

廢棄物類

## 煉鋁集塵灰循環再生氫氧化鋁量產製程 技術開發

陳俊良\*、梁智超\*、卓憲和\*、王多美\*\*、簡光勵\*\*、楊昇府\*\*\*

### 摘 要

鋁合金為現代工業中相當重要的材料，其材料壽命儼然成為重要的議題。本研究接續前期在煉鋁集塵灰純化再生氫氧化鋁的成果，以鹼溶液純化提取鋁集塵灰中的鋁元素，以滴定方式獲得高純度氫氧化鋁，達到資源永續循環的目的。為提升本循環再生製程技術的商業性，核能研究所開發相關量產製程技術，開發項目包含 2 項製程設備：公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統與公斤級連續自動化滴定系統，應用於煉鋁集塵灰與氫氧化鈉溶液純化反應及滴定析出反應步驟，本研究規劃以 12 公升批次量進行技術驗證。

循環再生氫氧化鋁成品粉末經分析，與前期實驗室規模少量生產的研究結果一致，同樣在溶出液 pH 值 12~13 之間析出，並經電子掃描式顯微鏡 (SEM)、X 光繞射圖譜 (XRD) 分析、粒徑分析以及 X 射線螢光光譜 (XRF) 等分析，氫氧化鋁粉末外觀呈層狀，晶型為單斜晶和三斜晶結構，粉末中位粒徑大小為 12.94  $\mu\text{m}$ ，主要成分鋁元素含 99% 以上。

【關鍵字】煉鋁集塵灰、循環再生、氫氧化鋁

---

- |                    |      |
|--------------------|------|
| * 行政院原子能委員會核能研究所   | 技術員  |
| ** 行政院原子能委員會核能研究所  | 副工程師 |
| *** 行政院原子能委員會核能研究所 | 工程師  |

## 一、前言

鋁元素是地殼蘊含量最高的金屬元素，在地殼中的含量僅次於氧元素與矽元素，占地殼質量的 8.3% 左右。自然界中少有還原態金屬鋁，主要以鋁土礦的形式存在在地殼中。鋁屬輕金屬，密度僅  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ，導熱導電且外觀呈白色，用途廣極為廣泛，是當今相當重要的工業原料 (Nemerow, 2010)。純鋁塊材的表面易形成氧化鋁，可作為保護膜，具有抗腐蝕的效果。鋁合金的低密度特性兼具輕量與強度的性能，廣泛應用在航太、汽車、建築、國防等產業，其合金的用途在工業上占有非常重要的角色。

台灣每年產出 1.2 萬噸以上廢棄鋁製品，主要的回收方式為熔煉成鋁錠。在過去，生產過程產生的廢棄殘渣多以掩埋方式處理 (林建榮, 2012)，隨著近年環保意識的抬頭以及掩埋成本高漲至 1.6 萬元 / 噸以上，煉鋁業廢棄物的再生製程成為重要的研究項目 (方容利, 2005；楊異, 2006；吳佳正, 2010)，經由再生製程可獲得氫氧化鋁 (張晶, 2007；丁宏婭, 2006)，亦有研究可以機械方式將白鋁飛灰純化得鋁材 (Kudyba A., 2021)。再生氫氧化鋁可應用於生產多種含鋁無機鹽；也可製造阻燃劑、油墨等用品 (Horrocks A.R., 2008)；氫氧化鋁亦可利用膠體狀態時的吸附特性作為顏料的媒染劑 (Zeng, 2007)；氫氧化鋁膠體能膠結水中雜質，在淨水過程中擔任過濾的功用 (Isupov V.P., 1999)；廢鋁渣經循環再生後可製作成金屬玻璃 (Shen H., 2021) 和耐火材料 (Ramaswamy P., 2018)。

本研究延續本團隊前期煉鋁業集塵灰循環再生氫氧化鋁相關研究 (王多美, 2012；王多美, 2012；陳俊良, 2021)，採用溶出法將鋁集塵灰的鋁元素溶解於水溶液中 (Li, 2009；王紅偉, 2011；How, 2017)，並依據前期研究成果採用適當的製程參數設定。針對單批次循環再生製程產量的提升進行技術開發，由前期處理量約 100 公克的飛灰進步至 5 公斤。開發設計的主要製程設備有 2 項，分別為公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統以及公斤級連續自動化滴定系統，詳細細部規格設計將於實驗設備章節進行詳細說明。

煉鋁產業集塵灰經由公斤級循環再生製程所產製之氫氧化鋁成品，經電子掃描式顯微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM)、X 光繞射光譜儀 (X-Ray Diffraction spectrometer, XRD)、粒徑分析儀以及 X 射線螢光光譜分析儀 (X-Ray Fluorescence spectrometer, XRF) 進行產品材料分析 (Müller, 2006)，檢測產品粉末微觀樣貌、晶型結構、粉末粒徑分布以及成分分析，與前期煉鋁業集塵灰循環再生氫氧化鋁實驗室規模成品進行比較，確認產品品質。

## 二、研究架構與方法

### 2.1 研究架構

圖 1 為煉鋁集塵灰循環再生純化提取氫氧化鋁的簡易製作流程圖，本研究製程採用方式以箭頭標示，煉鋁集塵灰加入鹼性水溶液提取其中的鋁元素成為鋁酸鈉水溶液，鹼性溶液於純化過程中水量與濃度會耗損，需在過程中補充水分與氫氧化鈉，將溶液調整至適當濃度值。此溶液可以循環使用，減少廢水處理需求與製作成本。煉鋁業集塵灰經循環再生可適當地有效再利用，經由純化製程產出氫氧化鋁、氧化鋁以及陶瓷等材料，可減少廢鋁渣固體廢棄物掩埋處理費用與掩埋後對環境的不良影響及原物料的開採及製作成本。

透過本團隊前期研究定義最佳回收率與分離純化效率的製程參數，本期研究循環再生製程參數設定為鹼性水溶液採用莫耳體積濃度 3M 的氫氧化鈉溶液濃度、飛灰鹼液固液比 1:3、反應溫度 100°C、反應時間 2 小時，依據前期研究成果，在此條件下的再生氫氧化鋁純度可達 99.5% 以上，鋁離子的提取率也達 97.8% 以上 (陳俊良，2021)。預期成果為透過批次製程產量的提升，加速推動煉鋁業廢棄物相關循環再生產業的技術應用。

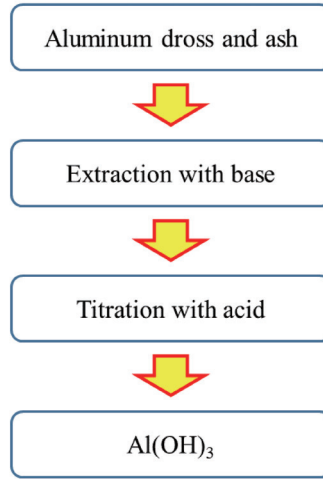
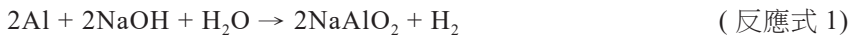


