

专家论坛

SPECIALIST FORUM

燃气互换性与燃气分类的关系

中国市政工程华北设计研究院 (300074) 李猷嘉

1 引言

对事物的分类经常是一个模糊的概念, 根据事物不同的特征或特性可以有不同的分类方法和标准, 如生物学中的分类。而工程技术上的互换性, 则是一个具体的概念, 如机械工程中对螺钉的互换等应有更为具体的描述, 如结构、材质和强度等, 燃气的分类和互换也有类似的关系。但燃气的分类可看成是互换的必要条件, 即同类燃气才具有互换的可能性, 而能否确切的互换, 还必需具备充分条件, 即必须研究互换性的理论基础和实践状况。例如天然气中 L 类与 H 类之间就不能互换; 而 H 类燃气能否互换, 则尚需考虑其他条件后才能确定。在分类中通常应先确定一个参照体系, 例如燃气分类中的基准气或参照气 (Reference gas), 基准气或参照气通常是一种抽象了的气体, 并不是实际使用着的气体。不确定基准气就无法分类, 无法建立一个共同的标准。而燃气的互换性则是针对实际长期使用中的燃气而言的, 这是一种按合同要求必须长期供应的气体, 是设计、运行和设备选择的基础, 常称为核定燃气 (Adjust gas), 所谓互换性就是针对这类燃气而言的。一种实践情况是, 当气源的气质发生了变化, 后续长期供应的燃气, 能否替代原来使用的核定燃气, 就产生了燃气的互换问题。这种后续供应的燃气也就称为替代燃气 (Substitute gas), 如果由于技术、经济的原因, 互换情况并不理想, 就要采用燃气的转换 (Conversion) 方式, 求得彻底的解决。另一类情况常出现在调峰运行中。例如, 美国首都华盛顿, 虽有几条长输管

线供气, 也有地下气库设施, 但每年的冬季总有 7 天因气源的供气不足, 利用可中断供气户的调节后仍不能满足要求, 只能采用丙烷空气混合气补充不足的办法来解决, 这就产生了需要短期互换的问题。类似的例子在欧洲也时有发生, 如图 1 所示^[3], 发生在荷兰。图 1 中用负荷延时曲线表示 (Load duration curve), 虽在荷、德边境设有地下气库, 但也需要短期采用 LNG 调峰的方法才能满足用户需要, 必须做好计算和预测, 这就是互换性的意义。

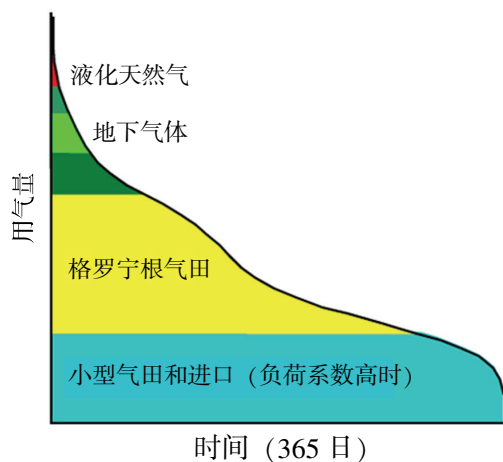


图 1 负荷延时曲线

在研究燃气分类和互换性问题时, 对基准气、核定气和替代气这三种燃气的概念应先分清楚。

在燃气工业发展的过程中, 各国根据本国的情况对燃气的分类方法和标准, 也由简单到复杂在不断的进步之中。我国城镇燃气分类和基本特性从

1992年的 GB/T 13611 到 2006 年的 GB/T13611 也有许多变化和进步^[4]。提出“本标准适用于作城镇燃料使用的各种燃气的分类”，没有再提及它与燃气互换性的关系。值得商榷的是仍将燃烧势定义为燃烧速度指数，从法国德尔布的原著中也查不出这样的解释，且与德尔布关于 CP 值的计算公式大相径庭。对 12T 天然气的回火界限气作了修改，由原来的 CH₄—65%，H₂—35% 改成 CH₄—77%，H₂—23%，H₂ 含量大大降低，改动较大。实践中对规定界限气的依据也应该弄清楚，它来自欧洲，以天然气为例，是企图统一欧洲所有国家现用的 H 类天然气的质量，是由贸易部门根据〈燃具导则〉90/396/CEE 和试验气标准移植过来的（详见本刊 2008.3 “正确处理天然气质量中的燃气互换性问题”一文）。我国并无一个像欧洲那样的〈燃具导则〉，也无燃具必须经过试验气试验合格后才能出厂的要求，更没有研究我国自己的国情报告，即使在欧洲的实践中也存在许多问题，反倒在我国造成了“只要通过基准气试验合格后，就一定能满足界限气范围要求”的误解，并作为判定燃气互换性的依据。

2006 年出版的燃气分类标准中将原标准中的气体状态标准 0℃，101.325kPa，改成按 ISO13443 规定的 15℃，101.325kPa，是完全必要的，但在我国其他的燃气规范、标准中还在沿用 0℃ 和 101.325kPa 的状态标准，欧洲除意大利、英国（美国、加拿大相同）外，其他国家也尚未统一。例如，法国计算燃气互换性的德尔布法，其判定图表就是按 0℃ 判定的，就华白数而言，15℃ 的值比 0℃ 的值要小 0.9461 倍，在互换性判定中，如按德尔布法 0℃ 的图表不合格，但如按 15℃ 的计算结果查 0℃ 的判定范围就可能合格，凡此种种，不得不察。

总之，分类标准中虽然采用了德尔布的 CP 值作为参考指标，但德尔布并不是分类标准的提出者，CP 值的计算方法也与德尔布的不同，提出的界限气的目的也不明确。

自 1976 年 13 届世界燃气大会文件中介绍了燃气的分类方法后，有些国家和我国一样，也开始按此方法对燃气进行分类，但这些国家从未将这样的分类与燃气互换性的判定相挂钩。

