



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114934077 A

(43) 申请公布日 2022. 08. 23

(21) 申请号 202210698444.1

(22) 申请日 2022.06.20

(71) 申请人 香港浸会大学深圳研究院

地址 518000 广东省深圳市南山区高新园
南区粤兴三道2号深圳虚拟大学园产
业化综合大楼10楼

(72) 发明人 黄焕忠 罗丽雯

(74) 专利代理机构 南京知识律师事务所 32207

专利代理师 韩朝晖

(51) Int. Cl.

C12P 5/02 (2006.01)

C02F 11/04 (2006.01)

C12R 1/01 (2006.01)

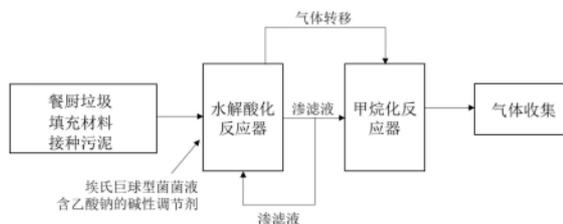
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷方法。所述方法包括水解酸化反应和甲烷化反应,通过在水解酸化相中接种埃氏巨型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561及加入乙酸根,促进餐厨垃圾等有机固体废物水解酸化过程中乳酸定向转化产氢产丁酸,产生的酸化液和产酸相气体均作为底物,转移到产甲烷相厌氧消化产生甲烷。本发明利用外源性生物调控水解产酸相的定向转化,克服厌氧发酵中乳酸累积的抑制作用,提高水解酸化效率,同时促进酸化液中丁酸的富集和提升产酸相气体中氢气含量,强化厌氧产甲烷效能。本发明具有效率高、易操作等优点,可提高厌氧消化的转化效率和甲烷产量,减少碳排放。



1. 一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,包括水解酸化反应和甲烷化反应,其特征在于,将埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561接种于水解酸化相,调节pH后水解酸化,将产生的酸化液和产酸相气体转移到产甲烷相作为底物,产甲烷相厌氧消化转化产生甲烷。

2. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述的埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561的接种量为2-5% (vol/vol),接种浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL。

3. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述的水解酸化相中加入乙酸根。

4. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,转移到产甲烷化相的所述产酸相气体的氢气与二氧化碳的体积比大于等于4。

5. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述水解酸化相的pH为 6.0 ± 1.0 。

6. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述水解酸化相和产甲烷相的温度维持在 37°C 。

7. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述水解酸化相的酸化液部分转移到产甲烷相,其余加水补足体积,并调节pH后回流至水解酸化相。

8. 根据权利要求1所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 将破碎或切块的有机固体废弃物加入水解酸化反应器,添加填充材料、接种污泥和水,均匀混合;

2) 在水解酸化反应器中接种埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561,接种量为有机固体废弃物总量的2-5% (vol/vol),接种浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL;

3) 调节pH为 6.0 ± 1.0 ,水解酸化反应器中进行水解酸化;将产生的酸化液和产酸相气体转移至甲烷化反应器,转移酸化液时,将部分酸化液转移到甲烷化反应器,其余酸化液加水补齐体积并调节pH到 6.0 ± 1.0 后,回流至水解酸化反应器;

4) 酸化液和产酸相气体在甲烷化反应器中厌氧消化产生甲烷。

9. 根据权利要求8所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述的酸化液按体积计25-50%回流至水解酸化反应器,剩余部分转移到甲烷化反应器。

10. 根据权利要求8所述的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其特征在于,所述酸化液加水补齐体积后添加含有乙酸钠的混合碱溶液调节pH。

一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法

技术领域

[0001] 本发明属于废物资源化技术领域,涉及一种两相厌氧消化产甲烷的方法,具体涉及一种利用外源性生化添加物强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法。

背景技术

[0002] 餐厨垃圾是典型的生物质固体废弃物,其有机含量高,易生物降解,具有较高的资源化属性。若将餐厨垃圾进行填埋处理,不但占用了宝贵的土地资源,而且废弃生物质在自然降解过程中还会产生大量的 NH_3 、 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 等温室气体,进而加剧碳减排压力。相较于填埋及焚烧,生物处理技术是实现餐厨垃圾等有机固体废弃物快速减量化和定向资源化的重要技术手段。其中,厌氧消化技术在有机废物处理中是一项发展良好且普及的技术,但是大部分研究集中于利用单相厌氧反应器处理餐厨垃圾产生生物气,而其可溶性有机物潜在积累的抑制效应促进了两相厌氧反应器的发展。

