

# 探索共射成型製程特殊芯-皮-芯結構形成與影響因子效應 Study on the Formation of the Special Core-skin-core Structure and the Effects of the Influencing Factors in Co-injection Molding Process

<u>吴冠呈1</u>, 饒又禔<sup>1</sup>, 柯冠瑜<sup>1</sup>, 黃招財<sup>1\*</sup>, 徐志忠<sup>2</sup>,許嘉翔<sup>2</sup>, 張榮語<sup>2</sup>, 曾世昌<sup>3</sup>, 陳立基<sup>4</sup> <sup>1</sup>淡江大學化學工程與材料工程學系 <sup>2</sup>科盛科技股份有限公司研發部 <sup>3</sup>國立雲林科技大學機械工程學系 4 工業技術研究院材化所 E-mail: cthuang@mail.tku.edu.tw

### 摘要

共射成型製程已經廣泛地應用於我們日常生活用品、汽車零組件之開發與生產,甚至可利用 此製程將回收料當芯層/新料當皮層,構成循環經濟新世代產品。然而,此等製程最主要挑戰 之一是如何準確預測皮/芯界面形態與其變化,並能有效對其進行適當調控,尤其是在皮層被 芯層材料吹穿現象發生後,整體共射流場變得異常不穩定,構成之產品常被視為不良品,因 此較少研究者專研。為此,在本文中,我們利用 CAE 模擬分析(Moldex3D)方法,針對 ASTM D638 TYPE V 系統,應用聚丙烯(簡稱 PP)及含 30%短玻纖之聚丙烯(簡稱 30SFPP)進行共射成 型之內在機理探討,特別是著重於皮層吹穿現象發生後,產生非常特殊的芯-皮-芯結構 (core-skin-core, 簡稱 CSC 結構)。明確而言,當皮/芯比例調整適當時(例如:皮/芯比例為 30/70),可以在 30SFPP/30SFPP 共射成品的中心截面出現 CSC 結構。另外,當皮/芯比例 和操作條件固定時,採用多種不同材料組合(包括 30SFPP/30SFPP; PP/PP; 30SFPP/PP; PP/30SFPP 體系),構成之 CSC 結構的形貌都非常相近。再者,我們也嘗試探討不同操作條件 變化,包括:不同充填流率、料温、模温,探索對 CSC 結構之影響,結果顯示在各種不同操 作條件下,CSC 結構並沒有明顯變化。接著,我們利用光學法進行剖析與觀察,從實際成品 之中心截面清楚地觀察到 CSC 結構,實驗結果與模擬分析相當一致。再者,我們也進一步應 用電腦斷層掃描進行共射成品內在 CSC 之三維結構之驗證,結果顯示實驗觀察與模擬分析預 測之形態相當吻合,此等結果切確證明芯-皮-芯(CSC)結構之存在。

**關鍵詞:**共射成型,CAE模擬分析,芯-皮-芯(core-skin-core, CSC)結構,皮層吹穿現象,電 腦斷層掃描

## Abstract

The co-injection molding process has been widely used in the development of our daily necessities and auto parts. This process can use recycled materials as the core layer and virgin materials as the skin layer to form a new generation of circular economy products. However, one of the main challenges in this process is how to accurately predict the skin/core interface morphology, and how to effectively regulate it properly. Especially after the skin layer is break-through by the core layer material, the overall co-injection flow field becomes extremely unstable, and the resulting products are often regarded as defected. Therefore, in this paper, we use the CAE simulation method (based on Moldex3D) to apply polypropylene (referred to as PP) and polypropylene containing 30% short glass fibers (referred to as 30SFPP) in co-injection molding process to make the ASTM D638 TYPE V system. Specifically, we have tried to investigate the internal mechanism to cause the skin breakthrough phenomenon, and discovered a very special core-skin-core structure (referred to as CSC



structure). Practically, when the skin/core ratio is properly adjusted (says skin/core ratio of 30/70), a CSC structure can appear in the central section of the 30SFPP/30SFPP co-injected part. In addition, when the skin/core ratio and operating conditions are fixed, the morphology of the CSC structures formed by using a variety of different material combinations (including 30SFPP/30SFPP; PP/PP; 30SFPP/PP; PP/30SFPP systems) are very similar. Furthermore, even with the different operating conditions, including: different filling flow rate, material temperature, and mold temperature, the results showed that the CSC structure did not change significantly. Moreover, to catch the internal morphology of a CSC structure, both optical method and m-CT scan method have been utilized. The experimental observations are quite consistent with that of the simulation analysis. These results clearly proved the core-skin-core (CSC) structure existence.

