



高等学校化学实验
系列教材

主编 董文生 杨荣榛

化工基础与 应用化学实验

高等教育出版社



高等学校化学实验
系列教材

HUAGONGJICHU YU
YINGYONGHUAXUE SHIYAN

化工基础与 应用化学实验

主 编 董文生 杨荣榛

副主编 张国防 刘春玲



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是为高等学校化学和应用化学等专业编写的化工基础与应用化学实验教材,内容包括化工基础与应用化学实验基础知识、化工基础实验、综合应用研究开发实验、化工参数测量及仪器仪表、实验数据处理与实验设计方法和附录。

本书可作为高等学校化学类专业的化工基础与应用化学实验教材,也可作为化学、化工及相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工基础与应用化学实验/董文生,杨荣榛主编

--北京:高等教育出版社,2016.10

ISBN 978-7-04-046490-0

I. ①化… II. ①董… ②杨… III. ①化学工程-化学实验-高等学校-教材②应用化学-化学实验-高等学校-教材 IV. ①TQ016②O69-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 226345 号

策划编辑	曹 瑛	责任编辑	曹 瑛	封面设计	王 鹏	版式设计	马敬茹
插图绘制	杜晓丹	责任校对	刘丽娴	责任印制	耿 轩		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 三河市潮河印业有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 12.75
字 数 300 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2016 年 10 月第 1 版
印 次	2016 年 10 月第 1 次印刷
定 价	19.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46490-00

前 言

化学工程学是一门理论性与实验性极强的工程学科,涉及的知识面广,且与其他学科联系紧密,具有独特的实验研究方法。随着科学技术的不断发展、学科的交叉融合,以及实验仪器仪表和测试手段的不断更新,化学工程学科对人才的知识结构和能力也提出了更高的要求。因此,为了满足新时代的发展需要,培养具有扎实的理论功底和开拓创新精神的复合型人才,化工基础与应用化学实验是培养新型人才不可缺少的重要组成部分。

为了更好地让学生在掌握理论知识的基础上,寻求解决工程应用问题的途径和方法,运用已有的知识,培养观察、动手操作和发现问题能力,进而达到提高综合素质的目的,编者结合相关化工课程的教学特点和培养目标,秉承提高素质、掌握实验设计研究方法,以及培养动手和创新研究能力的宗旨,编写了化工基础与应用化学实验教材。本实验教材在编排上,有意识、有目的地对课程中涉及的工程技术研究思想和方法进行阐述,强化对学生独立思考、自我获取知识和处理实验问题能力的培养,让学生熟悉实验装置、分析测试仪器、仪表,以及各种研究方法和测试手段,分析对不同实验研究对象采用不同研究方法的原因,筛选出正确的研究方法。

本书包括化工基础与应用化学实验基础知识、化工基础实验、综合应用研究开发实验、化工参数测量及仪器仪表、实验数据处理与实验设计方法等内容。旨在强调基本概念、基本操作和基本技能的训练,文字简洁、层次清楚,突出化工基础实验,兼顾综合与应用实验,凸显综合性的特色,实验内容可根据学校特点灵活选用。本书可作高等师范院校及综合大学化学类专业的化工课程实验教材,也可作为单独设置的应用化学实验教材,亦可供相关行业科研人员和实验人员参考。

本书由董文生、杨荣榛主编,参编人员有杨荣榛(第一部分、第五部分、实验6~9、11、13~15、23~28、附录),董文生(第四部分4.1~4.3),段兴潮(实验1~5、10、12),刘春玲(第四部分4.4),张国防(实验16~22)。全书由董文生审定、修改,完成统稿工作。在本书编写过程中,教研室的同仁及审稿专家提出了许多宝贵意见,出版中得到高等教育出版社、陕西师范大学教务处的资助和化学化工学院的大力支持,在此一并表示衷心感谢。另外,在本书编写过程中,参考了诸多书籍和资料,对相关作者表示感谢!

