

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 化學科

第三名

050204

「泥」給我「電電」！-製作及改善二次水泥電池

學校名稱：新北市立板橋高級中學

作者： 高二 林品睿 高二 王品翔 高二 劉芮瑄	指導老師： 陳香如
---	------------------

關鍵詞：混凝土、二次電池、固態電解液

摘要

「水泥電池」為一個以水泥為底的電池，想法是將水泥轉化為巨大的儲能裝置，而在2021年，首次有研究團隊將此概念擴展到了二次電池，此研究正是水泥電池的開路先鋒。而我們在這次的研究中，針對水泥基的電阻進行最佳化，發現水泥中電解液配方為在38公克的蒸餾水中加入0.5公克的CMC，3公克的矽酸鈉以及13.1公克的氫氧化鉀為最佳，能使水泥從原先16000歐姆的電阻降至514歐姆，降低96.8%。而我們也以自製的導電碳板代替碳纖維，製成了鐵及鎳電極，二次水泥電池首次充放電在8小時間功率有544微瓦特，第二次充放電有373微瓦特，只損失了31.4%。未來我們希望能繼續測試及解決電池的效能以及增加電池的能量密度。

壹、前言

一、研究動機

在居家防疫的期間，我們遇到不少次停電的問題，因此我們思考如何讓我們在停電的時候依然有電可以用。我們查了許多與電力相關的文獻，發現對於可再生能源的相關文獻很多，對於能源儲存方式的相關文獻較少，關於能源的儲存方式並沒有像再生能源發展得如此地快。恰巧我們發現了這部影片「未來建築可以直接儲電？科學家研發出最新『水泥電池』！」，影片中提到了許多關於能源儲存的新方式，其中一種就是「水泥電池」。影片中也提到了這篇文章〈Rechargeable Concrete Battery〉，此文章發表於2021年3月，是第一篇研究並成功製作出水泥基電池的文章。文中闡述了由水泥製成可充電電池的新概念，與製成水泥電池的最佳比例，並且已經成功地開發了可充電的水泥基電池，但文章中有一些細節並沒有闡述得非常清楚。我們對此感到非常好奇，深入研究後決定以「水泥電池」為題，展開我們的研究。

二、研究目的

1. 最佳化導電水泥基
2. 製作及研發二次水泥電池

三、文獻回顧

(一) 水泥與混凝土之比較¹

水泥是石灰與泥土組成的混凝土，主要組成材料為石、砂、水泥與水。石頭用量、砂用量、水泥用量、水量比為 8:4:2:1。如此一號比一號大的級數配合，目的在求得緻密的混凝土。因此我們所製作的水泥電池理論上須稱為混凝土電池。但因眾多文獻都對其稱之為水泥電池(cement battery)，故沿用此名稱。

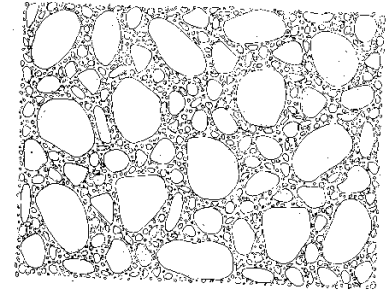


圖 1、理想的混凝土構造。

(二) 水泥電池製作與研發²

1. 電池製作

常見的水泥電池由三層組成，分別為陽極、電解液層以及陰極，而現在常見的水泥電池在電極製作的方面是採用在水泥中混入金屬粉末，簡稱粉末法，並在中間插入碳纖維網(carbon fiber，簡稱 CF)來連接電池，兩極中間則由含有電解液的水泥層隔開。這樣的做法製作簡單，但也有一個明顯缺點，就是導電度不夠。

此篇文獻採取了另一個做法，反而不使用金屬粉末，研究人員在 CF 上直接鍍上金屬，並將其置於水泥中，中間一樣加上電解液層隔開，這樣的做法能增加電池整體的導電度，而此方法簡稱電鍍法。水泥部分則為了增加導電性，添加了離子交換樹脂，由於是處在一個強鹼環境之下，樹脂是添加氫氧根交換樹脂，電解液則選擇了氫氧化鉀及氫氧化鋰的混合液。

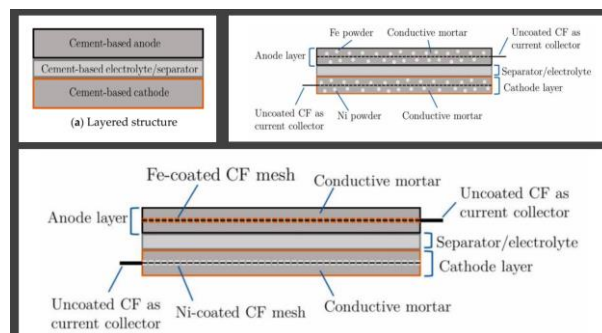


圖 2、電池結構圖。¹

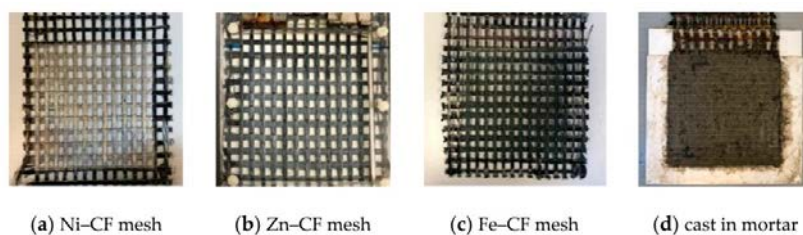


圖 3、電鍍上金屬的碳纖維網。¹

2. 電池實測

首先，測試了碳纖維含量對電阻的影響。可以從下圖看到，隨著碳纖維含量越多，電阻也隨之降低，而此研究選用碳含量為 0.9%，因為有相對低的電阻，而其他電阻更低的水泥絕大部分因為含水量過高而不適合製作電池。

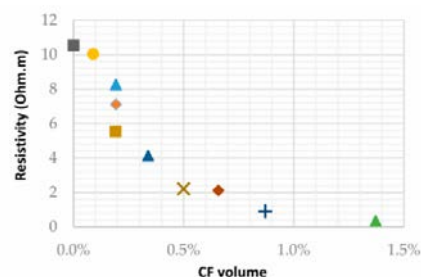


圖 4、碳纖維含量與電阻關係圖。¹

水泥電池在經過 12 小時充電之後進行 8~12 小時的空載放電，並測量電流、陰極電壓以及陽極電壓。而下圖為粉末法的電極數據，可以看見電流的部分不盡理想，因此不採取此方式製作水泥電池(圖 5)。

接著測試電鍍型水泥電池的實際放電情形，在充電 8 小時後對 165 歐姆的電阻放電，此電池的電極為 9 公分 x 9 公分。從圖中可知電壓及電流最初急遽下降，穩定了 6 小時後又再次下降，整個放電過程約 22 小時(圖 6)。

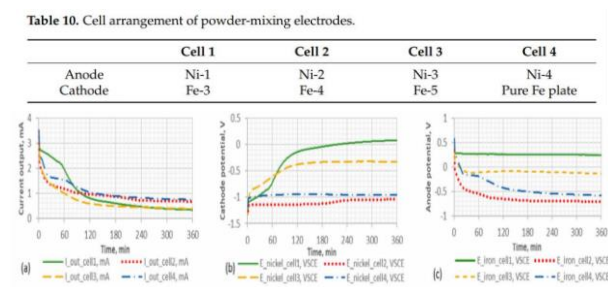


圖 5、粉末型水泥電池實測結果。¹

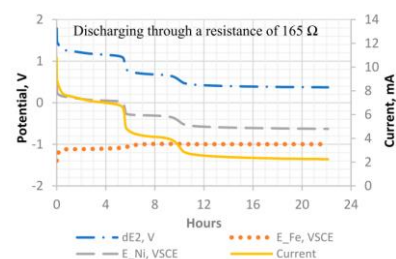


圖 6、電鍍型水泥電池實測結果。¹

貳、 研究設備與器材

名稱	數量	名稱	數量
KOH	1 罐	98% H ₂ SO ₄	1 罐
LiOH·H ₂ O	1 罐	NiSO ₄ ·7H ₂ O	1 罐
NaOH	1 罐	NiCl ₂ ·6H ₂ O	1 罐
聚乙烯醇	1 罐	H ₃ BO ₃	1 罐
羧甲基纖維素	1 罐	FeCl ₂ ·4H ₂ O	1 罐
矽酸鈉	1 罐	CaCl ₂	1 罐
銅線	1 卷	塑膠片	數片
鎳片	數片	水泥	數包
鐵片	數片	細沙	數包
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1 罐	超音波洗滌器	1 臺
酒石酸鉀鈉·4H ₂ O	1 罐	電源供應器	1 臺
檸檬酸三鈉·2H ₂ O	1 罐	三用電表	1 臺
KNO ₃	1 罐	毫安培計	1 臺

參、 研究過程與方法

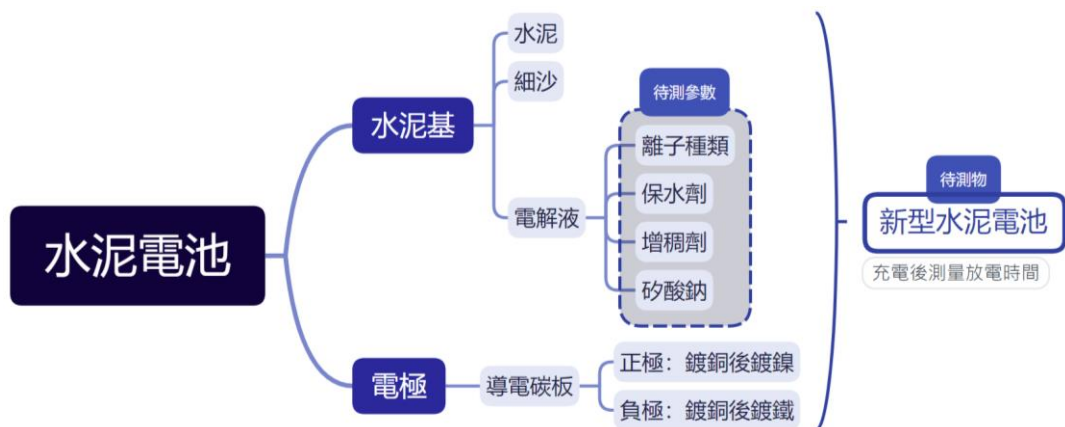


圖 7、實驗流程。

一、最佳化導電水泥基

(一) 測量水泥基電阻與距離之關係

電池由電極與電解液組成，水泥電池則是把電解液替換成水泥製成的固態電解液(以下簡稱水泥基)。此實驗為最佳化導電水泥基的預實驗，以此確認水泥基的電阻是否與距離成正比，以此來決定未來水泥基中的電極距離，而實驗步驟如下。

1. 秤量66公克水泥粉以及45公克細沙，並置於燒杯中。
2. 量取30公克的電解液並加入燒杯，並混合均勻。
3. 將其分裝於3個20毫升的塑膠杯中，並敲擊塑膠杯以去除氣泡。
4. 在水泥基中間隔0.5公分插入兩根粗銅線，並靜置五天(圖8)。
5. 重複步驟1~4，並將粗銅線距離改為1公分、1.5公分、2公分及2.5公分
6. 利用直流電源供應器對水泥基上的銅線施加20伏特的電壓，並測量其電流(圖9)。
7. 利用公式 $R = \frac{V}{I}$ 計算出水泥基的電阻。

(二) 最佳化導電水泥基

因為水泥為電的不良導體，所以減少水泥基的電阻是首要目標。在此實驗中，會測試不同配方的添加劑對水泥基電阻的影響，並製作電阻最低的水泥基，以便研發二次水泥電池。而下列為水泥基的統一製作方式以及電阻測量方式。

1. 秤量66公克水泥粉以及45公克細沙，並置於燒杯中。
2. 量取30公克的電解液並加入燒杯，並混合均勻。
3. 將其分裝置3個20毫升的塑膠杯中，並敲擊塑膠杯以去除氣泡。
4. 在水泥基中間隔1.5公分插入兩根粗銅線，並靜置五天(圖8)。

5. 利用直流電源供應器對水泥基上銅線施加20伏特的電壓，並測量電流(圖9)。
6. 利用公式 $R = \frac{V}{I}$ 計算出水泥基的電阻。



圖8、水泥基。

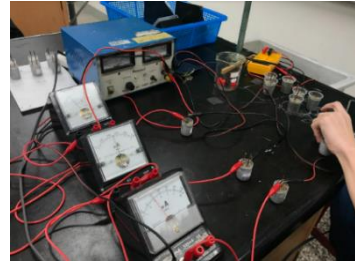


圖9、測量電阻。

本實驗針對水泥中常用的添加物進行研究，測試這些添加物對水泥基電阻的影響。最後選擇了離子種類、保水劑、增稠劑及矽酸鈉4種變因進行實驗，詳細整理如下表。

表1、探討不同參數對水泥基電阻的影響

參數	項目	說明
參數一	離子種類	改變氫氧化物的陽離子
參數二	保水劑	改變水泥中聚乙烯醇(PVA)的含量
參數三	增稠劑	改變水泥中羧甲基纖維素(CMC)的含量
參數四	矽酸鈉	改變水泥中矽酸鈉(Na_2SiO_3)含量

1. 參數一：離子種類

水泥中電解液是鹼金屬的氫氧化物水溶液，本實驗想探討不同的氫氧化物是否會對水泥基的電阻造成影響。此實驗中我們將統一水泥配方中的電解液分別改成相同濃度(6.17 M)的氫氧化鋰、氫氧化鈉及氫氧化鉀水溶液(詳細配方如下表)，探討不同陽離子種類對水泥基電阻的影響。

表2、氫氧化物水溶液配方

氫氧化物種類	氫氧化物使用量 (g/100mL)	氫氧化物重量莫耳濃度
KOH	34.66	6.17
NaOH	24.71	6.17
LiOH · H ₂ O	25.95	6.17

2. 參數二：保水劑

離子僅能在水中及溶液中移動，而水泥中的水溶液含量是影響電阻的重要關鍵。聚乙烯醇(結構式如右圖，以下簡稱PVA)為工業上常用的保水劑原料，因此我們探討在不改變電解液含量下，PVA的添加量是否會對電阻產生影響。

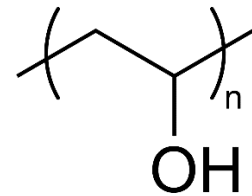


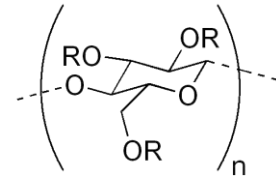
圖10、PVA結構式。

表3、PVA重量百分濃度

PVA重量百分濃度(wt%)	PVA使用量(g/100mL)
0	-
2.5	2.56
5	5.26
7.5	8.11
10	11.11

3. 參數三：增稠劑

羧甲基纖維素(carboxymethyl-cellulose，結構式如右圖，以下簡稱CMC)，在過去的文獻³中被發現有增長水泥凝固時間以及增強水泥的防腐蝕程度。此實驗探討CMC在水泥中的含量對水泥基電阻的影響，而我們也試著探討增稠劑與氫氧化鉀組成的電解液會不會有不同的結果。



