

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.13.012

# 硝基苯废水厌氧处理工艺的在线监测与诊断

李 辰<sup>1</sup>, 李 诚<sup>2</sup>, 吴 旭<sup>3</sup>, 董 方<sup>3</sup>

(1. 天津市融泰水务有限公司, 天津 300393; 2. 天津市华博水务有限公司, 天津 300040; 3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 硝基苯是一种广泛应用于工业以及化工生产中的难降解有毒物质。厌氧处理工艺可以降解废水中的硝基苯,但由于厌氧微生物敏感性强,导致厌氧工艺运行很不稳定,需要建立可靠的诊断方法,进而通过及时有效的控制实现厌氧反应器的高效稳定运行。为此,研究了厌氧工艺处理硝基苯废水的冲击影响,分析了不同的状态指标,进而提供合理的工艺诊断。结果表明,采用厌氧工艺处理硝基苯难降解废水时,在不同强度的冲击下气相和液相各参数都具有特征响应性,其中气相氢分压的敏感性最强,比其他参数提前2~10 h响应,可以作为快速预警参数。结合其他参数的特征响应,可以对硝基苯废水厌氧处理工艺进行快速准确的诊断预测,从而构建出难降解废水厌氧处理的通用智能诊断控制方法。

**关键词:** 硝基苯废水; 厌氧处理工艺; 在线监测; 运行状态诊断

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)13-0071-07

## On-line Monitoring and Diagnosis of Anaerobic Treatment Process for Nitrobenzene Wastewater

LI Chen<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, WU Xu<sup>3</sup>, DONG Fang<sup>3</sup>

(1. Tianjin Rongtai Water Co. Ltd., Tianjin 300393, China; 2. Tianjin Huabo Water Co. Ltd., Tianjin 300040, China; 3. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Nitrobenzene (NB) is a kind of refractory and toxic substance which is widely used in industrial and chemical production. Anaerobic treatment process is capable of degrading NB in wastewater. However, the strong sensitivity of anaerobic microorganisms leads to instable operation of the process. Therefore, it is necessary to establish a reliable diagnostic method to achieve efficient and stable operation of anaerobic reactor through timely and effective control. The impact of NB on anaerobic wastewater treatment process was investigated, and different state indexes were analyzed, so as to provide reasonable process diagnosis. In the treatment of nitrobenzene refractory wastewater, each parameter of gas phase and liquid phase had characteristic response under different shock intensities, among which the gas phase hydrogen partial pressure was the most sensitive and responded 2–10 hours earlier than other parameters, which could be selected as a quick warning parameter. Combined with the characteristic response of other parameters, the diagnosis and prediction of NB wastewater anaerobic treatment process

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308172)

通信作者: 董方 E-mail: donghfut@163.com

could be carried out quickly and accurately, so as to build a general intelligent diagnosis and control method for anaerobic treatment of refractory wastewater.

**Key words:** nitrobenzene wastewater; anaerobic treatment process; on-line monitoring; operation status diagnosis

硝基苯(NB)是水体中常见的毒性高、稳定性强且对人体和环境具有严重危害的难降解物质,一般采用物理法、化学法和生物法进行处理<sup>[1]</sup>,其中生物法具备处理成本低的优势。好氧生物法对低浓度硝基苯废水的处理效果较好,但不适用于处理高浓度硝基苯废水<sup>[2]</sup>;厌氧生物法对难降解物质的处理效果好,具有经济性好、可回收沼气的优点<sup>[3]</sup>,在处理高浓度硝基苯废水方面有较好的应用前景。但是,厌氧微生物敏感性强,受抑制因素众多,除进水负荷<sup>[4]</sup>和温度<sup>[5]</sup>外,难降解物质本身也是重要的抑制因素,硝基苯及其厌氧降解产物苯胺对微生物都具有一定毒性<sup>[6]</sup>,而且厌氧微生物相比好氧微生物更易受到抑制<sup>[7]</sup>。这些都会导致厌氧工艺运行不稳定,严重影响处理效果。解决难降解废水厌氧处理工艺的稳定性问题,关键在于选取合适的参数,构建可靠的诊断方法,利用在线监测对厌氧反应器状态进行合理的控制<sup>[8]</sup>。

