

# 稻殼烘乾用稻殼燃燒爐(一)

## Rice Hull Burner for Drying Rice Paddy

國立臺灣大學農機系教授

陳 貽 倫  
Yi-luen Chen

國立臺灣大學農機系研究助理

周 楚 洋  
Chu-yang Chou

### Abstract

A small scale survey was made to investigate the production and the utilization of rice hull at individual Farmers Association level. So far, local-produced rice hull has been used in rice seedling nurseries as artificial soil; for poultry house bedding and litter; for feeds; for soil amendment; for fuel in tile kiln and for water boiling, etc., However, the bulky rice hull mass is still a headache for local FAs in the matters of storing, disposing and effective using.

A small rice hull burner for drying rice paddy was designed and tested. Temperature rises, air flow rates, heat efficiencies in energy conversion and other performance were recorded and discussed.

### 一、前 言

#### 稻殼利用之背景

全世界有75個以上的國家生產稻谷，1977年之總產量為36,280萬公噸；臺省1978年產量（糙米）2,444,490公噸。收穫後之乾谷重量中，稻殼約佔1/3。每個產米國家的經濟結構不同，如何在各自經濟結構中處理利用這為數龐大的農業副產品，是農業工程人員之一大課題。

稻殼質硬而粗燥，纖維短，營養分不高，不易腐化，容積大，灰分多等特性是其不易利用處理的因素。

研究稻殼之處理利用和成分特點已逾百年歷史，歸納衆多研究報告，稻殼可作下列用途(6)：

1. 研磨劑

2. 吸收劑
3. 添加劑
4. 基層墊料
5. 建材
6. 製炭
7. 傳遞質 (Carrier)
8. 纖維紙漿
9. 飼料
10. 肥料
11. 過濾材料
12. 燃料
13. 填料
14. 製玻璃
15. 水耕材料
16. 絕熱材料

|          |    |        |
|----------|----|--------|
| 17. 畜舍墊底 | 灰分 | 19.13  |
| 18. 製板   | 水分 | 5.72   |
| 19. 包裝   | 炭  | 39.71  |
| 20. 製色素  | 氫  | 5.01   |
| 21. 粗料   | 氮  | 0.46   |
| 22. 耐火磚  | 硫  | 0.07   |
| 23. 製肥皂  | 氧  | 29.90  |
| 24. 砂料   |    | 100.00 |

25. 土質改良  
26. 水稻育苗

稻殼利用之方向雖多，但由於其本身之不良特性，許多方面之利用仍缺少經濟上之價值，將稻殼再用於水稻之生產似合乎邏輯；已有人用之於稻田土質之改良，水稻之育苗，稻谷之烘乾，米之蒸熟(Parboiling)，谷倉之絕熱，碾米廠之動力等。

「焚化」為處理稻殼之最古老，最常用的方法，焚化過程所生之熱能可用來燒水和產生蒸汽；早年本省農家每向農會購買稻殼作為燃料。近年來，因液化煤氣及電力之普及，農民漸漸採取較方便之燃料而捨棄稻殼，農會方面反需花代價僱工處理堆積如山的稻殼。

最近一兩年，人們又開始積極多方設法利用這數量龐大的稻殼原料。漸漸地，稻殼又有了銷路。

民國七十年五月下旬至六月中旬，我們派人抽樣調查了中南部十五個農會有關稻殼之處理與利用。其中每農會之每年稻殼產量自 12 公噸至 1800 公噸，生產月份不定，即當糧食局指令碾米時，才有稻殼生產。稻殼之用途有：水稻育苗、鷄鴨舍墊底、飼料填充、燒瓦、堆肥、農家燃料、鹿舍猪舍墊底等。雖然，有些農會仍需付每噸 150 元的代價僱人清除堆積的稻殼，無法處理的稻殼需運到海邊焚化，但是，也有農會出售稻殼，每噸有 200 元以上的收入。大多數農會有相同的煩惱，即堆積佔地太大，妨礙工作、污染空氣。也有一致的盼望；盼有人收購利用或有妥善的處理措施。

