

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2013.10.001

韦弗法燃气互换性公式和图表的评述（一）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

摘要：自从《美国燃气协会燃气互换性公式评述》一文在本刊2012年分4期刊出后，笔者就感到应对燃气互换性的韦弗法也做一个分析和评述。两种方法互换性指数的表达公式不同。韦弗法采用了6个互换指数，调定气也多了3种。36号公告法对不同调定气有不同的制定要求，而韦弗法则采用统一的制定要求。韦弗法采用的6个互换性指数的概念十分明确，两个是燃具设计的基本要求（热入力与效率因素），两个与火焰速度有关（离焰与回火），两个与火焰速度基本无关的指数（黄焰端与不完全燃烧）则有所创新。美国的评论认为韦弗法对互换性问题感兴趣的人都应该阅读的论文。

关键词：燃气的互换性 韦弗法

1 概述

早在上世纪的1915年，美国标准局就对民用燃具的使用做了大规模的调研，调研的结果用燃具及其运行满意范围的常规调定图表示（见图1）^[1]。图

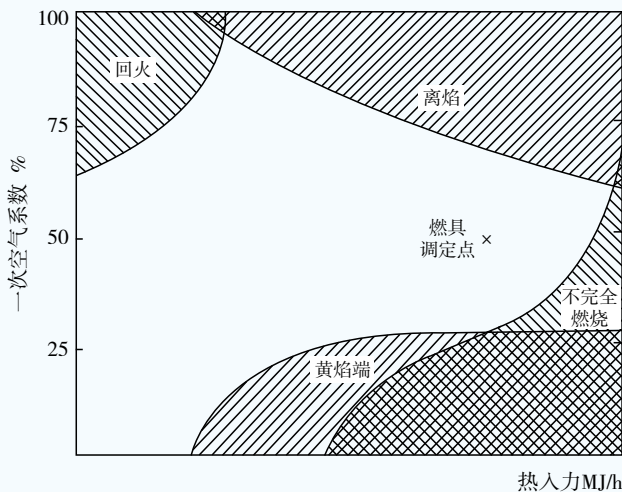


图1 燃具的调定与满意运行范围的关系

中由曲线表示的阴影部分分别表示离焰、回火、黄焰端和不完全燃烧区，X点为调定点。图2^[1]表示当所供燃气的组分发生变化，已调定燃具的运行范围也随之发生变化的常规图。图中，纵坐标用一次空气系数P（%）、横坐标用热入力I（MJ/h）表示。

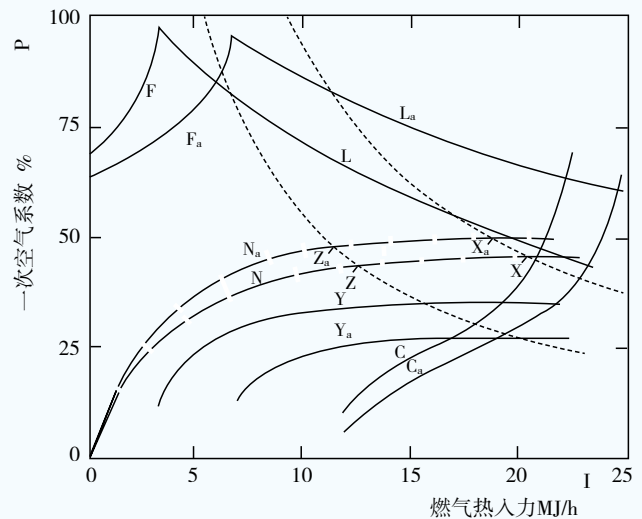


图2 燃具调定的常规图，表示供气组成变化后燃具性能的变化

假设燃具已被调定，燃烧器的阀门处于全开位置，状态点用 X_a 表示（对应于调定气a）。如用关闭阀门或其他方法将燃烧器喷嘴前的压力逐渐降低，则状态的变化可用一系列 X_a 点形成的 N_a 线表示，它代表任何入力值下，使用调定气a时一次空气正常变化的状况。如果部分关闭一次空气的入口（风门），则工作点将从 X_a 下降至 X 。燃具本身的其他变化也将会影响燃气流量和一次空气的引入量。如果不断调节燃气流量和一次空气量，就可观察和研究脱离火孔的离焰、回火、变成黄色等火焰现象以及CO的释放等。

当燃具的压力和调定的机械状况无变化，用置换气 s 代替调定气a时，代表入力 I 和一次空气 P 的位置从 X_a 点移向 X 点后，其坐标位置可用 X_a 点的值乘上一个数或相除一个数来表示。即 X 点的坐标成为：

$$\text{入力: } I_s = I_a \frac{H_s \sqrt{D_a}}{H_a \sqrt{D_s}} \quad (1)$$

$$\text{一次空气系数: } P_s = P_a \frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_a \sqrt{D_a}} \quad (2)$$

式（1）和式（2）中的 H 、 A 和 D 表示燃气的热值、完全燃烧所需的空气量和燃气的相对密度。a、s代表调定气和置换气。

在上两式的基础上可得出燃气互换性36号公告的3个互换性公式，即 I_L 、 I_F 和 I_Y 。而韦弗法中则将式（3）和式（4）作为判定燃气互换性的入力指数和一次空气指数的独立公式。

$$J_H = \frac{I_s}{I_a} = \frac{H_s \sqrt{D_a}}{H_a \sqrt{D_s}} \quad (3)$$

$$J_A = \frac{P_s}{P_a} = \frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_a \sqrt{D_a}} \quad (4)$$

