

# 中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高中組 生活與應用科學科

040803

環保「粉」重要-非「筆」尋常

學校名稱：桃園縣私立新興高級中學

作者：  高一 魏少亭  高一 何羽柔  高一 王雅婷  高一 王子彬	指導老師：  王建民
---	------------------

關鍵詞：蛋殼粉筆、植物色素、自製明礬

## 壹、摘要

本研究以自製研磨機，將蛋殼磨成粉體。排乙二醇試驗中，藉反應速率與接觸面積成正比<sup>(4)</sup>，推得溼磨粉體較乾磨細，再由廷得耳試驗得知乾、溼磨 7 小時之粉體皆達膠體粒子範圍 ( $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{m}$ )<sup>(5)</sup>，可由粒徑分析獲得證實，並得知溼磨 10 小時之粉體粒徑最小 ( $0.22\mu\text{m}$ )。以溼磨粉體製作粉筆，透過附著率、剝離率、磨損量及粉塵飄散試驗，測試粉筆品質，得知蛋殼粉 60% 之粉筆 (固含量 83.8%) 最佳，與市售粉筆之附著率分別為 85.07、87.74%；剝離率為 0.77、0.06%；磨損量為 0.027、0.023 g/cm；粉塵飄散集中區為 0~7.8、30.0~82.0 cm。自製粉筆試驗結果與市售相近，飄散結果更優於市售。以此比例製成有色粉筆，經實驗證實，添加植物色素及自製媒染劑，對粉筆品質無顯著影響，說明本研究之可行性。

## 貳、研究動機

在日常生活中隨處可見的廢棄蛋殼，由於無法回收，只能被當作一般垃圾焚燒處理。蛋殼燃燒後產生大量的  $\text{CO}_2(\text{g})$ ，會對地球造成極大的傷害。在一次化學課中，老師提及粉筆中的主成份之一為  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ ，而恰好蛋殼中亦含有大量的  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  成份<sup>(14)</sup>，更吸引了我們的注意。

資料顯示：在過去的科展中，曾經有許多組別均以粉筆為主題進行研究，例如第十四屆廢物利用－粉筆屑再製粉筆<sup>(1)</sup>與第二十一屆－粉身碎骨的粉筆<sup>(2)</sup>，但是我們發現在這些研究報告中，並沒有詳細說明粉筆製作之過程，如：使用之模具、烘乾粉筆之溫度與時間、加壓、固含量…等，亦未透徹的分析粉筆性質及進行測試檢驗粉筆的品質，因此更激起我們對於此研究的熱誠，希望能藉由進行這項研究，突破過去在他人的研究中未曾被注意或未能克服的問題。和老師討論過後，我們決定以廢棄蛋殼作為原料，製造出一種不同於一般粉筆的「環保粉筆」。

## 參、研究目的

- 一、排乙二醇速率試驗：
  - (一) 利用排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_2(g)$  體積。
  - (二) 了解蛋殼粉體研磨時間與反應速率的關係。
- 二、利用物質科學化學篇上冊第三章所敘述到的「膠體溶液—廷得耳效應」，了解粉體粒徑之範圍。
- 三、了解乾、溼磨之蛋殼粉體粒徑差異。
- 四、了解研磨時數對粉體粒徑大小的關係。
- 五、了解顆粒大小、加壓與否對粉筆品質的影響。
- 六、了解  $\text{H}_2\text{O}(l)$ 、蛋殼粉及  $\text{CaSO}_4(s)$  含量對粉筆品質的影響。
- 七、探討烘乾溫度、時間與固含量對粉筆品質的影響。
- 八、萃取植物色素以製作有色粉筆。
- 九、加入自製媒染劑明礬以增加色素附著。
- 十、透過各項實驗以檢驗粉筆的品質。

## 肆、研究設備及器材

### 一、使用器材：

鹽酸 ( $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ ) (島久化學)	1 瓶
硫酸 ( $\text{H}_2\text{SO}_4_{(\text{aq})}$ ) (島久化學)	1 瓶
乙醇 ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{aq})}$ ) (島久化學)	1 瓶
氫氧化鉀 ( $\text{KOH}_{(\text{s})}$ ) (島久化學)	1 瓶
丙酮 ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3_{(\text{aq})}$ ) (島久化學)	1 瓶
市售硫酸鈣 ( $\text{CaSO}_4_{(\text{s})}$ ) (島久化學)	1 瓶
市售碳酸鈣 ( $\text{CaCO}_3_{(\text{s})}$ ) (島久化學)	1 瓶
乙二醇 ( $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2_{(\text{aq})}$ ) (島久化學)	20 瓶
碼表	1 個
塑膠盆	1 個
量筒 (50mL)	1 個
燒杯 (500mL)	1 個
容量瓶 (500mL)	1 個
磁石	1 顆
氧化鋁研磨球 (平均直徑 2.0 cm, 以 D2.0 表示)	15 顆
烘箱	1 台
離心機	1 台
吹風機	1 台
電風扇	1 台
超音波洗淨機	1 台
中央大學雷射儀器	1 台
去離子純水製造機	1 台
磁石加熱攪拌器 (400°C)	1 台
電子天秤 (小數點後四位)	1 台
雷射筆	1 支
離心管 (10mL)	6 支
拋棄式滴管	數支
自製明礬 ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}_{(\text{s})}$ )	數克
拋棄式塑膠手套	多副
塑膠硬管	適當長度
溼磨蛋殼粉體	研磨 4~11 小時
乾磨蛋殼粉體	研磨 4~11 小時

## 二、改良式自製滾動研磨機：

- (一) 目的：簡單省力，又可研磨出所需的超細粉體。
- (二) 使用材料：帶動鏈 1 條、鐵製擋板 1 片、加強固定鐵板 1 片、控制面板 1 個、氧化鋁墊 4 個、滾輪 6 個、鐵材數個。
- (三) 功能：藉由滾輪轉動，帶動 PE 瓶內氧化鋁研磨球相互撞擊粉體，以達到研磨效果。
- (四) 使用方法：將蛋殼及氧化鋁研磨球裝進 PE 瓶內，並置於改良式自製滾動研磨機的滾輪上，設定時間、調整滾輪轉速後，按下啓動鈕即可（如圖 4-1）。

## 三、自製模具：

### (一) 黏土模具：

1. 目的：使粉筆定形。
2. 使用材料：黏土 58g。
3. 使用方法：將黏土模具一端封口，並倒入已調配完成之粉筆溶液，待凝固後便可將粉筆取出（如圖 4-2）。

### (二) 金屬模具：

1. 目的：使粉筆定形。
2. 使用材料：350mL 鋁罐空瓶 1 個。
3. 使用方法：將金屬模具一端封口，並倒入已調配完成之粉筆溶液，待凝固後便可將粉筆取出（如圖 4-3）。



圖 4-1 改良式自製滾動研磨機



圖 4-2 黏土模具

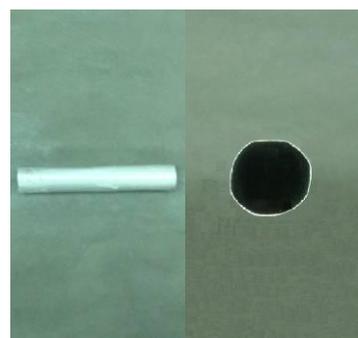


圖 4-3 金屬模具

### (三) 石墨模具：

1. 目的：使粉筆定形。
2. 使用材料：石墨 158g。
3. 使用方法：將模具一端封口，並倒入已調配完成之粉筆溶液，待凝固後以推出裝置將粉筆取出（如圖 4-4，4-5）。

(四) 改良後石墨模具：

1. 目的：使粉筆定形。
2. 使用材料：石墨 370g、鐵棒 2 根、螺絲 2 根、螺絲帽 2 個。
3. 使用方法：模具組合後，將一端封口，並在模具內部塗上一層蠟，倒入已調配完成之粉筆溶液，待凝固後將螺絲鬆開並取出粉筆（如圖 4-6、4-7）。

四、自製粉筆測試裝置：

- (一) 目的：便於測試粉筆及減少人為誤差。
  - (二) 使用材料：面紙盒、釣魚線、彩色黏土、紙黏土、厚紙板、廢棄曬衣夾、寶特瓶。
  - (三) 使用方法：利用繩子綁一重物，馬車裝置<sup>(註)</sup>將因受重力作用，拖動粉筆向前運動（如圖 4-8）。
- 註：本研究將此自製裝置命名為馬車裝置。

五、改良式馬車裝置：

- (一) 目的：便於測試粉筆及減少人為誤差。
- (二) 使用材料：塑膠板、釣魚線、鐵鉤、寶特瓶、橡皮筋、砝碼、擋板、毛巾。
- (三) 使用方法：利用繩子綁一重物，改良式馬車裝置將因受重力作用，拖動粉筆向前運動（如圖 4-9）。



