

模流設計應用於射出成型之光學特性分析

Study on the Optics Performances using Mold Flow Analysis

林肇民¹ 鄭釗瀚² 林建宏⁴ 張維霖³
Chao- Ming Lin Chao- Han Cheng Chien-Hung Lin Wei-Lin Chang

吳鳳科技大學 光機電暨材料研究所 教授¹ 研究生² 研究助理³

吳鳳科技大學 機械工程系 專題生⁴

¹⁻³Graduate School of Opto-Mechatronics and Materials, WuFeng University

⁴ Department of Mechanical Engineering, WuFeng University

摘要：本文運用射出成型方法來製造塑膠鏡片在市場中已被廣為應用，但在高精密度的要求下，肉厚不均的特性及折射率導致鏡片的使用範圍受限，使塑膠光學鏡片在製作上的技術尚有許多空間等待突破，其中塑料在充填流動時所造成的流動殘留應力，及冷卻時溫度差異所形成的熱殘留應力，是使塑膠鏡片產生雙折射影響光學性質的主要原因。因此，本計劃藉由三維電腦模流分析探討典型鏡片成型案例，經由改變澆口及塑料溫度來觀察流動殘留應力、熱殘留應力等對塑膠鏡片光學性質的影響。分析結果顯示澆口的選擇會影響雙折射分佈的差異，主要在於澆口與產品端的接觸面積大小，接觸面積大產生的殘留應力範圍較大，而分子鏈結受到擠壓的效應相較於小澆口型式的流道來得小，因此大澆口型式可得到較低的殘留應力；在塑料溫度方面，分析顯示塑料溫度低能降低熱殘留應力的問題，但相對的可能會增加流動殘留應力。因此，對於塑膠鏡片的設計上必須考量澆口及塑料溫度對於殘留應力的影響。

關鍵詞：雙折射、光程差、光彈條紋、殘留應力

Abstract : This paper using the mold flow software to analyze the optics performances (including birefringence, optical path difference, Photo-elastic fringe order, residual stress) of the plastics injection molding lens. The flow (is apparent in the injection molding) and thermal residual stresses (appear in the general manufacturing processing) are major defects for considering the lens performances. The present results show mold flow technology can effectively provide some solutions for the optics lens manufacturer to improve the optics lens quality.

Keywords : Birefringence, Optical path difference, Photoelastic fringe order, Residual stress



壹、前言

近年來隨著科技產業的迅速發展與技術層面的提升，塑膠材料之應用已由原本民生消費性產品轉型進入高精密工業產品上，加上 3C 產品走向功能多元化的發展潮流，使精密光學元件在 3C 產品上使用率越來越高。為符合經濟效益，許多廠商紛紛投入塑膠光學產品製造，藉以達到產品輕量化並且快速生產的目的。因此，間接促使光電產品及相關零組件不斷地推陳出新。而光學鏡片即為光電產品中最常見也是最不可或缺的零組件，除了望遠鏡與攝影機外，光學鏡片在數位相機、雷射印表機、影印機、投影機及行動通訊等產品上的應用相當普遍，故市場對光學鏡片的品質與精度的要求愈來愈高。在光學鏡片的製程中，除了材質本身的缺陷外，加工過程亦會對鏡片品質造成影響，不論是以鑽石輪磨機對玻璃材料進行研磨加工或是塑膠材料之射出成型製作，都容易使材料本身產生暫時性應力及殘留應力。這些殘留應力的存在會破壞光學鏡片的均質性，對要求高精度的光學系統而言，殘留應力的移除是很重要的過程。因此，若能分析出各種加工參數下殘留應力的深度與大小，將對於殘留應力的移除或改善有所幫助。

射出成型塑膠鏡片具有成本低、生產效率高、成型後不需研磨拋光二次加工、重量與耐衝擊強度等特點 [1]-[2]，但塑膠材料卻有著相同或更勝於玻璃鏡片的問題，即是如何克服殘留應力及雙折射 (Birefringence) 等問題。殘留應力將導致鏡片的變形及翹曲現象，嚴重影響尺寸精度；而雙折射會使鏡片的光學解析度及成像品質大幅降低，使得在精密儀器的應用上還無法完全克服而取代玻璃鏡片[3]。

傳統的光學鏡片製作技術需要長時間的經驗累積，必需靠著專業且有經驗的技師來負責設計並監督製程的每一個環節，但是應因塑膠光學產品種類的多樣性以及需求量大增，使原本傳統製造方式不敷需求。塑膠鏡片的市場占有率每年都有在成長，其高密度的要求、肉厚不均的特性及折射率導致鏡片的使用範圍受限，使塑膠光學鏡片在製作上的技術尚有許多空間等待突破。過去只能透過實驗得知經射出後產品的光學優異，使用圓偏振光彈觀測儀實驗出光彈條紋，在根據應力-光學定律推算出厚度方向下的平均雙折射[4]；現今技術只需利用光學分析模擬軟體來進行專業的光學設計，之後再依照光學設計的結果便可生產所需的產品。

