

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2011.08.001

· 续上期 ·

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

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

1 燃气质量标准的现状

二百年来，燃气工业在发展的过程中，由于气源的不断变化，在质量问题上始终没有像其他行业那样拥有国际标准，直到今日仍然如此，各国都是根据本国的要求，自行其事。文献1中（P48-P49）列出的ISO标准共31种，除ISO 6976—1995涉及根据天然气的组成计算其热值、密度、相对密度和沃泊指数外，其它大部分只关系到成份分析等的规定。即使是ISO 6976—1995的这一标准，由于传统习惯，采用的国家也不多，如表1为国际沃泊指数定义的比较，表中：当前英、美和EASEE-gas采用的参照条件也不同。

表1 国际沃泊指数定义的比较

国家	定义	单位	燃烧的 参照温度	体积参 照温度
英国 GS（M）R*	全热（卡）值 （比重） ¹ / ₂	MJ/m ³	15℃	15℃
美国	高热值 （相对密度） ¹ / ₂	Btu/scf	60F	60F
EASEE-gas**	热（卡）值 （相对密度） ¹ / ₂	kwh/m ³	25℃	0℃

* 英国燃气安全（管理）规程
** 欧洲气体能量交换合理化协会

引用参照条件非常重要，表2为同一天然气用不同参照温度时的差值。如我国使用20℃，101.325kPa（GB 17820—1999），西班牙使用25℃，101.325 kPa

（BOE，2006.4）等，更遑论燃气质量和互换性标准（可参看文献1中P40-P43中列出的23国标准汇总）。

表2 同一天然气用不同参照温度时的差值

压力	101.325kPa			
燃烧参照温度（℃）	15	25	15	0
体积计量温度（℃）	15	0	0	0
全热（卡）值（MJ/m ³ ）	39.37	41.52	41.56	41.62
沃泊指数（MJ/m ³ ）	50.00	52.71	52.77	52.85

国际燃气联盟（IGU）是一个非政府间组织，1931年成立至今已近80年，为世界燃气行业的发展做了许多有益的工作。有鉴于燃气互换问题的重要性，上世纪50年代初，从所属各委员会中抽调人员成立了燃气应用委员会，主要侧重于研究燃气的互换性，并于50年代末和60年代初发表了许多燃气互换性的研究资料和信息，但由于成员中主要是欧洲的一些国家，只能反映欧洲国家的情况和看法。从应用委员会成立至今，美国始终未参加，亚洲国家也只有日本、马来西亚参加活动。由于当时世界燃气发展水平的限制，在天然气互换性方面的研究，法国只做到拉克天然气，英国只做到北海天然气，美国做到高热值、高甲烷和高惰性气体含量3种天然气。1981年在美国燃气研究院（GRI）的发起下，编纂出版了《现有互换性预测方法样本》一书（Catalogue of

Existing Interchangeability Prediction Methods—by Science Application Inc简称SAI)。已有的方法难以覆盖当前世界LNG国际贸易和用户多样化的需求,于是在2005年美国天然气委员会(NGC+)的互换性研究组发表了《天然气互换性和非燃烧终端用户的白皮书》。与此同时,欧盟试图解决天然气跨国联网一体化的问题,EASEE-gas也做了大量工作,试图以“燃具导则”(Gas Appliances Directive) 90/396/EEC为基础制定一个公共商务准则,形成了2005年2月7日发表的《天然气质量的协调》(Harmonisation of Natural Gas Quality)文件,引起了欧洲内部一些国家和学术团体的讨论。笔者曾结合本人的认识在本刊简要地讨论了争论的重点问题,也对已有的互换性预测方法做了综合的介绍和分析。近几年来,收集和看到国际上新出版的书籍和发表的论文已相当可观,科技的发展与进步,提出了许多新的要求与概念,但是本文开头所说的“共同”问题,并不是所有国家的“共同”问题。有的国家,如日本,是世界上LNG应用规模最大的国家,根据其法律规定要求,引进的LNG经LPG增热后质量始终稳定,LNG中C₂以上的组分提高后可以减少LPG的增热量。中国和印度是刚开始引进LNG的国家,国际上的评价是⁽¹⁾:至今还只关心气价问题,引进合同中尚未涉及质量问题。在此情况下,国际燃气联盟2006年—2009年的研究工作计划中“LNG质量与互换性”课题由英国负责。英国虽属欧盟国家,但不属大陆欧洲范围,互换性的研究历史较长,成果显著,有自己独特的观点,具体由BP公司负责。

BP接受任务后,也开发了一些室内模型以预测和解决LNG的质量和互换性问题。经过几年的努力,发表了大量研究论文和专题研究报告,如向英国商贸部提出的“燃气质量对民用燃具性能影响的评估(指导性研究)”报告(共74页)等。在此基础上,得到国际燃气联盟的支持,于2009年24届世界燃气大会后出版了一本《燃气互换性和燃气质量的参考手册》(Guidebook of Gas Interchangeability and Gas Quality)(大开本152页)。有BP全球燃气运行部主席、IGU主席和秘书长写的前言。BP声明:不承担任何人员据此使用的责任;IGU除对BP表示感谢外,也希望其他成员国做出类似的贡献。所采取的慎重态度,值得我们学习和深思。

2 燃气的质量与互换性

2.1 燃气的质量

制定燃气质量的规定是基于燃气的组成,燃气质量变化的允许范围应以保证燃气工业有较高的运行效率为准则,质量标准还应考虑到对终端用户燃烧设备性能的影响。因此,燃气质量的共同参数常包括水露点、烃露点、有害杂质、各组分的含量以及沃泊指数等互换性参数。燃气的互换性旨在保证任何一种燃烧设备在使用替代燃气时必须能继续满足最初确定的决定于燃气质量的性能标准。因此,燃气的互换性是燃气质量规定中的一个子项,目的是确保用户使用的安全与高效。互换性决定于燃气的质量,但它只发生在出现替代燃气时。在燃气链中,互换性与上游、中游和下游均有关系。在上游涉及到不符合规定的燃气处理问题;中游关系到管道内部燃气质量调节的效益,如估计混合或掺和其他燃气后可能发生的问题;下游则涉及到新一代燃烧器的开发及其与燃气质量规定范围的兼容性问题。因此,互换性的重要意义在于:

- (1) 满足运行安全和性能的要求;
- (2) 保证燃气输送系统的整体性和可操作性;
- (3) 满足能源账单的需要,不同热值的燃气会造成计量和控制上的困难。

如果进口的天然气不符合原用管道气的规定,则按照互换性的要求,必须采用以下措施中的一项:

- (1) 在燃气生产厂调节好燃气的质量;
- (2) 在进入管网时调节好燃气的质量;
- (3) 考虑到扩大燃气的使用范围时,对下游燃烧设备产生的影响。

燃气的质量可以是全国性的规定,如英国,燃气在进入国家的燃气系统时需遵守燃气安全(管理)规程[1996 GS(M) R-Gas Safety (Management) Regulations]。但在美国,互换性仍保留作为一个地方性问题,供气质量由各州的管道公司自行处理。最复杂的是大陆欧洲,各国都有自己的历史特征和标准,要统一燃气质量非常困难。

