

沼气净化制取高纯度生物质甲烷 技术进展

李 胜,肖友程,卢朝霞,黄福川

(广西大学化学化工学院,广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室,广西南宁530004)

摘要:分析和对比了国内外沼气利用技术现状,综述了高压水洗工艺、化学吸收工艺、变压吸附工艺(PSA)、膜分离工艺、低温分离工艺和原位脱碳工艺等技术的研究和发展概况,对各种工艺技术进行了对比和总结,指出需要依据当地自然条件和政府政策等因素对净化工艺进行选择 and 开发。

关键词:沼气;净化;生物质甲烷;技术

中图分类号:TK6;S216.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)11-0019-05

Technical progress in purification technology for high purity methane biogas from biomass

LI Sheng, XIAO You-cheng, LU Zhao-xia, HUANG Fu-chuan

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Key Laboratory of Guangxi Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Nanning 530004, China)

Abstract: The current situation of biogas utilization technology at home and abroad is analyzed and compared. The research and development situation of technologies such as high pressure water washing process, chemical absorption process, pressure swing adsorption technology (PSA), membrane separation technology, low temperature separation process and in-situ decarburization process are summarized. The suggestions that selection and exploitation of purification process should obey the local natural conditions and government policies and other factors are proposed as well.

Key words: biogas; purification; bio-methane; technology

随着经济的快速发展,我国对天然气能源的需求也越来越高。据有关数据显示^[1],2009年全国天然气产量为852.69亿m³,消费量为887亿m³,供需缺口高达34亿m³。沼气是一种优质的可再生生物质能源,具有抗爆性良好和燃烧产物清洁等特点,其热值为20~25MJ/m³。沼气经过净化处理后,可制成高纯度生物质甲烷,热值可以达到35.91MJ/m³,相当于1.1L汽油^[2],可以作为常规天然气的替代品。沼气净化制取高纯度生物质甲烷产业的发展,对实现我国节能减排,缓解能源危机和环境压力,优化能源结构,实现社会可持续稳定和谐发展等方面都具有至关重要的作用和意义。

1 国内外沼气利用技术现状

当前,随着沼气技术的不断成熟和发展,沼气工程的不断普及,厌氧发酵工艺的日趋完善,我国沼气年产量也在不断增加。有关数据显示,截至2009年,我国大中型沼气工程共产沼气74.55亿m³,合标煤532万t。其中,以工业废水为发酵原料的沼气工程2000余座;以大型养殖场畜禽粪便为原料的

沼气工程超过4000座;以城市垃圾填埋、污泥为原料的沼气工程627座^[3],规模化畜禽养殖产生的粪便资源量为11.2亿t,其沼气生产潜力约200亿m³;分散性畜禽养殖农户中,适宜发展沼气的约1.48亿户,其沼气生产潜力超过500亿m³,而目前已开发利用的沼气资源仅仅为上述资源的1/10。虽然我国沼气发展潜力巨大,但是存在着沼气技术市场成熟度低、政策体系不完善、研发投入不足、技术创新能力和产业体系薄弱等问题^[4],使得我国沼气市场无法形成一个完整的产业。同时,由于缺乏对沼气工程成套高效净化设备和相关技术的研发,因此我国对沼气的利用还处在较为原始落后的阶段。在我国广大农村,沼气仅仅用于取暖、炊事及生活照明;在工业上主要作为热电联产或工业原料,没有将沼气的潜在巨大经济效益发挥出来。

21世纪以来,欧盟国家的沼气生产和净化技术逐步发展成熟,已成为欧盟各国的一大重要产业。有关资料显示,欧盟2007年沼气总产量约100×10⁸m³;其中有50%来自垃圾填埋气;30%来自农业废弃物和能源作物;20%来自下水道处理产生的污

收稿日期:2014-06-03;修回日期:2014-09-09

作者简介:李胜(1990-),男,硕士生,研究方向为沼气高值化处理及利用;黄福川(1963-),男,博士,教授,主要从事绿色能源及石化能源方面的研究工作,通讯联系人,0771-3234296,huangfuchuan@gxu.edu.cn。

