

Qigu
Guocheng
Gongcheng Xue

jiqizai shuini gongye zhong de yingyong

气固过程工程学

及其在水泥工业中的应用

胡道和 徐德龙 蔡玉良 著



武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

气固过程工程学

及其在水泥工业中的应用

胡道和 徐德龙 蔡玉良 著

武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

气固过程工程学及其在水泥工业中的应用/胡道和,徐德龙,蔡玉良著—武汉:武汉理工大学出版社,2003.3

ISBN 7-5629-1912-7

I. 气…

II. ① 胡… ② 徐… ③ 蔡…

III. ① 气固反应-化学工程 ② 气固反应-应用-水泥工业

IV. TQ172

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 018822 号

武汉理工大学出版社出版发行

各地新华书店经销

武汉理工大印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:480 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~3000 册 定价:36.00 元

序

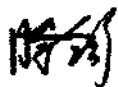
近半个世纪以来,化学工程学科理论的高速发展是举世瞩目的。但如何更好地扩展其应用,促进更多的相关产业,特别是高温化工产业的技术进步,一直是我们十分关注并寄予希望的。

建材行业是国民经济的重要支柱产业之一,尤其是硅酸盐产品,如水泥、陶瓷、玻璃等更是基本建设的主要材料。虽然多年来,我国的水泥产量一直居于世界首位,但实际上 3/4 以上的产品是以较落后的生产方法和设备生产的,在资源利用、产品质量、生产成本以及环境保护等方面均存在许多问题,亟需进行工艺和设备的彻底改造和技术创新。由于硅酸盐产品的生产都是以固体原料加工和高温下非均态化学反应为特征,在过程与机制上都非常复杂,难于掌握。因此生产长期处于“经验”和“技艺”的阶段。近二十年来,由于相关技术不断进步,国际上水泥熟料的煅烧技术和设备开发均出现了一些革命性的创新成果。但由我国自主开发的新技术还不多见。因此,无论从消化、吸收、掌握、推广国外的新成果,还是从深入认识过程实质并开发更新的、具有自主知识产权的技术和设备出发,都需要基础学科与化学工程近代理论的指导。为此编写一本适用于水泥工业的理论与实践兼备的专著,既是生产发展的需要,也是为科教兴国的基本国策服务的。

这本书的主要内容是以气、固相的基本性质和系统接触状态特征为起点,重点阐述了各类床层中气固相的流动、传热、传质与反应(三传一反)的基本理论和规律。同时对各类典型气固反应器的结构特点作了介绍,并汇集了作者对水泥煅烧过程所作的大量理论研究成果和建立的相关数学模型。在此基础上,经作者归纳提炼给出了用于水泥的新型气固反应器开发与设计的工程科学方法和实例。因此可以说这本书具有学科间相互渗透、理论与实践密切结合的显著特色,在硅酸盐行业中尚属首创。据我所知,这本书的部分内容曾在硅酸盐工程专业研究生学位课程中多次采用,在培养创新人才方面,起过很大的作用。据此我相信它对相关专业的高校师生、生产技术人员和研究设计人员来说都将是一本很好的教材与参考书。

顺便说一下,20 世纪 80 年代中期,在重视与提高培养工程型人才质量的思想指导下,我曾提出在大学本科和研究生中开设这类服务于生产的应用型理论课程的设想。令我欣慰的是本书作者们,相互切磋,亲密合作,十年如一日,在从事学科理论融合、教学、科研、设计、生产的实践与创新工作中,通过大量积累以后,最终完成了本书的编写并将与读者见面。我为此感到高兴并向他们致贺。

中国科学院资深院士



2002 年 11 月

作者自序

科学发展到今天,组成科学的各学科正在高度交叉,它们之间因分割而形成的樊篱正在不断地被打破。谁也说不清楚,流态化科学及技术到底应该归类于化学工程、冶金工程、还是能源工程、材料工程。又恰恰在这些交叉点上科学找到了自己新的成长点,技术取得了惊人的进步。真可谓是“它山之石,可以攻玉”。某一个专业(或学科)在自身发展中长期积累的经验、或者是为解决某些特殊问题所开发的专门方法,可能成为打开另一个领域中桎梏的金钥匙。粉体(或者颗粒)的制备、储存、输送方面的知识,气固两相的动量、能量、质量传递的规律,气固间化学反应和热力学方面的理论与实践经验……等等,都不再是哪一個工业部门或行业所专有,而逐步变为整个工业领域的共同财富。不管我们今天从东面观察它,还是明天从西面去测量它,谁也无法忽视科学的这种完整性、统一性。这就是我们撰写气固过程工程学的初衷和落脚点。