2.2 燃气的互换性

当前的情况是:一个国际统一确认的对互换性的解释也在发展。在不同的国家、甚至同一国家的不

同地区也在使用完全不同的参数和可接受的性能变化范围来评估燃气质量变化对燃气供应和用户运行的影响。

2.2.1 燃气互换性的定义

经过几年的讨论，燃气互换的定义已开始采用美国白皮书的表达，作为一个共同的定义。即：在一种燃气应用中，当其运行的安全、效率、性能或增加污染物的排放等方面无实质性的变化时，一种燃气替代另一种燃气的能力。（The ability to substitute one gaseous fuel for another in a combustion application without materially changing operational safety, efficiency, performance or materially increasing air pollutant emissions）

发表白皮书的目的有⁽⁵⁾：

（1）保证终端用户在安全性、可靠性和环境性能的前提下天然气特性的可接受范围。既适用于国内供气，也适用于进口的LNG。

（2）在某种程度上保持系统的整体性、运行的可靠性和环境性能，评估向用户合理、可靠供气时涉及的相关问题。

燃气的互换性并不是一个新概念，在上世纪中叶，美国和欧洲已做了许多工作，更早的研究则来自对气体混合的研究。开始时是为了满足人工燃气之间混合的需要，以后转移到天然气之间混合。发展到当前，再次提出这个问题是为了适应世界LNG市场发展特别迅速的形势需求。展望未来，非常规天然气、生物质气等的混合与利用，也会出现许多互换性的问题。

上述定义与传统概念的主要区别在于：

（1）所谓燃烧应用已不限于民用的本生式燃烧器，还涉及到工业、交通燃气应用中的发动机、燃气轮机等。泛指各类的燃烧应用技术。

（2）节能、减排的目标放在第一位。笔者注意到，以前国外的文献中虽十分强调燃烧效率这一根本要求，但在我国已逐渐演变到只注意互换性的几个性能参数。污染物的排放只注意到CO，而未考虑到NO_x和未燃烃HC等。国际上最新的研究表明，越是新开发的燃气燃烧设备，对其效率和排放要求越高，则其互换范围越小。

（3）“无实质的变化时”与以前的概念是共同

的。过去以本生式燃烧器为主研究互换性时，是指包括风门、喷嘴等部分不能有变动，而新定义的概念则扩大到其他燃烧方法的燃烧器。

（4）所谓燃具的适应性，原意是指燃具的灵活性，是指燃具适应燃气质量中组分变化的能力，无确切的定义。一般有两种理解：一种是在互换性的允许范围之内，热出力或热效率允许有一些变化；另一种是指互换性的允许范围之外的，如对民用本生式燃烧器而言，允许在燃具的使用现场，由专业人员改变风门、喷嘴的位置和规格，以适应燃气组分的变化。历史上甚至有过通用燃烧器的概念，极端的情况就是彻底更换燃具，也就是转换。所谓现场调节就是由专业技术人员在用户处一个个调节，方法主要靠目测，如涉及到节能与排放，就要靠仪表挨户调节，工作量和困难很大。一些国家，如比利时和法国曾投资于灵活性的燃烧器生产，在现场易于更换和调节燃烧器的喷嘴⁽¹⁾。有的国家供气与输气采用分离的管网，如德国、荷兰和法国就分别供应低沃泊指数和高沃泊指数两种燃气⁽¹⁾。也有将不同燃气掺混后输入管网，如荷兰和德国⁽¹⁾。

这些均属于燃气不能互换时的应对方法，LNG与管道天然气不能互换时的应对方法很多，需另文分析研究。

欧盟标准EN437《试验气—试验压力—燃具分类》就是一个属于欧盟内部应对方法的标准。其适用范围为第一族、第二族和第三族可燃气体。该标准是作为与欧盟燃具导则（90/396/EC）法律相近的欧盟成员国燃具具体标准的一个参照文件。在该标准中同一燃具有的可满足1族，有的可满足2族，甚至可满足3族的极端界限气性能范围，只要按规定的表示极端变化的试验气试验即可。法国就有6种燃具可适应3族燃气的极端变化界限气范围。由于超脱了互换性的要求，在整个标准中无一处提到互换性的概念，这说明不同国家有不同的处理方法。

3 国际燃气联盟委托英国BP的研究结果

英国是欧盟成员国，但其思路明显的与其他欧洲国家（如大陆欧洲）不同，也习惯于采用英国传统的方法，因此，需要审慎对待其研究方法和成果。

与CO和CO₂类似,燃烧过程还有其他类别的污染物产生,如:

氮的氧化物(NO_x),积碳和颗粒物,硫的氧化物等。

全球贸易中多数天然气的硫含量很低,积碳和颗粒物的生成量也相对较低,NO_x就成为主要的污染物类别。

NO_x的形成有3条主要途径:

(1) 燃料NO_x: 燃料本身形成的氮氧化物。天然气不含任何的燃料固定氮,也就不存在产生燃料NO_x的机理,该方式主要是煤炭。

(2) 瞬发的NO_x: 这形成于烃的裂变生成物和氮在后续的氧化反应中,对多数燃烧器的总NO_x中只占很小的部分。

(3) 热形成的NO_x: 高温下,氮分子氧化而生成NO。天然气燃烧时产生的NO主要是此机理,原因是燃烧温度。低温通常只产生较低的NO_x排放量。

以上说明了复杂的燃烧化学过程,以下再研究火焰的形成过程。

火焰定义为一个快速的燃烧反应区,产生了光和热。形成火焰的条件是燃料和空气平衡的准确性。燃料太少,燃烧过程本身难以维持,燃料和空气太少会使整个反应停止,火焰也就消失。界定可形成火焰的燃料/空气混合物是采用可燃极限(下限和上限)这一术语。对天然气而言,在空气中此极限约为5%—15%。

在可燃混合物中,火焰以一定的速度移动或传播。在一个流动的可燃混合物中,如燃烧速度大于流动速度,火焰会向上游传播;如一个固定的火焰前沿(焰面)出现在一个导管流的固定位置上,且燃气的流动速度大于火焰的传播速度,稳定的火焰就有一定的形状。如果燃气流的流动速度过大,火焰的前沿向下游掠过并消失(术语中称为脱火),为了使火焰稳定,可使用火焰稳定器(稳焰器),这是一种部分限流的障碍物,在火焰的基底造成一个局部的分流区,使该处的燃烧速度略大于局部的流动速度,或将上游的部分气流分流,形成一个低压区,在此能产生稳定的燃烧。

