

# 運動鏡框成形條件優化之研究

\*蘇嘉祥、林育均

南臺科技大學機械工程系

\*jssu@stust.edu.tw

## 摘要

本研究是以運動眼鏡之設計開發為主題，結合逆向工程技術、田口法與模流分析，從而引申出一套新型運動鏡框快速開發的製程技術，並以模流分析結合品質管理方法，從複雜的射出成型參數中分析出重點參數與合理範圍。在考量產品的耐用性與功能性下，結合設計與塑料成形性，在模流分析與田口式的品質管理間取得優化的射出成型壓力與剪切率，相較於一般的成形條件，其射出成形的剪切率可降低約 18%、射壓值可大幅減少約 26% 間，除了可以強化產品的使用耐用性外，亦可減輕生產耗能的問題，而在結合逆向工程的新式運動眼鏡開發設計上，則更可快速設計出符合人體工學以及流線的新式造型，研究成果可提供運動眼鏡在設計、改良與生產上，一套快速且穩定的研發參考。

**關鍵詞：**模流分析技術、田口方法、剪切率

## Research on Optimizing the Injection Molding Conditions of Sports Glasses

\*Chia-Hsiang Su, Yu-Jyun Lin

Department of Mechanic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

### Abstract

This study presents a novel process technology for the rapid development of sports glasses, which combines reverse engineering technology, Taguchi method, and mold flow analysis. The key parameters and their reasonable ranges were analyzed from complex injection molding parameters using the mold flow analysis and quality management method. Optimal injection molding pressure and shear rate were obtained by considering durability, functionality, design, and plastic formability. The results show that, compared with general molding conditions, the injection molding shear rate can be reduced by approximately 18% and the injection pressure value can be reduced by approximately 26%, leading to improved durability and reduced energy consumption during production. The application of reverse engineering technology in the development and design of new sports glasses enables the creation of ergonomic and streamlined shapes in a shorter time. The research results provide a stable reference for the design, improvement, and production of sports glasses using a fast and efficient approach.

**Keywords:** Mold flow analysis, Taguchi method, Shear rate

## 壹、前言

近年世界各國受到大型國際運動賽事的影響，運動休閒人口數大幅增加，運動館與場所如雨後春筍般快速建立，台灣也陸續舉辦許多大型的運動賽事，逐漸帶動了運動養生的風氣，在運動兼具休閒的氛圍下也開始重視運動配件的使用，運動型眼鏡與機能性服飾更成為運動時的必需品，其中運動型眼鏡更成為戶外運動的重要配件，除了用於擋陽光、保護眼部的功能外，亦需兼具人體工學設計與耐用性，才能不失競賽之成績，目前運動鏡框的生產主要仍以射出成形加工為主，近年有許多相關的文獻在探討射出成形之剪應力問題以及影響成形的參數，亦有部份研究者專注於材料的選擇上，特別是分析與探討耐衝擊性相關的塑化原料與應用條件[1-3]，於2018年 Toth[4]等人針對射出成形的剪切粘性進行分析探討，研究發現溫度、射壓、分子量與結構是影響剪切度的重要因子，也提出聚合物在成形時的流動活化能與化學結構有關，以及流動活化能的計算方式，近年亦持續有研究者於不同材料探討射出成形的最佳化參數，以及分析各成形參數對成形品質的影響性[5-6]。2008年 Lladó[7]等人在聚氯乙烯管的成形上發現，射出的參數會影響白斑缺陷的形成，並以成形速率與料體溫度的設定影響最大。2009年Shin [8]則提出塑膠製品易斷裂的主要因為塑料在成型流動時所殘留的應力，導致塑料充填過程中產生高剪切率，而使成型品在使用時容易產生破壞情形，2002年 Liang [9]則進一步分析，塑性材料在射出成形時所產生的臨界剪切率與成型品變形之關聯性，研究發現，當塑料成形時的臨界剪切率過高時，將會造成塑料分子鏈大幅度的變形並斷裂，最後導致成形品的機械強度下降與弱化。

