

普通高等学校教材

化工原理典型教学案例

李仲民 张琳叶 魏光涛 编著



科学出版社

普通高等学校教材

化工原理典型教学案例

李仲民 张琳叶 魏光涛 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书分4章,主要包括:化工单元操作的典型实例,介绍了自来水厂、糖厂、淀粉厂中的动量传递过程,糖厂、氯碱厂的传热,中药厂、糖厂的多效蒸发,糖厂的吸收操作,乙醇精馏工艺,糖厂及淀粉厂的干燥工艺;适于计算机辅助计算的化工单元操作参数举例,包含动量传递流体参数、过滤能力、精馏参数的计算机辅助计算等;部分化工单元操作的 Aspen 仿真模拟,包含流体在管段流动、泵输送流体、换热器换热、精馏、吸收等单元操作的模拟;化工单元操作知识要点讨论,主要是重要知识点的分析。

本书可作为高等学校化工类专业本科生学习化工原理的教学参考书,也可供相关专业教师和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理典型教学案例 / 李仲民, 张琳叶, 魏光涛编著. —北京: 科学出版社, 2018.12

普通高等学校教材

ISBN 978-7-03-058669-8

I. ①化… II. ①李… ②张… ③魏… III. ①化工原理—高等学校—教材. IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 200274 号

责任编辑: 陈雅娴 付林林 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年12月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年12月第一次印刷 印张: 8 3/4

字数: 176 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略而实施的“卓越工程师教育培养计划”，需要在课程教学手段上做重大调整以强化培养学生的工程素质及创新能力。编者基于这种想法，编写了本书作为化工原理课程教学改革的配套参考书。

本书旨在将化工原理的理论知识与工程实际相结合，让学生了解单元操作实例的基本规律及共性，掌握单元操作相关设备的结构、性能，了解设备的设计原理及操作特性，了解实际过程包含的要素，以拓展学生的工程知识、训练学生的逻辑思维、强化学生的工程意识及工程素养。另外，本书注重培养学生利用应用软件系统及编程计算解决复杂工程问题的能力。与常规计算相比，计算机计算仅需输入数据，复杂的计算工作由计算机完成，且能很快得到结果，大大节省了工程计算与设计的时间及工作量，还可避免常规计算过程容易出现的错误。Aspen 软件具有大量的化工过程模型，本书给出十个例子作为学生学习 Aspen 仿真的入门素材，学生在此基础上可进行更深入的学习。学会利用功能强大的 Aspen 软件对化工过程进行模拟、计算、设计，可获取大量贴近实际工程的训练。通过对各种工艺条件及设备参数的计算结果进行比较、分析、优化，掌握解决实际问题的技能，提高工程设计的创新能力。本书还对学习过程中需要重点掌握的知识点及难以理解的问题进行辨析，使学生深入透彻地理解化工原理课程的内容。

李仲民负责本书编写方案的制订及编写工作，张琳叶、魏光涛参与了第 3 章的编写工作、制作了书中的部分示意图，并对书稿进行了文字编排及审核。

多家企业的技术人员为本书提供了生产流程及工艺操作条件实例，在此向他们表示感谢。

由于编者学识有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 化工单元操作的典型实例	1
1.1 流体动量传递实例	1
1.1.1 自来水厂实例	1
1.1.2 糖厂蔗汁澄清实例	4
1.1.3 淀粉生产中旋液分离器的应用	4
1.1.4 与流体压强有关的一些应用实例	5
1.1.5 与伯努利方程有关的一些应用实例	5
1.1.6 测流体流速的实例	8
1.2 糖厂及氯碱厂的传热实例	8
1.2.1 糖厂的直接混合式传热	8
1.2.2 氯碱厂的直接混合式冷却	9
1.2.3 糖厂的间壁式传热	9
1.3 蒸发生产实例	9
1.3.1 中药厂制备中成药	9
1.3.2 糖厂蒸发实例	9
1.4 糖厂吸收实例	13
1.4.1 蔗汁吸收二氧化硫	13
1.4.2 蔗汁吸收二氧化碳	14
1.5 乙醇精馏实例	14
1.5.1 醪液成分物性数据	14
1.5.2 乙醇精馏工艺	17
1.5.3 乙醇精馏塔的辅助设备	22
1.6 干燥生产实例	24
1.6.1 白糖干燥实例	24
1.6.2 淀粉干燥实例	24
第 2 章 适于计算机辅助计算的化工单元操作参数举例	27
2.1 动量传递流体参数的计算机辅助计算	27
2.2 过滤能力的计算机辅助计算	35

