

杨运泉 ◎ 主编

尹双凤 揭 嘉 ◎ 副主编

化工原理实验

HUAGONG YUANLI SHIYAN



化学工业出版社

卓越 工程师教育培养计划系列教材

杨运泉 ◎ 主编

尹双凤 揭嘉 ◎ 副主编

化工原理实验



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理实验/杨运泉主编. —北京: 化学工业出版社, 2012

卓越工程师教育培养计划系列教材

ISBN 978-7-122-14914-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 163062 号

责任编辑: 徐雅妮 杜进祥
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 向 东
装帧设计: 关 飞

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 8½ 字数 186 千字 2012 年 10 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: 20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理实验教学是化工原理课程教学的一个重要组成部分。近年来,随着全国高校化工类专业“卓越工程师教育培养计划”项目的深入实施,以及教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导分委员会对所制订的《“化学工程与工艺”指导性专业规范》的不断完善,全国不少高校为了适应这种新形势的迫切要求,对化工原理实验和其他实践教学环节的改革日益重视。引入先进的实验教学理念和内容,不断完善实验教学方法和手段,加快建设具有“基础、综合、提高、创新”功能的工程教学实验室及相关教材,培养理论基础扎实、专业知识综合运用能力强和创新素质良好的“工程型、复合型”化工专业技术人才,已经成为全国高校化工类专业人才培养的共同目标。基于这一目标,我们组织编写了本实验教材。

本教材的编写突出了如下几个特点。

1. 实验项目编写既紧扣《“化学工程与工艺”指导性专业规范》的基本要求,又较好地反映了现代化工单元操作新技术研发与应用成果。通过开设基础实验项目,强化学生对化工原理课程涉及的基本概念、基本理论的深入理解,对化工单元过程基本操作方法的熟练掌握,以及对化工单元操作的工艺流程与设备装置的较全面了解,培养学生的基本动手能力和实验基本技能;通过开设提高性实验项目,充分调动学生的主观能动性,提高学生学习本课程的兴趣和积极性,增强学生掌握和运用所学基本理论分析和解决实际工程问题的能力、专业知识综合运用能力和创新能力,为学生今后开展科学研究工作奠定良好的基础。

2. 在实验内容中引入近年来化工原理实验教学改革和发展的新成果。将计算机仿真系统引入化工原理实验教学过程,借助先进的计算机模拟、仿真功能,更好地加深和巩固学生对化工原理课堂教学内容的理解,提高学生应用计算机分析、处理实际工程问题的能力,同时开阔学生的专业视野。

3. 在教材中增编了对工程实验组织和设计的基本方法、实验数据测定与处理方法、化工实验常用测量仪表等知识的介绍,既有利于拓展学生知识面,又有利于提高本课程的实验教学效果。

4. 教材内容简要、理论适中、实验项目实用性强、思考题内容与课程理论教学紧密联系。

湘潭大学化工原理教研室和湖南大学化工原理教研室一起,共同完成本书的编写工作。其中,第一章和第二章由揭嘉副教授(湘潭大学)编写,第三章由揭嘉副教授和杨运泉教授(湘潭大学)共同编写;第四章由熊鹰副教授(湘潭大学)编写;第五章由杨运泉教授(湘潭大学)编写;第六章由杨彦松实验师(湘潭大学)编写;附录由李国龙高级实验师(湘潭大学)编写。湖南大学化工原理教研室尹双凤教授对全书进

行了初审并提出了许多有益和宝贵的修改建议，杨运泉教授对全书进行了统稿和最终审校。在本教材的前期内部试用过程中，湘潭大学化工原理教研室周大军教授也为本书的编写做了大量工作。在本教材出版之际，编者对参编单位的相关老师和同事们所作出的贡献表示由衷的感谢，对在本教材编写过程中所参考的文献作者或单位致以深切的谢意。

由于编者水平有限，疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
一、概述	1
二、化工原理实验教学目的	1
三、化工原理实验教学要求	2
四、化工原理实验教学内容	2
五、化工原理实验报告编写	3
思考题	5
第二章 工程实验基础	6
第一节 工程实验的基本方法	6
一、数学模型法	6
二、量纲分析法	8
三、工程实验的组织	10
第二节 实验数据测定常用方法及仪表简介	12
一、压力测量	12
二、流量测量	13
三、温度测量	17
四、组成和成分的分析测定	23
第三节 实验数据的整理方法	25
一、实验数据的取舍	25
二、实验数据的读取与记录	25
三、实验数据的计算与处理	25
思考题	29
第三章 化工原理演示实验	30
实验 1 雷诺演示实验	30
实验 2 伯努利方程演示实验	31
实验 3 热边界层演示实验	33
实验 4 旋风分离器除尘演示实验	35

