

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2012.08.001

· 续上期 ·

美国燃气协会燃气互换性公式评述（第二部分）

□ 中国市政工程华北设计研究总院（300074）李猷嘉

3 美国燃气协会燃气互换性公式（36号公告法）基本原理

所导出的公式应能说明，对一个已调定的燃烧器，使用不同燃气时，其一次空气的引入量，即空气/燃气比或体积引射系数正比于燃气相对密度的平方根，反比于燃气的热值。这一关系为半理论半经验的关系式，在文献2中有数据说明。用数学式表示为 $\left(\frac{\sqrt{d}}{h}\right)$ 。在英制单位中，热值用Btu/cf表示时，由于此值太小，容易忽略小数点后面的数而造成计算错误，因而常用 $\left(\frac{1\,000\sqrt{d}}{h}\right)$ 表示，但在国际单位中，如热值用MJ/m³表示则不必再加1 000。用符号*f*表示后，即 $f = \left(\frac{\sqrt{d}}{h}\right)$ ，*f*称为一次空气因数。如不同燃气有相同的*f*值，就表示燃烧器的头部有相同的空气/燃气值。由于置换气*S*与调定气*a*在完全燃烧时所需的理论空气量不同，如用一次空气系数表示，则两种燃气在燃烧器头部的一次空气系数也不同。又由于一次空气系数等于体积引射系数，即空气/燃气比除以燃烧的空气需要量，用数学式表示即 $\frac{f}{a}$ ，*a*即单位热值燃气燃烧所需的空气量m³，其大小决定于燃气的热值，即 $a = \frac{A}{h}$ ，式中*A*为燃气燃烧的理论空气需要量，*h*为燃气的热值。由于英制单位中*A*为1或2位数，*h*为4位数，因而*a*用热值为100Btu/cf时燃烧所需的空气量m³表示。在国际单位中可用1MJ/m³燃气燃烧所需的空气量表示，于是一次空气系数 $\frac{f}{a} = \left(\frac{\sqrt{d}}{h}\right) / \left(\frac{A}{h}\right) = \frac{\sqrt{d}}{A}$ ，

即前述所用计算置换前后一次空气系数变化的公式。由上述计算可知，置换后的工作点与置换前调定点一次空气系数的变化可用比值： $\frac{f_s}{a_s} : \frac{f_a}{a_a}$ 或 $\frac{f_s a_a}{f_a a_s}$ 表示，此即前述计算中（式2）所用的 $\left(\frac{\sqrt{d_s}}{A_s}\right) \left(\frac{A_a}{\sqrt{d_a}}\right)$ 。

同理，置换后的火孔负荷*f_s*反比于调定时的火孔负荷*f_a*，即 $\frac{f_s}{f_a}$ ，即前述计算中（式1）所用的 $\left(\frac{h_s}{\sqrt{d_s}}\right) \left(\frac{\sqrt{d_a}}{h_a}\right)$ 由此导出了前述的（1），（2）两式。

如所供燃气的化学组分发生变化则燃气燃烧的极限特性曲线也随着变化，也引起燃烧器的运行特性发生变化。美国燃气协会实验室利用其精密燃烧器对多种单一燃气和研究中所遇到的全部混合气体做了试验，有各种数据发表，其中各单一燃气在精密燃烧器上所得的极限特性曲线可见图6。

在燃烧器头部的温度为常值时得到的离焰极限数据在半对数纸上作图后，可得相互平行的直线，并可整理成以下通式：

$$\log R = mL + K \quad (3)$$

式中 *R*—火孔负荷 $\frac{\text{kJ/h} \cdot \text{mm}^2}{16.35}$ 或 $\frac{\text{Btu/h} \cdot \text{in}^2}{10\,000}$

L—用一次空气系数表示的离焰极限%；

m—离焰曲线的斜率；

K—离焰极限常数。

在后述的计算中，斜率*m*为常数，等于-0.016，与燃气的性质无关，而常数值（截距）“*K*”决定离焰极限曲线位置，可作为一个如同燃烧速度那样的燃气离焰特性的准则。“*K*”值与燃气的化学组成直接有关。任一混合燃气*K*值的计算在后述中将有介绍。

