

# 石油化工设计参考资料

(五)

## 流化床反应器的設計

(内部資料·注意保存)

燃料化学工业部石油化工設計院

## 編 者 的 話

伟大領袖毛主席亲自发动和领导的这场史无前例的无产阶级文化大革命，彻底地粉碎了叛徒、内奸、工贼刘少奇一类政治骗子复辟资本主义的阴谋，大大地加强了无产阶级专政。

经过无产阶级文化大革命战斗洗礼的七亿中国人民，在党的“九大”团结胜利的旗帜下，更加紧密地团结在以毛主席为首的党中央周围，认真学习毛主席著作，把伟大的毛泽东思想同革命实践更深刻地结合起来，工农业生产出现新的高涨，形势一派大好。

在新的形势下，广大石油化工设计人员紧跟毛主席的伟大战略部署，正以阶级斗争和路线斗争为纲，以毛主席的哲学思想为武器，开展革命大批判，坚持**独立自主、自力更生、艰苦奋斗、勤俭建国**的方针，深入现场实际，认真搞好斗批改。

为了迎接石油化工大发展的新形势，为了适应备战和现场设计的需要，我们编写了这一本《流化床反应器的设计》，供内部参考使用。

当前技术革新、技术革命的群众运动蓬勃发展，新生事物不断涌现，希望同志们在使用这一本参考资料的过程中不断总结经验，对其错误和不足的地方给予批评、指正，以求逐渐完善。

# 目 录

<b>第一章 流化床的基本知識</b> .....	( 1 )
第一节 流化床的主要优缺点.....	( 2 )
第二节 流态化过程.....	( 4 )
第三节 流化床的基本构件.....	(14)
<b>第二章 流化床反应器的設計</b> .....	(20)
第一节 床型的选择.....	(20)
第二节 床径的确定.....	(24)
第三节 床高的确定.....	(32)
第四节 气体分布板和预分布器.....	(39)
第五节 内部构件.....	(55)
第六节 流化床热交换器的设计.....	(62)
第七节 气固分离器.....	(74)

# 第一章 流化床的基本知識

我国广大劳动人民很早就认识了大自然中的流态化现象，并将其用于人类物质的生产活动。远在几千年前，我国广大农民就普遍采用风选技术来选取谷物。我们的祖先也很早就用浮选法来淘金。但由于当时生产规模狭小，限制了人们的眼界，还不能了解其性质和规律性。

直至二十世纪初期，伴随着巨大生产力——大工业的出现，流态化技术才被用于工业生产。约于1921年，德国第一次建造了一台沸腾床煤气发生炉，使劣质的粉状褐煤得到了合理的利用，同时其单位截面积的处理量也比老法提高了三倍。在第二次世界大战期间，石油流化催化裂化的双炉操作装置得到了大规模发展，以适应当时汽油用量急剧增加的需要。随后，人们通过生产实践，逐渐地了解其性质和规律性，流态化技术在工业中的应用也越来越广泛。

我国自1958年大跃进以来，在硫酸和苯酐等生产中就广泛采用这项新技术。通过生产实践，使我们对原来还只是感觉了的东西，现在能逐渐地理解了。尤其从无产阶级文化大革命以来，石油化工迅猛发展，而流化床反应器是其中关键设备之一。为使这门新技术更好地为无产阶级政治服务，为伟大的社会主义祖国服务，广大工人和革命的工程技术人员在伟大领袖毛主席和以毛主席为首的党中央领导下，在“九大”团结胜利的路线指引下，坚持独立自主、自力更生方针，贯彻执行鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义总路线，以实际行动抓革命，促生产，促工作，促战备，在流化床的生产、设计和科研方面都取得了丰硕成果。

## 第一节 流化床的主要优缺点

近十年来，流化床的使用范围越来越广泛，仅化工行业国内已有几十种产品采用流化床生产，很多固定床日益被流化床所代替。流化床的主要优缺点如下：

### 一、优点

#### (一) 气-固間传热和传质速率快，床层温度均匀

流化床所用的固体粒子比固定床的小得多，粒子的比表面积很大，每立方米床层的接触表面积可达  $3,280 \sim 49,200$  米<sup>2</sup>，因此，气体与固体间的传热和传质速率要比固定床的快得多。由于气体和固体粒子的强烈搅动，使得床层内局部热量和气体分子迅速传至其他方向。这对于许多化学反应十分可贵，尤其是强烈放热的过程，如果热量不及时取出，将使过程无法进行。流化床能理想地满足这种过程的要求。

