

深床过滤沉积物质量与体积的换算关系

张建锋 金同轨 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要 过滤过程滤层中沉积物的空隙率随水流平均速度梯度的改变而变化。通过受力情况和结构特性的分析,推导出了沉积物空隙率的函数表达式,在此基础上,给出沉积物质量与体积的换算关系。采用称重法和示踪剂试验的方法,通过测定沉积物的质量比截留量和体积比截留量,对给出的换算关系进行了试验验证,试验结果与理论分析相吻合。不同混凝条件的试验结果表明,随着铝盐投药比(ALT)的增加,滤层中沉积物的密度减小。

关键词 深床过滤 沉积物 密度

Mass and volume conversion of deep bed filtration sediment

Zhang Jian-feng, Jin Tong-gui, Wang Xiao-chang

(School of Enviromental and Municipal Engineering,

Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In the duration of deep bed filtration the void ratio of sediment will be varied with the average flow velocity gradient. It has deduced the mathematical function of the sediment void ratio on the basis of stress and structure analysis, and then the mass and volume conversion of deep bed filtration sediment is given. This calculation has been verified by examinations of the ratio of sediment mass to captured mass and sediment volume to captured mass by gravimetric and tracer methods. The results are identical to the theoretic analysis. The experiments under different coagulation conditions show that the density of the sediment in the filtering bed decreased with the increasing of aluminum salt dosage.

Keywords: Deep bed filtration; Sediment; Density

在深床过滤的研究中,滤层内的物料平衡方程、水头损失方程和截留速率方程构成了整个过滤数学模型的基本框架。在分析滤层内物料平衡关系时,一般以水中悬浮絮体和滤床沉积物(截留的悬浮颗粒)的质量为基准。而滤层水头损失以及滤料间隙内水流速度梯度的变化,均与沉积物的体积有关。因此,推求滤层中沉积物质量与体积的换算关系,是过滤数学模型求解的基础。

滤层空隙中的沉积物与絮凝体的结构相似,具有一定的空隙。在最初的研究中,沉积物空隙率被认为是一个常数,但不同的研究者给出的数值不同,

Deb 认为该值为 0.75, Huthison 和 Sutherland 的分析结果是 0.80, Tien 和 Pendse 认为 0.7 比较合理^[1]。Semi 和 Ives 经过研究认为沉积物的空隙率不是常数,而是一个随滤层中水力条件变化而改变的量^[2]。因此,确定沉积物空隙率的函数表达式,是推求滤层中沉积物质量与体积换算关系的前提。本文拟从沉积物的结构特性出发,通过分析水中絮体发生沉积和剥离的临界条件,推导出沉积物空隙率的函数表达式,在此基础上,给出沉积物质量与体积的换算关系,并通过试验进行验证。

1 沉积物质量与体积的换算关系式

滤层中沉积物由三部分构成,即原水中的浊度颗粒、混凝剂固体和空隙水,这里定义沉积物的空隙

率等于单位体积沉积物中空隙水的体积比率。

在滤层深度 x 处任取一个单位体积微元,该微元中沉积物体积比沉积量随时间的变化率与质量比沉积物时间变化率的关系如下:

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial t} = \frac{1}{q_0(1 - \epsilon_d)} \frac{\partial \sigma_m}{\partial t} \quad (1)$$

式中 q_0 ——沉积物中固体成分(浊度固体和混凝剂固体)的密度, g/cm^3 ;

σ_v ——微元中截留絮体(沉积物)的体积比沉积量, cm^3/cm^3 ;

σ_m ——微元中截留絮体(沉积物)的质量比沉积量, g/cm^3 ;

ϵ_d ——沉积物的空隙率(为时间 t 的函数)。

当时间 t 固定时,有:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_v} = q_0(1 - \epsilon_d) \quad (2)$$

式(2)为比沉积物的视密度 σ_m/σ_v 与真密度 q_0 的关系,在给定的 x 和 t 时, σ_m/σ_v 为一定值。

在过滤过程中,已沉积在滤料颗粒表面的絮体外缘受到流体的水力剪切,另外絮体本身也具有一定的抗剪强度,当水力剪切作用大于絮体抗剪强度时,已沉积絮体发生剥离,浊质沿水流方向移动。这一现象已在很多过滤研究中得到证实。随着滤层沉积物的增加,滤层空隙中的水力剪切作用加强,絮体继续发生截留并保持沉积状态的前提是改变自身的结构,提高其对水流剪切的抵抗能力。

