

《水污染控制工程》



沈耀良

Ph.D/Professor

2010-3-9

苏州科技大学

University of Science and technology of Suzhou(USTS)

1

《水污染控制工程》

第2篇



物理、化学及物理化学处理工艺原理

□ 主要内容

- [5.1](#) 过滤工艺的基本原理与类型
- [5.2](#) 滤池的构造、运行及除污原理
- [5.3](#) 滤池的工艺设计
- [5.4](#) 其他类型的滤池（简介）



5.1 过滤工艺的基本原理与类型

- 5.1.1 过滤的基本概念
- 5.1.2 过滤的主要处理对象及功能
- 5.1.3 过滤在水处理工艺中的位置
- 5.1.4 过滤工艺的类型



西安饮用水处理厂

5.1.1 过滤的基本概念

- 以粒状滤料层（如石英砂、无烟煤等）截留水或废水中的细小杂质而使得到澄清的处理工艺。
 - 给水处理中常用的传统处理工艺。
 - 废水处理中常用于深度处理或用于保护其它处理工艺（如活性炭吸附、离子交换及膜分离等）正常运行的预处理或以去除废水中细小**SS**的终处理工艺。

5.1.2 过滤的主要处理对象及功能

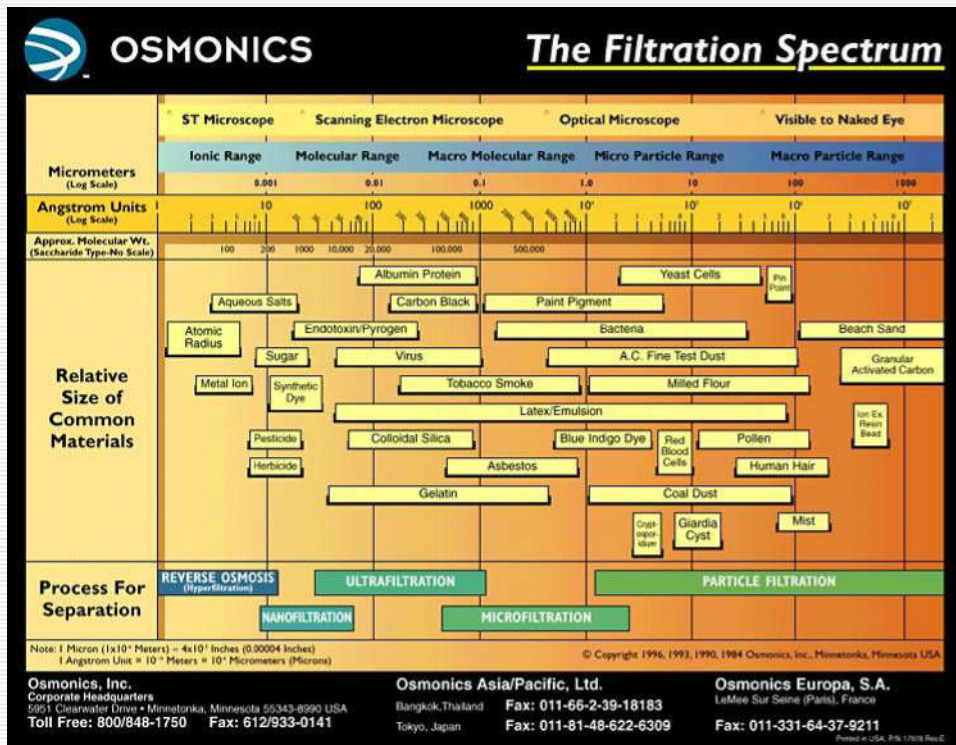
□ 处理对象

- 去除水或废水中细小（ $2\sim 10\mu\text{m}$ ）的**SS**、絮凝性胶体颗粒。
- 去除水或废水中有机物、大量的微生物及病源体。

□ 主要功能

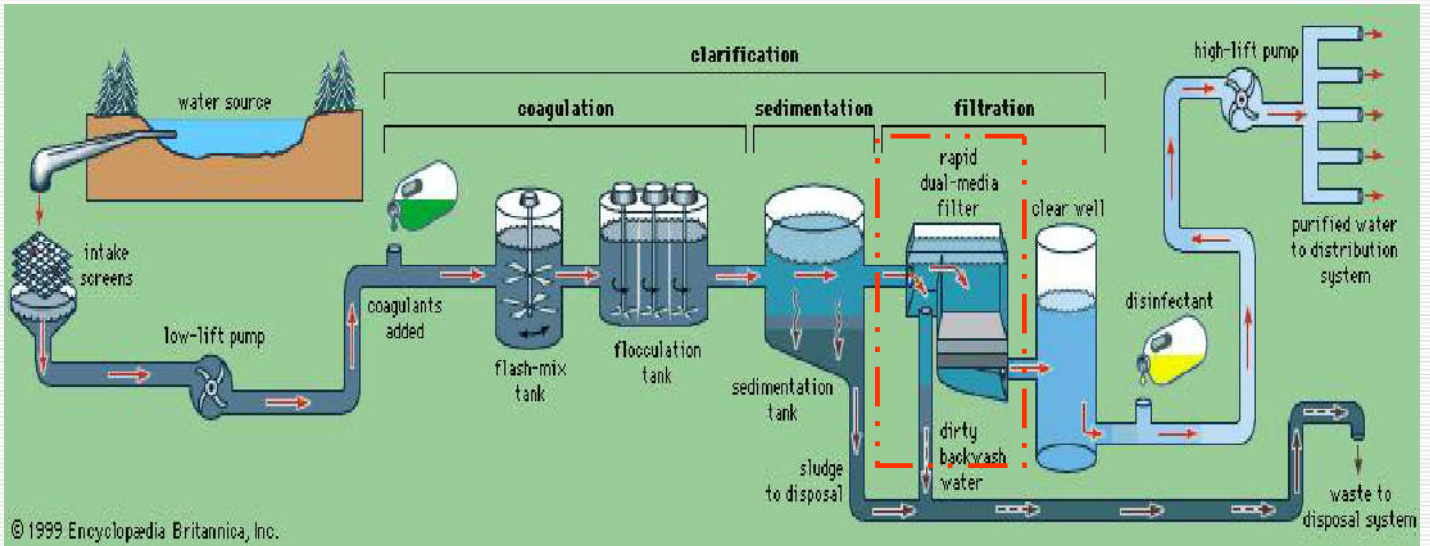
- 经其处理后使出水中残留的微生物体及病源体等失去保护而利于其在后续处理设施、中得以有效去除。
- 降低水或废水的浑浊度，使处理出水清澈透明。

5.1.2 过滤的主要处理对象及功能



5.1.3 过滤在水处理工艺中的位置

- 一般位于沉淀池处理工艺之后、深度处理工艺之前，有时也作最终处理工艺。

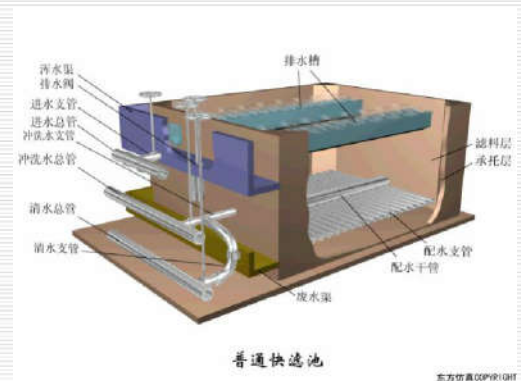


5.1.4 过滤工艺的类型

- **慢滤池，普通快滤池**（降流式、单层滤料）
- **多层滤料滤池**（改进滤料的组成及粒径分布，提高滤池的截污能力）
- **升流式滤池**（改进滤池的构造及工艺操作）
- **虹吸滤池、无阀滤池**（减少滤池的闸阀、简化运行控制、实现自动化）
- **压力滤池**（适用于小规模处理场合）

5.2 滤池的构造、运行及除污原理

- 5.2.1 基本组成及其功能（以普通快滤池为例）
- 5.2.2 运行过程
- 5.2.3 除污原理
- 5.2.4 滤池的运行方式及其分析
- 5.2.5 提高滤池过滤效能的途径



5.2.1 基本组成及其功能

□ 滤料层

- 一般以石英砂作滤料。粒径为 $0.5 \sim 1.2 \text{ mm}$ ，层厚一般为 $0.6 \sim 0.8 \text{ m}$ 。粒径自上而下有小至大分布。
- 截留细小的污染物。

□ 承托层

- 一般为鹅卵石层。粒径为 $2.0 \sim 32 \text{ mm}$ ，层厚一般为 $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$ 。粒径自上而下有小至大分布。
- 支撑滤料、均匀集水和布（配）水。

5.2.1 基本组成及其功能

□ 配水系统

- 一般均匀集水和配水。

□ 洗砂排水槽

- 过滤过程中起均匀配（布）水作用，冲洗过程中起集水作用。

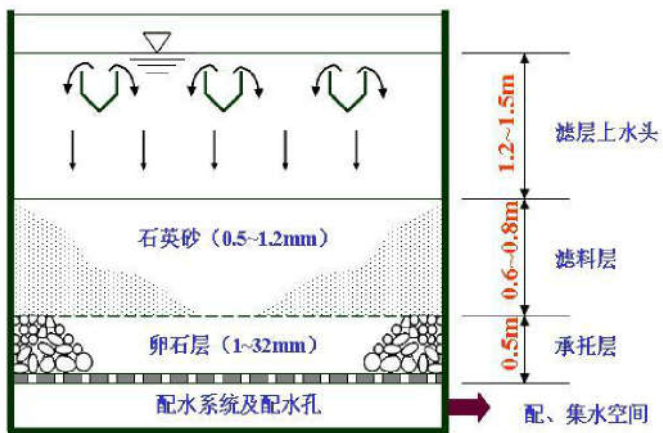
□ 反冲洗系统

- 将过滤过程中截留在滤料层中的污物以一定的方式清洗干净，恢复滤池的工作能力。

□ 进、出水闸阀及管道系统

- 原水管阀、清水管阀、反冲洗水管阀、反冲洗排水管阀、集水和配水管等。

5.2.1 基本组成及其功能



滤池构造示意图

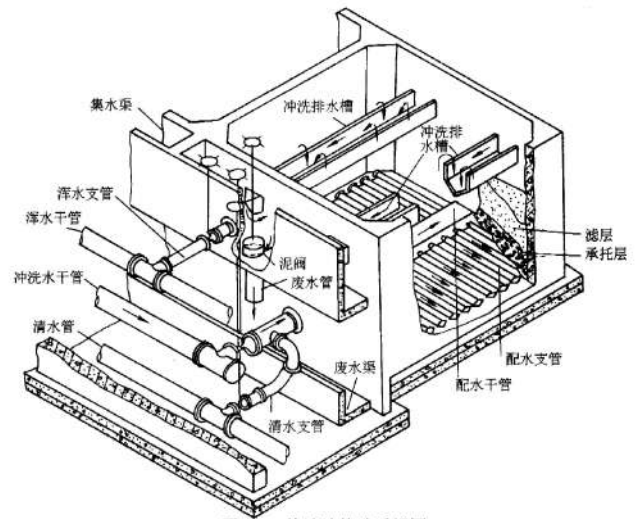
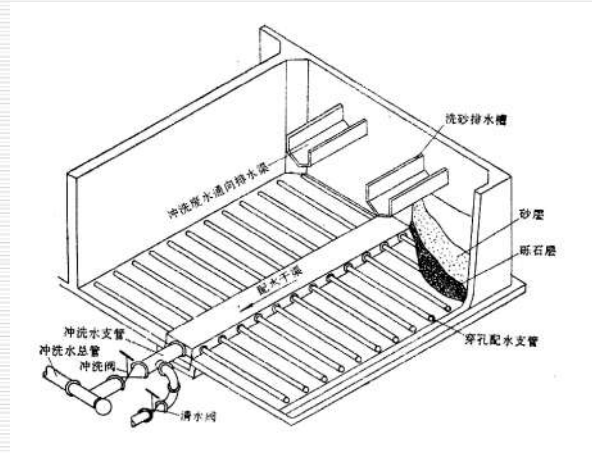
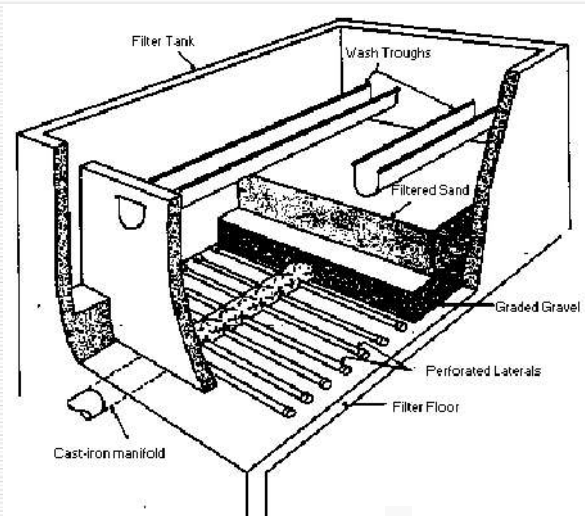


