

深床过滤颗粒截留机理研究

郭瑾珑, 孟军, 李桂平, 栾兆坤*, 汤鸿霄(中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:对深床过滤过程中颗粒物与滤料之间的相互作用进行了理论分析, 讨论了两者的相互作用及影响因素。对微絮凝深床过滤进行了中试研究, 考察了 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径颗粒在 500cm 滤床中的截留情况, 并连续 65h 监测滤柱水头损失的变化; 在滤速为 24m/h 情况下, 计算了 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 粒径颗粒所受的水流剪切力; 利用理论分析, 分别讨论了表面电位为 -25mV 及 -125mV 、粒径为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒与滤料之间的物理化学作用力。理论计算值对实验结果进行了很好的解释, 说明可以通过颗粒与滤料间的作用力分析来研究均质滤料深床过滤运行规律。

关键词:微絮凝; 深床过滤; 物理化学作用; 颗粒截留

中图分类号: X703.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)03-05-0040

Particle Entrapment Mechanism in Deep Bed Filtration

Guo Jinlong, Meng Jun, Li Guiping, Luan Zhaokun, Tang Hongxiao(SKLEAC, RCEES, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: Theoretical analysis was carried out in this paper to study the interaction in the deep bed filtration process, and the physico-chemical forces between the filter media and suspended particles in water were presented. Pilot study of the micro-flocculation deep bed filtration was carried out in the No. 9 Potable Water Treatment Plant of Beijing, the interception of particles of $1 \sim 10 \mu\text{m}$ diameter in the 500cm deep filter bed was analyzed, and the head loss variation during 65h was monitored. The shear force of $1 \sim 10 \mu\text{m}$ diameter particle under 24m/h filtration velocity was calculated. The theoretical physico-chemical forces between the filter bed and suspended particle of $1 \sim 10 \mu\text{m}$ diameter under the condition of -25mV and -125mV surface potential was also presented. The theoretical results are reasonably consistent with the experimental data, from which it can be concluded that the operation principles of micro-flocculation deep bed filtration could be analyzed by the physico-chemical interaction between the particles and filter media.

Keywords: micro-flocculation; deep bed filtration; physicochemical interaction; suspended particulate interception

水处理过程中, 过滤的主要目的是去除水中的悬浮颗粒物^[1]。作为水处理工艺的关键环节, 过滤质量的好坏直接影响到自来水水质。深床过滤对于低温低浊原水是非常经济有效的, 其在世界范围内得到广泛地研究与应用^[1, 2]。

过滤过程中颗粒物的去除包括一系列复杂的作用机理, 许多研究者^[3~5]对颗粒物与滤料间的相互作用进行了深入研究。深床过滤工艺中, 待去除颗粒物的尺度远小于滤料孔隙尺度, 因此两者间的物理化学相互作用是颗粒物去除的主要影响因素, 同时滤料孔隙中的水流剪切力也将影响到颗粒物的吸附与解吸^[6, 7]。化学处理对颗粒物的表面电性与尺度有很大的影响, 进而影响到滤床对颗粒物的粘附与截留, 所以预处理在深床过滤工艺中是非常重要的。为了

提高过滤效率, 不同絮凝剂对颗粒物长大与粘附的影响研究也很受重视^[8~10]。总之, 过滤是一种非常有前景的处理工艺, 而且其作用机理及相关研究还有待提高。

毛细管模型曾被用来对过滤过程中的浊度去除及水头损失进行理论计算^[11~13]。本文结合毛细管理论, 对微絮凝深床过滤过程中滤料与颗粒物间的相互作用进行了分析, 并对试验结果进行很好地解释。

1 理论分析

1.1 毛细管模型

基金项目: 国家“九五”科技攻关专题(96-909-03-02)

作者简介: 郭瑾珑(1976~), 男, 博士研究生, 主要从事水处理过程中的水质学研究。

收稿日期: 2002-05-29; 修订日期: 2002-09-18

* 通信联系人

滤床由粒状材料填充构成,待处理水以层流状态通过滤料间的孔隙通道.因此,可以将滤床间的孔隙看作由毛细管道组成.滤池运行过程中,由于剪力的不同,颗粒物首先在剪力较小的位置沉积.当滤池稳定运行时,孔隙通道接近圆形,将毛细管道视为圆管分析如下.

