

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 化學科

佳作

040208

礦物自發性長晶現象與 BHR 機制之探討

學校名稱：國立臺中第一高級中學

作者： 高二 廖彥閔	指導老師： 王文杰
---------------	--------------

關鍵詞：自發性生長晶體、BHR 機制、晶體結構

摘要

“Spontaneous Growth of One-Dimensional Nanostructures from Films in Ambient Atmosphere at Room Temperature: ZnO and TiO₂” (Shou-Yi Chang 等人) 在 2011 年發表的文獻中，提出一種新的生長奈米結構的方法—BHR (bond breaking – hydrolysis – reconstruction) 機制，結合了應力和水氣可讓金屬氧化物自發性成長並長出一維奈米結構的氧化物。

石膏晶體在自然界中生成的條件與水有關係，藉由進行硫酸鈣水化實驗驗證此現象，以濕度和放置時間作為控制變因，觀察到生成晶體的長度與溼度、放置時間有關，濕度越高、放置時間越長，所得的晶體尺寸越大且晶體形狀越明顯。

透過 BHR 作用在花崗岩表面，發現表面生成的晶體尺寸與溼度、放置時間有關，濕度越高、放置時間越長，所生成的晶體尺寸越大，認為自然界中的矽酸鹽礦物有可能透過 BHR 作用進行生長，印證地球科學對紫水晶形成的理論不一定正確。

壹、研究動機

在地球科學課程學習到礦物時，我對於紫水晶的生成感到興趣，所以查閱相關文獻。傳統地球科學的學說有好幾種，主要是針對在紫水晶晶洞形成原理有許多爭議，在此列舉兩種較為廣泛接受的說法：第一種是火山熔岩從地底噴發至地表時，除了有岩漿以外，另外也含有大量的揮發性氣體。這些氣體多半以二氧化碳、硫化氫等為主，當火山岩漿冷卻的過程中，這些揮發性氣體從岩漿裡釋放出來，以氣泡的形式存在成為火成岩中的空洞，這些空洞，或稱孔隙，在後期熱液或是流體侵入後，孔隙裡面開始沉澱許多的礦物晶體，形成了所謂的晶洞。第二種則是談到當熔岩流降溫時，它的岩石性質開始由塑性轉為脆性，在熔岩流的內部由於熱應力產生了許多裂隙，這些裂隙被後來由下方往上侵入的熱液所反應，慢慢的溶解出結晶紫水晶的空洞，而紫水晶也在同時間形成。

兩種說法的共通點都是有熱液流過，因為水晶的形成中，需要很多的二氧化矽基質，而富含矽的火山玻璃質很容易被熱水反應、溶解，進而能提供熱液大量的二氧化矽，並且使得紫水晶經過多年沉澱後才會在晶洞裡形成。但是，上述摘要提到的文獻中提出了一種有別於傳統的論述，認為紫水晶生成的過程不一定要有熱液流動而沉澱出晶體，因為一般發現的紫水晶洞都是形狀完整且腔壁緻密的封閉系統，在水晶晶體的生長過程中，富含二氧化矽基質的熱液不易侵入晶洞內，但是水氣的侵入是可行的，藉由在地底的高溫與高壓下應力誘發斷鍵並提供水氣使其在表面發生水解，最後重構而成的，但因為紫水晶的形成需要很多時間，於是嘗試是否能在其他天然的礦物中如石膏、同樣為矽酸鹽礦物的花崗岩等，去印證此種機制產生自發性成長晶體的現象，對於現今地球科學對紫水晶形成的理論造成極大的衝擊。

貳、研究目的

- 一、透過硫酸鈣與水作用，控制溼度的多寡與放置時間的長短來進行實驗，最後透過掃描式電子顯微鏡觀察得到的結果，做出實驗結果的討論和與 BHR 機制之比較。
- 二、透過 BHR 作用在花崗岩表面，利用掃描式電子顯微鏡觀察是否有晶體的生長，並且觀察晶體的形狀與結構。

三、印證地球科學對紫水晶形成的理論不完全正確，確認礦物在自然界中是否能透過 BHR 機制自發性成長晶體的可能性。

參、研究材料

一、實驗材料

(一) 石膏(Gypsum)實驗

硫酸鈣粉末 (CaSO_4)、分子量 136.142 g/mol、純度 90%、廠牌:choneye pure chemicals
實驗膠膜
去離子水

(二) 花崗岩(Granite)實驗

花崗岩
氧化鋁粉 (顆粒大小: $0.05 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$)

二、實驗器材

(一) 石膏(Gypsum)實驗

場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM)、型號: JEOL JSM-6700F,Japan
微吸管、燒杯、藥膏盒、夾鏈袋
培養皿 (壓克力盒)、電子天平、手套、口罩

(二) 花崗岩(Granite)實驗

場發射掃描式電子顯微鏡 (FE-SEM)、型號: JEOL JSM-6700F,Japan
研磨機、砂紙 (號數: 120、200、240、400、800、1000、1200、2000、4000)
拋光布
氧化鋁粉水溶液、光學顯微鏡

肆、研究過程及方法

一、實驗原理：

(一) BHR (bond breaking – hydrolysis – reconstruction) 機制

此機制是中興大學奈米暨生物機械技術實驗室於 2010 年所發表的一篇文獻中提出，利用施加應力在氧化物膜上，使金屬氧化物的鍵結被打斷，經由放置在潮濕環境下，發生水解及脫水的作用，使金屬氧化物（如 ZnO ）自發性長出一維的奈米結構。

(二) 石膏的機制

石膏的化學成分為硫酸鈣帶兩分子的結晶水 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，晶體形貌以板狀居多 (圖一)，少數呈柱狀或針狀。石膏可以透過硬石膏經由水化作用 (hydration) 產生。石膏結晶良好而透明者，稱為透石膏(selenite) (圖二)。



(圖一) 板狀透明的石膏晶體



(圖二) 結晶良好的透石膏。

硬石膏的化學成分為硫酸鈣 (CaSO_4) (圖三)，硬石膏可從石膏經脫水作用 (dehydration) 轉變而來。硬石膏主要為層狀產於蒸發環境中。海水經蒸發作用，濃度漸增，若達到飽和點，便開始沈澱。硬石膏的沈澱、結晶順序是在石膏之後，亦即硬石膏是在水溫和濃度相對較高的條件下沈積的。

硬石膏從水化作用轉變成石膏可以經由兩種途徑，一種是直接變為石膏，另一種是先形成半水硫酸鈣 (bassanite)，之後形成帶兩個結晶水的石膏，此兩種途徑中，硫酸鈣都會先解離再結晶形成半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 或石膏，半水石膏也是經由相同過程變為石膏。

石膏是在大自然中容易取得的礦物，通常作為建築材料、土壤改良劑、水泥緩凝劑等，也可用於製造陶器、各種的模型、塑像和牙模；硬石膏的用途較少，多用來做土壤改良劑及水泥緩凝劑，也可用來提煉硫磺。



(圖三) 淺褐色板狀的硬石膏晶體以放射狀聚集。

(三) 紫水晶的成分

紫水晶為矽酸鹽礦物 α -石英(SiO_2)的良好結晶體(圖四)，造成水晶體呈現紫色是因為裡面含有微量的鐵離子元素，晶洞內部是由一連串二氧化矽礦物的連續生成，晶洞由外而內依序為：主基岩、玄武岩壁→瑪瑙層(非晶質的二氧化矽礦物)→無色水晶→紫水晶。

