

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 化學科

最佳(鄉土)教材獎

040216

竹炭的製備與竹碳水

學校名稱： 桃園縣私立新興高級中學

作者：	指導老師：
高二 黃彥鈞	王建民
高二 蔡至翔	
高二 李曄婷	
高二 陳怡臻	

關 鍵 詞：竹炭水、焰色試驗、除氯試驗

壹、摘要

本研究以孟宗竹、苦竹及麻竹三種竹材，經微觀實驗得知 350°C (一次碳化) 前脫出物以水及竹醋液為主，由滴定試驗測得一次碳化之竹炭水 pH=7.69 小於市售竹炭水 (pH=8.30)；因 BET (54.7m²/g) 較小，使每克竹炭除氯量僅有 0.001 克，且焰色試驗不明顯，故進行二次碳化 (750°C)⁽¹⁾。麻竹含水率低 (14.3%) 但結構鬆散 (0.22g/cm³)；苦竹雖結構緻密 (0.43g/cm³) 但含水率高 (30.1%)，兩者體積收縮率大 (25.13% 及 23.11%)，皆不適合燒製竹炭；孟宗竹含水率較低 (10.7%)、體積收縮率小 (19.29%)、結構緻密 (0.42g/cm³)，可得較佳之竹炭。由焰色試驗及原子吸收光譜測試結果證實竹炭水中含有 Ca²⁺、Na⁺、K⁺ 等離子 (與文獻⁽⁶⁾吻合)，但 Ca²⁺ 與 Na⁺ 顏色相近，因此先以 Na₂C₂O₄ 使 Ca²⁺ 沉澱，再進行焰色試驗以確定 Ca²⁺ 存在。由 HCl 滴定試驗得知二次碳化之竹炭水 pH=9.60 且 BET 為 195.2m²/g，使得除氯量較大 (0.021 克)，因此得知竹炭不但可放出鹼性鹽類，也可吸附 Cl⁻，使 pH 值上升；由一次及二次碳化後之竹炭外表長寬變化推知，一次碳化屬纖維間空隙，表面積較小；二次碳化屬纖維內斷裂，表面積較大，這可由表面積 (BET) 測試結果 (54.7 m²/g、195.2m²/g) 得到驗證。

貳、研究動機

由於最近市面上有販售竹炭、竹炭水以及報章雜誌皆大肆報導它的好處，例如：用竹炭淨水能除去水中雜質(如 Cl^- 等)、竹炭水泡茶、牛奶，能使口感變好且能補充日常生活所缺乏的礦物質(如 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等)。而且最近化學課教到原子光譜，老師提到焰色試驗能使不同的原子放出不同的光譜，因此我們對竹炭的製備及竹炭水的研究感興趣，而作進一步的探討。

參、研究目的

- 一、了解不同的竹材對製備竹炭的影響
- 二、了解竹子的年齡對製備竹炭的影響
- 三、了解竹子的部位對製備竹炭的影響
- 四、了解竹材含水率對製備竹炭的影響
- 五、了解升溫速率對製備竹炭的影響
- 六、了解溫度高低對製備竹炭的影響
- 七、找出製備竹炭的較佳條件
- 八、由焰色試驗了解竹炭水 pH 值上升之原因
- 九、了解竹炭水之成分
- 十、了解竹炭對Cl⁻的吸附能力

肆、研究設備及器材

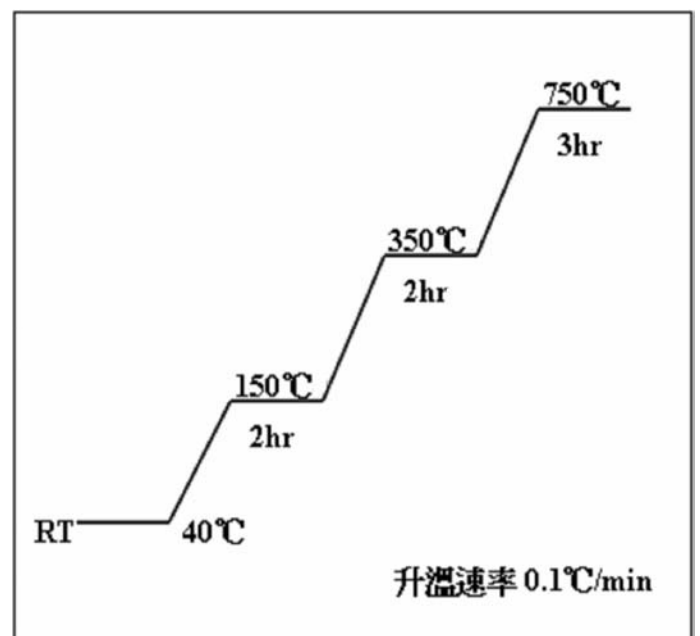
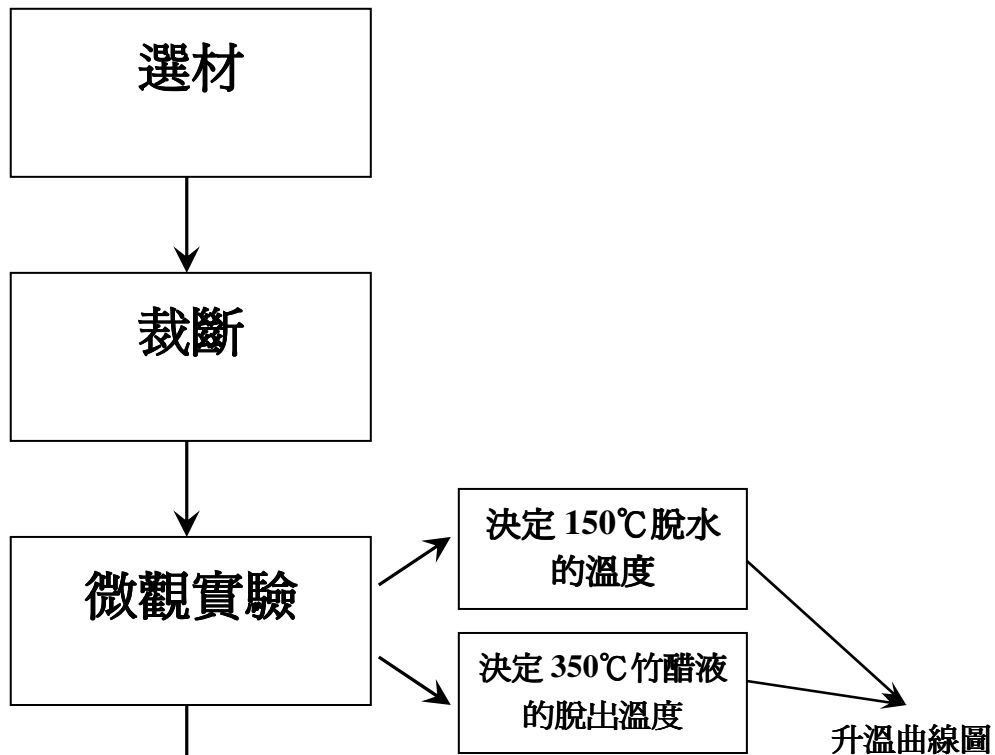
一、研究設備及器材：

