

各國碳纖複合材料循環與應用研究現況

台灣亞太產業分析專業協進會 104 年認證產業分析師 蕭亞漩

一、碳纖複合材料具回收價值

本文所指之複合材料以纖維補強高分子材料 (FRP, Fiber Reinforced Polymer) 為主軸，依據高分子基材與補強材料種類，衍生出各種高性能複合材料，包括玻璃纖維補強不飽和聚酯樹脂、碳纖維補強環氧樹脂等各種材料。若以補強材料區分，碳纖維價格為玻璃纖維的 15 倍以上，使得高值碳纖維複合材料具有回收價值，各國研究機構及國際廠商在碳纖維回收技術上皆有所佈局。

二、碳纖維循環使用驅動力分析

(一) 歐盟汽車廢棄指令要求汽車材料回收

根據歐盟汽車廢棄指令(End of Life Vehicles)，汽車部件與材料回收比例須達 85% 以上。在汽車輕量化趨勢下，2016~2030 年歐洲與美國汽車領域使用的碳纖複合材料用量以年複合成長率 17.1% 速度高速成長。國際車廠 BMW 的電動車 i 系列，即採用大量碳纖複合材料於車身、結構、次結構件以及內外裝等；受到廢棄指令的要求，BMW 現行 i 系列車款碳纖複合材料的 10%，來自再生碳纖複材應用。另外，除了歐盟汽車廢棄指令要求汽車材料回收之外，由於德國禁止碳纖維使用掩埋方式廢棄處理，將增加製造商對於碳纖維回收的研發需求。

(二) 航空客機提出碳纖複材回收目標

新型商用客機如 Airbus A350、Boeing 787 使用碳纖複合材料取代鋁金屬，2016~2030 年歐洲與美國航空領域使用的碳纖複合材料用量以年複合成長率 9.6% 速度快速增加。以 Airbus 公司生產之飛機為例，1985 年的 A310-300 複材用量僅為重量的 5%，現在 A380-800 機型用量為 25%、A350XWB 機型之機身複材用量更達 53%。在碳纖維大量應用在航空客機的趨勢下，

Airbus 公司成立回收諮詢委員會，並加入美國先進複材創新研究所(IACMI)開發碳纖回收技術；並提出公司碳纖維回收目標：2020-2025 年回收客機使用的 95%碳纖複合材料製品，其中 5% 應用於航空領域。

三、各國碳纖複合材料技術研發現況

(一) 歐洲 CCEV 研究機構投入永續複材開發

1. 歐洲 M.A.I. UCB 的碳纖維回收計畫現況

M.A.I. Carbon 屬於歐洲高性能纖維複合材料研究機構 CCEV，以碳纖複合材料為研發主軸的計畫，著重於碳纖維複合材料在汽車，航太和機械工程的應用開發。在計畫中獨立以「永續與效率」作為碳纖複材研發方向，包括碳纖複材結構持續利用的生命週期評估、熱塑性碳纖複材新結構與應用，合作夥伴包括飛機製造商 Airbus、材料生產商 BASF、汽車品牌商 BMW、碳纖維製造商 SGL 及歐洲重要學研機構等。

其中 M.A.I. UCB 項目於 2016 年 10 月啟動，計畫目標為研究碳纖維廢料回收處理的智慧可持續解決方案，並在巴伐利亞設立碳纖回收試驗場域。2018 年該計畫已建立複合材料熱裂解程序，並進行其他回收碳纖複材技術研究，包括化學回收、超臨界流體回收以及微波技術等新型碳纖維分離技術。計畫項目同時也開發再生碳纖維應用，材料型態包括短纖、帶狀、長纖或無紡布形態之強化應用。

除了回收再利用碳纖維之外，由於碳纖複材掩埋後難以分解，其衍生的熱能應用也是發展方向之一。AlzChem 公司使用碳纖複合材料廢棄物作為電石製造原料。此外，Georgsmarienhütte 公司將碳纖複合材料廢料作為鋼鐵製造所需熱源中。特殊垃圾焚燒爐 Indaver 公司也使用特殊垃圾焚化爐進行碳纖複合材料的熱回收。碳纖複材新技術開發，朝向材料使用生命週期中整體碳平衡的永續製造與應用方向發展。

2. 德國亞琛工業大學 Verbund.NRW 進行再生碳纖維應用效益分析

德國亞琛工業大學聯合三個研究所進行再生碳纖維的循環應用網絡分析，Forschungskolleg Verbund.NRW 計畫首先確立評估碳纖維跨領域的物質流情況，進行航空、汽車、風力發電和建築應用的碳纖維廢棄量與流向進行詳細調查。

德國建築領域消耗全國 60% 的資源、35% 的能源，並產生 50% 的建築廢棄物，同時每年使用超過五萬噸纖維強化混凝土，進行修復工程和建築應用。亞琛工業大學 Forschungskolleg Verbund.NRW 計畫瞄準建築領域作為再生碳纖維應用標的。2018 年研發再生碳纖維強化混凝土應用，由於再生碳纖維具有耐火的優點，作為纖維強化混凝土應用較玻璃纖維使用壽命更長、節省 75% 的材料。除了碳纖維再生應用之外，碳纖維複材的熱循環回收處理方法，也是具有商業效益的碳纖維複材循環應用選項之一。

