

彗星式纤维滤料的性能及应用

（本节作者为清华大学环境科学与工程系 李振瑜 王夏）

彗星式纤维滤料是结合颗粒滤料与纤维滤料优点的一种纤维成形体滤料，是在国家高技术研究发展计划（863 计划）支持下研制成功的创新性过滤材料。

彗星式纤维滤料适用于去除水中悬浮物的过滤操作，属深层过滤技术领域。与通用滤布、纤维长丝束过滤材料以及无纺布过滤毡等纤维过滤材料的显著区别是，彗星式纤维滤料填充在过滤装置中形成滤床，即，滤床由在水中呈散落状、无固定约束的单体过滤材料的集合体而构成，因此，彗星式纤维滤料的性能与其所采用的过滤装置和应用条件密切相关。

本节从滤料、过滤装置以及使用条件三个方面论述彗星式纤维滤料的性能，并简介若干应用实例。

12.6.1 彗星式纤维滤料

彗星式纤维滤料是一种不对称构型的过滤材料，其一端为松散的纤维丝束，称“彗尾”；纤维丝束的另一端固定在比重较大的实体内，实体又称为“彗核”，滤料的整体呈彗星状，故名“彗星式纤维过滤材料”，简称“彗星式纤维滤料”（图 12-1）。

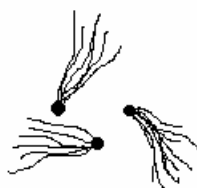


图 12-1 彗星式纤维滤料简图

彗星式纤维滤料的独特构型使其具有一系列突出的特点^[1]：①彗星式纤维滤料滤床的孔隙率较大，并且滤床孔隙率沿高度由下至上逐渐增大，因而具有较大的纳污量和过滤效率；②滤料的尺度小，使得滤床横断面上的孔隙均匀性较好；③过滤时，比重较大的彗核起到了对纤维丝束的压密作用；④滤料可以方便地在过滤装置内完成清洗，反冲洗时，由于彗核和彗尾纤维丝的比重差以及滤料的不对称形状使滤料产生旋转，彗尾纤维随反冲洗水流而散开并摆动，产生较强的甩曳力，彗核与纤维丝束之间的相互碰撞和摩擦加剧了纤维在水中所受到的机械作用力，使得附着在纤维表面的杂质颗粒容易脱落，从而可提高滤料的洗净度。

彗星式纤维滤料的规格具有较大的可调节性，通过改变滤料各组成部分的尺寸和选用不同的材料可制成具有不同性能的滤料^[2]，例如，适于高速过滤的高孔隙率滤料和适于高精度过滤的低孔隙率滤料。

典型滤料产品的规格为 $\phi 2.5 \times (0.4-0.7) \times (25-35)$ ，规格表示法中各项数字的含义是，彗核直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$ ，纤维丝束直径 $0.4-0.7 \text{ mm}$ ，彗尾长度 $25-35 \text{ mm}$ 。

12.6.2 过滤装置的性能参数及描述方法

滤料的性能是通过过滤装置的运行性能而体现的,采用彗星式纤维滤料的过滤装置包括压力式过滤器和滤池。

描述过滤装置性能的通用方法是采用技术指标进行描述,如,滤池结构参数、过滤速度和过滤周期等操作参数、滤料性质参数,以及滤床纳污量等综合性参数。

彗星式纤维滤料过滤对原水的水质和水量变化具有较强的适应性,过滤操作参数的选择范围大,因此,在采用常规技术指标法描述的基础上,辅以性能曲线描述彗星式纤维滤料过滤过程,可更直观地反映过滤装置的性能,从而为过滤装置的设计、运行操作和监控提供有效的参数选择依据。

12.6.2.1 过滤装置的性能参数

衡量过滤装置性能的技术参数涉及滤料性质、滤床状态、过滤过程和反冲洗操作等几个方面,见表 12-1。

表 12-1 过滤装置的主要性能指标和参数

类别		指标	参数及符号
滤料性质指标		材料种类与来源	如砂滤料、纤维成形体滤料
		尺寸	如粒度、纤维单丝直径等
		物化性质	水力分级特性、表面性质等
滤床状态指标		填充量	滤床高度(H)
		孔隙率及其分布	孔隙率,滤床可压缩性
		纳污能力	单位体积滤床纳污量(R)
运行操作指标	过滤过程	运行效率	滤速(V)
		过滤操作时间	过滤周期(T)
		动力效率	滤床水头损失(ΔH)
		处理能力	单位面积日产水量(Q_n)
		悬浮物去除能力	悬浮物去除率,过滤精度
	反冲洗操作	反冲洗规程	反冲洗时间,反冲洗的气/水强度
		水利用率	反冲洗耗水率(α)
		反冲洗程度	滤料剩余积泥率