自製管狀爐(中央大學)	1 組
k-type 熱電偶感溫棒(中央大學)	2 組
角架	1 個
升降裝置	1 個
硬質試管	10 個
白色無水硫酸銅(檢測水分)	20 克
藍色石蕊試紙(檢測酸性物質)	20 張
500 萬畫素數位相機	1 台
直尺	1 把
烘箱	1 台
高溫爐	1 台
電子秤	1 台
鋸子	2 把
鑷子	2 支
鋁箔紙	3 盒
500ml 燒杯	8 個
250ml 錐形瓶	3 個
100ml 滴定管	2 支
甲基橙酸鹼指示劑	5ml
濾紙	10 張
噴燈	1 個
噴霧器	1 個
寶特瓶	5 個
孟宗竹(四年)	5 根
苦竹(二年)	5 根
苦竹(四年)	5 根
麻竹(四年)	5 根
市售竹炭(林業試驗所製)	10 片
BET ASAP-2000 型(中央大學貴儀中心)	1 台
離心機	1 台

伍、研究過程或方法

一、研究原理：

(一)竹炭製作流程圖：



(二)何謂竹炭⁽¹⁾：

竹炭基本上具有與竹材相同之組織與構造，其孔隙內部表面積依測定方法不同而有或多或少之差異，通常以木炭內部表面積測定方法測試時，每克竹炭之內部表面積高達 300m^2 遠大於木炭，表現出獨特的吸附現象。不同溫度所燒製之竹炭，具有不同的表面性質，用途也不同，如高溫(1000℃以上)燒製之竹炭，具有良好的導電性。

(三)選材要點：

1.選材要點⁽²⁾：

竹子的枝節要長、發育要完全、纖維間密度大、含水率較低的竹材為優。含水率高，燒製時收縮率、變形率高，而不適合燒製竹炭。由於竹材隨竹桿高度、竹節之位置與年齡不同，其組織構造與性質(如密度、含水率、硬度與乾燥速度)也不同，在選材時應加以區分。

2.如何分辨竹子的年齡⁽³⁾：

生長特性上，竹子在出土後三、四個月就成形，竹子的口徑也定形了。一年內的竹子都屬新竹，具白色蠟質粉末，第二年後蠟質脫落，外皮呈油亮的綠色，第三年在生長期間開始有蘚苔寄生，四年以上的竹子外皮會佈滿蘚苔，若要分辨就要比較竹子上蘚苔的顏色(如圖 5-1)，年份越高顏色越深。



2 年的竹子

1 年的竹子

3 年的竹子

4 年生的竹子

圖 5-1 竹子年齡的判斷

(四)竹材的種類⁽⁴⁾：

我們常見的竹材有孟宗竹、麻竹、苦竹、桂竹、綠竹等。而孟宗竹與苦竹因結構緻密被列為上等竹材，所以本次實驗以孟宗竹與苦竹作比較，再選用結構較為鬆散的麻竹作對照。

(五)微觀實驗：

以自製管狀爐加熱試管中的竹材，觀察各溫度發生的現象並記錄，同時以白色無水硫酸銅檢驗水(變藍)，以藍色石蕊試紙檢驗酸性物質(變紅)⁽⁵⁾找出竹材脫水碳化之溫度。本試驗於中央大學化工所進行。

(六)一次碳化：

竹材中含有大量水分及竹醋液(甲酸、乙酸、甲醇、乙二醇、甲醛、苯酚等等)⁽⁶⁾，經由微觀實驗得知，350℃可將這些物質除去，謂之一次碳化。

(七)二次碳化：

因一次碳化後之竹炭無明顯吸附能力故進行二次碳化。將一次碳化之竹炭以鋁箔紙緊密包覆，以隔絕空氣加熱(乾餾)⁽⁷⁾到 750℃，可加強竹炭的結構，並增加其表面積。

(八)含水率⁽⁸⁾：

某一塊竹材中含有水分重量與該竹材原重之比值。
設測試前竹子重量為 X_1 ，加熱後竹子重量為 X_2 ，則

$$\text{含水率} = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\%$$

註：溫度設定 150℃(由微觀實驗得知 150℃前大部分為水分脫出)。

(九)體積收縮率的求法：

設竹子測試前體積為 V_1 ，加熱後竹子體積為 V_2 ，則

$$\text{體積收縮率} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100\%$$

註：含水率試驗與體積收縮率依序進行

(十)單位竹炭的除氯量：

設竹炭重量為 W_0 ，KCl 溶液之 AgCl 沉澱量為 W_1 ，泡竹炭後 AgCl 沉澱量為 W_2

$$\text{單位竹炭的除氯量} = \frac{W_1 - W_2}{W_0}$$

(十一)竹子各部分含水率的多寡⁽²⁾：

含水率的多寡會影響燒製竹炭的品質，竹子分三部分，根桿、中桿、先端桿，三者含水率的多寡為 根桿>中桿>先端桿 而以中桿(根桿以上10節)含水率低且生長完全，最適合燒製竹炭。

(十二)機械窯與土窯的比較⁽⁶⁾：

表 5-1 機械窯與土窯比較表

	機械窯	土窯
動力來源	重油、柴油或電力	竹材熱分解
窯燒溫度	1000℃以上	600~800℃
升溫時間	快	慢
硬度	較大	較小
窯內溫差	較小	較大

註：本實驗因場地限制所以以機械窯燒製竹炭

(十三)竹炭與備長炭的比較⁽⁶⁾：

表 5-2 竹炭與備長炭比較表

項目	竹炭(黑炭)	備長炭(白炭)
製造原料	孟宗竹桂竹等竹材	馬目堅科木材
碳化溫度	600~800℃	1000℃以上
表面積	大(300 m ² /g)，是備長炭的五~十倍	小(6~30 m ² /g)
內部孔隙	分佈廣，孔徑多種有大有小	分佈較狹，孔徑較單一
官能基	較完整(吸附力較強)	退化(吸附力較弱)
礦物質	量多，是備長炭的三倍	量少
燃點	較低(350~400℃)	較高 (500℃)
硬度	較小 (軟炭)	較大
含碳量	較低	較高(較耐燃)

(十四)微觀實驗中 H₂O 的驗證⁽⁹⁾：

將硫酸銅放入烘箱烘乾至白色硫酸銅粉末(遇水變藍)，以棉花棒沾取少許白色硫酸銅粉末，檢測水分的有無。

(十五)微觀實驗中酸性物質的驗證⁽⁶⁾：

以藍色石蕊試紙(遇酸性物質變紅)來檢測竹醋液的有無(竹醋液主要成分為酸性物質)。

(十六)升溫速率的影響⁽²⁾：

升溫速率過快易使水分快速脫出，導致纖維劇烈收縮破壞其結構，使竹體容易鬆散成灰。升溫速率慢，可得到較佳品質之竹炭。

(十七)指示劑的選擇⁽¹⁰⁾：

選對指示劑，終點所用去的體積非常接近當量點所計算的體積，此時則可以終點表示當量點，因此必須選擇變色範圍恰在當量點附近的指示劑，且愈接近當量點愈佳。本研究以 HCl(強酸)滴定竹炭水(弱鹼)，所以以甲基橙(變色之 pH 範圍為 3.1~4.5)作為指示劑，顏色變化由黃變橙(中間色)再變紅。

