

長纖維複合材料射出成型塑化參數與塑化特性對 纖維長度變化與流動特性影響之研究

Effects of Molding and Plasticizing Parameters on Fiber Variation and Melt Flowability of Long Glass Fiber Reinforced PP Injection Molding

陳柏智¹、柯奕羽¹、柯宗偉¹、彭信舒^{1,2}、黃柏維^{2*}

黃聖杰³、黃招財⁴、杜俊毅⁵、許暉勳⁵、蘇培鈞⁶

Po-Chih Chen¹, Yi-Yu Ke¹, Tsung-Wei Ke¹, Hsin-Shu Peng^{1,2}, Po-Wei Huang^{2*}, Sheng-Jye Hwang³,
Chao-Tsai Huang⁴, Chun-I Tu⁵, Wei-Hsun Hsu⁵, Pei-Chiun Sue⁶

¹逢甲大學/機械與電腦輔助工程學系

¹ Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, Feng Chia University

²逢甲大學/智慧機械產業發展中心

² Smart Machinery Development Center, Feng Chia University

³國立成功大學/機械工程學系

³ Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University

⁴淡江大學/化學與材料工程學系

⁴ Department of Chemical and Materials Engineering, Tamkang University

⁵全立發機械廠股份有限公司

⁵ Chuan Lih Fa Machinery Works Co. Ltd (CLF)

⁶研發中心/大東樹脂化學股份有限公司

⁶ Research and Development Centers, Great Eastern Resins Industrial Co. Ltd. (GRECO)

*Email: fcuplastic@gmail.com

摘要

近年來，隨著環保、節能的議題發酵，讓輕量化複合材料持續受到重視，透過產品重量的減輕，以降低能耗，特別是在交通運輸方面。添加補強材料(如:玻璃纖維)的塑膠材料不僅可讓產品輕量化，亦能提高其強度與剛性，但在實際應用過程中，其纖維之微結構特性較難以掌握與透視。纖維長度會影響複合材料的機械性質，若複合材料的纖維長度較長，纖維含量也大時，會有比較好的強度與剛度。可是，當含有補強纖維之高分子複合材料，經螺桿塑化與射出成型時所造成纖維斷裂，其產品的結構強度與品質不如預期，原因在於長纖維歷經螺桿運作後，產生的剪切力對纖維斷裂的嚴重性較大。因此，本研究將設計一低壓縮比之塑化螺桿，選用聚丙烯為成型材料，玻璃纖維為補強材料，以長度 25 mm 之纖維長度進行射出成型實驗與探討。由研究結果顯示，纖維會隨著螺桿轉速的提高而長度縮減，原長度 25 mm 的纖維可保留 50% 的長度。而背壓壓力可提高熔膠的混煉性與流動性，藉由背壓壓力的加壓下，其纖維長度的斷裂現象增加，流動阻力相對降低，其流動長度和纖維比重也相對提高。

關鍵詞：長纖維複合材料射出成型、螺桿塑化品質、斷纖分析、流動特性。

Abstract

In recent years, lightweight composite materials have continued to receive attention along with the rise of environmental protection and energy conservation issue, through reducing part weight energy consumption reduction could be achieve, especially in transportation applications. The plastic material with reinforcing materials (such as glass fiber) not only makes the product lighter, but also improves its strength and rigidity. However, the microstructural characteristics of the fiber are difficult to grasp and see through in practical applications. The fiber length affects the mechanical properties of the composite, when the fiber length is long and the fiber content is large, the composite will have better strength and stiffness. However, when a polymer composite material containing reinforcing fibers, the fibers break during screw plasticization and injection molding process, the structural strength and quality of the product will not be as expected. This is because after the screw plasticization process, the shear force causes greater breakage of the long fiber. Therefore, in this study a low-compression plasticizing screw will be design, using polypropylene as the molding material, glass fiber as the reinforcing material, and the injection molding experiment and discussion will be conducted with the fiber length of 25 mm. The results of the study show that the fiber length shrink as the screw speed increases, and the fiber length of 25 mm can retain 50% of the original length. The back pressure can improve the mixing and fluidity of the melt. With the increase of back pressure, the fiber length breakage phenomena increases, the flow resistance decreases relatively, and the flow length and fiber specific weight also increase.

