

科学出版社  
化学工业出版社  
北京

# 深层过滤理论

与

# 长纤维高速过滤器

王世和 周飞 等著



化学工业出版社

# 深层过滤理论

与

# 长纤维高速过滤器

王世和 周飞 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：28.00元

内容简介 请见封底

本书是迄今为止国内不多的较全面、系统地介绍深层过滤理论与技术发展的专著，特别是对长纤维高速过滤技术的完整展示，将为新型过滤器的开发和过滤技术的发展提供有价值的参考。全书注重体系的完整性与系统性，兼顾理论与实用，紧密结合国内外最新研究进展与观点，其中的众多内容为作者研究的最新成果，突出了工艺的理论基础与性能优势。

全书共分7章，内容包括：深层过滤技术与理论的发展历程，长纤维高速过滤器的试验研究，长纤维高速过滤器的运行特性，长纤维高速过滤器与石英砂过滤器的性能比较，长纤维高速过滤器的过滤机理，长纤维高速过滤器的运行动力学研究，长纤维高速过滤技术的扩展应用——长纤维附聚粗粒化除油器除油特性。

鉴于其内容特点，本书可作为科研院所、工程设计单位及其他各类从事水处理、污水资源化利用、化学工程、分离过程等方面技术人员的参考书；也可作为高等院校市政工程、环境工程、生态工程、化学工程、能源工程等专业研究生、大学生的教材或教学参考书。

# 设计类高等教育出版社

王世和周飞著

## 图书在版编目 (CIP) 数据

深层过滤理论与长纤维高速过滤器/王世和，周飞等著. —北京：  
化学工业出版社，2008.1

ISBN 978-7-122-01679-9

I. 深… II. ①王…②周… III. ①过滤-理论②水处理-过滤机  
IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 193530 号

责任编辑：满悦芝  
责任校对：徐贞珍

文字编辑：刘莉珺  
装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）  
印 装：北京云浩印刷有限责任公司  
720mm×1000mm 1/16 印张8¼ 字数177千字 2008年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：28.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

深层过滤，系指在过滤介质的深层进行的澄清过滤。它是利用滤料所提供的巨大表面积以截留滤液中的悬浮物和胶体，并将截留物储存于滤层孔隙中的工艺过程。1829年，英国伦敦Chelsea供水公司建成了世界上第一座慢滤池，标志着深层过滤技术用于现代水处理工程的开始。经历了近两百年的发展，目前，深层过滤已普遍用于饮用水处理、城市景观水体的循环净化、工业废水处理、废水深度处理、油田回注水处理等几乎所有水处理领域，是去除水和废水中悬浮物、胶体及微生物等的最常用、最有效的处理手段之一，同时也是电力、冶金、轻工、食品、石化等行业从废气或废液中去去除固体微粒的重要处理方法，且其应用范围仍在不断扩大。

鉴于此，受政府科技主管部门的立项，并得到相关企业的有力支持和配合，我们研究并开发出一种新型深层过滤设备——长纤维高速过滤器。5年多来的反复试验研究和初步应用证明，其性能优势明显，目前已获国家发明专利和实用新型专利授权，成为我国水处理装备的新兵和生力军。为了对本技术的性能特点进行介绍，并对其作为主要开发依据的深层过滤理论进行必要的解析，作者决定将大量研究结果和可收集的资料进行归纳整理，编撰成此书，以飨广大读者、使用者和水处理界同行。

基于以上初衷，本书在内容上突出了工艺的理论基础与性能优势，注意了体系的完整性和系统性，并力求紧密结合国内外最新研究进展与观点。全书共分7章。其中，第1章较全面地回顾了深层过滤理论与技术的发展历程，将已有的各类纤维过滤器从总体上进行分类，分别介绍了它们各自在滤料形式和滤层结构上的发展过程、优势与不足；在此基础上，阐明了长纤维高速过滤器的理论依据和结构特点，从内部结构和过滤机理上分析了该型过滤器的性能优势；本章还通过深层过滤理论发展的介绍，指出了深层过滤理论有待进一步研究的问题。第2章结合长纤维高速过滤器的研究过程，介绍了深层过滤设备的研究内容与方法。第3章较系统地介绍了从滤床成熟期至反冲洗结束的整个工作周期内长纤维高速过滤器的运行特性，通过与其他深层过滤设备的比较，阐明了长纤维高速过滤器的性能优势，给出了优化的操作条件。第4章通过与石英砂过滤器的同比试验，从技术和经济两方面阐述了长纤维高速过滤器的实用意义。第5章从长纤维高速过滤器的床层结构特征、滤出水水质和水头损失沿滤层的变化及积泥形态学等方面，对长纤维高速过滤器的过滤机理进行了分析。第6章介绍了长纤维高速过滤器运行动力学模型的建立，利用所建立的动力学方程对长纤维高速过滤器的运行特性及优化设计进行了模拟分析。第7章针对长纤维高速过滤技术扩展应用中的一个热门话题——长纤维滤料的除油过程与特性进行了较详尽的论述。

除介绍用于长纤维除油器的纤维改性方法及除油效果外，重点介绍了以聚乙烯醇改性纤维为滤料的长纤维附聚粗粒化除油器的除油特性、影响因素及反冲洗再生条件。

全书由王世和、周飞合作完成。参与此项技术研究和资料收集的还有张浩、赵欢、张建国、刘莉、黄娟、卢宁、吴剑、陆敏博等。编写过程中，承蒙不少水处理界前辈和同行的热诚鼓励与支持，使本书得以顺利成稿。东南大学科技出版基金为本书的出版提供了经费上的支持；化学工业出版社为本书的出版提供了机会，并为本书质量的提高进行了大量卓有成效的工作，在此一并致以诚挚的谢意。

