

普通高等院校“十一五”规划教材

化工原理

—— 流体流动与传热分册

HUAGONG YUANLI — LIUTILIDONG YU CHUANRE FENCE

张洪流 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校“十一五”规划教材

化工原理

——流体流动与传热分册

张洪流 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本教材主要介绍流体力学和传热学基本理论以及相关单元操作的原理、流程、典型设备的构造、操作性能与调节、工艺计算及设计选用等。内容包括绪论、流体力学、流体输送机械、非均相物系分离、固体流态化、机械搅拌、传热、蒸发与结晶。

本教材力求体现工科院校化工类专业及其相关专业的教学特点,本着理论必需、够用为度,强化培养应用能力的原则,注重理论与实践相结合,引入大量工程实例,着重培养读者的工程观念和处理问题的能力。

本教材可作为高校化工类专业以及过程装备与控制、石油加工、林产加工、矿物加工、生物工程、食品工程、制药工程、环境工程、纺织染整等专业的化工原理课程教材使用,也可供相关企事业单位工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理. 流体流动与传热分册/张洪流主编. —北京:
国防工业出版社, 2009. 2
普通高等院校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-06100-0

I. 化... II. 张... III. ①化工原理—高等学校—
教材②化工过程—流体流动—高等学校—教材③化工过
程—传热—高等学校—教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 199553 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 31 字数 750 千字

2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 55.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

“化工原理”课程是化工类专业以及过程装备与控制、生物工程、食品工程、制药工程、材料工程、环境工程、石油加工、林产加工、矿物加工、纺织染整等专业的重要技术基础课程之一。该课程在化工行业素有“万精油”之美称,是直接服务生产一线的课程。流体流动与传热分册主要研究流体力学和传热学基本理论,以及相关单元操作的原理、典型设备的结构与操作调控方法、单元操作计算、典型设备的选型和设计方法。由于单元操作理论在上述专业的专业课程教学中被作为重要基础知识反复应用,故本课程也是上述专业的“平台课程”。

随着我国高等教育的发展,企业用人机制的不断变更,高等教育由理论研究型向应用型转化势在必行。为此,出版一套符合当前工科院校人才培养机制,以强化应用能力培养为目标的化工原理教材十分必要。本教材正是在此指导思想下编写的。在编写过程中,力求体现高校工科专业的教学特点,本着理论必需、够用为度,强化培养应用能力的原则,通过简化公式推导并引入大量工程实例,着重培养读者的工程观念和处理问题的能力。

本书包括绪论、流体力学、流体输送机械、非均相系统的分离、固体流态化、液体搅拌、传热、蒸发与结晶。为便于实施目标教学,教材内容按“掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写,在每章“学习目的及要求”中均有明确的说明,并通过例题、思考题和习题进行反复练习,以达到理解和熟练掌握的要求。为便于读者复习,每章均设有“本章小结”。此外,为便于自学,同时配套出版有《化工原理——流体流动与传热电子教材光盘》及《化工原理——流体流动与传热分册学习指导书》。

本书由安徽理工大学张洪流主编并负责全书的统筹工作。其中绪论、第一章、第六章及附录由张洪流编写,第二章由张茂润编写,第三章由陈明功编写,第四章、第五章由陈明强编写,第七章由徐继红编写。在本教材的出版过程中,得到了国防工业出版社的大力支持与帮助,在此致以诚挚的谢意。

由于水平有限,书中不完善之处敬请同仁批评指正。

张洪流

2008年6月

目 录

绪论	1
学习目的及要求	1
一、本课程的形成	1
二、本课程的性质与任务	3
三、单位与单位制	3
四、基本概念	4
复习思考题	10
第一章 流体力学	11
学习目的及要求	11
第一节 流体的基本物性	11
一、密度	11
二、压强	14
三、流量与流速	16
四、黏度	17
第二节 流体静力学	19
一、流体静力学基本方程式	19
二、静力学基本方程的应用	21
第三节 流体动力学	30
一、流动系统的能量类型	31
二、稳定流动系统的能量衡算——伯努利方程式	32
三、伯努利方程式的应用	34
第四节 管流过程	39
一、流体阻力的表现与形成原因	40
二、流体的流动型态	40
三、圆管中的速度分布与流动边界层概念	43
第五节 化工管路基础	46
一、管路的分类	46
二、化工管路的基本构成	47
三、管子的选用与连接	52
第六节 管流系统的能量损失	53
一、直管阻力损失	53
二、局部阻力损失	58

