

電漿熔渣中銅金屬之資源回收

李清華¹ 李文成² 陳靖良² 劉冠廷¹ 張人權¹ 伍紹文¹ 顏辰有¹

¹大葉大學環境工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

²核能研究所化工組

325 桃園縣龍潭鄉佳安村文化路 1000 號

摘要

本研究主要針對含銅電子廢棄物經電漿熔融處理後熔渣中之銅金屬進行回收純化。本研究所收集之電漿熔渣經磁選、篩分後之篩下物 (-0.149 mm) 約尚含有 32% 之銅，值得進一步回收其銅金屬。本研究結果顯示，此電漿熔渣 (-0.149 mm) 經一次硫酸浸漬，於 18N 硫酸、固液比 10 g/50ml、70°C 下，浸漬 1 小時，可達成 90.56% 之銅浸漬回收率，此一次含銅浸漬液直接在室溫下靜置 48 小時，可將浸漬液中 58.28% 之銅晶析成硫酸銅晶體，而晶析過後濾液中之殘留銅金屬，經以鐵粉為置換劑，可將晶析濾液中之銅 100% 予於置換回收。另殘留於一次硫酸浸漬殘渣中之銅，則可以 18N 硫酸在固液比 5 g/50ml、70°C 下，浸漬 2 小時，可將殘渣中之銅 100% 予以浸漬溶蝕，再以鐵粉置換法，可將二次硫酸浸漬液中之銅 100% 予以置換回收。根據上述方法之實施，應可回收純化電漿熔渣中之有價銅金屬，以達成電漿熔渣之減量及銅資源永續循環使用之雙重目的。

關鍵詞：電漿，熔渣，浸漬，晶析，置換，銅

Recycling of Copper from Molten Plasma Slag

CHING-HWA LEE¹, WEN-CHENG LEE², CHING-LIANG CHEN², KUAN-TING LIU¹, REN-CHIUAN CHANGE¹,

SHAO-WEN WU¹ and CHEN-YU YEN¹

¹Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University

No. 168 University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

²Chemical Engineering Division, Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, R.O.C.

No. 1000, Wenhua Rd., Jiaan Village, Longtan Township, Taoyuan County 32546, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The main purpose of this study was to recover copper from molten plasma slag. After magnetic separation and screening of the collected material, the slag of less than 0.149 mm in size contained 32% copper worthy of further recycling. The results revealed that 90.56% of the copper can be leached from the dross (-0.149 mm) by using 18N H₂SO₄ at a solid/liquid ratio of 10g/50mL at 70°C for one hour; moreover, 58.28% of the copper content in this leachate can be crystallized as CuSO₄·5H₂O after standing for 48 hours at 27°C without any disturbance. After crystallization, the remaining copper can be completely recovered by using iron powder replacement. Subsequently, a

second leaching treatment was performed on the residue by using 18N H₂SO₄ at a solid/liquid ratio of 10g/50mL at 70°C for 2 hours. It was also observed that 100% of the copper content in the second leachate can be recovered by iron powder replacement.

Key Words: plasma, slag, leaching, crystallization, replacement, copper

一、前言

台灣全年主機板產量約為八千六百五十餘萬片，全球市場佔有率達 74% [6]，加上電腦內其他印刷電路板產品（以下簡稱廢 IC 板），推估約每年可達 10 億片以上，這意味著國內每年將會產生數量龐大之廢 IC 板，這些廢 IC 板含有有害重金屬，如任其棄置將會對環境造成相當程度之危害，而廢 IC 板中含有大量之銅金屬，銅金屬目前之售價約為新台幣 17.8 萬元/公噸，如任其棄置無法回收，將甚屬可惜。

我國目前廢 IC 板之回收處理技術主要為粉碎回收法及燃燒回收，但由於 IC 板中含有樹脂成份，具彈性不易粉碎，如採用直接粉碎方式將需耗費較大能源，亦會產生粉塵、噪音及機具損耗等問題。故亦可採取熱處理方式來將廢 IC 板中之有機樹脂成分予以燃燒去除，以降低後續研磨所需之耗能與機具損耗，而經熱處理後之殘渣再經破碎分選方式回收其中之有價銅金屬。因此本研究將以經電漿焙燒處理後之廢 IC 板殘渣為對象，來進行後續廢 IC 板中有價銅金屬之回收純化。

本研究所收集的樣品為廢 IC 板經電漿爐以 800°C 熔融 10 分鐘後所得之殘渣。另根據本研究之先期研究結果得知，此電漿熔渣經破碎、磁選、篩分後，大於 0.149 mm 之篩上物之銅含量甚高，可直接送至煉銅廠進行銅金屬回收；而小於 0.149 mm 之篩下物（以下簡稱 -0.149 mm 電漿熔渣）約尚含有 32% 銅金屬，因此本研究乃針對此 -0.149 mm 電漿熔渣中之銅，以濕式冶煉法來進行純化回收。

