



水中爆破破碎法於城市採礦之應用

王立邦／國立台北科技大學環境工程與管理研究所 助理教授

資源處理技術中破碎及粉碎之目的為提高回收對象物的單體分離度，以利後續的物理選別及化學冶金程序。傳統的機械破碎法係針對破碎對象物進行均一性的破碎，對於組成及構造皆複雜化的人工廢棄物較難適用，亦或需投入更多的破碎能量。本文介紹一嶄新的破碎方法—水中爆破破碎法，其可對破碎對象物進行零組件別的選擇性破碎，有效率地達成單體分離。本文介紹水中爆破破碎法的原理、於城市採礦之應用時機、以及從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的破碎應用實例。

前言

隨著科技的發展，智慧型手機、平板電腦等各類 3C 電子產品不斷推陳出新，使生活更為便利。而各種電子產品的生產製造，都需要使用貴金屬或稀有金屬等各種金屬作為原料。而地球上金屬礦物資源的產地集中於少數國家地區，且由於經濟快速成長，資源物質被大量開發，致使資源逐漸枯竭。另一方面，各種電子產品使用壽命終了後，形成大量人工廢棄物，排放至環境中，亦增加地球環境之負荷與污染。為邁向永續發展之社會，促進資源物質之循環利用，減輕地球環境之污染負荷，從廢電子產品等人工廢棄物中回收有價金屬，亦即城市採礦（Urban mining），在近年來逐漸受到重視。

從人工廢棄物中回收金屬的程序，與從礦物中生產金屬的過程類似，亦即：破碎 → 選別 → 冶煉，其中破碎的目的為減少礦物或人工廢棄物的大小與體積，使其中的對象金屬與雜質解離，提高回收對象金屬的單體分離度。於破碎階段如能使回收對象金屬盡可能地分離獨立出來，將有助於提升後續的物理選別及化學冶煉等程序的效果，並節省處理成本。

傳統針對礦物的破碎設備，如碎礦機、磨礦機等，係利用機械破碎方法，減少礦物的大小與體積，破碎後得到的礦物粒子大小較為均一，但獲得的破碎

物中含有各種成分，屬於非選擇性破碎，如圖 1(a) 所示。此類破碎方式對於組成、材質、構造皆複雜的人工廢棄物，較難適用，亦或需投入更多的破碎能量。對於人工廢棄物，依其不同材質進行破碎，亦即選擇性破碎，使破碎物中含有單一材質，如圖 1(b) 所示，更為重要。本文所介紹的水中爆破破碎法，可對於人工廢棄物進行選擇性破碎，達到零組件別分離的效果。

水中爆破破碎法原理

水中爆破破碎法顧名思義，於水中進行爆破。將炸藥和破碎對象物置於水中，利用炸藥的爆轟產生的衝擊波和爆炸生成氣體，對破碎對象物進行破碎的方法。藉由改變炸藥量及炸藥與破碎對象物的距離，可容易調節爆破威力。較常應用於如港灣、河海的水下工程施作，或軍事上的彈藥試爆等。水中爆破破碎法的炸藥和破碎對象物的配置方式如圖 2 所示，炸藥可

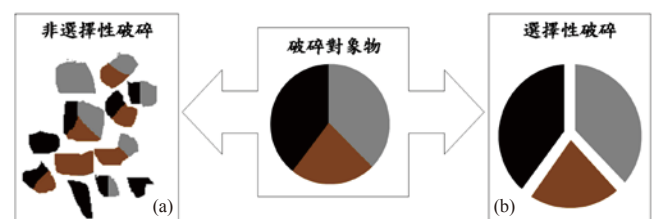


圖 1 (a) 非選擇性破碎與 (b) 選擇性破碎示意圖

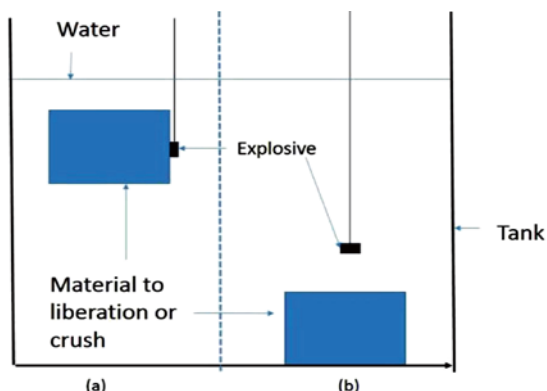


圖 2 炸藥與破碎對象物配置方式示意圖

與破碎對象物直接接觸連接 (a)，或與破碎對象物相隔一定距離 (b)，進行爆破。一般而言，前者適用於堅硬材質的破碎，後者適用較易破碎的材質。

與於空氣中進行的爆破相比，因水的密度比空氣大，壓縮性比空氣低，故爆炸的能量傳遞在水中較空氣中為有效。此外，爆炸產生的噪音及震動等可局限於水中，對環境的衝擊影響較低。將此破碎方法應用於人工廢棄物的破碎時，衝擊波於所作用的對象物的界面產生反射，並產生拉應力。當不同密度的材料複合接着時，可於不同密度的材料界面產生剝離，因而具有機械破碎所沒有的選擇性破碎效果。

