

水的澄清器

[苏] E.Φ.库尔加耶夫
黄元鼎 钱达中 袁 果译

电 力 工 业 出 版 社

水的澄清器

[苏] E.Φ.库 尔 加 耶 夫
黄元鼎 钱达中 袁 果译

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

澄清器广泛用于水的澄清、除色、石灰处理、软化和镁剂除硅等工艺过程中，是工业、城市供水净化和发电厂水处理工艺中不可缺少的设备。本书详细地阐述了澄清器的工作原理，水在澄清内净化过程的规律性，澄清器的计算方法、设计和运行、结构型式，以及提高澄清器工作效率的途径等。

本书可供从事工业及城市供水专业的技术人员，以及火力发电厂和工业锅炉水处理专业的工程技术人员使用；此外，也可供大专院校有关专业师生参考。

Е.Ф.Кургаев
Осветители Воды
Стройиздат, Москва, 1977

水的澄清器

[苏]Е.Ф.库尔加耶夫
黄元鼎 钱达中 袁果译

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7印张 156千字

1981年8月第一版 1981年8月北京第一次印刷

印数00001—5200册 定价0.75元

书号 15036·4236

科技新书目：10-198

译 者 的 话

随着工业生产和生活上对水质要求的日益提高，在很多情况下，需要对水进行严格的净化处理。澄清器是实现这种净化处理的重要设备之一。目前，国内外水处理装置中，广泛地采用澄清器进行水的澄清、除色、石灰处理和软化等工艺。

作者根据大量科研工作的实践，在书中详细阐述了澄清器的工作原理，水在澄清器内的净化过程，改进和完善澄清器结构的方法，以及提高澄清器工作效率的措施等问题。本书对提高我国澄清器的运行效果，改进设备的结构，开展澄清理论的研究等，都具有实际意义。因此，我们将它译出来，供从事本专业工作的技术人员参考。

本书第一章由钱达中翻译，第二、三章由袁果翻译，第四、五、六章由黄元鼎翻译。全书由黄元鼎校核。在译校过程中，承蒙宋珊卿同志的热情帮助，在此表示感谢。由于我们水平所限，书中难免有不妥和错误之处，敬希读者指正。

译 者

1981年4月

目 录

译者的话

第一章 悬浮接触介质的特性和水在澄清器内的净化过程

化过程	1
1. 非均相体系的粘度和密度	1
2. 悬浮物的浓差扩散	14
3. 接触介质悬浮物的物理特性和参数	22
4. 泥渣的浓缩	41
5. 澄清器内的水处理	49

第二章 澄清器工作的水力学规律性

1. 固体颗粒在液体中的非自由沉降	72
2. 澄清器内水流的分配和清水的排出	94
3. 过剩悬浮物从澄清器接触介质中的排除	98
4. 澄清器的模拟	103

第三章 澄清器的结构

1. 苏联澄清器的结构	121
2. 国外澄清器的结构	142

第四章 澄清器的计算方法和最佳计算参数

1. 计算澄清器的原始工艺参数	148
2. 澄清器的最佳计算参数	154
3. 澄清器的计算方法和设计	167

第五章 提高澄清器工作效率的方法

1. 泥渣再循环	176
2. 凝聚物的除气	180
3. 氧化剂和吸附剂的使用	183

4.澄清器运行的自动化	187
第六章 澄清器的运行.....	196
1.总论	196
2.水的澄清和除色	199
3.水的石灰处理和软化	212
参考文献.....	218

第一章 悬浮接触介质的特性和 水在澄清器内的净化过程

1. 非均相体系的粘度和密度

澄清器中的接触介质是由水处理过程产生的固体颗粒组成的。这些颗粒在上升水流的动压力作用下处于悬浮状态，并与分离出颗粒的水一起组成非均相体系。固体颗粒总的体积浓度（也就是固体颗粒在非均相体系中所占的体积部分）为 $0.04 \sim 0.25$ 。颗粒分布在澄清器底部至其高度的 $2/3 \sim 4/5$ 区域内，在这里形成一动态平衡层。澄清的水于此层上部流动。