2.3 精馏参数的计算机辅助计算	38
2.3.1 编程逐板计算精馏塔理论板数	38
2.3.2 利用 Excel 对比间接蒸汽加热精馏与直接蒸汽加热精馏	40
第 3 章 部分化工单元操作的 Aspen 仿真模拟	49
3.1 Aspen 过程仿真模拟说明	49
3.1.1 动量传递模型	49
3.1.2 热量传递模型	50
3.1.3 质量传递模型	51
3.2 部分单元操作仿真模拟举例	53
3.2.1 动量传递模型举例	53
3.2.2 HeaterX-热量传递模型举例	57
3.2.3 质量传递模型举例	60
第 4 章 化工单元操作知识要点讨论	93
4.1 流体流动知识要点	93
4.1.1 流体静力学与流体流动能量衡算方面	93
4.1.2 流体流动阻力损失方面	97
4.2 流体输送设备知识要点	102
4.2.1 泵性能参数计算	102
4.2.2 泵的组合使用	103
4.3 颗粒分离知识要点	107
4.3.1 过滤方面	107
4.3.2 颗粒沉降方面	108
4.4 传热知识要点	108
4.4.1 热传导方面	108
4.4.2 对流传热方面	110
4.4.3 辐射传热方面	111
4.5 蒸发知识要点	112
4.6 气体吸收知识要点	112
4.6.1 吸收传质方面	112
4.6.2 吸收操作方面	113
4.7 精馏知识要点	118
4.7.1 精馏气液平衡方面	118
4.7.2 精馏操作方面	119
4.8 液液萃取知识要点	126

4.9 固体干燥知识要点	127
4.9.1 固体干燥基础理论方面	127
4.9.2 固体干燥操作方面	129
参考文献	131

第 1 章 化工单元操作的典型实例

1.1 流体动量传递实例

流体动量传递是研究流体在静止或运动过程中遵循的流体力学规律。化工、轻工、输水工程、交通运输、气象预报、环境流体学、体育中的运动阻力等与流体相关的方面都是流体动量传递研究的领域。下面给出与流体动量传递相关的几个实例。

1.1.1 自来水厂实例

自来水与人们的日常生活密切相关，去除河水中的胶体、悬浮物、溶解物，使河水变成干净、卫生的自来水，并输送到用户的过程涉及流体动量传递的知识。自来水生产工艺如图 1-1 所示。

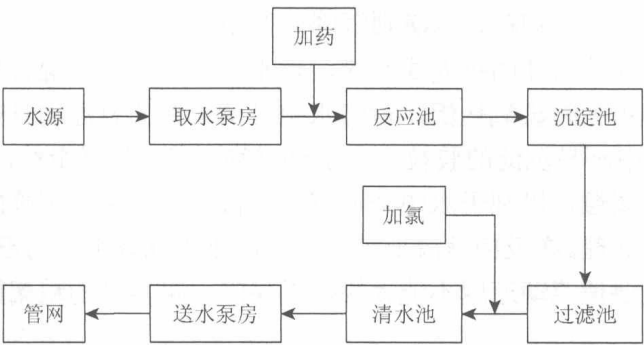


图 1-1 自来水生产工艺

取水：水泵的安装高度最好是低于或是接近于河流历年来的最低水位。这是因为即使在泵入口处达到绝对真空状态的极端情况下，静态的水也只能上升 10m 的高度。而实际抽水时，泵会受到允许吸上真空高度、吸入管路阻力损失及气蚀因素的限制。如果泵安装得太高，遇到极低水位时，则有可能抽不上水。当水位极低时，泵的吸程高度一般也不宜超过 3m。因此，泵安装位置比常规河水水位低，需要建一个抗压的圆形混凝土泵房，使泵不被水淹，河水在通常情况下能自动流

