

全国高等医学院校教材

制药工程原理与机械

主编 周长征



北京大学医学出版社

全国高等医药院校教材

制药工程原理与机械

主 编 周长征

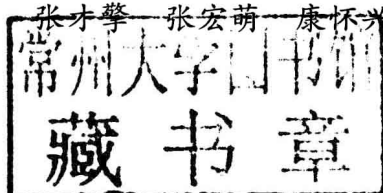
副主编 (按姓氏笔画排序)

刘玉国 杨 东 辛义周 梁伟玲

编 委 (按姓氏笔画排序)

马 山 田桂珍 刘汉强

张才擎 张宏萌 康怀兴



化学工业出版社

ZHIYAO GONGCHENG YUANLI YU JIXIE

图书在版编目 (CIP) 数据

制药工程原理与机械/周长征主编. —北京:
北京大学医学出版社, 2012. 4
ISBN 978-7-5659-0388-5
I. ①制… II. ①周… III. ①制药工业—化工原理
②制药工业—化工设备 IV. ①TQ460
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 073066 号

制药工程原理与机械

主 编: 周长征

出版发行: 北京大学医学出版社 (电话: 010-82802230)

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

网 址: <http://www.pumpress.com.cn>

E - mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 莱芜市圣龙印务有限责任公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 陈 碧 责任校对: 金彤文 责任印制: 张京生

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 17.25 字数: 449 千字

版 次: 2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5659-0388-5

定 价: 35.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

前 言

制药工程原理与机械是运用药理学、工程学、经济学及其他相关学科的理论和方法，研究和探讨制药过程中原料、半成品和成品的生产原理与制药装备的一门应用性学科。

本教材结合最新 GMP，以实用性为原则，介绍制药生产过程中的典型单元操作与主要制药装备。以动量传递、热量传递和质量传递为主线，全面、系统地阐明制药工程的基本原理和实现制药单元操作的装备。动量传递过程是研究以流体力学为基础的基本原理和装备，包括流体流动、流量的测量与设备、流体的输送机械、非均相混合物的分离与机械、液体搅拌与机械等；热量传递过程是研究以热量传递为基础的基本原理和装备，包括加热、冷却、蒸发、冷凝以及热交换设备等；质量传递过程是研究以物质通过相界面的迁移过程为基础的基本原理和装备，如液体精馏、干燥、固液提取及其设备等。以药物制剂的生产流程为顺序，分别介绍药物前处理机械、制剂的成型机械（包括固体制剂和液体制剂机械）、药品包装与包装机械等。此外，本教材还将介绍制药工艺设计的内容。本教材供高等学校药理学、中医学、制药工程、药物制剂专业及相关专业教学使用，可供制药行业从事研究、设计和生产的工程技术人员参考，也可以作为制药企业职工的培训教材。

目 录

第一章 绪论	1
第二章 流体流动与输送	6
第一节 流体静力学基本方程式	6
第二节 流体流动的基本方程式	11
第三节 流体在管内的流动	16
第四节 流速和流量的测量	26
第五节 流体的输送	31
第三章 分离与搅拌	52
第一节 沉降	52
第二节 过滤	59
第三节 离心分离	67
第四节 液体搅拌	71
第四章 传热与换热器	76
第一节 热传导	77
第二节 对流传热	81
第三节 传热过程计算	83
第四节 换热器	87
第五章 蒸发与蒸发器	95
第一节 单效蒸发	96
第二节 多效蒸发	101
第三节 蒸发设备	104
第六章 液体精馏与精馏设备	111
第一节 双组分溶液的气液平衡	111
第二节 蒸馏方法	114
第三节 双组分连续精馏的计算	119
第四节 精馏设备	124
第七章 干燥与干燥器	128
第一节 湿空气的性质和湿度图	129
第二节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	134
第三节 干燥速率与干燥时间	137
第四节 干燥器	142
第八章 药物前处理机械	157
第一节 中药前处理机械	157
第二节 粉碎机械	159
第三节 筛分设备	165

第四节 混合设备·····	168
第九章 中药浸出流程与设备·····	173
第一节 概述·····	173
第二节 提取流程及设备·····	176
第十章 固体制剂生产设备·····	181
第一节 丸剂设备·····	181
第二节 颗粒剂机械·····	183
第三节 片剂设备·····	189
第四节 胶囊剂机械·····	206
第十一章 液体制剂生产设备·····	220
第一节 水针剂生产设备·····	220
第二节 口服液剂生产设备·····	229
第十二章 药品包装与包装机械·····	232
第一节 药品包装材料与容器·····	232
第二节 药品包装技术·····	237
第三节 铝塑泡罩包装机·····	241
第四节 其他包装机械·····	244
第十三章 制剂工程设计·····	250
第一节 概述·····	250
第二节 平面设计原则·····	252
第三节 车间设计·····	257
第四节 中成药生产车间的工艺设计·····	265

