

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 化學科

第二名

040204

蛋殼中  $\text{CaCO}_3$  之定量研究

學校名稱：桃園縣私立新興高級中學

作者：	指導老師：
高三 洪佩琪	王建民
高三 蔡玉婷	林宗伯
高三 楊雅玲	
高一 韓詩喻	

關鍵詞：熱重分析、排乙二醇速率、等壓差

## 壹、摘要

本研究利用高中三年所學之熱重分析<sup>(1)</sup>、排乙二醇速率<sup>(2)</sup>、酸鹼滴定<sup>(3)</sup>及等壓差<sup>(4)</sup>四種方法推求蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量。熱重分析試驗是以質量守恆及嘗試錯誤法之概念推得所求，試驗結果，一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 90.8%，土雞蛋殼粉體為 93.9%；排乙二醇速率試驗是利用非勻相反應中，相同接觸面積下，排乙二醇速率與市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  及蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量成正比的關係推得所求，所得結果，一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 87.3%，土雞蛋殼粉體為 89.4%；酸鹼滴定試驗是以逆滴定的方式進行，試驗結果，一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 88.7%，土雞蛋殼粉體為 91.4%；等壓差試驗是於相同壓差下，比較市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  及蛋殼粉體所取克數，結果顯示，一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 87.8%，土雞蛋殼粉體為 90.4%。本研究於試驗結束後，以文獻<sup>(5)</sup>提及之蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量 92.0~95.8% 為標準值進行試驗誤差分析。本團隊於此研究最大之收穫，即是將高中三年所學，學以致用，並得到從做中學的寶貴經驗。

## 貳、研究動機

根據文獻<sup>(18)</sup>，由科學家利用蛋殼成分了解鳥類的食物來源，並探討鳥類的生活環境可知，飼料攝取與蛋殼成分有密切的關係，因此，與老師多次討論後，決定針對蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量，利用高中所學之定量分析方法，如熱重分析、酸鹼滴定，及利用氣體特性與反應速率快慢，藉由土雞和一般飼料雞於飼養上之差異，進行此專題研究（土雞為放山飼養，藉由攝取土壤中的礦物質，促使土雞蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量較一般蛋殼粉體高）。

## 參、研究目的

- 一、測量蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量。
- 二、熱重分析試驗：
  - (一) 質量守恆定律之運用。
  - (二) 利用嘗試錯誤法判斷物質成分。
- 三、排乙二醇速率試驗：
  - (一) 利用排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_{2(g)}$ 。
  - (二) 了解粉體粒徑與排乙二醇速率之關係。
  - (三)  $\text{CO}_{2(g)}$  之檢驗。
- 四、酸鹼滴定試驗：
  - (一) KHP 之配製及標定  $\text{NaOH}_{(aq)}$  之方法。
  - (二) 逆滴定法之使用。
- 五、等壓差試驗：
  - (一) 使用波以耳壓力計測量壓差。
  - (二) 理想氣體方程式之運用。

## 肆、研究設備及器材

### 一、研究設備及器材

鹽酸 ( $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ ) (小島化學)	1 瓶
鄰苯二甲酸氫鉀 (KHP) (小島化學)	1 瓶
乙二醇 ( $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ ) (小島化學)	20 瓶
碼錶	1 個
塑膠盆	1 個
血清篩	1 個
磨砂夾	1 個
錐形瓶 (250ml)	1 個
分子篩除水器	1 個
燒杯 (500ml)	1 個
容量瓶 (500ml)	1 個
抽濾瓶 (250ml)	2 個
橡皮塞	2 個
PE 瓶	6 個
注射針筒	1 支
塑膠滴定管	1 支
玻璃滴定管	1 支
K 型溫度計	1 支
pH 計	1 台
溫控器	1 台
雷射粒徑分析儀	1 台
去離子純水製造機	1 台
電子天秤 (小數點四位)	1 台
磁石加熱攪拌器 (400 )	1 台
石英棉	1 包
封口膜	2 張
氫氣	1 桶
氧化鋁研磨球 (平均直徑 2.5 cm)	數顆
市售 $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$ (小島化學)	500 克
氫氧化鈉 ( $\text{NaOH}_{(\text{s})}$ ) (小島化學)	500 克
塑膠硬管	適當長度
自行研磨之一般蛋殼粉體	研磨 6 小時
自行研磨之土雞蛋殼粉體	研磨 7 小時

## 二、自製儀器

### (一) 自製管狀爐：

1. 目的：為使市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  及蛋殼粉體加熱均勻，本研究於熱重分析試驗中使用自製管狀爐作為加熱工具，並外接溫控器，使爐心能穩定加熱及維持定溫。
2. 過程：購買由防火磚包裹電阻之爐心（長 15.2 公分、內徑 2.2 公分）。使用保溫棉包裹爐心，接著於茶葉罐之蓋子上鑿半徑 2.8 公分之開口，並於茶葉罐側邊鑿兩個可外接電源線之小洞，再將爐心、保溫棉放入茶葉罐後，便可進行加熱（如圖 4-1）。

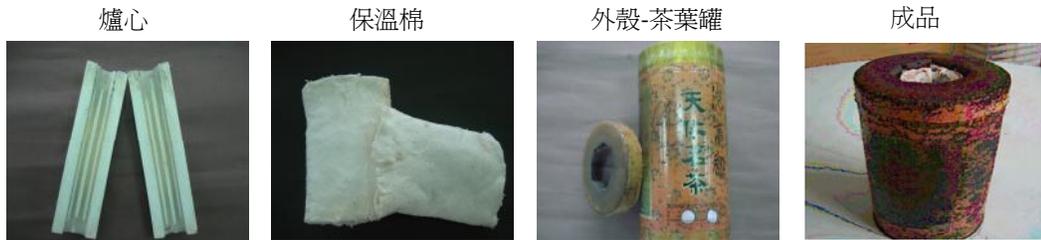


圖 4-1 自製管狀爐使用材料

### (二) 自製 U 型石英反應管：

1. 目的：本研究於熱重分析試驗中使用自製管狀爐作為加熱工具，為配合管狀爐形狀及試驗過程中所需歷經之高溫，本研究選用石英作為材料，製成加熱粉體之反應床。
2. 過程：購買長 1 公尺、內徑 0.4 公分之石英管，交由玻璃加工廠製成 U 型，並於一端上方彎曲，作為氣體通入之預熱段（如圖 4-2），以避免氣體降低粉體溫度，導致試驗誤差。

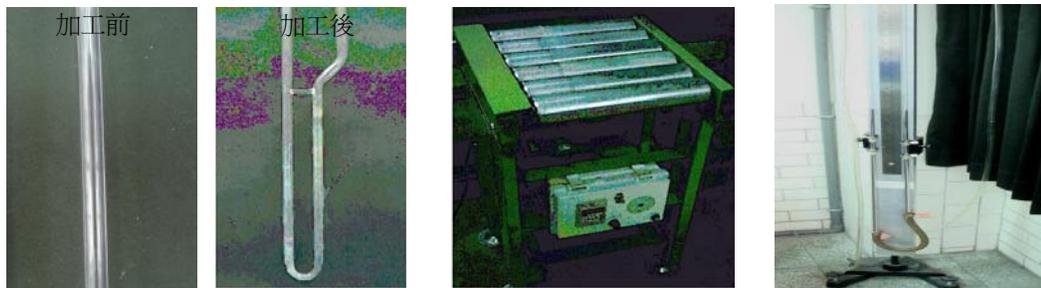


圖 4-2 自製 U 型石英反應管

圖 4-3 自製滾動式研磨機

圖 4-4 自製波以耳壓力計

### (三) 自製滾動式研磨機：

本研究使用自製滾動式研磨機<sup>(6)</sup> 研磨蛋殼至排乙二醇速率試驗所需之超細粉體，其原理是藉由滾輪轉動，帶動 PE 瓶內之氧化鋁研磨球撞擊蛋殼粉體，達到研磨效果（如圖 4-3）。

### (四) 自製波以耳壓力計：

本研究於等壓差試驗中，利用波以耳壓力計測量生成物  $\text{CO}_2(\text{g})$  產生之壓差。試驗中使用之壓力計是將原波以耳壓力計放大製造，目的是為求數據精準（如圖 4-4）。

