



聚四氟乙烯(PTFE)含量對聚丙烯(PP)/聚四氟乙烯複材在傳統和微細發泡射出成型品機械、熱性質及發泡型態之影響

Effect of PTFE content on the property of convention/microcellular injection molded PP/PTFE composite materials

譚安宏¹、簡民原²、黃世欣¹、李育安^{1*}

¹健行科技大學 機械工程系

²健行科技大學 車輛工程系

E-mail: D11021127@uch.edu.tw

摘要

聚四氟乙烯(俗稱鐵氟龍, PTFE)是一種工程塑膠, 以其極低的摩擦係數、優異的耐磨性和耐熱性而著稱, 常被用作潤滑劑或耐高溫材料。在食品工業、半導體、化工、機械、建築和醫療等多個領域得到了廣泛應用。本研究利用PTFE依不同重量比例 0、1、3、5、7和10 wt%當作填充材料加入聚丙烯(PP)中, 控制傳統射出與微細發泡射出成型參數條件, 及透過拉伸測試、衝擊測試、流變性質和熱重分析, 以評估PTFE含量對聚丙烯/聚四氟乙烯複材性能的影響。結果顯示: 在傳統射出中添加聚四氟乙烯能增加複材的抗拉強度和延展性, 當聚四氟乙烯含量為10 wt%時, 有最高的抗拉(31.73 MPa)和延展性(1265%), 延展性約為聚丙烯的4倍。在微細發泡拉伸測試中, 在彈性限度內添加聚四氟乙烯都能增加其楊氏係數(剛性), 在3 wt%時, 有最高的抗拉強度。但當含量超過5 wt%時, 延展性為12.5%時, 材料的延展性開始下降, 致材料失去塑性變形能力, 過量添加會導致材料脆性增加。在衝擊實驗後顯示, 傳統射出的PTFE的添加能降低PP的衝擊性能。熱分析中的二次加熱中, 可觀察到所有樣品在150°C附近出現明顯吸熱峰, 顯示PTFE的摻雜不會顯著影響PP的熔點。在1次冷卻中, 添加PTFE使複材結晶變慢, 代表PTFE摻雜對可減緩其結晶速率。在熱裂解溫度方面, 添加PTFE可增加複材的熱裂解溫度(約增加10度)。在微細發泡射出方面, 添加PTFE使氣泡變小且氣泡密度變大。

關鍵詞：高分子複材、微細發泡射出成型、聚四氟乙烯、抗拉強度、衝擊強度、熱性質。

Abstract

Polytetrafluorethylene (PTFE) is one of the engineering plastics known for its extremely low friction coefficient, excellent wear resistance and heat resistance. It is often used as a lubricant or high-temperature resistant material. It has been widely used in many fields such as food industry, semiconductor, chemical industry, machinery, construction and medical treatment. In this study, PTFE was added as a filler material, at different proportions of 0, 1, 3, 5, 7, 10 wt%, to polypropylene (PP) to improve the composites performance. This study investigated the PTFE content on the mechanical, thermal, and foaming property of PP/PTFE composites. The results showed that the addition of PTFE can increase the tensile strength and elongation of the composites on conventional injection molding and decreased the impact of the composites. The 10 wt% PTFE has the largest tensile strength and toughness. While the stiffness is increased under elastic behavior range for microcellular injection molding. And the composites had the largest tensile strength at 3 wt% of PTFE for foamed composites. The addition of PTFE can not change the melt temperature



but increase the thermal stability on thermal property. The cell size decreased and cell density increased for the addition of PTFT into PP matrix for foamed composites.

Keywords: Polymer composites, Microcellular injection molding, Polytetrafluoroethylene, Tensile strength, Impact strength, Thermal property,

