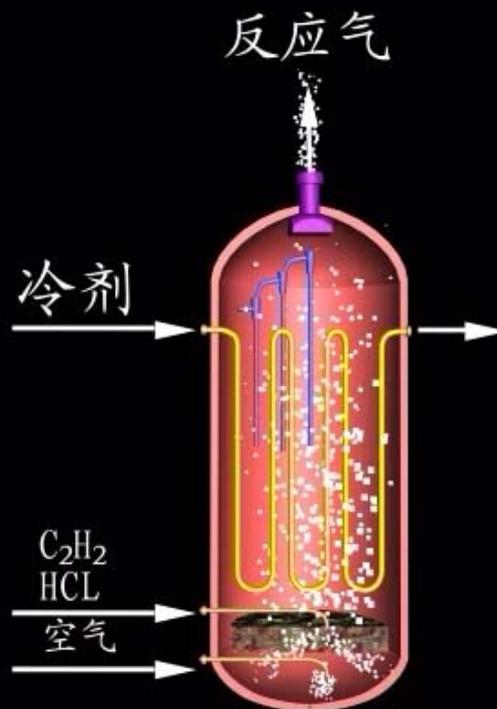


# 第四节 固体流态化技术

## 一、流化床的基本概念

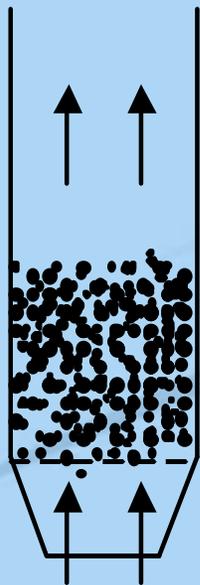
固体流态化是一种使流体与固体颗粒接触并使整个流—固系统具有流体性质的技术。广泛应用于：颗粒物料的加热、干燥、混合、浸取、煅烧、输送及反应过程。

**标准流化床**  
(乙烯氧氯化反应器)

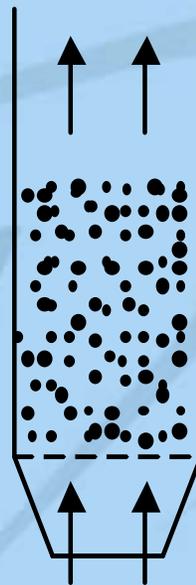


**流态化**是一种使固体颗粒通过与流体接触而转变成类似于流体状态的操作。

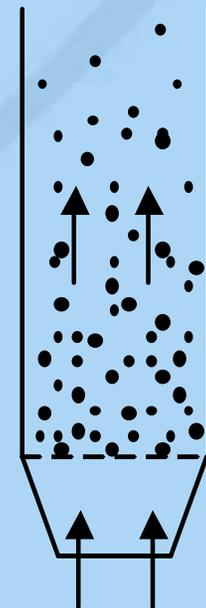
当流体自下而上地流过颗粒层，则根据流速的不同，会出现下面三种不同的情况：



(a)固定床



(b)流化床



(c)气力输送

流态化的三个过程



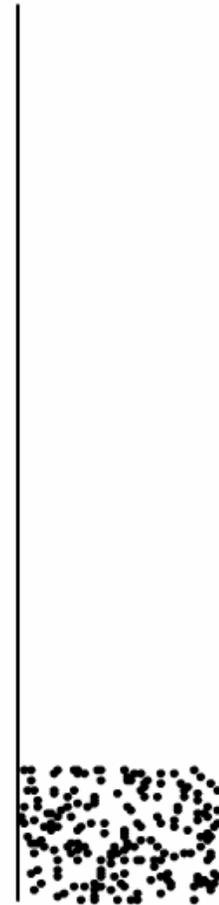
# 1. 流化床

## ① 固定床阶段

如果流体通过床层的表观速度(即空塔速度) $u$ 较低, 颗粒空隙中流体的实际流速 $u_1 < u_t$ , 则颗粒基本静止, 颗粒层为固定床。则理论最大表观速度:

$$u_{\max} = u_t \epsilon$$

流化床在不同气速下的状态-固定床



↑ 气体



## ② 流化床阶段

如果流体通过床层的表观速度  $u$  大于固定床阶段的最大表观速度  $u_{\max}$ ，流体通过颗粒空隙的实际流速  $u_1 > u_t$ ，此时床层内颗粒将“浮起”，颗粒层“膨胀”，称为流化床。此时床层内流体的实际流速  $u_1$  与与表观速度  $u$  的关系可表示为：

$$u_1 = \frac{u}{\varepsilon}$$



流化床在不同气速下的状态-流化床



↑ 气体



### ③ 颗粒输送阶段

如果继续提高流体的表观速度  $u$ ，使真实速度  $u_1 > u_t$ ，则颗粒将被气流所带走，此时床层上界面消失，这种状态称为颗粒输送阶段。依据此原理，可实现气力和液力输送。

## 2. 广义流化与狭义流化

狭义流态化—— $u_1 = u_t$  阶段；

广义流态化——各种非固床的流—固系统，包括载流床和气力输送。

流化床在不同气速下的状态-流体输送



↑ 气体





## 二、实际的流化现象

按照流体和颗粒的运动状况分类：

### 1. 散式流化

一般发生在液—固系统，当表观流速接近临界值 $u_{mf}$ 时，发生流化现象，将 $u_{mf}$ 称为起始流化速度。此种流化床的上界面比较清晰，散式流化床比较接近理想流化床。

### 2. 聚式流化

一般发生在气—固系统，当表观流速超过 $u_{mf}$ 而开始流化后，床内出现一些空穴，气体将会优先穿过各个空穴至床层顶部逸出。聚式流化界面有频繁的起伏波动，界面以上的空间也会有部分固体颗粒，与理想流化床偏离较大。





## 三、流化床的主要特征

### 1. 液体样特征

- ① 无定形，随容器的形状变化，有一定的上界面；
- ② 如将小于床层密度的物体放入，此物体将浮在表面上；
- ③ 当容器倾斜时，床层上界面保持水平；
- ④ 两个床层连通时，其床面自动调整到同一水平面上；
- ⑤ 床层任意两截面间的压强变化等于这两截面间单位面积上床层的重力；
- ⑥ 流化床与液体一样具有流动性。



