

# 長玻璃纖維補強聚丙烯肋板在射出成型的背壓與幾何尺寸之微結構分析

## Microstructural Analysis of Injection-Molded Back Pressure and Geometry of Long-Glass-Fiber-Reinforced Polypropylene Ribbed Plates

王冠勳<sup>1</sup>、陳雅彤<sup>1</sup>、黃聖杰<sup>1\*</sup>、黃招財<sup>2</sup>、彭信舒<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立成功大學機械工程系

<sup>2</sup> 淡江大學化學與材料工程系

<sup>3</sup> 逢甲大學機械與計算機輔助工程系

\*E-mail: jimppl@mail.ncku.edu.tw

### 摘要

近年來纖維補強熱塑性塑膠在汽車行業廣泛地被應用，具有輕量化、高耐衝擊、低翹曲等優點，並且在產業界掀起「以塑代鋼」的風潮。而這些產品的機械性能主要取決於射出成品中纖維的長度和排向，因此在產品中保持完整的纖維長度及均勻的纖維排向是提高射出成型纖維補強熱塑性塑膠機械與模具性能的關鍵。在這項研究中發現板厚過薄會導致纖維在熔膠射進模穴內時纖維就已斷裂，使纖維長度無法維持，因此本研究設備有別於以往使用的一般射出機台較容易使纖維造成嚴重斷裂，使用了具有射出長玻璃纖維補強熱塑性塑膠能力的特殊三柱式射出成型機，使用低剪切率射出螺桿並且無加裝止逆環，澆口方面為了保持纖維長度也不能過小等種種因素使纖維較不容易斷裂。在產品方面基於仿汽車板件的概念設計了在整個表面上具有橫向和縱向肋的平板，然而為了研究板件的幾何尺寸對肋板的影響，本研究擬定背壓、肋厚度和板厚作為參數，並設計了三種背壓(0 MPa、0.42 MPa、0.84 MPa)、三種平板厚度(1 mm、3 mm、5 mm)和三種肋板厚度(1 mm、3 mm、5 mm)，將九種數據做全因子實驗後利用電腦斷層掃描(CT)得到長玻璃纖維補強聚丙烯試片圖像，導出至 Avizo 後使用內建光學追蹤模組和感測器模型分析得出試片的纖維長度和纖維排向結果。實驗結果說明當背壓較低時，隨著板厚和肋的厚度增加，肋板的纖維長度隨之增加，尤其以改變板厚的影響最為顯著，並且可以在實驗結果觀察到纖維排向大多沿著熔膠流動方向。

**關鍵詞：**射出成型、長纖維增強熱塑性塑料、纖維長度與排向、纖維排向、肋

### Abstract

Recently, fiber-reinforced thermoplastics have been widely used in the automotive industry. The plastic have the advantages of light weight, high impact resistance and low warpage. The mechanical properties of these products mainly depend on the length and orientation of the fibers in the product. Therefore, maintaining fiber length and uniform fiber orientation are the key to improve the mechanical properties of injection-molded fiber-reinforced thermoplastics. In this study, it was found that the thickness of the plate is too thin, which will cause the fiber to break when the melt is injected into the cavity, so that the fiber length cannot be maintained. Therefore, the equipment in this study is different from the general injection machine used in the past. The fiber caused serious breakage. A special three-column injection molding machine with the ability to inject long glass fiber reinforced thermoplastics was used. The screw was injected with a low shear rate and no check ring was added. In order to maintain the fiber length, the gate should not be too small. A variety of factors make the

fibers less prone to breakage. In this study, a plate with transverse and longitudinal ribs is designed based on the concept of an the oil pan of vehicles. A three-barrel injection molding machine with the ability to inject long-fiber reinforced thermoplastics is used to reduce fiber breakage during operation to maintain fiber length.

