

Caractéristiques de combustion d'un combustible

par J.P. SAWERYSYN

Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandres Artois

Laboratoire de Cinétique et Chimie de la Combustion

U.A. CNRS 876

59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

Malgré le développement de l'électro-nucléaire, la combustion des combustibles fossiles (charbon, fioul et gaz naturel) assurait 60 % environ des besoins énergétiques de la France en 1989*. Il s'agit donc d'une transformation chimique essentielle sur le plan énergétique. En théorie, le rendement de cette transformation sera maximum si elle est réalisée dans des proportions stoechiométriques correspondant à une combustion complète sans excès ni défaut d'air (comburant usuel). C'est ce type de combustion idéale - également appelé combustion neutre - qui sert de référence à la définition des caractéristiques de combustion de chaque combustible : **pouvoir comburivore, pouvoir fumigène et teneur en CO₂**. La connaissance de ces caractéristiques est non seulement indispensable pour la conception et le mode de fonctionnement de la chambre de combustion mais également pour son contrôle effectué à partir de l'analyse des fumées.

1. DÉFINITIONS

1.1. Pouvoir comburivore (ou volume d'air théorique)

C'est le volume d'air sec V_a nécessaire à la combustion neutre d'un kg de combustible solide ou liquide ou d'un m^3 (n) (à 0°C, 101325 Pa) de combustible gazeux. V_a est donc exprimé en m^3 (n) d'air par kg de combustible solide ou liquide ou m^3 (n) de combustible gazeux.

* D'après les données publiées par le Ministère de l'Industrie et de l'Aménagement du Territoire, Observatoire de l'Énergie. Septembre 1990.

1.2. Pouvoir fumigène (ou volume des fumées neutres)

C'est le volume de fumées, défini dans les conditions normales, libéré par la combustion neutre d'un kg de combustible solide ou liquide ou d'un m³ (n) de combustible gazeux. On l'exprime :

- sur **fumées humides** lorsque l'eau est présente dans les fumées à l'état vapeur,
- sur **fumées sèches** lorsque l'eau libérée est condensée ou piégée.

Le pouvoir fumigène est symbolisé respectivement par V_f ou $V_{f'}$, selon qu'il est rapporté aux fumées humides ou sèches.

2. EXPRESSIONS

Les combustibles solides ou liquides usuels sont à base de carbone et d'hydrogène, et éventuellement d'oxygène, de soufre et d'azote. Tout combustible comportant ces cinq éléments principaux peut alors être représenté par une formule fictive du type $C_x H_y O_z S_t N_u$, si l'on connaît sa composition élémentaire et sa masse molaire. Quant au comburant, il s'agit essentiellement de l'air atmosphérique ou exceptionnellement d'air suroxygéné. On admet pour l'air atmosphérique que $[N_2] / [O_2] = 3,76$.

Ainsi, l'équation stoechiométrique de combustion dans l'air d'un combustible solide ou liquide de formule fictive $C_x H_y O_z S_t N_u$ s'écrit :

$$C_x H_y O_z S_t N_u + (x + y/4 - z/2 + t) (O_2 + 3,76 N_2) = x CO_2 + y/2 H_2 O + t SO_2 + [u/2 + 3,76 (x + y/4 - z/2 + t)] N_2$$

2.1. Pouvoir comburivore

Par définition, le volume d'air théorique V_a en m³ (n) nécessaire pour brûler 1 kg de combustible s'écrit :

$$V_a = \frac{4,76 (x + y/4 - z/2 + t) \cdot 22,4}{12x + y + 16z + 32t + 14u} \quad (1)$$

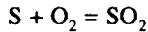
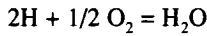
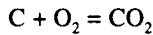
Dans le cas où la masse molaire moyenne M du combustible n'est pas connue, le calcul de V_a s'effectue à partir de la composition élémentaire exprimée en % pondéral sachant que :

$$\frac{x}{M} = \frac{C\%}{100} \cdot \frac{1}{12} ; \frac{y}{M} = \frac{H\%}{100} ; \frac{z}{M} = \frac{O\%}{100} \cdot \frac{1}{16} \text{ et } \frac{t}{M} = \frac{S\%}{100} \cdot \frac{1}{32} \quad (2)$$

il vient d'après (1) :

$$V_a = 4,76 \left(\frac{22,4}{12} \frac{C\%}{100} + \frac{22,4}{4} \frac{H\%}{100} - \frac{22,4}{32} \frac{O\%}{100} + \frac{22,4}{32} \cdot \frac{S\%}{100} \right) \quad (3)$$

En tenant compte des équations de combustion des éléments C, H et S :



la relation (3) peut également s'exprimer en fonction des volumes de CO_2 , H_2O , O_2 et SO_2 obtenus dans les conditions normales :

$$V_a = 4,76 \left(V_{CO_2} + V_{H_2O}/2 - V_{O_2} + V_{SO_2} \right) \quad (4)$$

2.2. Pouvoir fumigène sur fumées sèches

D'après l'équation stoechiométrique de combustion, on a :

$$V_{f'} = \frac{22,4 [x + t + u/2 + 3,76(x + y/4 - z/2 + t)]}{12x + y + 16z + 32t + 14u} \quad (5)$$

soit également,

$$V_{f'} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + 0,79 V_a \quad (6)$$

2.3. Pouvoir fumigène sur fumées humides

Par définition, on a :

$$V_f = V_{f'} + V_{H_2O} + V_{humidité} \quad (7)$$

avec
$$V_{humidité} = \frac{22,4}{18} \frac{E\%}{100} \quad (8)$$

en posant E% le taux global d'humidité contenu dans le combustible sous forme d'eau superficielle ou de rétention dans le cas des combustibles solides et liquides, ou sous forme de vapeur d'eau dans le cas des combustibles gazeux.

