习题：1(做第一问)，2，3

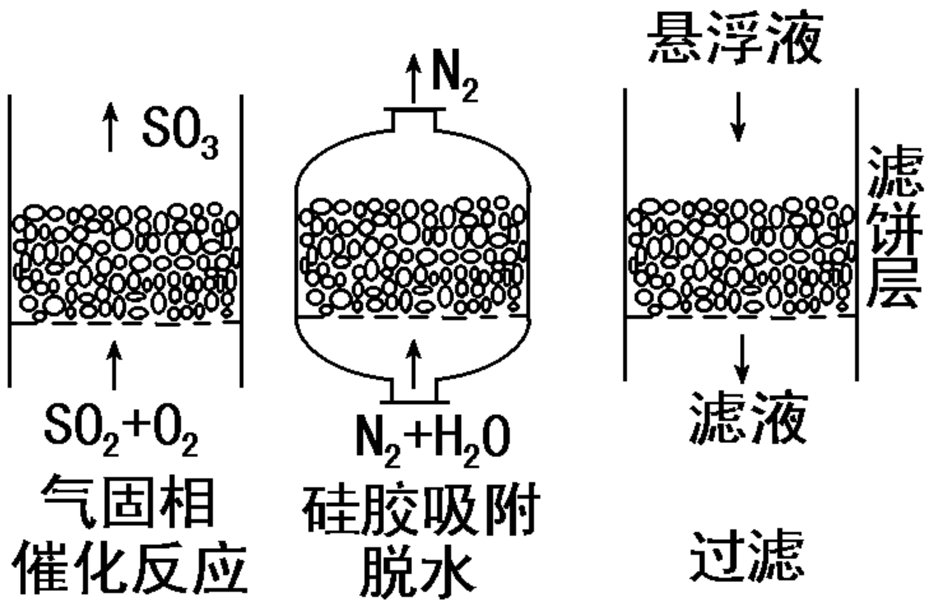
4 流体通过颗粒层的流动

4.1 概述

1. 固定床概念

众多固体颗粒堆积而成的静止的颗粒层

例：　　流体通过固定床反应器
爬流　　固体悬浮液的过滤
　　　　地下水，石油的渗流



2. 研究任务

a、流体通过颗粒层的基本流动规律

b、过滤（重点）

4.2 颗粒床层的特性

思路： 单颗粒（球形 $\longrightarrow$ 非球形）

$\downarrow$

颗粒群

$\downarrow$

堆放在床层中所具有特性

4.2.1 单颗粒特性

描述一个颗粒 $\begin{cases}\text{粒度：（体积，表面积等）} \\ \text{形状（球形度 } \psi\text{）}\end{cases}$

对球形颗粒：$\psi=1$

体积：$V=\frac{\pi}{6}d_p^3$

表面积：$S=\pi d_p^2$

比表面积：$a=\frac{S}{V}=\frac{6}{d_p}$

以球形颗粒为标准（$\psi=1$），只需单一参数 d_p 就可全面表示有关单颗粒的特性。

非球形颗粒的形状可以千变万化，为获得各种颗粒所遵循的共同规律，总试图将非球形颗粒以某种当量的球形颗粒表示。

非球形颗粒 $\begin{cases}\text{粒度：当量直径} \begin{cases} d_{e,V} \\ d_{e,S} \\ d_{e,a} \end{cases} \\ \text{形状：} \psi \text{（球形度）}\end{cases}$

根据不同方面的等效性，可以定义不同的当量直径。

体积等效：（$d_{e,V}$）

真实颗粒体积（V）=当量球形颗粒体积（$\frac{\pi}{6}d_{e,V}^3$）

$$V=\frac{\pi}{6}d_{e,V}^3 \qquad \therefore d_{e,V}=\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

同理：表面积等效（$d_{e,S}$）

$$S=\pi d_{e,S}^2 \qquad d_{e,S}=\sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

比表面积等效：（$d_{e,a}$）

$$a=\frac{6}{d_{e,a}} \quad \Longrightarrow \quad d_{e,a}=\frac{6}{a}$$

显然： $d_{e,V}\neq d_{e,S}\neq d_{e,a}$

三者关系：

$$a=\frac{6}{d_{e,a}}=\frac{S}{V}=\frac{\pi d_{e,S}^2}{\frac{\pi}{6}d_{e,V}^3} \qquad \therefore d_{e,a}=\frac{d_{e,V}^3}{d_{e,S}^2}$$

