

奶牛养殖废水厌氧出水的吹脱混凝处理试验研究

金要勇, 孟海玲*, 刘再亮, 张 回

(安徽工业大学能源与环境学院, “生物膜法水质净化及利用技术”教育部工程研究中心, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要:为探索高效、可行的养殖废水处理方法,以马鞍山蒙牛现代牧场废水处理中的 UASB 出水为研究对象,进行吹脱和混凝试验处理。通过 UASB 出水吹脱处理试验,对比不同 pH 值、吹脱时间、气液比(体积比)、温度等参数对氨氮的去除效果,再对吹脱出水进行混凝处理试验,选择 PFS(聚合硫酸铁)、PAC(聚合氯化铝)为混凝剂,分别研究混凝剂投加量、pH 值、搅拌速率、搅拌时间、沉淀时间对混凝效果的影响。结果表明:吹脱试验中,当 pH 值为 11、吹脱时间为 5 h、气液比为 3000、温度为 30 ℃时,氨氮去除效果最好,去除率达 85.5%,UASB 出水氨氮浓度由 468.1 mg·L⁻¹ 降到 67.9 mg·L⁻¹。混凝试验中,确定 PFS 为较佳混凝剂,当 PFS 投加量为 2.85 g·L⁻¹、搅拌速率为 180 r·min⁻¹、搅拌时间为 4 min、沉淀时间为 20 min 时,处理效果最好,处理水 COD_{Cr} 和 SS 分别由 713.4、458.0 mg·L⁻¹ 降到 154.1、123.2 mg·L⁻¹,去除率分别达到 78.4%和 73.1%。出水氨氮略有降低,降至 50.9 mg·L⁻¹,最终出水达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)。

关键词:沼液;UASB;氨吹脱;混凝

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0384-07 doi:10.11654/jaes.2015.02.024

Treatment of Anaerobic Effluent of Dairy Wastewater by Ammonia Stripping-Coagulation Combination

JIN Yao-yong, MENG Hai-ling*, LIU Zai-liang, ZHANG Hui

(Energy and Environment School, “Water Purification and Utilization Technology of Biofilm Process” Engineering Research Center of Ministry of Education, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: The UASB effluents often contain relatively high ammonia, which affects their secondary treatment. In this experiment, a combined ammonia stripping and coagulation method was used to treat the UASB effluents of dairy farm wastewater from Maanshan Mengniu modern ranch. In the stripping experiment, influences of pH values, stripping time, air-liquid ratios(volume ratio), and temperature on ammonia removal rate were investigated. In the coagulation experiment, PFS(Polymeric Ferric Sulfate) and PAC(Polyaluminium Chloride) were selected as coagulants to treat the ammonia stripping effluent. Influences of coagulant rates, pH values, stirring rates, stirring time, and settlement time on coagulation effectiveness were studied. The results showed that the highest ammonia removal rate was 85.5% at pH value of 11, stripping time of 5 hours, air-liquid ratio of 3000 and temperature of 30 ℃, reducing ammonia concentration from 468.1 mg·L⁻¹ to 67.9 mg·L⁻¹. PFS was a better coagulant, and decreased COD_{Cr} and SS concentrations to 154.1 mg·L⁻¹ and 123.2 mg·L⁻¹ from 713.4 mg·L⁻¹ and 458.0 mg·L⁻¹, respectively. The COD_{Cr} and SS removal rates were up to 78.4% and 73.1%, respectively, at PFS rate of 2.85 g·L⁻¹, stirring rate of 180 r·min⁻¹, stirring time of 4 min and settlement time of 20 min. After coagulation, ammonia nitrogen further dropped to 50.9 mg·L⁻¹. The final effluent met the requirements of “Pollutant discharge standards of livestock and poultry breeding”(GB 18596—2001).

