

混凝—吸附组合工艺 处理洗浴废水试验研究

缪璐¹, 孙晓旭², 丁睿³

(1. 南京市江宁区水务局, 江苏 南京 211100; 2. 南京工程学院 环境工程学院, 江苏 南京 211167;
3. 南京市麒麟科技创新园(生态科技城)开发建设管理委员会, 江苏 南京 211135)

摘要:为高效处理洗浴废水, 针对其水质特点, 研究采用混凝—吸附组合工艺处理洗浴废水。混凝剂采用聚合氯化铝、氯化铁和硫酸铝, 吸附剂采用活性氧化铝、凹凸棒土和粉末活性炭, 分别研究了混凝剂种类、投加量对混凝处理效果的影响, 吸附试验中研究了吸附剂类型和吸附剂投加量对处理效果的影响, 测定水中的浊度、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮和阴离子表面活性剂(LAS)等水质指标。数据对比分析得出, 聚合氯化铝作为混凝剂与粉末活性炭吸附组合工艺具有最佳的处理效果, 处理后水质满足我国城镇污水处理厂污染物排放标准中一级A的排放标准。

关键词:洗浴废水; 混凝; 吸附; 阴离子表面活性剂; 氨氮

中图分类号: X703.1

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2025)04-0027-0005

Experimental study on the treatment of bathing wastewater by coagulation-adsorption combined process

MIAO Lu¹, SUN Xiaoxu², DING Rui³

(1. Jiangning District Water Affairs Bureau, Nanjing 211100, China;

2. School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. Nanjing Qilin Science and Technology Innovation Park (Ecological Science and Technology City)
Development and Construction Management Committee, Nanjing 211135, China;)

Abstract: To efficiently treat bathing wastewater, in view of its water quality characteristics, a coagulation-adsorption combined process was studied for the treatment of bathing wastewater. Polymeric aluminum chloride, ferric chloride, and aluminum sulfate were used as coagulants, while activated alumina, attapulgite, and powdered activated carbon were used as adsorbents. The effects of the type and dosage of coagulants on the coagulation treatment efficiency were investigated respectively. In the adsorption experiments, the effects of the type and dosage of adsorbents on the treatment efficiency were studied. Water quality indicators such as turbidity, chemical oxygen demand (COD_{Cr}), ammonia nitrogen, and anionic surfactant (LAS) in the water were measured. Through comparative analysis of the data, it is concluded that the combined process of using polymeric aluminum chloride as a coagulant and powdered activated carbon for adsorption has the best treatment effect. After treatment, the water quality meets the Grade A of Level 1 in the discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plants in China.

Key words: bathing wastewater; coagulation; adsorption; anionic surfactant (LAS); ammonia nitrogen

收稿日期: 2025-02-12

作者简介: 缪璐(1985—), 女, 工程师, 本科, 研究方向为水利工程管理, 水环境整治与提升等。E-mail: 148308571@qq.com

洗浴废水是一种可回收再利用的优质中水水源,水量占城市生活污水量的30%,污染物浓度较低,相对于工业废水和其他类型的废水,处理成本较低,如果能够将洗浴废水单独收集处理后回用,不仅可以降低污水处理难度,简化处理设备,降低处理成本,而且最重要的是,可以缓解城市水资源短缺压力。

洗浴废水主要污染指标有浊度、 COD_{Cr} 、 BOD_5 、LAS等,LAS具有化学稳定性高、生物降解性差等特点,是洗浴废水相较难去除的污染物之一^[1]。针对洗浴废水的水质特点,常采用混凝法、过滤吸附法、Fenton氧化法、膜处理等技术对洗浴废水进行处理,或联用不同方法^[2-4]。混凝法是废水处理的常用方法,处理洗浴废水时,混凝剂不仅可以去除吸附在胶体表面上的LAS,还可与溶解在水相中的LAS形成难溶性的沉淀物,同时洗浴废水的水温在冬季也能达到20℃以上,该温度有利于水中絮凝体形成,而且脱稳凝聚能力较好,废水的pH值为7.0左右,有利于胶体的形成;吸附法是指利用固体多孔材料将废水中的污染物质吸附去除,常用的吸附剂包括硅藻土、凹凸棒土、活性炭、火山岩、沸石等,这些吸附剂具有较大的表面积和较强的吸附能力。多年的生产应用实践表明,一般对轻污染废水先进行混凝沉淀和过滤,然后进行吸附,且运行效果都比较理想,采用吸附法处理洗浴废水是合理可行的。

