

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)

052412

溫「暖」「釉」美麗-利用廢棄暖暖包製備陶瓷釉藥及建材再生利用之研究

學校名稱：臺中市立大甲高級中等學校

作者： 高一 紀淳譯 高一 鄭亘旂 高一 曾子芸	指導老師： 黃嘉男
---	------------------

關鍵詞：暖暖包回收、陶瓷釉藥、建材環保應用

摘要

本研究探討廢棄暖暖包回收作為陶瓷釉藥及建材的可行性。暖暖包使用後主要成分為鐵氧化物 (Fe_3O_4 、 Fe_2O_3)，經水洗、磁性分離與高溫燒製回收後應用於陶瓷釉藥。水洗階段以濾紙抽氣過濾法可有效去除氯化鈉 (NaCl)，回收率達 80% 以上。XRD 分析顯示，回收物中以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 為主，證實回收後具釉藥著色潛力。釉藥燒製測試顯示，回收物取代 35% 至 70% 氧化鐵可維持穩定色澤，超過 50% 部分試片出現縮釉，經溶劑處理可改善。所有試片莫氏硬度為 6~7，符合 CNS 建材標準。耐酸鹼測試中，跟市售的磁磚總色差無差異，具穩定色澤與耐腐蝕能力。防滑測試結果顯示乾濕狀態下皆具良好摩擦係數，吸水率亦符合瓷質面磚規範。廢棄暖暖包可成功再利用於陶瓷與建材，兼具環保與經濟價值。

壹、前言

一、研究動機

寒流來時為了保暖，許多人手上都拿著暖暖包，使用後的廢棄暖暖包要如何處理回收？經調查每年全球生產的暖暖包高達數百萬噸(陳誼安，2024)，暖冬時單一通路的暖暖包(10片/包)平均銷售量約 300-400 包/天 (洪玲明，2021)，寒流來時會讓暖暖包的銷售與用量大量增加，且除冬天用暖暖包保暖外，很多用來舒緩肌肉的加熱包(圖 1)，其成份與原理都與暖暖包相同，這些使用後的廢棄暖暖包若是被隨意丟棄，恐因屬於複合性材質而造成環境污染，也不能自行焚燒，因暖暖包成分中具有氯化鈉，焚燒時會產生戴奧辛，環境部雖建議民眾，家庭少量的廢棄暖暖包可隨一般垃圾進入具有空氣污染防制設備的焚化爐，但環境部也呼籲一般民眾，可利用暖暖包中的活性碳，作為除臭、防潮的再利用(環境部新聞專區)。



圖 1 功能多樣化的暖暖包。(照片由第二作者自行拍攝)

我們設計簡單實驗測試暖暖包的除溼能力。裝置如圖 2 所示，在密閉小方盒空間中，於室溫(15-20°C)下放置廢棄暖暖包一週，每組共進行 10 次重複，計算水與暖暖包的重量變化。測試後分析水溢散比例與暖暖包除溼比例(圖 3)，發現與暖暖包一起放置的水明顯減少($p<0.001$)，且暖暖包重量也顯著增加($p<0.001$)，顯見環境部確實提供一個廢棄暖暖包再利用的好方法，但並非所有家庭都能進行廢棄暖暖包的再利用，若是大量丟棄，進入焚化爐後不僅會增加戴奧辛產生的風險，也可能會縮短焚化爐壽命，所以除了防潮、除臭外，還可以如何再利用廢棄暖暖包？值得我們深思！



圖 2 廢棄暖暖包除溼能力測試裝置

左盒：水(實驗前重 10.108 ± 0.069 公克)、中盒：水(實驗前重 10.084 ± 0.054 公克)+暖暖包(實驗前重 64.101 ± 0.827 公克)、右盒：暖暖包(實驗前重 64.022 ± 1.000 公克)。(照片由第一作者自行拍攝)

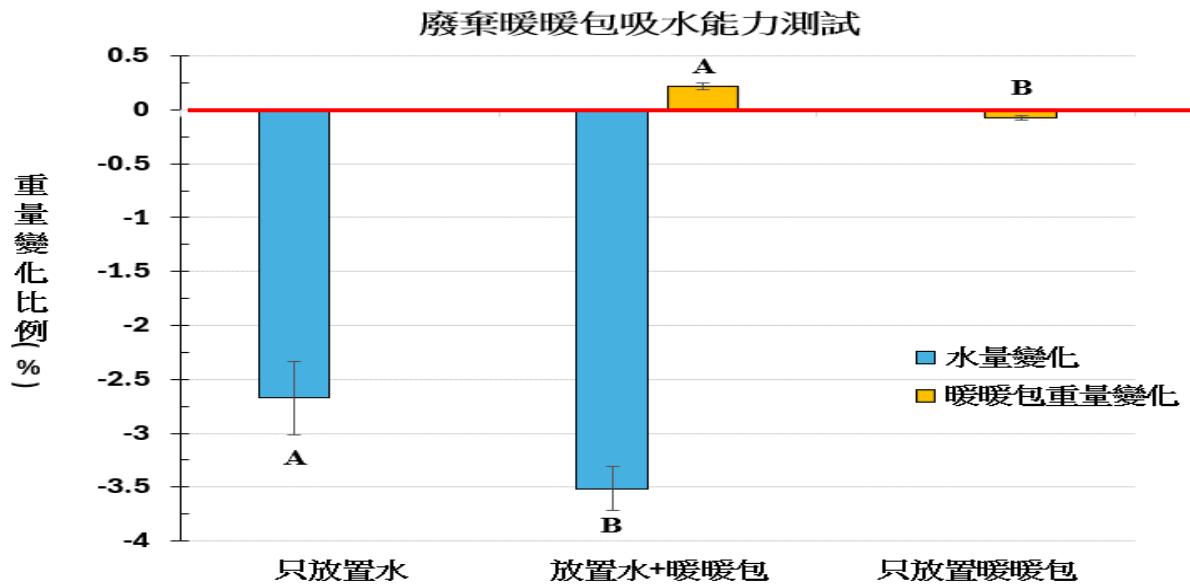


圖 3 廢棄暖暖包除溼能力測試結果
A、B 為顯著性差異化標示(p 值皆<0.001)。(圖片由第一作者繪製)

廢棄暖暖包主要材料是鐵粉，具有良好的化學穩定性和潛在的再利用價值，社團活動時，老師介紹釉藥成分，製作釉藥時需加入氧化鐵，這讓我們想到用完的暖暖包中會有氧化鐵，若是能將這些廢棄資源用於陶瓷釉藥或建材，既可減少廢棄物，又能提供新的環保材料來源。因此，本研究希望透過對廢棄暖暖包的再利用，尋求開發陶瓷釉藥和建材的可行性，以達到減少垃圾、保護環境的目的。

二、研究目的

1. 回收廢棄暖暖包，並探討不同回收方式與階段的回收物之差異。
2. 研究將廢棄暖暖包作為陶瓷釉藥的配方設計，並測試其燒成效果和穩定性。
3. 探討利用廢棄暖暖包材料製成的釉藥應用於建材的可行性，包括釉層附著力、耐候性及環保性。
4. 評估此材料在建材實際應用中的優劣勢，為建材開發提供新思路。

三、文獻回顧

(一)廢棄暖暖包介紹

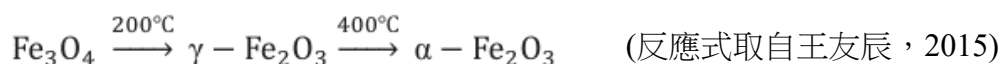
1. 反應前成分分析

暖暖包是利用氧化還原反應的放熱原理達到發熱的效果，通常包含作為反應物的鐵粉、用以幫助電子及離子轉移、加速反應進行的鹽類（例如氯化鈉、氯化鈣）、能吸水以促進氧化的活性碳、保水用的蛭石與吸水性樹脂。各成分所占比例可能因廠牌不同而有

所差異。本研究使用小林製藥公司製作的小白兔暖暖包，依照小林製藥公司所申請的專利文件(證書號數：TW 1849167B)內文所示，該公司的發熱產品「被氧化金屬粉(鐵粉)」最佳比例為 30~60 質量%，氧化促進劑(活性碳)最佳含量 5~23 質量%，水溶性鹽類(NaCl)最佳比例為 1~5 質量%，反應時水最佳比例為 15~35 質量%，保水劑可以是多孔質物質(ex 蛭石)或吸水性樹脂等混合物，其最佳比例為 5~10 質量%。

2. 反應後產物種類

根據陳誼安(2024)的研究，使用後的小白兔暖暖包主要的氧化產物應為 Fe_3O_4 (磁鐵礦)，但隨放置時間長短，顆粒大小不同，氧化程度也會有所不同，故使用後的廢棄暖暖包中，除產生具有磁性的 Fe_3O_4 外，也會產生不具磁性的 Fe_2O_3 。高溫也會導致磁鐵礦、磁赤鐵礦、赤鐵礦的相轉變，三者的相轉變溫度如下：



我們搜尋文獻，針對 Fe_3O_4 與 Fe_2O_3 的物化特性加以彙整、比較。 Fe_3O_4 中的鐵原子有二價和三價兩種價態，是很普遍的礦物，經過氧化作用、長期風化作用後即能變成 Fe_2O_3 。兩者的特性比較請見表一。

表一 Fe_3O_4 (磁鐵礦)與 Fe_2O_3 (赤鐵礦)之比較表

物化特性	Fe_3O_4 (磁鐵礦)	Fe_2O_3 (赤鐵礦)
顏色	鐵黑色、灰黑色	暗紅色
鐵氧含量	Fe72.4%，O 27.6%	含 Fe70%，O 30%
物理特性	<ol style="list-style-type: none"> 1. 具磁性 2. 硬度：5.5~6.5 3. 密度約 4.9~5.2 g/cm³ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不具磁性 2. 硬度：5.5~6.5 3. 密度約為 5.26 g/cm³
化學反應	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可溶於酸(與酸反應) 2. 被還原性較 Fe_2O_3 差 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可溶於酸(與酸反應) 2. 被還原性較 Fe_3O_4 好

(表格由第二作者繪製整理，資料參考出處：陳燕華，2013；MoneyDJ 網；地質知識服務網地質百科)

3. 廢棄暖暖包高溫燃燒可能造成的汙染

環境部呼籲民眾再利用廢棄暖暖包，除希望民眾勿隨意丟棄、汙染環境外，也希望盡量不要讓大量的廢棄暖暖包進入焚化爐，因暖暖包中含有氯化鈉，在燃燒系統中若有氯的存在，將使得燃燒後產生金屬氯化物，當溫度高達 850°C 時，金屬氯化物的揮發性增加，造成氯化氫的排放，此些結果會對爐體造成直接的衝擊損壞，排放後也會造成酸雨與戴奧辛的汙染，且當燒製的溫度越高時，氯化氫排放的量會增加(許宏銘，2004)，故我們想回收暖暖包，應用於釉藥中，第一要件是要先去除暖暖包中的 NaCl。

4. 回收暖暖包後，不同高溫下的重量變化

李松柏(2024)的研究指出，加熱暖暖包粉時，隨著溫度的升高，其明顯的重量發生變化，主要可分為(1)150°C以下的水分散失；(2)230°C時鐵粉開始氧化，產生鐵氧化物；(3)400~700°C活性碳氧化三個階段。我們回收廢棄暖暖包的過程與燒製釉藥的過程都有高溫加熱的階段，所以我們的回收物中若有鐵氧化物與活性碳混合的情形，則預期可能會出現因不同物質進行氧化反應，導致重量產生明顯變化。

5. 廢棄暖暖包再利用實例

暖暖包使用後主要產物為 Fe_3O_4 與 Fe_2O_3 ，二者應用極廣，我們不再此贅述，以下僅針對「回收暖暖包加以再利用」的研究做彙整。作為暖暖包主要供應國的日本，為解決廢棄暖暖包過多的問題，募資回收暖暖包，利用回收後的內容物，製作富含二價鐵離子的圓錠，用以淨化水質(宋瑞文，2021)。除淨化水質外，因廢棄暖暖包的含鐵廢棄物具有吸附重金屬能力，故在台灣有不少研究將廢棄暖暖包粉利用於吸附鉛離子、銅離子、活性染料等，或是利用含鐵廢棄物回收鐵離子，藉由鐵離子的催化劑能力降解環境中的土黴素、去除除草劑、處理廢水等(李松柏，2024；陳誼安，2024；游翊洋，2022；蔣佩珊，2018)。

(二)氧化鐵、釉藥及建材

釉藥（釉料）在建築材料中的應用，特別是在陶瓷磚和玻璃等建材表面的裝飾和保護方面，已有悠久的歷史。傳統上，釉藥主要由矽酸鹽、氧化鋁和氧化鈣等無機物組成，經高溫燒製後形成光滑且耐用的表面。然而，隨著技術的進步，現代建材中的釉藥組成和製備技術也發生了顯著變化。

在綠色建築的推廣中，綠建材的開發與應用成為重要課題。內政部建築研究所於 2004 年建立「綠建材標章制度」，將永續與健康的元素導入至建築材料中。截至民國 109 年，歷年累計核發的綠建材標章數量已超過兩千九百件，涵蓋的系列產品超過兩萬種。這些綠建材的推廣，有助於提升建築物的環保性能，促進資源的有效利用。

氧化鐵作為無機顏料，在建築材料的釉藥應用中扮演關鍵角色。其顏色多樣，包括紅色、黃色、棕色及黑色，這些色澤的差異主要來自其化學結構、晶體形式與粒徑大小的不同。例如，赤鐵礦($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)呈現鮮明的紅色，針鐵礦($\alpha\text{-FeOOH}$)則顯現黃色，而磁鐵礦(Fe_3O_4)則為黑色。

在釉藥製備中，常透過金屬氧化物作為著色劑，經過高溫燒製後產生多樣化且穩定的色彩。此過程中，氧化鐵與釉料成分之間的化學反應對最終色澤有顯著影響。現代合成氧化鐵顏料因粒徑均勻且純度高，已成為釉藥工業的主流選擇。混相顏料（CICP）作為另一

種重要的顏料種類，結合多種金屬氧化物，經由高溫處理後形成穩定的晶體結構，提供優異的耐候性與化學穩定性，適用於建築材料如陶瓷、混凝土及屋頂瓦片。

此外，氧化鐵顏料在調節建材的熱性能方面亦具重要作用。以氧化鐵黑為例，因其在太陽光譜範圍內的高吸收率，能有效降低材料的太陽能反射率，進而影響建築物的隔熱性能。透過選擇合適的金屬氧化物顏料，可同時實現美觀與節能的雙重目標。整體而言，氧化鐵及相關金屬氧化物在釉藥應用中，提供豐富的色彩變化與功能性。

貳、研究設備及器材

一、暖暖包：小林製藥小白兔手握式暖暖包



(照片由第一作者拍攝)

二、設備類：

微量電子天秤(Precisa)

解剖顯微鏡(Nikon 1095502)

烘箱(DENG YNG)

抽氣過濾器

水浴裝置

鑽石硬度儀

pH 計

真空練土機	磨釉機	陶板機
		
電窯爐	球磨瓶	摩擦係數測定裝置
		




(本表之照片由第二作者拍攝)

三、藥品類：

釜戶長石	輕質碳酸鈣	碳酸鎂	石英	白瓷土
德國黑色氧化鐵	美國高嶺土	95%乙醇	丙酮	正己烷
9%NaOH(pH13.0)	2.9%氨水(pH11.7)	10%醋酸(pH2.0)	3%HCl(pH0.5)	

四、器材類

各式量筒	玻璃棒	刮勺	110mm 濾紙	抽氣錐形瓶	玻璃培養皿
各式燒杯	軟磁鐵	鑷子	抽氣漏斗	塑膠收納盒	4"×4" 不織布紗布
莫氏硬度計	計時器	紙膠帶	微量吸管	血清瓶	不鏽鋼烘盤
矽膠乾燥劑	PP 塑膠收納箱	試管架	研磨鉢	手機架	

圓形陶板彈簧壓模 (直徑 11.4cm)	方形陶板彈簧壓模 (5.6×5.6)	拍攝裝置
		 攝影棚

(本表之照片由第三作者拍攝)

五、軟體：網路版 ImageJ

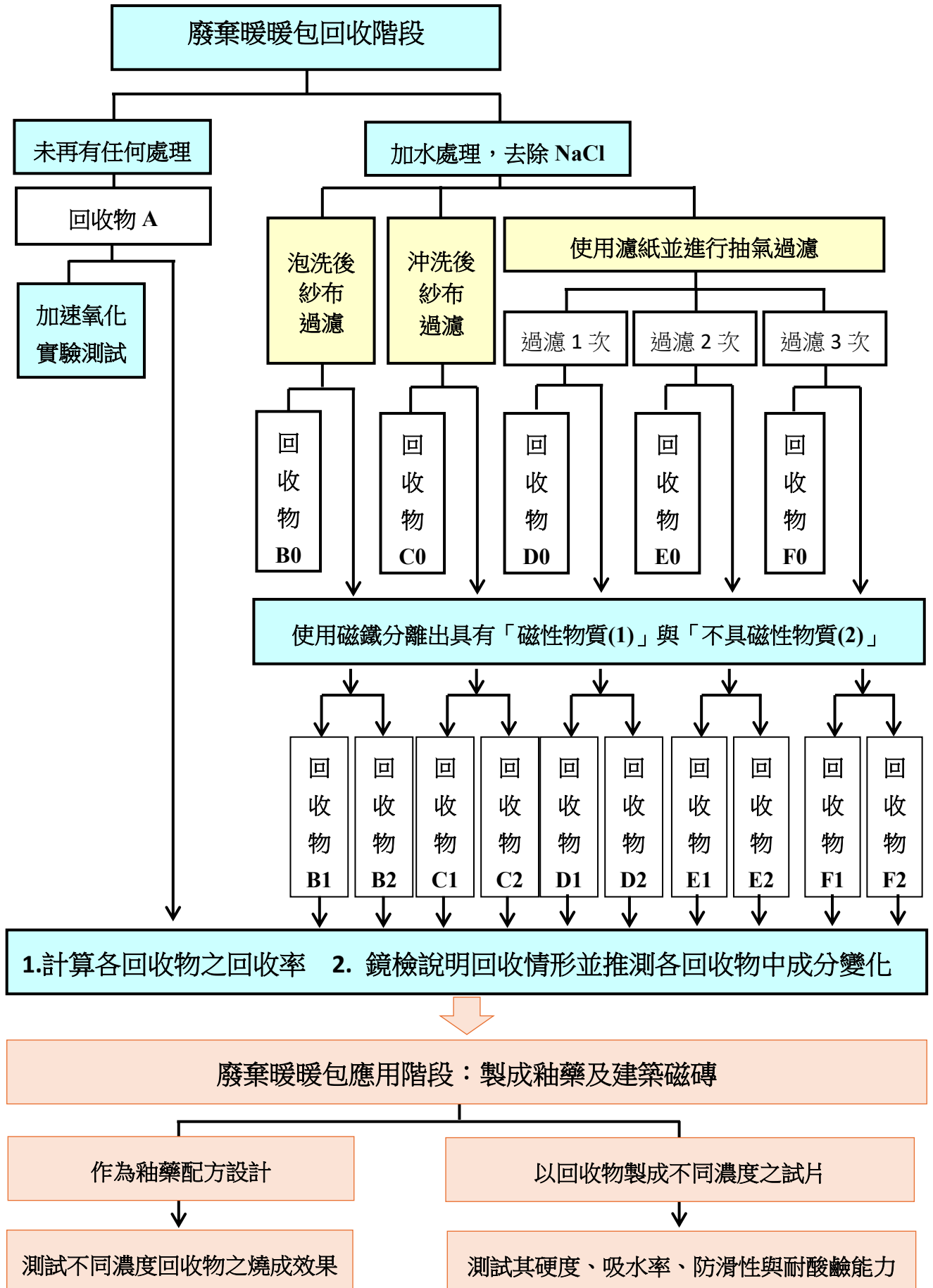
使用的功能選項包括：Adjust / Color Threshold 與 ROI Manager / Add / AND / Measure

六、色碼分析：

- 1.使用「PEKO STEP 網站」中的色碼選取器，進行照片試片的色碼讀取。
- 2.使用「ColorMine 網站」的 Delta-E Calculator 功能，將兩種顏色 RGB 值轉換成 Delta E (總色差 ΔE)。

參、研究方法

一、實驗架構



二、實驗階段與步驟

本研究主要實驗可區分為「廢棄暖暖包回收」、「回收物高溫燒製測試」與「製備釉藥及建材再生利用」三大階段。

(一)「廢棄暖暖包回收」階段

許宏銘(2004)指出若燃燒物中具有 NaCl，當溫度高達 850°C時，會造成氯化氫的排放增加，排放至空氣中將會造成酸雨與戴奧辛的污染，故本研究的「廢棄暖暖包回收」階段決定參考高一化學課本 1-2 單元提到的混合物的分離方法(葉名倉等人，2024)，先使用「水洗」去除氯化鈉，再利用磁鐵將內容物分成磁性回收物與非磁性回收物。

1. 「水洗」去除氯化鈉

使用研钵研磨廢棄暖暖包內容物，使其成為顆粒大小均勻的粉狀物，秤重記錄後，以粉：水(RO 水)=1：10(w/w)比例清洗粉狀物。因不同的清洗、過濾方法，可能會影響回收物的成分，故在此階段我們分成 5 種不同清洗過濾方式，其預期的優缺點如表二所示，詳細操作步驟如後敘述。