圖 4-4 石墨模具



圖 4-5 粉筆推出裝置



圖 4-6 改良後石墨模具（組合前）



圖 4-7 改良後石墨模具（組合後）

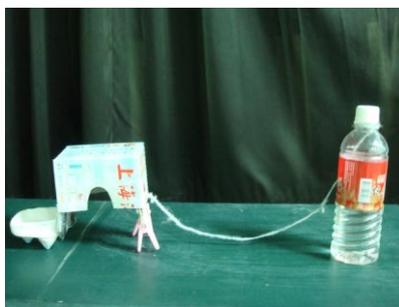


圖 4-8 自製黑板與馬車裝置



圖 4-9 改良式馬車裝置

## 伍、研究過程或方法

### 一、研究原理：

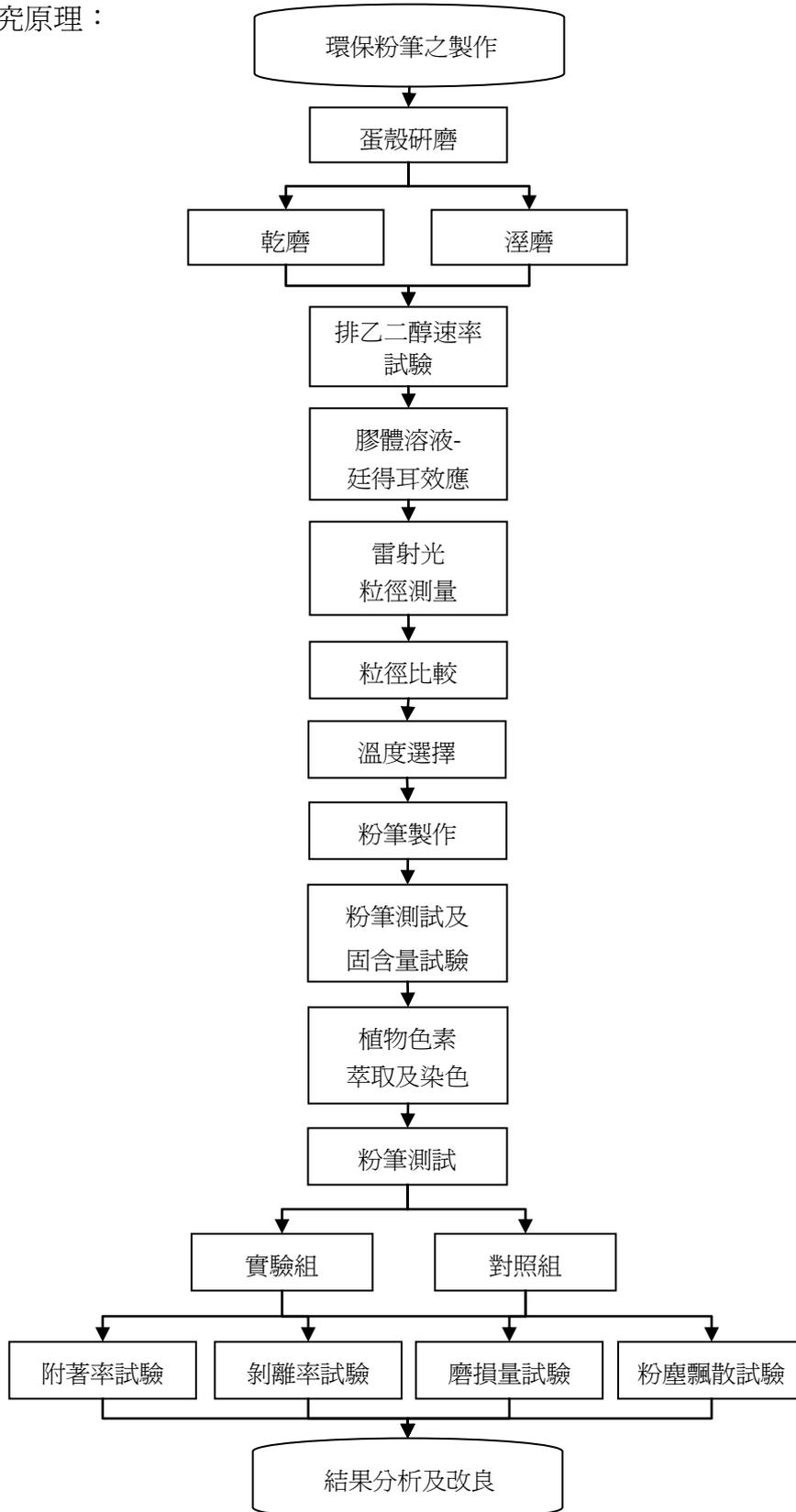


圖 5-1 實驗流程圖

(一) 排乙二醇速率試驗<sup>(3)</sup>：

非勻相反應中，反應速率與接觸面積成正比<sup>(4)</sup>，本研究於排乙二醇速率試驗中，分別取市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  粉體及研磨 4~11 小時之蛋殼粉體，加入  $\text{HCl}(\text{aq})$ ，計時 1~2 秒並收集排乙二醇所產生之  $\text{CO}_2(\text{g})$  體積，並計算其生成速率。反應方程式如下：



(二) 膠體溶液－廷得耳效應<sup>(5)</sup>：

1. 膠體溶液：

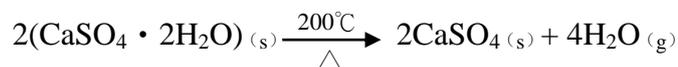
當物質的粒子介於  $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ m}$  之間，粒子和液體並不均勻混合，但靜置也不發生沉澱，這樣的溶液稱為膠體溶液。

2. 廷得耳效應：

本研究透過此實驗得知蛋殼粉體的粒徑範圍。膠體粒子的大小大約  $10^{-7}$  至  $10^{-9} \text{ m}$ 。當一道很強的光通過膠體，則由於分散粒子的關係，使得這道光線更清楚可見，稱為廷得耳效應 (Tyndall effect)。常被用來區分溶液中的膠體和溶液。另一個廷得耳效應的例子，就是在一個黑暗多塵的房間內，通入一道光線，則塵粒就像膠體一般分散在空氣中。雖然個別粒子無法看見，但是由於粒子使得光反射，光線的路徑卻能看見。

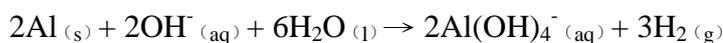
(三) 使用  $\text{CaSO}_4(\text{s})$  為凝固劑<sup>(6)</sup>：

硫酸鈣為白色固體，自然界中以  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$  的形態存在，稱為石膏 (gypsum)。石膏難溶於水，加熱至  $125^\circ\text{C}$  會失去部分結晶水，若再與水化合，則變回石膏，而產生硬化現象，因此可用來製模、塑像和當外科接骨的紮繃材料。石膏加熱至  $200^\circ\text{C}$  以上時，會完全失去結晶水，而成無水硫酸鈣，可用以製造粉筆。本研究採用此特性使粉筆成形。反應方程式如下：

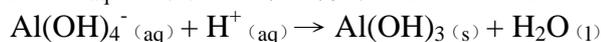


(四) 明礬 ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ ) 製作原理<sup>(7)</sup>：

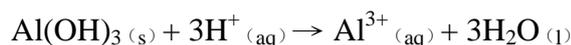
$\text{Al}_{(s)}$  和  $\text{KOH}_{(s)}$  溶液的反應可形成  $\text{Al}(\text{OH})_4^{-}(\text{aq})$  及  $\text{H}_2(\text{g})$ ，其反應式如下：



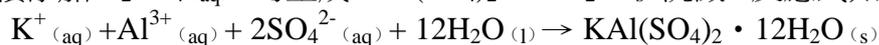
加入適量的  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$  可形成  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  沉澱，反應式如下：



再加入酸可與  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  作用形成  $\text{Al}^{3+}(\text{aq})$  和  $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$  的澄清溶液，反應式如下：



繼續添加  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$ ，可生成  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}_{(s)}$  沉澱，反應式如下：



(五) 媒染劑<sup>(8)</sup>：

對纖維缺乏親和力，不能用直接染色方法進行之染料，須用一種藥劑作為纖維與染料間之媒介，以達到染色目的，這種藥劑叫做媒染劑。我們將其應用在粉筆染色，藉由媒染劑之金屬離子固著於粉筆上，而再與色素形成配價鍵。元素和元素之間所組成的鍵，是由其中一個元素單獨提供組成該鍵所需的所有電子，即為配價鍵。

(六) 離心機工作原理<sup>(9)</sup>：

電動離心機是利用電機高速旋轉時所產生的離心力，將液-固、液-液混合物中各組成成份分離的機械設備。離心機主要用於懸浮液體中的固體顆粒與液體分離，或是將乳狀液中兩種密度不同而又互不混溶的液體分開，或使黏度較大的溶液和不易過濾的膠體溶液進行分離。電動離心機的離心分離效率與離心機的轉速和待沉降物的質量有關，離心機的轉速越大，待沉降物的質量越高，分離效果越好。

(七) 植物色素<sup>(10)</sup>：

天然著色劑或發色劑多係動植物者，著色力較人工著色劑弱，價亦較昂貴，但無礙衛生，如：葉綠素、血紅素、類葉紅素、花青素等色素，皆屬天然色素，可分為水溶性色素和脂溶性色素，水溶性色素係指能溶於水者；脂溶性色素係指溶於油脂及有機溶劑者。本研究以丙酮 ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3(\text{aq})$ ) 或  $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$  萃取天然植物之色素，並透過離心原理分離雜質，取得純度更高之色素溶液，作為粉筆植物染色之著色劑。

(八) 自製馬車裝置行進及煞車原理<sup>(11)</sup>：

自製馬車裝置（如圖 4-8）以綿繩綁一重錘，受重力作用產生一加速度，及與行進方向相反之摩擦力  $f$ （如圖 5-2），若重錘質量不足，則馬車無法被拉動，處於靜力平衡狀態，此時馬車不移動（ $\sum \vec{F} = 0$ ）。當所受之重力大於馬車與自製黑板之間的最大靜摩擦力時，馬車逐漸開始向前行，此時馬車受重力及動摩擦力作用。當自製馬車裝置臨近黑板邊緣時，以馬車前腳（曬衣夾）為支點產生一力矩（如圖 5-3），其所受之重力  $mg$ 、馬車質量  $Mg$  及向上作用力  $N$ ，三者之合力矩與合力皆為零，達靜力平衡，此時馬車停止行進因而呈現靜止。

註：改良式馬車裝置（如圖 4-9）與改良前相似，但因以滾動取代滑動，無法產生力矩使其停止運動，故需加裝擋板。

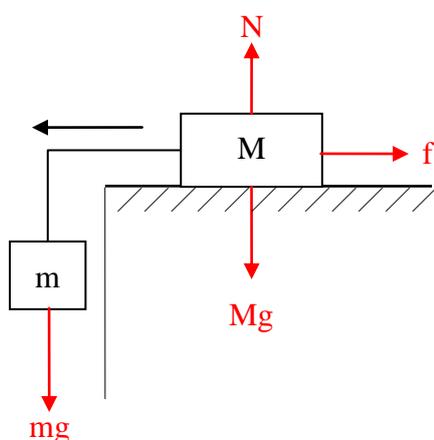


圖 5-2 馬車移動示意圖

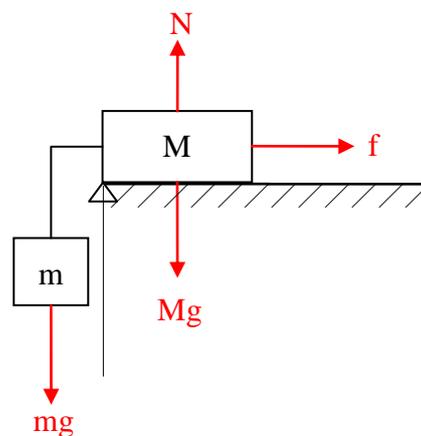


圖 5-3 馬車煞車示意圖

(九) 附著力定義<sup>(12)</sup>：

附著力可分為兩種，一為基準附著力，二為實際附著力。所謂基準附著力是在薄膜與基材完全接觸時，在界面處的結合力。這種結合力主要是離子鍵、共價鍵、金屬鍵、氫鍵和凡得瓦鍵等；實際附著力是由實驗求得的，也稱為附著強度。實際附著力用兩種型式來表示，一為剝離基材上單位面積薄膜所需的力，一為剝離薄膜所需的能量，即力與能量。由於不知道力的分布情況，所以難以進行力和能量的換算，因此只有根據所採用的測量方法，取其中的一種表示附著力。本研究以附著率試驗（如圖 5-11）探討粉體與黑板間的作用力關係。

(十) 超音波震動原理<sup>(13)</sup>：

超音波震盪，是一種超過人類聽覺（20Hz~20KHz）數倍甚至百倍的周波震動，即超音波熱能。在液體裡，以每秒數萬次反覆地震動，所產生或消失極小的氣泡，就稱為空洞現象，而此氣泡有時會成真空狀態，所以當氣泡破裂時，會產生極大音壓，形作一股衝擊波，可將污物剝離物體，而兩者之間產生間隙後，其它的小氣泡再侵入此間隙，破裂後再次形成一股衝擊波，如此地循環，使污物剝落，達到洗淨的效果。本研究藉由此衝擊波來測試粉筆之剝離率（如圖 5-12）。

## 二、研究過程或方法：

### (一) 蛋殼研磨：

1. 秤取約 100g 的蛋殼。
2. 加入  $D_{2.0}$  氧化鋁研磨球 15 顆。
3. 加入  $H_2O_{(l)}$  200mL。
4. 置於改良式自製滾動研磨機（如圖 4-1），設定所需時之研磨時數及轉速 70speed，開始研磨。  
註：若使用乾磨，則無步驟 3。

