

廢棄物及資源化

熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥 效益評估

段紀義*、陳庭堅**

摘 要

廢水污泥使用機械脫水得到的脫水污泥，雖含水減少但仍有有機物等物質，在儲存及清運時易發臭引起環境污染問題。而使用藥劑除臭滅蟲也會造成二次污染，所以脫水污泥仍有進一步乾燥除水的必要。本研究針對板框脫水污泥，以批次操作使用循環空氣乾燥機乾燥，含水率由 68% 降至 30%。研究模擬三個案例：案例 C1 為傳統循環空氣乾燥機，使用鍋爐蒸氣與冰水機製作熱水與冰水提供污泥乾燥用。案例 C2 探討熱泵取代鍋爐蒸氣與冰水機的可行性。案例 C3 結合熱泵與狹點技術改善能源使用效益。結果顯示 C3 效益最好，熱泵可完全取代鍋爐蒸氣與冰水機，狹點溫度亦由 18 °C 降至 1.3 °C，能源使用效益達最佳化；與 C1 比較，CO₂ 排放量全年減少 12,522 kg-CO₂，投資設備亦在 6.1 年可完全回收。

【關鍵字】污泥乾燥、節能減碳、熱泵、廢熱回收

*新加坡商傑樂生技股份有限公司 台灣分公司 技術經理

**國立屏東科技大學 環境工程與科學系 教授

一、前言

污泥是廢水處理過程中最終產出的固體物，含有有機物質，重金屬、致病菌和寄生蟲等成分。在空氣中暴露，儲存及清運時均容易發臭引起環境污染問題，並會招來蚊蟲蒼蠅，而使用藥劑除臭及滅蟲也會造成二次污染。近幾年國內經濟成長及環保法規加嚴，使廢水處理量亦增加，污泥產出量相對也增多。依據環保署統計民國 100 年國內污泥清運量總計 2,767,547 公噸，其中有害污泥清運量約 16.31%、一般污泥清運量約 66.49%、再利用污泥清運量約 17.20% [1]。污泥處理的目的地為減量化、穩定化、無害化及資源化，一般從廢水處理廠排出污泥需先經機械方式脫水處理，常見污泥脫水機有帶式壓濾脫水機、板框式壓濾脫水機及離心式脫水機等，脫水後污泥的含水率為 60-80% [2]。1980 年代末污泥熱乾燥技術已成功應用在歐美等國家，一般採用加熱蒸發方法使含水率降至 10-50%。乾燥後污泥體積減少 4-5 倍，產品無臭且無病原體，微生物和病菌也減少；除方便污泥的存儲、運輸和利用外，亦可用作肥料、土壤改良劑以及替代能源等 [3]。

循環空氣乾燥機為一個密閉系統，空氣循環可使污泥蒸發出的異味不至外散造成環境問題。傳統乾燥設備的熱源還是以使用火力或電力乾燥為主，其中 25% 使用瓦斯，25% 燃油，30% 電力(及電熱管、遠紅外線等)，15% 超導電磁電熱器，5% 其他方式(如木材屑等) [4]。而火力(瓦斯、重油或柴油)成本高，亦有火災等風險，完全燃燒時有溫室氣體(CO₂)問題，不完全燃燒時有粉塵及 CO 問題。電力乾燥(電熱管或紅外線)耗電，使成本增加 [5]。因此需要有低成本、省能，又兼顧環境安全地乾燥機。

熱泵(heat pump)利用冷媒冷凝及蒸發的特性可製作熱水及冰水，運用在乾燥機可取代鍋爐蒸氣及冰水機的功能，預期此熱泵乾燥機除可節省能源使用，降低生產、操作成本。因無燃燒亦無火災等風險，更可減少 CO₂ 排放減少溫室效應的危害 [6]。雖然使用熱泵目的為降低能源耗用，但能源仍需整合以達到最適化使用狀況。狹點技術(pinch technology)可調整能源利用達到最適化目標，是提高能源使用效率的最佳方法之一 [7]。狹點技術主要為分析由各製程設備所收集的能耗數據及狀況，然後製作能源傳送及使用的熱交換網路，經由網路可瞭解各熱交換系統能源使用效率，

整合各能源使用網路系統後，進行部分製程或能源傳遞路線的修改，以達成能源使用最適化及節能的目的。

本研究使用循環空氣乾燥機，以批次操作方式乾燥廢水處理場產出的脫水污泥，探討使用熱泵取代乾燥機的鍋爐蒸氣及冰水機的可行性，並用狹點技術調整及確認設備達到最適化能源需求。研究模擬三個案例：案例 C1 為傳統循環空氣乾燥機，使用鍋爐蒸氣與冰水機製作熱水與冰水提供污泥乾燥用；案例 C2 探討使用熱泵取代蒸氣與冰水機製作熱水與冰水的可行性，案例 C3 結合熱泵與狹點技術進行能源使用效益改善。最後對 3 個案例除進行使用效益評估外，亦探討各案例對溫室氣體排放改善結果。

二、材料與方法

2.1 污泥乾燥

傳統污泥乾燥法係使用熱能蒸發污泥內水份，污泥在恆溫下受熱乾燥時，自由水份自固體內部供給至污泥表面，以補足表面蒸發水份，乾燥速率保持恆定，此時期稱為恆速乾燥期。然後污泥顆粒表面蒸發速率大於內部供給至表面的速率時，造成乾燥速率下降，此時期為第一減速期。最後污泥的水份變成自表面以下蒸發，由於質傳與熱傳均需透過一層逐漸加厚的半乾固體，因此蒸發速率也逐漸下降，直至為零，此時期所移除的為表面水，稱為第二減速期。其他未被移除的水份，以化學鍵結在固體顆粒上為化學結合水。如為脫水後的污泥濾餅進行乾燥，自由水與間隙水均已被移除，故開始的重量變化曲線會從第一減速期開始^[8]。

污泥乾燥法最常用者為曬乾床法，優點為能源支出極小，但缺點為佔地大，陰雨天無法使用，且有二次空氣污染問題。其他使用的設備(及其對應熱源)一般分為熱風直接加熱式、熱風傳導加熱式、輻射乾燥、除濕式乾燥及低溫冷凍乾燥。其中又以熱風加熱方式使用最為普遍^[9]。主要利用燃燒裝置，例如乾燥設備提供熱風和煙氣，在高溫作用下蒸發污泥中水分。其中熱風加熱可藉由蒸氣或電熱產生，一般最常用蒸氣，可使污泥的含固率從 25% 提高至 85 ~ 95%^[3]。近來環保意識抬頭，工

62 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

廠空間受限，有愈來愈多的業者改使用其他機械乾燥方式，唯受限能源費用，目前仍尚未普及。

2.2 熱泵

熱泵主要用途在熱能移送，可將相對低溫處的熱能藉由熱泵作用後送至相對高溫的地方；操作原理及設備與冷氣機或冰水機相同，但功能目的不同。工業界使用熱泵基本方法(或配置)如圖 1 所示，此為水對水型熱泵系統，冷媒至蒸發器吸收循環冰水熱能後蒸發成氣態(D→A)，並使冰水溫度降低，可供應工廠製程冰水使用或吸收工廠排放出廢熱。冷媒離開蒸發器後經由壓縮機壓縮(A→B)成高溫高壓氣體，再利用水冷方式在冷凝器使冷媒放出熱能(B→C)而冷凝，此放熱可提升循環熱水溫度供製程使用。最後冷媒經膨脹器釋放壓力(C→D)降溫回復到原始狀態，如此冷媒可重複使用^[10]。而運用熱泵冷凝器放熱與蒸發器吸熱的功能，可直接取代乾燥機外部鍋爐蒸氣及冰水機的功能，而達成製作熱水及冰水的目的。

一般熱泵能源效率使用 COP 值(coefficients of performance，輸入每單位的消耗功率所能產出能量數值)作為判斷依據。COP 值可使用方程式(1)計算，在合理規劃使用下熱泵在放熱製作熱水部份 COP 值大於 3.0。此即表示輸入 1kW 的能量給熱泵，可達到輸出最少 3kW 熱能的效果，比傳統電力、瓦斯、柴油等熱水加熱系統更節省能源。如再運用熱泵吸收廠內廢熱製作冰水功能後，則整體熱泵 COP 值可高達 5.5 以上^[11]。並可連續、穩定使用，不會類似太陽能受到日、夜與氣候等因素影響而暫停使用。

$$COP = W / E \text{ -----(1)}$$

式中 COP 為熱泵性能係數，W 與 E 分別為設備輸出與輸入的能量(kW/Kw)。圖 1 中只考慮熱泵冷媒在蒸發器吸熱作用時，此即為冷氣機或冰水機；除用於降溫及製冰水外，另運用在超市作空氣除濕機用時 COP 值可達 4.2^[12]，運用在海水淡化製程使蒸發海水冷凝時 COP 值可達 3.0^[13]，及運用在食品廠乾燥食品時 COP 值可

達 1.85^[14]。相反，只強調熱泵冷媒在冷凝器放熱功能時，此即為一般熱泵熱水器；如用在建築物地板加熱時 COP 值可達 3.75^[15]、用於食品廠廢熱回收再利用時 COP 值可達 2.36^[16]。而同時運用熱泵蒸發器及冷凝器功能時，熱泵 COP 值可達最大；如 Rajapaksha 及 Suen^[17]於製程評估使用 R134a 及 R407C 不同冷媒時，整體 COP 值可分別達到 5.96 及 6.48。

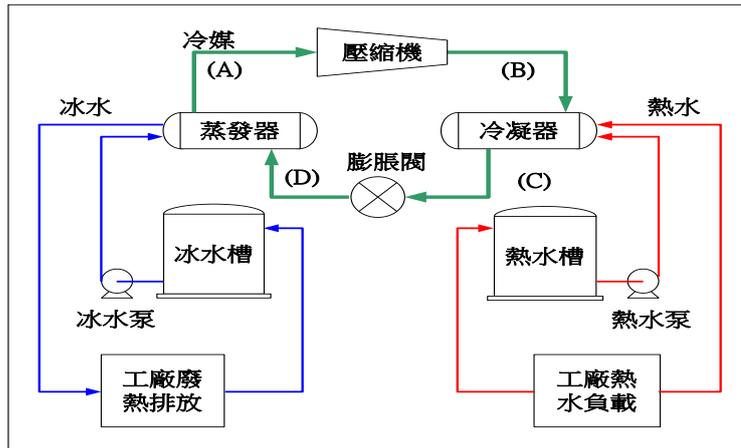


圖 1 熱泵使用流程示意圖

工業上應用均涉及複雜的理論及計算，但實務上可更廣泛使用在一些簡單組合上，只要將熱泵吸熱與放熱間達到平衡，即可使熱泵發揮最大效益，亦可達到降低成本及節能減碳最大的功效。

2.3 狹點技術

在 1980 年代 Linnhoff^[18]等即提出熱交換網路的狹點溫度(pinch point)概念並運用在一些獨立的製程上，Linnhoff and Hindmarsh^[19]亦運用狹點技術進行熱交換器網路設計。Linnhoff 及 Ahmad^[20]與 Ahmad 等^[21]也發展出含有目標總成本(total cost target)及區塊分解(block decomposition)的總複合曲線(grand composite curve, GCC)狹點技術理論。接著，又建立熱交換網路(heat exchanger network, HEN)改善觀念在製程狹點(Tjoe and Linnhoff^[22])、網路狹點(Asante and Zhu^[23])，及更多用途

