

四川理工学院课程实施大纲

课程名称：化工原理 C

授课班级：自动 2016 卓越、自动 20161~20166

任课老师：邢波

工作部门：化学工程学院

联系方式：17348006863

四川理工学院 制

2018 年 3 月

《化工原理》课程实施大纲

基本信息

课程代码：

课程名称：化工原理C

学分：3

总学时：48

学期：2018-2019-1

上课时间：3-15 周

上课地点：星期1（7~8，11~12）： LA4-405，LA5-337；星期四
（1~2，9~10）： LA5-231，LA4-108

答疑时间和方式：课前，课间和课后，考前集中

答疑地点：上课教室，第二实验楼215

授课班级：自动2016（卓越），自动20161~20166

任课教师：邢波

学院：化学工程学院

邮箱：xingbo0216@163.com

联系电话：17348006863

1. 教学理念

高等院校教师必须形成以学生为本的现代教育理念，做到尊重、理解、重视和爱护学生，把“以学生为本、以培养目标为导向、持续改进”的新工科教学理念融入教学的全过程，重视课程设置、教学过程、教学评价等教学环节，做到持续改进整个教学过程。把现代教育理念和高校教学观真正地融为一体，在教育实践中逐渐形成系统化、可操作性强的教学观，完成由纯粹的理念体系向具体实践的转型。

化工原理是一门工程性、实用性很强的课程。在课程内容中，既有详细的过程分析，又有大刀阔斧的粗描概略；既有详尽的理论分析，又有许多的经验总结。作为一门专业基础课，起着承前启后的作用，对于帮助学生建立基本的工程观点、培养专业的学习兴趣至关重要。在教学过程中，强调理论联系实际，加强设计和分析能力的训练，以提高解决实际问题的能力。通过本课程的学习，为后续的石油炼制工程、有机化工工艺学、化工设计等专业课程的学习打下理论基础。按照四川理工学院的教学计划，课时设置为 48 学时。要让学生系统掌握该课程的内容，并运用于实践中，必须在教学手段和方法上进行改革，把化工原理的基本要点和有关基础知识与工业生产中实际的分离过程紧密结合起来，并运用工程思维、工程分析的方法来学习化工原理的重要概念，使学生形成完整的工程观点。教学过程中主要采用讲授法、归纳总结法、知识脉络法、提问法、对比法、归纳法、演示法、练习法以及案例分析法等多种教学方法，同时结合教师自身的科研工作，以基于研究的学习亦作为教学方法的重要方面，使学生充分掌握分离工程分析的内容和方法手段，提升分析和解决实际工程问题的能力。

从如何有效地培养和训练学生的工程意识、创新意识和专业应用能力来制定课程实施大纲，以期对培养具有较宽厚的基础理论和专门知识，能在化工、炼油、冶金、能源、轻工、医药、环保和军工等部门从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的应用型工程技术人才的目标作最大贡献。

本课程教学将坚守以下原则：

(1) 坚持以现代教育理念为先导，以科学的教学观念武装自己的头脑，实现“学生中心、教师主体”的大学教育观，不断的持续改进。同时要注意以发展的眼光来看待大学教学，看待学生，包容和理解学生，切不可自身的教学经历直

接映射到当代的大学生身上。为了最大程度的帮助学生学习，教学过程中师生之间必须形成平等、民主、和谐的情感关系，师生在心理上能够互相包容，在心灵上能够互相接纳，能营造民主、和谐的课堂气氛，与学生一起平等、互动地参与课堂教学，激发学生学习兴趣和求知欲。

(2) 做课程改革的实验者，而不是旁观者。课程改革要求在教学过程中持续改进，根据教学过程中学生存在的问题进行不断的调整。同时自身也要保持一颗不断学习的心态给学生传递知识。要在教学过程中改进自身的教学方式方法以及与学生沟通的方式方法。

(3) 积极引导主动学习。知识只有自己主动获取才来得深刻，才能够融会贯通。因此在教学过程中我会引导学生主动学习，通过提前预习、课后习题以及课后答疑的方式使得学生主动参与学习过程中，同时我会结合我自身的科研经历，给学生讲解一些有趣的分离工程应用案例，启发大家对知识点的应用；另外我也会给学生介绍一些关于分离技术的最新研究成果，开拓学生的眼界和知识面，激发学生的求知欲。

2. 课程介绍

2.1. 课程的性质

化工原理是一门工程性、实用性很强的课程。在课程内容中，既有详细的过程分析，又有大刀阔斧的粗描概略；既有详尽的理论分析，又有许多的经验总结。作为一门专业基础课，起着承前启后的作用，对于帮助学生建立基本的工程观点、培养专业的学习兴趣至关重要。

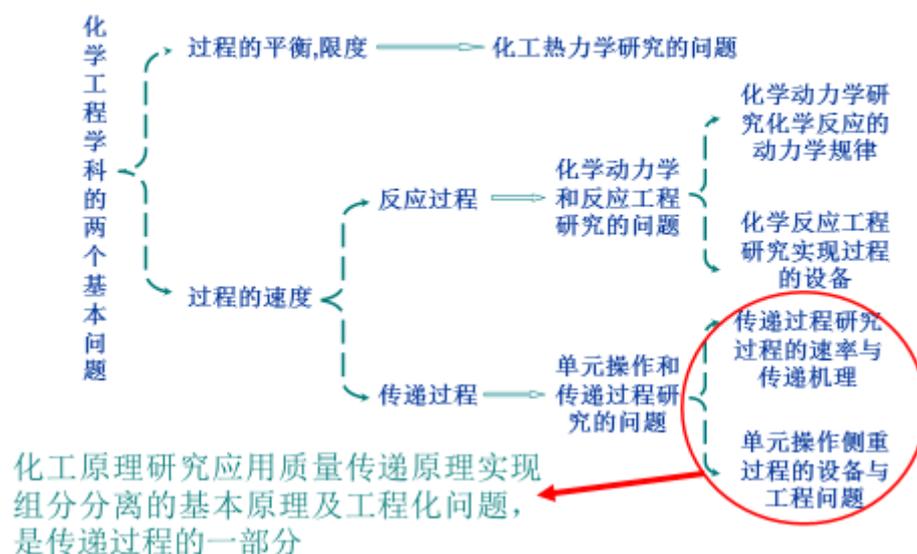
在教学中重视基本概念、基本理论和工程分析方法的传授。把握反应的温度效应和浓度效应，体现工程因素和工程措施的对不同反应的具有不同的影响效应，这也是贯穿化工原理基本内容的主线。一方面突出化工原理学科的共性问题，即影响反应结果的工程因素，如返混、预混合、质量传递和热量传递等，另一方面突出化工原理理论思维方法，即工程因素通过影响反应场所温度与浓度而改变反应结果，使学生了解实际反应过程开发的分解与综合、个性与共性之间的关系，从而增强工程分析和解决工程问题的能力。化工原理理论思维方法揭示了反应器型式、操作方式、操作条件等实际上是通过工程因素来实现对反应场所温度和浓度的影响。在教学过程中重视结合相应的思考题、例题教学，并进行必要的习题练习，以期学生将所学内容融会贯通，举一反三，学以致用。

2.2. 课程在学科专业结构中的地位、作用

《化工原理》是一门工程技术学科，兼有“科学”与“技术”的特点，它研究化工产品及其它相关产品生产过程的基本规律，并应用这些规律解决生产中所出现的各种现象或问题。在教学计划中，这门课程是承前启后，由理及工的桥梁。先行的数学、物理、化学等课程主要是了解自然界的普遍规律，属自然科学范畴。而化工原理则属工程技术科学的范畴，是专业课程的基础。化工原理具有显著的工程性。它要解决的问题是多因素、多变量的综合性的工业实际问题，因此分析和处理问题的方法也就与理科课程有较大的不同，这可能会导致部分学生在学习初期有些不适应。《化工原理》的内容主要涉及化工单元操作的基本原理及其相关基础，它来自化工实践，又面向化工实践，是化工技术工作者的看家本领所在，可以说“化工原理”四个字恰如其分地表达了这门课程的性质与重要性。《化工原理》是化学工程的一个分支，以工业单元操作过程为主要研究对象，研究内容

是研究各单元操作的基本原理、过程计算及典型设备，其应用遍及化学、石油化学、生物化学、医药、冶金及轻工等许多工业部门。

► 化工原理在化学工程学科中的地位



2.3. 课程的历史与文化传统

作为现代工程学科之一的化学工程，则是在 19 世纪下半叶随着大规模制造化学产品的生产过程的发展而出现的,经过 100 多年的发展，化工原理已经成为一门有独特研究对象和完整体系的工程学科。

最开始由里特在 1922 年美国化工学会年会提出建立“单元操作”的概念，他指出“任何一个化学过程,不管它的规模如何,都可分解成为一系列互相类同的被称作“单元操作(Unit operation)”的组成部分，如粉碎、混合、加热、焙烧、吸收、沉淀、结晶、过滤、溶解等。这些基本单元操作的数目并不多，对于一个特定的加工过程，可能只包括它们中的几个。要使化学工程师们具备广博地适应职业需要的能力，只能是对实际规模上所进行的过程作出分析并将其分成多个单元操作来获得。……”。

之后 1923 年 MIT 的著名教授 W.D.Walker、W.H.Lewis 和 W.H.Mcadams 等人根据此概念写成了第一部单元操作的书“Principles of Chemical Engineering (化工原理)”从以产品来划分的化工生产工艺中，抽象出各种单元操作，即从特殊性中总结出普遍性，是认识上的一个飞跃，对化学工程学的形成和发展起了

重要的推动作用化工原理学科体系已大体形成，理论研究也渐趋完善。

此后,研究发现动量传递、热量传递与质量传递在许多过程中同时发生,并且三种传递现象有类似性。这使得原本是分立学科的“三传”合而为一。1960年,美国威斯康新大学的 Bird 等人把“三传”的内容组织在一起写成了《Transport phenomena》一书,加强了学生工程学科基础的训练。与此同时,化学反应过程经过了由“单元过程”到“化学反应工程学”的发展。至此,化学工程学科发展到了“三传一反”的较完整阶段。

2.4. 课程的前沿及发展趋势

化工原理所面临的重要挑战是开发一个科学的、可持续发展的技术以满足未来世界能源、环境和材料的需求。计算机应用的快速发展,使化学工程成为更完整的体系,并推向了“过程优化集成”、“分子模拟”的新阶段。随着科学技术的高速发展,化学工程与相邻学科相融合逐渐形成了若干新的分支与生长点,诸如:生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等。同时,上述新兴产业与学科的发展,也推动了特殊领域化学工程的进步。

2.5. 课程与经济社会发展的关系

《化工原理》是一门有关工程问题的学科,是解决如何将实验室成熟的化学反应应用到工业生产过程中,是为选择一种经济可行的工业反应器所服务的。因此经济性是在选择工业反应器时所必须要考虑的问题。另外,随着社会经济的快速发展,人们对日益丰富的物质文化提出更加的要求。需要开发出更加环保、安全、绿色化的化工产品;而这些产品的生产开发离不开绿色健康的化工生产工艺的开发,所以说化工原理的发展与经济社会发展密切相关。因此在《化工原理》的教学过程中不仅需要给学生传递基本的化学动力学理论和常见的工业反应器,同时还需要与时俱进、紧跟社会技术进步、将课程涉及新技术引入课程教学,尤其是针对一些新技术的应用、社会发展热点问题,在课堂上开展讨论,引导学生思考解决问题的方法,也能让学生切身体会所学知识并非空洞无物,而是能解决生活中实际问题的有用技能,激发学生的学习热情。

2.6. 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题

《化工原理》作为本科主干基础学科，对未来培养国家后备工程人才起到关键性的作用，而在此课程学习基础上，化学工程类科学研究才可能成为现实。其中科学研究是运用严密的科学方法，从事有目的、有计划、有系统的认识客观世界，探索客观真理的活动过程，是对研究变量或指标的共同的本质的概括。而当代“伦理”概念蕴含着西方文化的理性、科学、公共意志等属性，“道德”概念蕴含着更多的东方文化的情性、人文、个人修养等色彩。我们所讲的科学研究中的伦理与道德，是科学研究者应当秉持的研究规则和行为规范，使伦理道德规范运用到涉及科技活动现实的具体问题的规范问题。科学研究的基本任务是探索、认识未知。理想的科学研究被描述为一个科学家求真、至善、臻美的过程。