其他的互换性指数都是根据曲线 L_a 、 F_a 、 Y_a 和 C_a 的试验数据得出。显然，韦弗法和36号公告法的理论和实验基础是完全相同的，差别在于后者的公布已满足了当时应用的需要，致使前者的方法当时未能广泛应用。随后的评论认为，前者的研究也有重要意义，因而各种参考书中对两种方法均同时有介绍^[2]。

韦弗法的试验基础⁽¹⁾包括美国燃气协会（AGA）的研究报告1106-A、B、C和D以及安齐思（J.F.Anthes）

的实验资料和36号公告法所使用的全部数据。试验的燃具扩大到28种，有6种调定气，分别与98、65、57、72、94和13种置换气作比较，其中，相应的29、30、23、27、33和13种为未经混合的补充燃气。

失效分析是互换性研究中的重要内容，用来确定燃气互换性指数的允许范围，为此对调定状态的火焰有一定的标准要求，对试验时采用的3种压力（额定压力的0.5、1和1.5倍）和完整性试验的压力（1.25倍的额定压力）也有规定。对3种压力和4种极限条件（图1、图2）均有失效记录。失效分析本身就是一个重要的研究内容。

2 代表离焰新指数的导出^[1]

由前所述，燃具运行中的两个限值：离焰与回火，与燃烧反应包括一次空气和二次空气量的大小关系较大，与热的释放量关系较小，因此直接采用与一次空气有关的 A/\sqrt{D} 而不是 H/\sqrt{D} 作主要变数。离焰试验时，燃具并非在常压下进行，对燃具已不再作任何机械的调节，仅是用阀门调节燃具的热入力。对炊事燃具而言，主要考虑最大热入力时是否会出现离焰。根据AGA的847报告，取燃具的火孔负荷为 $6.54\text{kJ/h} \cdot \text{mm}^2$ 火孔面积（ $4\,000\text{Btu/h} \cdot \text{in}^2$ ）时得到的离焰曲线表示。见图3⁽¹⁾。纵坐标为一次空气因数 $\left(\frac{\sqrt{D}}{A}\right)$ ，

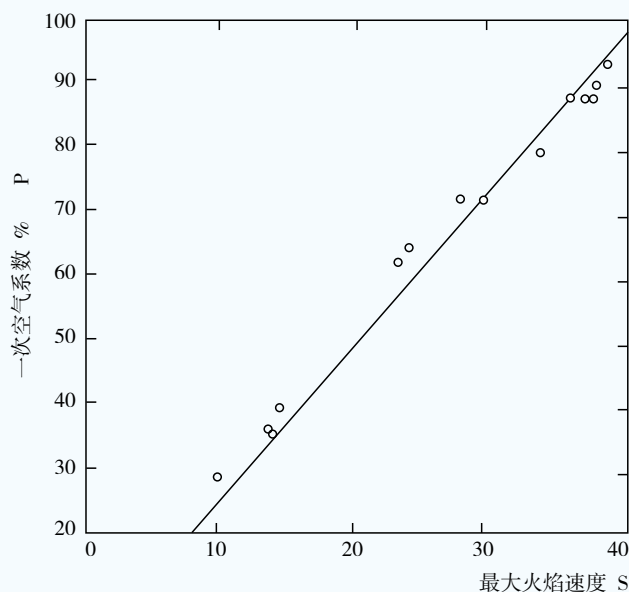


图3 火孔负荷为 $6.54\text{kJ/h} \cdot \text{mm}^2$ 火孔面积时的离焰曲线

横坐标为S。韦弗导出的系数S用以代表近似的最大火焰速度。此值与美国国家标准局（NBS）405通告中提出的值并不完全相同而有一些差别。简单而又准确的计算火焰速度至今尚有许多困难，当前主要根据应用的效果来判定，还要做一些假设。假设的原则是两种燃气混合后的最大火焰速度与加入燃气完全燃烧所需的空气体积成线性关系。根据这一假设可得韦弗的S计算公式。这一公式在很多国家得到应用。

由图3可得^[1]：

$$S = k \frac{\sqrt{D}}{A} \text{ 或 } \frac{AS}{\sqrt{D}} = k \quad (5)$$

式（5）中k为一常数，代表一个与所供燃气无关的燃具特性。因此，与可完全互换的偏离程度就可用

系数 $\frac{A_s S_s \sqrt{D_s}}{A_a S_a \sqrt{D_a}}$ 表示（ $\frac{A_s S_s \sqrt{D_s}}{A_a S_a \sqrt{D_a}} = 1$ 表示可完全互换）。

按照AGA的用语，称为与离焰有关的互换性指数，用符号记作 J_{L-1} ，以示与36号公告法中的 J_L 有所区别，经修正之后再统一用 J_L 表示。

新指数的优点是首次尝试绘出了 $\frac{S_s}{S_a}$ 与 $\frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_a \sqrt{D_a}}$ 的关系。图4为用安齐思报告中的数据所绘出的图^[1]。安齐思报告实质上是1106-A研究报告未正式公布前的一