Keywords: slurries; UASB; ammonia stripping; coagulation

近年来,规模化、集约化的畜牧业得以迅猛发展,畜牧业逐渐成为我国农村经济的优势产业和支柱产业

业,同时畜禽养殖废水的排放和处理问题也日益严重,若治理不当,可导致水体的富营养化,造成水体、土壤和环境空气的严重污染,直接影响人们的身体健康和正常生产生活^[1]。目前一般的养殖场污水处理设施不够完善,即使少数已建有较为完善的设施,也普遍存在处理效果不佳,排水水质不达标的问题。因此,开发研究高效、可行的处理技术,加强对畜禽养殖废

收稿日期:2014-08-10

基金项目:安徽工业大学研究生创新基金(2013037)

作者简介:金要勇(1991—),男,硕士研究生,研究方向为难降解废水处理。E-mail:jinyayong@126.com

*通信作者:孟海玲 E-mail:menghlahut@163.com

水的处理显得至关重要。

目前畜禽养殖废水大多采用厌氧消化和好氧生化相结合的处理方法。厌氧处理不需要氧源,运行费用低,既解决了大型畜牧养殖场的畜禽粪便废水污染问题,还能提供清洁的沼气。然而,养殖废水厌氧消化液存在着 COD_G 、氨氮浓度高,碳氮比严重失调等问题,往往使后续的好氧生物处理难以正常运行,导致不能达标排放。本试验对奶牛养殖废水 UASB 出水通过吹脱法去除其中的氨氮,确定其合适的运行条件,再采用化学混凝法对氨吹脱出水进行处理,得出较佳的运行参数,为养殖废水的后续处理探索高效、可行的处理方法。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验用水为马鞍山蒙牛现代牧场奶牛养殖废水的 UASB 出水。该奶牛场采用干清粪工艺,废水主要由尿液、部分残余的粪便和饲料残渣、冲洗水组成,其中冲洗水占绝大部分,主要处理流程如图 1 所示。

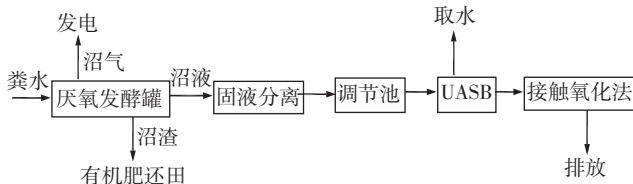


图 1 牧场奶牛养殖废水处理流程图

Figure 1 Flow chart of dairy wastewater treatment

UASB 采用中温发酵,水力停留时间为 3 d。其进水水质为: COD_G 4000~5000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 800~1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SS 1400~1600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 8.10~8.70; 出水水质为: COD_G 1100~1600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 400~550 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SS 920~980 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 7.60~8.50。

1.2 试验装置

1.2.1 吹脱试验装置

如图 2 所示。氨吹脱柱高 1 m, 直径 10 cm, 置于储液池(容积 5 L)内, 每次氨吹脱试验用水量为 3 L, 吹脱柱底部装有曝气头(连接在排气量为 65 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的空气泵上, 通过转子流量计控制反应过程的气流量), 储液池内装有加热棒(温度可调)、潜水泵(扬程为 1.6 m)等。距吹脱柱底部 0.4 m 处设置隔板, 把吹脱柱分为上下两个部分, 隔板上布满直径为 0.5 cm 的小孔。在隔板上方装有填料, 填料高 0.5 m, 选用直径为 25 mm 的聚乙烯空心多面球。液体喷头位于填

料上方 0.1 m 处, 吹脱柱中空气由底部向上流动、液体由顶部向下喷淋, 形成错流环境, 以提高氨气吹脱效果。装置运行时, 通过曝气头进行曝气吹脱, 由潜水泵把水样抽提到吹脱柱上方, 由喷头均匀流出, 水样经填料和隔板, 最终进入吹脱柱底部, 再由潜水泵抽提, 循环往复。试验用盐酸溶液吸收吹脱出氨气, 在不同的吹脱时间段从储液池中抽取水样测定氨氮值。