笔者利用在线监测系统获取硝基苯废水厌氧处理工艺的运行参数,主要包括氢分压、甲烷含量、挥发性脂肪酸(VFA)浓度等。首先,进行梯度浓度的硝基苯静态冲击实验,分析硝基苯浓度与VFA浓度、氢分压、甲烷含量及硝基苯去除率之间的关系;再进行动态冲击实验,结合在线监测,分析不同浓度的硝基苯对反应器运行状态的影响;最后分析各参数的响应特征和适用性,构建可靠的诊断方法。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 反应器与在线监测系统

实验采用上流式厌氧污泥床(UASB)反应器,有效容积为2.5 L,反应区外部设水浴保温层,通过温控仪及加热带维持循环水的温度为 $(35\pm 1)^\circ\text{C}$ 。水力停留时间(HRT)设置为12 h。UASB反应器及在线监测系统如图1所示。接种污泥为安徽省阜阳市金种子酒业股份有限公司污水处理车间厌氧罐中的颗粒污泥,悬浮固体(SS)浓度为48.4 g/L,挥发性悬浮固体(VSS)浓度为41.9 g/L。反应器进水采用人工合成废水,以蔗糖(4 455 mg/L)为碳源(COD浓

度为5 000 mg/L),以碳酸氢铵(450 mg/L)为氮源,并添加碳酸氢钠(2 000 mg/L)作为缓冲盐,添加的常量元素包括钙、镁、铁、磷等,微量元素包括钴、锰、铝、镍、铜、锌、硼、钼等<sup>[9]</sup>。

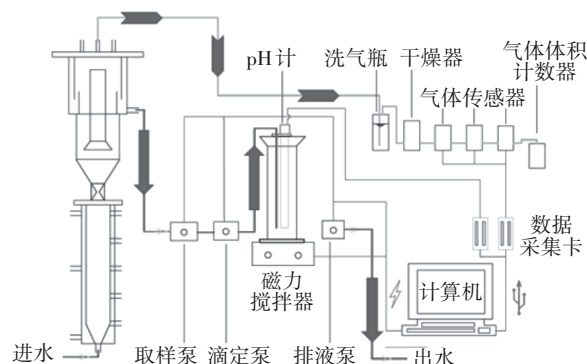


图1 UASB反应器和在线监测系统

Fig.1 UASB and on-line monitoring system

### 1.2 实验方案设计

**静态冲击实验:**取适量经过硝基苯驯化的污泥放入250 mL盐水瓶,密封放在 $35^\circ\text{C}$ 恒温箱中静置48 h。以5 g/L蔗糖作为共降解基质,配制与反应器进水相同成分的基质废水,再添加4 g/L碳酸氢钠。250 mL盐水瓶内装5 mL实验污泥和50 mL废水。A组实验添加200、400、600、800 mg/L的硝基苯;B组实验添加150、300、450、600 mg/L的苯胺(按硝基苯与苯胺的相对转化率为100%计算);C组作为空白对照,不添加硝基苯和苯胺。用氮气对反应装置进行排空气操作,使小瓶达到厌氧环境再进行封口,然后置于 $35^\circ\text{C}$ 、转速为100 r/min的恒温摇床上。实验过程间歇取适量水样和气样进行分析。

**连续流冲击实验:**待UASB反应器运行稳定后,在进水中先后添加300和600 mg/L的硝基苯进行两组冲击实验。每组的冲击时长为48 h,两组实验的间隔超过2个月,以确保在每次冲击实验前,反应器处于稳定运行状态。监测冲击过程中各气相和液相参数的变化,并进行参数响应特征分析。其中,气相参数为氢分压和甲烷含量,液相参数为总VFA、VFA组分(乙酸和丙酸)、硝基苯和苯胺浓度。

1.3 测定项目与方法

实验测定项目主要包括氢分压、甲烷含量、VFA 浓度、硝基苯和苯胺浓度。氢分压和甲烷含量采用气相色谱法测定,总 VFA 浓度采用五点滴定法测定,VFA 组分浓度采用气相色谱法测定,硝基苯和苯胺浓度采用高效液相色谱法测定。