R = H or CH₂CO₂H

圖11、CMC結構式。

表4、CMC重量百分濃度

CMC重量百分濃度 (wt%)	CMC使用量 (g/100mL)	氫氧化鉀使用量 (g/100mL)	氫氧化鉀重量莫耳濃度
0	-	- 34.66	- 6.17
1.25	1.27	- 34.66	- 6.17
2.5	2.56	- 34.66	- 6.17
5	5.26	- 34.66	- 6.17
7.5	8.11	- 34.66	- 6.17
10	11.11	- 34.66	- 6.17

4. 參數四：矽酸鈉

水泥中添加矽酸鈉的主要目的是使水泥快速凝固，由於矽酸鈉是離子化合物，我們想知道在水泥中添加適量的矽酸鈉是否會影響水泥基的電阻，且也探討增稠劑與氫氧化鉀組成的電解液會不會有不同的結果，此實驗的詳細矽酸鈉配方如下表。

表 5、矽酸鈉使用量與重量百分比換算

矽酸鈉使用量 (g/38mL)	矽酸鈉重量百分比濃度(wt%)	氫氧化鉀使用量 (g/38mL)	氫氧化鉀重量莫耳濃度
-	0	- 13.1	- 6.17
3	7.5	- 13.1	- 6.17
6	14.3	- 13.1	- 6.17
9	20	- 13.1	- 6.17
12	24	- 13.1	- 6.17
15	28.3	- 13.1	- 6.17
18	32.1	- 13.1	- 6.17

5. 最佳化固態水泥電解液

綜合上述的四項參數，並探討將四項參數合併對固態水泥電解液的電阻帶來的影響。此實驗的結果將會是我們最佳化的固態水泥電解液，而此水泥基將會被使用在以下的二次水泥電池的開發之中。下表為我們測量的5種水泥配方。

表6、最佳化水泥使用配方

編號	詳細配方 (g)							氫氧化物重量莫耳濃度
	水	CMC	PVA	矽酸鈉	KOH	LiOH	NaOH	
1-1	38	3	4					-
1-2	38	1.5	2					-
2-1	38	0.5		12				-
2-2	38	0.25		6				-
3-1	38	0.5		3	13.1			5.62
3-2	38	0.25		1.5	6.55			2.93
4-1	38	0.5		3		9.8		5.62
4-2	38	0.25		1.5		4.9		2.93
5-1	38	0.5		3			9.38	5.62
5-2	38	0.25		1.5			4.69	2.93

二、製作及研發二次水泥電池

水泥電池的兩大要素為電極和固態水泥電解液，在上方的實驗中我們已經統整出最佳化的固態水泥電解液，而接著是製作此電池所需的鐵和鎳電極，此電池的化學運作原理如下表。我們會從使用純金屬片當作電極推廣到以電鍍金屬之碳板作為電極。接著了解電極的充放電以及電池輸出功率的關係。

表7、電池半反應式

金屬化合物	半反應式	標準還原電位(V)
羥基氧化鎳	$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$	+0.52 ⁴
氫氧化亞鐵	$\text{Fe(OH)}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe} + 2\text{OH}^-$	-0.89 ⁵

(一) 製作電鍍電極

為了有效降低成本及減少金屬使用量，本實驗採用電鍍法製作電極，並探討如何製造導電碳塗層以及金屬電鍍層。

1. 製作導電碳板

原先預計採用碳纖維網作為基底材料，但碳纖維網購買不易，於是採用價格低廉的自製碳塗層來取代碳纖維。

(1) 自製導電碳塗層

使用碳黑、壓克力顏料和水，以電鑽攪拌調和成導電漆⁶，並塗抹在塑膠片上製成導電碳板，並測量電阻，以下為詳細實驗步驟。

1. 將塑膠板切割成 3 公分 x 10 公分的塑膠片。
2. 將塑膠片放入超音波洗滌器中 60 秒並取出。
3. 將碳黑 30 公克及壓克力顏料 20 公克用電鑽混合均勻，並緩緩加入 5 毫升的蒸餾水(圖 12)。
4. 均勻塗抹一層在塑膠片上(圖 13)，並放入攝氏 60 度的烘箱一小時。
5. 利用三用電表測量導電碳板的電阻(圖 14)。
6. 重複步驟 4~5 一次。



圖 12、自製導電漆。



圖 13、塗抹導電塗層。



圖 14、自製導電碳板。

2. 製作電鍍金屬電極

接著我們須選用適當的電鍍液來對導電碳板進行電鍍，以製作金屬電鍍電極，而我們總共電鍍銅、鎳及鐵三種金屬，下列為三種金屬的統一電鍍方式及步驟。

(1) 電鍍銅

1. 如下表調配電解液，並用直流電電源負極接待鍍電極，正極接銅線，並用 500 毫安培電鍍 6 小時(圖 20)。
2. 將鍍銅碳板取出並放置於 5%硫酸水溶液中防止鍍銅層氧化。

表 8、銅電鍍液配方⁶

陰極	陽極	電鍍液成分(每 100mL)	電流與電鍍時間
		50g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
		10g 酒石酸鉀鈉 $\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
導電碳板	銅線	90g 檸檬酸三鈉 $\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	500mA/6h
		18g KNO_3	
		1.5mL 98% H_2SO_4	

(2) 電鍍鎳

1. 如下表調配電解液，並用直流電電源負極接待鍍電極，正極接鎳片，並用 2 安培電鍍 0.5 小時(圖 21)。
2. 沖洗殘留電解液，接著立即放入水泥電池中。

表 9、鎳電鍍液成分²

陰極	陽極	電鍍液成分(每 100mL)	電流與電鍍時間
		25g $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
待鍍電極	鎳片	2g $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2A/0.5h
		2g H_3BO_3	

(3) 電鍍鐵

1. 如下表調配電解液，並用直流電電源負極接待鍍電極，正極接鐵片。
2. 以 2 安培電鍍 0.5 小時，並沖洗殘留電解液，接著立即放入水泥電池中。

表 10、鐵電鍍液成分⁷

陰極	陽極	電鍍液成分(每 100mL)	電流與電鍍時間
待鍍電極	鐵片	37.45g FeCl ₂ ·4H ₂ O 20.60g CaCl ₂	2A/0.5h

我們總共製作了 4 種電極，詳細製作步驟如下。

(1) 鍍鎳銅片

在 3x10 公分的銅片上電鍍鎳。

(2) 鍍鐵銅片

在 3x10 公分上的銅片電鍍鐵。

(3) 鍍鐵導電碳板

在 3x10 公分上的導電碳板上先電鍍銅再電鍍鐵。

(4) 鍍鎳導電碳板

在 3x10 公分上的導電碳板上先電鍍銅再電鍍鎳。

(二) 製作新型水泥電池

為了探討水泥電池，我們展開了一系列的水泥電池相關實驗，分別是純金屬片水泥電池、電鍍銅片水泥電池、小型水泥電池及大型水泥電池，而水泥電池的統一製作方式及電流測量方式如下。


1. 配置**實驗指定份數**最佳化水泥(水泥配方為 66 公克水泥粉、45 公克細沙及 30 公克電解液，電解液配方為 0.5 公克 CMC、3 公克矽酸鈉及 13.1 公克氫氧化鉀)。

- 間隔 1.5 公分放入**實驗指定電極**，並指定電極浸入水泥的**電極有效面積**，並靜置 24 小時(圖 15)。
- 將直流電電源供應器正極接上鎳，負極接上鐵並以 70 毫安培充電 6 小時(圖 16)。
- 在**實驗指定的放電時間**內持續測量電壓及電流，並利用 $W = I \times V$ 計算電池作功，獲得首次水泥電池放電數據。
- 重複步驟 3~4，再次對水泥電池進行充放電，獲得第二次水泥電池放電數據。



圖 15、水泥電池。 圖 16、對水泥電池充電。 圖 17、對水泥電池放電。

表 11、新型水泥電池一覽

水泥電池 名稱	純金屬片 水泥電池	電鍍銅片 水泥電池	小型水泥電池	大型水泥電池
水泥份數	2	2	2	30
正極電極 種類	純鎳片	鍍鎳銅片	鍍鎳導電碳板	鍍鎳導電碳板
負極電極 種類	純鐵片	鍍鐵銅片	鍍鐵導電碳板	鍍鐵導電碳板
電極有效 面積(cm ²)	15	15	15	96
放電時間 (hr)	0.5	1	8	8
實際照片				

肆、研究結果

一、最佳化導電水泥基

(一) 測量水泥基電阻與距離之關係

1. 電極擺放距離

測量不同的電極擺放距離對水泥基電阻的影響。

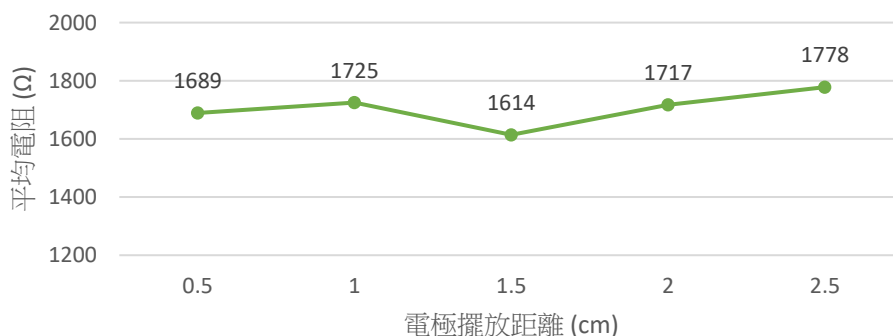


圖 18、電極擺放距離對水泥基電阻的影響。

從圖中可以得知，在電阻擺放距離為 0.5~2.5 公分的實驗中，各組平均電阻的差距小，最高的電阻與最低的差距只有 164 歐姆。而此實驗中又以擺放距離為 1.5 公分的電阻最低，因此之後的水泥基參數之實驗與製作水泥電池時電極擺放距離將統一為 1.5 公分。

(二) 最佳化導電水泥基

1. 參數一：離子種類

此實驗測量使用不同鹼金屬氫氧化物的水泥基對電阻的影響，下圖為以氫氧化鋰、氫氧化鈉、氫氧化鉀作為電解液的水泥基電阻。

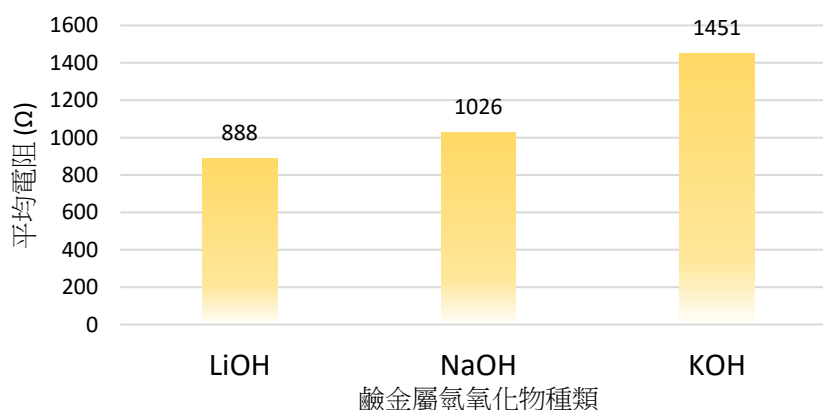


圖 19、不同鹼金屬氫氧化物對水泥基電阻的影響。

預想結果是隨著陽離子的原子序增加，離子的分子量增加導致離子移動速度減緩，進而升高電阻。而實驗結果符合此假說，添加氫氧化物能有效地把水泥基的電阻從 16000 歐姆降至 1000 歐姆，而水泥基的電阻中最小的是氫氧化鋰。

2. 參數二：保水劑

此實驗測量聚乙烯醇(PVA)對水泥基電阻的影響。

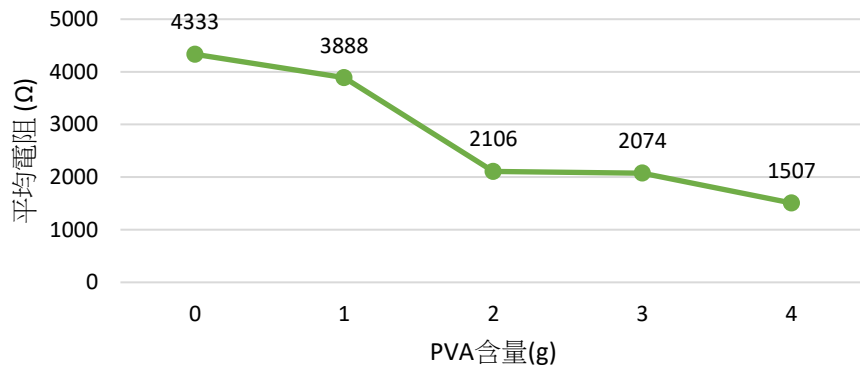


圖 20、PVA 含量對水泥基電阻的影響。

在圖表中可以發現，隨著 PVA 量的增加，水泥基的電阻逐漸降低，但當 PVA 的含量上升時，水泥會變得愈加濃稠，約 4 公克即是水泥能成型的極限值了。此外，PVA 水溶液遇到離子化合物會析出，例如氯化鈉、氫氧化鉀及硫酸鎳等都會導致 PVA 析出，使得添加 PVA 的水泥無法再添加其他化合物。

3. 參數三：增稠劑

此實驗測量羧甲基纖維素(CMC)對水泥基電阻的影響，而結果如下圖。我們分別製作了只有添加 CMC 以及添加 CMC 和氫氧化鉀的兩種水泥基。

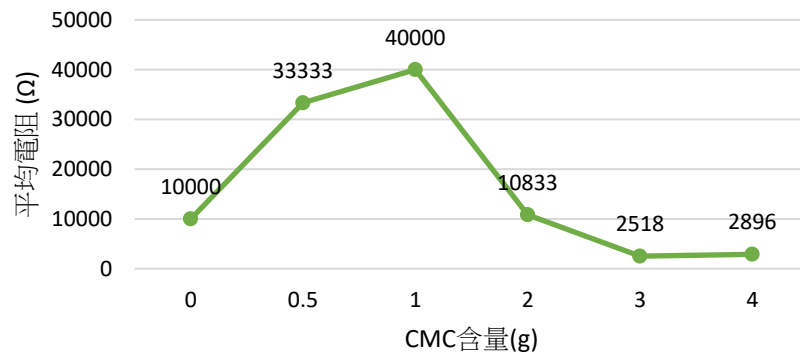


圖 21、CMC 含量對水泥基電阻的影響。

從圖中可以得知，添加 0~2 公克的 CMC 反而會導致水泥基電阻的上升，但有趣的是 2~3 公克時水泥基的電阻降至約原本的 1/4，而在之後則持續升高。添加 4 公克以上的 CMC 會導致水泥變得過於黏稠而無法成型。