### (二) $CO_2_{(g)}$ 溶解試驗：

1. 校正 pH 計。
2. 將  $CO_2_{(g)}$  分別通入  $H_2O_{(l)}$  及乙二醇中，觀察其 pH 值變化。
3. 每二分鐘記錄一次，直至 pH 值無明顯變化。

### (三) 排乙二醇速率試驗：

1. 校正 pH 計。
2. 將  $CO_2_{(g)}$  通入乙二醇內直至 pH 值不再變化。
3. 將量筒及校正後之 pH 計置於裝有飽和乙二醇之塑膠盆內。
4. 取市售  $CaCO_3_{(s)}$  粉體約 2g、 $H_2O_{(l)}$  20mL 及磁石置於抽濾瓶中。
5. 加入 0.2M  $HCl_{(aq)}$  20mL 後迅速蓋上橡皮塞，調整磁石加熱攪拌器轉速至 10speed（如圖 5-4）。
6. 於量筒中冒出第一顆氣泡後開始計時，1~2 秒間停止計時，並將硬管快速抽出，紀錄  $CO_2_{(g)}$  排開體積。
7. 將產生氣體通入  $Ca(OH)_2_{(aq)}$  中，證明其為  $CO_2_{(g)}$ 。
8. 取適量溼磨及乾磨蛋殼粉體，重複上述 2~6 步驟。

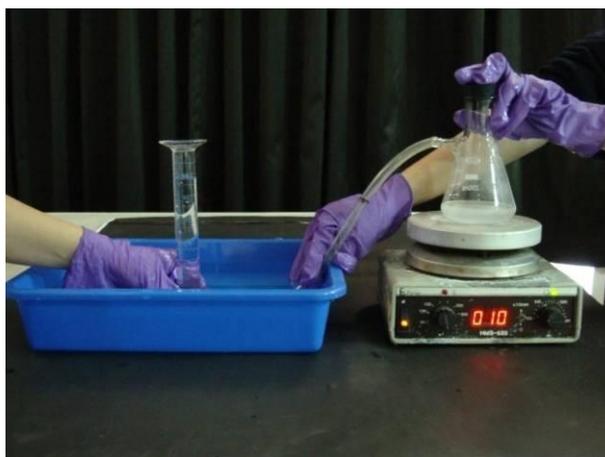


圖 5-4 排乙二醇速率試驗

### (四) 膠體溶液－廷得耳效應：

1. 分別將乾、溼磨 4、5、6、7 小時之蛋殼粉體加入  $H_2O_{(l)}$  中。
2. 以雷射筆照射蛋殼粉體溶液，觀察是否有光散射之現象並拍照。

(五) 溫度選擇：

- 1.先秤模具重量。
- 2.將粉筆溶液倒入模具中，並秤其溼重。
- 3.每 1 小時秤量一次重量。
- 4.計算粉筆烘後重量。
- 5.選取最佳之烘乾溫度。

(六) 粉筆製作：

- 1.設定各成份所需比例<sup>(註)</sup>。
- 2.設定比例分別以不同質量蛋殼粉、CaSO<sub>4(s)</sub>和 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>，調製各種不同成份比例之粉筆溶液。
- 3.將自製模具內部上一層蠟（如圖 4-6、4-7），後將自製模具置入烘箱預熱。
- 4.將調配完成之粉筆溶液倒入已預熱之自製模具中。
- 5.設定烘箱溫度為 50°C，將溶液連同自製模具一起置入烘箱內加熱烘乾。
- 6.以每 1 小時為單位進行秤重，直至重量不再變化後，將粉筆取出。

註：我們以蛋殼粉、CaSO<sub>4(s)</sub>和 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>含量比例為 2：3：5 為基準，設定一項為控制變因，固定另外兩項之比例，計算出所需之粉體或水重量。

$$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \% = \frac{\text{H}_2\text{O}_{(l)} \text{ 重量}}{\text{粉筆總重量}} \times 100\%$$

為比較 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>含量的影響，我們固定蛋殼粉、CaSO<sub>4(s)</sub>比例製作粉筆。

以 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>含量 10%為例：

設定為 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub> 10%、總重量為 10g，計算出 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub> 重量為 1.0g。其餘 90%以固定 2：3 之蛋殼粉：CaSO<sub>4(s)</sub>比例分配。

$$\text{蛋殼粉}\% = \frac{\text{蛋殼粉重量}}{\text{粉筆總重量}} \times 100\%$$

為比較蛋殼粉含量的影響，我們固定 CaSO<sub>4(s)</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>比例製作粉筆。

以蛋殼粉含量 10%為例：

設定蛋殼粉為 10%、總重量為 10g，計算出蛋殼粉重量為 1.0g。其餘 90%以固定 3：5 之 CaSO<sub>4(s)</sub>：H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>比例分配。

為比較 CaSO<sub>4(s)</sub>含量的影響，我們固定蛋殼粉、H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>比例製作粉筆。

以 CaSO<sub>4(s)</sub>含量 20%為例：

設定 CaSO<sub>4(s)</sub>為 20%、總重量為 10g，計算出 CaSO<sub>4(s)</sub>重量為 2g。其餘 80%以固定 2：5 之蛋殼粉：H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>比例分配。

$$\text{CaSO}_{4(s)} \% = \frac{\text{CaSO}_{4(s)} \text{ 重量}}{\text{粉筆總重量}} \times 100\%$$

本研究所製成之粉筆均以代號表示：

H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>含量為 X%，其代號為：HX。以 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub>含量 10%為例，代號為 H10。

蛋殼粉含量為 Y%，其代號為：CY。以蛋殼粉含量 10%為例，代號為 C10。

CaSO<sub>4(s)</sub>含量為 Z%，其代號為：SZ。以 CaSO<sub>4(s)</sub>含量 10%為例，代號為 S10。

(七) 明礬之製作：

1. 將鋁罐以砂紙磨去瓶身印刷，並裁成小片。(如圖 5-5)
2. 將裁好的鋁片放入裝有 50mL 4M KOH<sub>(aq)</sub> 的燒杯中。
3. 使用磁石加熱攪拌器，將燒杯置於上方加熱，使反應速率加快。
4. 約為 65°C 時，H<sub>2(g)</sub> 氣泡增多(如圖 5-6)。
5. 將溶液於室溫中靜置直到不再生成 H<sub>2(g)</sub>。
6. 取出燒杯中液體置入離心管，對稱放入離心機內，以轉速 3speed 進行離心 5 分鐘。
7. 取出離心管內上層澄清溶液置入燒杯中，並加入 9M H<sub>2</sub>SO<sub>4(aq)</sub> 100mL 使其反應(如圖 5-7)。
8. 將燒杯中的溶液以相同的條件再次離心，離心完畢，可看見離心管內下層的膠狀明礬(如圖 5-8)。

(八) 植物色素萃取及有色粉筆製作：

1. 將要萃取的原料放入果汁機中攪碎或切成小塊。
2. 加入溶劑丙酮，隔水加熱使色素溶解(如圖 5-9)。
3. 將溶出的色素放入離心機中離心 5 分鐘(如圖 5-10)。
4. 將離心後取得的色素溶液與明礬，同時加入粉筆溶液中，並倒入自製石墨模具(如圖 4-6、4-7)中，待其完全乾燥。

註：本研究以 C60 粉筆進行植物染色。



圖 5-5 砂紙磨過的鋁片



圖 5-6 快速溶解的鋁片



圖 5-7 混合之膠狀明礬



圖 5-8 沉澱之膠狀明礬



圖 5-9 色素萃取



圖 5-10 去雜質之色素

(九) 粉筆測試：

1. 附著率：

- (1) 秤塗有黑板漆的紙板原重，再以改良式馬車裝置拖動留下痕跡。
- (2) 計算留有粉筆痕跡的紙板與原紙板重之差異，並求出附著其上的粉筆灰質量。
- (3) 使用電風扇以強風吹 30 秒鐘，再秤一次紙板重量，算出風吹後依然附著於紙板上之粉筆灰質量（如圖 5-11）。
- (4) 計算出附著率。計算公式如下：(單位：%)

2. 剝離率：
$$\text{附著率}\% = \frac{\text{吹 30 秒後紙板重} - \text{紙板原重}}{\text{劃過紙板重} - \text{紙板原重}} \times 100\%$$

- (1) 秤粉筆原重。
- (2) 將粉筆放入密閉離心管內。
- (3) 將離心管置於超音波洗淨機中震動 16 分鐘（如圖 5-12）。
- (4) 取出離心管中的粉筆並秤其重量。
- (5) 計算出剝離率。計算公式如下：(單位：%)

3. 磨損量：
$$\text{剝離率}\% = \frac{\text{粉筆原重} - \text{震後重量}}{\text{粉筆原重}} \times 100\%$$

- (1) 秤粉筆原重後，將粉筆裝入改良式馬車裝置，並在自製黑板上拖動，再次秤量粉筆重量（如圖 5-13）。
- (2) 量出粉筆拖動距離。
- (3) 求出單位距離磨損量。計算公式如下：(單位：g/cm)

$$\text{磨損量 (g/cm)} = \frac{\text{粉筆原重} - \text{拖後重量}}{\text{拖動距離}} = \frac{\text{總磨損量}}{\text{拖動距離}}$$

4. 粉塵飄散集中區：

- (1) 預先鋪好黑色壁報紙，並將皮尺固定於壁報紙右方。
- (2) 再以吹風機開強風吹固定重量之粉塵。
- (3) 固定吹 5 秒鐘後觀察其粉塵集中的範圍（如圖 5-14）。
- (4) 測量粉塵飄散的集中區域。(單位：cm)
- (5) 將集中區粉塵刷下，秤其重量，驗證是否占原粉體重量的 70%。  
註：粉塵範圍內到達 70% 以上之粉塵量，即定義為集中區。

(十) 固含量試驗：

1. 秤模具重量，並將粉筆溶液倒入模具中，並秤其重量。
2. 將烘箱溫度調至最佳溫度 50°C，並將最佳比例之粉筆放入烘箱。
3. 每 1 小時秤量一次重量，計算粉筆烘後重量。
4. 利用公式計算其固含量。計算公式如下：(單位：%)  
註：本研究固含量之定義為：添加固定量粉體佔烘乾時間粉筆總重的含量。

$$\text{固含量}\% = \frac{\text{粉筆總重}}{\text{各時間烘後粉筆總重}} \times 100\%$$



圖 5-11 附著率試驗



圖 5-12 剝離率試驗

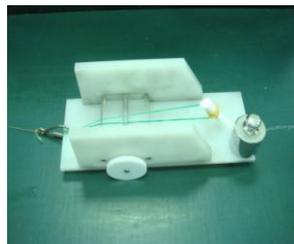


圖 5-13 磨損量試驗

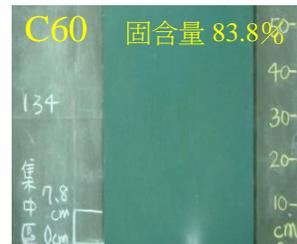


圖 5-14 粉塵飄散集中區

## 陸、研究結果

### 一、乾磨與溼磨之比較：



圖 6-1 乾磨粉體



圖 6-2 溼磨粉體

### 二、氧化鋁研磨球的重量改變：

表 6-1 氧化鋁研磨球重量變化

	D <sub>2.0</sub> 的氧化鋁研磨球
氧化鋁研磨球研磨前平均重量 (g/顆)	14.87
氧化鋁研磨球研磨後平均重量 (g/顆)	14.76
研磨前及研磨後平均相差重量 (g/顆)	0.11
平均每顆減少重量佔原重量之百分比	0.74%
總減少重量佔蛋殼粉體總重量之百分比	0.165%

