

过程装备与控制工程专业内涵拓展系列教材

普通高等教育“十二五”规划教材



物理过程及设备

WULI GUOCHENG JI SHEBEI

□ 陈建国 主编 □ 何 燕 副主编 □ 王吉岱 主审



化学工业出版社

过程装备与控制工程专业内涵拓展系列教材

普通高等教育“十二五”规划教材

物理过程及设备

陈建国	主 编
何 燕	副主编
王吉岱	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是从过程工业的研究对象物料转换规律及方法入手,将物料的转化过程分类为物理过程变化、化学过程变化及生物过程变化,其中的物理过程变化占据过程工业的各个方面,成为本书的编写内容。主要包括概述,粉体的物理过程及设备,液体的物理过程及设备,气体的物理过程及设备,传热过程及设备,蒸发与干燥过程及设备。

本书不仅可作为过程装备与控制工程专业本科及大专学生的教材,亦可作为过程工业各企业工程技术人员、设备制造设计和使用人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理过程及设备/陈建国主编. —北京:化学工业出版社, 2012.11

过程装备与控制工程专业内涵拓展系列教材

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-15437-8

I. ①物… II. ①陈… III. ①物理过程-设备-高等学校-教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第232654号

责任编辑:刘俊之 王清颖

文字编辑:向东

责任校对:宋夏

装帧设计:韩飞

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:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张16 $\frac{3}{4}$ 字数435千字 2013年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 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:35.00元

版权所有 违者必究

过程装备与控制工程专业内涵拓展系列教材 编审委员会

主任委员：李庆领（青岛科技大学）

副主任委员：王威强（山东大学）

王振波（中国石油大学）

王吉岱（山东科技大学）

委	员：	陈建国	吴俊飞	骆晓玲	杭柏林	何燕
		付平	栾德玉	余真珠	任济生	王宗明
		王建军	郭建章	段振亚	刘炳成	胡德栋

前 言

“过程装备与控制工程”专业是机械、化学、能源、轻工、医药、冶金、军工、信息、材料等工程学科的交叉学科，专业覆盖面广，与经济建设密切相关。专业内容集成了加工与制造流程性材料的过程单元设备和机泵群通过管路、阀等连成的机电仪监控一体化的连续性复杂系统的过程工艺技术，成为国民经济支柱产业的“过程工业”对应学科，具有强大的生命力和广阔的发展前景。

过程技术的研究对象是物料转换规律及方法，而过程技术及过程装备中之“过程”的概念就可理解为：以物质转化为核心，产品计量而不计件的过程制造业。原料和产品或中间体可分为固体性材料和流程性材料，而流程性材料包括气体、液体和粉体类材料，也称为流体介质（或连续介质）。在过程工业生产过程中，通常是指对流程性材料进行加工和处理的工业生产过程，所以也称为流程性工业。本专业学科内容改革的核心是将原来以行业及社会属性为主要依据的专业设置方法转变为以其自然属性为主要依据的分类方式，使其专业内涵更能反映专业的本质。

广阔的“过程工业”从原料到产品的生产过程是由各种“单元过程”组成的。目前已知工业生产的单元过程（单元操作）大约可分为 60 余种，这 60 余种单元过程通过不同的组合可以演变出成百上千种产品的生产工艺过程，对应还有产品制造所必需的原材料预处理过程，后续成品合成、包装、储存等过程。按照单元过程的本质及自然属性可将其分为三大类。

（1）物理过程：在这类过程中，物料只发生物理变化（可以改变组分及性质）。包括机械过程技术和热力过程技术。

（2）化学过程：在此类过程中，通过化学反应来改变物料的性质及种类。例如：合成、裂解、催化、聚合、氧化等。

（3）生物过程：在此类过程中，通过生物作用（生物反应）、生物催化剂来改变物料的性质及种类。例如：发酵、合成、生物净化、DNA 技术、基因工程药物、生物芯片、动植物反应等。

物理过程中的机械过程技术，泛指通过机械作用（力学作用）来改变物料的组分及性质。机械过程技术在工程上俗称为冷过程技术。例如：粉碎、筛选、分离、混合、造粒、包装、输送、储存等。

物理过程中的热力过程技术，泛指通过改变热力学参数（温度、压力等）来改变物料的组成或性质。例如：干燥、蒸发、蒸馏、萃取、结晶、吸收、浓缩、吸附、冷冻等。

本教材相对系统地阐述了过程工业中所涉及的物理过程及设备，力求尽可能地把所用的相关设备包括进来，简述其工作原理、结构形式、运行使用的相关参数及有关参数计算。由于物理过程所涉及的工业门类较多，对应的设备在种类、式样、性能、结构等方面繁杂多样、五花八门，各种物理过程设备只能按所处理的气体、液体、固体或这些混合物来大类划分，在机理相同或相似的前提下，把大类划分的设备尽可能多地引入，以引导学生触类旁通，掌握和了解更多的专业知识，有利于培养学生适应宽专业、交叉学科和综合应用知识的能力。

本教材是青岛科技大学李庆领教授统一组织编写的本专业系列教材中的一本，系列教材

计划按产品生产过程的自然属性为主要依据，侧重过程工业所用设备与机械，结合过程工业发展、工艺原理及主要物理、化学、生物的基本属性来全面叙述所用设备。本教材第1~4章由陈建国编写，第5章由何燕编写，第6章由何燕、陈建国编写，全书由陈建国统稿，王吉岱教授主审。李庆领教授对本书大纲及内容进行了具体指导和审阅；书中借鉴、参考了一些参考书籍的内容，在此一并表示衷心的感谢。