泥^[5]。为了提高沼气热值,使其成为高附加值商品,欧洲各国都将沼气进行净化处理,使其品质达到民用天然气或车用燃料气水平。根据欧盟不完全统计,截至 2005 年,瑞典已有 223 家沼气工厂和 31 家沼气净化厂;2007 年共使用车用生物沼气 2 800 万 m³;2009 年达到 4 400 万 m³;2010 年全国使用压缩生物质甲烷的车辆有 7 万辆,相关加气站 500 个。首都斯德哥尔摩从 2003 年起,开始使用以生物质甲烷为动力的公交车,目前已占到所有运营公共汽车的 1/3 以上^[6-8]。另有数据显示,截至 2008 年,瑞士已有车用压缩生物甲烷加气站 100 座,首都伯尔尼市在 2010 年已有 1.5 万多辆汽车使用高纯度生物质甲烷。

2 沼气净化制取高纯度生物质甲烷技术

根据发酵原料的不同(污水、畜禽粪便、秸秆和填埋垃圾等)及厌氧发酵方式(低温、中温或高温)的不同,沼气中的组成及各组分含量也会发生较大的变化。一般而言,沼气主要由甲烷、二氧化碳和少量的 H₂S、H₂O、卤化烃等物质组成。如果是垃圾填埋气,还会含有一定量的 N₂ 和 O₂。由于不同沼气工程所产沼气成分差异大,各组分含量不稳定,以及沼气中含有较多的阻燃性气体 CO₂ 等原因,沼气的能量密度较低,限制了其利用范围。不仅如此,沼气中含量最多的 CO₂ 和 CH₄ 都是导致温室效应的主要气体;若随意将沼气排入大气,会对环境造成严重影响。因此,如何提高沼气的热值,扩大沼气的使用范围,实现沼气的高效利用是当前国内外沼气行业研究的重点。

由于 CO₂ 的存在,降低了沼气的热值和能量密度,使得沼气高位热值比常规天然气低 30% ~ 50%,沃泊系数仅为天然气的 1/2 左右,这样就极大地限制了沼气的利用范围。因此,需要将沼气进行净化处理,净化后所制得的沼气中甲烷体积分数在 95% 以上,真正成为高纯度生物质甲烷。由于我国沼气净化技术尚未完全成熟,以及各个沼气工程所产沼气成分不稳定,因此尚未制定关于沼气净化的相关技术标准。我国主要以管道天然气标准和车用天然气标准作为产品气的标准进行参考,相关工艺设计和净化目标也按照上述 2 种标准进行制定。

当前,沼气脱碳方法大多是借鉴常规天然气脱碳工艺技术,根据沼气成分及产品目标要求,对相关脱碳技术进行改良而发展起来。目前主要的脱碳方式有物理吸收工艺、PSA 工艺、化学吸收工艺、膜分离工艺和原位脱碳工艺等。

2.1 物理吸收工艺

物理吸收工艺是利用 CO₂ 比 CH₄ 在吸收剂中溶解度高的特性,对沼气中 CO₂ 进行吸收净化的一种净化工艺。

高压水洗工艺是最古老的物理吸收 CO₂ 的方法。其原理是,利用 CO₂ 加压情况下在水中溶解度与 CH₄ 差异较大这一特性,用水吸收加压后沼气中的 CO₂ 气体,从而实现沼气的净化。图 1 是高压水洗工艺流程。首先,沼气经过压缩机压缩后,从吸收塔底部进入;然后,在吸收塔内自下而上与水逆流接触,完成 CO₂ 被水分的吸收;接着,净化后的沼气从塔顶引出,经过干燥处理后成为生物质甲烷;最后,吸收了 CO₂ 的水进入闪蒸罐,通过减压或者用空气

(上接第 18 页)

- [21] Lee J Y, Lee W H, Park Y K, et al. Catalytic conversion of silicon tetrachloride to trichlorosilane for a poly-Si process[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 105: 142 - 147.
- [22] Paetzold U, Reisbeck A, Sumner M. Process and apparatus for the hydrogenation of chlorosilanes; US, 007305[P]. 2008 - 10 - 28.
- [23] Stochniol G, Müller T, Pauli I. Catalytic systems for continuous conversion of silicon tetrachloride to trichlorosilane; US, 0216464[P]. 2013 - 08 - 22.
- [24] Pfluegler B, Ring R. Method for the production of trichlorosilane; US, 8197784[P]. 2012 - 06 - 12.
- [25] 路新龙,李世勤,舒兴田,等. 四氯化硅氢化制备三氯氢硅的催化剂及其制备; CN, 101972657[P]. 2011 - 02 - 16.
- [26] 任延涛,周东松. 一种四氯化硅氢化制备三氯氢硅的方法; CN, 102633263[P]. 2012 - 08 - 15.
- [27] 任延涛,东松,张晓昕,等. 一种四氯化硅转化生产三氯氢硅的

方法; CN, 101941702[P]. 2011 - 01 - 12.