1. 前言

聚四氟乙烯(俗稱鐵氟龍, PTFE)是一種工程塑膠, 以其極低的摩擦係數、優異的耐磨性和耐熱性而著稱, 常被用作潤滑劑、密封元件及高溫耐化設備等領域, 在汽車、電子與航太等產業中皆有廣泛應用^[1]。而聚丙烯作為熱塑性塑膠, 因其良好的機械性能、耐化學性和被大量用於包裝、汽車零件和家電等領域^[2]。然而, 聚丙烯的摩擦性能和耐熱性表現不足, 限制了使用範圍。由於聚四氟乙烯加工溫度遠高於聚丙烯, 其於聚丙烯成型條件下不會完全熔融, 因此在聚丙烯基材中以固態粒子或纖維形態存在, 形成異相分散結構。這種異相結構可作為泡孔成核點, 促進微細發泡效果, 但亦可能因相容性不佳導致界面裂縫, 降低整體韌性。進一步研究發現, 當聚四氟乙烯與無機填料(如滑石粉)共同存在於聚丙烯基材中時, 可能產生協同效應, 不僅提升了複合材料的剛性與尺寸穩定性, 也改善了泡孔的均勻性與微結構^[3]。已有文獻指出, 少量聚四氟乙烯可顯著降低聚丙烯複合材料的摩擦係數, 並提升其抗磨耗能力, 這主要歸功於聚四氟乙烯在材料表面形成的潤滑轉移層^[4]。因此, 本實驗擬利用聚丙烯當基材, 添加聚四氟乙烯當作填充材, 並以特定比例混合, 希望提升聚丙烯在摩擦和耐熱方面的性能, 以提升材料的均勻性與機械強度。再利用傳統射出與微細發泡射出研究樣品試片, 對比機械抗拉的影響、熱性質、流變性質與發泡樣品的泡孔形貌作討論。

2. 實驗設備與方法

2-1 實驗器材

射出成型機是德國阿伯格, 型號 ARBURG 420C-1000-350 射出機, 鎖模力 1000 kN, 螺桿直徑 40 mm, 最大射壓 2500 Bar, 最高熔膠射出量 183 cm³。材料射出溫度控制在 175~180°C, 冷卻時間設定 35 秒, 統一使用標準拉伸模具, 模穴為 ASTM D638 標準拉伸試片。本研究中所使用之聚四氟乙烯為細粉末型態, 透過添加白蠟油與聚丙烯粒料進行混合方式, 隨後再進行傳統射出成型與微細發泡射出成型。

2-2 實驗材料介紹

2-2-1 聚丙烯

聚丙烯(PP), 使用李長榮化學工業公司料號為 ST-4366。

2-2-2 聚四氟乙烯(PTFE)

聚四氟乙烯(PTFE), 使用 Asahi Glass Co., Ltd. Japan. (A.G.C 旭硝子株式會社) 料號為 PB-1211。

2-2-3 發泡劑

使用春源公司提供的氮氣(N₂)作為發泡氣體。

3. 結果與討論

3-1 機械性質

3-1-1 傳統射出與微細發泡射出之抗拉強度-不同含量對比

在傳統射出中圖3-1 (a) 純聚丙烯約在 24.5 MPa 左右達到峰值後迅速下降，當聚四氟乙烯含量為 1、3、5、7、10 wt% 添加時，抗拉強度分別為 25.5、26.5、27、26.5、25.5 MPa，1~7 wt%聚四氟乙烯後的峰值應力比純聚丙烯略高，證明適量添加聚四氟乙烯對強度有正面幫助。當添加10 wt% 聚四氟乙烯後，仍保持一定的拉伸強度，顯示材料的延展性良好，約為純聚丙烯的4倍。

在圖 3-1 (b) 微細發泡射出中，當聚四氟乙烯含量為 1、3、5、7、10 wt% 添加時，應力值分別為 21.5、22.5、21、20.5、19 MPa，結果顯示含量為 3 wt% 時應力在最高，意味著此時材料的抗拉強度最好。超過 3 wt% 後，隨著聚四氟乙烯含量增加，應力下降，顯示材料變脆。延展性也隨著聚四氟乙烯含量增加而下降，應變值大幅縮短，尤其是添加10 wt%時應力最低，表示過量添加會導致材料脆性增加。

