

彗星式纤维过滤材料

(清华大学环境科学与工程系 李振瑜, 刘沫)

摘要: 简述了规格化纤维材料的发展历程。提出了一种不对称构型的纤维过滤材料，并命名为“彗星式纤维过滤材料”。结合彗星式纤维过滤材料的滤床特点，探讨了新型滤料的运行性能。试验表明：新型滤料可实现高速(40m/h)过滤，并具有反冲洗耗水率低(<1-2)，剩余积泥率低(<1%)的特点。

关键词： 彗星式纤维滤料 过滤材料 过滤 水处理

1. 纤维过滤材料

纤维材料用于去除水中杂质在几十年前就已有应用。据作者调查，20世纪70年代初期，北京的花鸟鱼虫市场便已出现将合成纤维无纺布用于观赏鱼水处理的商品过滤材料，这种至今仍在延用的过滤材料由卷曲的纤维构成蓬松的棉絮片状，俗称“过滤棉”。“过滤棉”并不能用于常规的过滤池或机械过滤器，原因在于其填充的滤床难以布置均匀，易使水流“短路”，此外，滤料清洗也无法在滤池内完成。

20世纪80年代初期，研究人员通过短纤维乱堆形成滤床的方法开始了“规格化纤维滤料”的研究与发展历程^[1]。所谓“规格化纤维滤料”是指将纤维材料按规定的设计要求制成某种形式的成型体，该成型体滤料具有特定的形状和规格，与通用滤布、长丝束滤料以及“过滤棉”的最显著区别是：滤床由在水中呈散落的、无固定约束的单体滤料的集合体所构成。

2. 规格化纤维滤料

2.1 发展历程

(1) 短纤维单丝乱堆滤料(1980)^[1]

以比重大于过滤水的短纤维单丝乱堆的方式构成滤床，在过滤器中设置隔离丝网以防止短纤维滤料流失，反洗方式为空气—水联合反冲洗。

这种滤料的缺点是显而易见的，如短纤维单丝易流失，易缠挂隔离丝网，此外，由于纤维与过滤液的比重差小，因而清洗效果差。

(2) 低卷曲纤维椭球过滤材料(1981)^[2]

长5-50mm的无卷缩(低卷曲)纤维丝在液体中搅拌制作椭球状纤维滤料，亦称纤维球。丝径5-100μm，滤料外型为直径5-20mm，厚3-5mm的偏平椭球体。



图 1 低卷曲纤维椭球滤料

这种滤料的特征是制造简便，由于滤料在液中成型，纤维缠绕紧密，因而滤料内核较硬，变形小，但滤料内部捕捉的粒子反洗时脱落困难，此外，多次运行后从滤料上脱落的短纤维较多，见图 1。

(3) “布帛片”滤料(1981)^[3]

将类似于毛毡的无纺布切割成 20mm 厚，面积为 0.5–20cm² 的“毡片”，制成过滤材料，特点是纤维牢固不掉丝，但同样存在滤料内部捕集的粒子不易清洗干净的缺陷。

(4) 实心纤维球(1981)^[4]

采用静电植绒法将长 2–50mm 的纤维植于实心体上，可以通过改变实心体(核)的比重而改善滤料床的特性，见图 2。



图 2 实心纤维球

(5) 中心结扎纤维球(1985)^[5]

以纤维球直径的长度作为节距，用细绳将纤维丝束扎起来，在结扎间的中央处切断纤维丝束，形成大小一致的球状纤维滤料，亦称纤维球，见图 3。



图 3 中心结扎纤维球

(6) 卷缩纤维中心结扎纤维球(1986)^[6]

卷曲度高的纤维丝束结扎、切断后形成球状过滤材料，特点是弹性好、耐机械变形，见图 4。



图 4 卷缩纤维中心结扎纤维球

(7) 棒状纤维过滤材料(1992)^[7]

将卷曲纤维长丝集束，用粘合剂喷雾收束，纤维丝束上的纤维之间形成多点相接，成为一体的棒状，然后切开成定长度的，类似于去外皮的香烟滤嘴形状的过滤材料，见图 5。



图 5 棒状纤维滤料

(8) 彗星式纤维过滤材料(1998)^[8]

一种不对称构型过滤材料，一端为松散的纤维丝束，另一端纤维丝束固定在比重较大的实心体内，形如彗星，故命名为彗星式纤维过滤材料。

2.2 技术逻辑

第一，颗粒滤料的重要特征是可以方便地在滤池(器)内完成清洗，因此，作为纤维滤料的一个发展方向，用短纤维成型体制作滤料是合乎情理的。

第二，采用纤维材料作为过滤材料的一个出发点是鉴于其比砂或其它实体颗粒材料具有大得多的比表面积和空隙率，由此推断，由纤维材料构成的滤床应具有比常规颗粒滤料更大的纳污量。

