

HAC净水工艺在中小型水厂中的应用实践

陈辉明

福建省水务发展集团福鼎水务有限公司

摘要：本文分析了乡镇中小型水厂工艺运行中存在的主要问题，介绍了适用于村镇供水的HAC净水工艺和技术，系统地介绍了HAC工艺在加药、反应、澄清和过滤等净水工序的做法和参数选择，特别介绍了旋流澄清池和U型滤池的构造，指出了革新后的工艺具有可靠性强，占地面积小（约为传统工艺的2/3），投资省（约为传统工艺的80%），营运维护费用低，出水水质效果好等优点，已经在国内40多家中小型自来水厂建设过程中使用。本文中介绍的HAC工艺可供城镇中小型水厂设计和升级改造中借鉴使用。

关键词：水力自控；网格絮凝；旋流澄清池；U型滤池；均质滤料

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.15.067

一、前言

在城市供水水厂管网延伸难以企及的乡镇，其自建中小型水厂一般位于偏远地区，原水水源受到一定的限制，主要存在以下三种情况：原水低温低浊水、雨季雨水冲刷导致原水高浊以及存在微污染。以福建地区为例，很多乡镇采用水库水为水源，在冬季时水库原水浊度较低，属于低浊水，加药絮凝后矾花细、轻，难以沉降而影响沉淀池的效率，导致水厂出水浊度偏高；在雨季雨水冲刷导致原水浊度较高，如果加药系统不及时调整最佳加药量，或者如果排泥系统不能及时排泥（一般采用时间控制排泥，比如24小时排泥），将导致净水系统的崩溃，只能降低进水量。在夏季的高温时期，原水中藻类含量可能升高而影响水厂絮凝沉淀的效果，带有藻类的矾花难以在沉淀池中沉降，至滤池后导致滤池堵塞，引起滤池频繁反冲洗而影响水厂的正常营运。因此，乡镇水厂源水水质变化大，同时缺乏系统培训的管理人员导致中小型水厂的运营实际上比城镇水厂面临更大的挑战，这也是城镇水厂的水处理工艺不能照搬至乡镇水厂的重要原因之一。

随着饮用水标准日趋严格，常规的水处理工艺已难以满足人们对饮用水水质的要求。将于2023年4月1日起正式实施的新《生活饮用水卫生标准》（GB5749-2022），不但增加了饮用水检测指标数量，而且对水质各项指标有了更加严格的控制。与以往不同的是，新的

标准中，除个别指标外，城乡水厂的出水水质指标均趋于统一，这也与国家的乡村振兴战略要求是一致的，因此，大量采用传统工艺的乡镇水厂的技术运营面临巨大的挑战。

在水处理过程中，沉淀的方式一般可以分为自由沉降、絮凝沉降、成层沉降以及压缩沉降等四种方式，颗粒物沉降方式和沉降速度取决于颗粒物的浓度、形状、大小、孔隙率以及密度等特性。与普通沉淀池中絮体通过重力作用自由沉降的原理不同，澄清池是集药剂混合、絮凝反应和絮体分离三个过程于一体的水处理构筑物，澄清工艺中泥渣可在上升水流中因重力作用而形成高浓度的处于动态平衡状态的泥渣絮体层，絮体性质（尺寸和密度）在絮体层形成过程中发生变化^[1]，絮体层中高浓度的絮体具有疏松的结构和很大的表面积，混凝过程在絮体的团体表面上进行（接触凝聚）要比在水中（自由凝聚）强的多，这种絮体层接触絮凝技术可以显著提高沉降池中颗粒物的去除率，并且可有效提高对原水CODMn和藻类的去除率。可有效应对低浊原水絮凝不佳的难题^[2]。

