专家论坛 SPECIALIST FORUM

预测燃气互换性的各种方法论述

中国市政工程华北设计研究院 (300074) 李猷嘉

1 研究背景概况

参考文献1中，在论述什么是互换性的含义时，首先引用了美国政府中对一条格言的解释：“对将军而言，远离战争十分重要；而对化学工作者和众多使用的人们而言，各自远离互换性这个题目也十分重要”（That war is too important to leave to the generals, so the subject of interchangeability is too important to leave solely to the chemists and utiligation people)。对机械工程师而言，互换性表示组件的互换部分在相同的空间中可以准确的安装，并可采用与原件相同的安装方法。对电力工程师而言，除满足上述要求外，电力性能也应是相同的。对燃气工程师而言，新气在燃具不作任何变更时，其性能应完全雷同于使用老气，且在应用和配气方面无任何的区别。

上述最简单的定义，虽然已道出了燃气互换性的本质，但决不能望文生义，还应深入的了解其内涵，且注意过去的讨论范围只限于低压大气式燃烧器，不涉及燃烧方法不同的其他类型的燃烧器。

1.1 互换性的准则（Criteria）或依据[6]

互换性是指两种燃气在不同的时间段（因而需要预测）内，在同一设备上运行操作的可能性。这两种燃气常称为：

（1）调节燃气或核定燃气，可简称为调定气（Adjustment gas）

这是指过去正常使用的燃气，且燃气设备已按这种燃气调定到最佳的运行状态，也是美国等一些国家文献书籍中常用的术语和说明，通常用“a”气表示。在美国的天然气类别中，虽有高热值天然气、高甲烷含量天然气和高惰性气体含量天然气的区别，且各有其参照的组分[11]，但调定气并不固定或按照这一组成来操作，这可见文献10中的示例。在欧洲一些国家，H类天然气是规定以纯甲烷（Pure methane）作标准，称为参照气或基准气（Reference gas)，是一个固定的组成，便于用固解法表示，通常用“R”气表示，两者不能混淆。

（2）替代气或置换气（Substitute gas）

替代或置换调定气“a”或基准气“R”的另一种新气。置换时，原用的燃气设备和供气应力等无任何的变动。通常用“S”气表示。

1.2 使用置换气后燃具合适的运行状态

（1）燃烧所生成的CO浓度应在燃具有关标准的范围之内。

（2）火焰无黄色焰尖（除燃烧器在设计时要求在黄焰下运行)。黄焰是用户产生怨言之源，特别是燃具。也是发生结碳（Sooting）和可能产生不完全燃烧的预兆。

（3）在燃烧器的火孔上不发生离焰（Lift)（允许的离焰等级有规范或标准规定）或脱火（熄灭)。应易于点火，火焰能迅速在火孔上传递。

（4）不发生回火（Flash back）（在燃烧器的腔内燃烧)，且在压力变化时十分稳定（要考虑到采用自动控制阀门的一些设备，在信号略为迟后时的回火现象)。在点火和熄火时无不适当的噪音。

（5）输入热量（Heat imput）（我国常称热负荷式热流量、热入力）和热效率之间不发生逆向的影响。

（6）排放量，特别是NOx的排放量不能超过规定的标准。尚无这一标准时，应迅速建立。

（7）燃具构件的性能和寿命，如点火器，热电偶、热交换器、烟道等不致产生逆向的影响。

（8）对用户的运行，燃气公司的服务经验和成本等也不产生逆向的影响。

一个燃具设计工作者对上述要求是熟知的。节能、减排和安全的目标如不能实现，就产生了燃气的改质和转换问题。

1.3 燃气互换性的原理或基础（Fundamentals of Interchangeability of gases）

这是研究和讨论燃气互换性问题的基础，可参阅参考文献 7 和 8。文献 7 是我国当今唯一按文献 8 移植过来的内容，且基本完整，因而在此从略。虽然各国的燃气行业有不同的规范和标准，但燃气互换性的原理或基础是相通的，因而各种互换性的方法也是可以比较的。

1.4 互换性研究的几个阶段

关于互换性的研究过程和历史，参考文献 1、2 有详细的记述，在此不作细述。它与燃气工业气源的变化有关，大致可分为三个阶段[1]：

（1）人工燃气阶段。由于燃气的种类不断增加，影响到燃具的使用。1915 年，美国标准局对美国民用燃具的燃烧情况开始进行调研；1927 年，美国燃气协会（A.G.A）开始了一个为期 6 年的关于互换性的研究计划，称之谓“混合燃气的研究”（Mixed Gas Research）。当时燃烧器的设计都是根据经验，采用“试着干”（Cat-and-try）的技术，直到二次世界大战结束后，仍是如此。当由人工气转变成天然气，并有一定的市场规范后，才开始发生根本的变化。这是互换性研究的人工气阶段，延续到上世纪 40 年代的末期。目标是解决混气比例的可能性。

（2）上世纪初，美国的天然气已发展到一定的规模，首先接触到由人工气转变到天然气的问题，但从世界范围看，使用天然气的国家尚不多；直到上世纪的中叶，虽然天然气的前景仍不十分明朗，欧洲也开始了天然气的利用，产生了一个向主流燃气“转换”（Conversions）的潮流。由于欧洲的加入，燃气互换性的研究达到了一个新的高潮，各种方法不断涌现。由于燃烧器的设计仍是处于凭经验的水平上，因而互换性的研究也仍是采用试验的方法。有鉴于互换性问题的重要性，1956年，国际燃气联盟（IGU）从所属的“生产”、“输配”、“管网”、“集体与家庭用户”和“工业与商业用户”分委员会中各分派出一人，成立了“燃气应用”委员会，并在1961年发表了《各种燃气互换性的研究》报告。上世纪60年代末，世界上发达国家燃气的转换工作基本结束，燃气工业又开始探索满意的调节方法和新型的燃气生产方法以补充天然气供应的不足。许多互换性的研究是结合“人工”油制气来完成的，这在当时是一种合乎逻辑的选择，特别是欧洲国家，天然气的前景仍不十分明朗；直到油制气的运行成本太高，维持困难和受过培训的人才供应不足，才逐步退役[6]。到上世纪70年代早期，已证明天然气的供应是可靠的和有效的，互换性的研究也进入低潮，只有美国等少数国家，还在时断时续的进行着。

（3）上世纪70年代后期至今。随着常规天然气产量的减少和供应不足，应对上世纪70年代的石油危机和节能、减排以应对气候变化的问题，国际天然气（包括LNG等）贸易蓬勃发展，必须研究新的气源和看到互换性研究中的另一些问题（Other look at interchangeability）。

从本世纪初开始，互换性问题又重新受到关注。由于欧盟的建立和不断扩大，要求统一欧洲管网的要求日益高涨；美国LNG的进口量迅速发展，加上管理体制上的因素，燃气的互换性再次成为国际燃气界的热点。本世纪以来，大量文章出现，争论不断（尤其是欧洲内部），一直延伸至今。

