

多指数法和Dutton图形互换性预测方法 对我国的适用性说明

□ 天津大学环境科学与工程学院 (300072) 张杨竣

□ 同济大学机械与能源工程学院 (201804) 秦朝葵

摘 要: 针对燃气互换性问题, 上世纪美国和欧洲等国家投入了大量的时间、人力和物力进行研究, 并基于经验判断、理论分析、实验观察以及联合各种方法进行系统研究, 提出了各种各样的燃气互换性预测方法, 但尚未有一套完整且完全适用各国情况的方法可用于实际应用。美国提出的AGA和Weaver多指数法, 形成背景不仅仅限于天然气之间的互换, 而是针对不同类别燃气之间的互换, 所选实验燃气质特性与现有天然气差别较大, 且所针对的燃烧器结构和设计参数与我国设备差距较大; 英国Dutton图形法将天然气划分为4种当量组分, 以华白数为纵坐标、定义PN数为横坐标, 建立互换性预测图形, 然而, 每种极限工况下的当量换算并不采用同一换算公式, 且换算后气体组分与原组分燃烧特性表现实质上存在差异, 如离焰和CO排放针对我国燃气具结构特点时, 是否可以完全复现原燃气表现存在疑问。由于各方法研究时针对的燃气种类和燃烧器均与我国情况不同, 且各方法提出的机理受条件限制, 当应用于我国现阶段天然气互换性预测时, 应做相应的实验研究和科学验证。

关键词: 燃气互换性 预测方法 适用性 多指数法 图形法

Applicability of Multiple Indices and Dutton Diagrammatic Methods for Gas Interchangeability Prediction Used in China

School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University Zhang Yangjun

College of Mechanical Engineering, Tongji University Qin Chaokui

Abstract: In last century, USA and Europe had spent a lot of time, manpower and resources to carry out research on gas interchangeability, and concluded various prediction methods based on experiential judgment, theoretical analyses, experimental test as well as combined different research approaches. But by the practical application of different prediction methods, it does not exist one common method which can be totally used around world. The research gas sources of AGA and Weaver indices not only included natural gases, but also were about different gas families, moreover the properties of gas samples were really different from nowadays' natural

gases in China, otherwise the structure and design parameters of experiment sample appliances were varied hugely with Chinese gas appliances. Dutton diagrammatic method classified the natural gas components into four equivalent components, and built up the interchange prediction diagram by defining Wobbe Index as vertical axis and PN as horizontal axis. But the change methods of equivalent component during different limit combustion conditions were different and it was hard to determine the same combustion performance before and after equivalent component change of gases. Such as for Chinese gas appliances, the lift flame characteristic and CO emission performance are uncertain all the same when they are operated under the original gases and equivalent components gases, respectively. Because the research gas sources, the structure of end-use appliance and the conditional limits of application of each gas interchangeability prediction method are different from Chinese gas industry situation, if it is used directly to predict Chinese gas interchangeability, it seems like not very scientific and may be still cause gas interchangeability problems.

Keywords: Gas interchangeability Prediction method Applicability Multiple indices method Diagrammatic method

1 引言

大部分城市燃气用户在日常使用时,都会因为城市燃气管网供应的燃气组分发生变化而受到影响,且近年来逐渐演变成一种燃气置换另一种燃气或多种燃气共同存在于某一城市燃气管网。针对这一普遍存在的问题,上世纪美国和欧洲等国家投入了大量的时间、人力和物力进行研究,并基于经验上的判断、理论上的分析、实验观察以及联合各种方法进行系统研究,提出了各种各样的燃气互换性预测方法,但尚未有一套完整且完全适用各国情况的方法可用于实际应用^[1]。现有国外燃气互换性预测方法可以归类为:单一指数法、多指数法和图形法^[2]。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。

Harsha P.T.等^[2], Halchuk R.A.^[3]指出:虽然多指数类互换性判定法对于改进单指数互换性判定法有十分重要的意义,但是对于不断发展的燃气质量规范,其仍有一定的局限性,主要因为这些多指数法的形成大都偏向于经验判断得出的数据,因此其适用性应该