Keywords: *Long Fiber-Composite Injection Molding, Plasticizing Performance, Fiber Breaking Length, Jet-Flow Characteristics.*

1. 前言

汽車結構減重，目前最重要的手法之一就是大量使用複合材料。複合材料具有高強度、高剛性、耐疲勞/腐蝕，並可大規模量產並整合多個零組件一體成型及減震性能良好等一系列獨特優點。複合材料之核心優點在於高強度及高剛性，可以簡單的定義為由兩種或兩種以上不同種類的材料所組成，且具有優異的物理或化學性質及巨觀的材料界面存在，例如：鋼筋混凝土、人體的肌肉加骨骼等。目前高分子複合材料很多是用在需求高強度且質輕之用途(例如：航空工具、交通工具、運動器具)，因此補強是一項非常重要的功能。除了補強的纖維長度很重要外，目前因應複合材料運用於車輛產業，需有能力大量生產，傳統使用熱固性塑膠的生產方式，生產量慢，且有無法再生使用的環保問題，因此以射出成型方式製作工件以達快速大量生產，並注意到環保回收問題是目前複合材料技術發展的最重要趨勢。目前長纖複合材料的射出大多是以預配料的方式達成，雖然進料長度可以很長。但塑化後射入模穴內則剩下的纖維長度常斷成只有 1 mm 左右。最大的問題皆在於纖維在熔融過程中會被螺桿剪斷，使得補強效果大打折扣，而目前依測試結果，纖維長度需在 10 mm 以上才能達到業界的強度、剛度與耐衝擊的需求，才能滿足 95%以上，以連續纖維補強的複合材料性質，也才会有好的剛度與強度之特性，也才能達成輕量化的目標。LFT 是為現有廣義之用詞，意指纖維長度超過 10 mm 和熱塑性材料進行熔融複合所形成[1-2]。與 SFT 塑膠製品中，所保留的最小纖維長度相比，LFT 塑膠製品中，所保留的最小纖維長度較大，因此 LFT 的剛性、強度、衝擊性能與能量吸收率等較高[3-9]。由於複合材料添加纖維後，纖維於基材中的排列與分佈情形會影響裂縫成長情形，因此不同纖維含量、纖維排列與分佈均是影響複合材料機械性質之重要因素之一[10-15]。但在於實際應用方面，纖維之微結構特性不易透視與掌握。因此，當含有纖維之強化塑膠，在歷經螺桿塑化製作成產品後，一般期待的強化效果，常與實情有明顯落差。其中最大之原因是長纖維強化塑膠在歷經螺桿運作後，非常容易斷裂，此

缺陷將讓材料之強度需求大幅降低，射出成型過程中，螺桿運作對纖維的斷裂，該斷裂之纖維長度與成型特性的變化，皆是難以預測[16-20]。

2. 研究方法與步驟

2.1 螺桿分析與建置

2.1.1 螺桿設計

透過傳統 2D 設計圖面資訊與協助，進行射出機螺桿結構 3D 繪製；同時，利用專業 3D 繪圖軟體自動檢查射出螺桿結構組立後有無干涉情形，並將射出機相關部件進行分類與材料物性資料建立並整合在射出機材料物性資料庫中，用以提升傳統 2D 圖面設計之自由度，為朝向射出機台 3D 圖形模組化設計邁進，如圖 1 為射出機射出螺桿之設計參數規劃。