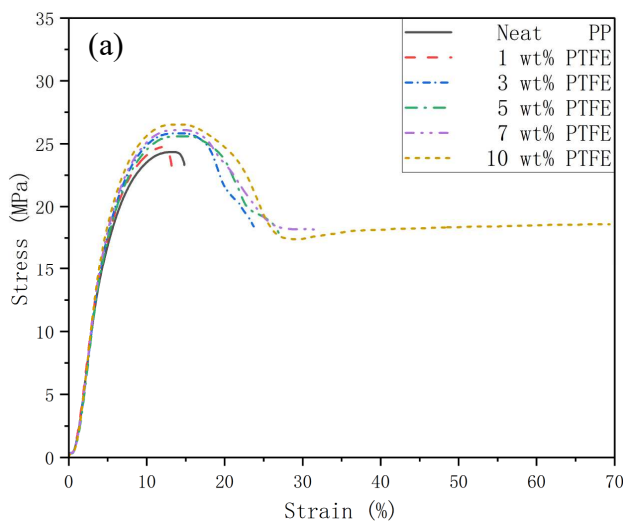


圖3-1 (a) 聚四氟乙烯不同含量傳統射出拉伸強度

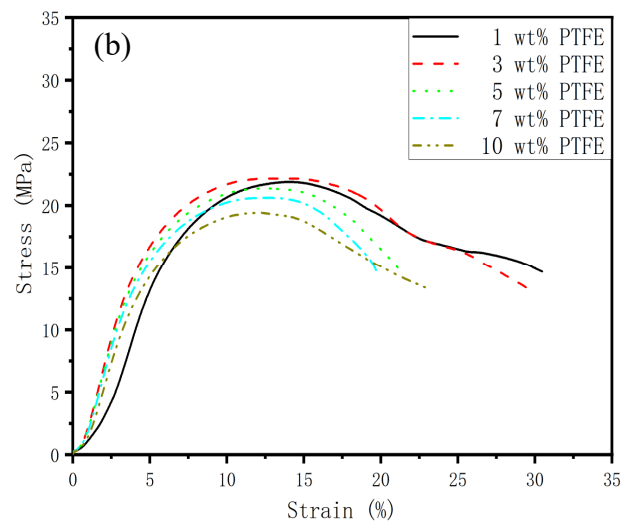


圖3-1 (b) 聚四氟乙烯不同含量發泡射出拉伸強度

3-2 傳統射出-不同含量對衝擊的影響

圖3-2 為聚四氟乙烯含量對聚丙烯加聚四氟乙烯複材衝擊強度的結果，當聚四氟乙烯含量為 0、1、3、5、7、10 wt% 添加時，衝擊強度為 15、20、21、22、28、27 J/M，顯示純聚丙烯衝擊強度最差，添加 1~5 wt% 時，衝擊強度逐漸上升增強效果顯著，添加 7 wt% 時，衝擊強度最高，約 28 J/M，為最佳添加比例。添加 10 wt% 時，衝擊強度略微下降，表示過多的添加聚四氟乙烯可能導致衝擊強度下降。與玻璃纖維增強聚丙烯複合材料的衝擊性能實驗類似[5]。