对燃气互换性研究比较深入的国家都是燃气使用历史悠久的发达国家，如美国、英国和法国，从对人工气的研究开始，逐步发展到天然气，至今尚未看到有第 4 个国家的有关材料。美国和英国还有计算机应用软件可以利用。

本世纪以来，由于高烃含量的 LNG 与原有管道 H 类天然气之间互换问题的研究和讨论，涉及的因素越来越多，包括欧洲在内都在研究美国的经验，他们相互联系，在贸易上将逐步统一在互换性逻辑框图中（Interchangeability box），荷兰在研究加 H₂ 量对排放的影响时，也在不断引用和参考美国的资料，值得我们注意。

2 互换性要求和分类指标的形成

2.1 互换性的定义（基本原理从略）^[2]

当本生型燃烧器使用两种燃气中的任一种时，对燃烧器不作任何调节或改变其形状，而能产生同样的火焰时，这两种燃气在该燃烧器上就可以完全互换。由某种可完全互换的燃气替代参照气（基准气）或核定燃气时，本生型燃烧器需保持：

- (1) 相同的热负荷；
- (2) 相同的一次空气系数；
- (3) 烟气中 CO 和 CO₂ 的含量比相同，并均无黄焰；
- (4) 火焰稳定，无脱火或回火；
- (5) 在燃具不同部位点火时的灵活性相同；
- (6) 同样的一次空气需要量和烟气的最高温度；
- (7) 相同的燃烧效率；
- (8) 其它（如环境要求相同等）。

2.2 热负荷（华白数）、一次空气系数和燃气模数的表达式（推导略）

2.2.1 热负荷

当喷嘴的结构和孔径相同时，如假设（h-h₀）不变，B 和 t 在相同的工作环境下也不变，则可得热负荷的表达式为：

$$Q_B = k \frac{Hg}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

上式在推导中：

h—喷嘴前燃气的工作压力，kPa；

h_0 —喷嘴后有效截面处的工作压力, kPa;

B —燃烧器工作地点的绝对大气层, kPa;

B_0 —标准大气压, 取 101.325kPa;

t —燃烧器喷嘴前的燃气温度,℃;

不同国家还规定了不同的燃烧基准 (参照) 温度 (combustion reference temperature), 有 25℃, 15℃和 0℃ 3 种;

Q_B —燃具的热负荷, MJ/m³;

H_g —燃气的高热值 (也可用低热值), MJ/m³;

d —热气的相对密度 (空气=1.0)。

$$\text{令 } W = \frac{H_g}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

$$\text{则热负荷 } Q_B = kW \quad (3)$$

式中: W —华白数。上世纪 60 年代由英国定名, 已为各国通用。

热负荷, 即燃具的出力, 是一个关键指标, 是燃烧设备的铭牌标志, 是任何热力设备高保证的基本参数。

2.2.2 一次空气系数

一次空气系数影响到燃具的效率、完全燃烧程度、火焰内锥高度和燃烧的稳定性等, 是另一个重要指标。不能离开一次空气值来讨论燃烧的稳定性。

从近似计算中可知, 一次空气系数与华白数的关系为:

$$\alpha = k'W \quad (4)$$

式中 α —一次空气系数, 即燃烧器中 1m³ 燃气所引入的空气量 (m³) 与 1m³ 燃气所需的燃烧理论空气量 (m³) 之比。

2.2.3 燃气模数

当燃烧器需由热值不同的替代气(2), 代替原用的参照气(核定气)(1), 并保持相同的热负荷和一次空气系数时, 应调节喷嘴或喷嘴前燃气的压力。在喷嘴不变时, 则与喷嘴前压力的关系式为:

$$\frac{h_1}{h_2} = K'' \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 \quad (5)$$

式(5) 可写成:

$$\frac{\sqrt{h}}{W} = m \quad (6)$$

式中 m —燃气模数

在上述各式的推导中, 均引用了 1 000kcal 热

值的经验定律, 即 1 000kcal/m³ 的燃气, 在燃烧时的理论空气需要量约为 1m³。

2.3 互换性要求与分类的形成

根据表达燃气模数的式(6)^[2], 可预计到燃烧器在使用天然气 (热值为 9 000—10 000 kcal/m³) 时, 燃具前的供气压力最低应为 15—25 毫巴; 使用城市燃气 (热值为 4 500 kcal/m³) 时, 最低供气压力应为 5—7 毫巴; 使用 LPG (热值为 22 000—28 000 kcal/m³) 时, 供气压力应为 40—60 毫巴, 才能保持燃烧器恒定的热负荷。这是对燃具而言, 燃气按压力分类的依据。

又根据燃气互换性的定义, 燃气的互换只限在热值相近的不同燃气间进行, 因此, 习惯于将燃气分成 3 族, 在每族中再分成若干类, 以同族或同类燃气作为讨论燃气互换性的必要条件。分类方法也是按上述城市燃气 (人工气)、天然气和 LPG 进行, 并与压力要求相匹配, 也可看作是最初从燃气互换性角度讨论燃气分类的意义所在。如美国的燃气分类。

讨论燃气互换性时限定热值相近范围的另一明显原因是涉及到 H₂ 和其它燃气的热值和燃烧特性的不同特征。在 0℃, 101.325 kPa 时, H₂ 的高热值为 12.745 MJ/m³, 相对密度为 0.0695; 15℃时 H₂ 的热值为 12.095 MJ/m³, 相对密度为 0.0695, 因此, 0℃时 H₂ 的华白数为 $W_0=48.34\text{HJ/m}^3$, 15℃时为 $W_{15}=45.879\text{ MJ/m}^3$, 而相应的甲烷华白数为 $W_0=53.49\text{HJ/m}^3$ 和 $W_{15}=50.72\text{ MJ/m}^3$, 华白数值与多种实际应用的天然气相差不大, 而热值相差达 3 倍*, 同样热负荷要求时, 在相同的压力下通过同样的喷嘴时, H₂ 的流速比 CH₄ 要大 3 倍以上, 且燃烧特性又迥然不同, 因此, 在分类中不能仅考虑华白数, 有的国家在分类中再以热值为补充指标 (如美国), 也有的国家 (如欧洲) 再以相对密度作补充指标, 以作为限制条件。

