

回收聚酯纖維的技術與市場趨勢 & 智能紡織材料的發展

■ 摘錄自紡織產業綜合研究所 Tnet 全球紡織資訊網

一、回收聚酯纖維的技術與市場趨勢

回收保特瓶製成原生級聚酯，最終投入紡織用途的研究依然持續。據稱，正在研發的新型化學和生物技術比機械製程更加靈活、且具成本競爭力。

拜全新解聚技術（depolymerizing techniques）的所賜，將二手塑料和紡織品製成可無限再加工的高階聚酯材料已非遙不可及。PET 保特瓶常透過機械製程回收再利用，切成薄片後被熔融後抽絲。但此法所得的長纖或短纖紗常無法達到石油系（oil-derived）或原生聚酯（virgin polyester）的品質。相對地，化學循環過程將PET瓶或聚酯織品轉化為原生單體，據稱可產出如同原生聚酯品質的聚合物。

2002年，日本帝人首度發表PET保特瓶和服裝的化學回收方法，命名為Ecocircle。Patagonia很早就採取該製程，並於2005年開始向帝人提供二手衣物。到了2012年，超過150家企業都向帝人在中國的回收廠提供回收服飾。Ecocircle以水解及甲醇分解的雙重步驟解聚衣物，獲得製作「全新」聚酯的原料。隨之而來的

第三項化學反應除了使用糖酵解技術，反向聚合法目前還採用了酶（enzymes）、微波（microwaves）或磁流體（ferrofluids）等媒介。

（一）回收有色PET保特瓶

1. PerPETual Global Technologies

論及新型化學回收法的開發，由Aloe公司在倫敦創立的PerPETual Global Technologies為佼佼者（工廠在印度）。2008年，Aloe取得ReNEW的專利權，此技術在1993年由多次獲得商業專利的澳洲科學家Simon West發明。同年，Aloe買下印度納西克地區Polygenta Technologies的多數股權，從此投入ReNEW製程並於2010年正式營運。

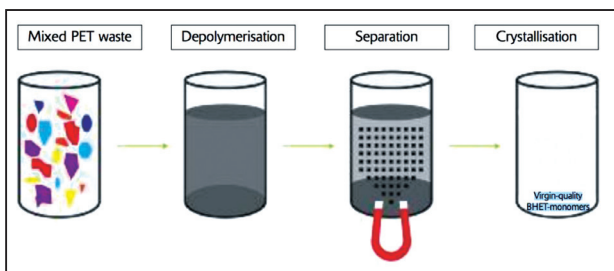
ReNEW以專利過濾技術將各類二手PET保特瓶解聚成酯類。「我們將沖洗過的PET切成瓶片，以環保製程製做成液態寡聚物（liquid oligomer）。隨後過濾寡聚物除去雜質，最終所得的酯可作薄膜、保特瓶、包裝材和紡織紗線等聚酯產品。」perPETual執行長Vivek Tandon說到：「我們的製程利潤高、少有浪費，一公噸的瓶罐薄片可產出950公斤以上的酯（ester）」。



該公司目前每天回收多達200萬個PET瓶，為滿足需求還預計強化產能至目前的三倍。Tandon表示：「如今，我們生產的酯被用來製造高品質且永續的紡織長纖。我們的目標是在2022年每天處理超過1億個保特瓶。」perPETual為此正在尋求財務與產業合夥。過去在Newlife旗下的Stefano Cochis最近就加入perPETual的銷售團隊。

2. Ioniqa Technologies

另外，從荷蘭艾恩德霍芬理工大學起家的Ioniqa Technologies也開發出磁力智慧材料回收技術。據稱，此技術也能將所有類型的二手PET廢棄物轉化成最基本的「無色純單體（pure colourless monomers）」。該公司2009年成立、2011年開始測試PET廢料回收法、2013年達成理論實證，目前在鹿特丹擁有產能1,000公升之設施。Ioniqa傳播總監Gert van Exel表示：「我們希望2018年首座10,000噸級工廠可以正式運作。」這將是公司專利申請的技術藍圖。



Ioniqa公司藉由「磁性智慧材料」過濾著色劑和污染物，已經找到可獲利的PET廢料循環回收方法

Ioniqa其技術將混合PET廢料切碎成薄片，再溶解於離子液體（ionic liquid）中。此時要加入含有氧化鐵奈米顆粒的催化磁性智慧材料。接著在大氣壓下將混合物加

