

# 射出成型品殘留應力線上監測技術 Online Monitoring Technology for Residual Stress in Injection Molded Components

陳建羽<sup>1</sup>\*、武氏芳鸞<sup>2</sup>、蔡哲偉<sup>2</sup>、黃明賢<sup>2</sup> <sup>1</sup>國立高雄科技大學機械工程系 <sup>2</sup>國立高雄科技大學機電工程系 \*E-mail: jianychen@nkust.edu.tw

#### 摘要

殘留應力為射出成型顯著品質缺陷,它不僅導致成品翹曲變形和應力龜裂,更可能潛在 影響成品表面處理品質。然而,目前除了透過線下光彈法進行量化外,尚缺乏有效的線上監 測方法,以便即時掌握其變異情況並提出改善對策。本研究基於射出成型壓力感測資訊,提 取品質特徵,以發展線上監測殘留應力的方法,此外,利用應力偏光儀獲取射出成品殘留應 力質化影像,並通過影像分析獲取 HSV(Hue-Saturation-Value)數值,以進一步藉由區域色相值 (用)量化其表現。研究透過單因子實驗,分析對殘留應力具顯著影響的製程因子,並藉以擾動 以驗證殘留應力監測方法可行性。實驗結果顯示:在應力偏光儀下取像的射出成品,透過用成 功量化殘留應力表現;就製程參數而言,保壓壓力、料溫及射速對殘留應力影響最為顯著。 隨著保壓壓力提升、料溫及射速降低,用越大,代表殘留應力越嚴重;背壓和模溫的影響相對 較小,這與模流分析結果是一致的。由近澆口模穴壓力感測曲線提取的壓力峰值、歷程黏度 指標和保壓結束時的殘壓值等三個感測品質指標均能成功監測殘留應力變動。本研究成果為 產業提供了殘留應力量化和線上即時監測之可行方法。

關鍵詞:殘留應力、HSV、品質指標、射出成型

#### Abstract

Residual stress is a significant quality issue in injection molding. It not only causes product warpage and stress cracking but also potentially affects the quality of surface treatment. However, there is currently a lack of effective online monitoring methods apart from quantification through offline photoelasticity, making it difficult to promptly identify variations and propose improvement strategies. This study extracts quality features based on pressure sensing information from injection molding to develop an online monitoring method for residual stress. Additionally, a stress viewer is used to obtain qualitative images of residual stress in injection-molded components. These images are further quantified by extracting regional hue values ( $\overline{H}$ ) from the HSV (Hue-Saturation-Value) values through image analysis to evaluate residual stress performance. This study analyzes the process factors that significantly affect residual stress through single-factor experiments. By varying the most significant factor, the feasibility of the residual stress monitoring method is validated. The experimental results show that residual stress performance can be successfully quantified through  $\overline{H}$ when imaging injection-molded components with a stress viewer. Regarding process parameters, holding pressure, melt temperature, and injection speed have the most significant impact on residual stress. As holding pressure increases, and melt temperature and injection speed decrease, HSV values



rise, indicating more severe residual stress. In comparison, the effects of back pressure and mold temperature are relatively minor, consistent with the molding simulation results. Three quality indicators extracted from the pressure sensing curve near the gate, including pressure peak value, viscosity index overall the entire process, and residual pressure at the end of holding, successfully monitor variations in residual stress. This study provides the industry with a feasible method for both quantifying and online monitoring residual stress.

Keywords: residual stress, HSV value, quality index, injection molding

## 1. 前言

射出成型具備高效率、高精度及可生產複雜幾何外型之優異成型特性,使其為塑膠產品 重要暨受歡迎量產方式之一。然而,高分子材料在整個射出成型過程歷經不同溫度、壓力及 剪切應力作用之複雜熱機程序,使其流變性質不斷變化,進而引起諸多射出成型缺陷,如: 流痕、短射、毛邊、虎皮紋、表面光澤度不一等,其中,殘留應力更導致最終射出成品外觀 翹曲變形,甚至應力龜裂,然而,該缺陷往往在成品離型後短時間不易由其表面察覺,必須 待射出成品於常溫放置一段時間或高溫烘烤後,使其殘留應力釋放才會發生,該窘境經常造 成品檢不良率大幅提升。