## 伍、研究過程或方法

### 一、研究原理

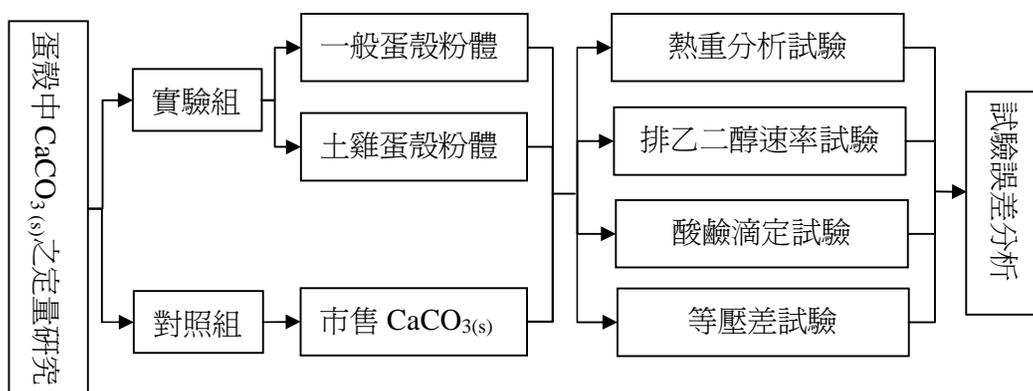


圖 5-1 實驗流程圖

#### (一) 熱重分析法 (TGA)<sup>(1)</sup>：

升溫過程中，物質可能發生脫水、熔解、蒸發、分解及固相轉變等現象。熱重分析便是利用物質於緩緩加熱的過程中所發生之變化，進行分析。當已知成分之混合物以熱重分析法測得其重量變化，即可根據化學反應式，計算其組成比例。

#### (二) 排乙二醇速率法<sup>(2)</sup>：

非勻相反應中，反應速率與接觸面積成正比，為使接觸面積一致，並藉由反應速率差異推得蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量，本研究於排乙二醇速率試驗中，取市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  及研磨至與其相同粒徑之蛋殼粉體，分別加入  $\text{HCl}_{(aq)}$ ，藉由測量生成物  $\text{CO}_{2(g)}$  排乙二醇之速率差異推求蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量。

#### (三) 雷射粒徑分析儀<sup>(7)</sup>：

本研究所使用之粒徑分析儀型號為 Beckman Coulter 230，其工作原理是利用光學模式 PIDS 測量。PIDS 技術是使用三種不同波長之雷射光，外加七道光電二極管光強度感測器所組成，由此三道光之垂直及平行偏振光經過顆粒散射所產生之訊號，經固態晶體轉變成電子訊號，再放大後，透過類比訊號轉換器轉換成數位訊號，傳送至個人電腦，經由軟體運算處理，便可得顆粒粒度分布資料。此光學模式測量之有效粒徑範圍為  $0.04\mu\text{m} \sim 0.40\mu\text{m}$ 。

註：本儀器由中央大學提供

#### (四) 瞬時速率<sup>(2)</sup>：

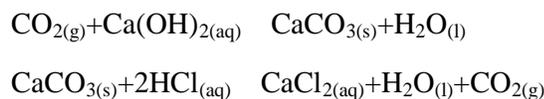
瞬時速率之測定通常是於反應後極短的時間內，以某反應物或生成物的濃度變化作為反應速率之近似值。

(五) 排乙二醇集氣法：

本研究原擬定以向上排空氣法收集  $\text{CO}_{2(g)}$ ，但因向上排空氣法無法收集高純度之  $\text{CO}_{2(g)}$  且無法得知  $\text{CO}_{2(g)}$  生成多寡，又  $\text{CO}_{2(g)}$  溶於水，無法以排水集氣法進行試驗，而乙二醇具有高沸點（ $197^\circ\text{C}$ ）、低蒸氣壓（ $0.05\text{mm-Hg}$ ）<sup>(16)</sup> 及  $\text{CO}_{2(g)}$  不溶於其中等特性，故改以排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_{2(g)}$ 。

(六)  $\text{CO}_{2(g)}$  之檢驗<sup>(8)</sup>：

$\text{CO}_{2(g)}$  通入澄清石灰水溶液，可生成白色  $\text{CaCO}_{3(s)}$  沉澱。本研究於排乙二醇速率試驗中，使用澄清石灰水檢驗蛋殼粉體與  $\text{HCl}_{(aq)}$  反應後產生之氣體是否為  $\text{CO}_{2(g)}$ ，並由此推得粉體中是否含有  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 。其反應式如下：



(七) 酸鹼滴定法<sup>(3)</sup>（逆滴定）：

酸鹼滴定是利用一種已知濃度之酸或鹼性溶液，來測定另一種未知濃度之酸或鹼性溶液的方法。本研究於酸鹼滴定試驗中，因  $\text{CaCO}_{3(s)}$  不溶於水而溶於  $\text{HCl}_{(aq)}$ ，故先將  $\text{CaCO}_{3(s)}$  溶於過量  $\text{HCl}_{(aq)}$ ，再以  $\text{NaOH}_{(aq)}$  滴定。另外，此試驗使用  $\text{NaOH}_{(aq)}$  滴定溶解  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之  $\text{HCl}_{(aq)}$ ，為強鹼滴定弱酸，故以酚酞作為指示劑，其變色範圍為 pH 值  $8.2 \sim 10.0$ ，滴定終點為粉紅色。

1. 當量點<sup>(9)</sup>：酸與鹼之當量數相等，即為當量點。
2. 滴定終點<sup>(9)</sup>：指示劑變色瞬間為滴定終點。

(八) 標定  $\text{NaOH}_{(aq)}$ <sup>(10)</sup>：

本研究於酸鹼滴定試驗中使用 KHP 標定  $\text{NaOH}_{(aq)}$  濃度，並由  $\text{NaOH}_{(aq)}$  之當量數 = KHP 之當量數推得所求。KHP 為一級標準試藥，取得容易、終點明確、界限分明，且其克當量大、準確度高，符合基本標準，適用於以酚酞作為指示劑之滴定。

(九) 理想氣體方程式<sup>(4)</sup>：

於高溫、低壓下，氣體將遵守一共同的極限狀態方程式，此方程式稱為理想氣體方程式。理想氣體定律為一組合定律，包含波以耳定律、查理定律及亞佛加厥定律。方程式如下：

$$PV = nRT$$

註：P 為壓力、V 為體積、n 為莫耳數、R 為氣體常數、T 為絕對溫度

## 二、研究過程或方法

### (一) 熱重分析試驗：

1. 取適量市售  $\text{CaCO}_3(s)$ ，置於 105 之烘箱內。
2. 將石英棉及市售  $\text{CaCO}_3(s)$  分別依照石英棉、粉體、石英棉之順序置入石英管中，並秤其重量。
3. 將石英管及 K 型溫度計（如圖 5-2）置入管狀爐中（如圖 5-3），並於石英管內通入已經過分子篩除水器（如圖 5-4）除水之氫氣。
4. 將溫控器（如圖 5-5）設定每分鐘加熱 10 ，於加熱至 150 、 250 、 350 、 450 、 550 、 650 、 750 、 850 時各停留 30 分鐘後取下秤重，並於 850 停留秤重後再恆溫 30 分鐘。取下秤重前，須先將石英管靜置至室溫，取下時，迅速以封口膜封住石英管管口。
5. 取適量一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體置入 105 之烘箱內，並重複上述 2~4 步驟。

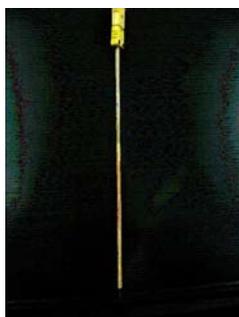


圖 5-2 K 型溫度計



圖 5-3 置入溫度計及石英管之管狀爐

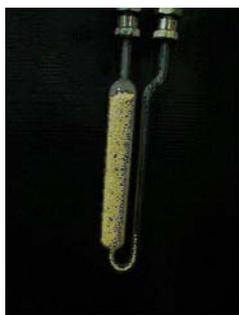


圖 5-4 分子篩除水器



圖 5-5 溫控器

(二) 排乙二醇速率試驗：

1. 校正 pH 計。
2. 將  $\text{CO}_2(\text{g})$  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. 取適量市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 、 $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  20ml 及磁石置於抽濾瓶中。
5. 加入 0.2M  $\text{HCl}(\text{aq})$  20ml 後迅速蓋上橡皮塞，調整磁石加熱攪拌器轉速至 15 (如圖 5-6)。
6. 於量筒中冒出第一顆氣泡後開始計時，3~4 秒間計時停止，並將硬管快速抽出，記錄  $\text{CO}_2(\text{g})$  排開體積。
7. 將產生氣體通入澄清石灰水中，證明其為  $\text{CO}_2(\text{g})$ 。
8. 取適量一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體，重複上述 2~7 步驟。



圖 5-6 排乙二醇集氣法裝置

(三) 酸鹼滴定試驗：

1. 清洗滴定管。
2. 標定 0.1M  $\text{NaOH}(\text{aq})$ ：
  - A. 取 KHP 5.1001 克，加入  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  250ml，配製成 0.1M KHP。
  - B. 以  $\text{NaOH}(\text{aq})$  潤濕旋塞，使開關操作順滑。
  - C. 將 KHP 置入滴定管內，並置於滴定管架上，記錄其體積。
  - D. 取  $\text{NaOH}(\text{aq})$  30ml 置於錐形瓶內並滴入 3 滴酚酞。
  - E. 以 KHP 滴定  $\text{NaOH}(\text{aq})$  至指示劑呈無色 (如圖 5-7)，並記錄 KHP 之滴定量。



