

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2013.11.002

· 续上期 ·

韦弗法燃气互换性公式和图表的评述（二）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

6 从一个实例分析36号公告法与韦弗法的异同

(1) 设调定气a(塔里木气田气)的组分为: CH₄-96.27%, C₂H₆-1.77%, C₃H₈-0.30%, i C₄H₁₀-0.06%, nC₄H₁₀-0.08%, C₅H₁₂-0.13%, N₂-1.39%。

置换气S(澳大利亚等LNG)的组分为: CH₄-89.3%, C₂H₆-7.1%, C₃H₈-2.5%, C₄⁺-1.0%, N₂-0.1%

用36号公告法和韦弗法计算互换结果,并对两种方法作细部分析。

(2) 基本数据计算结果见表1:

表1 基本数据计算结果

参数	调定气a	置换气S
高热值Q	$Q_a=38.2232\text{MJ/m}^3$	$Q_s=42.1292\text{MJ/m}^3$
相对密度D	$D_a=0.57708$	$D_s=0.6300$
分子量	16.6727	18.1819
惰性气体总量E	$E_a=1.39\%$	$E_s=1.0\%$
离焰常数F	$F_a=0.6924$	$F_s=0.7736$
黄焰端常数T	$T_a=2.2763$	$T_s=2.772$
燃烧空气需要量A	$A_a=9.63\text{m}^3/\text{m}^3$	$A_s=10.59\text{m}^3/\text{m}^3$
单位热值燃烧空气需要量a	$a_a=0.25194$	$a_s=0.25137$
一次空气因数f	$f_a=0.019874$	$f_s=0.018840$
离焰极限常数K	$K_a=1.1998$	$K_s=1.2279$
黄焰端极限常数Y	$Y_a=23.4$	$Y_s=26.18$
火焰速度系数总和 $\sum X_i F_i$	$\sum_{i=0}^a X_i F_i=150.3864$	$\sum_{i=1}^a X_i F_i=168.165$
总C $\sum C$	$\sum C_a=1.03352$	$\sum C_s=1.153$
总H $\sum H$	$\sum H_a=0.9681$	$\sum H_s=0.9990$
火焰速度S	$S_a=14.055$	$S_s=14.455$
氢碳比R	$R_a=3.935$	$R_s=3.732$
游离碳原子数N	$N_a=3.31$	$N_s=15.1$

(3) 两种方法的计算结果如下:

36号公告法:

$$I_L=0.946 < 1$$

$$I_F=1.032 < 1.18$$

$$I_V=0.8492 < 1.0 \text{ (不可接受)}$$

韦弗法:

$$J_A=1.053 > 1 \text{ (不可接受)}$$

$$J_I=0.072 > 0 \text{ (不可接受)}$$

$$J_V=0.162 > 0.14 \text{ (不可接受)}$$

$$J_H=1.0549 > 1.05 \text{ (不可接受)}$$

$$J_F = -0.0457 < 0.08$$

$$J_L=1.083 > 0.64$$

结论: S气不能与a气互换; 36号公告原因为黄焰端; 韦弗法为黄焰端与不完全燃烧。韦弗法在入力与一次空气指数两项亦不可接受。

(4) 两种方法的细部分析

① 离焰:

由式(9)知:

$$J_L = \frac{1}{I_L} = \frac{K_s a_s f_a}{K_a a_a f_s} \left(1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s} \right)$$

上式中:

$$\frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s} = \frac{1}{1.2279} \log \frac{0.019874}{0.018840} = \frac{0.023}{1.2279} = 0.019 < 0.02$$

