

干式厌氧发酵反应器的中试研究

许国栋^{1,2}, 闫园园³, 李彩斌³, 王凯军¹

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 中持 <北京> 环保发展有限公司, 北京 100192;
3. 北京中持绿色能源环境技术有限公司, 北京 100192)

摘要: 采用一种新型卧式推流干式厌氧发酵系统用于猪粪、秸秆和污泥处理中试研究。试验阶段干式厌氧发酵系统表现出较好的稳定性, 运行效果良好。新型卧式推流干式厌氧反应器能够有效解决传热和传质差的问题。当进料含水率为80%、回流比为50%时, 出料含水率为84%~88%, 有机质含量为60%~70%, 酸碱比基本维持在0.1~0.3。干式厌氧发酵系统的最佳有机负荷为4.8 kg/(m³·d), 有机物降解率为40%~50%, 容积产气率可达2~3 m³/(m³·d)。猪粪与秸秆协同厌氧发酵的效果好于猪粪、秸秆单一物料, 因为猪粪与秸秆混合可以将进料的C/N值控制在厌氧发酵的最佳范围(20~30)。猪粪和秸秆混合发酵系统中, C/N值的提高使得氨氮浓度呈下降趋势, 这在一定程度上避免了系统出现氨抑制的情况。

关键词: 干式厌氧发酵; 卧式推流; 有机负荷; 容积产气率; 氨抑制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0033-06

Pilot Study on Dry Anaerobic Fermentation Reactor

XU Guo-dong^{1,2}, YAN Yuan-yuan³, LI Cai-bin³, WANG Kai-jun¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. CSD <Beijing > Environmental Protection Development Co. Ltd., Beijing 100192, China; 3. Sustainable Green Energy ET. Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: A new horizontal push-flow dry anaerobic fermentation system was applied in a pilot study on pig manure, straw and sludge treatment. During the experimental period, the system showed good stability and good operational performance. The new horizontal push-flow dry anaerobic reactor could effectively solve the problem of poor heat and mass transfer. When water content of the feed was 80% and the reflux ratio was 50%, water content of the discharge was 84% - 88%, the organic matter content was 60% - 70%, and the acid-base ratio was basically maintained at 0.1 - 0.3. The optimal organic load of the dry anaerobic fermentation system was 4.8 kg/(m³·d). At this point, the degradation rate of organic matter was about 40% - 50%, and the volumetric gas production rate could reach 2 - 3 m³/(m³·d). The effect of synergistic anaerobic fermentation of pig manure and straw was better than that of individual pig manure or straw. The reason was that the C/N ratio of the feed could be controlled to the optimal range of anaerobic fermentation (20 - 30) when pig manure and straw were mixed. In the mixed fermentation system feeding pig manure and straw, the increase of C/N ratio led to the decline of ammonia nitrogen concentration, which avoided ammonia inhibition in the system to some extent.

Key words: dry anaerobic fermentation; horizontal push-flow; organic load; volumetric gas production rate; ammonia inhibition

干式厌氧发酵技术指进料固体含量为20%~35%的厌氧发酵技术,与湿式厌氧发酵技术相比,干式厌氧发酵技术具有低能耗、高容积产气率、沼液产生量少等优势,市场应用前景广阔,已逐渐成为沼气技术研究关注的焦点。但是,在实际工程应用中,干式厌氧发酵技术还存在着系统启动缓慢、传热和传质差、操作运行不稳定等诸多问题。

20世纪40年代以来,欧洲一些国家就开始研究干式厌氧消化技术。到20世纪80年代,干式厌氧消化技术在德国、荷兰、瑞士和比利时等国家开始工程化应用。目前欧洲主要有德国Bioform公司车库型干发酵系统、比利时Dranco系统、瑞典Kompogas发酵系统、法国Valorga筒仓型干发酵系统等几种干式厌氧发酵技术^[1]。国外技术应用较多,相对成熟,但其设备结构复杂、操作繁杂、投资成本较高等问题仍然存在。我国对干式厌氧发酵技术的研究起步较晚,且相对滞后。干式厌氧发酵大型装备尚处于技术研发阶段,一方面是缺乏配套设备,另一方面是干式厌氧发酵技术工艺参数调控、传热和传质、抑制等问题还没有得到有效解决^[2]。