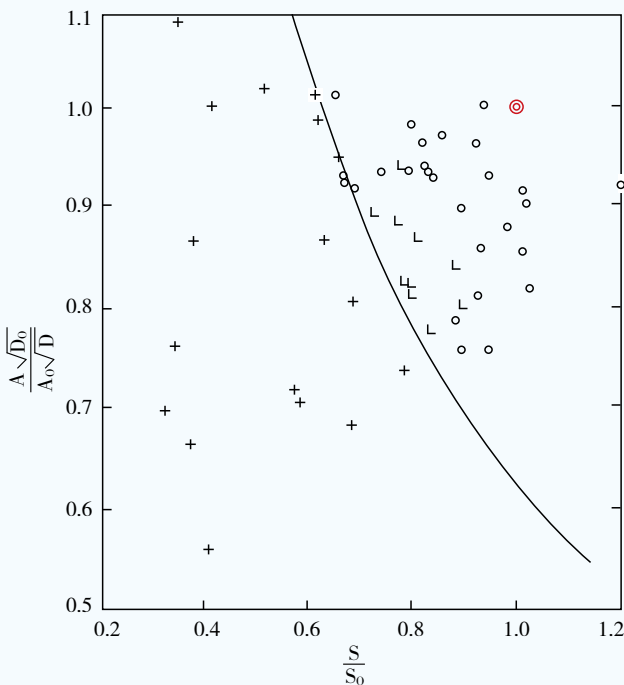


图4 根据安齐思报告绘出的离焰图

个初步节缩本。没有说明燃具失效的数量和范围（如指出是+4或+5类的火焰），但指出了补充燃气未与调定气以一定比例混合燃气方案条件下对应每一互换极限的可互换情况，以及补充燃气不能互换时，应以多大的百分比与调定气混合才合适的结果。

图4中，曲线以下为不可互换区，用+号表示试验点；曲线的右上方为可互换区，试验点用o表示。与极限位置对应的混合燃气用符号L表示。o为调定燃气的位置。图中只有调定点附近的一段曲线可近似的看作直线。

图5是用36号公告的数据，以高热值天然气调定后，用同样的坐标绘出的互换图^[1]。曲线的左下方也有几个o点划在不可互换的区内。同样，对高甲烷和高惰性天然气的36号公告和1106-A研究报告的数据也可绘出相类似的曲线（在此不再引证）。

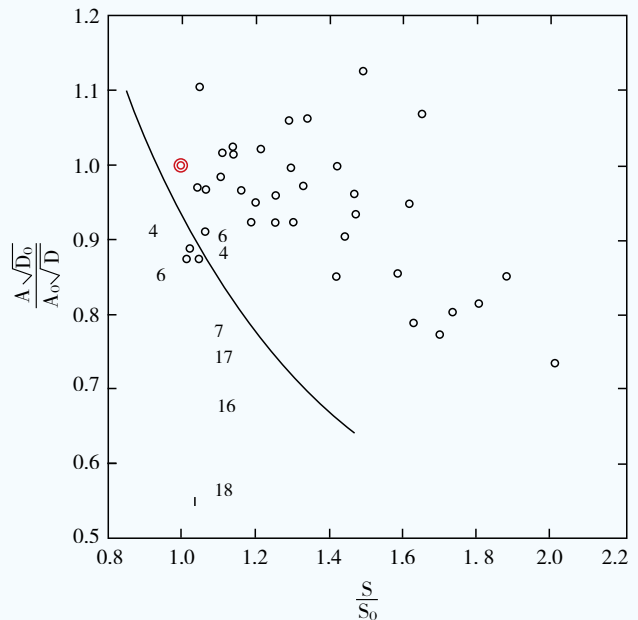


图5 根据36号公告数据绘出的高热值天然气的离焰图

研究中发现，如燃气中含有较多的 O_2 ，则离焰指数需要修正。检测表明，如燃气的 A/\sqrt{D} 值乘以除 O_2 以外的组成百分数后，公式所得的值将减小，于是，离焰互换指数的常规式可写为：

$$J_L = \frac{S_s A_s \sqrt{D_s} (100 - Q_s)}{S_a A_a \sqrt{D_a} (100 - Q_a)} \quad (6)$$

式中：Q为燃气中 O_2 含量的体积百分数。

比较韦弗的离焰新指数 J_L 和36号公告中的离焰指

数 I_L 后,可以看出两者之间的异同点,对加深这两个公式的理解甚有帮助。

AGA 36号公告中的离焰指数 I_L 为:(请参看笔者在本刊2012年7~10期的一文)

$$I_L = \frac{k_a}{\frac{f_a a_s}{f_s a_a} (k_s - \log \frac{f_a}{f_s})} \quad (7)$$

公式取国际单位时可知:

$$K_a = \frac{F_a}{D_a} \quad K_s = \frac{F_s}{D_s}$$

$$f_a = \frac{\sqrt{D_a}}{H_a} \quad f_s = \frac{\sqrt{D_s}}{H_s}$$

$$a_a = \frac{A_a}{H_a} \quad a_s = \frac{A_s}{H_s}$$

$$F_a = F G_a \quad F_s = F G_s$$

式(7)中: D_a, D_s 为调定气与置换气的相对密度;

f_a, f_s 为调定气与置换气的一次空气因数;

K_a, K_s 为调定气与置换气的离焰极限常数;

a_a, a_s 为调定气与置换气的单位热值燃气完全燃烧时所需的空气量;

F_a, F_s 为调定气与置换气的离焰常数;

F 为各单一燃气的离焰常数, G_a, G_s 为各单一燃气的体积百分数。

式(3)可改写为:

$$I_L = \frac{k_a}{\frac{f_a a_s}{f_s a_a} k_s (1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s})} = \frac{k_a}{K_s} \times \frac{1}{\frac{f_a a_s}{f_s a_a} (1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s})} \quad (8)$$

$$\text{令 } J_L = \frac{1}{I_L} = \frac{K_s a_s f_a}{K_a a_a f_s} (1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s}) \quad (9)$$

式中: $\frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s}$ 之值甚小,笔者校验常小于0.02,

