

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2015.11.003

# 天然气组分对家用灶具污染物排放的影响

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 秦朝葵 陈楠楠

**摘 要:** 不同气源的天然气接入同一管网系统, 改善供应可靠性的同时, 带来燃烧特性差别的问题。家用灶具数量庞大, 当天然气组分变化时, CO、NO<sub>x</sub>等污染物排放量若出现超标情况, 因不会像离焰、吹熄一样可肉眼发现, 将构成潜在的长期危害且造成环境污染。为研究气源组分变化而灶具不进行任何调整的情况下灶具的排放, 作者选取17台样本燃气灶(其中16台为嵌入式灶, 1台为台式灶), 测试了10种不同组分的天然气及12T-0下的CO、NO<sub>x</sub>排放, 发现同一灶具在不同组分天然气下CO排放差别较大, 并指出: 实验研究天然气组分变化导致的污染物排放问题是互换性研究的重点之一且对促进天然气的高效与安全使用、规范气质管理具有重要意义。

**关键词:** 互换性 CO NO<sub>x</sub>排放 家用燃气灶 不同组分天然气 安全

## Impact of Gas Constituents upon Pollutant Emissions of Domestic Gas Cookers

School of mechanical engineering, TONGJI University Qin Chaokui, Chen Nannan

**Abstract:** With natural gases from different sources being introduced into the same network, supply security would be improved while difference in combustion characteristics shows up. If CO/NO<sub>x</sub> emissions from huge amounts of domestic gas cookers increase as a result of variable gas constituents, long-term hazard and environmental pollution may be resulted in since it is quite difficult to observe by naked eyes as with lift or blow-out. To investigate the CO/NO<sub>x</sub> emissions of domestic gas cookers without any adjustment under variable gas constituents, 10 kinds of natural gases were input into 17 sets of sample gas cookers (16 sets of embedded type and 1 set of desktop type) to evaluate CO/NO<sub>x</sub> emissions. The results show that CO/NO<sub>x</sub> emissions from the same gas cooker fueled with different gases vary dramatically. It was concluded that pollutant emissions resulting from changing gas constituents should be an important part of gas interchangeability research. The research in this field would be helpful to safe and efficient utilization of gas and can promote gas quality management as well.

**Keywords:** Interchangeability CO/NO<sub>x</sub> emissions Domestic gas cooker variable constituent of gases safety

随着天然气工业快速发展，为了改善气源供应的稳定性与可靠性，拓展气源采购范围、降低采购成本，国内大型输气管网（如省级主干网络）越来越多地采取多气源供应格局。由于天然气产地及生产工艺的不同，各气源间（尤其是LNG和管输天然气PNG）的组分与燃烧特性参数存在较大差异。在各种应用领域的终端设备结构形式各异，对组分变化的适应能力差别很大，导致天然气互换性问题。其中，家用灶数量庞大，其污染物排放随着天然气组分的变化规律尚处于研究阶段。设计灶具时，常选择某种燃气作为基准气进行设计，并对其工作状态进行调节，使灶具在设计气情况下达到最佳燃烧工况；当气源组分发生变化时，灶具的工作性能会发生相应的变化，CO、NO<sub>x</sub>等污染物排放量若出现超标情况，因不会像离焰、吹熄一样可肉眼发现，将对人体构成潜在的长期危害同时会污染环境。因此，实验研究天然气组分变化引起的CO、NO<sub>x</sub>等问题，是互换性研究的重点之一，且对

促进我国天然气的高效与安全使用、规范气质管理具有重要意义。

## 1 实验研究CO等污染物排放的必要性

### 1.1 气源多样性

我国现已进入天然气快速发展阶段，其标志一是消费快速增长，二是气源日益多样化、组分变化范围加大。2003年~2013年我国天然气产量和消费量如图1<sup>[1]</sup>所示。从2003年始，产量和消费量呈快速增长趋势。截至2013年，我国天然气产量达到1 171亿m<sup>3</sup>，比2012年增长9.5%；天然气消费量达到1 616亿m<sup>3</sup>，比2012年增长10.8%。随着我国天然气需求量的增大，LNG作为一种重要的城市气源，进口量亦逐年增加；表1列出了2013年LNG贸易情况，产地集中在卡塔尔和澳大利亚，由于产地、生产工艺等因素，LNG气质组分、燃烧特性等存在一定差异<sup>[1]</sup>。