限于笔者水平与经验所限，书中疏漏和不当之处，恳请读者批评指正。谨以此书献给水处理及分离过程界的同行和朋友们！

作者

2008年1月于南京

# 目 录

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 1     | 深层过滤技术与理论的发展历程          | 1  |
| 1.1   | 引言                      | 1  |
| 1.2   | 传统深层过滤技术的发展             | 1  |
| 1.3   | 纤维过滤技术的应用与发展            | 3  |
| 1.3.1 | 散堆式纤维过滤器                | 3  |
| 1.3.2 | 规整式纤维过滤器                | 8  |
| 1.3.3 | 长纤维高速过滤器的理论依据、结构特点与性能优势 | 12 |
| 1.4   | 深层过滤理论的研究进展             | 14 |
| 1.4.1 | 深层过滤的微观机理研究             | 14 |
| 1.4.2 | 深层过滤的数学模型               | 17 |
| 1.5   | 本章小结                    | 20 |
|       | 参考文献                    | 21 |
| 2     | 长纤维高速过滤器的试验研究           | 25 |
| 2.1   | 引言                      | 25 |
| 2.2   | 试验原理                    | 25 |
| 2.2.1 | 长纤维高速过滤器运行特性的研究         | 25 |
| 2.2.2 | 长纤维高速过滤器的运行动力学研究        | 27 |
| 2.3   | 试验装置                    | 27 |
| 2.4   | 试验方法                    | 28 |
| 2.4.1 | 过滤方式的选择                 | 28 |
| 2.4.2 | 试验内容与过程                 | 29 |
| 2.4.3 | 分析方法和仪器                 | 30 |
| 2.4.4 | 其他辅助性试验                 | 30 |
|       | 参考文献                    | 31 |
| 3     | 长纤维高速过滤器的运行特性           | 32 |
| 3.1   | 引言                      | 32 |
| 3.2   | 滤床成熟期                   | 32 |
| 3.3   | 滤出水水质与有效过滤周期            | 33 |
| 3.4   | 有效过滤周期内的平均滤速与纳污量        | 35 |
| 3.5   | 有效过滤周期内的水头损失            | 37 |
| 3.6   | 反冲洗特性与条件                | 39 |
| 3.6.1 | 反冲洗方式的选择                | 40 |