进行一定的规范。Ennis C.J.等^[4]对比美国和欧洲的气源以及各自所使用的互换性判定法,两者之间并不存在通用性。Ted A. Williams等^[5, 6], Liss W.E.等^[7]指出:美国燃气互换性研究经历过人工煤气置换天然气、天然气置换液化石油气(LPG)、天然气置换进口液化天然气(LNG)时代,随着气源种类的不同,燃气互换性研究也在逐步加深,且不断更新互换性预测方法使用条件。Rosemarie Halchuk-Harrington等^[8]指出:1946年美国燃气协会(AGA)研究中只有7%的数据是来自天然气,且只有部分试验气气质特性与现今美国所使用的天然气以及进口LNG比较相近,而其他试验气都相差很大,基本无法用于现有燃气互换性判定法的研究,有必要对燃气互换性进行进一步的研究。AGA和燃气研究协会(GRI)先后于1992年和2003年对AGA和Weaver指数法进行了修正^[7, 9]。2003年国际石油委员会(NPC)明确必须对已有天然气互换性判定方法进行发展和更新,以确保非传统天然气的市场供应^[10]。同年,美国天然气委员会(NGC+)成立了一个工作小组,并由Ted A. Williams负责,对美国现有互换性判定方法进行重新研究,并于2005年2月形成研究报告^[11]。与此同时,欧盟EASEE-gas提出了天然气质量一体化的“通用商业实践CBP”^[12]。2007年美国联邦能源法律委员会(FERC)在燃气轮机互换

性方面的实验研究表明：组分不同但华白数相同的两种天然气，其在燃具上的响应可能完全不同，且驳回了NGC+的建议书，要求继续跟踪可能的问题，并对其严重程度进行评估^[13]。2010年IGU委托英国BP公司进行LNG与天然气互换性研究，对LNG与天然气引发的互换性问题在不同燃烧装置上进行实验研究，重新规范了Dutton图形互换范围^[14]。

从现有国外针对各主要互换性预测方法的研究可以发现，随着燃气类别的变化，形成于上世纪中叶的各燃气互换性预测方法，即使应用于现阶段国外各国自身的燃气互换预测时，仍需进行适用性再研究。根据现有的燃气组分和气质特点以及末端使用设备，重新规范用于评判是否可以互换的指标和相应范围。而目前，我国面对城市多气源现象造成的燃气互换性问题时，更多的做法是直接采用国外的方法和互换指标范围，来进行气质是否可互换的评判，这并不可取。本文将对现有国外几大常用的燃气互换性预测方法，进行研究思路和研究对象的梳理，对各方法应用于我国现阶段燃气质情况情况和末端设备情况的适用性进行说明。

2 各主要燃气互换性预测方法适用性说明

2.1 AGA多指数法

AGA多指数法于1946年由AGA经过为期6年的研究后提出，实验中采用的基准气和置换气，以及实验样本设备情况列于表1^[15]、^[16]。其研究思路是：在燃烧特性曲线图中，以基准气燃烧特性曲线a和置换气燃烧特性曲线s的相对位置关系为基础，分析置换后工作点的一次空气系数与同火孔热强度条件下在置换气s曲线上相应点的一次空气系数相对关系，如图1

