

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.024

# 有机玻璃钢沼气池池壁材料机械和传热性能研究

杨欣怡, 马晓婧

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**传统的玻璃钢沼气池因不能有效保持发酵罐内温度而影响了在低温条件下的沼气发酵产气性能。因此研究沼气池壁材料的机械和热学性能能有助于指导新型绝热沼气反应池的设计,利用发酵过程代谢产热以提高沼气的产气率。实验主要研究了以有机玻璃钢为主要骨架的沼气池池体材料的力学和热学性能。研究结构表明,传统的玻璃钢沼气池池体材料具有较高的机械强度和一定的保温性能;同时该有机玻璃钢材料具有一定的耐酸性,而耐碱性较差。材料尚需改进以进一步增强其绝热性能以满足沼气池内微生物菌种发酵产气所需的能量要求。

**关键词:**玻璃钢;沼气;机械强度;导热系数;抗腐蚀

**中图分类号:**TK6   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0095-03

## Investigation on the Mechanical and Thermal Performances of Biodigester Wall Made of Glass Fiber-Reinforced Plastic Used for Biogas Fermentation

Yang Xinyi, Ma Xiaojing

(The School of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400030, P. R. China)

**Abstract:** The traditional biogas reactor made of glass fiber-reinforced plastic decreases the performance of biogas fermentation under low temperature condition because it can't remain the inner temperature. Therefore, to learn the characteristics of reactor wall will help to give guidance to the design of novel biodigester with thermal insulation and thus increase the biogas productivity by utilizing the metabolic heat. In this work, the mechanical and thermal performances of biodigester wall made of organic glass fiber-reinforced plastic were investigated. The results indicated that this traditional biodigester possessed high mechanical intensity and low thermal insulation. And it was anti-acids rather than anti-alkali. Furthermore, the experiments reveal that the compositions and structure of this traditional biodigester should be further modified to enhance the thermal insulation to remain the energy for biogas fermentation by methanogen.

**Key words:** glass fiber-reinforced plastic; biogas; mechanical intensity; heat conductivity coefficient; anti-corrosion

沼气是一种理想的气体燃料,热值高,经济环保,来源广<sup>[1]</sup>,但沼气厌氧发酵需要的条件复杂,其中沼气发酵的温度是厌氧消化过程中最重要的影响因素之一,厌氧发酵的温度不仅影响有机物厌氧消化的程度,而且限制沼气的产气速率。根据沼气发酵所需的温度可以分为高温发酵(45~60℃)、中温发酵(28~38℃)、常温发酵(10~26℃)<sup>[2]</sup>。中国纬度跨度大,各地甚至不同季节气温变化很大,在冬季大部分地区难以维持沼气池发酵的正常温度需求。目前多通过利用太阳能或电加热方式来提高沼气池内的发酵温度<sup>[3-4]</sup>,这种方式一方面成本较高,另一方面操作实用性较差<sup>[5-7]</sup>,限制了农村沼气的推广应用。但微生物在降解有机物进行沼气生产过程中,要释放大量的能量,采取适当的保温措施,充分利用代谢热,完全能保证产甲烷微生物常年甚至冬季进行正常生长代谢对温度的要求。目前玻璃钢沼气池因操作方便、使用寿命长等优点而在家庭中广泛使用<sup>[8-9]</sup>,但传统的玻璃钢沼气池同传统的沼气池一样不能有效保持发酵罐内温

度而影响了在气温较低时的发酵产气性能。因此详细研究玻璃钢沼气池壁材料的机械和传热性能,将有助于指导新型绝热沼气池的设计,改进池壁材料的绝热性能以提高沼气的产气率。本文主要针对制备的沼气池池壁材料,分析测试了其部分力学性能及绝热性、耐酸碱腐蚀性,并对测试结果进行了不确定度分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验方法

试验前期利用191#不饱和聚脂树脂、33#胶衣树脂、固化剂、促进剂、轻质碳酸钙以一定比例混合,在玻纤布上分阶段逐步涂布,制备相应厚度的玻璃钢材料。将平整、光滑、无气泡、无裂纹、无明显杂质等缺陷的试样制备成矩形截面,试样宽度为10~14 mm,厚度为4~14 mm,长厚比L/h为16~20。试样采用机械加工法制备,上下端面要求相互平行,且与试样中心线垂直。不平行度应小于试样高度的0.1%。同

