

高效、超低排放沼气热水器的设计及性能研究

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 齐亚腾 冯良 胡标

摘要: “十二五”期间, 沼气产业蓬勃发展, 但长期的重建设轻利用给沼气产业带来了严重的利用率差、应用新技术推广滞后, 沼气设施闲置等问题。为改善这一现状, 本研究针对传统沼气热水器在性能方面的缺陷, 在理论研究的基础上设计了一款高效、超低排、安全舒适的沼气热水器, 旨在提高沼气热水器的市场占有率。通过试验的方法, 分析空燃比与污染物排放的关系, 确定该沼气热水器的最佳空燃比; 并在最佳空燃比下, 对其污染物排放、热效率、温控等性能进行测试, 分析了热负荷与沼气热水器热效率、污染物排放(主要指NO_x及CO)的关系。试验结果表明, 在额定负荷下, CO ($\alpha=1$)及NO_x ($\alpha=1$)的排放量分别为32.5ppm、22.9ppm, 排放特性好; 热效率为103.4%, 达国家一级标准(96%); 水温动态响应时间短, 且触摸屏技术实现手动、自动双模式水温调控, 具有较高的舒适性及操作便捷性。该沼气热水器克服了传统沼气热水器燃烧不稳定, 热效率不高, 排放特性差, 恒温性能差等缺陷; 同时集成触摸屏等信息技术, 为用户营造了极好的视觉体验, 相比市场上的沼气热水器具有很大的市场竞争力及开发潜力。

关键词: 沼气热水器 全预混 冷凝换热 触摸屏 热效率 排放特性 动态响应时间

The Design and Properties Research of Biogas Water Heater with High Efficiency and Low Exhaust

College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University

Qi Yateng, Feng Liang, Hu Biao

Abstract: During China “12th five-year” plan, the biogas has been a flourishing industry. But long-term heavy construction and light utilization bring biogas industry to some matters, such as low availability, use of the new technology lagging behind, biogas facilities being lay aside and so on. To improve this status quo, this paper aims at the defects of the old biogas water heater existing in terms of its thermal performance, based on the theoretical research, devises an efficient, ultralow-emission, safe and comfortable dual-use biogas water heater which also fit to the domestic gas to enhance its market share. This paper analyzes the relations between air-fuel ratio and discharge of pollutants by experimentation and determines the optimal air-fuel ratio. In the optimal air-fuel ratio, we text its emission performance, thermal efficiency and temperature

control performance. Also, we analyze how the thermal load impact on the thermal efficiency and pollutant discharge (mainly means NO_x and CO) of the biogas water heater. Results of the trial indicates that under rated load, the emissions of CO ($\alpha=1$) and NO_x ($\alpha=1$) are 32.5 ppm and 22.9ppm, which shows an eminent emission performance; Its thermal efficiency is 103.4%, coming up to first class of national pollutant discharge standard to gas water heater; the dynamic response time of water temperature is shorter and the touch screen technology achieves the water temperature control in both modes of manual control and automatic control, which makes its users feel more comfortable and convenient. This biogas water heater overcomes the defects of combustion instability, low thermal efficiency, bad emission performance, weak temperature persistence and so on; also, its integration with touch screen technology creates stunning visual experience to the users, compared to traditional biogas water heater, and there exists great market competitiveness and developing potential.

Keywords: biogas water heater premix combustion condensation heat transfer touch screen technology thermal efficiency emission performance dynamic response time

1 引言

为解决能源和环境问题，“十二五”规划提出对中国的能源结构进行调整，从调整目标可以看出，天然气等清洁能源、可再生能源在一次能源消费中的比重均有很大提升，其中可再生能源将由2009年0.8%增长到2.6%^[1]。

沼气作为一种清洁的可再生能源，对节能减排及能源结构调整意义重大。在中央政策引导及资金投入的支持下，中国沼气产业的规模呈现逐年递增的趋势。以户用沼气池为例，2000年底，农村户用沼气池达到848万户，2006年底已达到2 200万户，到2010年底已经超过4 000万户，户用沼气池正以平均每年约17%的速度增长^[2]，中国已成为世界上最大的农村户用沼气池保有国^[3]；同时，农业部规划，“十二五”期间中央投资优先支持向农户集中供气的大中型沼气项目，进一步扩大“沼气用户”，到2015年，农村户用沼气用户达到5 000万户~5 500万户。