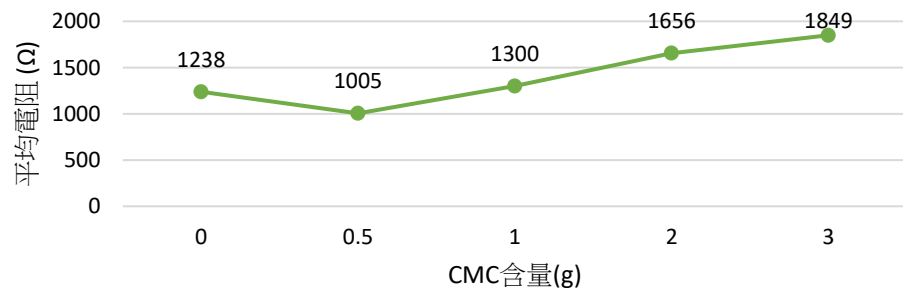


圖 22、CMC 含量對含有氫氧化鉀的水泥基電阻的影響。

接著我們測量了 CMC 是否能有效降低含有氫氧化鉀水泥基的電阻，在圖表中可以看出，添加 0.5 公克的 CMC 能降低水泥基的電阻，而在此之後水泥基的電阻反而比未添加時高。

4. 參數四：矽酸鈉

此實驗中分別測量了矽酸鈉水泥基以及氫氧化鉀加矽酸鈉水泥基的電阻變化。

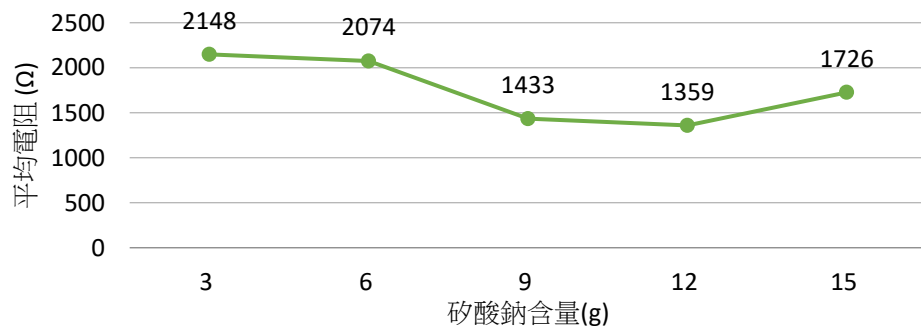


圖 23、矽酸鈉含量對水泥基電阻的影響。

從圖中可以得知，添加矽酸鈉能有效降低水泥基的電阻，從未添加的到添加 3 公克矽酸鈉，其電阻減少到了 1/5 以下。而在添加 3~15 公克的矽酸鈉中又以添加 12 公克的矽酸鈉電阻最低，而添加了 18 公克矽酸鈉的水泥基則導致水泥過於鬆散，無法結成堅固塊狀，導致電阻急遽上升。

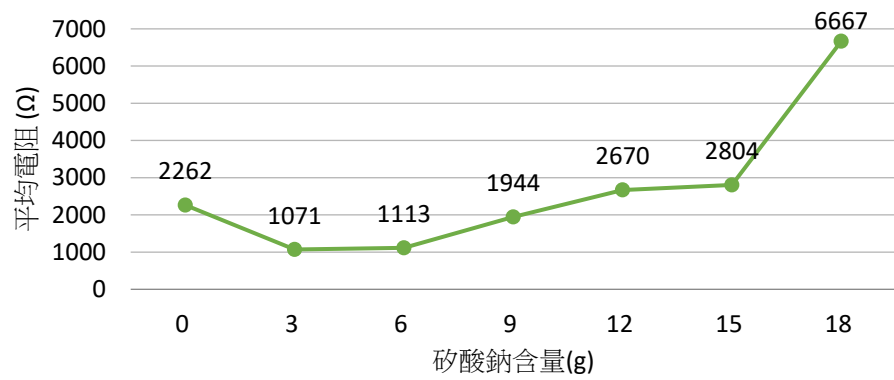


圖 24、矽酸鈉含量對含有氫氧化鉀的水泥基電阻的影響。

而在含有氫氧化鉀的水泥中，加入 3 公克的矽酸鈉能最有效的降低電阻，而添加 3 公克以上的電阻則會上升，在添加 12 公克的矽酸鈉之後，電阻會超過沒有添加矽酸鈉的狀態。

5. 最佳化固態水泥電解液

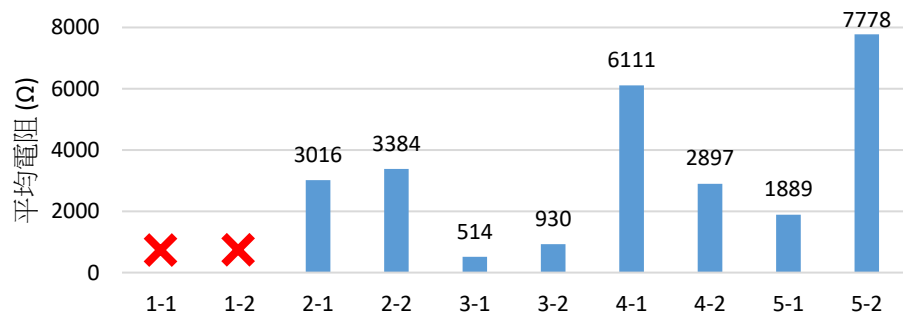


圖 25、最佳化水泥基電阻結果，配方詳見研究過程。

從圖中可以得知，電阻最低的是在 38 公克的水中，添加 CMC 0.5 公克、氫氧化鉀 13.1 公克及矽酸鈉 3 公克(3-1)的組合。而 1-1&1-2 沒有數據則是因為 CMC+PVA 不能互溶，導致無法製成水泥。於是我們接下來製作二次水泥電池將會採用的固態電解液配方將為此組合。

二、製作及研發二次水泥電池

(一) 製作電鍍電極

1. 製作導電碳板

(1) 自製導電石墨塗層

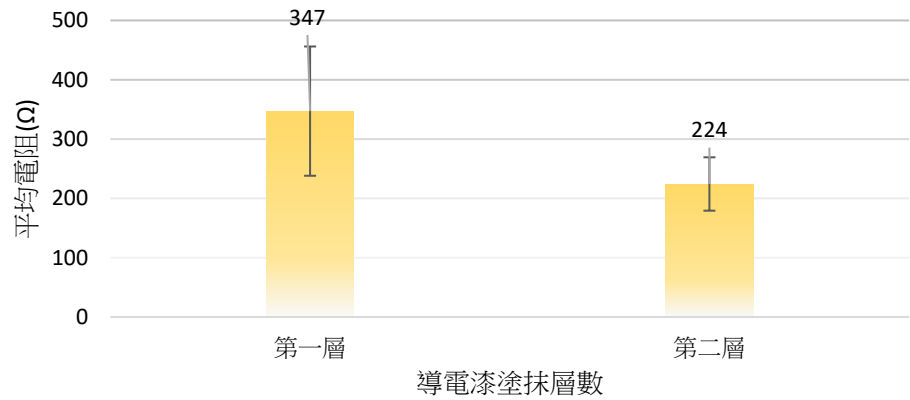


圖 26、導電漆塗抹層數與電阻相關性。

從圖中可以得知，塗抹一層時的電阻約在 350 歐姆且浮動較大，導致每片導電碳板的電阻值相差甚遠，這可能造成電鍍時電鍍層分布不均勻。而塗抹兩層塗層的導電碳板則有相對低的電阻，且誤差範圍較小。於是我們之後電鍍所採用的自製導電碳板為塗抹兩層導電漆的塑膠片。

2. 製作電鍍金屬電極

(1) 鍍銅及鍍鎳碳板

因為我們發現直接將導電碳板鍍上鐵及鎳金屬會導致電鍍層不均勻(圖 27)，後來我們發現先鍍上一層銅能得到均勻地電鍍層(圖 28、29)，於是我們採用鍍銅碳板來製作鐵及鎳電極。



圖 27、鍍不均勻的鐵電極。



圖 28、鍍鐵導電碳板。

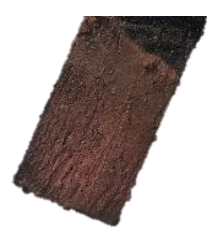


圖 29、電鍍銅的導電碳板。

(二) 製作新型水泥電池

1. 純金屬片水泥電池

(1) 首次水泥電池放電

總放電時長為 30 分鐘，初始電功率為 216600 微瓦特，而電壓跟電流則隨時間快速下降，電壓在 5 分鐘後即降到 0.1 伏特以下。在 30 分鐘的放電過程中平均電功率為 8078 微瓦特，總作功 8 焦耳。

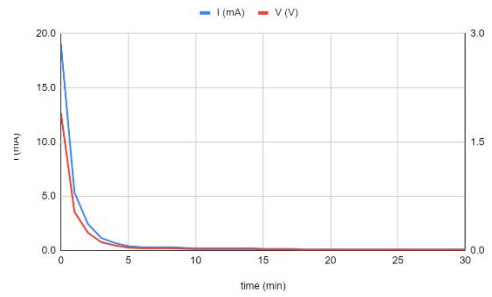


圖 30、放電過程。

(1) 第二次水泥電池放電

總放電時長為 30 分鐘，初始電功率為 148838 微瓦特，而電壓跟電流則隨時間快速下降，電壓在 4 分鐘後即降到 0.1 伏特以下。在 30 分鐘的放電過程中平均電功率為 5268 微瓦特，總作功 2 焦耳，較第一次下降了 74.1%。

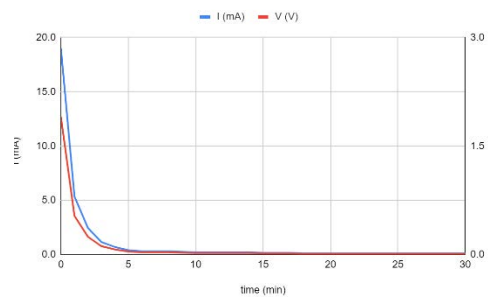


圖 31、放電過程。

2. 電鍍銅片水泥電池

(1) 首次水泥電池放電

總放電時長為 60 分鐘，初始電功率為 86700 微瓦特，而電壓跟電流則隨時間快速下降，電壓在 12 分鐘後即降到 0.1 伏特以下。在 60 分鐘的放電過程中平均電功率為 4650 微瓦特，總作功 16.8 焦耳。

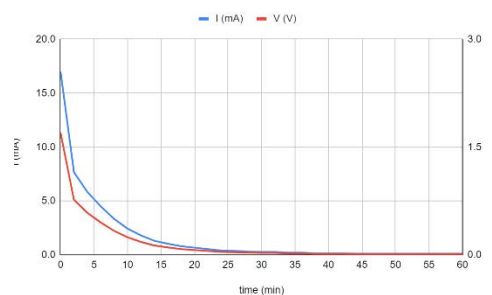


圖 32、放電過程。

(2) 第二次水泥電池放電

總放電時長為 60 分鐘，初始電功率為 49408 微瓦特，而電壓跟電流則隨時間快速下降，電壓在 12 分鐘後即降到 0.1 伏特以下。在 30 分鐘的放電過程中平均電功率為 2062 微瓦特，總作功 7.4 焦耳，較第一次下降了 55.7%。

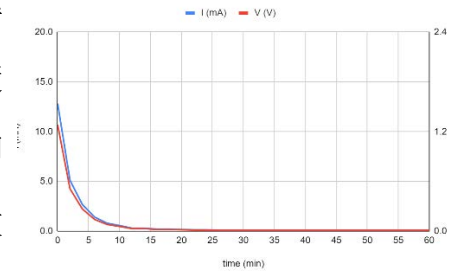


圖 33、放電過程。

3. 小型水泥電池

(1) 首次水泥電池放電

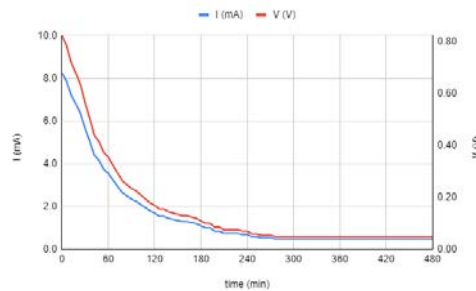


圖 34-1、放電過程。

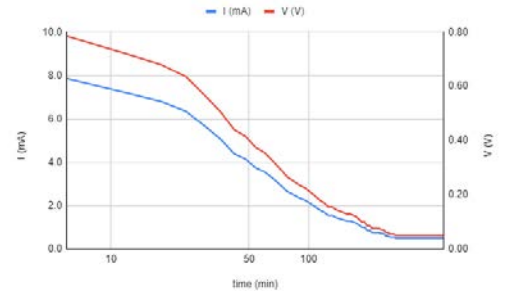


圖 34-2、放電過程(對數刻度)。

在 8 小時的放電過程中，水泥電池的電壓及電流在 300 分鐘中持續下降，最後停在 0.5 毫安培(圖 34-1)。而在對數刻度中，電壓以及電流在 35 分鐘後以近似直線的方式下降，直到 300 分鐘趨緩成水平線(圖 34-2)。8 小時總作功 17.5 焦耳，平均功率為 544.4 微瓦特。

(2) 第二次水泥電池放電

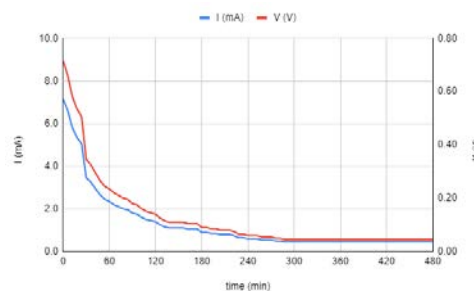


圖 35-1、放電過程。

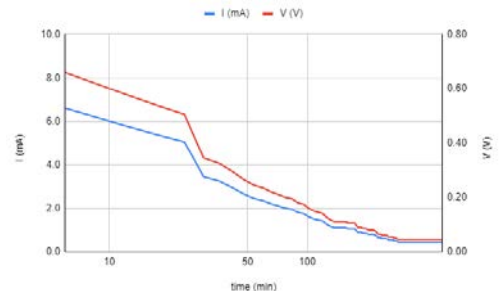


圖 35-2、放電過程(對數刻度)。

在水泥電池第二次 8 小時的放電過程中，水泥電池的電壓及電流在 300 分鐘中持續下降，最後一樣停在 0.5 毫安培(圖 35-1)。而在對數刻度中(圖 35-2)，電壓以及電流在 35 分鐘後以近似直線的方式下降，直到 300 分鐘趨緩成水平線。第二次初始功率為首次充放電的 87%。8 小時總作功 10.7 焦耳，為首次的 61%，平均功率為 372.6 微瓦特，為首次的 68%。