对于非球形级配滤料,滤床中的毛细管孔径大小与数目可通过(1)和(2)式计算^[7,11,12]:

$$d_c = \frac{2\varepsilon}{3\alpha(1-\varepsilon)} d_e \quad (1)$$

$$n = \frac{9\alpha^2(1-\varepsilon)^2}{\pi\varepsilon \cdot d_e^2} \quad (2)$$

式中, ε 为滤料的孔隙率(孔隙/滤料); n 为单位面积滤池中毛细管数目(根/ m^2 滤池), d_c 为毛细管管径(m); α 为滤料的表面形状系数; d_e 为滤料的当量直径(m).

单根毛细管中的平均流速应该与滤池总的孔隙流速相等,通过对圆管层流的流态分析可以得到过滤过程中水力坡度的计算式^[14]:

$$J = 32 \cdot u \mu / r d_c^2 \quad (3)$$

式中, J 为水力坡度, $J = h_f / l$, h_f 为沿程水头损失(m), l 为管段的长度(m); r 为水的重度, $9.789(\text{kN}/\text{m}^3)$; μ 为水的动力粘度, $\mu = 1.002 \times 10^{-3}(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ ($t = 20^\circ\text{C}$); u 为毛细管中的平均流速.

对于有压圆管均匀流,切应力 τ 与沿程损失的关系为 $\tau = r \times r \times J/2$,圆管层流的平均水头损失为 $h_f = J \times l$,由式(3)可以得到圆管中的切应力分布.设毛细管壁与絮体颗粒间的距离为 z ,则 z 处的剪切应力计算式为^[7]:

$$\tau = 16 \times \mu \times u \times \left| \frac{d_c}{2} - z \right| / d_c^2 \quad (4)$$

1.2 颗粒与管壁的相互作用

胶体颗粒与平面以及胶体颗粒之间存在多种物理化学作用力,根据这些力的作用范围可以将它们分为长程力和短程力2类.过滤过程中,这些物理化学作用力将影响到颗粒的粘附与脱落.温度为 20°C 时,一价电解质溶液中颗粒与毛细管壁的作用力可以简化如(5)~(8)式^[7,15~18]:

考虑延迟作用的伦敦-范德华作用力:

$$F_L = 1.43 \times 10^{-2} a_p \cdot (1 + 0.28z) \cdot (z + 1.4 \times 10^{-3} z^2)^{-2} \quad (5)$$

双电层作用力:

$$F_e = -0.334 \cdot I^{1/2} \cdot a_p \cdot 0.74 I^{0.5 \times z} \tanh(9.756 \phi_1) \tanh(9.756 \phi_2) \quad (6)$$

Born 斥力:

$$F_B = -4.77 \cdot 10^{-23} a_p \cdot q^6 z^{-8} \quad (7)$$

水合作用力:

$$F_h = -6.28 \cdot a_p \cdot K_1 h \cdot \exp(-z/h) \quad (8)$$

式中, F_B 、 F_e 、 F_h 、 F_L 的作用方向均为沿颗粒球心垂直于毛细管壁的方向; a_p 是颗粒的半径(m); z 是颗粒与毛细管壁之间的分隔距离(nm); I 为离子强度(mol/L); ϕ_1 、 ϕ_2 分别为2个表面的电位(V); q 为碰撞直径(nm); K_1 和 h 为经验常数,对于一价电解质, h 约为 $0.6 \sim 1.1 \text{ nm}$ ^[3].

2 实验研究

2.1 实验方法

在北京市水源九厂对微絮凝深床过滤进行中试研究,实验原水为密云水库引水.实验流程如图1所示.絮凝剂由蠕动泵投加(Model 7523-37, Cole-Parmer Instrument Cor.),与原水在静态管式混合器中(Model 1-40C-412-2, Koflo Cor.)混合,混合水通过管道直接进入填充滤柱.实验出水水质通过在线浊度仪(Model 8220, Great Lake Co. Ltd)监测,监测结果输入记录仪(Model 056-3002, Hitachi Cor.)进行输出与分析.

