

射出成型光學鏡片的模擬與驗證

Simulations and Verifications of Injection Molded Optical Lenses

張元榕、游朝凱、邱顯森、楊文賢

Yuan-Jung Chang, Chao-Kai Yu, Hsien-Sen Chiu, Wen-Hsien Yang

科盛科技股份有限公司

CoreTech System (Moldex3D) Co., Ltd.

王培仁

Pei-Jen Wang

國立清華大學動力機械工程學系

Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University

摘要

射出成型光學鏡片近來已大量應用於各種電子產品，然而厚度變化大與低殘留應力之要求提高鏡片製造的困難度。本論文藉由黏彈模型結合三維電腦模流分析討論典型之鏡片成型案例，本文不但發現模擬結果預測出一些在充填與保壓過程中的有趣現象，並且證明此 COC 材料的預測結果在流動方向與厚度方向都與實驗相當吻合。

關鍵詞：光學鏡片、模流分析、射出成型

Abstract

Injection-molded optical parts have been widely employed for various electronic products in the market today. The large variations in thickness and stringent requirements in residual stresses have made the parts tough to manufacture. In this study, a true 3D CAE analysis incorporated with visco-elasticity models have been adopted for studies of typical cases. Some interesting phenomena during filling and packing of the parts have been predicted by the CAE simulations. Furthermore, the CAE simulation results agree well with the experimental measurements not only in flow paths but also in gap-wise direction for the COC materials.

Keywords: Optical Parts, Mold Filling Analysis, Injection Molding

一、前言

隨著消費性產品功能趨於多元化，光學元件經常整合到日常各項消費性產品上。在顧及光學元件的品質之餘，還需要降低成本至消費大眾可以負擔的價格，因而近來多採用塑膠製造，藉以達到產品輕量化並且大量快速的生產，提高經濟效益，其中射出成型製程是被業界最廣為接受的生產方式。

射出成型的光學鏡片之成像品質主要受到兩個因素影響，分別為幾何外形與雙折射。加工過程中的體積收縮會影響產品的形狀精度，而幾何外形的誤差在成像時所呈現出來就是光學各種像差，如球差、慧差、像散、場曲、畸變等。而雙折射則會使得原本應該清晰銳利的影像變成有離焦與模糊等問題。

雙折射現主要成因是由高分子的光學非定向所導致，微觀下的高分子在軸向、背脊或側鏈方向的光學偏振特性不同，因此空間上之分子排向不一致，雙折射之程度也就不同。而分子排向在射出成型過程中，主要受到兩種不同來源的應力所影響，分別為流動殘餘應力與熱殘餘應力。

流動殘餘應力與其所造成的分子排向在充填階段與保壓階段是屬於高分子黏彈性的行為。在溫度高於玻璃轉移溫度之下，塑料處於熔融的階段，高分子鏈將很容易的依據流動方向產生相應的配向。而射出成型過程中高冷卻率下的快速固化將使得這些應力與分子排向無法被完全的鬆弛及釋放。

熱殘餘應力與其所造成的分子排向之成因，則主要是高溫的熔膠冷卻到室溫後的會產生體積收縮，且不同的位置的溫度與壓力等歷程不同，因而產生空間中的不均勻體積收縮與密度變化。經過分子鏈間的相互牽制與妥協後形成了產品的翹曲與變形，其中無法完全釋放掉的體積收縮所呈現的內應力，就是熱殘餘應力。熱應力一般比流動應力大，但是由於在溫度較低時所產生，造成的分子排向卻相對較流動應力小。

雙折射使得光線穿透過透明性材料時，分解為兩道有快慢差異之光線。光線速度快慢的不同與經過厚度方向的累計後，會產生光路程相位上的落差，稱之為光程差。當以偏振光觀察雙折射晶體材料時，由各光線亮度上的相互消長，產生明暗相間的光彈條紋，而其條紋級數與材料內部