圖 1 廢鋁渣和集塵灰循環再生純化提取氫氧化鋁製作流程圖

## 2.2 實驗方法

氫氧化鋁純化萃取方法主要透過酸溶法與鹼溶法進行，依前期研究成果經驗得知，酸溶法製程後續的成分分離較困難，鹼溶法製程鋁溶出率一般較酸溶法低，但可得純度較高的成品，提取過程也較容易，具有較好的應用潛力。並透過前期研究成果優化鹼溶法製作過程，目前技術可將鋁溶出率提升至 94.5~99.8%，頗具有商業化利用價值。

本批次式製程實驗利用氫氧化鈉鹼溶液來將煉鋁業集塵灰中的鋁元素溶出，煉鋁業集塵灰由台南某廠商提供，鹼溶反應大致如下：



使用體積莫耳濃度 3 M 的氫氧化鈉溶液進行，製程參數設定為固液比 1:3、反應溫度 100°C、反應時間 2 小時。反應過程中有沸騰噴濺的現象發生，造成的水份流失，需於反應過程中緩慢進行少量補水，過程中不可快速大量補水會容易造成降溫現象使析出過程受影響。反應完成後進行固液分離，固體以水洗淨並烘乾，澄清液體則利用

酸鹼滴定法生成氫氧化鋁固體沉澱，沉澱生成反應大致如下：



煉鋁業集塵灰使用濃度 3M 的氫氧化鈉溶液進行純化萃取，於 pH 值 13 時開始有白色沉降物出現，白色沉降物經 SEM 分析外觀如圖 2 所示，經 XRD 檢測確認為  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ，檢測結果如圖 3。經循環再生的純化氫氧化鋁粉末，與商規氫氧化鋁如圖 4 比對，皆為片狀結構，商規氫氧化鋁粒徑範圍約在 3~15  $\mu\text{m}$ ，而本技術在前期研究中所循環再生的氫氧化鋁粒徑範圍約在 1~5  $\mu\text{m}$ ，粒徑分布較一般商規品細小。

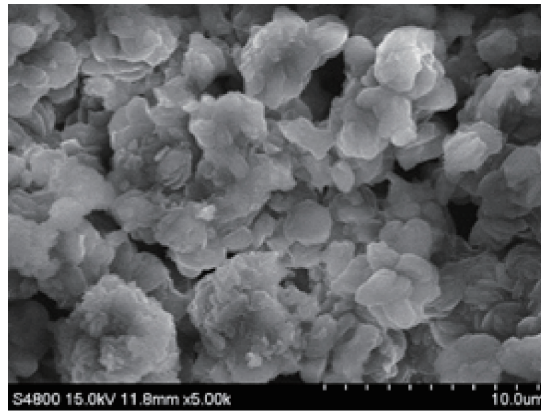


圖 2 煉鋁業集塵灰循環再生氫氧化鋁 SEM 外觀圖

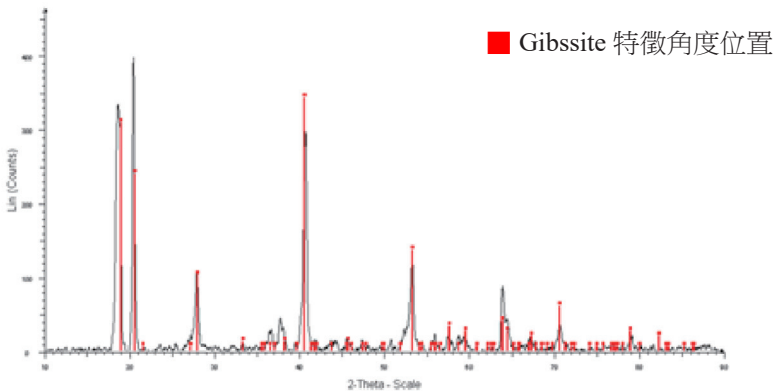


圖 3 煉鋁業集塵灰循環再生氫氧化鋁 XRD 分析圖

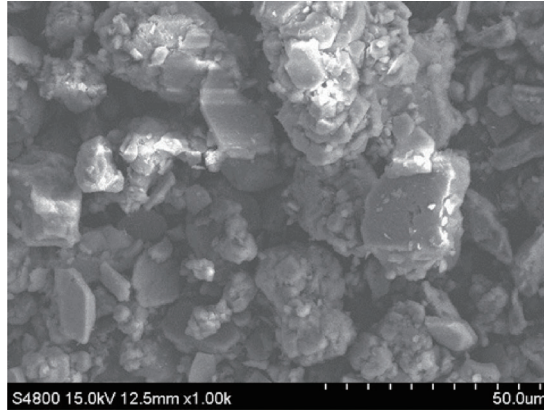


圖 4 商規氫氧化鋁粉末 SEM 外觀

為達到將製程批次量放大、增加商業應用價值的目的，本研究著重於增加批次量與自動化設備規劃設計及試產測試，以本所自主規劃設計研製之公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統及公斤級連續自動化滴定系統進行試產，將此產品與本所前期研究小規模實驗生產產品進行比較，驗證引入公升級製程設備系統提升生產批量的可行性。

### 2.3 實驗設備

公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統為本所開發之設備，目的為提升煉鋁業集塵灰鹼溶出步驟的生產批次量，設計圖如圖 5 所示。腔體材料使用 316 不鏽鋼，腔壁厚度 2 毫米厚，腔體內部直徑為 300 毫米，腔體內部高度為 320 毫米，腔體容積為 25 公升。反應系統具備氣壓式升降機構，以氣動機制進行反應系統腔體的開關。為因應純化反應過程產生的氣體，系統亦設置了背壓閥，在反應過程中進行排氣保持常壓，排出氣體則進入燃燒室燃燒後排出。另配置 1 石英玻璃視窗，直徑 85 毫米、厚度 5 毫米，作用為觀察純化反應過程。公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統透過控制盤進行操作，操作功能包括啟動開關、定時開關、完成信號燈、升降控制開關、轉速控制旋鈕、緊急停止鈕。