64 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

(Salama^[24])。

狹點技術又稱為製程整合技術，亦是網路設計方法並已使用在工廠運作；主要運用熱力學第二定律進行製程整合以改善資源利用方式。各種製程均可使用此方法評估最佳熱能回收量和定出達成此回收量的熱交換器安排配置。理論而言，在設定區域範圍內收集製程各項設備能耗狀況及數據，將放熱設備與吸熱設備進行匹配熱交換時，分析並製作能源傳送及使用的熱交換網路，將所有放熱設備在溫度-熱焓圖上合併成一條熱流組合曲線，所有吸熱設備合併成一條冷流組合曲線。經由網路瞭解各熱交換系統使用效率，然後整合各能源使用網路系統進行部分製程或能源傳遞路線的修改，可將工廠能源利用調整達到最適化目標，是提高能源使用效率的最佳方法之一^[25]。

狹點技術使用時為使能源利用效率能達到最適化狀況，應遵循三項原則：能源利用不可穿過狹點、在狹點上方不可使用冷卻設備及在狹點下方不可使用加熱設備。在整體製程最大能源利用設計時亦應注意將能源使用區隔成狹點上、下不同區域分別處理，並由狹點附近開始向外展開設計。而狹點技術的應用可清楚定義不可避免和可避免的能量損失目標值，此亦可用於能源監控部分。在製程整合研究方面，狹點技術是一個成熟但仍在持續研究利用的方法^[26]。

三、研究案例及模擬結果

研究案例探討常用的批次操作循環空氣乾燥機，此系統為密閉設計，循環空氣再利用，可避免污泥乾燥過程產出的異味造成環保問題。待處理污泥為經板框過濾後的污泥濾餅(含水率 68%)，操作時將污泥桶中裝入 850kg 污泥餅後，啟動設備，循環空氣經冷卻器降溫至 20°C 使相對濕度達到飽和(100%)，空氣中水氣會因飽和結露去除使絕對溼度降至 0.0147 kg-H₂O/kg-dry air。然後循環空氣再加熱至 65°C，空氣中的絕對濕度雖然不變，但相對濕度會降至 9.34 % 成為乾燥空氣。將此乾燥空氣通過污泥桶後吸收污泥中的水份，在恆速乾燥期空氣的相對濕度增加到 60.29%、溫度亦下降至 38°C。將此空氣再降溫至 20°C 回復到原來空氣狀態後可循環再利用。

循環空氣乾燥機降溫所使用的冰水(進、出口為 7°C、12°C)與加熱使用的熱水(進、出口為 70°C、65°C)均分別由外部供應。系統經過 20 小時循環空氣操作後，最終污泥含水率可下降至 30% 達到污泥乾燥的目的。

研究同時結合熱泵與循環空氣乾燥機以降低污泥中含水率，並利用狹點技術建構循環空氣乾燥機製程的 HEN 網路，確認製程狹點溫度達到最適能源需求。研究模擬三個循環空氣乾燥機降低污泥中含水率的製程案例，案例 C1 為使用鍋爐蒸氣與冰水機製作熱水與冰水提供循環空氣乾燥機降低污泥中含水率，案例 C2 探討使用熱泵取代鍋爐蒸氣與冰水機製作熱水與冰水的可行性，案例 C3 在乾燥機使用熱泵結合狹點技術乾燥污泥。而狹點技術模擬溫度對應熱能圖數據是使用 Kemp^[26]所開發軟體計算；各個案例的計算結果列於表 1 內。

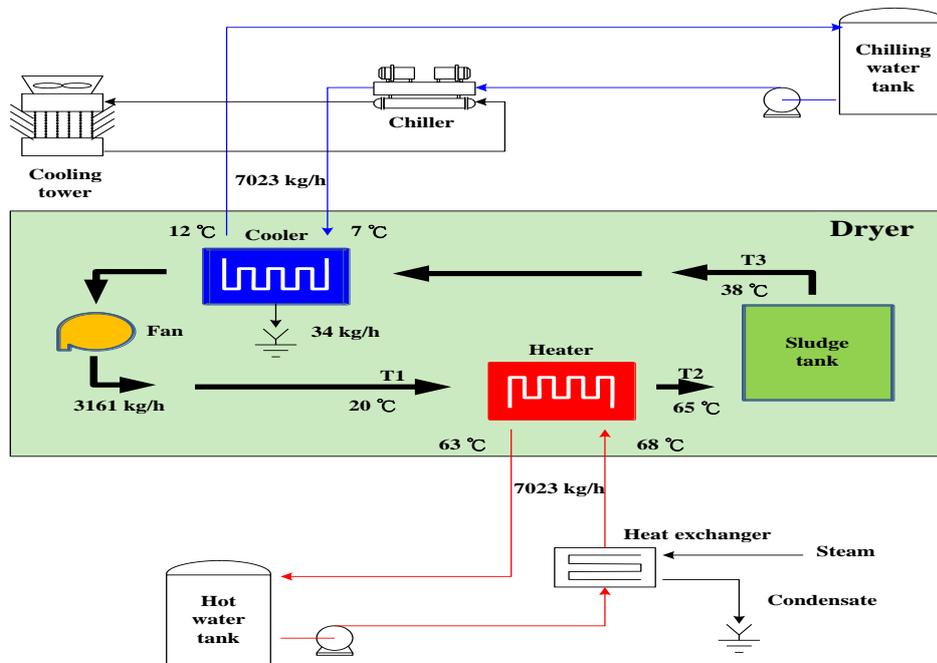


圖 2 傳統熱風乾燥機流程示意圖(案例 C1)

3.1 使用蒸氣與冰水機製作熱水與冰水(案例 C1)

圖 2 為傳統熱風乾燥機系統流程圖(案例 C1)。如圖 2 所示，乾燥機使用外部熱源(5kg/cm² 飽和蒸氣)在加熱器提供熱能製作熱水，及使用冰水機(COP 為 4，使用電力 10.2kWh) 在冷卻器移除熱量製作冰水。在恆速乾燥期，83kg/h 蒸氣冷凝放出熱量 40.8kWh，可將 7,023kg/h 循環熱水由 65°C 加熱到 70°C，而冰水機所移除熱量 40.8kWh，亦可使 7,023kg/h 冰水溫度由 12°C 下降至 7°C。乾燥機內循環空氣量為 3,161kg/h，在恆速乾燥期每小時可移除水量為 34 kg/h。

3.2 使用熱泵取代蒸氣與冰水機製作熱水與冰水 (案例 C2)

圖 3 為一般熱泵乾燥器流程圖(案例 C2)。循環空氣乾燥機的操作條件與案例 C1 相同，但提供熱能的蒸氣及移除熱能使用的冰水機完全由熱泵取代。熱泵同時具有製作熱水及冰水的能力，可完全取代蒸氣及冰水機的作用在乾燥機降低污泥中含水率。

圖 3 中所使用的熱泵在製冷處及製熱處的 COP 分別為 2.5 及 3.5。乾燥機所需的冰水，使用熱泵製作電力需求為 16.3kWh(=40.8/2.5)，相對熱泵可放出 57.2kWh(=16.3×3.5)熱量。此處共計可使 9,832kg/h 熱水由 65°C 提升至 70°C。扣除乾燥機所需 7,023kg/h 熱水後，另可供其他製程設備 2,809kg/h 熱水使用。本案例中熱泵電力需求以配合乾燥機冰水製作所需為主，而所有熱泵產出的熱水均附帶產出，可視為免費供應。

圖 4 為乾燥機溫度對應熱能圖(案例 C1 及 C2)。C1 與 C2 兩個案例，基本上乾燥機部分完全相同，僅是外部供應及移除熱能所使用設備不同，所以導入狹點技術評估乾燥機系統的溫度對應熱能圖均是相同。圖 4 中實線與虛線分別代表熱(H, C1/C2)及冷(C, C1/C2)流體。分析結果顯示外部熱源負載(Q_{H, C1/C2})與外部冷卻負載(Q_{C, C1/C2})均為 40.8 kWh、冷、熱流體線完全沒有重疊及狹點溫度(ΔT_{C1/C2})為 18 K。由狹點溫度的顯熱溫差大，表示系統內熱能未完全回收有熱損失。另外，冷、熱流體線完全沒有重疊，亦表示系統內由熱流體放出的熱能相對於冷流體是完全沒有回收，所以此乾燥機內部應仍有使用熱交換器回收熱能的空間。

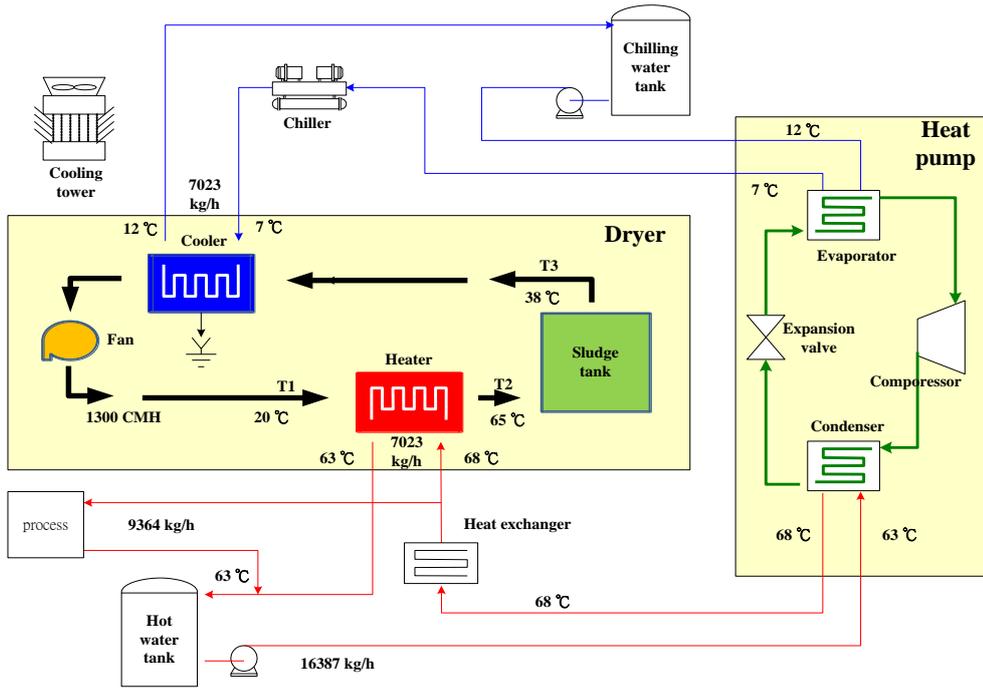


圖 3 一般熱泵乾燥機流程圖(案例 C2)