由于本教材按工业生产原理的物理过程大类编写，所涉及的工艺过程及生产的产品种类较多，不能全部概括过程工业中的物理过程设备，难免挂一漏万，又限于编写人员的水平有限，书中难免有不妥之处，切望广大读者批评指正，提出宝贵意见，以期今后作相应的纠正和完善。

编者

2012年8月

目 录

1 概述	1	3.3.1 管道的种类及标准.....	84
1.1 物理过程的出现与应用	1	3.3.2 阀门类型及选用	85
1.2 物理过程设备的分类	4	3.3.3 管道的设计计算	87
1.3 物理过程设备的发展	5	3.4 液体的分离与过滤	89
2 粉体的物理过程及设备	7	3.4.1 液体混合物的分类	89
2.1 固体颗粒形状、粒度、测量方法	7	3.4.2 液-固分离设备	92
2.1.1 颗粒的形状	7	3.4.3 液-液分离设备	98
2.1.2 颗粒的粒度	8	3.4.4 离心机与分离机的轴功率及 选型	101
2.1.3 颗粒群的平均粒径	10	3.4.5 过滤机	103
2.1.4 粒径分布规律	11	3.4.6 压力式过滤设备	110
2.1.5 颗粒的测量方法	13	3.4.7 膜过滤	113
2.2 粉体的力学特性	16	3.5 液体介质的搅拌混合	119
2.2.1 粉体颗粒的附着力	16	3.5.1 搅拌混合机理	119
2.2.2 粉体摩擦特性、安息角与 摩擦角	18	3.5.2 液体介质搅拌混合设备	121
2.2.3 粉体的流动性	21	3.5.3 搅拌功率计算	123
2.2.4 颗粒沉降与悬浮现象	21	参考文献	124
2.3 粉碎过程及设备	23	4 气体的物理过程及设备	126
2.3.1 粉碎机理与方法	25	4.1 工业气体的种类及特性	126
2.3.2 初级粉碎设备	26	4.2 工业气体的制备	133
2.3.3 细颗粒粉碎设备	35	4.2.1 空气的分离过程	133
2.4 粉体分离设备	40	4.2.2 空分装置制备氧气、氮气工艺	134
2.4.1 分离过程基本概念	40	4.2.3 氢气的生产与应用	138
2.4.2 分离设备	41	4.2.4 天然气净化与液化装置	141
2.4.3 除尘设备	47	4.3 工业气体储存	146
2.5 粉体的混合	54	4.3.1 工业气体储存容器	146
2.5.1 粉体颗粒混合特性	54	4.3.2 固态气体储存技术	156
2.5.2 粉体混合设备	55	4.4 工业气体运输	158
2.6 粉体的输送设备	59	4.4.1 无缝气瓶与长管拖车	159
2.6.1 机械输送	60	4.4.2 低温液化气体罐车	161
2.6.2 气力输送	64	4.4.3 液化气体铁路运输	163
2.6.3 气力输送相关计算	67	4.4.4 液化天然气运输船	165
参考文献	70	4.4.5 液化石油气管道输送	166
3 液体的物理过程及设备	72	4.4.6 液化石油气的分配与供应	169
3.1 液体类产品的工艺过程	72	参考文献	172
3.1.1 原油的常减压蒸馏工艺	72	5 传热过程及设备	173
3.1.2 牛奶的生产过程	74	5.1 热量传递的基本方式	173
3.2 液体输送机械	76	5.1.1 传导换热	173
3.2.1 离心泵	76	5.1.2 对流换热	179
3.2.2 容积式泵	78	5.1.3 辐射换热	180
3.3 输送管道	83	5.1.4 两流体间的热量传递	182

5.2 换热器	184	6 蒸发与干燥过程及设备	223
5.2.1 换热器的分类	184	6.1 蒸发过程及设备	223
5.2.2 换热器的结构与特性	185	6.1.1 蒸发过程与分类	223
5.2.3 管壳式换热器的选型计算	198	6.1.2 蒸发设备的结构	225
5.3 加热炉	202	6.1.3 蒸发器的选型及附属装置	230
5.3.1 加热炉的分类	203	6.1.4 蒸发器的计算	231
5.3.2 管式加热炉的结构	203	6.2 干燥过程及设备	236
5.3.3 管式加热炉的热力核算	209	6.2.1 干燥过程与分类	236
5.4 锅炉	215	6.2.2 工业干燥设备	238
5.4.1 锅炉的结构类型	215	6.2.3 湿空气的状态参数	251
5.4.2 锅炉的热力计算	219	6.2.4 干燥过程的物料衡算与热量衡算	254
参考文献	222	参考文献	259

1 概 述

过程工业 (Process industry) 是以加工流体性材料或制造流体性产品为主的工业, 因而也称为流程工业。所谓流体性材料是指以气体、液体、粉体等流体形态为主的材料, 此类材料占自然界物质种类的大部分, 也是工业、农业和日常生活所必需依赖的物质。

过程工业是现代国民经济的支柱产业之一, 现代工业的主要体现。科学技术越发达, 过程工业的种类就越多、规模就越大。过程工业的特点是: 大型化、管道化、连续化、自动化、智能化, 生产效率高、产值比例高、安全可靠、控制先进、人员少; 另外, 覆盖面宽, 发展前景好, 资源、能源耗量大, 设备管理不当则污染严重。过程工业对现代科技发展起着重要作用, 它是新材料生产的基础、能源开发转化的核心、现代农业生产的后盾、生物技术产业化的依托、信息技术发展的支撑、环境治理的手段。