### 三、排乙二醇速率試驗：

#### (一) CO<sub>2</sub>(g) 溶解試驗：

表 6-2 CO<sub>2</sub>(g) 溶解試驗

	0 分鐘	10 分鐘	20 分鐘	30 分鐘	40 分鐘
CO <sub>2</sub> (g) 溶於水	6.87	5.62	5.04	4.96	4.92
CO <sub>2</sub> (g) 溶於乙二醇	6.94	6.53	6.51	6.51	6.51

單位 (pH)

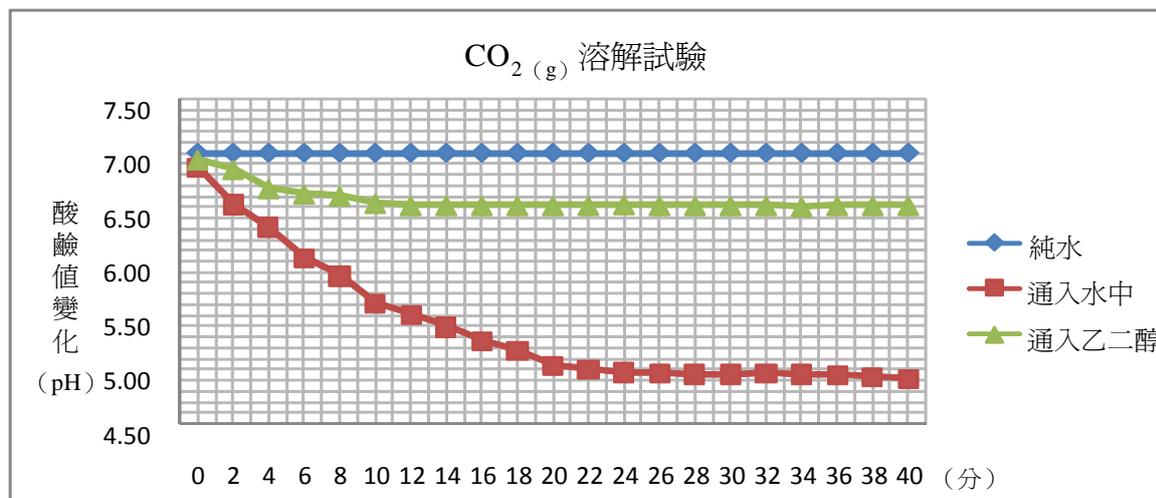


圖 6-3 CO<sub>2</sub>(g) 溶解試驗

(二) 蛋殼粉體與市售  $\text{CaCO}_3(s)$  粉體排乙二醇速率：

表 6-3 乾磨蛋殼粉體排乙二醇速率

乾磨蛋殼粉體研磨時數	粉體 (g)	產生氣體體積 (mL)	反應時間(秒)	排乙二醇速率 (mL/秒)
4 小時	2.0001	15.6	1.54	10.13
5 小時	2.0003	24.4	1.61	15.16
6 小時	2.0005	24.8	1.36	18.24
7 小時	1.9997	28.1	1.28	21.95
8 小時	2.0003	29.8	1.31	22.75
9 小時	1.9998	40.9	1.75	23.37
10 小時	2.0002	30.8	1.32	23.33
11 小時	2.0004	41.1	1.76	23.35
市售 $\text{CaCO}_3(s)$ 粉體	1.9998	42.7	1.66	25.72

表 6-4 溼磨蛋殼粉體排乙二醇速率

溼磨蛋殼粉體研磨時數	粉體 (g)	產生氣體體積 (mL)	反應時間(秒)	排乙二醇速率 (mL/秒)
4 小時	2.0003	18.6	1.37	13.58
5 小時	1.9996	26.5	1.53	17.32
6 小時	2.0002	30.6	1.47	20.82
7 小時	1.9998	38.3	1.48	25.88
8 小時	2.0005	35.0	1.32	26.52
9 小時	1.9998	46.4	1.56	29.74
10 小時	2.0004	39.7	1.29	30.78
11 小時	2.0001	41.2	1.34	30.75
市售 $\text{CaCO}_3(s)$ 粉體	1.9998	42.7	1.66	25.72

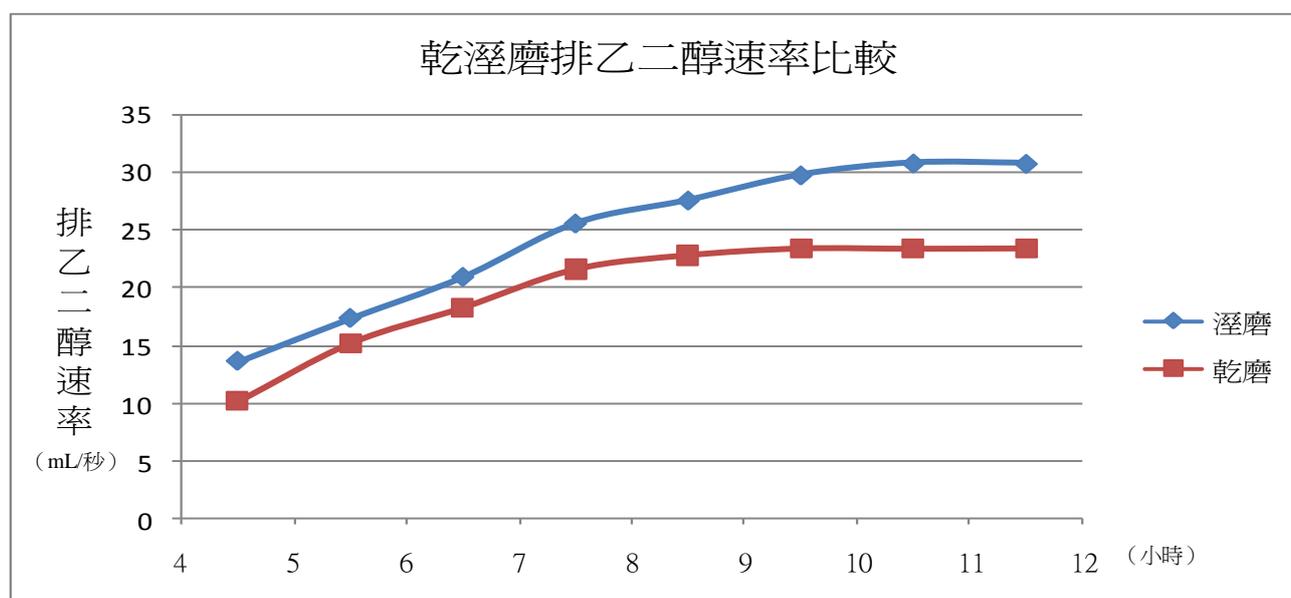


圖 6-4 乾溼磨排乙二醇速率比較

#### 四、廷得耳效應：

以雷射光分別照射粉體溶液，發現以乾磨及溼磨方式研磨至 7 小時後便會有一條光亮的通路顯現，而研磨 6 小時則無此現象（如圖 6-5、6-6）。



圖 6-5 溼磨 6 小時無廷得耳效應

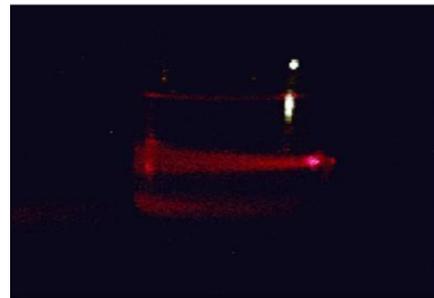


圖 6-6 溼磨 7 小時有廷得耳效應

#### 五、粒徑分析：

表 6-5 乾溼磨粒徑比較

研磨時數(小時)	4	5	6	7	8	9	10	11	市售 CaCO <sub>3(s)</sub> 粒徑
乾磨之粉體粒徑	1.83	0.94	0.63	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.30
溼磨之粉體粒徑	1.46	0.70	0.41	0.28	0.24	0.23	0.22	0.22	

單位 (μ m)

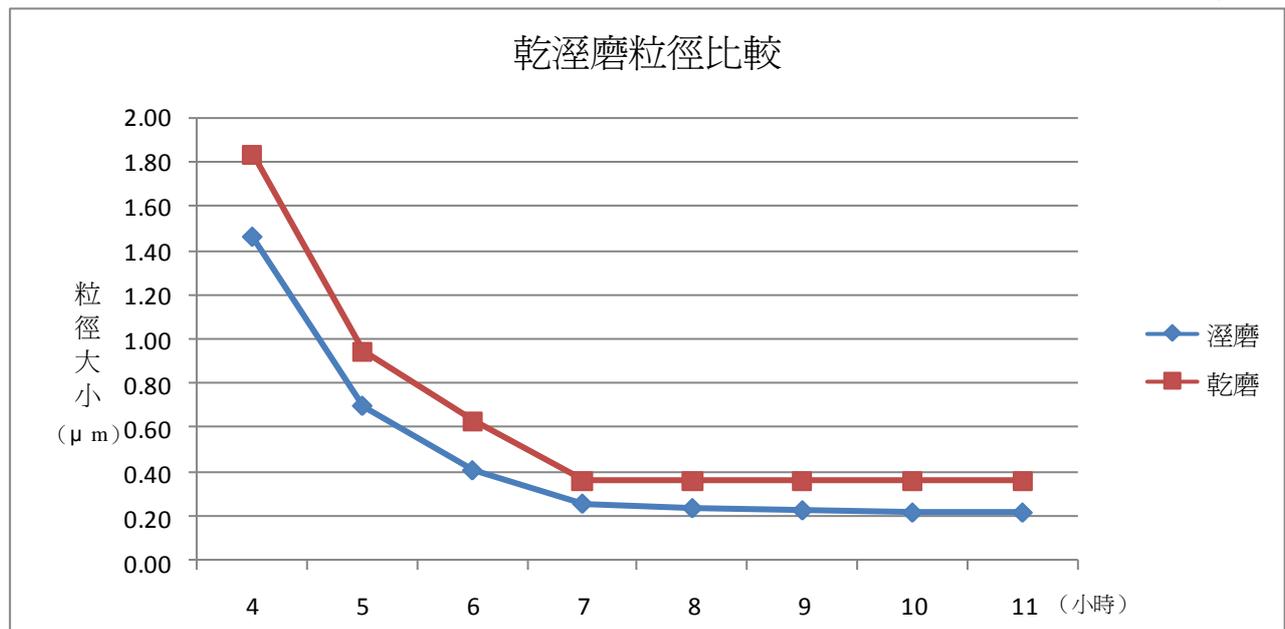


圖 6-7 乾溼磨粒徑比較

#### 六、蛋殼粉體研磨時數對粉筆的影響：

表 6-6 蛋殼粉體研磨時數對粉筆的影響

研磨時數	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量(g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)
4 小時	47.23	0.39	0.203	0~8.5
7 小時	58.75	0.34	0.075	0~12.2
10 小時	62.92	0.32	0.026	0~32.0

註：以 S30 進行測試。

七、加壓之差異：

表 6-7 加壓之差異

	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)
未加壓粉筆	36.75	6.28	0.157	0~31.7
加壓後粉筆	62.92	0.32	0.026	0~32.0