随着工业化和城镇化进程的加快,针对不同有机废物,如畜禽粪便、秸秆、餐厨垃圾等,干式厌氧发酵技术的优势将逐步显现,可能会取代传统的湿式厌氧处理方法,成为主流的厌氧发酵技术,在可持续废物处理和能源回收等方面具有广阔应用前景^[3]。

笔者在小试的基础上,研发了一种卧式推流干式厌氧发酵系统,并以猪粪、秸秆和污泥作为原料进行中试研究,考察卧式推流干式厌氧发酵系统的运行效果,确定最佳运行条件及调控参数,旨在为我国干式发酵技术的发展奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验装置

中试工艺流程如图1所示。卧式推流干式厌氧发酵装置采用碳钢材质,长为7.5 m,宽为1.6 m,高为2 m,有效容积为20 m³。内部有卧式搅拌装置,具有搅拌和推流的作用。反应器采用外部保温、内部盘管循环加热的方式运行。利用螺旋装置控制反应器的进、出料,出料采用螺旋挤压固液分离机进行固液分离,通过热式质量流量计对产气进行计量。

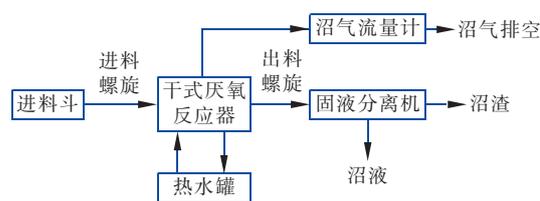


图1 干式厌氧发酵工艺流程

Fig. 1 Flow chart of dry anaerobic fermentation process

1.2 试验原料

反应器采用牛粪消化液进行接种启动,接种物料及原料的基本性质:新鲜猪粪的含水率为75%~78%,VS为78%~84%,密度为1 000 kg/m³;干秸秆的含水率为12%,VS为85%;预处理后秸秆的含水率为80%~85%,VS为80%~85%;污泥的含水率为80%~85%,VS为60%~65%;接种牛粪消化液的含水率为93.1%,VS为69.2%,密度为1 002 kg/m³。秸秆采用沼液浸泡的预处理方式,浸泡时长为7 d。

1.3 试验方法

试验采用干式厌氧发酵技术,进料含水率控制在80%左右,采用中温和高温发酵,搅拌器控制在2 r/min。采用连续进出料的方式,逐步提高进料量从而提升有机负荷。在进料的同时回流消化液,回流比为50%。试验过程中,监测产气量、挥发性脂肪酸(VFA)、总碱度、pH值、氨氮等指标,分析厌氧发酵过程中不同有机负荷和不同温度条件下的运行效果及产气性能,确定最佳运行参数,并探索干式厌氧发酵工艺的氨抑制和酸积累的形成与控制方法。

1.4 分析项目与方法

含水率采用重量法测定;有机质含量采用灼烧减量法测定;挥发性脂肪酸和氨氮采用蒸馏后滴定法测定;总碱度采用酸碱指示剂滴定法测定;气体成分采用沼气成分分析仪测定;pH值采用多参数水质分析仪测定。

2 结果与讨论

中试共连续运行了392 d,考察猪粪、秸秆和污泥等在不同试验条件下的处理效果。启动阶段,为了尽快将反应器内的料位提升至设计值,系统前11 d每天进300 kg猪粪,但不出料。从第12天开始出料,并增加回流,回流比为50%,达到设计料位后开

始出料,之后逐渐增大进、出料量,提高系统有机负荷。中试分10个阶段进行,详见表1。

表1 不同试验阶段的工况

Tab.1 Conditions of different test stages

阶段	时间/d	猪粪/ (kg·d ⁻¹)	秸秆/ (kg·d ⁻¹)	污泥/ (kg·d ⁻¹)	温度/ ℃
1	1~134	1~1 000	0	0	38
2	135~150	300	300	0	38
3	151~174	0	600	0	38
4	175~197	0	600	0	38~55 (升温)
5	198~203	0	600	0	54~48 (降温)
6	204~245	0	600	0	48
7	246~307	0	0	700	38
8	308~324	0	0	700	38~55 (升温)
9	325~364	0	0	700	52
10	365~392	0	0	700	48

从表1可以看出,第1、3、7阶段分别采用猪粪、

表2 不同试验条件下沼气产量、有机物降解率、物料产气量的变化

Tab.2 Variations of gas production and organic matter degradation rate in different test conditions