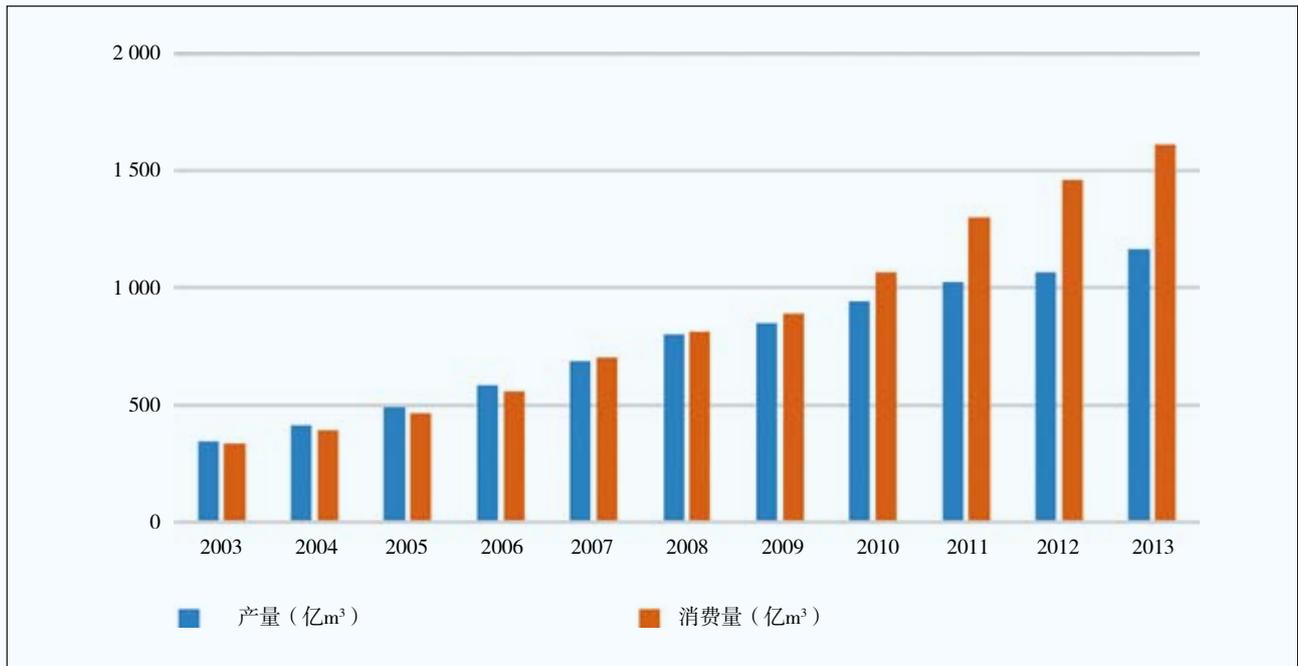


图1 2003年~2013年我国天然气生产与消费情况

表1 2013年我国LNG进口情况 (亿m<sup>3</sup>)

特立尼达和多巴哥	欧洲	卡塔尔	赤道几内亚	尼日利亚	澳大利亚	也门	阿尔及利亚	安哥拉	印度尼西亚	马来西亚	埃及	进口总额
1	1	92	5	5	48	15	1	1	33	36	6	245

从改善供应可靠性的角度,目前全国大部分省市均接入多种气源。以广东为例,已规划的3 200km省级管网,覆盖全省21个地级以上城市,形成海上天然气、陆地天然气、LNG三大种类九大气源联供的局面,表3中列举了各气源组分,可看出组分与燃烧特性参数存在较大差异。

