

热裂解生物质气发动机怠速燃烧及排放特性

张强¹, 李娜², 王志明¹

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 济南大学机械工程学院, 济南 250022)

摘要: 为了研究热裂解生物质气发动机的怠速燃烧特性及控制怠速排放的方法, 利用低热值热裂解生物质气作为内燃机的燃料, 采集火花点火生物质气发动机怠速运转时的示功图及怠速排放指标, 分析了发动机怠速放热率、燃烧参数及排放特性。试验结果表明: 不完全燃烧及燃烧参数的变化主要是由于缸内充量的波动及火焰发展的差异而造成的; 怠速失火和不完全燃烧现象, 导致发动机的怠速 CO 排放为 4.07%~4.32%、HC 排放为 $350 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$; 怠速运转时存在 0.2~0.4 BSU 的碳烟排放。减小缸内充量的波动性可以有效改善非正常燃烧现象并降低怠速排放。

关键词: 生物质气, 发动机, 燃烧, 怠速, 排放特性, 热裂解

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.029

中图分类号: TK421.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0170-04

张强, 李娜, 王志明. 热裂解生物质气发动机怠速燃烧及排放特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 170-173.

Zhang Qiang, Li Na, Wang Zhiming. Combustion and emission characteristics of thermal cracking biogas engine at idle speed[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 170-173. (in Chinese with English abstract)

0 引言

化石燃料是目前世界应用最为广泛的能源, 其在燃烧过程中排放大量的有害排放物及温室气体, 导致日益严重的气候异常问题及环境污染问题。控制温室气体排放防止全球变暖是各国的职责, 低碳经济成为科技发展的趋势, 因此寻找和开发新型可再生能源成为内燃机行业的一个重要研究领域, 而生物质能恰恰能够解决这些问题。生物质与化石类燃料相比具有以下优点: 生物质原料可以再生, 资源开发潜力大; 生物质参与大气中的碳循环可以实现温室气体的零排放; 生物质的 S、N 含量少, 使用过程中可以减少环境污染^[1-4]。

因此生物质能的利用受到世界各国的重视。美国 2002 年制定的生物质能源发展计划预计到 2020 年全美生物质能源和生物质产品达到能源总消费量的 25%; 欧盟生物质能源约占总能源的消耗的 4%, 15 a 后预计可达 15%; 丹麦主要利用生物质进行热电联产, 使生物质能在提供高品位电能的同时, 满足供热要求, 可再生资源占全国能源消费的 24%^[5-8]。中国农业资源丰富, 分布在全国各地的米粉厂、木器厂产生大量的稻壳、木屑等废弃物, 适合发展以热裂解生物质气作为可燃气体的分布式能源计划, 中华人民共和国农业部将生物质能的利用作为重点项目进行推广。国内有关研究机构开展了对热裂解生物质气发动机的研究工作, 对发动机的动力性、经济性和燃烧放热特性进行了研究^[9-11]。

由于受到混合气浓度和充量波动的影响, 气体燃料发动机怠速运转时容易出现失火和不完全燃烧现象, 造成发动机工作不稳定、排放高。本文针对发电机用火花点火生物质气发动机, 采集发动机在怠速运转时的示功图及有害排放物, 分析了发动机的怠速燃烧和排放特性。

1 试验装置

试验发动机为 4135 型 4 缸 4 冲程水冷生物质发动机, 表 1 所示为发动机的主要技术参数。

表 1 试验发动机技术参数
Table 1 Specifications of the experimental engine

项 目	参 数
型式	立式, 水冷, 四冲程, 非增压
气缸数	4
缸径×冲程/mm	135×150
压缩比	10.5(11.5):1
燃烧室形式	浅盆形
标定转速/(r·min ⁻¹)	1500
点火方式	火花点火

利用 AVL6200 型燃烧分析仪采集怠速转速下缸内示功图, 采用 AVL 水冷压力传感器; 发动机转速由燃烧分析仪自带的传感器测定; 节气门开度利用节气门位置传感器测定。排放测量仪器为 FGA4015 型五组分排气分析仪, 试验前对排放仪进行标定, 表 2 为排放测量装置主要技术指标。

表 2 排放测量装置主要技术参数
Table 2 Specifications of emission measurement setting

测量项目	量程	分辨率
HC/10 ⁻⁶	0~10 000	1
CO/%	0~10	0.01
NO/10 ⁻⁶	0~4 000	1

收稿日期: 2010-06-04 修订日期: 2010-08-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAD4B11); 山东省自然科学基金 (2006ZRB02354)