目前射出的光學元件，主要有收縮變形與雙折射等問題，收縮變形目前可透過製程參數的調配與模具補償加以改善，但是雙折射問題卻影響整體光學系統，因為雙折射現象是在光穿透材料時，由快慢差異的兩條光線，在不同的雙折射與厚度方向的累計後產生光程差 (Optical path difference)，在各光線相互的消長下，產生明暗相間的光彈條紋，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，產品受到的應力越大相對的雙折射率越高，因此解決雙折射是目前重要的課題[5]。雙折射是殘留應力 (Residual stress) 所導致的，殘留應力會降低鏡面的精度，遭受應力腐蝕而降低了使用壽命，嚴重者會因為材料本身的應力光學效應產生雙折射的現象，降低成像品質，而殘留應力可分為流動殘留應力與熱殘留應力兩部份，流動殘留應力是因為塑料在充填過程中產生高剪切率，因塑料的快速冷卻使得靠近模壁處的分鏈造成流動定向，產生殘留應力[5]-[6]；熱殘留應力則是因為不均



勻冷卻，造成產品內的分子鏈不均勻收縮，當成品快速冷卻到塑膠的 Tg（玻璃轉換溫度）點以下時，冷卻收縮造成分子鏈應力無法完全釋放，且塑膠件厚度方向之冷卻是由與模壁接觸之成品表面開始向成品內部延伸，所以中心層較慢冷卻，使其分子鏈間受到周圍之拘束，此種是屬於冷卻所造成的應力。

本計劃即使用 Moldex3D 模流分析軟體進行光學性質的模擬分析，利用 Optics 光學模組，可模擬塑膠鏡片在射出成型後之光學特性，包括雙折射、光程差、條紋級數及光彈條紋（Photoelastic fringe order）等。

貳、理論分析

光學性質

光彈應力分析是根據某些透明材料的雙折射現象（double refraction or birefringence phenomenon）。亦即，當透明材料受力在垂直於運動方向振動的投射光線分解成平行於主應力（principal stresses）方向的兩分量，由於光線的速度與主應力成正比例關係，因此兩分量將因主應力的不同而以不同的速度通過透明材料，因而造成相位偏移（phase shift）。如果相位偏移是建設性的，則兩分量彼此加強，而形成亮的區域，反之，如果相位偏移造成兩分量互相干擾，則形成暗的區域。如此一來，在偏光儀（polariscope）上將看到透明材料上產生明暗的線條，這些線條可以用來解釋應力分佈的情況並計算之。

因此，光彈是一種光學式的全域性應力量測方法，採用具有雙折射的透明光彈材料，製成與實際物件形狀相似的模型，並施加與實際情況相似之負荷，當光入射時會產生暫時性雙折射現象，此種現象稱之為光彈效應。若將其置於偏光場中，由於應力造成偏振光的相位差所產生的干涉作用，形成明暗相間的條紋，這一些條紋即代表著模型內部各點的應力分佈情形，並以光彈理論加以分析，便可確定模型內部各位置之應力，可作為實驗的分析與比較。

在分析軟體中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：

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

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

$$\sigma = -pI + \tau \quad (3)$$

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

其中， u 為速度向量、 T 為溫度、 t 為時間、 p 為壓力、 σ 為總應力張量、 ρ 為密度、 τ 為額定應力張量、 k 為熱傳導係數、 C_p 為比熱。 τ 由 White-Metzner 模型的本



質方程式可得：

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta (\nabla u + \nabla u^T) \quad (5)$$

其中， λ 為鬆弛時間而 η 為黏度，兩者皆是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：

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

因此，殘留應力的狀態可透過計數 Δn 所形成的等色線應力條紋 (Isochromatic fringe) 階數和決定 C 值而得。[7]

CAE 理論

Moldex3D 主要可分為四個分析模組，包含充填 (Flow)、保壓 (Pack)、冷卻 (Cool)、翹曲 (Warp)，其在理論模型方面在各模組的假設如下：

充填 (Filling)

射出成型中充填分析的過程全為壓力推動塑料熔膠前進，因壓力的差異使塑料波前 (Melt Front) 前進充填模穴。由於塑料本身具有黏度，黏度越高代表流動越困難，因此塑料局部黏度大小可以視作是流動阻力的度量；而塑料黏度受溫度及剪切率影響較大，所以局部溫度大小、熱傳速率以及塑件肉厚均影響局部黏度大小，也視為流動阻力大小的依據。

