

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.19.008

高藻太湖表层水深井加压混凝浓缩技术研究及应用

朱晔宸¹, 张铮惠², 徐 俭², 陈旭清², 胡航宇³, 徐卿源¹,
张 森¹, 丛海兵¹

(1. 扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 无锡市蓝藻治理办公室,
江苏 无锡 214000; 3. 无锡德林海环保科技股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 为了探索高藻太湖表层水深井加压混凝沉淀浓缩技术的可行性,并优化技术参数后将其应用于工程实践,采用混凝实验优化了混凝剂投加量,采用静态沉淀实验测定了加压混凝高藻太湖表层水颗粒的沉淀速度,采用中试研究了深井加压混凝沉淀高藻太湖表层水的处理效果。结果表明,将PAC/干藻(质量比)控制在16%~32%、PAM/干藻(质量比)控制在0.3%~0.4%,混凝后高藻太湖表层水颗粒的沉淀速度可达47 cm/min左右,沉淀池表面负荷可达 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,实际工程中可将平均含固率为0.5%的高藻太湖表层水浓缩至平均含固率为4.08%,使出水浊度为1.83~8.33 NTU,叶绿素a浓度为6.32~11.72 $\mu\text{g/L}$,TN为0.30~5.20 mg/L,TP为0.03~0.26 mg/L。

关键词: 高藻太湖表层水; 深井加压; 混凝沉淀; 浊度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)19-0053-08

Application of Deep Well Pressurized Coagulation Concentration Technology in the Treatment of High Algae-laden Surface Water from Taihu Lake

ZHU Ye-chen¹, ZHANG Zheng-hui², XU Jian², CHEN Xu-qing², HU Hang-yu³,
XU Qing-yuan¹, ZHANG Sen¹, CONG Hai-bing¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Wuxi Cyanobacteria Treatment Office, Wuxi 214000, China; 3. Wuxi Delin Hai Environmental Technology Company, Wuxi 214000, China)

Abstract: This paper optimized the dosage of coagulant by coagulation experiment, determined the settling velocity of the particles in high algae-laden surface water from Taihu Lake after pressurized coagulation through static settling experiment, and investigated the performance of deep well pressurized coagulation for the treatment of high algae-laden surface water in a pilot test, so as to explore its feasibility for the concentration of high algae-laden surface water, optimize the technical parameters and apply it to engineering practice. When the ratio of PAC dosage to dry weight of algae was controlled at 16%~32%, and the ratio of PAM dosage to dry weight of algae was controlled at 0.3%~0.4%, the settling velocity of particles in the high algae-laden surface water from Taihu Lake after pressurized coagulation reached approximately 47 cm/min, and the surface load of the settling tank reached $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. In the actual

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020033)

通信作者: 丛海兵 E-mail: chb9903@126.com

project, the high algae-laden surface water could be concentrated from the average solid content of 0.5% to 4.08%, resulting in the effluent turbidity, chlorophyll-a, TN and TP decreased to 1.83–8.33 NTU, 6.32–11.72 $\mu\text{g/L}$, 0.30–5.20 mg/L , and 0.03–0.26 mg/L .

Key words: high algae-laden surface water from Taihu Lake; deep well pressurized; coagulation sedimentation; turbidity

近年来,淡水湖泊水体富营养化导致的蓝藻暴发问题愈发严重。在适宜的温度下,蓝藻繁殖迅速,易大量聚集漂浮于水体表面,形成像绿油漆一样的黏稠浆液,在风力驱动下聚集于下风向的湖泊岸边,聚集面积可达数百公顷,厚度达数十厘米,在太阳暴晒下腐烂发臭,污染湖泊水质和周边环境^[1-2]。为了控制蓝藻水华,解决其聚集带来的环境问题,目前主要采取化学杀藻、生物控藻、物理打捞法清除聚集的蓝藻^[3]。化学杀藻是向湖泊中投加 NaClO 、 KMnO_4 、 CuSO_4 等药剂,虽然见效较快,但有效期短,且对水体生态系统破坏较大;生物控藻是通过培养水生植物与蓝藻进行营养竞争,或放养鱼类摄食藻类,从而抑制蓝藻生长,但是这种方法实施难度大、见效慢^[4-5];物理打捞法是通过水泵抽取高藻太湖表层水送入蓝藻处理站,进行藻水分离处理,清水返回湖泊,藻泥处置利用。物理打捞高藻湖泊表层水见效快,在太湖、巢湖、滇池、洱海等湖泊已建成数十座藻水分离站。随着政策的支持和技术的发展,蓝藻打捞处置已从“勺舀人运”的人海战术逐步发展形成“机械化打捞、工厂化处理”的良好格局^[6],成为应用广泛的蓝藻治理技术。