(十八)HCl 滴定⁽⁵⁾：

使用已知濃度的 HCl 標準液，以滴定方式測量未知濃度的竹炭水，當滴定達終點時，HCl 的當量數等於竹炭水的當量數(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等礦物質與竹醋液中的甲酸、乙酸等形成鹼性鹽類，因此假設竹炭水溶液中鹼之價數為 1)。

(十九)焰色試驗⁽¹¹⁾：

當原子中的電子獲得能量時，電子會躍升至高能階再藉由放出光的形式回到低能階，每種原子的光譜各不相同，因此以焰色試驗檢測竹炭水中所含之金屬離子。

(二十)除氯試驗：

將純水及放入竹炭的純水分別加入 KCl 及 AgNO_3 溶液產生沉澱⁽¹²⁾，再以沉澱量的差異來探討竹炭對 Cl 的吸附量。

(二十一)BET(法)－測量表面積⁽¹³⁾：

此方法是在 1938 年由 Brunauer、Emmett 和 Teller 所提出，其原理最主要是利用高純度氮氣於液態氮的溫度下吸附於物質表面，再由氮氣分子的截面積(0.162nm^2)求得表面積。本試驗委託中央大學貴儀中心進行。

(二十二)原子吸收光譜儀⁽²²⁾：(Atomic Absorption Spectrophotometer) 簡稱 A.A.

原理是將待測物中所含之金屬原子化，原子再吸收由中空陰極射線管所放出之特定波長的光，測定其吸光度，再換算出濃度。本試驗委託中央大學貴儀中心進行。

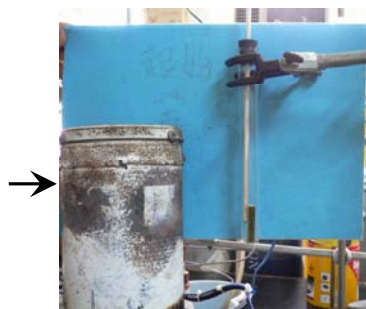
二、研究過程或方法：

(一) 微觀實驗：

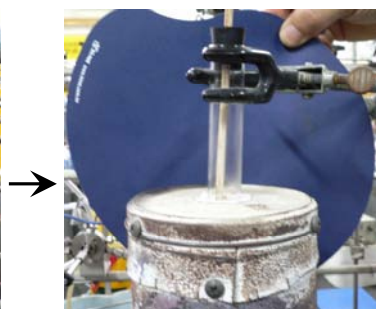
目的：找出竹材脫水與碳化的溫度。



竹材放入硬質試管中



將熱電偶感溫棒置入試管中



將試管放入直徑 3cm 管狀爐中



啟動溫控器

以每分鐘 5°C 加熱到 100、150、200、250、300、350°C 各停留 15 分鐘觀察其變化

於各溫度停留時間配合藍色石蕊試紙(檢驗酸)和白色無水硫酸銅粉末(檢驗水)來檢測

圖 5-2 微觀實驗流程圖

(二) 含水率測試：

1. 將不同竹材，鋸成大小約略相等之試片。
2. 將六類竹子分別秤重。
3. 將烘箱溫度設定在 150°C (由微觀實驗得知 150°C 前脫出物質以水分為主)，以 k-type 熱電偶感溫棒校正 (如圖 5-3)。
4. 每小時快速的將竹子夾出來秤重後，再放回烘箱繼續烘乾，直到重量持平不再改變為止 (差距要在 0.01 克~0.09 克之間)。

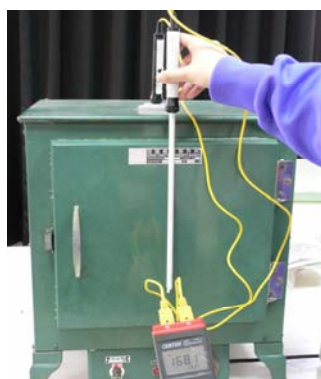


圖 5-3 校正烘箱內的溫度

(三)體積收縮率測試：

- 1.測量所有竹子的長和寬，秤重並拍照。依序放入 500ml 量筒中，竹子排開水的體積加以秤重後，再查出當時溫度下水之密度(接近 1)即可求出竹子的體積。
- 2.同含水率測試之步驟，計算吸水量。
- 3.烘乾後之竹材，依烘乾前測量體積之方法測量(但竹子排開水的重量需再加上吸水量)，即可得竹子烘乾後的體積，計算體積收縮率。

註：體積收縮率測試與含水率測試依序進行。

(四)自製竹炭：

- 1.將孟宗竹裁成長 10cm 的長度。
- 2.以鋁箔紙緊密的包覆(隔絕空氣)，放入高溫爐將升溫曲線(微觀實驗得知)設定為 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 150°C 及 350°C 各停留 2hr(一次碳化)， 750°C 停留 3hr(二次碳化)。

(五)竹炭水之製備：

- 1.將自製竹炭放入裝有純水 300ml 的燒杯中。
- 2.水加熱至沸騰，持續約 1 小時後靜置降溫，得竹炭水。

(六)焰色試驗：

- 1.取竹炭水與乙醇以 1:10 的比例混合。
- 2.將溶液倒入寶特瓶，裝上噴霧器，按幾下確認噴頭通暢。
- 3.將噴頭與噴燈保持 20~30cm 的距離並垂直 90 度 (如圖 5-4)。



圖 5-4 焰色試驗要點

(七)除氯試驗：

- 1.取適量的 KCl 加水配成 0.1M KCl 水溶液。
- 2.將竹炭放入裝有 200ml 0.1M KCl 溶液靜置兩天。
- 3.取 KCl 水溶液及含竹炭的 KCl 水溶液各 15ml。
- 4.分別加入 0.5M AgNO_3 水溶液 10ml 使之產生沉澱。
- 5.將溶液經離心後，過濾、烘乾、秤重。

(八)HCl 滴定：

- 1.將竹炭水以石蕊試紙測試呈藍色(鹼性)。
- 2.將 0.01M 的 HCl 滴 100 滴，秤重為 4.76 克，水在 23°C 之密度為 0.998，求得平均一滴為 0.05ml。
- 3.取 100 ml 竹炭水加入錐形瓶中，加入 2 滴甲基橙指示劑。
- 4.再以 0.01M 的 HCl 滴定，顏色變化由黃變橙(中間色)再變紅為止，即達終點。
- 5.算出 HCl 溶液之滴數，再由每滴體積(0.05ml)，求出 HCl 體積，即可由酸鹼當量數相等求出竹炭水之 pH 值。
- 6.此步驟重複三次取平均值。

(九)BET(法)－測量表面積：

- 1.取 0.2 克竹炭磨成粉狀，置於 BET 特用的試管中。
- 2.抽真空後加熱至 150°C 除去竹炭粉孔洞中所吸附之水氣及其他氣體。
- 3.將試管置入裝有液態氮的杜耳瓶中。
- 4.將不同壓力的高純度氮氣通入試管中，由平衡時的壓力和體積的關係式，可求出被吸附的氮氣量。最後由氮氣分子的截面積 0.162nm^2 ，經由電腦的計算即可求出表面積。

