

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.007

水平管沉淀池处理高藻水库水的应用研究

宋学峰, 吴越强, 许成君, 狄 茂, 王 飞, 陈雨鸽
(大庆油田水务公司, 黑龙江 大庆 163000)

摘 要: 针对东北高寒地区某浅水型水库在夏秋季发生蓝藻水华后,以其为水源的 D 水厂现有工艺无法满负荷运行、处理难度大的问题,分析了原水蓝藻特性及已有处理工艺现状,并采用一体化水平管沉淀分离中试设备进行试验,探求在该水质条件下对相关水质指标的去除效能。结果表明,当聚硅氯化铝(PASC)投加量为 3 mg/L、处理水量为 8 m³/h、水平管沉淀池的过流负荷为 20.05 m³/(m²·h)时,中试设备对浊度的去除率为 98%、对 COD_{Mn} 的去除率为 49%、对 UV₂₅₄ 的去除率为 89%、对藻密度的去除率为 95%;同时该中试装置的特殊结构和材质可有效避免藻类的附着及生长,对水厂安全平稳度过蓝藻水华期具有重要借鉴意义。

关键词: 蓝藻水华; 高藻; 高浊; 高有机物; 水平管沉淀池

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0041-06

Application of Horizontal Tube Sedimentation Tank to Treatment of Reservoir Water with High Algae

SONG Xue-feng, WU Yue-qiang, XU Cheng-jun, DI Mao, WANG Fei, CHEN Yu-ge
(Daqing Oilfield Water Company, Daqing 163000, China)

Abstract: When cyanobacteria bloom occurs in a shallow reservoir in the alpine region of Northeast China in summer and autumn, the existing process of D water treatment plant with the reservoir as water source could not operate at full capacity and the treatment effect was difficult to be guaranteed. Characteristics of cyanobacteria in raw water and operating status of the existing treatment process were analyzed. A pilot integrated horizontal tube sedimentation separation plant was applied to investigate the removal efficiency of related water quality indexes under the condition of cyanobacteria bloom. When dosage of poly-aluminum silicate chloride (PASC) was 3 mg/L, water treatment capacity was 8 m³/h and hydraulic loading was 20.05 m³/(m²·h), removal efficiencies of turbidity, COD_{Mn}, UV₂₅₄ and algae density by the pilot plant were 98%, 49%, 89% and 95%, respectively. Moreover, the unique structure and material of the pilot plant could effectively avoid the attachment and growth of algae, which has important reference significance for the water treatment plant to safely and smoothly pass the cyanobacteria bloom period.

Key words: cyanobacteria bloom; high algae; high turbidity; high organic content; horizontal tube sedimentation tank

水库水资源对于我国的社会经济发展具有极大 的促进作用,但是水库水的微污染及季节性藻类暴

发造成的水质超标问题给水厂的正常生产造成了严重影响^[1-2]。东北某市D水厂的取水水源地属于浅水淡水型湖库,平均水深为3.8 m,水体pH值、溶解氧(DO)均较高。水库水受磷污染严重,总氮为Ⅲ类水体水质标准,总磷为劣Ⅴ类水体水质标准,且TP中正磷酸盐比例很高。2019年7月该水库发生蓝藻水华,检测出蓝藻类12种,且微囊藻占绝对优势。高峰期,蓝藻达到 10^7 cells/L以上,岸边局部通过风力堆积达到 10^8 cells/L级别水平。蓝藻腐烂后形成的腐殖酸、富里酸类有机物进入水体,造成D水厂原水浊度、藻密度、 UV_{254} 、 COD_{Mn} 含量升高。

D水厂的设计规模为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,受有机物及藻类的影响,目前实际处理量仅为 $23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。针对原水水质情况,在取水泵站增设高锰酸钾、二氧化氯预氧化及粉末活性炭投加装置^[3-4],其中高锰酸钾投加量为2~3 mg/L,粉末活性炭投加量为5~15 mg/L。经预氧化的原水通过管道输送至水厂,采用微涡旋网格反应絮凝池+小间距斜板沉淀池+快滤池的常规工艺处理后^[5],出水 COD_{Mn} 接近《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定的限值(3 mg/L), COD_{Mn} 去除率在38%左右,斜板沉淀池出水浊度约为6 NTU,超出日常平均值200%,且藻类极易穿透滤池,导致出厂水水质变差,严重影响供水安全。经分析,混凝沉淀在常规处理工艺中起着至关重要的作用^[6],其对有机物的去除直接影响出厂水水质。因此,针对该水厂的实际情况,笔者开展了新型水平管沉淀技术应用研究,探索其合适的运行参数,旨在为进一步改善水质提供新思路。

