

测定 α 和 η 的燃气分析计算法

清华大学 焦 树 建

摘 要

本文根据在燃烧各种液体、固体和气体燃料时燃气成分的分析结果,提出计算燃烧过程中余气系数 α 和燃烧完全系数 η 的统一计算关系式,它既能使计算结果更加准确,还能使计算方法统一化。

一、前 言

本文在参考文献〔2〕的基础上,根据在燃烧各种液体、固体和气体燃料时燃气成分的分析结果,提出计算余气系数 α 和燃烧完全系数 η 的统一计算关系式。计算时取液体和固体燃料中各组成元素的质量分数为: $C_p\%$, $H_p\%$, $S_p\%$, $O_p\%$, $N_p\%$, $W_p\%$ (水份)气体燃料中各组成气体的体积分数则取为: $CO^f\%$, $H_2^f\%$, $H_2S^f\%$, $CH_4^f\%$, $\Sigma(C_nH_m^f)\%$, $N_2^f\%$, $O_2^f\%$, $W^f\%$ (水份),其燃烧后干燃气中诸组成气体的体积分数为: $CO\%$, $H_2\%$, $CH_4\%$, $\Sigma C_nH_m\%$, $C_{n_f}H_{m_f}\%$ (液体燃料蒸气的概括式), $CO_2\%$, $SO_2\%$, $A\%$, $NO_x\%$, $N_2\%$, $O_2\%$,但气体燃料燃烧后无 $C_{n_f}H_{m_f}\%$ 项,干燃气中都还会有未燃尽的固体炭粒,但其体积则可以忽略不计。

计算时取空气中各组成气体的体积分数为: $N_2^0\% = 0.780881$, $O_2^0\% = 0.209495$, $A^0\% = 0.009324$, $CO_2^0\% = 0.000300$ 。空气的摩尔质量 $\mu_a = 28.9666\text{kg/kmol}$ 。诸化学元素的摩尔质量为 $\mu_{O_2} = 32.000\text{kg/kmol}$, $\mu_{N_2} = 28.016\text{kg/kmol}$, $\mu_{H_2} = 2.0160\text{kg/kmol}$, $\mu_C = 12.010\text{kg/kmol}$, $\mu_A = 39.944\text{kg/kmol}$, $\mu_S = 32.064\text{kg/kmol}$ 。

二、液体与固体燃料部分

1. 轻质液体燃料燃烧时 α 的计算 在燃烧航空煤油和柴油时,若能使取样探头和输送管路的温度恒定为 $200^\circ\sim 400^\circ\text{C}$,就能使尚未燃烧的液滴以蒸气状态出现于燃气中。经折算后,它在干燃气中的体积含量以 $C_{n_f}H_{m_f}\%$ 表示。计算时我们若以1kg燃料作为分析对象,假定燃烧过程中供给1kg燃料的实际空气量的摩尔数为 M_a ,它们在烧燃后生成的干燃气的摩尔数为 M_g ,而且假定其中含有尚未燃尽的固体炭粒 $C_s\%$ kg。那么,我们就可以写出燃烧过程前后炭元素、氧元素和氮元素的质量守恒关系式,即

$$C_p + 0.3603M_a = 12.010M_g \Sigma C + C_s \quad (1)$$

$$20.9795M_a + O_p/32.000 = H_p/4.0320 + M_g\{O_2 + CO_2 + 0.5CO + SO_2 + 0.5xNO_x - (0.5H_2 + CH_4 + m_f C_{n_f}H_{m_f}/4 + \Sigma(mC_nH_m/4))\} \quad (2)$$

$$79.0205M_a + N_p/28.016 = M_g (\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) \quad (3)$$

$$\Sigma C = CO_2 + CO + CH_4 + \Sigma(nC_nH_m) + n_f C_{n_f}H_{m_f} \quad (4)$$

$$\tilde{N}_2 = 100 - (H_2 + CO + CH_4 + \Sigma C_nH_m + C_{n_f}H_{m_f} + NO_x + CO_2 + SO_2 + O_2) \quad (5)$$

$\tilde{N}_2\%$ 是干燃气中含氮量与含氩量的体积分数的总和。联解关系式(1)、(2)与(3)后可得:

$$M_g = \beta_f / (20.9795 (\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) - 79.0205P) \quad (6)$$

$$M_a = 0.012655 [M_g (\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) - 0.035694N_p] \quad (7)$$

$$C_s = C_p - [12.010 \Sigma C - 4.5596 \times 10^{-3} (\tilde{N}_2 + 0.5NO_x)] M_g - 1.6275 \times 10^{-4} N_p \quad (8)$$

$$\beta_f = 19.598338H_p - 2.469391O_p + 0.748840N_p \quad (9)$$

$$P = O_2 + CO_2 + 0.5CO + SO_2 + 0.5xNO_x - [0.5H_2 + CH_4 + m_f C_{n_f}H_{m_f}/4 + \Sigma(mC_nH_m/4)] \quad (10)$$