燃烧速度、火焰温度和NO_x的生成量与当量比 ϕ 的关系如图2。

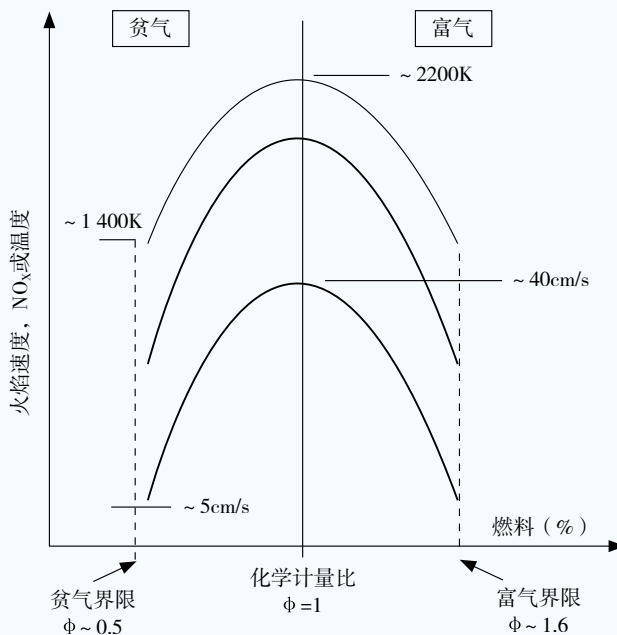


图2 层流火焰速度, NO_x和火焰温度与当量比 ϕ 的关系

图2中有3条曲线,下部的曲线表示燃烧速度与当量比 ϕ 的关系;中间的曲线表示NO_x与 ϕ 的关系,上部的曲线表示火焰温度与 ϕ 的关系。火焰的最高温度2200K发生在 ϕ 略大于1或 α 略小于1的富混合气区,在该 ϕ 值处也是NO_x排放量的最大区和燃烧速度的最大值区(40cm/s)。3条曲线的贫气极限 $\phi=0.5$ ($\alpha=2.0$)和富气极限 $\phi=1.6$ ($\alpha=0.625$)代表火焰的最低温度1400K、NO_x的排放量最低和燃烧速度最小值(5cm/s)。

如燃气的质量发生变化,离开了预先设定的位置和燃烧室的优化当量比值,又未增设控制设施,就会产生不完全燃烧,导致NO_x的高排放量和火焰的不稳定性。

3.2 互换性

美国和欧洲出现燃气互换性的概念已有30年以上的历史,但由于长期未形成一个燃气国际贸易市场,各国均侧重于研究本国的燃烧设备,国际上没有形成一个共同研究燃气互换性问题的动力,只有少数国家根据不断出现的问题在继续进行研究。本世纪以来,国际燃气联盟希望英国BP公司来继续这一工作,投入了很大的力量,英国也宣称⁽¹⁾,在发展和讨论中虽明显的带有英国所偏爱的倾向,但许多概念也有一定的全球认可度。

3.2.1 互换性参数

沃泊指数，可以定义为燃烧能的生成率，是世界各国广为接受的互换性参数。在英国，离焰指数（LI），不完全燃烧因素（ICF）和积碳指数（SI）等这些属于非优化的性能也在考虑之列。在其他国家也常用另一些的互换性参数。

（1）沃泊指数（WI）

沃泊指数或沃泊数用来表示燃气通过燃烧器固定喷嘴的热入力。文献1引用了美国燃气协会36号公告对沃泊指数的解释：沃泊指数可用燃气的高热值除以其对空气而言的比重（相对密度）的方根值表示。燃气的沃泊指数越高，通过一个已知规格的孔口，在已知的时间段内的燃气热量值也越大。几乎在所有的燃具中，燃气的流量是通过一个孔口或喷嘴来调节的。

沃泊指数的作用在于对已知的喷嘴而言，所有的燃气混合物只要有相同的沃泊指数，则可提供的热量也相同。沃泊指数与当量比 ϕ 或燃烧器的化学计量空气需要量之间有一定的比例关系。

$$\text{沃泊指数} = \frac{\text{燃气的高热值}}{\sqrt{\text{相对密度}}}$$

虽然沃泊指数已成为描绘互换性的一个众可接受的参数，但其他参数在不同国家也广为采用。在多数情况下，包括英国在内，用一个以上的参数的极限值作为设定的范围，作为一个可接受的运行范围。相关的术语简述如下：

（2）高热值或毛卡值（HHV或GCV）

热值不能作为代表互换性的最佳参数，因不能表示通过一个燃烧器的流量。热值有高、低（或毛、净）之分，差别在于燃烧中水蒸汽的潜热。

（3）燃气的相对密度或比重（对空气而言）

在互换性的参照条件中常规定燃气的相对密度值，其目的是限制燃气中的高烃含量。高烃含量的增加会导致许多燃烧问题的产生，如CO排放量的增加、形成积碳、发动机爆燃（敲缸）或沃泊指数相同时燃气轮机发生的自动点火问题。

（4）修正的沃泊指数（MWI）

燃气轮机使用燃料的范围很大，但对燃料的变化十分敏感，只有重新改装后才能适用，燃气轮机生产厂规定使用修正的沃泊指数，但这一修政沃泊指数的

含义与法国德尔币互换图纵坐标所用的修正沃泊指数概念完全不同，其重要性是考虑了燃气的温度和采用燃气的低热值（LHV），表达式为：

$$MWI = \frac{LHV}{\sqrt{RD_g \times T_g}}$$

式中 LHV—燃气的低热值，MJ/m³；

RD_g—燃气的相对密度；

T_g—燃气的绝对温度，K。

燃料热值的任何变化均需相应的改变进入机械的燃料供给量。在计算燃气轮机供给的能量时，必须考虑到温度效应，燃气的输入温度对其影响很大。修正沃泊指数的允许变化范围必须满足燃料喷嘴压力比的要求。例如，对老式的扩散式燃烧室，燃气轮机的控制系统可允许修正的沃泊指数变化范围在±15%之内。但对新型的干式低NO_x排放型燃烧室（DLN），MWI在±3%的范围内变化也会发生问题（见2006 EPPI报告Fuel Composition Impact on Combustion Turbine Operability）。通过一个DLN系统精密燃料喷嘴的速度变化就会产生火焰的不稳定性，造成压力的脉动或“燃烧冲击力”，严重时就破坏燃烧系统。

（5）甲烷数（MN）

气体燃料的主要抗爆性能用甲烷数（MN）表示，类似于汽油的辛烷值。为保证发动机运行的安全，甲烷数至少应等同于发动机所要求的数值。发动机的MN数值与发动机的设计和运行参数有关。改变发动机的运行，可调整甲烷的需要值（MNR），改变点火时间、空/燃比和出力，是减少MNR的有效方法。

压缩天然气的抗爆性有不同的度量值，包括发动机的辛烷数和甲烷数。不同的度量值（标度）是参照与天然气相比时所用燃料掺混量。如掺混后燃料的甲烷数以甲烷为100，氢的甲烷数为0表示。如果混合燃气的甲烷数为70，其抗爆性相当于混合气中含有70%的甲烷和30%的氢。活性 $\frac{H}{C}$ 比与发动机辛烷值以及发动机辛烷值与甲烷数之间的关系可表达如下：

$$\text{发动机的辛烷数 MON} = -406.14 + 508.04 \left(\frac{H}{C} \right) - 173.55 \left(\frac{H}{C} \right)^2 + 20.17 \left(\frac{H}{C} \right)^3$$

$$\text{甲烷数 MN} = 1.624 \times \text{MON} - 119.1$$

（6）不完全燃烧因素（ICF）

这是英国燃气研发部 (British Gas R&D) 的达顿 (Dutton) 于1970年后期开发的3个互换性因素之一。他用当时英国有代表性的燃具开发出可根据已知的燃气组分定量计算出不完全燃烧、离焰和积碳因素的方法。达顿的互换图中用非甲烷的当量丙烷和N₂的混合物 (%) 和沃泊指数做坐标。