殘留應力大致上可區分為兩種組成效應,其一發生於熔膠充填階段的流動殘留應力,因 分子鏈受到流場剪切應力作用,使其沿著速度梯度方向配向並拉伸,當冷卻固化後,如分子 鏈無法恢復至初始狀態並保持拉伸狀態,即會形成流動殘留應力;其二發生於熔膠冷卻階段 的熱殘留應力,其主要受溫度梯度和冷卻速率不勻而引起,其中,不均勻溫度梯度導致模內 熔膠因熱傳差異而引起不均勻收縮應力,而冷卻速率過高則導致分子鏈在冷卻過程快速凍結, 進而在熔膠收縮過程形成殘留應力[1-2]。在射出成型過程,諸多因素影響射出成品殘留應力, 其大致區分模具幾何參數設計及製程參數設置。就模具幾何而言,澆口幾何至關重要,其決 定熔膠充填過程流動狀態、模穴熔膠體積收縮補償效果及射出成品殘留應力大小[3-5],研究 結果說明澆口越大,射出成品殘留應力越小,其中,澆口厚度、長度及寬度顯著影響殘留應 力分布狀態,隨著平均殘留應力的降低可使光學射出成品之折射率更為均勻,並降低光彈條 紋級數,以提升射出成品光學性質表現,相對而言,澆口幾何設計對薄殼射出成品之翹曲影 響有限[6]。就製程參數而言,其主要影響熔膠流變性質及 pvT 性質,進而引起射出成品不同 程度的收縮行為、翹曲及殘留應力,由諸多研究可獲悉料溫、模溫、射速、保壓壓力/時間及 冷卻速率皆會影響殘留應力,其中,較大的壓力、溫度變化及分子鏈鬆弛行為皆會引起較大 殘留應力,並導致成品收縮翹曲變形[7],故料溫及保壓壓力是影響殘留應力甚鉅的兩個主要 因子[8-10],並顯著影響成品光學特性(光彈條紋級數及光程差),當料溫升高可有效降低熱殘 留應力及分子配向應力,並提升殘留應力分布均勻性[11,13],而提升保壓壓力雖然有助於減 少成品收縮翹曲並提升彎曲強度,但其增加分子配向應力,進而使殘留應力趨於嚴重[11-12]; 相對而言,射速僅影響熔膠流動過程剪切率及黏滯耗散程度,對殘留應力影響有限,且熔膠 流率與殘留應力彼此間並無顯著規律及相關性[13]。Guevara-Morales 等人[14]針對殘留應力的 成因、機制、預測模型及量測方法進行綜合性文獻回顧,並由不同文獻歸納證實料溫及保壓 壓力兩者是對殘留應力顯著影響的製程因子。

殘留應力不僅會造成成品外觀翹曲變形[7],更影響產品機械及光學性能表現,此尤是造成光學射出成品成像品質不良主要因素。由於殘留應力的形成引起雙折射現象,導致光線在不同方向存在不同折射率,造成光學產品在透光過程引起影像扭曲及成像失真,此外,在應力集中區更引發光散射,進而降低光學透明度,並增加成品霧度,最終影響整體光學成像品

2



質[15],因此許多研究基於田口方法或人工智慧方法優化製程參數及澆口設計以降低殘留應 力[4,16-19]並提升分布均勻性,此外,適當模溫設定可有效降低薄殼射出成品表面凝固層, 從而降低熔膠充填阻力以獲得較低殘留應力並提升光學成品品質[19],而多段保壓設定方法 不僅可進一步降低成品殘留應力外,更提升成品尺寸一致性[20];就工程實務而言,透過退火 處理使分子鏈在成型後再次受熱以有效獲得應力鬆弛/釋放亦是有效消除殘留應力方法,也是 國內業者經常使用的方法[21]。