Keywords: Co-injection molding, CAE simulation analysis, core-skin-core (CSC) structure, skin break-through phenomenon, computerized tomography

# 1. 前言

近年來塑膠材料被大量使用後,形成之廢棄物問題已對我們環境產生巨大的衝擊。為了 減輕這種巨大的衝擊並因應塑膠使用之循環經濟考量,特別是針對傳統塑膠或是含纖複合材 料之固態廢棄物之處理,共射成型製程或許是一種可行之良好方案之一[1]。過去幾十年來, 共射成型最大優點是組合不同材料體成型,降低成本並提高生產效率,或是將回收料當芯層, 純料當皮層製作成新的共射產品,開發可循環再利用之產品。然而,採用此等製程進行新產 品開發,並非每次都能順利獲得優良產品,其中主要挑戰之一是製程中芯層滲透的形態很難 準確預測,故不易適當地掌控。特別是想要了解芯層材料的形態如何變化,需要準確監測芯 層材料的在共射系統內推進狀況,但實際製程中許多參數都會影響芯層材料的滲透狀況,包 括皮/芯層材料組合與比例、產品與模具設計、操作條件等。Seldén [2] 研究了影響共射成 型製程的關鍵參數,包括皮層和芯層溫度以及芯層含量,他發現影響表皮/芯層分佈的最重要 參數是射出速度、芯層溫度和芯層含量。另外,許多先前的研究者 [3-5] 討論了內部材料分 佈、工藝條件和材料特性之間的關係,其中,材料的皮/芯比例決定了皮層吹穿的位置,材料 黏度和填充率影響芯層材料分佈的均匀性。 雖然操作參數不容易掌控,但與傳統射出產品相 比,共射成型可用於提高射出零組件的機械性能[6]。還可用於增強微細發泡射出成品的機械 性能 [7];或是藉由純生物相容性聚合物或聚合物共混物之使用 [8-9] 來製造環保或新型 綠色複合材料。另外,由於共射過程的複雜動態行為一直不易透過實驗觀察到,因此許多研 究人員試圖利用數值模擬分析法來探討共射成品內在界面的演化和機制 [10-14]。Ilinca 和 Hetu [10] 利用有限元方法來預測氣體輔助和共射成型中熔膠的流動行為。Liu 等人[11] 則 利用廣義 Na-vier-Stokes 方程的 3D 數值方案來揣測共射成型參數變化的填充行為。之後, 孫等人[12] 利用數值模擬熔膠在螺旋共射模具系統之行為,成功地驗證了文獻[3] 之皮層 吹穿的實驗概念。 Kim 和 Isayev [13] 提出了一種混合有限元/有限差分/控制體積法的數 值方法用於估計共射成型中流動引起的殘餘應力和雙折射。 最近,He 等人 [14] 利用 CAE 模擬和實驗研究探討共射系統中皮/芯層的界面,他們試圖根據模擬的剪切率結果來定義皮/ 芯層的動態黏度比,他們並且聲稱透過調整動態黏度比,共射成型成品的皮/芯界面可妥善地 被掌控。然而,時至今日這種共射系統內皮/芯層界面形態變化常隨皮/芯比例變化而變化,特 別是吹穿現象之成因,以及如何量化仍未完成掌握。整體而言,在以往的文獻中,當皮層材 料發生吹穿現象後,一般學者都認為芯層材料將接管皮層材料完全佔據後段流場區域。然而, 在某些情況下,皮層材料仍會進一步與芯層材料競爭,從而生成一些特殊結構。為了探索此

等特殊結構,本文的其餘部分安排如下:第2節將描述模型和相關資訊,並從虛擬系統與實際實驗設備同步探討。之後,結果和討論在第3節中。第4節將作為結論。

## 2. 模型與相關資訊

#### 2.1 虛擬模型系統與相關資訊

產品與流道的幾何模型及其相關尺寸如圖 1 所示,主要是以 ASTM D638 Type V 標準試片為主,其產品尺寸為 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,基本流動行為測試的操作條件如下:填充時間為 0.3 s;皮層和芯層的充填流速均為  $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ;皮層 和芯層的料溫度均為  $230^{\circ}\text{C}$ ;模具溫度為  $35^{\circ}\text{C}$ ;皮/芯層入料切換點在總體積的 60%;皮/芯比例設定從  $90/10 \cong 10/90$ 。