由于编者水平有限,书中谬误之处在所难免,恳请批评指正。

编 者
2016年4月

目 录

第一部分 化工基础与应用化学实验基础知识	1
1.1 实验特点	1
1.2 教学目的	2
1.3 实验要求	2
一、实验预习	2
二、实验过程	3
三、实验数据的记录	3
四、实验报告的书写	4
五、考查	4
1.4 实验室安全	4
一、防火安全	4
二、用电安全	5
三、高压钢瓶的安全使用	5
四、实验室的环境保护	6
五、实验室注意事项	6
第二部分 化工基础实验	7
实验 1 雷诺实验	7
实验 2 管内流动规律验证实验	9
实验 3 流体管路流动阻力系数的测定	13
实验 4 流量计的校核	18
实验 5 离心泵特性曲线的测定	22
实验 6 过滤实验	26
实验 7 空气-蒸汽对流传热系数的测定	29
实验 8 填料塔流体力学性能和吸收传质系数的测定	33
实验 9 板式塔精馏实验	37
实验 10 膜分离实验	41
实验 11 流化床基本特性的测定	45
实验 12 流化床干燥实验	49
实验 13 内循环无梯度反应器停留时间分布的测定	53
实验 14 连续流动搅拌釜式反应器停留时间分布曲线的测定	57
实验 15 催化剂比表面积及孔径分布测定	61
第三部分 综合应用与研究开发实验	69

实验 16	双酚 A 型低相对分子质量环氧树脂的合成与应用	69
实验 17	牙膏摩擦剂的制备及产物分析	72
实验 18	乙酸苄酯的制备	78
实验 19	反应精馏法制乙酸乙酯	80
实验 20	植物精油的小规模提取及鉴定	83
实验 21	壳聚糖的制备与表征	87
实验 22	二茂铁四氮唑及其钠盐的制备及性能测定	91
实验 23	绿色环保型复合阻燃剂的制备及性能测定	94
实验 24	喷雾干燥实验	97
实验 25	水热合成法制备硫氧镁晶须	100
实验 26	药物滴丸剂制备实验	103
实验 27	药物结晶实验	106
实验 28	中药有效成分提取实验	110
第四部分	化工参数测量及仪器仪表	115
4.1	温度的测量及仪表	115
一、	热膨胀式温度计	117
二、	压力式温度计	119
三、	热电偶式温度计	119
四、	热电阻式温度计	123
五、	非接触式温度计	124
4.2	压力的测量及仪表	125
一、	液柱式压力计	126
二、	弹性压力计	128
三、	压力的电测方法	129
四、	压力仪表的选择、检验和安装	130
4.3	流量的测量及仪表	131
一、	差压式流量计	131
二、	转子流量计	133
三、	涡轮流量计	135
4.4	化工实验室常用仪器	136
一、	气相色谱分析仪	136
二、	溶氧仪	139
第五部分	实验数据处理与实验设计方法	142
5.1	实验数据采集与误差分析	142
一、	实验数据的采集与运算	142
二、	实验数据的误差分析	143
三、	间接测量值的误差传递	146
四、	随机误差的正态分布	147

5.2 实验数据处理 148

 一、实验数据列表法 148

 二、实验数据图示法 149

 三、经验公式的选择 151

 四、图解法求经验公式中的参数 151

 五、实验数据的回归分析法 154

5.3 实验设计方法 163

 一、实验设计方法概述 163

 二、正交实验设计方法 166

 三、正交实验设计的基本方法及举例 170

 四、均匀实验设计方法 178

 五、正交实验设计方法与均匀实验设计方法的比较 183

附录 184

 附录 1 常用固体材料的密度、比热容和导热系数 184

 附录 2 铜-康铜热电偶的温度-热电动势关系 185

 附录 3 水的物理性质 185

 附录 4 饱和水蒸气表 186

 附录 5 一些气体-水体系的亨利系数 E 值 188

 附录 6 部分气体在水中的溶解度 189

 附录 7 乙醇-水溶液的比定压热容 190

 附录 8 乙醇-水溶液的汽化潜热 190

 附录 9 乙醇-水溶液在常压下气液平衡数据 191

参考文献 192

第一部分

化工基础与应用化学实验基础知识

1.1 实验特点

在化工生产或科学研究中,无论是基础理论的实验验证,还是新产品、新工艺、新设备的研发,以及对工艺、设备的改造等,均离不开实验研究。虽然许多实验研究工作可以通过计算机模拟实现,但最终还必须通过实验来检验模型所需的基础数据及结果的可靠性。因此,实验在理论研究和工程设计中具有不可替代的作用。对化学、化工与制药类专业的学生和技术人员来说,如何进行基础研究、规划和设计,并做好相关实验研究,获得规律性的结果尤为重要。