4. 大型水泥電池

(1) 首次水泥電池放電

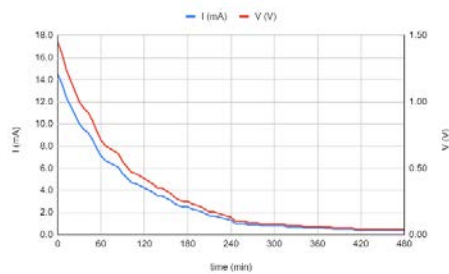


圖 36-1、放電過程。

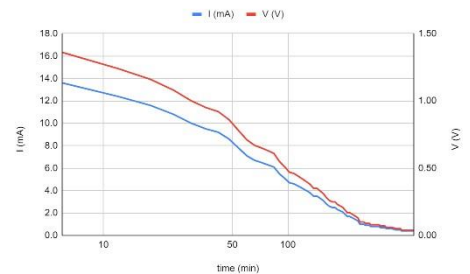


圖 36-2、放電過程(對數刻度)。

在 8 小時的放電過程中，水泥電池的電壓及電流在 420 分鐘中持續下降，最後停在 0.4 毫安培(圖 36-1)。而在對數刻度中，電壓以及電流在 30 分鐘後以近似直線的方式下降，直到 420 分鐘趨緩成水平線(圖 36-2)。8 小時總作功 61.7 焦耳，平均功率為 2140.7 微瓦特。

(2) 第二次水泥電池放電

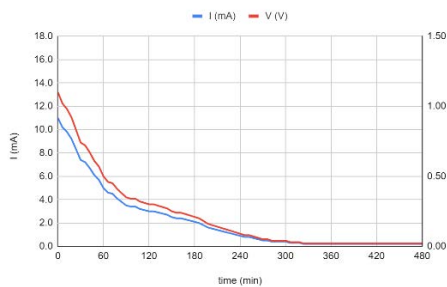


圖 37-1、放電過程。

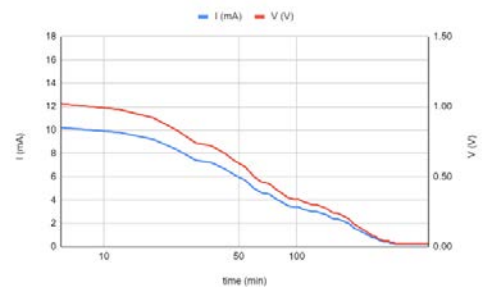


圖 37-2、放電過程(對數刻度)。

在水泥電池第二次 8 小時的放電過程中，水泥電池的電壓及電流在 300 分鐘中持續下降，最後停在 0.2 毫安培(圖 37-1)。而在對數刻度中(圖 37-2)，電壓以及電流在 35 分鐘後以近似直線的方式下降，直到 300 分鐘趨緩成水平線。而在 0 分鐘時的功率還有首次充放電的 76%。8 小時總作功 34.1 焦耳，為首次的 55%，平均功率為 1184.1 微瓦特，為首次的 55%。

伍、 討論

一、最佳化導電水泥基

(一) 參數一：離子種類

在此實驗中我們發現水泥基的電阻隨著陽離子的原子序減少而下降，隨著原子序上升鹼金屬氫氧化物越接近完全離子鍵，因此解離度越大。推測因為離子的擴散速度與 $\frac{1}{\sqrt{\text{原子量}}}$ 成正比，因此原子序小的擴散較快，才能有效降低水泥基的電阻。

(二) 參數二：保水劑

在此實驗中添加 PVA 能使水泥基的電阻下降，我們推測因為 PVA 上有許多的氫氧基，能與離子產生氫鍵，像是環狀醚類能對陽離子產生氫鍵(圖 38)，因此能讓離子更好移動進而降低電阻。

我們也發現 PVA 水溶液再加入其他水溶性物質之後會析出(例如：CMC、氯化鈉、氫氧化鉀)，所以我們在 PVA 的實驗中無法進行 PVA+氫氧化鉀的實驗，也無法在最佳化導電水泥基中進行 CMC+PVA 的實驗。

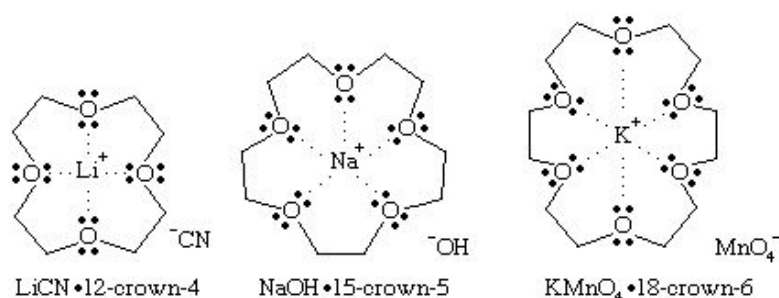


圖 38、環狀醚類與陽離子的交互作用。

(三) 參數三：增稠劑

在只添加 CMC 的情況下，水泥的電阻隨著 CMC 的增加而先上升後下降，我們目前沒有想到一個合理的方式來解釋這件事，但有可能是因濃度高的時候後水泥 CMC 能使水泥中的孔隙增加而降低電阻。添加 CMC 及氫氧化鉀的情況中，我們發現添加太多 CMC 會使電阻上升，推測因為電解液的黏稠度太大，水泥基鬆散，導致水泥中間困住了空氣進而升高電阻。

(四) 參數四：矽酸鈉

添加矽酸鈉可以降低水泥基電阻，推測是因為矽酸鈉為離子化合物，在水泥中能增加導電度而降低電阻。而在高濃度下因為電解液的黏稠度太大，水泥基鬆散，導致水泥中間困住了空氣進而升高電阻。

(五) 最佳化導電水泥基

我們發現在相同濃度下，氫氧化鋰+CMC+矽酸鈉(4-1&4-2)的電阻大於氫氧化鉀+CMC+矽酸鈉(3-1&3-2)，這與參數一：離子種類的結果互相矛盾，在參數一中氫氧化鋰的電阻小於氫氧化鉀。而我們發現矽酸鋰是不溶於水的，這使得氫氧化鋰+CMC+矽酸鈉的離子數下降，進而使電阻上升。

二、製作及研發二次水泥電池

(一) 純金屬片水泥電池。

儘管純金屬片製成的水泥電池初始功率(216600 微瓦特)較小型水泥電池的初始功率(6806 微瓦特)高出許多倍。但是純金屬片放電時間僅有 16 分鐘，相較於小型水泥電池的 8 小時放電時間過短，且在相同的電極面積下，總做功僅有小型水泥電池的 45%。

推測是因為內電阻較低導致電能流失較快而縮短放電時間。而總做功較低的原因推測是因電鍍層的表面積較金屬片高。因此我們未來實驗將採用小型水泥電池。

(二) 電鍍銅片水泥電池

在銅片上電鍍鎳及鐵製成的電鍍銅片水泥電池輸出功率(16.7 焦耳)比純金屬片水泥電池(14.5 焦耳)僅高出 2.2 焦耳，可能是因為鍍鎳銅片、鍍鐵銅片與純鎳片、純鐵片的面積相差不大。但此實驗證明電鍍電池能有與純金屬片電池相當的電量。

(三) 小型水泥電池

在純金屬片水泥電池、電鍍銅片水泥電池與小型水泥電池的實驗數據中可以發現，放電時長依序增長(0.28、0.64 及 4.4 小時)。可能代表內電阻的增加可以延長總體的放電時長。而此三組的輸出功率則是遞減(8078、4650 及 544 微瓦特)，但是總作功卻是增加的(14.5、16.4 及 17.4 焦耳)。於是我們認為最後用鍍鐵及鍍鎳導電碳板最適合製作水泥電池，因為有較高的輸出功率且可以長時間放電。除此之外，第二次放電功率的下降比例也是最低的(34%、56%及 32%)。

(四) 電鍍層的穩定性

右圖為兩顆小型水泥電池的電流與時間關係圖，可以看到兩條虛線並沒有偏差甚遠，而是有著相似的趨勢。這說明了我們的電鍍層在每一顆電池中有穩定性，因此可以撇去電鍍層此因素。

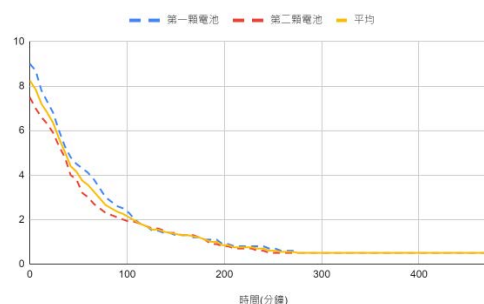


圖 39、小型水泥電池電流與時間關係圖。

(五) 水泥電池電極面積大小與能量密度之影響

原本我們預期隨著水泥電池電極的大小增加，水泥電池輸出的功率能呈線性成長，也就是說，能量密度(Wh/L)會相同，但在下圖可以看到，儘管電極面積增加了 6.4 倍，但是能量密度下降了 45%。所以我們未來會在同一個水泥基中插入多組電極以增加輸出功率，而不是增加單一電極面積。

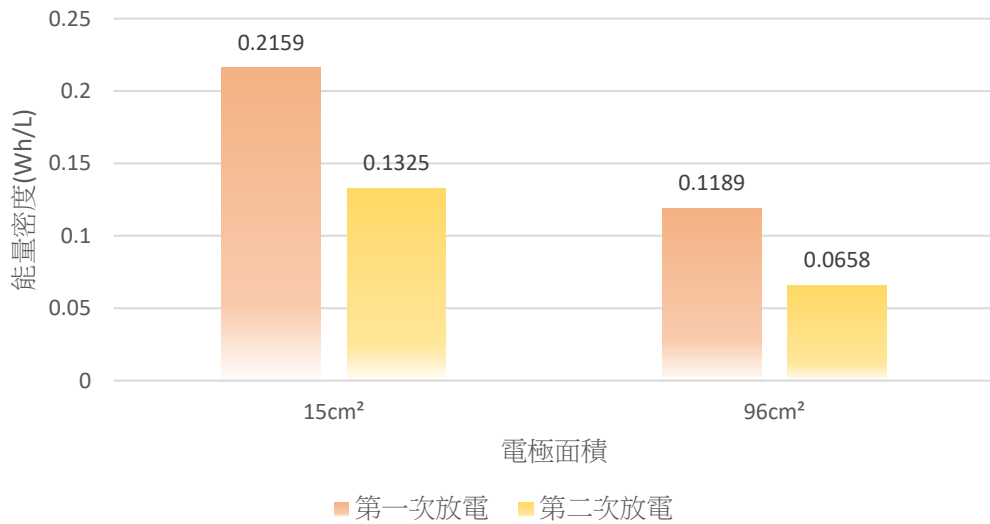


圖 40、電極面積與能量密度之關係。

(六) 二次水泥電池之比較

我們製作的水泥電池的能量密度僅有 0.22Wh/L，而瑞典查爾摩斯工學院新型混凝土電池能量密度為 0.8Wh/L¹，僅有 28%。推測是因為在他們的研究中使用碳纖維網，具有較高的表面積，而我們採用碳塗層，表面積較低。但我們水泥電池的優點是能降低成本，於是我們未來會在同一水泥電池中放入多組電極作為研究方向，以達到相當的能量密度。

(七) 水泥電池與市售電池比較

將水泥電池與常見的市售電池的能量密度進行比較，可以獲得下圖。

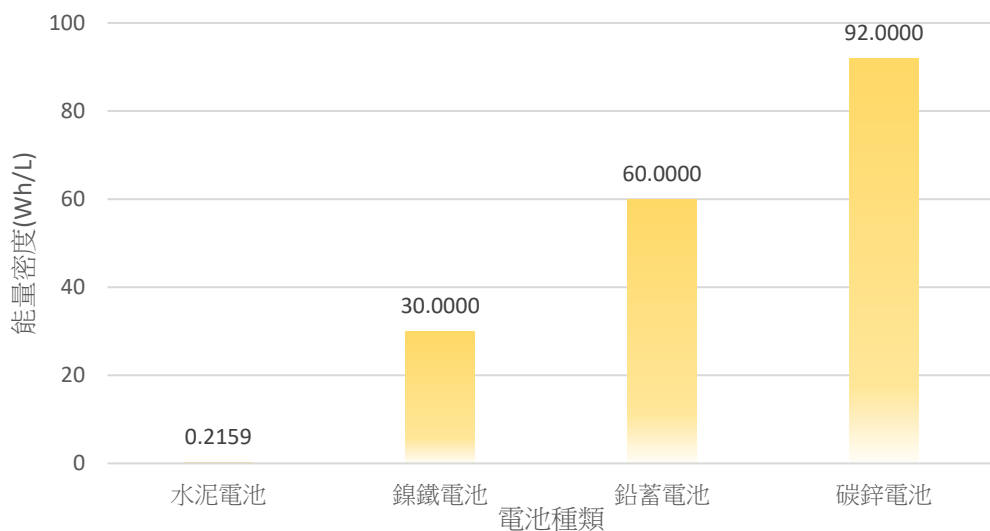


圖 41、水泥電池與市售電池能量密度。

在此圖中發現水泥電池的能量密度相當的低，但是水泥電池的主要優勢是體積，所以我們想知道需要多少公升的水泥電池能輸出的能量相當於一公升的市售電池。

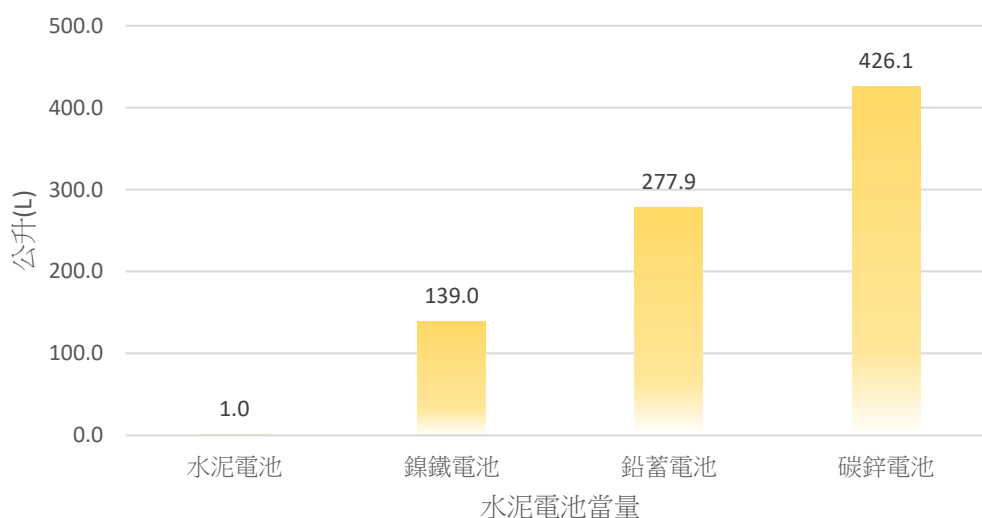


圖 42、水泥電池當量(多少公升的水泥電池能輸出一公升該電池的能量)。

在此圖中我們可以看到 139.0 公升的水泥電池就能輸出跟 1 公升鎳鐵電池一樣多的能量，而鉛蓄電池需要 277.9 公升，碳鋅電池則需要 426.1 公升。說明水泥電池的能量密度偏低，希望未來能對此加以改善，也希望未來能夠利用水泥電池大體積的特性加以儲電。