|          |                                   |           |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 3.6.2    | 气、水联合反冲洗条件的确定 .....               | 40        |
| 3.6.3    | 长纤维高速过滤器反冲洗性能 .....               | 45        |
| 3.7      | 长纤维高速过滤器的操作条件优化 .....             | 46        |
| 3.7.1    | 优化原则 .....                        | 46        |
| 3.7.2    | 操作条件优化 .....                      | 47        |
| 3.8      | 本章小结 .....                        | 48        |
|          | 参考文献 .....                        | 49        |
| <b>4</b> | <b>长纤维高速过滤器与石英砂过滤器的性能比较</b> ..... | <b>50</b> |
| 4.1      | 引言 .....                          | 50        |
| 4.2      | 长纤维与石英砂滤料对比试验 .....               | 50        |
| 4.3      | 对比试验结果与分析 .....                   | 51        |
| 4.3.1    | 石英砂滤床过滤出水水质和有效过滤周期 .....          | 51        |
| 4.3.2    | 有效过滤期内的平均滤速和纳污量 .....             | 51        |
| 4.3.3    | 滤出水化学及卫生学指标 .....                 | 52        |
| 4.4      | 长纤维高速过滤器的性能优势 .....               | 55        |
| 4.4.1    | 长纤维高速过滤器的技术性能 .....               | 55        |
| 4.4.2    | 长纤维高速过滤器的实用性 .....                | 55        |
| 4.5      | 本章小结 .....                        | 58        |
|          | 参考文献 .....                        | 58        |
| <b>5</b> | <b>长纤维高速过滤器的过滤机理</b> .....        | <b>59</b> |
| 5.1      | 引言 .....                          | 59        |
| 5.2      | 长纤维高速过滤器的床层结构特征 .....             | 60        |
| 5.2.1    | 清洁滤床床层结构特征 .....                  | 60        |
| 5.2.2    | 长纤维滤床床层结构沿滤程的变化 .....             | 62        |
| 5.3      | 过滤水水质沿滤层的变化 .....                 | 63        |
| 5.4      | 水头损失沿滤层的变化 .....                  | 64        |
| 5.5      | 长纤维高速过滤器的积泥形态 .....               | 65        |
| 5.5.1    | 长纤维滤料积泥的宏观形态 .....                | 65        |
| 5.5.2    | 长纤维滤料积泥的微观形态 .....                | 65        |
| 5.5.3    | 反冲洗后残留积泥形态 .....                  | 67        |
| 5.5.4    | 积泥孔隙率的测定 .....                    | 67        |
| 5.6      | 本章小结 .....                        | 67        |
|          | 参考文献 .....                        | 68        |
| <b>6</b> | <b>长纤维高速过滤器的运行动力学研究</b> .....     | <b>69</b> |
| 6.1      | 引言 .....                          | 69        |
| 6.2      | 深层过滤建模方法概述 .....                  | 69        |
| 6.3      | 长纤维高速过滤器水头损失方程 .....              | 70        |
| 6.3.1    | 单元模型 .....                        | 70        |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 6.3.2 | Oseen 模型                        | 73  |
| 6.3.3 | Brinkman 模型                     | 73  |
| 6.3.4 | 曳力模型水头损失方程简评                    | 74  |
| 6.3.5 | 长纤维高速过滤器水头损失方程的建立               | 74  |
| 6.4   | 长纤维高速过滤器传质动力学方程                 | 77  |
| 6.4.1 | 物料平衡方程                          | 78  |
| 6.4.2 | 传质速率方程                          | 79  |
| 6.5   | 长纤维高速过滤器数学模型的数值计算               | 85  |
| 6.5.1 | 长纤维高速过滤器过滤过程方程组                 | 85  |
| 6.5.2 | 边界条件                            | 86  |
| 6.5.3 | 方程组的数值解法                        | 86  |
| 6.6   | 长纤维滤床的优化设计                      | 89  |
| 6.6.1 | 长纤维滤床优化设计的任务                    | 89  |
| 6.6.2 | 长纤维滤床优化设计的原则                    | 89  |
| 6.6.3 | 长纤维滤床优化设计的计算                    | 89  |
| 6.7   | 本章小结                            | 90  |
|       | 参考文献                            | 91  |
| 7     | 长纤维高速过滤技术的扩展应用——长纤维附聚粗粒化除油器除油特性 | 93  |
| 7.1   | 引言                              | 93  |
| 7.1.1 | 含油废水的来源及危害                      | 93  |
| 7.1.2 | 含油废水处理技术概况                      | 93  |
| 7.1.3 | 不同处理方法的特点                       | 97  |
| 7.1.4 | 技术研究的目的及意义                      | 99  |
| 7.2   | 试验原理与概况                         | 99  |
| 7.2.1 | 试验装置及原理                         | 99  |
| 7.2.2 | 试验内容                            | 100 |
| 7.2.3 | 试验水质及滤料参数                       | 100 |
| 7.2.4 | 测定参数及仪器                         | 100 |
| 7.3   | 除油纤维滤料的改性筛选                     | 101 |
| 7.3.1 | 纤维改性试验结果与分析                     | 101 |
| 7.3.2 | 不同改性纤维周期运行效果比较                  | 107 |
| 7.3.3 | 纤维除油反冲洗效果比较                     | 110 |
| 7.3.4 | 聚乙烯醇改性纤维作为滤料的可行性分析              | 111 |
| 7.4   | 长纤维除油器性能研究                      | 112 |
| 7.4.1 | 除油效果的影响因素                       | 112 |
| 7.4.2 | 滤速变化规律                          | 113 |
| 7.4.3 | 气、水强度对反冲洗效果的影响                  | 114 |
| 7.4.4 | 除油及去除其他污染物特性分析                  | 116 |
| 7.4.5 | 非曝气条件下的除油特性                     | 119 |
| 7.4.6 | 长纤维除油器的技术优势                     | 120 |
| 7.5   | 工艺处理油田采出水的可行性分析                 | 121 |





# 1

## 深层过滤技术与理论的发展历程

### 1.1 引言

本章通过对深层过滤技术和理论发展的历史回顾,阐明“理想滤层”概念是深层过滤技术发展的理论基础。以粒状滤料为滤材的传统深层过滤由于自身的局限,难以在截污容量、滤速、滤阻、过滤效率等方面获得突破性进展<sup>[1]</sup>,而以富有弹性的纤维滤料为滤材所构成的纤维滤床较好地符合了理想滤层的概念,加之纤维滤料较强的吸附性能、巨大的比表面积及纤维滤层较高的孔隙率,一经应用,便显示其巨大的优势<sup>[2]</sup>。本章较详细地介绍了近三十年来纤维过滤技术在水处理中的应用,将已有各类纤维过滤器从总体上分为两类——散堆式和规整式,分别介绍和分析了它们在滤料形式和滤层结构上的发展过程及各自的优势和不足,以此为基础,阐明自行开发的长纤维高速过滤器的理论依据及其结构特点,从内部结构和过滤机理上分析了该型过滤器的性能优势。本章还介绍了深层过滤理论近年来的主要研究进展,为长纤维高速过滤器数学模型的建立提供了理论指导。

### 1.2 传统深层过滤技术的发展

所谓深层过滤,系指在过滤介质的深层进行的澄清过滤过程,它是利用滤料所提供的表面积来截留滤液中的悬浮物和胶体,并将截留物储存于床层之孔隙中的工艺过程。在深层过滤中,每个孔隙均具有从流经它的流体中截留悬浮颗粒的可能。1746年,法国批准了世界上第一个深层过滤技术专利,1829年,英国伦敦的Chelsea供水公司建成了世界上第一座用于实际生产的慢砂滤池,标志着深层过滤用于水处理的开始<sup>[3]</sup>。

在传统的深层过滤中,以石英砂滤料为代表的粒状滤料应用最早,也最广泛,但如前所述,粒状滤料存在其固有缺陷:首先,常规粒状滤料虽可通过减小粒径的办法来提高其滤床横断面上的均匀致密性和增大其比表面积,以提高过滤效果,但考虑到反冲洗效果的降低和过滤阻力的增大,粒状滤料的粒径最小不应小于0.3~0.5mm;另外,粒状滤料滤层在反冲洗时,上向流水流使砂粒处于悬浮的流化状态,使其产生水力分级现象,即自动地重新按小颗粒在上、大颗粒在下的顺序排列,从而使孔隙尺寸也从上到下逐渐增大。这样,当下向流过滤时,水流因先经过粒径小、孔隙尺寸也

