

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812017

家用燃气灶具的 CO 排放预测与界限气设定

段鹏飞^{1,2}, 秦朝葵^{1,2}, 陈志光^{1,2}

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 燃气工程研究所, 上海 201804)

摘 要: 同一管网引入不同来源的天然气已成为规划建设阶段的常见做法. 不同天然气气源的组成可能存在差异, 为了解不同燃气组成对民用燃烧灶具的 CO 排放的影响, 避免大量终端用户的室内环境品质受到损害, 对民用灶具的 CO 排放进行了实验研究. 首先考察了中国 12T 天然气组成的分布并利用华白数相等与碳氢原子数守恒原则, 确立了 6 组原组成天然气以及对应的三组分天然气, 并测试灶具在每组燃气运行下的 CO 排放情况; 对原组成天然气以及对应的三组分天然气的 CO 排放差异进行了讨论; 在灶具上测试了以华白数和 *PN* 数为变化依据的不同三组分天然气. 实验表明: 三组分天然气的 CO 排放与原组成天然气等价; 气质参数华白数和 *PN* 数可以描述灶具在不同燃气组成下运行时的 CO 变化规律; 在 *PN-W* 图上存在等 CO 排放线簇, 可用于家用灶具使用不同组成燃气的 CO 排放预测, 并以此为依据提出了一种确立 CO 排放界限气的思路. 对保障室内环境空气品质以及输配管网气源质量管理, 都具有现实意义和实用价值.

关键词: 家用灶; 多气源; 实验研究; CO 排放预测; 界限气; 气质管理

中图分类号: TU996 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0194-07

Prediction on the CO emission of Chinese gas cooker and limit gas setting

DUAN Pengfei^{1,2}, QIN Chaokui^{1,2}, CHEN Zhiguang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. HVAC & Gas Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: It has become a common practice to connect the gas distribution system with various gas sources. However, constituent difference of natural gas may have negative effectgs on the end users. To understand the influence of different gas constituents on the CO emission of gas cooker and avoid the damage to the indoor air quality of a large number of end-users, an experimental study on the CO emissions of gas cooker was carried out. First, the distribution of 12T natural gas constituent in China was investigated, and six groups of the original natural gas and the corresponding three-component gas were prepared by using the principle of equal Wobbe number and the conservation of hydrocarbon atom number. The CO emission of the gas cooker under each set was also tested. Then the difference between be CO emission of the original natural gas and that of the three-component gas was discussed. Different three-component gases based on Wobbe number and PN number were tested on the cooker. Results show that the CO emission of the three-component gas was equivalent to that of the original natural gas. The gas quality parameters, Wobbe number, and PN number could be used to describe the variation of CO emission of gas cookers with different gas constituents. A series of CO isoline were revealed on the PN-W diagram, which can be used to predict the CO emission of gas cooker with different gas constituents. A method to establish the CO emission limit was put forward based on the diagram. The work of this paper is of practical significance and value for ensurance indoor air quality and gas source quality management of distribution network.

Keywords: Chinese gas cooker; various gas sources; experimental research; CO emission prediction; limit gas; gas quality management

进入 21 世纪, 中国天然气工业开始迅猛发展. 2007 年, 中国天然气消费量为 711 亿 m³, 2017 年, 消费量猛增至 2 404 亿 m³, 10 年间年均增长率达 13% 以上^[1]. 据预测, 到 2025 年天然气的总供应量将达到 6 000 亿 m³^[2].

为提高燃气供应的可靠性, 中国许多省、市在资源允许情况下均引入多种气源, 多气源供气的格局逐渐形成. 例如, 广东省已规划建设的 3 200 km 省级管网, 引入了陆地天然气、近海天然气和 LNG, 13 个气源联合供气; 上海现有 5 个气源, 北京引入 6 个气源. 不同气源之间存在组成的差异, 同一燃烧设备使用不同燃气组成时, 是否影响燃烧的稳定性以及影响程度, 目前尚未开展过系统的研究.

在民用燃具方面, 家用燃气灶(简称家用灶)已

收稿日期: 2018-12-06

作者简介: 段鹏飞(1992—), 男, 博士研究生;

秦朝葵(1968—), 男, 博士生导师

通信作者: 秦朝葵, chkqin@tongji.edu.cn

成为居民生活中使用数量最多的燃烧设备,年产销量在 3 000 万台左右^[3]. GB16410—2007《家用燃气灶具》^[4]规定:家用灶功率在 3.5 kW 以上,其热效率与 CO 排放应同时满足一定的指标要求. 当天然气组成发生变化时,CO 如何变化,对于灶具的安全设计和入网气质的管理均非常重要.