国际上由于预感到互换性问题的重要性，要求由美国燃气研究院（GRI-Gas Research Institute）负责进行汇总、评估和研发工作。1981年由SAI（Science Application，Inc）出版了一本“已有互换性预测方法样本”（Catalogue of Existing Interchangeability Prediction Methods），简称SAI样本，作为第一步的基础性工作。由于涉及面广，各国情况不同，必需采取十分谨慎的态度，进展不会太快。例如，未来非常规燃气作为补充和替代天然气的就有[6]：

1）人工气（以煤、油、油页岩、泥煤和废弃物（Refuse）等原料生产的）；

2）填埋气（Landfill gad）；

3）生物质气（Bio-gas）；

网上投稿 www.gas800.com

4）精炼废气（Refinery off-gas）；
5）焦炉气（Coke-oven gas）；
6）进口液化天然气（ILNG）
7）煤层气（Coal-seam gas）
8）地层压力气（Geopressuriged gas）
9）紧密砂质层气（Tight-sands gas）
10）泥盒纪页岩气（Devonian-shale gas）

即使最后的几类燃气，也已引起我国学者的注意。以上这些燃气均期望加工后有可能列入通常可称的“管输质量燃气”（pipeline quality gas）或更贴切的“终端使用天然气”（End-use-Natural gas）的范畴。

在1993年前，美国没有正式的天然气标准，也没有国际标准。近年来，国际标准化组织（ISO）仅提出了一个委员会草案（CO-Committee Draft），名称为“质量标识或规定”（Quality Designation），它包含天然气的质量参数和互换性的信息（Interchangeability information）[6]。如欧洲燃气能量交换合理化协会（EASEE-gas），通过发展和推广燃气质量公共商务准则（CBP-Common Business Practice）来创建一个有效的欧洲燃气市场就是一例。(可参见本刊2008，3.4两期笔者的两文)。

1.5 互换性研究的依据

各国的燃气互换性研究都以本国所达到的燃气种类为依据，欧洲8个主要国家的情况可参见本刊2008年4期笔者的一文。美国的情况比较完善和具体。如图1所示[6]

我国正在制订的天然气标准GB17820-200x（代替GB17820-1999）中，按高热值将天然气分成两类：一类为>36MJ/m³（36.65MJ/m³）

二类为>31.4MJ/m³（31.97MJ/m³）

体积标准的参比条件为20℃，101.325kPa（括号内为15℃，101.325kPa时的值）。

编制说明中给出了2005年—2007年被抽检的68个天然气气源按高热值的分布情况（图2）。

由图2可知，68个样品中只有2个样品的高热值小于36MJ/m³。如果从天然气输送的体积量看，高热值低于36MJ/m³的天然气所占的比例就更低。此外，俄罗斯行业标准对天然气的高热值的要求不低于36MJ/m³，加拿大也相同。在图2中主要样品的热值集中在36MJ/m³—38MJ/m³，其次是38MJ/m³—40MJ/m³，再次是40MJ/m³—42MJ/m³，最后是33MJ/m³—35MJ/m³的一档，如有完整的组分参数，可作为研究我国燃气互换性的一个基础。LNG的状

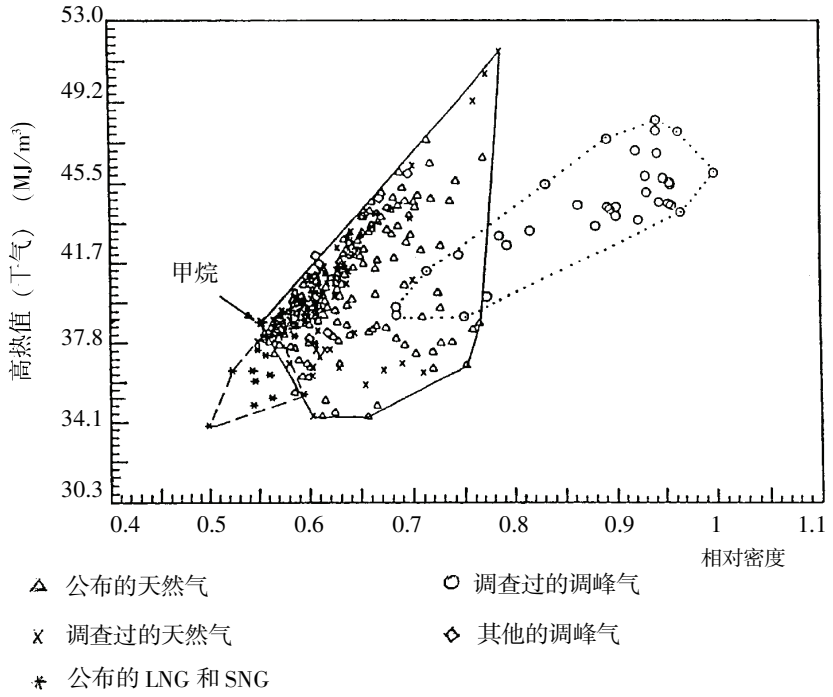


图 1 美国燃气体系的热值和相对密度（空气=1.0）

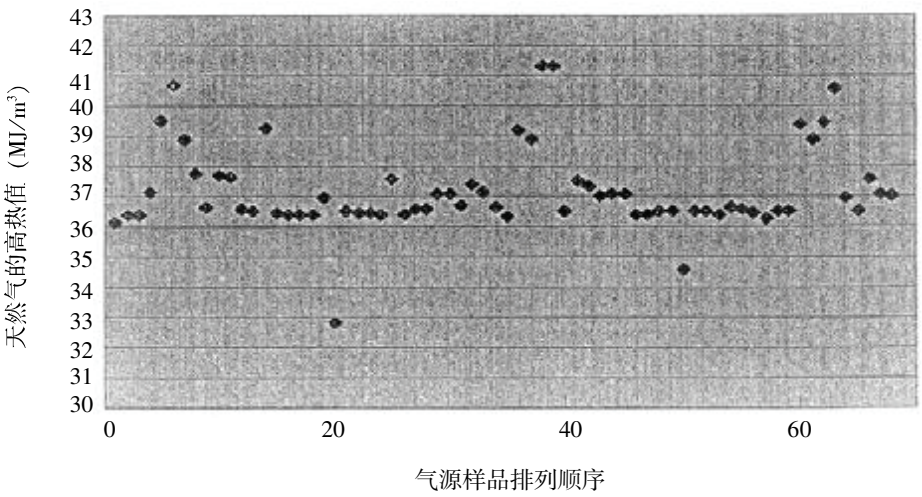


图2 中国石油2005年—2007年被抽检的68个天然气样品分布情况

况，除各出口国的情况有资料可参考外，我国的进口资料还难以完整的列出。至于调峰气尚谈不上有统一的安排思路和计划，这是我国的实情。

2 各种燃气互换性预测方法综述

从各种混合气体的研究中可知，产生燃气互换性问题的根本原因是燃气组分发生的变化，对本生型燃烧的燃具，表示燃具性能变化的指数“C”可用下式表示[2]：

$$C=M+(Ka-Ks)$$

式中M—代表燃具性能变化的指数中与燃气热值和相对密度有关而与燃烧特性无关的因素。

K—决定于燃气化学组分的因素。

a，s 代表调定气和置换气

所有的研究工作者，都通过本国使用的各类燃气和燃烧器的设计经验制造的燃具用敏感性强的精密燃烧器（Precision burner）和各种燃具进行试验研究，这是唯一的方法。由于研究者的思路不同，掌握的原始数据不同，便出现了不同的方法。例如，对上式中的M，就有沃泊数、广义的沃泊数、修正的沃泊数等之分。对式中的K，就有以燃烧速度、燃烧势、火焰高度、爆炸极限、临界速度梯度，甚至直接用当量组分等之分；整理数据的方法，有的用单指数，有的用多指数或图解法。由于这一原因便产生了众多的方法，随后经过不断的实践检验，经过大浪淘沙，形成了SAI所选择的以下十几种，并分成4类，即单一指数法、多指数法、图解法和其他方法，这些方法各有所长或尚在不断的完善中，也有的方法虽然理论与实践基础比较完善，尚需继续研究且不是近期所能完成的。从上世纪末到本世纪，也有另辟蹊经的，均值得我们注意。