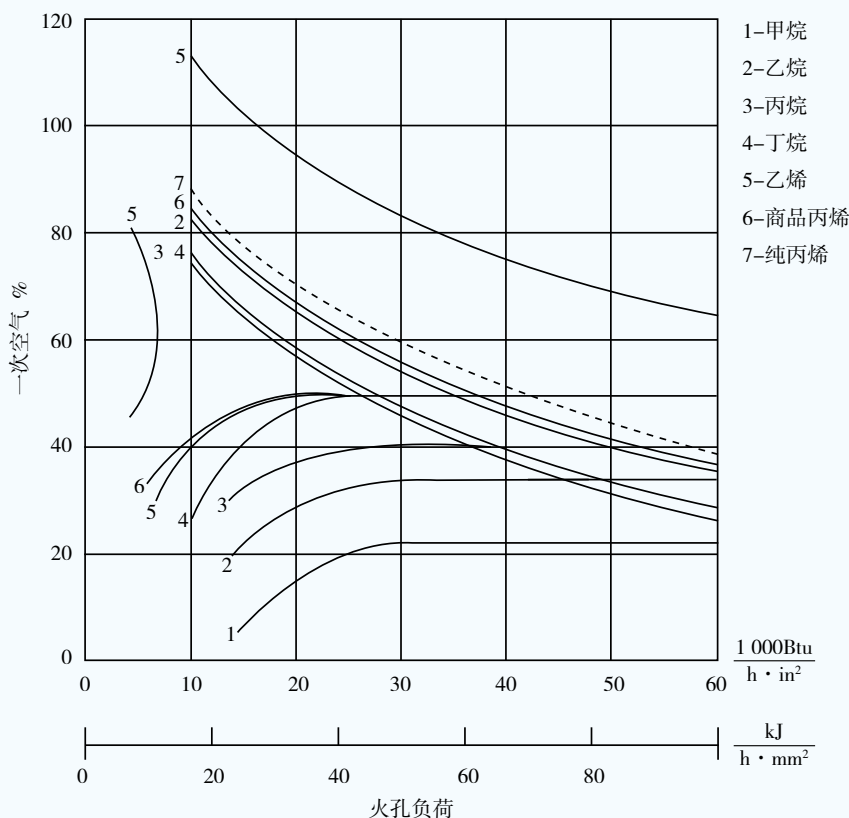


图6 不同单一燃气用A.G.A精密燃烧器测得的极限特性曲线

如果一个公式能包括“f”、“a”和“K”3个因素，也就是包含了可指出离焰互换性的所有基本因素。用因数“f”和“a”可得一种燃气置换另一种燃气后一次空气系数和火孔负荷（乃至入力）的变化值，同样也可得出置换后发生黄焰端和回火时一次空气系数的变化值，从而根据其变化后的位置确定互换性的指数。

4 互换性计算公式的导出

4.1 离焰和黄焰端的互换性公式导出原理

离焰互换性公式导出的基础如图7，黄焰端互换性公式导出的基础如图8。

图7、图8中A代表调定气，S代表置换气的离焰极限（图7）和黄焰端的极限特性（图8）曲线。曲线均是标准精密燃烧器的测定数据或燃气的化学组分用计算方法求得。根据A气调定的标准燃烧器如在某一火孔负荷和一次空气系数条件下用于A气，其运行工作点如落在A气的曲线之下（图7），表示可期望获得满意的火焰性能；反之，如在曲线之上，则将发

生离焰。如工作点落在A气的曲线之上（图8），表示可期望得到满意的火焰性能，在曲线之下的所有工作点将发生黄焰端。

一个燃烧器在已知的火孔负荷下用A气调定运行时，可以调节此燃烧器的空气引入量，使之等于其离焰或黄焰端的限值。该点在图7和图8上可用火孔负荷等于已知值的X点表示。如果改用置换气S，已知其一次空气系数小于A气；用来置换A气时，根据给定的一次空气系数值在图上可找到工作点 X_1 ，其位置在X点的右下方，火孔负荷值增加。如果有另一种置换气S，已知其一次空气的引入因数大于A气，现用来置换A气，可根据已知的一次空气系数在图上可找到工作点 X_2 ，其位置在X点的左上方，火孔负荷值减小。

曲线S的位置是否高于、低于或与A曲线重合，决定于调定气与置换气的化学组分。这些曲线的相对位置对离焰公式而言用符号K表示，调定气用 K_a ，置换气用 K_s 。对黄焰端公式而言，用符号Y表示，调定气用 Y_a ，置换气用 Y_s 。如曲线重合，则表示不存在互换问题。

