



高职高专“十三五”规划教材
辽宁省职业教育教学改革示范校建设成果

化工单元操作

聂莉莎 魏翠娥 主编



化学工业出版社

《化工单元操作》结合高职教育教学的特点和项目化教学改革思路,以“教-学-做”一体化为原则进行编写。本书包含了流体物料的输送、传热、精馏、吸收、萃取、干燥、非均相混合物分离七个项目。每个项目均从操作任务引入,让学生明确化工单元操作是“做什么”;用相关的基础理论作为支撑,让学生明白“为什么这么做”;递进式的技能训练设计,让学生体会“怎么做更合理”,培养学生的创新能力、综合运用能力和解决关键问题的能力,突出了项目化教学的特色。本教材的内容主要分为操作技能和基础理论两大部分。操作技能包括操作规程、工艺流程图及设备使用方法等,具有一定的直观性、实用性、工程性和典型性;基础理论包括了基本工作原理、典型设备的结构特点、操作方法及影响因素的分析等,以够用、实用为度,能解释操作技能,能应用到技能操作当中。

本书可作为高等职业院校化工及其相关专业的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作/聂莉莎,魏翠娥主编. —北京:
化学工业出版社, 2019.3 (2024.1 重印)

高职高专“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-33836-5

I. ①化… II. ①聂…②魏… III. ①化工单元操作-
高等职业教育-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 022121 号

责任编辑:王海燕 满悦芝
责任校对:张雨彤

装帧设计:刘丽华

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:北京印刷集团有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数413千字 2024年1月北京第1版第5次印刷

购书咨询:010-64518888 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:48.00 元

版权所有 违者必究

目 录

绪论	1
项目一 流体物料的输送	8
任务一 化工管路的认知	9
【任务引入】	9
【任务实施】	9
【任务评价】	10
【知识链接】	10
知识点 流体输送设备和管路	10
【自测练习】	16
任务二 流体流动阻力的测定	16
【任务引入】	16
【任务实施】	16
【任务评价】	18
【知识链接】	18
知识点一 连续性方程	18
知识点二 伯努利方程	21
知识点三 流体流动过程的阻力	24
【自测练习】	30
任务三 离心泵工作点的测定	32
【任务引入】	32
【任务实施】	32
【任务评价】	33
【知识链接】	34
知识点一 离心泵的工作原理	34
知识点二 离心泵的特性曲线	35
知识点三 离心泵的选用	38
【自测练习】	40
任务四 离心泵送料系统的调控	41
【任务引入】	41
【任务实施】	41

【任务评价】	44
【知识链接】	44
知识点一 离心泵的串并联	44
知识点二 离心泵的安装高度	46
【自测练习】	47
任务五 压缩机送料工艺系统的调控	47
【任务引入】	47
【任务实施】	48
【任务评价】	52
【知识链接】	52
知识点 气体输送机械	52
任务六 流体输送操作训练	56
【任务引入】	56
【任务实施】	56
【任务评价】	62
【知识链接】	63
知识点 其他类型泵	63
项目二 传热	66
任务一 传热工艺的认识	67
【任务引入】	67
【任务实施】	67
【自测练习】	73
任务二 对流传热系数的测定	73
【任务引入】	73
【任务实施】	73
【任务评价】	74
【知识链接】	74
知识点一 传热推动力	74
知识点二 导热速率	78
知识点三 对流传热速率	80
【自测练习】	85
任务三 不同套管换热器的操作训练	86
【任务引入】	86
【任务实施】	86
【任务评价】	87
【知识链接】	88
知识点一 传热速率与热负荷	88
知识点二 总传热系数	90
【自测练习】	93

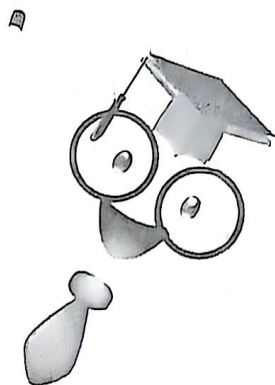
任务四 传热工艺系统的调控	93
【任务引入】	93
【任务实施】	94
【任务评价】	97
【知识链接】	97
知识点一 传热计算	97
知识点二 其他常用换热设备	98
任务五 间壁式换热器换热性能的测定	100
【任务引入】	100
【任务实施】	101
【任务评价】	107
【知识链接】	107
知识点一 强化与削弱传热	107
知识点二 列管换热器的日常维护与保养	109
项目三 蒸馏	111
任务一 蒸馏工艺的认识	112
【任务引入】	112
【任务实施】	112
【知识链接】	114
知识点 蒸馏的气液相平衡	114
任务二 精馏塔效率的测定	118
【任务引入】	118
【任务实施】	118
【任务评价】	120
【知识链接】	120
知识点 精馏的工艺计算	120
【自测练习】	130
任务三 精馏工艺系统的调控操作	132
【任务引入】	132
【任务实施】	132
【任务评价】	136
【知识链接】	137
知识点一 精馏操作分析	137
知识点二 板式精馏塔	138
任务四 精馏装置操作训练	142
【任务引入】	142
【任务实施】	143
【任务评价】	149
【知识链接】	149