表1所示，为各种互换性预测方法所用的原始燃气和原始燃烧器。

对表1中所述方法做以下简要的介绍，对某些方法则侧重于讨论。

2.1 第一类：单一指数法

2.1.1 A.G.A “C”指数法

适用范围可参见表1中的原始燃气。

“C”指数的算式为：

$$C=\frac{hsAsda}{hsAads}+(Ka-Ks)$$

式中，C—燃气性能的变化指数。s气与a气相比，允许值在0.85~1.15之间。

h—燃气的高热值，Btu/cf（英制）（15℃换算系数为0.03726，可得MJ/m³。0℃的换算系数为0.03938。

A—完全燃烧所需的空气量，cf/cf。

d—燃气的相对密度（空气=1）

网上投稿 www.gas800.com

$$K=\frac{hA}{5000EF}$$

E=理论燃烧产物的热量（Heat Capacity），Btu/cf（燃烧温度为60℉—1 600℉时），

$E=0.029V_{CO_2}+0.023V_{H_2O}+0.0189V_{N_2}$。

F=摩尔组分产物的总和。每一可燃组分以当量自由H_2为基础的计算常数。见表2。

a—调定气（adjustment gas)

s—置换性（Substitute gas）

上式在预测计算中的反映较少。多数意见来自燃烧器的调查错误，少数由于燃具的设计太差影响了其适应性。参考文献3中有详细的计算示例。

2.1.2 威伦法，也称“C”指数的简化式。

$$C=\frac{hsAs'da}{haAa'ds}+\left(\frac{haAa'}{5\ 000}-\frac{hsAs'}{5\ 000}\right)$$

式中，C=惠伦指数

$$A'=\frac{h}{96}-1.0$$

式中的h值应大于300Btu/cf

其他符号的说明同前。

公式简化后的误差在4%以内。

2.1.3 诺氏（Frank Knoy）法

使用范围见表1中的原始燃气栏。

表1 各种互换性预测方法所用的原始燃气和原始燃烧器

方 法	日 期	原始燃气	原始燃烧器
第一类：单一指数法			
A.G.A.“C”指数法	1933	人工气和混合气。热值为 28.3MJ/m³ (760Btu/cf)。试验燃气约 250 种	燃具为大气式燃烧器。材料为铸铁，有圆形和方形火孔。 火孔负荷：40.75MJ/h·mm²
威伦（Willien）“C”指数的简化式	1938	人工气，热值为 18.6MJ/m³ (500Btu/cf)	本生式燃烧器
诺氏（Knog）	1941	以 LPG-空气的混合气作天然气的补充燃气	本生式燃烧器
舒斯脱（Schuster）	1957	人工气	用代表德国燃具特性的奥托式试验燃烧器（Ott test burner)
第二类：多指数法			
A.G.A.（36 号公告）	1946	调定气：高热值天然气；高惰性气体含量的天然气。补充气：增碳水煤气；焦炉气；丁烷-空气混合气；丁烷-丙烷混合气和丁烷-水煤气混合气。	用 AGA 精密燃烧器（试验燃烧器）表示实际燃具的特性。包括：铸铁钻孔的灶面燃烧器；方形火孔的灶面燃烧器；具有铸铁喷管型燃烧器的热水器；有铸铁喇叭型火孔燃烧器的热水器；有黄铜楔形火孔燃烧器的冰箱；有铸铁星形灶面燃烧器的灶具，和有撞击式喷管的燃烧器。
韦弗法（Weaver）	1951	用由 CH_4，H_2，CO，C_2H_6，C_3H_8，C_4H_{10}，C_2H_4，C_3H_6，C_2H_2，C_6H_6，N_2，CO_2 各组分混合的混合气，代表天然气和人工气。	用有一次空气和二次空气火焰的民用燃具。
德尔布（Delbourg）（法）	1953	第一族燃气：高 H_2 含量的城市人工燃气；天然气-空气混合气；丙烷-空气混合气。 第二族燃气：天然气	具有控制器的燃烧器（试验燃烧器）确定法国民用燃具的特性。也应用了工业燃烧器。

第三类：图解法			
吉尔伯特和普里格（Gilbertprigg）（英）	1956	第一族燃气：高 H_2 含量的城市人工燃气，涉及 4 种沃泊数的范围： 26.08–28.27MJ/m^3 (701–760Btu/cf) 23.85–26.04MJ/m^3 (641–700Btu/cf) 21.99–23.81MJ/m^3 (591–640Btu/cf) 19.72–21.95MJ/m^3 (530–590Btu/cf)	英国燃具（不含特别敏感的工业燃烧器），民用燃烧器包括大气式和补充吸气式燃烧器（Post–aerated burners）。 典型的大气式燃烧器由带圆形火孔的铸铁制成。 火孔负荷：65.2 –114.1MJ/h·mm^2（40 000 –70 000Btu/h·in^2） 一次空气吸入量：50%–60%
霍姆维斯脱（瑞典）（Holmqvist）	1957	城市人工燃气； 发生炉气和水煤气	本生式燃烧器
哈里斯和洛弗雷斯（Harris–Lovelace）	1968	天然气；LNG；SNG	最新的本生式燃烧器 民用燃烧器由铸铁、钢板或铝板制成。 火孔为圆形或槽形。 火孔负荷： 40.75 MJ/h·mm^2 (25000Btu/h·in^2) 一次空气吸入量：55%–70%。 燃烧器的设计有提高火焰稳定性的装置（控制离焰）和头部网状物（防止回火）
哈里斯–威尔逊（Harris–Wilson）	1974	天然气；LNG；SNG	英国使用大气式燃烧器的最新燃具和补充吸气式燃烧器。后者由多针孔带状薄钢板制成
法朗士（France）	1976	由 CH_4，H_2，C_3H_8，N_2 和 CO_2 构成的多组分混合物，代表天然气和 SNG	大气式燃烧器和最新的补充吸气式燃烧器
格鲁姆，哈里斯和罗维（美）（Grummer Harris and Rowe）	1956	由 H_2，CO，CH_4 和 C_2H_4，和 N_2 构成的混合气代表人工气，油制气，丙烷–空气混合物和天然气	实验室燃烧器（圆筒形管）
凡·克里夫林和谢尔（Von krevelen and chermin）	1958	由 CH_4，C_2H_6，C_3H_8，C_2H_4，C_3H_6，H_2，CO，N_2 构成的混合气	本生式燃烧器（民用和工业用）
凡·得尔·林登（Vander Linden）	1970	天然气	用工业和民用燃烧器 用欧洲实际使用的燃烧器进行中试
达顿（Dutton）（英）	1978	用由 CH_4，C_3H_8，H_2 和惰性气体构成的混合气	应用民用和工业燃烧器，最初开发的目标是针对英国的民用燃烧器
第四类：其他方法			
索姆斯（Sommers）	1973	高惰性气体含量的天然气，高甲烷含量的天然气	实际的德国燃具，采暖、热水器，有一次、二次空气的火焰；燃气灶和有机力供风的燃烧器。

