

第十七屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA17-294

作品名稱：調皮搗「蛋」——蛋殼環保人造磚

姓名：涂可凡

關鍵字：蛋殼、燒結、人造磚

摘要

蛋類食用後的外殼因無法再利用，每年會產生兆顆以上的廢棄物。在相關文獻研究已被證實主要成分為碳酸鈣，與大理石建材類似。本研究是利用複合材料製成蛋殼環保磚，過程中加入第二相材料及黏著劑，藉由高溫燒結形成高硬度陶瓷磚的方式，來達成蛋殼應用時對於強度及硬度的基本需求。實驗過程中透過調整燒結溫度、黏著劑種類及第二相材料比例，燒結出成品後，再經由檢測建材的基本要求，如失重率、密度、硬度、吸水率、抗酸鹼性及抗壓能力等，作為製程參數最適化的評估標準。實驗結果顯示以碳酸鈣粉末及重量百分比低於 31% 的蛋殼粉末均勻混合後，加入 2% PVA 黏著劑及 5% Li_2CO_3 的第二相材料，已成功製作出具低吸水率、高抗酸鹼及良好抗壓與高硬度的環保磚。

壹、 研究動機

全世界消費超過一兆顆蛋類，而臺灣全年可生產雞蛋約 61 億~66 億顆，每人每年平均吃掉約 265~285 個雞蛋，屬於高消費量之國家[1]。然而食用過後，雞蛋的廢棄物——蛋殼，卻成為數以萬噸的垃圾，甚至在燃燒過後，產生大量的溫室氣體 CO_2 ，對環境造成負擔，於是想藉由科學原理的處理方式，將廢棄蛋殼再生變為再利用的材料。

一次因緣際會的課程，授課老師講述可將蛋殼變成粉筆的研究成果，開啟本研究團隊對蛋殼再利用的決心，從文獻了解蛋殼是由 91%~95% 的碳酸鈣所組成[2]，而此成分讓人聯想到基礎地球科學上冊課本[3]中說明碳酸鈣是人類經常使用的建材、也是大理岩石的主要成分，所以團隊成員想透過科學研究方式，讓蛋殼能轉變為堅硬的人造磚石，成為環保建材，為綠色地球目標盡一份心力。

貳、 研究目的

將藉由研究燒結溫度、黏著劑種類及第二相材料比例等主要製程參數，為讓蛋殼能夠達到成為建材的人造磚，主要研究目的如下：

- 一、製作並檢驗不同黏著劑(PVA)比例、種類及添加不同第二相物質的碳酸鈣磚及蛋殼磚，找出製作蛋殼磚的最佳比例。

二、利用初步檢驗的結果找出最適合製作混合磚的蛋殼粉及碳酸鈣之重量百分比。最後透過檢測建材的基本要求，如失重率、密度、硬度、吸水率、抗酸鹼性及抗壓能力等，作為製程參數最適化的評估標準。

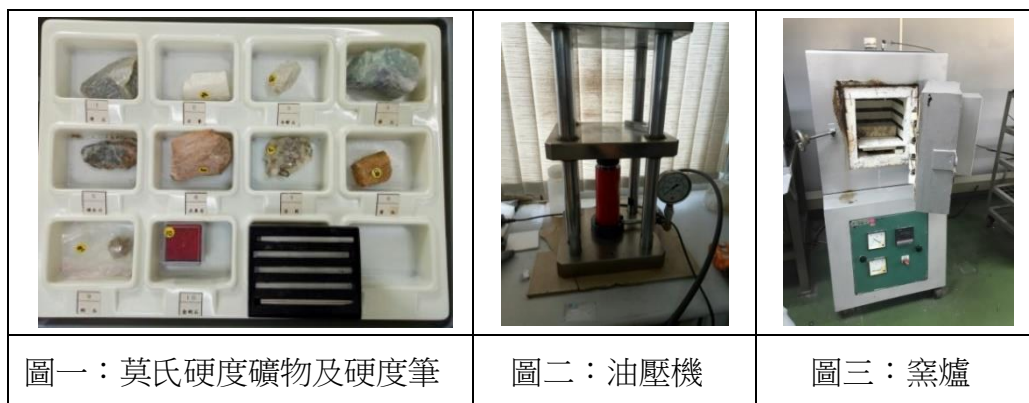
參、 研究設備及器材

本研究進行過程，依所需要的製程設備及檢測儀器，分別在清華大學材料工程系李三保教授實驗室、中釉公司及建功高中實驗室等三處進行。而進行主要的材料及設備如下所述。

一、藥品與材料： PVA（聚乙烯醇）BF-17、 PVA（聚乙烯醇）BP-17、蛋殼、 Li_2CO_3 、 NaCl 、碳酸鈣、蒸餾水、鹽酸（ $\text{pH}=2.0$ ）、強鹼清潔劑（ $\text{pH}=14.4$ ）。

補充說明：本實驗選用的 PVA 為 BF-17、BP-17 型。BF 為完全鹼化型 PVA，於常溫下在水中僅吸收膨潤而不溶解，於高溫中（ 80°C 以上）迅速溶解；BP 為部份鹼化型 PVA，可於常溫下緩慢溶解，正常使用時為縮短溶解時間，仍需加熱溶解。而 17 所代表的意義，則為其分子量聚合度，計算方式為將 PVA 標準規格品名後之二位阿拉伯數字乘以 100[4]。本實驗使用不同溶解方式的 PVA，作為比較。

二、器材與設備：380 微米的篩網、250 微米的篩網、燒杯、10ml 量筒（最小刻度：0.1ml）、500ml 量筒（最小刻度：10ml）、刮杓、溫度計、莫氏硬度礦物（如圖一）、硬度筆（如圖一）、pH 酸鹼計、游標尺（最小刻度：0.001cm）、油壓機（如圖二）、窯爐（如圖三）、果汁機、電子秤（至小數點第三位）、烘箱、加熱板、Microsoft Word 2007、 Microsoft Excel 2007。