燃烧设备的 CO 排放规律随气源组成的变化属于“燃气互换性”研究. 欧美各研究机构通过大量的实验确立了不少预测方法,如 AGA 指数法、Weaver 指数法、Dutton 图形法、Delbourg 图形法等. 这些预测方法均是针对当时的燃烧方式、燃烧器结构以及可能出现的气源而开展的^[5],并且随着气源的变化、燃烧器结构的改变而不断通过实验来调整. 文献[6-7]对中国燃气互换性问题做了综述,提出了研究方向,并对燃气互换性与燃气质管理、燃气分类以及燃具适用性之间的关系进行了阐述. 文献[8-10]关注气源的离焰、回火等问题,应用 AGA 指数对中国各地区气源的情况进行互换指数计算. 张杨竣等^[11]通过在基准燃烧器上的实验对 AGA 方法中的参数范围进行了修改,增强了其预测离焰、回火问题的准确性. 王启等^[12]通过实验,得到了 i-C₄H₁₂、N₂ 和 H₂ 3 种组分燃气以华白数、燃烧势作为表征燃具适应性的燃烧特性指数的结论. 国内现有的研究主要是解决家用灶的离焰和回火问题,并没有能预测

家用灶在不同燃气组成下 CO 排放的方法^[13]. 本文参考 Dutton 图形法的研究路线^[14],选用一台市场上典型家用灶,使用 6 组具有代表性的天然气及其三组分燃气,测试在不同功率和不同一次空气系数下的 CO 排放情况,确立了 CH₄、C₃H₈、N₂ 三组分燃气在 CO 排放方面与原组成天然气的等价性. 这将简化传统的、耗时费力的燃气配气工作. 同时提供了 *PN* 数这一基于燃气组成的燃气质参数来代替传统的燃烧势. 另外,测试了在某一初始状态下,使用不同三组分天然气的 CO 排放情况,得到了目标家用灶在不同三组分燃气下的 CO 排放规律以及等 CO 排放线簇,可用于家用灶的 CO 排放预测,根据管理部门设定的允许值,可明确该种天然气可否进入天然气管网. 最后,提出了一种寻找 CO 界限气的思路,可为后续的气质管理工作提供参考依据.

1 研 究

1.1 实验测试用气

考察中国天然气气源组分,选出 6 种具有代表性的天然气气源,其华白数和 *PN* 数范围可涵盖中国天然气气源. 其中 *PN* 为三组分燃气中的丙烷与氮气的体积分数之和. 根据 Dutton 法,分别计算出其等价三组分燃气,见表 1. 其中原组成天然气的编号为 O,对应三组分燃气的编号为 T.

表 1 测试用天然气及对应的三组分燃气

Tab. 1 Constituents of the test gas and the corresponding three-component gas

编号	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	<i>PN</i> /%	华白数 <i>W</i> /(MJ·Nm ⁻³)
PNG	93.67	4.24	0.42	0.06	0.07	0.03	0.48	1.03	—	50.494
12T-O	100.00	0	0	0	0	0	0	0	0	50.724
O1	88.93	8.47	0.54	0.10	0.09	0.04	0.67	1.15	—	51.016
T1	92.73	0	5.18	0	0	0	0	2.09	7.27	51.001
O2	83.76	13.61	0.50	0.08	0.09	0.04	0.71	1.22	—	51.745
T2	90.26	0	7.60	0	0	0	0	2.14	9.74	51.756
O3	93.67	4.24	0.42	0.06	0.07	0.03	0.48	1.03	—	50.494
T3	95.58	0	2.74	0	0	0	0	1.68	4.42	50.469
O4	93.82	2.06	0.34	0.05	0.07	0.03	0.73	2.90	—	48.620
T4	94.5	0	1.61	0	0	0	0	3.89	5.50	48.619
O5	91.07	2.54	0.42	0.06	0.08	0.03	0.67	5.12	—	47.350
T5	92.04	0	1.95	0	0	0	0	6.01	7.96	47.344
O6	86.32	5.82	0.41	0.06	0.08	0.03	0.70	6.59	—	46.961
T6	88.92	0	3.58	0	0	0	0	7.50	11.08	46.968

1.2 实验台架

测试台架参考 GB16410—2007《家用燃气灶

具》^[4]设计,包括连续自动配气系统、烟气分析系统和燃具燃烧系统 3 部分,如图 1 所示.

