



氣泡成長與纖維排向交互作用對射出成品幾何變化影響之研究 Investigation on the Influence of the Interaction between Bubble Growth and Fiber Orientation on the Geometric Variation of Injected Parts

陳雋岑¹, 柯樂¹, 黃招財^{1*}, 黃世欣²

¹淡江大學化學工程與材料工程學系

²健行科技大學機械工程學系

*E-mail: cthuang@mail.tku.edu.tw

摘要

纖維複合材料射出與微細發泡射出是近年來產業輕量化非常有效之技術，其中透過纖維微結構特性(包括：纖維排向、纖維長度、纖維濃度)可具體提升射出成品之機械強度。然而，纖維微特性卻可能造成射出成品幾何收縮不均勻，影響成品精度控制，但是如何具體標定收縮不均勻並能有效調控，一直是產學界努力的目標。為此，本研究採用 ASTM D638 Type V 標準試片作為系統，應用聚丙烯(PP)及含 30 wt% 玻璃纖維複合聚丙烯(30SFPP)做為材料，進行傳統射出與微細發泡射出成型製程，並且同時應用 CAE 模擬分析與實驗方法，觀察與探討成品中氣泡成長效應如何影響射出成品之幾何收縮變化。結果顯示，當比較傳統 PP 及 30SFPP 射出成品在接近澆口(NGR)區域時，纖維的出現可以讓成品在三個方向之收縮率有明顯改善，此等抵抗收縮變形之效應與纖維排向張量相當一致。另外，當比較傳統 PP 及 30SFPP 射出成品在充填結束(EFR)區域時，纖維的出現除了能有效抵抗收縮，但卻讓射出成品在垂直流動方向及厚度方向之兩側邊長產生左右收縮不均的現象，尤其是左邊長小於右邊長。此等左右兩側收縮不均的現象，主要與纖維排向張量在垂直流動方向(A₂₂)以及厚度方向(A₃₃)變化完全一致。再者，透過微細發泡射出引導之氣泡成長與纖維排向交互作用，可以有效消除前項因纖維排向所引導之射出成品兩側邊長產生左右收縮不均的問題。

關鍵詞：纖維複合材料射出成型、微細發泡射出成型、CAE 模擬分析、纖維排向、幾何收縮不均現象。

Abstract

Fiber-reinforced plastics injection molding and microcellular injection molding are very effective technologies for industrial lightweighting in recent years. The mechanical strength of these products can be specifically improved through fiber microstructure characteristics (including: fiber orientation, fiber length, and fiber concentration). However, the micro-characteristics of fibers may cause uneven geometrical shrinkage of the injected parts. This uneven geometrical shrinkage problem will affect the precision control of the finished product. However, how to specifically calibrate the uneven shrinkage and effectively control it has always been the goal of the industry and academia. For this reason, this study uses ASTM D638 Type V standard specimen model as the system, and uses polypropylene (PP) and 30wt% glass fiber polypropylene (30SFPP) as materials to carry out traditional injection and microcellular injection molding processes. At the same time, CAE simulation analysis and experimental methods are used to observe and discuss how the bubble growth effect in the finished product affects the geometrical shrinkage of the injection product. The results show that when comparing traditional PP and 30SFPP injection products near the gate (NGR), the appearance of fibers can significantly improve the shrinkage of the finished product in three directions. In addition, when comparing traditional PP and 30SFPP injection products in the end of filling region

(EFR), the appearance of fibers can reduce the shrinkage of injected part, but it can also cause uneven shrinkage of the two sides of the injection part in the cross flow direction and thickness direction. Specifically, the left side length is shorter than the right side. This phenomenon of uneven shrinkage is mainly caused by the variation of fiber orientation tensor in the cross-flow direction (A_{22}) and in the thickness direction (A_{33}). Furthermore, to reduce this uneven shrinkage problem, the microcellular injection molding process is introduced. Results show that as increasing the gas content, the uneven shrinkage problem happened on both sides happened in cross-direction and thickness direction can be effectively removed.

Keywords: Fiber-reinforced plastics injection molding, microcellular injection molding, CAE simulation, fiber orientation, geometrical uneven shrinkage phenomenon.