第一章 绪 论

制药工程原理与机械是运用药理学、工程学、经济学及其他相关学科的理论和方法研究和探讨制药过程中原料、半成品和成品的生产原理与制药装备的一门应用性学科。它既可被视为化学工程中的一个分支，又是制药工程的重要组成部分之一。

利用劳动工具改变劳动对象的形状、大小、成分、性质、位置或表面，使之成为预期产品的过程称为工艺过程。实现工艺过程的装备分为设备和机械。

就制药装备而言，所实现的过程是靠反应进行，或者用某种力场（热场、电场、重力场等）作用于被加工对象，而与机械能的消耗无关（或仅作用于物料输送和强化过程），统称为设备，如反应器、提取罐、蒸发器、干燥器等。用机械功来改变劳动对象的外形、状态等的装备称为机械，如压片机、制粒机等。

制药机械设备的生产制造是机械工业的子行业之一，为区别制药机械设备和其他机械的生产制造，从行业角度上，将完成制药工艺的生产设备和机械统称为制药机械。

一、制药生产过程与单操作

制药生产过程中所包括的步骤通常分为两大类。一类是以化学处理为主的过程，在反应釜内进行反应，其制造方法、工艺流程、操作原理及反应装置均有很大差别，此类过程不属于本课程的讨论范畴。另一类是以没有发生化学反应的纯物理过程的加工处理为主，为了使制药过程能经济、有效地进行，以获得合乎要求的产品，在各种加工过程中，除了化学反应外，还有很多基本的物理过程，称为单元操作。例如原料的粉碎、筛分、混合、输送等前处理过程，半成品的提纯、精制等后处理加工，如采用沉降、分离、提取、蒸发、蒸馏和干燥等典型的单元操作。

单元操作按其遵循的基本规律分为：遵循流体动力学基本规律的单元操作、遵循热量传递基本规律的单元操作和遵循质量传递基本规律的单元操作。

在实际生产过程中，前处理与后处理过程中的单元设备数量较多，占着工厂中的大部分设备投资费用和操作费用，因此，它们在生产过程中占有一定的地位，是制药过程中不可缺少的环节。

单元操作具有下列共同的特点：单元操作纯属物理性的操作，只能改变物料的物理性质，其化学性质保持不变；同类单元操作其基本原理相同，操作设备往往可以通用；不同生产过程可以由共有的单元操作组合而成。

一个工艺制造过程从原料到产品，是由若干个单元操作串联而成。而每一个单元操作都是在一定的设备内进行的。不同的工艺过程存在较多的单元操作的共性，如操作原理、方法及设备等。这些单元操作在理论上和技术上均可相互沟通、相互借鉴。

例如，中药制药过程中的喷雾干燥与食品工业、化学工业中的喷雾干燥都是应用干燥这一单元操作来实现的；中药生产中提取液的浓缩与酿造工业中的乙醇的提纯都是通过蒸馏方法来完成的。从工业角度来看，这是两个截然不同的过程，各有其独特的工艺条件，从所采用的单元操作角度来看，无论是干燥操作还是蒸馏操作，它们在基本原理、设备类型、设计

方法、过程放大、操作控制等方面均具有共同的规律，即工程原理与所使用的机械和设备相似。

本教材主要讨论以下内容：动量传递过程是研究流体力学为基础的基本规律，如流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌等；热量传递过程是以研究热量传递为基础的基本规律及其单元操作，如加热、冷却、蒸发等；质量传递过程是研究物质通过相界面的迁移过程的基本规律，如蒸馏、干燥、固液提取等；机械过程是研究以机械力学为主要理论基础的过程，如粉碎、筛分、混合、固体输送、成型等。此外，本书还介绍工艺设计部分。通过本课程的学习，可帮助学生掌握制药典型机械和设备的基本原理、类型、结构、选型及其计算等有关知识，能运用于选型、开发、设计和操作。

二、物料衡算与能量衡算

在分析单元操作中，经常用到物料衡算、热量衡算、过程平衡与速率和经济核算等几个基本概念，它们贯穿于本课程的始终，在这里作简单介绍。

1. 物料衡算 根据质量守恒定律，在某一设备输入物料质量减去从设备输出物料质量，等于累积在设备里的物料质量。它适用于任何指定的空间范围，并适用于过程所涉及的全部物料。当没有化学变化时，混合物的任一组分都符合这个通式；有化学变化时，其中各元素仍然符合于这个通式。