鉴于余气系统 $\alpha = M_a \mu_a / L_0$ (11)

式中 L_0 是完全燃烧 1 kg 燃料所需消耗的理论空气的质量数, 它可以用下式表示, 即

$$L_0 = \beta \mu_a / 20.9495 \quad (12)$$

$$\beta = (0.083264C_p + 0.248016H_p + 0.031188S_p - 0.031250O_p) \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{0.265115}{\beta} \left[\frac{(\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) \beta_f}{20.9795 (\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) - 79.0205P} - 0.035694N_p \right] \quad (14)$$

式(14)就是计算轻质液体燃料的燃烧过程中余气系数的通用关系, 它既可以适用于 $\alpha \geq 1$ 和 $\alpha \leq 1$ 的情况, 也可以适用于 $C_s\% > 0$ 或 $C_s = 0$ 的情况。

实际上要利用式(14)来计算 α 是困难的, 因为人们难于测定燃料蒸气的含量 $C_{n_f}H_{m_f}\%$ 。为此, 人们总是把从燃烧设备中抽取的燃气, 首先经过图 1 所示的催化燃烧炉的补燃处理, 然后再作干燃气的成份分析和计算的。通常, 当催化燃烧炉的温度升到 $1000^\circ \sim 1100^\circ\text{C}$ 时, 燃气中的气相可燃物质 H_2 、 CO 、 CH_4 、 ΣC_nH_m 以及 $C_{n_f}H_{m_f}$ 是能够完全燃烧成为 CO_2 与 H_2O 的。但是与炉温介于 $900^\circ \sim 1000^\circ\text{C}$ 时, 补燃后的燃气中则仍有少量的 CO 。

在这种条件下, 我们得区别两类情况来讨论余气系数的计算问题。

(1) $\alpha \geq 1$ 的情况 这时, 无需对进入催化燃烧炉的样气补给空气, 则

$$\tilde{N}_2 = 100 - (CO_2 + CO + SO_2 + O_2 + NO_x)$$

因而

$$\alpha = \frac{0.265115}{\beta} \left\{ \frac{[100 - (CO_2 + CO + SO_2 + O_2 + 0.5NO_x)] \beta_f}{100(20.9795 - (CO_2 + O_2 + SO_2 + 0.6049CO)) - 0.5(20.9795 + 79.0205x)NO_x} - 0.035694N_p \right\} \quad (15)$$

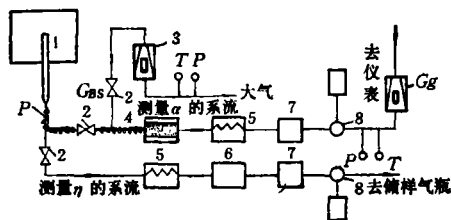


图 1 取样系统示意图

1. 取样探头 2. 阀门 3. 流量计 4. 催化燃烧炉
5. 冷却器 6. 除油器 7. 干燥器 8. 真空泵
9. 电保温管道 p. 压力表 T. 温度计

$$C_s = C_p - \frac{\{12.010(\text{CO}_2 + \text{CO}) - 4.5596 \times 10^{-3} [100 - (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.5\text{NO}_x)]\} \beta_f}{100(20.9795 - (\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{SO}_2 + 0.6049\text{CO})) - 0.5(20.9795 + 79.0205x)\text{NO}_x} - 1.6275 \times 10^{-4} N_p \quad (16)$$

当然,如能使催化烧燃炉的温度高达 $1000^\circ \sim 1100^\circ \text{C}$,式中的 CO 值将趋于零。

(2) $\alpha < 1$ 的情况 当时需要对进入催化燃烧炉的样气补给 $G_{BS} \text{ kg/s}$ 的空气,则

$$\alpha = \alpha_s \{ 1 - (G_{BS}/G_g) [1 + (1 - C_s/100 - 0.089365H_p - W_p/100)/28.9666M_a] \} \quad (17)$$

式中 $G_g \text{ kg/s}$ 是在催化燃烧炉后测得的干燃气的质量流率。 α_s 和 C_s 值则可根据补燃后测定的成分按式(15)与(16)计算。 M_a 的计算式为

$$M_a = 0.012655 \left\{ \frac{\{100 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} + 0.5\text{NO}_x)\} \beta_f}{100(20.9795 - (\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{SO}_2 + 0.6049\text{CO})) - 0.5(20.9795 + 79.0205x)\text{NO}_x} - 0.035694N_p \right\} \quad (18)$$