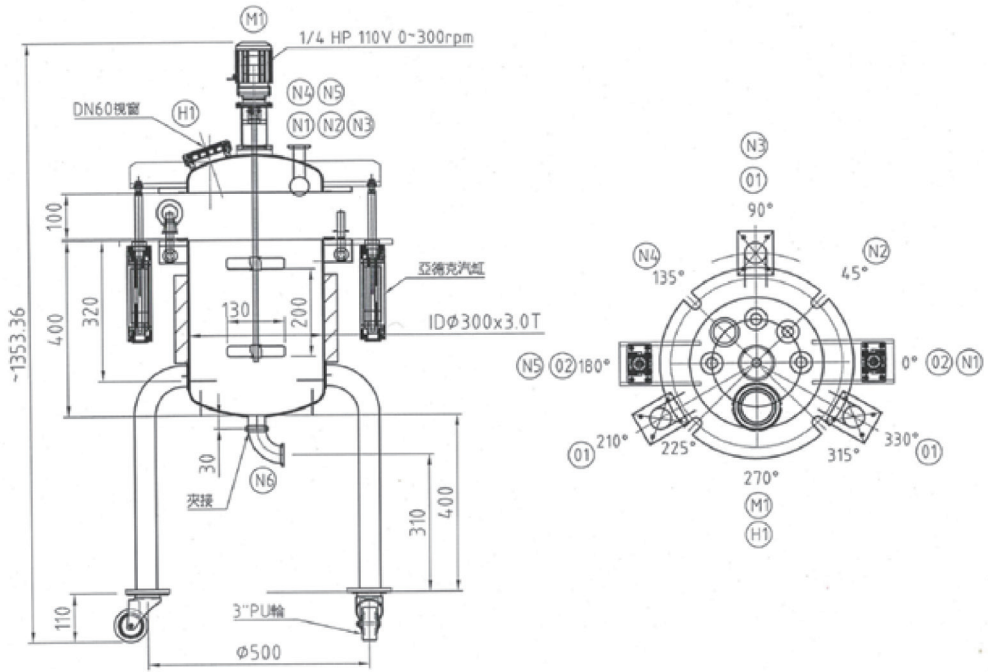


圖 5 公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統設計圖

公斤級連續自動化滴定系統為本所開發之設備，目的為提升滴定沉澱膠羽析出沉澱步驟的製程效率，設計概念圖如圖 6 所示。系統外觀尺寸為寬 80 公分、深 60 公分、高 130 公分，由自動化控制介面裝置、連續滴定沉析攪拌裝置組成。自動化控制介面裝置藉由實驗室虛擬儀器工程平台 (Laboratory virtual instrumentation engineering workbench, LabVIEW) 進行電腦圖形化程式控制與記錄，可設定自動化多階段滴定程式、手動控制滴定程式，並依時間記錄製程相關參數。連續滴定沉析攪拌裝置尺寸高 30 公分、高 40 公分，篩網網目規格為 150~200 目 (mesh) 的 304 不鏽鋼，可控制磁石轉子轉速範圍 60~1,400 rpm，容器容積為 30 公升。可以自動控制方式進行操作，利用電磁閥及軟體調控滴定液添加量，搭配篩網蒐集滴定析出的氫氧化鋁沉澱膠羽，簡化蒐集步驟、提升批次量，達到製程效率提升的效果。



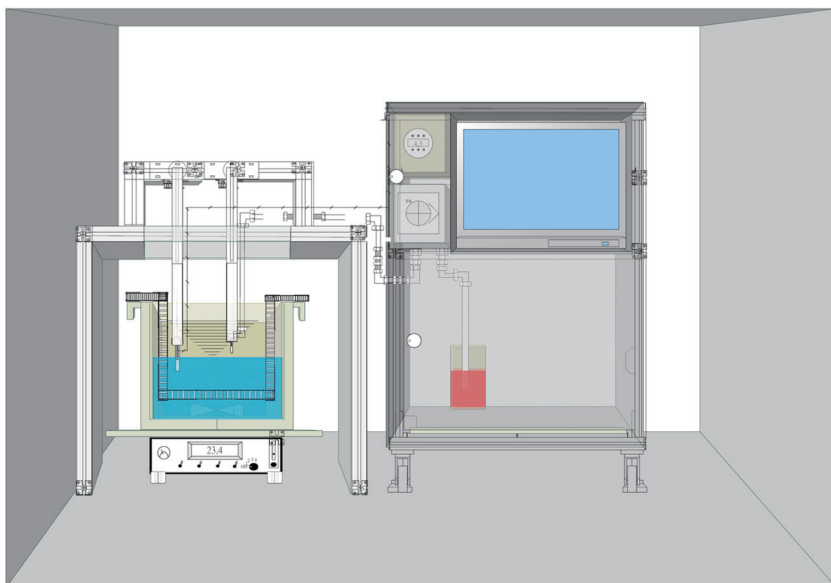


圖 6 公斤級連續自動化滴定系統設計概念圖

## 2.4 分析設備

掃描式電子顯微鏡 (SEM) 利用電子束撞擊檢測樣品，蒐集電子束撞擊樣品作用後的背向散射電子訊號，依訊號強弱產生對比差異來顯示圖像。本研究採用 HITACHI S-4800 型號之掃描式電子顯微鏡設備進行氫氧化鋁產品粉末的形貌外觀分析，設備外觀如圖 7(a) 所示。

X 光繞射分析儀 (XRD) 利用 X 光束射向樣品，X 光束只有在滿足週期性結晶結構的條件下才會產生繞射光束訊號，利用偵測器測量個角度的繞射光束強度，可以此訊號來分析物種成分及其結晶態的分析方法。本研究中採用 Bruker D8 型號之設備進行成果樣品結晶態分析，設備外觀如圖 7(b) 所示。此外，XRD 繞射圖譜資料透過定量軟體可進行成分定量分析，分析方式採用里特費爾德精算法 (Rietveld refinement method)，透過以資料庫繞射圖譜訊號進行組合模擬，與試驗數據圖譜進行比較並計算圖譜誤差，反覆迭代運算達最佳解，在已完成定性的前提下，可得到更精確、高再現性的定量分析數據。



圖 7 (a) 掃描式電子顯微鏡 HITACHI S-4800；(b)X 繞射分析儀 Bruker D8

粒徑分析儀是利用光散射法 (Scattering) 原理進行粒徑分布量測，透過量測雷射光線通過溶液中的顆粒時產生的散射光能分布，可以推算出待測顆粒的粒徑分布，此方法可量測的粒徑範圍廣，可量測  $0.01\sim 5000\ \mu\text{m}$  的顆粒粒徑，且分析成果具有高再現性，為目前主流廣泛應用的粒徑分析方式。粒徑分析儀設備外觀圖如圖 8(a) 所示。

X 射線螢光光譜分析儀 (XRF) 利用高能量 X 光射入待測材料，待測材料中元素的內層電子被擊出後，造成外層電子向內層躍遷，躍遷過程的能量差以光的形式釋放，呈現具特徵性的二次 X 光 (Secondary X-ray)。經偵測器蒐集此二次 X 光 (即為螢光) 進行能量散布分析，可有效地對待測物進行非破壞性定性分析，快速獲得元素半定量的分析結果。X 光螢光光譜分析儀設備外觀圖如圖 8(b) 所示。