1 材料和方法

1.1 试验用水

2019年7月—9月,取水厂预氧化后进入水平管沉淀池系统的原水,其浊度为65~106 NTU,平均值为75 NTU; COD_{Mn} 为5.12~6.34 mg/L,平均值为5.80 mg/L; UV_{254} 为0.509~0.855 cm^{-1} ,平均值为0.560 cm^{-1} 。试验期间是该水库蓝藻繁殖高峰期,通过在取水泵房投加高锰酸钾预氧化后,进入水厂的原水藻密度为 $4.69 \times 10^6 \sim 3.38 \times 10^7$ cells/L,平均值为 9.50×10^6 cells/L。

1.2 水平管沉淀分离技术概况

目前水处理过程中常见的斜管、斜板技术来源于浅池理论,其倾角一般为 60° ,可提高沉淀区面积,缩短絮体沉淀距离^[1]。但是由于泥和水同在管

间、板间异向流动,相互影响容易形成可逆沉淀,且存在死区,可能造成断流,在实际应用中对于低温低浊和含藻类的原水处理效果不理想^[7]。

水平管沉淀分离技术由若干组水平放置的沉淀管和与水平成 60° 的滑泥道组成,其中沉淀管倾角设计为 0° ,每个菱形管侧壁开口设置滑泥道(见图1),实现了“水走水道、泥走泥道”,可以缩短沉降距离,使絮凝物快速脱离水体,是沉淀工艺的一次技术革新^[8]。

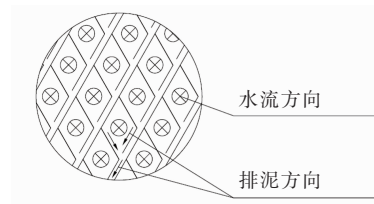


图1 固液分离示意

Fig. 1 Schematic diagram of solid and liquid separation

由于规避了泥和水在同一通道中相互影响的难题,所以能有效提高低温低浊及高浊度原水的沉淀效率。在应对含藻原水时,由于藻类在水中以浮游方式生活,通过高锰酸钾灭活和活性炭吸附之后,与水中悬浮物形成絮凝物后共同沉降,该絮凝物质量轻、密度小,常规沉淀技术的沉降效率低,水平管沉淀分离装置首先通过沉淀管快速沉淀含藻絮凝物,其次一旦含藻絮凝物进入在水流方向上两端封闭的滑泥道后,就不会受到水流影响而再次漂浮进入水体,通过滑泥道下滑至泥斗后排放,可彻底解决藻类处理难题,并且沉淀管与滑泥道的304不锈钢材质及叠装结构设计无法直接接触阳光,可有效避免藻类的附着及生长。

1.3 中试装置

中试装置如图2所示。

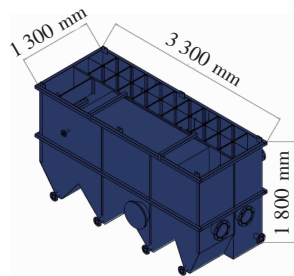


图2 中试装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of pilot plant

一体化筛板絮凝水平管沉淀池的设计规模为5

m^3/h ,水平管沉淀池的具体尺寸为 $3\,300\text{ mm} \times 1\,300\text{ mm} \times 1\,800\text{ mm}$,其中筛板絮凝池的尺寸为 $3\,300\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 1\,800\text{ mm}$,菱形沉淀管的当量直径为 40 mm ,絮凝池的水力停留时间为 34.5 min ,水平管的过水断面负荷为 $13.9\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,过管流速为 5.08 mm/s 。

1.4 运行参数

蓝藻暴发期间,D水厂絮凝沉淀工艺无法满负荷运行,在保障出水水质达标的条件下,日处理水量

为 $19.6 \times 10^4\text{ m}^3$,两期共20组沉淀池,单池沉淀部分的平面尺寸为 $23.3\text{ m} \times 10.8\text{ m}$,面积为 251.64 m^2 ,其表面负荷为 $1.63\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,斜管上升流速为 0.45 mm/s 。

2 结果与讨论

2.1 水平管沉淀池对污染物的去除效果

在设计水量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,向中试装置中投加聚硅氯化铝(PASC),水平管沉淀池对污染物的去除效果见表1。

表1 投加聚硅氯化铝时水平管沉淀池对污染物的去除效果

Tab.1 Removal efficiency of pollutants by adding PASC in horizontal tube sedimentation tank