知识点一 精馏塔操作的要点	149
知识点二 精馏操作的节能	150
项目四 吸收	151
任务一 吸收工艺的认识	152
【任务引入】	152
【任务实施】	152
任务二 吸收塔流体力学性能的测定	160
【任务引入】	160
【任务实施】	161
【任务评价】	162
【知识链接】	162
知识点一 吸收的气液相平衡关系	162
知识点二 吸收的传质速率	164
知识点三 吸收塔的工艺计算	167
【自测练习】	174
任务三 吸收工艺系统的调控	174
【任务引入】	174
【任务实施】	175
【任务评价】	181
【知识链接】	182
知识点一 解吸	182
知识点二 吸收操作分析	182
任务四 吸收解吸装置操作训练	184
【任务引入】	184
【任务实施】	184
【任务评价】	189
【自测练习】	190
项目五 萃取	191
任务一 萃取塔性能的测定	192
【任务引入】	192
【任务实施】	192
【任务评价】	193
【知识链接】	193
知识点一 萃取工艺流程	193
知识点二 萃取的相平衡关系	197
【自测练习】	202
任务二 萃取工艺系统的调控	202
【任务引入】	202

【任务实施】	202
【任务评价】	205
【知识链接】	205
知识点一 萃取设备	205
知识点二 萃取塔操作分析	207
项目六 干燥	210
任务一 干燥工艺的认识	211
【任务引入】	211
【任务实施】	211
【知识链接】	216
知识点 湿空气的性质	216
【自测练习】	221
任务二 干燥速率的测定	221
【任务引入】	221
【任务实施】	222
【任务评价】	223
【知识链接】	223
知识点一 干燥过程的工艺计算	223
知识点二 干燥速率	227
【自测练习】	229
任务三 干燥装置操作训练	230
【任务引入】	230
【任务实施】	230
【知识链接】	233
知识点 干燥操作的节能与安全	233
项目七 非均相混合物的分离	235
任务一 非均相混合物分离设备的认识	236
【任务引入】	236
【知识链接】	236
知识点 非均相混合物的分离方法及设备	236
任务二 恒压条件下过滤速率的测定	247
【任务引入】	247
【任务实施】	247
【任务评价】	248
【知识链接】	248
知识点一 过滤	248
知识点二 其他分离方法——沉降	251
【自测练习】	255

项目四

吸 收



在化工生产中，有许多原料、中间产品等是气体混合物，为了从气体混合物中分离出其中一个或多个组分，将气体混合物与选择的某种液体接触，气体中的一个或几个组分便溶解于该液体中形成溶液，不能溶解的组分则保留在气相中，然后分别将气液两相移出而达到分离的目的。这种分离气体混合物的操作称为吸收。



教学目标

【知识目标】

- ① 了解吸收操作的工艺流程及设备的结构、特点和流体力学性能；
- ② 熟悉吸收在化工生产中的应用；
- ③ 掌握吸收的基本概念、基本理论及工艺计算；
- ④ 理解吸收和解吸机理及二者间的区别；
- ⑤ 熟悉吸收操作方法、故障判断与处理方法。

【技能目标】

- ① 能熟练完成吸收塔的性能测定；
- ② 能完成吸收解吸操作；
- ③ 能分析吸收操作过程中的影响因素，并能运用所学知识解决实际生产问题；
- ④ 能正确查阅和使用常用的工程计算图表、手册、资料等；
- ⑤ 能进行必要的工艺计算。

【素质目标】

- ① 形成安全生产、环保节能、讲究卫生的职业意识；
- ② 树立工程技术观念、理论联系实际；

- ③ 培养敬业爱岗、服从安排、吃苦耐劳、严格遵守操作规程的职业道德；
④ 培养团结协作、积极进取的团队合作精神。

任务一 吸收工艺的认识



任务引入

吸收是利用混合气中各组分在液体中的溶解度不同而将气体混合物分离的重要单元操作。在进行吸收工艺操作之前，应先了解吸收的作用、工艺流程及相应设备的结构和特点。

吸收操作中所用的液体称为吸收剂或溶剂，以 S 表示；混合气体中，能溶解于液体的组分称为吸收质或溶质，以 A 表示；不能溶解的组分称为惰性气体，以 B 表示；吸收后所得到的溶液称为吸收液，其成分是溶剂和溶质；吸收后排出的气体称为吸收尾气，其主要成分是惰性气体及残留的溶质。