可近似的认为 $1 - \frac{1}{K_s} \log \frac{f_a}{f_s} \approx 1$

于是可得:

$$J_L = \frac{1}{I_L} = \frac{K_s a_s f_a}{K_a a_a f_s} = \frac{K_s \cdot \frac{A_s}{H_s} \cdot \frac{\sqrt{D_a}}{H_a}}{K_a \cdot \frac{A_a}{H_a} \cdot \frac{\sqrt{D_s}}{H_s}} = \frac{K_s A_s \sqrt{D_a}}{K_a A_a \sqrt{D_s}} \quad (10)$$

式(10)与式(6)类似,两者的区别在于K值与S值,比较如表1。

在36号法公布时,尚无韦弗提出的火焰速度指数的概念,只能从实验数据确定一个离焰常数和离焰极限常数的概念。从燃烧的本质看,两者应有一定的关系,但从推荐的数值看,两者仍有一定的差别,且 C_2H_4, C_3H_6 和 C_6H_6 的差别较大,这说明气体燃料的实用数据至今仍得依靠实验方法(伯纳德·刘易斯(1899-1993)语)。

根据 I_L 导出的 J_L 公式,韦弗用 J_{L-1} 表示作为区别,也做了比较研究。

3 代表回火新指数的导出^[1]

与离焰互换性公式的导出类似:图6表示火焰速度S(纵坐标)与热入力 A_F (用燃烧所需的空气量 $\frac{A}{\sqrt{D}}$ 表示)之间的关系。试验时,先用调定燃气对燃具作初始调定,记录燃气压力降低时发生回火的各个数据。于是

表1 K值与S值的比较

燃气	燃烧空气需要量A	相对密度D	F	$K = \frac{F}{D}$	$K_{H_2=100}$ 时	F_a	$S = \frac{F_a}{A+1}$
H ₂	2.39	0.07	0.60	8.57	100	339	100
CO	2.39	0.97	1.407	1.45	17	61	18
CH ₄	9.55	0.55	0.67	1.22	14	148	14
C ₂ H ₆	16.71	1.04	1.419	1.36	16	301	17
C ₃ H ₈	23.87	1.56	1.931	1.23	14	398	16
C ₄ H ₁₀	31.03	2.09	2.55	1.22	14	513	16
C ₂ H ₄	14.32	0.97	1.768	1.82	21	454	29.6
C ₃ H ₆	21.48	1.45	2.06	1.42	17	674	29.98
C ₆ H ₆	35.79	2.70	2.71	1.00	12	920	25.0

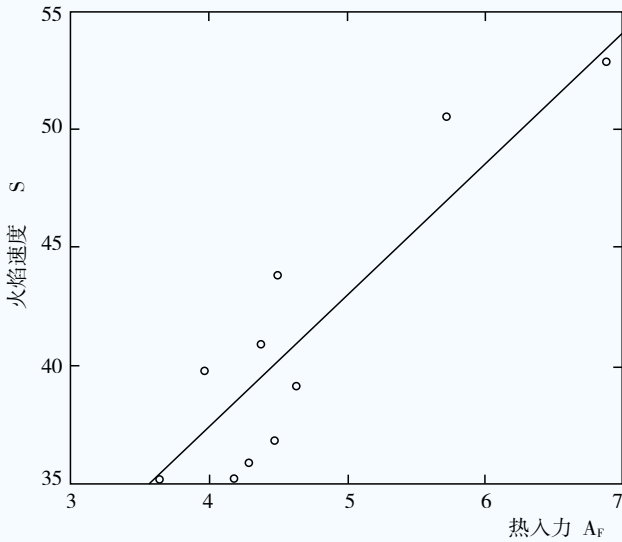


图6 用火焰速度与 $\frac{A}{\sqrt{D}}$ 之间的关系表示燃具的回火

$$A_F = k \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (11)$$

图中的直线可用式(12)表示

$$S - k \frac{A}{\sqrt{D}} + C = 0 \quad (12)$$

式(12)中k、C为常数，代表A、D和S之间的关系，与观察结果符合。根据1106-A研究报告绘出的 $J_A = \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$ 与 $\frac{S_s}{S_a}$ 的关系可见图7^[1]。图7中的离焰与回火曲线分成4个区：①：区表示既无离焰也无回火；②：区表示仅可能发生离焰；③：区表示仅可能发生回火；④：区表示离焰与回火均可能发生，该图展示了离焰与回火均与火焰速度相关的关系。