- [28] 齐林喜,刘灵犀,王晓亮. 四氯化硅冷氢化生产三氯氢硅的系统及方法; CN, 103101913[P]. 2013 - 05 - 15.
- [29] 华超,闫岩,王军武,等. 一种快速循环态化的四氯化硅氢化方法; CN, 102674369[P]. 2012 - 09 - 19.
- [30] 陈维平. 制备三氯氢硅和多晶硅的改进方法和装置; CN, 1011437123[P]. 2010 - 09 - 01.
- [31] Wu Q, Chen H, Li Y, et al. Preparation of trichlorosilane from hydrogenation of silicon tetrachloride in thermal plasma[J]. Inorganic Materials, 2010, 46(3): 251 - 254.
- [32] Gusev A V, Kornev R A, Sukhanov A Y. Preparation of trichlorosilane by plasma hydrogenation of silicon tetrachloride[J]. Inorganic Materials, 2006, 42(9): 1023 - 1026.
- [33] Lu Zhenxi, Zhang Weigang. Hydrogenation of silicon tetrachloride in microwave plasma[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(2): 227 - 233. ■

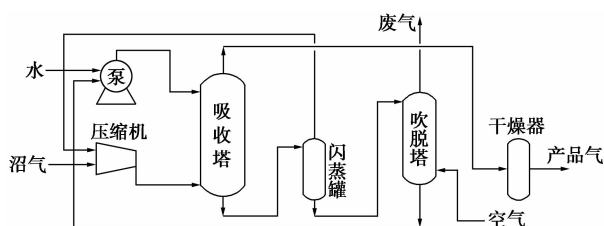


图1 高压水洗工艺流程图

吹脱再生,以便循环利用。

由于欧洲水资源丰富、高压水洗法工艺简单而且技术成熟,净化后甲烷损失率低。因此,高压水洗法在欧洲得到了广泛应用,该净化工艺占欧洲沼气净化工程的42%左右^[9]。其中,在瑞典约2/3的沼气净化工程采用水洗工艺^[10]。

当前,国内外众多学者都对高压水洗技术进行了深入研究和不断改进。李艳等^[11]运用 Aspen Plus 软件对沼气高压水洗净化工艺进行了模拟计算。结果表明,选用合适的填料和吸收塔,在最佳温度、压力和流量条件下,塔顶产品气中 CH_4 摩尔分数可以达到97%以上, CO_2 摩尔分数 < 2%。马志勇等^[12]采用沸石作为填料进行沼气高压水洗试验。结果表明, CO_2 的去除率和 CH_4 的回收率分别达到了50%和75%。Lantela 等^[13]的研究结果表明,在压力为2.5 MPa、水流速度为11 L/min 条件下,采用反向水洗工艺, CO_2 的去除率可以达到88.9%。此外, Ofori-Boateng 等^[14]采用水洗工艺净化填埋气,产品气中 CH_4 体积分数达到75%~95%。

除了高压水洗工艺之外,物理吸收法还有碳酸丙烯酯法、聚乙二醇二甲醚法和低温甲醇法等。此类物理吸收法与高压水洗法的工艺流程相似,主要的不同之处在于吸收剂采用的是有机溶剂, CO_2 在有机溶剂中的溶解性比在水中的溶解性更强,因此吸收等量 CO_2 所需要的液相循环量更小。李超伟等^[15]对水洗法和碳酸丙烯酯法2种物理吸收法进行了模拟对比研究,综合对比脱碳效果、投资及运行费用,得出碳酸丙烯酯法比水洗法更有优势的结论。

2.2 化学吸收工艺

化学吸收法是利用弱碱性吸收剂(醇胺溶液、碱溶液等),在吸收塔内与 CO_2 发生化学反应形成富液,之后进入脱吸塔加热完成再生,最终实现 CO_2 的分离回收的一种净化工艺。该类吸收工艺的优点是,化学反应的强选择性较强,净化后的产品气纯度高,处理气量大。缺点是当沼气成分复杂且不稳定时,需要设置复杂的预处理系统。此外,由于吸收工