过程工业所涉及的理论技术可总称为过程技术, 过程技术涵盖众多的过程工业分支, 对口工业有: 化工、石油化工、煤化工、冶金、建材、化肥、轻工、制药、生物工程、食品、燃烧、制汽、电力、能源、国防、合成材料、环境、生态、设备制造、检测、管理等, 特别是新能源、新材料、循环工业等。

过程技术是一个典型的多学科交叉型技术, 它融合了化学工程、生物工程、机械工程、信息工程及材料工程等学科。面宽、方向多, 偏重工程应用。涉及的机械工程基础理论有固体力学、流体力学、工程热力学、机械设计; 涉及的化学与生物工程基础理论有热量传递、质量传递、能量传递、反应工程、生物技术; 涉及的信息工程基础理论有测试技术、信息技术、电子技术、系统控制技术; 涉及的材料工程基础理论有金属材料、合成材料、高分子材料、防腐材料等技术。

过程工业在其众多企业应用中, 按所涉及的工艺原理可归纳为化工工艺过程、生物工艺过程和物理工艺过程, 此大类划分可基本概括过程工业所使用的工艺过程。对应工艺过程的设备, 可分为化工过程设备、生物过程设备和物理过程设备, 另外还有过程系统控制设备。

本书所涉及的物理过程及设备内容概况为粉体物理过程及设备, 液体物理过程及设备, 气体物理过程及设备, 热传递过程及设备。从物理的角度去研究液体、气体和粉体的物理性质、力学性质、流动性质、能量和热传递与交换。主要分析液体、气体和粉体的输送、分离、过滤、净化、混合、搅拌、传热、传能、蒸馏、萃取、吸收、提纯、蒸发、干燥、加湿、冷冻、液化、粉碎、储存等物理过程中所应用的设备, 成为以物理过程为主线来引述其设备的研究体系。

1.1 物理过程的出现与应用

使用物理方法进行物料研磨、破碎、分离、过滤、凝聚及混合等可追溯到悠久的历史, 而我国的中草药熬制、酿酒、火药与造纸术, 主要采用物理的方法来制造和生产。

物理过程中对受机械作用影响的基本工艺占据较大比例, 其中包括碾碎过程 (如研磨、破碎、制粉、造粒), 分离过程 (如筛选、过滤、分离、蒸发、浓缩、除尘), 混合凝聚过程 (如搅拌、混合、揉捏、乳化、压片、压块), 干燥 (加热干燥、冷冻干燥); 对依据物料的密度、热物性不同而进行蒸馏 (精馏、提取、吸收、萃取、蒸发); 另外对物料的储存、冷

冻、加热、输送及运输等。

【典型示例 1-1】 啤酒生产工艺流程

啤酒生产工艺流程可以分为制麦、糖化、发酵、包装四大工序。现代化的啤酒厂一般把制麦部分的麦芽车间单独设厂生产，啤酒生产工艺流程从麦芽粉碎开始，后续过程所用设备由管道串联形成工艺流水线，直到产品包装。在整个啤酒生产工艺流程中，除发酵过程外，其它单元操作基本以物理过程为主，属于典型的过程工艺技术。随着灭菌、消毒和系统密闭性技术的提高，鲜啤酒的保质期进一步延长。

制麦的主要过程为：大麦先经风选或筛选除杂，永磁筒去铁，比重去石机除石，精选机分级。大麦进入浸麦槽洗麦、吸水后，进入发芽箱发芽，成为绿麦芽。绿麦芽进入干燥塔/炉烘干，经除根机去根，制成成品麦芽。从大麦到制成麦芽需要 10 天左右时间，然后以原料的形式供应啤酒生产厂。

制麦工序的主要生产设备为：筛（风）选机、分级机、永磁筒、去石机等除杂和分级设备；浸麦槽、发芽箱/翻麦机、空调机、干燥塔（炉）、除根机等制麦设备；斗式提升机、螺旋/刮板/皮带输送机、除尘器/风机、立仓等输送、储存设备。

麦芽在送入酿造车间之前，先经过轻压粉碎制成酿造用麦芽。然后，进入糊化锅，粉碎的麦芽/谷粒与水在糊化锅中混合进行糊化处理。糊化锅是一个巨大的回旋金属容器，装有热水与蒸汽入口、搅拌棒或搅拌桨类搅拌装置，以及温度、压力等控制装置。在糊化锅中，麦芽和水经加热后沸腾，天然酸将难溶性的淀粉和蛋白质转变成为可溶性的麦芽提取物，称作“麦芽汁”。然后麦芽汁被送至分离塔的过滤容器。麦芽汁在被泵入煮沸锅之前需先在过滤槽中去除其中的麦芽皮壳，并加入啤酒花和食糖，进入煮沸锅中。混合物被煮沸以吸取啤酒花的味道，并起色和消毒。在煮沸后，加入酒花的麦芽汁被泵入回旋沉淀槽去除不需要的酒花剩余物和不溶性的蛋白质。洁净的麦芽汁被送入热交换器冷却。随后，麦芽汁中被加入酵母，开始进入发酵的程序。

发酵过程在发酵罐与成熟罐内进行，麦芽汁在啤酒酵母作用下发酵。发酵在 8h 内发生并以较快的速度进行，积聚一种被称作“皱沫”的高密度泡沫。这种泡沫在第 3 天或第 4 天达到它的最高阶段。从第 5 天开始，发酵的速度有所减慢，麦汁中的糖分分解为酒精和二氧化碳，大约一星期后，即可生成“嫩啤酒”，然后进入成熟罐，再经过几十天的发酵过程使其成熟。成熟的啤酒在过滤机中将所有剩余的酵母和不溶性蛋白质滤去，就成为待包装的清啤酒。