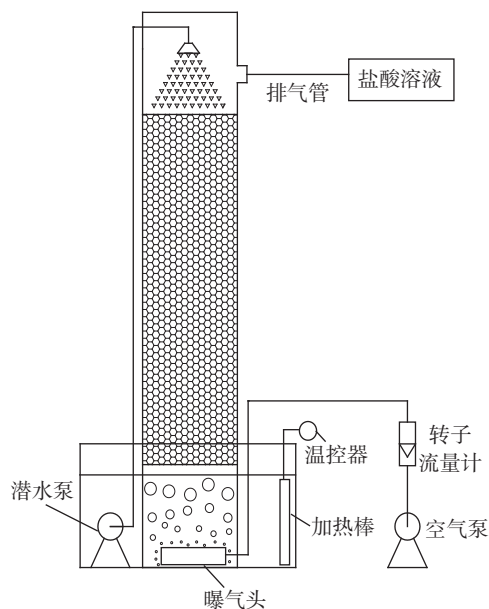


图 2 氨吹脱试验装置

Figure 2 Experimental apparatus of ammonia stripping

1.2.2 混凝试验装置

混凝试验利用六联电动搅拌器搅拌, 在 250 mL 的烧杯中进行, 每次试验用水量为 200 mL。

1.3 试验方案

1.3.1 吹脱试验方案

首先研究 pH 值及吹脱时间对 UASB 出水氨吹脱的影响, 在获得较佳 pH 值和吹脱时间基础上, 研究气液比与水温 2 个参数的影响。水样 pH 值采用投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行调节, 气流量固定为 3000 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$, 气液比是随吹脱时间而变化的。在确定了较佳 pH 值及吹脱时间条件下, 通过调节气流量来改变气液比, 探讨不同气液比的影响。水温通过可控的加热棒来进行调节。此外, 研究了在采用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节 pH 值时不同投加量对处理水 COD_G 和 SS 的影响。每次试验做三次重复, 吹脱试验方案如表 1 所示。

1.3.2 混凝试验方案

无机高分子混凝剂分子量大, 具有很强的吸附架桥和电中和作用, 在水处理上具有很好的絮凝效果,

表 1 吹脱试验方案
Table 1 Scheme of stripping experiment

试验参数	试验条件			
	pH 值	吹脱时间/h	气液比	温度/℃
pH 值	10	0.5, 1, 1.5, 2	气流量固定为 3000 L·h ⁻¹	25
	11	2.5, 3, 3.5, 4		
	12	4.5, 5, 5.5, 6		
气液比	11	5	1000, 1500, 2000	25
			2500, 3000, 3500	
			4000, 4500, 5000	
温度	11	5	3000	10, 15, 20
				25, 30, 35

且其生产费用低,因而得到了大范围的应用。聚合氯化铝(PAC)和聚合硫酸铁(PFS)混凝剂是无机高分子絮凝剂的典型代表^[2]。

对吹脱处理后的出水,分别选用 PFS^[3]和 PAC^[4-5]进行处理试验。通过改变混凝剂投加量、pH 值、搅拌速率^[6-7]、搅拌时间和沉降时间等参数,取上清液测其 pH 值、COD_{Cr}、SS 和氨氮浓度。比较不同参数下的出水去除效果,最终确定试验中最佳的混凝剂种类及其运行参数,每次试验做三次重复,混凝试验方案如表 2 所示。

1.4 分析项目与方法

COD_{Cr} 的测定采用重铬酸钾法^[8],氨氮的测定采用纳氏试剂比色法^[8],SS 的测定采用重量法^[8],pH 采用 PHS-3C 型精密数字显示酸度计测定。采用 SPSS 19 统计分析软件在 95%置信区间作方差分析,进行差异显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 氨氮吹脱试验

试验所用 UASB 出水氨氮为 410~510 mg·L⁻¹,

COD_{Cr} 为 1100~1300 mg·L⁻¹,pH7.8~8.1。

2.1.1 吹脱时间和 pH 值对去除氨氮的影响

不同 pH 值和吹脱时间下的氨氮去除率如图 3 所示。对吹脱时间和 pH 值进行多因素方差分析,可知二者的交互作用对氨氮去除率无影响。pH 值一定时,随着吹脱时间的增加,氨氮去除率逐渐增加,5 h 以后均趋于平缓,不同吹脱时间下的氨氮去除率有显著差异($P<0.05$),在吹脱时间 5~6 h 之间不存在显著差异($P>0.05$),试验得出的较佳吹脱时间为 5 h。相同的吹脱时间条件下,氨氮去除率随着 pH 值的增大而增大,pH 值为 11 与 12 的氨氮去除率较显著高于 pH 值为 10($P<0.01$),而 pH 值为 11 与 12 之间不存在显著差异($P>0.05$),且高 pH 容易导致吹脱过程中产生大量黏性气泡,降低曝气吹脱池的容积利用率^[9]。试验确定氨吹脱的较佳 pH 值为 11。

当吹脱时间为 5 h、pH 值为 11 时,氨氮去除率为 82.8%,此时出水氨氮浓度为 70.8 mg·L⁻¹。曾晓岚等^[10]