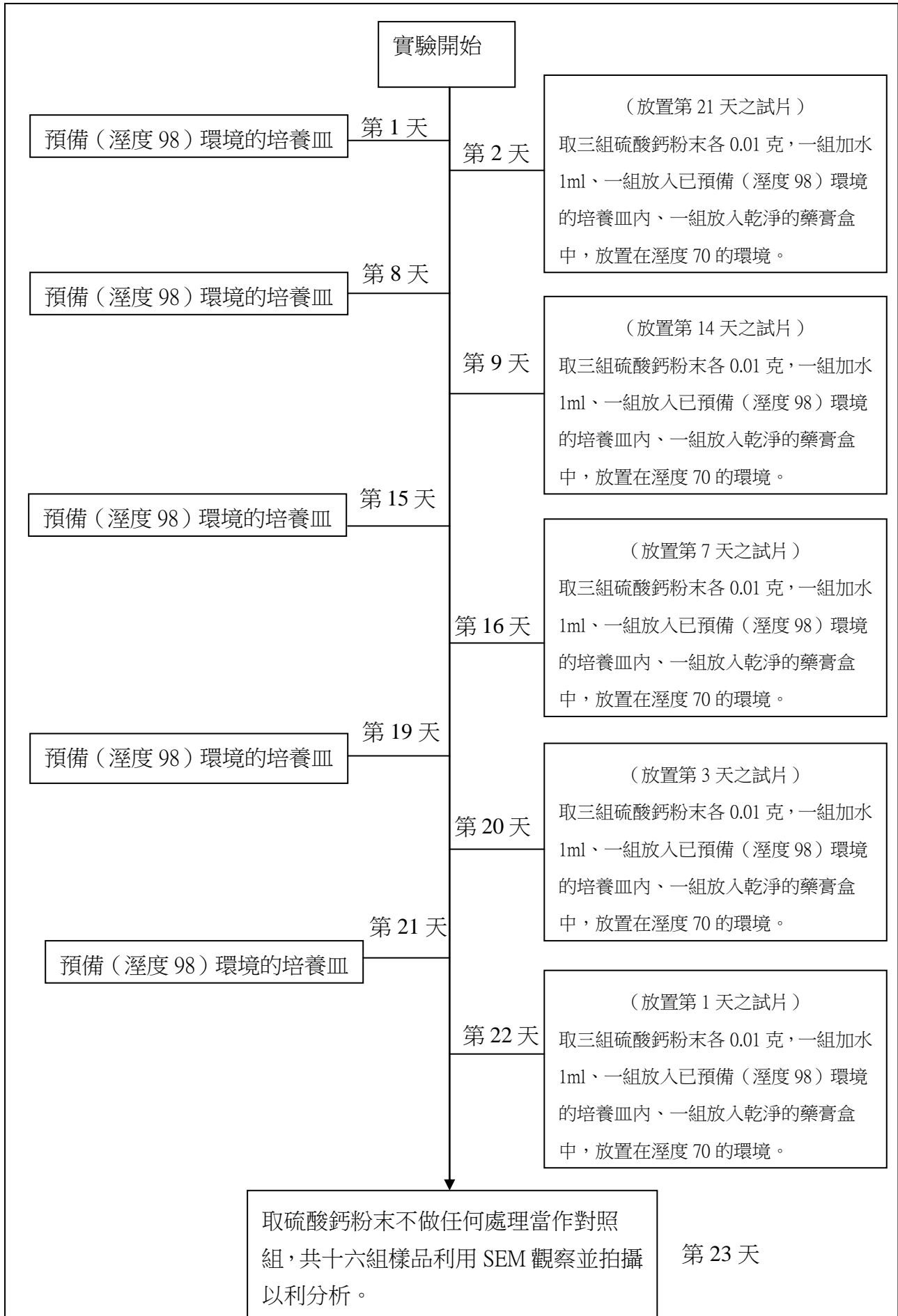


(圖四) 紫水晶洞

二、實驗方法：

(一) 第一階段—石膏

1. 實驗流程圖



2.實驗流程

(1) 製造溼度 98 的環境

在一乾淨培養皿中放入一裝水但不密封、不加蓋的藥膏盒，將培養皿以實驗膠膜密封，製造實驗要用的溼度 98 的潮濕環境；分別在天數第 1 天、第 8 天、第 15 天、第 19 天及第 21 天製作完成，作為實驗前的準備。

(2) 量取硫酸鈣粉末

利用刮杓及電子天平，測量出 0.01 克的硫酸鈣粉末三份；分別在第 2 天、第 9 天、第 16 天、第 20 天及第 22 天製作。

(3) 放入各種環境中（延續實驗流程（2）；分別在第 2 天、第 9 天、第 16 天、第 20 天及第 22 天製作。）

將第一份 0.01 克的硫酸鈣粉末放入乾淨且乾燥的藥膏盒中，用蓋子稍微掩蓋，放置在實驗室的空氣下。（註：實驗室室內的相對溼度為 70%。）

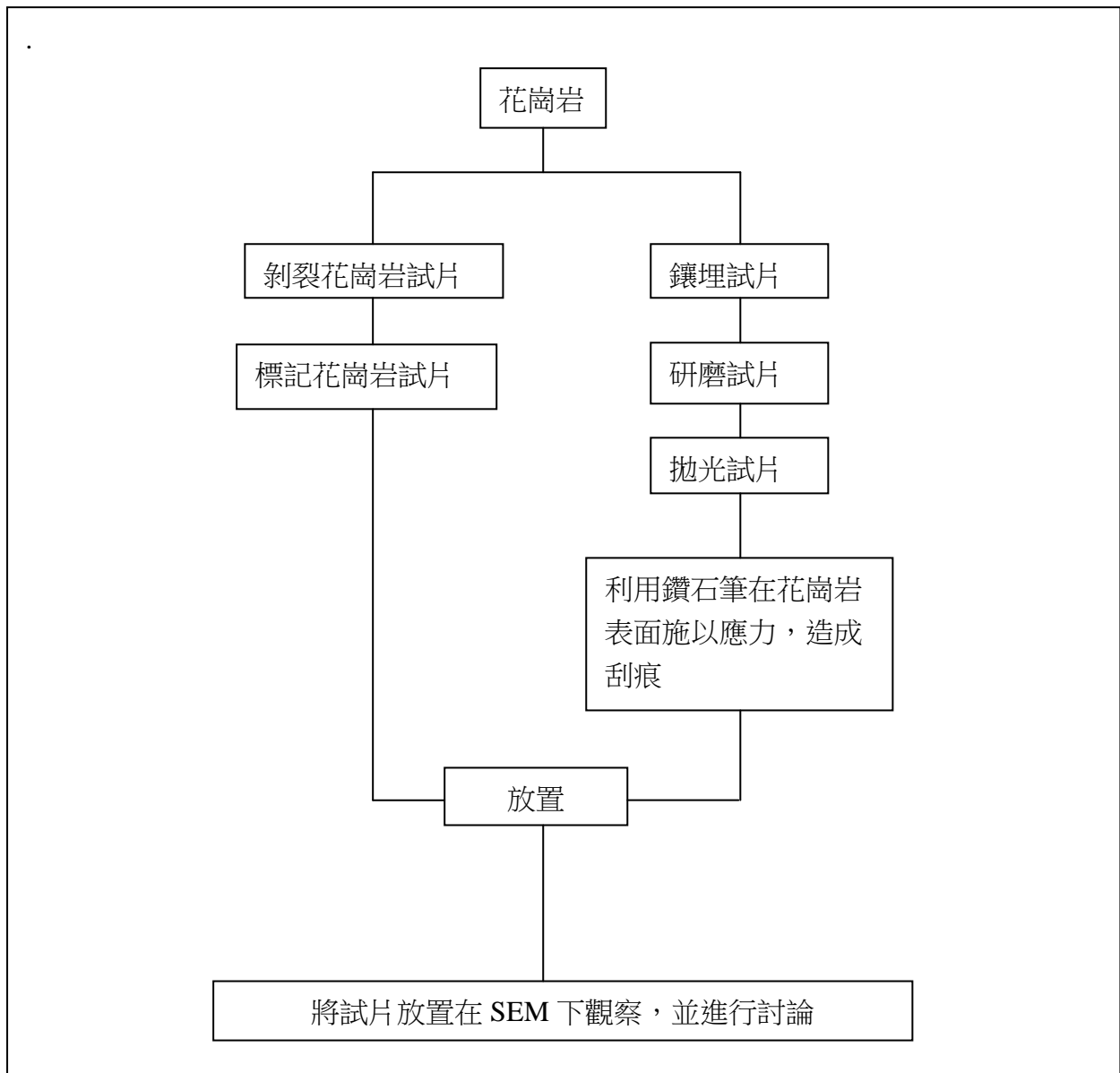
將第二份 0.01 克的硫酸鈣粉末放入另一藥膏盒中，再將藥膏盒不加蓋放入前一天所製備溼度 98 的培養皿內，最後再用實驗膠膜密封培養皿，靜置在室溫一大氣壓的環境下。