小的上部滤层，再到粒径大、孔隙也大的下部滤层。水中悬浮颗粒大部分被截留在上部数厘米深度内，表现为悬浮固体的截留量沿滤层厚度方向呈指数级递减，从而使滤层上部孔隙迅速被悬浮固体堵塞，滤床水头损失迅速上升，而下部滤层大部分容积尚未发挥作用便不得不终止过滤<sup>[4]</sup>。

石英砂等粒状滤料滤层“水力分级”之不足，促成了“理想滤层”概念的提出。所谓“理想滤层”是指在滤层中，沿过滤方向孔隙尺寸按由大到小递减分布的滤层。按“理想滤层”的方式进行过滤可有效地克服过滤时上部滤层水头损失快速升高的缺点，从而使更多的悬浮物有机会进入更深的滤层得以截留，如此，在过滤终了时，整个滤层的效能均能得以充分发挥。“理想滤层”的概念是研究者们对滤料、滤层和过滤工艺进行不断改进和开发的理论基础<sup>[5]</sup>。

基于“理想滤层”的概念，研究人员在 20 世纪 50 年代开发了双层滤料，即在石英砂滤层上部堆置一层粒径较大、密度较小的轻质滤料。使用较早也较广泛的轻质滤料为无烟煤。双层滤料在一定程度上实现了理想深层过滤，使在过滤周期内滤层的有效功能得以发挥，水头损失增速减缓，过滤周期延长，从而提高了床层的生产能力<sup>[6]</sup>。

在此基础上又进一步发展了三层滤料<sup>[7,8]</sup>，即在双层滤料下部再加一层密度大、粒径小的滤料，如石榴石、磁铁矿等，三层滤料比双层滤料床层结构更为合理。随后又出现了四层滤料<sup>[9]</sup>和五层滤料<sup>[10]</sup>。Sembi 和 Ives 用计算机模拟了十层滤料滤层的过滤过程<sup>[11]</sup>。依此推论，从理论上，滤料层数越多，滤层结构就越合理，越符合理想滤层的概念。然而，在实际应用中存在许多困难，如相邻两层滤料间的混杂和滤料流失，以及滤料来源有限、加工复杂等因素，极大地限制了这一技术的推广应用。因而，生产中所采用的大多仍然是双层或三层滤料。通过分析可知，双层和三层滤料滤床实质上不过是两个或三个不同的单层滤料滤床串联而成的，而在每层内仍存在水力筛分作用，主要担负截污作用的仍为每层的表面部分。

另外，在理论方面，对为减小“水力分级”而采用“多层滤料”以实现“理想滤层”过滤的方法进行的深入分析发现，粒状滤料多层滤床以不同粒径、密度的颗粒滤料搭配的方式所实现的“沿过滤方向孔隙尺寸由大到小递减的理想滤层的分布”是靠增大上层滤料的粒径，因而减小了滤料的比表面积，而各层孔隙率基本保持不变的方式实现的，即相当于在孔隙率不变的情况下将滤床上层的小颗粒合并成了大颗粒、小孔隙合并成了大孔隙而得到的上部滤层的大孔隙。如此，虽然减少了截留的悬浮物聚集于滤料上层而发生堵塞的现象，但由于滤床总比表面积的大幅度下降，床层对截留悬浮物的有效容积下降，很容易被穿透。

20 世纪 80 年代以来，开发应用的均粒滤料在很大程度上解决了非均粒滤料存在的问题，过滤速度、过滤效率及床层截污量都得到了明显的提高<sup>[12]</sup>。但均粒滤料只是采用大小均一的滤料，达到沿滤层厚度均一的孔隙，从而避免了反冲洗时的水力分级现象，这与“理想滤层”的要求还是有差别的，且同样存在加工复杂的问题。

传统的以粒状滤料为滤材的深层过滤技术为实现理想过滤的方式，除在滤料上加以变革外，还在过滤工艺上加以改进，据此发展了上向流过滤和双向流过滤技术<sup>[13]</sup>。

在上向流过滤中，滤液自下而上穿过滤层，充分利用了反冲洗后水力筛分所形成

的滤层孔隙尺寸下大上小的分布，因而增加了悬浮物穿透滤层的深度，提高了滤层的截污能力。但上向流过滤时，滤速不能过大，否则滤层膨胀并呈流态化，不仅会使滤层失去截污能力，而且还可能使已截留的悬浮物被冲出。这极大地限制了上向流过滤的处理能力。双向流过滤为上下双向进水、中部集水的过滤方式，它解决了上向流过滤滤层膨胀的问题，并且由于上下同时过滤，生产能力得以大大提高。但双向流过滤下层滤料难以获得有效的反冲洗，且设备结构复杂，操作困难，故至今未能在实际生产中得以推广应用。

综上所述，粒状滤料围绕着增大滤层截污量，提高滤速，改善过滤效率等，在“理想滤层”概念下，从滤料级配组合和过滤水流方向两方面对过滤设备进行了发展，但由于粒状滤料自身的限制<sup>[14]</sup>，使以上几方面的技术指标均未能得到突破性进展。因而，人们开始探寻粒状滤料以外的材料作为滤材，以推动深层过滤技术的发展。

