

厚件射出成型表面微縮痕品質監測

Quality Monitoring on Micro-shrinkage during Thick-walled Component Injection Molding

蕭煜錡¹、陳建羽^{2*}、黃明賢¹

¹ 國立高雄科技大學機電工程系

² 逢甲大學精密系統設計學士學位學程

*E-mail: jianyuchen@fcu.edu.tw

摘要

由於熔膠熱脹冷縮特質，厚件射出成品因體積收縮顯著，易於成品表面形成凹痕，特定凹在成品表面留下微縮痕，並可作為除了成品重量及幾何尺寸外之成品品質指標，然而其甚難量化品質表現，為此，本文探討一厚件把手(平均厚度 11.5 mm 及最大厚度 14.4 mm)，首先以模擬分析觀察射出成型過程熔膠在模穴充填之波前行為及體積收縮分布型態以決定感測器安裝位置，並獲悉不同製程參數對厚件成品品質影響，隨即，透過實驗驗證並分析不同感測位置擷取之感測特徵與射出成品表面微縮痕之相關性，進而歸納厚件成型適當之品質監測指標。研究結果顯示，僅保壓壓力顯著影響成品品質(重量及微縮痕)，並隨著保壓壓力提升，成品重量越重，量化微縮痕指標越小，其代表收縮缺陷越輕微；就感測品質指標而言，所有模穴壓力曲線擷取之品質指標及鎖模力增量峰值皆與成品重量及量化微縮痕指標呈強相關性，其中，模穴壓力峰值與黏度品質指標等兩者與成品表面收縮品質相關性最強烈，故可作為厚件射出成型線上品質監測良好之感測品質特徵。

關鍵詞：微縮痕、品質指標、品質監測、厚件成型

Abstract

A volumetric shrinkage that induces a surface defect known as sink mark is significant during thick-walled injection molding due to thermal expansion and contraction of the polymer melt. It leads to a micro-shrinkage and could be considered as the quality indicator for molded components, which is additional to the molded part weight and geometric dimensions, although it is difficult to quantify. Accordingly, taking an injection molded plastic handle with an average thickness of 11.57 mm (the maximum thickness is 14.4 mm) for illustration purposes, the present study preliminarily proposes a molding simulation to observe the polymer melt front in the mold cavity to determine the appropriate point for cavity sensors installation and diagnose the effect of different processing parameters and levels on the molded component qualities. Then, the experimental trials are performed to investigate the correlation between the quality index extracted from sensing profiles at different locations and surface micro-shrinkage to evaluate the appropriate indexes for quality monitoring. The experimental results depicted the holding pressure significantly affects the molded part qualities (molded part weight and micro-shrinkage). The molded part weight increases with a higher holding pressure, and the quantitative micro shrinkage tends to be smaller which represents the volumetric shrinkage alleviating. All the quality indexes revealed in this study are highly correlated with the molded part weight and the micro shrinkage. In particular, the pressure peak and viscosity index extracted from the cavity pressure profiles are stronger than the peak clamping force increment sensing on the tie-

bar elongation profile. Thereafter, they are both appropriate indicators for online quality monitoring in thick-walled injection molding.

Keywords: micro-shrinkage, quality index, quality monitoring, thick-walled molded component.

1. 前言

射出成型工藝發展已久並為塑膠產品量產重要技術之一，然而高分子熔膠具熱脹冷縮特質，在熔膠充填後的保壓及冷卻過程，其在模穴內由液態相變化為固態，其中，當保壓壓力過低或時間過短會使熔膠在冷卻過程所致體積收縮無法獲得有效補償並在射出成品表面形成凹痕缺陷，降低成品表面品質，該窘境顯見於厚件及高厚薄比設計之射出成品[1-2]，傳統上，成品表面凹痕缺陷往往藉由人為視覺檢測判定，然而人為定性地檢測方式不僅誤差甚大並存有潛在誤判風險，凹痕缺陷更難以量化表現，此外，人工檢測亦無形地增加量產成本，因此，如何在厚件射出成型過程有效監測射出成品體積收縮及表面凹痕缺陷以便即時作出製程處置以避免不良品流出至關重要。