网上投稿 www.gas800.com

表2 “C”指数计算用常数值[3]

组分	可燃组分的燃烧空气需要量 cf/cf	可燃组分的燃烧产物			F 值
		CO_2	H_2O	N_2	
H_2	2.38	—	1.00	1.88	1.00
CO	2.38	1.00	—	1.88	5.36
照明气 *	19.65	3.00	2.25	15.51	35.20
CH_4	9.53	1.00	2.00	7.52	27.30
C_2H_6	16.68	2.00	3.00	13.16	38.70
C_3H_8	23.80	3.00	4.00	18.80	63.30
C_4H_{10}	30.97	4.00	5.00	29.44	80.80
C_2H_4	14.29	2.00	2.00	11.28	15.00
C_6H_6	35.73	6.00	3.00	29.20	78.00
O_2	−4.76**	—	—	−3.76**	—

* 常假设为按组分1C_6H_6+3C_2H_4计算

* * 常为负值

$$C=\frac{h-175}{\sqrt{d}}$$

式中：C=诺氏指数

175—燃烧器经专门调节后，燃气与一次空气的混合物在燃烧器头部的热值（Btu/cf）。此值在1938年由威伦建议提出[3]，而后来发现，此值常在135~320Btu/cf的范围内变化[1]。

a气与s气的C指数相同时可以互换。实际上多数民用燃具在正常的适应性能力下最初允许的偏差值为±10%[3]，后来又改为±5%[10]。

s气的C值大于a气的C值时，火焰成为松软型（Softer type）；小于时，火焰成为“硬实型”（Harder type）。

若已知调定气a，根据真热值和相对密度之值，也可按下式求得置换气S的相对密度：

$$d=\left(\frac{h-175}{c}\right)^2$$

或热值h：

$$h=C\sqrt{d}+175$$

用同样的方法，也可根据置换气S与一次空气的混合物，按下式求得在燃烧器头部的热值：

$$Ps=\frac{hs\sqrt{da}}{\left(\frac{ha-Pa}{Pa}\sqrt{ds}\right)+\sqrt{da}}$$

式中，P=燃气与一次空气混合物在燃烧器头部的热值。如果Pa的平均值设定为175Btu/cf，则Ps值不应小于160Btu/cf或大于190Btu/cf，Ps>Pa表示火焰松软，Ps<Pa表示火焰硬实。

上式的使用条件为[3]：

（1）燃烧器使用不同燃气时，压力应稳定；

（2）使用不同的燃气时，喷嘴的直径不变；

（3）通过燃烧气喷嘴的燃气量与燃气相对密度的平方根成反比（喷嘴的流量系数应相同）

（4）大气式燃烧器引入燃烧器头部的一次空气量（cf/h）应相同，且不随燃气相对密度的变化而变化。

此法至今在表1所示的范围内仍有参考价值。

2.1.4 舒斯脱法

由表1可知，该法适用于人工气。

$$S.I=\frac{h}{\sqrt{d}\sqrt{S_{max}}}=\frac{W}{\sqrt{S_{max}}}$$

式中：S.I=舒斯脱指数，

h=燃气的高热值（$kcal/m^3$），

W=沃泊数，$\frac{kcal}{m^3}$，

S_{max}=火焰传播速度最大值，cm/sec。

对Ott燃烧器，S_{max}值也可用韦弗的火焰速度因素来代替。

各种燃气的最大火焰传播速度S_{max}可见表3。

这是互换性研究中直接用火焰传播速度表达的一个例子。

与此类似的，还有一个W·德凡奇（W. Devechi）氏的“D”指数法。

计算方法有两类：

表3 各种燃气的最大火焰传播速度（S_{max}）[5]

组分	H_2	CO	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	C_4H_8	C_4H_{10}
S_{max} cm/s	280	14.5	40.0	150.2	70.0	43.3	45.6	41.4	46.0	39.2
燃气含量 %	42.4	40~55	10.05	9.45	7.3	6.25	4.95	4.30	3.5	3.45

（1）按燃气的爆炸上限和相对密度计算：

$$D=\frac{100\ (\frac{100}{E}-1)}{\sqrt{d}}$$

式中，D—德凡奇指数；

E—燃气的爆炸上限；

$$E=\frac{100}{\frac{a}{A}+\frac{b}{B}+\cdots\frac{c}{C}}$$

a，b，c 燃气中各组分的%

A、B、C 各组分的爆炸上限。

（2）按燃气的高热值、相对密度和惰性成分计算：

$$D=\frac{h+30.35I-2\ 634}{11.12\sqrt{d}}$$

式中：h—燃气的高热值（$\frac{kcal}{m^3}$），

I—燃气中的惰性气体含量（%）

该法未被SAI所收录。

2.2 第二类：多指数法

由表1可知，该法以A.G.A（36号公告）和韦弗法为代表。这两种方法笔者在本刊2007.8期，2008.9期和2009.6期均有应用的实例，以前我国有关文献[9]中评价为“计算复杂”，实际上，美国有计算机软件可用（编号为Catalog NO. XH9301，1993年专利）。参考文献1中（第5页），热烈的推荐它作为对互换性感兴趣的人阅读。文献6中指出，经美国燃气研究院再次审定，1984年发表的结果认为上述方法仍然是“美国对互换性预测的最有效工具和方法”，“至今仍认为是美国最先进的方法”。韦弗的论文[2]中，对其每一个公式均有详细的论证，令人信服。限于篇幅在此从略。

2.3 第三类：图解法

图解法是实践中一种常用的方法，它有4个特点：

（1）必须按方法提出者所规定的图象求解；

（2）图示只能按规定的基准气或参照气（Reference gas）绘出，不同的基准气应有不同的图象。这是它与核定气（Adjustment gas）不同的地方。确定两种燃气能否互换时，都是与基准气相比较，且应在同一基准气所表示的图象范围内。

