

长纤维高速过滤器的深层过滤过程与特性

王世和, 周 飞, 鄢 璐

(东南大学市政工程系, 南京 210096)

[摘要] 以自行开发的长纤维高速过滤器为对象, 通过在净水厂长期的过滤试验, 从过滤器床层孔隙分布、床层内滤液浓度及各层比积泥量和水头损失沿滤层的变化等方面, 详细分析了长纤维高速过滤器基于结构上独特特点而形成的积泥逐层向滤床深处推移, 直至整个滤床“衰竭”的典型深层过滤过程与特征, 为过滤技术的深度开发提供了依据。

[关键词] 长纤维高速过滤器; 深层过滤; 过程机理

[中图分类号] TU991 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)02-0043-05

1 前言

深层过滤(或称理想过滤)是在过滤介质的深层进行的澄清过滤过程。它是利用滤料的表面积截留滤液中的悬浮物和胶体, 并将截留物储存于床层孔隙中的工艺过程。由于介质孔隙率沿流程具有由大到小的分布, 滤质可逐级深入下层并被截留, 从而达到滤层利用率高、纳污量大、过滤周期长、出水水质好等性能优势, 成为当今过滤器开发研究的理想目标。

纤维过滤是近年来相继开发并被越来越多应用的新型过滤设备。笔者开发的长纤维高速过滤器是将纤维滤材的体轻、质柔、径细、强度高、比表面积大等优势予以充分发挥, 使其在过滤水压的作用下自下而上地自然压缩, 并形成类似于多层滤料的理想过滤床层结构, 从而获得比现有过滤器更理想的过滤效果和运行特点。为了充分展现长纤维高速过滤器的结构特点与性能优势, 并为新型过滤技术的研发提供借鉴, 笔者从过滤器床层孔隙结构的变化、滤质在纤维表面的迁移、附着、截留与脱落过程^[1,2]、滤液浊度与截泥量的沿程变化、截留积泥对床层结构、水头损失及过滤效率的影响等方面, 对长纤维高速过滤器典型的深层过滤过程及特征进行了试验研究与分析。

2 试验概况

2.1 试验装置

研究的试验装置如图 1 所示。为便于观察过滤过程纤维表面积泥的形成、滤层的压缩和反冲洗时纤维束的形态, 过滤器主体以有机玻璃管制成。设

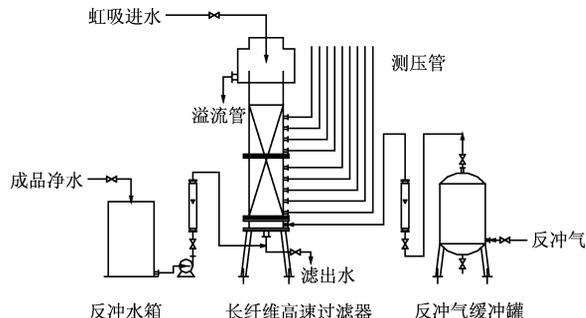


图 1 试验装置与流程示意图

Fig.1 Test device and technological process

备规格: 内径 300 mm, 总高约 2 500 mm。设备构成: 将预先编制好的纤维组件固定于过滤器筒体; 过滤器上部设进水分布器, 以使进水分布均匀, 并避免对滤料层局部产生较大冲击; 过滤器底部设气、水分布器, 使反冲洗时布气、布水均匀; 上部设溢流口, 可确保过滤器恒压过滤, 并兼作反冲洗排水口; 筒体中部不同高程处设多个取样、测压口, 用于研究过滤器对悬浮物的截留过程及水头损失的沿程变化。滤出水

[收稿日期] 2007-09-18; **修回日期** 2008-01-07

[作者简介] 王世和(1945-), 男, 江苏东台市人, 东南大学市政工程系教授, 研究方向水处理及资源化理论与技术; E-mail: wshhj@seu.edu.cn

经控制阀和出口管进入集水箱,以体积法测量不同时刻的滤速。

纤维组件采用聚酯纤维按照特有方法编制,编制密度、纤维长度、纤维丝径等依不同过滤要求而定,试验纤维组件的主要参数如表 1 所示。

表 1 长纤维过滤组件基本特性

Table 1 Basic characteristic of the long fiber filtrating module

纤维丝径/ μm	纤维长度/mm	孔隙率/%	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$
35	1 200	~96	4 233

