

PET塑料化學回收再循環技術

PET Plastic Chemical Recycling Technology

芮嘉瑋

Chia-Wei Jui

聚對苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene terephthalate, PET) 為著名的一次性塑料之一，其廢棄物已在環境中堆積造成全球性污染問題。運用循環經濟的概念，以可被回收且再利用的方式開發可持續性的 PET 塑料，係涉及一種化學再循環方法。本文除了介紹 PET 主要的三種化學回收傳統技術 (水解法、醇解法及胺解法) 外，為了掌握最新 PET 化學回收的產業技術現況與發展，亦就近期數家廠商開發出具競爭力的 PET 新型化學回收技術，分享其化學解聚製程的技術特徵及應用潛力。

Polyethylene terephthalate (PET) is one of the famous disposable plastics, and its waste has accumulated in the environment causing global pollution problems. Using the concept of circular economy, the sustainable PET plastics can be recycled and reused involves a chemical recycling method. The three main traditional PET chemical recycling technologies can be categorized as hydrolysis, glycolysis and aminolysis. In order to grasp the current status and development of the latest PET chemical recycling industry technology, this article also shares the technical characteristics and application potential of its chemical depolymerization process on the competitive PET new chemical recycling technology recently developed by several manufacturers.

一、PET 化學回收傳統技術

PET 化學回收技術是將 PET 鏈化學解聚為單體或各種有價值的化學物質，用於分解聚酯鏈不同的化學試劑 (簡稱解鏈劑) 時有不同的解聚途徑。基本上，PET 化學回收技術係利用解鏈劑將 PET 酯基進行斷鍵以降解為二元醇、二元酸與二元胺等單體，這些解聚生成的單體可再作為 PET 聚合的原料循環利用。依照目前 PET 的解聚製程化學方法，如圖 1 所示，主要有水解法 (包括酸性水解、鹼性水解、中性水解)、醇解法 (包括甲醇解、乙二醇解) 及胺解法。各方法分述如下：

1. 水解法 (hydrolysis)

水解法是在鹼性、酸性和中性水溶液環境下將 PET 解鏈對苯二甲酸 (terephthalic acid, TPA) 及乙二醇 (ethylene glycol, EG)。PET 鹼性水解反應及其酸性水解反應如圖 2、圖 3 所

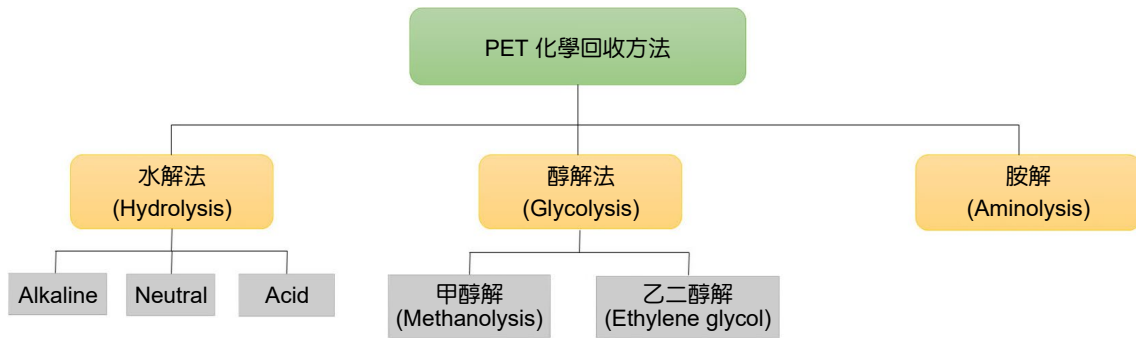


圖 1. PET 解聚製程化學回收方法的分類 (Source：作者繪製)。

示。待解聚的 PET 與乙二醇 (EG) 中的鹼性氫氧化物 (NaOH、KOH 或其他鹼性氫氧化物) 所構成的溶劑混合物反應，使在乙二醇 (EG) 的溶液中生成對苯二甲酸 (TPA) 或其鹽 (例如鈉鹽或鉀鹽)。由於水解反應需要加酸或加鹼處理產品，酸鹼廢液汙染環境，同時反應條件為高壓製程且反應時間長，製程成本高而不易在實際應用中使用。

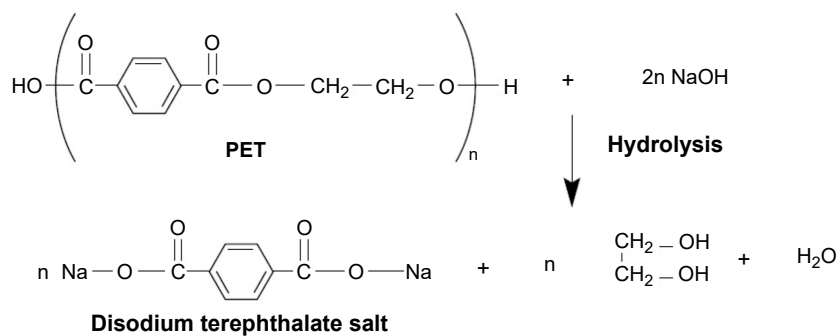


圖 2. PET 鹼性水解反應^(1,2) (資料來源：工業材料雜誌 (2019/12))。

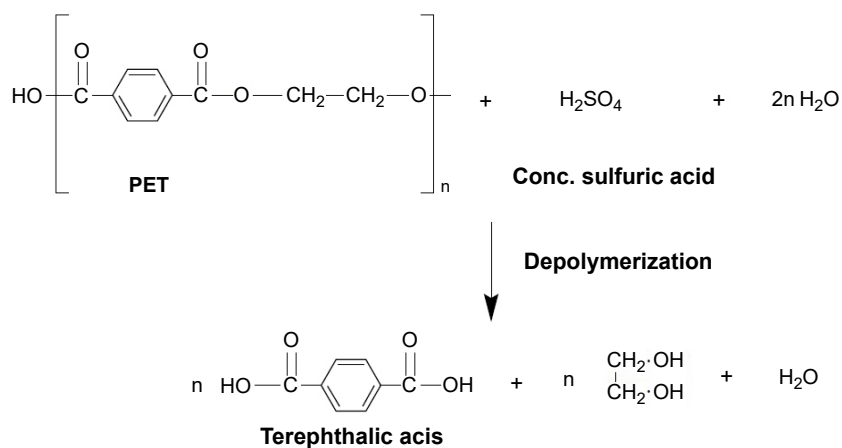


圖 3. PET 酸性水解反應^(3,4) (資料來源：工業材料雜誌 (2019/12))。

2. 醇解法 (glycolysis)