随着科技的进步和对各种燃气 (包括混合燃气) 燃烧性能研究的不断深入, 要处理好燃气分类和燃气互换性之间的关系, 不外有两种方法: 一种是在燃气分类的基础上, 对同类燃气补充进行燃气互换性的计算, 以确定替代燃气能否与原用的核定燃气互换, 计算的方法可采用美国的多种方法 (包括韦弗法)、英国的多种方法和法国的德尔布法等,

也可以用各种方法的计算结果进行比较后再作出制定。另一种方法是类似欧洲的思路：根据欧洲各国燃气的实际使用组成和预期可能出现的组成（如LNG）——核定燃气，制定适用于欧洲各国的强制性标准《燃气导则》和界限气标准，燃气生产厂必须满足这一标准的要求后产品才能出厂，并对用户的使用和运行负全部的责任，能做到这种程度后，燃气的分类再引用有关数据，作为标准内容。这样的标准当然也可指导作为判定燃气互换性的依据。这一思路是欧洲的燃气贸易协会所追求的，工作量很大，实际执行中存在的问题很多，不再赘述（可参阅本刊2008，3—4期）。

本世纪以来，国际上对燃气互换性的讨论又深入到一个新的阶段（如涉及到发动机的缸和环境要求等），值得注意。

3 对法国德尔布法的分析比较

3.1 德尔布的试验燃烧器

试验燃烧器应具有比商业燃气设备中的燃烧器对燃气质量的变化更为敏感的特点。许多国家都有自己的试验燃烧器，1918年首先出现在美国和加拿大，到上世纪的40年代已有14种，且不同的火焰特性可用相应的试验燃烧器来测试，而不是直接用燃具。这类燃烧器一般也是本生型的，可直接提

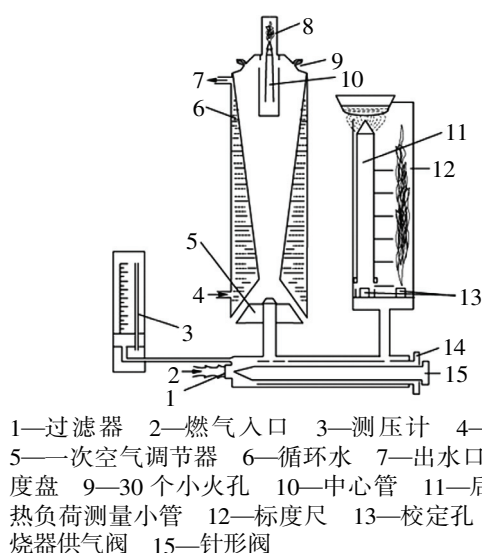


图2 试验燃烧器图

供与燃气质量有关的指标。德尔布先生认为过去的各种试验燃烧器已难适用于法国当时的情况，因而制造出一台新型的试验燃烧器，如图2所示。

试验燃烧器主要包括一个含有两个层流扩散火焰的燃烧器（图中右部）和1个预混式燃烧器（图中左部），1个阀门和1个测压计。

(1) 首先找出需要试验燃烧器试验的燃气额定流量和相应的燃气压力 h_n 。以火焰的高度作为额定流量的标志。因此，在两个层流扩散火焰达到刻度尺上标定的高度时，记录其所需的压力。

求其第一近似值时，火焰的高度只与一定的热输入有关，实际上，它与燃气在空气中的扩散系数也有关。

(2) 利用一个后装入的小管，使两个层流火焰中的一个改变成预混空气的火焰，并测定蒸发 20cm^3 水所需的时间。不同的时间段有不同的 h 值。在这一试验燃烧器所附带的经验图表上，可查得随水量蒸发所需时间变化的 h 值，或 $\frac{h_n}{h}$ 值。如扩

散火焰在 h_n 的压力下能稳定，且 $\frac{h_n}{h}=1.5$ ，则可认为扩散式燃烧器的工况令人满意，并可在 h_n 压力下向预混空气的燃烧器供气。

(3) 预混空气的燃烧器包括一个一次空气入口（可以准确记下此进气口的开度）；一个用来减少金属件温升的水套；30个直径为2.5mm冠状排列的火孔和一根长120mm，直径为8mm的中心管。从刻度盘上可读出中心管出口的火焰内锥高度。所附图表规定了使一次空气为0.8时随 h_n 压力变化的进气口开度。一旦预混空气的火焰稳定，压力 h_n 低于最大压力值 h_m ，中心管火焰的内锥高度不超过刻度尺上所标的一定高度时，测试用燃气即可不干扰在用燃具的正常工况。

(4) 试验燃烧器具有比商业燃具的燃烧器对燃气质量更敏感的特点。根据经验得知，冠状排列小火孔的火焰若微弱脱火，即表示在民用燃具上将出现离焰或吹熄。中心管火焰的轻微飘动，即表示在民用燃具上将出现回火。

3.2 燃烧势 CP (Combustion potential)

德尔布先生分析找出了应予以重视的燃烧势 CP 值。法国的弗朗索瓦·莫斯先生在他的著作中解

释为“燃烧势可说明外形尺寸一定的燃烧器的热输出情况,是判断两种燃气互换作用的非常有用的补充资料。实际上,燃烧势不是直接以燃气每种可燃成分的燃烧速度来表示,而是在同样含氧量下,比较燃气每种可燃成分的热效应”。这与我国燃气分类标准中对燃烧势解释为燃烧速度指数不同,从其它的原文或我国或从日文翻译过来的原文资料中也未见到对燃烧势的物理概念有解释,只有在某些中文图书中解释为燃烧速度指数,来源和出处不详。