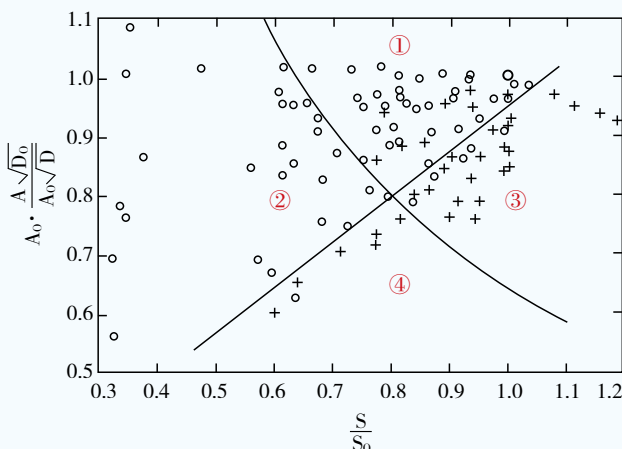


图7 根据1106-A研究报告绘出的回火图

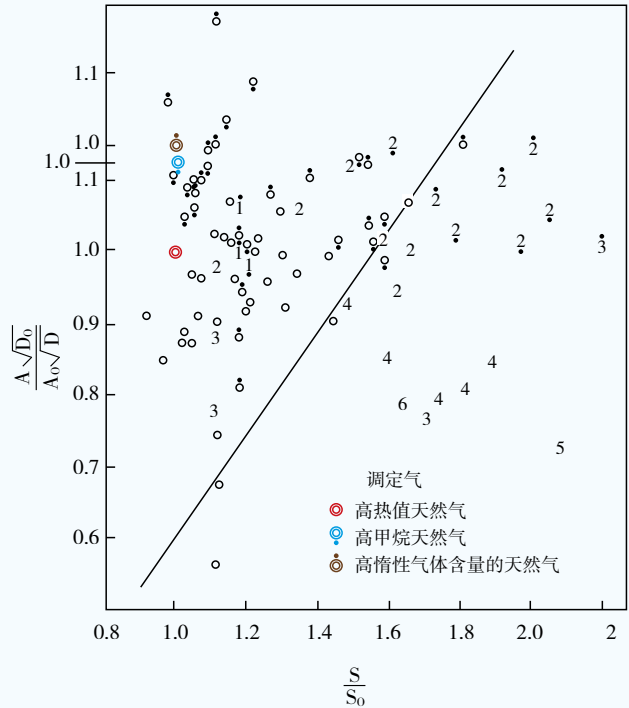


图8 根据36号公告的数据绘出的3种天然气的回火图

笔者根据图7和图8上直线的相应数据，可得该直线的斜率约为0.70~0.717。

于是可得：

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = (0.7 \sim 0.717) \frac{S_s}{S_a} + C$$

$$\text{即 } \frac{S_s}{S_a} - (1.39 \sim 1.43) \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = C \quad \text{取括号内的数为}$$

$$1.4, \text{ 则 } \frac{S_s}{S_a} - 1.4 \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = C \quad (13)$$

式中的常数C：调定气用 C_a 、置换气用 C_s 表示。

回火互换性新指数的定义为置换气 C_s 与调定气 C_a 的差值，即 $C_s - C_a$ ，可得：

$$J_F = C_s - C_a = \left[\left(\frac{S_s}{S_a} - 1.4 \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} \right) - \left(\frac{S_a}{S_a} - 1.4 \frac{A_a \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_a}} \right) \right]$$

$$\text{即 } J_F = \frac{S_s}{S_a} - 1.4 \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} + 0.4 \quad (14)$$

式(14)即韦弗互换性回火新指数。该式与36号

公告中的回火指数IF作比较： $J_F = \frac{k_s f_s \sqrt{H_s}}{k_a f_a}$ 于是

$$\frac{K_s}{K_a} = I_F \frac{f_a}{f_s} \sqrt{\frac{H_a}{H_s}} = I_F \frac{H_a}{\sqrt{D_s}} \sqrt{\frac{H_a}{H_s}}$$

$$\frac{K_s}{K_a} = I_F \frac{H_s \sqrt{D_a}}{H_a \sqrt{D_s}} \sqrt{\frac{H_a}{H_s}} \quad \text{或} \quad \frac{K_s}{K_a} = I_F \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} \sqrt{\frac{H_a}{H_s}} \quad (15)$$

36号公告法中 H_a 取1 000Btu/cf, 作为一个常数。用国际单位

$$\frac{K_s}{K_a} = 6.104 I_F \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s} \sqrt{H_s}} \quad (16)$$

式中 H_s 单位为MJ/m³。

式(14)、式(15)和式(16)反映 J_F 与 I_F 的差别。

4 代表黄焰端互换性新指数的导出⁽¹⁾

燃气的燃烧热主要来自所含的烃。在一次反应区烃分解的化学式为:



虽然燃气中所含的CO和H₂同时也会氧化成CO₂和H₂O, 但与烃相比, 其量甚少。即使一次空气中O₂含量足以满足上述反应式, 实际上总会有少量的烃未能完全反应。这些烃在高温下继续分解, 形成固态碳, 在传递中呈黄色, 在火焰的顶端尤为明显, 形成黄焰端。

黄焰端的限值用避免发生黄焰端所需的空气量表示。这一空气量通常指接近于按式(17)所算得的量。至今大约有十几个公式试图能反映这些因数, 其中有3个~4个所得的结果较好, 比较符合36号公告和1106-A研究报告的数据。简言之, 一个类似于 $\frac{A}{D}$ 的

函数和一个N数的公式最简单且结果较好。N表示游离C的原子数, 定义为每100个燃气分子中燃烧时易析出的碳原子数。设每一个饱和烃为1个烃分子, 因此:

$$N = 100 (\text{烃的总C原子数} - \text{烃分子数}) \quad (18)$$

如燃气的组分为CH₄=80%, C₂H₆=10%。惰性气体含量为CO₂+N₂=10%。

则C原子数: CH₄=1×0.8=0.8

C₂H₆=2×0.1=0.2

共计 1.0

烃分子数: CH₄=1×0.8=0.8

C₂H₆=1×0.1=0.1

共计 0.9

因此N=100(1.0-0.9)=10

N和 $\frac{A}{D}$ 之间的函数关系只能根据36号公告、安齐思报告和1106-A报告的数据得出, 不像离焰和回火那样还有其他研究报告可以提供研究数据。图9的数据来自安齐思的研究报告。纵坐标用 $J_A = \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$, 横坐标用N表示。不用 $\frac{N_s}{N_a}$ 的原因是若 N_a 接近于零, 则 $\frac{N_s}{N_a}$ 会无意义。图中的直线将产生黄焰端(曲线上)与无黄焰端(曲线下)分成两个部分。+号表示不能互换, o表示可互换, L表示补充燃气产生的黄焰端已处于极限状态, ⊙表示调定气的位置。图10为根据1106-A研究报告绘出的黄焰端图。图中+表示某些试验燃具出现5类的火焰; ×代表4类火焰; o代表火焰中无黄焰端产生。