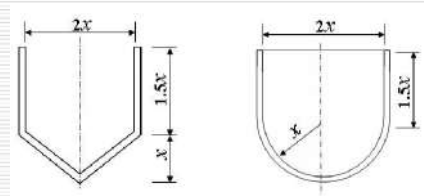
图 6-5 快滤池构造透视图

快滤池构造透视图

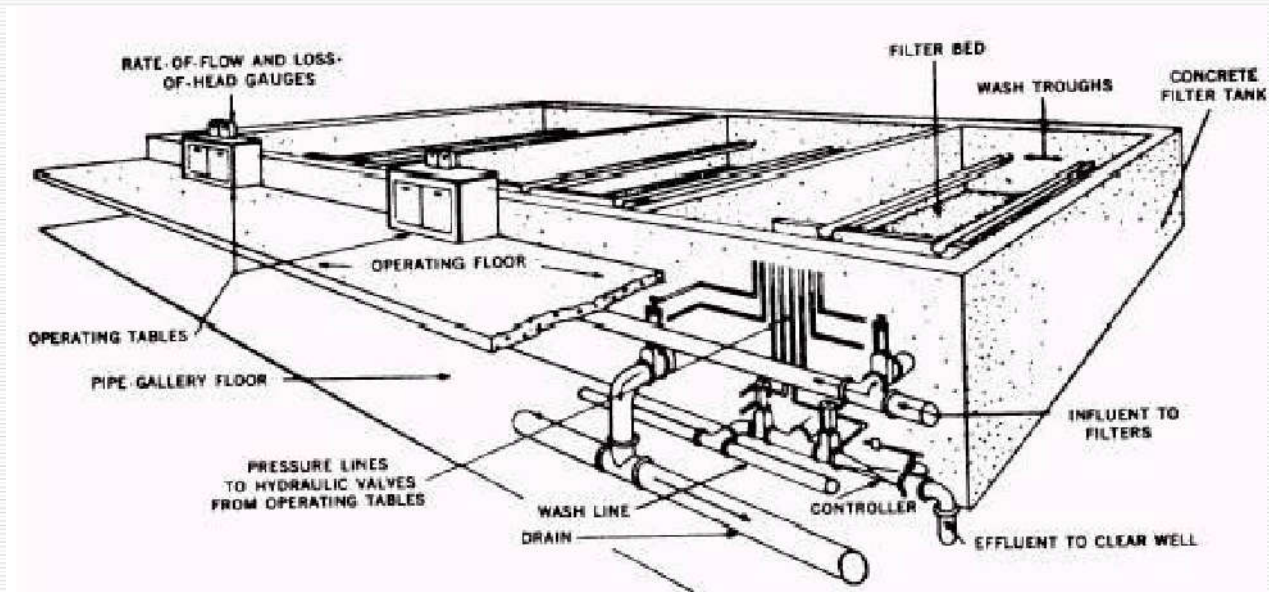
5.2.1 基本组成及其功能



滤池的基本构造

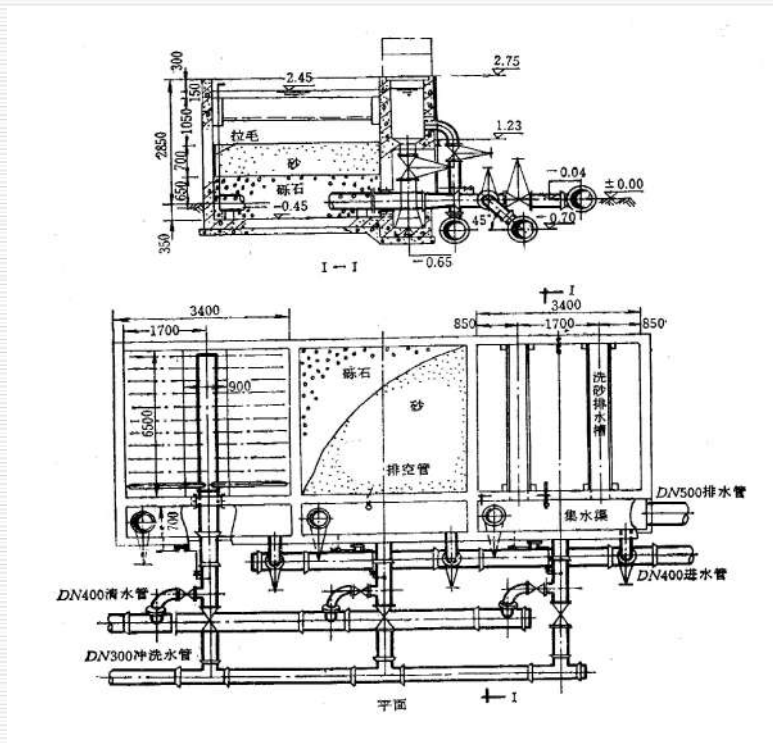


5.2.1 基本组成及其功能



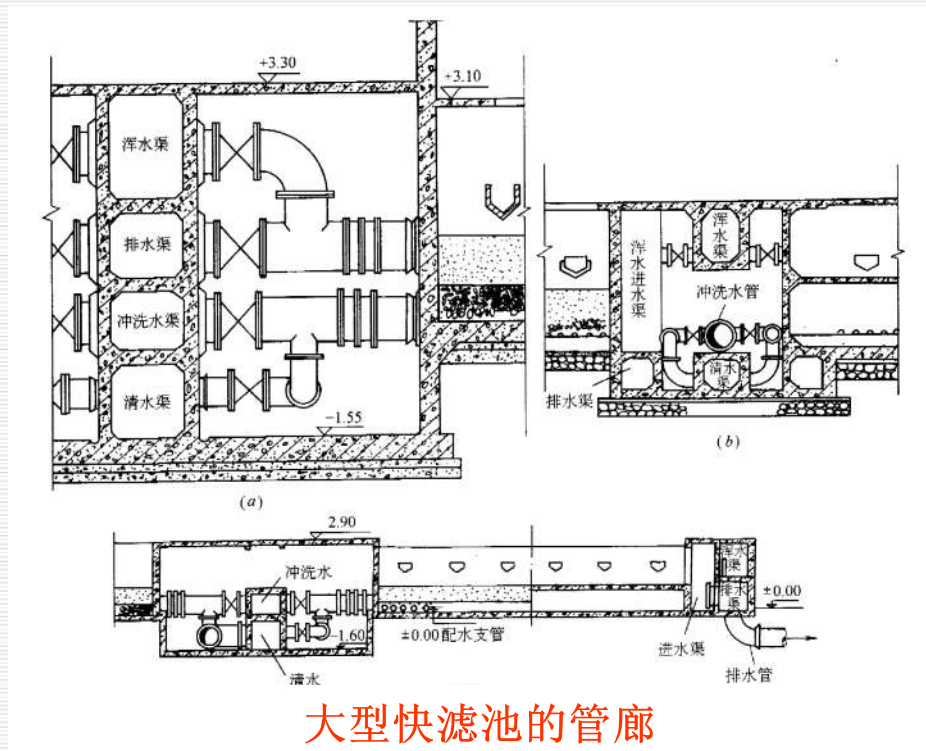
过滤工艺系统

5.2.1 基本组成及其功能

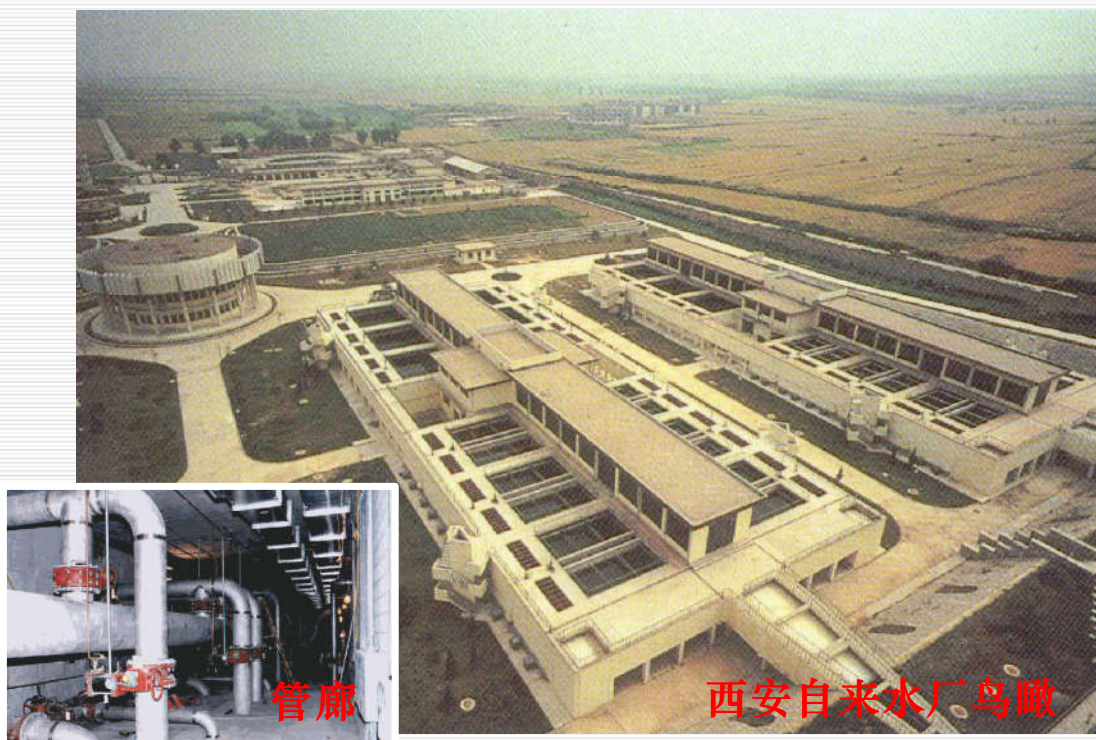


普通快滤池的平面及剖面布置

5.2.1 基本组成及其功能



5.2.1 基本组成及其功能



5.2.2 运行过程

□ 过滤

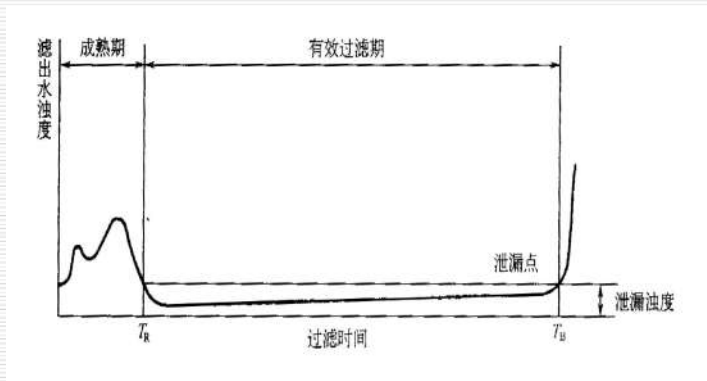
- 水流走向：原水（来自前处理工艺，如沉淀池）→集水渠→洗砂排水槽→滤料层→承托层→集、配水系统→清水管→贮水池（清水池）或后处理设施