#### (二) 床层与壁面間的传热系数大

流化床内固体颗粒扫过传热表面的剧烈运动，促使传热表面不断更新，沿壁存在固体颗粒亦使壁面气体流膜的厚度减薄，这些都使流化床传热系数提高。一般流化床传热系数比固定床大10倍左右。

#### (三) 便于实现过程連續化和自动化

流化床粒子处于运动状态，因此粒子的取出和加入床层特别方便。有些催化反应过程，催化剂失活很快，须及时再生。要达到过程的连续化，必须将催化剂不断地加入和取出。例如，一个炼制能力为60万吨/年的流化催化裂化装置，催化剂的循环量达760吨/时，象这样大量的催化剂从反应器取出，经再生后又返回反应器，在固定床内根本无法实现。

#### **(四) 设备生产强度大**

由于流化床具有传热、传质效果好，速度快和过程的连续化，因此设备在单位时间内处理量大，又可提高年平均操作天数。与相同生产量的固定床相比，流化床设备直径小，造价低。

#### **(五) 操作条件好**

过程的连续化、自动化和流动化，使操作简化，减轻了体力劳动，改善了操作条件。

## **二、缺 点**

#### **(一) 固体颗粒磨损大，损耗多**

固体颗粒的剧烈搅动，造成粒子的磨损，增加了粉尘的带出和回收系统的负担。固体颗粒的带出损耗，对有些催化剂价格昂贵者，使其产品成本增加。此外，由于坚硬粒子的剧烈运动也带来了设备的磨损。

#### **(二) 气固接触不良，反应效率下降**

流化床内固体颗粒和流体沿设备轴向混合（又称返混）很严重，大量参加反应的物质被已反应的物质所稀释，使传质推动力减小，导致反应过程的转化率下降和选择性变差。由于床内产生大气泡，使气固接触极不均匀，气体在床层内的停留时间分布不均匀，增加了副反应的产生，亦导致反应过程的转化率下降和选择性变差。另外，气固接触不良和严重的返混现象，都使催化剂的利用效率降低，所以流化床的空间时间收率比固定床低。如有些反应，流化床催化剂效率只有固定床的10~15%。为了克服返混造成的弊病，可以采用多层流化床或者在流化床内加设内部构件等措施来弥补。

必须指出，虽然流化床具有很多优点，甚至有些过程只有在流化床中才能实现，但是，并不是所有用固定床的过程均可用流化床代替。“不同质的矛盾，只有用不同质的方法才能解决。”如果上述缺点成为主要矛盾，使用固定床可能更为合理。

## 第二节 流态化过程

流态化技术有很多专用名词，今将常用的有关术语结合过程现象作一简介。

“流态化”是指固体粒子被流体吹起呈悬浮状态，粒子可以互相分离作上下、左右、前后运动，这种状态称“流态化”。流态化也称假液化、流动化、流化、沸腾状态、悬浮状态等，下文都按习惯称呼，并尽量考虑统一。

### 一、流化床范围

在一个容器内放些固体粒子，下部通进流体，流体通过粒子间的空隙上升，从容器上部流出。这样一个设备，化工上称为床（层）。

#### （一）固定床区

在一个床内，当流体速度较小时，固体粒子不动，床层的压降随流体速度增加而增加，这种床称固定床（静止床），如图1-2-1所示。床内粒子保持不动是有一定的流速范围的，在这种情况下流体流速与床层压降的关系在对数坐标纸上是一条直线，如图1-2-4中的AD线所示。粒子在床内占据一定的体积，粒子与粒子间的空隙亦占有一定的体积，空隙体积占粒子层总体积的分数称为空隙率。固定床的空隙率为0.26~0.57（一般为0.4左右）。空隙率随粒子形状、大小、排列