第四章 化工原理基础实验 36

实验 5 流体力学综合测定实验	36
I 流体阻力的测定	36
II 流量测定与流量计校核	39
III 离心泵特性曲线的测定	41
实验 6 恒压过滤常数测定实验	43
实验 7 传热系数测定实验	45
实验 8 筛板精馏塔全回流操作及塔板效率测定实验	48
实验 9 填料吸收塔吸收系数测定实验	51
实验 10 干燥速率曲线测定实验	56

第五章 化工原理提高实验 61

实验 11 固体流态化实验	61
实验 12 填料吸收塔流体力学和传质性能综合测定实验	63
I 填料吸收塔流体力学性能的测定	63
II 填料吸收塔传质单元高度的测定	66
III 填料塔中液相轴向混合特性的测定	68
IV 填料塔中填料持液量的测定	71
实验 13 板式精馏塔部分回流操作及塔板效率测定实验	73
实验 14 转盘萃取塔操作与传质单元高度测定实验	80
实验 15 降膜式薄膜蒸发实验	85
实验 16 动力波吸收操作与吸收效率测定实验	87
实验 17 中药中挥发性有效成分的超临界流体萃取实验	90
实验 18 鱼油中 DHA 和 EPA 的分子蒸馏提取实验	94

第六章 化工原理计算机仿真实验 98

第一节 计算机仿真实验系统简介	98
一、系统版本和安装使用环境	98
二、计算机仿真实验内容	98
三、计算机仿真实验系统的启动	98
四、实验仿真系统功能	98
第二节 化工原理计算机仿真实验	106
实验 19 离心泵特性曲线测定	106
实验 20 流量计的认识和校验	108

实验 21	流体阻力系数测定	109
实验 22	板框过滤实验	109
实验 23	空气-蒸汽/水-蒸汽系统的传热实验	110
实验 24	乙醇-水体系的精馏实验	111
实验 25	乙醇-丙醇体系的精馏实验	113
实验 26	填料吸收塔的流体力学性能测定实验	114
实验 27	清水吸收混合空气中氨的传质性能测定实验	115
实验 28	干燥实验	116
附录.....		117
附录一	化工原理实验基础数据.....	117
附表 1-1	干空气的物理性质	117
附表 1-2	水的物理性质	117
附表 1-3	丙酮饱和蒸气压与温度的关系	118
附表 1-4	丙酮-水溶液的平衡分压	119
附表 1-5	丙酮在空气中的极限含量	119
附表 1-6	氨气的性质	119
附表 1-7	乙醇-水的汽液平衡组成	119
附表 1-8	常压下乙醇-水系统汽液平衡数据	120
附表 1-9	不同温度下乙醇-水溶液的密度与质量分数的关系	120
附表 1-10	文氏管流量计压差计示值与流量的换算关系	121
附录二	化工原理实验常用工具/量具、材料与管件/阀门.....	122
附表 2-1	常用工具/量具	122
附表 2-2	常用材料	123
附表 2-3	常用管件/阀门	124
附录三	化工原理实验学生守则.....	125
附录四	化工原理实验安全操作规程.....	126
参考文献.....		128

第一章 绪 论

一、概述

化工原理实验是化工类专业学生必修的实践性教学课程，是培养学生理论联系实际和实践动手能力的重要教学环节。化工原理实验不同于其他基础课程的实验，它属于工程实验的范畴。工程实验与基础课程实验的不同之处在于以下几方面。

(1) 工程实验常常涉及复杂、有普遍意义的实际工程问题，而基础课程实验所涉及的则常是简单、基本的，有时甚至是理想的，与生产实践有较大距离的基础科学问题。

(2) 基础课程实验采用的方法，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、基本定理与定律为依据；而工程实验采用的方法则常常是模拟的、抽象的、千变万化的，通常以数学模型法和量纲分析法为依据。