綜合上述的文獻探討，近年對於射出成型品的殘留內應力改善尚有極高的需求，特別是在造型強化設計與塑性流體在射出成形參數的分析上，一直仍存有整合設計與系統性分析的必要性，以進一步取得快速、穩定且具效能的射出成形參數，因此，本研究擬以運動型鏡框為分析對象，結合逆向工程技術與人體工學設計，並導入模流分析與田口品質管制理論，以及依據標準生產的模具設計、澆口尺寸與流道設計，擬在系統性的技術整合下，快速開發出符合人體工學的運動型鏡框外型，又可在穩定與盡可能降低能源耗損的條件下提出具強化性的射出成形參數組合，以提供符合製造成本及提升鏡框強度之設計，並能兼具保護力、合理性與美觀之目標。

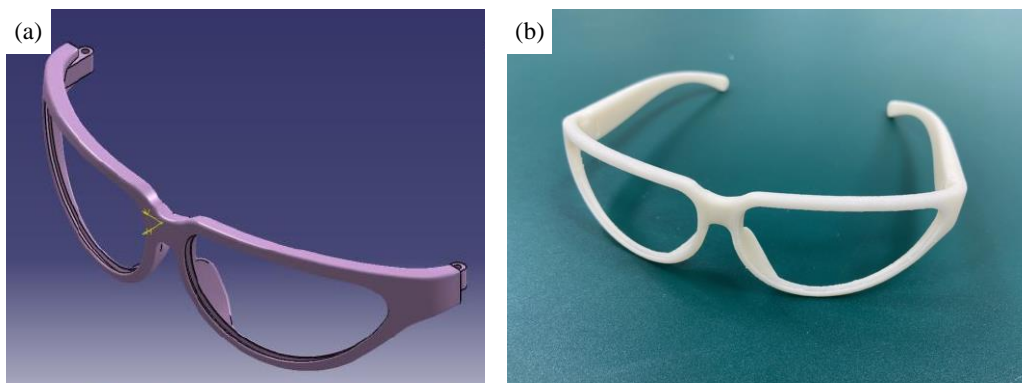
## 貳、模擬分析步驟

運動型眼鏡的開發仍需以符合人體工學，且考量設計開發之時效性為主，如圖1所示，在本研究中，新樣式的運動型眼鏡鏡框設計將結合逆向工程技術，參考各式模型頭並擷取穿戴眼鏡時之重點曲線/曲面，做為運動型眼鏡鏡框設計之基礎，在貼合、流線與舒適性下，以電腦繪圖軟體（CAD）快速勾繪出特徵曲線/曲面，即可完成一副新樣式且符合人體工學的運動型眼鏡鏡框，如圖2(a)所示。惟設計與實體常仍存有部份的變異性，且模具的開發與製作亦存有不可逆性，因此，對於新樣式的運動型眼鏡鏡框，則將先藉由3D列印機進行打樣並實際驗證穿戴的合適程度，如圖2(b)所示，在快速取得新樣式運動型眼鏡鏡框輪廓並初步驗證穿戴的舒適性後，另一個較為關鍵的課題為模具設計與射出成形的參數規劃，配合常見的模具設計原則，以及針對運動型眼鏡鏡框射出成形後的澆口去除問題，模具設計之尺寸長寬高分別約為  $230*150*132\text{mm}^3$ ，水路設置距離物件為 20mm，母模方水路間距離為 155mm，公模方水路間距離為 65mm，水路管徑為  $\varnothing 8\text{mm}*4$  根，此均為實際模具設計所使用的尺寸。考慮到運動鏡框外觀與後續處理成本，澆口位置的選擇需考量隱密性、大小與去除後的表面曲面度，因此，選定放置眼鏡鼻墊後方並選用  $\varnothing 2\text{mm}$  之圓形澆口，同時根據產品造型與生產穩定性，模具的設計主要為一模一穴，如圖3所示。