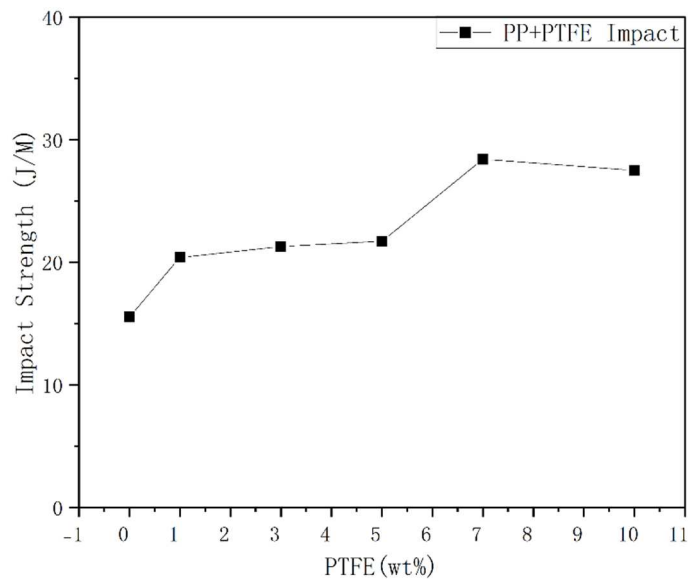


圖 3-2 聚四氟乙烯不同含量的衝擊折線圖

3-3 熱性質

3-3-1 DSC

圖 3-3-1 (a) 為 1 次冷卻過程中放熱的變化，當聚四氟乙烯含量為 0、1、3、5、7、10 wt% 時，結晶溫度分別為 122、120、120、121、120、121°C，結果顯示，加入聚四氟乙烯對結晶溫度也影響輕微，但結晶溫度降低，表示延遲結晶。圖 3-3-2 (b) 2 次加熱過程中吸熱的變化，當聚四氟乙烯含量為 0、1、3、5、7、10 wt% 時，複材的熔點溫度分別為 150、150、151、149、150、151°C，結果顯示聚四氟乙烯的加入熔融溫度影響極小，熔點變化不大。但過程中出現兩個熔融峰，第一個小峰約 140~145°C(低溫峰)對應 γ 結晶態，第二個高溫主峰約 149~151°C 則對應 α 結晶態，顯示樣品中存在雙晶型結構。Chen et al. 指出聚四氟乙烯的摻雜主要改變聚丙烯的結晶形貌，但對熔點無顯著影響，與本研究結果一致^[6]。

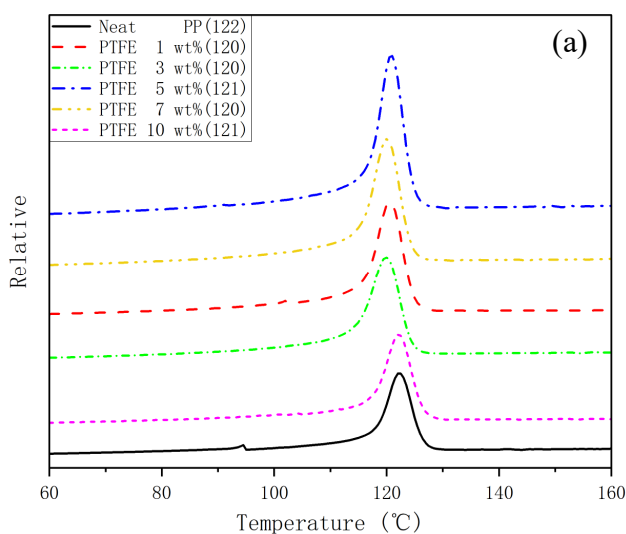


圖 3-3-1 (a) 一次冷卻曲線圖

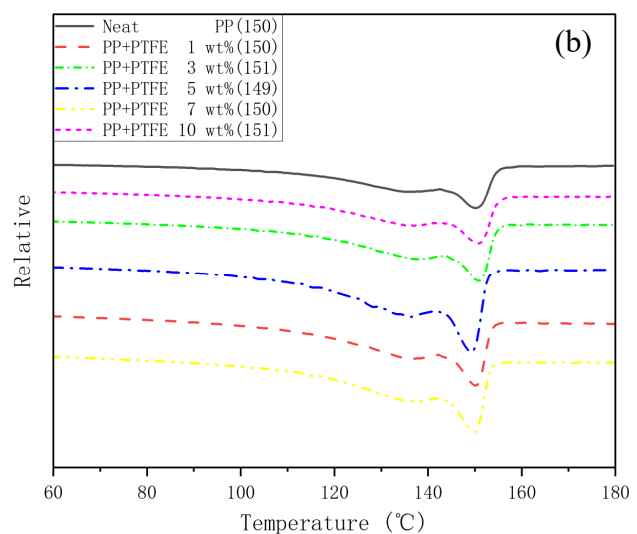


圖 3-3-1 (b) 二次加熱曲線圖

3-3-2 熱重分析

圖 3-3-2 (a) TGA 曲線反映出樣品在加熱過程中的熱穩定性與分解行為：純聚丙烯在約 462°C 開始快速分解，於約 500°C 完全分解。添加不同含量聚四氟乙烯 1、3、5、7、10 wt% 後，分解溫度分別為 467、468、474、469、473°C，溫度上升熱穩定性提升。而含聚四氟乙烯的樣品在 500°C 之後仍有殘留。圖 3-3-2 (b) DTG 曲線反映出樣品在加熱過程中的分解溫度及分解速率：純聚丙烯的主分解峰出現在 462°C，分解速率高，當添加不同含量聚四氟乙烯 1、3、5、7、10 wt% 後，分解溫度分別為 468、470、474、469、474°C，分解峰右移，顯示熱穩定性提升^[7]。峰值高度下降，表示分解速率 5 wt% 時是僅次於純聚丙烯的，接下來是 10、1、7、3 wt%。3 wt% 的分解速率最慢。