三、系统的总能量损失	63
第七节 管路计算	64
一、单一管路计算	65
二、复杂管路计算的原则	67
第八节 流量测量	69
一、测速管	69
二、孔板流量计	71
三、文氏流量计	74
四、转子流量计	75
本章小结	76
复习思考题	78
习题	79
本章主要符号说明	85
第二章 流体输送机械	85
学习目的及要求	85
第一节 离心泵	85
一、离心泵的结构及工作原理	86
二、离心泵的主要性能参数与特性曲线	89
三、影响离心泵性能的主要因素	93
四、离心泵的吸上高度及其确定	93
五、离心泵的工作点与调节	97
六、离心泵的类型与选用	101
第二节 其他化工生产用泵及其选用	107
一、其他化工生产用泵	107
二、各类泵型的性能比较	114
第三节 气体输送机械	115
一、通风机	116
二、鼓风机	120
三、压缩机	120
四、真空泵	131
本章小结	133
复习思考题	134
习题	135
本章主要符号说明	136
第三章 非均相物系的分离	138
学习目的及要求	138
第一节 重力沉降及设备	139
一、自由沉降	139

二、重力沉降设备	144
第二节 离心沉降及设备	152
一、离心沉降与离心沉降速度	152
二、离心沉降设备	155
第三节 过滤	160
一、过滤操作的基本概念	160
二、过滤基本方程式	163
三、恒压过滤	164
四、过滤设备	167
第四节 离心机	173
一、基本概念	173
二、工业离心机简介	174
第五节 其他气体净制设备	177
一、惯性分离器(组)	178
二、袋滤器	178
三、电除尘器	179
四、文丘里除尘器	179
五、泡沫除尘器	180
第六节 分离设备的选择	180
一、气—固混合物的分离方案及设备选择	180
二、液—固混合物的分离方案及设备选择	181
本章小结	182
复习思考题	182
习题	183
本章主要符号说明	184
第四章 固体流态化	185
学习目的及要求	185
第一节 流体在固定床层中的流动	185
一、固定床的简化模型	185
二、流体通过固定床层的压强降	186
第二节 固体的流态化	189
一、床层的流态化过程	189
二、两种典型流化类型	190
三、流化床的特性	190
四、流体通过流化床的压强降	192
五、流化床的操作范围	194
六、流化床的工艺设计	196
第三节 气力输送	199

一、气力输送的特点	199
二、气力输送的类型	199
本章小结	201
复习思考题	202
习题	202
本章主要符号说明	202
第五章 搅拌	204
学习目的及要求	204
第一节 概述	204
一、机械搅拌装置的构成	204
二、搅拌器中的流型及其控制	209
三、搅拌效果	212
四、搅拌器的液体循环量、压头及功率消耗	212
第二节 搅拌功率计算及搅拌器选型	214
一、标准搅拌器构型	214
二、功率关联式	214
三、功率曲线	215
四、非均相物系搅拌功率的计算	218
五、搅拌器选型	218
第三节 搅拌器的放大	222
一、单元设备的放大基础	222
二、搅拌器的放大问题	223
本章小结	225
复习思考题	225
习题	225
本章主要符号说明	226
第六章 传热	227
学习目的及要求	227
第一节 概述	227
一、传热在化工生产中的应用	227
二、传热的基本方式	228
三、工业换热方式	229
第二节 传热基本方程	231
一、典型间壁式换热器	231
二、传热基本方程	232
第三节 传热速率与热负荷	233
一、热负荷	233
二、热负荷与传热速率间的关系	233