水中爆破破碎法應用於廢棄手機的破碎實例如圖 3 所示。手機係由金屬及塑膠等各種不同零件材料所組合而成，如利用傳統的機械破碎方法，將無法達成零組件別的選擇性破碎。利用水中爆破破碎法，可沿著不同材料的接合處進行破碎，使金屬與塑膠等不同材質有效分離，而達到零組件別的破碎分離效果，有利於後續的選別及冶煉等分離回收程序。例如利用酸進行金屬的浸出溶解時，可減少酸的使用量，提高處理效果，並減少成本。



圖 3 水中爆破破碎後的手機

水中爆破破碎法的應用時機

水中爆破破碎法可適用於以下幾類人工廢棄物的破碎：

1. 機械破碎困難的超硬材料的破碎：

如碳化鎢 (WC) 等廢棄超硬合金的破碎。

2. 需大量處理的人工廢棄物的解體分解：

如廢棄電子機械製品、廢棄鋼筋混凝土、塑膠和金屬、電路板和組裝零件等的大量解體分解。藉由調整炸藥量及與破碎對象物的距離，可避免造成過度破碎、粉碎。

3. 危險物質的破碎和分解：

如電池類等以機械方式進行破碎時，會發生爆炸或產生有害物質者，可將爆炸或有害物質的衝擊危害侷限於水中。

應用水中爆破破碎法進行馬達轉子中鈹鐵硼磁鐵的分解回收

以下介紹筆者實際從事，利用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的破碎應用實例。

含有稀土金屬的鈹鐵硼磁鐵，已廣泛使用於油電混合車和電動車用的馬達、大型空調和冷凍庫的壓縮機用的馬達中。當這些汽車空調家電等使用壽命終了後，從其馬達轉子中回收鈹鐵硼磁鐵，做為稀土金屬的二次資源，甚為重要。惟馬達轉子甚為堅硬，構造複雜，利用傳統的機械破碎方法進行破碎非常困難，目前僅能利用人工進行拆解，費工費時。利用水中爆破破碎法，可有效地從馬達轉子中瞬間且大量分解回收鈹鐵硼磁鐵，其流程如圖 4 所示。

將分離式冷氣機的室外壓縮機的外殼切開 (a)，並將和壓縮機連結的回轉軸以機械式切斷後，取出馬達轉子 (b)。轉子內部構造為在回轉軸方向為積層式的鋼片，鈹鐵硼磁鐵嵌入內部貫通其中。於馬達的中心，塞入約 10 g 炸藥後 (c)，裝上電氣式雷管 (d)。將破碎對象物的馬達轉子、炸藥和雷管所形成的整套實驗物，吊於圓筒形不銹鋼水槽 (直徑 1.8 m、水深 1.5 m)，並置於其中心部 (e)。於水槽下部配置回收網，爆破後將其拉起回收破碎物。炸藥的起爆為使用瞬間啟動爆發的電氣式雷管，以遠隔通電起爆。