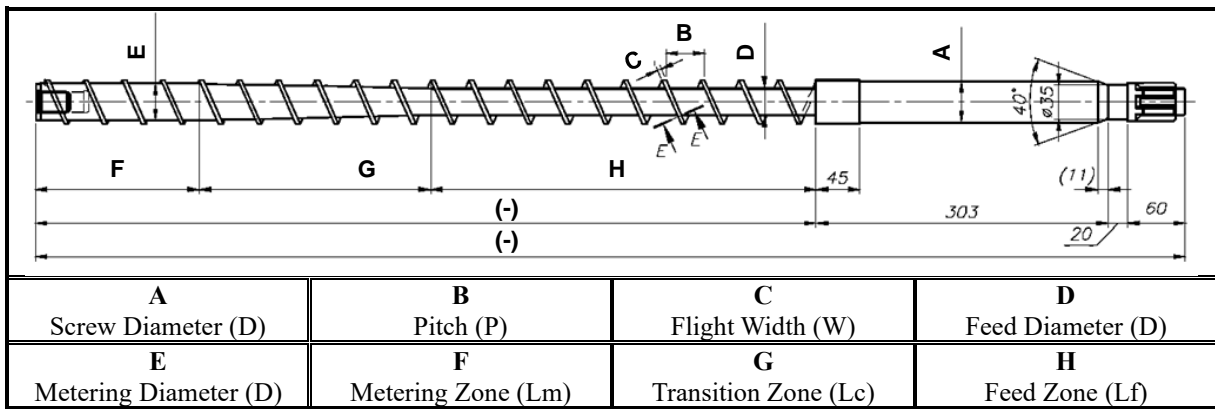


圖 1 射出螺桿之設計參數規劃

2.1.2 分析設定

Moldex3D-ScrewPlus 可提供與評估螺桿作動行為，以及料管內部的壓力與溫度之變化；另一方面，可藉由參數方面的設定與幾何結構的設計，觀察到其設定與設計在不同材料塑化時，所產生的剪切效應。因此，本次分析將以聚丙烯為成型材料，補強材料為玻璃纖維，設定其纖維長度為 12mm(因現有材料庫所得之複合材料，其纖維長度最高設定為 12mm 以下，故分析以長度 12mm 的纖維進行分析)。圖 2 為 Moldex3D-ScrewPlus 螺桿分析介面與設定方式。透過 ScrewPlus 探討不同螺桿幾何設計下，其材料之塑化情形，以利實際開發之要點。

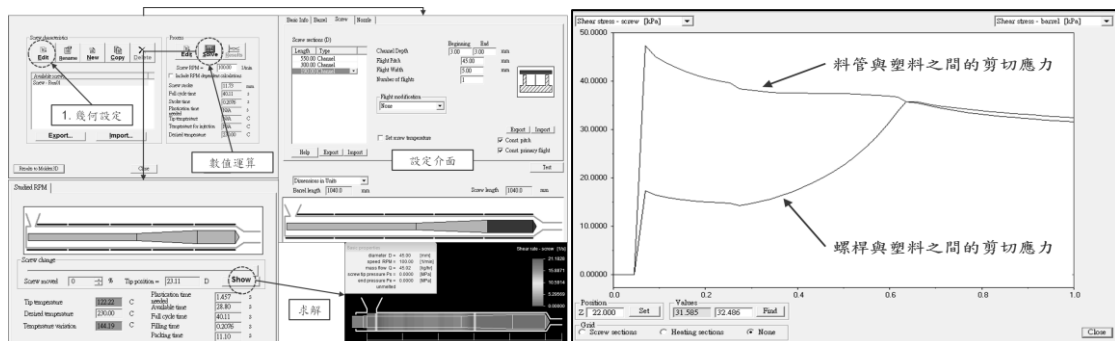


圖 2: 螺桿分析之設定/結果介面

2.2 實驗材料

本研究之成型材料將選用聚丙烯(PP, Polypropylene)，補強材料選用玻璃纖維，纖維長度為 25 mm，纖維含量為 50%，為大東樹脂化學股份有限公司所生產(如圖 3 所示)。其材料特色為具高結晶度，使得單聚合物具有優良的機械性質，包含高剛性、高抗拉強度、耐熱變形性佳，其流動性的良好與高結晶溫度縮短製品成型週期，為射出工藝最為廣泛與比重較輕之塑膠材料。