陸、研究結果

一、微觀實驗結果：

表 6-1 微觀實驗各溫度試管內的變化

	孟宗竹	麻竹	苦竹
100℃	管壁開始有小水珠出現	管壁開始有小水珠出現	管壁有小水珠出現，且有些微苦的味道出現
150℃	水滴越來越多	水滴越來越多	水滴越來越多
200℃	竹子的顏色微微變深	蒸氣變多，竹子顏色微微變深	有竹醋液味道脫出，(竹子尚未變色)
250℃	有竹醋液味道，且管壁有黃褐色液體(開始碳化)	有竹醋液味道，管壁微黃(開始碳化)	試管內中蒸氣量增多，有竹醋液味道，管壁微黃
300℃	管內對流旺盛，產生大量蒸氣，表示竹醋液大量跑出(如圖 6-1)	大量蒸氣冒出(如圖 6-1)，且對流旺盛	管內對流旺盛，大量蒸氣出現且管壁有大量黃色液體出現(開始碳化)
350℃	一次碳化完成	一次碳化完成	還在碳化(約在 350℃ 停留 12min 才碳化完成)
燒製後結果	結構堅固，手摸不會黑	結構鬆散，手摸會黑(如圖 6-2)，且有細屑掉落	結構鬆散，手摸會黑，且竹體有彎曲現象

註:從微觀得知 150℃ 以前水分脫出，150℃ -350℃ 竹醋液脫出，即一次碳化完成。



圖 6-1 竹醋液氣體生成



圖 6-2 結構鬆散的竹炭



圖 6-3 石蕊試紙變紅

表 6-2 微觀實驗脫出物質檢測表

溫度	測試工具	孟宗竹	麻竹	苦竹
100℃	藍色石蕊試紙	無變化	無變化	微紅
	白色無水硫酸銅	深藍	深藍	深藍
150℃	藍色石蕊試紙	些微變紅	些微變紅	粉紅
	白色無水硫酸銅	淡藍	淡藍	深藍
200℃	藍色石蕊試紙	變紅較明顯	變紅較明顯	紅
	白色無水硫酸銅	變藍不明顯	些微變藍	淡藍
250℃	藍色石蕊試紙	淡紅	淡紅	很紅
	白色無水硫酸銅	不變	變藍不明顯	變藍不明顯
300℃	藍色石蕊試紙	很紅	很紅	很紅
	白色無水硫酸銅	不變	不變	不變
350℃	藍色石蕊試紙	深紅	深紅	深紅
	白色無水硫酸銅	不變	不變	不變

註：藍色石蕊試紙遇酸呈紅色

註：白色無水硫酸銅遇水呈藍色



孟宗竹 麻 竹 苦 竹

無水硫酸銅-水的測試

石蕊試紙-酸的測試



孟宗竹 150°C



麻 竹 150°C



苦 竹 150°C

白色變成藍色

變化不明顯



孟宗竹 麻 竹 苦 竹

無水硫酸銅-水的測試

石蕊試紙-酸的測試



孟宗竹 250°C



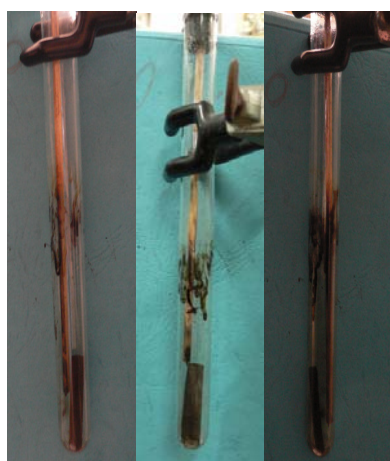
麻 竹 250°C



苦 竹 250°C

變化不明顯

顏色明顯變紅



孟宗竹 麻 竹 苦 竹

無水硫酸銅-水的測試

石蕊試紙-酸的測試



孟宗竹 350°C



麻 竹 350°C



苦 竹 350°C

顏色不變

顏色明顯變紅

圖 6-4 微觀實驗硫酸銅與石蕊試紙之變化

二、含水率試驗：

1.含水率：苦竹(二年根桿)>苦竹(四年根桿)>苦竹(二年中桿)>苦竹(四年中桿)>麻竹(四年)>孟宗竹(四年) (如表6-3)。

表6-3竹材含水率測試結果

竹子種類	原重量	第1小時	第2小時	第3小時	第4小時	第5小時	含水率
孟宗竹 4年	4.01	3.71	3.67	3.58	3.58	3.59	10.7%
麻 竹 4年	4.04	3.52	3.49	3.47	3.46	3.47	14.3%
苦 竹 2年中桿	4.03	3.22	2.83	2.74	2.73	2.73	32.3%
苦 竹 2年根桿	4.00	2.53	2.32	2.25	2.24	2.26	44.0%
苦 竹 4年中桿	4.01	3.26	2.86	2.82	2.80	2.81	30.1%
苦 竹 4年根桿	4.02	2.85	2.45	2.38	2.36	2.36	41.3%

單位: 克

孟宗竹

麻竹

苦竹 4 年中桿

苦竹 2 年中桿

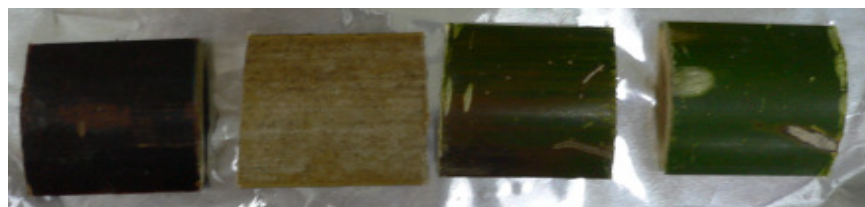


圖 6-5 含水率及體積收縮率測試前外觀

孟宗竹

麻竹

苦竹4年中桿

苦竹2年中桿



圖 6-6 含水率及體積收縮率測試結果

三、體積收縮率：

表6-4竹材體積收縮率及密度測試結果

竹子種類	測試前體積 cm ³	測試後體積 cm ³	體積收縮率 %	含水率 %	竹材密度 g/cm ³
孟宗竹 4年	9.64	7.78	19.29	10.7	0.42
麻 竹 4年	18.10	13.55	25.13	14.3	0.22
苦 竹 2年中桿	10.87	8.24	24.20	32.3	0.37
苦 竹 2年根桿	17.10	12.02	29.71	44.0	0.23
苦 竹 4年中桿	9.30	7.15	23.11	30.1	0.43
苦 竹 4年根桿	14.25	10.24	28.14	41.3	0.28