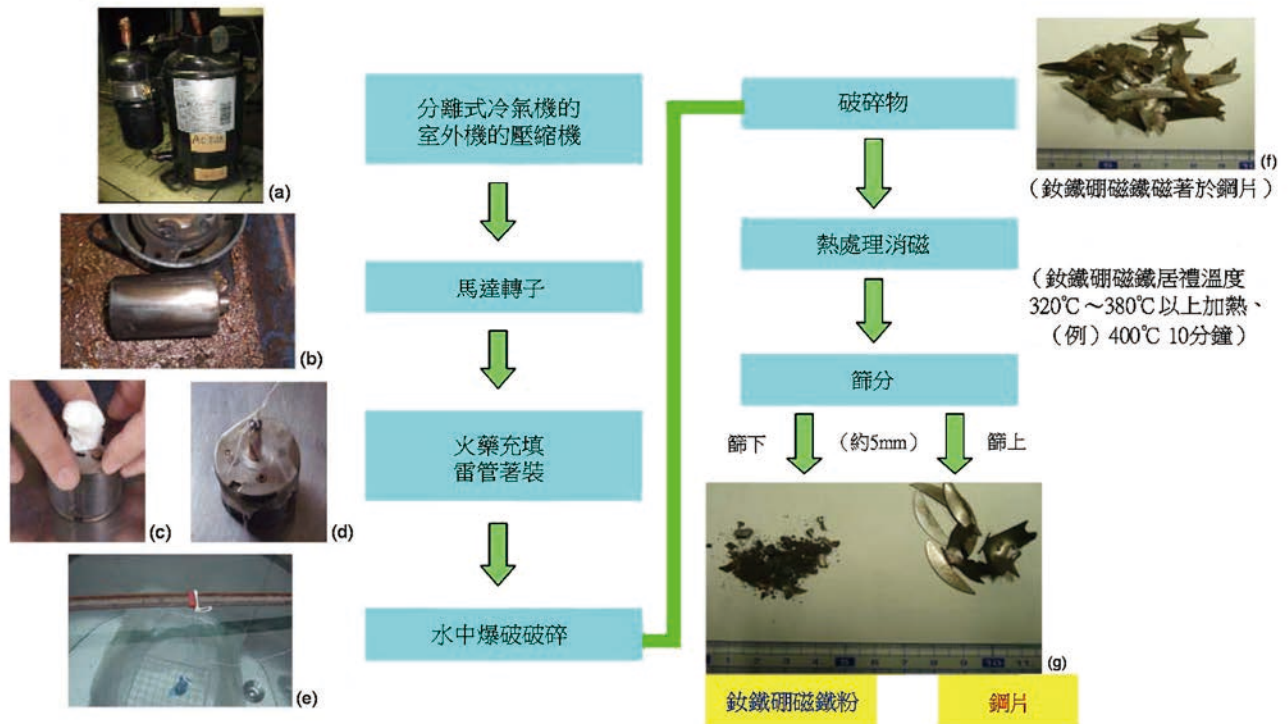


圖 4 利用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的流程

水中爆破破碎後，轉子的積層鋼片一片片地分離，因鈹鐵硼磁鐵破碎後仍具有磁性，故磁著於鋼片 (f)。鈹鐵硼磁鐵的居禮溫度 (Curie temperature，亦即消磁溫度) 約 320°C ~ 380°C，故將磁著在一起的鈹鐵硼磁鐵粉和鋼片的破碎物放入 400°C 的電氣爐中 10 分鐘，將鈹鐵硼磁鐵粉消磁。待冷卻後，將破碎物過 5 mm 篩，篩下物 (g 左) 為鈹鐵硼磁鐵粉、篩上物 (g 右) 為鋼片，而將鈹鐵硼磁鐵粉和鋼片分別回收。鈹鐵硼磁鐵粉可進行後續冶煉程序回收鈹等稀土金屬。

以上確認應用水中爆破破碎法從馬達轉子中分解回收鈹鐵硼磁鐵的可行性。藉由調整水中爆破破碎的條件，將可以處理更大型更大量的馬達轉子。

結語

水中爆破破碎法可對破碎對象物進行選擇性破碎，對於組成、構造皆複雜的人工廢棄物，可達到零組件別破碎分離的效果。對於今後日亦增加且組成構造更為複雜的人工廢棄物，做為從人工廢棄物中進行資源回收的程序的一環，水中爆破破碎法於破碎的應用值得期待。

惟需特別留意的是，水中爆破破碎法應用於人工廢棄物破碎的實際操作具有危險性，需由擁有操作炸

藥經驗的專業技術人員，於特定設施場所進行，以確保安全性。

誌謝

本文部分圖片由日本東京大學工學系研究科藤田豐久教授及日本工機株式會社村田健司博士提供，特此致謝。

參考文獻

1. 村田健司、加藤幸夫、柴山敦、藤田豐久，「リサイクルのための水中での爆破粉碎法」環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」第 12 回建設廢材リサイクル促進のための分離精製技術、2006、pp. 18-21。
2. 藤田豐久，「水中爆破を用いたリサイクル前処理のための各種廢棄物の剝離による単体分離」ケミカルエンジニアリング、2010、Vol. 55、No. 10、pp. 764-769。
3. 王立邦、Gjergj Dodbibba、岡屋克則、藤田豐久、村田健司、川野誠、藤垣雄一，「モーター中の希土類含有永久磁石の水中爆破破碎による分離」資源・素材 Vol. 2011、No. B/C/S、pp. 199-200、2011.9.26-29 (大阪府立大学)。
4. Li Pang Wang, Wei Sheng Chen, Chih Mei Chou, Kenji Murata, Toyohisa Fujita: Applying Underwater Explosion for the Liberation of Neodymium Magnet Rotor Followed by Thermal Treatment for Recycling, Materials Transactions, Vol. 57, No. 9, pp.1664-1666 (2016).