

流 态 化

〔英〕 J. F. 戴维森 D. 哈里森 编

中国科学院化工冶金研究所
化学工业部化工机械研究院 等译

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书是 J. F. 戴维森和 D. 哈里森组织世界上十九位从事流态化研究的著名科学家共同写成的。它汇总了流态化研究工作的基本进展。

书中从流化床的气泡现象出发,对流化床反应器的数学模型、传热、传质、混合、扬析以及大型流化床的行为等作了详细介绍。此外,还对挡板化床、密相颗粒流动、稀相输送以及流态化系统的流变特性和实验技术作了较为全面的论述。

本书可供科研、设计人员以及大专院校师生和从事生产实践的技术人员参考。

J. F. Davidson D. Harrison Ed.

FLUIDIZATION

Academic Press, London and New York, 1971

流 态 化

[英] J. F. 戴维森 D. 哈里森 编
中国科学院化工冶金研究所 等译
化学工业部化工机械研究院

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 4 月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1981 年 4 月第一次印刷	印张: 19 7/8
印数: 0001—2,600	字数: 525,000

统一书号: 15031·334

本社书号: 2091·15—2

定价: 3.65 元

译 序

目前,流态化技术已在我国化工、石油、冶金、电力等工业中得到了广泛应用。在流态化技术应用中存在的较为突出问题是流化床反应器的放大。它也是近年来国际上普遍注目的课题。自六十年代以来,为了解决流化床的放大,世界各国的研究者都将其研究重点放在气泡现象及两相模型的基础上,并从气泡现象出发对流化床反应器的数学模型以及传热、传质、混合、扬析等作了进一步研究。与过去的纯经验放大不同,经过近年的研究,可以说在一定程度上已有可能对流化床反应器进行理论计算了,这主要应归功于对气泡现象所作的基础研究。

为了满足国内对流化床反应器科研、设计等方面的迫切需要,由中国科学院化工冶金研究所、化工部化工机械研究院、中国科学院太原煤炭化学研究所、浙江大学、上海化工学院等五个单位共同协作翻译了本书。

本书是英国剑桥大学的戴维森(J. F. Davidson)和哈里森(D. Harrison)组织世界上十九位从事流态化研究的著名科学家共同写成的,它汇总了流态化研究的主要成果和进展,特别是介绍了气泡现象以及用气泡现象的基础理论来解决流化床设计、强化等方面的问题,对于现代的实验技术也以专门的章节进行了详细介绍。因此,本书对于进一步发展我国的流态化技术有一定参考价值。

为了本书能更为紧凑以及解决我国当前流态化技术发展的迫切问题——流化床反应器的研究、设计、放大和强化,根据各有关单位的建议,我们删去了原书中有关流化床的一些分枝应用方面章节,使本书的内容紧紧围绕着反应器。

由于我们水平不高,翻译中可能会有错误,敬请读者给予批评

指正。

本书译校者如下：

- | | | | |
|---|---|------|-------------------|
| 前 | 言 | 李佑楚译 | 郭慕孙校 |
| 第 | 一 | 章 | 吴鸿恩、郭 铨译 郭慕孙校 |
| 第 | 二 | 章 | 杨益中、黄竞存译 张先润、秦霁光校 |
| 第 | 三 | 章 | 葛世培译 杨贵林校 |
| 第 | 四 | 章 | 严子纲译 郭慕孙校 |
| 第 | 五 | 章 | 顾其威译 秦霁光校 |
| 第 | 六 | 章 | 崔世纯、张先润译 秦霁光校 |
| 第 | 七 | 章 | 戴干策译 秦霁光校 |
| 第 | 八 | 章 | 乐慧慧、吴志泉译 陈敏恒校 |
| 第 | 九 | 章 | 何素英、陈洪生译 秦霁光校 |
| 第 | 十 | 章 | 何顺生译 秦霁光校 |
| 第 | 十 | 一 | 章 王高升译 谭天恩校 |
| 第 | 十 | 二 | 章 陈维柟译 谭天恩校 |
| 第 | 十 | 三 | 章 刘月初译 杨贵林校 |

前 言

由于六十年代流态化文献的迅速增加,显然,一个作者现在难以单独完成一部内容广泛的流态化专著。的确,流态化已获得了一种莎士比亚评论的特征:文献资料数量之巨大是一辈子也读不完的。基于这种认识,我们邀请十个国家的著名研究工作者来撰写有关章节。在准备手稿的过程中,文献资料进一步有所扩充,写完的全部著作比我们最初考虑的要长得多。然而,我们希望这本书——它汇总了十年来研究工作的进展情况——能使下列读者有所裨益。

(1) 研究工作者会觉得本书是很有参考价值的。

(2) 尽管大多数作者是学术工作者,然而,所论述的范围是广泛的——从理论到纯粹的实践。因此,这本书在工业上,对过程设计工程师和企业管理人员都是有用的。当前,流态化技术已被广泛采用;我们相信,这种应用还将扩大。对流态化基本原理了解得越多,就更便于对这些应用进行评价。

(3) 对于讲授流态化的教师来说,我们估计,流态化的最新进展对他们将是有益的。现在,基本理论已有庞大的体系。同时,我们的经验表明,无论是单独地或者作为流体力学课程的一部分,流态化已成为化学工程中大学课程的重要组成部分。

关于流态化,最引人入胜的问题之一就是流态化两相理论的真实性和真实性,特别是关于气泡现象。这是近年来着重研究的课题,也是本书若干章的基础内容。虽然,两相理论未能得到普遍的承认,但在许多情况下,似乎与实际很相近。在高速条件下——超过床层单个颗粒的自由沉降速度——颗粒床层的行为,如象极细颗粒床层的行为一样,仍然是不清楚的。但是,其基本方法——原理上常以两相理论为基础或作了某些修改——已成功地用于解决几年前

完全是凭经验的一些问题,例如,热交换、浓相流动、三相流态化和喷泉床。

作者们只负责自己章节的内容。对于这么多作者——地理上彼此相隔很远——章与章之间的某些重复实为在所难免。但是,对于重要的物理量,力图用共同的符号求得统一。

有疑问的读者可直接给作者们写信询问,但是,我们——作为编者——欢迎来信批评。

这本书的国际特征是预先考虑好了的。我们的作者来自澳大利亚、加拿大、丹麦、德国、英国、意大利、巴基斯坦、荷兰、美国和苏联。各国研究工作者之间的通讯联系往往不象人们所期望的那样方便,因而,我们希望这次出版将有助于避免重复性的工作,并有助于传播世界各地的发现。我们特别高兴地铭记着致力于使这本书能以出版而辛勤工作的人们所给予的慷慨而密切的合作。

我们也衷心地感谢帮助进行大量编辑工作的人们:打印编辑资料的散桑(M. Sansom)女士;编制作者索引和打印条目索引的洪(P. Humm)夫人;对于初期编辑工作给予大力帮助的霍夫曼德(S. Hovmand)博士,以及帮助编制条目索引的阿维德塞(M. M. Avedesian)先生。最后,我们要感谢我们出版者的友好帮助的态度,他们在长期的编排过程中表现出令人钦佩的毅力。

戴维森(J. F. Davidson)

哈里森(D. Harrison)

1971年8月于剑桥

目 录

第一章 起始流态化和散式流态化系统	
..... 理查森 (J. F. Richardson)	1
I. 引言	2
II. 压降-流速的关系	3
III. 起始流态化和临界流态化速度	7
IV. 散式相的膨胀——液-固系统	11
V. 散式相的膨胀——气-固系统	18
VI. 固定床和流态化床特性的比较	23
VII. 散式系统中流体和颗粒的混合	30
VIII. 摘要和结论	36
IX. 符号	37
X. 参考文献	38
第二章 气泡的实验性质..... 罗 (P. N. Rowe)	42
I. 引言	42
II. 观察气泡的方法	43
III. 气泡的一般性质	57
IV. 气泡引起的颗粒运动	76
V. 伴有气泡的气体流动	96
VI. 符号	110
VII. 参考文献	111
第三章 中型和实验室规模的高气速流化床反应器：气栓流 的影响.....	
霍夫曼德 (S. Hovmand) 和戴维森 (J. F. Davidson)	113
I. 引言	113
II. 流化床中气栓的上升	117
III. 节涌流化床的行为	138
IV. 气栓和散式相之间的传质	149

V.	节涌流化床反应器	162
VI.	实验室数据用于流化床的放大	175
VII.	符号	178
VIII.	参考文献	181
第四章	流态化系统的流变特性..... 许格尔(K. Schügerl)	185
I.	引言	185
II.	适合于流态化系统流变测量的实验方法	186
III.	流态化系统剪切图的测定	188
IV.	从剪切图求流动方程	199
V.	流态化系统的流动方程及其意义	202
VI.	流态化系统的粘度	205
VII.	符号	215
VIII.	参考文献	217
第五章	混合..... 波特(O. E. Potter)	219
I.	引言	219
II.	开拓性实验研究——聚式流态化	221
III.	理论研究——聚式流态化	235
IV.	理论模型的参数	247
V.	用实验法进行的示踪研究	268
VI.	混合与化学反应	287
VII.	散式流态化中的分散作用(主要是液体流化床)	298
VIII.	符号	305
IX.	参考文献	307
第六章	流化床催化反应器.....	
	考尔德班克(P. H. Calderbank)和图尔(F. D. Toor)	313
I.	引言	313
II.	数学模型的发展	317
III.	汇合模型	323
IV.	实验结果与气泡汇合模型的比较	336
V.	模型的讨论	343
VI.	“贯穿流动”与气泡内的“扩散”之间的相互影响	344
VII.	“放大”问题	351
VIII.	结论	355

IX.	符号	356
X.	参考文献	358
第七章	流化床中的传质.....比克 (W. J. Beek)	362
I.	引言	362
II.	流化床与壁或内件之间的传质	364
III.	流化颗粒与流体间的传质	371
IV.	相离析对流化床中传质的影响	381
V.	流化床中带有化学反应的传质	389
VI.	符号	399
VII.	参考文献	401
第八章	流化床中的传热.....盖尔佩林 (N. I. Gelperin) 和爱因斯坦 (V. G. Einstein)	403
I.	引言	403
II.	流化床和表面之间的传热	404
III.	固体颗粒和流体间的传热	447
IV.	符号	463
V.	参考文献	466
第九章	挡板流化床.....哈里森 (D. Harrison) 和格雷 (J. R. Grace)	472
I.	引言	472
II.	基础工作	473
III.	讨论	496
IV.	符号	497
V.	参考文献	498
第十章	扬析.....李伐 (M. Leva) 和温 (C. Y. Wen)	502
I.	引言	502
II.	颗粒分层现象: 扬析条件	503
III.	终端速度	504
IV.	输送分离高度 (TDH)	505
V.	操作和系统变量的影响	509
VI.	颗粒扬析的机理	511
VII.	提出的关联式	517

VIII. 符号	524
IX. 参考文献	525
第十一章 流化密相的流动性质…马塞米拉 (L. Massimilla) 527	
I. 引言	527
II. 通过孔口和非圆形开口的流动	530
III. 通过喷嘴的流动	541
IV. 在垂直管内的流动	546
V. 符号	550
VI. 参考文献	552
第十二章 稀相系统…温 (C. Y. Wen) 和伽里 (A. F. Galli) 554	
I. 引言	554
II. 水平固-气输送的流动特性	558
III. 固-气混合物稀相悬浮体的输送	560
IV. 固-气混合物的密相输送	569
V. 固-气混合物的垂直输送	574
VI. 固体和气体流量的测量	577
VII. 关于固-气悬浮体压缩机设计上的意见	580
VIII. 输送固-气混合物所需的功率	583
IX. 符号	585
X. 参考文献	587
第十三章 大型流化床的一些问题	
..... 怀特黑特 (A. B. Whitehead) 590	
I. 引言	590
II. 大型气体分布器的性质	591
III. 大型流化床的气泡行为	607
IV. 大型流化系统的固体行为	614
V. 多层反应器	622
VI. 符号	624
VII. 参考文献	624

第一章 起始流态化和散式流态化系统

理查森 (J. F. Richardson)

威尔士斯旺西大学化工系

I. 引言	2	统	18
II. 压降-流速的关系	3	A. 气-固系统形成散式流 态化的流速上下限	18
A. 理想流态化特性	3	B. 加压操作的影响	19
B. 实际流态化与理想流态 化的偏差	4	C. 气-固和液-固系统膨胀 特性的比较	22
C. 床层支承和流体分布器 的影响	6	D. 极细粉末的起始流态化	22
III. 起始流态化和临界流态化 速度	7	E. 填料-流态化床的膨胀	23
A. 形成良好流态化的因素	7	VI. 固定床和流态化床特性的 比较	23
B. 由固定床向流态化床的 转变	8	A. 低雷诺数	23
C. 临界流态化速度的定义	9	B. 颗粒自由沉降速度与临 界流态化速度的综合关 系	26
D. 临界流态化速度的计算	10	C. 根据流速预测床层的膨 胀	28
IV. 散式相的膨胀——液-固系 统	11	D. 实验确定指数 n 值的含 义	29
A. 床层膨胀的特性	11	VII. 散式系统中流体和颗粒的 混合	30
B. 颗粒形状的影响	13	A. 流体的混合	30
C. 高密度颗粒	14	B. 颗粒的混合	32
D. 基于修正的斯托克斯定 律的一个关联方法	16	VIII. 摘要和结论	36
E. 混合粒度流态化床中颗 粒的分级	17	IX. 符号	37
V. 散式相的膨胀——气-固系 统	18	X. 参考文献	38

I. 引 言

流体在低流速下向上流过颗粒床层,形成固定床,如果流速较大,颗粒就会在流体中悬浮,形成流态化床。若流速很高,颗粒就会随流体从系统中带走。

若流体速度增大到高于流态化床的临界速度,将出现两种情况:不是床层连续膨胀,以致颗粒间平均距离加大;就是过量流体以气泡形式通过床层,实际上形成两相系统。这两种类型分别称为“散式”流态化和“聚式”流态化。大体上,液-固系统及仅限于一定流速范围的颗粒很细的气-固系统呈散式流态化。所有其它气-固系统和一些固体密度大的液-固系统都呈聚式流态化。杰克逊(Jackson, 1963),皮格福特(Pigford)和巴伦(Baron, 1965)以及默里(Murray, 1965)对颗粒浓度均匀流态化床中低扰动的稳定性作了理论研究,指出气-固系统中小气泡的长大速率通常比液-固系统中的大。

哈里森(Harrison)等人(1961)提出,所形成的流态化类型与流态化床中能存在的最大稳定气泡的大小有关。如果气泡内气体的循环速度(近似等于气泡上升速度)超过颗粒的终端速度,颗粒就被吸入气泡尾部,气泡因此趋于销毁。由于气泡上升速度随气泡体积的增大而增大,且实际上与流态化床性质无关,最大稳定气泡的大小随流体中颗粒终端沉降速度的增大而增大。若气泡过大,比如说10倍于颗粒的直径,气泡就很明显,呈聚式流态化,但如果气泡的大小与颗粒的直径具同一量级,气泡与间隙中的气体就不再有所差别,流态化表现为散式。因此,气-固系统多数表现为聚式流态化,而液-固系统多数为散式流态化。

威海姆(Wilhelm)和郭慕孙(Kwauk, 1948)提出用弗鲁特(Froude)数 $\frac{U_m^2}{gd}$ 作为流态化类型的判据;大体上弗鲁特数大于

1为聚式流态化,而弗鲁特数小于1为散式流态化。

这一章将考察散式流态化的特性。前面所述过于简化了的事实，一般仅适用于理想系统。以下我们将较详细地探索不同流速下床层压降和空隙度的变化；我们也要知道散式流态化存在的条件范围，因此要能预测起始流态化的最小速度（临界流态化速度 U_{mf} ）和床中出现气泡的最小速度（临界鼓泡速度 U_{mb} ），即散式流态化速度的上限。

增大流体向上通过固定床的速度就能形成流态化床。这样在标志固定床向流态化状态转变的临界流态化速度下，可望把固定床的流动关系式用于流态化床。在其上限，如果床层充分膨胀到空隙度接近于 1，床层实际上由单个、孤立的悬浮在流体中的颗粒所构成，因此描述流态化床的任何关系式，在空隙度为 1 时可外推到单颗粒。在中间的状态下，散式流态化床水力学上相似于沉降的悬浮物。流态化床中颗粒没有净移动，而是被向上流动的流体支承着，而沉降悬浮物中颗粒连续向下移动，流体仅有的净移动是来自于沉降颗粒对流体的置换。这意味着沉降悬浮物和散式流态化可能具有类似的流速-空隙度的关系。

流态化床具有固体与流体之间迅速传热和传质的有利条件：固体颗粒一般混合很快并床层界面传热系数很高。因此，流态化床常用作热交换器或化学反应器，特别为那些温度控制要求严格和大量吸热或放热的系统所采用。因此就有必要知道流体和颗粒的流动型式。流态化床给人以高度湍流的印象。但通常接近临界流态化速度的床层和气泡床的散式相中流体的流动是层流。仅当散式床高度膨胀和用大颗粒时，流动才不再是层流。

II. 压降-流速的关系

A. 理想流态化特性

若流体垂直向上通过颗粒床层，其初期压降 Δp_B 将随流体速度 U 的增加而增大（见图 1.1）。压降和流速之间具有一般固定床的关系，例如对细颗粒床可用卡曼-科泽尼（Carman-Kozeny）方程，

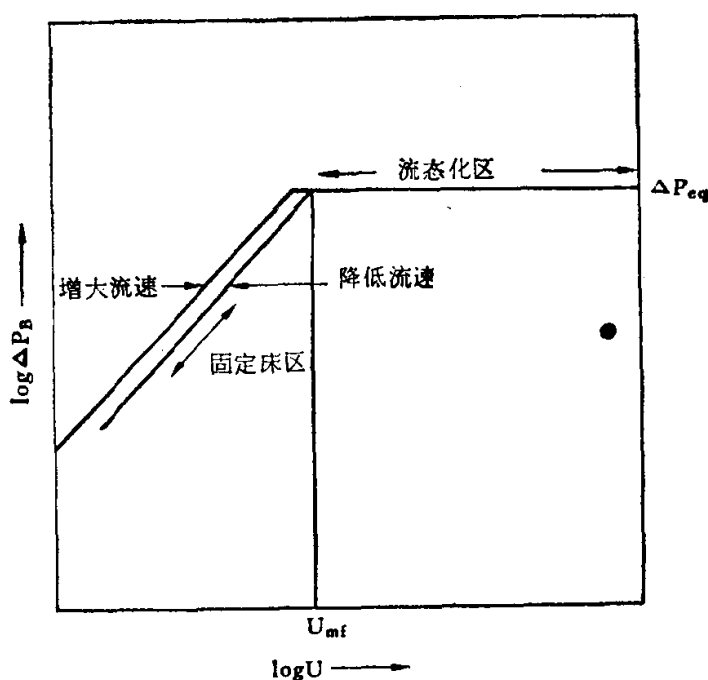


图 1.1 理想的压降-流速曲线。

且有线性关系。当流速达到某一数值，摩擦压降等于单位床面积颗粒的浮重 (Δp_{eq}) 时，再稍微增加流速，床中颗粒就会向上微动。颗粒重新排列使流体流动的阻力降低，且通常床层空隙度将增大。而在理想流态化系统中，压降保持不变 (Δp_{eq})。进一步增加流速，床层仍继续膨胀，直到最后只有颗粒互不接触，在流体中自由运动，才能使之进一步分散。到此阶段床层正好流态化；即所谓“起始流态化点”，此时的流体表观速度称为“临界流态化速度”， U_{mf} 。若流体速度再进一步增加，床层压降仍保持不变。假如现在逐步降低流速，直至“起始流态化”点之前，压降仍保持恒定。进一步减低流速，压降也随着逐步减小，但压降-流速曲线通常将比逐步增大流速时得到的曲线要低，因为在没有振动的情况下，床层空隙度近似于起始流态化点的空隙度 ϵ_{mf} 。

B. 实际流态化与理想流态化的偏差

以上描述系理想状态，实践中是不可能真正做到的，而从实际

压降!

与理想性状的偏差，可以找出影响流态化性能的因素。主要的偏差如下：

(a) 流速接近临界流态化速度时，在压降还没有达到单位床面积浮重之前，一般床层即有所膨胀。假如固定床层原来是很紧密的，这种效应尤为明显。此外，由于随机填充床层中局部透气性的差异，两段曲线之间是逐渐过渡的，而不是突变。

(b) 由于颗粒相互联锁的倾向，颗粒会部分架桥，尤其是对小直径的床层而言，会产生床层和器壁之间的摩擦。因此，床层压降可能大于理论值，使曲线呈现出一个小小的特征性的“峰值”，如图 1.2 所示。

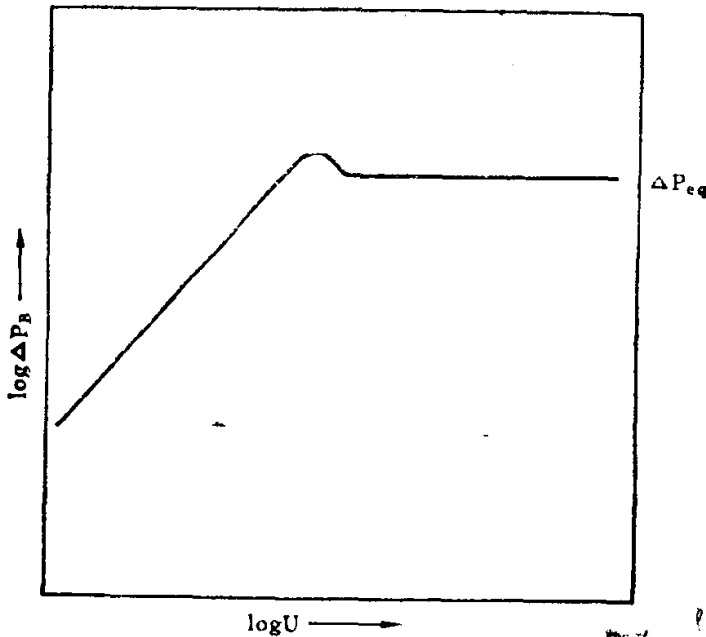


图 1.2 颗粒联锁对压降的影响。

(c) 流态化床的非均匀结构使流体选择性地流过，造成床层中固定床和流态化床的同时共存。床层可能呈现均匀流态化的外观，但是部分床层重量却由分布器承受，结果床层压降低于计算值。此种现象在气-固系统比液-固系统中更多见。床层重量完全由流体所承受的最小流速 (U_{f_0}) 示于图 1.3。

(d) 流态化床中可能存在某种循环流动，致使器壁产生与床

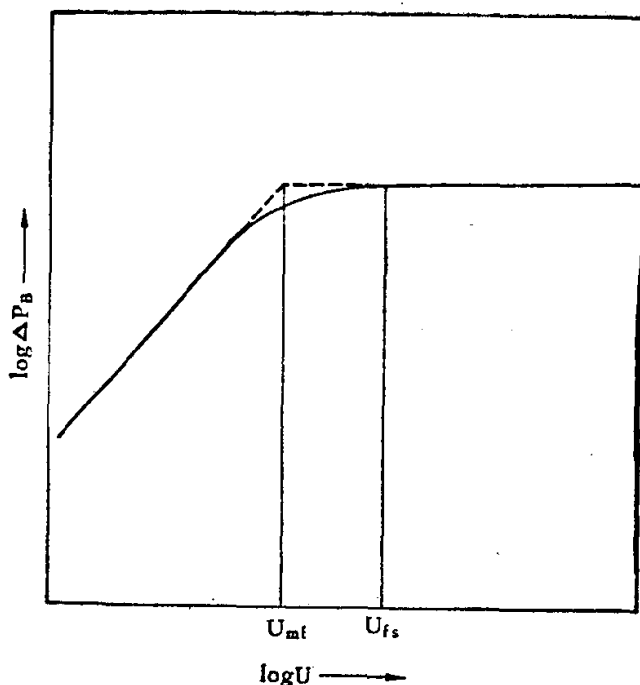


图 1.3 床内存在不流态化区的影响。

层移动方向相反的净摩擦力。这种效应能引起异常的压降。

(e) 流态化床中可能发生严重沟流，结果大部分流体可能通过沟道，而其余的床层可能处于非流态化状态。

(f) 逐步降低流率至低于临界流态化速度时，由于振动的影响，床层空隙度可能低于起始流态化点的数值。

(g) 如果床底分布器不能使流体分布均匀，也可能导致沟流。

固定床和流态化床压降与流速曲线的形式，可对床层结构提供不少线索。理想流态化是难以得到的，多数偏差出自于颗粒之间力的作用和床中流体分布的不均。实际上，临界流态化速度如图 1.3 所示，是用流态化与固定床二条压降线的交点来确定的（用降低流速的方法来测定较好一些）。

C. 床层支承和流体分布器*的影响

床底流体分布器对整个床层的结构具有很大的影响。理想分

* 一般指流体分布板。——译者注

布器应该具有质地精细的多孔结构，流体通过许多小喷孔而进入床内。质地粗糙的分布器在局部点上产生过高的喷射速度，使床中易于生成沟流。如果床层本身易于生成沟道，采用高压降分布器也有助于得到较均匀的流态化，因为不管床层自身如何不均匀，而流体却是很均匀地引入床层底部。对于浅床层，分布器的压降和床层压降应该是同一量级。格罗斯（Grohse, 1955）以及罗（Rowe）和斯特普尔顿（Stapleton, 1961）都指出，用素烧分布器得到的临界流态化速度值是最为一致的，且床层膨胀均匀。

✓ 对分布器和床层压降的关系，希比（Hiby, 1964）已经作了详细的研究。他指出，如果床中生成沟道，就给流体提供了低阻力的通道。而且随流速增大，沟道有进一步扩展的趋势。然而，沟道下面分布器的流动阻力随流率增大而增大。要使沟道不能稳定生成，通过分布器的压降的增高至少需大于沟道中压降的降低。

显然大型流态化床不能用素烧板分布器，一是费用高，二是机械强度差。若气体的均匀分布极为重要，一般采用多喷嘴或多泡罩分布器，为使流体分布均匀，各开孔可以分别调节。分布器方面的详细结构已有大量专利。皮特里（Petrie）和布莱克（Black, 1966）以及怀特里特（Whithead）和登特（Dent, 1967）对于分布器设计中的一些基本原则，特别关于防止泡罩上面物料不流态化区的问题作了研究。

III. 起始流态化和临界流态化速度

A. 形成良好流态化的因素

尽管在流态化方面已作过大量研究，但是还不可能完全根据颗粒和流体的物理性质以及操作条件，确切地预示流态化系统的特性，而且往往发现，那些可形成均匀、良好流态化床的物料，正是那些起始流态化有困难的物料。

对于液-固系统来说，通常起始流态化没有多大困难，一旦流态化开始后立即达到均匀状态；有关均匀流态化床的状态，下面第