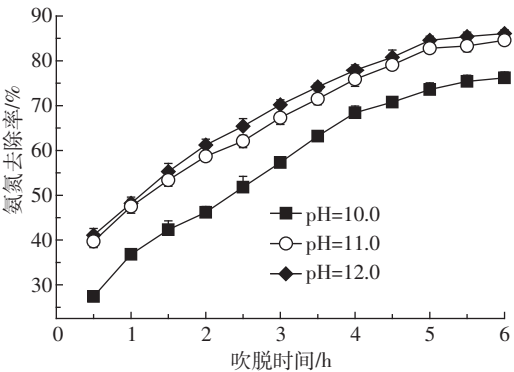


图 3 不同 pH 值下氨氮去除率随吹脱时间的变化
Figure 3 Variation of ammonia removal rate with stripping time at different pH values

表 2 混凝试验方案
Table 2 Scheme of coagulation experiment

试验参数	试验条件				
	PFS 投加量/g·L ⁻¹	PAC 投加量/g·L ⁻¹	搅拌速率/r·min ⁻¹	搅拌时间/min	沉降时间/min
PFS 投加量	0.81, 1.22, 1.63	0.10, 0.15, 0.20, 0.25	160	5	20
	2.04, 2.44, 2.85				
	3.26, 3.66, 4.07				
PAC 投加量		0.30, 0.35, 0.40, 0.45	160	5	20
		0.50, 0.55, 0.60			
搅拌速率	2.85		80, 100, 120, 140	5	20
搅拌时间	2.85		160, 180, 200, 220		
沉降时间	2.85		180	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	20
			180	4	5, 10, 15, 20, 25, 30

注:试验快速搅拌时间和速率均分别设定 30 s 和 280 r·min⁻¹

利用响应面学的方法对吹脱处理垃圾渗滤液的影响因素进行探讨时,也发现当 pH 超过 11、曝气时间大于 6 h 时,氨氮去除率基本维持在 85% 的较高水平。

2.1.2 气液比对去除氨氮的影响

提高氨氮的吹脱效果还可以通过增加气液界面的表面张力来实现,恰当的气液比也是提高吹脱效果的重要条件。在 pH 值为 11、吹脱时间为 5 h 基础上,研究气液比对出水氨氮的影响。

由图 4 可知,氨氮去除率随气液比的增大而增大,由 52.3% 上升到 84.2%。当气液比为 1000~3000 时氨氮去除率较显著增加 ($P < 0.01$),而当气液比为 3000~5000 时氨氮去除率变化趋于平缓,气液比为 3000~4000 时氨氮去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。综合考虑动力消耗和吹脱效率两个因素,试验较佳气液比为 3000,此时氨氮去除率为 77.8%。

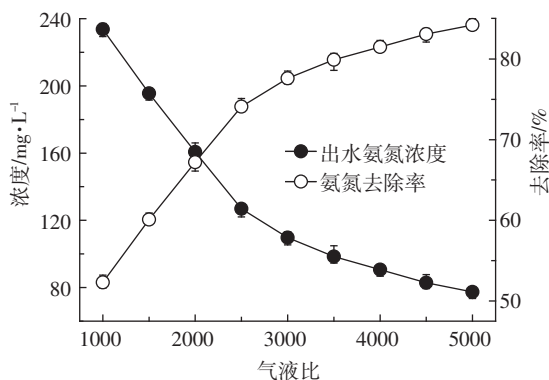


图 4 不同气液比下的出水氨氮浓度和氨氮去除率

Figure 4 Ammonia concentrations and removal rates at different air-liquid ratios

2.1.3 温度对去除氨氮的影响

提高水温可提高厌氧消化液中游离态氨分子的浓度^[1],在一定压力下,氨在水中的溶解度随着温度的升高而降低,因此温度提高将使氨氮的去除率升高。在 pH 值为 11、吹脱时间为 5 h、气液比为 3000 的条件下,调节水样温度,测定不同温度下的氨氮去除率,如图 5 所示。氨氮去除率随着温度的升高而逐渐增加,温度由 10 ℃ 升高到 30 ℃ 时,氨氮去除率显著增加 ($P < 0.05$);当温度由 30 ℃ 升高到 35 ℃ 时,氨氮去除率变化不大,仅提高了 1.1 个百分点,不存在显著差异 ($P > 0.05$)。同时考虑到经济性,试验确定适宜的吹脱水温为 30 ℃。此时水样氨氮去除率为 85.5%,氨氮浓度由 468.1 mg·L⁻¹ 降到 67.9 mg·L⁻¹。