以此为基点来审视我国以往的高等教育,我们就不难发现,过去那种以产品或行业设置专业培养人才的专才教育模式,已越来越不能满足知识经济时代社会进步和经济发展对人才质量的基本要求,也无法适应商品经济条件下由于激烈的竞争所造成的人们职业性质的变迁。我们再也不能几十年一贯制地培养炼铁工程师、炼钢工程师、水泥工程师、日用陶瓷工程师、无机化工工程师……,使他们一毕业就可能“转业”。我们应该培养的是人格健全、基础雄厚、素质全面、适应性强的过程工程师(Process Engineer)。我们不能无视这种时代的需要。这也是本书编著的主要宗旨。我们深深地感觉到,在未来,那些能够应用基本理论和方法,从整体上把握整个复杂而又宽广的工程领域的人,更有辉煌的前景和开拓新领域的可能。

狭隘的专才教育制度导致了大学生们在大学期间学习的难度逐年递减的实际。以数学知识中的方程应用为例,基础课学偏微分方程,专业基础课用常微分方程,专业课只用到代数方程。这种状况很不利于学生所学知识的巩固和提高。在这本书中我们试图全面地使用已学过的各种基础知识,尽力将读者引向科学的前沿。

科学的方法是支撑科学前进的重要基石。科学的方法严格起来说可以分为两类,一类是逻辑学的方法,另一类是具体的技术操作方法。技术的方法是把握具体现象(或过程)的方法,如精确测量的方法、确定现象发生条件的方法,以及有效地观察过程的方法等。而逻辑的方法则是追本溯源地理解现象的方法,从现象发生的条件进行演绎过程和结果的方法,是尽可能精确抽象地说明和解释现象的方法。因而,技术的方法可能因行业不同而千变万化;而逻辑的方法则对任何行业都是通用的。故本书不着重介绍具体的技术方法,而主要致力于介绍气固系统的基本概念、基本理论、基本规律、数学推理方法和逻辑思维方法。至于具体的技术方法相信读者在工作实践中能快速掌握。

将气固过程工程作为一门学科来建立,对我们来说实感力不从心,因为我们本身的专业知识而有限。书中有关应用实例部分,仍然以硅酸盐水泥工业为主,这就如同让一个木匠来设计、组织、并建成一座钢混结构的新型摩天大厦一般,其中的遗憾自然在所难免。唯一的希望在于它是个开始,一个会逐步完善的开始。

本书在编写过程中,部分内容选用了南京工业大学周松林教授、叶旭初教授(博士)、李昌勇教授及西安建筑科技大学陈慧霞老师、程国坚副教授(博士)、曾汉侯副教授等参与的科研成果,在此表示感谢。

最后谨以此拙作献给多年来一直关心、支持和致力于本学科发展的各位老前辈们,尤其是时钧先生、吴中伟先生、郭慕荪先生等。

胡道和 徐德龙 蔡玉良

2002 年 10 月于南京

前 言

气固系统的加工和处理过程,广泛应用于化工、冶金、医药、能源等行业,更是硅酸盐水泥工业中最主要、最关键的工艺过程。这些过程除包括物理性单元操作,如流动、传热、传质、干燥、吸收、混合、过滤、分离、粉碎、沉降和粉体输送、分级、流化等等而外,往往还需要完成某些特定的化学反应如氧化、还原、燃烧、分解、合成、烧结等等。因此,借鉴当代化学工程理论研究的最新成果和方法,探讨硅酸盐水泥工业中有关气固系统的处理过程,即气固过程工程学,乃科技进步的必然。而气固过程工程实际上是化工工程学的一个分支,是按物态区分的一个大类。

事实上,任何化学过程都是在一定的条件下发生和进行的,也就是说与诸多物理因素有着密切的关系。因此,实际化学反应的进程与规律都是物理与化学两类因素的综合结果。长期以来,人们没有能认识各类反应过程的共同规律,从而使某些化工产品包括硅酸盐水泥的生产,只能依靠经验成为一种“技艺”,技艺的不断积累和提炼形成了“工艺”,但始终未能达到工程科学的水平。近年来,一方而是近代大型化的生产对这方面提出了紧迫的要求;另一方面也是由于过程工程学、化工单元操作的理论与实践有了长足的进展,使由工艺学向工程学过渡成为可能,也就是在过程上力求尽善尽美,直至实现最优化的目标。

