

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.24.008

小型水厂星伞絮凝浮沉过滤一体化工艺设计与运行

祝雄涛¹, 李德良², 于洋³

(1. 广州市城建规划设计院有限公司, 广东 广州 510280; 2. 广州正清水处理工程有限公司, 广东 广州 510053; 3. 通化师范学院 计算机学院, 吉林 通化 134001)

摘要: 华南地区某水厂以水库水为水源,设计供水能力为6 000 m³/d。针对春秋季水源藻类含量高、浊度低,夏季暴雨后浊度高的情况,采用星伞絮凝+浮沉+自冲洗过滤一体化净水设备,利用星伞填料絮凝形成大量微涡旋提高絮凝效果;通过切换运行气浮或沉淀工艺,解决了滤池易堵塞、反冲洗周期缩短,以及气浮处理高浊度原水时效果差、水质不达标等问题。实际运行表明,在高藻期运行气浮工艺,当藻含量为 8.32×10^7 个/L时,对藻类的去除率>98%;在高浊期运行沉淀工艺,当进水浊度为772.8 NTU时,出水浊度最高为2.15 NTU。该项目总投资为380万元,制水成本为0.72元/m³,自投产以来,供水水质、水量均达到设计目标。

关键词: 浮沉池; 星伞絮凝; 小型水厂

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)24-0053-06

Design and Operation of a Small Waterworks Featuring Integrated Process Utilizing Star-umbrella Flocculation-Flotation and Sedimentation-Self-cleaning Filtration

ZHU Xiong-tao¹, LI De-liang², YU Yang³

(1. Guangzhou Urban Construction Planning and Design Institute Co. Ltd., Guangzhou 510280, China; 2. Guangzhou Zhengqing Water Treatment Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510053, China; 3. School of Computer Science, Tonghua Normal University, Tonghua 134001, China)

Abstract: In the southern region of China, a waterworks utilizes a reservoir as its primary water source, boasting a designed water supply capacity of 6 000 m³/d. Due to the high algae concentration and low turbidity observed during spring and autumn, as well as the increased turbidity following summer rainstorms, an integrated water purification system featuring star-umbrella flocculation, flotation and sedimentation, and self-cleaning filtration has been implemented. The star-umbrella fillers are employed for flocculation purposes, generating numerous micro-vortices that can enhance the flocculation effect. By switching the operation of the air flotation or sedimentation processes, the system effectively addresses challenges such as filter blockage, shortened backwashing cycles, poor performance of air flotation in treating high turbidity raw water, and substandard water quality. Operational data indicates during the high-algae period, when the algae content is 8.32×10^7 cells/L, the removal rate of the air flotation process exceeds 98%. During the high turbidity period, when the turbidity reaching 772.8 NTU, the sedimentation process is operated, and the maximum turbidity of the effluent is 2.15 NTU. The total investment of this

通信作者: 于洋 E-mail: 15011578155@163.com

project is 3.8 million yuan, and the water production cost is 0.72 yuan/m³. Since its commissioning, both the quality and quantity of supplied water have consistently met design requirements.

Key words: flotation and sedimentation tank; star-umbrella flocculation; small-scale waterworks

1 工程概况

华南地区某市拟建一座规模为6 000 m³/d的小型水厂,向城区供给生产与生活用水,其原水取自一座小型水库,春、秋季节水库水浊度低,藻类含量高,pH较高,而雨季大雨或暴雨后则出现浊度很高的情况。目前,国内外给水厂较多采用沉淀工艺,一般情况下处理效果较好^[1],但当原水藻类含量较高、pH较高、浊度较低时其处理效果变差,常常造成滤池堵塞、反冲洗周期大幅缩短^[2-3]。针对高藻原水水质,一些水厂采用气浮工艺替代沉淀工艺,取得了较好的处理效果。然而,气浮工艺对高浊度原水的处理效果很差,存在出厂水水质不达标的问题。此外,藻类含量高、pH较高、浊度较低的原水絮凝效果较差,目前国内外还没有很好的解决办法。上述原水水质特点,给该小型水厂的设计和建设带来严峻的挑战。