肆、 研究過程及方法

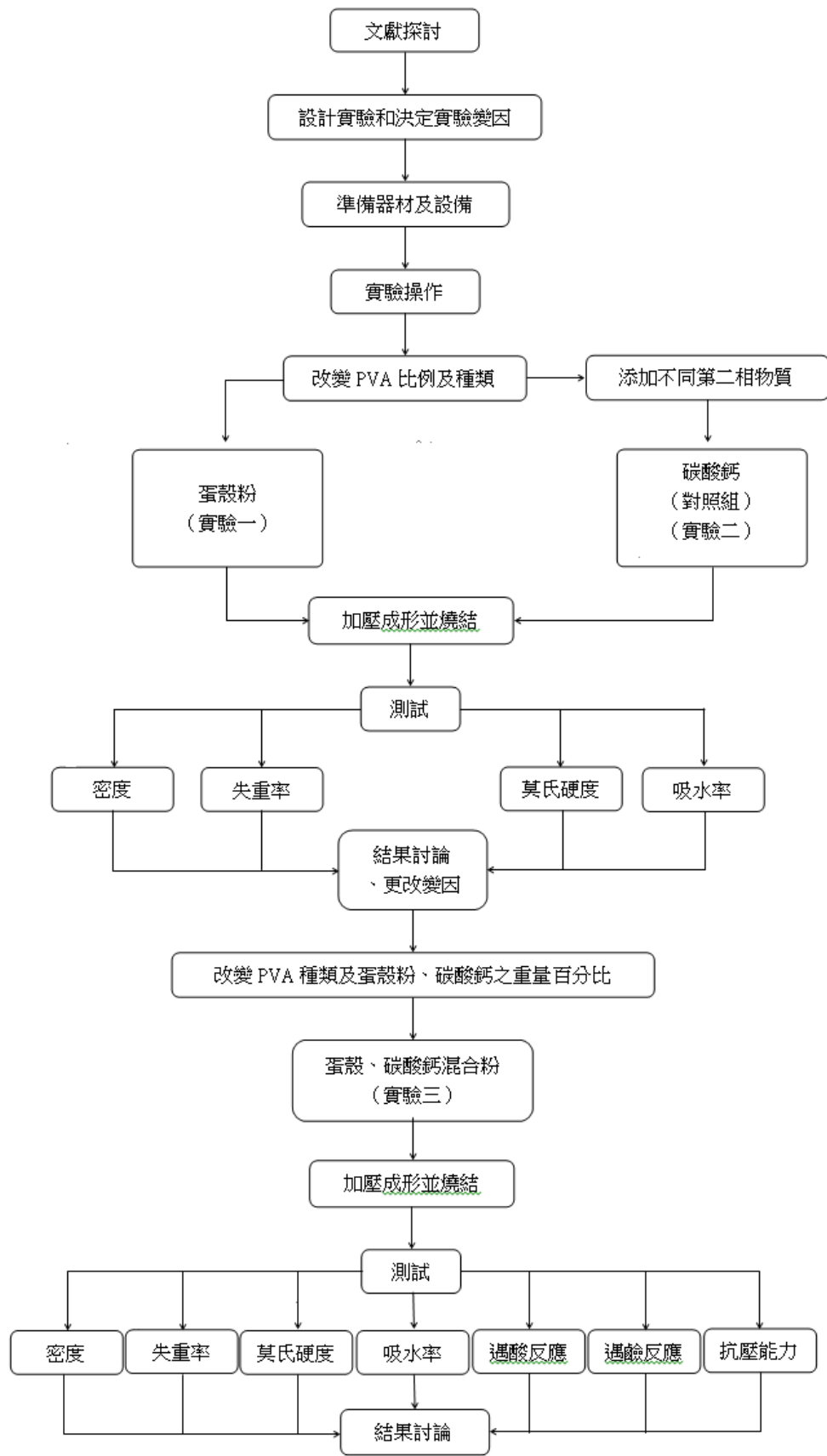
一、 複合材料強化及燒結原理

進行實驗前參考許多有關材料強化及燒結實驗的研究文獻[5-7]，其中陳鴻文的「碳酸鈣的燒結行為與顏色成因的初步研究」[6]，此研究討論純碳酸鈣粉末的燒結溫度、第二相物質對胚體密度的影響等。然而燒結溫度及密度將會影響材料強度及硬度等特性，這些特性改變的參數因子對於蛋殼轉變為建材具有相當的重要性。

所謂燒結作用是指粉末處於高溫下（但是低於主要成分的熔點），因原子擴散效應使粉末中的顆粒與顆粒產生互相連接，導致粉末間空隙變小，來達到緻密化的現象，能有效地使胚體的密度提高。燒結可依過程中有無液態的產生分為固態燒結及液態燒結，本實驗採用的是液態燒結。進行液態燒結時，大部分的實驗會加入第二相物質。當溫度加熱至第二相物質成分之熔點以上時，第二相物質會形成液態並促使顆粒重新排列，而使胚粉緊密結合，對提升材料強度有相當助益。

二、 研究流程

藉由參考研究文獻來進行整個實驗設計，團隊成員一起討論重要的實驗變因，首先以不添加第二相的蛋殼粉和添加第二相的碳酸鈣及蛋殼粉為胚粉，進行加壓並燒製。燒製後，進行密度、失重率、莫氏硬度與吸水率的測試。利用各項測試結果，尋找出最適合的添加物種類、比例，再以不同比例的蛋殼粉末及碳酸鈣粉末均勻混合為胚粉來進行加壓燒製，並對此燒製成品進行測試並討論實驗結果（如圖四）。



圖四：研究流程圖

三、 實驗步驟

(一) 實驗一：PVA（聚乙烯醇）的種類與比例對蛋殼粉末燒結影響（共八種）

此實驗以蛋殼粉末為主要原料，實驗步驟如下：

- 1、 蒐集蛋殼並以人工方式將蛋液清洗乾淨。
- 2、 利用果汁機進行濕磨，使蛋殼成為細粉。
- 3、 將兩個篩網疊合，380 微米的篩網在上，250 微米的篩網在下，自上方倒入蛋殼粉（或碳酸鈣粉末），即可篩出 > 380 微米（最上層）、380~250 微米（中間）與 < 250 微米（最下層）三種不同顆粒大小的粉末。
- 4、 依各項變因的比例（如表一）以電子秤稱量 PVA、蒸餾水與蛋殼粉的重量。
- 5、 將稱量完成後的 PVA 加入水中後，將 PVA 水溶液放置於加熱板上加熱，並攪拌，使之均勻溶解，同時須插入溫度計隨時監測溫度，避免沸騰。
- 6、 當 PVA 完全溶解於水中時，加入蛋殼粉，並繼續攪拌，使之混合均勻後，置入 110°C 烘箱烘乾 24 小時。
- 7、 依照編號分裝成每袋 20g 的胚粉。
- 8、 用油壓機以 400kgw/cm² 壓製成形，並以高溫爐加溫至 650°C，再恆溫 2 小時，進行燒製。

表一：實驗一之各項編號與實驗變因

種類 編號	PVA（比例）	PVA（種類）	粉末	顆粒大小
A1	1%	BF-17	蛋殼粉	< 250 微米
A2	2%			
A3	3%			
A4	4%			
A5	5%			
A6	2%	BP-17		< 250 微米
A7	2%	BF-17		> 380 微米
A8				250~380 微米

(二) 實驗二：PVA（聚乙烯醇）和第二相材料種類與比例對碳酸鈣和蛋殼粉末燒結之影響（共十四種）

編號 B1~B13，由參考文獻「碳酸鈣的燒結行為與顏色成因的初步研究」[6]的實驗使用材料（碳酸鈣、PVA、 Li_2CO_3 、 NaCl ）及比例，本研究利用此實驗參數進行研究，並作為本實驗的對照組。除了編號 B14 是以蛋殼粉末取代碳酸鈣外，而其他藥品的比例和種類都與編號 B1 相同。實驗步驟如下：

- 1、同實驗一的步驟 1 至步驟 3。
- 2、依各項變因的比例(如表二)以電子秤秤量 PVA、第二相物質(Li_2CO_3 或 NaCl)、蒸餾水與碳酸鈣（或蛋殼粉）的重量。
- 3、將秤量完成後的 PVA、第二相物質加入水中後，將 PVA 水溶液放置於加熱板上加熱並攪拌，使之均勻溶解，同時插入溫度計隨時監測溫度，避免沸騰。
- 4、當 PVA 完全溶解於水中時，加入碳酸鈣或蛋殼粉，並繼續攪拌，使之混合均勻後，置入 110°C 烘箱烘乾 24 小時。
- 5、同實驗一的步驟 7 與步驟 8。

表二：實驗二之各項編號與實驗變因

種類 編號	PVA (比例)	PVA (種類)	第二相物質 (種類)	第二相物質 (比例)	粉末	顆粒大小
B1	2%	BF-17	Li_2CO_3 (s)	5%	碳酸鈣	<250 微米
B2	4%					
B3	6%					
B4	8%					
B5	2%	BP-17	Li_2CO_3 (s)	5%		<250 微米
B6	2%	BF-17	Li_2CO_3 (s)	5%		>380 微米
B7						250~380 微米
B8						混合
B9	2%	BF-17	Li_2CO_3 (s)	1%		<250 微米
B10				10%		
B11	2%	BF-17	NaCl (s)	1%		<250 微米
B12				5%		
B13				10%		
B14	2%	BF-17	Li_2CO_3 (s)	5%		蛋殼粉

(三) 實驗三：PVA（聚乙烯醇）種類和比例變化對於蛋殼及碳酸鈣混合粉末的燒結特性影響（共九種）。

此研究是將胚粉改為不同比例蛋殼與碳酸鈣的混合粉末（其比例設定為 0:1、1:1、2:1、3:1、4:1、1:2、1:3、1:4）。至於 PVA 之比例及第二相物質之種類及比例則採取實驗二的最佳測試結果。其中編號 K 之 PVA 種類以 BF-17 取代 BP-17，其餘藥品之比例及種類皆與編號 C 一致，為編號 C 之對照組。每個種類各製作 13 塊。實驗步驟如下：

- 1、同實驗一的步驟 1 至步驟 2。
- 2、依各項變因的比例（如表三）以電子秤秤量 PVA、第二相物質（ Li_2CO_3 ）、蒸餾水與蛋殼粉及碳酸鈣的重量。
- 3、同實驗二的步驟 3。
- 4、當 PVA 完全溶解於水中時，加入蛋殼、碳酸鈣混合粉，並繼續攪拌，使之混合均勻後，置入 110°C 烘箱烘乾 24 小時。
- 5、同實驗一的步驟 7 與步驟 8。

表三：實驗三之各項編號與實驗變因

種類 編號	PVA (比例)	PVA (種類)	第二相物質 (種類)	第二相物質 (比例)	混合粉比例 (蛋殼粉： 碳酸鈣粉)	蛋殼粉 之重量 百分比
C	2%	BP-17	Li_2CO_3 (s)	5%	0:1	0%
D					1:1	46.50%
E					2:1	62.00%
F					3:1	69.75%
G					4:1	74.40%
H					1:2	30.99%
I					1:3	23.25%
J					1:4	18.60%
K					BF-17	0:1

(四) 燒結成品的檢測

以建材應用時的基本要求，如失重率、密度、硬度、吸水率、抗酸鹼性及抗壓能力等，來作為燒結成品製程參數最適化的評估標準。

1、 成品體積與密度

密度 = 質量 ÷ 體積，透過測量完成品重量，以兩種方式進行體積測量：

- (1) 游標尺：假設成品為圓柱體，利用游標尺測量直徑與高度，計算出實驗二、實驗三的成品體積與密度。
- (2) 排水法：將實驗二、實驗三的成品置於大量筒中，再利用滴管將多餘的水滴入小量筒，求得成品的體積來計算密度。