取第三份 0.01 克硫酸鈣粉末倒入藥膏盒，用微吸管吸取 1 毫升去離子水滴進藥膏盒內，均勻攪拌後再用實驗膠膜對藥膏盒密封，最後放入一封閉夾鏈袋中，靜置在室溫一大氣壓環境下。

3.在第 23 天將樣品取出，利用 SEM 來觀察並拍照，以利分析。

(二) 第二階段－花崗岩

1. 實驗流程圖



2.剝裂實驗：

(1) 剝裂：

先將花崗岩剝斷，盡量選擇有平坦面的碎片。

(2) 標記：

延續上述實驗，將欲觀察試片繪製在實驗紀錄簿上，在每塊試片欲看面的背面做上記號。

(3) 放置：

標記的試片分別放置 10 天、20 天與 40 天以及在濕度 70、98 與泡水的環境下，共 9 片試片。

3.刮痕實驗：

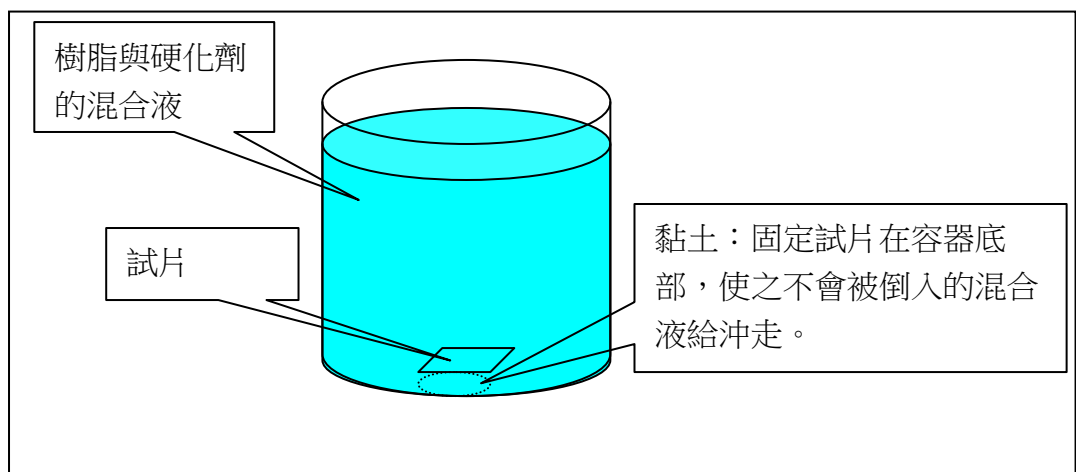
(1) 利用榔頭敲出適合實驗大小的花崗岩試片。

(2) 鑲埋:

取一黏土放置在容器底部，將黏土試片放置在黏土上，固定試片在容器裡，接著利用樹脂與硬化劑混合的溶液，倒入容器中使其淹蓋過花崗岩試片，去除溶液中的氣泡，如有氣泡的存在，容易造成試片龜裂，放置一段時間後即算完成鑲埋的步驟。

(3) 放置：

製作試片分別放置 10 天、20 天與 40 天以及濕度 70 與 98 的環境下，共 6 片試片。



鑲埋示意圖

(4) 研磨:

利用不同號數的砂紙(120、200、240、400、800、1000、1200、2000、4000)依序由號數小到號數大放置於研磨機中，且每個號數的砂紙研磨約 2 分鐘,使之研磨出光滑的花崗岩表面。

(5) 拋光:

先進行水拋，讓試片在水拋約 5 分鐘，將試片洗淨，利用拋光布與不同顆粒大小($0.1\ \mu\text{m}$ 、 $0.05\ \mu\text{m}$)的震盪後氧化鋁粉水溶液，最後再水拋 5 分鐘，將殘留在試片上的氧化鋁粉給去除掉。

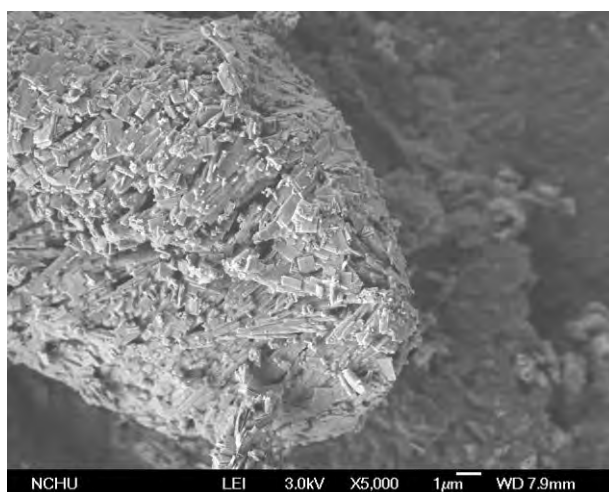
(6) 利用鑽石筆造成刮痕：

在桌面固定筆尖朝上的鑽石筆，抵觸住花崗岩試片的光滑表面，在鑲埋的花崗岩試片上面放置已測量好重量的重物，移動鑲埋好的花崗岩，使鑽石筆會在花崗岩表面產生一道細長的刮痕。

伍、研究結果

一、硫酸鈣在不同條件下成長的晶體形貌之討論

純硫酸鈣的粉末未經任何處理在 SEM 下所觀察到的樣貌如圖(五)，可觀察到純硫酸鈣是由許多顆粒團聚成塊狀，每個顆粒的大小約 0.2~0.3 μm 。以下分別說明硫酸鈣在濕度及放置時間不同的條件下，得到的石膏晶體之差異。