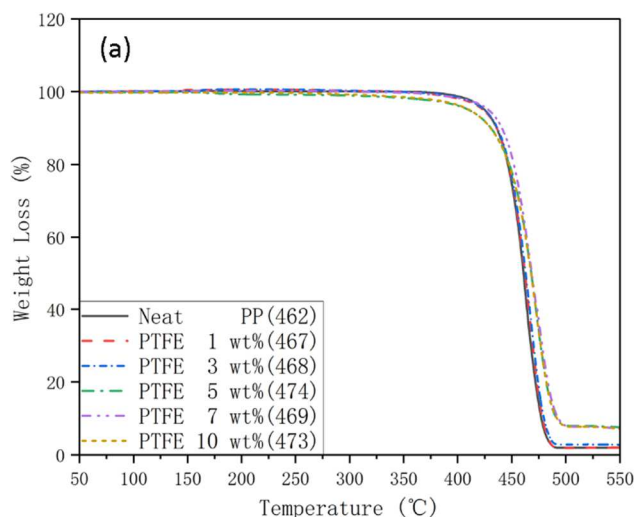


圖3-3-2 (a) TGA of PP / PTFE

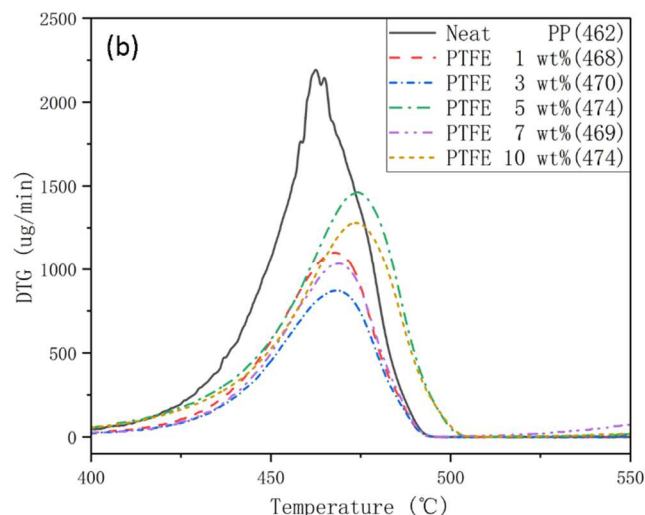


圖3-3-2 (b) DTG of PP / PTFE

3-4 發泡形貌

圖 3-4 (a)及(b)為添加不同聚四氟乙烯含量 0、1、3、5、7、10 wt%之聚丙烯/聚四氟乙烯發泡材料的表面微觀結構，呈現泡孔形貌與分佈情形。結果顯示當純聚丙烯時，泡孔分布不均，孔洞形狀不一，當添加 1 wt%、3 wt%時，泡孔逐漸增多，從約 80 μm 到 90 μm ，氣泡密度也上升，約從 $1.0\text{E}+13$ 增加到 $1.3\text{E}+13$ cells/ cm^3 ，顯示聚四氟乙烯有促進成核作用及能提升泡孔數量。當添加 5 wt%時，泡孔數量達到最多，大小約 100 μm ，氣泡密度大幅上升至約 $2.5\text{E}+13$ cells/ cm^3 ，且分布極為均勻，氣泡圓整飽滿，是最佳微細發泡結構狀態。但當含量提高至 7 wt% 時，孔洞呈現聚集現象，氣泡大小顯著下降至 45 μm ，整體結構趨於不穩定與部分氣泡破裂^[8]。

圖 3-4 (a) cell size/ cell density 定義方式如下：

cell size (泡孔尺寸)：指泡孔的平均直徑，常以 μm 表示

cell density (泡孔密度)：單位體積中泡孔的數量，常用 cells/ cm^3 表示。

公式 $\text{Cell Density} = ((n_c \times M^2) / A)^{(3/2)} \times (1 / (1 - \text{Void Fraction}))$

其中：

- n_c ：氣泡數量 (number of cells)

- M ：放大倍率 (magnification)

- A ：觀察面積 (cm^2)