醇解法是 PET 重要的商業化解鏈方法，將 PET 碎片按一定比例加入醇液中，加熱一段時間，可解聚為單體或是低聚物。醇解法用於分解聚酯鏈的解鏈劑通常為低分子量二元醇，包括甲醇及乙二醇。若使用乙二醇醇解，產物是對苯二甲酸乙二醇酯 (bis(2-hydroxyethyl) terephthalate, BHET) 及其低聚物 (oligomers)。若使用甲醇醇解，產物是對苯二甲酸二甲酯 (dimethyl terephthalate, DMT) 和乙二醇 (EG)。

1. 乙二醇解法 (ethylene glycol)

乙二醇 (EG) 為最常使用的醇解劑，在解聚過程中扮演著綠色溶劑/試劑，使得乙二醇醇解法被認為是友善的創新環保技術。圖 4 為 PET 之乙二醇醇解反應，在轉酯化催化劑與醇解劑的作用下，PET 可在低壓和 108–240 °C 的反應條件下降解成 BHET 及 PET 低聚物。由於這些產物可混合 BHET 新料並回用於 PET 製造，也可進一步應用於 PU 泡棉、共聚酯、疏水性染料、不飽和樹脂與丙烯酸塗料，從而乙二醇解法為目前方法中最具有實用價值的回收方法。然而，低壓醇解反應速度慢為其缺點。

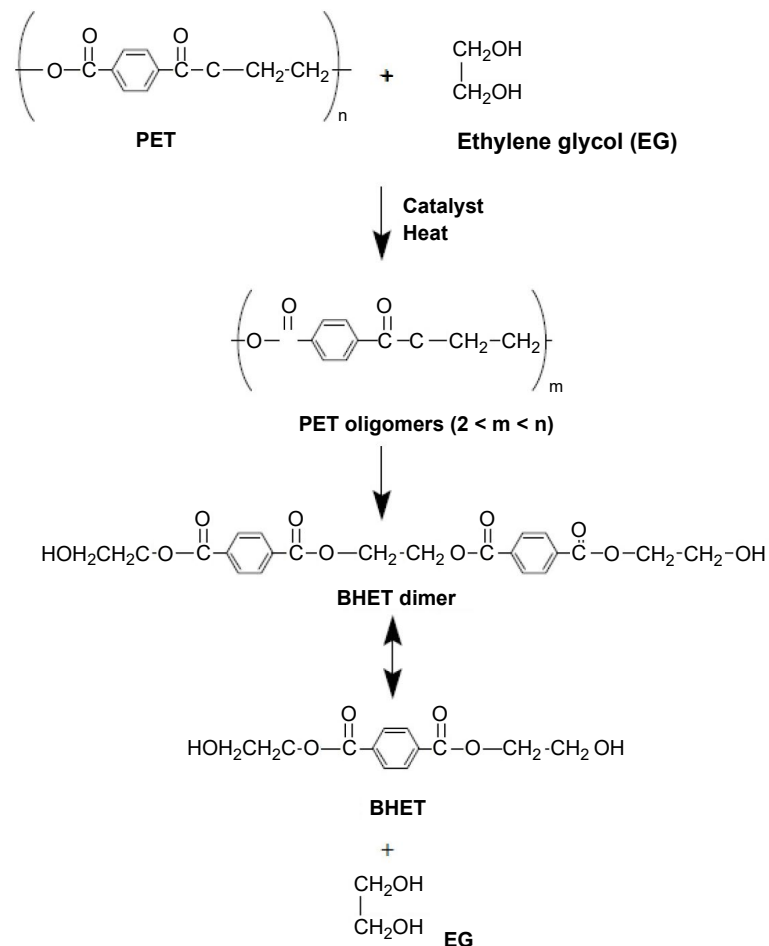


圖 4. PET 乙二醇醇解反應^(5,6) (資料來源：工業材料雜誌 (2019/12))。

2. 甲醇解法 (methanolysis)

1980 年美國 Eastman 公司即成功開發了甲醇降解 PET 的技術，並於 1987 年建置其商業化之設備⁽⁷⁾。在高溫及高壓的甲醇環境下，PET 可降解形成對苯二甲酸二甲酯 (DMT) 和乙二醇 (EG)。圖 5 為 PET 甲醇解反應。此法目前雖可有效地應用於廢料瓶、廢纖維與薄膜回收，但反應物的分離與純化成本高為其缺點。

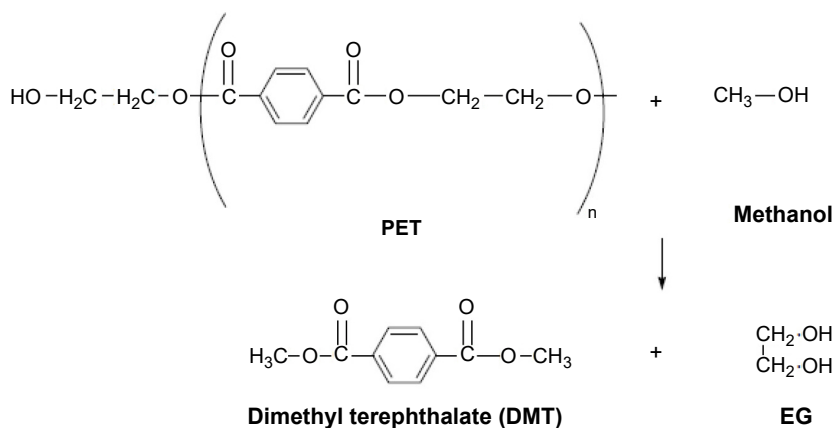


圖 5. PET 甲醇解反應^(8,9) (資料來源：工業材料雜誌 (2019/12))。

3. 胺解 (aminolysis)