### 稻殼之燃燒

比較許多其他稻殼利用方法，焚化法仍是最簡易可行的方法。在石油來源短缺，能源費用高昂的情況下，若能設計一種簡易方便的稻殼燃燒爐，稻殼燃燒所得之熱能仍大有利用之價值。

據 Beagle 氏 (1968) 分析<sup>(5)</sup>，稻殼組成之重量百分比如下：

灰分中，約有 94~96 % 為矽。其中炭、氫、硫可以燃燒；其燃燒值為每公斤稻殼 3542 Kcal (6389 Btu/lb)，約為煤油的 1/3，即一公升煤油(或輕柴油)之熱量與 2.4 公斤稻殼之熱量約相等。

稻殼燃燒方式有多種：

1. 在爐篋上燃燒<sup>(1)</sup>
2. 浮懸式 (Air suspended) 燃燒
3. 浮動層式 (Fluidized-Bed) 燃燒
4. 堆積燃燒 (Burning in a pile)
5. 密閉器 (室) 內燃燒
6. 擠壓成棒狀稻殼炭

稻殼不易點燃，一堆稻殼，如僅點燃少許，仍會自行熄滅，必需同時點燃足量稻殼，始可持續燃燒。燃燒時有焦油 (Tar) 產生，並有惡臭。燒後之灰燼可能為含高炭質之黑色灰，可能為含低炭質之灰色灰，也可能為不含炭之白色灰，端視燃燒條件而定<sup>(4)</sup>。

稻殼燃燒方式多，已如上述，但在密器內逆流 (Counter-current) 燃燒方式，國內尚未有人提出報告，本系講師馮丁樹先生年前試驗此一燃燒方式，其基本構思為稻殼燃燒方向朝上方進行，而空氣供給是由上方向下。

這種逆流燃燒爐的特點為：

1. 在燃燒層之上揮發性物質先因熱氣化自稻殼中逸出，而後隨即隨空氣通入燃燒層而被燃燒，使揮發性可燃氣體不致浪費，同時使惡臭減至最低程度。
2. 控制空氣流量可調節燃燒之速率；稻殼可以非常緩慢的速率燃燒。
3. 燃燒爐構造與使用均非常簡單，造價低。

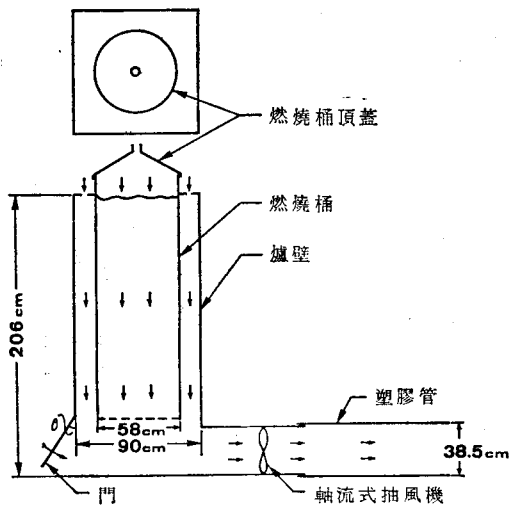
## 二、目的

由過去所進行的小桶燃燒爐試驗中，發現逆流式燃燒爐的可行性<sup>(2,3)</sup> 因此着手進行設計適合實用性的燃燒爐。實用的燃燒爐除了熱效率要高外，選

必須能够控制熱風的風量、溫昇以及燃燒速率。因此在不同的控制條件之下進行多次試驗，期能找出控制的方法，建立一套控制稻殼燃燒的理論。最終目標為：經過不斷試驗修改，盼能達成一個實用的稻殼燃燒爐設計，可以推廣給農家，使原為農產廢物的稻殼得一有效利用途徑，也能節省一部分石化能源。

