

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 化學科

佳作

030214

隨「晶」所欲，從「核」開始

學校名稱：桃園縣立大成國民中學

作者： 國二 陳冠儒 國二 秦宗佑 國二 翁維謙	指導老師： 呂昕潔 黃永定
---	-----------------------------

關鍵詞：過飽和、醋酸鈉、晶核

摘要

我們已經知道，過飽和醋酸鈉水溶液可以產生結晶放熱反應，之後再利用過飽和醋酸鈉水溶液放熱特性，製作出了一些簡易的暖暖包，經過詳細的觀察後，測量出它的多種性質：不同過飽和醋酸鈉水溶液濃度與質量，它們分別的溫度、持久時間等。除此之外，為了要使自製暖暖包更迅速、更簡易的產生出結晶，所以我們便將長尾夾、髮夾、彈簧等各式各樣不同的觸發介質丟入自製暖暖包裡面，或是利用在袋外敲擊、按壓、音叉震動等不同的方式來使它產生結晶，並探討與延伸結晶之位置及結晶困難與簡單的程度。最終，我們期望能做出一個能重複使用、不會發生低溫燙傷、又可以維護大自然的自製暖暖包。

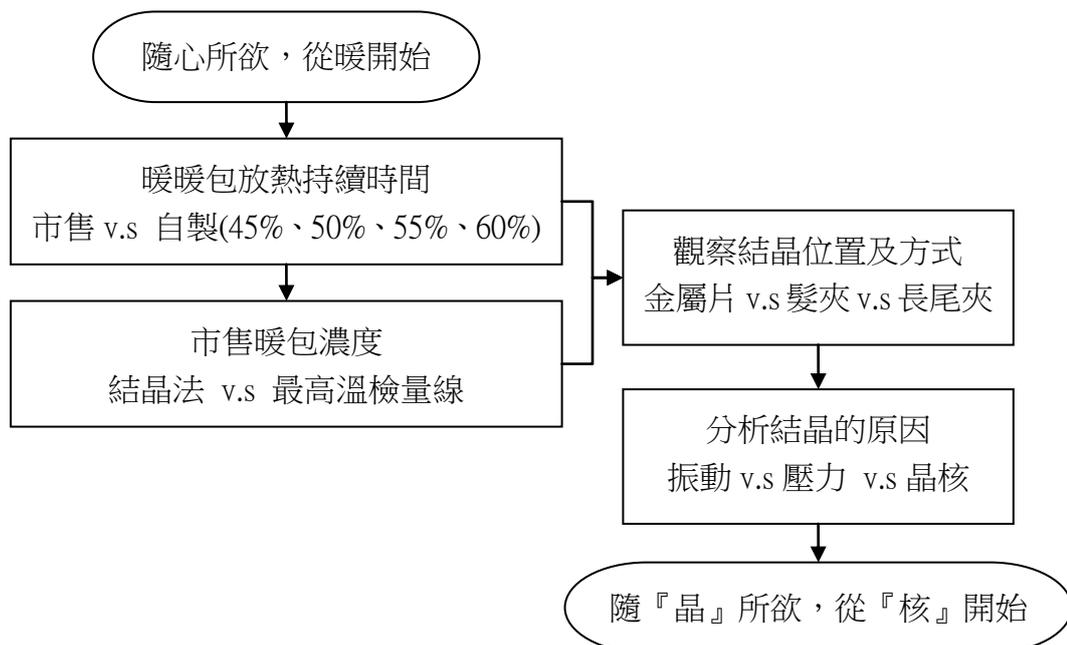
壹、研究動機：

自有印象以來，今年冬天真是最冷的一次了，在這天寒地凍的氣候裡，寒風凜冽，氣溫低糜，做什麼事都讓人十分痛苦，想要快點投入夏天的懷抱。要能自在的活動，真的要有保暖的好幫手，近幾年研發許多保暖衣、暖暖包等多種保暖適品，但卻常在新聞時事中看到因冷熱溫差過大而發生的暴斃事件或是不當使用暖暖包而導致低溫燙傷的情形發生，所以我們希望藉由簡易的實驗，製作兼具方便與實用性的暖暖包。

目前市售暖暖包分為拋棄式的鐵粉暖暖包及重覆式的醋酸鈉暖暖包，拋棄式的「市售暖暖包」屢屢發生低溫燙傷且不環保，很難再生使用，對大自然造成很大的傷害；我們認為重覆式的醋酸鈉暖暖包溫度既沒有那麼高，又可保暖，還能重覆使用，那豈非絕佳之選擇嗎？剛好在八年級上學期中溶解度的單元裡，老師曾經提過醋酸鈉的過飽和現象可以拿來製作暖暖包，所以我們因此想要對它有更多更深入的了解。

貳、研究目的：

- 一、探討暖暖包放熱時所維持之時間長短
- 二、不同濃度之醋酸鈉溶液所達到之最高溫度有何差別？
- 三、測量市售暖暖包的濃度。
- 四、觀察其結晶之位置及方式
- 五、分析結晶的原因



參、研究設備及器材：

- 一、藥品：醋酸鈉(CH₃COONa)、醋酸鈣(Ca(CH₃COO)₂)、醋酸(CH₃COOH)、氯化鈉(NaCl)、
 硫代硫酸鈉(Na₂S₂O₃)、碳酸鈉(Na₂CO₃)、碳酸氫鈉(NaHCO₃)、碳酸鈣(CaCO₃)
- 二、觸發介質：長尾夾、髮夾、彈簧、金屬片、迴紋針、指甲剪、音叉、釘子、石磨
 棒
- 三、加熱器：恆溫槽、酒精燈
- 四、容器：燒杯、密封袋、蒸發皿
- 五、測量用具：溫度計、碼表、電子秤
- 六、工具：三腳架、陶瓷纖維網、滴管、鑷子、尖嘴鉗、保麗龍、錶玻璃

肆、研究過程或方法：

一、配置過飽合醋酸鈉水溶液：

(一)、由文獻上可找到各個溫度的醋酸鈉溶解度(表一)，並利用式 1 進行計算
 求出其用定量三水合醋酸鈉配製時所需要的蒸餾水量。

物質	化學式	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	60°C	80°C	90°C	100°C
乙酸鈉	CH ₃ COONa	36.2	40.8	46.4	54.6	65.6	139	153	161	170
重量百分濃度		26.6	29.0	31.7	35.3	39.6	58.2	60.5	61.7	63.0

表 1

$$\frac{W_{\text{三水合醋酸鈉}} \times \frac{82}{126}}{W_{\text{三水合醋酸鈉}} + W_{\text{外加蒸餾水}}} \times 100\% = \text{重量百分比濃度}(P\%)$$

$$W_{\text{外加蒸餾水}} = \frac{\text{重量百分比濃度}(P\%)}{100\% \times W_{\text{三水合醋酸鈉}} \times \frac{82}{126}} - W_{\text{三水合醋酸鈉}}$$

