁场、重力加速度以及其他因素）力求确定其修正公式、修正曲线和修正表格，以便修正测量结果。

(3) 测量过程中选择适当的测量方法，使误差抵消而不至于带入测量结果中。如：测取数值时，要在仪表显示数值相对稳定后，读取结果。

(4) 认真分析测取的实验结果，对严重不合理和明显误差的结果，应舍去。

二、有效数字及运算规则

1. 有效数字

在实验中，无论是直接测量的数据还是运算结果，到底用几位数字表示，这是一件很重要的事。在整理实验数据时，有人认为一个数值中小数点后面的位数越多越准确，或者计算结果保留的位数越多越精确可靠。实际上，这两种想法都是错误的。因为其一，数据中小数点的位置在前或在后是与测量的单位有关，而与测量的准确度无关。例如：某一长度的数据为 21.9cm 和 0.219m，其准确度是完全相同的，但小数点的位值是不同的。其二，在实验测量中所用的仪器仪表只能做到一定的精确度，因此，测量或运算的结果不可能也不应该超

越仪表所允许的精度范围,如上面的长度测量中的 21.9cm,标尺的最小分度为 cm,其读数可以达到 0.1cm (估计值),故取三位有效数字。

那么,如何确定有效数字?

(1) 从左边第一个非零的数字起,至末尾一位数字为止的所有数字,都叫做这个数的有效数字。

如: 0.187, 0.0187; 近似值左边为零,不是有效数字,故有效数字为三位。

又如: 187000, 1870; 它们后面的零是作为定位用的,故有效数字也为三位。

(2) 小数点右边末尾的零为有效数字。

如: 1.60, 3.00 的有效数字为三位。

必须注意: 1.60 与 1.6 是不等的值。1.60 表示大于或等于 1.595 而小于 1.605; 1.6 表示大于或等于 1.55 而小于 1.65。由此可以看出,1.60 比 1.6 的准确度高,故 1.60 后面的“0”不能随意舍掉。

(3) 科学记数法。当数字过大或过小时,可以写成 $A \times 10^n$ 或 $A \times 10^{-n}$, A 表示有效数字, n 代表次方。

如: 187000 可写成 1.87×10^5 ; 0.0000187 可写成 1.87×10^{-5} 。

2. 有效数字的运算规则

(1) 当有效数字确定后,其余数字一律舍去。舍弃的办法可按四舍五入或偶舍奇入的原则。一般采用偶舍奇入的原则,对于拉匀所统计的数据更有利。

如: 0.235, 1.34, 1.459, 1.368, 1.247

$0.235 + 1.34 + 1.459 + 1.368 + 1.247 = 5.649$

若以准确度最差的 1.34 为准,按四舍五入的原则,上组数值为 0.24、1.34、1.46、1.37、1.25,则 $0.24 + 1.34 + 1.46 + 1.37 + 1.25 = 5.66$ 。这样误差更大了。

按偶舍奇入的原则,上组数值为 0.24、1.34、1.46、1.36、1.25,则 $0.24 + 1.34 + 1.46 + 1.36 + 1.25 = 5.65$ 。由于有舍有入,基本均匀,使误差不扩大。

(2) 加减计算中,各数值所保留的小数点的位数,应与其中各数小数点后位数最少的相同。

如: $13.65 + 0.0065 + 1.627$; 应改为 $13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$

(3) 在乘除计算中,各数值保留的位数,以有效数字最少为标准,所得积或商的准确度,不大于精度最小者。

如: $0.0125 \times 20.02 \times 1.0562$ 中最少有效数字为三位,故应改为 $0.0125 \times 20.0 \times 1.06 = 0.265$

(4) 乘方、开方运算时,有效数字的位数应与其底数相同。

(5) 取对数时,对数的有效数字的位数应与其真数相同。

特别指出:有效数字及其运算规则讲的是实验数据的记录和运算规则,一般指的是近似数的运算规则,因此,它不能代替绝对(或相对)误差的计算。

三、实验数据的记录

1. 数据的正确记录

实验测量数据记录的好坏,直接影响到数据处理结果的正确与否,正确记录实验数据应注意以下几点。

(1) 实验过程中,数据应记录在预习时所拟定的表格上,表格要求设计合理,项目齐全,绝不允许随便拿一个纸片作记录,更不允许只凭脑子记忆。实验数据记录是实验过程的第一手资料,每个学生都应该妥善保管。