二、研究方法

本研究主要之研究樣品為電漿熔渣經磁選，篩分後所得之篩下物（-0.149 mm），並針對此部份利用濕式冶煉法經由浸漬溶蝕、晶析及置換將 -0.149 mm 電漿熔渣中之銅金屬純化回收，另銅全含量之分析方法係依據環保署公告之土壤中重金屬檢測方法－水王消化法（NIEA S321.63B）[1]。本研究之各項工作內容與實施步驟如下：

（一）浸漬溶蝕

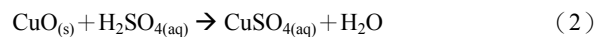
根據吳彥翬 [2]、李清華與李文成 [3] 及柯清水 [4]，

硫酸對銅金屬有良好之浸漬溶蝕效果，故本研究將以硫酸作為浸漬劑來回收 -0.149 mm 電漿熔渣中之銅金屬，並探討最佳硫酸浸漬條件，再以此條件來收集最佳含銅浸漬液，以利後續純化回收之研究。另銅金屬在潮濕的空氣中易氧化生成氫氧化銅或氧化銅，此兩者與硫酸的反應式分別如下所示 [2, 5]：

氫氧化銅與硫酸之反應式 [2]：



氧化銅與硫酸之反應式 [5]：



（二）晶析

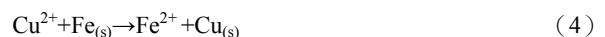
本研究預計以晶析法來回收純化含銅浸漬液之有價銅金屬，本工作欲探討之操作條件包括靜置溫度及靜置時間，以獲得最佳之硫酸銅結晶效果，並以（3）式計算不同條件下之累積銅晶析百分率。

銅晶析百分率

$$= \frac{\text{晶析前水相之金屬重量} - \text{晶析後水相之金屬重量}}{\text{晶析前水相之金屬重量}} \times 100\% \quad (3)$$

（三）置換法

置換法乃是利用各金屬離子化之有所差異，以較卑之金屬使溶液中較貴之金屬離子還原成金屬，而各金屬間之電位差距愈大愈易置換。銅金屬置換最常使用的卑金屬為鋅粉，其次為鐵粉或鎳粉 [7]，但使用鎳粉成本較貴，故本研究預計將以鐵粉及鋅粉作為置換劑與含銅水相溶液加以置換，其鐵粉與含銅水相溶液之反應式如（4）式所示 [8]，而鋅粉及含銅水相溶液之反應推估如（5）式 [8]。另各金屬置換回收率計算方式如（6）式所示。





金屬置換回收率

$$= \frac{\text{置換前水相之金屬重量} - \text{置換後水相之金屬重量}}{\text{置換前水相之金屬重量}} \times 100\% \quad (6)$$

三、結果與討論

本研究主要之研究目的為探討 -0.149 mm 電漿熔渣中銅有價金屬之回收純化，而根據本研究先期研究結果 [3] 得知 -0.149 mm 電漿熔渣中約含有 32% 之銅金屬，以下將利用浸漬溶蝕、晶析、置換針對此部份之銅金屬進行回收，並將針對上述研究成果一一介紹與討論。

(一) 第一次硫酸浸漬之研究成果與討論

由於硫酸對銅金屬有良好之浸漬溶蝕效果，且於高溫（70°C）時之浸漬溶蝕效果較室溫為佳，因此本項研究將固定浸漬溫度在 70°C，針對硫酸濃度、固液比、浸漬時間等操作條件，探討對銅金屬浸漬回收效率之影響，上述各項操作因子之實驗結果與討論一一敘述如下：

1. 硫酸濃度

於 70°C 下，以 1 N、6 N、12 N、18 N 濃度之硫酸作為浸漬劑，浸漬液體 50 ml，取 -0.149 mm 電漿熔渣 1 g，分別浸漬 4 小時。-0.149 mm 電漿熔渣於不同硫酸濃度下銅浸漬回收率結果如圖 1 所示，由浸漬結果可知在濃度 1 N、6 N、12 N、18 N 的銅金屬回收率皆為 100%，因此可知在上述操作條件下，硫酸浸漬劑濃度達 1N 以上，即可將 -0.149 mm 電漿熔渣中所有銅金屬予以浸漬溶蝕於浸漬液中，本研究為增加後續固液比之操作量以及降低浸漬所消耗的時間，故選定硫酸濃度 18 N 作為後續硫酸浸漬實驗之硫酸濃度。