目前,藻水分离处理主要采用气浮技术,利用蓝藻易上浮的特性,向水中通入溶气水和絮凝剂,加速蓝藻凝聚上浮,清水从下部流出。气浮技术需要处理20%~40%水量的高压溶气水,能耗大、处置能力有限。在蓝藻暴发季节,藻水分离能力远不及蓝藻聚集量,大量高藻湖泊表层水遗留在湖泊中腐烂发臭。因此,迫切需要大通量的高效藻水分离技术。

蓝藻之所以会上浮,是因为蓝藻细胞内存在气囊,为蓝藻提供浮力,使其能停留在水面光亮区域,接受光照而生长繁殖,这是蓝藻的生存策略。蓝藻细胞气囊能够抵抗0.4~0.7 MPa的外界压力,如果外界压力超出这一范围,气囊就会不可逆转地破裂^[7]。蓝藻气囊破裂以后,由上浮转而沉淀,就可以

通过传统的混凝沉淀法进行藻水分离^[8]。基于此理论,本团队发明了一种深井水压破气囊高藻太湖表层水沉淀浓缩技术装置^[9]。笔者通过实验验证了该技术的可行性,优化了技术参数,并将其应用于工程实践。

1 材料与方法

1.1 实验水样

实验装置放置于无锡某藻水分离站,藻水来自于太湖梅梁湾,随用随取。优势藻种为铜绿微囊藻,占比在98%以上。原水经蒸馏水稀释后测得进水浊度为6 890~9 330 NTU,平均值为8 110 NTU;进水叶绿素a为9 360~13 990 $\mu\text{g/L}$,平均值为11 675 $\mu\text{g/L}$;进水藻细胞数为 $8.97\times 10^9\sim 12.88\times 10^9$ 个/L,平均值为 10.93×10^9 个/L。

1.2 实验装置

蓝藻加压深井是同心的双通道深井,外井顶部开口淹没于太湖水面下,底部封闭,外井与外侧土层隔绝不透水;内井置于外井内,底部开口且与外井底部离开一定距离,内井顶部连通出水管。井深为80 m,外井直径为1 200 mm,内井为800 mm。

高藻太湖表层水混凝剂投加量优化实验采用六联搅拌机进行。采用沉淀柱和搅拌桨测定混凝颗粒的静水沉淀速度(见图1)。沉淀柱采用有机玻璃制成,直径为400 mm,高度为2 000 mm;搅拌桨垂直置于沉淀柱中心。

高藻太湖表层水深井加压混凝沉淀动态中试装置由混凝沉淀池、流量计、进出水管组成。混凝沉淀池的材质为透明有机玻璃,长为1.5 m,其中混凝区为0.2 m,沉淀区为1.3 m,宽为0.2 m,深度为1.2 m。进水管从底部接入混凝池,前段连接深井出水管,进水管上设置PAC、PAM加药泵注入口和流量计。混凝池内设置搅拌桨。在混凝池与沉淀池隔板上0.8 m高度开设过水孔。沉淀池末端水面位置设锯齿堰出水,底部设穿孔排泥管。中试装置如图2所示。

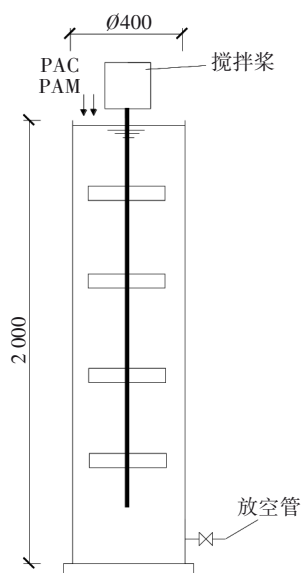


图1 混凝颗粒静水沉淀速度测定装置示意

Fig.1 Schematic diagram of device for determining settling velocity of coagulation particles in still water

