

光學透鏡降低殘留應力之製程參數優化策略與驗證

Optimization Strategy and Verification of Process Parameters for Reducing Residual Stress in Optical Lenses

鄒濠亘*、黃俊欽、陳旻揚

國立高雄科技大學模具工程系

*E-mail: I109147102@nkust.edu.tw

摘要

在射出成型過程中，殘留應力對產品品質有顯著影響，特別是在光學產品中可能導致雙折射現象，而在一般產品中可能引起材料龜裂或翹曲變形。殘留應力主要由塑膠材料的長鏈狀分子在射出過程中受到拉伸應力、壓縮應力及冷卻收縮時的熱應力作用而產生，體積收縮變化愈劇烈的地方，愈容易造成分子間的劇烈拉扯，則殘留應力愈高，因此對產品內部的體積收縮控制至關重要，特別是在肉厚不均的產品上需以多段保壓的方式來控制及降低不同區域的體積收縮差異。本研究以直徑 75mm 且具有不等厚度的平凹透鏡作為實驗載具，以光程差做為殘留應力的量化量測指標，探討透鏡內部殘留應力的產生機制並結合響應曲面法(RSM)發展一套製程參數的自動優化策略達到降低透鏡殘留應力。首先根據透鏡的肉厚變化及光學性能需求，以響應曲面法來建立保壓參數與產品品質之間的預測模型，並且以光程差分布作為優化目標，自動建立最適化的多段保壓曲線。同時在模具內安裝溫度及壓力感測器，藉由模內感測技術量測熔膠溫度及壓力的即時變化，確認在製程參數的優化策略下，不同肉厚區域的熔膠具有較一致的成型軌跡，可以達到縮小體積收縮差異的幅度，進而降低透鏡的殘留應力。研究結果顯示，透過本研究提出的製程參數自動優化策略，能快速且有效地建立起最適化的多段保壓曲線，使平凹透鏡的最大光程差可從 230 nm 降低至 35 nm，並大幅縮短現場操作人員的調機時間。

關鍵詞：射出成型、殘留應力、模流分析、響應曲面法、線上感測技術

Abstract

During the injection molding process, residual stress significantly affects product quality. This stress may lead to birefringence in optical products, while in general products, it can cause material cracking or warping. Residual stress arises mainly from the stretching, compressive, and thermal stresses experienced by the long-chain molecules of plastic materials during the injection process. Areas with more intense volumetric shrinkage changes are more likely to experience severe molecular tension, resulting in higher residual stress. Therefore, controlling internal volumetric shrinkage is crucial, especially for products with uneven thickness, which require multi-stage holding pressure to control and reduce shrinkage differences in different regions. This study uses a plano-concave lens with a diameter of 75mm and varying thickness as the experimental vehicle, utilizing retardation distribution as the quantitative measurement indicator for residual stress. It investigates the mechanism of residual stress generation within the lens and employs Response Surface Methodology (RSM) to develop an automated process parameter optimization strategy to reduce lens residual stress. Firstly, based on the lens's thickness variation and optical performance requirements, RSM is used to establish a predictive model between holding pressure parameters and product quality. The retardation distribution is used as the optimization target to create the optimal multi-stage holding pressure curve automatically. Temperature and pressure sensors are installed in the mold to measure real-time melt temperature and pressure changes through in-mold sensing technology. This confirms that under the optimized process parameters, the melt in regions with different thicknesses exhibits a more consistent molding trajectory, thus reducing volumetric shrinkage differences and lowering residual stress in the lens. The results of the study indicate that the proposed automated process parameter optimization strategy can quickly and effectively establish the optimal multi-stage holding pressure curve, significantly improving the retardation distribution of the plano-concave lens and greatly reducing the machine adjustment time for on-site operators.

Keywords: Injection Molding, Residual Stress, Mold flow analysis, Response Surface Methodology, Online Sensing Technology.

1. 前言

在射出成型過程中，產品內部通常會產生殘留應力。殘留應力主要分為流動和熱應力兩類。流動引起的殘留應力主要與聚合物分子的配向有關[1]。在充填階段時，塑膠的長鏈狀分子產生拉伸及配向現象，其現象產生為熔膠在流動時受到剪切作用影響，此時以成品厚度方向來看皮層部分的分子鏈受到壓縮應力作用，但內部核心層則受到拉伸應力的作用[2]。在保壓階段時若有發生過度充填及過度保壓現象時，分子容易因被過度壓縮而產生較高的應力，在成品不同區域造成較大的體積收縮差異，進而產生品質不良；在熱應力的部分，主要為冷卻過程中熔膠皮層及核心層的冷卻速率不一致，造成產品內部在皮層及核心層間彼此產生壓縮與拉伸之應力[3]。