式 1

我們認為暖暖包在放熱時的溫度，能維持在 40°C 左右，所以溶解度下限
 設定在稍大於 40°C 的 45%，在使用後欲將暖暖包溶解時，如果可以藉由一般
 開飲機來完成，會比較方便，因為把溶解度上限設定在稍低於 80°C~90°C 的
 60%，所以選擇 45%、50%、55%、60% 為目標濃度，並依表 2 配製自製暖暖包。

	CH ₃ COONa · 3H ₂ O	水	CH ₃ COONa · 3H ₂ O	水
45%	20	6.80	100	33.99
50%	20	4.12	100	20.59
55%	20	1.93	100	9.63
60%	20	0.10	100	0.49

表 2

(二)、以燒杯調配：

- 1、在燒杯中入加 100g 醋酸鈉及不同濃度所需的蒸餾水。
- 2、以酒精燈加熱至完全融化，再倒入夾鏈袋保存。

(三)、裝入塑膠夾鏈袋內密封後，利用隔水加熱

- 1、將 100g 醋酸鈉結晶及不同濃度所需的蒸餾水放入塑膠夾鏈袋中密封。
- 2、隔水加熱至結晶完全溶解後，放入觸發結晶之介質(例：髮夾、金屬片、長尾夾等)。
- 3、隔水加熱，後放置在室溫下自然冷卻。

二、探討暖暖包放熱時所維持之時間長短

(一)、取市售暖暖包，扳動金屬片使之結晶，並迅速放到以保麗龍作為隔熱之測溫裝置上，以降低外界影響。如圖 1



圖 1

(二)、從觸發開始計時，於 10 分鐘內，每 1 分鐘記錄一次溫度，10~60 分鐘，每 5 分鐘記錄一次溫度，60~分鐘，10 分鐘記錄一次溫度

(三)、重覆三次取平均值。

(四)、取用 45%、50%、55%、60%等不同濃度同質量的自製暖暖包，放入金屬片，重覆（一）～（三）步驟。

(五)、採用 55%的同濃度但不同質量的自製暖暖包，放入長尾夾，測量其溫度對時間的變化量。

三、測量市售暖暖包的濃度

(一)、使用結晶蒸發法來測定：

從課本上，我們學到可以使用加熱結晶法，使物質純化，也可以利用此方法來計算物質的濃度（如圖 2）。

- 1、取完全烘乾的表玻璃和蒸發皿。
- 2、取 10g 的 45%的溶液加入蒸發皿，於酒精燈上持續加熱至完全無水(錶玻璃上無水蒸氣)。
- 3、連同蒸發皿、錶玻璃及結晶一同稱重，計算結晶重量，回推濃度。
- 4、重覆三次取平均值。
- 5、取 10g 的 55%的溶液，重覆 1~4 步驟，用以驗證誤差大小。
- 6、再使用市售暖暖包重覆 1~4 步驟。

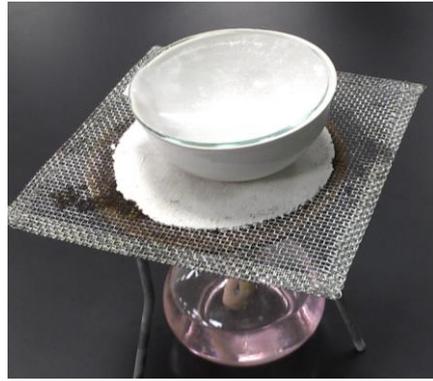


圖 2

(二)、利用最高溫及其放熱曲線來判定濃度區間

以研究二的資料，把其最高溫與濃度之間做比較，發現兩者有很大的關聯性，老師說這個叫相關係數，並教我們以 Excel 做圖比較，後來以此方法來求出市售暖暖包濃度。

四、觀察其結晶之形狀、位置及方式

我們發現市售暖暖包的金屬片與髮夾有許多相似之處，所以決定將金屬片替換成髮夾嘗試看看會有什麼驚人的收穫？同時從文獻上也可以發現長尾夾能讓暖暖包結晶，所以我們選擇市售暖暖包金屬片、髮夾、長尾夾，做為觸發的介質進行測試。

(一)、市售暖暖包金屬片

- 1、採用市售暖暖包，以手扳動金屬片一次，觀察是否結晶。
- 2、加熱使其溶解，將其復原。
- 3、重覆上述步驟 10 次。
- 4、採用 45%、50%、55%、60% 等不同濃度的自製暖暖包，放入金屬片，重覆 1~3 步驟。

(二)、髮夾

- 1、取 45% 的自製暖暖包，放入一個髮夾和一個金屬片，利用手扳動髮夾一次，觀察是否結晶。
- 2、若無法結晶，則再扳動金屬片，使其結晶，並加熱溶解，將其復原。
- 3、重覆 1、2 步驟 10 次。
- 4、採用 50%、55%、60% 等不同濃度的自製暖暖包，重覆 1~3 步驟。

(三)、長尾夾

- 1、取 45% 的自製暖暖包，放入一個長尾夾和一個金屬片，利用手用力按壓長尾夾，觀察是否結晶。
- 2、若無法結晶，則扳動金屬片，使其結晶，並加熱溶解，將其復原。
- 3、重覆 1、2 步驟 10 次。
- 4、採用 50%、55%、60% 等不同濃度的自製暖暖包，重覆 1~3 步驟。

五、分析結晶的原因

根據研究四的實驗結果，我們把結晶的原因，做了以下三種假設：1、振動，2、壓力，3、晶種，因此設計了以下的幾組實驗：

(一)、振動

1、徒手搖晃：

- (1)、採用市售暖包，以手搖晃暖包一分鐘，觀察是否結晶。
- (2)、重覆上述步驟 10 次。
- (3)、採用 45%、50%、55%、60%等不同濃度的自製暖包，放入金屬片，重覆(1)、(2)步驟。

2、使用迴紋針摩擦（圖 3）：

- (1)、取 55%的自製暖包，放入兩個交扣的迴紋針。
- (2)、待溶解降溫後，於袋外將兩個迴紋針不斷摩擦一分鐘，觀察是否結晶。
- (3)、重覆(1)、(2)步驟 10 次。



