

# 深水循环加压混凝沉淀除藻工艺研究

鲁梦江<sup>1</sup>, 丛海兵<sup>1</sup>, 洪苏科<sup>2</sup>, 鄢琪<sup>1</sup>, 郑全兴<sup>3</sup>, 王巍<sup>1</sup>

(1. 扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 裕腾建设集团有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 扬州自来水有限责任公司, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为提高水中蓝藻的混凝沉淀去除效果,采用深水循环并对水体进行预处理,使蓝藻气囊在深水压力作用下破裂,藻体失去气囊浮力,再经后续混凝沉淀去除。静态试验表明,随深水循环井深度的加大,混凝沉淀后各项出水指标浓度降低;当循环井深度为 80 m、混凝剂 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ 投加量为 30 mg/L 时,对叶绿素 a、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 DOC 的去除率分别为 95.5%、62.1% 和 39%,出水浊度为 1.35 NTU,较 2 mg/L 的 NaClO 预氧化混凝沉淀出水效果好且供水水质安全。动态试验进一步表明,深水循环混凝沉淀工艺对去除蓝藻是有效的,特别是对微囊蓝藻的去除尤为明显。

**关键词:** 深水循环; 混凝沉淀; 微囊藻; 去除率

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0054-05

## Deep Water Circulation/Coagulation and Sedimentation Process for Cyanobacteria Removal

LU Meng-jiang<sup>1</sup>, CONG Hai-bing<sup>1</sup>, HONG Su-ke<sup>2</sup>, YAN Qi<sup>1</sup>, ZHENG Quan-xing<sup>3</sup>,  
WANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Yuteng Construction Group Co. Ltd., Suzhou 215000, China; 3. Yangzhou Tap Water Co. Ltd., Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to increase the removal efficiency of cyanobacteria by coagulation and sedimentation, the cyanobacteria-containing water was pretreated with the deep water circulation well. Under the pressure of the deep water, the gas vesicles of cyanobacteria were broken and the cyanobacterial cells lost buoyancy, which promoted the removal of cyanobacteria by coagulation and sedimentation. Static experimental results showed that with the increase of well depth, the effluent indices after coagulation and sedimentation decreased correspondingly. When the depth of the deep water circulation treatment was 80 m, and the  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  dose was 30 mg/L, the removal rates of chlorophyll-a,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and DOC were 95.5%, 62.1% and 39%, respectively, and the effluent turbidity was 1.35 NTU, which indicated better and safe treatment effect compared with that by preoxidation (2 mg/L NaClO)/coagulation and sedimentation process. Dynamic experiments further indicated that the deep water circulation/coagulation

基金项目: 江苏省水利动力工程重点实验室项目(K12020); 扬州市市校合作研究项目(2014-4); 扬州市前瞻性研究计划项目(SQZ201430062); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20150456); 江苏省高校自然科学基金研究项目(15KJD610006); 扬州市重点研发计划(社会发展)项目(YZ2015072)

通信作者: 丛海兵 E-mail: chb9903@126.com

and sedimentation process is effective for the removal of cyanobacteria, especially for the removal of *Microcystis*.

**Key words:** deep water circulation; coagulation and sedimentation; *Microcystis*; removal rate

蓝藻是我国湖泊、水库的公害性藻类,其中微囊藻是蓝藻家族中最常见的单细胞藻类<sup>[1]</sup>。大多数微囊藻细胞内存在气囊,使其在水中具有很强的上浮能力而难以下沉<sup>[2,3]</sup>,这给含藻的饮用水处理带来极大的困难,同时蓝藻细胞外通常被胶质鞘包裹,会阻碍混凝剂与之结合<sup>[4]</sup>。目前水厂一般采用预氧化沉淀和预氧化气浮等工艺<sup>[5]</sup>,对藻类的去除率达到 80%~90%<sup>[6]</sup>,但这些方法存在混凝剂投加量大、能耗高、水处理成本高等问题,同时预氧化会导致藻细胞破裂,引起藻毒素和藻液外泄,增加消毒副产物,威胁供水安全<sup>[7]</sup>。因此,改善蓝藻的混凝沉降性能、提高含藻水的处理效果,降低处理成本,提升供水安全性,成为蓝藻水处理的重要研究方向。