□ 反冲洗

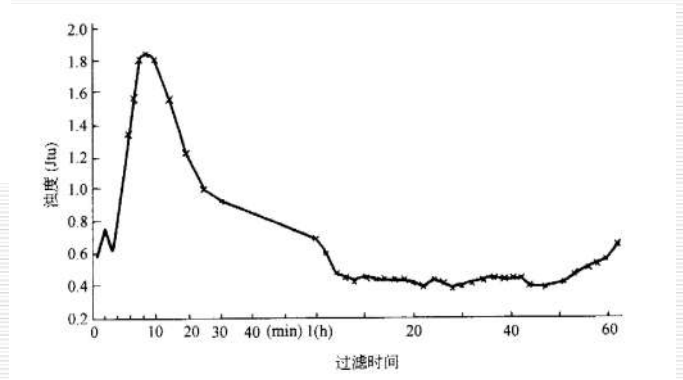
- 水流走向：冲洗水（来自贮水池或水塔）→冲洗水管→集、配水系统→承托层→滤料层→洗砂排水槽→集水渠→废水渠（去下水道或后处理）

完成一个过滤—反冲洗过程为一个周期

5.2.2 运行过程

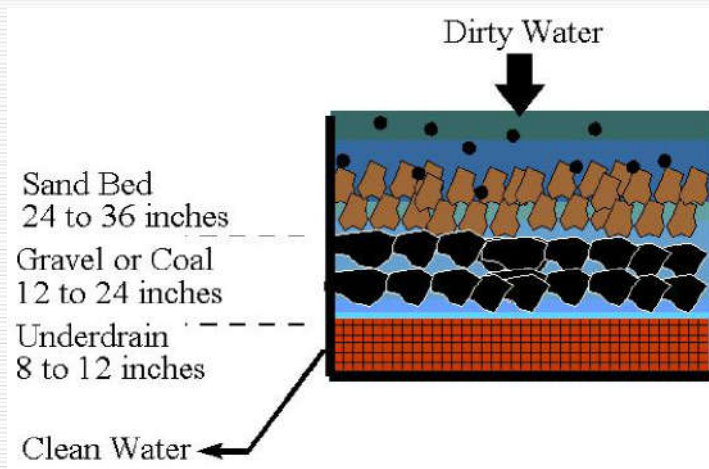


过滤出水浊度—时间曲线

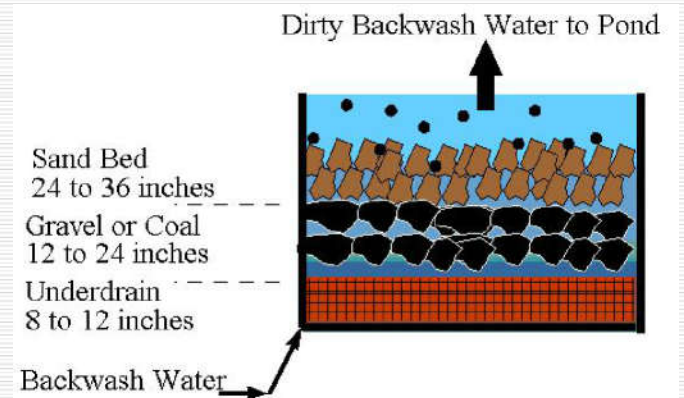


过滤出水浊度—时间曲线实例

5.2.2 运行过程

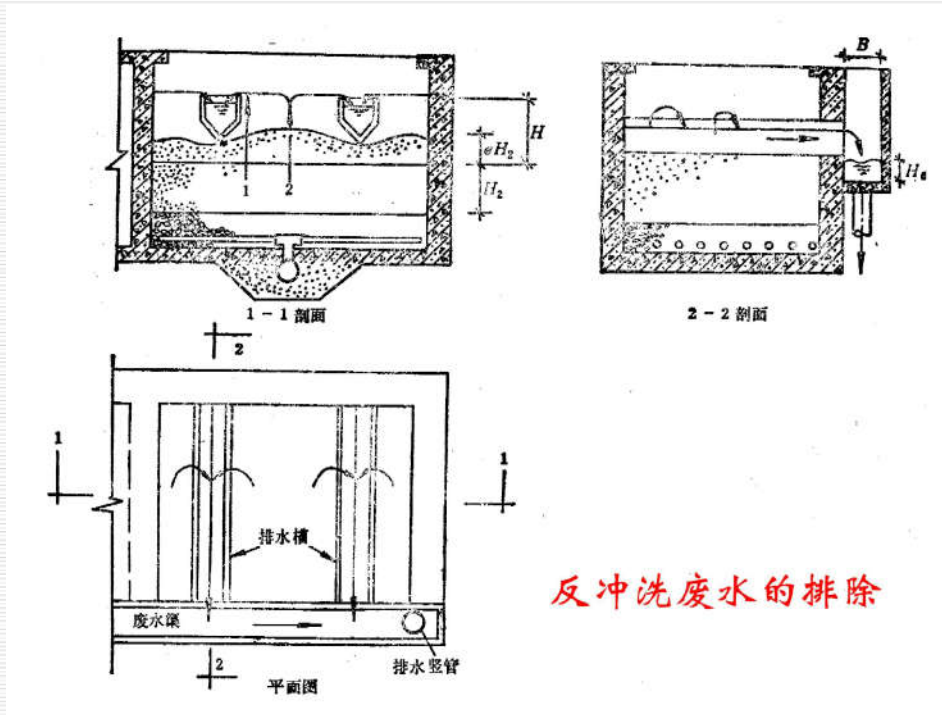


滤池的过滤

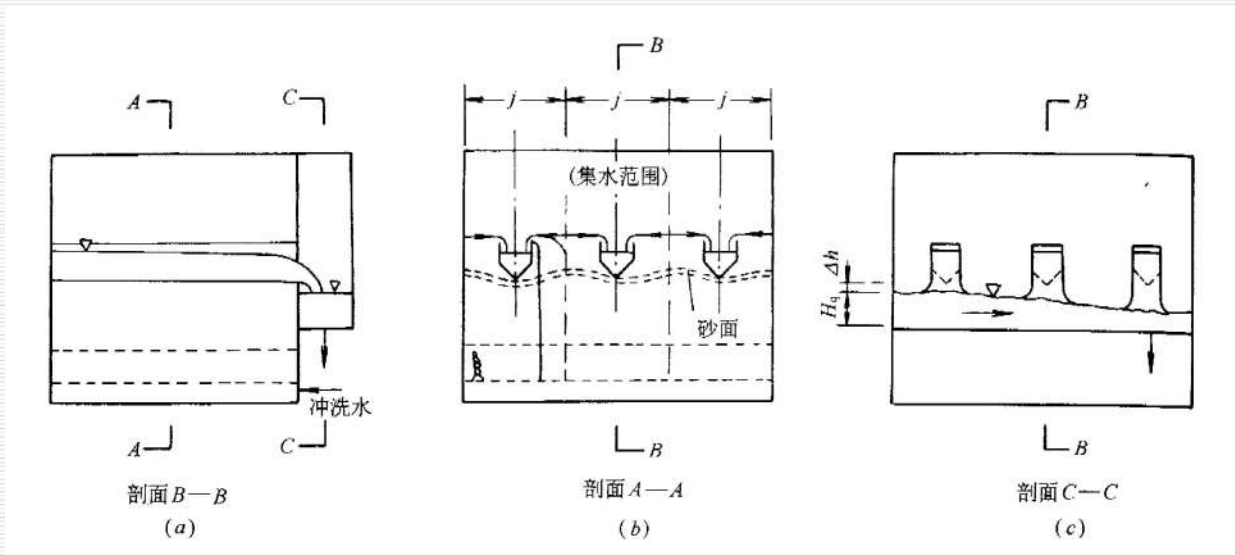


滤池的反冲洗

5.2.2 运行过程



5.2.2 运行过程



反冲洗过程中的水流情况

5.2.2 运行过程



运行中的滤池

5.2.2 运行过程

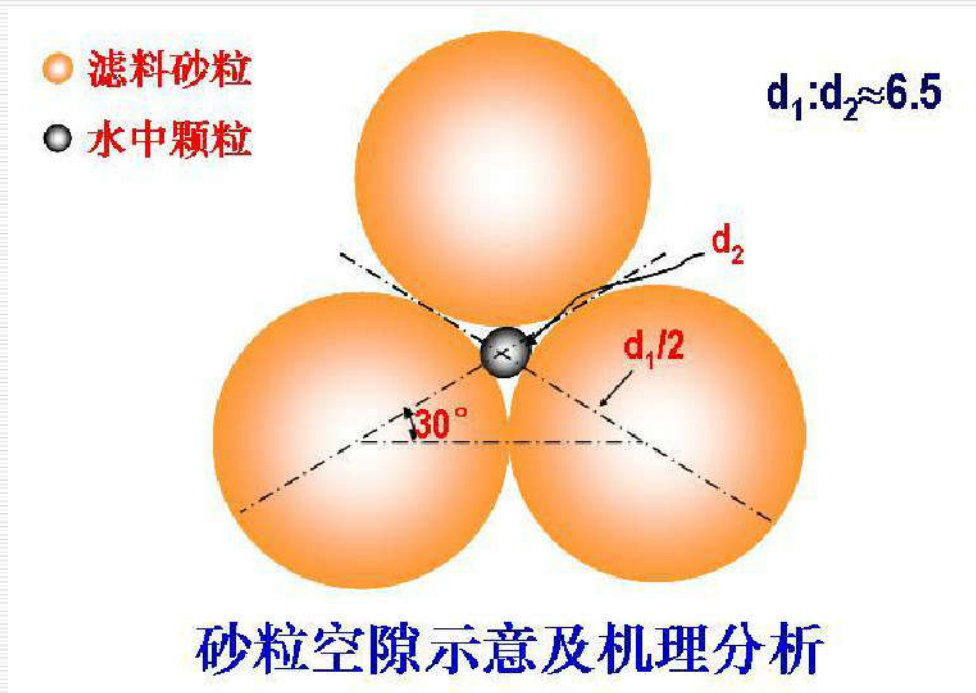


滤池反冲洗

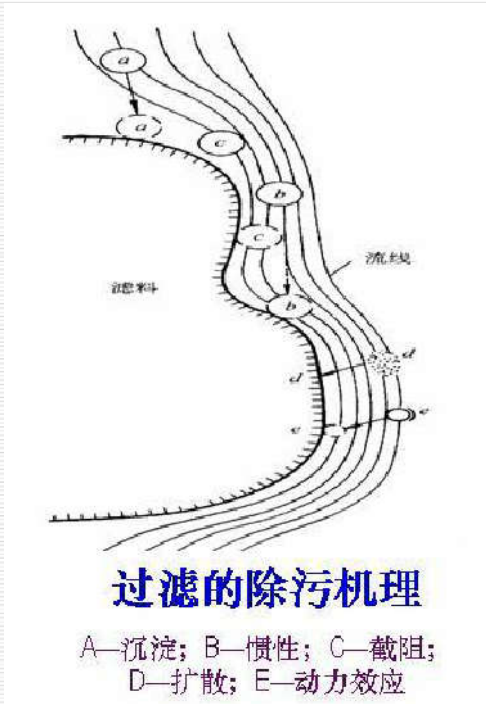
5.2.3 除污原理

- 杂质的去除以接触絮凝作用为主
- 截留机理为沉淀、惯性、截阻、扩散和动力效应
- 当滤料粒径很小时，亦有筛除截留作用（并不希望发生）
- 水中杂质在滤料层中被截留并向下推移的过程（杂质在滤料层中的分布规律）