圖(五)

(一) 不同天數的影響 (1 天、3 天、7 天、14 天、21 天)

利用相同濕度下，不同天數的數據來探討研究的結果。

1. 溼度 70

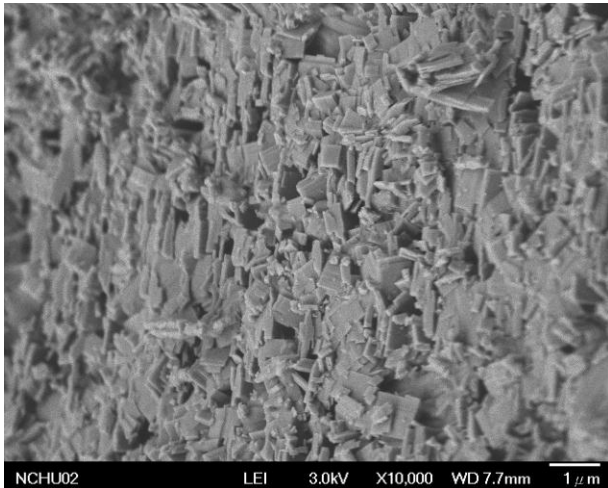
石膏晶體	反應條件：濕度 70 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
長度 (μm)	0.534	0.657	0.864	1.010	1.166

利用 SEM 拍攝石膏晶體在濕度 70 的環境下長出的晶體平均長度統計表

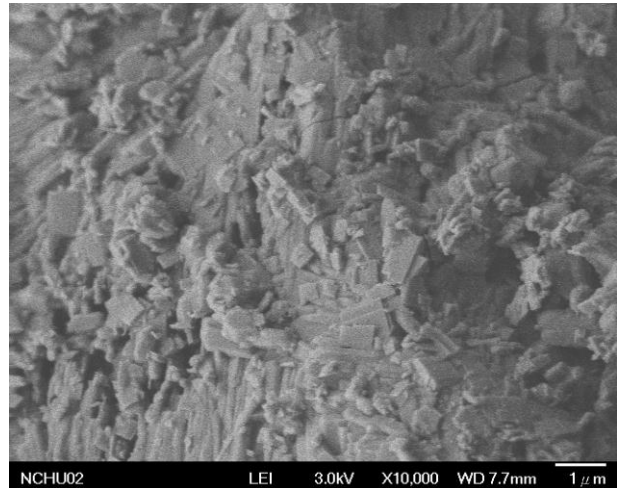
石膏晶體	反應條件：濕度 70 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
寬 (μm)	0.306	0.317	0.319	0.333	0.375

利用 SEM 拍攝石膏晶體在濕度 70 的環境下長出的晶體平均寬度統計表

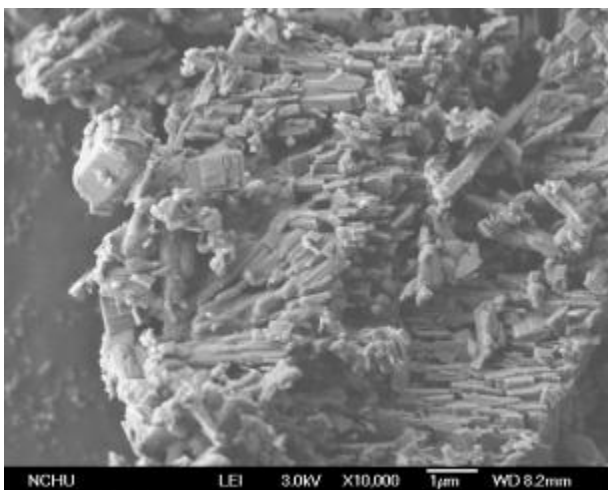
比較上表後可以發現，環境溼度 70 的石膏晶體放置時間越長，在長度上會有些微成長，有符合趨勢，但是一天到三天成長的幅度極低，有可能在測量誤差內，而 3 天到 21 天的成長幅度雖然較前者高一些，但不及其他濕度的成長情況；而從下圖（六）、（七）及（八）可以看出，環境溼度 70 的石膏晶體較原始石膏的模樣稍微細長，推測有可能是水氣不足，導致晶體的成長不明顯，而圖（九）及（十）雖然在測量長度上有些許成長，但是其形狀沒有明顯的柱狀或板狀結構，推測水氣對石膏晶體的生長極為重要。



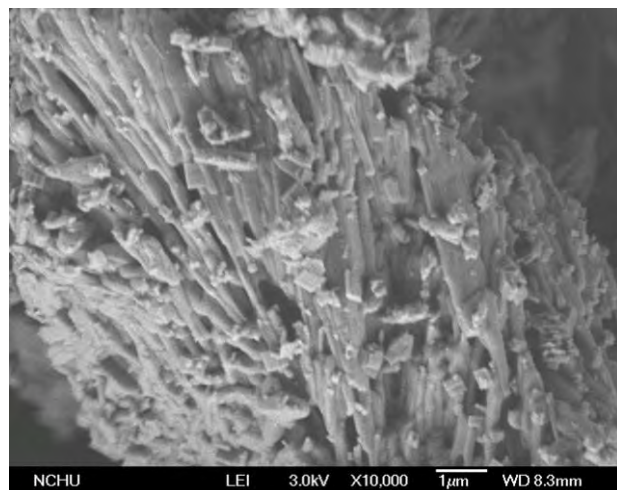
圖（六）溼度 70 且放置 1 天的石膏



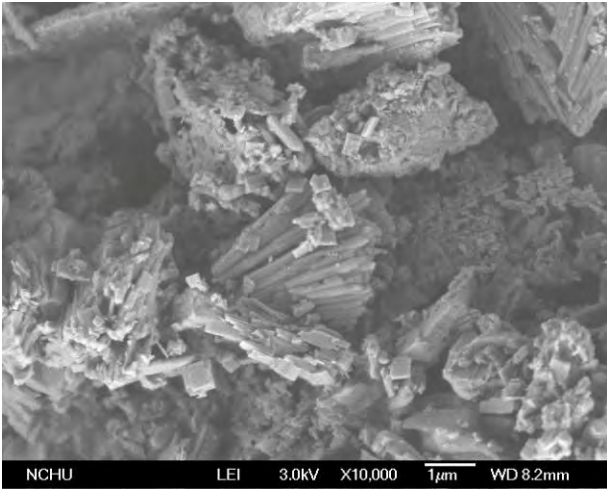
圖（七）溼度 70 且放置 3 天的石膏



圖（八）溼度 70 且放置 7 天的石膏



圖（九）溼度 70 且放置 14 天的石膏



圖(十) 溼度 70 且放置 21 天的石膏

2. 溼度 98

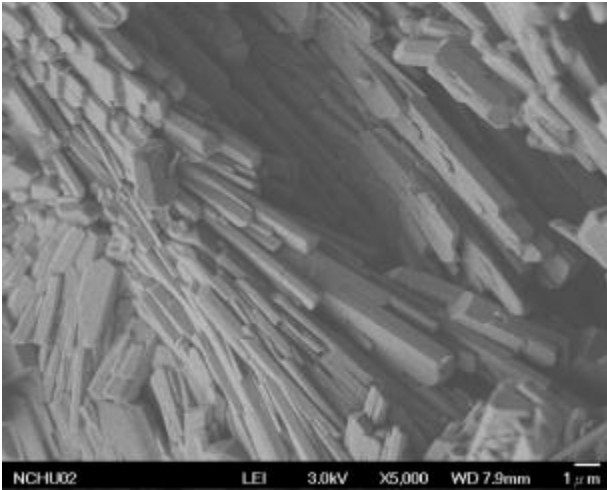
石膏晶體	反應條件：濕度 98 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
長度 (μm)	3.875	4.361	4.814	5.016	5.680

