



# 熔膠翻轉對纖維強化塑膠在射出成型中纖維排向與幾何收縮變化影響之研究 Investigation of the Melt Rotation Influence on the Fiber Orientation Variation and Geometrical Change in FRPs Injection Molded Parts

高靖凱<sup>1</sup>, 黃世欣<sup>2</sup>, 簡民原<sup>3</sup>, 黃招財<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 淡江大學化學工程與材料工程學系

<sup>2</sup> 健行科技大學機械工程學系

<sup>3</sup> 健行科技大學車輛工程學系

\*E-mail: [cthuang@mail.tku.edu.tw](mailto:cthuang@mail.tku.edu.tw)

## 摘要

纖維塑膠複合材料 (fiber reinforced thermoplastics, FRPs) 已廣泛地應用於航太、汽車、風電、遊艇船舶等產業。然而，此等材料會因內在纖維作動導致射出成品產生不對稱收縮幾何問題，但其成因仍未完全掌握。為此，本文想透過熔膠翻轉效應進行改善，具體為採用兩組一模四穴模具系統作為研究平台，其中一組為平衡流道 (balanced runner, BR) 系統，另一組為非平衡流道 (non-balanced runner, NBR) 系統。在此等模具系統中，每個模穴為一個 ASTM D638 標準試片產品，尺寸為 63.5 mm x 9.53 mm x 3.5 mm。再者，為深入了解熔膠翻轉效應與其影響，本研究同時採用理論模擬分析 (Moldex3D 軟體系統) 和實驗研究 (Arburg 機台系統) 進行。結果顯示，對於 BR 和 NBR 系統，模擬分析的充填行為與實驗研究的結果相當吻合。再者，透過觀察與對比 NBR 系統與 BR 系統射出成品的幾何收縮變化可以發現，成品在三個方向 (x、y、z) 的尺寸變形都有明顯差異。具體而言，在填充末端區域 (end of filling region, EFR)，射出成品在流動方向上的收縮變化差異並不明顯，但在垂直接流動方向的收縮變化差異性會減少。此外，針對 BR 和 NBR 系統的相同模穴，由於熔膠翻轉效應明顯降低射出成品在垂直接流動和厚度方向上的收縮。這些現象足以證明熔膠翻轉效應可用來修正射出成型件的尺寸收縮。再者，應用模擬分析進一步對 BR 和 NBR 系統進行纖維排向分析與比對，結果顯示，在 NBR 系統中，熔膠翻轉效應對纖維排向有較大的影響。具體來說，流動方向 (A<sub>11</sub>) 的纖維排向張量呈現先增加後下降的趨勢；垂直向流動方向 (A<sub>22</sub>) 呈現下降趨勢；厚度方向 (A<sub>33</sub>) 的纖維排向張量呈現上升趨勢。透過此等結果可以合理推測熔膠翻轉引起流場的變化，使流動-纖維耦合效應減弱，進而改變纖維排向，再進一步減少射出成品在垂直接流動方向之不對稱性收縮問題。

**關鍵詞：**射出成型、纖維強化塑膠 (fiber-reinforced plastics, FRP)、纖維排向、熔膠翻轉效應、CAE 模擬分析

## Abstract

Fiber-reinforced thermoplastics (FRPs) have been widely applied in industries such as aerospace, automotive, wind energy, and marine/yacht manufacturing. However, these materials often exhibit asymmetric shrinkage in injection molded products due to the internal behavior of the fibers, the underlying mechanisms of which remain not fully understood. To address this issue, this study aims to improve the shrinkage behavior by utilizing the melt rotation effect. Specifically, two sets of four-cavity mold systems were employed as the research platform—one with a balanced runner (BR) system and the other with a non-balanced runner (NBR) system. In both mold systems, each cavity has an ASTM D638 standard specimen, with dimensions of 63.5 mm × 9.53 mm × 3.5 mm. To thoroughly investigate the melt rotation effect and its influence, both theoretical simulation (using the Moldex3D software) and experimental analysis (conducted with the Arburg injection molding machine) were carried out. The results showed that, for both BR and NBR systems, the



filling behavior predicted by simulation quite matched the experimental results. Furthermore, by observing and comparing the geometric shrinkage variations of molded products from the NBR and BR systems, it was found that dimensional deformation differed significantly in all three directions (x, y, and z). Specifically, in the end of filling region (EFR), the shrinkage variation along the flow direction was not significantly different; however, the shrinkage variation perpendicular to the flow direction was notably reduced. In addition, for corresponding cavities in both BR and NBR systems, the melt rotation effect significantly reduced shrinkage in both the transverse and thickness directions. These findings clearly demonstrate that the melt rotation effect can be effectively utilized to correct dimensional shrinkage in injection-molded components. Moreover, simulation analysis was further applied to compare fiber orientation between the BR and NBR systems. The results revealed that the melt rotation effect had a greater impact on fiber orientation in the NBR system. Specifically, the fiber orientation tensor in the flow direction ( $A_{11}$ ) exhibited an increasing trend, whereas the orientation tensors in both the transverse direction ( $A_{22}$ ) and thickness direction ( $A_{33}$ ) showed decreasing trends. These results suggest that the melt rotation effect induces changes in the flow field, which weaken the flow–fiber coupling effect, thereby altering fiber orientation and subsequently reducing the asymmetric shrinkage in the transverse direction of the molded parts.