作者简介: 张强 (1973-), 男, 山东青州人, 博士, 主要从事新能源发动机的研究。济南 山东大学能源与动力工程学院, 250061。

Email: sduzq01@163.com

试验过程中燃用生物质气的主要体积分数为： H_2 为 14.2%， CO 为 16.1%， CH_4 为 3.43%， C_nH_m 为 0.96%， CO_2+H_2O 为 14.77%， O_2 为 0.86%， N_2 为 49.68%，生物质气的平均低热值为 $5\ 500\ kJ/m^3$ 左右。燃烧分析试验中测录了 4135 型生物质气发动机第 1 缸的示功图。在 0.5° 曲轴转角的采样间隔下连续测量 100 个循环的气缸压力数据，并进行了多次对比分析。数据统计结果表明每次测量结果的统计值基本一样，因此采用 100 个循环的气缸压力统计数据进行分析。

2 怠速燃烧特性

对于热裂解生物质气发动机而言，由于生物质气体中含有大量的 CO_2 和 N_2 ，可燃成份仅占 1/3 左右，燃气热值低， CO_2 和 N_2 具有阻碍燃烧的作用；但是生物质热裂解过程中产生一定量的氢气，氢气是自然界中点火能量最低、火焰传播速度最快的气体，是改善怠速点火及燃烧的有力因素，两者的综合作用决定了发动机的怠速燃烧过程。

2.1 怠速放热率

图 1 为发动机怠速 100 个连续循环的平均示功图及对应的放热率。如图中曲线所示，怠速运转时发动机的气缸压力较低，燃烧开始后瞬时放热率的数值上升较慢，燃烧放热的速率变化比较平缓，瞬时放热率的峰值很小，

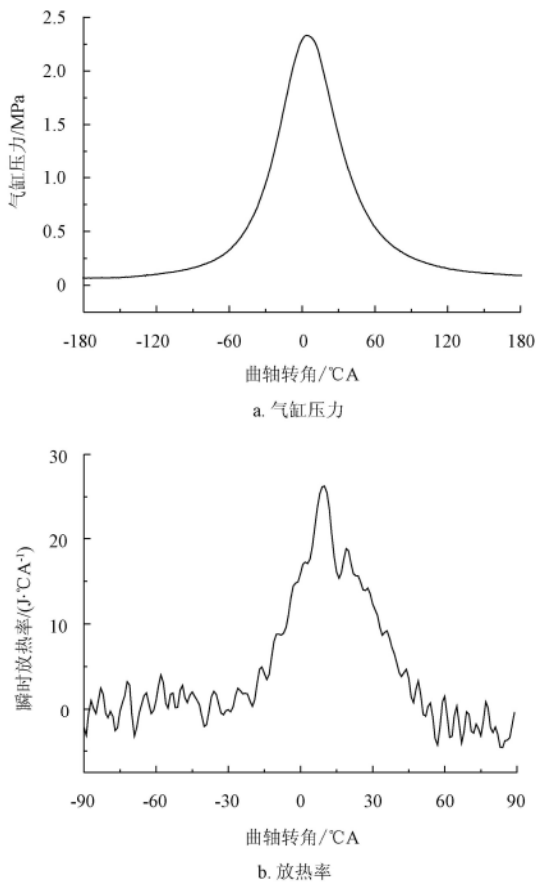


图 1 怠速 100 个循环平均示功图及对应放热率
Fig.1 Average indicator diagram and heat release rate of 100 cycles under idle speed

瞬时放热率在上止点后 $10^\circ CA$ 左右达到最大值，然后开始下降，放热持续时间较长。这是因为怠速运转时进入缸内的混合气量较少，浓度较低，燃烧温度较低，虽然氢气的存在有利于改善燃烧但其实际放热过程较慢，大部分热量在一较大的曲轴转角范围内放出，不利于发动机热量的有效利用。

分别对 100 个循环进行放热率研究表明：生物质气发动机在怠速运转时存在 10% 左右的部分燃烧和 3% 的失火循环。图 2 是试验发动机怠速运转时的 3 种典型循环（正常燃烧循环、部分燃烧循环、失火循环）的缸内压力曲线及其对应的燃烧放热率曲线。分析图中曲线所示：对于正常燃烧循环而言，在压缩行程末期混合气开始燃烧并使缸内压力升高曲线脱离压缩线，其压力峰值很高，燃烧比较完全，相应的最高放热率大，放热量多且较集中；而部分燃烧的放热率峰值偏低，放热量少，放热持续期长，压力曲线在膨胀行程中与压缩膨胀线分离；失火循环中的气缸压力曲线为压缩膨胀线，由于膨胀行程中最低排气压力低于排气行程中的压力，而接近进气行程中的压力，在排气门开启后，排气管内的废气发生倒流现象，使缸内压力略有升高。

