

## 知識物件上傳表

計畫名稱：節能綠色吸附材料關鍵元件及設備技術開發計畫(2/3)

上傳主題：用於烹飪的新型表面火焰自吸式多孔輻射燃燒器的性能評估

提報機構：行政院原子能委員會核能研究所

資料時間：2023/03

與計畫相關	<input checked="" type="checkbox"/> 是
國別	<input checked="" type="checkbox"/> 國內
能源業務	<input type="checkbox"/> 總體能源 <input type="checkbox"/> 化石能源 <input type="checkbox"/> 電力 <input type="checkbox"/> 核能 <input type="checkbox"/> 新及再生能源 <input checked="" type="checkbox"/> 節約能源
能源領域	<input type="checkbox"/> 政策與法規 <input type="checkbox"/> 環境衝擊與調適 <input type="checkbox"/> 經濟及產業 <input checked="" type="checkbox"/> 科技 <input type="checkbox"/> 統計資訊
決策知識類別	<input type="checkbox"/> 建言 <input checked="" type="checkbox"/> 評析 <input type="checkbox"/> 標竿及統計數據 <input type="checkbox"/> 其他
重點描述	多孔輻射燃燒器(Porous Radiant Burners, PRB)基於多孔介質燃燒(Porous Media Combustion, PMC)的原理，其中火焰的燃燒和穩定都發生在燃燒區(combustion zone, CZ)的末端。與傳統的自由火焰燃燒器相比，它具有許多優點。多孔基體具有高導熱性和高發射率。因此，對 PMC 中的傳導、對流和輻射的貢獻是顯著的。本文介紹新開發之自吸式多孔輻射燃燒器的熱性能和廢氣排放性能的實驗結果。自吸式多孔輻射燃燒器在燃燒區(CZ)為多孔陶瓷材料和預熱區(preheating zone, PZ)為鋼球組成，該燃燒器在 0.5-2 kW 的功率條下與傳統烹飪燃燒器(Conventional Cooking Burner, CB)之性能比

	<p>較。還進行橫截面為圓形和方形之幾何形狀不同燃燒器之熱性能和排放的影響比較，且將它們的熱性能與傳統烹飪燃燒器(CB)進行比較，實驗結果顯示，圓形和方形多孔輻射燃燒器(PRB) 的熱效率遠高於傳統烹飪燃燒器(CB)。</p>
詳	<p><b>1. 簡介</b></p> <p>家中廚房用於烹飪的加熱系統，係為自由火焰燃燒加熱，由於較低的傳熱係數、不完全燃燒和薄短的反應區，導致較低的熱效率和較高的 CO 和 NO<sub>x</sub> 排放。多孔輻射燃燒器(PRB)具有高熱效率且這些燃燒器由於傳熱係數大、峰值火焰溫度高及能改善燃燒而使有害氣體排放減少。基於多孔介質燃燒(PMC)技術的多孔輻射燃燒器(PRB)，依據火焰穩定性和燃燒的位置分為兩類，在基體穩定的多孔輻射燃燒器(PRB)，火焰的穩定和燃燒完全發生在多孔基體燃燒區(CZ)；表面穩定的多孔輻射燃燒器(PRB)，燃燒和火焰的穩定都發生在燃燒區(CZ)的下游。雖然基質穩定的多孔輻射燃燒器(PRB)比表面穩定的多孔輻射燃燒器(PRB)有很多優勢，但適用於高功率強度的應用，而後者僅限於 400 kW/m<sup>2</sup> 的功率強度應用，因此，表面穩定的多孔輻射燃燒器(PRB)適合家庭使用。</p> <p>文獻顯示，有些專家學者進行應用多孔介質燃燒(PMC)技術，開發家用傳統烹飪燃燒器(CB)，控制空氣流到氣體混合室進行稀燃料燃燒，在功率強度為 0.5-3.0 kW 時，所得到之熱效率為 75%，以及 CO 和 NO<sub>x</sub> 排放量非常低。Namkhat 和 Jugjai 研究了自吸氣式傳統燃燒器的主要空氣夾帶特性，他們觀察到燃燒溫度、火焰的外觀（氧化或擴散）及其穩定性，係受到燃料流量輸入和通氣的影響，他們還證明，如果空氣與燃料混合前，對空氣進行預熱，則會提高反應速率並減少一次充氣。Yoksenakul 和 Jugjai 設計和開發一種自吸式多孔介質燃燒器(A Self-Aspirated Porous Medium Burner)，在相同的燃料流率下，其燃燒效率比傳統燃燒器(CB)高 4.58%，他們觀察到兩個燃燒器的熱效率隨著燃料流率的增加，以及燃燒器頂部和裝載容器底部之間的距離的增加而降低，對於這種燃燒器，NO<sub>x</sub> 排放量約為 59 ppm，但由於缺乏二次空氣混入和不完全燃燒，CO 排放量略高於傳統燃燒器。</p> <p>本文介紹一種用於家庭烹飪型之自吸式多孔輻射燃燒器(Self-Aspirating Porous Radiant Burners, SAPRB)的實驗分析，該燃燒器在功率 0.5-2 kW 條件下與自由火焰之傳統烹飪燃燒器(CB)進行熱性能比較，這種自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRBs)之內部燃燒區(CZ)中有置放多孔耐火磚材料，另在預熱區(PZ)中置放鋼球層。另本研究使用一個是圓形截面，另一個為方形截面之不同幾何形狀之自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)，研究幾何形狀對熱性能的影響。本燃燒器新穎之處在於燃燒區(CZ)中使用耐火磚陶瓷材料和在預熱區(PZ)中使用更好的導熱材料來提高性能之概念。</p>