方式而变化。

## (二) 流化床区

床内流体流速逐渐增大到一定值时，粒子开始松动到随机运动。继续增加流速，床层压降仍旧保持不变。这种床称为流化床（又称沸腾床，流动床，假液化层，悬浮床，涡动床，流态化床），如图1-2-2所示。流化床的流体流速与压降

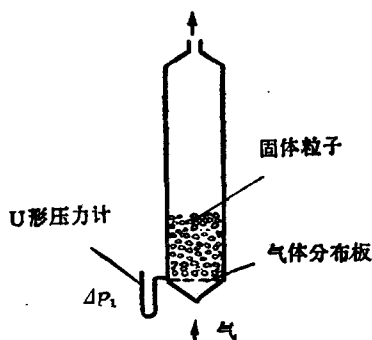


图 1-2-1 固定床示图

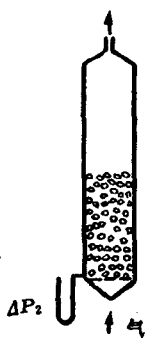


图 1-2-2 流化床示图

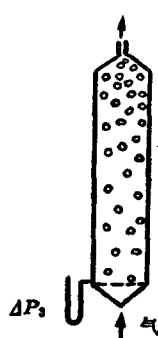


图 1-2-3 稀相流化床示图

关系如图 1-2-4 中  $DD_2$  线所示。固体粒子开始流动的流体流速，叫临界流化速度 ( $U_{mf}$ )。流化床中颗粒与颗粒间的相对

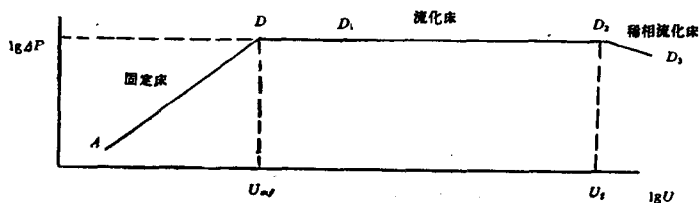


图 1-2-4 粒子床压降—流速图



运动，使整个床层呈现似流体，床层有明显的料面，具有液体的某些特性。流化床的压降等于床层单位截面积上的颗粒重量，可按下式计算：

$$\Delta P = L_0(\rho_s - \rho_f)(1 - \epsilon_0) = L(\rho_s - \rho_f)(1 - \epsilon) \quad (1-2-1)$$

式中：  $\Delta P$ ——床层压降，公斤/米<sup>2</sup>；

$L_0$ ——开始流化时床层高度（近似等于固定床高度），米；

$L$ ——流化床层高度，米；

$\epsilon_0$ ——开始流化时床层空隙率（近似等于固定床空隙率）；

$\epsilon$ ——流化床层空隙率；

$\rho_s$ ——固体粒子密度，公斤/米<sup>3</sup>；

$\rho_f$ ——流体密度，公斤/米<sup>3</sup>。

### （三）稀相流化床区

当床内流体速度继续增加到一定值 ( $u_t$ ) 时，固体粒子开始吹出容器，这时粒子散满整个容器，这种状态叫稀相流化床，如图 1-2-3 所示。这时流速越高，带出粒子越多，床层压降就越小，如图 1-2-4 中的  $D_2D_3$  线所示。 $u_t$  称为粒子的带出速度（又称粒子沉降速度，终端速度）。当流体速度达到粒子沉降速度时，粒子的重量与粒子在流体内的浮力平衡，这时粒子处于“失重”状态，作漂浮运动，床内颗粒之间的空隙极大，床层空隙随流速增大而逐渐增大，这时也可称稀相输送阶段。最后容器中颗粒全部吹出，床层空隙率达到 100%。

## 二、两种流态化

近年，大家习惯把流态化系统分为两大类：散式流态化

和聚式流态化。流化床内粒子均匀地分散，平稳地流化，这种状态称“散式”流态化。流化床内粒子成团地湍动，气体主要以气泡形式通过床层而上升，气泡内可能夹带有少量粒子，整个床层呈两相状态（气泡相和连续相），这种状态称“聚式”流态化。一般液体流化固体都属散式流态化，散式流态化的床层压降与流体流速关系如图 1-2-4 所示。一般气体流化固体都属聚式流态化。但个别液体流化固体的场合也可聚式流化，如用水流化铅珠就是一例。聚式流态化因有大量气泡存在，床层极不稳定。气泡生成后沿床层上升，上升过程中逐渐长大和互相合并（少量破裂），气泡越来越大，到床面时即破裂。气泡的破裂和扰动导致床层压降的波动，因此，聚式流化的压降流速关系呈一波线图，气速越大，波幅越宽。床内气泡的不稳定性恶化了流态化质量。工业上一般气固系统居多，各种过程都期望得到好的流态化质量，因此，常在床内加设挡板等内部构件使聚式流态化向散式流态化转变。