圖 1.產品與流道的幾何模型和尺寸。

#### 2.2 實驗模型及相關資料

為了驗證模擬分析結果,並且瞭解真實的共射成型機理,我們也同步建構實際共射系統, 如圖 2 所示,其中共射機器為大愛機械有限公司提供TA-4.0ST-2ST-80T系統(見圖 2(a)), 此系統有兩個射出螺桿系統,分別用於製備皮層及芯層材料,每個射出螺桿系統中,螺桿直 徑為28 mm,最大射出量為75克,最大射出量為70 cm³/s;最大射出壓力為1302 kg/cm²,最 大鎖模力為85噸。此外,真實的模具系統和模穴結構,如圖 2(b)所示。此實際產品尺寸 大小與虛擬系統完全。再者,基本流場形態測試、皮/芯比例效應、射速效應、不同材料組合 效應等實際操作條件設定,與2.1節所述相同。

#### 3. 結果和討論

#### 3.1 皮層吹穿現象測試

共射成型產品開發中最關鍵的因素之一是芯層材料滲透形態的掌控。為研究皮/芯層比例如何對皮層材料吹穿位置的影響,首先我們選擇 30SFPP/30SFPP 材料組合,圖 3(a)顯示當皮/芯比例從 90/10 變為 60/40 時,芯層含量越高,芯層滲透距離越長,但都不會發生皮層吹穿現象。然而,當皮/芯層比例為50/50時,吹穿現象開始發生。這意味著芯層材料將從內部區域吹穿皮層材料,再抵達模具末端。再者,當皮/芯層比例由50/50變為10/90時,皮層吹穿的面積增大,最終皮層吹穿的位置也會從靠近模穴末端轉移到模穴澆口位置, 甚至往前推到流道部分。很明顯地,在共射成型中皮層吹穿的位置變化對皮/芯層比例設定 敏感。另外,我們也執行一系列之實驗驗證,如圖3 (b)所示。實驗觀察的趨勢與模擬預測



結果相當吻合,特別是當皮/芯層比例改變成50/50 時,可明確觀察到吹穿現象開始發生。 另外,當芯層比例從 50 持續增加到 90 時,皮層吹穿的面積增加,甚至芯層材料試圖包覆 皮層材料。



圖 2. (a) 實際共射成型系統,(b) 模座和模穴結構。



圖 3. 充填速度10 cm<sup>3</sup>/s 下,針對30SFPP/30SFPP組合皮/芯層比例從 90/10 到 10/90,皮 /芯層比例時芯層材料滲透行為:(a) 模擬分析結果,(b) 實驗結果

### 3.2 探索並發現芯-皮-芯結構

為了解皮層吹穿現象與其後續之影響,我們進一步透過模擬分析(使用Moldex3D軟體)深 入探索共射成型製程,如圖 4 所示。當皮/芯層比例為 70/30 至 50/50 時,穿過中央截面 的芯層材料滲透呈現圓形圖樣。當皮/芯層比例為 40/60時,樣品之中央截面芯層材料變成方 形。最有趣的是,當芯層比例變為 70% 時,可以觀察到一種特殊的界面結構,此時芯層材料 除了佔有中央區域外,它還會在靠近模具邊界形成一圈芯層材料,形成"芯-皮-芯"結構 (core-skin-core, CSC structure)。之後,當皮/芯層比例改變為20/80至10/90時,仍可觀 察到此種特殊的界面結構仍然存在。特別是針對皮/芯層比例為70/30、50/50、30/70 時樣品 仔細觀察。結果顯示,30/70系統的截面型態由"外芯材料-表皮材料-內芯材料"三層結構組 成,這種特殊的"芯-皮-芯"結構不同於一般未有皮層吹穿現象的皮-芯結構,也不同於一般 推測:當皮層被吹穿後,整體流場皆由芯層材料所佔有。事實上,據筆著多年來在共射領域 的研究經驗,並從過去的文獻來看,這種CSC結構從未被提及和討論過。



圖 4. 芯層材料滲透的形態及其截面觀察結果

#### 3.3 驗證 CSC 結構的出現

為了驗證 CSC 結構的發生,本研究進行多項實驗研究探索,圖 5 顯示 PP/PP 系統皮/ 芯層比例從 90/10 到 10/90 的中心截面之數值模擬分析與實驗觀察的結果比較。具體而言, 當皮/芯層比例為70/30至50/50時,中心區域芯層截面呈現圓形。然而,當皮/芯層比例為 40/60,中心區域芯層截面轉呈矩形。當皮/芯層比例變為 30/70 和 20/80 時,可以從實驗 結果觀察到特殊的 "芯-皮-芯"結構出現。 若再仔細比較,可以確定模擬分析結果和實驗觀 察是相當一致的。