運動型鏡框生產目前主要仍之射出成形法為主，因此對於產品的成形性、穩定性與強度等品質的管控，則需藉由模流分析來進一步了解新式樣設計品之特性，期能透過產品設計與成型參數管控，找出符合產品特性的生產，以做為實際生產之依據，模流分析之塑膠材料採用PC，其為目前市面上運動眼鏡鏡框常用的塑料，具有良好的耐衝擊、耐熱與耐刮等性能，此外考量產品型態與物件大小，射出成形機台規格選用鎖模力為 125 Ton 之設備。在新式樣運動型眼鏡射出成形生產上，其考量的重點除了成形件的

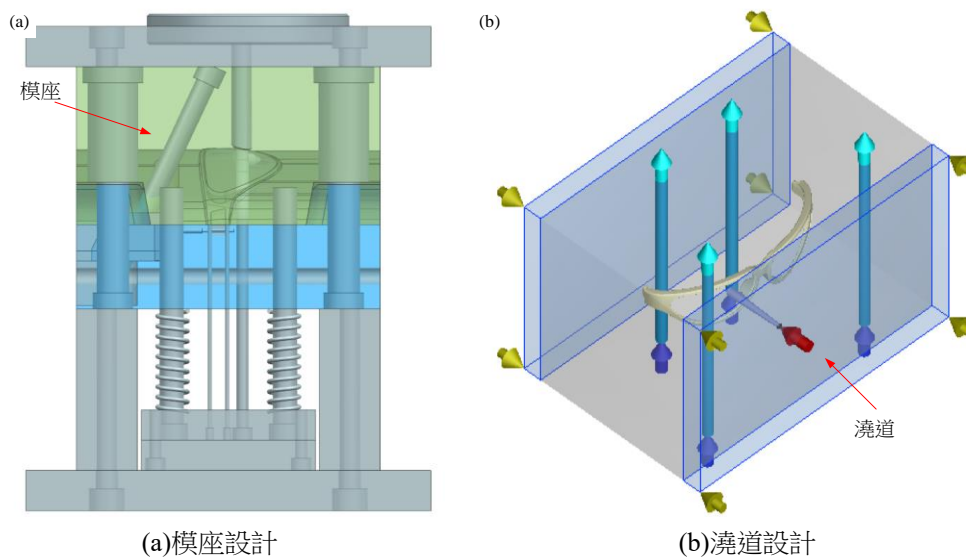


圖1 運動眼鏡設計規範  
([RX 鏡片製作技術 ADHOC 艾德國際 \(adhoceyewear.com\)](http://RX鏡片製作技術 ADHOC 艾德國際 (adhoceyewear.com)))



(a)結合逆向工程技術與人體工學之鏡框 (b) 3D列印測試件

圖2 新樣式運動型眼鏡鏡框設計



(a)模座設計 (b)澆道設計

圖3 實體模具設計

完整性外，亦評估產品的變形量、包封與剪切率等問題，特別是剪切率的降低評估上。而影響射出成形品質的參數相當多計有：充填壓力、料溫、模溫、保壓壓力、保壓時間、冷卻時間與平均流率，其中又以料溫、平均流率、保壓壓力與模溫等之設定最為關鍵，在多元的參數下為取得合理、低耗能且成形性較佳的參數組合時，若以全模組並採逐一測試參數的影響性，則恐耗時且亦可能受參數間的交互影響而失去分析的精準性，因此，研究中將透過田口品質設計，並以平均流率、料溫、保壓壓力與模溫為控制因子，根據材料特性以及加工條件，其中料溫與模溫水準的設定區間是參考材料為主，其安全使用範圍區間值分別為 250~300°C（料溫）與 70~120°C（模溫），而平均流率與保壓壓力的區間設定則是以選用的機台規格，經前導模擬測試與分析，取得合理的水準範圍，其參數列表與範圍如表1 所示。選用四因子三水準之  $L_9$  直交表進行模擬實驗分析，如表2所示，其他射出成形參數如：保壓時間則固定設為6秒、冷卻時間則設為 18秒，以及充填壓力設為 170MPa，其中保壓壓力則是根據充填壓力依百分比的方式進行設定。根據1999年 Smith[10]所提的研究報告分析與評估，塑料於模穴內流動所產生的剪切率，若其值愈高將愈易造成成形品於使用中突然劣化的現象，或易由高剪切應力處產生破壞，因此，本研究擬以此為目標值，在合理的參數範圍內尋求射出成形剪切率的望小值，並期望所求得的參數能提供在低耗能的成形條件下，亦可獲得容易成形、變形量小以及內應力低的產品，田口品質設計之望小信號雜訊比特性公式如（1）所示。

