

试验研究

脉动频率对低浓度瓦斯脉动燃烧的影响研究

高丽霞, 刘杰

(神华宁煤集团煤化工烯烃公司动力中心, 宁夏银川 750411)

摘要: 本文将低浓度瓦斯与脉动燃烧结合, 主要研究了脉动频率对低浓度瓦斯燃烧的影响。实验结果发现: 频率为 99Hz 至 120Hz 之间的脉动燃烧不仅可以降低贫燃极限, 实现瓦斯在 5% 浓度下稳定而充分的燃烧, 而且在相同温度下提高了瓦斯燃烧效率, 污染物的排放也得到了改善。

关键词: 低浓度瓦斯; 脉动燃烧; 脉动频率

中图分类号: TQ038.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8759(2011)04-0024-05

THE EFFECT OF PULSATING FREQUENCY ON COMBUSTION

GAO Li-xia, LIU Jie

(SNCC Yinchuan Ningxia 750411 China)

Abstract: Gas of low concentration and pulsating combustion are combined in the paper, and the effect of pulsating frequency on combustion is studied. The experimental results show that, pulsating frequency between 99Hz to 120Hz not only can broaden the lean flammability of gas, making the steady combustion in much lower equivalent ratio come true, but also advance the efficiency of gas combustion at the same temperature, the emission of pollutants is improved;

Keywords: Gas of low concentration; Pulsating combustion; Pulsating frequency

我国是瓦斯资源丰富的国家, 开发和利用瓦斯对改变能源结构、节约能源、改善环境具有深远的意义。但基于现有的技术条件, 对低浓度煤矿瓦斯的利用十分困难。脉动燃烧是一种具有燃烧强度高、热效率高、生成污染物低、传热效率高等优点的新型燃烧技术。所以作者以低浓度瓦斯的有效利用为背景, 将低浓度瓦斯与脉动燃烧结合, 对其展开了实验研究。实验中发现脉动频率是影响低浓度瓦斯燃烧特性的最主要因素, 本文将重点研究脉动频率对燃烧特性的影响。

1 实验系统设计

收稿日期: 2011-03-31

第一作者简介: 高丽霞(1983-), 女, 汉, 陕西定边人, 2010年毕业于中国矿业大学流体机械专业, 硕士。现在神华宁煤集团煤化工烯烃动力中心发电部。

低浓度瓦斯脉动燃烧实验系统总体结构示意图如图 1 所示。

其工作流程为: 打开燃气管道上的电磁阀、减压阀、调节阀和空气压缩机, 空气和燃气进入混合室充分混合后进入燃烧室, 然后再打开助燃空气管路的风机, 空气进入燃烧室, 同时打开点火装置, 进入燃烧室的混合气体被高能点火器点燃。燃烧伴随着放热过程使燃烧室内温度、压力升高, 燃烧产生的压力使空气、燃气阀关闭, 燃烧产物以高速沿尾管排出。由于气流的惯性作用, 使燃烧室内产生负压, 空气、燃气阀又被打开吸入新的空气和燃气, 同时尾管中的部分高温烟气也返回燃烧室, 与燃烧室内余热一起重新点燃混合气, 燃烧过程自动重复, 不需外加点火和风机, 这时可关闭风机和点火装置。

本实验装置中燃烧器根据 Helmholtz 型燃烧器设计。由于脉动燃烧是声波与燃烧耦合振荡燃烧,其共振频率利用 Helmholtz 共振器的频率计算公式^[1]可得:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{lV}} \quad (1)$$

式中: f 为脉动燃烧器的声学共振频率, Hz;

c 为声速, m/s;

A 为尾管横截面积, m^2 ;

l 为尾管长度, m;

V 为燃烧室容积 m^3 , 为 $1.9 \times 10^3 mm^3$ 。

从上式可以看出,对于一定的燃烧室,尾管长度的改变可引起频率的变化。本文主要研究的是脉动频率对低浓度瓦斯燃烧的影响,所以实验中通过改变尾管长度来改变脉动频率。考虑燃气性质,脉动燃烧的稳定性机理,本实验中选取 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5 m 各一段的尾管进行燃烧实验,其对应的频率分别为 135, 120, 99, 86, 77 Hz。