对于连续操作的过程，若各物理量不随时间改变，即处于稳定操作状态时，过程中不应有物料的累积，即累积物料质量为零，则输入物料质量的总和等于输出物料质量的总和。

物料衡算的步骤：用物料衡算式可先定出衡算范围，规定一个基准，间歇过程以一次（一批）操作为基准，对于连续过程，则以单位时间为基准，用虚线划出衡算范围，定出衡算基准，列出衡算式并求解。

2. 热量衡算 热量衡算是能量衡算的一种形式，热量衡算的理论基础是能量守恒定律。根据此定律可以引出热量衡算表达式，即：

输入系统的热量－输出系统的热量＝系统向环境散失的热量（热损失）

上式中输入系统的热量应包括外界加入热量、反应物带入热量、放热反应所放出热量；输出系统的热量应包括反应产物带走的热量、吸热反应吸收的热量、热损失等。作热量衡算时，由于焓是相对值，与温度基准有关，故应说明基准温度。习惯上选 0°C 为基温，并规定 0°C 时液态的焓为零。热量衡算的步骤与物料衡算基本相同。

3. 过程平衡与速率

（1）过程平衡：要确立过程能否进行、进行方向及最终可能状态，必须借助于平衡关系。过程平衡表明过程进行的方向和能够达到的极限。例如连通器中的液面最终是处于同一水平面，换热的极限是换热终了时冷、热液体温度相同，药材浸出的极限是浸出物质自药材中扩散入溶液的量与自溶液扩散至药材的量相平衡。因此，利用平衡条件，可以找出当时条件下物料或能量利用的极限，为确定工艺方案提供依据。还可以用实际操作条件结果与平衡数据的比较作为衡量过程的效率，从而找出改进实际操作的方法。

（2）过程速率：即过程进行的快慢。过程速率决定设备的生产能力，过程速率越高，单位设备体积的生产能力越大。过程速率可以用如下的基本关系表达，即：

$$\text{过程速率} = \text{过程推动力} / \text{过程阻力}$$

过程推动力是指过程在某瞬间距平衡的差额，它可以是压力差、温度差或浓度差。增大

过程的推动力或减小过程的阻力均可提高过程速率。当过程推动力一定时,要提高过程速率,应考虑降低过程阻力来实现,其措施不应降低物料和能量利用率,否则会引起副反应或副作用,也不宜增加过多的设备,因为将增加生产成本。

4. 经济核算 在设计具有一定生产能力的设备时,根据设备型式、材料不同,可提出若干个设计方案。对同一设备,选用操作参数不同,直接影响到设备费和操作费。因此,要用经济核算确定最经济的设计方案。

三、单位制与单位换算

选择几个独立的物理量,根据方便原则规定单位,称为基本单位。由有关基本单位组合而成的单位称为导出单位。同一物理量若用不同单位度量时,其数值应相应地改变。这种换算称为单位换算,单位换算时,需要换算因数。

(1) 绝对单位制:常用的绝对单位制有两种:①物理单位制(又称厘米克秒,简称 CGS 制)。其基本量为长度、质量和时间,它们的单位为基本单位。其长度单位是厘米(cm),质量单位是克(g),时间单位是秒(s)。力的单位由牛顿第二定律 $F=ma$ 导出,其单位为克·厘米/秒²,称为达因。在过去的科学实验和物理化学数据手册中常用这种单位制。②绝对实用单位制(又称米千克秒制,简称 MKS 制)。其基本量与 CGS 制相同,但基本单位不同,长度单位是米(m),质量单位是千克(kg),时间单位是秒(s)。导出量力的单位是千克·米/秒²,称为牛顿。

(2) 工程单位制:选用长度、力和时间为基本量,其基本单位分别为米、千克力和秒。质量为导出量。工程单位制中力的单位(千克力)是这样规定的:它相当于真空中以 MKS 制量度的 1 千克质量的物体,在重力加速度为 9.807 米/秒²下所受的重力。质量的单位相应为千克力秒²/米,并无专门名称。

(3) 国际单位制:简称为 SI 制。SI 是在 MKS 制基础上发展起来的,共规定了 7 个基本单位,除了 MKS 制中原有单位米(m)、时间单位秒(s)和质量单位千克(kg)外,还加上热力学温度单位开尔文(k)、电流单位安培(A)、光强度单位坎德拉(cd)和物质的量单位摩尔(mol)。这些单位都有严格的科学定义。SI 有两大优点:一是通用性,所有物理量的单位都可由 7 个基本单位导出;二是一贯性,任何一个 SI 导出单位都可由上述 7 个基本单位相乘或相除而导出。SI 中每种物理量只有一个单位,如热、功、能三者的单位都采用焦耳(J),转换时无需换算因数。