当借上升水流而悬浮的固体颗粒的成分处于稳定时，固体颗粒层高度随水流速度的加快而增加，层的上分界面随水流速度的减小而下降。同时，在层内，固相体积浓度的变化与层高成反比。降低温度和增加液相粘度（流速保持不变）会引起固体颗粒悬浮层的膨胀（高度上升）及其体积浓度的降低。层的上分界面处于水平状态，即使在模拟装置或设备本体偏离垂线时，仍保持这种状态。所以，此层称为假液化层。

层的固体颗粒始终处于无规则运动状态（循环），并伴随有局部浓缩和稀释（浓度波动）以及层表面的小部分地区有个别的波状或间歇升高的现象，因此又称其为沸腾层。

在以后的叙述中，将使用水净化文献中所用的术语，即悬浮接触介质或固体颗粒悬浮层。有时使用“悬浮过滤器”

这个术语是不完全正确的，因为过滤的概念指过滤介质（粒状的、网状的、纤维状的、多孔的）稳定地分布于静止的多孔滤层内，并且滤层的孔隙度与水中被除去杂质的大小是可比拟的。但在悬浮接触介质中，颗粒的分布不断地在变化，它们之间的距离可达几个毫米，而从水中除去的杂质可能具有胶体或离子的分散度。在这些条件下，杂质的去除是在它们与非均相固体颗粒接触下进行的（由于吸附和粘附的结果）。接触的机率在很大程度上取决于该体系固体成分的循环。

非均相体系的特性，甚至在其固相体积浓度相当小（5~10%）时，也与液相有显著的不同。例如，含有固体颗粒（粘土或砂）的水在管道中流动时，紊流程度下降而临界雷诺数增大。在此情况下，流动处于层流或过渡状态。在非均相体系中，固体颗粒的沉降速度与单独颗粒在液体自由体积中的下降速度相比是降低了。这些现象，是由于非均相体系比它的液体成分有较大的粘度所引起的。在液体-固体颗粒体系中所发生的这种状况，已用各种不同方法进行的许多试验所证实。试验是在水不流动的容器内或内部有靠上升水流而悬浮的固体颗粒的装置中进行的[45]，也就是在类似于澄清器内的接触介质条件下进行的。

爱因斯坦提出了非均相混合物粘度的第一个理论计算公式：

$$\mu_c = \mu_0(1 + 2.5C_0),$$

式中 μ_c 和 μ_0 ——分别为非均相体系和其液体组份的动力粘度； C_0 ——体系中固相的体积浓度。

在推导公式时曾提出以下假设：颗粒为球形；相邻固体颗粒间的平均距离与固体颗粒的大小相比要大得多；固体颗

粒在液体中的动能很小。

爱因斯坦公式对悬浮物^①（悬浮颗粒）的体积浓度小于0.04时是适用的。许多作者又提出了一系列公式[8]。但是，这些公式也只是在固相体积浓度很窄的范围内，才能与试验数据较好地吻合，这是因为到现在为止还没有彻底研究出和揭示其现象的物理本质。

为了确定非均相体系粘度现象的机理和性质，苏联交通部中央科学研究所对液体在固体颗粒悬浮层中的动态[37~40]，即对在该层中流动水流的特性、组成和参数作了研究。在研究过程中，采用了灵敏度高和惯性低的热电传送器，其读数由示波器记录下来。按照固体颗粒的几何尺寸、密度和水力粗度等悬浮层参数，模拟类似于澄清器工作的条件。在悬浮层高度和截面的某些点上，记录水的流速，其精确度为几十分之一毫米/秒。

研究指出，当雷诺数相应为水在自由体积中呈层流工况时的数值情况下，在悬浮层内和层的上部，水流具有显著的速度脉动，其值和液流的各局部组成速度一样，并不沿水流截面而改变（靠器壁区除外）。

