

流 态 化 工 程

[日]国井大藏、[美]O.列文斯比尔编著

华东石油学院、上海化工设计院等译

石 油 化 学 工 业 出 版 社

本书内容包括四大部分。第一部分介绍流态化技术在工业上应用的概况。第二部分叙述流化床层的基本特性,以及床层与接触表面的传热、夹带和扬析现象,固体颗粒在流化床层中的时间分布和粒度分布等。第三部分提出一种鼓泡床模型理论;并用这一理论来解释气体通过床层的流型,和计算流化床层中的传热、传质速率及催化反应速率。最后一部分指出如何把以上所叙述的知识和资料用于设计,介绍流化床固体颗粒循环系统,流化床传热、传质和干燥操作,以及流化催化反应器和气-固流化床反应器等的设计计算原理。

参加本书翻译工作的有华东石油学院、上海化工设计院,还有大连工学院、南京化工学院、兰州化学工业公司化工机械研究所。译稿最后由华东石油学院统一审校。

本书供石油、化工、冶金、轻工等工业部门的工程技术人员参考。

Daizo kunii Octave Levenspiel

FLUIDIZATION ENGINEERING

John Wiley & Sons, Inc. 1969

*

流 态 化 工 程

华东石油学院、上海化工设计院等译

*

石油化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

石油化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $830 \times 1168^{1/32}$ 印张17 字数444千字 印数1--8,750

1977年12月第1版 1977年12月第1次印刷

书号15063·化56 定价2.10元

毛 主 席 语 录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

古为今用，洋为中用。

26038/22

序 言

流态化的发展历史是颇不平坦的。1942年它随同催化裂化在工业上获得巨大成功，从此便进入其它许多领域。它的应用有多次辉煌的成就，也有不少次显然的失败，这就推动了对它的研究工作，以致关于这个课题，现在已有几千份研究报告。遗憾的是，在报道的文献中还存在着大量的矛盾说法和紊乱不清之处，发表了无数推荐的关联式，都很少成为统一的理论。大多数研究是在小型设备中进行的，尽管设计人员清楚知道，大小型床层二者的性状悬殊，以致外推到工业规模是极不可靠的，在反应器的应用上尤其如此。因此，工业设计十分着重过去的实践经验，或者细心地进行放大，同时选用大的安全系数。因此，在设计中还是以经验成分为主，很少有试用基本原理来进行设计的，而且为数众多的研究结果，看来对设计也并不十分有用。所有这些表明，情况是相当不能使人满意的。

1963年我们两人开始就流态化进行通信。我们都感到，实际设计应更紧密依据基础研究。不久我们一致认为，为了弥合这个缺口，首先需要的是对床层中气固接触的一个合理的表示方法。我们探索了若干方法，并且每种都用文献中所报道的结果对其进行验证，最后采用了一个较为简单的描述方法，我们称之为鼓泡床模型。这个模型能解释许多种所观察到的动力学和流动现象，其方程式适用于放大和设计目的，而其推算结果已由国井在工业应用中验证过。1964年初我们便决定编写本书，以鼓泡床模型为其主要内容。

我们作为作者的首要责任之一，当然是决定本书要包括哪些，但更重要的还是舍去哪些。我们这本书并不企图包罗万象，对文献中已有充分叙述的某些题目只略为涉及，或全都略去。在选材

中我们主要考虑是否实用。特别着重实用，便是本书题名为流态化工程的理由。

我们在编写中，尽量用理论来试将杂乱无章的孤立的事实和关联式整理成序，以有助于组织材料，并便于理解。例如，对于床层和器壁的热传递，我们用一种统一的表示方法将迄今所提出过的看来相互矛盾的各种理论归纳在一起；建立一个考虑扬析和带出的各个方面的模型；并且提出描述物理和化学变化的速率、固体颗粒的长大和缩小的速率和催化剂减活和再生速率的许多动力学模型。

为了有助于说明文中内容，我们编有许多例题（68个）。还有152个习题。这些题目将文中概念加以运用，可供参考。

编写本书时并未考虑特定对象。不同读者会对不同部分感到有参考价值。首先我们指望，从事有关气固接触过程的设计和工业化试验工作的人员，会觉得后半部分特别有用。其次，研究人员将会对深入探索所提出的概念上的发展感到兴趣。这些将有助于进一步研究有关问题。特别是鼓泡床模型的引伸、修正和完善值得继续探讨。

国井大藏

列文斯比尔

1968年10月

目 次

符号

第一章 绪论	1
流态化现象	1
流化床的类似液体的性状	3
和其他接触方法的比较	5
流态化用于工业操作的优缺点	8
流态化操作的类型	10
提纲	11
第二章 流化床的工业应用	15
历史梗概	15
物理操作	21
输送	21
细粉的混合	22
热交换	23
金属表面涂敷塑料	24
干燥和分选	25
颗粒长大和升华物料的凝聚	28
吸附	28
合成反应	30
乙烯的氧化	30
氯代烷	31
苯二甲酸酐	32
索亥俄法制丙烯腈	33
费歇-托洛普许合成	34
其它应用	35
烃类裂解和重整	37
流化催化裂化	37

流化催化重整	41
流化焦化	41
热裂解	42
干馏和气化	45
油页岩和煤的干馏	45
煤和焦炭的气化	46
炭的活化	47
煅烧	48
石灰石、白云石和磷矿石的煅烧	48
水泥熟料	49
气-固反应	50
硫化矿石焙烧	50
氧化铁的还原	52
第三章 流化床的总体性状	57
固定床——单一粒度的颗粒	57
固定床——具有粒度分布的固体颗粒	60
临界流化速度、终端速度和流化床的压降	64
流化型式、气泡形成和分布板的重要性	73
流化床的空隙度	83
夹带分离高度	86
粒度分布随高度的变化	87
流化床的粘度和流度	88
功率消耗	93
第四章 密相床中的气泡	101
单个上升气泡	102
戴维森模型	104
戴维森模型的引伸和说明	111
来自单一气源的气泡流	116
普通鼓泡床中的气泡	119
气泡相的鼓泡床模型	122
鼓泡床模型的说明	126
第五章 密相鼓泡床中的乳化相	132
实验结果	132

单个颗粒的运动	132
固体颗粒的翻转速率	133
固体颗粒的停留时间分布	137
固体颗粒运动的扩散模型	138
气泡引起的混合	141
乳化相的鼓泡床模型	143
用鼓泡床模型解释固体颗粒混合数据	147
固体颗粒的翻转速率	147
固体颗粒进出尾涡的交换系数	148
固体颗粒的轴向分散	149
固体颗粒的横向分散	150
第六章 通过流化床的气体流型	157
实验结果	157
激发-响应法研究	157
气体流动的扩散模型	163
被固体颗粒捕获的气体对轴向分散系数的影响	165
理想混合级模型	166
双区模型	167
气体交换的鼓泡床模型	170
气体交换的定义	170
交换系数的计算	172
用鼓泡床模型解释气体的混合	177
气体的径向分散	178
气体的轴向分散	180
气体的停留时间分布	182
鼓泡床模型提要	184
第七章 流体与固体间的传质和传热	188
传质实验结果	188
由鼓泡床模型所得的传质速率	194
固体颗粒在气泡、气泡晕和乳化相区域之间的分布	194
传质系数的定义	197
传质系数的计算	198
传热实验结果	203

由鼓泡床模型所得的传热速率	212
第八章 鼓泡床中气体的转化	221
以前研究的结果	221
双区模型	221
应用时龄分布的模型	230
由鼓泡床模型所得的催化转化率	236
反应速率的定义	236
乳化相气体向下流动时的转化率	239
乳化相气体向上流动时的转化率	242
接触效率	243
用于连续反应	244
气泡尺寸的控制、挡隔和放大	245
第九章 流化床与表面间的传热	259
实验结果	259
影响传热率的变量	260
容器壁上的传热	262
对浸没管的传热	265
对浸没物体的传热	268
床层-器壁间传热的理论	270
阻力存在于器壁上的一层薄膜的理论	271
阻力来自接触中的乳化相的理论	271
兼考虑薄膜和乳化相阻力的理论	280
各种理论的比较	282
机制 I 和机制 III 的比较	284
机制 II 的作用及其与机制 I 的比较	285
机制 III 和机制 IV 的比较	285
评价	289
第十章 夹带和扬析	296
以前的研究	297
在夹带分离高度或高于夹带分离高度时的夹带量——单一粒 度的固体颗粒	297
在夹带分离高度或高于夹带分离高度时的夹带量——具有 粒度分布的固体颗粒	298

低于夹带分离高度时的夹带量	301
扬析	306
密相流化床夹带模型	310
夹带模型在扬析上的应用	315
小结	315
第十一章 流化床中固体颗粒的停留时间分布和粒度分布	320
粒度不变的颗粒	320
进料为单一粒度、单层和多层床、夹带	320
进料为宽粒度分布、夹带	323
一些简单的引伸	326
粒度变化的颗粒	330
通用性能方程式的推导	330
单一粒度进料的性能方程式	332
宽粒度分布进料的性能方程式	334
颗粒长大和缩小的速率公式	336
第十二章 循环系统	349
确定所需的固体颗粒循环量	350
减活催化剂的循环量	350
满足所需除热速率时的循环量	356
高松密度混合物的流动	362
粘附滑移流动中的压降	364
充气流动中的压降	365
垂直管向下卸料	365
水平管中的流动	369
流化床侧面孔口的流出	371
容器至容器的充气流动	372
低松密度混合物的流动（气力输送）	378
水平流动时的最低气体流速（沉积速度）	378
垂直流动时的最低气体流速（噎塞速度）	381
倾斜管中的最低气体流速	382
气力输送中的压降	383
弯管中的压降	387

循环系统的组成	391
两个容器之间的压差	401
实用问题	401
第十三章 物理操作的设计	413
设计所需的资料	413
间歇操作	414
传热	414
传质	417
固体颗粒的干燥	420
连续操作	423
传热	423
传质	434
固体颗粒的干燥	439
流化床内热气体的骤冷	451
第十四章 催化反应器的设计	456
小型反应器得到的资料	456
中间试验反应器	457
中间试验装置和工业生产装置设计方案的确定	458
没有固体颗粒循环的反应器的设计计算	462
减活催化剂	469
有催化剂循环的反应器-再生器系统的设计计算	473
第十五章 非催化气-固反应器的设计	478
固体颗粒转化的动力学模型	479
固体颗粒粒度保持不变的连续反应模型	480
固体颗粒粒度保持不变的未反应核模型	480
缩小颗粒情况下的反应速率	482
选择正确的模型和正确的速率控制步骤	484
无气体反应物的固相反应	486
均匀粒度固体颗粒的转化	488
单层流化床	488
多层流化床	490
小结	491
气体固体两者的转化	494

非均匀粒度固体颗粒的转化	502
粒度变化的固体颗粒	503
长大的颗粒	504
缩小的颗粒	504
固体颗粒粒度变化的反应器-再生器系统	506
非催化气相反应	514

第一章 绪 论

流态化是一种使微粒固体通过与气体或液体接触而转变成类似流体状态的操作。这种接触方法有一些不寻常的特征，而流态化工程所要研究的就是，如何利用这类特性并使之得到很好的工业应用。

流 态 化 现 象

使一流体向上通过一个微细颗粒的床层，如图 1 所示。当流速低的时候，流体只是穿过静止的颗粒之间的空隙，称为固定床。

随着流速的增加，颗粒互相离开，并可看到有少量的颗粒在一定的区间内进行振动和游动，称为膨胀床。

速度再升高达到使全部颗粒都刚好悬浮在向上流动的气体或液体中。此时，颗粒与流体之间的摩擦力与其重量相平衡，相邻

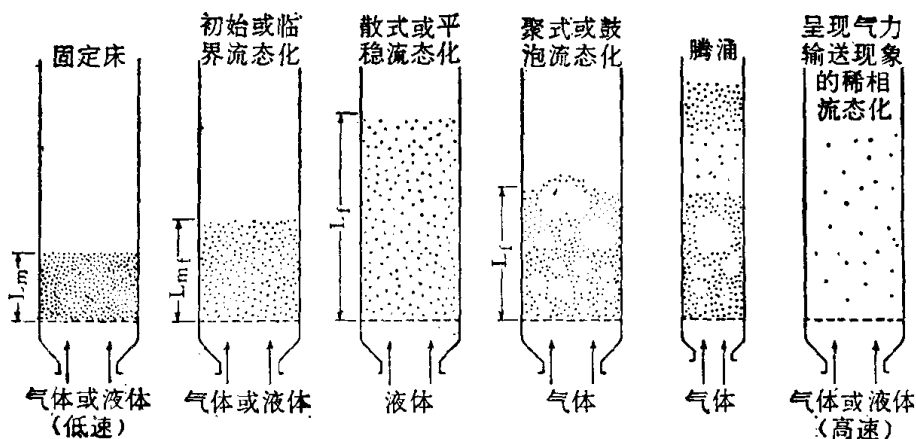


图 1 固体颗粒层与流体接触的不同类型

颗粒间的挤压力的垂向分量等于零，而且通过这床层的任一截面的压降大致等于在该截面上颗粒和流体的重量。床层可认为是刚刚流化，并称为初始流化床，或者称为处于临界流化状态的床层。

在液-固系统中，流速增加到临界流态化以上，通常导致床层平稳而渐增的膨胀。总体流动的不稳定性受到阻抑并且很小，在正常情况下观察不到大规模的鼓泡或不均一性。这样的床层称为散式流化床，均一流化床，平稳流化床，或者简称为液体流化床。

气-固系统则一般表现为迥然不同的情况。随着流速增加超过临界流态化，就出现很大的不稳定性，发生鼓泡和气体沟流现象。在更高流速下，搅动变得更激烈而且固体颗粒的运动变得更活跃。此外，床层的膨胀并不较其临界流态化时的体积大很多。这样的床层称为聚式流化床，非均一流化床，鼓泡流化床，或简称为气体流化床。有少量罕见的例子，液-固系统不能平稳地流化，而气-固系统却不发生鼓泡。目前这类床层只是实验室里理论上可探索的特例。

只要床层有一个十分清晰的上界或床层上表面，气体和液体流化床都可认为是密相流化床。但是流速高到足以超过固体颗粒的终端速度时，床层面上界就消失，可以观察到夹带现象，固体颗粒随流体从床层中带出。这种情况称为呈现气力输送固体颗粒现象的分散相、稀相，或贫相流化床。

兹简短地探讨鼓泡床中的流化质量。虽然仅仅固体和流体的性质就能决定产生的是平稳流化还是鼓泡流化，但是还有许多因素影响固体混合的速率、气泡的大小及床层不均一的程度。这些因素包括床层几何尺寸，气体流速，气体分布板的型式，以及容器内部构件，如筛网、挡板和热交换器等。

例如腾涌这种现象就受容器几何尺寸很大影响。气泡在上升中聚集并长大，并且如果床层高度足够，气泡最终会大到足以布满整个容器截面。此后气泡之上的那一部分床层，就犹如被活塞

作用向上推动。颗粒从上面纷纷下落，最后腾涌消失。大约即在此时，另一个腾涌正好形成，而且这种不稳定的上下往复运动又重复出现。通常不希望发生腾涌，因为它使夹带问题加剧，而且对于物理的和化学的两个方面的操作来说，都使床层性能降低。在细而高的流化床中，腾涌现象特别严重。

与其他气-固接触方法比较，气体流化床具有某些独特的和有用的性能，而液-固系统就达不到同样这种功效。因此，实际上流态化所有重要的工业应用，都是气体流化系统。由于其独特的性状和实用价值，本书将主要讨论气体流化系统。书中将叙述其特殊的性能，并说明如何能很好加以应用。

流化床的类似液体的性状

密相气体流化床看起来非常象沸腾的液体，并在许多方面表现出类似液体的性能，如图 2 所示。例如，一个大而轻的物体可很容易地推入床层，而一松开，它就弹起并浮在表面上。当容器倾斜时床层上表面保持水平，而且当两个床层连通时，它们的床面自行找平。还有，床层中任意两点间的压差大致等于这两点间床层静压头。这种流化床也具有象液体那样的流动性能。固体颗粒可从容器壁上的小孔喷出，并可象液体那样，从一个容器流入另一容器。

利用这种类似液体的性能，可以设计出不同的气体与固体的

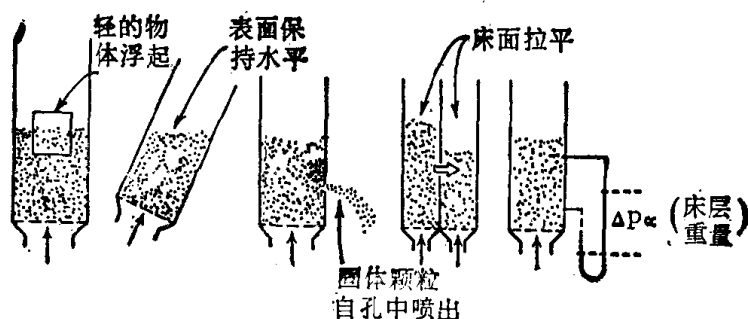


图 2 气体流化床的类似液体的性状

接触方式。如图 3 所示，这些接触方式中有：在装有几层多孔板和下流管的容器中多层逆流接触；在分隔床中交叉流接触；以及在两个床层之间的固体循环系统。

为了深入了解一种接触方式的工作情况，下面对两个流化床

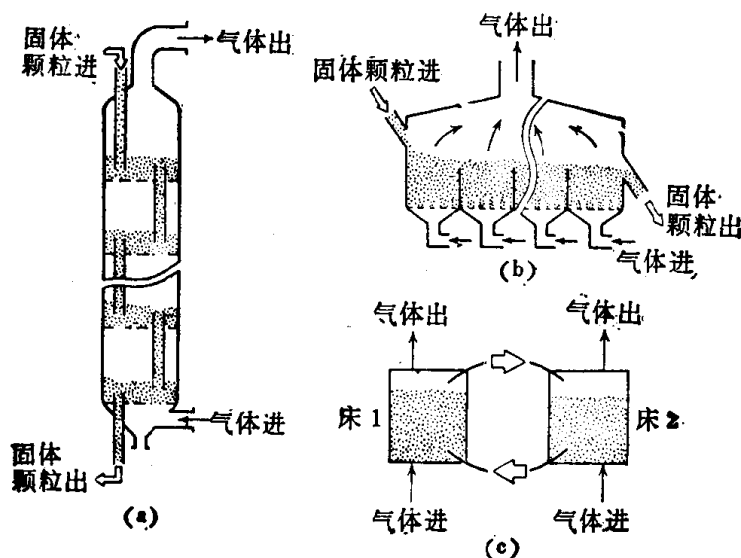


图 3 气体流化床的接触方式

(a) 逆流接触；(b) 交叉流接触；(c) 两床层间固体循环系统

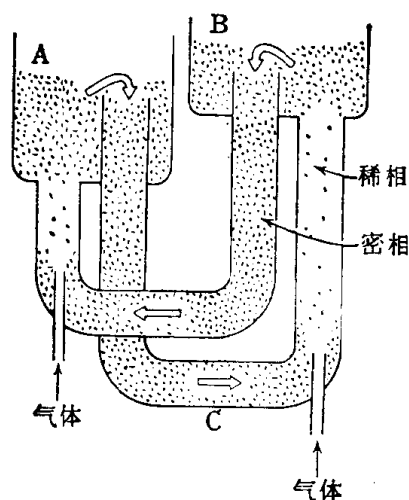


图 4 固体颗粒稳定循环系统的操作原理

之间的固体循环系统作较详细的描述。其示意图见图4，更为真实的示于表3。如果将气体注入连通流化床A和B的C管中，并且床层和管中的固体颗粒都处于流化状态，那么就很容易证明管子两端的静压差就是使颗粒从A流到B的推动力。用两条这样的管子就可以得到一个完整的固体颗粒循环系统。混合相流动越快，摩擦阻力就越大，而且就象在任一这类水力系统中一样，循环速率可以由摩擦阻力与前述压差之间衡算而得到。循环的控制，或者是靠改变系统对流动的摩擦阻力，比如用滑阀，或者是靠改变连通管不同部分中流动混合物的平均密度，即一种控制压差的办法。

要使循环操作及其他固体流动系统得以顺利进行，固体颗粒必须全部处于动力悬浮状态，因为颗粒的任何沉积，都会阻塞管线并使操作完全停止。因此这类系统必须加以精心设计：注气口大小必须适当，管线安装要避免有容易发生沉积和堵塞的地方，并且可靠的开工和停工程序必须加以特别注意。

象图4那样的循环系统广泛地用于固体催化的气相反应。催化剂平稳并连续地在反应器和再生器之间流动。由于固体的比热大，固体颗粒在反应器和再生器之间迅速流动，就能把大量的热从一处传递到另一处，因此这些循环的固体颗粒可以最有效地用于控制系统的温度。实际上，在高度吸热和放热反应中，固体颗粒循环速率的选定，不仅以催化剂减活的速率为依据，而且也是作为控制反应器和再生器中有利温度的一种手段。这类操作通常要进行自动控制。

固体颗粒这种类似液体的性状，以及流态化能使固体快速、容易和经济地进行输送，并使气-固之间密切接触等，或许是使流态化得以在工业上应用的最重要的性质。

和其他接触方法的比较

图5所示为流化床以及固定床、移动床和气力输送，与返混流接触及活塞流接触的理想状态的对比。在所示的多数接触型式