沼气事业蓬勃发展，但长期的重建设轻利用又导致了一些新问题的出现，比如应用新技术推广滞后^[4]、利用形式单一，沼气设施闲置^[5]，沼气供大于求，管理服务不到位^{[6]、[7]}，沼气市场机制不健全^{[8]、[9]}等。据有关调查显示，有的畜禽养殖场将无法消纳的沼气直接排放到大气中，不但造成了能源的极大浪

费，而且严重影响了空气质量^[10]。上述现象表明，寻求新的沼气利用途径十分必要。

作为环保型沼气利用设备，沼气热水器被认为是农村地区开发利用可再生能源，解决广大农村居民生活用能问题，改善农村生产和生活条件，保护生态环境和巩固生态建设成果的利器^{[11]、[12]}，但其市场占有率一直不高。究其原因，主要有如下几点：

(1) 沼气具有明显季节性，供应稳定性差。目前沼气供应还未实现液化，沼气具有明显的季节性，在产气量低的冬天通常不能满足用户的需求，导致很多用户在冬天弃用沼气热水器或直接改用其他热水器。

(2) 沼气压力、成分不稳定，水分较多、含硫较高导致燃烧条件恶劣，沼气热水器很难长期稳定运行^[13]。生产一台能够长期稳定工作的沼气热水器，难度极大。

(3) 市面上现存的沼气热水器在安全舒适、效率、排放等性能方面存在极大不足，质量不高。

针对上述沼气利用率差的问题及沼气热水器市场占有率低的发展现状，本研究旨在全面提升沼气热水器性能，推出一款高效、超低排、安全舒适的沼气热水器，并对其排放、热效率、温控等性能进行测试，从沼气使用末端实现沼气事业的优化，提升农村居民生活质量，促进节能减排及我国能源结构的调整。

2 冷凝式沼气热水器的设计

2.1 系统方案设计

在普通沼气热水器的研究基础上，本方案期望设计出一套高效、超低排的沼气热水器，产热水能力20L/min，额定功率36kW；热水器能够实现即开即热；自动恒温、控制精度高，且操作方便；结构简单、方便安装。

具体设计方案如下：

(1) 采用全预混燃烧系统，充分发挥全预混燃烧器火孔热强度高，污染物排放量低等优势。

目前采用大气式燃烧方式的沼气（燃气）热水器在市场上占据统治地位，但由于沼气压力、成分不稳定，当采用大气式燃烧方式时，热水器往往伴随着点火困难、易产生脱火、黄焰以及水烧不热等问题^[4]；同时，大气式燃烧技术产品在进一步提高燃烧效率方面的潜力已非常有限。考虑到上述不足，沼气热水器将采用全预混燃烧方式。

(2) 采用翅片盘管式冷凝换热器。

冷凝式换热能够充分利用排烟中的潜热，使沼气热水器的有效热 Q_{val} 增加了潜热 $Q_{潜}$ 的部分，热效率明显提高，理论上能够超过96%，达到GB20665-2006《家用燃气快速热水器和燃气采暖热水炉能效限定值及能效等级》中规定的家用燃气热水器一级能效标准。

(3) 以触摸屏为辅助，采用多流阀直接恒温控制方法，实现水温的自动恒定。

该控制方法是在传统PID控制的基础上进行改进，根据水温最大扰动因素水流量整定PID参数，该方法具有比传统PID更高的控制精度，较自适应等智能控制又存在控制算法更加简单的优势。

2.2 系统组成及其工作原理

全预混沼气热水器系统主要由燃烧系统、冷凝换热器、控制系统3部分组成，图1为其结构示意图。

工作原理：在比例调节阀的作用下，沼气和空气在混合器内按理想空燃比预混，风机将预混后的空气和沼气进一步混合后送入全预混燃烧器。点火针脉冲点火，沼气在金属纤维表面燃烧，产生的高温烟气与换热器盘管内的水对流换热，经末端二次换热后，获得恒温热水；同时烟气中的水蒸气冷凝成水滴落在积水盒内。