[0003] 两相厌氧反应器将水解酸化相和产甲烷相分开,从而为产酸细菌和产甲烷古菌提供了最佳条件,促进餐厨垃圾厌氧消化的效率和系统稳定性。其中,餐厨垃圾在水解酸化相的降解伴随着氢气和二氧化碳的产生,该气体的碳转化率占总碳转化效率的20-30%。产酸相气体的释放大大降低了厌氧系统的能源回收效率。为了在总碳转化效率的范围内提高甲烷产量,在两相厌氧消化过程中实现产酸相气体的高效再利用,CN106282243A公开了“一种改进的两相厌氧消化法生产甲烷的方法和系统”,其通过水解酸化反应器顶空的压力调控产酸相气体的氢气分压和氢碳比,将产酸相气体转移到甲烷化反应器中再利用,大大提高了甲烷产量。对于该工艺而言,促进酸化相产氢产酸是进一步升级该系统碳转化效率及产甲烷的关键。

[0004] 此前研究表明,餐厨垃圾的水解酸化先经过乳酸代谢后发生丁酸代谢。其中,固态有机废弃物水解酸化过程中乳酸代谢是产氢发酵的限制性因素之一且无法避免。减少乳酸产生是克服乳酸代谢抑制的常用途径。其中,热预处理既可杀灭乳酸菌及耗氢菌,又可保留产氢菌芽孢,故常用于抑制乳酸产生以提高有机废弃物产氢产酸。专利CN104998886A所披露的餐厨废弃物分相产能的方法,采用湿热预处理的方式提高餐厨废弃物在分相系统中产氢产甲烷性能,但是该工艺基于分相反应以氢气和甲烷分别从有机废弃物中回收能源,并未将厌氧产氢的产物,如氢气和二氧化碳用于产甲烷相,以提高甲烷产量、减少二氧化碳排放。专利CN104561222A为解决酸化液所产生的抑制,通过对餐厨垃圾和污泥混合物预先进行135℃高温处理,再接种产氢菌进行产氢深度酸化预处理,预处理液再进行甲烷化反应,一定程度上提高了有机废弃物的产甲烷速率;然而该方法除热预处理增加了能耗,在不同阶段需分别添加酵母粉、产氢菌和产甲烷菌,增加了操作的复杂性外,同样没有将水解酸化的气相产物,特别是二氧化碳在产甲烷相中高效再利用。热预处理不可避免地存在高能耗高、高有机质流失等问题。

[0005] 为了克服高含固餐厨垃圾水解酸化的乳酸抑制,除了利用预处理等方式减少乳酸产生,促进酸化相的乳酸转化是优化餐厨垃圾产氢发酵的另一思路,亦是亟需解决的问题。

其中,添加微生物菌剂是提高有机质转化的常见方式。专利CN104087622A通过接种不同种类梭菌的厌氧产氢菌调控丙酮-丁醇-乙醇发酵过程及产氢发酵产物实现木质纤维素联产丁醇和氢气。专利CN110484570A则通过接种芽孢杆菌属微生物,例如枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌等提高了餐厨垃圾的水解效率进而增加氢气产量。但是上述技术虽然促进了底物的转化,但其水解酸化主要以大量产氢从而提高有机物利用率为目标,并未针对水解酸化过程中存在的乳酸抑制,也不包含在两相厌氧消化法中通过促进水解酸化过程中乳酸的定向转化来提高碳转化及产甲烷效率的技术构思和方法。目前,没有在餐厨垃圾等水解酸化反应中强化乳酸转化定向产氢产酸的报道,也没有关于在两相厌氧消化中强化水解酸化相的乳酸定向转化促进产甲烷相甲烷生产的报道。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,其中水解酸化相利用外源性功能菌定向强化乳酸转化,同时解决餐厨垃圾等有机废弃物厌氧发酵中乳酸累积对产氢产酸的抑制,所述方法能够促进水解酸化反应中乳酸定向转化,并通过乙酸根进一步提升其定向产氢产酸,将酸化液和产酸相气体直接进行产甲烷反应,从而提高碳转化率和甲烷产率,提高两相厌氧消化产甲烷的效能。