1. 前言

為了提高汽車的能源效率，纖維複合材料(fiber-reinforced plastics, FRP)射出與微細發泡射出是近年來產業輕量化非常有效之技術，其中透過纖維微結構特性(包括：纖維排向、纖維長度、纖維濃度)可具體提升射出成品之機械強度，進而部分取代金屬。另外，微細發泡射出成型則透過塑料中生長數以萬計之為小氣泡，在不明顯降低塑料之機械特性，達成減輕重量之目標[1-3]。然而，當纖維複合材料射出成型製程進行中，纖維的微結構特性，包括纖維排向、長度和濃度分佈如何觀察、預測與掌握，並不容易。特別是因為流場變化常常引發纖維排向出現不等向性，此等不等向性很容易導致成品產生不均勻收縮，進而導致翹曲變形問題，只是纖維排向的變化很難被預測與觀察，更難以量化與掌握，因此成品不均勻收縮與翹曲問題一直是產業界面臨的巨大挑戰[4-6]。再者，近年來為了減少由纖維排向特性引起的不均勻收縮和翹曲問題，部分專家建議可改採微細發泡技術 [7,8]，只是如何調控仍未完全清楚。事實上，自從 1980 年代初由麻省理工學院的 Nam Suh 博士及其同事提出後，微細發泡技術已被引入到許多塑料發泡工藝中[9]。此外，為了掌握發泡零組件內部的微觀結構，許多研究人員提出許多數學理論模型來模擬氣泡成核和生長[10-12]。雖然，相關成核和成長的關鍵參數已被不斷研究。然而，當纖維強化塑膠進行微細發泡射出製程，氣泡與纖維之間的相互作用，以及該等作用如何具體影響射出成品之關聯性，至今仍未完全被解析。為此，在本研究中，我們將一方面應用數值模擬分析(採用 Moldex3D 軟體)方法，嘗試探討射出成品內氣泡成長與纖維排向的相互作用，另一方面也將應用實際試模深入觀察，探討氣泡與纖維之間的相互作用與其巨觀成品幾何尺寸變化關聯性。具體而言，首先針對聚丙烯與含纖維之聚丙烯進行射出成型製程，比較與掌握纖維材料之出現引發內在微結構特性的變化，並且仔細量測射出成品之幾何尺寸變化，探索纖維微結構特性與成品外觀尺寸之關聯性。之後，在進行一系列之微細發泡射出成型，探討氣泡成長如何影響射出成品外觀尺寸之變化，探討氣泡成長與纖維排向交互作用之效應。

2. 模型與相關資訊

2.1 虛擬模型系統與相關資訊

本研究產品與流道的幾何模型及其相關尺寸如圖 1 所示，此為含有 ASTM D638 Type V 標準試片之一模四穴系統，內在產品尺寸為 63.5 mm × 9.53 mm × 3.5 mm。使用的材料包括純聚丙烯(後續簡稱 PP 材料)，型號為 Globalene ST868M，以及含有 30% 纖維的聚丙烯(後續簡稱 30SFPP 材料) 型號為 Globalene SF7351，兩種材料皆由 LCY Chemical 公司提供。另

外，基本射出成型製程的操作條件如下：填充時間為 0.6 s；保壓時間為 5 s；冷卻時間為 30 s；料溫度均為 230°C；模具溫度為 25°C。再者，針對微細發泡射出製程的操作條件主要增加進氣量從 0.2wt%至 0.5wt%及 0.9wt%。再者，因應後續射出成品之巨觀幾何尺寸變化，我們特別將流動方向(x-方向)定義為上邊(Lx)_U，下邊(Lx)_D上；垂直接流動方向(y-方向)定義為左邊(Ly)_L，右邊(Ly)_R；厚度方向(Z-方向)定義為左邊(Lz)_L，右邊(Lz)_R，如圖 1(c)所示。