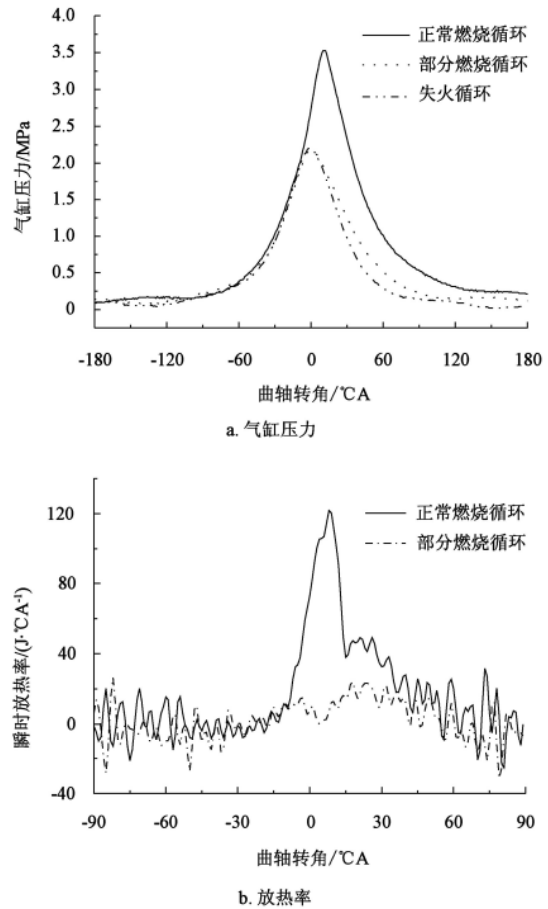


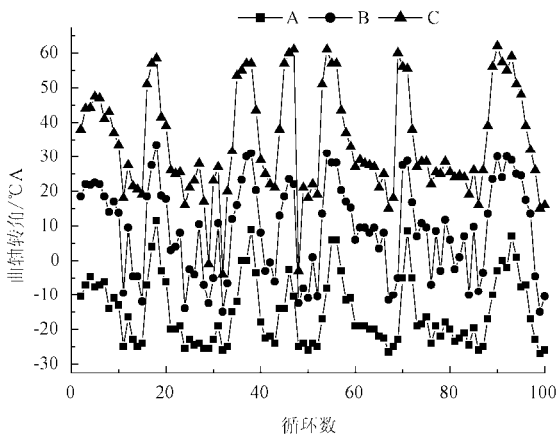
图 2 怠速三种典型循环的示功图及对应放热率
Fig.2 Three representative indicator diagrams and heat release rate under idle speed

分析其原因如下：对于燃烧室内一定状态的可燃混合气，只有当火花放电能量足够大时，可燃混合气才能

被点燃。生物质气发动机点火后，燃烧的初始放热量与散失热量的平衡状态决定了能否形成稳定的火核中心并向外传播。当放电能量不够大，或者火花塞附近的混合气浓度过低时，即便击穿了电极间隙，并且形成了初始燃烧火焰，但由于加入的热量小于所散失的热量，火焰传播也可能由此中断，导致部分燃烧循环和失火循环。

2.2 怠速燃烧参数

火焰发展期是火花点火发动机燃烧过程的一个重要参数，它对整个燃烧过程和发动机经济性、排放性等各方面的指标都有影响。图3中曲线A、B、C分别为怠速100个循环中10%、50%、90%的燃料燃烧所对应的曲轴转角。分析图中曲线：燃烧参数呈现规律的波动性，火焰发展期的长短直接决定了50%燃料燃烧所对应的燃烧相位角和90%燃料燃烧所对应的速燃期终点，火焰发展期短时，燃烧相位角提前，燃烧速度快，热量集中在上止点附近放出，热效率高。



注：A为10%燃料燃烧对应的曲轴转角；B为50%燃料燃烧对应的曲轴转角；C为90%燃料燃烧对应的曲轴转角

图3 怠速100个循环的燃烧参数

Fig.3 Combustion characteristic parameters of 100 cycles under idle speed

经统计，怠速100个连续循环的平均火焰发展期为11°CA，50%燃料燃烧平均燃烧相位角为9.03°CA，平均速燃期为49°CA，火焰发展期和速燃期时间较长。分析其原因为：怠速燃烧过程中进气量少残余废气系数大，火花塞点火时混合气的温度较低，燃料燃烧所需要的物理、化学反应时间较长，同时也影响到火核的发展和传播速度，造成火焰发展期和速燃期较长。