2.2 试验方法

试验地点为南京浦口自来水厂。自 2002 年 9 月持续至 2005 年 5 月,进行了净水厂沉淀出水的过滤试验,考察了长纤维高速过滤器运行的稳定性。试验期间,沉淀出水浊度变化范围为 2~12 NTU, pH 为 7~8.5,色度小于 5°,试验初始滤速为 10~60 m/h,过滤以 0.5 NTU 作为过滤穿透点。

3 结果与分析

3.1 长纤维高速过滤器的床层结构

长纤维高速过滤器组件采用一定长度和丝径的

表 2 初始滤速 56 m/h 时纤维床层初始压缩情况(起始水头损失 8 120 Pa)

Table 2 The compression of fibrous layer when original velocity of filtrate is 56 m/h(initial loss of pressure is 8 120 Pa)

	纤维滤床由上至下层数					
	1	2	3	4	5	6
各层起始位置/cm	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
纤维滤床各层初始高度/cm	20	20	20	20	20	20
纤维滤床各层压缩后高度/cm	20	16.8	14.4	12.9	11.5	10.4
压缩比(压后高/压前高)	1	0.840	0.720	0.645	0.575	0.520
各层平均孔隙率 ϵ_0 /%	96.3	95.6	94.9	94.3	93.6	92.9
$-\ln \epsilon_0$	0.037 7	0.045	0.052 3	0.058 9	0.066 1	0.073 6
纤维滤床总压缩量/cm	34					

表 3 初始滤速 27 m/h 时纤维床层初始压缩情况(起始水头损失 3 570 Pa)

Table 3 The compression of fibrous layer when original velocity of filtrate is 27 m/h(initial loss of pressure is 3 570 Pa)

	纤维滤床由上至下层数					
	1	2	3	4	5	6
各层起始位置/cm	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
纤维滤床各层初始高度/cm	20	20	20	20	20	20
纤维滤床各层压缩后高度/cm	20	19.1	17.8	17.0	15.9	15.2
压缩比(压后高/压前高)	1	0.955	0.890	0.850	0.795	0.760
各层平均孔隙率 ϵ_0 /%	96.3	96.1	95.8	95.6	95.3	95.1
$-\ln \epsilon_0$	0.037 7	0.039 8	0.042 9	0.045	0.048 1	0.050 2
纤维滤床总压缩量/cm	15					

聚酯纤维按照特有方法编制而成。由于聚酯纤维密度(1 300~1 380 kg/m^3)与水的密度相差不大,故反冲洗后处于非过滤状态的纤维组件,在高度上处于完全伸展的非压缩状态,此时,整个纤维滤层的孔隙率均大于 96 %。为便于长纤维高速过滤器床层结构的研究,同时考虑试验装置上取样和测压口的设置,研究将纤维滤床沿过滤方向平均分为 6 层,分别研究各层的压缩、过滤及阻力情况。

过滤时,水流自上而下流经纤维滤层并产生一定大小的水头损失,在水头损失造成的纵向压力作用下,纤维随即产生一定程度的弯曲,并使纤维床层整体下移。试验发现,长纤维床层最下部纤维首先弯曲并被压缩,此弯曲、压缩的过程随过滤历程逐渐上移,直至纤维床层的支撑力与水头损失平衡;纤维层被压缩的程度沿过滤方向依次增大;压缩状态接近于短纤维散堆床层的横向弯曲状态。

3.1.1 清洁滤床床层结构特征

经彻底反冲洗后,过滤初期的纤维滤层可近似看作清洁床层,现将试验中 3 种代表性滤速下,纤维滤床各层过滤初期的压缩情况示于表 2~表 4。

表 4 初始滤速 10 m/h 时纤维床层初始压缩情况(起始水头损失 2 080 Pa)

Table 4 The compression of fibrous layer when original velocity of filtrate is 10 m/h(initial loss of pressure is 2 080 Pa)

	纤维滤床由上至下层数					
	1	2	3	4	5	6
各层起始位置/cm	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
纤维滤床各层初始高度/cm	20	20	20	20	20	20
纤维滤床各层压缩后高度/cm	20	19.7	18.8	18.3	17.5	17.1
压缩比(压后高/压前高)	1	0.985	0.940	0.915	0.875	0.855
各层平均孔隙率 $\epsilon_0/\%$	96.3	96.2	96.1	96.0	95.8	95.7
$-\ln \epsilon_0$	0.037 7	0.038 7	0.039 8	0.040 8	0.042 9	0.044 0
纤维滤床总压缩量/cm	8.6					

