

# 沼气净化技术现状

宋灿辉, 肖波, 史晓燕, 杨小艳

(华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 沼气中主要含  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ , 还有少量的  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ , 痕量的  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  和卤化烃, 沼气通过净化达到含甲烷 97% 以上, 可以被用作汽车燃料, 并入天然气网, 沼气燃料电池发电等高端应用, 发挥更大的经济价值。本文综述了近年来国外在沼气应用方面的主要技术状况和进展, 并结合我国沼气应用方式现状分析了我国沼气能源应用的发展方向。

**关键词:** 沼气; 净化; 甲烷; 硫化氢; 二氧化碳

中图分类号: X704; S216.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1166(2007)04-0023-05

**Review on Biogas Upgrading Technology / SONG Can-Hui, XIAO Bo, SHI Xiao-yan, YANG Xiao-yan / (Institute of Environmental Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China)**

**Abstract** Biogas is primarily composed of methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) with small amounts of hydrogen sulphide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) and ammonia ( $\text{NH}_3$ ), and trace amounts of hydrogen ( $\text{H}_2$ ), nitrogen ( $\text{N}_2$ ), carbon monoxide ( $\text{CO}$ ), halogenated carbohydrates. Biogas could be used as fuel for vehicle or fuel cell or merging into nature gas net after purification when the methane content reached to 97%. The biogas purification and application technology in recent years were reviewed in this paper and developing orientation in our country were analyzed and suggested.

**Key words** biogas upgrading; methane;  $\text{H}_2\text{S}$ ;  $\text{CO}_2$

在我国农村大量的小型沼气池所产的沼气主要是用于做饭和照明, 没有发挥出更大的经济效益。而在欧洲和北美, 生产的沼气通过净化并入天然气网、用于沼气燃料电池发电、热电联产或用作汽车燃料, 能产生更大的经济效益。国外很多农场甚至将玉米、大麦、黑麦和草用来发酵产沼气, 因为沼气发电的利润比养殖牲畜的利润更大。由于国情原因, 我国厌氧产沼技术和后续的应用工程工艺技术都比较落后, 导致了我国在沼气利用上停留在一种低效率生产, 低经济价值利用的阶段。

沼气的净化主要是对沼气中的  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  和卤化混合物的去除: 脱硫是为了避免腐蚀设备和  $\text{H}_2\text{S}$  中毒, 如果沼气燃烧放出  $\text{SO}_2$  /  $\text{SO}_3$ , 会比  $\text{H}_2\text{S}$  造成更大的危害,  $\text{SO}_2$  会降低露点, 硫酸有高腐蚀性; 脱水是因为导气管中如果积累了水会溶解  $\text{H}_2\text{S}$  而腐蚀管道, 此外当沼气被加压储存时, 为了防止因为凝结水而冻坏储气罐, 也必须对水进行去除; 去除沼气中  $\text{CO}_2$  是因为  $\text{CO}_2$  降低了沼气的能量密度, 如果所用的沼气需要达到天然气标准或者被用作汽车燃

料, 那么就必须对其中的  $\text{CO}_2$  进行去除; 如果只作为一般的没有特殊要求的用途, 就没有必要脱除  $\text{CO}_2$ 。此外, 填埋场气体中常常含有一定量的卤化物需要被优先去除。有时, 在收集填埋场气体时会吸进大量的空气而造成氧气含量过高, 如果氧气到达甲烷的爆炸极限水平, 会对人的生命安全造成威胁。

在净化天然气、煤气、污水气体和填埋场气体等方面已经开发了很多工艺, 但是因为价格和环境原因, 并不是所有的工艺都适用于沼气的净化。

## 1 沼气中 $\text{CO}_2$ 的去除

通过去除  $\text{CO}_2$  可以提高单位体积气体的能量值, 此外, 去除  $\text{CO}_2$  也可以提高沼气品质, 用作甲烷汽车燃料。当前, 从沼气中去除  $\text{CO}_2$  以使沼气达到汽车燃料的标准或者达到输入天然气网的质量标准, 共有 4 种不同的工艺在工业中常用。

### 1.1 水洗工艺

因为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  在水中的溶解度比甲烷大, 所以

收稿日期: 2007-01-15

项目来源: 湖北省教育厅科研资助项目 (D200618006)

作者简介: 宋灿辉 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事厌氧产沼方向研究工作, E-mail: songcan0007@sina.com

水洗不但可以去除  $\text{CO}_2$  还可以去除  $\text{H}_2\text{S}$  此吸收过程是纯粹的物理反应。通常沼气通过压缩后从吸收柱底部进入,水从顶部进入进行反相流动吸收。

