

均质滤料过滤截污模型研究

郭瑾珑¹, 王毅力², 刘瑞霞¹, 汤鸿霄¹ (1. 中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 北京林业大学资源与环境学院)

摘要:对均质滤料过滤进行了分析,采用毛细管模型研究过滤水流,给出毛细管中剪切应力的分布,通过毛细管中颗粒物的受力分析,求得颗粒与毛细管壁间的物理化学作用力.对颗粒在毛细管中运动的受力平衡进行分析简化,得到了截污饱和时滤床中孔隙率的计算公式,由此可以计算出均质滤床的最大截污能力,即:清洁滤床的孔隙率与饱和孔隙率之差乘以滤床的体积.

关键词:过滤;截污能力;毛细管模型;孔隙率

Study on the uniform media filtration model calculation

GUO Jinlong¹, WANG Yili², LIU Ruixia¹, TANG Hongxiao¹ (1. SKLEAC, Res Center for Eco-Envir Sci, CAS, Beijing 100085; 2. College of Natural Resource and Environment, Beijing Forest University)

Abstract: Through analyzing the uniform media filtration, the capillary model was used to determine the flow pattern in the packed bed, and then the fluid shear force distribution in the capillary was presented. The physical-chemical forces between a particle and the capillary wall were calculated by analytical equations. By equilibrium analysis of the forces acting on a particle adhered on the capillary wall and appropriate simplification, the analytical equation of the porosity in the saturated filter bed was obtained, from which the maximum entrapment capacity during the filtration process was achieved. Moreover, the filtration capacity under certain operations were also presented and discussed.

Key words: filtration; entrapment capacity; capillary model; porosity

过滤是一种行之有效的悬浮颗粒物质去除方法,在液体和气体的净化处理中广泛应用.在饮用水处理工艺中,作为最后一道除浊工序,过滤效果的好坏直接影响到饮用水水质.过滤机理非常复杂,其基本理论在数十年前就已经提出来了,但在这些理论与实际应用之间差距很大^[1-3].同样,过滤截留机理和界面间相互作用力也得到了广泛的研究^[4-11],但其结论应用起来难度更大^[4-6].这些理论用于沉积速率和过滤能力预测时通常会出现一定的偏差^[2,3,12,13].

基于多孔介质过滤,景有海等人提出用毛细管模型来计算过滤过程中的浊度去除过程和水头损失^[14,15].在此基础上,本文对于均质滤床等流速过滤截污进行了详细分析,给出了截污能力计算公式.首先,基于均质滤料过滤毛细管模型,对滤床中的流动形态进行了分析,得到了毛细管中水流剪力分布的解析解;其次,对毛细管中颗粒与毛细管壁间的相互作用力进行计算,综合考虑了伦敦-范德华力、双电层力、Born 斥力和水合力的作用情况,对各个力的解析解作了进一步的简化;最后,通过毛细管中颗粒的受力平衡计算,得到了饱和滤床中孔隙率的计算公式.

收稿日期:2001-08-27;修订日期:2001-11-22

基金项目:九五攻关项目(No. 96-909-03-02);国家自然科学基金(29977027,50178009)

作者简介:郭瑾珑(1976—),男,博士研究生

1 毛细管模型

1.1 模型简介

过滤工艺中,滤床由粒状滤料组成,待处理水以层流流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(如图 1 所示),颗粒物首先在剪力较小的位置(图 1a 处)沉积.当滤池接近饱和时,毛细管管壁各处的剪力应该接近,所以孔隙通道接近圆形.将毛细管道视为圆管分析,可以得到下面的假定及计算公式:1. 毛细管道的总体积与滤床的孔隙体积相同;2. 毛细管道的总表面积与滤料的总表面积相同^[14]:

$$= n \cdot /4 d_c^2 \quad (1)$$

$$f = n \cdot d_c \quad (2)$$

式中: 为滤料的孔隙率(m^3/m^3); f 为滤料的比表面积(m^2/m^3); n 为单位面积滤池中毛细管数目(根/ m^2); d_c 为毛细管管径(m). 对于非球形级配滤料,其比表面积可表示为:

$$f = 6 (1 -) / d_c \quad (3)$$

式中: 一滤料的表面形状系数; d_c 一滤料的当量直径(m).