就殘留應力量測而言,分層去除法(Layer removal method)、鑽孔應變釋放法(Hole drilling method)、X 射線繞射法(X-ray diffraction)及數位影像法(Digital image correlation)等皆可應用於量化殘留應力,其中,光彈法(Photoelasticity)是最廣為人知與應用的非侵入式量測方法之一,其透過高分子材料在應力作用下所致雙折射現象並反映出不同光彈條紋狀態及密度以量化殘留應力大小及分布狀態[22,23],當殘留應力越大,因相位延遲現象趨於嚴重,導致光彈條紋密度越趨集中,Vargas-Isaza等人[12]基於光彈法更進一步透過影像處理方法解讀光彈條紋以量化實際殘留應力數值,然而,以光彈法解析射出成品殘留應力屬線外量測方式,並非線上即時監測方法,此外,量測前的相位延遲校正步驟不僅費時,數位光彈儀更是昂貴儀器設備,因此產業導入應用得支出大筆經費採購設備。為此,本研究基於射出成型感測資訊以發展線上殘留應力即時監測方法,此外,有鑑於國內成型業者經常使用應力偏光儀質化觀察射出成品殘留應力狀態,本研究更進一步透過殘留應力質化影像,並以影像分析獲取其 HSV 數值以提出殘留應力量化方法。

## 2. 研究方法

#### 2.1 殘留應力評估理論基礎

為期瞭解不同製程參數對殘留應力影響性,本文基於單因子實驗方法,透過 Moldex3D 分析料管溫度、背壓壓力、射出速度、保壓壓力及模仁溫度等五個製程參數在不同因子水準設置下對殘留應力影響性,分析結果分別透過 von Mises 應力(σ<sub>V</sub>)、光彈條紋級數及光程差以評估製程參數對殘留應力影響。由於σ<sub>V</sub>可描述材料在複雜應力負載下之等效受力行為,其估算方法如下所示:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]$$
(1)

其中, σ<sub>1</sub>、σ<sub>2</sub>及σ<sub>3</sub>分別代表材料在三個軸向之主應力。當透明塑膠射出成品存在殘留應力時, 折射率在不同主應力軸向是相異的,進而使偏振光通過成品引起雙折射(Birefringence)現象, 使成品外觀呈現彩色干涉條紋或明暗條紋變化,由 ASTM D4093-95 測試規範[24]可知主平面 上折射率差與主應力關係如下:

$$n_{1} - n_{2} = C(\sigma_{1} - \sigma_{2})$$

$$n_{2} - n_{3} = C(\sigma_{2} - \sigma_{3})$$

$$n_{1} - n_{2} = C(\sigma_{3} - \sigma_{1})$$

$$(4)$$

$$(4)$$

其中, $n_i$ 、 $\sigma_i$ 及 C 分別為沿主軸折射率、主應力及應力光學常數。當偏振光穿越具殘留應力 塑膠成品並發生雙折射現象時會形成相位延遲(Retardation)行為,其可透過下列數學式描述:

$$\delta = (n_1 - n_2)t = \frac{1}{\lambda}[(n_1 - n_2) \cdot t] = C(\sigma_1 - \sigma_2)t = \frac{1}{\lambda}\Delta$$
(5)
$$N = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{Ct(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda}$$
(6)

其中,t、λ、N及Δ分別為成品厚度、光波長、光彈條紋級數及光程差,由此可知相位延遲與 光程差存在正比關係,當成品殘留應力越大時,主平面折射率差值越大,導致相位延遲越嚴 重並在表面出現大量且密集光彈條紋。 2024 模具暨應用產業技術論文發表會 中華民國 113 年 08 月 22 日(四)



#### 2.2 殘留應力量化方法

雖然應力偏光儀可提供射出成品殘留應力質化表現結果,並為產業習知量測手法,但其 無法有效提供射出成品間殘留應力量化數值,以進行客觀比較。為此,本研究首先透過應力 偏光儀取得射出成品殘留應力質化影像,並透過自行撰寫程式擷取其 HSV 數值以進一步量化 殘留應力表現。

HSV 為一色彩模型,其可用於表示殘留應力質化影像中每一個像素點的色相、飽和度及 明暗度,因此可模仿人類直觀觀察影像結果。由於透過 HSV 模型可簡單分離像素點中三者資 訊,在適當的飽和度及亮度調整狀態下提取色相值,因此在分析殘留應力質化影像相對不受 飽和度及亮度影響,可更為客觀分析光彈干涉條紋。整體殘留應力量化流程,首先在質化影 像上窗選欲分析區域並撒點,進而提取區域中每一點 HSV 數值,如下圖 1 所示,量化殘留應 力估算方法如下:

 $\overline{H} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i}$ 

(7)