瓶装啤酒是最为大众化的包装形式，也具有最典型的包装工艺流程，即洗瓶、灌酒、封口、杀菌、贴标和装箱。

一个典型的啤酒生产工艺流程如图 1-1（不包括制麦部分）所示。

啤酒糖化、发酵工艺流程中主要设备：糊化锅、糖化槽、麦汁过滤槽、煮沸锅、外加热器、酒花添加罐；回旋沉淀槽、麦汁冷却器；空气过滤器、酵母培养及添加罐、发酵罐、啤酒稳定剂添加罐、成熟罐（缓冲罐）、硅藻土过滤机、精滤机、清酒罐等。

【典型示例 1-2】 石油炼制过程中的常减压蒸馏工艺

常减压蒸馏工艺是原油进入炼油厂后必须经过的第一道工序，如图 1-2 所示。常减压蒸馏得到的成品和半成品叫做直馏产品，如直接生产的汽油、煤油、柴油等燃料，提供其它炼油装置加工的原料或石化原料及许多其它碳化合物等。

蒸馏是通过加热、汽化、分馏、冷凝等过程使液体混合物分离为一定纯度产品的方法。液体混合物中各组分沸点不同，加热时低沸点组分优先汽化，高沸点组分为液体，由此产生分离。原油通过加热炉加热，输入蒸馏塔中并在各层塔板上多次部分汽化和部分冷凝，汽液

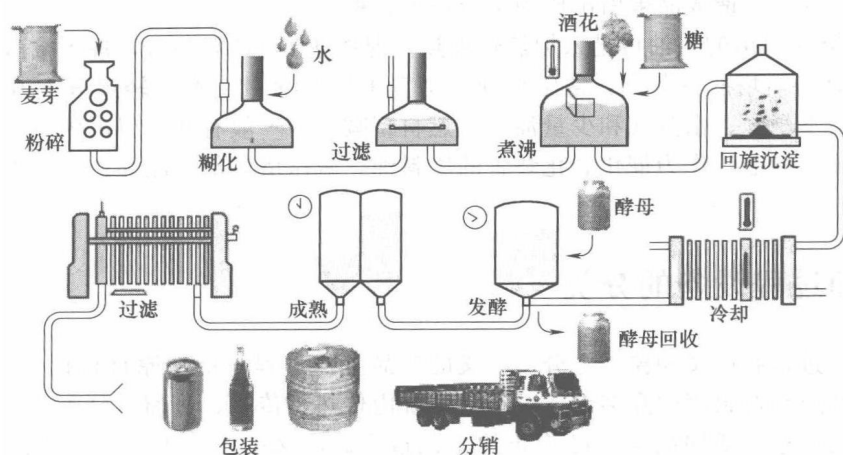


图 1-1 啤酒生产工艺流程图

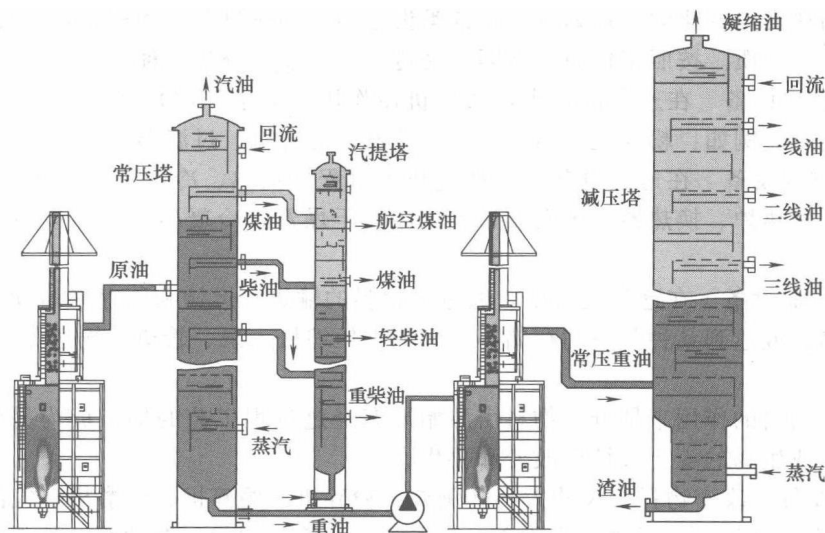


图 1-2 原油常减压蒸馏流程图

两相进行充分的热量交换和质量交换，使沸点不同的组分得以充分分离，沸点低的汽油升在塔的最上部，其次不同沸点的煤油、柴油等从不同高度塔板分流，沸点高的重油由塔底分流。这种将原油按沸点范围分为几个馏分的生产过程叫原油的蒸馏。常减压蒸馏过程是由于蒸馏塔分两个，一个塔在常压（一个大气压）状态下工作，另一个塔在减压（抽真空）状态下工作，其工艺过程主要由以下组成。

① 原油经脱盐，进换热器加热，温度达到 $220 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ，进初馏塔，蒸发最轻组分汽油和残余水分及腐蚀性气体。

② 初馏塔塔底油进入加热炉加热，温度达到 $360 \sim 370^{\circ}\text{C}$ ，进入常压塔中部，塔底供蒸汽，原油在塔盘上进行热量和质量交换，低沸点的轻组分上升，重组分下降，塔顶出汽油，一部分作塔顶回流。依次向下不同高度塔板引出口分别出航空煤油、煤油、柴油、重柴油，这些侧线产品由于是初级蒸馏产品，必然含有相对数量的轻馏分，需要经汽提塔进一步分离。汽提塔依据产品数量分段精馏，各段内的轻馏分经蒸馏汽化，由各段上部回流到常压塔