2 实验结果与分析

2.1 硝基苯废水静态冲击实验

2.1.1 硝基苯初始浓度对甲烷累积产量的影响

在去除硝基苯及苯胺的过程中,反应器中的甲烷累积产量变化如图 2 所示。空白组的甲烷累积产量在 24 h 后达到最高(73.8 mL),添加苯胺的实验组甲烷累积产量在 36 h 后达到最高(45~60 mL),在 0~4 h 和 12~24 h 产甲烷速率较高。而硝基苯实验组的甲烷累积产量在 60 h 后才达到最高(36~45 mL),在 0~4 h 和 24~60 h 产甲烷速率较高。从图 2 可以看出,除了初始累积和平台期以外,不同浓度硝基苯组的甲烷快速累积时间并不完全一致,但都比苯胺组滞后,都在 24 h 之后,其中 600 mg/L 和 800 mg/L 硝基苯组在 36 h 之后。

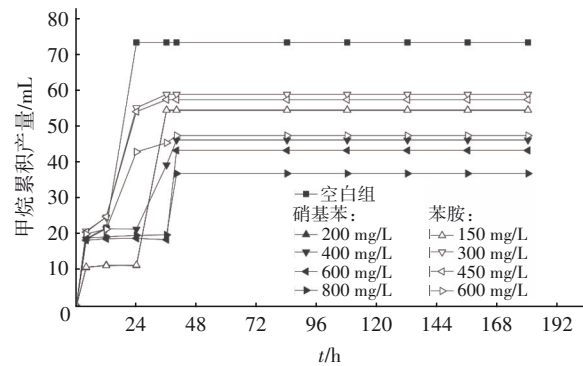


图2 不同浓度硝基苯实验组的甲烷累积产量  
Fig.2 Cumulative methane production at different NB concentrations

根据图 2 可计算不同实验组的产甲烷速率和产甲烷抑制率,计算公式如下:

$$U = \frac{dV}{dt} \tag{1}$$

$$I = \left(1 - \frac{V_s}{V_c}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中:U 为产甲烷速率, mL/h; V 为甲烷产量, mL; t 为实验时间, h; I 为产甲烷抑制率, %;  $V_s$  为实验组的甲烷产量, mL;  $V_c$  为空白组的甲烷产量, mL。

产甲烷速率的计算结果如表 1 所示。产甲烷抑

制率的计算结果如下:硝基苯浓度为 200、400、600、800 mg/L 的实验组,产甲烷抑制率分别为 26.8%、39.3%、43.1%、48.5%;苯胺浓度为 150、300、450、600 mg/L 的实验组,产甲烷抑制率分别为 24.1%、21.4%、22.8%、37.6%。可知,与添加硝基苯的实验组相比,添加苯胺的实验组甲烷累积产量较高,产甲烷抑制率较小,与 Lin 等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。

表 1 不同实验组的产甲烷速率  
Tab.1 Methanogenesis rate of different experiments

时 间/h	产甲烷速率/(mL·h <sup>-1</sup> )								
	空白 组	硝基苯组				苯胺组			
		200 mg/L	400 mg/L	600 mg/L	800 mg/L	150 mg/L	300 mg/L	450 mg/L	600 mg/L
4	5.50	2.83	5.48	4.73	5.08	5.23	5.45	5.23	5.25
12	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.80	0.43	0.00	0.08
24	4.32	0.00	0.00	0.00	0.00	2.33	2.52	2.80	1.79
36	0.00	3.60	1.50	0.00	0.00	0.00	0.32	0.29	0.21
60	0.00	0.00	0.29	0.95	0.78	0.00	0.00	0.00	0.10

2.1.2 硝基苯和苯胺浓度对其去除效果的影响

不同初始浓度硝基苯和苯胺实验组的硝基苯和苯胺去除效果见图 3。硝基苯去除率(93.3%~100%)比苯胺去除率(39.7%~49%)要高,并且去除硝基苯所需的时间随其浓度的升高而增加。硝基苯和苯胺浓度在 0~12 h 都有明显的降低趋势,硝基苯的降解速率在 24 h 后开始提升(800 mg/L 硝基苯组除外),而苯胺浓度在 12 h 后基本不变,这证实了苯胺通常情况下难以被厌氧降解的结论<sup>[1]</sup>。