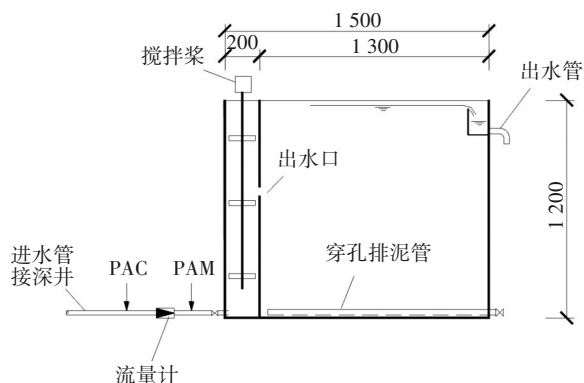


图2 动态中试装置示意

Fig.2 Schematic diagram of dynamic pilot device

工程设备如图3所示。

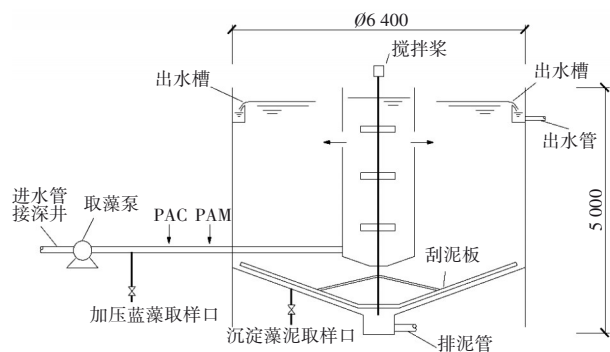


图3 工程设备示意

Fig.3 Schematic diagram of engineering equipment

高藻太湖表层水深井加压沉淀浓缩工程设备由取藻泵、双旋流沉淀池、进水管组成。双旋流

沉淀池为圆柱形,直径为6.4 m,高为5 m。沉淀池分内筒和外筒,内筒为反应区,外筒为分离浓缩区,内筒里设置搅拌桨,外筒底部坡向中心,底板上设置刮泥板,外筒顶部设出水锯齿堰。进水管与深井的内井出口相连,其上设取藻泵,进水管进入内筒底部,其上设PAC、PAM注入口。

1.3 实验方法

混凝剂投加量优化实验:将原水加入1 000 mL烧杯中,根据杯中干藻量,按一定比例加入PAC和PAM。PAM/干藻(质量比)分别为0.03%、0.05%、0.07%、0.09%、0.11%。针对某个PAM投加量,PAC/干藻(质量比)分别设置为10%、12%、14%、16%、18%、20%、22%、24%、26%、28%、30%、32%、34%、36%、38%。启动六联搅拌机,投加PAC后以100 r/min的转速搅拌10 s,再投加PAM并以60 r/min的转速搅拌170 s,静置沉淀180 s,取上清液测定浊度,取沉淀的藻泥测定浓度。

混凝颗粒静水沉淀速度测定实验:用软管引深井加压高藻太湖表层水注入塑料桶中,混匀测定原水藻类含固率,计算应加入的PAC和PAM质量。将混匀后的高藻太湖表层水注入有机玻璃沉淀柱中,一边进水搅拌一边缓缓加入PAC,共加入高藻原水220 L,然后再加入PAM,待加药完毕后,搅拌3~5 min。关闭搅拌桨开始计时,记录此时藻水界面高度,此后每隔1 min记录藻水界面的高度,直到界面基本不下降为止。

深井加压混凝沉淀中试:引深井加压高藻太湖表层水进入中试装置,调节管路阀门以调整高藻太湖表层水流量,测定原水藻类含固率,根据引流量和高藻原水含固率计算PAC和PAM投加量,开启搅拌桨,待沉淀池出水稳定后取水样测定浊度和叶绿素a浓度。

深井加压沉淀浓缩工程设备运行:双旋流沉淀池运行流量为120~150 m³/h,测定原水藻类含固率,计算PAC和PAM投加量,待运行稳定后在出水槽取水样测定浊度、叶绿素a、TN、TP。从沉淀池底部取样管取沉淀藻泥测定含固率。

1.4 分析项目及方法

浊度采用便携式浊度仪测定;藻泥含固率采用污泥浓度计测定,通过烘干法校正;叶绿素a浓度采用分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;TP采用钼酸铵分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 混凝剂投加量优化分析

深井加压后的高藻太湖表层水在不同PAC、PAM投加比例下,经过搅拌后上清液的浊度情况如图4所示。可知,随着PAC投加量的增加,出水浊度快速下降,当PAC/干藻达到16%时,出水浊度达到4.38~5.71 NTU,之后趋于稳定,下降幅度很小。当PAC/干藻达到32%时,浊度达到最低值1.16~1.88 NTU。继续增大PAC投加量后,出水浊度小幅度上升。浊度达到稳定阶段后,不同PAM投加量的出水浊度并无明显差别,即在一定投药量范围内,出水浊度主要受PAC投加量的影响,而与PAM投加量关系不大。

