

高效臭氧+混凝工艺用于循环冷却补充水处理的应用实例

李 慧¹, 朱慕来², 李 辉²

(1, 上海虹桥国际机场有限责任公司, 上海 201105; 2, 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘 要: 南方某企业循环冷却补充水主要指标要求满足《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022), 根据小试实验得到的结果, 结合相关工程经验, 最终设计采用“臭氧+高效混凝沉淀+砂滤+紫外消毒”工艺。实际出水水质满足设计要求。

关键词: 循环冷却补充水; 臭氧; 混凝沉淀

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0062-03

南方某企业循环冷却补充水设计水量为 2,000m³/d, 以企业附近河水作为水源, 设计合适的工艺进行处理。受当地水环境容量限制, 经处理后的水指标要求满足《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022), 主要作为循环冷却水补充水使用。

一、设计水量与水质

1. 设计水量

本项目水源为河水, 设计日供水量为 2,000m³/d, 为保证正常补水同时减少出水池的容积, 处理系统每天间歇式运行, 设计小时流量为 80m³/h。

2. 设计进水水质

表 1 设计进水水质 (mg/L)

项目	pH	钙硬度	总碱度	浊度	氯化物	总磷	COD _{Mn}
水质指标	8.12	250	100	60	150	0.5	25

3. 设计出水水质

表 2 设计出水水质 (mg/L)

项目	pH	钙硬度	总碱度	浊度	氯化物	总铁	铜离子	COD _{Mn}
水质指标	6.5~8.5	≤ 450	≤ 100	≤ 1	≤ 250	≤ 0.3	≤ 1	≤ 5

二、实验与分析

1. 某河流水质分析

(1) 夏季

表 3 某河流 2020 年 8 月水质指标 (mg/L)

项目	pH	钙硬度	总碱度	浊度	氯化物	总磷	COD _{Mn}
平均值	6.6~9.1	230	130	120	200	0.5	25
超出天数	4	3	5	4	4	3	4

(2) 冬季

表 4 某河流 2020 年 12 月水质指标 (mg/L)

项目	pH	钙硬度	总碱度	浊度	氯化物	总磷	COD _{Mn}
平均值	7.1~9.3	290	180	60	130	0.2	15
超出天数	5	4	5	3	2	4	3

分别选取该河流一年中夏季及冬季最不利一个月的水质数据进行分析, 可以看出, 夏季河水的钙硬度与总碱度明显低于冬季, 这是由于碳酸钙在水中的溶解度随温度升高而降低。

因此, 温度越高, 河水中的钙硬度与总碱度就越低。夏季降水增多, 细菌及水藻滋生, 导致浊度、氯化物、COD 高于冬季。

结合出水水质要求, 根据现有水质数据, 对河水水质分析如下^[1]:

1) 河水中 pH 经多次检测一直处于稳定状态, 满足出水水质要求, 并且碱度满足出水水质要求, 工艺不需考虑进酸碱度的问题。

2) 河水浊度变化明显, 存在水质超标趋势, 工艺需要考虑浊度的去除。

3) 河水 COD 存在水质超标, 故工艺需要考虑 COD 的去除。

综上所述, 循环冷却补充水的处理重点是 COD 和悬浮物的去除。考虑采用臭氧、混凝进行处理^[2], 通过小试实验, 得出冬夏两季河水的最佳臭氧浓度与混凝剂投加量。

2. 某河流小试实验与结果分析

(1) 实验仪器及药剂

六联搅拌器、臭氧发生器、固体 PAC (聚合氯化铝), Al₂O₃ ≥ 29%、非离子 PAM (聚丙烯酰胺)、烧杯、臭氧反应装置、温度计、PH 计、有关水质测定的药品和仪器。

(2) 混凝处理河水实验

1) 实验方法

取 2L 待处理河水样, 分别加入 PAC、PAM, 采用六联搅拌器进行混凝沉淀实验。实验分为三个方面: 选择药剂同时投加或分别投加; 分别投加时, PAC 在前还是 PAM 在前; 分别投加时, 两种药剂间隔多久投加为好。实验条件如表 5 所示。搅拌后沉降 30min, 取上清液测定浊度^[3]。