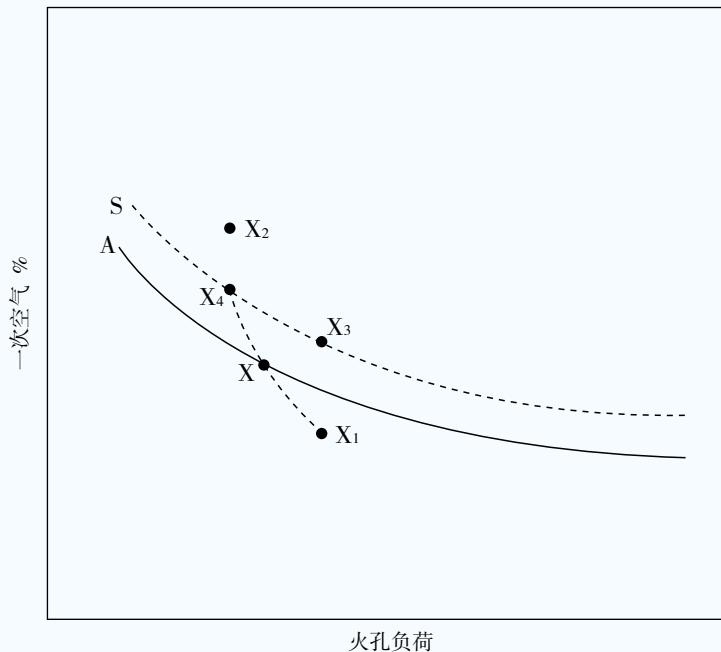


图7 离焰互换性公式导出原理

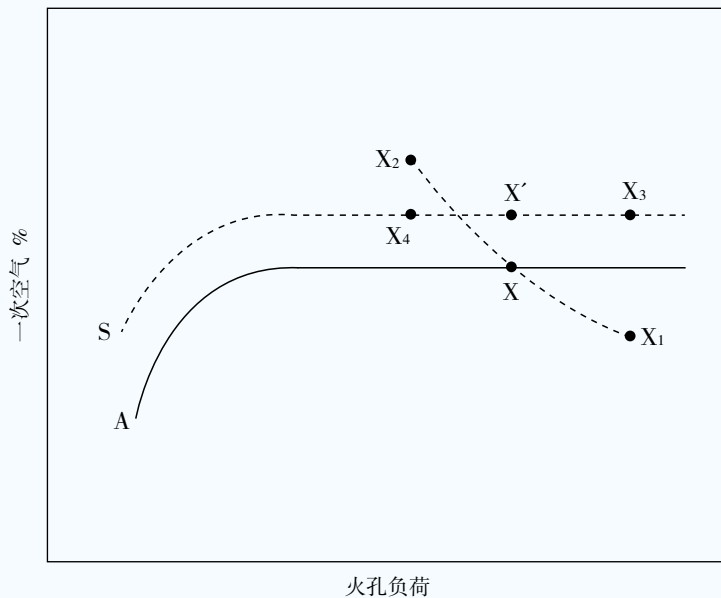


图8 黄焰端互换性公式导出原理

对离焰的判明而言，如用置换气S置换A气后的工作点 X_1 和 X_2 落在置换气S离焰曲线的下方，表示可期望获得满意的火焰性能；如 X_1 和 X_2 落在S曲线的上方则表示产生离焰。在图7中， X_1 点可期望有满意的火焰性能， X_2 点表示有离焰产生。

对黄焰端的判明而言，如用置换气S置换A气后的工作点 X_1 和 X_2 在置换气S黄焰端曲线的上方，表示

可期望获得满意的火焰性能；如 X_1 和 X_2 落在S曲线的下方，则表示产生黄焰端。在图8中， X_1 点表示产生黄焰， X_2 点期望可得满意的火焰性能。

在上述讨论基础上作进一步推论，可知：

(1) 假设用S气置换A气后所得的火孔负荷和一次空气系数可用点 X_1 作代表（图7）。如若置换时保持火孔负荷值与 X_1 点相同，但在S气的离焰极限曲线

上找到一个点 X_3 , 点 X_3 可有一个代表的一次空气系数值。这表明, 由于置换后点 X_1 的一次空气系数小于与 X_1 同一火孔负荷时在置换气S离焰曲线上点 X_3 的一次空气系数值, 这一关系可用来表示可期望获得满意的火焰性能(即比较点 X_1 和点 X_3 的一次空气系数值, 而点 $X_1 < X_3$)。

(2) 反之, 如置换后的工作点为 X_2 , 与点 X_2 同火孔负荷时在置换气S离焰极限曲线上点 X_4 的一次空气系数值相比, 如点 X_2 的一次空气系数大于点 X_4 的一次空气系数值, 即点 $X_2 > X_4$, 表示有离焰产生。

