

短纖強化塑膠射出成型品之微觀力學分析(I)

計劃編號: NSC 88-2216 E-002-008

執行期限: 87/08/01 – 88/07/31

主持人: 陳兆勛 國立台灣大學應用力學研究所副教授

一、中文摘要: 關鍵字: 短纖, 射出成型品, 纖維排列, 繞射, 等值內含物, 平均應力場。

本研究主旨在探討短纖補強射出成型品, 在不同的纖維排列下, 導致機械性質的差異。研究主要內容分成纖維排列的決定和理論預測材料彈性傳導係數與驗證兩方面來進行。

實驗上是將射出試片在厚度方向分成三層, 兩層表皮層中間夾一層中心層。由於成型過程高分子的各種流動效應影響, 表皮層和中心層纖維排列不同, 並造成熱性能差異。藉由分析同一試件兩層間的差異, 來證實纖維排列對機械性能的影響。

在纖維排列的決定方面, 我們嘗試以 Fraunhofer 繞射和顯微影像量測兩種方法來確定纖維排列參數; 在 Fraunhofer 繞射方面, 我們藉由新近的影像技術, 改進 McGee[8] 等距光強量測法和藍宏裕 [10] 的繞射等光強量距法, 使用圓形灰階值運算法; 在顯微影像量測方法上, 藉由光學顯微鏡與影像系統的結合, 統計顯微鏡下纖維分佈狀況, 利用分佈函數回歸出分佈參數, 並觀察纖維實際狀況。在理論預測材料機械性質方面, 我們運用 Eshelby 的等值內含物原理和 Mori-Tanaka 的平均溫度場概念, 並假設纖維是平面的二維分佈; 在整體複材上, 則是假設纖維分佈與長寬比是由三層結構決定, 將實驗結果確定的排列參數代入理論中, 並藉由單軸拉伸實驗驗證理論的預測。

英文摘要: Abstract:

Keywords: short fiber, injection-molded plastics, fiber-orientation distribution, scattering, equivalent inclusion, mean stress field

This research is to study the effect of different fiber-orientation distribution (FOD) on the mechanical properties of short-fiber reinforced plastics (FRP) of injection molding. The research topic consists of two main subjects. One is the determination of FOD and the other is the theoretical prediction of elastic properties of FRP.

In experiments, the injection-molded specimen can be decomposed into three layers of thickness direction, two skin layers with one core layer. Due to the flow current of injection molding induce the effect of different FOD of skin layers and core layer individually on the mechanical properties of injection molded specimens. Via the analysis of the difference between these two layers of the same specimen to identify the effect of different FOD on the thermal properties. In the aspect of the determination of FOD, we will try to use both techniques of Fraunhofer scattering light method and micro-image processing method to determine FOD. In the aspect of Fraunhofer scattering light, we will use the newly developed image processing technique of image-gray-level calculation to improve both the McGee's [8] equivalent light intensity measurement and Lan's [10] equivalent scattering light intensity measurement; In the aspect of micro-image processing, we will incorporate with the observation of optical microscope and image processing system to compute the FOD under microscopic scale. The parameters of FOD function then can be regressed via the

measurements of FOD.

In the aspect of theoretical prediction of elastic moduli of material, we will incorporate with Eshelby's theory of equivalent inclusion and Mori-Tanaka's idea of mean-stress field, and treat the FOD as 2D planar distribution. Globally, the FOD and aspect ratio of the composite specimen are determined via the composite structure of these three layers. Substituting the FOD results of experimental measurements into the micro-mechanical model, we then can predict the thermal conductivity of the injection molded plastics. Finally, we will try to verify our theoretical model via the performance of the uniaxial tensile test of the specimen.