过滤装置各项性能指标的重要性随着滤料性质、运行方式和处理要求而不同,单一的性能参数不能确切表示滤料或过滤装置的性能优劣。

12.6.2.2 过滤装置性能曲线的基本概念

1. 过滤参数与性能曲线

过滤装置的性能指标参数(如滤速、过滤周期、水头损失和纳污量等)可以通过试验和计算得出,但这些参数之间的关系是什么?当某项参数发生变化时,其它操作参数又如何随之发生变化的?这些问题可以通过过滤装置的性能曲线进行描述和分析。

彗星式纤维滤料过滤装置的性能曲线是将过滤过程的主要参数相互关联起来的一组曲线,可直观地反映出过滤装置的工况范围和操作点。通过性能曲线,设计者和使用者可以方便地掌握过滤装置的适用条件和范围,进而有针对性地进行设备选型和运行操作条件选择。

采用性能曲线描述彗星式纤维滤料过滤装置性能的方法是一个新的尝试，这一方法在以往的过滤理论中缺乏系统性论述。

由于过滤过程涉及因素众多，除过滤装置本身的性能指标外，还与原水的性质（如悬浮物组成和浓度、水温）以及预处理方法和效率等各种因素有关，目前的性能曲线主要针对过滤装置的运行参数，包括：过滤速度(下简称滤速， V ， m/h)、过滤周期(T ， h)、单位面积日产水量(Q_n ， $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)、滤床水头损失(ΔH ， $\text{m H}_2\text{O}$)、进水悬浮物浓度(C_i ， mg/L)和出水悬浮物浓度(C_e ， mg/L)、反冲洗耗水率(α ，%)、单位体积滤床纳污量(R ， kg/m^3)等^[3]，这些参数的相互关系分别阐述如下。

2. 单位面积日产水量(Q_n)与滤速 (V)的关系

理论上，若过滤装置以恒定滤速(V)无限期运行，则单位面积最大日产水量(Q_m ， $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)为：

$$Q_m = 24V \quad (12-1)$$

即，最大日产水量(Q_m)与滤速(V)呈线性关系。

若假设：①原水水质不变，即不考虑进出水浓度对过滤周期的影响；②反冲洗操作时间为 0.5 小时；③过滤周期为 T ；④每日反冲洗次数为 n ；⑤反冲洗耗水率为 α 。

过滤装置的每日反冲洗次数：

$$n = \frac{24}{T + 0.5} \quad (12-2)$$

每日反冲洗耗水量：

$$q = \alpha nVT \quad (12-3)$$

过滤装置单位面积日产水量：

$$Q_n = nVT - q$$

即，

$$Q_n = \frac{24(1 - \alpha)VT}{T + 0.5} \quad (12-4)$$

式(12-4)为过滤装置日产水量与滤速的关系式，简记为 Q_n - V 关系。

在实际过滤操作中，如果过滤周期不变，则该曲线为直线。对式(12-4)作图得不同滤速下过滤装置单位面积日产水量与过滤周期的关系，见图 12-2，图中， $\alpha = 5\%$ 。

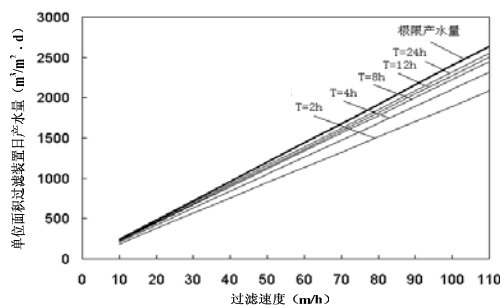


图 12-2 不同过滤周期下单位面积日产水量与滤速的关系

从单位面积日产水量与滤速的分析可得出如下结论：①针对每个滤速值，过滤装置的日产水量都有一个上限， T 越大， Q_n 越接近 Q_m ；②过滤周期相同的情况下，滤速每增加一倍，日产水量增加 100%，因此，滤速的大小决定了日产水量的大小，亦即决定了处理能力。