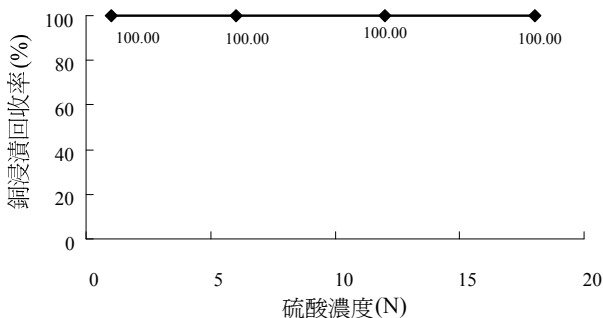


圖 1. -0.149 mm 電漿熔渣於不同硫酸濃度下銅浸漬回收率

2. 固液比

於 70°C 下，固定硫酸濃度 18 N，浸漬液體積 50 ml，浸漬時間為 4 小時，並分別取 -0.149 mm 電漿熔渣 1 g、5 g、8 g、9 g、10 g、15 g 進行實驗，-0.149 mm 電漿熔渣於不同固液比下銅浸漬回收率結果繪於圖 2。

由圖 2 可知，在固液比 1 g/50ml、5 g/50ml 時，銅金屬回收率皆為 100%，而在固液比 8 g/50ml、9 g/50ml、10 g/50ml、15 g/50ml，銅金屬回收率分別為 99.41%、96.37%、92.40%、58.72%，因此可知當固液比大於 8 g/50ml 時，銅金屬浸漬回收率始有下降趨勢，但根據本研究了解硫酸銅晶體之市場價格及銷售管道皆甚為良好，因此本研究預計先以硫酸銅晶析法回收浸漬液中之銅金屬。另本研究將不同固液比下所得浸漬液中之銅含量列於表 1，而由表 1 得知於固液比 10 g/50ml 時浸漬液中含有銅金屬 65,578 ppm 較其他固液比條件下浸漬液中的銅含量高，其硫酸銅晶析效果亦應較佳，因此本研究選擇以固液比為 10 g/50ml 為第一次硫酸浸漬之固液比操作條件。

3. 浸漬時間

於 70°C 下，固定硫酸濃度 18 N，浸漬樣品 10 g，浸漬液體積 50 ml，浸漬時間分別設為 0.25 小時、0.5 小時、

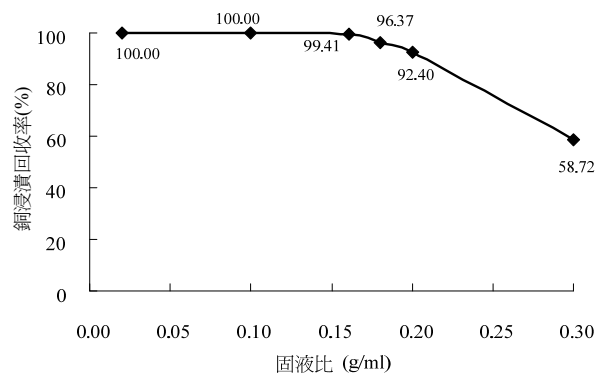


圖 2. -0.149mm 電漿熔渣於不同固液比下銅浸漬回收率

表 1. 電漿熔渣於不同固液比下硫酸浸漬液中之銅含量

固液比	銅含量 (ppm)
0.02(1g/50ml)	53,422
0.10(5g/50ml)	54,578
0.16(8g/50ml)	56,443
0.18(9g/50ml)	61,556
0.20(10g/50ml)	65,578
0.30(15g/50ml)	62,510

1 小時、1.5 小時、2 小時、3 小時、4 小時，實驗結果如圖 3 所示。由圖 3 可知，-0.149 mm 電漿熔渣在浸漬時間分別為 0.25 小時、0.5 小時、1 小時、1.5 小時、2 小時、3 小時、4 小時之銅金屬浸漬回收率依序為 57.46%、73.11%、90.56%、90.79%、93.61%、91.69%、92.74%。由上述結果得知，在浸漬時間大於 1 小時（亦即 1.5 小時、2 小時、3 小時、4 小時）之銅金屬浸漬回收率並無顯著之上升趨勢，因此本研究選擇以 1 小時做為第一次硫酸浸漬之浸漬時間。

綜合上述結果可知 -0.149 mm 電漿熔渣之銅金屬硫酸浸漬之最佳操作條件為使用 18 N 硫酸作為浸漬溶蝕劑，在固液比 0.2 (10 g/50ml)、70°C 下，浸漬 1 小時，可將 -0.149 mm 電漿熔渣之銅 90.56% 予以浸漬回收，經過濾所得之濾液即為本研究之「一次含銅浸漬液」。