由表 2~表 4 可见,整个长纤维床层孔隙率为上部高、下部低,呈现“理想滤层”的床层结构,并且此种床层结构随初始滤速的提高或水头损失的增大而愈发明显;进一步观察不同初始滤速下起始水头损失与纤维滤床的初始压缩情况可以看出,在试验的纤维装填密度下,纤维滤床的初始压缩程度与起始水头损失近乎成正比关系。

将各初始滤速时过滤初期各层孔隙率取自然对数的负值(即 $-\ln \epsilon$),并将其沿过滤方向的变化绘图(见图 2),由图可见,长纤维高速过滤器床层孔隙率沿床层深度方向近乎呈半对数分布规律。

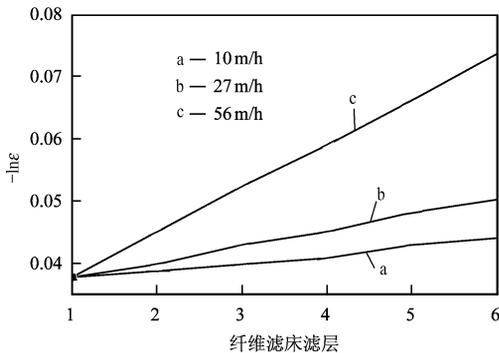


图 2 不同初始滤速下清洁床层孔隙率分布特征
Fig.2 The distribution characteristics of cleaned layers' porosity in different original velocity of filtrate

将长纤维滤床因过滤水头损失的压缩而实现的“理想滤层”床层孔隙分布与多层颗粒滤料滤床因采用不同粒径和密度的滤料搭配实现的“理想滤层”床层分布比较发现,二者间有本质上的不同。

刚性均匀球形颗粒堆积形成的床层孔隙率,依组成粒径大小,一般在 47%~70% 之间。对于多层颗粒滤床,采用上部大粒径、小密度,下部小粒径、大密度滤料所形成的“理想滤层”的床层是通过增大上层滤床粒径及孔隙尺寸,但同时也是在不可避免使其比表面积减小的情况下实现的。此时,虽在一定程度上减缓了滤床的堵塞,但由于整个滤床吸附表面的降低,床层的有效纳污容积下降,使床层很容易被穿透,且在反冲洗后极易引起混层,破坏理论上的多层结构。而长纤维床层本身具有很高的孔隙率(约为颗粒滤床的两倍)和比表面积,其“理想滤层”的实现是通过纤维滤床自下而上的自然压缩,使孔隙率和孔隙尺寸均沿过滤方向渐次减小的方式实现的,滤料本身的尺寸并未改变,各层均保持很高的比表面积,因此和多层颗粒滤床比较,其床层结构更合理、过滤效率更高。

3.1.2 长纤维滤床床层结构沿滤程的变化

在研究长纤维滤床床层结构沿滤程的变化时,首先认识到,长纤维滤床即使在积泥截留量为 30 kg/m³ 的情况下,截泥对单位面积纤维施加的压力也仅为 0.25 kPa 左右,远低于水头损失对纤维床层施加的压力。因此可认为,长纤维滤床的压缩主要由水流阻力引起。而截留积泥的增加对滤床压缩量的影响主要是通过缩小床层空隙率,使滤床水头损失增加,进而对纤维滤床的压缩产生影响。

将在上述 3 种典型初始滤速下,不同过滤时段长纤维高速过滤器纤维滤床的压缩程度与水头损失的关系示于表 5。

表 5 不同过滤时段纤维滤床压缩情况

Table 5 The compression of fibrous layer in different filtrate process

	初始滤速 56 m/h			初始滤速 27 m/h			初始滤速 10 m/h		
水头损失/Pa	10 950	12 930	15 000	4 860	7 010	9 020	2 120	2 240	2 330
纤维滤床压缩量/cm	45.2	53.8	61.2	20.0	29.3	37.6	8.6	9.4	9.7