之主軸應力差值成正比，代表著材料受力之狀況。

根據 Wang 等人先前研究 COC 材料鏡片的雙折射[3,4]，流動應力導致雙折射的影響約佔 92%，而熱應力導致的雙折射則約佔 8%。因此本篇論文將以具有真實三維模擬與黏彈性模型的 CAE 分析工具，透過模擬 COC 熔膠在射出成型製程中的流動殘餘應力，研究鏡片的各項性質並與實驗做比較。

二、數值模型

假設高分子熔膠行為為黏彈性流體，非恆溫的三維流動之數學方程式可以表示如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \boldsymbol{\sigma}) = \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = -p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}, \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} : (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (4)$$

其中， \mathbf{u} 為速度向量、 T 為溫度、 t 為時間、 p 為壓力、 $\boldsymbol{\sigma}$ 為總應力張量、 ρ 為密度、 $\boldsymbol{\tau}$ 為額外應力張量、 k 為熱傳導係數、 C_p 為比熱。在本文中， $\boldsymbol{\tau}$ 由 White-Metzner 模型的本質方程式可得：

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} = \eta (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad (5)$$

其中， λ 為鬆弛時間而 η 為黏度，兩者皆式溫度與剪切率的函數。

雙折射大小與塑膠內部所承受主軸應力差值的成正比，此現象為所謂之應力-光學定律，如下：

$$n_1 - n_2 = C_B (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (6)$$

其中， n_1 與 n_2 為主軸方向之折射率， σ_1 與 σ_2 為主軸應力，而 C_B 為光學應力常數。

在光線穿過雙折射晶體，由快慢兩光線而形成相位的差異，若以長度表示，一般稱之為光程差。光程差與雙折射大小及材料厚度 d 成正比：

$$\delta = \Delta n d. \quad (7)$$

條紋級數 N ，則定義為光程差與光波長 λ 之比值，可表示如下：

$$\frac{\delta}{\lambda} = N \quad (8)$$

三、CAE 模擬結果

設計一個平凸透鏡作為研究案例如圖 1，其中，凸面是設計為球面且曲率為 70 mm，而其餘的幾何為直徑 32 mm、厚度 2 mm 與澆口厚度 0.80 mm。加工參數也如表 1 所示。

圖 2 是模擬的光彈條紋結果。流動導致的光彈條紋，如圖 2(a)，與充填結束時的最大剪切應力(圖 3)分佈類似。較高的流動殘餘應力將集中在鏡片的澆口與模壁附近，而熔融態的流動應力可以輕易造成分子排向，因此流動導致的雙折射與流動應力相似度很高。

熱導致的光彈條紋分佈如同心圓狀，如圖 2(b)，但是由於量值不高因此條紋的圓形分佈較為模糊。這可能是與空間中的不均勻體積收縮有關，中心的高溫熔膠收縮的比其他區域劇烈，因而造成此類似同心圓分佈。

進一步比較圖 2(a)與圖 2(b)後，發現流動導致的條紋級數明顯高於熱導致的條紋級數。綜合雙折射相關的模擬結果可以知道採用 ZEONEX 480R 材料成型的鏡片，其流動導致雙折射問題比較嚴重，而比較沒有熱導致雙折射的問題。

圖 4 顯示與光彈條紋相關的光程差分佈，最高的光程差發生在澆口的位置。另外，仔細觀察圖 4 發現在遠離澆口的位置，受到幾何形狀的突然改變所影響，光程差相對其他附近區域有較高的量值。

圖 5 為厚度方向的雙折射分佈，有一個值得注意現象，除了靠近模壁的雙折射量值較高之外，在中心的區域也有較高的雙折射分佈。充填過程中，流動會造成的分子鏈的拉伸，在接觸到低溫的模壁後，拉伸的分子鏈就受到凍結，產生靠近模壁的雙折射。在保壓階段，額外的熔膠不斷被擠壓進去澆口，且其路徑必須經過隨時間發展的固化層所造成的狹小通道，因而在鏡片澆口附近的厚度中心區域產生相對應的第二個高峰量值。