随着离层上分界面的距离增大，脉动减弱并消失，水流速度分布截面也变成与无悬浮物的设备中的水流动方式一样。例如，对小的雷诺数来说，速度分布截面具有抛物线形，水流平均速度为其最大值的二分之一。

图 I-1所示为固体颗粒悬浮层上的水流速度波形图，而图 I-2所示为悬浮层中的水流速度波形图。

① 本书在以后的叙述中将采用“悬浮物”这一术语。

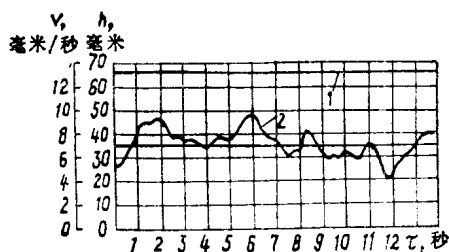


图 I-1 固体颗粒悬浮层上的水流速度波形图

1—在400毫米高度处； 2—在8毫米高度处； h —波形图的线性纵坐标

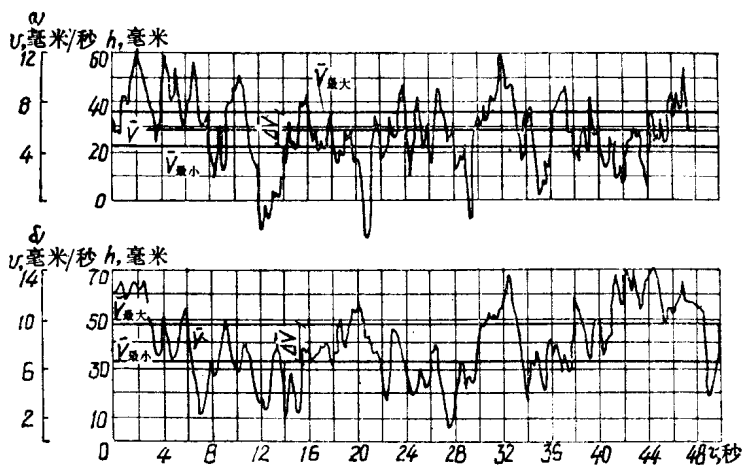


图 I-2 直径为0.37毫米固体颗粒悬浮层中的水流速度波形图

$$a-C_0 = 0.29, \quad \bar{v}-C_0 = 0.21$$

试验结果证实了如下几点：

1. 随着固体颗粒体积浓度 C_0 的增大，平均速度脉动 $\Delta \bar{v}$

与水流平均速度 $\bar{v}$ 的比值，按一定规律增长；

2. 在液相温度和粘度变化情况下， $\Delta\bar{v}/\bar{v}$ 这一比值仍保持其与 C_0 的关系；

3. 悬浮物颗粒的密度和直径不影响速度脉动的相对值 $\Delta\bar{v}/\bar{v}$ ；

4. 当悬浮物的运动方向与液流方向一致，但速度不一致时，固体颗粒的无规则运动（循环）急剧减弱甚至消失。但是，非均相体系的速度脉动始终存在，虽然它们的相对值小于悬浮层动态平衡时的值。

分析上述试验研究的结果，可以得出如下的非均相混合物粘度现象的物理本质。当液体绕固体颗粒流动和液流各局部组成的通流截面频繁而有显著变化时，在非均相混合物中形成速度脉动。水流具有沿整个混合物截面平均分布的特殊的局部紊流性，而紊流脉动能引起液体宏观质体（克分子）间动量的交换。这种交换比分子间的交换更为剧烈。分子间的交换是形成液体一般性粘度的原因。由此可见，非均相混合物具有较大的粘度，这种粘度按照上述动量交换的特点称为克分子粘度。

在原则上，这一现象与自由扩展的紊流流体的粘度相类似，这种粘度称为表观[47, 45]、当量或紊流粘度。布辛涅斯克首先提出了这一粘度的概念，此后，布朗脱尔和捷依洛尔发展了这一概念。同样，可以把紊流粘度的物理本质看作是在速度脉动条件下，液体宏观质体间动量交换的结果。