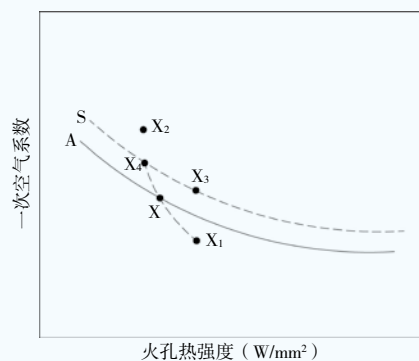


图1 AGA离焰指数推导原理图

表1 AGA指数实验对象和气源情况

类别	气源名称	热值		相对密度	实验对象
		Btu/scf	MJ/m ³		
基准气	高热值天然气	1 115	41.5	0.64	1、代表铸铁钻制火孔的灶具 2、方型火孔的灶具用燃烧器 3、使用射流燃烧器的地下热风炉 4、使用铸铁环形钻制火孔的热水器 5、铸铁喇叭型钻制火孔燃烧器 6、使用黄铜楔型火孔燃烧器的冰箱 7、用于灶具的铸铁星形燃烧器 8、冲焰燃烧器 9、进行燃烧特性极限曲线测试 Precision Burner 10、测试火焰传播速度的本生燃烧器 所有测试燃烧器热负荷变化范围在 1 900Btu/h ~27 500Btu/h (0.56kW~8.06kW)，火孔热强度变化范围在 10 000Btu/(h in ²) ~37 000Btu/(hin ²) (4.5W/mm ² ~16.8W/mm ²)
	高甲烷天然气	959	35.7	0.558	
	高惰性天然气	1 000	37.3	0.693	
置换气	增热水煤气	800	29.8	—	
		1 000	37.3	—	
		1 200	44.7	—	
		1 400	52.2	—	
	焦炉煤气	800	29.8	—	
		900	33.5	—	
		1 000	37.3	—	
	丁烷-空气混合气	1 000	37.3	—	
		1 200	44.7	—	
		1 400	52.2	—	
		1 600	59.6	—	
		1 800	67.1	—	
	改制丁烷气	—	—	—	
丁烷-蓝焰水煤气	—	—	—		
丁烷-发生炉煤气	—	—	—		

所示,并根据大量实验数据最终形成用于评判燃气是否可互换的“离焰指数 I_L ”、“黄焰指数 I_Y ”和“回火指数 I_F ”。

AGA指数法形成于上世纪40年代,所选用的燃气灶具以铸铁圆型火孔和铸铁方型火孔为主,目前我国市场上普遍使用的民用燃烧器的引射器一般为铸铁材料,分气盘一般采用铝或者铁进行加工,火盖普遍采用铜材料。且火孔热强度变化范围远小于AGA实验选用的实验样本火孔热强度 $10\ 000\text{Btu}/\text{hin}^2\sim 37\ 000\text{Btu}/\text{hin}^2$ ($4.5\text{W}/\text{mm}^2\sim 16.8\text{W}/\text{mm}^2$),我国燃气灶一般在 $7.0\text{W}/\text{mm}^2\sim 9.0\text{W}/\text{mm}^2$ 之间。在末端设备侧,我国与美国存在着巨大的差异。另一方面,AGA做研究时,虽然定义的3种天然气基准气较典型,然而选择的置换气及其相应的混合气已很少供应管网用气,且与我国目前燃气管网所供应的天然气完全不同。我国基本不存在气质特性差别如此巨大的燃气互换现象。且各国对于设备性能响应的检测标准和方法并不完全相同,若完全照搬美国现有AGA互换性预测指数,来预测我国目前多气源天然气的互换性,并不科学。表2列出了近年来,一些组织对AGA部分指数的互换性预测范围进行了重新修正的研究结果。

2.2 Weaver多指数法

Weaver多指数法是Elmer R. Weaver于1951年基于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的^[17]。用以表示燃气置换时燃烧不正常现象相对倾向性的近似表达式,部分由理论推导而得,部分从以前的实验研究而来,定义6个指数分别描述热负荷、一次空气系数、回火、脱火、黄焰和不完全燃烧。

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,可以用一种简单的数学关系表示。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,便可用一数学公式对这一极限关系进行描述,如图2所示。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。

相比于AGA提出的3指数法,Weaver指数主要增加了不完全燃烧和一次空气系数两指数。但Weaver指数所用的数据,主要基于3个报告:1938年AGA Testing Laboratories发表的847号报告、1946年AGA Laboratories发表的36号报告和1948年Anthes报告(后被AGA进行整理分析发表成1106A~D 4份报告)。即Weaver指数所提出的各指数,其数据支撑仍为AGA研究时期的数据,其样本气源均未发生变化。因此,Weaver指数对于我国燃气的互换性预测适用性类似于AGA指数法,不可一概而论的直接进行应用。近年来,国外一些研究机构也对Weaver各指数的互换范围进行了相应的实验修正研究,修正结果如表3所示。

2.3 Dutton图形法

1978年,英国Dutton提出按照化学组分来划分燃气行为的图形法,将天然气划分为4种当量组分(CH_4 、 C_3H_8 、 N_2 和 H_2),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,建立互换性预测图形^{[18]-[20]}。在拆分天然气组分过程中,Dutton提出少量的 O_2 可视作惰性气体, CO 的浓度可用 $2/3$ 的 CO_2 和 $1/3$ 的 CH_4 替代。燃气的热值、相对密

表2 AGA部分指数互换性预测范围重新修正结果^[8]