表1 控制因子水準表（\*為基準值）

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	料溫（°C）	260	275*	290
B	平均流率（%）	20 (約19.05cm <sup>3</sup> /s)	25* (約24.05cm <sup>3</sup> /s)	30 (約29.05cm <sup>3</sup> /s)
C	保壓壓力（%）	30	35*	40
D	模溫（°C）	85	95*	105

表2  $L_9$  直交表

Exp.	A	B	C	D
1	A 1	B 1	C 1	D 1
2	A 1	B 2	C 2	D 2
3	A 1	B 3	C 3	D 3
4	A 2	B 1	C 2	D 3
5	A 2	B 2	C 3	D 1
6	A 2	B 3	C 1	D 2
7	A 3	B 1	C 3	D 2
8	A 3	B 2	C 1	D 3
9	A 3	B 3	C 2	D 1

望小信號雜訊比

$$S/N(\text{dB}) = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

## 參、結果與討論

根據參數列表（表2）進行系列性的模流實驗與分析，並在剪切率最小化的情形，進一步探討射出成形各參數的影響性與組合，提出合理且具製程效率的關鍵參數值，提早預防因過高的殘留應力對成品造成應用強度的影響，因此對於產品的成形性探討，將分成外在與內在兩部份進行分析，外在的部份指的是成品的翹曲變形問題，而內在的部份則為射出過程所產生的材料剪切性分析。首先由田口分析實驗觀察參數對產品外在的影響性，研究發現，當在熔融的塑料進入模穴後，隨塑料流動阻力變大使得充填壓

力會有逐步增加的趨勢，9組參數組合皆有明顯的變化，如圖4所示，然而隨著料溫設定的不同，在充填壓力曲線中也可明顯觀察到充填壓力的變化，在實驗組別1、2、3（料溫為260℃），其充填時壓力值約在150~170 MPa間（如圖4），但當料溫升高至290℃時，其充填壓力則僅需約90~100 MPa間（如實驗組別7、8、9）即可完成整個模穴的充填，顯見較高的料溫是有助於塑料在模穴內的流動，並可減緩充填壓力的升高而避免高射壓促使產品（鏡框）產生過度膨脹，造成產品降溫後頂出時鏡框向外翹曲變形的畸形，但高料溫的設定除了需配合材料別外，仍需配合其他射出參數的組合，才能不致讓塑料在射出過程中產生過度剪切而有燒焦與耗能的問題，因此接續再以射出成形流率為分析，若以低料溫與高流率的組合進行射出（第3組），則模穴內部容易有殘留壓力的情形（約27MPa），如圖5(a)所示，此易造成過度撐模而讓模形產生毛邊的問題。反觀若以高料溫與低流率（第7組）進行射出，如圖5(b)所示，則可取得成形後模內壓力趨近於常壓之效果，能有效改善產品頂出時鏡框向外變形之情形。在分析各重要成形條件對模形外在變形的影響性後，其模形內部強化問題亦需共同考量，而成形性內在評估的方式則以最大剪切率為依據，經由剪切率分析發現，9組實驗的最大剪切率均分佈於澆口與成形品的交口處，如圖6所示，此與預估趨勢完全一致，因為熔融塑料在進入交口處會受阻力與流向大幅變化，而使塑料分子鏈間產生劇烈剪切現象，由表3中清楚觀察到第3組、第6組與第9組，其剪切率皆接近於40000 s<sup>-1</sup>間，以標準的PC材料而言，其已達剪切率容許上限值，在模形內部的剪切率雖不致會達上限值，但經由交口處產生的高剪切性，可能已大幅增加模穴內部其塑料高分子鏈斷裂的機率，進而影響運動鏡框強度與使用的耐受性；相比之下，第1組、第4組、第7組（平均流率20%約19.05cm<sup>3</sup>/s）時剪切率可落於28000~30000 s<sup>-1</sup>間，不僅優於原始設計之估計值（35000 s<sup>-1</sup>）也接近期望值之下限（剪切率容許上限之80%內），此有助於產品耐衝擊性的提升與使用壽命的延長。