## 2. 實驗設置和程序

### 2.1 實驗裝置

用於測試傳統烹飪燃燒器(CB)和多孔輻射燃燒器(PRB)性能的實驗裝置示意圖，如圖 1 所示。解析度 2 g 之數字電子秤，用於測量液化石油氣的質量流量速度。14.2 公斤之液化石油氣(Liquefied Petroleum Gas, LPG)瓶、另附有內徑為 12.7 mm 柔性軟管。丙烯酸材質之 LPG 轉子流量計，測量體積流量，該轉子流量計放置在燃料噴嘴之前，以測量來自氣缸的燃料的體積流量。波登管壓力錶量測 LPG 瓶中氣體壓力。

有四個 K 型熱電偶測量燃燒器上方的氣氛和火焰溫度，除了這四個熱電偶之外，還連接了另外兩個熱電偶，一個在燃燒區(CZ)和預熱區(PZ)之間的界面間隙中，另一個放置靠近預熱區(PZ)的位置，分別量測燃燒區(CZ)和預熱區(PZ)之溫度，溫度數據由 ZAILA 應用軟件之數據收集系統紀錄。紅外線熱像儀用於測量來自表面的輻射溫度分佈，並識別火焰中的較高溫度位置。熱電偶採樣數據存於計算機中，並使用 Smart View 應用軟件進行數據分析。使用熱線風速計測量燃料速度。使用煙氣分析儀測量燃燒器的 CO、CO<sub>2</sub>、HC、NO<sub>x</sub>、O<sub>2</sub>) 排放參數，並在 SCOPE 應用軟件環境中進行數據分析。

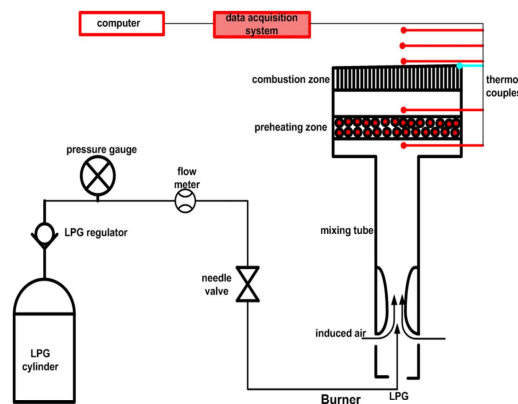


圖 1 實驗裝置示意圖

### 2.2 實驗步驟

實驗進行係依據 BIS: 4246:2002 規範，在封閉及開放之大氣中進行實驗，在功率 0.5-2.0 kW 條件下，燃料速度為 0.4、1.0、2.0、3.0 和 3.6 m/s 等 5 種流速作為實驗參數。首先將液化石油氣瓶放在電子秤上，然後打開燃油單向閥調節閥，讓燃油流經壓力錶和轉子流量計到達第二個控制閥，調節第二個控制閥，讓 LPG 流過噴射器，將熱線風速計靠近噴射器尖端來調節流速。記錄實驗對應燃料流速之相關數據，如氣瓶的氣體壓力、帶有氣體的氣瓶的初始重量 (W1) 和來自轉子流量計的體積流量等等。然後將一個已知重量

的鋁製容器裝入 5 公升的水放置燃燒器上，記錄容器內水的初始溫度( $t_1$ )，連續攪拌水以保持溫度均勻，直至  $90^{\circ}\text{C}$ 。最後，停止燃燒器之燃料供應，並記錄氣缸(W2)的氣體重量，還使用數字秒錶記錄每組操作所花費的時間，在每組操作期間消耗的燃料質量，經由氣缸初始重量和最終重量之差來計算，重覆上述實驗流程，對五組不同燃料速度之實驗進行觀察。

### 2.3 儀器和實驗不確定性

儀器之不確定度是固定誤差，可從技術規範中獲得。體積流量使用丙烯酸本體 LPG 轉子流量計測量，精度為全刻度之 $\pm 2\%$ ，範圍為 0-12 lpm，解析度 0.5 lpm。溫度量測系統之參考補償精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，高速採樣精度為 $\pm 0.1\%$ 。燃燒器表面溫度，使用紅外線熱像儀 (FLUKE) 在 20 至  $600^{\circ}\text{C}$  的溫度測量範圍內測量，精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$  或  $2\%$ 。熱線風速計測量燃料流動的速度，速度測量範圍 0.1 - 25.0 m/s、解析度為 0.01 m/s，讀數精度為 $\pm(5\%+1d)$ ，溫度測量範圍 0 -  $50^{\circ}\text{C}$ ，解析度為  $0.1^{\circ}\text{C}$ ，精度為 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。電子秤來測量 LPG 質量流量，解析度為 1 g、精度 $\pm 2\text{ g}$ 。煙氣分析儀 (AVL DITEST) 用於測量煙道中的  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{HC}$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_2$  之排放。空孔材料之孔尺寸量測，使用 10 $\times$ 、20 $\times$ 和 50 $\times$ 透鏡的放大倍率和精度 $\pm 0.1\%$ 的輪廓投影儀[Metzer M, 806A]。上述量測，重複測試至少五次獲得測量參數的誤差，並使用 Kline 和 Mc Flintlock 提出的方法，估算實驗結果的不確定性，計算方法如下列方程式(1):

$$W_r = \left[ \sum \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中  $R$  是自變量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $\dots$ 、 $X_n$  的函數； $W_r$  是結果的不確定性， $W_i$  是自變量的不確定性。

最大表面溫度的不確定性為 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ ，其係對應於 2 m/s 輸入速度，其熱效率的不確定性約為 $\pm 2.34\%$ ，如圖 7 所示。