修正指数		AGA互换性 预测程序默认值	Brooklyn Union Gas (BUG)	AGA36号公告			极限值 类型
				高热值基准气	高甲烷基准气	高惰性气体基准气	
AGA指数	离焰 I_L	< 1.02 (2001)	1.02	≤ 1	≤ 1	≤ 1	适合
		< 1.10 (1988, 2002)		> 1.12	> 1.06	> 1.03	不适合
	黄焰 I_Y	> 0.96 (2001)	0.96	≥ 1	≥ 1	≥ 1	适合
		> 0.86 (1988, 2002)		< 0.7	< 0.8	< 0.9	不适合

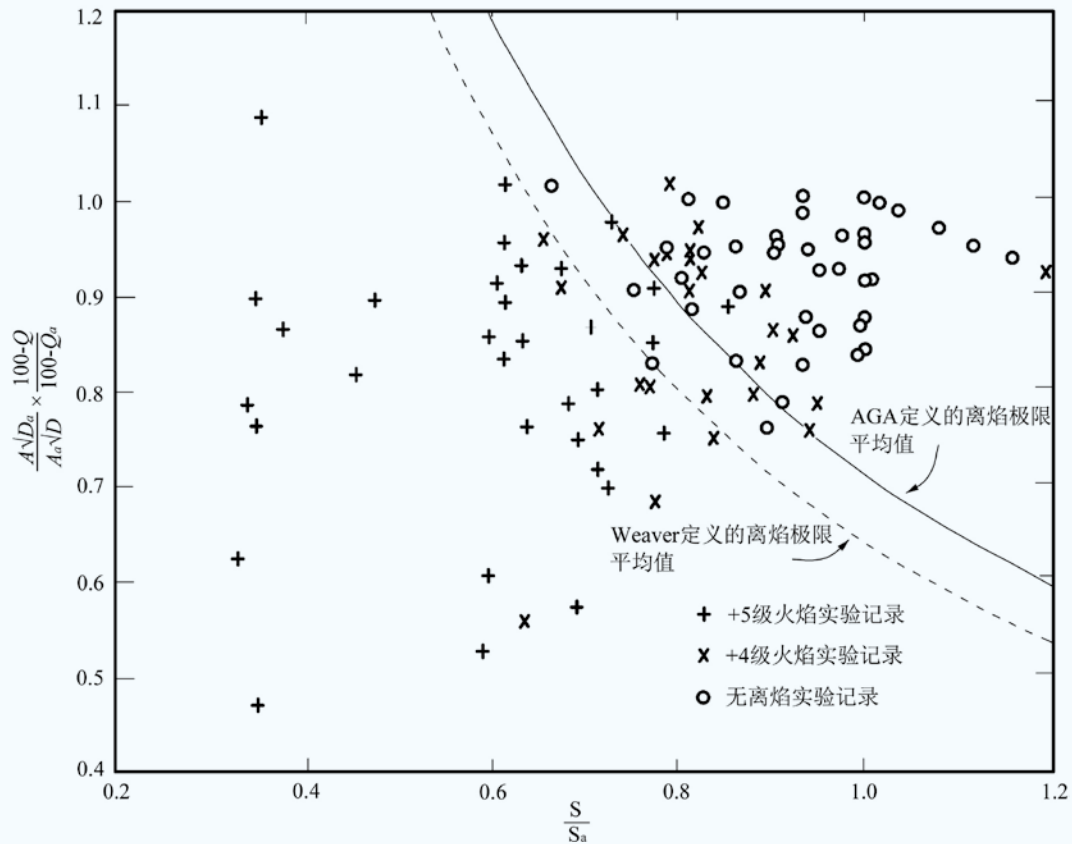


图2 Weaver离焰指数得出原理图

表3 Weaver各指数互换性预测范围修正结果^[8]

修正指数		AGA互换性预测程序默认值	Public Service Gas & Electric (PSE&G)	Weaver	极限值类型
Weaver指数	离焰 J_L	≥ 0.64 (2002, 2001, 1988)	> 0.64	> 1	精确
				> 0.64	焦炉煤气
	黄焰 J_Y	≤ 0.30 (2002, 2001, 1988)	< 0.30	< 0	精确
				< 0.14	焦炉煤气
	不完全燃烧 J_I	≤ 0.05 (2002, 2001, 1988)	< 0.05	< 0	精确
				< 0	焦炉煤气
	回火 J_F	≤ 0.26 (2002, 2001, 1988)	< 0.26	< 0.08	xx
	热负荷 J_H	0.95~1.05 (2001) 0.98~1.02 (2002, 1988)	0.95~1.03	1	xx
	一次空气系数 J_A	0.8~1.20 (2002, 2001, 1988)	xx	1	xx

