

陈甘棠 王樟茂 编著

流态化技术 的理论和应用

中国石化出版社



291766

TQ 026 /

C 41

流态化技术的理论和应用

陈甘棠 王樟茂 编著



中国石化出版社

DU37/19

内 容 提 要

本书以流态化技术的实际应用为目标,以理论为基础,共分八章。第一章为绪论,第二章介绍作为基础知识的颗粒流化特性,第三章介绍液固流态化,第四章鼓泡流化床中提供有许多重要概念,份量较多,第五章高速流态化是较近发展的领域,第六章介绍颗粒的输运和捕集,其它多种流化床归入第七章中,而第八章则介绍若干重要工业技术开发的情况。

本书第二、第三章及第四章的4.4、4.5节由王樟茂编写,其余由陈甘棠编写。

本书可供化工工程技术人员及高等学校师生参考。



流态化技术的理论和应用

陈甘棠 王樟茂 编著

中国石化出版社出版发行

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码: 100029)

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092毫米 32开本 10印张,219千字 印1—3000

1996年5月北京第1版 1996年5月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-588-1/TQ·367 定价: 14.00元

序

流态化技术应用之广，发展之快，生产规模之大，久为人所共知；但因涉及到复杂的两相流动和化学反应，常使人有难知其所以然之感，于是便把它看成是以经验为主的一种技艺。然而曾几何时，在各国学者的大力研究下，基本原理已经阐明，体系和方法已经建立，而工业界的努力又提供了许多宝贵的实例，在理论知识和实践经验长期的相互激励下，流态化已形成成为一门工程科学，并已对生产实践起到巨大的推动作用。

笔者多年来从事研究和教育，浅有体会，常感需要有一本既说明原理、又不陷入繁琐的研究资料之中，既结合工业实际，又不追求面面俱到的材料，以供广大工程技术人员及高校学生参考之需。本书第一章对流态化技术作一总体的简述。第二章阐述颗粒的流化特性，因为它与流体同是系统状态的根本性依据。第三章是对液固流态化的简要叙述。第四章鼓泡流化床是重点，这不仅因为它应用得最早、最广，而且对它的研究也最长、最深，许多重要概念和方法均在这里产生和建立，巍然成为整个流态化技术的基石。第五章介绍湍动流化床与快速流化床，它们拓展了流态化的领域，是近年来的研究热点。第六章专门扼要介绍了颗粒的输运和捕集，它们也属两相流动，是流态化技术的重要组成部分。第七章对其它类别的一些流化床作了简介，以扩大视野。第八章则对流态化技术的若干工业应用作了示例介绍，阐述流态

化的具体应用以求举一反三。

由于流态化是极复杂的两相流动系统，其动态已难尽察，再加有化学反应存在时，浓度分布、温度分布及停留时间分布又与流体力学因素互相耦合，情况更趋严峻。此外，流态化是一跨行业的通用技术，处理的物料和加工目标多种多样，因此多学科，多行业分头并进，各领风骚，令人目不暇接，欲统一概括，篇幅既不允许，又谈何容易。好在我国在这一领域的研究已蔚然成风，与国际的交流亦较多，适当选择各方的贡献，加以报道，或能有所促进。但限于水平和时间，选择欠妥、挂一漏万，甚至谬误之处自亦不少，谨请读者们给予帮助指正，不胜感荷。

陈甘棠 王樟茂

1994年7月于杭州

目 次

第一章 绪论	1
1.1 沿革简述	1
1.2 流态化现象的区分	3
1.3 流态化技术应用概述	7
第二章 颗粒的流化特性	18
2.1 颗粒的基本物理性质	18
2.2 流化状态的识别	26
2.3 颗粒的分类及判别	39
2.4 粒度及粒度分布的影响	43
2.5 异类颗粒混合物的流化特性	50
第三章 液固流态化	60
3.1 流体力学行为	60
3.2 液固运动	65
3.3 热质传递	74
第四章 鼓泡流化床	82
4.1 概述	82
4.2 气泡运动及气泡理论	83
4.3 流化床中的混合	108
4.4 气体分布器	113
4.5 内部构件	124
4.6 自由空间中的气、固运动	134