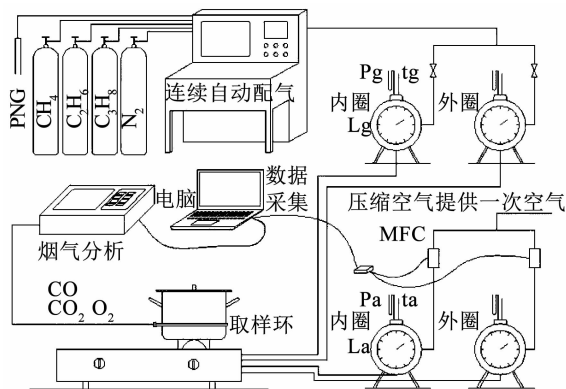


图 1 测试台架系统示意

Fig. 1 Schematic illustration of test system

连续自动配气系统由 5 路质量流量计 (MFC, S48 300/HMT) 组成, 分别连接中压管道天然气 (PNG) 和单组分高压气体钢瓶. 需配制目标燃气组成、流量等可通过电脑设定和控制. 配置原组成天然气时, 向 PNG 中掺混 C_2H_6 、 C_3H_8 、 N_2 等组分获得.

燃具燃烧系统包含一台测试灶具, 选用市场上的一款嵌入式双眼灶 (樱花 SCG-6530s), 额定热负荷均为 3.8 kW. 右侧燃烧器的引射器改装为强制混合装置, 如图 2 所示. 一次空气由压缩空气提供, 质量流量计 (MFC, S48 300/HMT) 和湿式燃气表可协同工作, 调整并计量一次空气流量. 燃烧器分为内外圈, 其燃气流量和一次空气流量均可单独控制和计量. 三组分燃气与原组成天然气的等价性测试在右侧燃烧器上完成. 左侧的大气式燃烧器结构保持不变, 一次空气由引射器提供. 在某个初始一次空气系数下, 燃气组成发生变化时, 引射器会自动调整到另一工作状态点. 左侧燃烧器用于测试并探讨燃具的等 CO 排放规律.

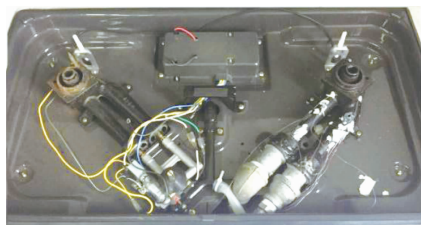


图 2 测试燃具 (左侧为自然引射, 右侧改装为强制混合)

Fig. 2 Test burners (left: injectors; right: modified forced-mixed burner)

烟气分析系统由烟气分析仪 (Agilent GC7890) 以及负责数据采集的电脑组成, 烟气分析仪中装有真空泵, 可通过取样环抽取烟气, 分析烟气中的 CO 、 CO_2 和 O_2 的浓度.

1.3 测试流程

1.3.1 三组分燃气与原组成天然气的 CO 排放等价性测试

GB13611—2006《城镇燃气分类和基本特性》^[15] 规定了天然气的华白数波动范围 (12T 天然气的华白数的变化范围限制了燃具的热负荷的变化范围, 测试时, 燃具的热负荷由 90% ~ 110% 的额定热负荷调整). 测试时, 燃具的一次空气系数范围是 0.40 ~ 0.60. 一次空气系数、热负荷的变化范围涵盖家用灶可能的工况点. 另外, 测试过程中, 外圈、内圈的燃气流量始终保持为 1.0: 3.5, 该比例为二者的引射器喷嘴面积之比.

首先设置连续自动配气系统, 设定某一热负荷输入. 同时, 选定初始一次空气系数, 计算一次空气量. 内外圈的一次空气流量通过 MFC 调整并通过湿式表计量. 待燃烧稳定后, 烟气分析仪以 1 Hz 的采样频率持续采样 10 min. 之后, 改变一次空气系数, 重新设定 MFC 到下一个工况点, 重复 CO 测试. 最后, 改变热负荷, 重复上述测试步骤. 即可得到在一系列热负荷下, CO 排放随一次空气系数变化的值.

1.3.2 在燃具未经改装的燃烧器上进行等 CO 线测试

首先使用 12T-0 基准气进行初始状态的调节. 保持灶前压力为 2 kPa, 使燃烧器在额定热负荷下 (3.8 kW) 工作; 调整一次空气, 使火焰处于合适的形态, 测试记录 CO 等烟气组分. 然后使用不同的三组分燃气, 保持灶前压力不变, 测试记录对应的烟气组分. 为考察华白数 W 和 PN 数对 CO 排放的影响, 输入的测试三组分燃气以华白数 W 、 PN 数相等为原则.