### 1.3 纤维过滤技术的应用与发展

以富有弹性的软填料——纤维取代传统的粒状滤料，是深层过滤技术发展史上的一种崭新的思维和尝试。纤维材料以其较高的机械强度、良好的化学稳定性和较强的吸附能力，具有作为深层过滤材料的理想条件；而其所具有的体轻（密度小）、径细、质柔的特点，则使纤维滤床不仅具有巨大的比表面积和较高的孔隙率，而且还可在水力或机械压缩的作用下形成“理想滤层”的过滤方式。并且，对比于前述颗粒滤料多层床的“理想滤层”，纤维滤床的“理想滤层”具有明显不同的特点：纤维滤床上部大孔隙的实现是在滤料总比表面积恒定的基础上，通过床层上部孔隙率的增大而实现的，也即相当于在滤料尺寸不变的情况下，拉大彼此间距离获得的上部滤层的大孔隙，如此，孔隙尺寸和孔隙率均沿过滤方向呈逐渐减小的变化趋势，因而，这种“理想滤层”床层结构更合理，过滤效率更高。纤维滤料和纤维滤床的这些特点为提高其过滤效率，增加床层截污量，降低过滤阻力及拓展过滤工艺的适应范围创造了条件。近年来，随着合成纤维工业的发展，可供选择的纤维种类和数量越来越多，纤维的物理和化学性能也有了很大的提高，进一步从材料上保证了纤维滤床几乎可用于各种过滤过程。纤维材料逐渐被认为是最理想的过滤材料之一，也因此得到了越来越多的开发和越来越广泛的应用<sup>[15]</sup>。

在深入分析工程应用和文献报道的各种纤维过滤器的结构特点和运行特性的基础上，作者将已有各类纤维过滤器从总体上分为两大类：散堆式纤维过滤器和规整式纤维过滤器。

#### 1.3.1 散堆式纤维过滤器

过滤和反冲洗是深层过滤的两个基本操作，性能良好的深层过滤器应能满足在过滤时滤料排列紧密，滤床横断面上孔隙均匀分布，并能实现沿过滤方向滤层孔隙率由大到小、比表面积由小到大、过滤效率由低到高的理想过滤；而反冲洗时则能达到滤层膨松舒展、内部孔隙充分张开，滤料间剧烈碰撞、摩擦，以保证滤料的彻底清洗。

这两种要求是一对矛盾，深层过滤技术正是在不断协调和改善这一对矛盾的过程中，得以逐步发展和完善的。

粒状滤料尽管在实际使用中显露出孔隙率小、比表面积低、反冲洗时出现水力分级等诸多主要源自个体特性的不足，使其过滤性能难以得到根本性提高，但粒状滤料散堆深层滤床所具有的一些群体优势应值得充分关注和借鉴，如颗粒床在流化状态下能够较容易地形成床层内较均匀的孔隙分布，壁流、沟流现象容易得到控制；反冲洗时滤料颗粒能达到很好的流化效果，颗粒间碰撞、摩擦较为剧烈；对反冲洗配水、配气系统要求相对较低，设备易于大型化等。近年来，很多新建水厂所采用的均质粗粒滤料，更是使颗粒滤床的优良特性得到了进一步的发挥<sup>[16]</sup>。粒状滤料散堆滤床所具有的这些优势，使其过滤时能达到较好的出水水质和能够方便地在滤池内完成清洗，因而，迄今为止，在深层过滤中仍居主导地位。而纤维滤料的优点则在于其良好的个体性能，如吸附性能好，比表面积大，体轻质柔、床层孔隙率高，从而有效地增大了滤床的截污能力和纳污能力；此外，纤维材料还是一种弹性材料，所构成的滤床在过滤时由于流体压力的压缩作用，可形成沿过滤方向孔隙尺寸逐渐减小（孔隙率也逐渐减小）的孔隙分布，使之符合“理想滤层”的概念。因而，如何充分发挥纤维滤料的优良个体性能，并能保持粒状滤料的群体优势，实现二者的统一，使所研制的滤料在“局部上保持纤维的特点，整体上具有粒状滤料的特性”，是推动深层过滤技术发展的一条正确思路，也是纤维深层过滤器的一个发展方向。散堆式纤维过滤器即是在这种思路下产生和发展的。

所谓“散堆式”纤维过滤器，是指床型结构类同于颗粒床，仅是以纤维滤料代替了颗粒滤料。性能良好的散堆式纤维过滤器应能达到：过滤时在滤床横断面上形成的孔隙要致密、均匀，以避免水流短路和提高滤出水水质，且沿过滤方向孔隙分布符合“理想滤层”的概念；而反冲洗时，则具有类似于粒状滤料的特点，即能实现高质量的流态化，纤维滤料在水流中散开并相互碰撞、摩擦，彻底消除反洗“死区”，以达到良好的反冲洗效果。目前，主要的散堆式纤维过滤器有短纤维过滤器、纤维球过滤器、彗星式纤维过滤器及 HW 深层过滤器。