二、計劃緣由與目的：

由於強化塑膠射出成型品在成型過程中，纖維在分子熔融液中，因為填充過程流體的噴泉流效應(fountain flow effect)和剪切流等流動效應，造成纖維在成型品中排列的差異，因而導致材料在各方向上熱性質的不等。所以有人嘗試去分析纖維分佈狀況和因纖維分佈不同造成的材料整體性質的差異。纖維在成品中配向分析的實驗上，較早 Kacir 等人[1]利用透明懸浮液加入著色的纖維作為標示，追蹤纖維流動並以照相後逐根計算統計偏離流向的角度，並進一步求取纖維平均配向；Sanou 等人[2]以反射式顯微鏡觀察射出成型品中纖維的長短比，並換算其二度空間的排列狀況；另外 Sanou[3]亦探討模穴在不同厚度層纖維排列的狀況；Malzahn[4]，Darlington[5]由顯微照相觀察纖維的排列狀況，也是使用逐根計算的方式；Bright[6]，Darlington[7]使用試片切薄，X光穿透照相術 CMR(contact micro-radiography)得到圓盤模穴中纖維排列分佈；McGee 等[8]和 Yang[9]採用光學繞

射法，將局部區域的纖維排列狀況製成多狹縫光柵，利用光學繞射將空間分佈轉換角度的原理，求取纖維的排列狀況。藍宏裕[10]改進 McGee 的方法，採取繞射邊界量測的方法，取得纖維的二維平面分佈狀況。由於近代影像處理技術的進步，顯微量測軟體的發展，直接影像量測可以處理大量纖維資料，而且快速準確度高，漸漸被採用。另外在纖維填充物造成強化塑膠成型品的機械性質差異上，理論方面最早 Goodier [11]對單一球形內含物或孔洞的問題作了完整的分析，還有 Sadowsky 等[12]考慮平面應力下橢圓孔洞周圍應力場的狀況，Eshelby[13]提出橢圓形內含物及中間界面應力場的一般解，他並提出了一個重要的結論：在無限域介質受到一個均勻應力場，其內含物內部的應力場也是均勻的，內含物和基材中間面上的應力可經由等值內含物原理(equivalent inclusion principle)換算等效應變(equivalent strain)；Mori-Tanaka[14]提出基材中平均應力場的概念。結合等值內含物原理和平均應力場的概念，Taya 等[15] [16]、Weng[17]、Benveniste[18]、鄭江河[19]等，成功的提出複合材料的等效熱傳導數的理論。值得一提的是 Hatta 等[20]運用了此一概念，提出等效熱傳係數的模型。另外在實驗方面 Choy[21]針對同一射出成型試件的不同薄層，應用超音波量測的方法，成功的得到在不同薄層之異向性彈性模數，證實在不同薄層，因射出成型造成纖維排向差異而導致其異向性行為。

三、研究方法

本文的研究方向就是針對纖維在強化塑膠射出成型品中的分佈狀況，嘗試以 Fraunhofer 繞射法和直接顯微影像量測的方法來確定纖維的分佈狀況，並進一步將確定的分佈函數代入理論中，驗證理論的預測。

(一) 理論分析:

本研究理論分析包含了等效彈性模數的微觀力學理論、光學繞射法的理論和分佈加權平均張量的推導。

1. 等效熱傳導係數是採用 Eshelby 的等值內含物與 Mori-Tanaka 的平均溫度場的概念，再加上使用平均溫度場推導所得。
2. 採用的分佈函數()形式及特性。
3. Fraunhofer 繞射理論，引用 McGee 等人利用矩形狹縫繞射的形狀振幅(shape amplitude)，推導出狹縫分佈的繞射結果。
4. 因為採用的分佈函數，因此對在此函數下分佈加權平均張量做推導。

(二) 實驗量測分析:

實驗的架構，包含了試件與光柵的製作、繞射法利用影像系統求取分佈參數的方法，以及利用顯微影像量測系統的直接量測，另外，針對材料的彈性模數以單軸拉伸實驗確定材料的彈性模數並與理論值做比較。

(三) 理論分析與實驗結果相互驗證:

對於運用兩種方式量測纖維分佈結果做個總結，並描述繞射法的改進與校正方法；最後在理論預測和實驗驗證材料彈性模數上做探討。

四、結果與討論:

1. 由理論與實驗證明，纖維在複合材料中的排列對材料機械行為的影響很大。因此對此類材料的品管可以藉由控制射出成形條件，掌握纖維的排列狀況，達到預期的補強效果。
2. 光學繞射可以很清楚的判定纖維排列的方向性。因此，光學繞射法可應用於簡單判定材料中非均勻向物質的分佈方向性，約略估計材料在不同方向上材料性質的差異。

3. 在量化排列參數值上，由於纖維的簡單幾何構形，光學繞射法就不如應用影像系統作大量纖維方位量測以求取排列參數值準確。但如果能在光柵製作技術上有突破，並使用本實驗所採用的影像光強疊加法，應該可以獲致不錯的排列參數數值結果。

4. 由顯微鏡接影像系統對薄片觀察，看出纖維在薄片中的分佈情況幾乎可視為平面分佈，這證實了最初平面分佈的假設合理。經影像系統與光學繞射法的分析，射出成型試件的表皮層和中心層的確在排列分佈上有差異性。由影像系統更可看出表皮層的平均纖維長度較中心層長，而且排列與流動方向較一致。

5. 引用分佈參數的理論來預測複合材料的等效彈性模數，經拉伸實驗驗證，結果顯示本文之理論模式尚稱滿意。

在此也提出幾點對未來的展望：

1. 短纖補強射出成型品的纖維分佈在射出充填過程即可決定，也就是說纖維的排列狀況可由高分子流動特性與纖維間之互制關係來取決。因此未來可進一步朝模流分析方面來分析纖維在成品中的分佈。本文對纖維分佈的觀察與確定，可以作為將來研究的基礎。
2. Fraunhofer 繞射法，雖然在簡單構形的判別上不如顯微影像系統；但對於複雜構形卻可以藉由狹縫形狀振幅的確定，完成狹縫分佈狀況的判讀。這可以應用於材料中異質物的分佈狀況判讀；藉由這些分佈狀況判定，再利用微觀力學的描述，建立含異質物材料的各種等效模數(如等效彈性模數、等效熱傳常數....等)。

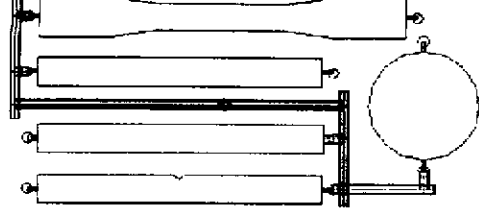


圖3-1 模具形狀

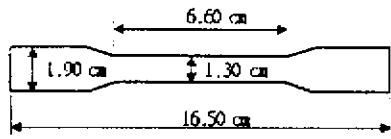


圖3-2a 試片尺寸

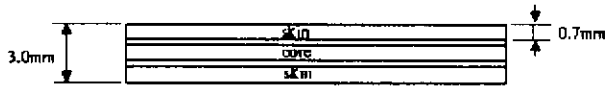


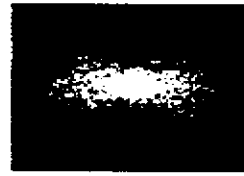
圖3-2b 試件側視圖與加工尺寸與表皮層和中心層示意圖



15% core



15% skin



25% core



25% skin

圖3-6a 15%及25%表皮層與中心層光相顯影結果

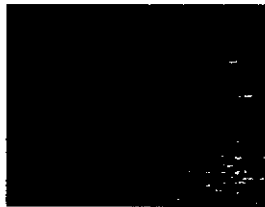


圖3-3a 顯微影像圖形



圖3-3b 標示出纖維

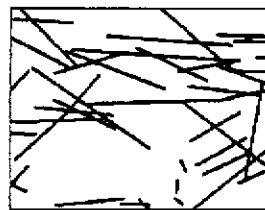
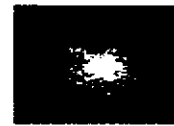


