Evaluation des flux de chaleur mis en jeu lors de la combustion de plaques thermiquement épaisses de PMMA



Soutien : ANR-12-ASRT-0002-01.

CFM 2013 - GDR feux, 26-27 Août 2013, Bordeaux

Puissance du feu, débit massique surfacique de pyrolyse de la source



Etude d'un modèle de dégradation basé sur un bilan énergétique complet

Quantification de l'ensemble des flux de chaleur mis en jeu lors de la combustion stationnaire d'une plaque verticale de PMMA

 → améliorer notre connaissance des mécanismes impliqués dans le processus de dégradation thermique des matériaux solides
 → acquérir des données utiles à la validation des modèles de pyrolyse

Matériau et configuration de référence :

- Clear PMMA
- → sublimation, no-charring, propriétés thermophysiques connues
- Plaque plane thermiquement épaisse positionnée verticalement

→ existence d'une solution analytique, largement étudiée dans la littérature (grande dispersion des résultats)

Bilan énergétique au niveau de l'interface combustible/gaz



Combustion stationnaire, solide infiniment épais (Orloff et al., 1976):



Bilan simplifié

 $q_{fl}^{conv} + (1-r)q_{fl}^{rad} = q_{rr} + \dot{m}''L_q$

 $L_g = \int_T^{T_p} c_p(T) \, dT + L_{mel} + L_{pyr}$

Configuration retenue, dispositif expérimental et instrumentation

- ✓ Plaque plane PMMA (10 cm de large, 3 cm d'épaisseur, 20 cm de hauteur)
- ✓ Masque acier definissant la zone de pyrolyse, socle aluminium rotatif
- ✓ Allumage en partie basse (barreau chauffant)
- ✓ Balance de précision, caméras CCD*, thermocouples, fluxmètres total et radiatif (Captec)



Débit massique surfacique de pyrolyse le long de la plaque combustible (rappel)





Ré-émission de la surface : procédure d'auto-extinction



CFM 2013 - GDR feux, 26-27 Août 2013, Bordeaux

+ le flux réémis par la surface

Mesures complementaires : FTIR et caméra multispectrale (LEMTA, Nancy)



Débit massique surfacique de pyrolyse (bilan simplifié vs. Exp.)

$L_g = 2500 kJ/kg$	Erreur relative (%)	<i>ṁ</i> mesuré [9]	<i>ṁ</i> déduit de Eq.	<i>x (cm)</i>
		m²/s	(3) g/	
→ Bon accord Sans s'intéresser aux pertes internes	-7.06	5.10	4.74	20
	-8.00	5.50	5.06	10
	-8.70	6.90	6.30	5
	+6.57	7.00	7.46	2.5

Influence de la chaleur de gazéification sur le débit local de pyrolyse stationnaire



Pertes internes dans le matériau solide : modèle numérique

La procedure consiste à résoudre l'équation 1D de transfert couplés conduction / rayonnement (hypthèse de propriétés thermophysiques du PMMA constantes), l'équation de la chaleur prend la forme :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \vec{\nabla}. \vec{q}$$

L'approximation de Schuster-Schwarzschild pour un milieu 1D, non gris, absorbant / diffusant

 $q_{n}^{+}(0)$

 $q_{\eta}^{-}(\mathsf{L})_{\bigstar}$

$$\vec{\nabla}.\,\vec{q} = \int_0^\infty \vec{\nabla}.\,\vec{q}_\eta\,d\eta = \int_0^\infty \left(\frac{dq_\eta^+}{dy} - \frac{dq_\eta^-}{dy}\right)d\eta$$



Arrhenius pour le calcul du débit de pyrolyse

Propriétés radiatives 14 bandes de kulkarni, brehob, monohar, Nair, 1994→Boulet et al. 7668 bandes

Validation : 2 températures dans le matériau, position de l'interface et perte de masse

 $+\frac{dq_{\eta}^{+}}{dy} = 2\kappa_{\eta} (E_{b\eta} - q_{\eta}^{+})$ $-\frac{dq_{\eta}^{-}}{dy} = 2\kappa_{\eta} (E_{b\eta} - q_{\eta}^{-})$