定义球形度 ψ

$$\psi=\frac{\text{与非球形颗粒体积相等的球表面积}}{\text{非球形颗粒的表面积}}$$

$$=\frac{\pi d_{e,V}^2}{\pi d_{e,S}^2}$$

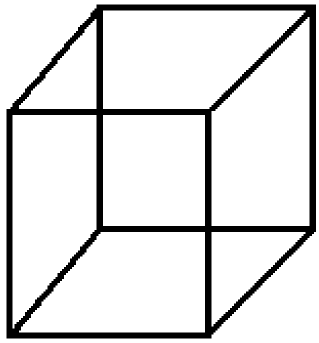
$$\therefore \quad d_{e,a}=\psi d_{e,V}$$

省略下标： $d_{e,V}=d_e$

$$\therefore \quad a = \frac{6}{d_{e,a}} = \frac{6}{\psi d_e}$$

因而对非球形颗粒除了当量直径的 d_e 外，还须有球形度ψ共同来描述颗粒特性。

例：如边长为 B 的立方体，ψ=？



由定义出发：$\psi = \dfrac{\pi d_{e,V}^2}{6B^2}$

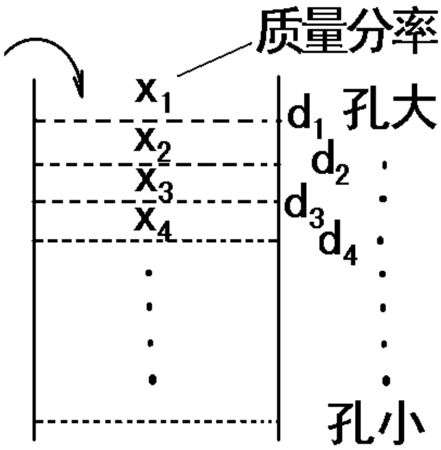
$$V = B^3 = \frac{\pi}{6} d_{e,V}^3 \qquad d_{e,V} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} B$$

$$\therefore \psi = \frac{\pi\left(\sqrt[3]{\frac{6}{\pi}}B\right)^2}{6B^2} = 0.806$$

等体积下，球的表面积最小，故非球形颗粒ψ<1

4.2.2 颗粒群特性

颗粒群存在粒度分布问题



对于大于 70μm 的颗粒，通过筛分分析来确定粒度分布，从而求得平均直径 d_m.

筛分分析结果：

描述 { 分布函数曲线
频率函数曲线

分布函数： $F_i = f(d_{pi})$

$$F_i = \frac{筛过量}{总量}$$

筛过量：通过筛孔的颗粒量

频率函数： $f_i = \dfrac{x_i}{d_{i-1} - d_i}$

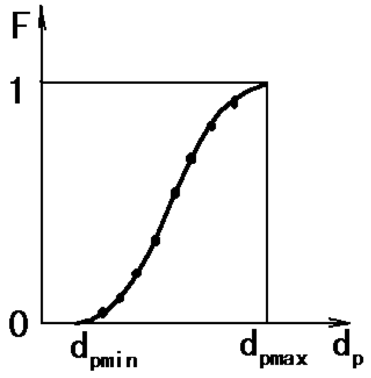
x_i：某号筛面上颗粒占全部试样的质量百分率

$$x_i = \Delta F$$

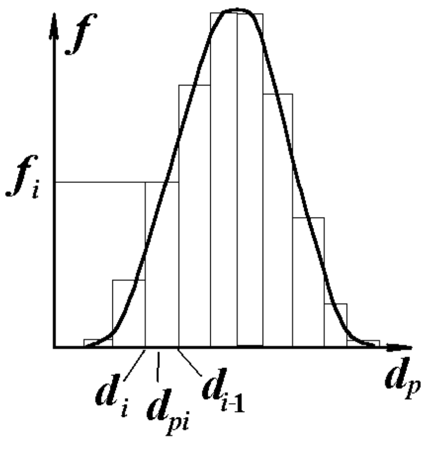
$$\therefore f_i = \frac{dF}{d(d_p)}$$

频率曲线下的全部面积等于 1。

分布函数F
(筛过量~dp)