任务实施

一、吸收在化工生产中的应用

(1) 原料气的净化 如用稀氨水脱除合成氨原料气中的硫化氢，用丙酮脱除裂解气中的乙炔，用碱液除去煤气中的 H_2S 等。

(2) 有用组分的回收 如从焦炉煤气中用洗油回收粗苯，从合成氨厂的放空气体中用水回收氨。

(3) 某些产品的制取 将气体中需要的成分以指定的溶剂吸收出来，成为液态的产品或半成品，如用水吸收氯化氢气体取盐酸，用水吸收二氧化氮制取硝酸等。

(4) 废气的治理 如磷肥生产中放出含氟的废气具有强烈的腐蚀性，用水制成氟硅酸；又如用碱吸收硝酸厂尾气中含氮的氧化物制成硝酸钠等。

二、吸收过程的分类

1. 按吸收原理分

按吸收过程中是否有显著的化学反应可分为物理吸收和化学吸收。物理吸收是吸收质与吸收剂间不发生明显的化学反应，可视为气体溶解于液体的物理过程，如水吸收 CO_2 等。化学吸收是吸收质靠化学反应与吸收剂相结合而被吸收的过程，如用 $NaOH$ 溶液吸收 CO_2 等。

2. 按吸收温度分

按吸收过程中温度是否变化可分为等温吸收和非等温吸收。气体溶解于液体中，通常有溶解热放出，当发生化学反应时，还会有反应热，结果是使液相温度逐渐升高。温度发

生明显变化的吸收过程称为非等温吸收。若混合气中吸收质含量低，吸收剂用量相对较大时，吸收过程中温度变化不明显则称为等温吸收。

3. 按吸收组分分

按吸收过程中被吸收组分数目的不同可分为单组分吸收和多组分吸收。若混合气体中只有一个组分被吸收，其余组分皆可认为不溶于吸收剂的吸收过程称为单组分吸收。若混合气体中两个或多个组分进入液相则称为多组分吸收。

4. 按吸收浓度分

按混合气体中溶质浓度的高低可分为低浓度吸收和高浓度吸收。多数工业吸收操作是将气体中少量溶质组分加以回收或除去，为确保吸收质的高纯度分离，吸收剂的用量比较大，因进塔混合气中吸收质浓度低，吸收液浓度也低。当进塔混合气中溶质浓度小于10%时，通常称为低浓度吸收，否则就是高浓度吸收。

下面主要讨论低浓度、单组分、等温、物理吸收过程。

三、吸收剂的选择

吸收剂性能的优劣往往成为决定吸收传质效果是否良好的关键，选择时需要注意以下几点：

(1) 溶解度 吸收剂对溶质应具有较大的溶解度，这样可提高吸收速率并减少吸收剂用量。

(2) 选择性 吸收剂对溶质有良好的吸收能力，对混合气体中其他组分基本不吸收或吸收甚微。

(3) 挥发度 吸收剂在操作温度下的挥发度要小，以减少溶剂的损失及避免在气体中引入新的杂质。

(4) 再生 当吸收液不作为产品时，吸收剂要易于再生，循环使用，以降低操作费用。

(5) 黏性 吸收剂在操作温度下的黏度要低，这样可以改善吸收塔内的流动状况，提高吸收速率，减少吸收剂输送时的动力消耗。

(6) 其他 吸收剂应化学稳定性好、不易燃、无腐蚀性、无毒、易得、廉价。

四、吸收过程

化工生产中的吸收操作是在吸收塔内进行的，图 4-1 为从煤气中回收粗苯的吸收流程简图。

图中虚线左边为吸收部分，含苯煤气由底部进入吸收塔，洗油从顶部喷淋而下与气体呈逆流流动。在煤气和洗油的逆流接触中，苯类物质蒸气大量溶于洗油中，从塔顶引出的煤气仅含少量的苯，溶有较多苯类物质的洗油（称为富油）则由塔底排出。为了回收富油中的苯并使洗油能循环使用，在另一个被称为解吸塔的设备中进行与吸收相反的操作——解吸，图中虚线右边即为解吸部分。从吸收塔塔底排出的富油首先经换热器被加热后，由解吸塔塔顶引入，在与解吸塔底部通入的过热蒸气逆流接触过程中，粗苯由液相释放出来，并被水蒸气带出塔顶，再经冷凝分层后即可获得粗苯产品。脱除了大部分苯的洗油（称为贫油）由塔底引出，经冷却后再送回吸收塔塔顶循环使用。