内,而各段下部的精馏成品被引出成为常压塔的合格产品。

③ 常压塔底引出的重油再进入加热炉加热,温度达到 410°C 左右,进入减压塔(塔内压力约 0.095MPa),塔底供蒸汽,常压重油在塔盘上进行热量交换,轻组分上升,重组分下降,塔顶抽出不凝气、水蒸气和少量油气,燃料型减压塔一般有两个引出侧线,分别为减压一线油和减压二线油,作为催化裂化装置的原料油,减压塔底部产品为渣油,作为延迟焦化工艺的原料。

1.2 物理过程设备的分类

物理生产过程有广义和狭义之分。狭义的产品生产过程是指从原材料投入生产系统中,此系统是连续或相对封闭的众多设备,经过系统内传热、传质、蒸馏、分离、混合等物理工艺,直到成品制造完成即出新产品为止的工艺过程。广义的产品生产过程是指从原材料加工、运输、选择,然后进入生产系统中,到新产品被制造出来,后续有包装、储存及销售等全部过程。按广义物理过程主要有三种划分方法。

(1) 按物料发生变化的原理划分 在这类设备中,物料只发生物理变化或采用物理方法改变物料形态和性质。按照工作原理不同,又可将这类设备分为三种。

① 机械过程设备 在这类设备中,通过机械作用(力学作用)来改变物料的组成、形状、尺寸或性质。例如:粉碎机、离心机、搅拌器、混合机、过滤器、流化床设备等。

② 热力过程设备 在这类设备中,通过热力过程(加热、冷却)来改变物料的组成或性质。例如:加热炉、换热器、蒸发器、流化床、干燥器、冷凝器、蒸馏设备、吸收设备、萃取设备等。

③ 输送存储设备 在这类设备中,通过对物料的输送、运输和储存来增加物料的能量,实现物料的输送或达到某种状态的存储等。例如:压缩机、泵、管道、输送器、保温储存容器等。

(2) 按对物料的作用来划分 物料由原始形态经过过程工艺的加工成为另外一种形状,但不发生化学或生物的变化及性质改变和再生。

① 粉碎设备 改变物料的尺寸大小。例如:粉碎机、磨碎机、球磨机、气流磨等。

② 分离筛选设备 进行物料的分离、筛选和过滤等。例如:振动筛、选粉机、除尘器、收尘器、过滤器、离心机、过滤机、压滤机、膜过滤器等。

③ 混合设备 对两种或两种以上物料进行混合,形成混合物料。例如:容器混合机、转子混合机、犁刀混合机、气流混合机、射流混合器、搅拌釜等。

④ 传热设备 对物料进行热交换或冷凝冷冻。例如:加热炉、换热器、蒸发器、干燥机、流化床、冷凝器、冷冻机等。

⑤ 传质设备 对物料进行传质包括传热和蒸馏。例如:蒸馏塔、吸收塔、萃取塔、搅拌釜、蒸发器、流化床设备等。

⑥ 输送存储设备 例如:螺旋输送器、输送带、气力输送系统、气液储存罐、杜瓦容器、吸附容器、压缩机、泵、管道等。

(3) 按照在生产过程中的次序划分

① 预处理设备 用于将原料加工处理成适于“主转换”要求形式的设备。例如:脱盐罐、脱硫塔、换热器、预加热炉、粉碎机、筛选机、混合机等。

② “主转换”设备 用于完成关键物料转化过程并生产出初始形态产品的设备。例如:精馏塔、汽提塔、吸收塔、萃取塔、搅拌釜、蒸发器、流化床设备等。

③ 后处理设备 用于将初始形态的产品处理为消费者所要求之商品的设备。例如：过滤设备、冷却设备、分离设备、储存设备、包装设备、输送设备等。

依据生产的产品种类和行业还可进行不同的分类，例如还可按操作单元种类来区分等。

1.3 物理过程设备的发展

当今推进过程学科发展的动力出自两方面，一是新兴产业，主要为生物技术、材料技术和环保技术；二是过程分支学科本身的积累和交叉结合。近年来，过程分支学科在科学和技术方面的发展，促进了过程工业整体的前进。这些代表性的分支学科包括热力学、流体力学和传递过程，以及生物工程、催化和反应器工程、颗粒学、材料学等。因此，面向高新技术的过程装备技术将为高新技术产业化提供技术支持并将成为未来过程装备发展的方向。纵观近年来过程装备的发展状况，过程装备技术的进展主要体现在过程强化、多尺度空间结构和过程装备微型化方面。

在过程工业中，高新技术、精细化工、生物化工及医药制造等方面，各种液体、气体、颗粒及超细颗粒产品的处理水平飞速发展，我国与国际先进水平相比差距较大，直接影响国际竞争及产品价格，尽管较多产品在其纯度达到甚至超过国外产品，但因后处理中的某些环节不够精细，使同类产品在价格上仅为国外产品的 1/3。如轻质碳酸钙、白炭黑、中药制剂等。微观尺度 ($10^{-6} \sim 10^{-2} \text{m}$) 的物料粉碎与制备，纳米尺度 ($10^{-10} \sim 10^{-7} \text{m}$) 的过滤与材料合成，成为新材料工业、药品、食品等优先发展的重点。