## 3. 燃燒器特性

### 3.1 自吸式傳統烹飪燃燒器(CB)

圖 2 所示為市售之傳統烹飪燃燒器(CB)，該燃燒器之直徑、厚度、孔徑、孔數和孔陣列模式，以及混合管的內徑和長度等參數，詳列於表 1，這燃燒器是垂直設置，額定功率 2~5 kW。





圖 2 研究中使用的傳統燃燒器的照片視圖

表 1 傳統多孔燃燒器的特性

燃燒器 類型	外徑 (mm)	厚度(mm)	孔數	孔大小 (mm)	材料
市售商 業型號	114.42	6.0	60*3+22 = 202	2.61	CI

### 3.2 新型自吸式多孔輻射燃燒器 (SAPRBs)

圖 3 為設計和製造的自吸式多孔輻射燃燒器多孔輻射再循環燃燒器(Porous Radiant Recirculation Burner, PRRB)之示意圖。在設計新燃燒器時，將傳統自吸氣式燃燒器以及公開文獻中的輻射表面燃燒器的測量特性作為參考數據，燃燒器主體由 3mm 厚之低碳鋼製成，以提供燃燒器的穩定性，內部有陶瓷基體、直徑 3mm 或 5 mm 不銹鋼球、金屬絲網和支撐框架等組件。在預熱區(PZ)中使用支撐框架來支撐鋼球，在燃燒區(CZ)中具有不同厚度和孔隙率的陶瓷基體，所使用之陶瓷材料的規格列於表 2。本研究分別製造圓形和方形橫截面等兩種不同幾何形狀的多孔輻射再循環燃燒器(PRRB)，擬比較幾何形狀對燃燒器之燃燒性能的影響，圓形燃燒器的直徑 80 mm，高度 65 mm，方形多孔燃燒器之長、寬為 80 mm，高 65 mm，除幾何形狀外，兩個燃燒器之其他條件都相同，對不同厚度和孔隙率的陶瓷基體進行測試，如表 3 所示。傳送空氣燃料到燃燒器之混合管內徑為 40 mm、厚 3 mm、長 110 mm。支撐架內部開有凹槽，用於固定燃燒器之多孔陶瓷材料和鋼珠球。燃燒區(CZ)和預熱區(PZ)之間保持 12-15 mm 界面間隙，以減少混合物過度預熱對熱性能造成影響，測量界面間隙內及靠近預熱區(PZ)之燃燒器內部溫度，以分析預熱和燃燒區之溫度影響，有助於進一步改進燃燒器的性能。

自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRBs)的設計概念是基於預熱和內部再循環的原理，以產生多量的焓及提高反應區火焰的峰值溫度。為了穩定陶瓷基體表面上方不同層的火焰，進行鋼珠層優化，並利用 Liu 和 Hsieh 學者實驗觀察所獲得之結果，配置 PZ 中的鋼珠球和 CZ 的多孔陶瓷材料厚度。

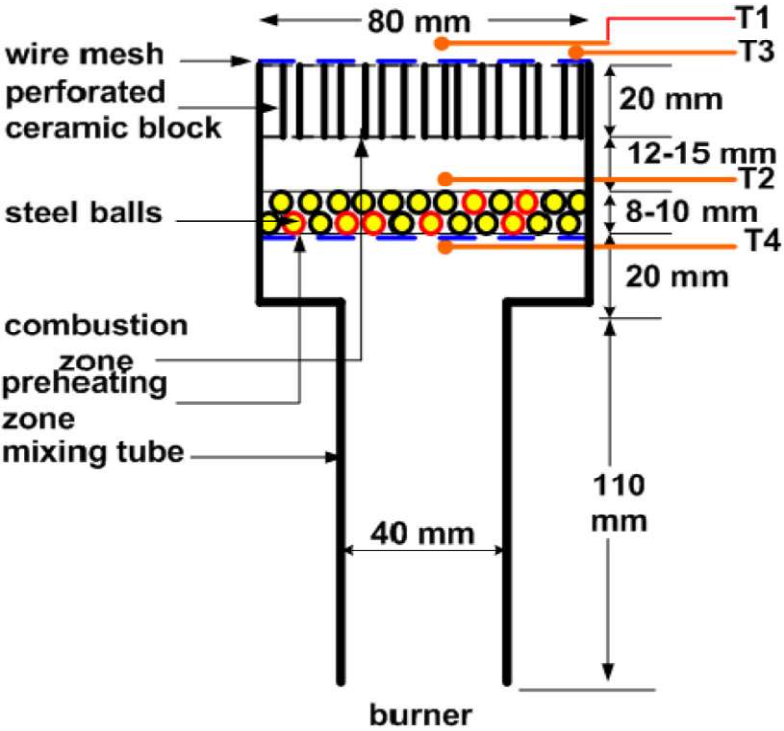


圖 3 新型多孔輻射燃燒器的示意圖

表 2 隔熱輕質陶瓷耐火磚的特性

熱物性值	值	化學成分	濃度(%)
堆積密度	604 kg/m3	氧化鋁	37
斷裂模量	1.52 MPa	二氧化矽	61
永久線性變化 (加熱24小時@1280 °C)	1.95%	三氧化二鐵	1.6
冷壓強度	2.01 MPa		
熱導率 @ 300°C	0.2 W/mK		
熱導率 @ 750°C	0.28 W/mK		

表 3. 多孔陶瓷燃燒器的特徵

多孔 陶瓷 基體	直徑/寬度 (mm)	厚度 (mm)	孔徑 (mm)	陶瓷基 體類型	孔隙 率 (%)
1	80	10	1.5	圓型	85
2	80	15	1.5	圓型	85
3	80	20	1.5	圓型	85
4	80	10	1.5	圓型	80