化工基础与应用化学实验是一门实践性极强的基础实验课程,它不仅有完整的科学理论体系,还有一些独特的实验研究方法。与其他基础实验课程的最大区别在于处理的物料千变万化,设备的结构、形状大小各异,面对的实际问题错综复杂,并且还受到高温、高压和多种物料混合状况等多重因素的影响。鉴于这些研究对象和因素不同,研究方法也必然不同,只有通过实验研究,体验实验的工程性和处理工程问题的方法,才能使学生实现专业学习与全面发展相结合,运用已有的基础理论知识和科学的思维进行全面细致的观察,从中发现问题,并寻求解决问题的途径和方法。因此,培养化学专业与应用化学专业高级人才,化工基础与应用化学实验教学是必不可少的。

随着科技的飞速发展,以单元操作为基础的化学工程学科,研究内容已从装备水平向分子水平乃至整个宇宙延伸,研究领域也向环境、生命、材料、能源和信息等领域拓展。在这种交叉发展的学科氛围中,新时代呼唤具有扎实基础理论、开拓创新能力和竞争意识的复合型人才,因此在教学中,旨在从培养模式上充分激发学生的想象力,鼓励学生思考和注重实践动手能力,提高解决问题的素质,为学生的全面发展奠定坚实的基础。因此,化工基础与应用化学实验对学生工程训练的加强和各种技能的培养,以及综合素质的提高有着举足轻重的作用。

1.2 教学目的

化工基础与应用化学实验是理科化工课程教学不可分割的一部分,通过实验得到的结论对化工单元操作的设备设计和过程条件的确定有非常重要的意义,它有其自身的教学目的、特点和要求。化工基础与应用化学实验教学应达到如下的目的:

(1) 培养学生从事实验研究的初步能力。在实验研究中,应当对实验现象具备敏锐的观察力;能够通过实验的设计、组织及文献查阅等,运用各种实验手段正确地获得实验数据;并会分析和归纳实验数据获得结论,完成实验报告。这些能力正是创新型人才所必须具备的基本素质,因此,培养学生从事实验研究的初步能力是培养学生创新能力的一种途径。

(2) 验证各单元操作过程的机理、规律,强化课堂教学中的理论,加深对主要原理、方法及重要概念的理解,并能灵活应用这些原理进行化工操作、设计及模拟实验。同时对研究的新技术、新工艺、新产品进行实验生产,优化工艺条件,强化解决工程实际问题的能力。

(3) 熟悉典型单元操作的流程及设备,以及常用仪器仪表的使用方法,初步掌握一些有关化学工程学的实验研究方法和技术,如操作条件的确定、操作规程及故障的分析处理、测试仪表的选择、数据采集、处理分析和过程控制的实现等。

(4) 培养严谨求实的良好作风。实验数据是实验结果的真实反映,在任何情况下都不能偏选或修改数据,必须如实记录,认真对待实验中的每一个问题。

1.3 实验要求

实验的目的是使学生在学化工传递过程、反应器基本原理和化工工艺学的基础上,加深对化工主要原理、方法及重要规律的理解,并能灵活应用这些原理进行实验操作、设计及模拟实验。为了培养学生能力和提高素质,在整个实验过程中必须坚持启发式、讨论式、研究式的实验教学方法,体现学生的主动性,避免教师包办及学生依赖教师的被动学习现象,做好实验,对培养学生独立从事科学研究,特别是应用性研究的能力具有非常重要的现实意义。通常情况下,实验时,每个实验小组以2~3人为宜,小组成员间必须通力协作,共同完成实验。实验过程中,应该明确实验目的,认真进行实验预习,做好实验及设计,认真细心记录数据及实验中出现的现象,并完成实验报告。

一、实验预习

实验预习是做好实验的前提,也是实验教学的关键环节。预习时,认真阅读实验教材,并查阅有关手册和参考资料,掌握原料和产品的物性数据,了解实验原理和步骤,做到有的放矢。还可利用多媒体实验课件预习,并现场实地考察,熟悉实验设备流程。学生进入实验室进行实验前,首先应接受教师对预习情况的检查,根据检查和提问情况,决定学生可否进入实验室进行实验。若未能通过,必须重新预习,直至达到要求。具体要求如下:

- (1) 认真阅读实验教材,明确实验的目的、原理及注意事项等;
- (2) 根据实验的具体要求,明确实验的目的、内容和步骤,分析需要测定哪些数据,并结合理论估计实验数据的变化规律;
- (3) 在实验现场,结合实验教材,明确操作要点,仔细观察设备流程、主要设备的构造及仪表的种类,了解设备的开启方法及设备的操作注意事项;
- (4) 写出预习报告,内容包括实验目的、实验原理、实验装置流程示意图、实验步骤和注意事项,拟定记录原始数据的表格。