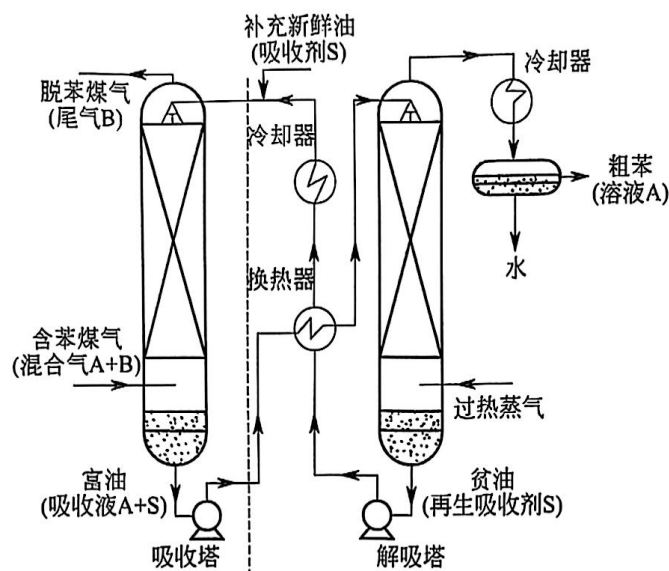


图 4-1 从煤气中回收粗苯的吸收流程图

五、吸收塔设备结构

吸收既可在填料塔中进行，也可在板式塔中进行。在前文的精馏内容中已介绍过板式塔，这里只介绍填料塔。

（一）填料塔的构造

填料塔的结构如图 4-2 所示。填料塔的塔身是一直立式圆筒，底部装有填料支承板，填料以乱堆或整砌的方式放置在支承板上。填料的上方安装填料压板，以防被上升气流吹动。液体从塔顶经液体分布器喷淋到填料上，并沿填料表面

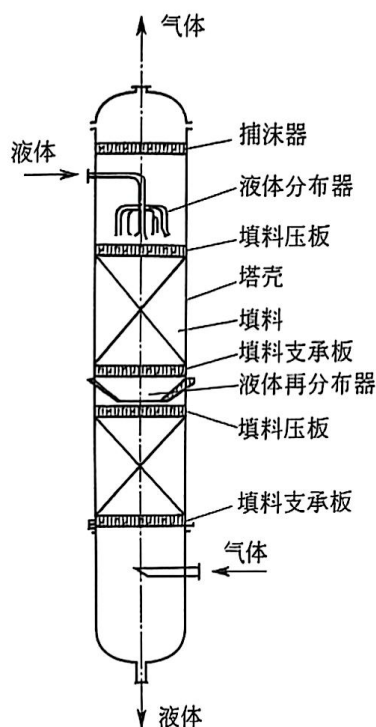


图 4-2 填料塔结构图

流下。气体从塔底送入，经气体分布装置（小直径塔一般不设气体分布装置）分布后，与液体呈逆流连续通过填料层的空隙，在填料表面上，气液两相直接接触进行传质。填料塔属于连续接触式气液传质设备，两相组成沿塔高连续变化，在正常操作状态下，气相为连续相，液相为分散相。

当液体沿填料层向下流动时，有逐渐向塔壁集中的趋势，使得塔壁附近的液流量逐渐增大，这种现象称为壁流。壁流效应造成气液两相在填料层中分布不均，从而使传质效率下降。因此，当填料层较高时，需要进行分段，中间设置再分布装置。液体再分布装置包括液体收集器和液体再分布器两部分，上层填料流下的液体经液体收集器收集后，送到液体再分布器，经重新分布后喷淋到下层填料上。

填料塔不仅结构简单，而且具有阻力小，便于用耐腐蚀材料制造等优点，尤其对于直径较小的塔、处理有腐蚀性的物料或要求压力较小的真空蒸馏系统，填料塔都表现出明显的优越性。

填料塔是以塔内的填料作为气液两相间接接触构件的传质设备，其生产情况的好坏与是否正确的选用填料有很大关系，因而了解各种填料及其特性是十分必要的。

(二) 填料

1. 填料的分类

填料的种类很多,大致可分为实体填料和网体填料两大类。实体填料包括环形填料、鞍形填料以及栅板填料、波纹填料等由陶瓷、金属和塑料等材质制成的填料;网体填料主要是由金属丝网制成的各种填料。现介绍几种常见填料。

(1) 拉西环填料 拉西环填料是最早使用的一种环状简单的圆环形填料 [如图 4-3(a)],高度与直径相等,缺点是当该填料横卧放置时,内表面不容易被液体润湿,气体也不能从环内通过,致使流体阻力大,气液接触面积小,传质效率低,气体通量小,目前工业上已较少使用。