入泵内。部分水厂由于取水泵的安装位置高于水位，需要配真空泵抽真空将水吸进泵内，才能抽水。而采用灌水方法，需要安装用于灌水的、低于水位的止回阀，止回阀会增加取水的阻力。若先开泵，再打开止回阀，由于阻力大容易产生气蚀；若打开止回阀而不能及时开泵，则水会漏完，产生气缚。因此，自来水厂通常不采用灌水的方式来抽水。泵的扬程依据河流历年水位的平均值选取，这样可以保证日常水位在平均值附近的大多数情况下，泵能在接近最高效率下工作，节省水的输送成本。水位偏离平均值较大时，泵仍然能抽水，但效率降低，输送单位体积水耗费的电能较大。大功率泵的效率比小功率泵的效率，因此尽量选用大功率泵。通常安装三台取水泵是较佳的选择，其中两台工作，一台备用。水泵采用高压电机驱动，可减少电机电流，降低电机电阻对电能的消耗。自来水厂的取水涉及泵实际安装高度的确定、泵的工作点应在设计点附近等方面的知识。

加药：自来水中含有胶体、悬浮物、溶解物等，需要加入混凝剂，借助吸附、聚结、架桥等作用，使这些杂质尽可能地以粗絮粒形式从水中沉降下来，从而将其除去。用泵将混凝剂（如碱式氯化铝水溶液）压入取水管中，河水在取水管中的流动处于湍流状态，由化工原理知识可知，湍流流体具有脉动的特性，因此加药过程不需要搅拌，混凝剂也能与水很好地混合。颗粒在流体中沉降，颗粒沉降速度不仅与颗粒及流体两者的密度差成正比，也与颗粒直径成正比，颗粒越大，沉降速度越快。空气中的尘埃、水雾虽然密度大于空气，但并不容易沉降下来，而空气中较大尺寸的土颗粒、水滴则沉降速度很快。

反应池：反应池为迂回折返式水槽，使水与药剂能充分混合反应。在水中碱式氯化铝形成带正电的氢氧化铝，对河水中带负电荷的悬浮物具有吸附、电性中和作用，能使水中不易沉淀的胶粒及微小悬浮物脱稳、相互聚结，再被吸附架桥，从而形成较大的絮粒，以利于水中杂质沉降而被分离出来。沉降的污泥可以采用外排的方式进行处理。在反应池既要使流体动起来以保障流体与混凝剂充分混合、吸附、聚结，又要使流动速度不能太快，以保障大量聚结的粗絮粒不会重新破碎为细絮粒。

沉淀池：气体中的固体颗粒常采用旋风分离法去除。如果采用旋液分离法去除大量水中的固体颗粒，大量水的旋转需要消耗很大的电能。因此，水厂通常采用斜管（或斜板）来分离水中的固体颗粒。设置斜管与水流方向成一定角度，水流进斜管，水流方向改变，水中固体颗粒运动的惯性使其往斜管管壁方向移动，固体颗粒与管壁碰撞失去能量而附着在管壁上，当管壁处的固体颗粒越积越多时会团聚成大的颗粒。在紧靠壁面区域的大絮凝颗粒受到水流的扰动较小，在重力作用下，这些大颗粒会沉降下来。水厂的经验表明，斜管壁面受扰动的程度比斜板壁面要小，因此固体颗粒在斜管的沉淀效果比斜板好。由化工原理知识可知，

颗粒沉降包括自由沉降、离心沉降，其中离心沉降是利用外力加快颗粒的沉降速度，而自来水厂是利用颗粒的惯性力加快颗粒的沉降速度。

过滤池：水经沉淀池处理后，其中的粗絮粒被分离出来，而细絮粒仍需采用过滤法来去除。为了使水能均匀分布，过滤层的第一层为粗石头，接下来依次为中石、小石、粗沙、细沙，起主要过滤作用的是细沙。当过滤沉积下来的固体颗粒较多时，采用反冲的方法将过滤截留下来的颗粒除去。化工原理介绍的典型过滤是采用加压或真空给流体提供推动力，并用滤布作为过滤介质。自来水厂水中絮凝颗粒形成的滤饼与细沙配合，能较好地过滤细小的颗粒，不需要滤布。水过滤时，形成的滤饼较薄、较松散、阻力较小，不需要加压，利用水层的静压强作为推动力即可进行过滤。

加氯：由过滤池出来的水要进行加氯杀菌，以保证自来水达到饮用水细菌指标要求。加氯可以加入液态的氯气或是气态的二氧化氯。两者都是利用氧化作用，破坏细菌的酶系统，使细菌死亡。液氯可以通过购买的方式得到，使用起来比较方便，但氯气有毒，泄漏会危及厂区附近居民的人身安全，二氧化氯则通常是现场制备。