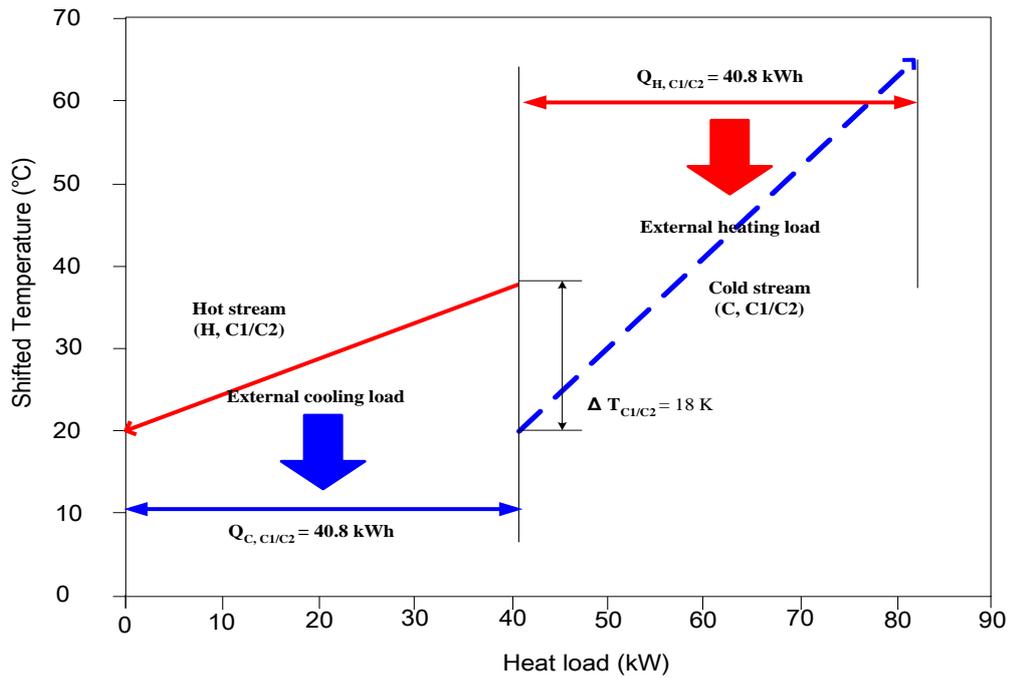


圖 4 乾燥機溫度對應熱能圖(案例 C1 及 C2)

3.3 改良乾燥機以提高熱能使用效率(案例 C3)

圖 5 為改良乾燥機流程圖(案例 C3)。由圖 4 顯示案例 C1 及 C2 乾燥機內並無熱能回收再利用，而狹點溫差又顯示有回收空間。經狹點技術分析後，分別在通過污泥桶及冷卻器的循環空氣管線上各設置一組熱交換器，利用循環水回收污泥桶後空氣的熱能，然後將此熱能輸送到冷凝器空氣出口，並加熱降溫後的空氣。此部分對於通過污泥桶後的空氣有預冷效果，空氣可降至 29.8°C。此處移出的熱量用於冷卻器後的空氣亦有預熱的功用，可將低溫空氣升溫至 28.5°C。循環水流量為 5,107kg/h，循環溫度分別為 29.8°C 及 28.5°C。所使用的熱泵在製冷處及製熱處的 COP 亦為 2.5 及 3.5，因乾燥機冰水需求下降，所以熱泵使用電力降為 13.2kWh(=33.1/2.5)，熱泵放出熱量亦下降為 46.2kWh(=13.2×3.5)。總計可使 7,973kg/h 熱水由 65°C 提升至 70°C。扣除乾燥機所需 5,695kg/h 熱水後，另可供應其他製程設備 2,278kg/h 熱水使用。

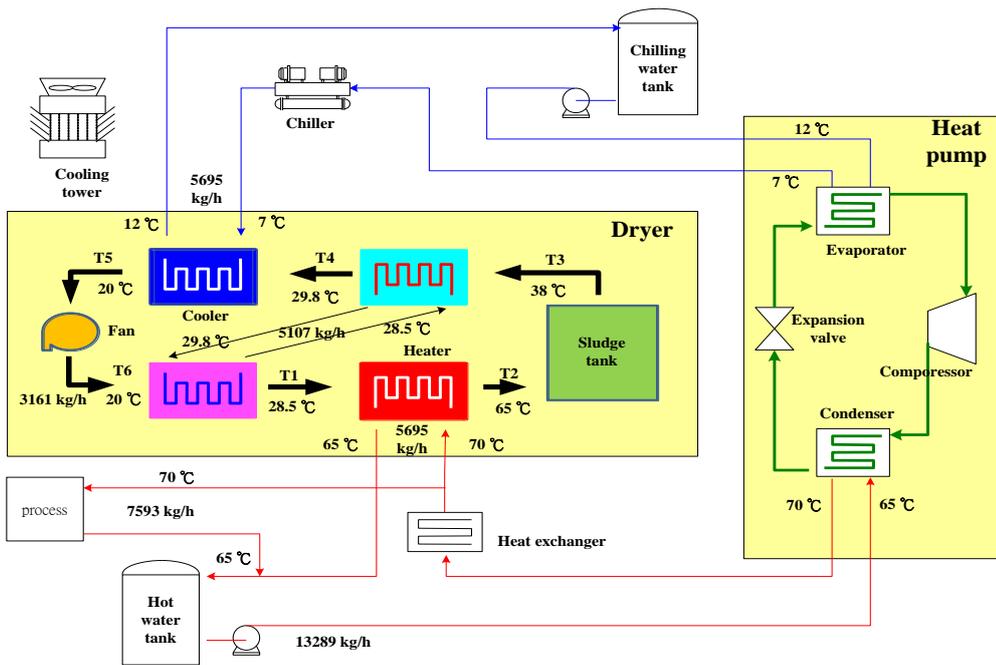


圖 5 改良乾燥機流程圖(案例 C3)

圖 6 為改良乾燥機溫度對應熱能圖(案例 C3)。與圖 4 中 C1 與 C2 兩個案例不同處，在於乾燥機內部分別設置預冷及預熱的熱能回收熱交換器，在總熱需求不變的條件下，其中經由兩個熱交換器可回收熱能($Q_{R, C3}$)7.7kWh 使用，所以乾燥機熱能需求及移除均降為 33.1kWh。狹點溫度(ΔT_{C3})亦因此降至 1.3K。

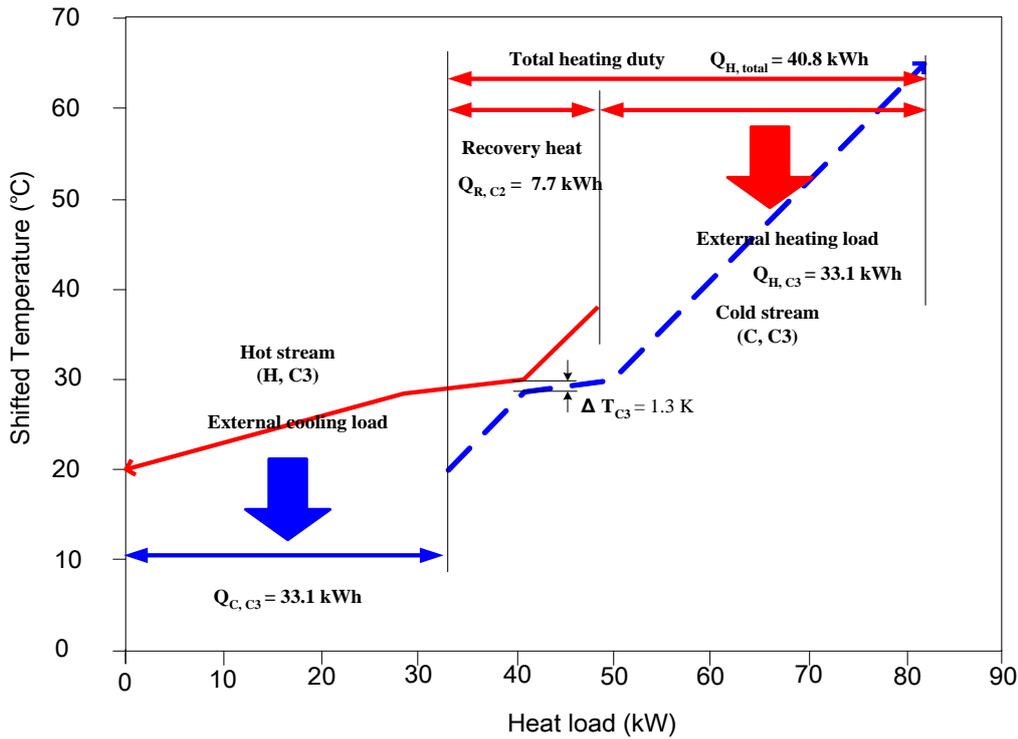


圖 6 改良乾燥機溫度對應熱能圖(案例 C3)

四、結果與討論

4.1 各模擬案例效益評估

表 1 為各模擬案例恆速乾燥期操作數據，結果顯示案例 C1 傳統循環空氣乾燥機，乾燥系統所需及移除的熱能均為 40.8kWh，此熱能由外部蒸氣及冰水機分別提

70 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

供，共計蒸氣使用 83kg/h(=6.4L/h)及冰水機電力耗用 10.2kWh(COP=4)。案例 C2 中乾燥機操作條件與案例 C1 相同，但使用熱泵取代蒸氣與冰水機提供熱能及移除熱能，熱泵電力需求為 16.3kWh，熱泵吸熱為 40.8kWh(製冷 COP=2.5)製作冰水，可完全供乾燥機移除熱能使用。熱泵放熱為 57.2kWh(製熱 COP=3.5)，總製作熱水 9,832kg/h，扣除乾燥所需 7,023kg/h 後，仍有 2,809kg/h 熱水可供應其他製程設備需求使用。案例 C3 為結合熱泵及狹點技術以提高能源使用效益，熱泵的效果與案例 C2 相同。但使用狹點技術評估回收廢能源再利用後，狹點溫度可由 18K(C1/C2)降至 1.3K(C3)。乾燥機需移除的熱能降為 33.1kWh，熱泵電力需求亦降為 13.2kWh。相對熱泵放熱製作的熱水減為 7,973kg/h，扣除乾燥用 5,695kg/h 後，供應製程其他熱水使用量亦減為 2,278kg/h。

表 1 各模擬案例恆速乾燥期操作數據

項目	單位	C1	C2	C3
熱水用量	kg/h	7,023	9,832	7,973
乾燥器	kg/h	7,023	7,023	5,695
其他製程	kg/h	0	2,809	2,278
熱能需求, Q_H	kWh	40.8	57.2	46.4
冰水用量	kg/h	7,023	7,023	5,695
移除熱能, Q_C	kWh	40.8	40.8	33.1
回收熱能, Q_R	kWh	0	0	7.7
狹點溫度, ΔT_{pinch}	K	18	18	1.3
冰水機 / 熱泵的效能, COP		4	2.5	2.5
電力需求, W_{EP}	kWh	10.2	16.3	13.2
鍋爐蒸氣需求 ^a	kg/h	83	0	0
燃料油用量需求	L/h	6.4	0	0

表 2 為各模擬案例成本效益評估。本系統為批次操作，每日操作一批操作時間 20hr，每批操作時先將污泥桶裝入 850kg 的污泥，乾燥前污泥含水率為 68%，經乾燥操作後，污泥含水率降為 30%(389kg)，共可移除污泥中水量 461kg。污泥最終處理費用為 2,800NT\$/ton，每批操作後可節省 1,292NT\$(=0.461×2,800)，每年污泥處

理費用可降低 426,360NT\$(每年以 330 天計)。操作成本計算，操作數據以恆速乾燥期操作數據推估得到的全程操作數據，主要因設備未保溫及保冷，造成減速期操作數據受外界影響較大，所以各案例中數據統計均忽略減速期操作數據。