註：以 S30 進行測試。

八、烘乾溫度與時間之關係：

表 6-8 烘乾溫度與時間之關係

	30℃	40℃	50℃	60℃	70℃	80℃
粉筆原重	4.9678	4.8976	5.0027	4.9968	5.0013	5.0007
1 小時	4.9317	4.8527	4.8535	4.7496	4.8128	4.7422
2 小時	4.8834	4.7742	4.7848	4.4797	4.5480	4.3021
3 小時	4.8329	4.6825	4.5664	4.2792	4.1371	碎裂
4 小時	4.7724	4.5917	4.2675	3.9379	碎裂	
5 小時	4.6433	4.5006	3.9683	碎裂		
6 小時	4.5197	4.3911	3.9683			
7 小時	4.3769	4.2864	3.9683			
8 小時	4.2373	4.1593	碎裂			
9 小時	4.0817	3.9784				
10 小時	3.9554	3.9784				
11 小時	3.9554	3.9784				
12 小時	3.9554					

註：以 S30 進行烘乾試驗。

單位 (g)



圖 6-8 加壓粉筆

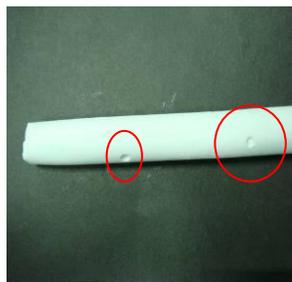


圖 6-9 未加壓粉筆



圖 6-10 S10 粉筆



圖 6-11 H10 粉筆



圖 6-12 黏土模具加熱軟化



圖 6-13 受熱不均粉筆



圖 6-14 高溫碎裂



圖 6-15 完整粉筆

九、H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub> 含量對粉筆的影響：

表 6-9 H<sub>2</sub>O<sub>(l)</sub> 含量對粉筆的影響

H <sub>2</sub> O <sub>(l)</sub>	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)	編號
10%	粉筆無法成形				H10
20%	45.45	0.08	0.027	0~16.5	H20
30%	58.65	0.15	0.030	0~18.3	H30
40%	64.28	0.22	0.032	0~21.5	H40
50%	70.46	0.29	0.035	0~23.1	H50
60%	粉筆無法凝固				H60
市售粉筆	87.74	0.06	0.023	30.0~82.0	市售

十、蛋殼粉含量對粉筆的影響：

表 6-10 蛋殼粉含量對粉筆的影響

蛋殼粉	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)	編號
10%	粉筆無法凝固				C10
20%	69.75	0.35	0.015	0~30.6	C20
30%	72.46	0.56	0.018	0~14.7	C30
40%	73.52	0.64	0.023	0~14.0	C40
50%	77.26	0.75	0.026	0~12.8	C50
60%	81.67	0.91	0.040	0~10.5	C60
70%	74.16	0.98	0.042	0~6.2	C70
市售粉筆	87.74	0.06	0.023	30.0~82.0	市售

十一、CaSO<sub>4(s)</sub> 含量對粉筆的影響：

表 6-11 CaSO<sub>4(s)</sub> 含量對粉筆的影響

CaSO <sub>4(s)</sub>	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)	編號
10%	粉筆無法成形				S10
20%	53.68	0.47	0.042	0~32.0	S20
30%	62.92	0.32	0.026	0~22.6	S30
40%	刮黑板	0.09	0.019	0~14.7	S40
50%	刮黑板	0.02	0.008	0~6.3	S50
市售粉筆	87.74	0.06	0.023	30.0~82.0	市售

## 十二、粉塵飄散試驗結果：



圖 6-16 4 小時飄散試驗

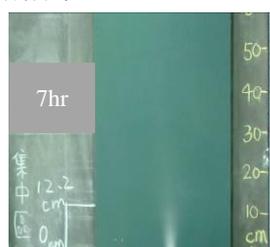


圖 6-17 7 小時飄散試驗



圖 6-18 H20 飄散試驗



圖 6-19 H30 飄散試驗



圖 6-20 H40 飄散試驗



圖 6-21 H50 飄散試驗

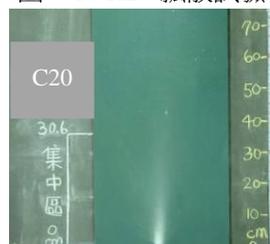


圖 6-22 C20 飄散試驗

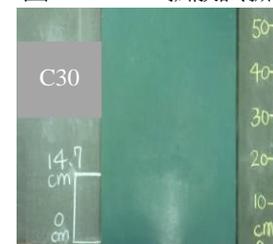


圖 6-23 C30 飄散試驗

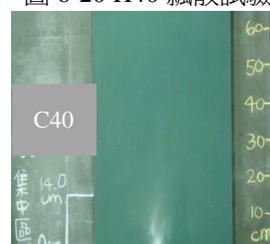


圖 6-24 C40 飄散試驗



圖 6-25 C50 飄散試驗



圖 6-26 C60 飄散試驗

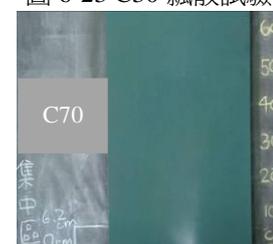


圖 6-27 C70 飄散試驗

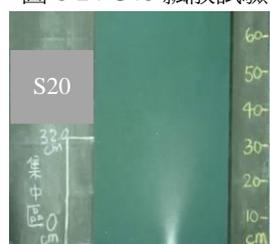


圖 6-28 S20 飄散試驗



圖 6-29 S30 飄散試驗



圖 6-30 S40 飄散試驗

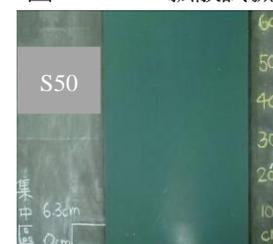


圖 6-31 S50 飄散試驗

## 十三、固含量試驗：

表 6-12 烘乾時間之固含量

	溼重	1 小時	2 小時	3 小時	4 小時	5 小時	6 小時	7 小時	8 小時
C60 粉筆	75.0	75.4	76.3	77.5	80.2	83.8	85.7	88.1	92.3

註：烘乾溫度為 50°C。

表 6-13 固含量測試

單位 (%)

C60 固含量 (%)	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)
75.4	粉筆無法成形			
76.3	粉筆無法成形			
77.5	粉筆因太溼無法書寫			
80.2	粉筆因太溼無法書寫			
83.8	85.07	0.77	0.027	0~7.8
85.7	84.13	0.79	0.029	0~8.7
88.1	83.79	0.83	0.032	0~9.5
92.3	83.27	0.85	0.036	0~10.2

十四、有色粉筆之測試

表 6-14 有色粉筆之測試

	附著率 (%)	剝離率 (%)	磨損量 (g/cm)	粉塵飄散集中區 (cm)
自製綠色粉筆	85.06	0.76	0.026	0~8.0
自製橘色粉筆	84.07	0.75	0.029	0~7.6
自製黃色粉筆	85.07	0.78	0.033	0~7.9
自製紅色粉筆	85.10	0.81	0.031	0~8.2



圖 6-32 菠菜色素 綠色粉筆

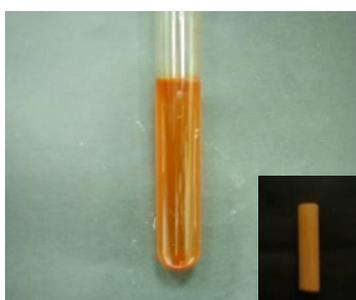


圖 6-33 辣椒色素 橘色粉筆

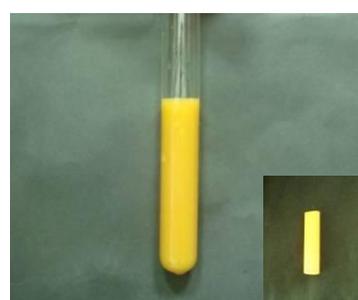


圖 6-34 薑黃色素 黃色粉筆



圖 6-35 番茄色素 紅色粉筆

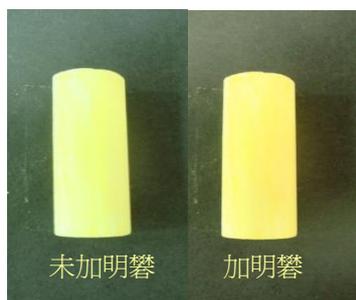


圖 6-36、37 黃色粉筆之差異



圖 6-38 胡蘿蔔褪色粉筆

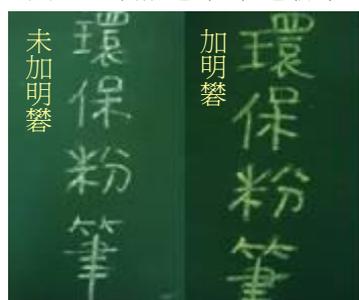


圖 6-39 有無明礬之差異



圖 6-40 自製黑板與科展成功

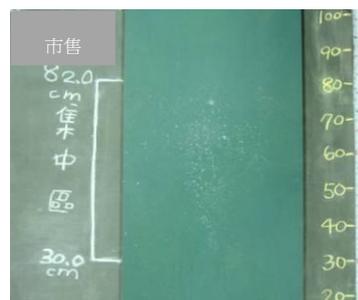


圖 6-41 市售粉塵飄散



圖 6-42 綠色粉塵飄散



圖 6-43 橘色粉塵飄散



圖 6-44 黃色粉塵飄散



圖 6-45 紅色粉塵飄散

## 柒、討論

### 一、選用蛋殼製作粉筆之原因：

貝殼、牡蠣殼、蛋殼等物質均含有  $\text{CaCO}_3(s)$  成份，但因牡蠣殼與貝殼等取得較不容易，且質地過於堅硬不利研磨，故本研究不以其作為原料。由文獻<sup>(14)</sup>得知，蛋殼中含有 92.0~95.8% 的  $\text{CaCO}_3(s)$ ，且廢棄蛋殼無法回收，只能作為一般垃圾焚燒，燃燒後會產生大量的  $\text{CO}_2(g)$ ，為了保護環境、減少溫室效應對地球的影響，故我們選擇將廢棄蛋殼研磨成粉，以取代粉筆中主要原料之一的「 $\text{CaCO}_3(s)$ 」，製成環保粉筆。

### 二、研磨蛋殼：

#### (一) 使用改良式自製滾動研磨機：

未改良之滾動研磨機在高轉速時，滾輪上的 PE 瓶易在研磨過程中掉落，使我們無法確切掌握研磨時數。但在外部加裝鐵製擋板後（如圖 4-1），上述問題便可獲得解決，且能增加本研究之準確性。

#### (二) 選用氧化鋁研磨球之原因：

根據文獻<sup>(15)</sup>可知，氧化鋁研磨球的密度大且硬度大，具有高粉碎性能力，能使蛋殼在不斷撞擊之下被研磨成超細粉體。氧化鋁研磨球的耐磨性高，所以在撞擊過程中較不易產生粉末摻雜於蛋殼粉體內，此可由實驗結果（如表 6-1）得到證實：本研究由開始至結束，使用之氧化鋁研磨球每顆平均之磨損量為 0.74%，且摻雜於蛋殼粉體中之粉末僅占總重的 0.165%，更證明其為適合之研磨球材料。