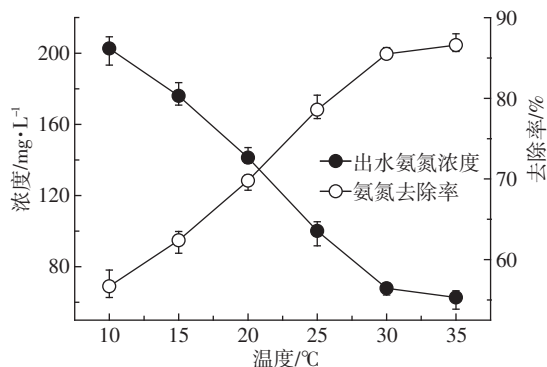


图 5 不同温度下的出水氨氮浓度和氨氮去除率

Figure 5 Ammonia concentrations and removal rates at different temperature

2.1.4 投加 Ca(OH)₂ 对 COD_{Cr} 的去除作用

与 NaOH 相比,投加 Ca(OH)₂ 不仅可以调节水样的 pH 值,并且由于石灰的混凝作用,Ca²⁺ 与 CO₃²⁻ 形成 CaCO₃ 沉淀,可降低废水中的 COD 和 SS,有效地降低了后续处理的有机负荷^[12]。试验结果如图 6 所示。

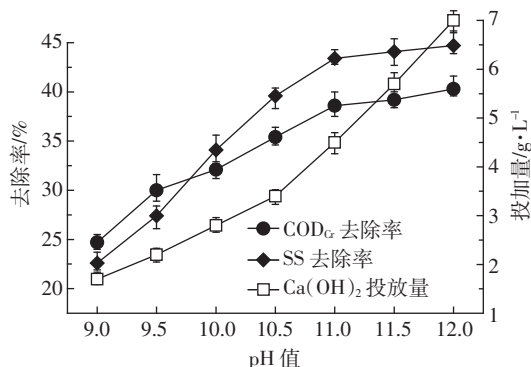


图 6 投加 Ca(OH)₂ 调 pH 值对出水的影响

Figure 6 Influences of pH with Ca(OH)₂ on treatment efficiencies of wastewater

随着 pH 值的增加,Ca(OH)₂ 投加量逐渐增加,COD_{Cr} 和 SS 去除率随着 pH 值的增大逐渐升高,pH 值为 11 时趋于稳定,pH 值在 11~12 时,COD_{Cr} 和 SS 去除率差异不显著 ($P > 0.05$)。较佳氨吹脱条件(pH 值为 11)下 Ca(OH)₂ 投加量为 4.5 g·L⁻¹,COD_{Cr} 和 SS 去除率分别为 38.6% 和 43.4%。隋倩雯等^[13]在氨吹脱处理猪场沼液试验中,在 Ca(OH)₂ 最佳投加量 5.0 g·L⁻¹ 条件下,COD 去除率最高,为 30.13%。投加 Ca(OH)₂ 调节厌氧消化液的 pH 值对氨氮的浓度基本没有影响。

2.2 混凝沉淀试验

混凝试验用水为在吹脱试验所确定的较佳参数条件下的吹脱出水,吹脱后出水水质为:COD_{Cr} 600~750 mg·L⁻¹,SS 420~490 mg·L⁻¹,氨氮 60~75 mg·L⁻¹,

pH9.43~9.71。确定混凝剂最佳投加量时,在试验确定的混凝操作条件下,根据文献资料^[14-15]大致确定混凝剂的初始投加量范围,比较不同混凝投加量下的出水效果,在相对较高去除率对应的投加量下再确定较小范围的投加量重复对比出水效果,最终确定混凝工艺的最佳参数。

2.2.1 PFS 投加量对处理效果的影响

图7为不同PFS投加量下出水 COD_Cr 和SS去除效果的变化情况。随着PFS投加量的逐渐增加,出水 COD_Cr 和SS去除率呈现先升高后降低的趋势,且具有显著差异($P<0.05$)。当PFS投加量为 $2.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD_Cr 和SS去除率最高,分别为74.8%和72.3%,出水 COD_Cr 和SS浓度分别为 154.1 、 $107.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验还探讨了投加PFS对水样氨氮和pH值的影响。当PFS投加量为 $2.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,氨氮去除率最高,为25.3%,此时出水氨氮浓度为 $51.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH值随着PFS投加量的增大而逐渐降低。试验确定PFS的最佳投加量为 $2.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