表 2 各模擬案例成本效益評估^a

項目	單位	C1	C2	C3
移除水量 ^b	kg/批	461		
污泥處理節省成本 ^b	NT\$/y	426,360		
投資費用	NT\$	550,000	950,000	1,000,000
乾燥設備成本	NT\$	350,000	350,000	350,000
熱泵購置成本	NT\$	---	500,000	500,000
工程費用	NT\$	200,000	100,000	150,000
操作成本	NT\$/y	1,044,120	322,740	261,360
加熱部份	NT\$/y	842,160	---	---
燃料油需求	L/h	6.38	---	---
燃料油單價	NT\$/kL	20,000	---	---
冷卻部份	NT\$/y	201,960	322,740	261,360
電力需求， W_{EP}	kWh	10	16	13
單位電價	NT\$/kW	3		
水移除操作成本	NT\$/kg	2,263	699	566
節省成本	NT\$/y	-617,760	103,620	165,000
回收年限	years	---	9.2	6.1

^a 操作時間以每年 330 天、每天操作一批及每批操作 20 小時計

^b 移除水量為實測值，但全程數據以恆速期操作數據推估得到，忽略減速期操作數據

案例 C1 因外部熱源使用的蒸氣由燃料油在鍋爐燃燒產生，每年燃油成本 842,160NT\$；另使用冰水機製作冰水移除熱能，每年電力成本為 201,960NT\$，所

72 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

以整體能源成本為 1,044,120NT\$，明顯 C1 操作成本已高出節省費用，所以並不適用。案例 C2 使用熱泵取代蒸氣及冰水機提供及移除乾燥機熱能後，雖然電力需求增加，但熱能可免費提供，所以整體操作成本下降至 332,740NT\$，污泥中移除 1 kg 的水操作成本為 699NT\$。與污泥處理降低費用比較後每年仍可節省 103,620NT\$，設備投資成本約在 9.2 年可回收。案例 C3 經使用狹點技術評估 C2 乾燥系統以提高熱能使用效率後，整體操作成本下降至 261,360NT\$，污泥中移除 1kg 的水操作成本為 566NT\$。與污泥處理降低費用比較後每年仍可節省 165,000NT\$，設備投資成本約在 6.1 年可回收。

4.2 熱泵適用於循環空氣乾燥機系統

循環空氣乾燥機使用冰水去除空氣中含水份然後使用熱水降低空氣的相對濕度，而傳統式設備需耗用大量能源使成本過高，所以使用效果不佳。熱泵可同時提供冰水及熱水，但所耗用能源成本較低。在本研究，案例 C2 中乾燥機操作條件與案例 C1 相同，但完全使用熱泵取代傳統的冰水機製作冰水及鍋爐蒸氣製作熱水，在乾燥機製冷需求完全滿足的狀況下，對乾燥桶而言還有過多的熱水產出，在一般狀況是使用散熱設備(如冷卻水塔等)將多餘的熱能排放至大氣中，但本案在工廠內其他設備亦有熱水需求(如鍋爐飼水預熱等)，所以反而可節省整體工廠熱能需求。

另將熱泵設置於乾燥機附近，可降低熱水及冰水管線配管距離，明顯改善工廠內土地及空間不足的問題，配管費用亦可下降。目前案例 C2 設備投資成本回收約需 9.2 年，但隨者環保意識高漲，未來清運成本不斷增加的狀況下，投資成本應會回收更快。

4.3 狹點技術可使能源使用效率最適化

雖然使用熱泵已可降低能源需求，但仍需進一步考量整體能源使用效率達到最適化。傳統設備大部份僅考量到生產效益，忽略能源使用效益，所以在能源使用上大多均高於理想目標值甚多。狹點技術主要是整合及運用熱能網路，使能源利用效益最大化的方法。可充份利用能源，降低能源需求及減少環境污染。

研究案例運用狹點技術評估及整合各案例循環空氣乾燥機能源狀況後，發現案例 C2 熱風通過乾燥系統並無回收廢熱能源再利用，所以狹點溫度達 18K，此表示案例 C2 系統能源使用仍有提高效益空間。案例 C3 經加入熱交換器回收熱能 (7.7kWh) 提高熱能使用效率後，狹點溫度已降至 1.3K。整體案例 C3 設備投資成本亦降至 6.1 年即可全部回收。

4.4 二氧化碳排放減量

燃燒每公升燃料油相當於產出 3.111kg-CO₂、使用每 kW 電力相當產出 0.612 kg-CO₂^[27]。表 3 內為各個案例 CO₂ 排放統計，其中以案例 C3 的 CO₂ 排放量降低最多，案例 C2 及 C3 燃料油可完全節省不用，與案例 C1 比可減少 130,998kg-CO₂ 排放；但案例 C3 全年運轉電力較案例 C2 減少 20,460kW，相對減少 12,522kg-CO₂ 排放量。因此以案例 C3 案的 CO₂ 排放量最少。

表 3 各模擬案例二氧化碳^a排放數據^b

項目	單位	C1	C2	C3
燃料油使用部份	L/h	6.38	---	---
	L/y	42,108	---	---
	kg-CO ₂	130,998	---	---
電力使用部份	kWh	10	16	13
	kWh/y	67,320	107,580	87,120
	kg-CO ₂	41,200	65,839	53,317
總 CO ₂ 排放量	kg-CO ₂	172,198	65,839	53,317

^a 燃料油及電力的 CO₂ 排放係數分別為 3.111 及 0.612 kg-CO₂

^b 操作時間以每年 330 天及每天 24 小時計

4.5 增加保溫及保冷後可進一步節能

操作中因設備未保溫及保冷，造成減速期操作數據受外界影響較大，尤其循環

74 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

空氣經冷卻器降溫至 20°C 後，風管外壁露水凝結嚴重，所造成的外部干擾十分明顯。所以各案例中數據統計均忽略減速期操作數據，而以恆速乾燥期操作數據推估作為全程操作數據。此做法直接影響的即是乾燥效率統計；案例 C2 使用熱泵取代蒸氣及冰水機提供及移除乾燥機熱能後，污泥中移除 1kg 的水操作成本為 699NT\$。案例 C3 經使用狹點技術評估 C2 乾燥系統以提高熱能使用效率後，污泥中移除 1kg 的水操作成本為 566NT\$。

但實際恆速乾燥期每小時可移除水份 34kg。在此時期，案例 C2 中污泥移除 1kg 的水操作成本為 474NT\$，而案例 C3 中污泥移除 1kg 的水操作成本為 384NT\$。所以設備增加保溫及保冷後應可進一步使操作成本下降。

五、結論

污泥雖經機械脫水，但含水率仍高達 60% 以上，除影響再利用外，在清運及儲存上也造成困擾，除無法創造再利用的價值，亦有二次污染的問題存在。所以進一步降低污泥含水率成乾燥污泥即為工業廢水處理重要工作之一。本研究將熱泵結合狹點技術運用在循環空氣乾燥機的污泥乾燥改善上，熱泵已可完全取代外部熱水及冰水，狹點技術亦可進一步提高熱能使用效率。由結果可以得到：最終電力使用部份雖增加 29%，但可完全不用外部提供熱能，熱泵除可完全供應乾燥機熱水需求外，還可增加約 40% 熱水供製程其他需求使用。整體 CO₂ 排放量減少 69%，投資設備費用在 6.1 年也可完全回收。

本案設計上因設備未保溫及保冷，所以操作時受外界影響較大，特別是減速期更為明顯。數據統計時以恆速乾燥期操作數據推估全期使用狀況，結果造成能源使用效率偏高。所以改善設備的保溫及保冷條件後應可使操作成本進一步下降。

參考文獻

1. 環保署，國內產業污泥處理處置現況與展望，環保署，p.31~36，2012。

- 2.張添晉、陳俞穎，有機污泥之生物減量技術，廢棄物資源化專輯，p.66~77，2008。
- 3.李中光、劉新校、侯佳蕙，淺談污泥脫水及加熱乾燥技術，環保簡訊，第 20 期，p.2-1~2-9，2013。
- 4.陳樹鍊，電磁熱風乾燥機之開發與應用，食品資訊，第 143 期，p.35~39，1997。
- 5.蔡禎輝、張勝發、葉國榮，加熱乾燥技術簡介，電子電力技術雙月刊，第 49 期，p.1~19，1992
- 6.Lazzarin, R.M., Heat pumps in industry: applications, Heat recovery system & CHP, 15, p.305~317, 1995.
- 7.Gundersen, T., Naess L., The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: An industrial review of the state of the art, Heat Recovery Systems & CHP, 10, p.301~328, 1990.
- 8.陳見財，污泥加熱乾燥技術，廢水污泥減量技術手冊，p.1~9，2004。
- 9.陳政澤、賴重光、李進成、陳毓生、黃財坤、陳政宗，石化業污泥乾燥減量處理應用實例探討，產業環保工程實務技術研討會論文集，p.484~499，2003。
10. Stoecker, W.F., Jones, J.W., Refrigeration and Air Conditioning. 2nd ed., McGraw-Hill. Taipei. Taiwan, p.229-246, 1982.
- 11.節約能源中心，高效率熱泵熱水系統，財團法人台灣綠色生產力基金會. 2006.
- 12.Lazzarin, R.M., Castellotti, F., A new heat pump desiccant dehumidifier for supermarket application, Energy and Buildings, 39, p.59~65, 2007.
- 13.Gao, P., Zhang, L., Zhang, H., Performance analysis of a new type desalination unit of heat pump with humidification and dehumidification, Desalination, 220, p.531~537, 2008.
- 14.Soylezmez, M.S., Properties of modified atmosphere heat pump dried foods, Journal of Food Engineering, 74, p.292~298, 2006.
- 15.Sakellari, D., Lundqvist, P., Modelling and simulation results for a domestic exhaust-air heat pump heating system, International Journal of Refrigeration, 28, p.1048~1056, 2005.
- 16.Soylezmez, M.S., Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery,

76 熱泵乾燥機結合狹點技術用於污泥乾燥效益評估

- Journal of Food Engineering, 74,p.546~551, 2006.
- 17.Rajapaksha, L., Suen, K.O., Influence of liquid receiver on the performance of reversible heat pumps using refrigerant mixtures, International Journal of Refrigeration, 27, p.53~62, 2004.
- 18.Linnhoff, B., Townsend, D.W., Boland, D., Hewitt, G.F., Thomas, B.E.A., Guy, A.R., Marsland, R.H., User guide on process integration for the efficient use of energy. 1st-ed, Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, 1982.
- 19.Linnhoff. B., Hindmarsh. E., The pinch design method of heat exchanger networks, Chemical Engineering Science, 38, p.745~763, 1983.
- 20.Linnhoff, B., Ahmad, S., Cost optimum heat exchanger networks-1.minimum energy and capital using simple models for capital cost, Computers and Chemical Engineering, 147, p.729~750, 1990.
- 21.Ahmad, S., Linnhoff, B., Smith, R., Targets and design for detailed capital cost models, Computers and Chemical Engineering, 14, p.751~767, 1990.
- 22.Tjoe, T.N., Linnhoff, B., Using pinch technology for process retrofit, Chemical Engineering, 28, p.47~60, 1986.
- 23.Asante, N.D.K., Zhu, X.Y., An automated approach for heat exchanger retrofit featuring minimal topology modifications, Computers Chemical Engineering, 20 (Suppl.1), p.s7~s12, 1996.
- 24.Salama, A.I.A., Optimal assignment of multiple utilities in heat exchange networks, Applied Thermal Engineering, 29, p.2633~2642, 2009.
- 25.Staine, F., Favrat, D., Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors, Applied Thermal Engineering, 16, p.497~507, 1996.
- 26.Kemp, I.C., Pinch Analysis and Process Integration. 2nd ed., Elsevier Ltd. UK, p.1~31, 2007.
- 27.能源局，燃料油及電力使用 CO₂ 排放係數，經濟部能源局，2011。