(2) 鲍尔环填料 鲍尔环是对拉西环的改进 [如图 4-3(b)],在拉西环的侧壁上开出两排长方形的窗孔,被切开的环壁一侧仍与壁面相连,另一侧向环内弯曲,形成内伸的舌叶,各舌叶的侧边在环中心相搭。鲍尔环的这种结构大大提高了环内空间及环内表面的利用率,气流阻力小,液体分布均匀。与拉西环比较,鲍尔环的气体通量可增加 50%以上,传质效率提高 30%左右。鲍尔环是一种应用较广的填料。

(3) 阶梯环填料 阶梯环是对鲍尔环的改进 [如图 4-3(c)],在环壁上开有长方形孔,环内有两层交错 45° 的十字形翅片。与鲍尔环相比,阶梯环高度通常只有直径的一半,并在一端增加了一个锥形翻边,使填料之间由线接触为主变成以点接触为主,这样不但增加了填料间的空隙,同时成为液体沿填料表面流动的汇集分散点,可以促进液膜的表面更新,有利于传质效率的提高。阶梯环的综合性能优于鲍尔环,成为目前所使用的环形填料中最为优良的一种。

(4) 弧鞍与矩鞍填料 弧鞍与矩鞍填料属鞍形填料 [如图 4-3(d)]。弧鞍填料的特点是表面全部敞开,不分内外,液体在表面两侧均匀流动,表面利用率高,流道呈弧形,流动阻力小。其缺点是易发生套叠,致使一部分填料表面被重合,使传质效率降低。弧鞍填料强度较差,容易破碎,工业生产中应用不多。矩鞍填料 [如图 4-3(e)] 将弧鞍填料两端的弧形面改为矩形面,且两面大小不等,即成为矩鞍填料。矩鞍填料堆积时不会套叠,液体分布较均匀。矩鞍填料一般采用瓷质材料制成,其性能优于拉西环。目前,国内绝大多数应用瓷拉西环的场合,均已被瓷矩鞍填料所取代。

(5) 金属环矩鞍填料 金属环矩鞍填料如图 4-3(f) 所示。环矩鞍填料是兼顾环形和鞍形结构特点而设计出的一种新型填料,该填料一般以金属材质制成,故又称为金属环矩鞍填料。环矩鞍填料将环形填料和鞍形填料两者的优点集于一体,其综合性能优于鲍尔环和阶梯环,在散装填料中应用较多。

(6) 球形填料 球形填料一般采用塑料注塑而成,其结构有多种 [如图 4-3(g)、图 4-3(h)]。球形填料的特点是球体为空心,可以允许气体、液体从其内部通过。由于球体结构的对称性,填料装填密度均匀,不易产生空穴和架桥,所以气液分散性能好。球形填料一般只适用于某些特定的场合,工程上应用较少。

(7) 波纹填料 如图 4-3(n)、图 4-3(o) 所示。波纹填料是由许多波纹薄板组成的圆盘状填料,波纹与塔轴的倾角有 30° 和 45° 两种,组装时相邻两波纹板反向靠叠。各盘填料垂直装于塔内,相邻的两盘填料间交错 90° 排列。波纹填料按结构可分为网波纹填料和板波纹填料两大类,其材质又有金属、塑料和陶瓷等之分。波纹填料的优点是结构紧凑,

阻力小，传质效率高，处理能力大，比表面积大；缺点是不适合于处理黏度大、易聚合或有悬浮物的物料，且装卸、清理困难，造价高。



图 4-3 常见填料

2. 填料的特性

填料的特性数据主要包括比表面积、空隙率、填料因子等，是评价填料性能的基本参数。

(1) 比表面积 塔内单位体积填料层具有的填料表面积，称为比表面积，用符号 a 表示，单位为 m^2/m^3 。填料的比表面积愈大，所提供的气液传质面积愈大。因此，比表面积是评价填料性能优劣的一个重要指标。

(2) 空隙率 塔内单位体积填料层具有的空隙体积，称为空隙率，用符号 ϵ 表示，单位为 m^3/m^3 。填料空隙率越大则气体通过填料层的阻力越小，压降越低，故空隙率是评价填料性能优劣的又一重要指标。

(3) 填料因子 填料的比表面积与空隙率三次方的比值，即 a/ϵ^3 ，称为填料因子，以 ϕ 表示，其单位为 $1/\text{m}$ 。填料因子分为干填料因子和湿填料因子，填料未被液体湿润时的 a/ϵ^3 值称为干填料因子，它反映填料的几何特性；填料被液体润湿后，填料表面覆盖了一层液膜， a 和 ϵ 均发生相应的变化，此时的 a/ϵ^3 称为湿填料因子，它表示填料的

流体力学性能。填料因子值越小，表明流动阻力越小。

3. 填料类型的选择

填料类型的选择首先取决于工艺要求，如所需理论级数、生产能力（气量）、容许压降、物料特性（液体黏度、气相和液相中是否有悬浮物或生产过程中的聚合等）等，然后结合填料特性，使所选填料能满足工艺要求，技术经济指标先进，易安装和维修。