3. 过滤周期(T)与滤速(V)的关系

一般而言，滤速越大，水中悬浮颗粒在滤床中的迁移速度越快，相应地，滤床越容易穿透，过滤

周期也就越短。

理论分析表明^[4]，滤床纳污量(R)是决定过滤周期(T)和滤速(V)的关键因素，故而，可以通过计算滤床纳污量求得过滤周期(T)和滤速(V)的关系。

滤床纳污量的表达式：

$$R = \frac{VT(C_i - C_e)}{H} \times 10^{-3} \tag{12-5}$$

$$\text{或, } T = \frac{RH}{V(C_i - C_e)} \times 10^3 \tag{12-6}$$

对于彗星式纤维滤料，滤速不同，过滤压力不同，则滤床的压缩程度不同，滤床孔隙率亦不同，因此，滤床纳污量主要与滤速有关。

由式(12-6)，当进水和出水浓度变化不大时，T随R的增加而增加，随V的增加而减小。通过试验可测定滤床纳污量随滤速的变化关系，采用理论计算与试验数据拟合的方法可得出滤床纳污量与滤速的关系式R(V)，结合式(12-6)，可得出过滤周期与滤速的关系，简记为T-V关系。

4. 水头损失(ΔH)与过滤速度(V)的关系

由试验数据可以绘制出滤床水头损失随过滤速度的变化，简记为ΔH-V关系。

5. 性能曲线的实用意义

通常，过滤装置的使用者出于不同目的和应用条件，需要在初始投资、运行成本、占地面积和处理效率等诸多因素中权衡利弊。由于彗星式纤维滤料过滤装置可以实现在较宽的工况参数范围内运行，单纯性能指标不便于使用者做出决定，因此，使用者可参考性能曲线进行过滤装置的选型、过滤系统配置和运行操作控制。

以较小的占地面积实现较大的处理规模是水处理工程追求的目标之一，通过日产水量与滤速的关系(Q_n-V关系)，可以粗略估计出过滤装置应采用的滤速值。

由过滤周期与滤速的关系(T-V关系)，一方面，设计人员可以根据不同的处理任务选择合理的过滤周期和滤速；另一方面，操作人员在运行过程中，可以根据运行条件或运行要求的变化，选择相应的过滤运行工况。

滤床水头损失与过滤速度的关系(ΔH-V关系)的实用意义在于：第一，是水泵选型的依据之一；第二，为过滤系统的水力设计（如管路配置、过滤器配水系统）提供了基础数据。

12.6.3 彗星式纤维滤料过滤器的性能^[4]

12.6.3.1 过滤过程的试验结果

表 12-2 为彗星式纤维滤料过滤器的典型运行结果。

表 12-2 彗星式纤维滤料过滤器的典型试验结果

试验周期编号	1		2		3		4		5	
水温（℃）	17		13		9		10		8	
絮凝剂	PAC	PAM	PAC	PAM	PAC	PAM	PAC	PAM	PAC	PAM
絮凝剂投加量（mg/L）	6	0	6	0.02	4	0.01	8	0.016	8	0.02
滤速（m/h）	20		40		40		60		80	
过滤周期（h）	16.5		6.5		14.0		7.0		5.0	

单位面积日产水量 (m ³)	460	880	915	1347	1760
单位面积周期产水量 (m ³ /m ² ·d)	330	260	560	540	560
平均进水浊度 (NTU)	62	58	28	21	17
出水浊度 (NTU)	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
平均去除率 (%)	99.47	98.64	98.54	98.17	96.10
起始水头损失 (mH ₂ O)	—	0.45	—	0.96	1.47
终止水头损失 (mH ₂ O)	—	6.07	—	7.60	8.92
滤床纳污量 (kg/m ³ 滤料)	24.1	17.7	18.4	10.4	8.0

分别取过滤器进出水水样，用显微图像仪记录水中颗粒状况，采用划线计数法直接测量水中大于 2 μm 粒子的个数，得出试验条件下彗星式纤维滤料过滤器对大于 2 μm 的颗粒的去除率≥95%。