但是，自由紊流的粘度和非均相混合物的粘度有本质上的差别。

自由紊流的表观运动粘度，按布朗脱尔提出的概念[75]为：

$$\nu_T = l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|$$

或按不太严格的公式:

$$\nu_T = \alpha_1 b (u_{\text{最大}} - u_{\text{最小}}),$$

式中 l 和 b ——分别为与水流成横向运动的部分液体体积同主水流混合的路程长度和宽度^①; $\bar{u}$ ——水流组成速度的平均值; y ——水流组成速度的坐标轴; $u_{\text{最大}}$ 和 $u_{\text{最小}}$ ——速度 u 的最大值和最小值; α_1 ——经验常数。

公式中的 l 和 b 值, 取决于水流的水力学参数。在非均相混合物中, 混合的路程长度显然等于固体颗粒间距离的一半, 即为其体积浓度的函数。这就是自由紊流粘度和非均相混合物粘度之间的第一个差别, 第二个差别取决于形成紊流的不同条件及其在不同情况下的特性。

从上列公式可知, ν_T 不取决于液体的分子粘度。这对呈扩展紊流的自由水流的所有计算值来说是有代表性的。固体颗粒妨碍非均相混合物中扩展紊流的形成(在净水构筑物实际可能的水力学参数条件下), 并使它限于水流的局部组成。此组成具有大的湿润周边和小的水力半径, 平均而言, 在结构和水力工况方面彼此相似。在固体颗粒的伸展表面附近, 分子粘度使局部的紊流扰动加剧, 从而直接影响非均相混合物中粘度的增大。事实上, 正如试验所表明, 此种混合物的粘度与分子粘度成正比, 并取决于液相的温度。这就

① 液体体积的这种运动是由于水流的紊流所致, 而其运动的路程长度类似于分子粘度现象中分子的自由行程。

是自由扩展的紊流粘度和非均相混合物粘度之间第三个十分重要的差别。

在分析了现象的物理本质的基础上，可认为，非均相混合物的粘度是与液体的分子粘度和水流的动量相对变化成正比的。这种相对变化与在固体颗粒间运动的局部紊流有关。

因此，

$$\mu_m = \mu_0 \left(\frac{K_{\pi} + \Delta K_{\pi}}{K_{\pi}} \right) = \mu_0 \left(1 + \frac{\Delta K_{\pi}}{K_{\pi}} \right), \quad (I-1)$$

式中 K_{π} ——平均流速为 $\bar{v}$ 的水流动量； ΔK_{π} ——由于速度脉动和水流截面中流速分配不均匀所引起的动量增量； $K_{\pi} = W_m \bar{v}$ ，此式中的 W_m 为水流组成的质量。

在固体颗粒悬浮层中，液体单位质量的动量变化与具有平均速度的动量成比例，等于：

$$\frac{\Delta K_{\pi}}{K_{\pi}} = \alpha_{\kappa} \frac{\bar{v}_{\text{最大}} - \bar{v}_{\text{最小}}}{\bar{v}}, \quad (I-2)$$

式中 $\bar{v}_{\text{最大}}$ 和 $\bar{v}_{\text{最小}}$ ——在固体颗粒悬浮层中，水流动的平均最大和平均最小速度； α_{κ} ——动量系数，它取决于水流截面上速度分配的不均匀性。

将 (I-2) 式代入公式 (I-1)，得：

$$\mu_m = \mu_0 \left(1 + \alpha_{\kappa} \frac{\bar{v}_{\text{最大}} - \bar{v}_{\text{最小}}}{\bar{v}} \right) = \mu_0 \left(1 + \alpha_{\kappa} \frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} \right), \quad (I-3)$$

