

沼气净化提纯制生物甲烷技术与应用

江 皓, 吴全贵, 周红军

(中国石油大学, 北京 102249)

摘 要: 文章对沼气净化与提纯的相关技术进行了综述, 并对生物甲烷在我国的应用前景进行了分析与评价, 最后对我国产业发展障碍进行了分析, 并对未来发展提出了几点建议。

关键词: 沼气净化; 生物甲烷; 生物质; 提纯

中图分类号: Q93; S216.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1166(2012)02-0006-07

Biogas Purification Technology Producing Bio-methane and Its Applications / JIANG Hao, WU Quan-gui, ZHOU Hong-jun / (China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Purification of biogas could produce high quality bio-methane which could replace the use of natural gas. The related technologies on purification of biogas were reviewed in this paper. The application prospect of high quality bio-methane in China were discussed and evaluated. The obstacles for its industrial development in China were also analyzed. Suggestions were made for future development.

Key words: biogas purification; bio-methane; biomass; upgrading

1 引言

中国有着丰富的生物质资源, 每年有木材 $2.8 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8$ 吨、油菜籽 4.0×10^6 吨、玉米秸秆 7.7×10^8 吨、畜禽粪便 3.97×10^9 吨、市政垃圾 1.48×10^8 吨、有机废水 4.37×10^{10} 吨等^[1]。相比其他可再生能源, 生物质既可生产固、液、气三态能源产品, 又可作为物质载体生产其他化工产品, 从而有望替代化石能源及其衍生的各种各样的化工产品^[2]。因此, 发展生物质能源对中国实现节能减排、缓解能源危机、优化能源结构、发展循环经济等都具有至关重要的作用。

沼气作为生物质能源的一种, 在我国有近百年的应用历史。它是一种宝贵的可再生能源, 可以直接用作燃料, 或经重整后生产合成气。沼气经净化提纯后即成为生物甲烷, 作为一种生物燃气, 具有清洁、高效、安全和可再生四大特征, 其高效制备与综合利用是极具代表性的双向清洁过程, 作为新型能源必将在能源格局中占有一席之地。本文将从中国实际情况出发, 阐述现有的沼气净化提纯技术及生

物甲烷在中国的应用前景。

2 沼气组成和产品要求

沼气的组成与厌氧发酵的原料和操作方式有关, 主要成分为甲烷 (CH_4 , 40% ~ 75%), 二氧化碳 (CO_2 , 15% ~ 60%), 还有少量的水 (H_2O , 5% ~ 10%), 硫化氢 (H_2S , 0.005% ~ 2%), 有机硫 (< 0.5%), 硅氧烷 (0% ~ 0.02%), 卤代烃 (< 0.6%), 氨 (NH_3 , < 1%), 氧气 (O_2 , 0% ~ 1%), 一氧化碳 (CO , < 0.6%), 氮气 (N_2 , 0% ~ 2%)。若为垃圾填埋场产生的沼气, 则成分更为复杂, 并可能含有较多的氧气 (O_2 , 0% ~ 5%) 和氮气 (N_2 , 5% ~ 20%)。各种杂质的影响见表 1 所示^[3]。

沼气生产生物甲烷主要经过净化和提纯两个步骤, 净化是去除沼气中微量的有害组分, 提纯是去除沼气中的二氧化碳, 以提高燃气的适用性和热值。经过净化提纯得到的生物甲烷, 通常含有 95% ~ 97% 的甲烷和 1% ~ 3% 的二氧化碳, 可以作为替代天然气使用。净化提纯技术的选择, 主要取决于原始沼气的组成和对目标产品的要求标准。遗憾的是, 目

收稿日期: 2011-10-13

项目来源: 国家高技术研究发展计划(2010AA101604); 国家科技支撑计划课题(2011BAD15B02)

作者简介: 江 皓(1982-), 博士, 主要从事生物能源方向的研究。

通讯作者: 周红军, E-mail: zhouhongjun@cup.edu.cn

表1 沼气中杂质的影响

杂质	可能的影响
水	与 H ₂ S, NH ₃ 和 CO ₂ 反应,引起压缩机、气体储罐和发动机的腐蚀;在管道中积累;高压情况下冷凝或结冰。
粉尘	在压缩机和气体储罐中沉积并堵塞。
H ₂ S	引起压缩机、气体储罐和发动机的腐蚀;沼气中 H ₂ S 达中毒浓度 (>5 cm ³ · m ⁻³);燃烧产生 SO ₂ 和 SO ₃ ,溶于水后引起腐蚀;污染环境。
CO ₂	降低沼气热值。
硅氧烷	燃烧过程中形成 SiO ₂ 和微晶石英;在火花塞、阀和汽缸盖上沉积,造成表面磨损。
卤代烃类化合物	燃烧后引起发动机腐蚀。
NH ₃	溶于水后具有腐蚀作用。
O ₂	沼气中 O ₂ 过高容易爆炸。
N ₂	降低沼气热值。
Cl ⁻ 和 F ⁻	腐蚀内燃机。