12.6.3.2 反冲洗操作的试验结果

反冲洗操作采用气-水联合反冲洗的方法。进行气—水联合反冲洗时，空气泡与滤料间的摩擦力、单个滤料间碰撞力和水的剪切力是促使杂质颗粒与滤料分离的主要因素，反冲洗操作的关键在于过滤器反冲洗时间与条件控制，以及反洗空气的压力、强度和均匀度。

经试验，确定彗星式纤维滤料过滤器的反冲洗规程为：先以反冲洗水将滤床托起，然后通入反冲洗空气，详见表 12-3。

表 12-3 彗星式纤维滤料过滤器反冲洗操作规程

反冲洗规程	操作时间 (min)	反冲洗空气强度 (L/m ² ·s)	反冲洗水强度 (L/m ² ·s)
水流托起滤床	1	—	30
空气反冲洗	6.5	40	—
气-水混和反冲洗	2	40	11
水流冲洗	2.5	—	30
总计	12	—	—

试验得出，反冲洗耗水率为 1.27%。

12.6.3.3 彗星式纤维滤料过滤器的性能参数

通过生产性试验考察，彗星式纤维滤料过滤器的性能参数如表 12-4。

表 12-4 彗星式纤维滤料过滤器的性能参数试验结果

类别		技术指标	
原水性质		水温, °C	8 - 17
		进水浊度, NTU	15 - 110
		出水浊度, NTU	≤1
运行操作指标	过滤过程	滤速, m/h	20 - 100
		过滤周期, h	5 - 16.5
		滤床水头损失, mH ₂ O	6.07 - 8.92

		单位面积日产水量, $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	465 - 2000
		悬浮物去除率, %	> 95
		滤床纳污量, kg/m^3	21.70 - 41.52
	反冲洗过程	反冲洗时间, min	12
		反冲洗空气强度, $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	40
		反冲洗水强度, $\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	11/30
		反冲洗耗水率, %	1 - 2
		滤料剩余积泥率, %	0.5 - 2

12.6.3.4 彗星式纤维滤料过滤器的性能曲线

1. 试验数据整理

日产水量与滤速的关系 (Q_n -V关系) 和滤床水头损失与过滤速度的关系 (ΔH -V关系) 可由表 12-2 中的试验数据绘出, 如图 12-3 和图 12-4。

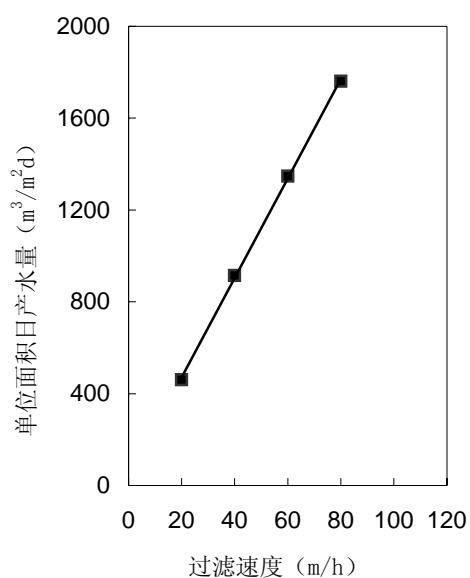


图 12-3 日产水量与滤速的关系

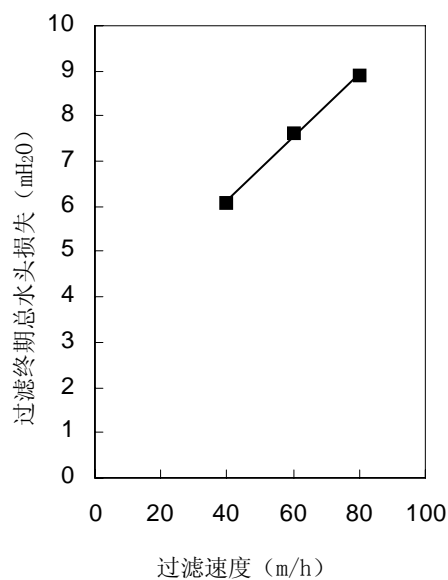


图 12-4 滤床水头损失与过滤速度的关系

过滤周期与滤速关系 (T-V 关系) 与过滤器进水浓度密切相关, 由表 12-2 中的数据仅能绘出试验条件下的 T-V 关系, 见图 12-5, 图中, 进水浊度分别为 17-28NTU 和 54-62NTU。