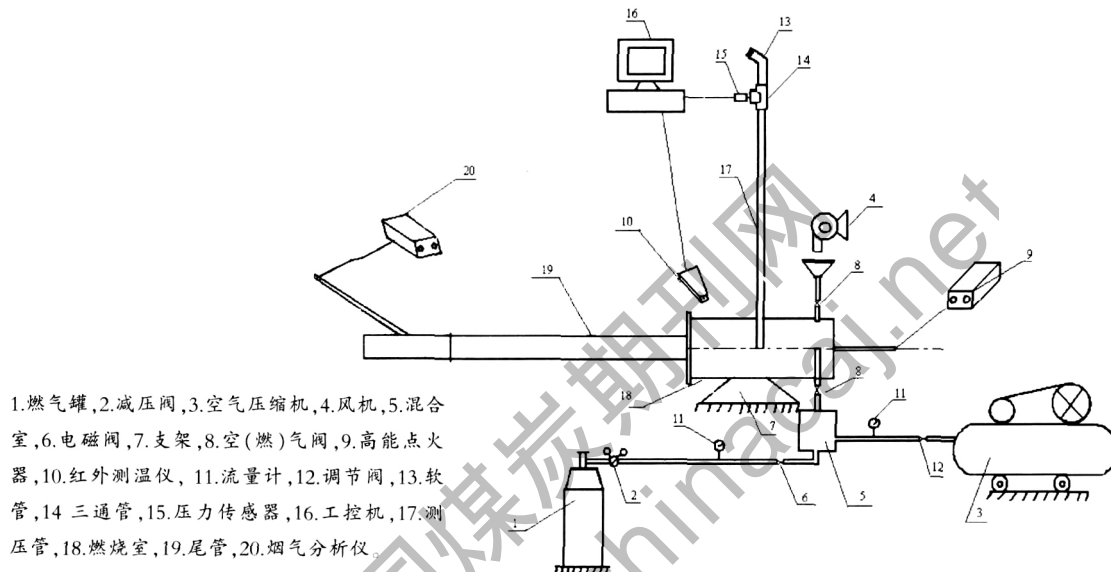


图1 低浓度瓦斯脉动燃烧总体结构示意图

2 实验结果分析

实验中选取甲烷浓度为 33.4% 的瓦斯气体为实验用气,通过改变其与空气的配比,调节出不同当量比(不同浓度)的瓦斯进行实验。

2.1 频率对贫燃极限的影响

为了分析比较脉动燃烧与常规燃烧、脉动燃烧对低浓度瓦斯贫燃极限的扩展的影响,首先进行了常规燃烧试验。即在一定流量下,逐渐改变当量比,观察火焰情况并测量污染物排放量。

实验中,瓦斯当量比为 0.65 时,常规燃烧已无法维持。在当量比为 0.7 和 0.75 时,常规状态下燃烧也变得非常困难,不仅要持续点火,保证供给大量助燃空气,而且污染物的排放量也很大(当量比为 0.7~0.75 时 NO_x 的浓度为 45 ppm 左右),并经常在燃烧室内发生小范围的爆炸,这也证明了使用常规燃烧方法很难将较低浓度的瓦斯保持稳定完全的燃烧。

脉动燃烧实验中,在每个频率下改变当量比

进行试验以测定低浓度瓦斯的贫燃极限,其结果如图 2 所示。从图中可以看出,在频率为 135 Hz 的时候,瓦斯可以在当量比为 0.55 下进行脉动燃烧,在 86 和 77 Hz 的时候当量比只能达到 0.75 和 0.9; 在 99 至 120 Hz 之间瓦斯则可以进行当量比为 0.5 的脉动燃烧。