表二 不同的「水洗去除氯化鈉」處理

清洗過濾方式	預期的優缺點	所得回收物
(泡洗後) 紗布過濾組	方便操作，紗布孔隙大，可去除較多的有礙高溫窯燒過程的活性碳，但顆粒較細小的鐵氧化物，甚至小蛭石，也有可能一併流失。	B0
(沖洗紗布過濾) 紗布沖洗組	方便且快速操作，因是使用沖洗，故在流失活性碳的同時，一併流失的鐵氧化物與小蛭石應該會較少，但缺點是會消耗更多水。	C0
(泡洗後，使用濾紙過濾)抽氣過濾組	1 次 使用濾紙、抽濾裝置進行過濾，步驟較繁瑣，耗時久，	D0
	2 次 但濾紙孔隙小，鐵氧化物與蛭石無法通過，活性炭會少	E0
	3 次 部分卡進濾紙內部，過濾越多次期望可以濾掉越多活性碳，但同時也耗時越久、耗水越多。	F0

(本表由第一作者自行彙整製作)

(1) 泡洗後紗布過濾操作步驟

以粉：水(RO 水)=1：10(w/w)比例加水，充分攪拌 10 分鐘。使用 4"×4"不織布紗布四層交錯放置，作為過濾器材。過濾後所得之回收物以 110°C烘 6 小時至全乾。烘乾後秤重，計算回收率，最後再研磨成顆粒均勻的粉狀保存。

(2) 沖洗紗布過濾

先將要沖洗的粉狀物放置於四層交錯放置的 4"×4"不織布紗布上，以粉：水(RO 水)=1：5(w/w)比例緩慢加水沖洗，沖洗後所得之回收物以 110°C烘 6 小時至全乾。烘乾後秤重，計算回收率，最後再研磨成顆粒均勻的粉狀保存。

(3) 泡洗(濾紙)抽氣過濾

以粉：水(RO 水)=1：10(w/w)比例加水，充分攪拌 10 分鐘。使用孔徑 6μm、尺寸 110mm 的 1 號定性濾紙進行抽氣過濾。多次過濾時，於每一次抽氣過濾完畢後，再重複加入 10 倍重量的 RO 水與回收物混合，繼續充分攪拌 10 分鐘後再行過濾下一次。

2. 水洗後回收物進行磁性分析

使用面積大的軟磁鐵進行水洗後回收物的磁性分離，將 B0~F0 五種回收物都進行磁性分離，區分成(1)磁性物質與(2)非磁性物質，分別定義回收物編號為 B1、B2、C1、C2、D1、D2、E1、E2、F1、F2。

經過「水洗」去除氯化鈉」與「磁性分析」後，連同未加以任何處理的對照組 A，我們共得到如實驗架構圖中的 16 種回收物。秤重並計算所有回收物之回收率。

3. 顯微鏡觀察 16 種回收物與推測成分變化

每種回收物取 0.01 克於解剖顯微鏡下觀察，20 倍放大倍率下拍照，每種回收物鏡檢觀察重複取樣次數 15-18 次(每次取樣只拍照一次)，所得影像利用 ImageJ 軟體計算蛭石(淺亮色)與其他深色物體(鐵、鐵氧化物、碳粉等混合物)的面積比例，以推測使用不同的水洗過濾方式對回收到的成分影響為何？並以磁性分析後各回收物之蛭石(淺亮色)與其他深色物體(鐵、鐵氧化物、碳粉等混合物)面積比佐證鏡檢照片，以說明回收物的純度。

ImageJ 軟體分析計算面積操作步驟(圖 4)：

- (1) 使用圈選功能，圈選出蛭石，利用「ROI Manager」中的 Add 選項，將所圈選的蛭石面積加入。
- (2) 重複步驟(1)，直到圈選完、記錄完所有蛭石為止。
- (3) 使用軟體工具列「Adjust」中的「Color Threshold」選項，調整 Hue(色相)、Saturation(飽和度)、Brightness(亮度)等參數，直到選出視野中全部物質或是深色物質所覆蓋的面積(圖 4 紅色部分)，再使用「ROI Manager」中 Add 選項，將所圈選的面積加入。
- (4) 於「ROI Manager」視窗中選取所加入的每一區塊，之後選擇 Measure 選項，最後即會出現計算結果「Results」，視窗中的 Area 部分的數字即代表該塊的面積。

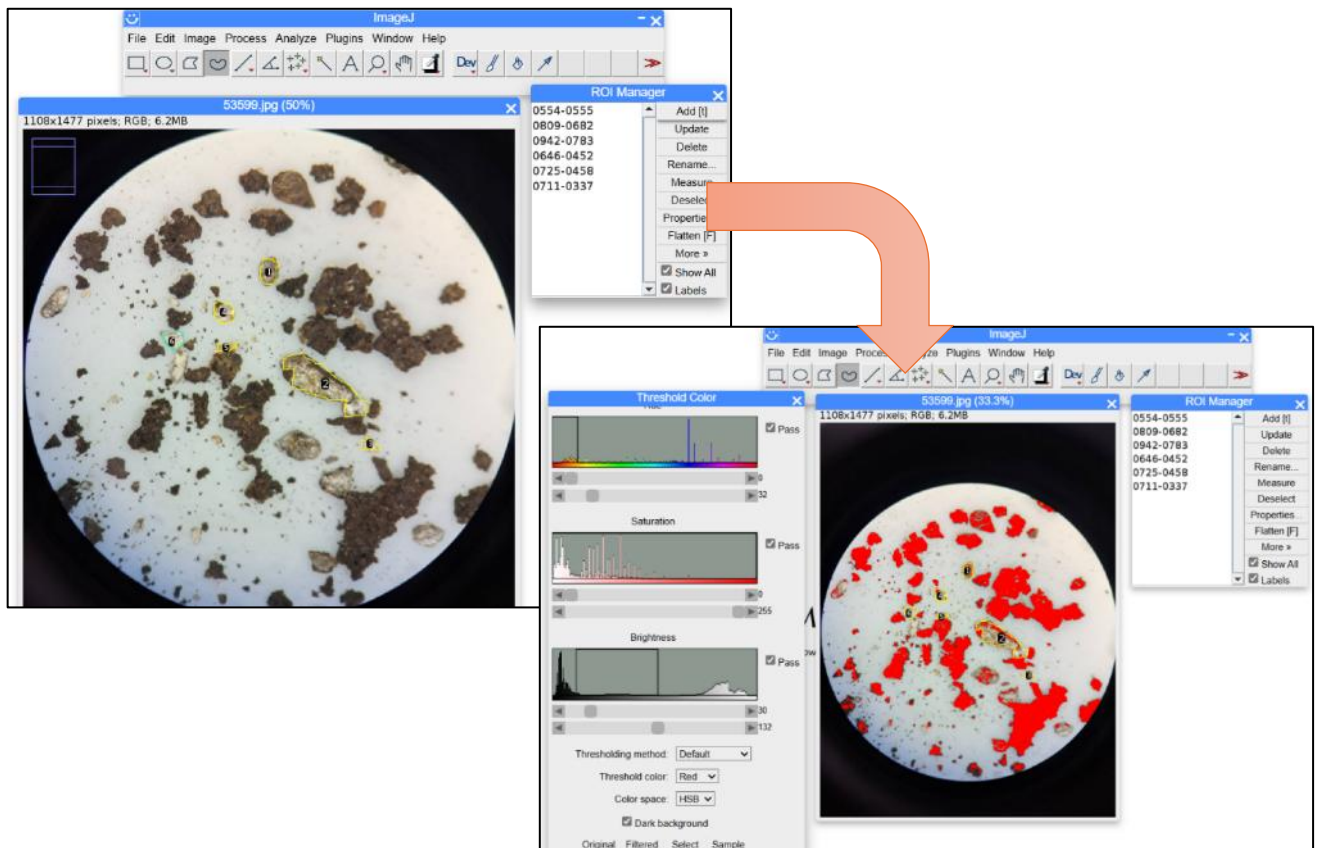


圖 4 ImageJ 軟體分析計算影像面積之工作畫面截圖。(圖片由第一作者繪製)

4. 加速氧化實驗測試

因回收時發現使用後的廢棄暖暖包中，磁性物質遠多於非磁性物質，所以推測廢棄暖暖包中的氧化產物應是 Fe_3O_4 多於 Fe_2O_3 ，但使用後的暖暖包若不馬上進行回收再利用，放置一段時間後，潮濕的空氣依然會使 Fe_3O_4 繼續氧化。為了日後能有更足夠的回收之 Fe_2O_3 可利用，我們利用暖暖包中已經存在 NaCl 的事實，選擇測試加水的量，以了解在放置一週的時間中，如何使蒐集到的廢棄暖暖包產生更多的 Fe_2O_3 。實驗步驟如下：

- (1) 將廢棄暖暖包多包混合後， 110°C 烘 10 分鐘，冷卻後秤取 10 克/份置於燒杯中。
- (2) 依加入的水(RO 水)量分成「0mL、5 mL、10mL、20mL、40mL、80mL」6 種處理，加入水後攪拌均勻。(圖 5)

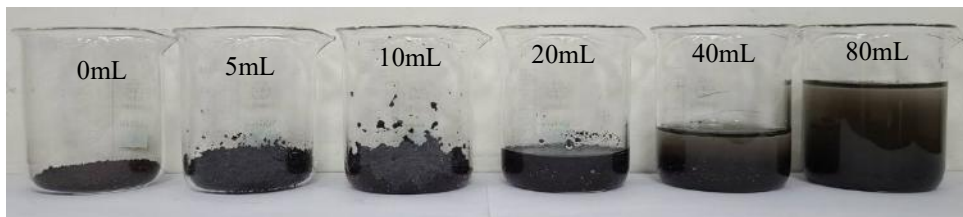


圖 5 廢棄暖暖包加速氧化實驗。燒杯上的標示為該杯加入的水量。(圖片由第三作者繪製)

- (3) 每隔 1-2 天即均勻混合一次，放置一週後，使用抽氣過濾的方法進行水洗回收，所得回收物秤重記錄後，再以磁鐵進行分離，獲得磁性物質與非磁性物質後，秤重計算各組回收率，找出可使廢棄暖暖包氧化速度最快的最佳加水量。

(二) 作為釉藥配方設計

使用白瓷土製作 $5.6 \times 5.6(\text{cm})$ 方形試片，經 1250°C 窯燒完成後備用。配置釉藥母液，母液各成分比例如表三所示。以每次燒製時母液重量為基準，測試 16 種回收物相對母液重量百分比濃度為 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80% 時，取代原先釉藥中氧化鐵的能力，以相同濃度的德國黑鐵作為標準品進行評比。

表三 母液成分表。(母液 1kg 時之成分比例)

成分	濃度	成分	濃度	成分	濃度
釜戶長石	46%	美國高嶺土	8%	碳酸鎂	10%
輕質碳酸鈣	16%	石英	24%	水	80%

(本表由第三作者自行彙整製作)

秤取 16 種回收物(重量計算公式如下)，分別混入母液中，混合均勻後倒至方形試片上，之後進入窯燒，以平均 $200^\circ\text{C}/\text{小時}$ 的升溫速度達至 1250°C ，高溫燒製後觀察結果，判斷 16 種回收物取代原先釉藥中的氧化鐵能力。

計算添加回收物重量之公式=回收物秤取量=取適當的母液÷ $1.8 \times$ 欲燒製之回收物濃度

(三) 製備釉藥及建材再生利用

依據回收過程的「方便性」與「高回收率」兩項原則，選定泡洗後紗布過濾的 B0(未經磁性分析)、B1(磁性物質)、B2(非磁性物質)與泡洗後抽氣過濾的 D0(未經磁性分析)、D1、D2(非磁性物質)共 6 種回收物，製作 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%直徑 11.4cm 之圓形試片，燒製完成的圓形試片進行硬度測試與耐酸鹼測試。

1. 硬度測試

使用鑽石硬度儀測定圓形試片之硬度，測定時使用莫氏硬度計中硬度 6、7 兩種礦物作為鑽石硬度儀之參考基準，每種濃度的圓形試片取樣檢測重複數為 10 次，計算所測硬度之平均值與標準差，再與 CNS 對磁磚品質的硬度規定進行比較。

2. 耐酸鹼測試

使用 9%氫氧化鈉溶液(pH13.0)、2.9%氨水(pH11.7)、10%醋酸溶液(pH2.0)與 3%鹽酸溶液(pH0.5)做為檢測液，將圓形試片分成四個扇形，再以微量吸管分別吸取四種檢測液 0.5mL，滴於圓形試片的四個扇形中，靜置、等待 24 小時後，肉眼觀察圓形試片的變化，若試片表面與測試前無異，則記錄獲 4 分；若試片表面光澤減弱，則記錄獲 3 分；若試片出現變色情形，則記錄獲 2 分；若試片已出現釉料掉落的情形，則記錄獲 1 分。利用上述定義的積分來量化耐酸鹼測試的結果，每種濃度試片共檢測 3 個重複，計算總積分後，再計算平均積分與標準差。

防滑性測試與吸水性測試因考量斜坡寬度與水浴鍋容量，故改燒製 5.6×5.6(cm)方形試片做為測試用，又因 11.4cm 之圓形試片的硬度測試結果，各組試片硬度皆在 6-7 之間，肉眼觀察耐酸鹼測試結果發現大部分 30%以上的回收物製成的圓形試片耐酸鹼能力良好，但若採用高濃度非磁性回收物替代釉藥，進行高溫燒製時易發生縮釉情形，故防滑性與吸水性兩種測試僅測試 30% B0、B1、B2、D0、D1 與 D2 六種方形試片。

3. 防滑性測試

使用物理課的最大靜摩擦係數測量教具測量各種試片的最大靜摩擦係數(μ_s)。測定的步驟為(1)將待測「乾燥試片」之釉面朝向斜面，放置於斜面上，(2)慢慢提高斜面斜度，記錄試片恰由靜止開始運動時的最大傾斜角(θ_s)，(3)帶入公式 $\mu_s = \tan\theta_s$ ，計算 μ_s 值，(4)每種試片測試重複數為 12 次，計算所得之平均最大靜摩擦係數(μ_s)。

將上述步驟中的「乾燥試片」替換成被水浸濕的試片，測試前以水淋濕斜坡，之後依照上述四項步驟重新測定潮濕試片的最大靜摩擦係數(μ_s)，藉由測試所得之數據推斷自製的試片磁磚之防滑性。

4. 吸水率測試

參考 CNS 3299-3：2020 陶瓷面磚試驗法進行吸水率測試(經濟部標準檢驗局，2000)。將試片置於 110°C 下烘 3 小時，取出後再放入裝有矽膠乾燥劑的氣密容器中，待其降溫至室溫時取出試片秤重，所得重量視為試片的乾燥時重量。

秤重後之試片放在水面以下 5 公分，加熱至水沸騰並維持 2 小時，加熱過程中試片需一直維持在水面以下 2 公分。加熱完成後，切斷熱源，靜置 12 小時以上。取出水中試片，擦去試片表面水分後秤重，所得重量視為試片的吸水時重量。

每種試片各測試重複數為 12 次，套用以下公式計算吸水率，並計算平均值、標準差，進行 t-test 分析，以分析之結果判斷各試片之吸水率是否符合面磚吸水率之 CNS 標準。

$$\text{吸水率 Eb(\%)} = \frac{\text{吸水時質量} - \text{乾燥時質量}}{\text{乾燥時質量}} \times 100 \quad (\text{經濟部標準檢驗局，2000})$$

5. 30%方形試片耐酸鹼測試

為了更精確了解酸鹼測試後，肉眼不易察覺的試片顏色變化，我們決定使用色碼分析與 Delta E (總色差 ΔE)來作為判斷顏色變化的量化工具。

製作 30% B0、B1、B2、D0、D1、D2 與德國黑鐵(作為標準品)六種方形試片各 12 片，並以市售施釉磚為對照組，測試前先進行拍照，每張照片皆是以同一支手機、手機架固定同一位置、採用相同光源進行拍攝。拍攝後再進行一次耐酸鹼測試。同樣使用 9%氫氧化鈉溶液(pH13.0)、2.9%氨水(pH11.7)、10%醋酸溶液(pH2.0)與 3%鹽酸溶液(pH0.5)做為檢測液，但不同的是，本測試是將方形試片放入 250mL 燒杯中，再加入 80mL 的檢測液，浸泡 24 小時後，取出試片，並以清水沖洗，晾乾 3-4 小時後再拍攝測試後照片。

每種試片於每種檢測液中測試三片，拍攝的照片借用 PEKO STEP 網站中的色碼選取器，進行試片照片的色碼讀取，每張照片讀取 5 筆數據，固定讀取位置如圖 6 所示。記錄測試前、後各照片中的 R、G、B 數值。

Delta E (總色差 ΔE)由國際照明委員會所制定，用來表示兩種色彩差異的度量標準， ΔE 數值愈接近 0，代表兩顏色間的色差愈小(支點科技網站)。本研究利用 ColorMine 網站的 Delta-E Calculator 功能，將 RGB 數值轉換計算 ΔE ，將測試前、後的 RGB 數值輸入，經網站計算獲得 ΔE ，再將所得的各組試片 ΔE 扣除極端值後，計算平均值、標準差與 t-test 分析。透過 ΔE 的數值來了解各試片於四種酸鹼溶液下的色澤變化。

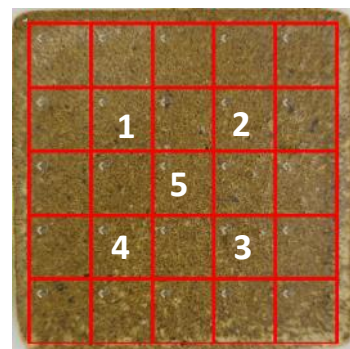


圖 6 色碼讀取時所選用的位置。每張照片透過軟體讀取 RGB 值時，皆固定讀取圖中 1-5 數字的區塊。(圖片由第一作者拍攝與繪製)

(四) 回收物 X 光繞射分析(X-ray diffraction analysis, XRD)

進行回收率、高溫燒製測試後，為了能更確認使用後與回收後的小白兔暖暖包各成分變化，選擇 A0(使用後回收前成分)、D0(水洗並抽氣過濾後成分)、D1(水洗、抽氣過濾且磁性分析後之磁性成分)與 D2(水洗、抽氣過濾且磁性分析後之非磁性成分)四種回收物並進行 X 光繞射分析(X-ray diffraction analysis, XRD)。

肆、研究結果

一、「廢棄暖暖包回收」階段

本研究共蒐集 99 包小白兔暖暖包，以開封進行實驗的前 66 包計算，發現使用前(氧化反應前)各成分平均淨重= 56.31 ± 1.99 克；氧化反應進行後各成分平均淨重= 62.31 ± 1.62 克；計算氧化反應前後增加的平均重量為 5.98 ± 1.33 克。

依小林製藥公司所申請的專利文件(證書號數：TW 1849167B)內文所提及的各成分最佳比例，配合我們所蒐集到的暖暖包平均重量計算使用前各成分的實際重量，計算結果如表四。

表四 推算小白兔暖暖包使用前各成分的重量(若使用前總重為 56.31 ± 1.99 克)。

小林製藥公司表定比例	使用前重量(克)
鐵粉 30~60 質量%	$16.89 \pm 0.60 \sim 33.79 \pm 1.19$
活性碳 5~23 質量%	$2.82 \pm 0.08 \sim 12.95 \pm 0.37$
NaCl 1~5 質量%	$0.56 \pm 0.02 \sim 2.82 \pm 0.10$
蛭石或吸水性樹脂 5~10 質量%	$2.82 \pm 0.10 \sim 5.63 \pm 0.20$

(本表由第一作者自行彙整製作)

使用後(反應後)平均淨重 62.31 ± 1.62 克，扣除反應前後不變的成分後，剩餘約 40.91 克，此應是未反應完全的鐵與鐵氧化物混合之重量。

(一)回收物成分分析

本研究將暖暖包粉體進行 X 光繞射分析(XRD)。分析結果如圖 7 所示。由圖 7 結果可得知使用後的暖暖包粉體中主要是 γ - Fe_2O_3 ，而非文獻中所說的 Fe_3O_4 (陳誼安，2024；李松柏，2024)，此兩種鐵氧化物都具有磁性，XRD 波峰也極具相近。