(3) 同理, 研究图8后可知, 假设用S气置换A气后所得的火孔负荷和一次空气系数可用点 X_1 为代表, 与点 X_1 同火孔负荷而在置换气S黄焰端极限曲线上可得点 X_3 , 比较点 X_1 和点 X_3 的一次空气系数值, 则有黄焰端产生。

(4) 反之, 如置换后的工作点为点 X_2 , 与同一火孔负荷值在置换气S黄焰端极限曲线上的点 X_4 相比, 如点 X_2 的一次空气系数大于点 X_4 的一次空气系数值, 则可得到满意的火焰性能。

由于黄焰端极限特性曲线不论对调定气或置换气都有较长的平坦部分, 与调定气火孔负荷值相同而在置换气S曲线上的点 X' , 其一次空气系数值与点 X_3 和点 X_4 相同, 因此, 比较 $\frac{X_1}{X_3}$ 和 $\frac{X_2}{X_4}$ 的一次空气系数时可用 $\frac{X_1}{X'}$ 和 $\frac{X_2}{X'}$ 代替。

从上述推论可知, 用置换后工作点的一次空气系数值与同火孔负荷条件下在置换气S曲线上(离焰或黄焰端极限曲线)相应点的一次空气系数值相比, 可作为建立离焰或黄焰端互换性公式的基础。

4.2 离焰的互换性指数公式

用离焰互换指数 I_L 表示上述的 $\frac{X_1}{X_3}$ 或 $\frac{X_2}{X_4}$, 数学式为:

$$I_L = \frac{P_s}{L_s} \quad (4)$$

式中 I_L —离焰互换性指数;

P_s —置换后工作点的一次空气百分数, %;

L_s —与置换后工作点火孔负荷相同, 但在置换气离焰极限曲线上相应点的一次空气百分数, %。

这一公式涵盖了确定离焰互换性范围内所有的必要条件。理论上, I_L 的值若小于1, 表示有稳定的火焰, 因为置换后运行点的一次空气系数落在同火孔负荷条件下, 在置换气离焰极限曲线上的相应点之下。实例如同图7所表示的第一种情况, 即根据 $\frac{X_1}{X_3}$ 可得 I_L 的值小于1。如 I_L 大于1, 则表示置换后工作点的一次空气值 X_2 大于同火孔负荷条件下在置换气离焰极限曲线上相应点 X_4 的一次空气系数值, 就会产生离焰。实例如同图7所示的第二种情况, 即 $\frac{X_2}{X_4}$ 可得 I_L 的值大于1。

为计算公式(4)中“ P_s ”和“ L_s ”的值, 以表明标准燃烧器的性能, 必须先设定由火孔负荷和一次空气系数所代表的固定调节点(亦即参照点或基准点)。推导公式时假设固定调节点的条件如下:

(1) 可控燃烧器只是根据基础负荷燃气(即调定气A)的离焰极限来调节。

(2) 燃烧器在火孔负荷为 $16.35 \text{ kJ/h} \cdot \text{mm}^2$ (或 $10\,000 \text{ Btu/h} \cdot \text{in}^2$)的条件下被调定。

上述两项都是燃烧器设计中考虑的主要因素。基础负荷表示日负荷变化较小的那部分用气量; 火孔负荷是燃烧器设计的主要依据。文献2中表明设计中对天然气和混合气的最大火孔负荷和火孔孔径的要求。

(见表1)

不同类型燃具的最小一次空气系数的设计值可见表2。

以上说明调定值应考虑满意的运行条件(设计要求), 不是任意选取的, 火孔负荷也是如此。当使

表1 天然气和混合气的最大火孔负荷和孔径^[2]

燃气类别	火孔负荷 kJ/h · mm ² (Btu/h · in ²)	最大火孔孔径(钻孔) mm (in)	槽形孔最大宽度 mm (in)	
			分离火孔	不分离火孔
天然气	32.7 (20 000)	3.3—2.9 (0.1285—0.116)	2.4 (2/32)	1.6 (1/16)
混合气	32.7 (20 000)	2.8—2.7 (0.111—0.1065)	2.0 (5/64)	1.2 (3/64)

表2 不同类型燃具的最小一次空气系数^[2]

燃烧器类型	最小一次空气系数%	燃烧器类型	最小一次空气系数%
灶面	55—60	辐射型空间采暖	65
烤炉	35—40	其他加热燃具	可低至35
热水器	35—40		