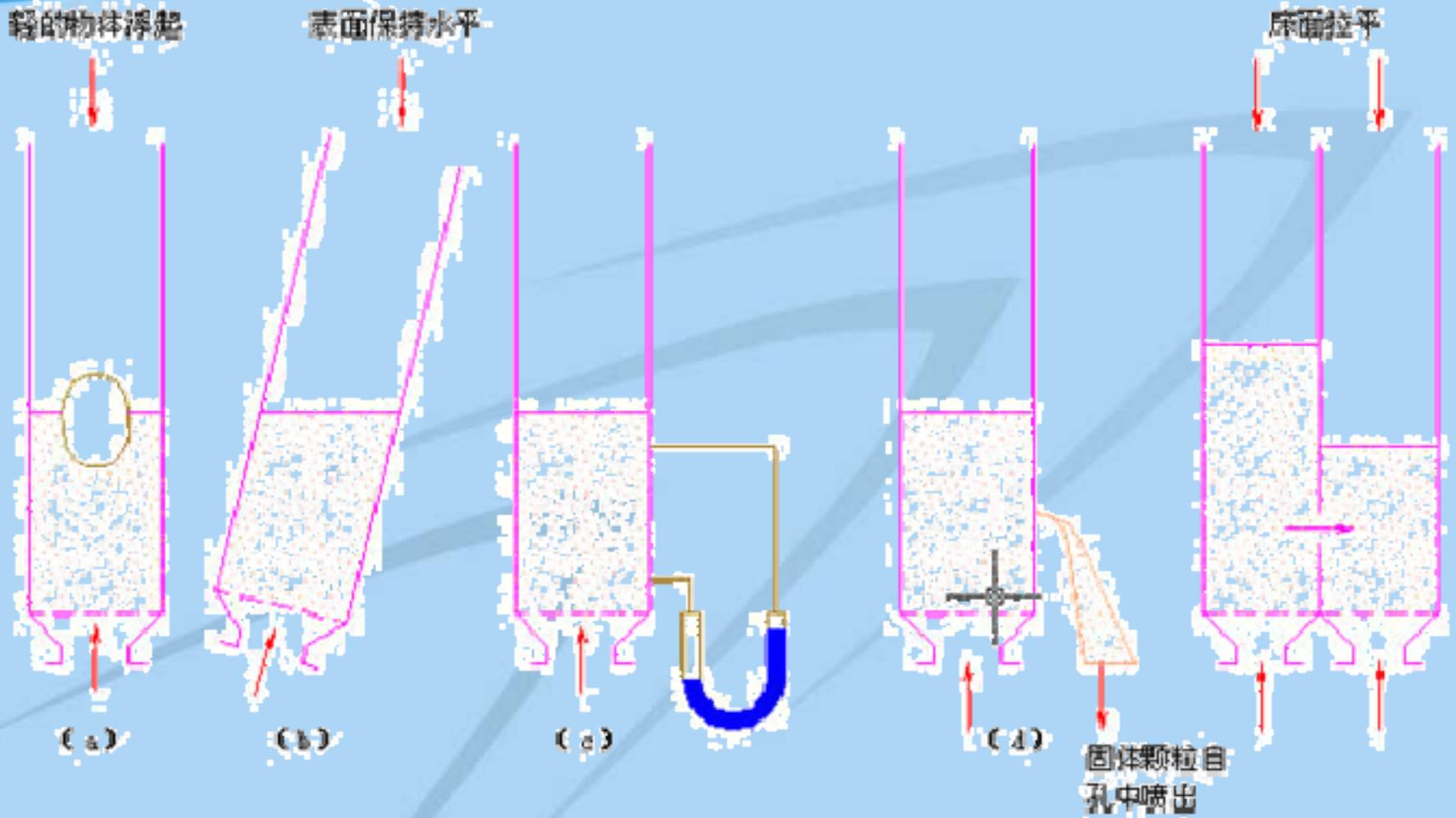


图5-24 流化床的液体样特征



## 2. 固体充分混合

床内 $c$ 、 $t$ 很快达到均一 —— 主要**优点**

## 3. 气流不均匀分布和气-固不均匀接触

### ① 腾涌或节涌

颗粒层象活塞那样被气泡向上推动，在达到床层上界面后气泡崩裂，颗粒分散下落，这种现象称为腾涌现象。

### 动画演示

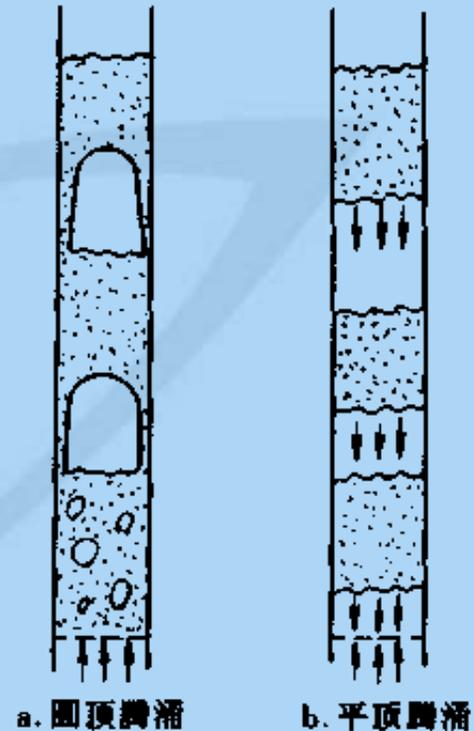


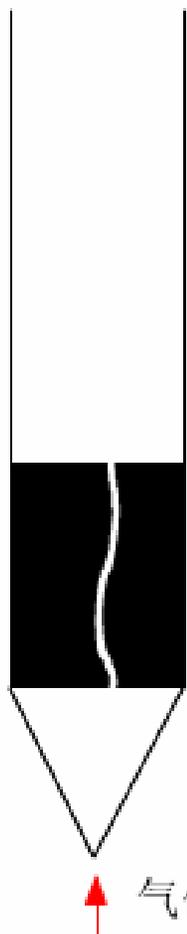
图 5-25 腾涌现象

### ② 沟流

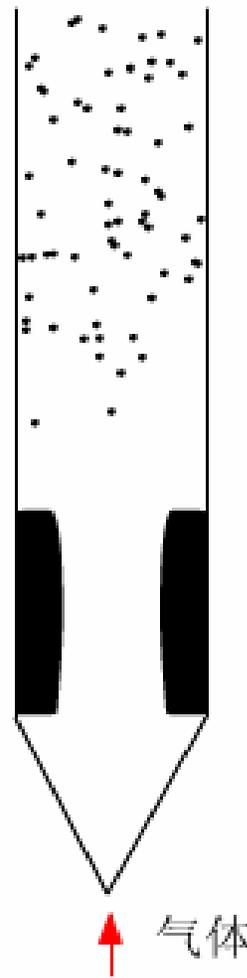
沟流是指气体通过床层时形成短路。发生沟流现象时，床层内密度分布不均，且气体不能充分与颗粒接触，使传质、传热等工艺条件恶化。