2、 莫氏硬度

林蔚[8]指出：「**礦物間相互刮磨是一種簡易衡量礦物硬度的方法。相對較低硬度者會被刮出痕跡。**」，本研究利用上述方式進行成品的硬度測試。考慮同一成品會因測試位置不同而有不同的莫氏硬度，為了降低實驗誤差，以三組測得結果平均值，作實驗二及實驗三成品的莫氏硬度。

3、 吸水率測試

- (1) 實驗二：將成品置於水中，每五分鐘測量一次重量，共進行五次量測。
再將泡水後未崩解胚體浸泡 24 小時來觀察並進行秤重。
- (2) 實驗三：成品吸水率測量方法為前 5 分鐘內，每 1 分鐘測量一次重量；第 5 至第 25 分鐘內，每 5 分鐘測量一次重量。再浸泡水中 24 小時後觀察其狀態。

4、 抗酸鹼能力

燒結成品主要成分為 $CaCO_3$ （蛋殼、碳酸鈣），因成分相同的大理岩遇到酸會產生反應，遇鹼則不會。抗酸鹼測試是將坯體置於秤重機上並歸零，於坯體上滴三滴酸（或鹼），靜置 30 秒並測量其重量，再扣除只滴三滴酸（或鹼）而不放坯體的空白試驗值，最終結果為坯體與酸（或鹼）的反應值。

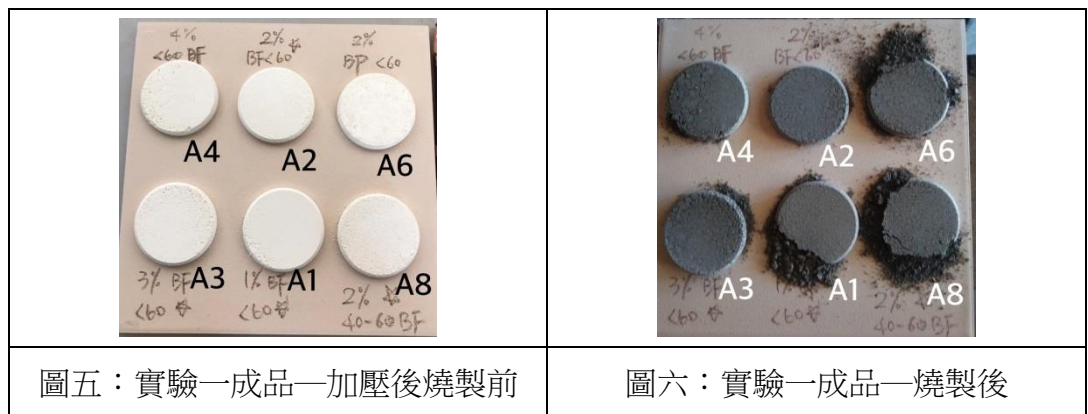
5、 抗壓能力

將燒結成品置於模具上並利用手動式油壓機進行測試（如圖二十二）。以 100 公斤重為一單位，測試成品產生裂縫的區間，對每一編號進行三次測試。

伍、 研究結果

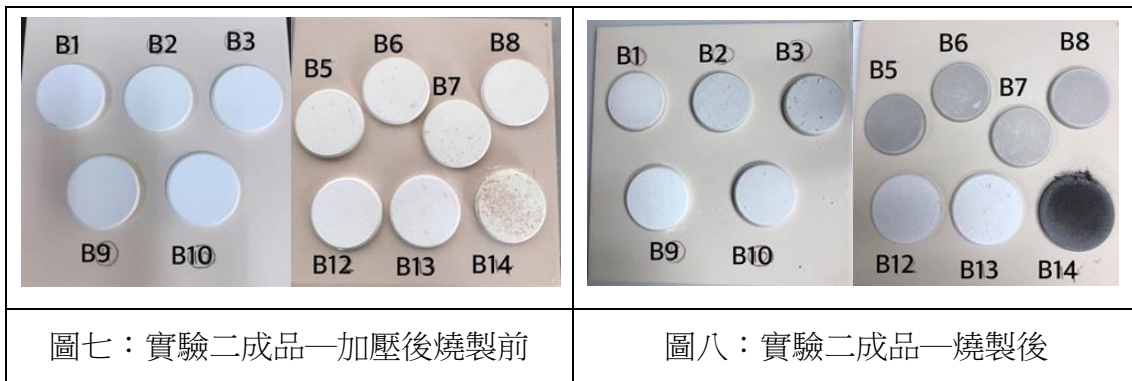
一、 燒結後成品及體積密度測量

（一） 實驗一：經 $400\text{kgw}/\text{cm}^2$ 的壓力壓製後，胚體成薄圓片狀（如圖五）；但經 650°C 燒結後，胚體卻無法成形、一觸即碎，並發生碳化現象（如圖六）。

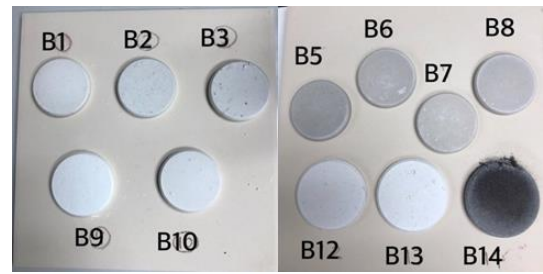


（二） 實驗二：

- 1、 成品：胚粉在加壓後，胚體與實驗一同樣呈薄圓片狀（如圖七）。燒結後，雖有部分胚體變色及有大小不一和輕微龜裂的現象（如圖八），但皆有成形。其中編號 B14 與實驗一結果類似，有碳化現象發生。



圖七：實驗二成品—加壓後燒製前



圖八：實驗二成品—燒製後

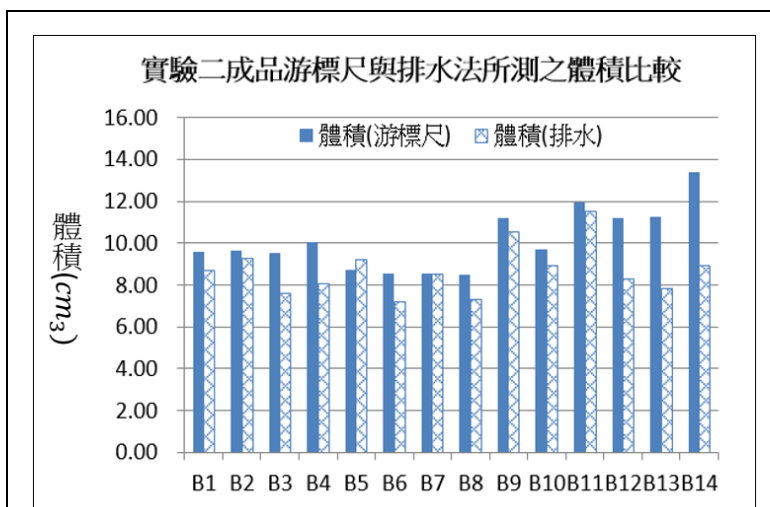
2、體積與密度：使用游標尺所測量的體積大部分比使用排水法來的高，以編號 B12、B13、B14 的相差最大（如圖九）。使用排水法所測量的密度大部分比使用游標尺來的還高，以編號 B3、B6、B12、B13、B14 的相差最大（如圖十）。

表四：實驗二成品之直徑、厚度、體積及密度（游標尺）

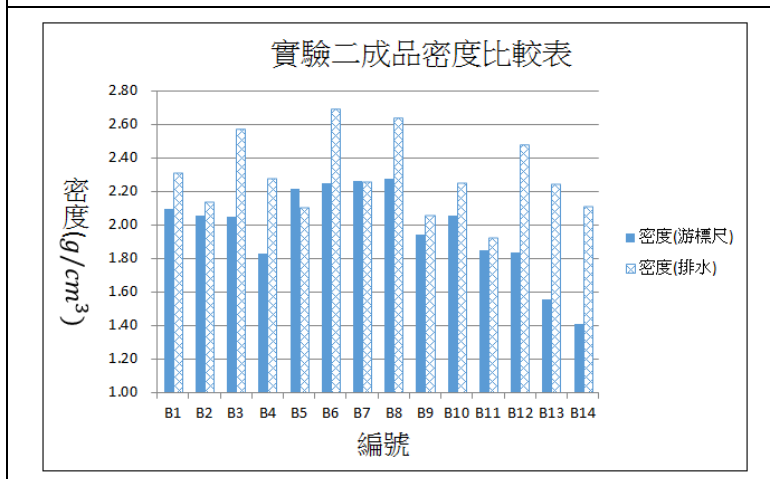
項目 編號	直徑(cm)			平均 直徑 (cm)	厚度(cm)			平均 厚度 (cm)	平均 體積 (cm ³)	平均密度- 游標尺 (g/cm ³)
B1	4.580	4.550	4.565	4.565	0.585	0.585	0.585	0.585	9.57	2.10
B2	4.560	4.560	4.560	4.560	0.590	0.595	0.585	0.590	9.64	2.06
B3	4.535	4.535	4.535	4.535	0.585	0.590	0.595	0.590	9.53	2.05
B4	4.620	4.635	4.630	4.628	0.595	0.600	0.595	0.597	10.04	1.83
B5	4.465	4.465	4.465	4.465	0.555	0.555	0.560	0.557	8.72	2.22
B6	4.410	4.415	4.425	4.417	0.555	0.560	0.565	0.560	8.58	2.25
B7	4.410	4.410	4.415	4.412	0.555	0.560	0.560	0.558	8.53	2.26
B8	4.455	4.475	4.475	4.468	0.540	0.540	0.540	0.540	8.47	2.28
B9	4.830	4.825	4.825	4.827	0.620	0.610	0.605	0.612	11.19	1.94
B10	4.610	4.625	4.620	4.618	0.580	0.580	0.580	0.580	9.72	2.06
B11	5.025	5.030	5.035	5.030	0.605	0.600	0.600	0.602	11.96	1.85
B12	5.025	5.030	5.035	5.030	0.560	0.565	0.565	0.563	11.19	1.83
B13	5.045	5.045	5.045	5.045	0.560	0.560	0.570	0.563	11.26	1.56
B14	5.140	5.140	5.140	5.140	0.645	0.645	0.650	0.647	13.42	1.41