(二)「一次含銅浸漬液」中銅金屬純化回收之研究成果與討論

1. 晶析

為獲得具銷售價值之硫酸銅晶體，本研究乃研究一次含銅浸漬液於不同加熱時間、不同加熱溫度、不同靜置時間、不同靜置溫度及不同去離子水添加量下其硫酸銅之晶析成效，以下將針對上述晶析結果一一介紹並討論。

取一次含銅浸漬液 45 ml，並分別標示樣品編號 A、B、C，其中操作條件 A 係直接於室溫下靜置；操作條件 B 係於 5°C 下冷卻靜置；操作條件 C 係添加 25 ml 去離子水後於 5°C 下冷卻靜置，並分別將各樣品靜置 0 小時、24 小時、48 小時、72 小時、96 小時、120 小時、144 小時，不同操作條件下之硫酸銅實驗晶析情形如表 2 所示，另不同靜置時間下浸漬液中累積銅晶析出量百分比則繪於圖 4。

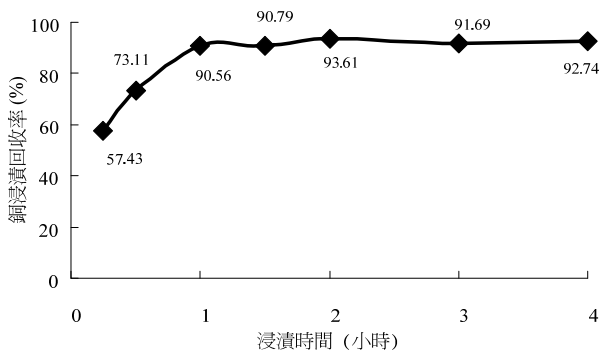


圖 3. -0.149 mm 電漿熔渣於不同時間下銅浸漬回收率

表 2. 硫酸銅晶析實驗情形

編號	操作條件	硫酸銅晶析實驗情形
A	室溫下靜置	
B	5°C 下冷卻靜置	
C	添加 25 ml 去離子水後於 5°C 下冷卻靜置	

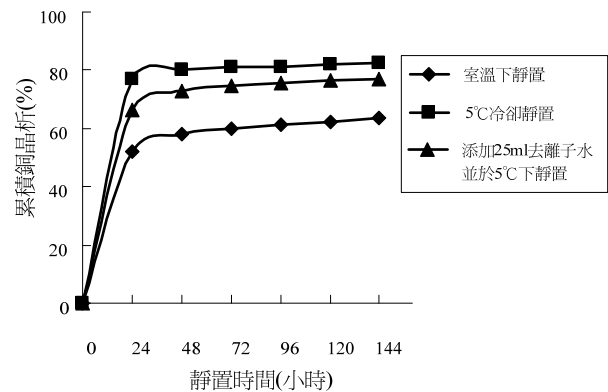


圖 4. 不同靜置時間下之累積銅晶析出量百分比

由圖 4 可知一次含銅浸漬液於操作條件 A、B 及 C 的銅晶析效果，皆於 48 小時有其極為顯著之效果，操作條件 A 於 48 小時之累積銅晶析出量為 58.28%，操作條件 B 於 48 小時之累積銅晶析出量為 80.15%，操作條件 C 於 48 小時之累積銅晶析出量為 72.87%；而在晶析時間於 48 小時後，三者之晶析效果明顯減緩，另由圖 4 可知，在低溫靜冷卻置時，因為溫度降低，飽和濃度下降故對於硫酸銅之晶析效果較佳。雖然於低溫下冷卻靜置之晶析效果較於室溫靜置之晶析效果優良，但因為低溫下冷卻靜置，將會額外增加實際回收之操作成本，故本研究選擇以室溫靜置為硫酸銅晶析

之最佳操作條件，又因為操作條件 A、B 及 C 之效果皆於晶析時間 48 小時後明顯減緩，因此本研究以最佳晶析時間為 48 小時。另本研究將所得之最佳硫酸銅結晶經以 SEM-EDS 檢測後（如圖 5 所示），得知含銅量為 27.91%，而根據硫酸銅結晶分子式（ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ），其銅含量為 26.05%，因此可知本研究所獲得之硫酸銅結晶純度甚高，幾乎接近 100%。

綜合上述實驗結果，將一次含銅浸漬液於室溫下靜置 48 小時設為本研究之最佳硫酸銅晶析條件，而經 48 小時晶析後所得之殘留液（亦即本研究最佳晶析濾液）中尚含有 41.72% 之銅，本研究預計以置換法來回收最佳晶析濾液中之銅離子。

