

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190002

酸改性蛭石连续化絮凝装置的设计与研究

王 昶, 王耀琛, 马一鸣, 曾 明, 孙娟娟
(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 针对酸改性蛭石絮凝剂建立了一套连续絮凝装置, 考察无机矿物蛭石絮凝剂对有机胶体牛奶模拟废水浊度和 COD 的去除率、Zeta 电位以及沉降速度的影响, 并与传统无机絮凝剂聚合氯化铝 (PAC) 进行对比。由实验结果可知: 连续絮凝装置出水浊度和 COD 去除率虽然比间歇的烧杯实验上清液低, 但仍然可以分别达到 91.4% 和 73%, 传统 PAC 即使在最佳条件下, 出水浊度和 COD 去除率只有 39.3% 和 33.2%。酸改性蛭石絮凝剂电中和效果和形成的絮体沉降速度都优于传统的 PAC, 在最佳投加量下, 蛭石絮凝剂上清液的 Zeta 电位接近 0 mV, 絮体易于絮凝, 而 PAC 的 Zeta 电位为 -6 mV, 难以压缩而松散。

关键词: 无机矿物材料; 蛭石; 连续絮凝装置; 絮凝沉降

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2020)03-0052-05

Design and Research of Continuous Flocculation Device for Acid Modified Vermiculite

WANG Chang, WANG Yaochen, MA Yiming, ZENG Ming, SUN Juanjuan

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: A continuous flocculation device was developed for acid modified vermiculite flocculant. The effects of inorganic mineral vermiculite flocculant on turbidity, COD removal efficiency, Zeta potential and settling rate of organic colloidal milk wastewater were investigated, and compared with traditional inorganic flocculant polyaluminum chloride (PAC). The experimental results show that the turbidity and COD removal efficiencies of the effluent from continuous flocculation unit reached 91.4% and 73% respectively, although they were lower than those of batch beaker supernatant. However, the turbidity and COD removal efficiency of the effluent from the traditional PAC were only 39.3% and 33.2% even under the optimum conditions. The electro-neutralization effect of acid-modified vermiculite flocculant and the settling speed of flocs formed were better than those of the traditional PAC. With the optimum dosage, the Zeta potential of supernatant for vermiculite flocculant was close to 0 mV, and flocs were easy to flocculate, while the Zeta potential of supernatant for PAC was -6 mV, which was loose and difficult to compress.

Key words: inorganic mineral material; vermiculite; continuous flocculation device; flocculation and sedimentation

絮凝是一种高效的废水处理方法。絮凝技术已被广泛应用于各行各业, 如饮用水、废水处理以及食品、发酵工业等领域^[1-2]。该技术既可以降低原水的浊度和色度等感官指标, 又可以去除水中各种有毒有害污染物; 可自成独立系统, 又能与其他单元组合使用, 广泛用于预处理、中间处理和最终处理过程^[3-4]。

传统的聚合氯化铝 (PAC) 和聚合硫酸铁 (PFS), 在水中水解作用形成的聚合大分子无机物具有毒性, 易于产生二次污染, 沉降物难以利用; 另外, PAC 和 PFS 形成的絮体沉降性能差, 在实际应用过程中, 为加快分离速度需通过气浮方法将絮体上浮分离, 不能真正实现沉降分离。为此, 开发无生物毒性、絮凝效

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 天津市科技支撑计划资助项目 (14ZCDGNC00097); 天津市企业科技特派员项目 (18JCTPJC55100)

作者简介: 王 昶 (1958—), 男, 江苏人, 教授, wangc88@163.com

果良好的新型无机矿物絮凝剂尤其重要。针对这些问题,本团队^[5]选用含量丰富且有着多种矿物元素及良好的吸附性、溶出性、矿化性、离子交换性等特性的蛭石作为制备絮凝剂的原料,该材料具有广泛的开发和应用前景。研制和开发经济、高效、安全的絮凝剂,并使其连续化、产业化,是国内外重要的研究方向,针对新型无机矿物絮凝剂创建连续化设备,在絮凝剂产业化推广应用上具有十分重要的意义^[6-8]。

本研究从实际应用出发,依据混凝搅拌静置的间歇实验结果,使用本团队研发的无机矿物蛭石酸改性絮凝剂,设计一套连续处理的絮凝装置,处理配制而成的牛奶模拟废水,与 PAC 进行对比,详细考察连续搅拌速率、投加量对牛奶模拟废水的出水浊度、COD 去除率的影响以及最佳的操作条件,为新型酸改性蛭石絮凝剂的工业化应用提供基础实验数据。

1 材料与方 法

1.1 原料与仪器

邻苯二甲酸氢钾、硫酸汞、重铬酸钾、硫酸银、硫酸,分析纯,天津市江天化工技术有限公司;用于配制模拟废水的纯牛奶为市售某品牌纯牛奶;蛭石取自灵寿县嘉源矿产品加工厂。

Turb 550 型便携式浊度仪、PhotoLab S6 型光电比色计、Cond 3210 型电导率仪、pH 3210 型精密酸度计,德国 WTW 公司;FW100 型高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;JJ-4 型六联同步混凝搅拌器,金坛市城西瑞昌实验仪器厂。

1.2 牛奶模拟废水的制备

牛奶模拟废水具有发酵行业废水的特点^[9],其配制方法为:用纯水和自来水调制成电导率为 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的混合液,加入牛奶使其浊度达到 211 NTU。牛奶模拟废水的其他水质参数如下:pH 为 7.8 ~ 7.5; COD 为 529.6 ~ 536 mg/L,平均值为 533 mg/L;电导率为 332 ~ 336 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Zeta 电位为 -23 ~ -20.5 mV。从 Zeta 电位可知该废水为带有负电荷的胶体。

1.3 酸改性蛭石絮凝剂的制备

首先,对蛭石进行简单的预处理,将蛭石矿物材料置于粉碎机中研磨,过 200 目(74 μm)筛后置于室温下密封保存。然后,通过加入一定质量分数的 H_2SO_4 溶液改性蛭石,将 H_2SO_4 溶液和蛭石在室温下充分混合,反应 4 h 后在 105 $^\circ\text{C}$ 下干燥,制得酸改性蛭石絮凝剂。具体实验步骤可参考文献^[10]。

1.4 实验方法

开发无机矿物蛭石絮凝剂的连续化絮凝装置,需要考察絮凝过程的最佳条件,如桨叶的性质和尺寸、快搅拌速率、慢搅拌速率以及絮凝剂的最佳投加范围。烧杯实验具体步骤如下:取若干份原水水样于 500 mL 烧杯中,投加不同质量的酸改性蛭石絮凝剂,同时在六联同步混凝搅拌器上快速搅拌 3 min (200 r/min),慢速搅拌 15 min (40 r/min),静置 30 min。测定上清水样浊度、COD 以及 Zeta 电位,以浊度、COD、Zeta 电位作为评价絮凝效果的主要依据。

根据六联同步混凝搅拌器上的序批絮凝实验,依据快速搅拌与慢搅拌时间比为 5 : 1,将连续絮凝操作装置的快速搅拌槽的体积定为 0.6 L,慢搅拌槽的体积定为 3 L,桨叶长度与筒体直径比为 1 : 2,整个连续絮凝实验的流程如图 1 所示。该实验装置主要由进水装置、定量蠕动泵、絮凝剂搅拌装置、絮凝剂进料蠕动泵、快速搅拌槽和慢速搅拌槽构成。

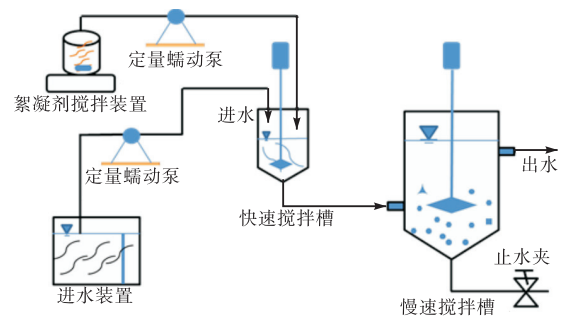


图 1 实验装置流程图

Fig. 1 Flow chart of the experimental device

将一定量的絮凝剂与水放入絮凝剂搅拌装置中,搅拌均匀,避免絮凝剂颗粒物沉降分离,保持均一浓度;以一定速度投加絮凝剂,同时将牛奶模拟废水通过加料蠕动泵定量加入到快速搅拌槽,然后通过液位差,以切线的方向,流入到沉降慢搅拌槽中,形成的絮体在重力作用下沉降到槽的底部,实现固液分离,上清液通过液位差的压力而排出。定时对出水进行分析,测定其浊度、COD 以及 Zeta 电位。为了进一步考察连续絮凝装置的运行效果,选用 PAC 絮凝剂进行对照实验^[5],实验步骤同上。

2 结果与讨论

2.1 酸改性蛭石絮凝剂投加量对絮凝效果的影响

通常絮凝实验是在六联同步混凝搅拌器上分段进行的,沉降分离过程不受干扰,而连续絮凝过程流

体的流动会直接影响絮体的沉降. 本文通过六联同步混凝搅拌器考察理想情况下蛭石絮凝剂投加量对絮凝效果的影响, 将其结果作为连续化装置实验的一个重要参考. 该过程蛭石絮凝剂投加量为 300 ~ 650 mg/L. 待实验结束后, 取静置下的上清水样, 测定其浊度与 COD, 结果如图 2 所示. 由图 2 可知: 经过絮凝剂的絮凝作用, 混浊的牛奶模拟废水的浊度和 COD 明显下降, 在投加量范围内, 都有较好的絮凝和沉降效果. 随着投加量的不断增加, 上清液的浊度先降低后升高, 而 COD 的变化趋势更加明显, 当投加量增加到 500 mg/L 时, 上清液的浊度和 COD 都为最低, 分别达到 2.5 NTU 和 104.1 mg/L, 去除率分别达到 98.8% 和 80.5%, 这说明酸改性蛭石絮凝剂具有很好的絮凝和沉降性能, 絮体矾花大, 沉降分离快. 超过 500 mg/L 后, 电中和效果反而降低, 从而引起絮凝和沉降效果有所下降, 上清液的浊度和 COD 有所上升. 因此, 此处选择最佳投加量为 500 mg/L.

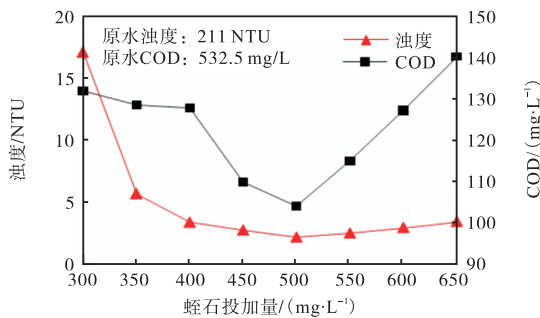


图 2 蛭石絮凝剂投加量对浊度和 COD 的影响

Fig. 2 Effect of dosage of vermiculite flocculant on turbidity and COD

2.2 快速搅拌速率对絮凝效果的影响

蛭石经过酸改性后所得的絮凝剂主要依靠电中和和颗粒物的质量作用力来发挥作用. 对于颗粒态物质来说, 搅拌速率十分重要, 要克服颗粒物的沉降, 就必须有一定的搅拌速率, 而沉降阶段发生在慢速搅拌槽中, 实验过程中一直保持搅拌速率不变. 所以, 要先考察快速搅拌对絮凝效果的影响. 该实验在烧杯中进行, 絮凝剂投加量为 500 mg/L, 将快速搅拌速率初始值设为 100 r/min, 以 50 r/min 的间隔增加至 500 r/min, 考察上述条件下快速搅拌速率对絮凝效果的影响, 结果如图 3 所示. 由图 3 可知: 转速为 100 r/min 时, 浊度为 15.7 NTU, 而 400 r/min 时, 浊度达到最低仅为 1.57 NTU, 浊度去除率达 95% 以上, 而当转速增加到 450 r/min 和 500 r/min 时, 浊度又上升到 2.36 NTU 和 2.5 NTU. 随着搅拌速率的增加, 处理

后的水样浊度由大变小, 然后再变大. 电中和作用有效地消除了胶体的电荷, 使之脱稳, 而颗粒物的质量力作用有效地发挥其吸附作用, 形成较好的絮体, 在颗粒物的重力影响下, 得到快速沉降. 搅拌速率继续增大之后, 浊度反而升高, 浊度去除率降低, 这是由于过快的搅拌反而会使胶状颗粒相互作用形成的絮凝体被更大的搅拌剪切力破坏, 形成更多细小漂浮的絮体, 减弱了沉降性能. 因此, 快速搅拌速率也是影响絮凝效果的重要因素之一, 此处选择最佳快速搅拌速率为 400 r/min.

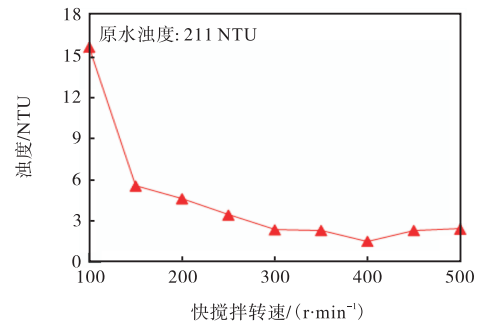


图 3 不同快搅拌转速对浊度的影响

Fig. 3 Effect of different fast rotation speed on turbidity

2.3 连续絮凝装置中慢搅拌速率对絮凝沉降效果的影响

慢速搅拌槽有两个作用, 第一个作用是使脱稳的颗粒群在槽中相互碰撞, 形成较大的絮体; 第二个作用是这些絮体在重力的作用下缓慢沉降, 使溶液上部形成上清液. 因此, 慢速搅拌槽的搅拌速率以及酸改性蛭石絮凝剂的投加量, 成为本装置实验中最需要探究的影响因素.

快速搅拌槽中混合流体以切线方向、依靠自流方式进入慢速搅拌槽, 慢速搅拌槽中的搅拌方向与切线方向一致; 慢速搅拌槽中的搅拌桨置于出水口下三分之二处, 与进水口基本平行, 实验条件采用之前烧杯实验优化出的絮凝剂投加量和快速搅拌速率, 即 500 mg/L 和 400 r/min, 进水流量为 200 mL/min. 为了考察慢搅拌速率对絮凝沉降效果的影响, 将其初始转速设为 20 r/min, 以 10 r/min 的间隔增加至 70 r/min, 出水浊度变化如图 4 所示. 随着搅拌速率的增加出水浊度由大到小, 再由小到大. 当转速为 20 r/min 时出水浊度为 65.4 NTU, 去除率为 69.0%; 当转速为 40 r/min 时, 出水浊度为 31.1 NTU, 去除率为 85.3%, 40 r/min 的转速下出水的透明度明显好于 20 r/min. 转速再度提高后, 出水水质反而会下降, 因此确定最佳慢速搅拌速率为 40 r/min. 实验过程中可

发现,由于搅拌桨转速增大,轻小的絮体受干扰大、难以沉降、絮体向上提升,使得出水中絮体增加,所以慢搅拌速率这一参数在没有静置的连续沉降过程中十分重要。慢搅拌槽中絮体的流动状态和絮凝剂自身的沉降性能决定了其是否能够迅速沉降。适度的慢搅拌有利于较小絮体相互吸附聚集、形成絮体,逐步构建成矾花很大的絮凝团。如果搅拌过快,剪切力远大于吸附质量力,降低其吸附团聚,进而影响大絮体的产生,导致絮凝沉降效果不好。

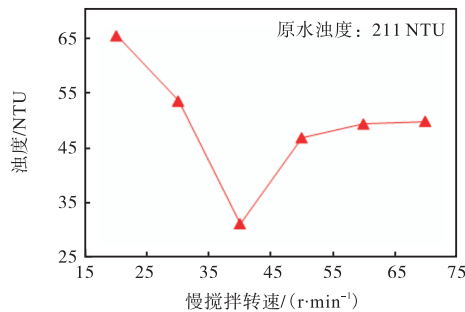


图4 不同慢搅拌转速对浊度的影响

Fig. 4 Effect of different slow rotation speed on turbidity

由实验结果可知:40 r/min 时出水浊度达到最优(31.1 NTU),高于烧杯实验的平均值,原因在于连续化装置没有相对独立的静置沉降过程,流动扰动对絮体的沉降影响很大,但连续化装置有效地提高了单位体积单位时间内的处理量。

2.4 无机矿物蛭石絮凝剂和无机 PAC 絮凝剂的比较

为了考察酸改性蛭石絮凝剂的絮凝效果,选择传统无机絮凝剂 PAC,在连续化装置中进行对比实验。将进水流量固定为 200 mL/min,快速搅拌槽的搅拌速率固定为 400 r/min,慢速搅拌槽的搅拌速率固定为 40 r/min,慢速搅拌槽的桨叶置于出水口下三分之二处,以达到最佳的外界条件,测定絮凝剂投加量对出水浊度、Zeta 电位、COD 的影响。

2.4.1 不同絮凝剂投加量对浊度去除率的影响

待出水稳定后,检测水样浊度,结果如图 5 所示。酸改性蛭石絮凝剂的投加量在 450~600 mg/L 之间都有较好的效果,特别是投加量为 600 mg/L 时,浊度最低,为 18.2 NTU,浊度去除率为 91.4%。当投加量增加到 650 mg/L 时,出水浊度上升到 32.5 NTU,其原因可能是酸改性蛭石絮凝剂主要由可溶态和颗粒态两部分组成,其中可溶态的物质在絮凝过程中主要起到初步的电中和作用,让废水中的胶体脱稳。而颗粒态物质主要是让脱稳后的微粒与不溶颗粒物质相互作用,靠各自的质量力相互吸引,克服一些负电

荷的干扰实现絮凝;如果可溶态物质投加不够,电中和不完全,胶体脱稳不够,絮凝效果达不到。但过多投入絮凝剂,过剩的可溶态物质和颗粒物反而会残余在溶液中,导致水质变差,浊度上升。

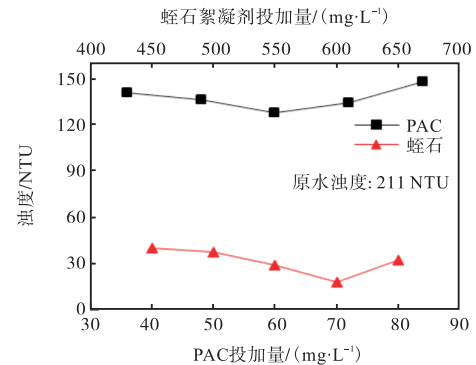


图5 絮凝剂投加量对浊度的影响

Fig. 5 Effect of flocculant dosage on turbidity

相比之下,PAC 虽然产生的矾花较大,但由于这些絮状聚合物密度小,漂浮在溶液里,沉降速度很慢,再加上连续化过程流体流动的干扰,很难沉降,与蛭石絮凝剂相比几乎不产生分层,其出水的浊度较烧杯实验中的值要高。烧杯实验中 PAC 最佳投加量为 60 mg/L,实验后静置 30 min 浊度可达 2.23 NTU,浊度去除率为 98.9%,而相同投加量时,连续化装置出水浊度达 128 NTU,浊度去除率仅为 39.3%。实际应用中,往往在 PAC 的絮凝过程中还需投加部分碳酸钙粉末,加速絮体的沉降。因此酸改性蛭石絮凝剂在连续化絮凝工艺中具有很好的絮凝沉降性能。

2.4.2 不同絮凝剂投加量对 COD 去除率的影响

考察两种不同絮凝剂在连续化絮凝过程中对 COD 去除的影响,其实验结果如图 6 所示。PAC 对 COD 与浊度的去除效果均较差,最佳投加量 60 mg/L 时,出水 COD 由原水 COD 的 535.2 mg/L 降低到 357.1 mg/L,去除率仅为 33.3%,原因在于快速搅拌能促使絮凝剂在水体中分散均匀,有利于带正电荷的絮凝剂与废水中的胶体发生充分电中和反应,实现胶体脱稳,PAC 产生的絮体难以沉降,故采集的出水水样中絮体较多,COD 难以去除。与此相比,蛭石絮凝剂对 COD 的去除趋势是由大到小然后再由小增大,变化的规律与其浊度一致。当投加量为 450 mg/L 时,出水 COD 从原水的 530.6 mg/L 降低至 165.6 mg/L,其去除率达到 68.8%。投加量为 600 mg/L 时出水 COD 由原水的 532 mg/L 降低到 143.8 mg/L,去除率为 73.0%。投加量继续增加之后,COD 反而增加,装置效率降低,但从整个装置上来

说,出水 COD 在投加量 450 mg/L 到 600 mg/L 之间的波动并不是很大,去除率均高于 68%. 这说明蛭石絮凝剂投加量的操作可控范围较大,COD 变化小,絮凝效果明显.

从以上实验结果亦可知,传统絮凝剂 PAC 引起沉降速度慢,分离效果较差,对于连续化絮凝过程难以达到较好的絮凝沉降效果,而酸改性蛭石絮凝剂不仅絮凝效果比 PAC 好,而且沉降速度快,易于分离,更加适合连续化絮凝过程. 更为重要的是酸改性蛭石属于天然的矿物材料,没有二次污染,沉降物能够被安全利用,是未来一种重要的无机矿物絮凝剂.

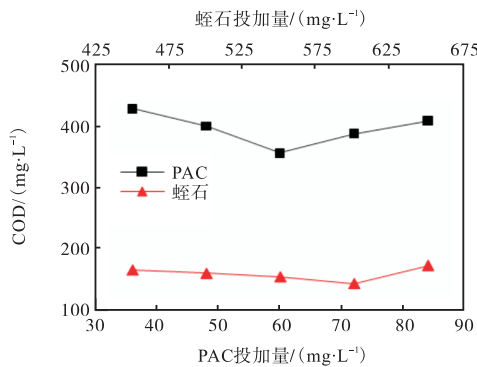


图 6 絮凝剂投加量对 COD 的影响

Fig. 6 Effect of flocculant dosage on COD

2.4.3 不同絮凝剂投加量对 Zeta 电位的影响

为了探明更深层次的絮凝机理,使用 Zeta 电位分析仪分析上清液,考察不同投加量下,水相中 Zeta 电位的变化情况,结果如图 7 所示.

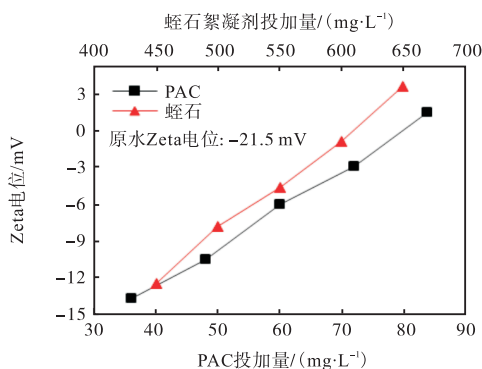


图 7 絮凝剂投加量对 Zeta 电位的影响

Fig. 7 Effect of flocculant dosage on Zeta potential

由图 7 可知:随着酸改性蛭石絮凝剂和 PAC 投加量的增加,Zeta 电位逐步增加,由负值穿过零逐步升为正值. 从酸改性蛭石絮凝剂最佳投加量 600 mg/L 和 PAC 最佳投加量 60 mg/L 时的 Zeta 电位来看,二者截然不同,酸改性蛭石对应的 Zeta 电位接

近 0 mV,而 PAC 的为-6 mV,说明酸改性蛭石絮凝剂中的可溶态物质在水相中以离子态存在,能与胶体有效地发生电中和作用^[1],使胶体脱稳,这些粒子和颗粒态物质相互作用形成絮体,逐步增大而沉降;而 PAC 在溶液中形成聚合物,离子态的铝较少,以聚合物自身形成的絮体主要依靠网捕、吸附的形式对溶液中牛奶胶体等粒子产生作用,所以即使在最佳投加量的条件下,溶液的 Zeta 电位仍然有-6 mV,从而反映了这两种絮凝剂不同的絮凝机理.

3 结 语

本文以烧杯中絮凝剂效果实验结果为基础,设计了一套完整的由快搅拌槽和慢搅拌槽构成的酸改性蛭石连续化絮凝装置,通过对进料和搅拌速率加以控制,实现优化过程,为工业化应用提供基础数据. 实验结果表明:

(1)快速搅拌能促使絮凝剂在水体中分散均匀,有利于带正电荷的絮凝剂与废水中的胶体发生充分电中和反应,实现胶体脱稳. 但速率过快则不利于絮体的絮凝,其最佳转速为 400 r/min.

(2)慢速搅拌实现了絮体絮凝和沉降两个过程,搅拌速率是关键. 过慢的速率不能促进絮体的相互碰撞,不能优化絮凝效果. 过快则会扰动形成的絮凝固体,进而影响出水水质,最佳转速为 40 r/min.

(3)连续絮凝装置实现了搅拌、絮凝、沉降 3 个过程的连续化,有效去除了废水中的浊度和 COD,两者的最大去除率分别为 91.4% 和 73%. 单位时间内处理废水的量为 200 mL/min.

(4)酸改性蛭石絮凝剂电中和效果和形成的絮体的沉降速度都优于传统的 PAC,在最佳投加量下,上清液的 Zeta 电位接近 0 mV,絮体易于絮凝;而 PAC 的为-6 mV,难以压缩而松散,故在连续装置中,酸改性蛭石絮凝剂的效果明显好于传统 PAC.

参考文献:

[1] Wu J Y, Ye H F. Characterization and flocculating properties of an extracellular biopolymer produced from a *Bacillus subtilis* DYU1 isolate[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42 (7) : 1114-1123.

[2] Lee C S, Robinson J, Chong M F. A review on application of flocculants in wastewater treatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92 (6) : 489-

(下转第 80 页)

- tation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(6): 880–892.
- [15] 宋瑞霞, 孙相东, 王小春. 基于 HSI 颜色空间和暗原色先验的去雾算法[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(10): 2111–2120.
- [16] Sun S, Zhang R. Region of interest extraction of medical image based on improved region growing algorithm[C]// Energy and Environmental Engineering. New York: MSEE, 2017: 372–376.
- [17] 王鑫. 基于双目视觉的移动机械臂物体抓取控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

责任编辑: 郎婧

(上接第 51 页)

- 性炭研究[J]. 中国造纸, 2017, 36(1): 36–41.
- [22] 孟祥美, 万月亮, 冯琨, 等. 不同改性方法对制浆木片筛渣吸附效果的影响[J]. 中国造纸, 2018, 37(8): 24–30.
- [23] Shende R V, Mahajani V V. Wet oxidative regeneration of activated carbon loaded with reactive dye[J]. Waste Management, 2002, 22(1): 73–83.
- [24] 樊强. 湿式氧化法再生粉末活性炭的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [25] 刘军利, 古可隆. 高温处理对活性炭孔隙结构的影响[J]. 林产化学与工业, 1999, 19(3): 37–40.
- [26] Kaneko K, Ishii C, Ruike M. Origin of superhigh surface area and microcrystalline graphitic structures of activated carbons[J]. Carbon, 1992, 30(7): 1075–1088.
- [27] Arriagada R, Garcia R, Molina-Sabio M, et al. Effect of steam activation on the porosity and chemical nature of activated carbons from Eucalyptus globulus and peach stones[J]. Microporous Materials, 1997, 8(3/4): 123–130.
- [28] 张小璇. 染料废水的活性炭吸附及其热再生研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [29] 李洪美. 活性炭纤维对有机废气吸附性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [30] 路遥, 李建芬, 李红霞, 等. 废弃粉末活性炭热再生实验及表征分析[J]. 化工进展, 2018, 37(1): 389–394.
- [31] 马承愚, 毛宇, 徐鹏飞, 等. KOH/NaOH 活化法辣椒秸秆制备高表面积活性炭与表征[J]. 功能材料, 2013, 44(5): 704–708.
- [32] Hu Z, Srinivasan M P, Ni Y. Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous activated carbons[J]. Carbon, 2001, 39(6): 877–886.
- [33] 余银明. 活性炭电热再生技术机理性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.

责任编辑: 周建军

(上接第 56 页)

- 508.
- [3] 苏腾, 陈中兴, 陆柱. 混凝剂的研究应用现状与开发动向(一)[J]. 净水技术, 2000(3): 7–9.
- [4] 苏腾, 陆中兴. 混凝剂的研究应用与开发动向(二)[J]. 净水技术, 2000(4): 8–12.
- [5] 王昶, 刘芳, 胡文红, 等. 改性蛭石无机矿物絮凝剂的性能研究[J]. 天津科技大学学报, 2018, 33(2): 53–57.
- [6] 周俊波. 过滤分离技术在中国化工行业的应用与未来发展趋势[C]//2014 中国(北京)国际过滤技术高峰论坛论文集. 北京: 万方数据电子出版社, 2014.
- [7] 郭二民, 李海生, 李明, 等. 传统过滤器改造连续动态过滤器的研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 56–58.
- [8] 冯令艳, 吕岩林. 内循环连续式砂滤器微絮凝过滤机理研究[J]. 黑龙江水利科技, 2002, 30(2): 4–6.
- [9] Reddy S P, Sultan C, Kapania R K, et al. Accurate computing of higher vibration modes of thin flexible structures[J]. AIAA Journal, 2016, 54(5): 1704–1718.
- [10] 王昶, 林鹏, 豆宝娟, 等. 黏土矿物为原料絮凝剂的制备及应用研究[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(1): 62–66.
- [11] 汤鸿霄. 无机高分子絮凝理论与絮凝剂[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

责任编辑: 周建军