1981年，日本尤尼奇卡公司研究人员将长纤维制成短纤维，取代粒状滤料，以散堆形式构成短纤维深层滤床<sup>[17]</sup>，首先开始了“规格化纤维过滤材料”的研究与开发历程<sup>[18]</sup>，也开始了纤维滤料在水处理中的应用<sup>[19]</sup>。所谓“规格化纤维过滤材料”是指将纤维材料按一定的设计要求制成具有某种特定形状和规格的纤维成型体，而滤床则由这种规格化的纤维滤料以散堆的方式，堆积成无固定约束的集合体，滤床的特性将由个体滤料构成的床层的整体特性所决定。国内也对短纤维滤料的过滤性能进行了系统研究<sup>[20~22]</sup>，研究结果表明，短纤维滤料具有优良的过滤效果：过滤出水水质好（在进水悬浮物浓度不大于 150mg/L 的条件下，滤出水悬浮物浓度均小于 1mg/L），滤速高（大于 20m/h），过滤周期长（大于 16h）、截泥量大（可达 60kg/m<sup>3</sup> 滤层<sup>[20]</sup>）。文献所述试验更进一步表明<sup>[21]</sup>，短纤维滤层厚度在比纤维球滤层厚度薄 30% 的情况下，平均悬浮物脱除率仍比纤维球过滤器高 31.7%。短纤维深层滤床优良的过滤效果一方面源自纤维滤料优良的过滤性能，如吸附性能强、比表面积大、所形成滤床孔隙率高、床层孔隙分布沿过滤方向逐渐减小，即符合“理想滤层”的分

布；另一方面，还源自短纤维散堆滤床仍保留了颗粒状散堆滤床的群体优势，如短纤维间互相交错叠置，形成许多细小孔隙，所形成滤床不仅孔隙率高，且滤床断面孔隙分布均匀，故无滤液壁流和沟流等短路现象。然而，短纤维散堆滤床在反冲洗时却暴露出严重不足：由于纤维滤料相对较小的密度，使短纤维滤床在反冲洗时难以形成良好的流化效果，极易出现腾涌或节涌现象，纤维滤层整体上浮，形成逆向过滤，严重恶化了反冲洗效果，致使短纤维滤床无法高效稳定运行；即便以挡板阻拦，短纤维也很容易流失。

为克服短纤维散堆滤床在反冲洗时的严重不足，尤尼奇卡公司研究人员继续对“规格化纤维过滤材料”的形状和规格进行探索和发展，首先采用丝径 $5\sim 100\mu\text{m}$ ，长 $5\sim 50\text{mm}$ 的无卷缩（低卷曲）短纤维丝，在液体中搅拌，使短纤维相互缠结成直径 $5\sim 20\text{mm}$ 、厚 $3\sim 5\text{mm}$ 的偏平椭球状纤维块<sup>[23]</sup>，如图 1.1 所示。这种滤料的特点为纤维缠绕紧密，因而过滤材料内核较硬，变形小。其主要缺点是滤料内部吸附的悬浮颗粒在反洗时难以洗脱，此外，纤维块不牢固，运行时短纤维容易从纤维块上脱落。随后又改用静电植毛方法，将 $2\sim 50\text{mm}$ 长的短纤维植于多面实心体，如球体、椭圆体、圆柱体、板状体等载体表面，形成如图 1.2 所示的滤料<sup>[24]</sup>。但这种滤料加工困难，纤维黏结也不牢固。至 1986 年，又发展为采用卷曲度高的纤维丝束，结扎、切断后形成如图 1.3 所示球状过滤材料<sup>[25]</sup>。由于这几种纤维块均呈球形，故在国内通称为纤维球。据资料介绍，以这种滤料堆积而成的纤维深层散堆滤床，滤速可达 $20\sim 85\text{m/h}$ ，实际截泥量为 $6\text{kg/m}^3$ 滤料，采用气、水联合反冲洗，反洗水量约为过滤产水的 $1\%\sim 2\%$ <sup>[26]</sup>。

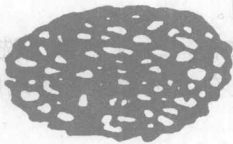


图 1.1 缠结纤维块

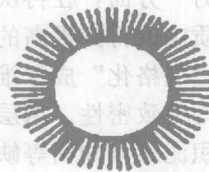


图 1.2 植毛纤维块

清华大学环境工程研究所从 1983 年起对纤维球过滤器进行了系统研究，采用的纤维球为用细绳在一束短纤维丝中心处结扎而形成的富有弹性的球状体<sup>[27]</sup>，如图 1.4 所示。



图 1.3 卷曲纤维结扎纤维块

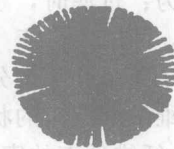


图 1.4 国产纤维球

文献<sup>[28~32]</sup>对国产纤维球的过滤特性进行了系统研究，证明了其具有滤速高（最高可达 $50\text{m/h}$ ）、截泥量大（ $3\sim 10\text{kg/m}^3$ 滤料）、过滤周期长的优点，并且适用于直接过滤给水和废水，具有良好的过滤适应性和稳定性，除出水水质未能显现出特

别优势外，其他指标均明显优于石英砂过滤器。同时，还通过试验对国产纤维球与日本纤维球的性能作了对比。日本纤维球比较硬，纤维丝在球内卷曲成一团，滤床中球与球间的纤维丝互不交叉，球与球间的空隙较大，因而滤床横断面孔隙率分布不均匀，在过滤中容易产生沟流、短路现象，虽然水头损失小，但容易穿透。国产纤维球纤维丝呈辐射状，在床层中相互交叉，球的柔软度有所提高，滤床横断面孔隙率分布均匀，特别是滤床下层孔隙分布有所改善，壁流、沟流现象得以减少，过滤效率有所提高，但在过滤后期易产生堵塞，使水头损失迅速上升。