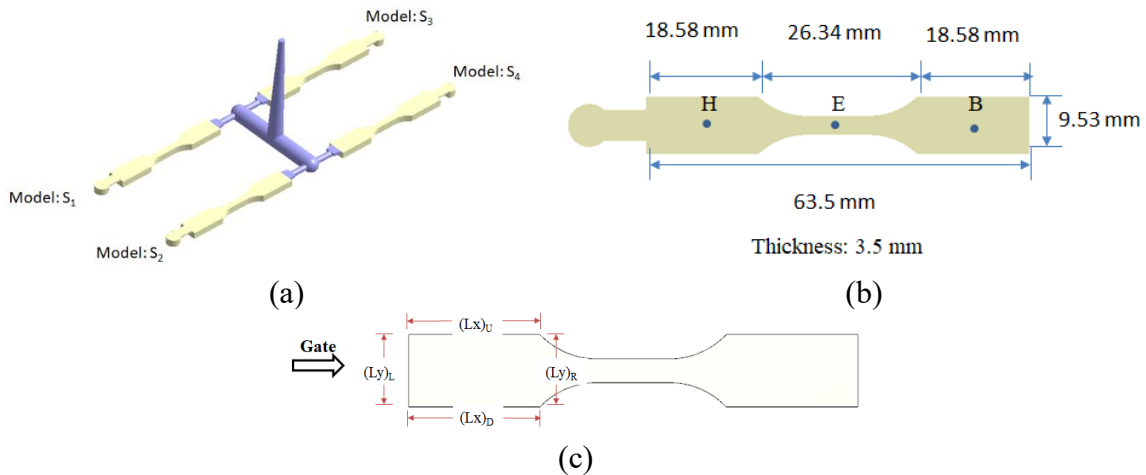


圖 1. (a)產品與流道結構圖，(b) 產品的幾何尺寸，(c)成品各邊長定義。

2.2 實驗模型及相關資料

為了驗證模擬分析結果的正確性，並且瞭解纖維的真實機理，我們也建構實際射出系統，其中實驗機台為Arburg 420C-1000-350-40，如圖 2 所示，模具系統與虛擬系統相同，如圖2(b)所示。另外，實際操作條件設定，與2.1節所述相同。



圖2. (a) 實際實驗射出機台Arburg 420C 1000-350-40，(b) 實際模具結構

3. 結果和討論

3.1 流場與纖維排向測試

在未考慮氣泡效應之前，圖3(a)顯示流場短射測試結果，可以清楚看出每一個模穴的流動行為非常相近。另外，也進一步針對每一個模穴之成品重量與幾何尺寸進行比對，結果相當

接近，因此後續結果展示將以”S₁模型”為基礎進行探討。圖3(b)顯示在 B 點的纖維配向張量模擬分析結果，其中A₁₁（流動方向之纖維排向張量分量）在剪切層約為0.7至0.8，在核心層降至0.20；同時A₂₂（垂直流動方向之張量分量）在剪切層約為0.20~0.10，在核心層可達0.30；A₃₃（厚度方向的之張量分量）在剪切層從0.10降至0.05，在核心層達到0.40。顯然，纖維在剪切層沿流動方向強烈排列，但在核心層則屬於任意排列方式，因三個張量分量接近 0.33。