2 设计进、出水水质

该水厂主要设计进、出水水质指标见表1,其他指标执行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。原水为典型南方水库水,春秋季节藻类含量较高,最高为8.32×10⁷个/L,pH最高为9.0;夏季大雨或暴雨后,原水浊度升高,最高达772.8 NTU。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	浊度/ NTU	pH	藻类/ (10 ⁷ 个·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)
进水	2~700	6.9~9.0	0.4~8.0	0.25~0.5	2.0~4.5
出水	≤0.5	6.5~8.5	0.05~0.6 (不影响过滤)	≤0.5	≤3

3 工艺流程

根据原水水质特点,采用星伞絮凝+浮沉+过滤+消毒处理工艺,工艺流程见图1。

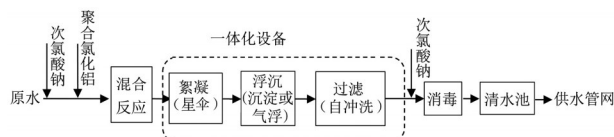


图1 水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of water treatment process

由于水厂规模小,采用钢筋混凝土浇筑施工困难,甚至无法施工,因此将絮凝、浮沉、过滤合建,建造成一体化处理设备。

① 星伞絮凝

该水厂高藻期原水藻类含量和pH高、浊度低,现有絮凝工艺的效果不佳,采用星伞填料絮凝可解决这一问题。星伞絮凝填料单体上分布着许多雪花状小杆,截面尺寸长×宽为3 mm×2 mm,当水流流经时可产生大量微小涡旋。投加药剂混合后的原水从一座竖井流到另外一座竖井,由于流向的反向变化而产生极大的扰流,形成了较大的涡旋、速度差、速度梯度。星伞絮凝填料单体及流线示意图2。

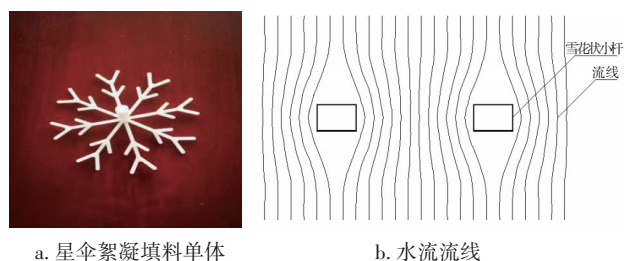


图2 星伞絮凝填料单体及流线示意

Fig.2 Star-umbrella flocculation filler monomer and packing flow line

根据Kolmogorov涡旋理论,湍动能主要分布在大的涡旋中,而小的涡旋较少。星伞絮凝填料微涡旋示意如图3所示。

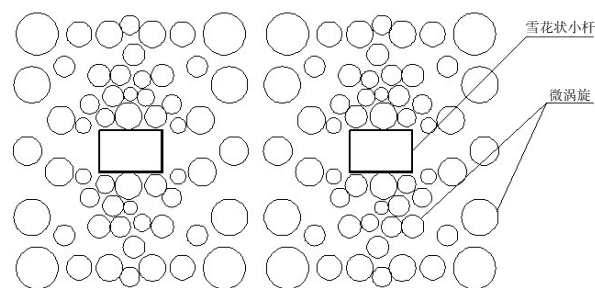


图3 星伞絮凝填料微涡旋示意

Fig.3 Schematic diagram of star-umbrella flocculation filler micro-vortex

雪花状小杆将场中的大涡旋分割为大量微

小尺度的涡旋,形成Kolmogorov级别的涡旋,从而加速了微小絮粒的涡旋絮凝过程。同时,不同尺度的涡旋在能量转换过程中不断由大涡演变为小涡,而大涡的外缘线速度大于小涡,进而在涡旋演变区间形成大量的局部速度梯度变化区,利于絮凝颗粒在涡旋区迁移时发生碰撞^[4]。由此,形成了良好的絮凝水力条件,促进了絮凝反应的高效进行。

② 浮沉池

在原水高藻期,目前采用较多的沉淀工艺对藻类的去除率仅为85%左右,易导致滤池堵塞,使过滤周期大大缩短,影响水厂正常供水。气浮工艺对藻类的去除率可达到95%以上,能有效解决滤池堵塞、过滤周期缩短的问题,出厂水水质也优于沉淀工艺。但夏季大雨或暴雨过后,原水浊度大幅上升,气浮工艺无法有效处理这种高浊度原水,出厂水浊度往往无法达标。目前,部分水厂采用沉淀与气浮工艺串联模式,设计并建造沉淀池与气浮池两个构筑物,虽然解决了上述问题,但增加了投资。而浮沉池可在同一构筑物内切换运行沉淀或气浮工艺,即:当原水藻类含量较高、浊度低且运行沉淀工艺处理效果较差时,可切换运行气浮工艺;当原水浊度高而运行气浮工艺处理效果不佳时,可切换运行沉淀工艺。浮沉池工艺仅需建造一个构筑物,与沉淀和气浮工艺串联相比,降低了建设投资、减少了占地面积和运行费用。因此,为应对处理上述水质原水,减少投资与运行费用,选择浮沉池工艺。