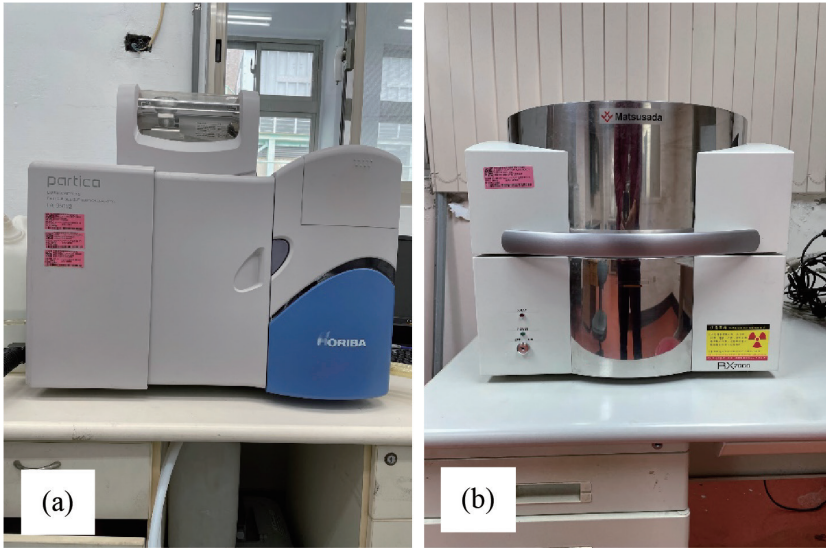


圖 8 (a) 粒徑分析儀 HORIBA LA-950V2 ; (b) X 射線螢光光譜分析儀 Matsusada RX7000

### 三、結果與討論

本批次製程實驗鹼溶出步驟採用體積莫耳濃度 3 M 的氫氧化鈉溶液進行，煉鋁業集塵灰原料由國內某廠商提供，煉鋁業集塵灰與氫氧化鈉鹼溶純化反應液固液比為 1:3，純化反應溫度為 100°C、反應時間 2 小時。實驗參數設定表如表 1 所示。

表 1 實驗參數設定表

固液比	氫氧化鈉溶液 (M)	反應溫度 (°C)	反應時間 (hr)
1:3	3	100	2

每批次進行純化反應需要 3 公升莫爾體積濃度 3 M 的氫氧化鈉溶液。氫氧化鈉分子量為 40 g/mol，以 3 公升純水作為溶劑，目標莫爾體積濃度為 3 M，經計算可得配製方式為：在 3 公升純水溶劑中加入 360 公克重的氫氧化鈉，配製過程如圖 9 所示。搭配磁石攪拌子加速氫氧化鈉溶解過程，溶解過程為放熱反應，實驗操作時須小心注意高溫。

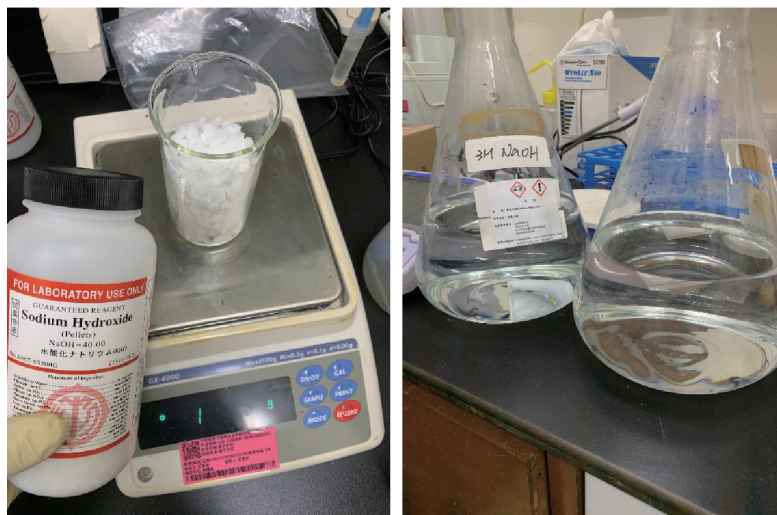


圖 9 以純水及氫氧化鈉配製 3 M 氫氧化鈉溶液

### 3.1 公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統運轉測試

為提升煉鋁業飛灰循環再生產業技術應用潛力，本所自主設計開發公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統，並針對再生氫氧化鋁鹼溶純化反應步驟進行製程優化。基本組成零件與工件尺寸規格已於實驗設備進行簡單說明，設備實際圖如圖 10 所示。反應腔內體積為 25 公升，考慮到反應過程會產生氣體及氣泡，每批次純化反應製程可混入 1.0 公斤的煉鋁集塵灰及 3.0 公升的 3 M 氫氧化鈉反應溶液。反應過程中會產生氣體將促使腔內氣壓上升，當腔內氣壓大於  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  時，純化反應系統會透過爐腔上的背壓閥進行排氣，將反應腔體內維持在接近常壓的狀態。整個純化反應過程中，純化反應系統的攪拌刀葉可定轉速穩定運轉，幫助固液混合過程，加速純化反應進行。

反應過程中經 2 小時攪拌並完成純化反應後，可由腔體下方洩漿閥洩料，洩料狀況如圖 11(a) 所示，將反應完成後的混合液洩漏並蒐集。反覆進行 5 批次的純化反應後，蒐集 5 批次的洩料混合物，可得約 18 公斤的洩料混合物，如圖 11(b) 所示。

洩料混合物為固液混合物，上層液體仍具有許多懸浮固體，因此下一步為取出上層液體部分後進行離心，如圖 12(a)，以達到固液分離的目的。經離心分離過後，取液體的部分可得到深褐色的透明澄清液，如圖 12(b)，共蒐集得 12 公升深褐色澄清液。

