

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學科

080824

埋鍋造爐，火箭爐的研究與探討

學校名稱：連江縣立東引國民小學

作者： 小六 王皓宇 小五 陳奕文 小四 劉辰新 小四 林映岑	指導老師： 陳志宥
---	--------------

關鍵詞：野炊、燃燒、煙囪效應

摘要

火箭爐是聯合國在非洲地區推動的節能設備，其原理類似中國傳統燒柴的爐灶。我們回到學校在安全的角落搨風點火，利用三個鐵罐的組合自製火箭爐，並改變了我們對燃燒的想法，原來三個罐子的簡單構造就能讓煮飯變得簡單、容易。動手改裝讓火箭爐的高度有所改變，爐口彷彿火箭般噴射火焰，還伴隨著強勁氣流的「咻、咻」聲，原來煙囪效應、二次燃燒及白努利定律能讓燃燒變得不一樣。

壹、研究動機

水煮蛋就是我們的研究動機。一個週末午後，老師和學生相約在校園後山野餐，點心就是一盒生雞蛋，老師說野餐就要像野餐，要善用大自然環境中的素材，然後又說了很多老師小時候在戶外撿柴野炊的趣事。面對一頭霧水的學生，老師請大家搬石塊架鍋子，撿柴火燒水煮蛋。野炊活動果然搞得大家灰頭土臉，師生 5 人合吃一顆蛋真是狼狽，卻也啟發我們再次挑戰的動機

煮泡麵就是我們的研究動機。下一個週末午後，師生相約在山林裡，點心就是煮泡麵，老師說小時候常常看到阿兵哥就這樣在戶外填飽肚子。大家搬石塊架鍋子，撿柴火燒水煮泡麵。分不清麵條是煮熟的？還是泡爛的？太美味了！所以老師一口都沒有吃到。

校園、山林中隨處都是枯枝、毬果可以用來野炊，可是真正難找的是石頭。我們想要到處去野炊，有什麼辦法能滿足我們的願望呢？炊煙裊裊之際，很多人擔心我們在玩火自焚，但我們一致的說法是：我們在進行自然課中認識植物構造、熱對物質的改變、空氣與燃燒的延伸學習。

於是，探討「火箭爐」的主題就這樣出現了！

貳、研究目的

- 一、瞭解火箭爐製作的基本原理。
- 二、比較不同可燃物在火箭爐中的燃燒狀態。
- 三、比較可燃物在不同燃燒室高度在燃燒時的效果。
- 四、掌握戶外使用火箭爐的最佳策略。

參、研究設備及器材

一、燃燒材料

本次實驗所使用的枯枝及毬果是緊鄰社區的小山坡上撿拾，枯枝主要來自於相思樹和紫珠樹；毬果則全部都是台灣二葉松的落果。撿拾枯枝的尺寸不拘，以直徑不超過自己的食指為原則。毬果則要求為鱗片張開的雌毬果，大小不拘。木屑是蒐集學校鄰居以漂流木製作家具時所回收的木屑。本次實驗所使用的木質顆粒由原木製成，具備水分低、比表面積大、低灰份的特點，能提供高燃燒效益，基於好奇心驅使，透過網路購買用於實驗。上述燃燒材料如圖 1 所示。



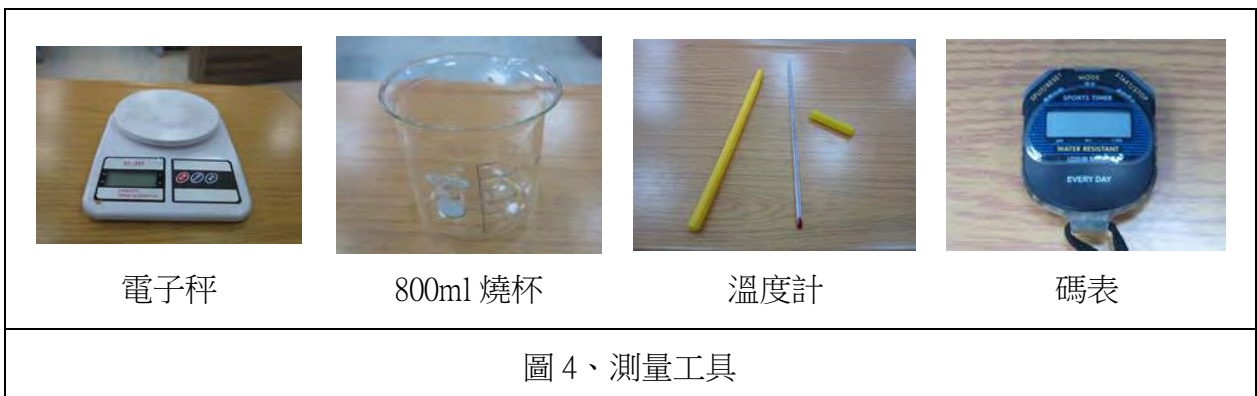
二、製作及輔助工具

本研究之製作工具頗為尖銳，剪裁後鐵片也呈現銳利之狀態，須搭配製作工具(見圖 2)進行；燃燒中高溫容易造成危險，亦須使用輔助工具(見圖 3)才能安全進行。



三、 測量工具

為測量各項燃燒實驗所需時間、可燃物重量及溫度的改變，本研究主要採用下列各工具，如圖所示。



四、 火箭爐製作流程

蒐集三個鐵罐，以開罐器、鐵皮剪刀加工。最大的作為外罐、次大的作為內罐、最小的作為側罐。組合時內罐與外罐相鄰的兩面需間隔 2 公分，組合後填入砂礫作為保溫層，最後以塑鋼土封填縫隙收尾。



肆、研究過程或方法

為了深入了解火箭爐是否真的像參考資料中所描述「噴射火焰」般猛烈，藉由火箭爐內燃燒與開放式燃燒的比較、在火箭爐中燃燒不同可燃物的比較及不同高度燃燒室的比較，獲得更多有關火箭爐的資訊。

燃燒實驗會受到人為操作的影響，因此在展開實驗前必須先累積豐富的生火經驗，以期降低人為影響。而生火的流程由製作定量凡士林火種開始，因燃燒中無法定時定量可燃物，因此添加可燃物的時機以目視爐口火燄為準，實驗結束的時間以火焰消失為原則。

一、開放式火源與火箭爐的燃燒效能

戶外生火常見於電影情節及求生實境節目中，本實驗以回收的鐵罐，透過剪裁與組合製作成火箭爐燃燒撿拾所得枯枝，為了比較火箭爐與開放形式的燃燒情形，進而設計以下實驗。

(一) 實驗原理

火箭爐形式的燃燒能提升燃燒效能在於「煙囪效應」及「二次燃燒」。其中煙囪效應是指空氣在鐵罐內垂直的上升或下降，導致空氣加強對流的現象。火箭爐在燃燒時，鐵罐內的空氣因燃燒快速膨脹而向上竄升，造成下方側罐吸入空氣且循環不斷，使火勢更加猛烈。「二次燃燒」是指一次燃燒時因助燃物不足而未燒完的可燃物向上排出，遇到空氣快速補充，再次產生燃燒反應，不但可以燒掉烟塵，也讓可燃物得到更有效的應用。

(二) 實驗步驟

分別在火箭爐及標記燃燒範圍的鐵盤上固定放置 100 公克的枯枝，以凡士林火種生火後靜置到火焰熄滅，紀錄所需時間及剩餘枯枝的重量。



二、 燃燒素材的差異

本實驗嘗試以不同可燃物在火箭爐中燃燒是否有不同的效果，由生活中容易取得的枯枝、木屑、毬果及木質顆粒作為可燃物。

(一) 實驗原理

燃燒需要可燃物、助燃物及溫度到達燃點三要素同時存在才能發生。實驗主要以碳、氫、氧構成的木材當作可燃物，助燃物則是以空氣來取代，不再另外準備氧氣，幫助燃燒抵達燃點則是由凡士林製作的火種，並以盛水燒杯作為捕捉燃燒能量的工具。可燃物在燃燒狀態的異同，除了與可燃物的性質有關之外，「表面效應」也會影響燃燒的情形，即可燃物與氧氣接觸的面積愈大，燃燒的反應速率愈快。

(二) 實驗步驟

燃燒前，我們準備 800ml 燒杯盛水紀錄原始溫度，取 300 公克素材為可燃物置於火箭爐中，以凡士林火種生火後於火箭爐頂架設燒杯，燃燒結束時測量溫度同時計錄所需時間。



三、 燃燒室高度

新聞畫面中常見工廠高聳的煙囪，因此我們推論煙囪能改變燃燒的結果。在本實驗中嘗試改變火箭爐內罐的高度，比較在不同燃燒室高度在燃燒時是否產生影響。

(一) 實驗原理

除了前面提到的「煙囪效應」，依白努利定律：流體的速度越快，壓力就越小。當內罐開始燃燒時，內罐的空氣快速從上方排出，形成內罐壓力小於罐外的情形，此時壓力大的一方會向壓力小的一方產生推力，空氣會沿側罐進入內罐加速燃燒。

(二) 實驗步驟

以鐵皮剪刀及鉗子製作圓周相同，高度為分別為 5.5 公分、13 公分、20.5 公分的內罐，另製作連接器固定以減少兩內罐間隙散溢熱量並提升火箭爐的穩定性。依可燃物及不同高度之實驗設定展開燃燒，燃燒結束時測量溫度並計錄所需時間。