四、實驗驗證

圖 6 為實驗觀察的光彈照片，根據應力-光學定律可以推算出厚度方向的平均雙折射，如下

$$\Delta n = \frac{\lambda N}{h} = N, \quad (9)$$

Δn 為雙折射; λ 為光波長，採用標準的黃光 589.3 nm; N 為條紋級數; h 為量測位置當下的厚度。計算出的厚度方向平均雙折射如圖 7。

圖 8 為圓偏振光彈觀測儀下的模擬與實驗光彈條紋比較。兩者的條紋都同樣清楚指出殘留雙折射沿著流動路徑減少，最高值發生於澆口區域與澆口旁銳利的轉角。搭配圖 4 與圖 8 一同觀察，發現模擬與實驗都發現雙折射增加量值於切面面積變化區域，圈選標示於圖 8。若細數條紋級數則發現，實驗觀測的最大級數是 5，而模擬值是 4，表示模擬的雙折射相較於實驗觀測尚有些微低估。

除了模擬與實驗結果整體的光彈條紋有很高的吻合性之外，澆口區域厚度方向的雙折射分佈同樣需要實驗進行驗證。傳統的作法是將成品做厚度上進行固定厚度的移除，本文採取同樣製程條件下的四個產品進行精細的鑽石切削移除，原本澆口厚度 0.8 mm，預計逐漸移除到一半的厚度，移除厚度分別為 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 與 0.4 mm。圖 9 比較不同移除厚度下的光彈照片，圖 9(b)經過移除 0.1 mm 後，條紋相較於移除前產生明顯的變化。

進一步探討殘留雙折射在厚度方向上的變化，各個樣品的光彈級數的減少量值與減少比率繪製於圖 10。首先，移除 0.1mm 後，接近 30% 的殘留雙折射被移除。再比較移除量值的增減幅度後，推測第二個峰值位置大約落在 0.2~0.3mm 之間。此外，移除澆口的一半厚度後(0.4 mm)，大約移除了接近 50% 的雙折射，可以看出厚度方向上有相當程度的對稱性。上述的實驗觀察現象，可以由搭配 White-Metzner 模型的 CAE 模擬結果所準確掌握，如圖 5。

五、結論

本文採用了真實三維 CAE 分析工具研究射出成型的光學鏡片，並且整合 White-Metzner 模型可以考慮高分子熔膠流動時的黏彈效應，且透過應力-光學定律將預測的應力轉換求得殘留雙折射。模擬的雙折射的分佈無論在厚度方向或流動方

向，均與實驗有相當高的吻合。結果亦顯示，使用射出成型加工的光學 COC 材料，充填與保壓造成的流動應力是造成最後殘留雙折射主要原因，而停止流動且開始固化後的熱應力所造成的雙折射則可以被忽略。

六、參考文獻

- [1] Y. B. Lee, T. H. Kwon, and K. Yoon, *Polymer Engineering and Science*, 42:2246 (2002).
- [2] A. I. Isayev, G. D. Shyu, and C. T. Li, *J Polym Sci Poly Phys*, 44, 622 (2006).
- [3] Wang, P. J. and Lai, H. E., *ANTEC Proceeding*, 2494-2498 (2007).
- [4] Wang, P. J. and Lai, H. E., *ANTEC Proceeding*, 421-425 (2008).
- [5] R. Y. Chang and W. H. Yang, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 37: 125 (2001).
- [6] Chang, Y. J., Yang, W. H., Hsu, C. H., and Chang, R. Y., *Proceedings of the Polymer Processing Society, 24th Annual Meeting*, Salerno, Italy (2008)

七、圖表彙整

表 1. 平凸透鏡之加工參數

	Clamping force	550	kN
	Injection weight	27	Gm
	Max. Pre.	259	Mpa
Machine	Max. Flow	190	cc/sec
	Screw diameter	22	Mm
Conditions	Stroke	70	Mm
	Injection speed	22	mm/sec
	Holding pres.	98.10	Mpa
	Cooling time	60	Sec
Mold	Open time	8.76	Sec
	Coolant	Silicone oil	
Conditions	Rom temp.	25	°C
	Resins	Zeonex 480R	
Melt	Melt temp.	275	°C
	Mold temp.	124	°C
Conditions	Ejecting temp.	127	°C