表五：實驗二成品之體積及密度（排水法）

項目 編號	體積-排水 (cm^3)	平均密度-排水 (g/cm^3)
B1	8.70	2.31
B2	9.27	2.14
B3	7.60	2.57
B4	8.08	2.28
B5	9.20	2.10
B6	7.17	2.69
B7	8.54	2.26
B8	7.32	2.64
B9	10.55	2.06
B10	8.90	2.25
B11	11.50	1.92
B12	8.30	2.47
B13	7.84	2.24
B14	8.95	2.11



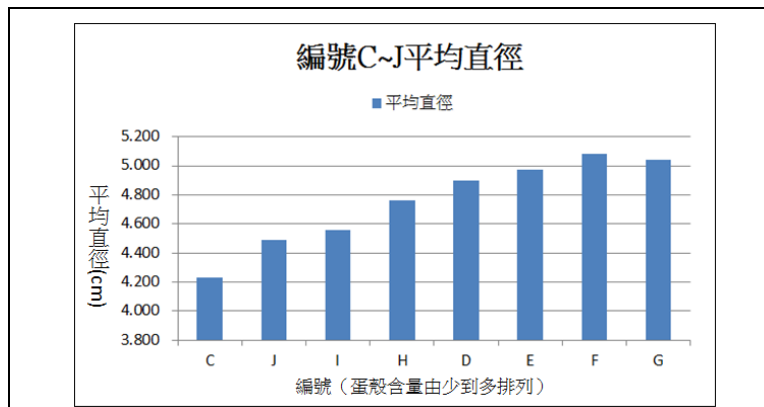
圖九：實驗二成品游標尺與排水法所測之體積比較



圖十：實驗二成品密度比較表

(三) 實驗三：

- 1、 成品：蛋殼、碳酸鈣混合胚粉加壓後，皆呈薄圓片狀，且壓製、燒結完成後皆有成形，大部分成品都有產生碳化現象。其中編號 C~J 在燒結完成後的平均直徑略與蛋殼含量的多寡呈正相關(如圖十一)。更進一步發現，蛋殼含量越多的成品，其顏色相對越深(如圖十二)。



圖十一：編號 C~J 平均直徑比較表



圖十二：編號 C~K 成品 (依蛋殼含量由少到多排列)

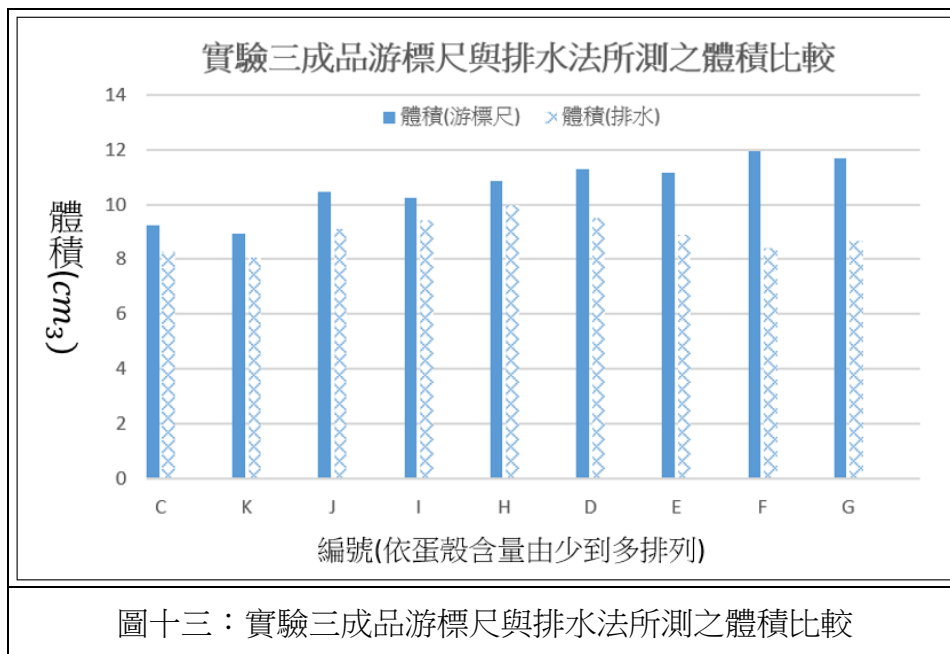
- 2、 體積與密度：使用游標尺所測量的體積皆比使用排水法的還大，且蛋殼比例偏多的成品相差最大(如圖十三)。使用排水法所計算出的密度皆比使用游標尺的還大，且蛋殼比例偏多的成品相差最大(如圖十四)。