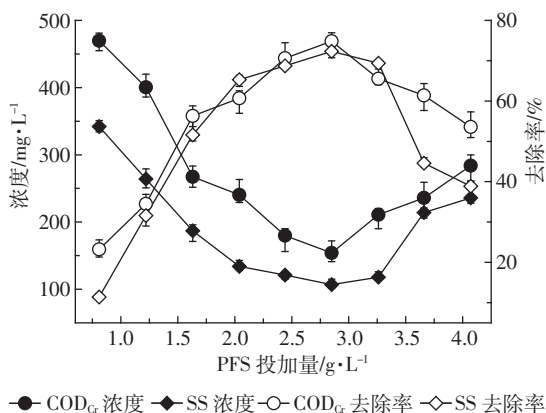


图7 PFS 投加量对混凝效果的影响

Figure 7 Effects of PFS rates on coagulation

2.2.2 PAC 投加量对处理效果的影响

图8为不同PAC投加量下出水 COD_Cr 和SS去除效果的变化情况。随着PAC投加量的逐渐增加,出水 COD_Cr 和SS去除率呈现先升高后降低的趋势,且具有显著差异($P<0.05$)。当PAC投加量为 $0.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, COD_Cr 和SS去除率最高,分别为25.0%和34.2%,出水 COD_Cr 和SS浓度分别为 540.6 、 $305.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验确定PAC的最佳投加量为 $0.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。不同PAC投加量下,氨氮浓度和pH值变化不大,最佳PAC投加量下氨氮去除率仅为14.7%,出水氨氮浓度为 $49.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH值为9.12。

由试验结果可知,PFS作为混凝剂时的处理效果

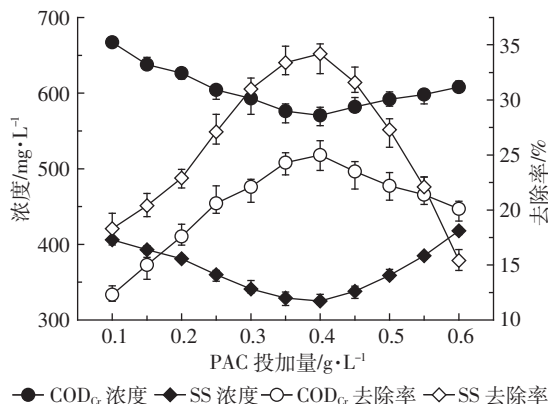


图8 PAC 投加量对混凝效果的影响

Figure 8 Effects of PAC rates on coagulation

明显优于PAC。即使调节水样的pH值,PAC的处理效果有所改善,调节pH值为6时,PAC的处理效果最好, COD_Cr 和SS的去除率分别达到58.7%和57.1%,仍远远低于PFS的处理效果(COD_Cr 和SS的去除率最高分别达到74.8%和72.3%)。故确定PFS为较优的混凝剂。

2.2.3 搅拌速率对处理效果的影响

采用PFS为混凝剂,投加量为 $2.85\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,不同搅拌速率的 COD_Cr 和SS去除效果如图9所示。

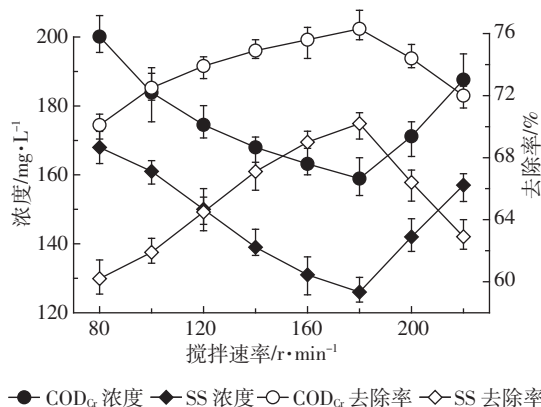


图9 搅拌速率对出水的影响

Figure 9 Effects of stirring rates on treatment of wastewater

随着搅拌速率增大, COD_Cr 和SS去除率呈先增大后减小的趋势,且有显著差异($P<0.05$),当搅拌速率为 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, COD_Cr 和SS去除率最大,分别为76.3%和70.2%,出水 COD_Cr 、SS和氨氮浓度分别为 $158.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $126\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $53.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验确定最佳搅拌速率为 $180\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