二、实验过程

实验操作是实验教学的核心,学生通过操作才能了解和领会单元操作设备及流程,掌握相关理论知识,了解如何实现过程的优化,分析各种非正常现象产生的原因,并研究可能采取的措施。在实验操作过程中,应当注意以下几点:

(1) 实验时,要认真操作,仔细观察各种现象,积极思考,注意安全,保持整洁,不得脱岗。密切注意装置上仪表显示数字的变化,随时调节,保证操作过程的稳定。只有在过程稳定后方可取样或读取数据;改变实验条件后,必须稳定或等待一段时间后(按照实验装置的要求)方可取样或读取相关数据。

(2) 与实验相关或影响实验结果的数据均应测取,不能遗漏,包括大气压强、室温、水温、物料的性质和参数,以及设备的有关尺寸(管径、管长、流通面积)等。

(3) 在同一条件下,至少应该读取两次数据,重复性较好时,方可改变条件进行下一组数据的读取。

(4) 要有勤于观察、善于观察的工作作风。实验现象往往与过程的内在机理、规律密切相关,也是对物料流动状况的真实反映,实验中切忌只顾埋头操作和读取数据,忽略对实验现象的观察。

(5) 实验中若出现异常现象,或数据有明显的误差时,应如实注明,小组成员应及时与老师讨论分析,研究异常现象发生的原因,对现象做出合理的解释,并解决问题。

(6) 用事先拟定的原始数据表格认真记录实验中的数据和现象,切忌随便记录,保证记录的数据可靠、清晰。记录后应及时检查,避免读错、记错的现象发生。

(7) 实验结束后,按照实验设备的操作规程关闭仪器设备,将实验记录交教师检查并签字;检查水源、电源、气体是否关闭,以及仪器设备复原情况,打扫实验室后方可离开。

三、实验数据的记录

(1) 按照拟定的原始数据表格要求,记录测定的各项实验数据,并记录实验条件。实验条件一般包括环境条件(室温、大气压强和湿度等)、仪器设备(仪器设备的名称、规格、型号和实验精度等)和药品条件(药品的名称、纯度等)。

(2) 数据读取必须在实验设备稳定后读数,如果条件改变,要等待一定时间后再读取相关数据,以排除在管路系统含有气泡或仪表滞后等引起的读数不准情况发生。实验过程中,要及时、准确地记录实验现象和数据,以便对实验现象做出分析和解释。

(3) 记录实验数据必须准确、可靠,严禁随意涂改数据,在相同的实验条件下,至少应读取

两次数据,且只有在两次读数相近的情况下方可改变实验条件,进行下一步操作,切不可在实验结束后补写实验记录。

四、实验报告的书写

实验报告是实验工作的全面总结和系统概括。对实验报告内容的书写要表达清晰、准确;通过书写实验报告,使学生在实验数据处理、作图、误差分析、问题归纳等方面得到全面提高。实验报告内容包括:实验目的、实验原理、实验装置流程、实验操作步骤、注意事项、原始数据记录、数据处理(作表或图、数据计算过程举例)及对实验结果的分析讨论。实验结果的分析讨论非常重要,它是学生对基本原理、实验方法及结果进行的综合分析,包括实验结论、对实验结果的评价和误差分析等,并对实验中发现的问题进行讨论,或提出改进建议等,最后给出实验结论。

对实验目的、基本原理、实验装置流程、实验操作方法和注意事项等在本书的每一个实验中均有较为详尽的叙述,鉴于学生在实验前已对上述内容有充分了解,书写实验报告时要求学生根据自己的实验结果书写,不能照抄书本内容。记录原始实验数据时,要根据仪表的精度决定实验数据的有效数字位数。对实验所需的物性数据可从相关手册或本书的附录中查取。

由于化工实验比较繁杂,数据处理量大,要制成图表,很多还要回归为关联式,工作量很大。在处理数据时,要将实验数据整理、加工成表格或图形的形式呈现出来。鼓励学生运用已掌握的原理和知识,自行设计实验方案,拟定实验流程和数据处理方法,借助计算机编程处理相关实验数据,并要以某一组原始数据为例,列出各项计算过程,说明数据图表中结果的来源。报告应力求条理清楚、文字简练、结论明确、书写整洁。此外,在每个实验后都有思考题,旨在加深学生对基本原理的理解,学生可结合实验并阅读有关资料认真回答。