圖 6 為 PET 胺解反應，使用乙二醇胺 (ethanolamine) 胺解 PET 產生雙 (2-羥基乙基) 對苯二甲酰胺 (bis-(2-hydroxyethylene)terephthalamide, BHETA)。PET 經胺解反應會生成雙酰胺，但此製程尚未商業化。

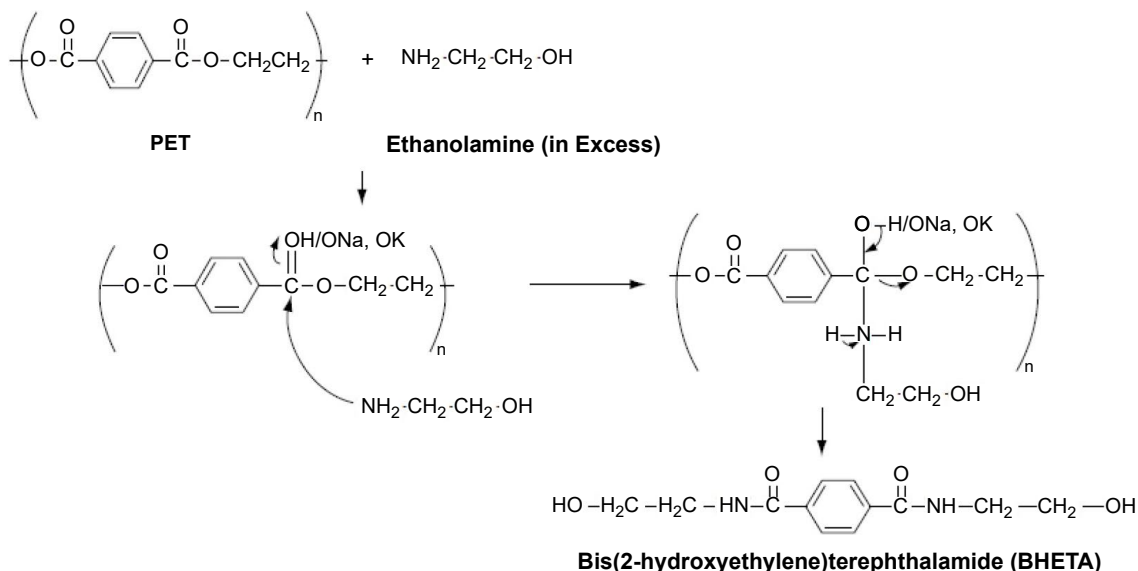


圖 6. PET 胺解反應^(10,11) (資料來源：工業材料雜誌 (2019/12))。

二、PET 化學回收新技術

儘管已知有不同的解聚反應，可以透過其解聚製程還原成單體 (或低聚物) 的形式，然後再聚合以產生新的產物，但現有 PET 解聚化學回收技術都存在著一定的缺陷，在簡單性、產率、效率和處理速度方面仍有許多需要改進之處，以試圖探索開發工藝簡單、反應條件適中的環保型解聚方法。論及 PET 新型化學回收法的開發，近期已有數家廠商開發出較具競爭力的製程技術，表 1 僅代表性的列示這些公司、技術主要特徵及其化學解聚後之產品，後續將依序分述說明。

表 1. 列舉 PET 化學回收新技術的公司 (資料來源：作者繪製)。

公司	技術特徵	產物	作用溫度
GR3N	連續操作運行微波反應器	TPA/EG	150–350 °C
Ioniqa	磁性智能觸媒	BHET	190–200 °C
LOOP	無負擔反應條件 (環境溫度及大氣壓) 下將 PET 與非極性溶劑、氫氧化物及醇混合	TPA/EG	25 ± 5 °C (環境溫度)
IBM	分子篩選、胺類觸媒回收機制	BHET/EG	150–250 °C

1. 微波反應器解聚製程技術 (GR3N 公司)

瑞士的 GR3N 公司基於微波解聚反應器之核心技術提供了一種經濟高效的 PET 化學回收方法，並獲得專利許可使回收方法能在工業上實現。技術的核心是 DEMETO (“DEpolymerization by MicrowavE TechnolOgy” 的縮寫) 專利技術，意思是由微波工藝進行的解聚。GR3N 公司在 PET 解鏈技術開發上提供一種用以回收 PET 的微波解聚製程和設備，在工業規模下使用簡單、有效和廉價的方式回收 PET 材料。GR3N 公司所開發之 PET 解聚製程回收技術於 2012 年申請歐洲發明專利⁽¹²⁾，涉及一種透過微波解聚製程回收 PET 塑料的方法和設備。圖 7 為根據該發明用於透過解聚製程回收 PET 塑料的設備的示意圖，圖 8 是圖 7 的設備的一部分的示意圖，特別是與反應物移動系統有關的微波解聚反應器的示意圖，圖 9 係示意性地示出具有複數個如圖 8 所示類型之解聚反應器的可能配置。

在方法上，參見圖 7、8 所示，其特徵在於 PET 解聚製程反應至少包括以下幾個步驟：提供一基本上沿著軸線 (A) 延伸的微波解聚反應器 (6)；定義解聚反應的反應物並分別構成固、液相，透過各自的進料管線 (9、10) 將固相之待解聚材料 (PET 廢料) 與液相之溶劑混合物進料到反應器 (6) 中；透過一阿基米德螺桿移動系統 (7) 使該反應器 (6) 中之反應物基本上透過沿軸線 (A) 移動的反應器 (6) 彼此混合以形成非均相 (heterogeneous) 反應混合物；以微波輻射照射該反應器 (6) 之一反應腔室 (15) 中的反應物以進行解聚反應；該反應腔室 (15) 被限定在該反應器 (6) 的一管狀殼體 (14) 內，該管狀殼體 (14) 具有對微波輻射透明的一側壁 (20) 並被容納在一微波室 (16) 的內部，該微波室 (16) 同軸地且徑向地配置在該殼體 (14) 的周圍並且圍繞殼體 (14) 和反應室 (15)；反應物透過一環形螺桿 (22) 移動，該螺桿沿軸線 (A) 延伸穿過反應室 (15) 並繞著軸線 (A) 旋轉。