式中 $\Delta \bar{v}$ ——速度脉动的平均值，等于 $\bar{v}_{\text{最大}} - \bar{v}_{\text{最小}}$ 。

公式 (I-2) 中所列的值可用下式表示：

$$\bar{v}_{\text{最大}} = \frac{v_0}{\omega_{\text{最小}}}; \quad (I-4)$$

$$\bar{\eta}_{\text{最小}} = \frac{v_0}{\bar{\omega}_{\text{最大}}}, \quad (\text{I } 5)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{\eta}_{\text{最大}} + \bar{\eta}_{\text{最小}}}{2}, \quad (\text{I } 6)$$

式中 v_0 ——不含固体颗粒的水流截面上的水流速度； $\bar{\omega}_{\text{最小}}$ 和 $\bar{\omega}_{\text{最大}}$ ——非均相混合物中（即固体颗粒悬浮层或静止层中），水通流截面的平均最小和最大面积，与图I-2中的 $\bar{\omega}_{\text{最大}}$ 和 $\bar{\omega}_{\text{最小}}$ 值相对应。

平均最小面积可由下式求得：

$$\bar{\omega}_{\text{最小}} = (1 - C_o)^2. \quad (\text{I } 7)$$

固体颗粒所有空隙中的水流通流截面的平均面积，通常可认为等于：

$$\bar{\omega} = 1 - C_o.$$

设

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{\omega}_{\text{最大}} + \bar{\omega}_{\text{最小}}}{2},$$

则得

$$\bar{\omega}_{\text{最大}} = 2\bar{\omega} - \bar{\omega}_{\text{最小}} = 1 - C_o^2. \quad (\text{I } 8)$$

因此，

$$\bar{\eta}_{\text{最大}} = \frac{v_0}{\bar{\omega}_{\text{最小}}} = \frac{v_0}{(1 - C_o)^2}; \quad (\text{I } 9)$$

$$\bar{\eta}_{\text{最小}} = \frac{v_0}{\bar{\omega}_{\text{最大}}} = \frac{v_0}{1 - C_o^2}. \quad (\text{I } 10)$$

当水流具有脉动性质时， $\bar{\eta}_{\text{最大}}$ 和 $\bar{\eta}_{\text{最小}}$ 值可由下式表示：

$$\bar{\eta}_{\text{最大}} = \frac{1}{T} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + T} (\bar{\eta} + \Delta v_B) d\tau;$$

$$\bar{v}_{\text{最小}} = \frac{1}{T} \int_{\tau_0}^{\tau_0 + T} (\bar{v} + \Delta v_H) d\tau.$$

式中 Δv_B 和 Δv_H ——速度 v 对平均值 $\bar{v}$ 的正偏差和负偏差；
 $\bar{v}_{\text{最大}}$ 和 $\bar{v}_{\text{最小}}$ ——速度，其值等于波形图 $v=f(\tau)$ 的相应面积除以试验的延续时间 T 。

对大量波形图的面积进行测定表明，试验数据与按公式 (I-9) 和 (I-10) 计算的结果之间具有良好的一致性。

水流平均计算速度，可由下式求得：

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{\bar{v}_{\text{最大}} + \bar{v}_{\text{最小}}}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{v_0}{(1-C_0)^2} + \frac{v_0}{1-C_0^2} \right] \\ &= \frac{v_0}{(1-C_0)^2(1+C_0)}, \end{aligned} \quad (\text{I } 11)$$

$\bar{v}$ 值与静止的或悬浮的颗粒层空隙中的水流平均计算速度 $\bar{v}_p$ 的通式略有差别：

$$\bar{v}_p = \frac{v_0}{1-C_0} = \frac{v_0}{\omega}.$$

不能同时满足以下两个条件：第一，平均面积等于最大和最小面积之和的一半；第二，平均速度等于最大和最小速度之和的一半^①。我们选择第二个条件——流体动力学条件，而不选择第一个——几何条件。

利用公式 (I-9) ~ (I-11) 的 $\bar{v}_{\text{最大}}$ 、 $\bar{v}_{\text{最小}}$ 和 $\bar{v}$ ，可求得：

$$\frac{\Delta \bar{v}}{\bar{v}} = \frac{\bar{v}_{\text{最大}} - \bar{v}_{\text{最小}}}{\bar{v}} = 2C_0. \quad (\text{I } 12)$$