5.2.3 除污原理



5.2.3 除污原理



分析两个问题：

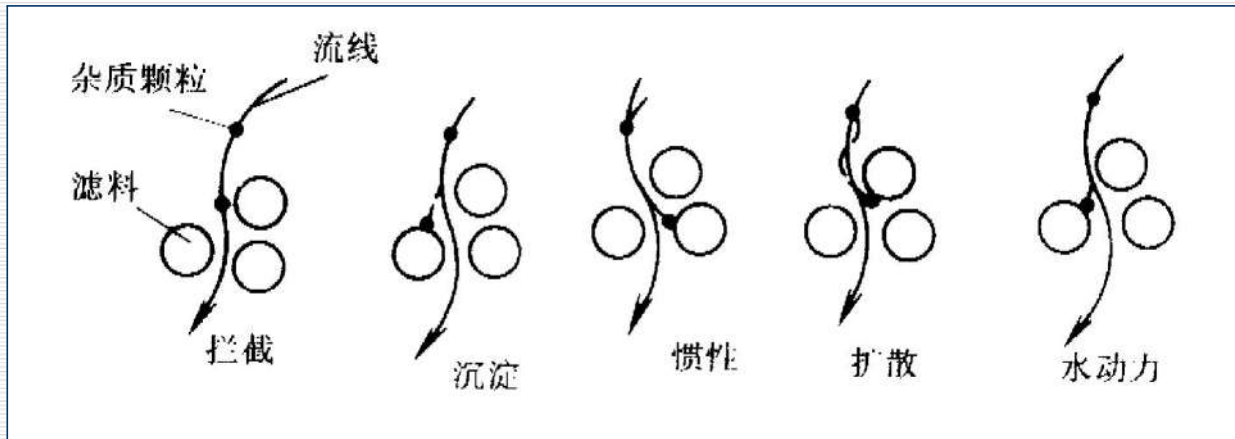
1、被水流挟带的颗粒如何与滤料颗粒表面接近或接触？

百股——颗粒的迁移（物理作用：机械力）

2、当颗粒与滤料颗粒表面接触时，依靠哪些力的作用使它们粘附于滤料颗粒表面的？

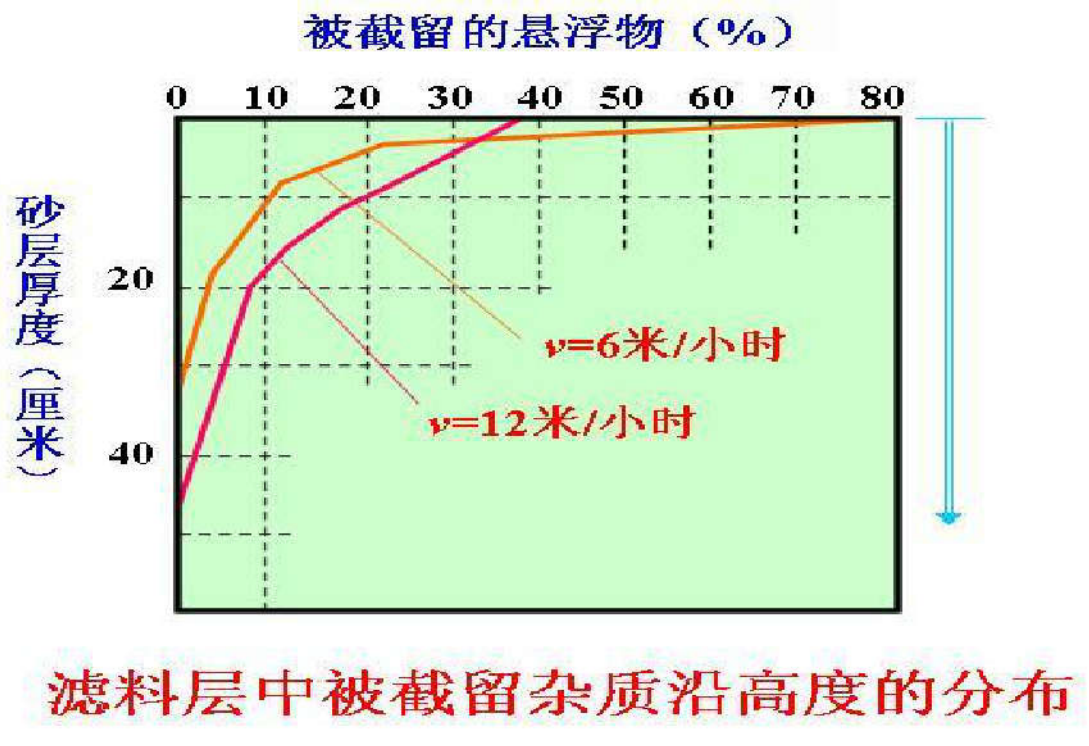
百股——粘附机理（物理化学作用：范德华引力、静电引力）

5.2.3 除污原理



过滤过程中，颗粒在滤料间的迁移机理

5.2.3 除污原理



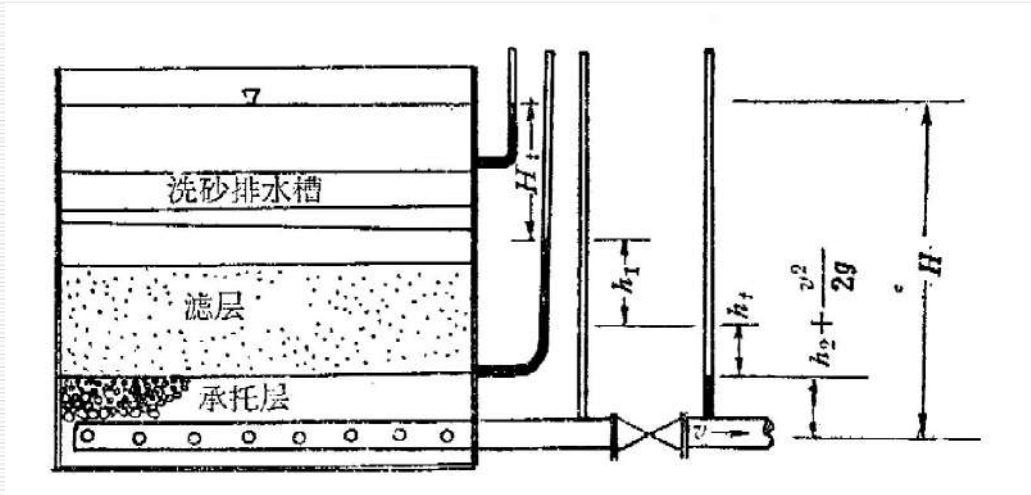
5.2.4 滤池的运行方式及其分析

□ 滤池的运行方式

- 变水头等速过滤（阻力—时间为线性关系）
 - 通过调节出水闸阀的开启度实现
 - 过滤过程中过滤速度（及流量）始终保持不变
 - 过滤时，滤层上部水位升高以克服滤层不断增加的水头损失
- 恒水头变速过滤（阻力—时间为复杂非线性关系）
 - 出水闸阀的开启度不变
 - 过滤过程中滤层上部水位不变
 - 过滤速度（及流量）随过滤时间、阻力增加而降低
- 变水头变速过滤（阻力—时间为复杂非线性关系）

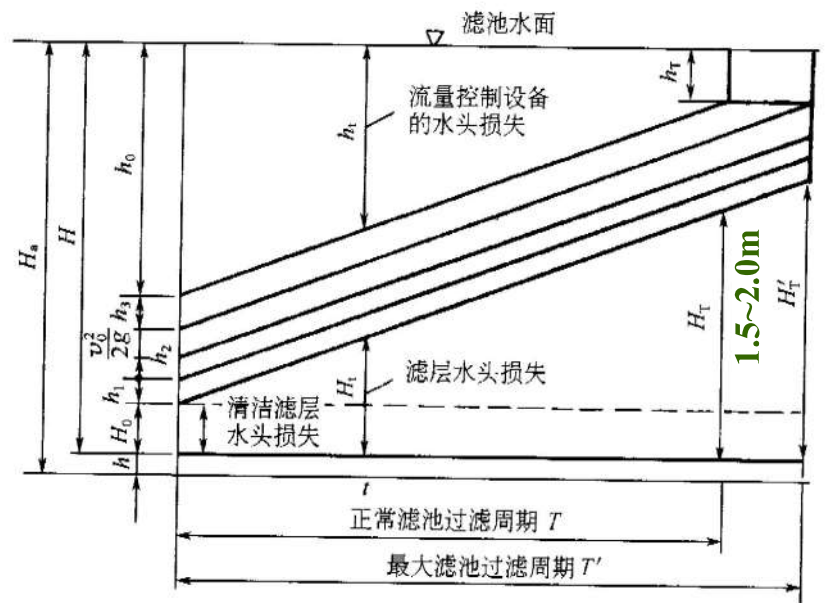
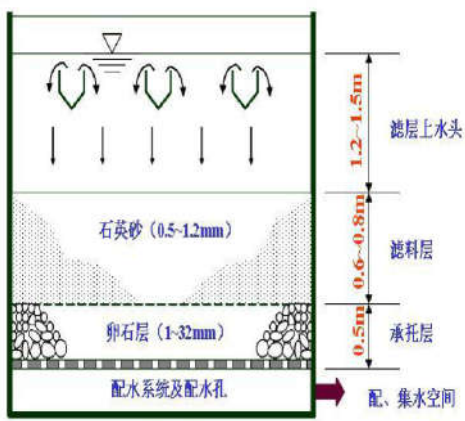
5.2.4 滤池的运行方式及其分析

