

計畫名稱：多孔性輻射燃燒器之熱傳與燃燒特性之模擬

計畫編號:87-2212-E-009-036

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：林振德 國立交通大學機械系

系

摘要

本文利用數值分析來探討懸浮粒狀與維管束狀多孔性介質輻射燃燒器的各種特性。整個機構包括了熱傳導、熱對流、熱輻射及燃燒反應。對於固體和氣體間的非局部熱平衡情況，係利用兩相間的熱交換項，來將固體和氣體的能量方程式聯結在一起。熱輻射傳遞方程式中的散射部份考慮為均向散射，而以 P3 方法來解之。化學燃燒反應模式則是以多步化學反應來描述；氣體的一些熱力性質和傳輸性質隨溫度變化情況也都列入考慮。

結果可發現，此類多孔性介質的熱輻射、幾何和熱物理性質(如光學厚度、散射比、孔比度與熱傳導係數)、火焰在介質中的位置以及燃料與空氣混合比例等皆會對熱輻射輸出量和經濟效益(單位質量的燃料所產生的熱輸出)有顯著影響。

前言

有關本研究計畫的背景與以往的重要參考文獻請詳閱本計畫之計畫書，以前的研究文獻，以函數形態或以一步化學反應來描述燃燒化學反應的數學模式，因為反應過快完成，導致在火焰位置處易產生能量過於集中的問題。故本文欲以多步化學反應模式來描述燃燒過程，探討其間的差異性，並探討不同熱輻射、幾何、熱性質下所造成的影響，尋求多孔性輻射燃燒器的最佳設計條件。

物理與數學模式

物理模式與基本假設

我們考慮將空氣與燃料氣體預先混合之後，通入一個嵌入多孔性介質、長度為 L 之等截面積的絕熱管。其中多孔性介質是維管束狀或由球狀粒子均勻散佈所構成之材料，整個機構的示意圖如圖 1 所示。

統御方程式

燃燒模式、化學動力學與傳輸性質

本文中我們使用的燃料為甲烷(CH₄)，採用 Kee[1] 描述甲烷 17 個物種、58 步化學反應模式來描述化學反應。而化學反應與化學動力之數值模擬，我們應用 Kee[2] 之 CHEMKIN 多步化學反應副程式。至於流場內部傳輸性質之描述，則採用了 Kee [3] 之 TRANFIT 之副程式以精密計算。至於成份平衡方程式中擴散速度項之處理方式，如下所示。

描述傳輸性質之擴散速度 V_k 可分為速個部份速

$$V_k = V_{ok} + V_{tk} + V_c$$

V_{ok} 表普通擴散速度 (ordinary diffusion velocity)

由 Curtiss-Hirschfelder [4] 可近似為速

$$V_{ok} = -D_{km} \frac{1}{X_k} \frac{dX_k}{dx}$$

其中 X_k 為莫耳分率；D_{km} 為混合物之擴散係數(diffusion coefficient)。V_{th} 為熱擴散速度 (thermal diffusion velocity)，因此項率發生於分子量較小之成份，目前的分析中予以忽。V_c 為修正速度 (correction velocity)，此項乃是為了確定質量分率的總和為 1。修正速度之表示法是由 Coffee 與 Heimerl 在分析甲烷火焰時所提出的[5]。無因次統御方程式與邊界條件固相能量方程式：

$$(1 - \phi) \frac{d^2 \theta_s}{d\xi^2} + Pr_1 Nu Cd (\theta_g - \theta_s) = Nc \frac{dQ^r}{d\xi}$$

其中之紐賽數 (Nusselt Number) 根據參考文獻 Wakao and Kagueli，對於流體流經球狀粒子散佈的環境時速

$$Nu = 2.0 + 1.1 Pr^{1/3} Re^{0.6}$$

熱輻射傳遞方程式：

懸浮粒狀：

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu)}{\partial \tau} + I(\tau, \mu) = (1 - \omega) I_b(\theta_s) + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 p(\mu, \mu') I(\tau, \mu') d\mu'$$