四、升溫速率的影響：

孟宗竹

苦 竹

麻 竹



升溫速率 0.1°C/min



升溫速率 1°C/min



升溫速率 5°C/min

圖 6-7 升溫速率的影響

五、焰色試驗⁽¹⁴⁾：

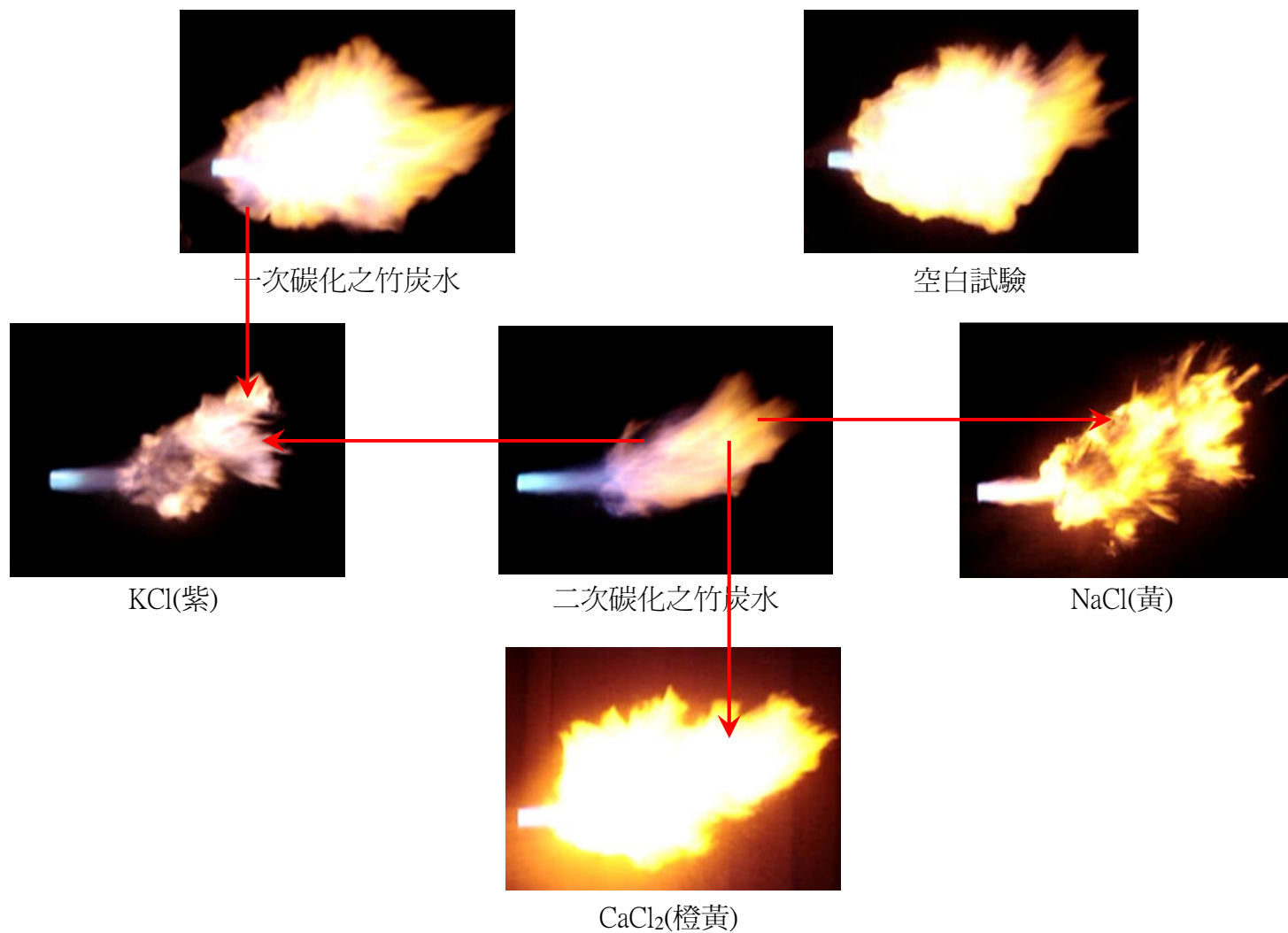


圖 6-8 焰色試驗

六、 CaC_2O_4 沉澱與焰色試驗：



圖 6-9 CaC_2O_4 沉澱(左)空白試驗(右)

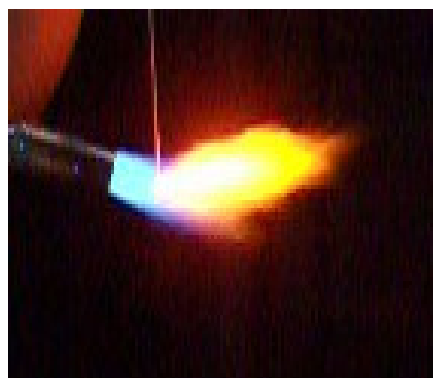


圖 6-10 CaC_2O_4 焰色試驗

七、除氯試驗：

表 6-5 除氯重量變化表

	總重量	濾紙重量	沉澱量	竹炭的除氯量 克(氯)/克(竹炭)
KCl + AgNO ₃ 溶液	1.05	0.57	0.48	-----
一次碳化竹炭+KCl + AgNO ₃ 溶液	0.99	0.58	0.41	0.001
二次碳化竹炭+KCl + AgNO ₃ 溶液	0.83	0.60	0.23	0.021

單位：克

八、HCl 滴定試驗：

取竹炭水 100ml 以 0.01M HCl 進行滴定，以甲基橙為指示劑(顏色變化由黃變橙(中間色)再變紅)，HCl 用去 0.4ml(三次均為八滴，每滴為 0.05ml) 達 滴 定 終 點。達 當 量 點 時，酸 之 當 量 數 = 鹼 之 當 量 數， $0.01 \times 0.0004 \times 1 = M \times 0.1 \times 1$ (鹼之價數為 1，參考原理 P9)， $M = 4 \times 10^{-5}$ ，pH=9.60。

表 6-6 竹炭水之 HCl 滴定結果

	純水	市售竹炭水	一次碳化之竹炭水	二次碳化之竹炭水
pH 值	6.83	8.30	7.69	9.60

單位: pH

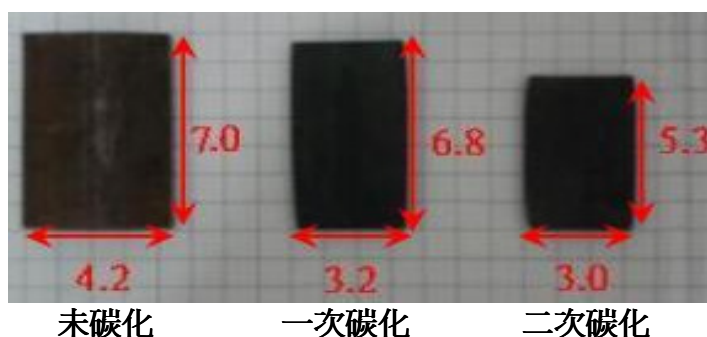
九、一次及二次碳化重量測試結果：

表 6-7 一次及二次碳化重量變化表

	原重	一次碳化(350℃)			二次碳化(750℃)		
重 量	26.72	重 量	減 少	減 少 %	重 量	減 少	減 少 %
		12.83	13.89	51.98	6.50	6.33	49.33

單位：克

十、一次及二次碳化外觀變化：



單位: cm

圖 6-11 一次及二次碳化外觀變化圖

十一、BET－表面積測試：

表 6-8 BET 測試結果

	一次碳化	二次碳化	市售竹炭
BET	54.7	195.2	186.7

單位： m^2/g

十二、原子吸收光譜測試結果：

表 6-9 原子吸收光譜測試結果

	K	Ca	Na
濃度	30.1	4.8	1.5

單位：ppm

十三、竹材發黴⁽¹⁾及竹炭浸泡時的現象：



圖 6-12 竹材發黴(左)及竹炭浸泡時的現象(右)