艺属于化学反应,反应过程中涉及反应物质化学键的形成;当溶剂再生时,需要打断原有反应物质的化学键。因此需要较高的能量投入,且再生循环工艺操作较为烦琐。

在对化学吸收工艺的研究过程中,国内外学者纷纷对该类工艺进行了优化和改进。Gaur 等^[16]提出,在醇胺溶液中加入 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,不仅可以提高 CO_2 去除率,而且可以得到高纯度的 BaCO_3 晶体,提高了净化工艺的经济效益。Lombardi 等^[17]通过实验证明,选择 KOH 作为吸收液吸收填埋气中 CO_2 ,在最佳工况条件下,产品气中 CH_4 体积分数可以达到97%。Baciocchi 等^[18]提出一种将化学吸收剂的再生与 CO_2 固定相结合的一种思路,首先利用 KOH 作为吸收剂吸收 CO_2 ;其次,利用含有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的工业废弃物将 CO_2 转化为 CaCO_3 。

2.3 膜分离工艺

膜分离工艺是利用沼气中不同组分,在通过膜时各组分渗透速率存在差异,从而实现气体分离的一种方法^[19]。膜法分离主要有2种:高压气相分离和液相吸收膜分离。前者的原理是,首先去除沼气中的卤化烃和部分 H_2S 后,再将其压缩至3.6 MPa 左右,最后通过膜分离组件进行净化;后者是在低压条件下,当沼气中的 CO_2 分子穿过多孔的气液相疏水膜时,被反向流过的液体选择吸收去除的一种净化工艺。

膜分离工艺简单,操作方便,对环境友好,是近期国内外的研究热点。然而,由于目前沼气的膜分离法技术不够成熟,不仅分离效率偏低,甲烷损失量大,而且会因沼气中存在的某些少量杂质,导致膜易受损。因此,目前膜分离沼气工艺在工业化应用还较少,主要还是处在中试摸索试验阶段。其中, Harasimowicz 等^[20]采用聚酰亚胺膜对沼气进行净化试验时发现,聚酰亚胺膜对 H_2O 和 H_2S 具有很高的透过性,一级膜处理可以使产品气中 CH_4 摩尔分数达到94%。梁素钰等^[21]研发出一种沼气制取车用天然气级燃料系统,该系统采用中空纤维聚酰亚胺膜作为主脱碳装置,辅以脱水、脱硫、脱氧和脱氮装置,对天然沼气进行净化试验;试验前后沼气中 CH_4 体积分数从56.72%提高至81.90%, CO_2 体积分数从37.85%降至13.69%。尼珠丽等^[22]采用聚酰亚胺作为单级膜组件材料,在膜组件入口压力为0.6 MPa 条件下进行膜分离工艺,可获得 CH_4 体积分数为80%以上的沼气。

2.4 变压吸附工艺

变压吸附法(PSA)是近年来兴起的一种新型气体分离工艺。该工艺基于吸附单元操作,通常用于混合气体中某种气体的分离与精制。吸附的工艺原理是,利用吸附剂对不同气体的吸附能力不同,对混合气体中的某种组分进行选择性的吸附,使之与其他气体得到分离^[23-24]。PSA 工艺一般需要多个平行吸附塔同时进行工作,通常选用的是四塔工艺。工作时,4 个吸附塔循环交替处于高压吸附、降压再生、负压再生和升压恢复等 4 个阶段。因为 PSA 工艺避开了高压、深冷等苛刻工艺要求,所以该工艺具有能耗低、效率高、装置自动化程度高等特点。但是,由于变压吸附需要多套吸附装置并联使用,以保证工艺连续性,因此该技术在产气量不稳定的工况下应用时,会造成操作工艺参数波动、操作难度增加、运行成本高等问题。

由于沼气中残存的硫化氢和水蒸汽会不可逆地吸附于吸附剂上,沼气中含有的少量高分子烃类等杂质也会影响吸附剂寿命,因此当前 PSA 工艺的研究重点是吸附剂的选择与开发。赵玉杰等^[25]分别采用 CMS-Ta 和 A 型分子筛作为吸附剂,净化后产品气中 CH₄ 体积分数分别达到 90% 和 96%,CH₄ 回收率分别大于 60% 和 54.3%。Delgado 等^[26]的试验表明,海泡石作吸附剂也能取得良好的净化效果,净化后沼气中 CH₄ 摩尔分数在 97% 以上。

2.5 低温液化分离工艺

低温液化分离工艺是利用 CH₄ 和 CO₂ 临界条件差异大,在低温环境下 CO₂ 会率先液化,从而实现气体分离的一种方法。虽然低温液化需要的技术条件比较苛刻,能耗较高,但是当 CO₂ 分离时,气体温度已较低,只需进一步冷却即可得到单位体积能量密度大的液化生物质甲烷。