(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、计量控制、分析与操作等各方面知识，综合要求较高。

(4) 基础课程实验采用的实验装置，通常都是用精密的、与实际生产装置完全不同的通用小型实验仪器与设备来完成；而工程实验则基本上都是采用模拟的、与实际生产装置相类似的、有一定规模的专用实验设备来完成。

(5) 基础课程实验的内容简单、目的明确，所以占用的时间少，需记录、整理的数据也少，对实验结果有影响的因素不多，且对实验装置的流程与操作无过高的要求；而工程实验常常涉及范围广、内容复杂、实验过程中的变化多，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，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。

通过化工原理实验，可以学习到一般工程实验的基本操作，了解各类操作参数的变化对化工过程带来的影响，熟悉化工单元操作中各种非正常操作现象产生的原因及处理方法，培养学生分析和解决实际工程问题的能力。

二、化工原理实验教学目的

化工原理实验教学的目的主要有以下几点。

(1) 加深对基本概念、基本理论的理解。通过化工原理实验，可以使学生对基本概念、基本理论的理解更进一步，对公式中各种参数的来源及使用范围有更深入的认识。

(2) 帮助学生掌握处理化工单元操作过程相关工程问题的实验方法，掌握用所学理论知识分析和解决实际工程问题的基本方法，了解化工单元过程的基本操作方法，了解化工单元操作的工艺流程与设备装置。

(3) 培养合理设计实验方案、解决实验问题的能力，以及组织工程实验与数据处理能力。

(4) 培养学生实事求是、严肃认真的学习态度以及科学的思维方法, 增强工程意识, 提高自身素质水平。

三、化工原理实验教学要求

为了达到化工原理实验的目的, 让每一个实验者在实验过程中始终保持“严肃的态度、严密的作风”, 必须做到以下几点。

(1) 认真听好实验课, 认真阅读实验指导书和有关参考资料, 了解实验的目的和要求。

(2) 认真做好实验的预习工作。实验的预习主要是对照实验指导书(必要时还需到实验室的现场)完成以下几方面的工作:

- ① 弄清实验原理;
- ② 摸清实验流程;
- ③ 了解实验装置(包括装置类型、规格型号、结构特点、主要用途及操作方法);
- ④ 了解实验的测试点及其位置;
- ⑤ 了解实验操作控制点与控制要求;
- ⑥ 了解实验过程中所使用的检测仪器、仪表与使用方法;
- ⑦ 了解实验的操作要点与注意事项。

(3) 认真做好实验的组织与安排工作。在实验之前一周, 根据指导老师的安排完成实验的组织与安排工作。其主要内容有:

- ① 分组(实验小组的人数以3~4人为宜), 并选出实验小组长;
 - ② 拟定小组的具体实验方案, 包括实验方案的设计、实验操作的人员分工、实验数据记录的具体安排、完成实验操作的具体步骤、数据的检查与分析及实验准备工作的落实;
 - ③ 确定实验的具体日期与时间, 以及各小组的轮换顺序等。
- (4) 认真写好实验预习报告。
- (5) 精心完成实验操作, 包括:
- ① 切实按照实验小组预先制定的实验方案与步骤完成实验操作;
 - ② 认真细致地记录好实验原始数据;
 - ③ 认真观察和分析实验过程中的各种操作因素对实验结果的影响;
 - ④ 积极运用所学理论知识, 了解实验操作控制的基本原理, 处理实验过程中可能出现的各种设备与操作故障等。

(6) 精心处理好实验数据。如果用计算机处理实验数据, 还必须给出一组手算示例。

(7) 认真写好实验报告。撰写实验报告是实验教学的重要组成部分, 也是培养学生独立思考、分析和解决生产实际问题能力的重要手段。独立完成实验报告是最基本的要求。

四、化工原理实验教学内容

化工原理实验教学内容主要由化工原理实验理论、计算机仿真实验和操作实验三部分组成。

1. 实验理论

化工原理实验理论主要介绍化工原理实验的基本特点和要求、实验研究的方法论、实

验数据误差分析及处理方法、实验数据测量技术等内容。

2. 计算机仿真实验

化工原理计算机仿真实验涵盖的基本内容如表 1-1 所示。仿真实验的目的是通过计算机模拟操作，使学生对化工单元操作方法有一定的感性认识，同时对影响化工单元操作的基本因素和规律有初步了解和理性认识，为化工装置和设备的实际操作及调节控制提供模拟训练手段。因此，化工原理仿真实验必须开设于化工原理操作实验前。