在这个过程中，科学家揭示着自然界的客观规律，开发应用有利于人类利益的技术，去追求人类社会的持续、和谐的发展。但是，理想状态只能是一个无限接近到无法到达的状态，科学和现实社会可能会产生各种各样的冲突和矛盾，科学研究中的伦理道德就成为一个为人们关注的焦点。我们讲科学研究中的伦理与道德，并不是指科技成果本身有什么伦理道德，而是指科学研究、技术探索过程中的伦理道德，更是指科学研究应用到政治、经济、文化、军事领域之中产生的伦理道德问题。而《化工原理》正是作为科学研究的基础知识学科，必须考虑“伦理”和相关的“道德”问题。

2.7. 学习本课程的必要性

《化工原理》是化学工程学科的重要组成部分，是化学工程与工艺专业的一门专业必修课。通过本课程的学习，可以正确理解化工原理的有关基本概念和理论；理解各概念之间的联系和应用；掌握化工原理的基本计算方法；能够理论联系实际，灵活分析和解决实际化工生产和设计中的有关问题。

其教学内容是以化工生产的核心工业化学反应和工业化学反应器为研究对象，有着不可替代的作用。因此，本课程在学习化学反应动力学基本理论、原理和方法的基础上，思考如何将成熟的实验室进行的化学反应应用到工业生产过程中。了解现代化工原理的发展动态，关注针对目前严峻的能源问题、环境问题、资源问题化工原理所起的作用。因此学习好《化工原理》这门课程对化工专业学生有着极其重要必要性和实用性，是其在今后的化工工作中能够独立发现问题、

解决问题必然所在。

3. 教师简介

3.1 教师的职称、学历

讲师，工学博士

3.2 教学背景

时间	学校	专业	学历	导师
2014/9 - 2017/7	中国科学院大学	应用化学	博士	导师：陈洪林，张小明
2012/9 - 2014/7	中国科学院大学	应用化学	硕士	导师：陈洪林，张小明
2008/9 - 2012/7	长江大学	化学工程与工艺	学士	导师：尹先清

3.3 研究兴趣（方向）

高级氧化技术、氮掺杂多孔碳材料制备与应用、高浓度有机废水处理

4. 先修课程

高等数学、大学物理。

5. 课程目标

学习本课程中，应注意以下几个方面能力的培养：

- (1) 选择单元操作和设备的能力
- (2) 工程设计能力（工艺设计和设备设计）
- (3) 操作和调节生产过程的能力
- (4) 过程开发或科学研究能力

6. 课程内容

化工原理 C 课程授课内容包括绪论、第一章流体流动、第二章流体输送机械、第四章传热以及第六章蒸馏，共五部分内容。

6.1 课程的教学大纲

绪论

掌握的内容：

- 1、掌握单位换算方法；
- 2、掌握物、热衡算的原则以及衡算的方法和步骤。

熟悉的内容：

- 1、熟悉单元操作的概念及其在化工过程中的地位。

了解的内容：

- 1、了解化工原理的目的、任务、化学工程的发展简史；
- 2、了解过程速率、平衡关系。

第一章 流体流动

掌握的内容：

- 1、流体的密度和粘度的定义、单位、影响因素及数据获取；
- 2、压强的定义、表达方法、单位换算；
- 3、流体静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用；
- 4、流体的流动类型及其判断、雷诺准数的物理意义、计算；
- 5、流体阻力产生的原因、流体在管内流动的机械能损失计算；
- 6、管路的分类、简单管路计算及输送能力核算；
- 7、液柱式压差计、测速管、孔板流量计和转子流量计的工作原理、基本结构、安装要求 and 计算；
- 8、因次分析的目的、意义、原理、方法、步骤；

熟悉的内容：

- 1、流体的连续性和压缩性，定常态流动与非定常态流动；

- 2、层流与湍流的特征；
- 3、圆管内流速分布公式及应用；
- 4、Hagon-Poiseuille 方程推导和应用；
- 5、复杂管路计算的要点；
- 6、正确使用各种数据图表；

了解的内容：

- 1、牛顿粘性定律，牛顿流体与非牛顿流体；
- 2、边界层的概念、边界层的发展、层流底层、边界层分离。

第二章 流体输送机械

掌握的内容：

- 1、离心泵的结构、工作原理、性能参数、特性曲线及应用；
- 2、影响离心泵性能的主要因素，离心泵特性曲线测定；
- 3、管路特性曲线，离心泵的工作点及流量调节；
- 4、允许吸上真空高度、允许气蚀余量，确定泵的安装高度；
- 5、离心泵的设计型计算与操作型计算、离心泵的操作要点；

熟悉的内容：

- 1、离心泵的组合操作及选择组合形式的原则；
- 2、往复泵的结构、工作原理、性能参数、特性曲线、操作要点与应用。

了解的内容：

- 1、离心力场中的流体静压强分布；
- 2、了解其它泵的工作原理。

第四章 传热

掌握的内容：

- 1、热传导基本原理，一维定常态傅立叶定律及应用，平壁及圆筒壁一维定常态热传导计算与分析；

- 2、对流传热基本原理，牛顿冷却定律，影响对流传热的主要因素；

3、无相变管内强制对流的 α 关联式及应用；Nu、Re、Pr、Gr 等的物理意义及计算。正确选用 α 的计算式，注意其用法和使用条件；

4、传热计算：传热速率方程与热负荷的计算、平均温差推动力、总传热系数、污垢热阻、壁温计算、传热面积、加热程度和冷却程度计算、强化传热的途径；

熟悉的内容：

- 1、对流传热系数经验式建立的一般方法；
- 2、蒸汽冷凝、液体沸腾对流传热系数计算；
- 3、传热效率、传热单元数及其在传热操作型计算中的应用；
- 4、热辐射的基本概念、两灰体间辐射传热计算；
- 5、列管换热器的结构及选型计算。

了解的内容：

- 1、加热剂、冷却剂的种类和选用；
- 2、各种常用换热器的结构特点及应用；
- 3、高温设备热损失计算。

第六章 蒸馏

掌握的内容：

1、双组分理想体系的汽液平衡：拉乌尔定律、泡点方程、露点方程、汽液平衡图、挥发度与相对挥发度定义及应用、相平衡方程及应用；

2、精馏原理与流程；

3、精馏塔物料衡算、操作线方程和 q 线方程及物理意义、图示及应用；

4、双组分连续精馏塔计算及操作调节、分析：恒摩尔流假设、理论板、等板高度、汽液两相的摩尔流率、回流比选用与最小回流比、加料热状况影响及选择、全塔效率、单板效率、理论板数的确定。

熟悉的内容：

1、平衡蒸馏与简单蒸馏的流程、特点、计算；

2、精馏装置的热量衡算；

3、非常见的二元连续精馏塔计算：直接蒸汽加热、多股进料与多股出料、提馏塔、塔顶采用分凝器、冷液回流；

4、Fenske 方程、Gilliland 关联图，捷算法。

了解的内容：

- 1、非理想物系的汽液平衡]；
- 2、间歇精馏的特点、计算步骤及应用；
- 3、恒沸精馏、萃取精馏的特点及应用；
- 4、精馏节能技术进展。

6.2 教学日历

2018-2019 学年 第 1 学期

填写时间：2018 年 9 月 3 日

课程名称	化工原理 C			时间分配	上课周数	3-15 周
学院	自动化与信息工程	专业	自动化		学时数	48 学时
班级	自动 2016 (卓越)				讲课时数	40 学时
学院	自动化与信息工程	专业	自动化		习题课及课堂讨论	8
班级	自动 20161~20166				实验	无
学院		专业			每周上课学时数	4 学时
班级						

周次	教 学、作 业 类 别 及 内 容					讲 课 学 时	自 学 学 时	课 堂 作 业 数	课 外 作 业 数	课 程 度 完 成 情 况	
	讲授内容（教学大纲分章和题目的名称）										
第 3 周	第 1 次	绪论					2	2			
	第 2 次	第一章 §1-1 流体的物理性质 §1-2 流体静力学基本方程					2	3		1	
第 4 周	第 3 次	§1-3 流体流动的基本方程					2	2			
	第 4 次	§1-3 伯努力方程的应用					2	2		1	
第 6 周	第 5 次	§1-5 流体在管内的流动阻力					2	2			
	第 6 次	§1-6 管路计算					2	2		1	
第 7 周	第 7 次	§1-7 流量测量 第一章 复习					2	2		1	
	第 8 次	第二章 流体输送机械 §2-1 离心泵（工作原理、主要部件、基本方程）					2	2			

第8周	第9次	§2-1离心泵（主要性能参数与特性曲线）	2	2		1	
	第10次	§2-1 离心泵（流量调节和组合操作）	2	2			
第9周	第11次	§2-1 离心泵（气蚀现象、工作点、类型与选用） §2-2其他类型液体输送机械+期中考试	2	2		1	
	第12次	第四章 传热 §4-1 概述 §4-2 热传导	2	2			
第10周	第13次	§4-3 对流传热 §4-4 对流传热系数关联式	2	2		1	
	第14次	§4-4 对流传热系数关联式 §4-5 传热过程计算	2	2			
第11周	第15次	§4-4 热辐射	2	2		1	
	第16次	§4-2 换热器设计与选型 第四章 复习	2	3			
第12周	第17次	第1章 蒸馏 §1-1 概述 §1-2 两组分溶液的气液平衡	2	2		1	
	第18次	§1-3 平衡蒸馏与简单蒸馏 §1-4 精馏原理与流程	2	2		1	
第13周	第19次	§1-5 两组分连续精馏的计算 1.5.1 理论板的概念及恒摩尔流假定					
	第20次	1.5.2 物料衡算和操作线方程 1.5.3 进料热状况的影响	2	2		1	
第14周	第21次	1.5.4 理论板数的计算 1.5.5 回流比的影响及其选择	2	2			
	第22次	1.5.6 简捷法求理论板层数 1.5.8 塔高和塔径的计算	2	2			

第 1 5 周	第 23 次	1.5.10 精馏塔的操作和调节 §1-6 间歇精馏	2	2			
	第 24 次	习题课+总复习	2	2			

7. 课程实施

7.1 教学单元一（绪论）

7.1.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 3 周星期一

7.1.2 教学目标

介绍化工原理相关的基本知识：

- (1) 化工原理的定义；
- (2) 化工原理学科的发展；
- (3) 化工原理的研究主要内容和研究方法；
- (4) 单位制和单位换算，五个概念两条主线

7.1.3 教学内容

知识点：

重点：

- (1) 化工原理学科的内容、分类；

难点：

- (1) 化工原理的研究方法。

7.1.4 教学过程

化工过程---对原料进行大规模的加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，成为合乎要求的产品，即为化学工业的生产过程，其余设备及管道中进行的都是物理过程。化工生产过程的物理加工过程称为单元操作(unit operation)-----即为化工原理(Principles of Chemical Engineering) 所要研究的内容。

按操作目的分为以下几类：

- (1) 物料的增压、减压和输送；
- (2) 物料的混合和分散；
- (3) 物料的加热和冷却；
- (4) 混合物（均相与非均相混合物）的分离。

常见单元操作有：

流体输送、沉降、过滤、搅拌、换热、蒸发、吸收、精馏、萃取、结晶、干燥、膜分离等。

(1) 遵循流体动力基本规律的动量传递过程 (momentum transfer process): 包括流体输送、沉降、过滤、搅拌等;

(2) 遵循传热基本规律的热量传递过程 (heat transfer process): 包括换热、蒸发等;

(3) 遵循传质基本规律的质量传递过程 (mass transfer process): 包括吸收、精馏、萃取、结晶、干燥、膜分离等。因此, 化工原理又称为“三传过程”。

单元操作的特点:

(1) 他们都是物理性操作, 故只改变状态和物理性质, 不该变化学性质。

(2) 他们都是化工生产中共有的操作, 但不同的化工过程所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异。

(3) 某单元操作用于不同的化工过程, 其原理并无不同, 进行该操作的设备往往也是通用的。因此, 单元操作是奠定化学工程学的科学基础, 属于专业基础课。在高等学校化工等过程工业专业的教学计划中,起到为自然科学与应用科学的搭桥作用。

“化工原理”课程的两条主线

(1) 统一的研究对象-----传递过程

(2) 研究工程问题的方法论

实验研究方法 ----- 经验的方法

数学模型法 ----- 半理论半经验的方法

本课程的任务

研究单元操作的基本原理、所用典型设备的结构和设备工艺尺寸的计算或设备选型。掌握单元操作通用的学习方法和分析问题的思路, 培养理论联系实际的观点方法, 提高单元操作设备的设计计算、操作、选型、实验研究方法与技术, 学会以经济核算为杠杆,增加解决工程实际问题的能力。

需要加强的基本技能

(1) 单位制、单位换算

(2) 物料衡算、热量衡算步骤

7.1.5 教学方法

1、举例法: 以典型化工生产过程为例, 引出化工原理研究对象研究内容研究方法;