周淑霞等^[27]利用 Aspen 模拟软件进行数据模

拟和实验验证,发现在压力 3.7 MPa、温度 -78.5℃ 条件下,液化分离后 CH₄ 体积分数从 58.2% 升至 82.8%,CO₂ 体积分数从 36.4% 降至 8.8%。Hullu 等^[28]在深冷分离净化填埋气的模拟试验中发现,在温度为 -90℃、压力为 4 MPa 条件下,CO₂ 的去除率可以达到 94%。可见,采用低温液化分离工艺对沼气进行净化,产品气质量往往离 LNG 标准还有一定的差距,且能耗较高,因此该技术的推广尚待进一步的研究。

2.6 原位脱碳工艺

原位脱碳工艺是一种新兴的净化工艺。它是指在沼气生产过程中降低和去除沼气中 CO₂,生产生物质甲烷的一类工艺。由于其具有投资少、运行成本低和灵活性高等特点,因此近年来该工艺及相关设备的研发得到了越来越多学者的关注。

Nordberg 等在 2012 年利用工业废水作为吸收剂,进行了甲烷原位富集的中试试验。该试验采用容积为 19 m³ 与 15 m³ 的厌氧消化反应器,以及容积为 90 dm³ 和 140 dm³ 的脱碳器进行试验。试验结果中 CH₄ 质量分数达到 87%,N₂ 体积分数控制在 2% 以内。但是,CH₄ 的流失率高达 8%,效果不能令人非常满意^[29]。Lindeboom 等^[30]研发了一种厌氧消化和沼气富集集成系统,在 0.3~9.0 MPa 压力条件下,添加适量的醋酸钠,可以使得 H₂S 和 CO₂ 被发酵液吸附,净化气中 CH₄ 质量分数可达 90%~95%。

3 净化方法的对比和总结

目前,各种沼气净化技术的发展都已比较成熟,主要工艺包括高压水洗工艺、物理或化学吸收工艺、变压吸附工艺、膜分离、低温液化分离工艺和原位脱碳工艺等。由于净化工艺的原理不同,因此其各自的特点也不同。表 1 主要对当前主要几种沼气净化工艺的特点进行了对比和总结。

表 1 几种沼气净化工艺特点的对比和总结

工艺	优点	缺点
高压水洗工艺	净化率高,技术成熟,设备简单,水资源可以循环利用	耗水量大,填料表面容易生成微生物,造成堵塞
其余物理吸收工艺	净化率高,吸收液消耗量少且可再生,可同时吸收 H ₂ S、有机硫化物和水	溶剂挥发性高,操作费用高难度大
化学吸收工艺	化学反应选择性强,净化效率高,甲烷损失率低,净化前无需加压	吸收剂再生能耗大,沼气需要经过预处理
PSA 工艺	可同时除去卤代烃、硅氧烷等杂质,净化率高,不需要使用化学物质,自动化程度高	投资和操作费用高,甲烷损失率高,设备易损坏
膜分离工艺	环境友好,设备简单,能耗低	净化率较低,分离膜更换频繁,维护费用较高
低温分离工艺	不需要使用化学物质,进一步冷却液化易得到液化生物天然气	能耗高,需要的预处理工艺较多,净化率不够高
原位脱碳工艺	投资少,运行成本低,灵活性高	技术不够成熟

4 结论与展望

(1)我国沼气资源开发潜力巨大,大中型沼气工程技术已经成熟,但是沼气的高附加值化利用率依然偏低。为缓解当前能源紧缺和环境污染日趋严重的问题,我国应当积极借鉴国外沼气高附加值化利用的成功经验,通过引进、消化、提高、创新,加以推广,使沼气净化工程建设规模化、产业化。

(2)由于不同条件下,生产的沼气含有不同种组分,且各种组分体积分数不确定,导致沼气热值偏低,适用范围过窄。应用沼气净化技术制取高纯度生物质甲烷,去除沼气中的 CO_2 、 H_2O 、 H_2S 和卤代烃等杂质气体,可以提高沼气的热值和经济性。

(3)沼气净化技术的发展已经比较成熟,主要净化技术有高压水洗、化学吸收、变压吸附、膜分离和低温液化等。虽然水洗工艺、变压吸附工艺和化学洗涤工艺在欧洲应用最为广泛,但在实际选择中,还需根据各地不同情况,全面分析和考虑沼气成分、净化目标、当地相关政策等具体因素,结合我国实际国情,选择和开发合适的沼气净化工艺。

参考文献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴(2010)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.