表 5 混凝小试实验条件

步骤	转速 / (r/min)	时间 / min
同时加入 PAC 与 PAM	100	12
加入 PAC	40	2
加入 PAM	150	10

收稿日期: 2022-08-19

作者简介: 李 慧, 上海虹桥国际机场有限责任公司能源保障部。

通讯作者: 朱慕来, 上海理工大学环境与建筑学院。

2) 实验结果及分析

表 6 夏季、冬季的混凝小试实验结果

时期	最佳投药量/(mg/L)	原水浊度/NTU	处理后浊度/NTU
夏季	PAC: 25; PAM: 20	120	25
冬季	PAC: 20; PAM: 15	60	15

根据两组混凝实验结果可得，投加适量的混凝剂可以有效降低河水中的浊度。综合药剂投加量、絮体情况、浊度等方面进行考虑，确定最佳混凝条件为：PAC 与 PAM 分点投加，先加 PAM，后加 PAC，中间间隔时间大于 2 min 为宜。

(3) 臭氧+混凝处理河水实验

1) 实验方法

①取 2L 待处理河水样于臭氧反应装置，通过接入臭氧发生器进行臭氧处理实验。实验分为两个方面：臭氧浓度多大为宜；臭氧接触时间多久处理效果最佳。实验结束后，取上清液测定 COD、浊度。

②取 2L 在最优条件下经过上述臭氧处理后的河水作为原水样，根据 2.2.2 得到的最佳混凝药剂投加量，进行混凝实验。实验结束后，取上清液测定浊度。

2) 实验结果及分析

表 7 夏季、冬季的臭氧+混凝小试实验结果

时期	最佳臭氧浓度/ (mg/L)	最佳接触时 间/min	处理前浊度 /NTU	处理后浊度 /NTU	处理前 COD /(mg/L)	处理后 COD /(mg/L)
	(mg/L)	间/min	/NTU	/NTU	/(mg/L)	/(mg/L)
夏季	1	4	120	15	25	12
冬季	0.8	4	60	6	15	7

根据两组臭氧+混凝实验结果可得，在混凝前进行臭氧预处理，比单独采用混凝处理效果更好，浊度、COD 的去除效果更优。最佳条件为：夏季臭氧浓度 1mg/L，臭氧接触时间 4min；冬季臭氧浓度 0.8mg/L，臭氧接触时间 4min。

三、污水处理工艺设计

1. 处理工艺的分析

通过对河水水质进行综合分析，水中 COD、浊度等超标，结合小试实验结果与类似实际工程经验，本着运行稳定、低耗高效、可靠的原则，确定该处理工艺，采用臭氧+高效混凝沉淀处理工艺。