项目	运行温度/ ℃	进料量/ (kg·d ⁻¹)	折算VS负荷/ (kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	沼气产量/ (m ³ ·d ⁻¹)	有机物降解率/%	物料产气量/ (m ³ ·t ⁻¹ VS)
猪粪	38	400	3.2	25~30	40~45	390~467
		500	4.0	30~35	45	375~438
		600	4.8	40~45	45~50	417~521
		700	5.6	40~45	45~50	417~521
		800	6.4	40~45	35~40	417~521
		900	7.2	40	30	278
猪粪+秸秆	38	600	4.8	55	50	573
秸秆	38	600	4.8	25	20~30	260
	48			40	30~40	417
污泥	38	700	4.6	30	30~40	330
	52			30~40	40~50	330~440
	48			35	40~50	385

从表2还可以看出,在中温厌氧发酵阶段,随着负荷的提高,产气量逐渐增加,猪粪进料量由400 kg/d提高到600 kg/d,即有机负荷由3.2 kg/(m³·d)提高到4.8 kg/(m³·d)时,沼气产量、有机物降解率和物料产气量都逐渐增加,沼气产量由25 m³/d增加到45 m³/d,有机物降解率也由40%增加到50%,物料产气量由390 m³/tVS上升到521 m³/tVS。进一步增加进料负荷,沼气产量增加不显著,基本稳定在40~45 m³/d,有机物降解率和物料产气量均有不同程度的降低。因此,初步判断进料负

荷已经超出了系统的承载能力,系统内的环境抑制了微生物对有机物的降解和利用。从综合产气性能和有机物降解率两方面考虑,当进料量为600 kg/d、有机负荷为4.8 kg/(m³·d)时,总碱度在10 000~12 000 mg/L,VFA在4 000~6 000 mg/L,酸碱比在0.2~0.4之间浮动,该干式厌氧消化中试系统运行稳定,处理效率高,并可获得较好的产气效果。

2.1 产气性能分析

表2为不同试验条件下沼气产量、有机物降解率和物料产气量的变化。可以看出,在最佳有机负荷条件下,采用猪粪和秸秆混合进料时,有机物降解率较高,达到了50%,产气量为573 m³/tVS。进行预处理后,秸秆中温厌氧发酵(38℃)的产气量为260 m³/tVS,有机物降解率为20%~30%;高温厌氧发酵(48℃)的产气量为417 m³/tVS,有机物降解率为30%~40%。污泥中温厌氧发酵(38℃)的产气量为330 m³/tVS,有机物降解率为30%~40%;高温厌氧发酵(48℃)的产气量为385 m³/tVS,有机物降解率为40%~50%。

在最佳有机负荷条件下,分别进行猪粪加秸秆、秸秆、污泥试验。其中,猪粪和秸秆协同厌氧试验中,猪粪进料量为300 kg/d,预处理秸秆(含水率为

80%) 进料量为 300 kg/d, 此阶段的沼气产量为 55 m³/d, 物料产气量为 573 m³/tVS, 相比于单独猪粪明显提升。分析原因, 可能是由于秸秆的加入提高了系统内的 C/N 值(猪粪的 C/N 值为 13, 干秸秆的 C/N 值为 60, 混合后物料的 C/N 值为 21), 且达到了最佳范围(20~30)。

在单独秸秆进料阶段, 中温工况下的沼气产量较低, 维持在 25 m³/d, 逐渐提升反应温度后(由 38 ℃ 提高到 55 ℃), 沼气产量逐步增加, 48 ℃ 时达到最大值, 为 40 m³/d。继续提高温度, 则沼气产量急剧下降, 总碱度也下降, VFA 升高, 酸碱比升高到了 1, 系统出现了酸化现象。停止进料, 并将温度调至 48 ℃, 总碱度逐渐上升, 酸度下降之后恢复进料。开始进料后, 温度控制在 48 ℃ 左右, 酸碱比由 0.5 逐渐下降到正常范围(0.3 左右)。沼气产量也随之上升, 并稳定在 40 m³/d 左右, 系统恢复正常。因此, 判定秸秆干式厌氧发酵在温度为 48 ℃ 时反应效率最高。

2.2 沼气成分分析

厌氧发酵产生沼气的主要成分是甲烷和二氧化碳, 还有少量的一氧化碳、硫化氢、氧气等, 其中甲烷产量达到 50% 以上。试验过程中, 不同物料产生的沼气中甲烷含量有所差别。其中, 猪粪干式厌氧发酵沼气中甲烷含量最高, 为 65%, 秸秆和污泥产沼气中甲烷浓度较低, 均为 55%, 如图 2 所示。另外, 温度对于甲烷含量的影响不明显。