□ 阻力和滤速变化的分析



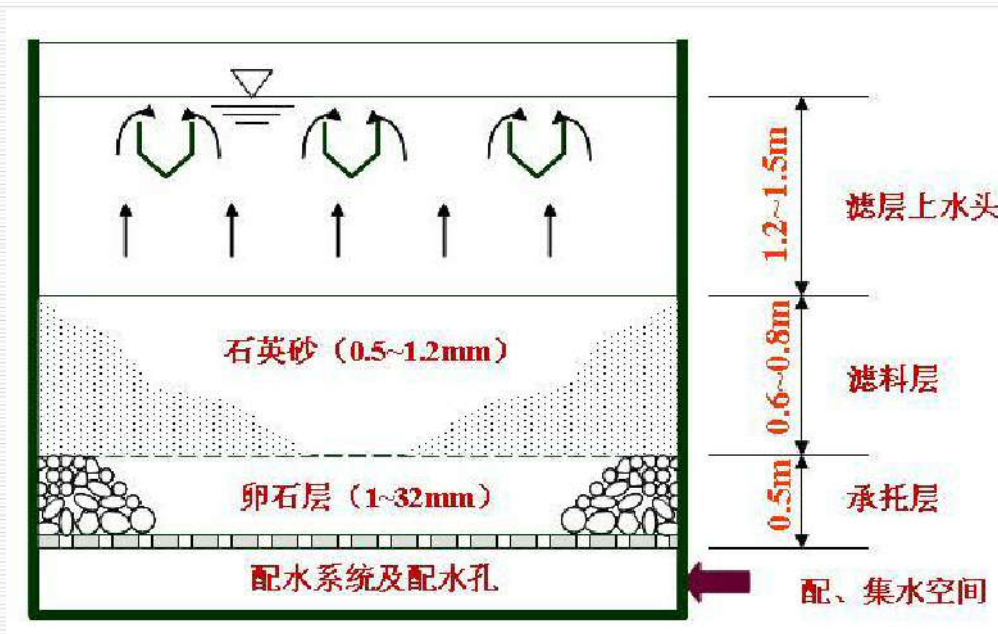
滤池工作时的水头损失示意

5.2.4 滤池的运行方式及其分析



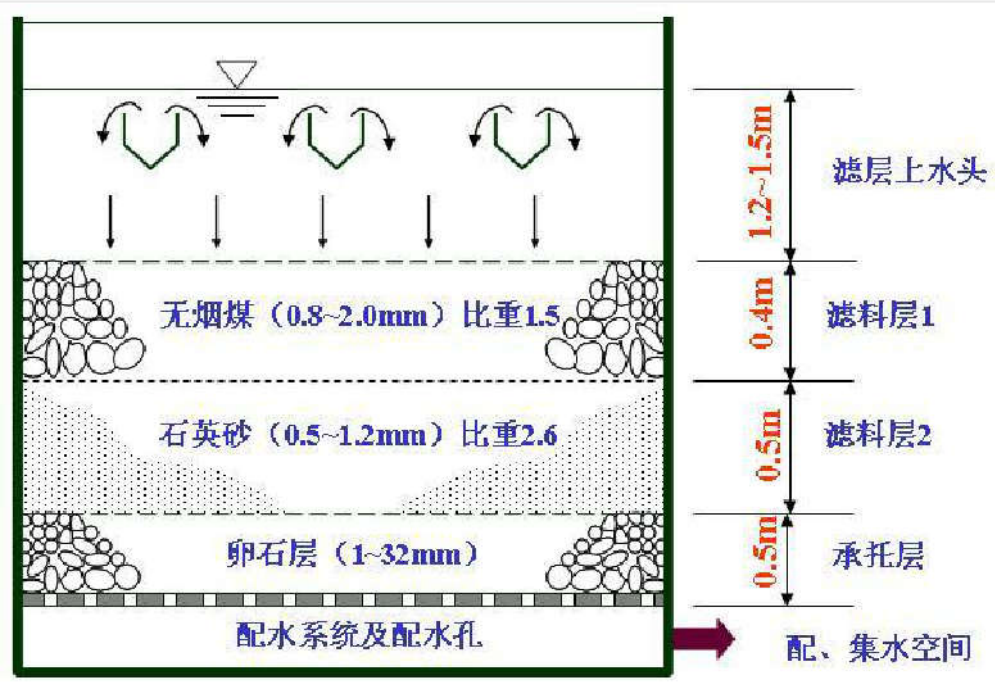
等速过滤过程中各项水头损失的变化

5.2.5 提高滤池过滤效能的途径



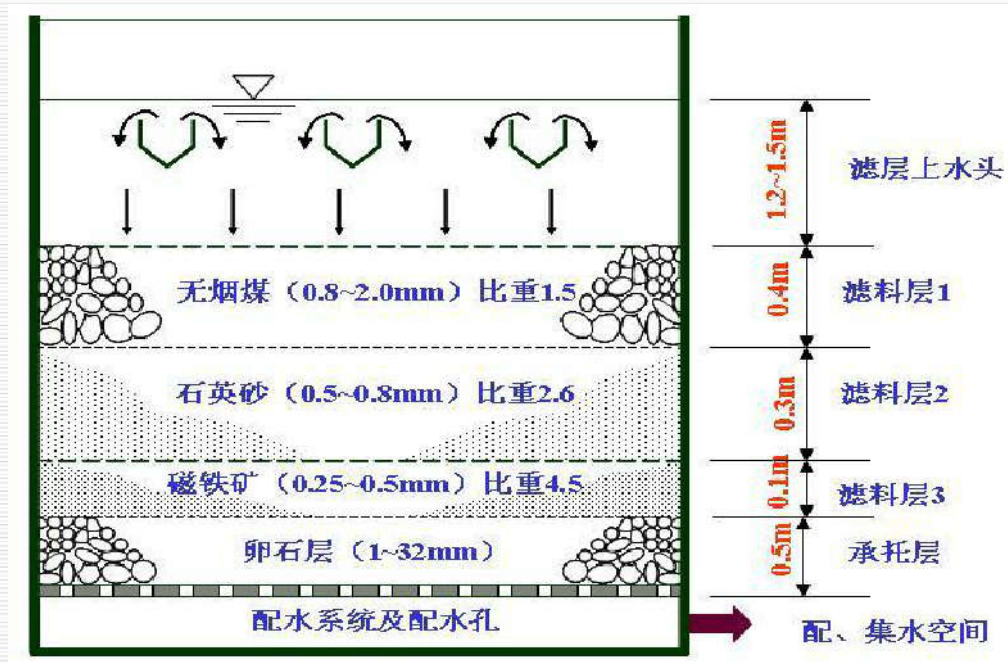
(1) 上向流过滤

5.2.5 提高滤池过滤效能的途径



(2) 反粒度过滤—双层滤料

5.2.5 提高滤池过滤效能的途径



(3) 反粒度过滤—三层滤料

5.3 滤池的工艺设计

□ 5.3.1 设计基本原则和要求

- 滤料
- 承托层
- 配水系统
- 滤池的反冲洗
- 管廊布置

□ 5.3.2 滤池工艺设计参数

- 滤速（正常滤速、强制滤速）
- 布置



西安饮用水处理厂

5.3.1 设计基本原则和要求

□ 滤料

■ 要求

- 足够的机械强度
- 优异的化学稳定性
- 适当的颗粒级配
- 就地取材、货源充足、价格便宜

■ 种类

- 石英砂、无烟煤、钛铁矿、磁铁矿
- 聚氯乙烯小球、聚苯乙烯小球



无烟煤



石英砂

5.3.1 设计基本原则和要求

■ 级配

- (1) 单层滤料滤池：石英砂，粒径0.5~1.2mm，层厚0.6~0.8m
- (2) 双层滤料滤池：无烟煤，粒径0.8~2.0mm，层厚0.4~0.5m
石英砂，粒径0.5~1.2mm，层厚0.6~0.8m
- (3) 三层滤料滤池：无烟煤，粒径0.8~2.0mm，层厚0.4~0.5m
石英砂，粒径0.5~1.2mm，层厚0.6~0.8m
磁铁矿，粒径0.2~0.5mm，层厚~0.1m

5.3.1 设计基本原则和要求

□ 承托层

■ 要求

- 不被水流冲动
- 形成均匀空隙
- 性质稳定

■ 种类

- 天然鹅卵石
- 碎石

■ 级配

厚度一般为0.4~0.5m。一般分四层布置。粒径分布为：

第一层	2~4mm,	厚0.1m	↓ 上 下
第二层	4~8mm,	厚0.1m	
第三层	8~16mm,	厚0.1m	
第四层	16~32mm,	厚0.1m	



5.3.1 设计基本原则和要求

□ 配水系统

■ 大阻力配水系统

- 利用穿孔管增大配水系统阻力的方法提高配水的均匀性
- 配水均匀性好，但构造复杂、易堵塞、检修困难
- 所需反冲洗动力消耗大

■ 小阻力配水系统

- 在滤池底部设置较大的配水空间，降低配水系统的阻力而实现均匀配水
- 配水均匀性较差，但构造较为简单、易检修
- 所需反冲洗动力消耗小（反冲洗水头一般为2米左右）
- 滤池深度较浅

5.3.1 设计基本原则和要求

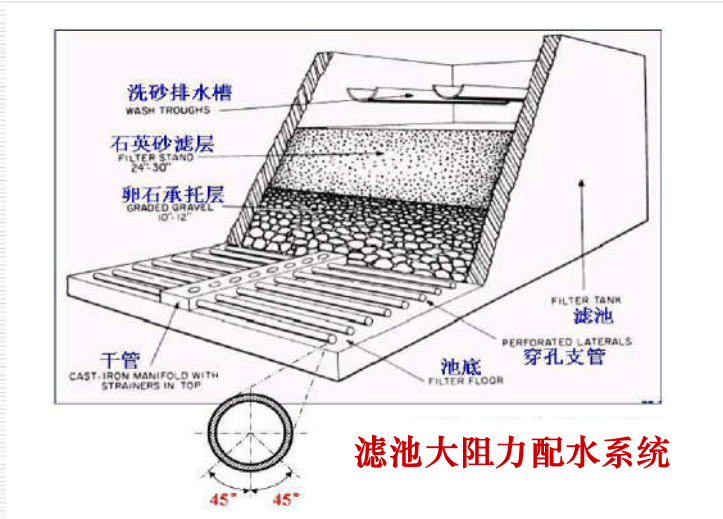
□ 配水系统

★ 配水系统的开孔比 (p)

$$p = \frac{\omega_0}{A} \times 100\% = \frac{q}{v_0} \%$$

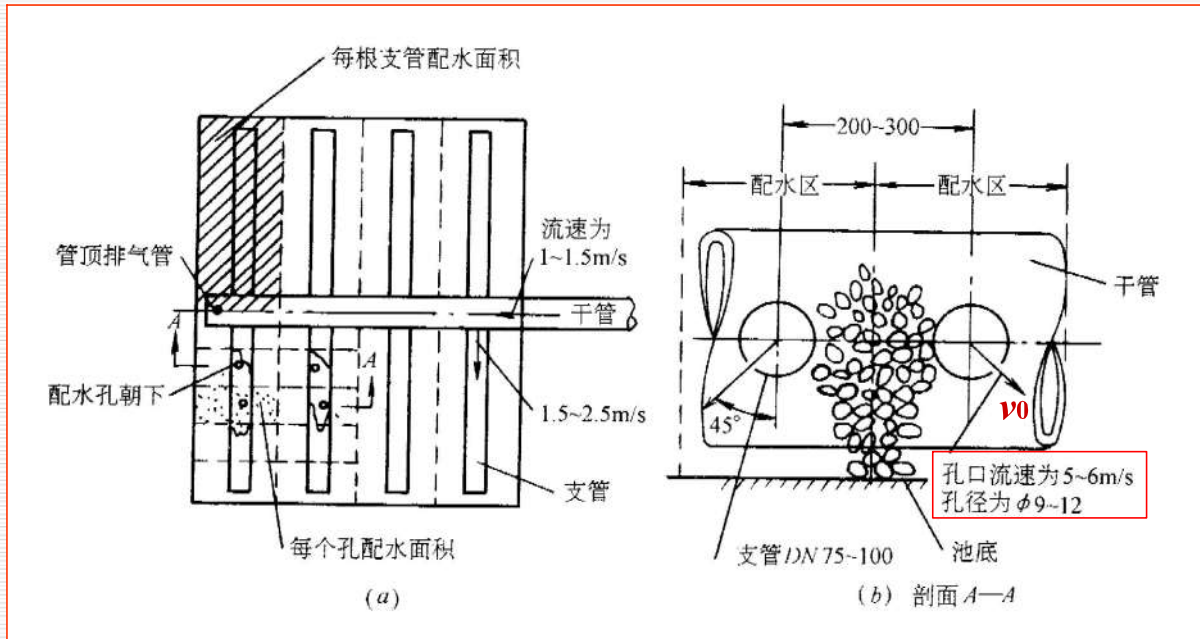
式中： A —滤池的过滤面积 (m^2)；
 q —滤池的反冲洗强度 (L/s.m^2)
 v_0 —穿孔流速 ($5\sim 6\text{m/s}$)

滤池的反冲洗强度一般为 $10\sim 15 \text{ L/s.m}^2$ ，则为获得均匀的配水效果，大阻力的配水系统的开孔比一般为 $0.2\%\sim 0.25\%$ ，配水的均匀性一般可达 $90\%\sim 95\%$ 。



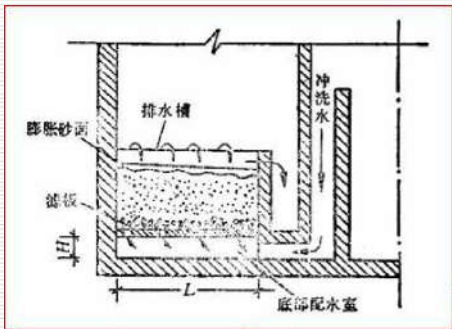
滤池大阻力配水系统

5.3.1 设计基本原则和要求



滤池大阻力配水系统

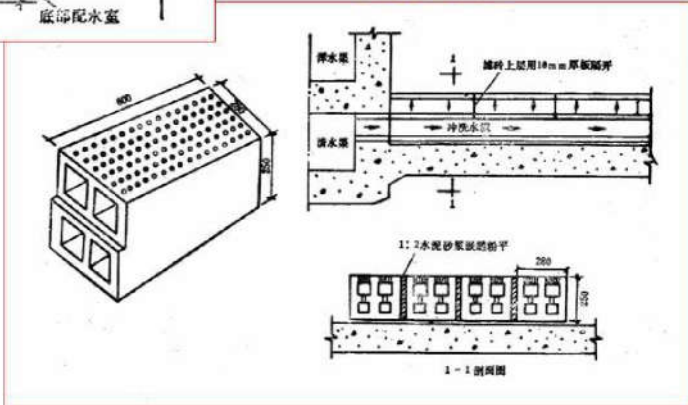
5.3.1 设计基本原则和要求



滤池小阻力配水系统

滤板及其布置

滤池



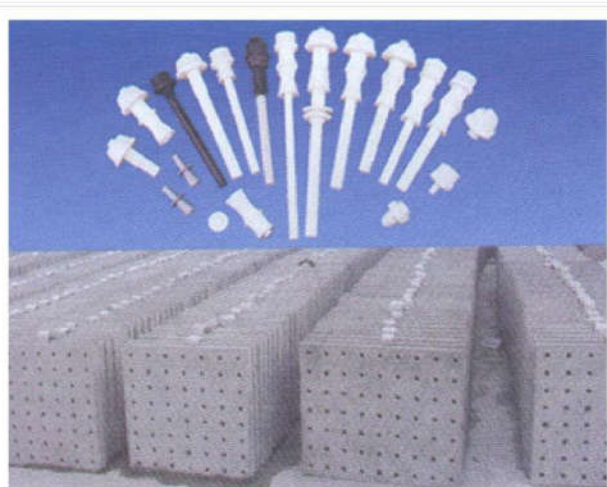
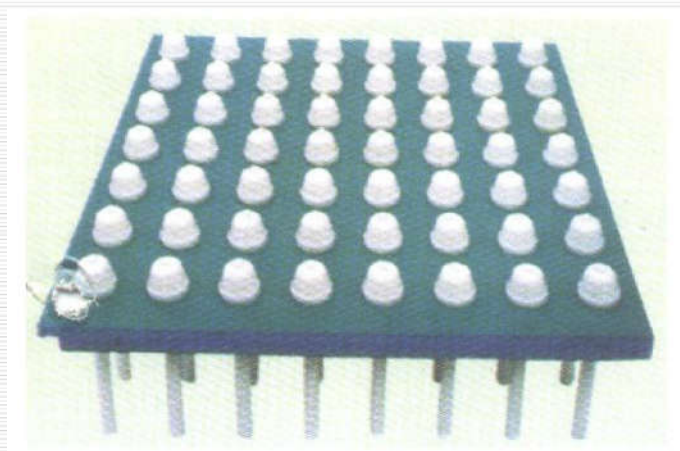
格栅—12mm厚钢条焊制，缝隙3~5mm，开孔比很大(10%~20%)，配水均匀性较差，适用于小型滤池；