圖 5-7 酚酞變色 (無色)



圖 5-8 酚酞變色 (粉紅色)

### 3. $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 滴定過量 $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ :

- A. 取適量市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  及  $0.3\text{M HCl}_{(\text{aq})}$  25ml 置入錐形瓶內，並放入磁石，調整磁石加熱攪拌器轉速至 30，直至  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  不再冒出氣泡。
- B. 將  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  過濾後微微加熱，並滴入 3 滴酚酞。
- C. 以  $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$  滴定，直至指示劑呈粉紅色（如圖 5-8），並記錄  $\text{NaOH}_{(\text{aq})}$  之滴定量。
- D. 取適量一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體，重複上述 A~C 步驟。

#### （四）等壓差試驗：

##### 1. 測量 $\text{CO}_{2(\text{g})}$ 產生之壓差：

- A. 取適量市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  及磁石置入抽濾瓶中，調整磁石加熱攪拌器轉速至 30。
  - B. 將裝有  $0.3\text{M HCl}_{(\text{aq})}$  20ml 之注射針筒插入附有血清篩之抽濾瓶中（如圖 5-9）。
  - C. 注入  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ ，使之與  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  反應生成  $\text{CO}_{2(\text{g})}$ ，並記錄產生之壓差（如圖 5-10）。
2. 取一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉重複上述 A~C 之步驟，調整蛋殼粉體所取克數，使壓差與市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  相等。

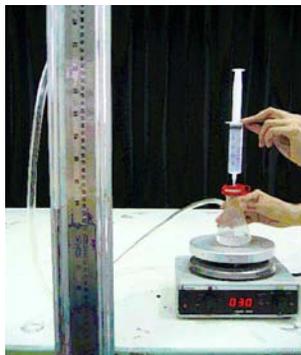


圖 5-9 附有血清篩之抽濾瓶

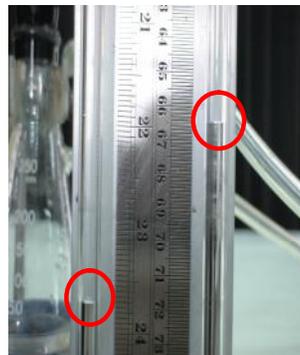


圖 5-10 水銀柱之壓差

## 陸、研究結果

### 一、熱重分析試驗

#### (一) 溫度對各粉體重量之影響：

##### 1. 市售 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ ：

表 6-1 市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 於各溫度之重量變化

溫度 ( )	管中市售 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 之重量 (g)	管中市售 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 之重量 (%)
室溫	0.2614	100.0
150	0.2588	99.0
250	0.2577	98.6
350	0.2571	98.4
450	0.2568	98.2
550	0.2567	98.2
650	0.2565	98.1
750	0.2431	93.0
850	0.1448	55.4
850 恆溫	0.1450	55.5

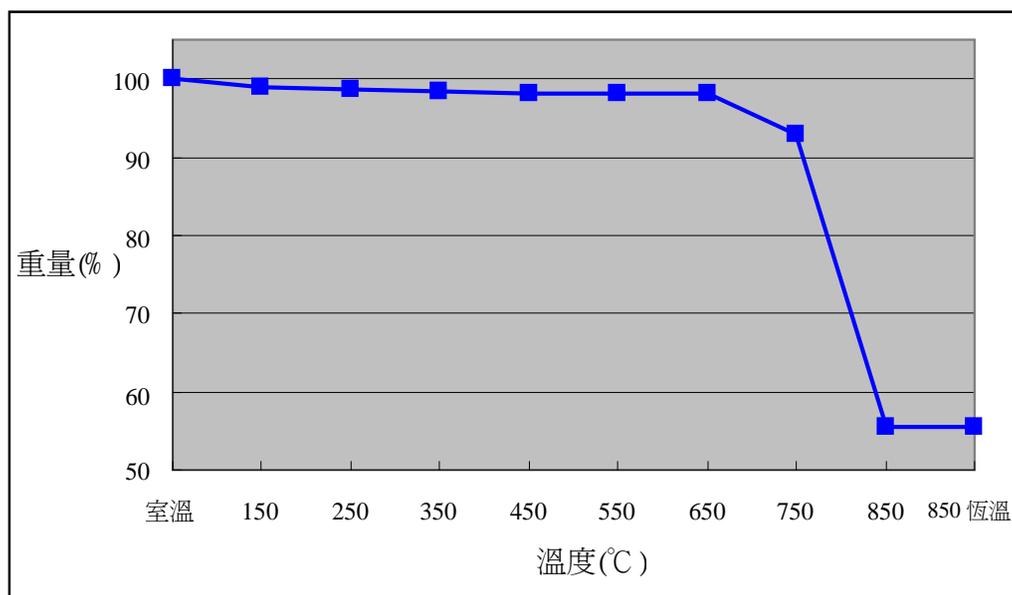


圖 6-1 溫度對市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 之重量變化圖

2. 一般蛋殼粉體：

表 6-2 一般蛋殼粉體於各溫度之重量變化

溫度 ( )	管中一般蛋殼粉體之重量 (g)	管中一般蛋殼粉體之重量 (%)
室溫	0.2613	100.0
150	0.2600	99.5
250	0.2584	98.9
350	0.2570	98.4
450	0.2547	97.5
550	0.2527	96.7
650	0.2485	95.1
750	0.2391	91.5
850	0.1441	55.1
850 恆溫	0.1442	55.2

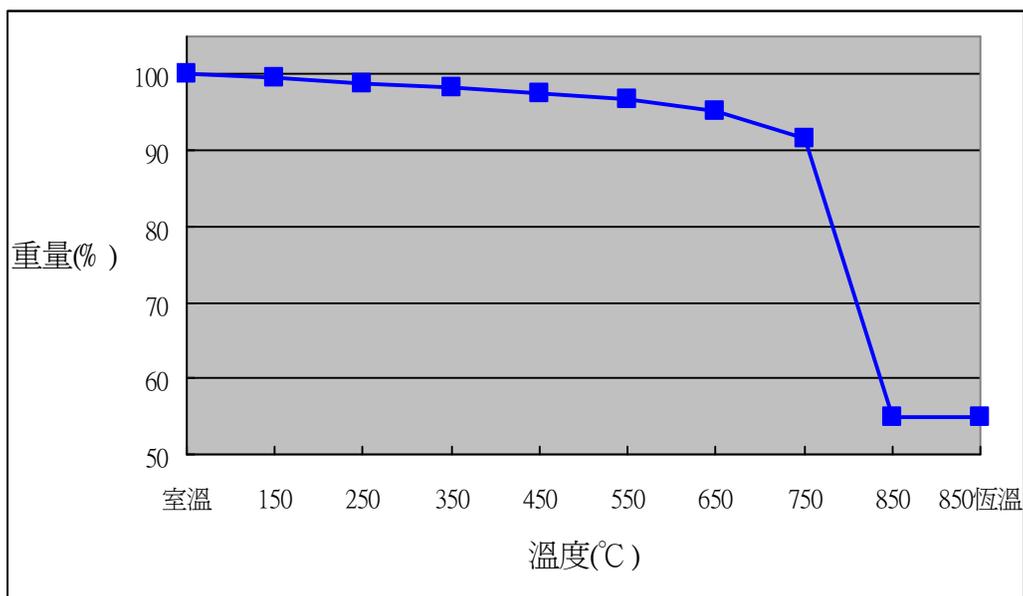


圖 6-2 溫度對一般蛋殼粉體之重量變化圖

3. 土雞蛋殼粉體：

表 6-3 土雞蛋殼粉體於各溫度之重量變化

溫度 ( )	管中土雞蛋殼粉體之重量 (g)	管中土雞蛋殼粉體之重量 (%)
室溫	0.2615	100.0
150	0.2599	99.4
250	0.2572	98.4
350	0.2568	98.2
450	0.2536	97.0
550	0.2505	95.8
650	0.2497	95.5
750	0.2375	90.8
850	0.1417	54.2
850 恆溫	0.1419	54.3