### 三、試驗材料

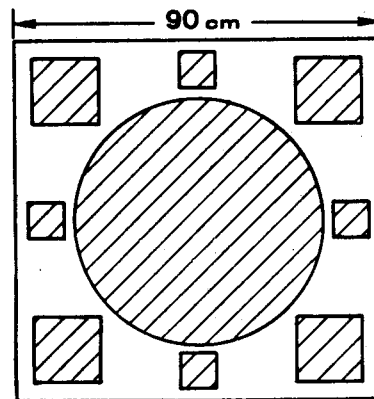
1. 燃燒爐（圖一）：燃燒桶高 180 公分，容量 45~50 公斤。燃燒桶和爐壁之間有空隙，可減少對流及輻射損失。底部前方接軸流式抽風機，後方有一長方形門，可供調節風量、熱風溫度及清除灰燼用。



圖一 燃燒爐

2. 220V，軸流式抽風機：供應整個燃燒爐所需之空氣，同時將熱風送出，前方接塑膠管可引導熱風的流向。
3. 溫度計錄器：記錄大氣及出口的熱風溫度。
4. 風速計：量取出口風速。
5. 家用瓦斯爐：供引燃稻殼用。
6. 吹風機：僅在引燃時使用，導引空氣由下往上。
7. 燃燒桶頂蓋：引燃時覆在燃燒桶正上方（參考圖一）。另第一、二次試驗為控制風量，在進行試驗時此頂蓋皆覆蓋在燃燒桶上，第三、四、五次試驗時則不用頂蓋。
8. 風量調節裝置：為了調節進入燃燒桶以及燃燒桶外圍的空氣量，在爐頂部加裝一個覆蓋裝置，如圖二所示，斜線部份均已挖空，中央的圓

孔，直徑與燃燒桶外徑相同，可供空氣進入燃燒桶，旁邊的方形孔為冷空氣進口。調整圓孔與方形孔面積的比例，即可調節進入燃燒桶的空氣量。



圖二 風量調節裝置

9. 稻殼：取自士林農會

### 四、試驗方法

1. 將稱重過的稻殼倒入燃燒桶中，然後把頂蓋覆在燃燒桶上（如圖一），邊緣以膠帶密封，頂蓋的圓管上再接吹風機，由下往上吸風，以幫助引燃。
2. 引燃時打開爐底的門，將瓦斯爐放在燃燒桶下方，點燃瓦斯，為使底部的稻殼全面燃燒，瓦斯爐在每個部位燃燒約一分鐘後，即移動至另一未燃燒的位置，直至整個面皆燃燒為止，通常引燃約需 10 分鐘，是否點燃只要觀察吹風機送出的氣體是否呈微藍色即可知道。
3. 引燃後，立即打開溫度紀錄器，開動軸流式抽風機，並取下頂部的吹風機和頂蓋（第一、二次試驗仍保留頂蓋）。
4. 每隔一小時量取一次出口的風速。
5. 當溫度紀錄器顯示出溫昇在  $4^{\circ}\text{C}$  以下時即終止試驗。

### 五、結果

本燃燒爐共進行過五次完整的試驗，溫度紀錄如圖三、四、五、六、七所示，茲以第一次試驗為例，說明試驗結果的計算方法如後：

#### 1. 平均溫昇

首先求出溫度曲線和座標軸所圍成的面積，設  $\Delta T$  為溫昇， $\Delta t$  為時間差，經計算求得圖三的  $\Sigma \Delta T \Delta t$  為  $5344.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$

$$\text{平均溫昇} = \frac{\Sigma \Delta T \Delta t}{\text{試驗進行時間}} = \frac{5344.5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}}{11 \text{ hr} \times 60 \text{ min/hr}} = 8.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 2. 空氣加熱所得之總熱量

熱風出口面積,  $A = 0.116 \text{ m}^2$  (參考圖一)

