

# 菲涅爾微結構隱形眼鏡之殼模射出成形與充填率分析研究

## Research on Contact Lens Shell Mold with Fresnel Microstructure Groove Filling Ratio Analysis by Injection Molding Process

陳炤彰、莊程嬰、楊筑渝\*、魏俊安、Vivek B. Kshirsagar

國立臺灣科技大學機械工程系暨機械工程研究所

\*E-mail: [M10903209@mail.ntust.edu.tw](mailto:M10903209@mail.ntust.edu.tw)

### 摘要

本研究透過射出成形製造含菲涅爾微結構隱形眼鏡殼模，再利用殼模進行二次翻模製成菲涅爾隱形眼鏡，以矯正高度數遠視。隱形眼鏡的厚度隨著光學度數的增加而提高，而在輕而薄的隱形眼鏡上較難製作高度數的鏡片，透過結合微結構的方式，降低鏡片厚度以達到相同的光學性能，但因微結構的死角會導致光線散失，進而影響成像的些微失真與模糊。射出成形製程上，利用 CAE(Computer Aided Engineering)軟體 Moldex3D R16.0 模擬分析重要的製程參數，透過實驗設計(Design of Experiment, DoE)三因子兩水準進行實驗，以減少成形誤差對微結構表面形貌的影響，並提高微結構充填率與探討分析製程參數，經模擬分析結果顯示隱形眼鏡殼模光學區微結構的平均位移量是設計值的 1.2%及分析結果顯示模具溫度最為影響充填率之製程參數。於實際量測部分，因菲涅爾微結構尺度達到微米等級和殼模的凹面形狀，皆會造成量測上的困難，本研究利用彩色共軛焦進行微結構量測，並透過後處理及資料分析，經量測結果顯示平均微結構充填率 GFR(Groove Filling Ratio)可以達到 70%以上。本研究未來可應用於虛擬成像的微結構光學元件與智慧隱形眼鏡的領域。

**關鍵詞：**菲涅爾微結構，隱形眼鏡殼模，射出成形，模擬分析，微結構充填率

### Abstract

In this study, a contact lens shell mold containing Fresnel microstructures was manufactured by injection molding, and then the shell mold was used for secondary remolding to make Fresnel contact lenses to correct high hyperopia. The thickness of contact lenses increases with the increase in optical power, and it is difficult to produce light and thin high-power contact lenses. By adding microstructure on the lens can reduce the thickness and maintain the optical performance. However, the dead angle of the microstructure will cause light loss, which will affect the slight distortion and blur of the image. In the injection molding process, using Moldex3D R16.0 simulation software to analyze important process parameters, through Design of Experiment with three factors and two levels to reduce the influence of forming errors and increase the filling ratio of the microstructure, also discuss and analyze the process parameters. The simulation results show that the average displacement of the optical zone of the microstructure contact lens shell mold is 1.2% of the design value, and concluded that mold temperature affects the filling ratio the most among process parameters. In the measurement part, because the scale of the microstructure and the shape of the shell mold, it will be difficult to measure. This study uses laser confocal to measure the microstructure, and through post-processing and data analysis, the measurement results show that the average microstructure filling ratio can reach more than 70%. Results of this study can be extended in the field of smart contact lens design and injection molding of micro structured optics for VR/AR imaging systems.

Keywords: Fresnel microstructure, contact lenses shell mold, injection molding, simulation and

analysis, microstructure filling ratio

## 1. 前言

近年來視力矯正人口比例持續上升，矯正方式的選擇日趨多樣，例如眼鏡、隱形眼鏡及角膜雷射手術等等，於矯正同時追求便利及美觀性，多數人選擇佩戴隱形眼鏡，且隱形眼鏡的球面像差及色散像差皆較小於普通眼鏡。隱形眼鏡主要分為硬式(Hard Contact Lens, HCLs)及軟式(Soft Contact Lens, SCLs)兩大類，硬式隱形眼鏡多為角膜塑形的視力矯正，軟式隱形眼鏡提供光學性能進行矯正，具高舒適性、透氧性及良好適應性。台灣市場坊間的軟式隱形眼鏡多為水膠材質[1]，如圖一所示。本研究採用鑄模成形法(Cast Molding Method)，以塑膠射出成形製造含菲涅爾微結構之軟式隱形眼鏡塑膠殼模後，如圖二所示，再注入水膠至塑膠殼模中壓製成形並由UV燈固化成形，此加工方法具有大量生產、複製性高、鏡片表面光滑等優點。微結構複製率會影響成像，因此將在本研究探討射出成形與充填率分析。