- 2、提问法：给出一化工过程，请学生思考并回答其包含的典型单元操作过程，老师结合学生回答讲解；
- 3、对化工原理过程发展历史，以教师讲解为主。

7.2 教学单元二（流体的物理性质）

7.2.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第3周星期四

7.2.2 教学目标

掌握密度、粘度基本性质；
掌握静力学基本方程

7.2.3 教学内容

内容：流体的特点及其物理性质(密度和粘度)，流体流动中的压力，流体静力学基本方程的推导及变形式。

重点：流体的特点及其物理性质(密度和粘度)；流体静力学基本方程。

难点：剪应力和粘度的概念。

7.2.4 教学过程

第一节 概述

一、流体流动的考察方法

- 1、什么是流体？
- 2、流体的连续性假定。
- 3、流体流动的考察方法。

二、流体流动中受到的作用力

1、体积力

- 1) 体积力的定义；
- 2) 密度的概念：(1)气体的密度；(2)液体的密度。

2、表面力

- 1) 压力的概念：(1)压力的定义；(2)压力的单位；(3)压力的表示方法。举例说明

表压、真空度和绝对压强的关系和计算（如图 1）。

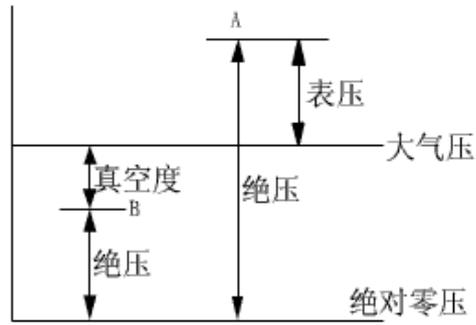


图 1. 表压和真空度示意图

2) 剪应力和粘度:

- (1) 牛顿粘性定律;
- (2) 粘度的概念、单位、影响因素、物理意义。

第二节 流体静止的基本方程式

一、静力学基本方程的推导: (如图 2):

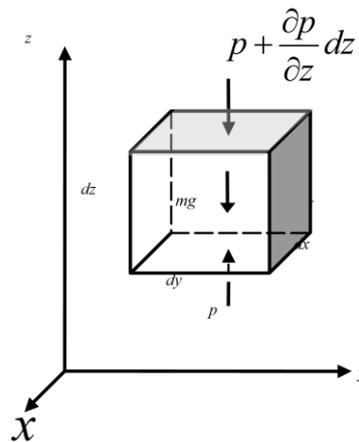


图 2. 微元流体的静力平衡

$$z \text{ 方向: } p dx dy - (p + \frac{\partial p}{\partial z} dz) dx dy - \rho g dx dy dz = 0$$

$$\text{化简: } -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0$$

$$x \text{ 方向: } -\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$y \text{ 方向: } -\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$p = p_0 + \rho g h \quad \text{——流体静力学方程}$$

二、流体静力学方程的应用条件:

静止的、连通着的同一种连续流体的内部。

三、静力学基本方程的讨论：

- 1、总势能守恒；
- 2、等压面：在静止连续的同一种液体内部，水平面必为等压面；
- 3、传递定律——巴斯噶定理：压力可传递；
- 4、可以用液柱高度来表示压力差或压力。

7.2.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.2.6 作业安排

作业：P 76 第 1,3,4 题。

7.3 教学单元三（静力学基本方程应用）

7.3.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第4周星期一

7.3.2 教学目标

- (1) 掌握静力学方程的应用
- (2) 熟悉流量和流速等概念；稳态流动和非稳态流动；
- (3) 掌握连续性方程

7.3.3 教学内容

内容：静力学方程的应用；熟悉流量和流速等概念；稳态流动和非稳态流动；掌握连续性方程

重点：静力学方程的应用；流量和流速等概念；稳态流动和非稳态流动；连续性方程

难点：连续性方程

7.3.4 教学过程

静力学基本方程的应用:

1、压差计 manometer:

(1) U 管压差计: 利用 U 管压差计测量管道任意两点间的压差。

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B)gR \quad \text{——两点间压差计算公式}$$

(2) 倾斜式液柱压差计: $p_1 - p_2 = \rho_0 g R' \sin \alpha$

(3) 微差压差计(双液体 U 管压差计):

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C)gR + \rho_C g \Delta R \quad \Delta R = R \left(\frac{d}{D} \right)^2$$

式中: ΔR 一为水库的液面差; d 一U 管内径; D 一水库内径

2、液位的测定: 例题 1-7

3、液封及液封高度的计算: 例题 1-8,1-9

第三节 流体流动的基本方程

一、流量(Flow Rate)与流速(Velocity):

1、体积流量 V_s : m^3/s ; 2、质量流量 W_s : kg/s ,

3、流速 u : m/s ; 4、质量流速(质量通量) G : $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

二、稳态流动与非稳态流动 (Steady flow and Unsteady flow): 与时间是否有关。

三、物料衡算——连续性方程 (Continuity Equation):

1、连续性方程的导出:

通式: $m_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots = u A \rho = \text{常数}$

不可压缩流体: $u_1 A_1 = u_2 A_2$

不可压缩流体在圆形直管中: $\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$

7.3.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.3.6 作业安排

作业: P77 第 7、8 题。

7.4 教学单元四（连续性方程）

7.4.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第4周星期四

7.4.2 教学目标

掌握连续性方程

7.4.3 教学内容

内容：机械能衡算方程。

重点难点：机械能衡算方程。

7.4.4 教学过程

一、总能量衡算方程：

1、能量形式：（如表 1）

流体本身具有的能量

（1）内能；（2）动能；（3）位能；（4）压力能

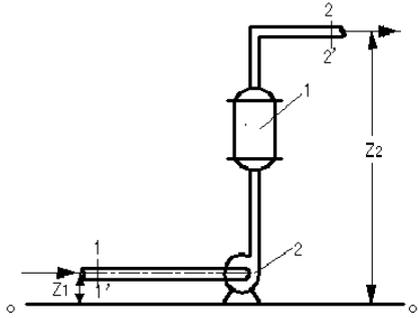
外界提供的能量

（1）热；（2）功

表 1. 流体及流动有关能量（运动着的流体涉及的能量形式）

能量种类 基准	流体具有的能量				与环境交换 能量	
	内 能	位 能	动 能	静 压能	热 量	外 功
mKg流体 (J)	m U	mgz	1/2 mu ²	pV	mQ _e	mW _e
1Kg流体 (J/Kg)	U	gz	1/2 u ²	pv	Q _e	W _e

2、总能量衡算：（如图 3）



1—换热器 2—泵

图 3. 柏努利方程的推导

总能量衡算，对于定态流动系统： Σ 输入能量= Σ 输出能量

$$U_1 + gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + Q_e + W_e = U_2 + gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

$$\text{即 } \Delta U + g\Delta z + \Delta \frac{u^2}{2} + \Delta(pv) = Q_e + W_e \quad \text{---(1-16a)}$$

二、流动系统的机械能衡算——柏努利方程（Bernoulli Equation）方程的导出：

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + W_f$$

$$\text{增量形式： } W_e = g\Delta z + \frac{\Delta u^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho} + W_f$$

对于理想流体($\mu = 0$)，当没有外功加入时， $W_f = 0$ ， $W_e = 0$ ，上式可简化为：

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

——最初的柏努利方程

程

三、柏努利方程的讨论：

- (1) 柏努利方程式的适用条件；
- (2) 各种形式的机械能可以相互转换：

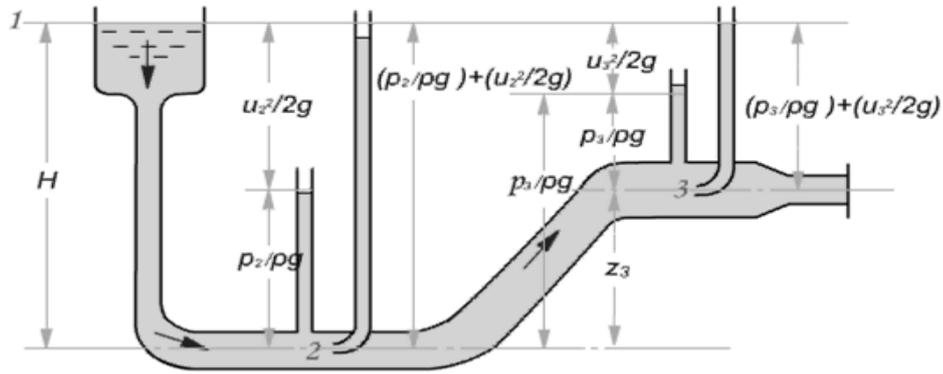


图 4. 柏努利方程的物理意义

流体在管道流动时的压力变化规律（如图 4 所示）。

(3) 柏努利方程式中各项的物理意义：

1) 截面性质的能量： $gz, \frac{u^2}{2}, \frac{p}{\rho}$ ； 2) 沿程性质的能量： W_e, W_f

(4) 流体静力学方程是流体动力学方程的特例。柏努利方程不但适用于流动系统，还适用于静止系统。

(5) 柏努利方程的其它形式（其它衡算基准的柏努利方程）：

柏努利方程的 3 种衡算基准形式：质量基准：1kg；重力基准：1N；体积基准：1m³

质量基准：1kg 流体： $gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + W_f$ ； J/kg

重量基准：1N 流体： $Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_e = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_f$ ； J/N=m

体积基准：1m³ 流体： $\rho g Z_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + p_1 + W_e \rho = \rho g Z_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + p_2 + \rho W_f$ ；

J/m³=Pa

7.4.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.5 教学单元五（伯努利方程应用）

7.5.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第5周星期一

7.5.2 教学目标

掌握柏努利方程的应用。

7.5.3 教学内容

内容：柏努利方程的应用。

重点：柏努利方程的应用。

难点：截面的截取，以例题形式讲解。

7.5.4 教学过程

第三节 流体流动的基本方程

一、柏努利方程的应用（Applications of Bernoulli Equation）

1、应用柏努利方程的注意事项：

- （1）作图并确定衡算范围
- （2）截面的截取
- （3）基准水平面的选取
- （4）单位必须一致
- （5）大口截面的流速为零。

2、例题：

- （1）教材例题：例题 1-12,1-13,1-14,1-15
- （2）补充例题：

例一、如图 5，已知管道尺寸为 $\varphi 114 \times 4 \text{ mm}$ ，流量为 $85 \text{ m}^3/\text{h}$ ，水在管路中流动时的总摩擦损失为 10 J/kg （不包括出口阻力损失），喷头处压力较塔内压力高 20 kPa ，水从塔中流入下水道的摩擦损失可忽略不计。（塔的操作压力为常压）求：泵的有效功率。

例二、如图 6， $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水以 $7 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量流过如图所示的文丘里管，在喉

颈处接一支管与下部水槽相通。已知 1-1 截面处的压强为 0.2 at(表), 管内径为 50 mm, 喉颈内径为 15 mm。设流动无阻力损失, 大气压为 101.3 kPa, 水的密度取 1000 kg/m^3 。试判断支管中水的流向。