因此: $1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s}$ 可看作为1

于是用36号公告法中的离焰权限常数K也可近似的算出韦弗离焰指数(简化法)。在本例中

$$J_A = \frac{K_s a_s f_a}{K_a a_a f_s} = \frac{1}{I_L} = \frac{K_s \frac{A_s \sqrt{D_a}}{h_s}}{K_a \frac{A_a \sqrt{D_s}}{h_a}} = \frac{K_s A_s \sqrt{D_a}}{K_a A_a \sqrt{D_s}}$$

$$\text{上式中 } \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = J_A = 1.053$$

$$\text{可知 } J_L = \frac{K_s A_s \sqrt{D_a}}{K_a A_a \sqrt{D_s}} = \frac{1.2279}{1.1998} \times 1.053 = 1.0772$$

$$\text{即 } \frac{K_s}{K_a} = 1.023.$$

$$\text{而 } \frac{S_s}{S_a} = \frac{14.455}{14.055} = 1.028, \text{ 两者十分接近。}$$

$$\text{且韦弗式 } J_L = J_A \frac{S_s}{S_a} = 1.053 \times 1.028 = 1.082$$

也接近于1.0772, 两种方法的差异甚小。

② 回火

由上述可知, 式(14)、(15)或(16)式可反映 J_F 与 I_F 的差别。

由来自36号公告法的(16)式可知

$$\frac{K_s}{K_a} = 6.104 J_F \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s} \sqrt{H_s}} = 6.104 \times 1.032 \times 1.053 \frac{1}{\sqrt{42.1292}}$$

$$= 1.022 \approx \text{离焰计算中的} 1.023$$

或

$$\frac{S_s}{S_a} = J_F + 1.4 J_A - 0.4 = -0.0457 + 1.4 \times 1.053 - 0.4 = 1.0285 \approx 1.023$$

也说明两种方法的差异甚小。

③ 黄焰端

可用 $\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$ 值对韦弗法和36号公告法作比较:

按式(20), 在韦弗法中:

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = \frac{N_a + N_s}{110} + J_y + 1 = \frac{3.31 - 15.1}{110} + 0.162 + 1 = 1.055$$

按式(21), 在36号公告法中:

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = \frac{1}{I_y} \frac{Y_a}{Y_s} = \frac{1}{0.8492} \times \frac{23.4}{26.18} = 1.0525$$

均接近于1.053的值。

④ 不完全燃烧

图36号公告法中无单独的不完全燃烧公式, 韦弗法无从比较。

7 互换性指数的应用

在讨论互换性指数的应用时, 韦弗先做了一个比喻^[1]: 如果我们决定是否可用一块长的木板在小溪上搭起一个小桥, 首先就必需考虑两个因数, 即准确的量测板的长度和估计小溪的宽度。一个燃气公司或公用事业的管委会在决定所供燃气的变化是否需要调整或直接使用时所出现的问题也相类似。互换性的某些指数相当于板的量测方法(即确定燃气的组分变化对已调定燃具运行的影响), 小溪的宽度则相当于已有燃具的全部调定情况或大部燃具正在使用的状况。进一步做出决定时, 必然会考虑到小溪的岸边是否是受力的软土带? 木板能否到达坚硬的彼岸? 是否会成为一座不能满意的小桥? 或者认为有它总比没有好? 与此类似的是: 应该确认所供燃气的变化是否会

使某些燃具的运行发生困难?不能正常运行的燃具太多或是出现问题的性质太严重?也就是如何根据燃具的失效分析来确定指数的应用范围。韦弗认为,至今论文所涉及的还只是一些容易解决的问题,遗憾的是在评估中某些困难的部分或有创新的设计可能在观察中已完全被忽略,做进一步论述可能会有所帮助。

最明显的是一条小溪并不一定都有同样的宽度,相当于燃具的种类很多,并不是所有类型的燃具毋须再调定就能容许使用,或同类燃具在原始调定时所采用的标准就不同。实际上,原始调定时就随调定人员对当时燃气组成的特性要求就有理解上的差别,有一定的多样性。如燃具按天然气进行调定时,大部分燃具可能按接近于离焰的位置调定,燃烧时满足额定负荷和有最高热效率的要求。也可能是多数燃具按不完全燃烧进界的位置调定,既可合理的处理黄焰端,又扩大了回火的安全范围。调定人员各自掌握的程度也不同,又不可能留下记录。这些均对互换性指数的使用范围的确定造成困难。从笔者在本刊对36号公告法的介绍数据中可看出端倪。