**Keywords:** Injection molding, Fiber-reinforced plastics (FRP), Fiber orientation, Melt rotation effect, CAE simulation analysis

## 1. 前言

由於地球暖化問題日益嚴峻，溫室氣體的排放被視為導致地球暖化的主要因素之一。根據美國環保署近年的調查顯示，燃燒化石燃料的交通運輸工具是溫室氣體排放的重要來源之一[1-2]。為了緩解這一問題，過去幾年來許多國家積極推動以複合材料為主之汽車輕量化技術，希望藉由減輕汽車總重量，提升行駛效能並降低排放，其中，纖維排向已被證實可提升產品機械強度且與產品的幾何收縮變化有一定的關係，但是纖維排向如何調整，至今仍不易[3-4]。另外，Beaumont 等人[5-6]透過引導熔膠在射出成型之流道運行中進行適當地翻轉，可以改變熔膠在流場中之溫度分佈，進而改變熔膠與成品品質。此等現象也經其他專家透過學理得到驗證[7-8]。雖然熔膠翻轉(melt rotation)已被證實可改變流場，但是能否用來改變纖維排向，至今仍未明瞭。因此，本研究一方面利用 CAE 模擬分析(Moldex3D 分析軟體)探討熔膠翻轉如何影響纖維排向變化，再進一步討論纖維排向變化對產品幾何尺寸收縮變化之關聯性，另一方面，也應用實際射出成型系統進行研究，透過模擬分析與實驗研究深入探討熔膠翻轉之效應。

## 2. 數值理論分析

在本研究中數值模擬分析軟體使用 Moldex3D 模擬分析軟體，假設其材料為可壓縮牛頓流體。對塑料在射出成型製程中所產生之三維流動行為與變化，以下列主控方程式(Governing Equation)之數學模型進行表示：

### 2.1 高分子熔膠流場模型

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u} + \tau) = -\nabla p + \rho g \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

## 2.2 纖維張量模型

再者，針對纖維排向張量預測，本研究採用Tseng等人於2013年所提出之纖維排向模型，結合Jeffery之流體力學(HD)模型、以及iARD model、RPR model，即為iARD-RPR模型，此模型主要是從Tucker等人長纖維模型修改而成，詳細內容請參閱文獻[9-10]。

## 2.3 描述流動與纖維耦合作用之黏度模型

再者，此處將利用由Tseng與Favaloro[10]所提出之修正型 IISO 黏度模型來分析及預測流動與纖維耦合作用，此等數學模型已經引入於 Moldex3D 軟體中，該程序當進行射出成型模擬時，將利用 3D 有限體積法計算出流動場及纖維排向分佈，初期速度場及纖維排向將被計算出來，接著此等資料將用來推估 IISO 黏度，再利用此等黏度進行速度場及纖維排向之計算，直到收斂結果為止，詳細過程請參閱參考文獻[10]。至於修正型 IISO 黏度模型如下：

$$\eta^{IISO} = (1 + R_T K_S) \eta_S \quad (4)$$

$$R_T(\dot{\gamma}) = \frac{R_T^0}{1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_C)^2} \quad (5)$$

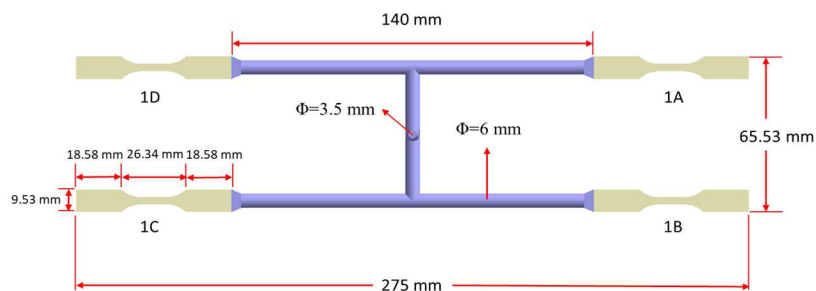
$$K_S = \frac{\mathbf{D} : \mathbf{A}_4 : \mathbf{D}}{2\mathbf{D} : \mathbf{D}} \quad (6)$$

其中  $\eta_S$  為含纖維高分子之非線性牛頓黏度； $R_T$  為Trouton 比率參數； $R_T^0$  為 $R_T$ 之初始值； $K_S$  為特有參數； $\dot{\gamma}_C$  為臨界剪切應變(1/s)。

## 3. 研究之模型與資訊

### 3.1 模擬分析及系統相關資訊

本研究所採用之產品與流道幾何模型及其相關尺寸，如圖 1 所示，其中(a)為一模四穴平衡流道(BR, Balanced Runner)系統，(b)為一模四穴 45 度熔膠翻轉不平衡流道(NBR, Non-balanced Runner)系統，主流道與次流道直徑皆為 6 mm。再者，於不平衡流道系統中設計了一組熔膠翻轉流道裝置，其設置位於 1C 產品之次流道上，該翻轉流道之幾何尺寸包括長度 20 mm、高度 10 mm，如圖 1(c)所示，主要用以調控熔膠於不平衡流道內之流動行為。此外，每個系統內皆含有 ASTM D638 Type V 標準試片，其標準試片產品尺寸為 63.5 mm × 9.53 mm × 3.5 mm，如圖 1(d)所示。另外，標準試片根據不同流場分成兩個區域，靠近澆口區域(NGR)及充填結束區域(EFR)。再者，所使用之材料為聚丙烯(PP)及含有 30 wt%纖維的聚丙烯(30SFPP)，型號分別為 Globalene ST868M 及 SF7351，材料由 LCY Chemical 公司提供。至於射出成型製程之操作條件如下：填充時間為 0.14 s；保壓時間為 5 s；冷卻時間為 30 s；料溫為 220 °C；模具溫度為 25 °C；保壓壓力為 800 bar。再者，為因應後續射出品之巨觀幾何尺寸變化，我們將流動方向之邊長(x-方向)定義為上邊( $Lx_U$ )，下邊( $Lx_D$ )；垂直接流動方向之邊長(y-方向)定義為左邊( $Ly_L$ )，右邊( $Ly_R$ )；厚度方向之邊長(z-方向)定義為左邊( $Lz_L$ )，右邊( $Lz_R$ )，如圖 1(e)所示。另外，熔膠纖維排向張量定義， $A_{11}$  為平行流動方向， $A_{22}$  為垂直接流動方向， $A_{33}$  為厚度方向。