2. 鐵粉置換法

本研究以鐵粉做為置換劑，分別添加不同理論倍數的鐵粉來探討對於最佳晶析濾液中銅離子之回收。已知本研究所使用之最佳晶析濾液中含有 13,240 mg/l 之銅離子，又銅的分子量為 63.55 g/mole，故本研究所+使用之最佳晶析濾液中含有 $\{[13,240(\text{mg/l}) \times 10^{-3}(\text{g/mg})] / 63.55(\text{g/mole})\} = 0.208(\text{mole/l})$ 的銅，而鐵的分子量為 55.85 g/mole，再根據（4）式計算 20 ml 之最佳晶析濾液之一倍鐵粉理論添加量，其計算方式如下：

$$0.208(\text{mole/l}) \times 20(\text{ml}) \times 10^{-3}(\text{l/ml}) \times 55.85(\text{g/mole}) = 0.23 \text{ g}$$

0.23 g 即為本研究置換 20 ml 最佳晶析濾液之銅所需添加之 1 倍鐵粉理論值。本研究各別取 20 ml 最佳晶析濾液，分別加 1、3、5、10、20、50、70、100 倍之鐵粉理論添加

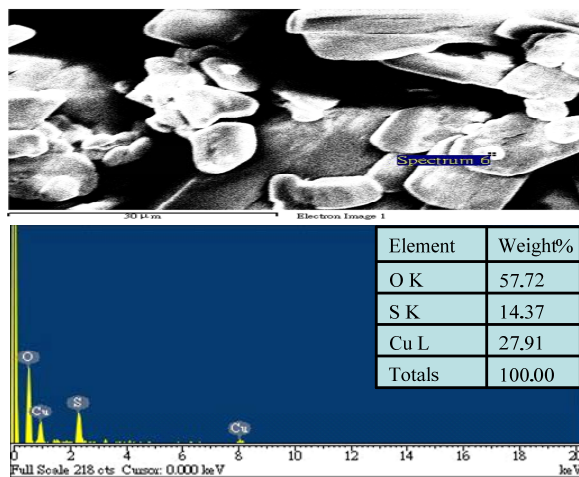


圖 5. 最佳晶析條件所得硫酸銅晶體 SEM-EDS 分析結果

量來進行置換實驗之研究，待實驗完成後，再利用（6）式計算銅金屬置換回收率。並將最佳晶析濾液使用鐵粉置換銅回收情形會於圖 6。

由圖 6 可知，1、3、5、10 倍鐵粉理論添加量之置換回收率分別為 6.19%、6.81%、7.18%、7.17%、而 20 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 27.84%、50 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 91.71%、70 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 99.85%、100 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 100%。

綜合上述鐵粉置換實驗結果得知，以鐵粉做為置換劑來置換最佳晶析濾液中之銅離子，銅置換回收率隨著鐵粉添加量增加而上升，並於 20 倍鐵粉理論添加量時，有明顯上升趨勢，而當添加量為 100 倍鐵粉理論添加量時，可達銅 100% 置換回收率。本研究另將此置換銅粉以 SEM-EDS 檢測分析其銅含量（如圖 7 所示），由圖 7 可知最佳晶析濾液置換後之銅粉純度約可達 56.83%。

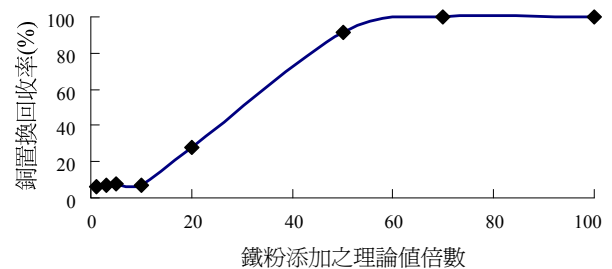


圖 6. 最佳晶析濾液於不同鐵粉添加量下之銅置換回收率

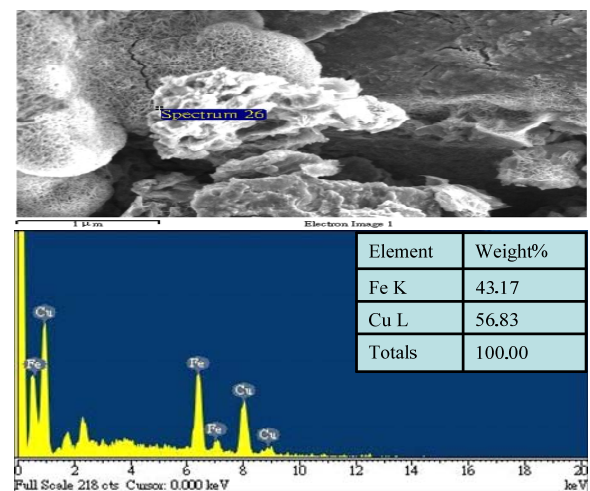


圖 7. 最佳晶析濾液置換銅粉 SEM-EDS 分析結果

(三) 第二次硫酸浸漬之研究成果與討論

根據上述第一次硫酸浸漬實驗結果得知，經一次硫酸浸漬後之殘渣再次以王水消化法檢測後得知尚含有銅 9.44%，因此本研究收集經一硫酸浸漬後之殘渣，再利用硫酸作為浸漬劑，進行二次硫酸浸漬來回收經一次硫酸浸漬後殘渣中之銅金屬。