③ 预氧化与消毒

采用两点投加次氯酸钠的方式,前投加点选择在进厂原水管线上,主要用于预氧化原水中的有机物,改变藻类本身的电性,提升絮凝效果,同时抑制絮凝池、沉淀池藻类的滋生;后投加点选择在清水池前的滤池出水管上,其主要作用是消毒,杀灭水中的细菌、病原微生物等。对于前、后投加次氯酸钠的控制,以实现各自目的为标准,前投加量会对后投加量产生影响,可根据前投加量适当减少后投加量。

4 一体化净水设备工艺特点及设计

4.1 工艺特点

星伞填料絮凝+浮沉+自冲洗过滤一体化净水设备分为絮凝区、浮沉区、过滤区三个部分,总长24.2 m,总宽4.5 m,总高6.5 m。其中,絮凝区长×

宽×高为3.0 m×4.5 m×6.5 m,浮沉区为11.2 m×4.5 m×6.2 m,过滤区为10 m×4.5 m×5.5 m。各个区域高度不断降低,满足相应水头损失要求,确保了各个工艺环节的水力高程(见图4)。

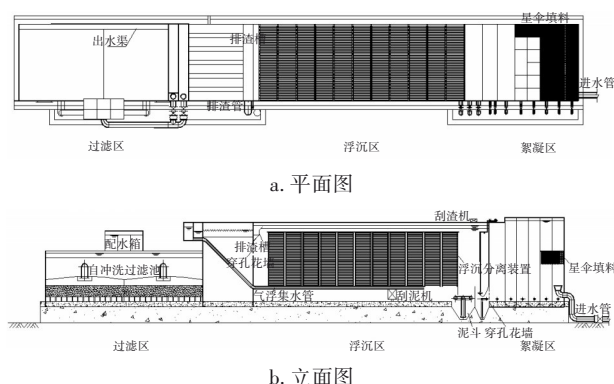


图4 星伞絮凝浮沉自冲洗过滤一体化净水设备示意
Fig.4 Schematic diagram of integrated water purification equipment utilizing star-umbrella flocculation-flotation and sedimentation-self-cleaning filtration

在进水管上先投加次氯酸钠进行预氧化,再投加絮凝剂聚合氯化铝(PAC),充分混合反应后依次流入一体化设备的絮凝区和浮沉区。运行气浮工艺时,释放器将溶气水注入接触区,与絮凝后的水进行充分混合,释放出微小气泡,与絮体(矾花)黏附形成聚集体,产生的极大浮力使聚集体随水流进入浮沉(分离)区的浮沉分离装置,向上运动至水面形成浮渣,通过刮渣实现固液分离,去除水中杂质。浮沉分离装置具有抑制水流紊动、提高气浮效果的作用。

运行沉淀工艺时,接触区的出水进入浮沉(分离)区的浮沉分离装置。浮沉分离装置根据浅池理论设计,具有显著提高沉淀效能的作用,絮体(矾花)在自身重力作用下沉降至浮沉分离装置,下滑至池底后通过排泥管、阀排出,实现固液分离。

气浮或沉淀后的水先进入配水箱,再流经滤池进行过滤,实现固液分离,去除水中杂质。过滤后的清水流入滤池顶部出水区,一部分用于反冲洗,其他流入清水池,经水泵输送至供水管网进行供水^[5-6]。

4.2 工艺设计

4.2.1 絮凝区

池体结构采用竖井形式,星伞填料安装在框架上,并放置在托架上。竖井前中段和末段的设计流

速分别为0.12~0.14、0.1~0.14 m/s,孔洞前段、中段、后段的设计流速分别为0.2~0.3、0.15~0.2、0.1~0.14 m/s,絮凝时间为18.5 min。