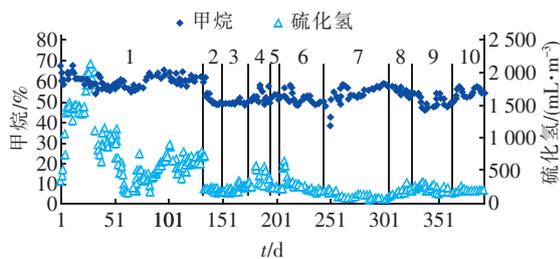


图2 气体成分的变化

Fig. 2 Variation of gas composition

一般认为, 大部分硫化氢是在水解阶段产生的, 硫化氢的生成来源主要有含硫蛋白质的降解、硫酸盐的还原和硫化物的直接转化。开始阶段, 随着猪粪的不断加入, 硫化氢浓度先逐渐增加, 到第 6 天时硫化氢由起始的 355 mL/m³ 增大到 1 400 mL/m³, 之后基本保持在 1 400 mL/m³ 左右。但是从第 28 天开始, 硫化氢含量出现了大幅度的波动, 由 1 400

mL/m³ 上升到 2 100 mL/m³ 又下降到 718 mL/m³, 随后稳定在 600 mL/m³ 左右。秸秆和污泥试验阶段, 硫化氢基本稳定在 100~300 mL/m³。前期硫化氢浓度波动较大, 一方面可能是猪粪性质变化导致的, 由于猪粪中混入了部分饲料, 使得油脂类物质增加, 所以厌氧分解后产生了更多的硫化氢; 另一方面可能是初始阶段硫化氢与铁质物质反应导致其浓度下降, 反应完全后, 硫化氢逐渐稳定。同时, 近年来关于高浓度厌氧研究的结果表明, 同样的物料在高浓度厌氧情况下, 产生的气体中硫化氢浓度远低于传统低浓度厌氧的, 学界对此结论还没有统一的认识, 可能与高浓度情况下系统内 pH 值偏高不利于硫化氢的逸出有关。

2.3 氨氮影响分析

在厌氧发酵系统中, 氨氮发挥着重要作用, 但其对厌氧发酵系统具有双面性。一方面氨氮是微生物的氮源, 另一方面其可调节厌氧发酵系统的 pH 值, 因此适宜的氨氮浓度能够促进厌氧发酵系统中微生物的生长, 但氨氮浓度过高时会降低产甲烷菌等微生物的活性, 对厌氧发酵系统产生抑制作用, 影响系统的正常运行。

开始进料之后, 氨氮浓度逐渐升高, 这是由于猪粪中含有的氮元素含量较高, 碳氮比低, 而且氮元素在厌氧消化过程中去除效率较低。因此, 随着进料的增加和时间的推移, 系统中氨氮逐渐累积, 浓度逐渐升高。在猪粪中, 还会混入部分猪尿, 猪尿中氮元素含量较高, 也加剧了氨氮浓度的升高, 当氨氮浓度增加到 5 000 mg/L 时, 浓度趋于稳定(见图 3)。

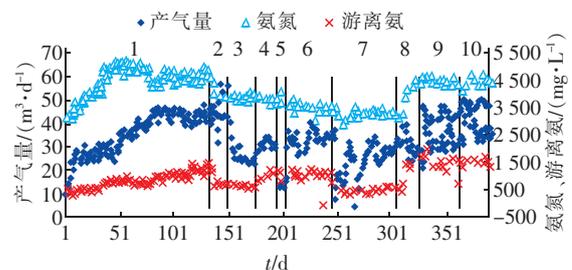


图3 产气量、氨氮和游离氨的变化

Fig. 3 Variations of gas production, ammonia nitrogen and free ammonia concentration

为了防止氨氮浓度的进一步升高, 降低高氨氮浓度对系统的影响, 物料回流由消化物改为固液分离后的沼渣。沼渣的氨氮浓度是消化液氨氮浓度的 1/10, 回流降低了返回厌氧系统的氨氮浓度, 对降低