式(15)和(17)就是采用催化燃烧炉时计算轻质液体燃料燃烧过程中 α 的通用式。

此外,人们还可以采用氧化铜催化燃烧炉来补氧燃烧的方法。在 $\alpha < 1$ 的条件下,氧化铜能自动释放氧气,以烧燃样气中的可燃气。在这种方法中,由于无法测定自动释氧的流率,因而我们只能假定样气经催化烧燃后 $C_s = 0$,这样才能按下式计算出 $\alpha < 1$ 时的余气系数,即

$$\alpha = \frac{20.9495 \{ C_p [100 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.5\text{NO}_x)] - 0.428684 \text{CO}_2 N_p \}}{\beta \{ 949.0362 \text{CO}_2 - 0.3603 [100 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.5\text{NO}_x)] \}} \quad (19)$$

显然,当 $C_s \approx 0$ 时,用这种方法计得的余气系数是不正确的。

2. 航空煤油燃烧时 α 的计算 前节介绍的计算余气系数的通用关系式似乎比较复杂,实际上当我们预先得知燃料的元素组成后,完全可以把它整理成为非常简单的形式。下面让我们以航空煤油为例来说明之。计算中取航空煤油的元素组成为: $C_p = 85.6267$, $H_p = 14.3733$, $S_p = O_p = N_p = W_p = 0.0000$ 。假如忽略燃气中 NO_x 的微量影响,那么

(1) 在 $\alpha \geq 1$ 和 $C_s \geq 0$ 的情况下 式(15)与(16)可简化为:

$$\alpha = 69.8316 \times 10^{-3} (100 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - \text{CO}) / (20.9795 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - 0.6049\text{CO}) \quad (20)$$

$$C_s = 85.6267 - \{ [33.8440(\text{CO}_2 + \text{CO}) + 0.012844\text{O}_2 - 1.2844] / (20.9795 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - 0.6049\text{CO}) \} \quad (21)$$

(2) 在 $\alpha \geq 1$ 和 $C_s = 0$ 的情况下 由式(21)中可得知,干燃气中 CO_2 、 CO 与 O_2 的体积组成为

$$\text{O}_2 = 20.99135 - 1.39504\text{CO}_2 - \text{CO} \quad (22)$$

$$\alpha = (5.5173 + 0.027586\text{CO}_2) / (0.39504(\text{CO}_2 + \text{CO}) - 0.01185) \quad (23)$$

(3) 在 $\alpha < 1$ 和 $C_s \geq 0$ 的情况下 式(17)可以简化为

$$\alpha = 69.8316 \times 10^{-3} \left(\frac{100 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - \text{CO}}{20.9795 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - 0.6049\text{CO}} \right) \left[1 - \frac{G_{BS}}{G_g} \left(\frac{76.81096 + 0.43248\text{CO}_2 + 0.10485\text{O}_2 - 0.00403\text{CO}}{100 - \text{CO}_2 - \text{O}_2 - \text{CO}} \right) \right] \quad (24)$$

显然,倘若能把催化燃烧炉的温度提高到 $1000^\circ \sim 1100^\circ \text{C}$ 则 CO 将趋于零,式(20)、(21)、

(22)与(24)就能进一步简化。那时,只要测定 CO_2 与 O_2 的体积分数,就能计得 α 。若 $C_s = 0$,

$$\alpha = (0.139863/\text{CO}_2\%) + 0.06993 = [0.195124/(0.209795 - \text{O}_2\%)] + 0.06993 \quad (25)$$

这与B. A. Чистихин建议的(26)式类似,但(26)式只能适用于补燃后 $\text{CO} = 0$ 与 $C_s = 0$ 的情况。

$$\alpha = [0.1397/(\text{CO}_2 - 0.03)\%] + 0.0698 = [0.1949/(0.2095 - \text{O}_2\%)] + 0.0698 \quad (26)$$

当采用氧化铜催化燃烧炉补氧时,只能假定 $C_s = 0$,才能按下式计算 $\alpha < 1$ 时的 α

$$\alpha = [0.17668(100 - \text{CO}_2 - \text{O}_2)]/(\text{CO}_2 - 0.0003795\text{O}_2 - 0.03795) \quad (27)$$

表1证明本文给出的计算公式能够考虑燃烧过程中 $C_s \approx 0$ 的普遍情况,并且准确得多

表1 计算结果比较 α 由(20)式, α_1 和 α_2 由(26)式用 CO_2 和 O_2 体积分数计算得,
 $\bar{\alpha}_1 = (\alpha_1 - \alpha)/\alpha$, $\bar{\alpha}_2 = (\alpha_2 - \alpha)/\alpha$, C_s 由(21)式得,并且 $\text{CO} = 0$)