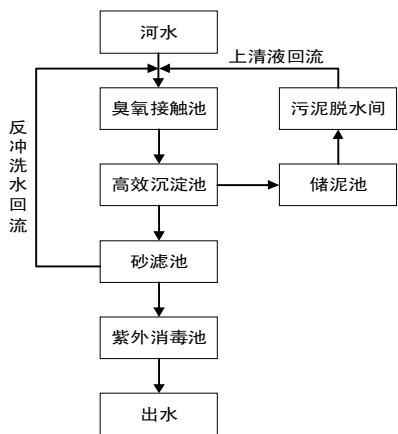


图 1 处理工艺流程图

工艺流程说明：河水首先进入臭氧接触池，臭氧与河水充分接触，去除水中的 COD 及部分微生物，臭氧对循环水

具有阻垢、缓蚀等效果。

处理后的水进入高效混凝沉淀池，通过投加 PAC/PAM 药剂，与悬浮物产生絮凝作用，同时通过污泥回流，吸附、絮凝水中的有机物，最终经高效沉淀池以污泥的形式去除；

经沉淀后水自流进入砂滤池，进一步去除水中的悬浮物质，避免堵塞后续系统；

为保证循环水补充水中的细菌达标，采用紫外线进行消毒，杀灭水中微生物，进入循环冷却塔。

高效沉淀池产生的排泥水先经污泥浓缩池进行污泥浓缩，降低污泥含水率，再经过叠螺机进行脱水，进一步降低污泥含水率，最后泥饼外运处置。

2. 主体构筑物设计

(1) 臭氧接触池。1 座，分 2 组。臭氧投加量 1mg/L，臭氧接触池停留时间 4min，有效水深 5.5m，内部装填陶瓷鲍尔环填料^[4]。

(2) 高效沉淀池。包含混合、絮凝、沉淀、回流等系统。2 座，分 2 组，有效水深 5m，总水力停留时间 2.5h。混合区设置 1 台 Ø300mm 搅拌机，功率 2.2kW。絮凝池设 1 套导流筒，Ø1000mm；设 1 台 Ø600mm 搅拌机，功率 4.0kW。沉淀区斜管表面负荷 5.71m³/ (m² · h)，设 1 台 Ø2.5m 中心传动刮泥机。设置 4 台回流泵，4 台污泥泵，4 用 4 备，Q=6m³/h，H=12.5m，P=0.75kW。

(3) 砂滤池。罐体结构，4 座。有效水深 3.5m，设计滤速为 8m/h。滤料采用粒径 Ø0.55mm 的石英砂，高度 0.7m；罗茨鼓风机 4 台，2 用 2 备，风量 0.94m³/min，功率 3kw，压力 49kpa。反冲洗水泵 4 台，2 用 2 备，Q=110m³/h，H=15m，P=7.5kW。

(4) 紫外消毒池。1 座，有效水深 3m，总水力停留时间 2h。采用紫外线杀菌器消毒，1 台，功率 900w。

(5) 污泥脱水系统。设 1 座污泥浓缩池。采用 1 台叠螺式污泥脱水机，处理能力 1.2m³/h。配备螺杆泵 4 台，2 用 2 备，Q=0.8m³/h，H=200kPa，P=0.75kW。

3. 工艺设计特点

(1) 整个工艺采用水循环利用，高效合理的利用水资源，大大节约了能源。

(2) 工艺使用高密度沉淀池，采用污泥回流，提高絮凝效果，减少了加药量。

(3) 针对循环水水质特点，采用臭氧处理技术，可同时实现阻垢、缓蚀、杀菌、提高浓缩倍数等功能，省却了阻垢缓蚀剂和杀菌剂等药剂投加，具备高效、环保、经济的优势^[5]。

(4) 有效实现了污泥资源化利用。将污泥处理后用于厂区绿化中，可在缓解有机肥短缺问题的同时解决污泥的处理问题，并且能改善土壤条件，提高绿化质量。通过植物的吸收利用，降解成无害产物，实现资源的持续利用。

四、实际运行情况

该项目已进入正式运营阶段，经过工艺处理后，出水各项水质指标均满足设计要求。在线监测平均进、出水水质见表 8。（下转第 71 页）

2. 钢护筒沉放

钢护筒在专业厂家进行自动化加工制造和防腐涂装,制造完毕后,再利用港口上的起吊及运输设备采用四吊点方式吊运上船,然后经由运桩驳方式进行运送。钢护筒沉放采用打桩船(配D138柴油打桩锤),打桩船在抛锚艇的协助下进行抛锚定位后,对钢护筒整桩施打。

3. 钻孔施工

钻机就位时,在钢护筒上拉上十字线,调整钻杆垂直度后,同时确保钻头位于中心点。由于本工程护筒埋入岩面,因此不会出现塌孔现象,只需在施工时加入清水,保持内外压相对稳定,不让护筒受压变形即可。

在成孔施工中随时了解岩层对旋挖钻机的影响状况,严格根据该岩层情况下的钻孔参数进行实施。在钻进过程中要经常检查钻斗尺寸,以防过大磨损。如果发现地质情况与原钻探资料不相符及时调整钻进参数。合理控制钻斗的转速和升降速度,当钻进到设计高程,经检验同意后终止钻进。最后用钻斗进行掏渣清孔,沉渣厚度不得大于5cm。

4. 钢筋笼施工

钢筋笼采用滚焊机在后场的钢材加工场生产,箍筋与主筋交叉点采用CO₂保护焊100%焊接,声测管在钢筋笼加工时同时安装^[4]。由龙门吊装上平板车,平板车运输至材料周转平台,周转平台上履带吊吊至运输船,运输船运输到平台指定位置。为保证钢笼能顺利下放到位,在钢筋笼骨架外设置了保护层垫块,加设保护层支撑钢筋。钢筋笼在孔口利用起吊设备吊起转换成竖直状态,然后缓慢下放。钢筋笼节间通过套筒机械连接,分节安装下放钢筋笼后,用4根吊筋将桩基结构钢筋笼接长至护筒口,并固定在护筒口钢筋笼下放平台上,固定后应确保钢筋骨架与孔中心线基本吻合,不会发生倾斜和移动。