在研究高分子化合物空间构型与性质的相关性时,发现化合物的很多物理性能与单体间的化学键数目有关^[3]。在沉积物中,原浊度固体颗粒的粒径远大于混凝剂固体颗粒的粒径,可以将沉积物视为由混凝剂固体粘结浊度固体而形成的絮体,粘结点即为浊度固体的附着点。假设沉积物抗剪强度与沉积物中单位横断面上浊度固体颗粒间平均附着点数成正比,即:

$$\tau_1 \propto N_c \quad (3)$$

式中 τ_1 ——沉积物的抗剪强度, $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$;

N_c ——沉积物中单位横断面上浊度固体颗粒间平均附着点数, cm^{-2} 。

N_c 是沉积物空隙率 ϵ_d 的函数^[4,5]。

$$N_c = \frac{1 - \epsilon_d}{\pi d_e^2} n_c \quad (4)$$

式中 d_e ——构成沉积物的浊度颗粒的当量粒径, cm ;

n_c ——单个浊度颗粒的平均附着点数。

单个浊度颗粒的平均附着点数 n_c 随沉积物的空隙率变化。Tien 和 Payatakes 根据轨迹分析,计算出过滤过程中沉积絮体的最大空隙率约为 0.8^[6]。当絮体空隙率大于 0.53 时,Gotoh 给出下列关系^[7]:

$$n_c = \frac{36(1 - \epsilon_d)}{\pi} \quad (\epsilon_d > 0.53) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),得到:

$$N_c = \left[\frac{6(1 - \epsilon_d)}{\pi d_e} \right]^2 \quad (6)$$

由式(3)和式(6)可得到沉积物空隙率与沉积物抗剪强度之间的关系:

$$\tau_1 \propto (1 - \epsilon_d)^2 \quad (7)$$

另一方面,根据牛顿内摩擦定律,滤层空隙中水流对沉积物的剪应力 τ_2 与水流平均速度梯度 G 有以下关系^[8]:

$$\tau_2 \propto \mu G \quad (8)$$

式中 τ_2 ——滤层空隙中水流对沉积物的剪应力,

$\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$;

G ——滤层空隙中水流平均速度梯度, s^{-1} ;

μ ——水的粘性系数, $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ 。

絮体发生沉积和剥离的临界条件为 $\tau_1 = \tau_2$ 。这样,沉积絮体的空隙率与空隙中水流的平均速度梯度的关系如下:

$$\mu G \propto (1 - \epsilon_d)^2 \quad (9)$$

假设在某一个水力剪应力 $\mu_s G_s$ 下,沉积絮体的空隙率为 ϵ_s ,以此为基准,则有:

$$\left(\frac{\mu G}{\mu_s G_s} \right)^{1/2} = \frac{1 - \epsilon_d}{1 - \epsilon_s} \quad (10)$$

式(10)即为沉积物空隙率的函数关系式,代入式(2),有:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_v} = q_0(1 - \epsilon_s) \left(\frac{\mu G}{\mu_s G_s} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$\text{设: } q_s = \frac{q_0(1 - \epsilon_s)}{(\mu_s G_s)^{1/2}} \quad (12)$$

式(11)变为:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_v} = q_s (\mu G)^{1/2} \quad (13)$$

式中 q_s ——沉积物质量与体积换算系数, $\text{g}^{1/2} \cdot \text{s} / \text{cm}^{5/2}$ 。

式(13)即为滤层中沉积物质量与体积的换算关系。

在滤层中,水流平均速度梯度 G 为滤层深度 x 和过滤时间 t 的函数,在 x 和 t 给定的情况下,有^[9]:

$$G = \left(\rho g u \frac{\partial H}{\partial x} \frac{1}{\varepsilon_0 - \varepsilon_v} \cdot \frac{1}{\mu} \right)^{1/2} \quad (14)$$

式中 ρ ——水的密度, g/cm^3 ;

g ——重力加速度, cm/s^2 ;

H ——水头损失, cm ;

u ——滤速, cm/s ;

ε_0 ——清洁滤层的空隙率;

x ——滤层厚度, cm 。

式(14)中,水头损失梯度 $\partial H / \partial x$ 通过沿滤层深度设置的测压管水位变化经过计算得到,滤层的空隙率和沉积物体积比沉积量通过示踪剂试验求得。