前中国虽有管道天然气和压缩天然气(CNG, compressed natural gas)的标准,但对生物甲烷作天然气替代,尚无相关政策和标准。

3 净化技术

3.1 脱水技术

未经处理的沼气通常含有饱和水蒸汽,其绝对含量与温度有关,如 35℃ 时沼气中水含量约为 5%^[3]。沼气脱水技术主要分为物理分离和化学干燥两类,这些方法也可以同时去除沼气中的泡沫和粉尘。

冷凝法是去除沼气中水蒸汽最简单的物理方法,但由于水会在热交换器上结冰,这种方法只能将露点温度降低至 0.5℃,要得到更低的露点温度,需将沼气进行压缩,且露点温度越低,所需压力越高。冷凝法包括除雾器、旋风分离器、湿气捕集阱等。化学干燥法通常在较高的压力下进行,最常用的吸附剂为氧化铝或者沸石,此外还可用三甘醇或可吸湿盐类作为干燥剂。^[3]

3.2 脱硫技术

沼气中的硫主要以硫化氢的形式存在,也可能含有少量的硫醇等其他硫化物。硫化氢的浓度受发酵原料和发酵工艺的影响很大,蛋白质或硫酸盐含量高的原料,发酵沼气中硫化氢的含量较高。由于硫化氢腐蚀性强,通常在净化步骤的早

期进行去除。

脱除沼气中硫化氢的工艺可分为原位脱硫和沼气脱硫两类。原位脱硫即把脱硫剂加入发酵罐,使硫化氢的脱除与发酵过程同步进行,此法可节省脱硫装置的投资,但出口沼气的硫化氢浓度仍偏高。沼气脱硫即脱除已产生的沼气中的硫化氢。

在沼气脱硫方法中,较为传统的有干法脱硫和湿法脱硫两类。干法脱硫操作简单,设备投资小,其突出的优点是净化度高,精度可达 10⁻⁶,而且有的干法工艺可以脱除多种有机硫化物,当原料气含硫量较低,或需净化的气体流量较小时,适宜采用干法脱硫工艺,如氧化铁法、活性炭法(催化浸渍活性炭、浸渍活性炭、非浸渍活性炭)、分子筛法等。湿法脱硫是用特定的溶剂与原料气接触,脱除其中的硫化氢,溶剂通过再生循环使用,该法适用于处理气量大、硫含量高的粗脱硫,其缺点是硫容低,净化精度较干法差,一般脱除不了有机硫,如加压水洗法、碱吸收法、铁溶液吸收法、栲胶法等。

此外,新型的沼气脱硫工艺还有膜分离脱硫和生物脱硫等方法。半渗透膜分离技术可以同时去除硫化氢和二氧化碳,但操作和维护成本较高,尚未在工业上广泛应用。荷兰的 Shell - Paques/ Thiopaq 工艺是较为成熟的生物脱硫工艺,它利用脱氮硫杆菌(*T. denitrificans*)等微生物在需氧及碱性条件下的新陈代谢作用将硫化物氧化为单质硫或硫酸化合物,从而脱除气体中的硫化物并回收硫磺。

常用的沼气脱硫方法比较见表 2^[3-5]。

3.3 脱氧技术

生物甲烷常需要进行压缩生产 CNG,为了保证安全,需将沼气中的氧气控制或脱除至 0.5% 以下。沼气脱氧工艺可以有如下选择:方法 1,利用气源中的原有气体和氧气反应;方法 2,通入氢气与氧反应,生成较易除去的水;方法 3,混合气中的氧直接与催化剂发生氧化反应,使催化剂活性组分转化成高价氧化物;方法 4,通过膜分离或低温变压吸附法(PSA, Pressure Swing Adsorption)去除。方法 2 需氢源,且要确定通入氢气量,方法 3 较难达到合格的脱氧深度,而方法 4 成本较高,因此,利用沼气中主要组分甲烷与氧气在催化剂作用下反应,是较为经济有效的脱氧方法。