通过对纤维球过滤器的结构和过滤特性的分析可以看出，纤维球滤料是在综合粒状滤料和纤维滤料各自优点的思路下产生和发展的，是“规格化纤维过滤材料”中的一种构型对称的纤维滤料，它在拥有纤维滤料优良品质的同时，融入了粒状滤料的部分优良性能，故相对于散堆短纤维滤床，反冲洗性能大为改善，但过滤效果有所降低。纤维球滤料的不足之处在于：床层中球与球间的孔隙较大，影响了滤床孔隙的均匀分布，容易出现水流短路，影响了出水水质。这种情况在日本纤维球滤料上表现尤为明显；其次，纤维球未能充分发挥柔性纤维的特性，滤层压缩缓慢，使滤床的成熟期较长<sup>[33]</sup>；再者，每个纤维球的中心处都有热黏结或细绳结扎所形成的硬结，一方面降低了滤层的有效过滤面积，还使滤液至此容易形成死角，造成流动不均匀，增大了“壁流”和“沟流”的概率，从而影响了过滤质量。反冲洗时，硬结周围纤维密实处积泥难以洗脱，存在较大的反洗“死区”。据文献报道，纤维球滤床在滤床中、底部的纤维球密实处反洗后残留的积泥量约占纤维球滤料重的11%，而滤床表层纤维球残留积泥量高达滤料重的30%~50%<sup>[31]</sup>。这部分残存积泥一方面使纤维球过滤器截污能力降低，另一方面，在再次过滤时因滤料受压释放而影响出水水质，这也是纤维球过滤出水水质难以得到提高的另一个重要原因。

短纤维滤料“规格化”成纤维球的目的在于改善短纤维滤料反洗时的严重不足，但纤维球滤床的均匀致密性、床层的可压缩性以及有效过滤面积等均明显不如散堆短纤维滤床，内部积泥难以冲刷等缺点亦亟待改善。

针对纤维球滤料的不足，彗星式纤维过滤材料以其新颖的不对称构型，使其在过滤与反冲洗两方面的性能均得到较大的改善<sup>[18,34]</sup>。该型滤料目前有单尾型、双尾型和多尾型三种。

图1.5为单尾型彗星式纤维过滤材料的结构特点。单尾型彗星式纤维过滤材料的一端为松散的纤维丝束，又称“彗尾”，另一端为密度较大的“彗核”，用以固定纤维丝束。其设计思路为：过滤时，“彗尾”纤维丝束彼此互相交错叠置，形成许多细小且分布均匀的空隙，同时，由于“彗核”的相对尺寸对比于纤维球“球核”的相对尺寸要小，因而对滤床断面孔隙率分布均匀性的影响减小，使彗星式纤维过滤材料的滤层结构更接近短纤维散堆滤床的状态，提高了滤床的截污能力；而反冲洗时，则由于“彗核”和“彗尾”纤维丝束的密度差，“彗尾”纤维丝束在反冲洗水流、气流的作用下，散开并摆动，产生较强的甩曳力，纤维丝束间的相互碰撞、摩擦得以加剧；此外，彗星式纤维过滤材料的不规则形状也使过滤材料在反冲洗水流作用下产生旋转，进一步强化了过滤材料在反冲洗时的机械作用力，上述几种力的共同作用，使附着于纤维表面的固体颗粒较易脱落，从而提高了彗星式纤维过滤材料的反冲洗效果。



图 1.5 彗星式纤维  
过滤材料（单尾型）



图 1.6 彗星式纤维过滤  
材料（双尾型、多尾型）

为进一步减少实心“彗核”在滤床中所占体积，进一步提高滤层过滤断面空隙的均匀分布和增大滤床的有效过滤面积，彗星式纤维过滤材料从单尾型发展到了如图 1.6 所示的双尾型和多尾型。双尾型和多尾型彗星式纤维过滤材料的结构特点为一个“彗核”带有两股或多股纤维丝束，这一方面提高了纤维束在滤床中所占的体积，另一方面在相同滤床体积下，也减少了所需单个过滤材料的数量，从而提高了过滤材料的加工生产效率。

研制者对彗星式纤维过滤材料的性能进行了详细的试验研究，文献报道<sup>[35]</sup>，相对于纤维球过滤器，彗星式纤维过滤材料的出水水质、滤床成熟期、截泥量和过滤周期等均大为改善，并且，反洗水耗低（1%~2%）、残留积泥量小（占滤料重 0.5%~2%），是一种值得进一步深入研究和发展的“规格化”散堆纤维过滤材料。彗星式纤维过滤材料在使用过程中存在的主要问题有：在“彗核”处依然存在一定的过滤不均匀性和反洗“死区”；反冲洗时出现“彗尾”团在“彗核”上而成球，以及多个填料相互缠绕在一起，严重影响反冲洗效果的现象。这些不足之处在一定程度上影响了彗星式纤维过滤材料设计思路的实现。

上述三类散堆式纤维滤料均为依靠过滤流体的压力作用，实现弹性纤维滤料的压缩，形成滤床较小的孔隙率和沿滤床深度“理想滤层”的孔隙分布；而反洗冲时，则为利用反洗液伸展、舒松滤层，并凭借气、水联合作用的冲击力、振荡力和摩擦力以达到良好的反冲洗效果。由于流体的压力作用有限，当对过滤精度有很高要求时，只有通过增加床层高度和增大滤料的装填密度来提高滤床的过滤效率。