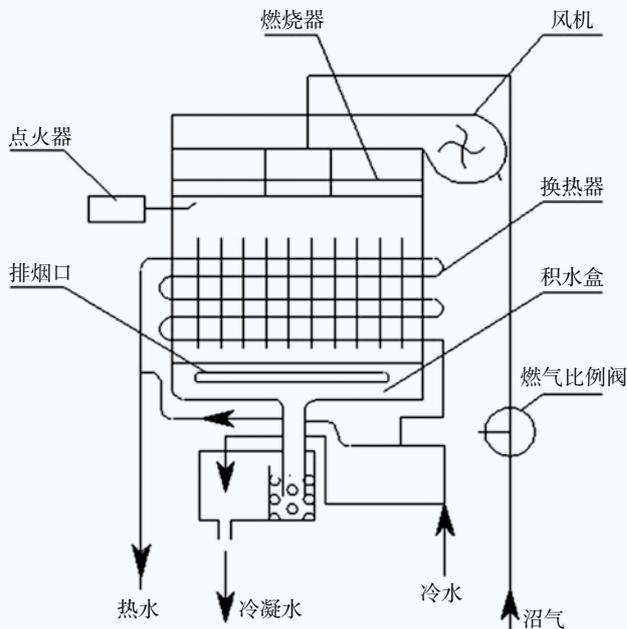


图1 冷凝式沼气热水器结构示意图

2.2.1 燃烧系统

燃烧系统由金属纤维燃烧器头部、空气/沼气全预混装置、风机、燃烧器控制器以及其他配件组成。

(1) 空气/沼气全预混装置

空气/沼气全预混系统由文丘里式混合器与比例调节阀组成，混合器采用文丘里式混合器，比例调节阀选用西门子VGU8系列。风机运行时，在风机入口形成负压，沼气依靠自身压力和入口空气负压的双重作用进入混合器，预混后进入风机，强烈的气流湍动使得沼气与空气能够达到较高的混合均匀度。为减小设备体积，本研究采用风机上游混合式，图2为空气/沼气全预混装置组合图，图3为混合器结构图。

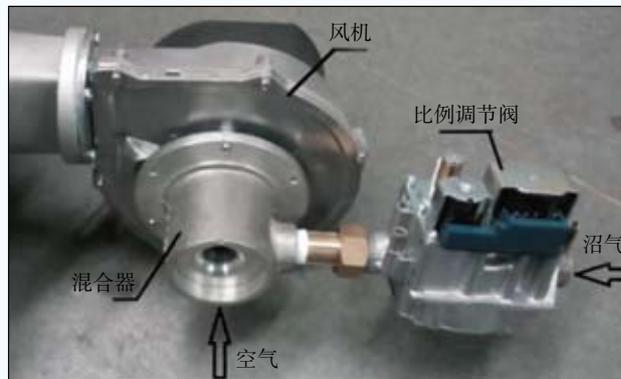


图2 空气/沼气全预混装置图

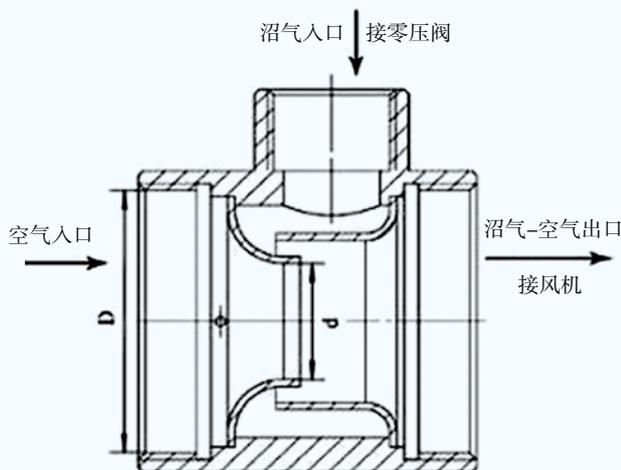


图3 混合器结构图

(2) 金属纤维燃烧器头部

设计中,采用金属纤维筒形燃烧器,其头部结构如图4所示。金属纤维由于其特殊的内部结构,具有节能、污染物排放低、外形适应性强、燃烧稳定性好等优势,经计算,金属纤维面积为 150.72cm^2 ,开孔率 ϕ 为23%。