当以氢的燃烧速度作为参照时,燃烧势的表达式为^[2]:

$$CP = \frac{H_2 + 0.3CH_4 + 0.7CO + v \sum aC_mH_n}{\sqrt{d}} \cdot U \quad (7)$$

式中: H_2, CH_4, C_mH_n, CO —测试燃气中上述组分的含量百分点数 (C_mH_n 为甲烷以上的烃类)。

0.3, 0.7, a —经验系数值 (未和燃烧速度相联系)。

v —修正系数。德尔布得出了区别于第一族燃气和第二族燃气 v 值的修正图表,在计算中可查取。

U —含 O_2 燃气的燃烧势修正系数。德尔布也得出了区别于第一族和第二族燃气的 U 值修正图表,在计算中可查取。

同时也说明,除华白数和燃烧势外,还必需考虑下列因素:

(1) 黄焰指数 I_j —与避免民用燃具火焰顶端出现黄焰所需的最小一次空气系数有关。

(2) 不完全燃烧指数 I_{cn} —与非预混空气的小火燃烧器的火焰不完全燃烧的倾向性有关。

在利用德尔布法制定燃气的互换性时,由于未建立起脱火、回火极限与 CP 值的数学关系式 (与韦弗法不同),但德尔布通过试验,建立了互换范围图。以天然气的互换范围图为例,该图纵坐标为华白数,横坐标为 CP 值,曲线包括掺混极限和不同压力下的脱火、回火和 $\frac{CO}{CO_2} > 0.02$ 的曲线等。如

按替代气组分求得的华白数和 CP 值曲线所规定的互换范围之内,则尚需利用德尔布法所提供的黄焰和不完全燃烧指数公式和相关的系数表进行计算,如黄焰指数不符合要求,则替代气也不能互换。

德尔布的另一贡献是得出了用他的名字命名的

半校正华白数法,用以计算燃具的热出力,考虑了式 (1) 的 K 值中随喷嘴流量系数变化的燃气粘度等的影响,而不是简单的用华白数代表热出力。

3.3 燃烧势 CP 与火焰速度 S 的比较

众所周知,韦弗 (Weaver) 提出了从各燃气组分的火焰传播速度系数 F 求出火焰传播速度指数 S 的关系式: 见式 (8), 用来表示混合燃气与氢在空气中最大火焰传播速度的百分比关系 (后者为 100)。

$$S = \frac{r_A B_A + r_B B_B + r_C B_C + \dots}{V_0 + 5r_i - 18.8r_0 + 1} \quad (8)$$

式中 $r_A, r_B, r_C, \dots$ ——燃气中各组分 A、B、C 的容积组分, %;

$B_A, B_B, B_C, \dots$ ——燃气中各组分 A、B、C 的火焰传播速度系数, (查表 1)

V_0 ——理论空气需要量;

r_i ——惰性气体的容积组分, %;

r_0 ——燃气中 O_2 的容积组分, %。

上式中用来导出火焰传播速度系数的单一气体火焰传播速度与用现代技术测量的结果并不完全一致。在 S 值的推导过程中也包含一些近似的计算。因此 S 值只作为混合气体火焰传播速度的近似指标,这一公式在工程计算中广为应用,公式的概念也十分清晰。

用式 (8) 可算出各单一气体的火焰速度指数 S 值, 如: 甲烷 $S = \frac{14.8}{9.52+1} = 14.06$; 氢 $S = \frac{339}{2.38+1} = 100.295$ (计算的依据和结果可见表 1)。

用同样的方法, 根据式 (7) 和表 1 中不同的 a 值, 也可算出各单一气体的 CP 值, 如: 甲烷: $CP = \frac{0.3 \times 100}{0.7448} = 40.28$; 氢 $CP = \frac{1 \times 100}{0.2637} = 379.22$; 乙

烷: $CP = \frac{0.95 \times 100}{1.0231} = 92.86 \dots$ 。

将计算结果也依次列入表 1 中。为了比较方便, 将氢的 CP' 值定为 100, 也可得出各单一气体的 CP' 值并列入表 1 中。将 CP' 与 S 值相比较, 可见两者的差异十分明显。若两者均是反映燃烧速度的一个指数, 则其中必有一个是错误的或不符合实际的; 或者一个称为火焰速度指数, 另一个称为燃烧势较为确当 (关键在于德尔布法中的 a 值)。

表 1 计算参数和可比较的计算结果

气体名称	分子式	0℃ 101.325kPa 高热值 MJ/m ³	15℃ 101.325kPa 高热值 MJ/m ³	相对密度 (空气=1)	$\sqrt{S}$	空气需 要量	德尔布法需用系数			美国 ACA 法及韦弗法				可作比较的计算结果			
							a	j	b	FL	T	B	S	CP	CP'	CP''	CP'''
一氧化碳	CO	12.636	11.966	0.9672	0.9835	2.38	-	0	-	1.407	0.00	61	18	71.17	18.77	61.0	16.09
氢	H ₂	12.745	12.095	0.0695	0.2637	2.38	-	0	-	0.600	0.00	339	100	379.22	100	379.22	100
甲烷	CH ₄	39.842	37.782	0.5548	0.7448	9.52	-	1	1	0.670	2.18	148	14	40.28	10.62	40.28	10.62
乙烷	C ₂ H ₆	70.351	66.636	1.0467	1.0231	16.66	0.95	2.85	2	1.419	5.80	301	17	92.86	24.49	58.65	15.47
丙烷	C ₃ H ₈	101.266	95.652	1.5496	1.2448	23.80	0.95	4.80	3.6	1.931	9.80	398	16	76.32	20.13	48.20	12.71
丁烷	C ₄ H ₁₀	133.886	126.774	2.0852	1.4440	30.94	1.10	6.80	4.7	2.550	16.85	513	16	76.18	20.09	41.55	10.96
乙炔	C ₂ H ₂	58.502	55.442	0.9057	0.9517	11.90	3.0	2.40	-	-	17.40	776	60	315.22	83.12	63.05	16.63
乙烯	C ₂ H ₄	63.438	60.105	0.9745	0.9872	14.28	1.75	2.65	2.8	1.768	8.70	454	29.6	177.27	46.75	60.78	16.03
丙烯	C ₃ H ₆	93.667	88.516	1.4759	1.2149	21.42	1.25	4.80	6	2.060	13.00	674	30	102.89	27.13	49.39	13.02
丁烯	C ₄ H ₈	125.847	118.536	2.008	1.4170	28.56	1.50	6.80	7	-	20.00	-	-	105.86	27.92	42.34	11.17
苯	C ₆ H ₆	162.259	146.429	2.967	1.7225	35.70	0.90	20.0	16	-	-	920	25	52.25	13.78	34.83	9.18
氧	O ₂	-	-	1.1053	1.0513	-	-	-	-	2.900	-4.76	-	-	-	-	-	-
氮	N ₂	-	-	0.9671	0.9834	-	-	-	-	0.688	-	-	-	-	-	-	-
二氧化碳	CO ₂	-	-	1.5275	1.2359	-	-	-	-	1.080	-	-	-	-	-	-	-