孔板—孔眼4~10mm，开孔比1~2%，孔眼流速1~2m/s，适用于中小型滤池；

穿孔渠—常用的小阻力配水系统。孔眼直径8~10mm，开孔比0.5%~1%，孔眼流速高达2~3m/s，配水均匀性好，适用于大中型滤池。

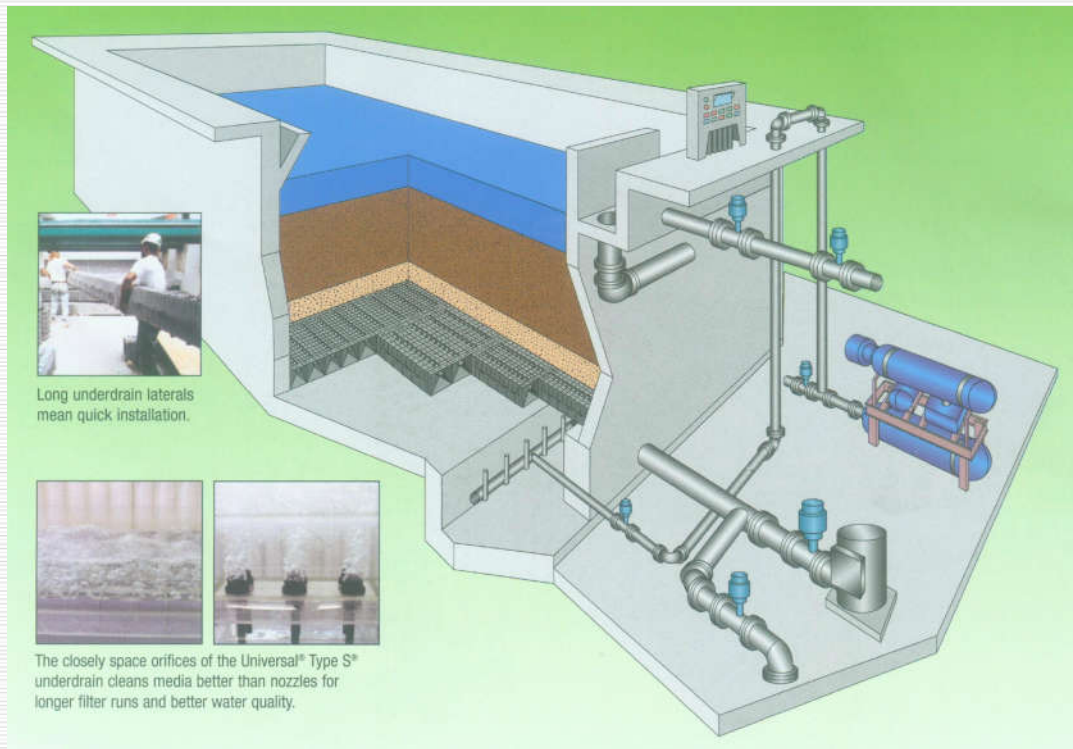
滤头—滤头缝隙0.25~0.4mm，一个滤头的缝隙面积为100~300mm²，每1m²上布置40~60个滤头，开孔比为0.5%~1%，孔眼流速高达2~3m/s，配水均匀性好，适用于大中型滤池。

5.3.1 设计基本原则和要求



滤池配、集水滤头滤板

5.3.1 设计基本原则和要求



5.3.1 设计基本原则和要求

□ 滤池的反冲洗

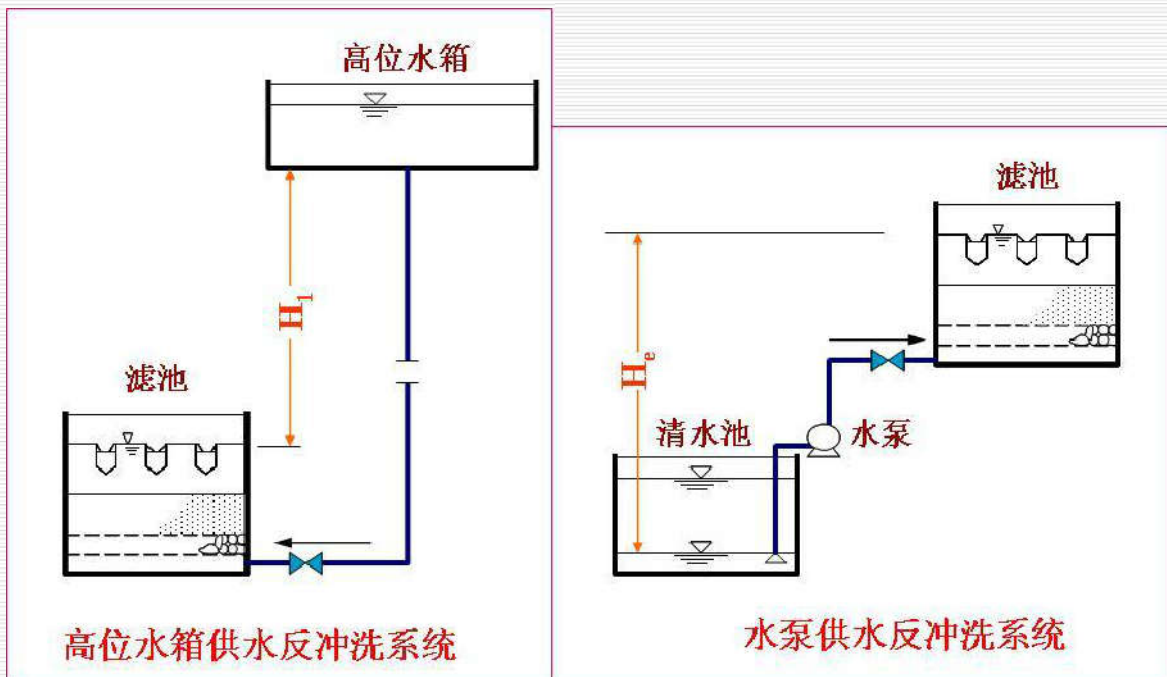
■ 要求

- 冲洗水均匀分布在整個滤池断面上、不夹带气泡
- 有足够的上升流速使滤料层得到适当膨胀
- 足够的冲洗时间、冲洗水排除迅速

■ 方式

- 水泵供水（造价低、但操作复杂、耗电大）
- 高位水塔供水（造价高、但操作简单、耗电小）

5.3.1 设计基本原则和要求



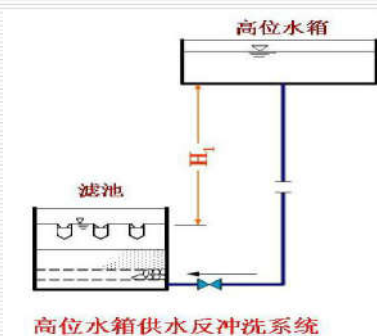
5.3.1 设计基本原则和要求

■ 冲洗水箱

★ 贮水量（ V ，应为滤池一次冲洗水量的1.5倍）

$$V = \frac{1.5qft \times 60}{1000} = 0.09qft(m^3)$$

★ 扬程（冲洗水箱底距洗砂排水槽顶的距离 H_1 ）



$$H_1 = h_{w1} + h_{w2} + h_{w3} + h_{w4} + h_{w5}$$

$$h_{w3} = 0.022H_g q$$

$$h_{w4} = (S_p - 1)(1 - \varepsilon_0)L_0$$

5.3.1 设计基本原则和要求

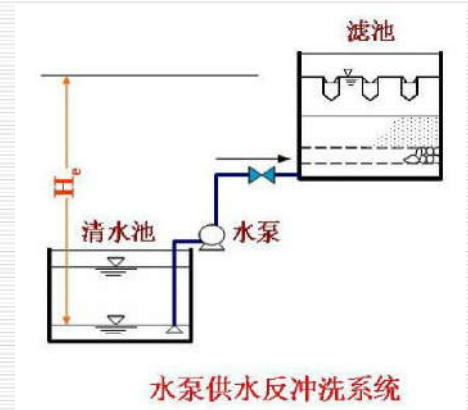
■ 冲洗水泵

★ 扬程

$$H_p = H_e + h_{p1} + h_{w2} + h_{w3} + h_{w4} + h_{w5}$$

式中：

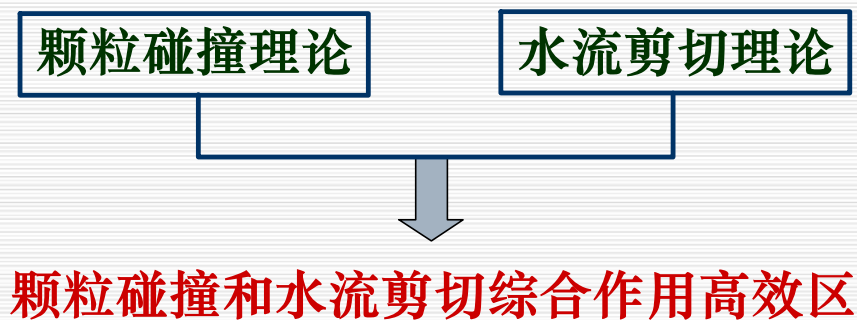
q —反冲洗强度 ($L/s.m^2$)； f —单个滤池面积 (m^2)； t —反冲洗时间 (min)； h_{w1} —冲洗水箱与滤池间的冲洗管道的沿程和局部损失之和 (m)； h_{w2} —配水系统的水头损失 (m)； h_{w3} —承托层的水头损失 (m)； H_g —承托层的厚度 (m)； h_{w4} —冲洗时滤料层的水头损失 (m)； S_p —滤料的比重 (石英砂为2.65)； ε_0 —滤料未膨胀前的空隙率 (%)； L_0 —滤料未膨胀前的厚度 (m)； h_{w5} —备用水头 (一般为1.5~2.0 m) h_{p1} —清水池与滤池间的冲洗管道的沿程和局部损失之和 (m)。



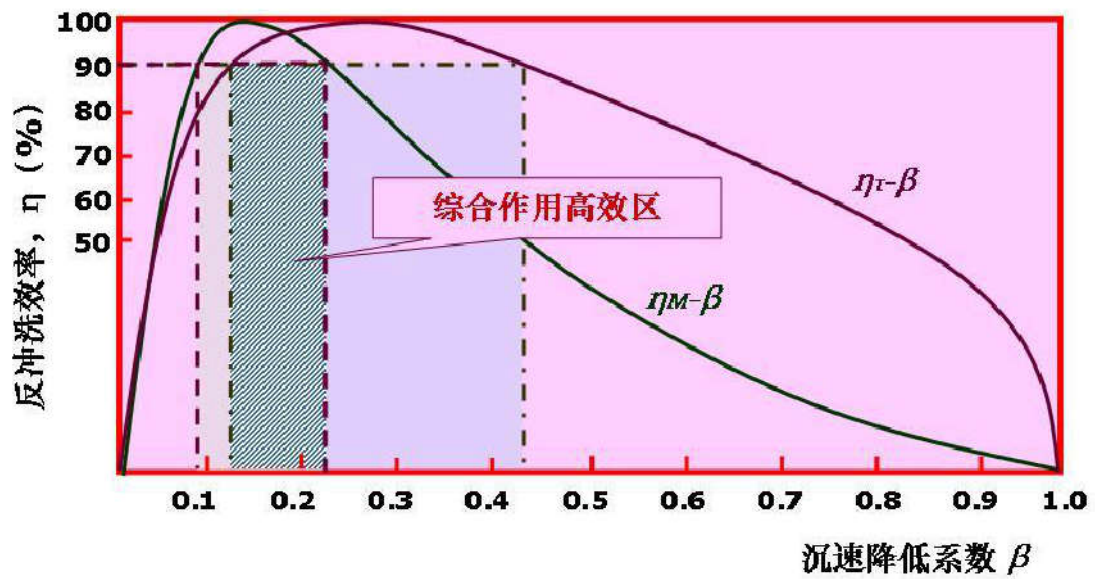
5.3.1 设计基本原则和要求

■ 反冲洗的最优工况

- 用最少的水获得最优的冲洗效果
- 确定最优反冲工况的两种理论



5.3.1 设计基本原则和要求



反冲洗效率与沉速降低系数间的关系曲线

5.3.1 设计基本原则和要求

■ 水力筛分与层间混杂

■ ——水力筛分理论

◆ 粒径配比计算理论（等降粒子概念——具有不同密度的滤料（如多层滤料滤池中），在反冲洗过程中具有相同沉速的颗粒成为等降粒子。以自由沉降或拥挤沉降为依据）。为此，在双层滤池中，无烟煤的最大粒径与砂的最小粒径只比一般控制在4左右。