保壓 (Packing)

在保壓階段，由於壓力相當高，所以在高壓下塑料呈現部份可壓縮 (Compressible) 之特性，在壓力較高區域，塑料較為密實、密度較高；在壓力較低區域，塑料較為疏鬆、密度較低，因此造成密度分佈隨位置及時間發生變化。保壓階段最重要的物性是塑料 PVT 性質，塑料比容為溫度與壓力函數，熱物性質僅為溫度函數，因此可利用 GHS (Compressible Generalized Hele-Shaw) 流動模式來描述塑料保壓過程。

冷卻 (Cooling)



在射出成型模具（Injection Molding）中，冷卻系統（Cooling System）的設計甚為重要，因為在充填射出的過程中冷卻系統將可以有有效的冷卻並且使成型的塑件凝固，避免變形的情況發生。然而冷卻時間佔了整個成型週期約 70%~80%，因此設計良好之冷卻系統可以大幅縮短成型時間，並提高產率、降低成本。冷卻不均勻更會進一步造成塑件的翹曲變形（Warpage and Distortion）及收縮不均（Non-uniform Shrinkage）的情形發生。[8]

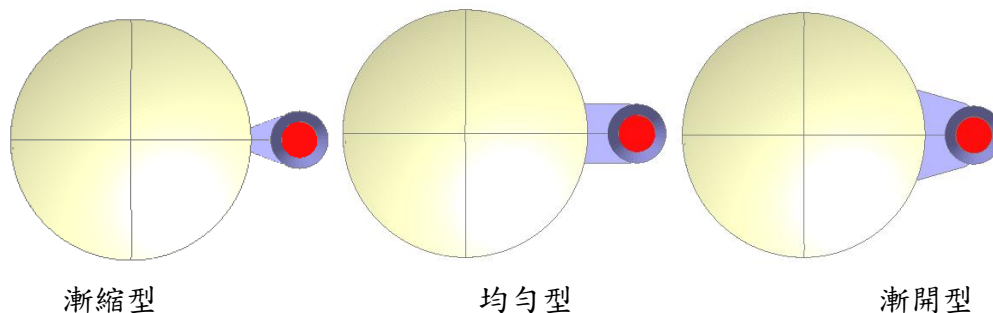
參、模擬分析

產品設計

本研究案例使用 Rhinoceros4.0 來繪製產品與流道，利用 Moldex3D-Mesh 模組進行網格製作，此專案共設計三種澆口進行分析，分別為漸縮型、均勻型、漸開型，設計此三種類型是為了研究其流動殘留應力所造成的光學現象，產品尺寸由表一所示，三種產品設計分別如圖一所示。

表一 產品尺寸

塑件尺寸	100.00 x 100.00 x 22.00 (mm)
模具尺寸	282.84 x 217.57 x 153.60 (mm)
模穴體積	126.526 (cc)



圖一 產品設計

材料及加工參數

塑膠材料使用 COP，其型號為 Zeonex1430R Zeon；射出成型條件如表二所示。經模擬分析可獲取之結果為充填、保壓、冷卻及翹曲，藉由此分析來獲得光學部分的雙折射、光程差、條紋級數及光彈條紋等分析比較。

表二 成型加工條件

填充時間	1.1921 (sec)
料溫	280 (°C)
模溫	80 (°C)
射出壓力	170 (MPa)



射出體積	146.849 (cc)
保壓時間	5 (sec)
保壓壓力	170 (MPa)
頂出溫度	138 (°C)
空氣溫度	25 (°C)

數據分析

流動導致雙折射

藉由此組別可以觀察出流動殘留應力於充填階段結束的瞬間影響的雙折射產生的區域，從這些區域知道可能是剪切率較高的位置。

熱導致雙折射

在此模組可以觀察出熱殘留應力造成的雙折射區域，從這些區域知道可能是內應力較大的地方。

熱導致光程差

從此模組可以觀察到熱殘留應力造成的光程差區域，在這些區域可以觀察到雙折射經由產品肉厚累積下於產品表面的結果。由理論分析得知光程差是由雙折射的光源進入產品後，於肉厚不斷累計於產品表面的結果。