熱塑性高分子熔膠特殊的剪切致稀行為，使其黏度隨著剪切率及相應剪切熱效應的增加而降低，故熔膠在射出成型流動過程隨著充填路徑截面幾何變化而致體積流率差異，並引起不同程度剪切應力及相應黏滯耗散行為，此外，熔膠的壓力-比容-溫度(pvT)相依性質亦隨之變動並影響其pvT路徑發展，最終，在冷卻過程不同的冷卻速率決定不同的熔膠比容[3]變化，因此射出成型熔膠的收縮行為建立在複雜耦合的pvT行為表現，對肉厚較厚位置之熔膠而言，當表面冷卻固化後，核心層熔膠仍維持熔融態並緩慢冷卻收縮，以致於當其冷卻至室溫時，表面固化層受核心層體積收縮影響而致凹陷。近年來因感測技術發展成熟，透過安裝於模穴溫度及壓力感測器不僅可解析射出成型歷程熔膠pvT路徑發展，並可藉此發展射出成型品質監控技術，因此Hopmann等人[4-5]透過模穴壓力及溫度訊號估算熔膠當下pvT狀態，並基於模糊控制演算法反饋自適應調整製程參數(射速、熱澆道溫度)以補償熔膠品質擾動並優化pvT路徑以減少體積收縮，而透過分段動態模溫控制可實現區域模溫控制，使模穴各部位熔膠比容均勻化以減少翹曲[6]。

然而，上述技術需同時量測壓力及溫度以解析熔膠pvT狀態，對產業應用不甚便利，此外，當成品表面具曲率且為表面品質在意之處，該部位並非適合安裝感測器，這使得前述技術僅限制在簡單幾何薄件成型之品質監控應用，取而代之，透過模穴壓力感測或機台感測資訊並擷取品質特徵以分析射出成品品質變異性仍是較受歡迎的作法，如在射嘴設計一特殊狹縫模頭以觀察流動熔膠品質變化[7-9]，實驗結果不僅記錄熔膠在射出成型高剪切及高壓力作用下的流變行為變化，其黏度性質更與線下流變儀量測結果相同，此外，因量測模組直接安裝於射出成型機，故所獲得熔膠熱機械歷史更貼近實際射出成型製程狀態，然而，熔膠上游的射嘴感測資訊與實際形成射出成品的模穴位置仍有段距離，上述技術較常見於線上量測熔膠流變性質而鮮少應用於品質監控目的；相對來說，模穴感測資訊更為接近形成成品時實際熔膠狀態，當製程變異時感測特徵預期對射出成品品質反應更為靈敏，故以模穴感測資訊發展品質解析方法仍為目前產業相對可接受的方案[10]，特別是Kazmer等人[11]以自行設計的多變量感測器在射出成型過程量測熔膠充填壓力、溫度、速度等，藉以估算熔膠黏度變化，其實驗結果證實在模穴所收集感測資訊進行特徵擷取以分析成型品質更接近最終成品品質狀態，Chen等人[12-13]更綜合性比較射嘴、流道及模穴感測資訊所擷取之感測特徵與薄殼射出成品品質(重量)相關性，其研究結果表明熔膠流動距離越長，熔膠品質會趨於一致，越接近熔膠源頭(即射嘴)，感測特徵越能反應熔膠品質，相對而言，越接近熔膠充填末段(即模穴)，感測特徵越能反應成型品質，此與Kazmer等人[11]研究結果相符，此外，射速、料溫及背壓相對於模

溫及螺桿轉速顯著地影響射出成品品質，透過大柱延伸資訊所擷取最大鎖模力增量亦能反映射出成品品質變化，因此Chen等人[14]進一步基於鎖模力感測資訊成功發展智慧化射出成型品質監控技術，實驗結果證實射出速度、射切保時機、保壓壓力及料管溫度對薄殼射出成品品質皆有顯著影響，當製程發生變異時透過射切保時機及保壓壓力等兩個參數巧妙地調控可良好維持射出成品重量一致性。