因为  $\text{H}_2\text{S}$  在水中的溶解度比  $\text{CO}_2$  大,所以水洗也可以去除  $\text{H}_2\text{S}$ 。吸收了  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的水可以再生循环使用,可以在吸收柱中通过减压或者用空气吹脱再生,当水中的  $\text{H}_2\text{S}$  浓度比较高的时候,一般不推荐使用空气吹脱,因为水很快又会被硫污染。如果有废水可以利用,不推荐对水进行再生。

### 1.2 聚乙二醇洗涤工艺

聚乙二醇洗涤和水洗一样也是一个物理吸收过程。Selexol是一种溶剂的商品名,主要成份为二甲基聚乙二醇(DM PEG)。和在水中一样, $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 在 Selexol中的溶解度比甲烷大,不同之处是 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 在 Selexol中溶解度比水中大,这样所需 Selexol的量也会减少,更加经济和节能。另外,水和卤化烃(填埋场沼气中的成份)也可以用 Selexol洗涤去除。Selexol可以再生重复使用,可以使用水蒸汽或者惰性气体(净化后的沼气和天然气)吹脱 Selexol中的元素硫,但是不推荐使用空气。

### 1.3 碳分子筛工艺

分子筛在分离沼气中特定的气体组分上是一种非常好的产品。通常,分子被松散地吸附在炭孔隙中,并且可以析出。通过不同的网孔大小或者压力可进行选择性的吸收。当压力减小时,分子筛中吸收的化合物组分会释放出来。所以这个过程常常被称作“变压吸附”(PSA)。可以用焦炭制作富有微米级孔隙结构的分子筛净化沼气。

为了节省压缩气体的所需的能量,需要把一系列分子筛串连在一起。气体压力从一组分子筛中释放后加入接下来的一组。通常是将四组排为一列(图1),可以同时用来去除  $\text{CO}_2$  和水蒸汽。利用活性炭去除了  $\text{H}_2\text{S}$  后,冷凝器在  $4^\circ\text{C}$  下冷凝去除水后,沼气在  $6 \times 10^5 \text{ Pa}$  的压力下通入吸收单元,通过第一个吸收柱后可以使沼气中的水蒸汽分压小于  $10 \text{ ppm}$ ,甲烷含量超过  $96\%$  以上。

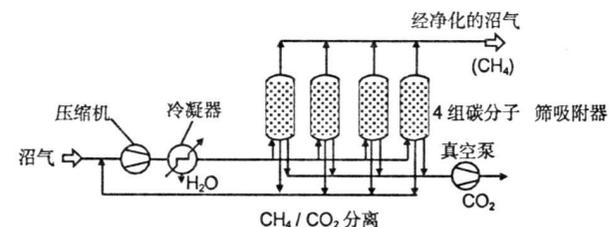


图1 碳分子筛沼气净化工艺示意图

因为第二个柱子和第四个柱子压力相通,而第

四个柱子是先被用来抽真空脱附的,所以第二个柱子压力从  $6 \times 10^5 \text{ Pa}$  释放到接近  $3 \times 10^5 \text{ Pa}$  再接着减至常压,释放出的气体再返回消化罐中以回收甲烷。第三个柱子压力从  $1 \times 10^5 \text{ Pa}$  减少到  $0.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  放出的气体主要含有  $\text{CO}_2$ , 并有少量甲烷,通常都直接排放,也可以设置一个回收装置来回收甲烷。

可以用红外检测仪对第一个柱子分离的甲烷进行在线连续监测,如果不能满足所需的沃泊指数(指在同一基准条件下,单位容积燃气的高位发热量与其相对密度的平方根的乘积,一般是各种燃气混合气气质的一个重要的度量指标),气体需要再进行变压吸附,如果甲烷含量足够高的话,可以输送进天然气网或者通过压缩机压缩至  $250 \times 10^5 \text{ Pa}$  进行储存。

### 1.4 膜分离工艺

膜法分离主要有两种方法,一种是膜的两边都是气相的高压气体分离;另一种是通过液体吸收扩散穿过膜的分子的低压气相-液相吸收分离。

(1)高压气相分离。压缩到  $36 \times 10^5 \text{ Pa}$  的沼气首先通过活性炭床以去除卤化烃和  $\text{H}_2\text{S}$  接着便通入滤床和加热器。膜是由醋酸纤维素制成,可以用来分离像  $\text{CO}_2$ , 水蒸汽,和残留的  $\text{H}_2\text{S}$  等极性分子,它有一定的选择性,即在不同的区域吸收  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$ ,但不能分离甲烷中的  $\text{N}_2$ 。