圖 3

3、使用音叉（圖 4）：

- (1)、取 55%的自製暖包，待溶解降溫後，於袋外以音叉振動暖包，觀察是否結晶。
- (2)、重覆上述步驟 10 次。

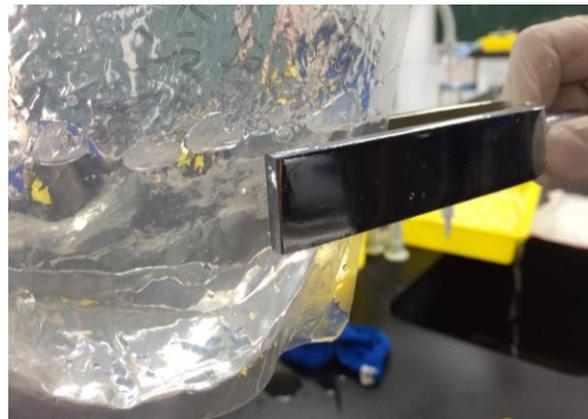


圖 4

(二)、壓力

1、使用長尾夾尾（圖 5）：

- (1)、取 55%的自製暖包，放入兩個長尾夾尾。
- (2)、待溶解降溫後，於袋外將兩個長尾夾尾進行結合，並施加壓力，觀察是否結晶。
- (3)、重覆(1)、(2)步驟 10 次。



圖 5

2、使用釘子與金屬片（圖 6）：

- （1）、取 55% 的自製暖包，放入釘子與金屬片，利用釘子壓擊金屬片，觀察是否有結晶。
- （2）、重複上述步驟 10 次。



圖 6

3、使用指甲剪（圖 7）：

- （1）、取 55% 的自製暖包，放入一個指甲剪（如圖），用力按壓它，觀察是否有結晶。
- （2）、重複上述步驟 10 次。



圖 7

（三）、壓合

1、使用彈簧（圖 8）：

- (1)、取 55% 的自製暖暖包，放入一個彈簧，用力按壓它，再放開，觀察是否有結晶。
- (2)、重複上述步驟 10 次。

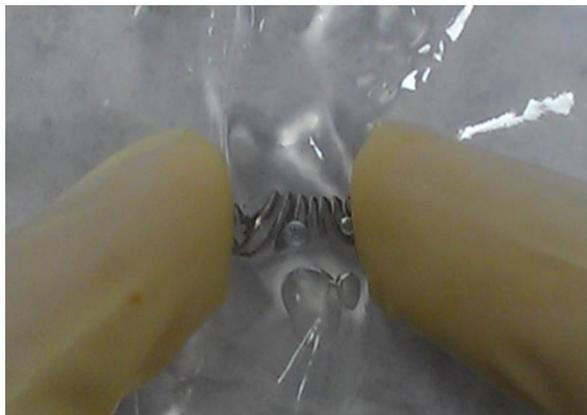


圖 8

(四)、晶種

1、使用摩擦石墨棒

- (1)、取 55% 的自製暖暖包，打開夾鍊袋加入些兩根石墨棒。
- (2)、待溶解降溫後，於袋外摩擦袋內的兩石墨棒，觀察是否有結晶。
- (3)、重複上述步驟 10 次

2、外加結晶：

- (1)、取 55% 的自製暖暖包，打開夾鍊袋加入些微醋酸鈉 (CH_3COONa) 結晶，觀察是否有結晶。
- (2)、若有結晶，則再放入恆溫槽加熱溶解後，放置室溫冷卻，觀察是否能穩定不再結晶。
- (3)、若能穩定不再結晶，則再加入些微氯化鈉 (NaCl) 結晶，觀察是否有結晶。
- (4)、取用醋酸鈉 (CH_3COONa)、醋酸鈣 ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$)、醋酸 (CH_3COOH)、氯化鈉 (NaCl)、硫代硫酸鈉 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)、碳酸鈉 (Na_2CO_3)、碳酸氫鈉 (NaHCO_3)、碳酸鈣 (CaCO_3)、溴化鉀 (KBr)，重覆 (1) ~ (3) 步驟。

伍、研究結果：

一、探討暖暖包放熱時所維持之時間長短

- (一)、取用市售、45%、50%、55%、60% 等不同濃度的自製暖暖包，放入金屬片，使之結晶，並將此實驗重複測量三次，以求平均值 (圖 9)

濃度越高，暖暖包的最高溫就越高，而所有的曲線，都非常相似，但市售暖暖包的保暖效果最好，可以 90~120 分鐘，我們認為應該是溶液總量的關係，所以做了不同質量的測試。

- (二)、取用 55% 同濃度不同質量的自製暖暖包，放入長尾夾，使之結晶，測量其溫度對時間的變化量 (圖 10)