用的燃烧器选定后，火孔面积就成了已知量。火孔面积乘以火孔负荷后就成为燃烧器的热负荷值，即入力值MJ/m³，（Btu/cf）。因此，在计算互换性指数时也可直接利用热入力值以代替火孔负荷。在此不用入力值表示是为了说明满意的运行条件是互换性的基本要求，不能仅看燃烧性能。

选择上述调定值从技术上还由于：

(1) 按离焰极限值调定的一个燃烧器代表了可能遇到的一个极端条件。它是确定由一种燃气置换另一种燃气时，从离焰角度看的一个极限因数。

(2) 调定气采用16.35kJ/h·mm² (10 000Btu/h·in²) 的火孔负荷值是为了简化计算在离焰极限条件下火孔负荷与一次空气的变化值，因为由式(3)可知，火孔负荷R的单位取 $\frac{1}{16.35} \text{kJ/h} \cdot \text{mm}^2 (\frac{\text{Btu/h} \cdot \text{in}^2}{10\ 000})$ ，调定气采用16.35 kJ/h·mm² (10 000Btu/h·in²) 的火孔负荷后，由式(3)可知

$$\log R_a = -0.016L_a + K_a$$

$$\text{由于 } R_a = \frac{16.35}{16.35} = 1, \text{ 则 } \log 1 = 0,$$

$$\text{于是 } L_a = \frac{K_a}{0.016} \quad (5)$$

置换后所得的一次空气系数值P_s应是调定气的一次空气系数值乘上由一种燃气置换另一种燃气后用来确定其一次空气值的因数。从上述讨论中可知，这一因数即： $\frac{f_{sa} a_a}{f_{sa} a_s}$ ，于是：

$$P_s = L_a \frac{f_{sa} a_a}{f_{sa} a_s}$$

将式(5)代入，可得

$$P_s = \frac{K_a}{0.016} \frac{f_{sa} a_a}{f_{sa} a_s} \quad (6)$$

为求得L_s，必须已知置换气在喷嘴无变动条件下在标准燃烧器上运行使用时的火孔负荷（或热入力）值。此火孔负荷R_s值可用调定气的火孔负荷值R_a乘上由一种燃气置换另一种燃气后为确定其火孔负荷变化

的因数，此因数即前述的 $\frac{f_a}{f_s}$ ，于是，置换后的火孔负荷R_s可写为：

$$R_s = R_a \frac{f_a}{f_s}$$

在上述假设中，由于R_a=1，因此

$$R_s = \frac{f_a}{f_s} \quad (6)$$

至此，在可控燃烧器上使用置换气后的火孔负荷和一次空气系数的公式已建立。在置换后所得火孔负荷（或入力）条件下，置换气在离焰时的一次空气系数值R_s或 $\frac{f_a}{f_s}$ 可记为：

$$\log \frac{f_a}{f_s} = -0.016L_s + K_s$$

$$\text{即 } L_s = \frac{1}{0.016} (K_s - \log \frac{f_a}{f_s}) \quad (7)$$

根据定义，从离焰角度求得的互换指数I_L即置换后的一次空气系数与置换后同火孔负荷条件下，置换气S在离焰极限时一次空气系数L_s的比值，也即以式(6)除以式(7)，于是，离焰互换指数的计算式可写为：

$$I_L = \frac{P_s}{L_s} = \frac{\frac{K_a}{0.016} \frac{f_{sa} a_a}{f_{sa} a_s}}{\frac{1}{0.016} (K_s - \log \frac{f_a}{f_s})} = \frac{K_a}{\frac{f_{sa} a_s}{f_{sa} a_a} (K_s - \log \frac{f_a}{f_s})} \quad (8)$$

式中：I_L—离焰的互换指数；

K—离焰极限常数（由下述公式求出）；

f—一次空气因数，即燃烧器头部的空气/燃气比；

a—燃气1MJ热值完全燃烧时的理论空气需要量（燃气的热值用MJ/m³表示）。

以高热值天然气为例，热值为41.54MJ/m³，1MJ/m³热值的燃气燃烧的空气需要量为 $\frac{10.575}{41.54} = 0.2546$ ；

角码a和s分别代表调定气和置换气。

确定燃具I_L的数字使用范围，以表示可期望得到满意的运行条件时，尚须根据在民用燃具上进行现场

运行试验的结果。试验时,燃具燃烧器的火孔负荷也取 $16.35\text{kJ/h}\cdot\text{mm}^2$ ($10\,000\text{Btu/h}\cdot\text{in}^2$),一次空气系数也调节到相当于调空气的离焰极限值,以检验公式的适用性和符合现场的使用情况。