2.2 实验材料

滤柱为高500cm的有机玻璃管,其内径为20cm;采样口间距离30cm,承托层为20cm厚的卵石;填充滤料为无烟煤颗粒,等效粒径 2.7 mm ;填充床高度为 2.5 m ;实验滤速为 $24 \text{ m}/\text{h}$.原水投加絮凝剂后的混合水以及出水中的颗粒粒径分布都由Coulter Counter(Multisizer II, Coulter Electronics)进行测量.实验中所用絮凝剂为液体聚合铝(PAC,青岛净水剂厂)和聚合铁(PFC,由酸洗废液制取).聚合铁中 Fe^{3+}

浓度为 2.23 mol/L,碱化度为 12%,而聚合铝中的 Al 含量为 2.57 mol/L,碱化度为 62%。

由于原水浊度较低,所以实验过程中规定水头损失最大不超过 200 cm,而水质穿透标准为 0.3 NTU,否则认为过滤结束,完成一个过滤周期。

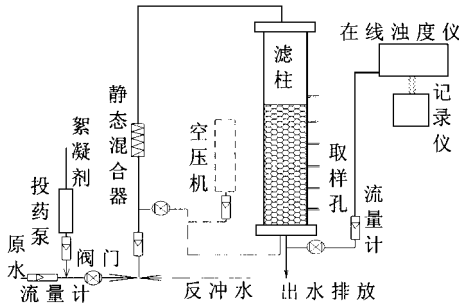


图 1 微絮凝-深床过滤实验流程图

Fig.1 Schematic flow chart of the Micro flocculation deep bed filtration

3 结果与讨论

3.1 实验结果

由图 2 可以看出,当没有絮凝剂投加时,颗粒的去除与其直径成反相关关系,即:颗粒物的直径越大其去除率越低。一旦投加絮凝剂就会观察到不同的实验现象,如图 3、图 4 所示,随着颗粒物直径的增加,其去除率也相应增加。

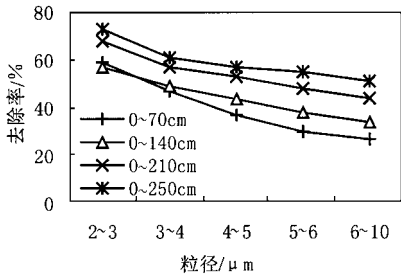


图 2 未投加絮凝剂时颗粒去除情况

Fig.2 Effect of particle diameter on its removal without flocculent dosage

通过图 3 与图 4 的对比可以得到不同絮凝剂类型对颗粒截留的影响。对于聚合铁絮凝剂,颗粒物主要在滤床的顶部截留,而对于聚合铝,颗粒物的截留沿整个滤柱长度方向比较均匀。如图 5 所示,相比聚合铝,聚合铁作絮凝剂时水头损失增长比较缓慢,这或许由于聚合铁絮体

更容易脱水密实导致^[19]。

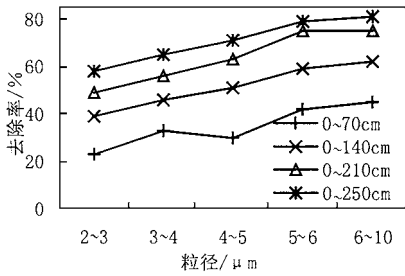


图 3 PAC 做絮凝剂时颗粒物截留 (0.5 mg/L)

Fig.3 Particle removal efficiency along the filter bed(PAC dosage 0.5 mg/L)

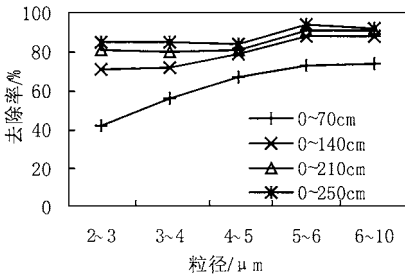


图 4 PFC 做絮凝剂时颗粒物截留 (0.4 mg/L)

Fig.4 Particle removal efficiency along the filter bed(PFC dosage 0.4 mg/L)

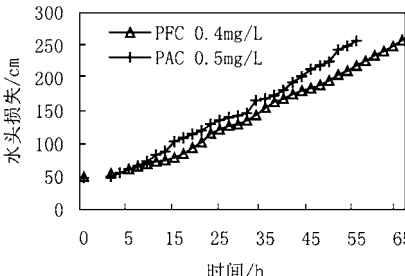


图 5 水头损失随过滤时间的变化曲线

Fig.5 Influence of operation time on the head loss of filter bed

理论计算过程中所采用的部分常数为:离子强度为 0.001;常数 K_1 和 h 分别为 0.00001 和 0.8^[3];滤料的形状系数取值 2.08,等效粒径为 2.7 mm;滤床高度为 2.5 m,滤床的孔隙率为 55%;过滤流速为 24 m/h。其它计算条件在各组讨论中分别给出。