特点: dpmax处F=1



MASTERSIZER 2000

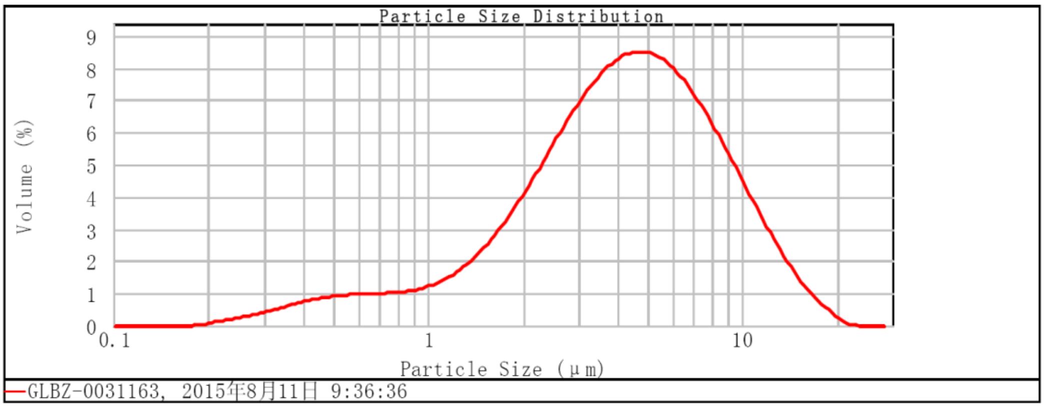
粒度分析报告

样品名称: GLBZ-0031163	SOP名称: 1	测量时间: 2015年8月11日 9:36:36
样品来源及类型:	操作者: DELL	分析时间: 2015年8月11日 10:35:29
样品参考批号:	结果来源: Edited	

颗粒名称: Default	进样器名: Scirocco 2000 (A)	分析模式: General purpose	灵敏度: Enhanced
颗粒折射率: 1.520	颗粒吸收率: 0.1	粒径范围: 0.020 to 28.850 um	遮光度: 3.41 %
分散剂名称:	分散剂折射率: 1.000	残差: 0.975 %	结果模拟: Off

浓度: 0.0004 %Vol	径距: 2.008	一致性: 0.617	结果类别: Volume
比表面积: 2.45 m^2/g	表面积平均粒径D[3,2]: 2.453 um	体积平均粒径D[4,3]: 5.011 um	D(0.16) : 1.85 μm D(0.84) : 8.25 μm

d(0.1): 1.291 um　　d(0.5): 4.232 um　　d(0.9): 9.788 um



以比表面积相等为原则求平均直径（d_m）

(爬流，流动阻力取决于表面积)

平均直径：

比表面积相等　　$a_m = \Sigma a_i$

$$a = \frac{6}{d_p} \qquad \therefore \quad \frac{1}{d_m} = \Sigma \frac{1}{d_{pi}} \cdot x_i$$

$$\therefore d_{32} = \frac{1}{\Sigma \frac{x_i}{d_{pi}}}$$

非球形：$d_m = \dfrac{1}{\Sigma \dfrac{x_i}{(\psi d_e)_i}}$

4. 2. 3 床层特性

1、空隙率：ε

$$\varepsilon = \frac{V - V_S}{V}$$

V：床层体积，V_S：颗粒所占体积

$V_S = G/\rho_p$　ρ_p：真密度

$$\therefore \varepsilon = 1 - \frac{G/\rho_p}{V} = 1 - \frac{\rho_{堆}}{\rho_p}$$

$\rho_{堆}$：颗粒在静置堆放时的松密度，称为堆积密度　　　kg 颗粒/m³ 床层

$$\rho_{堆} = (1 - \varepsilon)\rho_p$$

2、床层的各向同性

3、壁效应

4、床层比表面积　a_B

$$a_B = \frac{颗粒表面积}{单位床层体积} = \frac{aV_S}{V}$$

$$= a(1-\varepsilon)$$

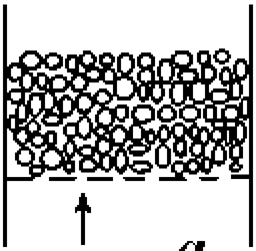
4.3 流体通过固定床压降

——数学模型法规划实验方法

1、床层的简化物理模型

保持单位体积表面积相等的前提下，将颗粒层内的实际流动简化。

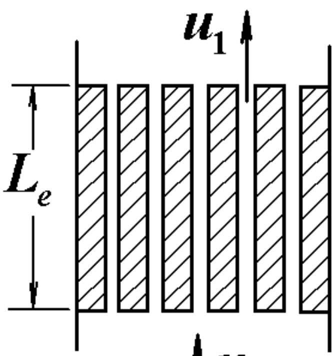
目的：解决床层的压降



$u = \frac{q_V}{A}$ 表观速度

简化的物理模型：

将床层中的不规则通道简化成长度为 **L_e** 的一组平行细管。



物理模型

规定：

(1)细管的内表面积等于床层颗粒的全部表面。（保持压降不变）

(2)细管的全部流通空间等于颗粒床层的空隙容积。（保持流速不变）

∴虚拟细管的当量直径 **de**:

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{(1-\varepsilon)a}$$

[表面积： $LA(1-\varepsilon)a = nL_e \pi d_e$

体积： $LA\varepsilon = nL_e \cdot \frac{\pi}{4} d_e^2$]