在美国,一些已经使用炼油厂副产气的地方,多数燃具是按临近于回火的位置调定,保证一次空气量以防止烟尘的产生。由于燃气中的 H_2 含量较高,又能远离离焰,但却减小了不完全燃烧的安全范围。如该地区燃气公司的燃具调定政策中,规定压力应接近于最大值,经过培训的科技人员又坚持燃具额定入力的要求,则在通常情况下,当燃气的 J_L 值在0.10~0.15的范围内时,可认为是安全、合理的。遗憾的是,该公司的供气系统内装有许多无排烟道的辐射采暖器,调定时未考虑到压力变化的瞬时情况,燃具的入力可能高于额定值,用户又喜欢这一状态,但是要 J_L 略有增加,某些用户的生命就可能发生危险。对这类无法应付的突发危险,为了安全,只能做出一个相对严格的规定。如汽车运行中的车速规定或热烟道的本质建筑材料之间隔离层要求。这一事例说明,互换性指数的应用必须考虑到各种类别的燃具。

以上说明,确定互换性指数的应用范围是十分复杂的,在许多不确定因素条件下,要做好失效分析。既要考虑燃具的多样性,又要考虑初次调定的情况;既要考虑实验室的研究数据,又要考虑到广大用户的使用条件。一个国家燃气使用的历史越久,用户的情

况就越复杂。韦弗以1106-A研究报告所得的数据为基础,提出了互换性指数的制定范围,并认为比一般燃气公司或规程管理部门的规定要优越。

规定的离焰指数 J_L 不应小于0.64(应大于0.64);回火指数 J_F 不大于0.08(应小于0.08);黄焰端指数 J_H 不应大于0.14(应小于0.14);不完全燃烧指数不应大于0.0(应小于0.0);此外,还有 $0.95 \leq J_H \leq 1.05$ 和 $J_A=1$ 的基本要求。

实际应用中,常遇到以下几种情况:

(1)评估一种替代燃气能否用于当前使用的各种燃具?作为寻求对策的依据。问题的复杂性在于替代燃气与当前使用的燃气不属于同一时间段。燃具只能保证使用原用燃气时有最佳的性能。燃气公司要求用户购买燃具时并未向用户或燃具制造厂提出任何需要适应其他燃气的要求,显然责任不在用户而在供气方。如果用户只有简单的燃气灶,问题较易解决(可换燃具)。遇到这类问题时供气方要做出评估,先确定这两种燃气能否互换;不能互换时要研究对策。燃气使用历史悠久的国家都是尽可能采用调整供气质量的方法,回避与用户发生纠纷。历史上这类例子很多。

(2)评估调峰燃气的互换性。调峰燃气即本文所指的补充燃气。如调定气为天然气,有地下气库设施,用储气方法调峰则毋须评估;如地下储气量不足以满足冬季用气高峰的需要,就必须另选补充燃气(美国首都华盛顿虽有地下气库,但每年仍有7天需用丙烷-空气混合气作补充燃气)。补充燃气的种类很多,根据地区的经济性,可用煤、油、LPG或LNG作原料。补充燃气的成本很高,通常与原供燃气按一定比例掺混后使用,这就要根据互换性原理算出可掺混补充燃气的百分比(可见本刊2007.8燃气质量中的互换性问题一文)。

如补充燃气有两种,加上原基础燃气有三种,如三种燃气混合的比例各以5%作为一种燃气的体积变化量组成方案,用36号公告法每次计算 J_L 、 J_F 和 J_H 三个指数,就需独立计算231个方案,美国编有计算机程序(Catalog No.XH9301)可使用。在计算机未出现前,美国也有简化的计算方法,分粗算与精算两步。粗算时,假设互换性指数与燃气组分的变化呈线性关系,先取两个组成,得出结果后对其他组分用外推法

求定，再根据逻辑推理，排除不必计算的部分后，对剩下的少数方案进行精算，求出转换燃气最合适的比例。韦弗在他的论文中，对此亦有介绍^[1]。

(3) 当今遇到的燃气互换问题是液化天然气与原管道天然气的互换，要用增热法或减热法等，并满足非本生火焰装置的互换需要。作为一个重要的燃气质量问题，国际上至今仍在继续研究。