表 1-1 化工原理计算机仿真实验内容

序号	实 验 内 容	序号	实 验 内 容
1	离心泵特性曲线测定	6	乙醇-水体系的精馏实验
2	流量计的认识和校验	7	乙醇-丙醇体系的精馏实验
3	流体阻力系数测定	8	填料吸收塔的流体力学性能测定实验
4	板框过滤实验	9	清水吸收混合空气中氨的传质性能测定实验
5	空气-蒸汽/水-蒸汽系统的传热实验	10	干燥实验

3. 操作实验

化工原理操作实验涵盖的基本内容如表 1-2 所示。操作实验又分基本操作实验和提高性操作实验，基本操作实验主要涉及化工原理理论课中讲述的典型和常用基本单元操作内容，要求学生熟练掌握这些单元操作的原理、方法和过程调控措施，提高性操作实验则涉及化工原理理论课中部分选修或自学内容以及一些新型单元操作技术，主要是培养学生独立开展科学研究工作的能力、创新能力及专业知识综合运用能力。

表 1-2 化工原理操作实验内容

性质	序号	实 验 内 容
基本实验	1	流体力学综合测定实验 (1)流体阻力的测定 (2)流量测定与流量计校核 (3)离心泵特性曲线的测定
	2	恒压过滤常数测定实验
	3	传热系数测定实验
	4	筛板精馏塔全回流操作及塔板效率测定实验
	5	填料吸收塔吸收系数测定实验
	6	干燥速率曲线测定实验
提高实验	1	固体流态化实验
	2	填料吸收塔流体力学和传质性能综合测定实验 (1)填料吸收塔流体力学性能的测定 (2)填料吸收塔传质单元高度的测定 (3)填料塔中液相轴向混合特性的测定 (4)填料塔中填料持液量的测定
	3	板式精馏塔部分回流操作及塔板效率测定实验
	4	转盘萃取塔操作与传质单元高度测定实验
	5	降膜式薄膜蒸发实验
	6	动力波吸收操作与吸收效率测定实验
	7	中药中挥发性有效成分的超临界流体萃取实验
	8	鱼油中 DHA 和 EPA 的分子蒸馏提取实验

五、化工原理实验报告编写

化工原理实验不同于一般基础课实验，其实验原理、设备装置、操作程序、数据处

理,以及过程分析等,都比一般基础课实验要复杂得多。因此,要真正做好化工原理实验,并达到预期的实验效果,在正式做实验之前必须写出实验的预习报告,在实验做完之后,必须认真写好实验正式报告。实验操作的目的是培养实际动手能力,而撰写实验报告的主要目的则是培养分析和解决实际工程问题的能力。

1. 预习报告编写

实验预习报告主要包括以下内容。

- (1) 实验目的:指通过实验应达到的基本教学目标。
- (2) 实验原理:包括实验的流程原理、设备原理和操作原理。
- (3) 实验流程:根据实验指导老师的要求,设计并绘制该实验(或实验室现有)的实验装置流程图。

(4) 实验操作步骤:根据实验要求,写出完成该实验的详细操作步骤和注意事项,以及实验小组安排的详细实验操作分工情况。

(5) 原始数据记录表:根据实验要求,自己动手设计一个用于记录实验原始数据的记录表。

2. 正式报告编写

实验的正式报告是对所做实验的总结。通过实验报告,对在实验操作过程中出现的各种实际工程问题进行分析 and 讨论,可以帮助学生学习分析和解决实际工程问题的方法,培养分析和解决实际工程问题的能力。撰写实验报告,是化工原理实验的重要组成部分。

实验正式报告主要包括以下内容。

- (1) 实验目的、实验原理(同预习报告);
- (2) 实验流程:根据实验室的现有装置的实际流程绘制出正规的、带控制点的工艺流程图;

(3) 实验操作步骤与实验操作现象记录:根据实验操作的体会记录实验操作实际情况和步骤,并简要地记述所观察到的实验现象;

(4) 原始数据记录表:指由自己设计的、在实验过程中用来记录实验数据的和未经整理的原始表格;

(5) 数据整理:对所记录的原始实验数据进行数学处理的过程及结果(含各种图、表、曲线和计算机程序);