[0007] 本发明所述的方法为两相厌氧消化法,包括水解酸化反应和甲烷化反应,其特征在于,将埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561接种于水解酸化相,调节pH后水解酸化,将水解酸化反应产生的酸化液和产酸相气体均作为底物转移到产甲烷相,产甲烷相厌氧消化产生甲烷。本发明方法用于可降解有机固体废弃物,包括但不限于餐厨垃圾、畜禽粪便、农业废弃物等,优选餐厨垃圾。

[0008] 所述的埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) 是典型的乳酸分解菌,利用乳酸作为碳源增值产生丙酸、丁酸等有机酸。本发明在两相厌氧消化的水解酸化相中接种埃氏巨球型菌强化乳酸定向转化,以克服厌氧发酵中乳酸累积的抑制作用,提高水解效率,同时引导代谢途径向有利方向转化,定向产氢产酸使酸化液中含有更多的丁酸,且产酸相气体有更高的氢碳比,作为底物在甲烷化反应中更高效地向目标产物甲烷转化。

[0009] 作为优选的实施方案之一,所述的埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561接种量为2-5% (vol/vol),接种浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL。

[0010] CN106282243A已实现在两相厌氧消化法中对于产酸相气体在甲烷化反应中的再利用。不同于该方法采用的调节水解酸化反应器顶空压力的方法,本发明方法强化乳酸定向产氢产酸的结果之一是产酸相气体包含更多的氢气,直接转移至甲烷化反应器可强化二氧化碳还原进而有利于能源(甲烷)的回收,减少二氧化碳的排放。

[0011] 为更好的实现本发明的技术效果,作为优选的实施方案之一,本发明所述方法还包括在所述的水解酸化相中加入乙酸根,例如乙酸或乙酸钠,进一步强化乳酸定向转化,促进酸化液中丁酸的定向富集,提升产酸相气体中氢气含量。

[0012] 作为优选的实施方案之一,转移到产甲烷化相的所述产酸相气体的氢气与二氧化碳体积比大于等于4。除在水解酸化相中加入乙酸根外,本技术领域人员还可以采用其他方法提高产酸相气体的氢气比例,包括但不限于水解酸化反应器顶空加压、碱液吸收等。

[0013] 作为优选的实施方案之一,所述水解酸化相的pH为 6.0 ± 1.0 。pH调节采用在水解

酸化相中加入碱溶液,可选自氢氧化钠、碳酸钠、碳酸氢钠、乙酸钠等常用碱,优选含乙酸钠的混合碱液。

[0014] 作为优选的实施方案之一,所述水解酸化相和产甲烷相的温度维持在37℃。

[0015] 作为优选的实施方案之一,所述水解酸化相的酸化液部分转移到产甲烷相,其余加水补足体积,调节pH后回流至水解酸化相。

[0016] 具体和优化地,本发明的技术方案为:一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,包括以下步骤:

[0017] 1) 将破碎或切块的有机固体废弃物加入水解酸化反应器,添加填充材料、接种污泥和水,均匀混合;

[0018] 2) 在水解酸化反应器中接种埃氏巨球形菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561,接种量为有机固体废弃物总量的2-5% (vol/vol),接种浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL;

[0019] 3) 调节pH为 6.0 ± 1.0 ,水解酸化反应器中进行水解酸化;将产生的酸化液和产酸相气体转移至甲烷化反应器,转移酸化液时,将部分酸化液转移到甲烷化反应器,其余酸化液加水补齐体积并调节pH到 6.0 ± 1.0 后,回流至水解酸化反应器;

[0020] 4) 酸化液和产酸相气体在甲烷化反应器中厌氧消化产生甲烷。

[0021] 优选地,所述的酸化液的25-50%,最优选50% (v/v) 回流至水解酸化反应器,剩余部分转移到甲烷化反应器供产甲烷菌进一步利用。

[0022] 优选地,所述酸化液加水补齐体积后添加含有乙酸钠的混合碱溶液调节pH,促使水解酸化相定向发酵且提升酸化气体中的氢气含量。

[0023] 有益效果:本发明的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,利用埃氏巨球形菌可分解乳酸的特性来调控水解产酸相乳酸代谢路径,以解决乳酸累积限制产氢的问题,促进定向产氢产酸转化,酸化液中富集更多的丁酸,且产酸相气体有更高的氢碳比,实现水解酸化效率的提高和水解酸化相产物的高效利用。通过在酸化相中加入乙酸根(利用含乙酸钠的混合碱性溶液调节pH)可进一步促进定向发酵路径,提升氢气产量和浓度,进而促进二氧化碳还原为甲烷,提升整体甲烷回收率。本发明操作简单,无需对餐厨垃圾等有机固废进行热预处理等,整体能耗低,反应条件温和、定向发酵效果明显,适合工程化应用。