其中,h<sub>i</sub>代表單一取樣點色相值,而H為總體取樣點平均色相值,其代表選取區域量化殘留應 力大小,並可作為後續分析不同感測品質特徵與量化殘留應力間之相關性分析基礎。





圖1殘留應力量化流程:(a) 在應力偏光儀下拍攝殘留應力質化影像並框選欲量化區域; (b) 撒點並統計區域量化殘留應力大小H

#### 2.3 感測品質指標

為建立射出成型線上殘留應力監測方法,本研究基於成型過程模穴壓力感測資訊,萃取 感測品質特徵,並分析其與量化殘留應力之相關性,以理解不同感測品質特徵與殘留應力關 聯性。本研究就單一感測曲線提出單一感測指標,包含:模穴壓力峰值( $P_p$ )、整體歷程黏度指 標( $\eta_{tot}$ )、保壓結束殘壓指標( $RP_h$ )及冷卻結束殘壓指標( $RP_c$ );此外,透過兩感測曲線萃取複合 感測品質指標,包含:壓力峰值差( $\Delta P_p$ )、充填至保壓段黏度指標差( $\Delta \eta_{f-h}$ )、保壓至冷卻段黏 度指標差( $\Delta \eta_{h-c}$ )、整體歷程黏度指標差( $\Delta \eta_{tot} = \Delta \eta_{f-h} + \Delta \eta_{h-c}$ )、保壓結束殘壓差( $\Delta RP_h$ )及冷 卻結束殘壓差( $\Delta RP_c$ ),整體感測品質指標設計如圖 2 所示。

#### 2.4 相關性分析

皮爾森相關性分析(Pearson correlation)是用以探討兩獨立變數彼此間之線性依存關係、強度 及方向,並以r值表示,其正負號分別表示相關性方向,值的大小表示相關性強度,小於0.3為 弱相關,介於0.3至0.7之間為中相關,大於0.7為強相關,數學算式如下:

$$r = \frac{\sum(x-x)(y-y)}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2(y-\bar{y})^2}}$$

(8)

其中x和y分別表示兩個獨立物理量, x及y分別為它們各自獨立平均值。本文將用以評估不同 感測品質指標與量化殘留應力大小之相關性,以歸納可顯著反映射出成品殘留應力之有效感 測品質指標,進而在射出成型過程進行殘留應力線上監測。 2024 模具暨應用產業技術論文發表會 中華民國 113 年 08 月 22 日(四)





圖2 模穴壓力曲線提取的感測特徵品質指標示意圖:(a) 單一感測品質指標;(b) 複合感測 品質指標

#### 3. 實驗設置

本研究射出成型載具為一模二穴拉伸試片,模穴幾何設計參照ASTM D638規範,試片長 度及厚度分別為125 mm及1.2 mm,兩側寬度為19 mm,中心寬度為13 mm,每穴採單一澆口 進行熔膠充填,如圖3所示;射出成型實驗採用發那科株式會社所生產鎖模力1000 kN全電式 射出成型機(FANUC, ROBOSHOT S-2000i 100B)進行,其中,螺桿直徑及最大射速分別為28 mm及500 mm/s;實驗塑料使用台灣奇美實業生產聚甲基丙烯酸甲酯(ACRYREX CM-211),塑 料熔融流動指數為16 ml/10 min(在230℃,3.8 kg荷重下測得);熔膠充填及保壓過程,除透過 DAQ訊號擷取卡(NI USB-6343)以收集射出成型機螺桿後方之荷重元及編碼器訊號以分別換 算獲得熔膠射出及保壓過程之射出系統壓力及螺桿位置外,透過自行在模穴內部安裝之壓力 感測器(Futaba SSB01KN08X06;感測位置:A<sub>1</sub>及A<sub>2</sub>)更可獲悉射出成型過程熔膠在模穴流動壓 力狀態。基礎製程參數採用科學化試模方法獲得[20],並尋找適當成型視窗以分別定義料溫及 保壓壓力範圍[25],最終,據此設定變動參數因子水準,如表1所示。