5	80	15	1.5	圓型	80
6	80	20	1.5	方型	80
7	80	10	1.5	方型	85
8	80	15	1.5	方型	85
9	80	20	1.5	方型	85
10	80	10	1.5	方型	80
11	80	15	1.5	方型	80
12	80	20	1.5	方型	80

### 3.3 熱效率測試

圖 4 顯示了三種不同燃燒器的熱效率測試示意圖，依據 BIS 4246:2002 規範，進行水沸騰之熱效率測試，燃燒器表面和容器底部間保持 50mm 距離，使用方程式(2)計算熱效率。

$$\eta = \frac{(m_w c_{pw} + m_v c_{pv})(t_2 - t_1)}{m_f CV} \quad (2)$$

式中

$m_w$  水質量

$c_{pw}$  水比熱

$m_v$  容器質量

$c_{pv}$  容器比熱

$t_2$  水的最終溫度

$t_1$  水的初始溫度

$m_f$  燃料質量

$CV$  燃料的熱值

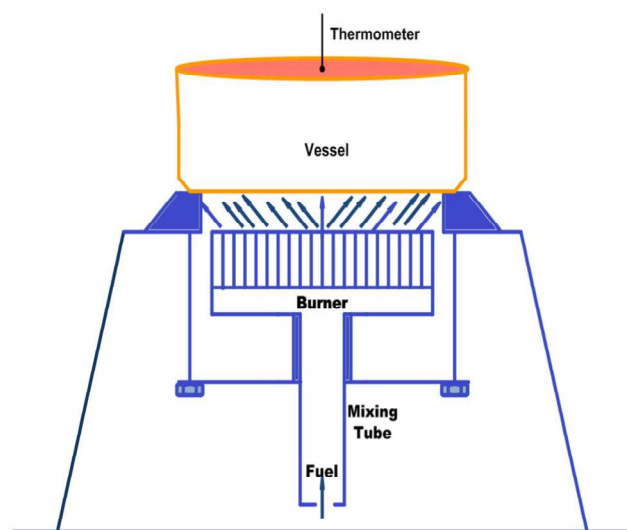


圖 4 熱效率測試示意圖

### 3.4 輻射效率

輻射效率是針對各燃燒器在最佳燃燒率狀況下計算，輻射效率計率的計算，依 Leonardi 等人使用的計算式進行計算：

$$\eta = \frac{Q_{\text{rad}}}{FR} \quad (3)$$

$$FR = \frac{LCV \times \dot{m}_f}{A} \text{ kW/m}^2 \quad (4)$$

式中 LCV、 $\dot{m}_f$ 、A 分別為燃燒器的熱值、燃料的質量流量和燃燒器的橫截面積。

$$\dot{m}_f = \rho a v \quad (5)$$

式中  $\rho$  是燃料的密度， $a$  是燃料噴嘴的面積， $v$  是噴嘴尖端處的燃料流速。因此 FR 和  $\dot{m}_f$ 、 $v$  成正比關係。

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma [T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{surr}}^4] \quad (6)$$

式中 Stefan – Boltzmann 常數  $\sigma = 5.669 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  和發射率  $\varepsilon = 0.95$ ，計算，在燃料流速 2 m/s 下的輻射效率為 23.11%。

### 3.5 排放測試

排放測試是在密閉環境中進行，在排放測試期間，使用 5 mm 厚石棉板將燃燒器周圍區域封閉起來，煙氣分析儀的探頭準確地保持在火焰的頂部，記錄排放數據之前，將氣體分析儀放置 30 秒進行自動校準，排放結果可從分析儀得知 CO、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、HC 和 O<sub>2</sub> 的百分比表示，並在 SCOPE 應用軟件環境中進行處理。

## 4. 結果與討論

### 4.1 熱效率

進行商業傳統烹飪燃燒器(CB)和自吸式多孔輻射燃燒器(SCPRB 和 SSPRB)之熱效率比較，如圖 5 所示，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的最大熱效率發生在流速為 2 m/s、孔隙率為 85%條件下，熱效率的測試是在 0.4、1.0、2.0、3.0 和 3.6 m/s 等 5 種速度進行，所得到之熱效率分別為 68.12%、69.44%、71.78%、71.23%及 71.02%。而在相同的流速和孔隙率下，從自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)獲得的熱效率略低於自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的熱效率。然而，傳統烹飪燃燒器(CB)對應於 0.4、1.0、2.0、3.0 和 3.6 m/s 等 5 種輸入速度，所得到之熱效率為 36.52%、43.65%、48.24%、55.46% 和 64.16%，以在 3.6 m/s 的流速下，所得到之熱效率 64.16%為最大，傳統烹飪燃燒器(CB)的熱效率隨著流速增加而逐漸增加。

傳統烹飪燃燒器(CB)通常是自由火焰燃燒器，燃燒反應從端口的底面開始，並形成一個薄的反應區，燃料在開放空間中燃燒，燃燒器頂部的端口表面用作持續燃燒的點火器，隨著燃料質量流量的增加，燃料以更高的速度移動，它沒有足夠的時間與空氣更好地混



合，並且由於反應區非常薄，燃料和空氣之混合物在開放空間中燃燒，並帶有兩種不同類型的火焰，中心藍色火焰隨著燃料流量增加，沿直線路徑往上传播並接近鍋底表面。因此，燃燒器的熱效率隨著燃燒率的增加而增加，當燃燒速率和流速使得火焰開始撞擊鍋底面時，燃燒器的熱效率由於火焰熄滅而開始降低。在此狀況，對流是唯一的主要傳熱方式，隨著燃燒速率進一步提高，燃燒器表面單位時間內產生的火焰可能無法完全容納在鍋底表面，從而向周圍環境散失的熱量越來越多，在這種情況下，吸收熱量的表面積對效率損失起著至關重要的作用。