In order to study the effect of the geometric dimensions of the plate on the rib, the back pressure, the thickness of the rib, and the plate thickness are defined as parameters. Three kinds of back pressure (0 MPa, 0.42 MPa, 0.84 MPa), plate thicknesses (1 mm, 3 mm, 5 mm), and rib thicknesses (1 mm, 3 mm, 5 mm) are designed for full factor experiments and computed tomography (CT) was used to obtain the images of long glass fiber reinforced polypropylene test pieces. After exporting the images to Avizo, the built-in fiber tracing module was used to analyze the fiber length and fiber orientation of the test piece. The results show that when the back pressure is lower, the fiber length of the rib increases with the increase of the thickness of the plate and the rib, especially the effect of changing the plate thickness is the most significant. It can be observed in the experiments results that the fiber orientation is mostly along the melt flow direction.

Keywords: Injection Molding, Long-Fiber-reinforced Thermoplastic, Fiber Length, Fiber Orientation, Rib

## 1. 前言

將傳統金屬與合金相比，具有纖維補強的複合熱塑性材料具有許多優勢，包括成本更低、重量更輕和先進的機械性能，因此在當今的汽車工業中得到了廣泛的應用[1]。透過Sun等人[2]發現長纖維補強熱塑性塑料的力學性能取決於三個主要因素，即纖維長度、纖維排向和纖維重量。Hung等人[3]表示長纖維補強熱塑性材料中的纖維在通過射出機的塑化螺桿時容易斷裂。除了纖維微結構的作用外，成型條件和成型參數也是決定因，參數設置不當可能造成缺陷進而降低產品的力學性能。Güllü等人[4]發現較大的澆口橫截面積有利於降低纖維斷裂率並因此提高抗拉強度。Rohde等人[5]研究了射出速度、保壓壓力、螺桿速度和背壓對射出成型長玻璃纖維補強聚丙烯纖維長度的影響。結果表明，在所有加工條件中背壓對試片的纖維長度和能量吸收能力的影響最大。

Advani等人[6]提出的模型分析掃描截面中的纖維排向，發現其張量分量 $a_{11}$ 、 $a_{22}$ 和 $a_{33}$ 分別與流動方向、錯流方向和厚度方向對齊。Liou等人[7]在不同製程參數(螺桿轉速、背壓壓力、熔膠溫度)觀察對纖維長度和排向影響，得到在背壓壓力和螺桿轉速參數下纖維長度影響較大。

本實驗參考Huang等人[8]使用電腦斷層掃描觀測長玻璃纖維補強聚丙烯的微觀結構進行實驗。Teuwsen等人[9]使用微結構電腦斷層掃描技術檢查射出和單次射出成型試片的纖維排向。在這項研究中，三柱式射出機進行了射出參數的影響，結果表明背壓為重要參數，以及不同的板厚和肋材厚度對長纖維補強熱塑性塑料有兩種重要的纖維特徵：纖維長度和纖維排向，本實驗利用電腦斷層掃描的圖像導入Avizo以獲得纖維長度和纖維排向並探討結果。

## 2. 實驗與方法

### 2.1 材料

射出成型實驗使用GECO(台灣大東方樹脂工業有限公司)提供的長玻璃纖維補強聚丙烯(LGP503NA250)進行。本材料的纖維含量為50 wt.%，平均纖維長度和直徑分別為25 mm和17  $\mu$ m。

### 2.2 射出成型機台

本文實驗所使用之射出成型機為全立發機械股份有限公司所生產之180噸射出成型機，最

大射出速度為150 mm/s，最大射出壓力為177 MPa。為了大幅減少塑化、射出和保壓階段所產生的纖維斷裂，本實驗使用具有三柱式射出裝置之射出成型機台，此射出機將螺桿設計為不會往復運動並且無加裝止逆環減少纖維斷裂。三柱式射出裝置包括塑化螺桿( $\phi = 55 \text{ mm}$ )、射出柱塞( $\phi = 45 \text{ mm}$ )和保壓柱塞( $\phi = 40 \text{ mm}$ )，如圖1所示。