[2] 孟昭满. 生活垃圾填埋产沼的提取净化利用[J]. 中国环保产业, 2007, (12): 49-51.

[3] 沈振寰, 徐海云. 中国沼气产业发展路线图[R]. 北京: 轻工工业环境保护研究所, 2011: 1-3.

[4] 韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 137-140.

[5] 程序, 朱万斌. 欧盟国家新兴的生物天然气产业[J]. 中外能源, 2011, 16(6): 22-29.

[6] Holm-Nielsen J B, Al Seadi T, Oleskiewicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22): 5478-5484.

[7] 邓良伟, 陈子爱. 欧洲沼气工程发展现状[J]. 中国沼气, 2007, 25(5): 23-31.

[8] 赵军, 田博, 汪国刚. 循环利用的典范: 欧洲沼气工程[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(1): 13-14.

[9] 宫徽, 徐恒, 左剑恶, 等. 沼气精制技术的发展与应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(5): 103-108.

[10] 黄黎. 气制备车用燃料的实验研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.

[11] 李艳, 魏森, 贾红华, 等. 高压水洗沼气净化吸收塔的模拟研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(5): 71-74.

[12] 马志勇, 黄黎, 张全国, 等. 沸石填料水洗法提纯沼气实验研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(4): 718-722.

[13] Lantela J, Rasi S, Lehtinen J, et al. Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with absorption water recycling[J]. Applied Energy, 2012, 92: 307-314.

[14] Ofori-Boateng C, Kwofie E M. Water scrubbing: A better option for biogas purification for effective storage[J]. World Applied Science Journal, 2009, 5(3): 122-125.

[15] 李超伟, 作浩, 范良忠. 两种物理吸收法在沼气脱碳中的模拟对比研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(9): 75-79.

[16] Gaur A, Park J W, Jang J H, et al. Precipitation of barium carbonate from alkanolamine solution-study of CO_2 absorption from landfill gas (LFG)[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, 86: 153-156.

[17] Lombardi L, Corti A, Carnevale E, et al. Carbon dioxide removal and capture for landfill gas up-grading[J]. Energy Procedia, 2011, (4): 465-472.

[18] Baciocchi R, Corti A, Costa G, et al. Storage of carbon dioxide captured in a pilot-scale biogas upgrading plant by accelerated carbonation of industrial residues[J]. Energy Procedia, 2011, 4(8): 4985-4992.

[19] 李军, 卢英华. 化工分离前沿[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011.

[20] Harasimowicz M, Orluk P, Zakrzewska-Trznadel G, et al. Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(3): 698-702.

[21] 梁素钰, 王述洋, 李二平. 沼气制取车用天然气级燃料系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 210-213.

[22] 尼姝丽, 王述洋, 梁素钰. 餐厨垃圾制沼及沼气纯化系统[J]. 中国沼气, 2012, 30(4): 21-24.

[23] 田玲, 邓舟, 夏洲, 等. 变压吸附技术在沼气提纯中的应用[J]. 环境工程, 2010, 28(5): 78-82.

[24] 张韩, 李晖, 张亚兵, 等. 变压吸附在沼气脱碳中的应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(3): 117-120.

[25] 赵玉杰, 王伟. 埋地气体小型变压吸附的试验研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(3): 54-57.

[26] Delgado J A, Uguina M A, Sotelo J L, et al. Carbon dioxide/methane separation by adsorption on sepiolite[J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2007, 16: 235-243.

[27] 周淑霞, 董玉平, 张玉林, 等. 基于 Aspen HYSYS 的沼气中 CO_2 气体低温液化分离技术[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 111-116.

[28] Hullu De J, Maassen J I W, Van MeeL P A. Comparing different biogas upgrading techniques[R]. Eindhoven: Project Report Commissioned by Dirkse Milieutechniek BV and Submitted to The Technical University of Eindhoven, 2008.

[29] 郑戈, 张全国. 沼气提纯生物天然气技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 1-8.

[30] Lindeboom R E, Feroso F G, Weijma J, et al. Autogenerative high pressure digestion: Anaerobic digestion and biogas upgrading in a single step reactor system[J]. Water Science & Technology, 2011, 64(3): 647-653. ■