影響成品表面收縮行為因素相當眾多，其中保壓壓力及料溫對成品收縮行為影響最大[15-18]；就品質監測而言，製程參數層代表熔膠或固化的塑料性質對成型品質影響，其包含：熔膠溫度高低及均勻性、熔膠黏度、熔膠速度、熔膠密度、熔膠壓力、固化層及內應力等，因此適用於監測成型品質變異情況，相對地，機器參數層與控制曲線層影響製程參數運行的重現性與精度[19]。在厚件射出成型量產過程，量化品質特徵並監測成品表面收縮行為對維持量產良率至關重要，雖然透過熔膠pvT路徑量測或感測壓力特徵擷取技術可達致線上監測薄殼射出成型品質目的，但上述文獻不僅缺乏對具複雜曲面厚件成型表面微縮痕品質監測可行性考量，厚件相對於薄殼成型差異亦未作探討。為此，本文自行發展厚件射出成型表面微縮痕品質量化方法，並探討不同製程參數對厚件射出成型品質及不同感測位置擷取感測特徵影響，藉以歸納厚件射出成型適當感測品質指標以作為發展厚件射出成型品質監控技術基礎。

2. 研究方法

2.1 感測品質特徵

本文在射出成型過程分別擷取模穴壓力(近澆口端及遠澆口端)及機台大柱應變行為以解析厚件成型過程熔膠在模穴充填之壓力歷程變化及大柱受撐模效應影響之延伸行為，如圖 1 所示，其中，模穴內近澆口處($P_{n.g.}$)及遠澆口處($P_{f.g.}$)感測壓力曲線最大值分別為 P_A 及 P_B ，壓力曲線下積分值(η_A 及 η_B)定義為黏度品質指標(η)[12]，如下：

$$\eta = \int_{t_0}^{t_e} p(t) dt \quad (1)$$

其中， t_0 及 t_e 分別為射出起始時間及冷卻結束時間， $p(t)$ 為感測壓力；此外，當熔膠在模穴充填滿模後會進入壓縮行為並形成撐模效應，該現象進一步表現在大柱延伸行為，故感測鎖模力(CF)曲線在熔膠充填及保壓階段相對於適當鎖模力設定條件(CF_{set})會有進一步增量行為(CF_i)，如下：

$$CF_i = CF - CF_{set}, \text{ 當 } CF \geq CF_{set} \quad (2)$$

其中鎖模力增量中的最大值定義為鎖模力增量峰值($CF_{i,p}$)[13]，本文將觀察感測特徵(模穴壓力峰值、黏度品質指標及鎖模力增量峰值)與射出成品品質(成品重量及表面微縮痕)在不同製程條件運行下之變動狀態，以獲悉對厚件成型品質顯著影響之製程參數與成因。

2.2 皮爾森相關性分析

皮爾森相關性(Pearson correlation)分析探討兩個獨立物理量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：

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (3)$$

其中 x 和 y 分別表示兩個獨立物理量， \bar{x} 及 \bar{y} 分別為它們各自獨立平均值。在不同製程條件運行下，本文將評估不同感測特徵與厚件射出成品品質相關性，以找尋在量產過程可顯著反映厚件成品表面微縮痕品質變異之感測特徵並提出品質監測方法。