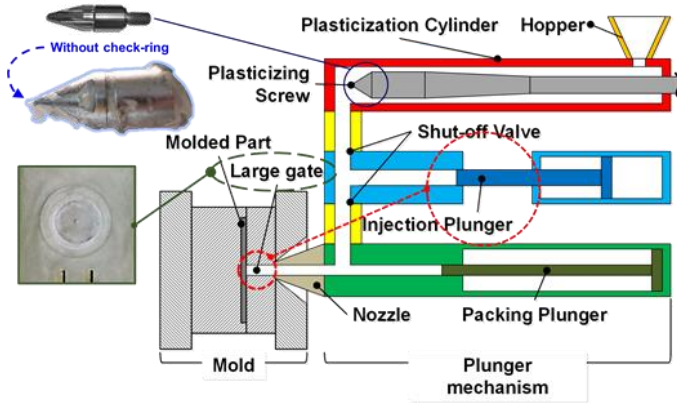


圖 1 三柱式射出機內部圖(塑化階段、射出階段和保壓階段)

### 2.3 模具設計

為了研究幾何參數對肋板纖維排向的影響，本實驗設計了具有三種板厚(1 mm、3 mm、5 mm)和三種肋厚度(1 mm、3 mm、5 mm)的成品，總共考慮了九種不同幾何的肋板，澆口方面為了使纖維較不易斷裂，設計了直徑較大的澆口進行實驗，如圖2至圖4。