(二) 美國 IACMI 開啟汽車碳纖維複材平級循環

美國先進複合材料製造與創新研究所(IACMI)負責美國產學研合作複合材料研究計畫，以發展低成本碳纖維複合材料、低能耗碳纖維製造技術以及碳纖維複材回收與應用。

該研究單位啟動了碳纖維回收項目，目的為使汽車使用的碳纖維複材可重複應用於新汽車中。計畫由碳纖維回收再利用公司 Vartega 領導，Vartega 為麻省理工學院之新創公司；該計畫合作夥伴還包括塗料公司 Michelman、橡樹嶺國家實驗室 ORNL、汽車品牌商 Ford、材料生產商 BASF、碳纖維複材車用零件製造商 Plasan 等。

計畫為期兩年，開發汽車應用的熱塑性再生碳纖維複合材料，在汽車輕量化趨勢下擴大至電動車輛應用。研發著重於碳纖維回收技術，確保再生碳纖維品質良好，可循環應用至同等級量產汽車產品中，以車用碳纖維平級循環為目標。美國 IACMI 全盤思考再生碳纖維的供應鏈解決方案，證明再生碳纖維的循環經濟可行性，同時開發優化製程與熱塑性高分子量產加工方法。

（三）荷蘭 TPAC 瞄準航空複材再應用開發

由於航太、體育用品、汽車和工業領域對複合材料使用量增加，導致消費後廢棄物同步增加，而荷蘭每年產生約 1000 噸的高性能熱塑性複合材料，在製造過程中材料的 1/3 用量將成為工廠內工業複材廢棄物。荷蘭熱塑性複合材料應用中心 TPAC 與大學和中小企業合作，開發更具成本效益的熱塑性複合材料回收技術，幫助實施熱塑性複材產品的回收。該中心與 Toray Advanced Composites 公司、飛機製造商 GKN、回收廠商 NRT、製品生產商 Cato Composites 等公司合作進行 TPC-Cycle 計畫。

TPC-Cycle 計畫中的 RESET 項目瞄準航太應用的碳纖複材循環發展，利用飛機生產過程中的熱塑性複材廢棄物，經過處理將其作為飛機新零件的原料，如支架、防滑釘等，廢棄物中高達 70% 的再生材料可用於生產新的複合材料。該計畫目前以熱塑性高分子材料為基質，進行回收後熱塑性碳纖複材性能研究，作為後續回收應用與再製的基礎資訊。2019 年飛機製造商 GKN，使用廢棄的航空方向升降舵製成再生熱塑性碳纖複材，應用於軍用直升機檢修門板，作為此計畫重要的商業化高值應用。

四、產業發展趨勢

1. 航空與汽車國際大廠布局碳纖維循環技術

全球對於輕量化產品需求增加，高強度的碳纖維強化複合材料再跨領域的應用逐漸增加，在環保、成本以及法規要求的考量下，汽車與航空領域的製造商開始思考高價值的碳纖複材需要回收再利用。汽車廠商 BMW 與 Ford、飛機製造商 Airbus 等國際大廠皆已加入碳纖複材回收與循環使用的研發布局。複合材料產業鏈中重要廠商也共襄盛舉，包括碳纖維製造商 SGL 與 Toray、材料生產商 BASF 等；同時碳纖複合材料產業鏈中也出現碳纖維回收再生公司，讓高價值碳纖維在跨領域應用能更永續循環使用。

2. 市場流向與商業分析為再生碳纖應用開發重要依據

在未來材料發展需求的趨勢下，各國研究機構皆已進行輕量化材料循環解決方案的研究，碳纖複合材料使用後纖維分離、再生碳纖維應用、廢棄物熱值應用皆是碳纖複合材料循環永續發展的技術選項。由於碳纖維複合材料以「高性能材料」角色實踐跨領域應用，國際研究單位投入大型研發計劃之前，第一階段投入資源，確立現行碳纖複合材料應用流向以及再生循環使用現況與潛力，作為後續技術開發與商業可行性的重要依據。

3. 碳纖複材循環技術研發仰賴產業與研究單位共同合作

歐洲碳纖複材聯盟 M.A.I. Carbon 以及美國國家級複合材料研究單位 IACMI，皆關注碳纖維與其複合材料的永續應用技術開發。除了開發碳纖維再生技術與潛力應用之外，參與計畫的公司涵蓋循環應用產業鏈，從碳纖維回收技術廠商、材料生產廠商、碳纖複材加工廠商、終端應用廠商等，上中下游產業鏈製造商共同解決技術和商業模式挑戰。

(本文作者為工研院產科國際所執行產業技術基磐研究與知識服務計畫產業分析師)

原文出處：ITIS 智網 <http://www.itis.org.tw/>