圖1 軟式隱形眼鏡[1]

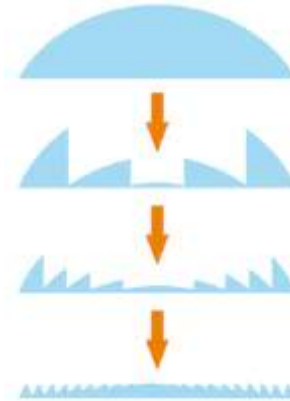


圖2 菲涅爾微結構示意圖[9]

## 2. 研究目的與方法

本研究以射出成形製造菲涅爾微結構隱形眼鏡殼模，如圖三所示，其殼模產品上具有前弧和基弧，前弧提供光學性能矯正視力，基弧其曲率設計為貼合人體角膜之曲線，如圖四所示。本研究目的為透過雷射共軛焦(Keyence CL-L(P) 015)，如圖五與六所示，對模仁入子與隱形眼鏡殼模上前弧的微結構進行量測，分析模仁入子的加工誤差及表面形貌，以及隱形眼鏡殼模微結構複製率(Groove Filling Ratio, GFR)。先以Moldex3D R16.0模流分析軟體對含菲涅爾微結構隱形眼鏡殼模進行模擬，並針對射出速度、保壓壓力及模具溫度作為製程參數進行實際射出。



圖3 微結構隱形眼鏡殼模與模仁入子

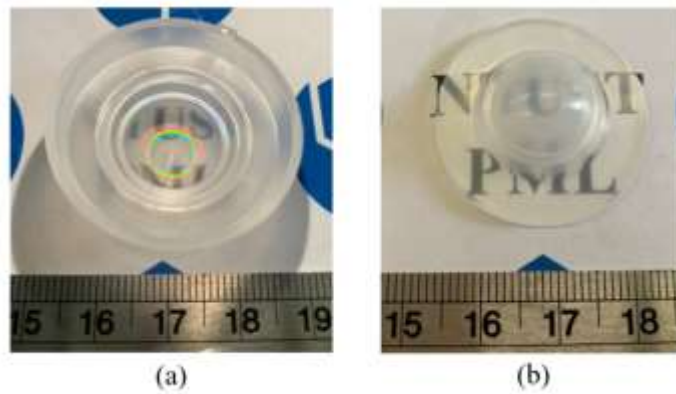


圖4 微結構隱形眼鏡殼模 (a)前弧殼模 (b)基弧殼模

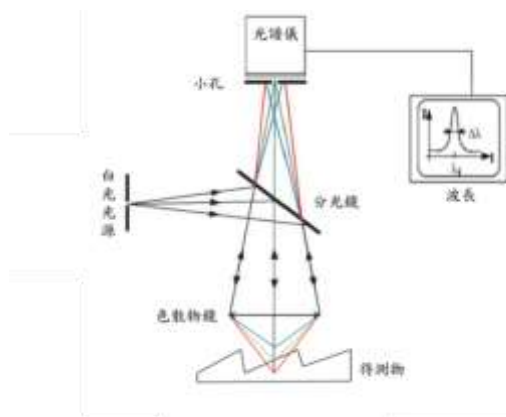


圖5 彩色共軛焦[10]



圖6 CL-P015彩色共軛焦鏡頭

### 3. 模流分析與射出成形

利用Moldex3D Studio模流分析軟體進行隱形眼鏡殼模之射出成形模擬。透過短射實驗與模流分析相互比較，如圖七所示，可以得知熔膠流動與模擬結果相符。於短射實驗中因射出機為V-Line系統導致實際上射速反應較快與充填模擬上有些微不同。本次模擬搭配實驗設計以三因子兩水準之全因子實驗分析，其中以射出速度、模具溫度以及保壓壓力作為三因子，並且搭配不同高低水準以訂定組合製程參數，成形參數表如表一所示，微結構複製率主因子分析圖如圖七所示，迴歸方程式如式一。射出成形實驗材料選用李長榮化工聚丙烯PP6331，並於射出成形前放置於烘料桶內進行溫度80°C的乾燥。射出成形機使用Sodick GL30油電混合式射出成形機，具有高精準劑量及高射出速度，提高微結構隱形眼鏡殼模於充填時之細部結構之品質。由實驗設計對微結構複製率結果得知，影響程度最高為模具溫度46.2%，其次為保壓壓力26.02%，接著是射出速度2.29%，如圖九與十所示；結果顯示高模具溫度、高保壓壓力與低射出速度的微結構複製率最高。