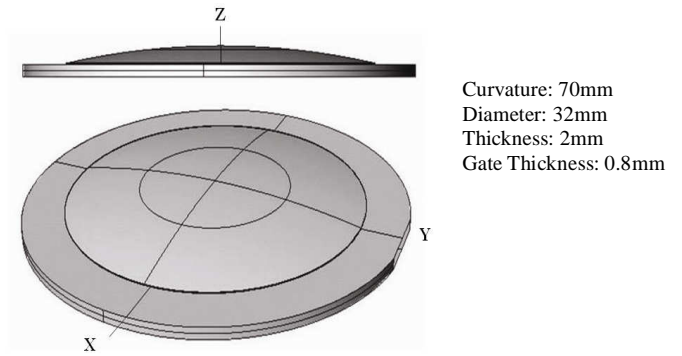


圖 1. 平凸透鏡幾何示意圖

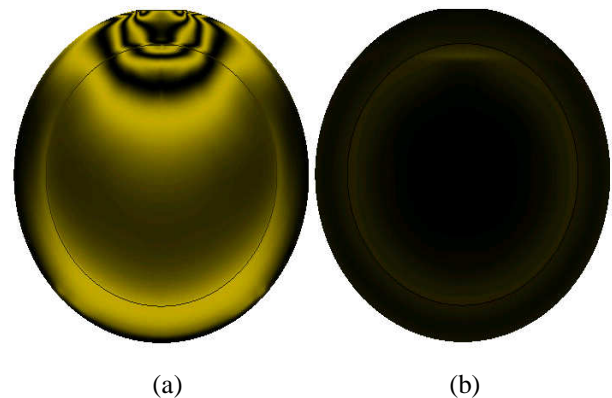


圖 2. 模擬透鏡的光彈條紋受到不同種類的應力影響;(a)流動應力導致雙折射的光彈條紋;(b)熱應力導致雙折射的光彈條紋

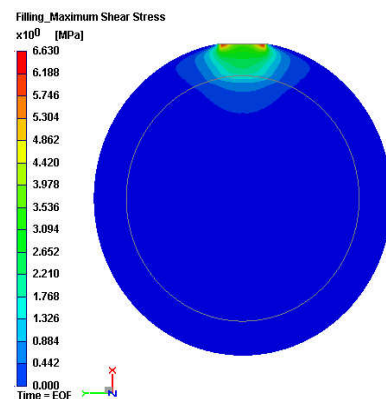


圖 3. 充填結束時的最大剪切應力分佈

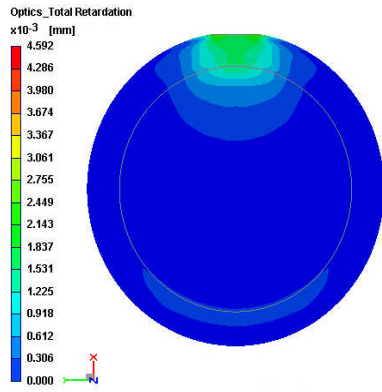


圖 4. 最後成品的光程差分佈

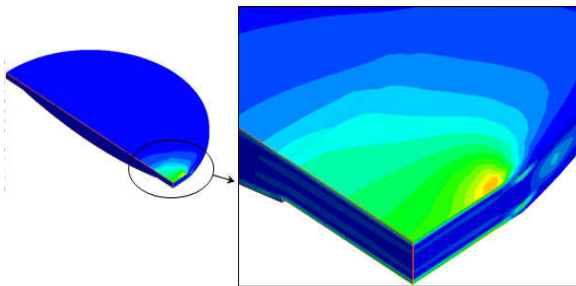


圖 5. 厚度方向的雙折射分佈;最大的高峯值發生在模壁附近，次大的高峯值發生於澆口中心

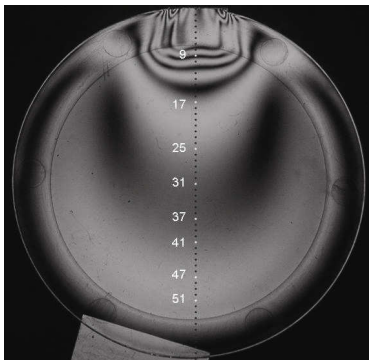