廢棄物及資源化

銻金屬之應用與回收技術介紹

吳俊毅*、黃淑媚**、陳智成***

摘 要

銻為一種稀有金屬元素，呈灰白色，質脆，半導體材料。銻在自然界分佈極少，其主要應用於光導纖維、催化劑、紅外光學和太陽能電池等領域，是非常重要的戰略資源。目前，全世界已探明的銻保守儲量約為 8,600 噸，少於 8.9 萬噸黃金儲量，可見它的稀有與珍貴。銻通常以分散狀態存在於其他礦物中，獨立的礦物很少，主要有銻石(含銻 10%)、硫銻鐵銅礦(含銻 7.7%)、硫銀銻礦(含銻 6.7%)、黑硫銀錫礦(含銻 1.8%)，工業上主要在處理硫化礦時副產品回收或從煉焦煙塵中回收銻。主要探討含銻廢料常見資源化處理技術包括酸溶、鹼溶集、置換與溶媒萃取等純化步驟回收高純度二氧化銻再生產物。

【關鍵字】 稀土金屬、獨居石、鈳鐵硼磁鐵、溶媒萃取

*遠東科技大學 機械工程系暨綠能材料中心 助理教授

**成功大學永續環境實驗所 研究助理

***遠東科技大學 機械工程系 特聘教授暨綠能材料中心 主任

一、鍺金屬介紹

鍺為稀散稀有金屬元素，呈灰白色，質脆，有單向導電性，為重要半導體材料。鍺在自然界分佈極少，且具備多方面的特殊性質，在半導體、航空航太測控、核子物理探測、光纖通訊、紅外光學、太陽能電池、化學催化劑、生物醫學等領域都有廣泛而重要應用，是非常重要的戰略資源。目前，全世界已探明的鍺保有儲量約為 8,600 噸，世界已查明黃金儲量約為 8.9 萬噸，鍺儲量明顯少於黃金，可見它稀有與珍貴。目前全球市場對鍺需求快速成長，美國市場對鍺消耗量已從 2004 年度的 25 金屬噸增長到 2007 年度的 60 金屬噸，年平均複合增長率達到了 33.89%，若依目前 8,600 噸儲量來計算，全世界的鍺只夠用 40 年。

1.1 定義

鍺(Germanium)是一種銀灰色稀有金屬，熔點 937.4°C，沸點 2,830°C，密度 5.35g/cm³，硬度 6~6.5，元素符號 Ge。鍺是重要半導體材料，室溫下晶體質脆，有明顯的非金屬性質。鍺晶體的原子排列與金剛石一樣，化學性質穩定，常溫下不與空氣或水蒸汽作用，但在 600~700°C 時，快速生成二氧化鍺。鍺不與鹽酸、稀硫酸反應；濃硫酸在加熱時，鍺會緩慢溶解；在硝酸、王水中，鍺易溶解。鹼溶液與鍺的作用很弱，但熔融的鹼在空氣中，促使鍺溶解迅速。由於鍺與碳不起作用，在石墨坩堝中熔化，能與碳分離。

鍺地殼豐度為 $1.5 \times 10^{-4}\%$ ，屬於稀有元素，自然界中以有機鍺與無機鍺形態存在。無機鍺大多以稀散形式存在於矽酸鹽、硫化物、含硫酸鹽的礦物和各種類型的煤中，主要分散在鋅銅鉛和鐵的硫化礦物中，其中閃鋅礦鍺含量達 0.01~0.1%，高含量鍺礦物有鍺石($3\text{Eu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}_2 \cdot \text{GeS}_2$ ，含鍺 7~8%)、硫銀鍺礦($4\text{Ag}_2\text{S} \cdot \text{GeS}_2$ ，含鍺 6~7%)、硫鍺鐵礦[(Fe、Cu、Ge、As)_xS_y，含鍺 7~8%]、硫鍺銀錫礦[$4\text{Ag}_2\text{S}(\text{Sn} \cdot \text{Ge})\text{S}_2$ ，含鍺 1~8%]、硫銀鉛鍺礦[(Pb、Ag、Ge、sb)_xS_y，含鍺約 4.0%]。

1.2 鍺資源儲存量與分布

世界鍺資源比較貧乏，全球保有鍺量約 8,600 噸儲量，中國、美國、俄羅斯和加拿大等是鍺資源相對豐富國家。從儲量上看，中國鍺儲量位居世界前列，已探明

銻礦產地 35 處，保守儲量約 3,500 噸，占全球銻保有儲量 41%，美國 45%，加拿大 10%，其他國家 4%。

1.3 銻產業鏈

銻產業鏈包括銻原料和銻產品兩大部分，其中銻原料包括銻精礦、銻煙塵和銻廢料，銻產品包括高純四氯化銻、高純二氧化銻、區熔銻錠、銻單晶和有機銻，產品彙整如表 1。

表 1 銻原料和產品彙整

名稱	說明
銻精礦	對低品位含銻礦通過濕法冶煉技術，進行二次富集得到的高品位產物。
銻煙塵	對低品位含銻礦通過火法冶煉技術，富集得到的高品位產物。
銻廢料	銻金屬的加工、生產、使用過程中產生的單晶廢料、紅外鏡頭廢料、銻合金廢料、區熔尾料等。
高純四氯化銻	生產高純度二氧化銻原料，更純的光纖級四氯化銻作為石英系光導纖維的摻雜劑。
高純二氧化銻	製造還原銻、有機銻、催化劑、銻酸鉍晶體及化合物晶體等。
區熔銻錠	以高純二氧化銻用氫還原取得還原銻經區熔提純而成，主要用於制取銻單晶及銻合金等。
銻單晶	銻單晶以區熔銻錠為原料，用直拉法（CZ 法）或垂直梯度法（VGF 法）等方法製備銻單晶體。紅外級銻單晶用於製作紅外窗口、紅外鏡頭等光學部件的基體材料；半導體器件用銻單晶製作各類電晶體和太陽能電池用基體材料；探測器級銻單晶用於製作高解析度 γ 輻射探測器。
有機銻	有機銻有很多種，其中銻 132 具廣泛生物生理活性產品，它具攜氧、清除自由基、免疫調節等諸多功能。

資料來源：東興證券

從目前國內的發展情況來看，四氯化銻、二氧化銻和區熔銻錠屬於傳統意義上的銻產品，近年來發展較快的高附加產品是銻單晶產品，銻單晶產品又包括太陽能級別銻單晶、紅外級銻單晶和探測器級銻單晶。

1.4 銻的消費結構與用途

從近 5 年來全球銻消耗領域的變動情況來看，銻主要消費應用領域在光纖和太

80 鍺金屬之應用與回收技術介紹

陽能電池等領域佔據著越來越重要的地位。近年來鍺終端消費結構之主要用途，包括光纖系統(fiber optics)用量最大、其次依序為紅外光學(infrared optics)、聚合催化劑 (polymerization catalysts)、電子和太陽能發電應用 (electronics and solar applications)以及螢光粉、冶金、化療(phosphors, metallurgy and chemotherapy)等，彙整如表 2 所示。

表 2 鍺終端消費結構之主要用途

年份	光纖系統	紅外光學	聚合催化劑	電子和太陽能發電應用	螢光粉、冶金、化療
2002 年	60%	15%	15%	5%	5%
2003 年	35%	25%	20%	12%	8%
2004 年	35%	25%	20%	12%	8%
2005 年	31%	24%	23%	12%	10%
2006 年	31%	24%	23%	12%	10%
2007 年	35%	30%	15%	15%	5%
2008 年	30%	25%	25%	15%	5%
2009 年	30%	25%	25%	15%	5%
2010 年	30%	25%	25%	15%	5%
2011 年	30%	25%	25%	15%	5%
2012 年	30%	25%	25%	15%	5%
2013 年	30%	20%	20%	15%	15%

資料來源：USGS 歷年統計，由本團隊彙整。

1.5 鍺市場現況

工業生產的鍺，主要來自銅、鉛、鋅冶煉的副產品。中國是產量最大國家，占全球鍺產量的 72%，中國的鍺產量影響著全球鍺的供應。美國雖然儲量最大，但是由於以鉛鋅伴生礦為主，因此鍺產量受制於鉛鋅的產量，近幾年美國鍺年產量穩定在 4.6 噸左右，只占全球產量的 3%。雖然中國儲量次於美國，占全球鍺儲量 41%，但是中國是鍺產量最大的國家。主要原因是中國鍺以原生礦為主，開採成本較低，擴產容易，中國鍺產量影響著全球鍺的總供應量。由於 2008 年鍺價格持續攀升，

二氧化銻從年初的 6,000 元/公斤上漲到年底的 7,000 元/公斤，中國銻產量從 2007 年的 60 噸急劇增加到 100 噸，造成市場供給快速擴大。

近年來光纖通信業發展、紅外光學在軍用、民用領域的應用不斷擴大，聚光太陽能電站推廣及新技術對銻產品用途的開發，全球對銻的需求量將穩定增長，加上銻在軍事領域的運用，國防對銻的需求也日益加大。中國銻市場平穩，區熔銻錠 5N 價格為 1,627-1,704 美元/公斤，出口價格仍穩定在 1,650 美元/公斤；氧化銻 5N 價格為 1,333-1,349 美元/公斤。相較於台灣銻來源是需仰賴進口，由表 3 得知目前銻(原物料、廢料以及產品)進口價約為 25,000 元/公斤、出口價為 140,000 元/公斤。全球銻總儲量僅有 8,600 噸，依目前消耗量，預計僅夠維持消耗 40 年。國內近年來銻相關進出口統計，進口量超過 10,000 公斤，出口明顯僅約 100 公斤，主要為銻晶圓產品為大宗，進出口類別包括氧化銻、銻晶圓、未經塑性加工之銻、銻廢料及碎屑、銻絲與銻製品等，其重量、價值與單價彙整如表 3 所示。

表 3 近年國內銻相關進出口統計表

銻	進 口			出 口		
	重量(kg)	價值(元)	單價(元/kg)	重量(kg)	價值(元)	單價(元/kg)
2007 年	772	27,947,000	36,200	73	429,000	5,900
2008 年	266	20,355,000	76,500	8	490,000	61,300
2009 年	304	10,280,000	33,800	72	2,751,000	38,200
2010 年	1,927	50,128,000	26,000	21	2,261,000	107,700
2011 年	7,312	177,907,000	24,300	14	1,963,000	140,200
2012 年	10,672	304,193,000	28,504	162	3,343,000	20,636
2013 年	10,630	372,079,000	35,003	92	4,414,000	47,978

資料來源：財政部關稅總局歷年進出口統計資料，由本團隊彙整。

二、銻的應用

2.1 紅外光學領域

銻材料紅外光譜較寬，範圍達到 2-16 μm ，同時適用於 3-5 μm 的中波紅外和 8-14

82 鍺金屬之應用與回收技術介紹

μm 的長波紅外，單晶矽只適用於中波紅外，同時鍺材料的折射率最高，有利於快速改變光線方向，提高成像品質。由於鍺材料的特性，單點金剛石車削非球面、折衍射面、微透鏡列陣等高級表面，相比較其他光學材料有明顯優勢。鍺在紅外光學中應用，主要是製造紅外光學鏡頭以及保護紅外光學鏡頭的紅外光學視窗。60% 以上的中低端紅外光學鏡頭為鍺單晶製造，50% 的高端紅外光學鏡頭為鍺單晶製造，鍺材料應用十分廣泛。紅外光學鏡頭在軍事領域主要用在機載紅外鏡頭、艦載紅外鏡頭、車載紅外鏡頭、紅外槍瞄鏡頭、手持紅外鏡頭等領域。民用領域主要用在民用車輛、船隻、飛機、警用等領域。