另就其設備上，設備 1 包括二個功能單元用以創建一個通用的整體系統，分別是解聚單元 2 和處理單元 3。解聚單元 (2) 包括用於對準備要再循環的材料 (PET 廢料) 進行初步機械處理的研磨單元 (4)、用以製備溶劑混合物的混合單元 (5)、至少一個配備用於移動反應物之

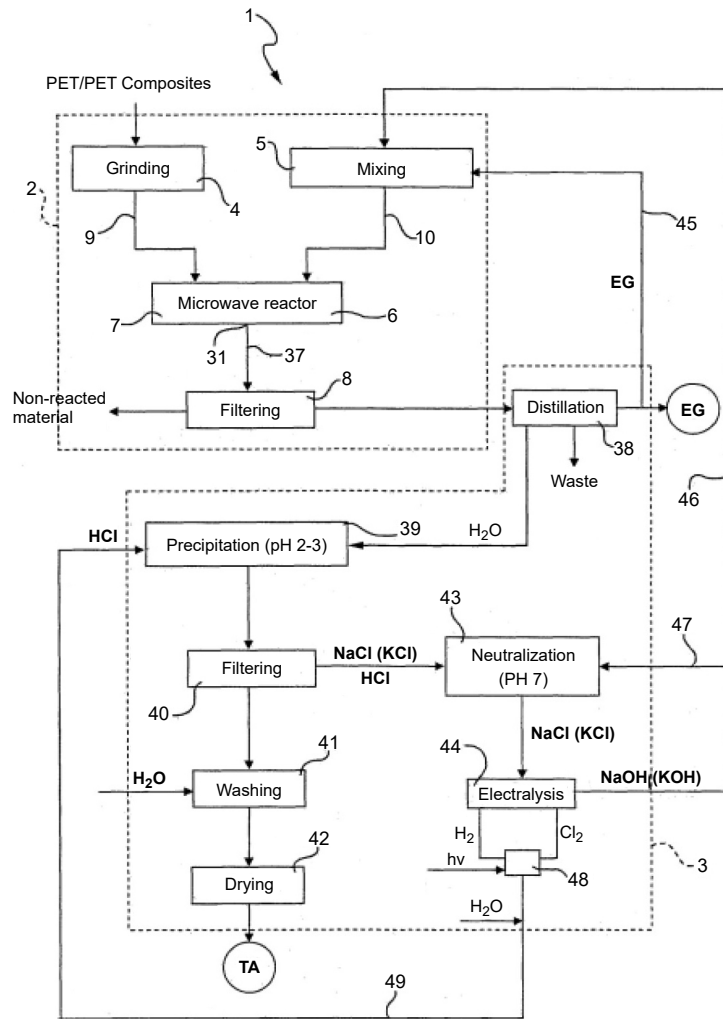


圖 7. GR3N 公司 PET 解聚製程回收技術設備示意圖
(Source : European Patent EP2736968B1)。

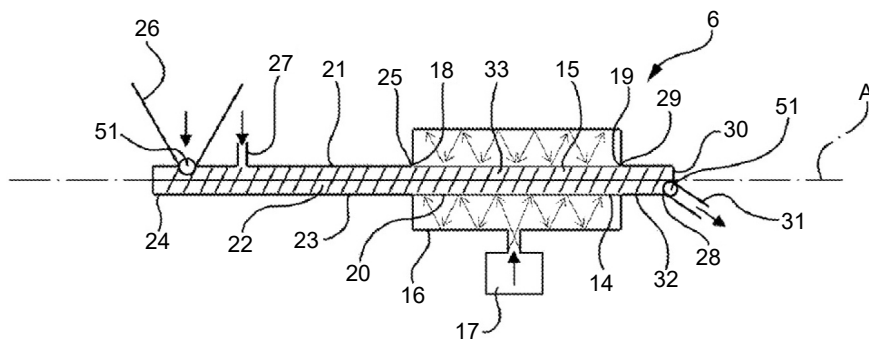


圖 8. GR3N 公司微波解聚反應器示意圖 (Source : European Patent EP2736968B1)。

系統 (7) 且可連續運作的微波解聚反應器 (6)，以及可對該反應器 (6) 出來之產物過濾的過濾單元 (8)。其中，研磨單元 4 的研磨材料 (待解聚的材料) 係構成固相，在混合單元 5 中製備的溶劑混合物係構成液相，透過各自的進料管線 9、10 進料到反應器 6 中混合形成非均相反

應混合物並使其反應。由於待解聚欲回收的材料是 PET，在混合單元 5 中製備溶劑混合物的組成包括乙二醇 (EG) 和至少一種鹼性氫氧化物 (例如 NaOH、KOH、LiOH)，使待解聚的 PET 與該溶劑混合物反應，最終將在乙二醇 (EG) 的溶液中生成對苯二甲酸 (TA) 和/或其鹽 (例如鈉鹽或鉀鹽)。

在該發明的一較佳實施例中，透過微波產生裝置 17 可發送頻率在 300 MHz 至 300 GHz 之間且功率密度在 1 W/L 至 1000 W/L 之間的微波至微波室 (16) 中。反應條件包括其反應溫度約在 150 至 350 °C 之間和壓力約在 1 atm 至 20 atm 之間。根據該發明的另一較佳實施例，設備 1 包括多個並聯運作的反應器 6，如圖 9 示意性地示出具有複數個如圖 8 所示類型之解聚反應器的可能配置。各反應器 6 沿著各自的軸線 A 延伸在徑向上圍繞集管 36 配置，且所述軸線 A 與集管 36 徑向地分開，彼此間隔一定的角度。集管 36 收集來自各個反應器 6 之未反應的物料和反應產物，以將它們輸送至過濾單元 8，然後輸送至隨後的處理單元 3。