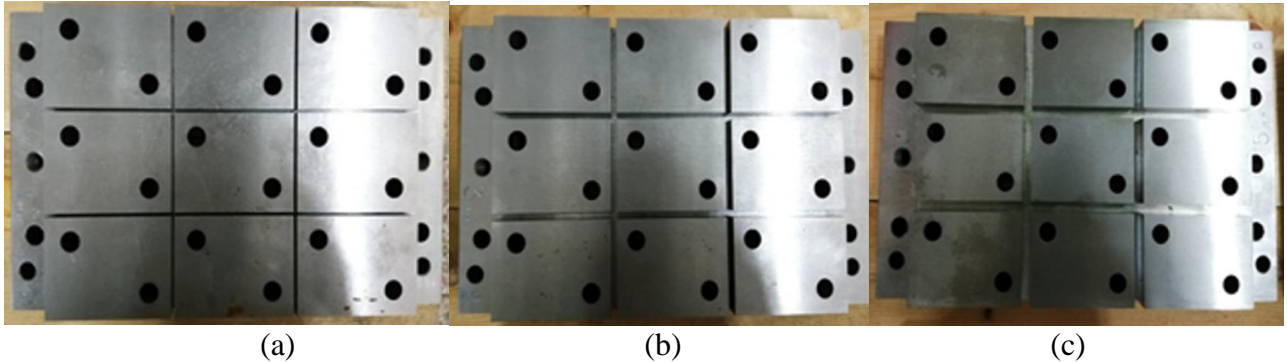


圖2 不同肋板厚度模仁圖 (a) 1 mm、(b) 3 mm、(c) 5 mm

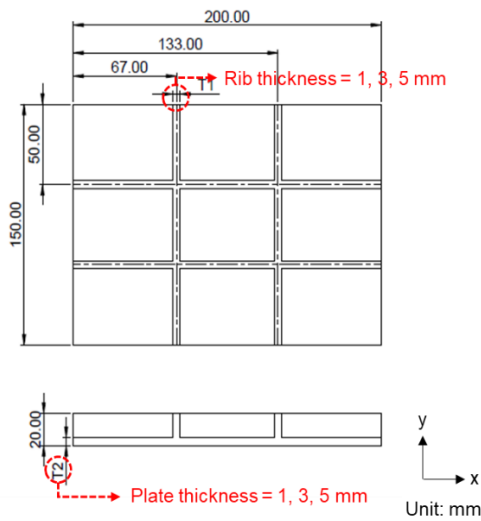


圖 3 試片尺寸

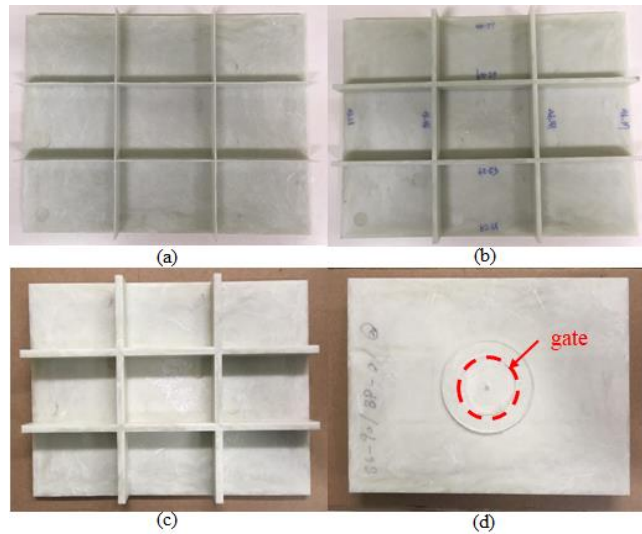


圖 4 不同肋厚試片圖: (a) 1 mm、(b) 3 mm、(c) 5 mm、(d) 模具澆口位置

## 2.4 幾何與實驗參數

為方便起見，將射出試片的九塊區域編碼為A到I，如表1所示。射出機成型參數(如射出壓力、保壓時間、模具溫度等)及實驗使用之三種不同背壓(0、0.42、0.84 MPa)由表2中所示。為了探討板厚、肋厚度及背壓對試片影響，本實驗將試片A到I進行全因子實驗，如A1為板厚5 mm、肋厚1 mm、背壓0 MPa，A2為板厚5 mm、肋厚1 mm、背壓0.42 MPa、如A3為板厚5 mm、肋厚1 mm、背壓0.84 MPa依此類推，共射出了27種實驗結果進行討論。

表 1 板厚及肋厚度的幾何編號

Plate(mm)	Rib(mm)		
	1	3	5
5	A	B	C
3	D	E	F
1	G	H	I

表 2 射出機成型參數

Number	Variable			Fixed	
	1	2	3		
Back pressure(MPa)	0	0.42	0.84	Injection pressure(MPa)	123.9
				Injection speed(mm/sec)	90
				Injection time(sec)	2
				Packing pressure(MPa)	73.5
				Packing time(sec)	10
				Melt temperature(°C)	230
				Mold temperature(°C)	60
				Cooling time(sec)	20
				Screw speed(rpm)	60

## 2.5 電腦斷層掃描及纖維長度與排向

在本研究中使用型號為Zeiss Metrotom 800 3D微型電腦斷層掃描(microCT)觀察纖維排向，將進行完CT掃描後的圖像導出至Avizo(版本9.7.0, ThermoFisher Scientific Company, USA)，使用Avizo內建的纖維追蹤模組和傳感器模型進行進一步處理。圖5(a)為CT掃描區域，圖5(b)將試片厚度細分為2000層，以獲得厚度中纖維分佈的採樣方向，圖5(c)為對於每組試片張量座標的定義。

根據[6]提出的模型分析掃描截面中的纖維排向，發現其張量分量  $a_{11}$ 、 $a_{22}$  和  $a_{33}$  分別與流動方向、錯流方向和厚度方向對齊，理論上纖維排向的二階張量表示僅適用於剛性纖維，由於使用Avizo判別纖維長度及排向此種方式讀取長玻璃纖維補強複合材料較為便利，且結果仍然為纖維排向提供了有用的定性描述，因此本實驗將此方法應用於長玻璃纖維補強複合材料。