3.2 颗粒粒径对水流剪力的影响

将颗粒视为质点,以颗粒中心作为质点位

置,由式(4)可以计算毛细管中颗粒粒径与其所受水流剪力间的相互关系.因为管径直接决定了其中的水流速度,所以颗粒所受水流剪切力是毛细管管径,也即滤床孔隙率的函数.颗粒物以及滤料的表面性质对其所受的水流剪力影响非常小,根据毛细管模型的计算结果,颗粒的粒径对其所受的水流剪力影响也较小,如图6所示.

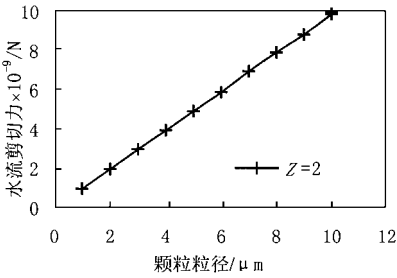


图6 颗粒直径对水流剪力的影响

Fig.6 Theoretical relation between the particle diameter and shear force

3.3 高表面电位情况

假定颗粒物与滤料的表面电位均为 -25 mV ,计算求得两者间的相互作用曲线如图7、图8所示.由图7可以看出,颗粒与滤料间的相互作用力随间距的降低而迅速降低,甚至会出现负值.当两者间距大于 5 nm 时,颗粒粒径的影响非常小;当两者间距离小于 5 nm 时,粒径对两者间的物理化学作用力会产生很大的影响,随着颗粒粒径的增加作用力急剧增加.从图8中可以观察到同样的变化趋势.

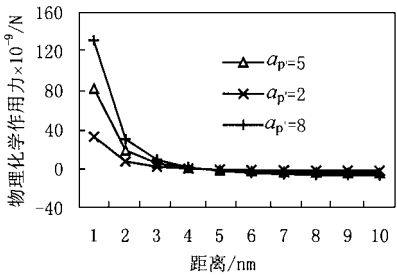


图7 颗粒-毛细管壁间距离与作用力关系曲线

Fig.7 Influence of separation distance on the physico-chemical force between the particle and filter grain

当表面电位较高时,颗粒粒径对物理化学作用力的影响很大,尤其是当两者间的间距较小时,因此在有效碰撞的范围内,相互作用力会随着颗粒粒径的增加而增加.投加絮凝剂后,颗粒物或者微絮体的表面电位迅速升高,滤料的表面电位也会由于粘附了微絮体而升高,所以两者之间的相互作用力的变化趋势将会如图7与图8所示.

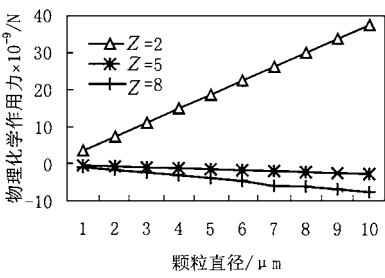


图8 颗粒直径与作用力关系曲线

Fig.8 Particle diameter influence on the physico-chemical force between the particle and filter grain

如上所述,颗粒粒径对剪切力的影响相对较小,也就是说致使颗粒脱离吸附位的作用力较小,因此颗粒与滤料间的物理化学相互作用力将成为最终决定颗粒的粘附去除.综上所述,药剂的投加会导致较大颗粒或颗粒聚合物的产生,从而提高了去除效率,如图3、图4所示.

3.4 低表面电位情况

假定颗粒物与滤料的表面电位均为 -125 mV ,则会得到图9的分析结果.由图9可以看出,此时颗粒与滤料间的作用力为负值,所

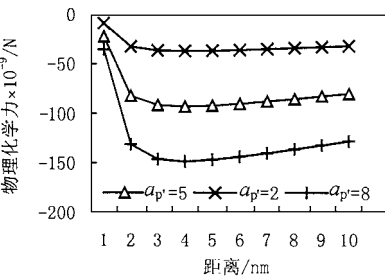


图9 颗粒-毛细管壁间距离与作用力关系曲线

Fig.9 Theoretical curve of the separation distance and the physico-chemical interaction force between the particle and filter grain