注：1. a. j. b 用于德尔布法。a—计算 CP 值时用于每种 C_nH_m 的系数（甲烷除外），j—黄焰系数，b—积碳系数。
2. F. T. B. S 用于 ACA 和韦弗法，F—最小空气量，B—单一燃气的火焰速度系数，S—单一燃气的火焰速度指数。

如果按照燃气分类中所采用的 CP 值计算式, 则各单一气体的 CP' 值亦列于表 1 中, 如含 H₂ 的 CP' 值为 100, 则将各单一气体的 CP'' 值亦列于表 1 中。由 CP' 的计算式可知, 单一气体 CO 和 C_nH_m 的 CP' 值均正比于 $\frac{60}{\sqrt{d}}$, 与按德尔布法的计算结

果已相去甚远, 但在我国标准的术语和定义中仍定名此燃烧势为燃烧速度指数, 不知德尔布先生本人能否接受这一结果。此式只有在日本瓦斯协会编的《煤气应用手册》(李强霖、蔡玉琢译) 一书中称之为“简化德尔布法”。在日本对燃气的分类中也曾用过根据华白数 W 来计算 CP 值的公式, 如日本 A 类燃气中 12A (12T) 的华白数范围为 12 850—1 1750 kcal/m³, CP 值的范围可用 $13.5 + 0.002041W \sim 40.8 + 0.004082W$ 来计算, 并规定计算时必须用 W 的下限值, 因此在上式中的 W 代入 11 750 后, 可得 CP 值的范围为 37—89, 与基准气相比, CP 值的范围为 -8%~+123%, 与原分类中的值完全相同。

从上述比较说明, 作为在分类标准中定义为“燃烧速度指数”的燃烧势 CP 值, 已在被滥用之中, 其后果也可想而知。笔者在此无进行评价之意, 只是提出问题以供质疑, 也联想到“尽信书, 则不如无书”这句名言。

4 对界限气规定的探讨

在我国《城镇燃气分类和基本特性》GB/T13611—2006 中, 采用了欧洲关于界限气的概念和数据。长期以来, 一直被理解为界限气所规定的

范围, 也就是以基准气为准的互换范围, 更进一步, 甚至理解为这就是德尔布法所规定的互换范围, 或这就是德尔布的互换性方法, 因为它引用了德尔布先生提出的 CP 值。与此同时, 虽然美国许多研究燃气互换性的专家提出了不同的意见, 但我国一直未加重视, 更谈不上进行比较研究。直到本世纪初, 欧洲的燃气交易协会 (EASEE-gas) 和欧洲的燃气技术协会 (MARCOGAZ) 的讨论公开后, 真实情况在我国才逐渐浮出水面, 原来与统一欧洲燃气的质量标准有关(可参见本刊2008年3、4期)。

如果根据各国多年来关于燃气互换性研究的结果和方法, 反过来研究规定的界限气能否与规定的基准气进行互换的问题, 则可能有益于帮助我们进一步理解两者之间的关系和存在的问题。

由于当前国际上讨论的焦点集中在 H 类的天然气上, 它代表着未来燃气发展中将遇到的主要问题, 因此, 比较的范围也只限于 H 类的天然气。

命题: 原始数据为 H 类天然气。

0 号气 (G₂₀) —基准气, CH₄=100%。

1 号气 (G₂₁) —不完全燃烧界限气, CH₄=87%, C₃H₈=17%。

2 号气 (G₂₂) —回火界限气, CH₄=77%, H₂=23% (原为 CH₄=65%, H₂=35%)。

3 号气 (G₂₃) ——脱火界限气, CH₄=92.5%, N₂=7.5%。

试求 1 号、2 号和 3 号气能否与 0 号气互换?

4.1 法国的德尔布法(标准状态 0℃, 101.325kPa)

计算结果列于表 2。

根据上述计算的结果, 再从德尔布的天然气互换范围图中查取 (燃气压力在 1 200—2 200Pa

表 2 互换性各项指标的计算结果与评价

燃气类别	华白数 W MJ/m ³	燃烧势 CP	黄焰指数 I _j	与 0 号气华白数的比较	结果评价
0 号气	53.4936	40.28	134.26	-	-
1 号气	57.825	46.49	180.63	+8%	在不完全燃烧区内, 但不脱火, 不回火, 无黄焰。
2 号气	50.486	69.25	69.25	-5.6%	已接近回火的限值, 无黄焰。
3 号气	48.16	36.26	120.86	-10%	在脱火区内, 热负荷不满足要求, 但无黄焰。