陸、 結論

- 一、在水泥基中加入鹼金屬氫氧化物、PVA、CMC 及矽酸鈉都能降低水泥基的電阻。
- 二、水泥中最佳化的電解液配方為在 38 公克的蒸餾水中加入 0.5 公克的 CMC，3 公克的矽酸鈉以及 13.1 公克的氫氧化鉀，能使水泥從原先 16000 歐姆的電阻降至 514 歐姆，降低 96.8%。
- 三、用碳黑及壓克力顏料製成的導電塗層能有效取代昂貴且難以購買的碳纖維。

- 四、先以小電流鍍上銅能解決製作電鍍電極時，電鍍鎳及鐵不均勻的問題。
- 五、在純金屬片、電鍍銅片、電鍍導電碳板三種電極材質中，電鍍導電碳板製成的水泥電池儘管輸出功率較低，但有著最高的總作功，且放電時間長及第二次放電輸出功率下降最少的特性。
- 六、二次水泥電池首次充放電在 8 小時間功率有 544 微瓦特，而第二次充放電有 373 微瓦特，只損失了 31.4%。
- 七、水泥電池的電極大小與輸出功率不成線性關係，電極面積小的水泥電池能量密度較高。

柒、 參考文獻資料

1. 混凝土簡介。高健章，取自 https://www.moea.gov.tw/Mns/CNC/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=1269。
2. Zhang, Emma & Tang, Luping. (2021). Rechargeable Concrete Battery. Buildings. 11. 103. 10.3390/buildings11030103
3. Mishra, P.C. & Singh, V.K. & Narang, Karan & Singh, Namita. (2003). Effect of carboxymethyl-cellulose on the properties of cement. Materials Science and Engineering: A. 357. 13-19. 10.1016/S0921-5093(02)00832-8.
4. Fetcenko, M.; Koch, J. Linden' s Handbook of Batteries. Cem. Concr. Compos. 2015, 3, 87 – 96.
5. Cotton, F. Albert; Wilkinson, Geoffrey; Murillo, Carlos A.; Bochmann, Manfred (1999), Advanced Inorganic Chemistry (6th ed.), New York: Wiley-Interscience, ISBN 0-471-19957-5.
6. Ni, Jia & Yu, Mu & Han, Ke. (2017). Electroplating of Copper on the Continuous Carbon Fibers. Materials Science Forum. 898. 2205-2213. 10.4028/www.scientific.net/MSF.898.2205.
7. Iron Plating。2002 年 3 月 1 日，取自 <https://www.pfonline.com/articles/iron-plating>。
8. Byrne, Aimee & Barry, Shane & Holmes, Niall & Norton, Brian. (2017). Optimising the Performance of Cement-Based Batteries. Advances in Materials Science and Engineering. 2017. 1-14. 10.1155/2017/4724302.

9. N. Holmes, A. Byrne, and B. Norton, “First steps in developing cement-based batteries to power cathodic protection of embedded steel in concrete,” *Sustainable Des and Res (SDAR)*, 2015.
10. G. T. Burstein and E. I. P. Speckert, “Developing a battery using set concrete as electrolyte,” in *Proceedings of the Metal/Air and Metal/Water Batteries - 210th ECS Meeting*, pp. 13 – 20, Mexico, November 2006.
11. S. A. A. El-Enein, M. F. Kotkata, G. B. Hanna, M. Saad, and M. M. A. El Razeq, “Electrical conductivity of concrete containing silica fume,” *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 8, pp. 1615 – 1620, 1995.
12. D. Pantea, H. Darmstadt, S. Kaliaguine, and C. Roy, “Electrical conductivity of conductive carbon blacks: influence of surface chemistry and topology,” *Applied Surface Science*, vol. 217, no. 1 – 4, pp. 181 – 193, 2003.
13. A. Byrne, N. Holmes, and B. Norton, “Cement based batteries and their potential for use in low power operations,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies, IMST 2015*, Iva, October 2015.
14. Morrison, Jennie & Jauffret, Guillaume & Galvez-Martos, Jose-Luis & Glasser, Fredrik. (2016). Magnesium-based cements for CO₂ capture and utilisation. *Cement and Concrete Research*. 85. 183-191. 10.1016/j.cemconres.2015.12.016.
15. Al-Mansour A, Chow CL, Feo L, Penna R, Lau D. Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability*. 2019; 11(19):5145. <https://doi.org/10.3390/su11195145>
16. Çelik, B., & Özturan, T. (2017). Green Concrete Produced by Fly Ash and Silica Fume.
17. Climate change: The massive CO₂ emitter you may not know about. 2018 年 12 月 17 日，取自 <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>。
18. Making Nickel Plated DIY Decorations!. 2019 年 9 月 22 日，取自 <https://www.youtube.com/watch?v=QjfNrZigqL0>。

【評語】 050204

1. 研究主題與社會關心的能源與綠色永續相關，自製的導電碳板代替碳纖維，製成了鐵及鎳電極，最適化水泥中電解液配方，首次充放電達8小時544微瓦特功率，第二次充放電只損失了31.4%。雖與市售電池仍有差距，實作內容精實，可圈可點。
2. 在文獻描述電池製作部分，提到粉末法與電鍍法，圖二等需標明出處。
3. 本實驗採用電鍍法製作電極，並探討如何製造導電碳塗層以及金屬電鍍層。最後用鍍鐵及鍍鎳導電碳板，有較高的輸出功率且可以長時間放電。需進一步探討可能造成放電平均電功率及二次放電回收率的影響變因，如電容，電極，電極距離等。解釋比傳統電池功率低的原因。
4. 文中提到”我們發現在相同濃度下，氫氧化鋰+CMC+矽酸鈉(4-1&4-2)的電阻大於氫氧化鉀+CMC+矽酸鈉(3-1&3-2)，這與參數一：離子種類的結果互相矛盾，在參數一中氫氧化鋰的電阻小於氫氧化鉀。而我們發現矽酸鋰是不溶於水的，此須有具體 K_{sp} 數值來支持
5. 使用「水泥電池」將水泥轉化為巨大的儲能裝置，在2021年，首次有研究團隊將此概念擴展到了二次電池，此研究正是水泥電池的開路先鋒。而本研究體現科學解決能源問題，也採取了一些自製的方法，降低成本及減少金屬使用

6. 只說明「水泥電池」如何製作及測試，未說明其可應用的場合、方式、配置等。例如一般水泥住宅可否配置「水泥電池」？如何用水泥儲電？這部分也許已經被發表，研究中仍應表述，最後製作一個模型屋具研發的水泥電池會更生動。

作品簡報

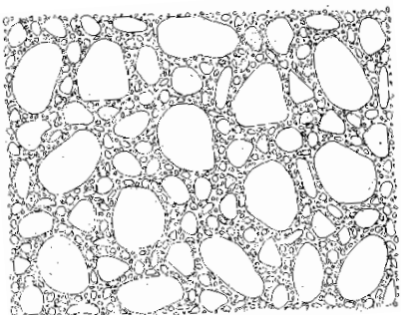
「泥」給我「電電」！ - 製作及改善二次水泥電池

高級中等學校組 化學科

研究目的

1. 最佳化導電水泥基
2. 製作及研發二次水泥電池

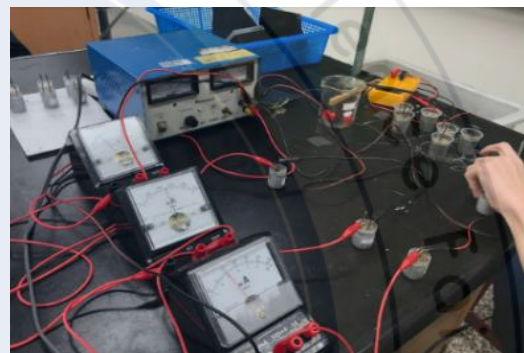
文獻回顧



實驗流程

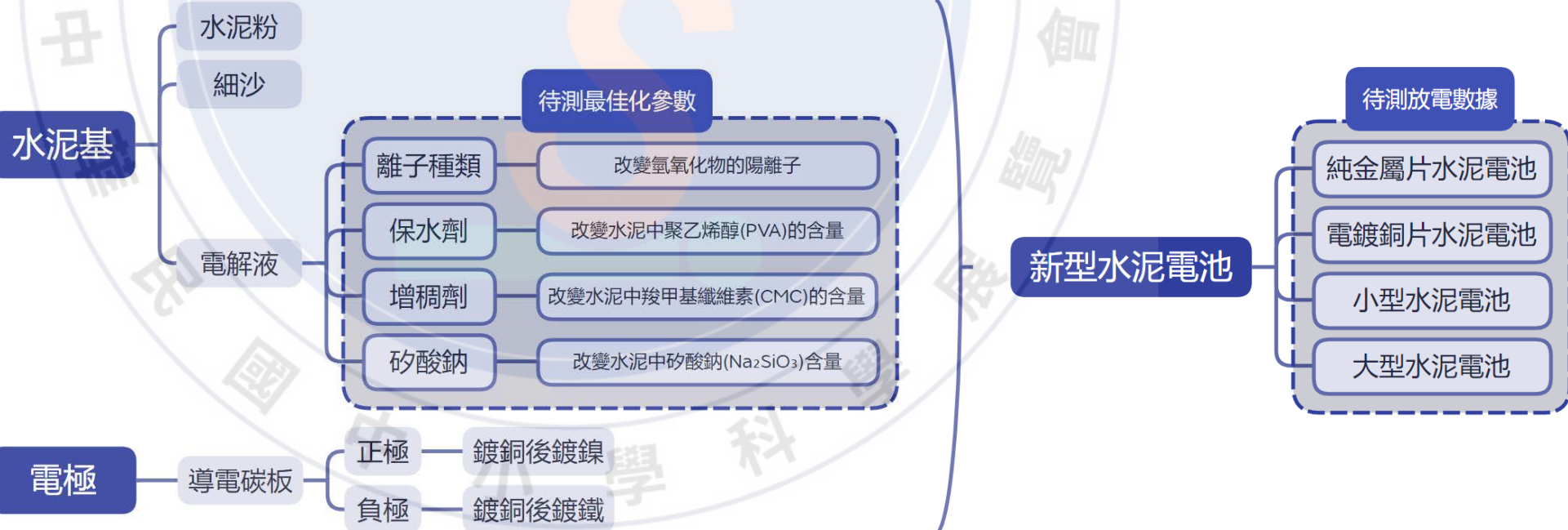
研究過程與方法

最佳化導電水泥基



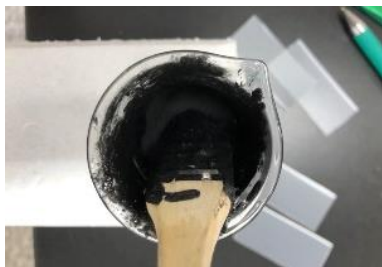
利用直流電源供應器對水泥基上銅線施加電壓20伏特，測量電流後算出該水泥基的電阻。

水泥電池

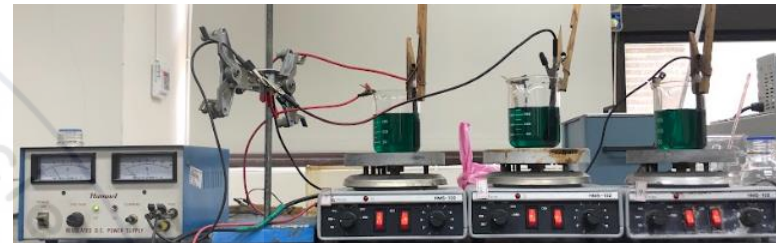


研究過程與方法

製作導電碳板

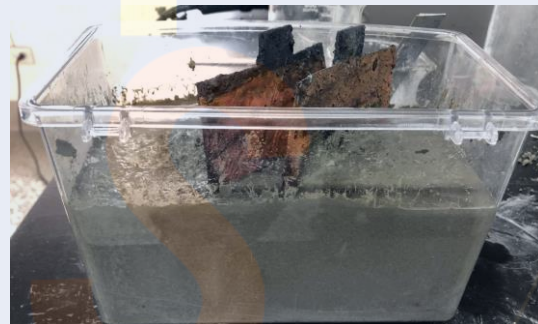
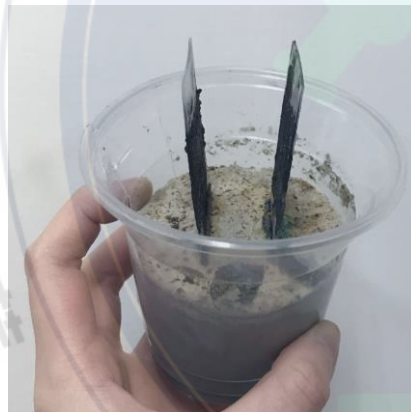


製作電鍍金屬電極



- 鍍鎳銅片
- 鍍鎳導電碳板
- 鍍鐵銅片
- 鍍鐵導電碳板

製作新型水泥電池



純金屬片水泥電池

電鍍銅片水泥電池

小型水泥電池

大型水泥電池

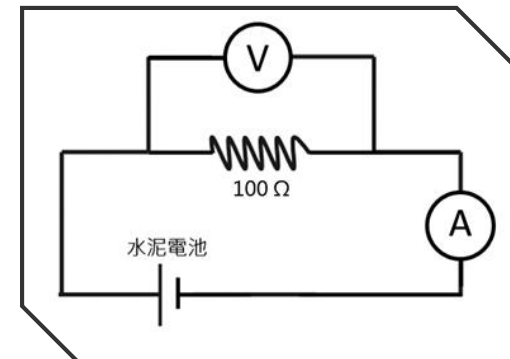
對水泥電池充電

金屬化合物	半反應式	標準還原電位(V)
羥基氧化鎳	$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$	+0.52
氫氧化亞鐵	$\text{Fe(OH)}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe} + 2\text{OH}^-$	-0.89