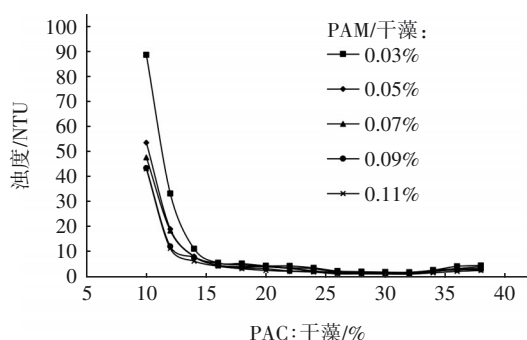


图4 PAC和PAM投加量对出水浊度的影响

Fig.4 Effect of PAC and PAM dosages on effluent turbidity

深井加压高藻太湖表层水混凝沉淀藻泥含固率情况如图5所示。可知,随着PAC投加量的增加,藻泥含固率先上升后下降,当PAC/干藻为32%时藻泥含固率最大。随着PAM投加量的增加,沉淀藻泥含固率增加。经过深井加压后,蓝藻细胞内的气囊消失,其由自然上浮变为自然下沉,混凝沉淀分离效果较好。据研究,太湖蓝藻细胞内气囊体积分数约为29%,经过0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 MPa加压后,藻细胞内的气囊体积分数分别减小为5.73%、4.43%、2.71%、2.46%、2.19%,最终气囊几乎全部消失^[10]。当作用压强 ≤ 0.1 MPa时,藻类上浮;经0.2~0.3 MPa压强作用后,大部分藻类悬浮于水中,少量藻类上浮或下沉;经过0.4~0.7 MPa加压后,藻类下沉^[11]。自然蓝藻上浮速度为0~35 cm/min,平均上浮速度为13.5 cm/min;经过0.7 MPa加压后,沉淀速度为0~3.5 cm/min,平均沉淀速度为1.55 cm/min。根据Storks公式计算得到自然蓝藻密度为

0.901~0.996 g/cm³,加压后藻类密度为1.008~1.043 g/cm³^[12]。蓝藻细胞的气囊壁为蛋白质结构,透气不透水,气囊受到外水压力作用后,内部气体穿过气囊壁进入细胞液中,再透过细胞壁扩散到水中,导致气囊空瘪,外部水体进入细胞后,填充了气囊空瘪留下的空间,使藻细胞密度增加。

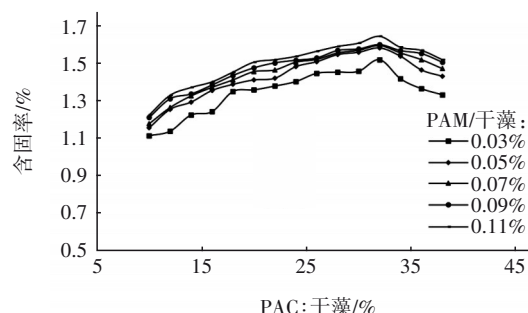


图5 PAC和PAM投加量对沉淀藻泥含固率的影响

Fig.5 Effect of PAC and PAM dosages on settled algal mud solid content

加压后向高藻太湖表层水投加PAC,蓝藻细胞、黏土等引起水体浑浊的细小颗粒开始脱稳凝聚成较大的颗粒,大颗粒沉淀后水质变清,浊度降低。但过量投加PAC后,胶体颗粒会重新稳定,使得混凝效果变差,且絮体变得蓬松,密度下降^[13]。PAM是有机高分子助凝剂,具有较大的分子质量(大于10⁴ ku),其主要作用是将经过PAC脱稳凝聚的絮体颗粒进一步变为大而密实的颗粒,对原始胶体颗粒的脱稳和凝聚作用较弱。

由此可见,PAC主要解决出水浊度问题,但也不宜过量投加,否则反而使浊度上升、沉淀藻泥含固率下降;PAM主要解决沉淀速度和沉淀藻泥密实度问题,其投加量越大,沉淀藻泥含固率越大。可见,为了得到澄清的出水,PAC投加量起决定性作用。结合上述分析,最佳PAC投加量取PAC/干藻为16%~32%。最佳PAM投加量还需根据后续沉淀速度实验和动态混凝沉淀实验进一步优化确定。

2.2 混凝颗粒静水沉淀速度分析

2.1节确定了合适的PAC投加量,但通过实验发现,按照原有PAM投加量进行高藻太湖表层水混凝颗粒静水沉淀速度测定实验时,混凝颗粒较小,沉淀速度较慢。因此,增大PAM投加量,观测混凝颗粒静水沉淀速度。将PAC/干藻控制在26%,改变PAM/干藻值(0、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%),进行混凝静置沉淀实验,得到沉淀柱中藻水界面高