考虑与浮沉区域的良好衔接,絮凝后出水通过穿孔花墙进入浮沉区,孔洞流速小于0.1 m/s,同时,采用过渡段,确保良好的水力条件,有助于形成良好的絮体,且不被搅碎。

4.2.2 浮沉区设计

浮沉区沿水流方向由接触区、分离区、集水区组成,接触区主要由接触区挡板、进水穿孔花墙板组成,分离区主要由上部的浮沉分离装置、中部(浮沉分离装置底部)的气浮集水管、下部(阻流墙/板与底板组成的集泥斗以及刮泥机或排泥管)的沉淀集泥区构成,集水区主要由沉淀集水槽、气浮集水槽构成^[7-8]。

① 气浮工艺

采用加压溶气气浮工艺,溶气水回流比为10%,溶气压力为0.3~0.5 MPa;溶气罐内装有翼型填料,采用栅道式减压释放器系统。

接触区上升流速为19.2 mm/s,停留时间为66.8 s。分离区表面负荷为 $6.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,下向流速为1.72 mm/s。

② 沉淀工艺

配水区上升流速为19.2 mm/s,分离区表面负荷为 $6.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水平流速为7.8 mm/s。集泥区高度为1.0 m,设置刮泥机,起端设集泥斗、排泥管与阀门排泥。

③ 两种工艺耦合设计

浮沉池工艺采用气浮与沉淀工艺在同一区域即共同分离区内进行切换运行,该区域的尺寸、内部构造以及所安装的设备与材料必须同时满足气浮与沉淀两种工艺的要求,且不能对气浮或沉淀工艺造成任何不良影响,以确保气浮与沉淀工艺的运行效果,保障浮沉池工艺的良好运行。

为了实现两种工艺的良好耦合,在气浮与沉淀工艺的共同分离区安装浮沉分离装置,提升沉淀效率,缩短沉淀分离所需长度,使其与气浮分离所需长度相耦合。同时,减小气浮水流紊动,提高气浮效率。浮沉分离装置底部设置气浮工艺出水集水装置,气浮出水装置底部设沉淀集泥区,用以储存沉淀污泥,并在集泥区设置刮泥机、集泥斗及排泥管,以收集并排除沉淀污泥。

共同分离区末端设置沉淀出水穿孔花墙、集水槽,在集水槽前部设置沉淀出水渠、气浮出水渠,分离区顶部设置刮渣机、排渣槽,排除气浮浮渣。

④ 沉淀与气浮工艺切换

气浮转沉淀:首先关闭释放器溶气水管总管阀门,停止向接触区注入溶气水,再关闭气浮溶气系统;进一步关闭气浮出水阀门,当浮沉区水位上升至排渣槽溢流时,启动刮渣机刮渣;刮渣结束后,打开沉淀出水阀门,即投入沉淀工艺运行。

沉淀转气浮:首先启动溶气水系统,向储气罐、溶气罐注入空气和水,调整至达到要求的溶气罐压力、液位;同时,打开排泥阀门、启动刮泥机进行集泥区排泥。排泥完成后,关闭沉淀出水阀门,打开溶气水总管阀门,通过释放器向接触区注入压力溶气水,同时,打开气浮出水阀门,即投入气浮工艺运行。

4.2.3 过滤区

滤床置于底部,滤速为6.5 m/h,滤料采用天然石英砂,粒径为0.6~1.2 mm,厚度为1 000 mm,不均匀系数 $K_{80} \leq 2$;采用滤头滤板小阻力配水系统。

反冲洗采用单一水洗,强度为 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,反冲洗周期为24 h。过滤出水在滤床上部区域储存作反冲洗用水,与滤床底部通过管道、阀门连通。当滤床上部过滤水位升高至设定水位或过滤时间达到设定时间时,自动打开阀门进行冲洗,冲洗结束后自动进行过滤,无需人员控制操作,节省反冲洗水泵与鼓风机,减少建设投资、占地及运行费用,易于实现自动控制。

5 操作运行管理

采用易于监测且能反映设备运行状态的参数(如液位、压力、流量等),进行在线实时检测与实时监控^[6]。编制程序,依据检测数据分析判断设备及工艺的故障情况,自动停止故障设备,自动启动备用设备,并提示巡检人员进行处理,从而使水厂所有设备实现自动运行、无人值守。操作人员每天巡检一次,负责检查、维修设备,制备、补充药剂,以及调整药剂投加。