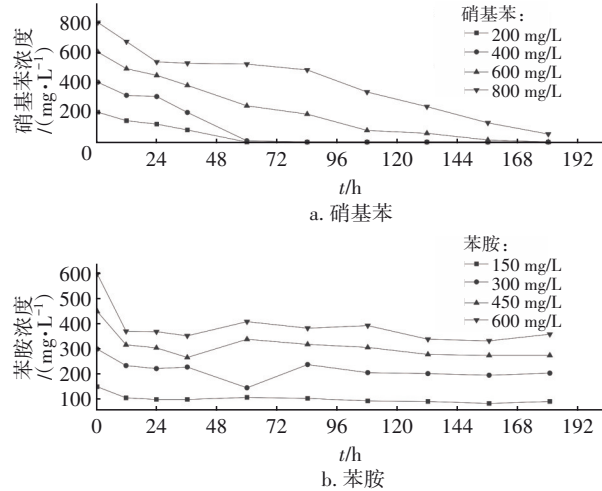


图 3 不同初始浓度下硝基苯和苯胺的去除效果  
Fig.3 Removal effect of NB and AN at different initial concentrations

添加硝基苯的实验组中,当硝基苯初始浓度为

200和400 mg/L时,硝基苯去除率在60 h时可达100%,而此时硝基苯初始浓度为600和800 mg/L实验组的去除率远低于50%。由此推断,600 mg/L的硝基苯可能会对活性污泥造成较强的抑制。

### 2.1.3 硝基苯初始浓度对总VFA浓度的影响

不同浓度硝基苯实验组的出水总VFA浓度如图4所示。在空白组以及200和400 mg/L硝基苯实验组,出水总VFA浓度都是先升至峰值后逐渐降低,且峰值出现的时间随硝基苯浓度的升高而后移。这可能是因为产甲烷过程受到抑制但产酸过程未受到抑制,引起产酸和产甲烷过程的失衡,导致VFA的短时累积。而在600和800 mg/L硝基苯实验组,总VFA浓度一直缓慢增长,可能是产甲烷过程的受抑制程度比产酸过程严重,硝基苯被完全降解后产酸过程才开始恢复<sup>[11]</sup>,而产甲烷过程的恢复更慢。因此,硝基苯不仅对产甲烷过程有较强的抑制作用,浓度较高时对产酸过程也有一定的抑制作用,且在一定范围内,硝基苯浓度越高,产酸过程受抑制后恢复得越慢。

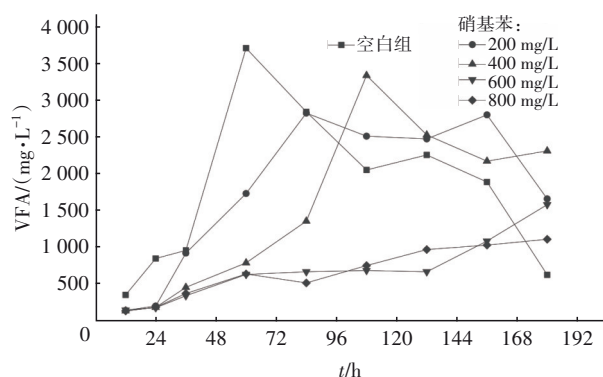


图4 不同浓度硝基苯实验组的出水总VFA浓度

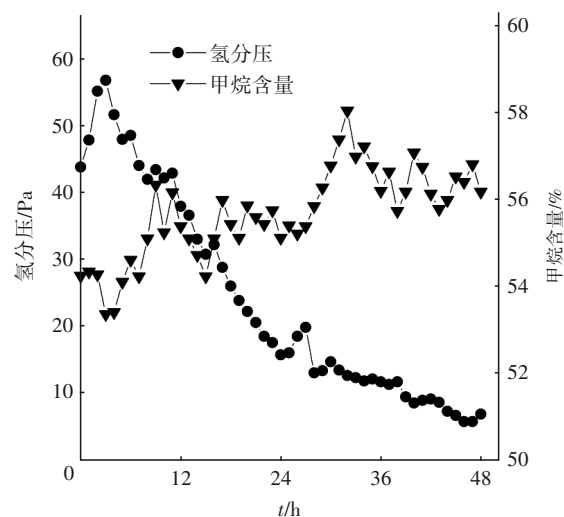
Fig.4 Total VFA concentration in effluent at different NB concentrations