◆ 具有同一密度但粒径不同的滤料，在同一反冲洗强度下具有不同的膨胀率，形成细上粗下的水力筛分现象。在反冲洗停止时，因大粒径滤料具有更大的沉速，而形成上细下粗的自然分层现象。

5.3.1 设计基本原则和要求

■ 反冲洗膨胀率 (e)

——滤层膨胀后所增加的高度 ($L-L_0$) 与滤层的原有厚度 L_0 之比。

$$e = (L - L_0) / L_0 (\%)$$

——普通快滤池 $E=45\%$ ，双层滤池 $E=50\%$ 。

5.3.1 设计基本原则和要求

■ 反冲洗强度 (q)

——单位滤池表面积上在单位时间内所通过的冲洗水量

$$q = \frac{Q}{A}$$

式中： q ——反冲洗强度 ($\text{L/s}\cdot\text{m}^2$)

Q ——反冲洗水流量 (L/s)

A ——滤池面积 (m^2)

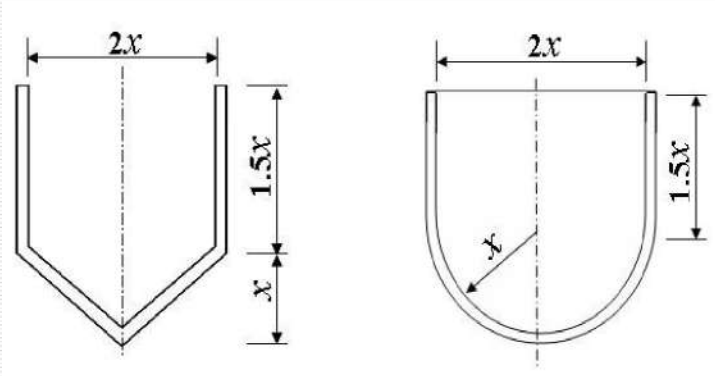
5.3.1 设计基本原则和要求

——常用的反冲洗强度及时间

冲洗方式	冲洗强度 (L/s.m ²)	冲洗历时 (min)
单独水冲洗	4~8	5~7
气水同时冲洗	气: 10~20 水: 2~8	6~7
单独气冲洗	10~20	3~10

5.3.1 设计基本原则和要求

■ 反冲洗排水装置（洗砂排水槽）

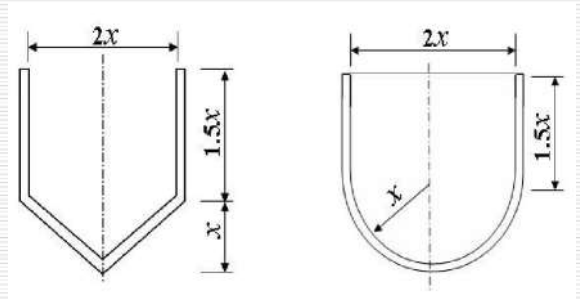


5.3.1 设计基本原则和要求

断面积 (m^2) :

$$\omega = 1.73 \sqrt[3]{\frac{Q^2 B}{g}}$$

$B=2x$ (x 为模数)



对于标准五角形排水槽有: $\omega = 4x^2$

考虑到排水槽自由跌水, 取 $\omega = 3.5x^2$, 则有: $x = 0.475Q^{0.4}$

排水槽的中心间距不大于1.5~2.5m; 排水槽的总平面面积不超过过滤池面积的30%。

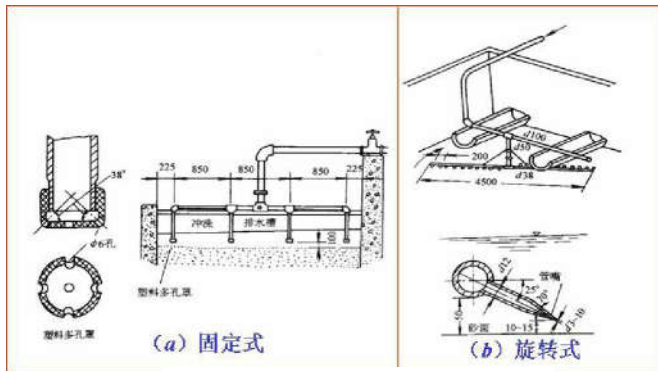
排水槽底边离滤层表面的距离 (m) : $H = eL_0 + 2.5x$
 x 可取0.25~0.3m

5.3.1 设计基本原则和要求

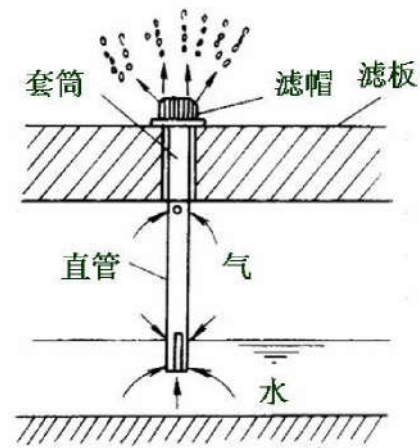
■ 反冲洗的辅助方法

——表面辅助冲洗（高压水：旋转管式、固定式）

——压缩空气辅助冲洗



滤池的表面冲洗装置



气-水同时反冲洗时长柄滤头的工况

5.3.1 设计基本原则和要求

□ 滤池的管廊布置

■ 布置原则：通风、照明、简捷、紧凑、便于安装维修、安全

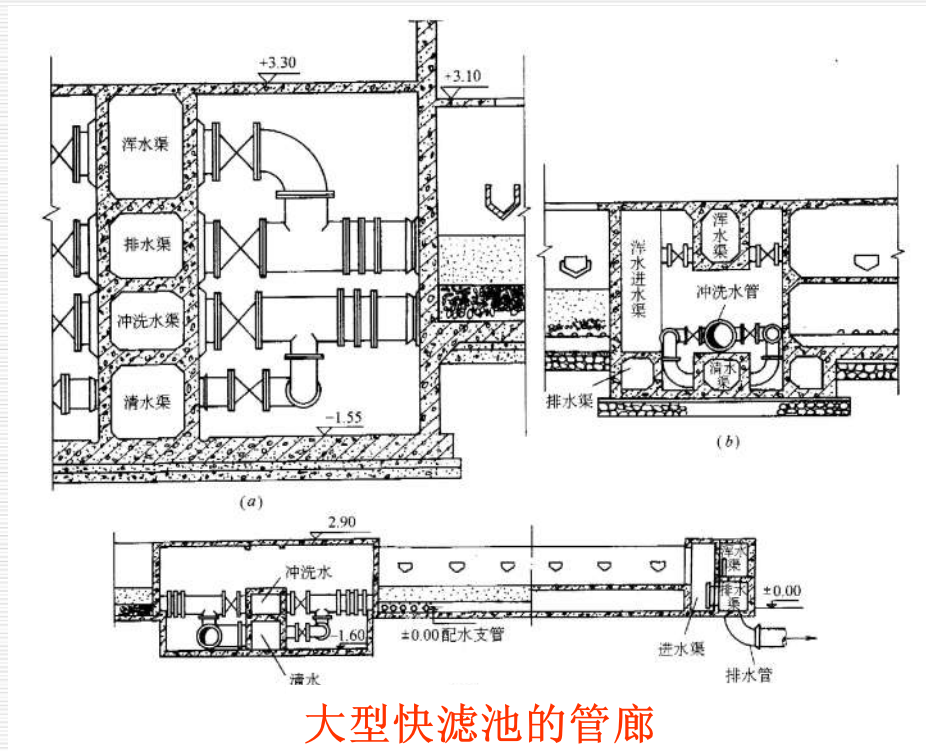
■ 布置形式：

（1）所有管道全部置管廊内（结构简单、施工方便、集中紧凑）

（2）冲洗和清洗管布置于管廊内，进水及排水管（渠）布置于滤池的另一侧（节省管件和阀门、管廊内布置简单、易于施工及检修，但造价稍高）

■ 管渠设计流速：进水管（渠）0.8~1.2m/s；清水管（渠）1.0~1.5m/s；冲洗水管（渠）2.0~2.5m/s；排水管（渠）1.0~1.5m/s。

5.3.1 设计基本原则和要求



大型快滤池的管廊

5.3.2 滤池工艺设计参数

□ 滤速

- **正常滤速 (v)**：正常运行时滤池的过滤速度，滤池表面积设计的主要依据（**注意其具体含义**）。

普通滤池 8~12m/h

双层滤池 12~16m/h

三层滤池 30~40m/h

- **强制滤速 (v_q)**：一个或数个滤池停产、检修或反冲洗时，其它滤池的过滤速度（滤池个数设计的主要依据）。主要进行校核，以防穿透或漏砂。

普通滤池 10~14m/h

双层滤池 14~18m/h

5.3.2 滤池工艺设计参数

□ 滤池面积 (A)

□ 滤池个数 (n)

$$A=Q/v \text{ (m}^2\text{)}$$

(1) 滤池数过多、过少的分析

(2) 一般原则

若一组滤池的池数为 n ，其中一座滤池反冲洗的流量为 Aq ，则剩余的 $(n-1)$ 个滤池的过滤水量为 $(n-1)Av$ ，假设过滤水量与反冲洗水流量相等（一种极端假设），则： $Aq=(n-1)Av/3.6$ 。则一组滤池的最低池数为：

$$n = \frac{3.6q}{v} + 1$$

滤池总面积 A (m^2)	<30	30~100	150	200	>300
滤池个数 N (个)	2	3~4	5~6	6~8	>10

5.3.2 滤池工艺设计参数

□ 平面布置

——正方形或矩形。

★单池面积小于 30m^2 时， $L:B=1:1$

★单池面积大于 30m^2 时， $L:B=1.25:1\sim 1.5:1$

□ 滤池的高度 (H)