熱導致條紋級數

藉由此模組可以觀察出熱殘留應力造成的條紋級數，在此處可預測光彈的區域。由理論分析得知條紋級數是由光程差與所投射光之波長比值產生在產品表面處的結果。

熱導致光彈條紋

在此模組可以觀察出熱殘留應力造成的光彈條紋，在此處可以看到應力可能集中的區域。此模組是模擬圓偏光儀所觀察出來的光彈條紋。

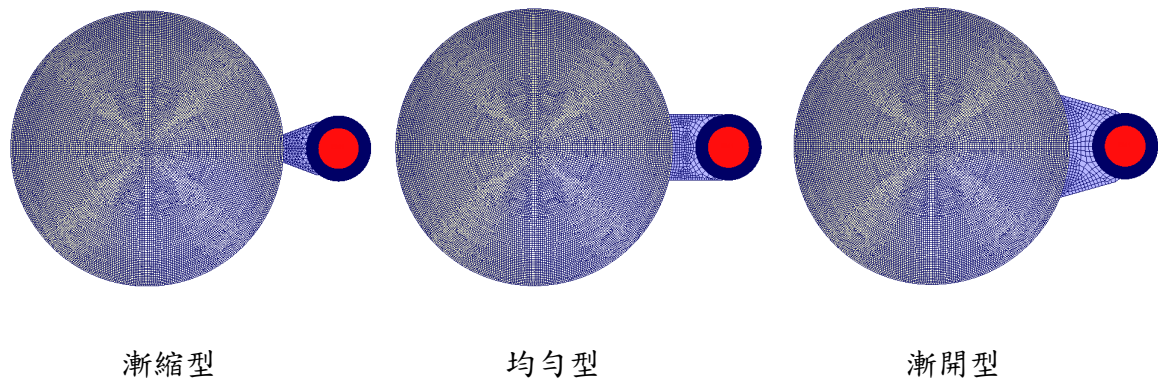
肆、結果與討論

我們將結果與討論分成兩部份，第一項為設計三種澆口的配置，第二項修改料溫參數，透過光學分析結果來探討殘留應力影響的各種光學特性，其分別討論如下。

(一) 澆口設計分析

在產品設計上改變澆口型式，將使塑料的流動充填路徑直接影響流動所造成的殘留應力分佈。因此，對於澆口型式上的選擇主要針對流動殘留應力對光學性質的影響做比較分析，其型式分別為漸縮型、均勻型及漸開型，網格數大約在 27 萬 5 千左右，此模型均以五面體及六面體的實體網格建置而成，如下圖二所示，而模擬分析結果如下。

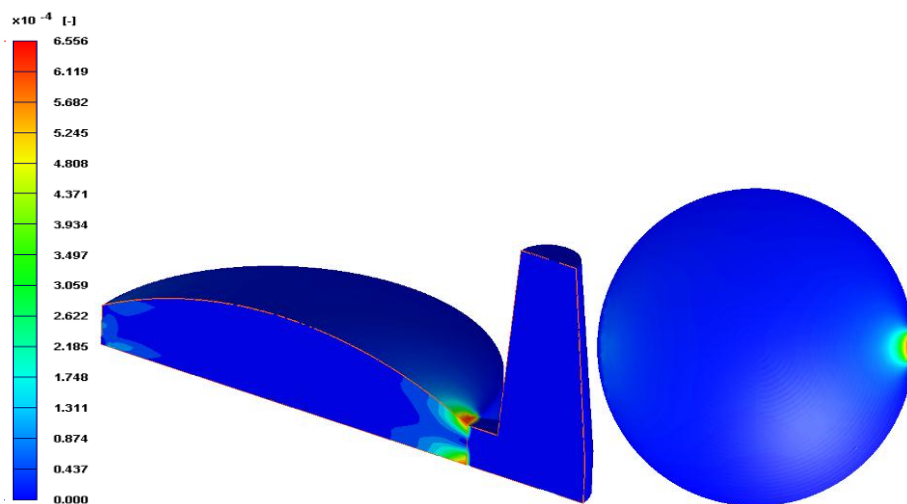




圖二 光學元件澆口設計網格分佈圖

漸縮型

圖三為漸縮型澆口型式進行光學分析之雙折射分佈範圍。分析顯示漸縮型澆口型式使光學元件的雙折射分佈集中在澆口處及產品末端，且出現最高值達 6.556×10^{-4} 。主因在於澆口採用漸縮型式，塑料在澆口處流動過程中由寬至窄，塑膠分子鏈結受到擠壓造成應力集中，使殘留應力範圍較大，而影響雙折射的分佈。