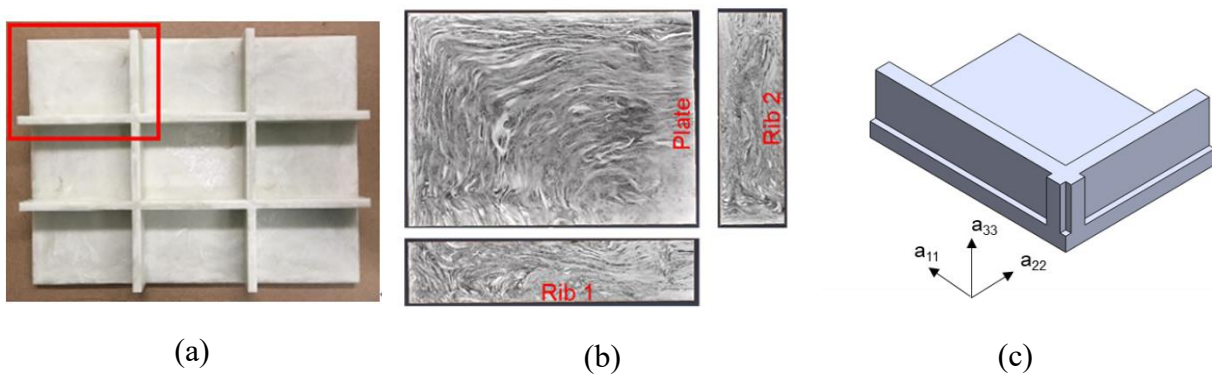


圖 5 CT 掃描方法: (a)試片的掃描位置、(b)掃描結果、(c)試片張量座標定義

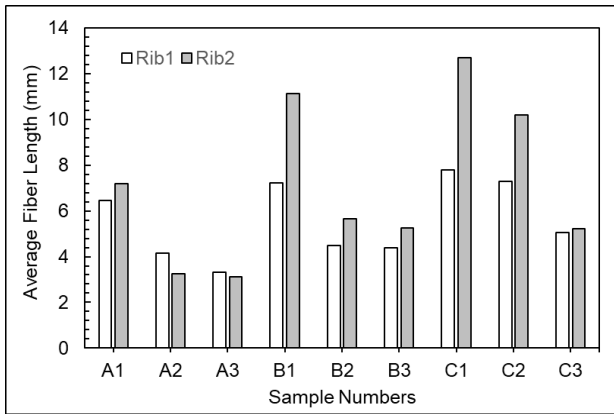
## 3. 結果與討論

### 3.1 纖維長度分析結果

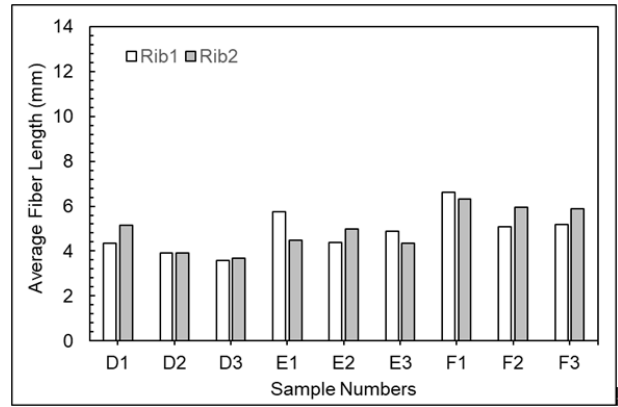
圖 6 顯示了背壓、補強肋厚度和板厚對長邊肋(Rib1)和短邊肋(Rib2)中平均纖維長度的影響。結果顯示在塑化階段作用於聚合物熔膠的剪切應變速率較大，平均纖維長度通常隨著背壓的增加而減小。因此，儘管使用了三柱式射出成型單元，仍應仔細控制背壓，盡量減少成型過程中的纖維斷裂率。

從圖 6(a)、(b)、(c)的比較中可以看出纖維長度隨著板厚的遞增而增加，尤其在最大厚度為 5 mm 的板中最为明顯。這項發現是合理的，因為隨著板的厚度增加，聚合物熔膠更順暢地流過模具，因此作用在纖維上的剪切速率降低。出於同樣的原因，對於每個板厚不同，纖維長度隨著補強肋厚度的上升而增加。因此，結果表明在具有最大厚度(5 mm)和最大肋厚度(5 mm)的板中獲得了最大纖維長度(如圖 6(a)中 C1、C2、C3)。