工业生产的高效、节水、节能、低（无）污染化是当今人类发展的必然趋势，也是过程装备技术发展的主要动力。过程工业是高利润附加值产业，同时也是水、资源、能源消耗及污染大户。因此过程工业的现代化发展离不开高新技术的应用和过程装备技术的提高。开发先进的过程装备，以高效能、高参数、高新技术、大型化、安全可靠为重要特征。新材料、新技术、新检验方法不断应用，实现长周期运行，提高系统和装置的安全性，实现可持续发展战略。

石化装置大型化对装备技术的新要求。目前，我国原油加工能力快速提升，形成沿海（沪、粤、津、鲁、浙、闽、琼）、沿江（苏、徽、湘、鄂）、东北（辽、吉、黑）三大石油化工板块。石油化工承压装置向大型化、高参数、长周期方向发展，炼油单套装置生产能力达到每年千万吨。最典型的例子，国外炼油常压塔内径 9m，而减压塔内径 16m，塔板上气液分配均匀度技术；大型加氢反应器，国外最大内径 6m，壁厚 480mm，其锻焊技术难度大，材质高强韧化；大型板式换热器国外最大 15000m^2 ，出现大波形板成型技术与板间密封技术的应用。乙烯单套装置年生产能力上百万吨；乙烯中大型离心式压缩机，单机 45000kW，要求高可靠性、高寿命。煤液化装置中的加氢反应器的最高工作温度达 454°C 、最高工作压力达 20MPa、壁厚达 340mm、直径 5m、高 20 m、重量达 1900t。为满足能源结构调整、能源战略储备和石化工业发展的需要，石油、天然气储罐大型化也是发展主流。大型低温球罐（ -30°C ，1.72MPa），国外最大 3700m^3 双层结构，涉及低温钢制造与应用。低温液化天然气储罐，内径 80m，高 38m，常压下保持低温 -173°C ，较高的保冷、隔热技术及安全性要求。

生态与环境保护呼唤先进装备。烟气除尘脱硫，酸性气体除酸等；干法除尘，干法脱硫；湿法除尘脱硫一体化；低 NO_x 燃烧器；炼厂干气的水蒸气重整制氢；水合物生成法分离气体，逐级分离出 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 等。高效高负荷化的水合物生成反应器；从烟气中分离出 CO_2 及对 CO_2 的利用与储存等。工业污水的处理回用，水处理技术。固体废弃物的

再资源化, 废轮胎低温粉碎作再生橡胶制品; 城市垃圾油制备生物柴油; 垃圾焚烧无害化处理, 产汽发电 (7 亿吨/年); 农业秸秆水解产沼气、乙醇、生物柴油等。

节能降耗推动开发高效装备。大型企业的汽电联产, 能源级梯利用 (燃气轮机发电产汽装备, 高温气体净化设备); 高温位热能回收, 如催化 700°C 烟气透平发电, 余热锅炉产汽; 低温位热能回收, 如 300°C 以下热源的利用 (热泵, 低温差高效换热器、余热发电用高效膨胀透平); 化学能回收, 如 CO 锅炉; 压力能回收, 如高压液体的液力透平; 优化换热网络、蒸汽网络等。强化传热技术, 如管壳换热器用螺旋槽管 (传热系数提高 60%)、横纹管 (传热系数提高 85%)、非圆形管 (椭圆、蛋形、鼓状、菱形管等), 管内插入扰动促进物, 壳程用折流杆栅 (压降低 50%, 传热系数高 20%, 防流体诱振), 壳程用螺旋形折流板。板壳式换热器 (Hybrid, Packinox), 传热系数一般为管壳式的 2~3 倍, 压降小, 结垢倾向小。

长周期安全生产要求装备新技术。密封防漏技术, 转轴机械密封, 上游泵送机械密封, 转轴的干气密封, 零泄漏密封如磁力传动泵 ($6000\text{m}^3/\text{h}$, 25MPa , 1400kW), 磁力悬浮轴承用于离心压缩机 (无润滑油系统, 无摩擦面)。防腐耐磨隔热技术, 金属表面改性与涂层, 功能梯度涂层 (耐蚀、耐热、耐磨), 自蔓延防腐涂层、管道的阻垢与防结焦; 隔热技术, 整体浇铸的隔热耐磨一体化衬里, 低温装备的隔热技术 (结构、材料)。大型机泵、高速压缩机设备故障诊断技术, 机械学、动态传感加计算机分析形成故障检测和诊断专家系统。机泵的振动监测与频谱分析, 判定故障性质与等级, 全息谱方法综合测定每阶频率分量上的振动形态。基于模糊神经网络的机泵故障检测系统。故障诊断专家系统, 包括复合振动、声发射、油液分析等多种诊断的综合, 等效均衡损伤的寿命预测准则, 时域相位互斥诊断法, 共同频率分析法等。

电子技术、计算机和信息技术对过程装备技术的提升。过程工业多尺度数值模拟与分析, 实现一步放大与结构优化设计。三维动态模拟 (应力应变场、温度场、流场等) 虚拟设计与制造。射线断层扫描实时成像和人工智能系统的结合, 装备内多相动态过程, 装备缺陷检测识别与寿命预估等。先进制造技术如数字化、信息化、智能化的制造过程。极端制造 (极大、微纳、高精、苛刻)。功能材料、记忆合金、陶瓷材料、膜材料的利用。微化工技术推出微装备技术, 特征尺度小于几百微米的设备, 极高的面体比 $10^4 \sim 10^5\text{m}^2/\text{m}^3$, 模块结构, 并行通道几万个、几十万个, 单通道液体流量 $1\mu\text{L}/\text{min} \sim 10\text{mL}/\text{min}$ 。微换热器 1m^3 可换热 18000MW , 水传热系数为传统的 6~12 倍, 气传热系数为传统的 30 倍。溴化锂微制冷系统的制冷强度高达 $10 \sim 15\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 体积只有传统的 1/60。微反应器可做到等温分布、快速反应。微检测 (传感器)、微分析、微制造的配套发展。