## 1.2 家用灶具应用现状

在我国,家用燃气灶是数量最多的燃烧设备,散布于千家万户。图2示出了2006年~2014年家用燃气灶的年度产量<sup>[2]</sup>。通常,家用燃气灶在安装时经专业人员一次调整后,不再进行调整;而任何燃具都是按一定的燃气成分设计的,当燃气成分发生变化而导致其燃烧特性发生变化时,燃具的热负荷、一次空气系数、燃烧稳定性、火焰结构、烟气中的CO含量等性能就会改变。这些燃具对气质变化的响应,可能会出现危及人身安全的情况。

## 2 民用灶具CO等排放预测方法的研究现状

### 2.1 燃气互换性预测方法中关于CO排放指数的研究

针对燃气互换性的预测,国外已经形成了一些普遍接受的技术方法。这些预测方法可以归类为:单一指数法、多指数法和图形法。单一指数法包括:Wobbe指数法、Willen指数法、Knoy指数法、Schuster指数法和AGA“C”指数法等;多指数法包括:AGA指

数法和Weaver指数法等;图形法包括:Delbourg图形法、Dutton图形法、Gilbert-Prigg图形法、Holmqvist图形法和Vander Linden图形法等。作为互换性研究的重点之一,燃气互换性的预测方法中包含各国针对不同燃气组分下不完全燃烧即CO排放作出的一系列研究。

我国在民用燃具互换性的研究中,常借鉴Weaver指数法和Dutton图形法,下面将详细介绍两种方法中关于CO排放的预测指数。

1951年Elmer R. Weaver基于AGA实验数据,对一次空气系数和其他参数(如火焰速度和化学组分)的变化进行经验关联后提出Weaver指数法,采用六个指数来描述热负荷、一次空气系数、回火、脱火、黄焰和不完全燃烧。部分由理论推导而得,部分从以前的实验研究而来。研究气种主要是CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、CO、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>、C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、苯、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>的多组分混合气体,来代表各种天然气、各种人工煤气;研究对象为扩散式或大气式燃烧的民用燃烧器。Weaver在分析AGA实验数据的过程中发现,引用Kony提出的火焰速度系数 $S_f$ ,可以对离焰、回火等燃烧现象进行数学解释。Weaver提出:离焰、回火发生时的一次空气系数和火焰传播速度关系,可以用一种简单的线性关系表示。结合AGA研究测试数据,将所有离焰和回火测试结果绘制在 $S_{fs}/S_{fa}-J_A$ 坐标图上,根据测试结果,定义出允许互换的离焰和回火极限值,便可用一线性关系公式对这一极限关系进行描