4.7	流化床中的热、质传递	143
4.8	鼓泡流化床反应器的数学模型	160
第五章	高速流态化	185
5.1	概述	185
5.2	湍动流化床	186
5.3	快速(转相)流态化	193
第六章	颗粒的输运和捕集	210
6.1	颗粒在立管中的流动	210
6.2	提升管中的气流输送	215
6.3	气-固输运系统的状态图	220
6.4	旋风分离器	226
第七章	其它流化床	238
7.1	喷动床	238
7.2	喷动-流化床	243
7.3	浅床及多层床	245
7.4	外力辅助的流化床	251
7.5	三相流化床	257
第八章	工业流态化技术的开发	269
8.1	石油流化催化裂化	269
8.2	乙烯氧氯化制二氯乙烷	276
8.3	丙烯氨氧化合成丙烯腈	280
8.4	聚烯烃的生产	286
8.5	萘氧化制苯酐	299
8.6	流化床反应器的开发和放大	302
	符号表	307

第一章 绪 论

1.1 沿革简述

流态化 (Fluidization) 这一名词是泛指固体颗粒在流体 (气体或液体) 作用下的流动现象。其实人类早已利用风簸水选的方法分离各类不同尺寸和密度的混合物了, 如谷粒扬场和砂里淘金等等都是。在自然界中, 如沙漠迁移、河流中的泥沙夹带也分别是气-固及液-固的流态化现象。然而作为工业规模的一项技术受到重视, 则开始于 1926 年德国的 Winkler 气化炉 (图 1-1.1)。

该炉燃煤造气, 高达 13m, 床层截面积 12m^2 , 虽然由于耗氧量高, 飞灰中碳损失量大而逐渐被效能更高的烧油的气化器所代替, 但近一、二年间许多煤燃烧和煤气化加工技术的开发实发源于此。

最重要的突破是在第二次世界大战期间, 为了解决对汽油的需求而在美国开发成功了石油流化催化裂化技术。在此以前曾采用固定床反应器, 但催化剂表面很快积炭而失活,

不得不频繁地进行反应-再生(烧炭)的切换操作, 致使

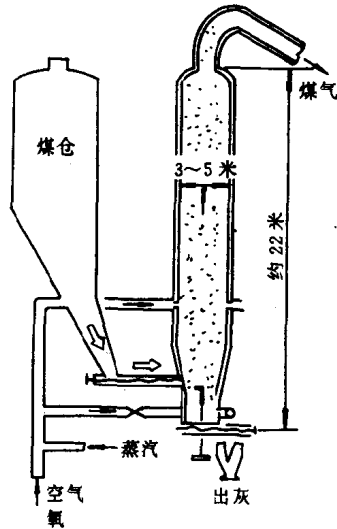


图 1-1.1 Winkler 煤气发生炉

实现大规模的生产十分困难。当时在 W.K.Lewis 及 E.R.Gilliland 教授的倡导和实验室研究的基础上，迅速在 1942 年发展出了第一代工业流化催化裂化（Fluid Catalytic Cracking，简称 FCC）装置（即上流式的 I 型装置），几经改进到 50 年代成为下流式的 IV 型装置（图 1-1.2），从而获得了广泛应用。这一技术的特点就是将催化剂极易因积炭而失活的强吸热的裂解反应与烧掉积炭的强放热的再生反应分别在两器（反应器及再生器）中进行，利用流态化技术使固体粒子在两器内循环，达到了热量自身平衡和连续生产的目标。其后又发展出了种种类型的流化催化裂化装置，直到近一、二十年间由于高活性的沸石催化剂的出现而又被提升管式催化裂化装置所取代。有关流化催化裂化装置的进一步问题，后面还将专门加以叙述。

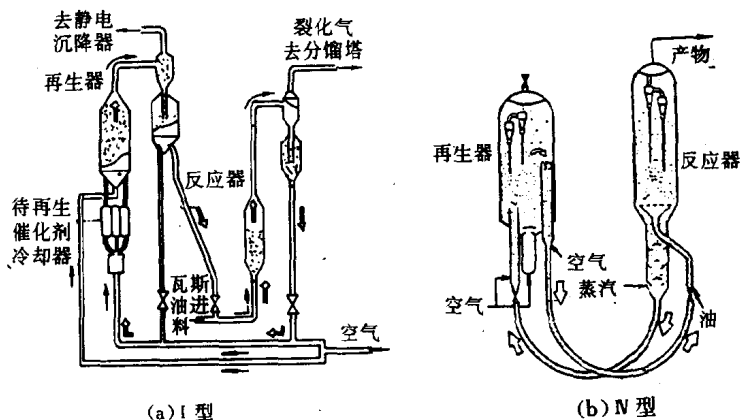


图 1-1.2 I 型及 IV 型催化裂化装置

FCC 的技术成功后又陆续在萘氧化制苯酐，乙烯氧氯化制二氯乙烷及丙烯氨氧化制丙烯腈等工业生产中开花结果。不久前供电厂用的煤的流态化燃烧炉（Fluidized Bed