上述离焰互换公式中的K值,可根据燃气的化学组分进行计算,计算中采用重量百分数,计算公式如下:

$$K = \frac{1}{100} (K_1 \times \%wt_1 + K_2 \times \%wt_2 + \dots) \quad (9)$$

用体积百分数时,公式为:

$$K = \frac{K_1 \times d_1 \times \%Vol_1 + K_2 \times d_2 \times \%Vol_2 + \dots}{100 \times \text{混合气的}d} \quad (10)$$

式中 d_1, d_2, \dots 为各单一气体的比重,也即相对密度。由于 $K \times d = F$ (11), 可得:

$$K = \frac{F_1 \times \%Vol_1 + F_2 \times \%Vol_2 + \dots}{100 \times \text{混合燃气的相对密度值}d} \quad (12)$$

式中: F=各单一燃气的离焰常数,可见表3

表3 各单一燃气的离焰常数

燃气	F	燃气	F
H ₂	0.6	C ₂ H ₄	1.768
CO	1.407	C ₃ H ₆	2.06
CH ₄	0.67	C ₆ H ₆	2.71
C ₂ H ₆	1.419	75% C ₂ H ₄ + 25% C ₆ H ₆	2.0
C ₃ H ₈	1.931	O ₂	2.9
78% C ₄ H ₁₀ + 22% C ₃ H ₈	2.414	CO ₂	1.08
C ₄ H ₁₀	2.55	N ₂	0.688

4.3 黄焰端的互换性指数公式

用黄焰端互换指数 I_y 表示上述 $\frac{X_1}{X'}$ 或 $\frac{X_2}{X'}$, 数学式为:

$$I_y = \frac{P_s}{Y_s} \quad (13)$$

式中: I_y —黄焰端互换性指数;

P_s —置换后工作点的一次空气系数;

Y_s —与置换后工作点火孔负荷相同时置换气黄焰端极限曲线上相应点的一次空气系数。

这一公式涵盖了确定黄焰端互换性范围内所有的必要条件。理论上 I_y 的值若小于1, 表示有黄焰端产生, 因为置换后运行点的一次空气系数落在同火孔负荷条件下在置换气黄焰端极限曲线的相应点之下。实例如图8上假设的第一种情况, 即根据 $\frac{X_1}{X_3}$ 或 $\frac{X_1}{X'}$ 可得

的 I_y 值小于1。若 I_y 大于1, 则表示置换后工作点 X_2 的一次空气系数大于其同火孔负荷条件下在置换气黄焰端极限曲线上相应点 X_4 (或 X')的一次空气系数值, 表示无黄焰端产生, 实例如图8上假设的第二种情况, 即 $\frac{X_2}{X'}$ 。

为了计算式13中的 P_s 和 Y_s 值, 以表明标准燃烧器的性能, 必须先设定由火孔负荷和一次空气系数所代表的固定调节点。推导公式时假定固定调节点的条件如下:

(1) 可控燃烧器只是根据基础负荷燃气黄焰端的极限值来调节。

(2) 被调节的燃烧器, 其火孔负荷处于黄焰端极限曲线的平坦部分上, 也即 X_2, X_4 和 X' 点有相同的一次空气系数值。与上述离焰条件相比是大大的简化了。

选择上述调定值是由于:

(1) 按黄焰端极限值调定的一个燃烧器代表了可能遇到的一个极端条件。它是确定由一种燃气置换另一种燃气时, 从黄焰端角度看的一个极限因数。

(2) 火孔负荷的变化在此可不考虑, 因为在确定置换气黄焰端极限曲线上工作点的一次空气时所用的火孔负荷与最初调定气相比时置换气的火孔负荷值相同。由图8可知, 即点 X_4, X_2 和 X' 有相同的一次空气系数值。

Y_a 可用来代表上述条件, 因为Y表明了一种燃气黄焰端极限曲线上一次空气系数最大值的一个点。

置换后工作点的一次空气系数 P_s 应是调定气的一次空气系数乘上由一种燃气置换另一种燃气时确定其一次空气值的因数。从上述讨论中知, 这一因数即 $\frac{f_s a_a}{f_a a_s}$, 于是:

$$P_s = Y_a \frac{f_s a_a}{f_a a_s} \quad (14)$$

在置换气黄焰端极限条件下的一次空气系数为 Y_s 。根据定义, 从黄焰端角度求得的互换性指数 I_y , 即置换后所得一次空气系数 P_s 与置换气在黄焰端极限曲线上相应点一次空气系数 Y_s 的比值, 也即式(14)除以 Y_s , 于是可得:

$$I_y = \frac{f_s a_a Y_a}{f_a a_s Y_s} \quad (15)$$

式中: I_y —黄焰端互换性指数;