3. 實驗設置

本文研究載具為一厚件把手(圖 2)，成品外觀幾何長度與寬度皆為 52.3 mm，平均厚度為 11.5 mm，其中最大厚度 14.4 mm 分布於把手橢圓靠破孔之下半部周圍，並在成品表面形成微縮痕；模具採一模四穴設計(圖 3)，每穴採單一潛狀澆口進膠充填；實驗設備使用發那科株式會社所生產 100 噸全電式射出成型機(ROBOSHOT S-2000i 100B)，螺桿直徑 28 mm，最大射壓 240 MPa，機台最大鎖模力 1000 kN；實驗使用材料為台灣奇美實業生產聚碳酸酯塑料(PC-110)，塑料熔融流動指數為 10.0 g/10 min(在 300°C，1.2 kg 下測得)，建議塑料及模具加工溫度分別為 250-310 及 70-120°C，塑料收縮率為 0.5-0.7%；在射出成型過程除了透過 DAQ 訊號擷取卡(National Instruments, USB-6343)以擷取射出成型機螺桿後方之編碼器訊號以獲得射出成型過程螺桿位置外，透過自行在機台大柱及模穴內部分別安裝之大柱應變感測器(GEFRAN, GE1029)及模穴壓力感測器(Futaba, SSB01KN08X06)更可獲悉射出成型過程模具撐模狀態及熔膠在模穴充填壓力狀態；為觀察不同製程參數及其設定水準對厚件射出成品體積收縮率及微縮痕影響，本研究基於表 1 進行模擬分析及實驗驗證，其中粗體字代表單因子變動實驗之固定數值，射切保螺桿位置相應模穴充填體積百分比分別為 80%、85%、90%、95%及 100%。

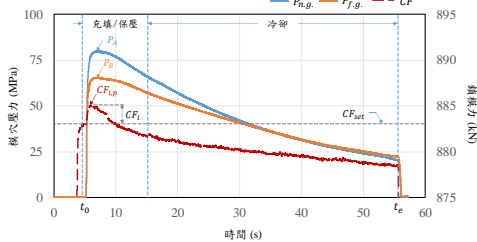


圖 1 感測特徵示意圖

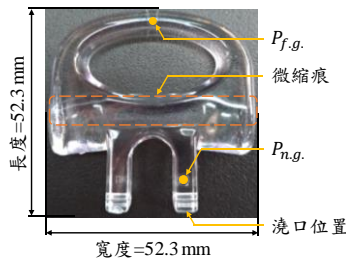


圖 2 射出成型載具及模穴壓力感測位置

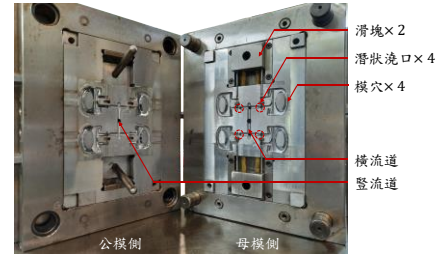


圖 3 一模四穴厚件把手射出成型模具

表 1 實驗製程參數表

固定參數			
計量位置 (mm)	77	保壓時間 (s)	10
背壓 (MPa)	6	冷卻時間 (s)	40
螺桿轉速 (rpm)	80	模溫機設定溫度. (°C)	120
後鬆退 (mm)	2.5	鎖模力 (kN)	900
變動參數			
射出速度 (mm/s)	80, 90, 100 , 110, 120		
V/P 切換位置 (mm)	25.1, 22.33, 19.55, 16.78, 14		
保壓壓力 (MPa)	80, 90, 100, 110, 120		
料管溫度 (°C)	260, 265, 270 , 275, 280		

4. 微縮痕量化方法

為量化厚件把手表面微縮痕，本研究以自行設計量測裝置透過固定光源及待測物位置，依循標準作業流程進行取像。因厚件把手表面特殊曲面設計之故，微縮痕在光源直射下呈現之反射線在特殊傾角下觀察具有類似希臘字母 Ω 字樣並定義為歐姆紋，如圖 4(a)所示，隨即將取像結果透過 Python 自行撰寫程式進行灰階化(圖 4(b))以提高歐姆紋辨識度，最後在灰階圖窗選歐姆紋範圍以自動識別歐姆紋分布狀態(圖 4(c))並轉換成像素點資訊以作為成品表面

微縮痕品質量化指標，本文圖片幾何尺寸為 $293 \times 391 \text{ mm}^2$ ，相當於 $1108 \times 1477 \text{ pixels}$ ，即 1 pixel 相當於 0.265 mm。因製程變動影響成品表面收縮程度並呈現不同歐姆紋扁平度，故透過歐姆紋分布像素資訊，將最高點及最低點彼此間之高度差($\Delta\Omega$)定義為成品表面微縮痕量化品質資訊，並探討感測特徵與其相關性及製程參數對其影響。