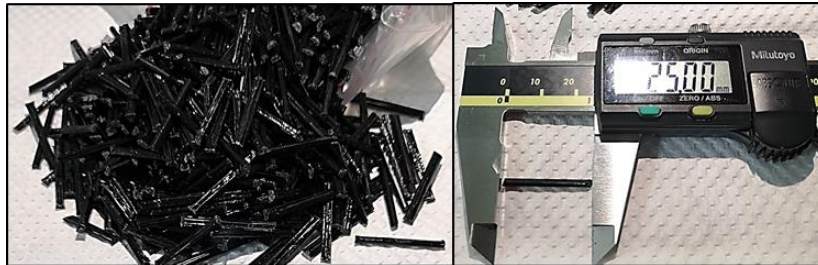


圖 3: 實驗材料(LGF-PP, 50% wt)

2.3 實驗設備與儀器

2.3.1 長纖維複合材料射出成型機

本研究所用之射出成型機為長纖維複合材料專用射出機(全立發機械廠(CLF)生產，型號 180-TX)，如圖 4 所示；將分析結果進行低壓縮比螺桿設計，實際開發並整合；其機制採用三段式設計暨(1)儲料單位、(2)射出推桿與(3)保壓推桿等設計，為保有纖維原有尺寸而設計之特殊機構。

2.3.2 實驗模具

本研究探討長纖維複合材料射出成型塑化參數對纖維斷裂行為、熔膠流動特性與纖維排向變化進行研究，模具採用一模一穴設計之流長比試片(圓形試片設計)，如圖 5 所示。其模具為配合長纖維複合材料射出成型，其澆口設計為一大孔徑，射出機射嘴直接接觸模具模穴內部。



圖 4: 長纖維複合材料專用射出機示意圖

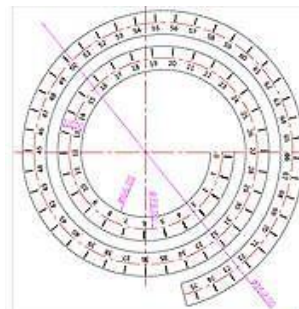


圖 5: 流長比實驗試片設計圖

3. 結果與討論

3.1 低壓縮比螺桿幾何設計之分析與比較

3.1.1 螺桿幾何設計對剪切效應之影響

分析中，以長度 12 mm 的纖維補強聚丙烯進行分析，設定傳統螺桿與低壓縮比螺桿而進行纖維在不同螺桿幾何設計對螺桿與塑料之間的剪切應力變化(如圖 6 所示)。從 CAE 結果發現，塑料隨著螺桿攪動而從進料區推進至計量區之過程，剪切應力有明顯上升的趨勢；另一方面，加深螺桿溝槽之深度，有助於剪切應力之降低，藉由加深螺桿溝槽深度之低壓縮比螺

桿設計，可降低 51.68% 的剪切應力，相對改善塑料與螺桿之間的高剪切之效應。

3.1.2 塑化參數對剪切效應之影響

圖 7 為不同螺桿轉速搭配背壓壓力之變化，對於螺桿與塑料之間的剪切應力變化。從 CAE 結果發現，含纖之塑料在隨著螺桿轉速的提高，相對增加螺桿與塑料之間的剪切應力；另一方面，搭配背壓壓力之下，其剪切應力有相對上升之趨勢。此外，針對剪切應力部分，觀察其應力值之最大值(如圖 8 所示)，從圖中可看出，隨著螺桿轉速的上升，所得低壓縮比螺桿之剪切應力來得比傳統螺桿的低，以螺桿轉速 150 rpm 觀察其剪切應力降低 68.1%；此外，低壓縮比螺桿搭配背壓壓力之下，其剪切應力則會上升 10.1%。藉由 CAE 分析所得之數據與其低壓縮比螺桿設計，實際開發一實驗用射出機台，針對螺桿幾何部分作一觀察與說明：圖 9 為利用螺桿轉速搭配背壓壓力的使用下，其纖維斷裂長度之趨勢變化。從圖中可看出，藉由長纖維塑化機構之三段式柱塞機構射出成型機與低壓縮比螺桿可有效留住纖維之長度；另一方面，在施加背壓壓力之下，纖維會因背壓的混煉下，纖維也會隨之斷裂。