2 结果与讨论

2.1 三组分燃气与原组成天然气在 CO 排放上的等价性测试

家用灶具的引射器可在不同的状态点下工作, 因此评价三组分燃气与原组成天然气在 CO 排放上的等价性时, 应当寻求一种方法可以综合考虑热负荷与一次空气系数这两个工作性能参数的影响.

图 3 为基准气 (12T-0, 纯甲烷) 在若干热负荷下的 CO 排放与一次空气系数 α' 的关系, 显然, CO 的排放随着一次空气系数增大而迅速减小. 对比了几种函数形式的 R^2 值和 RMSE 值, 可以发现在保证回归效果最好的情况下, 使用 " $\ln(E_{CO}) = u_1 \times (\alpha')^2 + u_2 \times (\alpha') + u_3$ " 这一形式来描述是最简便的. 图 4 给出了灶具在燃用 O1、O2 及其对应的三组分燃气 T1、T2 时, 测得的 CO 排放随一次空气系数和热负荷的变化情况. 可以看到, 在相同的一次空气系数和

热负荷下,三组分燃气的 CO 排放与原组成天然气非常接近.相似地,CO 排放的对数值与热负荷之间成二次函数关系.考察其他组成燃气的排放规律,均可得到相似的结论.

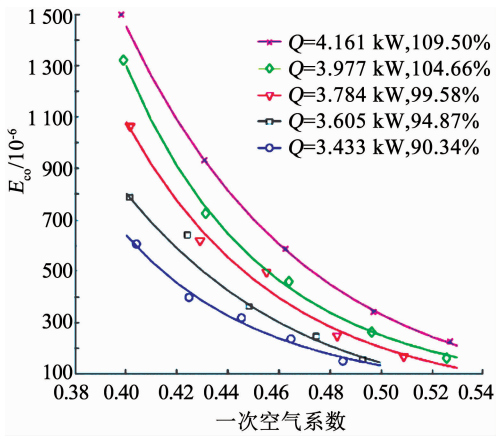
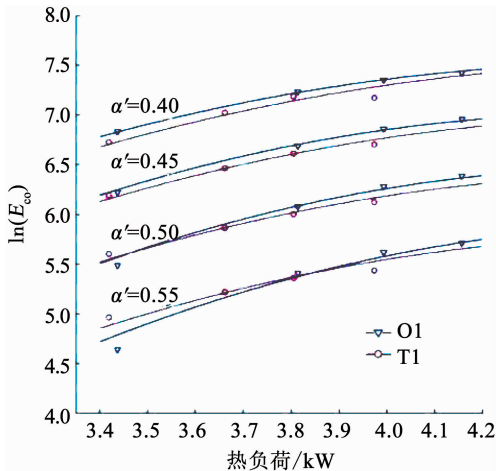
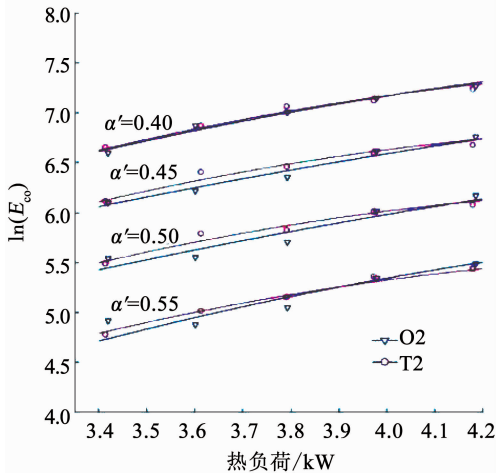


图 3 不同一次空气系数下的家用灶 CO 排放 (12T-0)

Fig. 3 CO emission of gas cooker under various primary air coefficients (12T-0)



(a)O1/T1 原组成燃气与其三组分燃气



(b) O2/T2 原组成燃气与其三组分燃气

图 4 不同热负荷下的家用灶 CO 排放

Fig. 4 CO emission of gas cooker under various heat inputs

为考察在不同工况下,三组分燃气的 CO 排放与原组成天然气 CO 排放的等价程度,即三组分燃气的 CO 排放多大程度上与原组成燃气等价,并综合上述分析,即灶具 CO 排放的对数值与一次空气系数 α' 和热负荷 Q 均呈二次函数的关系,可构造函数(1)来描述 CO 排放随热负荷、一次空气系数的变化情况.不同燃气的系数矩阵 A 不同,均由函数(1)对原始数据的拟合获得.