(2) 对于稳定过程,一定要等到操作稳定后才能开始记录数据。操作条件改变后,不能马上读取并记录数据,这是因为稳定过程需要一定的时间,而仪器仪表的读数通常都有滞后现象的缘故,不允许条件一改变马上就读取实验数据。

(3) 同一条件下,至少要读取两次数据(不稳定过程除外),而且只有当两次数据接近时才能改变操作条件。当两次读取的数据相差很大时,应及时检查原因,并做好记录。

(4) 数据记录表格上所注明的各个单位必须与实验测取数据的单位(仪器仪表上所标明的单位)一致,这样才能保证所记录的数据是直接读取的数据,而不是计算后所得到的数据。

(5) 所记录的数据必须真实地反映仪器仪表的精度。如温度计的最小分度为 1°C ,这种温度计只能读取到 0.1°C ,如可以读取 19.8°C ,绝不能读取 19.82°C 。

(6) 实验过程中不能随便舍弃可疑实验数据,一般应在数据处理时再根据给定的误差范围进行筛选。

(7) 实验结束时,应对数据的规律进行初步检查,如发现有明显错误或漏记的地方,则需要及时查找原因,必要时应重做实验,绝不允许在数据处理时随意增减数据。

2. 数据的合理取舍

在记录实验数据和进行数据处理时,用以测定数据的各种仪器仪表均有一定的精度,如测量长度用的刻度尺,如果是以 mm 为单位的,当有一读数为 26.5mm 时,说明最后一位数字 5 是估计出来的,如果读数为 26.52mm ,则第四位数字上的 2 是毫无意义的,也是无法读出来的。

有效数字的读取原则是:仪器仪表上刻度明确的基准单位以上的位数均为直接可读数字,当然是有效数字,两刻度间的第一位估计值是估读数字,也可以看做是有效数字,第二位和第三位以后的估计值,则是无效数字,因为它们是没有办法估计的。

3. 数据记录的完整性

根据实验内容,对于影响实验结果或者数据整理过程中所必需的数据,都必须在实验过程中进行测取和记录。实验数据记录通常包括:实验环境的有关数据、实验设备的有关数据和操作的有关数据三个方面的内容。以离心泵特性曲线测定为例来加以说明:

(1) 与环境有关的数据,如水温、气压等;

(2) 与设备有关的数据,如离心泵型号,进、出口管的直径,两测压力截面间垂直距离等。

(3) 与实验操作有关的数据,如离心泵的流量、泵进口真空表读数、出口压力表读数、功率表的读数等。

4. 其他

原始数据记录过程中,还应做到以下几点:

(1) 实事求是地记录实际测量的每一个实验数据;

(2) 记录数据尽量用表格,记录的数据整齐准确,小数点位对齐;

(3) 位数多的数值写科学记数法,如 0.000388 可以记录为 3.88×10^{-4} 。



第四节

实验数据的处理与整理

一、实验数据的处理

实验数据的处理是工程技术工作的一项基本技能,实验过程中所获取的大量原始数据,

必须经过进一步的数学处理,才能为实验数据的整理做好准备。实验数据处理得当,会使实验结果的结论正确、清晰,反之,则会使实验工作前功尽弃或者得到模糊的甚至是错误的结论。通常,处理实验数据的基本要求如下。

(1) 对所记录的原始数据只可进行处理,绝不可进行修改。

(2) 处理原始数据时,要先进行审查,筛选可靠的数据,舍弃不可靠或不稳定的数据。

(3) 在同一条件下,若记录有几个稍有波动的数据,则应先取其平均值,再加以处理,不必逐个处理后再取其平均值,这样可以节约时间。

(4) 数据处理时应根据有效数字的运算规则,舍弃一些没有意义的数字。一个数据的精度是由测量仪器、仪表本身的精度所决定的,绝不会因为计算时位数增加而提高。

(5) 数据处理时,如果过程比较复杂,实验数据又多,一般采用列表处理法为宜,同时将同一项目一次处理,这种处理方法不仅简洁、清晰,而且节约时间。采用列表处理时,必须以其中一组数据为例写出计算过程,以便检查。