根据絮体层澄清原理，美国开发了机械搅拌澄清池，欧洲和苏联地区推广了悬浮澄清池，法国研究开发了脉冲澄清池等澄清技术和工艺。随着技术的发展，采用的泥渣循环型的水力循环澄清池和脉冲澄清池在运行中发现存在絮凝时间短，对水质、水量及水温比较敏感，容易积泥，运行效果不稳定，且清水区上升流速一般低于1.0mm/s，处理效率比较低等缺点，因而传统的基于絮体层澄清技术的水力循环澄清池和脉冲澄清池的应用渐趋减少。法国得利满公司依据强化混凝理论、斜管沉淀技术，特别是絮体层澄清技术而创新开发了DENSEG高密度澄清池技术^[3]，其核心即采用了泥渣回流的絮体层澄清技术，大幅提高了系统的稳定性和澄清池的表面负荷，从而节省了投资。近年来，我国的研究人员主要通过微涡流理论以及浅池理论等对澄清池进行了研究改造，其中最主要的研究集中在利用微涡流理论强化了混凝，利用浅池理论在澄清池清水区增加了斜管（斜板）沉淀以提高澄清池的出水水质与处理负荷^[4、5、6]，但目前对絮体层澄清技术工艺应用的研究报道较少。

本文主要介绍了复旦大学等单位自主研发的以澄清池为核心的水力自控给水处理新工艺(The Hydraulic Auto-control Process, 简称为HAC), 该工艺利用系统工程的理论对水厂的工艺和技术做了系统革新, 具有占地面积小, 运行管理方便, 对原水水质适应性好等特点, 解决了现有中小型水厂中反应时间短, 运行不稳定, 不适应原水水质和流量变化等问题, 目前在国内

有40多家水厂中应用。在《村镇供水工程技术规范》SL310-2019中作为成熟工艺和技术被引入规范中, 本文在此全面介绍HAC工艺的技术特点。

二、HAC工艺简介

HAC净水处理工艺流程如下图1所示, 地表水经过取水泵站取水添加混凝剂后, 泵送至旋流澄清池, 出水经过U型滤池过滤后, 经过添加消毒剂消毒, 再进入清水池

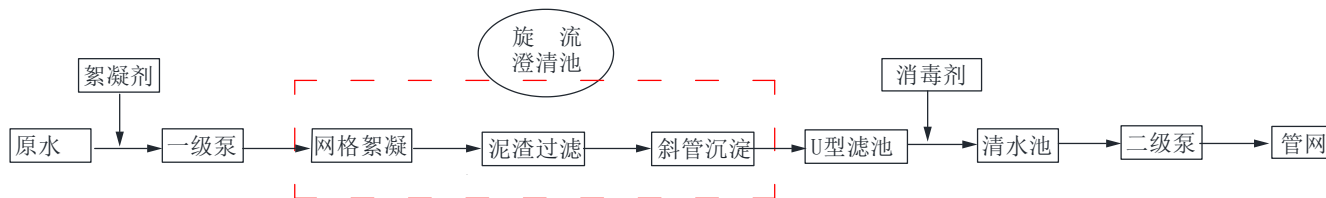


图1 HAC净水处理工艺流程图

池和管网。

(一) 自动加药及混合

水厂的加药即投加混凝剂, 一直是设计及运转比较关注的部分, 对水厂管理的水质和经济效益起着非常重要的作用。当量的投药是处理好水质的关键。药剂投加量与原水水量、浊度相关, 合适的药剂投加量实现了正负胶体电中和, 滤前水才可能清澈。

一般地根据处理原水对象的不同, 药剂的选择和添加量需要经过实验确定, 这样药剂的投加量做到适宜、经济。絮凝剂的投加控制一般是基于在线浊度仪和原水流量计, 结合自动化及相关程序实行在线加药量的控制。对于进水水量而言, 絮凝剂的加药量是线性变化的, 水量越大加药量越多, 而对于浊度而言, 絮凝剂加药量并不是线性变化, 而是根据原水水质做出的一个加药量曲线。乡镇水厂中, 主要存在的问题是在线浊度计需要定期维护, 否则浊度会发生漂移, 导致加药量也发生变化。因此, 该在线浊度计的维护是系统能正常运行的关键点之一。该工艺中加药量与浊度的关系则分为几个区间函数, 根据浊度所在区间的不同, 选择不同的运行曲线, 从而保证加药计量泵严格按照所需要的调节介质质量精确投加絮凝药液。智能型加药系统可实现全自动控制, 无须人为操作, 并可与上位机实时通讯。