表1 單因子製程參數表

Fixed Parameters					
保壓時間 (sec)	3	V/P 切換位置 (mm)		8	
射出壓力 (MPa)	240	螺桿轉速 (rpm)		50	
冷卻時間 (sec)	30	鬆退 (mm)		3	
計量延遲 (sec)	3	計量位置 (mm)		34	
Varying Parameters			Level		
	L1	L2	L3	L4	L5
保壓壓力 (MPa)	65	85	105	125	145
料溫 (°C)	215	225	235	245	255
射速 (mm/s)	70	90	110	130	150
背壓 (MPa)	3	3.5	4	4.5	5
模溫 (°C)	40	45	50	55	60
註:粗黑體字代表單因子實驗基礎參數設定值					

## 4. 結果與討論

## 4.1 製程參數對殘留應力影響

本文分別透過模擬軟體 Moldex3D 及實驗以分析不同製程參數(保壓壓力( $P_h$ )、料溫( $T_b$ )、 射速( $v_{inj}$ )、背壓( $P_b$ )及模溫( $T_M$ ))及相應水準對射出成品 $\Delta \cdot N \cdot \sigma_V$ 及量化殘留應力 HSV 數值



(H)影響。模擬及實驗結果分別歸納如表2及表3所示,基本上在不同製程參數設置條件下, 薄殼射出成品之光彈條紋皆集中澆口附近,代表殘留應力集中於模穴內靠近澆口處,此乃因 熔膠為可壓縮流體,因此在保壓階段,澆口凝固前保壓壓力持續作用並擠壓澆口附近未凝固 熔膠,進而形成較大壓力梯度有關;相對而言,遠離澆口處因熔膠充填後凝固甚快,故壓力 無法有效傳遞而形成較少光彈條紋,故後續將以模穴內近澆口處之光學模擬分析結果及H探 討製程參數對殘留應力影響。

就保壓壓力而言,隨著壓力由 65 MPa 提升至 145 MPa,因澆口處熔膠壓縮效應愈趨明顯 並引起較大壓力梯度,相位延遲趨於嚴重,故N由 0.48 增加至 0.77, $\sigma_V$ 由 2.10 MPa 增加至 5.22 MPa,代表殘留應力趨於嚴重,因此實驗所得Ħ值由 0.406 提升至 0.412。就料溫而言, 當其由 215℃提升至 255℃時,熔膠黏度隨之降低,並使其在模穴充填之流動阻力變小,射壓 在模穴較易傳遞,故澆口處壓力梯度相對降低,相位延遲趨緩,並使N由 0.51 下降至 0.41,  $\sigma_{V}$ 由 4.14 MPa 降低至 3.86 MPa,故實驗所得 $\overline{H}$ 隨之由 0.414 降低至 0.410,代表殘留應力隨 著料温增加而降低。就射速而言,雖然射速的提升可有效增加剪切熱效應,使熔膠溫度再次 上升,黏度降低,並提升模穴熔膠均溫性,但由於射速 110 mm/s 乃經由科學化試模尋得適當 射速條件,故當其由 70 mm/s 增加至 110 mm/s 時,N 雖從 0.50 降低至 0.45, σ<sub>V</sub>亦隨之由 3.78 MPa 降低至 3.11 MPa, 暗示殘留應力隨之趨緩, 因此 $\overline{H}$ 由 0.416 略為降低至 0.414, 但當射速 高於 110 mm/s,N及 $\sigma_V$ 不再顯著降低, $\overline{H}$ 僅輕微降低 0.001,代表殘留應力不再隨之降低,因 此射速提升雖可降低殘留應力,但其影響程度相對保壓壓力及料溫來說較小,此外,雖然射 速預期影響流動殘留應力,因此分析所得 $\sigma_{V}$ 的變動相對料溫結果更加明顯,但就 $\overline{H}$ 變化範圍 而言,兩者相當,該結果推測乃剪切應力對Gy在澆口部影響相對溫度變化明顯有關,然而, 較高的料溫使材料在充填後有充分時間鬆弛且充填阻力相對較小,導致流動殘留應力較小, 故變動料溫所得σν的變化相對變動射速小。就背壓而言,其影響熔膠塑化後緻密性,但在適 當背壓範圍內對熔膠黏度影響有限,導致模擬結果可見變動背壓水準對N及σ<sub>V</sub>影響甚微,因 此H並未顯著變動;相似地,由於模溫僅影響流動熔膠表層黏度與固化層厚度(即流動截面幾 何大小),因此在適當射速下固化層厚度不易增長,此外,因高分子材料為熱不良導體,故在 短暫熔膠充填時間內,核心層熔膠受模溫熱傳效應影響效果甚微,因此模擬所得模溫對N及  $\sigma_{V}$ 影響相當輕微,H並未顯著變動。整體而言,所有製程參數變動對H擾動之範圍介於 0.411±0.005,此乃因量化殘留應力是透過區域採樣點進行平均值估算,當採樣範圍內之色相 值相近時(代表採樣範圍內殘留應力相當), H 變動範圍將甚為有限,此外,最靠近澆口處顯著 具殘留應力位置之色相值表現亦受採樣範圍內殘留應力相對輕微處之色相值稀釋影響,換言 之,採樣區域範圍及撒點數量將影響殘留應力量化估算結果。