#### (三) 乾磨與溼磨之差異：

由圖 6-1、6-2 得知，以乾磨的方式研磨蛋殼，當研磨至較小顆粒時，分子間作用力會逐漸增大，產生結塊現象<sup>(16)</sup>；而在溼磨的過程中，因有  $\text{H}_2\text{O}$  分子阻隔在粒子之間作為分散劑，使作用力減小，因而無結塊現象。從表 6-5 可見溼磨之蛋殼粉體分別研磨 4~11 小時的粒徑均小於乾磨，故本研究均以溼磨之蛋殼粉體製作粉筆。

### 三、排乙二醇速率試驗：

為得知研磨時數與蛋殼粉體粒徑之關係，我們利用  $\text{CO}_2(g)$  不溶於乙二醇的特性，以  $\text{HCl}_{(aq)}$  與蛋殼粉體反應產生  $\text{CO}_2(g)$  進行排乙二醇速率試驗（如表 6-3、6-4）。測試時，若反應時間太長，則反應物濃度變化過大；時間若過短，則易產生較大之人為誤差，故本研究設定反應時間為 1~2 秒。由圖 6-4 知，乾磨研磨至 7 小時、溼磨研磨至 10 小時後，排乙二醇反應曲線趨緩，藉由反應速率與接觸面積成正比的關係，間接得知，乾、溼磨分別研磨超過 7、10 小時後，粒徑無顯著差異。若使用排水集氣法，則因反應生成物  $\text{CO}_2(g)$  易溶於  $\text{H}_2\text{O}(l)$ <sup>(18)</sup>，導致在收集  $\text{CO}_2(g)$  體積時會有極大的誤差，影響實驗準確性。為證明  $\text{CO}_2(g)$  溶於水而不溶於乙二醇，本研究尚進行了  $\text{CO}_2(g)$  溶解試驗，結果顯示： $\text{CO}_2(g)$  與水反應，導致 pH 值從 6.87 降至 4.92，而  $\text{CO}_2(g)$  通入乙二醇之 pH 值則於試驗開始後十分鐘，從 6.94 降至 6.53，而後呈現穩定（如表 6-2）。 $\text{CO}_2(g)$  加乙二醇之 pH 值曲線於開始時下降之原因為：

本試驗使用之乙二醇溶液含有水 0.5%， $\text{CO}_2(\text{g})$  溶於其中，故曲線下降，其後則因  $\text{CO}_2(\text{g})$  不溶於乙二醇，曲線趨於平穩（如圖 6-3），故本研究在實驗之前先將所使用之乙二醇飽和，以減少實驗誤差。

#### 四、廷得耳效應：

由排乙二醇速率試驗結果（如圖 6-4）可發現：以乾、溼磨方式研磨 4 至 7 小時，其曲線均有明顯上升的趨勢，可推得此時間範圍內粒徑有較明顯變化。之後進行廷得耳試驗，以驗證蛋殼粉體是否達膠體粒子範圍（ $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{m}$ ）。實驗結果：由圖 6-5、6-6 可知溼磨 6 小時之粉體無廷得耳效應；而 7 小時粉體則有，表示達膠體粒子範圍。

#### 五、粒徑分析：

爲了更精確得知粉體粒徑大小，並驗證廷得耳試驗之結果，本研究委託中央大學化工研究所，以雷射（Laser）光從不同角度照射樣品，再由雷射光的強度算出粒徑大小分布，取粉體粒徑分布集中者以求得平均粒徑（如表 6-5）。

#### 六、選用溼磨 10 小時蛋殼粉體之原因：

由表 6-5 及圖 6-7 知：以溼磨方式進行研磨，可發現研磨 10 小時與 11 小時之粉體粒徑均爲  $0.22\mu\text{m}$ ，表示研磨至 10 小時已達極致。此外，因本研究使用改良式自製滾動研磨機，其耗電功率爲 4.2w，由此計算出：若研磨一小時平均耗電量爲 0.0042 度<sup>(17)</sup>，電廠發電會產生約 2.6754 克的  $\text{CO}_2(\text{g})$  排放量，研磨愈久產生的  $\text{CO}_2(\text{g})$  愈多。根據計算，雖多研磨 1 小時，電費只增加約 0.00882 元，但爲響應環保，我們必需節約能源，盡量減少非必要性的用電量。故本研究研磨至 10 小時後即停止研磨。

#### 七、粉筆製作：

##### （一）模具演變：

首先，使用黏土作爲製作粉筆的模具，但發現已倒入粉筆溶液之黏土模具（如圖 4-2）不易加壓，且放入烘箱後，黏土模具會因溫度上升，而產生軟化的現象，使粉筆變形而斷裂（如圖 6-12）。

接著，改以金屬作爲模具材料（如圖 4-3），倒入粉筆溶液後，靜置於室溫當中，待其凝固後放入烘箱乾燥。但在烘乾過程中因金屬導熱速度快，使得粉筆外部與金屬接觸面積處先受熱，而內部較慢受熱，導致粉筆因內外受熱不均而易在乾燥過程中斷裂甚至碎成粉末（如圖 6-13）。

之後，使用石墨製作模具（如圖 4-4），因其膨脹係數較低、可耐高溫<sup>(19)</sup>，故爲製作模具之較佳材料。但在粉筆成形過程中，溶液遂即凝固於模具管壁之上，導致不易將成形之粉筆取出；又在使用粉筆推出裝置（如圖 4-5）時，因其與石墨模具孔洞大小十分吻合，導致推擠時有空氣阻隔於模具內無法排出，故不能順利將粉筆推出。且因石墨模具成形後加工不易，亦無法將粉筆推出裝置的長桿部分削細以改善推出狀況。最後，我們將石墨模具加以改良，成爲可拆式模具（如圖 4-6、4-7），並在倒入粉筆溶液前，於模具內部塗上一層蠟，希望自製粉筆在成形後，能直接將模具打開，方便取出粉筆，且不會凝固於管壁上。因  $\text{CaSO}_4(\text{s})$  與  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  混合後會有放熱現象，故在將粉筆溶液倒入模具

之前，先將模具預熱，使溶液與模具之間溫度差異降低，所以溶液加入模具後，膨脹率較小，較不易使其變形，故粉筆成形後品質較佳。且因石墨散熱不易，放入烘箱前後，溫度沒有明顯的升降，所以粉筆溶液不易大幅膨脹，凝固後粉筆較不會有膨脹率不同而斷裂的問題，故可在粉筆成形後順利將其取出並維持完整狀態（如圖 6-15）。

#### （二）粉筆加壓：

爲了使粉筆結構更緻密，在粉筆製作過程中增添一個加壓的步驟，使用重量爲 1 公斤的重物作爲加壓的固定壓力，在粉筆製作時給予溶液一個足夠的壓力以達到緻密的效果。如表 6-7：未加壓之粉筆其附著率爲 36.75%，剝離率爲 6.28%，磨損量爲 0.157 g/cm；加壓之粉筆其附著率爲 62.92%，剝離率爲 0.32%，磨損量爲 0.026 g/cm，由此數據可知，若在製作過程中少了加壓的步驟，則整支粉筆的結構鬆散，附著率、剝離率、磨損量皆較差，且在成形過程中因有氣泡阻隔其中，使得粉筆凝固後內部及表面皆有坑洞（如圖 6-9）。因結構鬆散，書寫或撞擊時容易掉粉，造成其剝離率及磨損量皆大；附著率方面，由於其內部不夠緻密，稍一輕觸黑板即大量掉粉，使附著於黑板上的粉量少，故附著率差。而粉塵飄散集中區方面，由於測試時取樣之粉體是收集書寫後兩粉筆掉落之粉塵，二者組成成份與含量皆相同，故測試結果加壓與未加壓之粉筆並無顯著差異。

#### （三）選定烘乾溫度：

爲了較快找到烘乾溫度，本研究取 5g 的 S30 粉筆進行此試驗。由表 6-8 得知，當溫度設定 40°C（或以下）時，因溫度較低，水分蒸發速率較慢，所以不會碎裂，但粉筆需烘乾 9 小時，才能完全乾燥，製作效率差，故不選用此溫度。當烘乾溫度設定爲 60°C（或以上）時，導致粉筆中的水份快速蒸發，易造成結構鬆散，影響粉筆品質，且烘乾超過 4 小時後，會產生碎裂的現象（如圖 6-14）。而溫度爲 50°C 時，不會有碎裂現象，只需 5 小時即可烘乾且效率較好，故選用此溫度烘乾粉筆。

#### （四）無法成形之粉筆：

在粉筆製造過程中， $\text{CaSO}_4(s)$  含量爲 10% 之 S10 粉筆，由於其內部凝固劑  $\text{CaSO}_4(s)$  過少，導致粉筆倒入模具後不易凝固成形，故無法製作出完整的粉筆（如圖 6-10）。另外， $\text{H}_2\text{O}(l)$  含量爲 10% 之 H10 粉筆，由於其含水量不足，與蛋殼粉及  $\text{CaSO}_4(s)$  粉體混合後，隨即於燒杯內硬化，產生結塊現象（如圖 6-11），故亦無法倒入模具內成形；蛋殼粉含量 10% 之 C10 粉筆則因水含

#### （五）色素萃取：

植物中有著許多色素，多數綠色植物內均含有葉綠素和類葉紅素，而類葉紅素又包括葉黃素及葉紅素。茄紅素及  $\beta$ -葉紅素包含於葉紅素中，前述各種色素均屬於脂溶性色素。本研究以菠菜萃取綠色色素，因其含有較大量的葉綠素，又葉綠素不溶於水，而溶於有機溶劑中，故以丙酮進行萃取。根據文獻<sup>(20)</sup>得知，以丙酮作爲溶劑自新鮮植物葉中可萃取 0.9~1.2g/kg 之葉綠

素，故經色素萃取濃縮後，可得到墨綠色之溶液，再以此溶液進行植物染色，可製成綠色之粉筆（如圖 6-32）。接著，我們以胡蘿蔔為原料，因其成份中以呈現黃色之  $\beta$ -葉紅素為主，而呈紅色之茄紅素較前者少，將其加入丙酮後，便可萃取出橘色色素，但在染色之粉筆乾燥過程中，因葉紅素在高溫之下會被分解，故所製出之粉筆產生褪色的現象（如圖 6-38）。其後改採辣椒萃取色素（如圖 6-33），其主要成份為辣椒紅素、辣椒黃素，亦能製得橘色粉筆，且因其只含有少量的葉紅素，故較不會有上述的褪色現象。薑黃屬薑科植物，其成份中含有薑黃素<sup>(21)</sup>，故本研究以薑黃為原料，所萃取之色素呈黃色（如圖 6-34），而製成之粉筆顏色略淡。番茄中因含有 90% 的茄紅素<sup>(22)</sup>，以丙酮萃取可得到較深的紅色色素（如圖 6-35），但因在製作粉筆過程中，將深紅色色素溶液與白色之粉筆溶液混合，會有色素調和之現象，故所製成之有色粉筆較原萃取色素顏色稍淡。

#### （六）自製媒染劑明礬：

本研究以廢棄鋁罐自製明礬（如 p.13），作為染色之媒染劑，一方面幫助色素附著於粉筆上，另一方面使用廢棄鋁罐可達到資源回收再利用的目的。若觀察薑黃萃取出之黃色色素，可發現製作粉筆時若加入明礬作為媒染劑，則製成之粉筆顏色較深、色素附著效果較好（如圖 6-37），反之，粉筆顏色為淡黃（如圖 6-36），經實驗發現，綠色、橘色及紅色亦得到相同結果。