过程工程学是以实际生产工艺过程中的工程问题为研究对象,既涉及到过程与化学反应,又涉及到设备特性和操作环境条件,因此是一门需要高度综合的近代工程理论。自从 20 世纪 50 年代末以来它已经取得了瞩目的成果,推动了生产技术水平的提高。但以气固系统为主要研究对象的气固过程工程尚在不断发展与完善的阶段。本书的编写是以推动该学科的发展为出发点,试图使其更加系统化、理论化、实用化。为读者提供该领域中的基础理论、科学概念和方法以及推广应用等知识。因此,有必要对如下问题作简要阐述。

1. 气固过程工程的学科范畴与主要内容

反应过程——为获取某种物质或产品而必须的均相、非均相反应动力学、热力学;

工艺过程——为达到目的而采用的生产工艺、设备与相应的操作条件;

传递过程——在整个工艺过程中,气固两相的行为,即流动、混合、分离、分级、传热和传质等;

工程控制——气固系统过程动态特性、数学模型、测量与控制最佳化等等。

2. 气固过程工程的研究目的

改进和强化现有的气固系统的生产过程和设备,挖掘生产潜力,降低消耗,提高效率;

开发有关的新技术、新设备、新工艺;

实现过程的最优化;

进一步完善有关气固过程工程的理论、方法和研究手段。

3. 气固过程工程学的研究方法

过程工程的研究是以“三传一反”(动量、能量、质量传递,化学反应)的理论为指导,深入分析,通过实验(包括实物模型实验和数学模拟实验)掌握规律,建立模型,直至应用于实际。

气固两相的作用和行为一般比较复杂,尤其是高温加工系统如硅酸盐水泥生产过程。完全依靠虚拟现实的方法(如仿真、模拟)困难还很大,尚需理论探索与实验研究并举。

对于复杂过程建立数学模型的一般步骤为:

(1) 明确建模目的、功能要求,对所涉及的过程细致的观测并进行理性剖析,通过已有的经验,分析主导事物发展变化的诸多矛盾和矛盾的主要方面及其影响因素的内在联系。

(2) 从理性认识出发,借助于已有的描述物质、能量变换的泛定方程(如三大守恒方程、各种化学反应方程、两相流方程),并针对实际过程建立定解方程和特殊的控制方程,形成既能反映实际情况,又能抓住事物本质的完整数学模型。

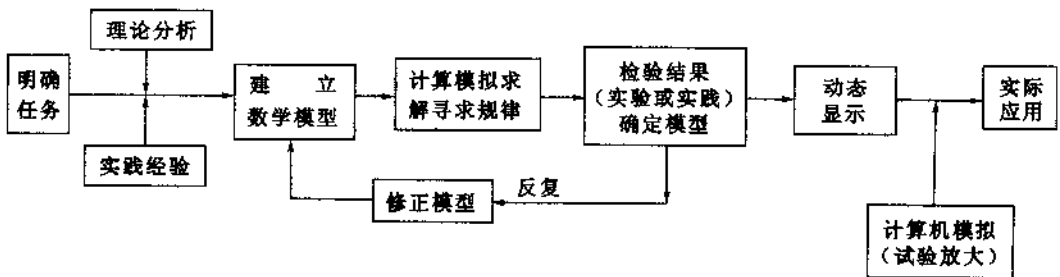
(3) 去伪存真、去粗取精,简化模型并编制计算程序。

(4) 调试程序,排除因程序设计上的缺陷,造成计算结果的偏差,完善程序结构。

(5) 将计算结果与实际(生产或实验数据)情况进行比较,找出差别的原因,合理修正某些参数乃至数学模型的整体结构,直至符合客观实际,并完成合理的可视化显示,实现认识上的飞跃。

(6) 计算机模拟放大,并应用于实际。

上述步骤以框图形式表示如下。



仿真模拟流程图

计算机模拟试验是当代科学的一大进展,它利用能说明过程实质的数学模型,在输入给定值后在计算机中求解所需的未知量,并对过程直接进行动画显示,从而可以明确各因素对过程影响的定量程度。所有的变量均可在模型适应的范围内以任意步长变化,因此实验的容量极大而速度又快。可以替代费时、费资甚至难以实现的真实实验工作。从而可达到改进、优化和模拟放大、推广应用的最终目的。

显而易见,上述过程的实施是建立在完善可靠的数学模型的基础之上,而建模是一项艰巨的工作,尤其是对某些复杂的工艺过程,因为人们对事物的认识是在逐步完善,往往还需要借助于必要的简化假设来完成。所作的假设,既要有利于求解,又不能失真,这是工作的关键之一,必须给以重视。

4. 气固过程工程的实际应用

近年来,在过程工程理论的指导下,针对硅酸盐水泥生产的实际问题,围绕着气固反应系统的某些典型生产过程,如水泥生料粉的预热、预分解过程、煤粉燃烧过程以及回转窑反应器的煅烧过程开展了一系列实用性研究,都取得了较为显著的效果,列举一些实例如下。