系统中氨氮浓度起到了一定作用。氨氮浓度在后期出现了小幅下降,在4 400~4 600 mg/L范围内。

随着秸秆的投加,氨氮浓度逐渐下降,基本在3 000~4 000 mg/L范围内,后期停止进秸秆后,进料全部为污泥,氨氮浓度又逐渐升高到5 000 mg/L。这是因为秸秆的含碳量较大,随着秸秆的加入,提高了系统的碳氮比,适宜的碳氮比可以降低氨氮浓度,避免和降低高浓度氨氮对厌氧系统的抑制作用,有利于提高原料转化率^[4]。后期由于系统的碳氮比降低,加之污泥中氮元素相比秸秆的要多,氨氮浓度逐渐升高。

从整个试验周期来看,干式厌氧发酵系统稳定后,氨氮浓度的变化并不大,维持在4 000~5 000 mg/L。这是由于在碱性条件下溶出的氨氮浓度基本上随着厌氧发酵时间的延长变化不大,而且氨氮在固相、液相和气相中有一个相对的缓冲平衡,因此最终氨氮浓度趋于稳定。

在厌氧发酵过程中,针对氨氮抑制厌氧系统的原因,不同的学者有着不同的观点。Van Velsen^[5]认为,在氨氮浓度为2 420 mg/L条件下,驯化过的甲烷菌能够在氨氮浓度达到3 000 mg/L时快速产生甲烷,没有任何滞后现象出现。Lay等^[6]认为,甲烷菌活性在氨氮浓度为1 670~3 717 mg/L时明显下降,在4 086~5 550 mg/L时下降50%,在5 875~6 600 mg/L时甲烷菌基本失活。Wiegant等^[7]指出,经过高浓度氨氮驯化的甲烷菌,氨氮抑制产氢产甲烷菌的浓度为3 500 mg/L,但产乙酸产甲烷菌在氨氮达到4 500 mg/L时仍未受到抑制。

但许多学者仍认为,氨氮产生抑制性的主要原因是游离氨的作用。张波等^[8]的研究表明,当游离氨浓度在1 100 mg/L以下时,产甲烷微生物的相对比表观增殖速度为1,处于稳定状态,当游离氨浓度为1 100~1 160 mg/L时,产甲烷微生物的相对比表观增殖速度下降至0.67,当游离氨浓度为1 160~1 340 mg/L时,产甲烷微生物的相对比表观增殖速度保持稳定下降。

厌氧消化系统内pH值、温度和氨氮的浓度影响着游离氨浓度的变化,它们之间的相互关系可由式(1)表示。

$$\frac{C_{FA}}{C_{TAN}} = \frac{10^{pH}}{e^{6.344/(273+T)} + 10^{pH}} \quad (1)$$

式中: C_{FA} 为游离氨浓度,mg/L; C_{TAN} 为氨氮浓

度,mg/L; T 为温度,℃。

从本试验可以看出,当氨氮浓度达到5 000 mg/L时,游离氨浓度高达1 500~1 800 mg/L,产气量下降不显著,系统也没有表现出受抑制现象。经过长时间高浓度氨氮驯化后,厌氧微生物对氨氮的抵抗能力大大增强,干式厌氧系统对氨氮的耐受浓度可达到5 000 mg/L。

当厌氧系统浓度过高后就要采取措施缓解和消除氨抑制现象,目前采取的主要技术:一是调整厌氧系统的碳氮比;二是添加适量微量元素,如Mg、Fe等,以提高微生物对高浓度氨氮的适应能力;三是利用高浓度氨氮对微生物进行驯化,以形成新的微生物群落结构,使其逐渐适应高氨氮环境,这种方法较经济,成为解决厌氧氨抑制的主要方法。

2.4 pH值影响分析

厌氧发酵系统中,pH值是二氧化碳和硫化氢等在气液两相间的溶解平衡、液相内的酸碱平衡以及固液间离子溶解平衡等综合作用的结果。pH值对厌氧系统的影响较大,过高或过低都会影响微生物的活性,进而导致厌氧效率下降。

第1阶段中,厌氧系统pH值呈先下降后上升的变化趋势,由8.1下降到7.8后又上升至8.4左右。这是因为在前期厌氧发酵过程中,微生物降解产生了大量乙酸等,而VFA中80%为乙酸,因此表现为系统VFA浓度上升,pH值下降。前期VFA浓度较高,产气量也较高,主要是因为约有70%的甲烷来自VFA中乙酸的降解。随着秸秆和污泥的加入,VFA缓慢下降,pH值逐渐稳定在8.2左右。系统pH值的升高与氨氮和游离氨浓度也有一定的关系。当pH值在8.2~8.4时,氨氮浓度高达4 500~5 000 mg/L,游离氨浓度在1 500 mg/L左右。