熱風平均風速,  $V = 5.6 \text{ m/sec}$

∴ 平均風量,  $Q = A \times V = 0.65 \text{ m}^3/\text{sec}$

又常溫 ( $27^\circ\text{C}$ ) 下的空氣密度 ( $\rho$ ) 和比熱 ( $C_p$ ) 分別為:

$$\rho = 1.1774 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1.0057 \text{ KJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \text{ (參考資料 7)}$$

$$\begin{aligned} \text{總熱量, } H &= 5344.5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min} \times 1.1774 \text{ kg/m}^3 \\ &\quad \times 0.65 \text{ m}^3/\text{sec} \times 1.0057 \text{ KJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \\ &\quad \times 60 \text{ sec/min} \\ &= 247000 \text{ KJ} \\ &= 59100 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

### 3. 熱效率

稻殼的熱值為  $3542 \text{ Kcal/kg}$  <sup>(5)</sup>

試驗的稻殼重:  $42 \text{ kg}$

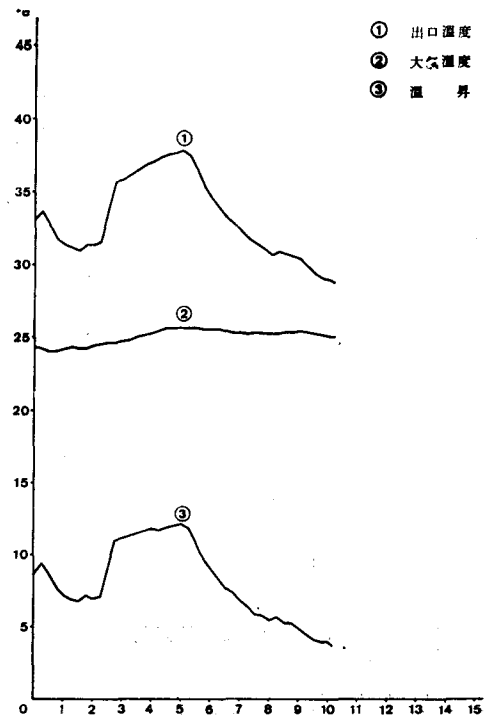
$$\text{熱效率, } \eta = \frac{59100 \text{ Kcal}}{3542 \text{ kcal/kg} \times 42 \text{ kg}} = 39.7\%$$