(1) 反求工程的研究

鉴于窑外分解窑的出现使水泥煅烧技术取得了突破性进展,各类气固反应器的开发应用,日新月异,尤其是水泥生料粉的预热和预分解设备类型,层出不穷,均取得了很好的实际效果。

我国花大量资金引进了许多这类设备,但对其特性和机制缺乏深入了解,为了做好消化吸收工作,在引进技术的基础上开发有我国自己特点的新设备,开展了一系列在过程工程学指导下的反求工程研究,如:

- ① NSF、SLC、MFC、RSP 四种分解炉运行特性的研究;
- ② 立筒预热器工作原理与结构改进的研究;
- ③ 生料悬浮预热器各级特性及合理匹配的研究;
- ④ 三通道喷煤管的流动特性的研究。

(2) 过程计算机模拟

① 预分解窑的计算机模拟

水泥窑外分解系统的计算机模拟是数学模拟和优化方法在水泥工业中应用的初次尝试,在建模过程中,为了避开高温煅烧的复杂动力学问题,采取给定约束条件并利用燃料作为可控变量负反馈调节的方法以及利用过程自适应的特点来保证约束条件的实现,并使模型具有动态的特征。与此同时,又作了若干合乎逻辑的假设,使求解成为可能。

② 水泥回转窑煅烧系统的计算机模拟

水泥回转窑作为气固反应器,涉及到气体流动、气固换热、生料分解、燃料燃烧、熟料烧成等诸多过程,采取分区、综合等方法,建立了多组数学模型。根据给定条件,可计算窑内气体、物料温度及组成的变化、窑皮形成、火焰分布等许多重要参数,给生产提供优化操作的依据。

(3) 开发性试验研究

用过程工程理论指导开发工作,可以较好地克服盲目性,有效地掌握过程设备的规律性,为提高生产水平创造条件。已开展的开发研究工作有:

① 喷旋预热器(SWP):基本思路是利用短管换热、旋流分离、外部返尘、多级串联原理,试图达到低阻高效、低框架、小体型的效果。

② 双喷旋预分解炉(DSW):利用喷旋流结合,以提高粉体在气流中的分散与均布;两级分别利用窑气与三次风的热能,充分进行气固热交换,达到更高的热效率。

③ 磷石膏循环复合式流化床分解炉(CFG):设计思路为复合式悬浮态、双气氛控制并具有循环系统的分解炉,以保证难于分解完全的 CaSO_4 能达到工艺要求的分解率与脱硫率等。

④ 高固气比预热器:利用气固换热效率随固气比增大而提高的理论而设计的,主要解决了最佳固气比的确定、实现高固气比的手段和工艺流程畅通的难题,从而使预热预分解系统的能耗降到最低。

(4) 测试手段与计算机程序软件的开发

为满足气固过程工程研究的需要,必须开发相应的测试手段和计算程序软件。如流场测定、浓度场测定、平均停留时间概率分布测定,温度场测定、反应速率和转化率测定的方法、仪器及新建数学模型编制计算机软件等。

目 录

1 气固系统的性状	1
1.1 气固接触过程与装备	1
1.1.1 气固接触过程与气固反应装备	1
1.1.2 流化床与流化技术	3
1.2 固体颗粒的性质	8
1.2.1 颗粒粒度及其分布	8
1.2.2 颗粒的形状及其表示方法	14
1.2.3 颗粒体的流动性	16
1.2.4 颗粒的粘附性	17
1.3 床层性状	17
1.3.1 静态特性—床层的结构特征	17
1.3.2 动态特征—床层的操作特性	19
符号汇总表	25
2 气固系统的流动	28
2.1 气体流动的类型和流场测定	29
2.1.1 流函数与势函数	29
2.1.2 各类简单流型的表达式	31
2.1.3 平面势流的叠加原理	33
2.1.4 绕柱流动	34
2.1.5 绕球流动	37
2.1.6 旋转流动	41
2.1.7 喷射流动	46
2.2 颗粒的流动模型与停留时间分布	55
2.2.1 颗粒在容器中的停留时间分布	55
2.2.2 典型的几种流动模型	60
2.2.3 停留时间分布曲线的应用	65
2.3 稀相悬浮体中气固流动模型	67
2.3.1 单颗粒在水平气流中的运动	67
2.3.2 单颗粒在垂直气流中的运动	71
2.3.3 单颗粒在回旋气流中运动	73
2.3.4 稀相悬浮体中颗粒群的运动	77
2.4 密相流化床中气固流动模型	80
2.4.1 基本观点	80
2.4.2 气泡相模型	81