綜合上述,在不同製程參數及其水準設置下,由模擬分析所得N及Gv與實驗所得H發展趨勢結果是吻合的,當N及Gv變大時,代表殘留應力趨於嚴重,因此H隨之增加,此外,由單因子實驗結果歸納可知,製程參數對殘留應力影響影響程度依序為:保壓壓力>料溫≈射速>背壓 ≈模溫。後續將由保壓、料溫及射速等三個因子變動以觀察不同感測品質指標對H響應狀況,以發 展線上射出成型殘留應力監測方法。

6



表 2 不同製程參數模擬分析結果統計表

# 表3 不同製程參數及水準設置之用值變化

台灣區模具工業同業公會



## 4.2 製程參數對品質指標之相關性分析

透過上述單因子實驗結果,本研究更進一步由模穴壓力曲線萃取不同感測品質指標以分 析其與H之間相關性,實驗結果如圖 4 所示,由圖可見A1及A2感測位置之模穴壓力曲線明顯 受到保壓、料溫及射速等三者影響,且隨著因子設定水準值的提升,感測所得模穴壓力皆隨 之增加,且不同水準間所得壓力曲線樣貌是相似的;由壓力曲線萃取不同感測品質指標與H之 相關性統計結果如圖 5 所示,基本上,所有指標皆與 $\overline{H}$ 呈現正強相關性,代表當射出成品殘留 應力隨著製程參數變動而增加,感測指標值是隨之變大的;就指標相關性強度(r)而言,除了 射速實驗之壓力峰值(Pn)表現為 0.77 以外(推測乃射速對殘留應力影響相對較弱,導致指標響 應不甚明顯有關),三個不同變動參數實驗結果皆呈現單一感測品質指標(0.84~0.89)略大於複 合感測品質指標(0.74~0.87)表現,其中,因保壓壓力對殘留應力影響最為顯著,故統計所得ηtot 及 $RP_h$ 對 $\overline{H}$ 響應相關性皆為 r=0.89,而壓力峰值 $(P_n)$ 對 $\overline{H}$ 響應的相關性僅略低一點(r=0.88),該 指標強度排序亦相似地發生在料溫及射速實驗結果,此外,保壓結束時的RP,及冷卻結束時的 RP。所得相關性強度是相當的,此乃因熔膠在保壓及冷卻階段幾乎是不會流動的,因此熔膠與 模穴內壁間的熱傳效果在保壓及冷卻階段是相當的,進而使冷卻過程壓力梯度表現相彷,故 由保壓結束及冷卻結束萃取的殘壓結果對用進行相關性分析強度會幾乎相同。然而,上述結果 與 Tsou 等人[23]研究略有差異,其推測與監測殘留應力之感測位置有關,換言之,如欲透過 感測器之感測品質特徵監測射出成品殘留應力變化,感測位置是至關重要的設定,此外,本 研究實驗載具選用側狀澆口(澆口截面幾何僅 2×1.2 mm<sup>2</sup>),故成品殘留應力預期更加集中在 澆口附近。

2024 模具暨應用產業技術論文發表會 中華民國 113 年 08 月 22 日(四)





圖 5 不同製程參數變動之感測品質指標與 $\overline{H}$ 相關性: (a)  $P_h$ ; (b)  $T_b$ ; (c)  $v_{ini}$ 