2.2.4 搅拌时间对处理效果的影响

其他条件不变,改变搅拌时间, COD_Cr 和SS去除

效果如图 10 所示。 COD_{Cr} 和 SS 去除率随搅拌时间的增加先升高后逐渐降低,且具有显著差异($P<0.05$)。当搅拌时间为 4 min 时, COD_{Cr} 和 SS 去除率最大,分别为 77.5%和 71.8%,此时出水 COD_{Cr} 、SS 和氨氮浓度分别为 $165.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $129 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $56.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验确定最佳搅拌时间为 4 min。

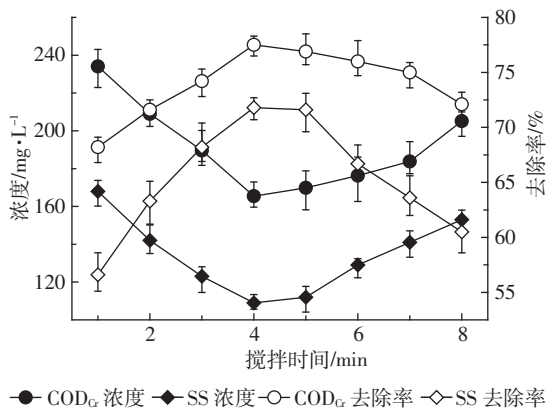


图 10 搅拌时间对出水的影响

Figure 10 Effect of stirring time on treatment of wastewater

2.2.5 沉降时间对处理效果的影响

采用上述试验确定的最佳运行参数,设置不同的静置沉淀时间,对应的混凝效果如图 11 所示。

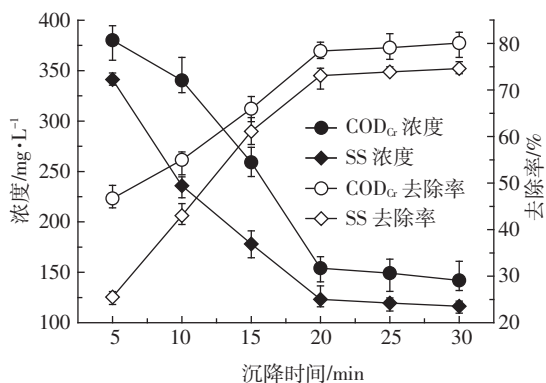


图 11 沉降时间对出水的影响

Figure 11 Effect of settlement time on treatment of wastewater

随着沉淀时间的延长, COD_{Cr} 和 SS 去除率逐渐增大,且具有显著差异($P<0.05$)。沉降时间在 5~20 min 之间时, COD_{Cr} 和 SS 去除率随沉降时间的增加快速上升,在 20~30 min 之间时,随沉降时间的延长,两者去除率虽有所增大,但增幅明显变小,无显著差异($P>0.05$)。从节约资源考虑,实验确定较佳沉淀时间为 20 min,此时 COD_{Cr} 和 SS 去除率分别达 78.4%、73.1%。

2.3 技术经济分析

以奶牛场排放废水 $300 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 为例,根据试验结果进行工程应用分析。吹脱工艺:按 $24 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 运行,选用 50 HP 风机进行曝气, 5.5 kW 离心泵进行抽提,电费约为 $1.7 \text{ 元}\cdot\text{m}^3$ 。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($350 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$) 耗费约为 $1.6 \text{ 元}\cdot\text{m}^3$,混凝工艺:PFS ($1400 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$) 投加量为 $1.63 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (由试验数据可知此投加量下出水 COD_{Cr} 和 SS 浓度已达到排放标准)时,耗费约为 $2.3 \text{ 元}\cdot\text{m}^3$ 。合计吹脱和混凝水处理成本约为 $5.6 \text{ 元}\cdot\text{m}^3$ 。

3 结论

(1) 吹脱试验确定较佳的运行参数为:pH 值为 11,吹脱时间为 5 h,气液比为 3000,温度为 30°C ,此条件下氨氮去除率为 85.5%;调水样 pH 值为 11 时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 投加量为 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, COD_{Cr} 和 SS 去除效率最高,分别为 38.6%和 43.4%。

(2) 混凝沉淀试验确定 PFS 为较佳的混凝剂,最佳投加量为 $2.85 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,不改变原水 pH 值,搅拌速率为 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,搅拌时间为 4 min,沉降时间为 20 min 时,水样 COD_{Cr} 和 SS 去除率分别达到 78.4%和 73.1%。