附图说明

[0024] 图1为本发明方法的工艺流程图;

[0025] 图2为本发明方法中水解酸化反应器中每日氢气产量;

[0026] 图3为本发明方法中甲烷化反应器中每日甲烷产量;

[0027] 图4两相厌氧消化产甲烷系统的碳平衡分析图。

具体实施方式

[0028] 下面结合具体实施例对本发明进行详细描述。以下实施例仅用于说明本发明,本发明的保护范围并不以具体实施方式为限,而是由权利要求加以限定。

[0029] 以下实施例中,以餐厨垃圾的两相厌氧消化法产甲烷为例,描述本发明方法的具体实施过程及其产生的技术效果。

[0030] 以餐厨垃圾为底物,根据本发明的强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方

法,具体包括以下步骤:

[0031] 1) 将餐厨垃圾切成10-30毫米方块,加入水解酸化反应器中,添加填充材料和接种污泥,加水均匀混合;其中包括餐厨垃圾、10% (wt%) 的填充材料以及20% (wt%) 的接种污泥,整体餐厨垃圾固态厌氧发酵的含固率为15%;

[0032] 2) 在水解酸化反应器中接种埃氏巨球型菌 (*Megasphaera elsdenii*) ATCC 12561, 接种量为体系餐厨垃圾总量的2-5%, 微生物菌液浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL;

[0033] 3) 碱性溶液调节pH为 6.0 ± 1.0 , 餐厨垃圾在水解酸化反应器进行水解酸化,产生的酸化液和产酸相气体每天转移至甲烷化反应器;转移酸化液时,每次将一半酸化液转移到产甲烷反应器,另一半酸化液加水补齐体积并利用碱性溶液调节pH到 6.0 ± 1.0 后,回流至水解酸化反应器进一步强化乳酸定向产氢产丁酸反应;调节pH采用含有乙酸钠的混合碱性溶液可以进一步促使水解酸化相定向发酵且提升氢气含量;

[0034] 4) 在甲烷化反应器中,酸化液和产酸相气体厌氧消化产生甲烷。

[0035] 所述水解酸化反应器和甲烷化反应器的操作温度均维持在37℃。

[0036] 如图1所示为本发明方法的工艺流程图。为具体实施本发明,有关两相厌氧消化法的系统和操作可参考CN106282243A。根据本发明的两相厌氧消化法生产甲烷的系统主要包括水解酸化反应器和甲烷化反应器,以及它们之间传输物料的装置。同样地,为实施本发明,所述甲烷化反应器包括但不限于升流式厌氧污泥床反应器 (UASB)、完全混合反应器 (CSTR)、内循环厌氧反应器 (IC) 或膨胀颗粒污泥床反应器 (EGSB); 所述水解酸化反应器包括但不限于渗滤床反应器,本领域技术人员还可以根据本领域常识选择适当的其他水解酸化反应器。所述两相反应器之间的物料输送装置分别将水解酸化相的气体和液体转移至产甲烷相。不同于CN106282243A,本发明方法无须对酸化反应器顶空的压力进行调控,因此省略与氢分压调控相关的传感器、控制器等设备及精细的调控操作。水解酸化反应器顶空不施加内源或外源压力,气体转移只需在顶部安装管道连接甲烷化反应器底部,将产酸相气体转移到甲烷化反应器。

[0037] 以下实施例中,所述水解酸化反应器采用渗滤床反应器,所述产甲烷反应器采用升流式厌氧污泥床反应器。

[0038] 根据本发明所述的方法,以餐厨垃圾为底物,通过强化乳酸定向转化产氢产酸,乳酸定向转化为丁酸的产量高达200.5-279.7克COD每千克挥发性固体,氢气产量高达80-86升每千克挥发性固体。乳酸定向转化不仅克服了乳酸累积对产氢产酸的限制,提高水解酸化效率,而且酸化液和酸化气体作为底物直接进行甲烷化反应,由于丁酸的富集和氢碳比的提高,能以更高的甲烷回收率转化为目标产物。与现有的两相厌氧消化法相比,本发明所述方法使餐厨垃圾甲烷回收量提高了11%-25%,最高日产甲烷速率提高了19.8%-41.8%。