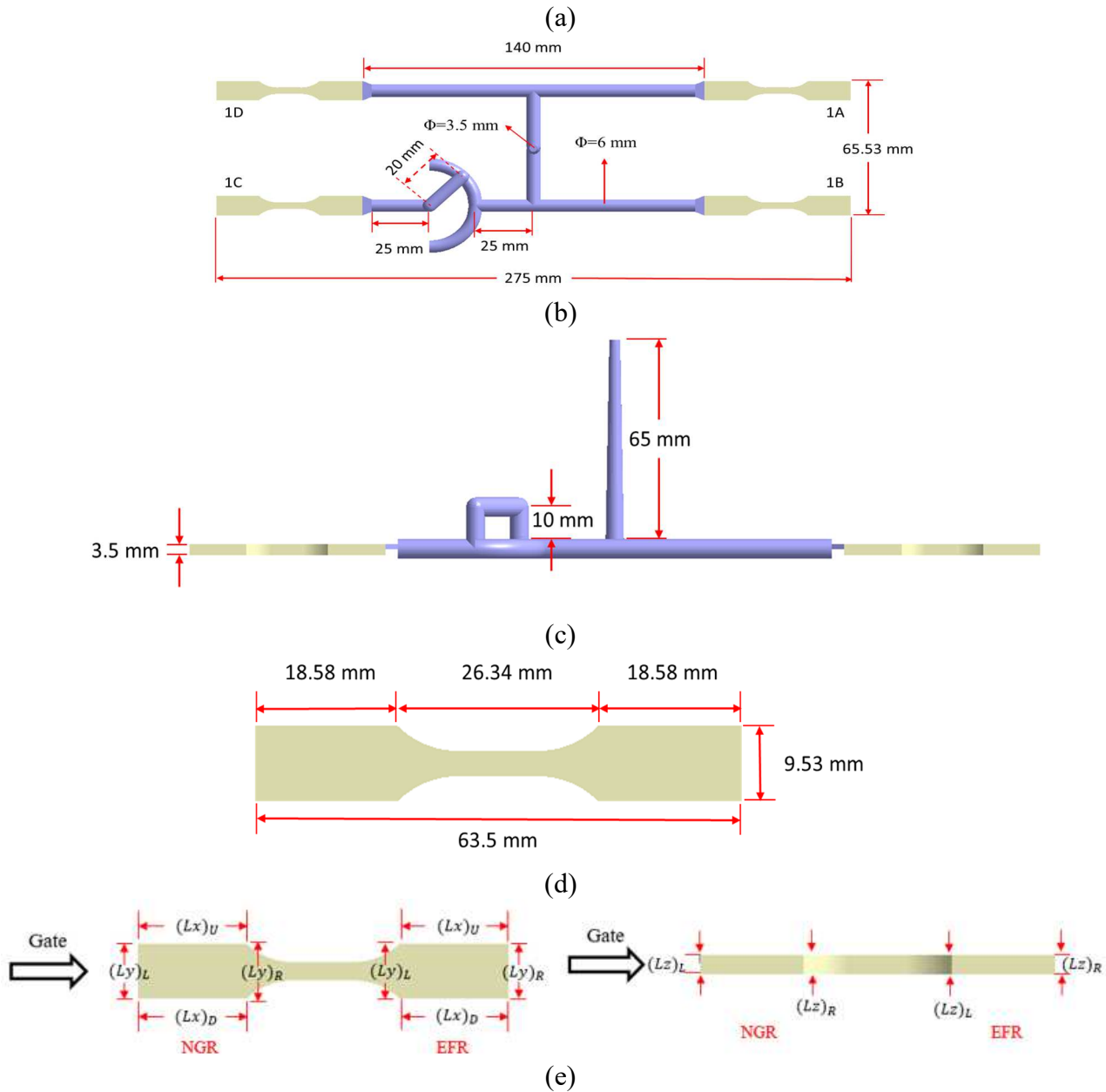


圖 1. 模穴及流道系統之幾何尺寸: (a) BR 平衡系統, (b)、(c) NBR 不平衡度系統, (d) 試片尺寸, (e) 成品各邊長定義

### 3.2 實驗系統及相關資料

為進行實務探索與驗證模擬分析結果之正確性，我們也建構實際射出系統，其實驗機台系統為Arburg 420C-1000-350，如圖2所示，其模具系統和模擬系統相同，如圖1所示。



圖2. 實際實驗射出機台 Arburg 420C 1000-350

## 4. 結果與討論

### 4.1 短射實驗

首先透過短射實驗瞭解熔膠流動行為，圖 3(a)為 BR 系統流場短射結果，從熔膠充填 70% 至 89%，再到 100%，可以發現模擬分析與實驗之流動現象相當一致。另外，圖 3(b)為 NBR 系統流場短射結果，明顯看出模擬分析與實驗之流動現象相當吻合。