(6) 实验结果分析与问题讨论:运用所学的理论知识,对实验的结果进行分析和讨论,尤其是对各种非正常操作现象与事故的分析与讨论,应力求全面、深入、细致、准确,使论点明确、论据充分,还可以提供利用现有实验装置,完成其他新内容实验项目的设想与构思(必须阐明其原理)。

3. 报告编写的其他要求

在编写实验预习报告或正式报告时,还应注意以下几点:

- (1) 文字简洁、字迹工整、叙述清楚、文理通顺、图表清晰、内容完整;
- (2) 所有物理量都必须采用法定单位;
- (3) 报告中所有计算公式都必须注明来源,所有引用的资料都必须提供出处;

(4) 实验预习报告应配置封面,并写明所在系、专业、班级、学号、姓名,以及实验名称、试验时间、指导老师与同组人姓名等内容;

(5) 必须附实验的原始数据记录表(原始记录必须有指导老师的签字方有效),实验报告应在实验结束后一周内送到实验室。

思 考 题

1. 化工原理实验与基础课程实验有哪些不同之处?
2. 化工原理实验的教学目的是什么?
3. 化工原理实验包括哪些内容?
4. 化工原理实验的全过程应包括哪些环节?
5. 怎样才能做好化工原理实验?

第二章 工程实验基础

第一节 工程实验的基本方法

针对工程实验的特殊性，必须采用有效的工程实验方法。化工原理实验课程在长期的发展过程中，形成了一系列的实验方法理论。数学模型法与量纲分析论指导下的实验研究方法是研究工程问题的两个基本方法。这两种方法都可以非常成功地使实验研究结果由小见大、由此及彼地应用于实际生产中的大型设备的设计上。

一、数学模型法

数学模型法是在对过程有充分认识的基础上，对过程作高度的概括，归纳为简单而不失真的物理模型，然后给予数学上的描述，明确各参数的物理意义。数学模型法实际上就是一种解决工程问题的实验规划方法。用数学模型法处理工程问题，同样离不开实验。因为这种模型是基于对事物过程本质的深入理论分析并作出适当简化而得到的，其合理性还需要经过实验的检验。同时，引入的常数项须由实验来测定。一般情况下，将复杂的工程问题归纳为数学模型的方法和步骤为：

(1) 通过预备实验认识过程，找出过程的主要影响因素，并将其归纳、总结、设想为简化物理模型；

(2) 根据物理模型建立数学模型；

(3) 通过实验确定模型参数、检验并修正模型。

下面以流体通过颗粒层流动的实例来说明这一方法的实际应用。

1. 数学模型的建立

流体通过颗粒层的流动，就其流动过程本身来说并没有什么特殊性，问题的复杂性在于流体通道所呈现的不规则几何形状。由于构成颗粒层的基本颗粒，不仅几何形状是不规则的，而且其颗粒大小、表面粗糙程度都是不均匀的，导致这类工程问题的处理就不可能采用严格的流体力学方法，必须寻求简化的工程处理方法。寻求简化途径的基本思路是研究过程的特殊性，并充分利用这一特殊性作出有效的简化。流体通过颗粒层流动的工程背景是过滤操作。在正常过滤时，滤液通过滤饼的流动是非常缓慢的，此时流体流动阻力主要来自流体的黏性力，阻力的大小与流体接触的表面积及流体在颗粒间的真实流速有关。因此，可以抓住“流动速率极为缓慢”这一特殊性，对流动过程作出简化。可以设想：

(1) 流动阻力主要来自于流体与流道的表面摩擦，而与流道形状的关系甚微；

(2) 流体阻力与总表面积成正比；

(3) 流道的简化物理模型为许多平行排列的均匀细管组成的管束；

(4) 流道的总表面积等于颗粒的总表面积；

(5) 流体的全部流道空间等于颗粒床层的空隙容积。

设流道的当量直径为 d_e ，当量长度为 L_e ，流道截面积为 A ，润湿周边长为 C 。颗粒床层的体积为 V ，厚度为 L ，空隙率为 ϵ ，颗粒的比表面积为 a ，则根据当量直径的定义可导出：

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流道截面积 } A}{\text{润湿周边长 } C} \quad (2-1a)$$

若分子、分母同乘以流道长度，则上式变为：

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流道容积 } AL_e}{\text{流道表面积 } CL_e} \quad (2-1b)$$