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(50976130)

作者简介:马晓婧(1992-),女,山东泰安人,主要从事能源与环境保护中的热物理问题研究,(E-mail)mjxqqu@126.com。

批有效试样为 5 个。实验主要测试材料的压缩强度、弯曲强度<sup>[10]</sup>、导热系数及材料的耐酸碱性等性能。

### 1.2 实验材料和仪器设备

利用热压实验机测试压缩强度和弯曲强度;以游标卡尺测量试样长度;利用数据采集器和热电偶、薄片加热器、稳压电源、电流表等仪器采用准稳态法测量试样导热系数。

### 1.3 实验结果的不确定度分析

对实验数据的分析主要进行数据的不确定度分析<sup>[11-12]</sup>。计算了实验数据的平均值、标准差和离散系数。算术平均值  $\bar{X}$  按式(1)计算:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

式中:  $X_i$  为每个试样的性能值;  $n$  为试样数。

标准差  $S$  按式(2)计算:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中符号同上式。

离散系数  $C_v$  按下式计算:

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 压缩强度的测试结果

调节好热压试验机使之与试样接近,接触后以缓慢地加载速度施加载荷。在测定压缩强度时,对试样施加均匀、连续的载荷,直到破坏(或达到最大载荷),记录破坏载荷(或最大载荷)。压缩强度按式(4)计算<sup>[13]</sup>:

$$\rho = \frac{P}{F} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为压缩强度,MPa;  $P$  为破坏载荷或最大载荷,N;  $F$  为试样横截面积,mm<sup>2</sup>。实验共测试了 5 组,每组 5 个样品,试样检测结果见表 1。

从表中可以看出:该有机玻璃钢材料压缩实验各组测量值的标准差和离散系数小,即结果偏离平均值较小,检测结果合理。同时实验结果表明:制备的玻璃钢材料压缩强度大,随厚度增加材料压缩强度逐渐增加,但并没有线性关系。当该有机玻璃钢材料厚度在 6.08 mm 以上时,压缩强度已达 142.87 MPa,超过了国家规定的标准。

表 1 压缩强度测试结果

试样	厚度平均值 $h/\text{mm}$	压缩强度 平均值 $\sigma/\text{MPa}$	标准差/ $S$	离散系数/ $C_v$
第 1 组	4.08	113.96	2.33	0.02
第 2 组	6.08	142.87	2.22	0.02
第 3 组	8.04	167.9	1.79	0.01
第 4 组	10.04	181.62	1.87	0.01
第 5 组	12.08	196.46	0.86	0

### 2.2 弯曲强度的实验结果

弯曲试验采用三点弯曲试验的方法。弯曲强度计算按式(5)计算<sup>[10]</sup>:

$$\sigma_f = \frac{3P_b \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_f$  为弯曲强度,MPa;  $P_b$  为试样破坏时的最大载荷,N;  $L$  为跨距,mm;  $b$  为试样宽度,mm;  $h$  为试样厚度,mm。实验结果见表 2。

实验结果表明:该有机玻璃钢材料弯曲实验各组测量值的标准差和离散系数小,即结果偏离平均值较小,检测结果合理。同时制备的新型材料弯曲强度较大,随厚度增加材料弯曲强度也增加,但不存在线性关系。当该有机玻璃钢材料厚度在 6.08 mm 以上时,弯曲强度在 120.4 MPa,超过了国家规定的相应标准。

表 2 弯曲强度测试结果

试样	厚度平均值 $h/\text{mm}$	弯曲强度平均值 $\sigma/\text{MPa}$	标准差/ $S$	离散系数/ $C_v$
第 1 组	4.08	83.84	3.5	0.04
第 2 组	6.08	120.4	2.17	0.02
第 3 组	8.05	140.45	2.83	0.02
第 4 组	10.04	159.24	2.48	0.02
第 5 组	12.08	174.04	2.87	0.02