式(1)和式(2)联立,带入式(3)求解,可得:

$$d_c = \frac{2}{3 (1 -)} d_c \quad (4)$$

$$n = \frac{9^2 (1 -)^2}{\cdot d_c^2} \quad (5)$$

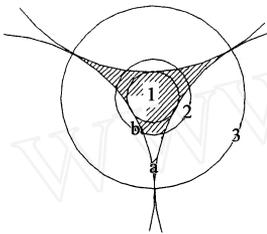


图 1 球形颗粒间最小过流断面示意图(阴影区)

圆 1 为孔隙最大内切圆,圆 2 为与孔隙等面积的圆,圆 3 为孔隙最大外切圆. a 处为剪力最小位置, b 处为剪力最大位置.(以圆管层流处理,计算式见式(8))

Fig. 1 The minimum cross-section of flow in uniform spherical filter bed (hatched area)

如 1.1 中所述,将毛细孔隙中的流态假定为圆管层流.对于半径为 r_0 的圆管层流,其平均流速为^[16]: $\bar{v} = J/32\mu \cdot d^2$. 式中: d 为圆管直径(m); r 为圆管内任意一点的半径(m); 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); γ 为水的重度, $9.789 (\text{kN}/\text{m}^3)$; μ 为水的动力粘度: $\mu = 1.002 \times 10^{-3} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$ ($T = 20$).

对于有压圆管均匀流,切应力 τ 与沿程损失的关系为: $\tau = \frac{r}{2} \cdot J$, 圆管层流的平均水头损失为: $h_f = J \times l$, 进一步计算得到圆管中的切应力分布:

$$= \frac{r}{2} \cdot J = \frac{r}{2} \cdot \frac{32\mu \bar{v}}{d^2} = \frac{16\mu \bar{v}}{d^2} \quad (6)$$

由上式可知剪力在管中心处为零,由中心向管壁呈直线增大,在管壁达到最大值 $8\mu \bar{v}/d$. 设毛细管壁与絮体颗粒间的距离为 z , 则 $r = d_c/2 - z$. z 处的剪切应力计算式为:

$$= 16\mu \cdot \bar{v} \cdot \left[\frac{d_c}{2} - z \right] / d_c^2 = 8\mu \cdot \bar{v} \cdot (d_c^1 - 2z d_c^2) \quad (7)$$

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着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成长程力和短程力两类^[12].长程力包括范德华引力和静电双层作用力,它们的作用范围在 100 nm 之内. Born 斥力和结构力(水合作用力)属于短程力,因为它们只有在表面相距小于 5 nm 时才起主要作用.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,其计算公式如下.

$$\text{考虑弛豫作用的伦敦-范德华作用力}^{[8,12]}: F_L = (A_{\text{cwp}} a_p / 6) [1 + 28(z/\lambda_D)] / \{ z^2 [1 + 14(z/\lambda_D)]^2 \} \quad (8)$$

$$\text{双电层作用力}^{[9,12]}: F_e = - 64 a_p [k_B T / Ze]^2 \tanh[Ze_1 / 4k_B T] \tanh[Ze_2 / 4k_B T] \exp(-z) \quad (9)$$

$$\text{Born 斥力}^{[10,12]}: F_B = - A_{\text{cwp}} a_p^6 / 180 z^8 \quad (10)$$

$$\text{水合作用力}^{[11,12]}: F_h = - 2 a_p K_1 h \exp(-z/h) \quad (11)$$

F_B 、 F_e 、 F_h 、 F_L 分别为 Born 斥力、双电层力、水合力和伦敦-范德华引力(N),这些力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); A_{cwp} 是以水作为介质时相互作用体系的 Hamaker 常数(J);同本文第一部分定义, z 是颗粒与毛细管壁之间的分隔距离(nm); λ_D 是相互作用力的特征波长(nm),其定义为: $2c/\nu$ (其中: c 为光速 2.9979×10^8 (m·s⁻¹), ν 是色散频率).对于大部分的物质而言, λ_D 大约为 100 nm^[12]; $1/\lambda_D$ 是 Debye 长度(即:双电层厚度)的倒数(nm),其近似计算式为: $0.304 \sqrt{I}$ (nm), I 为离子强度(mol L⁻¹)^[17]; k_B 是 Boltzmann 常数, 1.38×10^{-23} J·K⁻¹; T 是溶液的温度(K); Z 为使用电解质的电荷数目; e 是电子电荷 1.6022×10^{-19} (C); e_1 、 e_2 分别为两个表面的电位(V); d_1 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—1.1 (nm)^[12]; ϵ 为溶液的电容率, $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$, 式中: ϵ_0 为真空电容率, 8.85×10^{-12} (F/m); ϵ_r 为溶液的介电常数,在 20 °C 时水的介电常数为 80.10.