本研究采用混凝—吸附组合工艺处理洗浴废水,混凝剂选用了聚合氯化铝、氯化铁和硫酸铝,吸附剂采用活性氧化铝、凹凸棒土和粉末活性炭,分别研究混凝剂种类、投加量对混凝处理效果的影响,吸附试验中研究了吸附剂类型和吸附剂投加量的处理效果。

1 实验设计与样品测试

1.1 主要药品及仪器

实验所用洗浴废水采用洗浴用品进行配制,每30 L自来水中加入10 mL洗发露和10 mL沐浴露,测得初始废水浊度、 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 及LAS质量浓度。采用的混凝剂为聚合氯化铝、硫酸铝和氯化铁,质量浓度均为10 g/L;吸附剂为活性氧化铝、凹凸棒土和粉末活性炭(表1)。

主要药品:氯仿、重铬酸钾、硫酸亚铁铵、酒石酸钾钠、硫酸银、水杨酸、次氯酸钠、亚硝基铁氰化钠,均为分析纯。主要仪器:电子分析天平(型号BL610),电热恒温鼓风干燥箱(型号DHG-9090A),

表1 混凝剂和吸附剂具体信息

药品名称	试剂级别
聚合氯化铝	分析纯
硫酸铝	分析纯
氯化铁	分析纯
活性氧化铝粉(200目)	纯度>99%
凹凸棒土(200目)	分析纯
粉末活性炭(100目)	

箱式电炉(型号SX2),浊度仪(型号TB-2000),六联搅拌器(型号JJ-4),紫外及可见分光光度计(型号SP-1105)。

1.2 实验设计

(1)混凝实验

取6个2 L的烧杯,每个烧杯中加入1 000 mL废水,加入不同量的混凝剂,聚合氯化铝投加量分别为0.1 mL、0.2 mL、0.3 mL、0.4 mL、0.5 mL、0.6 mL,氯化铁投加量分别为0.125 mL、0.3 mL、0.475 mL、0.65 mL、0.825 mL、1 mL,硫酸铝投加量分别为0.125 mL、0.3 mL、0.475 mL、0.65 mL、0.825 mL、1 mL。将烧杯置于六联搅拌器上,快速搅拌30 s(转速300 r/min),中速搅拌5 min(转速150 r/min),慢速搅拌10 min(转速50 r/min)。搅拌后静置15 min,抽取上清液进行浊度、 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 和LAS质量浓度测定。

(2)吸附实验

取5个锥形瓶,每个锥形瓶中加入100 mL废水(经过聚合氯化铝混凝处理后的废水),加入不同质量的吸附剂,活性氧化铝投加量分别为1 g、1.5 g、2 g、2.5 g、3 g,凹凸棒土投加量分别为0.2 g、0.5 g、1 g、1.5 g、2 g,粉末活性炭投加量分别为0.05 g、0.1 g、0.15 g、0.20 g、0.25 g。加入吸附剂后使用保鲜膜封口并用绷带固定在振荡器上振荡1 h(转速100 r/min),振荡结束后静置5 min,采用0.45 μm 微孔滤膜进行过滤,过滤后的水样进行浊度、 COD_{Cr} 、 NH_4^+-N 和LAS质量浓度测定。

1.3 样品测试

共测定了浊度、 COD_{Cr} 、氨氮及LAS 4个参数,浊度采用浊度仪(型号TB-2000)进行测定,取待测水样10.00 mL,用蒸馏水将浊度仪校零后进行水样浊度测定; COD_{Cr} 值采用重铬酸钾法(GB11916-89)进行测定;氨氮质量浓度采用水杨酸—次氯酸盐法进行测定,LAS采用亚甲蓝分光光度法(GB/T7494-1987)进行测定。

2 结果与分析

2.1 原水水质特征

原水的水质特征如表2所示,通过查阅相关文献^[5-6]可知本次试验所配置原水水质参数基本符合洗浴废水的水质特点,COD_{Cr}和LAS值均在正常范围内,浊度和NH₄⁺-N质量浓度偏低。

表2 原水水质特征			
浊度/NTU	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{LAS})/(\text{mg/L})$
42.2	240.61	3.2155	1.6208

2.2 混凝处理效果分析

(1)聚合氯化铝的处理效果分析

经聚合氯化铝混凝处理后水样的浊度、COD_{Cr}值及氨氮含量,见表3。可知,随着聚合氯化铝投加量的增加,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度不断降低,但投加量为0.5~0.6 mL时,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度基本保持稳定。因此得出聚合氯化铝的最佳投加量为0.5 mL,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度分别为10.8 NTU、129.78 mg/L、1.6290 mg/L。与原水水质特征进行比较,计算得出聚合氯化铝混凝处理后浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N的去除率分别为74.40%、46.06%和49.34%。