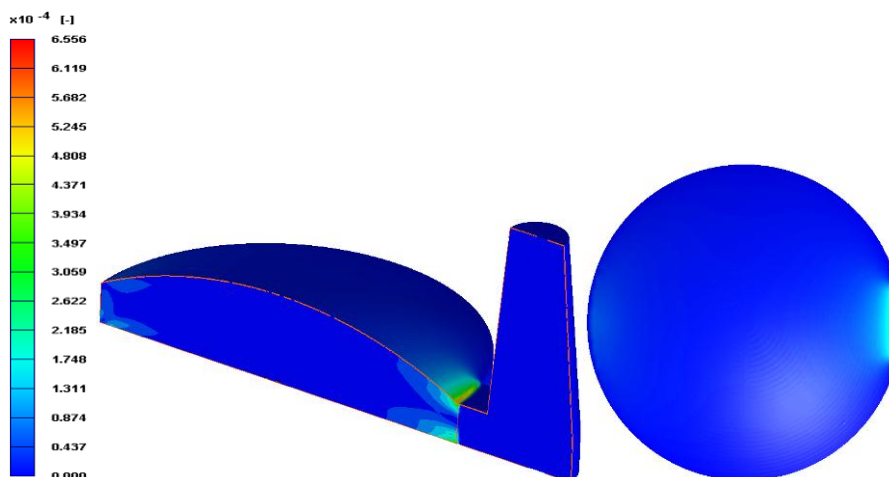


圖三 漸縮型澆口之流動雙折射

均勻型

圖四為均勻型澆口型式進行光學分析之雙折射分佈範圍。分析顯示均勻型澆口型式使光學元件的雙折射分佈集中在澆口處及產品末端，其數值最高達約 5.439×10^{-4} 。主因在於澆口採用均勻型式，塑料在澆口處較漸縮型的澆口幾何更易於流動，雖使應力集中的問題減少，卻因為澆口尺寸增加使澆口處所產生的雙折射現象對產品影響範圍更廣。

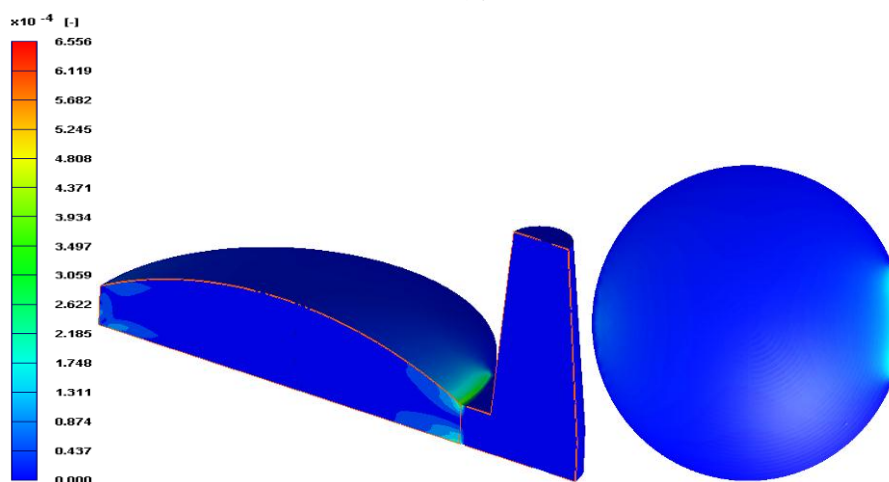




圖四 均勻型澆口之流動雙折射

漸開型

圖五為漸開型澆口型式進行光學分析之雙折射分佈範圍。分析顯示漸開型澆口型式使光學元件的雙折射分佈範圍降低至 3.905×10^{-4} 。相較於漸縮型與均勻型，漸開型澆口與產品接觸面積較大且澆口型式採用漸開易於推動塑料流動，使雙折射有明顯降低，但是所產生的雙折射面積也相對增加許多。



圖五 漸開型澆口之流動雙折射

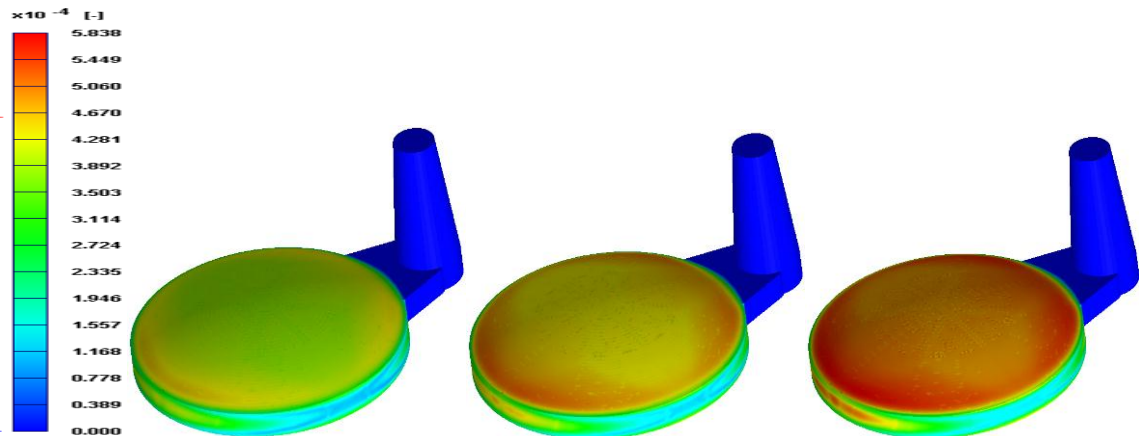
從以上分析顯示雙折射現象只在澆口及產品末端可被明顯察覺到，這是因為塑料在充填時受到澆口的幾何限制及產品末端漸縮之影響，產生流動殘留應力之所在。而以上的分析由於侷限於產品本身肉厚較厚，無法更詳盡的描述澆口設計對於光學性質的影響，唯藉此分析可獲知澆口與產品接觸面的大小，將直接影響雙折射的分佈範圍，並且澆口的形式也顯示出影響流動末端造成的雙折射分佈差異。