2.4.3 乳化相模型	86
2.5 固定床中的气固两相流动	89
2.5.1 Ergun 方程及其推导	89
2.5.2 Ergun 方程的讨论	90
2.6 喷腾床中的气固两相流动	94
2.6.1 喷腾床的形成	94
2.6.2 最低喷腾速度	95
2.6.3 喷腾床中气体的流动	96
2.6.4 D. Von. Velzen 的新概念	96
2.6.5 喷腾床中固体的运动	99
符号汇总表	102
3 气固系统的传热	107
3.1 单颗粒与流体间的传热	107
3.1.1 单颗粒与静止介质间的传热	107
3.1.2 单颗粒在流动介质中气固换热	109
3.2 稀相悬浮体中颗粒群与气体间的换热	112
3.2.1 颗粒群在气流中逆向沉降时的气固换热	112
3.2.2 颗粒群随气流同向运动时的气固换热	114
3.3 流化床中气固相间的传热	122
3.3.1 实验方法和条件	122
3.3.2 流化床气固换热的关联式	125
3.3.3 鼓泡床模型给出的气固换热关联式	129
3.3.4 流化床与悬浮床中气固换热的类比	130
3.4 固定床中气固相之间的传热	131
3.4.1 当固定床中颗粒内部热阻可以不计时的气固传热	131
3.4.2 当颗粒内部热阻需要考虑时的气固传热	132
3.4.3 固定床中气固换热关联式	133
3.5 喷腾床中的气固相间的传热	133
3.5.1 喷腾床中温度分布	134
3.5.2 喷腾床中气固间换热关联式	134
3.6 床层与壁面之间的传热	135
3.6.1 各类床层与壁面间换热系数数量级的比较	135
3.6.2 影响壁面换热系数 h_w 的因素及因次分析	136
3.6.3 床层与壁面间的传热机理	1356
3.6.4 各类床层计算 h_w 的关联式	137
符号汇总表	142
4 气固两相间的传质与反应	145
4.1 单颗粒气固反应的基本原理	145
4.1.1 总的反应过程可以分解为如下几个阶段	146

4.1.2 单颗粒与流动气体间的传质	146
4.1.3 气体在固体中的孔扩散	151
4.1.4 吸附与化学反应	153
4.1.5 多孔固体内部的导热	156
4.1.6 气固反应中结构的变化	156
4.2 无孔固体的反应	158
4.2.1 无孔颗粒的收缩模型	158
4.2.2 未反应核收缩模型	163
4.3 多孔固体的反应	167
4.3.1 多孔固体完全气化反应	167
4.3.2 总体尺寸不变的多孔固体反应	174
4.3.3 多孔固体与无孔固体解的比较和相似性	177
4.3.4 考虑外部传质的影响	178
4.4 多颗粒系统的气固反应	179
4.4.1 固定床中的气固反应	180
4.4.2 流化床中的气固反应	183
符号汇总表	184
5 气固反应器	187
5.1 概述	187
5.1.1 气固反应器的特点	188
5.1.2 气固反应器的分类	188
5.2 固定床与移动床式反应器	188
5.2.1 水泥机械化立窑	189
5.2.2 链式燃烧炉	195
5.3 广义流化床反应器	197
5.3.1 流化床反应器的特点	197
5.3.2 广义流化床反应器的分类	198
5.3.3 水泥生料粉煅烧系统的简介	198
5.3.4 喷腾式反应器——FLS型分解炉	199
5.3.5 旋流床式反应器——RSP(Reinforced Suspension Precaliner)分解炉 ...	201
5.3.6 流化床式反应器 MFC(Mitsubishi Fluidized Calciner)分解炉	202
5.3.7 悬浮湍动床式反应器 Pyroclon 分解炉	203
5.3.8 复合式分解炉	204
5.3.9 综合评述	208
5.4 回转式反应器——回转窑	209
5.4.1 回转窑的流程与结构	209
5.4.2 回转窑的发展和变化	209
5.4.3 回转窑内气固两相的运动	209
5.4.4 回转窑内气固传热	211

5.4.5 回转窑内气固反应	212
5.5 气固反应器的理论与数学模拟	215
5.5.1 旋风式气-固反应器理论与数学模型	215
5.5.2 旋风式气固反应器及其系统热效率的理论与模型	223
5.5.3 高温热反应器——回转窑内传热过程研究及数学模型	238
5.5.4 回转窑内喷煤燃烧器的旋转射流流场的数值模拟研究	246
5.5.5 预热器系统组合性能参数分布的研究	250
5.5.6 预热器系统实际过程的反求及分析比较	253
5.6 气-固反应器的开发研究与工程设计	259
5.6.1 气-固反应器开发研究的内容与步骤	259
5.6.2 预热器技术的开发与研究	259
5.6.3 流化床式分解炉的开发设计及应用	265
5.6.4 CFG 磷石膏分解炉的开发研究	275
5.6.5 流化床水泥熟料烧结系统的开发	280
5.6.6 新型工艺设备的开发设计及所面临的几个问题	282
符号汇总表	283
参考文献	286