[0039] 本发明所述的方法可采用间歇式、半连续或连续运行方式。

[0040] 实施例1

[0041] 一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,包括以下步骤:

[0042] (1) 取餐厨垃圾2.0千克,切成10-30毫米方块,均匀混合10%的填料和20%接种厌氧污泥至水解酸化反应器,添加自来水使得体系含固率为15%。

[0043] (2) 按餐厨垃圾的处理量接种2%的埃氏巨球型菌菌液,其中菌液中菌体浓度为2-

4×10^8 CFU/mL;

[0044] (3) 调节pH为 6.0 ± 1.0 ,水解酸化反应器中的底物发酵后,将产生的酸化液和产酸相气体转移至甲烷化反应器;

[0045] 每天收集一次水解酸化相渗滤液,一半渗滤液进料入甲烷化反应器供产甲烷菌分解利用,另一半渗滤液用自来水补齐体积后,用烧碱调节pH为 6.0 ± 1.0 ,回流至水解酸化反应器。

[0046] (4) 酸化液和产酸相气体在甲烷化反应器中厌氧消化产生甲烷。

[0047] 实施例2

[0048] 一种强化乳酸定向转化的两相厌氧消化产甲烷的方法,包括以下步骤:

[0049] (1) 取餐厨垃圾2.0千克,切成10-30毫米方块,均匀混合10%的填料和20%接种厌氧污泥至水解酸化反应器,添加自来水使得体系含固率为15%。

[0050] (2) 按餐厨垃圾的处理量接种2%的埃氏巨球型菌菌液,其中菌液中菌体浓度为 $2-4 \times 10^8$ CFU/mL;

[0051] (3) 调节pH为 6.0 ± 1.0 ,水解酸化反应器中的底物发酵后,将产生的酸化液和产酸相气体转移至甲烷化反应器;

[0052] 每天收集一次水解酸化相渗滤液,一半渗滤液进料入甲烷化反应器供产甲烷菌分解利用,另一半渗滤液用自来水补齐体积后,用含有乙酸钠的碱性调节剂调节pH到 6.0 ± 1.0 ,回流至水解酸化反应器。

[0053] (4) 酸化液和产酸相气体在甲烷化反应器中厌氧消化产生甲烷。

[0054] 对比例1

[0055] 作为对照组,采用与实施例1相同的带有气体转移装置的两相厌氧消化系统进行餐厨垃圾的厌氧消化,步骤和条件与实施例1基本相同。不同之处在于,对比例1的水解酸化相不接种埃氏巨球型菌。

[0056] 对比例2

[0057] 作为对照组,采用与实施例2相同的带有气体转移装置的两相厌氧消化系统进行餐厨垃圾的厌氧消化,步骤和条件与实施例2基本相同。不同之处在于,对比例2的水解酸化相不接种埃氏巨球型菌。

[0058] 上述各实施例或对比例在餐厨垃圾厌氧消化过程中,每天测定水解酸化反应器中乳酸定向代谢产物丁酸和氢气的产量,以及甲烷化反应器产生的甲烷气体。具体试验结果参见表1,图2和图3。

[0059] 水解酸化反应器中每日氢气产量如图2,甲烷化反应器中每日甲烷产量如图3。由图2可见,接种埃氏巨球型菌显著提高了水解酸化相的氢气产率,实施例1的日产氢峰值是对比例1的1.7倍。结合含乙酸钠的碱性调节剂的应用,实施例2的日产氢峰值可进一步提升至对比例1的2.2倍。然而,对比例2的氢气产量极低,在没有接种埃氏巨球型菌的条件下引入含乙酸钠的碱性调节剂则会改变产酸代谢路径,不利于产氢代谢。由图3可见,实施例1和实施例2的每日甲烷产量均比对比例1和对比例2高。实施例1的日产甲烷峰值为14.1L。引入含乙酸钠的碱性调节剂后,实施例2的产甲烷峰值进一步提高至16.7L。该产量约为对比例1和对比例2日产甲烷峰值的1.5倍。另外,从趋势上看,日甲烷产量在反应9天后有显著提升,这与日氢气产量的迅速增加相对应,表明在两相厌氧消化中,促进水解酸化反应器产氢代