上述公式的得出基于以下假定:与颗粒相比,毛细管壁可以视为一个平面,同时,将颗粒物视为球形,得到各种力的计算公式;弛豫范德华力的作用范围为颗粒半径的 20% 以内;双电层作用力的使用范围为表面电位小于 60 mV;对于较大表面电位的颗粒,应该使用椭圆积分公式对作用力进行计算^[12].过滤过程中 Hamaker 常数的计算如下^[17,18].

Hamaker 常数值取决于物质的密度和极化性,典型数值在 10^{-19} — 10^{-20} 焦耳数量级.对于同一物质的两个质点: $A_{131} = (A_{11}^{1/2} - A_{33}^{1/2})$, A_{131} 即质点在介质中的有效 Hamaker 常数, A_{11} 与 A_{33} 分别是质点与介质本身的 Hamaker 常数.滤料的种类多为石英砂,假定絮体中主要成分为 SiO₂, 则认为颗粒与毛细管壁间的 Hamaker 常数为: $A_{\text{cwp}} = (A_{\text{Si}}^{1/2} - A_{\text{H}_2\text{O}}^{1/2})^2$.水和石英的 Hamaker 常数分别取 5×10^{-20} , 1×10^{-19} (J), 则: $A_{\text{cwp}} = (A_{\text{Si}}^{1/2} - A_{\text{H}_2\text{O}}^{1/2})^2 = 8.58 \times 10^{-21}$ (J).

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下:

$$F_L = 1.43 \times 10^{-2} a_p \cdot (1 + 0.28z) (z + 1.4 \times 10^{-3} z^2)^{-2} \quad (12)$$

$$F_e = - 0.334 I^{1/2} \cdot a_p \cdot 0.74^{0.5} \cdot z^{-2} \tanh(9.756 e_1) \tanh(9.756 e_2) \quad (13)$$

$$F_B = - 4.77 \times 10^{-23} a_p \cdot \frac{6}{1} z^{-8} \quad (14)$$

$$F_h = - 6.28 a_p \cdot K_1 h \cdot \exp(-z/h) \quad (15)$$

3 滤床截污能力计算

通过上面分析可以得到作用在颗粒和毛细管壁间的力为： F_B 、 F_c 、 F_h 、 F_L 和 F_f 。垂直于管壁的作用力总和为： $F_{total} = F = F_L + F_c + F_B + F_h$ 。由于颗粒与毛细管壁的水膜及表面粗糙性，当颗粒与管壁间距离达到一定程度时，彼此之间便有摩擦作用力产生。所以颗粒与管壁间的摩擦力为： $F_f = F_{total} \cdot f_c$ ，式中： f_c 为颗粒与管壁间，垂直管壁的力与剪力间的作用系数，是两者粗糙性、距离等因素的函数。当滤床达到最大吸附时，毛细管壁处的颗粒受力平衡，其所受的剪力与摩擦阻力相等，即： $F_f = F$ ，联立式(4)求解得到：

$$= 12\mu (1 - s) \left[s d_c - 3 \left(z + \frac{a_p}{2} \right) (1 - s) \right] Q / s^3 d_c^2 \tag{16}$$

式中： s 为饱和时滤床的孔隙率， $z + a_p/2$ 代表以颗粒中心计算的水流剪力。

对于一定的过滤体系，式(12)至式(15)都有确定的解析解，即： F_f 可以以数值表示，而式(16)中的未知数也只有孔隙率，因此式(12)至式(16)联立求解就可以解得过滤饱和时滤床的孔隙率 s 。清洁滤床的孔隙率 s_0 与饱和孔隙率 s 之差乘以滤床的总体积即为滤床的最大截污能力。