① 只指在 $\bar{\omega}_{\text{最大}} = \bar{\omega}_{\text{最小}} = \bar{\omega}$ 的情况下。

系数 α_k 值表示水流截面上速度分配不均匀性对液体动量变化的影响，它可依据下述条件计算。与同质液体的自由流比较，固体颗粒悬浮层或静止层中的液体流动有其特点，它决定了在水流截面和流程上，速度有较大的不均匀性，也就是通流截面和水流方向有频繁显著地变化，以及由于固体颗粒的循环而引起水流的附加挤压。所以，固体颗粒总的空隙中液体运动的 α_k 值，将大于上述自由同质水流的 α_k 值。自由同质水流的 α_k 值，可按下式表示：

$$\alpha_k = \frac{\int \omega(\bar{v} + \Delta\bar{v})^2 d\omega}{\bar{\omega} \bar{v}} \quad (I-13)$$

对于我们讨论的这种情况，在水流截面和流程内的速度分配规律性方面没有解析公式，因而不能对 α_k 值进行严格和精确地计算。但是，运用公式(I-13)的原则和前面列述过的想法，以及根据一些试验结果， α_k 可用下列公式表示：

$$\alpha_k = \left(\frac{\bar{v}_{\text{最大}}}{\bar{v}_{\text{最小}}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{\omega}_{\text{最大}}}{\bar{\omega}_{\text{最小}}} \right)^2 = \left(\frac{1+C_o}{1-C_o} \right)^2 \quad (I-14)$$

由公式(I-3)、(I-12)和(I-14)，得克分子粘度或非均相体系粘度的公式

$$\mu_M = \mu_o \left[1 + 2C_o \left(\frac{1+C_o}{1-C_o} \right)^2 \right] \quad (I-15)$$

克分子粘度现象既与固体颗粒悬浮层有关，也与固体颗粒静止层有关，并在程度上是相等的。因为在这两种情况下，液体宏观质体间动量的交换都是由液流基本组成的速度值和液流方向连续、显著地变化引起的。这可从静止层和悬浮层中液体流动规律的相似性来证实。悬浮层可看作是静止过滤层和单独颗粒自由沉降的中间状态。在静止层中，水通流截面的附加挤压是由固体颗粒的水化膜和在颗粒相互毗连的地

方形成死区所致。根据列别松院士的理论计算和试验，甚至对球形颗粒，死区的容积可能达到层空隙率的37%。在固体颗粒悬浮层和静止层的水流动公式中采用了克分子粘度值，即可取消经验系数，获得与试验数据相符的规律性，并能从理论上确定水流动工况的界限[37~44]。

对悬浮层中的运动颗粒和静止颗粒所作的对比试验表明，这些运动颗粒不直接参加动量的交换。所以，无论是动力克分子粘度，还是运动克分子粘度直接与液相有关，并且，不要求考虑整个非均相体系的密度。勃拉乌顿和特拉维斯基从含有相同密度或比液相密度大的固体颗粒的混合物所做的试验中[36,43]，得出了类似的结论。因此，

$$\frac{\mu_M}{\mu_0} = \frac{\nu_M}{\nu_0},$$

式中 ν_M 和 ν_0 ——分别为非均相体系和液相的运动粘度。

按公式(I-15)计算所得的结果列于表I-1中。此表与有分子粘度值的一般表一样，可用于相应的计算。

表 I-1

指标	悬 浮 层										静 止 层			
C_0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
μ_M/μ_0	1.125	1.3	1.55	1.9	2.39	3.07	4.02	5.36	7.25	10	14.05	20.2	29.9	46.1

图I-3为公式(I-15)的曲线图，它指出克分子粘度随固体颗粒体积浓度的增大而变化的特性。同时，也列出根据其他作者的公式计算所得的数据[8]。这些公式得出与 C_0 值在狭小范围内的试验数据相符的结果，这是公式(I-15)的局部情况。