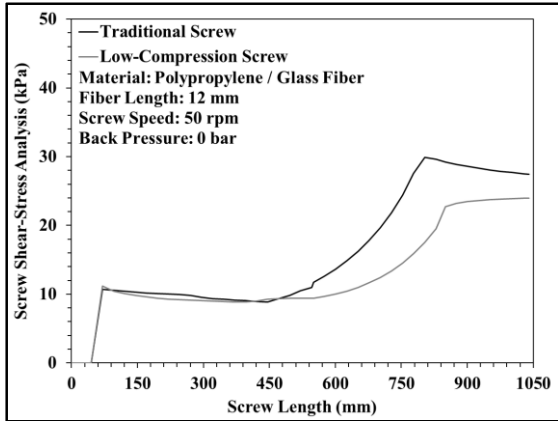


圖 6: 螺桿幾何設計對剪切應力分析之曲線變化圖

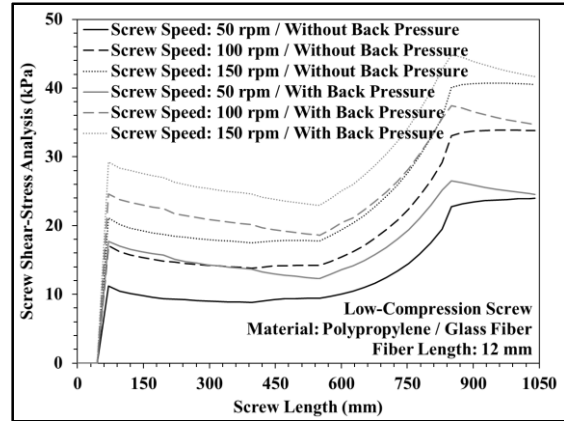


圖 7: 螺桿轉速與背壓壓力對剪切應力分析之曲線變化圖

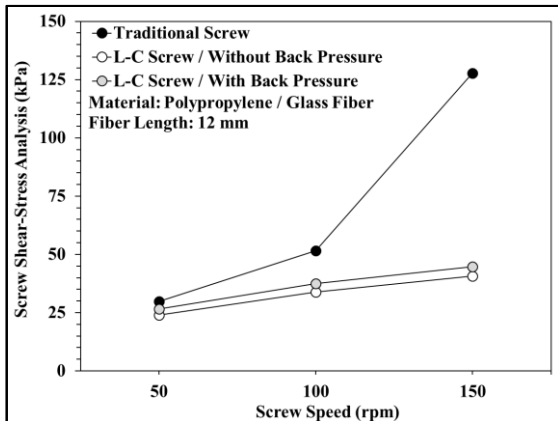


圖 8: 螺桿轉速與背壓壓力對剪切應力分析之趨勢變化圖

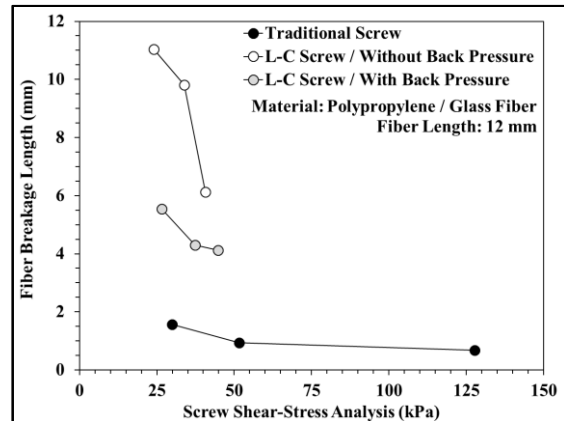


圖 9: 螺桿幾何設計對剪切應力分析與纖維斷裂長度之比對圖

3.2 長纖維複合材料射出之纖維斷裂行為與流動特性之探討

3.2.1 長纖維塑化機構對纖維長度之斷裂影響

藉由圖 9 可得到在三段式柱塞機構之塑化機構射出下，其長度 12 mm 的纖維可保留 50% 以上的纖維斷裂長度。故在後續實驗，將以長度 25 mm 的纖維，探討不同螺桿轉速與背壓壓力的搭配下，其纖維的斷裂長度、流動特性與其含量變化。圖 10 為不同螺桿轉速與背壓壓力設定下，對纖維斷裂之變化趨勢。