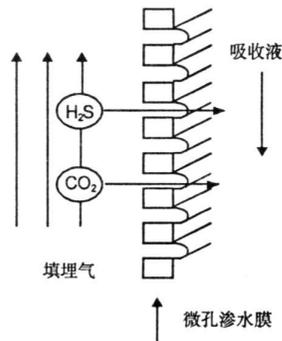


图2 气相-液相吸收膜工艺

经验表明,膜可以持续使用三年,在使用一年半后,因为萎缩的缘故,膜的渗透性会减少  $30\%$ 。

### (2)气相-液相吸收膜分离

气相-液相吸收膜工艺最近才被用在沼气净化上,其实质是沼气中的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  分子穿过一个多孔的疏水膜在液相中被吸收去除,如图2。从下方进入的气体,其中的  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  分子能够扩散穿过膜,然后被相反方向流过的液体吸收,吸收膜在一个标准大气压下工作。在  $25^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ , 可以非常有效地把沼气中的  $\text{H}_2\text{S}$  浓度从  $2\%$  减少到小于  $250 \text{ ppm}$ ,

液相的吸收剂可以用 NaOH 溶液。吸收了  $H_2S$  的 NaOH 溶液可以应用于水处理中以去除重金属。

$CO_2$  可以通过胺溶液作液相去除, 胺溶液可以通过加热再生, 释放处纯净的  $CO_2$  可作工业应用。

图 3 是上述不同沼气净化工艺的生产装置。

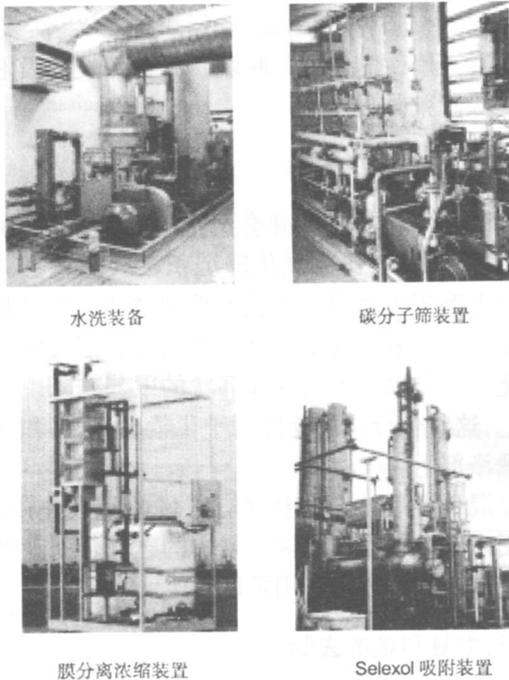


图 3 不同工艺的沼气净化生产装置

## 2 沼气中 $H_2S$ 的去除

$H_2S$  总是存在于沼气中, 尽管其含量因为发酵原料的不同有所变化, 但是必须予以去除, 以免腐蚀压缩机、气体储存罐和发动机。 $H_2S$  可以和大部分金属反应, 并且随着浓度和压力的变化反应也会改变。由于  $H_2S$  的存在会导致很多问题, 所以在沼气净化过程中应尽早予以去除, 最常用的方法如下。

### 2.1 生物降解工艺

沼气中的 S 可以通过微生物被去除。大部分的硫化细菌都属于硫杆菌属, 且大多都是自养的, 即它们可以利用沼气中的  $CO_2$  来满足其 C 营养的需要, 主要生成物是单质硫, 也有部分硫酸根, 在溶液中形成硫酸会造成腐蚀。根据沼气中不同的  $H_2S$  含量, 可以往沼气中通入 2% ~ 6% 的空气, 以满足生物氧化硫化物的需要。

最直接和简单的方法是直接往厌氧消化罐或储气罐中通入一定量的氧或空气并保持一定时间, 因为硫杆菌随处可见, 所以并不需要接种。消化物的表面可以提供给它们一个微观好氧环境和必需的营养以供它们生长, 并会形成菌落上面附着一层黄色

的硫。适当的温度、反应时间和空气量可以使  $H_2S$  减少至 50 ppm。对于不同的甲烷含量, 沼气在空气中的爆炸范围为 6% ~ 12%, 所以必需采取一定的安全措施以避免给沼气中通入过量的空气。

### 2.2 生物滤床工艺

在大型厌氧消化罐生产沼气中, 水洗和生物脱硫常常被联合起来用以去除  $H_2S$ 。可以使用废水或者消化罐中的上清液从滤床顶部通入, 沼气从底部通入, 进入滤床前的沼气中通入 4% ~ 6% 的空气, 滤床为水吸收  $H_2S$  和脱硫微生物的生长都提供了一个充足的接触面。在丹麦, 有几家工业污水处理厂和很多农场发酵产沼都在使用此种工艺净化沼气。

### 2.3 消化污泥中加氯化铁工艺

直接往消化污泥中加入氯化铁, 氯化铁会和  $H_2S$  反应而形成硫化铁盐颗粒。这种方法可以使  $H_2S$  的产生量大为减少, 但不能减少到天然气或汽车燃料所要求的水平, 需要再进一步处理。这种去除工艺的投资成本较少, 只需要一个盛氯化铁溶液的罐子和一个定量泵, 主要成本是氯化铁产生的。

### 2.4 氧化铁吸收工艺

$H_2S$  易与氢氧化铁、氧化铁反应生成硫化铁, 此反应是略微的吸热反应, 最低温度要求  $12^\circ C$ , 最佳反应温度为  $25^\circ C \sim 50^\circ C$ , 所以需要加热。因为氯化铁的反应需要一定量的水, 所以沼气不能太干, 但是应该避免生成冷凝水使球状氯化铁粘在一起, 减少了反应表面。

产生的硫化铁可以被空气氧化再生, 生成氧化铁或者氢氧化铁和硫单质, 再生过程中会放出大量的热, 因此常常会发生自燃。由于在氧化铁的表面上会覆盖一层硫单质, 所以在经过很多次重复使用后, 就需要更换氧化铁和氢氧化铁。通常, 一个装置中配有两个反应床, 当一个在进行脱硫的过程中, 另一个可以进行再生。

### 2.5 氧化铁木片吸收工艺

在木片上覆盖一层氧化铁相对于相同量的氧化铁有更大的比表面积和较低的密度, 大约 100 g 的氧化铁木片可以吸收 20 g 的  $H_2S$ 。这种方法在美国很流行, 价格相对较低, 但是必须注意再生氧化铁过滤器的时候温度不能太高。

### 2.6 赤泥颗粒吸收工艺

氧化铝生产中产生的废物赤泥可以被做成颗粒状用来吸收  $H_2S$ 。它有着更大的比表面积, 不足之处就是密度比氧化铁木片大得多。在德国和瑞士, 大部分的污水处理厂都使用这种方法。

### 2.7 活性炭吸附工艺

在变压吸附系统中  $H_2S$  可以通过用碘化钾浸泡过的活性炭去除,  $H_2S$  被转化为单质硫和水, 硫被活性炭吸收, 此反应最佳条件为: 压力  $7 \sim 8 \times 10^5$  pa 温度  $50^\circ C \sim 70^\circ C$ , 在压缩气体的过程中很容易使温度到达  $50^\circ C$  以上。通常气体停留时间为  $4 \sim 8$  小时。在连续运行的情况下, 系统要包含两个吸附装置, 如果  $H_2S$  的浓度在  $3$  ppm 以上, 需要进行再生。

## 2.8 吸收工艺

水洗工艺、聚乙烯乙二醇吸收工艺和  $NaOH$  溶液吸收工艺都常被用来去除沼气中的  $H_2S$ 。

## 3 沼气中 $H_2O$ 的去除

### 3.1 冷凝法

不同的温度下沼气中饱和水蒸汽的含量不同, 在  $35^\circ C$  时水的含量接近  $5\%$ , 在输入天然气网前沼气中的水必须去除。针对不同的净化工艺, 在各个阶段有不同的方法。在压缩之前需除去冷凝水, 这样, 在洗涤去除  $CO_2$  和  $H_2S$  工艺中就不需要再对气体进行干燥, 在吸收净化工艺之前也常常需要对气体进行干燥。主要有冷凝法和吸收法, 最常用的为冷凝法, 即在热交换系统中通过冷却器冷却气体而除去冷凝水。这种方法由于是在热交换器的表层冷却, 通常比露点低  $0.5^\circ C \sim 1^\circ C$ , 为了取得更低的露点, 必须在冷凝之前先压缩气体, 然后再释放到需要的压力。

### 3.2 吸附干燥

吸附干燥是指通过硅胶, 氧化铝或氧化镁等干燥剂来吸收气体中的水分, 待干燥的气体通过吸附床中的干燥剂被干燥。通常使用两套装置, 当一个工作的时候, 另外一个可以再生。干燥剂的再生可以通过两种途, 一种是可以有一部分 ( $3\% \sim 8\%$ ) 的高压干燥气体再生干燥剂, 这部分气体可以重新回流至压缩机入口。另外一种是在常压下, 用空气和真空泵来再生干燥剂, 此法会把空气混入沼气中, 一般不会用。

### 3.3 吸收法

水可以被乙二醇, 三乙二醇和吸水性的盐吸收, 有许多种盐都有不同的吸水性, 通常在干燥吸附塔中填充上小颗粒盐, 待干燥气体从底部通入, 被水溶解了的饱和盐溶液积累在吸收塔的底部, 通过阀门排出, 然后换上新盐颗粒, 盐一般不用再生。在一般工业应用干燥器中, 不同的盐露点通常在  $10^\circ C \sim 15^\circ C$  之间。

## 4 沼气中卤化烃的去除

填埋场的沼气中卤化烃含量较高, 这会腐蚀发

电机中的燃烧室, 火花塞, 阀门等。因此发电机厂商一般都对沼气中的卤化烃含量有所规定。

卤化烃的去除可以通过对沼气加压, 通入专门的活性炭去除, 像  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  小分子可以通过活性炭, 大的分子被截留。吸附装置的大小需满足气体停留时间  $10$  小时, 通常有两套装置, 一套解吸的时候另一套可被用来运行。加热活性炭到  $200^\circ C$ , 通入惰性气体即可吹脱所有被蒸发的吸附物而达到吸附剂的再生。

## 5 沼气中硅氧烷的去除

沼气中存在的有机硅会严重破坏发动机, 在燃烧后, 硅氧烷被氧化成氧化硅沉积在火花塞, 阀门, 和气缸上磨损表面或者造成严重的破坏。所以制造商对沼气中硅氧烷含量都有严格要求。沼气中的有机硅化合物是以一种线性和环状的甲基硅氧烷形式存在的, 这些化合物广泛应用于化妆品、药品和防泡沫的洗涤剂上。

烃混合溶液对硅化合物有很强的吸收作用, 可以被用来作为吸收剂去除沼气中的硅化合物。吸收剂通过加热和解吸附作用可以再生。

## 6 沼气中氧和氮的去除

在填埋场的沼气中, 因为收集沼气过程中的负压作用, 经常会把氧气和氮气吸入到沼气中。如果氧气浓度过大会爆炸的危险, 沼气中如含甲烷  $60\%$ , 其余的主要是  $CO_2$ , 空气含量在  $6\% \sim 12\%$  之间就会发生爆炸。氧气和氮气可以通过膜分离法或者变压吸收法去除, 然而去除的成本会比较大, 如果通过监测氧浓度, 防止空气被吸进沼气, 比直接净化沼气成本低也会更可靠。

## 7 结语:

因国情所限, 沼气池大多数都是农村的小型家用沼气池, 生产和净化沼气的成本远远高于欧洲大型沼气净化成本, 所以在沼气的利用上只能停留在直接燃烧。在欧洲许多国家, 生产沼气通过净化并入天然气网、用于沼气燃料电池发电、热电联产或用作汽车燃料, 可以发挥沼气更大的经济价值。今后, 能源紧缺会导致更多对高品质沼气的的需求, 各种浓缩、净化工艺也是应用沼气过程中非常重要的一个环节, 必须予以重视。