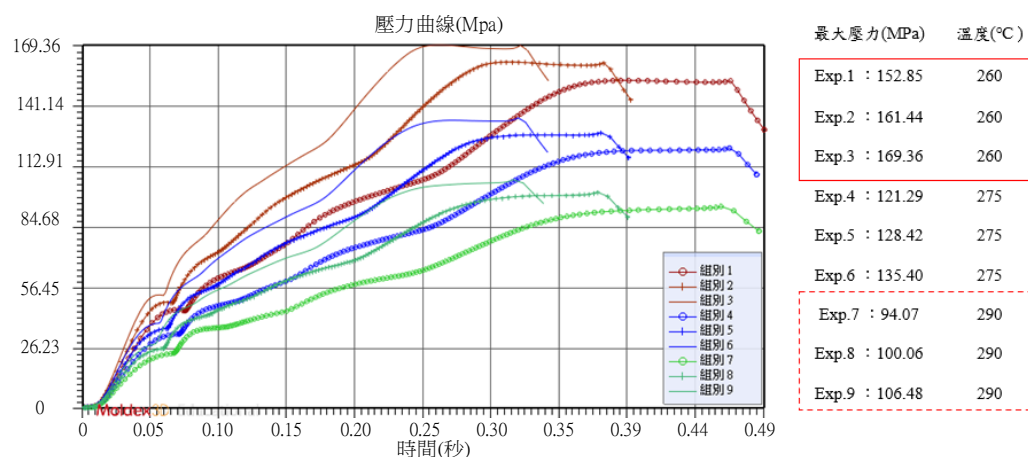


圖4 壓力曲線比較圖

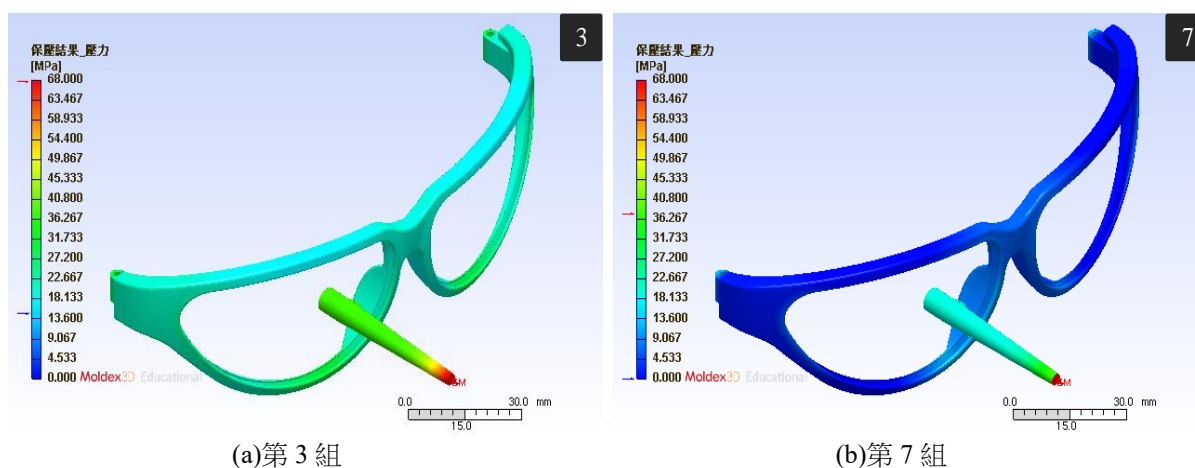




圖 5 模穴壓力分佈

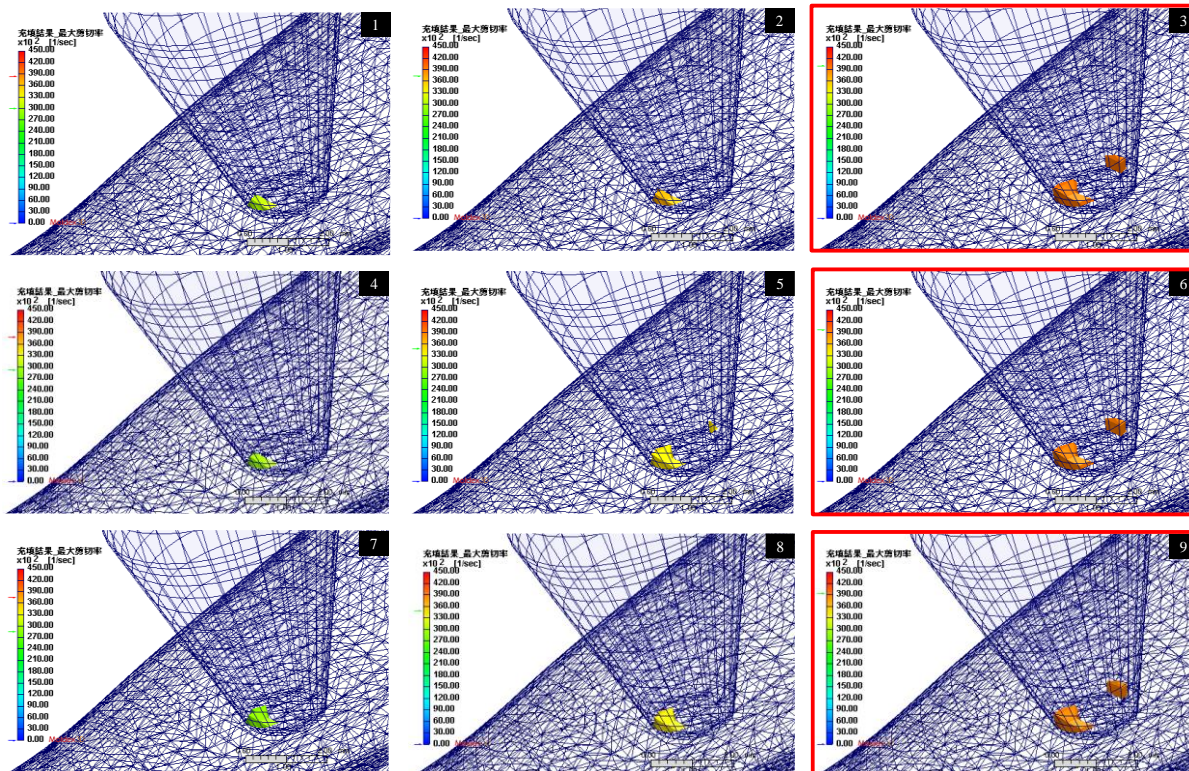


圖 6 9 組實驗最大剪切率分布圖

表 3 最大剪切率製程數據

Exp.	料溫 A (°C)	平均流率 B (%)	保壓壓力 C (%)	模溫 D (°C)	最大剪切率 (s <sup>-1</sup> )
1	A 1	B 1	C 1	D 1	30002
2	A 1	B 2	C 2	D 2	35595
3	A 1	B 3	C 3	D 3	40023
4	A 2	B 1	C 2	D 3	29220
5	A 2	B 2	C 3	D 1	34835
6	A 2	B 3	C 1	D 2	39684
7	A 3	B 1	C 3	D 2	28506
8	A 3	B 2	C 1	D 3	34488
9	A 3	B 3	C 2	D 1	39416
original	A 2	B 2	C 2	D 2	35000