CO_2	O_2	α	C_s	α_1	α_2	$\bar{\alpha}_1$	$\bar{\alpha}_2$
11.00	5.00	1.1780	11.1084	1.3433	1.2917	14.03	9.65
11.50	4.50	1.1780	7.7114	1.2878	1.2546	9.32	6.50
12.00	4.00	1.1780	4.3143	1.2369	1.2197	5.00	3.54
12.30	3.70	1.1780	2.2761	1.2083	1.1997	2.57	1.84
12.63505	3.36495	1.1780	0	1.1781	1.1781	0.008	0.008
1.10	19.40	11.5779	10.1456	13.1259	12.6440	13.37	9.21
1.15	19.35	11.5779	6.6179	12.5430	12.2511	8.34	5.81
1.20	19.30	11.5779	3.0901	12.0099	11.8819	3.73	2.63
1.2438	19.2562	11.5779	0	11.5791	11.5765	0.010	-0.012

因而为了准确地测定 α 值,应该采用本文建议的(20)式,那时应同时测量催化燃烧炉后干燃气中 CO_2 、 O_2 与 CO 的体积分数(当然,若能使催化燃烧炉在 $1000^\circ \sim 1100^\circ\text{C}$ 条件下工作的话,就无需测定 CO 值)。由式(20)中还可以看清:当 $\text{CO} = 0$ 时,在同一个 α 值工况下,不论 C_s 是否等于零,催化燃烧炉后干燃气中 CO_2 与 O_2 含量的和总是相等的。所以,当干燃气中 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 值趋近于15.0471时, α 值必定已趋于1。那时就应向催化燃烧炉补给助燃空气。

3. 有预热燃烧室时主燃烧室内 α 的计算 通常在试验中,往往在主燃烧室前加装预热燃烧室,以调整进入主燃烧室去的空气温度。此时空气已被污染,那么主燃烧室内各局部点上的 α 该怎么计算呢?我们可以用上面介绍的方法和公式,分别测量和计算出在预热燃烧室的出口(即主燃烧室进口)已经混合均匀的热燃气的余气系数 α_1 以及主燃烧室中任一测点上的综合余气系数 α_x 。经推导证明:真实余气系数 α 为

$$\alpha = (\alpha_1 \alpha_x) / (\alpha_1 - \alpha_x) \quad (28)$$

在应用式(28)时必须注意,应使预热燃烧室采用与主燃烧室同种燃料才行,否则将导致误差。

4. 轻质液体燃料燃烧时 η 的计算 从原则上讲,当我们测定了 $\text{CO}\%$, $\text{H}_2\%$, $\text{CH}_4\%$,

$\Sigma C_n H_m \%$, $C_{nf} H_{mf} \%$, $CO_2 \%$, $SO_2 \%$, $NO_x \%$, $O_2 \%$, 就可以计算出相应的 η 。因 1 kg 燃料的 M_g 摩尔干燃气中所含的可燃物质的质量千克数为: $CO \% M_g \mu_{co}$, $H_2 \% M_g \mu_{H_2}$, $CH_4 \% M_g \mu_{CH_4}$, $C_s \%$, $\Sigma (C_n H_m \% M_g \mu_{C_n H_m})$, $C_{nf} H_{mf} \% M_g \mu_{C_{nf} H_{mf}}$ 。显然

$$\eta = 1 - (339.13 C_s) / H_u - M_g \{ [2832.12 CO + 2422.32 H_2 + 8028.86 CH_4 + \Sigma (H_u C_n H_m C_n H_m \%)] / H_u + \mu_{C_{nf} H_{mf}} C_{nf} H_{mf} \% \} \quad (29)$$

式中 H_u ——液体燃料的低热值, KJ/kg; $H_u^{C_n H_m}$ —— $C_n H_m$ 气体的摩尔低热值, KJ/kmol, $\mu_{C_{nf} H_{mf}}$ ——液体燃料的平均摩尔质量; M_g ——由式(6)求得。

但是不可能直接测定以蒸气状态呈现的液体燃料的含量 $C_{nf} H_{mf} \%$ 。通常在测定干燃气的有关成份时, 总是先把燃气进行冷却和除水除油处理, 那时燃料蒸气成分 $C_{nf} H_{mf} \%$ 也将凝析出来, 因而在这种条件下测定的燃气成分: $CO' \%$, $H_2' \%$, $CH_4' \%$, $\Sigma C_n H_m' \%$, $CO_2' \%$, $SO_2' \%$, $NO_x' \%$, $O_2' \%$, 已不是计算 η 时所需要的相应值, 两者关系为:

$$\left. \begin{aligned} CO &= (1 - C_{nf} H_{mf} \%) CO', \quad H_2 = (1 - C_{nf} H_{mf} \%) H_2', \\ CH_4 &= (1 - C_{nf} H_{mf} \%) CH_4', \quad O_2 = (1 - C_{nf} H_{mf} \%) O_2', \\ &\dots\dots\dots, \dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