(6) 数据处理时还可以采用常数归纳法。例如,雷诺实验中,要计算圆形直管中由于流速改变后的雷诺数时,由于 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$, 在实验过程中, d 、 μ 、 ρ 的值均可看作是不变的,可以当作常数来处理,故 $Re = \frac{du\rho}{\mu} = Au$ 。计算时,先将 A 求出,然后根据流速 u 的变化来计算相应的 Re 的值,可以大大提高计算速度。

二、实验数据的整理

在这个实验过程中,实验数据的整理是一个重要的环节。它的目的是将实验中所获得的大量数据整理成各变量之间的关系,用最合适的方法表示出来,使人们能清楚地观察到各变量之间的定量关系,进一步分析实验现象,得出事物的客观规律,从而指导生产与实践。

实验数据的整理贯穿于整个实验过程中。在设计实验方案时,实验数据整理方法的选择是一项重要的工作,它直接影响实验结果的质量和实验工作量的大小,因此,它在整个实验过程中的作用不容忽视。

实验数据的整理通常有以下三种方法。

1. 列表表示法

将实验测定的一组数据,或根据测量值计算得到的一组数据,将其自变量和因变量以一定的顺序一一对应列出数据表。该实验数据表必须在实验前设计好,应该简明扼要,能反映变量之间的依从关系。例如:雷诺实验测得一组数据,以流速为自变量,以雷诺数为因变量列成数据表,可反映流体流动形态变化的规律。

将实验数据制成表格,不仅反映了各变量之间的对应关系,同时也能反映出各变量之间的变化规律。

2. 图形表示法

根据解析几何原理,可将实验数据的函数关系,整理成图形表示出来。这种表示法简明、直观,便于比较,容易从曲线直接看出函数关系的变化规律。

使用图形表示法时,应注意以下几个问题。

(1) 坐标纸的选择。常用的坐标纸有几种,如普通坐标纸或直角坐标纸、双对数坐标纸、单对数坐标纸等,对此应加以选择。通常将图形作成直线,因为直线容易制作,使用起来比较方便。通常,线性函数采用直角坐标,幂函数采用对数坐标,指数函数采用半对数坐标。若自变量和因变量两者的最大值和最小值之间的数量级相差较大时,可采用对数坐标或半对数坐标。化工单元操作实验中用得最多的是直角坐标纸和双对数坐标纸。

(2) 坐标的分度。分度是指沿 X 轴和 Y 轴规定每条坐标线所代表数值的大小。分度的选择,要反映出实验数据的有效数字的位数,即与被标数值一致,方便易读。坐标分度值不一定从零开始,使图形占满全幅坐标纸较为合理。

(3) 图形结构。常选横轴(X轴)为自变量,纵轴(Y轴)为因变量。在两轴侧要标明变量名称(或符号)和计量单位。

(4) 若在同一张坐标纸上,同时标绘几组测量值,则各点要用不同符号(如*、○、△等)以示区别。

(5) 由点连成曲线时,应做到曲线细实、光滑匀整,不应有含混不清点、不连续点或其他奇异点,并使曲线两侧的点数大致相等。

(6) 要在图形下面或图左上角注明图的名称、使用条件等。

3. 函数法

函数法就是将实验数据整理成经验公式的方法。在化工单元操作中,把理论上分析困难、影响复杂的物理量组合成一个数群(称为特征数),再将有关特征数关联成经验公式,即特征数关联式,用以描述过程或现象的自变量和因变量之间关系的方程式,这对于广泛应用计算机的今天,是十分必要的。



第五节 实验报告的基本要求

实验报告是对所做实验的总结,是工程技术文件之一。编写实验报告是工程技术人员的基本技能之一,因此,要求每一位参加实验的同学都能够根据自己的实验过程独立地完成实验报告。