谢确实提升了甲烷化反应器的甲烷产量。

[0060] 结果表明,在水解酸化反应器接种埃氏巨球型菌菌液可促使水解酸化相代谢产氢产丁酸路径,加入含乙酸钠的碱性调节剂可进一步提高该路径下氢气及丁酸的产量。与对照组(对比例1)相比,接种埃氏巨球型菌后,水解酸化液中丁酸产量提升了18%,在含乙酸钠的碱性调节剂的调控下,丁酸增量可提高至65%。然而,只加入含乙酸钠的碱性调节剂不接种埃氏巨球型菌,会改变产酸代谢路径,大部分丁酸和氢气会通过 β 氧化路径再利用从而形成己酸,故而对比例2中己酸产量高达116.2gCOD/kg挥发性固体。产气方面,相比对照组(对比例1),实施例的氢气产量提高了35.3%-57.6%,最高日产甲烷速率提高了19.8%-41.8%。该结果表明,通过接种埃氏巨球型菌可有效地强化乳酸的定向转化,提高餐厨垃圾甲烷回收率的同时也提高了水解酸化效率。对比已公开的专利CN106282243A,本发明方法在没有压力调控的情况下,利用生化添加物进一步整体上提升了两相厌氧消化系统的餐厨垃圾的转化效率,其中可溶性COD(化学需氧量)产率和产甲烷量分别从564.9gCOD/kg挥发性固体和250L/kg挥发性固体提升至780.3gCOD/kg挥发性固体和348.6L/kg挥发性固体。

[0061] 图4为对比例1和实施例2条件下两相厌氧系统的碳平衡分析,包括可溶、不可溶和气相中的碳分布。首先,强化乳酸定向转化(接种埃氏巨球型菌及引入含乙酸钠的碱性调节剂)可大幅降低沼渣中的碳残留量。相应地,餐厨垃圾的碳生化转换效率由对比例1的68%提高到实施例2的78%。其中,水解酸化反应器产生的可溶性代谢产物的碳含量从对比例1的58%增至实施例2的72%。值得注意的是,产酸气体的碳含量显著下降约2倍。因此,通过强化乳酸定向转化,餐厨垃圾的产酸代谢路径发生改变,乳酸-丁酸的定向转化等过程可促进有机物的生物合成,以保持更多的可用碳,减少产酸气体的碳损失。

[0062] 对于两相厌氧消化系统的总碳转化效率而言,对比例1和实施例2分别为32%和43%。在甲烷化反应器,其甲烷回收率与水解酸化反应器所转化的碳量呈正相关。对于实施例2,通过产酸阶段的碳流可以看出,强化乳酸定向转化有效地加速了餐厨降解,降低了沼渣中的碳含量,从而为产甲烷利用提供了更多的有机物。在实施例2中,甲烷生产的最佳前体丁酸盐的含量大大增加,可刺激强化嗜乙酸型产甲烷路径。此外,实施例2的产氢量增加,使得更多的氢气可以转移到产甲烷阶段,从而通过强化嗜氢型产甲烷促进 CO_2 的还原及甲烷的产生。

[0063] 表1餐厨垃圾两相厌氧消化性能

	对比例 1	对比例 2	实施例 1	实施例 2
COD 产率 (gCOD/kg 挥发性固体)	670.3	742.2	728.1	780.3
丁酸产量 (gCOD/kg 挥发性固体)	169.3	139.0	200.5	279.7
[0064] 酸化相: 己酸产量 (gCOD/kg 挥发性固体)	4.1	116.2	1.5	1.6
氢气产量 (L/kg 挥发性固体)	60.6	18.7	81.0	86.2
甲烷相: 甲烷产量 (L/kg 转化挥发性固体)	290.6	287.8	322.6	348.6