★超高 0.25~0.3m

★滤料层上部水深 1.5~2.0m

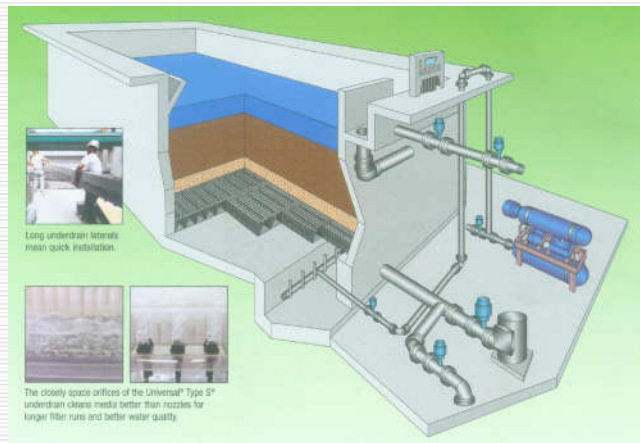
★滤料层厚度 0.6~0.8m

★承托层厚度 0.4~0.5m

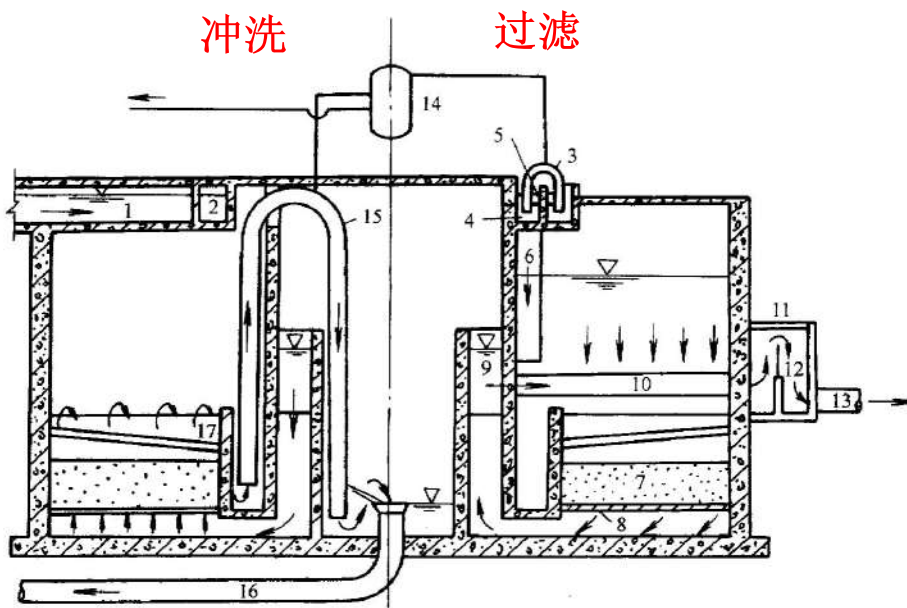
★配水系统高度 大阻力配水系统可忽略
小阻力配水系统 小阻力配水系统0.5m

5.4 其他类型的滤池（简介）

- 5.4.1 虹吸滤池
- 5.4.2 重力式无阀滤池
- 5.4.3 压力滤池
- 5.4.4 移动冲洗罩滤池
- 5.4.5 V型滤池



5.4.1 虹吸滤池

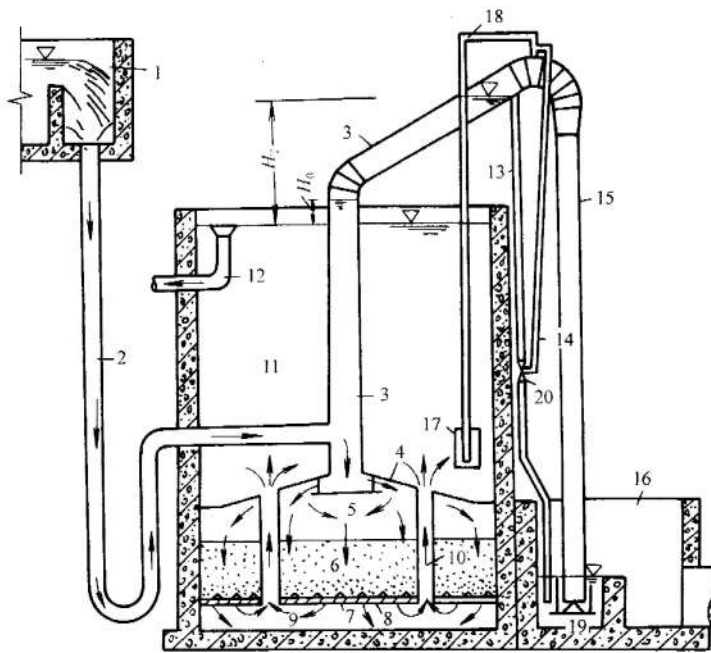


- 1、进水槽
- 2、配水槽
- 3、进水虹吸管
- 4、单元滤池进水槽
- 5、进水堰
- 6、布水管
- 7、滤层
- 8、配水系统
- 9、集水槽
- 10、出水管
- 11、出水井
- 12、出水堰
- 13、清水管
- 14、真空系统
- 15、冲洗虹吸管
- 16、冲洗排水管
- 17、冲洗排水槽
(洗砂排水槽)

虹吸滤池的构造及运行

5.4.2 重力式无阀滤池

重力式无阀滤池



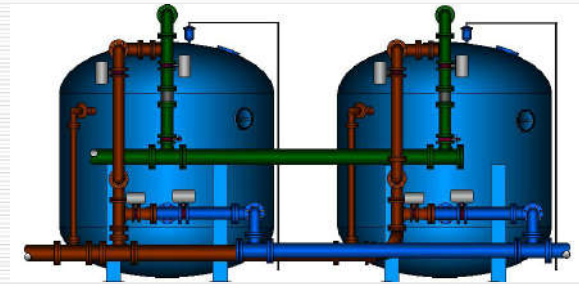
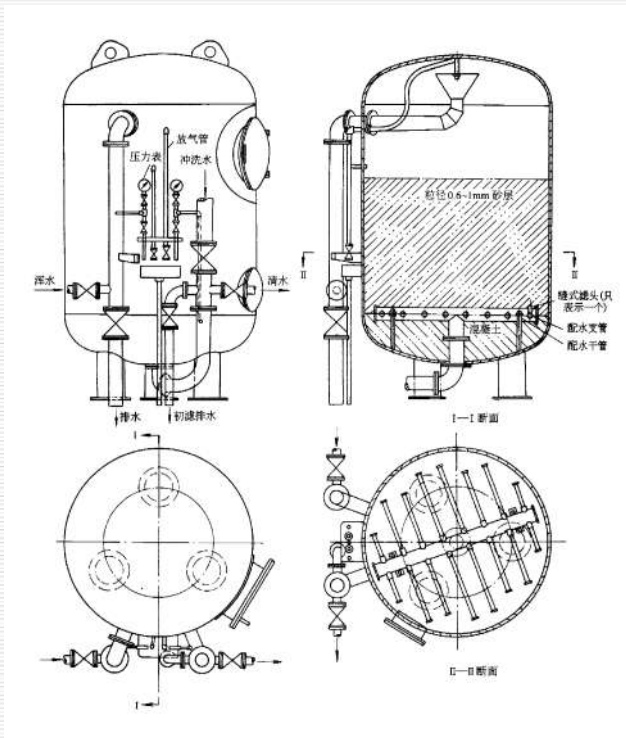
- 1、进水配水槽
- 2、进水管
- 3、虹吸上升管
- 4、顶盖
- 5、配水档板
- 6、滤层
- 7、滤头
- 8、垫板
- 9、集水空间
- 10、连通管
- 11、冲洗水箱
- 12、出水管
- 13、虹吸辅助管
- 14、抽气管
- 15、虹吸下降管
- 16、排水井
- 17、虹吸破坏斗
- 18、虹吸破坏管
- 19、锥形档板
- 20、水射器

5.4.2 重力式无阀滤池

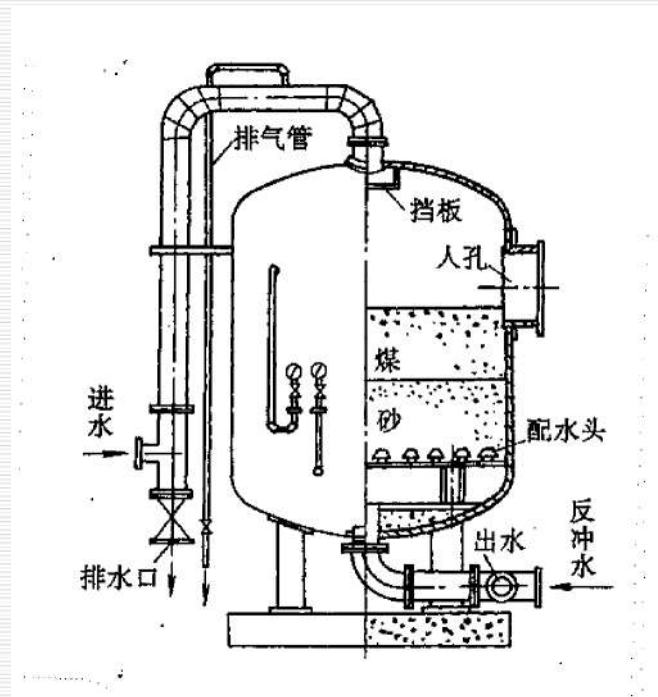


5.4.3 压力滤池

压力滤池的构造

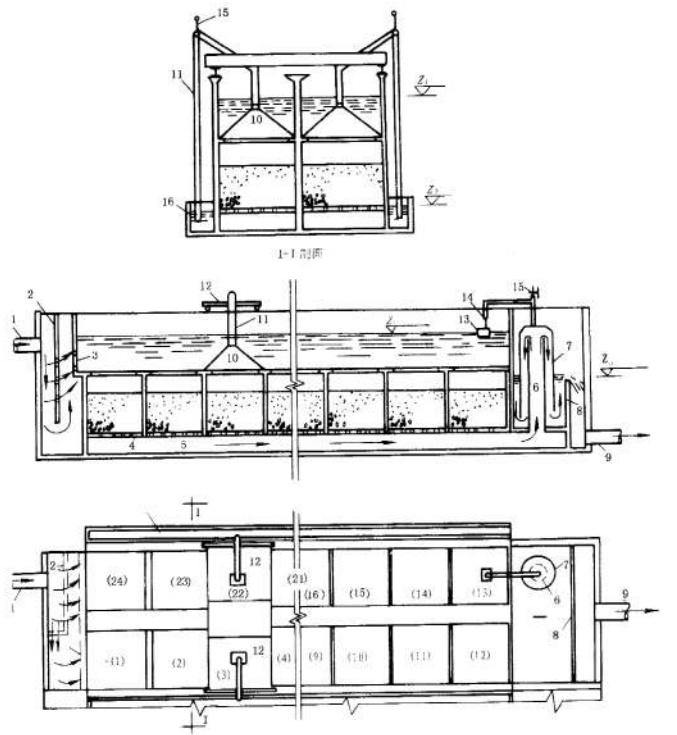


5.4.3 压力滤池



5.4.4 移动罩冲洗滤池

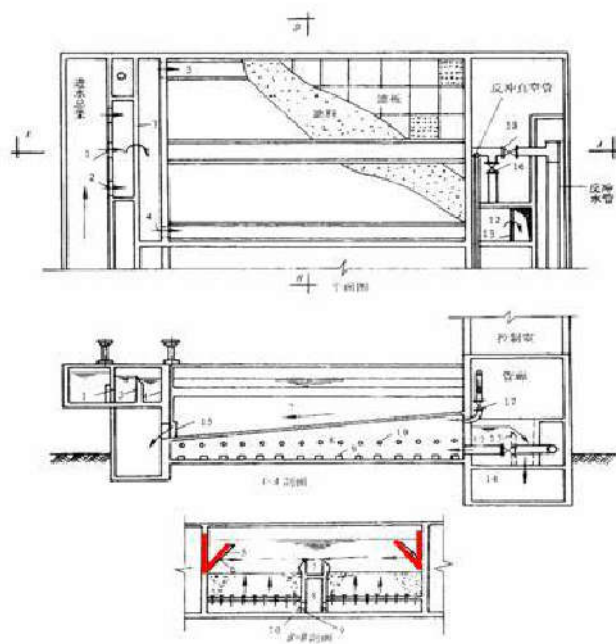
移动罩冲洗滤池



- 1、进水管
- 2、穿孔配水墙
- 3、消力栅
- 4、小阻力陪水系统配水孔
- 5、配水系统的配水室
- 6、出水虹吸中心管
- 7、出水虹吸管钟罩
- 8、出水堰
- 9、出水管
- 10、冲洗罩
- 11、排水虹吸管
- 12、桁车
- 13、浮筒
- 14、针形阀
- 15、抽气管
- 16、排水渠

5.4.5 V型滤池(又称粗滤料滤池)

V型滤池



- 1、进水气动隔膜阀
- 2、方孔
- 3、堰口
- 4、侧孔
- 5、V型槽
- 6、小孔
- 7、排水渠
- 8、气、水分配渠
- 9、配水方孔
- 10、配气小孔
- 11、底部空间
- 12、水封井
- 13、出水堰
- 14、清水渠
- 15、排水阀
- 16、清水阀
- 17、进气阀
- 18、冲洗水阀

5.4.5 V型滤池



运行中的V形滤池

采用较粗滤料，以
延长运行周期；

反冲洗时滤料层不
膨胀，采用均质滤料，无
水筛分现象；

一律采用砂滤料，粒
径一般为0.95~1.5mm，
滤层厚度约0.95~1.5m。

5.4.5 V型滤池



运行中的V形滤池

致谢



THANKS

for your keeping the water quality
after you use it.

A handwritten signature in brown ink, appearing to be 'J. P. Lee'.