Combustor, 简称 FBC), 因其效率好且污染低而成为工业上的热点, 其它如植物废料及工业废弃物的燃烧, 废气和废水的处理等方面亦有不少采用了流态化技术。

在冶炼工业方面, 如硫化矿的焙烧、钛矿及铀矿的氯化处理、水合物的脱水、氧化物的还原、矿物的热分解以及选矿和湿法冶金等方面也都有不少应用流态化技术的例子。

在非化学反应的应用方面, 如颗粒物料的气力或液力输送、湿颗粒的干燥等等都是常见的例子。此外, 还有利用惰性固体颗粒具有高热容量的特性, 把它作为传热介质或携热剂, 向装置内的物料进行加热或冷却。它比液体的载热体能承受更高的温度, 如石油的焦化及烃类的热裂解方面就有应用。

随着流态化技术在工业应用上的日益扩展, 基础性的研究蓬勃兴起, 文献如潮, 双边和多边的国际会议频频举行, 并已有不少专著出版, 在此不及备述^(1~15)。

1.2 流态化现象的区分

随着通过颗粒层流体速度的增大, 床层将如图 1-2.1

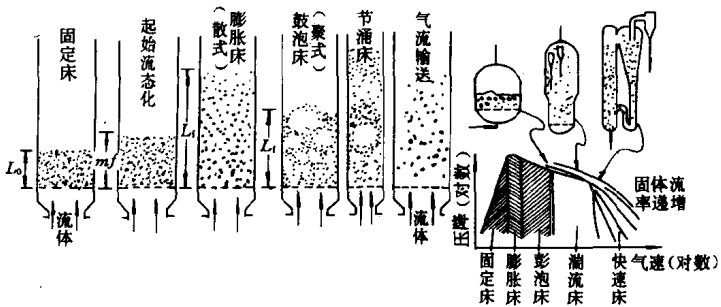


图 1-2.1 流态化的各个阶段及其与气速的关系
所示经历固定床、膨胀床……湍流床、快速床直至稀相气流

输送等各个阶段。如床层直径小，则在气速增大时还会形成节涌床。这些流型的变化，关系重大，因此需要加以明确认识，这里先作一些初步的叙述，进一步的细节将在以后各章中陆续阐明。

众所周知，在固定床时，流体（液体或气体）流经固体颗粒间的空隙而粒子并不浮动起来。一旦流体的表观（或称空塔）流速达到某一数值时，颗粒开始出现游动，这一表观流速称为起始流（态）化速度（又称最小流化速度，以 U_{mf} 表示）。随着流速的进一步增加，在液体的情况下，颗粒间的距离将进一步拉开，床层出现膨胀，虽然从微观来看，各个局部的空隙率未必相同，但总的说来颗粒的分散还是比较均匀的，故称为均匀流化床或散式流化床；不过对于气体的情况来说，如颗粒较粗，则一旦气速超过了 U_{mf} ，超过的那部分气量就会以气泡的形式通过；形成气泡相及乳化相（指气泡以外的床层区域，粒间也有气体流动，但不形成气泡）的两相结构，这种流化床又称聚式流化床，以与散式床相区别，由于床层内含有了气泡，因而床层也有所膨胀，但比起液体时的情况来，床面的起伏更加频繁和剧烈；只有颗粒甚细的情况下方类似于液体流化床那样表现出一定程度的均匀膨胀，直到表观气速进一步增大到超过起始鼓泡速度 U_{mb} （又称最小鼓泡速度）时才出现气泡。显然， $U_{mb} \geq U_{mf}$ ，其差别的大小主要取决于物料的粒度和性质。实际操作的流化床，其表观操作气速（ U_0 ）均大于 U_{mf} 及 U_{mb} ，通常将比值（ U_0/U_{mf} ）称为流化数，选用流化数的大小需根据过程的性质而定。上述的这类流化床中因有许多气泡通过故称为鼓泡床（Bubbling bed）。

实验室及中间试验装置由于床层直径较小，因此当气速

大到一定程度时会由于气泡直径长大到接近于床径而产生节涌 (Slugging)，这就使流化床的放大增加了一些问题，但在工业规模的大床中，这种现象不致发生。

鼓泡床的操作范围颇广，但如实际气速增加到终端速度 (Terminal velocity) u_t 时，颗粒就被气流所带走，因此这一速度便是一般鼓泡流化床理论上的操作极限。事实上，由于床层中的颗粒尺寸并不相同，所以只有那些终端速度等于或小于操作气速的小颗粒才会被夹带出去，这种现象称为扬析 (Elutriation)，扬析的结果可使这些颗粒最终全部从床层中被吹走。

