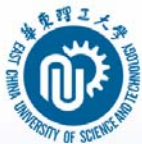




## 第二章 过滤

### 澄清过滤



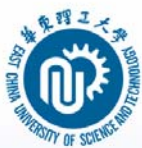
### 2.3 澄清过滤

本节的主要内容

2.3.1 澄清过滤法分类及比较

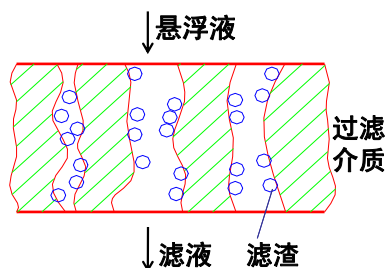
2.3.2 截留机理

2.3.3 深层过滤过程

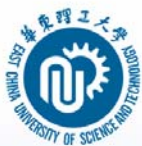


## 2.3 澄清过滤

- 利用过滤介质间空隙进行过滤
- 通常发生在以固体颗粒为滤料的过滤操作中
- 滤料内部空隙大于悬浮颗粒粒径
- 悬浮颗粒随流体进入滤料内部，在**拦截、惯性碰撞、扩散沉淀**等作用下颗粒附着在孔道中滤料表面上而与流体分开



流体在颗粒滤料层中的流动规律



### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

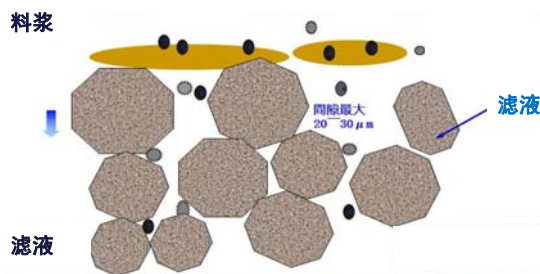
- 粒状层过滤或深层过滤
- 直接过滤
- 助滤剂过滤
- 膜过滤
- 磁过滤



### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

**粒状层过滤或深层过滤:** 以沙子等粒状物质为介质，由粒状物质的空隙捕捉固体粒子。

通常，被捕捉的粒子直径远远小于空隙的直径，捕捉在介质内部深处进行。



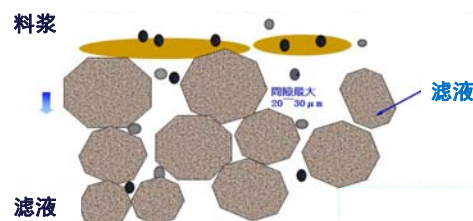
- 滤层常常会出现因滤层堵塞而造成压降过高情况，因此需要洗涤滤层。
- 为了避免频繁发生这样的情况，粒状层过滤通常只适用于浓度非常低的悬浮液的过滤。

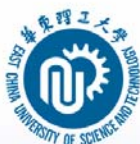


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

#### 粒状层过滤或深层过滤

- 为了提高过滤效果，通常会通过减小粒状滤料粒径的办法来提高滤床横断面上的均匀致密性和增大比表面积。
- 粒状滤料滤层在反冲洗时，上向流水流使砂粒处于悬浮的流化状态，使其产生水力分级现象，也就是自动地重新按小颗粒在上、大颗粒在下的顺序排列，从而使孔隙尺寸也从上到下逐渐增大。



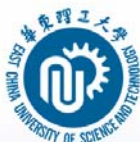
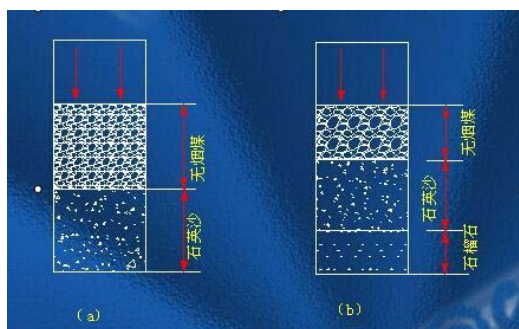


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

#### 粒状层过滤或深层过滤

**理想滤层：**沿过滤方向孔隙尺寸按**由大到小**递减分布的滤层。

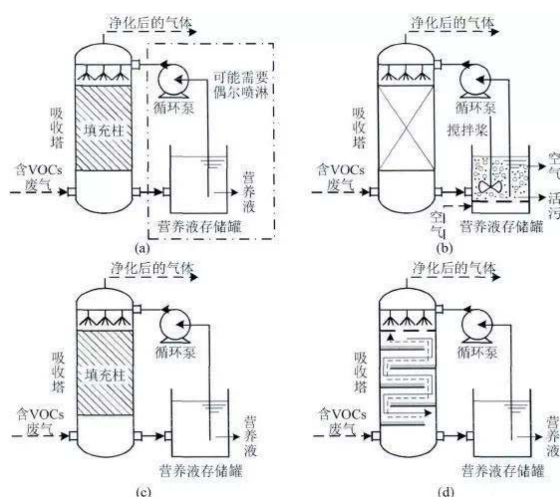
- 这样一种分层方式就可以在过滤过程中可有效地克服过滤时上部滤层水头损失快速升高的缺点，使更多的悬浮物有机会进入更深的滤层得以截留，如此，在过滤终了时，整个滤层的效能均能得以充分发挥。
- 双层滤料：无烟煤+石英砂
- 三层滤料：无烟煤+石英砂+石榴石