伍、 研究結果

利用所準備的器材，我們成功的完成了火箭爐，並利用自製的火箭爐執行第肆章內我們所設計的實驗。

一、 開放式火源與火箭爐的燃燒效能

在開放式範圍及火箭爐內燃燒 100 公克的枯枝，紀錄燃燒時間及剩餘枯枝重量。

實驗結果如下表所示：

表 1、開放式火源及火箭爐燃燒實驗紀錄表

	開放式火源		火箭爐	
	燃燒時間	剩餘燃料	燃燒時間	剩餘燃料
第一次	12 分鐘	14 公克	12 分鐘	0 公克
第二次	9 分鐘	20 公克	11 分鐘	3 公克
第三次	9 分鐘	84 公克	9 分鐘	3 公克

二、 燃燒素材的差異

在火箭爐內以 4 種素材進行燃燒實驗，可燃物重量為 300 公克。另以 800ml 盛水燒杯捕捉能量，燃燒結束時測量溫度並計錄所需時間。實驗結果如下：

表 2、不同可燃物燃燒實驗紀錄表

	枯枝		木屑		毬果		木質顆粒	
	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間
第一次	85°C	19 分鐘	52°C	23 分鐘	65°C	21 分鐘	70°C	20 分鐘
第二次	76°C	25 分鐘	57°C	28 分鐘	78°C	18 分鐘	63°C	23 分鐘
第三次	76°C	22 分鐘	51°C	27 分鐘	59°C	21 分鐘	74°C	19 分鐘
平均	79°C	22 分鐘	53.3°C	26 分鐘	67.3°C	20 分鐘	69°C	20.6 分

三、 燃燒室高度

利用內罐連接裝置改變燃燒室高度，繼續以 4 種素材進行燃燒實驗，可燃物重量為 300 公克。以 800ml 盛水燒杯捕捉能量，燃燒結束時測量溫度並計錄所需時間。實驗結果如下：

表 3、不同可燃物及高度燃燒實驗紀錄表

		枯枝		木屑		毬果		木質顆粒	
		溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間
20.5 公分	第一次	85°C	19 分鐘	52°C	23 分鐘	65°C	21 分鐘	70°C	20 分鐘
	第二次	76°C	25 分鐘	57°C	28 分鐘	78°C	18 分鐘	63°C	23 分鐘
	第三次	76°C	22 分鐘	51°C	27 分鐘	59°C	21 分鐘	74°C	19 分鐘
	平均	79°C	22 分鐘	53.3°C	26 分鐘	67.3°C	20 分鐘	69°C	20.6 分

續表 3、不同可燃物及高度燃燒實驗紀錄表

		枯枝		木屑		毬果		木質顆粒	
		溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間
26 公分	第一次	63°C	18 分鐘	60°C	18 分鐘	48°C	21 分鐘	53°C	16 分鐘
	第二次	61°C	19 分鐘	58°C	18 分鐘	61°C	18 分鐘	50°C	19 分鐘
	第三次	54°C	17 分鐘			52°C	17 分鐘	44°C	19 分鐘
	平均	59.3°C	18 分鐘	59°C	18 分鐘	53.6°C	18.6 分鐘	49°C	18 分鐘
33.5 公分	第一次	47°C	15 分鐘	41°C	15 分鐘	53°C	13 分鐘	46°C	14 分鐘
	第二次	51°C	15 分鐘	41°C	16 分鐘	43°C	14 分鐘	49°C	15 分鐘
	第三次	54°C	19 分鐘	38°C	18 分鐘	52°C	14 分鐘	47°C	11 分鐘
	平均	50.6°C	16.3 分鐘	40°C	16.3 分鐘	49.3°C	13.6 分鐘	47.3°C	13.3 分鐘
41 公分	第一次	46°C	11 分鐘	37°C	12 分鐘	42°C	8 分鐘	46°C	9 分鐘
	第二次	44°C	14 分鐘	40°C	11 分鐘	40°C	12 分鐘	40°C	12 分鐘
	第三次	40°C	11 分鐘	45°C	12 分鐘	52°C	12 分鐘	45°C	15 分鐘
	平均	43.3°C	12 分鐘	40.6°C	11.6 分鐘	44.6°C	10.6 分鐘	43.6°C	12 分鐘

四、 加熱能力

依實驗數據，換算出每 800ml 的水在 1 分鐘的加熱能力整理如下表：

表 4、加熱能力一覽表

	枯枝	木屑	毬果	木質顆粒
20.5 公分	3.59°C	2.05°C	3.36°C	3.34°C
26 公分	3.29°C	3.27°C	2.88°C	2.72°C
33.5 公分	3.10°C	2.45°C	3.60°C	3.55°C
41 公分	3.60°C	3.5°C	4.20°C	3.6°C

陸、 討論

一、 開放式火源與火箭爐的燃燒效能

我們將兩種燃燒實驗所得到的時間、剩餘可燃物重量至成點狀分布圖如下：

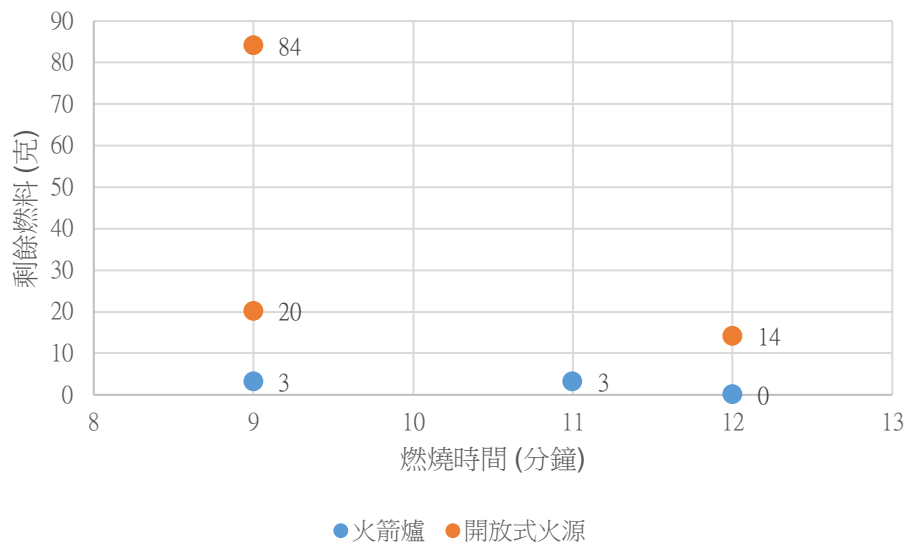


圖 9、燃燒實驗點狀分布圖

在使用火箭爐進行燃燒時，我們只要用一個火種就能完成生火，除了不需另外搨風，火焰的高度能超過內罐，在枯枝的爆鳴聲中可以察覺到輕微的「呼、呼」聲。在燃燒過程結束後，曾經出現全部燒完的情形，即便有沒燒完的實驗，剩下未燃燒的枯枝也僅佔 3%。

在進行開放式的燃燒時，我們採取井字堆疊方式，同樣只以一個火種完成生火，燃燒時的火焰高度相對於火箭爐矮了許多，枯枝爆鳴聲中沒有聽見「呼、呼」聲。燃燒後檢視剩餘的可燃物，發現沒燒完的枯枝都是堆疊在最底下的，占原來枯枝的 14%~20%；其中還有一次因為燃燒中的枯枝塌陷導致熄滅，剩下了大部分的可燃物。

比較火箭爐和開放式火源的燃燒，發現在起火階段，火箭爐僅需將枯枝任意投入即可完成生火與燃燒；開放式火源則需要設計堆疊才能順利設置火種。在燃燒中的火焰高度及火勢火箭爐明顯大於開放式燃燒。兩種實驗所花的時間雖然無明顯差異，但是以剩餘的枯枝重量來看，開放式火源要燒完相同的可燃物顯然需要更多時間。排除第三次開放式燃燒的實驗結果，雖然二者的加熱速度差異不大，而開放式火源顯然要花更多心思去顧火。

這二種實驗的可燃物都是枯枝，但是因為火箭爐在燃燒是在內罐的垂直空間進行，煙囪效應所引發的對流效果使燃燒更順利。枯枝經過高溫產生了可燃的「木煤氣」，而在火箭爐中的木煤氣會因內罐限制隨著氣流向上竄升，沒燒完的木煤氣在內罐頂端遇到補充的空氣，形成了「二次燃燒」；反觀開放式火源的枯枝在燃燒中散逸出來的氣體，一部分被火燒掉以外，仍有另一部份隨著上升的氣流飄到空中。因此，我們推論火箭爐的燃燒是明顯優於開放式火源的。

二、 燃燒素材的差異

枯枝的粗細在燃燒初期是會影響生火的，所以我們將細的枯枝先投入火箭爐內罐，等到可燃物開始燃燒之後，枯枝的粗細與大小並不影響燃燒的進行。枯枝在火箭爐中的燃燒實驗雖然不是速度最快的可燃物，卻是眾多次的燃燒實驗中，唯一一次讓燒杯裡的水沸騰的一次。

木屑吸收水氣造成的影響出乎意料，曾經在兩天未淋到雨的狀態下，因為木屑太潮濕而使燃燒中的火焰熄滅；也曾經以大太陽曝曬後的木屑立即進行實驗，僅以9分鐘便燒完全部可燃物。由於大部分的實驗都是夜間及陰天進行，所以燃燒較乾燥木屑的數據並未採用於本次研究之中。由於吸附水氣的緣故，擁有最大比表面積的木屑卻是4種可燃物中最難燃燒的材料，其他可燃物的實驗中，添加可燃物可增長火勢；燃燒中添加木屑反而會讓火勢變小。這或許是木屑組燒最慢、加熱能力最弱的原因。