清水池：清水池采用封闭方式防止外界异物如灰尘等掉入水中造成污染，其上方安装通气孔，使水输入或输出时，不会因过大的正压或负压而造成封闭式的清水池损坏。清水池的水位不能太低，否则清水池底部的沉淀物由于受到流水的扰动而被卷起、带走，影响水质。由化工原理知识可知，水位较高时，远离流体主体、靠近壁面的流体边界层流速较小，其脉动、扰动作用较小，对沉淀物的扰动较小。

送水泵房：送水泵的扬程约为 40m，泵出口处的表压强约为 4atm ($1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)。输水主干管道直径通常较大，与自来水厂所处高度相差不是很大的地方，主干管道压强变化不大，用户支管阻力损失为主要阻力损失。在居民用水量处于正常情况下，依靠自来水厂送水泵的水压一般可以为 10 层楼以下的用户供水。如果楼层更高，则需要安装增压泵，才能为更高楼层的用户供水。一些超高楼层，需要在不同的楼层设置多级增压泵。城市输水系统一般由多个自来水厂供水，采用网状管路，如果有一个自来水厂不能供水，其他几个可加大产量来保证供水。如果有某段管道需要抢修而关闭时，由于供水系统为网状管路，因此受断水影响的只是管道关闭段的小范围区域。化工原理涉及流体输送阻力损失及输送成本问题，若送水泵扬程太小，流体流速小，则流体的阻力损失小，输送消耗的能量小，操作费用较低，但需要较大直径的输送管道，投资费用会增加较多；若送水泵扬程很大，流体流速大，尽管输送管道直径较小，投资费用较小，但流速大，流动阻力大，流体输送消耗的能量大，操作费用较高。扬程的选择是为了保证输水的成本最低。

1.1.2 糖厂蔗汁澄清实例

甘蔗经压榨后得到的蔗汁含有蔗糖、蔗蜡、蔗脂、淀粉、泥尘、酚类物质等杂质，会影响成品糖的质量。在蔗汁中加入混凝剂，借助架桥作用，使其与大量非糖分杂质形成絮凝颗粒，可将杂质除去。经沉降处理的糖汁分为清汁和泥汁两部分，其中清汁占 70%~80%，泥汁占 20%~30%。泥汁中含泥沙、糖汁、化学处理生成的沉淀物。泥汁中的糖汁需要用板框压滤机或真空吸滤机进行回收。化工原理介绍了板框压滤机及真空吸滤机，由于泥汁中含有大量的蔗糖，在过滤时其形成的滤饼比较疏松，过滤阻力较小，因此可以利用过滤推动力较小的真空回转过滤机进行过滤。真空回转过滤机为连续操作，对于形成滤饼阻力小的液体，其生产能力很大。如果为了提高污泥中糖汁的回收率，或工艺原因或原料原因致使糖汁过滤时形成较大的滤饼阻力，则需要采用推动力较大的压滤机进行过滤。

在蔗汁中加入石灰乳，石灰乳中的钙离子、氢氧根离子可以吸附部分非糖分杂质，生成大颗粒沉淀物而将杂质除去。接下来，如果是亚硫酸法工艺则通入二氧化硫，使其与石灰乳反应生成亚硫酸钙沉淀物来吸附非糖分杂质而将此类杂质除去。如果是碳酸法工艺则通入二氧化碳，使其与石灰乳反应生成碳酸钙沉淀，碳酸钙通过吸附及架桥作用可去除蔗汁中的非糖分杂质。利用具有较大推动力的压滤机，采用孔径较小的滤布对蔗汁进行过滤，可以去除大部分的非糖分杂质。同时，二氧化硫还具有降低蔗汁色值的作用。二氧化硫是甘蔗糖厂使用的主要澄清剂。不少甘蔗糖厂以增大石灰乳加入量来降低白糖中二氧化硫的残留量，因此清汁中留有不少的钙离子，从而导致蒸发罐加热表面积垢增加。一般 3~5 天就需清理一次蒸发罐积垢。磷酸是辅助澄清剂，磷酸与钙离子在蔗汁中生成磷酸钙。磷酸钙是絮状沉淀物，吸附杂质能力强，易与通入液相中的微小气泡结合而浮升到液面，能方便地去除杂质。化工原理中过滤没有涉及使颗粒增大的内容，但生产中对于颗粒较小的悬浮物或杂质，需要添加组分使其形成大颗粒，再用沉降及过滤的方法对其进行去除处理。