若将 E_{CO} 视作一次空气系数和热负荷的函数,定义一个参数 I ,为两个函数差值的绝对值的数学期望,如式(2).明显地,参数 I 的物理意义是两个 E_{CO} 排放曲面之间的平均距离.若 $I < \sigma_0 + \sigma_T$ (σ_0 、 σ_T 分别为原组成 E_{CO} 排放曲面和三组分燃气 E_{CO} 排放曲面的面拟合均方根误差),即可判定三组分燃气的 CO 排放与原组成燃气的 CO 排放等价.表 2 中列出了 6 组原组成和三组分燃气之间的 I 、 σ_0 和 σ_T 的计算值.

$$\ln(E_{CO}) = (Q^2, Q, 1) \begin{pmatrix} A_1 & A_4 & A_7 \\ A_2 & A_5 & A_8 \\ A_3 & A_6 & A_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha'^2 \\ \alpha' \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$
$$I = EV(|(E_{CO}) - (E_{CO,T})|) = \frac{\iint_{\alpha',Q} |E_{CO} - E_{CO,T}| d\alpha' dQ}{\iint_{\alpha',Q} d\alpha' dQ}. \quad (2)$$

式中: E_{CO} 为原组成燃气的烟气中 CO 浓度, 10^{-6} ; $E_{CO,T}$ 为三组分燃气的烟气中 CO 浓度, 10^{-6} ; Q 为家用灶的热负荷, kW; A 为拟合的系数参数; α' 为一次空气系数.

表 2 参数 I 、 σ_0 及 σ_T 的计算值						
Tab. 2 Value of parameter I , σ_0 , and σ_T						
参数	O1/ T1	O2/T2	O3/T3	O4/T4	O5/T5	O6/T6
I	23	33	39	15	38	33
σ_0	52	59	52	34	39	36
σ_T	32	41	41	29	34	72

表 2 中的数据显示,各组测试气的 $I < \sigma_0 + \sigma_T$. 可认为在这台燃具上,根据 12T 天然气在 Dutton 上的范围所选的这 6 组三组分燃气,其 CO 排放与原组成燃气的 CO 排放的等价性良好.因此 12T 天然气均可通过该三组分转换规则,投影到 $PN-W$ 图上.

2.2 等一氧化碳线的测试

在灶具左侧未经改装的燃烧器上,使用 12T-0 基准气、调整一次空气系数;之后保持燃烧器结构不变,通入不同组成的三组分燃气,测试对应的燃烧 CO 排放值,结果见表 3.

表 3 三组分燃气燃烧的 CO 排放测试数据

Tab. 3 Experimental data of CO emission of the tested three-component gases

编号	华白数 / (MJ·Nm ⁻³)	PN/%	CO 测试值/10 ⁻⁶	编号	华白数 / (MJ·Nm ⁻³)	PN/%	CO 测试值/10 ⁻⁶
1	50.724	0	316	13	53.874	14	744
2	50.724	4	332	14	49.344	2	259
3	50.724	8	334	15	49.344	6	262
4	50.724	12	338	16	49.344	10	254
5	51.687	3	384	17	49.344	14	267
6	51.687	6	410	18	47.987	4	199
7	51.687	9	421	19	47.987	8	214
8	51.687	12	429	20	47.987	12	220
9	52.634	6	481	21	46.652	6	137
10	52.634	10	501	22	46.652	10	155
11	52.634	14	530	23	46.652	14	163
12	53.873	10	643				

固定某一华白数,考察 CO 排放随 PN 数变化规律,如图 5 所示,可知随着 PN 数的增大,CO 排放有增加的趋势,可以用一次函数来描述这一关系,即使加入了丙烷成分,但只要不同燃气的华白数相同,那么其 CO 排放近似相等,处在相同的水平上。

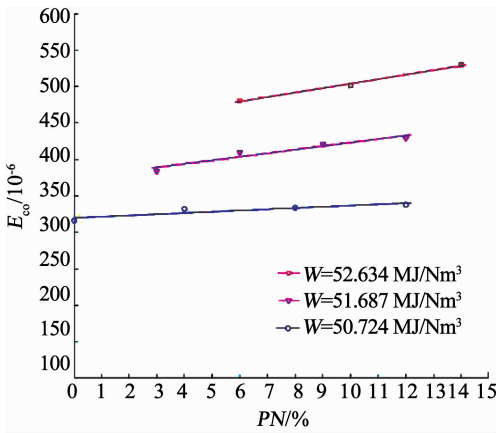


图 5 固定华白数下 CO 排放随 PN 数的变化

Fig. 5 Change of CO emission with PN under constant W

在相同的 PN 数下,考察 CO 排放随着华白数的变化关系,可知两者之间呈现出一种指数的关系,如图 6 所示. 这是因为当燃气的华白数变化时,燃烧器的工作状态点发生了偏移. 当燃烧器在某一组成下工作,转换到另一组成时,燃烧器的功率之比约等于两种燃气组成华白数的正比,其一次空气系数之比约等于两种燃气组成华白数的反比. 图 6 中 CO 排放的变化不仅仅由燃气组成中的化学因素影响,也有当燃气性质改变时,引射器工作状态点改变的物理因素的影响。