1. 浸漬時間

根據本研究一次硫酸浸漬之最佳操作條件，於 70°C 下，以 18 N 硫酸作為浸漬劑，浸漬劑體積 50 ml，取一次硫酸浸漬殘渣 5 g (亦即固液比 5 g/50ml)，並分別浸漬 1 小時、1.5 小時、2 小時、3 小時。圖 8 為上述二次硫酸浸漬操作條件下之銅浸漬回收率結果。由圖 8 可知，在二次硫酸浸漬時間為 1 小時，銅金屬回收率為 84.37%，浸漬時間 1.5 小時，銅金屬回收率為 94.13%，而浸漬時間 2 小時及 3 小時之銅金屬回收率皆為 100%，根據上述實驗結果可知，二次硫酸浸漬銅金屬回收率隨著浸漬時間增加而上升，並於浸漬時間 2 小時，已可達 100% 銅完全回收，因此本研究選擇第二次硫酸浸漬時間為 2 小時。

2. 固液比

於 70°C 下，以 18 N 硫酸作為浸漬劑，浸漬液體積 50 ml，分別取一次硫酸浸漬殘渣 5 g、8 g、10 g、12 g，浸漬時間為 2 小時，其實驗結果如圖 9 所示。由圖 9 可知，固液比 5 g/50ml 時，二次硫酸浸漬銅回收率為 100%，固液比 8 g/50ml 時，二次硫酸浸漬銅回收率為 97.77%，固液比 10 g/50ml 及 12 g/50ml 時，二次硫酸浸漬銅回收率分別為 90.94% 及 70.15%。因此本研究第二次硫酸浸漬之最佳固液比為 5 g/50ml。

綜合上述針對第二次硫酸浸漬條件實驗結果可知，本研究第二次硫酸浸漬之最佳操作條件為使用 18 N 硫酸，固液比 5 g/50ml、浸漬溫度 70°C、浸漬時間 2 小時，可將一次

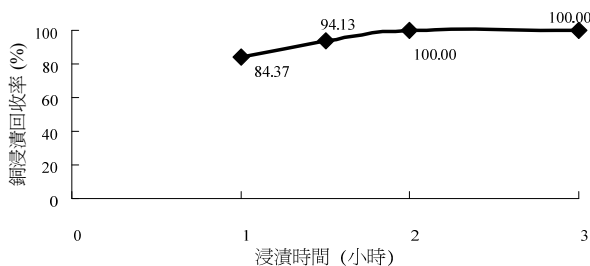


圖 8. 一次硫酸浸漬殘渣於不同時間下之銅浸漬回收率

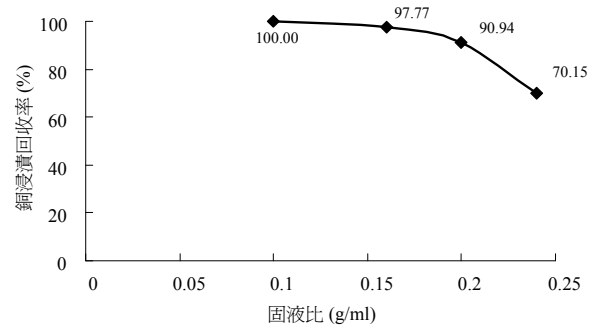


圖 9. 一次硫酸浸漬殘渣於不同固液比下之銅浸漬回收率

硫酸浸漬殘渣中之銅 100% 完全浸漬溶蝕至浸漬液中，而經過濾後所得之液體即為本研究之「二次含銅浸漬液」。另二次硫酸浸漬後尚含有約 60% 的殘渣，可視其有害性送交國內合格之廢棄物處理機構進行後續處理。

(四) 「二次含銅浸漬液」中銅金屬純化回收之研究成果與討論

根據一次含銅浸漬液銅金屬純化回收之結果得知，置換法對於銅金屬回收有其良好效果，另其置換法操作較為簡易，故本研究再次以置換法來回收二次含銅浸漬液中之銅金屬，並分別選擇以鐵粉及鋅粉做為置換劑回收，比較不同置換劑回收效果之優劣。