從結果發現，隨著螺桿轉速的提高，其剪切率相對越高，使纖維在螺桿塑化過程中造成斷裂情況程度越大，纖維長度也越短；在藉由三段式柱塞機構之塑化機構進行的塑化過程中，纖維在沒有背壓的情況下，保有的纖維長度在 50% 以上，在螺桿轉速 150 rpm 的情況下，纖維長度保有 15 mm 以上(原纖維長度為 25 mm)；而在有背壓壓力之塑化過程中，纖維

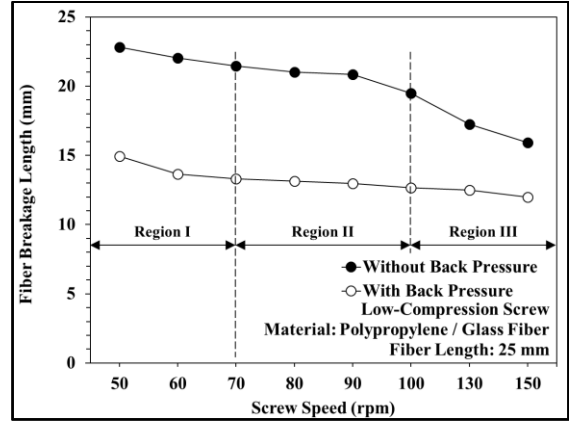


圖 10: 螺桿轉速與背壓壓力對纖維斷裂長度之曲線變化圖

長度則保有 10 mm 以上(保有 45% 的纖維長度)。圖中之結果分為三個區域進行細項說明：首先從區域 1 可看出，螺桿轉速在 60 rpm 以上與未使用背壓壓力的過程中，纖維的斷裂情形可保留 80% 的長度(平均為 20 mm 以上)，而使用背壓壓力後，其纖維則保留 50% (平均纖維長度為 11~13 mm 區間)；而在區域 2 中，螺桿轉速由 60 rpm 至 90 rpm 等區間，其纖維的斷裂情形呈現均一的情形，沒有背壓壓力之纖維保留長度為 75% 以上，具背壓壓力則保留 45% 以上；而在區域 3 時，因螺桿轉速在高轉速的剪切與塑化後，纖維在無背壓壓力的情形下，長度保留 70% 以上(纖維長度為 18 mm 以上，纖維斷裂的趨勢明顯)，具背壓壓力的塑化下，其纖維長度則尚保留 45% 以上，相關纖維斷裂的變化與圖 9 分析結果有相同之趨勢，將有助於未來進行長纖射出螺桿設計重要參考資料。

3.2.2 纖維斷裂長度對熔膠流動與重量之影響

圖 11 為不同螺桿轉速與背壓壓力設定下，對熔膠流動之變化趨勢。根據纖維斷裂長度之量測實驗中，以不同螺桿轉速與有/無背壓壓力的成型下，探討其熔膠流動長度之變化。從結果發現，熔膠流動長度會隨著螺桿轉速的提高而上升，對有/無背壓壓力之熔膠流動長度實驗中可觀察到，使用較快的螺桿轉速對熔膠流動長度相對較長，這是由於纖維長度在較快的螺桿轉速下，導致纖維斷裂嚴重而較短，其纖維對於熔膠的流動阻力相對降低，其熔膠流動長度也隨之增長。