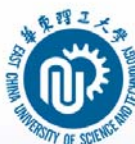


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

#### 粒状层过滤或深层过滤

**生物过滤：**用于处理或降解污染物（如恶臭、易生物降解的挥发性化合物和不产生酸性副产物的化合物）的有机质载体。



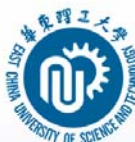
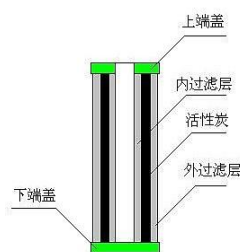


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

#### 直接过滤

**直接过滤：**滤芯过滤和微细筛网过滤

- 处理量不大时用**滤芯式过滤**。滤芯过滤能截留小到0.1 微米的粒子，并能除掉小于该尺寸的胶体粒子。
- 滤芯过滤可分成三类：深度过滤、表面过滤、边缘过滤。
- **微细筛网过滤：**适用于大容量过滤，广泛引用于饮料和废水处理等领域。

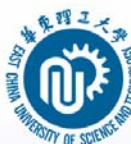


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

#### 助滤剂过滤

- **预敷层过滤：**兼有滤饼过滤和澄清过滤特点
- 最常用的是硅藻土，是优良的过滤介质
- ① 一般不与酸碱反应，化学性能稳定；
- ② 形状不规则，空隙大且多孔，具有很大的吸附表面
- ③ 无毒且不可压缩，形成的过滤层阻力不随操作压力变化
- **硅藻土预敷层过滤**

作为深层过滤介质。硅藻土过滤层具有曲折的毛细孔道，借筛分、吸附和深层效应作用除去悬浮液中的固体粒子，截留效果可达 $1\mu\text{m}$ 。

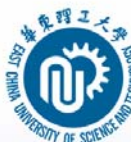


### 2.3.1 澄清过滤法的分类及比较

各种澄清过滤技术的比较

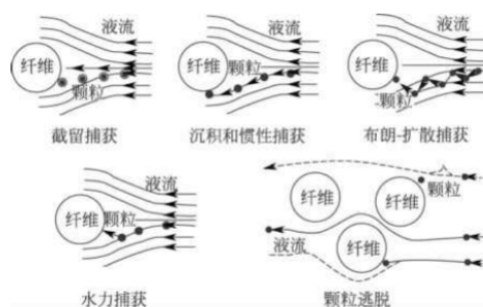
过滤技术	典型表现流速 $/\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	固相浓度为 $0.1 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 介质再生前单位过滤 面积所得到的滤液体 积/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$	除去单位 质量杂质 的相对运 行成本 <sup>①</sup>	可以得到的最好滤 液质量 <sup>①</sup>
深层床过滤	8(约2mm/s)	60(滤渣厚约6mm)	3	4
预敷过滤	50	1000	2	2
滤芯过滤	20	100	1	3
筛网过滤	35	连续	4	1

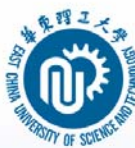
①数值越大表示性能越好或费用越低



### 2.3.2 截留机理

- 筛分作用
- 重力沉淀
- 拦截
- 惯性碰撞
- 扩散
- 流体动力干涉
- 静电吸引
- 电双层排斥
- 范德华-伦敦力
- 生物作用

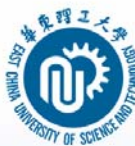
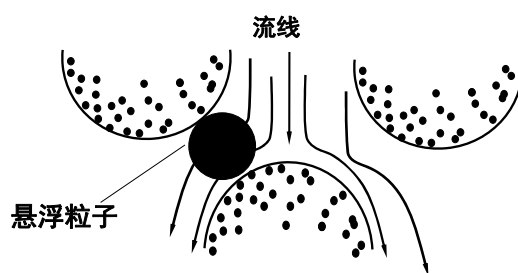




### 2.3.2 截留机理

#### 筛分作用

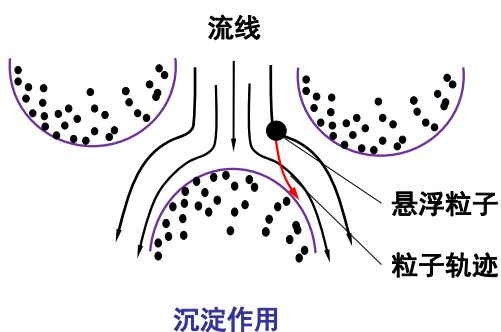
- 筛分作用（Straining）是收集固体粒子的最简单的机理。当筛网孔隙比固体粒子直径小时，就产生筛分作用。