（三）填料塔的附属结构

填料塔的附属结构主要有填料支承装置、液体分布装置、液体收集再分布装置等。合理地选择和设计塔附件，对保证填料塔的正常操作及优良的传质性能十分重要。

1. 填料支承装置

主要用途是支承塔内的填料，同时又能保证气液两相顺利通过。常用的支承板有栅板和各种具有升气管结构的支承板，如图 4-4 所示。支承装置的选择，主要依据是塔径、填料种类及型号、塔体及填料的材质、气液流量等。

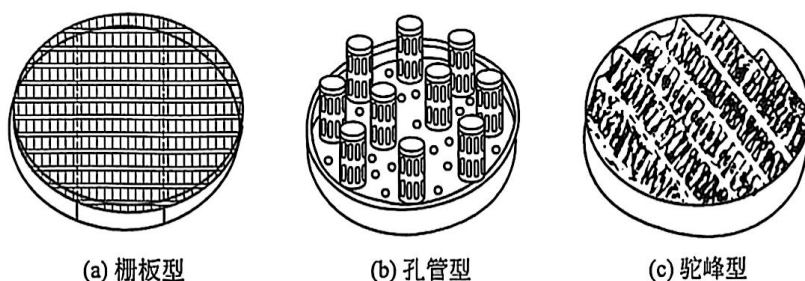


图 4-4 常见的支承板

2. 液体分布装置

液体分布器对填料塔的性能影响极大。分布器设计不当，液体预分布不均，填料层内的有效润湿面积减少，偏流现象和沟流现象增加，即使填料性能再好也很难得到满意的分离效果。

常用的液体分布器结构如图 4-5 所示。

（1）管式分布器 由不同结构形式的开管制成，结构简单，能适应较大的流量波动，对气体的阻力也很小。但是，由于管壁上的小孔容易堵塞，弹性一般较小。管式液体分布器应用十分广泛，多用于中等以下液体负荷的填料塔中。在减压精馏及丝网波纹填料中，由于液体负荷较小，故常用此类分布器。管式分布器有排管式和环管式等不同形状，根据液体负荷情况，可做成单排或双排。

（2）槽式分布器 通常是由分流槽（又称主槽或一级槽）、分布槽（又称副槽或二级槽）构成的。一级槽底开孔将液体分流到分布槽内，分布槽底或壁面上设有孔道，将液体均匀分布在填料上。槽式分布器具有较大的操作弹性和极好的抗污堵性，特别适合于大气液负荷及含有固体悬浮物、黏度大的液体的分离场合。这种分布器不易堵塞，对气体的阻力小，故应用广泛。

（3）盘式分布器 有盘式筛孔型分布器、盘式溢流管式分布器等形式。液体加至分布盘上，经筛孔或溢流管流下。分布盘直径为塔径的 $\frac{3}{5} \sim \frac{4}{5}$ ，此种分布器用于 $D < 800\text{mm}$ 的塔中。