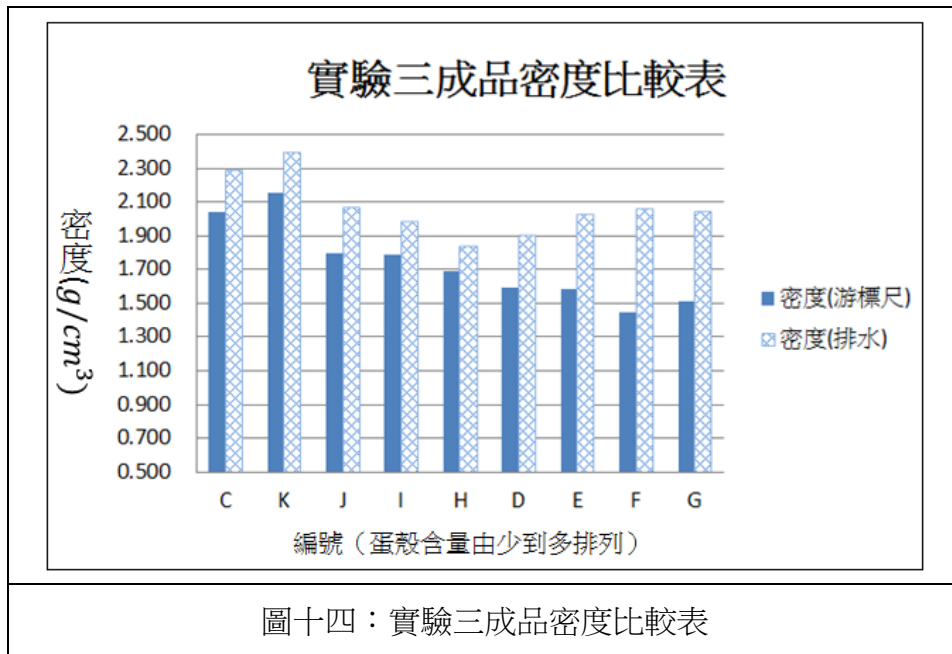
表六：實驗三成品之直徑、厚度及密度（游標尺）

項目 編號	直徑(cm)			平均 直徑 (cm)	厚度(cm)			平均 厚度 (cm)	平均 體積 (cm ³)	平均密度- 游標尺 (g/cm ³)	
C	C1	4.205	4.220	4.210	4.234	0.695	0.680	0.665	0.657	9.246	2.041
	C2	4.195	4.280	4.280		0.675	0.650	0.625			
	C3	4.200	4.260	4.260		0.660	0.630	0.630			
D	D1	4.895	4.900	4.880	4.901	0.600	0.600	0.600	0.599	11.307	1.596
	D2	4.915	4.915	4.920		0.595	0.610	0.605			
	D3	4.885	4.895	4.900		0.595	0.590	0.600			
E	E1	4.990	4.985	4.900	4.971	0.590	0.590	0.600	0.576	11.169	1.587
	E2	4.970	4.965	4.955		0.550	0.555	0.550			
	E3	4.995	4.990	4.985		0.580	0.580	0.585			
F	F1	5.085	5.085	5.090	5.080	0.580	0.585	0.585	0.588	11.924	1.449
	F2	5.075	5.075	5.085		0.570	0.580	0.575			
	F3	5.075	5.070	5.080		0.605	0.605	0.610			
G	G1	5.020	5.015	5.015	5.041	0.595	0.585	0.595	0.586	11.694	1.511
	G2	5.075	5.080	5.070		0.570	0.575	0.565			
	G3	5.030	5.030	5.030		0.600	0.585	0.605			
H	H1	4.790	4.830	4.805	4.759	0.605	0.605	0.610	0.609	10.837	1.689
	H2	4.660	4.665	4.640		0.625	0.620	0.630			
	H3	4.820	4.805	4.815		0.605	0.585	0.600			
I	I1	4.560	4.550	4.580	4.559	0.630	0.630	0.625	0.628	10.250	1.790
	I2	4.580	4.545	4.540		0.620	0.610	0.625			
	I3	4.560	4.545	4.575		0.640	0.635	0.635			
J	J1	4.510	4.485	4.490	4.491	0.655	0.650	0.645	0.660	10.453	1.798
	J2	4.475	4.475	4.510		0.685	0.650	0.650			
	J3	4.480	4.490	4.500		0.690	0.660	0.655			
K	K1	4.230	4.230	4.240	4.255	0.610	0.615	0.610	0.627	8.913	2.155
	K2	4.280	4.285	4.270		0.645	0.655	0.640			
	K3	4.255	4.255	4.250		0.625	0.630	0.610			

表七：實驗三成品之體積及密度（排水法）

項目 編號		體積-排水 (cm^3)	平均體積- 排水 (cm^3)	平均密度- 排水 (g/cm^3)
C	C1	7.95	8.267	2.285
	C2	8.45		
	C3	8.40		
D	D1	9.20	9.483	1.903
	D2	9.75		
	D3	9.50		
E	E1	9.25	8.883	2.020
	E2	7.40		
	E3	10.00		
F	F1	8.70	8.400	2.058
	F2	8.10		
	F3	8.40		
G	G1	8.20	8.660	2.042
	G2	8.65		
	G3	9.13		
H	H1	10.00	9.963	1.838
	H2	9.65		
	H3	10.24		
I	I1	7.80	9.393	1.986
	I2	9.90		
	I3	10.48		
J	J1	8.50	9.113	2.068
	J2	9.25		
	J3	9.59		
K	K1	7.30	8.070	2.391
	K2	8.20		
	K3	8.71		





二、失重率：因實驗一成品未成形，故只測量實驗二及實驗三成品燒結後之重量，並計算其失重率（如表八、表九）。

（一）實驗二：編號 B4、B14 失重率較大（大於 10%）；其餘成品之失重率皆在 2.75% ~7.00%之間。

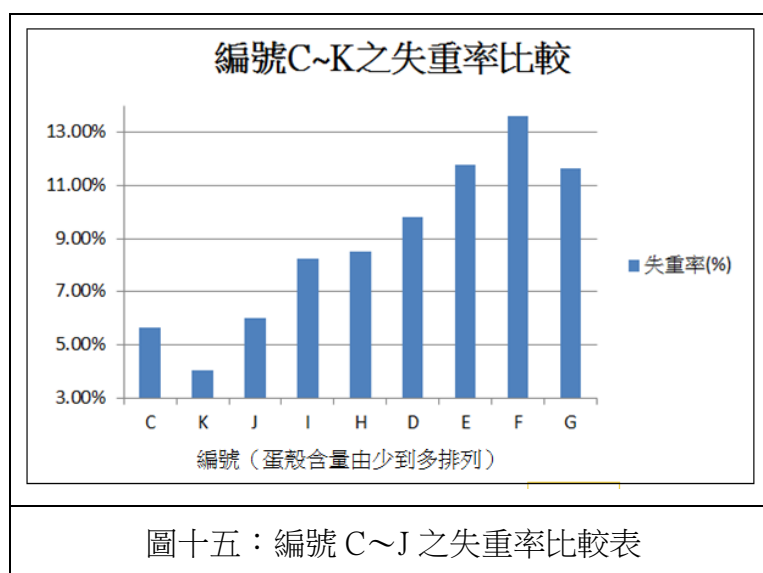
表八：實驗二成品之原重、燒結後重量和失重率的比較

編號	原重 (gw)	燒結後重量 (gw)	失重 (gw)	失重率 (%)
B1	20	19.38	0.62	3.10%
B2	20	18.83	1.17	5.85%
B3	20	18.66	1.34	6.70%
B4	20	17.92	2.08	10.40%
B5	20	19.30	0.70	3.50%
B6	20	19.20	0.80	4.00%
B7	20	19.20	0.80	4.00%
B8	20	19.19	0.81	4.05%
B9	20	19.45	0.55	2.75%
B10	20	18.89	1.11	5.55%
B11	20	19.35	0.65	3.25%
B12	20	19.00	1.00	5.00%
B13	20	18.60	1.40	7.00%
B14	20	17.84	2.16	10.80%

(二) 實驗三：編號 C、K 之失重率較小，編號 E~G 的失重率則較大（皆大於 10%）。且編號 C~J 之失重率和蛋殼含量的多寡略呈正相關（如圖十五）。

表九：實驗三成品之原重、燒結後之平均重量和平均失重率的比較

編號	原重 (gw)	燒結後之重量 (gw)	燒結後之平均重量 (gw)	平均失重 (gw)	平均失重率 (%)	
C	20	C1	19.00	18.87	1.13	5.65%
		C2	18.91			
		C3	18.70			
D	20	D1	17.89	18.04	1.96	9.80%
		D2	18.17			
		D3	18.07			
E	20	E1	17.97	17.72	2.28	11.40%
		E2	16.97			
		E3	18.23			
F	20	F1	17.23	17.28	2.72	13.60%
		F2	16.96			
		F3	17.65			
G	20	G1	17.35	17.67	2.33	11.65%
		G2	17.28			
		G3	18.38			
H	20	H1	18.35	18.30	1.70	8.50%
		H2	18.33			
		H3	18.21			
I	20	I1	18.43	18.35	1.65	8.25%
		I2	18.00			
		I3	18.62			
J	20	J1	18.77	18.80	1.20	6.00%
		J2	18.81			
		J3	18.81			
K	20	K1	19.10	19.19	0.81	4.05%
		K2	19.25			
		K3	19.23			



三、成品測試

(一) 莫氏硬度

1、實驗二：其中編號 B1~B10 之硬度較大；編號 B11~B14 硬度較小。

表十：實驗二成品之莫氏硬度

編號	組員一	組員二	組員三	莫氏硬度的平均值
B1	3~4	3~4	2~3	3~4
B2	1~2	2~3	3~4	2~3
B3	3~4	2~3	3~4	3~4
B4	2~3	3~4	3~4	3~4
B5	3~4	4~5	4~5	4~5
B6	4~5	2~3	4~5	3~4
B7	3~4	3~4	2~3	3~4
B8	3~4	3~4	2~3	3~4
B9	2~3	3~4	2~3	2~3
B10	3~4	3~4	2~3	3~4
B11	1~2	0~1	1~2	1~2
B12	1~2	2~3	1~2	1~2
B13	1~2	0~1	0~1	0~1
B14	1~2	1~2	0~1	1~2

2、實驗三：編號 C 的平均硬度較小；編號 K 的平均硬度最大；編號 D~J 的平均硬度則介於平均值。

表十一：實驗三成品之莫氏硬度

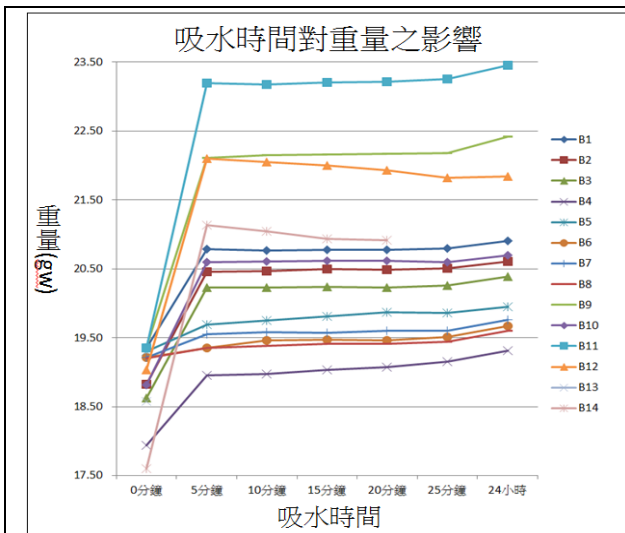
編號	組員一	組員二	組員三	莫氏硬度的平均值
C	C4	2~3	1~2	1~2
	C5	1~2	2~3	2~3
	C6	2~3	1~2	1~2
D	D4	2~3	2~3	2~3
	D5	3~4	2~3	2~3
	D6	2~3	2~3	2~3
E	E4	2~3	1~2	2~3
	E5	2~3	2~3	2~3
	E6	2~3	1~2	1~2
F	F4	2~3	2~3	1~2
	F5	2~3	1~2	2~3
	F6	1~2	1~2	1~2
G	G4	1~2	2~3	2~3
	G5	2~3	2~3	1~2
	G6	2~3	2~3	1~2
H	H4	2~3	2~3	3~4
	H5	2~3	1~2	2~3
	H6	1~2	2~3	2~3
I	I4	2~3	2~3	2~3
	I5	2~3	2~3	2~3
	I6	2~3	2~3	2~3
J	J4	2~3	2~3	2~3
	J5	2~3	2~3	2~3
	J6	2~3	2~3	3~4
K	K4	3~4	2~3	4~5
	K5	3~4	4~5	5~6
	K6	4~5	4~5	5~6