表2 H₂S的脱除方法

方法	优点	缺点
FeCl ₃ /FeCl ₂ /FeSO ₄ (发酵罐原位脱硫)	投资费用低;储罐和给料泵、低电耗和低能耗、操作和维护简单、技术简单、H ₂ S不进入沼气管线	出口H ₂ S浓度仍较高(100~150 ppmv),操作费用高(铁盐),pH和温度变化对发酵过程不利,难以确定合适的添加量
Fe ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃ 床层	去除效率高:>99%、投资低、简单	对水敏感,操作费用高,再生放热;床层有燃烧风险,反应表面随再生次数而减少,释放的粉尘有毒
活性炭吸附(以1%~5% KI 浸渍为例)	去除效率高:H ₂ S<3 ppmv、净化率高、操作温度低	投资和操作费用高,H ₂ S去除需要O ₂ ,H ₂ O会占据H ₂ S的结合位,450℃再生,单质硫易沉积在孔道里
加压水洗法	H ₂ S<15 ppmv;若水不需要再生,费用低;同时去除CO ₂	操作费用高:高压,低温,技术难度大,吸收塔易堵塞
化学吸收(以Fe(OH) ₃ 或Fe-EDTA为例)	去除效率高:95%~100%、操作费用低、所需体积小、可再生、甲烷损失小	技术难度大,通过氧化再生,CO ₂ 会引起沉淀,生成硫代硫酸盐(使用EDTA)
栲胶法	去除效率高:>98%;栲胶原料广泛,脱硫成本低、析出的硫易浮选和分离	设备多,操作复杂
膜分离法	去除效率高:>98%、同时去除CO ₂	操作和维护费用高、设备复杂
生物脱硫	去除效率高:>97%、操作费用低	可能引入O ₂ /N ₂

甲烷催化燃烧脱氧是过量甲烷与少量或微量氧在催化剂作用下发生氧化反应,温度为200℃~300℃,为无焰燃烧。国内外已经成功研制了多种甲烷燃烧催化剂可供选用,按组成可大致分为贵金属负载型催化剂和过渡金属氧化物催化剂。虽然过渡金属氧化物催化剂成本廉价,但其低温及贫氧活性差,制备过程复杂,结合沼气自身组成的特点,宜使用贵金属催化剂用于脱氧。当使用Pd/Pt=1:4(wt),含量为0.2 wt%的催化剂时,可将沼气中的氧脱除至0.09%,且长时间保持高活性状态,稳定性好^[5]。

3.4 其它杂质的脱除

除了水、硫化氢和氧气外,其它杂质气体通常含量较少,且可以在已有的净化或提纯单元中去除。如硅氧烷和卤代烃主要存在于垃圾填埋场沼气或混合原料发酵沼气,均可通过活性炭吸附去除,少量的氨也可被活性炭吸附,或者在二氧化碳脱除单元(如加压水洗法)去除。

4 提纯(二氧化碳脱除)技术

沼气脱碳技术多源于天然气、合成氨变换气脱碳技术,包括物理吸收法、化学吸收法、变压吸附法、膜分离法、低温分离法等,但由于沼气的处理量远小于天然气或合成氨变换气,在脱碳技术选择上应更注重小型化、节能化。

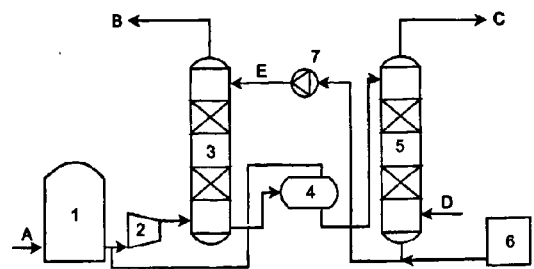
4.1 物理吸收法

物理吸收法脱除二氧化碳是根据溶液在不同压

力下对二氧化碳的溶解度不同,利用加压吸收、减压再生的方式实现二氧化碳的吸收与吸收液的再生,主要包括加压水洗法、碳酸丙烯酯法、聚乙二醇法等。物理吸收法适用于二氧化碳分压较高的场合。

加压水洗是沼气提纯中应用最多的物理吸收法,采用1~2 MPa水洗压力,脱除沼气中的二氧化碳。水的来源丰富,无毒,工艺简单,且由于二氧化碳在水中的溶解度远大于甲烷的溶解度,甲烷损失较少。在沼气产业发达的欧洲,加压水洗法脱碳得到广泛应用。水溶剂可选用再生循环方式或非循环方式,一般以工业废水做吸收液的常采用非循环方式。加压水洗法在长期使用中存在微生物堵塔的问题,进而影响脱碳效率,可采用紫外线照射,高温热水、过氧醋酸、柠檬酸或清洁剂洗塔^[6]。