熱到200°C以下附近，以促成PET解聚。第一階段結束後，磁力會分離著色劑和污染物，以獲得「原生級」PET單體。van Exel表示：「磁分離過程需要三個小時，所得之單體在結晶後就能製成新的聚酯顆粒。」製程結束後還能回收液態催化劑，但得先純化除去著色劑和污染物。

Ioniqa可將PET保特瓶和紡織廢料回收製成原生材料。「但聚酯纖維比塑膠包裝含有更多著色劑，想達到分離PET塑料相同的速度及效率會更為費工。因此，我們正致力於優化聚酯紡織物的回收製程。」van Exel表示，「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。」

（二）酶生物製程

若干學術實驗室和新創的企業都倚賴「酶」進行PET廢料反向聚合。目前，技術最先進的是法國的Carbios公司，其自2012年獲得為期五年公、私部門的補助共1,500萬歐元。Carbios首先找到可降解PLA塑料的酶。「塑料可融入聚合物中製造具使用年限的塑膠，並應用於農業或購物袋的生物自體降解覆蓋膜（mulching film）。」

進一步的研究還發現一系列能將聚酯解聚成MEG和對苯二甲酸的酶，可無限量地在真正的閉環系統中回收PET且不降低品質。Stephan表示：「這種酶可專門而完全降解聚酯纖維。」本製程廣泛應用於各種PET包裝，如不透明牛奶瓶、洗髮精和容器清潔劑。專利製程還伴隨著低溫下進行的過濾及淨化過程，耗能很低。Carbios打算研究分解屬於大宗廢料的聚酯織品。「在2020



年，歐盟法令將要求強制區分紡織類廢棄物，分類後更有助於回收。」

Carbios還表示，公司一間產能5,000升的小型試點工廠即將開始運作，並預計在2019年底或2020年初建造一間量產規模的示範工廠，並預計2022年工廠可全面投入生產。接著，技術將授權給尋求循環經濟認證的PET製造商。Stephan指出：「消費者、工程師、員工和投資人都漸漸將認證視為一種資產。」

酶生物技術的開發團隊還包括Ambercycle。身為H&M全球變化獎（Global Change Awards）的得獎單位，Ambercycle在2016年獲得25萬歐元研究「聚酯消化器（polyester digester）」。

另外，日本京都大學的研究小組也分離出一種可降解PET的細菌，並命名為Ideonella sakaiensis。該研究發表於2016年3月的科學期刊Science上。

（三）微波催化（Microwave catalysis）

還有一種運用微波解聚PET的新方法獲得歐盟Horizon 2020 programme資助，而建立示範工廠。這個由瑞士新創公司gr3n開發的製程名為Demeto（Depolymerization by Microwave Technology的縮寫），可解聚任何顏色的保特瓶及聚酯織品。

兩位發明家之一Maurizio Crippa表示：「微波可切割聚合物鏈結、釋出污染物，如化學物質、色料及所有異物。」最終產出的聚酯單體在品質和特性上都跟石油系聚酯如出一徹。據報，gr3n的Demeto製程大大縮減反應時間到10分鐘，異於傳統條件下化學回收的120到180分鐘。Crippa表

示：「微波具催化效果，可有效加速反應速度。我們的技術還同時生產解聚過程中所需的氯化鈉，不僅創造真正的閉環系統，成本上也頗具競爭力（因為可以處理為數眾多的製程進料）。」

Crippa自2011年開始研究此概念、2012年正式發表理論。他在瑞士成立gr3n，善用瑞士技術與創新委員會（CTI）為新創企業提供的協助和輔導。目前gr3n是歐洲企業集團Symbioptima的一員，同時正在建設第一個工業反應爐。「我們希望2017年底開始正式生產，」Crippa補充。此外，gr3n還會建造一間小型工業廠房（產能為標準工業廠房的十分之一）。Crippa認為製程也可回收混合織物、甚至貼膜織品，因為合成或天然纖維將被解聚且過濾或者未經任何反應而易於分離。另外，Crippa也不排除今後解聚尼龍或PU的可能性。