一份合格的实验报告应该是:数据完整,结论明确,有分析、有讨论,所得公式、图形有确定的使用条件;文字简练、通顺,字迹工整;图、表规范。实验报告的格式不要求一致,但所有的实验报告都应包括以下内容。

- (1) 实验名称。
- (2) 实验报告编写人及实验同组人。
- (3) 实验日期及实验条件(水温、气温、大气压等)。
- (4) 实验目的。
- (5) 实验原理。
- (6) 实验装置及流程(根据所使用实验装置的实际流程绘制)。
- (7) 操作步骤。

(8) 实验数据记录。包括基本实验数据、原始实验数据和通过查取有关手册、图标等所获得的数据记录。

(9) 实验数据整理。对实验过程中所记录的数据按要求进行整理。数据整理过程中要注意以下几点:

- ① 计算过程中凡是从文献、手册中引用的数据均要注明来源;
- ② 简化公式要写出导出过程;
- ③ 要以一组数据的计算过程作为计算示例。

(10) 实验结果。根据实验任务和实验所整理的各种数据,明确得出本次实验的结果及结论,并视具体情况将结果用列表法、图示法等表示出来。

(11) 实验结果讨论与分析。运用所学的理论知识,对实验结果的准确性、所产生误差

的原因及大小进行全面的讨论与分析。另外,对实验方法、实验步骤、实验装置等有不同意见和建议均可以列入此项内容中。

实验报告中所绘图表应规范,严格按照化工制图的要求,所有附图、附表都应在适当的位置。实验报告完成后,在规定时间内交给指导老师。



第六节

化工单元操作实验的安全知识

化工单元操作实验属于工程实验范畴,与化工生产过程十分接近,在实验室里有高温、高压设备,有易燃、易爆、有毒和具有腐蚀性的物料等。为确保实验的正常进行及设备及人身的安全,凡进入实验室的工作人员和学生都必须具备以下基本的安全知识。

一、化学药品

化工单元操作实验室中所接触的化学药品比化学实验室要少得多,往往不易引起学生的重视,这是极其错误的观念。无论什么时候、什么情况下使用化学药品,都必须了解药品的性能,如毒性、腐蚀性、易燃易爆性等,并要搞清楚每一种药品的使用方法及使用过程中的防护措施。例如:

酸、碱均刺激皮肤,有腐蚀性,易造成化学灼伤,吸入强酸烟雾还会严重刺激呼吸道,使用时应倍加小心。

丙酮、乙醇都是无色并具有香味的液体,沸点低,易挥发、易燃烧。因此在实验室要严禁明火。

汞是一种累积性毒物,进入人体后不易排除,积累多了就会中毒。在实验室里,当操作不慎时,压差计中的汞很容易被冲洒出来,因此,要求开关阀门要缓慢,防止管道中被测流体压强的突然增大而将汞冲出。一旦不小心将汞冲出来,一定要认真地、尽一切努力地将它收集起来,对于实在无法收集的细粒,要用硫黄粉或氯化铁溶液覆盖,千万不要用扫帚一扫或用水一冲了事的自欺欺人的办法来处理。

二、高压气瓶

化工单元操作实验室中要用到高压气瓶(俗称钢瓶),它是一种储存各种压缩气体或液化气的高压容器,一般容积为40~60L,最高工作压力为150MPa,最低也在6MPa以上。由于气瓶压力很高,加之所储存气体一般具有有毒、易燃、易爆等特性,因此,使用时必须严格遵守国家颁布的《气瓶安全检查规程》规定中的有关条例。下面介绍使用过程中的几点要求。

(1) 气瓶发生爆炸除了充装过量外,还可能由于撞击、坠落等原因所造成,因此搬运应有专用小车,轻装轻卸,严禁抛、甩、滚、撞等。

(2) 操作要正确,开阀宜缓,必须经减压阀,不得直接放气。减压阀有倒、顺螺纹两种,必须正确使用。

(3) 在冬天或瓶内压力低时,出气缓慢,可用热水加热瓶身,严禁用明火烘烤。气瓶不得靠近明火、热源,一般规定气瓶距明火、热源应在10m以上,如有困难,应有完全隔热措施,但不得少于5m。