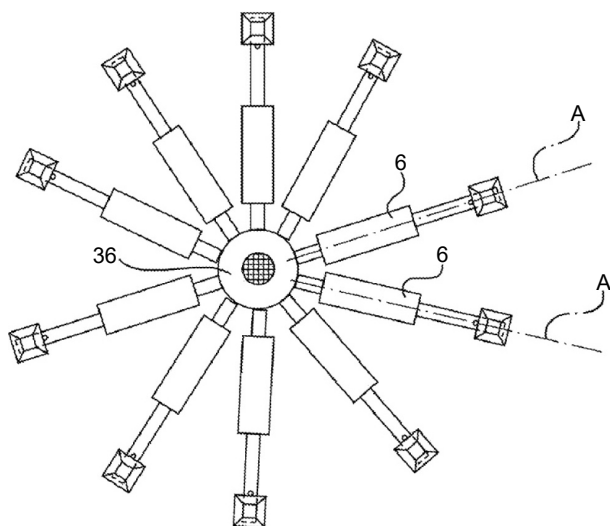


圖 9. 具複數個解聚反應器的配置圖 (Source: European Patent EP2736968B1)。

處理單元 3 用於進行回收和純化操作以及反應產物和副產物的任何再轉化，例如在圖 11 的實施方案中，處理單元 3 包括：蒸餾單元 38、沉澱單元 39、過濾和/或離心單元 40、洗滌單元 41、乾燥單元 42、中和單元 43 和電解單元 44。向蒸餾單元 38 進料來自過濾單元 8 的反應產物 (主要包括在乙二醇 (EG) 溶液中之對苯二甲酸 (TA) 和/或其鹽)，並產生乙二醇、對苯二甲酸和/或相關鹽的溶液以及廢產物，過濾單元 8 透過再循環管線 45 連接至混合單元 5 以便部分地將乙二醇 (EG) 作為溶劑再循環用於溶劑混合物中。沉澱單元 39 接受來自蒸餾單元 38 所回收到的含有對苯二甲酸 (TA) 的溶液並向其中添加水，將該溶液在沉澱單元 39 中用無機酸 (例如 HCl) 處理直至 PH 值在 2-3 之間，從而獲得對苯二甲酸 (TA) 的沉澱。在過濾和/或離心單元 40 中，將對苯二甲酸 (TA) 從酸性水溶液中除去，然後送至洗滌單元 41 和乾燥單元 42，從而所獲得的對苯二甲酸 (TA) 的純度足以進行新的聚合反應。在中和單元 43 中，例如使用 NaOH 或 KOH 之類的鹼性水溶液中和因去除對苯二甲酸而產生的酸性水溶液，直到中性 PH，獲得如 NaCl 或 KCl 等鹽類用以在電解單元 44 中之氯鹼電解製程 (electrolytic chloralkali process)。在電解單元 44 的出口處獲得 NaOH 或 KOH，NaOH 或

KOH 可透過再循環管線 46 部分地輸送到混合單元 5，以再次用於製備溶劑混合物以及可透過再循環管線 47 部分地輸送到中和單元 43；此外，在電解單元 44 的出口處亦可分別獲得氯和氫並收集在反應室 48 中形成 HCl，該 HCl 透過再循環管線 49 再循環到沉澱單元 39 以重新用於來自相應鹽類之對苯二甲酸 (TA) 的沉澱反應中。

GR3N 公司開發的微波解聚製程回收 PET 的方法及其設備，使用可連續操作運行的微波解聚反應器，其微波輻射可作為反應的催化劑，加快反應速度，大幅縮短製程時間。相較於傳統醇解、水解及酸解等長達數小時的製程時間及高耗能缺點，GR3N 公司開發的 PET 解聚製程回收技術係基於微波反應器中的鹼性水解 (整合鹼性水解與微波輻射)，提高反應效率使製程時間大幅縮減至約 10 分鐘。再者，由於微波輻射在 PET 解聚過程可視為觸媒系統，且因解聚為放熱反應，故不需額外使用能量來維持高溫狀態，相較於傳統使用加熱的方法，降低了能源成本而具經濟效益，從而具有 PET 解聚反應最佳性能構造的優勢。此外，微波技術的應用，除上述優點外，亦研究發現將微波輻射應用於 PET 中性水解解聚反應的過程中，反應中酯鍵的斷裂有一定的規律性⁽¹³⁾。

受到全球循環經濟政策擴大使用塑膠回收料的影響，GR3N 亦有技術授權的商業模式規劃，即希望將其創新技術授權給有興趣生產單體並製造回收 PET 的公司⁽¹⁴⁾。

2. 磁性觸媒 (催化劑) 智慧材料回收技術 (Ioniqa Technologies 公司)

由於催化劑通常相當昂貴，在溶劑中使用催化劑降解 PET 的問題是回收催化劑。在使用催化劑降解 PET 方面，研究者希望至少大部分地回收催化劑以重複利用，但使用的催化劑的量仍相對的高⁽¹⁵⁾，且在轉化率和選擇性方面相當差⁽¹⁶⁾。再者，由於催化劑對存在的污染物很敏感而僅能在相對純淨和乾淨的條件下才能恰當地發揮作用，使得大多數催化劑用於分子的合成而非降解，原因在於降解方法通常會引入污染物。為克服上述缺點，荷蘭的 Ioniqa 公司開發採用包含磁性奈米顆粒的流體作為 PET 降解製程中的催化劑，以非常低量的催化劑錯合物進行反應，不僅對環境存在之污染物不敏感，對原料組成中待降解的聚合物和添加劑的敏感性也降低，又可獲得相對高的回收率。由於磁性顆粒流體是一種在外部磁場存在下可逆地且相對快速地 (毫秒) 改變其性質的智能材料，Ioniqa 公司在其申請的美國專利⁽¹⁷⁾ 中，涉及關於此磁性顆粒流體的催化劑，以及採用該催化劑在溶劑中將聚合物降解成低聚物和/或單體的方法，以使選擇性和轉化率大幅提高。