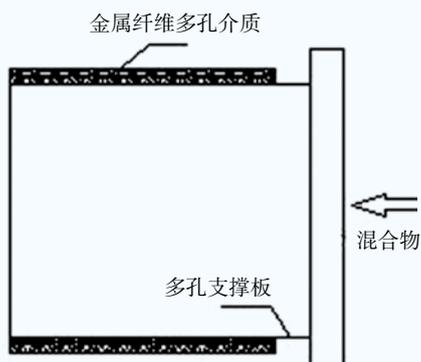


图4 燃烧器头部结构示意图

2.2.2 冷凝换热器

采用翅片盘管式冷凝换热器,进水管4根、出水管4根,图5为换热器及盘管的结构图。

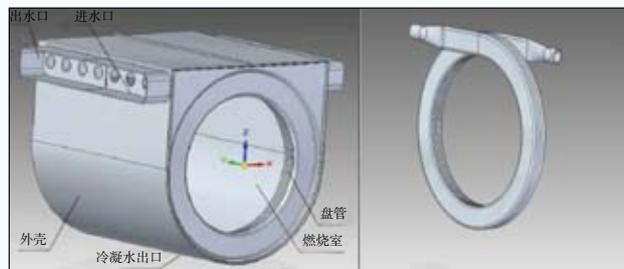
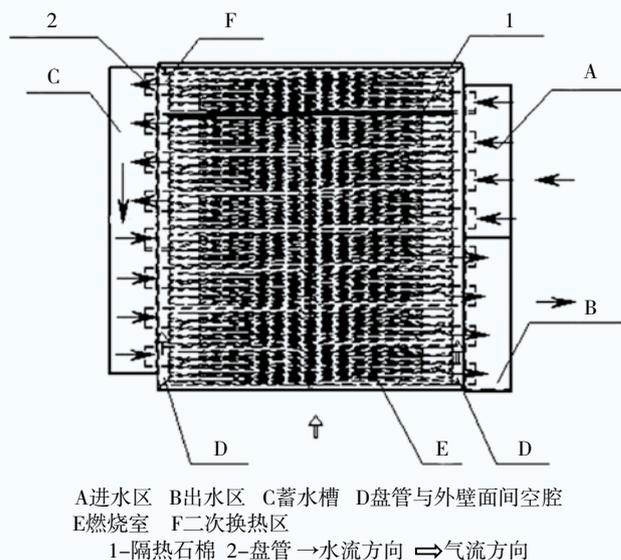


图5 换热器及盘管结构图

换热器的工作原理如图6所示:进水从A区流入4根并联的盘管,与高温烟气换热后到达C区蓄水槽,换热后的进水从蓄水槽内进入4根并联的出水盘管,经二次换热后从B出水区流出。而高温烟气在E燃烧室内产生,隔热石棉1阻挡了其在轴向上的流动,迫使其全部径向冲刷换热盘管,最后流入盘管与换热器外壁面形成的空腔D内,低温烟气通过空腔D最终流入二次换热区F,与盘管二次换热后排出。这种特殊的盘管排列形式,增大了盘管与烟气的换热面积,并进行了二次换热,换热效率高。



A进水区 B出水区 C蓄水槽 D盘管与外壁面间空腔
E燃烧室 F二次换热区
1-隔热石棉 2-盘管 →水流方向 ⇌气流方向

图6 换热器工作原理示意图

2.2.3 控制系统

控制系统由DFC燃烧器控制器、触摸屏、温度及流量传感器等部件组成,触摸屏辅助实现水温自动控制与手动控制两种模式间的自由切换。

系统运行时,温度、流量传感器测量当前工况下的水温、水量,输出信号经模块转化后传递给触摸屏,并在触摸屏的程序运行脚本内进行PID计算,风机占空比PWM与风机转速呈正相关,控制器根据计算得到风机占空比PWM,调节风机转速,从而调节空气流量,在空燃比例调节阀的作用下,沼气流量也相应变化,从而控制燃烧器负荷,维持水温自动恒定;若以触摸屏为人机交互界面,通过手动输入风机占空比PWM值,控制风量,则可实现水温的手动控制。

