深床过滤机理及其在水处理中 的应用研究与进展

范荣桂^{1,2} 范 彬^{2*} 杜显云^{1,2} 栾兆坤² 朱书全¹

(1.中国矿业大学(北京校区)化学与环境工程学院,北京 100083;2.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 深床过滤既有过滤功能,又具生物处理作用,具有良好的应用前景;本文阐述了深床过滤的最新研究动向,深床过滤 过程的数学模型的构建方法,国内外利用深床过滤技术处理微污染水源水、城市生活污水及污水深度处理的实验研究状况。 关键词 深床过滤 水处理 研究进展

中图分类号 TU991.2 文献标识码 A 文章编号 1008-9241 (2005) 09-0001-06

Development and application of deep bed filtration in micro-polluted raw water or wastewater treatment

Fan Ronggui^{1,2} Fan Bin² Du Xianyun^{1,2} Luan Zhaokun² Zhu Shuquan¹

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology Beijing, Beijing 100083;

2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for

Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract Deep bed filtration should be provided with better application since it possesses the functions of filtration and bio-treatment The latest research development about deep bed filtration was formulated The construction method of mathematic model about deep bed filtration process was also introduced The development of the experimental research on the treatment of micro-polluted raw water, sewage and wastewater tertiary treatment using deep bed filtration technology was summarized

Key words deep bed filtration; water treatment; research progress

过滤技术是一种广泛应用的固液分离技术。在 水处理领域,对含有固体悬浮微粒的水混凝后,不经 沉淀即直接进入滤池的过滤,称为直接过滤。采用 床深超过 1.8 m的过滤装置,对水及废水中的固体 悬浮物进行分离,称之为深床过滤。美国水工业协 会 (AWWA)对混凝后不经沉淀而直接过滤的水处 理工艺定义为微絮凝 直接深床过滤技术。水处理 中的过滤技术可以追溯到 1820年,由 James Smpson设计的一种慢速砂滤池,从此开创了过滤理论 与技术的研究^[1]。

1 经典过滤机理与物理模型

经典过滤物理模型由 Iwasaki于 1937年首先提 出来的。 Iwasaki以试验数据为基础,提出了过滤过 程颗粒物浓度与过滤深度间的关系^[1,2],即:

$$\partial C / \partial L = - C \tag{1}$$

Mintz于 1964年提出了唯象理论的修正式。

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -C + \frac{1}{v}$$
(2)

式中,*C*为悬浮液中颗粒浓度(kg/m³);*L*为滤床深 度(m); 为过滤系数(m⁻¹); 为扩散系数(s⁻¹); 为比沉降(kg/m³);v为过滤速度(m/s)。

上述 (1)、(2)式是唯象理论的基础,也是过滤 过程中应用最广泛的公式之一。以后出现的各种计 算形式多数集中在如何对过滤系数 的修正上。

对于 唯 象 理 论 的 数 值 计 算, Burger 和 Tien 等^[3,4]分别对此进行了深入的研究。

与唯象理论不同,轨迹理论认为,随同液相主体

资助项目:国家 "863 高技术研究发展项目 (2003AA601010; 2002AA601310)

收稿日期: 2004 - 12 - 15; 修订日期: 2005 - 04 - 06

作者简介:范荣桂(1962~),男,博士研究生,副教授,主要从事水资源 与水污染控制技术研究工作。Email: fantonggui@163.com

*通讯联系人, E-mail: fanbin@mail rcees ac. cn

一起运动的悬浮颗粒,虽然受到范德华力和双电层 力等力的作用,但只有在其作用的范围内,颗粒才能 发生沉降、吸附或脱附作用;即:只有以某种轨迹运 动的悬浮颗粒才能沉降到滤料的表面^[5],一旦颗粒 的运动轨迹超出了滤料与颗粒间作用力的范围,则 不能被捕获(图 1)。



图 1 轨迹理论示意图 Fig. 1 Schematic diagram of partical capture by track theory(intermolecular forces)

轨迹理论不仅以悬浮颗粒的运动轨迹作为颗粒 去除的重要依据,而且认为,颗粒的去除与滤料的有 效面积有关;比如,在滴滤床中,朝向流体运动方向一 侧的滤料表面才是有效表面,如果悬浮颗粒的运行轨 迹超出了滤料的有效表面范围,则悬浮颗粒不能在滤 料上沉降。对上升流式滤床过滤而言,悬浮颗粒在过 滤介质的向流面由于碰撞及拦截作用而沉积在过滤 介质表面;在背流侧,由于受重力及流体流动所产生 的局部负压作用,也会有悬浮颗粒沉降产生。

毛细管理论对过滤过程的机理研究亦有重要意 义,该理论把过滤介质内的通道抽象成有无数条毛 细管道组成的管束,把悬浮颗粒的过滤过程看成流 体相中的悬浮颗粒与毛细管壁间的相互作用,成为 毛细管理论,对此也有一定的研究^[6,7]。

过滤水头损失是深床过滤中的重要宏观控制指标。水头损失的大小,在一定程度上既能反应出滤床内悬浮物截留量,又与滤料的物理性能及过滤周期有很大的关系;经典的水头损失计算模型主要是Kozeny-Caman模型和 Happel模型^[8,9],计算表达式如(3)和(4)。

$$\frac{-H}{L} = -\frac{45\mu U \left(1 - \frac{1}{2}\right)^2}{\left(\frac{g r_s^2}{r_s^2}\right)^3}$$
(3)

$$\frac{-H}{L} = -\frac{3^{3}(3+2^{5})}{2-3+3^{5}-2^{6}} \left(\frac{-\mu U}{\lg \psi}\right), = (1-)^{1/3}$$

式中,*D*为水力扩散系数; *H*为水头损失 (kg/m²); *L*为滤床深度 (m); ¹为水的密度 (kg/m³); *g*为重 力加速度 (m/s²); *U*为滤速 (m/s); *r*, 为滤料颗粒半 径 (m); 为孔隙度。

Kozeny-Caman模型是以直管内的 Poiseuille流 动方程为基础,认为过滤介质的堆集构成了不同弯 曲和形状的通道,流体的流动呈层流态,符合 Darcy 定律;而 Happel模型将过滤介质及悬浮颗粒视为球 形,水头损失是由于过滤介质所受水流各向摩擦阻 力之和产生的,流体在滤料中的流动满足 Navier-Stokes公式。巧合的是,当孔隙度在 0.4~0.7之间 时,上述 2个模型的计算结果基本趋于一致。

2 过滤机理研究的新进展

2.1 过滤机理的研究进展

对过滤过程的深入研究发现,悬浮颗粒的去除 涉及 2个重要过程,即颗粒迁移与颗粒粘附,但被粘 附的颗粒物也同时存在脱附的可能。

2.1.1 颗粒迁移与粘附

含有悬浮颗粒的水相通过过滤介质时,悬浮颗 粒会由水相向滤料表面移动,即颗粒迁移,它是悬浮 颗粒去除的必要条件。Omelia^[10]认为,这种迁移包 括布朗运动和分子扩散、流体流动及重力作用; Ives 等^[11]则认为,当悬浮颗粒随水相在过滤介质中流动 时,会发生沉淀、扩散、惯性作用、拦截及水动力作 用,这些作用的综合结果,会使部分悬浮颗粒(包括 胶体颗粒)聚集在滤料表面,形成粘附作用,使悬浮 颗粒得以去除。



图 2 悬浮颗粒与过滤介质间的相互作用 Fig. 2 Suspended particles sedimentation process and interaction with filtration media

进一步研究发现,悬浮颗粒的去除还与颗粒 (滤料颗粒及悬浮颗粒)间的作用力及流动水相的 理化性能、电学性能有关^[12]。Semion等^[13]则按作 用力范围,将这些力划分为远程力(范德华力)和近 程力(双电层力、Bom力及水动力)。这些作用力的

(4)

综合作用,决定着过滤效果的优劣。颗粒间的作用 力不仅与颗粒本身的表面性质有关,且随过滤的进 行而变。因为一旦悬浮颗粒被滤料截获后,悬浮颗 粒和滤料的表面性质都会相应发生物理的或化学的 变化。Stephan等^[14]对过滤过程中的 Zeta电位研究 发现,Zeta电位可以作为宏观过滤形为的描述,通 过对高岭土、伊利石等 Zeta电位的测定证实,可以 利用 Zeta电位的测定来预测过滤性能。

深床过滤不仅可以去除固体颗粒,且能去除某些 病菌。Vitaly等^[15]在对过滤中对病菌去除影响的研 究发现,在过滤成熟阶段主要是表面吸附作用;Dai 等^[16]则研究了过滤过程中天然有机物和生物膜对原 生病菌去除的影响,结果发现,天然有机物的存在会 使病菌的去除率下降,当采用铝盐絮凝剂时,由于表 面电荷的中和效应,使病菌的去除效率大大提高。

悬浮颗粒的粒度大小及其分布对过滤效果有重 要影响^[17]。研究表明,在过滤的早期阶段,悬浮粒 子浓度的增加,对过滤效果有改善作用;随着过滤的 进行,沉降在过滤介质上的微粒形成包覆作用,一方 面改变了过滤介质原有的表面性能,同时也使过流 通道变小,导致过滤受阻。但 Beata等^[18]的研究表 明,过滤过程中床层的堵塞并不完全取决于水体中 的颗粒物大小,对某些高浊度水体,虽然水体中的颗 粒尺寸很小,由于积累作用,也易使床层堵塞。

2.1.2 颗粒的脱附

过滤的开始阶段,悬浮颗粒的去除效率呈增加 趋势,而后则明显下降,这不仅是滤层达到吸附或拦 截饱和的表现,同时说明颗粒脱附的存在。颗粒脱 附的原因可以归结为流动剪切力超过颗粒间的吸附 力,或由于其他颗粒碰撞造成的不稳定,或由于空隙 流体速度加快造成的,或是它们的综合作用; Mintz^[19]认为颗粒脱离与比沉降成比例。颗粒脱附 包括颗粒滚动、滑动和颗粒升起。滑动是由于切向 拽力造成的;泡动是由于沉降颗粒的不对称所产生 的扭力造成的;但若颗粒的滚动仅发生在过滤介质 表面,并不发生脱离现象;Jegatheesan等^[2]的研究表 明,过滤的初始阶段,低浓度时较大颗粒的去除及表 面覆盖要比颗粒小的多;去除率的降低主要是沉降 颗粒的阻塞;大量颗粒的沉降,改变了过滤介质的表 面特性,恶化了表面条件。

事实上,过滤过程中包含着许多竞争机制,有物 理的、化学的及物理化学作用,如水体中的有机物包 括天然的、合成的及胶体颗粒等会吸附在颗粒的表 面,从而改变其表面性质,直接影响深床过滤中悬浮 颗粒的去除。随着时间的推移,滤料上所能被占据 的位置逐渐减少,从而降低截留量。但如所捕获的 颗粒与被捕获的颗粒具有很好的亲合力,则滤料上 所能占据的实际位置并未减少,且有可能增加。因 此,实际过滤过程相当复杂,对吸附和脱附机理研究 尚未形成统一的认识。

2.2 构建过滤模型的新方法

深床过滤过程是动态的,受多重因素影响的复杂 过程,涉及颗粒捕获和颗粒脱附,且与悬浮液的理化 性质有关,尽管过滤过程的物理模型构建有很多方 法,但参数的计算及适应性仍有待提高,一些新的建 模方法也被移植到深床过滤的模型构建中。表现在:

Stephan等^[20]将遗传算法应用到深床过滤中, 实现以最少的实验来可获得更多的参数; Stephan认 为,对不同条件下的深床过滤模型只需将算法程序 中的一些参数进行修改即可,这使得深床过滤过程 的计算机模拟成为可能。

Osmak则采用综合衰变神经网络系统 (GRNN) 建立了深床过滤中悬浮颗粒分布、沉降颗粒分布与 速率分布间的关系。Osmak在假设含悬浮颗粒的水 相以接近推流式的方式通过床层及沉降动力学是悬 浮颗粒分布和沉降颗粒分布函数的前提下,构建出 新的过滤数学模型^[17]。其数学模型包括组成平衡 和动力学平衡 2方面,即:

组成平衡:
$$\frac{\partial [C \ Q_c^3(x) \, dx]}{\partial t} = -u \frac{\partial [C \ Q_c^3(x) \, dx]}{\partial l}$$

动力学平衡:
$$\frac{\partial [D_{D} Q^{3}(x) dx]}{\partial t} = -\frac{\partial [C Q_{c}^{3}(x) dx]}{\partial t}$$
 (6)

边界条件: $_{D}(l, t=0) = 0, C(l, t=0) = 0,$ $\partial C(l=1, t) = 0,$

$$\frac{C(l=1, t)}{\partial t} = 0 \tag{7}$$

式中: *C*为质量浓度(kg/m³); *l*为床深(m); *t*为时间(s); *u*为流速(m/s); *b*为比沉降(kg/m³); *x*为颗粒尺寸(µm); b3以向水力扩散能力; *Q³(x)* dx为分布函数。

Ortiz等则将计算流体力学 (CFD)应用到深床 过滤中,用来描述过滤过程中阻塞的时间 空间变 化,提出了对数过滤定律及有效比表面积的几何模 型。实验表明,CFD可有效地用于过滤阻塞的定量 描述。Ortiz等还采用拉格朗日 欧拉 欧拉 CFD 方 法评价两相流滴滤床过滤过程中的压力降,运用弹 道轨迹理论,建立了不同过滤阶段捕集效率和过滤 系数方程^[21,22]。

2.3 深床过滤截污机理的研究

深床过滤中的截污机理是深床过滤机理研究的 重要方面;郭瑾珑等^[7.23]通过研究不同絮凝剂对微 絮凝深床过滤截污的影响时发现,无絮凝剂时,水 中的亚微颗粒(2~10 µm)主要是依靠碰撞和流体 动力作用被拦截,而大颗粒由于受水力剪切作用和 颗粒惯性的影响,易被水流挟带,难以拦截;但在微 絮凝深床过滤工艺中,由于水流的剪切阻碍作用, 会增加颗粒的碰撞机会,促进颗粒长大。絮凝剂的 加入,改变了水中原有的化学条件和颗粒的表面性 质,使颗粒去除不再靠拦截沉降作用,更有颗粒和滤 料表面发生的粘附作用。实验表明,随着颗粒粒径 的增加,去除率有显著增加的趋势,这说明絮凝剂加 入后截污过程中化学吸附作用占有一定的优势。

3 深床过滤在水处理领域的应用进展

3.1 深床过滤过程中的生物作用

微生物细胞几乎能在水环境中的任何适宜的载 体表面牢固地附着,并在其上生长和繁殖,形成膜状 微生物即生物膜。载体可以是天然材料,如石英砂、 无烟煤等;也可以是合成材料,如各种塑料填料、发 泡粒子和陶粒等;可以是具有渗透性的材料,也可以 是不渗透的材料。深床过滤中的过滤介质为生物膜 的形成创造了极为有利的生存环境,当含有有机物、 氮、磷和其他电子供体的废水流过深床过滤介质时, 微生物消耗废水中的基质,并作为生物膜附着于过 滤介质之上,产生生物效应。深床过滤过程中水流 过生物膜产生剪切作用,又会去除微生物部分残体, 使生物膜的厚度基本保持相对恒定^[24]。

由于过滤介质上的生物膜作用,深床过滤过程 中不仅仅具有过滤作用,而且可以通过生物作用进 行同步脱氮脱磷,实现对污水的深度处理。Ritmanna等^[25]在研究瞬态生物过滤过程的生物膜模型时 指出,进入生物滤床不外乎以下 7种物种:生物可降 解有机物 (BOM)、NH4⁺-N、NO2⁻-N、NO3⁻-N、可利用 的副产物、生物副产物及溶解氧。在生物过滤过程中 主要包括 5种类型的微生物:自养和异养微生物、硝 化菌、亚硝化菌及惰性生物菌种。整个生物反应包 括:BOM的氧化利用及所引起的异养菌的合成、氧的 消耗、可利用副产生物的产生及用于微生物合成的氮 的吸附;氨氮氧化引起的氨氧化菌的合成;亚硝酸盐 氧化引起的硝化菌的合成;可利用副产物的氧化利 用;生物副产物的氧化利用;惰性生物的产生以及氨 氧化菌和硝化菌的内源衰减等 8类主要反应。除此 之外,尚有生物膜内溶解性物质的扩散、生物膜内各 种生物的生长、衰减和生物膜的周期性脱落等,可见 生物过滤过程中的生物反应是极其复杂的。

3.2 深床过滤在水处理领域的应用进展

深床过滤由于且有较好的除浊、去除悬浮颗粒 及某些病菌、芳樟醇等萜类致癌物、臭味化合物及 VOC等特点^[26-28],在给水系统受到青睐。作为过 滤介质,既且有截留悬浮颗粒的作用,同时也为微生 物的生长繁殖提供了良好的环境,为生物处理奠定 了基础。近年来的研究表明,利用深床过滤,结合微 絮凝技术,不仅在微污染源水除浊中使用,对城市生 活污水的深度处理,甚至可以直接用来处理城市生 活污水。

3.2.1 深床过滤在微污染源水中的应用

对于微污染饮用水源的慢砂过滤技术在国外已 有上百年的历史,采用双层或3层滤料的快滤池,也 有几十年的时间。对于低温低浊低色源水的水质净 化处理仍是当今给水处理的重点和难点之一。微絮 凝 深床过滤技术具有除浊、生物处理双重功效,在 国外发展迅速.已成为处理低温低浊低色源水的主 流选择。国内在此方面的理论和实用研究也十分活 跃。试验表明,只要混凝工艺合理,过滤参数适当, 能够实现出水浊度在 1 NTU 以下,且能有效去除水 中的 N、P等营养物及腐植酸 。栾兆坤等^[29]针对低 浊度水质,将聚合氯化铝应用于微絮凝深床直接过 滤工艺中,对滤床深度与均质超大粒径的滤料优选、 直接过滤过程最佳化学与水力学参数以及反冲洗技 术参数等因素进行了综合分析,认为超大粒径滤料 深床完全适合于聚合氯化铝的高效絮凝反应特征; 采用低滤速时其过滤周期可大大延长;微絮凝深床 直接过滤工艺在处理低温、低浊水质方面不仅节省 投资费用,而且可显著提高产水率和出水质 量^[30,31]。李冬梅等^[32]利用微絮凝深床过滤技术处 理低温低浊源水的试验表明,采用下向流等速变水 头过滤,加入适量的水溶性絮凝剂及相应的絮凝助 剂,可以实现出水浊度 <1 NTU。而膨胀珍珠岩作 为滤料进行上升流过滤实验,出水浊度在 9 h内符

合饮用水标准^[31~34]。

3.2.2 深床过滤在城市生活污水及工业污水处理 中的应用

由于生物作用的存在,深床过滤能有效地去除 水中的氨氮、亚硝酸盐氮、COD 及一些金属离子 等^[35,36]。深床过滤用于城市生活污水处理的试验 研究表明,受截污量的限制,作为二级处理的后续深 度处理要比直接处理原污水更有效。李桂平 等[37,38]以无烟煤作滤料,采用微絮凝深床过滤技术 处理二沉池出水,滤床前补加甲醇作为外碳源进行 脱氮研究,在滤速为 10 m/h时对 NO₃ N 的去除率 达 97%,出水的 TSS < 10 mg/L;并且发现,悬浮颗粒 和絮体的截留主要发生在滤床中、下部,而脱氮反应 中产生的氮气的积累主要发生在滤床的中、上部;在 过滤初期,由于水头损失较小,脱氮产生的氮气可溶 解在水中,并随水流带出滤床,但随着过滤的进行, 滤床内的水头损失增加,出现氮气释放现象;在对絮 凝剂除磷效果的研究中发现,虽然磷的去除率可达 到 90%以上,但 FeCl 的表层截污作用明显,而 PFC 则趋向于深层截污,后者可使滤床截污分布更为均 匀,并有利于减缓水头损失的增长速度,延长过滤周 期。在较高滤速时由于停留时间较短,且存在 N₂积 累现象,使得采用 PFC时存在滤后出水浊度和色度 有所增加的现象。

Jinenez等^[39]利用过滤技术直接处理 Mexico城 的生活污水,出水用于农业灌溉,以硫酸铝盐作絮凝 剂,加阴离子聚电解质作助剂,并对过滤介质的处理 能力和处理效果进行了比较。实验发现,合成过滤 介质更具优势,滤速要比砂介质大近 6倍,每循环产 水率是砂的 2.1倍,反冲洗用水仅为处理出水的 1%,TSS去除 40%,浊度降低 15%,近 70%以上的 寄生虫卵可以去除。

日本学者 Taira Hidaka等^[40,41]采用直径 6 mm 的聚苯乙烯颗粒作为过滤介质和生物载体,以 FeCl, 加阴离子高分子助剂为絮凝剂,采用缺氧 好氧加回 流,再接缺氧 好氧微絮凝深床工艺直接处理生活污 水的试验研究表明,回流比、水力停留时间以及氧化 还原电位是重要的控制参数,当回流比为 2~3时, 曝气塔内的溶解性氮可达到最低值;水力停留时间 控制在 1 h以上,进水 NH₄⁺ N浓度为 19 mg N/L时 可以实现水体中的 NH₄⁺ N浓度低于 1 mg N/L;硝 化反应前端缺氧反硝化的 ORP在 - 120~ - 150 mV 之间,以保证 NO, N 低于 1 mg/L;在水温 18 时, 硝化与反硝化活性分别达到 0.3和 0.4~0.7 kg N/ m³ 滤床体积 · d,最大氮负荷 < 0.25 kg N/m³ 滤床 体积 · d(18);当水力停留时间达到 3.2 h时,其 处理出水的总氮、总磷可以控制在 1 mg N/L和 0.2 mg P/L以下,而反冲洗用水仅为处理出水的 12% ~ 21%。

试验表明,微絮凝 深床过滤技术用于其他工业 污水的处理,同样能收到良好的处理效果^[42~45]。

4 展 望

深床过滤技术具有占地面积小、投资少、出水水 质高,且能有效去除水体中的有害病菌,N、P等营养 物的特点,适合于微污染水源水及低温低浊水源水 的处理,以及城市生活污水的深度处理。随着人们 环保认识的逐渐提高,对低温低浊低色度源水的开 发利用,对现有污水处理厂出水中 N、P等营养成分 的要求越来越严格,和对微絮凝,深床过滤技术的深 入研究,掌握深床过滤过程中的生物作用受制约因 素,通过优化技术参数,强化过程控制,完全可以直 接用来处理生活污水,或污水的深度处理,实现低成 本的水资源再用。

参考文献

- [1] V. Jegatheesan, S Vigneswaran Transient stage deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable conditions Wat Res , 2000, 34 (7): 2119 ~ 2131
- [2] V. Jegatheesan, S Vigneswaran The effect of concentration on the early stages of deep bed filtration of submicron particles Wat Res, 1997, 31 (11): 2910 ~ 2913
- [3] Burger, et al Phenomelogical model of filtration processes:
 I Cake formation and expression Chem. Eng Sci,
 2001, 56: 4537 ~ 4553
- [4] C. Tien Comments on Phenomelogical model of filtration processes: I Cake formation and expression Chemical Engineering Science, 2002, 57: 2119 ~ 2120
- [5] E A. Stephan, G G Chase A preliminary examination of Zeta potential and deep bed filtration activity. Separation and Purification Technology, 2001, 21: 210 ~ 226
- [6] David D. Putnam, Mark A. Burns Predicting the filtration of noncoagulating particles in depth filters Chemical Engineering Science, 1997, 52 (1): 93 ~ 105
- [7] 郭瑾珑,孟军,等. 深床过滤颗粒截留机理研究. 环境科学, 2003, 24(3):40~44
- [8] Metcalf & Eddy, Inc 废水工程 处理与回用 (第 4版). 北 京:清华大学出版社, 2003
- [9] 许保玖,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理. 北京:高等

第6卷

教育出版社,2000

- [10] O melia C. R. Particles, pretreatment and performance in direct filtration J EED, ASCE 1985, 114 (6): 874 ~ 890
- [11] K.J. Ives Filtration studied with endoscopes Wat Res , $\mathbf{1989}, 23~(7): 861 \thicksim 868$
- [12] R. Ginbel, A. Nahrstedt Removal of different kinds of particles in deep bed filters consisting of permeable synthetic collectors Wat Sci Tech , 1997, 36 (4): 249 ~ 258
- [13] Semion Shandalov, A lexander Yakirevich Model calibration of deep-bed filtration based on pilot-scale treatment of secondary effluent Wat Sci Tech, 1997, 36 (4): 231 ~ 237
- [14] E A. Stephan, G G Chase. A preliminary examination of Zeta potential and deep bed filtration activity. Separation and Purification Technology, 2001, 21: 219 ~ 226
- [15] Vitaly Gitisa, Avner Adina, et al Fluorescent dye labeled bacteriophages: A new tracer for the investigation of viral transport in porous media: 2 Studies of deep-bed filtration Water Research, 2002, 36: 4235 ~ 4242
- [16] Xiaojun Dai, Raymond M. Hozalski Effect of NOM and biofilm on the removal of *Crytosporidium parvum oocysts* in rapid filters Water Research, 2002, 36: 3523 ~ 3532
- [17] S Osmak, D. Gosak, et al Dynamic mathematical model of deep bed filtration process Computers Chem. Eng., 1997, 21 (suppl): 763 ~ 768
- [18] Beata Gorczyca, David London Characterization of particals in slow sand filtration ay North Caribou water treatment plant Water Qual Res., 2003, 38 (1): 153 ~ 168
- [19] Mintz D.M. Modern Theory of Filtrations Special Subject No 10 lut W at Supply A ssoc Congress (Barcelena), 1966
- [20] E A. Stephan, G G Chase Use of genetic algorithms as an aid in modeling deep bed filtration Computers Chemical Engineering, 2003, 27: 281 ~ 292
- [21] E A. Stephan and G G Chase CFD modeling and simulation of clogging in packed beds with nonaqueous media A IChE, 2000, 46(10): 1918 ~ 1926
- [22] Arturo Ortiz-Arroyo, et al CFD modeling and simulation of clogging in packed beds with nonaqueous media A IChE, 2002, 48 (8): 1596 ~ 1609
- [23] 孟军,李桂平,等.聚合氯化铁在微絮凝 深床过滤工艺 中的应用.环境科学,2003,24(1):98~102
- [24] Qingwei Liu, Karen Mancl, et al Biomass accumulation and carbon utilization in layered sand filter biofilm systems receiving milk fat and detergent mixtures Bioresource Technology, 2003, 89: 275 ~ 279
- [25] B. E Rittmanna, et al The transient-state, multiple-species biofilm model for biofiltration processes Water Research, 2002, 36: 2342 ~ 2356

- [26] C. P. Leslie, Grady Jr, et al 张锡辉,刘勇弟译. 废水 生物处理 (第 2版). 北京:化学工业出版社. 2003
- [27] 李科, 栾兆坤. 微絮凝 直接过滤中应用聚合铝处理低 浊低色水研究. 中国给水排水, **1998**, 14(6): 1~5
- [28] Monica B., Emelka Removal of viable and inactivated Cryptosporidium by dual and trimedia filtration Water Research, 2003, 37: 2998 ~ 3008
- [29] 栾兆坤,李桂平,等. 微絮凝 深床直接过滤及工艺参数 研究. 中国给水排水, **2002**, 18(4): 14~18
- [30] 王利平, 崔永亮, 等. 石英砂均质滤料过滤性能的试验 研究. 包头钢铁学院学报, **2001**, 20(2): 174~177
- [31] 贾建军,孙晓森,等.生物陶粒滤池纤维球过滤工艺用于回用水试验研究.山东科技大学学报(自然科学版),2002,21(1):111~113
- [32] 李冬梅,张弘. 低温低浊水的微絮凝 深床直接过滤技 术研究. 广东工业大学学报, **2003**, 20(2):65~69
- [33]陈超,王燕蓉,等.微絮凝直接过滤工艺处理微污染水 库水源的应用研究.山东工业大学学报,2000,30 (6):589~592
- [34] 陈永,孟了,等. 微絮凝 直接过滤中应用阳离子型高分 子絮凝剂处理低浊水的研究. 西安建筑科技大学学报, 2000, 32(2):151~154
- [35] 李德生,黄晓东,等. 微污染源水净化新工艺 生物强化 过滤研究. 中国给水排水, **2000**, 16 (10): 18 ~ 20
- [36] B jomar Eikebrokk Coagulation-direct filtration of soft, low alkalinity hum ic waters W at Sci Tech., **1999**, 40(9): $55 \sim 62$
- [37] 李桂平, 栾兆坤. 深床直接过滤工艺深度处理城市污水. 中国给水排水, 2002, 18(10): 12~15
- [38] 李桂平,栾兆坤.微絮凝 直接过滤工艺在城市污水深 度处理中的应用研究.环境污染治理技术与设备, 2002,3(4):65~68
- [39] B. Jimenez, Alma Chavez, et al Sand and synthetic medium filtration of advanced primary treatment effluent from Mexico City Wat Res., 2000, 34 (2): 473 ~ 480
- [40] Taira Hidaka, Hiroshi Tsuno Development of a biological filtration model applied for advanced treatment of sewage W ater Research, 2004, 39: 335 ~ 346
- [41] Taira Hidaka, Hiroshi Tsuno, et al Advanced treatment of sewage by pre-coagulation and biological filtration processs Water Research, 2003, 37: 4259 ~ 4269
- [42] 张永宏. 微絮凝接触过滤处理低浊度含藻水的研究. 工业水处理, **2002**, 22(2):46~48
- [43] 孙璐,周孝德. 微絮凝直接过滤法在电厂工业废水回用 中的应用研究. 陕西水力发电, **2001**, 17(1): 41~44
- [44] 吕名云,常青.微絮凝过滤用于含油废水处理研究.兰州 铁道学院学报(自然科学版),2003,22(1):137~139
- [45] 郑必胜,蔡妙颜,等. 深床过滤技术在植物油清净中的 应用. 食品科学, 2000, 21 (11): 30~31

1