由此可见, 在应用关系式(29)来计算 η 之前, 我们必须首先研究 $C_{nf} H_{mf} \%$ 含量的计算问题。

明显取样点上的 α 可按催化炉补燃法求得, 当然这个 α 值同时应该满足(14)式的要求, 经推导后可以得到计算 $C_{nf} H_{mf}$ 值的关系式:

$$C_{nf} H_{mf} = \frac{100 \{ (1 - k/100) \beta_f - (3.771952 \alpha \beta + 0.035694 N_p) [20.9795(1 - k/100) - 0.790205 B] \}}{(3.771952 \alpha \beta + 0.035694 N_p) [79.0205(m_f/4 + B/100) - 20.9795(1 - k/100)] + (1 - k/100) \beta_f} \quad (31)$$

$$\text{式中} \quad K = H_2' + CO' + CH_4' + \Sigma C_n H_m' + 0.5 NO_x' + SO_2' + CO_2' + O_2' \quad (32)$$

$$B = O_2' + CO_2' + SO_2' + 0.5 CO' + 0.5 x NO_x' - [0.5 H_2' + CH_4' + \Sigma (m_{C_n H_m} / 4)] \quad (33)$$

$$m_f = \mu_{C_{nf} H_{mf}} H_p / 100.8 \quad (34)$$

$$n_f = \mu_{C_{nf} H_{mf}} C_p / 1201.0 \quad (35)$$

在这种情况下, 式(10)中的 P 值可以简化为

$$P = B - (m_f/4 + B/100) C_{nf} H_{mf} \quad (36)$$

液体燃料的平均摩尔质量 $\mu_{C_{nf} H_{mf}}$ 可通过 $n-d-v$ 法测定。通常取 JP4 燃料的 $\mu_{C_{nf} H_{mf}} = 125.0$, JP5 燃料的 $\mu_{C_{nf} H_{mf}} = 169.0$, DF 2 号柴油的 $\mu_{C_{nf} H_{mf}} = 198.0$, 我国轻柴油的 $\mu_{C_{nf} H_{mf}}$ 大约等于 220。

这样, 就可求得 $C_{nf} H_{mf}$ 值, 进而用(30)式求得 $CO \%$, $H_2 \%$, $CH_4 \%$, $\Sigma C_n H_m \%$, $CO_2 \%$, $SO_2 \%$, $NO_x \%$ 和 $O_2 \%$ 。将其分别代入式(6)和(8), 就可求得 M_g 和 C_s , 进而由(29)式求得 η 。

5. 有预热燃烧室时主燃烧室的 η 计算 在主燃烧室前若装有预热燃烧室, 为了测定主燃烧室的 η , 首先分别测得预热燃烧室的 η_1 与 α_1 , 以及主燃烧室的 α_s , 进而测得干燃气的成份: $CO' \%$, $H_2' \%$, $CH_4' \%$, $\Sigma C_n H_m' \%$, $CO_2' \%$, $SO_2' \%$, $NO_x' \%$ 和 $O_2' \%$, 然后求出主燃烧室的综合燃烧完全系数 η_s 。

由于 $\eta_1 < 1$, 就会有部分残余可燃物质被带到主燃烧室。假定只有进入主燃烧室中

$\alpha = 2$ 区间范围内的那部分可燃物质能够进一步燃烧放热, 就能推导出 η 的关系式:

$$\eta = 1 - \{ (1 - \eta_s - (1 - K_f)(1 - \eta_1)\alpha_s/\alpha_1) / \{ 1 - (1 - (1 - \eta_1)K_f)\alpha_s/\alpha_1 \} \} \quad (37)$$

式中

$$K_f \approx 2(\alpha_1 - \alpha_s)(\alpha_1\alpha_s) \quad (38)$$

同样必须注意: 在应用式(37)时, 预热燃烧室应该采用与主燃烧室同种燃料才行。

6. 重质液体燃料燃烧时 α 与 η 的计算 从原则上来说, 上述计算公式也能用。但在重质液体燃料中将含有一定数量的沸点更高的碳氢化合物, 在取样过程中很难完全蒸发成为以 $C_{nf}H_{mf}\%$ 概括形式表示的燃料蒸气。不过当重质液体燃料沉积到温度高于 $400^\circ \sim 450^\circ\text{C}$ 的金属表面上时, 较轻质的碳氢物质几乎都能蒸发逸出, 残留下来的基本上就是固体炭。因而在取样过程中我们若能保证取样探头及其输送管路的温度高于 450°C , 就有可能把重质液体燃料中的含氢成分全部释放出来, 当样气经催化炉补燃后, 就可以采用关系式(15)和(17)来计算 α 。显然, 在这种情况下 $C_s > 0$, 因此不会影响 α 值的计算准确性。