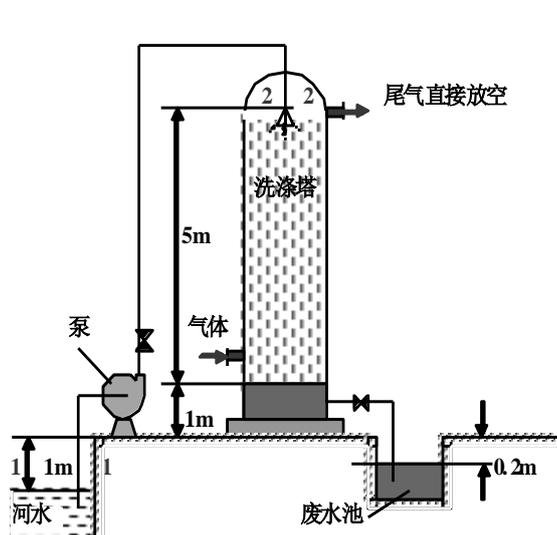


图 5

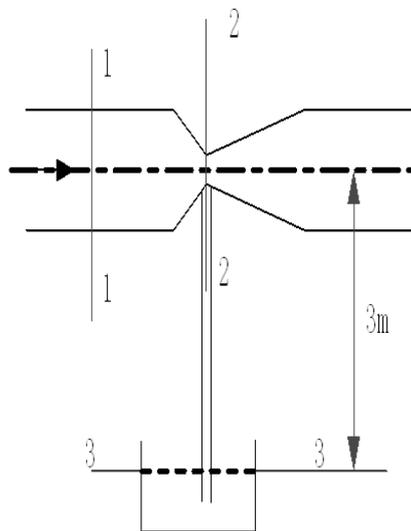


图 6

7.5.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.5.6 作业安排

作业：P78 第 13、15 题。

7.6 教学单元六（流体流动现象）

7.6.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 6 周星期四

7.6.2 教学目标

熟悉边界层的形成、发展、分离；掌握流动类型与雷诺准数

7.6.3 教学内容

内容：流动类型与雷诺准数；滞流与湍流。

重点：流动类型与雷诺准数，滞流与湍流的比较。

难点：滞流与湍流的比较

7.6.4 教学过程

第四节 流体流动现象

一、流动类型与雷诺准数（Flow Types and Reynolds Number）：

1、雷诺实验（播放动画视频，帮助学生理解什么现象对应什么流型）

2、雷诺数（Reynolds Number）：

雷诺数的物理意义：

两种完全不同的流动型态：层流、湍流

圆直管内判断流动型态的依据

二、管内流动的分析（滞流与湍流的比较）：

1、层流：

$$\text{速度分布 } u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

$$\text{平均流速 } \bar{u} = \frac{1}{2} u_{\max}$$

2、湍流

$$\text{速度分布 } u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{7}}$$

$$\text{平均流速 } u = 0.817 u_{\max}$$

三、边界层概念

1、边界层的形成（如图 7）：

边界层的定义和边界层的厚度

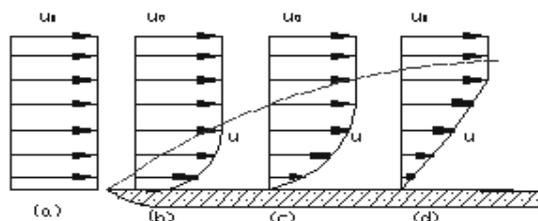


图 7 平板上边界层的形成

2、边界层的发展：（如图 8）

层流边界层；湍流边界层；层流内层；充分发展的流动

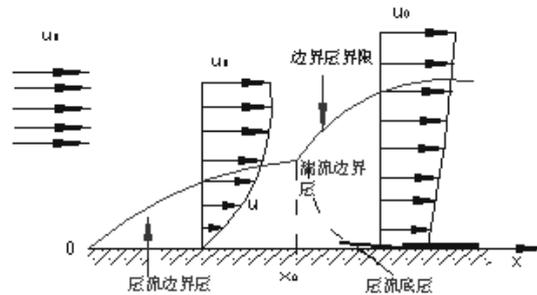


图 8 平板上层流边界层和湍流边界层

3、边界层的分离：（如图 9）边界层分离的原因、造成的后果。

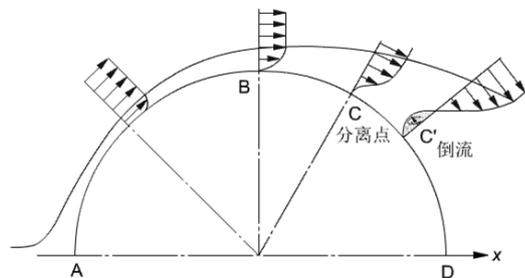


图 9. 边界层的分离

7.6.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.6.6 作业安排

无

7.7 教学单元七（管道内流体阻力）

7.7.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第7周星期一

7.7.2 教学目标

了解因次分析法；掌握管内流动的阻力损失

7.7.3 教学内容

内容：管内流动的阻力损失。

重点：管内流动的阻力损失。

7.7.4 教学过程

第四节 管内流动的阻力损失

一、阻力的分类 (Classification of the Friction)：直管阻力；局部阻力。

二、阻力的表现形式：压力降； Δp_f

三、圆形直管的阻力通式：范宁公式

1、范宁(Fanning)公式：

$$\text{表达式： } \Delta p_f = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u^2}{2} \quad ; \quad \text{J/m}^3$$

$$W_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad ; \quad \text{J/kg}$$

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad ; \quad \text{J/N}$$

2、摩擦系数(摩擦因数)：影响摩擦系数的因素

四、层流时的摩擦损失：

$$\text{哈根-泊谟叶公式： } \Delta p_f = \frac{32\mu l u}{d^2}$$

层流时摩擦系数与雷诺准数的关系。

五、湍流时的摩擦系数与因次分析法。

六、湍流的摩擦损失：

1、湍流的阻力

2、经验公式

3、Moody graph (如图 10 所示)

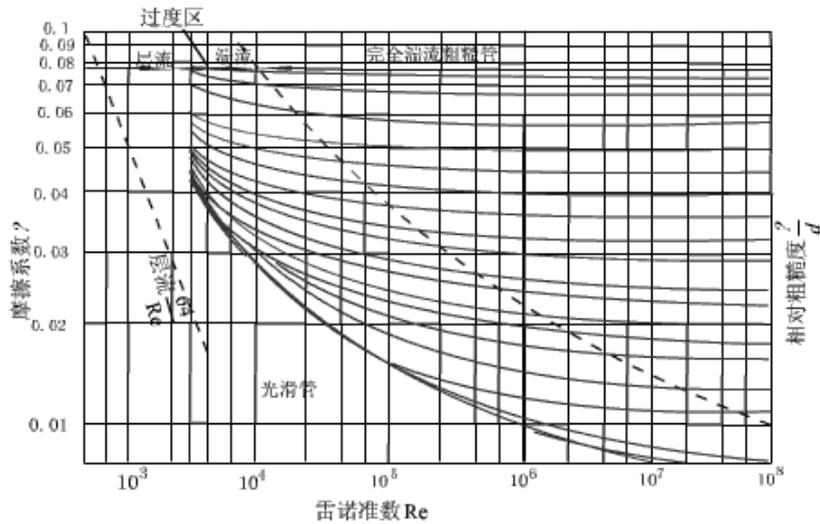


图 10. 摩擦系数与雷诺准数及相对粗糙度的关系

(1) 坐标系：横坐标，纵坐标，参变量

(2) 四个区域：

层流区(阻力一次方区)；过渡区；湍流区；完全湍流区(阻力平方区)

7.7.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.8 教学单元八（管道内局部阻力计算）

7.8.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第7周星期四

7.8.2 教学目标

熟悉设计型问题和操作型问题；掌握非圆形管内的摩擦损失、局部阻力损失和管内总阻力损失的计算。

7.8.3 教学内容

内容：非圆形管内的摩擦损失、局部阻力损失、管内总阻力损失的计算。

重点：直管与局部阻力损失；管路计算。

难点：局部阻力损失；突然扩大和突然缩小；试差法；复杂管路的计算。

7.8.4 教学过程

第五节 管内流动的阻力损失

一、非圆形管内的摩擦损失：

1、非圆管的用途

$$2、\text{当量直径 } d = 4 \times \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边长}} = \frac{\frac{\pi}{4} d^2}{\pi d} \times 4$$

二、局部阻力的计算：

$$1、\text{阻力系数法： } \Delta p_f = \zeta \cdot \frac{\rho u^2}{2}$$

$$2、\text{当量长度法： } \sum W_f = \lambda \cdot \frac{l + \sum l_e}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

三、突然扩大和突然缩小：

突然扩大的特例：管出口；突然缩小的特例：管进口

四、总管路阻力损失的计算：

第六节 管路计算

一、计算类型：

- 操作型问题：管路系统已固定，要求核算在某给定条件下的输送能力或某项技术指标。
- 设计型问题：对于给定的流体输送任务(如一定的流体的体积，流量)，选用合理且经济的管路。关键：流速的选择

计算依据：静力学方程、连续性方程、机械能衡算方程和阻力计算

二、管路系统

1、简单管路

2、分支管路和汇合管路

3、并联管路

三、 管路计算

1、简单管路（3种情况）：流量特点、阻力损失特点

2、分支管路和汇合管路：流量特点、阻力损失特点

$$(1) V = V_1 + V_2 + V_3$$

(2) 分支点处至各支管终了时的总机械能和能量损失之和相等。

3、并联管路：流量特点、阻力损失特点

$$(1) V = V_1 + V_2 + V_3$$

(2) $\Sigma h_f = \Sigma h_{f1} = \Sigma h_{f2} = \Sigma h_{f3}$ 各支路阻力损失相等。

即并联管路的特点是：

(1) 并联管段的压强降相等；

(2) 主管流量等于并联的各管段流量之和；

(3) 并联各管段中管子长、直径小的管段通过的流量小。

7.8.5 教学方法

2、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.9 教学单元九（离心泵基本方程式）

7.9.1 教学日期

课程安排：2018-2019学年第一学期；第8周星期一

7.9.2 教学目标

(1) 熟悉离心泵基本方程式

(2) 熟悉流体流动及输送综合计算

7.9.3 教学内容

内容：离心泵基本方程式、流体流动及输送综合计算

难点：离心泵基本方程式、流体流动及输送综合计算

重点：离心泵基本方程式、流体流动及输送综合计算

7.9.4 教学过程

1. 离心泵基本方程式

$$H_{T\infty} = \frac{u_2^2}{g} + \frac{u_2 \text{ctg} \beta_2}{g \pi D_2 b_2} Q_T = A - B Q_T$$

后弯叶片 $\beta_2 < 90^\circ$, $\text{ctg} \beta_2 > 0$, $B > 0$

$$Q_T = \pi D_2 b_2 C_{r2}$$

2. 离心泵的特性曲线由实验测定

$$H=A-B'Q^2$$

- ★问题: 1) 实验装置布置。
 2) 需测定什么参数。
 3) 实际操作中注意的问题。
 4) 性能参数 (H, η , N) 随流量 Q 的变化趋势。
 最高效率点对应的流量, 称为额定流量。对应一组最佳工况参数。
 轴功率

$$N = \frac{QH\rho}{102\eta}$$

3. 物性的改变对离心泵特性曲线的影响:
 1) 密度 ρ : 压头、流量、效率与密度无关, 轴功率随密度的增大而上升。
 2) 粘度 μ : 压头、流量、效率随粘度的增大而下降, 轴功率增大。
 4. 离心泵的工作点——管路特性曲线与泵特性曲线的交点
 管路特性曲线方程 $H_e=K+BQ_e^2$
 泵特性曲线方程 $H=A-B'Q^2$
 工作点 $H=H_e$ $Q=Q_e$
 5. 输送设备 (泵) 的分类
 动力式 (叶轮式) ——离心式、轴流式
 容积式 (正位移式) ——往复式、旋转式

往复泵属于正位移泵, 流量不均, 流量与缸体的容积及活塞的往复频率有关, 而与泵的压头及管路情况无关; 压头取决于管路情况, 受泵体的承压能力限制; 有自吸能力; 需用旁路调节流量。

7.9.5 教学方法

- 1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.10 教学单元十 (其他液体输送设备)

7.10.1 教学日期

课程安排: 2018-2019学年第一学期; 第8周星期四

7.10.2 教学目标

- (1) 熟悉工作点的改变
 (2) 了解泵的组合
 (3) 掌握泵的高度和管路测量

7.10.3 教学过程

- 1、管路测量
-

1) 毕托管（测大管气速）—动能式

$$u_r = \sqrt{\frac{2gR(\rho_A - \rho_C)}{\rho}}$$

（微差压差计）

2) 孔板流量计——差压式流量计（节流式）

$$V_S = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_A - \rho)}{\rho}}$$

标准孔板 $C_0 = f(R_e, A_0/A)$ ，当 C_0 为常数时，

$$V \propto \sqrt{R}$$

孔板流量计的阻力损失

$$h'_f = \zeta \frac{u_0^2}{2} = \zeta C_0^2 \frac{gR(\rho_{Hg} - \rho)}{\rho}$$

3) 文丘里流量计——节流式

$$V_S = C_V A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_A - \rho)}{\rho}}$$

4) 转子流量计——截面式流量计

$$V_S = C_R A_R \sqrt{\frac{2gV_f}{A_f \rho} (\rho_f - \rho)}$$

流量校正

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{\rho_1 (\rho_f - \rho_2)}{\rho_2 \left(\rho_f \frac{A_{R \min}}{A_{R \min}} \rho_1 \right)}}$$

转子切削后，流量变化。

2、分支汇合并联

分支汇合管路：

交点处产生动量交换，造成局部能量损失，同时各流股间还有能量交换。工程上采用

- (1) 对 $L/d \gg 1000$ 的长管，忽略交点阻力；
- (2) 用三通管的局部阻力（能量增加 $\zeta < 0$ ，能量减少 $\zeta > 0$ ）代替。