## 参考文献:

[1] Martin Hagen Erk Polman. Adding gas from biomass to

- the gas grid [ Swedish[ J]. Swedish Gas Center 2001 26- 48
- [ 2] Wellinger Anna Lindberg Biogas upgrading and utilization[ J]. Denmark EA Bioenergy 2004 10- 17.
- [ 3] Stefanie JW H, Oude Elferink Andre Visser Sulfate reduction in methanogenic bioreactors[ J]. FEMS Microbiology Reviews, 1994, 15 119- 136
- [ 4] Yoram Avnimelech, Mordechai Shechter Alternative MSW treatment options to reduce global greenhouse gas emissions: the Israeli example[ J]. Waste Manage Res, 2000, 18 538- 544.
- [ 5] A M McNeill J Erksen Nitrogen and sulphur management challenges for organic sources in temperate agricultural systems[ J]. Soil Use and Management 2005 21 82- 93
- [ 6] S J Pirat Y K Lee Enhancement of methanogenesis by traces of oxygen in bacterial digestion of biomass[ J]. FEMS microbiology Letters 1983, 18 61- 63
- [ 7] Kazutaka Umetzu, Yoshiaki Kinura Methane emission from stored dairy manure slurry and slurry after digestion by methane digester[ J]. Animal Science Journal 2005 76 73- 79.
- [ 8] Busin an C JN. Biotechnological Sulfide Removal with Oxygen[M]. The Netherlands WAU. 1989.
- [ 9] Akley M, G V R M arais Effect of Anoxic Sludge Fraction on the Activated Sludge Process[ J]. Research Report No. 38 South Africa Univ. of Cape town, 1982
- [ 10] Project 58241, 02- 1986 Consult Sulfide Removal Methods and Standards[ S].
- [ 11] Lefers D P, *et al*. Chemical Engineering [ J ], 1987 ( 15): 111- 120
- [ 12] R E斯皮思. 工业废水的厌氧生物技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 312- 347.
- [ 13] Sosuke N, Mctoyuk iY. Removal of hydrogen sulfide from an anaerobic biogas using a bio- scrubber [ J]. Water Sci Tech, 1997, 36 ( 6- 7): 349- 356
- [ 14] Martin S Method and System for Removal of siloxanes in biogases [ J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, B83 183- 196
- [ 15] Mak breiter S J Weiss I E Cryogenic Treatment of Landfill Gas to Remove Troublesome Compounds [ P]. US 552962
- [ 16] 朱世勇. 环境与工业气体净化技术[M], 北京: 化学工业出版社. 2001.

(上接第 9 页)

- [ 20] Jie-Hong Wu, Wen-Tso Liu, I-Cheng Tseng Sheng-Shung Cheng Characterization of microbial consortia in a terephthalate-degrading anaerobic granular sludge system[ J]. Microbiology, 2001, 147 373- 382
- [ 21] R E布坎南, N E吉本斯. 伯杰细菌鉴定手册(第八版)[M]. 科学出版社, 1984 535- 561.
- [ 22] Ham sen H M, Kengen H M P, Akkemans A D L, Stams A J M. Detection and localization of syntrophic propionate-oxidizing bacteria in granular sludge by in situ hybridization using 16S rRNA-based oligonucleotide probes[ J]. Appl Environ Microbiol, 1996, 62 1656- 1663
- [ 23] MacLeod F A, Guioit S R, Costerton J W. Layered structure of bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor[ J]. Appl Environ Microbiol 1990, 56 598- 607.
- [ 24] Wen-Tso Liu, h On-Chin Chang, Herbert H P. Characterization of microbial community in granular sludge treating brewery wastewater[ J]. Water Research, 2002, 36 1767- 1775.
- [ 25] Maria A P, Kees R, Alfons J M Stams *et al*. Molecular monitoring of microbial diversity in expanded granular sludge bed (EGSB) reactors treating oleic acid[ J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, 41 ( 3): 95- 103.
- [ 26] Zhao H, Yang D, Woese C R, *et al*. Assignment of fatty acid oxidizing syntrophic bacteria to Syntrophomonas adaceae fam nov on the basis of 16S rRNA sequence analysis [ J]. Int J Syst Bacteriol, 1993 43: 278- 286
- [ 27] Zheng D, Raskin L. Quantification of Methanoseta species in anaerobic bioreactors using genus- and species-specific hybridization probes[ J]. Microb Ecol 2000, 39: 246- 262
- [ 28] Pereira M A, Pires O C, Mota M, Alves M M. Anaerobic degradation of oleic acid by suspended and granular sludge identification of palmitic acid as a key intermediate[ J]. Water Sci Technol 2002, 68 1892- 1901.
- [ 29] 张春杨, 刘晓黎, 东秀珠. 豆腐废水 UASB 反应器中的原核生物多样性及主要功能菌群[ J]. 微生物学报, 2004, 44(4): 141- 147.
- [ 30] Batstone D. J Keller J Blackall L L. The influence of substrate kinetics on the microbial community structure in granular anaerobic biomass[ J]. Water Research, 2004, 38 1390- 1404
- [ 31] Wu J H, Liu W T, Tseng I C, *et al*. Characterization of microbial consortia in a terephthalate degrading anaerobic granular sludge system[ J]. Microbiology, 2001, 147 : 373 - 382
- [ 32] Binsson L, Hugenholtz P, Tyson G W, *et al*. Filamentous Chloroflexi (green nonsulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal[ J]. Microbiology, 2002, 148: 2309 - 2318