同样能用第四节的方法和公式来计算重质液体燃料的 η 。因为这种方法能够计算出以液体状态存在的未能起燃的燃料量 $C_{nf}H_{mf}\%$, 但是在测量 η 时, 为了防止尚未燃烧的 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_s 、 ΣC_nH_m 等物质在取样管内继续燃烧而影响测量准确性, 我们必须使样气自进入取样探头开始, 就能充分冷却。

由此可见, 为了提高测量的准确性, 在测 α 时, 取样探头和输送管路必须充分加热, 但在测定 η 时, 则需要冷却, 这样才能保证样气成分的正确有效。

7. 固体燃料燃烧时 α 与 η 的计算 通常, 在固体燃料燃烧后的干燃气中是不会出现 $C_{nf}H_{mf}\%$ 项的, 甚至连 $\Sigma C_nH_m\%$ 项都很少。因而可以不采取补燃措施, 而直接用(14)式令 $C_{nf}H_{mf}\% = 0$ 来计算 α 。假如也采用催化炉补燃的话, 则可以按式(15)和(17)来计算 α 。燃烧完全系数同样令 $C_{nf}H_{mf} = 0$, 可按(29)式求 η 。同时, 由取样探头抽出的燃气经冷却干燥后, 就能直接测得 $\text{CO}_2\%$ 、 $\text{CO}\%$ 、 $\text{H}_2\%$ 、 $\text{CH}_4\%$ 、 $\Sigma C_nH_m\%$ 、 $\text{SO}_2\%$ 、 $\text{NO}_x\%$, 和 $\text{O}_2\%$, 无需按式(30)进行修正。

三、气体燃料部分

1. 气体燃料燃烧时 α 的计算 在计算时, 取 1 标准立方米 (以后用符号 Nm^3 记之) 的气体燃料作为分析对象。假定供给 1Nm^3 气体燃料的实际空气的体积数为 $V_a \text{Nm}^3$, 燃烧后干燃气的体积为 $V_g \text{Nm}^3$, 其中含有 $C_s\%K_g$ 的尚未燃完的固体炭质。那么, 我们就可以写出燃烧过程前后炭元素、氧元素和氮元素的质量守恒关系式, 即

$$\begin{aligned} & \text{CO}^f + \Sigma n(C_nH_m)^f + \text{CH}_4^f + \text{CO}_2^f + 0.03V_a \\ &= [\text{CO} + \Sigma n(C_nH_m) + \text{CH}_4 + \text{CO}_2]V_g + 22.4C_s/\mu_c \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} 20.9795V_a + \text{O}_2^f &= [0.5\text{H}_2^f + \text{CH}_4^f + 0.5\text{H}_2\text{S}^f + m\Sigma(C_nH_m)^f/4 - \text{CO}_2^f - 0.5\text{CO}^f] \\ &+ [\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 0.5\text{CO} + \text{SO}_2 + 0.5x\text{NO}_x - (0.5\text{H}_2 + \text{CH}_4 \\ &+ m\Sigma(C_nH_m)/4)]V_g \end{aligned} \quad (40)$$

$$79.0205V_a + \text{N}_2^f = V_g(\tilde{\text{N}}_2 + 0.5\text{NO}_x) \quad (41)$$

$$\text{式中 } \tilde{\text{N}}_2 = 100 - (\text{H}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + \Sigma C_nH_m + \text{NO}_x + \text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2) \quad (42)$$

联解关系式(39)、(40)与(41)后可得

$$V_g = \beta_{fg} / [20.9795(\tilde{\text{N}}_2 + 0.5\text{NO}_x) - 79.0205P_g] \quad (43)$$

$$V_a = 0.012655(V_g(\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) - N_2^f) \quad (44)$$

$$C_s = 0.536161\{[CO^f + \sum(nC_nH_m)^f + CO_2^f + CH_4^f] - [\sum C_g - 3.7965 \times 10^{-4}(\tilde{N}_2 + 0.5NO_x)]V_g - 3.7965 \times 10^{-4}N_2^f\} \quad (45)$$

$$\beta_{fg} = 79.0205[0.5H_2^f + CH_4^f + 0.5H_2S^f + \sum(mC_nH_m/4)^f - (0.5CO^f + CO_2^f + O_2^f)] + 20.9795N_2^f \quad (46)$$

$$P_g = O_2 + CO_2 + 0.5CO + SO_2 + 0.5xNO_x - [0.5H_2 + CH_4 + \sum(mC_nH_m/4)] \quad (47)$$

$$\sum C_g = CO + \sum(nC_nH_m) + CO_2 + CH_4 \quad (48)$$

$$\text{鉴于余气系数} \quad \alpha = V_a/L'_0 \quad (49)$$

式中 L'_0 是完全燃烧 $1Nm^3$ 的气体燃料时所需供给的理论空气量的标准体积数,其值可表示为:

$$L'_0 = (100/20.9495)\{0.5H_2^f\% + 0.5CO^f\% + 2CH_4^f\% + \sum[(n+m/4)(C_nH_m)^f]\% + 1.5H_2S^f\% - O_2^f\%\}, Nm^3 \text{空气}/Nm^3 \text{燃料}, \quad (50)$$

$$\text{令} \quad \beta_g = 0.5H_2^f + 0.5CO^f + 2CH_4^f + \sum[(n+m/4)(C_nH_m)^f] + 1.5H_2S^f - O_2^f \quad (51)$$

$$\alpha = \frac{0.265115}{\beta_g} \left[\frac{(\tilde{N}_2 + 0.5NO_x)\beta_{fg}}{20.9795(\tilde{N}_2 + 0.5NO_x) - 79.0205P_g} - N_2^f \right] \quad (52)$$

(52)式是计算气体燃料的 α 的通式,适用于 $\alpha \geq 1$ 和 $\alpha \leq 1$ 及 $C_s\% > 0$ 或 $C_s = 0$ 的情况。

由于存在于气体燃料燃烧产物中的 $\sum C_nH_m$ 的结构形式比较简单,一般比较容易直接测量,因而我们完全可以对燃烧后的干燃气进行全分析,进而直接采用(52)式来计算 α 。

当然,人们也可以采用催化燃烧炉对燃烧产物进行补燃。当炉温高达 $1000^\circ \sim 1100^\circ C$ 时,燃气中的气相可燃物质将完全燃烧成为 CO_2 与 H_2O 。但当炉温介于 $900^\circ \sim 1000^\circ C$ 时,补燃后的燃气中则仍会有少量的CO。在这种情况下需要区别两种状态来讨论 α 的计算问题。

(1) $\alpha > 1$ 的情况

$$\tilde{N}_2 = 100 - (CO_2 + SO_2 + O_2 + CO + NO_x)$$

$$\alpha = \frac{0.265115}{\beta_g}$$

$$\left\{ \frac{[100 - (CO_2 + CO + SO_2 + O_2 + NO_x)]\beta_{fg}}{100[20.9795 - (CO_2 + O_2 + SO_2 + 0.6049CO)] - 0.5(20.9795 + 79.0205x)NO_x} - N_2^f \right\} \quad (53)$$

$$C_s = 0.536161\{[CO^f + \sum(nC_nH_m)^f + CO_2^f + CH_4^f] - 3.7965 \times 10^{-4}N_2^f - \frac{[(CO_2 + CO) - 3.7965 \times 10^{-4}(100 - CO_2 - SO_2 - O_2 - CO - 0.5NO_x)]\beta_{fg}}{100[20.9795 - (CO_2 + O_2 + SO_2 + 0.6049CO)] - 0.5(20.9795 + 79.0205x)NO_x}\} \quad (54)$$

(2) $\alpha < 1$ 的情况 需要对进入催化燃烧炉的样气补给 $G_{BS}kg/s$ 的空气。因此

$$\alpha = \alpha_s \{ [1 - (G_{BS}/G_g)] \{ 1 + (28.9666V_a)^{-1} [22.4\rho_f - 0.224C_s - 0.18016(H_2^f + 2CH_4^f + H_2S^f + \sum(mC_nH_m/2)^f + W^f)] \} \} \} \quad (55)$$

式中 G_gkg/s 是在催化燃烧炉后测得的干燃气的质量流率。 α_s 和 C_s 值可按(53)与(54)求得。

$$V_a = 0.012665 \left\{ \frac{[100 - (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.5\text{NO}_x)]\beta_{fg}}{100[20.9795 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.6049\text{CO})] - 0.5(20.9795 + 79.0205x)\text{NO}_x} - N_2^f \right\} \quad (56)$$

式(55)中的 ρ_f 是标准状态下气体燃料的密度,它可以按下式计算,即

$$\rho_f = \frac{1}{22.4} \{ 28.010\text{CO}^f + 2.016\text{H}_2^f + 16.042\text{CH}_4^f + \sum [(12.010n + 1.008m)\text{C}_n\text{H}_m^f] + 28.016\text{N}_2^f + 32.000\text{O}_2^f + 44.010\text{CO}_2^f + 18.016\text{W}^f + 34.080\text{H}_2\text{S}^f \} \% \quad (57)$$

式(53)和(55)就是采用催化燃烧炉时,计算气体燃料燃烧过程中余气系数的通用关系式,它适用于 $C_s\% \geq 0$ 的情况,并分别适用于 $\alpha \geq 1$ 和 $\alpha < 1$ 的燃烧情况。