第三，纳污量为周期产水量与去除悬浮物之积，纳污量的提高对过滤器效率的提高具有决定性的意义，因此，采用纤维材料制作过滤材料无疑是明智之举，至于纤维材料在应用上受到某些限制(如使用温度)是另外一回事。问题在于，如何充分发挥纤维材料作为滤料的特长？

第四，前面所举几例中，(2)～(7)均为对称性构型的滤料，除(4)外，滤料均含有“死区”，即部分滤料受某种约束，反冲洗时纤维无法散开，从而其间截留的悬浮物颗粒难以脱落，而降低了滤料的洗净度，因此，纤维滤料的开发应朝减少“死区”的方向发展。

第五，实心纤维球(4)的突出特点在于其实心部分(核)的比重可以根据需要进行配置，以促成反冲洗时实心部内核与纤维丝之间由于相对速度不同而产生的“甩曳力”，达到污物由于纤维摆动而脱落的清洗目的。

第六，滤料的尺度也是一个重要的考虑因素。过滤精度的提高取决于多方面的因素，其中之一是滤床横断面上滤料的空隙均匀性，一般讲，这种均匀性越高，过滤精度越高，因此，要求纤维滤料的尺度以小些为好，这样才有利于提高滤床横断面上的空隙均匀性，然而，滤料尺度小将带来制作上的困难和滤池(器)结构技术上的障碍。

第七，与常规颗粒滤料截然不同，纤维滤料构成的是弹性滤床，滤床的空隙率均可根据选择的纤维材料品种和规格进行调整，例如，由高卷曲度纤维制成的滤料比较适于高速过滤。弹性滤床的另一个优点是沿滤床纵断面空隙率是变化的，更符合“理想滤料”的构想。

综上所述，纤维滤料朝着既发挥纤维材料比表面积大的优势、又具备颗粒滤料反冲洗简便特点的方向发展，由此产生了一种新的不对称结构滤料——彗星式纤维滤料。

3 彗星式纤维过滤材料

3.1 构思^[8]

如前所述，高效滤料应发挥纤维滤料和颗粒滤料的各自优点，具体而言，滤床在过滤时应接近短纤维乱堆滤层的状态，以实现滤床空隙率分布均匀（过滤断面），无水流短路现象，提高出水水质；而在反洗时滤料应具有颗粒滤料的特点，滤料纤维在水流中散开并相互碰撞，从而清洗彻底。

基于以上分析，本研究设计了一种不对称结构滤料，并将其命名为“彗星式纤维滤料”。这种滤料的特点是一端为松散的纤维丝束，又称“彗尾”，另一端纤维丝束固定在比重较大的“彗核”内。过滤时，比重较大的彗核起到了对纤维丝束的压密作用，同时，由于彗核尺寸较小，对过滤断面空隙率分布的均匀性影响不大，从而提高了滤床的截污能力。反冲洗时，由于彗核和彗尾纤维丝的比重差，彗尾纤维随反冲洗水流而散开并摆动，产生较强的甩曳力，滤料之间的相互碰撞也加剧了纤维在水中所受到的机械作用力，滤料的不规则形状使滤料在反冲洗水流作用下产生旋转，强化了反冲洗时滤料受到的机械作用力，上述几种力的共同作用结果使附着在纤维表面的固体颗粒很容易脱落，从而提高了滤料的洗净度。

彗星式纤维滤料构成的过滤层其空隙率沿滤层高度呈梯度分布，下部滤料压实程度高，空隙率相对较小，易于保证过滤精度，整个滤床空隙率由下至上逐渐增大，滤层空隙率的分布特性将有助于实现高速和高精度过滤。

3.2 构造与规格

本研究试验了七种滤料构型，彗核外接圆直径0.7—6.0mm，丝束直径0.4—4.0mm，彗尾丝束长度7—80mm，经试验发现：

- ①彗核尺寸（外接圆直径）大于4mm，依丝束直径不同（2—3.5）彗尾存在无法散开的“死区”；
- ②彗尾长度大于50mm，则经过一段时间运行后，彗尾逐渐团在一起，有成球趋向；
- ③彗尾长度小于15mm，则滤料纤维在水中的“甩尾”现象不明显。

因此，确定彗星式纤维滤料尺寸为：

$$\Phi 2.2 \times 0.4 - 35/40 \quad (\text{彗核直径} \times \text{丝束直径} - \text{彗尾长度})$$