1 气固系统的性状

确保气、固、液多相过程安全高效运行,一直是过程工程学关注和研究的焦点。由于当前固体加工方法的改进,粉、粒体制备工艺的完善及经济性的提高,使许多以固体为原料的产品制造出现了新局面。尤其是气固之间,由于接触方式的多样性和接触表积极大的增加,不但使产品的性能有质的飞跃,而且使生产过程的效率大幅度地提高,从而大大推动了技术进步,成为当今材料工业发展的亮点之一。可以预见,气固系统的研究与工业设备的开发,潜力还很大。这一切都离不开对气固系统及相关装备基本性质和工作状况的研究。

1.1 气固接触过程与装备

1.1.1 气固接触过程与气固反应装备

不同的产品需要不同的工艺过程来完成,不同的工艺过程中气固两相的接触方式也不同。即使在一个工艺过程中的不同阶段,由于其肩负的任务不同,气固两相的接触方式也可能迥然不同。流化床是一个典型的气固两相接触的装备。

当流体通过筛板流动时,给定的固体颗粒堆积体(床层),可以出现如图 1-1 所示的典型流态化谱系。

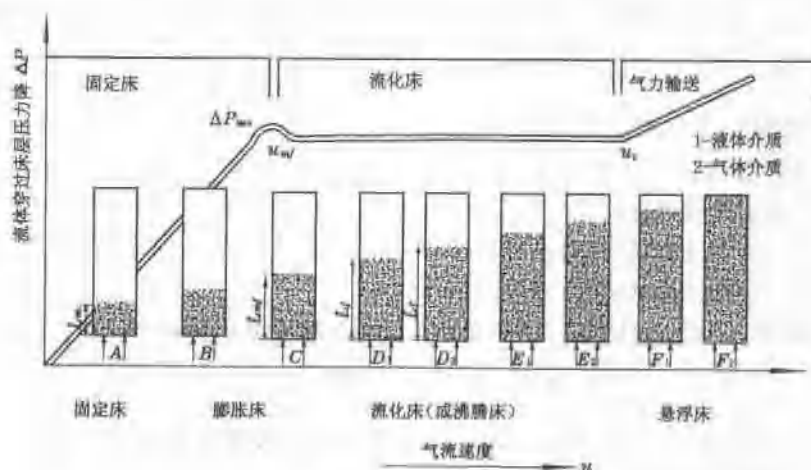


图 1-1 理想流化状态谱系

(1) 流体以较低速度流过颗粒堆积体——床层(Bed)时,颗粒本身不运动,流体从颗粒堆积间隙中流过。其特点是床层压降 ΔP 随风速 u 的提高而增大。此种接触状态称为固定床或填充床(Fixed Bed or Packed Bed)。

(2) 当流体速度增大到一定的程度,颗粒间的间隙加大,并开始有少量颗粒在一定区间内进行振动和游动,其数量随流速的增加而增多,床层也随流速的加大而不断膨胀,此种接触状

况称为膨胀床(Expansion Bed)。

(3) 流体速度进一步提高,使全部颗粒正好可以悬浮在上升的气流中,呈现完全自由运动(在一定范围内),此种流动状态称为起始流态化或临界流态化(Critical Fluidization)。其特点是:

- ① 颗粒与流体之间的摩擦力与其重力相平衡;
- ② 相邻颗粒间挤压力的垂直方向分量等于零;
- ③ 任一截面处的压降等于该截面上所受到颗粒与流体重量之和;
- ④ 此时床层的基本性状:空隙率(Voidage) ε_{mf} 、流速(Velocity) u_{mf} 、床高(Height of bed) L_{mf} 均为一定值(图中 C)。

(4) 当流速大于临界流化速度 u_{mf} 时,床层所表现的性状在一定程度上与流化介质的特性有关。其特点是:

对于液固系统 D_1 与 E_1 ,床层平稳而均匀膨胀,有稳定的上界面,称为散式流化床(Particulate fluidized bed)或称液固床。

对于气固系统 D_2 与 E_2 床层会出现很大的不稳定性,气相会相对集中形成鼓泡或呈现沟流现象,固体运动活跃,床层搅动剧烈,床层体积较临界状态增大很多,称为聚式流化床(Aggregative fluidized bed)。