根據過往文獻顯示，熔膠溫度、模具溫度及保壓壓力是影響射出成型中殘留應力的關鍵因素。當模具溫度較高且兩側溫度一致時，可以降低殘留應力；熔膠溫度的調整也呈現相似趨勢。然而，不適當的保壓壓力(過高或過低)，都可能對熔膠的表皮層和核心層造成不良的應力分布，從而增加殘留應力[4, 5]。為了優化成形條件，田口實驗設計法被廣泛應用於透過確定的實驗範圍評估製程參數對品質的影響，進而找到最優解。然而，這種方法在評估超出設定範圍的參數時可能會導致誤判，錯過更佳的製程參數組合。近年來，應用機器學習模型於參數優化顯示出更佳效益[6, 7]。特別是在光學領域，考慮到光學透鏡產品的面型和雙折射問題，廣泛採用多目標優化方法來尋找適合的製程參數組合[8, 9]。研究指出，殘留應力的形成與體積收縮直接相關。透過深入分析PVT(壓力-體積-溫度)曲線，並採用多段保壓或射出壓縮技術，可以有效調節產品各區域的體積收縮差異。實驗結果顯示，若能控制各區域的PVT曲線軌跡相近，則能顯著降低各區域間的體積收縮差異，進而有效改善產品的翹曲變形和雙折射問題[10-12]。

大部分光學產品設計皆屬於較複雜的設計，其厚度多為不均勻的狀態，這對於殘留應力的控制和優化來說，是有一定的難度。目前研究多集中於均勻厚度的產品，較少有肉厚不均產品的殘留應力改善案例。因此本研究以直徑75mm且具有不等厚度的平凹透鏡作為實驗載具，以光程差做為殘留應力的量化量測指標，探討透鏡內部殘留應力的產生機制並結合響應曲面法(RSM)發展一套製程參數的自動優化策略達到降低透鏡殘留應力。

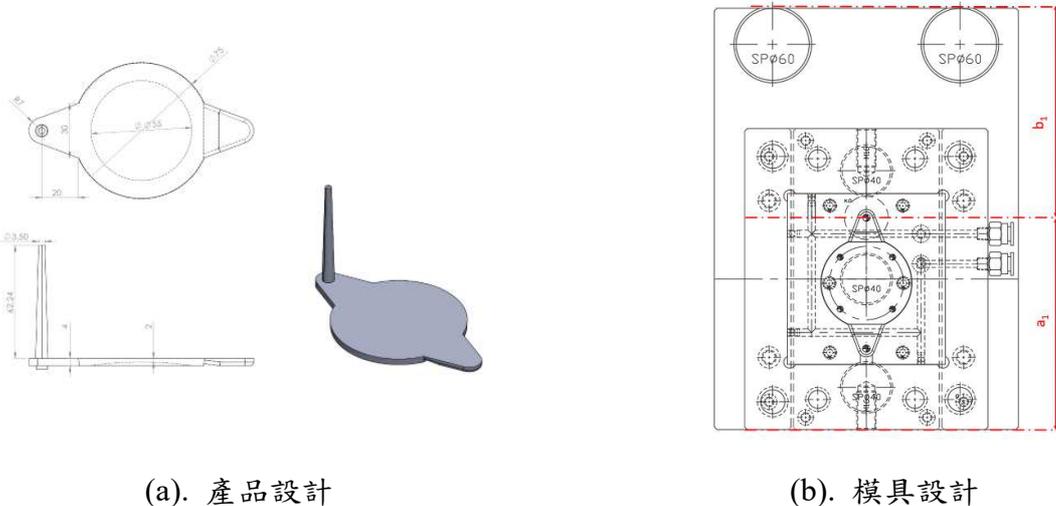
2. 實驗方法

2.1 研究架構

本研究以光學透鏡為例，使用 PMMA CM-211 作為成型材料，其材料具有優異的透光性、高透明度及低光學常數等優秀的光學性質，可應用於汽機車擋風玻璃、信號燈、指示燈、照明燈罩等配件。本研究透鏡具有 75mm 的外徑尺寸，而其肉厚從中心點向外的徑向方向漸增，範圍由小至大為 2 mm 至 4 mm。其曲面部分由球面設計，具有約 190mm 的曲率。至於澆口部分，採用扇型澆口設計，其寬度及厚度規格為 30 x 4 mm 的設計是為了避免側狀澆口容易造成的應力集中問題，如圖 1(a)所示。模具部分採用兩板式模座，其配置為一模一穴，因此為了因應偏心模具合模力不均問題，在天側增設兩支支撐柱來進行良好的配重比設計，避免造成射出過程中的四支歌林柱的應變不相等問題，如圖 1(b)所示，其研究流程如下所示。

- (1). 使用模流軟體建立分析模型，以評估光學透鏡的體積收縮變化及光程差分布。
- (2). 產品保壓區域劃分及參數評估。
- (3). 利用 Minitab 軟體規劃 RSM 實驗設計，並結合模流分析進行虛擬成形。
- (4). 基於分析結果，建立保壓參數與體積收縮指標的預測回歸模型。