假设细管的全部流道空间（容积）等于床层的空隙体积，则：

$$\text{流道容积} = \text{床层体积 } V \times \text{空隙率 } \epsilon \quad (2-1c)$$

若忽略床层因颗粒相互接触而彼此覆盖的表面积，则：

$$\text{流道表面积} = \text{颗粒体积 } V(1-\epsilon) \times \text{颗粒比表面积 } a \quad (2-1d)$$

所以，床层的当量直径为：

$$d_e = 4 \frac{V\epsilon}{V(1-\epsilon)a} = \frac{4\epsilon}{(1-\epsilon)a} \quad (2-2)$$

根据流体力学理论和简化模型可知，流体通过颗粒层的压降相当于流体通过一组当量直径为 d_e 、当量长度为 L_e 的细管的压降，即：

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L_e}{d_e} \times \frac{\rho u_1^2}{2} \quad (2-3)$$

式中 L_e ——模型床层高度，m；

u_1 ——流体通过模型细管的流速，m/s；

λ ——流体通过细管的摩擦阻力系数，无量纲。

模型床层高度与颗粒床层高度 L 一般并不相等，但应有下述关系： $L_e = kL$ 。式中 k 为某一待定系数。因此， u_1 与按整个床层截面计算的空床流速 u 的关系为：

$$u_1 = k \frac{u}{\epsilon} \quad (2-4)$$

将式(2-4)代入式(2-3)得：

$$\Delta p_f = \lambda \frac{k^3 L}{d_e} \times \frac{\rho u^2}{2\epsilon^2} \quad (2-5)$$

再将式(2-2)代入得：

$$\Delta p_f = \lambda \frac{k^3 L}{8} \times \frac{(1-\epsilon)a}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (2-6)$$

即：

$$\frac{\Delta p_f}{L} = \lambda \frac{k^3}{8} \times \frac{(1-\epsilon)a}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (2-7)$$

再设 $\lambda' = \lambda k^3 / 8$ ，则可得：

$$\frac{\Delta p_f}{L} = \lambda' \frac{(1-\epsilon)a}{\epsilon^3} \rho u^2 \quad (2-8)$$

式(2-8)即为流体通过颗粒层压降的数学模型，其中保留了待定系数 λ' 。 λ' 亦称为模

型参数,其物理意义为固定床的流动摩擦系数。获得了数学模型,尚需进一步描述颗粒的总表面积,才有可能投入使用。其可能的处理方法是:①根据几何面积相等的原则,确定非球形颗粒的当量直径;②根据总面积相等的原则,确定非均匀颗粒的平均直径。

上述理论分析是建立在流体力学的一般知识和对实际过程——爬流的深刻认识基础上的,也就是建立在理论的一般性和过程的特殊性相结合的基础上的。这是对大多数复杂工程问题处理方法的共同特点。尽管如此,该处理方法仍然还是近似的、抽象的,能否真实地描述实际过程,还需经过模拟实验的检验与修正。

2. 数学模型的检验与模型参数的确定

如果上述理论分析与推导是严格准确的,案例就可以用伯努利方程作出定量的描述,不必再进行实验验证。但事实并非如此,因为在理论分析和推导中就已经清楚地估计到了对过程的简化和模型的建立带来的各种误差所造成的与实际情况的差距,而留下了一个待定系数 λ' 。 λ' 与 Re 的关系必须通过模拟实验才能确定。如果所有的实验结果归纳出了统一的流动摩擦系数 λ' 与 Re 的关系,就可以认为所做的理论分析和模型构思得到了实验的检验。否则,就必须对模型进行若干修正后,再进行实验的检验。康采尼(Kozeny)对此进行了实验研究,他发现在流速较低时,在床层雷诺数 $Re' < 2$ 的情况下,实验数据能较好地符合下式:

$$\lambda' = \frac{K}{Re'} \quad (2-9)$$

式中, K 为康采尼常数,其值为5.0。 Re' 可由下式计算:

$$Re' = \frac{d_e u_1 \rho}{4\mu} = \frac{\rho u}{a(1-\epsilon)\mu} \quad (2-10)$$

对各种不同的床层,康采尼常数 K' 的颗粒误差不超过10%,这说明上述简化模型确实是实际过程的合理简化。当我们用模拟实验来确定模型参数 λ' 时,实际上也就是对简化模型的一种检验。