对不完全燃烧, 达顿认为快速式热水器最敏感, 因此用来做试验。其不完全燃烧因数是根据有效时间内的燃烧性能比CO/CO₂能增加1倍的条件作为参照的试验气, 并假设不含H₂。不完全燃烧的计算式如下:

$$ICF=[WI-50.73+0.03PN]/1.56$$

式中 WI—沃泊指数。

PN—当量混合物中 (C₃H₈+N₂) 的体积百分比。

英国燃气安全 (管理) 规程[GS (M) R]要求ICF应小于0.48。

(7) 离焰指数 (LI)

这是达顿用来评价不同条件下火焰离开燃烧器火孔的基础。试验采用的是模压炊事用具。根据火焰离开燃烧器火孔的状况建立一个离焰数和C₃H₈+N₂数之间的经验关系式进行评价。

——离焰指数 (LI) 是离焰数 (Lift number) 从0—6范围内的平均值。0表示火焰基部与燃烧器火孔之间无可见的分离现象, 6表示有50%—100%的火焰完全分离 (即离焰现象分成6个等级所得出的平均值)。

——C₃H₈+N₂数是一个沃泊指数等于真实燃气的甲烷、丙烷和氮的当量混合物中丙烷和氮所占的百分比。

在达顿图中可看出离焰指数与沃泊指数和C₃H₈+N₂数 (PN) 之间的关系。由实验结果得到的经验式为:

$$LI=3.25-2.41\tan^{-1}\{[0.122+0.0009H_2][WI-36.8-0.0119PN+(0.775-0.118PN^{1/3})H_2]\}$$

(8) 积碳指数 (SI)

积碳指数的计算是根据燃烧器产生积碳时的空气吸入量除以该燃烧器自然吸入量 (总行测出) 的比值表示。试验时, 燃具的一次空气吸入量可由大到小分成几个阶段进行。根据英国的应用范围, 达顿采用壁炉用的辐射燃烧器作为制定积碳的试验用燃烧器, 多数是从美学的观点来确定积碳等级 (如白色陶瓷辐射

器上出现黑色的积碳), 而不是出于安全或可靠性的考虑。

$$SI=0.896 \tan^{-1} (0.0255C_3H_8-0.0233N_2+0.617)$$

式中C₃H₈和N₂为当量混合物中C₃H₈和N₂的体积百分数, 英国燃气安全 (管理) 规程[GS (M) R]要求SI应小0.6。

笔者根据此式做了大量计算, 均不能得出所要求的结果, 但以上公式在文献中出现两次, 不存在印刷错误, 出现的矛盾需进一步求证。笔者根据后续的示例, 若公式改为:

$$SI=0.896 \tan^{-1} (0.200053C_3H_8-3.092313N_2+0.617)$$

可得满意的结果, 但仅供参考。

(9) 韦弗指数和AGA指数 (Weaver Indices和AGA Indices)

韦弗指数和AGA指数是美国至今采用的参数, 笔者在本刊上已介绍过, 在此不再赘述。

从上述互换性参数的分析可知, 安全和效率的性能主要决定于燃气的组分和燃烧器的适当调节。反映燃烧性能的问题是: 黄焰端 (CO和积碳); 离焰 (噪音、CO和效率); 回火 (噪音、燃烧中断和设备损坏)。

英国用实际燃具做试验时采用了对某种性能最敏感的燃具, 如不完全燃烧用快速式热水器, 离焰试验用模压式炊事用具, 积碳用壁炉用陶瓷辐射器, 试验结果需有1倍的裕量, 目的是实验室的结果必须要能全部覆盖实际的运行条件。我国常主张用实际燃具作互换性的性能试验, 压力和风门条件又经常在变化, 这样的试验结果究竟为实际的运行条件能留有多少裕量? 均值得研究和探讨。

3.2.2 达顿图解法

笔者在本刊2009年第6期《论液化天然气与管道天然气的互换性》一文中对达顿法及其形成的来龙去脉作了介绍, 并有计算示例。在2010年第1期和第2期介绍了《预测燃气互换性的各种方法论述》, 说明英国在燃气互换性的研究方面做了许多工作, 从吉—普法到达顿法, 延续了几十年, 中间经过了很大的变迁。欧盟要求英国的标准与大陆欧洲国家相一致, 采用EN—437中基准气与界值气的概念和定义, 英国考虑到北海天然气的沃泊指数为49.7MJ/m³, 而纯甲烷在饱和水蒸汽状态下的沃泊数为49.82 MJ/m³, 因而同

意EN—437中以纯甲烷作基准气的作法,但又声明必须用湿气作标准。达顿图解法的基础是湿燃气,显然又与EN—437有差异。BP在互换性问题上采用达顿法作为研究起点,反映了他们偏爱英国方法的特点⁽¹⁾,但也明确了许多新的概念。

(1) 惰性当量群 (The inert equivalence grouping)

达顿图解法是将天然气简化为一种由 CH_4 、 C_3H_8 、 H_2 和惰性气体 N_2 的混合物。其中惰性气体 N_2 也包括如 CO_2 等的其他气体,统称为以 N_2 所代表的惰性当量群。已知一种实际的天然气组分后,除甲烷外将其他烃类换算成 CH_4 和 C_3H_8 ,其原理是它的每个分子所代表的燃气具有相同的理想体积和平均碳原子数(可参看本刊2009年第6期第9页),于是燃气中的可燃成分就成为 CH_4 和 C_3H_8 两种气体(假设甲烷以外烃类的燃烧速度相接近)。算出实际燃气的沃泊指数后,再计算相同条件下简化为 CH_4 、 C_3H_8 和 N_2 (以 N_2 为代表的惰性当量群)所组成燃气的沃泊指数,即可计算出唯一的未知量 N_2 的百分数,以此作为惰性当量群的代表。

完整的达顿图是一个三维图(如考虑 H_2 含量),但对世界多数天然气而言,因不含 H_2 采用二维图已足够。稍加分析可知,这样的简化法只对烷烃适用,对含有非烷烃的烃类气体,就难以做出可由甲烷和丙烷两种气体作代表的结论(如丙烯 C_3H_6 仅按1.0的 C_3H_8 或丁烯 C_4H_8 仅按-0.5 CH_4 和1.5 C_3H_8 计算)。