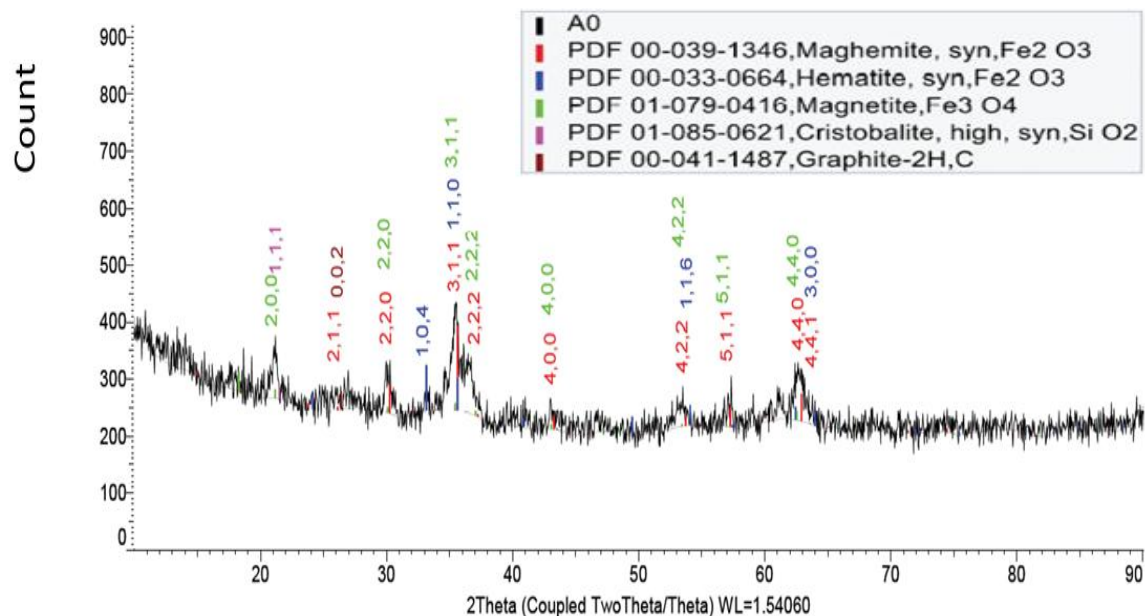


圖 7 使用後暖暖包粉體之 X 光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

(二)各階段所得之各項回收物的回收率

回收的第一個階段是水洗除去 NaCl，使用五種不同的水洗過濾方式，將回收物共區分成 B0、C0、D0、E0、F0 五種，未沖洗 A0 作為對照組，以各回收物「水洗前淨重」為基準計算各回收物之回收率，計算結果如圖 8 所示。圖 8 結果進行差異化分析(t-test)後，顯示泡洗後使用濾紙進行「抽氣過濾 1 次(D0)」所獲得的回收率較其他過濾方式更高(p 值皆 <0.05)，其餘的過濾方式彼此間則無差異性存在(p 值皆 >0.05)，可見使用紗布與抽氣過濾多次都將使更多物質流失。

水洗、過濾、烘乾後，以軟磁鐵進行磁性分析，區分出磁性物質(可能成分為未反應完的鐵粉、反應後產生的 Fe_3O_4 與 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)與非磁性物質(蛭石、吸水性樹脂、活性碳與反應後產生的 Fe_2O_3)，若以「水洗後所得之乾重」作為基準，計算不同水洗方式之磁性物質與非磁性物質回收率，則可發現磁性物質回收率與非磁性物質回收率各組的差異不大，彼此間無差異性存在(p 值皆 >0.05) (圖 9)。

綜上所述，我們挑選不同水洗過濾方式，但不管何種方式，回收率皆達 80%以上，磁性與非磁性物質的回收率與過濾方式無關，推測應與廢棄暖暖包的反應程度、產物量有關。

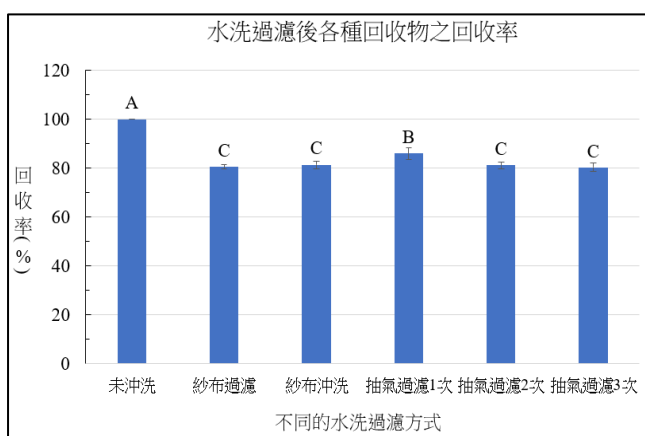


圖 8 不同水洗過濾方式對回收率的影響。A、B 為顯著性差異化標示(p 值皆 <0.001)。(圖片由第一作者繪製)

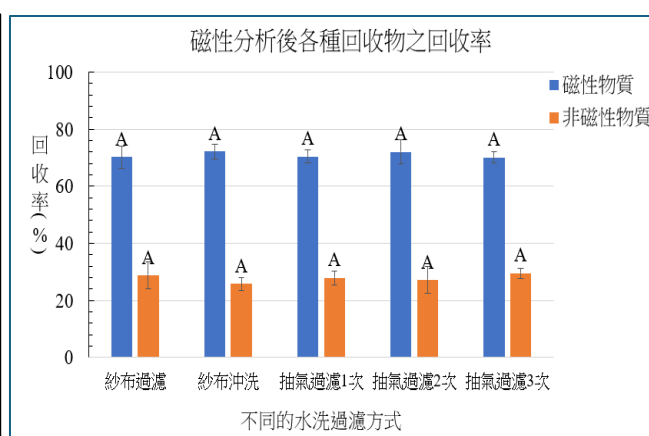

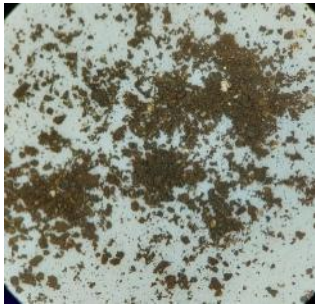

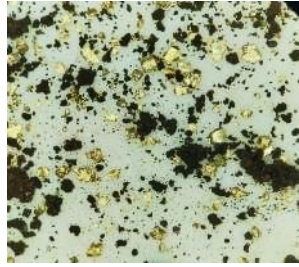
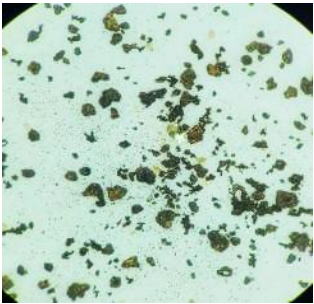


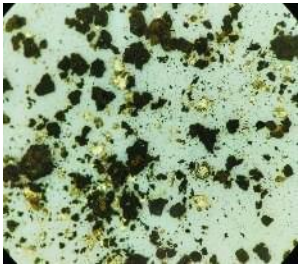
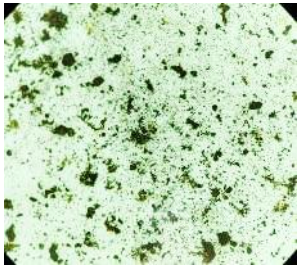

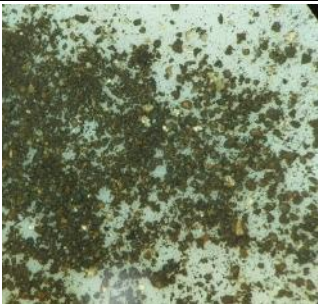


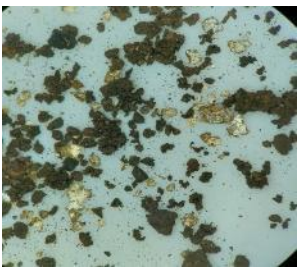




圖 9 不同水洗過濾方式對磁性分析後的回收率之影響。A 為顯著性差異化標示(p 值皆 >0.05)(圖片由第一作者繪製)

(三)16 種回收物中各成分比例變化

廢棄暖暖包經水洗、過濾、烘乾、磁性分析等階段後，連同對照組，共區分成 16 種回收物，將回收物進行顯微鏡觀察、20 倍放大倍率下拍照，所得結果如表五所示。表五中陳列的照片顯示不同回收物中蛭石(淺亮色)與其他深色物質(鐵粉、鐵氧化產物、活性碳)的相對比例有所不同，以 ImageJ 軟體分析計算兩者相對面積比例，藉此了解差異。

表五 16 種回收物鏡檢結果示意圖。(使用解剖顯微鏡觀察，放大倍率統一為 20 倍)

<div>回收物 A 深色混合物(鐵粉、鐵氧化產物、活性碳)</div> <div></div>		<div>回收物 B0</div> <div></div>	
<div>回收物 B1</div> <div></div>		<div>回收物 B2</div> <div></div>	
<div>回收物 C0</div> <div></div>		<div>回收物 D0</div> <div></div>	
<div>回收物 C1</div> <div></div>	<div>回收物 C2</div> <div></div>	<div>回收物 D1</div> <div></div>	<div>回收物 D2</div> <div></div>
<div>回收物 E0</div> <div></div>		<div>回收物 F0</div> <div></div>	
<div>回收物 E1</div> <div></div>	<div>回收物 E2</div> <div></div>	<div>回收物 F1</div> <div></div>	<div>回收物 F2</div> <div></div>

(本表中照片由三位作者共同拍攝，由第一作者彙整製表)

顯微鏡觀察時，每種回收物隨機取樣 15-18 次，拍攝的照片利用 ImageJ 軟體計算蛭石(淺亮色)與其他深色物體(鐵、鐵氧化物、碳粉等混合物)的面積比例，結果(圖 10)顯示「紗布過濾組」深色物質比例較高，蛭石比例較低，其餘各組皆無明顯差異，配合實作時的實際觀察(圖 11)，我們認為是因為「紗布過濾」時會同時流失碳粉與部分蛭石，導致蛭石比例降低，而顯示深色物質比例較其他組高。其他組的比例雖然沒有統計學上的差異性存在，但就圖 11 的實際觀察，我們認為使用紗布過濾，不管是泡洗(B0)還是沖洗(C0)，都會造成碳粉的大量流失，且泡洗後紗布過濾(B0)更會同時失去大量蛭石，選用濾紙抽氣過濾的組別(D0~F0)，只有少部分碳粉卡在濾紙中，蛭石、部分碳粉與絕大部分的鐵氧化物都被回收回來。

水洗過濾後，使用軟磁鐵而非強力磁鐵進行磁性分離，目的是以盡量讓回收物分散的方式，避免回收物的非磁性成分因互相包覆而被強力磁鐵誤吸。

所分得的磁性物質(未完全反應的鐵、反應後產生的 Fe_3O_4 與 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)與非磁性物質(蛭石、碳粉與反應後產生的 Fe_2O_3)也進一步使用顯微鏡觀察、拍照，同樣使用 ImageJ 軟體計算照片中蛭石(淺亮色)與其他深色物體的面積比例，將各組量測的面積比例與 0 號回收物進行差異性分析(t-test)，結果顯示 p 值皆 <0.001 。

以「水洗過濾後的回收物(B~F 各組的 0 號回收物)深淺色面積比例」作為基準，計算 B~F 各組的 1 號回收物、2 號回收物中蛭石與深色物質兩者比例的增減情形(圖 12)，比較後發現磁性回收物(B~F 各組的 1 號回收物)中蛭石比例皆減少、深色物質比例增加，而非磁性回收物(B~F 各組的 2 號回收物)中則是蛭石比例增加、深色物質比例減少，此趨勢也能從表五各回收物鏡檢照片窺知，顯示我們利用軟磁鐵進行最後分離，雖磁性不如強力磁鐵，但用面積換取純度的做法確實有效。

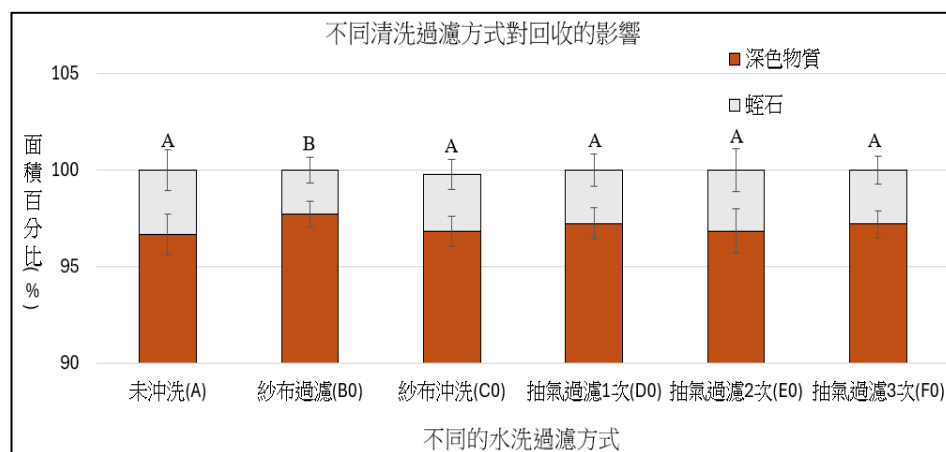


圖 10 不同方式水洗過濾後鏡檢顯示 A~F0 六種回收物中蛭石與深色物質之面積比例

A、B 為顯著性差異化標示(p 值 <0.05)。(圖片由第一作者繪製)

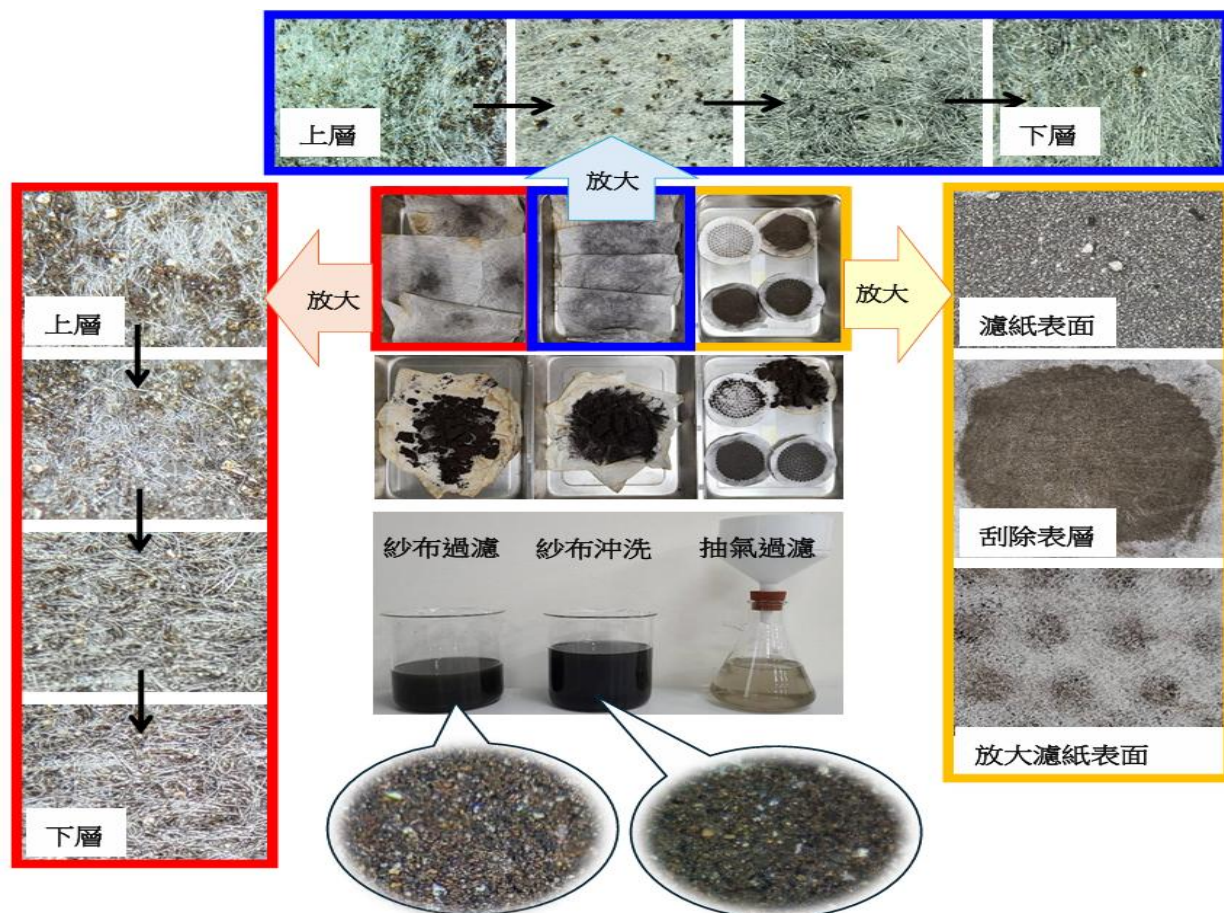


圖 11 不同方式水洗過濾結果。外框口字部位各圖是解剖顯微鏡放大圖，中間內圖為過濾後濾液與留存固體實際照片，最下方為紗布過濾與紗布沖洗後，濾液沉澱物烘乾放大圖。(濾液沉澱物觀察放大倍率 50 倍，其餘照片放大倍率皆為 6.7 倍)(圖片由第一作者繪製)。

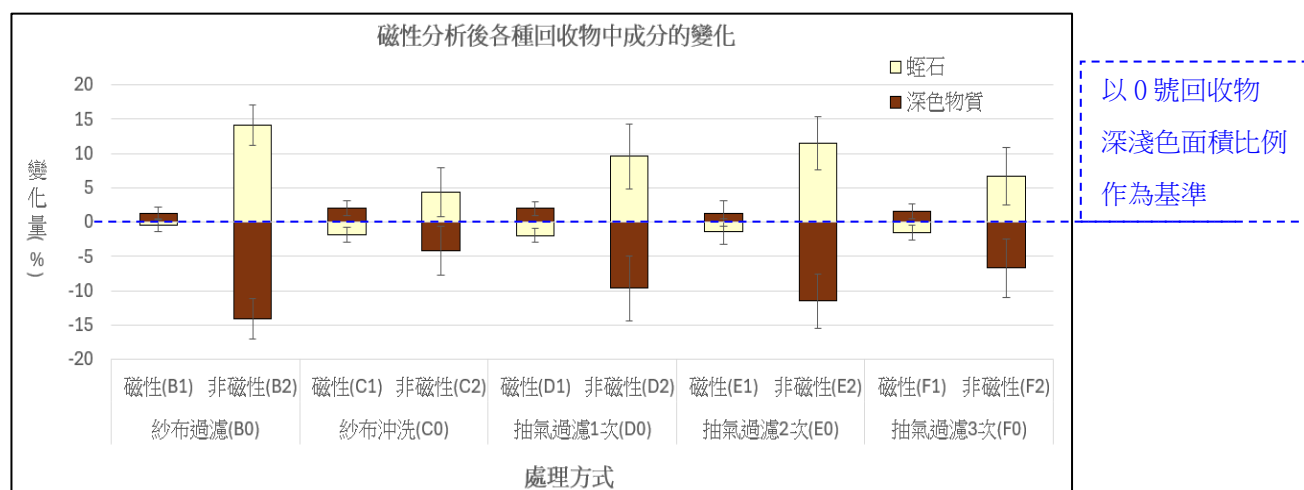


圖 12 軟磁鐵分離後回收物鏡檢顯示各回收物中蛭石與深色物質之面積比例增減情形。以水洗過濾後的回收物(0 號回收物)深淺色面積比例作為基準。(圖片由第一作者繪製)

(四)不同回收階段的回收物成分分析

選定 D0、D1、D2 三種回收物，分別作為水洗後抽氣過濾、磁性分析後不同階段的回收物代表，進行 X 光繞射分析(XRD)。分析結果如圖 13、14、15 所示，三者相比可發現磁性回收物(D1)中，主要成分應以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 為主，。