2、流体压降的数学模型：

圆形直管：$h_f = \frac{\Delta\mathscr{P}}{\rho} = \lambda\frac{L_e}{d_e}\cdot\frac{u_1^2}{2}$

u_1：流体在细管内的流速，即为实际填充床中颗粒空隙间流速。

用可测的空床流速（表观速度）u：

$$u=\varepsilon u_1$$

$$\therefore\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}=\lambda\frac{L_e}{L}\cdot\frac{(1-\varepsilon)a}{4\varepsilon}\cdot\frac{u^2}{\varepsilon^2}\cdot\frac{\rho}{2}$$

$$=\lambda\frac{L_e}{8L}\cdot\frac{(1-\varepsilon)a}{\varepsilon^3}\rho u^2$$

$$=\lambda'\frac{(1-\varepsilon)a}{\varepsilon^3}\rho u^2$$

$\Delta\mathscr{P}$在本章中均称为压降。

3、模型的检验及模型参数λ的确定

$$\mathrm{Re}'=\frac{d_e u_1\rho}{4\mu}=\frac{\rho}{4\mu}\cdot\frac{4\varepsilon}{(1-\varepsilon)a}\cdot\frac{u}{\varepsilon}$$

$$=\frac{\mathrm{u}\rho}{(1-\varepsilon)\mathrm{a}\mu}$$

（1）康采尼方程：

当$\mathrm{Re}'<2$ $\qquad \lambda=\frac{K'}{\mathrm{Re}'}=\frac{5}{\mathrm{Re}'}$

$$\therefore\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}=K'\frac{a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\mu u$$

适用爬流，误差<10%

(2)欧根方程

——适用于较广的 *Re*'范围

$$\lambda' = \frac{4.17}{\mathrm{Re}'} + 0.29$$

$$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L} = 4.17\frac{a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\mu u + 0.29\frac{(1-\varepsilon)a}{\varepsilon^3}\rho u^2$$

$$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L} = 150\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\cdot\frac{\mu u}{(\psi d_e)^2} + 1.75\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\cdot\frac{\rho u^2}{\psi d_e}$$

注意：(1)应用范围

Re'=0.17～420

当 *Re*'<3 时,

可忽略等式右边第二项

(2)误差约为±25%

(3)所有因素中ε的影响最大

讨论：

(1) $\dfrac{\Delta\mathscr{P}}{L} = f(u,\mu,\rho,\varepsilon,a)$

其中:操作变量: u

物性参数:μ,ρ

床层特性:ε,a

(2)数学模型法评述

a.成功的关键在于对复杂过程的合理简化,得

到足够简单的数学方程,且又有不失真的物理模型。

b.比量纲分析法更科学，但对事物的了解必须更深入。

(3)一般并不用欧根（康采尼）方程直接计算 $\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}$，原因是 a,ε是很难得到准确数值。

(4)床层阻力公式的意义。

a.由此及彼（**p137**，习题 **2**）

b.通过实验测得ε,a**(p118,**例 **4-2)**

c.过滤速率方程的基础

例：已知：**20**℃，**101.3kPa** 空气 u**=0.3m/s**，$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}$**=220Pa/m**，**0.8m/s**，$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}$**=1270Pa/m**。

30 ℃ ， **0.7MPa** 甲 烷 ， μ**=0.012mPa.s** ， ρ**=4.5kg/m**^{3}

求： u**=0.4m/s** 时，$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}$=？

解：将欧根公式简化

$$\frac{\Delta\mathscr{P}}{L}=4.17\frac{a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\mu u+0.29\frac{(1-\varepsilon)a}{\varepsilon^3}\rho u^2$$

$$=A\mu u+B\rho u^2$$

查 **20**℃，**101.3kPa** 空气，μ**=00181mPa.s**，

ρ=1.2kg/m^3

将两组数据代入上式

$$\begin{cases} 220=A\times 0.0181\times 0.3+B\times 1.2\times 0.3^2 \\ 1270=A\times 0.0181\times 0.8+B\times 1.2\times 0.8^2 \end{cases}$$

A=12193 B=1424

∴甲烷 $\dfrac{\Delta\mathscr{P}}{L}=A\mu u+B\rho u^2$

$$=12193\times 0.012\times 0.4+1424\times 4.5\times 0.4^2$$

$$=1084Pa/m$$

本学时的重点：

$$\frac{\Delta\mathscr{P}}{\rho}=\lambda\frac{L}{d}\frac{u^2}{2}$$

L_e, d_e

床层特性

$\varepsilon, a_B(=(1-\varepsilon)a)$

颗粒群特性

$d_m \left(=\dfrac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}}\right)$

单颗粒特性

非球形： ψ， d_e

球形：d_p

数学模型法

爬流

比表面积

a