4 结果与讨论

假定颗粒为球形，其与毛细管壁的表面电位均为 - 25 mV；溶液的离子强度为 0.02 mol/L；碰撞直径 d_1 为 5 nm； d_e 为 100 nm；温度为 20℃；溶液中的电解质为一价电解质； K_1 和 h 分别为 1×10^{-5} 和 0.8， f_c 取值为 1。计算得到上述条件下颗粒与毛细管壁间距离与饱和孔隙率以及相应水力坡度的关系曲线： $z - s$ 和 $z - J$ 曲线；过滤流量与饱和孔隙率以及其与水力坡度的关系曲线： $Q - s$ 和 $Q - J$ 曲线。图 2 和图 3 是在过滤流量为 8 m/h 的条件下计算得到，在图 4 和图 5 的计算中，对于半径(图例中 D_p)为 0.5 和 5 μm 的颗粒，吸附距离分别取 2 和 3 nm。图 6 给出了颗粒的表面电位对过滤能力与水力坡度的影响，其计算条件除颗粒表面电位外与上述计算条件相同。

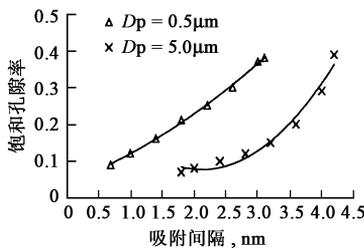


图 2 颗粒与毛细管壁间距离对饱和孔隙率的影响

Fig. 2 Theoretical effect of the particle-capillary wall distance on saturation porosity

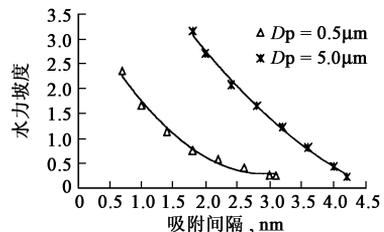


图 3 颗粒与毛细管壁间距离与饱和水力坡度关系

Fig. 3 Relation curve of the particle-capillary wall distance and saturation hydraulic slope

由图 2 可以看出：随着颗粒直径的增加，饱和孔隙率降低，这表明滤床对于较大颗粒截留能力较大。因此在过滤前进行一定的絮凝是必要的，这样有助于得到较高质量的出水。对于同

样直径的颗粒,吸附距离(即:发生吸附时颗粒与管壁之间的距离) z 越大,饱和孔隙率越大,滤床的截污能力越小.从图 4 可以看出饱和孔隙率随着过滤速度而变化,这主要是由于水流剪力的变化导致.由颗粒与管壁之间的相互作用受力分析可知,水流剪力增加,则颗粒的吸附量降低.

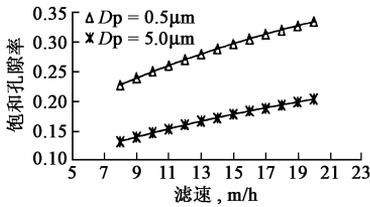


图 4 滤速对饱和孔隙率的影响

Fig. 4 Theoretical influence of filtration velocity on saturation porosity

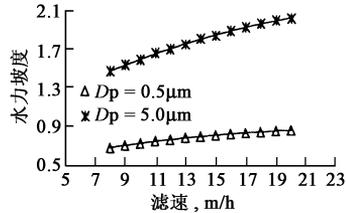


图 5 滤速与水力坡度的理论曲线

Fig. 5 Theoretical relations between filtration velocity and hydraulic slope

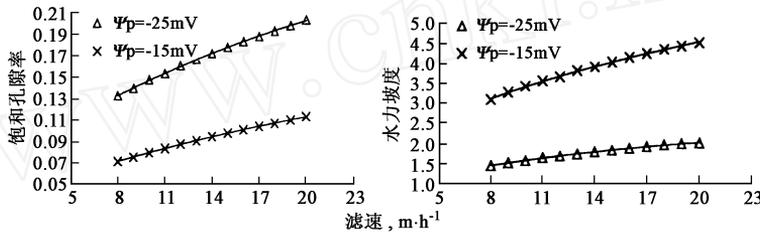


图 6 颗粒表面电位对过滤的影响

Fig. 6 Influence of particle surface potential on filtration

由图 3 可以得到以下结论:对于相同过滤流量,水力坡度随着相应饱和孔隙率的增加而降低.然而由图 5 可以观察到不同的结论:尽管饱和孔隙率随着过滤流量而增加,但是水力坡度也随着过滤流量的增加而增加.这主要是由于水力坡度与流速之间的相关关系导致.