图4为怠速50个循环示功图，如图中数据所示，怠速充量存在一定波动性，以发动机点火前缸内压力的变动系数^[11]作为表示充量波动程度的参数，经统计压力的变动系数为6.33%，这是造成怠速燃烧参数波动的一个重要原因。当发动机转速下降后排气阻力随之减小，同时由于经过失火或不完全燃烧现象后缸内的残余废气量减少，进气量及混合气浓度增大，混合气易被点燃，滞燃期短。正是发动机充量的波动造成每循环最大的放热潜能的变化和火焰的早期发展和传播存在的波动造成这种怠速燃烧参数的差异。

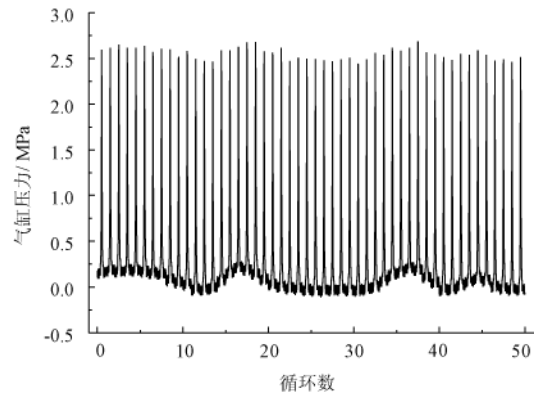


图4 怠速50个循环连续示功图

Fig.4 Indicator diagram of 50 continuous cycles under idle speed

3 怠速排放

发动机怠速工况排放一直是发动机领域倍受关注的问题。研究表明，火花点火发动机的HC排放有80%来自启动及怠速阶段^[12]。发动机在冷启动和怠速工况下HC排放主要由燃料着火性能差、燃料溶入润滑油、燃烧沉积物中及狭缝容积所产生。当然，非正常燃烧也是HC排放的重要来源。

对于汽油机和燃用天然气的常规火花点火发动机，CO的主要来源是由于燃烧过程中氧气浓度不足时，燃料中的碳不能被完全氧化为CO₂，而是部分氧化成为CO，CO的生成率主要受当量空燃比的影响。而对于热裂解生物质气发动机由于燃料本身含有一定量的CO，因此CO的另一个重要来源是燃烧不充分或失火现象导致燃气中的部分CO直接进入排气系统，使尾气中的CO含量增加^[9]。另外，CO在燃烧后的膨胀和排气过程中会继续氧化，排气温度和氧浓度决定了氧化速度的快慢，怠速运行过程中排气温度较低，CO在燃烧后的膨胀和排气过程中氧化速度较慢，造成CO排放升高。

表3为生物质气发动机怠速运行时的排放特性。如表中数据所示，发动机怠速运行时，由于进气量少，缸内温度较低，燃烧不充分，使CO和HC排放量较高；同时由于部分燃烧循环和失火现象的存在使得生物质混合气中的部分CO和CH₄未经燃烧而直接从废气中排出，造成怠速时HC和CO排放增加。同时由于缸内温度较低，生物质气中所含的焦油不能充分燃烧，加上部分机油裂解、不完全燃烧生成一定量的碳烟排放。

表3 怠速排放特性

Table 3 Emission characteristics under idle speed

压缩比	转速/(r·min ⁻¹)	HC排放量 体积含量	NO排放量 体积含量	CO排放/ %	烟度/ BSU
10.5	850	400×10 ⁻⁶	21×10 ⁻⁶	4.32	0.4
11.5	850	352×10 ⁻⁶	18×10 ⁻⁶	4.07	0.2

4 结论

1) 由于热裂解生物质气热值较低，试验发动机怠速工

况存在3%的失火循环和10%左右的不完全燃烧现象。

2) 发动机点火前内压力的变动系数为6.33%, 怠速充量的波动性和火焰发展的差异性造成怠速燃烧参数波动的原因, 减小充量波动性可有效改善怠速燃烧。

3) 怠速失火和不完全燃烧现象, 导致热裂解生物质含有的CO和CH₄直接排出使怠速排放升高, HC排放的体积含量为350×10⁻⁶~400×10⁻⁶, 生物质气发动机怠速具有0.2~0.4 BSU的碳烟排放。