时), 可得表 2 中的评价结论。这说明, 检验不完全燃烧和脱火用的界限气, 已在德尔布互换方法允许的范围之外。如燃具经这两种界限气检测后能满足要求, 表示其性能质量特别优秀, 已超过了德尔布互换方法的要求。与 0 号气相比的华白数值: 1 号气为+8%, 2 号气为-5.6%, 3 号气为-10.73%显然太高, 这与英国达顿(Dutton)规定的允许范围为-5%~+3%概念上是一致的, 但数值相差甚大。

笔者注意到原分类标准中回火界限气的组成为 $\text{CH}_4=65\%$, $\text{H}_2=35\%$, 用同样方法计算后, $W=48.55\text{MJ}/\text{m}^3$, $\text{CP}=88$, $I_j=104.77$, 已在德尔布法的回火区内, 不能容忍, 但无黄焰。值得注意的是, 判定回火的界限气, 对天然气而言没有什么意义, 因为天然气是回火倾向很小的燃气。以含 H_2 量超过 20% 的燃气作为界限气来判定, 在实际使用的天然气组成中根本不存在, 不必多此一举, 英国的

学者也早已提出过。至于近年来国外有学者在研究加 H_2 对改善天然气排放特性的作用^[5], 虽值得注意, 但这是另一类问题。

4.2 美国的 A.G.A 36 号公告和韦弗法 (标准状态 0°C , 101.325kPa)

美国的互换性方法与法国的德尔布法不同, 不是用互换范围图表示, 而是用替代气 S 与实际上正在长期使用的核定气 a (Adjust gas) 之间各种关系的计算式表示。在以下的计算中假设 0 号基准气为被替代燃气, 即核定燃气 a。1 号、2 号和 3 号界限气假设为 3 种替代气 S_1 、 S_2 和 S_3 。计算中用到的基础数据值可见表 1。对基础计算的结果汇总后列于表 3 中。

式中: q — 燃烧器头部燃气-空气混合气的热值。 q 值常取 $175\text{Btu}/\text{cf}$ ($1\ 560\text{kcal}/\text{m}^3$ 或 $6.52\text{MJ}/\text{m}^3$), 是上世纪 50 年代各国 (包括前苏联) 研究互

表 3 基础计算结果汇总

项目	核定气 a (G20)		替代气 S_1 (G21)		替代气 S_2 (G22)		替代气 S_3 (G23)	
	代号	数值	代号	数值	代号	数值	代号	数值
脱火极限	K_a	1.2076	K_{s1}	1.21897	K_{s2}	1.475	K_{s3}	1.1463
一次空气系数	f_a	0.7345	f_{s1}	0.680	f_{s2}	0.7782	f_{s3}	0.816
燃烧 100kJ 的空气需要量	a_a	0.890	a_{s1}	0.887	a_{s2}	0.873	a_{s3}	0.890
燃气的高热值	HV_a	37.782	HV_{s1}	45.305	HV_{s2}	31.874	HV_{s3}	34.948
黄焰极限	y_a	22.89	Y_{s1}	27.86	Y_{s2}	21.2993	y_{s3}	21.60
$\sqrt{\text{燃气相对密度}}$	$\sqrt{d_a}$	0.7448	$\sqrt{d_{s1}}$	0.8271	$\sqrt{d_{s2}}$	0.66572	$\sqrt{d_{s3}}$	0.76532
游离碳原子数	N_a	0	N_{s1}	26	N_{s2}	0	N_{s3}	0
火焰速度	S_a	14.06	S_{s1}	14.58	S_{s2}	21.613	S_{s3}	13.44
氢/碳比	R_a	4.0	R_{s1}	3.5873	R_{s2}	4.597	R_{s3}	4.0
理论空气需要量	A_a	9.524	A_{s1}	11.38	A_{s2}	7.881	A_{s3}	8.81
燃气中的 O_2 含量	O_{2a}	0	O_{2s1}	0	O_{2s2}	0	O_{2s3}	0
华白数	WI_a	50.73	WI_{s1}	54.776	WI_{s2}	47.879	WI_{s3}	45.665
诺埃数 *	KN_a	41.97	KN_{s1}	46.89	KN_{s2}	38.085	KN_{s3}	37.145
脱火常数	FL_a	0.67	FL_{s1}	0.8339	FL_{s2}	0.6539	FL_{s3}	0.6714
黄焰常数	T_a	2.18	T_{s1}	3.1706	T_{s2}	1.6786	T_{s3}	2.0165

* 诺埃指数 (knoy factor) $\text{KN} = \frac{\text{Hg}-q}{\sqrt{d}}$

换性时广为采用的指数，与华白数的概念相类似。美国的互换性判据表明，华白数与诺氏指数的允许偏差均为 $\pm 5\%$ ，对燃烧特性相同的燃气，是一项一票性可以否决燃气互换性的项目。

根据表 3 所示的基础计算结果，可对 3 种界限气(替代气)与基准气(核定气)之间的互换性做出评价。

4.2.1 A.G.A 36 号公告法

计算结果列于表 4。

4.2.2 韦弗法

计算结果列于表 5。

表 4、表 5 中各公式的物理概念十分清晰，黄焰、回火、不完全燃烧、脱火等指数以及火焰高度

等均与一次空气引入量有关，离开一次空气引入量来讨论上述指数则没有意义，与我们的实际经验是完全符合的。以上公式中除回火和脱火与火焰速度因素有关外，黄焰和不完全燃烧与火焰速度因素无直接关系，有关书籍中均有说明，不再赘述。

比较表 2、表 4 和表 5 中的数据后可知，用德尔布法判定 1 号试验气有不完全燃烧，2 号气接近回火，3 号气有脱火；用 A.G.A36 号公告法判定 1 号气有黄焰（不完全燃烧与黄焰不是同一概念），2 号气接近回火，3 号气有脱火；用韦弗法判定 1 号气有不完全燃烧和黄焰，2 号气有回火，3 号气接近脱火。3 种判定方法的结果十分相似，差别在于试验燃烧器和某些参数的偏差，且 3 种试验气均不