图 6 彗星式纤维滤料

4. 运行性能初探

4.1 实验装置

2000 年 3 月，德安公司大榭生产基地建立起一套标准试验系统，采用双池水循环，并投泥来实现连续过滤。试验装置如下：

过滤器规格 (1) 不锈钢，Φ800，净高 3.3M (2) 有机玻璃，Φ230，净高 3.3M

滤料型号 DA863-1

水池 2 座，每座 $6 \times 2.83 \times 2 = 34 \text{ m}^3$

泵 防腐泵 FS80-65-160, FS80-65-160, FS65-50-160

风机 TSB650-2.05/58.8 kPa

投加混凝剂 聚合氯化铝

投药量 4-8 mg/L

4.2 典型试验结果

(1) 滤速 20 M/h

n 试验条件

设备：过滤器内径 Φ 800 mm

过滤面积 0.5027 M²

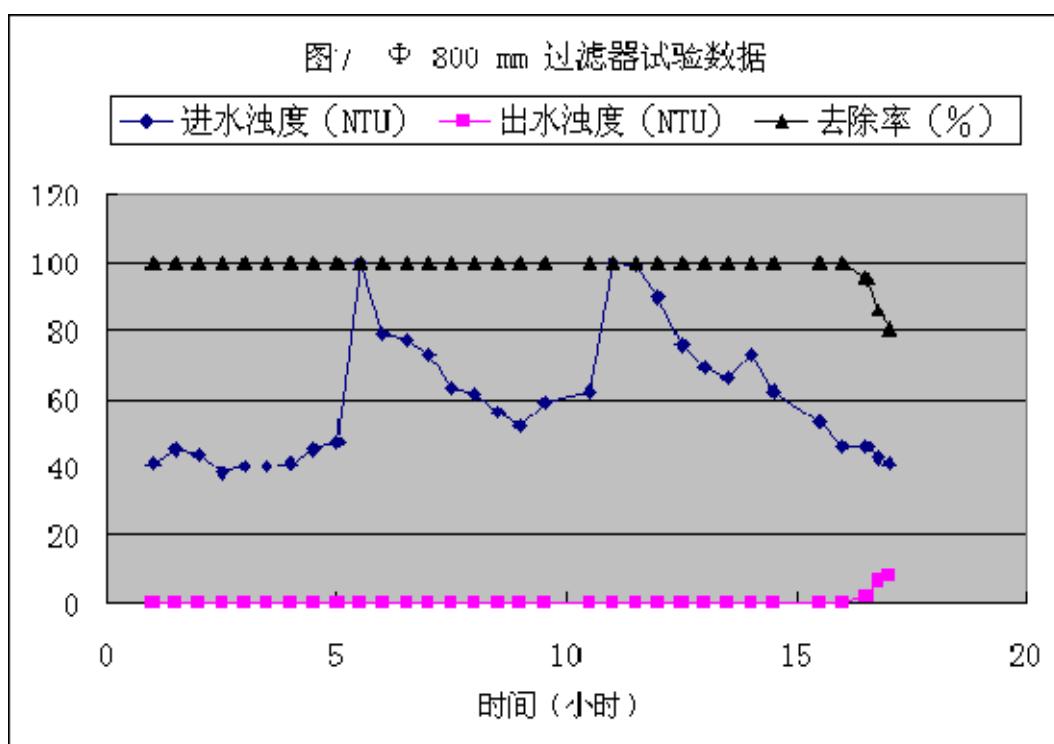
滤料: DA863-1

水源: 自来水+泥浆

加药系统: 药剂名称 聚合氯化铝

加药量 5-8 mg/L

n 试验结果



平均过滤速度 (m/h)	平均悬浮物去除率 (%)	过滤周期 (h)
20	100	16

反冲洗耗水率: 1.56%

剩余积泥率: 1.08%

(2) 滤速 40 M/h

n 试验条件

设备: 过滤器内径 Φ 800 mm

过滤面积 0.5027 M²

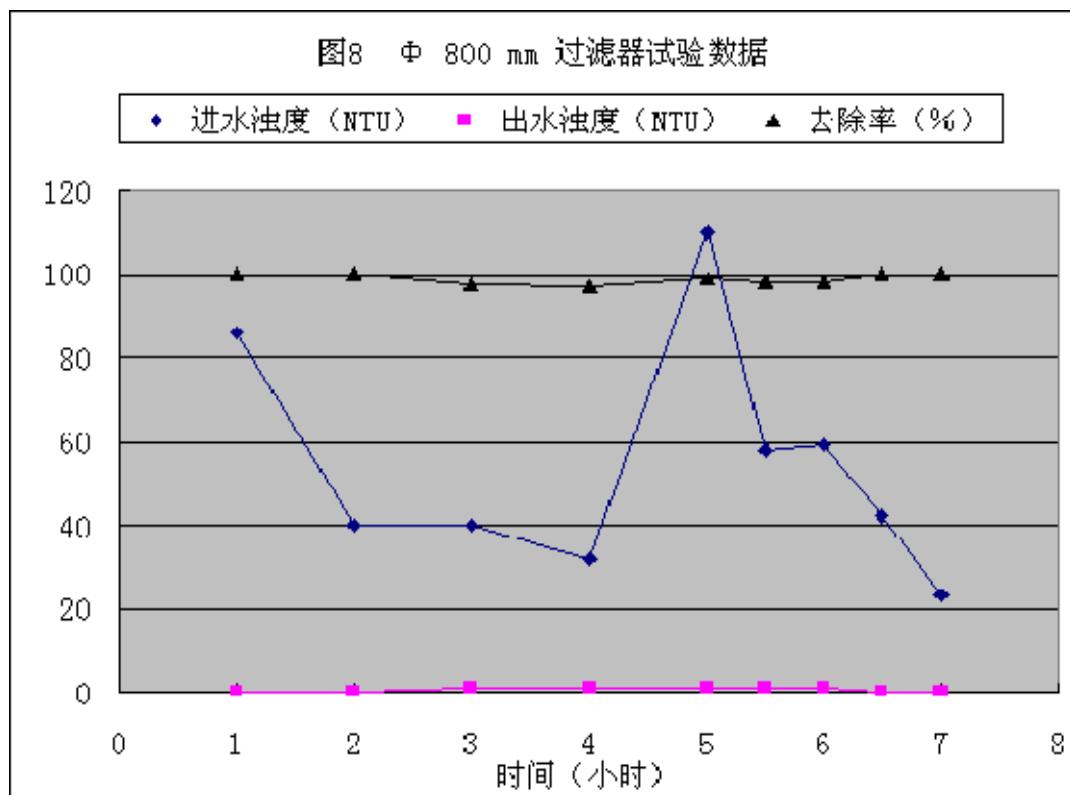
滤料: DA863-1

水源: 自来水+泥浆

加药系统: 药剂名称 聚合氯化铝

加药量 5-8 mg/L

n 试验结果



平均过滤速度 (m/h)	平均悬浮物去除率 (%)	过滤周期 (h)
40	98.9	7

5. 慧星式纤维过滤材料的最新进展