3 试验研究沼气热水器的性能

本研究采用的试验气是利用实验室配气系统,以管输天然气和灌装氮气为气源自行配置出的沼气。根据标准GB/T 13611-2006《城镇燃气分类及基本特性》,所配置的6T-0标准沼气的成分为 CH_4 —53.4%, N_2 —46.6%。所配置沼气的折算后高热值为 $21.30\text{MJ}/\text{m}^3$,低热值为 $18.18\text{MJ}/\text{m}^3$,相对密度为0.747。

试验包括对热水器基本性能和直接温控系统动态特性两方面的测试与分析。为此,搭建试验测试平台,图7为系统的实验系统示意图,图8为试验装置图。

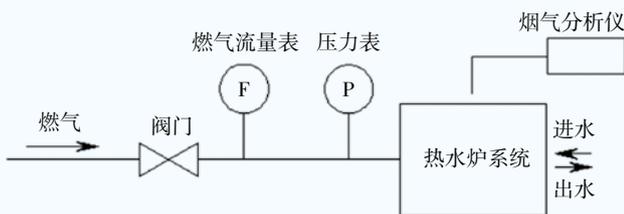


图7 试验系统示意图



图8 试验装置图

3.1 热水器的基本性能测试

空燃比对于全预混燃烧的效果至关重要。本试验通过调节燃气比例阀的开度,获取不同空燃比(过剩空气系数)下的污染物排放情况,根据获得的数据找出最佳的空燃比;保持该最佳空燃比不变,对热水炉在不同负荷下进行性能测试。为了便于根据GB6932-2001《家用燃气快速热水器》比较排烟中CO、 NO_x 的排放量,将烟气分析仪直接测得的CO、 NO_x 的浓度折算成过剩空气系数 $\alpha=1$ 情况下的浓度,图9为不同过剩空气系数下污染物排放情况。

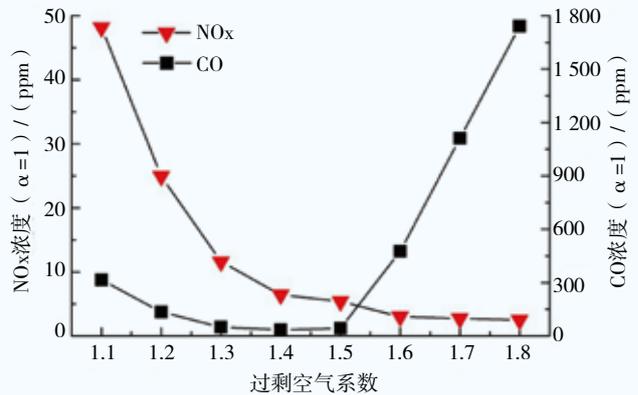


图9 烟气中CO、 NO_x 浓度随过剩空气系数变化趋势

由图9可以看出,CO浓度随过剩空气系数呈“U”型变化, NO_x 浓度随过剩空气系数的增加而减小^[15]。过剩空气系数在1.3~1.5时, NO_x 浓度在15ppm以内,CO的浓度在50ppm以内。此时,污染物排放理想。

过剩空气系数分别为1.3、1.4、1.5时,调节风机占空比,比较不同热负荷下的污染物排放及热效率情况,以确定最佳的过剩空气系数。不同占空比下的污染物(CO和 NO_x)排放情况如图10所示。国家标

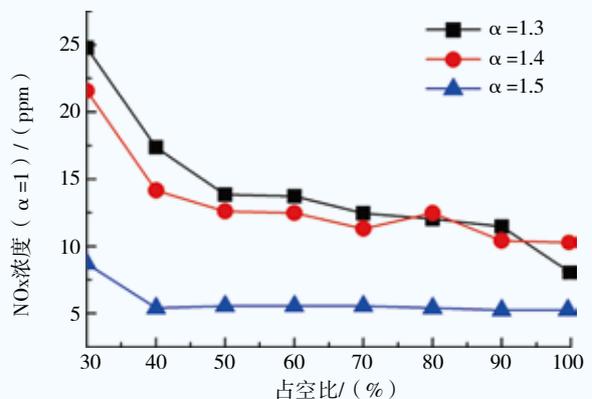
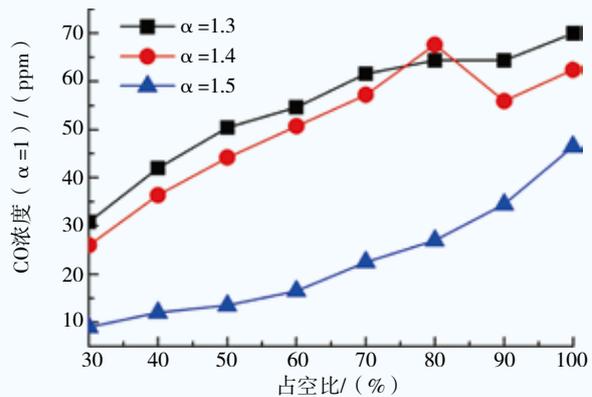