在知识经济、信息经济的时代, 过程工业作为基础产业, 其未来的重要技术应该适应不断加快的全球化进程的发展、适应可持续发展、适应用户不断增长的需求。展望未来, 过程装备技术的发展将在新能源技术、节能技术、新材料技术、生物技术与生物化工、计算机计算技术、环境技术和微技术等领域迅猛发展的推动下, 产生更为重大的进步和革命性的突破。

2 粉体的物理过程及设备

2.1 固体颗粒形状、粒度、测量方法

宏观世界中，固体物质占绝大多数。在茫茫宇宙中，众多天体、恒星是宇宙中的固体。在宏观世界中，目测眼观，固体物举目可视。固体颗粒是固体物的粒状形式，习惯上把相对尺寸较小的颗粒状固体物称为固体颗粒。可大体分为粒体和粉体两种。粒径大于 $50\mu\text{m}$ 的为粒体，粒径小于 $50\mu\text{m}$ 的为粉体。

粒体的力学行为主要受重力所控制，重力是影响粒体运动的重要原因。粉体则由于粒径的减小，粒子之间的附着力作用增大，当粉体颗粒为 $10\mu\text{m}$ 左右，附着力与重力平衡。当粒径小至 $10\mu\text{m}$ 以下，重力作用可以忽略。粒径较小的粉体附着力较大，进一步粉碎不容易，出现所谓的逆粉碎现象。颗粒粒径达到 10nm 左右时（或 100nm 以下），即成为纳米材料。此时，颗粒的物理性质与大颗粒时完全不同，热特性、电特性等都会发生变化。

固体颗粒的物理特性可用这样几个性能参数表示：颗粒粒径；聚集状态；易碎性；堆积密度；流动性；泛滥性（Floatability）；流化性等。

颗粒的粒径是描述颗粒的几何参数之一，也是固体颗粒按大小分类的重要数值。颗粒的聚集状态涉及颗粒是否有黏附到另一个颗粒上形成团簇的趋势，这与颗粒表面所带电荷有关，直接影响颗粒的流动性、混合与分离特性。易碎性则体现固体颗粒再次分离为更小颗粒的难易程度，不同的物质颗粒粉碎时难易程度不同，不同的工艺条件和方法可分离出不同大小粒径的颗粒。堆积密度是指单位体积下所含固体颗粒的质量，用 kg/m^3 来表示，颗粒堆积得越密实相对密度越大，振动和机械填充可使其密度增加，也受粒径大小和聚集状态影响。流动性是描述颗粒在自身重力作用下是否自由滚落流动，通常用静止角（又称安息角、休止角）来表示，即颗粒群从运动状态变为静止状态所形成的角。泛滥性是描述粉体易于产生粉尘飞扬的性质，粒径小、质量轻的粉体在移动时容易形成粉尘，粉尘所造成的污染和物料损失有时很严重。流化性反映粉体是否容易产生流态化的行为，如煤粉气化，硫化物矿流态化焙烧，化学工业中的硫化、催化、裂化。

2.1.1 颗粒的形状

颗粒的形状多种多样，它与具体粉体类型有关，与粉碎工艺、结晶合成工艺、晶体结构、物质性质等密切相关，在粉体储存、输送、混合、分离、结晶、烧结及流态化等操作单元的设计与工艺过程中，颗粒形状是需要考虑的重要因素之一。而颗粒的表面形式又影响着它自身的物性，如比表面、流动性、填充性、化学活性、吸附性、液体穿透性、混合性、流动阻力等。一般颗粒的形状可分为规则形和不规则形，规则形有：球状、卵石状、粒状、柱状、多棱体状、板状、片状、针状、角状、树枝状、纤维状等。不规则形有：雪花状等，如图 2-1 所示。

不同的物料粉体具有不同的颗粒形状，石灰石粉碎后所形成的碳酸钙颗粒为粒状；重晶石粉碎后得到的重质硫酸钡也是粒状；滑石粉、天然石墨为片状；高岭土是六角板状；聚氯乙烯、聚苯乙烯为球状粒子；氧化铁成为棒状或树枝状颗粒；很多高分子结晶后成为纤维状或球状。

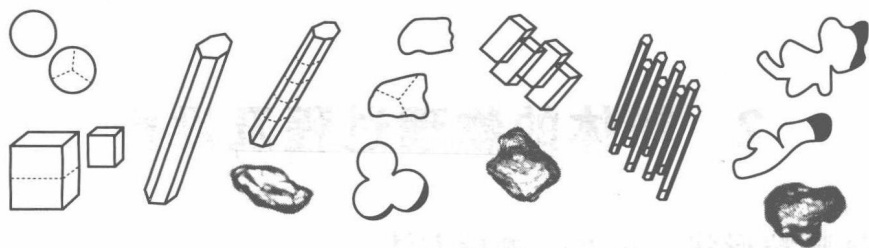


图 2-1 颗粒形状

一个粒子可能是由多个更细小的粒子或单晶凝聚而成，有的粒子可能只有一个单晶体，通常把最初生成的粒子称为一次粒子，一次粒子有的是形状单一的单晶，有的是物料分割的最小单位粒子或基本粒子。由多个粒子凝聚成的粒子为二次粒子，多个粒子之间的聚合合力是范德华力、静电力、磁力和化学力。众多粉体的物性特征由凝结粒子来体现。二次粒子较容易分离成一次粒子的称为软基粒子（Flocculate），各基本粒子之间的结合力较小，粒子表面相互融合力差。靠化学力结合的二次粒子不容易分离，各粒子之间融合力大，用常规方法难以分离到基本粒子，这种粒子称为凝结粒子（Aggregate）。