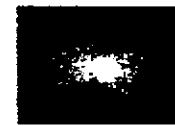
圖3-3c 將非纖維區消除



圖3-3d 影像反白並翻轉



Fp = 0.4



Fp = 0.5



Fp = 0.6



Fp = 0.8



Fp = 0.9



25% skin



圖3-6b 以25%表皮層為例顯影與高對比相攝影結果

此圖顯示纖維的排列方向，其長度與寬度之比例，以及纖維的粗細程度。

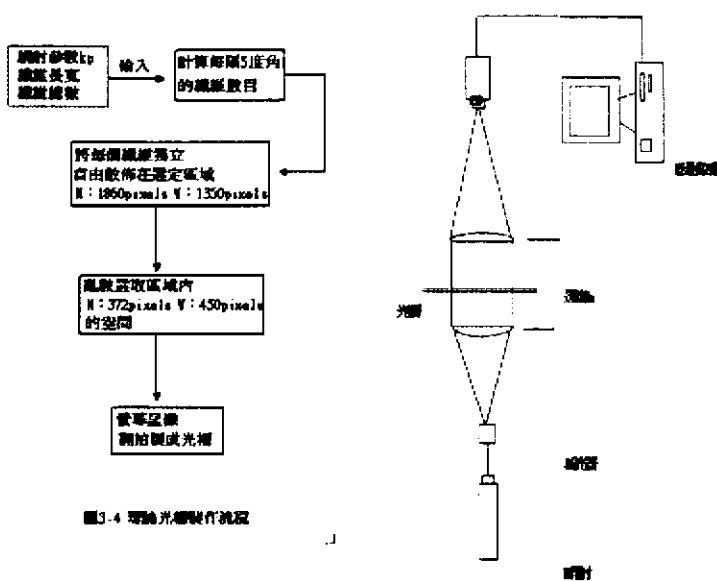


圖3-4 纖維光顯影作流程

表(一) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	15% core	15% skin	25% core	25% skin
Fp = 0.4 長度	1.75	1.77	1.77	1.77
Fp = 0.5 長度	1.64	1.65	1.63	1.61
Fp = 0.6 粗細度	0.75	1.64	0.79	0.89

表(二) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	15% core	15% skin	25% core	25% skin
Fp = 0.4 長度	1.75	1.77	1.77	1.77
Fp = 0.5 長度	1.64	1.65	1.63	1.61
Fp = 0.6 粗細度	0.75	1.64	0.79	0.89

表(三) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	Fp	(Mean, SD)
長度	1.75	(1.66, 0.09)
粗細度	0.75	(1.66, 0.09)
長度	1.64	(1.62, 0.02)
粗細度	1.64	(1.62, 0.02)
長度	1.63	(1.63, 0.02)
粗細度	1.63	(1.63, 0.02)

表(四) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	Fp = 0.4	15%	25%
纖維長度 (μm)	1.75	1.63	1.61
纖維粗細度 (μm)	1.64	1.65	1.63
纖維粗細度 (μm)	0.75	1.64	1.63

表(五) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	15% core	15% skin	25% core	25% skin
長度	1.75	1.77	1.77	1.77
粗細度	0.75	1.64	0.79	0.89
長度	1.64	1.65	1.63	1.61
粗細度	0.75	1.64	0.79	0.89

表(六) 不同 Fp 值之纖維長度與粗細度之統計分析結果

	15% core	15% skin	25% core	25% skin
長度	1.75	1.63	1.61	1.61
粗細度	1.64	1.65	1.63	1.63
長度	1.64	1.65	1.63	1.61
粗細度	0.75	1.64	0.79	0.89