### 2.3 准稳态平壁导热系数测定实验

实验采用的准稳态法是根据第二类边界条件、无限大平壁的导热问题设计的。导热系数按下式进行计算:

$$\lambda = \frac{q(y_1^2 - y_2^2)}{2\Delta t} = \frac{q\delta}{2\Delta t} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\Delta t$  指试样两端的温差,K,  $q$  指热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ,  $\delta$  指试样厚度。 $y_1, y_2$  分别为  $y$  轴上沿热流密度传递的两个点,实验中取  $y_2$  为 0。在实验中采用的试件截面积  $A$  为 0.000 6 m<sup>2</sup>,试件厚度  $\delta$  为 0.006 92 m,加热器电流  $I$  为 0.049 8 A,加热器电阻  $R$  为 451.5  $\Omega$ (其中  $R$  为两加热器电阻的平均值)。

由数据采集器扫描的冷、热端温升值和冷热端温差值组成的准稳态法实验结果见图 1。由图 1 可知,当在加热至 100 s 时,玻璃钢材料两端的温差逐渐显现,至第 170 s,材料两端的温差逐渐加大,在 170~200 s 之间温度变化最大,之后玻璃钢材料两端的温差变化较平缓,至第 440 s,材料两端的温差趋于平稳,表示测试系统基本达到稳态。由测试系统稳态期间的测试数据计算得到玻璃钢沼气池壁材料的导热系数,结果见表 3。

表 3 玻璃钢沼气池壁材料导热系数

时间/s	冷端温度/ $^{\circ}\text{C}$	热端温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷热端温差/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数
460	30.21	48.71	18.5	0.434
470	30.63	49.26	18.63	0.431
480	30.98	49.41	18.43	0.436
490	31.18	49.71	18.53	0.433
500	31.53	50.05	18.52	0.434
510	31.88	50.31	18.43	0.436
520	32.14	50.66	18.52	0.434
530	32.54	50.72	18.18	0.442
540	32.75	51.02	18.27	0.440

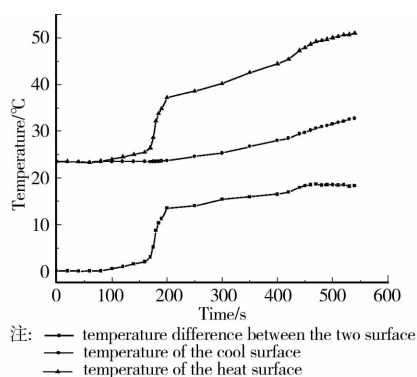


图 1 有机玻璃钢沼气池壁材料导热性能曲线

由以上数据和实验结果可知,以准稳态平壁方法测量得到的新型玻璃钢沼气池壁材料导热系数各组数据的标准差和离散系数小,即结果偏离平均值较小,说明实验数据测量误差在控制范围内。实验得到有机玻璃钢材料导热系数平均值为  $0.436 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,略偏高,表明所制备的材料尚需采取其他措施进一步降低壁面的导热性能,满足沼气池内微生物发酵所需的能量要求,提高沼产率。在实验中其标准差  $S$  为  $0.004$ ,离散系数  $C_v$  为  $0.008$ 。

#### 2.4 沼气池壁材料耐酸碱实验<sup>[14-15]</sup>

实验选取厚度为  $6.08 \text{ mm}$  的玻璃钢材料,切成相同大小的小块、称重并编号,分别用  $30\%$  硫酸溶液和  $10\%$  氢氧化钠溶液浸泡材料  $10 \text{ d}$ ,期间分别进行称量和测试材料的弯曲强度。

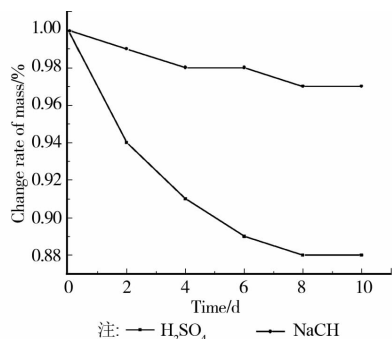


图 2 玻璃钢材料的质量保留率随腐蚀时间的变化

由图 2 可知,制备的玻璃钢材料在酸性溶液中质量变化较小,质量变化在  $3\%$  以内,而在碱性溶液中材料的质量则显著下降,减小达到  $12\%$ ,因此所制备的玻璃钢材料对酸具有一定的抗腐蚀性,但对碱液不具抗腐蚀作用。