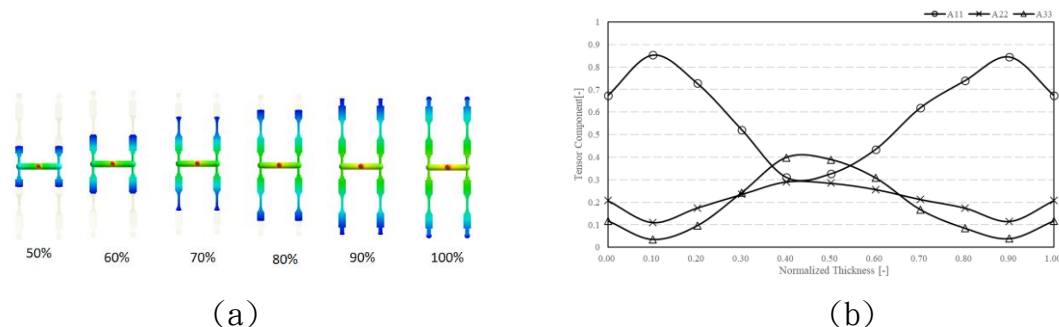


圖 3. (a) 短設實驗，(b) 在 NGR區域 B 點的纖維配向張量模擬分析結果。

3.2 探討纖維複合材料射出成品巨觀幾何變化

為了解含纖維複合材料射出成品微觀纖維排向如何影響其射出成品，模擬分析結果如表 1 所示，當著重於靠近澆口區(near gate region,NGR)時，比較 PP 與 30SFPP 系統可以發現射出成品在(x-, y-, z-)三個方向都發生收縮現象，不過在 x-方向(亦即流動方向)大大降低，此部份乃因為纖維在流動方向(A₁₁) 提供較強之抵抗力量，如圖 3(b)所示。另外，在此區域(Ly)_L 略大於(Ly)_R，而且(Lz)_L也略大於(Lz)_R。再者，當著重於充填結束區(end of filling region, EFR)時，纖維的出現雖然仍提供在流動方向(A₁₁) 提供較強之抵抗力量，但在垂直流動方向及厚度方向之兩側邊長卻產生左右收縮不均的問題，而且是左邊長小於右邊長(亦即 (Ly)_L<(Ly)_R，左右兩側差異 0.57%；以及(Lz)_L<(Lz)_R，左右兩側差異 0.79%)，此現象在 NGR 並沒有明顯發生。為了驗證並了解上述為何纖維參與引發射出成品產生此等幾何收縮不均問題，我們進一步進行實驗驗證，實際射出成品巨觀幾何尺寸收縮分析結果，如表 2 所示。基本上，成品收縮特性與模擬分析趨勢一致。不過，實際成品之收縮量值沒有模擬來的大；另外，在 EFR 區域實際發生左邊長小於右邊長(亦即 (Ly)_L<(Ly)_R，左右兩側差異 0.77%；以及(Lz)_L<(Lz)_R，左右兩側差異 1.4%)。但為何在垂直流動方向及厚度方向之左右兩側邊長發生收縮不均的問題？

3.3 探討纖維排向分布特性與射出成品巨觀幾何變化關係

此處我們將 NGR 及 EFR 區域再細分成 5 小區，每一區之中心點分別為 B1 至 B5，及 H1 至 H5，再於每一點擷取出平均之纖維排向張量，結果如圖 4 所示。從圖 4(a)明顯看出在 NGR 區域纖維排向張量 A₁₁ 明顯大於 A₂₂ and A₃₃，而且 A₂₂ 及 A₃₃ 都是左側大於右側，但變化不是太大，此部分與射出成品之幾何收縮現象相當一致。另外，圖 4(b)為 EFR 區域，特別是在最後一段 H4 至 H5 之纖維排向張量 A₁₁ 大量下降，而 A₂₂ 與 A₃₃ 大量上升，而且 A₂₂ 及 A₃₃ 都是右側遠大於左側，此部分與射出成品之幾何收縮現象相當一致。

3.4 探索氣泡成長與纖維排向交互作用

由前段章節得知，纖維排向張量的變化是導致射出成品幾何收縮不均最主要的原因，為了改善此等問題，我們嘗試藉由微細發泡射出來加以改善，圖 5(a)至 5(c)為實際 PP 材料射出成品在 EFR 區域之各邊長隨含氣量變化，結果顯示當含氣量從 0.2wt% 增加至 0.9wt% 時，垂

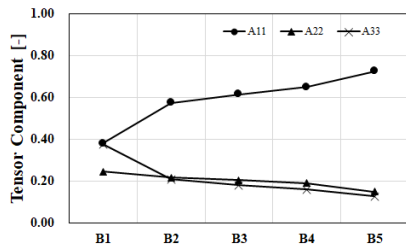
直流動方向及厚度方向之兩側邊長之收縮有逐漸趨於一致。再者，圖 5(d)至 5(f)為實際 30SFPP 材料射出成品在 EFR 區域之各邊長隨含氣量變化，結果顯示當含氣量從 0.2wt% 增加至 0.9wt% 時，原先在垂直流動方向及厚度方向之兩側邊長之明顯收縮差異，也就是說經氣泡作用下，成品在直流動方向及厚度方向之兩側邊長之收縮趨於一致。