毬果鱗片打開及含有油脂的特性讓燃燒實驗能快速的展開，但是單一毬果的體積較大，在投入火箭爐內罐的時候常常會卡住，反而需要藉由外力(用腳踩)將毬果鱗片閉合後才比較好投入。毬果在火箭爐中的燃燒效率最高，加熱能力雖然僅優於木屑，實際上與木質顆粒有僅有些微差距。

木質顆粒相較於枯枝雖然有較大的比表面積，但是由於質地緊實，是 4 種可燃物中最難被點燃的一種，但點燃後耐燒火勢穩定，具有除非燒完不然難以熄滅的特性。木質顆粒的燃燒表現在燃燒速度上僅次於毬果，加熱能力僅次於枯枝，雖然不是可燃物中的最佳材料，但體積小易於保存攜帶的特性相當適合在戶外炊事活動中使用。

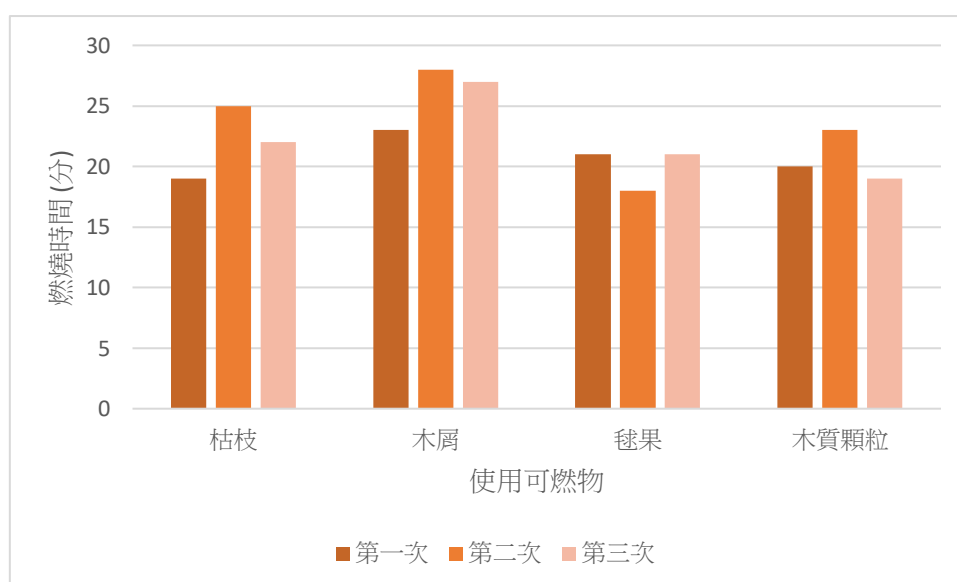


圖 10、燃燒時間直條圖

實驗中最快完成燃燒的時間是 19 分鐘，分別出現在枯枝組一次實驗及木質顆粒第三次實驗；燃燒最慢的實驗時間是 28 分鐘，出現在木屑第二次實驗。將各種可燃物燃燒後取得的時間數據加以平均，燒完 300 公克的可燃物，枯枝組需要 22 分鐘，木屑組需要 26 分鐘，毬果組需要 20 分鐘，木質顆粒組需要 20.6 分鐘。實驗結果顯示燃燒速度毬果 > 木質顆粒 > 枯枝 > 木屑。

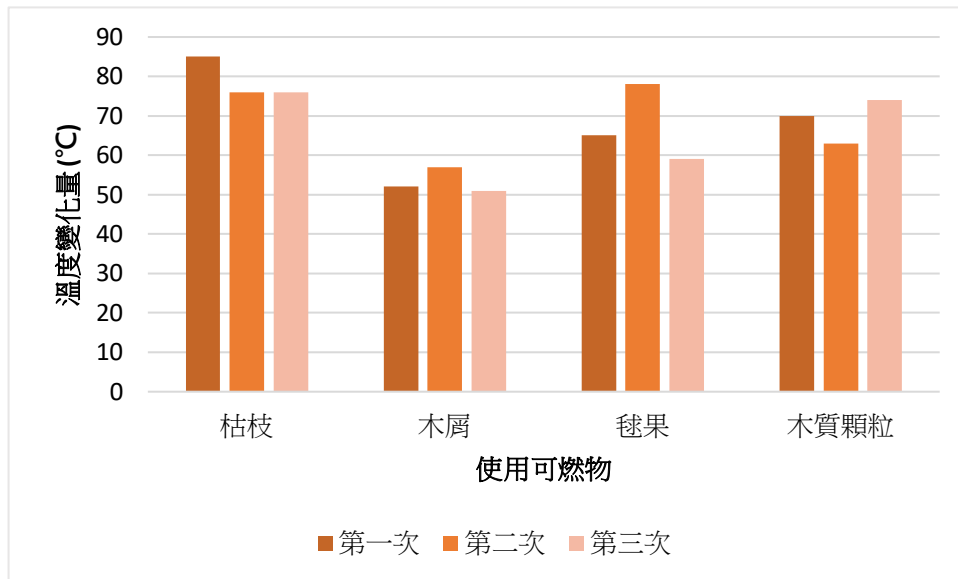


圖 11、溫差直條圖

880ml 燒杯裡測量到溫差最高為 85 度，出現在枯枝第一次實驗；最低溫差為 51 度，出現在木屑組第三次實驗。將各種可燃物燃燒後取得的溫差數據加以平均，燒完 300 公克的可燃物，枯枝組溫差 79 度，木屑組溫差 53 度，毬果組 67.3 度，木質顆粒組 69 度。實驗結果顯示在加熱效果方面枯枝 > 木質顆粒 > 毬果 > 木屑。

四種可燃物中，木屑燃燒實驗的頗有可議的地方，雖然三次實驗取得的溫差及時間數據相近，但每次操作時都能明顯感受木屑富含濕氣，即便是曬過太陽，等到實驗時又因為前一夜的濕氣而讓燃燒的過程充滿變異。四種可燃物自實驗初期起便一直存放在同一場域，而另外三種可燃物則無明顯差異。

三、 燃燒室高度

藉由自製連接器增加內罐的高度時，燃燒現象出現改變，我們將實驗所得數據製作折線圖，以分析討論改變高度所造成的改變。

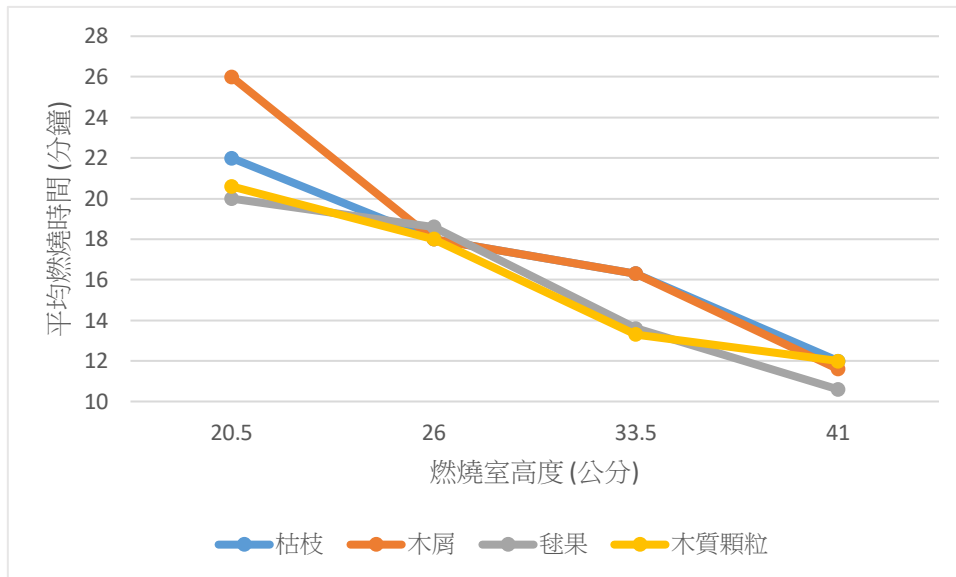


圖 12、燃燒速度折線圖

在枯枝組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，平均燃燒時間縮短 4 分鐘，燃燒速度增加 18%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，平均燃燒時間縮短 1.7 分鐘，燃燒速度增加 23%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，平均燃燒時間縮短 4.3 分鐘，燃燒速度增加 26%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，燃燒速度也隨之增加。

在木屑組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，平均燃燒時間縮短 8 分鐘，燃燒速度增加 30%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，平均燃燒時間縮短 1.7 分鐘，燃燒速度增加 9%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，平均燃燒時間縮短 4.7 分鐘，燃燒速度增加 29%。我們發現：木屑組在火箭爐內罐高度增加時，燃燒速度也隨之增加。

在毬果組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，平均燃燒時間縮短 1.4 分鐘，燃燒速度增加 7%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，平均燃燒時間縮

短 5 分鐘，燃燒速度增加 27%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，平均燃燒時間縮短 3 分鐘，燃燒速度增加 22%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，毬果燃燒速度也隨之增加。

在木質顆粒組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，平均燃燒時間縮短 2.6 分鐘，燃燒速度增加 7%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，平均燃燒時間縮短 4.7 分鐘，燃燒速度增加 26%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，平均燃燒時間縮短 1.3 分鐘，燃燒速度增加 10%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，燃燒速度也隨之增加。