柒、討論

一、為何竹子會發黴⁽¹⁾：

砍好的竹材放在桌上數天後會有發黴現象(如圖 6-12 左)，因為剛砍下的竹子含有大量水分，需氣乾來降低含水率。在氣乾時，須在完全密閉空間內進行，若放置在空氣流通的地方，會使環境利於微生物生長，使竹子發黴。

二、竹材年齡及部位的選擇⁽²⁾：

竹子含水率以 10%~15%，較適合燒製竹炭，以孟宗竹為例，燒製竹炭宜採用四年生以上之竹材，未滿三年生之幼竹由於生長旺盛、含水率高、收縮率大、變形率高，在燒製時這些都會影響竹炭的品質。一般而言可將竹材分成三部份，由下往上之名稱分別為「根桿」、「中桿」、「先端桿」，通常根桿指根部 1m 內之部分，先端桿指第一枝條以上之部分，上述兩者之間的部分稱之「中桿」，約佔竹材之 50%到 70%，由實驗得知，根桿含水率大於中桿(如表 6-3)，且含水率越大，體積收縮率越大，故中桿較適合燒製竹炭。

三、竹材的緻密度與鋸子的選擇⁽²⁾：

鋸子以鋤鋼鋸片為優，裁斷時宜用較細的鋸子，粗的鋸子在裁斷的過程中易破壞竹子纖維的結構，且裁斷時速度不宜過快，以避免使缺口出現嚴重之鬚狀竹絲而影響竹炭品質。由表 6-4 可知竹材纖維的緻密度苦竹>孟宗竹>麻竹，而緻密度亦可以從鋸竹子的過程略知，越緻密的竹材越不易鋸斷如孟宗竹和苦竹；麻竹則非常容易鋸斷。

四、含水率、緻密度與體積收縮率之關係：

體積收縮率與水分的多寡有關，水分含量越多，收縮率越大，且變形嚴重，即使結構緻密的苦竹(0.43g/cm^3)也因含水率高(30.1%)，使體積收縮非常明顯(23.11%)。麻竹雖含水率低(14.3%)，但因本質結構鬆散(0.22g/cm^3)，故體積收縮也非常明顯(25.13%)。孟宗竹因結構緻密(0.42g/cm^3)且含水率低(10.7%)，故體積收縮率小(19.29%)(如表6-4、圖6-5、圖6-6)。

五、升溫速率的影響：

升溫速率對竹炭的品質影響非常大，升溫速率過快，會使竹炭嚴重變形(如圖 6-7)。但每種竹材受到升溫速率影響不同，以苦竹為例，因其含水率過高(如表 6-3)，所以在升溫速率 5°C/min 時竹材會因升溫速率過快，使水分大量脫出而使之完全變形成灰。而升溫速率 1°C/min 雖有成灰，但沒有升溫速率 5°C/min 嚴重，再以升溫速率 0.1°C/min 燒製時，發現竹體雖然

龜裂嚴重但沒有如 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 時有灰的情形出現(如圖 6-7)。苦竹結構雖然和孟宗竹一樣緻密，都被列為上等竹材⁽⁴⁾，但因含水率過高所以在升溫速率太快的情況下竹體中的大量水分和竹醋液快速脫出，導致竹子纖維劇烈收縮，因此升溫速率對於含水率高的竹材影響非常大。

麻竹在升溫速率 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 時皆成灰(如圖 6-7)。雖然麻竹含水率低，但因纖維鬆散(從鋸麻竹的過程可知)，以至於麻竹不管在升溫速率快或慢皆成灰，由此得知，麻竹變灰的主要原因不是升溫速率的影響，而是本身結構鬆散，纖維間的空隙大，容易使大量助燃氣體(O_2)存在纖維的空隙中，使得麻竹在高溫下容易燃燒成灰。

由苦竹及麻竹結果得知，影響竹炭品質的關鍵就在於含水率、升溫速率及結構緻密度。孟宗竹雖然結構緻密且含水率低，但在升溫速率過快的情況下，依然會使其纖維劇烈收縮，導致竹體結構鬆散甚至成灰，在升溫速率 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 時竹體仍有變灰的情形出現，升溫速率 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 時竹體有嚴重變形及龜裂現象，在升溫速率 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 時，竹炭的纖維就不會因升溫速率過快，而使其劇烈收縮導致結構鬆散(如圖 6-7)，由此可見升溫速率對於結構緻密、含水率低的孟宗竹影響很大，升溫速率越慢燒製出來的竹炭品質越好。含水率與結構緻密度也是影響竹炭品質的原因之一。

六、微觀實驗之目的：

微觀實驗之目的是在了解竹材在燒製的過程中，不同溫度所發生的現象與脫出的物質，並找出燒製竹炭較佳溫度和速率，及做出燒製竹炭的升溫曲線，以利燒出品質較佳的竹炭。

七、微觀實驗之觀察：

150°C 前我們用棉花棒沾取少許白色無水硫酸銅粉末，檢測發現，白色無水硫酸銅粉末變為藍色(有水分)，由藍色石蕊試紙測試，三者皆無變色(如表 6-2)，而竹材顏色及結構也無任何變化。由此知 150°C 前從竹材脫出物質為水，並沒有酸性物質(竹醋液)脫出。

當溫度到達 150°C 時，我們一樣以白色無水硫酸銅粉末檢測，三者皆明顯變為藍色，以藍色石蕊試紙測試發現苦竹有些微變紅(代表有酸性物質脫出)，其它二者皆無變色，此時管壁開始有小水珠但竹材顏色皆無變色(如圖 6-4)。當溫度到達 250°C 時，以白色無水硫酸銅粉末檢測發現，硫酸銅粉末雖有變藍但都不明顯，由藍色石蕊試紙測試發現三種竹材都開始變紅，此時發現管壁變黃(竹醋液開始大量脫出且竹材開始碳化)，竹材顏色變深(如圖 6-4)。

溫度到達 350°C 時，以白色無水硫酸銅粉末檢測發現三者皆無變色(皆無水分)，由藍色石蕊試紙測試發現，三者皆變為紅色且管壁變黑(大量竹醋液脫出)，此時竹材一次碳化完成 (如圖 6-4)。三者測試後發現麻竹、苦竹結構鬆散，手摸會黑(如圖 6-2)，孟宗竹結構堅固，手摸不會黑。

由以上結果得知，150°C 以前大部份脫出的物質以水為主，但苦竹在 150°C 之前藍色石蕊試紙有些微變紅，是因為苦竹含水率高，使部分低沸點之酸性物質與水分一同脫出⁽⁶⁾，200°C 以後脫出物質以竹醋液為主(如圖 6-4、表 6-1)，350°C 之後碳化完成。由微觀實驗可決定一次碳化脫水及碳化的溫度(即一次碳化升溫曲線圖)。