并联管路:

$$\sum h_{f1} = \sum h_{f2} = \sum h_{f3}$$

$$V_1/V_2 = \frac{\sqrt{\frac{d_1^5}{\lambda_1 l_1}}}{\sqrt{\frac{d_2^5}{\lambda_2 l_2}}}$$

$$V = V_1 + V_2$$

并联滞流管路:

$$V_1/V_2 = \frac{d_1^4}{l_1} \frac{l_2}{d_2^4}$$

管网: 当以支管阻力为主时, 各支管流速均匀, 总流量与分支管路的数目近似成正比。

3、泵的安装高度

- 1) 允许吸上真空度法
- 2) 允许气蚀余量法

$$H_g = H'_g - \frac{u_1^2}{2g} - H_{f0-1} - \Delta h - H_{f0-1}$$

$$H'_g = \left[H_s + (H_a - 10) - \left(\frac{p_v}{\rho g} - 0.24 \right) \right] \frac{1000}{\rho}$$

4、工作点改变

A、改变泵的特性曲线

- 1) 改变转速

若转速变化小于 20%, 设速度三角形相似, 则效率不变, 有比例定律:

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{\pi D_2' b_2' C_{r2}'}{\pi D_2 b_2 C_{r2}} \frac{u_2'}{u_2} \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$

$$\frac{H'}{H} = \frac{u_2' C_2' \cos \alpha_2'}{u_2 C_2 \cos \alpha_2} \left(\frac{n'}{n} \right)^2$$

$$\frac{N'}{N} = \frac{H' Q'}{H Q} = \left(\frac{n'}{n} \right)^3$$

- 2) 改变叶轮直径 ($D_2' b_2' = D_2 b_2$)

若叶轮直径变化小于 5%，同上，有切割定律：

$$(1) \frac{Q'}{Q} = \frac{D'_2}{D_2}, (2) \frac{H'}{H} = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^2, (3) \frac{N'}{N} = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^3$$

3) 变泵的组合（详见 5）

B、改变管路特性

1) 改变阀门的开度

关小阀门，阀门局部阻力系数增大，B 增大，H 增大，Q 下降。见图 6(1)，阀门关小，管路特性曲线

变陡。

2) 改变上下游的静压头差和位压头差 $\Delta P/\rho g$ ， ΔZ 变化，引起 K 变化，则 H，Q 将发生变化。见图 6(2)， $(\Delta P/\rho g + \Delta Z)$ 增大时，管路特性曲线上移。



图6 (1)

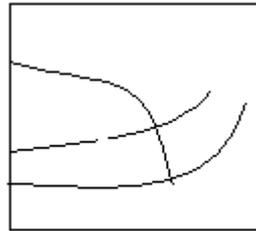


图6 (2)

5、泵的组合

型号相同的泵并联，同样压头下流量加倍。

$$H_{\text{并}} = A - B Q^2/4$$

型号相同的泵串联，同样流量下压头加倍。

$$H_{\text{串}} = 2(A - B Q^2)$$

低阻管路 $Q_{\text{并}}$ 大于 $Q_{\text{串}}$ ，高阻管 $Q_{\text{并}}$ 小于 $Q_{\text{串}}$ 。

7.10.4 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.11 教学单元十一（习题课）

7.11.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 9 星期一

7.11.2 教学目标

(1) 熟悉前面两章所学基础知识点

(2) 掌握常见类型问题计算

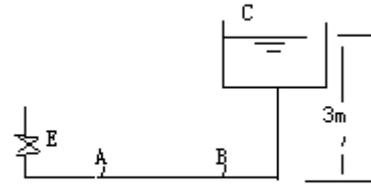
7.11.3 教学内容

习题课

7.11.4 教学过程

★基本知识的灵活运用举例

有一管路系统如图所示。水在管内向高位槽流动，当 E 阀开度为 1/2 时，A、B 两处的压强表读数分别为 $5.9 \times 10^4 \text{Pa}$ 及 $4.9 \times 10^4 \text{Pa}$ 。此时流体的流量为 $36 \text{m}^3/\text{h}$ 。现将 E 阀开大，B 点压强表读数升至 $6.87 \times 10^4 \text{Pa}$ ，水的密度为 $1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 。假设在两种情况下，流体都进入了阻力平方区。



求：E 阀开大后，

- (1) 管内水的流量；
- (2) A 处压强表读数 p_A 。(天大 95/10)

解：设水槽液面为 C-C 截面，以 AB 管道中心线为基准水平面，在 B-B 与 C-C 截面间

列柏努力方程：

$$\frac{p_B}{\rho} + \frac{u^2}{2} = Z_C g + \sum h_{fB-C} = Z_C g + \lambda \frac{l_{bc}}{d} \frac{u^2}{2}$$

$$\frac{p_B}{\rho} = Z_C g + \left(\lambda \frac{l}{d} - 1 \right) \frac{u^2}{2}$$

E 阀开大后

$$\frac{p'_B}{\rho} = Z_C g + \left(\lambda \frac{l}{d} - 1 \right) \frac{u'^2}{2}$$

$$\left(\frac{u'}{u} \right)^2 = \frac{p'_B - \rho g Z_C}{p_B - \rho g Z_C} = \frac{6.87 \times 10^4 - 1000 \times 9.81 \times 3}{4.9 \times 10^4 - 1000 \times 9.81 \times 3} = 2$$

$$Q' = (u'/u)Q = 1.414 \times 36 = 51 \text{m}^3/\text{h}$$

(2)

$$\frac{\Delta p'_{AB}}{\Delta p_{AB}} = \frac{\sum h'_{fAB}}{\sum h_{fAB}} = \left(\frac{u'}{u} \right)^2$$

$$p'_A = (p_A - p_B)(u'/u)^2 + p'_B$$

$$= (5.9 \times 10^4 - 4.9 \times 10^4) \times 2 + 6.87 \times 10^4 = 8.87 \times 10^4 \text{Pa}$$

★虹吸管问题：

如图 1 所示：反应器和储槽均通大气，用虹吸管从高位槽向反应器加料。要

求料液流速为 $u = 1 \text{ m/s}$ ，料液在管内阻力损失为 $\Sigma h_f = 20 \text{ J/kg}$ （不计出口损失）。求：高位槽液面比管出口高出多少？（ $h = 2.09 \text{ m}$ ） Notes: 空化现象

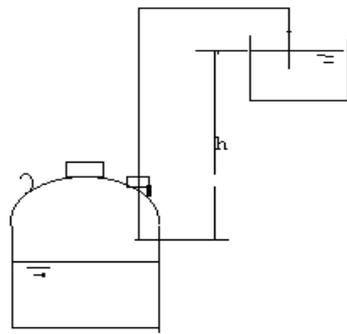


图 1

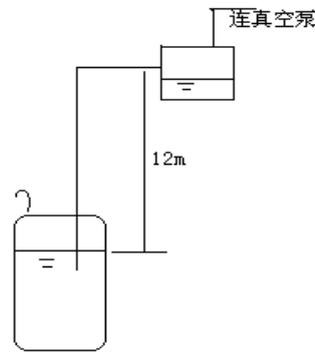


图 2

★ 真空吸料问题:

如图 2，储槽液面恒定。将 30°C 的 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ （密度为 800 kg/m^3 ）用 $\phi 57 \times 3.5 \text{ mm}$ 的无缝钢管吸入高位槽中。要求 $V_s = 0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ ，且 $\Sigma h_f = 0$ 。求真空泵需将高位槽的压力降到多少？（ $p = 5300 \text{ N/m}^2$ ）

解题中应注意多学科知识的结合，计算是一个方面，而更重要的是分析操作过程的可行性，实际生产中能否实现及如何实现的问题。

概念题

流体力学部分

1. 连续性介质假定是指（ ）。
2. 液封是指（ ）。
3. 流体阻力产生的根源是（ ）。粘性是指（ ）。
4. 在连续稳定流动过程中，流速与管径的（ ）成正比。均匀圆管内流体的流速不因流阻的存在而（ ）。（减、降或不变）
5. 无因次数群是（ ）的数组。
6. 滞流与湍流的根本区别是（ ）。
7. 一定量的流体在圆形直管内流过，若流动处于阻力平方区，则流动阻力与速度的（ ）成正比。
8. 圆形直管内流体滞流流动的速度分布呈（ ）形状。其平均速度是中心最大速度的（ ）。摩擦阻力系数与雷诺数的关系是（ ）。
9. 流体流动边界层是指（ ）。流体流过某一障碍物发生边界层脱体的原因是（ ）。由于固体表面形状而造成边界层分离所引起的能量损失，称为（ ）。粘性流体绕过固体表面的阻力为摩擦阻

力和（ ）之和，又称为局部阻力。

10. 局部阻力所引起的能量损失有两种计算方法：（ ）法和（ ）法。

11. 并联管路的特点是（ ）。分支管路的特点是（ ）。

12. 孔板流量计是通过（ ）来反映流量的大小，又称为（ ）流量计，而转子流量计是流体流过节流口的压强差保持恒定，通过变动的（ ）反映流量的大小，又称（ ）。

13. 教材 P88 思考题

流体输送设备部分

1. 离心泵在启动前，要先灌泵，以防止（ ）现象的发生。气蚀是指（ ）。为防止气蚀现象的发生，离心泵的安装高度应（ ）。

2. 离心泵的性能参数主要是（ 、 、 、 ）。性能曲线是指（ 、 、 ）的关系曲线。

3. 离心泵的允许吸上真空度是指（ ）。允许气蚀余量是指（ ）。

4. 离心泵的工作点是（ ）的交点。工作点调节即流量调节一般用（ ）方法。

5. 采用离心泵的串并联可改变工作点，对于管路特性曲线较平坦的低阻管路，采用（ ）组合可获得较高的流量和压头；而对于高阻高阻管路，采用（ ）组合较好；对于（ $\Delta Z + \Delta P / \rho$ ）值高于单台泵所能提供最大压头的特定管路，则采用（ ）组合方式。

6. 往复泵的有自吸能力，启动前不需（ ），往复泵的压头与泵的尺寸（ ），取决于管路特性，这类泵称为（ ）。流量调节不能简单地用排出管路上的阀门来调节流量，一般用（ ）来调节。

7. 风机的性能参数是指（ ， ， ）等。若被输送气体的温度增高，风机的风压将（ ）。风机的风量一般是以（ ）状态计量的。

8. 往复压缩机的主要部件有（ 、 、 ）等。压缩比是指（ ）。为解决压缩机的流量不均问题，在压缩机的出口应安装（ ）。

7.11.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.12 教学单元十二（传热基本方式、基本概念）

7.12.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 9 周星期四

7.12.2 教学目标

了解传热在工程实际中的应用，热传导在工程实际中的应用；熟悉：传热的三种基本方式，导热的机理、特点，热阻概念；掌握冷、热流体热交换的方式，间壁式换热器，工业上常用的加热剂、冷却剂及其选择，导热机理，温度场、等温面、温度梯度、傅立叶定律的概念，平壁和圆筒壁稳定热传导，对数平均值概念的提出。

7.12.3 教学内容

内容：传热在化工生产中的应用，传热的基本方式，冷热流体热交换的方式，传热量、热通量、间壁式换热器，载热体及其选择，导热机理，温度场、等温面、温度梯度、傅立叶定律的概念，平壁和圆筒壁稳定热传导，对数平均值概念的提出。

重点：热传导、对流传热及热辐射的机理，三种基本方式的特点；傅立叶定律，平壁和圆筒壁稳定热传导计算。

难点：冷、热流体热交换的方式，等温面的概念与建立立体平面，平壁热传导过程传热速率方程推导。

7.12.4 教学过程

第一节 概述

一、传热在过程化工中的应用：

- 1、加热或冷却
- 2、换热，回收利用热能
- 3、保温以减小热损失
- 4、工业传热过程举例

二、传热的三种基本方式：

- 1、热传导（又称导热）：金属，非金属固体，液体，气体

导热机理

特点：物体各部分无相对位移

2、热对流（又称为对流传热）：

（1）自然对流：流体是静止的，温度差引起密度差造成。

（2）强制对流：因外力（泵、搅拌等）造成。

特点：只发生在流体中，流体质点发生相对位移

牛顿冷却定律

工业对流传热过程（间壁换热），传热量 Q 、热通量 q

3、辐射传热：

因热的原因而产生的电磁波在空间的传播，特点是伴有能量形式的转换，不需要任何介质。

第二节 热传导

一、傅立叶定律：

1、温度场、等温面和温度梯度

2、傅立叶（Fourier）定律

3、导热系数（教材中称导热率）

（1）导热系数的定义

（2）固体的导热系数

（3）液体的导热系数

（4）气体的导热系数

二、平壁稳定热传导：

1、无限大单层平壁稳态热传导

2、无限大多层平壁一维稳态导热

实为通式：

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum \frac{b_i}{\lambda_i A}}$$

三、圆筒壁的稳态热传导：

1、单层圆筒壁一维稳态导热

2、多层圆筒壁一维稳态导热

实为通式：

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum \frac{b_i}{\lambda_i A_i}}$$