聚硅氯化铝投加量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	出水浊度/NTU	浊度去除率/%	出水 COD_{Mn} / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD_{Mn} 去除率/%	出水 $\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	UV_{254} 去除率/%	出水藻密度/ $(10^5\text{ cells} \cdot \text{L}^{-1})$	藻密度去除率/%
1.00	4.01	95	3.85	30	0.125	78	35.1	63
1.33	3.50	95	3.61	34	0.106	81	27.2	71
1.67	2.96	96	3.32	40	0.098	83	15.5	84
2.00	2.15	97	3.13	43	0.095	83	12.1	87
2.33	1.89	97	3.13	43	0.086	85	9.6	90
2.67	1.67	98	3.05	45	0.070	88	7.3	92
3.00	1.31	98	2.84	48	0.065	88	6.9	93
3.33	1.10	99	2.77	50	0.064	89	5.2	95
3.67	1.29	98	2.78	49	0.067	88	4.1	96
4.00	1.36	98	2.81	49	0.078	86	2.8	97

从表1可以看出,在聚硅氯化铝投加量大于 2 mg/L 的条件下,出水浊度可以降低至 2 NTU 以下,浊度去除率基本在 98% 以上;当聚硅氯化铝投加量为 3.33 mg/L 时,对 COD_{Mn} 的去除效果最佳,出水 COD_{Mn} 浓度约为 2.77 mg/L ,去除率可以达到 50% 。此外,聚硅氯化铝投加量对 UV_{254} 的去除效果影响较小,出水 UV_{254} 在 $0.06 \sim 0.13\text{ cm}^{-1}$ 之间,去除率为 $78\% \sim 89\%$ 。随着聚硅氯化铝投加量的不断增加,出水藻密度呈现降低的趋势,水平管沉淀池出水藻密度平均值为 10^5 cells/L 量级,对藻类的平均去除率约为 85% 。

综合上述分析可知,出水藻密度与 COD_{Mn} 的变化趋势基本一致,这也间接验证了水库水中藻类过度繁殖造成富营养化的主要因素为有机物富集,同时也表明了水体富营养化是导致藻类过度繁殖的重要原因。

2.2 水平管沉淀池运行参数分析

2.2.1 处理水量

在本试验过程中,设置聚硅氯化铝投加量为 3 mg/L ,沉淀池出水浊度和 COD_{Mn} 的限值分别为 2

NTU 和 3 mg/L ,于2019年8月13日—9月2日进行连续运行试验,不同处理水量下水平管沉淀池的运行参数见表2。

表2 不同处理水量下水平管沉淀池的运行参数

Tab.2 Operation parameters of horizontal tube sedimentation tank under different water treatment capacity

项 目	处理水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$			
	5	8	10	12
过流负荷/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	12.53	20.05	25.06	30.08
水平管管间流速/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	3.48	5.57	6.96	8.35
絮凝时间/min	39.2	24.5	19.6	16.3
沉淀时间/min	9.6	6.0	4.8	4.0
总停留时间/min	55.40	34.62	27.70	23.08

每个处理水量条件下运行 5 d ,以 5 d 的出水水质指标平均值进行分析。其中,原水浊度平均为 74 NTU 、 COD_{Mn} 浓度平均为 5.7 mg/L 、 UV_{254} 平均为 0.57 cm^{-1} 、藻密度平均为 $9.5 \times 10^6\text{ cells/L}$,水平管沉淀池对污染物的去除效果如表3所示。从表3可以看出,当过流负荷低于 $20.05\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,水

平管沉淀池对污染物的去除效果提升不明显。因此,综合考虑设计合理性、水厂投资建设的经济性及实际运营的高效性,确定最佳过流负荷为 $20.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $25.06 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 为最经济过流负荷。在水平管沉淀池中试设备的过流负荷为 $20.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 条件下,出水浊度可以达到 1.15 NTU、浊度去除率可达 98%,沉淀池出水 COD_{Mn} 浓度约为

2.79 mg/L 、去除率为 49%,出水 UV_{254} 约为 0.064 cm^{-1} 、去除率为 89%,沉淀池出水藻密度平均值为 10^5 cells/L 量级,去除率达到 95%。此外,当过流负荷由 $25.06 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 提升至 $30.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 及藻密度大幅度升高,且去除率明显下降,表明 $30.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 是水平管沉淀池在该种水质条件下的最大负荷。

表 3 不同处理水量下水平管沉淀池对污染物的去除效果

Tab. 3 Removal efficiency of pollutants by horizontal tube sedimentation tank at different water treatment capacity