八、何謂一次碳化：

從微觀實驗得知，當溫度升至 350°C 時，水及竹醋液脫出後，竹材立刻變黑(如圖 6-4)，表示竹炭碳化完成，謂之一次碳化。

九、為什麼要二次碳化：

從一次碳化之竹炭水焰色試驗，只能觀察出些微 K^+ 的顏色(紫色)(如圖 6-8)，與文獻不符⁽⁶⁾；且一次碳化竹炭水之 pH 值為 7.69 與市售竹炭水 pH 值為 8.30 相差甚大(如表 6-6)；而一次碳化的表面積不大($54.7\text{m}^2/\text{g}$) (如表 6-8)，及一次碳化竹炭每克的除氯量少(0.001 克)(如表 6-5)，所以綜合以上原因我們將溫度升高至 750°C 進行二次碳化。由二次碳化竹炭水之焰色試驗，明顯與一次碳化不同，且由滴定試驗得知其 pH 值為 9.60 明顯高於市售竹炭水，而在高溫狀態下會破壞竹子內的芳香環之片狀結構，由於非常不規則，故會形成一些裂隙使表面積($195.2\text{m}^2/\text{g}$)及吸附能力增加⁽¹⁷⁾，使除氯量增加為 0.021 克。因此想燒製品質好的竹炭，進行二次碳化是必要的過程。且二次碳化溫度的不同，會使得竹炭具有不同的功能，如 1000°C 以上之竹炭具有良好的導電性⁽⁶⁾。

十、為何二次碳化之溫度設定為 750°C：

- (1)一般市售竹炭由於成本限制，均以土窯燒製竹炭，而土窯最高溫只能達 800°C 左右⁽⁶⁾(如表 5-1)而我們也曾嘗試燒製高溫，但因包裹竹炭之鋁箔紙的限制，只能燒至約 750°C。
- (2)這次試驗主要目的之一是測試竹炭對氯的吸附能力，而 700~800°C 所燒製的竹炭具有最強的吸附能力⁽⁶⁾，因此綜合兩項因素我們將溫度設為 750°C。未來我們在燒製竹炭的過程中會通入 N_2 以隔絕空氣，使竹炭的應用更寬廣。

十一、一次及二次碳化後之外觀及重量變化：

從重量變化(如表 6-7)可知，一次碳化(350°C)後之重量減少 51.98%，從微觀實驗得知(如表 6-1)，最主要是水分子及竹醋液脫出，使得竹子纖維「間」出現空隙，造成寬度由 4.2cm 收縮至 3.2cm (左右收縮，如圖 6-11)。當溫度加熱到 750°C 時(二次碳化)，重量減少 49.33%，從文獻得知⁽⁷⁾，最主要是竹子纖維「內」的芳香族化合物(煤荅)脫出⁽¹⁷⁾，造成纖維斷裂，使得高度由 6.8cm 收縮至 5.3cm(上下收縮，如圖 6-11)，由於纖維內的空隙較纖維間小，使得表面積增加許多，故二次碳化後之表面積(195.2 m²/g)高於一次碳化後之表面積(54.7 m²/g)。由(圖 6-12 右)可發現當竹炭泡入水中時有大量的微氣泡出現，這表示竹炭中有無數大大小小的孔洞，而這些無數的孔洞就是造成竹炭高表面積的原因。

十二、為何竹炭水加熱到 80°C，竹炭周圍有沸騰現象⁽⁶⁾：

在加熱竹炭水時，發現水在 80°C 左右竹炭周圍就已有沸騰現象，但是此現象不符合理論(100°C)⁽¹⁸⁾，由文獻上得知竹炭具有遠紅外線的能力⁽¹⁶⁾，能保溫及使物體受熱平均，所以在 80°C 時竹炭附近的水就已經有沸騰的現象且溫度一直保持在 80°C 左右。

十三、HCl 滴定試驗及焰色試驗：

由滴定試驗結果(如表 6-6)得知竹炭水之 pH 值為 9.60(鹼性)，再經由竹炭水與標準溶液之焰色試驗比較(如圖 6-8)，與 A.A.測試結果(表 6-9)，可知竹炭水中含有 Ca²⁺、Na⁺、K⁺等鹼性鹽類(與文獻吻合⁽⁶⁾)，使竹炭水 pH 值上升。

十四、竹炭水中 Ca²⁺之定性分析⁽²⁰⁾：

由焰色試驗中(圖 6-8)發現 K⁺與 Na⁺顏色明顯，但 Na⁺和 Ca²⁺的焰色相近，因此先以 Na₂C₂O₄ 與濃縮竹炭水中的 Ca²⁺產生 CaC₂O₄ 沉澱(如圖 6-9 左)，由於沉澱量少，所以我們以多次實驗獲得較多沉澱，加入濃 HCl 溶解沉澱物，再進行焰色試驗，發現有澄黃色火焰(如圖 6-10)，證明 Ca²⁺ 存在。因為 CaC₂O₄ 的 K_{sp} 為 1.3×10⁻⁸ 小於 Ca(OH)₂ 的 6.5×10⁻⁶，所以選擇 Na₂C₂O₄ 與 Ca²⁺ 產生沉澱⁽²¹⁾。

十五、Ca²⁺定量分析之困難：

1. 要精確的將 Ca²⁺ 定量，必須選擇適當沉澱劑(Na₂C₂O₄)，經離心、過濾與秤重，最後求得 [Ca²⁺]，再和 A.A.測試結果比較，由於沉澱量少，所以將濃縮之竹炭水進行多次實驗，誤差因而產生。
2. 影響 A.A.測試之因素包含火焰高度、溶劑干擾及濃度校正曲線，常造成很大誤差⁽²²⁾，因此 A.A.常用於定性分析而非定量分析。

十六、為何以 KCl 溶液進行除氯試驗⁽¹⁹⁾：

一開始我們是仿照自來水公司的方法將 Cl_2 通入水中，但竹炭的吸附效果不明顯，由文獻上得知其實氯氣並不會全部溶於水中，其殺菌後會揮發到空氣中，從早晨使用自來水聞到濃濃的消毒水氣味就可證明，其實只有極微量的餘氯會殘留在水中，所以此方法效果不明顯，因此改用 0.1M KCl 來進行實驗，並求出每克竹炭可除去 0.021 克的氯(如表 6-5)。

十七、除氯試驗：

由工研院奈米中心的傅立葉轉換紅外線光譜儀(FTIR)進行檢測⁽¹⁹⁾，竹炭主要官能基為(C-H)、(C=C)、(-O-H)等。所以竹炭官能機對非極性物質吸附力極強。由除氯試驗得知(如表 6-5)，每克竹炭可除去 0.021 克的氯，量雖然不大，但以目前台灣省自來水公司公佈之餘氯標準 0.02~0.1ppm⁽¹⁵⁾，若取上限值 0.1ppm(0.1mg/L)推算，1 克竹炭可以處理約 210L 的自來水(約 350 瓶 600 ml 的寶特瓶)。