图 3 表明:试样在  $30\%$  硫酸浸泡腐蚀后弯曲强度保留率最小也不低于  $93\%$ ;而试样在  $10\%$  氢氧化钠浸泡腐蚀后,弯曲强度保留率也明显降低。此外比较图 2 和图 3 还发现:不管是在  $30\%$  硫酸浸泡腐蚀还是  $10\%$  氢氧化钠浸泡腐蚀中,试样性能参数都是在开始阶段变化较大,后期慢慢变缓。总的来说,有机玻璃钢材料具有优良的耐酸性,而耐碱性较差。

## 4 结论

实验研究了以有机玻璃钢为主要骨架的沼气池池体材料的力学和热学性能,研究结果表明,所制备的玻璃钢沼气池池体材料具有较高的机械强度和一定的保温性能;同时有机玻璃钢材料具有一定的耐酸性,而耐碱性较差。材料尚需

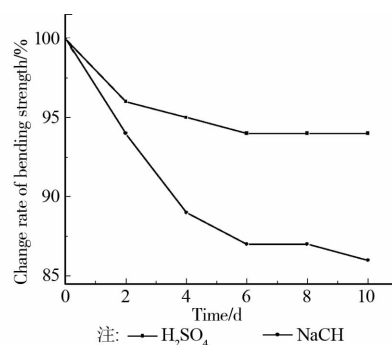


图 3 弯曲强度保留率随腐蚀的变化

改进以进一步增强其绝热性能以满足沼气池内微生物菌种发酵产气所需的能量要求。

致谢:本课题得到了国家自然科学基金项目(50976130)的支持,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Bambang S, Suyanta R. Biogas digester as an alternative energy strategy in the marginal villages in indonesia [J]. Energy Procedia, 2013, 32: 136-144.
- [2] Shi L J, Li J B, Zhang W Y, et al. Effect of temperature on dry anaerobic fermentation of animal manure and straw [J]. Progress in Renewable and Sustainable Energy, 2013, 608-609: 236-241.
- [3] 石磊,郑玉才,邓春岩,等. 新型太阳能玻璃钢沼气池的设计[J]. 太阳能,2008(3):34-35.
- [4] 陈志光,秦朝葵. 螺旋管加热沼气池的实验研究和 Fluent 模拟[J]. 中国沼气, 2009,27(3):36-39.
- [5] Maizonnasse M, Plante J S, Oh D, et al. Investigation of the degradation of a low-cost untreated biogas engine using preheated biogas with phase separation for electric power generation [J]. Renewable Energy, 2013, 55: 501-513.
- [6] Trendewicz A A, Braun R J. Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities [J]. Journal of Power Sources, 2013, 233: 380-393.
- [7] Karthik R, Solmaz A, Fredrik J, et al. Experimental and economical evaluation of a novel biogas digester [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 183-191.
- [8] 王成友,李达生. 玻璃钢沼气池的特点[J]. 农村能源, 2007, (9):59-60.
- [9] Liu M. Glass fiber reinforced plastic integrated biogas plant comprises a tank body with connected pipes at two sides having glass fiber reinforced plastic structures CN201932995-U [P]. China, 2011.
- [10] 黄燕,黎明发. 材料力学实验[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1997.
- [11] 国家质量技术监督局. 测量不确定度评定[M]. 北京:中国计量出版社, 2000:19-24.
- [12] ISO guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), Geneva: 1995.
- [13] 曾海燕. 材料力学实验[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 2004.
- [14] 周铸. 热固性玻璃钢耐腐蚀试验标准[J]. 玻璃钢, 1979(1):1-3.
- [16] 葛平. 热固性树脂耐腐蚀性能评估及其应用(I) [J]. 热固性树脂, 2007,22(1):51-54.