五、參考文獻

1. Kacir L. M. Narkis and O. Ishai, 'Oriented Short Glass-Fiber Composites: II Analysis of Parameter Controlling of Fiber/Glycerine Orientation Process', *Polym. Eng. Sci.*, 15, 532 (1975)
2. Sanou M., B. Chung and C. Cohen, 'Glass Fiber-Filled Thermoplastics: II Cavity Filling and Fiber Orientation in Injection Molding', *Polym. Eng. Sci.*, 25, 1008 (1985)
3. Sanou M., B. Chung and C. Cohen, 'Glass Fiber-Filled Thermoplastics: III Cavity Filling and Fiber Orientation in Injection Molding', *Polym. Eng. Sci.*, 25, 1008 (1985)
4. Malzahn, J. C. and J. M. Schultz, 'Transverse Core Fiber Alignment in Short-Fiber Injection-Molding', *Compos. Sci. and Tech.*, 25, 187 (1986).
5. Darlington M. W. and P. L. McGinley, 'Fiber Orientation Distribution in Short-Fiber Reinforced Plastics', *J. Mater. Sci.*, 10, 906 (1986)
6. Bright P. F., R. J. Crowson, M. J. Folkes, 'A Study of the effect of injection speed on fiber orientation in simple molding of short glass fiber-filled polypropylene', *J. Mater. Sci.*, 13, 2497 (1978)
7. Darlington M. W., P. L. McGinley, G. R. Smith, 'structure and anisotropy of stiffness in glass fiber-reinforced thermoplastics', *J. Mater. Sci.*, 5, 877 (1976).
8. McGee S. H. and R.L. McGulloug, 'characterization of fiber orientation in short-fiber composites', *J. Appl. phys.*, 55, 1394 (1984).
9. Yang C. F., C. M. Crosby, A.R.K. eusud\vfzai and R. E. Mark, 'determination of paper sheet fiber orientation distributions by a laser optical diffraction method', *J. Appl. Polym. Sci.* 34, 1145 (1987).
10. 藍宏裕, '以光學繞射原理測定短玻纖在塑膠中排列方向與排列程度的探討', 碩士論文, 國立台灣工業技術學院(1990)
11. Goodier J. N., 'concentration of stress around spherical and cylindrical inclusions and flaws', *ASEM J. Appl. Mech.*, 55, 39-44 (1933)
12. Sadowsky m. a. and Sternberg E., 'stress concentration around an ellipsoidal cavity in an infinite body under arbitrary plane stress perpendicular to the axis of revolution of cavity', *ASEM J. Appl. Mech.*, 69, a191 (1947)
13. Eshelby J. D., 'the determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problem', *Proc. R. Soc.*, a241, 376 (1957)
14. Mori T. and Tanaka K., 'average stress in matrix and average elastic of energy of materials with misfitting inclusions', *Acta. Metall.*, 21, 571(1973)
15. Taya m. and Chou T. W., 'on two kinds of ellipsoidal inhomogeneities in an infinite elastic body: an application to hybrid composite', *Int. J. Solids Struct.*, 17, 553(1981)
16. Taya m. and Mura T., 'on stiffness and strength of an aligned short-fiber reinforced composites containing fiber end cracks under uniaxial applied stress', *ASME J. Appl. Mech.*, 48, 361,(1981)
17. Weng G. J., 'some elastic properties of reinforced solids with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions', *Int. J. Eng. Sci.*, 22, 845 (1984)
18. Benveniste Y., 'a new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials', *mech. mater.*, 6, 147 (1987)
19. 鄭江河, '線性及非線性之中度填充短纖複合材料的機械性質研究', 博士論文, 國立台灣大學(1993)

20. Hiroshi Hatta and Minoru Taya, 'effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite', J. Appl. Phys., 58, 2478 (1985).
21. Choy C. L., Leung W. P. and Kowk, K. W., 'elastic moduli and thermal conductivity of injection-molded short-fiber-reinforced thermoplastics', Polym. Composites, 13, 69(1992)
22. S. G. Lipson and H. Lipson, 'optical physics' 2nd edition
23. 伊藤公正著, 工業調查會編, 塑膠材料手冊, 文源書局
24. C.L. Choy, W. P. Leung, and Y. K. Ng, J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed., 25, 1779 (1987).