從這個實驗，可以觀察到，相同都是 55% 的溶液，其最高溫在 50°C 左右，而溶液量越大，保暖的時間就越久。

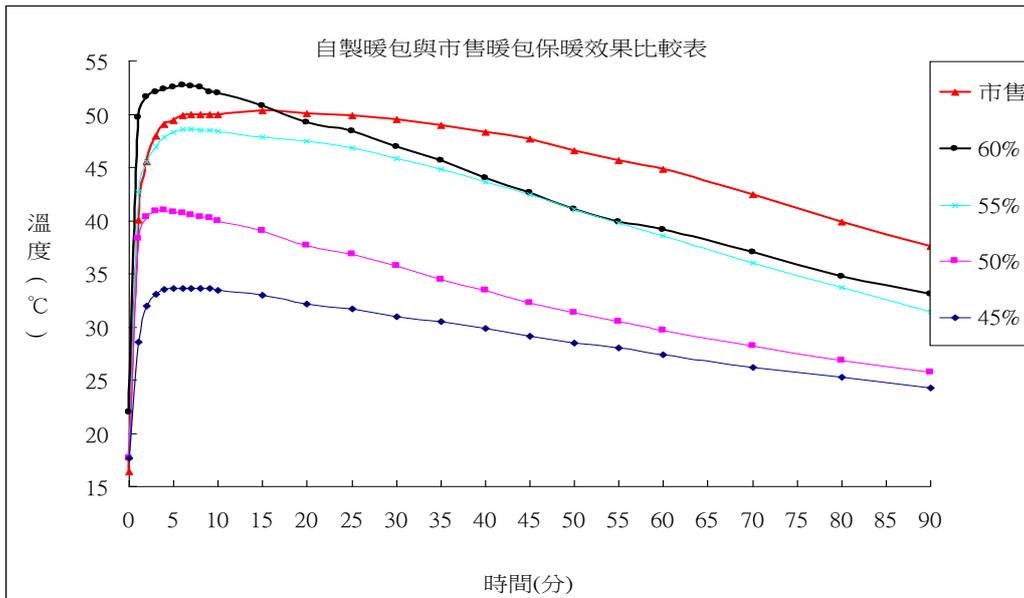


圖 9

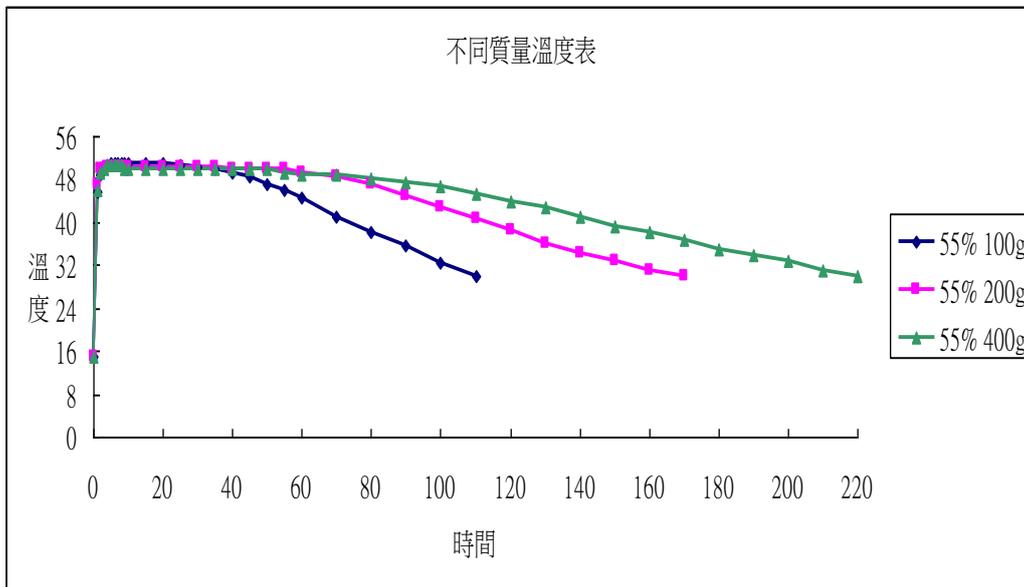


圖 10

二、測量市售暖暖包的濃度。

(一)、利用蒸發結晶法來測定

利用蒸發結晶法我們可以發現有部分的損失，但基本上算很穩定的一種方法，可以求相當接近的重量百分比。由此我們推論市售暖暖包的濃度大約在 55% 左右。

45%	溶液重	加熱前	加熱後	蒸發量	結晶重	濃度
1	10	113.2	107.6	5.6	4.4	44%
2	10	98.3	92.6	5.7	4.3	43%
3	10	98.3	92.6	5.7	4.3	43%
平均值						43.33%

表 3

55%	溶液重	加熱前	加熱後	蒸發量	結晶重	濃度
1	10	113.4	108.5	4.9	5.1	51%
2	10	102.9	98.2	4.7	5.3	53%
3	10	98.3	93.5	4.8	5.2	52%
平均值						52.00%

表 4

市售	溶液重	加熱前	加熱後	蒸發量	結晶重	濃度
1	10	102.6	97.9	4.7	5.3	53%
2	10	98.2	93.3	4.9	5.1	51%
3	10	100	95.2	4.8	5.2	52%
平均值						52.00%

表 5

(二)、利用最高溫及其放熱曲線來判定其濃度區間

利用研究一的結果，找出各濃度的自製暖暖包最高溫，並利用 Excel 作表(表 6)及繪圖(圖 10)，並做出趨勢線，顯現出非常高的相關性，同時將市售暖暖包利用趨勢線的式子，反推回得到市售暖暖包濃度為 57.374%。

溶液種類	最高溫度	回推式子
市售	50.33	$y = 1.2967x - 24.067$ y 軸為最高溫 x 軸為重量百分比濃度 $(50.33+24.067)/1.2967=57.374$ 即可利用上式回推市售暖暖包濃度為 57.374%
60%	52.77	
55%	48.57	
50%	41.03	
45%	33.67	

表 6

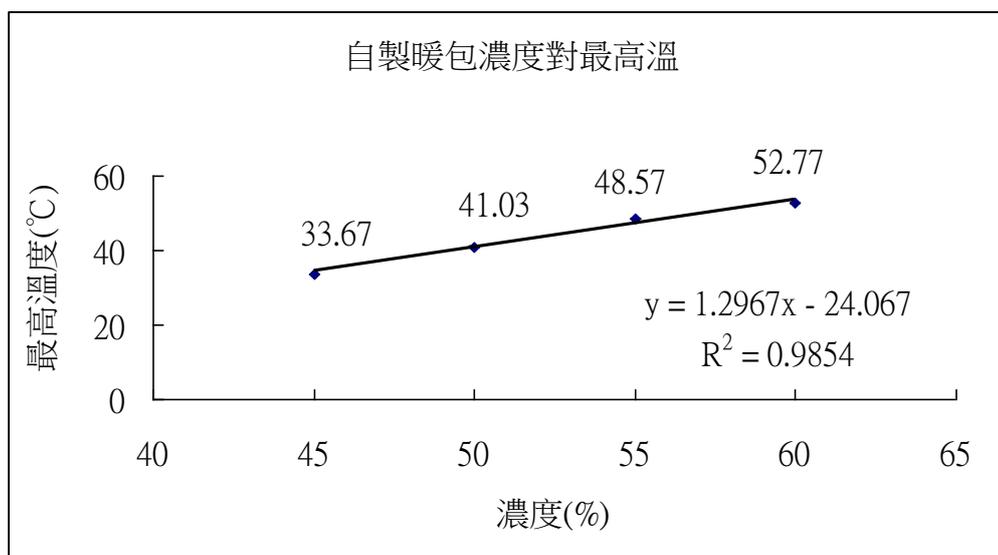


圖 11

不管由結晶法或最高溫來回推其濃度，都測得市售暖暖包的濃度大約是在

55%~60%之間。

三、觀察其結晶之位置及方式

(一)、結晶的難易程度

經過多次的實驗，圖 11，我們可以發現市售暖暖包的金屬片，能很輕鬆的將過飽和醋酸鈉溶液引起結晶，而長尾夾在 50%~60%濃度下，結晶機率很高，但在濃度 45%時，結晶機率卻異常的低，髮夾則讓人難以捉摸，有時可以引起結晶，但有時就是沒辦法，跟濃度好像沒有任何的直接關係。