本实验中燃烧器是在富氧的情况下工作,又

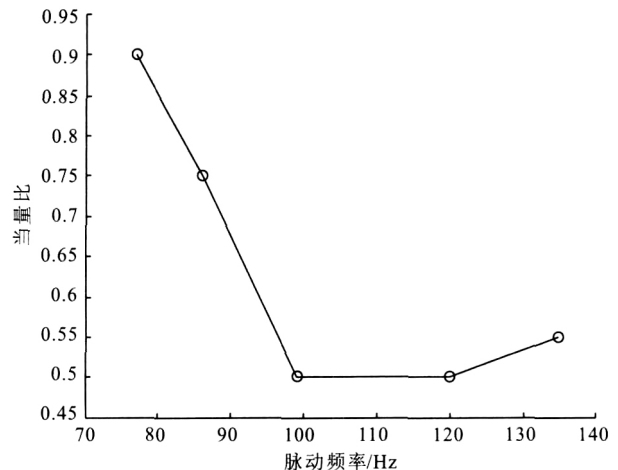


图2 脉动频率对贫燃极限的影响

因为燃气的压力高于空气管路的压力,所以较少的燃料先于空气进入燃烧室,与上一轮剩余的高温氧混合燃烧,放出热量。要保证能达到脉动燃烧,即热释放率与压力脉动必须要保持同相位($-90^\circ < \Phi < 90^\circ$)。当达到贫燃极限以后,不再驱动压力的脉动而熄火。而若减小脉动频率,即加长尾管,则脉动燃烧周期加长,压力波更滞后。所以只有缩短尾管,才能把瓦斯的贫燃极限进一步降低。但在实际燃烧过程中,当尾管 $l=0.8\text{ m}$ (频率为 135 Hz)时脉动状态很不稳定,因为对于一个固定的燃烧室,存在一个 l_{\min} ^[2],根据本实验燃烧室的设计尺寸, l_{\min} 应不小于 1 m ,所以在本实验中,尾管为 0.8 m 时脉动燃烧极不稳定。说明尾管中流动的燃烧产物不具有足够的惯性力,或者说,尾管不具有的阻抗,无法维持压力脉动,使得燃烧室不能稳定工作。这个结果也可以证明若要实现相反的目的,即扩展富燃极限,则可加长尾管长度。

由此可见,脉动频率对低浓度瓦斯燃烧的影响不是线性的,也不是单向的,而在极小和极大频率条件下都会出现不稳定燃烧,对于一定结构的脉动燃烧器只有在合适的脉动频率下才能扩展瓦斯的燃烧下限,使更低浓度的瓦斯得到利用。

此外,对污染物浓度测量发现,脉动燃烧过程中 NO_x 浓度都较小(当量比为 $0.7\sim 0.75$ 时 NO_x 的浓度为 18 ppm 左右),远远低于在相同当量比下常规燃烧时 NO_x 的浓度。减小烟气在高温区的停留时间则可降低 NO_x 的生成量。出现上述现象,其原因可能有:吸进燃烧室的冷的反应物冷却了燃烧上游部分,减小了其高温持续时间;而在下游,一方面,由于脉动作用,加强了换热效果,使烟气温度迅速下降;另一方面,降温后的烟气部分回流与高温烟气迅速混合,从而导致烟气在高温区停留时间缩短。因此可以说由于脉动装置的特殊性及其独有的运行方式降低了 NO_x 的生成量。

2.2 频率对污染物排放的影响

污染物的排放是研究瓦斯燃烧特性的一个重要方面。瓦斯完全燃烧生成 CO_2 和 H_2O ,但由于瓦斯热值较高,所以燃烧温度比较高,会生成 NO_x ;若燃烧不完全,则会产生大量的 CO 。 NO_x 和 CO 是瓦斯燃烧产生最主要的污染物。从图 2 可知,频率为 99 Hz 和 120 Hz 的脉动燃烧更适合低浓度瓦斯的燃烧,实验重点对脉动频率为 99 Hz 和 120 Hz 燃烧进行了实验研究,分别测量了不同的