1. 鐵粉置換法

已知本研究所使用之二次含銅浸漬液中，含有 12,350 mg/l 之銅離子，因此溶液中含 $\{[12,350(\text{mg/l}) \times 10^{-3}(\text{g/mg})] / 63.55(\text{g/mole})\} = 0.194 \text{ mole/l}$ 的銅，所以取 20 ml 之第二次硫酸浸漬液之一倍鐵粉理論添加量為 $0.194(\text{mole/l}) \times 20(\text{ml}) \times 10^{-3}(\text{l/ml}) \times 55.85(\text{g/mole}) = 0.21 \text{ g}$ 。

0.21 g 此即為本研究使用 20 ml 二次含銅濾液所需添加之 1 倍鐵粉理論值。本研究各別取 20 ml 二次含銅浸漬液，分別加 1、3、5、10、20、50、70、100、150 倍鐵粉理論添加量來進行實驗。二次含銅浸漬液於不同鐵粉添加量下之銅置換回收率如圖 10 所示。根據圖 10 可知，1 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 5.10%、3 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 5.75%、5 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 18.22%、10 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 23.40%、20 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 34.09%、50 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 57.65%、70 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 82.67%、100 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 92.06%、150 倍鐵粉理論添加量之置換回收率為 100%。

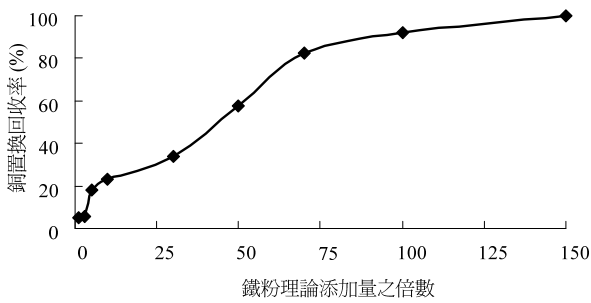


圖 10. 二次含銅浸漬液於不同鐵粉添加量之銅置換回收率

由實驗結果可知，二次含銅浸漬液銅置換回收率隨鐵粉理論添加量增加而上升，並於 150 倍鐵粉理論添加量時達銅置換回收率 100%。

2. 鋅粉置換法

接著本研究以鋅粉做為置換劑來回收二次含銅浸漬液中之銅金屬，已知本研究所使用之二次含銅浸漬液中，銅莫耳數為 0.194 mole/l，而鋅的分子量為 65.40 g/mole，接著利用 (2) 式，計算取 20 ml 二次含銅浸漬液之 1 倍鋅粉添加量，其計算結果如下：

$$0.194(\text{mole/l}) \times 20(\text{ml}) \times 10^{-3}(\text{l/ml}) \times 65.40(\text{g/mole}) = 0.25 \text{ g}$$

0.25 g 即為本研究使用 20 ml 二次含銅浸漬液所需添加之 1 倍鋅粉理論值。本研究各分別加 1、50、100、150、200 倍鋅粉理論添加量來進行實驗，並將鋅粉置換二次含銅浸漬液銅回收之情形繪於圖 11。

由圖 11 可知，以鋅粉作為置換劑來回收二次含銅浸漬液中之銅金屬，1 倍鋅粉理論添加量之銅置換回收率為 29.48%、50 倍鋅粉理論添加量之銅置換回收率為 90.62%、100 倍鋅粉理論添加量之銅置換回收率為 97.76%、150 倍鋅粉理論添加量之銅置換回收率為 98.04%、200 倍鋅粉理論添加量之銅置換回收率為 98.41%。

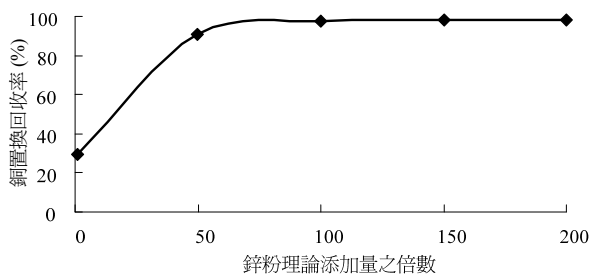


圖 11. 二次含銅浸漬液於不同鋅粉添加量之銅置換回收率

綜合上述針對「二次含銅浸漬液」之銅置換回收結果可知，以鐵粉為置換劑對於含銅浸漬液之銅金屬回收效果優於以鋅粉作為置換劑之效果。因此本研究選擇以鐵粉為置換劑針對二次含銅浸漬液中之銅金屬回收，並於鐵粉添加量 150 倍時可將二次含銅浸漬液中之銅 100% 予以置換回收。本研究另將二次含銅浸漬液置換後之銅粉，利用 SEM-EDS 分析其含銅量（如圖 12 所示），由此分析結果得知，二次含銅浸漬液之置換銅粉其銅純度約為 49.36%。