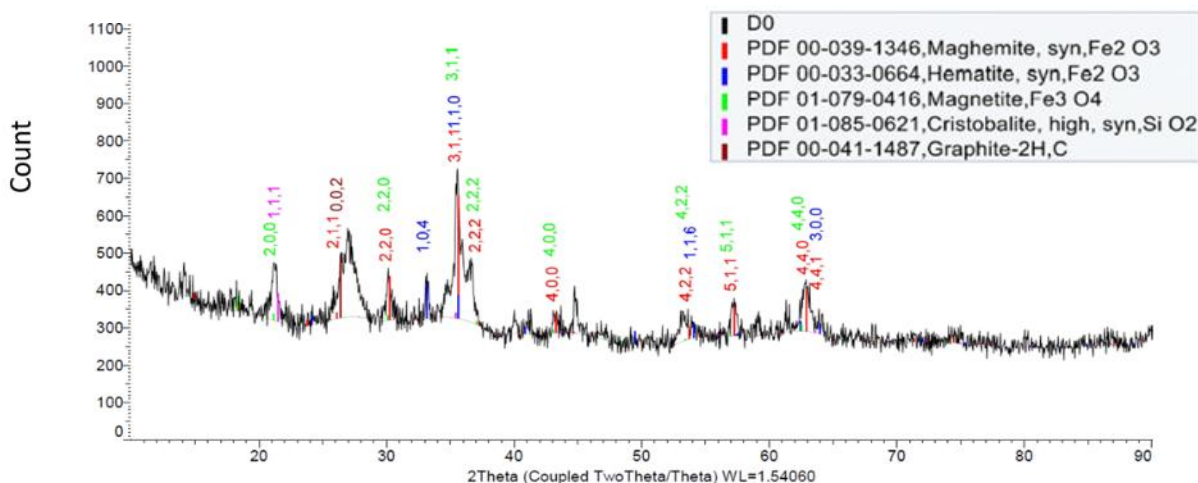


圖 13 水洗抽氣過濾後所得之回收物 D0 X 光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

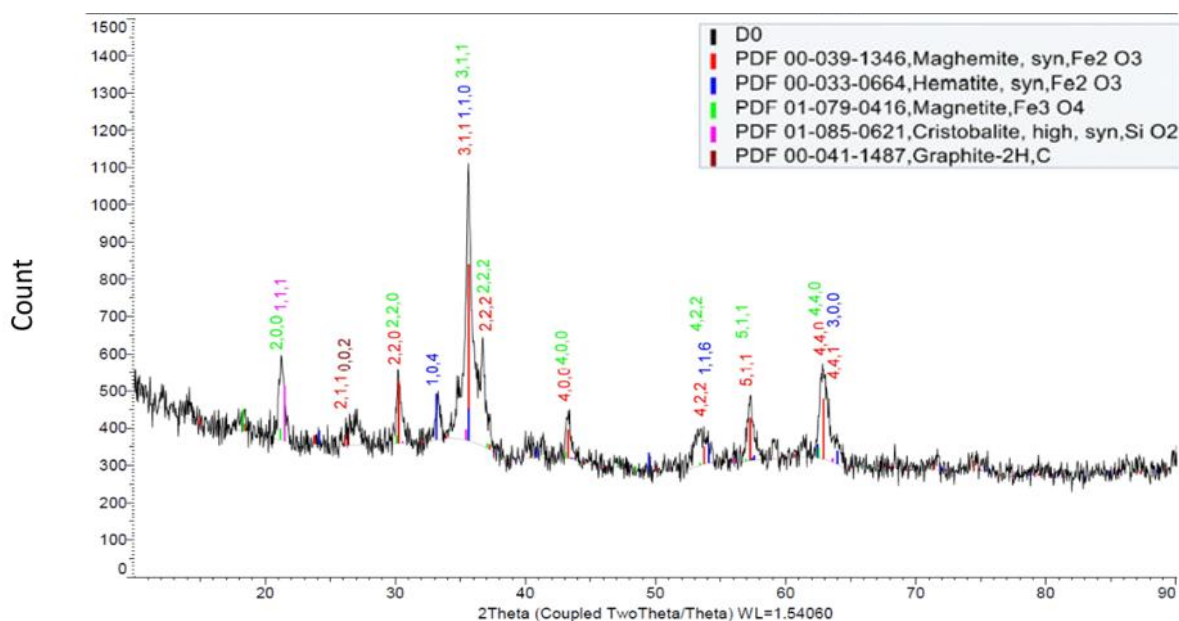


圖 14 水洗抽氣過濾、磁性分析後所得之磁性回收物 D1 X 光繞射分析結果。

(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

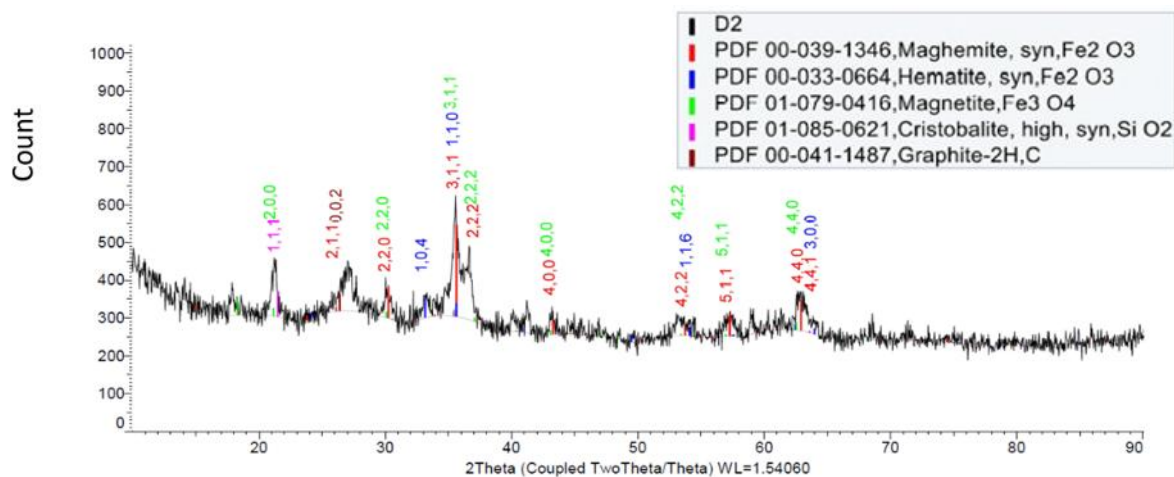


圖 15 水洗抽氣過濾、磁性分析後所得之非磁性回收物 D2 X 光繞射分析結果。

(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

(五)加速氧化實驗測試

為獲得更多回收的 Fe_2O_3 ，我們進行加速氧化實驗測試。暖暖包中的主要成分鐵粉會因氧化作用轉變為氧化鐵(Fe_2O_3)，而因暖暖包中已含有氯化鈉(NaCl)可作為催化氧化反應的助劑，提升反應速率，因此，我們設計不同水量比例的氧化實驗，來評估水分含量對氧化鐵產量的影響。實驗結果顯示，加入 2 倍重量水量(20mL)的組別產生最多的非磁性物質(圖 16)，顯示適當的水量有助於氧氣溶解並促進鐵粉氧化反應。而加入水量不足(1/2 倍及等量組別)時，水分無法完全浸潤鐵粉，影響氧化反應的進行。相反地，加入 4 倍與 8 倍重量的水量時，過多的水會降低氧氣的擴散效率，導致氧化反應速率下降。

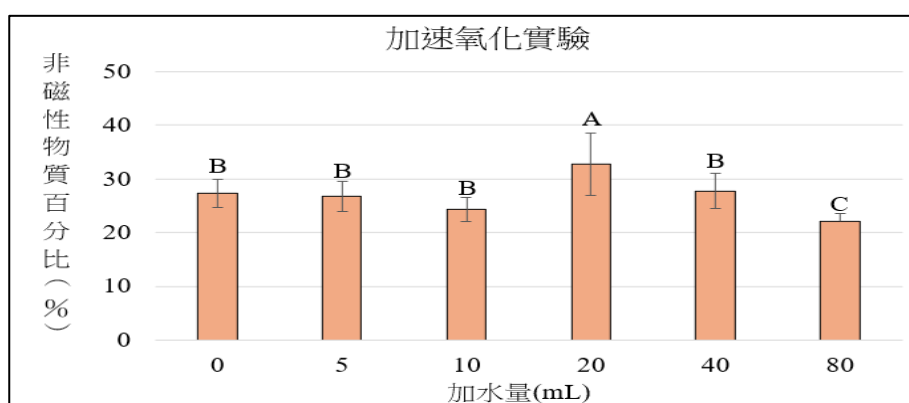


圖 16 加入不同水量以加速廢棄暖暖包內容物氧化之測試。A、B 為顯著性差異化標示 (p 值<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

總結以上的回收實驗，在回收過程中，透過三種水洗方式(泡洗、沖洗、濾紙過濾)進行粉狀物質分離。泡洗法可有效溶解鹽類及部分可溶性雜質，但碳粉與蛭石容易隨水流失。沖洗法雖能較快速地移除可溶性雜質，但同樣存在碳粉與蛭石流失的問題。使用濾紙過濾可有效回收蛭石及部分活性碳，並將大部分非磁性物質保留下來，整體回收率可達 80%以上。經由磁選方式，可進一步將磁性物質(Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)與非磁性物質(Fe_2O_3 、活性碳、蛭石)分離。 Fe_2O_3 可作為環保建材與陶瓷釉藥的再生原料，本研究的第二部份即針對 16 種回收物是否能替代釉藥中的氧化鐵進行高溫測試研究。

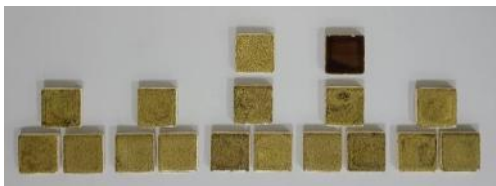
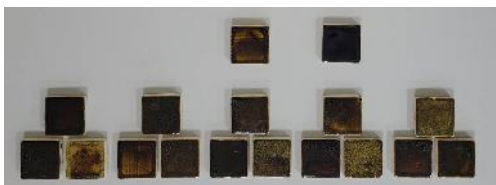
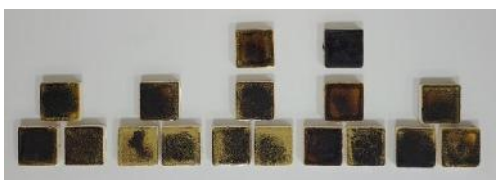

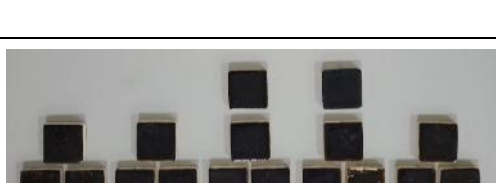




二、將回收物作為釉藥配方設計：16 種回收物高溫燒製測試

分別使用 16 種回收物替代釉藥中的氧化鐵，配置釉藥，並進行高溫燒製，燒製測試結果如表六所列。當回收物濃度為 5%、10%、15%、20%、25%時，燒製結果雖色澤各試片有所不同，但表面釉藥均無異常，但含 30%回收物的燒製結果中發現使用回收物 D2、E2、F2 之試片出現縮釉情形。

為了確認是否是因非磁性物質中殘留的活性碳還原了 Fe_2O_3 ，導致釉藥中 Fe_2O_3 減少才造成縮釉，參考鄭皓元、曾本荷、李元照(2018)等人的科展作品，使用乙醇、丙酮、正己烷三種

溶劑，分別洗滌 D2、E2、F2 粉狀物以去除碳粉，烘乾後再加入釉藥高溫燒製，結果如圖 17。去除部分碳粉後確實看到燒製後出現正常的試片。可見回收物中若存在活性碳，高溫燒製時活性碳會使 Fe_2O_3 還原，導致 Fe_2O_3 濃度減少，進而出現試片縮釉的情形。

表六 16 種回收物不同濃度(5%~30%)高溫測試結果。(所有試片擺放皆依照示意圖位置)

示意圖		<div>A：未進行任何處理</div> <div>M：標準品 (德國黑鐵)</div> <div>加水去除 NaCl</div> <div>依水洗過濾方式不同 區分出 5 種回收物</div> <div>使用磁鐵分離再分出 10 種回收物，其中 1：磁性 2：不具磁性</div> <div><div>A</div><div><div>B0</div><div>C0</div><div>D0</div><div>E0</div><div>F0</div></div><div><div>B1</div><div>B2</div><div>C1</div><div>C2</div><div>D1</div><div>D2</div><div>E1</div><div>E2</div><div>F1</div><div>F2</div></div></div>	
回收物 濃度	燒製結果	回收物 濃度	燒製結果
5%			
10%			
15%			
20%			
25%			
			<div>D2E2F2</div> <div>26%</div> <div>27%</div> <div>28%</div> <div>29%</div>
			為了解 D2、E2、F2 三種回收物燒製釉藥時，開始出現內縮的濃度，特別燒製 D2、E2、F2 三種回收物 26%~29% 試片，發現並無內縮情形。

(本表中照片由三位作者共同拍攝，第一作者彙整製表)

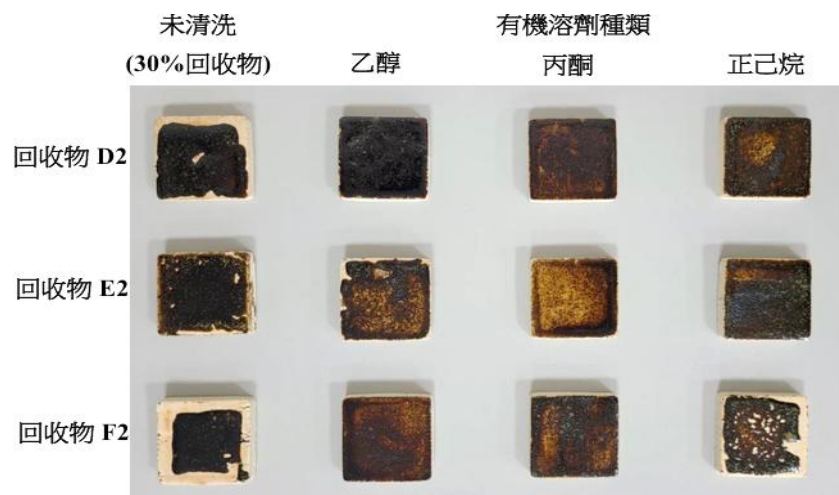


圖 17 使用三種有機溶劑移除活性碳後試片的燒製結果。對照組為 30%回收物 D2、E2、F2 燒製結果，右列是此三種回收物分別使用乙醇、丙酮、正己烷清洗後的燒製結果。(圖片由第一作者繪製)

針對暖暖包回收物取代陶瓷釉藥原料進行高濃度比例測試。將回收物依 35%~80%比例取代釉藥原料進行混合。測試樣品經過施釉與燒製後，發現隨著回收物比例增加，釉面色澤由淡黃色逐漸轉變為深褐色，並呈現霧面質感。不具磁性的物質 35%~80%均有縮釉情形(表七)。

上述證實可使用乙醇、丙酮、正己烷三種有機溶劑洗去碳粉以減緩縮釉發生，但為考量環保，我們又嘗試使用以磁性分離過後的磁性回收物 D1 進行第 18 頁提到的加速氧化的方式，加入 2 倍質量的水量，靜置一周，待 D1 中的 Fe_3O_4 自然氧化為 Fe_2O_3 後，再次進行磁性分離，分出來的非磁性物質即為 Fe_2O_3 ，且此非磁性物質(定義代號為 D1-2)中的碳粉含量應極少。使用 D1-2 回收物進行 70%、75%、80% 方形試片燒製，燒製結果(圖 18)顯示在 70%、75%、80% 三種濃度中，原本會產生縮釉的 D2 試片(成分為 Fe_2O_3 、活性碳、蛭石)，改用 D1-2 回收物(主要成分為 Fe_2O_3)燒製後，明顯改善縮釉情形，由此可知，要改善回收廢棄暖暖包燒製釉藥產生縮釉情形，關鍵在於除去更多的活性碳，故回收廢棄暖暖包、進行水洗磁性分離後，磁性回收物是較理想的釉藥替代成分，磁性回收物中的 Fe_3O_4 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 可於高溫下繼續氧化成 Fe_2O_3 ，替代原先釉藥成分，且磁性回收物中存在較少碳粉，能避免縮釉發生。

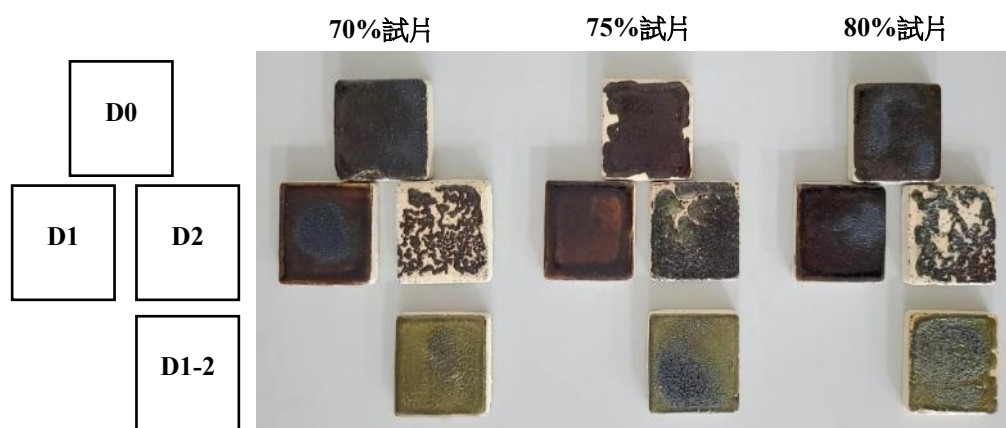


圖 18 改善高濃度回收物燒製後縮釉的方法測試結果。照片中各試片所使用的回收物如左列示意圖。

(圖片由第一作者繪製)

表七 16 種回收物不同濃度(35%~80%)高溫測試結果。(所有試片擺放皆依照示意圖位置)

<div>示意圖</div> <div><div>A：未進行任何處理</div><div>M：標準品 (德國黑鐵)</div><div>加水去除 NaCl</div><div>依水洗過濾方式不同 區分出 5 種回收物</div><div>使用磁鐵分離再分出 10 種回收物，其中 1：磁性 2：不具磁性</div><div><div>A</div><div>B0C0D0E0F0</div><div>B1B2C1C2D1D2E1E2F1F2</div></div></div>			
回收物 濃度	燒製結果	回收物 濃度	燒製結果
35%		60%	
40%		65%	
45%		70%	
50%		75%	
55%		80%	

(本表中照片由三位作者共同拍攝，第一作者彙整製表)

三、使用廢棄暖暖包之回收物製備釉藥及建材再生利用

依據回收過程的方便性與高回收率兩項原則，選定 B0、B1、B、D0、D1、D2 六種回收物，並以德國黑鐵作為對照組，製作 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、

45%、50%、55%、60%、65%、70%直徑 11.4cm 之圓形試片，燒製完成的圓形試片進行硬度測試與耐酸鹼測試。









(一)硬度測試結果

濃度%與硬度測試數值的相關性普遍較低，相關係數介於 -0.02 到 -0.05 之間，表示幾乎沒有明顯的線性關係。而各個硬度測試值（標準品、B0、B1、B2、D0、D1、D2）之間則呈現高度相關（相關係數接近 1），這可能表示測試結果在不同條件下保持一致。本實驗使用回收物不同濃度製作的磁磚釉面硬度皆於 6~7 之間，皆滿足台灣國家標準 CNS 對建材磁磚品質的規定。

(二)耐酸鹼測試

本實驗針對不同類型的磁磚樣品進行耐酸鹼測試，測試液包含 9%氫氧化鈉溶液(pH13.0)、2.9%氨水(pH11.7)、10%醋酸溶液(pH2.0)與 3%鹽酸溶液(pH0.5)等溶液，評估其對磁磚表面的影響。肉眼觀察結果顯示不同磁磚樣品對酸性溶液的耐受度存在差異。例如，低濃度部分樣品(如 B0)在鹽酸與醋酸環境下具良好的耐酸鹼性能，但 B2、D2 等樣品在同樣條件下則出現變色或腐蝕。高濃度樣品於四種酸鹼溶液的處理下，表面皆無明顯變化(表八)。

表八 不同磁磚樣品耐酸鹼測試結果。共施測 14 種不同濃度的樣品，在此僅呈現以下 3 種不同濃度之結果。

試片對應 回收物示意圖		D2	D1	D0	B2	B1	B0	標準 品
濃度	測試前				測試後			
5%								
15%								
30%								
60%								

(本表中照片由三位作者共同拍攝，第一作者彙整製表)

(三)防滑性測試

因各組試片硬度並無差異，且耐酸鹼測試高濃度試片也無明顯變化，但回收物替代釉藥的比例若超過 30%，則非磁性回收物組容易產生縮釉情形，兼顧以上幾項實驗結果，我們決定針對以 30%的 B0、B1、B2、D0、D1、D2 六種回收物釉藥燒製的試片進行防滑性測試與

吸水性測試，並以德國黑鐵作為對照組。

分別測試乾燥與潮溼時試片的最大靜摩擦係數(μ_s)，藉由測試結果推斷自製的試片磁磚之防滑性。結果顯示，乾測時，所有實驗組與對照組最大靜摩擦係數(μ_s)皆介於 1.501~1.524 之間(圖 19)，濕測時，各組 μ_s 皆介於 1.541~1.544 之間(圖 20)，顯示所測試的所有試片不管是乾燥或潮濕皆達美國標準 ANSI/NFSI B101.0-2012 要求的地板抗滑效果。

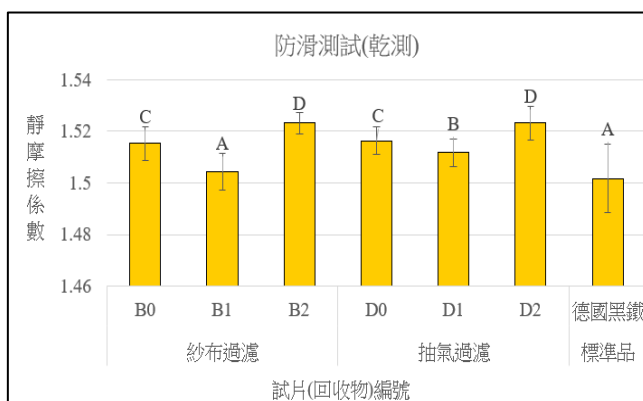


圖 19 乾燥的 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片防滑性測試。A、B、C、D 為顯著性差異化標示(p 值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

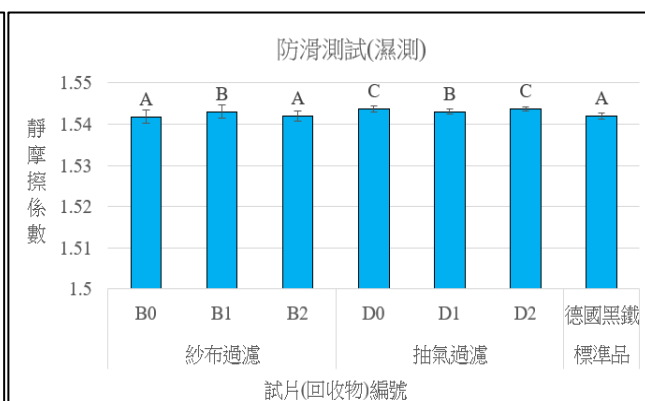


圖 20 潮濕的 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片防滑性測試。A、B、C 為顯著性差異化標示(p 值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

(四)吸水性測試

本研究採取煮沸法(經濟部標準檢驗局，2000)測試 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、德國黑鐵(標準品)7 種試片的吸水性，測試結果發現實驗組與對照組吸水率介於 4.40~6.22%(圖 21)，符合「CNS 9737 陶瓷面磚」石質面磚吸水率為 10%以下(冠軍磁磚網站)的標準。