(二) 吸水率

- 1、實驗二：其中編號 B13 在置於水中 5 分鐘內即崩解（如圖十七）；編號 B14 則是在置於水中 20~25 分鐘時發生崩解。其餘胚體在置於水中 24 小時後皆未發生崩解，且在 0~25 分鐘內各階段之吸水量皆屬置於水中前 5 分鐘為最大（如圖十四）。

表十二：實驗二成品泡水後重量比較表（單位：gw）

重量 編號	燒結後	泡水 5 分鐘	泡水 10 分鐘	泡水 15 分鐘	泡水 20 分鐘	泡水 25 分鐘	泡水 24 小時後	前五分鐘的 吸水率
B1	19.35	20.79	20.77	20.78	20.78	20.80	保持原狀	7.44%
B2	18.82	20.46	20.47	20.50	20.49	20.51	保持原狀	8.71%
B3	18.62	20.23	20.23	20.24	20.23	20.26	保持原狀	8.65%
B4	17.92	18.95	18.97	19.03	19.07	19.15	保持原狀	5.75%
B5	19.30	19.69	19.75	19.81	19.87	19.86	保持原狀	2.02%
B6	19.21	19.35	19.46	19.47	19.46	19.51	保持原狀	0.73%
B7	19.21	19.55	19.58	19.57	19.60	19.60	保持原狀	1.77%
B8	19.20	19.35	19.38	19.41	19.41	19.44	保持原狀	0.78%
B9	19.36	22.11	22.15	22.16	22.17	22.18	保持原狀	14.20%
B10	18.81	20.60	20.61	20.62	20.62	20.60	保持原狀	9.52%
B11	19.35	23.19	23.17	23.20	23.21	23.25	保持原狀	19.84%
B12	19.03	22.10	22.05	22.00	21.93	21.82	保持原狀	16.13%
B13	18.58	崩解	崩解	崩解	崩解	崩解	崩解	崩解
B14	17.60	21.13	21.04	20.93	20.91	崩解	崩解	20.06%



圖十六：吸水時間對重量之影響

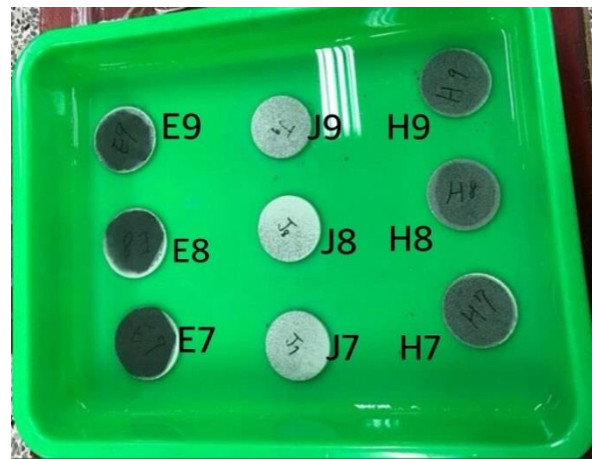
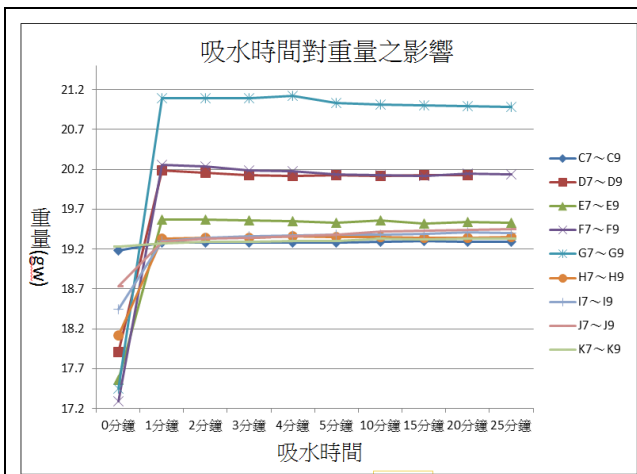


圖十七：實驗二成品之吸水度測試(第 5 分鐘)

2、實驗三：編號 D、E、F、H 在泡水超過 24 小時後其邊緣有破裂情形，且破裂地方大部分為人造磚的白色處（如圖二十、圖二十一）；而其餘種類成品皆保持原本完好狀態。而大部分的坯體在泡水 0~1 分鐘時的吸水量為最大，泡水 1~25 分鐘時則無明顯的重量變化（如圖十八）。

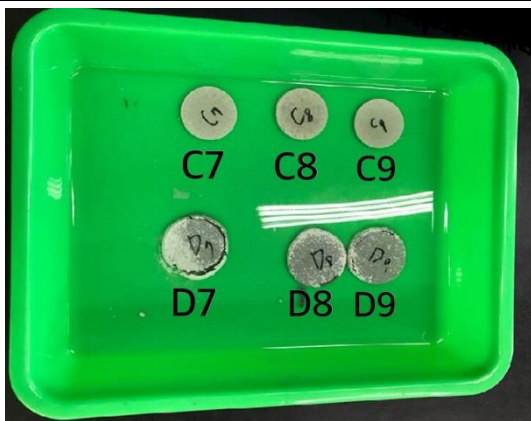
表十三：實驗三成品泡水後重量比較表（單位：gw）

平均重量 編號	燒結 後	泡水 1分鐘	泡水 2分鐘	泡水 3分鐘	泡水 4分鐘	泡水 5分鐘	泡水 10分鐘	泡水 15分鐘	泡水 20分鐘	泡水 25分鐘	泡水 24小時	前五分鐘 吸水率
C	19.18	19.28	19.28	19.28	19.28	19.28	19.29	19.30	19.29	19.29	保持原狀	0.52%
D	17.91	20.19	20.16	20.13	20.12	20.13	20.12	20.13	20.13	20.13	邊緣破裂	12.40%
E	17.56	19.57	19.57	19.56	19.55	19.53	19.56	19.52	19.54	19.53	邊緣破裂	11.22%
F	17.29	20.26	20.24	20.19	20.18	20.14	20.13	20.12	20.15	20.14	邊緣破裂	16.48%
G	17.45	21.09	21.09	21.09	21.12	21.03	21.01	21.00	20.99	20.98	保持原狀	20.52%
H	18.12	19.33	19.34	19.34	19.36	19.35	19.35	19.34	19.34	19.35	邊緣破裂	6.79%
I	18.44	19.30	19.34	19.36	19.37	19.38	19.38	19.39	19.41	19.40	保持原狀	5.10%
J	18.73	19.29	19.33	19.34	19.36	19.38	19.42	19.43	19.44	19.45	保持原狀	3.47%
K	19.23	19.27	19.29	19.29	19.30	19.30	19.33	19.32	19.33	19.33	保持原狀	0.36%



圖十八：吸水時間對重量之影響

圖十九：編號 E、H、J 之吸水率測試（第 25 分鐘）



圖二十：編號 C、D 泡水 24 小時後之狀態

圖二十一：編號 E7、E9 泡水 24 小時後之狀態

(三) 實驗三成品遇酸、鹼反應

1、抗酸反應

模擬家中使用強酸清潔劑不慎潑灑到磚塊上的情形，將選擇使用 pH=2.0 鹽酸做為酸性檢測物質。研究結果除編號 E 在與鹽酸反應後重量略上升；其餘成品的重量則是略微下降（如圖二十二）。