6 运行效果

6.1 沉淀工艺

冬季原水浊度和藻类含量均较低,水质较好,选择运行沉淀工艺,处理效果较好,出水水质满足

要求(见表2)。

表2 原水水质较好时沉淀工艺运行效果

Tab.2 Operation effect of sedimentation process with good quality of raw water

项目	浊度/NTU		pH		藻类/(10 ⁶ 个·L ⁻¹)		氨氮/(mg·L ⁻¹)		COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
原水	2.3~7.6	4.1	7.08~7.38	7.22	5.12~7.83	6.82	0.23~0.38	0.29	2.1~3.2	2.8
沉淀出水	0.85~1.5	0.96	7.02~7.26	7.12	0.94~1.28	1.07	0.23~0.38	0.29	1.2~2.3	1.6
过滤出水	0.19~0.45	0.22			0.34~0.82	0.42	0.09~0.19	0.14	0.09~1.5	1.1

6月—9月原水浊度较高,最高达 772.8 NTU,平均浊度为 213.6 NTU。此时切换运行沉淀工艺,出水浊度最高为 2.15 NTU,平均为 1.83 NTU(见表3),说明星伞絮凝+浮沉+自冲洗过滤一体化净水设备能够较好地处理高浊度原水,确保过滤进水水质符合要求,出厂水水质各项指标均满足要求。

表3 原水浊度高时沉淀工艺运行效果

Tab.3 Operation effect of sedimentation process with high turbidity of raw water

项目	浊度/NTU		pH		藻类/(10 ⁶ 个·L ⁻¹)		氨氮/(mg·L ⁻¹)		COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
原水	36.5~772.8	213.6	7.28~7.51	7.36	4.83~7.23	5.82	0.33~0.48	0.37	2.6~3.8	3.2
沉淀出水	1.15~2.15	1.83	7.19~7.41	7.24	1.07~1.69	1.21	0.19~0.29	0.22	2.1~2.9	2.4
过滤出水	0.32~0.42	0.38	7.09~7.28	7.25	0.32~0.87	0.51	0.12~0.16	0.13	1.3~2.2	1.6

6.2 气浮工艺

春季4月、5月与秋季10月、11月,原水藻类含量较高,系统切换运行气浮工艺,处理结果见表4。

表4 原水藻类含量较高时气浮工艺运行效果

Tab.4 Operation of flotation process with high algae content of raw water

项目	浊度/NTU		pH		藻类/(10 ⁶ 个·L ⁻¹)		氨氮/(mg·L ⁻¹)		COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
原水	3.2~12.6	10.8	8.58~9.08	8.82	57.6~83.2	78.2	0.38~0.46	0.39	2.9~4.3	3.7
气浮出水	0.45~1.12	0.86	7.37~8.21	7.82	3.19~5.68	3.98	0.20~0.27	0.23	1.9~2.2	2.0
过滤出水	0.25~0.41	0.34			0.72~1.35	0.98	0.11~0.19	0.14	0.92~1.34	0.98

由表4可知,一体化净水设备对藻类的去除效果显著(除藻率达98%以上),处理后水中藻类含量明显减少,确保了滤池对进水水质的要求,处理系统未出现滤池堵塞、过滤周期缩短的情况,解决了沉淀工艺易出现的除藻效果差、滤池堵塞问题,出厂水各项指标均满足要求。

6.3 除藻效果分析

沉淀与气浮工艺的除藻效果对比见图5。气浮工艺对藻类的去除率相对较高,在98.38%~98.87%之间,平均去除率为98.60%;沉淀工艺对藻类的去除率相对较低,在83.98%~95.66%之间,平均去除率为90.39%。

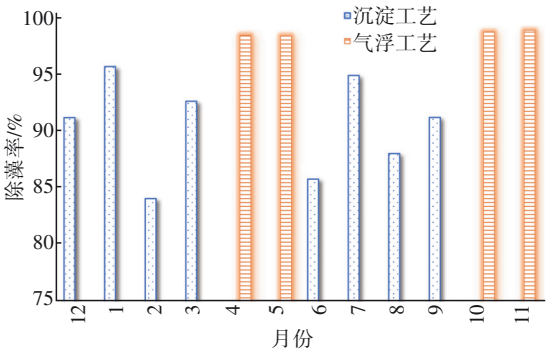


图5 沉淀和气浮工艺对藻类去除效果的对比

Fig.5 Comparison of algae removal efficiency between sedimentation process and flotation process