（4）喷洒式分布器 液体由半球形喷头的小孔喷出，小孔直径为 $3 \sim 10\text{mm}$ ，作同心

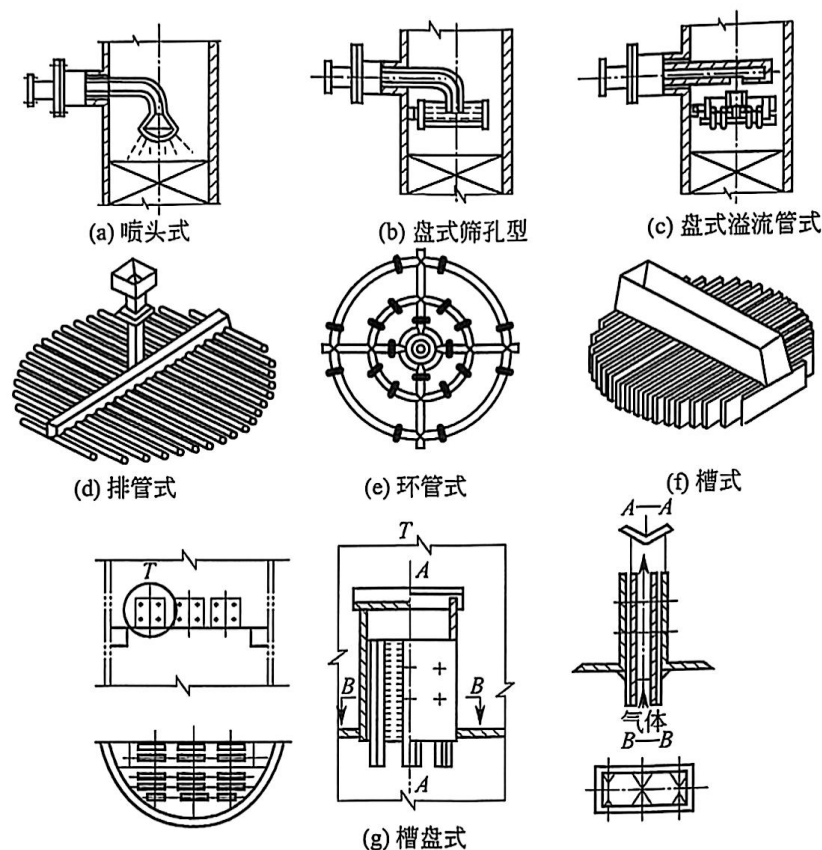


图 4-5 常用的液体分布器

圆排列，喷洒角不超过 80° ，直径为 $(1/3 \sim 1/5)D$ 。这种分布器结构简单，适用于 $D < 600\text{mm}$ 的塔中。

3. 液体再分布器

填料塔内液体沿填料层向下流动时，有向塔壁偏流的现象，这种现象称为壁流。这种现象导致填料层内气液分布不均，使传质效率下降。为减小壁流现象，在填料层内部每隔一定高度设置一液体再分布器。

最简单的液体再分布器为截锥式再分布器 [如图 4-6(a) 所示]。其结构简单，安装方便，但它只起到将壁流向中心汇集的作用，无液体再分布的功能，一般用于直径小于 600mm 的塔中。

在通常情况下，一般将液体收集器及液体分布器同时使用，构成液体收集及再分布装置。液体收集器的作用是将上层填料流下的液体收集，然后送至液体分布器进行液体再分布。常用的液体收集器为斜板式液体收集器 [如图 4-6(b) 所示]。

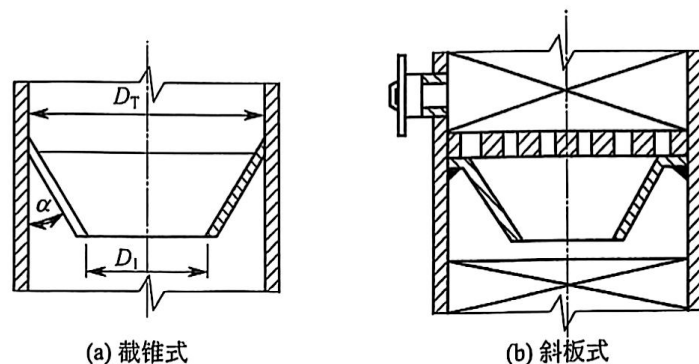


图 4-6 液体再分布器

六、填料塔的流体力学性能

填料塔的流体力学性能主要包括填料层的持液量、填料层的压降、液泛、填料表面的润湿及返混等。

1. 填料层的持液量

填料层的持液量是指在一定操作条件下，在单位体积填料层内所积存的液体体积，以 $(\text{m}^3 \text{ 液体})/(\text{m}^3 \text{ 填料})$ 表示。填料层的持液量可由实验测出，也可由经验公式计算。一般来说，适当的持液量对填料塔操作的稳定性和传质是有益的，但持液量过大，将减少填料层的空隙和气相流通截面，使压降增大，处理能力下降。

2. 填料层的压降

在逆流操作的填料塔中，从塔顶喷淋下来的液体，依靠重力在填料表面成膜状向下流动，上升气体与下降液膜的摩擦阻力形成了填料层的压降。填料层压降与液体喷淋量及气速有关，在一定的风速下，液体喷淋量越大，压降越大；在一定的液体喷淋量下，气速越大，压降也越大。将不同液体喷淋量下的单位填料层的压降 $\Delta p/Z$ 与空塔气速 u 的关系标绘在对数坐标纸上，可得到如图 4-7 所示的曲线簇。

在图中，直线 0 表示无液体喷淋 ($L=0$) 时，干填料 $\Delta p/Z-u$ 关系，称为干填料压降线。曲线 1、2、3 表示不同液体喷淋量下，填料层的 $\Delta p/Z-u$ 关系，称为填料操作压降线。

从图中可看出，在一定的喷淋量下，压降随空塔气速的变化曲线大致可分为三段：当气速低于 A 点时，气体流动对液膜的曳力很小，液体流动不受气流的影响，填料表面上覆盖的液膜厚度基本不变，因而填料层的持液量不变，该区域称为恒持液量区。此时 $\Delta p/Z-u$ 为一直线，位于干填料压降线的左侧，且基本上与干填料压降线平行。当气速超过 A 点时，气体对液膜的曳力较大，对液膜流动产生阻滞作用，使液膜增厚，填料层的持液量随气速的增加而增大，此现象称为拦液。开始发生拦液现象时的空塔气速称为载点气速，曲线上的转折点 A，称为载点。