表十四：實驗三成品遇酸之反應值（單位：gw）

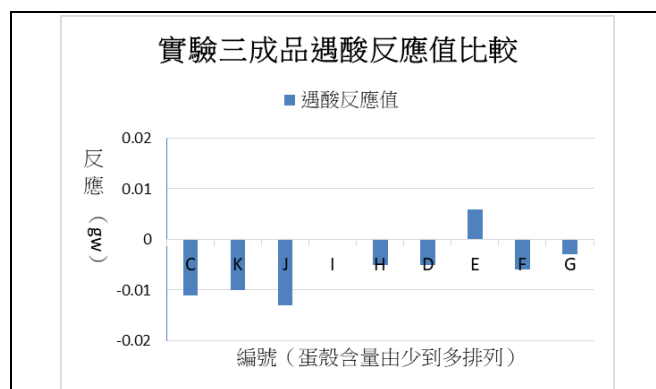
編號	空白試驗平均值	實際試驗值	反應值	反應平均值	
C	C4	0.205	0.187	-0.018	-0.011
	C5		0.182	-0.023	
	C6		0.213	0.008	
D	D4	0.205	0.199	-0.006	-0.005
	D5		0.206	0.001	
	D6		0.197	-0.008	
E	E4	0.205	0.210	0.005	0.006
	E5		0.219	0.014	
	E6		0.205	0.000	
F	F4	0.205	0.212	0.007	-0.006
	F5		0.175	-0.030	
	F6		0.210	0.005	
G	G4	0.205	0.220	0.015	-0.003
	G5		0.182	-0.023	
	G6		0.205	0.000	
H	H4	0.205	0.188	-0.017	-0.005
	H5		0.213	0.008	
	H6		0.201	-0.004	
I	I4	0.205	0.194	-0.011	0.000
	I5		0.210	0.005	
	I6		0.213	0.008	
J	J4	0.205	0.193	-0.012	-0.013
	J5		0.198	-0.007	
	J6		0.187	-0.018	
K	K4	0.205	0.213	0.008	-0.010
	K5		0.180	-0.025	
	K6		0.194	-0.011	

2、抗鹼反應

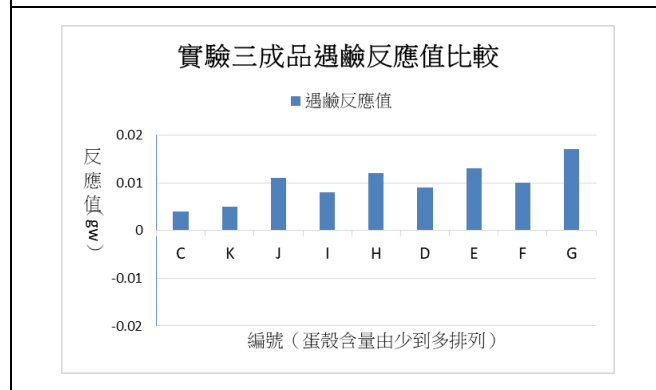
以日常生活中常使用的強鹼清潔劑（pH=14.4）作為檢測物質。發現所有坯體和鹼性清潔劑反應後其重量皆變高，其中以編號 G 上升最多；編號 C、K 上升最少（如圖二十三）。

表十五：實驗三成品遇鹼之反應值（單位：gw）

編號	空白試驗平均值	實際試驗值	反應值	反應平均值
C	0.069	C1	0.067	-0.002
		C2	0.073	0.004
		C3	0.081	0.012
D	0.069	D1	0.081	0.012
		D2	0.076	0.007
		D3	0.078	0.009
E	0.069	E1	0.090	0.021
		E2	0.081	0.012
		E3	0.077	0.008
F	0.069	F1	0.081	0.012
		F2	0.077	0.008
		F3	0.081	0.012
G	0.069	G1	0.092	0.023
		G2	0.084	0.015
		G3	0.084	0.015
H	0.069	H1	0.087	0.018
		H2	0.086	0.017
		H3	0.070	0.001
I	0.069	I1	0.084	0.015
		I2	0.076	0.007
		I3	0.073	0.004
J	0.069	J1	0.077	0.008
		J2	0.080	0.011
		J3	0.084	0.015
K	0.069	K1	0.069	0.000
		K2	0.075	0.006
		K3	0.079	0.010



圖二十二：實驗三成品遇酸反應值比較表



圖二十三：實驗三成品遇鹼反應值比較表

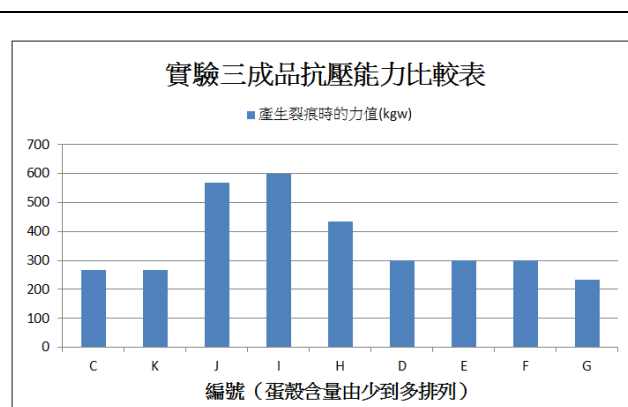
(四) 抗壓能力：其中以編號 H、I、J 之抗壓能力較佳。

表十六：實驗三成品產生裂縫時的力值（單位：kgw）

編號	產生裂縫時的力值(kgw)	產生裂縫時的平均力值(kgw)
C	C11	400
	C12	200
	C13	200
D	D11	300
	D12	200
	D13	400
E	E11	400
	E12	300
	E13	200
F	F11	100
	F12	400
	F13	400
G	G11	200
	G12	200
	G13	300
H	H11	600
	H12	300
	H13	400
I	I11	500
	I12	500
	I13	800
J	J11	500
	J12	500
	J13	700
K	K11	300
	K12	300
	K13	200



圖二十四：實驗三成品抗壓能力測試



圖二十五：實驗三成品抗壓能力比較表

陸、 討論

- 一、 實驗一的蛋殼粉末經過燒結後仍無法成形，可能燒結過程未能完全成功，從燒結原理知道燒結溫度是最重要的因素，但是過高燒結溫度將使蛋殼因高溫發生分解作用，原因為碳酸鈣在 690°C ， 1atm 下會發生分解作用，產生 CaO 及 CO_2 ，本實驗是以 650°C 進行燒結。在僅添加黏著劑的實驗條件下，因溫度不足，蛋殼粉末沒有產生燒結反應或是燒結不完全的成品發生碰觸即碎的現象，合理推測未達蛋殼粉末燒結溫度。而加入幫助降低燒結溫度的添加材料，從文獻資料[6]研究結果提到，有些物質能夠和碳酸鈣反應，並液化幫助燒結現象，第二相物質的加入將有助於降低燒結溫度，可讓蛋殼粉末燒結成磚。
- 二、 關於實驗二，因在燒結時有些成分會隨著溫度上升而消失，故燒結後，人造磚重量會隨之減少。由於燒結的好壞，主要是由燒結後的密度掌握，而密度和重量成正比，所以推論燒結後失重較少者為較佳條件，同時透過燒結作用使人造磚更堅硬，故硬度較大者，為較好結果。此外建材對於如地磚、牆壁等應用的目的，較低的水分吸附為佳。且進一步發現，碳酸鈣粉末不論大小（編號 B1、B6~B8），其成品失重、硬度、吸水率和密度所檢測出的數據皆相差不大。

（一） 失重

根據表八，比較編號 B1~B4，可以看出在 PVA 比例上升的情況下，人造磚的失重將會變大。推測其原因是 PVA 沸點僅 230°C ，在燒結過程中 PVA 將會汽化，造成人造磚失重。由編號 B5 可以看到，PVA 的種類對失重影響不大。比較編號 B1、B9、B10，及編號 B11~B13，實驗結果發現當 NaCl 、 Li_2CO_3 的比例逐漸上升，失重率也越大。可能是因燒結過程中，第二相物質和碳酸鈣粉末反應，產生氣體，導致重量變小。第二相物質不論是 NaCl 、 Li_2CO_3 ，其比例和失重皆呈正相關。不過，若個別比較 Li_2CO_3 和 NaCl 純碳酸鈣磚的失重，會發現無論比例為何， NaCl 的失重都比 Li_2CO_3 大，推測 Li_2CO_3 的燒結較成功，為較好的第二相物

質。而粉末為蛋殼的人造磚，失重較碳酸鈣粉末來的大，可推測是因蛋殼粉末其實包含了其他的成分，可能在燒結過程中，會發生揮發等反應，導致失重較大。總結而言，2%的 PVA，再加入 5%的 Li_2CO_3 ，其失重率小於 5%。

(二) 莫氏硬度

根據表十，編號 B1~B10 普遍都有 2~3 的莫氏硬度，有些甚至達到 4~5。它們都有一個共通點：第二相物質為 Li_2CO_3 ，粉末為碳酸鈣。而第二相物質為 NaCl 的人造磚（編號 B11~13），不論 NaCl 比例為多少，莫氏硬度都不大，介於莫氏硬度 0~2 之間，推論為 NaCl 的燒結並沒有那麼成功，造成硬度較小。而編號 B14，蛋殼粉末人造磚燒結較不成功（有崩解的現象），硬度也相對較小。實驗結果顯示純蛋殼粉末無法製成到達普遍的有實用性的人造磚，故實驗三將製作含有蛋殼粉和碳酸鈣的混合磚。總結而言，第二相物質為 Li_2CO_3 ，粉末為碳酸鈣的人造磚硬度較大。