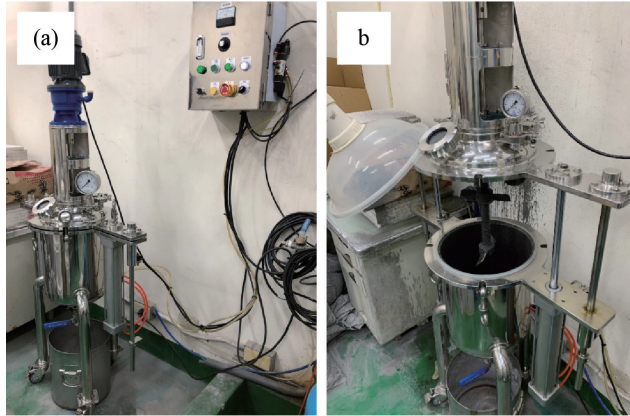


圖 10 公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統

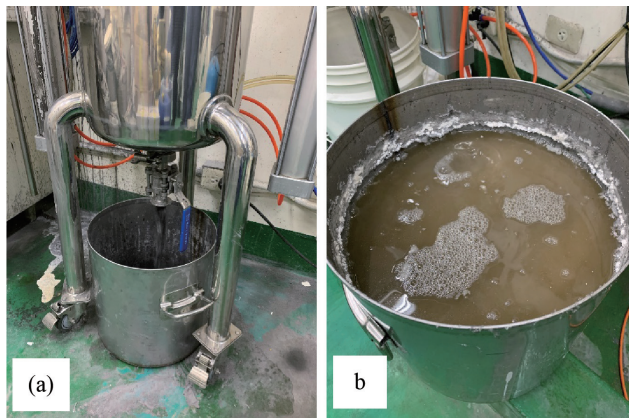


圖 11 (a) 洩漿閥洩料狀況；(b) 蒐集洩料混合液

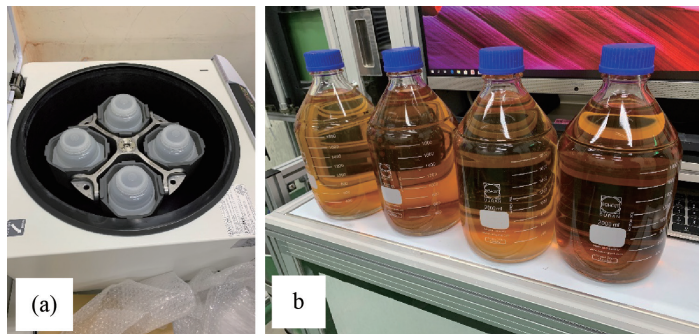


圖 12 (a) 離心機固液分離；(b) 蒐集上層深褐色澄清液

### 3.2 公斤級連續自動化滴定系統測試

蒐集的深褐色澄清液須經硫酸滴定，當 pH 值達 12.5 時，於滴定液中開始生成白色氫氧化鋁膠羽。為提升此滴定生成膠羽步驟的效率，本所自主設計開發公斤級連續自動化滴定系統，系統主要分為 2 個部分，一是連續滴定沉析攪拌裝置，另一是自動化控制介面裝置，規格尺寸分別如圖 13(a) 與圖 13(b) 所示。

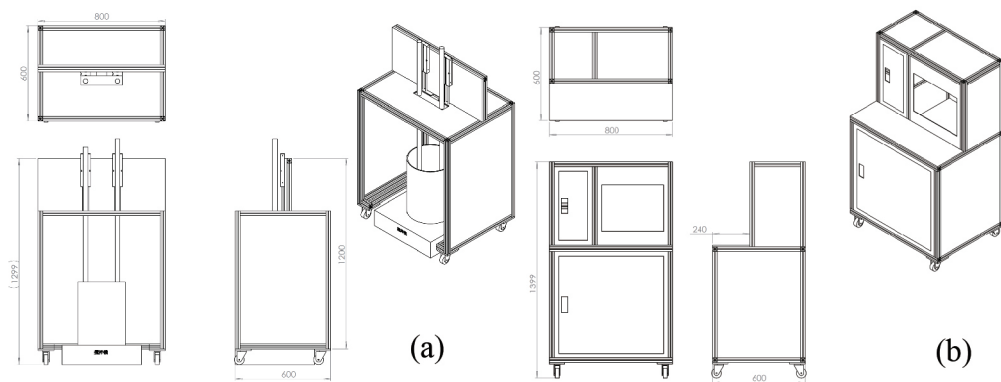


圖 13 (a) 連續滴定沉析攪拌裝置尺寸規格圖；(b) 自動化控制介面裝置尺寸規格圖

連續滴定沉析攪拌裝置外觀呈圓筒狀，尺寸直徑 30 公分、高度 40 公分，內層具篩網，網目為 150 ~ 200 目數 (mesh)，材料採用 304 不鏽鋼。搭配磁石攪拌器，轉速操作範圍 60 ~ 1,400 rpm，最大攪拌容積為 30 公升。自動化控制介面裝置由 LabVIEW 進行如電腦圖形化程式控制及記錄功能、可程式化設定多階段滴定製程、可視需求採用手動 / 自動滴定沉析製程、可自動依時間紀錄實驗製程參數包括氫氧化鋁沉析 pH 變化曲線及加藥曲線等。公斤級連續自動化滴定系統整體外觀如圖 14 所示。此系統的規劃設計導入自動控制以及程式化控制的概念，以軟體控制電磁閥進行滴定過程，並且可依需求設定階段式設定滴定終點及多段滴定製程。在自動化控制介面裝置與連續滴定沉析攪拌裝置的互相搭配下，不僅方便操作滴定過程及蒐集懸浮沉析物；也可方便記錄觀察各項實驗操作參數；達成 10 公升以上規模自動化滴定析出製程目標。



圖 14 公斤級連續自動化滴定系統整體外觀圖

系統操作主要透過自動化控制介面裝置進行，裝置啟動後為圖形化控制介面如圖 15 所示，並可透過溶液 pH 曲線圖以及滴定加藥曲線圖即時觀察實驗狀況。介面左側為手動控制介面區，可手動控制 pH 計 (pH meter) 以及滴定加藥管位置的上升 / 下降、以及手動控制磁石攪拌器之開關。介面右方為可階段化自動式滴定程式參數設定介面，首先加藥時間與停止時間之設定，可以直接控制蠕動馬達啟動與關閉時間，達到以間歇式加藥的方式進行滴定過程；加藥關閉點為階段式滴定終點，當 pH 計偵測到 pH 值低於設定值達持續時間設定值時，會自動結束滴定。資料儲存與紀錄功能，則在顯示介面右下角，可設定資料儲存路徑以及紀錄週期。

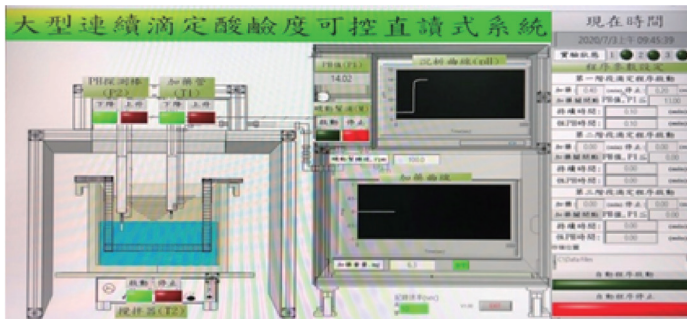


圖 15 自動化控制介面裝置圖形化控制介面

將收集的 12 公升澄清液倒入連續滴定沉析攪拌裝置，如圖 16 所示，酸滴定過程採用自動化控制介面裝置進行控制設定，滴定析出的過程如圖 17 所示，到達滴定終點並靜置片刻後的外觀狀況如圖 18 所示。向提取攪拌裝置容器內篩網，析出的氫氧化鋁膠羽會留在篩網內，下一步則將這些白色沉澱的氫氧化鋁膠羽蒐集起來。