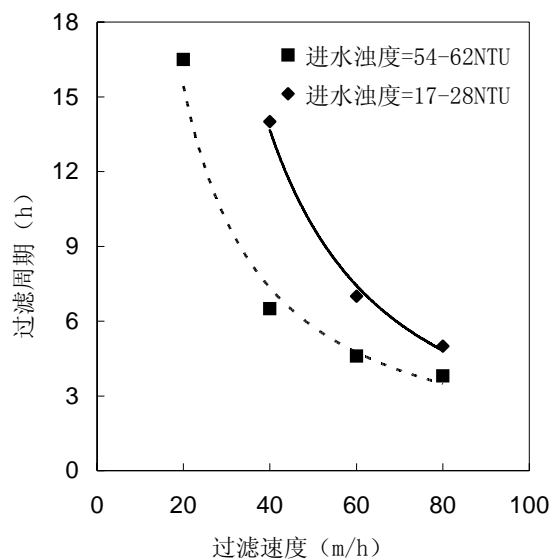


图 12-5 试验条件下过滤周期与滤速的关系

为绘制不同进水浊度下的过滤周期与滤速关系，对表 12-2 中的 R 与 V 值进行数值拟合，结果如式(12-7) 和图 12-6。

$$R = 35.84e^{-0.0192V} \quad (12-7)$$

将式(12-7)代入式(12-6)，得：

$$T = \frac{H \times 10^3}{V \Delta C} (35.84e^{-0.0192V}) \times 10^3 \quad (12-8)$$

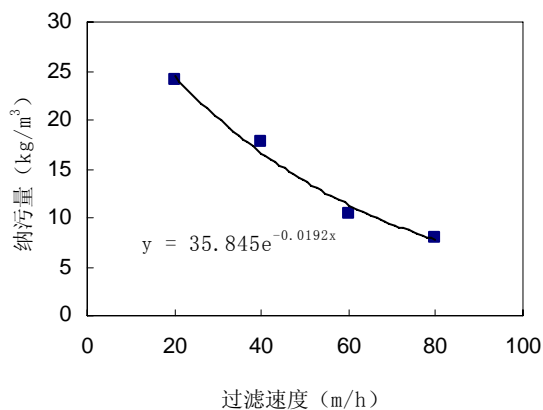


图 12-6 滤床纳污量与滤速的关系

依式(12-8)可计算在相同出水浓度下 ($C_e < 1\text{NTU}$)，不同进水浓度(C_i)和不同滤速(V)时的过滤周期 (T)，见图 12-7，该图显示，根据有限的试验数据，可以通过计算的方法得出一般条件下过滤器的滤速与过滤周期数值，从而大幅减少了试验工作量。