- (5). 應用多目標方法結合回歸模型評估多段保壓曲線的建議參數。
- (6). 進行多段保壓曲線機台轉換評估。
- (7). 實際射出成形驗證及討論。



(a). 產品設計

(b). 模具設計

圖 1 產品及模具設計

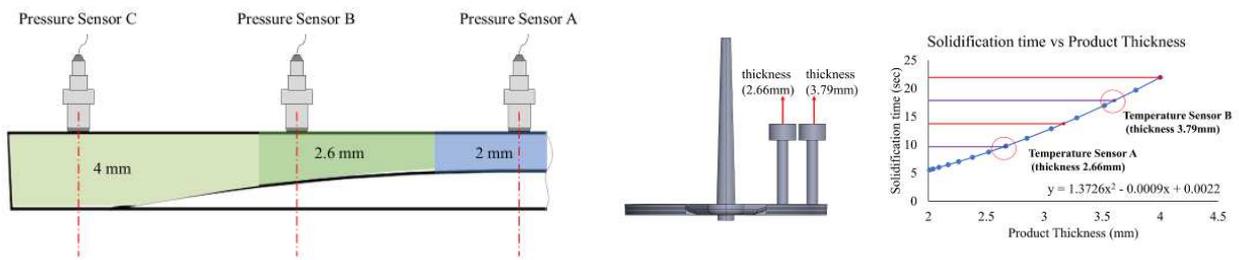
2.2 模流分析

本研究使用 Autodesk Simulation Moldflow Synergy 2024 進行模擬分析，由於本研究著重於探討透鏡的光學品質，故採用光學模組配合 3D 網格進行完整分析。為了使分析結果更貼近實際結果，本研究選擇使用 16 層的網格切層層數，根據軟體的建議，網格層數不應低於 10 層，最終 3D 網格數量達到約 210 萬。後續將利用模流分析軟體進行響應曲面法實驗，藉由模流分析結果的數據來建立預測回歸模型，以進行製程參數的優化。

2.3 模具內部線上感測設備安裝

本研究為了有效監測產品成形過程中的關鍵變化，因此必須藉由感測設備量測模穴內的真實熔膠壓力及溫度變化，以利後續對於殘留應力的監測及優化。本研究將產品按照徑向尺寸平均劃分為 A、B 及 C 等三個區域，其對應的產品肉厚分別為 2、2.6 及 4mm，以熔膠壓力感測器(6157CA, Swiss Commercial Kistler Technology Co., Ltd., Winterthur, Switzerland)來監測產品中三個不同肉厚區域的壓力變化，如圖 2(a)所示。在監測真實熔膠溫度方面，本研究採用紅外線型式的溫度感測器(EPSSZL, Futaba Electronics Corporation., Tokyo, Japan)來監測融體中心的最高溫度變化，可有效反映射出成型過程中融體溫度的變化。安裝位置分別對應肉厚 2.66mm 及 3.79mm，由於肉厚變化呈現較為線性的區域，因此本研究預估此兩點位置的感測數據擬合出的線性方程式可有效代表整體肉厚的溫度變化，如圖 2(b)所示。

在實際光學鏡片上不允許產品表面有感測器的安裝痕跡，由於本研究中的模內感測器僅用於評估模流分析與實際成型時的差異，因此若要將此方法應用於實際廠商的模具中，可將感測器安裝於鏡片外圍的非光學區域，即可達到相同作用。



(a). 壓力感測器安裝位置

(b). 溫度感測器安裝位置

圖 2 模內感測設備安裝

2.4 品質定義及量測規範

本研究採用光彈儀 (DIAS-1600, Strainoptics, Inc., North Wales, PA, USA) 進行光程差量測，其量測範圍為 0~280nm。該設備利用 CCD 鏡頭拍攝光彈影像圖，並通過專門的軟體分析，能夠詳細呈現由殘留應力所引起的光程差分佈圖。這對於平凹透鏡的光程差分佈測量尤為重要。本研究的目標是最小化產品中央區域的光程差分布並降低澆口區域的殘留應力，若調整製程參數不當時，容易產生過高的光程差分布，如圖 3 所示，因此需透過製程參數的調整來達到優化的目標。

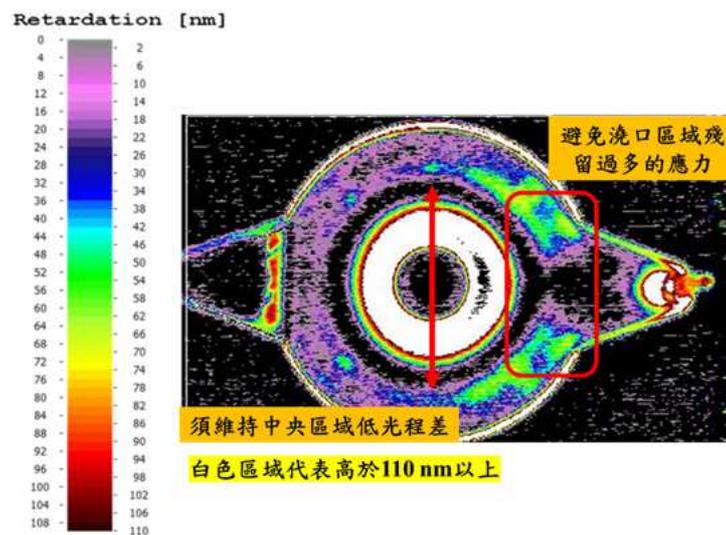


圖 3 產品光程差分布圖

2.5 反應曲面法 (Response Surface Methodology, RSM) [13]