度随时间的变化,如图6所示。

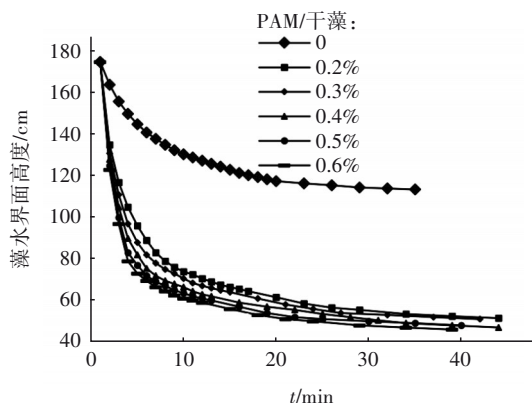


图6 不同PAM投加量下藻水界面的变化

Fig.6 Change of algal-water interface under different PAM dosages

根据每分钟藻水界面沉淀的距离计算沉淀速度,结果如图7所示。

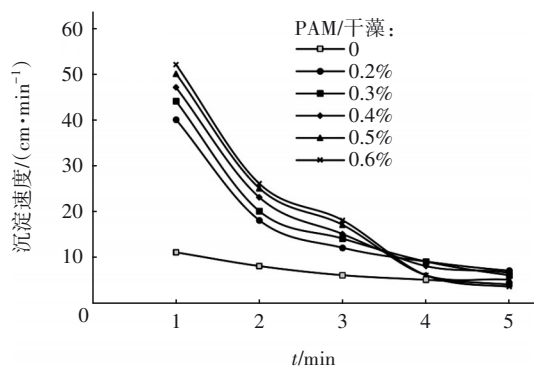


图7 不同PAM投加量下藻水界面沉淀速度的变化

Fig.7 Change of settling velocity of algal-water interface under different PAM dosages

由图7可知,沉淀初期藻水界面下降较快,后逐步减缓。这是因为初期为自由沉淀,随着颗粒的聚集,逐步转变为拥挤沉淀和压实沉淀。当PAM/干藻为0、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%时,第1分钟藻水分离界面下降速度分别为11、40、44、47、50、52 cm/min。5 min后,下降高度分别为30、79、87、93、98、102 cm,占总液柱高度的17.14%、45.14%、49.71%、53.14%、56.00%、58.29%,之后下降缓慢。虽然高藻太湖表层水经过加压混凝后有了一定的沉淀能力,但在未投加PAM(PAM/干藻为0)时,其沉淀速度较慢。PAM投加量越多,初始的沉淀速度越快,当PAM投加量增加1倍(PAM/干藻由0.2%增加至0.4%)时,第1分钟的沉淀速度加快17.5%,5 min后下降高度增加了17.72%;当PAM投加量增

加2倍(PAM/干藻由0.2%增长至0.6%)时,第1分钟沉淀速度加快30%,5 min后下降高度增加了29.11%。PAM翻倍后絮体颗粒沉淀速度增幅并不大,由于PAM价格较高,将PAM/干藻控制在0.3%~0.4%较为经济。

将PAM/干藻控制在0.4%,改变PAC/干藻值(19.5%、26%、32.5%),进行混凝静置沉淀实验,得到沉淀柱中藻水界面随时间的变化,根据每分钟藻水界面沉淀距离计算沉淀速度,第1分钟PAC/干藻为19.5%、26%、32.5%的藻水分离界面下降速度分别为45、47、48 cm/min,前5 min下降高度分别为91、93、94 cm,占总液柱高度的52.00%、53.14%、53.71%。3种PAC投加量下藻水界面下降速度差别不大,说明PAC投加量对藻水界面的沉淀速度影响不大。

综上所述,PAC的主要作用是使细小颗粒脱稳、水质澄清;PAM的主要作用是增大颗粒的粒径和密度,提高颗粒的沉淀速度和抗水力剪切的性能。可见,PAM对加快颗粒的沉淀速度起决定性作用,PAM投加量越多,蓝藻颗粒的沉淀速度越快,但从经济角度考虑,最佳PAM/干藻可控制在0.3%~0.4%。在该投加量下,高藻太湖表层水混凝颗粒的沉淀速度可达47 cm/min左右。

2.3 深井加压混凝沉淀中试分析

为了进一步考察连续流高藻太湖表层水深井加压混凝沉淀浓缩效果,将PAC/干藻控制在26%左右,PAM/干藻控制在0.3%~0.4%,在不同流量下系统运行稳定后,测定水样叶绿素a浓度和浊度,结果如图8所示。可以看出,当流量 ≤ 3.0 m³/h时,出水浊度和叶绿素a浓度均较低,浊度为1.95~8.32 NTU,叶绿素a浓度为6.42~34.23 μ g/L。随着流量的增大,出水水质开始变差,当流量达到3.5 m³/h时,出水水质显著变差,浊度为14.30 NTU、叶绿素a浓度为52.39 μ g/L,相比于流量为3.0 m³/h,出水浊度和叶绿素a浓度分别增加了71.87%和53.05%。分析原因,当流量增大后,混凝高藻太湖表层水的停留时间变短,混凝沉淀后的藻泥无法充分沉淀,从而部分未能充分沉淀的颗粒随出水外泄,导致出水水质变差。可以认为出水流量的极限为3.0 m³/h,此时沉淀池表面负荷为10 m³/(m²·h),已达到污水处理初沉池表面负荷设计最高值的2.22倍,处理效果较好且高效。