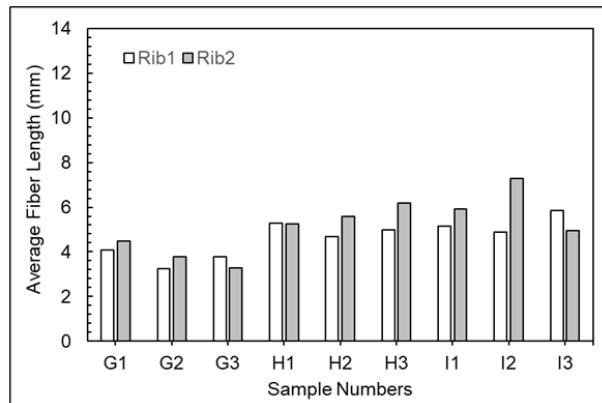
在近乎所有情況下，短邊肋(Rib2)中的平均纖維長度都比長邊肋(Rib1)中的長。這很可能是由於在厚度方向從底部進入短邊肋(Rib2)時，由於流動距離較短使纖維長度保持較完整，因此短邊肋纖維長度通常都比長邊肋纖維長度更長。



(a) 板厚5mm、肋厚度1、3、5mm



(b) 板厚3mm、肋厚度1、3、5mm

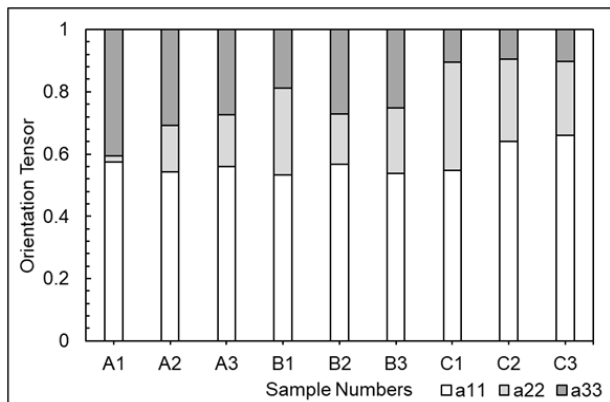


(c) 板厚1mm、肋厚度1、3、5mm

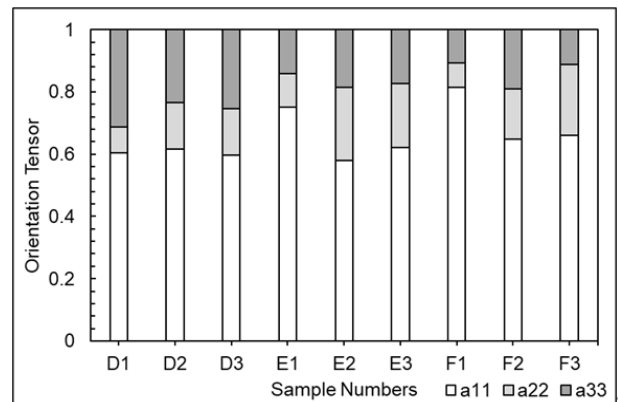
圖6 在不同背壓下的平均纖維長度

### 3.2 纖維排向分析結果

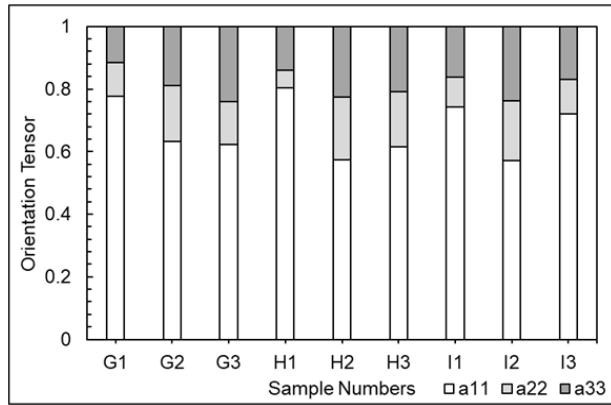