反應曲面法是一套統計與數學技術，用於研究和優化製程中多個因素對特定響應變量的影響關係。它在工程、科學和工業製造等領域廣泛應用。應用流程包括以下步驟：

- I. 實驗設計：選擇一組實驗點來收集因素和響應變量的數據，常見的方法有全因子實驗設計和分散式實驗設計。
- II. 數學模型建立：根據實驗結果，建立描述因素與響應變量關係的多項式方程式。這些模型可以用來預測不同因素組合下的響應變量值。
- III. 模型擬合：利用數據進行模型的參數估計，使模型能夠最好地擬合實際數據。常見的方

法有最小二乘法和最大似然法。

IV. 響應曲面優化：利用擬合的模型，找到使響應變量達到最優化的因素組合。這可以通過數學優化算法實現，如梯度下降法和遺傳算法。

2.6 多目標優化及複合期望值 [13]

多目標優化是一種解決多個相互衝突目標函數的優化方法。傳統的單目標優化方法追求在單一目標下達到最佳結果，然而在工程問題中，有時候需要同時考慮多個目標，而這些目標之間可能存在衝突，因此無法透過單一最優解滿足所有目標。

在多目標優化中，常使用複合期望值來綜合考慮多個變數的效應。複合期望值可以將多個相關聯的變數合併成一個單一的效應。這些變數可以包含干擾因素或系統內的各種影響因素。複合期望值通過將每個品質指標接近目標值的程度轉換為期望值，並根據其重要性加權，建立了品質指標與權重期望值之間的關係。通過乘積的方法綜合多個期望值的效應，可以計算整個系統的平均效應。複合期望值越高，表示多個品質指標能夠更接近需求目標。

複合期望值的應用有助於在多目標優化中找到平衡點，以獲得在各個目標之間最佳的折衷解。透過綜合考慮多個目標的影響，可以找到一組解決方案，使得系統在不同目標之間達到較好的平衡。這對於在工程和科學領域中做出有效的決策和優化設計至關重要。

2.7 響應曲面實驗設計及品質響應值規劃

本研究保壓參數優化的肉厚區域主要為中間最薄處 2mm 至最厚處 4mm，所需總保壓時間約為 30 秒。在研究中預計使用 BBD(Box-Behnken Design)方法來規劃實驗，預計將產品肉厚區域劃分為 10 段來進行後續研究。藉由固定各段保壓時間，變動保壓壓力來建立響應曲面模型。在實驗參數的上下限部分，根據實際射出狀況進行規劃（如表 1 所示），以避免產生毛邊或表面凹陷問題。本實驗利用模流分析軟體進行 170 組分析實驗，其優勢在於無需透過實際射出實驗，可有效降低製造及時間成本。

根據過往文獻可得知，各肉厚區域的體積收縮越相近時，可有效降低產品殘留應力。因此，在模流品質定義的部分，本研究採用透鏡產品 X 方向直線區域熔膠核心處的體積收縮分布平均值及落差值（最大值-最小值）作為品質指標，如圖 4 所示。在體積收縮平均值的部分採用望目方式進行優化，期望將數值控制在 1.0%，其上下限分別為 0.8%及 1.2%。在體積收縮落差值的部分則採用望小方式來進行優化，上限為 0.5%。

表 1 BBD 實驗設計因子上下限

| 變動保壓壓力(1~10 段) | | 備註 |
|----------------|----|--------------------|
| 因子上限 (bar) | 80 | 保壓壓力上限 (避免毛邊問題) |
| 實驗基準值 (bar) | 45 | 實驗以油壓壓力 進行設定 |
| 因子下限 (bar) | 10 | 保壓壓力下限 (避免凹陷問題) |

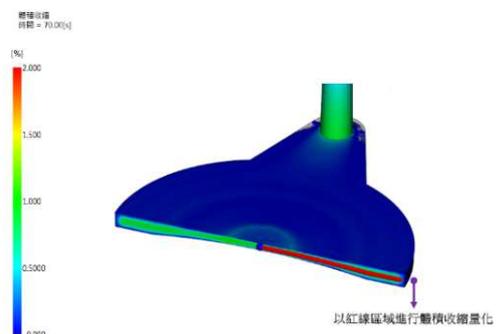


圖 4 體積收縮量化示意圖

3. 結果與討論

3.1 最佳多段保壓曲線建立

本研究將預測品質與目標品質之間的落差轉換為期望值，計算體積收縮平均值及其落差值之間的複合期望值，以探討綜合品質效應，最終確定各段適合的保壓壓力數值。其中，第十段保壓壓力對產品品質的影響較低，因此在後續研究中僅設定為 10 bar 用於洩壓。根據多目標優化結果，複合期望值約為 0.34，相關資訊如圖 5 所示。