## 2.2 硝基苯废水连续流冲击实验

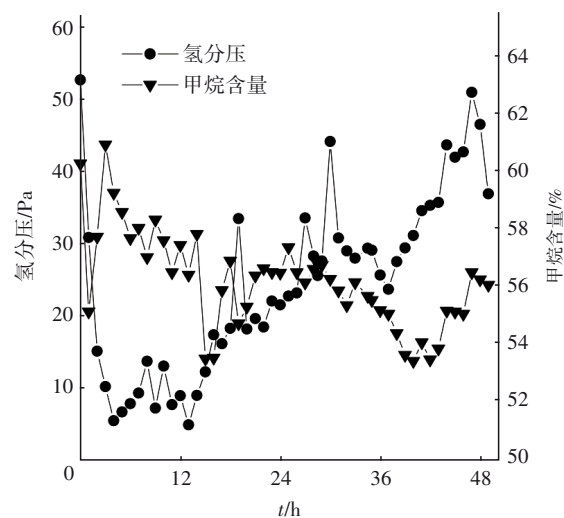
### 2.2.1 硝基苯对氢分压和甲烷含量的影响

300 mg/L硝基苯冲击实验中,氢分压和甲烷含量的变化如图5(a)所示。氢分压在冲击初始阶段(0~4 h)升高,随后降低;甲烷含量在冲击初始阶段基本保持稳定,之后略有降低,但随后立即恢复并维持在54%~58%。600 mg/L硝基苯冲击实验中,氢分压和甲烷含量的变化如图5(b)所示。氢分压在冲击初始阶段(0~4 h)快速降低,随后呈整体上升趋势,但存在较大的波动。总体上看,硝基苯的

冲击会造成厌氧反应器的甲烷含量始终剧烈波动,但整体趋势为降低。



a. 300 mg/L硝基苯实验组



b. 600 mg/L硝基苯实验组

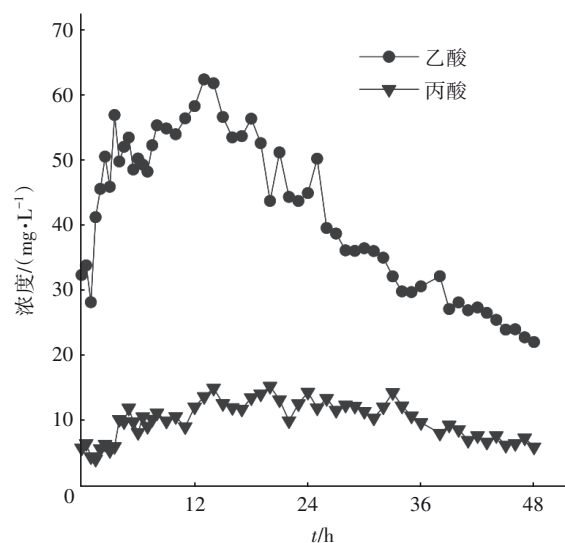
图5 不同浓度硝基苯实验组的氢分压和甲烷含量

Fig.5 Hydrogen partial pressure and  $\text{CH}_4$  content at different NB concentrations

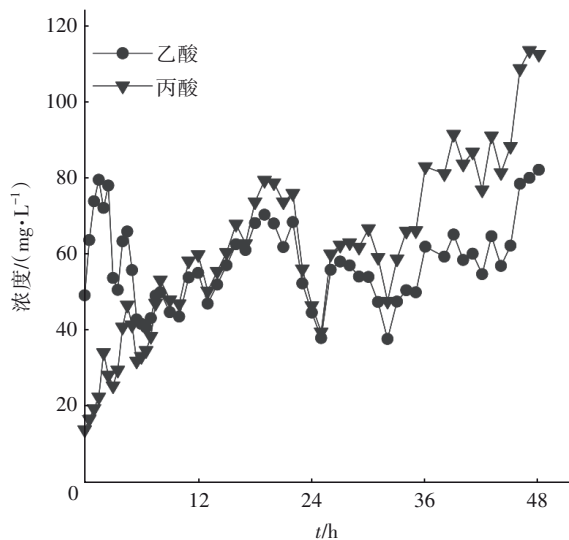
### 2.2.2 不同浓度的硝基苯对VFA的影响

300 mg/L硝基苯冲击实验组的VFA浓度变化如图6(a)所示。乙酸浓度在冲击初始阶段(0~4 h)快速升高,达到最高值(第14小时)后快速降低;丙酸浓度在冲击初始阶段升高,随后维持在较稳定的水平。600 mg/L硝基苯实验组的VFA浓度变化如图6(b)所示。乙酸和丙酸浓度在整个冲击过程中都剧烈波动,其中在冲击初始阶段(0~6 h)丙酸浓度整体为升高趋势,之后两者的变化趋势较为同步。