利用 SEM 拍攝石膏晶體在濕度 98 的環境下長出的晶體平均長度統計表

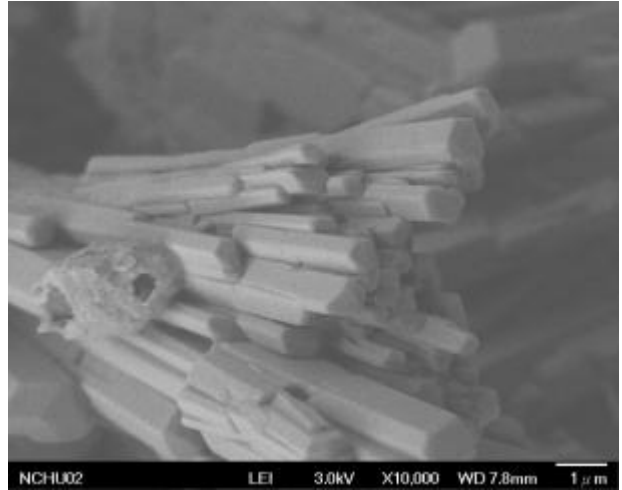
石膏晶體	反應條件：濕度 98 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
寬度 (μm)	0.605	0.734	0.831	0.922	1.009

利用 SEM 拍攝石膏晶體在濕度 98 的環境下長出的晶體平均寬度統計表

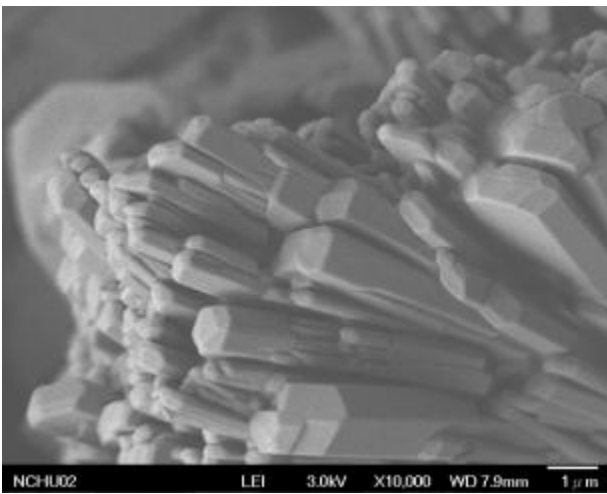
比較上表後可以發現，溼度 98 的石膏晶體在放置天數增加時，長度上有明顯成長，符合趨勢，而且五個天數的石膏長度都比在環境溼度 70 的石膏還長，印證濕度對石膏的影響極大。七天到十四天的成長幅度不大，可能是因為取樣的數據不夠多所導致測量的誤差；而從下圖(十一)、(十二)、(十三)、(十四)及(十五)可以看出，溼度 98 的石膏晶體比原始石膏和濕度 70 相比，結構長度更為完整，呈現柱狀或板狀的結構且石膏晶體會互相疊合在一起。



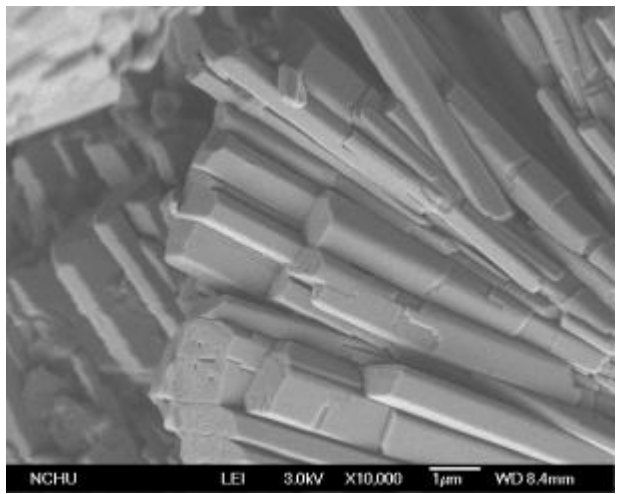
圖（十一）溼度 98 且放置 1 天的石膏



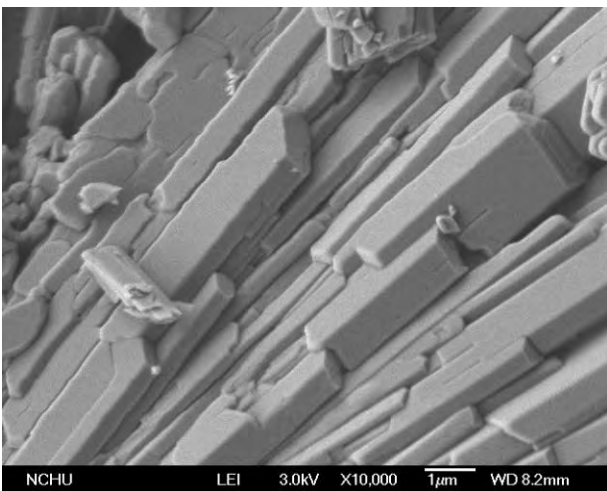
圖（十二）溼度 98 且放置 3 天的石膏



圖（十三）溼度 98 且放置 7 天的石膏



圖（十四）溼度 98 且放置 14 天的石膏



圖（十五）溼度 98 且放置 21 天的石膏

3. 泡水

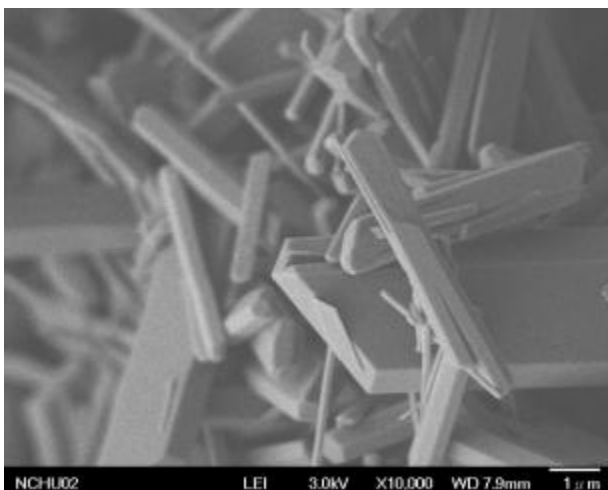
石膏晶體	反應條件：泡水 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
長度 (μm)	3.817	4.100	4.313	4.792	5.891