综合上述分析,可分别知道灶具 CO 排放与华白数 W 和 PN 数之间的关系,由此通过回归分析构

造函数(3)来描述不同气源的 CO 排放. 令 E_{CO} 为定值,例如 500×10^{-6} ,通过简单的变换,可得到 PN-W 的函数关系,如式(4). 此式为该燃具在不同燃气气源下的等 CO 排放曲线,在此线上的任意一种燃气,在该燃具使用 12T-0 调整后运行时,其 CO 排放均为 500×10^{-6} . 令 E_{CO} 为不同的排放值,可得到一系列等 CO 排放线簇,如图 7 所示。

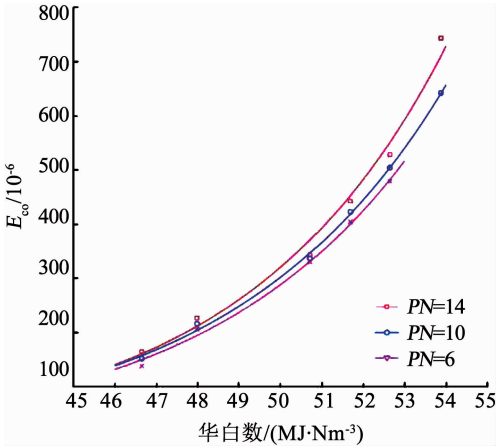


图 6 固定 PN 数下 CO 排放随华白数的变化

Fig. 6 Change of CO emission with W under constant PN number

$$E_{CO} = (a \times PN + b) e^{c \times W} = (1.52 \times 10^{-4} \times PN + 0.01095) e^{0.202 \times W}, \quad (3)$$
$$W = -4.950 \ln(1.52 \times 10^{-4} \times PN + 0.01095) + 30.77. \quad (4)$$

式中:PN 为三组分燃气中的丙烷与氮气的体积分数之和,% ;W 为三组分燃气的华白数, MJ/Nm³; a、b、c 为拟合系数。

为验证上述方法的准确性,在等 CO 线上选取若干点,人为设置一些三组分燃气,计算出各组分体

积分数,输入燃烧器中测试其 CO 排放,见表 4. 从实测 CO 排放与经过该测点的等 CO 线看,等 CO 线簇可以较为准确的预测不同三组分燃气的 CO 排放.

对于经过 12T-0 初始调节的灶具,在其他组成天然气下的 CO 排放可准确地预测.

表 4 验证三组分燃气及其 CO 排放
Tab. 4 Verified three-component gas and the measured CO emission

编号	三组分体积分数/%			华白数 / (MJ·Nm ⁻³)	PN/%	CO 预测值/10 ⁻⁶	CO 实测值/10 ⁻⁶
	CH ₄	C ₃ H ₈	N ₂				
1	87	11. 29	1. 71	53. 193	13	600	617
2	92	7. 31	0. 69	52. 590	8	500	510
3	87	10. 33	2. 67	52. 291	13	500	512
4	95	4. 34	0. 66	51. 675	5	400	399
5	92	6. 16	1. 84	51. 486	8	400	412
6	87	9. 16	3. 84	51. 186	13	400	398
7	95	2. 91	2. 09	50. 251	5	300	313
8	91	5. 30	3. 70	50. 000	9	300	304
9	87	7. 67	5. 33	49. 762	13	300	288
10	96	1. 40	2. 60	49. 413	4	250	254
11	92	3. 79	4. 21	49. 159	8	250	260
12	87	6. 74	6. 26	48. 859	13	250	244

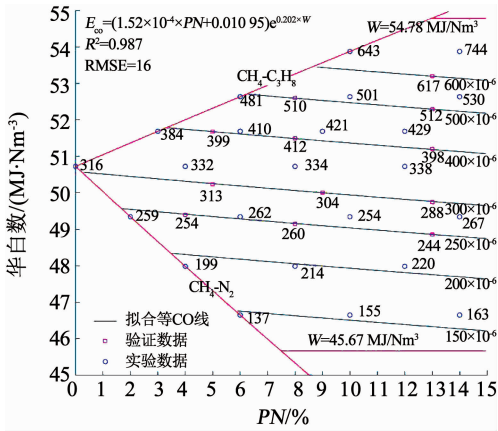


图 7 测试燃具在不同三组分气下的 CO 排放以及等 CO 线图
Fig. 7 CO emission of test burner under various three-component gases and CO isolines