散式与聚式流化床的差异,在于流体密度(ρ_f)与颗粒密度(ρ_s)的差值大小。

($\rho_s - \rho_f$)值大——聚式, $\rho_f \ll \rho_s$ (1 : 2000)

($\rho_s - \rho_f$)值小——散式, $\rho_f < \rho_s$ (1 : 2~8)

(可见,在高压下的气固系统中,随着 ρ_f 的增加,也有可能出现散式流化床,但十分罕见。)

区别两种流化床的判据,已经作过许多研究,下面两种方法比较常用:

- ① Wiehelm 与郭慕荪建议用表征惯性力与重力之比的弗鲁德数 Fr_{mf} 的大小进行判别:

$$Fr_{mf} = \frac{u_{mf}^2}{d_p g} \quad (1-1)$$

式中 d_p ——颗粒平均粒径;

g ——重力加速度;

u_{mf} ——临界流化速度。

当 $Fr_{mf} < 0.13$ 时为散式、平稳流化床;

当 $Fr_{mf} > 0.13$ 时为聚式、鼓泡流化床。

- ② Romero & Johanson 建议用四个无因次数相关准数来表达流化状态:

$$Fr_{mf}, Re_{dmf}, \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}, \frac{L_{mf}}{D_i}$$

式中 Re_{dmf} ——以颗粒尺寸 d_p 作为定型尺寸,以临界流化速度表达的雷诺数;

L_{mf} ——临界流化时的床层高度;

D_i ——流化床的有效内径。

通过试验,组合成如下关联判别式:

$$(Fr_{mf}) \times (Re_{dmf}) \times \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \times \left(\frac{L_{mf}}{D_i} \right) > 100 \quad \text{聚式流化床} \quad (1-2)$$

$$(Fr_{mf}) \times (Re_{dmf}) \times \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \times \left(\frac{L_{mf}}{D_i} \right) < 100 \quad \text{散式流化床} \quad (1-3)$$

由此可见,每一准数增大,均降低流化床层的稳定性,加大鼓泡的趋势。

此判据考虑因素比较全面,物理意义也比较明确,且更为可靠一些。总之,图 1-1 中 $C-D-E$ 区统称为密相流化床或简称流化床、沸腾床。

(5) 当流体速度超过固体的终端速度(Terminal Velocity) u_t 时,床层的上界面消失,物料被气流夹带(Entrainment)现象出现,直到全部颗粒被流体带走,此种状态称为分散相床(Dispersed phase bed)、稀相床(Diluted phase bed)或悬浮床(Suspended bed)直至气力输送(Pneumatic transport)。

在流化谱系中,严格地说只有密相流态化才属于流态化技术的探讨范围,有它独特的规律和理论基础,不乏专著论述。但对于气固系统而言,随着工业生产的需要,正在向谱系两端(固定床与悬浮床)延拓,这两类床层均与流化床有着密切的联系,需要理论上借鉴与移植。故此,本书讨论的出发点与理论基础,仍以密相聚式流化床作为起点。

需要说明的是,气固系统除上述三类主要床层之外,还可引伸出若干变种的床层,如移动床一是固定床的一种变型,其特点是颗粒与床体之间有整体的相对运动;又如喷腾床一是流化床的一种变型,床体有一缩口造成高速气流,使颗粒产生喷动作用,形成稀相与密相的组合;又如颗粒散落床,是悬浮床派生出来的,其特点是气固逆向流动。此外,由于气流运动的特征还有旋流床、湍流床、快速床之称,这些特殊床层大多数均已在工业上得到应用,也亟需开展探讨与研究,但不宜强行纳入流态化技术的范畴,故概括为气固反应装置。其包括范围可表示为图 1-2。