### 三、两种不正常的流化床

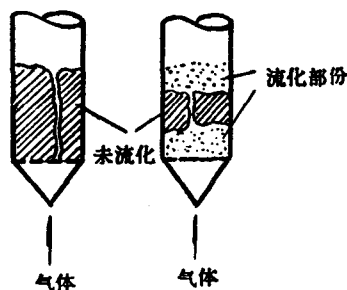
液固两相均匀接触，是散式流化床的重要特性之一。在实际生产中，气体与固体的接触状态是极其复杂的，经常产生一些不规则的流态化状态。现在将一些常见的不规则情况介绍如下：

#### （一）沟流

##### 1. 现象

气体通过床层，其流速虽超过临界流化速度，床层并不流化，而是大量气体短路穿过床层，床层内形成一条狭窄通道，此时大部床层仍处固定状态，这种现象称为沟流。如果

沟流穿过整个床层就称贯穿沟流，如图1-2-5A所示。如沟流仅发生在床层局部处，就称局部沟流，如图1-2-5B所示。



A. 贯穿沟流

B. 局部沟流

图 1-2-5 沟流现象图

## 2. 危害性

沟流造成床层密度不均匀，有可能产生死床，造成触媒烧结，降低触媒的寿命和效率，同时亦降低了设备的生产强度。

## 3. 影响因素

颗粒的性质，流体流速，床层的厚薄，设备结构等因素，都影响沟流的产生。下述几种情况尤其易产生沟流：

- (1) 颗粒粒度较细且气速过低时；
- (2) 潮湿的物料，易粘合、结团的物料；
- (3) 气体分布板设计不好，孔太少；
- (4) 床层内阻挡体附近。

## 4. 消除方法

消除沟流的最有效方法是加大气速，物料预先干燥和在床内加内部构件。

## (二) 腾涌

### 1. 现象

床内气泡汇合长大，当气泡直径接近容器直径时，床内物料成活塞状向上运动，料层达到某一高度后崩裂，颗粒雨淋而下，这种现象称为腾涌（气截，



图 1-2-6 腾涌现象示图

节涌，涌节），如图1-2-6所示。

## 2. 危害

床层极不均匀，降低触媒寿命和产量，增加固体粒子的机械磨损和带出。另外，设备内部受到冲击，容易损坏床内零部件。

## 3. 影响因素

颗粒性质、床层高度、气体速度等因素，都影响腾涌的产生。下述几种情况易产生腾涌：

(1) 床高与床径比  $L/D$  较大时；

(2) 大颗粒比小颗粒容易产生腾涌；

(3) 在  $L/D$  较大时，气速增大到一定值就会产生腾涌。如流化催化裂化触媒颗粒大于 100 微米，气速大于 0.3 米/秒， $L/D$  大于 10 时就会产生腾涌。

## 4. 消除方法

在给定的高床层、大颗粒等条件下，可以在床内加设内部构件，以防止腾涌的产生。一般  $L/D < 1$  及设备较大时不易产生腾涌。

# 四、流化质量

对于流化状态的好坏，通常以流化质量这一说法来描述。对于两相流化床，以流体与固体粒子的混合、接触状态等一系列参数来表征所谓流化质量的好坏。

在气固两相流化床中，气泡的生成、长大及崩裂，引起床层密度分布的不均匀性和压力的波动。大气泡的存在和运动破坏了气固两相的良好接触，造成了气体的短路，因而降低了气固加工的效果。所以通常用床层压降的波动（以应变仪进行测量或目测）、局部床层密度的变化（多以电容仪等