五、考查

考查可以采用不同的形式,除统一出题考试外,还可采用专题抽查、依据实验报告现场抽题选实验进行演示操作、实验记录和实验报告等方式考查,教师也可根据实验的具体情况灵活采用其他的方法。

1.4 实验室安全

化工基础与应用化学实验与其他基础化学实验不同,每个实验都相当于一个小型单元的生产装置,其将电器、仪表及机械传动设备等组合为一体。实验过程中要特别注意实验设备及测量控制仪表的安全使用,有些还要在高压、高温、低温下操作,有时还用到对人体有毒、有害的原料,甚至在高真空条件下操作,因此,实验操作前,必须掌握实验室在防火、用电、高压钢瓶的使用、蒸汽烫伤及化学药品使用等方面的相关安全知识,做到安全操作实验。

一、防火安全

化工实验室发生火灾的隐患主要包括易燃化学药品及电器设备或加热系统等,在实验操作

过程中要有安全意识,避免火灾等事故的发生,如在实验室不要存放过多的易燃品,用后及时回收、处理。实验前要检查电器设备,对已经老化的线路要及时更换。另外,还必须熟悉消防器材的使用方法,防患于未然,预防为主,防消结合。一旦发生火情,应冷静判断是哪一类物品着火,并尽快报警,采取相应的措施,迅速用灭火器或消防水龙头等进行灭火。实验室常用的消防器材有以下几种:

(1) 灭火沙箱(桶) 用于扑灭易燃液体和其他不能用水灭火的危险品引起的火灾。沙子是隔断空气并起到降温作用而灭火的,但沙子中不能混有可燃性杂物,并且要保持干燥。由于沙箱存沙有限,故只能扑灭局部小规模的火源;对于大规模火源,可用不燃性固体粉末灭火器扑灭。

(2) 石棉布、毛毡或湿布 用于扑灭火源区域不大的火灾,也是扑灭衣服着火的常用方法,通过隔绝空气来达到灭火的目的。

(3) 泡沫灭火器 实验室多使用手提式泡沫灭火器。外壳用薄钢板制成,内有一个盛有硫酸铝的玻璃胆,胆外装有碳酸氢钠和发泡剂(甘草精)。使用时,去掉插销,把灭火器倒置,对准火源,按下手柄,泡沫马上从喷嘴喷出,泡沫黏附在燃烧物体的表面,形成与空气隔绝的薄层而灭火。适用于扑灭实验室的一般火灾,但由于泡沫导电,故不能用于扑救电器设备和电线的火灾。

(4) 其他灭火器材 四氯化碳灭火器,适用于扑灭电器设备火灾;二氧化碳灭火器,使用时能降低空气含氧量,因此要注意防止现场人员窒息;干粉灭火剂,可扑灭易燃液体、气体、带电设备引起的火灾;1211 灭火剂,适用于扑灭油类、电器类和精密仪器等火灾。

二、用电安全

(1) 实验前,必须了解室内总电闸及分电闸的位置,若出现用电事故能及时切断电源。

(2) 接触或操作电器设备时,手必须干燥,避免发生触电事故。

(3) 导线的接头应紧密牢固,裸露部分必须用绝缘胶布包好或用塑料管套好;接头损坏或绝缘不良时应及时更换。进行上述操作或维修电器设备时必须关闭电源,方可操作。

(4) 电源或电器设备上的保险丝(或保险管)都应该在额定电流标准内使用,不能任意加大,更不能用铜丝或铝丝等代替;电器设备的金属外壳应接地线,并定期检查是否连接良好。

(5) 启动电动机时,接通电源前先用手转动一下电动机的轴,接通电源后,立即查看电动机是否已运转;若出现异常不转动,应立即切断电源,否则容易烧毁电动机,出现事故。

(6) 若用电设备是电加热器,在通电前,一定要弄清电加热所需要的前提条件是否已经具备。如在精馏塔实验中,在接通塔釜电热器之前,必须清楚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等。