三、热负荷的计算方法	234
第四节 传热平均温度差	236
一、恒温传热过程的传热平均温度差	236
二、变温传热过程的传热平均温度差	236
第五节 热传导	242
一、傅里叶定律	243
二、傅里叶定律的应用	245
第六节 对流传热	250
一、基本概念	250
二、对流传热基本方程——牛顿冷却定律	250
三、对流传热膜系数 α	251
第七节 辐射传热	262
一、基本概念	262
二、两固体间的辐射传热	265
三、气体和器壁间的辐射传热	268
第八节 传热系数	269
一、传热系数的确定方法	269
二、强化传热的途径	272
第九节 传热应用计算	276
一、传热系数法应用计算示例	276
二、传热单元数法及应用示例	279
第十节 工业换热器	283
一、换热器的分类	283
二、间壁式换热器简介	283
第十一节 列管式换热器的工艺设计	290
一、列管式换热器设计过程需考虑的问题	291
二、标准列管式换热器选型设计的一般步骤	293
三、非标准列管式换热器的工艺设计	297
本章小结	298
复习思考题	299
习题	300
本章主要符号说明	302
第七章 蒸发与结晶	304
学习目的及要求	304
第一节 概述	304
一、蒸发流程	304
二、蒸发操作的特点	305
三、蒸发操作的分类	305

第二节 蒸发设备	306
一、蒸发器的形式与结构	306
二、蒸发器的辅助设备	312
第三节 单效蒸发的工艺计算	312
一、蒸发水量	313
二、加热蒸汽消耗量	313
三、蒸发器的传热面积	316
第四节 蒸发系统的节能与多效蒸发	321
一、蒸发器的生产强度与蒸汽的经济性	321
二、多效蒸发	322
三、提高加热蒸汽经济性的其他措施	325
第五节 结晶分离技术	326
一、结晶操作的类型	326
二、结晶分离的基本原理	326
三、结晶过程的相平衡	327
四、影响结晶操作的因素	329
五、结晶工艺计算	330
六、结晶器	331
七、其他结晶方法	333
本章小结	334
复习思考题	335
习题	335
本章主要符号说明	336
附录	338
一、化工中常用的法定计量单位	338
二、常用单位的换算	339
三、某些气体的重要物理性质	342
四、某些液体的重要物理性质	343
五、干空气的物理性质	345
六、水的物理性质	346
七、水在不同温度下的黏度	347
八、水的饱和蒸汽压	348
九、饱和水蒸气表(按温度排列)	349
十、饱和水蒸气表(按压强排列)	350
十一、某些液体的导热系数	352
十二、某些气体和蒸汽的导热系数	353
十三、某些固体材料的导热系数	354
十四、常用固体材料的密度和比热容	355

十五、液体的黏度和密度 356

十六、常压下气体的黏度 359

十七、液体的比热容 360

十八、常压下气体的比热容 362

十九、汽化潜热(冷凝热) 363

二十、某些有机液体的相对密度(液体密度与 4℃ 水的密度之比) 365

二十一、液体的表面张力 366

二十二、某些固体材料的重要物理性质 368

二十三、常见无机盐水溶液在常压下的沸点 369

二十四、管子规格 370

二十五、常用离心泵的规格(摘录) 371

二十六、4-72-11 型离心式通风机的规格 379

二十七、列管式换热器规格(摘录) 379

参考文献 384

绪 论

学习目的及要求

1. 掌握内容

本课程的性质、地位及作用,单元操作的概念,单位与单位制度、单位换算,稳定流动系统与不稳定流动系统、稳定系统的特性。

2. 理解内容

物料衡算、能量衡算、热量衡算,平衡与过程速率的概念,实验关联方法、因次与因次一致性、特征数的概念等。

3. 了解内容

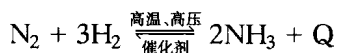
“三传”概念,实验数据关联方法、因次分析法。

一、本课程的形成

化学工业是国民经济的支柱产业,化工产品涉及到人们的衣、食、住、行各个领域,其产值是衡量国民经济发展水平的重要标志之一。以化学方法为核心将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程,其特点是所用原料广泛、产品品种繁杂、性质各异。本课程则是随着化学工业的发展而发展形成的。

随着科技的不断进步、化学工业的不断发展,化学工业已由早期单一的无机化工逐渐形成集无机化工、有机化工、高分子化工、精细化工、材料化工、制药化工、生物化工等分支为一体的化学工程领域,化工产品的种类已逾数万。虽然不同化工产品的生产工艺各不相同,但只需稍加分析就可以看出,它们均可视为由化学反应器与若干物理操作设备串联组合而成。