假如采用氧化铜催化炉来补氧燃烧,在 $\alpha < 1$ 的情况下,因无法测定氧化铜自动释放的氧气量,因而只能假定催化燃烧后 $C_s = 0$,按下式计算

$$\alpha = \frac{20.9495 \{ [\text{CO}_2^f + \text{CO}^f + \text{CH}_4^f + \sum (nC_n\text{H}_m)^f] (100 - \text{CO}_2 - \text{SO}_2 - \text{O}_2 - 0.5\text{NO}_x) - N_2^f \text{CO}_2 \}}{\beta_g \{ 79.0205\text{CO}_2 - 0.03[100 - (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + 0.5\text{NO}_x)] \}} \quad (58)$$

当然,当 $C_s \neq 0$ 时,用上式来计算 α 必将引起误差。

显然,在已知气体燃料的具体体积成分后,上述诸计算公式就可以大大简化。

2. 气体燃料燃烧时 η 的计算 从干燃气中直接测得 CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , $\sum \text{C}_n\text{H}_m$, SO_2 , NO_x 以及 O_2 的体积分数后,就可以得知 1 Nm^3 的气体燃料燃烧后在 $V_g \text{ Nm}^3$ 的干燃气中尚存的可燃物质的体积数(Nm^3),应分别等于 $\text{CO}\%V_g$, $\text{H}_2\%V_g$, $\text{CH}_4\%V_g$ 和 $\sum (\text{C}_n\text{H}_m\%V_g)$,此外还有 $C_s\%$ 公斤的固体炭。

$$\eta = 1 - 339.13C_s/H_{ug} - V_g(107.43\text{H}_2 + 126.36\text{CO} + 357.09\text{CH}_4 + \sum (\text{H}_c^{nC_n\text{H}_m}\text{C}_n\text{H}_m\%))/H_{ug} \quad (59)$$

式中 V_g 和 C_s 按(43)和(45)式计算 H_{ug} 是 1 Nm^3 气体燃料的低热值, KJ/Nm^3 ;

$$H_{ug} = 107.43\text{H}_2^f + 126.36\text{CO}^f + 357.09\text{CH}_4 + 233.62\text{H}_2\text{S}^f + \sum (\text{H}_c^{nC_n\text{H}_m}\text{C}_n\text{H}_m\%)$$

显然,有预热燃烧室时主燃烧室的 α 与 η 计算与燃烧液体燃料时同,可按式(28)与(37)式计算。

同样必须强调:在应用式(28)与(37)时,必须使预热燃烧室与主燃烧室采用同种燃料。

试验结果表明:本文提出的方法特别适用于测量燃烧区域内燃料的浓度场和燃烧完全系数的分布规律,但必须考虑尚未燃完的固定炭 C_s 和燃料蒸气 $\text{C}_{nf}\text{H}_{mf}$ 对计算 α 和 η 的严重影响。在一般情况下,倘若只要测定燃烧室的总体 α 和 η ,那么 C_s 和 $\text{C}_{nf}\text{H}_{mf}$ 的含量是很少的,计算公式就可以简化。但是在测定低负荷工况下重油燃烧室的总体 α 和 η 时,则仍有必要考虑 C_s 和 $\text{C}_{nf}\text{H}_{mf}$ 的影响。

参 考 文 献

- [1] 焦树建,“测定余气系数和燃烧完全系数的燃气分析算法”(全文),清华大学热能系科研工作报告,燃83-001, 1983, 1。
- [2] 范作民,“燃气分析计算”,航空科技,1981年第5期。

(责任编辑 王华芳)

A METHOD FOR DETERMINING EXCESS AIR RATIO AND COMBUSTION EFFICIENCY WITH GAS ANALYSIS

Jiao Shujian

(Tsinghua University)

Abstract

A series of generalized formulae for determining the excess air ratio and combustion efficiency on the basis of gas analysis of combustion products for any kind of liquid, solid or gaseous fuel is provided in this paper. Due to consideration of carbon formation and fuel vapors in the combustor and on the surface of the sampling probe, this method can provide more accurate results. Of course, a generalized computer program can be easily compiled for any kind of liquid, solid or gaseous fuel on the basis of the formulae presented.

A CHAIN REACTION MODEL FOR ALUMINUM AGGLOMERATION

Xia Younan

(Graduate School of Academia Sinica)

Li Shufen

(China University of Science and Technology)

Abstract

In order to describe the aluminum agglomeration process more clearly and quantitatively, a chain reaction model is proposed by analogy with the chain reaction in polymer chemistry. In this model, the agglomeration process can be divided into three steps: initiation step (breaking of oxide membrane on aluminum powder surface), propagation step (collision of aluminum powders and agglomeration) and termination step (ignition). The formulae of aluminum agglomeration rate, mean degree of agglomeration and distribution of agglomerating powder diameters are provided. They can predict the effects of burning rate, combustion chamber pressure, AP particle size, aluminum powder size and percentage on the agglomeration degree. The trends of all predictions by the provided formulae are consistent with the experimental researches.