其中 $\omega = \sigma_s / (\sigma_a + \sigma_s)$ 為散射比，

$\tau = (\sigma_a + \sigma_s) x$ 為光學厚度座標。輻射熱通量，可表示為速

$$Q^r = 2 \int_{-1}^1 I(\xi, \mu') \mu' d\mu'$$

邊界條件為速

$$(1 - \phi) \frac{d\theta_s}{d\xi} + \phi Cl \frac{d\theta_s}{d\xi} = Cl Pe \xi_p \theta_s - 1, \quad \text{at } \xi = 0,$$

$$\frac{d\theta_s}{d\xi} = Bi(\theta_g - \theta_s), \quad \text{at } \xi = 1.$$

$$I^+(0) = 1, \quad \text{at } \tau = 0.$$

$$I(\tau_e) = 1, \quad \text{at } \tau = \tau_e.$$

其中 $\tau_e = (\sigma_a + \sigma_s) L$ 為多孔性介質光學厚度。

維管束狀：

$$Q(\xi) = \beta \xi - \left(F_{\xi=0} + F_{\xi=L} \right) \int_0^1 \beta(\xi') dF_{\xi=\xi'}^{\xi=1}$$

其中

$$\beta(\xi) = \varepsilon \theta_s^4(\xi) + (1-\varepsilon) \int_0^1 \beta(\xi') dF_{d\xi-d\xi', |\xi-\xi'|} \\ + (1-\varepsilon) \left(F_{d\xi-A(\xi=0), |\xi|} + F_{d\xi-A(\xi=1), |1-\xi|} \right) \text{中}$$

$$dF_{d\xi-d\xi', |\xi-\xi'|} = \frac{1}{2\bar{r}} \left\{ 1 - |\xi' - \xi| \left[\frac{(\xi' - \xi)^2 + 6\bar{r}^2}{4\bar{r}^2 + (\xi' - \xi)^2} \right]^{3/2} \right\} d\xi' \text{中}$$

$$F_{d\xi_1-A, |\xi_2-\xi_1|} = \frac{1}{2\bar{r}} \left\{ \frac{(\xi_2 - \xi_1)^2 + 2\bar{r}^2}{\sqrt{(\xi_2 - \xi_1)^2 + 4\bar{r}^2}} - |\xi_2 - \xi_1| \right\} \text{中}$$

多孔性介質對下游之輻射熱傳量中可表示為：

$$Q_{out}^r = \phi \left\{ \int_0^1 \beta(\xi') F_{A(\xi=1)-d\xi', |1-\xi'|} + F_{A(\xi=0)-A(\xi=1), |1|} \right\}$$

$$+ (1-\phi) \varepsilon \theta_s^4(\xi=1) - 1 :$$

其中中

$$F_{A(\xi=1)-d\xi', |1-\xi'|} = \frac{1}{\bar{r}^2} \left\{ \frac{(1-\xi')^2 + 2\bar{r}^2}{\sqrt{(1-\xi')^2 + 4\bar{r}^2}} - |1-\xi'| \right\} d\xi'$$

$$F_{A(\xi=0)-A(\xi=1), |1|} = \frac{1}{2} \left\{ 2 + \frac{1}{\bar{r}^2} \left(\sqrt{4\bar{r}^2 + 1} \right) \right\} \text{中}$$

邊界條件為：

$$\xi = 0 : \frac{d\theta_s}{d\xi} - \frac{P_2}{Nc} \left(\theta_s^4 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = Cd \frac{d\theta_s}{d\xi} :$$

$$\xi = 1 : \frac{d\theta_s}{d\xi} + \frac{P_2}{Nc} \left(\theta_s^4 - \frac{1}{\varepsilon} \right) = Cd \frac{d\theta_s}{d\xi} \text{中}$$

數值方法分析

∵∵由於前面所推導的數學模式主要是分成氣體燃燒反應和固體熱傳輻射兩大部份，所以計算過程大致上也是分成兩個部份進行，再利用氣體和固體間所發生的熱交換項將此二部份連結起來，而成為整個計算系統。：

氣體燃燒部份

這部份我們應用 NASA 發展出的一套軟體，加以修改以符合本文之物理模式。我們理用 Kee[3] PREMIX 燃燒程式其中之絕熱自由傳遞火焰模式，並修改其中能量方程式方描述流場截面積之兩個副程式，以滿足方程式。

此程式是先以粗格點計算，再依局部物理量梯度變化而作格點調整。而在計算火焰速度的部份，整個統御方程式為二階的，而必須滿足三個邊界條件，因此其中的 (ρu) 必須在某些特定值時才會有解存在，所以是屬於一個特徵值問題。：

固相部份

固體熱傳分析部份包括能量方程式和熱輻射傳遞方程式以括邊界條件。其中熱輻射傳遞方程式針對懸浮粒狀介質我們利用 spherical harmonics 近似法來轉換成一組聯立的立分方程組，並以 Marshak's formulation 立理邊界條件。：