圖 5. PP/PP材料系統: 皮/芯層比例從 90/10 到 10/90 的中心區域芯層截面實驗驗證。

另外,為了進一步研究 CSC 結構的全貌,我們選定皮/芯層比例為 30/70 的 PP/30SFPP 共射成品,利用微電腦斷層掃描 (micro-CT) 技術進行樣品之內部掃描。之後利用 Avizo 軟體進行影像重建與分析,結果如圖 6 所示。具體來說,利用XZ 平面沿中心區域流動方向 的截面圖像(亦即中心截面),也可以明確觀察到特殊的"芯-皮-芯"結構,如圖 6(b)所示。 此部份明確證明特殊的"芯-皮-芯"結構之存在。

4. 結論

在這項研究中,我們利用標準拉伸試片(ASTM D638 TYPE V)做為研究系統進行共射成 型製程之研究,發現特殊之芯-皮-芯(CSC)結構的形成,並得到下列幾項重要結論:對於 30SFPP/30SFPP 系統,當皮/芯層比例為 30/70 時,可以利用光學法從樣品中心區域之截面





進行數值預測和實驗觀察到CSC 結構。再者,當皮/芯比例和操作條件固定時,CSC結構的形成不會因不同之材料組合而改變,此等材料組合包括:30SFPP/30SFPP、PP/PP、30SFPP體系。另外,應用微電腦斷層掃描和影像處理技術之輔助下,CSC 結構以及它的全貌可以完整地被觀察與驗證,此結果證明CSC結構的實際存在。至於目前CSC結構可重複出現與驗證,未來如何引導到應用層面,需要進一步研究。



圖 6. 通過截面觀察對 PP/30SFPP 體系在皮芯比為 30/70 的"芯-皮-芯"結構進行顯微 CT 掃描和圖像分析的 CAE 預測和實驗檢驗,其中心區域沿流動方向的 XZ 平面。

# 5. 參考文獻

- 1. K.; Ragaert, L.; Delva, K.V.; Geem, *Waste Management*, 69, pp 24-58 (2017).
- 2. R.; Seldén, Polymer Engineering Science, 40, pp 1165-1176 (2000).
- 3. D.; Watanabe, U.-S. Ishiaku, T.; Nagaoka, K.; Tomari, H., Hamada, *International Polymer Processing*, 18, pp 398-404 (2003)
- 4. Gomes, M., Martino, D., Pontes, A.J., and Viana, J.C., *Polymer Engineering Science*, 51, pp 2398-2407 (2011).
- 5. S.-P.; Sun, C.-C.; Hsu, C.-T.; Huang, K.-C.; Huang, and S.-C.; Tseng, *SPE ANTEC Tech. Paper*, Paper No. 1258422 (2012).
- 6. Y.; Lu, K.; Jiang, Y.; Liu, Y.; Zhang, and M.; Wang, *Polymer Testing*, 83, 106306, pp 1-11 (2020).
- 7. E.; Suhartono, S.-C.; Chen, K.-H.; Lee, and K.-J.; Wang, <u>International Journal of Plastics Technology</u>, 21, pp 351-369 (2017).
- 8. K.; Zhang, V.; Nagarajan, N.; Zarrinbakhsh, A. K.; Mohanty, and M.; Misra, Macromolecular Materials and Engineering, 299, pp 436-446 (2014).
- 9. M.; Zaverl, O.; Valerio, M.; Misra., and A.; Mohanty, Journal of Applied Polymer Science, 132, 41278 (2015); DOI: 10.1002/APP.41278
- 10. F.; Ilinca and J.-F.; Hetu, Polymer Engineering Science, 43, pp 1415-1427 (2003).
- 11. Q.; Liu, J.; Ouyang, W.; Zhou, X.; Xu, L.; Zhang, *Polymer Engineering Science*, 55, 8, pp 1709-1019 (2015).
- 12. S.-P.; Sun, C.-C.; Hsu, C.-T.; Huang, K.-C. Huang, and S.-C. Tseng, *SPE Technical Papers*, Paper No.1575837, pp 1-5 (2013, Apr).
- 13. N. H.; Kim, A. I.; Isayev, Polymer Engineering and Science, *Polymer Engineering Science*, 55, 1, pp 88-106 (2015).
- 14. W.; He, J.; Yang, Y.; Chen, P.; Liu, C.; Li, M.; X, X.; Niu, X.; Li, *Polymer Testing*, 108, 107510 (2022). https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107510