a. 300 mg/L 硝基苯实验组



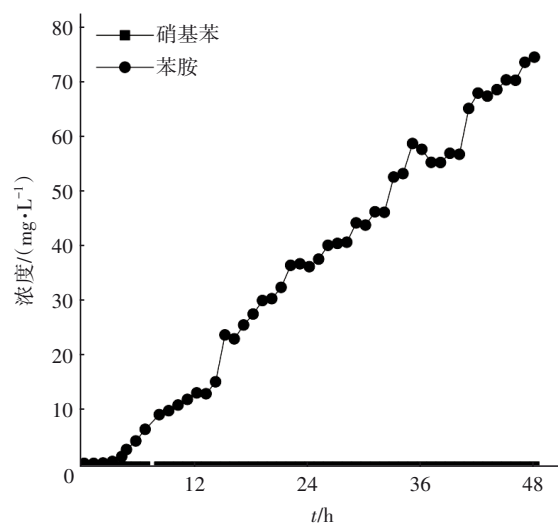
b. 600 mg/L 硝基苯实验组

图6 不同浓度硝基苯实验组的出水VFA浓度

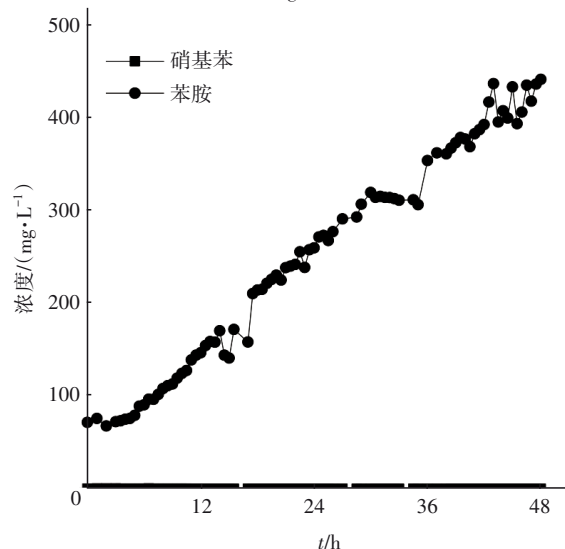
Fig.6 VFA concentrations in effluent at different NB concentrations

### 2.2.3 硝基苯浓度对其降解效果的影响

300 和 600 mg/L 硝基苯冲击实验组中硝基苯及苯胺浓度的变化如图 7 所示。300 mg/L 硝基苯冲击实验组中,苯胺从第 4 小时开始出现,之后苯胺浓度持续增加;600 mg/L 硝基苯冲击实验组中,苯胺浓度在 0~4 h 较稳定,从第 4 小时快速升高,表明污泥降解硝基苯的活性开始恢复,微生物开始降解硝基苯。两组实验中硝基苯始终未检出,表明在厌氧条件下硝基苯易被降解为苯胺<sup>[12]</sup>,但苯胺在厌氧条件下难以降解,苯胺生成速率大于降解速率,从而逐渐累积。



a. 300 mg/L 硝基苯实验组



b. 600 mg/L 硝基苯实验组

图7 不同浓度硝基苯实验组的出水硝基苯及苯胺浓度

Fig.7 NB and AN concentrations in effluent at different NB concentrations

综上,厌氧系统受到 300 mg/L 硝基苯冲击时,甲烷含量变化较小,氢分压升高,乙酸、丙酸累积,可能是因为产甲烷过程受到抑制而产酸过程未受到抑制或受抑制程度低。厌氧系统受到 600 mg/L 硝基苯冲击时,甲烷含量降低,氢分压降低,乙酸和丙酸浓度都降低,可能是因为产甲烷过程和产酸过程都受到抑制,产酸过程恢复后,产甲烷过程还未完全恢复。在两种浓度的硝基苯冲击过程中,出水硝基苯浓度都很低,但硝基苯降解中间产物苯胺的浓度持续升高,可能是微生物降解硝基苯的活性恢复得较快,但降解苯胺的活性恢复得很慢。