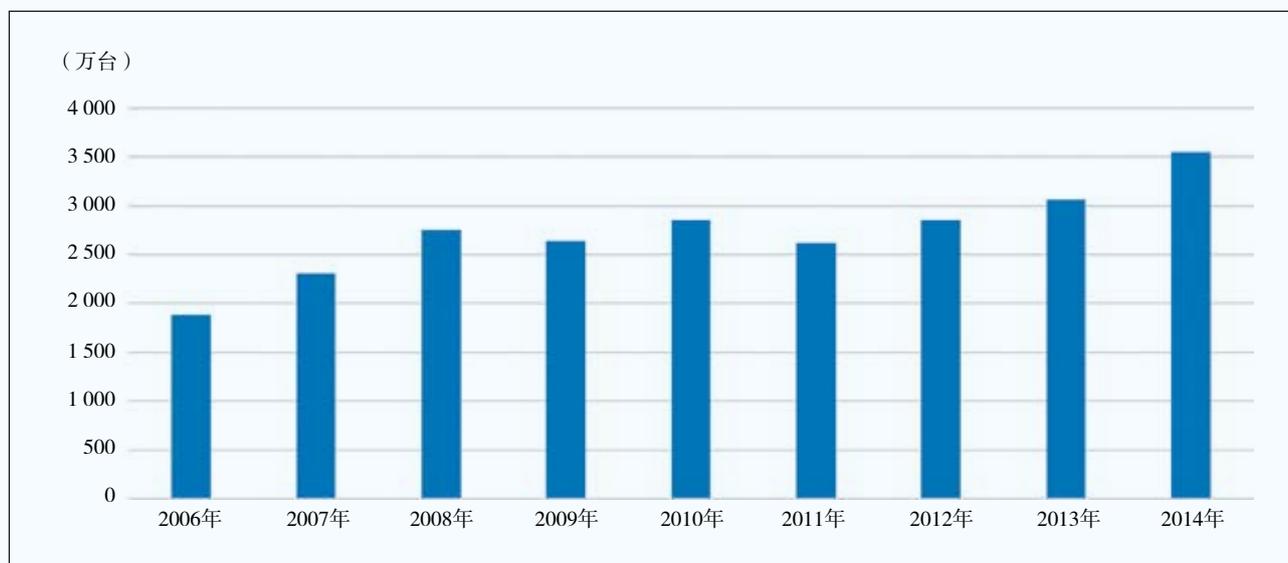


图2 2006年~2014年我国家用燃气灶产量

述。同理，Weaver通过分析AGA黄焰和不完全燃烧测试数据，分别引入了与积碳相关的参数N和碳氢比R两个参数描述黄焰和不完全燃烧。并将各气源黄焰和不完全燃烧观测结果，分别绘制于 $N-J_A$ 和 $J_A-R_s/R_a$ 坐标图上，发现两种坐标图上均会出现某一极限边界，用以区分黄焰的气源与未出现黄焰的气源，以及不完全燃烧问题的气源和正常燃烧气源。且两者均可以用一线性关系对这一极限线进行拟合，通过实验数据处理可分别拟合出黄焰和不完全燃烧指数计算公式<sup>[3]</sup>。其中，不完全燃烧指数：

$$J_I = \frac{V_{0s}\sqrt{S_a}}{V_{0a}\sqrt{S_s}} - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634$$

$V_{0s}$ ,  $V_{0a}$  分别为置换气与基准气的理论空气量， $\text{Nm}^3/\text{Nm}$

$S_s$ ,  $S_a$  分别为置换气与基准气的相对密度

$R_s$ ,  $R_a$  分别为置换气与基准气中氢原子数与碳氢化合物中碳原子数的比值

1978年，Dutton提出根据燃气组分预测互换范围的方法，将天然气划分为4种当量组分( $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2$ )。针对不同燃气组分下CO排放的预测，Dutton提出不完全燃烧因子 $ICF$ ，来表示CO排放的平均变化。在实验过程中，Dutton以8台快速式热水器为研究对象，不完全燃烧因子由以2为底的对数形式表示，即按照CO排放与华白数呈对数关系，华白数每升高 $1.5\text{MJ}/\text{m}^3$ ，CO翻倍为基准。实验分为两阶段进行，首先，用一系列 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2$ 混合气进行测试， $\text{C}_3\text{H}_8$ 变化范围0%~50%， $\text{N}_2$ 为0%~30%， $\text{H}_2$ 为0%~40%。对每种混合气体确定出 $ICF$ 值，其定义为：在所考察的100%~120%热负荷范围内，基准气与测试气的 $\text{CO}/\text{CO}_2$ 差值的线性分离度。并从结果中拟合出计算公式，将不完全燃烧因子 $ICF$ 与燃气组分、华白数关联起来。之后，进行27种混合物的实验测试，含有 $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 或 $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ，整理四组分的“当量”，最后确定不完全燃气因子 $ICF$ 可使用如下方程计算： $ICF = [(WN - 50.73 + 0.03PN) / 1.56] - 0.01H$ ，并以华白数为纵坐标、 $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$ 摩尔体积百分比（定义为 $PN$ 数）为横坐标，依据方程绘出等CO线，作为整体燃气互换性的一部分，英国燃气安全管理规程要求不完全燃气因子 $ICF$ 不大于0.48。随后Dutton用相同的实验方法，以多孔燃烧器为实验对象确定等离焰指数线，