实验的结果还表明气泡在上升途中会聚并而增大。当大到一定程度时就会变得不稳定而破裂，这种过程造成了床层内压力的波动，通常颗粒愈粗这种波动愈剧烈。对于细颗粒的床层，气泡小，最大稳定的气泡尺寸亦小，床层的波动亦较小。当气速达到一定程度时，压力波动近于消失，床层可认为进入了湍流状态，故称为湍流流化床 (Turbulent Fluidized Bed，称简 TFB)，这一气速便称湍流气速 U_c 。气速在 U_c 以上操作为湍流床，湍流床由于有较好的均匀性和强的热、质传递能力，因而在工业上应用颇广。

尽管操作气速超过终端速率 u_t 后，颗粒会被带走，但如将被带走的颗粒加以捕集并使之重新返回床中，就能连续不断地操作，成为循环流化床 (Circulating Fluidized Bed 简称 CFB)，如图 1-2.2 所示。如颗粒量少，气速足以把全部颗粒分散悬浮于其中，就成为稀相的气流输送；如颗粒量多，而带出的颗粒又不断循环回来，则因气流的颗粒夹带量是有限度的，故床内仍能保持有一定的密相料层，只是由于气速甚大，气体不再成单个的气泡，而是转变为连续的气

流，但在气流中包含着许多成簇的颗粒聚集体，俗称颗粒簇 (Cluster)。它们在向上运动的过程中也会经历分散 - 凝并的变化。这种流化状态被称作快速流化床 (Fast Fluidization)，这一名词通用已久，学术界对“快速”两字终嫌缺乏机理性的概念和形态学的含义，因而常有异议。如果考虑到在快速流化区间，所有气体从分散的气泡逐渐过渡到连续的气流，而所有颗粒则从被看作连续相的床层逐渐转变为不连续的颗粒簇和分散的单颗粒，则气、固两相分别从分散相及连续相互转变的流速范围可称之为转相流化区，而开始进入这一区域的流速可称为转相流化速度 (Phase transition velocity)。在转相流化区，由于气、固间的这种剧烈变动，因而传质及传热速率高，气、固接触时间短，并均近于平推流，因而对于许多快速的强放(吸)热反应

甚为合适。

另一种称作喷动床 (Spouted Bed) 的装置是专门用来处理大颗粒 (如谷粒等) 的，其特点是床底呈锥形，以利于颗粒的循环，气体从锥底中心喷入，将颗粒夹带而上，到达床面后形成喷泉一样而使气、固分离。