四、药品生产质量管理规范与制药机械

1. GMP 认证 《药品生产质量管理规范》(GMP)是顺应人们对药品质量必须万无一失的要求,为保证药品的安全、有效和优质,从而对药品的生产制造和质量控制管理所作出指令性的基本要求和规定,中国将实施 GMP 制度纳入了《药品管理法》。

GMP 是药品生产企业对生产和质量管理的基本准则,适用于药品制剂生产的全过程和原料药生产中影响产品质量的各关键工艺。《规范》中包括了人员、厂房、设备、物料、卫生、验证、文件、生产管理、质量管理、产品销售与收回、投诉与不良反应报告、自检等项的基本准则。

药品 GMP 认证是国家依法对药品生产企业(车间)及药品品种实施药品监督检查并取得认可的一种制度,是政府强化药品生产企业监督的重要内容,也是确保药品生产质量的一

种科学、先进的管理手段。国家药品监督管理局药品认证管理中心具体负责中国境内药品生产企业（车间）、药品品种和境外生产的进口药品 GMP 认证。药品 GMP 认证有两种形式，一是药品生产企业（车间）的 GMP 认证，另一种是药品品种的 GMP 认证。药品生产企业（车间）GMP 认证对象是企业（车间）。药品品种 GMP 认证对是具体药品。药品 GMP 认证的标准为：《药品生产质量管理规范》、《中华人民共和国药典》、《中华人民共和国卫生部药品标准》及《中国生物制品规程》。

新建、扩建和改建的药品生产企业及车间必须符合《药品生产质量管理规范》，并经认证后方可取得“药品 GMP 证书”。GMP 大体上分为硬件和软件两部分，厂房、空调、设备、给排水、电器等硬件到位只是条件，必须通过软件来组织、管理才是 GMP 的全部内容。

2. 确认与验证 验证就是证明任何程序、生产过程、设备、物料、活动或系统确实能达到预期结果的有文件证明的一系列活动。在 GMP2010 年修订版中将确认与验证正式列为一章，并规定了确认与验证的内容。

企业的厂房、设施、设备和检验仪器经过确认，采用经过验证的生产工艺、操作和检验方法进行生产、操作和检验，并保持持续的验证状态。

设计确认证明厂房、设施、设备的设计符合预定用途和本规范要求；安装确认应当证明厂房、设施、设备的建造和安装符合设计标准；运行确认应当证明厂房、设施、设备的运行符合设计标准；性能确认证明厂房、设施、设备在正常操作方法和工艺条件下能够持续符合标准；工艺验证应当证明一个生产工艺按照规定的工艺参数能够持续生产出符合预定用途和注册要求的产品。

确认和验证不是一次性的行为。首次确认或验证后，根据产品质量回顾分析情况进行再确认或再验证。关键的生产工艺和操作定期进行再验证，确保其能够达到预期结果。

3. 制药机械 制药机械可分为机械设备和化工设备两大类，一般来说，药物制剂生产以机械设备为主（大部分为专用设备），化工设备为辅。目前制剂生产剂型有片剂、针剂、粉针、胶囊、颗粒剂、口服液、栓剂、膜剂、软膏、糖浆等多种剂型，每生产一种剂型都需要一套专用生产设备。

制剂专用设备又有两种形式：一种是单机生产，由操作者衔接和运送物料，使整个生产完成，如片剂、颗粒剂等基本上是这种生产形式，其生产规模可大可小，比较灵活，容易掌握，但受人为因素的影响较大，效率较低；另一种是联动生产线（或自动化生产线），基本上是将原料和包装材料加入，通过机械加工、传送和控制，完成生产，如输液剂、粉针剂等，其生产规模较大，效率高，但操作、维修技术要求较高，对原材料、包装材料质量要求高，一处出问题就会影响整个联动线的生产。

设备的设计、选型、安装、改造和维护必须符合预定用途，应当尽可能降低产生污染、交叉污染、混淆和差错的风险，便于操作、清洁、维护，以及必要时进行的消毒或灭菌。

五、制剂车间工艺设计简介

药厂的基本建设项目和技术改造项目都涉及车间设计问题。车间设计是一项综合性很强的工作，是由工艺设计和非工艺设计（包括土建、设备、安装、采暖、通风、电气、给排水、动力、自控、概预算、经济分析等专业）所组成。