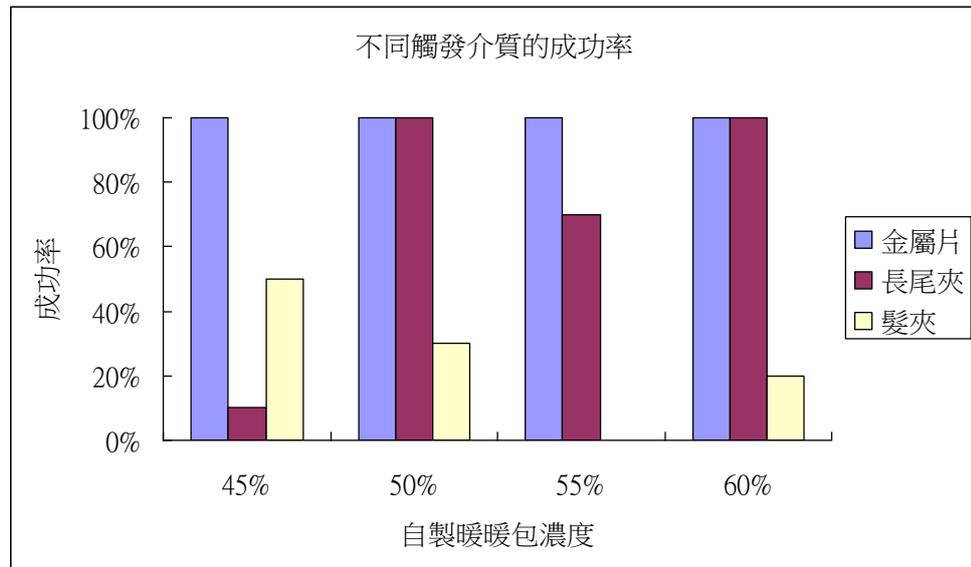


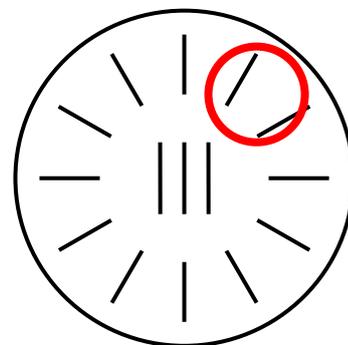
圖 12

我們認為髮夾成功引發結晶的機率並沒有長尾夾來的大，因此，我們的實驗都以長尾夾來做為觸發的介質。

(二)、結晶的位置

1、市售暖暖包金屬片

市售暖暖包金屬片的結晶位置如圖 12，在其金屬片上的裂縫處開始結晶，金屬片上兩面都有 15 條裂縫，由凸面的裂縫開始結晶。



2、髮夾

髮夾的確能產生結晶現象，觸發的位置都是在髮夾的夾合處(圖 11)或由中間彈出晶種(圖 12)生成。



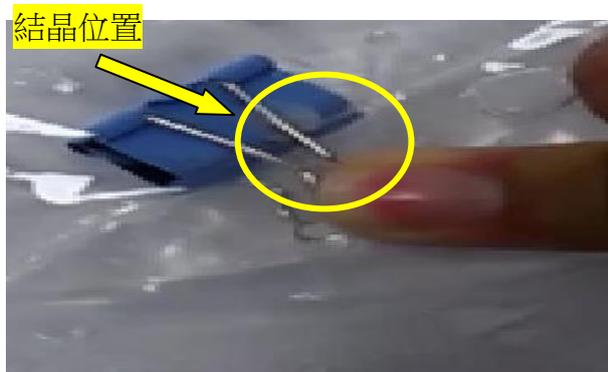
【圖 13】



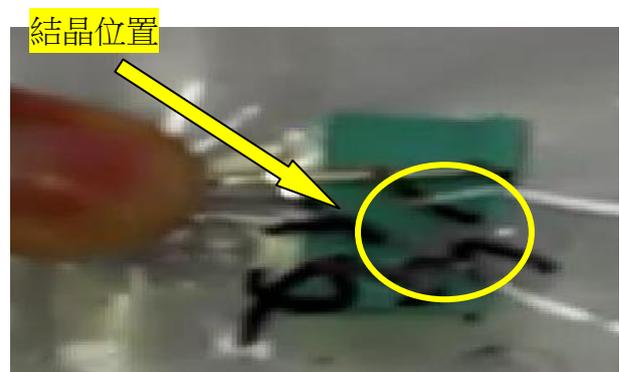
【圖 14】

3、長尾夾

結晶位置大多發生在壓環【圖 15】及夾體中【圖 16】：



【圖 15】



【圖 16】

四、分析結晶的原因

實驗至此，我們大多能穩定的觸發過飽和溶液結晶，但有時還是會失敗，所以我們實驗的重點，開始轉變為探討結晶的原因。

從文獻中我們發現大多數是以金屬片能藏結晶為結論，為此我們分別在溶解前、溶解後及冷卻後丟入從未使用過的髮夾、長尾夾也都能觸發結晶，我們發覺就算冷卻後才丟進也還是可以產生出結晶。藉此實驗結果，我們認為「金屬片裡藏有晶種，才使過飽合醋酸鈉水溶液結晶」的說法並不能完全解釋其結晶原因，因此做出以下三個假說並試著證明。

(一)、探討是否可藉由振動產生晶種

1、徒手搖晃

不論是市售暖暖包或是自製暖暖包都沒辦法結晶，為了增加振動的力量，甚至做了幾次直接摔擊暖暖包的測試，但也都沒辦法成功。

2、使用迴紋針摩擦

在十次的測試中，有兩次成功引起結晶，但之後想要再利用這個方法，卻沒有再成功過。

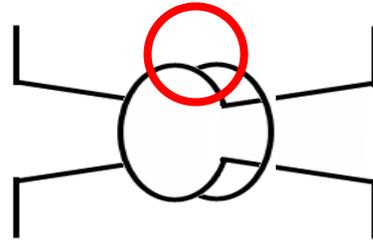
3、使用音叉

在十次的測試中，沒能有辦法成功引起結晶。

(二)、探討壓力是否為結晶的主要原因

1、從夾鍊袋外對夾鍊袋內的長尾夾尾施力

在十次的測試中，有五次成功引起結晶，但之後想要再利用這個方法，卻不一定會成功，而且有時候要用很大的力量，甚至把長尾夾尾都壓彎了，還是未成功，有時候卻是輕輕一壓就成功了。



2、利用螺絲釘給金屬片壓力欲使其結晶

為了怕是我們力量太小，而導致結晶不成功，我們使用了釘子加上金屬片，因為釘子的點壓力，應該是非常大的，在十次的測試中，沒能有辦法成功引起結晶。

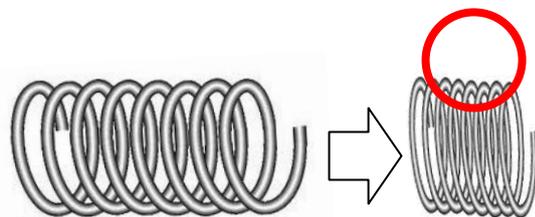
3、利用指甲剪底座施壓

使用指甲剪的底座，來做最後的檢測，因為釘子可能會勾破袋子，而且我們施力有限，使用指甲剪的底座，在其剪刀面的面積也小，同時又不會使袋子破掉，我們找了老師(85Kg)站上去做測試，在十次的測試中，也沒法使它引發結晶。