- Void Fraction：孔隙率 (通常為 0.9 表示 90% 氣泡區)。

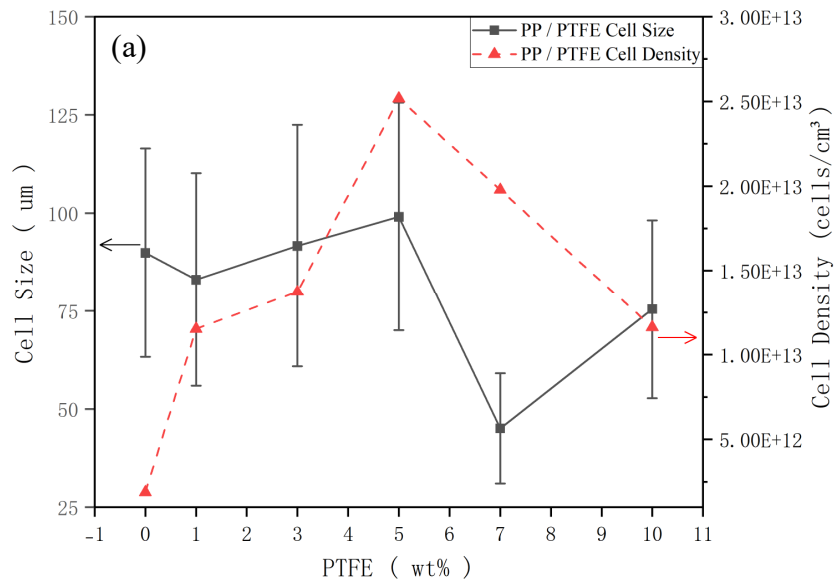


圖3-4 (a) 不同含量的氣泡尺寸與氣泡密度變化趨勢圖

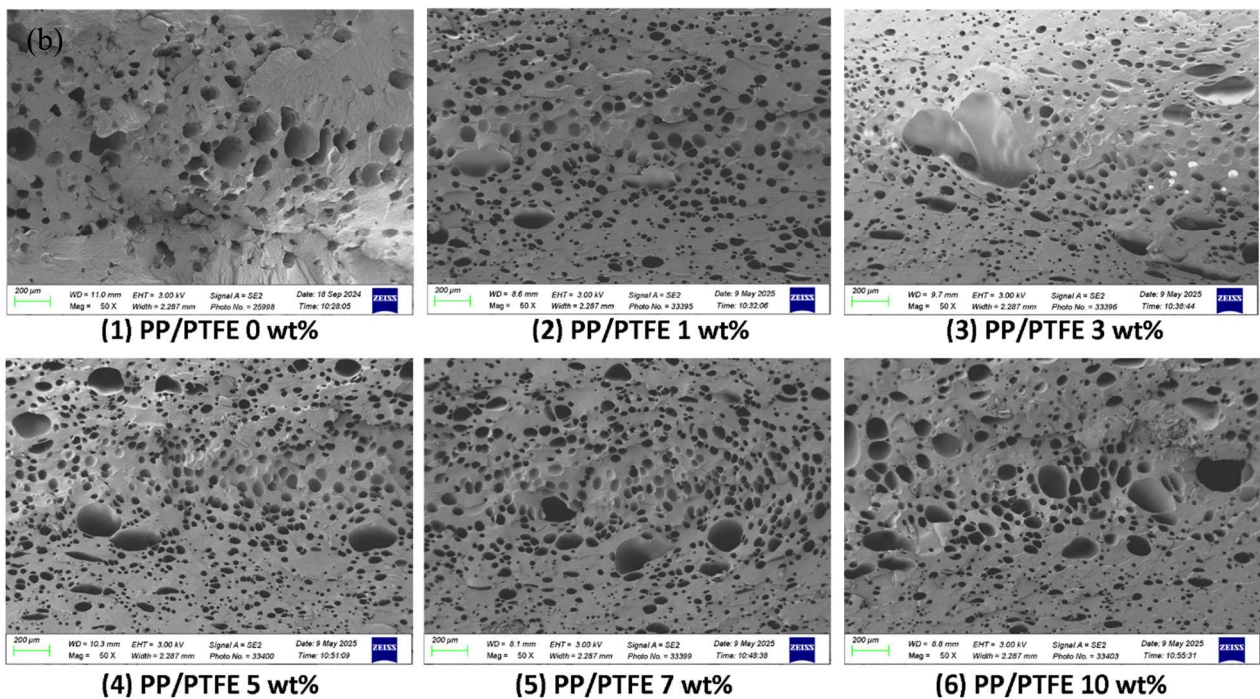


圖3-4 (b) 聚四氟乙烯不同含量的發泡形貌 SEM 影像

4. 結論

綜合上述的討論，可得到下列的結論：

1. 傳統與微細發泡射出比較，證明適量添加聚四氟乙烯對抗拉強度有正面幫助。當添加10 wt% 時，延展性是純聚丙烯的4倍。而微細發泡射出的抗拉強度跟傳統射出比剛好相反，當添加聚四氟乙烯過量，會造成脆性增加。
2. 適量添加聚四氟乙烯可有效提升聚丙烯材料的衝擊強度，最佳比例約為 7 wt%。超過此比例則可能導致強度下降。

3. DSC 熱性質變化分析結果，當聚四氟乙烯熔添加後，雖然有兩個熔融峰，但熔融溫度、結晶溫度變化不大(差異 2°C)，代表聚四氟乙烯摻雜對聚丙烯熱穩定性影響有限。
4. TGA/DTG 熱失重分析結果顯示，添加聚四氟乙烯能提升聚丙烯的熱穩定性，最高提升達約 12°C ，及分解反應變緩和，材料更耐高溫。
5. 發泡表面形貌顯示，聚四氟乙烯添加 5 wt%時，氣泡孔數量最多，氣泡孔尺寸越小，密度也最好。添加 7wt%時，則會下降，代表過量的聚四氟乙烯會造成結構團聚。
6. 聚四氟乙烯為高結晶性、低表面能材料，在聚丙烯中難以完全均勻分散，其微觀分布形態（如纖維狀或團聚狀）將直接影響應力傳遞與微細發泡的結構穩定性。當其以細微分散方式存在時，可有效提供成核點，有助於提升泡孔密度（cell density），改善材料的氣泡均勻性；但若分散不良而產生團聚，則易形成缺陷區域，導致機械性能如衝擊強度下降。
7. 微細發泡 聚丙烯/聚四氟乙烯 複合材料具有輕量化、高機械強度與良好結構穩定性等優點，適合應用於汽車內裝、電子元件保護包材、建築隔熱材料及3C產品外殼等領域。透過不同比例的聚四氟乙烯調控，可進一步拓展其在高性能工程塑膠領域的應用潛力。

5. 致謝

感謝 兆弘精密有限公司提供產學合作研究經費補助

6. 參考文獻

- [1] M. Ebnesajjad, Fluoroplastics: Volume 1: Non-Melt Processible Fluoroplastics, 2nd ed., William Andrew, 2015.