设计质量关系到项目投资、建设速度和使用效果，是一项政策性很强的工作。制药车间

设计也是一个多目标的优化问题，不同于常规的数字问题，不是只有唯一正确的答案，设计人员在作出选择和判断时要考虑各种经常可能相互矛盾的因素，满足技术、经济 and 环境保护等的要求。在允许的时间范围内选择一个兼顾各方面要求的方案，这种选择或决策贯穿于整个设计工程。

设计工作应委托经过资格认证并获得由主管部门颁发的设计证书从事医药专业设计的设计单位进行。

制剂厂设计是多专业的组合，在设计中大都以工艺为主导，工艺设计人员要对各专业提出设计条件，而相关专业又要相互提交和返回设计条件。因此，制剂车间设计是一个系统工程，工艺设计人员不仅要熟悉工艺，具有丰富的生产实践和各专业知识，还要熟悉各专业和工厂的要求，在设计中起主导和协调作用。作为建设单位的医药企业工程技术人员在整个工程建设程序中，特别是各阶段转换的衔接和后期工作中，应起积极的协调与组织作用。

第二章 流体流动与输送

气体和液体统称为流体，流体的性质有：易流动性；压缩性，液体为不可压缩流体，气体为可压缩流体；不能承受拉力。

在制药生产中所处理的物料有很多是流体。根据生产要求，往往需要将这些流体按照生产程序从一个设备输送到另一个设备。在制药厂中，管路纵横排列，与各种类型的设备连接，完成着流体输送的任务。除了流体输送外，制药生产中的传热、传质过程以及化学反应大多是在流体流动下进行的。流体流动状态对这些单元操作有很大的影响。为了能深入了解这些单元操作的原理，就必须掌握流体流动的基本原理。

在研究流体流动时，常将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质。把流体视为由无数个流体微团（或流体质点）所组成，这些流体微团紧密接触，彼此没有间隙，这就是连续介质模型。流体微团（或流体质点）宏观上足够小，以至于可以被看成一个几何上没有维度的点；同时微观上足够大，它里面包含着许许多多的分子，其行为已经表现出大量分子的统计学性质。把流体视为连续介质，其目的是为了摆脱复杂的分子运动，从宏观的角度来研究流体的流动规律。

第一节 流体静力学基本方程式

流体静力学是研究流体在外力作用下达到平衡的规律。在实际工程中，流体的平衡规律应用很广，如流体在设备或管道内压力的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等均以这一规律为依据。

一、流体的密度

单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度，其表达式为：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中， ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

密度属于流体的物理性质。影响密度的因素有：①气体：种类、压力、温度、浓度；②液体：种类、温度、浓度。液体的密度随压力和温度变化很小，在研究流体的流动时，若压力和温度变化不大，可以认为液体的密度为常数。

密度为常数的流体称为不可压缩流体。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得。

气体是可压缩的流体，其密度随压力和温度而变化。因此气体的密度必须标明其状态，从手册中查得的气体密度往往是某一指定条件下的数值，这就涉及到换算问题。在压力和温度变化很小的情况下，也可以将气体当做不可压缩流体来处理。

制药生产中所遇到的流体往往是含有几个组分的混合物。手册中所列的通常为纯物质的密度，所以混合物的平均密度 ρ_m 需通过计算求得。

1. 混合液体的密度 各组分的浓度常用质量分率来表示。若混合前后各组分体积不变，则 1kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和。混合液体的平均密度 ρ_m 为：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (2-2)$$

式中， ρ_A 、 ρ_B ... ρ_n ——液体混合物中各纯组分的密度 (kg/m^3)；

x_{wA} 、 x_{wB} ... x_{wn} ——液体混合物中各组分的质量分率。

2. 混合气体的密度 各组分的浓度常用体积分率来表示。若混合前后各组分的质量不变，则 1 m^3 混合气体的质量等于各组分质量之和，即：

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \quad (2-3)$$

式中， x_{VA} 、 x_{VB} ... x_{Vn} ——气体混合物中各组分的体积分率。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可用理想状态气体方程计算，此时应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替式中的气体摩尔质量 M 。气体混合物的平均分子量 M_m 可按式计算：

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_n \quad (2-4)$$

式中， M_A 、 M_B ... M_n ——为气体混合物中各组分的摩尔质量；

y_A 、 y_B ... y_n ——气体混合物中各组分的摩尔分率。

$$\rho_m = \frac{p M_m}{RT} \quad (2-5)$$

单位质量流体具有的体积，称为流体的比体积，流体的比体积是密度的倒数。

液体的相对密度是指该液体的密度和 4℃ 水的密度之比。

二、流体的静压力

1. 流体静压力的定义 流体垂直作用于单位面积上的力，称为压力，或称为静压力。其表达式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-6)$$