度和空气量、燃烧速度等物性，可以在W-PN坐标图中标出。使用特定燃烧器和4种组分的混合物，试验来定义离焰、回火、不完全燃烧、结碳和NO_x界限，研究对象主要是英国民用和工业燃烧器。如图3所示

为典型的Dutton天然气互换性预测图，目前英国等欧洲国家仍使用其对城市进网天然气的气质进行管理。

以不完全燃烧指数ICF (incomplete combustion flame) 推导原理为例。在一定的燃烧器压力下，依

次供入基准气 (CH₄) 和测试气, 测试燃烧器功率从90%额定热负荷增加到120%时的各功率点对应的CO、CO₂烟气浓度。以“相对于额定负荷的百分比”和“CO/CO₂的对数”为坐标绘图。不完全燃烧指数ICF的数值定义为: 在所考察的100%~120%热负荷范围内, 基准气与测试气的CO/CO₂差值的线性平均值 (mean linear separation)。选择对数坐标, 对数基数为2, 即这种线性平均值表示为两种气体情况下CO/CO₂的差值被放大了两倍, 如图4 (a) 所示。实验分

两阶段进行: 首先, 用一系列52%的CH₄、C₃H₈、N₂和H₂混合气进行测试, C₃H₈变化范围0%~50%, N₂为0%~30%, H₂为0%~40%; 对每种混合气确定出ICF值, 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, 如图4 (b) 所示, 可以拟合3组ICF计算公式为:

$$ICF=[(WN-50.73+0.03PN)/1.56]-0.01H$$

其中: WN——华白数; PN——C₃H₈+N₂的摩尔体积百分比; H——H₂的体积比。

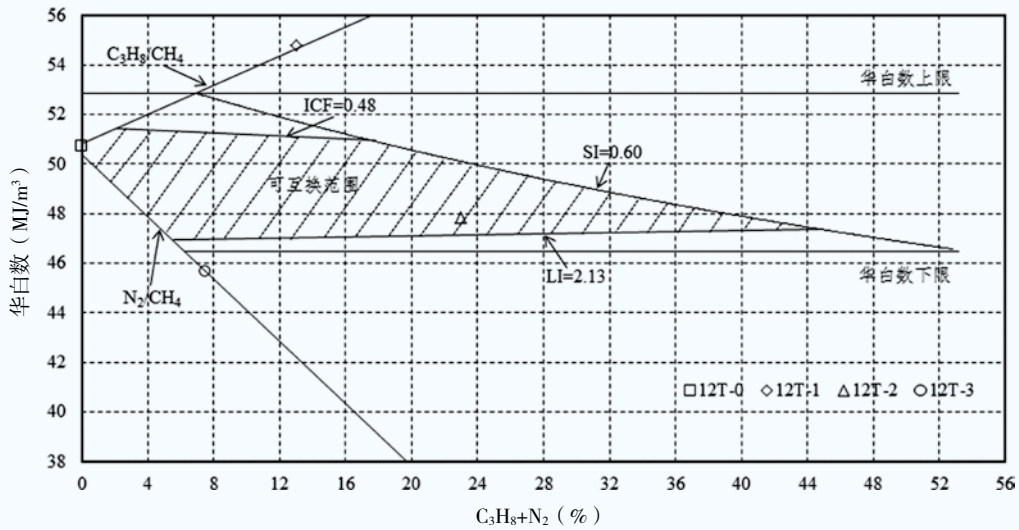
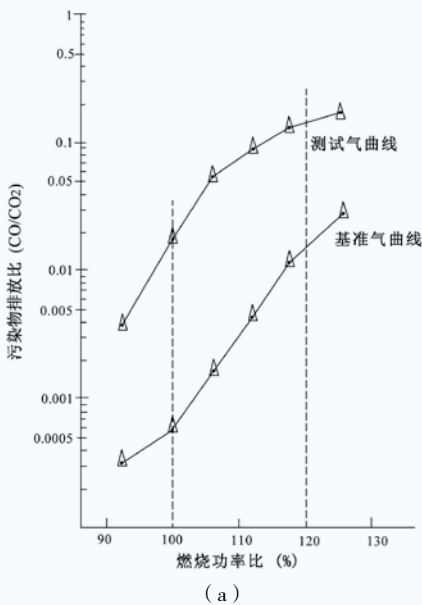
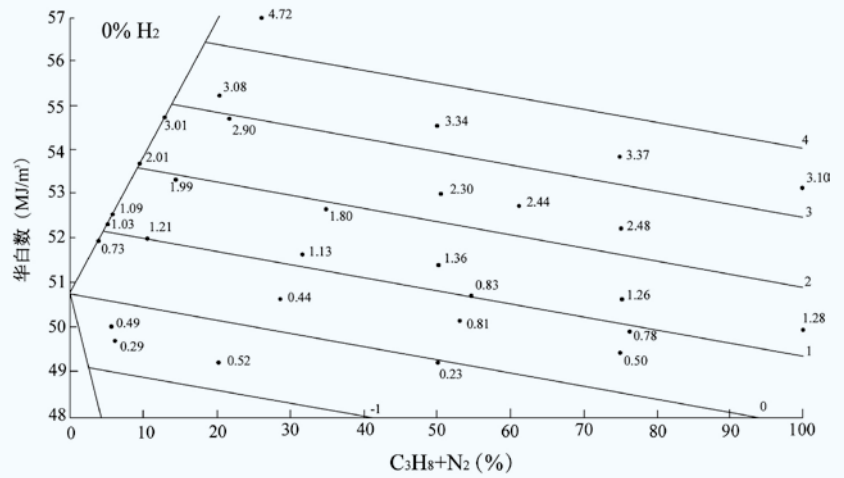