研究表明,蓝藻气囊能够承受一定的外部压力,当压力超过其临界破裂压力时,气囊将破裂,从而使蓝藻失去浮力而下沉<sup>[8,9]</sup>。基于此,笔者所在课题组设计出一种深水循环井加压方法<sup>[10]</sup>,利用深水压力破坏藻细胞内气囊,使藻体失去浮力,再经后续混凝沉淀去除。通过静态和动态试验测定含藻水在深水循环作用后混凝沉淀效果,并与预氧化混凝沉淀工艺进行比较。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

#### ① 静态试验装置

静态深水循环井模拟装置为 U 形管,见图 1。

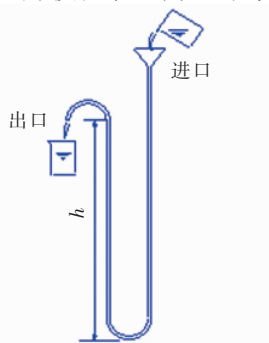


图 1 U 形管深水循环试验装置

Fig. 1 U shaped tube to simulate deep water circulation device

管道为塑料软管,口径为 12 mm。将 U 形管置于一高层建筑内,保持进、出口间存在一定高度差,总高度可调。混凝沉淀静态试验采用 ZR4-6 型六联搅拌机。

#### ② 动态试验装置

动态试验装置为平行的两套处理系统,见图 2。一套为深水循环混凝沉淀过滤系统(1<sup>#</sup>),包括深水循环井、机械搅拌混凝池、斜管沉淀池、提升泵、过滤柱、混凝剂投加泵和连接管路。另一套为预氧化混凝沉淀过滤系统(2<sup>#</sup>),将深水循环井更换成预氧化桶,其他与 1<sup>#</sup>系统相同。两个系统共用原水泵,型号为 QWD1.5-25-0.75 型潜水泵。深水循环井由内、外两个同心井组成,外井直径为 32 mm,内井直径为 20 mm,井深为 80 m。含藻原水从井口注入外井,向下流到井底,进入内井后向上流回地面,再进入混凝池。机械搅拌混凝池分 3 格,单格尺寸为 0.25 m×0.25 m×1.2 m,每格安装 6GN-7.5K-180 型搅拌器。斜管内径为 25 mm、长度为 1.0 m。提升泵为 YCT124 型隔膜泵。过滤柱为 Ø100 mm×3 000 mm 有机玻璃柱,滤料粒径为 0.8~1.5 mm,滤料高度为 1 m。混凝剂投加泵为 SK0803 型计量泵。水处理流量为 0.5 m<sup>3</sup>/h,混凝时间为 20 min,沉淀池有效表面负荷为 6 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),滤速为 7 m/h。预氧化桶停留时间为 30 min。

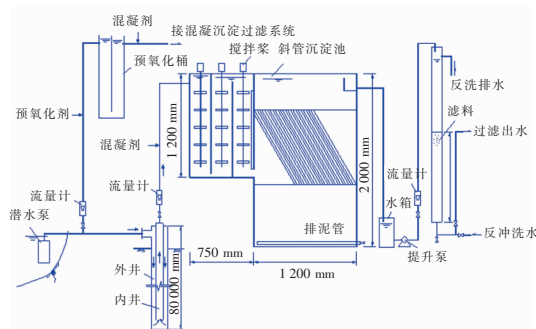


图 2 深水循环混凝沉淀过滤动态试验装置

Fig. 2 Dynamic experimental device of deep water circulation/coagulation/sedimentation/filtration process

### 1.2 试验材料

静态试验原水取自无锡太湖梅梁湾,优势藻种

为铜绿微囊藻,占95%以上,pH值在8.0左右,浊度为74.3 NTU、叶绿素a为78.47  $\mu\text{g/L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为15.34 mg/L、DOC为9.61 mg/L。

动态试验采用江苏省高邮市某水体进行,优势藻种为铜绿微囊藻、颤藻和小球藻,pH值在7.8左右,浊度为76.9~137 NTU、叶绿素a为119.57~281.72  $\mu\text{g/L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为9.91~13.26 mg/L。

预氧化剂采用NaClO,配制有效氯浓度为1.0 g/L的使用液。混凝剂采用 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,分析纯,配制成5.0 g/L的使用液。

### 1.3 试验方法

#### ① 深水循环及预氧化混凝沉淀静态试验

将含藻原水充分混匀,通过漏斗向深水循环装置U形管进口注入原水,原水受重力作用自流到出口,排入到盛水容器中,取得深水循环加压水样。调节U形管高度 $h$ 分别为30、40、50、60、70、80 m,制得不同循环深度的水样。