2 试验装置

试验装置包括直接过滤和示踪剂检测两部分,见图1。过滤柱用内径 100 mm 有机玻璃管制成。柱体沿纵向可以剖开,以便采集不同深度的滤料,定量测定沉积絮体质量比沉积量。沿滤层深度,柱体上每隔 10 cm 处设测压管。滤层表面下 0.5 cm, 10 cm, 20 cm, 35 cm 及 50 cm 处设置电导电极,采用 30% NaCl 溶液作为示踪剂,通过多管分散装置,在滤层表面以脉冲的方式瞬时加入微量 NaCl 溶液,通

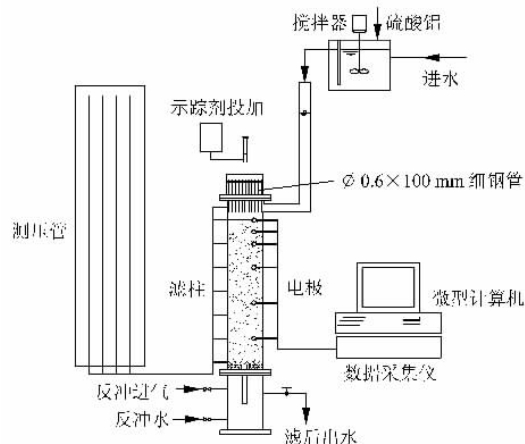


图1 试验装置示意

过不同深度处所测电导率的变化得到 RTD 曲线,按照文献[9]的方法分析求得滤层的空隙率和絮体体积比沉积量。

试验采用均质滤料直接过滤,人工配制的原水加药后经混合槽急速搅拌,直接进入滤床过滤。具体过程如下:在西安市自来水中投加高岭土浆液配制成一定浓度的原水,经泵、流量计进入混合槽。用微型计量泵投加混凝剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 至混合槽原水中,进行快速搅拌。通过调整计量泵的流量和混凝剂浓度来改变加药量,以满足不同的过滤条件。混合时间约 1~2 min。混合槽出水直接进入滤床进行等滤速过滤。用散射光浊度仪测定浊度,经过换算得到水中悬浮絮体浓度。

3 试验结果分析

不同混凝条件下的试验结果见图2。

从图2可以看出, σ_m 与 $(\mu G)^{1/2} \sigma_v$ 之间存在着近似的直线关系,直线的斜率即为沉积物质量与体积换算系数 q_s ,这与式(13)给出的关系是一致的。

根据前面式(12)的定义, q_s 与沉积物中固体成分的密度 q_0 有关,而 q_0 可以大致写成:

$$\begin{aligned} q_0 &= (\text{浊度固体} + \text{混凝剂固体}) / \text{cm}^3 (\text{无空隙沉积物}) \\ &= [f(\text{浊度}) + \text{ALT} \times f(\text{浊度})] / \text{cm}^3 \\ &= [f(\text{浊度})(1 + \text{ALT})] / \text{cm}^3 \end{aligned}$$

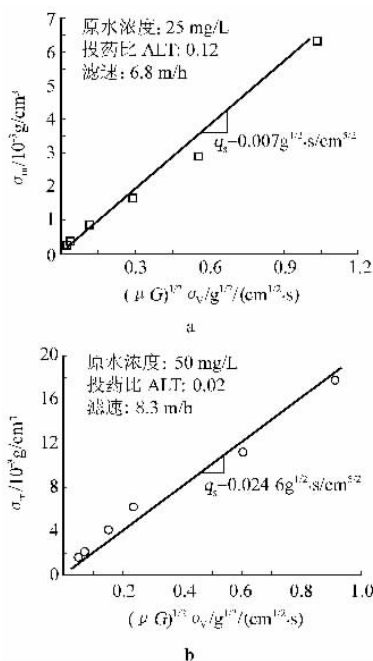


图2 σ_m 与 $(\mu G)^{1/2} \sigma_v$ 之间的关系

按 ALT 的投药量不等于混凝过程中水解物的量,因此以上的关系是近似的。由于这个原因, q_0 无法通过计算确定,但对于性质一定的原水,在混凝条件(主要是投药量)一定时, q_0 应该是定值。在过滤过程中,混凝投药比 ALT 相同时, q_s 也应该是一个定值,可以通过一定的模型试验求得。