## 4.3 線上殘留應力監測驗證實驗

基於上述統計分析結果,本研究選擇ηtot、RPh及Pp等三個感測品質指標,透過變動保壓 壓力(對殘留應力影響最鉅因子)以確認所提感測品質特徵在量產過程用以監測射出成品殘留 應力之效度,此外,為有效提升感測品質特徵對殘留應力監測能力,本研究在指標驗證實驗 過程針對每一試片窗選範圍內之澆口部位進一步加密撒點以提升用對殘留應力解析能力,實 驗固定參數基於表1進行設定,並在保壓壓力範圍 85~135 MPa 間每 10 模次提升保壓壓力 10 MPa(即 85-95-105-115-125-135 MPa),實驗結果如圖 6 所示,基本上用隨著保壓壓力的增加而 上升,並成功反映在三個不同感測品質指標,且三者皆隨之呈現上升趨勢以反映殘留應力趨 於嚴重,其中,所有感測品質指標與用之相關性皆為 0.98,代表射出成品殘留應力大小透過加 密撒點後取得的用更能精確的表現其量化結果,並有效且正確地反映在感測品質指標變動上, 故基於模穴壓力曲線萃取之感測特徵是可作為線上射出成品殘留應力監測指標的。



圖6 變動保壓壓力之感測品質指標與 $\overline{H}$ 發展趨勢: (a)  $P_p$ ; (b)  $\eta_{tot}$ ; (c)  $RP_h$ 



### 5. 結論

本文基於模穴壓力感測品質指標發展線上射出成型殘留應力監測方法,並藉由質化殘留 應力影像,透過 HSV 影像處理方法嘗試量化殘留應力表現,以供感測品質指標與量化殘留應 力進行統計分析,由模擬分析及實驗結果可得以下結論:

- (1) 藉由 HSV 影像處理方法可成功量化殘留應力表現以供統計分析及比較使用,而對殘留應 力的解析能力取決於取樣範圍、撒點位置及密度。
- (2) 由模擬分析所得N及σv增加時,代表殘留應力趨於嚴重,因此實驗所得用隨之增加。
- (3)由單因子的模擬分析及實驗結果可知保壓壓力、料溫及射速對殘留應力影響較為顯著, 背壓及模溫對殘留應力影響有限。
- (4) 在薄殼射出成型而言,基於靠近澆口(A1點)感測壓力曲線萃取之Pp、ηtot及RPh等三個品質指標對殘留應力變動之響應最為明顯,並成功由保壓壓力擾動實驗獲得驗證,換言之, 欲透過感測品質指標監測殘留應力變動,感測位置及指標選用至關重要。

本文所提射出成型線上殘留應力監測方法是基於薄殼射出成型所得結果,針對厚件成型及高 厚薄比之射出成品殘留應力監測有待未來更多實驗結果加以驗證,使所提方法更具產業通用 性以提升技術應用價值及泛用性。

## 6. 致謝

本文研究感謝國科會計畫(NSTC112-2221-E-992-098及 MOST109-2221-E-992-001-MY3) 研究經費支持,及高科大機電系盧泇樺及陳相評先生分別在模擬分析及實驗提供之協助。

# 7. 參考文獻

- 1. J.W. Woo and M.Y. Lyu, 2015. Relationship between Residual Stress in the Surface of an Injection Molded Specimen and Chemical Crack, Polymer-Korea, vol. 39, pp. 827-829.
- Y. Chen, J. Yang, W. He, L. Liu, X. Niu, C. Li, M. Xiong, and X. Li, 2022. Injection molding and shear-induced stress simulation of poly (styrene-ethylene-butylene-styrene) and polypropylene blends, Journal of Applied Polymer Science, vol. 139, 52128.
- 3. V. Leo and Ch. Cuvelliez, 1996. The effect of the packing parameters, gate geometry, and mold elasticity on the final dimensions of a molded part, Polymer Engineering and Science, vol. 36, pp. 1961-1971.
- C.M. Lin, C.M. Tan, and C.K. Wang, 2013. Gate design optimization in the injection molding of the optical lens, Optoelectronics and Advanced Materials Rapid Communications, vol. 7, pp. 580-584.
- 5. P. Xie, F. Guo, Z. Jiao, Y. Ding, and W. Yang, 2014. Effect of gate size on the melt filling behavior and residual stress of injection molded parts, Materials and Design, vol. 53, pp. 366-372.
- M.C. Huang and C.C. Tai, 2001. The effective factors in the warpage problem of an injectionmolded part with a thin shell feature, Journal of Materials Processing Technology, vol. 110, pp. 1-9.
- 7. D.S. Choi and Y.T. Im, 1999. Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding, Composite Structures, vol. 47, pp. 655-665.
- 8. M.S. Huang, J.Y. Chen, and Y.Q. Xiao, 2022. Quality monitoring of micro-shrinkage defects in thick-walled injection molded components, Measurement, vol. 201, 111733.
- 9. J. Li, C. Zhao, F. Jia, S. Li, S. Ma, and J. Liang, 2023. Optimization of injection molding process parameters for the lining of IV hydrogen storage cylinder, Scientific Reports, vol. 13, 665.
- 10. M. Estrella-Guayasamin, U. Figueroa-López, and A. Guevara-Morales, 2023. Effect of crystallization and packing pressure on the development of residual stresses on injection molded