以辐射燃气炉为对象确定出等结碳线，结合英国相关标准建立燃气互换性预测图<sup>[4]~[6]</sup>。

必须说明的是，国外各种互换性预测方法的研究对象均是本国的典型燃烧器，如AGA和Weaver指数法，所选燃烧器均是美国当时较常用的燃烧器类型（图3），AGA所设计的precision burner同样也是根据当时的燃烧器设计参数制作；又如Dutton图形法测试不完全燃烧所用的三组燃烧器，同样代表了当时英国的燃烧器水平。我国燃气互换性研究则始于上世纪80年代。1985年，夏昭知<sup>[7]</sup>等人对第一族燃气的互换性进行了研究，给出了针对第一族燃气的可互换性区域图。随着天然气大量应用于各个领域，天然气与人工煤气、液化石油气、焦炉煤气以及LNG等燃气的互换性问题再次被重视。李猷嘉<sup>[8]</sup>等对我国燃气互换性问题的研究方向提供了思路，并对燃气互换性与燃气气质管理、燃气分类以及燃具适应性等问题的关系进行了理论阐述，提出了目前我国互换性研究的不足和缺陷，但未形成CO、NO<sub>x</sub>等污染物排放的预测与评价体系。



图3 AGA研究用的燃烧器

## 2.2 民用灶具的CO、NO<sub>x</sub>排放研究

Yung-Chang Ko, Ta-Hui Lin<sup>[9]</sup>等指出燃烧器设计的目的是确保燃料和适量的空气充分混合；点火装置可控且可靠；火焰形态和结构稳定；燃烧器自身安全。目前存在的设计中较重视前两点。他们在同一台燃气灶上用不同组分低热值的天然气实验研究了五种参数（燃气组分、一次空气系数、燃气流量、燃气供应压力、支架高度）对灶具热效率和CO排放的影响。结果表明：通过考虑CO的排放标准，热效率和CO排放量之间的平衡应被量化；用高热值天然气替代低热值天然气时，通过调整燃气压力，一次空气系

数,热输入和支架高度可以改善燃烧特性。

Keeman Lee, Jong-Minkim deng<sup>[10]</sup>等研究了不同组分燃气对民用燃烧器之燃烧特性的影响。研究选取家用灶和冷凝式锅炉作为部分预混和全预混的代表,通过观察来测定包括不完全燃烧和离焰特性在内的燃烧特性之上下限,进而用SG和WI表述燃气互换的适用性。结果表明:当火焰稳定时,CO和NO<sub>x</sub>的浓度随着SG和WI的增加而增加;特别地,当WI在52.0MJ/Nm<sup>3</sup>~53.0MJ/Nm<sup>3</sup>时,离焰特性发生变化。对于燃气灶,基准气的CO和NO<sub>x</sub>的浓度分别为173ppm和74ppm;对于冷凝炉,基准气的CO和NO<sub>x</sub>的浓度分别为175ppm和35ppm。相应地,WI为53.0MJ/Nm<sup>3</sup>可取为燃气互换中离焰特性的下限;对于上限值,不同结构的燃烧器,CO和NO<sub>x</sub>的浓度变化较大。

Shuhn-Shyurng Hou, Chien-Ying Lee<sup>[11]</sup>等实验研究在民用燃气灶中5种参数包括旋流火、支架高度,一次空气系数,燃气流量以及局部稳焰器对热效率和CO排放的影响。与常规的径向流燃气灶相比,旋流燃气灶的热效率较高、CO排放量略高,因为燃烧产物在锅底附近停留的时间延长;随着支架高度的增加,火焰冲击锅底减少熄火,CO排放进而减少;然而支架较高时,火焰和燃气在接触到锅底之前与周围空气混合,很大程度上被冷却,因此热交换的温度梯度降低,进而导致热效率的降低;随着燃气流量的增加,热效率降低,CO排放量增加;随着一次空气系数的增大,CO排放量减少,热效率几乎不受影响。另外,稳焰器有助于提高热效率。带有稳焰器的旋流燃气灶热效率比常规径向流燃气灶效率高12%

LI<sup>[12]</sup>等和Mishra<sup>[13]</sup>等讨论了当雷诺数、一次空气系数、火孔距锅底高度、喷嘴间距及入燃气流量等发生变化时,对CO排放量的影响。Makmool<sup>[14]</sup>等利用粒子图像测速技术对民用灶具的燃烧性能进行了分析,并以此为基础讨论了不同因素对民用灶具CO排放量和热效率的影响,并提出了相应的优化建议。