（3）图象有二维或三维的。图中不能表达的互换性指数，可再辅之以计算方法。

（4）状态的参照条件，各国尚不统一，应特别注意。

2.3.1 德尔布法

表1介绍了该法所用的原始燃气和原始燃烧器。

（1）参数的变化

德尔布法在我国广为大家所熟知，但对其判定的图像则介绍甚少。笔者在本刊2008.9期一文中介绍了该法所用的试验燃烧器构造，方法的特点与成就（如德尔布半校正系数），以及对燃烧势的理解。德尔布先生共发表论文约5篇。其中有一篇于1964年第9届国际燃气会议上（荷兰海牙）以预印件（Preprint）发表，题为“关于互换性的法国新近研究”（New French Studies on Gas Interchangability）。在1961年第8届国际燃气会议上（瑞典斯德哥尔摩），《各种燃气互换性研究》的专题报告中也有介绍[5]。据称，他对第一族和第二族燃气已经制作出互换性的预测图[9]。纵坐标是校正沃泊数W′，横坐标为燃烧势CP。CP的计算公式如下（1972）[9]：

$$CP=U\frac{H_2 0.3CH_4+0.7CO+U\Sigma aCnHm}{\sqrt{d}}$$

黄焰指数与结碳指数另用公式计算。黄焰指数中涉及到j值，结碳指数涉及到b值。加上上式中的a值，在计算中是必需已知的。笔者发现，不同年代的文献中，a，b两值是有变化的，见表4。

1961年是文献5，1972年见文献9，校正沃泊数单位$kcal/m^3$[5]

上表说明同一个推荐的系数，在国际会议的正式材料中发生了变化。

网上投稿 www.gas800.com

表4 a，b，j数值的变化

燃气	a		j		b		校正的沃泊数[5] W′	燃气	a		j		b		校正的沃泊数[5] W′
	1961	1972	1961	1972	1961	1972			1961	1972	1961	1972	1961	1972	
CO	0.7	–	0	0	–	–	1 800	C_7H_{16}				15		13	
H_2	1	–	0	0	–	–	11 570	C_2H_2	3.0	3	2.4	2.4	–		15 370
CH_4	0.3	–	1	1	1	1	12 780	C_2H_4	1.9	1.75	2.65	2.65	5.7	2.8	15 930
C_2H_6	0.75	0.95	2.85	2.85	2.08	2	17 080	C_3H_6	1.1	1.25	4.80	4.8	9.2	6	19 200
C_3H_8	0.95	0.95	4.80	4.80	4.0	3.6	20 070	nC_4H_8	1.2	1.5	6.8	6.8	10.8	7	22 080
nC_4H_{10}	1.0	1.10	6.80	6.80	4.4	4.7		iC_4H_8	1.2	1.5	6.8	6.8	10.8	7	23 020
iC_4H_{10}	1.0	1.10	6.80	6.80	4.4	4.7		C_4H_6		2.7		6.1		10	
C_5H_{12}	1.15	1.15	8.8	8.80	–	6		C_6H_6	0.9	0.9	20	20	39	16	
C_6H_{14}				12		10		C_7H_8				16		20	

（2）8届国际燃气会议上《各种燃气互换性的研究》报告中提出了法国拉克天然气互换性的预测图（图3）

图中，实线表示的范围为法国天然气在燃具额定压力为90mm水柱下的互换范围。当额定压力增高或降低时，互换范围也相应的缩小或大[5]。

（3）向美国燃气研究院提供的德尔布互换性预测图，可见图4。得到美国燃气研究院同意后发表于参考文献6（这是一套1994年出版的美国丛书）。由图可知，以纯甲烷为基准气的互换图上，落在互换范围内的，只有法国拉克的天然气、高烃含量天然气、SNG和60/40比的丙烷-空气混合气。其他如LNG、高甲烷含量天然气、填埋气、高惰性气体含量的天然气、50/50比例混合的丙烷-空气混合气和精炼气均在可互换的范围之外。在德尔布的互换预测图上未表示任何类似于EN437中界限气的关系。这说明，德尔布完成其研究工作时，界限气的概念尚未出台，且再也看不到德尔布的任何继承人继续完成其研究事业的任何信息。所有离开其互换预测图或用界限气的概念来联接其预测方法，都是后来由别人加上去的。

（4）参考文献7中，有一张德尔布的预测图，

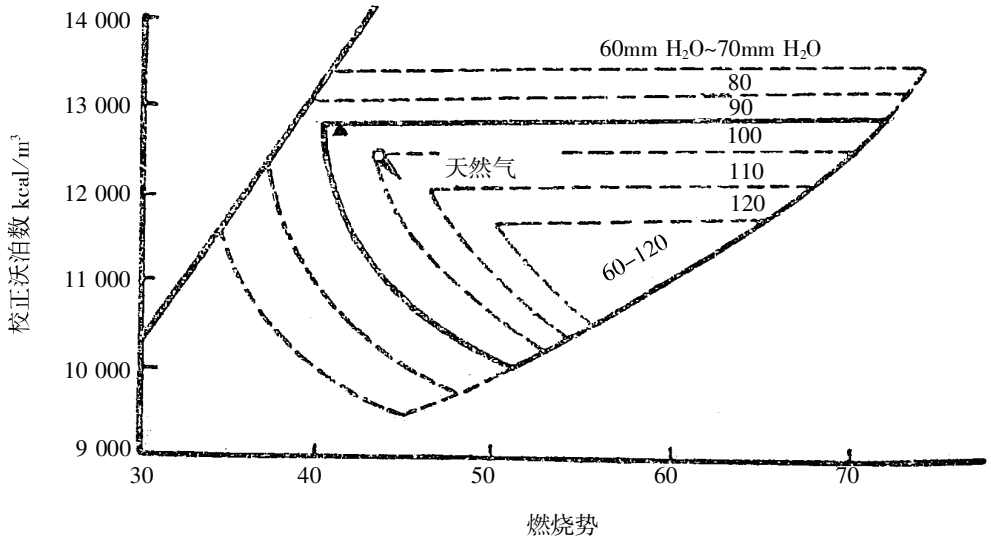


图 3 法国天然气互换性预测图 [5]

