doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2011.12.001

天然气组分变化时燃气热水器的性能响应研究

□ 同济大学机械工程学院（201804）杨贤潮 秦朝葵 童超

摘　　要： 使用管道天然气掺混乙烷、氮气的方法模拟LNG，并配制不同比例管道天然气与LNG的掺混气，对上海市场上几种热水器的热工性能进行响应测试。测试结果表明：随LNG比例的增加，热水器负荷增加，热效率下降，CO排放基本处于国标允许的范围内，NO_X排放无显著变化。热效率的变化会引起能效指标管理方面的混乱，需引起重视。

关 键 词： 燃气热水器 上海 响应 实验研究 天然气 互换性

Experimental Study on Response of Water Heaters to Different Composition of Natural Gas

College of Mechanic Engineering, Tongji University　Yang Xianchao, Qin Chaokui, Tong Chao

Abstract: Pipeline natural gas（PNG）in lab was blended with ethane and nitrogen to simulate liquefied natural gas（LNG）. The mixed gases of LNG and PNG at different proportions were used to test performance response of several water heaters popular in Shanghai markets. The result shows that when the percentage of LNG increased from 0% to 100%, the heat load of water heater increased, the thermal efficiency decreased, the CO emission is basically less than 500ppm, which comply with the national standard, and no significant change was observed in NOx emission. Serious attention should be paid to thermal efficiency changes, close related to Energy Efficiency Administration.

Keywords: gas-fired water heater　shanghai　response　experimental study　natural gas　interchangeability

1　背景

目前上海市燃气管网中有4种气源：西气东输天然气（下简称西气）、东海天然气（下简称东气）、川气和进口LNG。在组分与燃烧特性上，LNG与前三种天然气存在较大差别。因此，管网中的用户将会面对波动的气源组分，所使用的天然气为管道天然气与LNG的某种混合气体。对于这种可能出现的组分波动，燃具会发生何种变化？是否能够保持良好的适应性？这是多气源天然气供应格局下必须回答的问题。

燃气利用中的安全问题一直以来都被人们高度关注。已有的互换性指标（如AGA指数法、Weaver指数法以及德尔布法等）均是从安全要求出发来判断燃具的互换性，国外制定的这些判别法也是针对其自身气源和燃具，而我国的燃具设计理念、制造技术、气源成分等均与国外有较大区别。这些判别法能否适用，尚需进行实验验证。

天然气的普及使燃气热水器得以快速发展，家用快速热水器已成为居民必备的燃气具之一。为系统考察LNG接入天然气管网后，用户处可能发生的问题，

本文选择上海燃具市场上具有代表性的7台燃气热水器，通过配制不同比例管输气与LNG的掺混气，测试热水器的热负荷、热效率、CO排放等性能指标的变化情况。

2 实验用气

用户处的气源应为不同比例的管输气与LNG的混合气体，最富时为LNG，最贫时为管输气。重点需考察当气源由100%管输气逐渐转变为100%的LNG时，热水器的热负荷、效率、CO、NOx等发生的变化。已知西气、东气、川气及LNG 4种气源组分，但在实验进行时LNG尚未引进上海燃气管网。因此，在实验室内采用管输气掺混乙烷、氮气的方法配制LNG，此种方法既反映了LNG乙烷含量较高的特点，又简化了实际配气流程。通过配气后的色谱取样分析，发现配制气与目标气LNG之间华白数与燃烧势偏差基本稳定在±0.1%左右，符合国标关于配气的规定[1]。

按照上述方案配制的LNG以不同比例（0、20%、40%、60%、80%、100%）与实验室管输气掺混即可模拟真实情况下用户处的气源组分。配气装置见图1，配气时采取西气–乙烷–氮气多次交替进入的方式，尽可能保证均匀。监测膜式燃气表处的燃气温度，以便于进气量的修正。配气的目标原则是华白数与目标气一致，燃烧势尽可能接近。表1给出了实验室配制的测试用气组分及特性，以LNG比例作为标识。作为对比，同时给出了LNG的实际组分。