在采用一级泵的水厂, 投药点离厂区距离短的情况下一般采用泵前加药, 通过水泵自身的水力条件实现快速混合。根据混凝新理论计算并经实践表明, 在混合设备提供能量足够的条件下, 混合过程宜在1秒钟内完成, 混合时间过长, 将会造成絮凝体不可逆的破坏, 会影响混合效果。

(二) 反应系统

目前, 常规的水处理工艺中, 原水与药剂的反应系统没有经过特别的强化, 一般地采用隔板反应, 机械搅拌反应, 穿孔旋流反应等以提高颗粒的接触碰撞机会, 从絮凝的动力学过程而言, 如何有效地从颗粒脱絮后粒径较细, 数量较多, 逐步演变为颗粒粒径较大而数量较少, 需要良好的水力条件的配合。从这个角度来讲, 絮凝实际上是整个水处理系统的关键, 如果絮凝之后的矾花颗粒密实而且粒径较大, 那么之后的沉降和过滤的效率将大为提升。有鉴于此, 该工艺采用网格作为絮凝反应的核心, 网格反应位于旋流澄清池的中心部分, 如图2所示。

该工艺设计中注重了对絮凝反应过程的强化, 工艺设计中采用的网格絮凝的设计参数与国家规范有所差异, 主要设计参数和关键点如下:

1) 网格絮凝一般采用竖井, 竖井的断面A的流速在沿程是不变的, 绕流装置满足速度梯度的要求。

2) 一般地, 竖井流速 \bar{v} 平均比规范中的0.12~0.14m/s取值小, $v < [0.02, 0.1]m/s$, 平均流速常用0.02~0.05m/s。其原因在于絮凝主要靠网孔射流产生的紊流而发生絮凝, 上升流速的减少有利于增加絮凝时间, 并且, 在竖井中采用低的上升流速, 使得部分大颗粒的矾花沉降从而在竖井底部区域形成矾花密集区, 可对小颗粒矾花形成接触絮凝作用, 从而达到强化絮凝效果的目的。

3) 由于竖井平均流速相同, 为适应絮凝的要求, 即随着矾花的增大, 对矾花的干扰应该减小, 能耗应分段递减的要求, 在该工艺中采用以不同规格的网

格来调整水流沿程能耗，从而降低絮凝末端水力条件对矾花的干扰，避免了矾花的破碎。网孔尺寸采用25mm×25mm，30mm×30mm，以及50mm×50mm，在沿程上，网格层数由3—5段逐渐演变为2—4层，随段数N的提升，放的网格层少，以减少絮凝末端对矾花的干扰。

4) 网孔的流速与竖井的流速比采用 $V_{孔}/V_{井}=2\sim 7$ ， $V_{孔}=0.05\sim 0.35\text{m/s}$ ， $V_{井}=0.02\sim 0.1\text{m/s}$ 。 $\bar{G}=20\sim 70\text{S}^{-1}$ ， $\bar{G}\cdot T<2\times 10^4$ 。

5) 采用网格絮凝的絮凝时间不宜过短，根据CECS06-88，建议絮凝时间为4~5min，实际应用过程中发现对于某些水质采用该设计参数存在絮凝时间短，絮凝的颗粒尚小就进入沉淀池，从而不利于絮凝的沉淀，在该工艺中，针对不同的水质采用的絮凝时间为7.5~15min，充分保证了絮凝的要求。

(三) 旋流澄清池

旋流澄清池技术完善于20世纪90年代初自来水厂澄清池的改造。旋流澄清池是高效容积絮凝和高体积浓度接触絮凝及小循环回流活性泥渣结团絮凝于一体的，采用浅层泥水分离技术的澄清池。见图2所示。