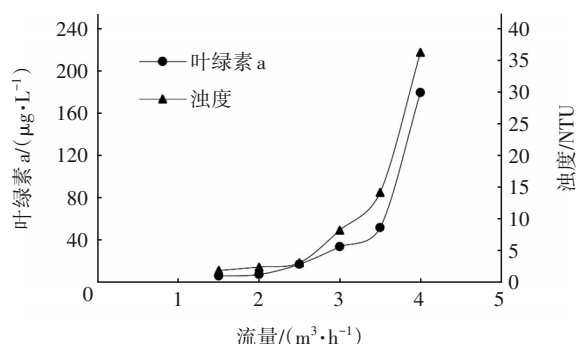


图8 不同流量下水浊度和叶绿素a浓度的变化

Fig.8 Change of effluent turbidity and chlorophyll-a concentration under different flow rates

综合上述分析可知,当PAC/干藻在26%左右、PAM/干藻在0.3%~0.4%时,动态中试可以获得较好的出水水质,极限表面负荷为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

2.4 深井加压混凝沉淀浓缩工程应用

根据烧杯混凝实验得出了最佳PAC和PAM投加量,中试得出了极限表面负荷为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,但在工程中需要运行稳定的出水水质,取安全系数为1.3,故将表面负荷确定为 $7.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。经计算,沉淀池实际出水表面积约为 20 m^2 ,能处理的原水流量为 $150 \text{ m}^3/\text{h}$ 。实际运行时,高藻太湖表层水进水浓度存在波动,为了保障出水效果,将运行流量控制在 $120 \sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

高藻太湖表层水深井加压混凝沉淀浓缩工程设备于2021年5月—9月运行,进水平均含固率在0.5%左右,叶绿素a的平均浓度为 $11\,675 \mu\text{g/L}$,PAC平均投加量占干藻质量的25%,PAM平均投加量占干藻质量的0.37%。测试水质48次,出水叶绿素a的浓度为 $6.32 \sim 11.72 \mu\text{g/L}$,平均值为 $8.79 \mu\text{g/L}$,去除率超过99.9%。可见,高藻太湖表层水经过深井加压后混凝沉淀效果很好,出水中几乎没有藻颗粒外泄。出水浊度如图9所示,总氮、总磷如图10所示。出水浊度为 $1.83 \sim 8.33 \text{ NTU}$,低于 3 NTU 的占比为50%,低于 5 NTU 的占比为80%。出水TP为 $0.03 \sim 0.26 \text{ mg/L}$,出水TN为 $0.30 \sim 5.20 \text{ mg/L}$,其中出水TN达到Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类水质标准的比例分别为25%、35%、50%。TP达到Ⅲ、Ⅳ类水质标准的比例分别为95%、100%,出水水质较好。TN的来源主要有四个方面,一是由于打捞不及时,腐烂的藻细胞或是自然死亡的藻细胞所释放的细胞液;二是藻细胞分泌的胞外有机物,由蛋白质、多糖、氨基酸、脂

肪酸、类腐殖酸组成^[14-15];三是混凝沉淀不彻底而残留的颗粒态含氮物质;四是氨氮、硝酸盐氮等溶解态无机氮。虽然总氮浓度稍高,但并不是加压造成的。藻细胞壁具有网状结构,能允许水分子通过,却可以阻止分子质量较大的胞内有机物流失,加压过程中水能自由穿过细胞壁,细胞内外压力平衡,并不会在细胞壁上产生水压力,因而加压并不会使藻细胞破裂,藻细胞内的细胞液也不会外泄,不会对水质产生不良影响^[16-17]。