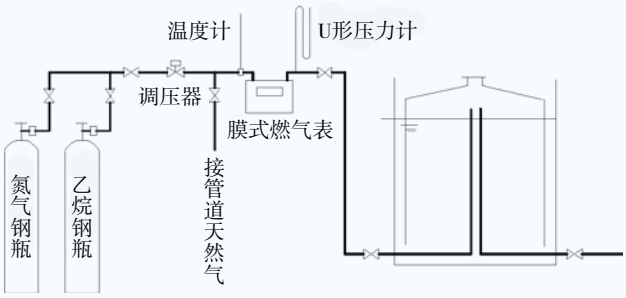

图1 配气流程图

3 实验燃具

实验燃具的选择是互换性实验中至关重要的环节，只有采用一定市场占有率且具有结构代表性[2]的燃具进行实验，得出的结论才具有一定的代表性。由上海市燃气行业管理部门结合燃具生产企业的销售情况，筛选了上海市场上占有率最高的4个品牌燃气

表1 实验用配制气的体积成分及特性

组分名称	配制气组分						实际LNG组分
	0%LNG	20%LNG	40%LNG	60%LNG	80%LNG	100%LNG	
氮气N_2	1.07	1.04	1.05	0.98	0.95	0.91	0.11
二氧化碳CO_2	0.63	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	0
甲烷CH_4	93.8	90.7	87.5	84.1	80.4	76.3	89.4
乙烷C_2H_6	3.63	6.67	10.05	13.48	17.26	21.45	5.76
丙烷C_3H_8	0.65	0.72	0.64	0.63	0.62	0.59	3.3
异丁烷i–C_4H_{10}	0.09	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.78
正丁烷n–C_4H_{10}	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.66
戊烷C_5H_{12}	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0
高热值（MJ/m^3）	38.79	39.73	40.66	41.66	42.76	43.95	42.58
低热值（MJ/m^3）	34.97	35.86	36.72	37.66	38.68	39.79	38.50
华白数（MJ/m^3）	50.34	50.92	51.46	52.06	52.69	53.38	53.30
燃烧势CP	40.0	40.8	41.5	42.3	43.1	44.0	41.5

热水器，挑选各自有代表性的型号（共7台）进行测试。样机基本情况如表2。必须说明的是：热水器不同于燃气灶，没有任何用户可以干预的调节手段，而燃气灶必须进行必要的一次空气调节，以获取较好的初始状态。

表2 燃气热水器测试的样机概况

序号	品牌	型号	型式	额定功率	额定效率
1	1	A	室内强排型	20kW	88%
2	1	B	户外强排型	22kW	88%
3	2	A	室内强排型	20kW	88%
4	2	B	数码恒温型	26kW	88%
5	3	A	数码恒温型	21kW	84%
6	3	B	室内强排型	21kW	84%
7	4	A	室内强排型	21kW	88%

4 测试方法与流程

试验参照GB6932-2001《家用燃气快速热水器》规定的试验条件、试验条目和试验方法，重点考察燃气热水器在无风条件下的燃烧工况（火焰状态及排放）以及热负荷、热效率的变化，部分测试细节根据具体情况有所调整，于是制定以下测试流程：

（1）选定待测热水器，进行安装，调试。对于非恒温机，将燃气阀门开至最大，调节出水温度比进水温度高40 ± 1℃，当不能调节至此温度时，在热水器温度可调范围内，调节至最接近的温度。对于恒温机，将温度设定在最高状态，适当提高进水压力，使热水器在最大负荷状态下工作；

（2）使用管输气预热热水器15min，切换到测试用气，烟气取样管放置到热水器排烟管内；预热的做法相对国标有改动，其主要目的在于节省配制气用量；

（3）操作员A提示实验开始并计时，同时操作员C开始称取热水，操作员A负责计量燃气流量和读取进水温度，操作员B负责读取出水温度和烟气中CO、NO_X、O_2含量，此后A与C间隔10s读取进出水温度；