### 八、粉筆測試：

#### （一）馬車裝置改良：

原自製馬車裝置使用曬衣夾作為前腳（如圖 4-8），故其摩擦力較大，導致實驗的準確性降低，因此，我們將其改良為滾動式的馬車（如圖 4-9），以輪子前進可以減少摩擦力，使馬車更順利地運動，且實驗結果的誤差較小，但因摩擦力變小無法使馬車停止行進，其運動到自製黑板邊緣時，需加裝一擋板，以防止馬車掉落。

#### （二）各項測試之目的：

本研究以改良式馬車裝置及電風扇進行附著率測試（如圖 5-11），探討粉筆灰與黑板之間的作用力關係；以超音波洗淨機進行剝離率測試（如圖 5-12），藉由衝擊波撞擊粉筆以探討粉筆內部結構的緻密程度；以改良式馬車裝置進行磨損量測試（如圖 5-13），探討粉筆製作因素與書寫時損耗程度之關係；以自製黑板進行粉塵飄散試驗（如圖 5-14），探討各因素對粉筆灰飄散距離的影響，為驗證是否有大於 70% 之粉塵集中於此區域，先將集中範圍內之粉塵以小刷子輕刷下來，秤其是否達到原重之 70%，若有，則能確定其為粉塵集中區；若無，則需擴大所刷下粉塵飄散集中區的範圍，直到粉體達原重之 70%。

#### （三）蛋殼粉體粒徑對粉筆的影響：

從表 6-6 可知，溼磨 4 小時與 10 小時之粉體製成的粉筆其附著率分別為 47.23%、62.92%，剝離率分別為 0.39%、0.32%，磨損量分別為 0.203 g/cm、0.026 g/cm，粉塵飄散集中區分別為 0~8.5 cm、0~32.0 cm。就附著率而

言，研磨時間愈長，粒徑愈小（如表 6-5），粉體與黑板的接觸面積較大，可以較緊密的與黑板貼合，故附著率較好；反之，粒徑愈大，製成之粉筆質地愈粗糙，附著率愈小，且書寫時會產生刮黑板之現象；剝離率而言，粒徑愈小，其粒子間吸引力愈大，較不易剝離粉筆本身，故剝離率小。就磨損量而言，以粒徑較大之粉體製成粉筆，粉筆內部各粒子排列時產生較大空隙，導致結構不緻密，故其磨損量較大。由圖 6-16、6-17 可知，蛋殼研磨得愈細，其粒子愈小，重量愈輕，故粉塵飄散的集中區較大、範圍較遠。

#### （四） $H_2O_{(l)}$ 含量對粉筆的影響：

因  $H_2O_{(l)}$  在粉筆中可作為分散劑，含量愈多分散效果愈好，粉體與黑板的接觸表面積增加，因此附著率較大（如表 6-9），書寫時的顏色也較深；就剝離率及磨損量而言，因水蒸發後留下空隙，造成粉筆結構鬆散，導致剝離率及磨損量較大；由圖 6-18~6-21 可知，因  $H_2O_{(l)}$  的分子量較小，其含量愈多，分子量大的蛋殼粉與  $CaSO_{4(s)}$  含量相對較少，故粉體粒子重量較輕，以風力進行粉塵飄散試驗時，粉塵集中範圍會較大、飄散集中區較遠。

#### （五）蛋殼粉含量對粉筆的影響：

由表 6-10 可知，就附著率而言，蛋殼粉愈多，因其內部  $CaSO_{4(s)}$  含量相對較少，粉筆質地軟，粉筆與黑板摩擦時，能有較多的粉塵附著於黑板之上，故附著率較大；就剝離率而言，因  $CaSO_{4(s)}$  可作為凝固劑，而蛋殼粉愈多， $CaSO_{4(s)}$  相對愈少，其所能凝固之蛋殼粉有限，粉筆內部的蛋殼粉無法全部被  $CaSO_{4(s)}$  凝固，導致部分粉體易剝離，因此剝離率較大；就磨損量而言，粉筆與黑板接觸時，蛋殼粉含量愈多， $CaSO_{4(s)}$  含量相對變少，凝固作用較弱、粉筆緻密度較低，使得粉筆之磨損量較大；就粉塵飄散集中區而言（如圖 6-22~6-27），蛋殼粉粉體含量愈多，重量較重，以風力吹散時，不易飄散得很遠，導致粉塵飄散距離愈近。

#### （六） $CaSO_{4(s)}$ 含量對粉筆的影響：

由表 6-11 知， $CaSO_{4(s)}$  過少時，粉筆無法成形；但含量過多時，卻會使得粉筆硬度提高，不但無法書寫且會將黑板漆刮落，而無任何附著率可言。至於  $CaSO_{4(s)}$  對剝離率及磨損量的影響：粉筆內部  $CaSO_{4(s)}$  含量愈多，結構愈緻密，粉體粒子不易剝離，使剝離率趨近於零，而磨損量也有減少的趨勢，因為蛋殼粉受  $CaSO_{4(s)}$  作用力的束縛，故書寫不易脫落，而磨損量小。由圖 6-28~6-31 可知，因  $CaSO_{4(s)}$  之分子量大，其含量愈多，粉體重量愈重，故粉體飄散距離近。

#### （七）附著率、剝離率、磨損量及粉塵飄散集中區之關聯性：

由表 6-9、6-10、6-11 可知，附著率愈大時，粉筆磨損量相對愈大，因書寫時，附著於黑板上之粉塵為粉筆磨損後產生，故兩者之數值變化有相同的趨勢。而剝離率也與磨損量有關，剝離率愈大時，表示粉筆內部緻密度愈差，此亦是造成磨損量大之主因。粉塵飄散集中區與其他三項測試無顯著關聯，僅有粉體粒徑大小與各成份比例會影響粉塵飄散範圍。

#### （八）四項試驗之實用性及最佳比例之自製粉筆：

本研究採用具實用性的幾項測試探討粉筆品質。就附著率而言，可知寫於黑板上的字是否明顯易見，使坐離黑板較遠的學生，也能清楚看見；就剝

離率而言，是測試粉筆本身的緻密程度，緻密度高則粉體較不易剝離，使用者較不易沾染粉筆灰於手上；就磨損量而言，可得知自製粉筆之實用程度，高磨損量表示其並不耐用，粉筆壽命較短。就粉塵飄散集中區而言，可間接得知大部分的粉筆灰會影響到多大範圍的同學，若飄散的集中區域大且遠，人體易吸入粉塵而危害身體。自製粉筆中，蛋殼粉含量 60% 之 C60 粉筆其附著率為 81.67%、剝離率為 0.91%、磨損量為 0.040 g/cm、粉塵飄散集中區為 0~10.5 cm，綜合各項數值，可得 C60 為各比例粉筆中較佳者。市售粉筆之附著率為 87.74%、剝離率為 0.06%、磨損量為 0.023 g/cm、粉塵飄散集中區為 30.0~82.0 cm，C60 之飄散範圍遠較市售之飄散範圍集中且距離近，雖其附著率、剝離率、磨損量均較市售粉筆差，但因自製粉筆之粉塵較重，在書寫時會垂直落下，故剝離率及磨損量稍大，對於人體不會產生危害。本研究選擇較佳之 C60 粉筆後，接著進行固含量試驗，藉此改善粉筆品質，得到最佳粉筆。

(九) 烘乾時間對固含量的影響：

本研究以較佳之 C60 粉筆、最佳溫度 50°C 進行烘乾。當粉筆烘乾時間過長時，水分蒸發過多會導致粉筆固含量提高、水含量過少，使粉筆使用時觸感乾澀、質地堅硬而不易書寫，嚴重降低粉筆的品質；粉筆烘乾時間過短時，導致粉筆固含量低、水含量較多，使粉筆書寫時因過溼而不易顯色，無法確定粉筆品質。由表 6-12 得知在烘乾時間為 5 小時，粉筆的固含量為 83.8%，經由測試後（如表 6-13），此固含量的 C60 粉筆品質較佳，因此本研究選用 5 小時烘乾 C60 粉筆。

(十) 固含量對粉筆的影響：

由表 6-13 得知，固含量愈低，粉筆附著率愈好，因其內部  $H_2O_{(l)}$  較多， $H_2O_{(l)}$  作為分散劑使得粉筆內部蛋殼粉與  $CaSO_{4(s)}$  粉體之間的距離變大，增加粉體附著的表面積，書寫時粉塵易附著在黑板上；就剝離率及磨損量而言，固含量愈高因烘乾的時間較長，粉筆中所含水份較少，使得粉筆較乾燥、內部結構較不緻密，因此剝離率及磨損量皆較大；就粉塵飄散集中區而言，固含量愈低，因水分較多，使得粉體的重量增加，以風力進行飄散試驗時，粉塵飄散範圍較近。綜合四項測驗得知：最佳的粉筆是固含量為 83.8% 的 C60 粉筆，其附著率為 85.07%、剝離率為 0.77%、磨損量為 0.027g/cm、粉塵飄散範圍為 0~7.8 cm，為最佳粉筆。

(十一) 有色粉筆：

在固含量為 83.8% 之 C60 粉筆條件下，添加色素和媒染劑明礬，製作出綠色、橘色、黃色、紅色之有色粉筆並加以測試，可從表 6-14 發現加入色素及媒染劑之綠色粉筆其附著率為 85.06%、剝離率為 0.76%、磨損量為 0.026g/cm、粉塵飄散集中區為 0~8.0 cm，而同條件之 C60 粉筆其附著率為 85.07%、剝離率為 0.77%、磨損量為 0.027g/cm、粉塵飄散集中區為 0~7.8 cm，兩者間僅有些微差異，而其餘有色粉筆亦是如此，故可證明在製作有色粉筆時，添加天然染料及媒染劑明礬不會對粉筆品質造成太大的影響。

## 九、經濟環保評估：

### (一) 經濟評估：

以一個學期計算，本校約會使用 40 箱的白色粉筆，一箱有 48 盒，每盒有 45 支粉筆，總量是 86400 支粉筆，粉筆每箱約 1200 元，一學期所需支付的粉筆費用是四萬八千元（平均每支約 0.6 元）。若改為使用自製蛋殼粉筆，每支平均成本不到 0.4 元，86400 支成本也才 34560 元，一學期就能減少約 13440 元的白色粉筆費用，若再加上有色粉筆，所節省的费用更是倍增。自製環保粉筆若取代學校所使用的市售粉筆，不僅能為學校省錢，也能讓使用者在書寫時，能真正安心的使用，不會對人體產生過多的傷害。

### (二) 環保評估：

廢蛋殼燃燒處理會排放出大量  $\text{CO}_2(g)$ ，若以蛋殼中  $\text{CaCO}_3(s)$  含量為 95% 計算，本校合作社每日平均產生 20kg 廢蛋殼，其中便含有 19kg 的  $\text{CaCO}_3(s)$ ，即有 190 莫耳的  $\text{CaCO}_3$  分子，將其全部燃燒處理，會產生 190 莫耳的  $\text{CO}_2$  分子，換算成重量為 8.36kg，即合作社一天產生 8.36kg 的  $\text{CO}_2(g)$ ，一年 365 天產生 3051.4kg，即超過 3 噸的  $\text{CO}_2(g)$  排放量。若將每天製造出的廢蛋殼回收再利用，研磨後製成粉筆，即可減少如此大量的  $\text{CO}_2(g)$ ，對環境的幫助也不容小覷。雖使用電力研磨會消耗電能，使發電廠排放  $\text{CO}_2(g)$ ，但回收蛋殼所減少之  $\text{CO}_2(g)$  遠多於發電廠產生之  $\text{CO}_2(g)$ ，故本研究能達到節能減碳之效果，減少  $\text{CO}_2(g)$  對環境的傷害。