图11为根据36号报告所作的图, 将3种调定气(以⊙表示)画在一张图上, 对黄焰端的程度未加区分。3个图中的直线斜率笔者核算十分接近, 用来区分满意区和不满意区的性能相当成功。

直线方程为:

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = -\frac{N_s}{110} + C$$

斜率为 $\frac{1}{110}$, 可写为:

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} + \frac{N_s}{110} = C \quad (18)$$

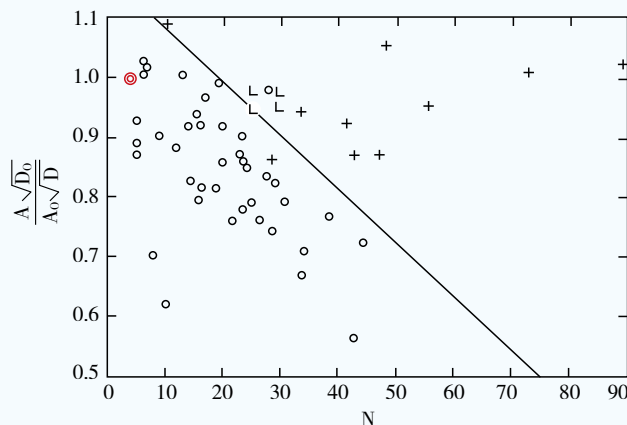


图9⁽¹⁾根据安齐思研究报告的数据绘制的燃气黄焰端互换性图

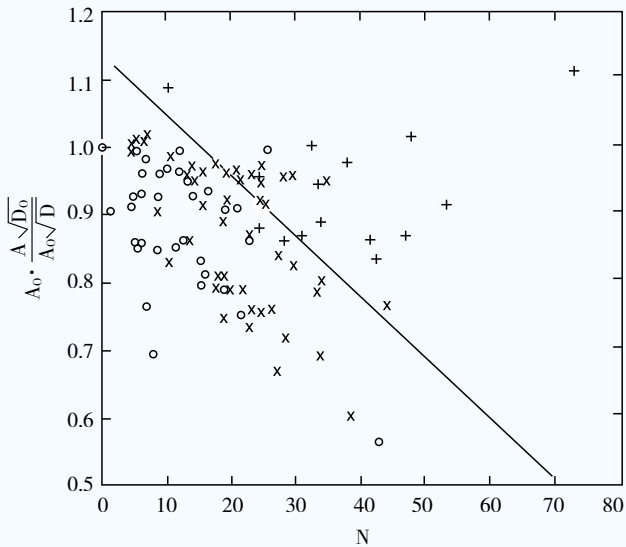


图10 根据1106-A研究报告所得的黄焰端互换图

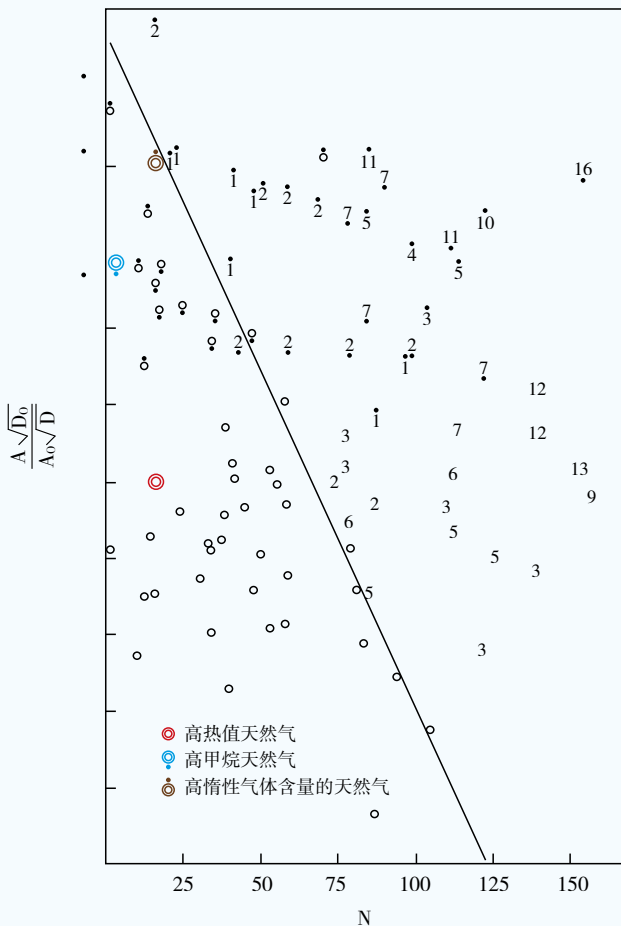


图11 (1) 根据36号公告数据绘制的黄焰端图

式中C=对任一类别的燃气，易于发生黄焰端的值相同，为一常数。与导出回火互换性指数的方法相

同，C代表不同类别燃气可互换的差别，可用两个C值之差度量产生黄焰端的方法。于是

$$J_y = C_s - C_a \left[\left(\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} + \frac{N_s}{110} \right) - \left(\frac{A_a \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_a}} + \frac{N_a}{110} \right) \right]$$

$$J_y = \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} - 1 + \frac{N_s - N_a}{110} \quad (19)$$