1. 澄清池的集配水

澄清池配水的均匀性与澄清池的负荷有着很大的影响。考虑运行的可靠性一般在水厂中采用双系统，传统的配水方式即采用阀门对水量进行二次分配，难以均衡控制两组澄清池的水量，比如，当一组澄清池进行排泥时，因排泥产生水位差使得该池内产生冲击负荷，从而破坏池内的流态和泥渣层，对水质产生负面的影响。在该工艺中利用配水斗的水平堰均衡泼水，既直观的控制均匀分配水量，又不会产生冲击负荷。同时，泼水对水体产生曝气作用，为水体充氧从而去除水中一定的腥臭味，利用配水斗泼水形成的夹气，在澄清池的反应室内形成“小气浮”，将水中的藻类、油污、杂质等有害物体托起，并通过澄清池内的浮渣槽收集先期分离，有效地去除了部分难以沉降的悬浮污染物。

2. 流程和构造

如图2所示，当原水经投药加混凝剂后，经水泵作用实现高速混合均匀后，进入渐变流水力状态完成胶体的脱稳，并经渐变管1从澄清池下部进入澄清池内的预沉室10，在预沉室10内，大颗粒的泥沙发生沉降；水流经过缓冲后进入高效容积网孔絮凝室2和7，在高效容积絮凝室2和7中设有网孔扰流装置3和4，水流经扰流装置3和4后，因动能转换的惯性效应而产生大量不同尺度的微涡旋，微涡旋中的初始粒子因惯性效应而发生接触和碰撞，从而在整个反应区内发生容积絮凝，初始粒

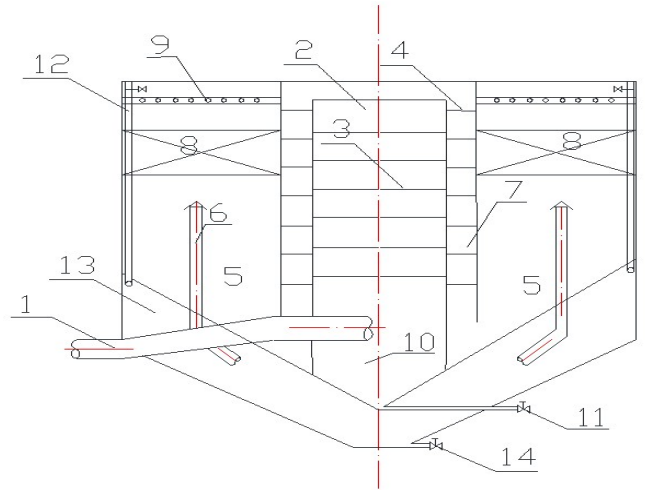


图2 澄清池构造示意图

子在沿水流上升的过程中经过多次接触变形而形成密实的絮凝颗粒；均匀地进入高体积浓度活性泥渣悬浮区5中。经斜管泥水分离后的下滑活性泥渣在上下循环回流的摩擦和挤压旋转作用下，形成致密化的活性泥渣悬浮区5，不断吸附水中的部分有机物和微量有毒重金属元素，经斜管8的沉降区时，由于絮体的比重增加，泥水得到很好的分离，半成品清水进入集水区经集水系统9收集后由集水总渠排入滤池。活性泥渣层5的泥水界面通过导流排渣口6控制在池内五分之二左右的高度，泥渣通过导流排渣口6进入污泥浓缩室13内，泥渣部分发生沉降浓缩；浓缩室的清水经与出水渠相连通的强制出水管12输送至集水系统9内。预沉室10和泥渣浓缩室13底部分别设有排泥阀11和14。

泥渣悬浮层的设计和充分利用，既提高了系统对原水的适应性，有增加了处理负荷，滤前水质一般稳定在0.5~2.0NTU之间，从而减轻滤池负荷，节约反冲洗水耗。

3. 本澄清池的特点

该工艺中采用的清水区上升流速一般采用1.5~2.0mm/s，比规范中的清水区流速0.7~1.0mm/s高，选择该参数的原因是该工艺中絮凝效果较好，矾花较大和密实，因而可以提高清水区的流速，并且在污泥浓缩区，强制出水量约为澄清池出水总量的10%~25%。在设计参数调整的同时，旋流澄清池采用了以下的独特技术：