1.1.3 淀粉生产中旋液分离器的应用

化工原理仅介绍了旋风分离器，旋液分离器的工作原理与旋风分离器类似，含悬浮物的液体从切线方向高速进入旋液分离器，由于高速旋转而产生离心力，密度大的固体颗粒或液体被甩向外壁而沉降分离。旋液分离器具有沉降、浓缩、除砂、分级等功能。密度大的液体或固体颗粒随螺旋流降至底部后排出，而澄清液体则在内层旋转由中心位置向上流动，从顶部溢流管排出。在淀粉企业，旋液

分离器用于低浓度淀粉乳的除砂、从淀粉乳中分离蛋白和脂肪、对淀粉乳进行清洗和精制、从溢流和洗涤水中回收淀粉等。

1.1.4 与流体压强有关的一些应用实例

(1) 改变流体压强以实现某种功能的装置：压力锅、吸尘器、冰箱、打气筒、真空盒、钉枪、风镐、气刹、气控门、水压机等。

(2) 利用压强改变材料性能的方法：在高压下，石墨可以变成金刚石；普通的刀在几万个大气压下处理后可削铁如泥；铝在 8000atm 下处理后强度可增加一倍；在超高压下，磷、碘、硒、硫、氢具有金属性能。

(3) 改变流体压强的生产工艺：变压吸附及脱附工艺；加压或减压使反应向目的产物方向进行；气体混合组分加压液化后精馏；减压提高组分间相对挥发度的精馏；对空气进行多次加压、冷却，最后减压膨胀变冷使空气液化，再利用精馏的方法将氮气和氧气分离；对氢气进行多次加压、冷却，最后减压膨胀变冷可得到 -272°C 的超低温。

(4) 超临界生产工艺：气体或液体可在高压强和适当温度下处于超临界状态。在超临界状态下，流体中的溶质浓度大、流体黏度小、物质扩散速度快，对许多传质过程和反应过程有促进作用。例如，二氧化碳在 30°C 、200 多个大气压的超临界状态下，可萃取植物中的药用成分、辣椒中的红色素等。有机废水在 374.3°C 和 22MPa 的超临界状态下，其中的有机物在 1min 内能被混合空气中的氧完全氧化（或称燃烧掉）。当废水中的有机物含量达到 10% 以上，利用有机物氧化产生的热能发电可满足生产运行的电能需求，不用外界提供能量。

1.1.5 与伯努利方程有关的一些应用实例

水塔能将水的位能转换为水的动能和压强能。

实验室有时会用图 1-2 所示的“水老鼠”玻璃装置接入打开水的水龙头，用于产生真空。“水老鼠”喷嘴处水的流通截面较小、流速较大，由伯努利方程原理可知，此处的压强很小，因此可以将该装置产生的真空用于抽滤、真空蒸发等。

高速运动的物体（飞机、车、船）和高速流体的附近有快速运动的流体，快速运动流体的压强小，对周围物体有一定的吸力，因此，为了人身安全，要远离高速运动的物体或流体。

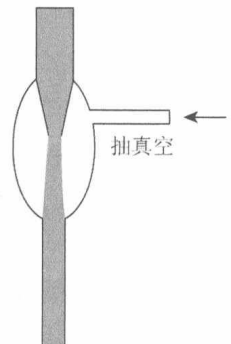


图 1-2 “水老鼠”抽真空

射流技术是伯努利方程原理的应用系统。如图 1-3 (a) 所示, 当 L 形壁面有流体从壁上的孔射出时, 射流束附近会产生负压, 由于左边是固定的壁面, 壁面不会被吸过来, 而射流会被吸过去。将图 1-3 (b) 所示的碗倾斜倒出碗里的水时, 由于有宽碗边, 流出的水与碗壁间有较大空间的空气隔开, 水流不容易贴碗壁; 而用图 1-3 (c) 所示的碗倒出碗里的水时, 由于没有宽的碗边, 流出的水容易贴向碗壁。射流技术主要是利用运动流体的附壁原理。