（4）待流量计走动2圈，A提示实验结束并结束计时，同时C停止称取热水，关闭烟气分析仪；

（5）停水温升的测试。读取当前出水温度，关闭热水器，1min后开启热水器，读取热水的最高出水温度。

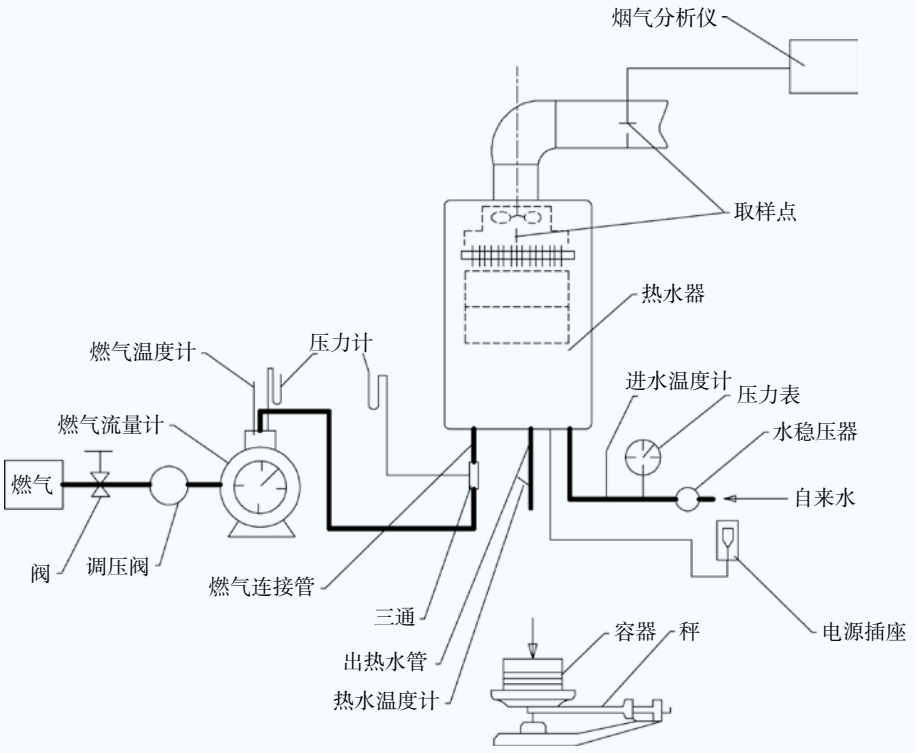

图2 测试装置图

5 实验结果与分析

5.1 测试结果

对7台燃气热水器在6种气源下进行了重复测试，获得了每台热水器的热负荷、热效率及CO和NO_X排放变化情况，如图3～图6所示。采用数字表示品牌，字母表示型号。

5.1.1 热负荷

为了能够准确反映出不同燃气组分下的热负荷变化情况，采用实测热负荷指标来衡量热水器在用户侧的热负荷性能。具体计算方法参见GB16410-2007《家用燃气灶具》关于实测热负荷的规定。

图3为LNG比例对热水器热负荷的影响。热水器的热负荷随着LNG比例的增加呈现增大的趋势，其变化规律随着热水器结构型式与品牌的不同而不同。

理论上似乎可以用华白数来预测热负荷的变化，从100%管输气变化到100%LNG，华白数增加了6%，对于不同品牌的热水器，热负荷的增加基本上未超出5%，热水器1-B达到最高的偏差4.6%。个别点的热负荷与总体变化趋势的偏离可以认为是燃气粘度导致喷嘴流量发生变化所致。