利用 SEM 拍攝石膏晶體在泡水的環境下長出的晶體平均長度統計表

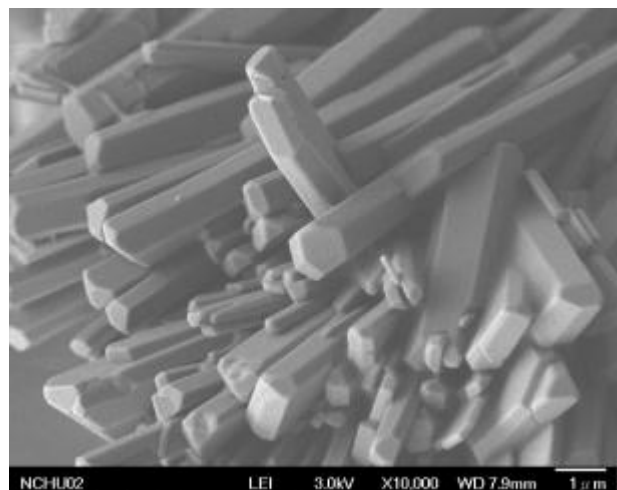
石膏晶體	反應條件：泡水 倍率：5000				
天數	1 天	3 天	7 天	14 天	21 天
寬度 (μm)	0.547	0.641	0.803	0.919	0.967

利用 SEM 拍攝石膏晶體在泡水的環境下長出的晶體平均寬度統計表

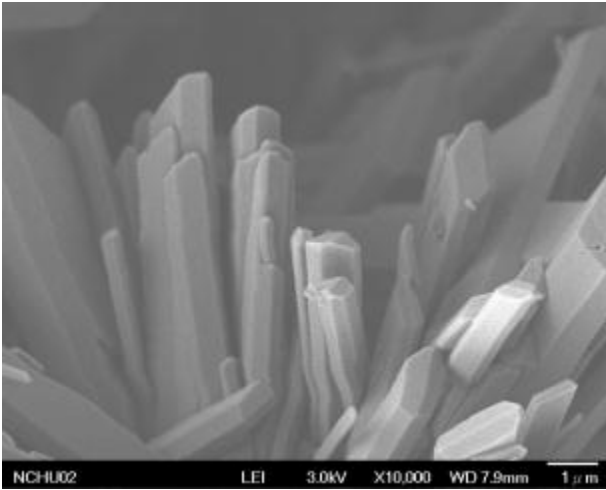
比較上表後可以發現，泡水的石膏晶體隨著放置時間增長而在長度上都有成長，符合趨勢，成長的幅度近似於溼度 98，因此推測不論是直接加水或利用高濕度中的水氣與石膏粉末反應，都可形成石膏晶體；而從下圖（十六）、（十七）、（十八）、（十九）及（二十）可以看出，泡水的石膏晶體結構完整，呈現柱狀、板狀及六角柱狀的結構並且較為散亂，但是溼度 98 的石膏晶體會互相疊合在一起，可能是因為在潮濕的環境下，水氣進入粉末的速度小於直接加水，因此泡水的石膏晶體成長的比較完整且分散。



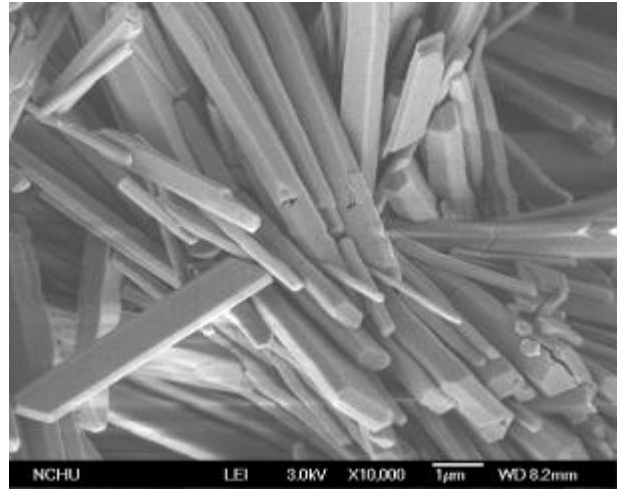
圖（十六）泡水且放置 1 天的石膏



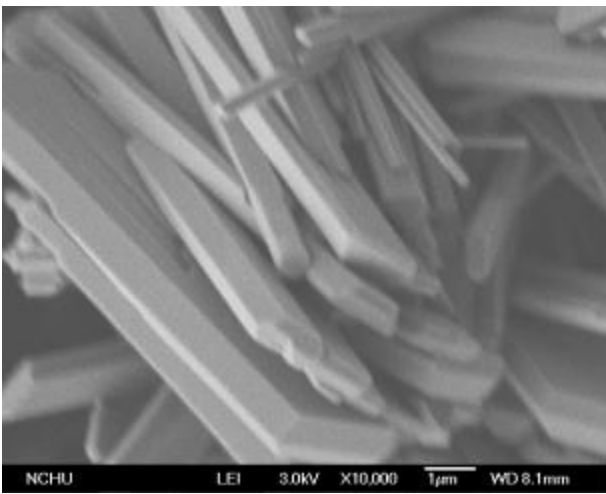
圖（十七）泡水且放置 3 天的石膏



圖（十八）泡水且放置 7 天的石膏



圖（十九）泡水且放置 14 天的石膏



圖（二十）泡水且放置 21 天的石膏

（二）不同溼度的影響

觀察相同放置時間不同溼度的數據後可以發現，濕度 70、98 與泡水的石膏晶體長度及寬度有明顯的差異，證明了石膏結晶對於水氣多寡的重要性。

二、硫酸鈣的水化作用與 BHR 機制之比較

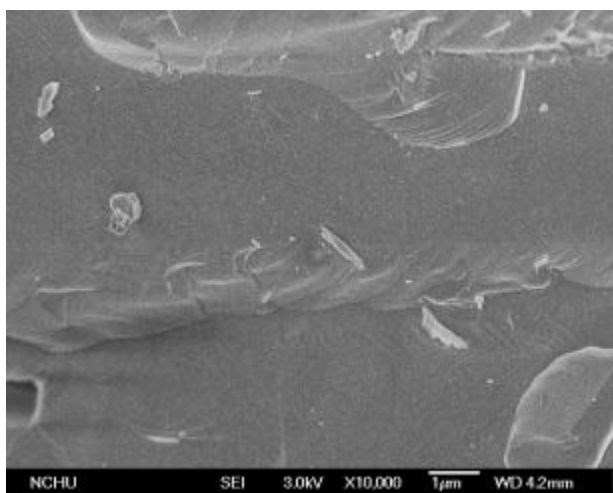
本次實驗所得到的石膏是長板狀及柱狀的結晶，可得知硫酸鈣與水反應的程度會受水量及時間影響。根據文獻資料，硫酸鈣在水化過程中，會有兩種途徑，第一種會先形成半水硫酸鈣 ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)，然後再變成帶有兩分子水的石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)；第二種則直接變成石膏，此兩種途徑，硫酸鈣遇到水時都會先溶解，然後再結晶形成晶體，而且石膏的晶形屬於單斜晶系，形成的晶體多為厚或薄板狀。