(二) 溫度影響分析

對於溫度與光學性質相互影響之研究採用漸開型澆口型式，主因是塑料在採用漸開型澆口型式中的模穴流動時，對於流動殘留應力的影響較小，可以忽略塑料在流動過程中可能形成的問題點，對於研究熱所造成的殘留應力影響較無干涉的問題。塑料溫分別採用 260°C 、 280°C 及 300°C 去做各項光學性質分析比較。

熱雙折射

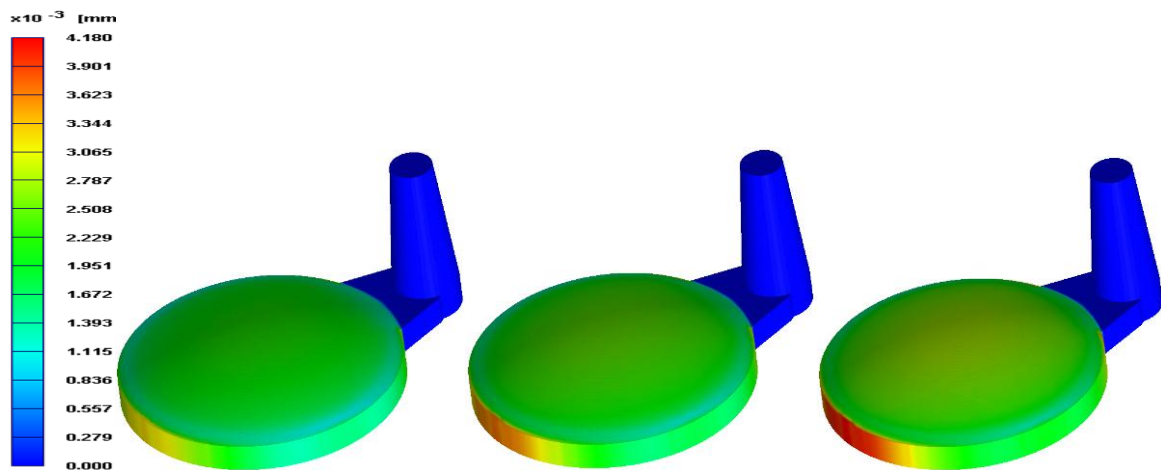
圖六為三種料溫之熱殘留應力的雙折射的影響，產生雙折射數值分別為 4.603×10^{-4} 、 5.238×10^{-4} 、 5.838×10^{-4} 。分析顯示料溫越高時，所造成之熱殘留應力的越劇烈，雙折射影響範圍也越大，觀察發現靠近模壁處的雙折射數值為較高區域，而產品內部卻較低，是因為熱殘留應力在靠近模壁處遭受快速冷卻無法釋放其應力，越往產品內部中心則越有時間釋放其殘留應力，影響之雙折射也越低。



圖六 塑料 260、280、300°C 之熱雙折射分佈

熱光程差

圖七為三種料溫之熱殘留應力所影響的光程差。分析顯示光程差數值分別為 3.247×10^{-3} mm、 3.724×10^{-3} mm、 4.180×10^{-3} mm，光程差是由雙折射現象經過肉厚層累積後呈現在表面的結果，可以發現與三種料溫的熱雙折射影響一樣，當料溫越低時，所影響之熱光程差也會越低。