(7) 在电源开关与用电设备之间若有电压或电流调节器时,在接通电源开关前电压或电流调节器应置于“零位”状态,以保护用电设备不被损坏。

三、高压钢瓶的安全使用

气体钢瓶是由碳钢或合金钢制成的,适用于装存介质压强在 15.0 MPa 以下的气体。常见的气体钢瓶主要装存氮气、氢气、二氧化碳和乙炔等。如果气体钢瓶使用不当,就有可能造成爆炸和漏气事故。已充气的气体钢瓶爆炸的主要原因是受热而使其内部气体膨胀,以致压强超过

钢瓶的最大负荷而爆炸。另外,可燃性气体的漏气也会造成危险,如氢气泄漏时,与空气混合后体积分数达到 4.0%~75.2%时,遇明火就会发生爆炸。因此,在使用钢瓶时应注意以下几点:

(1) 搬运钢瓶时,应戴好钢瓶帽和橡胶安全圈,严防钢瓶摔倒或受到撞击,以免发生意外事故;钢瓶应远离热源,放在阴凉、干燥通风的地方。使用时,必须牢固地固定在架子上、墙上或实验台旁。

(2) 绝不可使油或其他易燃性有机物沾污在气瓶上,特别是出口和气压表处;也不能用棉、麻等堵漏,以防燃烧引起事故。

(3) 使用钢瓶时,必须连接减压阀或高压调节阀,一定要用气压表,一般可燃性气体的钢瓶螺纹是左旋的,如 H_2 和 C_2H_2 钢瓶,不可燃或助燃性气体的钢瓶螺纹是右旋的,如 N_2 、 O_2 等。注意:各种不同气体的气压表不能混用。

(4) 开启钢瓶阀门及调压时,人不要站在气体出口的前方,头不要在瓶口上方,以防钢瓶的总阀门或气压表冲出伤人。

(5) 当钢瓶使用到瓶内压强为 0.5 MPa 时,停止使用。压强过低会给重新充气带来不安全因素,若钢瓶内的压强与外界压强相同时,会导致外界的空气窜入瓶内。

有关化学药品的安全及使用内容,基础化学实验教材中已有详细介绍,在此不再赘述。

四、实验室的环境保护

实验室排放的废气、废渣等虽然数量不大,但不经必要的处理直接排放,会对环境和人体造成危害,要特别注意以下几点:

(1) 实验室所有药品及中间产品,必须贴上标签,注明名称,防止误用和因情况不明而处理不当造成事故。

(2) 绝对不允许用嘴去吸移液管液体以获取各种化学试剂和溶液,应该用洗耳球等专用用具吸取。

(3) 处理有毒或刺激性物质时,必须在通风橱内进行,防止误用和因情况不明而处理不当造成事故。

(4) 废液应根据物质性质的不同分别集中在废液桶内,并贴上标签,以便集中处理。

注意:有些废液不可混合,如过氧化物和有机物、盐酸等挥发性酸和不易挥发性酸、铵盐及挥发性胺与碱等。

(5) 接触过有毒物质的器皿、滤纸、容器等要分类收集后集中统一处理。

(6) 一般的酸碱处理,必须在进行中和后用大量水稀释,然后才能排放到水槽。

(7) 处理废液、废物时,一般要戴上防护眼镜和橡胶手套。处理兼有刺激性、挥发性的废液,要戴上防毒面具,在通风橱内进行。

五、实验室注意事项

(1) 遵守实验室的各项规章制度,听从教师的指导,尊重实验室工作人员。

(2) 保持实验室整洁,在整个实验过程中,保持桌面和仪器的整洁,保持地面、水槽干净,不得将废液等倒入水槽。

(3) 公用仪器和工具在指定地点使用,公用药品不能任意挪动,要爱护仪器,节约药品。

(4) 实验完毕离开实验室时,应关闭水源、电源、气体、门、窗和换气扇等。

第二部分

化工基础实验

实验 1 雷诺实验

一、实验目的

- (1) 通过观察实验现象,判断流体在圆管内流动的基本流动形态,掌握层流和湍流的特点;
- (2) 观察层流向湍流过渡的临界状态,并测定临界雷诺数 Re_c 。

二、基本原理

流体在圆管内流动的基本流动形态有两种,即层流(或称滞流, laminar flow)和湍流(或称紊流, turbulent flow),此现象是雷诺(Reynolds)于1883年首先发现的。当流体作层流流动时,其流体质点沿平行于管轴的方向作直线运动,且在径向无脉动;当流体作湍流流动时,流体质点除沿圆管轴心向前作直线运动外,还有径向的运动,在宏观上显示出紊乱状,并向各个方向作不规则的运动。