进行测量)、床层料面起伏比等参数来评价流化状态的好坏。床内粒子的分级, 温度分布, 传热和传质, 流化床床身的振动等, 都在不同情况下用作判断流化状态的手段。

一般认为, 较宽的固体粒度分布, 较低的床层和气流, 会出现较好的流化状态。

流化床内加设挡网、挡板等内部构件, 有改善气相或固相停留时间分布, 抑制和破碎气泡, 强化两相接触, 降低床层压力波动, 减小料面起伏比, 使高床层操作成为可能等等提高流化质量的作用。

应该指出, 以上所说的流化质量的各参数, 仅是表示了流化状态某一方面的特征。例如自由床较之内部构件床有着更均匀的轴向、径向温度分布, 但其总的反应效果却低于内部构件床。所以, 孤立地认为流化状态的某一参数好就是流化质量好的看法, 是不够全面的。

在工业生产中, 一般以转化率高, 收率高, 副产物多少等来判断流化质量的好坏。

## 五、临界流化速度

当流体流速达到流化点时, 床层压降等于单位面积床层重量, 这时流体的流速称临界流化速度, 已如上述。

对于采用高流化数 ( $\text{流化数} = \frac{\text{操作速度}}{\text{临界流化速度}}$ ) 操作的过  
程, 如石油流化催化裂化, 流化数为 300~1000, 萘氧化制苯酐过程流化数不低于 10~40, 由于这些过程中操作速度大大超过临界流化速度, 床层不会出现局部静止状态, 好象临界流化速度不是迫切需要测求的参数。但是对于很多过程仍然希望操作速度不要超过临界流化速度太大, 这时, 确定临

界流化速度就显得比较重要。

固体颗粒的临界流化速度，可用计算方法和实测方法来  
确定。计算方法可见第二章。因计算受公式准确程度限制，  
如要得到物料较精确的临界流化速度数值，还是要用实验方  
法求得。下面介绍实测方法。

使用如图 1-2-7 所示的试验装置，可以测得固体颗粒料  
层从固定状态到流化状态的一系列压降和气体流速的关系数  
值，并可在对数坐标纸上绘出流速压降曲线，如图 1-2-8 所

图 1-2-7 试验装置  
流程图

- 1—风机；2—缓冲罐；  
3—流量计；4—U形  
压力计；5—分布板；  
6—流化床

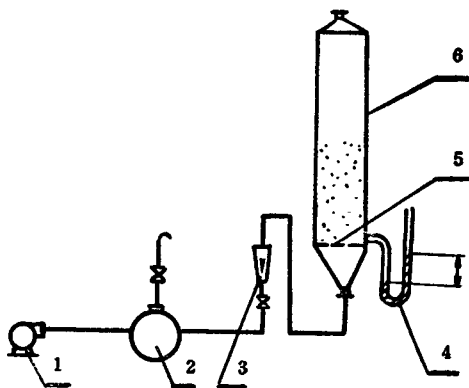
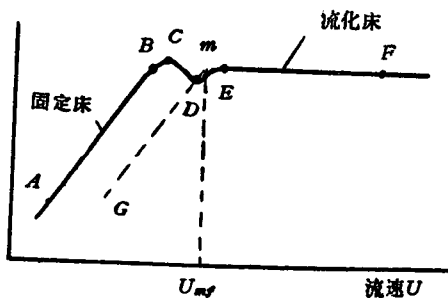


图 1-2-8 粒子床流  
速与压降关系



示。ABCDEF 曲线是在不断增加气流速度而测得的。当获得流化状态的料层后，再逐步降低床内气速，其流速与压降关系不再恢复至直线BA，而是沿DG变化。GD的延长线与直线FE的延长线交于m点，与m点相应的流速 $u_m$ ，即所测的临界流化速度。

必须指出，临界流化速度的测定值受很多因素的影响，如果在给定的固体颗粒、流体介质条件下，还必须有良好的气体分布装置和流化床。一般使用密孔板或开孔率远小于临界值的分布板来分配气体，流化床可用摩擦力较小的玻璃管。测试时常使用空气做流体介质，最后将测得的值进行流体介质物理常数的校正。