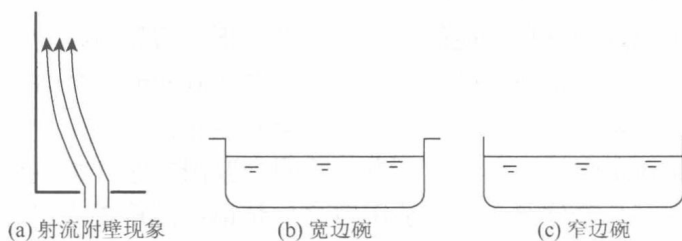


图 1-3 流体附壁效应

图 1-4 为射流技术应用中的双稳态触发器。如果流体走开叉通道的左通道, 流动流体导致左通道的压强减小, 流体会一直从左通道通行。如果施加一个从左往右的脉冲控制流, 原来走左通道的流体被推向右通道, 当控制流停止后, 流体流动导致右通道的压强减小, 流体会一直从右通道通行。

双稳态触发器可以实现两种操作, 如用于开关元件“开”和“关”的操作, 左通道的流体可触发“开”的动作, 而右通道的流体可触发“关”的动作。双稳态触发器还可以控制火箭喷出火焰的方向, 进而控制火箭的飞行方向。同时类似于磁记录 (无磁表示“0”, 有磁表示“1”), 可以将串联的双稳态触发器用作记忆元件。一个触发器相当于 1 位数, 可定义左通道流动流体表示“0”, 右通道流动流体表示“1”。

图 1-5 为射流技术应用中的放大器元件, 可实现类似电学中三极管放大信号的功能。当流体进入放大器到达开叉支路, 由于右通道的曲率小于左通道曲率,

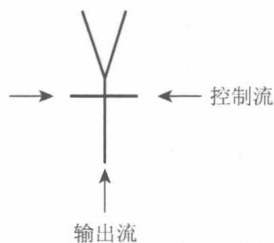


图 1-4 双稳态触发器

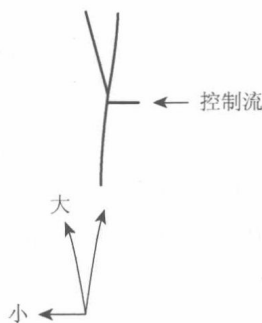


图 1-5 放大器元件

因此流体走右通道。当放大器输入一个控制流（或称信号流），控制流会将不同比例（依据控制流的大小）右通道的流体推向左通道，当分叉的左右通道曲率相差不太大时，较小流量的控制流就可以将较大流量的右通道的流体推向左通道。从左通道流出的流体流量与控制流流量是呈放大比例关系的，即放大器具有放大信号的作用。

图 1-6 为射流技术应用中的射流二极管，从射流二极管右边进入的流体可以从左上方的通道流出。若流体从图 1-6 左下方通道进入，则会从右上方的通道流出，左上方通道没有流体流出。这样就可以实现类似于电学中二极管单向通行的功能。图 1-7 为射流技术应用中的部分其他元件。与门元件是实现与门逻辑关系的元件。与门逻辑关系要求同时满足一定的要求。例如，“本地 70 岁的老年人进公园可以免费”，要同时满足“本地”和“70 岁”两个条件，仅满足一个条件均视为不能满足要求，结果不成立。当流体从与门元件 [图 1-7 (a)] 的左下方或右下方通道进入，流体都将走直线，中间通道没有流体流过，对应于条件不满足的情况；当流体从左下方和右下方通道同时进入时，中间通道才会有流体流过，对应于条件满足的情况。或门元件是实现或门逻辑关系的元件。或门逻辑关系只要满足其中一个要求就视为满足要求。例如，公共汽车上的老弱病残孕专座，只要满足老弱病残孕五个条件中的一个，就视为满足要求。流体从或门元件 [图 1-7 (b)] 的左下方或右下方通道进入，中间通道都有流体流过，对应于条件满足的情况。由电学知识可知，当电流突然增大时，电感可以抑制电流的突然增大，在射流技术中对应的元件是流感 [图 1-7 (c)]。流感是一根细长管，当流体流量突然增大时，由于管细且长，在管子的另一段要经过比较长的时间流量才会增加。另外，对应电学中的电容、电阻，射流技术有流容 [图 1-7 (d)]、流阻 [图 1-7 (e)]。