polypropylene samples, Polymer Bulletin, vol. 80, pp. 4355-4369.

- 11. X. Zhang, T. Ding, W. Wang, J. Liu, and C. Weng, 2022. Study on the effect of processing parameters on residual stresses of injection molded micro-pillar array, Polymers, vol. 14, 3358.
- 12. C. Vargas-Isaza, J. Posada-Correa, and J.B. León, 2023. Analysis of the stress field in photoelasticity used to evaluate the residual stresses of a plastic injection-molded part, Polymers, vol. 15, 3377.
- 13. C. Wang, W.B. Lee, and S. To, 2010. A study of the relevant effects on the maximum residual stress in the precision injection moulding of microlens arrays, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 20, 035033.
- 14. A. Guevara-Morales and U. Figueroa-Lopez, 2014. Residual stresses in injection molded products, Journal of Materials Science, vol. 49, pp. 4399-4415.
- 15. S. Chen, B. Li, Y. Zhang, and Z. Jin, 2020. Effects of the injection compression process parameters on residual stress of plastic lenses, Applied Optics, vol. 59 pp. 9626-9632.
- C. Peixoto, P.T. Valentim, P.C. Sousa, D. Dias, C. Araújo, D. Pereira, C.F. Machado, and A.J. Pontes, 2022. Injection molding of high-precision optical lenses: A review, Precision Engineering, vol. 76, pp. 29-51.
- 17. C. Zuo, J. Qian, S. Feng, W. Yin, Y. Li, P. Fan, J. Han, K. Qian, and Q. Chen, 2022. Deep learning in optical metrology: a review, Light: Science and Applications, vol. 11, 39.
- Z.Y. Huang, C.Y. Chiu, K.C. Ke, and S.Y. Yang, 2023. Fabrication of the low-residual-stress optical microstructure by using the simulation and practice strategies, in-mold induction heating system, and injection compression molding technology, Polymer Engineering and Science, vol. 63, pp. 2265-2277.
- C.M. Lin and H.K. Hsieh, 2017. Processing optimization of Fresnel lenses manufacturing in the injection molding considering birefringence effect, Microsystem Technologies, vol. 23, pp. 5689-5695.
- 20. J.Y. Chen, P.H. Hung, and M.S. Huang, 2021. Determination of process parameters based on cavity pressure characteristic to enhance quality uniformity in injection molding, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 180, 121788.
- C. Macías, O. Meza, and E. Pérez, 2015. Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process, Engineering Failure Analysis, vol. 57, pp. 490-498.
- J.W. Woo, J.S. Hong, H.K. Kim, and M.Y. Lyu, 2016. Analysis of residual stress and birefringence in a transparent injection molded article for molding condition, Polymer-Korea, vol. 40, pp. 175-180.
- H.H. Tsou, C.C. Huang, Y.C. Chen, and S.Y. Shih, 2023. Online detection of residual stress near the gate using cavity pressure for injection molding, Journal of Polymer Engineering, vol. 43, pp. 89-99.
- 24. American Society for Testing and Materials, 2014. Standard test method for photoelastic measurements of birefringence and residual strains in transparent or translucent plastic materials," ASTM D4093-95.
- 25. S. Kulkarni, 2017. Robust process development and scientific molding. Theory and practice," Carl Hanser, 2<sup>nd</sup> ed., Munich, Germany.