5. 水下混凝土施工

灌注型嵌岩桩采用C40水下混凝土,混凝土采用导管法浇筑,正常浇筑过程中混凝土浇注能力超过50m³/h。桩基

混凝土浇筑前检测孔底沉渣厚度,若沉渣厚度大于5cm,则需要二次清孔,二次清孔采用气举反循环工艺。

桩底混凝土封底采用拔塞法,首批混凝土用量与桩长有关,根据 $V \geq \pi D^2 (H + h + 0.5t) / 4 + \pi d^2 (0.5L - H - h) / 4$ 计算。灌注型嵌岩桩最长桩长为46m,计算得首封混凝土量为8m³。封底成功后,随即转入正常灌注阶段,混凝土塌落度在200±20mm。当混凝土灌注临近结束时,核对混凝土的灌入数量,并采用测绳测量,以确定所测混凝土的高度是否准确,当确定混凝土的顶面标高到位后,停止灌注,及时拆除灌注导管。灌注完成时,混凝土面应高于设计桩顶标高1.0m,以保证桩头混凝土质量。

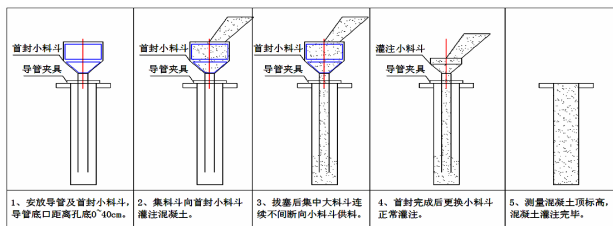


图6 水下混凝土灌注施工示意图

七、结束语

高桩码头灌注型嵌岩桩采用旋挖钻施工与传统工艺相比,经济效益明显,大大节约了工期,提高了桩基施工质量。同时也为今后类似工程建设提供相关经验及参考。

参考文献

- [1] 中交第三航务工程勘察设计有限公司. 港口工程桩基规范 JTS167-4-2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [2] 雒焕斌, 赵江倩. 浅覆盖层水域高桩码头灌注型嵌岩桩施工技术[J]. 江西水利科技, 2019, 45(6): 415-419.
- [3] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准 GB50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [4] 薛磊, 何珺怡, 骆锦成等. 水上旋挖机成孔钢管嵌岩斜桩施工技术[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(7): 54-57, 75.

(上接第63页)

表8 平均进、出水水质

项目	钙硬度 (mg/L)	碱度 (mg/L)	浊度 (NTU)	COD _{Mn} (mg/L)	氯化物 (mg/L)
进水	250	100	60	25	150
出水	240	85	0.5	3	140
指标	≤450	≤100	≤1	≤5	≤250

该项目运行能耗指标: 电耗 0.31 元/m³水, PAC0.18 元/m³水, PAM 0.04 元/m³水, 总运行费用(包含人工费等其他费用)为 0.922 元/m³水。

五、结语

本工艺首先通过小试实验,得出臭氧+混凝沉淀为主的处理工艺对于该河水水源处理效果更优,不仅减少了投药量,还降低了运行费用。工程建成投入运行后,出水水质能够满

足设计要求,验证了该工艺的可行性。加强了对河水的循环重复利用,同时也优化了当地水资源结构,有利于改善该地区的投资环境。

参考文献

- [1] 金亚颀. 《工业循环冷却水处理设计规范》(GB 50050—2007)分析与探讨[J]. 给水排水, 2011, 47(10): 53-57.
- [2] 邱真真, 杨林, 李德良等. 臭氧技术在轨道交通车站中央空调循环冷却水处理中的应用[J]. 净水技术, 2011, 30(1): 53-57.
- [3] 常华, 赵宇, 于益群等. 滦河水混凝特性的试验研究[J]. 绿色科技, 2015, (4): 228-230+232.
- [4] GB/T 32107-2015, 臭氧处理循环冷却水技术规范[S].
- [5] 郭一平. 循环冷却水处理技术工程应用研究[J]. 化学工程, 2014, 42(12): 74-78.