### 2.3.2 截留机理

#### 重力沉淀

- 当悬浮液朝下通过介质时，悬浮粒子将因重力沉淀（Gravity Sedimentation）作用而被去除，如图所示。

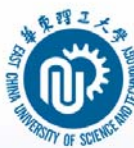


如果将粒状层中的间隙看成是微小沉淀池，那么固体粒子的沉淀可能性可用一个无量纲数来表征。此数就是斯托克沉淀速度 $u$ 与流体逼近速度 $v$ 之比值 $s$ ：

$$s = \frac{u}{v} = \frac{g(\rho_s - \rho_L)x^2}{18\mu v} \quad (2-33)$$

$$(v \propto Q/A)$$





## 2.3.2 截留机理

### 重力沉淀

$$\frac{u}{v} = \frac{g(\rho_s - \rho_L)x^2}{18\mu v}$$

(2-33)

Q—流量, L/min; A—过滤面积, m<sup>2</sup>;  
v—流体逼近速度, m/s;  
 $\rho_s, \rho_L$ —固体粒子的密度和液体的密度, g/m<sup>3</sup>;  
x—沉淀固体粒子的直径(有时用  $d_p$  表示),  $\mu\text{m}$ ;  
 $\mu$ —液体黏度, Pa·s; g—重力加速度, m/s<sup>2</sup>

通常,  $u$  比  $v$  小, 单层粒状介质的固体粒子除去率为  $\gamma = \alpha(u/v)$ , 其值很小。多层粒状介质的固体粒子的总除去率  $R$  就增大了, 如下式:

$$R = 1 - \alpha(u/v)^n$$

式中  $\alpha$ —常数;  $n$ —粒状介质的叠层数

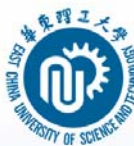
$$u/v = 0, \gamma = 0$$

$$u/v \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow$$

$$\mu \uparrow \rightarrow \gamma \downarrow$$

$$x = d_p \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow$$

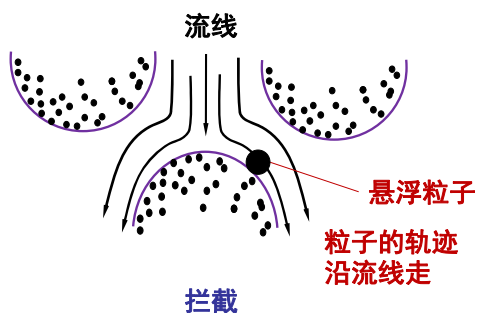
$$v \uparrow \rightarrow \gamma \downarrow$$



## 2.3.2 截留机理

### 拦截

当流线通过介质颗粒的周边时, 如果流线束距过滤介质表面的距离小于悬浮粒子的直径, 那么处于此流线束内的悬浮粒子, 就与介质相接触。此种输送现象称做拦截(Interception), 在流线收缩的部分能非常明晰地见到, 如图所示。



借助流线使悬浮粒子与过滤介质接触, 从而实现捕捉的概率可用

无量纲数  $I$  表示:

$$I = \frac{d_p}{D_p} \quad (2-34)$$

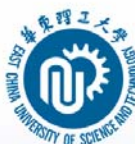
式中:  $d_p$ —悬浮粒子直径,  $\mu\text{m}$ ;

$D_p$ —过滤介质颗粒的直径,  $\mu\text{m}$ ;

$I$  值越大, 捕捉粒子的概率便越高



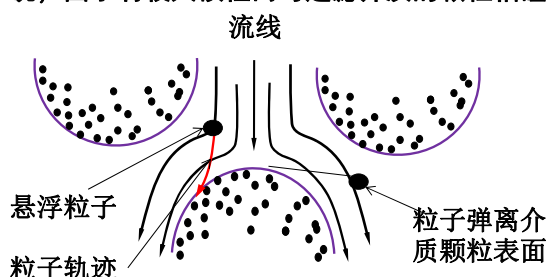




## 2.3.2 截留机理

### 惯性碰撞

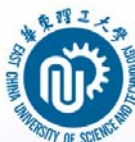
当悬浮液通过介质颗粒间的回曲流道时，若是悬浮粒子与液体之间的密度差很大，那么悬浮粒子将不追随流线方向的改变而改变自己的运动方向，就是说，由于有较大惯性而与过滤介质的颗粒相碰撞，直至被捕捉，如图所示



表征粒子惯性的无量纲项  
称做斯托克数：

$$\text{斯托克数} = \frac{\rho_s x^2 u}{18 \mu d_t}$$

式中， $\rho_s$ 是悬浮粒子的密度， $x$ 是悬浮粒子的直径， $u$ 是粒子的沉淀速度， $\mu$ 是液体的黏度， $d_t$ 是表征介质颗粒（砂粒、助滤剂粒及纤维等）特征的线性尺寸。