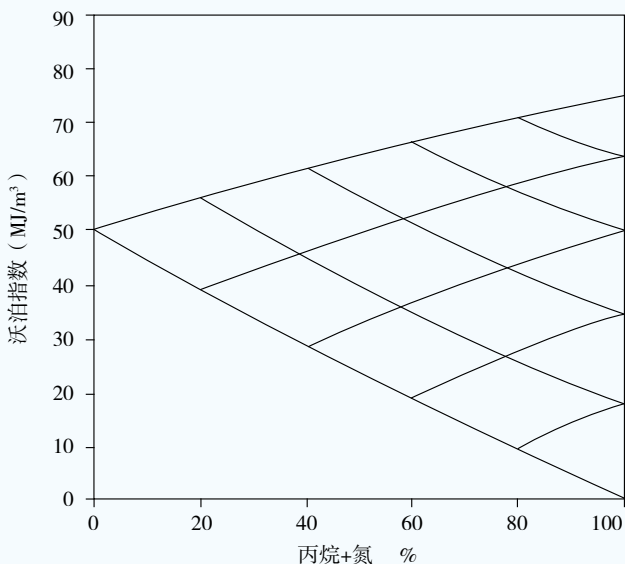


图3 达顿图的基础

按此概念可得图3中达顿图的基本图式。

图3中纵坐标为沃泊指数,甲烷在15℃和101.325kPa时的沃泊指数为50.7MJ/m³。横坐标为不同的 $\text{C}_3\text{H}_8+\text{N}_2$ 的百分值,如按不同的 $\text{C}_3\text{H}_8/\text{CH}_4$ 和 N_2/CH_4 值计算就可得到图中的两条界限曲线。笔者据此计算也可得同样的图形。结论是没有一种天然气可能处于图3中两条边界线之外,网格所示的范围即可用的燃气混合物。实际的燃气混合物不可能覆盖 $\text{C}_3\text{H}_8+\text{N}_2=100\%$ 的情况,这是一条LPG的界限线或者是一种处于正常火焰范围以外的混合物。

在英国,燃气安全(管理)规程部门(GS(M)R)通过健康和执行委员会(Health and Safety Executive)和国家管网(National Grid)规定燃气质量和天然气的进入条件。原则为以沃泊指数为互换的主要参数,同时也考虑到不完全燃烧范围和积碳指数。GS(M)R规定的约束范围如图4。

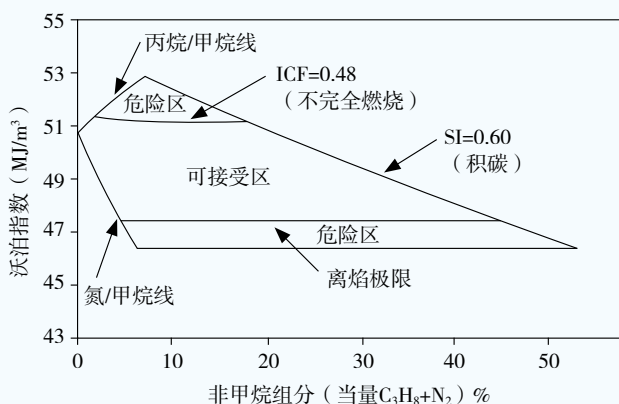


图4 附有GS(M)R极限范围的达顿图

图4中,可接受的燃气质量范围上部受不完全燃烧因素,右侧受积碳指数,下部受离焰范围的限制。BP的评价也以此图做基础。

(2) N_2 的配置

LNG的沃泊指数较高,多数在图5中可接受的范围之外,用加氮的方法可以重新回到可接受的范围之内,如图5所示。

由图5可知,在组分不同的15种LNG中,只有2种在可接受范围的边界线上;如掺进2%的 N_2 ,则有4种进入可接受的范围;如加进4%的 N_2 ,则除1种在可接受范围之外,其他14种均进入了可接受的范围之内。实际上当今许多LNG进口厂已建有 N_2 的引入装置,但

这只是可采用的一种方法。

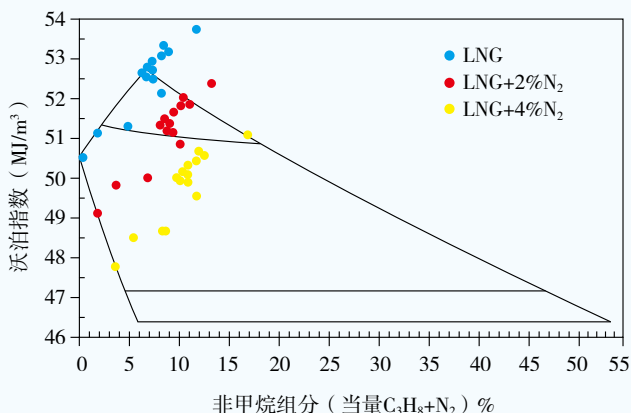


图5 表示N₂配置效应的达顿图

个案研究一：英国燃具的试验计划

作为英国燃具试验的一个部分，对可以代表英国2/3以上的25种不同燃具，用15种不同的燃气进行了试验。这15种试验燃气的沃泊指数范围如图6所示。试验中先加入6%的N₂，后再加入6%的CO₂。图中有一条相对密度RD线，在RO ~ 0.7线右侧范围内的燃气做过加N₂或CO₂的试验。

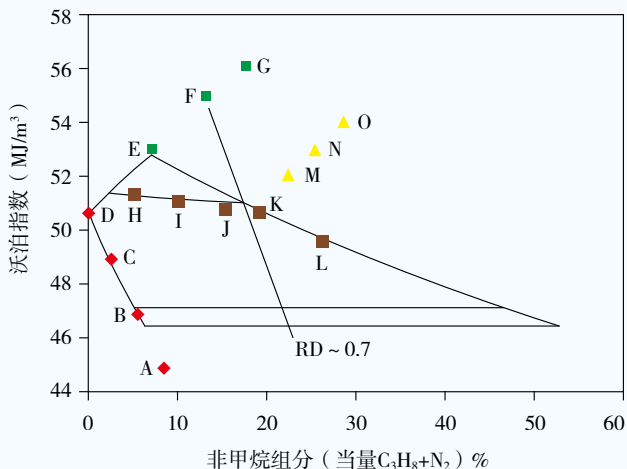


图6 表示试验气特性的达顿图

试验设计是尽可能的代表英国现有的各类燃具，首先着重于那些按欧洲燃具导则 (GAD-Gas Appliance Directive) 90/396/EEC制造和发证的燃具。对新型的和常用燃具试验的目的是确定其对燃烧性能和运行中排放量的影响。对GS (M) R规定以外的燃气也测定

了其排放量和效率性能，对再气化的LNG加N₂后的燃气也做了评审。

当初期望的是新型燃具与老型的相比应受沃泊指数变化的影响较小。但实际情况是新型燃具的高效和减排允许的沃泊指数变化范围很窄，在燃气质量规定中均应协调好。在GS (M) R范围以外的燃气，其CO排放量均随沃泊指数的增加而增高，如图7所示。英国管道天然气燃烧设备造成CO中毒死亡人数每年为10人—20人，这说明，在GS (M) R范围以外的燃气不论设备按现有的燃气规定做多好的精心设计，发生性能被破坏的状况也在增多。