另取一份原水充分混匀,加入2 mg/L(有效氯)的NaClO,在60 r/min下搅拌30 min后,制得预氧化水。

取原水、深水循环水等水样进行离心浓缩,然后制成藻细胞超薄切片,用透射电镜对其进行扫描。另将部分含藻原水、深水循环水、预氧化水用0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤,取滤液测定藻毒素。其余各类水样用于下述混凝沉淀试验。

将原水、深水循环水、预氧化水各自装入6~8个1 L的烧杯中,依次加入不同量的混凝剂,先后经200 r/min搅拌1 min,100 r/min搅拌10 min,60 r/min搅拌10 min,静沉30 min,虹吸出烧杯上层800 mL水,混匀后测定浊度、叶绿素a、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC。

#### ② 深水循环及预氧化混凝沉淀过滤动态试验

开启原水泵、混凝剂加药泵、搅拌器、过滤提升泵开始试验。待出水稳定后每隔1 h测定原水、沉淀出水及过滤出水的浊度、叶绿素a、藻类数。

### 1.4 测定方法

浊度:哈希2100q01型浊度仪;叶绿素a:采用丙酮提取,UV759S型分光光度计测定; $\text{COD}_{\text{Mn}}$ :酸性高锰酸钾滴定法;DOC:水样经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,采用岛津TOC-VCPN仪测定;抽取一定量的水样,浓缩后置于显微镜下进行观察和计数,藻细胞计数采用XSP-BM-8CA型生物显微镜;离心得到的高浓度藻液经固定、漂洗、脱水、浸透、包埋、聚合、切

片及染色等主要步骤制作出藻细胞超薄切片,利用Tecnai-12型透射电子显微镜扫描拍照;藻毒素MC-LR采用固相萃取-液相色谱串联质谱法检测,液质联用仪型号为Agilent1200-6460 QQQ。

## 2 结果与讨论

### 2.1 深水循环混凝沉淀静态试验

#### 2.1.1 不同循环深度混凝沉淀处理效果

试验数据表明,随着循环深度的加大,深水循环混凝沉淀后各项出水指标浓度越来越低,循环深度为30~50 m时的处理效果已好于未循环时的效果,循环深度为60~80 m时处理效果更好且趋于稳定。在60~80 m循环深度下,投加25~35 mg/L混凝剂可以达到较好的处理效果,沉淀出水浊度为1.3~2.3 NTU,对叶绿素a、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC的平均去除率分别为95.8%、62.4%、38.6%;而未经深水循环的原水混凝沉淀出水浊度为14.2~15.8 NTU,对叶绿素a、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、DOC的平均去除率分别为77.9%、48.9%、19.4%。

通过透射电镜对原水、深水循环出水中的藻细胞切片进行扫描拍照,见图3。深水循环前,藻细胞内有大量长圆柱形气囊,为蓝藻提供了浮力,因而蓝藻沉淀去除效果差。蓝藻气囊壁是由蛋白质组成的薄膜,透气不透水,在高压作用下气囊会破裂,图3(b)、(c)中藻细胞内气囊数量减少即为其受压的结果,随着循环深度的加大,消失气囊的数量越来越多,导致藻细胞失去浮力,从而改善了沉淀性能。

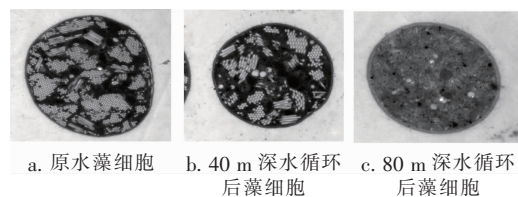


图3 藻细胞超薄切片透射电镜扫描照片

Fig. 3 Transmission electron microscope photos of ultrathin sections of cyanobacterial cell

#### 2.1.2 深水循环、预氧化混凝沉淀处理效果比较

试验数据表明,60~80 m深水循环混凝沉淀处理含藻水效果显著优于预氧化混凝沉淀工艺。30 mg/L投药量时,80 m深水循环混凝沉淀后上清液浊度为1.35 NTU、叶绿素a为3.56  $\mu\text{g/L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为5.81 mg/L、DOC为5.86 mg/L,去除率分别为98.2%、95.5%、62.1%、39%;而相同混凝剂投加量