亦可写成：

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} = \frac{N_s - N_a}{110} + J_y + 1 \quad (20)$$

20式可用来与36号公告法中的I_y作比较。

36号公告法中：

$$I_y = \frac{f_s a_s Y_a}{f_a a_s Y_s} \quad \text{式中 } Y = \frac{110T}{A + 7Z - 26.30_2}$$

$$\text{于是: } I_y = \frac{\frac{\sqrt{D_s}}{H_s} \cdot \frac{A_a}{H_a} \cdot \frac{Y_a}{Y_s}}{\frac{\sqrt{D_a}}{H_a} \cdot \frac{A_s}{H_s}}$$

$$I_y = \frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_s \sqrt{D_s}} \cdot \frac{Y_a}{Y_s} = \frac{A_s \sqrt{D_s} T_a}{A_s \sqrt{D_a} T_y} \times \frac{A_s + 7Z_s - 26.3Q_s}{A_s + 7Z_a - 26.3Q_a} \quad (21)$$

$$\frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_s \sqrt{D_s}} = \frac{1}{I_y} \cdot \frac{Y_a}{Y_s} \quad (22)$$

式20和式22可作比较。

在式20中，如图 \$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}\$ 与 \$N_a - N_s\$ 的关系绘图，可得一系列的平行线，每一平行线有不同的J_y值。在式22中 \$\frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_s \sqrt{D_s}}\$ 与 \$\frac{Y_a}{Y_s}\$ 的关系在图上也可得一系列的直线，每一直线有不同的I_y值，直线收敛于原点。

5 代表不完全燃烧新指数的导出^[1]

在燃气的使用中，突出的潜在危险常与不完全燃烧所释放的CO量有关。在美国，如所供燃气有同一的标准，则在燃具试验中就按照美国标准所规定的要求调定，有“入力”安全的标识。受过训练的工作人员已按“入力”值，调定了标准的一次空气供给量，表示已经排除了潜在的危险。如所供燃气发生了变化，“入力”值已不符合标准，就可能在发生CO的释放，应特别注意。

以本生火焰为例，其燃烧化学反应集中在两个细

薄的区内。在主要反应的内锥，通常形成 H_2 和 CO ，而外锥则是 CO 和 H_2 与二次空气的燃烧完成区。一次反应区内火焰的形状与尺度决定于火焰适度或着火速度。此时火焰的前沿（焰面）向燃气和一次空气的混合物方向流动。而第二区，即外锥区的位置，则决定于周围空气和所包围的燃气之间相互的扩散或形成火焰。燃烧焰面的温度及其浓度的变化可参看有关的资料。一旦火焰形成，两个反应区就可保证 CO 不再有机会从反应区逸出。如向火焰插入一个冷体，则冷体表面因温度降低可能导致火焰中断，也会产生少量 CO 的逸出。随着插入物温度的升高，中断的间隙会变窄，直至消失。这就是撞击式火焰的 CO 释放量明显决定于固体表面温度的原因。又如带有燃烧室的燃具，如二次空气的供给不足，壁面的温度又较低，也会有气体逸出，以寻求合适的二次空气。为此，必须考虑到两种情况：1）开启式火焰与冷壁撞击，因火焰周围有适量的二次空气存在，稀释了 CO 量得的浓度，使 CO 的含量未达到危险程度。2）由于封闭的燃烧室，妨碍了所需二次空气的进入。前一种情况下，火焰尺度的增大，是否反映有更多的燃气需要燃烧，或是发生缓慢的 CO 释放效应。后一种情况是火焰尺度的增大与燃烧室的容量无关，烟气直接排入二次空气中，使 CO 突然排放的量也未达到危险程度。有时撞击火焰和二次空气缺少的两种情况均会出现且难于区别。辐射采暖器内和周围燃气燃烧的发光火焰就是一例。

二次空气供给不足的情况十分重要，在开始研究各种燃气的互换性时就注意到这个问题。在多数燃具中，在一次空气形成的锥体内，烃类均能很好的分解，只有余下的 CO 和 H_2 需要继续燃尽。更值得注意的是，这两种燃气的热值几乎相同，而燃烧所需的空气量更是完全相同；但其最终的燃烧产物为 CO_2 和 H_2O ，有不同的扩散率，会影响到火焰的尺度。如燃烧所需的空气体积以 m^3/h 计，则在相同的燃具上使用 CO 或 H_2 两种燃气的燃烧情况也应是相同的；如引入的一次空气系数也相同，则满足最终燃烧所需的二次空气量也相同，也即 CO 和 H_2 这两种燃气满足 $\frac{A}{D}$ 的条件也应该相同。此外，由于 CO 和 H_2 的热值也近似，正比于其燃烧所需的空气量，因此与热对流有关的二

次空气体积也接近相同，上述结论可以预测到 $\frac{A_s \sqrt{D_s}}{A_a \sqrt{D_a}}$ 也可作为因二次空气不足而产生的不完全燃烧。其特征可作为最佳的一个互换性指数。这一关系也可从图2得到确认，即当燃气的组分变化不大时，曲线 C 和 C_a 与离焰曲线 L 和 L_a 、回火曲线 F 和 F_a 相比，其位移量较小，这也与 CO 和 H_2 的上述燃烧特征有关。美国在混合燃气的研究报告中也常对这一观察结论有所说明。