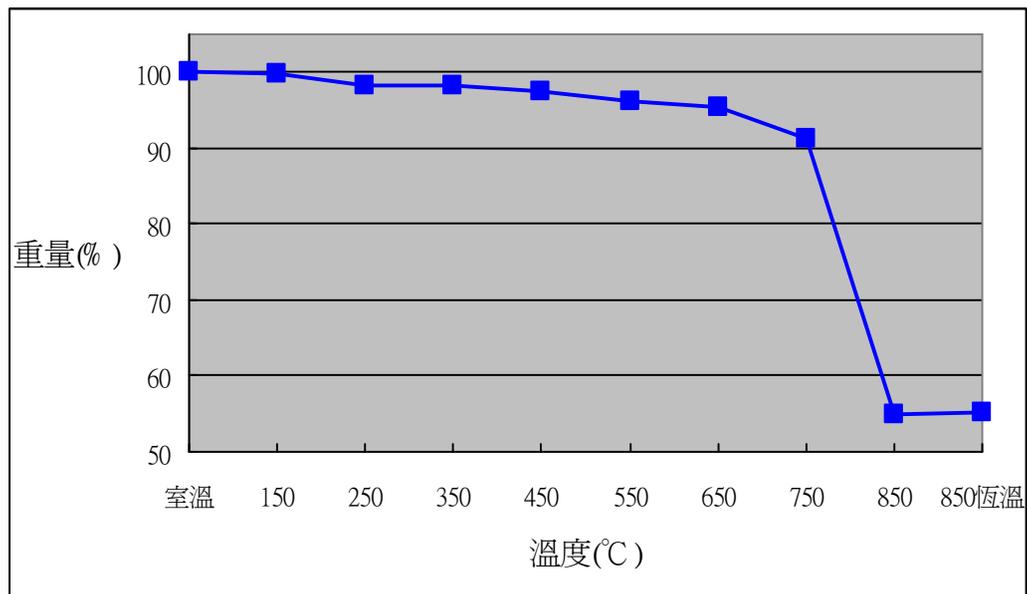


圖 6-3 溫度對土雞蛋殼粉體之重量變化圖

(二) 加熱中石英管內粉體之變化：

市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$

一般蛋殼粉體

土雞蛋殼粉體



圖 6-4 室溫之石英管



圖 6-5 350°C 之石英管



圖 6-6 650°C 之石英管



圖 6-7 850 °C 之石英管

(三) 520 時出現黃褐色凝結物質：

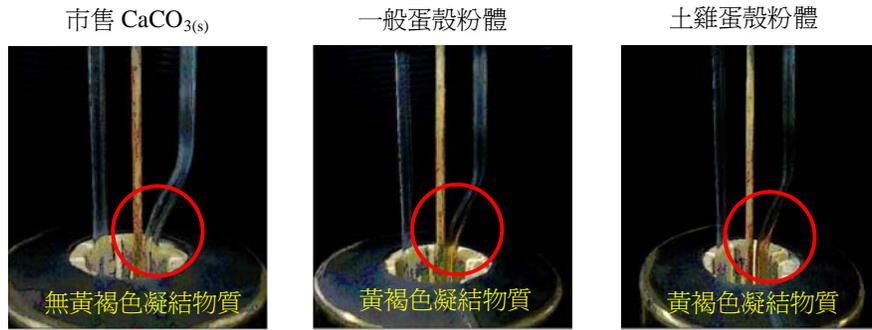


圖 6-8 520 °C 之石英管

(四) 加熱前後之粉體：

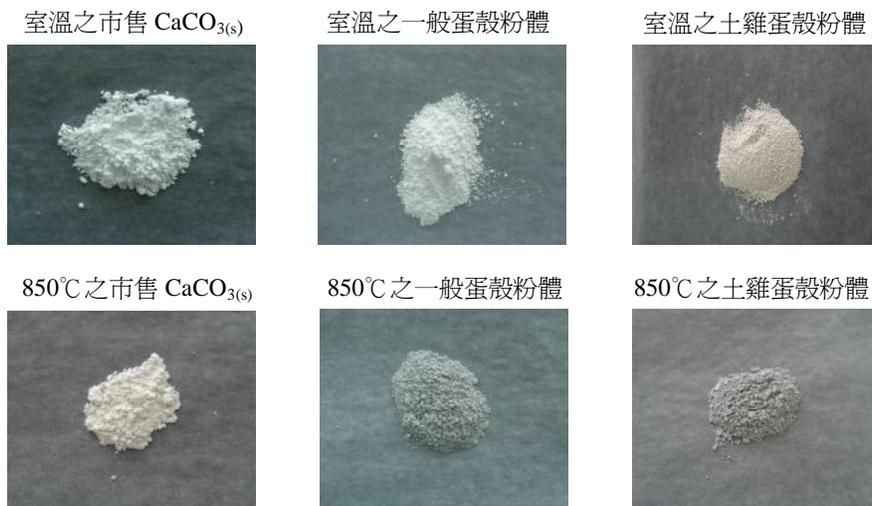


圖 6-9 加熱前後之粉體比較圖

(五) 熱重分析試驗結果：

表 6-4 熱重分析試驗結果

市售 $\text{CaCO}_3(\text{s})$ (%)	一般蛋殼粉體 (%)	土雞蛋殼粉體 (%)
97.1	90.8	93.9

## 二、排乙二醇速率試驗

(一) 市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  及蛋殼粉體平均粒徑大小：

表 6-5 市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$  及蛋殼粉體平均粒徑大小

	市售 $\text{CaCO}_3(\text{s})$	一般蛋殼粉體	土雞蛋殼粉體
研磨時間 (時)	/	6	7
平均粒徑 (um)		0.310	0.318

(二) CO<sub>2(g)</sub>溶解試驗：

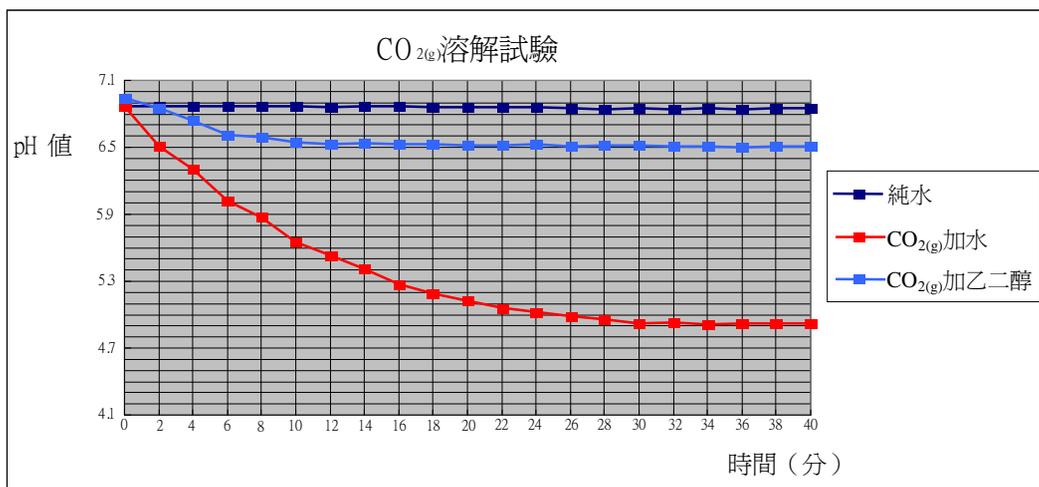


圖 6-10 CO<sub>2(g)</sub>溶解試驗

(三) 乙二醇吸水試驗：

表 6-6 乙二醇吸水試驗

日期	時間	相對溼度 (%)	乙二醇重量 (g)	吸水率 (%)
二月五日 星期一	7:00	67	33.4517	0.0
	19:00	89	34.0952	1.9
二月六日 星期二	7:00	92	35.1316	3.0
	19:00	90	35.8071	1.9
二月七日 星期三	7:00	93	36.6244	2.3
	19:00	76	37.0720	1.2
二月八日 星期四	7:00	85	37.7336	1.8
	19:00	73	38.0361	0.8
二月九日 星期五	7:00	95	38.4945	1.2
	19:00	89	38.6258	0.3

(四) 排乙二醇速率試驗結果：

表 6-7 排乙二醇速率試驗結果

	所取克數 (g)	時間 (s)	CO <sub>2(g)</sub> 排開體積 (ml)	瞬時速率 (ml/s)	含量 (%)
市售 CaCO <sub>3(s)</sub>	1.0001	3'54	27	7.63	98.0
一般蛋殼粉體	1.0001	3'38	23	6.80	87.3
土雞蛋殼粉體	1.0000	3'45	24	6.96	89.4

(五)  $\text{CO}_2(\text{g})$ 之檢驗-石灰水試驗：

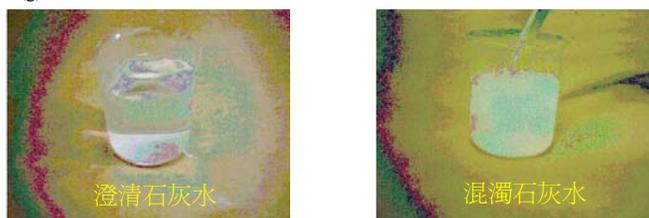


圖 6-11  $\text{CO}_2(\text{g})$ 之檢驗

三、酸鹼滴定試驗

表 6-8 酸鹼滴定試驗結果

	所取克數 (g)	$\text{NaOH}_{(\text{aq})}$ 滴定量 (ml)	$\text{CaCO}_{3(\text{s})}$ 含量 (%)
市售 $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$	0.3001	20.4	97.8
一般蛋殼粉體	0.3000	27.2	88.7
土雞蛋殼粉體	0.3001	25.2	91.4