试验过程中还发现,在第4和第7阶段,当系统pH值逐渐下降到7.8以下时,VFA上升,浓度高达12 000 mg/L,产气量也急剧下降,厌氧系统效率下降,出现了酸化现象。此时通过添加碳酸氢钠及惰性物质(如锯末、稻壳等),同时采取降低负荷或停止进料等措施可以将系统pH值提高到8左右,系统逐渐恢复正常。

综上所述,干式厌氧发酵与传统厌氧发酵有所不同,pH值应控制在8.2左右,更有利于厌氧微生物的生长和繁殖,厌氧效率更高。当厌氧系统pH值出现下降并低于7.8时,应采取相应措施,提高系

统 pH 值,防止出现酸化现象。

3 结论

① 干式厌氧发酵系统在试验阶段表现出较好的稳定性和良好的运行效果。当进料含水率为 80%、回流比为 50% 时,出料含水率为 84%~88%,有机质含量为 60%~70%,酸碱比维持在 0.1~0.3 的正常范围内。试验结果表明,干式厌氧发酵系统的最佳有机负荷为 $4.8 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,有机物降解率为 40%~50%,容积产气率为 $2 \sim 3 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在最佳有机负荷下,当猪粪在厌氧反应温度为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,产气量为 $417 \sim 521 \text{ m}^3/\text{tVS}$ 。当猪粪和秸秆混合后,在厌氧反应温度为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,产气量为 $573 \text{ m}^3/\text{tVS}$ 。预处理后的秸秆在厌氧反应温度为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,产气量为 $260 \text{ m}^3/\text{tVS}$;反应温度为 $48 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,产气量为 $417 \text{ m}^3/\text{tVS}$ 。污泥在厌氧反应温度为 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,产气量为 $330 \text{ m}^3/\text{tVS}$;在温度为 $48 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,产气量为 $385 \text{ m}^3/\text{tVS}$ 。

② 在高温发酵条件下,控制干式厌氧发酵温度为 $48 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,厌氧发酵效果最佳。

③ 干式厌氧发酵系统 pH 值稳定在 8.2 左右。当系统 pH 值降低到 7.8 以下时,可以初步判断系统受到了影响,出现了受抑制现象,在这种情况下应采取措施,如降低负荷、停止进料或添加惰性及碱性物质等。

④ 不同物料产沼气中甲烷含量有差别,猪粪产沼气中甲烷含量最高,为 65%;秸秆和污泥产沼气中甲烷含量较低,均为 55%。

参考文献:

- [1] Li Y B, Park S Y, Zhu J Y. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15 (1):821-826.
- [2] 谭业琴. 城市生物质废弃物干式厌氧消化启动实验与方案设计[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
Tan Yeqin. The Urban Biological Waste Anaerobic Digestion Starting Experiment and Schematic Design[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013(in Chinese).
- [3] 祝其丽,何明雄,汤晓玉,等. 有机固体废弃物干式发

酵产沼气研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (18):21-26.

Zhu Qili, He Mingxiong, Tang Xiaoyu, et al. The progress of dry anaerobic digestion of organic solid waste [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29 (18): 21-26 (in Chinese).

- [4] Kayhanian M. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: An overview and practical solutions[J]. *Environ Technol*, 1999, 20(4):355-365.
- [5] Van Velsen A F M. Adaptation of methanogenic sludge to high ammonia-nitrogen concentrations [J]. *Water Res*, 1979, 13(10):995-999.
- [6] Lay J J, Li Y Y, Noike T, et al. Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 36 (6/7): 493-500.
- [7] Wiegant W M, Zeeman G. The mechanism of ammonia inhibition in the thermophilic digestion of livestock wastes [J]. *Agricultural Wastes*, 1986, 16(4):243-253.
- [8] 张波,徐剑波,蔡伟民. 有机废物厌氧消化过程中氨氮的抑制性影响[J]. *中国沼气*, 2003, 21(3):26-28, 31.
Zhang Bo, Xu Jianbo, Cai Weimin. Review on the ammonia inhibition for anaerobic digestion [J]. *China Biogas*, 2003, 21(3):26-28, 31 (in Chinese).



作者简介:许国栋(1965-),男,河南沁阳人,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为污水和污泥处理、有机废弃物处理、环境管理政策与机制创新等。

E-mail: xugudong@zchb.net

收稿日期:2019-07-09