專利發明採用的催化劑錯合物 (catalyst complex) 包含三個部分：奈米顆粒、催化劑實體以及用以連接奈米顆粒與催化劑實體之間的橋接部分 (通常通過化學共價鍵)。其中，奈米顆粒包括具有磁性材料的奈米顆粒以及在相對適度的磁場下可以被充分磁化的顆粒。這些磁性奈米顆粒具有 2–500 nm 的平均直徑，在使用後可以透過磁吸引來回收，優選使用含有鐵、錳和/或鈷的氧化物 (例如 Fe_3O_4 、 CoFe_2O_4 等鐵氧化物)。另，催化劑實體至少包含兩個部分，第一個涉及具有正電荷 (陽離子) 的芳香族的部分，第二個涉及具有負電荷 (陰離子) 的鹽錯合物部分。就轉化率和選擇性而言，正負電荷通常互相平衡而對聚合物降解過程具有協同和增強作用。其中，芳香族部分優選包含具有至少二個氮原子的雜環，例如一個五元雜環芳香性有機化合物，咪唑 (化學式 $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2$)，正電荷在其氮上；鹽錯合物部分優選具有帶二價或三價正電荷的金屬離子 (如 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Cu^{2+}) 與帶負電荷的離子 (例如 Cl^- 、 F^- 和 Br^-) 構成的金屬鹽錯合物。

在該專利申請的一個實施例中，聚合物是聚對苯二甲酸乙二醇酯 (PET)，溶劑是乙

二醇，催化劑包括丁基甲基咪唑鎓 (bmim^+)、乙基咪唑鎓 (eim^+) 或丁基咪唑鎓 (bim^+) 和 FeCl_4^- ，橋接部分衍生自三乙氧基矽烷基丙基氯化物，奈米顆粒是磁鐵礦或磁赤鐵礦。奈米顆粒優選具有 5–10 nm 的尺寸，橋接部分優選以每克奈米顆粒存在有 10^{-4} – 10^{-2} 莫爾橋接部分的量。以此進行 PET 醇解化學反應，如圖 10(a) 所示，在乙二醇中透過採用 (bmim) FeCl_4^- 之催化劑錯合物降解 PET，結果形成對苯二甲酸雙 (2-羥乙基) 酯 (BHET) 進而轉化為二聚體 (dimers) 和低聚物 (oligomers)。圖 10(b) 示出了該催化劑錯合物的示意圖，其中 A 表示奈米顆粒，例如磁赤鐵礦，B 是直接連接到奈米顆粒上的橋接部分，例如三矽醇丙基 (trisilanolpropyl)，以及 C 是直接連接到橋接部分的催化劑實體，其中 C1 是帶正價離子 (例如 bmim^+) 的催化劑部分，C2 是帶負價離子 (例如 Cl^-) 的催化劑部分。圖 10(c) 示出了奈米顆粒 A 被許多連接到奈米顆粒 A 上的橋接部分 B 和催化劑實體 C 所包圍。採用此具體的實施例，不僅轉化率可約提高至 100%，選擇性也至少高達 90% (現有技術約 59.2%)，同時催化劑使用量非常低且可重複利用超過 50 次。

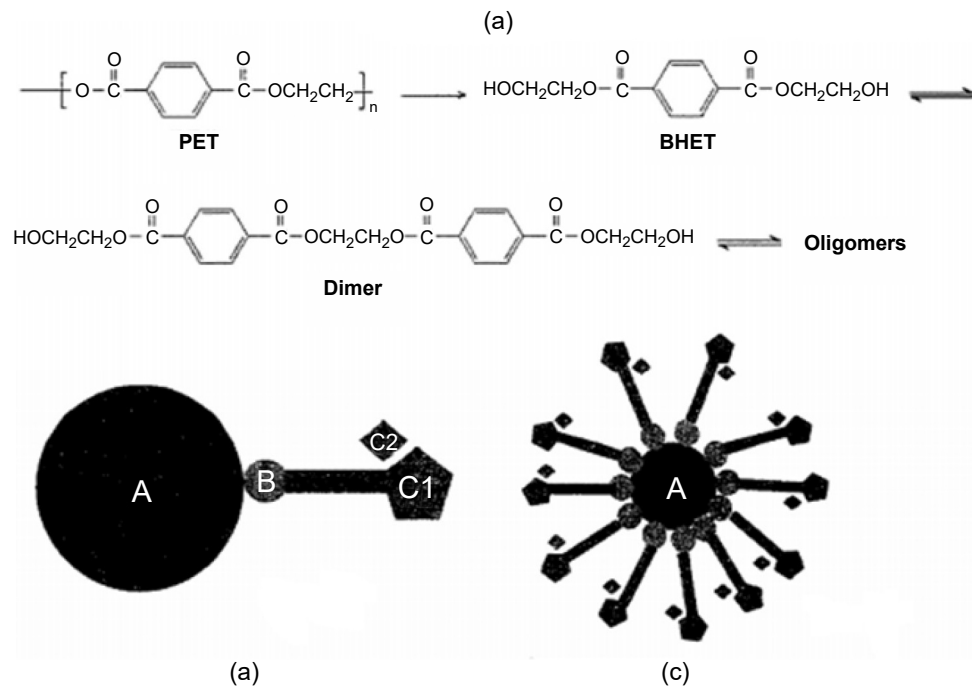


圖 10. Ioniqa 公司採用含磁性奈米顆粒之催化劑錯合物進行 PET 醇解反應 (Source: US Patent US10316163B2)。

Ioniqa Technologies 公司透過具有成本效益的解聚工藝，開發磁性奈米顆粒智能觸媒材料的 PET 化學回收技術，將各種類型和顏色的 PET 廢料轉化成最基本的無色純單體 (pure colourless monomers)，升級改造轉變為如同純質未使用過的新型 PET 的寶貴資源，生產出食品安全的新型透明 PET 寶特瓶。除了適用 PET 寶特瓶外，Ioniqa Technologies 的磁性催化劑智能材料回收技術，也可應用於聚酯纖維的回收。Ioniqa 的製程是個平台技術，且公司還在實驗回收其他廢料，如其他類型的塑膠或如棉花或紙張的有機廢物，回收技術具有革命性的應用潛力。此外，近來可口可樂公司更宣佈與 Ioniqa Technologies 簽署協議，將難以回收的塑膠廢棄物轉變為優質食品級 PET，有助於塑膠的循環經濟，這項協議反映出可口可樂投資有前途的回收技術⁽¹⁸⁾。

3. 無負擔反應條件及溶劑輔助專利技術 (Loop Industries公司)