总的来说,从天然气设备的数量来看,民用燃气灶是最多的,导致后果的补偿成本也是最高的,一直以来民用灶具是各国互换性研究的起点和重点,CO、NO<sub>x</sub>等污染物排放是国外考虑组分变化影响时的重中之重,但我国尚未形成CO、NO<sub>x</sub>等污染物排放随天然气组分变化的预测与评价体系。

### 3 实验过程及分析

为研究气源组分变化而灶具不进行任何调整的情况下,灶具的性能变化,笔者进行了家用燃气灶的测试分析。试验用的样本燃气灶数量为17台,其中16台为嵌入式灶,1台为台式灶,包括10个品牌、5种火孔形式,如表2。试验过程中采用广东省天然气管网中10种不同组分天然气及12T-0作为气源,详细组分如表3所示。

表4和表5分别列出了17台初始合格的灶具在11种组分下的CO和NO<sub>x</sub>排放情况。

表4灰色部分表示当气源发生变化时,CO排放剧烈变化且超过国标规定的500ppm。

在国标GB16410-2007中仅指出需在热效率测试过程中同时测量CO、NO<sub>x</sub>排放量,但与热效率测试一样,并未指明使用何种组分的气体;因此,基准气的选择与初始状态点的调节格外重要。采用粤西LNG2这种介于贫气、富气之间且接近于富气的基准气是本文采用的方法,从实际的效果看,能够比较好地反映灶具的性能变化。

表2 试验灶具样本品牌及结构形式

品牌	名称	火孔及灶具结构形式
A	A1	圆火孔嵌入式
	A2	旋转条缝嵌入式
C	C1	方火孔嵌入式
E	E1	红外嵌入式
F	F1	圆火孔+旋缝嵌入式
	F2	圆火孔+旋缝嵌入式
	F3	旋转条缝嵌入式
G	G1	旋缝台式
H	H1	旋转条缝嵌入式
J	J1	圆火孔嵌入式
	J2	旋转条缝嵌入式
L	L1	旋转条缝嵌入式
	L2	旋转条缝嵌入式
M	M1	内圆火孔嵌入式
	M2	旋转条缝嵌入式
N	N1	圆火孔嵌入式
	N2	旋转条缝嵌入式

表3 试验配气方案

组分	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>	Ws
西气二线	92.67	3.96	0.26	0.36	0.02	0	1.89	0	0.86	49.34
川气	96.96	0.31	0.09	0.0020	0.0005	0	2.01	0	0.63	48.52
惠州番禺	86.00	9.15	0.27	0.06	0.01	0	3.69	0	0.82	48.56
大鹏1期	86.54	8.55	2.97	1.22	1.11	0	0.06	0	0.65	53.12
粤东LNG	96.25	2.32	0.50	0.20	0.00	0	0.05	0	0.68	50.85
荔湾海气	87.50	4.35	2.09	3.99	0.07	0	0.61	0	1.39	52.59
珠海贫LNG	96.66	2.00	0.40	0.03	0.01	0	0.12	0	0.77	50.56
珠海富LNG	89.41	5.37	3.15	1.33	0.01	0	0.06	0	0.66	52.72
粤西LNG (1)	98.02	0.54	0.21	0.17	0.00	0	0.05	0	1.00	50.23
粤西LNG (2)	90.61	7.83	0.26	0.14	0.01	0	0.08	0	1.08	51.34