(三)、探討壓合是否為結晶的主要原因

1、使用彈簧

基於壓力測試是有成功引起結晶的可能，但卻沒有辦法做到穩定的引發結晶，我們猜測壓力並不是主要的因素，但在壓合的過程中，是有機會把離子壓縮，提高濃度，而促使引發結晶，在實驗的過程中，也的確是有辦法引發結晶，十次中，會成功兩次至三次。



(四)、探討晶種的不同是否為的主要原因

1、使用摩擦石墨棒

由於文獻上偏向金屬片裡藏有晶種，但也可能是在扳動金屬片時會產生一些鐵原子成為外加晶種，觸發結晶，使用石墨棒摩擦，必可

釋放出部分碳原子作為晶種，但實驗結果也是失敗，並沒有辦法引起結晶。

2、外加結晶：

外加晶種有可能觸發結晶，但並不是任何晶種都可以，如下表所示，大部分的藥品並沒有辦法觸發結晶，但有部分可以，可能是其大小、形狀相仿所致。

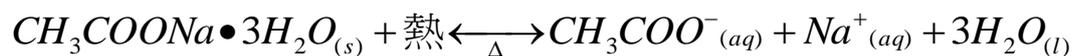
加入藥品	丟入結晶與否	溶解後再丟入	藥品晶格形狀
醋酸鈉(CH ₃ COONa)	結晶	結晶	單斜
醋酸鈣(Ca(CH ₃ COO) ₂)	結晶(較稀)	結晶(較稀)	
醋酸(CH ₃ COOH)	未結晶	未結晶	
氯化鈉(NaCl)	未結晶	未結晶	八面體
硫代硫酸鈉(Na ₂ S ₂ O ₃)	未結晶	未結晶	四面體陰離子
碳酸鈉(Na ₂ CO ₃)	未結晶	未結晶	三角雙錐
碳酸氫鈉(NaHCO ₃)	未結晶	未結晶	單斜晶系
碳酸鈣(Ca CO ₃)	未結晶	未結晶	三方晶系

陸、結論

一、探討暖暖包放熱時所維持之時間長短

當溫度不變，而我們又加了超過飽和狀態的物質質量時，欲使之溶解於水中，便需加熱。當溶液溫度降回室溫，物質仍溶於水中，超過了原本飽和狀態，我們稱為過飽和。

此一狀態是不穩定的，一旦經由某種物品觸發，溶液便會開始結晶，並同時釋放之前所吸之熱，於是便有了暖暖包的效果。反應式如下：



此醋酸鈉過飽和溶液可以重複使用，當其結晶之後，再加熱後慢慢地冷卻，便可恢復成原來的過飽和溶液。因為加熱可使反應向右進行，使晶體溶解在水中，呈離子的狀態，也因此暖暖包才可以不斷重複使用。

以醋酸鈉所製成的暖暖包，其放熱維持的之時間，跟整個溶液的總量相關，相同濃度的暖暖包，溶液越多，放熱保暖效果越好。

二、不同濃度之醋酸鈉溶液所達到之最高溫度有何差別？

醋酸鈉濃度不同，跟它能達到的最高溫度有很大的關聯性，以反應式來看當醋酸鈉結晶出來時，會放出大量的熱，而這些熱會由結晶出來之醋酸鈉及剩餘之溶液所吸收，由於結晶的速度非常的快，所以熱量會於短時間放出來，因此濃度越高的醋酸鈉溶液，於結晶時可達到的最高溫越高。

然而為什麼跟溶液的總量沒有太大的關係，我們認為從開始結晶到達到最高溫的時間不長，放出的熱量跟其過飽和濃度與飽和濃度的差距有關，也就是濃度越高，單位重量溶液就會放出越多的熱量，而這些熱量就會由這單位重量溶液及結晶所吸收，因此跟溶液的總量沒有關係。

而到達最高溫後就是跟外界的室溫開始進行熱平衡，根據我們所學的熱平衡

概念：放熱=吸熱+熱量散失； $H = m \times s \times \Delta t$ 在溶液的總量越大，就可以釋放出越多的熱量，所以可以讓保暖效果持久。

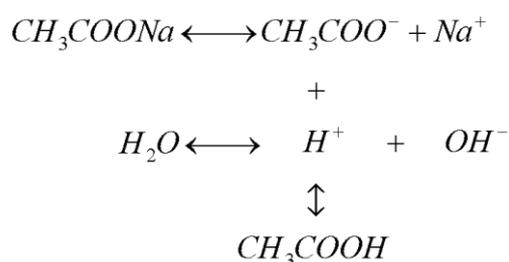
三、測量市售暖暖包的濃度。

市售暖暖包的濃度，從加熱結晶法測出來，大約是 52% 左右，但驗證實驗顯示出會有低估的現象。而以最高溫所做出來的檢量線去判斷，其濃度應在 57%~58%，兩者結果是相當的符合。

實驗一定會有誤差，在這次的實驗中，讓我們確實的了解到，但為什麼會有低估的現象呢？我們分析原因有二個：

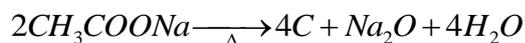
(一)、在加熱的過程中，產生了醋酸氣化：

由右方式子可以發現，醋酸鈉在水中會解離出醋酸根離子，而醋酸根離子會與水中存在的氫離子結合成醋酸，醋酸有些微的揮發性，在加熱的過程中，會跟著蒸發的水蒸氣一同蒸散而流失。



(二)、直接加熱溫度過高：

醋酸鈉也是一種有機物質，在高溫加熱下，會使其產生熱裂解，甚至是焦化成碳：



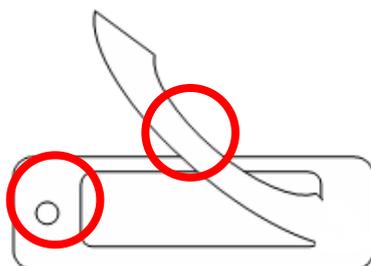
上述式子可能會發生，而使造成結果的低估。

四、觀察其結晶之位置及方式 (表 7)

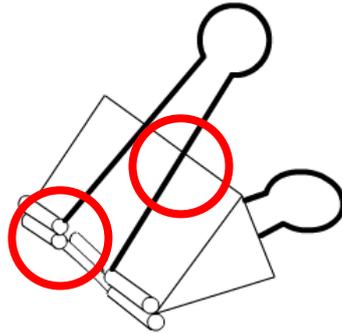
物品/特點	有凹槽(縫隙)	可壓合	可凹摺
金屬片	✓		✓
長尾夾	✓	✓	
髮夾	✓		✓
彈簧	✓	✓	

表 7

在實驗的過程中，不論是髮夾或是長尾夾都有能力觸發結晶，我們一直在排除藏晶種的可能，在髮夾實驗成功後，表示藏晶核並非其必然的條件，在髮夾扳動的過程中，會發出喀喀喀聲，可能是有產生振動。