7.12.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.13 教学单元十三（热传导）

7.13.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 10 周星期一

7.13.2 教学目标

了解对流传热的分类在工程实际中的应用；熟悉影响对流传热系数的因素和量纲分析；掌握流体在管内（管程）作强制对流时的对流传热系数计算。

7.13.3 教学内容

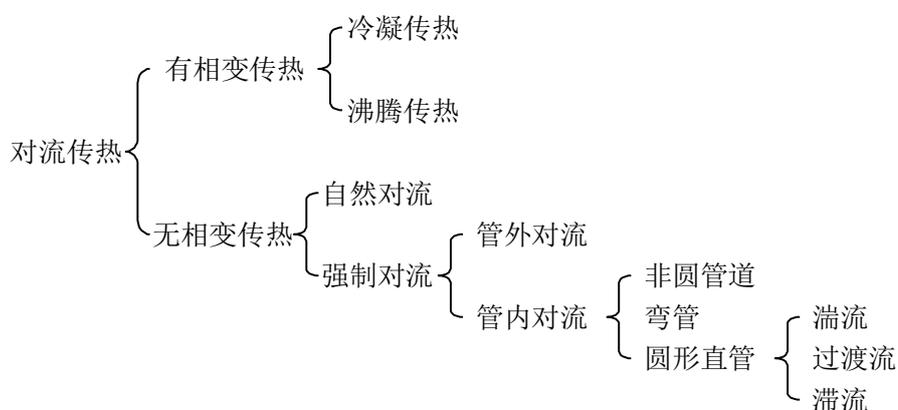
内容：流体在管内作强制对流时的对流传热系数，影响对流传热系数的因素，提高对流传热系数的途径。

重点：各种流动状态下对流传热系数计算。

难点：对流传热系数具有局部性，对流传热系数的提高，强调对流传热系数关联式应用时注意使用范围。

7.13.4 教学过程

一、对流传热的多样性：



二、对流传热系数的影响因素：

- 1、引起流体流动的原因：自然对流和强制对流
- 2、流动型态：层流和湍流
- 3、流体的物性： λ ρ μ c_p
- 4、传热面的形状、放置方式和大小（冷凝器垂直或水平放置相差十几倍）
- 5、有无相变化

三、因次分析法在对流传热中的应用：（见表 2 所示）

- 1、流体无相变时的强制对流传热过程：

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \text{流体无相变时强制对流时的准数关系式}$$

- 2、无相变自然对流下的对流传热系数：

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad \text{无相变自然对流下的对流传热系数}$$

表 2. 准数的符号和意义

准数名称	符号	准数式	意义
努塞尔特准数 Nusselt	Nu	$\frac{\alpha l}{\lambda}$	表示过程中对流传热的热量与导热热量之比，包括待求给热系数
雷诺准数 Reynolds	Re	$\frac{lu\rho}{\mu}$	表示流动形态和湍动程度对对流传热的影响
普兰特准数 Prandtl	Pr	$\frac{c_p\mu}{\lambda}$	表示物性影响的准数
格拉斯霍夫准数 Grashof	Gr	$\frac{l^3\rho^2g\beta\Delta t}{\mu^2}$	表示自然对流影响的准数

四、流体做强制对流时的对流传热系数：

- 1、流体在管内做强制对流：

- (1) 流体在圆形直管内作强制湍流：

$$Nu_u = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad \text{或} \quad \alpha = 0.023\frac{\lambda}{d}\left(\frac{du\rho}{\mu}\right)^{0.8}Pr^n$$

- (2) 流体在圆形直管内作强制层流：

$$Nu = 1.86(Re Pr \frac{d_i}{L})^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

(3) 流体在圆形直管内呈过渡流:

$$\phi = 1 - 6 \times 10^5 \text{Re}^{-1.8}$$

(4) 流体在弯管内作强制对流:

$$\alpha' = \alpha \left(1 + 1.77 \frac{d_i}{R} \right)$$

(5) 流体在非圆形管中作强制对流:

$$d'_e = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)}{\pi d_2} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_2}$$

7.13.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.14 教学单元十四（对流传热基本方程讲解）

7.14.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 10 周星期四

7.14.2 教学目标

了解有相变的对流传热在工程实际中的应用；蒸汽冷凝、液体沸腾的传热过程；有相变的对流传热过程强化途径。

7.14.3 教学内容

内容：蒸汽冷凝和液体沸腾。

重点：蒸汽冷凝和液体沸腾对流传热系数的影响因素

难点：蒸汽冷凝和液体沸腾对流传热系数的计算

7.14.4 教学过程

四、流体做强制对流时的对流传热系数:

2、流体在管外强制对流:

(1) 流体在管束外横掠流动

(2) 流体在换热器有折流挡板管间流动

3、提高对流传热系数的途径：

五、蒸汽冷凝时的对流传热系数：

1、蒸汽冷凝时的传热过程及其热阻：

(1) 膜状冷凝和滴状冷凝：如图 35 所示

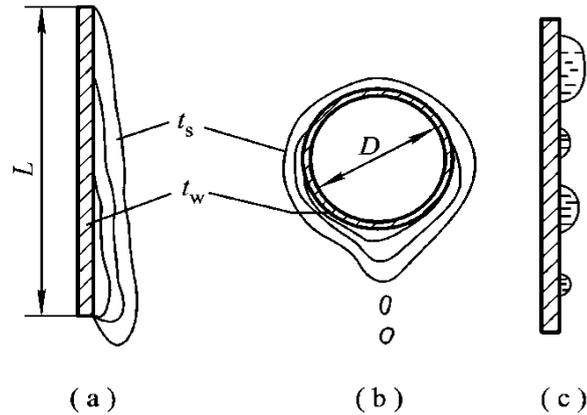


图 35. 膜状冷凝 (a, b) 和滴状冷凝 (c)

(2) 蒸汽冷凝时的传热热阻

2、实验结果：

1) 单根水平管外层流膜状冷凝：

$$\alpha = 0.725 \left[\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu d_o (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

2) 竖壁和竖管外膜状冷凝：冷凝准数的提出

$$\alpha = 1.13 \left[\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu L (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

3、水平管束外层流膜状冷凝：

$$\alpha = 0.725 \left[\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu d_o (t_s - t_w)} \right]^{1/4}$$

4、影响冷凝时对流传热系数的因素、冷凝的强化：

1) 影响因素：不凝气的影响、过热蒸汽的影响、管子放置方式的影响。

2) 过程的强化

六、液体沸腾时的对流传热系数（大容积饱和沸腾）：

1、沸腾现象：

- (1) 气泡的生成和过热度
- (2) 大容积饱和沸腾曲线：自然对流、核状沸腾、膜状沸腾
- (3) 找出饱和沸腾临界点的工业意义

2、液体沸腾传热计算及其影响因素：

- (1) 准数关联式
- (2) 竖壁和竖管外膜状冷凝：冷凝准数的提出

3、影响大容积核状沸腾的因素：

- (1) 表面粗糙度和表面物理性质的影响
- (2) 温度和压力的影响

7.14.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.15 教学单元十五（传热过程计算）

7.15.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 11 周星期一

7.15.2 教学目标

熟悉间壁两侧对流传热温度分布情况；掌握总热量衡算、总传热系数的计算以及污垢热阻计算。

7.15.3 教学内容

内容：间壁两侧流体热交换过程的分析，总传热系数，热量衡算式与传热速率方程间的关系。

重点：总传热速率方程和总传热系数的计算，污垢热阻计算

难点：间壁两侧的流体热交换过程分析，冷热流体侧的对流传热系数和内外表面的对应关系， α 具有局部性。

7.15.4 教学过程

两流体间的热量传递

一、间壁两侧流体热交换过程的分析：（如图 34 所示）

- 1、热源
- 2、冷源
- 3、间壁两侧流体热交换过程的分析

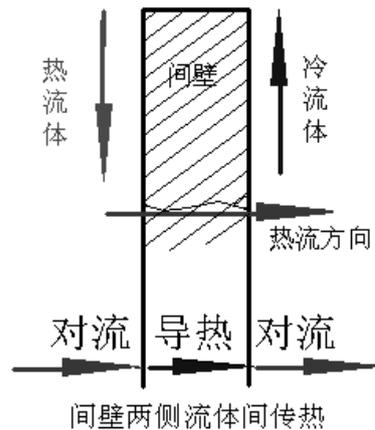


图 34. 间壁两侧流体传热过程

二、传热速率的表达式——两种表达方式

三、总传热系数 K_0 ：

1、对流传热系数 与总传热系数 K_0 ：

- (1) 对流传热与牛顿冷却定律
- (2) 对流传热系数 α , $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- (3) 总传热系数 K , $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

定义 $\frac{1}{K_0} = \frac{1}{\alpha_o} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i}$ 三个环节总热阻的构成

<p>热流体对流传给壁面的热量 = 壁面的导热量 = 壁面传递给冷流体的热量 = 过程传导的总热量 = 热流体降温放出的热量 = 冷流体升温得到的热量</p>	}	最重要的公式 1
---	---	----------

(前提：稳态传热、忽略热损失)

2、污垢热阻：

$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{\alpha_o} + R_{so} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_o}{d_m} + R_{si} \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_o}{d_i} \quad \text{最重要公式2}$$

总传热系数的定义式也是计算式，其实质是总热阻 $1/K_0$ 构成的。

三、K 值的大致范围：教材 P229 表 4-6 列出了不同冷热流体的总传热系数范围。

四、K 值的提高，即换热器传热过程的强化，减小总热阻中起决定作用的热阻。

7.15.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.16 教学单元十六（对流传热关联式）

7.16.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 11 周星期四

7.16.2 教学目标

了解实际换热器中流体流向（逆流、并流、错折流）；熟悉逆流和并流时传热平均温度差的计算；掌握对数平均温度差计算。

7.16.3 教学内容

内容：热量衡算式与传热速率方程间的关系；平均温度差的计算，复杂错折流时 Δt_m 计算；传热效率—传热单元数法。

重点：逆流和并流平均温度差计算

难点：复杂流向时的平均温差计算，温度差校正系数。工业上采用管方分程、壳方加折流挡板来提高对流传热系数是以降低传热推动力为代价的。

7.16.4 教学过程

一、热量衡算式与传热速率方程间的关系：

1、热量衡算：

$$Q = \text{热流体放出的热量} = \text{冷流体获得的热量} \quad \text{——热量衡算式}$$
$$\text{即： } Q = m_{s1}c_{p1}(T_1 - T_2) = m_{s2}c_{p2}(t_2 - t_1)$$

2、传热速率方程：

$$\left. \begin{aligned} Q &= KA_o \Delta t_m \\ Q &= \alpha_o A_o \Delta t_{m0} \\ Q &= \alpha_i A_i \Delta t_{mi} \\ Q &= \frac{\lambda}{b} A_m (T_w - t_w) \end{aligned} \right\} \text{——传热速率方程 (Q、A 和传热系数之间的关系)}$$

二、平均温度差的计算：

1、恒温差传热

2、变温差传热

(1) 一侧变温时的平均温差

(2) 两侧变温时的平均温差：

1) 逆流和并流时的传热温差

2) 错流和折流时的平均温度差

3) 不同流动型式的比较

三、传热效率—传热单元数法 ($\varepsilon - NTU$ 法) 简介：

ε = 实际的传热量 Q / 最大可能的传热量 Q_{\max}

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(NTU)_{\min} (1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}})]}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}}$$