- [2] G. Rosato, Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook, Plastics Design Library, 2001.
- [3] 李政軒，聚丙烯/滑石粉之複合材料製備及其物理性質探討，碩士論文，長庚大學化工與材料工程研究所，2007。
- [4] Y. Sawae, T. Morita, K. Takeda, S. Onitsuka, J. Kaneuti, T. Yamaguchi, J. Sugimura, Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas, Tribology International,157, 2021.
- [5] 周英國，長纖維增強聚丙烯複合材料的發泡工藝研究，江蘇科技大學材料科學與工程學院 副教授，模具與成型智慧工廠雜誌， 2018年2月雜誌專題。
- [6] C. Wang, L. M. Hwang, Transcrystallization of PTFE fiber/PP composites (I) crystallization kinetics and morphology, Polymer Physics, 34(1), 47–56, 1996.
- [7] E. Dhanumalayan, G. M. Joshi, Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review, Advanced Composites and Hybrid Materials, 1, 247-268, 2018.
- [8] Wang Suwei, Effect of material properties on the foaming behaviors of PP-based wood polymer composites prepared with the application of spherical cavity mixer, Polymer Foams : Processing and Characterization, Polymer, 13, 18, 19, 2021.

2025 模具暨應用產業技術論文發表會
中華民國 114 年 08 月 21 日(四)

台灣區模具工業同業公會