表 4 A、G、A36 号公告法的计算结果*

项目	公式	由 S ₁ 替代 a	由 S ₂ 替代 a	由 S ₃ 替代 a	判据
脱火指数	$I_L = \frac{K_a}{\frac{f_{a_s}}{f_{s_a}} (K_s - \log \frac{f_a}{f_s})}$	0.9458 不发生	0.8696 不发生	1.125 发生脱火	>1.1 发生脱火
回火指数	$I_F = \frac{0.16383 K_s f_s \sqrt{HV_s}}{K_a f_a}$	1.0305 不发生	1.196 接近回火	1.0214 不发生	>1.2 发生回火
黄焰指数	$I_T = \frac{f_{s_a} y_a}{f_{a_s} y_s}$	0.7632 有黄焰	1.1608 无黄焰	1.1773 无黄焰	<0.86 有黄焰产生

*36 号公告法只有黄焰指数，无不完全燃烧指数。

表 5 韦弗法的计算结果和评价

项 目	公 式	由 S ₁ 替代 a	由 S ₂ 替代 a	由 S ₃ 替代 a	判 据 完全互换 极限值
空气需要 量指数	$J_A = \frac{A_s \sqrt{da}}{A_a \sqrt{ds}}$	1.076	0.9258	0.9002	$\frac{1}{-}$
黄焰指数	$J_y = J_A + \frac{N_s - N_a}{110} - 1$	0.3124 有	-0.0742 无	-0.0998 无	$\frac{0}{<0.14}$
回火指数	$J_r = \frac{S_s}{S_a} - 1.4 J_A + 0.4$	-0.0694 无	0.6411 有	0.0956 (接近)	$\frac{0}{<0.08}$
完全燃烧 指数	$J_r = J_A - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634$	0.1138 有	-0.1288 无	-0.0698 无	$\frac{0}{<0}$
热负荷 指数	$J_H = \frac{HV_s \sqrt{da}}{HV_a \sqrt{ds}}$	1.0298 不允许	0.9438 不允许	0.9002 不允许	$\frac{1}{0.95 < J_H < 1.05}$
脱火指数	$J_L = J_A \frac{S_s}{S_a} (\frac{100 - O_{2a}}{100 - O_{2s}})$	1.1158 无	1.423 无	0.8605 (接近)	$\frac{1}{\geq 0.64}$

能与 0 号气相互换，界限气本身就在可互换的范围以外，是一种贸易部门一厢情愿的要求。在制定天然气的质量标准时，如盲目作为依据，必然会成为燃气应用部门反对的焦点，当前欧洲在标准研究中的不同看法也就必然会产生。

5 关于互换性逻辑框图

值得注意的是，当今国际上表达燃气互换性的概念时，又出现了一种“互换性逻辑框图 (The interchangeability box)”，并认为，在市场上缺乏影响燃烧器性能的资料时，确定燃气的互换范围十分有用。

互换性的限值框 (The interchangeability limit box) 最早在美国用来将 A.G.A 36 号公告的方法图示化，并非商业用途，表达的坐标也不同。2005 年美国《天然气可互换性及非燃烧应用白皮书》中也应用了互换性逻辑框的概念，图中纵坐标用华白数，横坐标用称为补充的指标，如热值， C_4 等表示 (可参见本刊 2006.8，刘艳华一文)。这种逻辑框图也被欧洲所采用，如图 3 所示^[1]。

在图上，欧洲合理能源 (燃气) 交易协会 (EASEE-gas) 的互换性逻辑框规定了华白数值的上下限和相对密度的限定值。实际上来自欧洲 EN437 试验气标准 (即我国燃气分类标准中所引用的值，且华白数的范围更大 $45.67\text{MJ}/\text{m}^3 \sim 54.78\text{MJ}/\text{m}^3$)。

图 3 中的 LNG 质量反映了当今出口厂的生产数据，也是对规划建设中 LNG 出口厂设计质量的要求，但它不能作为长期销售协议 (Sales and purchase Agreement (SPA)) 中的质量保证值。质量的保证度与规定值总会有一些出入，可能有 $\pm 2\text{MJ}/\text{m}^3$ 的差别，视出口厂的具体情况而定。由于气田有效生产能力的升降，而出口厂的供气情况也会有变化，有一些灵活性也是必要的。此外，出口厂为了扩大产量，考虑到维修和年收入的最优化，也可能改变其对重组分的萃取量等级，这与某些具体市场所期望的质量要求也有关。

图 3 中也表示了一些管道气的状况。在热值—华白数关系图上的上部，LNG 围绕虚线有一些小量的偏差；管道气多数位于图的下部，其华白数常低于甲烷，因惰性气如 N_2 或 CO_2 相对含量较高所引起。

图 4 所示为用华白数—热值表示的 LNG 供需图^[1]，反映了世界主要市场对燃气质量的要求，其中 LNG 为装载处的质量。LNG 供应商的责任就是必须要满足这一要求。

必需注意的是，欧洲燃气交易协会 (EASEE-gas)、美国天然气委员会 (NGC+) 的互换性逻辑框图至今还只纯粹是一个建议，反映了交易部门即市场能接受的要求。图中，日本和英国则是反映了当今该国想往的要求。