$$\begin{aligned}
 \text{GFR} = & 94.38 - 0.4765 * T_{\text{mold}} - 0.4207 * P_{\text{pack}} - 1.055 * V_{\text{inj}} \\
 & + 0.007858 * T_{\text{mold}} * P_{\text{pack}} + 0.01554 * T_{\text{mold}} * V_{\text{inj}} \\
 & + 0.01250 * P_{\text{pack}} * V_{\text{inj}} - 0.000188 * T_{\text{mold}} * P_{\text{pack}} * V_{\text{inj}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

表1 短射實驗










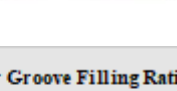
Simulation	Filling Time (%)	Experiment	Piston Position (mm)
	40 %		22.6
	50 %		25.7
	70 %		33.6
	90 %		39.5
	100 %		42.3

表2 實驗設計

Exp.	(A)	(B)	(C)	Result
	Mold Temperature (°C)	Packing pressure (MPa)	Injection velocity (mm/sec)	GFR (%)
R1	40 (-)	70 (-)	50 (-)	63.70
R2	40 (-)	70 (-)	70 (+)	62.03
R3	40 (-)	100 (+)	50 (-)	68.01
R4	40 (-)	100 (+)	70 (+)	69.34
R5	80 (+)	70 (-)	50 (-)	71.47
R6	80 (+)	70 (-)	70 (+)	71.73
R7	80 (+)	100 (+)	50 (-)	73.96
R8	80 (+)	100 (+)	70 (+)	72.72

表3 微結構填充率GFR變異數分析表

Source	SS	D.O.F	MS	F0	Fcrit
Mean	623.90	1	623.90	12480.5	4.15
V <sub>inj</sub>	0.004	1	0.004	0.07	
P <sub>pack</sub>	0.46	1	0.46	9.29	
T <sub>mold</sub>	1.46	1	1.466	29.33	
V <sub>inj</sub> * P <sub>pack</sub>	0.004	1	0.004	0.09	
P <sub>pack</sub> * T <sub>mold</sub>	0.13	1	0.13	2.70	
V <sub>inj</sub> * T <sub>mold</sub>	0.0008	1	0.0008	0.02	
V <sub>inj</sub> * P <sub>pack</sub> * T <sub>mold</sub>	0.04	1	0.04	0.82	
Error	3.59	72	0.05		
Total	629.62	80			

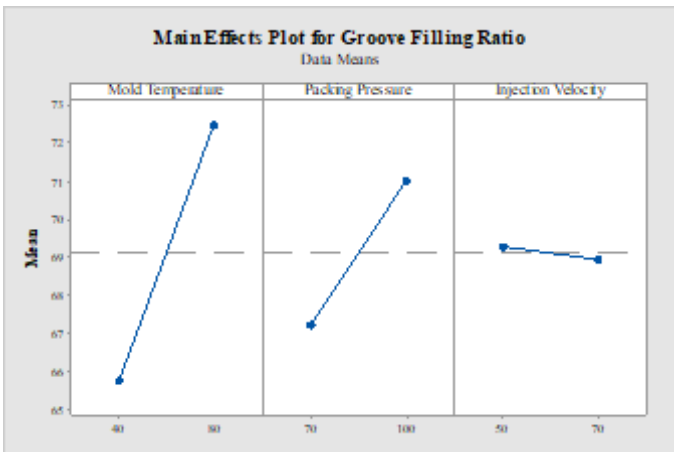


圖7 微結構複製率主因子分析圖

表4 微結構填充率GFR實驗因子影響表

Source	Regression Coefficient	Effect (%)
Constant	2.79	-
V <sub>inj</sub>	-0.006	2.29
P <sub>pack</sub>	0.08	26.02
T <sub>mold</sub>	0.14	46.2
V <sub>inj</sub> * P <sub>pack</sub>	0.007	2.57
P <sub>pack</sub> * T <sub>mold</sub>	-0.04	14.03
V <sub>inj</sub> * T <sub>mold</sub>	-0.003	1.12
V <sub>inj</sub> * P <sub>pack</sub> * T <sub>mold</sub>	-0.02	7.74