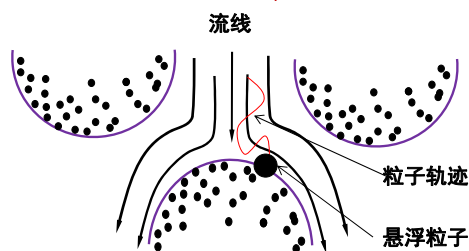
## 2.3.2 截留机理

### 扩散

悬浮粒子因受到其周围做热运动的液体分子的碰撞，而获得进行布朗运动的足够动量。连续的碰撞使悬浮粒子有机会靠近介质的表面，直至被捕捉。

普遍认为：粒子扩散(Diffusion)  
仅适于直径小于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子。扩散过程可用无量纲的皮克里特  $P_e$ (Peclet)准数 来表征：

$$P_e = \frac{D_p v}{D_{br}} \quad (2-3-3)$$

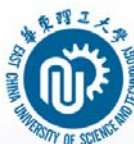


式中  $D_p$ -介质颗粒(如砂子)的直径,  $\mu\text{m}$ ;  $v$ -悬浮粒子的运动速度,  $\mu\text{m/s}$ ;  $D_{br}$ —扩散系数

$$D_{br} = \frac{KT}{3\pi\mu d_p} \quad (2-3-4)$$

式中： $K$ -玻耳兹曼常数( $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )；  
 $T$ -绝对温度, K;  $\mu$ -流体的黏性系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  
 $d_p$ -悬浮粒子的直径,  $\mu\text{m}$

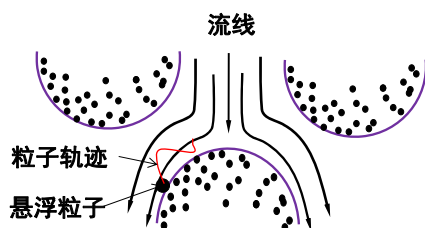




## 2.3.2 截留机理

### 流体动力干涉

表示流体动力干涉(Hydrodynamic interaction)的原理图如图所示。



在研究液体流量时，通常用雷诺数来区别流动的类型。液体在管中流动时，雷诺数为：

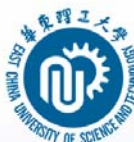
$$R_e = \frac{d \bar{v} \rho}{\mu} \quad (2-3-5)$$

式中： $d$ —管子直径，mm； $\bar{v}$ —平均流速，m/s； $\rho$ —流体密度，g/cm<sup>3</sup>； $\mu$ —流体黏度，Pa·s

但深层介质是由不同尺寸的流道组成的。应该用布莱克准数(Blake number)取代雷诺数：

$$Bl = \frac{x U_0 \rho}{\mu(1-\varepsilon)} \quad (2-39)$$

式中： $x$ —介质颗粒的平均直径， $\mu\text{m}$ ； $U_0$ —表面液体流速，cm/s； $\varepsilon$ —深层介质的孔积率，%

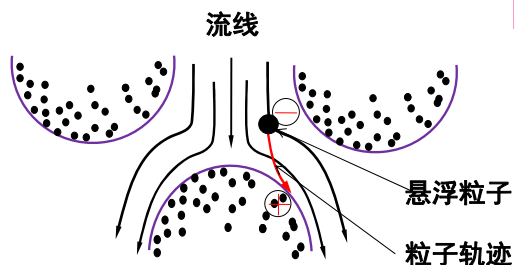


## 2.3.2 截留机理

### 静电吸引

- 给固-液或者液-液分散系施加电场，则悬浮粒子便向阴极或者阳极移动。
- 在电场下，分散粒子的这种移动现象称为电泳(Electrophoresis)。电泳的斯姆拉克斯基(Smoluchowski)公式为：

$$U_E = \frac{E \varepsilon_w \zeta_p}{\mu} \quad (2-40)$$



式中：

$U_E$ —电场引起的分散粒子的移动速度，m/s；

$\varepsilon_w$ —分散介质的介电常数；

$\zeta_p$ —分散粒子的杰达(Zeta)电位，V

静电吸引 (Electrostatic attraction)

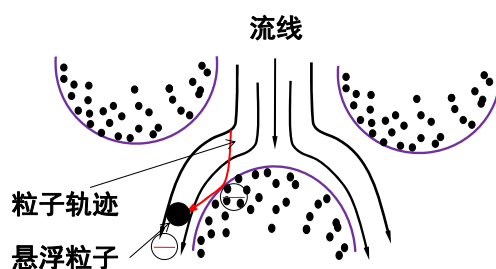




### 2.3.2 截留机理

#### 电双层的排斥

悬浮粒子的附着水层内的电双层(Electrical double layer)是这样形成的：悬浮粒子表面的净负电荷将水中的阳离子吸近，同时将阴离子斥远。结果，在粒子表面近旁形成了非常薄的固定层（牢固吸住阳离子，粒子因此带有界面电荷）和较厚一些的扩散层，即形成了电双层。



静电相斥的机理图

两相邻粒子的电双层是这样引起相斥的：当两粒子接近到彼此的电双层重叠时，重叠部分的离子浓度增大，造成渗透压增大，界面自由能增大，引起粒子间的斥力势能 $V_R$ 增大，最终导致两粒子相斥。



### 2.3.2 截留机理

#### 范德华-伦敦力

为了解释非理想气体的特性，范德华假设：在中性的，化学饱和的分子之间，存在着吸引力。此吸引力与离子吸引和电吸引无关，称为范德华力(Vander waals forces)。范德华力还存在于胶体粒子之间。只有当两相邻粒子之间的距离极近时，范德华力才能体现。