图 3 为在不同原水浓度和投药条件下得到的 q_s 与 ALT 之间的关系。随着 ALT 增大, q_s 值呈急剧减小的趋势。这是因为,随着投药比的增大,硫酸铝水解产物在沉积物(絮体)中所占的体积比增大,或者说单位体积沉积物中浊度颗粒的比例减小,沉积物变得更加蓬松,从而沉积物质量与体积的比例系数降低。文献[10]在研究絮凝体的密度时,认为絮凝体密度函数的系数均为混凝投药比 ALT 的函数,这从另一个方面印证了上面分析中有关原水性质一定时, q_s 主要与投药比 ALT 有关的假设。

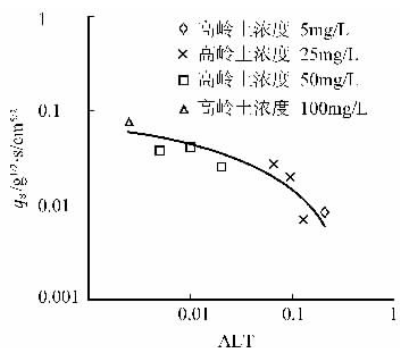


图 3 系数 q_s 与投药比 ALT 的关系

4 结语

过滤过程中滤层内沉积物与絮凝体的结构相似,具有一定的空隙。本文通过分析沉积物的受力情况和结构特性,给出了沉积物空隙率的函数表达式,进而推导出深床过滤中沉积物质量与体积的换算关系。在一定的操作条件下,沉积物的质量比沉积量 σ_m 与体积比沉积量 σ_v 和 $(\mu G)^{1/2}$ 的乘积之间呈良好的直线关系,试验的结果也证明了这一点。当原水性质一定时,沉积物质量与体积的换算系数 q_s 值主要取决于投药比 ALT,将这一结果引入深床过滤的基本方程,可很好地反映不同投药条件下絮凝体密度的变化对过滤过程的影响。通过建立深床过滤中沉积物质量与体积的换算关系,结合一定的试验,可以对过滤过程的数学模型进行求解,为滤池

的设计优化和技术改造提供依据。

参考文献

- Chi Tien, Turian R M, Pendse H. Simulation of the dynamic behavior of deep bed filter. AIChE, 1979, 25(3): 385 ~ 395
- Sembi D M, Ives K J. Optimization of size-graded water filters. Filtration & Separation, 1983, 20: 338 ~ 341
- 王祖陶编著. 现代分子结构研究方法. 北京: 科学出版社, 1987
- Rumpf H. The strength of granules and agglomerates. Agglomeration. Interscience Pub, 1962
- 铃木道隆他. 均一径球形ランダム充填粒子集合体の配位数に关する - 考察. 化学工学论文集, 1980, 6(1): 59 ~ 64
- Chi Tien, Payatakes A C. Advance in deep bed filtration. AIChE, 1979, 25(5): 737 ~ 759
- Gotoh K. Liquid structure and the coordination of equal spheres in random assemblage. Nature Phys Sci, 1971, 231: 108 ~ 110
- 严熙世, 范瑾初. 给水工程. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- 张建锋, 等. 均质滤料过滤阻力的数学模型. 环境科学学报, 2003, 23(2): 246 ~ 251
- 松井佳彦他. 凝集制御のためのフロック径のオンライン計測(II) - 系数の評価と実験的の检讨. 水道协会杂志, 1990, 664: 2 ~ 12

○E-mail: jfzh@pub. xaoonline. com

修回日期: 2003-5-22

西安北郊东郊新建污水处理厂工程将启动

今年,西安市将投入 2.2 亿元启动城市水环境综合治理一期工程,分别在北郊和东郊新建一座污水处理厂,工程总投资 12.46 亿元。

第三污水处理厂位于东郊,占地 21 hm^2 ,建设规模为 10 万 m^3/d ,其中深度处理回用 5 万 m^3/d ;第四污水处理厂位于北绕城以北,占地 38.5 hm^2 ,建设规模为 25 万 m^3/d 。

排水管网改造 17 项,包括枣园路、丰庆路、环城东路、环城北路等排水工程以及纬一街雨水截流、大寨路雨水出口、北郊 1#、2#、3#、4# 雨水出口、张家堡退水明渠改造、西斜三明渠改造工程等。

今年计划投资 2.2 亿元完成 2 座污水处理厂的征地拆迁,并于 10 月开建第三污水处理厂。整个工程将于 2007 年全部完工,项目竣工后将整体提高西安市水环境质量,改善城市综合环境和投资环境,减少城市污水排放,减轻渭河水系乃至黄河中下游的水体污染。

(水 工)