#### 4. 隱形眼鏡殼模之量測

透過射出成形生產隱形眼鏡殼模，並且利用彩色共軛焦量測模仁入子與隱形眼鏡殼模光學區域，由公式進行換算得到微結構充填率，如式二。GFR是微結構充填率(%)，以模仁為基準其微結構平均微米高度 $H$ 和成品微結構平均微米高度 $h$ 比較而來，如圖八所示。本研究設計一治具且訂定一基準面進行殼模的量測，如圖九所示，而量測方法為取殼模  $R=5\text{mm}$  之長度進行初步量測，量測之結果若呈現左右高低差，代表中心偏移，因此進行 $x$ 及 $y$ 方向補正，並且將誤差設定在 $1\mu\text{m}$ 以內，最後再進行完整的量測，如圖十所示。微結構高度為每一鋸齒狀之波峰至波谷之高度差值，利用此特性將具有微結構之光學區劃分為4個段落，再個別將每段落中微結構的波峰及波谷值擷取後進行運算。量測結果顯示模仁平均微結構高度約 $4.02\pm 0.02\mu\text{m}$ ，隱形眼鏡殼模平均微結構高度約 $2.9\pm 0.1\mu\text{m}$ 且微結構複製率為64.3-69.3%，如圖十一所示。

$$\text{GFR}(\%) = \frac{h}{H} \times 100\% \quad (2)$$

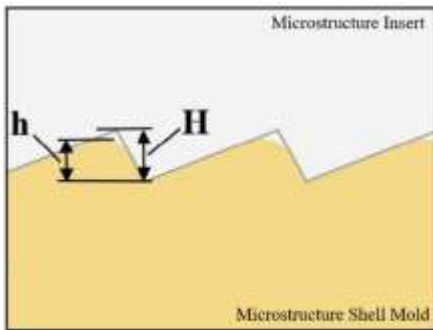


圖8 微結構複製率示意圖

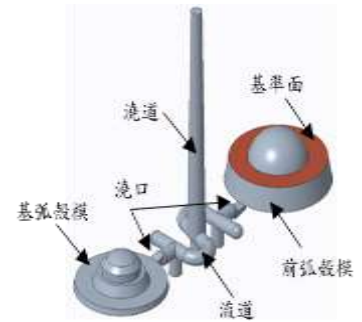
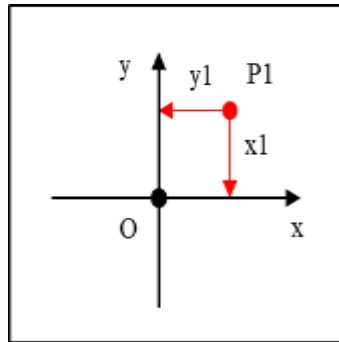