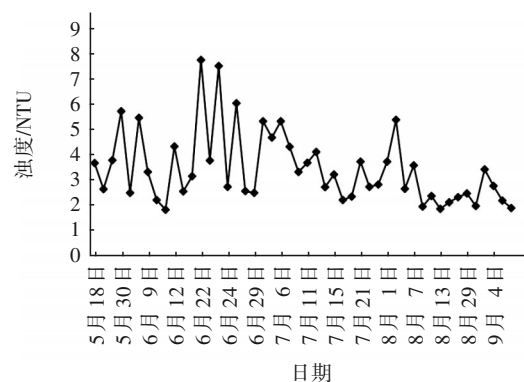


图9 工程设备出水浊度

Fig.9 Effluent turbidity of engineering equipment

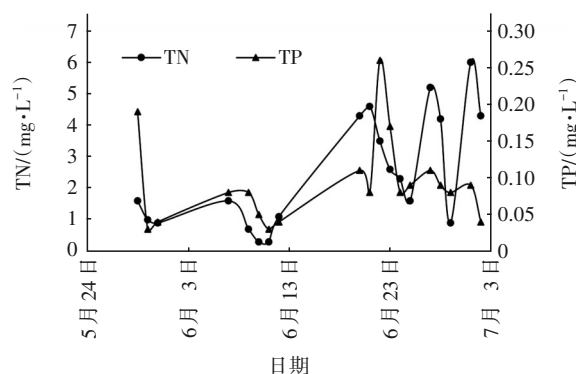


图10 工程设备出水TP、TN

Fig.10 Effluent TP and TN of engineering equipment

沉淀藻泥含固率的变化如图11所示。可知,沉淀藻泥含固率为 $3.54\% \sim 4.98\%$,平均含固率为 4.08% ,相较于进水高藻太湖表层水含固率增大了8.16倍,体积减小为原来的 $1/8.16$,浓缩效果很好。这是因为沉淀池的双旋流结构使得沉淀的蓝藻颗粒在刮泥板的缓慢搅动下进行有序排列,排出颗粒之间的水分,减小了颗粒间隙,增大了沉淀高藻太湖表层水的密实度。同时,较高的存泥高度对下层藻泥有较大的压实作用,提高藻泥含固率,为后续脱水作业节约了成本。

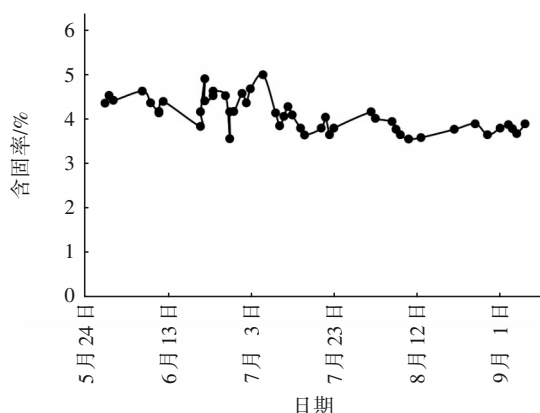


图11 沉淀藻泥含固率的变化

Fig.11 Change of settled algal mud solid content

综上所述,高藻太湖表层水深井加压混凝沉淀浓缩技术在实际工程中取得了较好的效果,出水浊度、叶绿素a、TP、TN浓度较低,浓缩藻泥平均含固率为4.08%,高藻太湖表层水被浓缩了8.16倍。

2.5 深井加压混凝沉淀浓缩工程成本分析

深井加压混凝沉淀浓缩高藻太湖表层水的运行成本包括药剂费和电费。进水高藻太湖表层水平均含固率在0.5%左右,PAC投加量占干藻质量的25%,PAM投加量占干藻质量的0.37%,混凝剂PAC价格为1200元/t,助凝剂PAM价格为7500元/t,药剂成本为1.64元/m³。主要能耗在于取藻泵、沉淀池搅拌桨和加药泵,取藻泵的功率为10kW,搅拌桨及加药泵的功率为1.5kW,处理流量为150m³/h,电价为1元/(kW·h),能耗成本为0.08元/m³,总成本为1.72元/m³。

3 结论

① 深井加压高藻太湖表层水混凝沉淀效果良好,PAC投加量主要影响加压混凝沉淀的出水水质,最佳PAC投加量为干藻质量的16%~32%。PAM投加量主要影响高藻太湖表层水深井混凝颗粒的沉淀速度和沉淀池表面负荷,适宜的PAM投加量为干藻质量的0.3%~0.4%。

② 深井加压高藻太湖表层水混凝颗粒的沉淀速度为47cm/min左右,沉淀池最大表面负荷达到10m³/(m²·h)。

③ 平均含固率为0.5%的高藻太湖表层水经深井加压混凝沉淀浓缩工程处理后,出水浊度为1.83~8.33NTU,出水叶绿素a浓度为6.32~11.72μg/L,去除率超过99.9%;出水TN和TP分别为0.30~5.20和0.03~0.26mg/L;浓缩藻泥含固率为

3.54%~4.98%,平均值为4.08%,高藻太湖表层水被浓缩了8.16倍。

参考文献:

- [1] 杨柳燕,杨欣妍,任丽曼,等.太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J].湖泊科学,2019,31(1):18-27.
YANG Liuyan, YANG Xinyan, REN Liman, et al. Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1):18-27(in Chinese).
- [2] LI J, HANSSON A L, PERSSON K. Nutrient control to prevent the occurrence of cyanobacterial blooms in a eutrophic lake in southern Sweden, used for drinking water supply[J]. Water, 2018, 10(7):919.
- [3] 王寿兵,徐紫然,张洁.大型湖库富营养化蓝藻水华防控技术发展述评[J].水资源保护,2016,32(4):88-99.
WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie. A review of technologies for prevention and control of cyanobacteria blooms in large-scale eutrophicated lakes and reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4):88-99(in Chinese).
- [4] 王寿兵,屈云芳,徐紫然.基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J].水资源保护,2016,32(5):1-4,23.
WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):1-4,23(in Chinese).
- [5] 方雨博,王趁义,汤唯唯,等.除藻技术的优缺点比较、应用现状与新技术进展[J].工业水处理,2020,40(9):1-6.
FANG Yubo, WANG Chenyi, TANG Weiwei, et al. Comparison of advantages and disadvantages of algae removal technology, application status and new technology progress [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(9):1-6(in Chinese).
- [6] 殷鹏,张建华,孔繁璠.太湖蓝藻无害化处置资源化利用现状分析与对策研究[J].江苏水利,2019(9):23-25,55.
YIN Peng, ZHANG Jianhua, KONG Fanfan. Current situation analysis and countermeasure research on the harmless disposal and resource utilization of cyanobacteria in Taihu Lake [J]. Jiangsu Water Resources, 2019(9):23-25,55(in Chinese).

- [7] 储昭升,杨波,金相灿,等. 6株蓝藻伪空胞的临界破裂压力研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2695-2699.
CHU Zhaosheng, YANG Bo, JIN Xiangcan, *et al.* Critical collapse pressure of gas vesicles in six strains of cyanobacteria [J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2695-2699 (in Chinese).
- [8] 鲁梦江,丛海兵,洪苏科,等. 深水循环加压混凝沉淀除藻工艺研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(1): 54-58.
LU Mengjiang, CONG Haibing, HONG Suke, *et al.* Deep water circulation/coagulation and sedimentation process for cyanobacteria removal [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(1): 54-58 (in Chinese).
- [9] 丛海兵,费广武. 深井水压破气囊蓝藻浆沉淀浓缩装置: CN201620541870. 4[P]. 2016-11-23.
CONG Haibing, FEI Guangwu. Deep Well Water Pressure Breaking Balloon Blue Algae Pulp Precipitation Concentration Device: CN201620541870. 4 [P]. 2016-11-23 (in Chinese).
- [10] 王巍,丛海兵,徐亚军,等. 不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2974-2979.
WANG Wei, CONG Haibing, XU Yajun, *et al.* Volume fraction of gas vesicle and floating characteristics of cyanobacteria in Taihu Lake under different pressures [J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 2974-2979 (in Chinese).
- [11] 丛海兵,高郑娟,孙秀秀. 压力作用后太湖蓝藻沉淀性能及其去除研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 43-47.
CONG Haibing, GAO Zhengjuan, SUN Xiuxiu. Sedimentation and removal of cyanobacteria in Taihu Lake under external pressure [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 43-47 (in Chinese).
- [12] 孙秀秀,丛海兵,高郑娟,等. 混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1781-1787.
SUN Xiuxiu, CONG Haibing, GAO Zhengjuan, *et al.* Movement characteristics of cyanobacteria under stress of water-lifting aeration [J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1781-1787 (in Chinese).
- [13] 俞文正. 混凝絮体破碎再絮机理研究及对超滤膜污染的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
YU Wenzheng. Study on Floc Breakage and Re-growth and Its Effect on Ultrafiltration Membrane Fouling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [14] 刘菲菲,冯慕华,尚丽霞,等. 温度对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和鱼腥藻(*Anabaena* sp.)生长及胞外有机物产生的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(5): 780-788.
LIU Feifei, FENG Muhua, SHANG Lixia, *et al.* Effects of temperature on the growth and generation of extracellular organic matter of *Microcystis aeruginosa* and *Anabaena* sp. [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(5): 780-788 (in Chinese).
- [15] SUN F, YU P, XU C H, *et al.* Influence mechanism of cyanobacterial extracellular polymeric substances on the water quality in dynamic water supply system [J]. Sustainability, 2021, 13(24): 13913.
- [16] 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,等. 预压力混凝沉淀除藻工艺中DOC变化规律研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2579-2584.
CHEN Wenjing, CONG Haibing, XU Yajun, *et al.* Variation of water DOC during the process of pre-pressure and coagulation sedimentation treatment [J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2579-2584 (in Chinese).
- [17] 蒋新跃,栾清,丛海兵,等. 压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4171-4175.
JIANG Xinyue, LUAN Qing, CONG Haibing, *et al.* Microcystin safety study during cyanobacteria removal by pressure enhanced coagulation process [J]. Environmental Science, 2014, 35(11): 4171-4175 (in Chinese).

作者简介: 朱晔宸(1997-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 主要研究方向为水污染防治。

E-mail: 471618493@qq.com

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-03-25

(编辑: 任莹莹)