表一所列為各次試驗之結果, 其中  $\gamma = A_1/A_2$ ,

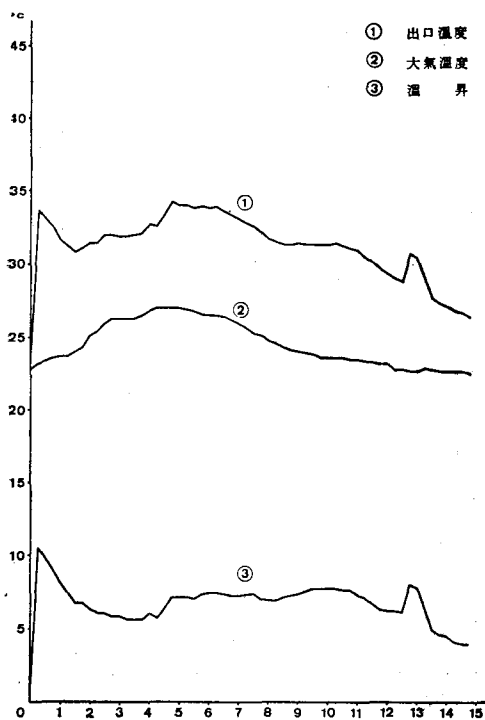
$A_1$ : 空氣進入稻殼層之面積

$A_2$ : 空氣進入燃燒爐壁間之面積

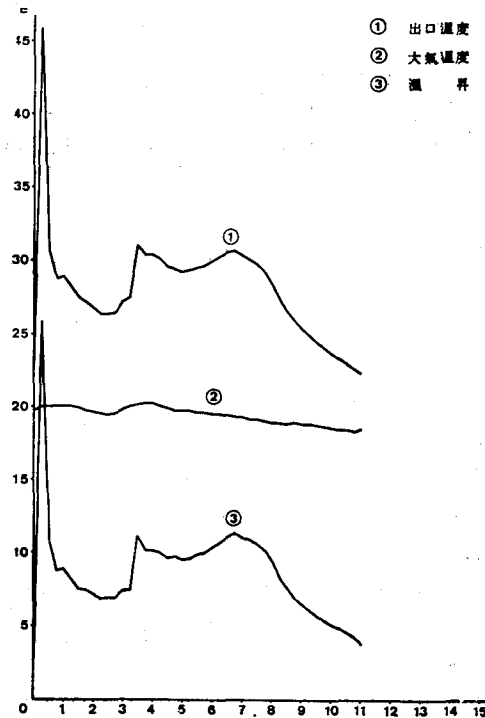
如圖二所示,  $A_1$  即為燃燒桶的截面積 ( $A_1 = 2642 \text{ cm}^2$ ),  $A_2$  即為所有方形孔的面積總和, 為一變數。 $\theta$  為底部活動門開啓的角度 (參考圖一)。



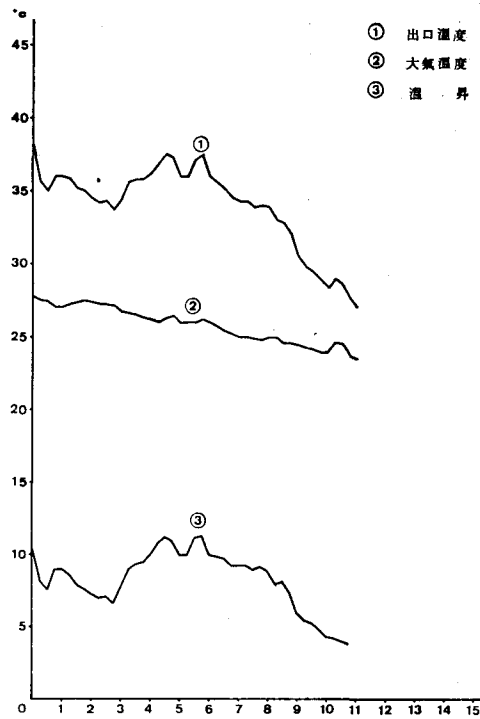
送風時間, 小時 (08:50~19:00)  
圖四 第二次試驗溫度變化圖 (70年10月20日)



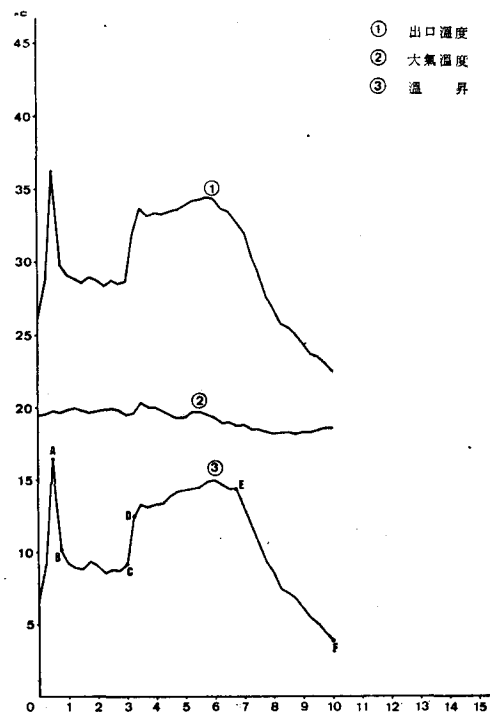
送風時間, 小時 (17:00~04:00)  
圖三 第一次試驗溫度變化圖 (70年10月1日)



送風時間, 小時 (09:15~24:00)  
圖五 第三次試驗溫度變化圖 (70年11月5日)