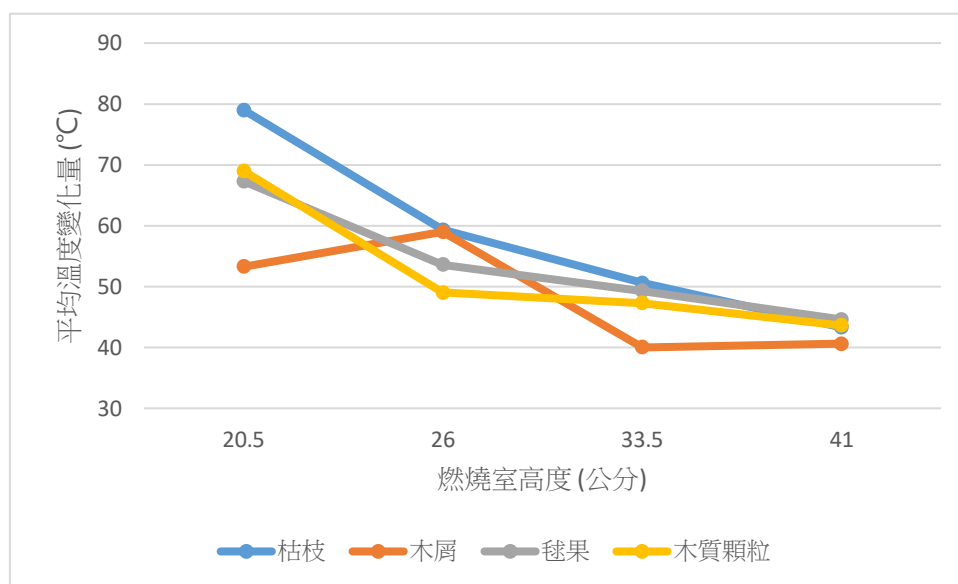


圖 13、加熱能力折線圖

在枯枝組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，加熱能力下降 25%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，加熱能力下降 15%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，加熱能力下降 14%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，加熱能力則呈現下降趨勢。

在木屑組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，加熱能力上升 11%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，加熱能力下降 32%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，加熱能力上升 2%。我們發現：木屑組在火箭爐內罐高度增加時，但是加熱能力沒有呈現持續下降趨勢。

在毬果組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，加熱能力下降 20%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，加熱能力下降 8%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，加熱能力下降 10%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，加熱能力則呈現下降趨勢。

在木質顆粒組的實驗中，內罐高度自 20.5 公分增加至 26 公分時，加熱能力下降 29%；內罐高度自 26 公分增加至 33.5 公分時，加熱能力下降 3%；內罐高度自 33.5 公分增加至 41 公分時，加熱能力下降 8%。我們發現：當火箭爐內罐高度增加時，加熱能力則呈現下降趨勢。

本實驗中四種可燃物在增加內罐高度後，均產生加速燃燒的效果。雖然因為可燃物的不同導致加速幅度不同，但是隨著燃燒室高度增加，燃燒所需的時間逐漸縮短是一致的趨勢，因此在依實驗的結果顯示燃燒室越高，燃燒速度越快。故推論火箭爐燃燒室增加高度有助於加速燃燒。改變燃燒室高度對可燃物燃燒的效果中：枯枝組最高能增加 45% 的速度；木屑組最高能增加 32% 的；松果組最高能增加 47% 的速度；木質顆粒組能增加 42% 的速度。

除了木屑組在自 20.5 公分增加至 26 公分及 33.5 公分增加至 41 公分時，出現了加熱效果提升的現象外；枯枝、毬果及木質顆粒三種可燃物都呈現加熱效果隨燃燒速度上升而下降的情形。數量不變的可燃物在猛烈的火勢中更快燃燒完，意味著燒杯能藉由熱傳導捕捉熱量的時間縮短。增加燃燒室高度使得燃燒效率更好，自罐外進入的空氣在燃燒後快速的膨脹，產生快速向上的氣流。原本又會散逸的能量此時以更快的速度進入空氣中，熱量與燒杯接觸的時間減短，因此推論增加燃燒室高度不利加熱。

四、綜合討論

火箭爐的收納其實可將側罐置於內罐，內罐置於外罐中，因此其實具備質輕高效的優點，且燃料來源可以是大自然中無限循環的生質能源，相當適合作為戶外炊事工具來使用。

木屑難以從自然環境中取得，雖然有較大的比表面積，但木屑的乾燥程度對燃燒過程有相當大的影響，雖然因此不建議將木屑作為火箭爐使用的燃料；木質顆粒具備環保、易於保存、體積小好攜帶的特性，但是必須透過購買才有辦法取得，對於沒有賺錢能力的小學生來說，木質顆粒比較適合做為陰天或雨天找不到可燃物時的備案。

隨著內罐高度的增加，我們發現煙囪效應變得更強烈，燃燒室內火焰呈現旋轉，還出現能將側罐口的火焰吸入內罐的畫面。雖然無法記錄白煙的數量，但是白煙減少的情形真的非常明顯，因此推論有更多可燃氣體在燃燒過程中被使用。

木屑組的加熱能力在不同高度中並未呈現一致的趨勢；枯枝、毬果及木質顆粒的加熱能力均在燃燒室 26 公分高時呈現下滑，之後又會隨著高度增加而逐漸提升加熱能力。雖然在枯枝及木質顆粒的提升有限，但是在毬果組則是有明顯的效果。

毬果在 41 公分時能提供最佳加熱能力，但是消耗毬果的速度也是最快，因此需要提供大量的可燃物才能滿足快速完成炊事活動的需求；枯枝在本研究中雖會隨著燃燒室高度改變而影響燃燒速度，但是對於加熱能力卻沒有大幅提升，因此以燃燒室 20.5 公分的火箭爐燃燒枯枝，熱源有最長的時間進行加熱，反而能發揮節省燃料的效果。

柒、 結論

依據研究結果及討論，本章節提出結論如下：

- 一、 以火箭爐進行燃燒實驗，在生火的難易度、燃燒速度及加熱效果都優於開放式燃燒。
- 二、 四種燃料在未經改造的火箭爐實驗中，燃燒枯枝能獲得最好的加熱效果。
- 三、 火箭爐的燃燒室越高，火勢越顯猛烈，可燃物燒完的時間也越短。
- 四、 火勢猛烈時，能量的散失也加遽。雖然看似能捕捉更多能量，但實際上因為熱傳導的時間變短，反而無法獲得更多能量。
- 五、 欲以火箭爐於戶外進行炊事活動時，若可撿拾可燃物有限時，建議以枯枝為優先，雖然燃燒速度慢，但有較佳加熱效果；若可燃物數量充足，建議以毬果優先並將燃燒室高度增加，雖然會消耗較多可燃物，但是能達到快速加熱的效果。

捌、參考資料及其他

一、中文部分

1. 翰林（2016）。*自然與生活科技*，第二單元，植物的構造。第三單元，熱對物質的改變。第四單元，空氣與燃燒。台北：翰林出版社。
2. 蘇卡奇（2006）。*觀念化學III化學反應*。台北，天下文化。
3. 朱士杰（2013）。「能源農村」的概念與實踐之行動研究（碩士論文）。台東：國立台東大學。

二、網路資源

1. 張慧貞（2016）。*白努利定理的誤解與錯誤應用*。台北，物理雙月刊。取自 http://psroc.org.tw/Bimonth/article_detail.php?classify=c4&cid=20。
2. 陳勝哲（2014）。*教育部 103 年度中小學科學教育計畫專案期末報告*。取自 <http://cse.ncue.edu.tw/sec/upload1/103%E6%88%90%E6%9E%9C%E5%A0%B1%E5%91%8A-2-076%E5%92%8C%E7%9D%A6%E5%9C%8B%E5%B0%8F%E9%99%B3%E5%8B%9D%E5%93%B2.pdf>
3. 謝仁壽（2013）。*木材科學技術*。取自 <http://www.hla.hlc.edu.tw/hlawww/dept04/woodscience/index.htm>

【評語】 080824

自製火箭爐進行燃燒實驗，驗證煙囪效應、二次燃燒及白努利定律體現在燃燒上的效益。建議增加創新性或加強實用性的探討。

作品海報

摘要

燃燒是需要可燃物、助燃物及抵達燃點三元素同時成立，產生光和熱的化學反應。透過火箭爐的輔助，應用煙囪效應、二次燃燒及白努利原理，相同的可燃物能展現更旺盛的火勢，野炊變得易如反掌。