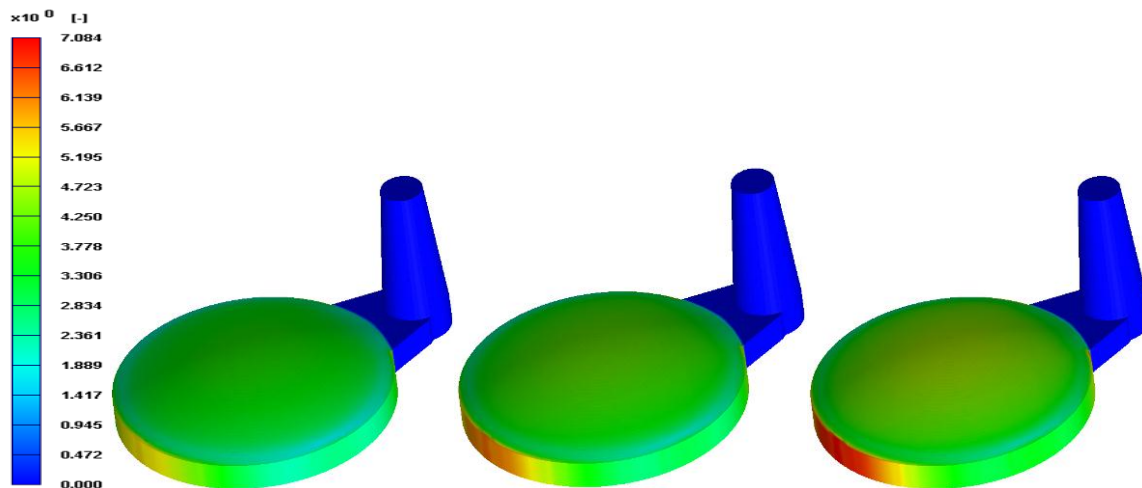


圖七 塑料 260、280、300°C 之熱光程差分佈

熱條紋級數

圖七為三種料溫之熱殘留應力所影響的條紋級數。分析顯示之條紋級數分別為 5.503、6.307、7.084，條紋級數是由投射光之波長與光程差之比值所呈現在產品表面的數值，可以發現與三種料溫影響之熱光程差所呈現的圖形相似，當料溫越低時，會有較低的條紋級數。

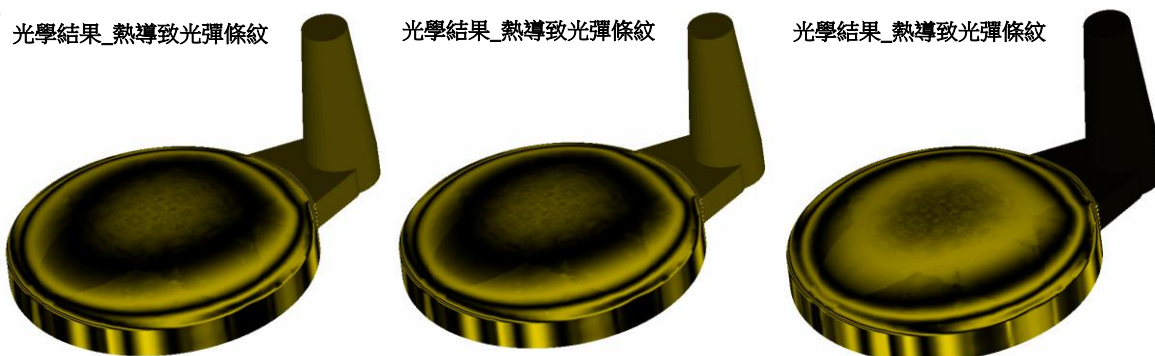




圖七 塑料 260、280、300°C 之熱條紋級數分佈

熱光彈條紋

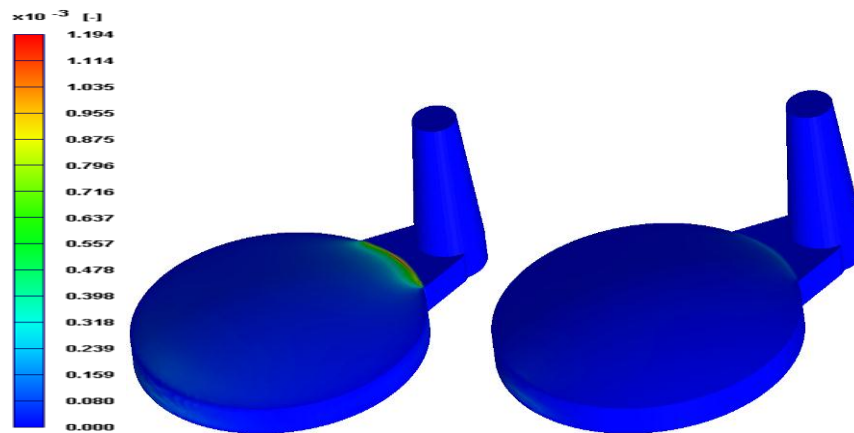
圖八為三種料溫之熱殘留應力所影響的光彈條紋，而光彈條紋是模擬圓偏光儀呈現明暗相間的圖形，以下為條紋級數值所呈現的區域性。