相应的，针对上述慧星式纤维过滤材料具有每个慧核固定的纤维数量较少，对过滤不起作用的实心慧核在滤床中所占体积较大的缺点，作者设计了由两股或两股以上的纤维丝束构成的滤料，一个慧核带有多股纤维丝束，提高纤维在滤床中所占的体积，从而提高滤床的容积利用率；从生产上讲，相同滤床体积下，改进后的滤料减少了所需单个滤料的数量，这样更加便于生产制造，提高滤料的生产效率。

下图为典型的两种经改进后的滤料形态：



图 9 彗星式纤维过滤材料的新构型

6. 结语

规格化纤维滤料的发展经历了短纤维原丝乱堆、对称结构纤维滤料成型体、不对称结构纤维滤料成型体三个阶段。彗星式纤维滤料的构思源于将颗粒滤粒与纤维材料的优点结合在一起。初步研究结果表明，该滤料设计新颖，综合技术指标优于常规滤料，值得进一步深入研究。

参考文献

- [1] 井田宏明. 过滤装置. 日本公开特许. 昭 56-152709. 1980. 4
- [2] 井田宏明, 藤井正博, 春田俊男. 水处理媒体的制造方法. 日本公告特许. 平 1-26726(特开昭 57-156012). 1981. 3
- [3] 井田宏明, 藤井正博. 过滤装置. 日本公开特许. 昭 57-197011. 1981. 5
- [4] 加藤幸喜. 水处理用媒体. 日本公开特许. 昭 58-17818. 1981. 7
- [5] 金实, 王占生, 张崇华. 纤维球滤料. 中国实用新型. ZL 85200039. 1. 1985. 4
- [6] 铃木信広, 武田幸雄, 山中润一. 过滤装置. 日本公开特许. 昭 63-93312. 1986. 10
- [7] 北山博, 廣田靖保, 上原勝. 水处理材. 日本公开特许. 平 5-285318. 1992. 4
- [8] 李振瑜, 刘力群, 金志刚. 彗星式纤维过滤体. 中国实用新型. ZL 98249298. 7.
- [9] 李振瑜. 一种由纤维丝束和丝束节构成的过滤材料. 中华人民共和国国家知识产权局. 00107758. 9