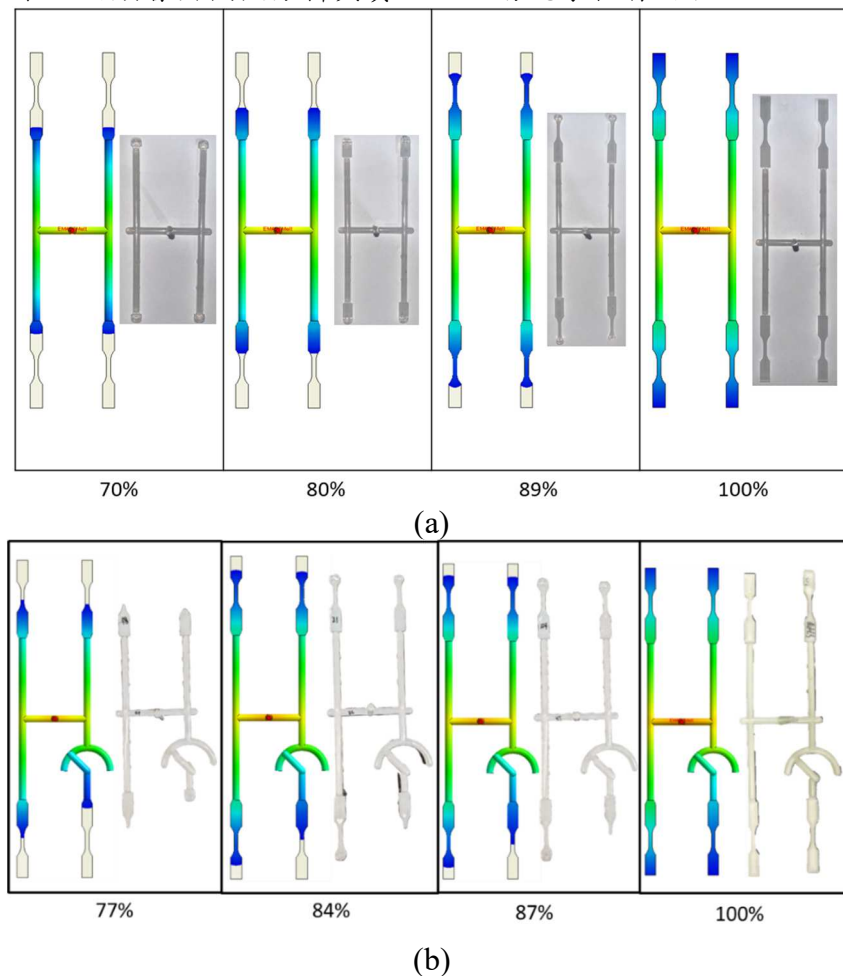


圖 3. 模擬分析與實驗短射實驗: (a) BR 系統，(b) 45-NBR 系統

### 4.2 射出成品巨觀幾何尺寸變化預測與驗證

#### 4.2.1 不同射出成品尺寸收縮變形探討

此處我們將模擬與實驗成品的外在幾何尺寸收縮進行對比，首先，圖 4(a)顯示兩個流道系統在 EFR 區域在  $L_x$  (流動)方向之模擬分析與實驗成品之尺寸收縮量值比較，可以發現兩個系統中 $(L_x)_D$ 與 $(L_x)_U$ 數值都相近。另外，模擬分析與實驗結果趨勢相似，不過兩者數值差異明顯。再者，圖 4(b)顯示兩個流道系統在 EFR 區域在  $L_y$  (垂流)方向之模擬分析與實驗成品之尺寸收縮量值比較，可以發現兩個系統中上游區之 $(L_y)_L$ 都小於下游區之 $(L_y)_R$ ，表示都有明顯的流動-纖維耦合現象所引導。另外，不論模擬分析與實驗結果都顯示熔膠翻轉後，在  $L_y$  方向之收縮都有明顯變小，模擬分析與實驗結果趨勢相當一致。最後，圖 4(c)顯示兩個流道系統在 EFR 區域在  $L_z$  (厚度)方向之模擬分析與實驗成品之尺寸收縮量值比較，可以發