電池半反應式



對水泥電池放電

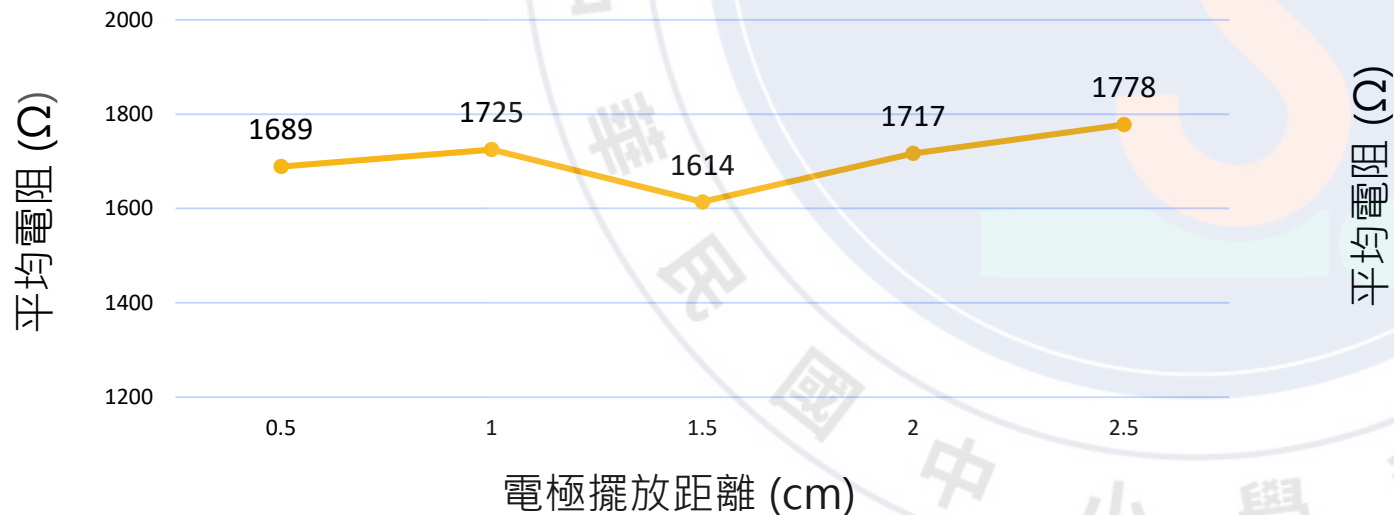


研究結果

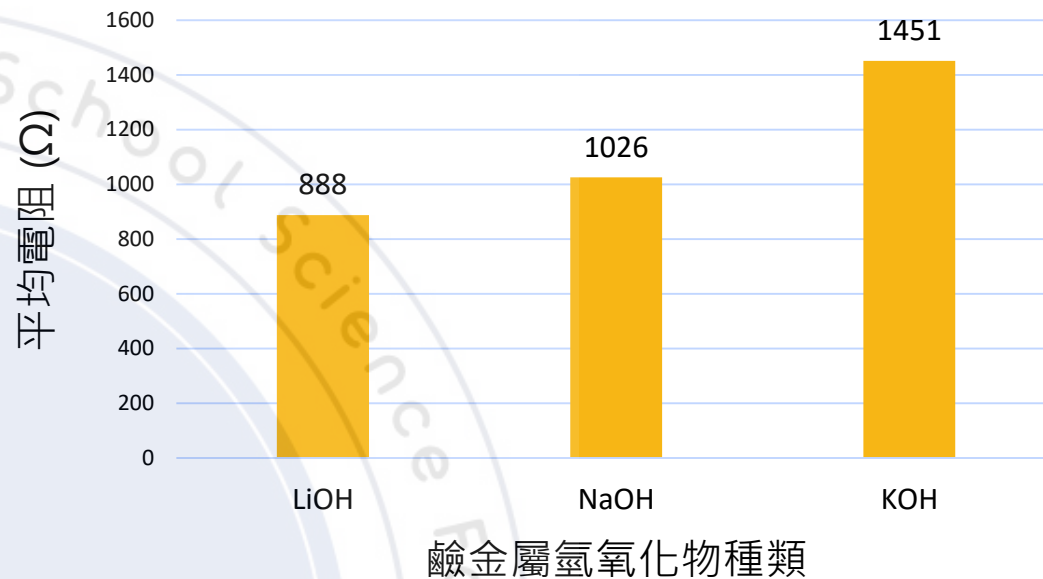
最佳化導電水泥基



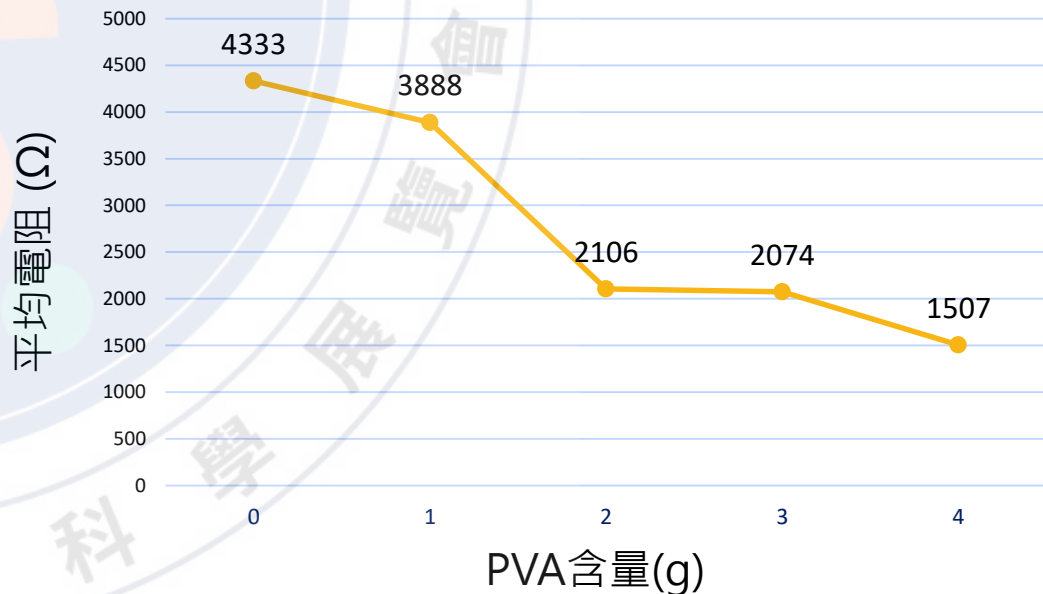
製作不含電解液的水泥基，其平均電阻為16000歐姆，為了方便比較含電解液的水泥基，因此不列入圖表中。