## 十、未來展望：

希望未來可用全蛋殼粉，以高壓的方式，製造出更無污染的環保粉筆，或從其他自然界的物質中得到可替代  $\text{CaSO}_4(s)$  之凝固劑，使得粉筆更天然，不再讓粉筆灰對人體產生各種傷害。也希望可利用其他植物中萃取出品質較佳、顏色明顯，且不會褪色之色素，以利用在多種染色工作上，既天然，亦不破壞環境，又可達到環保的效果。

因市面上所使用的化學媒染劑，其成份大部分皆含有重金屬物質，例如： $\text{CuSO}_4(s)$ 、 $\text{FeCl}_2(s)$ 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7(s)$ ... 等，會使地球受到重金屬污染，且重金屬物質會殘留於生物體內，無法順利排出，故希望能找出天然的原料，製作出較環保的媒染劑，才不會對環境造成傷害，也希望尋找出使用範圍更廣的媒染劑，達到更好的助染效果。

希望未來還可研發出可食用的粉筆，不僅能用來書寫，吃下肚對人體也無任何負面的影響，是真正天然又環保的粉筆。希望能以可食用的素材，例如麵粉、太白粉、玉米粉之類的材料製作，以取代粉筆中原來的化學成分，製作出名符其實的天然粉筆。

## 捌、結論

- 一、以溼磨方式研磨蛋殼，無結塊現象；乾磨則有，故溼磨效果較乾磨佳。
- 二、根據  $\text{CO}_2(\text{g})$  溶解試驗，可知  $\text{CO}_2(\text{g})$  溶於水而不溶於乙二醇，故本研究採用排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_2(\text{g})$ 。
- 三、由排乙二醇速率曲線得知：溼磨粉體反應速率較乾磨快，推知溼磨粉體較乾磨細，且乾磨至 7 小時及溼磨至 10 小時後粉體之反應速率趨於平緩，推知上述研磨時間後，其粒徑大小無顯著變化。
- 四、廷得耳試驗：乾、溼磨 7 小時之粉體皆達膠體粒子範圍 ( $10^{-7}\sim 10^{-9}\text{m}$ )。
- 五、由中央大學化工研究所之粒徑分析，測得乾、溼磨 7 小時粉體粒徑為  $0.36$  及  $0.28\mu\text{m}$ ，兩者均達膠體溶液範圍，亦可證明溼磨粉體粒徑小於乾磨。溼磨 10、11 小時之粉體平均粒徑皆為  $0.22\mu\text{m}$ ，可知溼磨至 10 小時粒徑無明顯差異。
- 六、使用黏土模具製作粉筆，在乾燥過程中，模具易因高溫而軟化；金屬模具則因導熱過快，易使粉筆內外膨脹率不同而斷裂，故兩者皆不適合作為模具。原石墨模具因無法順利取出粉筆，故進一步改良為可拆式模具，能產生上下加壓之效果，且增加模具厚度，避免熱脹冷縮劇烈之情形。
- 七、未加壓之粉筆其附著率為  $36.75\%$ ，剝離率為  $6.28\%$ ，磨損量為  $0.157\text{g/cm}$ ；加壓之粉筆其附著率為  $62.92\%$ ，剝離率為  $0.32\%$ ，磨損量為  $0.026\text{g/cm}$ ，故經加壓之步驟，粉筆表面平滑無坑洞，增加粉筆附著力、結構緊密，且能減少粉筆灰產生。
- 八、以  $60^\circ\text{C}$  以上之溫度烘乾粉筆時，粉筆會產生碎裂的現象；若溫度在  $40^\circ\text{C}$  以下，則烘乾效果有限，且粉筆不易完全乾燥，故將烘乾溫度設定為  $50^\circ\text{C}$  較適宜。
- 九、蛋殼粉體粒徑愈小，粉體與黑板接觸面積較大，故附著率大。且因粉筆結構緻密，故剝離率及磨損量皆小。
- 十、 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  可作為分散劑，使粉體與黑板接觸面積大，故附著率大； $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  含量愈多，粉筆結構愈鬆散，剝離率及磨損量愈大；而因  $\text{H}_2\text{O}$  分子量較小，含量愈多，分子量大的蛋殼粉與  $\text{CaSO}_4(\text{s})$  含量相對較少，粉體重量較輕，故飄散集中區較遠。
- 十一、蛋殼粉多時，粉筆質地軟，較易磨損，使附著於黑板之粉塵增加，故磨損量與附著率均大；因  $\text{CaSO}_4(\text{s})$  相對較少，故蛋殼粉體無法完全被  $\text{CaSO}_4(\text{s})$  凝固，導致剝離率大；蛋殼粉愈多，重量愈重，故粉塵飄散集中區較近。
- 十二、 $\text{CaSO}_4(\text{s})$  含量愈多時，蛋殼粉相對愈少，製成之粉筆較硬，以致附著率較差，甚至有刮黑板之現象。 $\text{CaSO}_4(\text{s})$  可作為凝固劑，使粉筆組織緻密，故含量愈多，剝離率及磨損量愈小，因  $\text{CaSO}_4$  分子量較大，粉塵重量較重，使得粉塵飄散集中區愈近。
- 十三、經試驗得知：蛋殼粉含量  $60\%$  之 C60 粉筆，其附著率為  $81.67\%$ 、剝離率為  $0.91\%$ 、磨損量為  $0.040\text{g/cm}$ 、粉塵飄散集中區為  $0\sim 10.5\text{cm}$ ，為較佳之自製粉筆。
- 十四、烘乾時間為 5 小時，粉筆的固含量為  $83.8\%$ ，其附著率為  $85.07\%$ 、剝離率及磨損量分別為  $0.77\%$  及  $0.027\text{g/cm}$ 、粉塵飄散範圍為  $0\sim 7.8\text{cm}$ ，粉筆品質較佳，故 5 小時為較適宜的烘乾時間。
- 十五、最佳的粉筆是 C60 粉筆固含量為  $83.3\%$ ，其附著率較大為  $85.07\%$ 、剝離率及磨損量較小，分別為  $0.77\%$  及  $0.027\text{g/cm}$ 、粉塵飄散範圍較近為  $0\sim 7.8\text{cm}$ ，因此為最佳粉筆。
- 十六、以丙酮萃取菠菜、辣椒、薑黃、番茄色素可製成綠色、橘色、黃色、紅色之天然粉筆。粉筆染色時添加媒染劑明礬，可增加色素附著。經實驗可知，添加明礬及天然色素對於附著率、剝離率、磨損量、粉塵飄散集中區無顯著影響。
- 十七、未來我們將以太白粉或糯米粉等製作粉筆，不僅可食用又可書寫，能減低粉筆灰對人體的傷害，為真正天然又環保的粉筆。

## 玖、參考資料及其他

- 一、第 14 屆中小學科展作品目錄 <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/14.html>
- 二、第 21 屆中小學科展作品目錄 <http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/21.html>
- 三、洪佩琪、韓詩喻、蔡玉婷、楊雅玲 四十八屆中小學科學展覽會作品說明書 “蛋殼中  $\text{CaCO}_3(s)$  之定量研究”伍-1 排乙二醇速率試驗 p.6
- 四、黃長司、黃芳裕、鐘崇燊 物質科學化學篇下冊 康熙圖書 修訂四版 第七章 化學反應速率 p.26 九十三年八月
- 五、曾國輝 觀念叢書溶液 建弘出版社 第五章 膠體 p.140
- 六、葉名倉 化學下冊 南一書局企業股份有限公司 修訂二版 第十章 金屬元素 10-2 鹼土金屬 p.171 九十八年二月
- 七、中學化學示範實驗 <http://163.23.211.30/laboratory/chemdemo/85/8523045/鉛寶寶再利用.htm>
- 八、邱永亮、魏盛德 科學圖書大庫染色化學(合訂本) 財團法人徐氏基金會 初版十三刷 第二冊 第二節染色藥品 2-5-1 媒染劑 p.55 八十一年二月一日
- 九、駱巨新 分析實驗室裝備手冊 化學工業出版社 初版 第十九章 電動設備 p.520 九十年三月
- 十、續光清 科學圖書大庫食品化學 財團法人徐氏基金會 初版十三刷 第二章 食品之色、香、味 2-1 食品之色與人工著色 p.109 八十一年五月十日
- 十一、林明瑞 物理〈上冊〉 南一書局企業股份有限公司 試閱版 第三章 靜力平衡 3-4 力矩和力偶 p.107 第三章 靜力平衡 3-5 靜力平衡的條件 p.110 第四章 牛頓運動定律 4-5 動摩擦力 p.172 九十六年四月
- 十二、林正裕 以氫電漿處理方法對金膜與自生氧化層矽基材附著力改善之研究 p.15 九十五年六月
- 十三、陳文典、陸健榮、黃福坤 物理〈上冊〉 康熙圖書 修訂一版 p.3 第一章 聲音 1-1 聲音的產生與傳播 九十二年八月
- 十四、石城 家禽世界現代畜殖合訂本 p.18~24 八十八年第七期：  
<http://www.miobuffer.com.tw/landpoultry/199807/02.htm>
- 十五、程道腴、鄭武輝 工業陶瓷 財團法人徐氏基金會 第七章 粉碎與調製 p.84
- 十六、張煥宗、王志傑、邱勝賢、陳振中、曾韋龍 普通化學 台灣東華書局股份有限公司 初版 第八章液體與固體 8-2 分子間作用力 p.175 九十五年四月
- 十七、台灣電力公司 詳細電價表 [http://www.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/11/main\\_3\\_6\\_4.pdf](http://www.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/11/main_3_6_4.pdf)
- 十八、張富昌 科學圖書大庫基礎化學 財團法人徐氏基金會 初版六刷 第四章分類 4-3 二氧化碳 p.132 八十一年六月十日
- 十九、何萬源 化學工業第二冊 正元圖書有限公司 第十一章 無機材料 11-11-1 石墨之性質 p.190 八十四年九月一日
- 二十、續光清 科學圖書大庫食品化學 財團法人徐氏基金會 初版十三刷 第二章 食品之色、香、味 2-1 食品之色與人工著色 p.103 八十一年五月十日
- 二十一、林耕年 應用食品化學 復文書局 八版 第二十三章 調味品及嗜好品 第二節 香辛料 p.236 民國 79 年 4 月發行
- 二十二、續光清 科學圖書大庫食品化學 財團法人徐氏基金會 初版十三刷 第二章 食品之色、香、味 2-1 食品之色與人工著色 p.108 八十一年 五月十日

## **【評語】 040803**

回收廢棄蛋殼自製粉筆，十分環保及健康。研究內容深入詳細探討粉筆製作過程，並測試各項實驗變因來檢測粉筆的品質，研究精神佳。最後利用萃取植物的色素來製造有色粉筆，若能進一步研發更多顏色，內容會更豐富。