注：图中○是指法国的拉克天然气 ▲纯甲烷是笔者加上的，便于与图4比较

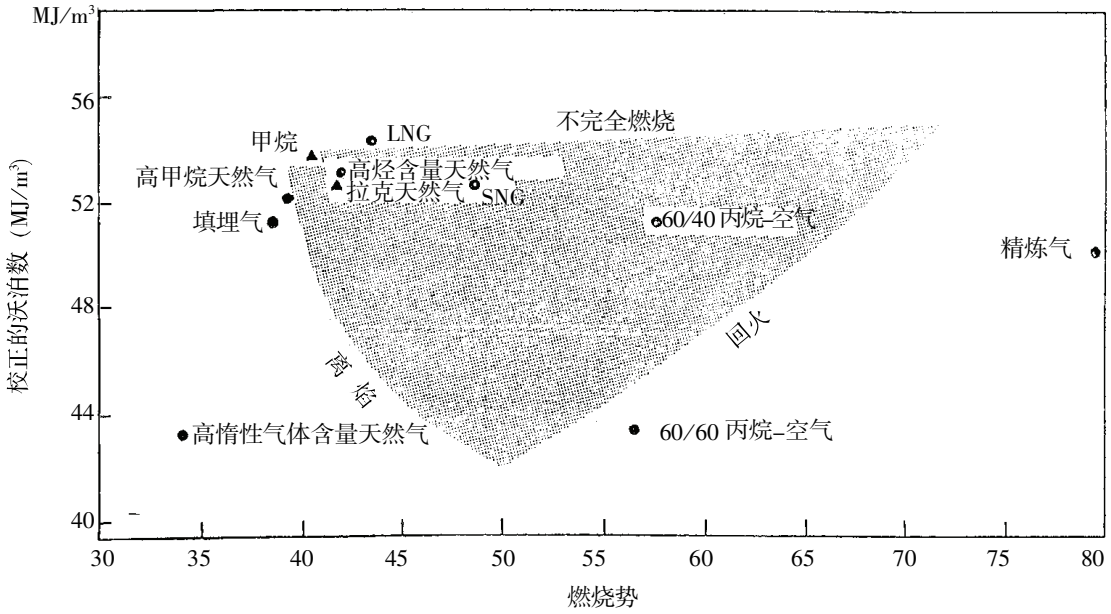


图 4　德尔布互换性预测图

未注明该图的原始出处，笔者也无从探索。

（5）日本煤气协会《煤气应用手册》（东京，1981）的中译本中，虽有德尔布法的较详细的介绍，也没有提供德尔布的权威互换性预测图，虽然该书在日本的出版日期已是1981年。

（6）文献1中，也提到德尔布法，但说“本文不加讨论并发展其程序，因为他的工作只关系到欧洲的燃烧器设计”（In this paper we do not discuss or develop this procedure， since his work relates to European burner designs）。供参考。

2.3.2 吉尔伯特和普里格（1956），哈里斯和洛弗雷斯（1968）及哈里斯和威尔逊（1974）法

这是3种英国的方法，其相互补充的情况可看出英国互换性研究的进展轨迹。

由表1可知，吉-普法主要是针对高H_2含量的城市人工燃气，涉及4种沃泊数的范围（即G_4、G_5和G_6、G_7），已分别作出互换性的预测图，纵坐标为沃泊数（CW），横坐标为韦弗火焰速度因数S，并用试验燃烧器补充结碳性能。G_4、G_5、G_6、G_7四种燃气的组分可参见文献5，互换性预测图可参见文献9，在此从略。

当时，吉-普也曾企图用数学公式来描述三条界限曲线，以适用于其他气体[5]，如

（1）离焰曲线（双曲线关系）

$$WS\ (1-O_2)=21\ 300$$

式中O_2为燃气中的O_2含量

（2）回火曲线（线性关系）

$$\frac{W}{W_a}-0.132\frac{S}{S_a}=0.460$$

（3）燃气的不完全燃烧（限值$\frac{CO}{CO_2}\leqslant 0.02$），也用与燃气组分有关的直线表示：

$$\frac{W}{Wa}-0.132\frac{S}{S_a}=0.968$$

但在以后的各种文献中未看到上述公式的应用实例。

天然气来到之前，英国必须重新研究另一种互换性的预测图。1968年哈里斯和洛弗雷斯，1974年哈里斯和威尔逊在吉-普二维图的基础上提出了类似的互换性预测图。见图5所示的大三角形。三角形表示的范围要求不仅适合英国北海高甲烷含量的天然气（英国属H类），还应适用于高惰性气体含量和其他高烃含量的天然气，甚至代用天然(SNG)。便以1964年国际燃气联盟可推荐的第二族天然气的试验气为基础，并考虑了使用SNG的可能性和英国当时实际的需要提出了该图。比较图4和图5后可知，除高烃和高惰性气体含量天然气和50/50比例的丙烷-空气混合气外，图5包含了在图4以

网上投稿 www.gas800.com

▲ 说明

1.LNG
2.高烃含量天然气
3.SNG
4.高甲烷含量天然气
5.60/40 丙烷空气混合气
6.填埋气
7.50/50 丙烷–空气
8.高惰性气含量天然气
9.油制气
10.精炼气

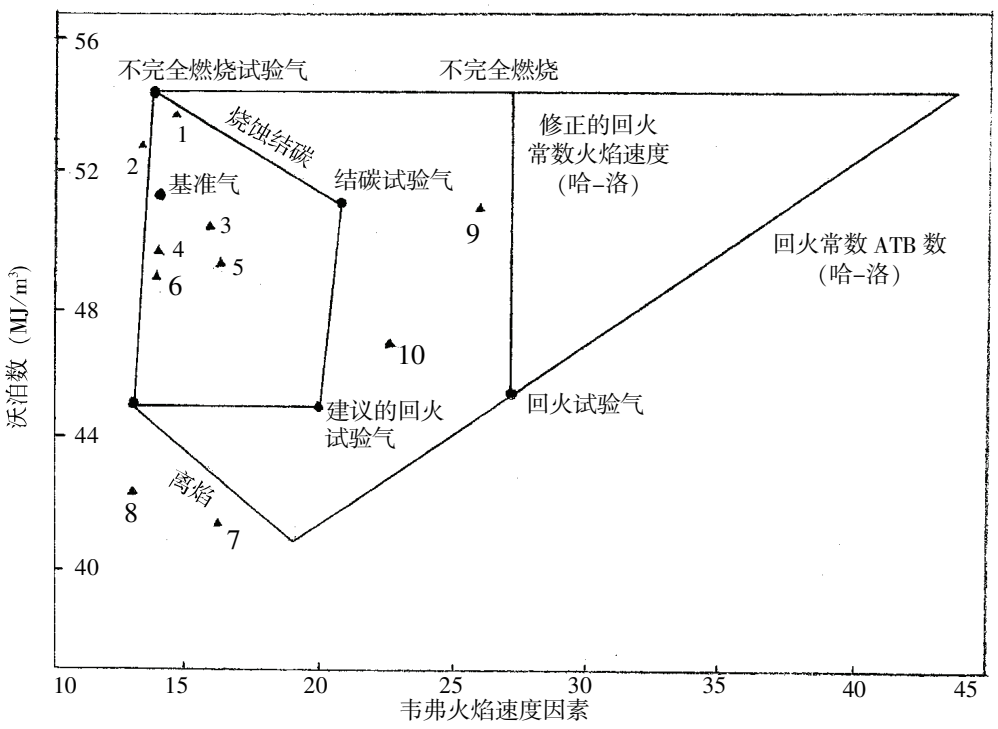


图 5　吉普互换性预测图（经哈–洛和哈–威修正）[6]