沟流示意动画-贯穿沟流



沟流示意动画-局部沟流





## 4. 恒定的压降

流体与颗粒间摩擦而产生的压降为：

床层压降=单位截面床内颗粒的表观重力（重力-浮力）

$$F_{\text{流}} + F_{\text{浮}} = F_{\text{重}}$$

A—床层截面积  $\text{m}^2$

$$F_{\text{流}} = F_{\text{重}} - F_{\text{浮}}$$

m—床层颗粒的总质量 Kg

$$\therefore \Delta p \cdot A = mg - \frac{m}{\rho_p} \rho g$$

$$\therefore \Delta p = \frac{m}{A \cdot \rho_p} (\rho_p - \rho) g$$

——恒压降

恒定的压降是流化床的重要优点，可使流化床中采用细小颗粒而无需担心过大的压降。



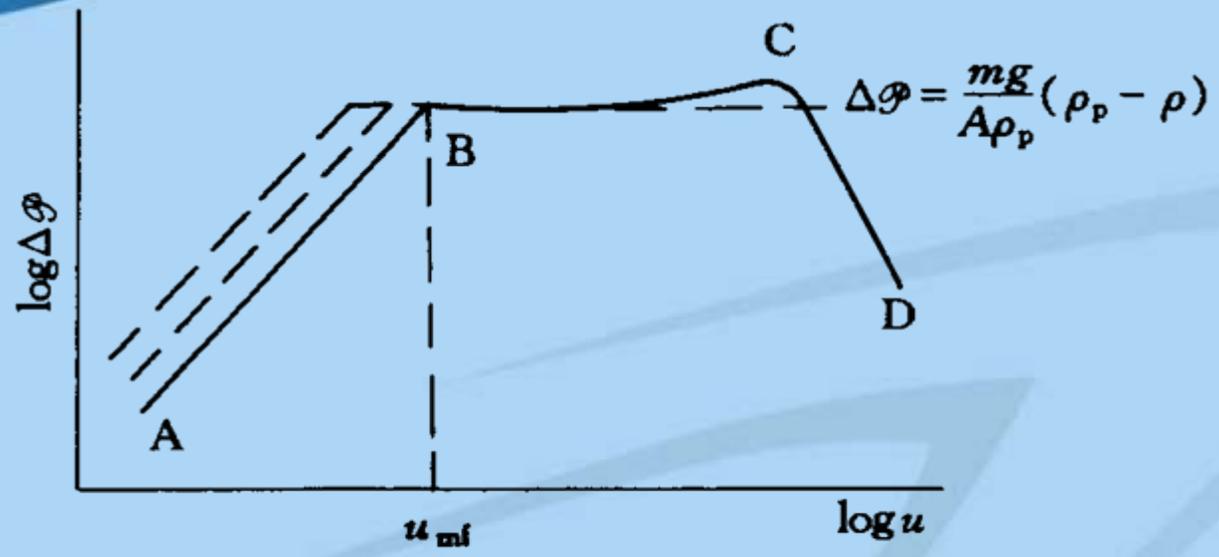


图 5-26 流体通过颗粒层的压降

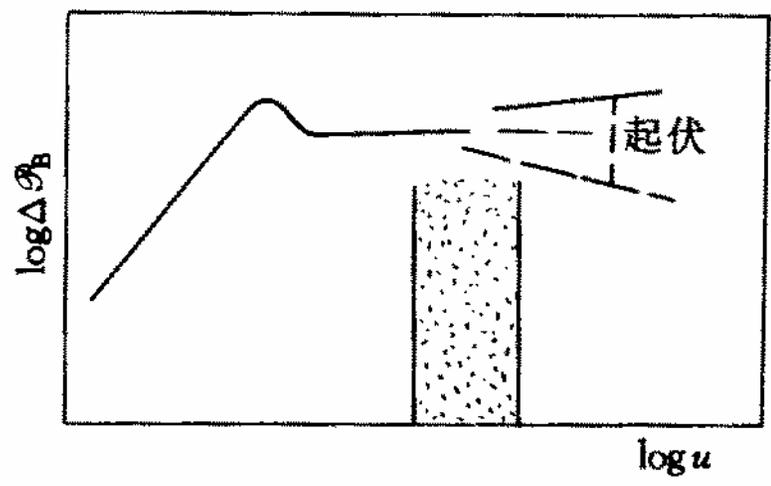


图 5-27 床层发生腾涌时的压降

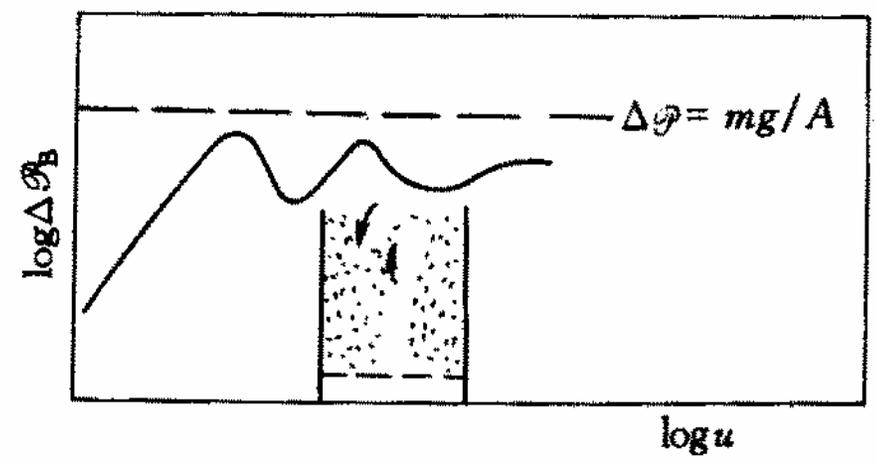


图 5-28 床层发生沟流时的压降



## 四、流化床的操作范围

### 1. 起始流化速度 $u_{mf}$

对非均匀颗粒组成的流化床，起始流化床的表观速度为：

$$\because \Delta p = \frac{m}{A \cdot \rho_p} (\rho_p - \rho) g = \frac{LA\rho_p(1-\varepsilon)}{A\rho_p} (\rho_p - \rho) g$$

$$\therefore \Delta p = L(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho) g \quad \text{—————恒压降阶段}$$

利用欧根方程，小颗粒条件下：

$$\Delta P = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \times \frac{\mu L}{\psi^2 d_e^2} u \quad \text{—————固定床阶段压降}$$

$d_e$  ———— 颗粒等体积当量直径





由于起始流化时  $L=L_{mf}$   $\varepsilon = \varepsilon_{mf}$

$$\therefore u_{mf} = \frac{\psi^2 \varepsilon_{mf}^3}{150(1 - \varepsilon_{mf})} \times \frac{de^2 (\rho_p - \rho) g}{\mu}$$

对工业常见颗粒

$$\frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\psi^2 \varepsilon_{mf}^3} = 11 \quad \therefore u_{mf} = \frac{de^2 (\rho_p - \rho) g}{1650 \mu}$$

## 2. 带出速度

当表观速度  $u=u_t$  时，大量颗粒将被流体带出流化床设备外，即流化床的带出速度等于  $u_t$ ，此速度为流化床操作范围的上限。

流化数：流化床实际操作速度与起始流化速度之比。

## 五、流化质量（自学）





# 本章结束