2.3 界限气的确定

GB16410—2007《家用燃气灶具》^[4]规定,燃具的 CO 排放测试使用基准气纯甲烷,在纯甲烷的测试下,CO 排放不超过 500×10^{-6} 即可判定为“合格”,但是这个规定并未考虑到不同气源下的 CO 排放情况. 各个城市管网中的天然气来源复杂,家用灶一般不是燃烧纯甲烷,因此应当在不同的燃气组成下考察家用灶的运行情况,并判定其 CO 排放是否合格. 界限气是根据燃气允许的波动范围配置的标准气体. 应当寻找一种界限气替代纯甲烷气,如果燃具在此界限气下测试 CO 排放合格,那么此燃具燃烧在 12T 天然气范围内的任一燃气时,其 CO 排放

均合格.

由式(3)可知,实验燃具的 CO 排放随着 PN 数的增加,呈线性递增趋势,同时其 CO 排放随着华白数的增加,呈指数递增趋势. 因此可以认为适用于 12T 天然气的燃具,其 CO 排放最差的情况,出现在天然气华白数和 PN 数同时达到最大值的情况. 在 Dutton 图上,做出 12T 天然气的范围,如图 8 所示,该区域内 CO 排放最差的点出现在 M 点,该点对应的燃气即可作为界限气使用. 家用灶使用该点所代表的三组分燃气测试,若 CO 排放合格,那么保持该家用灶结构不变,通入该区域内的其他三组分燃气,

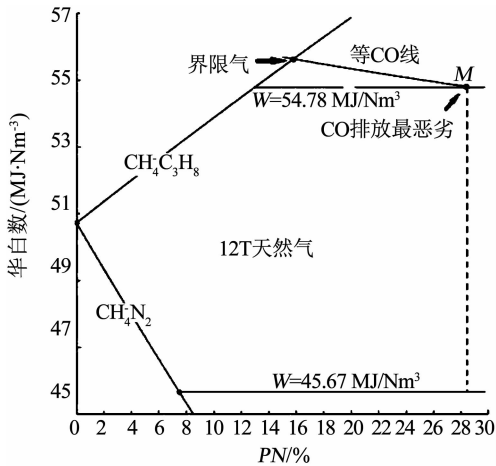


图 8 12T 天然气在 Dutton 图上的范围以及 CO 界限气示意
Fig. 8 12T gas on Dutton diagram and CO limit gas

家用灶的 CO 排放均低于 M 点的 CO 排放. M 点所代表的三组分燃气由 CH_4 、 C_3H_8 以及 N_2 组成, 为了测试时配气方便, 可以进一步简化为 CH_4 和 C_3H_8 两种组分. 即过 M 点, 做等 CO 排放线与 $\text{CH}_4 - \text{C}_3\text{H}_8$ 线交于一点, 该点所代表的二组分燃气的 CO 排放与 M 点相同, 可作为 CO 排放的界限气使用.

需要指出的是, 该界限气的结论是在本文实验用家用灶的某一初始状态下得到的, 也考察了该家用灶在其他初始状态下的 CO 排放情况, 可以得到相同的结论, 即对于该家用灶而言, M 点在 $\text{CH}_4 - \text{C}_3\text{H}_8$ 线上的 CO 排放等价点始终可以作为该家用灶的界限气. 但是对于其他不同结构形式的家用灶, 是否存在相似的结论, 还需进一步的实验与理论研究.

3 结 论

1) 对于某一组成的燃气, 一台家用灶的 CO 排放随着热负荷 Q 和一次空气系数 α' 呈现一种曲面关系; 定义一个参数 I , 以表征该家用灶在两种不同组成燃气下的 CO 排放差异, 即两个曲面之间的平均距离. 通过对比参数 I 与曲面拟合的均方根误差, 可得结论: 在 12T 范围内, 三组分燃气与原组成天然气的 CO 排放等价.

2) 将不同 W 、 PN 的三组分燃气通入家用灶燃烧器, 考察 CO 的变化规律. 对应于某一初始状态点, CO 排放随燃气组成变化的规律可以用函数 $E_{\text{CO}} = (1.52 \times 10^{-4} \times PN + 0.01095) e^{0.202 \times W}$ 来描述. 在 Dutton 图上, 确定的灶具存在对应的等 CO 线簇.