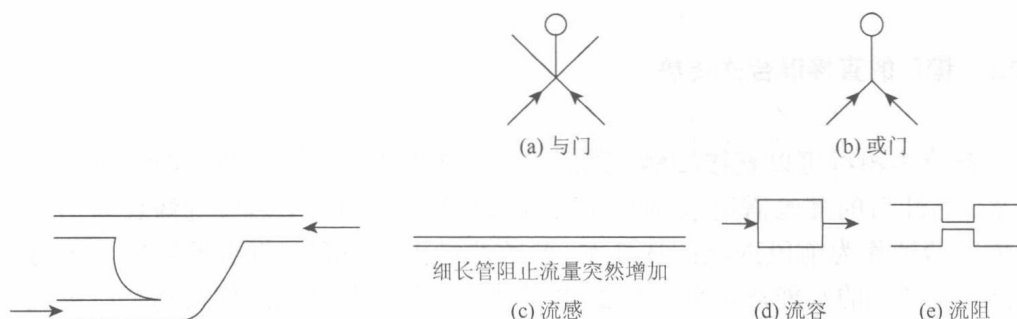


图 1-6 射流二极管

图 1-7 射流技术应用中的部分元件

将多个射流元件连接起来，可以实现类似于电子元件组合系统的功能。射流元件系统可用于震动、高温、腐蚀的场合，对生产中的流量、温度、压强等进行控制，还可用于机床的自动化控制。

1.1.6 测流体流速的实例

化工原理介绍了用于流体测速的皮托管，实际用得较多的测速仪器是飞机前端的空速管。空速管测两点的压强差不宜采用液体柱，可利用压强差使金属膜变形带动指针指示压强差数值。如果要测化工搅拌容器内各点的流体流速、水电站导流管各处流水的流速，则不宜用皮托管测量，因为皮托管太多会占用一定的空间，使流体的流通截面发生改变，此外读数也不方便。对此类情况可采用热电偶测流体流速。当流体流速不同时，存在温度差异的流体与热电偶之间的传热量不同，热电偶的温度发生变化，建立流速与温度间的关系，测定温度即可确定流体流速。

1.2 糖厂及氯碱厂的传热实例

传热在实际中涉及的领域很广，如能源工业：若核反应堆的热量能快速传出及发电机能快速冷却就能增加发电量；石油、化工、轻工：物料的加热、冷却；环境保护及节能方面：强化传热、保温；冶金工业：加热、余热的利用；交通领域：汽车、轮船、飞机等发动机的冷却；航天领域：宇航服的恒温、飞船表面的降温、隔热；建筑材料方面：保温、吸热、防辐射传热；家电：冰箱压缩管、空调外机、计算机部件的冷却；农业领域：蔬菜大棚吸收太阳能、保温；机械方面：机械部件散热；人们的日常生活：夏天用空调、吹风扇，冬天用暖气、穿厚衣服。下面介绍与传热相关的生产实例。

1.2.1 糖厂的直接混合式传热

若冷热物料可以直接接触，采用直接接触传热可减少传热热阻，提高传热效率。榨汁后的蔗丝需用水逆流洗涤溶出蔗丝中的糖分，后段洗涤蔗丝出来的低浓度糖汁作为前段蔗丝的洗涤水。蔗丝洗涤水采用直接混合热水的方式进行升温，温度高的水能溶出蔗丝中的更多糖分。末效真空蒸发罐及真空煮糖罐都是采用喷射真空泵来产生真空，在喷射真空泵内利用冷水与蔗汁沸腾产生的蒸汽直接混合来冷凝蒸汽，蒸汽变为液体，所占空间大大减小，有利于增大真空度。

1.2.2 氯碱厂的直接混合式冷却

电解氯化钠水溶液可得到氢氧化钠溶液、氯气和氢气，由于电解电流大，电解产生的氢气温度高而不好储存。考虑氢气在水中的溶解度极小，生产中采用冷水与热氢气直接混合进行冷却。热氢气在冷却塔内靠压差由下往上流动，冷却水由冷却塔顶部喷淋下来，两者直接混合，减少了传热阻力。