2.2 太陽能電池領域

目前太陽能產業的主要技術路線有三個，分別是晶體矽太陽能電池（單晶矽太陽能電池和多晶矽太陽能電池）、薄膜太陽能電池和半導體化合物太陽能電池。多晶矽是目前應用最廣的路線，太陽能薄膜電池相對具有更高的成本優勢，半導體化合物太陽能電池具備更高的轉化率，以前多用於航太飛行器太陽能電池，尤其是聚光技術的發展，為地面聚光太陽能電池的成本降低發揮了關鍵作用，未來將成為新一代太陽能電池的主流方向。表 4 為三種太陽能電池的比較彙整表。

表 4 三種太陽能電池對比彙整表

項目	多結聚光	薄膜	晶體矽	多結聚光太陽能電池的特點
最佳應用範圍	大規模發電站	建築外牆和一體化建築	中小規模發電和屋頂	航太轉民用，發電效率高
電池轉換效率	40%左右	6%-10%	17%	吸收光譜範圍廣，轉換效率高，還有提升空間
系統性能衰減	小	高	中	高溫合成的化合物半導體，因此衰減慢，耐溫性好
安裝面積	小	大	中	逐日和聚焦系統提高了轉換功率，安裝面積自然減少
有效發電時間	高	高	中	跟蹤光，有效發電時間延長

資料來源：SolFocus、Emcore 網站

2.3 光纖用四氯化鍺

光纖用四氯化鍺是光纖預製棒生產用的重要添加劑，作用是提高纖芯的折射指

數，降低光損耗，提高光纖傳輸距離，使長距離通訊成為可能提高纖心折射率，滿足光的無損耗傳輸。用高純四氯化銻和四氯化矽按一定比例裝入石英管中，在 1,300 °C 下於管壁形成二氧化銻膜層，經熔融拉絲即可得到光導纖維，用於光纖通訊系統。若加入 10% 四氯化銻，提高光纖折射率 1%，此光纖在 1.1-1.6 μm 波長內的光損失小於 0.29dB/km。由於光纖市場快速發展，帶動了銻需求量的較大幅度增長，也帶動銻價格上漲。

2.4 催化劑材料

金屬銻、銻合金和二氧化銻均為重要的催化劑材料。金屬銻兼有金屬與半導體型的催化活性，是脫氫或分解反應的催化劑。例如 C₆H₁₂ 在低壓（1.33Pa 及 200°C 下脫氫、300°C 下甲醇脫氫、170°C 下乙丙醇脫氫和 200-270°C 下真空中乙醇脫氫等，同時銻還可作為氨、甲醇和 N₂O 分解的催化劑。銻-鉑催化劑是碳氫化合物轉化、氫化、脫氫和汽油餾分調整的催化劑。二氧化銻在聚酯纖維生產中用作催化劑，也製備聚酯樹脂和紡織工業的漂白液做催化劑。二氧化銻與銻酸鎂是良好的發光材料，用於螢光管內壁上的塗層或調色劑，每年大約消耗 9 噸銻。目前合成聚酯催化主要有三種，分別為銻、銻、鈦，目前應用最普遍是銻系催化劑，如 Sb₂O₃、Sb(Ac)₃，其價格低，活性較高，對副反應催進作用小，當前全球 90% 的聚酯生產都用它們生產，但該催化劑易產生“灰霧”，後處理困難，對環境有污染。

2.5 有機銻

有機銻主要分散在自然界植物中，如靈芝、人蔘、蒜頭、黃豆、木瓜、蓮藕等，藉由攝取食物獲得，人體許多酶、大腦、小腦與腦髓液中都有銻存在。具 9 大功效，包括：(1)消除病痛功能；(2)排毒功能；(3)增強身體治癒功能；(4)脫氫功能；(5)供氧功能；(6)半導體作用與陰離子功能；(7)增強人體免疫功能；(8)誘發干擾素生成功能與(9)促進內啡呔生成功能，主要應用領域為三個方面包含化妝品、醫藥和保健食品。

2.5.1 化妝品領域

有機銻具有清潔皮膚、增強皮膚和毛髮攝取營養及放色素沉澱的功能，並應用

84 鍺金屬之應用與回收技術介紹

於痤瘡、濕疹和腋臭的治療。已應用於皮膚清洗劑、護膚冷膏等多種化妝品和護髮用品。

2.5.2 醫藥領域

無機鍺若進入人體會損傷腎臟，反觀有機鍺有益人體健康。有機鍺有極強的抗氧化能力，活性氧會損傷正常細胞，誘發動脈硬化。有機鍺能預防、改善癌症、心臟病等病，還有鎮痛、消炎作用，其最大特點是提高干擾素的生產能力。由於有機鍺藥理作用，應用於臨床，預防與治療多種疾病，包括癌症、老年癡呆症、高血壓、心血管病、止痛、抗菌消炎、肺炎、風濕及關節炎、骨質疏鬆病、皮膚炎、皮癬、驚厥、呼吸道疾病和糖尿病等。

2.5.3 保健食品領域

有機鍺不僅具有脫氫能力，能將氫離子帶出體外減少氫離子對氧的消耗並且提高紅血球攜氧能力，為增加人體含氧量最有效的微量元素。自由基會攻擊細胞造成細胞死亡、引起 DNA 突變造成癌症發生、引起免疫力下降產生疾病，因此自由基為了自身平衡，會獲得身體各器官的電子因而損害健康，鍺原子核外圍有 32 個電子，足夠抵擋自由基攻擊並排出體外，因此保健食品中添加鍺於食品和飲料中，能有效降解自由基預防疾病、延年益壽。

三、鍺的回收方法

3.1 鍺來源

鍺通常以分散狀態存在於其他礦物中，獨立的礦物很少，主要有鍺石(含鍺 10%)、硫鍺鐵銅礦(含鍺 7.7%)、硫銀鍺礦(含鍺 6.7%)、黑硫銀錫礦(含鍺 1.8%)，工業上主要是處理硫化礦時副產品回收或從煉焦煙塵中回收。

3.1.1 含鍺礦石

1.各類鉛鋅礦床中：a. 鉛鋅礦石中，含 Ge0.001%；b. 鋅精礦中，含 Ge0.01%；氧化鉛鋅礦，含 Ge 平均 0.004~0.005%，礦石中含鍺在 0.002%以上都有回收價值；

2.在赤鐵礦石中，含銻達 0.008%時可作為銻礦單獨開採；

3.銅和富銀礦石中，含 Ge0.002%；

3.1.2 銻廢料

銻產品的生產過程中會產生一些銻廢料，銻含量較高，也是提取銻重要原料。

可回收銻再生資源主要分為如下類別：

1.由生產銻過程中所產生廢料，如用鹽酸分解銻精礦後的鹽酸礦漿、廢液和不同純度銻錠的兩端頭；

(1)從氯化蒸餾殘渣中回收銻，殘渣含銻較高，占殘渣含銻量的 86-89%左右。

(2)單晶和區熔尾料中含銻 99%。

2.由單晶銻錠制取半導體器件過程中產生的廢料，如切邊碎料、含銻研磨金剛砂、拋光液和腐蝕液等；

(1)當用銻單晶在切割機中切割成不同的銻片時產生銻屑，一般銻屑含銻大約為 20-30% ；

(2)當切割後的銻片在研磨時產出的含銻金剛砂，一般含銻 1-15%。

(3)銻單晶區域熔煉銻的頭尾兩端頭，切片產生的邊角碎料和廢銻，含銻 > 99.99% 。

3.生產光導纖維過程中產生的含銻玻璃組成物； 含銻量大約 30-70%。

3.2 銻回收方法

銻回收方法區分為沉澱法、離子交換法和萃取法三類。沉澱法以丹寧沉銻法用得最多，缺點是單寧銻在灼燒過程中損失大，且污染環境、灼燒後產出的銻精礦品位低。離子交換法尚缺乏高交換容量和高交換速度的樹脂，大規模應用尚需克服。溶劑萃取法具分離效果好，生產能力大，金屬回收率高，產品純度高，可連續操作，易於實現自動化等。但需要研發更經濟的萃取劑；同時萃取劑的消耗比較大，需發展更完善萃取體系和萃取劑的回收系統。

3.3 國內外相關文獻

彙整國內外銻資源化處理技術文獻重點如表 5 所示。探討含銻廢料常見資源化

86 鍺金屬之應用與回收技術介紹

處理技術與提及含鍺廢料酸溶、鹼溶集、置換、萃取等純化步驟回收高純度二氧化鍺。此外部分學者從富鍺渣以濕法冶金技術提取鍺精礦。

表 5 國內外鍺資源化處理技術之文獻彙整表

No.	題目/作者/出處	重點內容彙整
1	Chitosan functionalized with di-2-propanolamine: Its application as solid phase extractant for the determination of germanium in water samples by ICP-MS A. Sabarudin et al. / Microchemical Journal 99 (2011) 34–39	1. CCTS-DPA 樹脂(螯合樹脂)，優勢是：1. 在 pH 為 6 吸附較多的鍺。 2. 樹脂吸附的 Ge (IV) 可達 106mg/g。 3. 使用微型填充柱，容易富集鍺。 4. 消除了大量雜質，如鹼金屬和鹼土金屬離子。
2	Germanium recovery from gasification fly ash: Evaluation of end-products obtained by precipitation methods F. Arroyo et al. / Journal of Hazardous Materials 167 (2009) 582–588	1. 鍛燒 750°C、7hr 的析出物，在室溫下 pH11 添加 CAT / Ge 和 CTAB / Ge 的莫爾比為 5 和 3，得粉煤灰水滲瀝液，用 SX 富集使用 HCl (1N) 進行分離，可得到純度 90% 的四方晶氧化鍺。 2. 在 90°C，水/飛灰比為 5 L / kg 從 IGCC 飛灰提取鍺；後續富集可選 AAC 或 SX 方法(鹽酸介質中)；以及沉澱硫化的 6N 鹽酸鍺富集的解決方案。(100 %H ₂ S 或 50:50 H ₂ S/CO ₂ ，在經由 700°C、4 h 的鍛燒)；沉澱由 CAT 加入(CAT / 鍺= 5)和 CTAB(CTAB / 鍺= 3)，並調節 pH 值 (9-11) 和隨後的焙燒至少在 750° 在 7 小時。採用上述最佳條件下，IGCC 粉煤灰的總鍺的恢復取得了 50-62%。
3	Study on Extracting of Germanium with Trioctylamine Jie Liang et al. / Energy Procedia 17 (2012) 1965 – 1973	通過使用萃取劑 TOA，配位劑 C ₄ H ₆ O ₆ 和改質劑 C ₁₂ H ₂₇ O ₄ P，利用煤油作為稀釋劑和 NaOH 作為反萃取劑。最佳提取條件是 TOA30%、改質劑 5%、稀釋劑 65%。O / A= 1/8，質量比鍺 12-16 配位劑；在常溫下、3-5 分鐘。最佳反萃取條件 NaOH 濃度 30%，O / A 為 2，常溫下 3-5 分鐘。鍺的提取率在 97% 以上。
4	Separation of radioarsenic from irradiated germanium oxide targets for the production of ⁷¹ As and ⁷² As M. M. Shehata. et al. / J Radioanal Nucl Chem (2011) 287:435–442	環己烷溶解萃取 As (III) 時，可利用 2M KOH、4.75 M 鹽酸和 0.5 M KI 取得的二氧化鍺；利用 0.1 % 過氧化氫溶液進行反萃取放射砷。