现以合成氨生产过程为例介绍:氨合成反应方程式为



众所周知,该反应为高度可逆反应,若从反应动力学角度分析,不难得到下述结论:

(1) 该反应的正反应为体积缩小的反应,增大反应系统的压强,有利于反应朝正方向进行。此外,高压下可增大气体的密度,提高气体分子的碰撞概率,有利于提高反应转化率、增大反应速度,并可缩小设备体积。因此,进入氨合成塔的气体必先经过压缩机增压。

(2) 为提高氨合成反应的速度,该反应需要借助催化剂的催化作用。不同温度条件下催化剂对反应的加速能力不同,随合成氨系统的不同,约在 $400^\circ\text{C} \sim 550^\circ\text{C}$ 具有最大催化能力。为确保氨合成反应在最高速率下进行,气体原料在进入合成塔前必先经过换热器预热升温。

(3) 该反应的正反应为放热反应,及时移出反应热将有利于反应朝正方向进行。因此,为提高氨合成反应的转化率,反应气体在反应过程中必须经过冷却设备冷却,以及时移出反应热。

(4) 按平衡移动原理,降低反应产物的浓度将有利于反应朝正方向进行。由于氨较氮、氢气易于液化,在高压下只须对合成气加以冷却即可将氨和氮、氢气分离。所以,为降低系统反

应产物的浓度、获得反应产物,合成气必须经过冷却设备冷却降温,并经过气—液分离设备(氨分)以分离出液氨,剩余的氮、氢气再经循环压缩机补充压强后返回系统循环反应。

此外,由于压缩机与循环机在对气体的增压过程中,会将机体内的润滑油夹带出,故在压缩机与循环机的出口部位均需设置气—液分离装置(油分)。

综上所述,由反应动力学原理确定的合成氨生产路线见图 0-1。

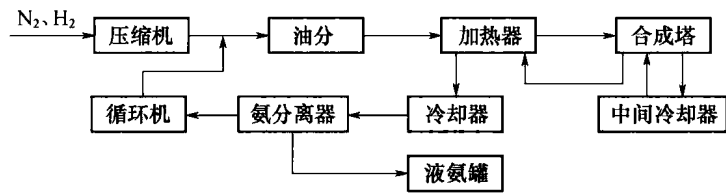


图 0-1 合成氨生产路线

在图 0-1 所示生产路线中,除合成塔为化学反应设备以外,其余设备均为物理操作设备。这些物理操作设备在生产工艺流程中起到输送流体及为化学反应过程准备必要条件的作用。

在化工生产过程中,常用的物理操作通常不超过 10 个。人们将这些在化工生产过程中普遍使用的、遵循一定的物理学定律、所用设备相似、具有类似作用的物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。

随着单元操作概念的引入,对某一化工产品的合成工艺研究就不再需要作为一个专门学科来研究,可分别从化学反应及单元操作这两方面来同时进行,从而大大加快化工产品的开发进程,有利于化学工业的迅速发展。

必须指出,在化工产品的生产过程中,化学反应是具有决定意义的一步。因此,人们常把化学反应称为化工生产过程的核心。而上述的单元操作在多数情况下是为化学反应这一核心服务的,只有少数的单元操作(如吸收、精馏等)在特定的场合可用来直接制造产品。

根据生产过程中常见单元操作所遵循的规律,可划分为以下 3 类,见表 0-1。

表 0-1 常见单元操作的分类

过程名称	单元操作名称	遵循的规律或原理	过程名称	单元操作名称	遵循的规律或原理
动量传递过程	流体的流动与输送 沉降 过滤 气力输送等	流体力学规律	热量传递过程	传热(加热或冷却) 蒸发等	热交换规律
			质量传递过程	蒸馏与精馏 吸收 萃取 干燥等	扩散规律

由表 0-1 可知,在各类单元操作中进行的基本过程主要包括动量传递、热量传递和质量传递过程,俗称“三传”。其中,由温度差和浓度差导致的热量传递及质量传递比较容易理解,至于动量传递的概念,则需借助牛顿第二定律来帮助理解。