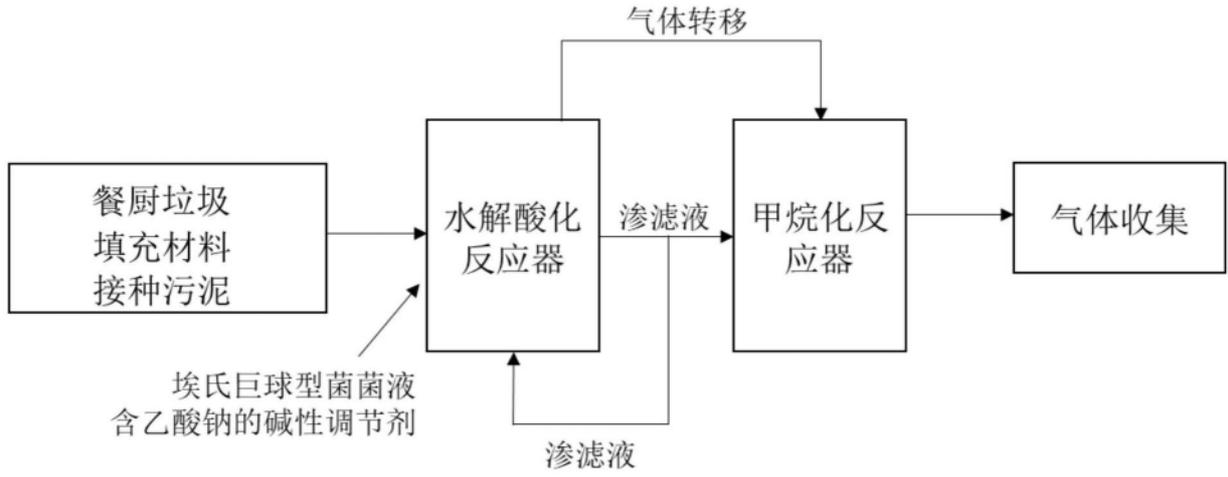


图1

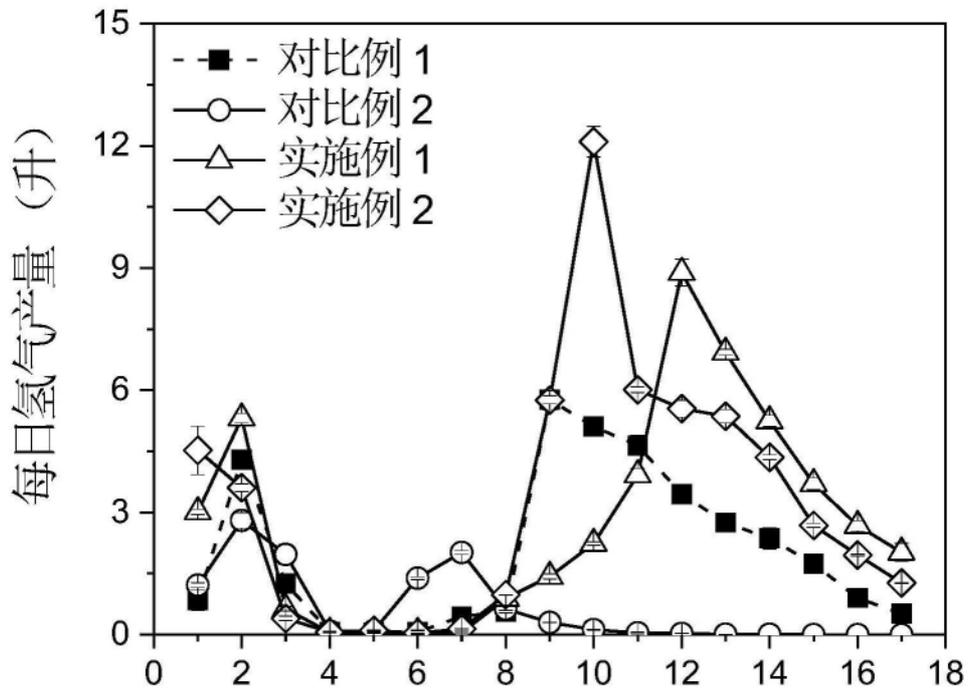


图2