而在長尾夾的實驗中，結晶的點有兩個位置，這兩個點有一個共通性：就是在這些點上，會產生很大的應力，所以是不是這些壓力點，使醋酸鈉產生結晶呢？



但溝槽也可能是藏有晶種的位置，也有可能是在扳動的過程中，跟長尾夾摩擦產生出小小的晶種，而文獻上有提到，在降溫結晶中，為加快結晶速度，常常會看到使用玻璃棒摩擦器壁加速晶體結晶的方法。這其中的原因，主要是靠摩擦，於燒杯內壁產生微小的玻璃微晶來充當晶核，細小的顆粒即具有較大曲率，容易誘導結晶。這與加入少量析出晶體（俗稱加晶種）來加速析出的原理是一樣的。但引起結晶，再次溶解、冷卻時，那些晶種不也還是在溶液中，那就沒辦法穩定了。

在實驗過程中，我們最好奇的點從原先想要延長保潔時間，到此轉變成探究結晶的原因。

市售暖暖包的金屬片，一直都被認為是有藏晶種，可以觸發結晶，但是為什麼那些藏起來的晶種，在降溫時，不會直接觸發結晶呢？而且，在我們實驗的過程中，髮夾及長尾夾都能確實的引起結晶，這一點深深的震撼我們，想要更進一步討論。

從文獻上我們知道，一般晶體的成長會經過三個階段：(1)過飽和溶液(Supersaturated Solution)：溶解的質量高於該溫度之下的溶解量，此溶液為「過飽和」溶液。(2)形成晶核(Nucleation)：溶質內的分子原本是呈穩定狀態，利用外力的干擾造成分子間的擾動與碰撞，造成其內的分子轉變為不穩定，進而析出晶核。(3)晶核成長(Growth)：晶核的表面逐漸沉積出更多晶體，最後佈滿整個溶液。

成晶的晶種可以為（圖 17），一次核（過飽和溶液自發或經其他粒子促成），一次核又可分為：1.均勻成核（是指基質體系內的點進入不穩定狀態而形成新相，此過程牽涉到粒子需要移動到正確的位置與方向才能開始發生堆積，因此克服相當大表面能障礙。）2.非均勻成核（非均勻成核是指已存在非均勻性的物質，像是：雜質微粒，或容器壁凹凸不平等因素，有效降低了成核時須突破的表面能障礙，因此會優先選擇在這些具有不均勻性的地點形成晶核）及二次晶核（殘核的結構與結晶材料與自身相同，則晶核可以在系統中已經存在的殘核附近產生，這種在有殘核存在的條件下的成核。）

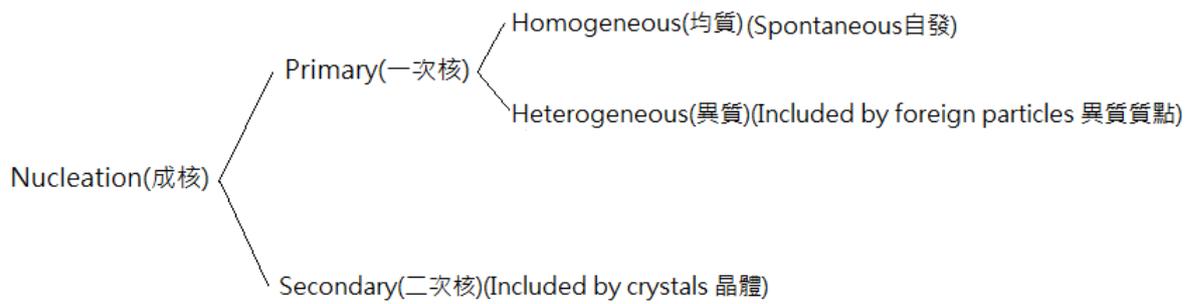


圖 17

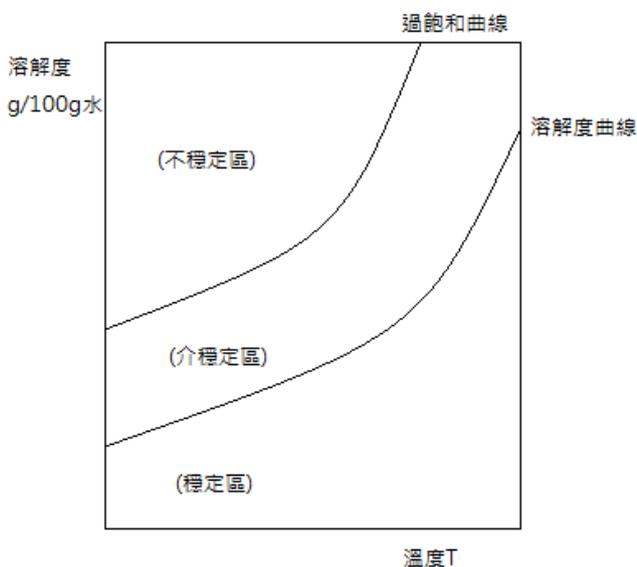
所以可知，在沒有外加晶種的情況下，必需要有一次核的，而我們把原因分成三大部分去檢驗：

- 1、振動
- 2、壓力
- 3、晶核

五、分析結晶的原因

在有限的設備下，我們徒手振動完全失敗，於是便使用音叉來振動，穩定且較高的頻率，但是完全失敗，徒手振動跟音叉都是在袋外振動，而且範圍過大容易將力分散掉，跟金屬片不相符，所以再使用迴紋針進行袋內的摩擦振動測試，在一開始也成功了兩次，但再也不復現，真是太神奇了。

文獻上可知（如下圖），過飽和溶液可分為不穩定區及介穩定區，而我們所配製的溶液，應該是屬於介穩定區，所以徒手振動，並無法使之結晶。



- a. 穩定區 (stable region)：溶液未達飽和，不會析出晶體。
- b. 不穩定區(unstable region)：溶液濃度高過飽和濃度，會迅速析出晶核的微小固體再成長結晶。
- c. 介穩定區 (meta -stable region)：此區不形成晶核，只會附著在外加晶種上成長。

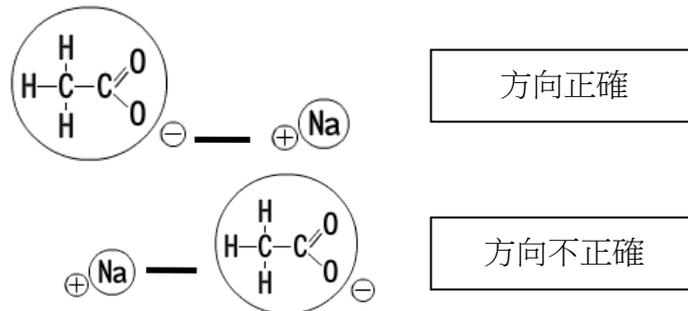
在分析了其迴紋針成功的原因時，我們認為可能是和金屬片扳動時相同，在摩擦時會對液體產生壓力，導致溶液局部的濃度上升，就像聲音一般的縱波，在介質比較密集的部分，如下圖所示，產成出結晶：