1.2.3 糖厂的间壁式传热

制糖生产中有许多低品位的液体热量，可借助间壁换热器用于预热生产原料来回收其热量，以达到节能的目的；而糖厂的蒸发罐、煮糖罐若采用直接蒸汽加热会导致蒸汽冷凝水稀释糖汁，因此需采用间壁式传热。蔗汁中的钙、镁离子会导致换热器结垢，垢层会导致传热系数 K 值降低 20%~40%，如不及时除垢，可使传热系数 K 值下降至 50%~80%。以前利用化学试剂溶解垢层来除垢，近年来比较环保的方法是采用 300atm 的高压水枪来除垢。

1.3 蒸发生产实例

1.3.1 中药厂制备中成药

化工原理讲述了分段蒸发的优点。中药厂在生产口服液时，中药熬制溶液经两段蒸发去除水分，使溶液浓缩。前段蒸发在低浓度和低黏度的条件下进行，能提高水分的蒸发速度。后段蒸发溶液浓度较高，传热系数小，传热速率变慢，因此后段蒸发设计成不需要蒸发太多的水分，这样可缩短后段蒸发时间。否则后段的蒸发时间太长，高浓度溶液会导致蒸发罐结焦，同时溶液也容易受热变质。

1.3.2 糖厂蒸发实例

1. 糖厂五效蒸发工艺

由化工原理知识可知，采用多效蒸发，其热能利用类似于多层蒸笼蒸馒头，可多次利用蒸汽的热能，大大提高了热能的利用率。甘蔗榨出的蔗汁经澄清处理后含水量为 86%~88%，需要蒸发水分浓缩后才能进入煮糖罐进一步浓缩至饱和，析出白糖晶体。蔗汁蒸发过程产生的二次蒸汽称为“汁汽”，其热量在蔗汁蒸发及

煮糖过程中要加以利用，蒸发前一效的二次蒸汽可作为后一效的加热蒸汽，冷凝水可作为锅炉用水及工艺用水。

糖厂蔗汁通常采用五效蒸发来提高蒸汽的利用率，前两效蒸发罐采用正压操作，后三效蒸发罐采用负压操作，蔗汁与加热蒸汽走向采用并流方式。糖厂五效蒸发操作设定的相关参数值见表 1-1。

表 1-1 糖厂五效蒸发操作设定的相关参数值

参数	I 效	II 效	III效	IV效	V 效
加热蒸汽绝压/MPa	0.2700	0.1905	0.1301	0.0841	0.0447
加热蒸汽温度/℃	128.9	118.0	106.5	94.3	78.0
糖汁沸点/℃	120.1	109.1	97.4	83.4	61.4
汁汽绝压/MPa	0.1965	0.1364	0.0872	0.0468	0.0135
汁汽温度/℃	119.0	107.5	95.3	79.0	51.0
有效温差/℃	8.8	8.9	9.1	10.9	16.6
糖分导致糖汁沸点升高/℃	0.6	0.8	1.1	1.8	3.6
静压导致糖汁沸点升高/℃	0.5	0.8	1.0	2.6	6.8

图 1-8 为汁汽温度与汁汽绝压及纯水温度与饱和水蒸气压的关系曲线，两条曲线几乎重合，这表明糖汁的沸点虽然高于同压强下纯水的沸点，但水蒸气从糖汁出来经膨胀做功后，温度降到与同压强下的纯水沸点几乎相等。

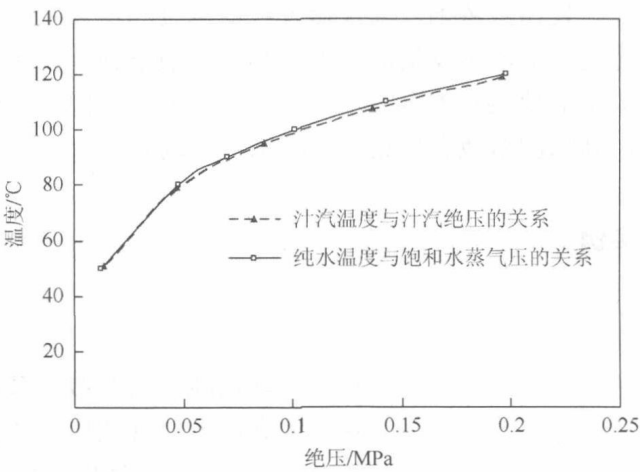


图 1-8 系统温度与压强关系