十八、未來展望：

1. 由於包裹竹炭之鋁箔紙最高只能加熱至 750°C ，未來我們在燒製竹炭的過程中會通入氮氣以隔絕空氣，使竹炭的應用更寬廣。
2. 竹炭包：未來我們想利用竹炭的高表面積及高吸附力，將其磨成粉(增加其表面積)製成竹炭包，可達到除臭效果，這樣能大量減少芳香劑的使用，也能使空氣變清新。
3. 竹醋液：在燒製竹炭的過程中，會產生茶褐色半透明的竹醋液，根據文獻報導，竹醋液對皮膚有止癢消炎作用，也可作為土壤消毒劑、堆肥發酵促進劑及驅蟲劑，用途也很廣，未來我們將設計有效的製程來收集竹醋液。
4. 竹炭胃藥：從本研究結果得知，竹炭不但可吸附水中酸性離子，更可放出鹼性鹽類，使 pH 值提高，若將竹炭研磨成粉後，製成膠囊給胃酸過多的患者服用，應會有不錯的效果，未來我們會進行相關之模擬研究。

捌、結論

- 一、竹子砍下後必須先將含水率降低，若直接放置在空氣流通的地方，會造成黴菌滋生，影響竹炭的品質。
- 二、竹子年齡越高、含水率越低，發育也越完全，而竹材部位以含水率低、發育完全的中桿(根桿以上 10 節)，較適合作為燒製竹炭的竹材。
- 三、使用鋸子時，細鋸子比粗鋸子較不易破壞竹子的纖維，且速度不宜過快，而鋸子種類，又以鋸鋼鋸最好。
- 四、雖然苦竹結構緻密(0.43g/cm^3)，但含水率大(30.1%)，在燒製的過程中易變形；麻竹含水率低(14.3%)但結構不夠緻密(0.22g/cm^3)，易導致竹炭鬆散；孟宗竹的含水率低(10.7%)且結構較緻密(0.42g/cm^3)，所以我們選擇以孟宗竹作為燒製的竹材。
- 五、升溫速率的快慢，影響到竹炭的品質好壞，升溫速率過快，易使竹炭的結構鬆散，甚至成灰，而升溫速率越慢，則結構越堅硬，所得之竹炭品質越好。
- 六、由微觀實驗得知 150°C 前大部分是水分脫出(以白色無水硫酸銅檢驗)，而 $200^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 大部分是酸性物質也就是竹醋液脫出(以藍色石蕊試紙檢驗)。故由本實驗可決定一次碳化的升溫曲線為 $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 加熱至 150°C 及 350°C 各停留 2hr。
- 七、從微觀實驗與一次及二次碳化之重量變化和竹炭外觀變化得知，一次碳化(350°C)時由於水及竹醋液脫出，造成竹子纖維間空隙(左右收縮)之 BET($54.7\text{ m}^2/\text{g}$)；二次碳化後(750°C)，由於大分子的芳香族化合物脫出，造成竹子纖維內的裂隙(上下收縮)使得 BET($195.2\text{ m}^2/\text{g}$)遠大於一次碳化。
- 八、由滴定試驗得知竹炭水之 pH 值從 6.83 升至 9.60，再經由焰色實驗及原子吸收光譜結果證實，竹炭含有 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等鹼性鹽類，但 Ca^{2+} 與 Na^+ 顏色相似，因此先以 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 使 Ca^{2+} 沉澱，再進行焰色確定 Ca^{2+} 存在。
- 九、由除氯試驗得知，每克竹炭能除去 0.021 克的氯，以自來水餘氯標準值上限 $0.1\text{ppm}^{(15)}$ 來說，1 克的竹炭能處理 210L 的自來水(約 350 瓶 600ml 的寶特瓶)，證實竹炭具有吸附氯離子的能力。
- 十、一次及二次碳化竹炭之比較表

	一次碳化	二次碳化
BET	$54.7\text{ m}^2/\text{g}$	$195.2\text{ m}^2/\text{g}$
滴定試驗	pH=7.69	pH=9.60
除氯試驗	0.001 克(氯)/克(竹炭)	0.021 克(氯)/克(竹炭)

玖、參考資料及其他

- 一、黃國雄 竹炭、竹醋液之製造與利用(附竹炭窯之建造) 林業試驗所 竹炭主要特徵 P1 九十三年
- 二、黃國雄 竹炭、竹醋液之製造與利用(附竹炭窯之建造) 林業試驗所 竹炭燒製時應注意事項 P3、P4 九十三年
- 三、科學文選 <http://www.bud.org.tw/hu/essay53.htm>
- 四、旦理俊次 植物自然學文化事業公司出版部 P55 八十八年七月
- 五、翁春和 物質科學 化學篇(下) 南一書局 第八章 酸與鹼 10-5 酸鹼滴定與指示劑 P69 九十一年二月
- 六、竹炭工坊 <http://www.taiwan-tan.com.tw/product/tan-index.html>
- 七、楊永華、張麗英、羅世焜、何金錫 基礎化學 修訂二版四刷 三民書局 第四章 生活中的能源 4-2.2 常見化石燃料 P79 九十三年八月
- 八、染化資訊網 <http://www.dfmng.com.tw/masp/standard/textile/tb07-2a13.htm>
- 九、翁春和 物質科學 化學篇(下) 南一書局 第十二章 金屬元素 12-4 鐵銅銀及其化合物 P190 九十一年二月
- 十、黃長司、黃芳裕、鍾崇桑 物質科學 化學篇(下) 初版 康熙圖書網路股份有限公司 第八章 酸與鹼 8-4 常用的酸鹼指示劑 P47 九十年八月
- 十一、曾國輝 化學平衡 再版 建宏出版社 第四章 定性分析簡介 焰色 P197 九十一年二月
- 十二、黃長司、黃芳裕、鍾崇桑 化學(上) 初版 康熙圖書網路股份有限公司 附錄 VII 離子沉澱表 P171 九十二年八月
- 十三、王奕凱、邱宏明、李秉傑 非均勻系催化原理與應用 初版 國立編譯館 渤海堂文化公司印行 非均勻系催化原理與應用 P163 七十七年二月
- 十四、維基百科 <http://zh.wikipedia.org/wiki>
- 十五、台灣省自來水公司 <http://www.water.gov.tw/sample1/index.asp>
- 十六、雨筍竹炭家居 <http://www.hlgnet.com/adv/jianzhong/>
- 十七、博克萊活性炭有限公司 <http://www.bybyu.com/a02.htm>
- 十八、黃長司、黃芳裕、鍾崇桑 化學(上) 初版 康熙圖書網路股份有限公司 第二章 物質狀態與氣體性質 2-1.3 能量與狀態變化 P39 八十九年八月
- 十九、科學月刊 2006 年 3 月號 第 435 期 科學月刊雜誌社 台北市科學出版事業基金會 竹炭的黑金世界-竹製多謀專輯 具吸附力的表面官能基 P182
- 二十、孟憲宏 定性分析實驗日 三版 高立圖書有限公司 P47~P59 八十年二月二十五
- 二十一、林洪志 分析化學 修定初版 三民書局股份有限公司 附錄五 溶解度積常數 P349 八十五年八月
- 二十二、賀孝雍 儀器分析 六版 曉園出版社 第十一章 原子分光光譜法 p363 七十八年九月

評	語
---	---

040216 竹炭的製備與竹碳水

生活器具的材質有系統的分析，有助於鄉土產業認知及民眾科學常識的提昇，因此推薦為最佳鄉土教材獎。