牛顿第二定律表达式为

$$F = ma$$

式中 F ——作用于质量为 m 的物湾上的外力(N);

a ——在外力 F 作用下引起该物体的加速度(m/s^2)。

根据物理学定义,加速度为

$$a = \frac{dv}{dt}$$

式中 v ——物体的运动速度(m/s);

t ——运动时间(s)。

若物体的质量不变,则有

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

式中: mv 为物体质量与瞬间速度的乘积,即物体的瞬间动量;而 $d(mv)/dt$ 则是物体的瞬间动量变化率。

牛顿第二定律可以理解为外力对物体的作用过程是使物体动量变化的过程,即涉及动量传递的过程。对流体输送、搅拌、过滤等需在外力作用下进行的单元操作过程必然要涉及动量传递,故称为动量传递过程。

“三传”过程往往是同时进行并相互影响的。例如,水向大气蒸发的过程为相际传质过程,同时因水分蒸发需吸收热量也是传热过程。在过程机理及过程速率问题上,“三传”之间存在一定的类似性。例如,过程进行的方向都是从高(动量、能量、温度、浓度)到低,过程速率均可表达成过程推动力除以过程阻力的形式等。此外,由于“三传”中的质量传递过程所涉及的单元操作是为分离混合物,故又称为“分离操作”。

随着科学技术的飞速发展,分离工程的应用领域越来越广,涉及的单元操作类型不断增加,新型分离设备也在不断开发,技术日益成熟,已有从化工原理课程中分离的趋势。为此,本书只讨论动量传递和热量传递部分,传质部分将单独成篇放在《化工原理——传质与分离技术分册》中加以讨论。

二、本课程的性质与任务

“化工原理”课程是化工类一切专业以及材料工程、过程装备与控制、制药工程、生物工程、环境工程、矿物加工、石油加工、酿造、林产加工、纺织染整等专业继高等数学、物理化学、工程力学、制图等课程的后续课程。通过本课程可将上述专业的基础课程与专业课程进行有机地衔接,培养学生的工程观念,是上述各专业的一门极为重要的技术基础课程。它在化工行业素有“万精油”的美称,是直接服务于生产一线的课程。由于相关的生产工艺流程由反应设备及单元操作设备组合而成,单元操作理论将在上述专业课程的教学过程中作为基础知识反复应用,因此本课程也是上述各专业的“平台课程”。

本课程主要研究讨论流体力学和传热学基本理论以及相关单元操作(如流体输送、非均相物系分离、固体流态化、搅拌、传热、蒸发与结晶等)的原理、典型设备的结构与操作调控方法、单元操作计算、典型设备的选型和设计方法。

研究相关单元操作的基本原理和规律,熟悉实现这些操作的设备结构、工作原理、主要性能、操作调控方法及有关技术问题,并掌握一定的工艺运算能力、设备的选型及设计能力,以便在工程实践中能运用这些知识去分析和解决问题,使单元操作在最优化条件下进行,这就是我们学习本课程的目的与任务。

三、单位与单位制

由于本课程具有很强的工程性,与生产实际紧密相连,因此,在课程教学过程中必将涉及

到工程实践中的单位与单位制问题。

单位是衡量物理量大小的依据,有基本单位和导出单位之分。如国际单位制规定有长度 m、质量 kg、时间 s 等 7 个基本单位,其余单位皆由此 7 个基本单位导出(如牛顿 $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)称为导出单位。基本单位与导出单位的集合则称为单位制度,简称单位制。

由于历史的原因及学科领域的不同,先后形成了不同的单位制,如物理单位制、工程单位制、英制以及目前通用的国际单位制(SI)等。鉴于 SI 具有“通用性”及“一贯性”两大优点(即 SI 涵盖了一切自然科学领域中的计量单位,SI 中任何一个物理量只有一个单位),所以我国现行的法定计量单位以国际单位制为基础,并结合国情增添了必要的辅助单位及词冠而构成,本教材除特别说明之处外均采用法定计量单位。