多孔輻射再循環燃燒器(SAPRB)的結構有燃燒區及預熱區等 2 層結構，隨著流量的增加，燃料與空氣混合之混合物的溫度，由於內部熱再循環而升高，溫度的升高降低了燃料中的初級曝氣，並獲得了富含燃料的混合物。因此，反應速率隨著富含燃料的混合物的增加而增加，並將反應區移到燃燒區(CZ)的下游，火焰穩定在燃燒器表面上方 50 mm 的高度內，以平衡混合物的流動速度和反應速率。反應速率經由燃燒器的自然通風進行二次曝氣來控制，從而在預熱區(PZ)和燃燒區(CZ)之間形成界面間隙，經由優化預熱區(PZ)中的鋼球層和燃燒區(CZ)的厚度來控制流速。從文獻中得知，燃燒區(CZ)區的多孔床長度的增加會增加質量流量，另預熱區(PZ)區的長度增加超過一定限度，會增加閃回的機會，預熱區(PZ)的長度保持在 8-10 mm 為最佳(使用直徑 5 mm 鋼球)，燃燒區(CZ)的最佳長度為 20 mm。經由對兩個區域的長度在 2 m/s 時進行優化，係因為火焰的長度保持在燃燒器表面上方 50 mm 處且預熱區(PZ)和燃燒區(CZ)之間存在界面間隙，它們之間沒有傳導熱傳遞。如圖 6 所示，部分預混的空氣-燃料之混合物被加熱到 175-193°C，對應上游方向的對流和輻射傳熱以及由於混合二次空氣而導致的淬火的流動速度，這個溫度範圍，仍然遠低於燃料的著火溫度。因此，在界面間隙中沒有燃料著火，然後該混合物在通過燃燒區(CZ)時被均勻地加熱到其點火溫度。由於預熱區(PZ)中使用了金屬球，因此通過在 12-15 mm 範圍內優化兩個區域之間的界面間隙長度來控制由於混合物過度預熱而導致的回火效應。經由測量靠近 PZ 的混合管中的溫度約 52 - 78°C，如圖 6 所示。

在預熱區(PZ)以下獲得的混合物溫度範圍證實沒有燃料點燃，因此在工作範圍內沒有回火。此外，IR 熱成像圖（圖 10a 和 10b）顯示由於燃燒區(CZ)中溫度的均勻性而導致的表面溫度均勻性。這種表面溫度約 500°C 的均勻性，是由於經由燃燒區(CZ)的熱傳輸組合（傳導、對流和輻射）模式產生的，若與傳統烹飪燃燒器(CB)相比，自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)在較低流速下獲得較高的熱效率，所以傳導、輻射和對流的燃料效率成為下游方向傳熱的主要模式，從結果可以明顯看出，對於每個輸入速度，傳統烹飪燃燒器(CB)中的燃料消耗都高於自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)。

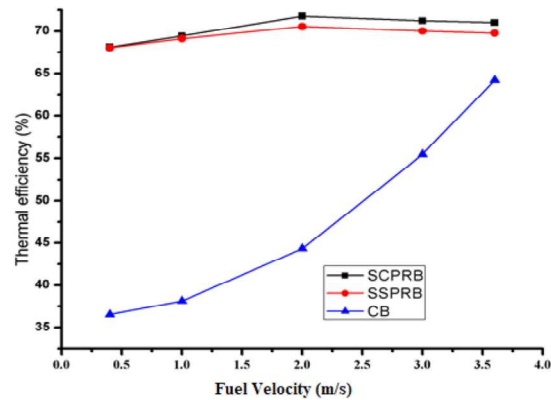


圖 5 熱效率與燃燒率/燃料流速 (m/s)

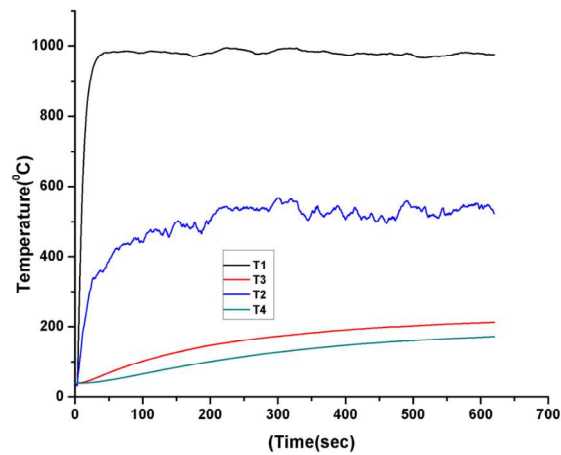


圖 6 當  $V=2$  m/s 時的瞬態溫度曲線

圖 6 採用 5 毫米鋼球、20 毫米厚的燃燒區(CZ)和 85%的孔隙率，T1：距燃燒器表面 110mm 處的軸向溫度，T2：恰好在燃燒器圓周處的徑向溫度，T3：預熱區和反應區界面處的溫度，T4：預熱區以下的溫度。