2.1.2 颗粒的粒度

颗粒的种类千差万别，描述它的第一参数是尺寸，通常称为颗粒的粒度（又称为粒径）。粒度是颗粒在空间所占大小的线性尺寸，粒度越小，颗粒越小。球形颗粒的粒度最简单，就是它的直径。表面不光滑、类似球形的颗粒，可用某种规定线性尺寸来表示它的粒度，如相当球或相当圆的直径为其粒度。颗粒的大多数形状是非球形和非近似球形，其粒度的定义大约有十几种，随粒度的测量方法不同而区分，常见的有 6 种粒径尺寸。

① 筛分粒径 d_F 定义为筛分所测量的颗粒尺寸。

② 体积粒径 d_v 定义为颗粒折成同等体积球的直径。

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (2-1)$$

式中， V 为颗粒的体积。

③ 表面积粒径 d_s 定义为颗粒折成同等表面积球的直径。

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{S}{\pi}} \quad (2-2)$$

式中， S 为颗粒的表面积。

④ 表面积与体积比粒径 d_{sv} 定义为颗粒折成同等表面积与折成同等体积之比的直径，又称为比表面积球当量径。

$$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2} = \frac{6V}{S} \quad (2-3)$$

⑤ 圆当量粒径（又称 Heywood 径） d_a 定义为颗粒投影面积折成同等圆面积的圆直径。

$$d_a = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2-4)$$

式中， A 为颗粒的投影面积。

⑥ 定向统计平均粒径 沿一定方向测得颗粒投影面积线段长度的统计平均尺寸，如水平方向定向平均尺寸 d_F ；垂直方向定向平均尺寸 d_M 。

以颗粒群表示的平均粒径可分为以个数为基准的平均粒径；以质量（体积）为基准的平均粒径，其中又可细分出几种粒径值和计算公式。然而，随着测量仪器的发展，测量颗粒粒径的方法越来越多，粒径的描述和获得也可由测量方法来给出。

颗粒的形状类型繁多，对其形体的具体描述不能只用粒径这一个参数，必须用面、体来体现。面的描述用两个参数，长度 l ，宽度 b 。体积描述则需用长 l 、宽 b 、高 h 。

(1) 球形粒子

平均表面积：
$$S = \pi d^2 = \alpha_s d^2 \quad (2-5)$$

平均体积：
$$V = \frac{\pi}{6} d^3 = \alpha_v d^3 \quad (2-6)$$

投影面积：
$$S_a = \frac{\pi}{4} d_a^2 = \alpha_a d_a^2 \quad (2-7)$$

式中， d 为球体直径； d_a 为球体投影面直径，如图 2-2 所示； α_s ， α_v ， α_a 分别为面积形状系数，体积形状系数和投影面形状系数。

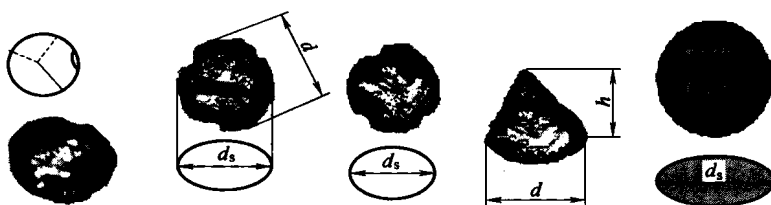


图 2-2 球形颗粒与圆锥形颗粒

单位体积颗粒的比表面积 S_{sv} ：

$$S_{sv} = \frac{S}{V} = \frac{k}{d} \quad (2-8)$$

式中， $k = \frac{\alpha_s}{\alpha_v}$ 为面积形状系数与体积形状系数比，称为比表面积形状系数。球的 $k=6$ ，表示颗粒形状对于球形的偏离为 6，此时球为光滑圆球。若 $k>6$ ，表示球颗粒面为非光滑面或与球形偏离。

(2) 圆锥形粒子 $h=d$ 的正圆锥。

平均表面积：
$$S = 0.81\pi d^2 = \alpha_s d^2 \quad (2-9)$$

平均体积：
$$V = \frac{\pi}{12} d^3 = \alpha_v d^3 \quad (2-10)$$

(3) 非球形粒子 如方形、圆柱形、锥角柱形等。

$$S = \alpha_s d_s^2 \quad (2-11)$$

$$V = \alpha_v d_v^3 \quad (2-12)$$

式中， α_s 、 α_v 、 k 由表 2-1 查出。

表 2-1 粒子形状系数及表面积和体积计算式

形状	α_s	α_v	k	表面积 S	体积 V	比表面积 S_v
球体 d	$\pi=3.14$	$\pi/6=0.523$	6	πd^2	$\pi d^3/6$	$6/d$
圆锥体 $h=d$	$0.81\pi=2.54$	$\pi/12=0.262$	9.7	$0.81\pi d^2$	$\pi d^3/12$	$12.5/d$
圆柱体 $l=h=d$				$\pi d(d/2+h)$	$\pi d^3 h/4$	$(2/h)+(4/d)$
$h=d$	$3\pi/2=4.71$	$\pi/8=0.393$	6			
$H=0.5d$	$\pi=3.14$	$\pi/8=0.39$	8			
$H=0.2d$	$7\pi/10=2.2$	$\pi/20=0.157$	14			