表1. 未考慮氣泡效應前射出成品幾何尺寸收縮模擬分析結果:(左)長度，(右)百分比

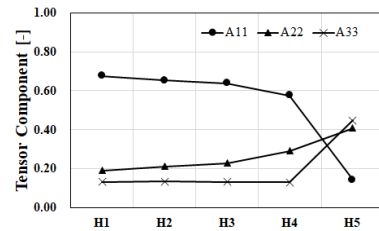
Shrinkage deformation length (mm)								Shrinkage percent (%)							
Region	Material	(Lx) _U	(Lx) _D	(Ly) _L	(Ly) _R	(Lz) _L	(Lz) _R	Region	Material	(Lx) _U	(Lx) _D	(Ly) _L	(Ly) _R	(Lz) _L	(Lz) _R
NGR	PP	-0.365	-0.356	-0.150	-0.171	-0.042	-0.053	NGR	PP	-1.965	-1.915	-1.577	-1.792	-1.198	-1.502
	30SFPP	-0.139	-0.135	-0.148	-0.190	-0.027	-0.034		30SFPP	-0.746	-0.724	-1.558	-1.997	-0.771	-0.978
EFR	PP	-0.357	-0.353	-0.174	-0.160	-0.051	-0.038	EFR	PP	-1.922	-1.900	-1.826	-1.674	-1.457	-1.099
	30SFPP	-0.147	-0.144	-0.186	-0.132	-0.043	-0.016		30SFPP	-0.789	-0.775	-1.952	-1.381	-1.240	-0.453

表2. 未考慮氣泡效應前射出成品幾何尺寸收縮實驗分析結果:(左)長度，(右)百分比

Shrinkage deformation length								Shrinkage percent (%)							
Region	Material	(Lx) _U	(Lx) _D	(Ly) _L	(Ly) _R	(Lz) _L	(Lz) _R	Region	Material	(Lx) _U	(Lx) _D	(Ly) _L	(Ly) _R	(Lz) _L	(Lz) _R
NGR	PP	-0.073	-0.073	-0.167	-0.170	-0.040	-0.043	NGR	PP	-0.395	-0.395	-1.749	-1.784	-1.143	-1.238
	30SFPP	0.173	0.167	-0.103	-0.117	-0.020	-0.030		30SFPP	0.933	0.897	-1.084	-1.224	-0.571	-0.857
EFR	PP	-0.140	-0.140	-0.213	-0.197	-0.060	-0.050	EFR	PP	-0.753	-0.753	-2.239	-2.064	-1.714	-1.429
	30SFPP	0.123	0.120	-0.177	-0.103	-0.063	-0.013		30SFPP	0.664	0.646	-1.854	-1.084	-1.810	-0.381

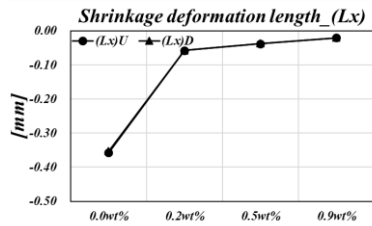


(a)

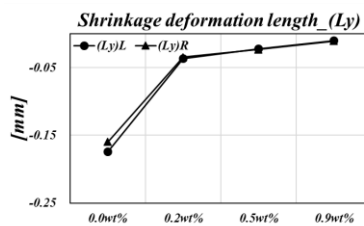


(b)

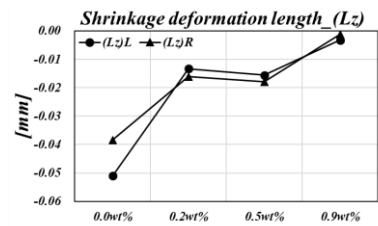
圖 4. (a) 在 NGR 區域之平均纖維排向張量，(b) 在 EFR 區域之平均纖維排向張量



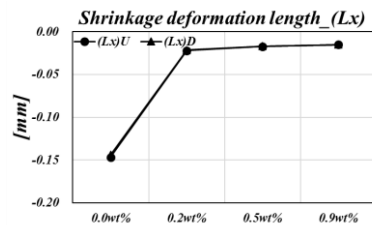
(a)



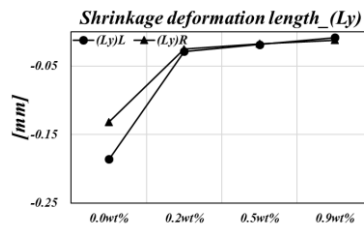
(b)