然而,计量单位的统一需要一定的时间,且工业设备的使用寿命往往长达几十年甚至上百年。就目前我国化工生产行业而言,往往是新旧生产流水线、设备并存,多种单位制并用。因此,在用教材中介绍的公式进行相关计算时必先进行换算。为便于换算,附录中列出了常见物理量在多种单位制下的换算因数表,可供读者查阅。

【例 0-1】由某压强表测得的读数为 2.5at (工程大气压, kgf/cm^2),试将其读数换算为 kPa 。

【解】由附录一查出: $1\text{at} = 98.07(\text{kPa})$ 。

所以

$$2.5\text{at} = 2.5 \times 98.07 = 245.175(\text{kPa})$$

四、基本概念

本课程知识体系是建立在物理学、物理化学等课程的基础上的。所以,在本课程的学习过程中必然要涉及到一些相关的基本概念,为有利于读者掌握教学内容,现将与本课程有关的基本概念逐一介绍如下。

(一) 稳定流动系统与不稳定流动系统

1. 稳定流动系统与不稳定流动系统的概念

工程上习惯将研究的对象称为系统。系统中的物料多为气体或液体,因其具有流动性,故统称为流体。由于液体的密度随压强的变化很小,故称为不可压缩流体;而气体的密度随压强的变化较大,称为可压缩流体。当系统中的流体处于流动状态时称为流动系统。根据其特点可划分为稳定流动系统和不稳定流动系统。

(1) 稳定流动系统又称定态或定常流动系统,是指流动系统中各物理量的大小仅随位置变化、不随时间变化的系统。

(2) 不稳定流动系统又称非定态或非定常流动系统,是指流动系统中各物理量的大小不仅随位置变化且随时间变化的系统。

由于稳定流动系统内部各物理参数的值仅随位置变化,换句话说,也就是在指定截面上物理量的值恒为常数。所以,若流动系统可视为稳定流动系统时,对有关问题的研究则相对简单一些。

如图 0-2 所示的是液体在连续生产流程中通过某设备的情况。若取自设备的入口至出口作为系统进行研究,则系统由设备的入口截面(1-1')、出口截面(2-2')以及其间的管道壁面与设备壁面构成。

当生产处于开车阶段时,虽然 1-1' 截面有一定的流量及流速,但由于设备内的液位高度

低于2-2'截面,故2-2'截面的流量与流速均为0,如图0-2(a)所示。

随着液体的不断输入,设备内的液位高度在不断增加,当液位高度高于2-2'截面时,2-2'截面的流量与流速均开始大于0,并随设备内液位高度的不断增加而加大,如图0-2(b)所示。

当设备内部被液体充满无空隙时,输入量则等于输出量,2-2'截面的流量、流速等物理量均为定值,系统则由起初的不稳定流动系统转变为稳定流动系统,如图0-2(c)所示。

系统停车开始,虽然1-1'截面的流量及流速可能为0,但由于设备内液位高度高于2-2'截面,故2-2'截面的流量与流速仍大于0,并随设备内液位高度的不断下降而减小直至为0,如图0-2(d)所示。显然,在此过程中系统为不稳定流动系统。

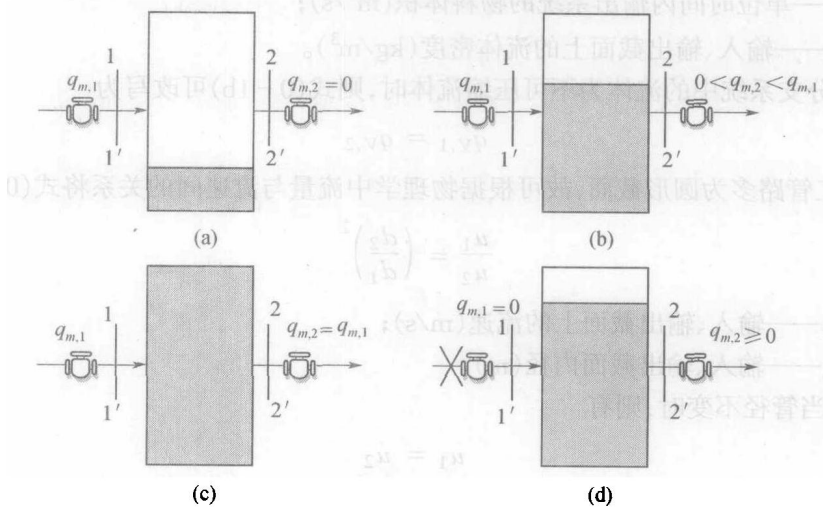


图0-2 稳定系统与不稳定系统

综上所述,对连续生产过程而言,在正常操作状况下系统可视为稳定流动系统;在生产的开、停车及其故障恢复阶段为不稳定流动系统。为简化研究起见,本课程主要讨论可视为稳定流动系统的连续生产过程。