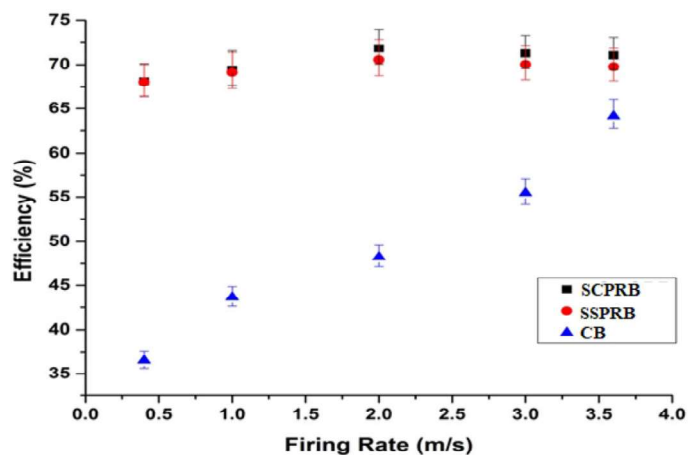


圖 7 熱效率的估計不確定性

## 4.2 排放特性

排放測試是在密閉環境中進行，將測試探針靠近燃燒器頂部，燃燒器的 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放值如圖 8 和 9 所示。在傳統烹飪燃燒器(CB)的情況下，NO<sub>x</sub> 和 CO 的排放值隨著燃燒率/流速的增加而增加，係由於較大的燃燒速率，較少的停留時間及火焰峰值溫度急劇上升，導致不完全燃燒。圖 10c 所示，在傳統烹飪燃燒器(CB)的情況下，由於燃料和空氣之混合物在反應區的停留時間較短以及火焰溫度的不均勻性，不完全燃燒導致 CO 排放增加。由於峰值火焰溫度的急劇上升，傳統烹飪燃燒器(CB)的 NO<sub>x</sub> 排放值在 73-101 ppm 的範圍內，對於自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)和自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)，在相同的燃燒率/速度條件下，NO<sub>x</sub> 排放值在 12-32 和 14-40 ppm 的範圍內，如圖 8 所示。在 2 m/s 的最佳速度的 NO<sub>x</sub> 排放值對於傳統烹飪燃燒器(CB)為 87 ppm，對於自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)和自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)分別為 24 和 32 ppm。在自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)的情況下，雖然燃燒區(CZ)中的溫度高於傳統烹飪燃燒器(CB)，但由於均勻加熱和火焰峰值溫度緩慢上升，NO<sub>x</sub> 的形成較低。對於所考慮的燃燒率/速度範圍，傳統烹飪燃燒器(CB)的 CO 排放值在 125-228 ppm 的範圍內，而自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的這些值範圍為 44 至 52 ppm，自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)的相應值範圍為 45 至 54 ppm，如圖 9 所示。自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)中的 CO 排放值低於傳統烹飪燃燒器(CB)，這可能因在燃燒區(CZ)中的燃料燃燒更充分，係因加熱徹底和均勻，並且在燃燒區(CZ)內的停留時間比傳統烹飪燃燒器(CB)長。較慢但完全燃燒的另一個原因是由於預熱區(PZ)和燃燒區(CZ)之間的界面間隙中的二次曝氣造成更高的燃燒溫度，是減少 CO 排放的另一個原因。

自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRBs)的 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放值均符合世界衛生組織標準的要求。對應於功率強度/燃燒率/燃料流動速度的增加，NO<sub>x</sub> 和 CO 排放顯示出不同的趨勢。於火焰溫度的升高時，NO<sub>x</sub> 排放量隨著功率強度/燃燒速率/燃料流速的增加而增加。CO 排放量在開始時隨著燃料流速的增加而減少，由於撞擊容器底面後火焰熄滅，CO 就急劇上升至 3.6 m/s。

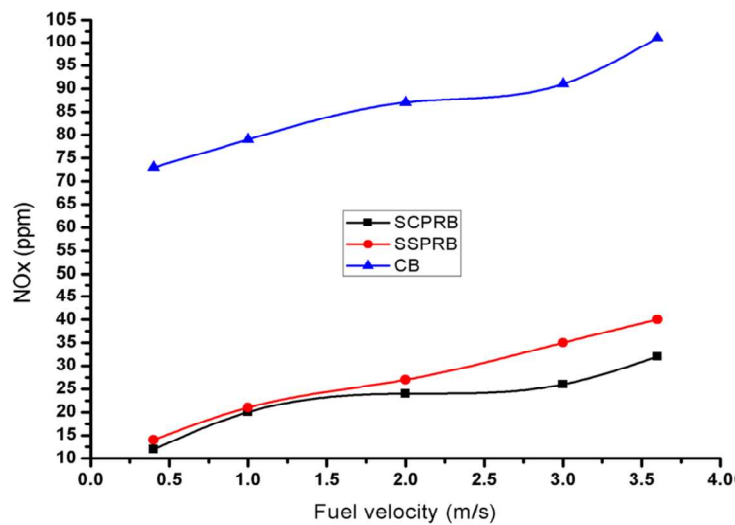


圖 8 NOx 排放與燃燒率/燃料流速(m/s)