Y —黄焰端极限常数(可由下述公式求得);

f, a 和角码 a, s 同式(8)。

十分重要的是, 表明可期望得到满意运行条件 I_L

的数值，尚须根据在民用燃烧器上现场试验的结果确定。

黄焰端互换性公式中的Y值可根据燃气的化学组成计算。混合燃气黄焰端极限值时的一次空气系数可按式计算：

$$Y = \frac{T_1 \times \%Vol_1 + T_2 \times \%Vol_2 + \dots}{A} \quad (16)$$

式中：Y—黄焰端极限值的一次空气系数，%；
T—每m³燃气为消除黄焰端所需的空气量，m³；

A—1m³燃气完全燃烧时所需的理论空气量，m³。

可燃气体中，不产生黄焰端的燃气，如H₂和CO的T值等于零。因此，计算Y值时不包括这些燃气，除非这些燃气会影响到完全燃烧时所需的理论空气量。但一些惰性气体，如N₂和CO₂有明显降低黄焰端极限值的趋势。因此在计算中增加了一项7倍惰性气体的量（7E）。

计算公式中必须考虑到含O₂量相当于空气量值，并在计算中剔除，因而用“—”号。混合气中的O₂量也会使N₂含量增加，有降低黄焰端极限的作用，为此在O₂含量前加上26.3（7×3.76）的系数。于是

$$Y = \frac{T_1 \times \%Vol_1 + T_2 \times \%Vol_2 + \dots}{A + 7E - 26.3O_2} \quad (17)$$

式中：E=混合气中N₂和CO₂的总含量
O₂=氧气含量

不同单一气体的黄焰端常数T可见表4

表4 不同单一气体的黄焰端常数T

化学式	T	化学式	T
H ₂	0.0	C ₂ H ₂	8.7
CO	0.0	C ₃ H ₆	13.0
CH ₄	2.18	C ₂ H ₄	17.4
C ₂ H ₆	5.8	C ₆ H ₆	52.0
C ₃ H ₈	9.8	75%C ₂ H ₄ +25%C ₆ H ₆	19.53
78%C ₄ H ₁₀ +22%C ₃ H ₈	15.3	O ₂	-4.76
C ₄ H ₁₀	16.85		

如前所述，“T”表示每m³燃气为消除黄焰端所需的空气量m³。将表4中的不同气体的T值除以该气的燃烧空气需要量A后，即每一燃气用一次空气系数表

示的黄焰端极限值。从实验数据可知，烷烃类气体的T值十分接近单一气体或混合气体的组成。对烯烃类及乙炔和苯而言，也能得到可靠的结果。但如这些燃气混以其他类气体时，则结果尚不清楚。从A.G.A精密燃烧器的试验数据可知，对任一单一气体或组成的混合气体，在当一次空气的引入量（体积引射系数）大于该燃气燃烧所需空气量的50%时，均未发现任何黄焰端。由于乙炔的T/A= $\frac{17.4}{11.911}$ ，苯的T/A= $\frac{52}{35.372}$ ，均超过100%，混合其他燃气后性质不变，可假设某些燃气在加热时可能分解，从而降低了黄焰端的极限值（如表4中的75%C₂H₄+25%C₆H₆）。

4.4 回火的互换性指数公式

由于高热值燃气在A.G.A精密燃烧器上做试验时甚难得到回火的极限特性曲线。这些曲线受燃烧器的设计和燃烧器头部温度的影响甚大。因此，回火的互换公式只能完全由经验的方法确定。

回火发生的趋势正比于燃气的着火速度，着火速度越大，发生回火的趋势也越大。它与量测离焰趋势时所用的燃烧速度和K值之间有某种相关关系。因此，各单一燃气的K值可用来与着火速度的数据相比较。当一次空气系数为100%时，K值与着火速度（cm/s）的关系在半对数纸上可得一条直线^[9]，其公式为：

$$S = 167 \log K + 12 \quad (18)$$

式中：S——一次空气为100%时的燃烧速度，cm/s；
K——离焰极限常数。

上式表明，K值与燃烧速度之间有一定的函数关系。K值越大，燃烧速度也越大，发生回火的趋势也越大。

回火互换性公式的建立同样也应与经验数据相一致。K值或燃烧速度可作为建立公式的基础。

对影响回火的因素作进一步的研究后可知，回火的趋势随燃烧器头部的一次空气系数而变。燃烧速度的最大值通常可从最大的一次空气系数时得到，也即回火常发生于最高的一次空气引入量时。典型的回火极限曲线常与较低的火孔负荷一致。因此，当置换燃气比调定燃气有较高的一次空气因数f时，易于发生回火的原因有二：降低火孔负荷和提高燃烧器头部的一次空气因数。