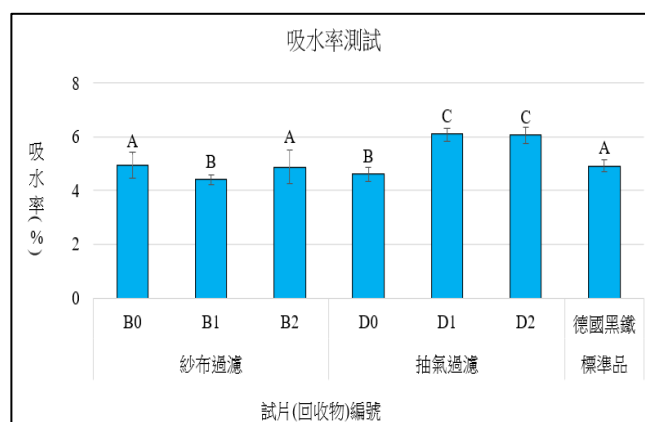


圖 21 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片吸水性測試。A、B、C 為顯著性差異化標示(p 值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

(五)30%方形試片耐酸鹼測試

透過 RGB 色碼分析後轉換為 ΔE 值 (Delta E) 進行量化比較，可用以判斷肉眼不易察覺的試片顏色變化。拍照紀錄測試前、後各試片照片中 RGB 值，再利用 Delta-E Calculator 網站將 RGB 數值轉換計算 Delta E (總色差 ΔE)，所得各組試片 ΔE 扣除極端值後，計算平均值、標準差，繪製成圖 22。歸納本實驗中不同回收物在 4 種溶液中(9% NaOH、2.9% NH_4OH 、10% CH_3COOH 與 3% HCl)處理後的 ΔE 分析結果(圖 22)成表九。

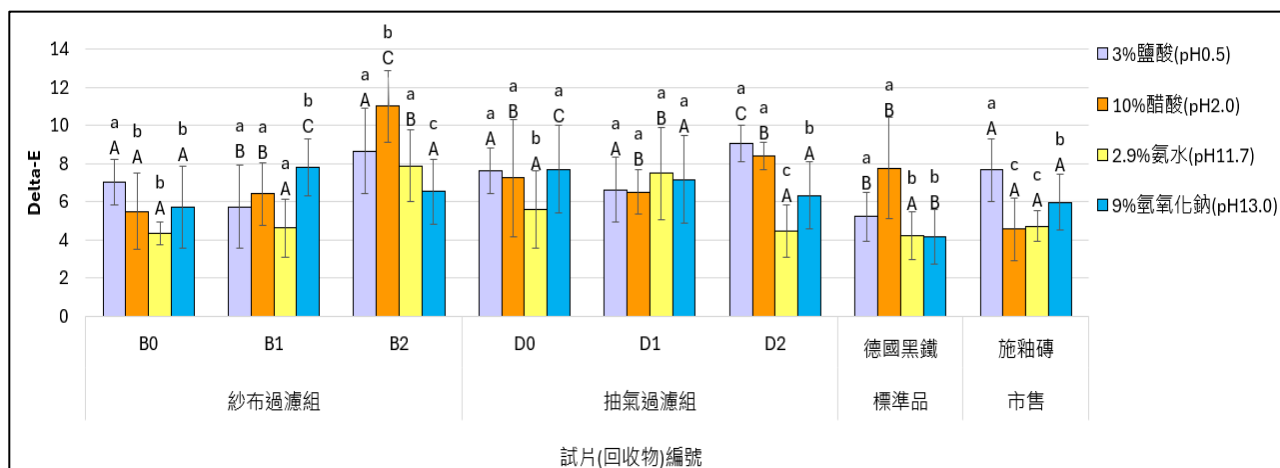


圖 22 以 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片與市售施釉磚進行耐酸鹼測試結果。圖中不同大寫字母表示相同溶液處理、不同回收物試片的顯著性差異，不同小寫字母表示相同回收物試片、不同溶液處理的顯著性差異($p < 0.05$)(數據由第二、第三作者轉換，圖片由第一作者繪製)。

表九 總結四種酸鹼溶液測試後，各組試片的耐酸鹼能力

試片編號	以市售施釉磚耐酸鹼為對照評比	同種試片的四種溶液結果相互對照
B0	皆與市售施釉磚一致(p 皆 >0.05)	較不耐強酸
B1	耐強酸能力優於市售施釉磚($p < 0.05$)	較不耐強鹼
B2	耐強酸、強鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆 >0.05)	耐強酸、強鹼能力較好
D0	耐強酸、氨水能力與市售施釉磚一致(p 皆 >0.05)	耐氨水能力相對較好
D1	耐強酸、強鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆 >0.05)	四種溶液影響皆不大
D2	耐鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆 >0.05)	耐鹼能力相對較好
德國黑鐵	耐強酸、強鹼能力優於市售施釉磚(p 皆 <0.05)	耐鹼能力相對較好
市售施釉磚		較不耐強酸、強鹼

(本表資料由三位作者共同彙整，第一作者製表)

此外，從統計分析可知，所有試片在經酸鹼處理後的 ΔE 變異程度（標準差）皆在合理範圍內，顯示試片表現穩定，具重現性。與市售釉面磚進行對照分析後發現，自製試片即便在高濃度 30%回收物條件下，其耐酸鹼性仍不遜於市售品，甚至在某些溶液下的 ΔE 變化更小，顯示本研究之回收釉藥具良好化學穩定性，適合應用於建材表面。

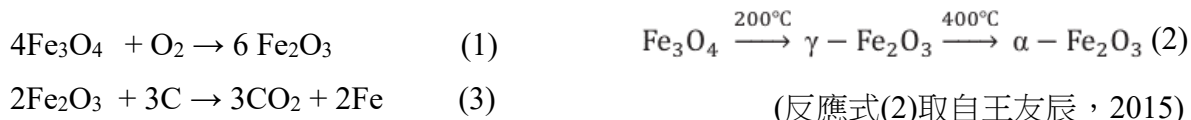
從 ΔE 的變化來看，大部分試片在鹽酸或氫氧化鈉處理後產生的色差最為顯著，可能因這兩種溶液的 pH 值極端，對釉面中鐵氧化物的化學鍵造成干擾。相對而言，B0、B1、D0、D1 等試片在醋酸與氨水處理下的 ΔE 變化趨於穩定，表示以此些回收物製作釉藥在弱酸與弱鹼環境下表現良好，對未來室內裝潢或一般潮濕場所之建材使用具高度可行性。

綜合分析結果，本研究所製備之 30%回收釉藥試片在耐酸鹼測試中表現出色，搭配色碼與 ΔE 量化工具，有效補足傳統肉眼觀察的侷限，進一步驗證廢棄暖暖包回收製釉的實用性與環保潛力。未來若能進一步優化回收流程並控制活性碳含量，有望提升釉面穩定性與色彩一致性，使之更適合推廣至建築與陶瓷產業之實際應用。

伍、討論

一、有關磁性回收物高溫下的進一步反應

文獻指出當高溫時， Fe_3O_4 與 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 能繼續進行氧化反應(反應式(1))，反應溫度如下反應式(2)。非磁性回收物中包含 Fe_2O_3 、活性碳與蛭石，當溫度達 $400\sim 700^\circ\text{C}$ 時，活性碳氧化(李松柏，2024)，氧化反應將導致 Fe_2O_3 減少(反應式(3))，故推測此為非磁性回收物在 30% 以上的釉藥燒製時出現縮釉的主因。



二、節約試算

若以平均淨重 62.31 ± 1.62 克之廢棄暖暖包經水洗(回收率約 80%)、磁性分析(回收率約 70%)後能獲得約 34.9 克的磁性回收物。

以此些回收物取代 10% 氧化鐵(作為釉藥著色劑常用的濃度)進行釉藥燒製，則需同時使用約 628.2 克($34.9 \div 0.1 \times 1.8$)母液，母液與回收物共 663.1 克，加水混和後約可製作 33 塊直徑 11.4 公分的大圓試片釉面，此相當於 3366.6cm^2 的面積，以此比例對應 40×40 公分磁磚面積，則回收一包廢棄暖暖包所得之磁性回收物將能燒製約 2 塊 40×40 公分的磁磚釉面。若直接使用水洗後之回收物進行釉藥燒製，則能燒製 3 塊 40×40 公分的磁磚釉面。

三、靜摩擦係數(μ_s)常被用來評比地面滑溜的程度。1990 年美國的「美國公民意外傷殘法案」指出公共場所人行地面摩擦係數不得小於 0.6，斜坡部位摩擦係數不得小於 0.8；美國標準 ANSI/NFSI B101.0-2012 則要求：乾燥且無污染物的地面，乾燥狀態下靜摩擦係數不小於 0.50；有時潮濕或有污染物的地面，乾燥狀態下靜摩擦係數不小於 0.50 且潮濕狀態下靜摩擦係數不小於 0.60；有潮濕或有污染物的地面，潮濕狀態下的靜摩擦係數不小於 0.60(內政部建築研究所委託研究報告，2022)，依照上述標準審視本研究中進行防滑測試的所有試片，可發現所測試的試片乾燥狀態(μ_s ：1.501~1.524)與潮濕狀態(μ_s ：1.541~1.544)皆達防滑標準。

四、比較不同回收物的防滑性 (圖 19、圖 20)

相同水洗過濾方式的比較可以發現，是否經過磁性分析，測定的最大靜摩擦係數 μ_s 明顯具有差異，紗布過濾組 μ_s ：B2>B0>B1(p 值皆<0.05)，抽氣過濾組 μ_s ：D2>D0>D1(p 值皆<0.05)，而圖 12 的結果也提到，相同水洗方式所得的 2 號回收物蛭石比例多於 1 號

回收物，結合兩者，故推測相同水洗過濾方式的回收物其防滑能力應與試片瓷磚中的蛭石比例有關。

不同水洗過濾方式所得到的回收物最大靜摩擦係數 μ_s 比較結果則是只有 D1>B1(p 值<0.01)，D0 與 B0、D2 與 B2 皆無差異性存在(p 值皆>0.05)，此結果與圖 10 提到的「抽氣過濾的 D 組蛭石比例高於紗布過濾的 B 組」相對照，使我們再次相信試片中的蛭石比例與其防滑能力有關，蛭石比例較高的試片，最大靜摩擦係數(μ_s)越大，防滑性越好。

「蛭石比例較高的試片，最大靜摩擦係數(μ_s)越大，防滑性越好」的推論在濕測的結果中並不存在，且各組的最大靜摩擦係數(μ_s)都是濕測時大於其乾燥時，推測因濕測時試片表面與斜坡表面皆潮濕，故水分子與物體間之附著力、水分子彼此間之吸引力皆有可能導致試片需要更高的角度才會滑動，也因為水作用力的影響，讓我們不易觀察到濕測時蛭石比例與試片防滑性的關係。

五、耐酸鹼測試

Delta E (總色差 ΔE)由國際照明委員會所制定，用來表示兩種色彩差異的度量標準， ΔE 數值愈接近 0，代表兩顏色間的色差愈小(支點科技網站)。色度分析的研究方法已廣泛被應用於食品科學、與色彩相關的研究中。研究透過將回收物製成 30%濃度之方形試片，進行耐酸鹼測試與色碼分析，進一步使用總色差(ΔE 值)評估試片於強酸、強鹼與弱酸、弱鹼環境下的色澤變化。結果顯示，多數試片在酸鹼浸泡 24 小時後仍能維持穩定外觀，與市售釉面磚對照 ΔE 值後無明顯差異。此結果顯示，回收暖暖包製釉材料應用於建材具高度潛力。

六、XRD 測試

XRD 結果確認回收過程中各階段物質組成差異，本研究針對使用後暖暖包粉體(A0)、抽氣過濾回收物(D0)、磁性分離後的磁性物質(D1)與非磁性物質(D2)進行 X 光繞射分析(XRD)。結果顯示，A0 樣本以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 為主要成分，與預期 Fe_3O_4 不同，推測因廢棄暖暖包長時間接觸空氣而進一步氧化所致。D0 與 D1 皆呈現明顯的磁性氧化鐵訊號，證實其仍保有磁性 Fe 氧化物(如 Fe_3O_4 或 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)；而 D2 則顯示為非磁性 Fe_2O_3 主成分，並含有部分非金屬雜質(如蛭石)。XRD 結果與磁性分析、顯微鏡觀察結果相符，支持本研究利用磁性分離有效區分不同氧化鐵成分的可行性。進一步驗證 D1 經過氧化轉化後可作為高純度 Fe_2O_3 來源，對釉藥著色與穩定性提供可靠支持，也說明材料分離過程對品質控制的關鍵性。

陸、結論

- 一、研究針對廢棄暖暖包的回收再利用，透過多階段的回收方式，探討回收物應用於陶瓷釉藥及建材製備的可行性。從研究動機出發，暖暖包因其大量使用後隨意丟棄，造成環境污染的問題，如何有效回收並再利用成為重要議題。實驗結果顯示，透過水洗去除氯化鈉的方式，可有效提升回收物的純度，並避免高溫燒製時產生有害氣體。三種水洗過濾方式中，以濾紙抽氣過濾法的回收率最高，達 80%以上，顯示此方式最能保留暖暖包中的鐵氧化物及蛭石成分。
- 二、本研究透過實驗證實，廢棄暖暖包經適當的回收程序可有效再利用於陶瓷釉藥及建材製備。水洗去除氯化鈉、磁性分離及加速氧化等階段，可提升回收物純度，並促使鐵氧化物轉化為非磁性 Fe_2O_3 。濾紙抽氣過濾法為最佳回收方式，可達到最高的回收率，並保留最多的鐵氧化物及蛭石。透過水洗去鹽、磁性分離與加速氧化等步驟，回收物中之鐵氧化物可有效轉化為非磁性的 Fe_2O_3 ，提高其作為釉藥原料的穩定性與著色能力。XRD 分析與色碼分析證實此趨勢，且濾紙抽氣過濾後所得回收物具較高純度與應用潛力，為本研究推薦的最佳處理方式。
- 三、在釉藥應用方面，回收物可成功取代 35%至 70%的氧化鐵原料，並呈現穩定的色澤變化。然而，過高比例(30%以上)的回收物可能影響釉層穩定性，需透過去除碳粉等方式改善釉藥品質。建材再生利用實驗證明，回收物可有效增加建材強度及耐候性，並兼具環保效益。在建材應用層面，30%濃度回收物製成之釉面磁磚，於耐酸鹼測試中表現穩定，與市售釉面磚對照 ΔE 值後無明顯差異。硬度測試結果皆介於莫氏 6~7 之間，顯示結構堅固。進一步的防滑性測試顯示，自製試片在乾燥與潮濕環境下皆具良好摩擦係數(μs)，具有實用的防滑功能。吸水率測試結果亦顯示回收釉面可有效阻隔水分滲透，達到 CNS 瓷質面磚之吸水標準，具備優良的耐候與耐久性能。
- 四、透過本研究結果，證實廢棄暖暖包回收具有可行性與環保效益，為資源再生與廢棄物管理提供創新方案。未來可進一步優化回收程序，並擴展回收物應用範疇，促進資源循環與永續發展。政策推動與回收機制的建立，將有助於提升民眾參與度，實現資源永續利用的目標(SDGs 指標 12-Responsible Consumption and Production)。

柒、參考文獻

1. 王友辰(2015)。奈米鐵氧化物之製備及特性研究。國立屏東大學應用物理系光電暨材料碩士班 碩士論文。
2. 李松柏(2024)。利用廢棄暖暖包粉體吸附水中重金屬鉛離子研究。長庚大學化工與材料工程學系 碩士論文。
3. 許宏銘(2004)。模擬都市垃圾衍生燃料及燃煤共同 燃燒之污染物排放特性研究。逢甲大學環境工程與科學學系 碩士論文。
4. 陳誼安(2024)。以暖暖包廢棄物去除染料橙黃 G 之研究。長庚大學化工與材料工程學系 碩士論文。
5. 游翊洋(2022)。自廢棄暖暖包回收鐵劑並應用於降解染料廢水之研究。明志科技大學化學工程系生化工程碩士班 碩士論文。
6. 蔣佩珊(2018)。暖暖包回收鐵進行芬頓反應去除 Alachlor 之研究。國立中興大學環境工程學系 碩士論文。
7. 葉名倉、劉如熹、邱智宏、周芳妃、陳偉民、吳明禧、陳昭錦(2024)。高一化學。南一出版公司。
8. 鄭皓元、曾本荷、李元照(2018)。碳無關紙-自由基對碳粉色素之降解。中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 高級中等學校組 化學科 作品。
9. 環境部新聞專區。使用後暖暖包請交由清潔隊垃圾車妥善處理-取自環境部網站 <https://enews.moenv.gov.tw/Page/3B3C62C78849F32F/10c1b94c-aaab-4b18-b0e8-c540aafa0d4b>
10. 洪玲明(2021)。暖暖包之亂！你不知道的缺貨內幕。取自 <https://tw.news.yahoo.com/%E7%8D%A8-%E6%9A%96%E6%9A%96%E5%8C%85%E4%B9%8B%E4%BA%82-%E4%BD%A0%E4%B8%8D%E7%9F%A5%E9%81%93%E7%9A%84%E7%BC%BA%E8%B2%A8%E5%85%A7%E5%B9%95-090035635.html>
11. 宋瑞文(2021)。用過暖暖包不浪費 日本募資計畫回收暖暖包淨化水質。環境資訊中心，取自 <https://e-info.org.tw/node/233031>
12. 陳燕華(2013)。礦物科技：神奇的奈米磁鐵礦。科技大觀園 取自 <https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000003/detail?ID=4flafcb0-0217-4297-b41e-82a52cffd031>
13. Money DJ 理財網。鐵礦石。取自 <https://www.moneydj.com/kmdj/wiki/wikiviewer.aspx?keyid=8b03388d-83d6-4178-aa85-0c2a143dc1ab>
14. 地質百科。赤鐵礦、磁鐵礦。地質知識服務網地質百科 取自 <https://tw.georef.gsmma.gov.tw/GipOpenWeb/wSite/ct?xItem=125797&ctNode=1233&mp=105>
15. 網路版 ImageJ 軟體之使用。 <https://ij.imjoy.io/>
16. 色碼選取器。PEKO STEP 網站。取自 <https://www.peko-step.com/tool/imageeditor/index.php?lang=zhtw&type=3>
17. 內政部建築研究所委託研究報告(2022)。各類使用場所騎樓地坪防滑性能之研究。取自 <9ffdec4a-190c-4200-829a-8b9309180746.pdf>
18. 經濟部標準檢驗局(2000)。陶瓷面磚試驗法—第 3 部：吸水率、視孔隙度及體密度試驗法。取自 https://www.cnsonline.com.tw/?node=hist-result&locale=zh_TW
19. 冠軍磁磚。CNS 對磁磚品質的規定。取自 <https://www.champion.com.tw/article/2098>
20. 支點科技。精密色差光學測量儀原理。取自 <https://www.fulcrum-technology.com/principle-of-colorimeter>
21. Delta-E Calculator。利用 RGB 值轉換成 Delta E (總色差 ΔE)。取自 <https://colormine.org/delta-e-calculator>

【評語】 052412

本研究針對回收之廢棄暖暖包，採用水洗去鹽、磁性分離與加速氧化實驗等方法，將其鐵氧化物有效轉化成非磁性 Fe_2O_3 ，經 XRD 與色碼分析，驗證採用濾紙抽氣過濾方法所得之回收物，具較高純度與應用潛力，提高其作為釉藥原料穩定性與著色能力。並進行多項測試以達到建材應用之標準。本實驗設計與規劃整體相當完整，除了分析各種前處理對成分之影響外，進一步增加前處理之步驟以達到所需之釉藥成分，更針對不同成分所發生之問題進行解決(縮釉)，最後更進行一系列測試，以分析釉層之穩定性。整體實驗討論與結果內容相當充實，並且透過系統性的分析歸納出各步驟可能之原因並進行改善，較為可惜的部分為蛭石對釉層的優劣無過多的贅述，難以判別蛭石是否該先行分離亦或虛保有一定比例，建議也可針對釉層之顏色變化與均勻性進行探討，分析釉藥成分組成與其關聯性，另外，實驗成果中回收率達到 80%以上，這一數據是如何計算的也需要在進一步說明，另外黃色由那一類金屬氧化物？所有陶瓷試片於陶瓷試片莫氏硬度量測主要是由陶瓷試片本身的硬度大小而非上層陶瓷試片所決定，這就說明為何所有試片莫氏硬度為 6~7，此部分可能需要在驗證。

作品海報

溫「暖」「釉」美麗 -

利用廢棄暖暖包製備陶瓷釉藥及
建材再生利用之研究

摘要

本研究探討廢棄暖暖包回收作為陶瓷釉藥及建材的可行性。暖暖包使用後主要成分為鐵氧化物（ Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 ），經水洗、磁性分離與高溫燒製回收後應用於陶瓷釉藥。水洗階段採用濾紙抽氣過濾法可有效去除氯化鈉（ NaCl ），回收率達80%以上。XRD分析顯示，回收物中以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 為主，證實回收後具釉藥著色潛力。釉藥燒製測試顯示，回收物取代35%至70%氧化鐵可維持穩定色澤，超過50%部分試片出現縮釉，經溶劑處理可改善。所有試片莫氏硬度為6~7，符合CNS建材標準。耐酸鹼測試中，跟市售的磁磚總色差無差異，具穩定色澤與耐腐蝕能力。防滑測試結果顯示乾濕狀態下皆具良好摩擦係數，吸水率亦符瓷質面磚規範。廢棄暖暖包可成功再利用於陶瓷與建材，兼具環保與經濟價值。

壹、研究動機

- 測試廢棄暖暖包的除溼能力(圖1)(圖2)。
- 廢棄暖暖包若大量丟棄進入焚化爐，會增加戴奧辛產生的風險(許宏銘，2004)。
- 製作釉藥時需加入氧化鐵，且廢棄暖暖包中含氧化鐵。
- 本研究希望透過對廢棄暖暖包的再利用，尋求開發陶瓷釉藥和建材的可行性，以達減少垃圾、保護環境的目的。