平均流速和不同当量比下尾管出口处烟气中 NO_x 和 CO 的浓度,结果如图 3~图 6 所示。

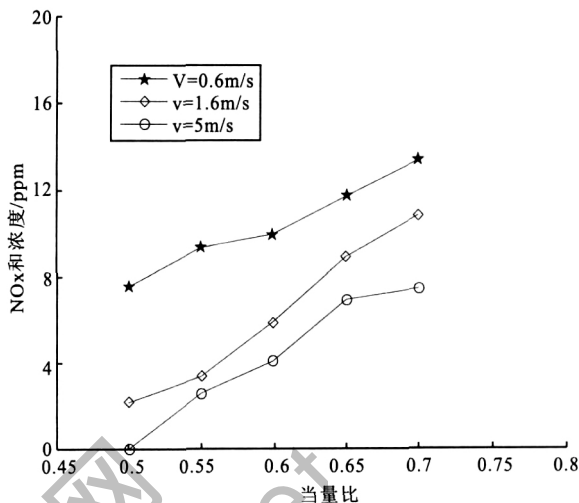


图 3 $f=120\text{ Hz}$ 下 NO_x 排放浓度的比较

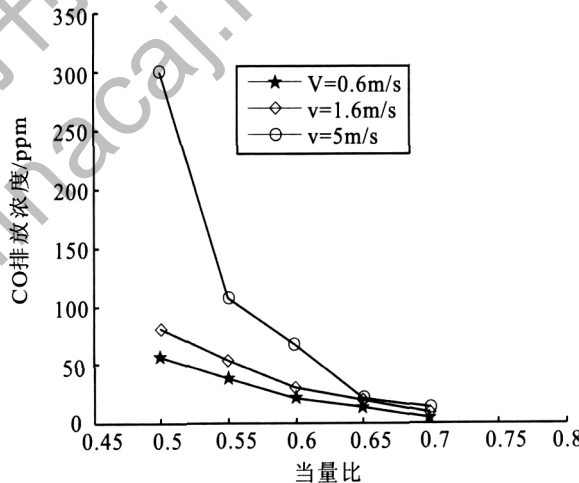


图 4 $f=120\text{ Hz}$ 下 CO 排放浓度的比较

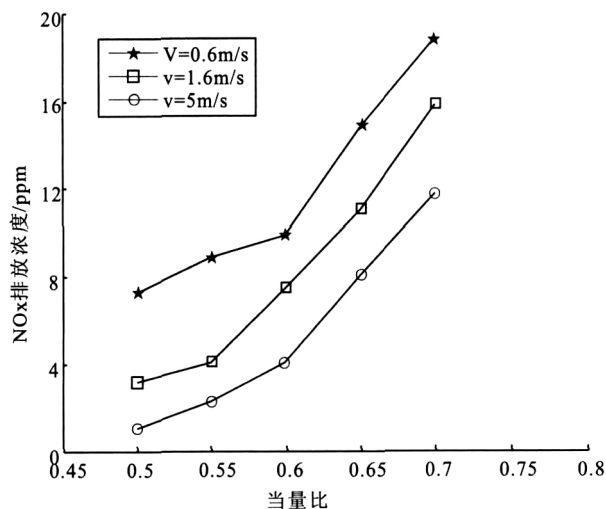
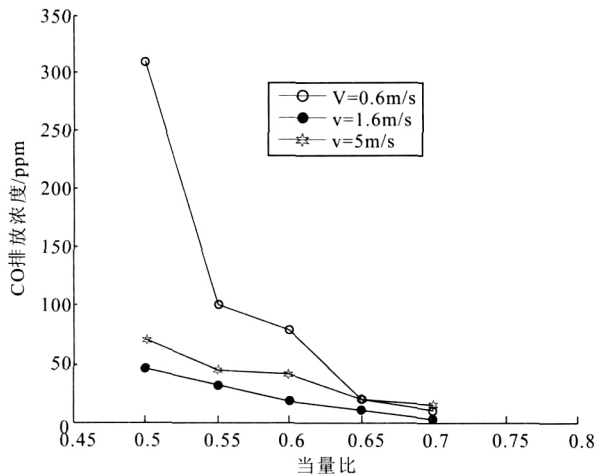


图 5 $f=99\text{ Hz}$ 下 NO_x 排放浓度的比较

图6 $f=99\text{Hz}$ 下 CO 排放浓度的比较

从图3和图5中可以看出当频率从120Hz降为99Hz时,当量比 $\varphi < 0.65$ 时,在相同当量比的情况下, NO_x 的浓度基本不变,而且都维持在0~10ppm之间;当 $\varphi > 0.65$ 时,在相同当量比的情况下频率为120Hz的燃烧器中烟气的 NO_x 浓度有一定的增加,但频率为99Hz燃烧器中的烟气中的 NO_x 量却是急剧增加,最大可达到18.8ppm。在实验中,当选择频率为135Hz的燃烧器时,虽然瓦斯可以燃烧到当量比为0.55,但实验中,燃烧过程中有时噪声很大,尾管振动很剧烈;有时燃烧很安静,尾管静止不动,这说明脉动燃烧器结构不合理,燃烧不稳定,有时候是脉动燃烧状态,有时候是非脉动燃烧状态。而在频率为77Hz和86Hz的时候,可以稳定的燃烧到当量比为0.75和0.9,但是在同一当量比下,烟气中 NO_x 的浓度远远大于频率为99Hz时的值,有的甚至可达35ppm。总的来说,当当量比增大时,脉动频率对 NO_x 浓度的影响逐渐变大,随着脉动频率的降低, NO_x 生成浓度急剧增大。