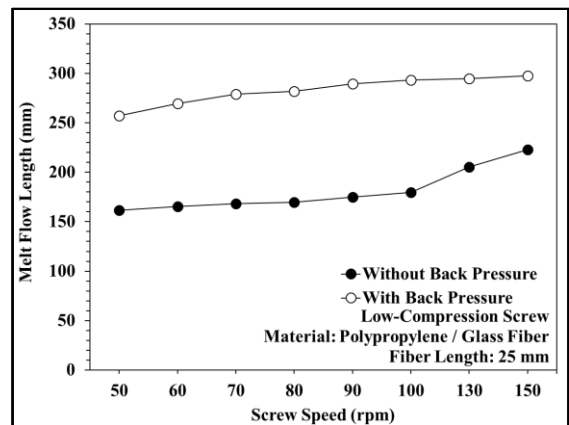


圖 11: 螺桿轉速與背壓壓力對熔膠流動長度之曲線變化圖

另一方面，纖維在螺桿轉速與背壓壓力的變化下，因纖維的斷裂與長度的變化，導致纖維與熔膠之間的流動性而變化(如圖 12 示)。從結果發現，越長的纖維，越不易流至試片本身，相對熔膠比例增加，導致纖維易堆積於冷料井而導致冷料井體積增加(如圖 13 所示)。此外，因冷料井體積增加，相對流入試片之纖維相對減少，越慢的螺桿轉速和無背壓壓力的情況下，纖維流入試片的比例也相對較差。

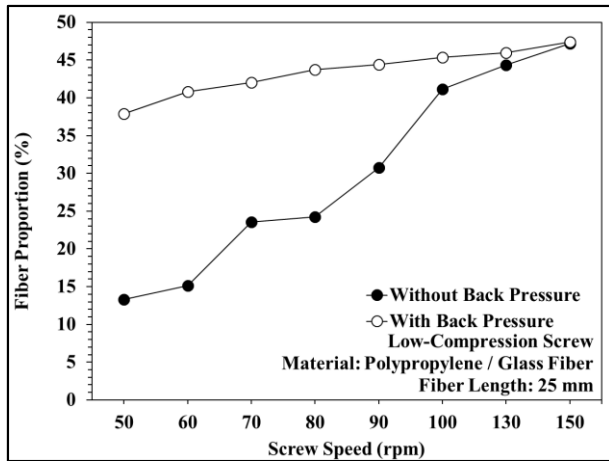


圖 12: 螺桿轉速與背壓壓力對纖維比重分析之趨勢變化圖

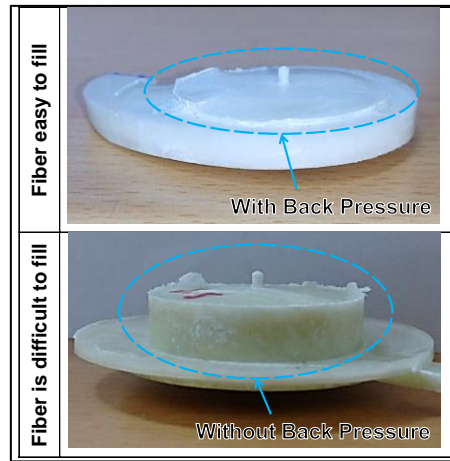


圖 13: 有/無背壓壓力對纖維不易充填，導致冷料井體積增厚示意圖

4. 結論

本研究以設計一長纖維專用之低壓縮比螺桿幾何機構為主，並建置與應用於長纖維複合材料射出成型機，同時探討其設計對剪切效應之變化、纖維與熔膠的結合性及纖維長度斷裂影響，並觀察彼此的關聯性進行研究。其研究結果得到以下結論：

1. 藉由三段式柱塞機構設計之射出單元進行纖維長度的斷裂實驗中，使用螺桿轉速與背壓壓力對於纖維長度的斷裂情形，纖維長度原為 25 mm，在螺桿轉速的提高下，纖維在高螺桿轉速 150 rpm 且無背壓壓力時，可保留 50% 的纖維長度(纖維長度均為 15 mm 以上)。
2. 在於越長纖維，會造成熔膠流動時的阻力，也會形成冷料井體積的增加，其原因在於較長纖維堵塞在流動通道，其試片部分本身僅有熔膠流入，而纖維皆留在冷料井，並造成體積增加。

5. 誌謝

本研究論文為科技部計畫編號“MOST 107-2622-E-006-024-CC1”之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。感謝逢甲大學/智能化模具設計與成型實驗室、國立成功大學/機械科技研發中心與淡江大學/高分子程序模擬實驗室在射出機操作與成型之贊助與協助；感謝全立發機械廠、大東樹脂、得力實業與科盛科技對研究之贊助與支持，使本計畫得以順利進行，特此誌謝。