石膏在自然中的方式不論是水分蒸發結晶，或是由硬石膏與水化合而來，皆與水有密切關係，並且可以長成特殊的晶體結構。

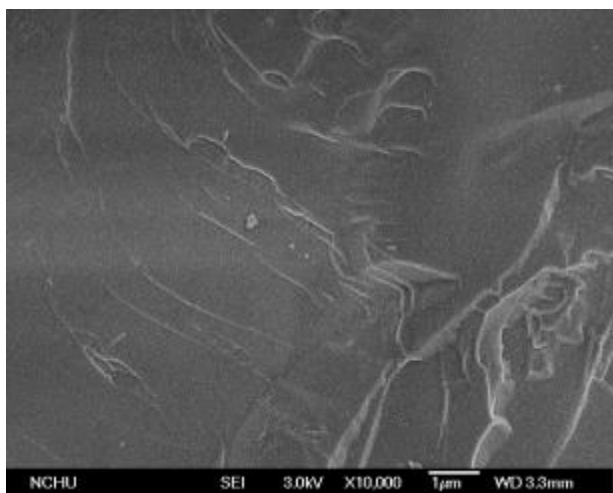
三、花崗岩的自發性成長反應觀察

(一) 剝裂：

觀察相同放置天數而不同溼度的試片後發現，花崗岩剝裂的試片會長出顆粒狀的晶體，如圖(二十一)、(二十二)，可能是因為剝裂所施加的應力不夠大，使得晶體無法成長成柱狀，在泡水的試片中卻無法看到，推測是因為被水膜的覆蓋進一步造成花崗岩的溶解，改變了形貌變成片狀結構，如圖(二十三)。



圖(二十一) 溼度 70 且放置 40 天的花崗岩剝裂試片



圖(二十二) 溼度 98 且放置 40 天的花崗岩剝裂試片



圖（二十三）泡水且放置 40 天的花崗岩剝裂試片

（二）利用鑽石筆造成刮痕：

1. 溼度 70

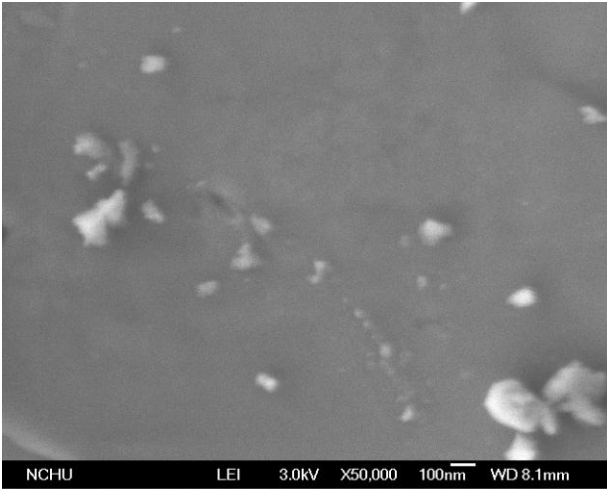
花崗岩晶體	反應條件：濕度 70 倍率：10000		
天數	10 天	20 天	40 天
長度 (μm)	無	0.19	0.43

利用 SEM 拍攝花崗岩在濕度 70 的環境下所長出的晶體平均長度統計表

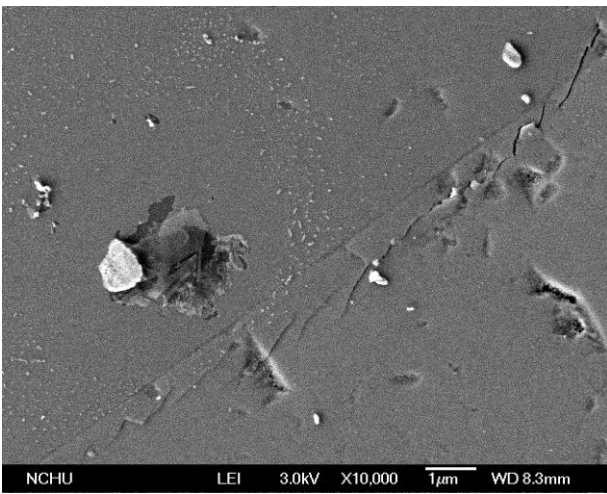
花崗岩晶體	反應條件：濕度 70 倍率：10000		
天數	10 天	20 天	40 天
寬度 (μm)	無	0.07	0.1

利用 SEM 拍攝花崗岩在濕度 70 的環境下所長出的晶體平均寬度統計表

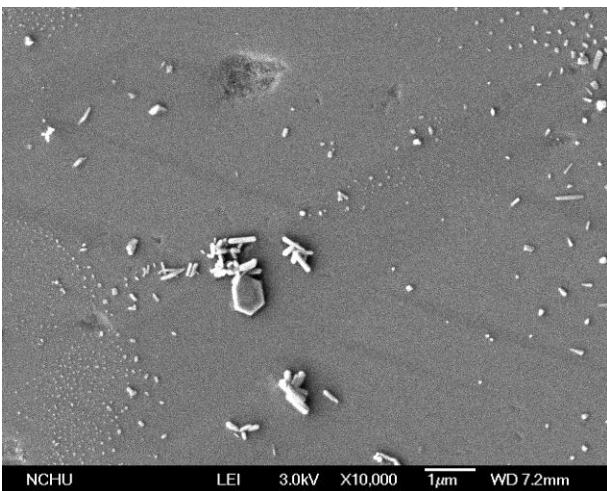
比較上表後可以發現，環境溼度 70 的花崗岩在 20 天與 40 天有生成晶體的數據，隨著放置時間增長而在長度上有成長，符合趨勢，但成長的幅度不如溼度 98 明顯，印證了水氣的多寡對晶體生長的重要性，10 天則是因為太小以致於需要到倍率 50000 才能觀察到晶體，故其數據不列在上表中。而比較下圖（二十四）、（二十五）及（二十六）可發現，10 天與 20 天的晶體偏向於顆粒狀的結構，而 40 天的晶體有些則小幅成長為柱狀的結構。



圖（二十四）利用鑽石筆造成刮痕溼度 70 且放置 10 天的花崗岩鑲埋試片



圖（二十五）利用鑽石筆造成刮痕溼度 70 且放置 20 天的花崗岩鑲埋試片



圖（二十六）利用鑽石筆造成刮痕溼度 70 且放置 40 天的花崗岩鑲埋試片

2. 溼度 98

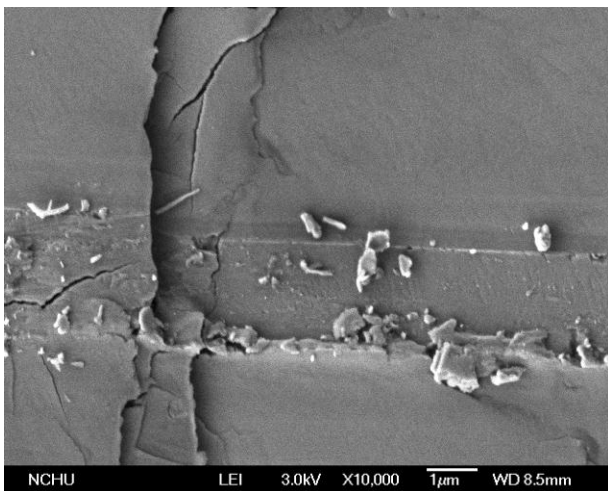
花崗岩晶體	反應條件：濕度 98 倍率：10000		
天數	10 天	20 天	40 天
長度 (μm)	0.176	0.769	1.517