比较各型号热水器在设计气下的热负荷，得出在

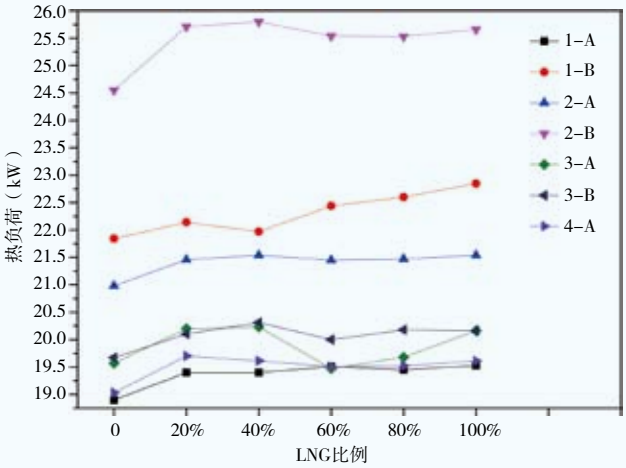

图3 燃气热水器的热负荷变化曲线

气源从100%管输气变化到100%LNG时每种热水器的热负荷偏差值。表中热负荷偏差较大者用棕色底纹标识出。可知热水器2-A与4-A在气源变化时会发生比较明显的响应，可能导致用户处的不满。

5.1.2 热效率

热效率为强制性指标，必须严格服从现有的热水器能效等级管理制度。

图4为LNG比例对热水器热效率的影响。热水器的效率随LNG比例的增加呈现下降的趋势。当由管输

表3 热水器在各试验气下相对设计气的热负荷偏差值

热水器类型	设计热负荷	0%LNG	20%LNG	40%LNG	60%LNG	80%LNG	100%LNG
1A	20kW	18.9	19.4	19.4	19.51	19.45	19.53
	偏差	-5.5%	-3.0%	-3.0%	-2.4%	-2.8%	-2.3%
1B	22kW	21.84	22.14	21.97	22.44	22.6	22.85
	偏差	-0.7%	0.6%	-0.1%	2.0%	2.7%	3.9%
2A	20kW	20.98	21.46	21.54	21.45	21.47	21.54
	偏差	4.9%	7.3%	7.7%	7.3%	7.3%	7.7%
2B	26kW	24.55	25.71	25.8	25.54	25.53	25.66
	偏差	-5.6%	-1.1%	-0.8%	-1.8%	-1.8%	-1.3%
3A	21kW	19.57	20.2	20.23	19.47	19.68	20.16
	偏差	-6.8%	-3.8%	-3.7%	-7.3%	-6.3%	-4.0%
3B	21kW	19.67	20.1	20.31	20	20.18	20.16
	偏差	-6.3%	-4.3%	-3.3%	-4.8%	-3.9%	-4.0%
4A	21kW	19.03	19.7	19.61	19.51	19.52	19.61
	偏差	-9.4%	-6.2%	-6.6%	-7.1%	-7.0%	-6.6%

气变化到掺混20%LNG时，效率的下降最为明显，之后随着LNG比例的增加，效率基本趋于稳定。

效率并非燃具互换性判断的必要条件。目前的热水器能效管理制度[3]规定，三级能效不小于84%，二级不小于88%，一级不小于96%。气源组分的变化所造成的效率变化，可能会引发热水器实际工作效率与能效标识不吻合的情况。以二级能效88%为考量基准，热水器1-A、1-B、2-A、2-B和4-A在20%～100%LNG下均达不到产品标识的能效，而热水器3-A和3-B均达到要求的三级能效84%。天然气组分的变化引起的此类问题应加以注意。