流体的流动形态通常用雷诺数(Re)来判断。它是一个由不同的影响变量组合而成的量纲为1的数群。在应用时应当注意,数群中各物理量必须采用国际单位制(SI)。流体在圆管内流动时,其雷诺数用下式表示:

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

式中, Re 是雷诺数,量纲为1; d 是管子内径,单位:m; u 是流体在管内的平均流速,单位: $m \cdot s^{-1}$; ρ 是流体密度,单位: $kg \cdot m^{-3}$; μ 是流体黏度,单位: $Pa \cdot s$ 。

工程上一般认为,流体在直圆管内流动时,当 Re 小于或等于2 000时为层流;当 Re 大于4 000时,圆管内已形成湍流;当 Re 在2 000至4 000范围内,流动处于一种过渡状态,可能是层流,也可能是湍流,或者是二者交替出现,这要视外界干扰情况而定,通常将这一雷诺数范围称为过渡区。由层流转变为湍流时的雷诺数称为临界雷诺数,用 Re_c 表示。

式(2-1)表明,对于一定温度的流体,在特定的圆管内流动,雷诺数仅与流体流速有关。本

实验就是通过改变流体在圆管内的流速(流量),观察在不同雷诺数下流体的流动形态。

三、实验装置及流程

实验装置如图 2-1 所示,主要由玻璃实验导管、流量计、流量调节阀、低位储水槽、循环水泵和稳压溢流水槽等部分组成,实验导管为 $\phi 20\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的硬质光滑玻璃管。

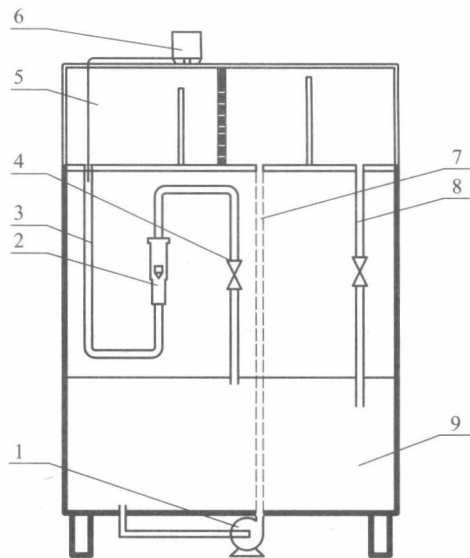


图 2-1 流体流动形态实验装置图

1—循环水泵; 2—流量计; 3—实验导管; 4—流量调节阀; 5—稳压溢流水槽;
6—红墨水瓶; 7—上水管; 8—溢流回水管; 9—低位储水槽

实验前,先将水充满低位储水槽,关闭流量计后的流量调节阀,然后启动循环水泵。待水充满稳压溢流水槽后,开启流量计后的流量调节阀。水由稳压溢流水槽流经缓冲槽、实验导管和流量计,最后流回低位储水槽。流体流量的大小,可通过流量计和流量调节阀进行调节。

实验中所用的示踪剂为红墨水。由红墨水瓶经连接管和有细孔的喷嘴,注入实验导管内,细孔喷嘴(或注射针头)位于实验导管入口的轴线部位;实验用的流体水应当清洁,红墨水的密度应与水相当,装置要平稳放置,避免震动,以免影响实验观测结果。

四、实验操作步骤

1. 层流流动形态

实验时,先小幅开启流量调节阀,将流速调至所需要的流量,再调节红墨水瓶的出口旋塞,并作精细调节,使红墨水的注入流速与实验导管中主体流体的流速相适应,一般略低于主体流体的流速为宜。待流动稳定后,通过流量计记录主体流体的流量值。此时,在实验导管的轴线上,就可观察到一条平直的红色细流,说明流体流动形态好像一根拉直的红线,层流的形态是流体主体质点间只有轴向运动而无径向运动,层与层之间无径向混合,记录实验现象及流量值。

2. 临界状态

缓慢增大流量调节阀的开度,使水流量平稳地增大,玻璃实验导管内流体的流速也随之平稳地增大。此时可观察到玻璃实验导管轴线上原来呈直线流动红色细流,开始发生抖动而变成波浪状,说明流体质点有径向混合。调节流量调节阀开度大小时要注意,一定要缓慢增大,找到红色细流刚开始发生波动的状态即为临界状态,此时的雷诺数即为临界雷诺数 Re_c ,记录实验现象及流量值。