圖 7、圖 8 分別為背壓和補強肋厚度為 5 mm、3 mm 和 1 mm 的長邊肋(Rib1)及短邊肋(Rib2)纖維排向的影響。符號 a11、a22 和 a33 分別指流動方向、錯流方向和厚度方向。結果表明，長邊肋(Rib1)中的纖維主要在 a11 方向上佔比較高，而短邊肋(Rib2)中的纖維主要在 a22 方向上佔比較高。由於長邊肋(Rib1)中在射出階段時熔膠流動方向為 a11 方向，因此長邊肋(Rib1)中的纖維多數沿著 a11 方向排列。



(a) 板厚5mm、肋厚度1、3、5 mm

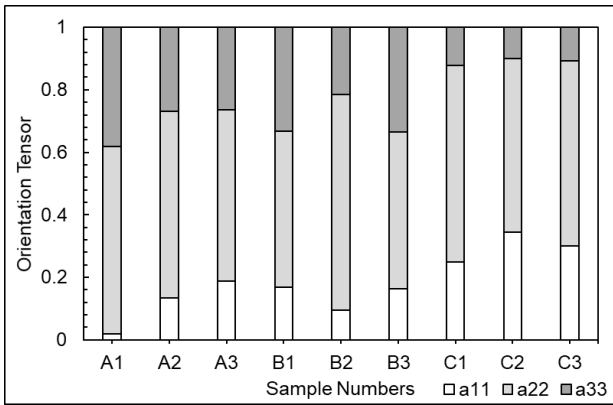


(b) 板厚3mm、肋厚度1、3、5 mm

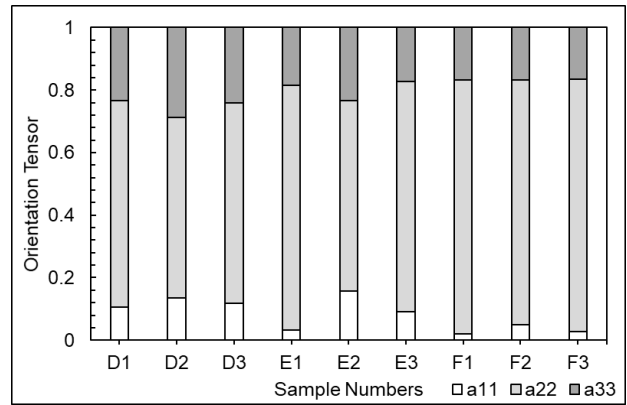


(c) 板厚1mm、肋厚度1、3、5 mm

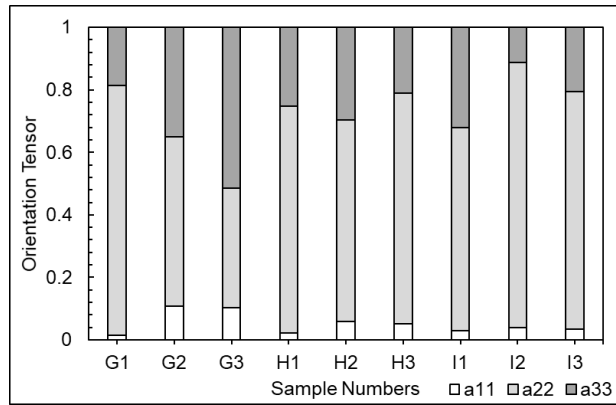
圖7 長邊肋(Rib1)在不同背壓(0、0.42、0.48 MPa)下的纖維排向



