

均质滤料滤层设计的优化研究^{*}

张建锋 金同轨 王晓昌 王峰慧

提要 通过对均质滤料直接过滤数学模型的研究及模拟计算,分析、讨论了滤层设计优化的基本思路和方法,并对原有评判滤池特性的指标进行了评析,为滤层的优化设计提供了理论依据。

关键词 均质滤料 模拟计算 滤池设计优化

0 前言

滤料层是快滤池的主要组成部分,是滤池良好运转的关键。滤池工艺设计的主要任务是选择合适的滤料种类,确定合理的滤料粒径、滤层厚度和滤速。长期以来,滤池的设计主要依靠经验,目前给出的一些有关滤层优化的经验公式和试验分析方法,并没有考虑到滤层截污的机理和过程,加上这些方法需要以大量的试验为基础,使得优化研究的实用性受到限制^[1]。本文将结合对均质滤料直接过滤模型的研究,通过计算、分析,阐述滤层设计优化的基本思路和方法。

1 均质滤料直接过滤的模型

均质滤料直接过滤的模型包括以下方程式^[2]:

水头损失方程:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{218\mu s_0^2 u}{\rho g \varepsilon_0^3} \left(1 + \frac{\sigma_v}{1 - \varepsilon_0}\right)^{2.0} \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{0.6} \quad (1)$$

式中 H ——水头损失,cm;

x ——滤层厚度,cm;

μ ——水的粘性系数,g/(cm·s);

s_0 ——清洁滤层内比表面积,cm²/cm³;

u ——滤速,cm/s;

ρ ——水的密度,g/cm³;

g ——重力加速度,cm/s²;

ε_0 ——清洁滤层的空隙率;

σ_v ——滤层中的浊质体积比沉积量,cm³/cm³。

滤层中水流平均速度梯度:

$$G = \frac{14.7 \mu s_0}{\varepsilon_0^2} \left(1 + \frac{\sigma_v}{1 - \varepsilon_0}\right)^{1.0} \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{-0.2} \quad (2)$$

式中 G ——滤层中水流平均速度梯度,s⁻¹。

物料平衡方程式:

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中 σ_m ——滤层中的浊质质量比沉积量,mg/cm³;

c ——水中浊质浓度,mg/L。

滤层内体积比沉积量与质量比沉积量的换算关系:

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial t} = q_s (\mu G)^{1/2} \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad (4)$$

式中 q_s ——换算系数,g/cm³。

滤层去除效率表达式:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -\alpha \eta p c \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \mu G / \tau_{sf}} \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{20} + \frac{1}{1 + \mu G / \tau_{pf}} \left(1 - \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{20}\right) \quad (6)$$

$$\eta = \left(\frac{3(1 - \varepsilon_0)}{\Psi_f^{1/2} \Psi_{\varepsilon_0}}\right) \left(\frac{d}{d_v}\right) \left(1 + \frac{\sigma_v}{1 - \varepsilon_0}\right)^{1.0} \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{0.8} \quad (7)$$

$$p = \frac{1}{2.21 d_v} \left[0.22 + 0.78 \left(1 - \frac{\sigma_v}{\varepsilon_0}\right)^{4.4}\right] \quad (8)$$

式中 α ——单元滤床的附着效率;

η ——单元滤床的输送效率;

p ——单位厚度滤层中单元滤床个数,1/cm;

Ψ ——滤料颗粒球形度系数;

Ψ_f ——水中悬浮颗粒球形度系数;

d_v ——滤料颗粒等体积球径,cm;

d ——水中悬浮颗粒等体积球径,cm;

τ_{sf} ——絮体与滤料表面的结合强度,g/(cm·s²);

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号 59778022)。

τ_{pf} ——絮体与沉积物间的结合强度, $g/(cm \cdot s^2)$ 。

滤层内的絮凝方程式:

$$\varepsilon \frac{\partial d}{\partial t} + u \frac{\partial d}{\partial x} = \frac{4\varepsilon\alpha_{ff}d^{1+k}G}{(3-k)\Psi_f^{3/2}\pi\alpha_q} \cdot c \quad (9)$$

$$\alpha_{ff} = \frac{1}{1 + \mu G / \tau_{ff}} \quad (10)$$

式中 ε ——滤层的空隙率;

α_{ff} ——絮体碰撞后附着效率;