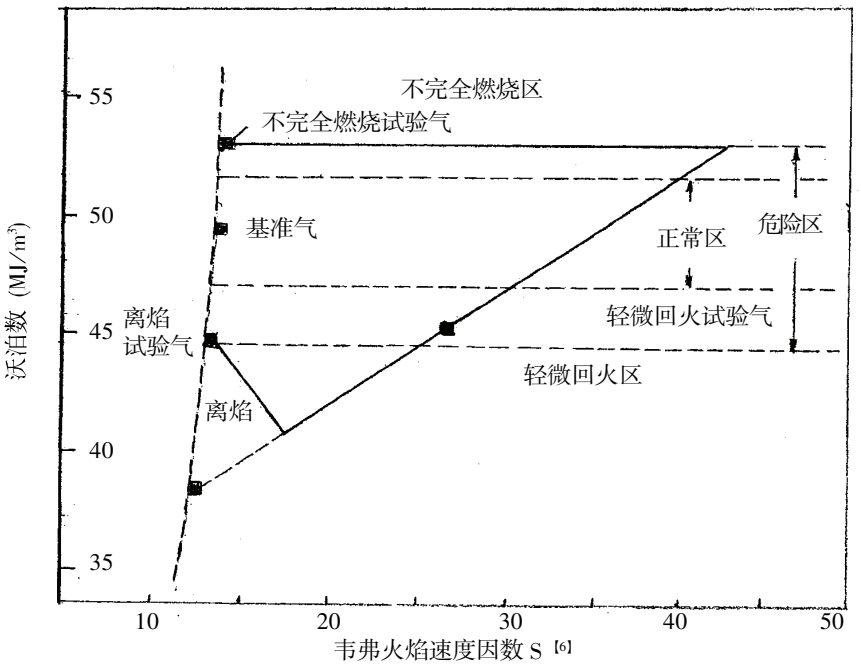


图 6　第二族燃气的最初预测图

外的全部其他燃气。但是大三角形图是在英国大规模使用天然气和天然气燃具投入使用之前预先制订的，不能预示以后出现的情况。经过几年的实践，发现大三角形规定的互换范围不适用于当时广泛使用的燃具，便不得不缩小互换范围。1982年，经达顿（Dutton）的努力，对第二族燃气的最初预测图可见图6。这是一段英国天然气互换图的演变历史，较为详细的说明可见文献7。熟悉这段历史对澄清我国关于界限气与互换范围的概念十分重要。

1986年，笔者作为我国海洋石油总公司的顾问参加香港准备购进我国崖13-1天然气的谈判。对方根据英国的互换预测图要求，提出H类天然气界限气沃泊数W的范围为-10%~+8%，允许互换范围的沃泊数为-5%~+5%；L类天然气界限气沃泊数W的范围为-6%~+8%，互换范围的沃泊数为-3%~+5%。莺歌海天然气（崖13-1）属L类，根据沃泊数为-3%~+5%的规定，在洽谈中对方提出的天然气质量文本为："天然气的沃泊数不能低于40.3MJ/m^3，卖方如不在3年前通知买方，则沃泊数不应高于43.6MJ/m^3，高于43.6MJ/m^3时，买方不能接受"(L类基准气的沃泊数为41.5MJ/m^3)。但笔者至今未能见到L类天然气的互换性预测图的正式文本)。文献6评论认为，本法实际上又回到根据单一沃泊数进行互换性预测的一种趋势。

2.3.3 霍姆维斯脱法（瑞典）[5][6]

表1介绍了该法所采用的原始燃气和原始燃烧器。这是唯一完全建立在实验基础上的方法。完全互换性用两个指数确定，即有效沃泊数W_u和指数C_k，其计算如下[5]：

$$W_u=\frac{h_L}{\sqrt{d}}$$

式中，h_L—燃气燃烧的低热值（15℃和760mmH_2O）

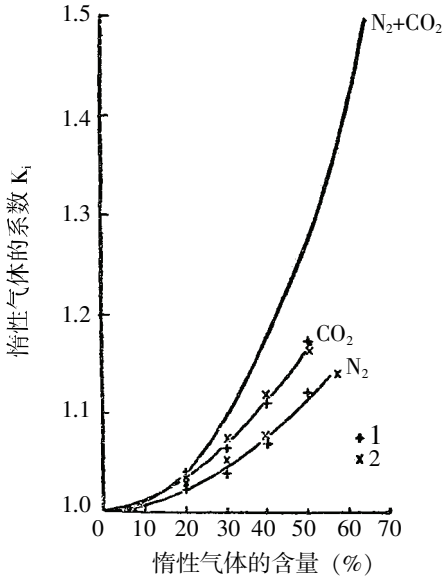
$$C_K=\frac{X_K}{\sqrt{d}}$$

式中，X_k—各燃气组分的这些数值的总和

$$C_K=Ki\frac{\sum a_i X_{Ka}}{\sqrt{d}}$$

式中，K_i—修正系数，可由图7查得，与惰性气体的含量有关，

a_i—数值为X_{ka}的组分含量（见表5）



1-CH_4+惰性气体; 2-C_2H_4+惰性气体

图 7 霍姆克维斯脱惰性气体修正系数[5]

表5 各单一气体的W_u，W和W_K（德尔布法校正的沃泊数）比较和X_K，C_K值[5]

	H_2	CO	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	C_4H_8	C_4H_{10}
有效沃泊数W_u $\frac{kcal}{m^3}$	9 785	3 070	11 520	14 190	14 410	15 060	17 260	17 860	19 500	20 540
沃泊数W(″)	11 570	3 070	12 780	14 685	15 360	16 450	18 440	19 400	20 900	22 240
校正的沃泊数W_K(″)*	11 570	1 800	12 780	15 370	15 930	17 080	19 210	20 270	22 080	23 020
X_K	0.291	0.487	7.24	—	7.58	10.84	14.10	16.67	—	—
C_K	1.102	0.495	9.73	—	7.66	10.59	11.58	13.34	—	—

* 某些单一气体的W_K与W有区别，值得注意研究。

对惰性气体，X_K=0；对空气（当$\frac{N_2}{O_2}$=3.76时）X_K=1。

燃气的压力和沃泊数为常数时，热输入量不变；如保持C_K值相等，则火焰的锥体高度也相同。在瑞典，认为W_u和C_K为常数时，不致有回火、离焰或形成CO的危险。C_K值降低时，回火的可能性增加；反之，C_K值增加，回火的可能性也降低。C_K

网上投稿 www.gas800.com

值增加或降低时，离焰的可能性均将增加。瑞士允许W_u有±5%的偏差，C_K有±3%的偏差。

2.3.4 格鲁姆法[1][5][6]

火焰稳定的物理学原理（回火与离焰）是美国伯纳德·刘易斯（Bernard Lewis）（1899—1993）（刘易斯被誉为国际燃烧学会之父）和京特·冯·埃尔具（1903—1988）奠基的，是一个研究火焰稳定性比较完整的理论。作为合作者的格鲁姆等，用大量的实验数据为这一理论做了验证。