Pertes internes dans le matériau solide : modèle numérique

Conditions aux limites au niveau de la surface exposée "noire" (y = s(t)):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(s,t) = q_{fl}^{rad} + q_{fl}^{conv} - E_b^{air}(T_s) - E_b(T_s) + q^-(s) - \dot{m}(L_{pyr})$$

Bilan complet précédent

$$q_{\eta}^{+}(s) = E_{b\eta}(T_{s}) = \sigma T_{s}^{4}$$

$$T_{s} = T(s,t)$$

$$q^{-}(s) = \int_{0}^{\infty} q_{\eta}^{-}(s) d\eta$$

$$E_{b}(T_{s}) = \int_{0}^{\infty} E_{b\eta}(T_{s}) d\eta$$

$$F_{b}^{air}(T_{s}) = \int_{0}^{\infty} E_{b\eta}^{air}(T_{s}) d\eta$$

$$y = \int_{0}^{\infty} q_{\eta}^{-}(L) \uparrow$$

Conditions aux limites au niveau de la face arrière "claire" (y = L):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y}(L,t) = q_0^{conv}$$
$$q_\eta^-(L) = \varepsilon_\eta E_{b\eta}(T_0)$$

Pertes internes dans le matériau solide : développement d'expérimentation et validation du modèle

Configuration de référence (10 x 10 x 3 cm³) : non flaming ($q_{cc} < q_{cri}$), plaque plane verticale soumise à un flux radiatif calibré

2 flux imposés (14 et 18 kW/m²), avec et sans suies à la surface l'échantillon (représentatif de la propagation)

- Perte de masse et position de l'interface combustible / gaz
- Températures à deux profondeurs dans le matériau (2 TC, 5 mm avant et 5 mm arrière)



 $d(t) = \delta - \delta_{reg}(t)$



Pertes internes dans le matériau solide : développement d'expérimentation et validation du modèle



Bon accord pour un flux imposé radiatif de 14 kW/m²



Bon accord pour un flux imposé radiatif de 18 kW/m²

Pertes internes dans le matériau solide : développement d'expérimentation et validation du modèle

Configuration de référence (10 x 10 x 3 cm³) avec flamme :

Difficulté à s'affranchir de la phase propagative \rightarrow developpement d'une flamme stationnaire \rightarrow qui se propage sur un échantillon instrumenté.



- Position de l'interface combustible / gaz
- Températures à deux profondeurs dans le matériau (5mm de l'avant, et 5 mm ٠ l'arrière)

Pertes internes dans le matériau solide : développement d'expérimentation et validation du modèle



• Bon accord pour un flux imposé représentatif de la flamme (x_p =10 cm)

Flux radiatif de 14 kW/m², $h_{conv} = 10$ et $T_{flamme} = 1100$ °K.

Conclusion

Bon accord concernant les debits massiques surfaciques calculés (bilan simplifié) et obtenus par mesure directe

→ Conformément à Orloff et al. 1976, les pertes internes n'ont pas à être considérées dans une phase de combustion stationnaire

- Extention du modèle à la phase de instationnaire de combustion et à la phase de préchauffage
 - → Etude détaillée des pertes internes (modèle 2 flux, spectral)
 - → Propriétés spectrales du PMMA, 7668 bandes (LEMTA, Nancy)
 - \rightarrow Validation du modèle de dégradation sans flamme pour 14 et 18 kW/m²
 - \rightarrow Validation du modèle de dégradation avec flamme à $x_p = 10$ cm

Estimation analytiques des pertes internes

$$\begin{split} C_p &= 2000 J/kg & \dot{m}'' \times (L_{mel} + \int_{T_0}^{T_p} C_p(T) dT) = q_{id}^{cond} + q_{id}^{rad} \\ L_{mel} + \int_{T_0}^{T_p} C_p(T) dT &= 950 \ kJ/kg & m^{''} \ _{moyen} = 0,0055 \ \text{kg/m}^2/\text{s} \\ \dot{m}'' h_{ng} &= 5150 \ W/m^2 \\ q_{id}^{cond} + q_{id}^{rad} \approx 5kW/m^2 \end{split}$$



Figure D4: Spectral absorption coefficient and the 14 band model. The superimposed blackbody curve shows the distribution of energy in this wavenumber regime