（四）瓶片清潔是關鍵

相對於機械回收PET保特瓶，開發中的各種創新製程可望成為低成本的替代方案。回收物的品質很大程度上取決於製程揀選並剔除有色瓶罐或碳酸飲料瓶（因為含有防止氣體逸出的阻擋層）的能力。充分的洗滌和清潔對確保高品質回收材料也十分重要。正因為多了這些步驟，機械回收法往往較為高昂。

1. 台灣

台灣如遠東新世紀、力寶隆等公司專精於PET的機械回收技術。根據紡拓會（TTF）估計，台灣每年回收約9萬噸保特瓶，相當於45億個水瓶。



2. 美國 Unifi

美國 Unifi 自 2007 年推出回收聚酯品牌 Repreve，也開始大量投資 PET 的回收技術。該公司最近在 Yadkinville 設立保特瓶加工中心，每年可產出 7,500 萬磅的瓶片。Unifi Jay Hertwig 表示：「一大捆瓶子可能含有高比例的非 PET 材料，亦即可能有罐頭、木頭、甚至岩石，而 PET 的平均含量佔 50 ~ 70%。」

Hertwig 說，Unifi 製程的回收聚酯品質相當於未經回收的原生聚酯。Unifi 將名為 Fiberprint 的追蹤劑加入聚合物中，以識別終端產品所含的回收原料量。Repreve 現在佔 Unifi 銷售額的 30%，並分為兩種等級：100% 純消費後回收的 PET 以及消費後保特瓶和工業廢料的組合等二種。染色用紡織品需要乾淨、透明的薄片，而有色薄片則再次回收形成原液染色 (solution-dyed) 短纖紗中。所有 Repreve 紗線均通過國際回收標準的 GRS 認證。

美國戶外品牌 The North Face 透過 Repreve Textile Takeback programme 走向採用回收聚酯材料的方向 (如：TNF 的 Denali 夾克)。計畫中保留中美洲工廠切割的純 聚酯碎屑，並送到 Unifi 回收製成纖維。Hertwig 指出，由於碎屑通常是多色的，所以都要經過原液染色。該公司正在尋求 PET 廢料的其他來源，如來自紡織廠以 Unifi 聚酯所生產的不織布和工業廢料。「此技術受到的關注似乎持續增加。」



三、義大利 Sinterama

在義大利，Sinterama 在 2012 年併購 Miroglio 的 Newlife PET 回收廠 (機械式)，並在生產基地半徑 90 公里內設立供應鏈 (位於都靈附近的 Saluzzo)。產品營銷經理 Matteo Soppera 表示：「Newlife 滴入 (drop-in) 技術兼具非回收 (原生) 聚酯的機械和技術特色，品質媲美標準聚酯，製造上毫不受限。」

Sinterama 近期在 Techtextil 展覽中推出兩個新的 Newlife 版本。首先，Newlife Easy 是 100% 的回收聚酯，可在 98°C (而非 130 ~ 135°C) 的環境下進行染色。「這意味著 Newlife Easy 可與彈性紗、棉花、羊毛或尼龍結合，且環境足跡也較低。」

另外，第二種 Newlife Thermal 除了是 100% 的回收聚酯，還含有可吸收能量的添加劑幫助隔熱保溫。Soppera 表示：「Newlife Thermal 可以讓服裝暖和 5°C。」

(五) 更多的 rePET 含量

1. Sympatex



Sympatex 現已能將 100% 回收的聚酯防水透氣薄膜用回收聚酯織物上，並預計 2020 年達成聚酯閉環製程。

Sympatex 最近啟動了提高自家產品回收原料含量、並同時達到二氧化碳平衡的計畫。該公司推出漸變色標「Sympathy Index」，從 10% 到 100% 呈現產品的回收利用量。Sympatex 也與 Schoeller 合作，最近推出 wear2wear 紡織品回收計畫。



2. Thermore

義大利填充保溫材料廠商 Thermore 歐洲區銷售經理 Oliver Brandes 表示：「我們在自家產品中盡可能多使用回收聚酯，最低含量至少要達到 50%。」

3. Primaloft

美國保溫材廠商 Primaloft 也有類似趨勢，回收保溫填充材預計從 2017 年 35% 高到 2021 年的 90%。Primaloft Jochen Lagemann 表示，部分產品已 100% 以回收纖維製成，而目前 Active Gold 系列亦含有 55% 回收原料的。