将表 5 中水头损失与纤维滤床压缩量的关系绘于图 3,由此可进一步证明,长纤维高速过滤器滤床压缩量与所承受的压力近似呈正比关系。

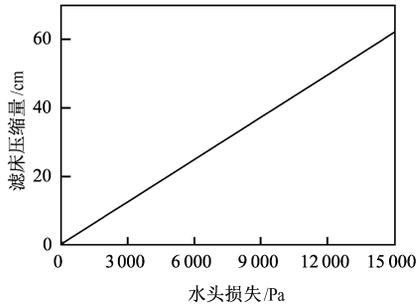


图 3 过滤过程中纤维滤床压缩情况

Fig.3 The compression of fibrous layer in filtrate process

从表 5 中选取 5 组不同水头损失下处于压缩状态的纤维滤床,将所测各层压缩后的纤维床层孔隙率(以清洁纤维计算出的床层孔隙率,未包括截留积泥对床层孔隙率的影响)沿滤程的变化示于图 4,从中可见,过滤中各时段的纤维滤床仍保持“理想滤

层”的床层结构,并且滤床各层孔隙率沿滤床深度仍近似呈对数分布。

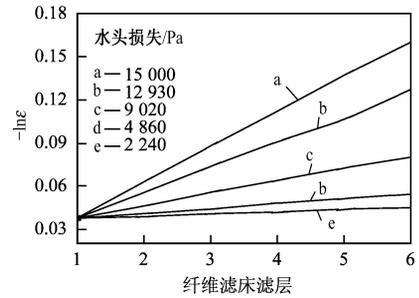


图 4 过滤过程中纤维滤床孔隙分布特征

Fig.4 The distribution characteristics of fiber layers' porosity in filtrate process

3.2 过滤水质沿滤层的变化

为进一步证明长纤维高速过滤器具有“理想滤层”的床层结构,试验中取样分析,并依纤维滤床的压缩程度将取样口位置对应到纤维滤床相应的层段,可得不同初始滤速下各过滤时段滤液浓度沿滤层的分布曲线(见图 5)。

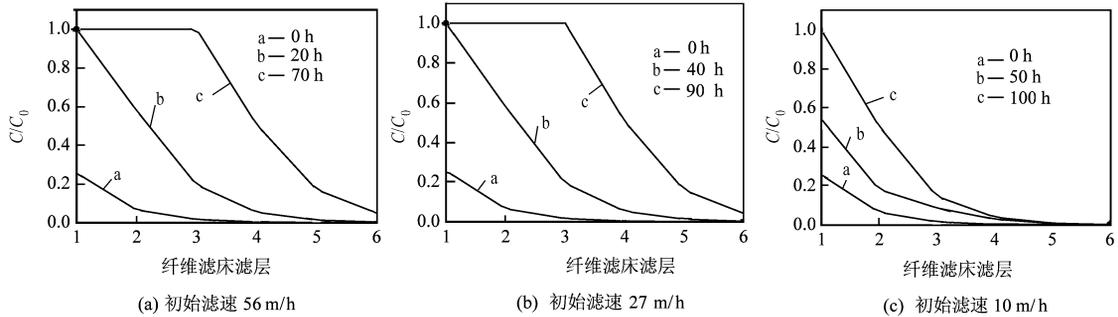


图 5 长纤维滤床内滤液浓度沿滤层的变化

Fig.5 Variety of filtrate water concentration along the depth of filtering bed

由图可见,随着过滤过程的进行,长纤维高速过滤器中的积泥逐层向滤床深处推移,直至整个滤床“衰竭”。此种情形一方面表明长纤维高速过滤器具有典型的“理想滤层”的床层结构;另一方面也说明,随着过滤过程的进行,纤维的压缩程度和滤层内积泥量均不断增加,已附着在滤层表面的截留积泥受水流的剪切作用也逐渐加大,当水力剪切作用大于已附着悬浮物的抗剪强度(或称结合强度)时,已截留的悬浮物将发生剥离,此时该层滤料对悬浮颗粒的截留作用达到“饱和”,理论上对滤液浊度的去除率将降为零。

依据过滤过程中滤液浓度随时间和滤层的变化规律及截留积泥的密度和孔隙率,计算出滤床各层截留积泥比积泥量的变化如图 6。可见,在同一过

滤周期内,积泥量随床层深度的增加而逐渐减小,最下层的积泥量最小,对出水水质起保护作用;而各层积泥量均随过滤过程而逐渐增加,并由上到下渐次达到“饱和”。进一步证实了长纤维高速过滤器“理想滤层”过滤的特点。

3.3 水头损失沿滤层的变化

随着积泥的不断截留和滤床压缩程度的增大,长纤维滤床的阻力损失也不断增大。试验所测不同初始滤速下,各过滤时段水头损失沿滤层的变化如图 7 所示。由图可见,在过滤初期,长纤维高速过滤器床层阻力较小,沿滤层变化也较均匀;随着过滤的进行,积泥的不断截留和滤床的不断压缩,各层阻力均有所增大,其中,中间各层阻力增大的幅度大于上下滤层。