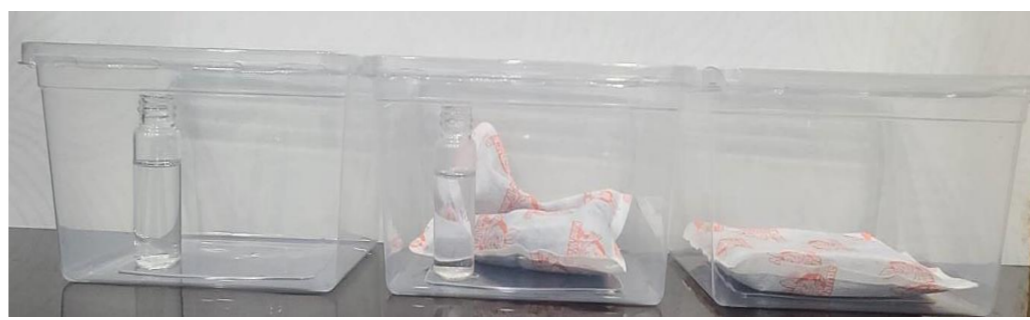


圖1 廢棄暖暖包除溼能力測試裝置左盒：水、中盒：水+暖暖包、右盒：暖暖包。
(照片由第三作者自行拍攝)

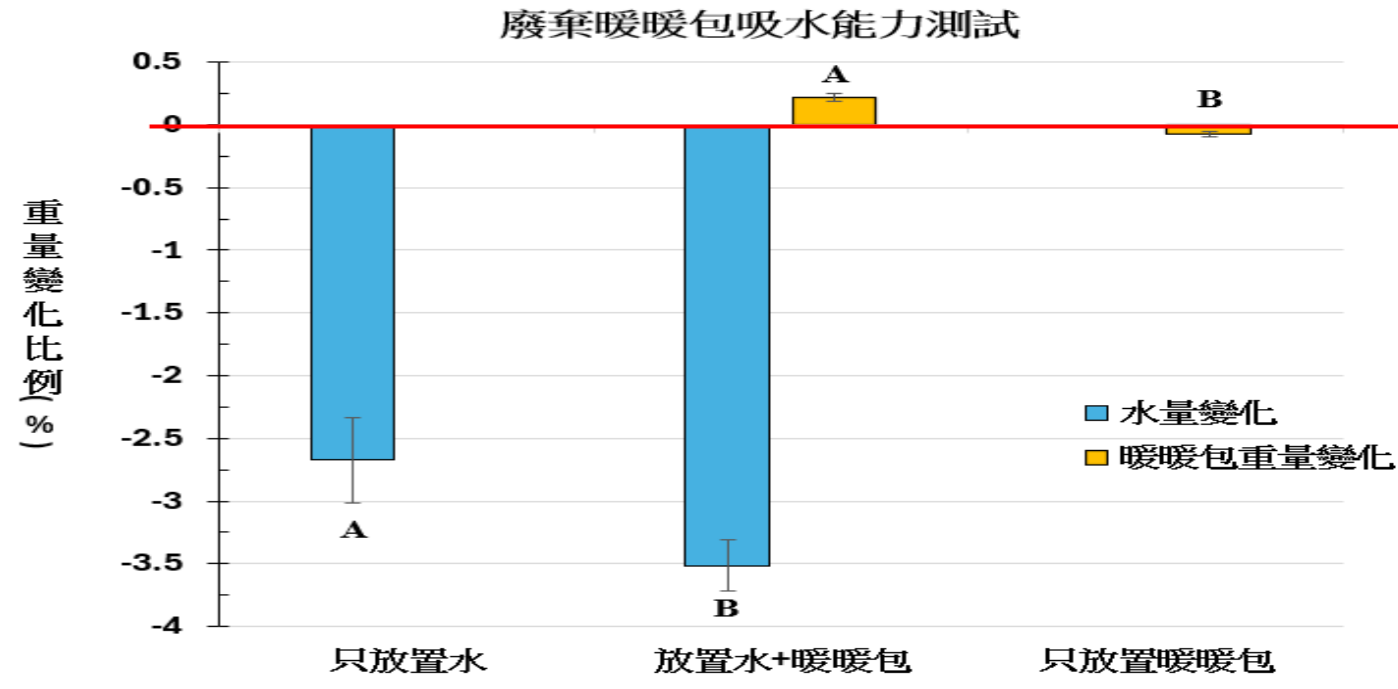


圖2 廢棄暖暖包除溼能力測試結果。A、B為顯著性差異化標示(p值皆<0.001)。(圖片由第三作者繪製)

貳、研究目的

- 回收廢棄暖暖包，並探討不同回收方式與階段的回收物之差異。
- 研究將廢棄暖暖包作為陶瓷釉藥的配方設計，並測試其燒成效果和穩定性。
- 探討利用廢棄暖暖包材料製成的釉藥應用於建材的可行性，包括釉層附著力、耐候性及環保性。
- 評估此材料在建材實際應用中的優劣勢，為建材開發提供新思路。

參、文獻回顧

- 根據陳誼安(2024)的研究，使用後之小白兔暖暖包主要產物應為 Fe_3O_4 與少量 Fe_2O_3 。 Fe_3O_4 具磁性、 Fe_2O_3 不具磁性， Fe_2O_3 被還原性較好， Fe_3O_4 可進一步氧化成 Fe_2O_3 (陳燕華，2013)。
- 燃燒系統中若含氯，燃燒後將產生金屬氯化物，除對爐體造成衝擊損壞外，也會造成酸雨與戴奧辛的汙染 (許宏銘，2004)。
- 加熱暖暖包粉的過程中，重量發生變化，主要可分為(1)150℃以下的水分散失；(2)230℃開始鐵粉開始氧化；(3)400~700℃活性碳氧化三個階段 (李松柏，2024)。
- 廢棄暖暖包粉再利用實例：用以吸附鉛離子、銅離子、活性染料，或回收鐵離子，藉其催化能力降解土黴素、去除除草劑、處理廢水(李松柏，2024；陳誼安，2024；游翊洋，2022；蔣佩珊，2018)。

肆、研究方法

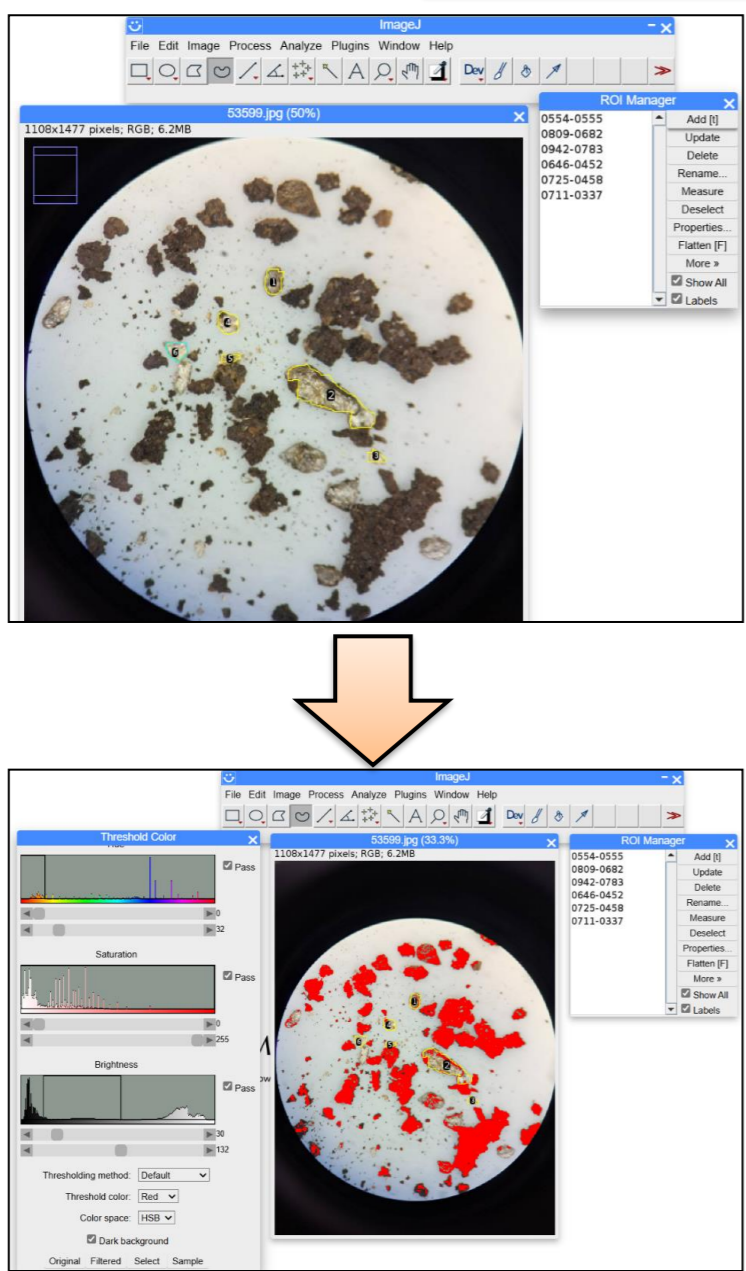
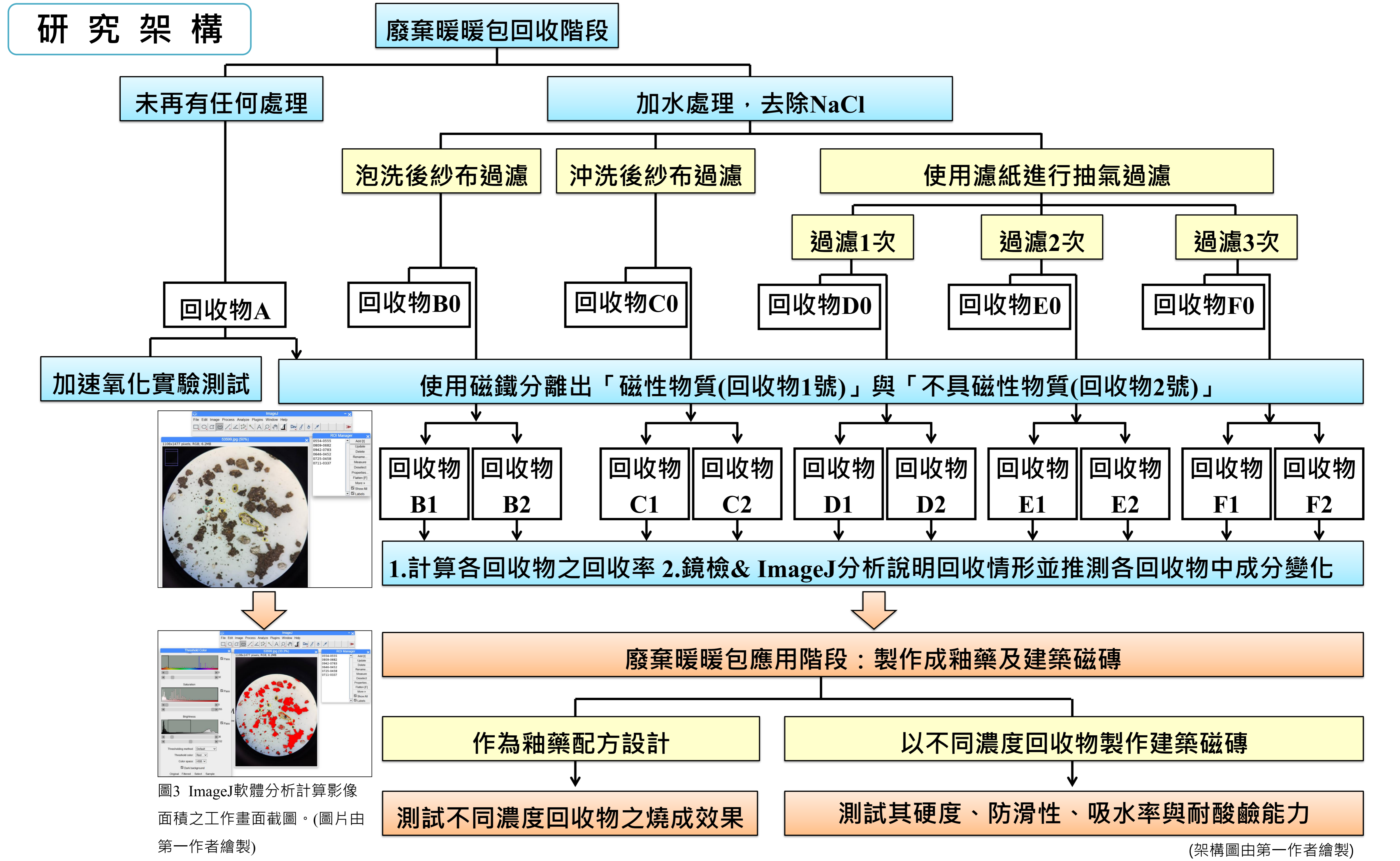


圖3 ImageJ軟體分析計算影像面積之工作畫面截圖。(圖片由第一作者繪製)

伍、研究結果

一、「廢棄暖暖包回收」階段

(一)反應前後各成分含量推算

表一 推算小白兔暖暖包使用前各成分的重量(若使用前總重為56.31±1.99克)。

小林製藥公司表定比例(證書號數：TW 1849167B)	使用前重量(克)
鐵粉30~60質量%	16.89±0.60 ~ 33.79±1.19
活性碳5~23質量%	2.82±0.08 ~ 12.95±0.37
NaCl 1~5質量%	0.56±0.02 ~ 2.82±0.10
蛭石或吸水性樹脂5~10質量%	2.82±0.10 ~ 5.63±0.20

(表一由第一作者繪製)

使用後(反應後)所得未反應完全的鐵與鐵氧化物混合之重量約40.91克。

不只一種鐵氧化物，主要應為具磁性的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

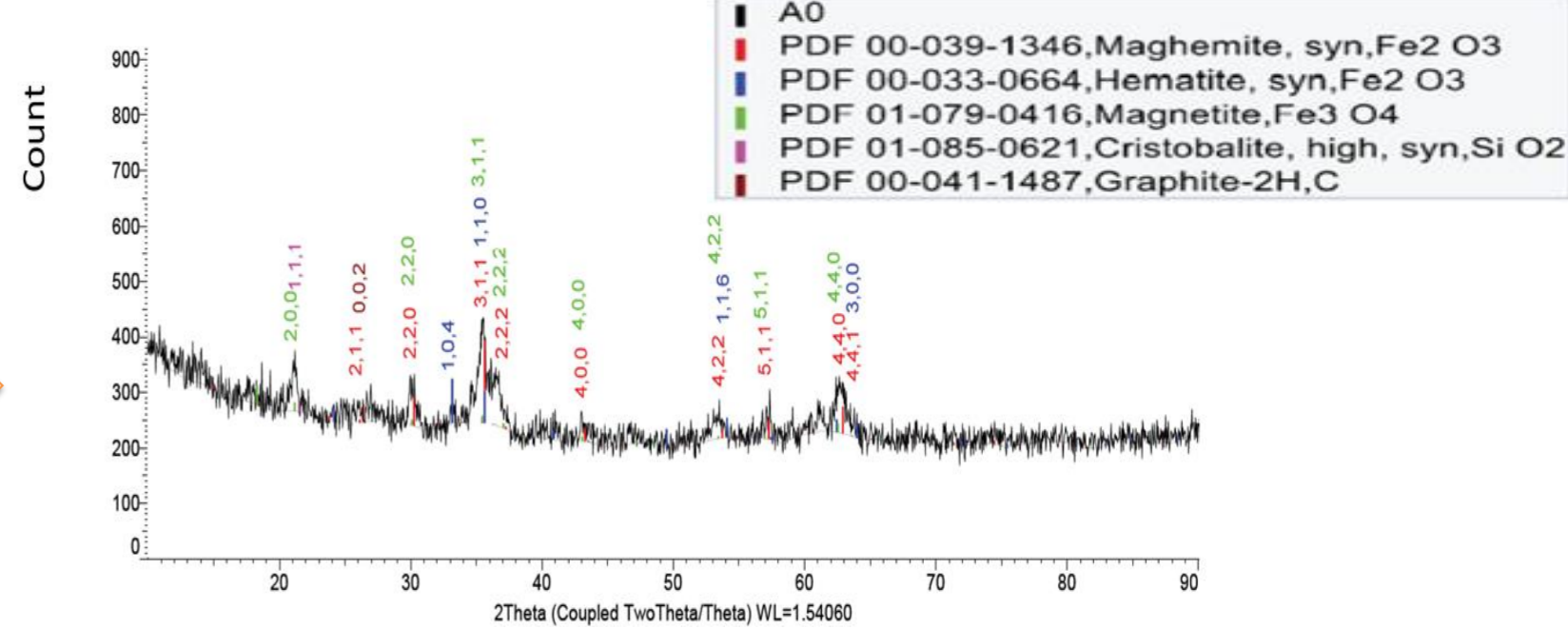


圖4 使用後暖暖包粉體之X光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

(二)各階段所得之各項回收物的回收率

1. 水洗除去NaCl階段：各組回收率皆達80%以上，且「抽氣過濾1次」回收率最高(p值皆<0.05)(圖5)。
2. 磁性分析後各組回收率無差異性存在(p值皆>0.05)，顯示磁性與非磁性物質回收率與過濾方式無關，應與廢棄暖暖包反應程度、產物量有關。(圖6)

(三)16種回收物中各成分比例變化

1. 解剖顯微鏡觀察各回收物(表二)。
2. 利用ImageJ軟體計算蛭石與其他深色物體面積比例(圖7)，配合實際觀察(圖8)，認為使用紗布過濾(B0)，會造成碳粉與蛭石大量流失，選用濾紙抽氣過濾 (D0~F0)，只有少部分碳粉卡在濾紙中，大部分物質都被回收回來。
3. 磁性分析後(圖9)，磁性回收物(各組1號回收物)蛭石比例皆減少、深色物質比例增加；非磁性回收物(各組2號回收物)蛭石比例增加、深色物質比例減少(各組與其0號回收物之差異性分析p值皆<0.001)。

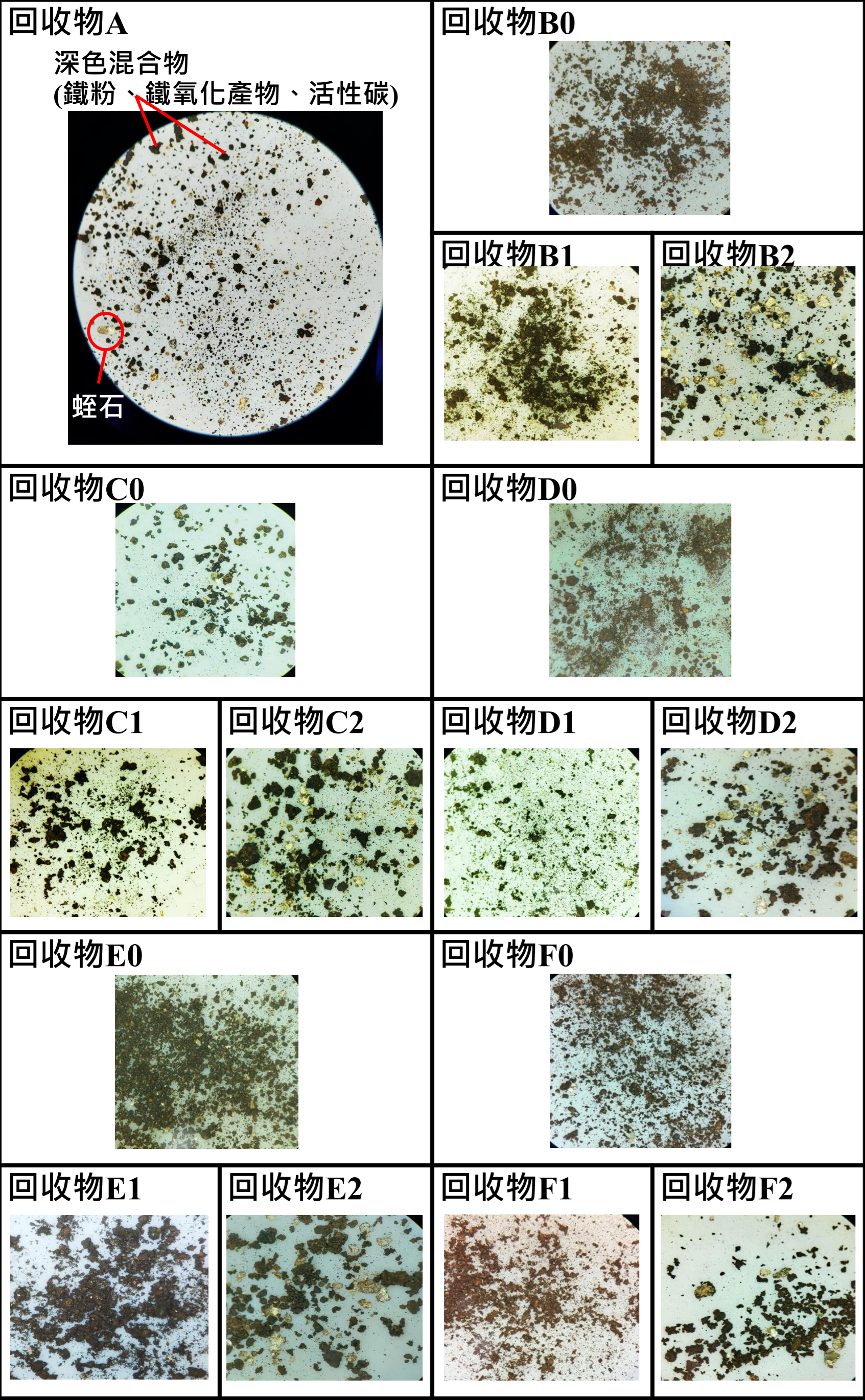
(四)不同回收階段的回收物成分分析

選定D0、D1、D2三種回收物，分別作為水洗後抽氣過濾、磁性分析不同階段的回收物代表，進行X光繞射分析(XRD)。分析結果如圖10、圖11、圖12所示，三者相比可發現磁性回收物(D1)中，主要成分應以γ- Fe₂O₃為主。