从图 6 可以看出,颗粒的表面电位对滤床的截污能力有很大的影响.颗粒物的表面电位越接近于零,滤床的截污能力越高,当颗粒物的表面电位为 -15 mV 时,滤床的饱和孔隙率大大低于表面电位为 -25 mV 的情况,而水力坡度则会有很大的升高,表示会有更大的水头损失发生.这主要是由于表面电位越接近于零,则颗粒物与毛细管壁的碰撞几率越高,所以导致更高的截留效果.

5 结论

通过对过滤过程中滤床孔隙水流运动进行分析,指出利用毛细管模型对饱和段过滤中颗粒的受力进行分析是合理的;进而通过对颗粒与毛细管壁间的受力平衡计算得到了饱和滤床中孔隙率的计算公式,并对在一定过滤条件下孔隙率-过滤流量、孔隙率-粘附距离的关系进行了计算,得到了相应的曲线.

基于对均质滤料等流速过滤的分析,在计算截污能力的过程中没有考虑过滤保护段的影响,认为整个滤床都达到饱和截污,这与实际过滤运行中的情况有所差别,因此在应用本文公

式进行计算预测时,应该对计算得到的截污能力乘以一个小于 1 的系数,该系数的值应该由具体实验确定.

参考文献:

- [1] Yao KM, Habibian M T, O'Melia C R. Water and waste water filtration: concepts and applications[J]. *Environ Sci Technol*, 1971, 5: 1105
- [2] Spielman L A, Goren S L. Capture of small particles by London Forces from low-speed liquid flow[J]. *Environ Sci Technol*, 1970, 4: 135—140
- [3] Payatakes A C, Chi T, Turian R M. Trajectory calculation of particle deposition in deep bed filtration[J]. *A I Ch E J*, 1974, 20 (5): 889—905
- [4] Bai R B, Tien C. Transient behavior of particle deposition in granular media under various surface interactions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 165: 95—114
- [5] Rajagopalan R, Tien C. Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model[J]. *A I Ch E J*, 1976, 22(3): 523—533
- [6] Ives K J. Deep bed filtration: theory and practice[Z]. *Filtration and Separation*, 1980, Mar/Apr: 157—166
- [7] Adamczyk Z, Warszynski P, Szyk-Warszynska L, et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 165: 157—185
- [8] Gregory J. Approximate expressions for retarded van der Waals interaction[J]. *J Colloid Interface Sci*, 1981, 83(1): 138—145
- [9] Gregory J. Interaction of unequal double layers at constant charge[J]. *J Colloid Interface Sci*, 1975, 51(1): 44—51
- [10] Ruckenstein E, Prieve D C. Adsorption and desorption of particles and their chromatographic separation[J]. *A I Ch E J*, 1976, 22 (2): 276—283
- [11] Israelachvili J N. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours[J]. *Surface Science Reports*, 1992, 14: 109—159
- [12] Jegatheesan V, Vigneswaran S. Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable conditions [J]. *Wat Res*, 2000, 34(7): 2119—2131
- [13] Wang Z S. Chemical aspects of deep bed filtration[D]. Ph D Dissertation, University of Johns Hopkins, Baltimore, Maryland, 1986
- [14] 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[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(2): 9—12
- [15] 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[J]. *中国给水排水*, 2000, 16(6): 1—4
- [16] 闻德荪, 魏亚东, 李兆年, 等. *工程流体力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 272—274
- [17] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters* (2nd ed.), A Wiley-Interscience Publication[Z]. NY: John Wiley and Sons, 1981. 610—625
- [18] 周祖康, 顾惕人, 马季铭. *胶体化学基础*[M]. 北京: 北京大学出版社, 1996. 273