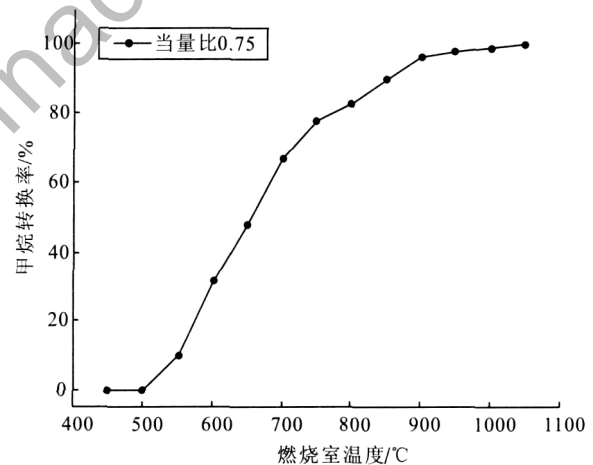
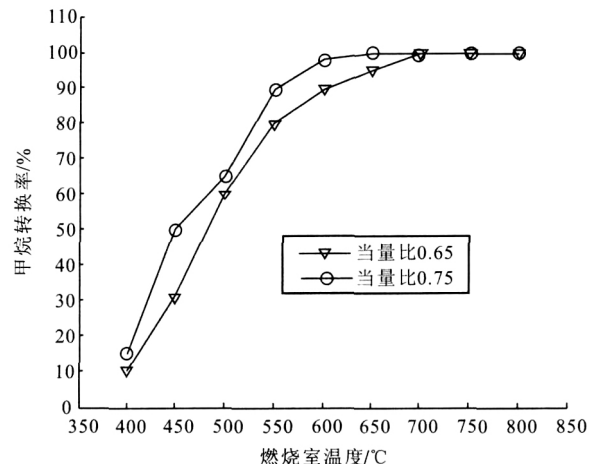
由图5和图6中还可以发现,无论燃烧脉动频率如何变化, NO_x 的浓度随着当量比的变化基本趋于一致,都是随着当量比的增大而增加。而从图4和图5中可以看出,在当量比小的时候CO的浓度非常高,而随着当量比的增加,CO的浓度在逐渐降低。产生CO的途径主要有两个:一是在高温缺氧的情况下, CO_2 被转化为CO;二是燃料的不完全燃烧。本文以低浓度煤矿瓦斯燃烧为实验内容,属于富氧燃烧,故CO主要是燃料不完全燃烧时的产物。形成不完全燃烧的原因主要有:在当量比较小时,过量的空气降低了燃烧室温度,使

得燃烧不完全。此时,整个燃烧产物温度降低,抑制了热力型 NO_x 的产生;反之,虽然过量空气较小,但燃烧状态良好,所以CO浓度在减小,而 NO_x 浓度在增加。

根据上述分析可以看出 NO_x 排放与CO排放刚好是一对矛盾,但是当频率为99Hz和120Hz时,在合适的当量比范围内($\varphi=0.5\sim 0.7$),脉动燃烧可以大大降低CO的排放,在保证燃烧效率的前提下,燃烧过程可在低于1000℃以下进行, NO_x 的产生被明显地抑制,从而实现 NO_x 与CO排放低排放的目的。

2.3 频率对瓦斯燃烧效率的影响

瓦斯的主要可燃成分甲烷完全燃烧时生成 CO_2 和 H_2O ,不完全燃烧时会生成CO,即甲烷转化率(甲烷转换为 CO_2 的量)表征了甲烷燃烧效率的大小。研究脉动频率对瓦斯燃烧效率的影响就是研究脉动频率对甲烷转化为 CO_2 量的影响,转化率越大,燃烧效率越高。图7~图9给出了脉动