6. 參考文獻

1. 楊淑麗，長纖維增強熱塑性塑料加工和應用的新發展，工程塑料應用，Vol.34，2006，pp.12-14。
2. 張曉明、劉維亞，纖維增強熱塑性復合材料及其應用，北京化學工業出版社，2007。
3. 張志堅、龔穎、盧康利、冉文華、張燕，玻纖含量對長纖維增強聚丙烯性能的影響，工程塑料應用，V01.41，No.1，pp. 35-38，2013。
4. 左曉玲、邵會菊、黃安榮、郝智、郭建兵，熱氧老化對長玻璃纖維增強聚醯胺 6 複合材

料的影響，加工與應用-合成樹脂及塑膠，pp. 66-70，2013

5. 盧桂陽、李瑤、許廣業，注塑條件對長玻纖增強聚丙烯性能影響研究，工程塑料應用，V01.40，No.7，pp. 46-49，2012。
6. Fang Kun, Yang Jie, Wu Sizhu, Li Mei, Ma Mingtu, "Comparison between the preparation, structure and mechanical properties of long fiber reinforced thermoplastics and short fiber reinforced thermoplastic", Engineering Sciences, Vol. 10, pp. 83-96, 2012.
7. 張宇、段召華、陳弦、何波兵，注塑工藝參數對長玻纖增強 PA66 復合材料力學性能的影響，塑料科技，Vol. 39，pp. 65-69，2011。
8. 段召華、周樂、陳弦、何波兵，長玻璃纖維增強尼龍 66 力學性能的研究，塑料工業，Vol.37，pp. 32-34，2009。
9. 方鯤、吳絲竹、張國榮、楊威、李玫，LGF 增強增韌 PA66 汽車專用料的製備及力學性能研究，工程塑料應用，第 37 卷，第 6 期，2009。
10. K.C. Ho and M.C. Jeng, "Fiber Orientation of Short Glass Fiber Reinforced Polycarbonate Composites under Various Injection Molding Conditions," *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, Vol. 25, No. 10, 1996, pp. 469-476.
11. H. D. Espinosa, G. Emore and Y. Xu, "High strain rate behavior of composites with continuous fibers," *The American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 48, 1995, pp. 7-18.
12. Fujijama, M., and Awaya, H., "Mechanical anisotropy in injection-molded polypropylene", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 21, 1977, pp. 3291-3309.
13. T. Harmia, K. Friedrich, "Mechanical and thermo mechanical properties of discontinuous long glass fiber reinforced PA66/PP blends", *Plastics rubber and composites processing and applications*, Vol. 23, pp. 63-69, 1995.
14. Younan, A. F., Ismail, M. N., and Khalaf, A. I., "Thermal stability of natural rubber-polyester short fiber composites", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 48, Issue 1, 1995, pp. 103-109.
15. S. A. Hitchen and S. L. Ogin, "Damage accumulation during the fatigue of an injection molded Glass/Nylon composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 47, 1993, pp. 83-89.
16. Vlcek, J., Miller, L., and Huang, C., "SIMULATION OF SCREWS FOR INJECTION MOLDING", *SPE Annual Tech meeting*, 2478-2481 (2009).
17. Thomason, J.L.; Vlug, M.A. et al: Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber-reinforced polypropylene: Part 1-Tensile and flexural modulus, *Composites; 27A*; p 477-484 (1996).
18. Potente, Helmut; Effen, Norbert; Ujma, A.; *Injection molding machines. Optimal use by computer simulation. Kunststoffberater* (1996), 41(10), 12-17.
19. Potente, H.; Schulte, H.; Effen, N.; *Simulation of injection molding and comparison with experimental values. International Polymer Processing* (1993), 8(3), 224-35.
20. Chao-Tsai (CT) Huang, Huan-Chang Tseng, Jiri Vlcek, and Rong-Yeu Chang, "Fiber Breakage Phenomena Investigation in Long Fiber Reinforced Plastic Preparation", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 87 (2015) 012023, pp 1-6.