图1为加压水洗法脱碳的工艺流程,生产的沼气经压缩,由吸收塔塔底进入,与从塔顶喷淋的水吸



1.储气罐; 2.压缩机; 3.吸收塔; 4.闪蒸罐; 5.解吸塔; 6.贮水罐; 7.水泵;
A.沼气; B.净化气; C.废气; D.废气; E.水

图1 水洗法脱除CO₂

收液逆向接触,富液由塔底减压后流向闪蒸罐(0.2~0.4 MPa),闪蒸出其中所溶解的部分二氧化碳、甲烷等气体,闪蒸气回收,闪蒸液流入解吸塔,再经常压气提,气提气放空,水得以再生,再生后的水循环使用。

4.2 化学吸收法

化学吸收法是指沼气中的二氧化碳与溶剂在吸收塔内发生化学反应,二氧化碳进入溶剂形成富液,然后富液进入脱吸塔加热分解二氧化碳,吸收与脱吸交替进行,从而实现二氧化碳的分离回收。化学吸收法的优点是气体净化度高,处理气量大,缺点是对原料气适应性不强,需要复杂的预处理系统,吸收剂的再生循环操作较为繁琐。目前工业中广泛采用的是醇胺法脱碳。

醇胺法吸收二氧化碳的实质是酸碱中和反应,弱碱(醇胺)和弱酸(二氧化碳、硫化氢等)发生可逆反应生成可溶于水的盐。通过温度调节控制反应方向,一般在311 K反应正向进行生成盐,二氧化碳被吸收;在383 K反应逆向进行,放出二氧化碳。根据吸收剂的不同,醇胺法又可细分为MEA法,DEA法和MDEA法等。与其它脱碳工艺相比,醇胺法具有成本低、吸收量大、吸收效果好、溶剂可循环使用并可得到高纯产品等特点。

4.3 变压吸附法

变压吸附法脱碳目前在沼气领域也得到广泛应用,常用的吸附剂有活性炭、硅胶、氧化铝和沸石等。图2^[9]为沼气加压吸附脱碳工艺流程图,四个吸附柱分别处于吸附、减压、脱附、加压的状态,吸附作用在相对较高的压力下(800 KPa左右)进行,脱附作用在较低的压力下进行,组分的吸附量受温度和压

力影响。硫化氢的存在会导致吸附剂永久性中毒,且变压吸附要求气体干燥,因此在变压吸附之前要脱除硫化氢和水。

沼气变压吸附脱碳的工艺已很成熟,为了更好的提高吸附脱碳效果,目前的研究主要集中在吸附剂的选择和开发。该工艺流程简单,脱碳率高,但甲烷损失较大,尾气中甲烷含量达5%,不易处理。

4.4 膜分离法

膜分离法是近期国内外的研究热点,其基本原理是利用各气体组分在聚合物中的溶解扩散速率不同,因而在膜两侧分压差的作用下导致其渗透通过纤维膜壁的速率不同而分离。对于醋酸纤维素膜,二氧化碳和硫化氢的渗透速率分别是甲烷的20和60倍^[7]。膜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低压气相-液相吸收分离^[8]。

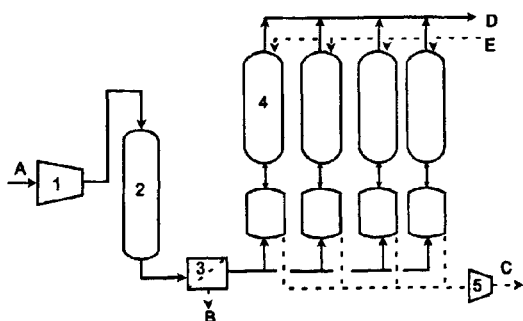
高压气相膜分离法是压缩到2~3.6 MPa的沼气先通过活性炭以去除卤化烃和硫化氢,膜由醋酸纤维素制成,可以用来分离二氧化碳、水蒸汽和残留硫化氢等极性分子,但不能分离甲烷中的氮气。气相-液相吸收膜分离工艺2003年才被用在沼气净化上,其本质是沼气中的硫化氢和二氧化碳分子穿过一个多孔的疏水膜,在液相中被吸收去除,液相吸收剂可使用氢氧化钠或胺溶液。