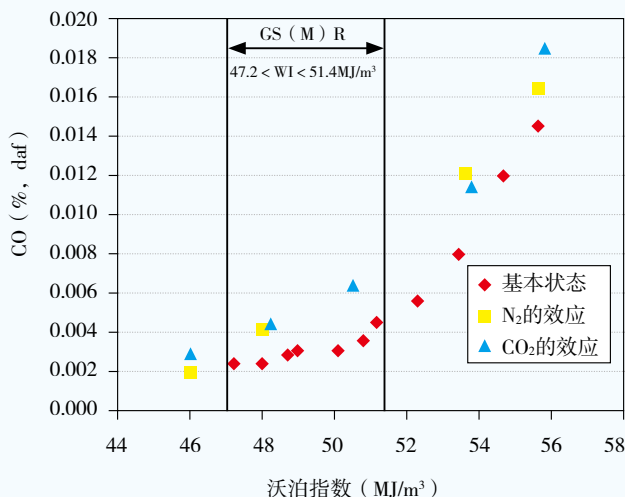


图7 天然气用N₂或CO₂稀释的效应

从试验计划得到的结果可概述如下：

- (1) 燃具对所有试验气的点火状况均良好；
- (2) 离焰通常不是主要问题；
- (3) 烟气中只有少量积碳或无积碳测出，但有些则发现沉积在壁炉里装饰用的仿制煤炭上（使用高沃泊指数的试验气时）；
- (4) 沃泊指数增大，则NO_x的排放也增加；
- (5) 沃泊指数变化时，效率有微小的变化；
- (6) 沃泊指数增大，CO₂的排放量增加。

以上结论也包括加N₂配置的LNG。更详细的有关燃气质量的试验信息可查阅《燃气质量对民用燃具性能的评估》报告。该报告长达74页，十分详尽，已成为英国不接受大陆欧洲标准的依据，笔者已得到原文⁽⁶⁾，需进一步认真研究。

3.2.3 工业和商业用的燃烧设备

除了民用燃具，还应考虑到工业和商业用燃烧设备的要求。详情可见本刊上期《燃气质量变化对终端用户影响》一文。

工业和商业用的燃烧设备，由于对较为复杂的工艺控制系统做了很大的投资，如空气/燃料比和烟气反馈调节控制系统等，理应对沃泊指数和热值的变化有更大的适应范围，但实际情况是生产率降低或热动力管理工作量的增大。

有些工业用户则对沃泊指数增大的变化特别敏感，如已介绍过的发电用燃气轮机，对燃气质量快速的变化特别敏感。可能受到不利影响的其他工艺和设备还有：浮法玻璃和玻璃纤维生产，有大气控制要求的窑炉，陶瓷和上釉工艺，燃气发动机，直接接触火焰的纺织工艺等。

4 各国的燃气质量计划

到目前为止，解决燃气质量中的互换性问题虽已成为各国的共同要求，但从未形成一个共同的研究组织来处理共同的问题。英国的上述研究是根据沃泊指数的定义和对互换图意义的解释，把下游燃气设备的燃烧性能表示在达顿图上，以便看到燃气质量的变化，特别是不同气源的LNG再气化后的组成对燃烧设备性能的变化在可接受的边界范围内的位置。

各国政府对天然气的安全供应和燃气的互换性均十分重视，以燃气质量研究计划的方式提出本国或本地区处理这类问题的原则。

4.1 英国的燃气质量计划

北海天然气的枯竭已向欧洲一些国家提出了供气的安全问题。若干条相互连接的新管线正在建设，并使用新的LNG进口端。为了推进和整合欧洲国际间边境的燃气贸易，欧洲管道燃气的输气方受其他欧洲燃气工业的支持建立了一个新的组织以发展和促进一个共同的商务准则，这一组织称为欧洲气体能量交换合理化协会（European Association for the streamlining of Energy Exchange-gas），简称EASEE-gas，总部设在巴黎，并受欧洲委员会（EC-European Commission）和欧洲法规管理部门（European Regulators）的支持，其目标之一是产生一个《协调的燃气质量规定》

（Harmonised Gas Qualify Specification）。

图8表示了英国GS（M）R规定的燃具运行可接受的沃泊指数范围为 $51.41\text{MJ/m}^3 \sim 47.20\text{MJ/m}^3$ ，而EASEE-gas建议的范围为 $54.00\text{MJ/m}^3 \sim 46.45\text{MJ/m}^3$ ，燃气的相对密度小于0.7。

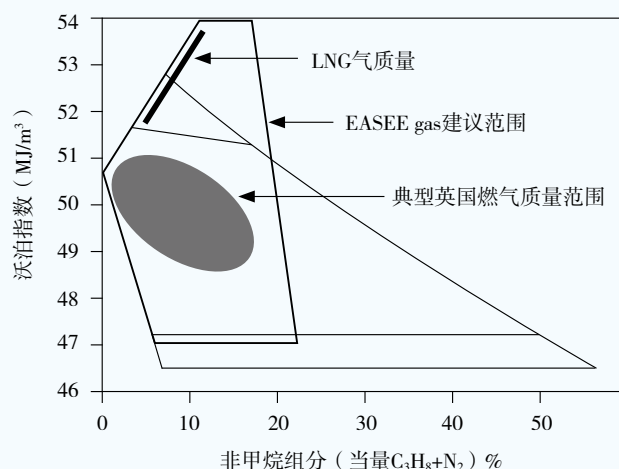


图8 表示GS（M）R和EASEE-gas建议范围的达顿图

由图8可知，同为欧洲国家，两者相差甚远，焦点在哪里？为了回应未来欧洲燃气质量规定可能实现的协调要求，英国政府制定了一个工作计划，对英国的情况做出鉴定。研究工作评估了在不同燃气质量条件下的燃具性能，并与燃气工业部门对未来的政策进行了咨询研究，弄清了潜在的争论焦点在于保持供气的公共安全性和保证终端用户的安全，即必须保证不降低能源效率和最大限度的减少能源成本增加，情况已逐渐清晰。另一个欧洲天然气工业技术协会即MACOGAE（Technical Association of European Natural Gas Industry），总部也设在巴黎，对EASEE-gas的建议方案也曾发表过立场文本，提出了不同见解，笔者在本刊2008.4曾有介绍。经过几年的讨论，现在已进入政府的层级。英国政府由工、商部负责（DTL），现称为商业、企业和法规改革部（DBERR—Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform），已完成了燃气质量的计划，包括研究和评论供气选择，燃气的替代处理，燃具的量测和试验计划，以及燃气质量变化对排放和效率的影响，均做了定量的研究。

2007年11月，英国政府发布了回应公众对英国燃气

质量规定 (Great Britain's gas quality specifications) 进一步的结论意见:

(1) 结论对燃气质量规定的选择“无变化”;

(2) 调节的成本、转换或买断2 200万幢房屋中4 500万个燃具的价值约为20亿—140亿英镑;

(3) 燃气价格的危机和供气的安全经评估影响甚小。

最后的结论是: 由各国互联的管网进口管道气或船运的LNG时, 需要经过处理, 以满足现有的GS (M) R规定, 进口LNG时将可能采用包括N₂的配置等方法, 降低沃泊指数值使之在允许的范围之内。

4.2 欧洲的计划

EASEE-gas建议的协调天然气质量标准目的是为了克服欧洲众多国家天然气跨境贸易的障碍, 与当今讨论的燃气质量中的互换性问题并不完全相同。

欧洲委员会导则 (EC Directive) 98/30/EC和2003/55/EC的目标是产生一个完全满足欧洲内部天然气运行的市场, 有共同的输气、配气、天然气供应和储存的法规, 而欧盟成员用不同的燃气质量标准看起来是跨境贸易的一个障碍。欧洲委员会要求欧洲标准化委员会 (CEN) 在EASEE-gas共同的最佳准则基础上执行一个协调的燃气质量标准。