圖一 燃燒三元素

壹、研究動機

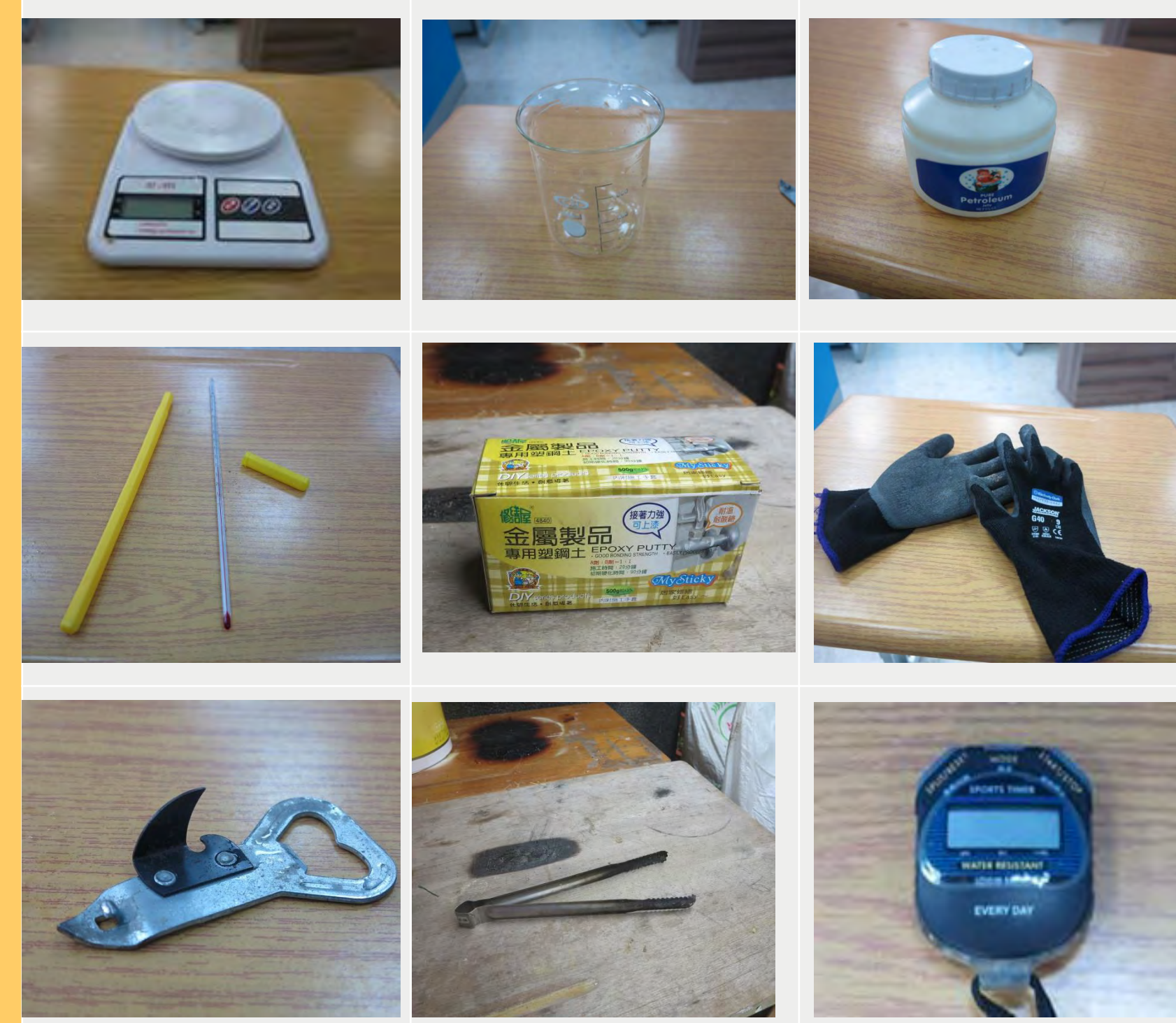
在自然課學習過植物構造、熱對物質的改變及空氣與燃燒主題後，我們嘗試在日常生活中實踐所學。夢想與現實之間的距離，在累積二十多次的失敗後，我們終於成功的完成料理。戶外野炊雖然令人灰頭土臉，卻總是回味無窮，在遊戲中完成實驗，在實驗中追求新知，果然是星火燎原，一發不可停止啊！



圖二 野炊趣

貳、研究目的

- 一、瞭解火箭爐製作的基本原理。
- 二、比較開放式火源與火箭爐的燃燒。
- 三、比較不同可燃物在火箭爐中的燃燒狀態。
- 四、比較可燃物在不同燃燒室高度在燃燒時的效果。
- 五、掌握戶外使用火箭爐的最佳策略。



圖三 測量與輔助工具

參、研究過程或方法

一、製作火箭爐：



圖四 火箭爐製作流程



圖五 燃燒素材

二、比較火箭爐與開放式火源的燃燒：

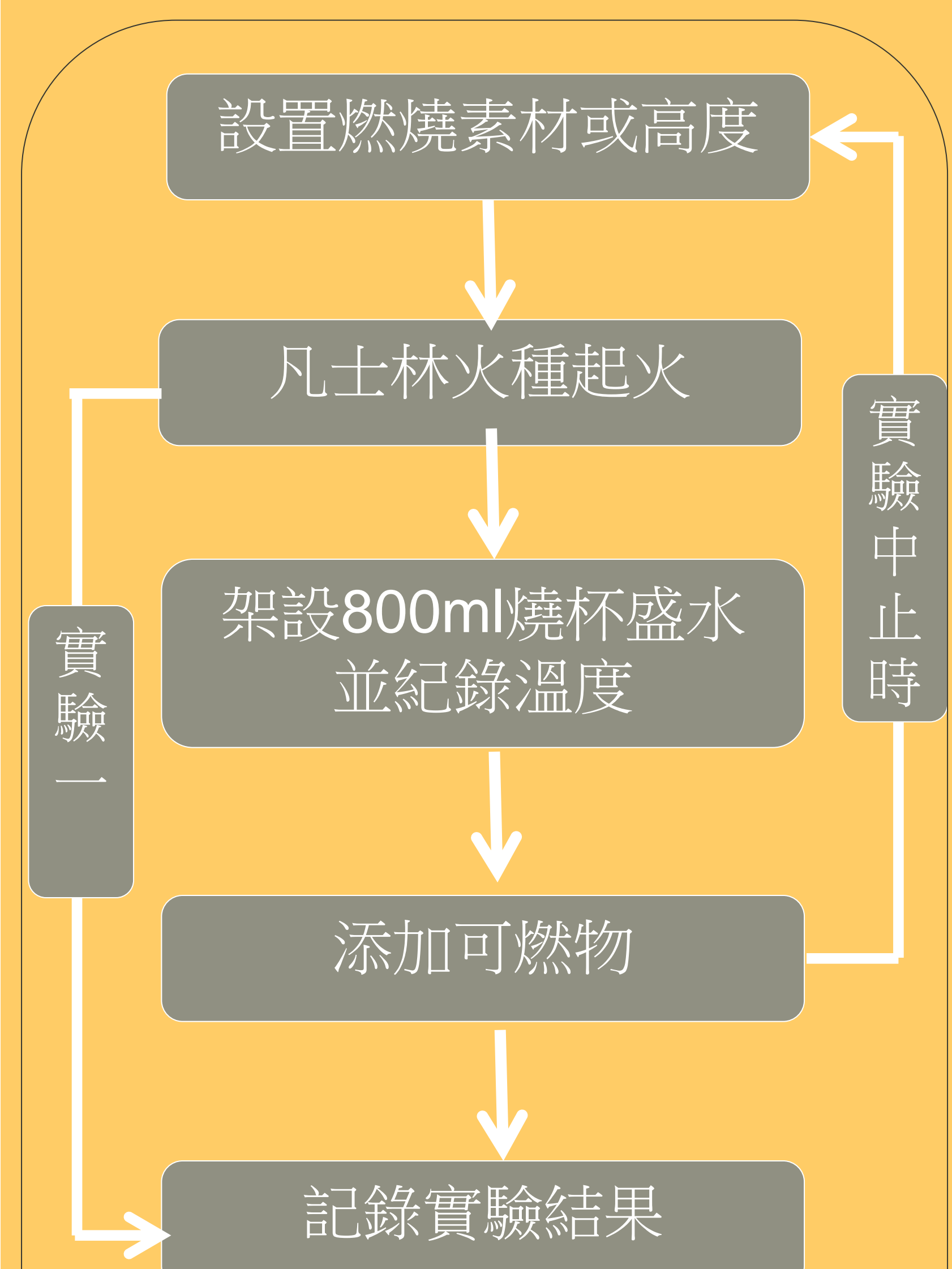
火箭爐罐口直徑16.5公分、燃燒室高度20.5公分在圓直徑16.5公分內進行開放式燃燒。燃燒素材為100g枯枝。

三、不同燃燒素材對燃燒的影響：

1. 準備800ml燒杯盛水並紀錄溫度。
2. 取300公克素材為可燃物置於火箭爐中。
3. 以凡士林火種生火後架設燒杯。
4. 枯枝、木屑、毬果及木質顆粒燃燒結束時測量溫度並計錄所需時間。

四、不同燃燒室高度對燃燒的影響：

1. 以鐵皮剪刀及鉗子製作圓周相同，高度為分別為5.5公分、13公分、20.5公分的內罐，
2. 製作連接器固定以減少兩內罐間隙散溢熱量並提升火箭爐的穩定性。
3. 取300公克素材為可燃物置於火箭爐中。
4. 以凡士林火種生火後架設800ml燒杯盛水燒杯。
5. 燃燒結束時測量溫度並計錄所需時間。



圖六 燃燒實驗流程圖

肆、觀察與研究結果

	開放式火源		火箭爐	
	燃燒時間	剩餘燃料	燃燒時間	剩餘燃料
第一次	12分鐘	14公克	12分鐘	0公克
第二次	9分鐘	20公克	11分鐘	3公克
第三次	9分鐘	84公克	9分鐘	3公克

表一 燃燒實驗紀錄表



圖七 火箭爐與開放式火源

一、開放式火源與火箭爐的燃燒效能：

火箭爐進行燃燒時，只要用一個火種就能完成生火，不需另外搨風，火焰的高度能超過內罐，在枯枝的爆鳴聲中可以察覺到輕微的「呼、呼」聲。在燃燒過程結束後，曾經出現全部燒完的情形，即便有沒燒完的實驗，剩下未燃燒的枯枝也僅佔3%。