现阶段膜分离法还处于实验室研究和小规模二氧化碳分离应用阶段,研究主要集中在高效低成本的膜材料的开发上。膜分离法工艺简单,操作方便,对环境友好,能耗低,但由于膜价格高,一次投资大,甲烷损失大,沼气中存在的某些少量杂质会导致膜受损,因此目前真正工业应用较少,且通常要与其他工艺联合使用。

4.5 低温分离法

低温分离法是利用制冷系统将混合气降温,由于二氧化碳的凝固点比甲烷要高,先被冷凝下来,从而得以分离。使用该方法进行脱碳时,首先要将原料气压缩到8 MPa,压缩前需脱水以防结冰,然后经冷却和换热装置使之降到-45℃,冷凝的二氧化碳得以分离,并经进一步处理以回收其中所溶解的甲烷。沼气再进一步冷却至-55℃,然后在蒸发器中膨胀到0.8~1 MPa,此时温度降至-110℃,在此平衡条件下,可得到含甲烷97%以上的净化气^[9]。

低温分离法工艺用到的设备较多,操作条件苛刻,投资和能耗较高,但进一步冷却即可得到液化生



1. 压缩机; 2. 脱硫装置; 3. 气体调节器; 4. 吸附装置; 5. 真空泵;
A. 沼气; B. 冷凝水; C. 废气; D. 富甲烷气体; E. 吹扫气体

图2 变压吸附法脱除CO₂

物甲烷。

4.6 脱碳技术比较

表3给出了常用的沼气脱碳方法的比较^[3]。

在瑞典,加压水洗法用得最多;在德国,变压吸附法更为广泛;而在荷兰,加压水洗法、变压吸附法和膜分离技术都比较普遍。

表3 CO₂的脱除方法

方法	优点	缺点
加压水洗法	提纯效率高(>97% CH ₄),甲烷损失小(<2%);当H ₂ S<300 ppmv可同时去除;易操作,溶剂易再生,耐受一定的杂质;通过改变压力和温度可调整处理能力	投资大,操作费用高;细菌生长引起堵塞;易发泡
碳酸丙烯酯法	提纯效率高(>97% CH ₄),吸收能力大;相比水洗法更节能,溶剂可再生;可同时去除H ₂ S、有机硫化物和水	溶剂挥发性大,损失大
聚乙二醇法	提纯效率高(>97% CH ₄),吸收能力大,甲烷损失小;可同时去除H ₂ S、有机硫化物和水;相比水洗法更节能,溶剂可再生、挥发性小	投资大,操作费用高、难度大;再生不完全
醇胺法(MEA; DEA; MDEA)*	提纯效率高(>97% CH ₄),吸收能力大,甲烷损失小(<0.1%);溶剂可再生,操作成本低	投资大,再生温度高,能耗大;O ₂ 或其它物质存在时易引起分解和中毒;易有益类沉淀,易发泡,有腐蚀性
膜分离法(气/气; 气/液)	可靠,操作简单;同时去除H ₂ S和水;处理量小时不增加单位成本;气/气去除效率:<92% CH ₄ (一步)或者>96%;CH ₄ 气/液去除效率:>96% CH ₄ ,可得到纯CO ₂	可选择的膜有限;需平衡CH ₄ 纯度和处理量;需要多步处理以达到高纯度CH ₄ 损失大
变压吸附法(碳分子筛;沸石分子筛;硅酸铝)	提纯效率高(95%~98% CH ₄);能耗低;高压但可回收;同时去除O ₂ 和N ₂ ,耐受一定的杂质;也适合低处理量	投资和操作费用高;大量的过程控制;CH ₄ 损失大
低温分选法	提纯效率高(90%~98% CH ₄);易得到液化生物甲烷	投资和操作费用高;能耗高;低温,高压

注: * MEA:单乙醇胺, Monoethanolamine; DEA:二乙醇胺, Diethanolamine; MDEA: N-甲基二乙醇胺, N-Methyldiethanolamine.