4. Burlington

美國 Burlington 公司與 Thread 公司合作。Thread 公司在 2010 年海地地震後創立，目前回收海地和洪都拉斯的舊保特瓶後取得聚酯材料以獨家供應梭織布廠。Burlington 表示：『人們喜歡「Thread」背後的故事，不僅簡單明瞭，大家也因此知道其化腐朽為神奇。』

Thread 的旗下機構不僅強調減少浪費，更重視回收計劃對社會的正面影響。隨著開發中的新方法可處理更多種廢料，聚酯纖維有望首度創造完整、無限的回收-製造閉環系統。

二、智能紡織材料發展動態

衣服從過去講究更保暖、更涼爽、更快的吸濕或透氣性，到現在甚至能改變形狀。根據環境調整機能的材料正在為下一代智能服裝鋪路。

若紡織品能主動（而非被動）適應環境及需求做出改變，將具備真正的「智能」。如：部分材料因應需求產生熱量、加速吸濕或在特定條件下讓更多空氣通過。

20 世紀 90 年代初，Outlast 聲稱藉由嵌入纖維（嫻縈纖維或聚酯）或塗佈中的微膠囊相變材料（PCM），衣物可提供所需的溫暖或涼爽。膠囊中填充石蠟，環境溫暖時會融化並吸收多餘熱量，溫度降低時則會固化放熱。Outlast 歐洲區總經理 Martin Bentz 表示：使衣物能配合穿衣者身體部位間的體溫差異。「因為腳通常較冷，而頭部則是全身最熱。」

Bentz 表示，今年推出的新產品「Outlast Xelerate」提升了技術層次。織物上印有導電材料層，沿著網格樣式於衣物表面散熱。「Xelerate 導電層散發更多熱量，在更大的區域被 PCM 吸收。不但加快 PCM 的熔化和結晶，也有效減少服裝的熱點。」散熱網格的銀色外觀還使產品頗具「太空感」。「經實驗證明，Outlast Xelerate 技術提高導熱率至 30%。」Outlast 歐洲區研發負責人 Volker Schuster 表示。

義大利織品商 Sitip 與日本纖維商 Asahi Kasei 合作，研發拉伸時可產生並保留熱量的織品 Behot。此動力功能來自 Asahi Kasei 的 Roica 彈性紗將運動轉為能量。據說織物拉伸時，放熱反應會產生「至少 1°C 的溫差」。Asahi Kasei 表示，反覆的膨脹和收縮會產生和吸收熱量。

保溫專家 Thermore 的 Thermal Booster 是另種反應型材料，靠的是塗在填充物上的

感溫型聚合物。聚合物在寒冷時膨脹，將產品的保暖特質「提高」達20%。

美商Polartec CEO Gary Smith表示，「我們以Polartec Alph研發且主導各式主動絕緣產品。」該公司的最新的填充材料Polartec Power Fill不同於絕大多數絕熱料，擁有無需稀鬆布層（scrim layer）的填充材，可減少衣服重量，並提高調節環境變化的能力。為提供絕緣產品以外服務而開發的Polartec Delta也具適應性。穿衣者出汗時，特殊的針織結構會吸收並排出水分。

Schoeller和Eschler採用的c_change薄膜具備智能、防水、防風和透氣功能，可因應溫度改變而反應。此仿生材料設計受到松果的啟發，當溫度升高或人體活動增加時，會開啟細孔逸散多餘的熱量；當穿衣者或在條件冷卻時，細孔則關密保持溫暖，以確保所有情況下的最佳舒適度。

（一）動態冷卻

汗水增多時紡織品開始吸濕以達到蒸發冷卻效果，是業界最接近反應型濕度管理的技術。當水分從皮膚蒸發時，會除去多餘的熱量，帶來舒適感。該織品以此模擬人體的生理性質。

瑞士公司HeiQ Smart Temp（舊名「Adaptive」）開發的加工劑在蒸發、織物潤濕及吸濕時，會出現一系列動態反應。公司聲稱產品可在溫暖條件下減少體熱、在寒冷時保持溫暖。

Omni-Shade Sun Deflector Columbia Sportswear SS18系列推出的新技術，面對過

多熱量和陽光照射同樣採取智能手段。目前公司山野系列的Columbia Montrail在織物表面塗佈可反射陽光的二氧化鈦小點，背部則備有特Omnifreeze Zero。公司的歐洲發言人Christelle Bretaudeau表示，此特殊結構可使織物的舒爽效果增加一倍。