图10 不同过剩空气系数下CO、 NO_x 排放随占空比变化曲线

准GB6932-2001《家用燃气快速热水器》规定试验气6T-0的额定供气压力为1 000Pa,在此供气压力下的热效率随占空比变化情况如图11所示。

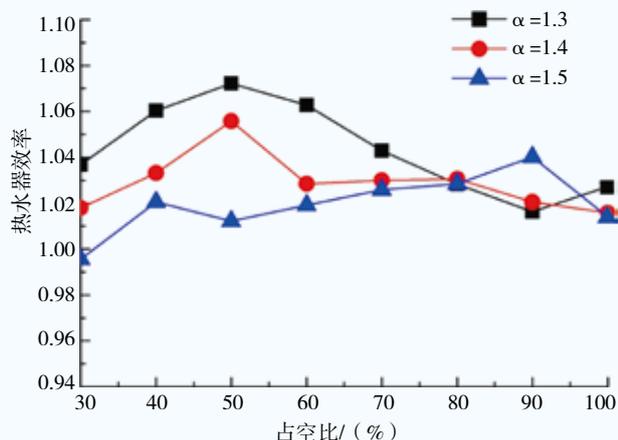


图11 热效率随占空比变化情况

试验结果表明:

(1) 不同过剩空气系数下,排放浓度均随占空比的增大而增大,但排放量较低,在70ppm以下。NO_x排放浓度均随占空比的增大而略微减小,可视为不变。

(2) 随过剩空气系数增大,热效率有下降的趋势。这是因为过剩空气越大,相同热负荷下,冷空气带走的热量越多,且排烟量增大导致烟气温度下降、换热时间减少。

(3) 由于本课题的热水器功率、负荷比较大,通常不会在满负荷下连续长时间运行,占空比为80%时,热效率明显高于其他,结合污染物排放及热效率情况,过剩空气系数最佳值为1.3。

(4) 最佳空燃比下,冷凝式沼气热水器的基本性能测试结果与常规冷凝式燃气热水器的基本性能参数对比结果,如表1所示。额定热效率高达103.4%,能达到1级能效标准,远高于常规的沼气热水器;市场上较好的产品可以达到低于150ppm的排放量。本产品

表1 燃烧沼气时热水器性能

基本性能指标	CO (a=1)	NO _x (a=1)	功率	效率
单位	ppm	ppm	kW	%
额定负荷	32.5	22.9	35.0	103.4

在额定负荷下,CO排放为32.5ppm ($\alpha=1$), NO_x排放为22.9ppm ($\alpha=1$), NO_x排放等级高达GB6932-2001《家用燃气快速热水器》规定的第五等级,减排效果明显。较同类产品在节能减排方面更具竞争优势。

3.2 直接温控系统动态特性试验及分析

MCGS组态软件编写测试用脚本程序,测试10℃温升下水温恒定所需动态响应时间,在触摸屏的“工程师界面”窗口中可直观显示响应曲线。

试验结果表明,水温稳定在30℃后,保持水流量不变将水温设定为40℃,响应时间为60s;水温稳定在50℃后,保持水流量不变将水温设定为40℃,响应时间为90s,该热水器温控性能良好,能够很好地满足用户的舒适性要求。

4 结语

(1) 沼气特殊的物化性质决定了其热值低且不稳定、燃烧强度低、燃烧速度慢,采用全预混燃烧方式,克服了空气/沼气按比例混合等技术难点,保证沼气热水器的长期稳定运行。