代表欧洲的输气方和感兴趣的其他方正在完成共同的燃气质量标准。

在一个两段的计划中, CEN将做以下工作:

(1) 对欧洲范围内已安装使用的大量燃具按试验计划进行测量和分析以选择有代表性的燃具 (类似于英国的计划);

(2) 工作完成后修订欧盟关于高热值燃气标准 (即所谓H类燃气), 以便成员国在3年内可使用新标准。

可能的结果是产生一个协调欧洲燃气质量的标准, 用范围大于多数欧洲国家现行规定的沃泊指数来表达互换性。对某些欧洲国家的影响是: 对再气化LNG只能作少量的处理或不加处理的要求。总的精神是具体问题由各国自行处理。

4.3 美国的计划

在美国, 天然气委员会 (NGC), 包括四大工业组织: 美国燃气协会 (AGA), 天然气供方协会 (NGSA—Natural Gas Supplier Association), 美国州际天然气

协会 (INGAA—Interstate Natural Gas Association of America) 和美国独立石油协会 (IPAA—Independent Petroleum Association of America)。组成了一个NGC+工作组, 不仅有来自NGC的技术代表, 还受到能源部 (DOE) 和联邦能源规程委员会 (FERC—Federal Energy Regulatory Commission) 对燃气互换性项目的财务支持。北美有几个LNG进口终端正在建设或正在规划阶段。美国一般已有各州的规程、燃气的规定或税收规则, 都是以历史上各州沃泊指数的平均值为基础。NGC+的白皮书已向FERC提出, 推荐一个临时导则, 规定沃泊指数的范围应在各地历史平均值的 $\pm 4\%$ 以内, 其最高值限定为1 400 Btu/scf (52.16 MJ/m³), 最高热值为1 100 Btu/scf (40.98 MJ/m³), 以及再用两个以上的其他参数说明互换性的问题。FERC已部分地采用了白皮书中的论证和数据, 作为各州使用再气化LNG供气时燃气规则的讨论基础 (如佛罗里达州)。

美国确认沃泊指数是互换性的主要参数, 与世界其他地区, 如欧洲趋于一致。NGC+的临时导则也包括了其他参数, 如高热值、高烃含量C₄+和惰性气体总量等 (可参见白皮书), 不完全采用美国40年前的韦弗互换性参数和AGA参数。美国互换性的历史研究状况可参见笔者在本刊2010.1的一文, 以便全面掌握美、英两国考虑互换性问题的异同点。

此外, 在美国已形成了一个该项目的研究团队, 在AGA组织下, 在继续审核AGA的4A报告: 《天然气合同计量方法和质量条款》以及36号研究公告: 《天然气与其他燃气的互换性》。

美国也继续进行燃具的试验, 通过燃具制造商协会 (GAMA—Gas Appliance Manufacturers Association), 南加州燃气 (SOCAL—Southern California Gas) 和加州能源委员会 (CEC—California Energy Commission) 与美国燃气工艺研究院 (GTI—Gas Technology Institute) 共同进行这一工作。FERC计划对众多的LNG进口终端进行公众听证 (佛、加两州), 提供公众讨论的燃气质量标准。领导部门首先收集各方关于燃气互换性的意见, 然后集中研究一个协调的标准, 既简单又能准确的改进天然气的跨国贸易。

4.4 远东地区的国家

日本是世界上主要进口LNG的国家。高热值再气

化的LNG供应日本的主要中心城市，如东京、大阪和名古屋等，而LPG则供应更多的地方区域。一个整体燃气族（IGF—Integrated Gas Family）计划已由政府建议，以整合燃气的供应。

中国还没有类似的国家天然气质量标准。我国天然气标准化技术委员会（CNGSTE）始建于1999年，负责开发天然气工业的标准，一个LNG标准技术工作组已形成，管理涉及LNG的标准。

4.5 存在的共同问题

4.5.1 参与与参考值

由表1所示，不同国家由于所取参照值的不同，相同的沃泊指数可能有不同的数值。英国GS（M）R是参照国际标准ISO 6976（1995），而美国则根据美国标准燃气处理协会（GPA—American Standard Gas Processors Association）GPA 2172—96的规定，在计算和引用时应特别注意。使用EASEE-gas的kWh/m³单位时也应考虑到参照条件进行换算，在购气合同中必须有明确说明。

4.5.2 沃泊指数的范围

本文虽然试图讨论燃气互换性的共同范围，但也应认识到在不同地区的设计、安装和各地区历史上燃气燃烧设备性能优化调节方法的区别。如有的国家是允许对燃具进行现场调节的，与公认的燃气互换性定义并不一致。

表3列出一些国家当前可接受的沃泊指数范围。由表3可知，除法国、德国和新西兰外，EASEE-gas根据《共同的商务准则》建议的沃泊指数范围最宽。

表3 各国允许的沃泊指数变化范围

国家	依据	沃泊指数变化范围
美国	NGC/AGA 白皮书	± 4.0%
英国	GS（M）R	± 4.9%
EASEE-gas	共同商务准则（建议）	± 5.6%
法国	长输管线进入标准	± 7.0%
德国	国家标准	± 10.1%
意大利	国家标准	± 5.0%
韩国	国家标准	± 4.6%
新西兰	国家标准	± 6.1%
阿联酋	阿布扎比规定	± 3.0%

这一建议规定可能根据两年的试验计划有变化和调整。

国际上一致认为，为保证供气的安全，来自不同气源的燃气质量今后的变化会更大，多数用户接受的沃泊指数可能在规定的范围内发生变化，且这种变化可能在短期内就出现。

4.6 LNG与管道天然气互换性的处理要求

根据当前所得的研究成果，笔者将美国、英国和EASEE-gas处理LNG与管道天然气互换性的要求汇总于表4中。

5 结论与认识

（1）英国BP在完成《燃气互换和燃气质量参考手册》（以下简称《手册》）一书中做了许多工作，也澄清了许多问题。英国BP采用了1984年达顿以沃泊指数和当量燃气组分C₃H₈+N₂为坐标的互换图为基础，再增加一些附加条件，以适应当今用户多样条件下LNG与管道天然气互换性的要求，整个思路与美国相类似。英国的方法已正式列入英国燃气安全（管理）规程（GS（M）R）中，美国则仍沿用自己的方法，保持地方标准。

（2）关于1982年和1984年英国达顿的互换图，笔者在本刊2009年6月和2010年1月的两文中均有详细介绍和算例。其区别在于1982年的二维图仍沿用沃泊指数与韦弗火焰速度因数两者的坐标关系。而1984年的三维图改成沃泊指数与当量燃气组分概念中的C₃H₈+N₂为坐标的关系。认为任何天然气均可转换成由CH₄，C₃H₈和N₂（三维图也包括H₂）组成的当量燃气，原因是烷烃的燃烧速度相类似，可使计算简单化，烯烃虽不符合换算原理，但也用相同于烷烃的方法处理，因天然气中通常很少含有烯烃。显然，这仍只是一个经验方法，目前除英国外，尚未见其他国家有采用。但存在的问题是1984年达顿的三维互换图只适用于湿燃气，必须换算成湿燃气后才能供用，但《手册》中并无声明，而互换图都完全相同，尚须进一步弄清楚。