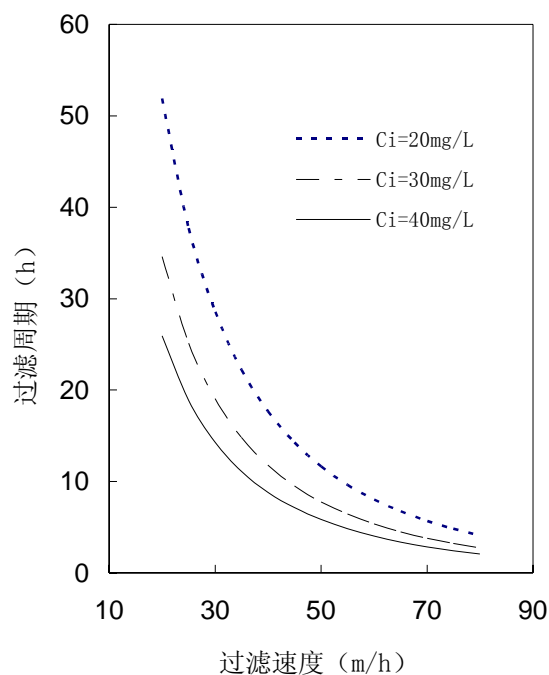


图 12-7 不同进水浓度的 T-V 曲线

2. 彗星式纤维滤料过滤器的性能曲线

针对一定的进水浓度范围，将上述的 Q_n -V关系、 ΔH -V关系和T-V关系绘制在同一张图上，便得到了过滤器性能曲线，图 12-8。

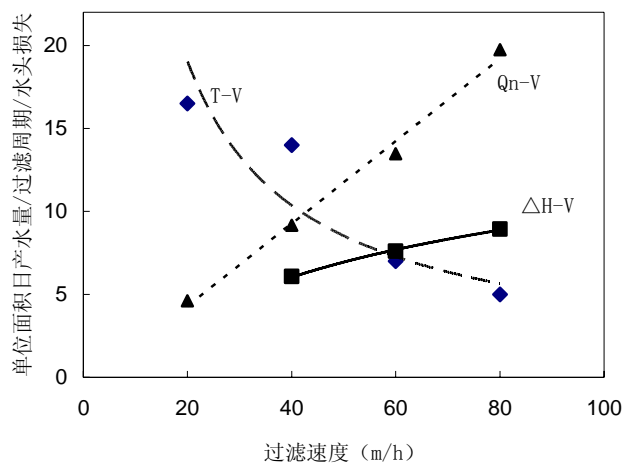


图 12-8 进水浊度为 54-62NTU 时过滤器的性能曲线

(注: $Q_n - \times 10^2$ m³/m²·d, T-h, ΔH -m)

彗星式纤维滤料过滤器的性能曲线给出了过滤过程的主要参数随滤速的变化情况，这一方法简明直观，对过滤器的设计和运行具有参考意义。

12.6.4 彗星式纤维滤料滤池的性能^[5]

12.6.4.1 性能试验

彗星式纤维滤料适用于多种构型的滤池，不同池型的滤池在应用上各具特点^[6]。

研究显示，彗星式纤维滤料滤池的性能在描述方法上与彗星式纤维滤料过滤器具有相似之处，表 12-5 为彗星式纤维滤料滤池性能参数的试验结果。

表 12-5 彗星式纤维滤料滤池性能参数的试验结果

类别		技术指标	
原水性质		水温，℃	8-17
		进水浊度，NTU	10-45
		出水浊度，NTU	≤1
运行操作指标	过滤过程	滤速，m/h	20 - 50
		过滤周期，h	8 - 37
		滤床水头损失，mH ₂ O	0.17 - 1.10
		单位面积日产水量，m ³ /m ² ·d	500 - 900
		悬浮物去除率，%	> 95
		滤床纳污量，kg/m ³	30.01 - 53.84
	反冲洗过程	反冲洗时间，min	15
		反冲洗空气强度，L/m ² ·s	30
		反冲洗水强度，L/m ² ·s	14
		反冲洗耗水率，%	1 - 2
		滤料剩余积泥率，%	0.78

12.6.4.2 彗星式纤维滤料滤池性能曲线

通过试验数据处理及分析，得出彗星式纤维滤料滤池的性能曲线如图 12-9，该图绘出了在出水浊度($C_e < 1\text{NTU}$)的条件下，进水浊度在 10-45NTU 的范围内，日产水量与滤速的关系 (Q_n -V 关系)、过滤周期与滤速关系 (T-V 关系)，以及滤床水头损失与过滤速度的关系 (ΔH -V 关系)。

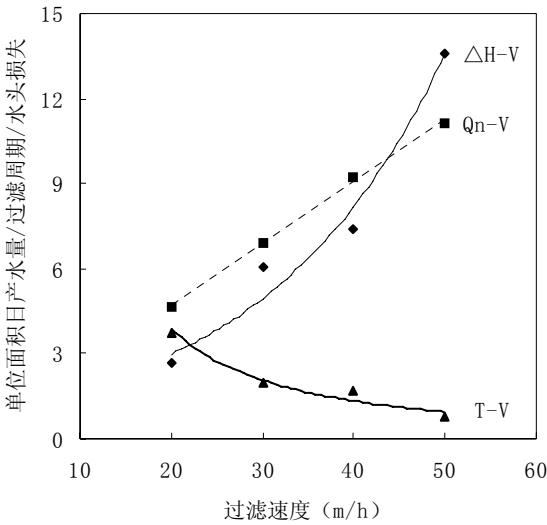


图 12-9 彗星式纤维滤料滤池的性能曲线

(注: $Q_n - \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, $T - \times 10\text{h}$, $\Delta H - \times 10^{-1}\text{m}$)