(3) 奶牛养殖废水 UASB 出水经吹脱和混凝处理后,出水 COD_{Cr} 、SS、氨氮浓度分别为 154.1、123.2、 $50.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。处理后出水达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),吹脱和混凝水处理成本约为 $5.6 \text{ 元}\cdot\text{m}^3$ 。

参考文献:

- [1] 陈蕊,高怀友,傅学起,等. 畜禽养殖废水处理技术的研究与应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 374-377.
CHEN Rui, GAO Huai-you, FU Xue-qi, et al. Study and application of treatment technology on wastewater from livestock farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 374-377.
- [2] Zeng Y B, Park J B. Characterization and coagulation performance of a novel inorganic polymer coagulant-poly-zinc-silicate-sulfate[J]. *Colloid Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 33(4): 147-154.
- [3] Wang H M, Min X B, Chai L Y, et al. Biological preparation and application of poly-ferric sulfate flocculant[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 2542-2547.
- [4] Zheng H L, Zhu G C, Jiang S J, et al. Investigations of coagulation-flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs[J]. *Desalination*, 2011, 269: 148-156.
- [5] 李风亭,何艳,潘宏杰,等. 聚合氯化铝混凝性能的影响因素研究[J]. 工业水处理, 2008, 28(10): 40-43.
LI Feng-ting, HE Yan, PAN Hong-jie, et al. Study of the influential

- factors of poly aluminum chloride on the coagulation performance[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(10):40-43.
- [6] 金鹏康, 张瑶瑶, 冯永宁, 等. 腐植酸絮凝体形成过程中初期搅拌条件对其形态结构的影响[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(6):1553-1560.
- JIN Peng-kang, ZHANG Yao-yao, FENG Yong-ning, et al. Effects of initial stirring conditions on humic floc morphological structure during coagulation on process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(6):1553-1560.
- [7] Zhang Z G, Liu D, Hu D D, et al. Effect of Slow-Mixing on the coagulation performance of polyaluminum chloride(PACI)[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2013, 21(3):318-323.
- [8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Methods for the monitoring and analysis of wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [9] 曾晓岚, 万 鹏, 丁文川, 等. 曝气吹脱预处理渗滤液影响因素的中试研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(8):3314-3319.
- ZENG Xiao-lan, WAN Peng, DING Wen-chuan, et al. Pilot study on influencing factors of pretreating leachate with ammonia stripping process[J]. *Journal of Central of South University(Science and Technology)*, 2012, 43(8):3314-3319.
- [10] 曾晓岚, 李作鑫, 丁文川, 等. 响应面法优化吹脱处理垃圾渗滤液[J]. *水处理技术*, 2011, 37(3):61-64.
- ZENG Xiao-lan, LI Zuo-xin, DING Wen-chuan, et al. Optimization of ammonia nitrogen stripping of landfill leachate by response surface methodology[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 37(3):61-64.
- [11] Angeles de la Rubia M, Walker M, Heaven S, et al. Preliminary trials of in situ ammonia stripping from source segregated domestic food waste digestate using biogas; Effect of temperature and flow rate[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101:9486-9492.
- [12] 陈 建. 吹脱法处理垃圾渗滤液中高浓度氨氮的主要影响因素[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(4):128-131.
- CHEN Jian. Main disposal influencing factors of high concentration ammonia nitrogen in landfill leachate by air stripping method[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(4):128-131.
- [13] 隋倩雯, 董红敏, 朱志平, 等. 提高猪场沼液净化处理效果的氨吹脱控制参数[J]. *农业工程学报*, 2012, 82(11):205-211.
- SUI Qian-wen, DONG Hong-min, ZHU Zhi-ping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of pig-gery wastewater[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11):205-211.
- [14] 潘世英, 万吉昌, 高宝玉, 等. 混凝试验条件下混凝剂最佳投加量的选择方法研究[J]. *工业水处理*, 2011, 31(10):25-27.
- PAN Shi-ying, WAN Ji-chang, GAO Bao-yu, et al. Studies on the determination of optimum dosage of coagulant under different coagulation experimental conditions[J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, 31(10):25-27.
- [15] 胡毓敏. 混凝理论与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 194-198.
- HU Yu-min. Coagulation theory and application[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007:194-198.