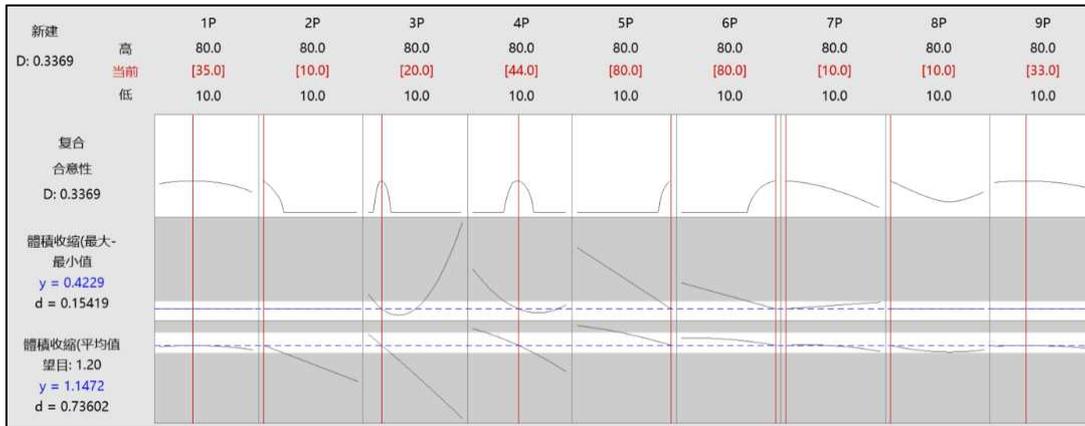


圖 5 多目標優化結果

3.2 多段保壓曲線機台轉換評估

在 3.1 節中，成功利用響應曲面法建立 10 段保壓曲線的建議參數，但由於本研究所使用的射出成形機最多僅能設定 5 段保壓參數，因此目前尚不能應用於實際生產。本節將說明如何將 10 段保壓曲線轉換為可使用的 5 段保壓曲線，並通過模流分析結果來判斷轉換前後產品品質的差異，以避免過度轉換造成優化效果的降低。

如圖 5 所示，前 6 段的保壓壓力變化較大，而後面 4 段則主要維持在較低的保壓壓力，其目的是用於洩壓，無需設定過多的保壓段數。因此，本研究重點在於前 6 段保壓壓力的整合，將其整合為前 4 段，最後 1 段則用於壓力卸除。具體作法是將第 3 至 4 段和第 7 至 10 段分別整合後取平均值，而第 5 至 6 段則整合為 1 段，如圖 6 所示。模流分析結果顯示，此轉換方式的光程差分布與原始 10 段保壓曲線的分析結果相近，如圖 7 所示。因此，選用此種轉換方式不會導致優化效果的下降。

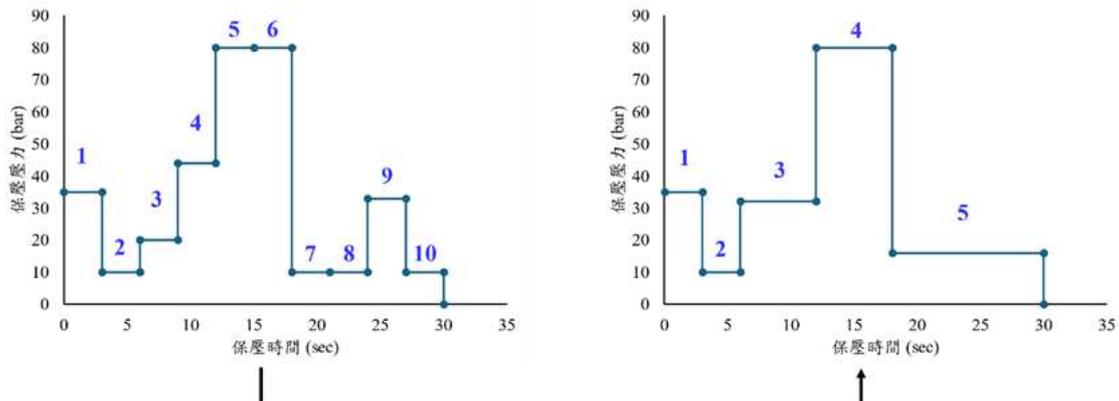


圖 6 多段保壓曲線轉換結果

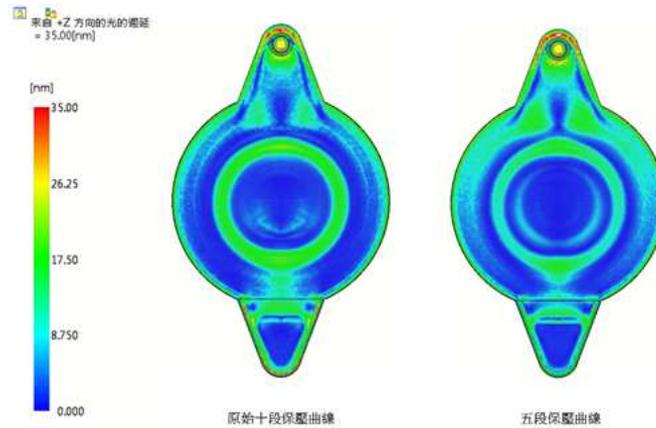


圖 7 曲線轉換方式對光程差分布的影響

3.3 實際射出成形驗證

在實際射出成型過程中，模流分析與實際情況之間可能存在一定的差異。為了避免以模流分析數據為基礎建立的響應曲面模型的優化效果降低，本研究期望通過熔膠壓力及溫度感測器擷取的數據，來比較模擬分析與實際成型之間的差異，並以此修正實際成型的製程參數，以縮小模擬分析與實際成型之間的落差，從而達到最佳的優化效果。