表 6 國內外銻資源化處理技術之文獻彙整表(續 1)

No.	題目/作者/出處	重點內容彙整
5	Recovery of germanium from real fly ash leachates by ion-exchange extraction F.A.Torralvo et al. /Minerals Engineering 24 (2011) 35–41	銻與鄰苯二酚 (CAT) 的水溶液中，使用強鹼性陰離子樹脂 (IRA-900)，進行離子交換。 CAT /銻的莫爾比為 9、樹脂/銻劑量為 3，可獲得 96.1% 的銻。HCl 在 50% 乙醇中是最佳洗脫劑。
6	Preconcentration of germanium on mercapto-modified silica gel G. Go`kt`urk et al./Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 55 (2000) 1063-1071	超微量銻濃度，7.0-9.0pH 範圍內，巰基氧化矽能有效的富集銻。
7	LIQUID-LIQUID EXTRACTION OF GERMANIUM BY LIX 63 DE SCHEPPER/Hydrometallurgy, 1 (1976) 291--298	選擇性地由硫酸和鹽酸的溶液或它們的混合物萃取銻，所使用的萃取劑是 LIX 63，萃取劑的最大萃取量為 14 g/1 Ge。分離使用 NaOH，能夠得到含有 60~80 g/1 銻的溶液。
8	Ion flotation of germanium from fly ash aqueous leachates A. Hern´andez-Exp´osito a et al. /Chemical Engineering Journal 118 (2006) 69–75	離子浮選能有效的由濃度為約幾十 ppm 的 IGCC 粉煤灰水滲濾液回收銻。 從 IGCC 粉煤灰浸出銻的最佳條件：以十二烷基胺作為表面活性劑、兒茶酚作為配位體、pH4-7，約 30 分鐘可回收 100% 的銻。 在溫度高於 600°C 下煨燒含 Ge 的泡沫，產生高存度的 GeO ₂ 。
9	High-speed recovery of germanium in a convection-aided mode using functional porous hollow-fiber membranes Ichiro Ozawaa, Kyoichi Saitoa et al. / Journal of Chromatography A, 888 (2000) 43–49	使用功能性的多孔中空纖維膜能夠快速的從液體中回收銻。多孔中空纖維膜的製備：通過輻射誘導接枝聚合反應的環氧基團的含乙炔基單體，甲基丙烯酸縮水甘油酯、2-29 - 亞氨基二乙醇、二-2 -丙醇胺、N-甲基葡糖胺、3-氨基-1-1,2 - 丙二醇，所得中空纖維官能團密度為高達 1.4 莫爾/公斤；在重複使用後的吸附和洗脫，其吸附能力也不會變壞。
10	Gallium and Germanium Recovery From Domestic Sources By D. D. Harbuck/UNITED REPORT OF INVESTIGATIONS/1992	經由控制硫酸的濃度從鋅渣中提取鎵和銻；在 2.9M H ₂ SO ₄ 濃度可浸出 95% 的鎵，而在 0.6M H ₂ SO ₄ 濃度可浸出 73% 的銻。從浸出溶液中回收鎵的溶劑萃取劑為辛基酸式磷酸鹽 (OPAP)；回收銻的萃取劑為 LIX63-OPAP，得到回收超過 94% 的鎵和超過 90% 的銻。
11	高酸浸出-鐵粉還原浸出-富集-萃取法回收銻	試驗條件確定對銻萃取過程中萃取劑組成 90% P204+10% 磺化煤油+1.5% Yw-100；水相有機相比為 5：1；振盪時間為 5min/次；淋洗用 6M 鹽酸溶液；反萃級數為三級。萃銻的 pH 值為 1.0，萃銻過程中反萃效率達到 98% 以上。

表 5 國內外鍺資源化處理技術之文獻彙整表(續 2)

No.	題目/作者/出處	重點內容彙整
12	新型鍺萃取劑 G315 的應用研究 王海北、林江順等 廣東有色金屬學第 15 卷第 1 期 2005 年 3 月	在有機相為 9.5%G315—5%改質劑，(O):(A) = 1:2，混合時間為 5min 的條件下，水相酸度影響的試驗結果可知，G315 對鍺的萃取率隨水相酸度的增大而增大，但對鍺、鐵、鋅度實現鍺與鍺、鐵、鋅的分離提供了依據。當水相酸度約為 40g/l 時，鍺的萃取及與其它金屬離子的分離效果最好 在有機相為 9.5%G315—5%改質劑，混合時間為 5min 條件下，在相比 (O):(A) = 1:3 時，採用 2 級逆流萃取，可將料液中的鍺從 0.01g/l 降到 0.005g/l 以下，萃取率大於 96.7%。若考慮萃取的級效率為 80%，則經過 3 級萃取可達到上述效果。 在相比 (O):(A) = 1:5 時，經過 3 級萃取也可使鍺萃取率大於 96%。從富集鍺的角度出發，串級萃取操作的相比定為 1:5。
13	N235 萃取色譜法分離萃鋅餘液中鍺的研究 蔣新宇等/稀有金屬，2002，26(2)：11D—119	試驗料液為 Ge0.04g/l，H ₂ SO ₄ 20g/l 的溶液。經研究證明： 加入酒石酸可明顯改善 N235 對鍺的吸萃能力，鍺的吸萃率隨酒石酸的加入量的增加而增加，當酒石酸用量為鍺量的 15 倍時，鍺的吸萃能力大於 98%；料液酸度降低，鍺的吸萃率上升；料液流速增加，鍺的吸萃率降低；N235 對鍺的選擇吸萃性好。此方法是一種新型有效的分離方法，具有高分離效能，高選擇性。
14	微生物從煤中浸出鍺的基礎熱力學 朱支等/雲南冶金，2002，31(3)：106-108	微生物法是借助某些細菌的催化作用，使礦石中的金屬溶解，進入溶液，再進一步提取金屬的方法。對於金屬而言，微生物的作用表現在四個方面：1. 元素的有機質化；2. 有機質分解；3. 氧化與還原作用；4. 溶解與沉澱。微生物法提取鍺國內已有些研究，微生物法提取煤中的鍺，在微生物作用下，大分子有機鍺被破壞，形成小分子結合鍺或易溶的遊離鍺（鍺酸根或鍺離子），這些鍺生成物都能溶於稀的硫酸、鹽酸、乙酸和 NaOH 水溶液，鍺浸出率可達 85%。此方法投資小，能耗低，成本低，技術簡單且對環境無負擔。
15	關於酒石酸體系萃取分離鍺鋅的研究 李世平/稀有金屬，1996。20(5)，334~357	採用酒石酸作螯合劑，以 H ₂ SO ₄ 酸化，從硫酸鋅溶液中萃取鍺。在水溶液酸度 4-5g/L 時，一級萃鍺率可達到 85%。經五級逆流萃取，鍺的萃取率可達到 99%，Zn、Fe ²⁺ 基本不被萃取，負載有機相用 NaOH 反萃，鍺反萃率達 100%，有機相酸化後可重複使用。

表 5 國內外銻資源化處理技術之文獻彙整表(續 3)

No.	題目/作者/出處	重點內容彙整
16	二醯異脛肟酸萃取法從粉煤灰中提取銻 李祥生等/ 現代化工，2000，N020(8)，34	採用含 DHYA0.5mol/l 有機相對約 pH1.5 的含銻硫酸鹽溶液按 O/A=1:3 相比進行萃取，銻一級萃取率 85%。三級逆流萃取可達 99.5%，有機相用 NI-HF (2.5mol/l) 進行反萃，反萃率達 93.1%，主要問題是反萃困難，只有採用含 F-反萃劑才能獲得較高反萃率。
17	Recovery of germanium from aqueous solutions by solvent extraction Daniel A.D. Boateng EP0313201 A1	單獨使用 D2EHPA，其萃銻率幾近為零。 若使用 LIX25%、D2EHPA2%、M2EHPA3%以及煤油 70%，O/A=1/1 提升萃取率達 99%。 利用 5N NaOH 溶液，O/A=2/1 進行反萃取，銻回收量達 93%。
18	Recovery of germanium from aqueous solutions Boateng, et al. United States Patent, 4,525,332 June 25, 1985	採用 IRA-46、IRA-68 以及 IRA-743 離子交換樹脂從含銻、銻、鋅溶液吸附銻。 IRA-46 對銻的選擇性較高，A26mm 直徑管柱與 pH0.3 對銻的回收率可達 90%。 脫銻，則採用 2 階段式淋洗，第一階段使用 0.5M NaOH、50°C、1500mm；第二階段則改為 3M NaOH、50°C、5500mm。

3.4 廢銻資源化流程評估

本團隊提出整合含銻廢料與廢液資源化回收銻處理流程，針對含銻廢料，研磨粉屑經酸溶、過濾等程序後，產生金剛砂與濾液，金剛砂經水洗後可回收再利用。含銻廢液，建議初步過濾分離後與含銻廢料酸溶後的濾液合併採富集程序，建議程序包括吸附、離子交換、萃取等方法處理。經富集過濾後濾液規劃 2 種資源化回收途徑，回收途徑 1：經由溶媒萃取純化步驟，再經水解沉澱回收二氧化銻。回收途徑 2：經離子交換樹脂富集純化步驟，再經水解沉澱成二氧化銻，詳細資源化銻處理流程如圖 1 說明。

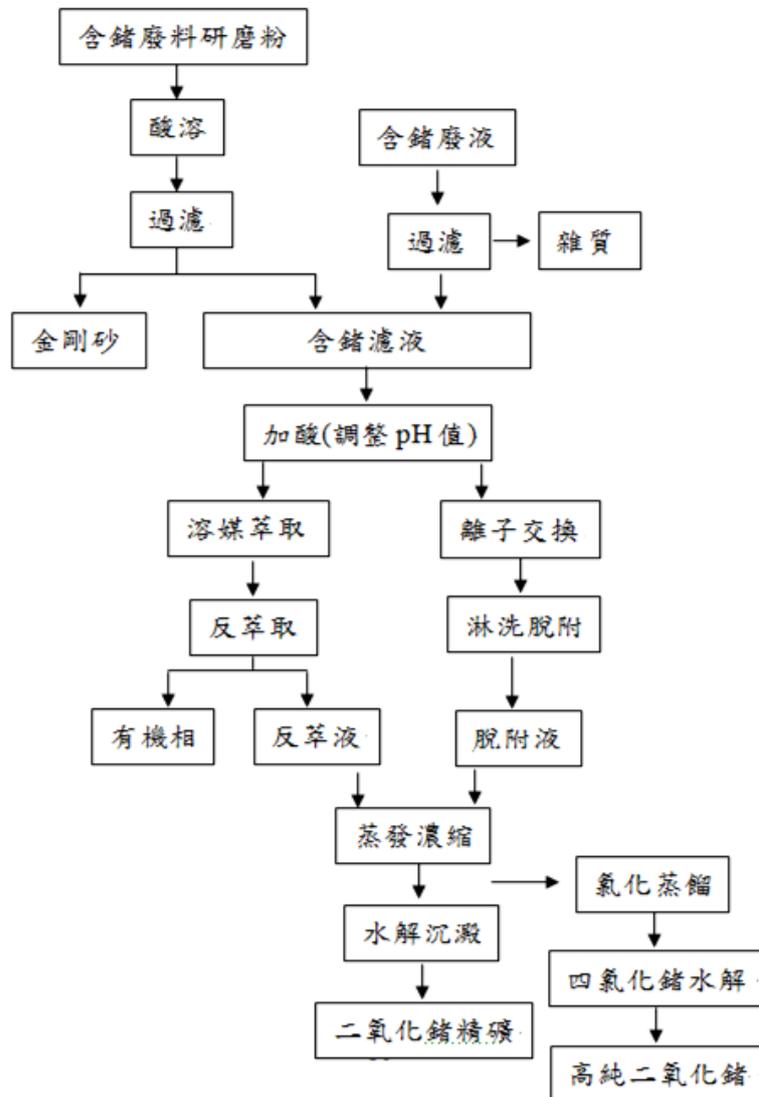
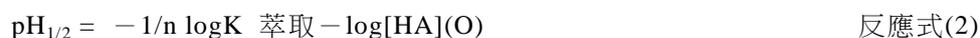