为了解决纤维压缩上的问题，英国 Exeter 大学分离中心研制成功 HW 深层过滤器，系通过机械加压的方式实现对弹性纤维滤料的压缩，可达到对滤料较大程度的压缩；同时，借助机械的往复运动形成对滤料的振荡来增强反洗的效果，可省去反洗气<sup>[36]</sup>。

图 1.7 为此种纤维过滤器的结构。以富有弹性的羊毛或碳纤维束等充填于过滤器滤柱内构成过滤床层，纤维丝径为 1~10 $\mu\text{m}$ ，滤层厚为 20~60cm。采用活塞对滤层进行压缩，可根据需要在较大的范围内调整滤床的压缩程度，因而可在滤料装填量较小的情况下，达到较高的过滤精度；设备尺寸也因此可减小，部分弥补了水力压缩式纤维

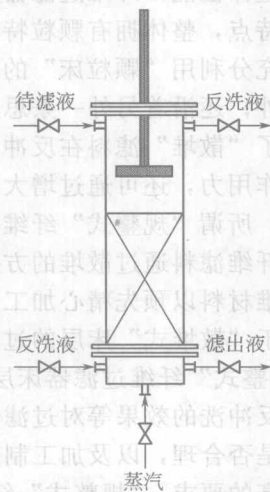


图 1.7 HW 深层过滤器



维过滤器的不足。

过滤时，活塞压缩过滤介质形成孔隙度较小的滤层，通过调节活塞对滤层的压缩程度，以控制过滤的精度。悬浮液由上部经由开有许多小孔的活塞和活塞压缩的纤维滤层后，进入过滤器，由过滤器底部排出；反冲洗时，在冲洗泵的带动下，冲洗液由过滤器底部进入，同时活塞上升，并在一定的高度振荡，借此造成滤料的搅动，增强滤料间的摩擦，以提高反冲洗效果。视实际过程需要，反洗后还可通入蒸汽进行灭菌。

研制者通过大量的现场试验证明，HW 深层过滤器可高效去除滤液中的悬浮颗粒，如  $3.5\mu\text{m}$  大小的悬浮颗粒的去除率达 99.99% 以上，可去除最小粒径为  $0.2\mu\text{m}$  的粒子，加之，碳纤维具有生物和化学方面的惰性以及特殊的强度，因此，HW 深层过滤器可广泛应用于医学和化工领域<sup>[37]</sup>。HW 深层过滤器的不足之处在于：其一，该型过滤器须借助活塞的上下运动，形成对纤维滤料的搅动来增强反洗效果，比之气、水搅动而处于充分流态化状态下的粒状滤料，HW 深层过滤器滤料间摩擦较小，反冲洗效果较差，因而 HW 深层过滤器反洗液耗量大（约占滤出液产量的 5%~10%）；其二，与散堆短纤维滤床一样，HW 深层过滤器反冲洗时，纤维也很容易流失，年损失量为 10%，远高于石英砂滤床；再者，HW 深层过滤器在压缩程度较大时，容易形成表面过滤，使截污量受到限制，且过滤阻力较大；另外，相对于普通的深层过滤器（池），HW 深层过滤器需配备较复杂的机械传动和自控设备，操作能耗大。HW 深层过滤器的这些不足，与前述分析所得出的散堆式纤维深层过滤器应保持粒状滤料滤床所具有的滤料群体上的优势的分析是一致的。作者认为，HW 深层过滤器较适合于对细小颗粒分离要求较高、滤液较稀以及分离量不大的精细分离的场合。

### 1.3.2 规整式纤维过滤器

为实现纤维深层过滤两个基本操作（过滤和反洗）的协调发展，提高纤维过滤器的整体性能，纤维过滤器除在“融合纤维滤料和颗粒滤料各自优点，以图局部保持纤维特点，整体拥有颗粒特性”的指导思想下，开发出了一系列的散堆式纤维过滤器，以充分利用“颗粒床”的群体优势，推动纤维深层过滤技术向着“散堆化”的方向发展外；还沿着另外一条思路——“规整化”的方向发展。“规整化”的纤维滤料，克服了“散堆”滤料在反冲洗时对流化效果的依赖，大幅提高了反洗液、气对纤维滤料的作用力，还可通过增大反冲洗液、气流量来提高反洗效果。

所谓“规整式”纤维过滤器，是对应着“散堆式”纤维滤床而言的，系将规格化的纤维滤料通过散堆的方式，堆积成无固定约束的单体滤料的集合体，其特点为：将纤维材料以预先精心加工好的组件的形式组装在过滤器（池）中而构成纤维滤床。相对于“散堆式”床层的过滤性能较多地依赖个体滤料随机堆积后形成的“滤料群体”，“规整式”纤维过滤器床层的均匀致密性、过滤时是否符合“理想滤层”的方式，以及反冲洗的效果等对过滤性能起主要作用的因素，完全依赖于纤维组件和过滤器的结构是否合理，以及加工制造是否精良，并且该类过滤器对反洗液、反洗气的预分布有较高的要求。“规整式”纤维过滤器通过不断完善过滤组件的形式和改进过滤器的结构来提高纤维滤床的过滤性能，构成了纤维深层过滤技术发展的另一个方向。目前出