7 技术经济分析

① 在建设投资与制水成本方面,由于减少了一个构筑物的设备容积,从而降低了设备造价,包括原水提升、供水(出厂水)提升以及原水净化处理等,建设总投资为380万元,制水成本0.72元/m³。

② 在运行费用方面,当原水藻类含量较高时,切换运行气浮工艺会增加溶气水回流泵和空压机的电耗,与沉淀工艺相比,用电量增加0.03 kW·h/m³,费用增加0.024元/m³。

③ 在管理费用方面,采用无人值守运行模式,人员费用减少0.118元/m³。

8 结论

针对冬季原水水质较好、雨季原水浊度大幅提高、春秋季节藻类含量高而浊度低的水质情况,采用星伞填料絮凝+浮沉+自冲洗过滤一体化净水设备,利用星伞填料絮凝解决絮凝效果差的问题,效果良好;高藻期运行气浮工艺,除藻率达到98%以上,解决了因沉淀工艺处理效果差导致的滤池堵塞及反

冲洗周期缩短问题,运行电费比沉淀工艺增加0.024元/m³;其他时期运行沉淀工艺,高浊期原水浊度最高772.8 NTU,沉淀出水浊度2.15 NTU,解决了高浊度时气浮工艺处理不能满足要求的问题。该水厂供水水质满足国家生活饮用水标准与设计要求,且无人值守节省人工费用0.118元/m³。

参考文献:

- [1] 徐晓然,唐曾晖,李振兴,等.气浮与沉淀切换运行的新型气浮-沉淀工艺设计和工程应用[J].环境工程学报,2021,15(3):791-798.
XU Xiaoran, TANG Zenghui, LI Zhenxing, *et al.* Design and engineering application of the integrated flotation and sedimentation unit [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(3): 791-798 (in Chinese).
- [2] 高雪,付乐,陈才高,等.高效浅层气浮工艺除藻效能研究[J].中国给水排水,2014,30(22):18-22.
GAO Xue, FU Le, CHEN Caigao, *et al.* Study on algae removal efficiency of efficient shallow air flotation process [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 18-22 (in Chinese).
- [3] 杨威,雷晓玲,王忠运,等.直接超滤工艺处理微污染水库水的工程实践[J].中国给水排水,2017,33(19):42-45.
YANG Wei, LEI Xiaoling, WANG Zhongyun, *et al.* Engineering practice of direct ultrafiltration process for treatment of lightly polluted reservoir water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 42-45 (in Chinese).
- [4] 张东海,弓亚栋,陈作云,等.栅条式微涡除浊技术流场数值模拟[J].环境工程学报,2023,17(3):829-840.
ZANG Donghai, GONG Yadong, CHEN Zuoyun, *et al.* Numerical simulation of flow field in grid micro-vortex for turbidity removal technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(3): 829-840 (in Chinese).
- [5] 温宇.福建地区城乡供水一体化工程技术要点和案例浅析[J].工程建设与设计,2024(3):55-57.
WEN Yu. Technical points and case analysis of urban rural water supply integrated project in Fujian [J]. Construction & Design for Project, 2024(3): 55-57 (in Chinese).
- [6] 刘国祥.加压溶气气浮与斜管沉淀工艺对水库原水的处理效能分析[J].供水技术,2023,17(6):22-25.
LIU Guoxiang. Comparative analysis of efficiency between pressurized dissolved air flotation and inclined tube sedimentation process for reservoir raw water [J]. Water Technology, 2023, 17(6): 22-25 (in Chinese).
- [7] LI L X, SUN Z M, ZHANG R J. Numerical simulation of sedimentation processes in a novel air flotation-sedimentation tank [J]. Journal of Water Process Engineering, 2017, 18:41-46.
- [8] ZHANG R J, SUN Z M, CUI B, *et al.* Improvement on algae and turbidity removal in an integrated flotation and sedimentation unit using side flow-inclined plate settlers: evidence from a full-scale field experiment [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2018, 67(1):84-98.

作者简介:祝雄涛(1978-),男,广东湛江人,本科,高级工程师,研究方向为给水与污水处理设计、给排水管网设计、城市内涝治理、顶管施工工艺。

E-mail:14378163@qq.com

收稿日期:2024-10-04

修回日期:2024-10-14

(编辑:丁彩娟)