这些普遍存在的吸引力，最先由伦敦(London)给予了解释。他认为这是由于一个粒子的起伏的电荷分布，在另一粒子上引起了极化电荷的缘故。

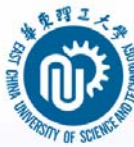


### 2.3.2 截留机理

#### 生物作用

像净水处理用的缓速砂层过滤那样，在粒状滤层的表面上生成了凝胶体生物过滤膜(微生物集群)。悬浮粒以附着在生物体表面的机理被捕捉。生物体的间隙越小，其捕捉作用越大。附着捕捉到的有机物粒子受到生物分解，并由生物体收取；而无机粒子受到氧化。

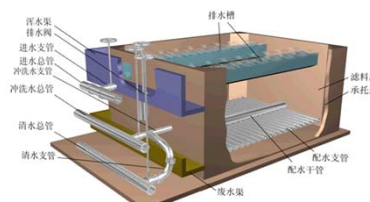
这些具有广泛能力的生物群的厚度至多不超过1cm。按其生物化学能力，能除掉多种无机、有机成分。这是其优点。缺点是只适用于处理低浓度污染液。



### 2.3.3 深层过滤过程

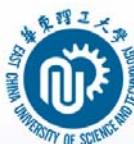
#### 缓速过滤池

- 深层过滤：流体通过充填着砂子、活性炭等粒状物的滤层，而得到净化的方法。
- 只适用于浓度非常低的悬浮液的过滤
- 深层过滤能除掉亚微米级的粒子，这样小的粒子很难用沉淀法或普通过滤法来处理。
- 最早应用的砂滤是净化水的砂滤池，分为快速过滤和慢速或缓速过滤两类。



普通快速池

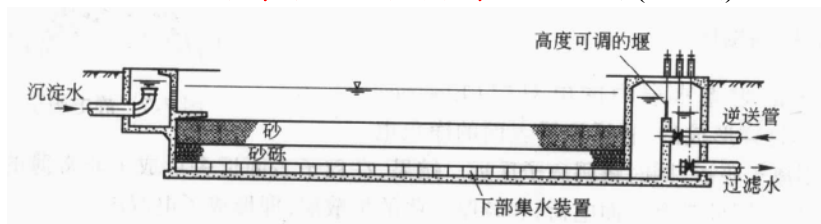
东方红COPYRIGHT



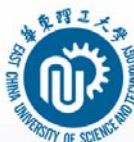
### 2.3.3 深层过滤过程

#### 缓速过滤池

- 缓速滤池的结构：过滤膜+砂+砂砾+下部集水装置+高度调节堰  
调节堰要高于滤层面，以免滤层成负压，破坏过滤膜(介质层)



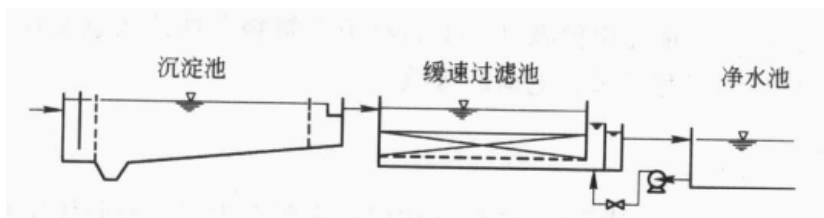
- 过滤介质：过滤膜(Schluzdecke)+砂+砂砾，过滤膜占主导。
- 缓速过滤膜是由喜气性生物及其代谢物构成的致密膜，带有悬浮粒子的原水通过砂层时，就由沉淀物在滤层的表面上生成了此过滤膜
- 悬浮物被筛分除掉，细菌则由生息在过滤膜内的生物捕食并除掉，铁、锰被生物膜氧化去除，氨被硝化，氮被脱除，臭气被分解



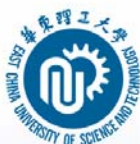
### 2.3.3 深层过滤过程

#### 缓速过滤系统

- 缓速过滤系统包括沉淀池、缓速过滤池、净水池等，过滤速度常为3~5m/d，最快为10m/d。
- 优点：净水的水质好



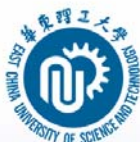
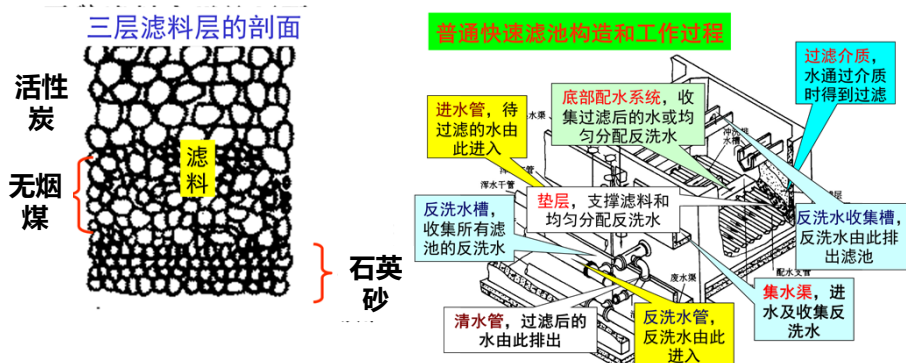
- 缺点：连续地过滤使滤膜增厚、压降升高、过滤速度逐渐降低，需人手刮换过滤层，喜气性的生物只能在良质水中生息，大型水厂已减少采用