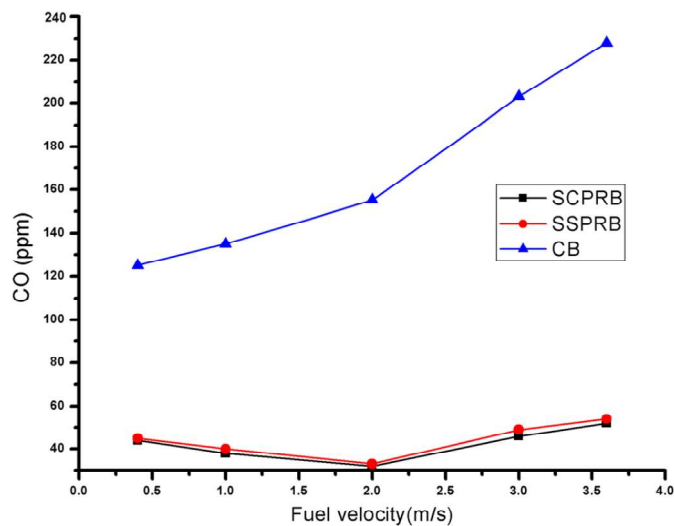
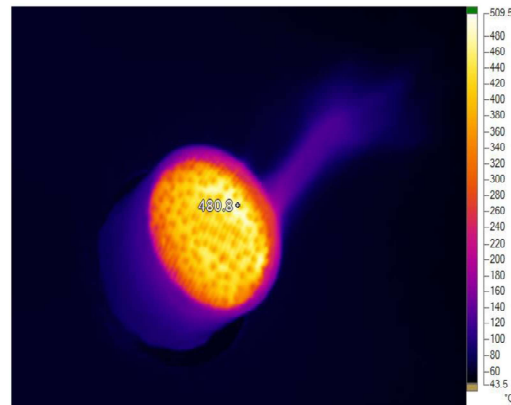


圖 9 CO 排放與燃燒率/燃料流速(m/s)

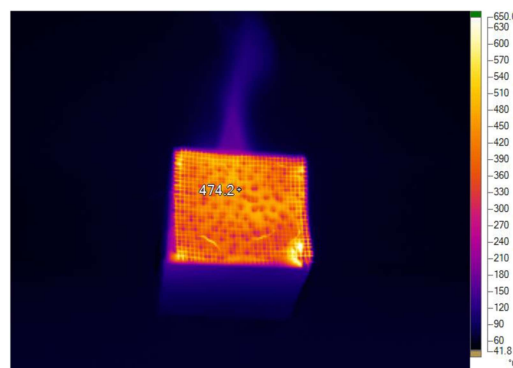
#### 4.3 溫度分析

紅外圖像分析，如圖 10 所示，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的平均表面溫度為  $480.8^{\circ}\text{C}$ ，而自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)的表面溫度比自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)低約  $6^{\circ}\text{C}$ ，這可能是由於兩者之間的結構差異。對於傳統烹飪燃燒器(CB)，其表面溫度在  $145$  到  $225^{\circ}\text{C}$  之間變化，燃燒器表面中心的溫度為  $157^{\circ}\text{C}$ 。自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)與傳統烹飪燃燒器(CB)相比，自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)中的溫度分佈更均勻，而傳統烹飪燃燒器(CB)之火燄溫度分佈較不均勻，係因傳統烹飪燃燒器(CB)採明火燃燒設計，燃燒器頭製成半球形以將火焰集中在中

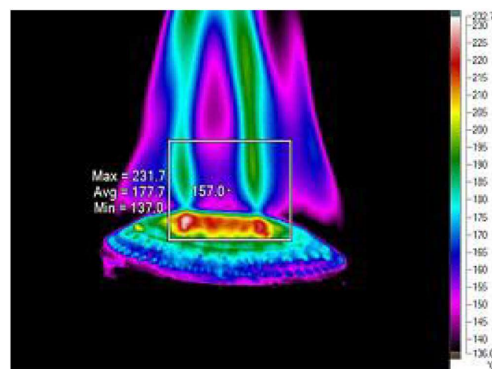
心處，以增加對流速率來提高熱效率。自燃之多孔輻射燃燒器 (PRB)，由於有多孔陶瓷基體層及鋼珠層之設計，厚度增加，且在該兩層及兩個區域界面處的二次曝氣，反應區內的流速充分減慢，且多孔基體的大表面積等，使對流和傳導之熱傳遞現象增加，因此，對流損失最小化，最終使火焰對基體的冷卻效果最小化，因此，多孔輻射燃燒器 (PRB) 與傳統烹飪燃燒器 (CB) 相比，多孔輻射燃燒器 (PRB) 中獲得了均勻的溫度分佈。



(a) SCPRB 紅外線圖像



(b) SSPRB 的紅外線圖像



(c) SSPRB 的紅外線圖像

圖 10 當  $V = 2.0 \text{ m/s}$  時 PRBs and CBCB 紅外線圖像

#### 4.4 孔隙率的影響

多孔輻射燃燒器 (PRB) 的熱效率在陶瓷材料的兩種不同孔隙率



80%和 85%下進行測試。當  $V=2.0$  m/s 條件下，80%孔隙率的自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)熱效率約 71.18%，孔隙率從 80%增加到 85% 時，燃燒器的效率提高到 71.78%。而自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)與自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)相比較，效率降低了 0.32%。文獻報告指出燃燒區(CZ)孔隙率增加，會提高燃燒器的熱效率，因為隨著接觸表面積的增加，熱傳遞的傳導和對流模式增加，但耐火磚陶瓷孔隙率的進一步增加可能會導致燃燒器的強度降低，會因熱應力產生毀損。另，隨著孔隙率從 80%增加到 85%，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)燃燒器的效率略微增加 0.86%，但隨著孔隙率增加，NO<sub>x</sub> 和 CO 排放量沒有顯著變化。