3. 湍流流动形态

继续加大流量调节阀的开度,随着流速的增大,红色细流的波动程度也随之增大,最后发生断裂,成为一小段的红色细流;当流速继续增大,红墨水进入实验导管后立即呈烟雾状分散在整个导管内,进而迅速与主流体水混为一体,使整个管内流体染为红色,以致无法辨别出红墨水的流线。说明流体流动形态为主体质点既有轴向运动、又有径向脉动的湍流,记录实验现象及流量。

4. 重现性操作

以上对层流、临界状态和湍流现象的观察是流量由小至大的操作过程,为了获得可信度较高的实验结论,需要对实验进行重现性操作。如上述三种现象的操作观察,即控制流量由小到大、由大至小进行操作,共获得两个循环约 12 组数据。注意:重现性操作并不等于重复性操作,即操作时要先观察确定状态的现象,再读取对应的流量,而不能先设定或调好流量再观察现象。

5. 结束实验

实验结束后,先关闭红墨水瓶的出口旋塞,再关闭循环水泵、仪表和照明灯管,打开低位储水槽排水阀门。经教师检查实验记录和数据无误后,签字并结束实验,最后整理实验室方可离开。

五、思考题

- (1) 流体的基本流动形态是层流、过渡流和湍流三种状态,你认为此说法对吗?为什么?
- (2) 在实验装置中用于实验观察的玻璃实验导管垂直放置,该导管能否水平放置?为什么?
- (3) 雷诺实验为什么要强调重现性操作?
- (4) 当 Re 大于 4 000 时,流体在圆管内的流动为湍流时,是否意味着 Re 等于 4 000 时圆管内的流动应该是湍流的临界状态?为什么确定临界雷诺数 Re_c 等于 2 000 而不是 4 000 呢?

实验 2

管内流动规律验证实验

一、实验目的

- (1) 观测流体在圆管内作定态流动时的动压头、静压头和位压头随管径、位置、流量的变化关系,验证连续性流动方程和伯努利方程;
- (2) 定量考察流体在圆管内作定态流动时,流经收缩和扩大管段流体流速与管径的关系;

(3) 测定定态流动时流体流经直管段中心点的流速,考察平均流速与管中心最大流速的关系;

(4) 定性观察流体流经节流管件、弯头和直管段时的压头损失。

二、基本原理

在化工生产中,流体输送大多是在密闭的管道中进行,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,必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前提和基本出发点。

1. 连续性方程

流体在圆管内作定态流动时,任意取两个不同的截面,根据质量守恒定律,可用如下形式的连续性方程表示:

$$\rho_1 \iint_1 v dS = \rho_2 \iint_2 v dS \quad (2-2)$$

根据平均流速的定义,有

$$\rho_1 u_1 S_1 = \rho_2 u_2 S_2 \quad (2-3)$$

即流体通过两截面的质量流量相等,有

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (2-4)$$

式中, ρ_1 、 ρ_2 分别为截面1、2处的密度,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; v 是流体流速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_1 、 u_2 分别为截面1、2处的流速,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; S_1 、 S_2 分别为截面1、2处的截面面积,单位: m^2 。

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

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 \quad (2-5)$$

由此可见,对均质、不可压缩流体,在圆管内作定态流动时,平均流速与流通截面面积成反比,即截面积越大,流速越小;反之,截面积越小,流速越大。

对于圆形管道,其截面积 $S = \pi d^2 / 4$, d 为直径,于是式(2-5)可变为

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 \quad (2-6)$$

即流体在圆管内作定态流动时,平均流速与流通管径的平方成反比。

2. 机械能衡算方程

运动的流体除了遵循质量守恒定律外,还应满足能量守恒定律,据此,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,在管路内作定态流动时,以单位重力的流体为基准(重力单位为牛顿),其机械能衡算方程为

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

式中, z 是位压头,单位: m ; $u^2/2g$ 是动压头(速度头),单位: m ; $p/\rho g$ 是静压头(压力头),单位: m ; H_e 是外加压头,单位: m ; $\sum h_f$ 是压头损失,单位: m 。

式(2-7)为实际流体在圆管内流动时的机械能衡算方程,也称为伯努利方程。显然,式(2-7)中各项均具有流体柱高度 m 的量纲。为了更好地理解上述机械能衡算方程,在此对其进行讨论: