

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.029

吹脱与鸟粪石沉淀组合工艺处理中温厌氧发酵沼液研究*

白晓凤^{1,2} 李子富^{1,2} 闫圆圆^{1,2} 白雪^{1,2}

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京市工业典型污染物资源化处理重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用吹脱 + 鸟粪石沉淀 (MAP) 组合工艺处理中温厌氧发酵沼液。研究发现沼液吹脱的最佳工艺参数为:pH 值为 10,吹脱时间 8 h,气液比 2 400,并添加填料,此时沼液中氨氮去除率在 90% 左右。吹脱后的沼液 pH 值在 9.2 左右,在 MAP 沉淀法的适宜 pH 值附近,不需再进行 pH 值调节,可节约药剂成本。经 MAP 沉淀处理后的沼液出水氨氮和总磷去除率分别达到了 95% 和 80%。COD 和 SS 去除率分别在 40% 和 32% 左右。MAP 沉淀出水的 pH 值在 8.3 左右,可满足生化处理的进水要求。同时,MAP 沉淀处理后的出水 C/N 比大大提升,从 0.7 上升到了 10,有利于后续生化系统的进一步处理。该工艺既可使沼液得到净化处理,又可回收其中的营养物质。

关键词: 沼液 吹脱 粪石沉淀 磷回收 氮回收

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)12-0218-08

Treatment of Liquid Digestate by Stripping Combined with Struvite Precipitation

Bai Xiaofeng^{1,2} Li Zifu^{1,2} Yan Yuanyuan^{1,2} Bai Xue^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of Industrial Pollutants, Beijing 100083, China)

Abstract: Stripping combined with struvite precipitation (MAP) was used to treat the liquid digestate. The results showed that the best process parameters for stripping of the digestate from mesophilic digestion were as follows: the pH value was 10, stripping time was 8 h, gas-liquid ratio was 2 400, and filler was added. The removal rate of ammonia in the digestate was about 90%. The pH value of the digestate after stripping was about 9.2 and it was suitable for MAP precipitation method. The pH value regulation was not necessary, so it can save the cost of dosage. The removal rate of ammonia nitrogen and total phosphorus were 95% and 80%, respectively, after MAP precipitation treatment. The removal rates of COD and SS were 40% and 32%, respectively. The pH value of the effluent after MAP precipitation was about 8.3, which can meet the requirements of biochemical treatment. Meanwhile, C/N ratio of the effluent was greatly improved, which was increased from 0.7 to 10, and it was conducive to further treatment of the follow-up biochemical system. The process not only makes the digestate be processed, but also can recover the nutrients.

Key words: Liquid digestate Stripping MAP Phosphorus recovery Nitrogen recovery

引言

目前沼液的处理与利用尚缺乏规范化的管理, 储存与运输设备还不完善,受运输成本的限制,沼液还田无法广泛实施,沼液必须经过合理的处理,才不会对环境产生破坏。而且畜禽沼液存在 C/N 比严

收稿日期: 2015-07-24 修回日期: 2015-08-19
* 国家国际科技合作专项资助项目(2013DFG92620)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2302013FRF-MP-13-001B)
作者简介: 白晓凤, 博士生, 主要从事厌氧发酵和水处理技术研究, E-mail: huanjing060546@163.com
通讯作者: 李子富, 教授, 博士生导师, 主要从事厌氧发酵、生态卫生和水处理研究, E-mail: zifulee@aliyun.com

重失调、氨氮浓度高等特点^[1-2],加大了沼液处理的难度。

氨吹脱法适合于高氨氮废水的预处理,脱氮率高、操作灵活、占地小,广泛应用于各类高浓度氨氮废水处理,在垃圾渗滤液、养殖废水、污泥调理废水、焦化废水等方面已取得一定研究进展^[1]。吴方同等^[3]采用规整填料塔吹脱去除垃圾渗滤液中的氨氮,吹脱效率达 95%。王文斌等^[4]对吹脱法去除垃圾渗滤液中的氨氮进行了研究,氨氮去除率可达 90%。徐彬彬^[5]采用空气吹脱法对包钢焦化厂剩余氨水进行氨氮脱除,氨氮去除率为 95%。Bonmati 等^[6]认为沼液中氨氮浓度高,沼液 pH 值较高,含有厌氧发酵余热等自身优势,适用于氨吹脱工艺。Gustin 等^[7]研究发现 pH 值是沼液吹脱的关键因素之一。

鸟粪石沉淀法的基本原理是通过向废水中投加

镁盐和磷酸盐沉淀剂,使 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 与废水中的 NH_4^+ 发生化学反应,生成磷酸铵镁(MAP)俗名叫鸟粪石^[8],从而将氨氮和磷去除^[9-10]。鸟粪石可作为缓释肥施用于农田,也可用于多种工业生产和动物饲料的生产^[11]。目前该工艺在垃圾滤液^[12]、养殖场废水^[13-14]、厌氧发酵沼液^[15-16]等废水中已有研究。Song 等^[17]研究了 MAP 沉淀法去除回收模拟猪场废水中氮磷的效果,结果发现反应的最佳 pH 值为 9.5~10.5,增加镁源可以提高磷的去除率。

本文提出吹脱 + MAP 沉淀组合工艺处理沼液,使沼液中的营养物质得到高效回收。

1 材料和方法

1.1 实验沼液

实验沼液取自北京市某沼气工程,具体水质参数如表 1 所示。

表 1 水质参数
Tab.1 Parameters of sample

参数	化学需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	总磷 TP/(mg·L ⁻¹)	磷酸盐/(mg·L ⁻¹)	固体悬浮物 SS/(mg·L ⁻¹)	pH 值
数值	2 600~3 100	3 200~3 800	140~170	90~120	1 000~1 300	7.8~8.2

1.2 研究方法

1.2.1 工艺流程

研究采用吹脱 + MAP 沉淀组合工艺处理沼液,工艺流程如图 1 所示。

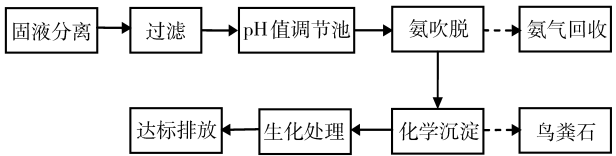


图 1 沼液处理工艺流程图
Fig.1 Flow chart of digestate treatment

氨吹脱和化学沉淀处理为后续的沼液生化处理单元提供了很好的条件。沼液进入生化处理单元进一步去除各种污染物质,最后达标排放。本工艺可将沼液在处理达标排放的同时,回收其中的氮磷营养物质,达到资源的有效回收。

1.2.2 实验方法

(1)吹脱

通过改变 pH 值、吹脱时间、曝气量、有无填料等因素,对中温发酵沼液(吹脱温度为 30℃)进行氨吹脱实验,考察吹脱对于沼液的处理效果。

实验考察中温发酵沼液(吹脱温度为 30℃)氨氮吹脱效果。实验开始时,将 1 L 沼液加入吹脱装置内,然后打开水浴锅加热至设计温度,启动气泵,通过流量计调节气量至设计值,进行吹脱。吹脱尾气通过软管排至装有 10% 硫酸的吸收瓶中。待吹

脱至设计时间后,取样测定各参数数值。

(2)MAP 沉淀

对于经吹脱处理后的沼液,通过添加镁源、改变 Mg 与 P 的比值、调节 pH 值、控制反应温度和反应时间,考察化学沉淀对沼液的处理效果。MAP 沉淀所用的实验装置如图 2 所示。

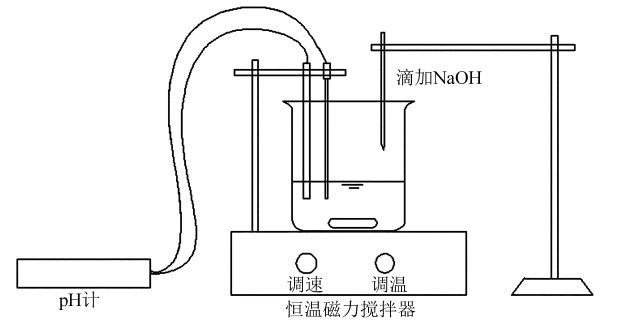


图 2 MAP 沉淀实验装置
Fig.2 Test device for MAP precipitation

为减少药剂的使用,降低处理成本,实验充分利用沼液中的磷酸盐和氨氮,未考虑再向混合废水中投加磷酸盐,只添加镁盐(实验采用 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 作为镁源)。

实验用 NaOH 溶液将吹脱后的沼液 pH 值调节至实验所需值。按 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 的摩尔配比添加 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$,将烧杯置于恒温磁力搅拌器上,调节温度至实验所需值,调节速度为 200 r/min,进行反应。反应一段时间后,静置沉淀 20 min,取上清液进

行分析,研究 MAP 沉淀法对沼液脱氮除磷的效果。

2 结果与分析

2.1 氨氮吹脱

2.1.1 pH 值对吹脱效果的影响

pH 值是吹脱除氮的关键控制参数之一。沼液中的氮主要为氨氮,溶液中存在 NH_4^+ 和游离氨 NH_3 的平衡,通过调高沼液 pH 值,可以促进离子态氮向游离态氮分子转化,提高氮分子浓度进而强化游离态氮的溢出^[18]。将 pH 值分别调至 8、9、10、11 的 1 L 沼液置于吹脱装置中,控制曝气量为 200 L/h,吹脱 6 h。pH 值对于沼液吹脱效果的影响如图 3 所示。从图中可以看出,氨氮去除率随着 pH 值的增大而提高,但当 pH 值增加到一定程度时,氨氮去除率增加不显著。在 pH 值从 8 增加到 10 时,氨氮的去除率增加很快,pH 值为 10 时,氨氮的去除率达到 56% 以上。而当 pH 值从 10 增加到 11 时,吹脱效率增加的速度明显降低,氨氮去除率增加缓慢,这是由于随着 pH 值的增加,游离态氮分子浓度基本不再增加,因而氨氮的去除率增加不明显。考虑到处理效果和药剂费用等因素,对于中温发酵沼液选取的最佳 pH 值为 10。

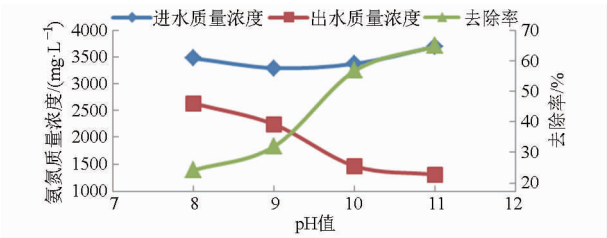


图 3 pH 值对吹脱效果的影响

Fig. 3 Effect of pH value on stripping

2.1.2 吹脱时间对吹脱效果的影响

取沼液 1 L,测得氨氮初始质量浓度为 3 564 mg/L,将其 pH 值调至 10 后加入吹脱装置中,曝气流量为 200 L/h。每隔 2 h 取样,分别测得吹脱时间为 2、4、6、8、10、12 h 时沼液中氨氮质量浓度。实验结果如图 4 所示。

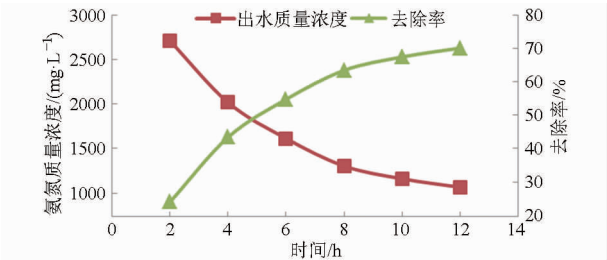


图 4 时间对吹脱效果的影响

Fig. 4 Effect of time on stripping

由图 4 可以看出,吹脱效率随着吹脱时间的延

长而提高,但当吹脱时间增加到一定程度时,氨氮去除率增加不显著。在实验开始的前 8 h,氨氮浓度高,反应动力大,氨氮的去除率增加很快,在 8 h 时,氨氮的去除率达到 60% 以上。而在 8 h 之后,继续增加吹脱时间,氨氮去除率增加速度明显降低,氨氮去除率的增加受到了抑制,这是由于随着吹脱时间的增加,氨氮浓度越来越低,沼液的 pH 值也会降低,氨氮去除率受到限制,氨氮的去除率增加不明显,说明吹脱时间并非越长越好。考虑到处理效果和运行费用等因素,对于中温发酵沼液选取的最佳吹脱时间为 8 h。

2.1.3 曝气量对吹脱效果的影响

由氨吹脱原理可知,游离态的氮分子从液相逸出至气相时需要克服液膜的阻力作用^[19]。在对水样进行吹脱的过程中,如果曝气量较小,则不足以克服液膜的阻力,吹脱就达不到很好的效果,如果曝气量过大,不仅会造成液泛使操作困难,还会消耗更多的动力,增加成本,造成能源浪费。

调节沼液的 pH 值为 10,吹脱时间 8 h,启动气泵,调节曝气量分别为 100、200、300、400 L/h,分别测定在不同曝气量下吹脱对 1 L 沼液中氨氮的去除效果,确定最佳的曝气量。实验结果如图 5 所示。

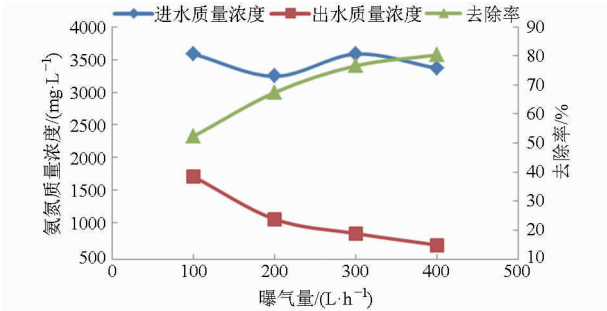


图 5 曝气量对吹脱效果的影响

Fig. 5 Effect of air flow rate on stripping

由图 5 可知,随着曝气量的增加,氨氮去除率也逐渐升高,这说明提高曝气量可以提高氨氮去除率。增大曝气量可以降低气体中氮的浓度,提高气液相间传质推动力,从而加快氮的气膜传质速率,使氨氮去除率增加。在曝气量小于 300 L/h 时,氨氮去除率几乎呈直线上升,曝气量增加到 400 L/h 时,氨氮去除率增加有限,这是因为气液在高度湍流条件下,气相和液相很难达到平衡。综上所述,选取 300 L/h 作为最佳曝气量。

2.1.4 填料对吹脱效果的影响

填料可以使气、液两相高度分散,对气泡进行切割和阻挡,使气泡的停留时间和气液接触的面积增加^[20]。填料也增加了对液体的搅动速率,气液面更新速度加快,使传质阻力大大减小,传质速率增

加,从而提高吹脱的效果。

实验所用填料为直径 1 cm 的柱状填料。向沼液中投加填料,填料与沼液体积比为 0.3。调节沼液的 pH 值为 10,曝气量为 300 L/h,分别在不同吹脱时间内考察不添加填料和添加填料对于去除率的影响。实验结果如图 6 所示,从图中可以看出,填料的添加对于沼液氨氮的去除具有一定的增进作用,在吹脱时间为 8 h 时,氨氮去除率接近 90%。

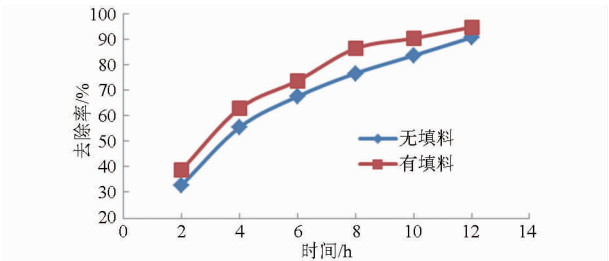


图 6 填料对去除率的影响
Fig.6 Effect of filter on stripping

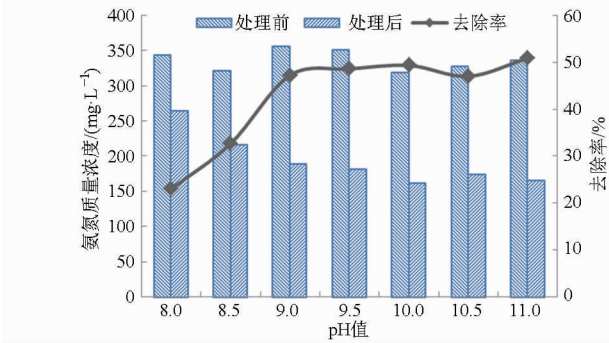
由实验结果及其分析可知,中温发酵沼液吹脱的最佳条件为:pH 值为 10,吹脱时间为 8 h,曝气量为 300 L/h(气液比为 2 400),并添加填料,此时沼液中氨氮去除率在 90% 左右。

2.2 MAP 沉淀

2.2.1 pH 值对 MAP 沉淀法处理效果的影响

控制反应温度为 30℃,搅拌速度为 200 r/min, Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 的摩尔比为 1,调节沼液的 pH 值分别为 8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、10.5、11.0。实验反应 20 min 后,静置 20 min,过滤取上清液,测其氨氮和磷酸盐的含量。实验结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,氨氮去除率随 pH 值的升高先上升后下降,而磷酸盐去除率则呈现不断升高的趋势,当 pH 值为 9.0 时,氨氮去除率达到 47%,磷酸盐去除率为 78%。之后 pH 值继续增加,氨氮去除率几乎没有增加,磷酸盐去除率增加缓慢。当 pH 值介于 10.0 与 11.0 之间时,氨氮去除率反而出现下降的趋势,主要是因为此时水样中 Mg^{2+} 和 OH^- 容易结合生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀,使得 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 的



利用率下降。同时,在搅拌过程中,会有部分氨挥发。在 pH 值大于 11.0 时,氨氮的去除率又出现了上升的现象,但上升趋势并不显著,因为在反应过程中会生成更难溶于水的 $Mg_3(PO_4)_2$ 沉淀,不利于氨氮的去除,但过高的 pH 值导致了更多氨氮的挥发,使得出水氨氮浓度降低,去除率出现小幅度的升高。

pH 值过高会导致过多副反应的发生,且达到较高的 pH 值需要加入较多的碱,增加药剂成本,还会对后续生物处理或出水造成影响^[21]。因此,实验所需的 pH 值在 9.0~9.5 之间,选取 9.0 为最佳值。

2.2.2 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 的摩尔配比对 MAP 沉淀法处理效果的影响

MAP 结晶工艺中,化学药剂投加量对废水的脱氮除磷效果有着极显著的影响^[22]。陈瑶^[23]的研究结果表明氮磷的回收率随着镁盐投加量的增加而增加,但当 Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 的摩尔比大于 1.3 时,氨氮和磷回收率增加幅度明显减缓,基本不变。

实验在反应温度 30℃,搅拌速度 200 r/min,沼液 pH 值 9 的条件下进行。调节沼液中 Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 的摩尔比 n 分别为 0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8。实验反应 20 min,然后静置 20 min,分析上清液中的氨氮和磷酸盐含量。实验结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出,当 n 为 0.8 时,由于此时没有足够的 Mg^{2+} 与沼液中的磷酸盐和氨氮发生沉淀反应,所以氨氮和磷酸盐的出水浓度较高,去除率较低。 Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 的摩尔比从 1.0 增大到 1.4 时,氨氮和磷酸盐的去除率上升显著。因为随着镁盐投加量的增加,提高了各反应离子相互碰撞的几率,有利于沼液中磷酸盐和氨氮的去除。而随着镁盐投加量的增加,氨氮和磷酸盐的去除率增加不明显,当 $n = 1.8$ 氨氮去除率出现下降趋势。这是因为随着镁盐投加量的进一步增加, Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 、 OH^- 的碰撞结合几率增加,从而使得氨氮去除率下降。当 $n = 1.4$ 时,氨氮和磷酸盐的去除率都相

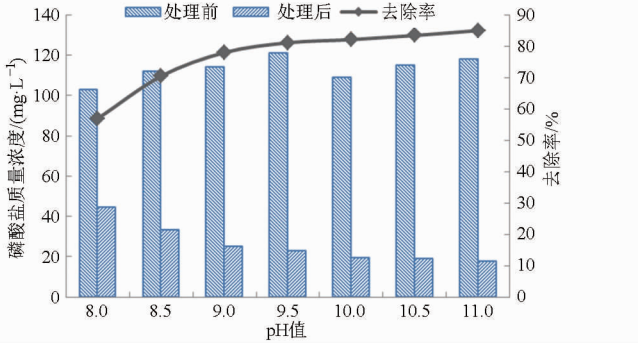


图 7 pH 值对氨氮和磷酸盐处理效果的影响
Fig.7 Effect of pH value on ammonia and phosphate removal

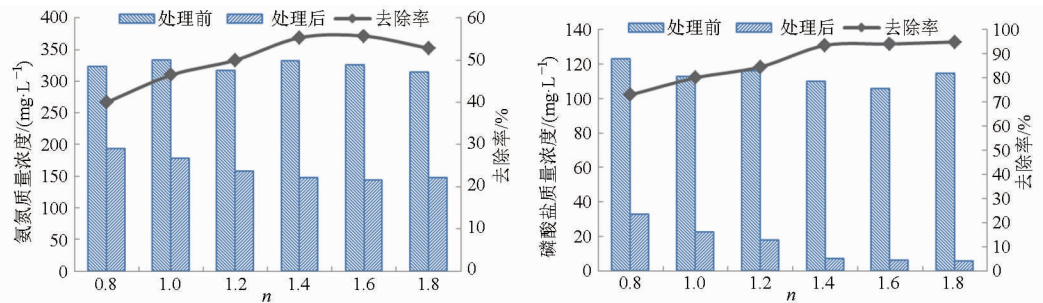


图 8 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} 摩尔比对沼液氨氮和磷酸盐处理效果的影响

Fig. 8 Effect of molar distribution on ammonia and phosphate removal

对较高。因此,选择 $n = 1.4$ 为镁盐的最佳投加量。

2.2.3 反应时间对 MAP 沉淀法处理效果的影响

反应时间取决于鸟粪石晶体的成核速率和成长速率。晶体开始成核需要的时间称为诱导时间。Bouropoulos 等^[24]发现晶体的成核速率和成长速率

都是过饱和程度的函数。

实验在反应温度 30℃,搅拌速度 200 r/min,沼液 pH 值 9,沼液中 Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 摩尔比为 1.4 的条件下进行。反应的时间分别为 10、15、20、25、30 min,然后静置 20 min,取上清液测其氨氮和磷酸盐含量。实验结果如图 9 所示。

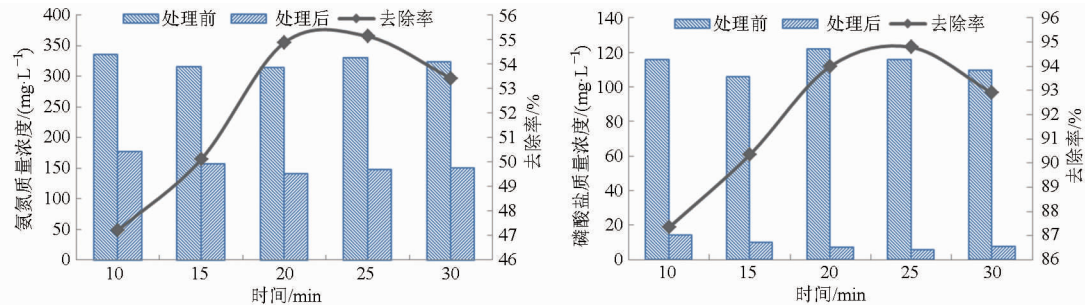


图 9 反应时间对沼液氨氮和磷酸盐处理效果的影响

Fig. 9 Effect of reaction time on ammonia and phosphate removal

由图 9 可知,反应时间对氮磷去除率有一定的影响,随着反应时间的增加,氨氮和磷酸盐去除率均有所提高。反应时间从 10 min 延长到 20 min 时,氨氮去除率从 47% 增高到 54%,磷酸盐去除率从 87% 增至 93%。反应时间继续增加,氨氮和磷酸盐去除率均有所下降。因为反应时间过长会破坏鸟粪石沉淀体系,沉淀物的沉降性能会降低,进而造成了去除率下降。反应时间过长,又会增加动力成本。综合考虑,最佳反应时间为 20 min。

2.2.4 温度对 MAP 沉淀法处理效果的影响

不同温度下溶质的相对扩散速率不同,离子在

晶体表面一体化的速率也不相同。温度较高时,扩散速率较高,晶体生长以表面扩散机制为主;温度较低时,晶体生长以表面一体化机制为主^[25]。实验在搅拌速度为 200 r/min,沼液 pH 值为 9, Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 摩尔比为 1.4 的条件下进行。反应温度分别取 20、30、40、50℃,反应 20 min 后再静置 20 min,然后取上清液测其氨氮和磷酸盐含量。实验结果如图 10 所示。

由图 10 可见,温度对氨氮和磷酸盐去除效果的影响不大。虽然温度过高使得生成的 MAP 沉淀不稳定,会发生分解进而游离出 NH_4^+ ,使反应后的

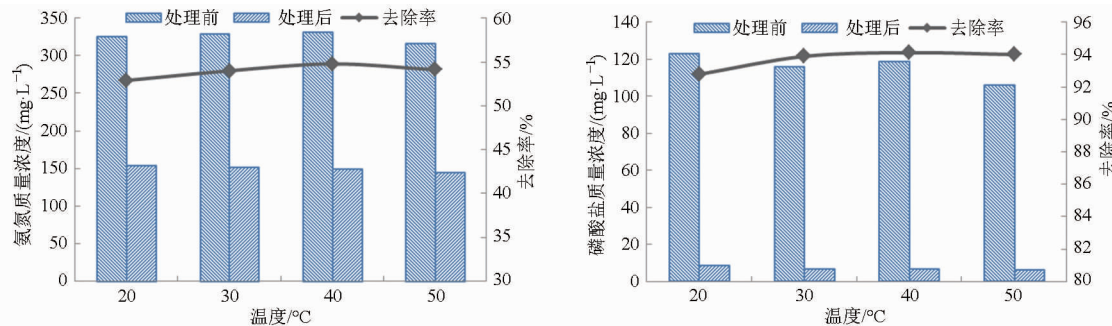


图 10 温度对沼液氨氮和磷酸盐处理效果的影响

Fig. 10 Effect of temperature on ammonia and phosphate removal

上清液氨氮质量浓度增加,但温度的升高也会造成氨氮的挥发,因此温度变化对氨氮去除影响不大。由于 PO_4^{3-} 还是成结合态,所以对磷离子的去除影响也不大,因此考虑去除率的变化和能源的消耗问题,在常温下(25℃左右)进行 MAP 沉淀即可。

2.2.5 最优参数下 MAP 沉淀出水效果

在最佳参数条件下进行 2 组 MAP 沉淀实验。反应条件:搅拌速度 200 r/min,常温,pH 值为 9, Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 摩尔比为 1.4,反应时间 20 min,静置时间 20 min。实验结果如表 2 所示。从表中可以看出,MAP 沉淀法对沼液中氨氮、磷酸盐、TP 去除率分别为 54%、93%、80% 左右。MAP 沉淀法对于 COD 和 SS 也有一定的去除效果,沼液中存在的固体悬浮物为沉淀物生成提供了很好的附着面积,具有助凝作用,而且生成的 MgNH_4PO_4 可吸附微小的悬浮物一同沉淀下去,也具有混凝吸附作用,因此使得沼液中的 COD 和 SS 的出水浓度下降,降低了后续生化处理的负荷,而且还可以去除一部分难降解有机物和对微生物生长有抑制作用的有毒有害物质,改善了沼液的可生化性。由于 TP 中大部分为磷酸盐,所以磷酸盐浓度的降低,使得 TP 的浓度大大降低,去除率在 80% 左右。

表 2 最佳参数下 MAP 沉淀法出水效果
Tab.2 Removal rates after MAP precipitation

水质指标	编号	进水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	出水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/%
氨氮	1	314	144	54.08
	2	326	151	53.56
磷酸盐	1	118	8	93.23
	2	115	8	92.67
TP	1	136	26	80.88
	2	133	28	78.95
COD	1	2234	1420	36.42
	2	2156	1397	35.21
SS	1	430	338	21.40
	2	443	346	21.90

从表 3 可知,沼液经过 MAP 沉淀处理后,出水的 pH 值降低至 8.3 左右。这主要是由于在反应过程中磷酸盐不断消耗,并随沉淀生成使得反应体系的碱度下降,pH 值降低。出水 pH 值的降低为后续

表 3 出水 pH 值变化
Tab.3 pH value changes of effluent

编号	进水	出水
1	9.00	8.30
2	9.00	8.38

生化处理提供了很好的条件,可以不经过加酸调节,直接进入生化处理系统。

2.3 吹脱与 MAP 沉淀法联合工艺处理效果

实验考察吹脱与 MAP 沉淀法联合工艺处理沼液的效果,并考察出水是否符合生化处理的要求。

将 pH 值调至 10 的 1 L 沼液置于吹脱装置中,保持恒温 30℃,曝气量 300 L/h,吹脱 6 h,测定吹脱后沼液的各项参数。然后将吹脱后的沼液,在搅拌速度为 200 r/min,常温, Mg^{2+} 与 PO_4^{3-} 摩尔比为 1.4 的条件下进行 MAP 沉淀实验。实验反应 20 min 后再静置 20 min,取上清液测其各项指标。实验结果如表 4、5 所示。

表 4 组合工艺的去除效果
Tab.4 Removal rates after combined process

水质指标	编号	进水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	吹脱出水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	MAP 沉淀出水质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总去除率/%
氨氮	1	3 356	325	149	95.56
	2	3 245	280	133	95.90
磷酸盐	1	118	110	8	93.22
	2	109	104	7	93.58
TP	1	142	131	29	79.58
	2	136	128	27	80.15
COD	1	2 348	2 131	1 371	41.61
	2	2 302	2 109	1 360	40.92
SS	1	513	450	347	32.36
	2	496	437	328	33.87

表 5 组合工艺处理 pH 值变化
Tab.5 pH value changes of combined process

编号	进水	吹脱出水	MAP 沉淀出水
1	10.00	9.21	8.40
2	10.00	9.16	8.32

由表 4 可以看出,经吹脱和 MAP 沉淀处理后,氨氮和 TP 的质量浓度大幅度降低,出水氨氮质量浓度在 140 mg/L 左右,TP 质量浓度在 30 mg/L 左右,去除率分别达到了 95% 和 80%。联合工艺对 COD 和 SS 也有一定的去除效果,COD 和 SS 的去除率分别在 40% 和 32% 左右。出水中 COD 质量浓度约为 2 100 mg/L,SS 质量浓度为 330 mg/L 左右。处理前沼液的 C/N 比为 0.7 左右,处理后由于氨氮质量浓度下降,C/N 比大大提升,达到了 10 左右,为后续生化系统的处理提供了很好的条件。

从表 5 可知,吹脱后出水的 pH 值在 9.2 左右,正好在 MAP 沉淀法最佳 pH 值附近,不用再调节 pH 值,可减少药剂的使用,节约成本。MAP 沉淀出水的 pH 值约为 8.3,符合生化处理的要求,可以直接进入生化系统进行处理。

综上所述,吹脱 + MAP 沉淀组合工艺处理沼液能发挥两种方法各自的优势,具有处理效果好,流程简单、处理效果稳定、基建投资少、运行费用低等优点,不仅回收了沼液中的营养元素,还为后续生化处理提供了良好的条件。

3 结束语

实验考察了吹脱与 MAP 沉淀法联合工艺对中温发酵沼液的处理效果。吹脱最佳工艺参数为: pH 值为 10,吹脱时间 8 h,气液比 2 400,添加填

料。吹脱后出水 pH 值在 9.2 左右,在 MAP 沉淀法适宜 pH 值范围内,不需再调节 pH 值,可减少药剂使用,节约成本。MAP 沉淀出水 pH 值在 8.3 左右,可满足生化处理的进水要求。经吹脱和 MAP 沉淀处理后沼液出水氨氮质量浓度为 140 mg/L 左右,TP 质量浓度在 30 mg/L 左右,去除率分别达到了 95% 和 80%。COD 和 SS 的去除率分别在 40% 和 32% 左右。处理后的出水 C/N 比大大提升,从 0.7 上升到了 10,有利于后续生化系统的进一步处理。

参 考 文 献

1 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, 2012,28(11): 205 – 211.
Sui Qianwen, Dong Hongmin, Zhu Zhiping, et al. Ammonia stripping control parameters for improving effluent treatment effect in anaerobic digesters of piggery wastewater[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(11): 205 – 211. (in Chinese)

2 王峰,严潇南,杨海真. 鸡粪厌氧发酵沼液达标处理工艺研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 84 – 90.
Wang feng, Yan Xiaonan, Yang Haizhen. Treatment process of anaerobically digested effluent of chicken manure for meeting the discharging standard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 84 – 90. (in Chinese)

3 吴方同,苏秋霞,孟了,等. 吹脱法去除城市垃圾填埋场渗滤液中的氨氮[J]. 给水排水, 2001,27(6): 20 – 24.

4 王文斌,董有,刘士庭. 吹脱法去除垃圾渗滤液中的氨氮研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(6): 51 – 53.
Wang Wenbin, Dong You, Liu Shiting. Air stripping to remove ammonia nitrogen in landfill leachate[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, 5(6): 51 – 53. (in Chinese)

5 徐彬彬. 吹脱法处理焦化厂高浓度氨氮废水的试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
Xu Binbin. Treatment of high concentrations of ammonia & nitrogen wastewater in coke-oven plant with blow-off method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

6 Bonmati A, Flotats X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion[J]. Waste Management, 2003, 23(3): 261 – 272.

7 Guštin S, Marinšek-Logar R. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(1): 61 – 66.

8 徐远,蒋京东,马三剑,等. 鸟粪石结晶沉淀法处理氨氮废水的应用研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(6): 26 – 30,57.
Xu Yuan, Jiang Jingdong, Ma Sanjian, et al. Advances in the application of struvite sediment to wastewater treatment[J]. Pollution Control Technology, 2006, 19(6): 26 – 30,57. (in Chinese)

9 Chen T, Huang X, Pan M, et al. Treatment of coking wastewater by using manganese and magnesium ores[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2 – 3): 843 – 847.

10 Uludag-Demirer S, Othman M. Removal of ammonium and phosphate from the supernatant of anaerobically digested waste activated sludge by chemical precipitation[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3236 – 3244.

11 Stratful I, Scrimshaw M D, Lester J N. Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate[J]. Water Research, 2001, 35(17): 4191 – 4199.

12 张道斌,吕玉娟,张晖. 化学沉淀法去除垃圾渗滤液中氨氮的试验研究[J]. 环境化学, 2007,26(1): 62 – 65.
Zhang Daobin, Lü Yujuan, Zhang Hui. Ammonia-nitrogen removal from landfill leachate by chemical precipitation [J] Environmental Chemistry, 2007,26(1): 62 – 65. (in Chinese)

13 岳建华. 鸟粪石化学沉淀工艺对猪场废水处理研究[J]. 安徽农业科学, 2012(19): 10264 – 10266.
Yue Jianhua. Swine wastewater treatment with struvite precipitation technology [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012(19): 10264 – 10266. (in Chinese)

14 张冬梅,程丽华,郭小慧,等. 鸟粪石沉淀法用于养猪场污水前处理的影响因素研究[J]. 华南师范大学学报:自然科学版, 2012,44(2): 99 – 102.
Zhang Dongmei, Cheng Lihua, Guo Xiaohui, et al. Mechanism study on apoptosis and necrosis induced by photodynamic therapy [J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2012,44(2): 99 – 102. (in Chinese)

15 杨雪,万春黎,杜茂安,等. 鸟粪石法同步回收发酵液中高质量浓度氮磷[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2013, 29(1): 36 – 39,45.
Yang Xue, Wan Chunli, Du Maoan, et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus in fermentive liquid by struvite precipitation [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2013, 29(1): 36 – 39,45. (in Chinese)

- 16 杨明珍,包震宇,师晓春,等. 鸟粪石沉淀法处理沼液实验研究[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(3): 31–32.
Yang Mingzhen, Bao Zhenyu, Shi Xiaochun, et al. Experimental study on treatment for anaerobic fermentation slurry by struvite precipitation[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(3): 31–32. (in Chinese)
- 17 Song Y, Yuan P, Zheng B, et al. Nutrients removal and recovery by crystallization of magnesium ammonium phosphate from synthetic swine wastewater[J]. Chemosphere, 2007, 69(2): 319–324.
- 18 白晓凤,李子富,尹福斌,等. 蒸发法处理厌氧发酵沼液试验研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 164–170.
Bai Xiaofeng, Li Zifu, Yin Fubin, et al. Evaporation treatment on biogas slurry from anaerobic fermentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 164–170. (in Chinese)
- 19 沈耀良,王宝贞. 吹脱法去除渗滤液中氨的动力学及机理[J]. 污染防治技术, 1999, 12(2): 67–70.
Shen Yaoliang, Wang Baozhen. Dynamics and mechanism of ammonia removal by stripping[J]. Pollution Control Technology, 1999, 12(2): 67–70. (in Chinese)
- 20 陈欣. 生物填料“涌动床 BIOFINGE”在污水处理工程中的应用[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
Chen Xin. Biological carrier flowing bed BIOFINGE application in wastewater treatment engineering [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 21 汤琪,罗固源,季铁军,等. 磷酸铵镁同时脱氮除磷技术研究[J]. 环境科学与技术. 2008, 31(2): 1–5.
Tang Qi, Luo Guyuan, Ji Tiejun, et al. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus by magnesium ammonium phosphate process [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 1–5. (in Chinese)
- 22 余荣台,丁丽丽,任洪强,等. 磷酸铵镁化学结晶技术研究现状[J]. 工业用水与废水, 2014(6): 1–3,50.
Yu Rongtai, Ding Lili, Ren Hongqiang, et al. Research status of struvite chemical crystallization technology[J]. Industrial Water & Wastewater, 2014(6): 1–3,50. (in Chinese)
- 23 陈瑶. 以鸟粪石形式从污水处理厂同时回收氨氮和磷的研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006.
Chen Yao. Simultaneous ammonia nitrogen and phosphorus recovery by struvite from wastewater treatment plant [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- 24 Bouropoulos N C, Koutsoukos P G. Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 213(3–4): 381–388.
- 25 杜英君,沈欣军,李艳平. 磷酸铵镁法处理污水回收氮磷影响因素的研究[J]. 水处理技术, 2012,38(增刊):19–22,27.
Du Yingjun, Shen Xinjun, Li Yanping. Research of treated wastewater and removal retrieve of nitrogen and phosphorus by magnesium ammonium phosphate process[J]. Technology of Water Treatment, 2012,38(Supp.):19–22,27. (in Chinese)

(上接第 101 页)

- 9 Murr R, Thieriot H, Zoughailb A, et al. Multi-objective optimization of a multi water-to-water heat pump system using evolutionary algorithm[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3580–3591.
- 10 田辉,孙秀玲,郭涛,等. 基于遗传算法的离心泵叶片水力性能优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 64–67.
Tian Hui, Sun Xiuling, Guo Tao, et al. Optimization for the hydraulic performance of centrifugal blade based on the genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 64–67. (in Chinese)
- 11 袁寿其,王文杰,裴吉,等. 低比转数离心泵的多目标优化设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 46–52.
Yuan Shouqi, Wang Wenjie, Pei Ji, et al. Multi-objective optimization of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 46–52. (in Chinese)
- 12 Xiao Mi, Shao Xinyu, Gao Liang, et al. A new methodology for multi-objective multidisciplinary design optimization problems based on game theory[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(3): 1602–1612.
- 13 Michael M Joly, Tom Verstraete, Guillermo Paniagua. Multidisciplinary design optimization of a compact highly loaded fan[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(3): 471–483.
- 14 汤方平,石丽建,雷翠翠,等. 轴流泵叶片多学科设计优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 96–100.
Tang Fangping, Shi Lijian, Lei Cuicui, et al. Multidisciplinary design optimization of axial-flow pump blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 96–100. (in Chinese)
- 15 申秀丽,龙丹,董晓琳. 航空发动机初步设计阶段涡轮流道多学科优化设计分析方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1369–1375.
Shen Xiuli, Long Dan, Dong Xiaolin. Multidisciplinary design optimization of aero-engine turbine flow path in preliminary design phase[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1369–1375. (in Chinese)
- 16 赵斌娟,侯多华,陈汇龙,等. 叶轮流道结构对双流道泵性能的影响[J]. 排灌机械工程学, 2013, 31(4): 294–299.
Zhao Binjuan, Hou Duohua, Chen Huilong, et al. Influence of impeller passage structure on performance of double-channel pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(4): 294–299. (in Chinese)
- 17 Zhao Binjuan, Wang Yu, Chen Huilong, et al. Hydraulic optimization of a double-channel pump's impeller based on multi-objective genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(3): 634–640.