若气速继续增大，到达图中 B 点时，由于液体不能顺利向下流动，使填料层的持液量不断增大，填料层内几乎充满液体。气速增加很小便会引起压降的剧增，此现象称为液泛，开始发生液泛现象时的气速称为泛点气速，以 u_f 表示，曲线上的点 B 称为泛点。从载点到泛点的区域称为载液区，泛点以上的区域称为液泛区。

应予指出，在同样的气液负荷下，不同填料的 $\Delta p/Z-u$ 关系曲线有所差异，但其基本形状相近。对于某些填料，载点与泛点并不明显，故上述三个区域间无明显的界限。

3. 液泛

在泛点气速下，持液量的增多使液相由分散相变为连续相，而气相则由连续相变为分散相，此时气体呈气泡形式通过液层，气流出现脉动，液体被大量带出塔顶，塔的操作极不稳定，甚至会被破坏，此种情况称为淹塔或液泛。影响液泛的因素很多，如填料的特性、流体的物性及操作的液气比等。

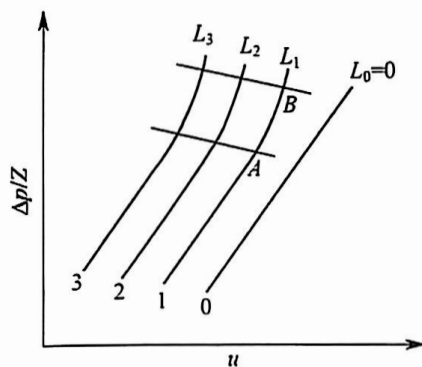


图 4-7 填料层的 $\Delta p/Z-u$ 关系

4. 液体喷淋密度和填料表面的润湿

填料塔中气液两相间的传质主要是在填料表面流动的液膜上进行的。要形成液膜，填料表面必须被液体充分润湿，而填料表面的润湿状况取决于塔内的液体喷淋密度及填料材质的表面润湿性能。

液体喷淋密度是指单位塔截面积上，单位时间内喷淋的液体体积，以 U 表示，单位为 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。为保证填料层的充分润湿，须保证液体喷淋密度大于某一极限值，该极限值称为最小喷淋密度，以 U_{\min} 表示。

最小喷淋密度通常采用下式计算，即

$$U_{\min} = (L_w)_{\min} a$$

式中 U_{\min} ——最小喷淋密度， $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；

$(L_w)_{\min}$ ——最小润湿速率， $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ ；

a 填料的比表面积， m^2/m^3 。

最小润湿速率是指在塔的截面上，单位长度的填料周边的最小液体体积流量。其值可由经验公式计算，也可采用经验值。对于直径不超过 75mm 的散装填料，可取最小润湿速率 $(L_w)_{\min}$ 为 $0.08\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ ；对于直径大于 75mm 的散装填料，取 $(L_w)_{\min} = 0.12\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ 。

填料表面润湿性能与填料的材质有关，就常用的陶瓷、金属、塑料三种材质而言，以陶瓷填料的润湿性能最好，塑料填料的润湿性能最差。

实际操作时采用的液体喷淋密度应大于最小喷淋密度。若喷淋密度过小，可采用增大回流比或采用液体再循环的方法加大液体流量，以保证填料表面的充分润湿；也可采用减小塔径予以补偿；对于金属、塑料材质的填料，可采用表面处理方法，改善其表面的润湿性能。

5. 返混

在填料塔内，气液两相的逆流并不呈理想的活塞流状态，而是存在着不同程度的返混。造成返混现象的原因很多，如填料层内的气液分布不均、气体和液体在填料层内的沟流、液体喷淋密度过大时所造成气体局部向下运动、塔内气液的湍流脉动使气液微团停留时间不一致等。填料塔内流体的返混使得传质平均推动力变小，传质效率降低。因此，按理想的活塞流设计的填料层高度，因返混的影响需适当加高，以保证预期的分离效果。



辽宁省职业教育教学改革示范校建设成果

职业文化与创新能力训练

李朝阳

职场实用英语教程

贾琳琳

高等数学

宿彦莉

体育与健康

王 涿

化工安全与职业健康

何秀娟

化工设备维护与维修

陈 星

化工单元操作

聂莉莎

石油加工生产过程操作

陈 月

反应器控制与操作

左 丹

石油地质

高文阳

采油工程

马 爽

钻井工艺

张金东

油层物理

赵 宁

修井工艺

赵志明

石油矿场机械

张翠婷

会计信息化

周晓娟

税费计算与申报

安 彬

企业财务管理

王 丹

基础会计实务

刘雅漫

成本计算与分析

李 侠

销售分类建议：化工

ISBN 978-7-122-33836-5



9 787122 338365 >

定价：48.00元