圖9 量測對中心示意圖與殼模之基準面示意圖

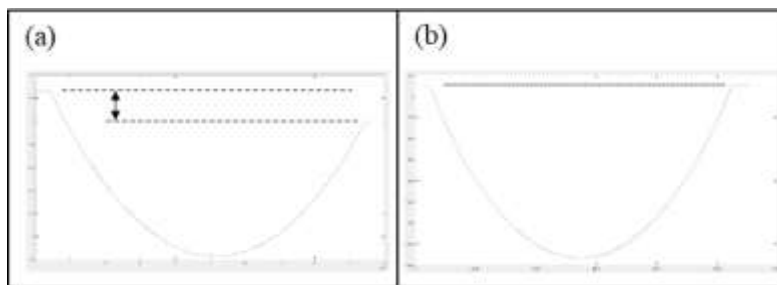


圖10 高低差補正(a)補正前(b)補正後

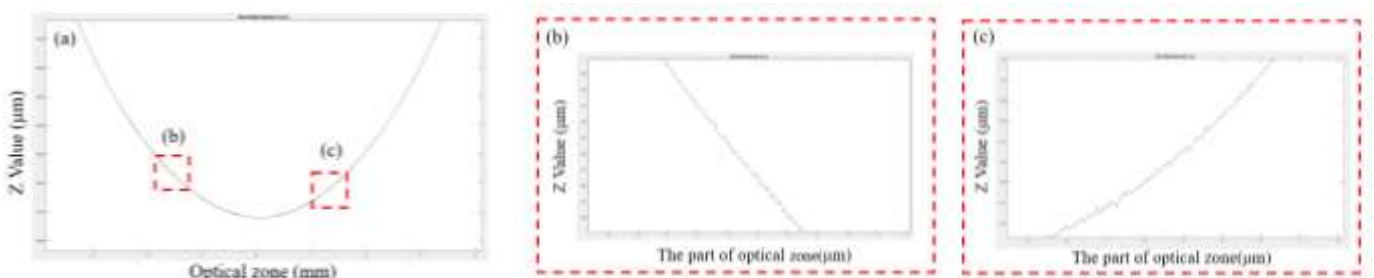


圖11 微結構量測結果圖 (a)光學區 (b)(c)光學區線段

## 5. 結果與討論

由微結構複製率分析結果得知，影響程度最高為模具溫度 46.2%，因模具溫度的提高可降低固化層的厚度，進而提升於充填階段時半固態狀的熔膠進行微結構充填；其次為保壓壓力 26.02%，因為在半固態狀態下經由保壓階段所施加的壓力，再將塑料向微結構內部進行充填，使得微結構複製率提升，最後是射出速度 2.29%的影響程度。當高模具溫度(80 °C)、高保壓壓力(100 MPa)及低射出速度(50 mm/sec)可以獲得最大之微結構填充率且達到 73.96%。由於塑料接觸到相對冰冷的模具後，會瞬間產生固化層，當固化層愈來愈厚時，流動阻力就會增加，因此模具溫度愈高，固化層愈薄，使得熔膠在模穴內的流動性較高。透過射出成形生產隱形眼鏡殼模，並且利用彩色共軛焦量測模仁入子與隱形眼鏡殼模光學區域，微結構高度為每一鋸齒狀之波峰至波谷之高度差值，利用此特性將具有微結構之光學區劃分為 4 個段落，再個別將每段落中微結構的波峰及波谷值擷取後進行運算。量測結果顯示模仁平均微結構高度約  $4.02 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ，隱形眼鏡殼模平均微結構高度約  $2.9 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ，且微結構複製率為 64.3-69.3%。

## 6. 誌謝

本論文為科技部計畫編號MOST 109-2221-E011-057-MY2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。最後感謝模具公會給予一個平台讓學生們進行學習與交流。

## 7. 參考文獻

1. 邱鈺婷，“非球面軟式隱形眼鏡之殼模射出成形研究”，國立臺灣科技大學，機械工程所，碩士論文，2016。
2. Vu, Thi Lien, “整合模擬退火法之 NURBS 近似於非對稱曲面之最佳化應用”，國立臺灣科技大學，機械工程所碩士論文，2010
3. L. T. Vu, C. A. Chen, Y. T. Qiu, "Optimization of aspheric multifocal contact lens by spline curve," Proc. SPIE 10021, Optical Design and Testing VII, 100210, 2016.
4. L. T. Vu, C. A. Chen, and P. J. Shum, "Analysis on multifocal contact lens design based on optical power distribution with NURBS," Applied Optics, vol. 56, no. 28, pp. 7990-7997, 2017.
5. L. T. Vu, C. A. Chen, Y. T. Qiu, "Study on Injection Molding of Shell Mold for Aspheric Contact Lens Fabrication." Procedia Engineering 184, 2016.
6. L. T. Vu, C. A. Chen, and C. W. Yu (2018, Feb). Optical design of soft multifocal contact lens with uniform optical power in center-distance zone with optimized NURBS. Optics Express (IF=3.356), Vol. 26, No. 3, (SCI), pp. 3544-3556.
7. L. T. Vu, C. A. Chen, C. C. Lee and C. W. Yu. Compensating additional optical power in the central zone of a multifocal contact lens for minimization of the shrinkage error of the shell mold in the injection molding process. Applied Optics (IF=1.791), Vol. 57, No. 12, 2018.
8. Vu, Thi Lien, “NURBS 多焦隱形眼鏡設計及殼模射出成形之收縮分析研究”，國立臺灣科技大學，機械工程所碩士論文，2018
9. Kshirsagar Vivek Balasaheb, “菲涅爾隱形眼鏡設計與殼模射出成形之體積收縮分析研究”，國立臺灣科技大學，機械工程所碩士論文，2020。

10. 廖偉程，“動態量測拋光墊系統於修整性能與銅膜晶圓化學機械平坦化之相關性研究”，國立臺灣科技大學機械工程系碩士論文, 2020