四、結論

1. -0.149 mm 電漿熔渣中銅之第一次硫酸浸漬操作條件為：硫酸濃度 18 N、固液比 10 g/50ml、於 70°C 下浸漬 1 小時，可將 -0.149 mm 電漿熔渣中之銅 90.56% 予以浸漬溶蝕。
2. 經第一次硫酸浸漬所得「一次含銅浸漬液」於室溫下靜置 24 小時後，可將浸漬液中 51.9% 之銅予以晶析成硫酸銅晶體，而靜置 48 小時後其累積銅晶析量達到 58.28%，由於 48 小時後，硫酸銅晶析量則明顯減緩，故本研究採用之最佳晶析條件為將一次含銅浸漬液於室溫下靜置 48 小時，以獲得具銷售價值高純度之硫酸銅晶體。
3. 經最佳晶析條件晶析後之最佳晶析濾液中尚含有浸漬液中 41.72% 之銅有待進一步純化回收，本研究以鐵粉做為置換劑，當其添加量為 100 倍鐵粉理論值時，可將最佳晶析濾液中之銅 100% 予以置換回收成銅粉，故本研究採用以鐵粉置換作為最佳晶析濾液中銅金屬之純化回收方法。
4. 經一次硫酸浸漬後殘渣中尚含有 9.44% 之銅，故本研究再次以硫酸浸漬來回收一次硫酸浸漬殘渣之銅，其銅金

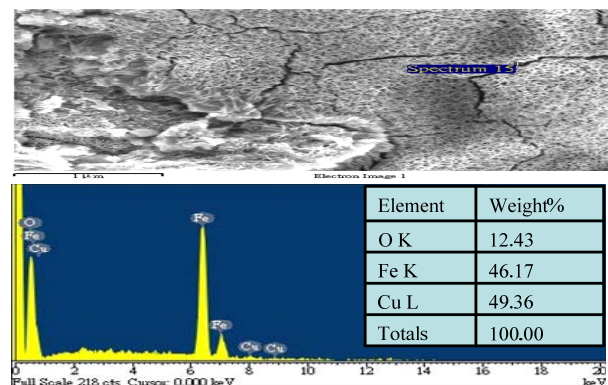


圖 12. 二次含銅浸漬液置換銅粉之 SEM-EDS 分析結果

屬第二次硫酸浸漬操作條件為：硫酸濃度 18 N、固液比 5 g/50ml、於 70°C 下浸漬 2 小時，經此浸漬操作條件可將一次硫酸浸漬殘渣之銅 100% 予以浸漬溶蝕。

5. 二次硫酸浸漬後所得之「二次含銅浸漬液」經以鐵粉做為置換劑，當其添加量為 150 倍鐵粉理論值時，可將二次含銅浸漬液中之銅 100% 予以置換回收成銅粉。而以鋅粉做為置換劑，當其添加量為 200 倍鋅粉理論值時，可將濾液中之銅 98.41% 予於置換回收成銅粉。本研究乃採用以鐵粉置換作為二次含銅浸漬液中銅金屬之純化回收方法。

參考文獻

1. 中華民國環境檢驗所 (民 92)，土壤中重金屬檢測方法—王水消化法 (NIEA S321. 63B)，2008 年 5 月 3 日，取自 <http://www.niea.gov.tw/>。
2. 吳彥翬 (民 97)，含銅廢矽晶圓資源再生之研究，大葉大學環境工程學系碩士論文。
3. 李清華、李文成 (民 96)，電子廢棄物電漿熔融處理熔渣中有價金屬之精煉回收 (I)，行政院原子能委員會核能研究所研究計畫 (972001INER015)，桃園。
4. 柯清水 (民 89)，新世紀化工化學大辭典，正文書局，台北。
5. 郁仁貽 (民 86)，冶金學概論，財團法人徐氏基金會，台北。
6. 新台灣新聞週刊 (民 93 年 01 月 16 日)，第 408 期，2007 年 7 月 3 日，取自 <http://www.newtaiwan.com.tw/bulletinview.jsp?bulletinid=14143>。
7. Chang, F. C., S. L. Lo and C. H. Ko (2007) Recovery of copper and chelating agents from sludge extracting solutions. *Separation and Purification Technology*, 53, 49-56.
8. Harry Clark's Chemistry Web Site (May, 14, 2008) Reference Tables of Standard Reduction Potentials, Retrieved July 10, 2008, from http://www.jesuitnola.org/upload/clark/Refs/red_pot.html.

收件：98.10.20 修正：99.03.08 接受：99.04.08