利用 SEM 拍攝用鑽石筆造成刮痕的花崗岩在濕度 98 的環境下所長出的晶體平均長度統計表

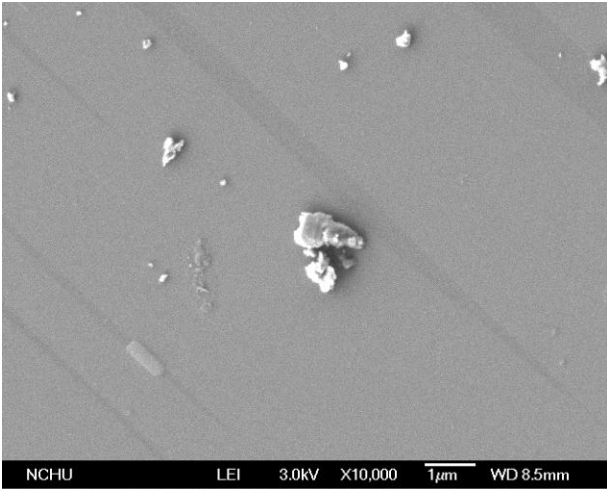
花崗岩晶體	反應條件：濕度 98 倍率：10000		
天數	10 天	20 天	40 天
寬度 (μm)	0.091	0.176	0.206

利用 SEM 拍攝用鑽石筆造成刮痕的花崗岩在濕度 98 的環境下所長出的晶體平均寬度統計表

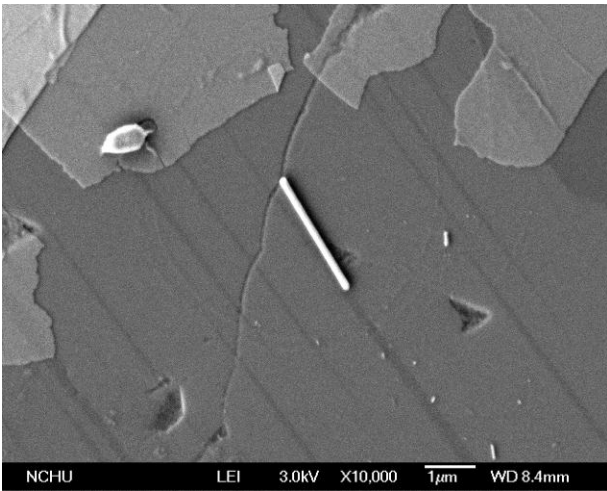
比較上表後可以發現，溼度 98 的花崗岩會長出晶體，並且隨著時間而在長度上有成長，符合趨勢，且成長的幅度較溼度 70 明顯，證明水氣的多寡對晶體生長的重要性。而比較下圖（二十七）、（二十八）及（二十九）可發現，在相同倍率下隨著時間增加，柱狀晶體的長度有明顯變長的跡象。



圖（二十七）利用鑽石筆造成刮痕溼度 98 且放置 10 天的花崗岩鑲埋試片



圖（二十八）利用鑽石筆造成刮痕溼度 98 且放置 20 天的花崗岩鑲埋試片



圖（二十九）利用鑽石筆造成刮痕溼度 98 且放置 40 天的花崗岩鑲埋試片

陸、討論

- 一、一維奈米結構有許多種成長方法，利用 BHR 機制來成長 ZnO 奈米結構就是其中一種，此方法的關鍵是應力誘發及溼度的參與，因此聯想到自然界中礦物形成是否與此種機制有關。礦物是組成岩石的基本物質，大部分是晶體，可由氣態及液態轉變而來，液態形成礦物是最普遍的方式。第一階段的選用了很常見的礦物—石膏，即是因為它在自然界中的條件與水有密切關係，透石膏可以由硬石膏經水化作用轉變得來；經由這次對硫酸鈣進行水化作用的實驗，在 SEM 下觀察石膏晶體結構為板狀、柱狀甚至是六角柱狀，而水化作用程度會受到濕度及放置時間的影響，濕度越高，放置時間越長，生成的晶體尺寸會越大且結構越趨完整。
- 二、第二階段的花崗岩長晶實驗是本次實驗的重點，藉由改變不同溼度氛圍，發現對晶體的生成有一定的影響，雖然目前在岩石及礦物的資料中尚未發現是利用 BHR 機制而形成的方式，但經由花崗岩長晶的實驗，在 SEM 下觀察花崗岩晶體形貌為顆粒狀與柱狀，且會受到濕度及放置時間的影響，濕度越高，放置時間越長，生成的晶體尺寸會越大，印證了矽酸鹽礦物藉由 BHR 機制長晶是可行的，相同的作用可以套用在紫水晶的生成機制上。
- 三、地球科學對於紫水晶形成的說法，包含含矽熱液流經以及孔隙兩種條件，但經由本實驗證實，藉由 BHR 機制，僅利用水氣也能導致晶體自行生成，不一定需要含有基質的熱液流過，可能是透過水氣經由 BHR 機制而形成的，現今地球科學對於紫水晶生成的沉積機制不一定正確。

柒、結論

- 一、第一階段實驗觀察到濕度愈大，石膏晶體愈能發展成完整的柱狀、板狀或六角柱狀。
- 二、放置時間越久，石膏晶體的長度會越長。
- 三、泡水與否會影響石膏晶體生長的聚團程度。
- 四、第二階段實驗觀察到剝裂實驗的花崗岩試片會藉由 BHR 機制生長出顆粒狀的晶體。

- 五、濕度愈大，利用鑽石筆造成刮痕的花崗岩試片所生長的晶體長度越長。
- 六、放置時間越久，利用鑽石筆造成刮痕的花崗岩試片所生長的晶體長度會越長。
- 七、第二階段實驗印證了晶體自發性成長是運用了B H R 機制，此機制可能適用於紫水晶的形成理論，地球科學對於紫水晶的成因不一定正確。

捌、參考資料

- 一、Shou-Yi Chang, Nai-Hao Yang, Yi-Chung Huang, Su-Jien Lin, Theo Z. Kattamis, and Chien-Yen Liu, “Spontaneous Growth of One-Dimensional Nanostructures from Films in Ambient Atmosphere at Room Temperature: ZnO and TiO₂”, *Journal of Materials Chemistry*, 2011, MAR, vol. 21 (12), pp. 4264-4271.
- 二、自然與人文數位博物館 <http://digimuse.nmns.edu.tw/>
- 三、何春蓀 “普通地質學” 國立編譯館主編，五南圖書出版(民 79)
p.25-26,52-56,76-80,125-139
- 四、何恭算，董國安，鍾坤煒合著 “礦物之美” 國立自然科學博物館(民 95)
- 五、台灣大百科全書 <http://taiwanpedia.culture.tw/>
- 六、http://volcano.gl.ntu.edu.tw/class/introduction_to_rock.htm
- 七、Chang, L.L; Howie, R.A; Zussman, J. In: Rock-forming mineral series, No. 5B. Geological Society. 1997. eBook. 384p.
- 八、何恭算，鍾坤偉 “館訊第 271 期：大地瑰寶—紫水晶” 國立自然科學博物館
- 九、梁繼文 “礦物學(下)” 國立編譯館主編，五南圖書出版(民 73)
p.987-997
- 十、Willam D.Nesse “Introduction To Mineralogy ” Oxford University Press 2000
- 十一、黎寓庭 “天然與人為形成奈米結構的方法之比較” 國立中興大學材料科學與工程學系(民 101)

【評語】 040208

學生製備硫酸鈣石膏以驗證紫水晶成長機制，另外用花崗岩剝裂試片比較剝裂後再結晶的情形，實驗發現溼度越高、放置時間越長，生成的板狀及柱狀晶體會越大。學生成果佳，但 BHR 機制的說法可能有問題。