

8

纤维球-砂直接过滤积泥形态学的研究

周北海

王占生

全浩

(中日友好环境保护中心)

(清华大学环境工程系)

(中日友好环境保护中心)

摘要

本文主要研究了纤维球-砂直接过滤的积泥形态,它包括宏观和微观形态以及积泥和剩余积泥的形成过程。

关键词: 积泥形态学 直接过滤 双层滤料

纤维球-砂

前言

过滤时水流经滤床,水中悬浮微粒由于扩散、重力、沉降、惯性、筛除和吸附等作用附着到滤料上,截留在滤床内部。水中悬浮微粒被滤料截留,形成具有一定形态(morphology)结构的积泥。对水过滤而言,正确地认识积泥的形态是确保建立恰当的过滤数学模型的先决条件。目前存在的数学模型主要有单球模型(single-sphere model)^[1,2]、毛细管模型(capillary model)^[3,4]、单元球模型(sphere-in-cell)^[3,5,6]和喉管模型(constricted tube model)^[7,8],它们均是建立在相应的过滤积泥形态基础之上。

对水过滤积泥形态学的研究很早就已开始,Baylis (1937)^[9]曾用放大镜观察水中悬浮微粒在滤床内的积泥情况时发现,滤床内不断增加的积泥改变了滤床的结构。Stein (1940)^[9]在由圆柱形棒状滤料组成的滤床中观察到,过滤时铁絮体在滤料上面形成相对光滑的涂层。在过滤CaCO₃和高岭土悬浮液实验中,Cleasby和Baumman(1962)^[9],Ison和Ives(1969)^[10]分别发现,光滑但不均匀的涂层只趋于在滤料的前沿部分形成。

Maroudas和Eisenklam(1965)^[11]设计了一种由若干粗大方形玻璃滤料组成具有大量毛细管连在一起的二维(水平和垂直方向)过滤器并进行了一系列研究。他们发现即使采用相同的滤柱悬浮物质,但滤速和悬浮微粒尺寸的不同会导致三种不同的结果。

Payatakes(1981)^[12]在玻璃片上蚀刻出类似实际石英砂滤床中尺寸大小的孔隙通道,对12种不同pH值和化学药剂用量的过滤过程及积泥形态进行观察,发现:(1)滤床上、下部滤料的积泥形态不同。过滤初期,滤床上部滤料的积泥呈“雪帽”(snow cap)状,随着过滤的进行,水的剪切力逐渐增大,一旦大于附着力,滤料上的“雪帽”的一部分会脱落,随水流进入滤床深处,重新截留;(2)被截留的悬浮微粒占据滤料表面后亦起截留过滤作用;(3)滤床堵塞一般发生在过滤后期。连接通道被堵塞后,借助积泥本身的孔隙仍可使水以渗流方式通过,并继续使悬浮微粒不断沉积于连接通道处,也称作“内部滤饼”。

过滤”。这种现象同 Maroudas 和 Eisenklam 发现的现象相同。

在研究纤维丝过滤气体时,积泥出现树枝(dendrite)结构,Tien(1977)^[13]提出了“荫影效应”(shadow effect)原理——一旦一个微粒被滤料捕获,在已沉积微粒附近的滤料表面区域(其面积称作荫影面积)将不允许其它微粒沉积。但大水过滤方面,Ives(1987)^[14]利用光导纤维内窥镜直接插入石英砂滤床的技术,没有发现“树枝”状积泥。张锡辉(1991)^[15]在研究纤维球深床水过滤(未加化学药剂)机理时,发现积泥多呈典型的“毛刺”结构,而非典型的“树枝”状结构。

本文旨在借助放大镜和电子扫描显微镜对纤维球的积泥和剩余积泥的形态和形成过程进行研究。

二、实验材料及方法

实验材料

进水采用含高岭土的人工配制水样,高岭土含量为 100mg/l;选用的助滤剂有阳离子和非离子型聚丙烯酰胺 PAM(+),PAM(非),阴离子型聚丙烯酸钠 PXY,阳离子型聚胺类高聚物 C₆₀ 以及阳离子型聚合硫酸铁 PFS;滤料为纤维球和砂。

实验方法

1 宏观观察

借助 5—10 倍放大镜和肉眼通过透明有机玻璃滤柱观察过滤时纤维球和砂积泥的形成过程。过滤结束后,缓慢放空滤床内的积水,小心取出若干纤维球和砂,观察其表面的积泥分布情况。

2. 微观观察

过滤(和反冲洗)结束后,缓慢放出滤床内积水,小心取出一些纤维球和砂,在纤维球不同表面处剪取部分纤维丝进行抽真空干燥、喷金处理。把配制好的样品置于电子扫描显微镜下进行不同放大倍数的观察和拍照。本实验所用仪器为日本日立(Hitachi)公司生产的 S-570 扫描电子显微镜。

三、实验结果及讨论

1. 纤维球的结构特征

纤维球(图 1)是由许多横截面为圆形的纤维丝粘接而成,纤维丝由球心向外散发呈辐射状结构,纤维丝的密度由球心向外逐渐减小。为更加详细地描述纤维球在过滤时和反冲洗后的积泥形态等的特点,将纤维球分成四个区域(图 2),即区域 I、II、III 和 IV,它们分别为由球心 $\sim \frac{1}{3}R$, $\frac{1}{3}R \sim \frac{2}{3}R$, $\frac{2}{3}R \sim R$ 和球表面的部分。

2. 纤维球-砂滤床的结构特征

纤维球-砂滤床系由上部为纤维球层和下部为砂层组成。由于纤维球的可压缩性及本身重力,纤维球层孔隙及孔隙率分布由上至下逐渐变小,滤床孔隙率平均约为95%。砂子为刚性不可压缩,内部无孔隙,其孔隙率只由砂子间的孔隙组成,约为42%。

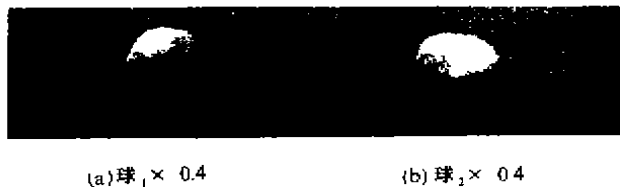


图1 纤维球的表现形态

(1) 宏观形态

纤维球本底为白色,借助裸眼和5-10倍放大镜检查发现,过滤时上层纤维球首先截泥,然后再往下层推移。上层纤维球不断增加的积泥使其孔隙逐渐变小,因而流经该处的水的剪切力增加,导致积泥脱落进入下面的纤维球层并被截留。



图2 纤维球切面示意图

过滤时水流经过纤维球的各个部位和水流方向形成不同的角度,截留泥的作用亦不相同,为此把纤维球表面分成几部分:纤维球(丝)迎着水流方向的部分称为迎水面或“阳面”;背着水流方向的部分称作背水面或“阴面”;相邻纤维球(丝)的纤维丝相互交叉、挤压出现的接触面称作过滤“盲区”,之所以称其为“盲区”,是因为这些接触面过滤时几乎不截泥(图3)。就整个滤床而言,由于表层纤维球排列疏松,球与球之间几乎无甚接触,可认为无“盲区”,阳面主要是迎着水流方向的上半部,下半部则为阴面;水流进入滤床内,水的流线方向沿滤床纤维球间孔道的方向而不断改变,因而该处纤维球(丝)的阴、阳面随水流方向而异,滤床内部的纤维球同时分别存在几个阴、阳面和“盲区”。

过滤时纤维球存在“阴、阳”面现象和“盲区”现象,阳面(迎着水流方向的部分)积泥很多,阴面(背着水流方向的部分)积泥很少,“盲区”(相邻纤维球挤压接触部分)几乎见不到积泥。

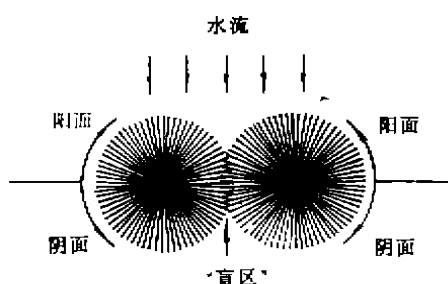


图3 纤维球表面的阴、阳及“盲区”示意图

随着过滤的进行,这种现象相对减弱。其主要原因是由于过滤时水中较大的微粒首先沉积到表层纤维球表面,表层纤维球排列疏松,球与球之间孔隙大,水流主要通过球间孔隙进入滤床;阴面的积泥是较小的悬浮微粒绕流通过纤维球表面至阴面,由于水力、扩散和吸附架桥等作用粘附到该处,使该处粘有少量的泥;“盲区”同水流主体不能直接接触,因此至过滤结束时仍为白色,这种现象愈往滤层深处愈加明显。

(2) 微观形态

阴、阳面及“盲区”现象

3. 纤维球积泥形态

纤维球是由许多纤维丝组成,同纤维球一样,过滤时纤维丝亦存在阴阳面和“盲区”现象。图 4a 是与水流方向近于垂直的纤维丝积泥的阴阳面现象,水流经过该纤维丝使迎着水方向的部分先积泥,这一现象主要出现在过滤初期。图 4b 是近于平行水流的单根纤维



(a) 阴阳面现象 $\times 350$



(b) 单根丝 $\times 560$

图 4 纤维丝的阴阳面及均匀涂层现象

丝的积泥情况,阴阳面现象很弱亦或是不存在。过滤“盲区”主要存在于 I 区域(图 2)的纤维丝部分,这主要是由于一区域的纤维丝密度过高造成的。

“树枝”现象

“树枝”现象是指过滤时在滤料上形成类似“树枝”状的积泥结构,最早由 Wasto(1946)^[16]在研究单根纤维暴露在含有悬浮物的气流中发现的,此后 Radushkevich(1964),Billings(1966),Payatakes(1977)和 Tien(1976,1977)^[18]分别对纤维深床气体过滤中的“树枝”现象进行了大量研究。而对由纤维丝组成的纤维球的水过滤(不加任何药剂)最早由张锡辉(1977)^[19]开始,并且仅发现非典型的“树枝”状的二粒“树枝”现象(图 5)。张锡辉认为,同气体相比水的密度要大得多,惯性过滤机理并不重要,水的粘度也很大,积泥受到水的剪切力

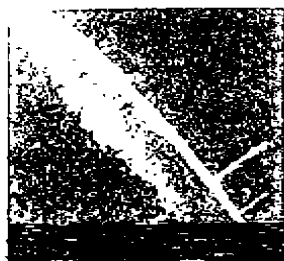


图 5 不加药过滤积泥的“树枝”状构型

较大,即使积泥形成较长的“树枝”,也容易塌折。

在本文过滤实验中,通过投加不同助滤剂(PAM、PXY 和 C_{100} 等),结果发现,纤维丝上积泥存在大量的“树枝”结构(图 6)、“树枝”千奇百态,似艺术雕塑佳品。

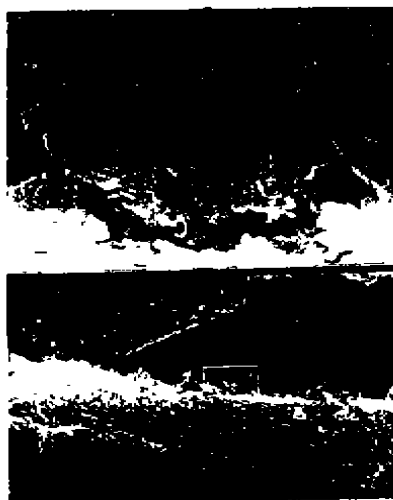
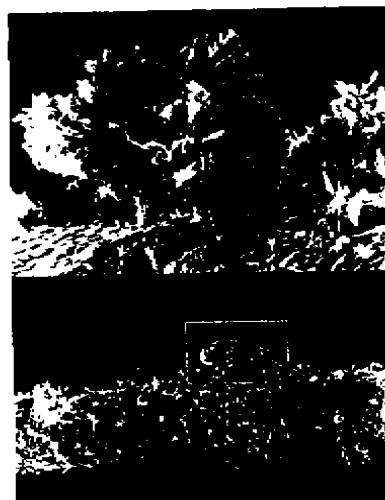
含有高岭土微粒的水同高分子药剂快速混合(约 1min)使得高分子链充分吸附到悬浮微粒上,然后直接进入滤柱。进入滤床,水中微粒借助高分子链的吸附架桥等作用,附着到纤维丝上,虽然水的密度和粘度比气体明显要大,并降低了微粒沉积的惯性作用,但



(a) 投加非离子 PAM 上, ×1400 下, ×2800



(b) 投加阴离子 PAM 上, ×2800 下, ×560

(c) 投加 C₁₀₀ 上, ×5600 下, ×560

(d) 投加阳离子 PAM 上, ×2800 下, ×560

图 6 纤维丝上积泥的“树枝”结构和“阴影效应”

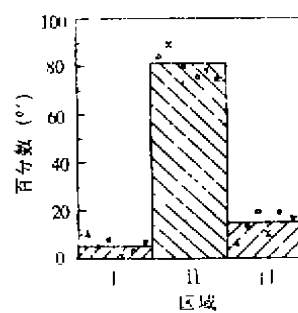


图 7 纤维丝剩余积泥量分布

后续的微粒仍然可继续依赖高分子的吸附架桥(主要)作用同已沉积的微粒集结,形成具有一定形状的“树枝”,“树枝”结构与不同尺寸的微粒到达纤维丝的顺序和多少有关,具有随机性。由于“荫影效应”的存在,“树枝”所在的纤维丝上就存在荫影面积,因而树枝之间彼此存在一定的距离。随着过滤的进行,“树枝”进入生长阶段,同一或相邻纤维丝上的“树枝”不断长大,相互联接(图 d)形成更粗大的“树枝”。

“树枝”的形成对过滤产生一定的影响。“树枝”占据纤维丝表面、向外突出伸向孔隙通道,为捕获后来的悬浮微粒提供新的表面、尤其为捕获流线方向在该处与纤维丝方向平行的微粒更为有利。

剩余积泥形态

纤维球(丝)剩余积泥分布

纤维球反冲洗后剩余积泥占球的重量是一定的(只要反冲洗气水强度一定),这项工作以前许多学者均已证实^[15,17],但对剩余积泥形态的研究尚不多。

反冲洗后的纤维球从表面看是干净的,但切开纤维球后发现纤维丝上(II 区域)存在明显的一圆环状沉积,可见积泥主要集中在这里。通过对 I、II、III 区域的纤维丝进行称量,可得到如图 7 所示的实验结果。这是由于 I 区域(过滤盲区)过滤时几乎就不积泥;区域 III 的空隙率较大,积泥易于被冲洗掉;而区域 II 的空隙率较小,反冲洗时气水对该处积泥的作用较小的原因所致。

剩余积泥的形成

纤维球在过滤-反冲洗后仍存在剩余积泥,但对其形成过程尚未见令人信服的报导。为观察剩余积泥的形成,把纤维球分成三种:首次过滤直接取出进行拍照的首滤球;首滤球经反冲洗后的首滤洗球;清洁未过滤直接同首滤球一起反冲洗的首洗球。

实验结果表明:剩余积泥的形成在稳定(动态平衡)之前是逐渐增加的,即粘附多(过滤)脱落少(反冲洗),以后粘附(过滤)和脱落(反冲洗)达到平衡即形成动态平衡。纤维球剩余积泥的形成是过滤和反冲洗共同作用的结果。

剩余积泥更新周期

为考察纤维球剩余积泥在过滤-反冲洗过程中的变化规律,先用含洪山土的水过滤若干周期至剩余积泥量稳定,此时纤维球的 II 区域呈深灰色,再改用含高岭土的水(分别加无色药剂 C_{60} 和稀溶液为桔红色的 PFS)过滤,以期观察剩余积泥的变化情况。观察结果表明,分别经过约 5 个周期的过滤-反冲洗,纤维球 II 区域的颜色由深灰色分别变成淡黄色和桔红色且剩余积泥量不变,因而可断定纤维球剩余积泥随着以后的过滤-反冲洗是在不断更新,更新期为 5 个过滤-反冲洗周期,且受纤维球密实度影响不大。

同时应当指出,剩余积泥的存在对纤维球过滤具有两个方面的作用。一为剩余积泥的存在会增加球本身重量,占据球内一定体积,无疑会降低纤维球的空隙率、降低纤维球的有效截泥能力;二为可增加纤维球的比表面积,尤其是类似于“树枝”状积泥的存在,会提高纤维球捕获细小微粒的效率。至于剩余积泥量多少为最佳,还有待进一步进行定量分析和研究。但有一点尚需指出:纤维球的剩余积泥如果不给反冲洗带来困难的话,它将对过滤产生有利作用。

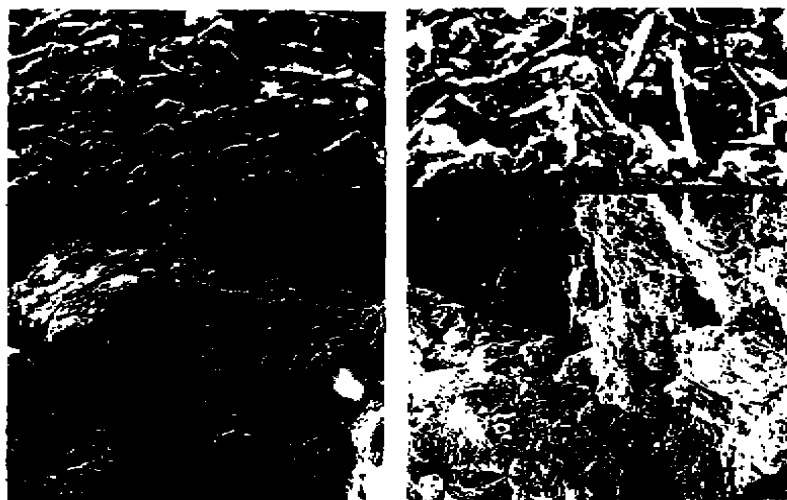
砂积泥形态

宏观形态

砂过滤积泥宏观形态类似于纤维球过滤,只是一点不同,砂子为实心,内部是不截泥的。

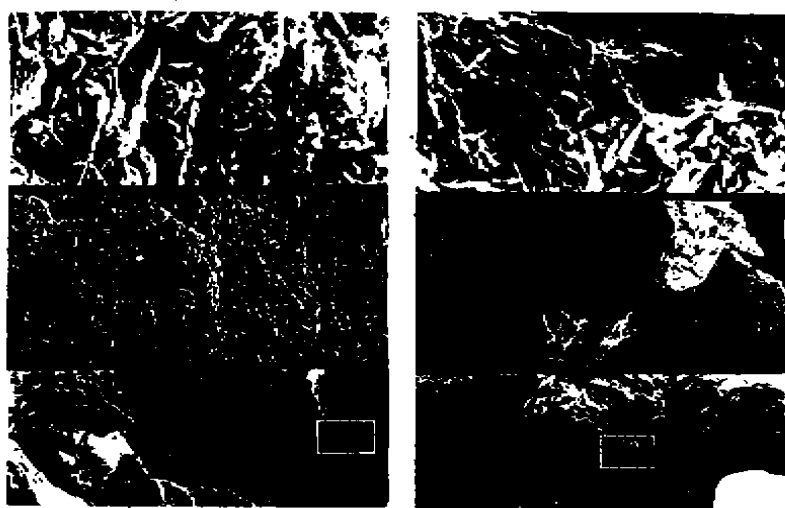
微观形态

砂子为密实颗粒状,过滤时只有砂表面和砂层孔隙起到截泥作用。表层砂截泥量大形成滤饼(图 8a),滤饼厚度与微粒大小滤速、进水浊度等有关。越往砂层深处,积泥越少(图 8b-d)。从它们的积泥形态看,表层砂积泥的微粒图(图 8a)排列较下层砂(图 b-d)紧密;另外可看出,除表层砂积泥呈泥饼状,下层砂表面的积泥呈喉管截泥的形



(a) 距表层 上: $\times 7000$ 下: $\times 28$

(b) 距表层 1cm 上: $\times 7000$ 下: $\times 28$



(c) 距表层 5 cm 上: $\times 7000$ 中: $\times 350$ 下: $\times 35$

(d) 距表层 10cm 上: $\times 7000$ 中: $\times 280$ 下: $\times 28$

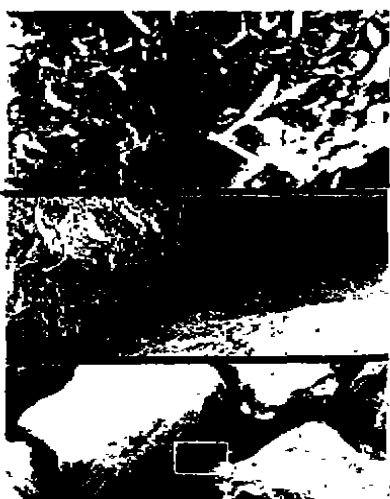
图 8 砂表面积泥形态

态。目前砂过滤的一些数学模型即过滤基本方程均假定砂孔隙通道为喉管是有实验根据的。

从图8发现砂积泥没有“树枝”生成,笔者认为砂孔隙率较小(约42%),积泥主要发生在砂表面,水力剪切作用较强(不像纤维球内水流较缓,纤维球层孔隙率为95%),不利于“树枝”的生成,即使生成也易塌折。

剩余积泥形态

过滤后进行反冲洗,可基本洗净砂表面的积泥,但通过显微镜观察(图9)仍可发现砂表面存在少许积泥,同过滤时底部砂层截泥情况(图10)相比可发现,过滤时底部砂层几乎不起截泥作用。



上:×7000 中:×350 下:×35

图9 反冲洗后砂剩余积泥



上:×7000 中:×350 下:×35

图10 滤层底部砂过滤积泥

四、结 论

通过对纤维球和砂积泥的宏观和微观研究,可得出以下几点结论:

1. 过滤时水中悬浮微粒先被表层的纤维球(砂)截留,并逐渐下移。
2. 纤维球(丝)在过滤初期存在明显的“阴阳”面和“盲区”现象,随过滤的进行,这种现象相对减弱,平行于水流方向的纤维丝积泥呈均匀涂层结构。
3. 与不加药过滤相比,加药过滤时纤维丝上有明显的“树枝”生成。“树枝”的形成主要是高分子链吸附架桥作用的结果。“树枝”的形成有利于提高纤维球捕获水中微粒的效率。

过滤时,表层砂积泥属滤饼状,表层以下的砂积泥属喉管状积泥,但没有“树枝”生成。

4. 反冲洗后的纤维球存在剩余积泥,其分布主要集中在II区域,约占积泥总量的

80%。

5. 剩余积泥的形成是过滤和反冲洗共同作用的结果,且剩余积泥会随过滤-反冲洗的进行而更新,其更新周期约为5个过滤-反冲洗时间。

参 考 文 献

- [1] Yao, K-M, M. F. Habibian & C. R. O'melia, Environ. Sci. Technol., 5, 1105 (1971)
- [2] Rajagopalan, R. & C. Tien, Can. J. Chem. Eng., 55, 246 (1977)
- [3] Payatakes, A. C., R. Rajagopalan & C. Tien, Can. J. Chem. Eng., 52, 727 (1974)
- [4] Hung, C. C. & C. Tien, Desalination, 33, 173 (1976)
- [5] Spidman, L. A. & J. A. Fitzpatrick, J. Colloid Interface Sci., 42, 607 (1973)
- [6] Rajagopalan, R. & C. Tien, AI ChE J., 22, 523 (1976)
- [7] Payatakes, A. C., C. Tien & R. M. Tunan, AI ChE J., 20, 889 (1974)
- [8] Payatakes, A. C., C. Tien & R. M. Tunian, ibid., 20, 900 (1974)
- [9] Tien, C. & A. C. Payatakes, ibid., 20, 737 (1974)
- [10] Ison, C. R. & K. J. Ives, Chem. Eng. Sci., 24, 717 (1969)
- [11] Maroudas, E. & P. Eidenklam, ibid., 20, 867 (1965)
- [12] Payatakes, A. C., H. Y. Park & J. Petne, Chem. Eng. Sci., 36, 1319 (1981)
- [13] Tien, C., W. Chu-sen, & D. T. Barot, Science, 196, 983 (1977)
- [14] Ives, K. J., Clay Minerals, 22, 49 (1987)
- [15] 张锡辉, "纤维球过滤机理的研究", 博士学位论文, 清华大学, 北京 (1991)
- [16] Payatakes, A. C. & C. Tien, J. Aerosol Sci., 7, 85 (1976)
- [17] 金实, "新型滤料-纤维球的研究", 硕士学位论文, 清华大学, 北京 (1984)

STUDY ON DEPOSIT MORPHOLOGY IN FIBRE-BALL —SAND DIRECT FILTRATION

Zhou Beihai

(China-Japan Friendship Centre for Environmental Protection)

Wang Zhansheng

(Environmental Engineering Department, Tsing hua University)

Quan Hao

(China-Japan Friendship Center for Environmental Protection)

ABSTRACT

This paper studies mainly on the deposit morphology in direct filtration with dual-layer media fibre-ball-sand, which consists of macro- and micro-morphology, and the forming process of deposit while filtering and remained deposit while backwashing.

Keywords: deposit morphology, direct filtration, dual-layer media