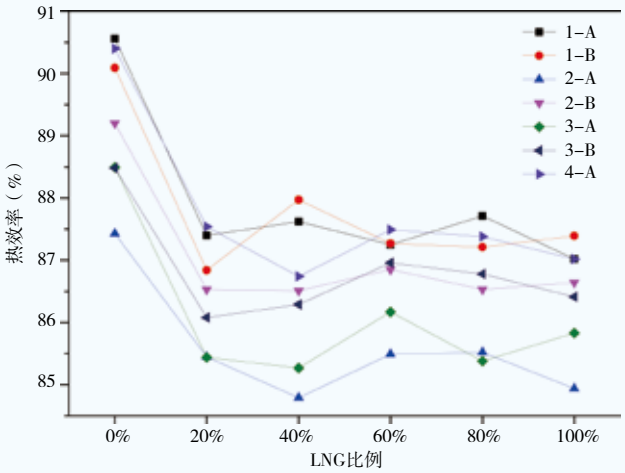

图4 燃气热水器的热效率变化曲线

5.1.3 CO排放

CO作为安全指标，是室内机安全性能的重要衡量标准。烟气的值应在烟气中O_2含量≤14%时进行读取。考虑到烟气被空气稀释的程度不同，应将烟气中的CO体积分数换算成过剩空气系数α=1时的体积分数，具体换算公式参见文献[5]。

图5为LNG比例对热水器CO排放的影响。随着LNG比例的增加，热水器的CO值呈现增大趋势。

7台燃气热水器在不同比例LNG下基本上没有出现CO排放超标问题，均在国标允许的范围之内，仅品牌2-A在80%LNG和100%LNG时出现了较为显著的CO超标现象。

另外，比较图4的效率曲线发现CO排放与效率曲线呈现相反的变化趋势，效率高的热水器CO排放量较低。LNG比例越高，燃气热值越大，燃烧所需理论空气越多，但由于空气供给量的限制，燃烧不完全程度增大，导致CO排放增加。同时火焰的长短也发生变化，而火孔到燃烧室出口的距离不变，传热量下降，以致效率下降。

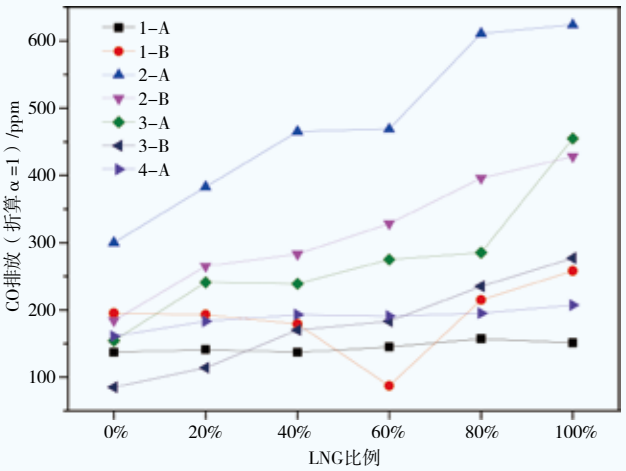

图5 燃气热水器的CO排放变化曲线

5.1.4 NO_X排放情况

NO_X的主要部分为thermal-NO_X，其生成主要受燃烧温度的影响。据资料显示，当温度高于1 800K时NO_X的生成才变得重要。为了说明问题，下面也给出了NO_X的值，处理方法同CO一样。

图6为LNG比例对热水器NO_X排放的影响。NO_X排放随LNG比例的增加呈现无规律的变化趋势，但基本稳定在50×10^{-6}～80×10^{-6}之间。由于热水器的燃烧室体积较小，相对散热强烈[4]，燃烧室内温度较低，NO_X生成量很小。

5.2 结果分析

针对7台热水器，随着气源组分从100%管输气变化到100%LNG，华白数增加，最大变化为6%，此时，

（1）热水器热负荷增加，热效率降低，CO排放增加，NO_X无显著变化；

（2）热负荷变化最大为+4.8%，不超过+5%；但相对设计热负荷，一些热水器的热负荷出现了较大偏差，尤其是热水器2-A和4-A，在几乎所有试验气下热负荷的变化都超出了5%；