#### 4.5 陶瓷基體厚度的影響

在燃燒區(CZ)中，考慮了三種不同尺寸的陶瓷基體用於效率和排放分析。在 20、15 和 10 mm 等 3 種不同厚度的陶瓷材料，進行多孔輻射燃燒器(PRB)的熱效率測試。在 2 m/s 的最佳流速下，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的熱效率為分別為 71.78%、69% 和 65.34%等，其熱效率隨陶瓷材料基材之厚度下降而下降，熱容量隨著多孔基體厚度的增加而增加，詳表 2 陶瓷基體的熱物理特性。此外，觀察到多孔床長度的增加會增加燃料的質量流量，陶瓷基體厚度的增加，需要更高的流速來克服摩擦，所以燃燒區(CZ)中 20 mm 厚的陶瓷基體，可能最適合實驗中使用的相應操作條件。在 2 m/s 的最佳流速下，對於不同厚度的陶瓷基體，NO<sub>x</sub> 和 CO 的值分別在 29-47 和 60-95 ppm 的範圍內。在預熱區(PZ)中使用直徑為 5 mm 的鋼球和燃燒區(CZ)的孔隙率為 85% 時，對應於 2 m/s 的最佳流速的 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放值分別為 24 和 32 ppm。

#### 4.6 不銹鋼球的作用

預熱區(PZ)中使用了兩種不同尺寸的不銹鋼球，並研究了它們對熱效率和燃燒器排放的影響。觀察到，在  $V=2.0$  m/s 時，直徑為 5 mm 的鋼球的最大熱效率為 71.78%，NO<sub>x</sub> 和 CO 排放量分別為 24 和 32ppm，但當鋼球直徑 3mm 時，觀察到有回火效應現象。由於混合物的預熱，混合物在初級曝氣非常低，因此反應速率較大，使用 3mm 鋼球，氣體的流動通道在預熱區(PZ)下游充分減少，火焰無法往下游方向傳播，混合物溫度升高，故使用 3 mm 鋼球有觀察到回火效應。

#### 4.7 場限制對熱效率和排放的影響

場限制封是指在在燃燒器周圍，使用 5 mm 厚的石棉板包圍燃燒器四個側面和底部，並用錐形罩包圍燃燒器的頂部，頂部的錐形罩裝有一個直徑為 40 mm 的排氣管。當水容器被加熱在水沸騰測試期間，裝置內的溫度仍然比大氣溫度高 5-10°C，因為開放大氣和燃燒器周圍的封閉空間之間沒有直接的熱傳遞。由於對流和輻射

造成的熱量損失減少到最低限度。因此，與開放環境相比，所觀察到的熱效率高出 2%，公開文獻還表明，燃燒器的熱效率隨著大氣溫度的升高而增加，對應於 2 m/s 的流速，未觀察到 NO<sub>x</sub> 和 CO 有顯著排放變化。

#### 4.8 燃燒器幾何形狀的影響

如圖 5 所示，在流速較低的情況下，如 0.4 和 1.0 m/s，相對於燃燒器幾何形狀（圓形和方形）的變化，自吸式多孔輻射燃燒器(SAPRB)的熱效率沒有顯著變化。在較高的燃燒率下，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)與自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)相比，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)熱效率略上升 1.2-1.24%。如圖 8 所示，自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)的 NO<sub>x</sub> 排放量幾乎隨著燃料流量的增加呈線性增加，與自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)與自吸式方形多孔輻射燃燒器(SCPRB)相比較，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)燃燒器顯示出不同的趨勢。在超過 2 m/s 的流速下，自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)和自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)兩者之 NO<sub>x</sub> 排放存在顯著差異。這種在較高燃燒率/流速下的 NO<sub>x</sub> 排放差異，可能是由於兩者的結構或幾何差異造成的。由於燃燒器的幾何形狀不同，實驗條件相同，並且 CO 排放值的差異很小。因此可知，幾何形狀對燃燒器的熱效率和 CO 排放影響很小，但在較高的速度或燃燒率下，NO<sub>x</sub> 排放值取決於燃燒器結構。

#### 5. 結論

1. 在大多數兩層多孔燃燒器中，預熱區(PZ)和燃燒區(CZ)是連續的，即在這些區域中使用的材料相互接觸，熱傳導為主要傳導模式，本研究在預熱區(PZ)和燃燒區(CZ)之間保持 12-15 mm 的間隙，這降低 PZ 熱傳導模式，展現主要的對流效應。
2. 在 85%孔隙度時，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)、自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)的熱效率較傳統烹飪燃燒器(CB)高。自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)在 0.4、1.0、2.0、3.0 和 3.6 m/s 流速下，的熱效率分別比傳統烹飪燃燒器(CB)的熱效率提高 31.6%、25.79%、23.54%、15.77% 和 6.86%。
3. 在相同的燃料流量下傳統烹飪燃燒器(CB)的 NO<sub>x</sub> 排放值在 76-102 ppm 範圍，自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)和自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)分別在 12-32 和 14-40 ppm 的範圍。對於所考慮的流量範圍，傳統烹飪燃燒器(CB)的 CO 排放值在 125 – 228 ppm，而自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)的 CO 值範圍在 44 至 52 ppm，自吸式方形多孔輻射燃燒器(SSPRB)的值範圍在 45 至 54 ppm。
4. 自吸式圓形多孔輻射燃燒器(SCPRB)燃燒器的熱效率，在 2 m/s 的流速下，孔隙率從 80% 增加到 85%時，熱效率增加 0.86%。

	<p>5. 燃燒器的幾何形狀對燃燒器的效率和排放影響很小。</p> <p><b>主要參考資料來源：</b></p> <p>Indian Academy of Sciences (2018) 43:173</p> <p><a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-018-0934-7">https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-018-0934-7</a></p>
關鍵字	多孔表面燃燒器、自吸、紅外熱成像、液化石油氣、熱效率、排放

註：1.請計畫執行單位上傳提供較具策略性的知識物件，不限計畫執行有關內容。

2.請計畫執行單位每季更新與上傳一次，另有新增政策建議可隨時上傳。

3.文字精要具體，量化數據盡量輔以圖表說明。