現不論上游區之 $(Lz)_L$ 或 $(Lz)_R$ ，NBR 系統收縮量值都小於 BR 系統，顯示熔膠翻轉可以改變射出成品幾何收縮變形。

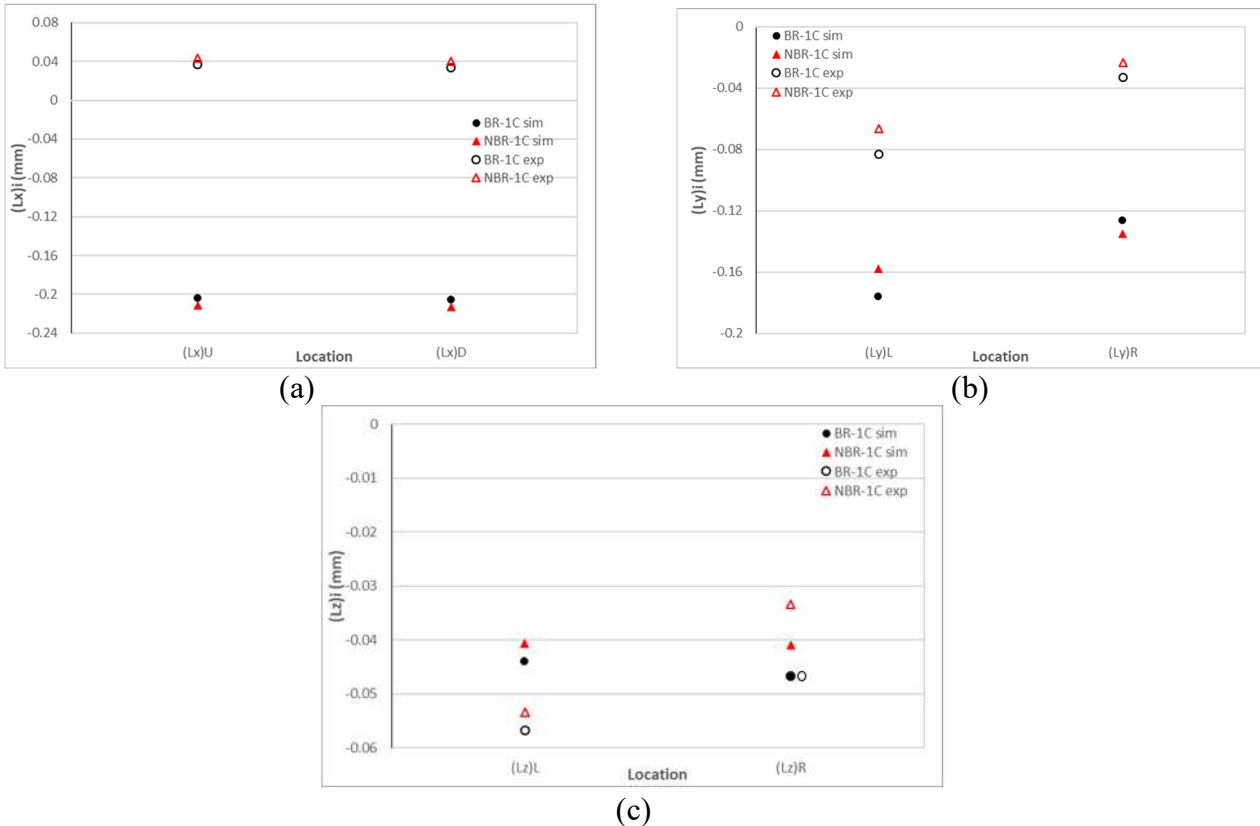


圖 4. 模擬分析與實際射出成品在不同方位之絕對尺寸變化：(a) Lx (流動)方向; (b) Ly (垂直流動)方向; (c) Lz (厚度)方向

#### 4.2.2 熔膠翻轉效應引導射出成品尺寸變化探索

為探索熔膠翻轉效應如何影響射出成品之幾何收縮變形，此處定義熔膠翻轉效應引導之成品收縮變化，如下：

$$\Delta(L_k)_j = (L_k)_{j,NBR} - (L_k)_{j,BR} \quad (7)$$

其中 k 為 x, y, z 等方位；j 分別為 L 及 R，代表不同位置之尺寸。

圖 5 為因熔膠翻轉引發射出成品在不同方位之模擬分析與實際尺寸變化結果，其中圖 5(a) 顯示不論模擬分析與實驗之 $(Lx)_D$ 及 $(Lx)_U$ 量值都非常相近，表示熔膠翻轉對流動方向之上下邊影響不大。再者，圖 5(b) 模擬分析結果顯示熔膠翻轉對垂直接流動方向在上游區 $(Ly)_L$ 變化遠大於下游區 $(Ly)_R$ 變化，此項作動可有效改善原先流動-纖維耦合(flow-fiber coupling)現象引發之上游區 $(Ly)_L$ 上游收縮遠大於下游區 $(Ly)_R$ 之問題。再比對實驗結果，可以發現變化趨勢與模擬分析結果相當吻合。另外，圖 5(c) 模擬分析結果顯示熔膠翻轉對厚度方向在上游區 $(Lz)_L$ 變化略小於下游區 $(Lz)_R$ 變化，此部分無法改善原先流動-纖維耦合(flow-fiber coupling)現象引發之上游區 $(Lz)_L$ 上游收縮遠大於下游區 $(Lz)_R$ 之問題。從射出成品在不同方位之模擬分析與實際尺寸變化結果得知，熔膠翻轉效應能在垂直接流動方向改善射出成品在上/下游收縮不均之問題。