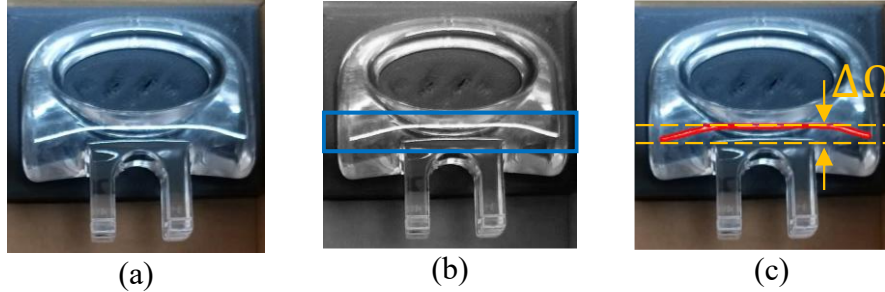


圖 4 微縮痕影像識別流程：(a) 原始圖像；(b) 轉換灰階圖像並窗選歐姆紋分布位置；(c) 自動識別歐姆紋分布狀態

5. 結果與討論

5.1 製程參數對感測特徵及成品品質影響

不同製程參數對厚件射出成品體積收縮率影響結果如表 2 所示，對厚件射出成型而言，熔膠體積收縮率最大位置皆發生於核心層(即肉厚較厚部位中心部)，此乃因表面熔膠接觸金屬模穴時，熱傳速率相對核心層高，故較快形成凝固層並箝制核心層熔膠收縮行為表現，相對而言，因核心層熔膠在表面熔膠凝固後仍處於高溫狀態，且表面凝固層塑料對核心層熔膠視為一熱絕緣體，故可提供核心層熔膠充分時間逐漸收縮，進而形成較大體積收縮行為；就不同製程參數對體積收縮影響而言，僅保壓壓力有顯著影響，隨著保壓壓力 80 MPa 提升到 120 MPa，平均體積收縮率由 1.852% 下降到 0.445% ($\Delta \approx -1.4\%$)，核心層最大體積收縮率由 5.742% 下降到 3.766% ($\Delta \approx -2.0\%$)；相對而言，體積收縮率在變動射速、射切保時機及料溫設定之表現幾乎維持一致且無顯著發展趨勢(最大及平均體積收縮率變動幅度分別僅約 0.4% 及 0.1%)，故模擬分析初步獲悉保壓壓力相對射速、射切保時機及料溫設定顯著影響厚件成型體積收縮率。

表 2 不同製程參數及水準對體積收縮率影響統計表

製程參數	水準設置					體積收縮率分析統計資訊
	L1	L2	L3	L4	L5	
射速	 Max.: 3.728% Avg.: 0.430%	 Max.: 3.764% Avg.: 0.443%	 Max.: 3.770% Avg.: 0.442%	 Max.: 3.786% Avg.: 0.447%	 Max.: 3.787% Avg.: 0.445%	Max.: 3.728%~3.787% ($\Delta=0.059\%$) Avg.: 0.430%~0.447% ($\Delta=0.017\%$)
射切保	 Max.: 3.772% Avg.: 0.443%	 Max.: 3.770% Avg.: 0.442%	 Max.: 3.773% Avg.: 0.444%	 Max.: 3.766% Avg.: 0.439%	 Max.: 3.774% Avg.: 0.444%	Max.: 3.766%~3.774% ($\Delta=0.008\%$) Avg.: 0.439%~0.444% ($\Delta=0.005\%$)
保壓壓力	 Max.: 5.742% Avg.: 1.852%	 Max.: 5.180% Avg.: 1.576%	 Max.: 4.677% Avg.: 1.214%	 Max.: 4.199% Avg.: 0.865%	 Max.: 3.775% Avg.: 0.445%	Max.: 3.775%~5.742% ($\Delta=1.967\%$) Avg.: 0.445%~1.852% ($\Delta=1.407\%$)
料管溫度	 Max.: 3.574% Avg.: 0.385%	 Max.: 3.673% Avg.: 0.414%	 Max.: 3.775% Avg.: 0.445%	 Max.: 3.874% Avg.: 0.479%	 Max.: 3.973% Avg.: 0.509%	Max.: 3.574%~3.973% $\Delta=0.399\%$ Avg.: 0.385%~0.509% ($\Delta=0.124\%$)