考虑到图 12-9 是在特定试验条件下的结果，而实际工程中有许多不确定因素，例如，原水的性

质及变化、原水预处理方法及效果、水处理工程的系统配置，以及运行管理等情况，因此，彗星式纤维滤料滤池的设计参数应根据待处理工程的实际情况综合权衡，参考取值如表 12-6，应用实例见 12.6.5。

表 12-6 彗星式纤维滤料滤池设计数据参考取值	
进水浊度(C _i , NTU)	≤30
过滤速度(V, m/h)	20 - 30
过滤周期(T, h)	8 - 20
单位面积日产水量(Q _n , m ³ /m ² · d)	400 - 700

12.6.4.3 彗星式纤维滤料滤池与过滤器的性能比较

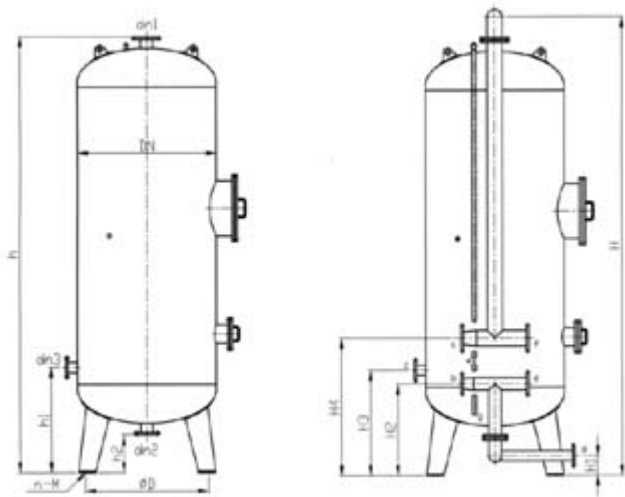
在使用相同滤料的条件下，彗星式纤维滤料过滤器性能曲线与彗星式纤维滤料滤池性能曲线的图形相似，过滤周期、日产水量及水头损失随过滤速度的变化趋势相同。

两者的性能差异主要体现在水头损失的大小，彗星式纤维滤料过滤器是压力式过滤器，滤速高，在过滤过程中，滤料所受的压力较大，滤床的孔隙率较小，因此，水头损失较大。彗星式纤维滤料滤池过滤压力较低，滤料之间的密实程度与过滤器相比较较小，滤床的孔隙率较大，因此，水头损失较小。

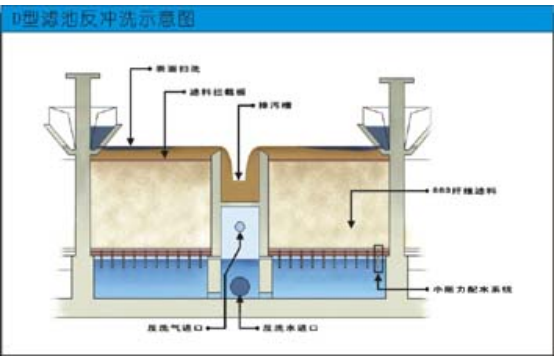
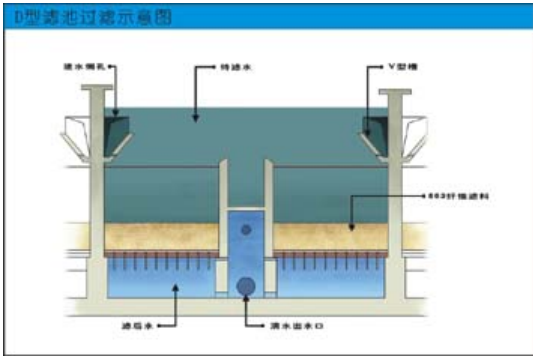
12.6.5 过滤装置的选型