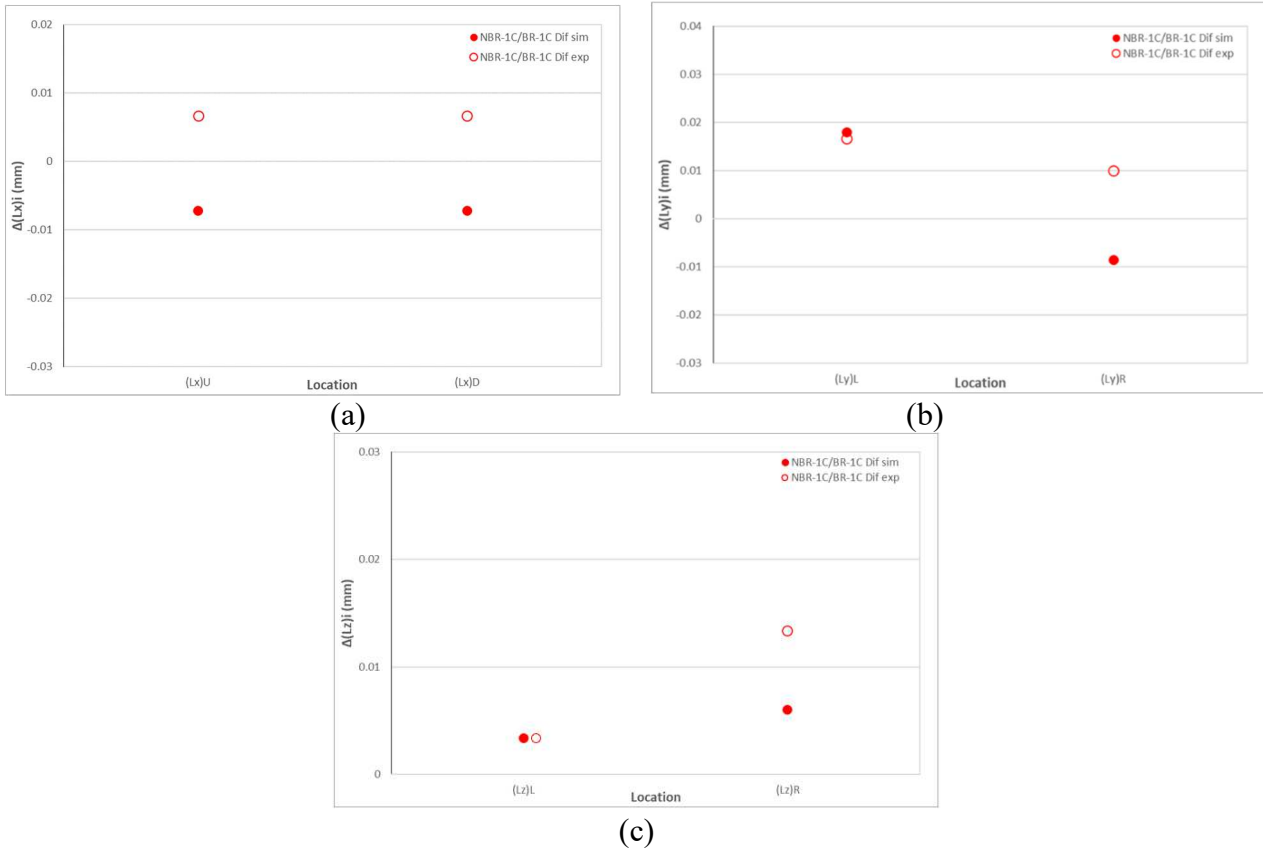


圖 5. 射出成品因熔膠翻轉效應引發在不同方位之模擬分析與實際尺寸變化：(a) Lx (流動)方向; (b) Ly (垂直流動)方向; (c) Lz (厚度)方向

#### 4.3 熔膠翻轉效應引導射出成品外在尺寸變化與內在機理探討

首先為探索熔膠翻轉效應引導射出成品內在機理，將針對 PP 及 30SFPP 材料進行內在微結構特性探討，圖 6 為不同材料之射出成品內在結構斷面 SEM 放大 100 倍之結果，可以明顯看出纖維的加入非常不容易利用破壞性實驗掌握。為此我們改用非破壞性實驗，亦即 3D 電腦斷層掃描與影像處理系統，圖 7 顯示 NBR 與 BR 不同射出成型系統在 EFR 區域纖維排向模擬分析的變化結果，特別從上游 H1 到下游 H5 位置進行檢視。不論在 BR 或是 NBR 系統，纖維在流動方向之排向張量  $A_{11}$  量值都呈現逐步下降；在垂直流動方向之排向張量  $A_{22}$  量值都呈現逐步上升；在厚度方向之排向張量  $A_{33}$  量值則呈現緩步下降再瞬間上升。