開放式的燃燒時，我們採取井字堆疊方式，同樣以一個火種完成生火，燃燒時的火焰高度相對於火箭爐矮了許多，枯枝爆鳴聲中沒有聽見「呼、呼」聲。燃燒後檢視剩餘的可燃物發現沒燒完的枯枝都是堆疊在最底下的，占原來枯枝的14%~20%；其中還有一次因為燃燒中的枯枝塌陷導致熄滅，剩下了大部分的可燃物。

二、燃燒素材的差異：

枯枝的粗細在燃燒初期是會影響生火的，所以我們將細的枯枝先投入火箭爐內罐，等到可燃物開始燃燒之後，枯枝的粗細與大小並不影響燃燒的進行。

最大比表面積的木屑是4種可燃物中最難燃燒的材料，燃燒中添加木屑反而會讓火勢變小。自起火到燃燒結束，不時伴隨濃濃白煙。

毬果鱗片打開及含有油脂的特性讓燃燒實驗能快速的展開，但是在投入火箭爐內罐的時候常常會卡住，反而需要用腳踩將毬果鱗片閉合後才比較好投入。

木質顆粒體積小、質地緊實，是4種可燃物中最難被點燃的一種，但點燃後耐燒火勢穩定，具有除非燒完不然難以熄滅的特性。

		枯枝		木屑		毬果		木質顆粒	
		溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間
20.5公分	第一次	85℃	19分鐘	52℃	23分鐘	65℃	21分鐘	70℃	20分鐘
	第二次	76℃	25分鐘	57℃	28分鐘	78℃	18分鐘	63℃	23分鐘
	第三次	76℃	22分鐘	51℃	27分鐘	59℃	21分鐘	74℃	19分鐘
	平均	79℃	22分鐘	53.3℃	26分鐘	67.3℃	20分鐘	69℃	20.6分

表二 不同可燃物燃燒實驗紀錄表

三、燃燒室高度的差異：

枯枝組的實驗中，內罐高度自20.5公分增加至26公分時，平均燃燒時間縮短4分鐘，燃燒速度增加18%，加熱能力下降25%；內罐高度自26公分增加至33.5公分時，平均燃燒時間縮短1.7分鐘，燃燒速度增加23%，加熱能力下降15%；內罐高度自33.5公分增加至41公分時，平均燃燒時間縮短4.3分鐘，燃燒速度增加26%，加熱能力下降14%。

木屑組的實驗中，內罐高度自20.5公分增加至26公分時，平均燃燒時間縮短8分鐘，燃燒速度增加30%，加熱能力上升11%；內罐高度自26公分增加至33.5公分時，平均燃燒時間縮短1.7分鐘，燃燒速度增加9%，加熱能力下降32%；內罐高度自33.5公分增加至41公分時，平均燃燒時間縮短4.7分鐘，燃燒速度增加29%，加熱能力上升2%。

毬果組的實驗中，內罐高度自20.5公分增加至26公分時，平均燃燒時間縮短1.4分鐘，燃燒速度增加7%，加熱能力下降20%；內罐高度自26公分增加至33.5公分時，平均燃燒時間縮短5分鐘，燃燒速度增加27%，加熱能力下降8%；內罐高度自33.5公分增加至41公分時，平均燃燒時間縮短3分鐘，燃燒速度增加22%，加熱能力下降10%。

木質顆粒組的實驗中，內罐高度自20.5公分增加至26公分時，平均燃燒時間縮短2.6分鐘，燃燒速度增加7%，加熱能力下降29%；內罐高度自26公分增加至33.5公分時，平均燃燒時間縮短4.7分鐘，燃燒速度增加26%，加熱能力下降3%；內罐高度自33.5公分增加至41公分時，平均燃燒時間縮短1.3分鐘，燃燒速度增加10%，加熱能力下降8%。

四、平均加熱能力：

我們將16組實驗的溫差除以燃燒時間，換算出加熱能力如右表。加熱能力最好組別是毬果41公分組；加熱能力最差的是木屑20.5公分組。各種燃燒素材在不同高度中，加熱能力差異最大的是木屑組，達1.45℃；次之是毬果組，差異達1.32℃；再來是木質顆粒，差異達0.88℃；相對之下，差異最小的是枯枝組，差異為0.5℃。

我們將四種可燃物在不同高度中所得實驗的溫差除以燃燒時間，得到平均加熱能力：毬果每分鐘加熱3.41℃、枯枝每分鐘加熱3.4℃、木質顆粒每分鐘加熱3.27℃、木屑每分鐘加熱2.63℃。

		枯枝		木屑		毬果		木質顆粒	
		溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間	溫差	時間
26公分	第一次	63℃	18分鐘	60℃	18分鐘	48℃	21分鐘	53℃	16分鐘
	第二次	61℃	19分鐘	58℃	18分鐘	61℃	18分鐘	50℃	19分鐘
	第三次	54℃	17分鐘			52℃	17分鐘	44℃	19分鐘
	平均	59.3℃	18分鐘	59℃	18分鐘	53.6℃	18.6分	49℃	18分鐘
33.5公分	第一次	47℃	15分鐘	41℃	15分鐘	53℃	13分鐘	46℃	14分鐘
	第二次	51℃	15分鐘	41℃	16分鐘	43℃	14分鐘	49℃	15分鐘
	第三次	54℃	19分鐘	38℃	18分鐘	52℃	14分鐘	47℃	11分鐘
	平均	50.6℃	16.3分	40℃	16.3分	49.3℃	13.6分	47.3℃	13.3分
41公分	第一次	46℃	11分鐘	37℃	12分鐘	42℃	8分鐘	46℃	9分鐘
	第二次	44℃	14分鐘	40℃	11分鐘	40℃	12分鐘	40℃	12分鐘
	第三次	40℃	11分鐘	45℃	12分鐘	52℃	12分鐘	45℃	15分鐘
	平均	43.3℃	12分鐘	40.6℃	11.6分	44.6℃	10.6分	43.6℃	12分鐘

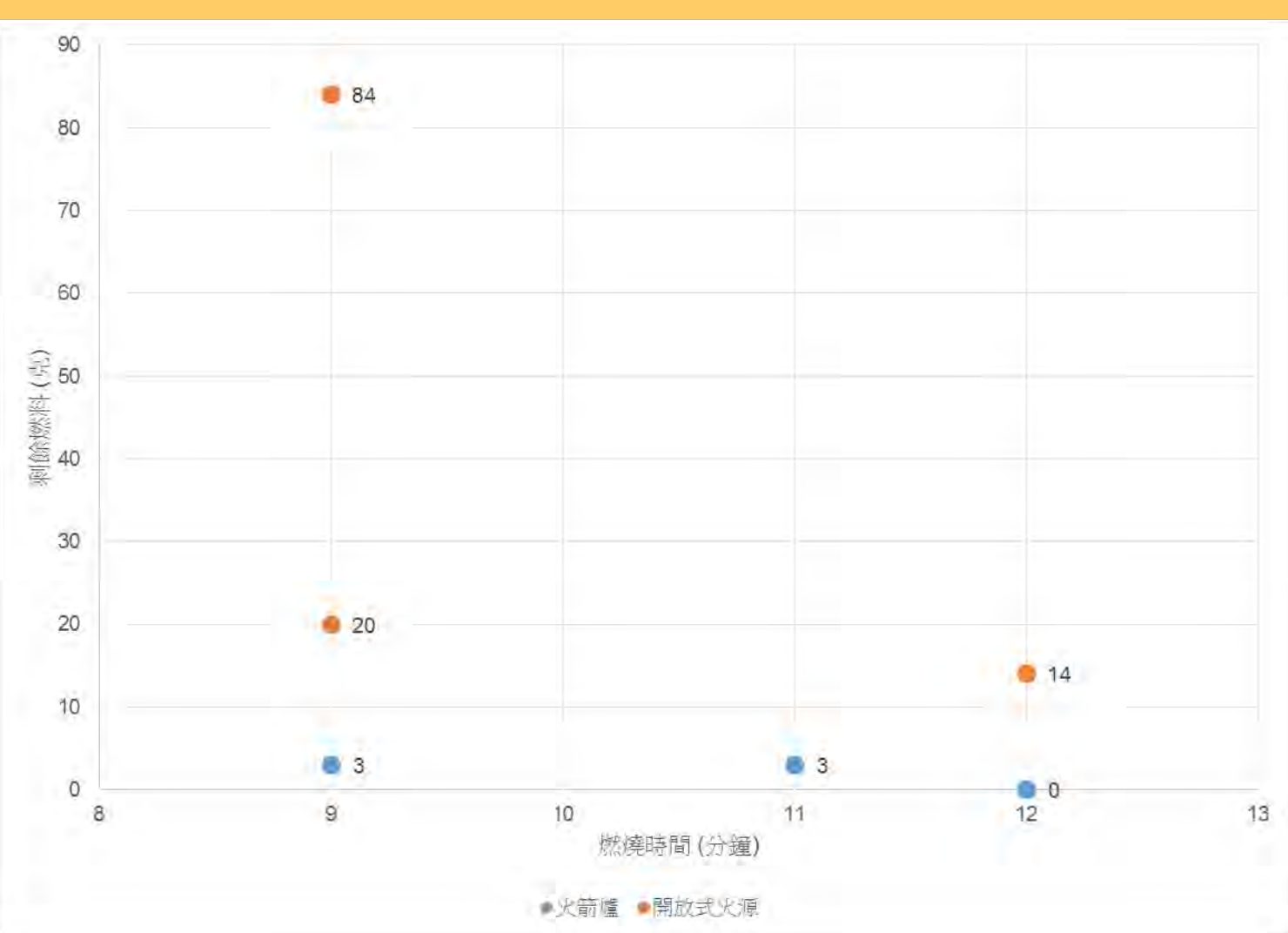
表三 不同燃燒室高度實驗紀錄表



圖八 火箭爐改裝圖

	枯枝	木屑	毬果	木質顆粒
20.5公分	3.59℃	2.05℃	3.36℃	3.34℃
26公分	3.29℃	3.27℃	2.88℃	2.72℃
33.5公分	3.10℃	2.45℃	3.60℃	3.55℃
41公分	3.60℃	3.5℃	4.20℃	3.60℃