5 生物甲烷在中国的应用前景

5.1 生物甲烷的用途

5.1.1 生产压缩天然气和管道燃气

沼气生产的生物甲烷,品质相当于化石天然气,在条件允许下,可直接并入管道燃气,也可制成压缩天然气,用于汽车燃料。这种利用特别适合于我国长江以南温带和亚热带地区,这些区域自然条件优越、生物质资源丰富、经济条件好,而天然气资源相对缺乏,利用生物甲烷替代化石天然气能率先得到突破。

5.1.2 用于热电联供

生物甲烷用于热电联供,可以避免单独发电或单独供热系统运行不灵活、能源效率低的缺点。在工程装备技术逐步升级的推动下,生物甲烷热效率能得到大幅的提升,尤其在我国的长江以北的寒带和温带地区,对热电的双重需求能吸引生物甲烷在热电联供方向上的大发展。

5.1.3 生产罐装生物燃气

将低品质的沼气净化提纯得到生物甲烷,然后生产高品质罐装燃料,灵活性强,可以替代罐装液化

石油气,是未来重要的发展方向。

5.2 生产管道燃气、CNG、LNG、HNG和ANG的比较

5.2.1 方法比较

管道燃气是指把沼气净化提纯生成生物甲烷进入低压天然气管网,要求生物甲烷达到管输天然气标准。

CNG(Compressed Natural Gas)是把天然气压缩至25 MPa运输,对天然气要求热值大于31.4 MJ·Nm⁻³,总硫不超过200 mg·m⁻³,氧气不超过0.5%,二氧化碳不超过3%,已广泛在工业应用,有国家标准,生物甲烷可达到该要求。

LNG(Liquefied Natural Gas)是指液化天然气,把天然气液化到-168℃,使甲烷由气体变为液体,在0.8 MPa压力下运输,对原料天然气要求二氧化碳小于50 ppmv,硫化氢小于1 ppmv,工艺指标极为严格,否则冰机易堵塞出事故,目前国家套用美国标准,已广泛工业化。利用沼气生产LNG理论上可行,但净化处理难度大,成本高,经济效益待验证。

HNG(Hydrated Natural Gas)为水合物天然气,即利用天然气水合物生成技术,把沼气做成水合物,用于分离和配送,然后再把沼气水合物净化提纯生

产生物甲烷,从而实现沼气的提纯、收集、配送和应用,是我国具有基础创新的沼气应用技术。

ANG(Adsorbed Natural Gas)为吸附加压储运天然气,即用吸附剂并在高压下储存天然气,目前已完成小试,压力等级与CNG相同,原料要求也应一样,只是高压容器内增加了吸附剂,以达到多储甲烷的目的。

5.2.2 安全与经济评价

CNG运输半径一般为100 km, LNG为1000 km, ANG与CNG相似,也应为100 km。

CNG和ANG都为高压易燃容器运输,因而安全性要求高,特别是对原料天然气,若氧含量超标,可能引起爆炸。ANG为CNG技术的改进,适用于单户配送,但设备投资相对较大,安全风险也高,但比CNG储气效率高,一旦开发应用成功,也具有好的创新性,并可制订新的行业标准。

LNG在低温下运输,压力一般为0.8 MPa,为液体状,安全保证相对容易。通常情况下,选择CNG还是LNG主要是经济效益问题。

HNG配送技术是以天然气水合物技术为基础,使沼气中的甲烷在工作液的作用下,在2℃~10℃, 0.1MPa~0.6MPa下与水形成甲烷水合物即可燃冰,配送到使用小区,然后解释出甲烷用做燃气,水合物工作液再循环利用。该法工艺简单、压力低、运输方便,特别适用于沼气集中收集和小区配送,为我国的基础创新,已申请多项专利,安全风险小,易于控制,并可制订新的行业标准。

利用沼气生产生物燃气,从国内外的成功经验来看,管道燃气效益最好,但需沼气工程附近有天然气管网且能并入,否则另铺设管网将不具经济性;用沼气生产CNG具有一定的经济效益,特别是在中国东部和南部地区,在沼气工程附近无管网情况下的首选;把沼气净化生产LNG,理论上可行,但净化成本太高。

对于中国农村、内陆地区及大量的分散沼气工程,需要开发低成本、易运输、投资小的配送技术,以适应中国沼气产业的特殊性,并走出一条特色创新之路。

6 我国产业障碍分析及未来发展建议

在沼气净化提纯生产高值燃气方面,我国产业技术与先进国家相比存在以下几个方面的差距:一是工程设计余量大,动力设备选型不合理,以致设备

投资较大,运行费用较高;二是厌氧发酵技术及关键设备有待完善和标准化,需进一步提高产气效率,控制氧含量;三是脱硫技术与国外相比有较大差距,易腐蚀设备,脱硫工艺复杂,运行成本高;四是科技开发起步晚,开发实力弱,科技人员和资金短缺,国家支持平台建设较滞后;五是国家政策导向及补贴力度较薄弱。针对上述问题,提出以下发展建议。