τ_{ff} ——絮体与絮体间的结合强度, $g/(cm \cdot s^2)$;

k ——系数;

α_q ——絮体内质量与体积的换算系数, $g \cdot cm^3 \cdot k$ 。

2 均质滤料直接过滤数学模型的求解

2.1 边界条件

在水的过滤中,有两个基本的事实,即:①滤床入口处空隙中的悬浮物浓度等于原水浓度;②过滤刚开始时滤层是清洁的,滤层空隙中的沉积量等于零。

对应以上两点,过滤过程的边界条件为:

$$\begin{cases} x=0, t \geq 0; & c=c_0 \\ x \geq 0, t=0; & \sigma_v=\sigma_m=0 \end{cases} \quad (11)$$

2.2 求解方法

对过滤模型求解的目的是得到出水浓度和水头损失随时间的变化规律。在过滤方程组中,水头损失只与滤层中的截留量有关。在滤层中物料平衡方程和浊质去除效率、滤层中混凝方程联解的过程中,可以得到水头损失的具体值。因此,求解过滤方程主要是针对物料平衡方程、浊质去除效率和滤层中混凝方程。对时间变量作变换,即令:

$$V=ut \quad (12)$$

式中 V ——单位面积滤床的产水体积, cm^3/cm^2 。

将式(12)代入式(3),物料平衡方程变为:

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial V} + \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

式(13)为二阶拟线性双曲偏微分方程。由于其它相关方程的表达式十分复杂,所以无法得到过滤方程的解析解,其数值解可以用前向差分法求得。

3 滤池设计优化的原则

3.1 优化的原则

滤池操作优化的概念最早由 Mintz 提出,优化的基本原则为^[3];

$$t_{opt} = t_c = t_H \quad (14)$$

式中 t_{opt} ——最优条件下滤池的运行时间, h ;

t_c ——滤池由于出水浊度超标而停止工作时的运行时间, h ;

t_H ——滤池由于水头损失过大而停止工作时的运行时间, h 。

3.2 优化计算的方法

优化计算必须首先确定出水浓度标准 c_{lim} 和极限水头损失 H_{lim} 。

最新颁布的《生活饮用水水质卫生规范》中规定饮用水的浊度不大于 1 NTU^[4],考虑到滤池出水点到用水点的距离和用水的卫生安全性,这里以 0.1 mg/L 作为滤池出水的浓度指标。极限水头损失 H_{lim} 的选取主要基于整个水厂能耗和避免浊度泄漏的考虑,一般取 150 cm。

美国供水协会(AWWA)建议直接过滤工艺的进水浊度一般应在 5 NTU 以下^[5]。根据国内目前水处理的实际生产情况,运转良好的沉淀池出水浊度一般可以控制在 5 NTU 以下。所以,这里选用 5 mg/L 作为典型的进水浓度来进行模拟计算。

根据几组直接过滤的试验数据,拟合得到过滤模型中的有关参数,依此来进行模拟计算和分析,具体的方法和步骤见参考文献^[2]。

选用一定粒径和滤速代入过滤模型进行计算,根据计算结果得到等出水浓度曲线和等水头损失曲线,两条曲线的交点对应着最优的过滤时间和滤层厚度(见图 1)。不同的粒径和滤速组合经过计算最后得到的关系图谱见图 2。