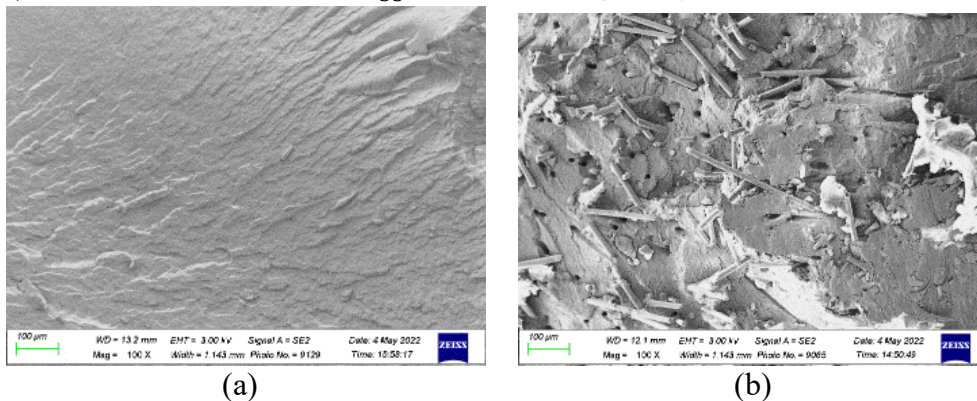


圖 6. 不同材料之射出成品內在結構斷面 SEM (放大 100 倍) 結果: (a) PP 系統; (b) 30SFPP 系統

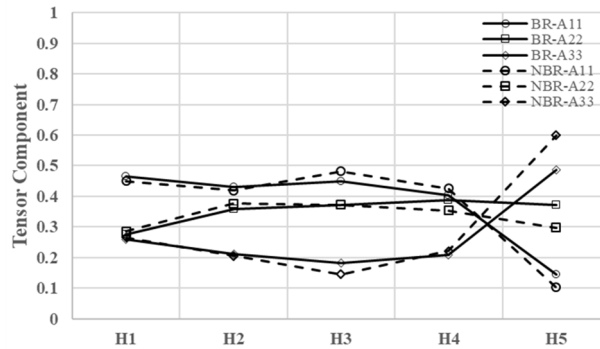


圖 7. 不同射出成型系統在 EFR 區域纖維排向模擬分析的變化結果

為進一步探討熔膠翻轉效應如何影響射出成品之內在纖維排向變化，此處定義熔膠翻轉效應引導之纖維排向變化，如下：

$$\Delta A_{ii} = (A_{ii})_{NBR} - (A_{ii})_{BR} \quad (8)$$

其中  $i$  為 1 到 3，代表不同之  $x, y, z$  方位

圖 8(a)顯示因熔膠翻轉效應引發在 EFR 區域(從上游 H1 至下游 H5)纖維排向在  $L_x$ (流動)方向之變化，其結果為逐漸變大，但在最後一段瞬間變小。圖 8(b)則顯示射出成品熔膠翻轉效應引發在  $L_x$ (流動)方向之變化，因都順著流動方向，上/下邊並沒有太明顯變化。再者，圖 9(a)顯示因熔膠翻轉效應引發纖維排向在  $L_y$ (垂直流動)方向之變化逐漸變小。此時，圖 9(b)則顯示射出成品熔膠翻轉效應引發在  $L_y$  方向之變化，結果顯示熔膠翻轉對垂直流動方向在上游區  $(L_y)_L$  變化遠大於下游區  $(L_y)_R$  變化，此項變化之主因可以確認來自於當熔膠翻轉引導纖維排向在垂直流動方向逐漸減少，因此逐漸克服因原先流動-纖維耦合(flow-fiber coupling)現象引發之上游區  $(L_y)_L$  上游收縮遠大於下游區  $(L_y)_R$  之問題。另外，圖 10(a)顯示因熔膠翻轉效應引發纖維排向在  $L_z$ (厚度)方向之變化，其結果為逐漸變大。此時，圖 10(b)則顯示射出成品熔膠翻轉效應引發在  $L_z$  方向之變化，結果顯示熔膠翻轉對厚度方向在上游區  $(L_z)_L$  變化小於下游區  $(L_z)_R$  變化，此項變化來自於當熔膠翻轉引導纖維排向在厚度方向逐漸增加，因此稍微加大原先流動-纖維耦合(flow-fiber coupling)現象引發之上游區  $(L_z)_L$  上游收縮遠大於下游區  $(L_z)_R$  之問題。

再者，針對熔膠翻轉效應對熔膠流動-纖維耦合效應引發不對稱收縮變化之量化結果可以從圖 9 獲得。圖 9(a)顯示熔膠翻轉 45 度後，模擬分析之纖維排向  $A_{22}$  之差異變化(利用  $H_5-H_1$ )會從(0.096)變為 (0.012)，改變率為 87.5%；對應之垂直流動方向尺寸不對稱性變化會從 0.049 mm 變為 0.023 mm，改善率為 65%。不過，實際尺寸變化會從 0.05 mm 變為 0.043 mm，改善率為 14%。整體而言垂直流動方向尺寸收縮不對稱性有非常具體之改善。根據此項研究結果顯示，實務上我們可以透過射出成型系統所建立之流道翻轉機制，讓熔膠流經該流道翻轉後，內在纖維隨著熔膠內涵之改變導致內在排向明顯變化，最後引導射出成品特別在充填結束瞬間產生之不對稱收縮變形可以適度地改善。

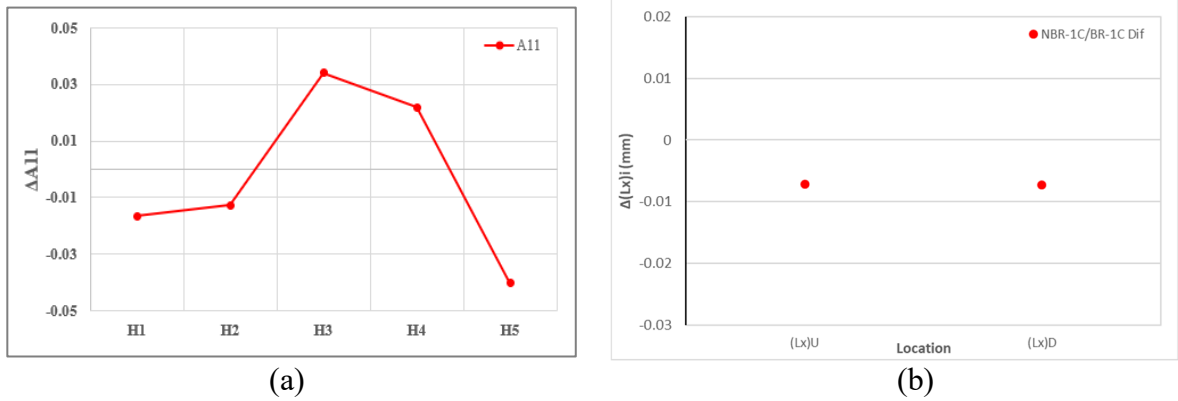


圖 8. 熔膠翻轉效應引發射出成品在 Lx (流動) 方向變化：(a) 纖維排向變化( $\Delta A_{11}$ ); (b) 流動方向尺寸變化。

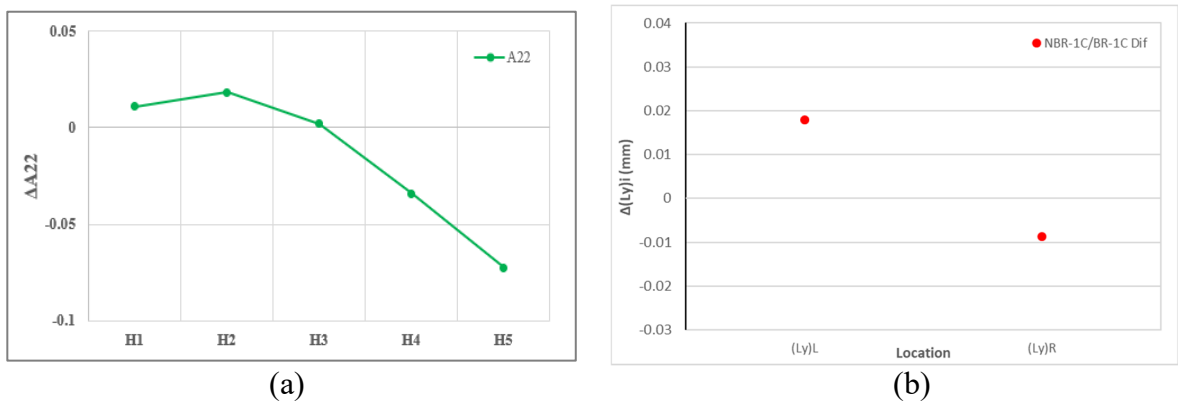


圖 9. 熔膠翻轉效應引發射出成品在 Ly (垂直接流動) 方向變化：(a) 纖維排向變化( $\Delta A_{22}$ ); (b) 垂直接流動方向尺寸變化。