在熔膠溫度曲線部分，如圖 8 所示，模擬分析的溫度曲線與實際利用紅外線溫度感測器擷取的曲線趨勢相近，且數值差異較小，顯示溫度變化的落差不大。因此，無需對溫度相關的製程參數進行修正。

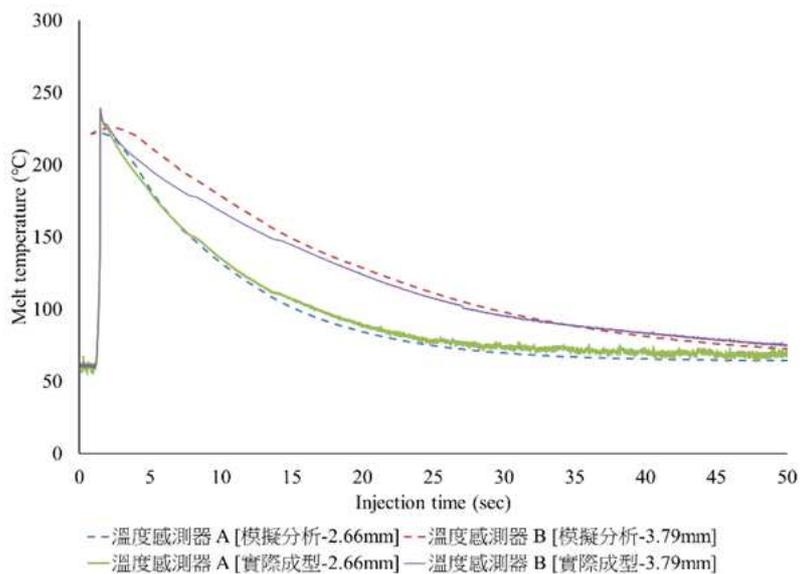


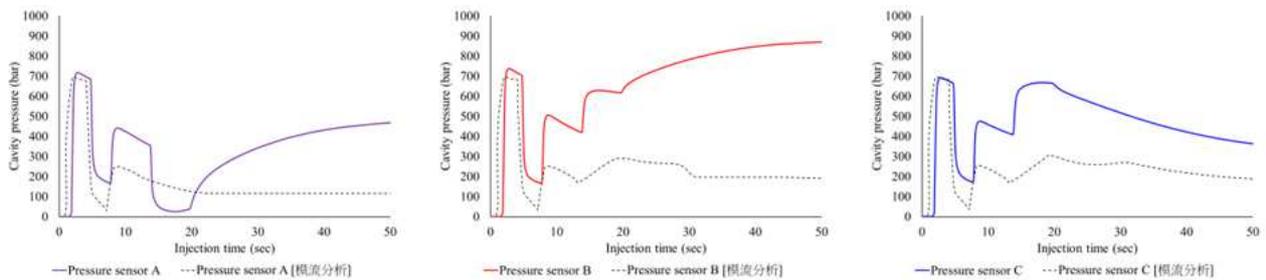
圖 8 熔膠溫度曲線比較 (模流分析 vs 實際成型)

在實際射出成型過程中，本研究希望利用前述模型建議的製程參數作為量產的條件，但根據實驗結果顯示，實際成型的模內壓力與模流分析結果相比異常偏高，且壓力曲線在開模時仍有較高的壓力殘留，如圖 9(a)所示。其主要原因在於模具結構強度不足，在較高的射出壓力下，模具容易變形，導致模穴中的熔膠量增加，進而產生過高的模內壓力。在冷卻階段，熔膠壓力開始下降，模具逐漸回彈，進而壓縮產品，使壓力曲線出現二次上升現象並持續高

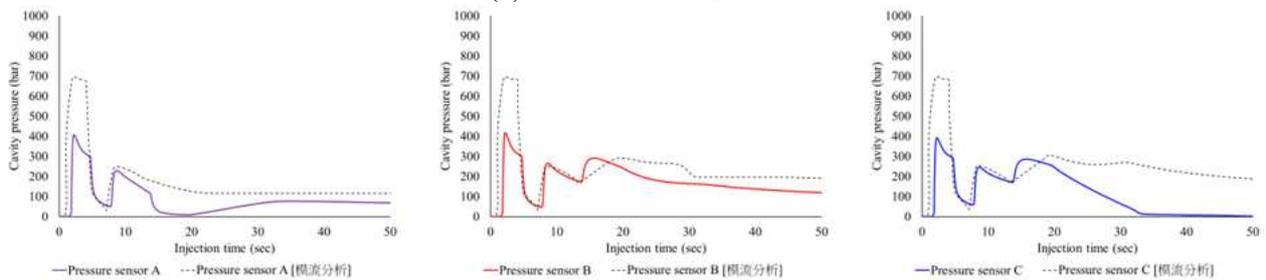
壓到開模前，造成嚴重的殘留應力問題，其最大光程差數值高達 230 nm，與模流分析結果的光程差分布有較大差異，如圖 11 所示。