（3）热效率不是互换性指标。但是除了3-A和3-B以外，几乎所有热水器在试验气下热效率均不达标，这一点应加以重视；

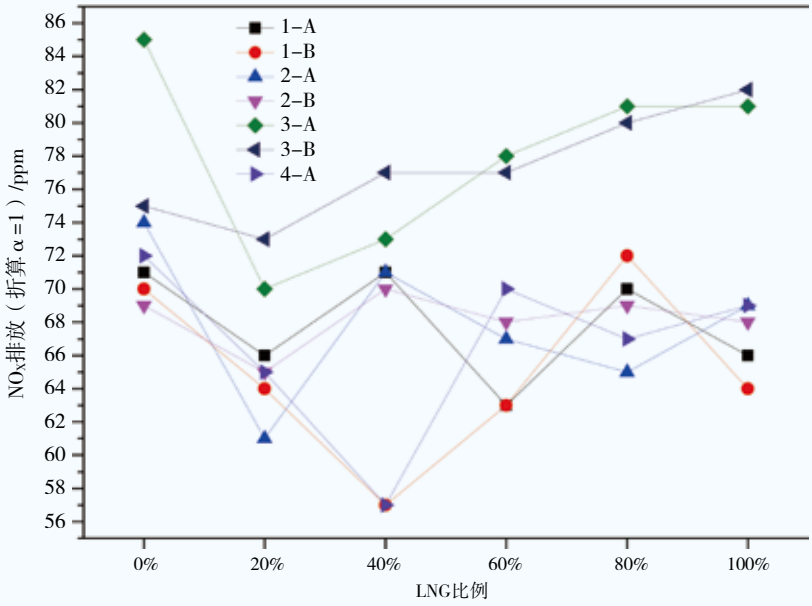

图6 燃气热水器的NO_X排放变化曲线

（4）CO排放基本处于国标允许的范围内，仅2–A在80%和100%LNG时出现超标现象；

（5）热水器实验不同于灶具实验，理论上似可以从观火孔中考察火焰形态，但由于观火孔视野小，无法全面观测，且黄焰受金属挥发影响较大，所以，在实际热水器实验中，燃烧工况无法得以准确观测考量[5]。

6 结论

进口LNG在参数特性上与管输气的显著差别使得管网中气源组分及特性发生了较大程度的波动，为了考察气源波动对接入管网中的家用燃气热水器性能的影响，采用实验室管道气掺混乙烷、氮气模拟上海即将进口的LNG，配制了不同比例LNG与管道气混合气，并进行了掺混气的一系列测试，测试结果表明：

随着LNG掺混比例的增加，热水器热负荷显著增加，一些热水器的热负荷变化会导致用户处的不满；当LNG比例从0%变化到20%时，效率大幅降低，之后随LNG比例增加，效率基本维持不变，部分热水器的效率未达标；CO排放基本处于国标允许的范围之内；NO_X排放在$5\times10^{-5}\sim8\times10^{-5}$之间波动；燃烧工况即火焰稳定性无法准确考量，需完善观测手段；热效率作为强制性指标，但不作为互换性判断指标，但实际操作中应加以考虑，结合能效标准来研究热水器的热工性能响应情况。

参考文献

1 GB/T 13611–2006, 城镇燃气分类和基本特性[S]

2 Gas Research Institute. Evaluating the Range of Interchangeability of Vaporized LNG and Natural Gas[R]., 2003

3 刘彤, 高文学, 王启. 燃具能效标准与节能测试研究[J]. 煤气与热力, 2010; 30（2）: 51–55

4 夏昭知, 伍国福. 燃气热水器 第1版[M]. 重庆大学出版社, 2002

5 GB 6932–2001, 家用燃气快速热水器[S]

6 同济大学, 重庆建筑大学, 哈尔滨建筑大学等. 燃气燃烧与应用 第3版[M]. 中国建筑工业出版社, 2000

7 NGC+ Interchangeability Work Group. White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non–Combustion End Use[R]., 2005

8 何淑静. 上海市多气源天然气互换性问题初探[J]. 城市公用事业, 2009; 23（2）: 14–18

9 任兴超, 吴之觐, 戴万能. LNG与管输天然气互换性的实验研究[J]. 煤气与热力, 2010,; 30（7）: 53–56