(三) 吸水率

根據表十二，人造磚普遍在 5 分鐘後，就會吸足水份，產生最大吸水量，其中又以編號 B9、B11、B12、B14 吸水比例較高。編號 B9，推論是在第二相物質比例較低時，燒結不會完全成功，較鬆散、孔隙多，所以吸水率才會高。編號 B11、B12、B13 為添加第二相物質 NaCl 的人造磚，B11、B12 推測燒結沒有很成功，以至於孔洞多，吸水率大，B13 甚至整個崩解，可能是孔洞多到結構無法支撐。而 B14 泡水 20 分鐘之後，即崩解，推測原因為燒結不完全，中心孔洞多，以至於一開始吸附了許多水分。總結而言，添加 5%的 Li_2CO_3 ，粉末為碳酸鈣的人造磚，其吸水率皆小於 10%。

(四) 體積和密度

圖九中可以看出游標尺所測出的體積，第二相物質若為 NaCl 或為 1%或 10% 的 Li_2CO_3 ，或是粉末為純蛋殼粉末的體積皆較大，代表燒結不是很成功，中間空隙多。根據圖十，游標尺所檢測出來的密度，在 PVA 比例當變因的 B1~B4 中，結果可以發現，在 PVA 比例達 8%時（編號 B4），因為 PVA 在加熱中散失，以至於中間孔隙多，故測出來的體積大，造成密度比較低。另外，B11~B13 以 NaCl 當第二相及 B14 純蛋殼磚的密度也較為低，原因應該也是 NaCl 所幫助的燒結不成功，造成體積大，因而密度小。排水法測出來的體積比游標尺都小，表示人造磚中間有孔隙或是人造磚會吸水，比較表十二吸水率可以發現吸水率大於 10%的 B11、B12、B14，其排水法和游標尺測出來的體積也相差最多。因此若要製成燒結較完全、體積較小、密度較大的人造磚，應添加 5%的 Li_2CO_3 及 2%PVA，可以製成密度較大的人造磚。

三、關於實驗三，討論不同變因（蛋殼及碳酸鈣的重量百分比）的失重、密度、莫氏硬度、抗酸鹼能力、吸水率及抗壓能力。每種變因都使用三片的人造磚進行測試，並取平均值，相較於實驗二更為精準。以其失重，判斷燒結反應對人造磚的影響；檢測其燒結完的密度，分辨其燒結的狀態是否成功；硬度、抗酸鹼能力、吸水率及抗壓測試則是判斷在未來使用的耐用性。失重、密度、莫氏硬度及吸水率的判斷，皆與實驗二相同，失重較少、密度較大、硬度較高及吸水較少為佳。另外在實際應用時，不會因為刷洗時所用的清潔劑，而造成人造磚的破壞，分別進行抗酸鹼測試，反應較小為佳。另一方面，磚在日常生活上是一定會遇到一些撞擊，抑或是物品的重壓，所以能承受較大的力者為佳。

(一) 失重、莫氏硬度及吸水率

這三種測試，與實驗二初步的檢測有一些相似，而結果也應證了實驗二單次的實驗。在失重方面，根據圖十五，透過不同比例的人造磚發現，蛋殼粉比例越重的人造磚，其失重是越大的。但蛋殼粉重量百分比小於 31% 的成品（編號 H、I、J），其失重率皆可達 9% 以下，進一步推想可以得知蛋殼粉末相較於碳酸鈣粉末更容易在燒結中散失。而莫氏硬度的部分（表十一），不論蛋殼粉的重量百分率是多少，硬度都分布在 2~3 之間，只有純碳酸鈣粉末磚表現較好。在吸水率方面，根據圖十八，普遍來說 1 分鐘內即可以達到飽和。原重較輕的人造磚吸水後的重量較重；而原本較重的高碳酸鈣粉末磚，則較不會吸水。整體而言，蛋殼粉的重量百分比小於 31% 的成品（編號 H、I、J），其前五分鐘的吸水率皆小於 10%。

(二) 體積和密度

圖十三顯示出的是用游標尺及排水所檢測的體積，游標尺體積所能看出的是其外觀體積，長條圖呈現出人造磚體積與蛋殼粉末比例呈現正相關。排水法則顯示當蛋殼重量百分比大於 31% 時，排水體積反而愈少，對照吸水率的實驗結果（表十三），相同的樣本其吸水率也大（大於 10%），由此可以推測蛋殼粉末百分比較多者中間孔隙較多。透過吸水率小而密度大的條件，考慮建材的實用性可以採用蛋殼百分比小於 31%，來製作環保人造磚。

(三) 抗酸鹼能力

在抗酸的部分（表十四），混和磚置放於空氣 30 秒後，其反應值相當的小，大則 0.01 公克，小則 0.001 公克，可推論酸與人造磚並不會產生反應，在使用上較

無此疑慮。在抗鹼的部分（表十五），和抗酸類似，反應值約在 0.01~0.005 公克之間，顯示人造磚與鹼也不會發生反應。所以圖十九、二十並無發現規律。

（四） 抗壓能力

從圖二十五顯示，純碳酸鈣磚的抗壓能力和蛋殼粉重量百分比大於 31%的人造磚相差不大，蛋殼重量百分比小於 31%的人造磚所能承受的力反而大於純碳酸鈣磚。

柒、 結論

- 一、不加入第二相材料的純蛋殼粉末，使用燒結溫度 650°C（低於碳酸鈣分解溫度 690°C），將因燒結條件不足夠的限制，導致無法進行或不完全的燒結反應，而無法製成人造磚。
- 二、由實驗結果可發現不同尺寸的碳酸鈣粉末顆粒所製作的人造磚，各項檢測結果皆相近。當加入 5% Li_2CO_3 第二相材料及 2%PVA 黏著劑時，可製成失重率最小、硬度較大、吸水率小於 10%、體積最小、密度最大的人造磚，達到可作為建材的基本條件。
- 三、蛋殼粉重量百分比小於 31%的成品，其失重率皆可達 9%以下，前五分鐘的吸水率皆小於 10%，可承受較大的力，且不與酸鹼反應，達到製作環保人造磚的基本條件。

捌、 應用與未來展望

- 一、從建材應用考量，以失重比率較小、密度較大、硬度較大、吸水率較小、高抗酸鹼能力、高抗壓能力的檢測標準，根據製程參數的最佳化，透過碳酸鈣粉末及重量百分比低於 31%的蛋殼粉末均勻混合，並加入 5% Li_2CO_3 第二相材料及 2%PVA 黏著劑，實驗結果顯示已成功製作具低吸水率、高抗酸鹼及良好抗壓與硬度的環保人造磚。
- 二、與現有的台灣標準規範（CNS）進行比較[9]。陶瓷磚的吸水率 18%以下，莫氏硬度至少 3~4，而本次實驗編號 H 成品吸水率為 6.79%，莫氏硬度 2~3，吸水率已達到標準，而未來可改善實驗以增加莫氏硬度。總結而言，若以蛋殼來製做環保人造磚確實可行。

三、有些蛋殼比例高的混合磚在泡水過後，在暴露於空氣之中，會發生龜裂的現象，這是下一階段要解決的問題，若能將人造磚應用在較乾燥的地方或是在人造磚表面進行防水的處理，則可以避免這個問題產生。

玖、參考資料及其他

- [1] 【談雞說蛋】之一：肉雞產肉、蛋雞產蛋，肉蛋有別（2017年10月5日）· 農傳媒· 取自 <https://goo.gl/Rio79B>
- [2] 蛋殼是價廉物美的鈣質補充品（2017年10月29日）· 樂活營養師· 取自 <https://goo.gl/TX6YBv>
- [3] 李通藝（主編）（2017）· 基礎地球科學上冊· 新北市：康熙。
- [4] PVA的特性（2018年3月15日）· 誠興關係企業· 取自 <https://goo.gl/4C5RYS>
- [5] 陳思宏（2011）· 真空燒結與熱均壓製程對鉻銅合金靶材為結構及其性質之影響（未出版的碩士論文）· 臺北市：國立臺北科技大學材料科學與工程研究所。
- [6] 陳鴻文（2001）· 碳酸鈣的燒結行為與顏色成因的初步研究（未出版的碩士論文）· 臺北市：國立台灣大學地質科學研究所。
- [7] 陳坤賢、麥恩、馮輝敏、吳嘉承、施俊伯（1986）· $(1-x) (Bi_{0.5} Na_{0.5} TiO_3 - xCaTiO_3)$ 添加燒結促進劑 PBS 之微結構研究（未出版的學士論文）· 台南市：私立崑山科技大學機械工程系。
- [8] 林蔚（譯）（1997）· 礦物硬度· 岩石與礦物· 臺北市：貓頭鷹。
- [9] 磁磚常識（2018年5月15日）· 漢樺企業股份有限公司· 取自 <https://goo.gl/PF9wqd>