上述分析中已说明，燃具火焰可能发生撞击的程度决定于火焰的尺度，但也与烃在一次空气区分解的完全程度及所形成的 CO 和 H_2 的比例有关。由于 CO 的扩散速度比 H_2 小， CO_2 的扩散速度更小于水蒸气；因而 CO 燃烧时反应物浓度的降低就比 H_2 更慢，反应区的位置就可能向外伸展；也即 CO 的浓度较高，就会有更多的 CO 可能通过反应区的孔隙向外逸出。通常希望在混合物中 CO 与 H_2 能按一定的比例离开反应区。根据这一燃烧特征，韦弗首先假设在所有燃气的组分中能有一个可代表 H 原子和 C 原子的比值，并绘出此比值与 $\frac{A}{D}$ 的关系。但从实验的观察结果中可知，如原始燃气中所含的 CO 较多（如人工燃气），则对不完全燃烧更为敏感；如燃气中不含 H_2 （如天然气），一次反应中的一次空气的作用就是氧化 CO ；如果有更多的烃存在，一次反应区就会产生更多的 CO ，这是十分合理的现象。因此，必须首先区分两种存在的 $\frac{H}{C}$ 比：一种是烃所含的 C 和组分中原始存在的 CO ；以及燃气中的总 H_2 和仅指烃中 C 原子的比值。韦弗定义的 $\frac{H}{C}$ 比用 R 表示，是属于后者。其定义为： R 是指燃气中烃类组分（仅指烃类）的 H 原子与 C 原子数的比值。

例如一种燃气混合物 $CH_4-80\%$ ， $C_2H_6-10\%$ ， $N_2-10\%$ 仅指烃类，即 $CH_4 = \frac{80}{80+10} = 0.88$ ， $C_2H_6 = \frac{10}{80+10} = 0.12$

于是H原子：	C原子：
$CH_4: H=4 \times 0.88=3.52$	$1 \times 0.88=0.88$
$C_2H_6: H=4 \times 0.12=0.72$	$2 \times 0.12=0.24$
4.24	1.12

则 $R = \frac{H}{C} = \frac{4.24}{1.12} = 3.79$ 。

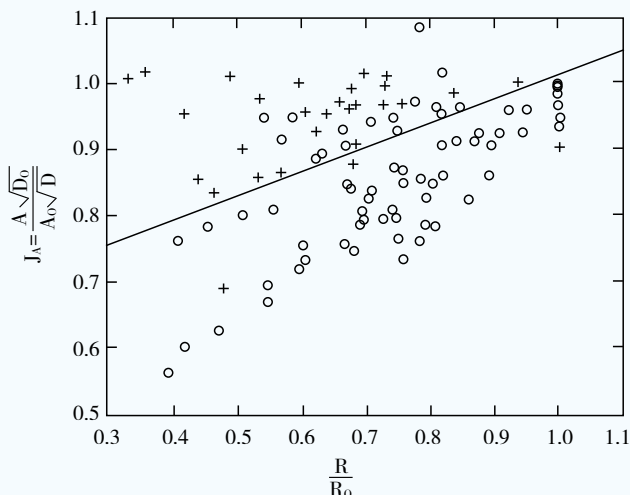


图12 根据1106-A研究报告绘出的 J_A 与 $\frac{R}{R_0}$ 的关系图

图12为根据1106-A研究报告的数据绘出的 $\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$ 与 $\frac{R_s}{R_a}$ 的关系图。图中+表示不完全燃烧；o表示完全燃烧。

以前曾用 J_A 表示 $\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}}$ ，现成为唯一保留下来作为确定不完全燃烧的因素。图中直线的斜率为0.366，可得直线的公式为

$$\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} - 0.366 \frac{R_s}{R_a} = C \quad (23)$$

式中 R_s 和 R_a 代表置换气和调定气的H原子数与烃类C原子数的比值；C为常数，完全互换时C值相同。与前所述类似，度量两种燃气不完全燃烧的互换性指数可用 C_s 和 C_a 之差表示：

$$\begin{aligned} J_I = C_s - C_a &= \left[\left(\frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} - 0.366 \frac{R_s}{R_a} \right) - \left(\frac{A_a \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_a}} - 0.366 \frac{R_a}{R_a} \right) \right] \\ &= \frac{A_s \sqrt{D_a}}{A_a \sqrt{D_s}} - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634 \end{aligned} \quad (24)$$

当置换气和调定气完全互换时， $J_I=0$ 。

36号公告法中无不完全燃烧的互换指数，当时认为有其他三个极限条件即可；但1106-A-D研究报告认为不完全正确。（未完待续，见下期）

工程信息

中石化煤制天然气项目获国务院批准

据悉，由中石化牵头的新疆准东煤制天然气示范项目获得国务院批准，目前已进入国家能源局审核阶段。这是到目前为止，我国投资规模最大的煤制天然气工程，此项目获批被认为是国家煤制气项目审批开始进入相对宽松阶段的信号，之前国内的很多煤制天然气项目均停留在申报阶段。

新疆准东煤制天然气示范项目由中石化牵头同，参与公司有华能、兖矿、新疆龙宇能源、潞安、神华等，所上报的年产量最高将突破360亿 m^3 ，工程总投资突破2 000亿元。据了解，煤制天然气产品将通过中石化新粤浙输气管道输送到东南沿海地区，到时，将间接让上海等地受惠。

规划明确开发煤制天然气项目，到2015年煤制天然气供应能力将达到150亿 m^3 ~180亿 m^3 。同时，国家要求在“十二五”末建立的天然气市场价格机



制，增加了天然气增价的可能性，但国际煤炭价格则上涨空间不大，给作为天然气补充的煤制天然气的高速发展创造条件。但是，煤制天然气产业要发展，必须克服投资大、经济效益差、管网设施不足和环保要求高等难题。

（本刊通讯员供稿）