8 评述

(1) 本世纪以来，自美国发表《天然气的互换性与非燃烧终端使用的白皮书》以来，燃气互换性的研究进入了一个新的阶段。国际燃气联盟再次立项研究，作为重要的燃气质量问题仍在继续研究中。

历史上各种燃气的互换性研究来自各种燃气混合中出现的问题。随着城市燃气的发展，也是从煤制气发展到油制气、液化石油气和天然气；燃具也是从民用到工业和交通运输，从本生火焰到预混空气的发动机、燃气轮机等，节能和排放要求也日益严格。如今天然气已成为世界能源的一个重要组成部分，液化天然气的国际贸易量日益增长，组成的多样化又产生了LNG与原管道天然气的互换问题，也涉及到许多技术经济问题，研究工作必须与时俱进。

(2) 我国城市燃气起步虽早，但发展缓慢。国外在“二战”后蓬勃发展时期的研究资料已甚难完整的看到，加上长期停留在解决燃气的有无问题，饥不择食，甚难考虑到燃气的质量要求。从上世纪末到本世纪初，由于“陕气进京”和“西气东输”，城市燃气才开始有较快的发展，至今已有一亿多人用上了天然气（“十二五”期末的目标是2.5亿人），已成为天然气的使用大国，但从技术和管理角度看，调峰与储气还不健全，应用中的事故率也较高。行业至今没有国家重点实验室，对许多问题难以开展深入的研究。

(3) 各国已有对燃气互换性的制定方法，都是为本国燃气的发展服务的。有的国家，如俄罗斯，天然气的利用规模仅次于美国，但从未见有燃气互换性的研究资料发表，原因是天然气的组分长期来十分稳定，调峰储气靠地下气库，因而出版的书籍中从未有燃气互换性的内容介绍，只有在他们介绍的国外资料

中，才能看到极为一般性的内容。亚洲国家如日本，由于对进口天然气有必须增热的法律规定，长期保持了燃气质量的稳定，也未见到本国对燃气互换性研究资料的发表，仅在书籍中有国外资料的一般介绍，如我国有译本的《煤气应用手册》。欧洲国家发表的许多燃气互换性预测方法也是为本国的燃气发展服务的。在我国书籍中介绍最多的是美国的几种方法和法国的德尔布法。对人工燃气互换性的研究较多，天然气的较少和较晚。法国局限在拉总气田的天然气，英国局限在北海气田。英、法同为欧洲国家，但采用的状态条件不同，自身也有不同的评价，在我国的出版书籍中也有介绍。

值得注意的是美国的AGA36号公告法和韦弗法。这两个方法的最后计算公式在我国的书籍中均有一般的介绍，对公式形成的来龙去脉不清，读到原文后，笔者认为对公式中形成的各个互换性参数可以有清晰的概念，思路的演变脉络十分清楚，到目前为止未看到有中文资料的介绍，因此认为有必要做一个全面的论述。由于原文较长，实验数据很多，只能取其精华，发表在本刊上供大家参考。笔者认为研究了这些资料后，对其他方法的认识和理解可大大提高一步，也不难做出评价。

(4) 各个工业领域都有互换性的问题，如机械工程中，互换性表示互换的组件能完全与原来的安装空间和操作要求相符；电气工程中，则还要增加一项相同的电力性能。在燃气工业中，一方面毋须再作鉴定，用户使用新燃气在燃具上燃烧时，不会增加使用麻烦和危险，另一方面要求新气的燃烧性能完全雷同于原用气，且应用和配气方式与原来完全没有差别。

美国的燃气著作中谈到互换性的涵义时，描述为“政府中让战争离开将军们太重要了；让互换性课题完全离开化学工作者和用户也太重要了。对系统的规划人员，配气人员和生产、运行人员而言，互换性都是致命的课题。”“燃气工业中充满着一些外行人员、甚至外行业的工程师们用所谓‘委婉’的设计以隐藏一些原始的缺陷”。以上这些情况都值得我们深思^[2]。