### 2.3.3 深层过滤过程

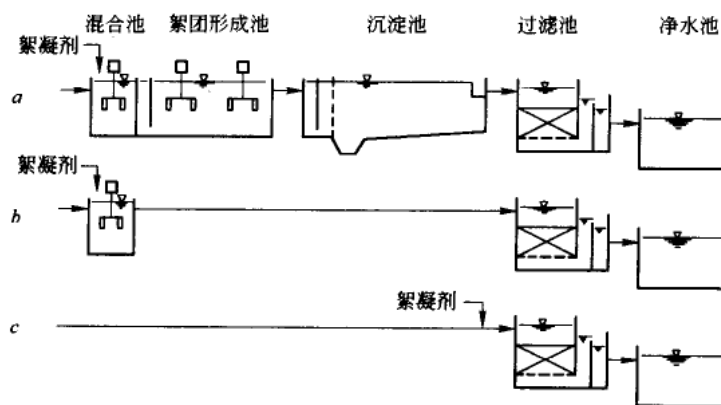
快速过滤

- 快速过滤能有效地去除经沉淀后尚在悬浮液中的颗粒，用粒度为0.5~1.0mm的砂和无烟煤等作为滤料，滤料层厚60-90厘米，孔隙率大约是40%~55%，滤速是5~15m/h



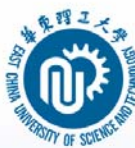
### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤



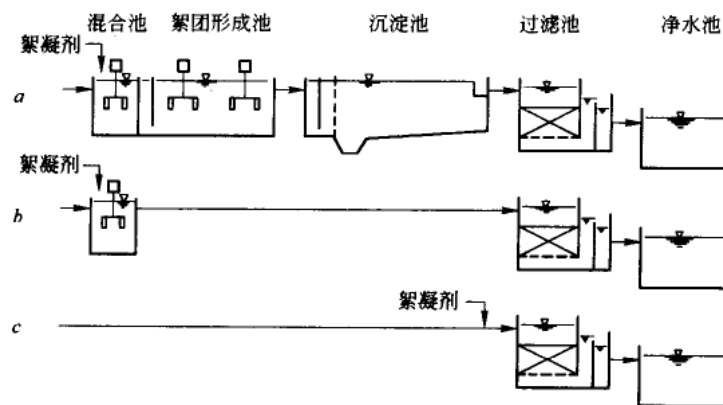
快速过滤系统

a-作为化学反应器的快速过滤；b-微絮团过滤；c-凝絮过滤



### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤



快速过滤系统

a-作为化学反应器的快速过滤；b-微絮团过滤；c-凝絮过滤



### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤

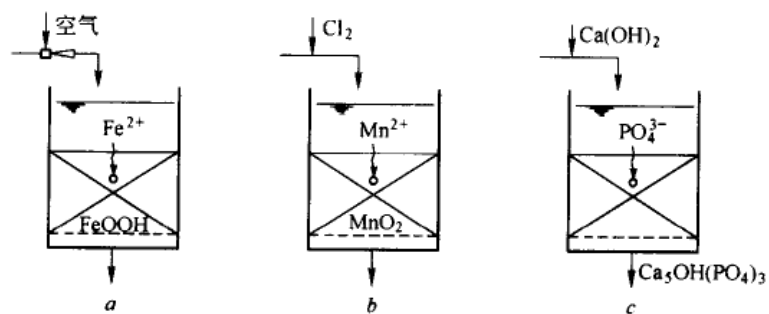
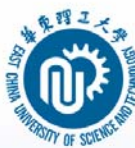


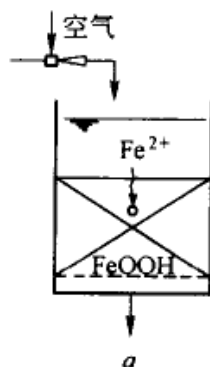
图 以触媒为过滤介质的化学反应槽

a-利用敷有 $\text{FeOOH}$ 层的砂层除铁；b-利用敷有 $\text{MnO}_2$ 层的砂层除锰；c-利用粒状 $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ 为滤层脱磷

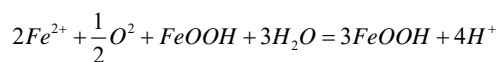


### 2.3.3 深层过滤过程

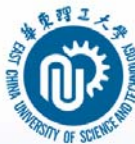
快速过滤



- 二价铁在水中溶解度高，三价铁小。
- 氧化剂的选择：空气or氯气
- 催化剂：FeOOH

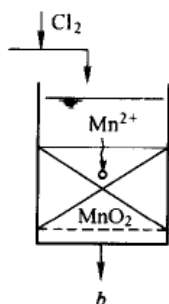


a-利用敷有FeOOH层的砂层除铁

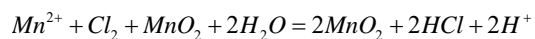


### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤

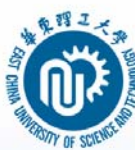


- 二价锰溶于水，四价锰不溶于水。
- 氧化剂：氯气
- 催化剂：MnO<sub>2</sub>



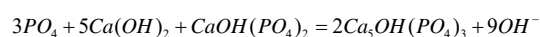
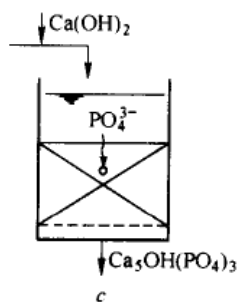
b-利用敷有MnO<sub>2</sub>层的砂层除锰