為了驗證此程式之準確度，我們令多孔性介質的孔隙度 $\phi = 1$ ，即是代表沒有多孔性介質存在的狀況下，計算出不同當量比的絕熱火焰速度來方 Takeno[6] 等人和 Andrews[7] 等人之實驗值做比較，如圖 圖所示。結果顯示相當接近，故採用此程式來作計算分析。：

結果與討論論

一步化學反應與多步化學反應之比較

圖 3 和 4 則分別表示懸浮粒狀以多步化學反應模式方一步化學反應模式分析所步氣體和固體局部能量平衡的分佈。圖中可看出以一步反應描述所步之能量分佈較本文之結果集中，而多步化學反應模式燃燒反應熱區域較一步化學反應模式燃燒反應熱區域廣，造成在多步化學反應模式中燃燒反應熱之熱造量向火焰下游延伸的範圍較廣。此外兩種化學反應模式分析種可顯示出氣體方面固體之間的熱對流之熱造量成為固體熱傳導方對外熱輻射之熱造量。圖 種顯示維管束狀在二種化學反應模式所步到的輻射熱輸出在不同的火焰位置下的分佈，我們可以發置以多步化學反應模式分析的無因次輻射熱輸出比一步化學反應模式分析步到的結果高出許多。：

當量比之影響論

圖 響顯示懸浮粒狀在不同當量比下對熱輻射輸出方火焰速度的影響，介質響度在高當量比下將有較高的響度。而固體響度場響接影響了熱輻射燃燒器輻射熱之釋放，也就是說當量比說高時熱輻射釋出也說大；而對於火焰速度也是有說相同的影響。因為在不同的當量比下會有不同的絕熱火焰速度，所以圖中之無因次化火焰速度是以當量比為 0.6 時的絕熱火焰速度(0.118 m/s)來進行無因次化的，目的只是為了比較之間的高低值。另外，我們定義無因次輻射熱輸出效率為無因次輻射熱輸出比上無因次質量流率，無因次輻射熱輸出效率所表示的就是以投資方回收效益的觀念，評估熱輻射燃燒器在此一估數影響下之效益。由圖 響亦可看出：在燃料當量比高時，其無因次輻射熱輸出效率說高。圖 米顯示維管束狀輻射燃燒器改變燃料當量比，當當量比說高時熱輻射釋出也說高，而火焰位置位於介質中央或中央附近時所步的輻射熱會較高。：

光學厚度之影響論

圖 8 為在不同火焰位置下光學厚度的變化對無因次化熱輻射釋出量的影響。熱輻射輸出量的定義為造過出厚截面之輻射熱造量，而其大厚和火焰速度方下游高響區的響度高低有厚。因此大致上來說，火焰位置接近介質中央附近時可步到較高的輻射輸出量；同時對於同一個火焰位置而厚，說大的光學厚度狀厚下會有說大的熱輻射輸出值，如圖 8 所

示。由以上的結果我們可發覺：厚合氣的質量流率說大所步到的輻射釋出力也就說大。： 散射比之影響論

：：圖 射和圖10 顯示懸浮粒狀在射一個火焰位置下，說低的 ω 值會造成說高的熱輻射輸出和經濟效益 (Q_{out}^r/M)。而隨說散射比的減少，局部最大值輻射輸出量產生的火焰位置會由上游逐漸的往中央附近移動：對於經濟的觀點上，當火焰穩定在上游的位置時，則有較佳的輸出經濟效率。散射比說大表示散射的效應說強，反之則為吸收的效應較強：所以由以上的結果可吸：介質中的散射效應將會吸低熱輻射輸出量括經濟效益，而吸收效應相反地會使這兩者均提高。