圖 16 將蒐集的澄清液倒入連續滴定沉析攪拌裝置



圖 17 澄清液滴定過程連續析出外觀圖





圖 18 澄清液達滴定終點並靜置後外觀圖

將蒐集到的白色沉澱物進行離心，使氫氧化鋁沉澱與澄清溶液分離，萃取出固體氫氧化鋁沉澱的部分。最後，以去離子水水洗析出的沉澱物，再次離心後取其氫氧化鋁沉澱物如圖 19 所示，並重複水洗離心步驟一次後，再將沉澱物經乾燥、烘乾，可得氫氧化鋁成品粉末。反應完成後的高鹼廢鋁溶液，須妥善收集後請環保清運公司進行後續處理。



圖 19 白色沉澱氫氧化鋁膠羽需水洗離心取白色固體部分

### 3.3 再生氫氧化鋁粉末分析結果

每家廠商、每批次提供的煉鋁集塵灰成分具有差異性，經檢測分析鋁元素重量占比大約在 53.9~71.7 wt% 之間，組成成分表如表 2 所示，因此每次再生製程結果具有差異性。本次製程實驗共使用約 5.0 公斤的煉鋁集塵灰、16.9 公斤的氫氧化鈉鹼溶液，產出再生氫氧化鋁約 4.2 公斤，如以使用的煉鋁集塵灰及氫氧化鈉鹼溶液加總做為原料計算，產率為 19.2%、鋁元素提取率(以煉鋁集塵灰鋁元素重量占比為 60 wt% 進行計算)約為 89.7%。

表 2 各廠家提供煉鋁集塵灰成分分析表

項目	星○	新○	振○	單位
Al	53.945	65.044	71.678	wt%
Si	15.935	10.698	6.377	wt%
Ti	0.905	1.194	1.275	wt%
Mn	0.167	0.180	0.175	wt%
Fe	3.529	3.144	3.388	wt%
Cu	1.038	0.892	0.921	wt%
Zn	7.023	5.450	5.475	wt%
S	5.354	2.829	1.188	wt%
Cr	0.253	0.241	0.229	wt%
Co	0.073	0.054	0.049	wt%
Ni	0.441	0.271	0.204	wt%
Zr	0.477	0.464	0.280	wt%
As	8.413	6.811	6.160	wt%
Hf	0.366	0.309	0.356	wt%
Pb	1.529	1.288	1.296	wt%
V	0.120	0.103	0.131	wt%
Sn	0.987	0.857	0.949	wt%
Bi	0.432	0.578	0.245	wt%
Mo	0.314	0.171	0.195	wt%

在酸滴定的過程中，沉降物於 pH 值 12.5 左右析出，析出過程滴定曲線圖如圖 20 所示。沉降物經固液分離、水洗、烘乾後，可得再生氫氧化鋁白色粉末，外觀如圖 21 所示。為確認公斤級批次量循環再生製程產品特性，對產品進行掃描式電子顯微鏡顯

(SEM 分析)、X 光繞射分析 (XRD)、粒徑分析以及 X 射線螢光光譜 (XRF) 分析。

產品粉末顯微結構外觀圖採用 HITACHI S-4800 掃描式電子顯微鏡設備進行分析，產品粉末顯微外觀如圖 22 所示，與前期研究相同製作條件在實驗室規模操作所得的循環再生產品粉末相近，前期研究產品 SEM 外觀圖如圖 2 所示，商規產品如圖 4 所示，皆為片狀結構，顯示在相同的再生製程條件下，以本所設計的公斤級批次量生產設備製作可得相同粉末外觀的氫氧化鋁產品。

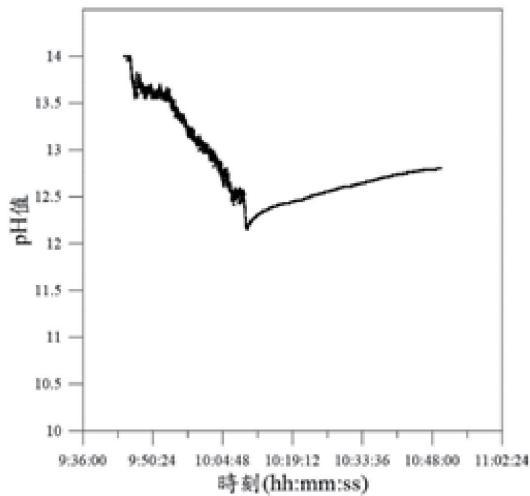


圖 20 析出過程滴定曲線圖

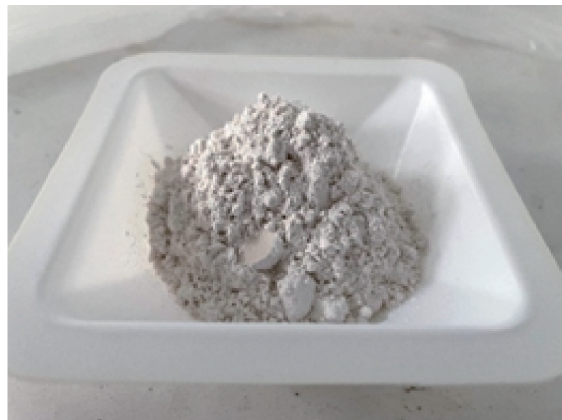


圖 21 循環再生氫氧化鋁產品粉末外觀

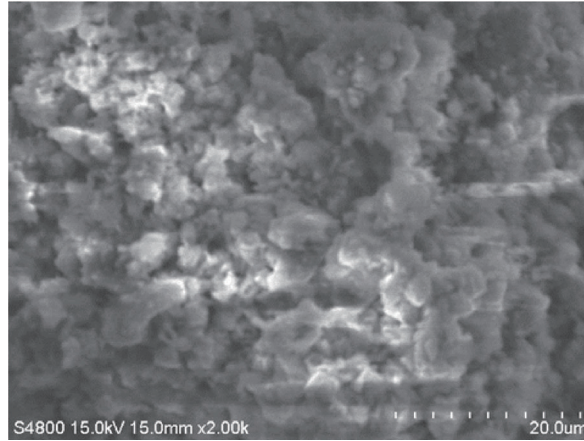


圖 22 再生氫氧化鋁 SEM 外觀圖

產品粉末結晶結構成分分析採用 Bruker D8 型號的 X 光繞射圖譜分析儀 (XRD) 進行分析，分析檢測圖譜如圖 23 所示，顯示產品粉末成分為單斜晶結構 (Gibbsite) 氫氧化鋁以及三斜晶結構 (Nordstrandite) 氫氧化鋁，其中以單斜晶結構峰譜強度較強。將 XRD 分析圖譜利用里特費爾德精算法進行結晶結構成分擬合計算，可進一步推算產品粉末成分比例，經成分定量分析結果如表 3 XRD 圖譜結構成分擬合定量分析結果表所示，顯示主要成分為單斜氫氧化鋁約 74%、其餘為三斜氫氧化鋁約 26%，主要成分與前期成果一致。