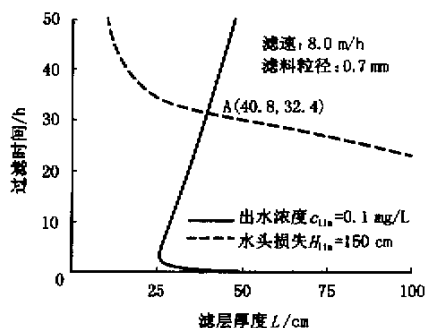


图 1 滤池的等出水浓度、等水头损失曲线

3.3 优化计算的结果

计算条件 进水浓度 $c_0 = 5.0 \text{ mg/L}$ 硫酸铝投药

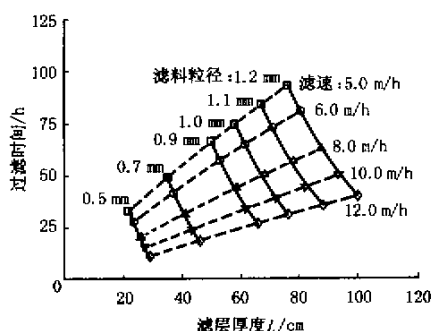


图2 过滤周期与滤速、滤料粒径和滤层厚度间的关系

比 $ALT=0.05$ 水中悬浮颗粒粒径 $d_0=14.5 \mu\text{m}$

图1中的两条曲线分别代表了等出水浓度线和等水头损失线,两条曲线的交点A满足式(14)。因此,A点即为给定条件下滤池的最佳操作点。具体的含义可以表述为:浓度 $c_0=5.0 \text{ mg/L}$ 的原水,在投药比 $ALT=0.05$ 的混凝条件下,采用直接过滤的方式,以 8.0 m/h 的滤速通过厚度 $L=40.8 \text{ cm}$,等体积粒径 $d_v=0.7 \text{ mm}$ 的均质石英砂滤层,在过滤进行了 32.4 h 后,滤层的出水浓度为 0.1 mg/L ,此时整个滤层的水头损失为 150 cm 。

以不同的滤速和滤料粒径的组合重复进行上述过程,可以得到一系列的最佳操作点,从而可以建立均质滤料滤池滤速、滤料粒径和滤层厚度间的关系(见图2)。

在滤池设计过程中,对于滤层厚度、滤料粒径、过滤速度的合理确定是保证滤池良好运转的前提。图2中基于滤池最优工作条件下给出的设计参数间关系,对于滤池工艺设计的指导意义是显而易见的。

生产中,在保证出水水质和有限能耗的前提下,单位面积滤池的最大产水量是评价滤池生产能力高低的主要指标。另外,实践中常用 $L/d_m \geq 800 \sim 1000$ 来评价滤层的结构特性^[6]。根据图2的结果经过计算,可以得到均质滤料滤池产水量与滤层评价指标 L/d_m 的关系(见图3)。

从图3给出的图谱来看,对于给定条件下的原水,存在着一个最大产水量点(如图3中B点)。与这个点对应的滤层结构参数和操作条件,可以保证滤池的生产能力最高,即在充分利用滤池截污能力的同时,得到最大产量的、合乎标准的滤后水。

以 L/d_m 作为评判指标只是大量实践经验的积

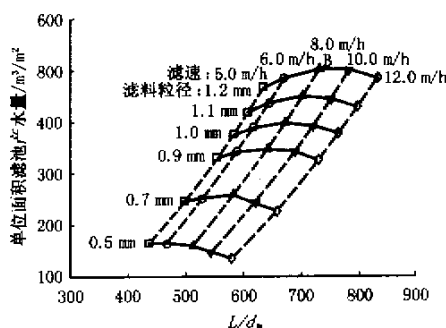


图3 产水量与滤层评价指标 L/d_m 的关系

累。由于对过滤模型研究的不足,无法采用模拟计算的方法来确定滤池设计的有关参数,而 L/d_m 的表达简单,易于被大家接收,因此,作为一种替代参数, L/d_m 值被广泛应用于滤池的设计和性能评判^[6]。从过滤模型的表达式和模拟计算结果来看,以 L/d_m 作为滤层设计的依据缺乏有力的理论支持。

另外,图3中最优操作点对应的 L/d_m 值的范围很大($430 \sim 840$),因此,滤层性能评判指标 L/d_m 的具体数值也值得商榷。

必须说明的是,依靠如图2,图3所示的图谱来设计滤池时,应该综合考虑。原水水质、水量的变化,整个处理工艺的目标要求以及反冲洗技术等都不不同程度地影响着滤池的设计,但图中给出的设计参数间的关系对滤池设计优化的指导意义毋庸置疑。

参考文献

- 1 钟淳昌. 净水厂设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 8
- 2 张建锋. 均质滤料直接过滤的模拟和计算: [学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001
- 3 Mintz D M. Modern theory of filtration. International Water Supply Congress Proceedings, Spain, 1966
- 4 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水水质卫生规范, 2001. 6
- 5 Water quality and treatment-A handbook of community water supplies. 4th Edition. AWWA, 1993
- 6 井出哲夫. 水处理工程理论与应用. 张自杰, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. 10

○作者通讯处 710055 西安市雁塔路13号

西安建筑科技大学环境与市政工程学院

电话: (029) 2205000

王峰慧 710082 西安市自来水公司

修回日期 2001-11-23