式中， p ——流体的静压力， N/m^2 、 Pa ；

F ——垂直作用于流体表面上的力， N ；

A ——作用面的面积， m^2 。

atm (标准大气压)、某流体柱高度、bar (巴) 或 kgf/cm^2 ，它们之间的换算关系为：

1atm = 1.033 kgf/cm^2 = 760mmHg = 10.33mH₂O = 1.0133bar = 1.0133 $\times 10^5$ Pa = 0.10133MPa

2. 绝对压力、表压力和真空度 压力的大小以两种不同的基准来表示：一种是绝对真空；另一种是大气压力。以绝对真空为基准测得的压力称为绝对压力，以大气压力为基准测得的压力称为表压或真空度。

表压力是由压力表直接测得的读数，按其测量原理就是绝对压力与大气压力之差，即：

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

真空度是真空表直接测量的读数，其数值表示绝对压力比大气压低多少，即：

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

绝对压力、表压力与真空度之间的关系可用图 2-1 表示。

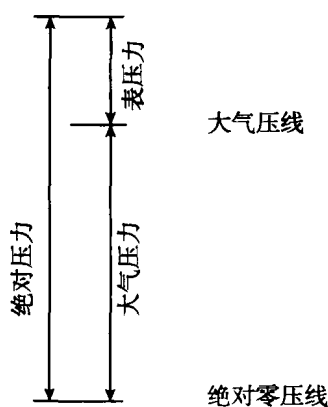


图 2-1 绝对压力、表压力和真空度的关系

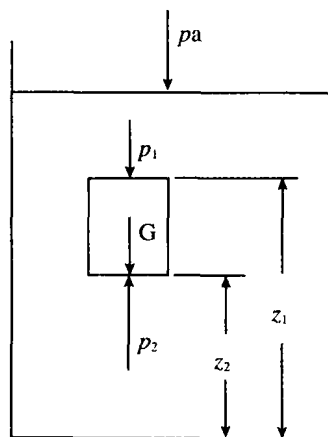


图 2-2 液柱受力分析

三、流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程是用于描述静止流体内部，流体在重力和压力作用下的平衡规律。重力可看成不变的，变化的是压力，所以实际上是描述静止流体内部压力变化的规律。这一规律的数学表达式称为流体静力学基本方程，可通过下述方法推导而得。

如图 2-2 所示，容器内装有密度为 ρ 的液体，液体为不可压缩流体，其密度不随压力变化。在静止液体中取一段液柱，其截面积为 A ，以容器底面为基准水平面，液柱的上、下端与基准水平面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 。作用在上、下两端面的压力分别为 p_1 和 p_2 。

重力场中在垂直方向上对液柱进行受力分析：

- (1) 上端面所受总压力 $P_1 = p_1 A$ ，方向向下；
- (2) 下端面所受总压力 $P_2 = p_2 A$ ，方向向上；
- (3) 液柱的重力 $G = \rho g A (z_1 - z_2)$ ，方向向下。

液柱处于静止时，上述三项力的合力应为零，即：

$$p_2 A - p_1 A - \rho g A (z_1 - z_2) = 0$$

整理得：

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2) \quad (2-7)$$

如果点 1 处于容器的液面上，设液面上方的压力为 p_0 ，距液面 h 处的点 2 压力为 p ，式 2-7 可改写为

$$p = p_0 + \rho g h \quad (2-8)$$

式 2-7、式 2-8 称为流体静力学基本方程式，说明在重力场作用下，静止、连续、均质、不可压缩的流体内部压力的变化规律。由式 2-8 可见：

(1) 当容器液面上方的压力 p_0 一定时，静止液体内部任一点压力 p 的大小与液体本身的密度 ρ 和该点距液面的深度 h 有关。

(2) 在静止的、连续的同一流体内，处于同一水平面上各点的压力都相等。该压力相等的平面称为等压面。

(3) 当液面上方的压力 p_0 改变时，液体内部各点的压力 p 也发生同样大小的改变，称为巴斯噶定律。

(4) 式 2-8 可改写为: $\frac{p-p_0}{\rho g} = h$ 。

上式说明, 压力差的大小可以用一定高度的液体柱表示。用液体高度来表示压力或压力差时, 式中密度 ρ 影响其结果, 因此必须注明是何种液体。

虽然静力学基本方程是用液体进行推导的, 液体的密度可视为常数, 而气体密度则随压力而改变, 但考虑到气体密度随容器高低变化甚微, 一般也可视为常数, 故静力学基本方程亦适用于气体。