由图可知：

(1) 大西洋地区 LNG 的新市场和日本市场在

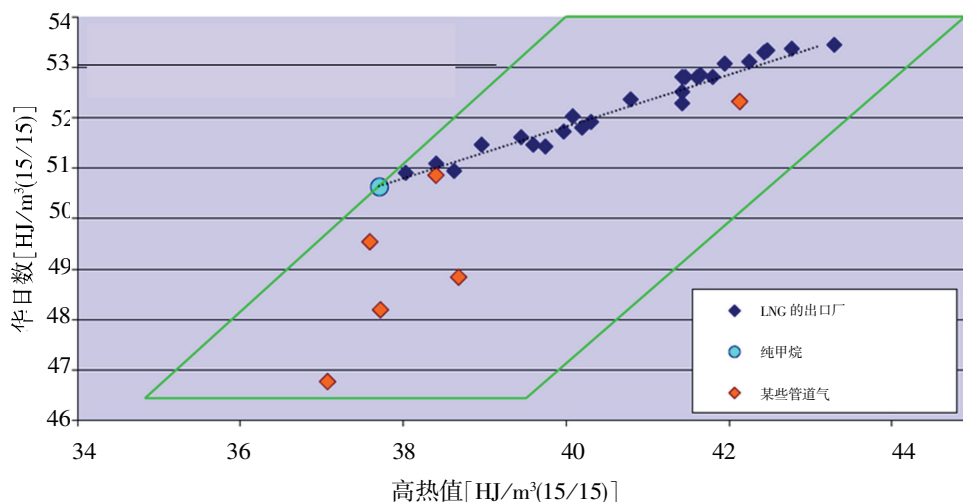


图 3 欧洲合理能源交易协会的互换性逻辑框 (LNG 和管道气质量)

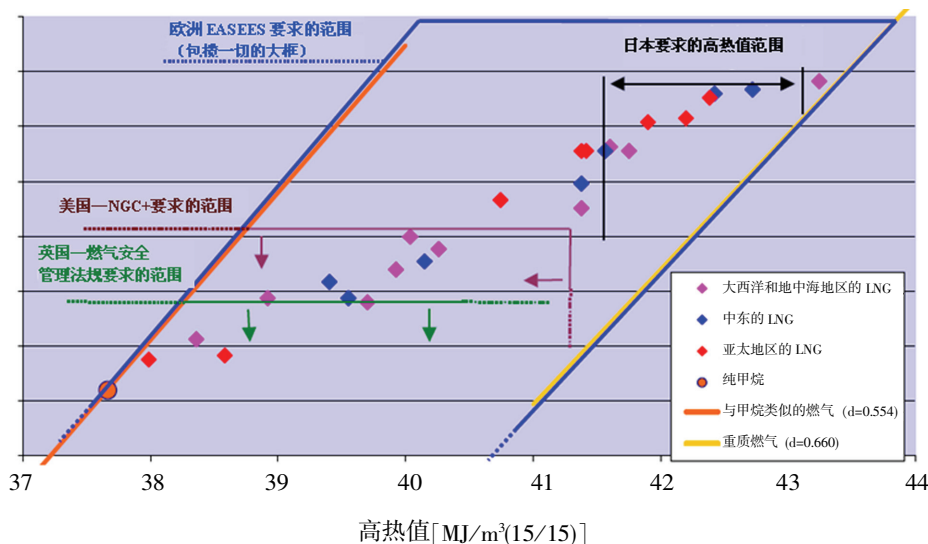


图4 用华白数—高热值表示的LNG供需图(图3的上半部分)

华白数热值图上分别处于两个不同的位置,前者属于贫质(Lean)而后者属于富质(Rich)1G区。

(2) 更多的富质LNG供应商将针对亚太地区,也有更多的供应商将针对大西洋地区(包括许多地中海地区的国家),于是,在上述3个区域出现了燃气质量的多样化要求*。

(3) 欧洲交易协会(EASEE-gas)所提出的质量“限定”要求并不能限制任何一个供应商。

(4) 只有中等华白数和热值的LNG,即热值约为 $41\text{MJ}/\text{m}^3$ ($1\text{ }100\text{Btu}/\text{scf}$),可以向所有的市场销售,但对美国、英国和日本市场销售的LNG,必需先对其华白数或热值进行调整。调整的方法很多,但不在本文的范围之内。

6 结 语

从不同的角度探讨和分析燃气分类标准和燃气互换性的关系后可知,分类标准不能用来确定燃气的互换范围。界限气的设定是欧洲贸易部门的单方要求,已在任何一种互换性方法所允许的范围之外,欧洲根据EN437试验气标准制作的互换性逻辑框图也反映了这一情况,已在逻辑框图范围内的LNG,也需要对燃气的组分进行调整后,才能满足各国市场的要求。再者,从我国分类标准的附录中,也介绍了不同的欧洲国家,采用了不同界限气的状况,但未说明原因。实际上欧洲试验气标准也

不能被所有欧洲国家所采纳,可从本刊2008.3—4期中得到答案。盲目采用欧洲标准对我国是无益而有害的,分类标准也不例外。至于燃气质量中的互换性问题,只有根据国情开展研究工作,吸取国外有益的成果,才是唯一的出路。

* 在天然气中加 H_2 时,若加 H_2 量小于70%,热值的降低比 $\sqrt{d}$ 的降低大;加 H_2 量>70%后,华白数值再回升^④。

* 由图4可知:日本气源3个来自亚太,3个来自中东,3个来自地中海;美国5个来自地中海,3个来自中东;英国2个来自亚太,1个来自地中海;其它3个来自亚太,1个来自中东,1个来自地中海,共计25个即图中的25个不同深浅的标记。

参考文献

1. Rob Klein Nagelvoort (The Netherlands) . Report of Study Group 01 “LNG quality” . The 23rd World Gas Conference. 5-9 June, 2006 Amsterdam-NL.
2. [法国] 弗朗索瓦.莫斯.《燃气的互换性》. 郑玉铸摘译. 城市煤气情报. 1982 (5) 北京
3. Joachim Wallbrecht (Germany) .IGU -WOC2 -Study Group2.1 《Basic UGS Activities》 The 23rd World Gas Conference.5-9 June, 2006 Amsterdam-NL.
4. 城镇燃气分类和基本特性.GB/T 13611-2006.
5. B.K.Slim (The Netherlands) . Should We Add Hydrogen to the Natural Gas Grid to Reduce CO_2 Emissions?. The 23rd World Gas Conference. 5-9 June, 2006 Amsterdam1