電極擺放距離對水泥基電阻的影響



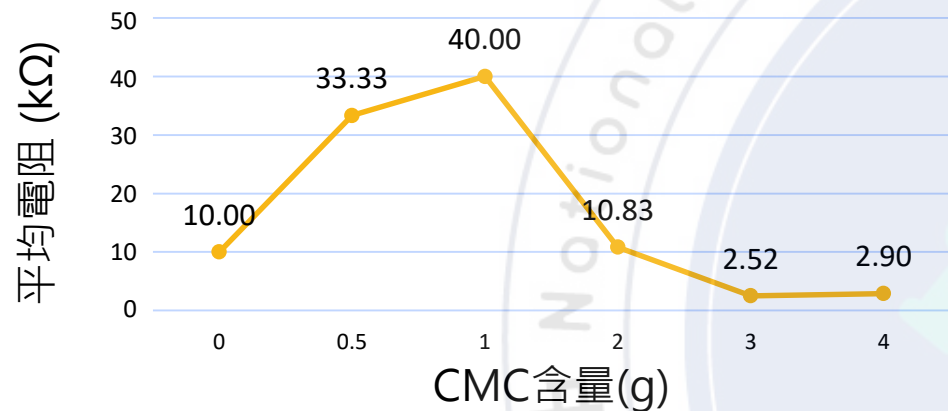
不同鹼金屬氫氧化物對水泥基電阻的影響



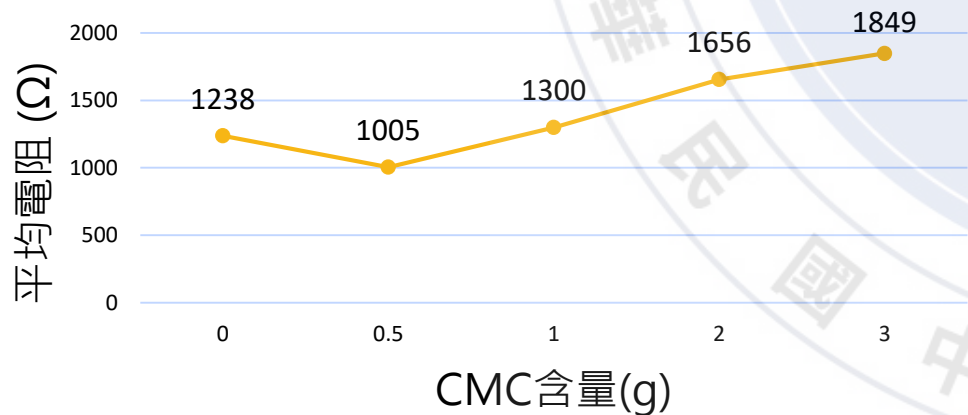
PVA含量對水泥基電阻的影響

研究結果

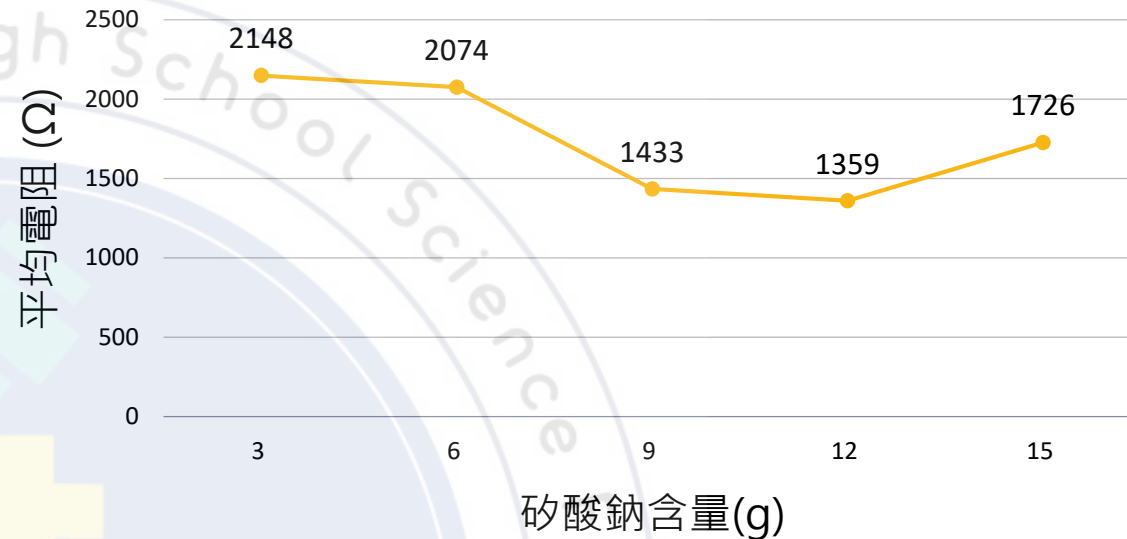
最佳化導電水泥基



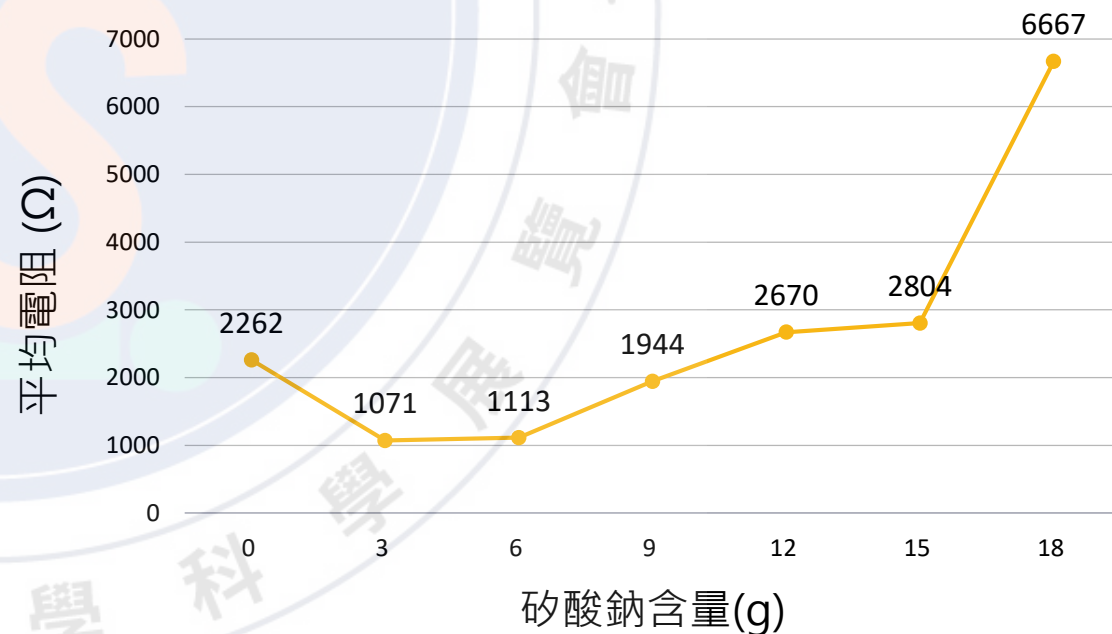
CMC含量對水泥基電阻的影響



CMC含量對含有氫氧化鉀的水泥基電阻的影響



矽酸鈉含量對水泥基電阻的影響

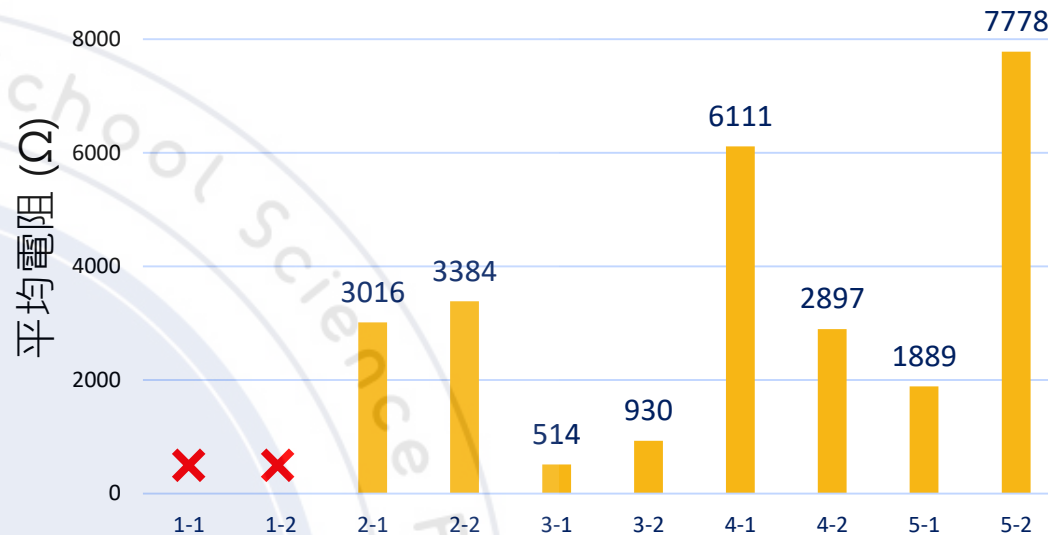


矽酸鈉含量對含有氫氧化鉀的水泥基電阻的影響

研究結果

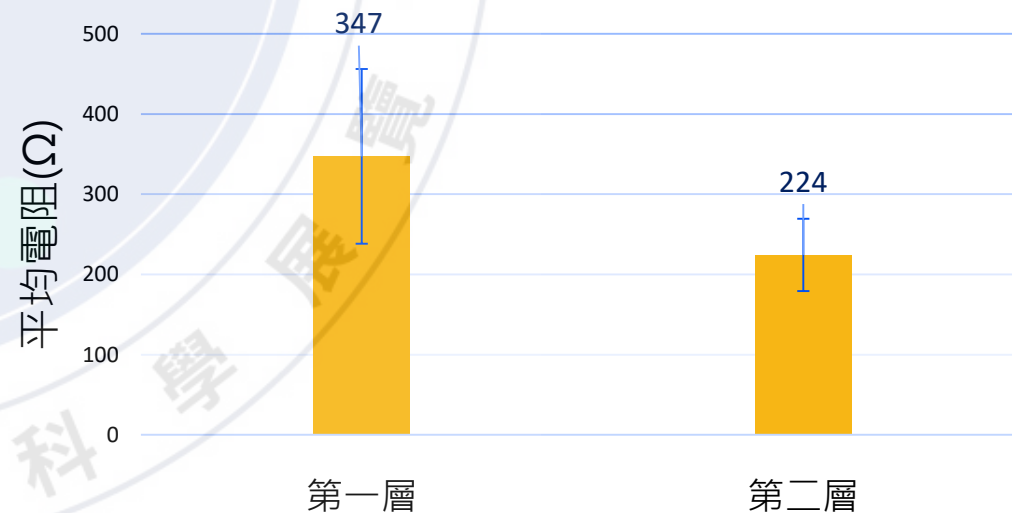
最佳化導電水泥基

編號	詳細配方 (g)							
	水	CMC	PVA	矽酸鈉	KOH	LiOH	NaOH	氫氧化物 重量莫耳 濃度
1-1	38.00	3.00	4.00					-
1-2	38.00	1.50	2.00					-
2-1	38.00	0.50		12.00				-
2-2	38.00	0.25		6.00				-
3-1	38.00	0.50		3.00	13.10			5.62
3-2	38.00	0.25		1.50	6.55			2.93
4-1	38.00	0.50		3.00		9.80		5.62
4-2	38.00	0.25		1.50		4.90		2.93
5-1	38.00	0.50		3.00			9.38	5.62
5-2	38.00	0.25		1.50			4.69	2.93



最佳化水泥基電阻結果

製作電鍍電極



導電漆塗抹層數

研究結果

製作及研發二次水泥電池

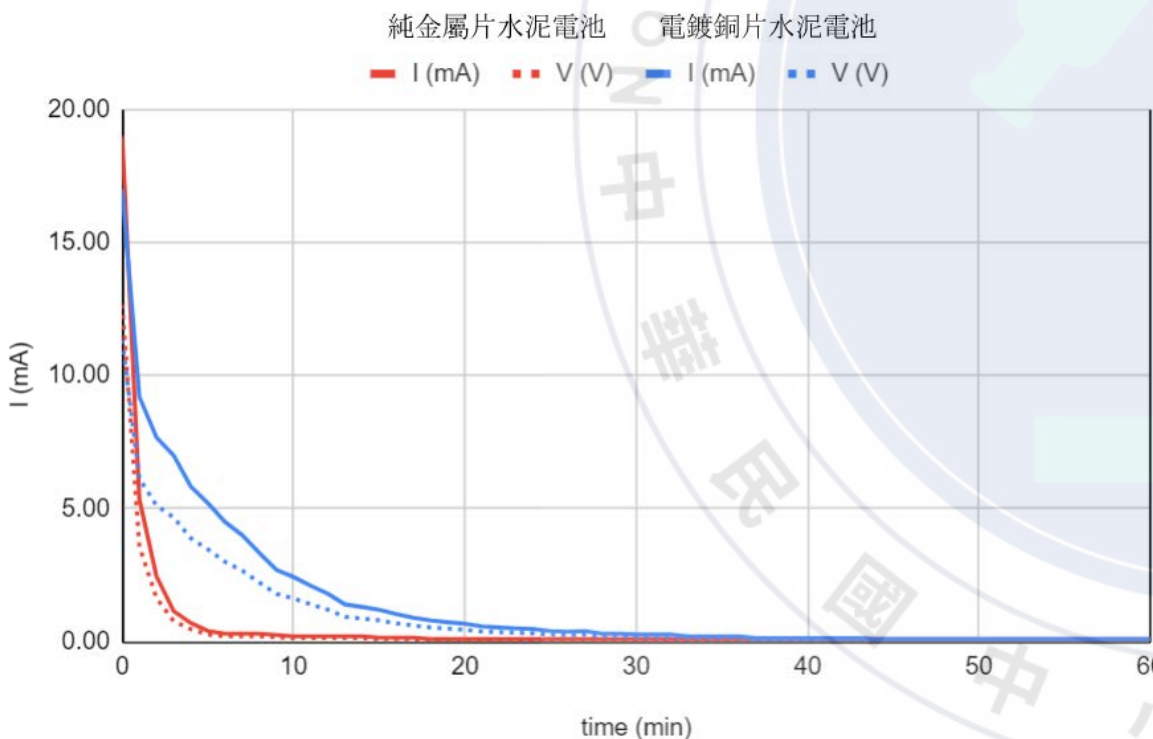
製作新型水泥電池

好的水泥電池放電必備條件：

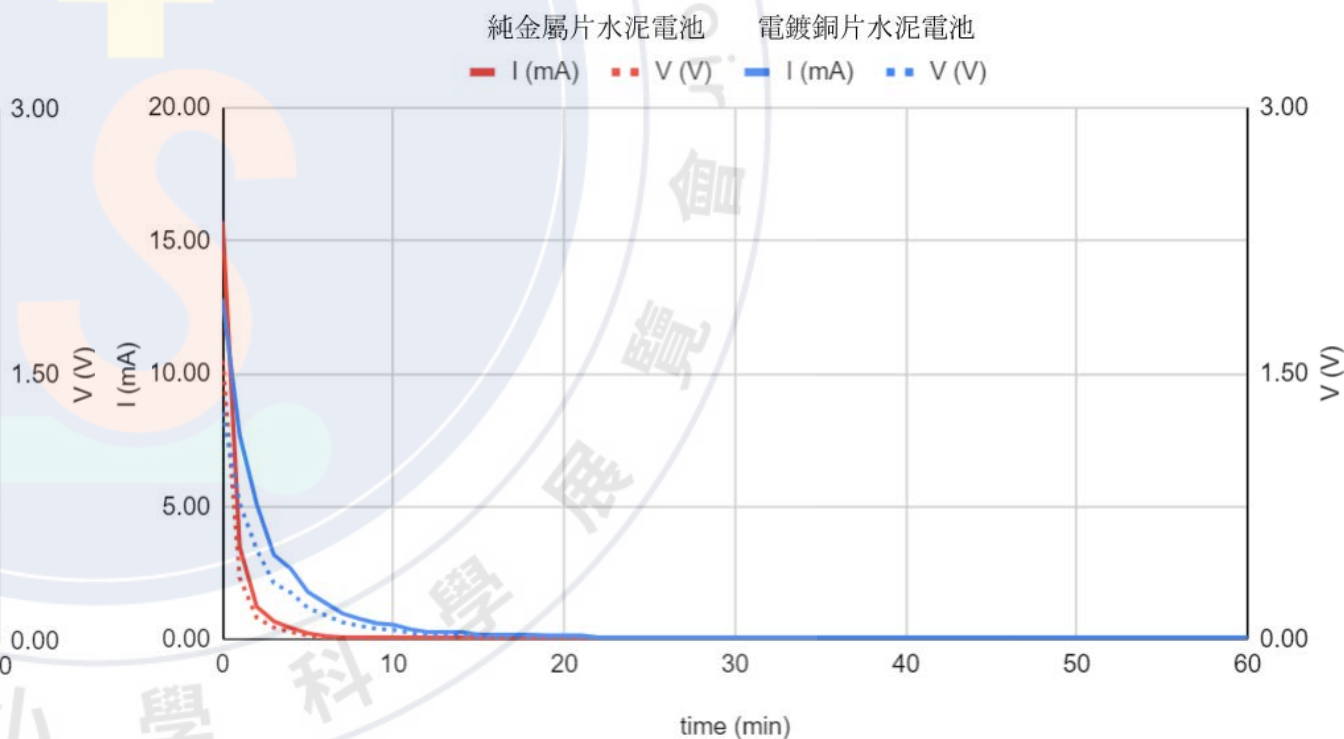
1. 輸出總功大
2. 放電時間長

純金屬片水泥電池與電鍍銅片水泥電池的比較

	純金屬片水泥電池	電鍍銅片水泥電池
首次放電初始電功率(微瓦特)	216600.0	86700.0
首次放電總作功(焦耳)	8.0	16.8
第二次放電初始電功率(微瓦特)	148838.3	49408.3
第二次放電總作功(焦耳)	2.0	7.4



首次水泥電池放電



第二次水泥電池放電

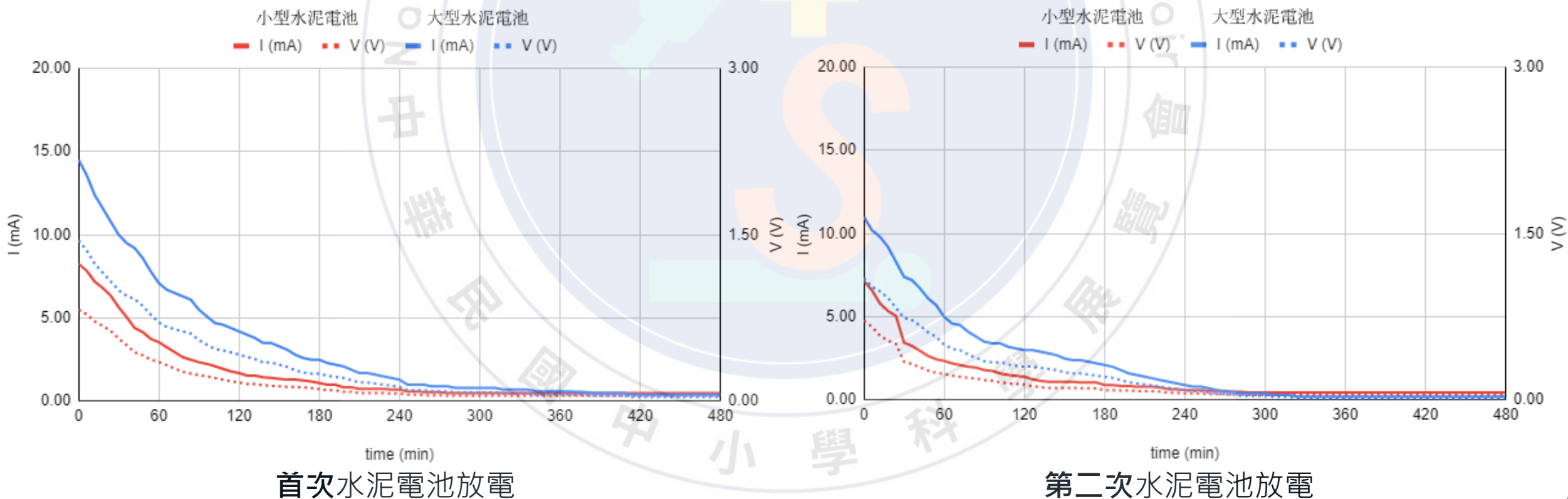
研究結果

製作及研發二次水泥電池

製作新型水泥電池

	小型水泥電池	大型水泥電池
首次放電初始電功率(微瓦特)	544.4	2140.7
首次放電總作功(焦耳)	17.5	61.7
第二次放電初始電功率(微瓦特)	372.6	1184.1
第二次放電總作功(焦耳)	10.7	34.1