除以上所述各种流化状况外，在垂直管、水平管、斜管或弯管中颗粒在流体影响下实现的密相流动亦属于流态化的范围，因此流态化是固体颗粒在流体

(气体或液体) 作用下运动现象的总称。在工业装置中，除

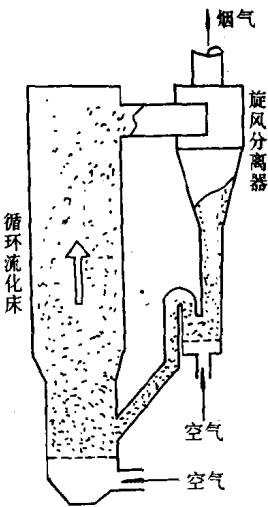


图 1-2.2 循环流化床
燃煤装置

床层外，还由于存在着气体分布器、内部构件（如冷却管、挡板）、自由空间（或称分离空间）、气-固分离器以及颗粒输送管等部件，因此各部分的流化状态往往可以各不相同。

1.3 流态化技术应用概述

流态化技术的本质特点有：

(1) 能使固体颗粒在装置（包括管道）内象液体般自由流动。这就使得对固体进行连续加工成为可能。目前每小时输运量在百吨以上的装置亦非罕见。

(2) 由于颗粒与流体间的相对动作频繁而剧烈，因而传热和传质的效率很高。

(3) 在气泡的作用下流化床中的颗粒亦四面八方运动，类似于在搅拌状态，这就使得床层内的温度除近床壁处外，基本均一。

(4) 颗粒的热容量大，故可以利用它作为热载体，对于高温的情况，尤为合适。

(5) 由于颗粒运动的情况近于完全混合，因此在有颗粒连续进出的装置中，颗粒的停留时间有较宽的分佈。

(6) 颗粒运动影响到气体发生返混，使气体沿路的浓度梯度减小，从而使传质和化学反应的推动力有所减小，气体的停留时间分布变宽。

(7) 由于颗粒的高热容量及其返混，故能防止局部过热或过冷，因此在爆炸范围内的气体组成下操作或燃烧低热值

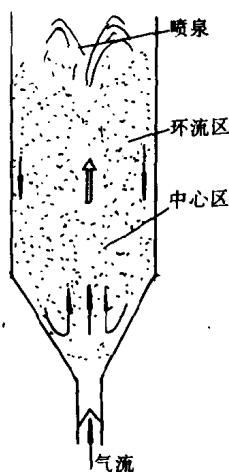


图 1-2.3 喷动床

的物料就成为可能，且操作较稳定。

(8) 因使用的颗粒尺寸小而且具有大的比表面积，有利于流-固两相间的传递。如为多孔性颗粒（如多数的催化剂）则因粒度小，微孔短，孔内扩散较易，因而内表面的利用率很高。

(9) 由于固体颗粒间相互撞击摩擦而生成细粉并被气流带走，故需要高效的捕集设施，以减少经济损失和对环境的污染。

(10) 装置的部件会被颗粒运动逐渐磨耗，甚至造成换热冷管的磨穿，使冷剂流入床中，而使催化剂失活。

(11) 由于无机械运动部件，故能胜任苛刻的反应条件。

上述各点，有些是优点，有些是缺点，对具体的过程孰重孰轻，就得具体分析了。

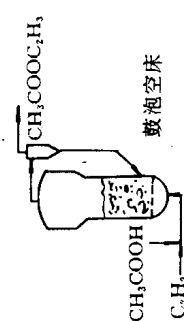
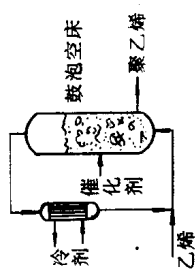
目前工业上流态化技术的应用颇为广泛，不论是物理的或化学的过程，不论是催化的或非催化的过程，也不论是常压或非常压的过程都有应用。表 1-3.1 中列出了若干工业流态化生产过程的例子。表中的装置形式和操作条件并不是唯一的，不同的专利均有其一定的特色，详细的情况可以从专利资料中查找。

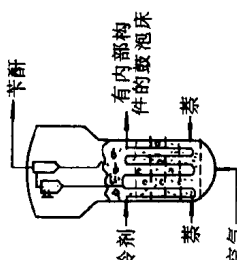
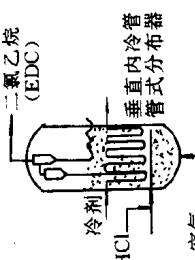
表 1-3.1 中只是按各种类别举了个别例子，此外流态化技术还用于颗粒物料的输送、分选，气体的吸附，作为热载体供热或除热，颗粒浸渍或涂膜等等，这里就不再列举了。

如上所述，流态化技术的对象多种多样，其装置及操作条件亦相应而异，与其一一阐述，不如考虑它们同属流态化，自亦有其共同的基本点和理论背景。对此有了充分理解，则不论对何种情况都能得心应手地加以运用了。

流态化技术的基本问题可归纳为：

表 1-3.1 流态化技术的工业应用举例

过 程	装 置 形 式	操 作 条 件 及 说 明
合成醋酸乙烯		<p>催化剂: 醋酸锌—活性炭(100~700μm) T: 170~220$^{\circ}$C P: 常压 空速: 100~500 l/h 醋酸转化率: 30~50 % 空时收率: 1~2 t/($m^2 \cdot d$)</p>
气相法聚乙烯		<p>催化剂: Cr 系或 Z-N 型催化剂 T: 90~100$^{\circ}$C P: 2.03 MPa 乙烯单程转化率: 2~5 %</p>

过 程	装 置 形 式	操 作 条 件 及 说 明
苯氧化制苯酐		催化剂: $V_2O_5-K_2SO_4-SiO_2(0\sim300\mu m)$ $T: 330\sim380^\circ C$ $P: 0.1MPa$ 表压 空速: $300\sim500 l/h$ 空床气速: $0.3\sim0.6 m/s$ 空时收率: $\sim 3t/(m^2\cdot d)$
乙烯氯化制 二氟乙烷		催化剂: $CuCl_2-KCl-Al_2O_3(0\sim150\mu m)$ $T: 220\sim250^\circ C$ $P: 0.3\sim0.4MPa$ 表压 空床气速: $0.3\sim1.6m/s$ 乙烯转化率: $96\sim98\%$ EDC收率: $>96\%$