2.4. Teneur en CO₂

Le taux de dioxyde de carbone libéré dans les fumées est rapporté au volume de fumées sèches.

$$\text{On pose :} \quad \alpha'_{\text{o}} = V_{\text{CO}_2} / V_{\text{f}} \quad (9)$$

3. APPLICATIONS

Selon les données disponibles (composition élémentaire, formule fictive ou réelle), les caractéristiques de combustion neutre d'un combustible quelconque pourront aisément se déduire de l'équation stoechiométrique de combustion ou des relations 1 à 9.

3.1. Cas d'un combustible solide

Soit un charbon de composition élémentaire exprimé en % pondéral :

% C = 78 ; % H = 5 ; % O = 6,4 ; % N = 1,4 ; % E = 1,2 et % K = 8 (taux de cendre).

D'après les relations précédentes, on tire :

$$V_{\text{CO}_2} = 1,456 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,560 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ;$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,045 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_{\text{N}_2} = 0,011 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ;$$

$$V_{\text{humidité}} = 0,015 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg}.$$

d'où il vient :

$$V_{\text{a}} = 8,05 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_{\text{f}} = 7,83 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_{\text{f}} = 8,40 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} \text{ et}$$

$$\alpha'_{\text{o}} = 0,186$$

3.2. Cas d'un combustible liquide

Soit un fioul domestique (F.O.D) de composition élémentaire exprimée en % pondéral :

% C = 85,7 ; % H = 13,5 ; % S = 0,3 ; % O = 0,25 ; % N = 0,25

On obtient :

$$V_{\text{CO}_2} = 1,600 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_{\text{H}_2\text{O}} = 1,512 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{kg} ;$$

$$V_{\text{SO}_2} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} ; \text{ et } V_{\text{O}_2} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 (\text{n})/\text{kg} ;$$

$$V_{\text{N}_2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 (\text{n})/\text{kg}$$

d'où :

$$V_a = 11,21 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} ; V_f = 10,46 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{kg} ; V_f = 11,98 \text{ m}^3(\text{n})/\text{kg} \text{ et } \alpha'o = 0,153$$

3.3. Cas d'un combustible gazeux

C'est l'exemple le plus simple à traiter car dans le cas d'un mélange gazeux d'hydrocarbures, V_{CO_2} et $V_{\text{H}_2\text{O}}$ se calculent immédiatement à partir du nombre d'atomes de carbone et d'hydrogène contenus dans chaque constituant. Examinons le cas du gaz naturel de GRONINGUE dont la composition élémentaire exprimée en % volumique est :

Composition élémentaire	V_{CO_2}	$V_{\text{H}_2\text{O}}$
% $\text{CH}_4 = 81,3$	$1 \times 0,813$	$2 \times 0,813$
% $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,9$	$2 \times 0,029$	$3 \times 0,029$
% $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,4$	$3 \times 0,004$	$4 \times 0,004$
% $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,2$	$4 \times 0,002$	$5 \times 0,002$
% $\text{N}_2 = 14,2$	—	—
% $\text{CO}_2 = 1,0$	$1 \times 0,010$	—
Total :	$0,900 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{m}^3 (\text{n})$	$1,739 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{m}^3 (\text{n})$

d'où l'on tire :

$$V_a = 8,38 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{m}^3 (\text{n}) \text{ de combustible gazeux} ;$$

$$V_f = 7,67 \text{ m}^3(\text{n})/\text{m}^3(\text{n}) ; V_f = 9,41 \text{ m}^3 (\text{n})/\text{m}^3 (\text{n}) \text{ et } \alpha'o = 0,117.$$

4. CONCLUSION

La détermination des caractéristiques de combustion de quelques combustibles usuels suggèrent les remarques générales suivantes :

- le volume d'air théorique V_a nécessaire pour brûler complètement 1 kg de combustible solide ou liquide ou 1 m³ (n) de combustible gazeux est considérable. Son évaluation permet de mieux comprendre les problèmes de sécurité posés par tout foyer de combustion en atmosphère confinée qui, en raison d'une alimentation insuffisante en air, peut conduire à une combustion «réductrice» émettant du monoxyde de carbone.
- les volumes de fumées sèches et humides sont en général assez voisins car le constituant principal des fumées est le diazote de l'air introduit initialement.
- la teneur en CO₂ prévue théoriquement en combustion neutre permet de définir, après analyse du CO₂ ou de O₂ dans les fumées réellement dégagées, le type de combustion mis en œuvre et par conséquent, d'agir éventuellement sur son réglage.
- Enfin, l'examen de ces notions simples d'ordre pratique peut constituer un bon apprentissage à l'établissement d'équations-bilan pour l'élève. Dans le cadre d'un atelier informatique, elles peuvent également faire l'objet d'un logiciel permettant de prédire les caractéristiques de combustion d'un combustible quelconque à partir de sa composition.

Pour en savoir plus :

- «Micro-informatique appliquée aux économies d'énergie en combustion». A. DUMÉZ, M. DUMÉZ, Ed. Technique et Documentation (Lavoisier), 1983.