## 六、流化床膨胀比

临界流化速度附近的床层料面十分平稳，床层膨胀很小。当气速较高时，床内大量气泡的形成、汇合、崩裂以及密相空隙率的增大，都使床层膨胀增大和起伏增加。为了便于比较床层的膨胀特性，大家习惯用膨胀比（膨胀比=

$\frac{\text{膨胀床层高度}}{\text{临界流化速度下的床层高度}}$ ）来描述床层膨胀特性。床层膨

胀比，与流体流速、物料性质和设备结构等因素有关。目前虽没有一个准确计算膨胀比的通用公式，但现有公式亦可供参考（详见第二章）。下面介绍一种实测方法。

试验流程如图 1-2-7 所示。在一定流速下，测定流化床不同高度的床层压降值： $\Delta P_a, \Delta P_b, \Delta P_c \dots \Delta P_f$ ，可得图 1-2-9，fd 线和 ab 线的交点K对应的横坐标值，即为所求的膨胀比（R）。

改变不同的流速可求得一系列膨胀比数值，从而可绘出

膨胀比—流速曲线图，见图1-2-10。凭此曲线就可估计不同气流速度下的床层膨胀高度。

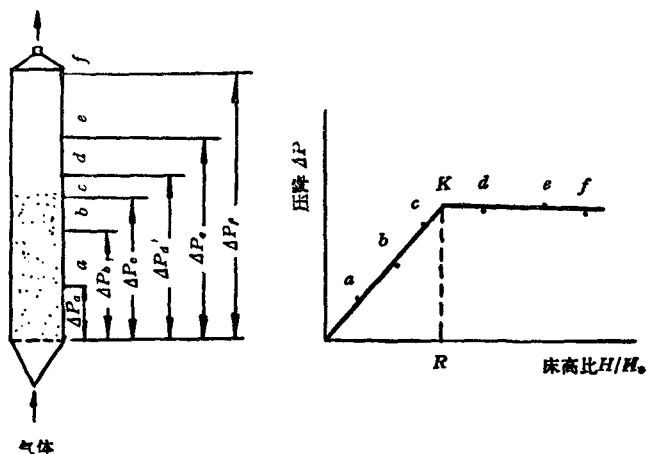


图 1-2-9 床层压降与床高比的关系

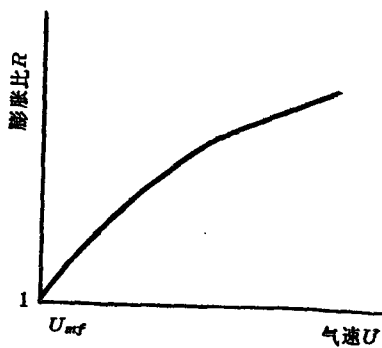


图 1-2-10 膨胀比与气速的关系



### 第三节 流化床的基本构件

流化床的结构型式很多，但不论什么型式，一般都由壳体，气体分布装置，内部构件，换热装置，气固分离装置和固体颗粒加、卸装置所组成（见图1-3-1）。今将这些基本构件的作用和概况分述于下：

#### 一、壳 体

壳体的作用，主要是保证流化过程局限在一定范围内进行。它由底盖、筒身和顶盖组成。筒身的形状有圆柱形（常用），圆锥形，箱式和组合式（变直径圆柱床，如明矾石沸腾焙烧炉；圆柱和圆锥组合，如重碱沸腾煅烧炉；圆柱形和箱式组合，有带前、后室的黄铁矿沸腾焙烧炉）。底盖和顶盖一般是配合筒身的形状。如果按照床内固体粒子的分区来分类，可以分为单层床、多层床、串联床、双容器或多容器循环装置。

#### 二、气体分布装置

气体分布装置主要是均匀分布气体，造成一个良好的起始流化条件，同时需要支承固体粒子。气体分布装置可分为气体预分布器和气体分布板两部分。气体预分布器虽然也有多种结构型式，但没有严格的设计要求，只要使进床的气体不偏流就行。气体分布板是均匀分布气体的关键构件，一块好的气体分布板要能达到良好的气体分布状态、阻力小、不漏料、不堵塞、结构简单、制造检修方便等要求。对于无溢流管多层床和流化催化裂化装置的气体分布板，除满足上述要求外，还需满足落料量和均匀落料的要求。