过流负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	出水浊度/NTU	浊度去除率/%	出水 COD_{Mn} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} 去除率/%	出水 UV_{254} / cm^{-1}	UV_{254} 去除率/%	出水藻密度/ ($10^5 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)	藻密度去除率/%
12.53	1.10	99	2.77	50	0.064	89	5.2	95
20.05	1.15	98	2.79	49	0.064	89	5.2	95
25.06	2.45	97	3.55	35	0.070	88	5.7	94
30.08	7.50	90	5.40	2	0.147	74	28.0	71

2.2.2 工艺运行参数

表 4 为水平管沉淀池与 D 水厂沉淀工艺的运行参数。相较于 D 水厂沉淀工艺,水平管沉淀池对浊度、 COD_{Mn} 、藻类的去除率提高了 5% ~ 10%。因

此,当过流负荷不超过 $20.05 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,出水浊度的去除率达到 98% 以上, COD_{Mn} 去除率达到 45% 以上, UV_{254} 去除率达到 85% 以上,藻密度去除率达到了 92%。

表 4 水平管沉淀池与 D 水厂沉淀池的运行参数

Tab. 4 Operation parameters of horizontal tube sedimentation tank and D water treatment plant sedimentation tank

项 目	预处理		常规处理工艺			
	高锰酸钾投加量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉末活性炭投加 量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	反应池水力停 留时间/min	沉淀池		滤池滤速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
				上升流速/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	过流负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	
D 水厂沉淀池	2 ~ 3	5 ~ 15	57.02	0.45	1.63	2.94
水平管沉淀池	2 ~ 3	5 ~ 15	24.50	5.57	20.05	—

2.2.3 冲洗周期、压力和冲洗流量试验

试验装置配套管道冲洗泵,通过喷嘴阀门控制冲洗装置压力为 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35 MPa,对应的冲洗流量分别为 35、30、25、20、15、10 m^3/h ,结果表明水平管沉淀池出水浊度分别为 4.2、3.9、3.8、4.5、4.2、4.3 NTU,管壁上的污泥情况分别为多、少、无、无、少、少。由于试验装置规模较小,因此采用手动冲洗,手动操作移动速度约为 $1 \text{ m}/\text{min}$,冲洗时间约 1 min,冲洗过程中不需要停水。当冲洗压力为 0.20 MPa 时出水浊度最低。冲洗会搅动已经沉淀的大颗粒,破坏水流平衡,造成出水浊度上升,但由于冲洗历时仅 1 min,浊度最高升至 4.5 NTU,对整体水质的影响有限,冲洗 5 min 后出水浊度逐渐恢复。经测试,冲洗期间沉淀池出水浊度仅升高 0.3 NTU,对沉淀池出水浊度的影响较小。

冲洗周期主要与原水水质、过流负荷及加药量

有关^[9]。查阅相关资料发现,巴彦淖尔市河套水务黑柳子水厂处理高浊黄河水采取的周期是 3 次/d,冬季低温低浊时为每 2 d 一次;重庆中法供水有限公司在处理嘉陵江水时,原水季节性高浊时浊度接近 8 000 NTU,冲洗周期为 4 次/d,大部分时间小于 50 NTU,则冲洗周期为 1 次/d^[10]。该水库型水源水浊度主要受温度、降雨、大风扬尘、富营养型水华等影响,浊度最高时可达 180 NTU,日常的浊度在 60 NTU 左右。所以,本中试选择在高浊期的冲洗周期为 3 次/d,日常为 1 次/d,结果表明在该冲洗参数下完全能保持管壁清洁,实际运行中可根据原水情况调整冲洗周期。

2.2.4 排泥周期和时间

中试水平管沉淀池为小型设备,采用穿孔管排泥。积泥区设置 6 根排泥管,管径为 DN50,均由自动电磁阀控制,可以单独设置排泥时间。排泥阀位

置如图3所示。

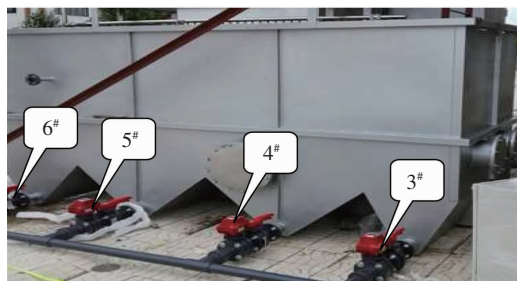


图3 水平管沉淀池中试装置排泥阀分布

Fig.3 Layout of sludge discharge valve in pilot plant of horizontal tube sedimentation tank