圖 1 含鍺廢料、廢液資源化回收處理流程

3.4.1 溶媒萃取純化程序

金屬溶劑萃取常伴隨著化學反應發生，即水相中金屬離子以不同型式與萃取劑發生化學結合，生成易溶於有機相的萃合物而被萃取，此萃取體系三大種類包括(1)

中性絡合萃取：此萃取劑為中性有機化合物，如 TBP、TOA、MIBK 或 N503、(2) 陽離子交換萃取：此萃取劑為弱酸(HR)，常如 P204、P507、P5708、Cyanex272 等，被萃物為金屬陽離子 Mn^+ ，萃取反應機制是陽離子交換，如反應式(1)。當游離萃取劑濃度一定時，此 pH 值為常數，以 $pH_{1/2}$ 表示，如反應式(2)。針對同一萃取體系， $pH_{1/2}$ 越小的金屬離子越容易被萃取，對同一金屬而言，具有 $pH_{1/2}$ 越小的萃取體系越有利該金屬離子萃取。(3)金屬絡合陰離子萃取：被萃金屬以絡合陰離子型式與帶相反電荷的有機陰離子形成疏水性的離子進入有機相，常使用胺類萃取劑，如 TOA 或 N235 等。影響萃取平衡因素包括溫度、萃取劑濃度、pH 值、接觸時間、O/A(油/水比)與金屬離子濃度影響。



3.4.2 吸附與離子交換之回收程序

透過吸附劑將溶液中吸附質結合於吸附劑表面達成吸附作用，優點能去除廢液中多成分的污染物，特別針對低濃度廢液處理透過不同吸附劑選用，達成選擇性高且效果好之優點。常見的吸附劑依化學結構可分為有機吸附劑(活性碳、樹脂吸附劑等)與無機吸附劑(氧化鋁、矽藻土、矽膠、分子篩等)。離子交換程序是利用離子交換劑與電解質水容易接觸時，溶液中的某種離子與交換劑中的同性電荷離子發生離子交換作用，結果溶液中的離子進入交換劑，交換劑中離子轉入溶液中，離子交換過程常包括吸附與淋洗二個階段。濕法冶金中常用人工合成的離子交換樹脂，此種含有可交換活性基團的高分子化合物，一般由高分子、交聯與官能團等三部分組成。由於銻在溶液中為四價陽離子，故可選擇官能團為強鹼型高分子聚合物的陰離子交換樹脂，如 IRA-900，為多孔性二乙烯苯聚合基體構造，多孔型樹脂之耐膨脹收縮衝擊力強，常用於廢水處理，交換離子型式為 Cl^- ，總交換容量最小 4.5 mmol/g，含水率 75~85%，在銻溶液中添加兒茶酚絡合形成陰離子團，如反應式(3)，隨陰離子團與交換樹脂中的氯(Cl^-)交換而被吸附。



3.4.3 資源化技術處理優點

- 1.針對半導體產業以及光纖生產中所產生的含鍺廢料、廢液中回收鍺金屬之資源化技術，經由富集程序與酸溶、溶媒萃取與反萃取、離子交換、水解沉澱等資源化回收途徑，製成高純度鍺金屬之再生產品，更可免除廢鍺料所造成污染問題，達到環保、資源再生與經濟等多重效益。
- 2.本資源化技術所得鍺金屬資源，並能符合售至國外精煉廠標準，其產品可達商品化規格，極具經濟價值。

藉由富集、酸溶、溶媒萃取與反萃取或離子交換等步驟處理後，將鍺金屬資源回收，不但處理成本低，並具高經濟回收效益。

四、結論與建議

- 1.每年全世界的鍺需求量超過 150 噸，由於鍺自然資源並不豐富，因此鍺廢渣的回收技術發展更迫切需要。
- 2.提出含鍺廢料資源化回收鍺處理流程，針對含鍺廢料經酸溶過濾程序後，富集過濾、調整 pH 經溶媒萃取純化步驟，反萃形成高純度的含鍺溶液，氨水調整 pH 使二氧化鍺產生沉澱，即得高純度金屬鍺再生產品。
- 3.回收後的氧化鍺不僅對資源業者有所助益，同時落實資源循環理念，使國內製造業、材料業及資源再生業形成共同體系。

誌謝

筆者特此感謝經濟部技術處學界科專—「半導體廢料回收及稀有金屬純化精煉技術研發」三年計畫（103-EC-17-A-10-S1-187）的經費支助與本團隊協助完成。

參考文獻

- 1.孫博、關興波，神秘的二十一世紀鏞，上海三聯書店，2007。
- 2.A. Sabarudin et al., Chitosan functionalized with di-2-propanolamine:Its application as solid phase extractant for the determination of germanium in water samples by ICP-MS, *Microchemical Journal* 99, pp.34~39, 2011.
- 3.F. Arroyo et al., Germanium recovery from gasification fly ash: Evaluation of end-products obtained by precipitation methods, *Journal of Hazardous Materials* 167, pp.582~588, 2009.
- 4.Jie Liang et al., Study on Extracting of Germanium with Trioctylamine, *Energy Procedia* 17, pp.1965 ~ 1973, 2012.
- 5.M. M. Shehata. et al., Separation of radioarsenic from irradiated germanium oxide targets for the production of ^{71}As and ^{72}As , *J. Radioanal Nucl Chem* 287, pp.435~442, 2011.
- 6.F.A.Torralvo et al., Recovery of germanium from real fly ash leachates by ion-exchange extraction, *Minerals Engineering* 24, pp.35~41, 2011.
- 7.G. Go"kt"urk et al., Preconcentration of germanium on mercapto-modified silica gel, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 55, pp.1063~1071, 2000.
- 8.A. DE Schepper, LIQUID--LIQUID EXTRACTION OF GERMANIUM BY LIX 63, *Hydrometallurgy* 1, pp.291~298, 1976.
- 9.A. Hern´andez-Exp´osito a et al., Ion flotation of germanium from fly ash aqueous leachates, *Chemical Engineering Journal* 118, pp.69~75, 2006.
- 10.Ichiro Ozawaa, Kyoichi Saitoa et al., High-speed recovery of germanium in a convection-aided mode using functional porous hollow-fiber membranes, *Journal of Chromatography A* 888, pp. 43~49, 2000.
- 11.D. D. Harbuck, Gallium and Germanium Recovery From Domestic Sources, UNITED REPORT OF INVESTIGATIONS, 1992.
- 12.Boateng , et al., Recovery of germanium from aqueous solutions, United States Patent, 4,525,332, June 25, 1985.
- 13.M. Kul and Y. Topkaya, Recovery of germanium and other valuable metals from zinc plant

94 鍺金屬之應用與回收技術介紹

- residues, *Hydrometallurgy* 92, pp.87~94, 2008.
14. Duoqiang Liang, Jikun Wang, Yunhua Wang, Difference in dissolution between germanium and zinc during the oxidative pressure leaching of sphalerite, *Hydrometallurgy* 95, pp.5~7, 2009.
15. Bina Gupta, Niti Mudhar, Zareena Begum I, and Indu Singh, Extraction and recovery of Ga(III) from waste material using Cyanex 923, *Hydrometallurgy* 87, pp.18~26, 2007.
16. Bina Gupta and Niti Mudhar, Extraction and Separation of Germanium Using Cyanex 301/Cyanex 923. It's Recovery from Transistor Waste, *Separation Science and Technology* 41, pp.549~572, 2006.
17. Amr S. Meawad, Darinka Y. Bojinova, and Yoncho G. Pelovski, An overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes, *Waste Management* 30, pp.2548~2559, 2010.
18. D. Kalderis, E. Tsolaki, C. Antoniou, and E. Diamadopoulos, Characterization and treatment of wastewater produced during the hydro-metallurgical extraction of germanium from fly ash, *Desalination* 230, pp.162~174, 2008.
19. Chang-Hwan Jung, Masahiro Osako, Leaching characteristics of rare metal elements and chlorine in fly ash from ash melting plants for metal recovery, *Waste Management* 29, pp.1532~1540, 2009.
20. USGS 美國地理資訊調查學會歷年統計資料, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/>。
21. John D. Jorgenson, Germanium Recycling in the United States in 2000, USGS Circular 1196-V.
22. David E. Guberman, 2011 Minerals Yearbook Germanium, USGS.
23. Donald I. Bleiwas, Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells, USGS Circular 1365.
24. 財政部關稅總局統計資料庫, <http://www.customs.gov.tw/StatisticWeb/IESearch.aspx>.

本期專題：環保設施之低碳技術

專題編輯委員

張添晉

學歷

國立中央大學土木工程博士

經歷

國立台北工專土木科副教授兼科主任
國立台北技術學院土木系副教授兼系主任
國立台北科技大學土木系/環境所副教授、教授

現任

國立臺北科技大學環境工程與管理研究所教授
兼工程學院院長
循環型環境研究中心主任

申永順

學歷

國立台灣科技大學化學工程研究所博士

經歷

大葉大學環境工程系副教授兼系主任
大葉大學環境工程系助理教授

現任

馬偕醫學院全人教育中心副教授兼學務長

專題介紹

為因應氣候變遷對全球的影響，國際社會對於低碳節能的進行不遺餘力，而我國環境政策亦以此為重點方向。在環保設施低碳的技術上，除透過使用高效能的環保設備外，產品研究及改良、生產製程的改善外，低碳技術的研發皆為重要的一環，讓製程生產及環保設施能達到最佳化模式，進而達到低碳之目的。

本期專題為「環保設施之低碳技術」，邀請台灣科技大學顧洋教授針對化學迴路程序及其在節能減碳領域應用提出未來發展趨式；淡江大學陳柏珍講師就傳統污水抽水站濕井之省能設計提供寶貴的實務經驗；朝陽科技大學莊順興教授介紹下水道脫水污泥低溫炭化資源化及減碳案例；中興工程陳立儒經理就碳管理角度探討公共污水處理廠節能減碳規劃設計提供分享。

本期專題透過邀請專家學者撰寫相關專文，藉以拋磚引玉，期能引起研究之風潮，提供國內環保低碳技術之參考。專題作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