应注意, 两点在静止的、连通着的同一流体内, 并在同一水平面上, 为等压面, 否则为非等压面。

四、流体静力学基本方程式的应用

(一) 压力与压力差的测量

测量压力的仪表很多, 现仅介绍以流体静力学基本方程式为依据的测压仪器。这种测压仪器统称为液柱压差计, 可用来测量流体的压力或压力差, 有以下几种。

1. U 型压差计 U 型压差计结构如图 2-3 所示, 内装有液体作为指示液, 指示液必须与被测液体不互溶, 不起化学反应, 且其密度 ρ_A 大于被测流体的密度 ρ 。

当测量管道中 1-1'、2-2' 两截面处流体的压力差时, 可将 U 型管压差计的两端分别与两截面测压口相连。由于两截面的压力 p_1 大于 p_2 , 所以在 U 形管的两侧便出现指示液液面的高度差 R 。因 U 形管内的指示液处于静止状态, 故位于同一水平面的 A、A' 两点压力相等, 即 $p_A = p_{A'}$, 根据流体静力学基本方程可得:

$$P_A = p_1 + \rho g(R+m)$$

$$p_{A'} = p_2 + \rho g m + \rho_A g R$$

于是

$$p_1 + \rho g(R+m) = p_2 + \rho g m + \rho_A g R$$

$$\text{或} \quad p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho) g R \quad (2-9)$$

式 2-9 表明, 当压差计两端流体相同时, U 形管压差计直接测得的读数 R 实际上并不是真正的压差, 而是两截面的虚拟压力之差。

同样的压差, 用 U 形压差计测量的读数 R 与密度差 $(\rho_A - \rho)$ 有关, 故应合理选择指示液的密度 ρ_A , 使读数 R 在适宜的范围内。

若被测流体是气体, 由于气体的密度远小于指示剂的密度, 则式 2-9 可简化为:

$$p_1 - p_2 \approx \rho_A g R \quad (2-10)$$

U 形压差计也可测量流体的压力, 测量时将 U 形管一端与被测点连接, 另一端与大气相通, 此时测得的是流体的表压力或真空度。

2. 微差压差计 若所测得的压力差很小, 为了把读数 R 放大, 除了在选用指示液时,

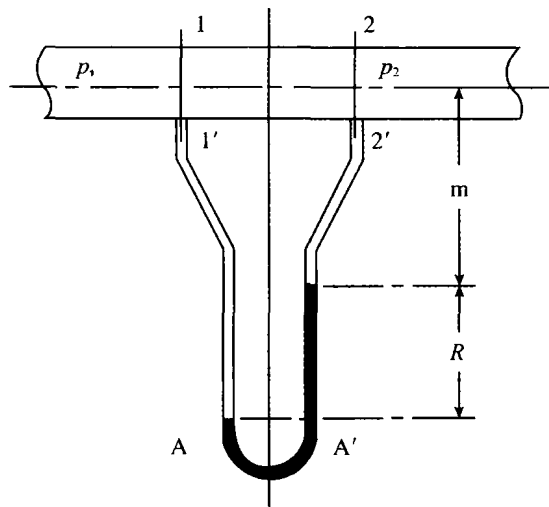


图 2-3 U 型管压差计

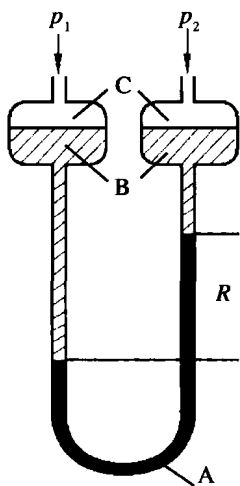


图 2-4 微差压差计

尽可能地使其密度 ρ_A 与被测流体 ρ 相接近外，还可采用如图 2-4 所示的微差压差计。其特点是：

(1) 压差计内装有两种密度相接、不发生化学反应且不互溶的指示液 A 和 B，而指示液 B 与被测流体 C 不发生化学反应且不互溶。

(2) 为了读数方便，U 形管的两侧臂顶端各装有扩大室，又称为“水库”。扩大室内径与 U 形管内径之比应大于 10，扩大室的截面积比 U 形管的截面积大很多，即使 U 型管内指示液 A 的液面差 R 很大，扩大室内的指示液 B 的液面变化仍很微小，可以认为维持等高。于是压力差 $p_1 - p_2$ 便可用下式计算，即

$$p_1 - p_2 = -(\rho_A - \rho_B)gR \quad (2-10)$$

由于两种指示液的密度差 $(\rho_A - \rho_B)$ 较小， R 值被放大。

3. 斜管压差计 当被测量的流体压差更小时，U 形压差计的读数 R 必然很小，为了得到精确的读数，可采用图 2-5 所示的斜管压差计。此压差计的读数 R' 与 R 的关系为：