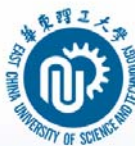


### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤



c-利用粒状 $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ 为滤层脱磷

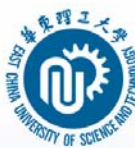


### 2.3.3 深层过滤过程

快速过滤

表 缓速过滤与快速过滤的比较

比较项	缓速过滤	快速过滤
过滤速度	3~5m/d，最大10m/d	120~400m/d，1500m/d 也可能
除油机理	借助生物过滤膜	以物理化学分离为主
预处理	不必要	必须絮凝处理
功能再生	刮掉过滤介质	逆流洗涤
过滤水质	臭气、气菌、氮也能除掉	不能除掉臭气和氮
原水水质	含有溶解氧的良质水	只要能絮凝就可以
构造	滤层不可发生负压	滤层发生负压也可以

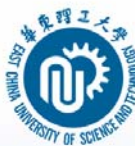


### 2.3.3 深层过滤过程

#### 活性炭过滤



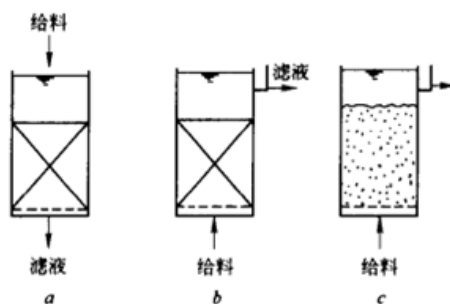
- 活性炭粉状、圆柱状、纤维状、颗粒、不定型、球状等。
- 活性碳：大孔孔径 $>500\text{\AA}$ 、过渡孔孔径 $20\sim500\text{\AA}$ 、微孔孔径 $<20\text{\AA}$ ，活性炭的表面积主要是由微孔提供的。
- 根据吸附过程中，活性炭分子和污染物分子之间作用力的不同，可将吸附分为两大类：**物理吸附**和**化学吸附**(又称活性吸附)。
- 在吸附过程中，当活性炭分子和污染物分子之间的作用力是**范德华力**(或静电引力)时称为物理吸附；当活性炭分子和污染物分子之间的作用力是化学键时称为化学吸附。



### 2.3.3 深层过滤过程

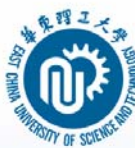
#### 活性炭过滤

活性炭的接触槽分为向下流固定层、向上流固定层以及向上流流动层等三类，分别如图a、b、c所示。此外还有可再生的半连续式移动床接触槽



粒状活性炭接触(吸附)槽

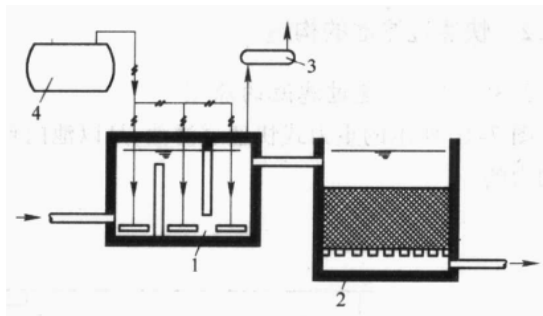
固定层活性炭接触槽的构造与快速过滤槽大致相同。它除了能吸附上面列举的物质外，滤层上还截留有悬浮物质。因此需通过逆洗将这些物质定期排出



### 2.3.3 深层过滤过程

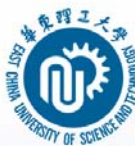
#### 生物活性炭过滤装置

- 生物活性炭过滤装置无需另外进行活性炭再生操作；臭氧将水中的不饱和有机化合物的二重结合或三重结合切断，使之容易被生物分解，而活性炭将这些有机物吸附，也称生物再生。