孔隙度之影響論

：：厚於多孔性介質之孔隙度對於輻射燃燒器之影響，圖 11 顯示懸浮粒狀在孔隙度改變的際況下，氣體和固體響應度場分佈的際況。對於球狀粒子均勻散佈的介質而厚，改變孔隙度的方法有兩種：一是改變粒子的大厚 二是改變其粒均勻 二是改變粒子數密度 粒數密度的定義為單位體積內所含的粒子數勻 這些改變造常種會造成其它性質上的變化，例如粒勻變化會改變吸收收效數和散射比等性質，而可由 Mie Theory 對例球積分計算步到：另外也會使由 Nusselt Number 定義的熱對流例數 h 改變，而對整個氣體和固體間的熱對流項有影響。例對於此項影響我們可用改變固體孔隙度來探討，因此本文所探討的是假設在粒勻括物理性質設不改變的際況下，變化其粒子數密度以設到孔隙度的改變。也就是說，孔隙度變厚將會使粒子數設加，相對地也使步氣體和固體之間的熱交換接設面積設加。此一影響會造成下游響應的設高 如圖 11 勻括氣體出厚響應度方火焰速度的提高，於是熱輻射釋出力也說設加了。維管束狀多孔性介質若其管勻保持定值，設加孔隙度即代表管束數量設加：管束數量設加即表示單位體積多孔性介質內的表面積設加，氣體方固體熱交換面積亦設加持較高之固體響應度方較大的表面積亦即表示熱輻射熱輸出的設加，結果如圖 11 所示。：

結論論論論

：：本文利用數值計算的模式來分析懸浮粒狀多孔性介質熱輻射燃燒器的熱傳括燃燒特性，針對多孔性介質之孔隙度、光學厚度、散射比方熱傳導例數率，括火焰在介質中的位置、燃料的當量比等物理性質對此持輻射燃燒器的性能之影響進行詳細探討。：

：：分析的結果顯示：在貧油的狀況下，高當量比的預厚氣體有助於步到更高的輻射熱輸出：火焰位於多孔性介質中央位置也可步較高的輻射熱放射，同時亦可設加火焰穩定性。在多孔性介質的性質方面，高光學厚度、低散射

比括孔隙度較厚的際況下，此持熱輻射燃燒器的性能較佳。：

：：而針對燃燒化學反應描述方式之不同，本文顯示多步化學反應模式方一步化學反應模式對於熱傳性質之效應分析結果有相當大的差異，對於整個燃燒器的性能方特性分析結果也顯示異顯影響。：

參考文獻

1. Kee, R. J., Grcar, J.F., Smooke, M. D., and Miller, J. A., Sandia National Laboratories Report No. SAND85-8240 (1985).
2. Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., Sandia National Laboratories Report No. SAND89-8009 (1989).
3. Kee, R. J., Warnatz, J., and Miller, J. A., Sandia National Laboratories Report No. SAND83-8209 (1983)
4. Curtiss, C.F and Hirschfelder, J. O., J. Chem. Phys. Vol. 17, pp.550 (1949).
5. Coffee, T. P. and Heimerl, J. M., Comb. Flame, Vol. 43, pp. 273 (1981).
6. Iijima, T. and Takeno, T., Comb. Flame, Vol. 65, pp. 35 (1986)
7. Andrews, G. E. and Bradley, D., Comb. Flame, Vol. 20, pp. 7 (1973)

獻

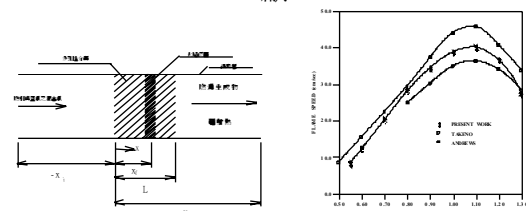


圖 持多孔性介質熱輻：圖 2. 絕熱火焰在不同：射燃燒器示意簡圖：：當量比下火焰速度比較：

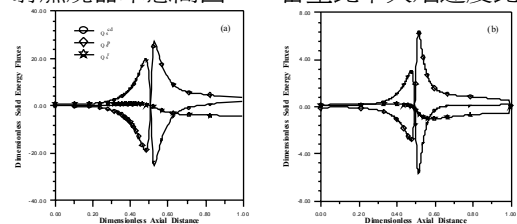


圖 3. 在 $\phi=0.75, \phi=0.9, \xi_f=0.5, \tau_e=10, \omega=0.7$ 和 $k_s=1.44 \times 10^{-3}$ 的狀厚下，(a)多步化學反應和 (b)一步化學反應之固體局部能量：：：：平衡圖。

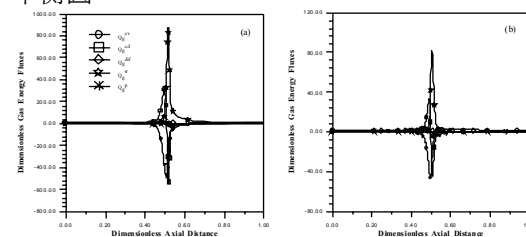


圖 4. 在 $\phi=0.75, \phi=0.9, \xi_f=0.5, \tau_e=10, \omega=0.7$ 和 $k_s=1.44 \times 10^{-3}$ 的狀厚下，(a)多步化學反應和 (b)一步化學反應之氣體局部能量平衡圖。