### 3 讨论

#### 3.1 多参数冲击响应分析

研究监测的在线参数包括氢分压、甲烷含量和总VFA浓度,各VFA组分通过气相色谱测定,也属于容易实现在线监测的参数。其中氢气和VFA是厌氧降解过程的中间产物,产酸菌或产甲烷菌受到抑制,都会引起产酸和产甲烷过程失衡<sup>[13]</sup>,氢分压和VFA浓度出现相应的特征响应曲线。VFA组分中的乙酸是产甲烷过程容易利用的基质,丙酸则是产甲烷过程较难利用的基质,氢气通过热力学调节实现厌氧系统平衡,氢分压过高时可能引起丙酸的积累,进而导致厌氧过程受到抑制,且丙酸的降解较慢,出现累积后,即使产甲烷活性恢复,丙酸浓度仍然在相对较长的一段时间内没有下降<sup>[14]</sup>,本实验的相关参数特征响应也符合这一特性。甲烷是厌氧降解过程的最终产物,气相甲烷含量主要受产甲烷菌活性的影响,产甲烷菌比产酸菌更容易受毒性物质和负荷冲击的抑制,也容易出现产酸与产甲烷反应过程的不平衡,导致气相中二氧化碳含量上升,甲烷含量下降,而在产甲烷菌活性恢复阶段,甲烷含量则会回升<sup>[13]</sup>。

在硝基苯冲击浓度不高时(300 mg/L),氢分压在冲击初始阶段(0~4 h)出现升高,随后保持降低的趋势。甲烷含量在冲击初始阶段(0~4 h)先维持稳定,经过短暂的降低(4~5 h)之后保持相对稳定的水平。乙酸和丙酸浓度在冲击初始阶段(0~4 h)快速升高,但乙酸浓度在达到最高值后快速降低,丙酸浓度则维持在最高值。这种响应特性说明厌氧工艺运行过程未受到严重冲击,在初始阶段产甲烷过程受到一定程度抑制后,迅速适应冲击并恢复活性。气相和液相监测参数的响应曲线都反映了这一过程趋势,但气相参数的响应速度明显快于液相参数,而中间产物参数氢分压的响应速度又快于终端产物参数甲烷含量。乙酸/丙酸浓度在0~4 h快速升高,而后波动上升,并在14 h时达到峰值,具有特征响应性,这与以前研究中乙酸/丙酸浓度具有明显的响应特征不同。

在硝基苯冲击浓度较高时(600 mg/L),氢分压在整个过程中持续剧烈波动,总体呈升高趋势。甲烷含量在整个冲击过程中也一直剧烈波动,但总体呈降低趋势。乙酸和丙酸浓度在冲击初始阶段均

有较大的波动(0~6 h),但随后两者基本维持同步的升高趋势。多参数的响应曲线说明厌氧工艺运行过程受到较严重冲击,工艺过程始终未从抑制中恢复,气相和液相监测参数的响应曲线变化趋势与较低浓度的冲击实验不同,气相参数在整个过程中始终维持剧烈波动,气相参数的响应速度明显快于液相参数,而中间产物参数氢分压的响应速度又快于终端产物参数甲烷含量。乙酸/丙酸浓度在冲击初始阶段剧烈波动,对冲击表现出明显的特征响应,但在随后维持在较稳定的水平,对恢复过程没有做出相应的响应。

苯胺是硝基苯厌氧降解的中间产物,苯胺在厌氧条件下无法继续降解<sup>[10]</sup>,在本实验较低强度和较高强度的冲击过程中,硝基苯浓度始终维持在很低的水平,苯胺浓度则在冲击初始阶段经过一个短暂的稳定期后持续升高,没有表现出特征响应性。

#### 3.2 参数适用性分析

从上述的参数响应分析来看,在较低浓度的硝基苯冲击实验中,氢分压、甲烷含量和VFA组分浓度都有明显的响应。冲击初始阶段,氢分压和乙酸浓度的响应最快,甲烷含量的响应具有滞后性;恢复阶段,氢分压的响应速度快于甲烷含量和乙酸浓度,丙酸浓度的响应不太明显。因此较低浓度的硝基苯冲击实验中氢分压响应最快,可作为预警指标,但在恢复阶段需结合其他参数的响应特性进行分析,才能对微生物受抑制程度做出较全面和准确的诊断。乙酸/丙酸浓度仅在冲击初始阶段有较强的响应性,但在恢复阶段不具有特征响应性,因此仅适用于冲击初始阶段的诊断。