生物活性炭过滤简图

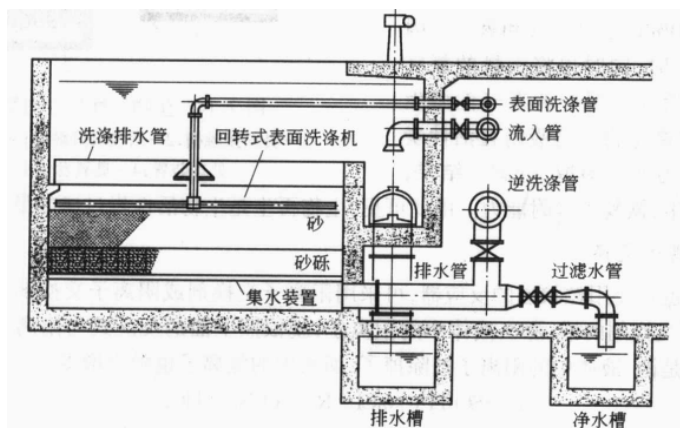
1—臭氧接触槽；2—活性炭接触槽；3—废臭氧处理装置；4—臭氧发生器

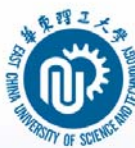


### 2.3.3 深层过滤过程

#### 重力式快速过滤池的原型

- 以池内自由水面的水位与排水管水位的水头差作为过滤推动力的。

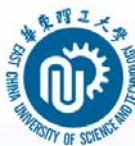
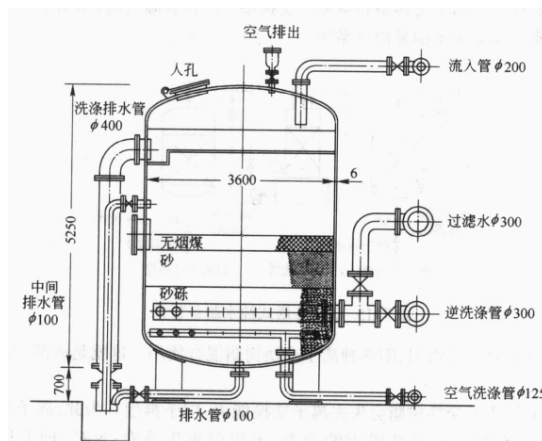




### 2.3.3 深层过滤过程

#### 加压式快速过滤罐

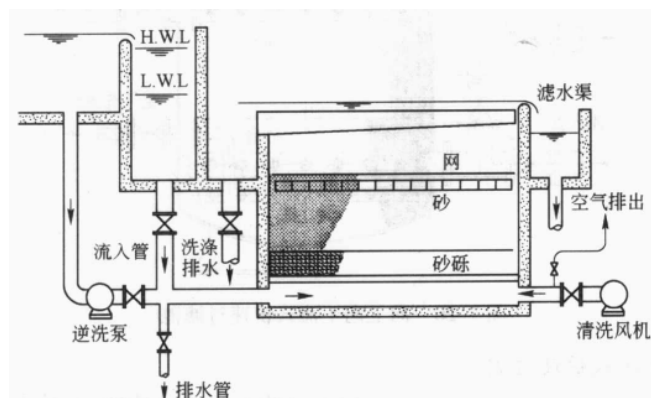
- 优点在于只要提高流入压力，就能补偿过滤损失水头，而不必像重力式那样必须增大过滤池的高度。

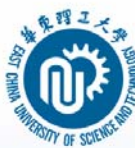


### 2.3.3 深层过滤过程

#### 向上流式快速过滤池

当浊水从滤层下方向滤层上方流动时，滤层呈流态化，整个滤层都在截留悬浮物，因而过滤损失水头的上升趋势减缓，悬浮物的截留量大。

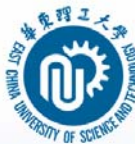
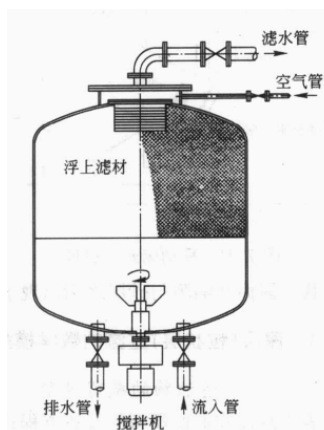




### 2.3.3 深层过滤过程

#### 快速过滤池的原型

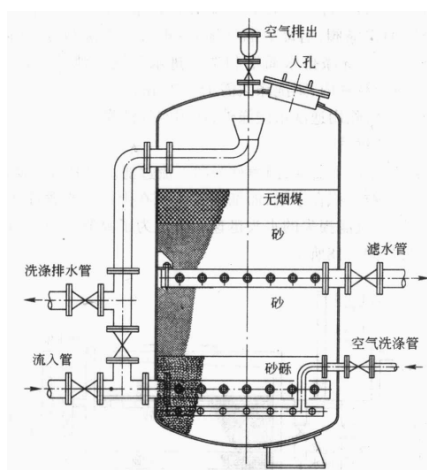
为了克服滤层膨胀流态化造成已截留的悬浮物随着净水流出这一缺点，可采用中空塑料球那样密度小于水的过滤介质，如下图所示。



### 2.3.3 深层过滤过程

#### 向上-向下流式快速过滤

- 向上-向下流联合式快速过滤池，能抑制单纯向上流时滤层的膨胀，如图所示。浊水从槽的上、下两端加入，净水从槽的中部集水管排出。
- 由于滤层的上下受到同样的压力，所以即使在过滤速度较大时，滤层也不膨胀，而且过滤面积增大了1倍，过滤速度能高达1000m/d。





### 2.3.3 深层过滤过程

#### 移动床式快速过滤

以上快速过滤池都是在一个槽内完成过滤和洗涤。而移动床式快速过滤池，却是过滤与洗涤分别在各自的槽内进行，致使过滤几乎实现了连续化，如图所示