5.2 保壓壓力對感測特徵及微縮痕影響

不同保壓壓力水準下成型之感測壓力及鎖模力增量實驗結果如圖 5 所示，擷取感測品質指標如圖 6 所示，隨著壓力增加時，近遠澆口的感測壓力曲線樣貌相似，且隨之呈現向上平移趨勢，故所有擷取的感測特徵值隨之增加，微縮痕($\Delta\Omega$)由 9.32 減輕至 7.41 mm，故與所有感測特徵皆呈現負強相關性，此乃因對厚件射出成型而言，僅於澆口凝固前透過壓力推擠熔膠可有效補償核心層熔膠因冷卻收縮所致缺陷並減少體積收縮行為，同時模穴內熔膠壓縮行為不僅使模穴壓力瞬間提升，更會反映顯著撐模效應，故所有感測特徵隨著壓力提升而增加。

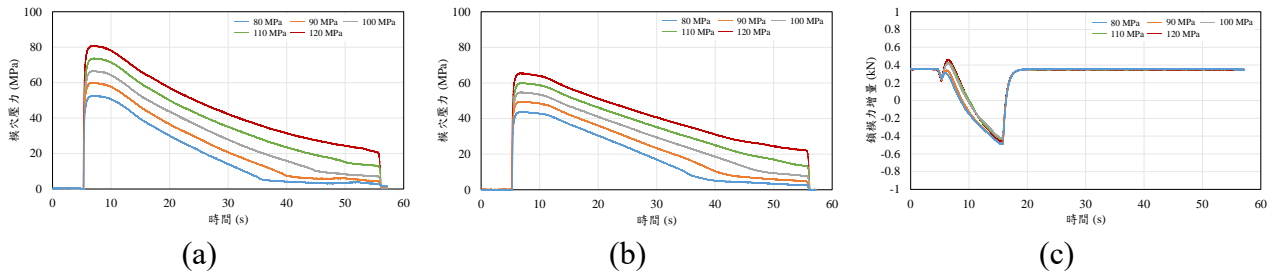


圖 5 不同保壓壓力設定成型感測曲線：(a) $P_{n.g}$ ；(b) $P_{f.g}$ ；(c) CF_i

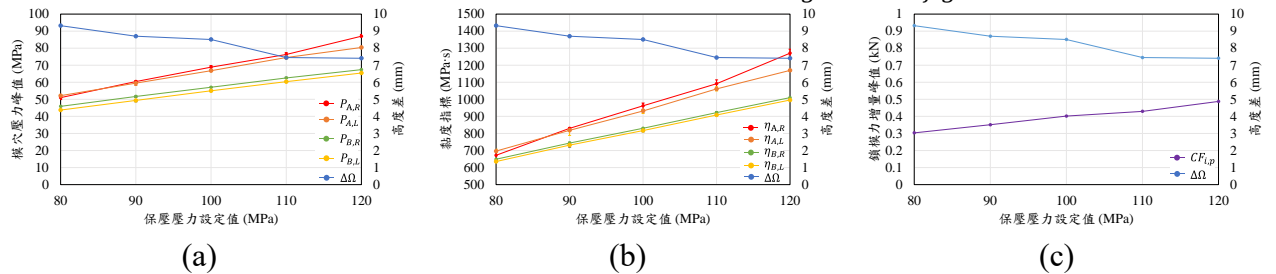


圖 6 不同保壓壓力設定成型感測品質指標發展趨勢：(a) P_A & P_B ；(b) η_A & η_B ；(c) CF_i

5.3 驗證實驗

本研究透過變動保壓壓力以確認上述感測品質特徵在量產過程用以監測表面微縮痕變化之效度，實驗參數基於表 1 並將保壓壓力設置為 100 MPa，依序每 5 模次變動保壓壓力(100-110-100-90-100-105-100-95-100-102.5-100-97.5-100 MPa)，實驗結果如圖 7 所示，基本上微縮痕高度差隨著保壓壓力變動而有所變化，所有感測品質特徵亦反映微縮痕變動，並與其呈現負強相關性，其中，模穴壓力擷取指標(壓力峰值及黏度指標)整體相關性大小平均 0.97 皆大於鎖模力增量峰值指標相關性 0.94，此推測與厚件射出成型相對薄殼成型並未形成顯著撐模效應而造成鎖模力增量峰值反映品質變異之靈敏度較弱有關；就模穴感測品質特徵而言，遠澆口處指標大小略大於近澆口處，推測與熔膠在遠澆口處形成的壓縮效應相對近澆口處大有關。