1) 澄清池内因为水流速度的变化而产生的絮体层可以看做是受阻沉降的一种形式，尽管真正的受阻沉降仅仅存在于污泥斗上部用于控制絮体层絮凝程度的区域内，该絮体层是由絮体颗粒形成的流化床。水在通过絮体层时，通过拦截作用和凝聚作用而进行的物理去除与

深层滤床中发生的颗粒表面吸引作用是类似的，其中最重要的可能是机械俘获和黏附，进而可以吸附水体中的部分有机污染物。这一点对于低温低浊水、高浊度水以及含藻原水而言是非常有利的净化机制。

絮体浓度和澄清的表面负荷是影响絮体层效果稳定的最重要的因素，该工艺在研发过程中发现，当沉淀速度达到可靠运行的最大上升流速的0.7V0时，絮体层保持稳定，而一旦超过0.75V0时，絮体很难保持稳定状态，而这代表了澄清池上升流速的设计参数的采用是有极限的。该工艺中，该V0max极限值取2.0mm/s。

2) 在水处理规范中规定，单个澄清池的处理水量不宜超过7500吨/天，主要原因在于水量大了之后，澄清池中的泥渣悬浮层面积较大而泥渣浓度不易均匀，在出水过程中形成短流，从而使得澄清池的出水水质下降。为了解决这个问题，该工艺中，采用了独特的泥渣层旋流均匀技术，安装过程中在第二反应室外安装有旋流导流管，促进了泥渣悬浮层的缓慢的运动，保证了泥渣悬浮层的均匀性，从而避免了短流的产生，保证了出水水质的均匀性。

(四) U型滤池

从早期的饮用水过滤开始，过滤的流量控制技术就得到了人们的重视。如果不控制流量，将造成装置进水与工厂的总水量不平衡，甚至造成水量的突变，而这些均会造成水质的波动。现行的滤池中，虹吸滤池，重力式无阀滤池等均采用了水力条件来控制过滤流量的渐变性，不管是进水还是停止进水反冲洗方面。对于虹吸滤池而言，由于池体面积较大，使得虹吸反冲洗的强度难以布置均匀，而对于重力式无阀滤池而言，尽管避免了反冲洗过程中阀门的开闭对滤料层造成的冲击，但仍然存在进水夹气，伞形罩在反冲洗过程中抽吸力不均衡，导致滤料表面不平整等弊端，难以适用于水量较大的水厂中。

U型滤池是吸收了虹吸滤池，无阀滤池以及V型滤池等的优点，综合开发而成的新型滤池，该池型运行管理简便，无需反冲洗水泵或者反冲洗控制阀门动作。

1. 构造

如图3所示，原水通过旋流澄清池澄清后，其水中的剩余浊度在10mg/L以下（一般在0.5~2.0NTU），絮凝体的尺寸一般不大于40~60 μm。澄清之后的原水由集水渠15通过进水虹吸管进入滤池的竖井配水渠16；再通过竖井配水渠进入隔板下部过滤区域，自上而下通过均粒滤料18和承托层19后经连通渠26进入清水箱22，并出水总渠23排至清水池。当处于反冲洗周期时，因过

滤阻力增大而使得竖井配水渠16内水位升高，虹吸管24在虹吸辅助管系的作用下形成大虹吸，对滤层产生抽吸作用；高位清水箱22内的清洁滤出水通过连通渠26进入均粒石英砂滤层18进行反冲洗，使滤料呈悬浮状并擦洗砂粒，反冲洗强度设计保证其洗脱能力能去掉污泥而保留砂表面滤膜，反冲洗水经过洗砂槽17收集后由大虹吸管24排出池外。竖井配水渠内的水位因大虹吸抽水而降低，进水虹吸管在虹吸辅助管系统的作用下停止进水，从而保证了洗砂效果，又节省了水资源，减少了废水的排放量。