(五)加速氧化實驗測試

加入回收物之2倍重量的水量(20mL)可使產生最多的非磁性物質(圖13) (p值<0.05)，顯示適當的水量有助於氧氣溶解並促進鐵粉氧化反應。

表二 16種回收物鏡檢結果示意圖。(放大倍率統一為20倍)



(表格由第一作者繪製，圖片由三位作者共同拍攝)

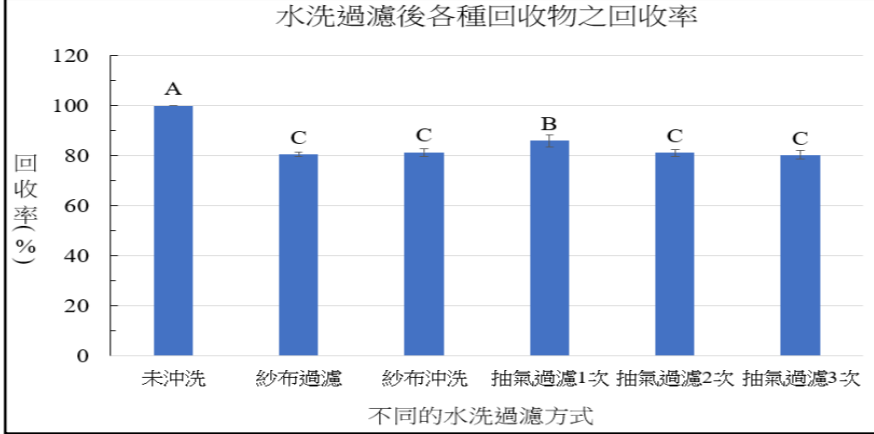


圖5 不同水洗過濾方式對回收率的影響。A、B為顯著性差異化標示(p值皆<0.001)。(圖片由第一作者繪製)

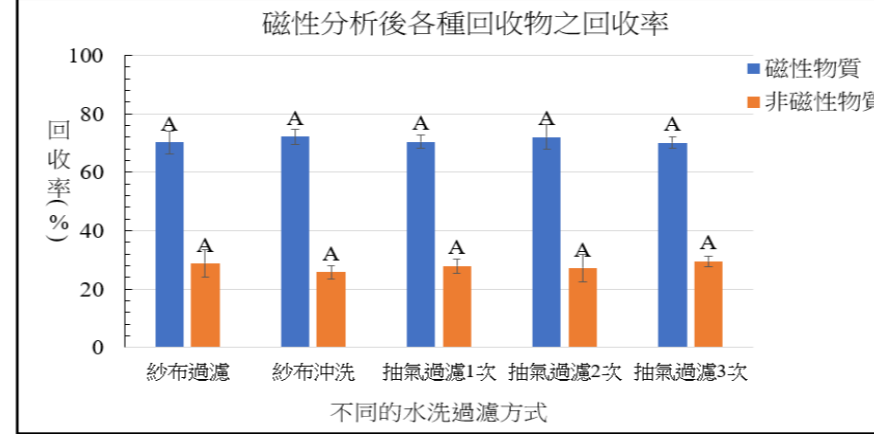


圖6 不同水洗過濾方式對磁性分析後的回收率之影響。A為顯著性差異化標示(p值皆>0.05)(圖片由第一作者繪製)

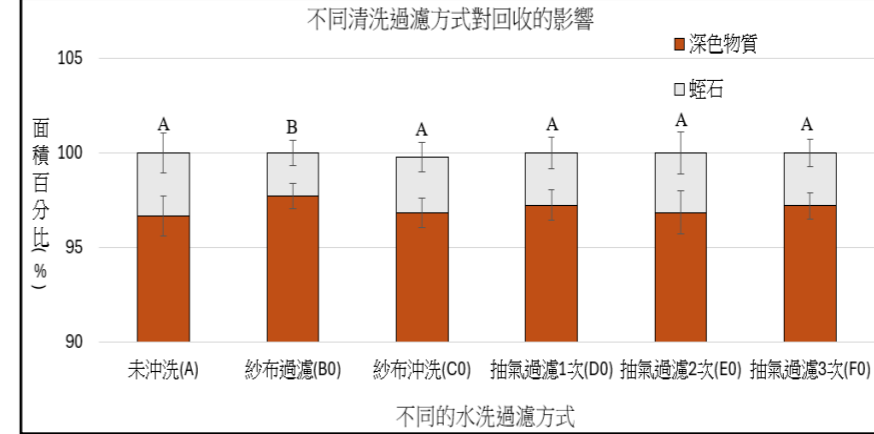


圖7 不同方式水洗過濾後鏡檢顯示A~F0六種回收物中蛭石與深色物質之面積比例(A、B為顯著性差異化標示(p值<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

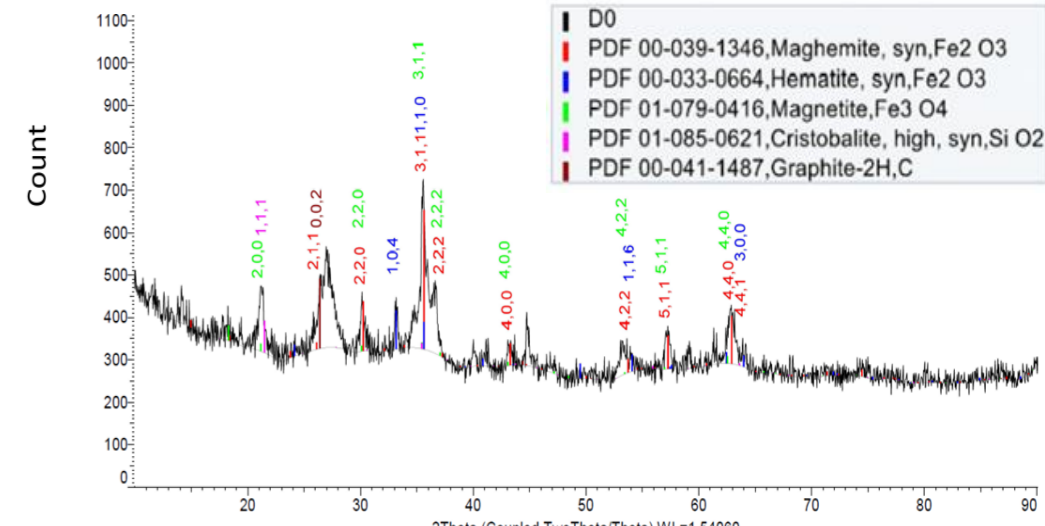


圖10 水洗抽氣過濾後所得之回收物D0 X光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

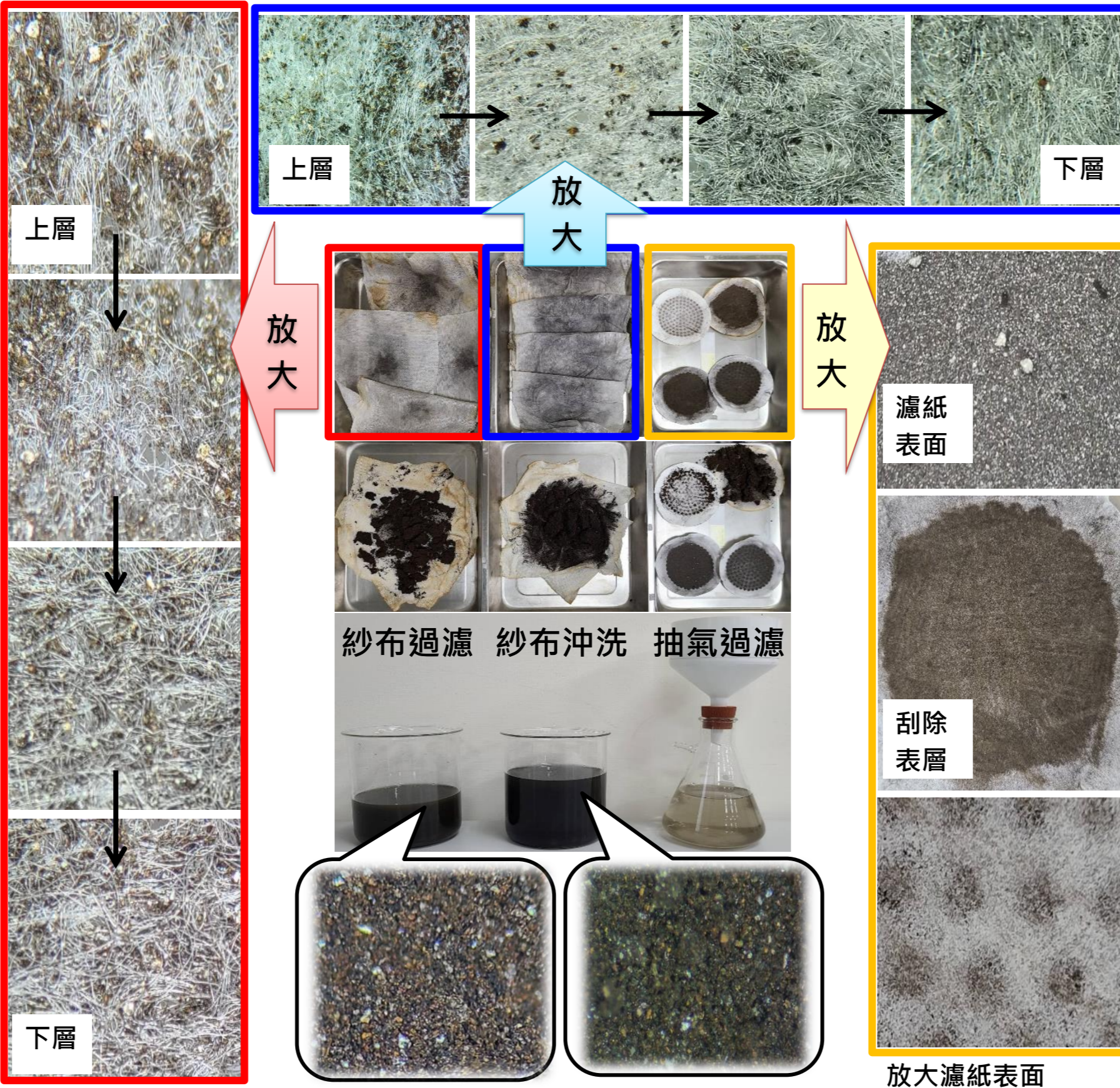


圖8 不同方式水洗過濾結果。外框口字部位各圖是解剖顯微鏡放大圖，中間內圖為過濾後濾液與留存固體實際照片，最下方為紗布過濾與紗布沖洗後，濾液沉澱物烘乾放大圖。(濾液沉澱物觀察放大倍率50倍，其餘照片放大倍率皆為6.7倍)(圖片由第一作者繪製)。

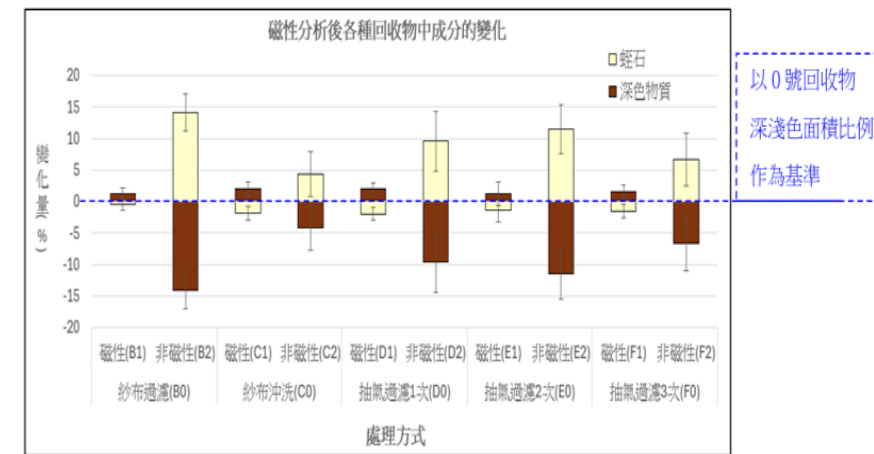


圖9 軟磁鐵分離後回收物鏡檢顯示蛭石與深色物質之面積比例增減情形。以水洗過濾後的回收物深淺色面積比例作為基準(各組與0號回收物之差異性分析p值皆<0.001)。(圖片由第一作者繪製)

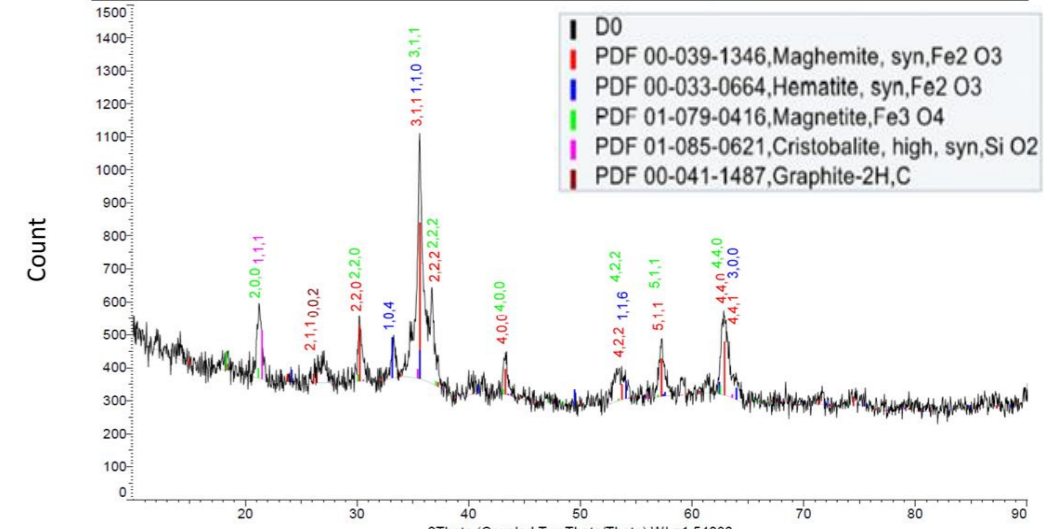


圖11 水洗抽氣過濾、磁性分析後所得之磁性回收物D1 X光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

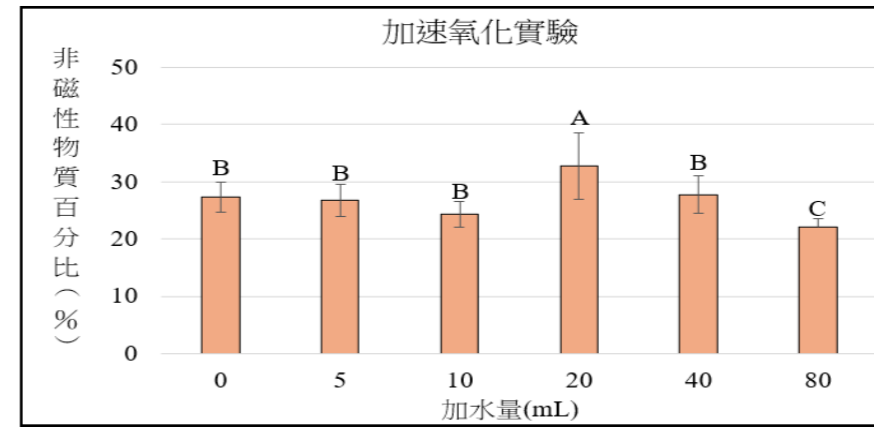


圖13 加入不同水量以加速廢棄暖暖包內容物氧化之測試。A、B為顯著性差異化標示(p值<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

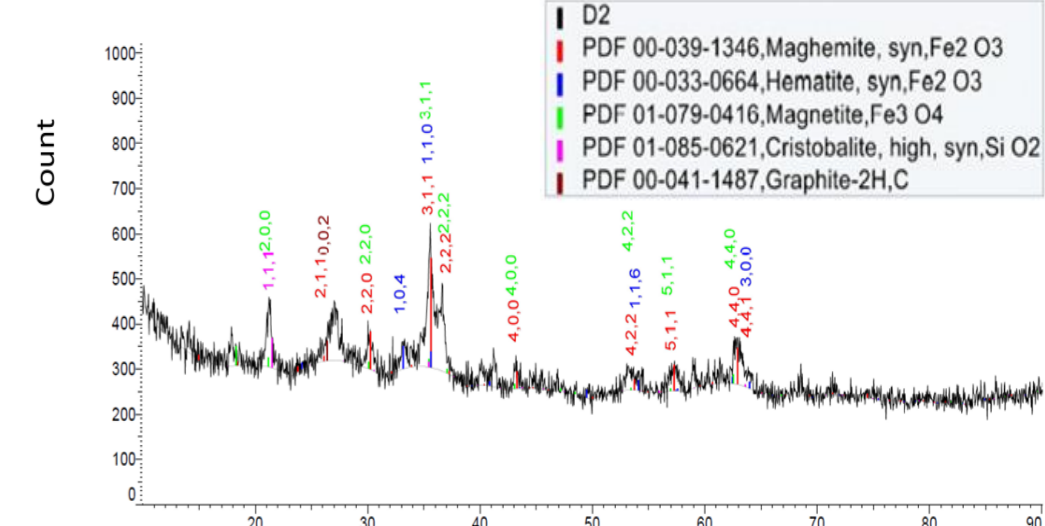


圖12 水洗抽氣過濾、磁性分析後所得之非磁性回收物D2 X光繞射分析結果。(圖片為本研究自行送檢之檢測報告)

二、作為釉藥配方設計：16種回收物高溫燒製測試

(一)16種回收物高溫燒製測試結果如表三。結果發現隨著回收物比例增加，釉面色澤由淡黃漸轉為深褐，並呈現霧面質感。當回收物濃度為5%、10%、15%、20%、25%、55%、60%時，表面釉藥均無異常，但含30%、35%、40%、45%、50%、65%、70%、75%、80%回收物的燒製結果中發現使用非磁性回收物(特別是D2、E2、F2)之試片出現縮釉情形。

表三 16種回收物不同濃度(5%~80%)高溫測試結果。(所有試片擺放皆依照示意圖位置)

示意圖	回收物濃度	燒製結果	回收物濃度	燒製結果	回收物濃度	燒製結果	回收物濃度	燒製結果
<div><div>A：未進行任何處理</div><div>M：標準品(德國黑鐵)</div><div>加水去除 NaCl</div><div>依水洗過濾方式不同區分出 5 種回收物</div><div>使用磁鐵分離再分出 10 種回收物，其中 1：磁性 2：不具磁性</div></div>	5%		25%		45%		65%	
	10%		30%		50%		70%	
	15%		35%		55%		75%	
	20%		40%		60%		80%	

(二)使用乙醇、丙酮、正己烷分別洗滌、去除D2、E2、F2中的碳粉，高溫燒製結果發現可減緩縮釉發生(圖14)，但考量環保，嘗試使用D1中Fe₃O₄自然氧化後產生的Fe₂O₃ (定義代號為D1-2)進行70%、75%、80% 試片燒製(圖15)，亦能明顯改善縮釉情形。

三、使用廢棄暖暖包回收物製備釉藥及建材再生利用

依據回收過程的方便性與高回收率兩項原則，選定B0、B1、B2、D0、D1、D2 六種回收物，替代釉藥濃度共有5%~70% 14種濃度，並以德國黑鐵作為對照組，製作圓形試片。