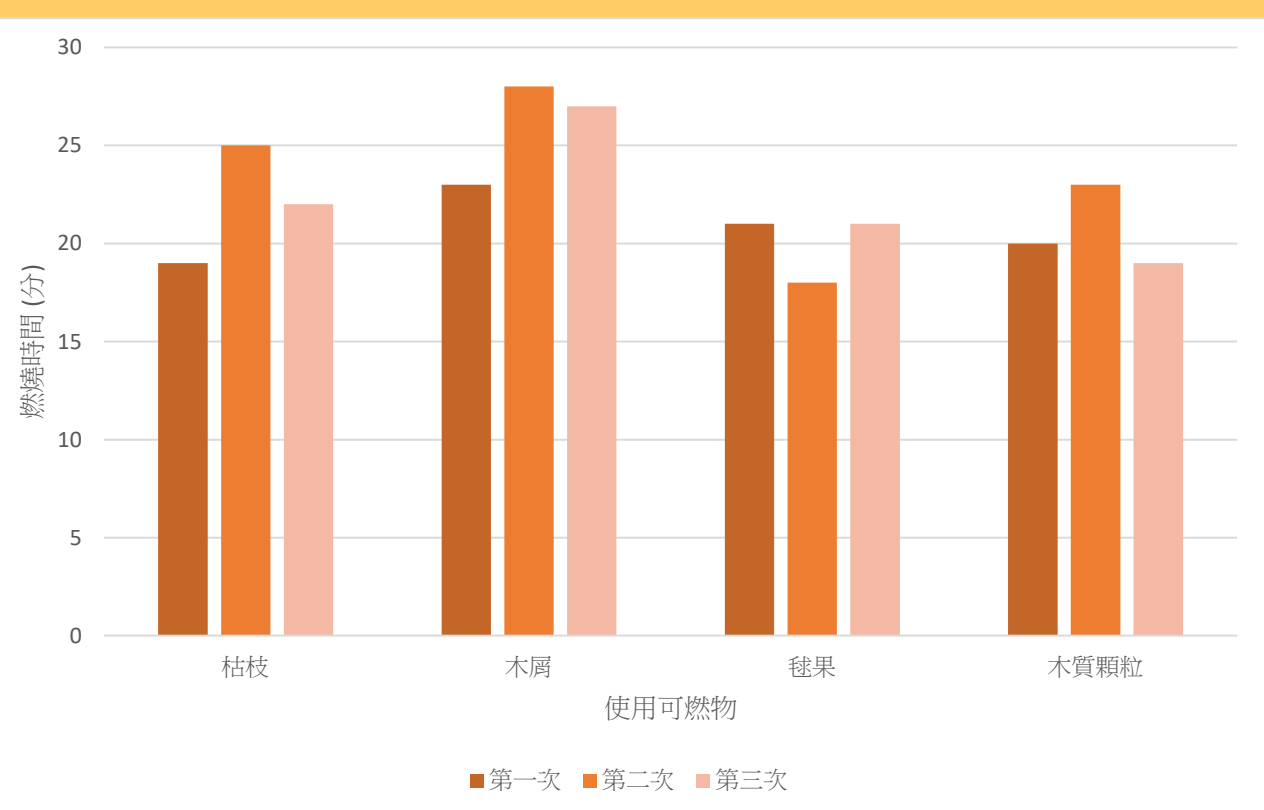
表四 加熱能力一覽表



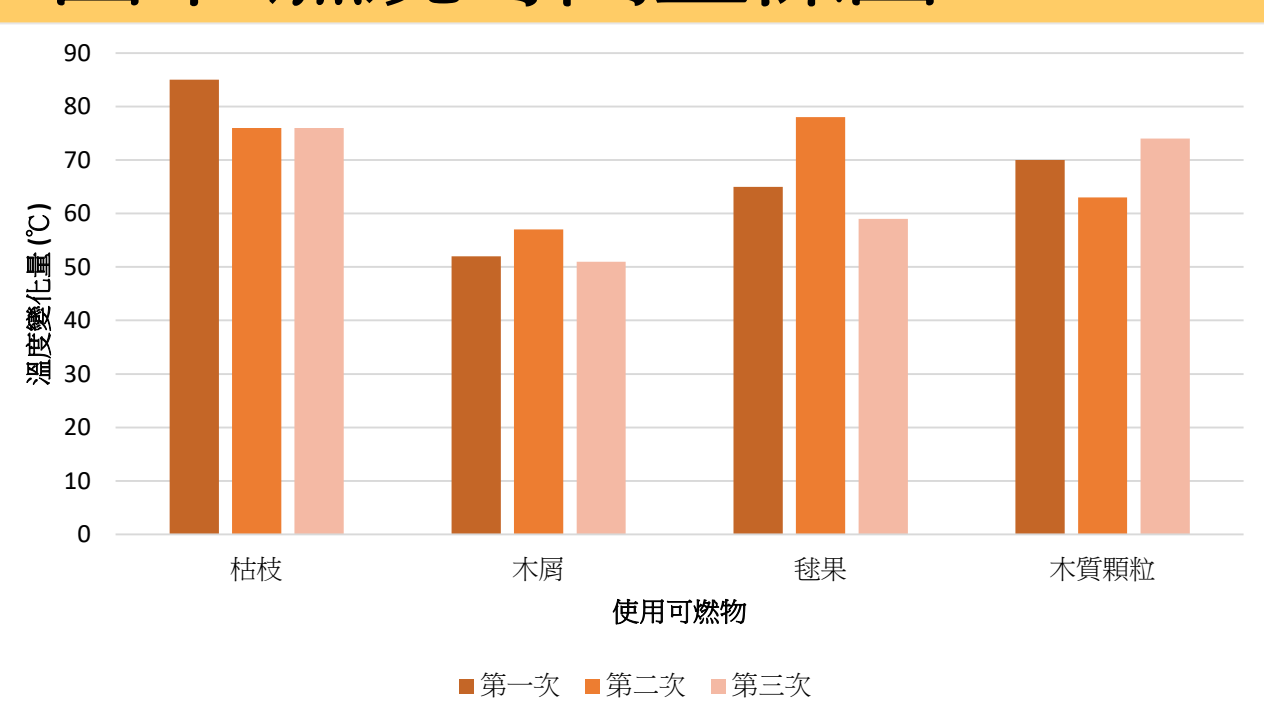
圖九 燃燒實驗點狀分布圖

伍、討論(實驗一)：

- 一、起火時，火箭爐隨意將枯枝投入即可；開放式火源須將枯枝設計堆疊才能設置火種。
- 二、燃燒時，火箭爐伴隨呼、呼聲響；開放式火源則無。
- 三、燃燒中，火箭爐的火焰高度大於開放式火源。
- 四、以火箭爐為輔助工具時，燃燒速度大於開放式火源。
- 五、燃燒反應終止時，開放式火源剩餘較多可燃物。