过滤单元的组合根据要求可分为多格。各格滤池的进水量由进水小虹吸及量水堰控制，通过虹吸配水往相应组合滤池内进水，尽量使其负荷均衡，同时当一组池进行反冲洗时，水位落差使空气吸入破坏虹吸，可使反洗水节约五分之一的耗水。同时，工艺中澄清池前泼水配水方式与滤池衔接而产生曝气滤池的效果，能尽快促成滤料活性膜的成长，对悬浮物有着很好截阻作用。滤池滤料选择均粒滤料，空隙率在50%左右，其滤速和吸污能力具佳。传统工艺选择的滤料其空隙率一般为37%左右，故能延长反洗周期，二十多个小时只需反洗一次，滤后水质的浊度，一般可稳定控制在0.1—1.0NTU。反冲洗则由水箱中的计量计控制，全部为虹吸水力自控。为此滤池工作周期为：（1）进水过滤；（2）反冲洗开始停止进水过滤；（3）反冲洗停止，进水过滤。周期有序保持了连续工作。

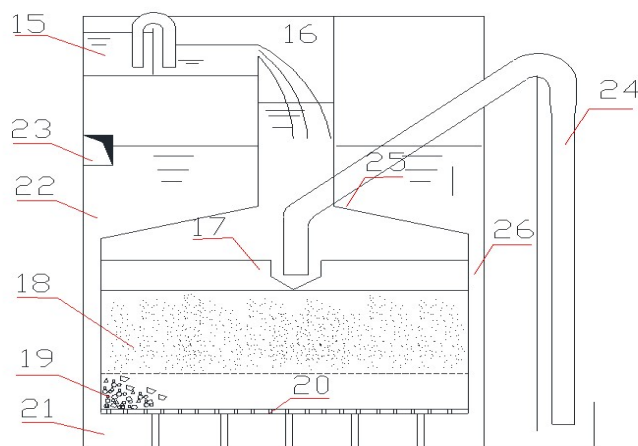


图3 U型滤池构造示意图

2. U型滤池的特点

U型滤池是吸收了虹吸滤池，无阀滤池以及V型滤池等的优点，综合开发而成的新型滤池，其在设计中采用了以下参数并独具特点：

1) 滤池的滤料有原先国家规范中规定的

0.5~1.2mm, 高度为700mm改变为V型滤池相似的滤料级配, 采用均质滤料颗粒直径变为0.9~1.1mm, $K_{80}=1.2\sim 1.4$, 滤床高度变为1000mm, 新型级配滤料的空隙率在50%左右, 其滤速和吸污能力具佳。传统工艺选择的滤料其空隙率一般为37%左右, 故能延长反洗周期, 二十多个小时只需反洗一次。一般采用反冲洗强度为 $15\text{L}/\text{s}\cdot\text{m}^2$, 过滤滤速采用 $5\sim 7\text{m}/\text{h}$, 低于规范中 $8\sim 10\text{m}/\text{h}$ 的过滤滤速。

2) 该工艺中研发的U型滤池, 采用了虹吸滤池的进水虹吸系统, 借鉴了重力式无阀滤池的大虹吸自动反冲洗的技术特点, 采用敞口渠进水的方式解决了滤池进水夹气的问题, 在滤池内部设置洗砂槽17, 保证了进水以及反冲洗水强度的均匀性, 取消了重力式无阀滤池中的伞形罩结构而采用大虹吸管直接对洗砂槽17抽吸而进行反冲洗, 避免了反冲洗时虹吸管直接对滤料形成抽吸作用。同时, 该反冲洗虹吸系统的设计避免了在反冲洗过程中排干滤床中的水, 不会对整个承托层造成扰动, 反冲洗过程中其强度加大并达到高峰后逐渐减小, 有利于滤料的沉降和恢复, 反冲洗强度的设定可通过虹吸管的开口大小决定。虹吸辅助管及抽气管为加速形成虹吸而设置, 虹吸破坏计时斗的标高则控制着冲洗历时的长短。一般在运转时调试反冲洗时间为4~5分钟。