二、量纲分析法

量纲分析法可以不需要对过程的充分了解,甚至可以不采用真实物料,真实流体和实际的设备尺寸,仅借助于模拟物料(如空气、水、砂等),在实验室规模的小型设备上,经过一些预备性实验或理论上的分析找出一些过程的影响因素,根据物理方程的量纲一致性原则和 π 定律归纳、概括为有实验依据的经验方程。量纲分析法是建立在对物理量量纲的正确分析基础上的。要掌握好量纲分析法,就必须了解物理量的量纲及相互间的关系。

1. 物理量的量纲与无量纲数

物理量的单位可分为基本单位与导出单位两大类型。SI制所规定的基本物理量单位有七个。按其所描述对象的不同,又可分为长度、质量、时间、温度、物质的量、发光强度、电流强度七种不同的单位种类。我们将基本物理量单位的种类称为物理量的基本量纲。同一种类的物理量单位,不论单位的大小、单位制,其量纲都是相同的。在化学工程中常用物理量的基本量纲只有长度、质量、时间和温度,分别以 L 、 M 、 θ 、 T 来表示。同理,导出单位的相应量纲称为导出量纲。导出量纲是由基本量纲经公式推导而得到的,是由基本量纲组成

的。通常可以把它表示为基本量纲的幂指数的乘积形式。如果一个物理量所有基本量纲的幂指数均为零,其量纲表达为“1”,这种物理量称为无量纲数。一个无量纲数可以由几个有量纲数的乘除组合而成,只要组合的结果能使各基本量纲的指数为零即可。

2. 物理方程的量纲一致性原则

不同种类的物理量不能相加减,不能列等式,也不能比较它们的大小。反之,对于能够加减、列等式的物理量,其单位必属于同一种类,即应具有相同的量纲。也就是说,一个物理量方程只要它是根据基本原理通过数学推导而得到的,在方程两边各项的量纲必然是一致的,这就是物理方程的量纲一致性(或均匀性)原则。物理方程的量纲一致性原则是量纲分析法的理论基础。但这一原则不适用于那些没有理论原则作指导,仅根据实际观察所总结出来的经验或半经验公式。不过应当指出,任何经验公式只要引入一个有量纲的常数,也可以使它成为量纲一致的物理方程。

3. 白金汉(Buckingham) π 定律

若影响某一个物理过程的物理变量有 n 个,即:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (2-11)$$

设这些物理变量中有 m 个基本量纲,则该过程可用 $(n-m)$ 个无量纲数所表示的关系式来描述,即:

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_i) = 0 \quad (2-12)$$

π 定律可以从数学上得到证明(此处从略),它的基本含义是:任何量纲一致的物理方程都可以表示为一组无量纲数群的函数,且无量纲数群的数目 i 等于影响该现象的物理量的总数 n 减去用以表示这些物理量的基本量纲的数目 m ,即 $i = n - m$ 。

4. 量纲分析法

利用 π 定律对研究对象进行量纲分析的基本方法及步骤,大致如下:

(1) 通过预备实验,确定对所研究的对象有影响的独立变量,并写出其相应的函数表达式:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0 \quad (2-13)$$

(2) 写出各变量的基本量纲表达式,并确定基本量纲的数目 m 。

(3) 从 n 个变量中选出 m 个变量作为基本变量,条件是它们的量纲应能包括 n 个变量涉及的所有基本量纲,并且它们是相互独立的(即一个不能从另外几个导出)。

(4) 根据 π 定律,写出用 $n-m$ 个无量纲数:

$$\pi_i = x_i x_1^a x_2^b \dots x_m^c \quad (2-14)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_m$ 为选定的基本变量; x_i 为除去基本变量之后余下的 $(n-m)$ 个变量中的任何一个; $a, b, \dots, c$ 为待定指数。

(5) 将各变量的量纲代入无量纲数表达式,依照量纲一致性原理,列出各无量纲数的关于其基本量纲的指数的线性方程,可求出各无量纲数群的具体表达式。

(6) 将原关系式改成 $(n-m)$ 个无量纲数之间,含有待定系数的函数关系表达式:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i) = 0 \quad (2-15)$$

(7) 根据函数 F 的无量纲数表达式组织模拟实验,以确定表达式中待定系数的值及原函数 f 的具体关系式。