表3 聚合氯化铝混凝处理后水质参数分析结果				
编号	聚合氯化铝投加量/mL	浊度/NTU	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg/L})$
1	0.1	21.4	182.52	2.7428
2	0.2	17.9	170.57	2.3021
3	0.3	13.6	157.79	2.1178
4	0.4	11.2	140.08	1.8133
5	0.5	10.8	129.78	1.6290
6	0.6	11.0	128.96	1.6492

(2)氯化铁的处理效果分析

经氯化铁混凝处理后水样的浊度、COD_{Cr}值及NH₄⁺-N质量浓度,见表4。可知,随着氯化铁投加量的增加,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度不断降低,但投加量为0.65~1.0 mL时,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度基本保持稳定。因此得出氯化铁的最佳投加量为0.65 mL,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度分别为12.4 NTU、141.73 mg/L、1.7572 mg/L。与原水水质

特征进行比较,计算得出氯化铁混凝处理后浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N的去除率分别为70.62%、41.10%和45.35%。

表4 氯化铁混凝处理后水质参数分析结果				
编号	氯化铁投加量/mL	浊度/NTU	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg/L})$
1	0.125	23.6	191.17	2.9030
2	0.300	19.4	178.39	2.4303
3	0.475	15.8	160.27	1.9736
4	0.650	12.4	141.73	1.7572
5	0.825	12.2	143.79	1.7411
6	1.000	11.9	140.08	1.7652

(3)硫酸铝的处理效果分析

经硫酸铝混凝处理后水样的浊度、COD_{Cr}值及NH₄⁺-N质量浓度,见表5。由表5可知,随着硫酸铝投加量的增加,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度不断降低,但投加量为0.825~1.0 mL时,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度基本保持稳定,因此得出硫酸铝的最佳投加量为0.825 mL,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N质量浓度分别为11.6 NTU、137.61 mg/L、1.5729 mg/L。与原水水质特征进行比较,计算得出硫酸铝混凝处理后浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N的去除率分别为72.51%、42.81%和51.08%。通过投加不同混凝剂对洗浴废水进行混凝处理,混凝出水水质有着明显的改善,3种混凝剂在最佳投加量时,浊度、COD_{Cr}和NH₄⁺-N的去除率对比如图1所示。可知聚合氯化铝作为混凝剂时,浊度和COD_{Cr}的去除率明显优于其他两种混凝剂,对NH₄⁺-N的去除,硫酸铝作为混凝剂时去除效果(51.08%)比聚合氯化铝混凝处理稍微高一些(49.34%),从投加量方面来看,聚合氯化铝的最佳投加量是0.5 mL,而硫酸铝最佳投加量是0.825 mL。综合考虑得出聚合氯化铝是处理洗浴废水最合适的混凝剂。因此,在设计吸附实验时,使用聚合氯

表5 硫酸铝混凝处理后水质参数分析结果				
编号	硫酸铝投加量/mL	浊度/NTU	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg/L})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg/L})$
1	0.125	23.0	186.22	2.7348
2	0.300	18.4	174.28	2.4784
3	0.475	14.8	165.21	2.1098
4	0.650	13.3	151.62	1.9896
5	0.825	11.6	137.61	1.5729
6	1.000	11.5	138.84	1.5889