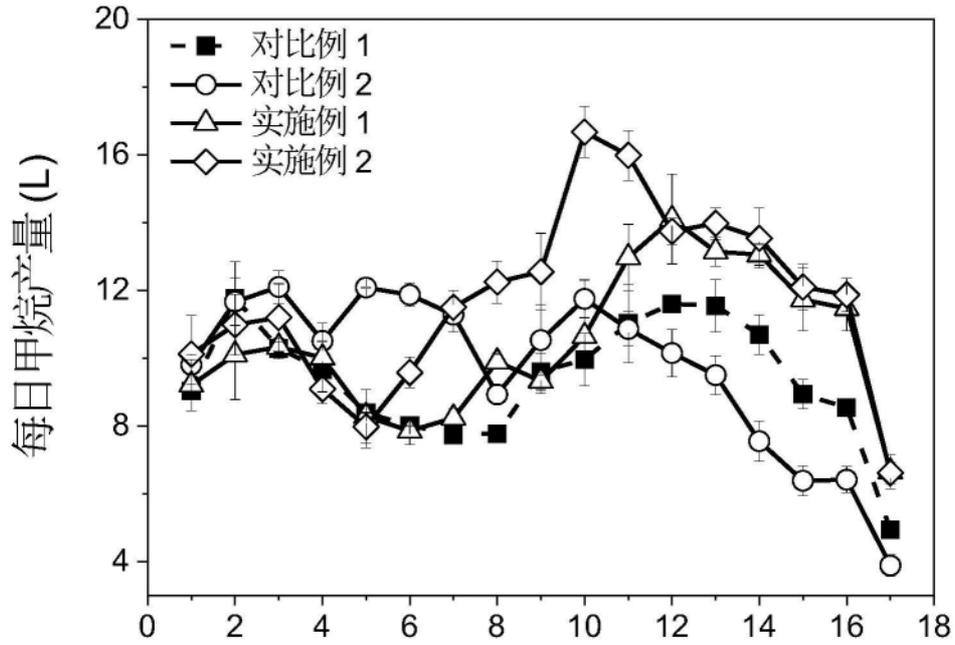


图3

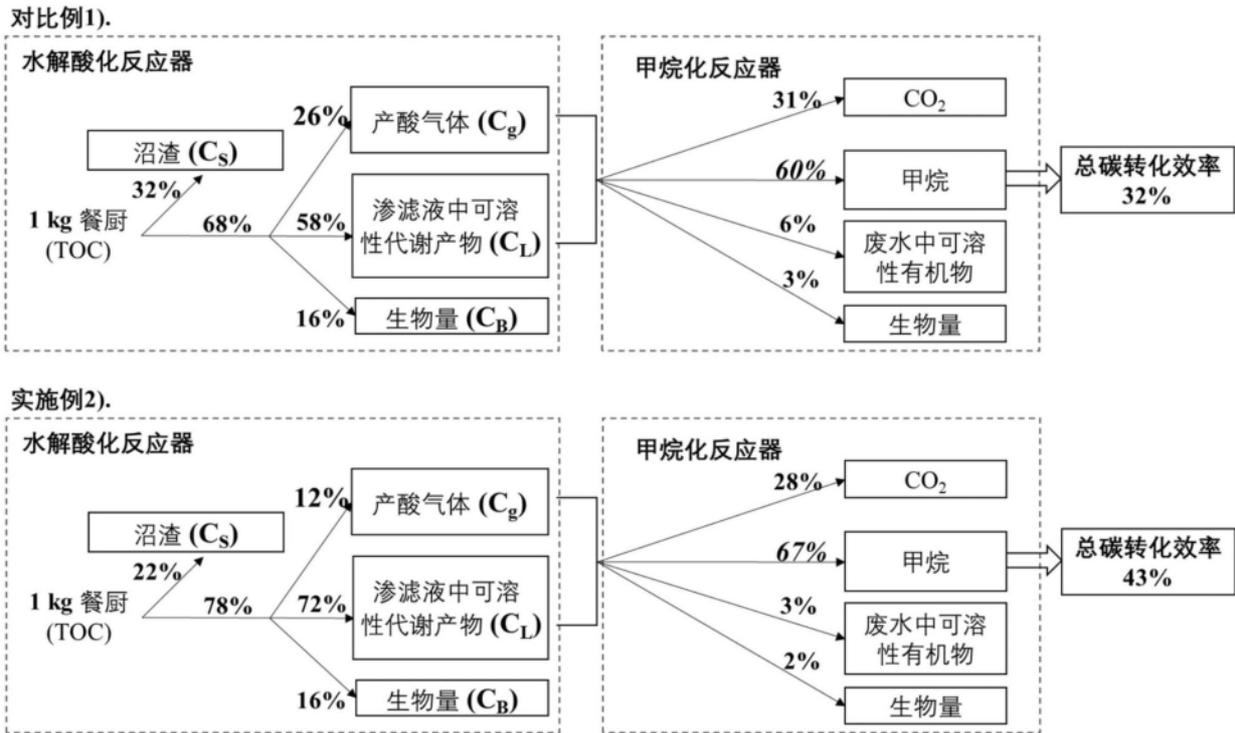


图4