圖 6. 實驗的光彈照片與根據光彈理論量測雙折射的位置

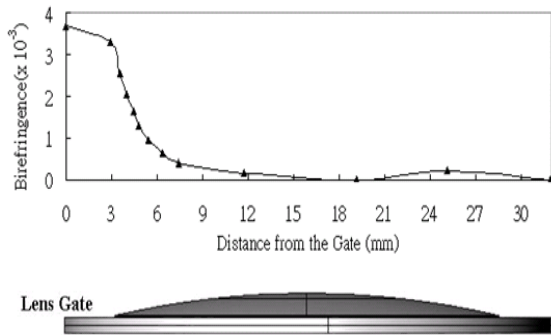


圖 7. 沿流動路徑的厚度方向平均雙折射分佈

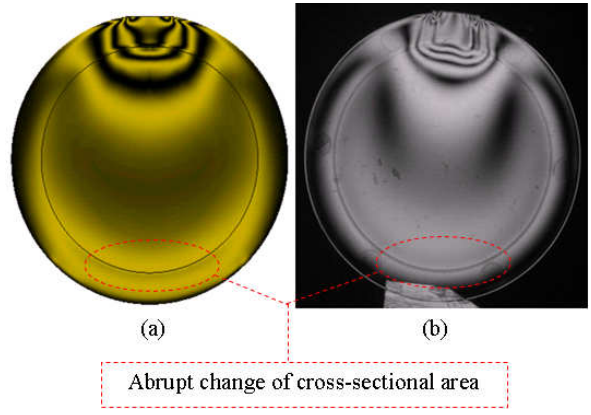


圖 8. 透鏡的光彈條紋分佈;(a)White-Metzner 黏彈模型下的 3D CAE 模擬結果;(b)實驗觀察照片

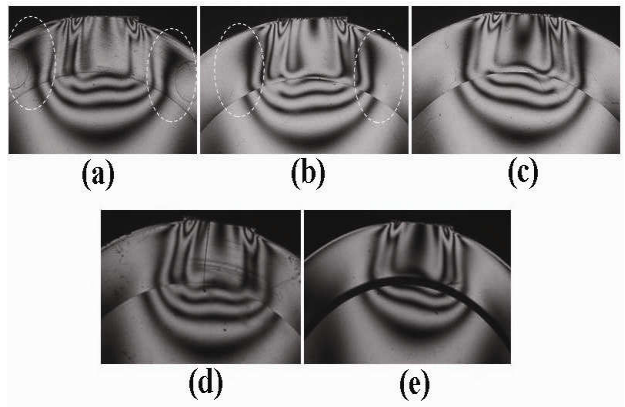


圖 9. 移除厚度後的光彈條紋照片;(a)切削前;(b)移除 0.1 mm,(c)移除 0.2 mm,(d)移除 0.3 mm,(e)移除 0.4 mm

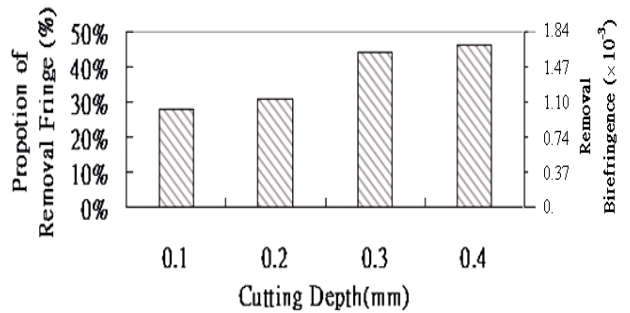


圖 10. 移除厚度與移除的雙折射比率間之關係條狀圖