下,2 mg/L NaClO 预氧化混凝沉淀后上清液浊度为 17.1 NTU、叶绿素 a 为 7.2 μg/L、COD<sub>Mn</sub> 为 8.42 mg/L,去除率分别为 77%、90.8%、45.1%,DOC 不仅没有去除,反而增加了 25%。除 DOC 指标外,预氧化混凝沉淀在投药量为 60~70 mg/L 时的去除效果与深水循环混凝沉淀在投药量为 25~35 mg/L 时的效果接近,即在获取相同的去除效果情况下,深水循环混凝沉淀较预氧化混凝沉淀可节省混凝药剂 50% 以上。

深水循环后,深水压力作用是否会将藻细胞压破,导致藻毒素泄漏? 为此,测定了深水循环后水中溶解性藻毒素(MC-LR)浓度,结果见图 4。可知,深水循环后水中溶解性藻毒素并没有增加,而 2 mg/L 有效氯氧化后藻毒素泄漏量较大,水中藻毒素浓度增大到原水浓度的 3.1 倍。说明深水循环没有导致藻细胞破裂、藻毒素外泄,除藻工艺是安全的。

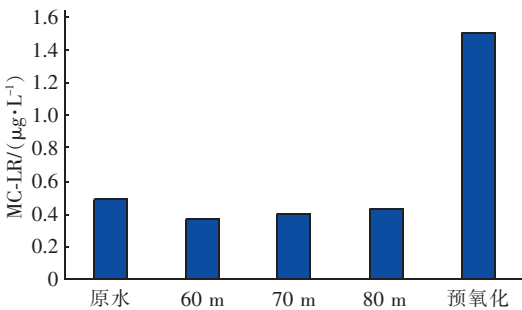


图 4 不同方式处理后藻毒素 MC-LR 的变化  
Fig. 4 Changes of MC-LR after different treatments

表 1 主要藻类计数结果

Tab. 1 Counting results of main algae

项 目		原水/ (10 <sup>5</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	深水循环混凝沉淀过滤系统				预氧化混凝沉淀过滤系统			
			淀后水/ (10 <sup>5</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	滤后水/ (10 <sup>5</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	沉淀去除 率/%	总去除 率/%	沉后水/ (10 <sup>5</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	滤后水/ (10 <sup>5</sup> 个 · L <sup>-1</sup> )	沉淀去除 率/%	总去除 率/%
蓝藻	总计	1 766.18	53.05	2.62	97	99.85	270.09	118.81	84.71	93.27
	微囊藻	1 645.71	未检出	未检出	100	100	182.71	80.82	88.90	95.09
	颤藻	102.79	2.62	2.62	48.39	97.45	74.60	29.36	27.42	71.44
绿藻	总计	142.58	128.21	41.50	10.08	70.89	108.11	59.41	24.18	58.33
	小球藻	118.26	42.28	39.68	4.86	67.29	103.27	55.26	12.68	53.27
	杂球藻	9.95	0.33	0.33	35.56	96.67	1.73	1.73	82.64	82.64
藻类数总计		1 916.49	182.81	44.18	90.46	97.69	378.20	178.22	80.27	90.7

原水中藻类主要有微囊藻、颤藻、念珠藻、螺旋藻等蓝藻和小球藻、杂球藻、栅藻、实球藻、衣藻等绿藻及少量硅藻,其中蓝藻为优势藻,占 92%,而蓝藻中的微囊藻数量最多,占总藻数的 85.9%。经过深水循环混凝沉淀、过滤处理后,对蓝藻的去除率分别

2.2 深水循环混凝沉淀过滤动态试验

动态试验采用的循环深度为 80 m,混凝剂投加量为 30 mg/L,预氧化剂 NaClO 投加量为 2 mg/L (有效氯)。每间隔 1 h,测定原水、深水循环沉后水和滤后水以及预氧化沉后水和滤后水的浊度和叶绿素 a 浓度。结果表明:预氧化混凝沉淀过滤系统中,沉后水浊度为 10.9~13.3 NTU,滤后水浊度为 3.09~6.09 NTU;深水循环混凝沉淀过滤系统中,沉后水浊度为 2.74~4.08 NTU,滤后水浊度为 0.79~0.96 NTU,均明显低于预氧化混凝沉淀过滤系统。