12.6.5.1 DA863 高效过滤器

1、DA863 过滤器外形尺寸参数表



2、DA863 过滤器规格及性能表



2、D 型滤池主要工艺参数表

名 称	参 数
进 水 浊 度	一般情况下 $\leq 10 \text{ NTU}$
出 水 浊 度	一般情况下 $\leq 1 \text{ NTU}$
设计过滤滤速	$20 \sim 30 \text{ m/h}$ (视水质情况而异)
过 滤 周 期	一般情况下 $8 \sim 24 \text{ h}$
水 头 损 失	$0.6 \sim 2.3 \text{ m}$
滤 床 厚 度	$0.65 \sim 0.8 \text{ m}$ (散装高度)
反冲流水洗强度	$\sim 6 \text{ L/s} \cdot \text{m}^2$
反冲洗气洗强度	$\sim 23 \text{ L/s} \cdot \text{m}^2$
表面扫洗强度	$1.4 \sim 2.8 \text{ L/s} \cdot \text{m}^2$

3、D 型滤池配套设备参数表

过滤面积 m^2	反洗水泵				反洗风机			
	流量 m^3/h	扬程 m	功率 KW	数量 台	风量 m^3/min	升压 Kpa	功率 KW	数量 台
4	89	10	4	1	5.6 (5.92)	50 (40)	11 (7.5)	1
5.3	130	11	5.5	1	7.5 (7.86)	50 (40)	11 (11)	1
6	130	11	5.5	1	8.1 (8.45)	50 (40)	11 (11)	1
7.5	179	10	11	1	10.4	50	15	1
9	200	12.5	15	1	12.98	50	22	1
12	260	10.5	15	1	16.9	50	30	1
15	179	10	11	2	10.4	50	15	2
	358	10	18.5	1	20.5	50	30	1
18	200	12.5	15	2	12.98	50	22	2
	400	12.5	22	1	25.4	50	37	1
21	260	10.5	15	2	15.2	50	22	2
	520	10.5	22	1	29.1	50	37	1
24	260	10.5	15	2	16.9	50	30	2
	520	10.5	22	1	32	50	37	1
28	358	10	18.5	2	20.5	50	30	2
32	358	10	18.5	2	23.0	50	30	2
36	400	12.5	22	2	25.4	50	37	2

注：本表括号内的数据为钢板滤池的相关数据。

4、D 型滤池参考选型表

处理水量 (m³/d)	滤池规格 (m²)	滤池数量 (只)	滤速 (m/h)	处理水量 (m³/d)	滤池规格 (m²)	滤池数量 (只)	滤速 (m/h)
2000	4*	1	21.7	20000	9	4	23.1
2500	5.3*	1	20.5		21	2	20.7
3000	6*	1	21.7	25000	12	4	21.7
3500	7.5	1	20.3		24	2	22.6
4000	4*	2	21.7	30000	15	4	20.8
	7.5	1	23.2	35000	18	4	20.3
5000	5.3*	2	20.5	40000	12	6	23.1
	12	1	18.1		21	4	19.8
6000	6*	2	21.7	50000	18	6	19.3
	12	1	21.7		24	4	21.7
7000	7.5	2	20.3	60000	21	6	19.8
	15	1	20.3		28	4	22.3
8000	4*	4	20.8	70000	18	8	20.3
	9	2	19.3		24	6	20.3
10000	5.3*	4	19.7	80000	18	8	23.1
	12	2	18.1		28	6	19.8
12000	6*	4	20.8		36	4	23.1
	12	2	21.7	100000	18	12	19.9
15000	7.5	4	20.8		24	8	21.7
	15	2	21.7		36	6	19.9

注:

- 1、带“*”的规格表示滤池有钢板和混凝土两种型式，其他规格滤池均为混凝土型式；
- 2、因水质情况千变万化，故本样本所列参数仅供参考，最终按实际水质情况选用参数。

参 考 文 献

- [1] 李振瑜, 刘力群, 金志刚. 彗星式纤维过滤体. 中国实用新型, 98249298.7
- [2] 李振瑜. 一种由纤维束和丝束节构成的过滤材料. 中国发明专利, 00107758.9
- [3] 闫冰, 李振瑜, 王夏. 彗星式纤维滤料过滤器性能曲线. 给水排水, 2003, 5
- [4] 王夏. 彗星式纤维滤料过滤器的性能及性能曲线: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2002
- [5] 闫冰. 彗星式纤维滤料滤池的特性研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2003
- [6] 李锦梁. “彗星式纤维滤料”高速滤池工艺设计. 净水技术. 2004, 23(2): 45-47