由於在成形過程中的模內壓力變化會與產品品質密切相關。因此本研究希望透過修改製程參數，使實際成型的模內壓力曲線更接近模流分析結果，以避免嚴重的模具變形問題，並達到較佳的光程差分布。如圖 9(b)所示，本研究透過等比例降低保壓壓力的方法，在維持保壓曲線趨勢的同時，成功降低實際成型與模流分析壓力曲線之間的差異(圖 10)，並減少因模具變形問題所產生的壓力曲線回彈量。經過修正製程參數後，光程差分布可從 230 nm 降低至 35 nm，使光程差分布得到良好的優化，並與模流分析中的光程差分布數值較為相近，如圖 11 所示。

本研究結合響應曲面法與模流分析技術所發展的殘留應力優化策略，針對平凹透鏡產品的殘留應力問題已取得良好成效。相信在後續研究中，依循此優化策略流程，也能應用於更為複雜的光學鏡片設計。



(a). 原始的保壓參數



(b). 修正後的保壓參數

圖 9 熔膠壓力曲線比較 (模流分析 vs 實際成型)

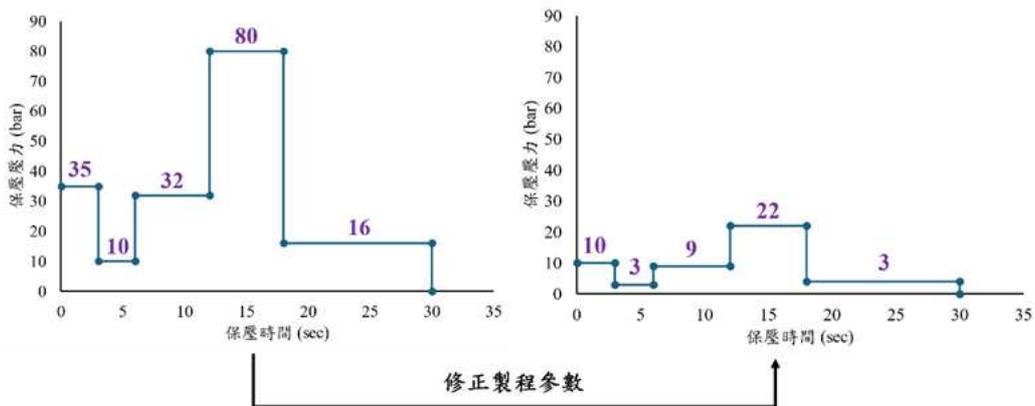
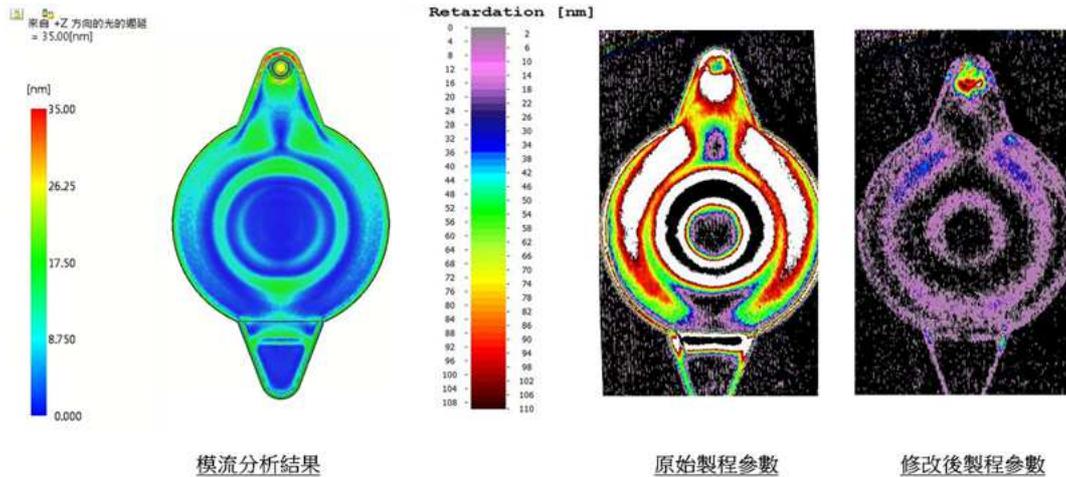
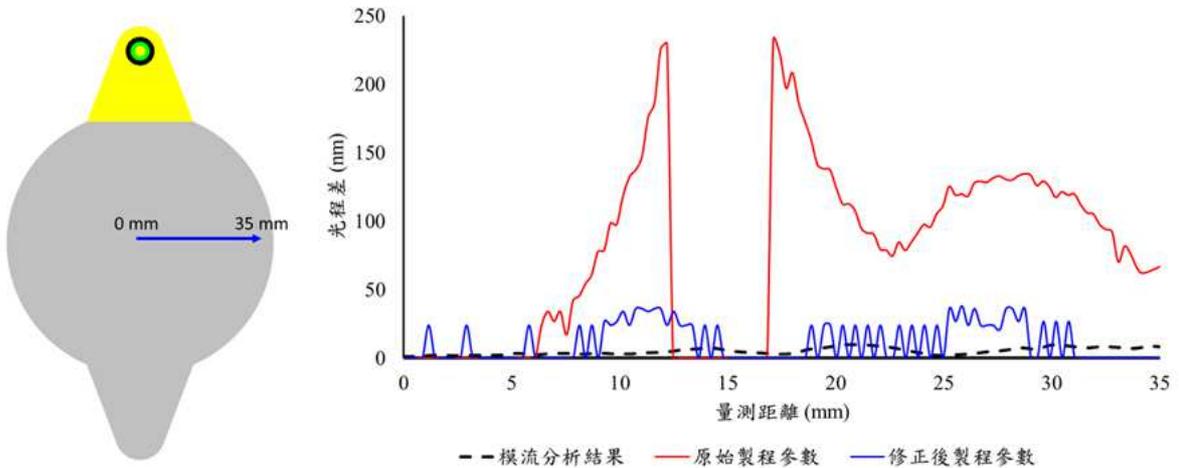