Loop Industries, Inc.係於 2014 年成立的一家可持續塑膠領域的領先技術創新企業，致力於解聚 PET 塑廢料並將其轉化為有價值的化學品。該公司所申請的美國專利⁽¹⁹⁾ 中，涉及聚合物之解聚合反應及用於生產新聚合物之起始物質 (starting materials) 之回收。其中，該聚合物之解聚係指包含酯官能基之聚合物 (例如 PET) 之解聚合反應，以及該新聚合物之起始物質之回收對苯二甲酸和乙二醇之回收。專利之申請專利範圍主張一種解聚合包含酯官能度之聚合物成用於生產新聚合物之對應之醇及羧酸組分的方法。更具體地，該專利另一獨立請求項主張一種解聚合聚對苯二甲酸乙二酯 (PET) 成對苯二甲酸或其鹽及乙二醇的方法，其包括將 PET 與以下之混合物混合：(i) 約 3 至約 5% (vol.) 之用於使該聚合物膨脹之非極性溶劑，其中該非極性溶劑為鹵化溶劑；(ii) 約 95 至約 97% (vol.) 之直鏈 C1-C4 醇；及 (iii) 氫氧化物；其中該混合係持續約 1 h；及其中該方法係在未施加外部熱下進行。進一步指出，該醇及氫氧化物之混合物係與該非極性溶劑同時添加至該聚合物。該非極性溶劑與醇之比為約 1:10 至約 1:50 (v:v)。該氫氧化物係包括鹼金屬氫氧化物、鹼土金屬氫氧化物、氫氧化鈹及其組合。

Loop Industries 專利技術特徵在於解聚製程時與 PET 混合之混合物的組成及其反應條件的獨特性，即在環境溫度及大氣壓下將 PET 與非極性溶劑、氫氧化物及醇混合。對於使包含酯官能基之聚合物 (例如 PET) 的膨脹之非極性溶劑而言，傳統之解聚製程使用的溶劑是需要能夠增強用於斷開酯官能度之離子 (諸如氫氧根) 之親核性的溶劑。其解聚合之最佳速率係藉由具有高介電常數之溶劑系統 (諸如醇及水之混合物) 達成，此等溶劑之使用需要高溫度以有效地解聚合該聚合物。傳統 PET 回收利用技術往往需要使用高溫 (例如 80 °C – 150 °C) 進行解聚製程，依據 Loop Industries 專利所述之方法，係能夠在環境溫度或接近環境之溫度下解聚合 PET 的快速方法 (例如實施例是在 25 ± 5 °C 的環境溫度)，同時未使用外部熱源來提高反應混合物之溫度。因此，以該專利技術所提供之非極性溶劑及能在環境溫度 (或接近環境之溫度) 下解聚的方法，更具能量效率且節省成本，使得如 PET 聚合物之再循環過程經濟上更具競爭性。

Loop Industries 公司透過專利技術從石化燃料中將廢棄 PET 塑膠和聚酯纖維解聚成基礎構成要素 (單體)，單體經過過濾、純化和聚合後可製成 Loop™ 品牌 PET 塑膠和聚酯纖維，從而使客戶能夠實現其可持續發展目標。

4. Volcat 分子篩選、觸媒化學回收技術 (IBM 公司)

耳熟能詳的 IBM 公司近年也因全球塑膠循環經濟的議題下，跨界從事塑膠回收再利用的技術研發，這可從 2019 年 IBM 研究中心所提出的未來五年五大創新科技預測報告「5 in 5」中看出端倪；在 IBM 揭示的五大創新科技中，包括了「塑膠變成可再利用」。依此，IBM 提出一種命名為 Volcat 的技術，預期五年內可以大幅改變垃圾處理的方式，使無法回收的塑膠容器不再成為地球生態的負擔⁽²⁰⁾。

基於 VolCat 新型化學回收技術，IBM 提供一種可將聚酯解聚以產生高純度反應產物的專利方法⁽²¹⁾。該解聚方法係使用具有 2–5 個碳原子的醇和胺有機催化劑使聚酯在約 150–250 °C 的溫度下反應。在一種應用中，使用沸點低於醇之沸點至少約 50 °C 的胺有機催化劑以使胺有機催化劑容易再循環。在另一應用中，使用醇與胺有機催化劑在壓力反應器中，在高於醇之沸點的溫度下進行解聚反應以加速解聚速率和胺有機催化劑的回收而無需進一步的熱輸入，其中該壓力反應器具有約 10–20 psi 的壓力且溫度比醇的沸點高約 10–30 °C。在

進一步的應用中，來自消費後飲料瓶的 PET 的醇解解聚以閉環工藝在最少輸出和廢棄物的情況下產生純的反應產物對苯二甲酸二 (2-羥基乙基) 酯 (BHET)，其可進而用於產生高純度飲料瓶等級 PET。

IBM 的 Volcat 新型塑膠回收方法，係使用一種壓力反應器，進行一種催化化學反應解聚製程，圖 11 顯示其閉環解聚／重新聚合方法的各個步驟流程圖。流程簡單且可持續，可將單體型二酯反應產物蒸餾以產生包括胺有機催化劑的餾出物，並將胺有機催化劑再循環。其中該胺有機催化劑包括三乙基胺、四甲基乙二胺。其中該醇選為二元醇。