在较高浓度的硝基苯冲击实验中,各参数都表现出明显的响应。氢分压整体升高,甲烷含量整体降低,乙酸和丙酸浓度整体升高,表明微生物活性受到较严重的抑制,并且始终没有恢复。氢分压、甲烷含量和VFA浓度的变化都比较剧烈,根据单个参数的变化特征无法全面而准确地分析系统状态和微生物受抑制程度。因此在对受到较严重冲击的厌氧系统进行分析时,必须综合考虑多个参数的响应特性。

综上,需要综合分析冲击过程中多个参数的响应特性,构建多参数的特性响应数据库,或者进一步构建多维矢量综合指标,从而建立难降解废水厌氧处理工艺的诊断方法,实现对反应器状态、冲击

类型、抑制程度的在线诊断识别。

#### 4 结论

① 气相和液相各参数具有特征响应性,可以通过构建特征响应数据库和综合指标,建立难降解废水厌氧处理工艺的在线诊断方法。

② 氢分压的响应最敏感,适合作为冲击初始阶段的预警参数,但要结合其他参数才能实现更全面、准确的状态诊断。

③ 本研究中硝基苯浓度和苯胺浓度不适合作为诊断参数,传统诊断参数乙酸/丙酸浓度仅在冲击过程的初始阶段具有预警性。

#### 参考文献:

- [1] CAO L, ZHANG C, ZOU S, *et al.* Simultaneous anaerobic and aerobic transformations of nitrobenzene [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 264–269.
- [2] SPONZA D T, KUSCU O S. Relationships between acute toxicities of para nitrophenol (*p*-NP) and nitrobenzene (NB) to *Daphnia magna* and *Photobacterium phosphoreum*: physicochemical properties and metabolites under anaerobic/aerobic sequential [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2/3): 1187–1197.
- [3] KONG Z, LI L, XUE Y, *et al.* Challenges and prospects for the anaerobic treatment of chemical-industrial organic wastewater: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 913–927.
- [4] XU J, LONG Y, SHEN D, *et al.* Optimization of Fenton treatment process for degradation of refractory organics in pre-coagulated leachate membrane concentrates [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 323 (Pt B): 674–680.
- [5] HESLOP J K, WALTER ANTHONY K M, GROSSE G, *et al.* Century-scale time since permafrost thaw affects temperature sensitivity of net methane production in thermokarst-lake and talik sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 124–134.
- [6] YANG L, ZHANG Y, BAI Q, *et al.* Intimately coupling of photolysis accelerates nitrobenzene biodegradation, but sequential coupling slows biodegradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 287: 252–258.
- [7] MUN C H, HE J, NG W J. Pentachlorophenol dechlorination by an acidogenic sludge [J]. *Water Research*, 2008, 42(14): 3789–3798.
- [8] MADSEN M, HOLM-NIELSEN J B, ESBENSEN K H. Monitoring of anaerobic digestion processes: a review perspective [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 3141–3155.
- [9] 董方, 陈林涛. 基于新型评估指标的厌氧反应器快速诊断方法 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2119–2126.
- DONG Fang, CHEN Lintao. Diagnosis system for anaerobic digestion reactor based on novel evaluation indexes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4): 2119–2126 (in Chinese).
- [10] LIN K H, JAW C G, YEN J H, *et al.* Molecular connectivity indices for predicting bioactivities of substituted nitrobenzene and aniline compounds [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(7): 1942–1949.
- [11] HUANG J, LI J, HAN W, *et al.* Effect of shocked nitrobenzene concentrations on the operational performance of anaerobic sequential batch reactor [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, 37(2): 712–718.
- [12] KUSCU Ö S, SPONZA D T. Effects of nitrobenzene concentration and hydraulic retention time on the treatment of nitrobenzene in sequential anaerobic baffled reactor (ABR)/continuously stirred tank reactor (CSTR) system [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(7): 2162–2170.
- [13] WU D, LI L, ZHAO X F, *et al.* Anaerobic digestion: a review on process monitoring [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2019, 103: 1–12.
- [14] KAMO T, WU B L, EGAMI Y, *et al.* Influence of mixed molten carbonate composition on hydrogen formation by steam gasification [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2011, 13(1): 50–55.

作者简介:李辰(1982–),男,山东泰安人,博士,高级工程师,主要从事水污染防治技术研发,水环境综合治理及修复,水务领域的投资、建设和运营管理等工作。

E-mail:lichen\_tianjin@163.com

收稿日期:2020-11-18

修回日期:2021-05-30

(编辑:刘贵春)