$$R' = R / \sin \alpha \quad (2-11)$$

式中 α 为倾斜角，其值越小，将 R 值放大为 R' 的倍数越大。

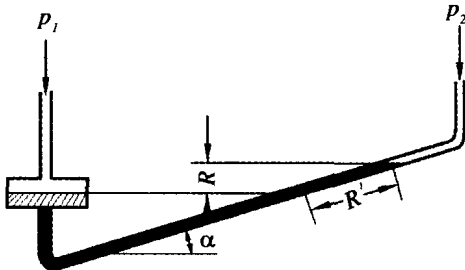


图 2-5 倾斜液柱压差计

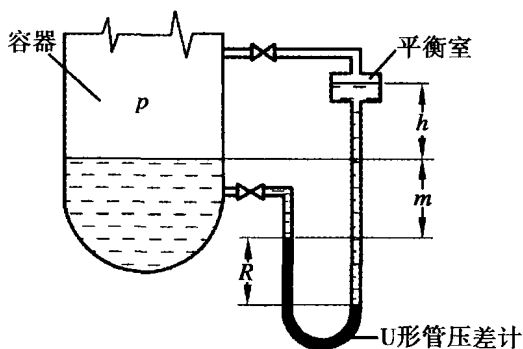


图 2-6 液位的测量

(二) 液面的测量

制药厂经常需要了解容器里物料的储存量，或要控制设备里的液面，因此要对液面进行测定。有些液位测定方法，是以静力学基本方程式为依据的。

最原始的液位计是在容器底部器壁及液面上方器壁处各开一个小孔，两孔间用短管、管件及玻璃管相连。玻璃管内液面高度即为容器内的液面高度。这种液面计结构简单，但易于破损和堵塞，而且不便于远处观测。

图 2-6 所示的是利用 U 形压差计进行近距离液位测量装置。在容器的外边设一平衡室，其中所装的液体与容器中相同，液面高度维持在容器中液面允许到达的最高位置。用一装有指示剂的 U 形压差计把容器和平衡室连通起来，压差计读数 R 即可指示出容器内的液面高度，关系为：

$$h = (\rho_0 - \rho)R / \rho \quad (2-12)$$

第二节 流体流动的基本方程式

制药厂中的流体大多数在密闭的管道或设备中流动,本节主要讨论流体在管内流动的规律,即讨论流体在流动过程中,其位能、静压能和动能如何变化的规律,从而解决流体流动这一单元操作中出现的工程问题。流体流动应服从一般的守恒定律:质量守恒和能量守恒。从这些守恒定律可得到反映流体流动规律的基本方程式:连续性方程式(质量守恒)和柏努利方程式(能量守恒)。

一、基本概念

(一) 稳定流动与不稳定流动

在流动系统中,若各截面上流体的流速、压力、密度等有关物理量仅随位置而变,不随时间而变,这种流动称为稳定流动;若流体在各截面上的有关物理量既随位置而变,又随时间而变,则称为不稳定流动。药品生产中,流体流动大多为稳定流动,故如非特别指出,一般所讨论的均为稳定流动。

(二) 流量和流速

单位时间内流过管道任一截面的流体量称为流量。若流体量用体积来计量,称为体积流量,以 V_s 表示,其单位为 m^3/s ;若用质量来计量,则称为质量流量,以 w_s 表示,其单位为 kg/s 。

体积流量与质量流量的关系为:

$$w_s = V_s \cdot \rho \quad (2-13)$$

式中, ρ ——流体的密度 (kg/m^3)。

单位时间内流体在流动方向上所流经的距离称为流速,以 u 表示,其单位为 m/s 。

流体流过管路时,在管路任一截面上各点的流速沿管径而变化,在管截面中心处流速最大,越靠近管壁流速就越小,在管壁处的流速为零。流体在管截面上各点的流速分布规律较为复杂,在工程中为简便起见,流速通常采用整个管截面上的平均流速表示,即用流量相等的原则来计算平均流速。其表达式为:

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (2-14)$$

式中, A ——与流动方向相垂直的管道截面积,单位 m^2 。

流量与流速的关系为:

$$w_s = V_s \rho = u A \rho \quad (2-15)$$

由于气体的体积流量随温度和压力而变化,因而气体的流速亦随之而变。因此采用质量流速较为方便,单位时间内流体流过管路截面积的质量称为质量流速,以 G 表示,其表达式为:

$$G = \frac{w_s}{A} = \frac{V_s \rho}{A} = u \rho \quad (2-16)$$

式中, G ——质量流速,亦称质量通量,单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

一般管道的截面均为圆形,若以 d 表示管道内径,则: $u = \frac{V_s}{\frac{\pi d^2}{4}}$