3) 阐述一种寻找 12T 天然气的 CO 排放界限气的思路. 一台家用灶在某一初始状态下使用该界限气进行 CO 排放测试, 如果排放合格, 那么该家用灶在这一初始状态下, 在 12T 天然气的范围内, 使用任何一种燃气, 其 CO 排放均合格.

参考文献

- [1] BP Statistical Review Team. BP statistical review of world energy June 2017[R]. British: British Petroleum, 2017
- [2] 郭焦锋, 高世楫. 中国气体清洁能源发展报告 2014[M]. 北京: 石油工业出版社, 2014
GUO Jiaofeng, GAO Shiji. The 2014 report on the development of China's clean energy-gases[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014
- [3] 秦朝葵, 陈楠楠. 天然气组分对家用灶具污染物排放的影响[J]. 城市燃气, 2015(11): 11
QIN Chaokui, CHEN Nannan. Impact of gas constituents upon pollutant emissions of domestic gas cookers[J]. Urban Gas, 2015(11): 11. DOI:10.3969/j.issn.1671-5152.2015.11.003
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 家用燃气灶具: GB 16410—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
General Administration of Quality Supervision, Inspection and

- Quarantine of PRC. Domestic gas cooking appliances: GB 16410—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007
- [5] HARSHA P T, EDELMAN R B, FRANCE D H. Catalogue of existing interchangeability prediction methods, Final Report-phase II, GRI-80/002[R]. Gas Research Institute, 1980
- [6] 李猷嘉. 论液化天然气与管道天然气的互换性[J]. 城市燃气, 2009, 412(6): 3
LI Youjia. On the gas interchangeability of liquefied natural gas and pipeline natural gas[J]. Urban Gas, 2009, 412(6): 3. DOI:10.3969/j.issn.1671-5152.2009.06.001
- [7] 郭开华, 王冠培, 皇甫立霞, 等. 中国天然气气质规格及互换性标准问题[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 97
GUO Kaihua, WANG Guanpei, HUANGPU Lixia, et al. Gas quality specification and interchangeability standards in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3): 97. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.03.025
- [8] 马晓茜. 天然气燃烧特性及其与其它燃气的互换性分析[J]. 冶金能源, 2001, 20(3): 33
MA Xiaoqian. Analysis on combustion characteristics of natural gas and interchangeability of other fuel gases with natural gas[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2001, 20(3): 33. DOI:10.3969/j.issn.1001-1617.2001.03.010
- [9] 杨庆泉, 苏杰飞. 液化气混空气燃气与天然气的互换性[J]. 上海煤气, 2003(3): 26
YANG Qingquan, SU Jiefei. Interchangeability between LPG-air mixture gas and natural gas[J]. Shanghai Gas, 2003(3): 26. DOI:10.3969/j.issn.1009-4709.2003.03.009
- [10] 罗东晓, 李明. 天然气与人工煤气的快速经济置换[J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 111
LUO Dongxiao, LI Ming. Economic rapid substitution between natural gas and city gas[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 111. DOI:10.3321/j.issn:1000-0976.2005.11.036
- [11] 张杨竣, 秦朝葵, 刘鹏君. LNG 互换性及我国天然气气质管理问题探讨[J]. 石油与天然气化工, 2012, 11(2): 219
ZHANG Yangjun, QIN Chaokui, LIU Pengjun. Discussion on LNG interchangeability and natural gas quality management in China[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2012, 11(2): 219. DOI:10.3969/j.issn.1007-3426.2012.02.021
- [12] 王启, 高文学, 赵自军, 等. 中国燃气互换性研究进展[J]. 煤气与热力, 2013, 33(2): B14
WANG Qi, GAO Wenxue, ZHAO Zijun, et al. Research progress in interchangeability of gases in China[J]. Gas & Heat, 2013, 33(2): B14. DOI:10.3969/j.issn.1000-4416.2013.02.016
- [13] LIN Xueyin, MA Hongting, LIU Chaofan, et al. Experimental research on gas interchangeability indices for domestic fully premixed burners[J]. Fuel, DOI: 10.1016/j.fuel.2018.06.097
- [14] DUTTON B C, SOUCHARD R J. Gas interchangeability: Prediction of incomplete combustion[J]. Journal of the Institute of Energy, 1985, 12: 210
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城镇燃气分类和基本特性: GB/T 13611—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of PRC. Classification and essential property of city gas: GB/T 13611—2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006

(编辑 张 红)