(4) 气瓶用完关闭阀门时,应用手旋紧,不得用工具硬扳,以防损坏阀门。

(5) 气瓶必须专瓶使用,不得擅自改装。要保证气瓶漆色完整、清晰。

(6) 瓶内气体不得用尽，一般应保证 196kPa 以上的余压，以备充气单位检验取样所需，防止气体装错。

(7) 使用氧气钢瓶时，严禁沾染油污。充气管道以及操作者手、工作服等都要进行检查，以防万一氧气冲出，造成燃烧或爆炸事故。

(8) 气瓶的安全附件包括安全帽、压力表、防震圈等均需要经常检查，保证完好合用。

(9) 气瓶必须与爆炸物品、氧化剂、易燃物、自燃物及腐蚀物品隔离，在运输时，各类气瓶应根据其性质合理分装。

(10) 气瓶存放应保持直立，用钢架固定，亦可卧放，但瓶口应朝一个方向并用三角木卡牢，高度不超过五层，严禁气瓶倒置。

(11) 气瓶必须进行定期检验。

三、安全用电

化工单元操作实验中用到的电器较多，某些设备（如精馏装置）的电负荷还比较高。如果对电器设备安装不妥、使用不当、管理不善等，都会造成用电事故。电气事故发生时没有任何预兆，如果实验室里有一些不安全的因素，更容易导致电气事故的发生。因此，在实验操作之前，一定要多检查，要以预防为主；其次，使用过程中一定要严格遵守操作规程，确保用电安全。

四、其他不安全因素

除了以上介绍的几种不安全因素外，化工单元操作实验室中还存在着其他的一些不安全因素，如机械创伤、烫伤、摔伤、扭伤等，所以，学生在进入实验室之前必须掌握一些必需的安全知识，以防意外事故的发生。

第二部分 实验内容



实验一

雷诺实验

一、教学目标

1. 观察流体层流、湍流的流动形态及由层流向湍流的过渡状态，增加对流体流动形态的感性认识。
2. 观察流体在圆管内流动时流速的分布。
3. 测定临界雷诺数。

二、能力目标

1. 掌握流体的流动形态。
2. 掌握流体在圆管内流速的分布。
3. 学习临界雷诺数的计算方法。
4. 通过现场动手操作，锻炼学生实际动手能力。
5. 通过理论与实际相结合，加深对理论知识的理解。

三、理论引导

流体在圆管内作层流流动时，质点是沿着与管中心线平行的方向向前运动；湍流时，质点除了沿着与管中心线平行的方向向前运动外，还有径向的复杂运动，但流体主体仍向前运动。

雷诺数 Re 是用来判别流体流动形态的特征数，流体从层流到湍流有一个过渡区域，我们把由层流刚刚进入过渡区域或者由过渡区域刚刚进入湍流的状态称为临界状态，对应的雷诺数称为临界雷诺数。本实验通过改变流体在管内的流动速率来观察流体流动形态并测定相应状态下的临界雷诺数。

实验证明，流体的流动形态受到流速 u 、管径 d 、流体的密度 ρ 和黏度 μ 的影响，在一定温度下，在一定的圆管内流动的流体，其雷诺数只与流速 u 有关。即：

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = Au$$

其中：

$$A = \frac{d\rho}{\mu} \quad (2-1)$$

当 $Re \leq 2000$ 时，层流；当 $Re \geq 4000$ 时，湍流；当 $2000 < Re < 4000$ 时，过渡状态。

四、实验装置及流程

实验管道有效长度 $L=600\text{mm}$ ，外径 $D_o=30\text{mm}$ ，内径 $D_i=23.5\text{mm}$ 。

实验装置如图 2-1 所示，通过调整水箱 5 的上、下水阀门和管路上的出口阀门 7，使得水箱内的水面保持稳定，确保流体做稳定流动。通过小瓶内的红色液体作示踪液来观察流体