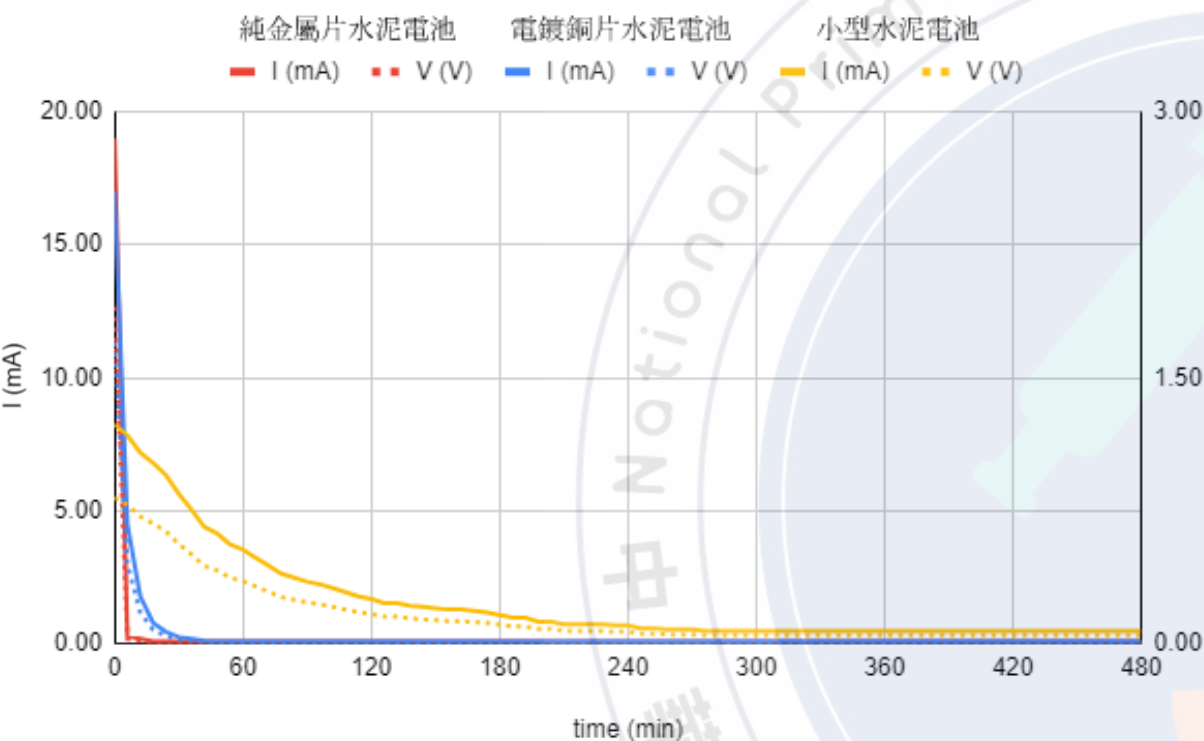
小型水泥電池與大型水泥電池的比較



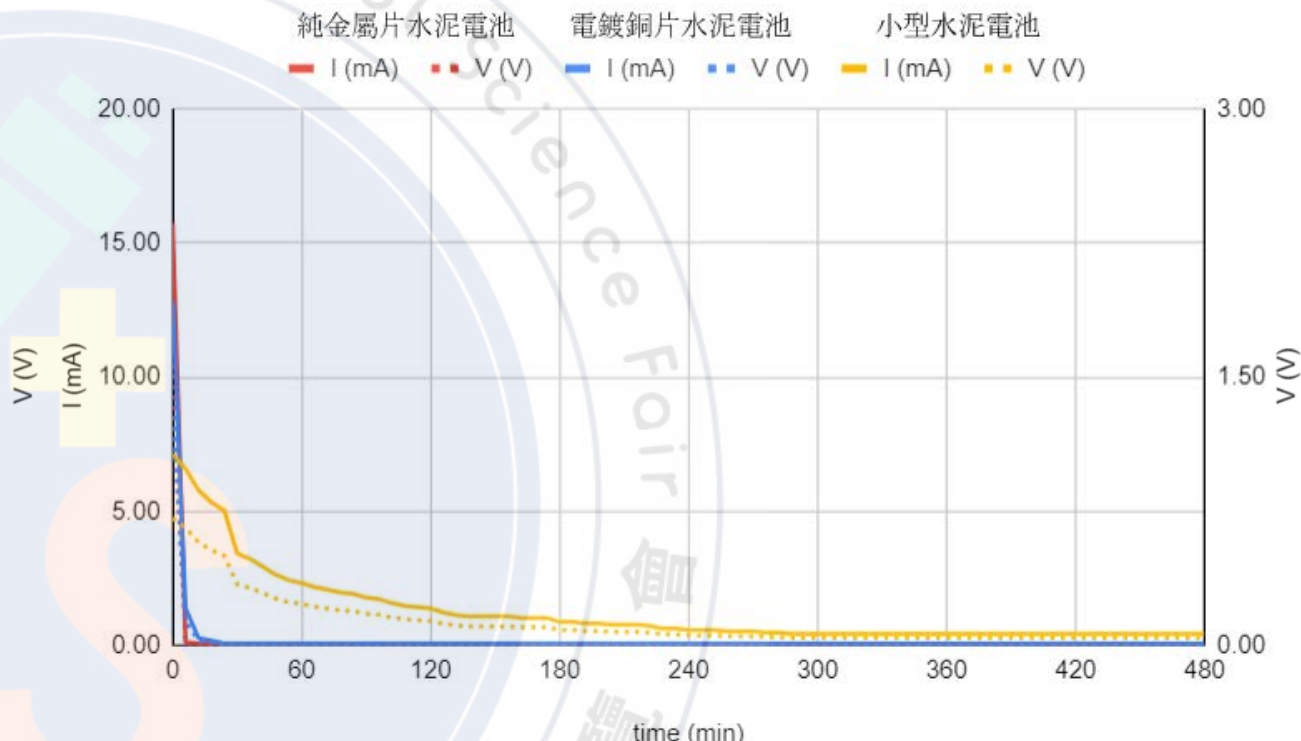
討論

製作及研發二次水泥電池

純金屬片水泥電池、電鍍銅片水泥電池與小型水泥電池的比較



首次水泥電池放電

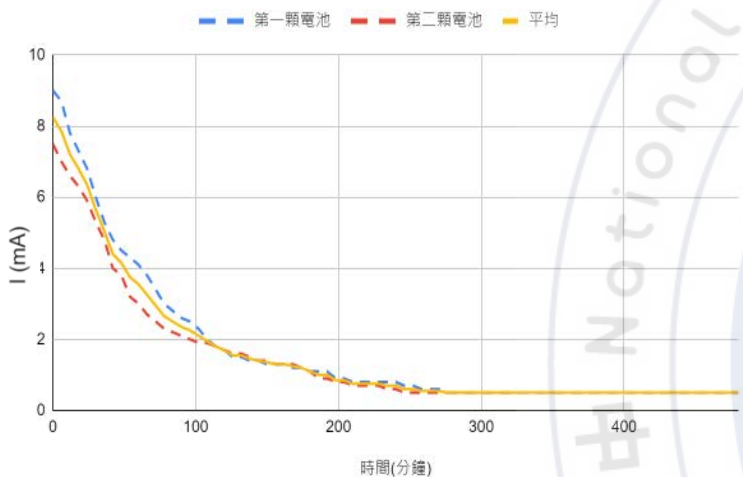


第二次水泥電池放電

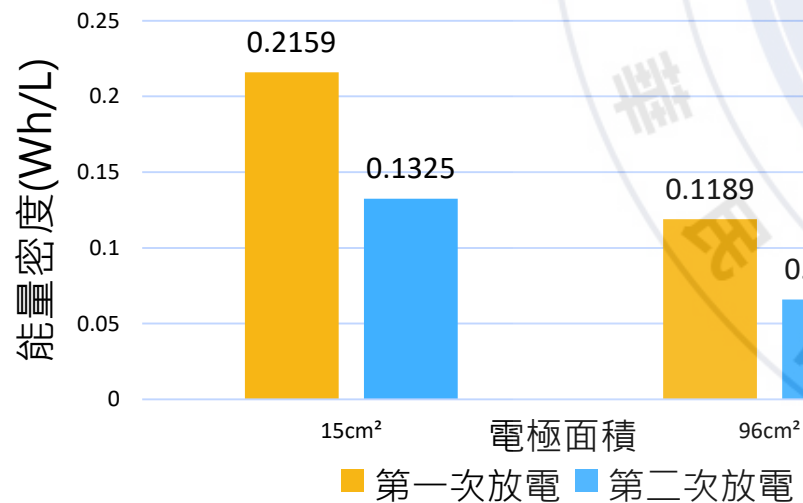
	純金屬片水泥電池	電鍍銅片水泥電池	小型水泥電池
放電時長(小時)	0.28	0.64	4.40
輸出功率(微瓦特)	8078	4650	544
總作功(焦耳)	14.5	16.4	17.4
第二次放電輸出功率下降比例	34%	56%	31%

討論

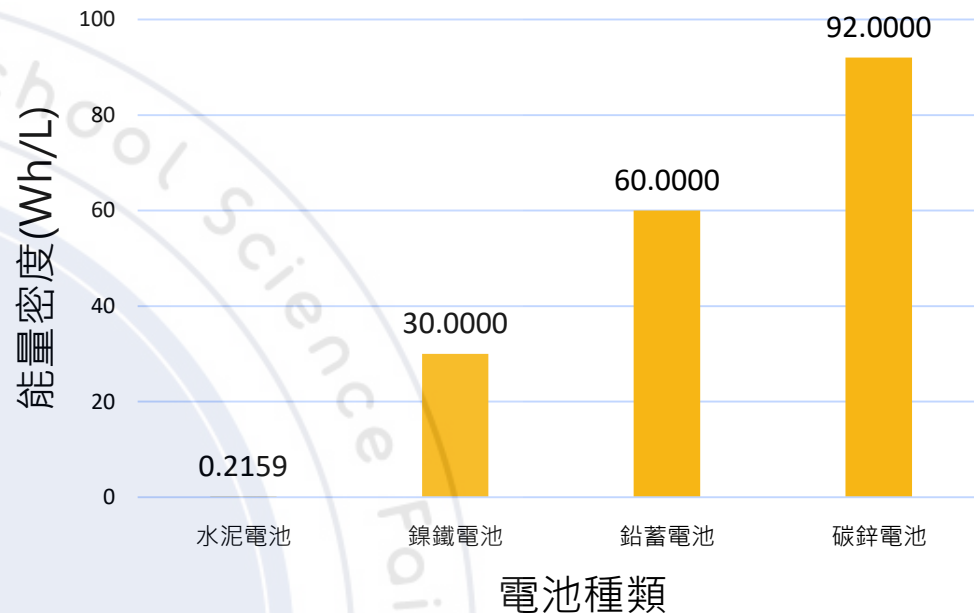
製作及研發二次水泥電池



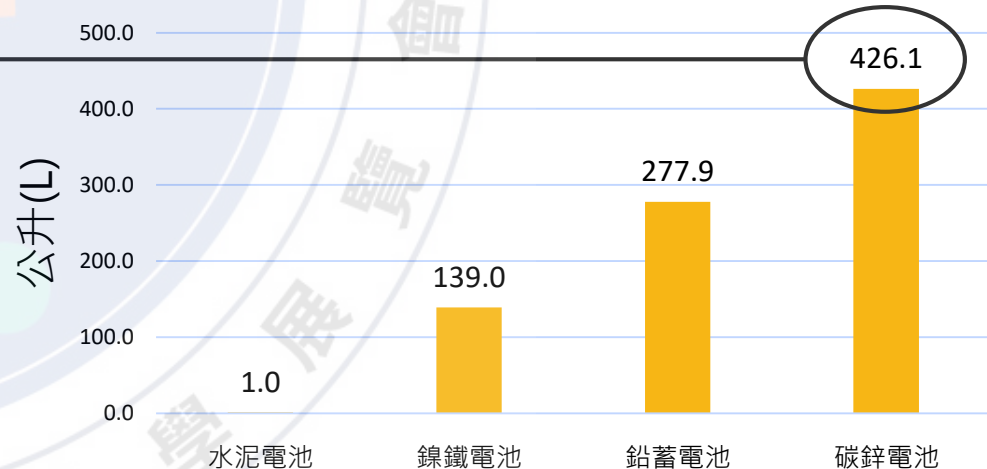
電鍍層的穩定性
兩條虛線有著相似的趨勢，說明我們的電鍍層在每一顆電池中都有穩定性。



電極面積與能量密度之關係



水泥電池與市售電池能量密度



約426公升的水泥電池能取代1公升的碳鋅電池

水泥電池當量

(多少公升的水泥電池能輸出一公升該電池的能量)

結論

- 一. 在水泥基中加入**鹼金屬氫氧化物**、**PVA**、**CMC**及**矽酸鈉**都能降低水泥基的電阻。
- 二. 水泥中**最佳化的電解液配方**為在38公克的蒸餾水中加入0.5公克的CMC、3公克的矽酸鈉以及13.1公克的氫氧化鉀，能使水泥從原先16000歐姆的電阻降至514歐姆，降低96.8%。
- 三. 用碳黑及壓克力顏料製成的**導電塗層**能有效取代昂貴且難以購買的碳纖維。
- 四. 先以較小的電流**鍍上銅**能解決製作電鍍電極時，電鍍鎳及鐵不均勻的問題。

➤ 鍍不均勻的鐵電極



➤ 鍍鐵導電碳板



➤ 鍍銅碳板



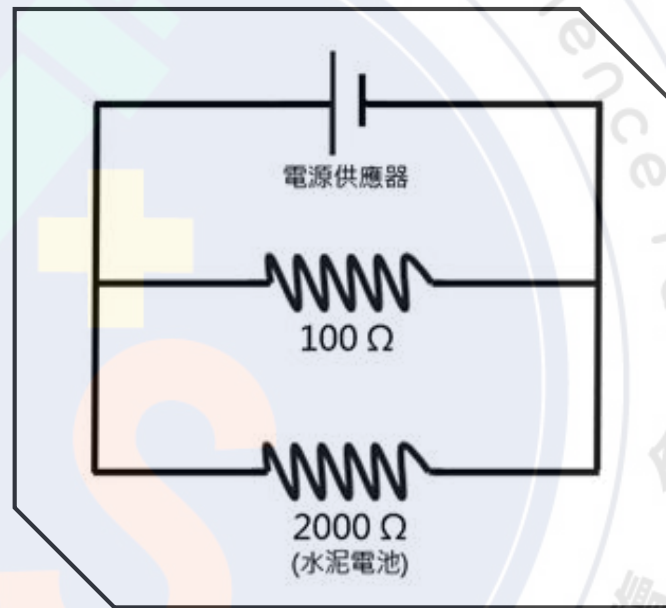
- 五. 在純金屬片、電鍍銅片、電鍍導電碳板三種電極材質中，**電鍍導電碳板**製成的水泥電池儘管輸出功率較低，但有著最高的總作功，且放電時間長及第二次放電輸出功率下降最少的特性。
- 六. 二次水泥電池首次充放電在**8小時**的功率有544微瓦特，而第二次充放電有373微瓦特，只損失了31.4%。
- 七. 水泥電池的**電極大小與輸出功率不成線性關係**，電極面積小的水泥電池能量密度高。

未來展望

水泥電池的優勢

1. 混凝土的建築物體積很大，結合電池體積也隨著增大，可以用量來**彌補儲電量的不足**。這一技術可以用在廢棄水泥上。
2. 與再生能源結合，儲存能源。未來若能探討出不會傷害建築結構且能有效二次充放電之水泥電池，可**作為智慧功能的建築材料**，以最普遍的混凝土型態，用來建築高樓，而每一樓層都可以嵌入電極，連接混凝土的功能，整棟大樓就成為一個大電池。

優化實驗



為避免使用過大的電壓導致水泥產生化學反應，未來我們希望**利用並聯電阻來降低總電阻**，藉此用較小的電壓進行測量。

如左圖，則電阻值(R)為：

$$R^{-1} = 100^{-1} + 2000^{-1}$$
$$R \approx 95(\Omega)$$

參考資料

1. Zhang, Emma & Tang, Luping. (2021). Rechargeable Concrete Battery. Buildings. 11. 103. 10.3390/buildings11030103
2. Mishra, P.C. & Singh, V.K. & Narang, Karan & Singh, Namita. (2003). Effect of carboxymethyl-cellulose on the properties of cement. Materials Science and Engineering: A. 357. 13-19. 10.1016/S0921-5093(02)00832-8.
3. 混凝土簡介。高健章，取自 https://www.moea.gov.tw/Mns/CNC/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=1269。