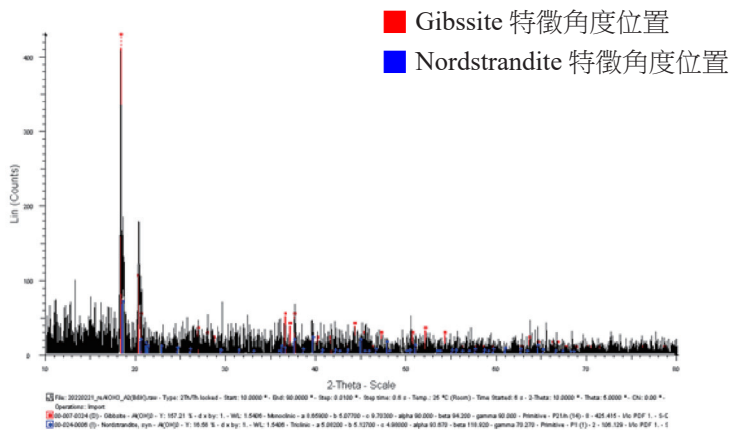


圖 23 X 光繞射圖譜特徵峰比對圖

表 3 XRD 圖譜結構成分擬合定量分析結果表

編號	晶相	化學式	結晶結構	重量百分比	擬合誤差
1	Gibbsite	Al(OH) <sub>3</sub>	monoclinic (單斜)	74.13%	0.80%
2	Nordstrandite	Al(OH) <sub>3</sub>	triclinic (三斜)	25.87%	0.80%

產品粉末粒徑分析採用 HORIBA LA-950V2 雷射粒徑分析儀進行分析，粒徑分析數據整理如表 4 所示，粒徑分析圖如圖 24 所示。再生氫氧化鋁公斤級批量生產產品粉末粒徑大致分布在 6.12~23.6 微米 ( $\mu\text{m}$ ) 間，前 10% 分布粒徑 (D10) 為 6.12  $\mu\text{m}$ ；中位分布粒徑 (D50) 為 12.94  $\mu\text{m}$ ；前 90% 分布粒徑 (D90) 為 23.62  $\mu\text{m}$ ，整體平均粒徑則為 14.25  $\mu\text{m}$ 。商規氫氧化鋁產品粒徑分布約在 3~15  $\mu\text{m}$  範圍內，與本研究設備批量生產的循環再生氫氧化鋁產品粒徑特性相近。

表 4 循環再生產品粉末粒徑分析數據表

前 10% 粒徑 (D10)	中位粒徑 (D50)	前 90% 粒徑 (D90)	平均粒徑 $D_{\text{mean}}$
6.12 $\mu\text{m}$	12.94 $\mu\text{m}$	23.62 $\mu\text{m}$	14.25 $\mu\text{m}$

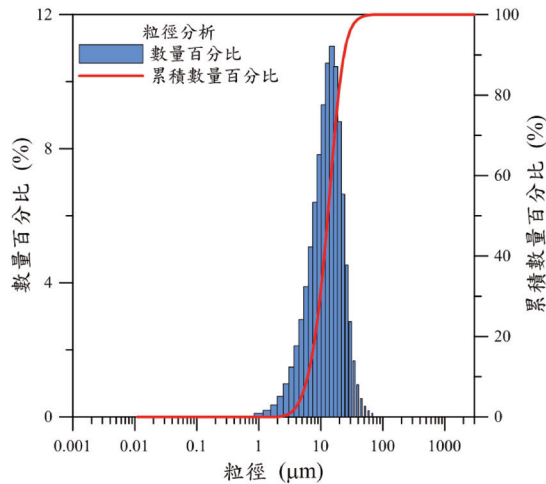


圖 24 循環再生氫氧化鋁產品粒徑分析圖。

產品粉末成分分析採用 Matsusada RX7000 型號的 X 射線螢光光譜分析儀 (XRF) 進行分析，分析結果成分比例報告如圖 25 所示，鋁元素 (Al) 峰譜圖如圖 26 所示。由於 XRF 無法定義輕元素 (如氫、氧)，分析得主要產品元素成分以鋁元素佔大部分，達重量百分比 99.9% 以上，與前期研究製作成果相同。分析結果中含有一小部分的鐵元素，鐵元素可能為製作過程所使用的不鏽鋼容器污染所造成。