圖八 塑料 260、280、300°C 之熱光彈條紋

根據以上分析顯示，塑料溫度越高對產品的光學性質影響越顯著。經由觀察發現塑料溫度較低時，可以獲得較佳的光學現象，而溫度較低的塑料會造成流動上的困難，使得塑料流動對光學性質上的影響更容易被察覺到，下圖九即可明顯觀察到此現象，兩者流動造成的雙折射分佈有所差異。





圖九 塑料溫度 260°C 與 300°C 之流動所造成雙折射比較

伍、結論

本計劃利用 Moldex3D 模流分析軟體的實體光學分析模組 (Moldex3D-Optics)，配合 Rhinoceros4.0 為建模平台，設計一光學元件，探討澆口型式及塑料溫度等因素對光學元件的雙折射現象所造成的影響，期望透過模擬分析來改善光彈條紋級數，降低光學元件的雙折射率，使透過射出成型所製造的光學元件能達成預期設計品質之要求。

雙折射是殘留應力所導致的，而殘留應力主要分為流動殘留應力及熱殘留應力兩部份，流動殘留應力是塑料在充填過程中產生高剪切率，因塑料的快速冷卻使得靠近模壁處的分分子鏈造成流動定向產生殘留應力；熱殘留應力則是因為不均勻冷卻，造成產品內的分分子鏈不均勻收縮，當產品快速冷卻到塑膠的 T_g (玻璃轉換溫度) 點以下時，冷卻收縮造成分分子鏈應力無法完全釋放，且塑膠件厚度方向之冷卻是與模壁接觸之成品表面開始向成品內部延伸，所以中心層較慢冷卻，使其分分子鏈間受到周圍之拘束，此種是屬於冷卻所造成的應力。根據上述理論，針對影響流動殘留應力及熱殘留應力來分析各種光學現象，由以上兩項分析結果獲得下列結論：

(一) 改變澆口型式：

分析中的三種澆口型式，因塑料在充填時受到澆口幾何的限制，與產品末端漸縮的影響而產生流動殘留應力，且流動侷限於產品本身肉厚較厚，無法詳盡的描述澆口設計對光學性質的影響，唯藉此分析可獲知澆口與產品接觸面的大小，將直接影響雙折射的分佈範圍，並且澆口的型式也顯示出影響流動末端造成的雙折射分佈差異。因此，建議設計者必須考量後續加工產品的分佈大小，選擇適用且合宜的澆口型式。

(二) 改變塑料溫度：

分析結果顯示，塑料溫度越高對產品的光學性質影響越顯著，經由觀察發現塑料溫度較低時，可以獲得較佳的光學現象，而溫度較低的塑料會造成流動上的困難，使得塑料流動對光學性質上的影響更容易被察覺到，所以設計者依產品需求，控制流動或熱所導致的殘留應力，將可針對光學性質做改善。



陸、致謝

本文感謝國科會計劃 98-2815-C-274-002-E 提供之資源補助及科盛科技股份有限公司之技術支援。

柒、參考文獻

- [1] 張元榕、楊文賢、許嘉翔，塑膠光學元件射出成型之殘留應力與光彈分析，科盛科技股份有限公司，2007 年。
- [2] 林文燦、謝忠佑、陳美子、陳明志、雒瑋群，光學鏡片製程改善之研究，國立勤益技術學院 工業工程與管理系研究所、國立勤益技術學院 精密機械與製造科技研究所，2006 年。
- [3] 王培仁、賴懷恩，非球面光學塑膠鏡片設計與成型研究，國立清華大學動力機械工程學系，2008 年。
- [4] 張元榕、游朝凱、邱顯森、楊文賢，射出成型光學鏡片的模擬與驗證，國立清華大學動力機械工程學系，2009 年。
- [5] 張元榕、楊文賢、游朝凱、張榮語，塑膠射出成型產品之雙折射預測，科盛科技股份有限公司、國立清華大學化學工程學系，2008 年。
- [6] 張元榕、邱顯森、楊文賢、張榮語，應用黏彈性分析於預測射出產品之流動殘留應力，科盛科技股份有限公司、國立清華大學化學工程學系，2008 年。
- [7] 張元榕、游朝凱、邱顯、楊文賢、王培仁，射出成型光學鏡片的模擬與驗證，科盛科技股份有限公司、國立清華大學動力機械工程學系，2009 年。
- [8] 科盛科技股份有限公司，Moldex3D 模流分析技術與應用，全華圖書股份有限公司，2007 年。