表4 11种气源下CO的排放

华白数 (MJ/Nm <sup>3</sup> )	48.3	48.8	49.4	50.1	50.6	50.6	50.9	51.1	52.4	52.9	53
CO <sub>α=1</sub> (ppm)	川气	惠州	土气	粤西1	珠海贫	12T-0	粤东	粤西2	荔湾	珠海富	大鹏
A1	38	59	44	45	58	61	63	52	54	92	88
A2	44	130	169	541	408	386	81	169	106	988	745
C1	56	117	119	232	141	160	317	181	151	265	121
E1	34	48	47	51	75	66	132	212	475	830	1 011
F1	71	88	145	168	262	289	258	185	373	502	247
F2	61	142	183	156	263	176	142	250	363	297	366
F3	153	267	202	308	428	203	277	229	336	517	363
G1	294	859	768	706	786	692	737	493	787	990	383
H1	307	179	140	140	167	241	353	274	185	419	317
J1	264	460	459	404	687	637	645	511	828	1 166	917
J2	404	750	621	1 059	1 014	1 030	507	512	424	682	762
L1	91	165	183	190	203	318	248	321	268	570	337
L2	401	266	421	233	127	470	167	568	591	224	254
M1	142	173	135	69	501	155	251	84	101	235	246
M2	284	556	468	701	607	468	882	510	1 010	653	821
N1	183	143	245	140	159	322	215	174	281	165	275
N2	37	50	54	101	109	68	76	83	43	174	66

表5 11种气源下NO<sub>x</sub>的排放

华白数 (MJ/Nm <sup>3</sup> )	48.3	48.8	49.4	50.1	50.6	50.6	51.1	52.4	52.9	53	50.9
NO <sub>x,α=1</sub> (ppm)	川气	惠州	土气	粤西1	珠海贫	12T-0	粤西2	荔湾	珠海富	大鹏	粤东
A1	58	55	60	62	58	70	62	62	66	69	NA
A2	45	42	43	44	47	42	46	48	37	43	NA
C1	69	58	64	56	66	66	61	64	60	70	NA
E1	11	11	9	11	13	12	15	15	11	14	13
F1	54	54	58	57	59	61	60	55	56	62	NA
F2	64	55	59	56	60	62	59	51	60	61	NA
F3	51	46	57	51	52	60	66	59	56	61	NA
H1	40	38	42	44	45	48	41	46	44	43	43
J1	71	69	77	75	75	76	73	65	75	74	NA
J1	31	39	49	40	39	47	53	59	51	46	51
L1	52	50	53	53	57	54	48	55	52	58	NA
L2	49	53	58	54	61	54	52	53	61	69	NA
M1	49	51	61	54	58	65	50	61	55	58	NA
M2	78	76	94	90	89	95	115	98	85	98	NA
N1	47	54	56	59	54	62	51	59	58	63	NA
N2	49	47	49	52	52	53	68	50	51	56	NA
G1	58	34	46	48	44	46	53	52	41	47	NA

表4中采用旋转条缝火孔的样本灶J2、M2、G1,除了在少数几种气源及基准气条件下CO排放量未超标,在大部分气源条件下,CO排放量均不同程度超标。旋转条缝的火孔设计,增加了热烟气与锅底的切向速度、强化了传热过程;但火焰与二次空气的接触条件变差,外围空气扩散到焰面比较困难;且火孔倾角过大,又火孔间距过小,导致连焰等因素均使得旋转条缝火孔的二次空气变得更糟,更易出现不完全燃烧,使得排放超标。

由表4看出,17台样本燃气灶除了在川气条件下不会出现CO排放量超标外,其他气源均会出现不同程度的超标现象,珠海富气和鹏LNG一期的CO排放量超标样本灶数量最多;可见同种燃气灶在不同组分天然气下CO排放差异较大,这就意味着气源变化后,烟气中的CO排放处于非受控状态。此外,由表5可看出同一燃气灶在不同气源下的NO<sub>x</sub>排放量存在一定的差异。

随着我国天然气行业的快速发展,目前我国大部分省市均接入多种气源,气源彼此间组分特性差别较大,同时国内燃气灶具由于品牌繁多、结构迥异、参数设计不同,对气源的适用性千差万别,当天然气组分发生变化时,污染物排放若出现超标情况,是目前的管理制度所无法控制和约束的。因此,实验研究不同组分天然气下民用灶具CO、NO<sub>x</sub>的排放对天然气的应用影响极大。

#### 4 结论

通过17台样本燃气灶在广东省天然气管网中存在的10种不同组分天然气和12T-0作为气源下的CO、NO<sub>x</sub>测试分析,得到如下结论:

(1) 同种燃气灶具在不同组分天然气下的CO排放差异较大且无明显变化规律,这就意味着气源变化后,烟气中的CO处于非受控状态,将对人体构成潜

在的长期危害且造成环境污染，并且NO<sub>x</sub>排放存在一定的差异；

(2) 以L1、L2的排放为例，同一品牌、不同结构形式的燃气灶具对气源的适应性不同，所以在灶具设计和初调解时，应考虑扩大燃气灶具的适应性；

(3) 旋转条缝型火孔较之其他型式的火孔，燃气灶出现CO排放量超标的可能性更大。同为超标情况、在同一种气源条件下，旋转条缝型燃气灶的CO排放量普遍高于圆孔燃气灶。

现阶段一些城市在气源选择上，或直接选用国外的结论进行定性评价，或回避可能导致的气源问题。但我国家用灶具与国外存在巨大差异，使得照搬国外判据的可靠性大大下降。针对我国家用燃气灶具在不同气源下污染物排放的研究可为能否入网提供科学可靠的判定依据，从而在保证灶具正常工作的情况下，引入尽可能多的气源，改善供应侧的可靠性，有助于推动建立更具有针对性、更为科学性的天然气质量管理体系。

参考文献

1 BP Company. BP Statistical Review of World Energy June 2014 [R]. bp.com/ statistical review, 2014; 6  
 2 智妍咨询集团. 2015-2020年中国燃气灶具行业运营态势与未来发展趋势报告[EB/OL]. (2014-11) [2015-07-05]. <http://www.chyxx.com/data/201504/309599.html>  
 3 Weaver, E.. Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1951; 46 (3) : 213-245  
 4 B. C. Dutton and R.J. Souchart. Gas interchangeability: prediction of incomplete combustion [J]. Journal of the institute of energy. 1985; 12: 210-212  
 5 B. C. Dutton and S.W. Wood Dphil. Gas interchangeability: prediction of soot deposition on domestic gas appliances with aerated burners [J]. Journal of the institute of energy. 1984; 9: 381-382  
 6 B.C. Dutton and E. Gimzewski. Gas interchangeability: prediction of flame lift [J]. Journal of the institute of energy. 1983; 66: 107-108  
 7 夏昭知. 第一族燃气互换性的研究[J]. 煤气与热力,

1985; 3: 25-30  
 8 李猷嘉. 燃气质量标准中互换性研究的进展—当今液化天然气质量与互换性研究进展论述之二[J]. 城市燃气, 2011; 8: 4-17  
 9 Yung-Chang Ko, Ta-Hui Lin. Emission and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various composition [J]. Energy conversion and Management, 2003; 44 (19) : 3001-3014  
 10 Keeman Lee, Jong-Min Kim, Byeonghun Yu, Chang-Eon Lee, Seungro Lee. Effect of various gas compositions on gas interchangeability and combustion characteristics for domestic appliances [J]. Mechanical Science and Technology, 2013; 27 (4) : 1191-1201  
 11 Shuhn-Shyurng Hou, Chien-Ying Lee, Ta-Hui Lin. Efficiency and emission of a new domestic gas burner with a swirling flame [J]. Energy Conversion and Management, 2007; 48 (5) : 1401-1410  
 12 H.B.Li, T.T.WONG, C.W.LEUNG, S.D.Probert. Thermal performances and co emissions of gas-fired cooker-top burners [J]. Applied Energy, 2006; 83 (12) : 1326-1338  
 13 Mishra D P. Emission studies of impinging premixed-flames [J]. Fuel, 2004, 83 (13) : 1743-1748  
 14 U. Makmoo, S. Jugjai, S. Tia, P.Vallikul, B. Fungtammasan. Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker top burner in Thailand [J]. Energy, 2007; 32 (10) : 1986-1995

其它消息

郑兵首席技师工作室  
获得批准

2015年9月22日，以重庆燃气集团安装公司劳模、技师郑兵命名的焊工首席技师工作室经重庆市委组织部、人力社保局同意获得批准。这是铜陵市第3批获批的企业技师首席工作室，该工作室将带动广大职工学技能、钻业务、强素质，为职工岗位成才搭建舞台，打造高技能人才队伍。

(郑婧)