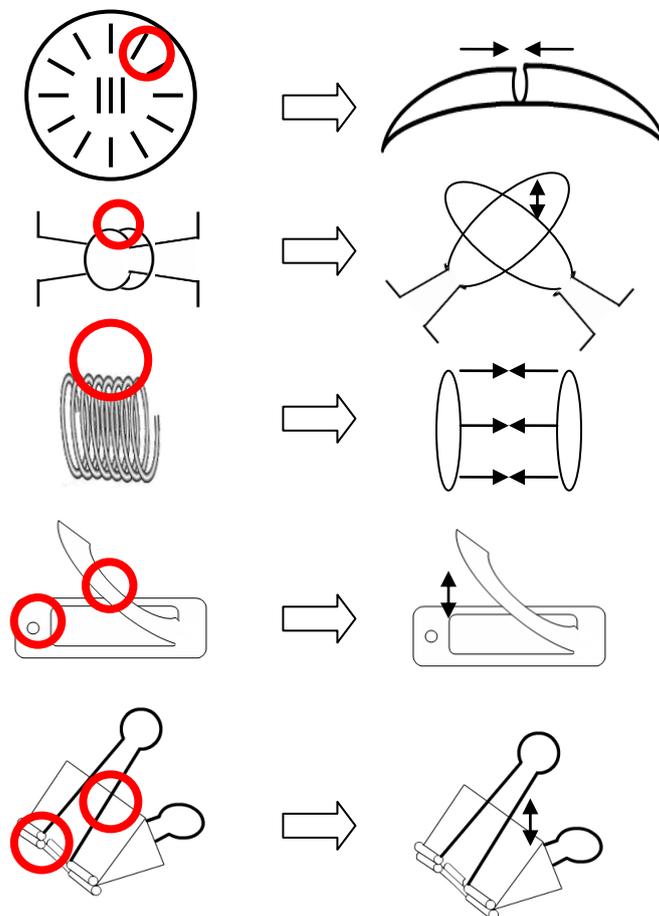
我們把長尾夾的一對尾巴拆下來，以它的形狀去嵌合，便於施力，在初期的

幾次實驗中，成功了五、六次，真是太令人振奮了，長尾夾尾端是光滑的金屬，是不可能晶種藏在其中，但也實讓我們困擾，因為有時候施力大到長尾夾尾都彎了，但終究無法成功，有時候卻是輕輕按壓就成功了，是壓力太小嗎？所以我們使用釘子跟金屬片，確定我們的施力都是在壓力點，但反而都沒成功，但再施力，袋子就會破掉，所以改用指甲剪的底座，來進行測試，我們非常用力的施壓，甚至找人站上去，皆沒成功。

但我們認為，這是因為均勻成核是牽涉到粒子需要移動到正確的位置與方向才能開始發生堆積，因此克服相當大表面能障礙。所以不只是壓合力量的大小，還有其分子的方向等機率性的因素，如下圖所示。



從之前的失敗經驗中，我們認為，力量大小不是重點，而是壓合的這個動作，所以使用彈簧進行測試，在實驗中，有時成功，有時不成功，但這讓我們有了些啟發。



晶核方面，我們試著使用多種化合物，但也大多沒能成功，所以我們可以知道，若是要靠摩擦產生出非醋酸鈉晶種去觸發結晶，應該是不太可能的。

柒、結論：

- 一、根據我們多個月的實驗，我們發現過飽和醋酸鈉水溶液的最高溫度和濃度有極高的關聯性，濃度越高，最高溫度則越高；另外，過飽和醋酸鈉水溶液的總質量和保溫時間也有關聯，質量越大，保溫時間則越長，反之，則越短。
- 二、如果想使結晶放熱的時間延長，達到 4 小時以上，則需配置大量的過飽和醋酸鈉水溶液，但在攜帶困難等多重限制下，無足以達成。所以我們經由縝密的思考與討論，認為它可以製成大型的墊被，供使用者在天氣寒冷之時，保持溫暖，隔天早上起床後便可插上電源加熱溶解，反覆使用。
- 三、除了利用蒸發結晶法可認定市售的濃度之外，亦可利用最高溫及其放熱曲線來判定濃度區間，多次實驗比對後，我們知道市售濃度大約是 55%，最高溫落在 50~51 度間，保溫效果遠比自製暖包（100g）高出甚多，原因則是因為質量較大，多達 217 公克。【請參閱圖 9】
- 四、我們發現過飽和醋酸鈉水溶液的結晶位置通常是位於：介質中的凹槽或夾體中，但是經過我們日以繼夜的實驗，發現「金屬片裡藏有晶種，才使過飽和醋酸鈉水溶液結晶」的說法並不能完全解釋其結晶原因，像是使用迴紋針摩擦偶爾也可產生出結晶等。【請參閱條目四：分析結晶的原因】
- 五、在產生結晶時，我們常利用長尾夾按壓的方法，覺得是因為壓力把它的濃度壓縮而提高，但它產生出結晶還有可能是因為方向、能量等因素。
- 六、在製作暖暖包時，我們有嘗試使用不同種類的藥品，但是全部使用過後，我們發現還是醋酸鈉最好，因為外加晶種有可能觸發結晶，但並不是任何晶種都可以，可能是其大小、形狀是否相仿所致。

捌、參考資料及其他：

- 一、徐岳暘、謝東凌、林聖芳，「晶」采世界，中學生網站投稿。
- 二、吳治緯、黃至傑、蕭雨萱、許雯華，引發結晶的伏兵，2004 年，中華民國第四十四屆中小學科學展覽會作品。
- 三、王玟淑、林昱君、陳瑞瑤、鄒佳諭，一觸即發—熱敷包的秘密，2005 年，中華民國第四十五屆中小學科學展覽會作品。
- 四、溶解度表，
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%BA%B6%E8%A7%A3%E5%BA%A6%E8%A1%A8>
- 五、保暖 4 大招，再教你自製「紅豆暖暖包」
<http://www.commonhealth.com.tw/article/article.action?id=5015125>
- 六、自動加熱暖暖包-漫談結晶與溫度
<http://www.scu.edu.tw/physics/science-scu/LivePhysics/m3.htm>

【評語】 030214

加熱包的結晶機制是一個相當不容易的研究題目，同學們想了很多方式來探討，相當有創意，而且結論與之前的科展研究結果不同，可見十分用心，可以在金屬夾縫上再研究。