(1)协调统筹各净化提纯技术及生物燃气产业链,提高技术可行性、安全性和经济可行性。沼气净化提纯高值利用是一个系统工程,涉及农业、化工、机械制造、环境保护等多个领域,要推动该产业的发展,需要把沼气厌氧发酵、净化纯化和高值利用产业链统一考虑,因时、因地制宜,以实现工程投资少、运行费用低、经济效益好等目标。

(2)建设统一的科研平台,加强技术和资金的资源统筹。在主管部门的领导和支持下,整合实力较强的科研单位,充分利用不同领域不同方向的优势技术,把有限的资金集中使用,形成更高效的科研实力,取得技术突破,更好地服务于国家生物能源的发展。

(3)共建科研与商业运作平台,实现“产学研用”一体化,加快关键技术的突破。德国和瑞典自2005年大力开发生物燃气以来,已孵化出几个销售额上亿欧元的沼气相关企业。中国市场巨大,应抓住发展机遇,加快生物能源领域的产业化进程。

(4)加强政府支持和引导力度。无论是欧洲还是美国的沼气产业,政府在技术研发方面投入力度大,在产业发展方面优惠政策多,如价格激励政策、财政补贴政策等,这些都很好的引导和促进了沼气这种可再生能源的发展。

沼气净化提纯生产生物甲烷,是极具开发前景的一种生物质能产业,将节约和替代大量化石能源,减少污染物和温室气体排放,对中国全面建设小康社会和社会主义新农村起到重要作用,会有力的推进经济和社会的可持续发展。

参考文献:

- [1] Peidong Z, Yanli Y, Yongsheng T, et al. Bioenergy industries development in China: Dilemma and solution [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13:2571-2579.
- [2] 石元春. 决胜生物质[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2011, 58-59. (下转第19页)

的出水在两个回流漩涡的交界处并流向上运动后兵分四路:一路朝向周边出口,一路朝向中心出口,一路夹带部分未沉降的污泥跟随逆时针回流漩涡沿朝向二沉池底板,一路夹带部分未沉降的污泥跟随顺时针回流漩涡朝向二沉池中心。图 15 中的驻流区和慢流区所占总体积分数小于 10%。因此,其容积利用率明显优于周进中出式和周进周出式辐流二沉池结构。

3 结论

本文利用改进的 RNG κ - ϵ 双方程模型和简化的双流体 Mixture 模型, Simplec 压力速度耦合方法, 基于大型流体力学 FLUENT6.3.26 软件, 对三种不同结构的周边进水辐流式二沉池池内水流流态进行了数值模拟。研究结果表明:

(1) 周进中出式辐流式二沉池沉淀区的刮泥板附近高速度范围较大, 且有明显小漩涡, 中心有大顺时针回流漩涡, 驻流区和漫流区面积占总体积分数大于 50%。

(2) 周进周出式辐流式二沉池沉淀区的刮泥板附近高速度范围较小, 无明显小漩涡, 中心有顺时针大回流漩涡, 驻流区和漫流区面积占总体积分数约为 10% - 20%。

(3) 周进周中同出式辐流式二沉池沉淀区的刮泥板附近高速度范围较小, 无明显小漩涡, 沉淀区有一个顺时针回流漩涡和一个逆时针回流漩涡, 驻流区和漫流区面积占总体积分数约为 10% ~ 20%。

可见, 从有利污泥沉降的效果来看, 三种周边进


水辐流式二沉池出水方式中, 周中同出式最优, 周出式其次, 中出式最差。

参考文献:

- [1] 叶飞, 许文峰, 王学超. 辐流式二次沉淀池固液两相流三维数值模拟[J], 中国给水排水, 2011, 27(9): 63 - 66.
- [2] 曾光明, 葛卫华, 秦肖生, 等. 污水厂二维沉淀池水流和悬浮物运动数值模拟[J], 中国环境科学, 2002, 22(4): 338.
- [3] 屈强, 马鲁铭, 王红武. 辐流式沉淀池固液两相流数值模拟[J], 同济大学学报, 2006, 34(9): 1212 - 1216.
- [4] 周力行. 多相湍流反应流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] Ekama G A, Marais P. Assessing the applicability of the ID flux theory to full - scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model[J]. Water Res, 2004, 34: 495 - 506.
- [6] 屈强, 马鲁铭, 朱伟. 周边式二沉池流态数值模拟[J]. 水处理技术, 2006, 32(2): 23 - 25
- [7] Taebi - Harandy Amir, Schroeder Edward D. Formation of density currents in secondary clarifier[J]. Water Research, 2000, 34(4): 1225 - 1232.
- [8] 曾光明, 葛卫华, 秦肖生, 等. 数值模拟方法在二维沉淀池优化设计中的应用[J], 环境工程, 2002, 20(4): 10 - 12.
- [9] 付立静, 王军, 陈胖胖. 辐流式二沉池的数值模拟及应用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(8): 64 - 67.