（二）生物反應型材料

有些實驗室正努力研發其他類型的反應型材料。這些研究的一大重點是組合對濕度或溫度變化具不同反應的材料。

麻省理工的Tangible Media Group設計了濕度反應型材料原型。BioLogi技術將納豆芽孢桿菌生物嵌於乳膠（latex），並塗佈於織物上。細胞會根據濕度高低收縮或膨脹，以打開和關閉服裝的小皮瓣。因此，這些細胞被稱為微型感應器和致動器。實驗室表示，使用的細胞（大腸桿菌）可安全觸摸甚至食用。「細胞溶液列印抽出並置200微米的乳膠片上。細胞層乾燥後約5微米厚。我們使用雙面塗佈細胞的乳膠片製造皮瓣。它們會在人出汗時打開，開啟的皮瓣可幫助通風。」麻省理Media Group前研究Wen Wang表示。目前原型樣本已進行100次乾/濕洗滌循環，其細胞層或整體性能並未出現任何嚴重的耗損。拜現今基因工程工具所賜，研究團隊還能研發其他功能的細胞，如改變顏色或散發香味。「目前細胞原型面對濕度變化會改變形狀和熒光。在不同的濕度水準會展現不同的彎曲率和熒光強度。我們正致力開發氣味改變，但尚未完成。」Wang表示。

BioLogic計畫與運動服飾品牌New Balance合。「New Balance協助我們2014～2015年



的研究。他們提供業界觀點和設備，密切合作開發產品原型。其中兩位New Balance研究員也是我們在Science Advances上論文發表的共同作者」Wang表示。儘管目前並無確切的發布日期，但他希望BioLogic可在五年內投入商業化生產。

Otherla是位於舊金山的創新實驗室，也正在研究生物學原理，研發因應不同氣候條件的熱適應織品。由MIT博士Brent Ridley和Saul Griffith創立的Otherlab研究各式各樣的材料組合，這些材料面對溫度變化的反應不同，絕緣性能藉由擴展或收縮適應環境。「隨溫度變化，兩種材料的長度變化也不同，導致紡織結構中改變厚度的彎曲。」Brent Ridley表示。

結合特定條件下反應不同的纖維和紗線，獲得隨視角或光線變化而出現的特殊顏色在紡織加工中十分常見。將此概念擴及面對溫、濕度水準的反應可望催生未來的非電子智能服裝。

Outlast ---

Outlast的氣候調節PCM材料可吸收、儲存、釋放多餘的體熱適應環境的變化。最近推出的Outlast Xelerate優化了熱管理且加快相變過程。



Schoeller Textil AG ---

瑞士紡織商Schoeller的針織部門Eschler製造的牛仔布採用「仿生」c_change膜製成，可根據人體活動改變透氣性。



Hannah Cohen --

這種透氣、可改變形狀的運動服原型塗佈大腸桿菌細胞，在不同的濕度水準收縮或膨脹，藉此因應運動員的體熱和汗水變化而打開和關閉通氣皮瓣。左圖為運動前扁平的通風皮瓣；右圖表示運動後，透氣皮瓣彎曲開啟。



Columbia Sportswear ---

Columbia Montrail山野系列推出的二氧化鈦Omni-Shade Sun Deflector保護穿衣者免於過量陽光照射，而背部的Omnifreeze Zero環可提供所需的舒爽感。



【註】1. 聚酯：2007年聚酯成為最常見的紡織纖維，佔全球服裝業的52%。根據美國纖維製造協會的統計，聚酯的使用量在過去二十年來保持領先，2014年更達到4,920萬公噸。每年全球PET產量估計為6,100至6,400萬噸，紡織用途佔60%、30%用來製造塑保特瓶。

2. 回收率：Worldwatch Institute表示，2012年歐洲保特瓶回收利用率為26%（660萬噸），而36%則作為廢棄物焚化；美國則在2015年回收了30%的PET瓶；亞洲的飲料瓶再加工比例則高達75%。以重量計算，中國的塑膠廢料進口量達全球的56%。Worldwatch Institute表示，間接證據指出大部分塑膠廢料都以科技低落的設施進行再處理，且缺乏環境保護措施。

資料來源：WSA(2017), "Closing the Polyester Loop," May/June 2017, p11-15. Steven Chi 編譯。