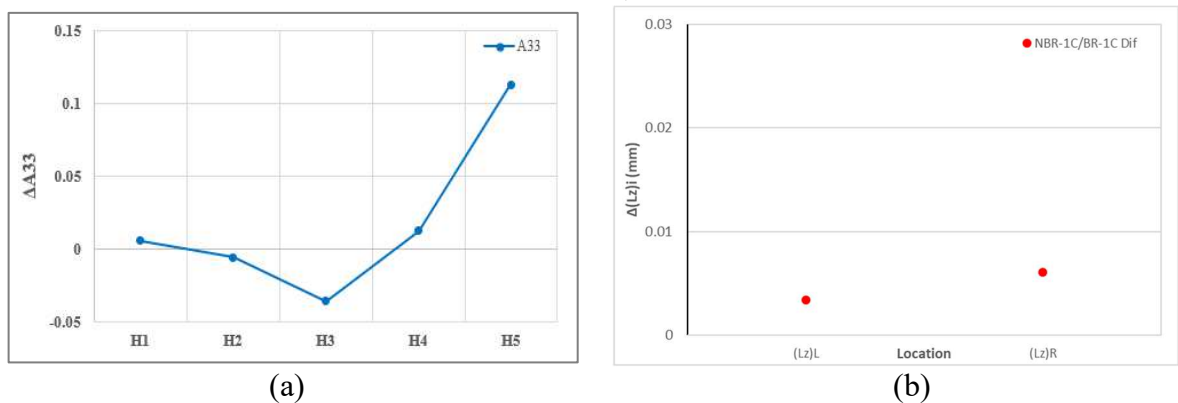


圖 10. 熔膠翻轉效應引發射出成品在 Lz (厚度) 方向變化：(a) 纖維排向變化( $\Delta A_{33}$ ); (b) 厚度方向尺寸變化。

## 5. 結論

本研究利用熔膠翻轉效應引導射出熔膠材料內在纖維排向產生變化，進而影響成品之幾何收縮變形結果，具體成果如下：

1. 對比於平衡流道系統(BR)，利用熔膠翻轉效應作用下，射出成品在 Ly(垂直接流動)及 Lz(厚度方向)方向收縮明顯變小，證明熔膠翻轉效應具有改變射出成品效果。
2. 熔膠翻轉效應能引發纖維排向在垂直接流動方向之變化逐漸變小，進而使上游區(Ly)<sub>L</sub>變化遠大於下游區(Ly)<sub>R</sub>變化，此項作動可有效改善原先流動-纖維耦合(flow-fiber coupling)現



象引發之上游區 $(Ly)_L$ 上游收縮遠大於下游區 $(Ly)_R$ 之問題。

3. 然而，熔膠翻轉效應也能引發纖維排向在厚度方向之變化逐漸變大，進而使上游區 $(Lz)_L$ 變化遠大於下游區 $(Lz)_R$ 變化，此項作動會稍微加大成品在厚度方向左右不對稱之問題。
4. 本研究有效建立射出成品微觀纖維排向特性與巨觀幾何收縮特性，可具體協助產學界對複合材料射出之內在機理有更深入的認識。

## 6. 誌謝

本文作者非常感謝國科會部分經費之支持(計畫編號：NSTC 113-2221-E-032-003-)。

## 7. 參考文獻

1. CO2 emissions, Our world in data, <https://ourworldindata.org/co2-emissions>, accessed: 2025, 02, 20
2. Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H., Basri, M.H.M., Sharudin, H., Hemdi, A.R. (2018). Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review, Journal of Mechanical Manufacturing, 1, 144-154.
3. U. S. Department of Energy report, Materials 2018 annual progress report (2018), Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
4. Huang, C.-T., Wang, J.-T., Lai, C. -H., Hwang, S.-J., Huang, P.-W., Peng, H.S. (2023) International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 10, 1039-1060.
5. Beaumont, J.P.; Young, J.H. (1999) Mold filling imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems, J. Reinf. Plast. Compos. 18, 572–59.
6. Beaumont, J.P. (2004) Runner and Gating Design Handbook, 2nd ed., Hanser: Munich, Germany.
7. Chiang, G.; Chien, J.; Hsu, D.; Tsai, V.; Yang, A. (2005) True 3D CAE visualization of filling imbalance in geometry-balanced runners, SPE Annual Tech Meeting (ANTEC2005), Boston, MA, USA, May 2005; pp. 55–59.
8. Wilczyński, K.; Narowski, P. (2020) A Strategy for Problem Solving of Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds, Polymers 2020, 12, 805.
9. Tseng, H.-C., Chang, R.-Y., & Hsu, C.-H., (2013). Journal of Rheology, 57(6), 1597-1631.
10. Phelps, J.H., Tucker, C.L., III. (2009). Non-Newton. Fluid Mech. 56, 165–176.
11. Hsieh, Fang-Lin., Chen, Chuan-Tsen., Hwang Shyh-Shin., Hwang Sheng-Jye., Huang Po-Wei., Peng Hsin-Shu., Jien Ming-Yuan., Huang Chao-Tsai. (2024). Polymers, 12, 1279.