送風時間，小時 (08:45~19:45)  
圖六 第四次試驗溫度變化圖 (70年11月17日)



送風時間，小時 (10:30~20:30)  
圖七 第五次試驗溫度變化圖 (70年11月27日)，溫昇曲線中的 A. B. C. D. E. F 在討論一節中另有說明。

表一 試驗結果

| 試驗編號                    | 1                         | 2                         | 3                         | 4                         | 5                         |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 日期                      | 70, 10, 1                 | 70, 10, 20                | 70, 11, 5                 | 70, 11, 17                | 70, 11, 27                |
| 測試時間                    | 660 min.<br>(17:00~04:00) | 610 min.<br>(08:50~19:00) | 885 min.<br>(09:15~24:00) | 660 min.<br>(08:45~19:45) | 600 min.<br>(10:30~20:30) |
| 稻穀重量<br>公斤              | 42                        | 40                        | 45                        | 45                        | 43                        |
| $\gamma^*$              | —**                       | —**                       | 4.97                      | 4.97                      | 5.36                      |
| $\theta^*$              | —**                       | —**                       | 10°                       | 5°                        | 0°                        |
| 風量<br>m <sup>3</sup> /s | 0.65                      | 0.43                      | 0.78                      | 0.71                      | 0.53                      |
| 大氣平均溫度<br>°C            | 25.9                      | 25.0                      | 24.5                      | 19.4                      | 19.1                      |
| 出口平均溫度<br>°C            | 34.0                      | 33.2                      | 31.2                      | 28.2                      | 29.8                      |
| 平均溫昇<br>°C              | 8.1                       | 8.2                       | 6.7                       | 8.8                       | 10.7                      |
| 總熱量<br>Kcal             | 59112                     | 36857                     | 78774                     | 69482                     | 58072                     |
| 熱效率<br>%                | 39.7                      | 26.0                      | 49.4                      | 43.6                      | 38.1                      |
| 濃煙持續時間<br>小時            | 3                         | 2.5                       | 2.7                       | 2.75                      | 2.0                       |
| 備註<br>(有否加頂蓋)           | 有                         | 有                         | 否                         | 否                         | 否                         |

\*  $\gamma, \theta$  見文中說明。

\*\* 加頂蓋時， $\gamma$  和  $\theta$  不作為風量的控制因素。

## 六、討 論

### 1. 溫昇變化與燃燒的關係

要利用稻殼的能源，對於稻殼燃燒的情形勢必充分了解才行，下面以 11 月 27 日第五次試驗的溫昇曲線來說明典型的燃燒進行的情形（參考圖七的溫昇曲線）。

稻殼點燃後，溫昇迅速升高至 A 點，然後又很快下降至 B，由 B 至 C 這段期間，溫昇變化不大，隨後又陡然上升至 D 點，D 以後溫昇又恢復平穩，雖有變化，但幅度不大，一直到 E 為止，又迅速下降，然後一直降至 F 點試驗終止。整個燃燒過程可分為三個階段，由開始至 C 為初次燃燒階段，由 D 至 E 為回燒階段，由 E 至 F 為降溫階段。我們都知道，燃燒的三個要素是可燃物、助燃物和燃點，當空氣量增加時，助燃的效果較佳，燃燒一定較易進行，溫度自然也跟着升高。通常初次燃燒的溫度都較低，但是在開始的 A 點為什麼會有如此高的溫昇呢？因為在稻殼引燃的過程，即開始點燃時，抽風機不能開動，以免火源熄滅，所以由瓦斯爐所放出的熱量大多儲存在稻殼堆中，俟抽風機一經開動後，熱量大量逸出，因而造成溫度的急遽上升，另外又由於底部的稻殼與大氣的接觸面積大，氧的供應充足，也易造成燃燒，因此 A 點會有如此高的溫昇主要就是這兩個因素形成的。等到與外界接觸的底部稻殼燒完後，燃燒層上升，與外界的接觸面積減小，所以溫昇立刻降了下來。第一階段的初次燃燒，稻殼燃燒的主要部份是揮發性物質，所以溫昇不高<sup>(1)</sup>。D 點表示回燒開始，燃燒層由最高點又逐漸往下降，此時稻殼燃燒的部份主要為炭分，所以溫昇會較高，雖然不會比 A 點高，但是在整個燃燒過程中，這是一個明顯而較長的高溫昇階段，故本文以後所引用的最高溫昇即是指 D 至 E 這個階段中的最大值，而不是 A 點。至於 E 點以後，則因回燒結束，可燃物大都已燃燒完畢，所以不會繼續加溫，而開始降低溫度，一直至試驗終結為止，以上是稻殼燃燒與溫昇變化的情形。