### Quantitative Analysis Result Report

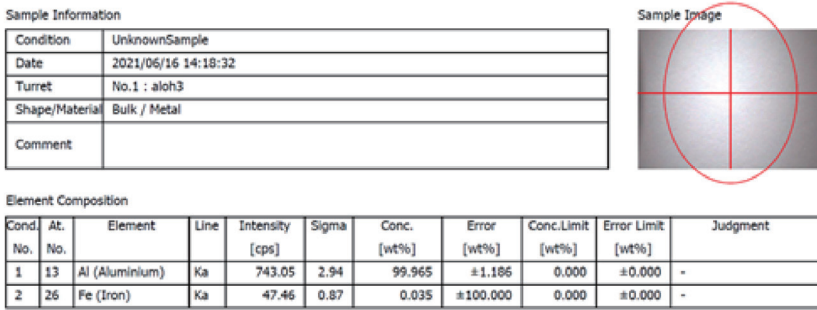


圖 25 X 射線螢光光譜分析成分比例

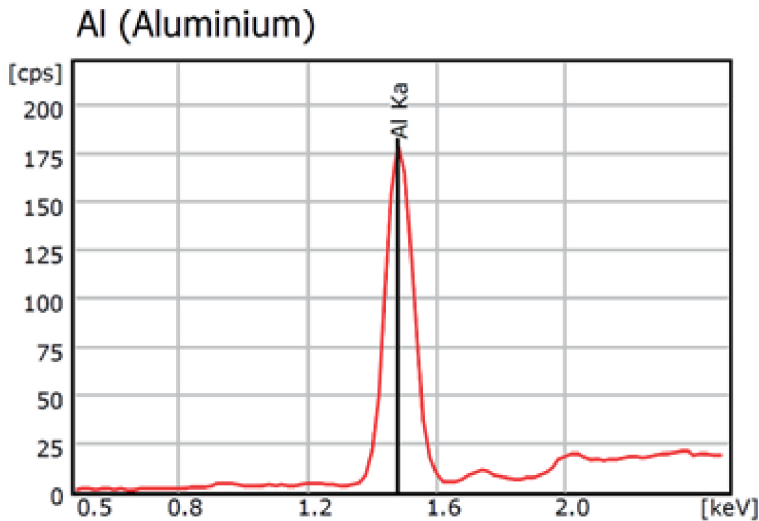


圖 26 X 射線螢光光譜分析鋁元素峰譜圖

## 四、結論

本研究延續前期關於煉鋁業集塵灰純化再生氫氧化鋁等相關研究，為提升煉鋁業廢棄物循環再生技術的商業應用價值，本所設計開發公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統以及公斤級連續自動化滴定系統進行循環再生製程。以前期研究所得的純化製程參數條件：鋁灰鹼液固液比 1:3、氫氧化鈉溶液濃度 3M、反應溫度 100°C、反應時間 2 小時進行實驗。並分析產品粉末與前期研究成果進行比較，以驗證公斤級循環再生製程的可行性。

製程採用公斤級煉鋁集塵灰純化反應系統可大幅提升單次處理量，實驗期間混合、排氣、洩料可正常運作，降低人力成本，符合設計目標。公斤級連續自動化滴定系統可程式化設定好滴定步驟，系統自動進行滴定達滴定終點停止，單次可處理 12 公升以上的製程液體，有效降低操作人力需求並提升批次處理量，符合設計目標。

本研究對以公斤級製程技術設備生產的循環再生氫氧化鋁產品粉末進行了特性分析，如電子掃描式顯微鏡、X 光繞射光譜分析、粒徑分析以及 X 射線螢光光譜分析等。經分析結果顯示粉末外觀呈層狀，顆粒大小約在 10  $\mu\text{m}$  左右。氫氧化鋁粉末結晶結構為單斜晶體 (Gibbsite) 以及部分的三斜晶體 (Nordstrandite)，其晶體成分比例約為 3:1。產品粉末經粒徑分析得中位粒徑為 12.94  $\mu\text{m}$ ，與 SEM 圖觀察的尺寸大致相符。並經 X 射線螢光光譜分析確認產品粉末鋁元素成分含量達 99% 以上。經比對與前期研究製造成品大致相符，與商規產品粒徑規格相近，符合產品應用規格。

## 參考文獻

- 丁宏婭、馬鴻文、王蕾、李賀香 (2006)，「利用高鋁粉煤灰製備氫氧化鋁的實驗」，現代地質，第 20 卷，第 3 期，第 405-408 頁。
- 方容利、王琳 (2005)，「生態化利用粉煤灰製備高純超細氫氧化鋁」，化學工程，第 33 卷，第 3 期，第 29-32 頁。
- 王多美、楊昇府、陳慶庭、李文成、孫金星 (2012)，「應用田口實驗計畫法於煉鋁集

- 塵灰製備氫氧化鋁之參數最佳化」氧化鋁之參數最佳化」，技術報告，編號 INER-9311，核能研究所。
- 王多美、楊昇府、陳慶庭、李文成、孫金星、曾錦清 (2012)，「煉鋁集塵灰使用鹼法製備氫氧化鋁」，技術報告，編號 INER-9842，核能研究所。
- 王紅偉、馬科友、秦鳳婷、杜新玲、郭江、張學英 (2011)，「拜耳法碳分製備粗粒氫氧化鋁工藝研究」，有色金屬，第 19-22 頁。
- 吳佳正、陳偉聖、蕭庭哲、周瑋珊、劉雅菁、蔡敏行 (2010)，「二次溶鋁廢渣資源化處理法」，中華民國專利證號 I319015。
- 林建榮、盧幸成、葉俊廷、蔡志威、戴年禧 (2012)，「鋁渣處置與管理現況探討」，中華民國環境工程會刊，第 23 卷，第 2 期，第 4 篇。
- 張晶、李風亭、張冰如 (2007)，「用鋁灰製備氫氧化鋁的試驗研究」，濕法冶金，第 26 卷，第 4 期，第 206-208 頁。
- 陳俊良、王多美、簡光勳、楊昇府 (2021)，「煉鋁產業二次物料提取永續氫氧化鋁之研究」，工業污染防治，第 151 期，第 122-145 頁。
- 楊異、吳竹成、楊冠群 (2006)，「鋁廢渣廢灰的治理」，Non-Ferrous Metals Recycling and Utilization，第 22-24 頁。
- Horrocks A.R. (2008), "Flame retardant/resistant textile coatings and laminates," *Advances in Fire Retardant Materials*, Woodhead Publishing Series in Textiles, p.159-187.
- How L.F., Islam A., Jaafar M.S., Taufiq-Yap T.H. (2017), "Extraction and Characterization of  $\gamma$ -Alumina from Waste Aluminum Dross," *Waste Biomass Valor*, Vol. 8, p.321-327.
- Isupov V.P., Menzeres L.T. (1999)," Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions," *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 120, Part. A, p.621-652.



- Kudyba A., Akhtar S., Johansen I., Safarian J. (2021), "Aluminum Recovery from White Aluminum Dross by a Mechanically Activated Phase Separation and Remelting Process," *The Journal of The Minerals & Materials Society*, Vol. 73, p. 2625-2634.
- Li J.P., Gan J.H., Li X.W. (2009), "Leaching of Aluminum and Iron from Boile Slag Generated from a Typical Chinese Steel Plant," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, p.1096-1101.
- Müller U., Rübner K. (2006), "The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component," *Cement and Concrete Research*, Vol.36, p.1434-1443.
- Nemerow, N.L. (2010), "Contemporary Practice and Vision for the Future," *Industrial Waste Treatment*, Butterworth, Heinemann Press, p.13-24.
- Ramaswamy P., Gomes S.A., Ravichander N.P. (2019), "Utilization of Aluminum Dross: Refractories from Industrial Waste," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol.577, 012101.
- Shen H., Ekberg C., Zhang S. (2021), "Harmless Disposal and Resource Utilization for Secondary Aluminum Dross: A Review," *Science of The Total Environment*, Vol. 760, 143968.
- Zeng F.H., Jiang Q.B., Chen X.H., (2007), "Surface Modification of Aluminum Hydroxide: Its Application in Silicone Rubber Based Coatings," *Paint & Coating Industry*, Vol.37-2, p.39-41.