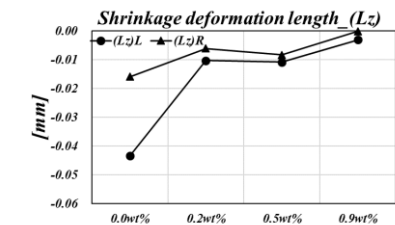
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 5. 實際射出成品在 EFR 區域之各邊長隨含氣量變化；(a) PP 在 (Lx)_U 及 (Lx)_D，(b) PP 在 (Ly)_L



及(Ly)_R，(c) PP在(Lz)_L及(Lz)_R，(d) 30SFPP在(Lx)_U 及(Lx)_D，(e) 30SFPP在(Ly)_L及(Ly)_R，(f) 30SFPP在(Lz)_L及(Lz)_R。

4. 結論

在這項研究中，我們利用具有標準拉伸試片（ASTM D638 TYPE V）之一模四穴平衡流道系統進行氣泡成長與纖維排向交互作用如何影響射出成品幾何變化之研究，重要結論如下：

- (a) 一模四穴平衡流道系統中，各模穴之流場行為與纖維排向特性非常相近。
- (b) 在未考慮氣泡效應前，射出成品之幾何尺寸收縮變化與內在纖維排向張量有非常一致之關係，特別是在充填結束區域(EFR)，發生垂流方向及厚度方向之兩側邊長產生左右收縮不均的現象，尤其是左邊長小於右邊長。此等左右兩側收縮不均的現象，主要與纖維排向張量在垂流方向(A₂₂)以及厚度方向(A₃₃)變化完全一致。
- (c) 進一步利用微細發泡射出引導之氣泡成長與纖維排向交互作用可以有效消除前項因纖維排向所引導之射出成品兩側邊長產生左右收縮不均的問題。

5. 誌謝

本文作者非常感謝國科會之經費支持(計畫編號: MOST 111-2221-E-032-002 -; MOST 110-2221-E-032 -015 -)。

6. 參考文獻

1. J.L. Thomason, M.A. Vlugh, "Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber-reinforced polypropylene: Part 1-Tensile and flexural modulus", *Composites*, 27A, pp 477-484 (1996).
2. C. Wang, and S. Yang, "Thermal, Tensile and Dynamic Mechanical Properties of Short Carbon Fibre Reinforced Polypropylene Composites", *Polymer & Polymer Composites*, 21, No. 2, pp 65-71 (2013).
3. P. H. Foss, H.-C. Tseng, J. Snawerdt, Y.-J. Chang, W.-H. Yang, C.-H. Hsu, "Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation", *Polym. Compos.*, 35, 4, pp. 671-680 (2014).
4. F. Folgar & C.L. Tucker, "Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 3(2): pp.98-119 (1984).
5. H.-C. Tseng, R.-Y. Chang, and C.-H. Hsu, "Phenomenological improvements to predictive models of fiber orientation in concentrated suspensions." *J. Rheol.* 57 1597 (2013).
6. A.-J. Favaloro, H.-C. Tseng, and R.-B. Pipes, "A new anisotropic viscous constitutive model or composite molding simulation", *Composite Part A*, 115, pp 112-122 (2018).
7. J. Webb and L. Qi, "3D process simulation of the microcellular foam injection molding in large automotive interior parts", *SPE Tech. Annual Meeting, ANTEC2013*.
8. H. K. Kim, J. S. Sohn, Y. Ryu, S. W. Kim and S. W. Cha, "Warp Reduction of Glass Fiber Reinforced Plastic Using Microcellular Foaming Process Applied Injection Molding", 11, 360, *Polymers* (2019)
9. N. P. Suh, Hanser/Garden Publications, Cincinnati, Chapter 3 (1996).
10. Venerus, *Cellular Polymers*, 22, 9 (2003).
11. K. Taki, *Chemical Engineering Science*, 63, 3643 (2008).
12. T. Shiu, Y. Chang, C. Huang., C. Hsu., R. Chang, S. Hwang, *SPE Tech. Annual Meeting, ANTEC2013*.