在滿足表面微縮痕品質需求所制定歐姆紋範圍設定為 $7.4 \text{ mm} \leq \Delta\Omega \leq 8.6 \text{ mm}$ ，相應保壓壓力可設定為 $100 \pm 5 \text{ Mpa}$ ，當保壓壓力大於 105 MPa 有潛在過保壓疑慮，而小於 95 MPa 時表面微縮痕則不符檢測規範。基於產業實用性，透過模穴壓力感測資訊擷取品質特徵是可有效並正確地反映厚件射出成型表面微縮痕變動趨勢，並可作為線上品質監測指標。

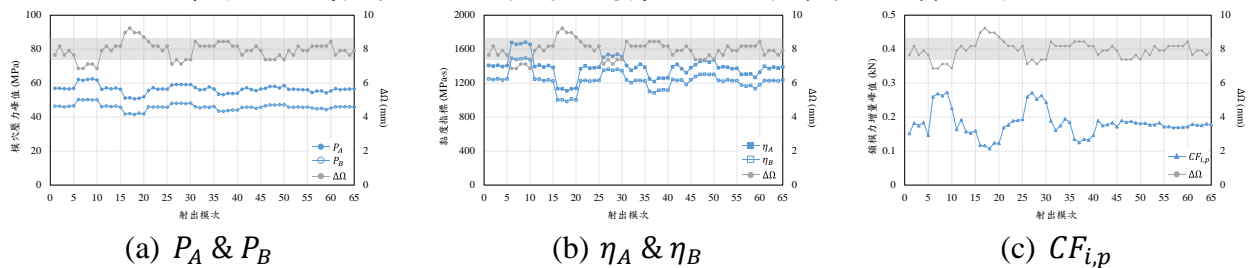


圖 7 連續實驗感測品質指標與微縮痕變動趨勢

6. 結論

本文探討的厚件成品相對一般常見厚件光學鏡片擁有更複雜的幾何曲面，故甚難進行量化品質探討。由於厚件成品相對薄殼射出成型擁有甚大肉厚，在成型後之體積收縮現象十分明顯並形成表面微縮痕(本文即特殊歐姆紋)，本文成功量化厚件成品表面微縮痕並透過感測特徵監測量產過程成品表面品質變異，由模擬分析及實驗結果歸納如下：

1. 本文成功透過影響識別及自行撰寫程式將厚件成品表面微縮痕量化以定義為成品表面量化品質指標。
2. 由模流分析結果可知保壓壓力顯著影響厚件射出成型體積收縮行為，相對地，變動射速、射切保時機及料溫設定並未顯著影響。
3. 由實驗結果得知，隨著保壓壓力提升使熔膠在收縮過程可更有效獲得熔膠二次充填以補償體積收縮缺陷，並在冷卻開模後有更小比容變化，從而確保成品表面品質。
4. 模穴壓力曲線擷取感測特徵及鎖模力增量峰值皆與成品重量及表面微縮痕有強相關性，就厚件射出成型實務而言，模穴壓力擷取感測特徵更敏感地反映成品微縮痕變化，故可作為線上品質監測良好之感測品質特徵，並提供未來發展線上品質監控技術良好基礎。
5. 未來本技術將近一步結合製程參數調整以發展智慧化厚件成型品質監控技術以提升射出成品品質一致性。