（3）为了探讨1984年达顿法采用烃的当量系数的近似性，笔者作了如表5的分析计算。

由表5可知，用当量系数法后，甲、乙、丙烷的

表4 LNG与管道天然气互换性要求

国家或地区	标准依据	要求	沃泊指数的范围	备 注
英国	在达顿图上标有GS (M) R的界限线	(1) 沃泊指数允许范围 47.20MJ/m ³ ~51.41 MJ/m ³ (2) 甲烷数、不完全燃烧因素、离焰指数、积碳指数 (用达顿图或计算公式) (3) 15℃/15℃/1atm	± 4.3%	
美国	1. NGC*临时导则, 其他参数包括高热值, 高烃C ₄ +和惰性气体含量 2. AGA 4A报告 (天然气质量条款中的合同计量值) 3. AGA 36号公告 (天然气与其他燃气的互换性)	(1) 最大沃泊指数值为: 1 400Btu/scf (52.08 MJ/m ³) (2) 最大高热值为: 1 100Btu/scf (40.92 MJ/m ³) (3) 离焰、回火、黄焰等 (4) 60F/60F/14.73Psi	± 4% 以历史上的平均值为标准	在此前的互换性计算中采用 ± 5%
EASEE-gas	EC导则98/30/EC 2003/55/EC 燃具导则90/396/EEC等	(1) 沃泊指数范围: 47.0MJ/m ³ ~54.0 MJ/m ³ (2) 限定相对密度的最大值为0.7 (3) 25℃/0℃/1atm	± 5.6%; 法国 ± 7%; 德国 ± 10.1%; 意大利 ± 5.0%。	(1) 两年试验计划完成后可能有变化 (2) 比利时、法国投资可适应气质变化的燃烧器, 在现场可更换替代喷嘴。 (3) 德国、荷兰用不同管网供应

表5 烃的当量系数假设分析

气体	高热值MJ/m ³	相对密度 (空气=1)	当量系数		当量值	
			CH ₄	C ₃ H ₈	高热值MJ/m ³	相对密度
甲烷 CH ₄	37.7816	0.5548	1.0	—	37.7816	0.5548
乙烷 C ₂ H ₆	66.6364	1.0467	0.5	0.5	66.7169	1.0522
丙烷 C ₃ H ₈	95.6522	1.5496	—	1.0	95.6522	1.5496
丁烷 C ₄ H ₁₀ *	126.2073	2.0787	-0.5	1.5	124.5875	2.0470
戊烷 C ₅ H ₁₂	159.7225	2.6575	-1.0	2.0	153.5266	2.5444
乙烯 C ₂ H ₄	60.1047	0.9745	0.5	0.5	66.7169	1.0522
丙烯 C ₃ H ₆	88.5163	1.4759	—	1.0	95.6522	1.5496
i—丁烯 C ₄ H ₈	118.5361	1.9663	-0.5	1.5	124.5875	2.0470
氮 N ₂	—	0.9671	—	—	—	—

高热值和相对密度与原值相差不大, 从丁烷开始与原值差别越来越大, 特别是烯烃也按烷烃计算的差别更大, 原因是已脱离了化学方程平衡的关系。BP认为当量法与美国白皮书用C₄+ (即丁烷以上) 原理上是

一致的, 这样的认识也值得商榷, 表5已表明了C₄+的特殊性。

(4) 《手册》中附上了不完全燃烧因素、离焰指数、积碳指数等的判别计算公式, 但在已有达顿图

的相关文献中均未见到过这类公式，似为BP提出的，却又未说明这些公式的出处。其中积碳指数的公式计算结果不令人满意，笔者只能根据后续的资料（之三中的表1）做了适当改动，以供参考。另外《手册》中离焰指数的公式没有说明其判定要求，似存在某些不足之处。

（5）在1984年的互换图上标出了EASEE-gas的建议范围（见图7），指的是极端危险区而不是允许的互换范围。这与本刊2008年9月笔者一文中的图中相类似。图4中EASEE-gas包揽一切的大框把美国、英国和日本的允许范围全部包括在内，这显然是值得商榷的。虽然英国也是欧洲国家，但BP竭力反对，值得我们思考和研究。

（6）《手册》中，将美国、英国当前的互换性处理方法与欧洲EASEE-gas的建议做了比较，如图6所示，后者似尚在变化中，又限定了相对密度的最大值不能超过0.7。英国和美国的思路基本相同，只是

判定互换的方法是结合本国的研究成果。美国虽未参加IGU的这项课题研究，但《手册》大量引用了美国当前的研究成果，从中可看到美国的研究进展和所起到的作用。欧洲的德尔布法在《手册》中没有提及，在EASEE-gas的建议和EN437中也没有任何反映。但在我国却十分流行，在各种文献中燃气的燃烧势与沃泊指数一样被当作燃气的一项特性参数，原因不明。实际上，不论达顿法、韦弗法或德尔布法等都是在互换图上采用沃泊指数以外的另一个参数，离开互换图的参数值已没有任何意义。

（7）IGU关于燃气互换性和燃气质量的研究将告一阶段，如何落实则是各国自己的事情，这项工作还正在开始或尚未开始，尤其是我国必须认真对待。世界燃气工业的发展日新月异，当前我国燃气工作者首先应认真研究国外所遇到的新问题和研究的新成果，掌握好第一性材料，在主管部门领导下制订试验计划，为制订好燃气质量与互换性标准做好准备。

安全管理消息

秦皇岛市燃气总公司 再次荣膺全国“安康杯”竞赛先进单位称号

近日，秦皇岛市燃气总公司荣膺全国“安康杯”竞赛先进单位称号，这是公司第三次获此殊荣。多年来，公司深入贯彻落实科学发展观，坚持“以人为本，安全第一，预防为主”的方针，以增强职工安全意识、提高企业安全管理水平为目标，大力开展“安康杯”竞赛活动，促进了企业健康发展。一是提高认识，强化组织领导，为竞赛活动的顺利开展提供了组织保证。公司及所属各单位都成立了“安康杯”竞赛活动领导小组，制定了活动方案，明确了竞赛主题，提出了实现两个提高、三个为零、三个加强的竞赛目标及竞赛活动的具体要求，形成了各级一把手亲自抓，主管领导专门抓，部门领导具体抓，相关业

务处室密切配合的竞赛活动网络体系。二是突出重点、创新活动载体，公司加强全员安全培训考核，广泛开展了“十个一”活动，全面推行“一法三卡”工作等，筑牢了安全生产基础。三是将开展竞赛活动与企业安全管理、班组管理有机结合起来，将竞赛活动内容作为“五型”班组创建活动的重要指标，使竞赛活动真正落到了实处。总之，公司把“安康杯”竞赛活动作为抓好企业安全生产工作的重要平台，作为引导职工参与企业安全管理、提高职工安全素质的重要抓手，营造了良好安全环境，切实保障了广大职工在生产过程中的生命安全与健康。

（李永柱 张爱民 王金华）