四、等壓差試驗

表 6-9 等壓差試驗結果

	所取克數 (g)	壓力計兩側壓差 (cm-Hg)	$\text{CaCO}_{3(\text{s})}$ 含量 (%)
市售 $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$	0.2006	11.6	98.0
一般蛋殼粉體	0.2238	11.6	87.8
土雞蛋殼粉體	0.2174	11.6	90.4

五、各試驗誤差範圍

表 6-10 各試驗誤差範圍

	標準值	熱重分析	排乙二醇速率	酸鹼滴定	等壓差
一般蛋殼粉體	92.0~95.8	1.3~5.2	5.1~8.9	3.6~7.4	4.6~8.4
土雞蛋殼粉體	92.0~95.8	2.0~2.1	2.8~6.7	0.7~4.6	1.7~5.6

單位 (%)

## 柒、討論

### 一、蛋殼粉體及市售 $\text{CaCO}_{3(s)}$ 成分

根據文獻<sup>(5)</sup>，蛋殼粉體中含有 92.0~95.8%之  $\text{CaCO}_{3(s)}$  及 3.6~6.5%之蛋白質有機物，此外尚含有  $\text{MgCO}_{3(s)}$ 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  及膠質等成分。而本研究使用之市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  純度為 98.0%，於包裝瓶上標示之 2.0%雜質中包括 0.05%之碳酸鹽類、0.02%之氯化物及 0.04%之硫化物等。另外，根據藥品公司網頁標示<sup>(11)</sup>，2.0%的雜質中還包含了  $\text{SiO}_{2(s)}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_{3(s)}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$  及  $\text{MgO}_{(s)}$ 。

### 二、熱重分析試驗

#### (一) 釋出物質分析：

本試驗將自製 U 型石英反應管（如圖 4-2）置於自製管狀爐（如圖 4-1）中加熱，並於 150、250、350、450、550、650、750、850 恆溫 30 分鐘，目的是為了確定物質完全釋出，取下石英管秤重前，須先將其靜置至室溫，為避免粉體與外界空氣接觸，靜置過程中仍持續通入氬氣，並於取下後迅速以封口膜封住管口。比較溫度對粉體之重量變化圖及試驗過程出現之變化，可將重量百分比曲線分為下面四個部份（如圖 6-1、6-2、6-3）：

#### 1. 室溫加熱至 350：

$\text{CaCO}_{3(s)}$  為多孔性物質，易吸收空氣中的水分，其吸收之水分分為表面水及孔洞水兩種，因此，本研究於進行熱重分析試驗前，先將粉體放入 105 之烘箱內，使  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之表面水能脫離粉體，以避免水分重量影響重量百分比計算。於室溫至 150，市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之重量百分比僅下降 1.0%（如表 6-1），對照市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  成分，2.0%的雜質中並無物質可於此段溫度釋出，因此，可判斷 1.0%的下降為市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  於秤重過程中，空氣含有之微量水分吸附於其表面所導致，同理，一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體 0.5%及 0.6%之重量百分比下降亦然。另外，蛋殼中含有膠質的成分，其分解溫度約為 140°C<sup>(12)</sup>，因此，亦有可能為膠質釋出所導致（如表 6-2、6-3）。而市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體於 150~350 之 0.6%、1.1%及 1.2%的重量百分比減少，為  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之孔洞水釋出。再由 350 之石英棉間並未出現明顯空隙（如圖 6-4、6-5）可判斷，於此段溫度中釋出之物質並不為粉體之主要成分。

### 2.350 加熱至 650 :

於此段加熱過程中，一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體之石英管於彎曲處釋出黃褐色凝結物質，520°C 為凝結物質釋出之最大量，而裝有市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之石英管內則並未有任何變化（如圖 6-8），因此，由蛋殼成分中含有少量蛋白質有機物可判斷，一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體 3.3% 及 2.7% 之重量百分比下降（如表 6-2、6-3）可能是蛋白質有機物分解釋出，而黃褐色凝結物質則為胺基酸變質後之產物。另外，市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  0.3% 之重量百分比下降（如表 6-1），則可能為分解溫度於 400°C 之  $\text{NaCO}_{3(s)}$ <sup>(13)</sup> 以及分解溫度約於 370~500°C 之氰化物<sup>(14)</sup> 分解釋出所產生之變化。

### 3.650 加熱至 850 :

由溫度對粉體之重量百分比曲線大幅下降（如圖 6-1、6-2、6-3），且石英棉間於 850 時出現明顯空隙可判斷（如圖 6-6、6-7），釋出物質為蛋殼粉體主要成分。另外，本試驗使用嘗試錯誤法假設釋出氣體為  $\text{CO}_{2(g)}$ ，若其莫耳數與  $\text{CaO}_{(s)}$  之莫耳數比為 1:1，且反應遵守質量守恆定律，即可證實  $\text{CO}_{2(g)}$  於 650~850 釋出。嘗試錯誤法計算如下：



$W_1$  為室溫之粉體重                       $W_2$  為 350 之粉體重  
 $W_3$  為 650 之粉體重                       $W_4$  為 850 之粉體重

#### A. 室溫加熱至 350 :

$$\frac{W_1 - W_2}{\text{CO}_2 \text{ 分子量}} : \frac{W_2}{\text{CaO 分子量}} \neq 1:1$$

a. 市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ :  $\frac{0.2614 - 0.2571}{44} : \frac{0.2571}{56} \doteq 0.0001:0.0046 \neq 1:1$

b. 一般蛋殼粉體:  $\frac{0.2613 - 0.2570}{44} : \frac{0.2570}{56} \doteq 0.0001:0.0046 \neq 1:1$

c. 土雞蛋殼粉體:  $\frac{0.2615 - 0.2568}{44} : \frac{0.2568}{56} \doteq 0.0001:0.0046 \neq 1:1$

#### B. 350 加熱至 650 :

$$\frac{W_2 - W_3}{\text{CO}_2 \text{ 分子量}} : \frac{W_3}{\text{CaO 分子量}} \neq 1:1$$

$$\text{a. 市售 CaCO}_{3(s)} : \frac{0.2571 - 0.2565}{44} : \frac{0.2565}{56} \doteq 0.00001 : 0.0046 \neq 1 : 1$$

$$\text{b. 一般蛋殼粉體} : \frac{0.2570 - 0.2485}{44} : \frac{0.2485}{56} \doteq 0.0002 : 0.0044 \neq 1 : 1$$

$$\text{c. 土雞蛋殼粉體} : \frac{0.2568 - 0.2497}{44} : \frac{0.2497}{56} \doteq 0.0002 : 0.0045 \neq 1 : 1$$

C. 650 加熱至 850 :

$$\frac{W_3 - W_4}{\text{CO}_2\text{分子量}} : \frac{W_4}{\text{CaO分子量}} = 1 : 1$$

$$\text{a. 市售 CaCO}_{3(s)} : \frac{0.2565 - 0.1448}{44} : \frac{0.1448}{56} \doteq 0.0025 : 0.0026 \doteq 1 : 1$$

$$\text{b. 一般蛋殼粉體} : \frac{0.2485 - 0.1441}{44} : \frac{0.1441}{56} \doteq 0.0024 : 0.0026 \doteq 1 : 1$$

$$\text{c. 土雞蛋殼粉體} : \frac{0.2497 - 0.1417}{44} : \frac{0.1417}{56} \doteq 0.0025 : 0.0025 \doteq 1 : 1$$

由 A、B、C 所得結果可證明 650~850 釋出之物質為  $\text{CO}_{2(g)}$ ，另外，本試驗之重量變化圖（如圖 6-1、6-2、6-3）與文獻<sup>(15)</sup>相符，更可證明本試驗之正確性。

4. 850 後恆溫：

由文獻<sup>(16)</sup>得知， $\text{CaCO}_{3(s)}$ 之分解溫度為 825°C，因此本試驗將末溫訂於 850。於 850 秤重後再恆溫 30 分鐘之目的是為了確定  $\text{CO}_{2(g)}$ 已完全釋出。於此段恆溫過程中，重量百分比曲線變化趨於平緩（如圖 6-1、6-2、6-3），且重量不再減少（如表 6-1、6-2、6-3），可證明  $\text{CO}_{2(g)}$ 已完全釋出。