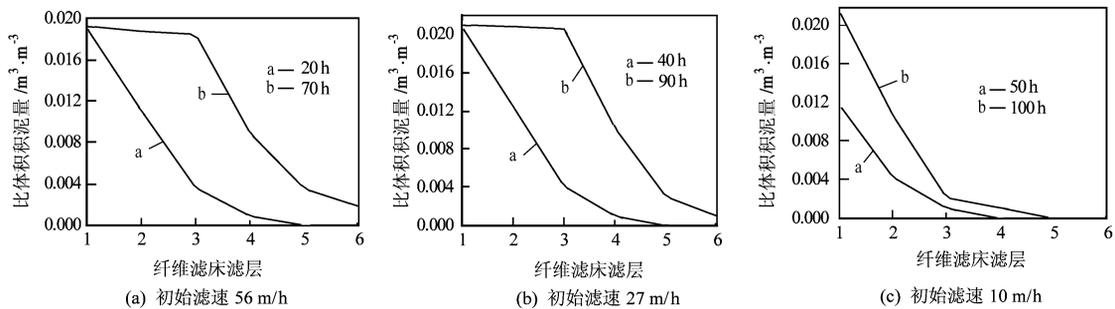


图6 长纤维滤床各层比积泥量的变化

Fig.6 Variety of the deposit in each long fiber layer

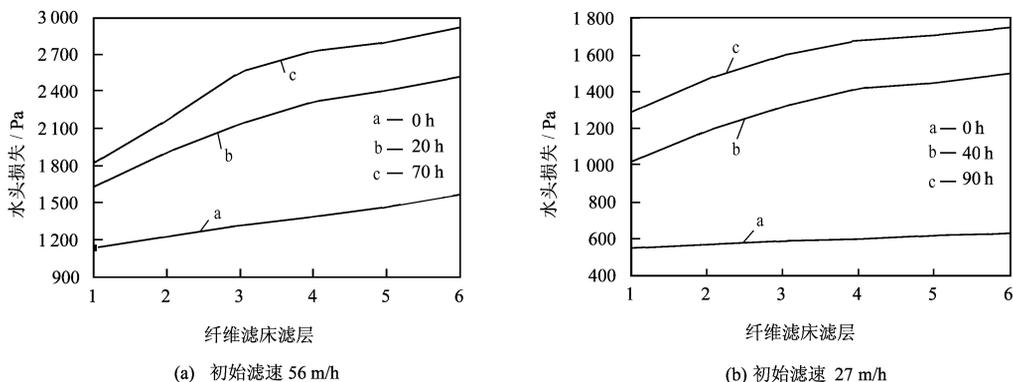


图7 长纤维滤床水头损失沿滤层变化

Fig.7 Variety of the head loss along the depth of filtering bed

通过与石英砂滤料的比较表明^[3],长纤维高速过滤器真正具有“理想滤层”的床层结构,过滤时整个滤床的截污能力可得到充分发挥;此外,长纤维高速过滤器水头损失曲线的形状及推移过程与文献[4]中以计算机模拟10层颗粒滤料床层水头损失的分布曲线及其推移过程非常相似,也佐证了长纤维滤床“理想滤层”的床层结构特点。

4 结语

通过对长纤维高速过滤器过滤过程及特性的研究,得出以下主要结论:

1)长纤维高速过滤器床层孔隙结构特征、床层内滤液浓度和各层比积泥量的变化规律及水头损失沿滤层变化规律均表明,长纤维高速过滤器具有典

型“理想滤层”的床层结构;

2)长纤维高速过滤器中悬浮粒子的截留形式表现出积泥逐层向滤床深处推移,直至整个滤床“衰竭”的深层过滤特征。

参考文献

- [1] O'Melia C R, Stumm W. Theory of water filtration[J]. *Jawwa*, 1967, 59(11):1393
- [2] Cookson J T. Removal of submicron particles in packed beds[J]. *Environmental Science Technology*, 1970, 4(2):126-134
- [3] 耿土锁. 纤维球直接过滤给水与废水的试验研究[J]. *江苏环境科技*, 1996, 2(2):1-6
- [4] Sembi S, Ives K J. Optimization of size-graded water filters[J]. *Filtr & Separ*, 1983, (5):396-402

(下转 52 页)