(上接第 11 页)

- [3] Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35: 1633 - 1645.
- [4] Horikawa M S, Rossi F, Gimenes M L, et al. Chemical absorption of H₂S for biogas purification[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004, 21: 415 - 422.
- [5] 陆聪. 沼气脱氧催化剂及工艺研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- [6] Tynell. Microbial Growth on pall - rings: A problem when upgrading biogas with the technique absorption with water wash[D]. Link pings Universitet, 2005.
- [7] Berndt A S S. Intelligent Utilization of Biogas Upgrading and Adding to the Grid[D]. Eco - Tech Scandinavia, 2006.
- [8] Wellinger A, Lindeberg A. Biogas upgrading and utilization[J]. Task 24: energy from biological conversion of organic wastes, 1999: 1 - 19.
- [9] Hagen M, Polman E, Jensen J et al. Adding gas from biomass to the gas grid[D]. Swedish Gas Center, 2001.

作者: [江皓](#), [吴全贵](#), [周红军](#), [JIANG Hao](#), [WU Quan-gui](#), [ZHOU Hong-jun](#)
作者单位: [中国石油大学, 北京, 102249](#)
刊名: [中国沼气](#) 
英文刊名: [China Biogas](#)
年, 卷(期): 2012, 30(2)
被引用次数: 6次

参考文献(9条)

1. [Peidong Z;Yanli Y;Yongsheng T](#) [Bioenergy industries development in China:Dilemma and solution](#) 2009
2. [石元春](#) [决胜生物质](#) 2011
3. [Ryckebosch E;Drouillon M;Vervaeren H](#) [Techniques for transformation of biogas to biomethane](#) 2011
4. [Horikawa M S;Rossi F;Gimenes M L](#) [Chemical absorption of H₂S for biogas purification](#) 2004
5. [陆聪](#) [沼气脱氧催化剂及工艺研究](#) 2011
6. [Tynell](#) [Microbial Growth on pall-rings:A problem when upgrading biogas with the technique absorption with water wash](#) 2005
7. [Berndt A S S](#) [Intelligent Utilization of Biogas Upgrading and Adding to the Grid](#) 2006
8. [Wellinger A;Lindeberg A](#) [Biogas upgrading and utilization](#) 1999
9. [Hagen M;Polman E;Jensen J](#) [Adding gas from biomass to the gas grid](#) 2001

引证文献(6条)

1. [刘应书](#), [魏广飞](#), [张辉](#), [李虎](#), [李小康](#), [谭雅倩](#) [沼气提纯过程中醇胺溶液吸收CO₂传质性能](#) [期刊论文]-[化工学报](#) 2013(11)
2. [谭雅倩](#), [刘洋](#), [张翠珍](#), [张四宗](#), [张辉](#) [高浓度CO₂在MEA溶液中平衡溶解度的实验研究](#) [期刊论文]-[低温与特气](#) 2013(3)
3. [张湜](#), [陈文亮](#), [李晖](#), [张亚兵](#), [韦萍](#) [真空变压吸附沼气净化过程的仿真研究](#) [期刊论文]-[化工学报](#) 2013(4)
4. [孙姣](#), [李果](#), [陈振斌](#) [沼气净化提纯制备车用燃气技术](#) [期刊论文]-[现代化工](#) 2014(4)
5. [周宗茂](#), [谢丽](#), [罗刚](#), [徐竟成](#), [周琪](#) [厌氧发酵沼气提纯技术研究进展](#) [期刊论文]-[环境工程](#) 2013(3)
6. [陈祥](#), [梁芳](#), [盛奎川](#), [包先斌](#) [沼气净化提纯制取生物甲烷技术发展现状](#) [期刊论文]-[农业工程](#) 2012(7)

引用本文格式: [江皓](#), [吴全贵](#), [周红军](#), [JIANG Hao](#), [WU Quan-gui](#), [ZHOU Hong-jun](#) [沼气净化提纯制生物甲烷技术与应用](#) [期刊论文]-[中国沼气](#) 2012(2)