3) 利用滤池本身的滤后水进行反冲洗, 无须另外设置高位水箱和管道。由于滤后出水水位高出滤料面以上, 因而不会产生滤层中的负水头, 使滤层处于良好的过滤水力条件下工作。

4) 过滤采用变水头的等速过滤, 配水(集水)系统为小阻力, 水头损失小。自身反冲洗水头损耗小, 在1%以内。

5) 结构紧凑, 具有虹吸滤池, 无阀滤池及V型滤池的优点。利用自身的水力条件运行自动化, 控制、维护方便简单。

(五) 自动控制与系统维护

水厂的全自动控制是水厂今后的发展方向, HAC新工艺吸收了先进的控制理念, 将水力全自动控制与先进的集散型控制方式相结合, 实现了水厂的全自动控制和全自动运行。其中, 主要构筑物的运行主要采用了水力全自动控制(旋流澄清池可采用虹吸排泥系统, U型滤池通过虹吸进出水实现了滤池的水力全自动运行), 而加药系统、消毒系统和一、二级泵房的运行控制则由控制系统控制, 最后由工控软件整合输出。整个制水过程中无须人工启、闭阀门, 通常的阀门均为调试或重启时所用, 减少了投资和维修费用, 降低运行成本, 真正做

到“复杂的问题简单化”。

三、结论

近十年来, 城市供水普及率持续平稳增长, 截至2018年, 我国城市供水普及率达到98.5%; 而同期, 全国农村自来水普及率为81%, 相比较城镇供水市场, 城乡供水尚有较大的发展潜力, 乡镇供水是国家乡村振兴战略基础设施建设中的重点。乡镇供水原水水质变化较大, 运行管理水平较低, 需要寻求耐冲击、运行维护管理简单的适用工艺。

HAC工艺充分应用流体动力学、扩散水力学的惯性效应强化了絮凝反应, 利用固体表面活化能的吸附粘着理论和浅池原理构建了旋流泥渣层, 优化了系统的澄清效果, 对过滤工艺采用进出水虹吸实现了过滤工艺段的水力自控运行, 该新工艺不仅对水中的浑浊度及相应的色度起去除作用, 而且对水中的有机物及藻类有先期地去除功能适于原水浊度低于 $1000\text{mg}/\text{L}$ 的原水水质, 出厂水质浊度一般为 0.5NTU 以内, 满足了村镇水厂中原水水质和水量变化的需求, 管理维护简单, 目前已经在江苏、浙江、安徽、江西和山东等省40多家中小型自来水厂的建设过程中使用, 结果表明该技术具有成熟可靠, 可供广大的乡村供水系统借鉴和采用。

参考文献

- [1] Matt Hurst; Monroe Weber-Shirk; and Leonard W. Lion. Image Analysis of Floc Blanket Dynamics: Investigation of Floc Blanket Thickening, Growth, and Steady State. Journal of Environmental Engineering. 2014, 140(4).
- [2] 李梓楠, 杨金月等. 澄清工艺中絮体层的运行效能和净水机制研究[J]. 复旦学报(自然科学版), 2021, 61(5): 587-595
- [3] 蒋玖璐, 李东升, 陈树勤. 高密度澄清池设计[J]. 给水排水. 2002, 28(9): 27-29
- [4] 童祯恭, 胡锋平. 一体化涡旋网格澄清工艺的研制与应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(6): 63-65.
- [5] 方永忠, 沈顺东. 微涡流混凝给水处理新工艺[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2004, 31(5) 210-212
- [6] 吴根林, 何坚, 刁远田. 一种高效节能净水工艺和装置[P]. 上海: CN1843960, 2006-10-11.

作者简介: 陈辉明(1967年11月), 性别: 男, 民族: 汉, 籍贯: 福建省福鼎市, 学历本科, 职称: 工程师, 工作单位福建省水务发展集团福鼎水务有限公司, 研究方向水处理与水质检测。