7.16.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.17 教学单元十七（换热器）

7.16.6 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 12 周星期一

7.16.7 教学目标

了解换热器类型（重点了解间壁式换热器类型）；熟悉常用套管式、夹套式换热器结构及特点；掌握列管式换热器设计计算和选型；掌握换热器（列管式）强化途径。

7.16.8 教学内容

内容：传热设备简介，列管式换热器设计计算和选型；介绍蛇管换热器（沉浸式、喷淋式），夹套式换热器，板式换热器，翅片式换热器；换热器强化途径

重点：列管式换热器选型；换热器强化途径。

难点：流程的选择，总传热系数的估算，各种换热器特性。

7.16.9 教学过程

一、换热器的类型：

1、直接接触式传热（混合式）

2、蓄热式换热

3、间壁式换热：

（1）套管式换热器

（2）列管式换热器：（特点，使用方法）

固定管板式、浮头式、U 型管式

二、换热器的选用和设计中应考虑的问题：

1、流体通道的选择原则

2、流速的选择

3、管子规格及排列方法

4、管程、壳程的压力损失

三、列管换热器的选用和设计的步骤：

1、计算传热速率 Q 及逆流时平均温差， K_o 估计 $\rightarrow A_o$ 估计

- 2、试选适当型号的换热器
- 3、核算总传热系数 K_0 。
- 4、计算传热面积
- 5、计算管、壳程阻力损失
- 6、讲解教材 P285 例题 4-22

四、其它类型换热器：

- 1、板式换热器、螺旋板式换热器
- 2、翅片式换热器：
 - (1) 翅片管换热器
 - (2) 板翅式换热器
- 3、热管

五、传热过程的强化途径：

- (1) 增大传热面积
- (2) 增大平均温差
- (3) 增大传热系数

7.18 教学单元十八（蒸馏概述及拉乌尔定律）

7.18.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 12 周星期四

7.18.2 教学目标

了解蒸馏在化工生产上有那些应用；掌握蒸馏的基本概念和二元理想溶液的汽液平衡

7.18.3 教学内容

蒸馏，理想溶液，拉乌尔定律，二元理想溶液的 t - x - y 相图和 x - y 相图；

重点：拉乌尔定律，汽液平衡关系

难点：处理方法，二元理想溶液的汽液平衡和 t - x - y 相图 x - y 相图结合相图讲解。

7.18.4 教学过程

（一）蒸馏过程概述

1. 蒸馏过程在化工中的应用

蒸馏分离的依据是，根据溶液中各组分挥发度（或沸点）的差异，使各组分得以分离。

2. 蒸馏分离的特点

3. 蒸馏过程的分类

工业上，蒸馏操作可按以下方法分类：

- (1) 蒸馏操作方式 可分为简单蒸馏、平衡蒸馏（闪蒸），精馏和特殊精馏等。
- (2) 蒸馏操作流程 可分为间歇蒸馏和连续蒸馏。
- (3) 物系中组分的数目 可分为两组分蒸馏和多组分蒸馏。
- (4) 操作压力 可分为加压、常压和减压蒸馏。

本章重点讨论两组分物系连续精馏的原理及计算方法。

(二) 蒸馏过程的汽液平衡关系

两组分理想物系的汽液平衡

所谓理想物系是指液相和汽相应符合以下条件：

- (1) 液相为理想溶液，遵循拉乌尔定律。
- (2) 汽相为理想气体，遵循道尔顿分压定律。

1. 汽液平衡相图

- (1) 温度—组成 ($t-x-y$) 图
- (2) 汽—液相组成图 ($x-y$ 图)

2. 汽液平衡的关系式

- (1) 拉乌尔定律

$$x_A = \frac{P - p_B^0}{p_A^0 - p_B^0}$$

- (2) 以平衡常数表示的汽液平衡方程

$$y_A = \frac{p_A^0}{P} \frac{P - p_B^0}{p_A^0 - p_B^0}$$

7.18.5 教学方法

- 1、举例法
- 2、提问法
- 3、逻辑推导

7.19 教学单元十九（简单蒸馏和平衡蒸馏）

7.19.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 13 星期一

7.19.2 教学目标

1. 熟悉非理想溶液的最低恒沸点及相应的最高蒸汽压和最高恒沸点及相应的最低蒸汽压
2. 掌握理想溶液及非理想溶液的挥发度和相对挥发度的定义，理想溶液的相对挥发度随温度增加而略有减小，简单蒸馏的计算

7.19.3 教学内容

内容：纯组分和溶液中各组分的挥发度，理想溶液和非理想溶液中两组分的相对挥发度，非理想溶液的相图，最高恒沸点和最低恒沸点，简单蒸馏的总物料衡算和微分物料衡算；

重点：理想溶液和非理想溶液相对挥发度的计算

难点：非理想溶液的最高恒沸点和最低恒沸点。

7.19.4 教学过程

（二）两组分非理想物系的汽液平衡

实际生产中所遇到的大多数物系为非理想物系。非理想物系可能有如下三种情况：

- (1) 液相为非理想溶液，汽相为理想气体；
- (2) 液相为理想溶液，汽相为非理想气体；
- (3) 液相为非理想溶液，汽相为非理想气体。

1. 汽液平衡相图

正偏差系

负偏差系

2. 汽液平衡方程

第二节 平衡蒸馏与简单蒸馏

（一）平衡蒸馏

1. 平衡蒸馏装置与流程

2. 平衡蒸馏过程计算

总物料衡算

$$F = D + W$$

易挥发组分衡算

$$Fx_F = Dy + Wx$$

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{x_F}{q-1}$$

(二) 简单蒸馏

1. 简单蒸馏装置与流程

2. 简单蒸馏的计算

$$\ln \frac{F}{W} = \frac{1}{\alpha-1} \left[\ln \frac{x_F}{x_2} + \alpha \ln \frac{1-x_2}{1-x_F} \right]$$

7.19.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.20 教学单元二十（平衡级蒸馏和精馏原理）

7.20.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 13 周星期四

7.20.2 教学目标

掌握平衡蒸馏的计算，液相分率对汽液相组成的影响，比较平衡蒸馏和简单蒸馏的分离效果，理解平衡级蒸馏，精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设。

7.20.3 教学内容

内容：平衡蒸馏，平衡蒸馏与简单蒸馏的比较，平衡级蒸馏，精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设；

重点：精馏的设备条件、回流条件和理论板假设、恒摩尔流假设

难点：简单蒸馏与平衡蒸馏的分离效果比较，用例题讲解。

7.20.4 教学过程

第三节精馏原理和流程

(一) 精馏过程原理

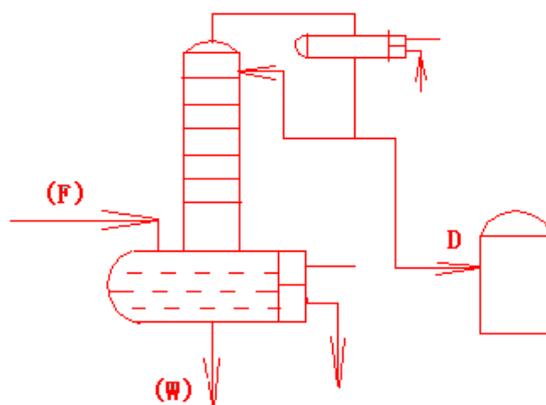
1. 多次部分汽化和多次部分冷凝
2. 精馏塔模型

(二) 精馏操作流程

1. 连续精馏操作流程
2. 间歇精馏操作流程

间歇精馏与连续精馏相比，有如下特点：

1. 间歇精馏为非定态过程，它有两种操作方式：即恒回流比操作和恒馏出液组成操作。
2. 间歇精馏只有精馏段。



7.20.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.21 教学单元二十一（二元连续精馏的全塔物料衡算）

7.21.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 14 星期一

7.21.2 教学目标

掌握回流比是精馏设计中的核心因素，二元连续精馏的全塔物料衡算，精

馏段操作线方程

7.21.3 教学内容

内容：全塔物料衡算，回流比，精馏段操作线方程教学重点、难点及其处理

重点：全塔物料衡算，精馏段操作线方程，精馏段操作线和理论板的图解

难点：理论板图解方法的理论依据

7.21.4 教学过程

全塔物料衡算

(一) 物料衡算：连续稳定操作，进料流量=出料流量

$$\begin{cases} F = W + D \\ Fx_F = Wx_W + Dx_D \end{cases}$$

x_F ——原料中易挥发组分的摩尔分率

x_D ——馏出液中易挥发组分的摩尔分率

x_W ——釜液中易挥发组份的摩尔分率

应用时要注意 F 与 x_F 的关系， F 若用质量表示，则 x_F 要用质量分率表示，统一

例题

(二) 精馏过程所要求的分离表示法

1. 用产品的组成表示 ($x_D=95\%$)

2. 用回收率表示

回收率：指回收了原料中易挥发（或难挥发）组分百分数

如：塔顶易挥发组分的回收率 η

$\eta_{易} = \text{馏出液中易挥发组份} / \text{原料液中易挥发组份} = Dx_D / Fx_F \times 100\%$

$\eta_{难} = W(1 - x_W) / F(1 - x_F) \times 100\%$

精馏的分析及其图解法

(一) 几个概念

1、理论塔板 (theoretical plate)：离开该塔板的汽、液组成达到相平衡的塔板。

注：理论板并不存在，但它可以作为衡量实际塔板分离效果的最高标准。

在设计中，求理论数后，则实际板数=理论板数×校正系数

2、操作关系：任意板下降液体组成 x_n 与下一板上升蒸汽组成 y_{n+1} 之间的关系。由物料衡算决定。

(二) 恒摩尔流的假定

1. 恒摩尔汽化

精馏段内，由每层塔板上升的蒸汽摩尔流量皆相等；提馏段内也是一样

2. 恒摩尔溢流

精馏段内，由每层塔板溢流的液体摩尔流量相等；提馏段内也是一样。

L ——精馏段下流的液体摩尔流量 kmol/h

L' ——提馏段下流的液体摩尔流量 kmol/h

$L_1=L_2=L_3=……=L_n=定值=L$

$L'_1=L'_2=L'_3=……=L_n=定值$

两段下降流体摩尔流量不一定相等

总称为恒摩尔流假设

3. 如符合以下条件，则上述两项假设与实际情况相近

① 各组分的摩尔潜热相等

② 汽液接触时回温度不同而变换的显热可以忽略

③ 保温良好，塔的热损失可以忽略不计

(三) 操作线方程的推导

1. 精馏段操作线方程式（笔记）

2. 提馏段操作线方程

7.21.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.22 教学单元二十二（提馏段的分析和进料状况的影响）

7.22.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 14 周星期四

蒸汽焓分别为 i_F, i_L, i_V (kJ/kmol)

进料带入的总焓=汽、液两相各自带入的焓之和，即：

$$Fi_F = (qF)i_L + (1-q)Fiv$$

对 1mol 进料，则 $i_F = qiL + (1-q)iv$

$$q = \frac{iv - i_F}{iv - i_L} = \frac{\text{每千克进料从进料状况化为饱和蒸气所需热}}{\text{进料的千摩汽化潜热}}$$

对于饱和汽、液混合进料这情况， $t_s < t_F < t_d$ ， $i_L < i_F < i_V$

则 $i_V - i_L > i_V - i_F > 0$ ， $0 < q < 1$

3. 推广至其它的情况

1) 过冷液体进料：原料进塔与蒸汽接触后应升至平衡温度（泡点），这就需要提馏段上升的一部分蒸汽冷凝下来，用冷凝放出的潜热 Q 供进料升温用。 $V' > V$

$\because i_F < i_L$ ， $i_V - i_F > i_V - i_L$ ，即 $q > 1$ （图 b，P405）

2) 泡点液体进料（饱和液体进料）： $t_s = t_F, i_F = i_L$ ， $\therefore q = 1$

3) 汽液混合进料： $i_L < i_F < i_V, 0 < q < 1$

4) 饱和蒸汽进料： $t = t_d$ 即 $i_F = i_V$ ， $\therefore q = 0, V = F + V', L = L'$

5) 过热蒸汽进料： $t > t_d$ 即 $i_F > i_V$ ， $\therefore q < 0$

进料不仅全部与提馏段上升蒸汽 V' 汇合进入精馏段，还将释放出显热，使精馏段的回流液额外汽化一部分，结果 $V > V' + F, L' < L$

4. q 线方程（进料操作线方程）

$$L' = L + qF, V' = V - (1-q)F$$

$$\begin{cases} Fx_F = Dx_D + Wx_W \\ F = D + W \end{cases}$$

$$\text{又 } V'y = L'x - Wx_W, Vy = Lx + Dx_D$$

$$(V' - V)y = (L - L)x - (Dx_D + Wx_W) \Rightarrow y = \frac{q}{q-1}x - \frac{1}{q-1}x_F$$

$$\text{两操作线的交点方程: } -(1-q)F_g = qF_x - Fx_F$$

若以 V 表示精馏段上升的蒸汽摩尔流量 kmol/h

V' ——表示提馏段上升的蒸汽摩尔流量 kmol/h

“下标”表示塔板序号，则 $V_1 = V_2 = V_3 = \dots$ ， $V'_1 = V'_2 = V'_3 = \dots$

注意：两段上升的蒸汽摩尔流量不一定相等。

7.22.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.23 教学单元二十三（理论板数确定）

7.23.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 15 星期一

7.23.2 教学目标

掌握逐板计算法和图解法求解理论板数

7.23.3 教学内容

内容：逐板计算法用到三个方程和四条线，直接水蒸气加热的适用场合和优缺点；

重点：图解理论板数

难点：逐板计算法和图解法的对应关系

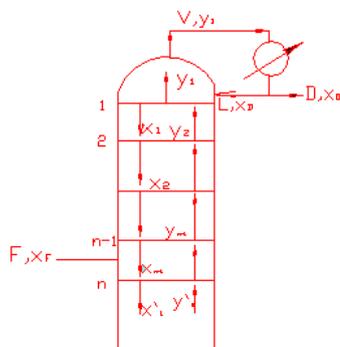
7.23.4 教学过程

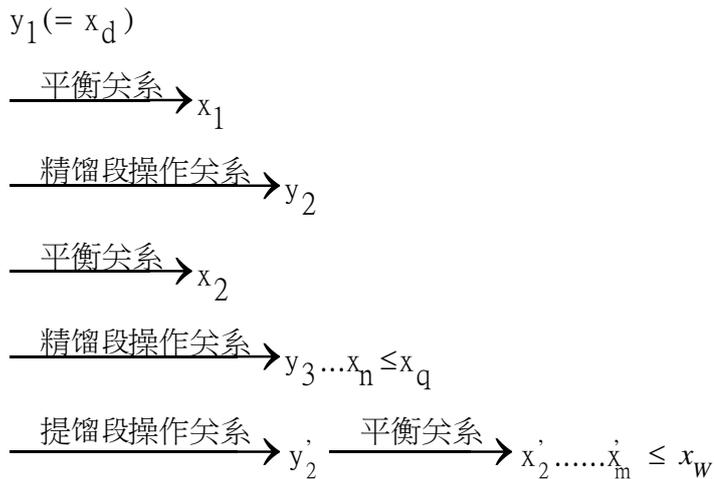
一、理论塔板数的确定

求理论塔板数，必须利用：（1）汽液两相的平衡关系（平衡曲线 $X-Y$ ），
（2）相邻两板间汽液两相组成的操作关系（操作线方程）

求解方法：逐板法和图解法

（一）逐板计算法





(二) 图解法 (笔记) x-y 图解法

1. 操作线的绘制

(1) 精馏段操作线

精馏段操作线方程:

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{x_D}{R+1}$$

对角线方程: $y = x$

精馏段操作线与对角线交点 $a(x_d, x_d)$, 与纵轴交点 $b(0, x_d/(R+1))$;

则, ab 即为精馏段操作线。(2) 提馏段操作线

提馏段操作线方程:

$$y'_{m+1} = \frac{L'}{L'-W} x'_m - \frac{W}{l'-W} x_w$$

提馏段操作线与对角线交点: $c(x_w, x_w)$;

提馏段操作线与精馏段操作线的交点:

精馏段操作线方程: $Vy = Lx + Dx_D$

提馏段操作线方程: $V'y' = L'x' - Wx_w$ 联立两个方程并整理得:

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{x_f}{q-1} \quad (1-38)$$

式 (1-38) 称为 q 线方程或进料方程, 是描述两个操作线交点轨迹的方程。

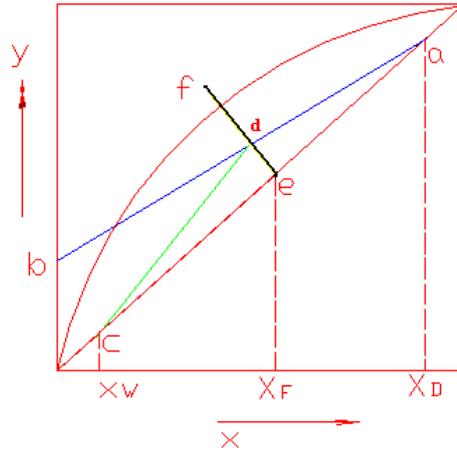
q 线的绘制:

q 线与对角线交点为 $e(x_f, x_f)$ 、其斜率为 $q/(q-1)$; 据此做直线 ef 即为 q 线。

q 线与精馏段操作线交点 d ; 则连 db 即得提馏段操作线

2. 图解求理论塔板数

过 a 依次在两个操作线与平衡线之间画梯级, 即可求得理论塔板数。(一个梯级代表一块理论塔板)



7.23.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

7.24 教学单元二十四（本章（蒸馏）小结和讲解习题）

7.24.1 教学日期

课程安排：2018-2019 学年第一学期；第 15 星期四

7.24.2 教学目标

1. 总结本章主要内容
2. 讲评习题

7.24.3 教学内容

总结本章的主要内容，讲评习题

7.24.4 教学过程

7.24.5 教学方法

1、举例法 2、提问法 3、逻辑推导

8. 课程要求

8.1 学生自学要求

课前预习：由于本课程的公式较多，计算流程比较复杂，需要学生课前对相关的基础知识进行预习，对下次所需学习内容有一个初步了解，这样老师在讲解知识点时能够更好理解。

课中：认真听讲，与老师互动，针对老师提出的问题积极思考，不懂的知识点向老师多加请教。

课后：认真学习教材，学习老师课件，巩固老师所讲知识点，并通过课后习题方式加深知识点理解。

8.2 课外阅读要求

阅读教材之外至少一本参考书，或者是充分利用网络知识，学习许多高校的精品课程，进一步加深知识点理解。

8.3 课堂讨论要求

针对重点和难点知识设置讨论或典型例题。讨论一般以分组的方式进行，要求每组要有自己的结论，小组成员必须发言。

8.4 课程实践要求

《化工原理》虽然并没有开设相关的实验实践课，有相关的《化工原理课程设计》。要求学生能够将所学知识点很好的应用与分析实践问题。

9. 课程考核

9.1 出勤（迟到、早退等）、作业、期中考试等要求

出勤：本课程的学习中，选课同学应该主动遵守四川理工学院学生管理条例中关于出勤的相政策规定。本课程将采用倒扣分形式，即对无故缺席的同学，每缺席1次平均时成绩扣5分，直至扣完。此外，请假的同学务必在上课前出示假条，后补无效。

迟到与早退：上课铃后进入教室的同学算迟到。下课前擅自离开教室的同学算早。迟到和早退一次扣2分。

作业：每缺交一次平均时成绩扣5分。

期中考试：期中考试以课堂测试为主，主要考察学生对已学知识的掌握情况。

9.2 成绩的构成与评分规则说明

课程成绩包括平时成绩和考试成绩。平时成绩20%，期中考试占10%，考试成绩70%。平时成绩主要由出勤、课堂发言、课后作业和期中考试组成。出勤不加分，仅扣分，具体扣分细节详见出勤作业考核方式；课堂发言随机抽点同学的方式，也可主动回答，教师根据题目的难易程度以及抽点同学回答情况给出等级分数，等级分数与百分制分数换算如下：A+:95，A:90，B+:85，B:80

9.3 考试形式及说明

《化工原理》是专业核心课程，闭卷考试，题型一般包括填空、选择、简答、判断和计算。具体考试要求按四川理工学院教务处规定执行。如果该课程总评成绩不及格（即该课程总评成绩<60分），将有且仅有一次补考机会，如果补考仍不及格，则需要重修本课程。

10.学术诚信

10.1 考试违规与作弊处理

考试违规与作弊按《四川理工学院生考试违纪和作弊处办法》处理。

10.2 杜撰数据、信息处理

对于涉及杜撰实验数据和信息处理的学生，一经查实，该实验计零分。

10.3 学术剽窃处理

实验报告和作业等，若有学术剽窃行为被证实，本次作业或报告记零分，并勒令重做。

11. 课堂规范

11.1 课堂纪律

学生在《化工原理》课程进行中应遵守以下规范：

1. 学生必须按时上课，不得无故旷课、迟到或早退。上课期间禁止使用手机，迟到的同学应从后门进入教室并不得影响其他同学。
2. 上课时学生衣着要整齐得体，专心听讲，认真做笔记，禁止随意交谈或
3. 学生应爱护教室内的一切公物，不得搬走桌椅、不准取走电器设备，损坏公物照价赔偿。
4. 若在课堂期间有私事需要处理，请安静离开，到教室外解决后安静地回到座位上。

11.2 课堂礼仪

1. 学生不得穿背心、内裤、拖鞋进教室，不准在教室内抽烟。
2. 学生应自觉保持教室整洁，不得随意吐痰、乱丢果皮、纸屑，严禁在桌椅上刻画。
3. 课堂讲授过程中若需表达自己的观点前，请举手示意，得到允许后，用普通话发言，同学发言时认真听不得嘲笑。
4. 课堂提问过程中请不要随意提醒或帮答，若想阐述自己的观点需在答题同学言毕后，举手示意得到允许后发言。
5. 不私下讲话，不做小动作，不能在课堂上吃东西、嚼口香糖和扇扇子。

12.课程资源

12.1 教材与参考书

教材：夏青、陈常贵编著，化工原理（上册），天津大学出版社，2005年

参考书：1、谭天恩、丁惠华等编著，化工原理，化学工业出版社，2000年；

2、赵汝溥、管国锋编著，化工原理，化学工业出版社，1999年；

3、陈敏恒、丛德滋等编著，化工原理，化学工业出版社，2001年；

4、赵文、王晓红等编著，化工原理，石油大学出版社，2001年。

12.2专业刊物

相关中文核心期刊有化工学报、石油化工、应用化学、化学工程、化工进展、精细化工、高校化学工程学报、过程工程学报，Journal of Chemical Engineering 等

12.3 网络课程资源

(1) <http://emuch.net/bbs> 小木虫论坛

(2) <http://bbs.hcbbs.com> 海川化工论坛

13.教学合约

13.1 教师作出师德师风承诺

作为一名光荣的人民教师，担负着教书育人的重任，为了认真履行教师职责，严格遵守《高等学校教师职业道德规范》；为了进一步明确授课教师对师德师风建设应负的责任，努力提高授课教师师德师风建设的整体水平，特向全社会作出公开承诺，全校教职工应在以下十方面履行职责，承担教育责任。

- 1、实行师德师风建设目标管理责任制，授课教师都应严格执行学校关于加强师德师风建设的各项规定，以德立身。
- 2、爱国守法。热爱祖国，热爱人民，拥护中国共产党领导，拥护中国特色社会主义制度。遵守宪法和法律法规，贯彻党和国家教育方针，依法履行教师职责，维护社会稳定和校园和谐。不得有损害国家利益和不利于学生健康成长的言行。
- 3、切实提高依法执教的法制意识，全校教职工都要自觉学法、知法、守法，用《教师法》、《教育法》、等有关政策法规规范自己的教学工作。
- 4、坚持开展以德立身，教学为本，情感育人的师德自律教育，铸师魂，修师德，练师能，内强素质，外树形象。
- 5、严谨治学。弘扬科学精神，勇于探索，追求真理，修正错误，精益求精。实事求是，发扬民主，团结合作，协同创新。秉持学术良知，恪守学术规范。尊重他人劳动和学术成果，维护学术自由和学术尊严。诚实守信，力戒浮躁。坚决抵制学术失范和学术不端行为。
- 6、模范遵守社会公德。为人师表，衣着整洁得体，语言规范健康，举止文明礼貌，以自身的良好形象教育引导学生。
- 7、尊重、爱护和信任学生，爱心育人，尊重学生人格，对学生不讽刺，不挖苦，不辱骂，杜绝体罚和变相体罚行为。
- 8、注重提高教育教学效果。爱生敬业，勤奋工作，备好每一篇教案，上好每一堂课，批好每一次作业，与学生谈好每一次话，以自己辛勤的劳动换取每一位学生的成功。
- 9、严格执行有关教育法规。不搞有偿家教，不向家长索要或暗示馈赠钱物，不参与黄、赌、毒及一切封建迷信活动，教师不得请学生代批作业、试卷，代写学

生成绩册和评语等。

10、自觉抓好自查自纠，围绕师德师风建设问题，定期进行自我对照，自我检查，自我整改，主动听取接受学生家长、学校行风监督员等各方面的批评与建议，自觉置于社会的监督之下。

以上十条，特向学校和上课学生作出公开承诺，如有违法违纪，授课教师将接受学校处罚，同时敬请学生、学校、行风监督员积极配合、支持，共同落实以上承诺。

13.2 阅读课程实施大纲，理解其内容

本课程实施大纲是对课程的教学内容、教学实施方案、师资基本情况、教学方法及其他与本课程相关的内容说明。本课程实施大纲主要是面向学生，以学习为中心，确保课程的每一个方面都能为学生的学习提供最为有效的支持。上课同学应该认真阅读本课程实施大纲，明确本大纲具体的教学以及规范内容，同时遵守课程实施大纲当中所确定的责任与义务。

13.3 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

本课程实施大纲由任课老师指定，教师对大纲中阐述的标准和期望能很好地理解和执行。同时，希望上课同学也能将本大纲的要求贯穿本课程。

14. 其他说明

如果上课同学有对本课程实施的意见和建议，欢迎大家提出，或对你自己做更多介绍，以便我对你有更多了解。同时进度安排可能会根据实际授课情况有所调整。