7. 誌謝

本文研究感謝科技部計畫(MOST109-2622-E-035-006-CC3)給予研究經費支持，並感謝科盛科技(股)提供分析技術協助，作者特此致上感謝之意。

8. 參考文獻

1. C. Hopmann, M. Röbig, 2016. Application of a multilayer injection molding process for thick-walled optical components, *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 36, pp. 557-562.
2. S.C. Nian, P.W. Chen, M.S. Huang, 2020. Multilayer injection molding of high-profile convex lens, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 137, 48600.
3. Y.J. Chang, R.Y. Chang, T.A. Osswald, 2021. Measurement and modeling of bulk viscosity for polystyrene melts, *Physics of Fluids*, Vol. 33, 073103.
4. Ch. Hopmann, A. Reißmann, J. Heinisch, 2016. Influence on product quality by pvT-optimised processing in injection compression molding, *International Polymer Processing*, Vol. 31, pp. 156-165.
5. Ch. Hopmann, J. Heinisch, 2018. Process control strategies for injection molding processes with changing raw material viscosity, *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 38, pp. 483-492.
6. Ch. Hopmann, C. Xiao, C.E. Kahve, J. Fellerhoff, 2021. Prediction and validation of the specific volume for inline warpage control in injection molding, *Polymer Testing*, Vol. 104, 107393.
7. J. Aho and S. Syrjälä, 2011. Shear viscosity measurements of polymer melts using injection molding machine with adjustable slit die, *Polymer Testing*, Vol. 30, pp. 595-601.
8. T. Köpplmayr, H.J. Luger, I. Burzic, M.G. Battisti, L. Perko, W. Friesenbichler, J. Miethlinger, 2016. A novel online rheometer for elongational viscosity measurement of polymer melts, *Polymer Testing*, Vol. 50, pp. 208-215.
9. H.J. Luger, B.L. Baselli, A. Neunhäuserer, W. Friesenbichler, J. Miethlinger, 2019. A novel

hyperbolic slit contraction with constant strain rate for elongational rheology of polymer melts, *Polymer Testing*, Vol. 73, pp. 104-114.

10. S. Farahani, N. Brown, J. Loftis, C. Krick, F. Pichl, R. Vaculik, S. Pilla, 2019. Evaluation of in-mold sensors and machine data towards enhancing product quality and process monitoring via Industry 4.0, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, pp. 1371-1389.
11. G. Gordon, D.O. Kazmer, X. Tang, Z. Fan and R. X. Gao, 2015. Quality control using a multivariate injection molding sensor, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 78, pp. 1381-1391.
12. J.Y. Chen, K.J. Yang, M.S. Huang, 2018. Online quality monitoring of molten resin in injection molding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 681-693.
13. J.Y. Chen, C.C. Tseng, M.S. Huang, 2019. Quality indexes design for online monitoring polymer injection molding, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 2019, 3720127.
14. J.Y. Chen, J.X. Zhuang, M.S. Huang, 2021. Enhancing the quality stability of injection molded parts by adjusting V/P switchover point and holding pressure, *Polymer*, Vol. 213, 123332.
15. Y. Liu, L. Cao, W.K. Chi, L.Y. Zhang, W.M. Yang, P.C. Xie, 2021. Multi-layer counter-pressure injection molding for thick-walled optical lens, *International Polymer Processing*, Vol. 36, pp. 131-136.
16. C.C.A. Chen, S.W. Chang, 2008. Shrinkage analysis on convex shell by injection molding, *International Polymer Processing*, Vol. 23, pp. 65-71.
17. M. Kurt, Y. Kaynak, O.S. Kamber, B. Mutlu, B. Bakir, U. Koklu, 2010. Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, 571-578.
18. D. Annicchiarico, J.R. Alcock, 2014. Review of factors that affect shrinkage of molded part in injection molding, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 29, pp. 662-682.
19. Y. Zhang, T. Man, S. Huang, H. Gao, D. Li, 2016. A statistical quality monitoring method for plastic injection molding using machine built-in sensors, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, pp. 2483-2494.