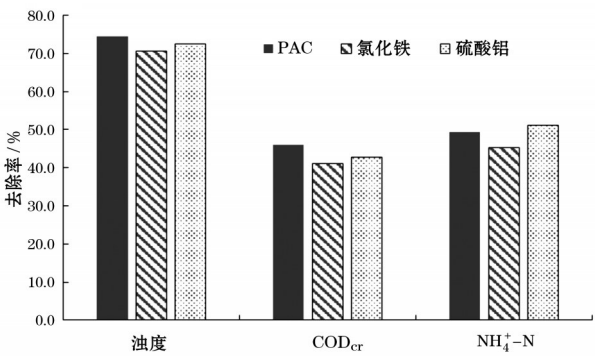


图1 混凝处理后浊度、COD_{cr}和NH₄⁺-N的去除率对比

化铝混凝处理后的废水作为吸附实验的原水。

2.3 吸附实验结果分析

2.3.1 吸附剂投加量对处理效果的影响

采用聚合氯化铝混凝处理后的废水作为吸附实验的原水(浊度 10.8 NTU, COD_{cr}为 129.78 mg/L、NH₄⁺-N 质量浓度为 1.6290 mg/L)。研究不同吸附剂的投加量对处理效果的影响,采用活性氧化铝、凹凸棒土和粉末活性炭作为吸附剂的实验结果如图2所示。可知,随着吸附剂投加量的增加,水的浊度、COD_{cr}和NH₄⁺-N 质量浓度均不断降低,在某一个投加量之后,浊度、COD_{cr}和NH₄⁺-N 质量浓度趋于稳定,可以得出每 100 mL 废水中活性氧化铝的最佳投加量是 2.0 g、凹凸棒土最佳投加量是 1.5 g,粉末活性炭最佳投加量是 0.20 g。

2.3.2 不同吸附剂处理效果对比分析

在最佳投加量的情况下,不同吸附剂对浊度、

COD_{cr}、氨氮的去除率如表6所示。可知,以去除率为y轴绘制柱状图,如图3所示,可以看出,经过吸附处理后,出水COD_{cr}、氨氮值均符合我国城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)中一级A的排放标准。三种吸附剂对浊度的去除率相差不大,均在46%左右,COD_{cr}的去除率在66.35%~73.33%之间,氨氮的去除率在41.81%~52.63%之间,采用粉末活性炭时,COD_{cr}和氨氮的去除率均达到了最大值,因此采用吸附法处理洗浴废水,粉末活性炭具有良好的应用前景。

2.4 组合工艺处理效果分析

2.4.1 LAS处理效果分析

LAS作为洗浴废水中重要的污染物之一,含量高、去除难度大,论文在确定了最适合处理洗浴废水的混凝剂和吸附剂之后,对LAS的处理效果进行研究。初始废水经聚合氯化铝混凝结束后,抽取上层清液按照水质分析方法进行LAS测定。测定结果如表7所示,可以看出随着聚合氯化铝投加量的增加,LAS值不断降低,投加量超过0.4 mL后,LAS值趋于稳定。最佳投加量(0.5 mL)的聚合氯化铝混凝处理后,采用粉末活性炭对废水继续进行处理,实验数据列于表7,在活性炭最佳投加量时(0.2 g),废水中的LAS值为0.2248 mg/L,符合我国城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)中一级A的排放标准。经过计算,使用聚合氯化铝作为混凝剂对LAS的去除率为46.96%,使用粉末活性炭作为

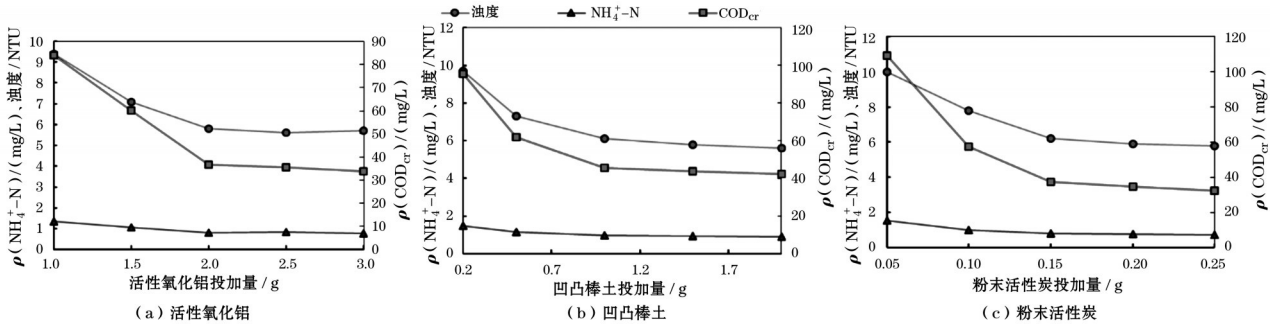


图2 浊度、COD_{cr}、NH₄⁺-N质量浓度随吸附剂投加量的变化规律

表6 不同吸附剂吸附处理后各参数的去除率结果

水质参数	浊度		COD _{cr}		NH ₄ ⁺ -N	
	浊度值/NTU	去除率/%	质量浓度/(mg/L)	去除率/%	质量浓度/(mg/L)	去除率/%
混凝处理后出水	10.8		129.78		1.6290	
活性氧化铝吸附处理	5.8	46.29	36.67	71.74	0.8197	49.68
凹凸棒土吸附处理	5.8	46.30	43.67	66.35	0.9479	41.81
粉末活性炭吸附处理	5.9	45.37	34.61	73.33	0.7716	52.63