图3 Dutton天然气互换性预测图



(a)



(b)

图4 (a) 基准气和测试气情况下, CO/CO₂比值随着热负荷的变化
(b) 0%氢气含量时ICF实验测试结果及各等ICF值线性拟合情况

Dutton图形法的主要思想是：将燃气组分通过当量换算，折合成4组分混合气，测试混合气的燃烧特性随4组分混合比例变化关系，总结出互换性预测公式。从离焰、析碳和不完全燃烧3种燃烧特性的实验测试和当量折算关系式发现，3种情况采用了3种不同的当量换算关系。这使得在实际应用中，必须针对同一种气体进行3种不同的当量换算，得到3种不同的换算后混合气体组分，这实际上已经改变了燃气本身特性参数，很可能造成换算之后所得到的混合气体组分特性表现不同。再者，这3种当量换算系数，是基于换算后能保证各自的实验现象可复现，燃烧特性相同。但这种换算多大程度上可以保证，原文中说的是95%以上。从实际操作看，不完全燃烧CO排放实验复现，就很难保证原有燃气组分和当量换算后4组分混合气的排放一致。同样，针对离焰的等效组分当量换算，也很难保证换算前后两种气体组分表现相同的离焰特性。

实质上Dutton法是对各种不稳定燃烧现象进行量化测试，并根据组分当量换算，统计归纳出允许燃烧现象出现变化的当量气体组分范围，具有特定的局限性。如CO作为不完全燃烧判据，是针对烟道式热水器，而我国目前的家用灶具均为开放式，热水器一般采用强排式。因此，形成与上世纪80年代的Dutton图形法，其推导得到的各组分当量换算关系式以及互换性预测公式，多大程度上可以应用于目前燃气互换性的预测以及我国的天然气情况，有待讨论。

3 结论

目前已有较常用的燃气互换性预测方法，大多形成于上世纪70年代以前，研究时主要针对的是人工煤气、天然气和液化石油气等不同类别燃气之间的互换性问题，所针对的燃烧器也是上世纪结构类型较单一、设计统一的民用燃气燃烧器。多指数法以燃烧器为研究对象，定义燃烧器初始状态，通过测试燃气组分变化导致的燃烧器工作状态和燃烧性能的变化，来总结预测互换性方法，更多的是利用数学处理方法结合实验测试结果，进行工程近似的半经验半理论处理，推导得出利用燃气组分来计算预测不同燃烧性能变化的互换性预测指数公式。图形法则主要着眼于燃

气的组分特性，通过定义不同的指数参数来代表不同燃气的组分特性，再通过部分代表性燃烧器的实验测试，总结归纳出符合燃烧性能变化允许范围的所有燃气组分特性，以此绘制这些参数为坐标轴的互换性预测图形。