2. 稳定流动系统的特性

1) 稳定流动系统的连续性

通过上述分析可知,欲使流动系统中指定截面上的物理量均为常数,系统中必须充满流体、无空隙。若用数学语言来描述就是系统中的流体质点应处于连续状态。对此特性则称为稳定流动系统的连续性。

由于稳定流动系统中充满稳定流体、无空隙(即无物料累积空间),故单位时间内输入系统的物料量应等于输出系统的物料量。可用代数式表达为

$$\sum_{i=1}^n q_{m,i} = \sum_{j=1}^m q_{m,j} \quad (0-1)$$

式中 $\sum_{i=1}^n q_{m,i}$ ——单位时间内输入系统物料量之和(kg/s);

$\sum_{j=1}^m q_{m,j}$ ——单位时间内输出系统物料量之和(kg/s)。

式(0-1)称为稳定流动系统的连续性方程,并可根据具体情况作如下变化:

① 当系统为图 0-2 所示的无分支系统时,则式(0-1)可简化为

$$q_{m,1} = q_{m,2} \quad (0-1a)$$

式中 $q_{m,1}$ ——单位时间内输入系统的物料质量(kg/s);

$q_{m,2}$ ——单位时间内输出系统的物料质量(kg/s)。

根据物理学中质量与体积间的关系,式(0-1a)也可改写为

$$\frac{q_{V,1}}{q_{V,2}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (0-1b)$$

式中 $q_{V,1}$ ——单位时间内输入系统的物料体积(m^3/s);

$q_{V,2}$ ——单位时间内输出系统的物料体积(m^3/s);

ρ_1 、 ρ_2 ——输入、输出截面上的流体密度(kg/m^3)。

② 当无分支系统中的流体为不可压缩流体时,则式(0-1b)可改写为

$$q_{V,1} = q_{V,2} \quad (0-1c)$$

由于化工管路多为圆形截面,故可根据物理学中流量与流速间的关系将式(0-1c)改写为

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (0-1d)$$

式中 u_1 、 u_2 ——输入、输出截面上的流速(m/s);

d_1 、 d_2 ——输入、输出截面内径(m)。

很显然,当管径不变时,则有

$$u_1 = u_2 \quad (0-1e)$$

【例 0-2】液体在一变径管中流动。若粗管端的内径为细管端的 4 倍,在粗管端的流速为 $0.5\text{m}/\text{s}$,试求细管端的流速。

【解】由式(0-1d)有

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

所以,根据题意,细管端的流速为

$$u_1 = u_2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 0.5 \times 4^2 = 8(\text{m}/\text{s})$$

2) 稳定流动系统的守恒性

(1) 稳定流动系统的质量守恒。式(0-1)表明:对稳定流动系统而言,单位时间内输入系统的物料量应等于输出系统的物料量,即存在质量守恒。

应用质量守恒定律对系统物料量进行相关运算的过程称为物料衡算。所以,式(0-1)也是稳定流动系统的物料衡算方程式。

必须指明:由于单元操作过程均为物理操作过程,故式(0-1)不仅适用于全系统的物料衡算,同时也适用于对系统中某一组分的物料衡算。

物料衡算过程通常需要规定衡算基准,对连续系统的衡算基准常以单位时间为基准,对有些过程还可用不参与过程的物质(工程上称为“惰性组分”)为基准。

【例 0-3】如图 0-3 所示,用一连续精馏塔以分离苯—甲苯混合物。已知:混合液流量 $F = 5000\text{kg}/\text{h}$,其中苯含量为 40% (质量百分数,下同),要求经精馏操作后塔顶产品中苯含量