絮凝反应区设置2个排泥阀(1[#]、2[#]),水平管沉淀区设置4个排泥阀(3[#]、4[#]、5[#]、6[#]),测试时单独开启每个阀门,以水清为标准确定排泥时间。排泥周期及时间与产泥量有关,产泥量取决于原水水质、进水负荷及加药量等参数。结合水库原水水质,当额定处理能力为5 m³/h时,确定排泥周期为2次/d,1[#]~6[#]排泥阀依次开启排放,其开启时间分别为30、50、70、70、60、20 s,总排泥时间为5 min,每日排泥所需水量总计为1.2 m³,即当产水量为5 m³/h时,日排泥水的消耗率为1%。

3 结论

针对东北高寒地区浅水型水库季节性高藻、高浊、高有机物的特性,通过中试验证了采用水平管沉淀分离技术进行处理的可行性,确定了水平管沉淀分离装置的最佳过流负荷为20.05 m³/(m²·h),最经济过流负荷为25.06 m³/(m²·h),最大过流负荷为30.08 m³/(m²·h)。当水平管沉淀池的过流负荷不超过20.05 m³/(m²·h)时,对浊度的去除率可达到98%以上,COD_{Mn}去除率达到45%以上,UV₂₅₄去除率达到85%以上,藻密度去除率达到92%。另外,通过与D水厂设计能力为50×10⁴ m³/d,而实际仅仅能够运行19.6×10⁴ m³/d的低负荷斜板沉淀池比较,蓝藻暴发期间,水平管沉淀池的过流负荷为斜板装置的12倍,对水厂满负荷安全平稳度过蓝藻水华期具有重要意义。配置的冲洗装置采用沉淀池出水对沉淀池进行不停水清洗,无需外接水源,同时不会影响出水水质,高浊度期间可采取的冲洗频率为3次/d,日常为1次/d,并且水平管沉淀池划分了相对独立的排泥区间,可根据沉泥浓度不同而精准

排泥,整体排泥水的消耗率可控制在1%以内。

参考文献:

- [1] 李国平,戚菁,兰华春. 水厂除藻技术的研究进展综述[J]. 净水技术,2018,37(11):32-39.
LI Guoping, QI Jing, LAN Huachun. Review on research progress of algae removal technology in water treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(11):32-39(in Chinese).
- [2] 杨文进,雷培树,王早文. 供水水源水华爆发时的应急除藻措施[J]. 净水技术,2012,31(6):1-3.
YANG Wenjin, LEI Peishu, WANG Zaowen. Emergency measures for algae removal in water supply source in case of algal blooms[J]. Water Purification Technology, 2012, 31(6):1-3(in Chinese).
- [3] 张晓东,乔俊莲,吕丽萍,等. 高锰酸钾预氧化对藻活性和胞内外有机物的影响[J]. 中国环境科学,2017,37(7):2708-2714.
ZHANG Xiaodong, QIAO Junlian, LÜ Liping, et al. Pre-oxidation effects of potassium permanganate on activity of algal cells and the organics of intracellular and extracellular [J]. China Environmental Science, 2017, 37(7):2708-2714(in Chinese).
- [4] 岳兵,颜勇,谢美萍,等. 高锰酸钾预氧化强化混凝工艺对高藻水的处理[J]. 净水技术,2013,32(2):16-19,29.
YUE Bing, YAN Yong, XIE Meiping, et al. Treatment of enhanced coagulation process of potassium permanganate pre-oxidation for raw water with high-algae [J]. Water Purification Technology, 2013, 32(2):16-19, 29(in Chinese).
- [5] 王品飞,倪澜漪,张丹轶,等. 预氧化强化混凝去除藻类的影响因素[J]. 净水技术,2016,35(1):33-37.
WANG Pinfei, NI Lanqi, ZHANG Danyi, et al. Influencing factors of algae removal by pre-oxidation and enhanced coagulation processes [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(1):33-37(in Chinese).
- [6] 镇祥华,李露,万年红,等. 给水厂炭砂滤池设计参数探讨[J]. 中国给水排水,2020,36(16):81-85.
ZHEN Xianghua, LI Lu, WAN Nianhong, et al. Discussion on design parameters of carbon-sand filter in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16):81-85(in Chinese).
- [7] 薛石龙,周密,张良纯. 水平管沉淀用于低温低浊或高浊原水厂扩建工程[J]. 中国给水排水,2017,33

(下转第50页)