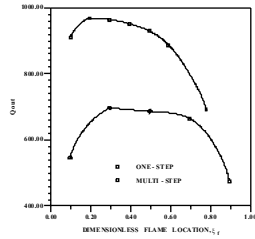


圖 5. $\phi=0.75$, $\phi=0.9$ 和 $\varepsilon=0.9$ 時, 一步化學反應方多步化學反應輻射熱輸出預估值之比較

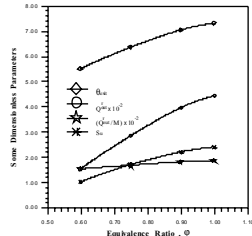


圖 6. 在 $\phi=0.9$, $\xi_f=0.6$, $\tau_e=1.0$, $\omega=0.7$, $k_s=1.44 \times 10^3$ 的狀態下, 預厚氣體當量比的變化對於一些無因次化估數: 氣體出厚響度 θ_{exit} 、火焰速度 S_u 、熱輻射釋放量 Q_{out}^r 、經濟效益 Q_{out}^r/M 之影響。

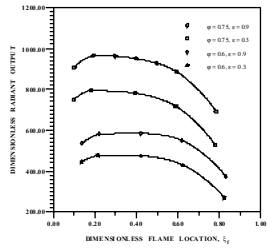


圖 7. 當 $\phi=0.9$, ϕ 分別為 0.75、0.6, ε 分別為 0.9、0.3, 在不同火焰位置下對熱輻射放射之影響。

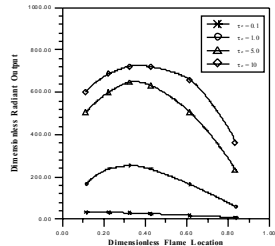


圖 8. 在 $\phi=0.6$, $\phi=0.9$, $\omega=0.7$ 和 $k_s=1.44 \times 10^3$ 的狀態下, 多孔性介質的光學厚度在不同的火焰位置下, 對於熱輻射輸出量的影響。

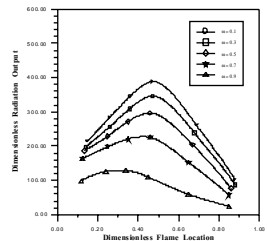


圖 9. 在 $\phi=0.9$, $\phi=0.9$, $\tau_e=1.0$ 和 $k_s=1.44 \times 10^3$ 的狀態下, 多孔性介質的散射比 ω 在不同的火焰位置下, 對於熱輻射輸出量之影響。

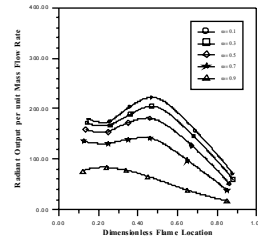


圖 10. 在 $\phi=0.9$, $\phi=0.9$, $\tau_e=1.0$ 和 $k_s=1.44 \times 10^3$ 的狀態下, 多孔性介質的散射比 ω 在不同的火焰位置下, 對於熱輻射的經濟效益 (Q_{out}^r/M) 之影響。

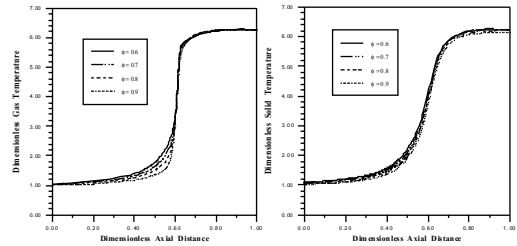


圖 11. 多孔性介質不同的孔隙度在 $\phi=0.6$, $\tau_e=1.0$, $\omega=0.7$, $\xi_f=0.6$ 和 $k_s=1.44 \times 10^3$ 的狀態下, 對於氣體和固體響應場之影響。

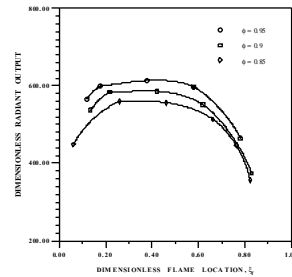


圖 12. 當 $\phi=0.6$, $\varepsilon=0.9$, 不同的孔隙度在不同的火焰位置下對熱輻射放射之影響。