该方法用来确定离焰和回火的极限范围，其基础是回火与离焰决定于燃烧器火孔壁速度梯度的临界值。

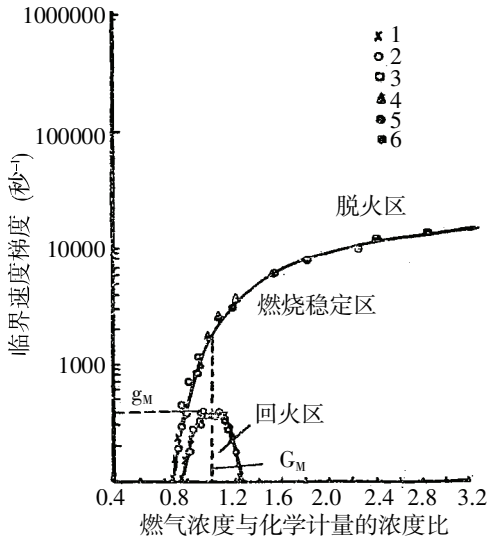
$$g=(\frac{dV}{dr})_r=r_0$$

此临界值与燃气的性质，燃气和空气在混合气中的比例有关，而与燃烧器火孔的直径无关。图8示出了甲烷的两条临界边界速度梯度（Critical boundary velocity gradient）曲线。燃气与空气的比值用指数G表示：

$$G=\frac{\%\ (燃气在混合气中)}{\%\ (燃气在化学计量混合物中)}$$

燃气的浓度为G_M时，回火曲线有一最大梯度值g_M，此值一般比化学计量的值稍大。最大值的坐标可用来编制坐标为$g_K=g/g_M$（相对临界梯度）和$G_R=1+\varphi\ (G-G_M)$（燃气的相对浓度）的临界梯度的缩小曲线图。梯度图用3个数值g_M、G_M和φ表示。因数φ为回火的相对宽度区。各单一气体的g_M，G_M和φ值可见表6。

在折算梯度的图上（图9），所有燃气的回火曲线为一条曲线；离焰曲线为一束曲线，这些曲线作为一个参数与H_2在惰性气体混合物中的含量有关。假定已知调定气的特性g_{Ma}、G_{Ma}和φ_a，当用另一种压力为P_S的燃气代替压力为P_a的调定燃气时，则这种燃气在图中各点的位置将是：



管径（cm）：1–1.358; 2–1.058; 3–0.873; 4–0.611; 5–0.468; 6–0.294

图 8 甲烷的临界速度梯度

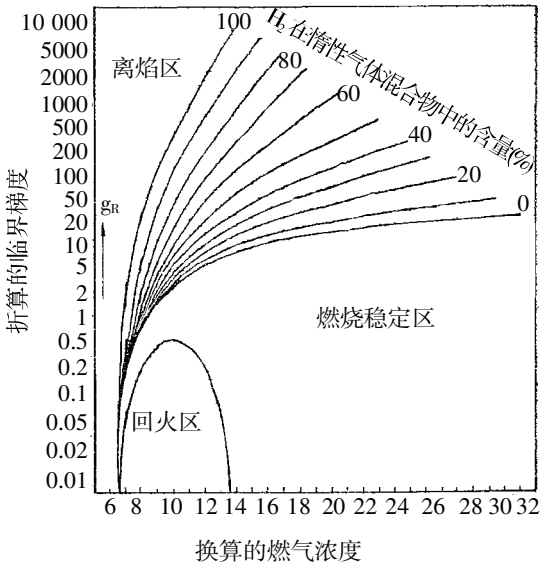


图 9 燃烧稳定性的广义图[5]

表6 单一燃气的g_M、G_M和φ值

	H_2	CO	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_8	C_8H_6
回火的最大临界速度梯度g_M	10 500	100	400	1 400	650	800	580	720
燃气与空气的比值系数G_M	1.2	1.39	1.00	1.10	1.13	1.14	1.12	1.09
折算系数φ	0.46	—	1.00	0.63	0.80	0.68	0.60	0.63

$$g_s=g_a\sqrt{\frac{ps}{pa}}$$

$$G_s=G_a\frac{Ws}{Wa}$$

计算出g_S、G_S和φ_S后，在图9上可查出S燃气的燃烧工况。这一方法中对不完全燃烧尚未研究[1]，美国燃气协会正在进行单一气体的燃烧基础试验，目前来看，获得的信息对燃烧器设计的价值远大于用作对燃气互换性的预测。要用于互换性的预测尚待时日[1]。

2.3.5 凡·得尔·林登法

在凡·得尔·林登的互换图中，表示离焰、回火和不完全燃烧的极限范围时，两轴用沃泊数和调定气与置换气的气体模数（Gas modules）的比值表示。这完全是一种经验的方法，需对每一个感兴趣的燃烧器在其使用的范围内进行试验。在第8届国际燃气会议上，他曾发表过一篇长文，题为《燃气的性质和压力对配气与应用的影响》，笔者当时根据俄译本译成中文，刊登在1965年《城市建设》建筑译丛上，可参考。

2.3.6 达顿法

这是一种英国的新方法。互换性的预测图直接立足于燃气组分的变化上，其方法是将第二族燃气归纳为可由4种当量燃气（甲烷、丙烷、H_2和惰性气体）组成的混合物，用试验方法来判定离焰、回火、不完全燃烧、积碳，以及用特制燃烧器试验NO_x的产生量和上述由4种组分所构成混合物之间的关系。其基本原因是，燃烧的完全程度的析碳之间有复杂的函数关系，不仅决定于燃具的设计，也与火焰速度常数和沃泊数以外的其他常数有关。如图6所示，仅用上述两个常数表示的图表在预测中常出现的不满意情况，要真正解决问题，必须涉及到燃具效应和火焰状态与燃气组分关系中的方方面面。以燃气组分为基础的预测系统，由英国华特生屋研究站（Watson House Research Station）开发用来预测燃气的互换性。要注意的是，这一方法也有一定的近似性；预测图也只有以纯甲烷为基准气的H类天然气。图示有三维和二维的两种，天然气中不含H_2时可用二维图。

达顿法的计算与互换性预测图在本刊2007.7期，笔者已有详细的介绍，在此从略。也可参看文献7。

表7 用SRG法判定天然气的互换性

燃气组分	H类天然气（%）	L类天然气（%）
甲烷	92.6	81.1
乙烷	3.4	3.2
丙烷	0.7	0.4
丁烷	0.3	0.2
重烃	0.2	0.1
N_2	1.8	14.1
CO_2	1.0	1.0
热值Btu/cf	1 034	898
相对密度	0.604	0.647
沃泊数Btu/cf	1 329	1 118
空气需要量cf/cf	9.8	8.52
燃烧速度ft/s	1.41	1.35

2.4 第四类：其他方法

还有众多的其他方法。SAI选出其中最有意义的一种：索姆斯-鲁尔燃气法[6]（简称SRG法—Sommers Ruhrgas）。

这一方法特别适用于德国当今使用高惰性气体天然气中补充供应高热值天然气的情况。例如,对表7中所列的H类和L类天然气，在预测中判定其能否互换时就可以使用。SRG法建议，两种燃气（有规定的范围）在相同的供气压力和对燃烧器不再调节的情况下，只要限定其输入的热量值，就可以确定其能否互换，毋需再考虑火焰的稳定准则。

从H类燃气改用L类燃气后，输入热量的变化为 $\frac{W_L}{W_H}=\frac{1\ 118}{1\ 329}=0.84$（式中$W_H$—H类天然气的沃泊数；$W_L$—L类天然气的沃泊数）

在表7所示的情况下，只要规定一个输入热量的范围，就可以判定其互换性。

以上所讨论的互换性问题是按历史上燃气类别的演变过程为主线总结的。试验燃烧器均为本生型，标准燃烧器对燃气的燃烧性能均十分敏感。需要正本清源的是每种方法的使用方法都是唯一的，如图解法要靠图像。对上述的互换性方法分析后可知，其间有许多相同点，也有不同处。

（未完待续，见下期）

网上投稿 www.gas800.com