### 2. 通過稻殼層空氣量的比例對試驗結果的影響

$r = A_1/A_2$ ， $A_1$  為燃燒桶的截面積， $A_2$  為開啓的方形孔面積的總和（見圖二），當  $r$  值小時，即表示通過稻殼層的空氣量減少，因而稻殼燃燒時所需的氧氣也跟着減少。相對地進入燃燒桶與爐壁之間的冷空氣增多（雖然冷空氣流經燃燒桶周圍時

有加熱的作用，但溫昇有限），因此出來的熱風溫度會降低。 $\theta$  值大時，表示門開啓的角度大，也就是進入的冷空氣量增多，同時通過燃燒桶的空氣也就相對地減少，其結果也是使熱風溫度降低，以下分別就試驗時不同的  $r$  和  $\theta$  值分別討論：a. 對風量，b. 對溫昇變化，c. 對熱效率的影響。

#### a. $r, \theta$ 對風量的影響

以第 3、4 兩次試驗作比較， $r$  相同，而第 3 次的  $\theta$  為  $10^\circ$ ，第 4 次的  $\theta$  為  $5^\circ$ ，結果是第 3 次的風量較第 4 次大（參考表一），所以底部的門開啓的角度大時，風量會增大。再加入第 5 次來比較，發現  $r$  值增大時，風量更小，這是因為空氣大多從中央的圓孔進入，由其它入口進入的量為減少，所以風量會變小，因此  $r$  值增大或  $\theta$  值減小均會使風量減小。

#### b. $r, \theta$ 對溫昇變化的影響

有關溫昇圖中幾個重要的變化，如峯點、谷點的位置、回燒持續的時間以及降溫的梯度等都是影響燃燒情況的因素，而  $r, \theta$  又為這些因素的控制因子，以下將五次試驗由溫昇變化形成的燃燒特性整理成表二，第一、二次雖不以  $r, \theta$  為控制因子，亦同時列出以供參考。

由表二所列出的結果，我們可以發現，第 5 次的  $r$  最大， $\theta$  最小，即通過稻殼層的空氣量最多，所以燃燒速度快，為  $4.3 \text{ kg/hr}$ 。而大量空氣通過稻殼層的結果，使其平均溫昇達到最高，為  $10.7^\circ\text{C}$ 。但因為燒得快，所以回燒持續的時間並不長，至少比起第 3 次試驗的 5.5 小時要短得多，僅 3.25 小時。又因燃燒得快，所以降溫也快，其降溫梯度為  $-3.23^\circ\text{C/hr}$ ，比第 3、4 次都快，所以同樣的時間內，它的溫度降得最多。

綜合以上結果，得知：當  $r$  較大，而  $\theta$  較小時，即通過稻殼層的空氣量增加時，(1)溫昇較高，(2)回燒持續的時間較短，(3)降溫梯度較大及(4)燃燒速率較快。