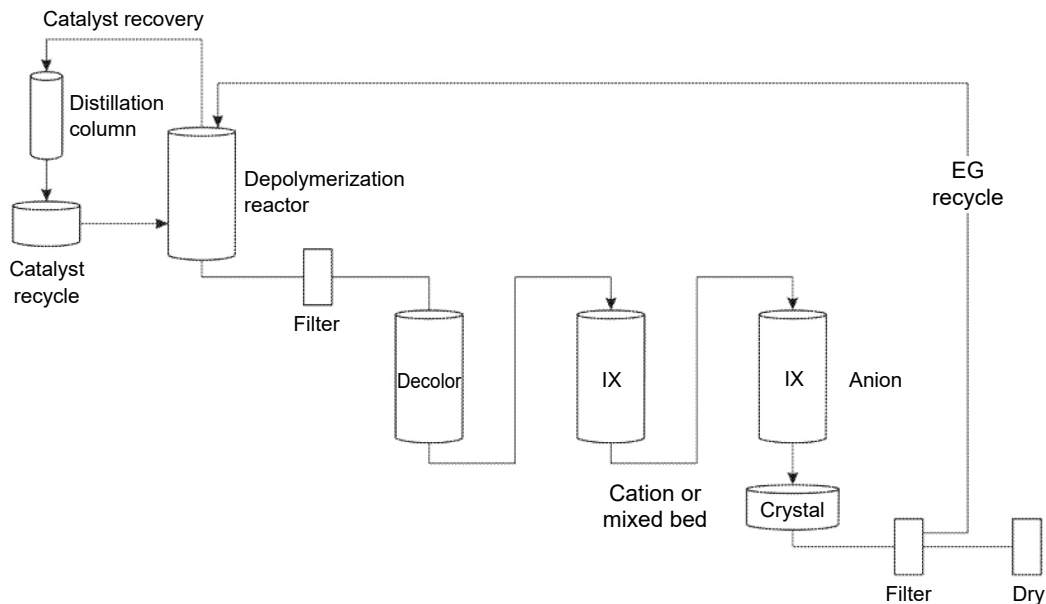


圖 11. IBM 的 Volcat 技術使用壓力反應器進行解聚再循環流程圖 (Source：US Patent US09255194B2)。

Volcat 回收技術旨在採用精準的化學配方、溫度和壓力組合，經過催化化學過程，可將 PET 塑料分解成為可直接送入塑膠製造機器，目標是把這些 PET 廢料轉化成新的可再生材料或作為生產新產品的原料，從而實現塑膠的回收再利用、賦予舊塑膠新生命。企業也能用這些再生資源，重新製造新的產品，不僅減少塑膠廢棄物的產生，也改變人類塑膠回收的模式。再者，IBM 在 PET 解鏈觸媒設計與製程開發上整合強大的演算能力，透過 AI 與機器學習的輔助進行材料模擬預測，使用過量乙二醇改變 PET 解鏈反應機制，並允許其他胺類觸媒的使用。Volcat 更可視為一種分子級篩選器，可大幅減少廢料篩選、清洗的工序，從而使 Volcat 技術具有快速、高選擇率、低溫處理以及觸媒易回收等特色⁽²²⁾。

三、結論

依據資料統計，全球實際採用降解方式化學回收 PET 的回收量占總 PET 之回收量仍低於 2%，歸因於化學回收的成本高出物理回收許多⁽²³⁾。若要提高 PET 塑料回收率與經濟效益，勢必要在化學回收新型技術上的開發多下功夫，並在成本、製程效率、產品純度、催化

劑使用等方面克服現有缺點，特別在製程成本上思考如何透過化學回收新型技術以確保塑料留在經濟中，尋求在「循環」和「經濟」上的突破，從而為人類創造更可持續的未來，並為全球循環經濟做出貢獻，將是全球塑料化學回收開發業者共同努力的目標。

參考文獻

1. Myungwan Han, *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, Chapter 5 -Chemical Depolymerization of PET Bottles Via Methanolysis and Hydrolysis*, 1st Edition, William Andrew, 85-108, (2018).
2. 林其瑞, 鄭承熙, 工業材料雜誌, **396**, 53 (2019).
3. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 2, 頁 54.
4. Myungwan, *supra* note 1, at 85-108.
5. Anvita Sheel and Deepak Pant, *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, Chapter 4 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Glycolysis*, 1st Edition, William Andrew, 61-84, (2018).
6. 林其瑞, 鄭承熙, 同註2, 頁 54.
7. Paszum, D. and Spychaj, T., *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **36**, 1373 (1997).
8. Myungwan, *supra* note 1, at 85-108.
9. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 2, 頁 55.
10. Prashant Gupta & Subhendu Bhandari, *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles, Chapter 6 - Chemical Depolymerization of PET Bottles via Ammonolysis and Aminolysis*, 1st Edition, William Andrew, 109-134, (2018).
11. 林其瑞, 鄭承熙, 同註 2, 頁 55.
12. Matteo Parravicini, Maurizio Crippa and Matteo Vittorio Bertele, Gr3n Sagl, *Method and apparatus for the recycling of polymeric materials via depolymerization process*, European Patent EP2736968B1, (2020).
13. L.X. Liu et al., *Journal of Applied Polymer Science*, **95** (3), 719 (2005).
14. GR3N: A New Approach to PET Chemical Recycling, please refer to the website: <http://greenblueorg.s3.amazonaws.com/smm/wp-content/uploads/2017/10/Gr3n.pdf>
15. H. Wang et al., *Catalysis Communications*, **11** (8), 763 (2010).
16. M.H. Valkenberg, C. deCastro and W.F. Holderich, *Green Chemistry*, **4** (2), 88 (2002).
17. Tonnis Hooghoudt, Vincent Philippi and Marcel Vilaplana Artigas, Ioniqa Technologies B.V., *Polymer degradation*, US Patent US10316163B2, (2019).
18. The Coca-Cola Company Announces Loan Agreement with Ioniqa Technologies to Transform Hard-to-Recycle Plastic Waste into High-Quality, Food-Grade PET, (2018). Please refer to the website: <https://www.businesswire.com/news/home/20181213005119/en/>
19. Hatem Essaddam, Loop Industries, Inc., *Polyethylene terephthalate depolymerization*, US Patent US9550713B1, (2017).
20. IBM Research, please refer to the website: <http://research.ibm.com/5-in-5/>
21. Robert D. Allen, Krishna M. Bajjuri, James L. Hedrick, Gregory Breyta & Carl E. Larson, International Business Machines Corporation, *Methods and materials for depolymerizing polyesters*, US Patent US09255194B2, (2016).
22. Bob Allen et al., "Polyester Digestion: VOLCAT", (2018).
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/Robert_Allen_CCE_PanelDay1_0.pdf
23. 陳育誠, IT IS 產業評析, 3 (2018).

作者簡介

芮嘉瑋先生為國立清華大學奈米工程與微系統研究所博士，現任職於工業技術研究院技術移轉與法律中心執行長室。

Chia-Wei Jui received his Ph.D. in Institute of NanoEngineering and MicroSystems from National Tsing Hua University, now is working at General Director Office of Technology Transfer and Law Center of Industrial Technology Research Institute.