[参 考 文 献]

- [1] 文丽华, 王树荣, 骆仲泱, 等. 生物质的多组分热裂解动力学模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(2): 61—65.
Wen Lihua, Wang Shurong, Luo Zhongyang, et al. Multicomponent kinetic model of biomass pyrolysis[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(2): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [2] 谭洪, 王树荣, 骆仲泱, 等. 木质素快速热裂解试验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(5): 710—714.
Tan Hong, Wang Shurong, Luo Zhongyang, et al. Experimental study of lignin flash pyrolysis[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(2): 710—714. (in Chinese with English abstract)
- [3] Goyal H B, Saxena R C, Seal D. Thermochemical conversion of biomass to liquids and gas[J]. Monograph communicated to Haworth Press, USA, 2006. Thermochemical conversion of biomass.
- [4] 姚燕, 王树荣, 郑赞, 等. 基于热红联用分析的木质素热裂解动力学研究[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 50—54.
Yao Yan, Wang Shurong, Zheng Yun, et al. Kinetic research of lignin pyrolysis by TGA-FTIR analysis[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13(1): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马志刚, 吴树志, 白云峰. 生物质能利用技术现状及进展[J]. 能源工程, 2008(5): 21—27.
Ma Zhigang, Wu Shuzhi, Bai Yunfeng. Research status and progress in biomass energy utilization[J]. Energy Engineering, 2008(5): 21—27. (in Chinese with English abstract)
- [6] 国家自然科学基金委. 工程热物理与能源利用: 学科发展战略研究报告(2006—2010年)[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [7] 董玉平, 王理鹏, 邓波, 等. 国内外生物质能源开发利用技术[J]. 山东大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 64—69.
Dong Yuping, Wang Lipeng, Deng Bo, et al. A review of the research and development of biomass energy technology[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(3): 64—69. (in Chinese with English abstract)
- [8] 雷学军, 罗梅健. 生物质能转化技术及资源综合利用研究[J]. 中国能源, 2010, 32(1): 22—29.
Lei Xuejun, Luo Meijian. Analysis on biomass energy conversion technology and resource comprehensive development and utilization[J]. Energy of China, 2010, 32(1): 22—29. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张强, 李娜. 火花点火生物质气发动机性能研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 133—136.
Zhang Qiang, Li Na. Performances of spark-ignition biogas engine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 133—136. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张强, 李娜. 热裂解生物质气发动机燃烧特性试验[J]. 太阳能学报, 2009(11): 1561—1565.
Zhang Qiang, Li Na. Experimental research on combustion characteristics of thermal cracking biogas engine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009(11): 1561—1565. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张强. 生物质气发动机工作过程的数值模拟及试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
Zhang Qiang. Numerical Simulation and Experimental Research on the Working Process of the Biogas Engine[D]. Jinan: Shandong University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [12] 梁小强, 刘圣华, 周龙保. 火花点火发动机冷启动和暖机过程未燃碳氢排放及控制[J]. 内燃机, 2005(6): 36—29.
Liang Xiaoqiang, Liu Shenghua, Zhou Longbao. Review on HC emission and control during cold start and warming-up processes of SI engines[J]. Internal Combustion Engines, 2005(6): 36—29. (in Chinese with English abstract)

Combustion and emission characteristics of thermal cracking biogas engine at idle speed

Zhang Qiang¹, Li Na², Wang Zhiming¹

(1. Department of Energy and Power Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061 China;

2. Department of Mechanical Engineering, Jinan University, Ji'nan 250022, China)

Abstract: In order to study the combustion characteristics of biogas engine and the method to control its emissions at idle speed, the low heat thermal cracking biogas was used as the fuel for the biogas engine. Heat release rate, combustion parameters and emission characteristics of the biogas engine at idle speed were analyzed by gathering the indicator diagram and emission index of the spark-ignition biogas engine. The experimental results showed that incomplete combustion and variety of combustion parameters were mainly caused by fluctuation of the charge in the cylinder and difference of the flame expansion. When the idle misfire or incomplete combustion happened, the exhaust of CO at idle speed could reach 4.07%—4.32%, the exhaust of HC could reach 350×10⁻⁶—400×10⁻⁶ and the carbon exhaust could reach 0.2—0.4 BSU. The abnormal combustion and the emissions at idle speed can be improved effectively by reducing the fluctuation of the charge in the cylinder.

Key words: biogas, engine, combustion, idle speed, emission characteristics, thermal cracking