以颗粒去除的决定因素为惯性、扩散或者其他相互作用。

随着颗粒粒径的增加,其与滤料间的物理化学作用力相应减小,导致两者间粘附能力的降低。与高表面电位时观测结果类似,当两者间间距大于 3 nm 时间距对作用力的影响会很小。在不投加药剂的情况下颗粒与滤料表面的电位会很低,而且颗粒粒径对剪切力的影响很小,所以随着颗粒粒径的增加去除效率会大大降低,这与图 2 所示实验结果一致。

4 结 论

微絮凝-深床过滤实验中,对实验过程中的水头损失、颗粒截流分布及去除效率进行了测量与分析;利用毛细管模型对过滤过程中颗粒与滤料的相互作用进行了理论分析,讨论了颗粒与滤料间的物理化学相互作用、水流剪切力、直径等因素对颗粒物去除的影响。理论计算结果能够对实验结果进行很好地解释,由此可以得出能够通过理论分析对均质滤料深床过滤过程进行分析控制。需要对微絮凝-深床过滤及其它过滤情况开展进一步的理论与实验研究,以便能够进行定量控制与优化。

参考文献:

- 1 Frederick W P. Water Quality and Treatment — A handbook of community water supplies (fourth edition). NY: McGraw-Hill, Inc., 1990. 455 ~ 456.
- 2 Yao K M, Habibian M T, O' Melia C R. Water and wastewater filtration: concepts and applications. Environ. Sci. Technol., 1971, 5(11): 1105 ~ 1112.
- 3 Jegatheesan V, Vigneswaran S. Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable conditions. Wat. Res., 2000, 34(7): 2119 ~ 2131.
- 4 O' Melia C R, Hahn M W, Chen C T. Some effects of particles size in separation processes involving colloids. Wat. Sci. Technol., 1997, 36(4): 119 ~ 126.
- 5 Huang C P, Pan J R, Huang S H. Collision efficiencies of algae and kaolin in depth filter: the effect of surface properties of particles. Wat. Res., 1999, 33(5): 1278 ~ 1286.
- 6 Warszynski P. Coupling of hydrodynamic and electric interactions in adsorption of colloidal particles. Adv. Colloid Interface Sci., 2000, 84: 47 ~ 142.
- 7 Guo J L, Wang Y L, Liu R X, Tang H X. Calculation model of uniform media filtration capacity. Colloids Surf. A, 2002, 21(1 ~ 3): 237 ~ 245.
- 8 Leprince A, Fiessinger F, Bottero J Y. Polymerized iron chloride: an improved inorganic coagulant. AWWA, 1984, 76(1): 93 ~ 97.
- 9 Tang H, Stumm W. The coagulation behaviors of Fe(III) polymeric species. Wat. Res., 1987, 21(1): 115 ~ 128.
- 10 Berre F L, Chauveteau G, Pefferkorn E. Perikinetic and orthokinetic aggregation of hydrated colloids. J. Colloid Interface Sci., 1998, 199(1): 1 ~ 12.
- 11 景有海, 金同轨, 范瑾初. 均质滤料过滤过程的水头损失计算模型. 中国给水排水, 2000, 16(2): 9 ~ 12.
- 12 景有海, 金同轨, 范瑾初. 均质滤料过滤过程的毛细管去除浊质模型. 中国给水排水, 2000, 16(6): 1 ~ 4.
- 13 Payatakes A C, Rajagopalan R, Tien C. Application of porous media models to the study of deep bed filtration. Can. J. Chem. Eng., 1974, 52(12): 722 ~ 731.
- 14 闻德荪, 魏亚东, 李兆年, 王世和. 工程流体力学. 北京: 高等教育出版社, 1992. 272 ~ 274.
- 15 Gregory J. Approximate expressions for retarded van der Waals interaction. J. Colloid Interface Sci., 1981, 83(1): 138 ~ 145.
- 16 Gregory J. Interaction of unequal double layers at constant charge. J. Colloid Interface Sci., 1975, 51(1): 44 ~ 51.
- 17 Ruckenstein E, Prieve D C. Adsorption and desorption of particles and their chromatographic separation. A.I.Ch.E. J., 1976, 22(2): 276 ~ 283.
- 18 Israelachvili J N. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapors. Surf. Sci. Rep., 1992, 14: 109 ~ 159.
- 19 O' Melia C R, Stumm W. Theory of water filtration. J. AWWA, 1967, 11: 1391 ~ 1412.