于是所建立的公式可采用调节气a和置换气s的燃烧速度或K值和一次空气引入因数f的比值来表示回火的互换性。这一关系在研究热值较低的增碳水煤气和

焦炉气(29.8—37.26MJ/m³或800—1 000Btu/cf)与高热值天然气的混合物时也是成立的。经验数据也表明,用丁烷—空气或其他较重的混合燃气做试验时,虽然其燃烧速度和一次空气因数在满意的燃烧性能范围内,但也会发生回火,这一现象可能是由于较重燃气混合的不均匀和分配的不适合而引起某些火孔产生的回火。为考虑到这一因素,置换气的热值也应加进回火的互换性公式。经过试算,符合试验的结果,且比公式中再加进置换气的相对密度为好(即仅用热值而不必考虑相对密度)。在英制单位中,燃气热值的比较是以1 000Btu/cf为参照值,相当于37.26MJ/m³。即 $\frac{h_s}{1\ 000}$ 改成以MJ/m³为单位表示的比值时应采用 $\frac{h_s}{37.26}$ 。

根据上述对影响回火因素的分析和在可控燃烧器与试验的结果得出了以下的经验公式:

$$I_F = \frac{K_s f_s \sqrt{\frac{h_s}{37.26}}}{K_a f_a} = \frac{K_s f_s \sqrt{h_s}}{6.1041 K_a f_a} = 0.163824 \frac{K_s f_s \sqrt{h_s}}{K_a f_a} \quad (19)$$

式中: I_F —回火互换性指数;

K —离焰极限常数(见式12和表3);

f —一次空气因数;

h —燃气的高热值, MJ/m³。

角码 a 和 s 相应于调定气和置换气。

一个类似于上述的公式,如用一次空气系数为100%时混合燃气燃烧速度的平方根值代替上式中的 K 值所得的结果与上式很接近。由于计算包括的项目多,结果也毋须再准确,上式可作为回火的互换性公式。

在 I_F 规定的范围内可得满意的运行结果,但仅适用于不同的补充燃气和天然气。

安全管理消息

北京燃气平谷有限公司开展有限空间作业实操应急演练

北京燃气平谷有限公司于2012年7月11日在峪口中闸1#开展了有限空间作业实操应急演练。

北京燃气平谷有限公司有限空间作业和应急救援工作难度大、危险性高,事关从业人员生命安全,作为安全生产工作的重要环节,我们要采取有效措施抓紧、抓实、抓好有限空间作业管理工作,提高作业人员的安全知识和防护意识,牢记“井下有风险,作业需谨慎”,要做到防患于未然。希望通过此次演练,能够进一步规范我公司有限空间作业的操作及流程,检验《应急救援预案》的适用性。

本次演练的内容为:高压A井室内部常规设备检查,检查设备外观和接口部位查漏。期间,调压器法兰突发漏气,井上监护人员立即对井下人员进行施救,协助井下作业人员逃生。

紧张有序的演练圆满结束了,此次演练充分体现了有限空间作业的针对性、实战性。

北京燃气平谷有限公司邀请了平谷区市容管理委员会、电力公司、联通公司、移动公司及其他相关单位的领导观摩此次演练。公司领导及

参加观摩的各单位领导共同对此次演练进行了评估。最后,平谷公司副总经理王自杰结合各单位领导的点评对此次演练做了总结发言,他表示通过此次演练进一步规



范了我公司有限空间作业的规范化管理。但某些细节还需进一步完善,实施救援过程中的真实感、紧迫感有待加强。作业及救援过程中关键环节的连接、流转的顺畅性有待加强。今后我公司将通过进一步加大演练力度,丰富演练形式与内容,制定明确的演练计划,细化演练流程,逐步提高公司作业及救援队伍的综合素质,强化应急反应能力及处置能力,解决演练过程中暴露出的问题,为燃气管网的安全稳定运行提供应急保障。

(王晓丹)