（二）室溫與 850 粉體顏色之比較（如圖 6-9）：

一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體加熱後呈現灰色而非白色，與市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 加熱後不同，是因蛋殼成分中含有許多無法因加熱而釋出之礦物質，如少量的鉀、鋅、錳、鐵及銅等，導致其呈現灰色。

（三）石英管內外溫度控制：

本試驗使用 K 型溫度計（如圖 5-2）測量管狀爐加熱溫度，但因溫度計無法測量石英管內部溫度，因此為使石英管內溫度與管狀爐加熱溫度相同，本試驗除將石英管加工製成 U 型，增加氬氣停留管中時間外（如圖 4-2），也控制氬氣流速，並於取下石英管秤重前恆溫 30 分鐘，使石英管內外溫度相同。

(四) 粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量之計算 (如表 6-4):

本試驗取市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  0.2614 克、一般蛋殼粉體 0.2613 克及土雞蛋殼粉體 0.2615 克, 已知  $\text{CO}_{2(g)}$  釋出溫度範圍為 650~850 , 即此段溫度之重量減少為  $\text{CO}_{2(g)}$  釋出總重, 再利用  $\text{CaCO}_{3(s)}$  加熱之反應式中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  與  $\text{CO}_{2(g)}$  莫耳數比為 1:1, 即可求得  $\text{CaCO}_{3(s)}$  於粉體中之實際重量, 進而求得  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量。公式如下:

$$\text{CaCO}_3\% = \left[ \left( \frac{650^\circ\text{C粉體重量} - 850^\circ\text{C粉體重量}}{\text{CO}_2\text{分子量}} \right) \times \text{CaCO}_3\text{分子量} \right] \div \text{所取粉體}(g) \times 100\%$$

1. 市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ :  $\left[ \left( \frac{0.2565 - 0.1448}{44} \times 100 \right) \times \frac{1}{0.2614} \times 100\% \right] \doteq 97.1\%$
2. 一般蛋殼粉體:  $\left[ \left( \frac{0.2485 - 0.1441}{44} \times 100 \right) \times \frac{1}{0.2613} \times 100\% \right] \doteq 90.8\%$
3. 土雞蛋殼粉體:  $\left[ \left( \frac{0.2497 - 0.1417}{44} \times 100 \right) \times \frac{1}{0.2615} \times 100\% \right] \doteq 93.9\%$

(五) 誤差原因分析 (如表 6-10):

1. 除  $\text{CaCO}_{3(s)}$  外, 蛋殼粉體中含有少量的碳酸鹽類, 碳酸鹽類之分解溫度大多介於 400~800 之間, 因此於 650~850 釋出之  $\text{CO}_{2(g)}$  並不完全為  $\text{CaCO}_{3(s)}$  所分解, 導致蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量較實際高。
2. 取下石英管秤重過程中, 雖迅速使用封口膜將管口封住, 但管中粉體仍吸收空氣中少量水分, 導致市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  及蛋殼粉體重量增加。但根據試驗結果, 市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 97.1% (如表 6-4), 而其實際純度為 98.0%, 由此可知, 本試驗之誤差僅接近 1.0%。

### 三、排乙二醇速率試驗

(一) 控制變因:

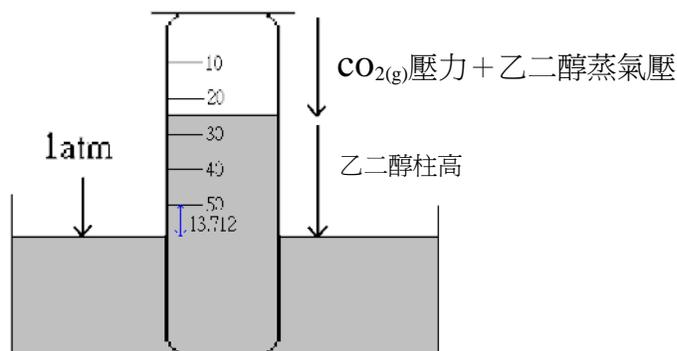
非勻相反應中, 反應速率與接觸面積成正比。本試驗為由排乙二醇速率推得蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量, 須使接觸面積一致, 因此使用自製滾動式研磨機 (如圖 4-3), 將蛋殼研磨至與市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  相同粒徑 (如表 6-5)。

(二)  $\text{CO}_{2(g)}$  之檢驗 (如圖 6-11):

將  $\text{HCl}_{(aq)}$  與蛋殼粉體反應後產生之氣體通入澄清石灰水中, 由產生混濁現象可知此氣體為  $\text{CO}_{2(g)}$  <sup>(8)</sup>。

### (三) 選用乙二醇之原因：

1. 乙二醇及水為極性分子， $\text{CO}_2(\text{g})$ 為非極性分子，理論上  $\text{CO}_2(\text{g})$ 不溶於此二種溶液，但  $\text{CO}_2(\text{g})$ 會與水反應生成  $\text{H}^+$ 及  $\text{CO}_3^{2-}$ ，因此無法使用排水集氣法。為證明  $\text{CO}_2(\text{g})$ 溶於水而不溶於乙二醇，本研究進行  $\text{CO}_2(\text{g})$ 溶解試驗，試驗結果（如圖 6-10）， $\text{CO}_2(\text{g})$ 與水反應導致 pH 值從 6.87 降至 4.92，而  $\text{CO}_2(\text{g})$ 加乙二醇之 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。 $\text{CO}_2(\text{g})$ 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，導致曲線下降，其後則因  $\text{CO}_2(\text{g})$ 不溶於乙二醇，曲線趨於平穩。
2. 因醇類易溶於水，為證明其吸水量不影響試驗結果，本研究進行乙二醇吸水試驗（如表 6-6），試驗結果，每十二小時之吸水率介於 0.3~3.0%，換言之，每秒之最大吸水率僅為 0.00007%，且本試驗採用瞬時速率，反應時間皆為 3~4 秒，因此其吸水量並不影響試驗結果。
3. 乙二醇沸點為 197，高於水之 100，且於 20 時飽和蒸氣壓為 0.05 mm-Hg<sup>(16)</sup>，低於水之 22.6 mm-Hg，經計算，乙二醇蒸氣於市售  $\text{CaCO}_3(\text{s})$ 與  $\text{HCl}(\text{aq})$ 反應生成之  $\text{CO}_2(\text{g})$ 排開體積中，莫耳分率為  $6.642 \times 10^{-5}$ ，一般蛋殼粉體為  $6.651 \times 10^{-5}$ ，土雞蛋殼粉體為  $6.645 \times 10^{-5}$ ，不影響  $\text{CO}_2(\text{g})$ 排開乙二醇之體積，因此可使用乙二醇進行試驗。另外，於研究過程中，曾以丙三醇進行試驗，但因其黏度過高，導致  $\text{CO}_2(\text{g})$ 不易排開，因此不適用於本試驗。乙二醇蒸氣之莫耳分率計算如下：



量筒口徑為 2.3 公分、半徑 1.15 公分，可求得底面積為 4.155 平方公分，而 50 毫升以下至乙二醇液面，高度為 3.3 公分，體積為 13.712 毫升。

A. 乙二醇蒸氣之莫耳數：

試驗過程中，實驗室溫度為 20，相當於絕對溫度 293K，又於 20 時，乙二醇之蒸氣壓為 0.05 mm-Hg，所占體積為 27ml。利用理想氣體方程式，求得乙二醇蒸氣之莫耳數為  $7.393 \times 10^{-8}$ 。乙二醇蒸氣之莫耳數計算如下：

假設乙二醇蒸氣之莫耳數為  $n_1$

$$\frac{0.05}{760} \times 27 \times 10^{-3} = n_1 \times 0.082 \times 293 \Rightarrow n_1 = 7.393 \times 10^{-8}$$

B. 生成  $\text{CO}_{2(g)}$  之莫耳數：

利用內外壓力相等及理想氣體方程式求得  $\text{CO}_{2(g)}$  之莫耳數為  $1.113 \times 10^{-3}$ 。

$$\text{乙二醇柱高之壓力} = \frac{[(50-27)+13.712] \times 1.115}{76} = 9.531 \times 10^{-3} \text{ a t}$$

註：乙二醇之密度  $1.115 \text{ g/cm}^3$

假設 P 為  $\text{CO}_{2(g)}$  壓力， $n_2$  為  $\text{CO}_{2(g)}$  莫耳數

$$P + \frac{0.05}{760} + 9.531 \times 10^{-3} = 1 \Rightarrow P = 0.990 \text{ a t}$$

$$PV = nRT \Rightarrow 0.990 \times 27 \times 10^{-3} = n_2 \times 0.082 \times 293 \\ \Rightarrow n_2 = 1.113 \times 10^{-3}$$

C. 乙二醇蒸氣之莫耳分率：

$$\frac{7.393 \times 10^{-8}}{(7.393 \times 10^{-8} + 1.113 \times 10^{-3})} = 6.642 \times 10^{-5}$$

同理，可求得一般蛋殼粉體與  $\text{HCl}_{(aq)}$  反應生成之  $\text{CO}_{2(g)}$  排開體積中，乙二醇蒸氣之莫耳分率為  $6.651 \times 10^{-5}$ ，土雞蛋殼粉體為  $6.645 \times 10^{-5}$ ，由此可知，乙二醇蒸氣之莫耳分率極小，對於  $\text{CO}_{2(g)}$  排開體積之影響更是微乎其微，故可忽略不計。

(四) 瞬時速率<sup>(2)</sup>：

本試驗採用瞬時速率而非平均速率，並訂定 3~4 秒為測量時間，是因反應過程中， $\text{HCl}_{(aq)}$  濃度會因與  $\text{CaCO}_{3(s)}$  持續反應而下降，導致排乙二醇速率變慢，進而使試驗結果失去其準確性。

(五) 粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量之計算 (如表 6-7):

本試驗所取相同粒徑之市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體之重量分別為 1.0001 克、1.0001 克、1.0000 克。已知市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 98.0%，經由排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_{2(g)}$ ，可得知市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體反應生成  $\text{CO}_{2(g)}$  之速率，利用排乙二醇速率與  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量成正比，即可推得所求。公式如下：

$$\frac{W_{(\text{蛋殼粉體})} \times P\%}{W_{(\text{CaCO}_3)} \times 98\%} = \frac{R_{\text{CO}_2(\text{蛋殼粉體})}}{R_{\text{CO}_2(\text{CaCO}_3)}}$$

已知：試驗所取之市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  重量為 1.0001 克，其與  $\text{HCl}_{(aq)}$  反應

$$\text{產生之 } \text{CO}_{2(g)} \text{ 排乙二醇速率爲 } \frac{27}{3.54} \doteq 7.63(\text{ml/s})$$

1. 一般蛋殼粉體：

假設： $P_1\%$  為一般蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{23}{3.38} \doteq 6.80(\text{ml/s})$$

$$\text{代入公式：} \frac{1.0001 \times P_1\%}{1.0001 \times 98\%} = \frac{6.80}{7.63} \Rightarrow P_1 \doteq 87.3$$

2. 土雞蛋殼粉體：

假設： $P_2\%$  為土雞蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{24}{3.45} \doteq 6.96(\text{ml/s})$$

$$\text{代入公式：} \frac{1.0000 \times P_2\%}{1.0001 \times 98\%} = \frac{6.96}{7.63} \Rightarrow P_2 \doteq 89.4$$

(六) 誤差原因分析 (如表 6-10):

1. 本試驗使用之乙二醇含有水 0.5%， $\text{CO}_{2(g)}$  溶於其中，導致誤差產生，且在讀取秒數時，也會因人為操作而造成誤差。
2. 本試驗所測得之市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$ 、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體之粒徑為平均粒徑 (如表 6-5)，故實際上，粉體粒徑大小並不完全相同，因此導致誤差產生。

#### 四、酸鹼滴定試驗

##### (一) 逆滴定：

由於  $\text{CaCO}_{3(s)}$  溶於  $\text{HCl}_{(aq)}$  而難溶於水，若以  $\text{HCl}_{(aq)}$  直接滴定，反應速率將過慢，導致滴定終點不易判斷，因此本試驗先將粉體溶於過量  $\text{HCl}_{(aq)}$  中，待  $\text{HCl}_{(aq)}$  與粉體完全反應並過濾、加熱後，再以  $\text{NaOH}_{(aq)}$  進行滴定，較能準確判斷滴定終點。

##### (二) 標定 $\text{NaOH}_{(aq)}$ <sup>(17)</sup>：

本試驗原配製 0.1M  $\text{NaOH}_{(aq)}$ ，但因  $\text{NaOH}_{(s)}$  易潮解，也易吸收空氣中之  $\text{CO}_{2(g)}$ ，因此 0.1M 僅為粗略濃度，必須再由標準物質標定其濃度。本試驗以 KHP 做為標準物質，標定 0.1M  $\text{NaOH}_{(aq)}$  30ml，經標定後得  $\text{NaOH}_{(aq)}$  實際濃度為 0.08M，計算過程如下：

已知：KHP 價數=1，濃度=0.1M，且 KHP 之滴定量為 25ml

假設  $\text{NaOH}_{(aq)}$  濃度為 X M

KHP 之當量數 =  $\text{NaOH}_{(aq)}$  之當量數

$$0.1 \times 1 \times 0.025 = X \times 1 \times 0.030$$

$$X \doteq 0.08$$

##### (三) 蛋殼粉體中 $\text{CaCO}_{3(s)}$ 含量之計算 (如表 6-8)：

蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  之當量數 + 滴定所需  $\text{NaOH}_{(aq)}$  之當量數 = 溶解蛋殼粉體所需  $\text{HCl}_{(aq)}$  之當量數

已知：標定後  $\text{NaOH}_{(aq)}$  之濃度為 0.08M，本試驗取 0.3M  $\text{HCl}_{(aq)}$  25ml，及市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  0.3001 克、一般蛋殼粉體 0.3000 克、土雞蛋殼粉體 0.3001 克， $\text{NaOH}_{(aq)}$  之滴定量分別為 20.4、27.2 及 25.2ml。

###### 1. 市售 $\text{CaCO}_{3(s)}$ ：

假設  $X_1\%$  為市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$\frac{0.3001X_1\%}{100} \times 2 + 0.08 \times 1 \times \frac{20.4}{1000} = 0.3 \times 1 \times \frac{25}{1000} \Rightarrow X_1 \doteq 97.8$$

###### 2. 一般蛋殼粉體：

假設  $X_2\%$  為一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$\frac{0.3000X_2\%}{100} \times 2 + 0.08 \times 1 \times \frac{27.2}{1000} = 0.3 \times 1 \times \frac{25}{1000} \Rightarrow X_2 \doteq 88.7$$

###### 3. 土雞蛋殼粉體：

假設  $X_3\%$  為土雞蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$\frac{0.3001X_3\%}{100} \times 2 + 0.08 \times 1 \times \frac{25.2}{1000} = 0.3 \times 1 \times \frac{25}{1000} \Rightarrow X_3 \doteq 91.4$$

(四) 誤差原因分析 (如表 6-10):

本試驗利用指示劑顏色變化判斷是否到達滴定終點,但因終點判斷過於主觀,易造成誤差。實驗過程中,曾嘗試使用溫度變化,判斷是否到達滴定終點,但因本試驗使用之  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  濃度過低,導致溫度變化並不明顯,故無法使用此種方式判斷。另外,試驗結果,市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  含量為 97.8%,而本試驗所取之市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  實際含量為 98.0%,由此可知,本試驗之誤差可低於 1.0%。

五、等壓差試驗

(一) 自製波以耳壓力計 (如圖 4-4):

本試驗利用波以耳壓力計測量市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$ 、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體與  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  反應產生  $\text{CO}_{2(\text{g})}$  之壓差 (P),並利用理想氣體方程式,體積及溫度固定時,相同壓差下, $\text{CO}_{2(\text{g})}$  之莫耳數相同,進而以產生相同莫耳數之  $\text{CO}_{2(\text{g})}$  所需的蛋殼粉體重量與市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  比較,推求蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  含量。本試驗原擬定將實驗組及對照組各置於壓力計兩側,並同時注入  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$ ,由兩側汞柱等高即可得知壓差相等,進而由理想氣體方程式推得  $\text{CO}_{2(\text{g})}$  之莫耳數相等,且以此方式進行所產生之誤差較小,試驗結果也較為準確。但經試驗後發現,若同時測量,會因產生之壓力過大,導致波以耳壓力計之軟管脫落,致使水銀及氣體洩出,因此,本試驗將各粉體分開測量壓差。

(二) 使用血清篩及注射針筒:

為避免反應發生時  $\text{CO}_{2(\text{g})}$  外洩,造成壓差不準確,本試驗將抽濾瓶瓶口套上血清篩及磨砂夾,並且以注射針筒注入  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  之方式進行試驗 (如圖 5-9)。

(三) 蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  含量之計算 (如表 6-9):

取 0.2006 克市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  為對照組,使之與  $\text{HCl}_{(\text{aq})}$  反應產生  $\text{CO}_{2(\text{g})}$ ,測得壓力計兩側壓差為 11.6 cm-Hg。調整蛋殼粉體所取重量,使壓差等於 11.6 cm-Hg,再將所取重量與市售  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  比較,求出蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  含量。公式如下:

$$\text{市售 } \text{CaCO}_{3(\text{s})} \text{ 所取重量(g)} \times 98.0\% = \text{蛋殼粉體所取重量(g)} \times X\%$$

1. 一般蛋殼粉體:

壓差為 11.6 cm-Hg 時,所取克數為 0.2238 克

假設:  $X_1\%$  為一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$  含量

$$0.2006 \times 98.0\% = 0.2238 \times X_1\%$$

$$X_1 = 87.8$$

## 2. 土雞蛋殼粉體：

壓差為 11.6 cm-Hg 時，所取克數為 0.2174 克

假設： $X_2\%$  為土雞蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量

$$0.2006 \times 98.0\% = 0.2174 \times X_2\%$$

$$X_2 \doteq 90.4$$

### (四) 誤差原因分析 (如表 6-10)：

因本試驗是使用開口式壓力計，與一大氣壓做比較，因此，溫度、溼度等變化，造成大氣壓力的波動，為試驗誤差之原因。另外，本試驗使用之波以耳壓力計精準度僅至  $\pm 0.1 \text{ cm-Hg}$ ，導致壓差無法完全相等，造成試驗誤差。

## 六、未來展望

### (一) 蛋殼之應用：

將四項試驗結果加以比較分析，平均而言，一般蛋殼粉體中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量為 88.7%，土雞蛋殼粉體為 91.3%，因飼養方式不同，蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量相差 2.5%，且根據文獻<sup>(18)</sup>，近期在澳大利亞內陸發現遠古時代鳥類的化石，科學家不但將化石加以分析，更將鳥類的蛋殼進行研究，利用蛋殼成分了解鳥類的食物來源，探討鳥類的生活環境，本研究結果及文獻都驗證了飼養方式與蛋殼成分有著密不可分的關係，若是能調整飼養方式，使其  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量增加，廠商與店家配合，回收蛋殼並加以利用，便能將日常生活中最容易取得的物品發揮功用。目前市面上關於鈣的產品，如牙粉、牙膏、鈣片等，早期大多是將牡蠣殼及貝殼中的  $\text{CaCO}_{3(s)}$  萃取製成，但日前，牡蠣殼因受海水污染而累積大量的重金屬，若製成鈣片食用，約有九成的重金屬會囤積在骨頭裡，而且其半衰期甚長，倘若孕婦誤食此種產品後，將會導致胎兒鉛中毒，雖然業者將來源改為以  $\text{CaCO}_{3(s)}$  高溫灰化後轉換成的  $\text{CaO}_{(s)}$ ，但仍然容易發生重金屬污染或殘留菌等危險，若是能將日常生活中最容易取得的蛋殼加以利用，不但減少危害健康的可能，又兼顧環保的概念，為兩全其美的辦法。

### (二) 試驗方法之改進：

本研究使用之四項試驗皆印證高中所學。但是四項試驗所得之數據與文獻有些微誤差，產生誤差之原因包括人為判斷的差異，如當量點的判斷，使用儀器不夠精確，如手調式滴定管並不如自動精準等，皆是有待加強改善的。另外，排乙二醇速率試驗中，因無法在碼錶計時停止瞬間抽出管子，停止氣體排出，致使試驗結果不如預期，因此，我們希望未來能使用更完善的器材，如紅外線和電腦同時控制，使氣體能準確的在第三秒末停止釋出。另外，我們也希望能使用更精準的儀器（如原子吸收光譜）推得蛋殼中  $\text{CaCO}_{3(s)}$  含量。

## 捌、結論

- 一、熱重分析試驗中，一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體於室溫至 150 釋出吸附在  $\text{CaCO}_{3(s)}$  表面的水分及膠質，150~350 釋出的則為  $\text{CaCO}_{3(s)}$  孔隙中的水分，350~520 為蛋白質有機物的分解， $\text{CaCO}_{3(s)}$  加熱分解後產生  $\text{CO}_{2(g)}$  的溫度範圍則為 650~850 。
- 二、熱重分析試驗中，市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  所含 2.0% 雜質，除了分解溫度於 400 之  $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$  以及分解溫度約在 370~500 之氯化物外，其餘物質分解溫度大多高於 850 ，因此，於加熱至 650 前，重量減少非常細微。
- 三、一般蛋殼粉體及土雞蛋殼粉體中皆含有無法經加熱釋出之礦物質，因此加熱後蛋殼粉體呈現灰色，與市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  不同。
- 四、 $\text{CO}_{2(g)}$  溶於水而不溶於乙二醇，而乙二醇之吸水率每秒低於 0.00007%，且其蒸氣之莫耳分率最多僅為  $6.651 \times 10^{-5}$ ，不影響試驗結果，因此本試驗可使用排乙二醇集氣法收集  $\text{CO}_{2(g)}$ 。
- 五、 $\text{HCl}_{(aq)}$  濃度會因與  $\text{CaCO}_{3(s)}$  持續反應而逐漸下降，因此排乙二醇速率試驗使用瞬時速率。
- 六、 $\text{CaCO}_{3(s)}$  溶於  $\text{HCl}_{(aq)}$  而難溶於水，為準確判斷終點，本研究採用逆滴定方式進行酸鹼滴定試驗。
- 七、因  $\text{NaOH}_{(s)}$  容易潮解，且易吸收  $\text{CO}_{2(g)}$ ，無法準確配製濃度，因此於酸鹼滴定試驗採用鄰苯二甲酸氫鉀(KHP)做為標準物質，重新標定  $\text{NaOH}_{(aq)}$  濃度。
- 八、波以耳壓力計下方之軟管及抽濾瓶之血清篩無法承受過大的壓力，因此等壓差試驗無法同時測量市售  $\text{CaCO}_{3(s)}$  與蛋殼粉體之壓力。
- 九、四種試驗結果如下：

	標準值		熱重分析 試驗	排乙二醇 速率試驗	酸鹼滴定 試驗	等壓差 試驗
一般蛋殼 粉體	92.0~95.8	$\text{CaCO}_{3(s)}$ 含量	90.8	87.3	88.7	87.8
		誤差範圍	1.3~5.2	5.1~8.9	3.6~7.4	4.6~8.4
土雞蛋殼 粉體	92.0~95.8	$\text{CaCO}_{3(s)}$ 含量	93.9	89.4	91.4	90.4
		誤差範圍	2.0~2.1	2.8~6.7	0.7~4.6	1.7~5.6

單位 (%)

## 玖、參考資料及其他

- 一、陳陵援、吳慧眼 儀器分析 三民書局 初版 第十五章熱分析法 P.289  
八十六年八月
- 二、黃思長、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
- 三、黃思長、黃芳裕、鐘崇燊 物質科學化學篇下冊 康熙圖書 修訂四版 第八章  
酸與鹼 P.33 P.47 P.50 九十三年八月
- 四、卓靜哲、施良垣、黃守仁、蘇軾剛、何瑞文 物理化學 三民書局 修訂初版  
第二章 氣體及液體 P.11 八十六年九月
- 五、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>
- 六、吳俊益、黃嘉慶、黃如鴻、鄧立敏 四十四屆中小學科學展覽會作品說明書  
肆-2 自製滾動式研磨機 P.5
- 七、賴建宇研究生、李永春博士 高強度超音波與氣泡空蝕場應用於奈米粉體製  
備與養份萃取 P.54 九十四年七月
- 八、楊永華、張麗英、羅世焜、何世錫 基礎化學 三民書局 修訂二版二刷  
第二章 自然界的物質 軟水與硬水 P.15 九十一年三月
- 九、吳銘鎮 新化學精粹 ( ) 建宏出版社 最新版 第七章酸與鹼 P.7-49  
八十一年二月
- 十、染化雜誌社·染化資訊網站：  
<http://www.dfm.com.tw/text/tb00-2e11.htm>
- 十一、梅林白石化(股)公司-成分分析表：  
<http://www.ml.com.tw/chinese/camposition%20anacysis.htm>
- 十二、染色處理用漿料與糊料 第十三章第六節：  
<http://www.dfm.com.tw/dasp/dfaux-1/sz06-p.htm>
- 十三、碳酸鈉 (SODIUM CARBONATE)：  
<http://www.dfm.com.tw/safe/safe/7122.html>
- 十四、研究成果：  
<http://jjliang.idv.fcu.edu.tw/%AC%E3%A8%A6%A8%AAG.htm>
- 十五、Ye Sheng, Bing Zhou, Nannan Tao, et al., Journal of Colloid and Interface  
Science 272 (2004) 326-329
- 十六、黃榮茂、黃禹文 化學化工高科辭典 曉園出版社 第二版 P.168 P.401  
一九八九年元月
- 十七、黃思長、黃芳裕、鐘崇燊 物質科學化學篇實驗活動手冊下冊 康熙圖書  
修訂三版 實驗七酸鹼滴定 P.7 九十三年八月
- 十八、生活起義：<http://www.life123.org/site/?p=116>

**【評語】** 040204

本作品利用四種不同方法檢測雞蛋殼含  $\text{CaCO}_3$  的成份。其中所使用的器材大都為自製。獲得之結果可信度高，具有相當之研究水平。特給予第二名之獎勵。