圖 10 製程參數修改結果



(a). 光程差分布結果



(b). 光程差 X 方向路徑出圖結果

圖 11 光程差分布結果比較

4. 結論

本研究以光學透鏡為例，結合 RSM 模型、模流分析和智慧感測等技術來優化產品的殘留應力，成功建立保壓參數的自動優化策略，以下為重點結論：

- (1). 本研究成功發展一套製程參數自動優化策略，藉由響應曲面法及模流分析技術能快速且有效地建立出最適當的多段保壓曲線，使平凹透鏡的光程差分佈有明顯的改善，並大幅縮短現場操作人員的調機時間。
- (2). 在實際射出成形驗證中，成功透過智慧感測技術監測成形過程，評估實際成型及模流分析的熔膠壓力及溫度曲線之間的差異，藉由評估結果進行製程參數的調整，最終達到良好的光程差分佈，並避免嚴重的模具變形問題。

5. 參考文獻

1. Chen, X.; Lam, Y. C.; Li, D. Q. Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 2000, 101 (1), 275-280.
2. Peixoto, C.; Valentim, P. T.; Sousa, P. C.; Dias, D.; Araújo, C.; Pereira, D.; Machado, C. F.; Pontes, A. J.; Santos, H.; Cruz, S. Injection molding of high-precision optical lenses: A review. *Precision Engineering* 2022, 76, 29-51.
3. Zoetelief, W. F.; Douven, L. F. A.; Housz, A. J. I. Residual thermal stresses in injection molded products. *Polymer Engineering & Science* 1996, 36 (14), 1886-1896.
4. Estrella-Guayasamin, M.; Figueroa-López, U.; Guevara-Morales, A. Prediction of Residual Stresses in Injection-Molded Plates Using the Residual Temperature Field Concept. *Polymer Engineering & Science* 2019, 59 (11), 2220-2230.
5. Guevara-Morales, A.; Figueroa-López, U. Residual stresses in injection molded products. *Journal of Materials Science* 2014, 49 (13), 4399-4415.
6. Bensingh, R. J.; Machavaram, R.; Boopathy, S. R.; Jebaraj, C. Injection molding process optimization of a bi-aspheric lens using hybrid artificial neural networks (ANNs) and particle swarm optimization (PSO). *Measurement* 2019, 134, 359-374.
7. Vargas Isaza, C. A.; Sierra, J.; Posada, J.; Botero-Cadavid, J. Analysis and modeling of simulated residual stress of mold injected plastic parts by using robust correlations. *Matéria (Rio de Janeiro)* 2017, 22.
8. Lin, C.-M.; Chen, Y.-W. Grey optimization of injection molding processing of plastic optical lens based on joint consideration of aberration and birefringence effects. *Microsystem Technologies* 2019, 25.
9. Lin, C.-M.; Chen, W.-C. Optimization of injection-molding processing conditions for plastic double-convex Fresnel lens using grey-based Taguchi method. *Microsystem Technologies* 2020, 26.
10. Hopmann, C.; Reißmann, A.; Heinisch, J. Influence on Product Quality by pvT-Optimised Processing in Injection Compression Molding. *International Polymer Processing* 2016, 31, 156-165.
11. Chang, Y.-H.; Wei, T. H.; Chen, S.-C.; Lou, Y. F. The investigation on PVT control method establishment for scientific injection molding parameter setting and its quality control. *Polymer Engineering & Science* 2020, 60.
12. Chang, Y.-H.; Chen, S.-C.; Ting, Y.-H.; Feng, C.-T.; Hsu, C.-C. The Investigation of Novel Dynamic Packing Technology for Injection Molded Part Quality Control and Its Production Stability by Using Real-Time PVT Control Method. *Polymers* 2022, 14, 2720.
13. 張國華，2021. 實驗設計-第二版，滄海書局，台中，台灣。