燃气的互换性来源于混合燃气的研究，目的是寻求一种可付诸应用的互换性预测方法。在当前已有的方法中，美国的AGA 36号公告和韦弗法是属于多

指数法,通过多个互换指数的计算和允许范围来制定置换气对调定气的互换性。为了得出多指数的计算公式,必须以大量的实验数据作基础,上两种方法的实验规模是很大的。同时,也要做大量的现场试验。现场的用户试验和调查可更清楚的反映用户的实际使用条件与实验室的差别。通过用户燃具现场使用的失效分析,以及实验室研究中所得数据的分布情况可合理的制定所得计算公式的允许使用范围。

本文限于篇幅,对每一互换性指数,只能介绍少量的实验数据。即使如此,也可看出实验数据的离散性很大。究其原因,实与原始的调定情况有一定的关系。同一燃具,调定人员的调定尺度本身就具有一定的随机性。稍有实验室工作经验的人对此都有体会,更何况研究所针对的是要满足全部各类燃具的要求,而不是某一种燃具。当前天然气民用炊事燃具在用户的使用中,由于厨房条件的千差万别,最易出现的是黄焰端问题,遗憾的是多年来并未引起重视,如表2所示,失效也与燃具的试验压力有关。用户处在管网不同的联接位置,对试验结果也有影响。

表2 模型汇总和参数估计值

失效类型	0.5N	N (额定压力)	1.25N或 1.5N*
离焰	239	519	732
回火	84	51	21
黄端焰	213	288	307
不完全燃烧	0	9	173

*炊事燃具用1.25N,其他燃具用1.5N

(5)多年前,我国常有“燃气的互换性?找个燃具试一下就可解决!”的说法。固不论这种说法是否有轻视燃气互换性研究之嫌。实际上,燃具试验是互换性研究中用户现场试验的一个内容。燃具的预测试验必须满足两个条件:其一,根据互换性的定义,必须使用按原气已调定的燃具,即压力参数与一次空气入口的机械状态与原用气无变化;其二,要对现用不同种类的燃具全部取样做试验,不能仅做炊事燃具。由于不同燃具对某一互换性指标的敏感性不同,对民用燃具而言,英国的研究样本分成5类^[3]:热水器,标准采暖锅炉、冷凝锅炉、炊事燃具和燃气壁

炉。除常规的离焰、回火,黄端焰外,每种燃具做了CO₂排放量,CO排放量,CO/CO₂比的关系,NO_x的排放量、烟气温度的净效率、积碳、燃气所含的N₂和CO₂的影响以及与入力有关的压力影响等,可见参考文献3,论文长达76页,可以参考。

长期以来,对待我国城市燃气中的某些技术问题,常采用粗放的态度,极少追根求底,提到城市燃气只想到民用炊事。实际上民用炊事用气在燃气用户中所占的比重很小。统计表明,发达国家受到电力的冲击,使用量在逐步减少。一些高层建筑,缺少完善的烟道设施,燃气使用的安全性甚难保证。另一方面,各种类别的新用户又在不断增加,如交通运输,工业、冷、热、电联产等涉及到各种利用气体燃料的发动机、燃气输机等正在日新月异的发展,也使燃气质量中互换性问题的内涵发生变化。以美国为例,液化石油气和空气的混合物常用来作为天然气调峰的补充燃气,天然气汽车发展后,就不能从管道中取出有这类补充燃气的天然气压缩作为汽车燃料。自美国燃气互换性的白皮书发布后,发动机等对天然气互换性的研究成果⁽⁴⁾也日益增多,值得注意和研究。

参考文献

- 1 Elmer R. Weaver 《Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases》Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 46, No.3 March 1951
- 2 E.O. Rossbuch, S.I. Hyman, P.E. 《Interchangeability: WHAT IT MEANS》Presented at A.G.A. Distribution Conference. Denver, Colorado May 22, 1978, Revised July 1984
- 3 Terry Williams, Graham MCKay & Martin Brown 《Assesment of the Import of Gas Quality On the Performance of Domestic Appliances (A Pilot Study)》R 7409 July 2004 Advantica United Kingdom
- 4 Chair Martin Josten, Secretary Stephen Hull UK, Programme committel D 1: 《LNG Quality a Interchangeability》2006-2009 Trienrcium Work Repoty October 2009 24th World Gas Conference Argentina. 5-9 October 2009

(全文完)