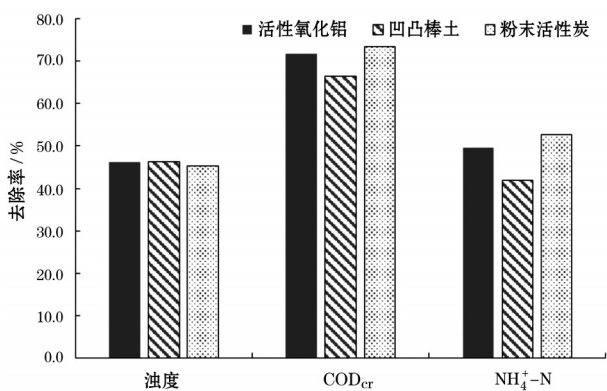


图3 不同的吸附剂对浊度、COD_{Cr}和氨氮的去除效果对比

吸附剂对LAS的去除率为73.85%。根据去除率的比较可以看出,吸附阶段更有利于LAS的去除。

2.4.2 综合处理效果分析

通过实验,研究了混凝—吸附组合工艺对洗浴废水的处理效果,确定了最佳混凝剂(聚合氯化铝)和最佳吸附剂(粉末活性炭),并确定了它们的最佳投加量。根据吸附处理后废水和原水的浊度、COD_{Cr}、NH₄⁺-N和LAS值进行总的去除率计算,结果如表8所示。可知,混凝—吸附组合工艺处理洗浴废水具有明显效果,浊度、COD_{Cr}和LAS的去除率均高达

表7 聚合氯化铝混凝—活性炭吸附联合处理后废水LAS含量

聚合氯化铝		粉末活性炭	
投加量/ mL	出水中ρ(LAS)/ (mg/L)	投加量/ g	出水中ρ(LAS)/ (mg/L)
0.1	1.4069	0.05	0.7229
0.2	1.0771	0.10	0.4914
0.3	0.9684	0.15	0.2331
0.4	0.8527	0.20	0.2248
0.5	0.8597	0.25	0.2318
0.6	0.8422		

86%,NH₄⁺-N的去除率达到76%。

3 结 论

通过实验得出处理洗浴废水最佳的混凝剂是聚合氯化铝,每1 L废水的投加量是0.5 mL聚合氯化铝,粉末活性炭是最佳的吸附剂,最佳投加量是每100 mL 0.2 g。经过综合处理后,浊度、COD_{Cr}、NH₄⁺-N和LAS质量浓度分别为5.9 NTU、34.61 mg/L、0.7716 mg/L和0.2248 mg/L,水质符合我国城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)中一级A

表8 洗浴废水各参数总的去除率

项目	浊度		COD _{Cr}		NH ₄ ⁺ -N		LAS	
	浊度值/ NTU	去除率/%	质量浓度/ (mg/L)	去除率/%	质量浓度/ (mg/L)	去除率/%	质量浓度/ (mg/L)	去除率/%
原水	42.2		240.61		3.2155		1.6208	
混凝-吸附组合工艺处理后出水	5.9	86.02	34.61	85.62	0.7716	76.00	0.2248	86.13

的排放标准,采用混凝(聚合氯化铝)—吸附(粉末活性炭)组合工艺处理洗浴废水具有良好的效果。本文中所用废水采用洗浴用品进行配制,与实际洗浴废水水质存在一定的差别,研究主要聚焦于混凝—吸附组合工艺本身,对其他可用于洗浴废水处理工艺的对比分析不足,今后需进一步优化实验设计,使其更好地适应实际工况。

参考文献:

[1] 文展. 洗浴废水处理技术研究进展[J]. 山西化工,2022, 42(8):32-33.

[2] 许春红,刘永德,刘战果,等. 混凝沉淀预处理洗浴废水试验研究[J]. 工业用水与废水,2013,44(3):39-41,63.

[3] 林静雯,邵绕蔚,王英刚,等. 用改性壳聚糖复配聚合氯化铝处理洗浴废水的研究[J]. 沈阳大学学报(自然科学版),2013,25(5):350-354.

[4] 李婉妮. 过滤吸附和生物活性炭技术处理洗浴废水的研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.

[5] 厉琨. 电絮凝气浮原位处理回用洗浴废水实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.

[6] 段玉戈. 洗浴废水特点及处理技术分析[J]. 山西建筑, 2016,42(27):128-130.