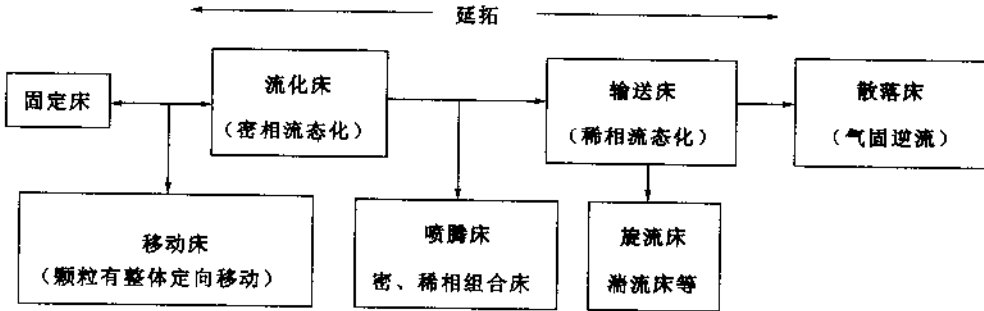


图 1-2 气固反应器的类型

上述各种床体,基本上是个固体颗粒的容器,但某些床层如固定床、移动床和流化床对床体内部结构尚有若干不同的要求。

1.1.2 流化床与流化技术

1.1.2.1 流化床的基本结构

流化床一般由圆柱形筒体(床)、配风板(俗称孔板)、加料口、排料口和排气管所组成(参见图 1-3)。固体颗粒层堆积在孔板上(称床层)。当风机鼓入的气体经风室通过孔板,均匀分布送入料层,使颗粒在被流化的同时,完成气固间传热、传质以及反应诸过程。固体颗粒不断由加料口输入,由排料口排出,保持固定的床层结构。为适应不同物料的不同工艺要求,孔板可以有多种形式。由于床层阻力较高,往往用罗茨风机或耶式风机(风压在 35000~50000Pa)供风。流化床要求固体颗粒粒度较均齐,过小的微粒在床层上部空间会被扬析,随气流经排风机

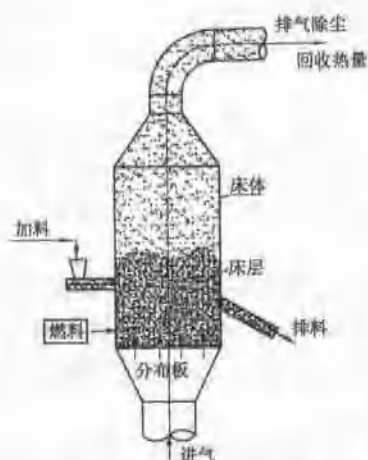


图 1-3 流化床典型结构

排出，必要时再串联收尘设备以回收被带走的小颗粒。

1.1.2.2 流化床的工作特征

理想流化床可以归纳出以下几个工作特征：

① 有一个明显的临界流化点和流化速度 u_{mf} ，当流速达到 u_{mf} 后，整个颗粒床层才开始流化；

② 流化床层的压降恒定；

③ 具有一个平稳的流态化上界面；

④ 流化床层的空隙率，在任何流速下，都具有一个代表性的均匀值，并不因测点的位置而变化；

⑤ 流态化的床层具有类似液体的性质，如具有浮力性质，容器倾斜时，床层表面会保持水平；将两个流化床连通，流化的颗粒会从高的床层向低的床层流动，直至两床层高度一致。固体颗粒还可以从开有小孔的容器中喷出，并像流体一样具有良好的流动性。利用这些类似流体的性质，可以设计出不同的气固接触方式，使众多的物理或化学过程快速进行。

1.1.2.3 流态化技术的优缺点

(1) 优点

① 传递过程快，由于流化床中颗粒与气体接触的表面大，床层湍动程度高，使气固之间传热、传质和化学反应速度大大加快。从某种意义上讲，流态化技术是强化固体处理过程最有效的方法之一。根据推测估计，通过流化床的气体湍动要比通过固定床时剧烈 1000 倍。实验还表明，在净空流速相等的可比条件下，流化床层与壁面间换热系数比固定床大 5~10 倍。

② 流化床层中的诸物理量易于均匀一致，如床层温度、浓度、反应的完全程度（即转化率）等都均匀。这对大量吸热、放热以及严格要求给定的物理量值的生产过程，具有非凡的优越性。

③ 通过床层的气体流速，可以在较大范围内波动而不增加功率消耗，使总的经济效果可能有所改善。

④ 填充率相对较高，传递过程又较快，因此可以在较小容积内处理大量固体物料。

⑤ 总体操作易于稳定，便于连续作业和自动控制。

(2) 缺点

① 不能进行真正意义上的逆流操作，因为不存在物理量梯度。

② 当颗粒的粒径分布较广时，飞扬较大，收尘负荷重。

③ 磨蚀比较严重，对设备和材料要求高。

④ 相对固定床而言，流化床的能量消耗较大。

⑤ 对某些物料，如易粘结、易粉化或粒度大小、密度大小相差悬殊的颗粒，或对操作条件敏感的物料会产生特殊流态化现象，如沟流（CHANNELING）和腾涌（SLUGGING），破坏流化状态，因此不宜采用流化床作反应器。

⑥ 气体和颗粒的运动状态很难确切描述，影响了对设备放大规律的掌握。颗粒返混（Back Mixing）严重，停留时间不均匀，使转化率、产率和热效率都受到影响。

基于以上分析，在选用流态化技术时，必须要有相应的其它技术与之相配合，或者采用多