(2) 多流阈值直接温控方法,以触摸屏为人机交互界面,可实现手控、自控两种控制模式的自由切换,控制方式便捷;克服了传统PID的控制缺陷,控制精度更高,增强了用户的舒适性;同时,触摸屏技术,更增强了用户的视觉体验。

(3) 性能测试结果表明,特殊的冷凝换热器使得热效率在额定负荷下为103.4%,达国家一级标准(96%);额定负荷下,CO ($\alpha=1$)及NO_x ($\alpha=1$)的排放量分别为32.5ppm、22.9ppm,排放特性好,具有很强的市场竞争优势。

注:本课题为基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题“村镇环境综合整治重大科技工程——村镇污水源头减排及生物生态处理关键技术和设备研发”(编号:2012BAJ21B01)

参考文献

1 林智钦. 中国能源环境中长期发展战略[J]. 中国软科学, 2013; 12: 45-57

2 王飞, 蔡亚庆, 仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. 农业工程学报, 2012; 28 (1): 184-189

3 Huang Liming. Financing rural renewable energy: A comparison between China and India [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009; 13 (5): 1096-4399

4 闵纲跃. 农村户用沼气利用现状分析与综合评价——以呼和浩特市为例[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2013

5 Zhang Xiliang, Wang Ruoshui, Huo Molin, Eric Martinot. A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply[J]. Energy, 2010; 35 (11): 4392-4399

6 徐庆贤, 林斌, 郭祥冰等. 福建省养殖场大中型沼气工程问题分析及建议[J]. 中国能源, 2010; 32 (1): 40-43

7 高云超, 邝哲师, 潘木水等. 我国农村户用型沼气的发展历程及现状分析[J]. 广东农业科学, 2006; (11): 22-27

8 文华成, 杨新元. 当前农村沼气发展的问题与对

策——以四川省为例[J]. 生态经济, 2006; (11): 70-73

9 方淑荣. 我国农村沼气产业化发展的制约因素及对策[J]. 农机化研究, 2010; (2): 216-219

10 周昱, 阳作锋. 畜禽养殖场沼气工程建设的思考[J]. 江西能源, 2002; (4): 41-42

11 刘东生. 农村可再生能源建设项目环境影响评价方法及案例研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004

12 吴坚, 利锋. 南方农村沼气发展新模式的环境经济分析[J]. 生态经济, 2008; 3: 61-64

13 张学先, 利锋, 宋明伟. 沼气热水器的发展方向探讨[J]. 生态经济, 2008; 8: 107-108

14 郭年东, 阳作锋, 许献洲. 沼气热水器常见问题的处理[J]. 可再生能源, 2005; 6: 55-56

15 Kenneth K. Kuo. Principles of combustion [M]. Wiley. 2005

16 傅忠诚, 徐鹏, 刘彤. 燃气热水器氮氧化物排放标准的探讨[J]. 煤气与热力, 2003; 23 (4): 211-213

其它消息

港华集团荣获“2015中国责任品牌最具影响力企业”奖

继陈永坚总裁2015年5月荣获“2015年燃气行业奖”之“最佳领袖”奖后, 港华集团在品牌形象方面再传喜讯, 6月28日, 在由中国社会联合会企业公民委员会、中央电视台财经频道和腾讯公益慈善基金会共同主办的“2015中国企业责任品牌大会”上, 港华燃气集团凭借在安全运营、优质服务及奉献社会等方面的杰出表现, 荣获“2015中国责任品牌最具影响力企业”奖, 香港中华煤气高级副总裁刘杰女士代表港华燃气集团领取奖项, 此为本次大会的最重要奖项, 同时获奖的还有英特尔(中国)有限公司、联合技术公司等9家企业。

“2015中国企业责任品牌大会”组委会自2015年3月底开始, 在全国范围内开展“寻找中国责任品牌企业”的活动。通过公众网络提名、专家综合评



定、公示入围企业榜单等环节, 最终产生上榜企业。主办方希望通过树立责任品牌榜样, 促进企业责任品牌建设, 真正实现企业、社会与环境的全面、协调和可持续发展。

(胡凯)