深水循环混凝沉淀过滤系统中,沉后水的叶绿素 a 浓度为 20.21~22.06 μg/L,平均去除率为 90%,滤后水的叶绿素 a 浓度为 3.28~4.61 μg/L,平均去除率为 98%;预氧化混凝沉淀过滤系统中,沉后水的叶绿素 a 浓度为 28.82~32.11 μg/L,平均去除率为 85.9%,滤后水的叶绿素 a 浓度为 6.61~11.19 μg/L,平均去除率为 95.8%。和静态试验结果一致,预氧化工艺对叶绿素 a 的去除效果较好,但这其实是个假象,因为在试验中,水力停留时间较长,NaClO 的强氧化脱色作用造成测得的叶绿素 a 浓度偏低<sup>[11]</sup>。实际运行中,能明显看到预氧化系统的沉后水和滤后水中有较多藻类,而深水循环工艺系统出水无明显肉眼可见的藻类,这从出水浊度上也可以得到印证。

为进一步剖析深水循环对藻类的去除,对水中藻细胞进行分类计数,主要藻类计数结果见表 1。

达到了 97%、99.85%,均远高于其对绿藻的去除率(10.08%、70.89%),蓝藻去除效果显著,尤其是对微囊藻的去除更是达到了 100%。正因为动态试验的原水中存有绿藻等不具备气囊的藻类,而深水循环对它们没有强化去除效果,使得深水循环混凝沉

淀动态试验对藻类的去除效果不如静态试验理想。预氧化混凝沉淀过滤系统对藻类的去除率低于深水循环工艺,仅在其混凝沉淀阶段对绿藻的去除效果好于深水循环工艺。

### 2.3 经济性分析

深水循环工艺依靠水的自重进行加压,不需要另外的加压动力,相比预氧化工艺可节省100%预氧化剂、50%以上混凝剂,该工艺经济、简单、实用。

以处理量为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的深水循环井为例,采用外井直径为600 mm,内井直径为350 mm,水头损失为0.6 m(6 kPa),电价按1元/(kW·h)计,泵站效率取0.75,可计算出循环井所需的单位能耗为 $0.908 \text{ kW} \cdot \text{h}/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h})$ ,运行成本为21.8元/d。

### 3 结论

① 静态和动态试验表明,深水循环混凝沉淀工艺处理含藻水是有效的,尤其适用于去除微囊藻。随着循环深度的加大,混凝沉淀出水效果越来越好;在60~80 m循环深度下,投加25~35 mg/L混凝剂可以达到较好的处理效果。

② 深水循环混凝沉淀工艺处理含藻水是经济、安全的,运行成本较低,处理 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的成本仅为21.8元/d。

### 参考文献:

- [1] 黄廷林,丛海兵,柴蓓蓓. 饮用水水源水质污染控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 丛海兵,黄廷林,周真明. 于桥水库铜绿微囊藻上浮运动规律及其控制[J]. 给水排水,2009,35(11):140-145.
- [3] 孔繁翔,宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [4] 李柱,高乃云,王海亮,等. 藻类对净水工艺的影响及应对措施[J]. 中国给水排水,2015,31(14):116-118.

- [5] 赵宗宇,文刚,黄廷林. 预氧化含蓝藻水过程中AOC变化规律及作用机理[J]. 中国给水排水,2016,32(3):46-51.
- [6] 黎雷,高乃云,殷娣娣,等. 控制饮用水源水中藻类、藻毒素的水厂处理工艺[J]. 中国给水排水,2008,24(6):20-24.
- [7] 谢鹏超,岳思阳,邹景,等. 四种预氧化方式对AOC及消毒副产物影响的对比[J]. 中国给水排水,2015,31(7):6-9.
- [8] 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.
- [9] 代然,储昭升,于秀娟,等. 压力下伪空胞破裂对3种水华蓝藻生长及光合作用的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(1):30-35.
- [10] 丛海兵,黄廷林. 深水循环强化混凝沉淀除藻水处理系统和方法[P]. 中国专利:CN201210109541.9,2013-06-26.
- [11] 丛海兵,陈雯婧,徐亚军,等. 压力强化混凝沉淀除藻工艺研究[J]. 环境科学学报,2013,33(7):1-6.



作者简介:鲁梦江(1971-),女,江苏盐城人,硕士,讲师,研究方向为微污染水处理技术。

E-mail:talk222@163.com

收稿日期:2016-07-12