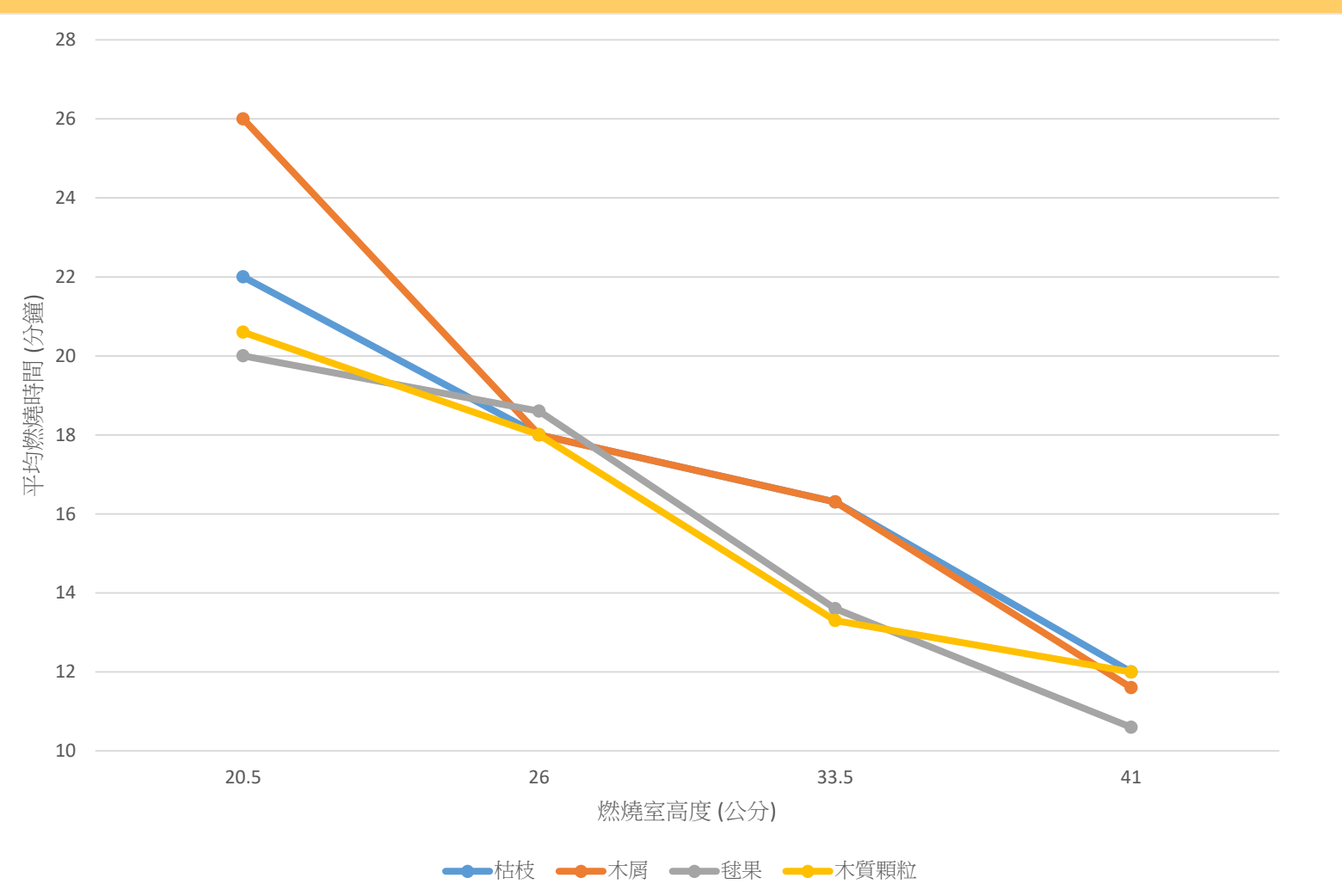
圖十 燃燒時間直條圖



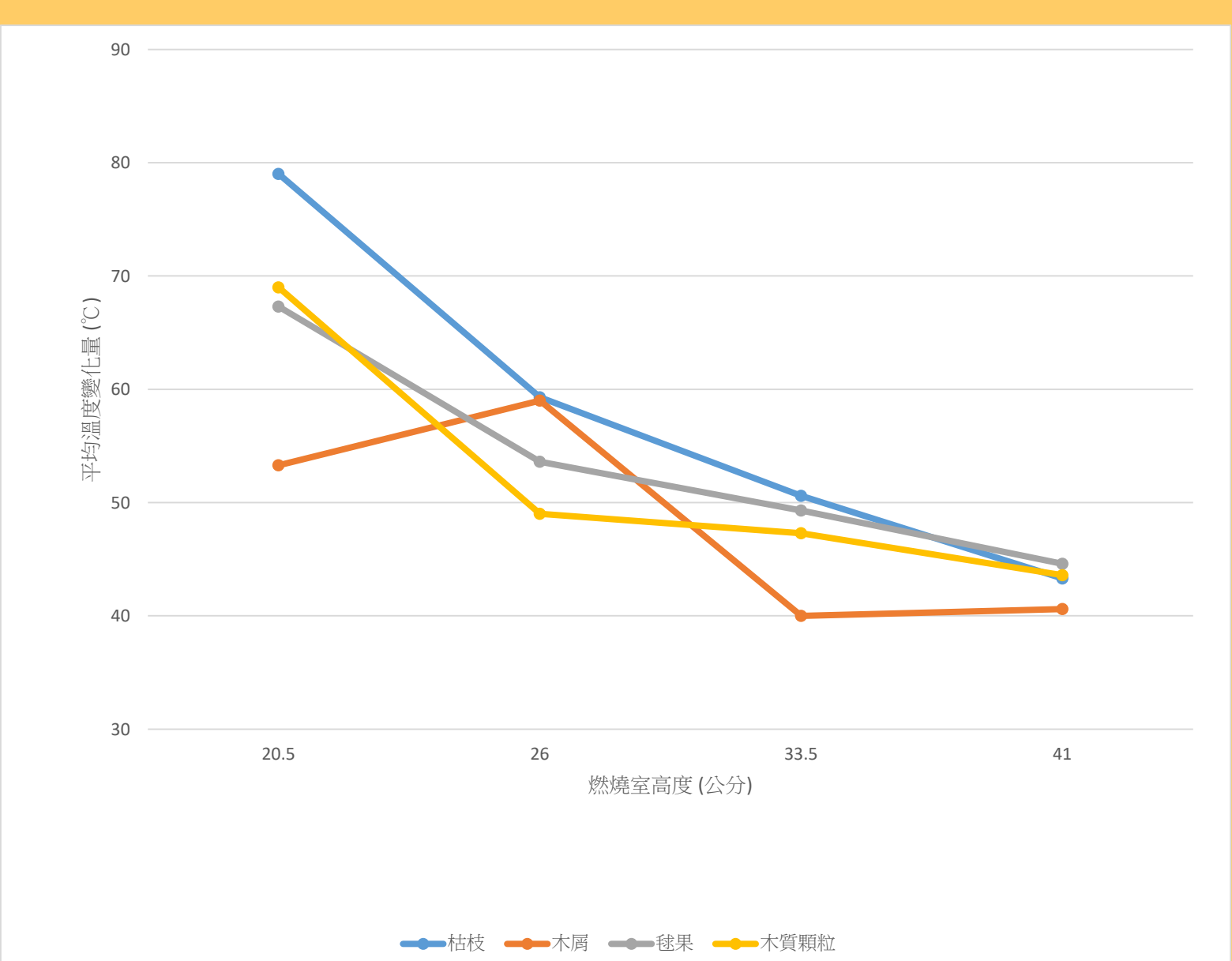
圖十一 溫差直條圖

伍、討論(實驗二)：

- 一、實驗結果顯示燃燒速度最快紀錄出現在枯枝組，以19分鐘完成燃燒；最慢的是木屑，需28分鐘。燃燒速度平均結果則是毬果 > 木質顆粒 > 枯枝 > 木屑。
- 二、實驗結果顯示在加熱效果方面，最高溫差出現在枯枝組，達85°C；最低溫差為木屑組，為51°C。加熱效果平均結果則是枯枝 > 木質顆粒 > 毬果 > 木屑。
- 四、四種素材質地不同，燃燒情形也各有差異，毬果與木質顆粒在燃燒速度及加熱效果中實驗結果相近；枯枝及木屑與其他素材有明顯差別。
- 五、相同儲存條件下，木屑易受環境濕氣影響，當含水量高的時候，燃燒速度及加熱效果明顯下降；枯枝、毬果、木質顆粒則無明顯差別。



圖十二 燃燒速度折線圖



圖十三 加熱能力折線圖

伍、討論(實驗三)：

- 一、火箭爐燃燒室增加高度有助於加速燃燒。改變燃燒室高度對可燃物燃燒的效果中：枯枝組最高能增加45%的速度；木屑組最高能增加32%的速度；松果組最高能增加47%的速度；木質顆粒組能增加42%的速度。
- 二、枯枝、毬果及木質顆粒三種可燃物都呈現加熱效果隨燃燒速度上升而下降的情形。數量不變的可燃物在猛烈的火勢中更快燃燒完，意味著燒杯能藉由熱傳導捕捉熱量的時間縮短。增加燃燒室高度使得燃燒效率更好，自罐外進入的空氣在燃燒後快速的膨脹，產生快速向上的氣流。原本又會散逸的能量此時以更快的速度進入空氣中，熱量與燒杯接觸的時間減短，因此推論增加燃燒室高度不利加熱。
- 三、研究中除木質顆粒以購買取得，枯枝、木屑及毬果皆為免費取得，木屑有最大比表面積卻因吸收水氣特性影響燃燒，因此戶外野炊建議以枯枝及毬果進行。
- 四、將實驗二與實驗三的16組實驗數據換算成單位時間的加熱能力，毬果在41公分時能提供最佳加熱能力，但是消耗毬果的速度也是最快。以20.5公分的火箭爐燃燒枯枝，熱源有最長的時間進行加熱，反而能發揮節省燃料的效果。

陸、結論

- 一、以火箭爐進行燃燒實驗，在生火的難易度、燃燒速度及加熱效果都優於開放式燃燒。
- 二、四種燃料在未經改造的火箭爐實驗中，燃燒枯枝能獲得最好的加熱效果。
- 三、火箭爐的燃燒室越高，火勢越顯猛烈，可燃物燒完的時間也越短。
- 四、火勢猛烈時，能量的散失也加遽。雖然看似能捕捉更多能量，但實際上因為熱傳導的時間變短，反而無法獲得更多能量。
- 五、欲以火箭爐於戶外進行炊事活動時，若可撿拾可燃物有限時，建議以枯枝為優先，雖然燃燒速度慢，但有較佳加熱效果；若可燃物數量充足，建議以毬果優先並將燃燒室高度增加，雖然會消耗較多可燃物，但是能達到快速加熱的效果。

柒、參考資料及其他

- 一、翰 林（2016）。自然與生活科技，第九冊，第二、三，四單元。台北：翰林出版社。
- 二、蘇卡奇（2006）。觀念化學Ⅲ化學反應。台北，天下文化。
- 三、朱士杰（2013）。「能源農村」的概念與實踐之行動研究。台東：國立台東大學。
- 四、張慧貞（2016）。白努利定理的誤解與錯誤應用。台北，物理雙月刊。
- 五、陳勝哲（2014）。教育部 103 年度中小學科學教育計畫專案期末報告。
- 六、謝仁壽（2013）。木材科學技術。