(a) 板厚5mm、肋厚度1、3、5 mm



(b) 板厚3mm、肋厚度1、3、5 mm



(c) 板厚1mm、肋厚度1、3、5 mm

圖8 短邊肋(Rib2)在不同背壓(0、0.42、0.48 MPa)下的纖維排向

#### 4. 結論

本研究探討長玻璃纖維聚丙烯製造之仿車殼板件之不同幾何尺寸和不同背壓壓力對纖維長度和纖維排向之影響。在設備上使用與以往不同的三柱式射出機而非纖維較易斷裂的一般式射出機，將射出成型參數設置為背壓(0、0.42、0.84 MPa)、板厚(1、3、5 mm)及補強肋厚度

(1、3、5 mm)進行纖維長度與排向分析的全因子實驗。

實驗結果表明當背壓為0MPa時纖維長度較長，由此發現纖維斷裂較不明顯，因此可判定纖維長度隨著背壓的增加而減少。在板厚及肋厚部分，實驗結果顯示當板厚越厚纖維長度越長，而當肋厚低於5 mm時纖維長度有越來越短的趨勢，因此判別板厚及肋厚越厚纖維長度越長。綜合上述結果，本研究發現最長平均纖維長度(12.08 mm)出現在背壓為0 MPa、板厚為5 mm和肋厚度為5 mm之參數作為仿車殼試片之最佳成型參數。

由本研究實驗結果得知，能減少纖維斷裂的方法為：使用具有射出長玻璃纖維補強熱塑性塑膠能力的特殊三柱式射出成型機，此射出機將螺桿設計為無加裝止逆環減少纖維斷裂，在澆口方面為了保持纖維長度設計了較大的澆口，背壓壓力方面背壓越小纖維斷裂越少，綜合以上三種使纖維較不易斷裂之方法找出強度較高的仿車殼板件射出成型參數達成目標。

## 5. 誌謝

本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。

## 6. 參考文獻

1. H. Dittmar, and H. Plaggenborg, "Lightweight Vehicle Underbody Design," *Reinforced Plastics*, vol. **63**, issue 1, pp. 29-32, 2019.
2. Z. Y. Sun, H. S Han, &, G. C Dai, "Mechanical Properties of Injection-Molded Natural Fiber-Reinforced Polypropylene Composites: Formulation and Compounding Processes," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, 637-650, 2010.
3. C. T. Huang, & H. C. Tseng, "Simulation Prediction of the Fiber Breakage History in Regular and Barrier Structure Screws in Injection Molding," *Polymer Engineering & Science*, vol. **58**, 452-459, 2018.
4. A. Güllü, A. Özdemir, and E. Özdemir, "Experimental Investigation of the Effect of Glass Fibres on the Mechanical Properties of Polypropylene (PP) and Polyamide 6 (PA6) Plastics," *Materials & Design*, vol **27**, issue 4, pp. 316-323, 2006.
5. Rohde, M., Ebel, A., Wolff-Fabris, F., & Altstädt, V, "Influence of Processing Parameters on the Fiber Length and Impact Properties of Injection Molded Long Glass Fiber Reinforced Polypropylene." *International Polymer Processing*, vol. **26**, 292-303, 2011.
6. S. G. Advani, and C.L. Tucker III, "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites," *Journal of Rheology*, vol. **31**, no. 8, pp. 751-784, 1987.
7. G. Y. Liou, C. W. Su, P. W. Huang, S. J. Hwang, C. T. Huang, & H. S. Peng, (2022). "Fabrication and Property Characterization of Long-Glass-Fiber-Reinforced Polypropylene Composites Processed Using a Three-Barrel Injection Molding Machine." *Polymers*, 14(6), 1251.
8. C. T. Huang, & C. H Lai, "Investigation on The Coupling Effects Between Flow and Fibers on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Injection Parts," *Polymers*, vol. **12**, 2274, 2020.
9. Teuwsen, Jan, S. Goris, and T. Osswald. "Impact of the process-induced microstructure on the mechanical performance of injection molded long glass fiber reinforced polypropylene." *Proceedings of the SPE ANTEC*. 2017.