#### c. $r, \theta$ 對熱效率的影響

由表一列出的結果，我們知道第 3 次試驗的熱效率最高，為  $49.4\%$ ，其次為第 4 次的  $43.6\%$ ，最後為第 5 次的  $38.1\%$ （第 1、2 次不列入比較），由前面的討論，我們已經知道，第 3 次試驗的燃燒速率最慢為  $3.0 \text{ kg/hr}$ （參考表二），而第 3 次試驗的  $r$  最小， $\theta$  最大，亦即通過稻殼層的空氣量最少，所以通過稻殼層的空氣量減少時，燃燒速率會

表二 燃燒特性

| 試驗編號          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 測試時間<br>分     | 660   | 610   | 885   | 660   | 600   |
| $\gamma$      | —     | —     | 4.97  | 4.97  | 5.36  |
| $\theta$      | —     | —     | 10°   | 5°    | 0°    |
| 開始回燒時的溫昇，°C   | 11.2  | 12.5  | 7.1   | 11.1  | 13.3  |
| 到達回燒所需時間，小時   | 4.5   | 2.75  | 4.75  | 3.5   | 3.5   |
| 回燒持續時間<br>小時  | 1.25  | 2.25  | 5.5   | 3.25  | 3.25  |
| 降溫梯度<br>°C/小時 | -1.48 | -1.56 | -0.82 | -1.76 | -3.23 |
| 平均溫昇<br>°C    | 8.1   | 8.2   | 6.7   | 8.8   | 10.7  |
| 燃燒速率<br>kg/hr | 3.8   | 3.9   | 3.0   | 4.1   | 4.3   |

減慢，根據灰化爐試驗(3)，燃燒速率較慢時，較易燒成白灰，亦即稻殼燃燒較完全，所以熱效率會較高。因此若要提高熱效率只要將 $\gamma$ 減小， $\theta$ 增大，使燃燒緩慢進行即可。

## 七、結 論

綜合以上結果，可得到下列結論：

1. 稻殼燃燒可分為：(1)初次燃燒，(2)回燒及(3)降溫三個階段，其中以回燒階段的溫昇為最高。
2. 通過稻殼層的空气量愈大時（即 $\gamma$ 愈大， $\theta$ 愈小時）：(1)風量愈小，(2)溫昇愈高，(3)回燒持續的時間愈短，(4)降溫梯度愈大，(5)燃燒速率愈快，(6)熱效率愈低。

高的熱效率，在利用上並不是全然有利，因為熱效率高，一定要降低溫昇才行，而溫昇過低的話，就無法配合實用上的需要，所以合理的運用方式應該是溫昇和熱效率兩者相互配合，控制燃燒速率，使在一定的時間內，能維持我們所要求的溫昇。

稻殼燃燒試驗進行迄今，是將實驗室操作的小型燃燒桶加以擴充成適於實用的燃燒爐，此次試驗的單桶燃燒爐，是跨進實用性燃燒爐的第一步，要改進的地方尚多，諸如溫昇、風量的控制、熱效率的提高、基本資料的建立、燃燒時放出的廢氣處理等問題，還有待進一步的試驗與研究。

## 八、參考資料

1. 李廣武、楊志成，1978. 稻殼燃燒爐之設計與性能試驗，農工學報 24 卷第 2 期
2. 吳柏青 1980. 稻殼能源利用研究報告，臺大農機系，尙未發表
3. 柯俊年 1980. 稻殼燃燒及其能源利用，臺大農機系，尙未發表
4. 陳貽倫、張谷川，1980. 稻殼之燃燒研究，省農林廳 69 年度農機研究發展與示範推廣彙報
5. Beagle, E. C. 1978. Rice Husk Conversion to energy. FAO.
6. Houston, D. F. 1972. Rice Hulls, a chapter in "Rice Chemistry and Technology", Edited by D. F. Houston, Published by American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, U. S. A.
7. Natl. Bur. Stand. (U. S.) Circ., 1955.

## 九、誌 謝

本文承行政院農業發展委員會農業重點研究計劃經費支持，及國家科學委員會獎助。

張谷川、吳枝榮、賴國興、吳柏青諸位協助製造、試驗及調查工作，在此致謝。