图7 $f=86\text{Hz}$ 时甲烷转化率随燃烧室平均温度的变化图8 $f=99\text{Hz}$ 时甲烷转化率随燃烧室平均温度的变化

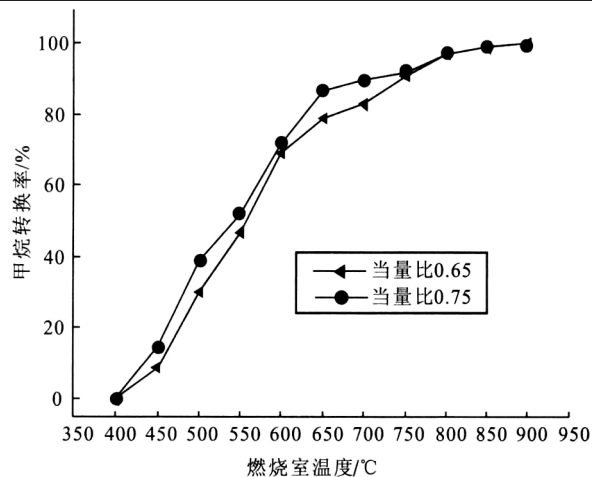


图9 $f=120\text{Hz}$ 时甲烷转化率随燃烧室平均温度的变化

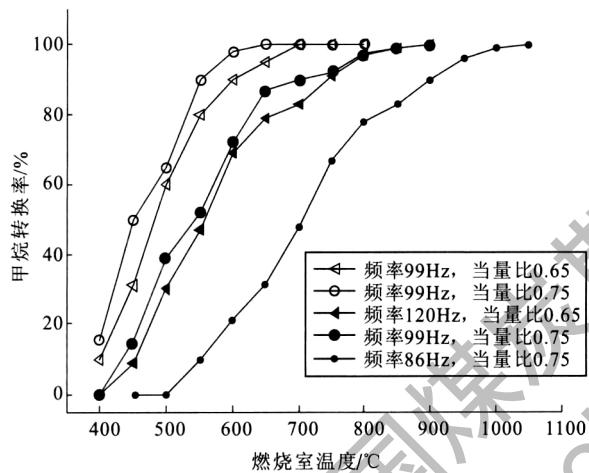


图10 脉动频率对甲烷转化率的影响

频率为 86Hz、99Hz 和 120Hz 时对应的甲烷转化率随燃烧室平均温度的变化情况。

(上接第 23 页)

[20] 邱凌, 卢旭珍, 王兰英, 等. 日光温室生产废弃物厌氧发酵特性初探[J]. 中国沼气, 2005, 23(2): 30~32.

[21] Ten Brummeler E., Koster I. W.. The effect of several pH control chemicals on the dry batch digestion of the organic fraction of municipal solid waste [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1989, 3(1): 19~32.

[22] Stroot G. P., McMahon K. D., Mackie R. I., et al. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions—I. digester performance [J]. Water Research, 2001, 35(7): 1804~1816.

[23] 邵立明, 何晶晶, 张晓星, 等. 添加污泥对渗滤液循环垃圾填埋

从图 10 可以看出温度对甲烷的转化率具有决定性的影响, 瓦斯在频率为 99Hz 燃烧器中燃烧时的初始转化温度 $T_{10\%}$ (转换率为 10% 时燃烧室的温度) 为 400 °C, 在 120Hz 中的瓦斯初始转化温度 $T_{10\%}$ 约为 450 °C, 而在 86Hz 时瓦斯的初始转化温度 $T_{10\%}$ 约为 550 °C。当温度升高时, 三种频率中所有当量比下的甲烷转化率均有不同程度的提高, 当温度达到 700 °C, 当量比为 0.65 和 0.75 时, 86Hz 中的甲烷转化率为 50% 左右, 120Hz 中甲烷的转化率能达到 90% 以上, 而 99Hz 中的甲烷已经完全转化, 即频率为 99Hz 的脉动燃烧效率最高。同时还可以看出, 当量比的变化对甲烷转化率也有很大影响, 当量比 0.75 对应的甲烷转化率比当量比为 0.65 时高。但是这并不能说明甲烷转化率具有随着当量比的增加而增大的趋势, 因为本实验只测试了当量比小于 1 时的情况, 对于当量比大于 1 时甲烷转化率的变化趋势还有待今后的实验研究。

参考文献

[1] Strahle, W.C., "Combustion Noise", Press in Energy and Combustion Science, 4,(3),157~176,1978.

[2] 程显辰. 脉动燃烧[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.

[3] 李保国, 曹崇文, 刘相东. 脉动燃烧技术及其应用[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(2): 36~40.

[4] 李保国. 脉动燃烧器及其尾管传热分析 [J]. 上海理工大学报, 2001, 23(3): 263~265.

[5] 周伟国, 秦朝葵. 燃气脉冲燃烧技术[M]. 上海: 同济大学出版社.

层甲烷产生的影响[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 840~844.

[24] 公维佳, 李文哲, 刘建禹. 厌氧消化中的产甲烷菌研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(06): 838~841.

[25] 任南琪, 王爱杰, 马放. 产酸发酵微生物生理生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[26] Salminen E. A., Jukka A. Rintala. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste—effect of hydraulic retention time and loading [J]. Water Research, 36(2002): 3175~3182.

[27] Bouallagui H., Touhami Y., Cheikh R. B. et al. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes [J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 989~995.