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，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3组燃烧器，同样代表了当时英国的燃烧器水平。另一方面，所有研究都形成于上世纪70年代之前，燃气主要是人工煤气，天然气尚未广泛使用。而目前随着全球天然气贸易的发展，各国天然气快速发展，人工煤气已逐渐退出历史舞台。因此，现在讨论的燃气互换性更多的是关心天然气气源之间的互换性，而非人工煤气、天然气、LPG等不同类别之间的互换问题。同属天然气类别，燃气组分之间差别相对小，上世纪形成的这些互换性预测方法，多大程度上可以适用、预测是否准确、是否可以直接在实际操作中应用，都亟需进行验证研究。

参考文献

- 1 Rossbach, E.O., Hyman, S.I. Interchangeability: What It Means [R]. American Gas Association, 1978
- 2 Harsha, P. T., Edelman, R. B., and France, D. H.. Catalogue of Existing Interchangeability Prediction Methods [R]. Gas Research Institute, 1980
- 3 Halchuk, R.A. Gas Quality Specifications and Interchangeability for End Use Applications [R]. AGA Operations Conference, Dallas, TX, 2001
- 4 Ennis, C.J., K.K. Botros and D. Engler. On the Difference between US Example Supply Gases, European Limit Gases, and their Respective Interchangeability Indices [R]. AGA Operations Conference & Biennial Exhibition, 2009
- 5 Williams, T.A. AGA Interchange Background: Technical issues and research need in gas interchangeability in the US [R]. 23rd World Gas Conference, 2006
- 6 Williams, T.A. AGA Staff Paper: Technical Background

and Issues of Gas Interchangeability [R]. 2006

7 Liss, W.E., Thrasher, W.H. Variability of Natural Gas Composition In Select Major Metropolitan Areas Of The United States, Final Report, GRI-92/0123 [R]. Gas Research Institute, 1992

8 Halchuk-Harrington, R. and Wilson, R. AGA Bulletin 36 and Weaver Interchangeability Methods: Yesterday's Research and Today's Challenges [R]. AGA Gas Operations Conference, May 2-4, 2006

9 Gas Technology Institute. Gas Interchangeability Tests: Evaluating the Range of Interchangeability of Vaporized LNG and Natural Gas[R]. 2003; 04

10 National Petroleum Council Report. Balancing Natural Gas Policy-Fueling the Demands of a Growing Economy [R]. 2003

11 NGC+ Interchangeability Work Group. White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion End Use[R]. 2005; 02

12 EASEE-gas Executive Committee. EASEE-gas CBP 2005-001/02[R].2005; 02

13 National Energy Technology Laboratory. LNG Interchangeability and Gas Quality [R].2007; 06

14 International Gas Union and BP. Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality[R]. 2010; 08; 40-87

15 American Gas Association Research Bulletin No. 36. Interchangeability of Other Fuel Gases with Natural Gas [R]. 1946.

16 American Gas Association Research Bulletin No. 60. Interchangeability of Various Fuel Gases with Manufactured Gas [R]. 1950

17 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

18 B.C. Dutton and R.J. Souchard. Gas interchangeability: prediction of incomplete combustion [J]. Journal of the institute of energy, 1985; (12) : 210-212

19 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

20 B.C. Dutton and E. Gimzewski. Gas interchangeability: prediction of flame lift [J]. Journal of the institute of energy, 1983; (66) : 107-108

其它消息

新疆天富天源燃气公司争做气化兵团的排头兵 民用燃气惠及9个团场2万余用户

截止2015年12月9日，新疆兵团第五师91团847户居民已开通使用天然气1个月有余。

2012年以来，新疆天富天源燃气公司积极实施走出去的战略，以石河子为基础，把目光对准了兵团团场。气化兵团与团场小城镇建设相得益彰，使得团场小城镇建设与天富天源燃气公司发展实现了双赢。团场用户过上了像城里人一样的生活，开阀门就可以做饭。

2012年以来，新疆八师石河子垦区7个团场、七师124团、五师91团，这9个团场2.3万余户居民使用上了清洁能源——天然气。

使用天然气40余天后，兵团五师91小区第二小区用户孙云霞说：她家在正常情况下，一个半月使用一罐液化石油气，价格为95元，而现在一个半月也就是30来块钱，不足原来的一半，使用天然气，实惠看得见。

(周运贵 李宏文)