(一)硬度測試結果：硬度皆於6~7之間，皆滿足台灣國家標準CNS對建材磁磚品質的規定。

(二)耐酸鹼測試：表四所示為部分濃度的測試結果，低濃度的少部分樣品會產生變色或腐蝕情形，但高濃度樣品於四種酸鹼溶液的處理下，表面皆無明顯變化。

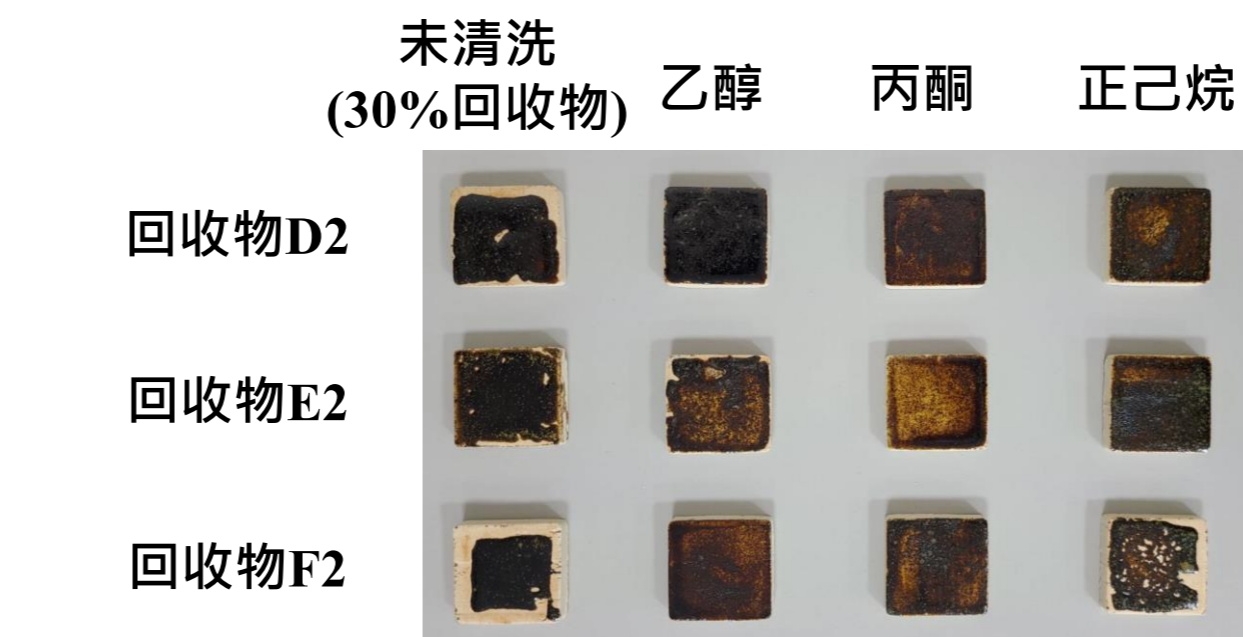


圖14 使用有機溶劑移除活性碳後試片的燒製結果。對照組為未清洗之30%回收物D2、E2、F2，右列是此三種回收物分別使用乙醇、丙酮、正己烷清洗後的燒製結果。(圖片由第一作者繪製)

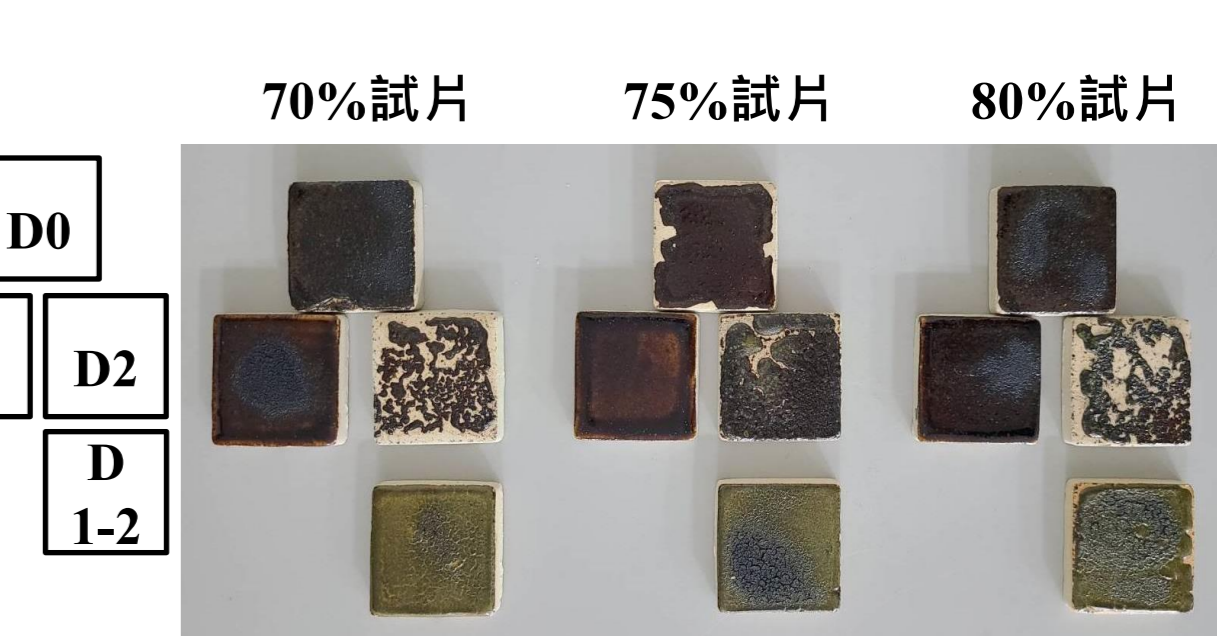


圖15 改善高濃度回收物燒製後縮釉的方法測試結果。照片中各試片所使用的回收物如左列示意圖。(圖片由第一作者繪製)

表四 不同類型的磁磚樣品耐酸鹼測試結果。共施測14種不同濃度的樣品，在此僅呈現以下4種不同濃度之結果。

試片對應回收物示意圖							5%	測試前							30%	測試前											
								測試後								測試後											
								15%	測試前							60%	測試前										
									測試後								測試後										
<div><div><div>D2</div><div>D1</div><div>D0</div><div>B2</div><div>B1</div><div>B0</div><div>標準品</div></div></div> <div>(表格由第一作者繪製，圖片由三位作者共同拍攝)</div>																											

(三)防滑性測試：所測試的所有試片不管是乾燥(圖16)或潮濕(圖17)皆達美國標準ANSI/NFSI B101.0-2012要求的地板抗滑效果。

(四)吸水性測試：各組吸水率(圖18)符合「CNS 9737陶瓷面磚」石質面磚吸水率為10%以下的標準。

(五)耐酸鹼測試之色碼分析

不同回收物使用4種酸鹼溶液(9% NaOH、2.9% NH₄OH、10% CH₃COOH與3% HCl)處理後的總色差(ΔE值)分析結果繪製成圖19並歸納於表五。自製試片耐酸鹼性不遜於市售品，顯示本研究之回收釉藥具良好化學穩定性，適合應用於建材表面。

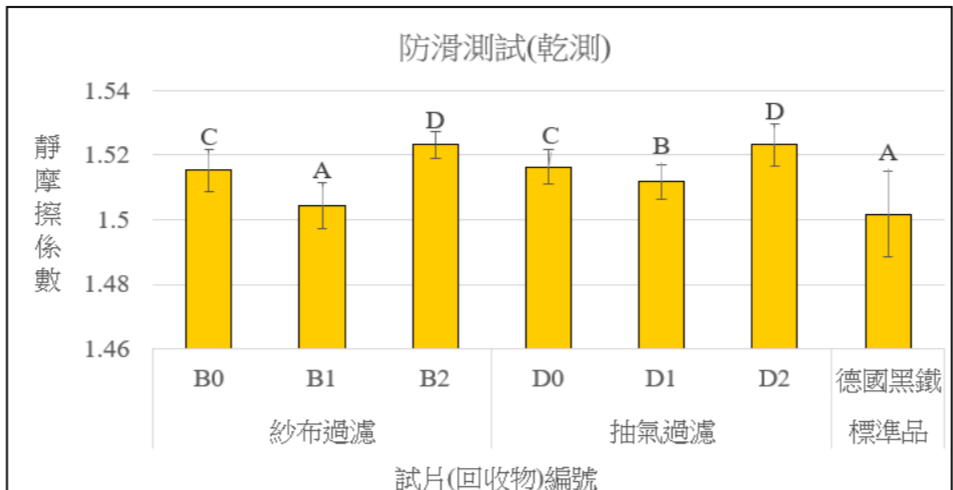


圖16 乾燥的30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片防滑性測試。A~D為顯著性差異化標示(p值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

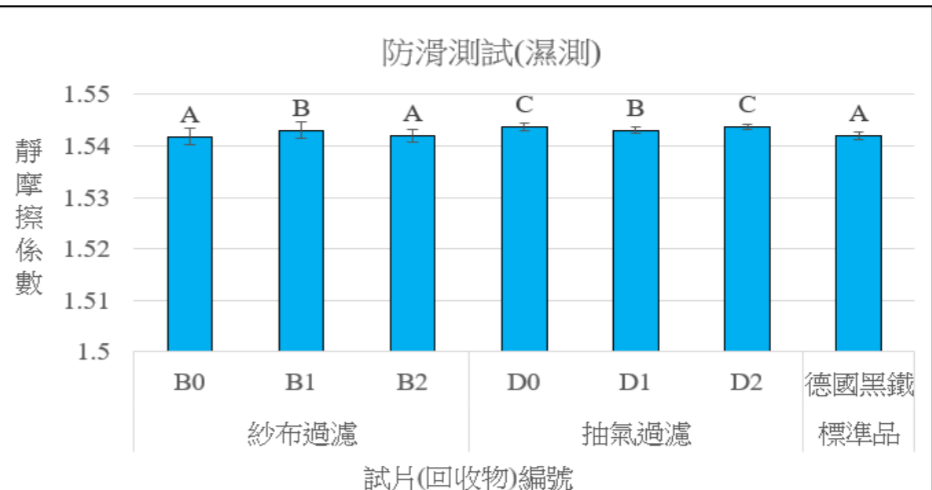


圖17 潮濕的30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片防滑性測試。A~C為顯著性差異化標示(p值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

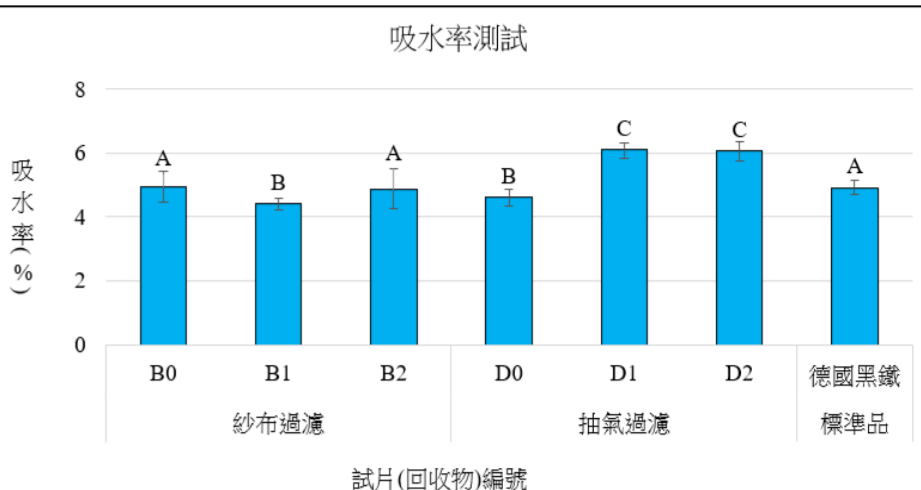


圖18 30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片吸水性測試。A~C為顯著性差異化標示(p值皆<0.05)。(圖片由第一作者繪製)

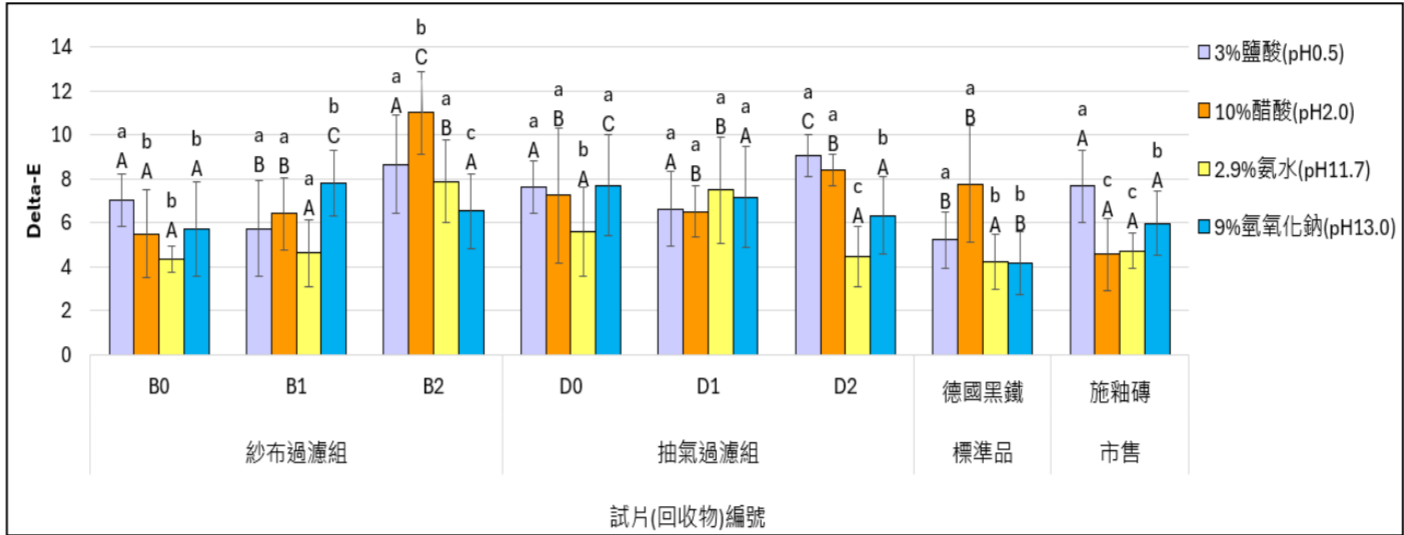


圖19 以30%B0、B1、B2、D0、D1、D2、標準品(德國黑鐵)釉藥燒製試片與市售施釉磚進行耐酸鹼測試。圖中不同大寫字母表示相同溶液處理、不同回收物試片的顯著性差異，不同小寫字母表示相同回收物試片、不同溶液處理的顯著性差異(p<0.05)(數據由第二、第三作者轉換，圖片由第一作者繪製)。

表五 總結四種酸鹼溶液測試後，各組試片的耐酸鹼能力		
試片編號	以市售施釉磚耐酸鹼為對照評比	同種試片的四種溶液結果相互對照
B0	皆與市售施釉磚一致(p 皆>0.05)	較不耐強酸
B1	耐強酸能力優於市售施釉磚(p<0.05)	較不耐強鹼
B2	耐強酸、強鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆>0.05)	耐強酸、強鹼能力較好
D0	耐強酸、氨水能力與市售施釉磚一致(p 皆>0.05)	耐氨水能力相對較好
D1	耐強酸、強鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆>0.05)	四種溶液影響皆不大
D2	耐鹼能力與市售施釉磚一致(p 皆>0.05)	耐鹼能力相對較好
德國黑鐵	耐強酸、強鹼能力優於市售施釉磚(p 皆<0.05)	耐鹼能力相對較好
市售施釉磚		較不耐強酸、強鹼

(本表資料由三位作者共同彙整，第一作者製表)

陸、討 論

- 一、高溫時，Fe₃O₄與γ-Fe₂O₃能繼續進行氧化反應(反應式(1))，反應溫度如下反應式(2)(王友辰，2015)。非磁性回收物中包含Fe₂O₃、活性碳與蛭石，當溫度達400~700℃時，活性碳氧化(李松柏，2024)，氧化反應將導致Fe₂O₃減少(反應式(3))，故推測此為非磁性回收物在30%以上的釉藥燒製時出現縮釉的主因。
- $$4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{..... (1)} \quad \text{Fe}_3\text{O}_4 \xrightarrow{200^\circ\text{C}} \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \xrightarrow{400^\circ\text{C}} \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{..... (2)} \quad 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 2\text{Fe} \quad \text{..... (3)}$$
- 二、節約試算：以一包廢棄暖暖包(62.31 ±1.62克)經水洗(回收率約80%)、磁性分析(回收率約70%)的磁性回收物取代10%氧化鐵(作為釉藥著色劑常用濃度)進行釉藥燒製，將能燒製約2塊40×40公分的磁磚釉面。若直接使用水洗後之回收物進行釉藥燒製，則能燒製3塊40×40公分的磁磚釉面。
- 三、靜摩擦係數(μs)常被用以評比地面滑溜程度。美國標準ANSI/NFSI B101.0-2012要求：有時潮濕或有污染物地面，乾燥狀態下靜摩擦係數不小於0.50，且潮濕狀態下靜摩擦係數不小於0.60(內政部建築研究所委託研究報告，2022)，依此審視本研究，可發現所測試之試片乾、濕狀態皆達防滑標準。
- 四、國際照明委員會制定總色差(ΔE值)作為兩種色彩差異的度量標準。本研究將回收物製成30%方形試片，進行耐酸鹼測試後，使用色碼分析並轉換總色差(ΔE值)評估試片色澤變化，顯示多數試片在酸鹼浸泡24小時後與市售釉面磚對照ΔE值並無明顯差異，顯見回收暖暖包製釉材料應用於建材具高度潛力。
- 五、XRD測試結果確認回收過程中各階段物質組成差異，結果顯示D0與D1皆呈明顯磁性氧化鐵訊號，證實其仍保有磁性鐵氧化物(如Fe₃O₄或γ-Fe₂O₃)；而D2則為非磁性Fe₂O₃主成分。XRD結果與磁性分析、顯微鏡觀察結果相符，支持本研究利用磁性分離有效區分不同氧化鐵成分的可行性。進一步驗證D1經過氧化轉化後可作為高純度Fe₂O₃來源，對釉藥著色與穩定性提供可靠支持，也說明材料分離過程對品質控制的關鍵性。

柒、結 論

- 一、實驗結果顯示，水洗去除氯化鈉可避免高溫燒製產生有害氣體。五種水洗過濾方式中，以濾紙抽氣過濾(1次)法回收率最高，顯示此方式最能保留暖暖包中鐵氧化物及蛭石成分。後續磁性分離及加速氧化等階段，可提升回收物純度。
- 廢棄暖暖包

⇒

⇒

⇒

磁性分析

非磁性回收物(Fe₂O₃為主)

⇐

建議取代釉藥濃度：< 30%

↑(加速氧化實驗)

⇐

磁性回收物(γ-Fe₂O₃為主)

⇐

建議取代釉藥濃度：可高達70%

(回收率>80%)

(圖由第二作者繪製)

二、釉藥應用：回收物可取代35~70%的氧化鐵原料，並呈現穩定色澤變化。然過高比例(>30%)的回收物可能影響釉層穩定性，縮釉現象可透過去除碳粉的方式改善。建材應用層面，30%回收物製成之釉面磁磚，耐酸鹼測試與市售釉面磚對照ΔE值後無明顯差異。硬度皆介於莫氏6~7之間，顯示結構堅固。自製試片在乾燥與潮濕環境下皆具良好摩擦係數(μs)，具有實用的防滑功能。吸水率測試顯示回收釉面可有效阻隔水分滲透，達到CNS石質面磚吸水標準，具備優良的耐候與耐久性能。

三、透過本研究結果，證實廢棄暖暖包回收具有可行性與環保效益，為資源再生與廢棄物管理提供創新方案。未來可進一步優化回收程序，並擴展回收物應用範疇，促進資源循環與永續發展。政策推動與回收機制的建立，將有助於提升民眾參與度，實現資源永續利用的目標(SDGs指標12-Responsible Consumption and Production)。
- ## 捌、參考文 獻
- 王友辰(2015)。奈米鐵氧化物之製備及特性研究。國立屏東大學應用物理系光電暨材料碩士班 碩士論文。
 - 李松柏(2024)。利用廢棄暖暖包粉體吸附水中重金屬鉛離子研究。長庚大學化工與材料工程學系 碩士論文。
 - 許宏銘(2004)。模擬都市垃圾衍生燃料及燃煤共同燃燒之污染物排放特性研究。逢甲大學 環境工程與科學學系 碩士論文。
 - 陳誼安(2024)。以暖暖包廢棄物去除染料橙黃G之研究。長庚大學化工與材料工程學系 碩士論文。
 - 游瑋萍(2022)。自廢棄暖暖包回收鐵劑並應用於降解染料廢水之研究。明志科技大學化學工程系生化工程碩士班 碩士論文。
 - 蔣佩珊(2018)。暖暖包回收鐵進行芬頓反應去除Atachlor之研究。國立中興大學環境工程學系 碩士論文。
 - 葉名倉、劉如熹、邱智宏、周芳妃、陳偉民、吳明禧、陳昭錦(2024)。高一化學。南一出版公司。
 - 鄭皓元、曾本鴻、李元照(2018)。碳無關紙-自由基對碳粉色素之降解。中華民國第58屆中小學科學展覽會 高級中等學校組 化學科 作品。
 - 環境部新聞專區。使用後暖暖包請交由清潔隊垃圾車妥善處理-取自環境部網站。
 - 洪玲明(2021)。暖暖包之亂！你不知道的缺貨內幕。取自三立新聞網。
 - 宋瑞文(2021)。用過暖暖包不浪費 日本募資計畫回收暖暖包淨化水質。取自環境資訊中心網站。
 - 陳燕華(2013)。礦物科技：神奇的奈米磁鐵礦。取自科技大觀園網站。
 - Money DJ理財網。鐵礦石。取自Money DJ理財網。
 - 地質百科。赤鐵礦、磁鐵礦。取自地質知識服務網地質百。
 - 網路版ImageJ軟體之使用。https://ij.imjoy.io/
 - 色碼選取器。PEKO STEP網站。取自https://www.peko-step.com/tool/imageeditor/index.php?lang=zhtw&type=3
 - 內政部建築研究所委託研究報告(2022)。各類使用場所騎樓地坪防滑性能之研究。取自9ffdec4a-190c-4200-829a-8b9309180746.pdf
 - 經濟部標準檢驗局(2000)。陶瓷面磚試驗法-第3部：吸水率、視孔孔隙度及體密度試驗法。取自https://www.cnsonline.com.tw/?node=hist-result&locale=zh_TW
 - 冠軍磁磚。CNS對磁磚品質的規定。取自冠軍磁磚網站。
 - 支點科技。精密色差光學測量儀原理。取自https://www.fulcrum-technology.com/principle-of-colorimeter
 - Delta-E Calculator。利用RGB值轉換成Delta E (總色差ΔE)。取自https://colormine.org/delta-e-calculator