由降低剪切率並提高產品結構強度觀點而言，在參數設計方面宜採用望小特性，進一步分析控制因子的影響性，以及藉由 S/N 比之田口品質特性，計算出各實驗組別之剪切率的雜訊比來進行品質評估，由表 4 之 S/N 比計算數據可觀察出，第 3 組與第 7 組分別為品質特性最差與最佳的組別，且可以發現在 9 組模擬實驗中，有 3 組之剪切率數據小於原始設計組。而 S/N 比不僅可作為品質管理的衡量指標，亦可經由 S/N 比進行數據統整與歸納出因子反應值與因子效應，而因子反應其計算方式是將控制因子在同一水準下之所有 S/N 比取平均值，因子效應則為每個控制因子的變動對 S/N 比與品質特性之影響性，統計表分別如表 5 與表 6 所示，由統計表中可發現控制因子 A 與 B 其因子反應最為明顯，因此推估因子 B 中水準 2 具有明顯改善品質變異的效益，且因子影響範圍最大亦為控制因子 B，也就是說，變動控制因子 B 所產生的影響性會遠大於其他的控制因子。另一方面，再以折線圖的方式呈現各控制因子的 S/N 反

表4 模擬實驗數據與S/N比統整表

Exp.	料溫 A (°C)	平均流率 B (%)	保壓壓力 C (%)	模溫 D (°C)	$\bar{Y}(s^{-1})$	S/N
1	A 1	B 1	C 1	D 1	30002	-89.54
2	A 1	B 2	C 2	D 2	35595	-91.03
3	A 1	B 3	C 3	D 3	40023	-92.05
4	A 2	B 1	C 2	D 3	29220	-89.31
5	A 2	B 2	C 3	D 1	34835	-90.84
6	A 2	B 3	C 1	D 2	39684	-91.97
7	A 3	B 1	C 3	D 2	28506	-89.10
8	A 3	B 2	C 1	D 3	34488	-90.75
9	A 3	B 3	C 2	D 1	39416	-91.91
original	A 2	B 2	C 2	D 2	35000	-90.88

表5 S/N因子反應表

Control Factors	料溫 A (°C)	平均流率 B (%)	保壓壓力 C (%)	模溫 D (°C)
Level 1	-90.872	-89.318	-90.756	-90.766
Level 2	-90.709	-90.874	-90.752	-90.700
Level 3	-90.589	-91.977	-90.662	-90.704
E <sup>1-2</sup>	0.164	-1.555	0.005	0.066
E <sup>2-3</sup>	0.120	-1.103	0.090	-0.005
Range	0.284	2.659	0.094	0.066
Rank	2	1	3	4
Significant	yes	yes	no	no

表6 品質特性反應表

Control Factors	料溫 A (°C)	平均流率 B (%)	保壓壓力 C (%)	模溫 D (°C)
Level 1	35207	29243	34725	34751
Level 2	34580	34973	34744	34595
Level 3	34137	39708	34455	34577
E <sup>1-2</sup>	-627	5730	19	-156
E <sup>2-3</sup>	-443	4735	-289	-18
Range	1070	10465	289	174
Rank	2	1	3	4
Significant	yes	yes	no	no

應結果，可協助判讀各應控制因子的對品質變異的影響性，如圖 7 所示，當折線之斜率愈大時，表示該控制因子對於整體品質特性影響性愈大（重要因子），反之，斜率變化不大時，則視為此控制因子對於整體影響較小，據此歸納出控制因子 A、B 為重要因子，而控制因子 C、D 則屬較不影響品質之因子，因此在望小特性（剪切率）分析下，獲得 A3, B1, C3, D3 之參數組合，而此組合也恰好為 9 組模擬實驗中的第 7 組，最後進一步以原始設計與最佳參數組合進行比較，如表 7 所示，於第 7 組的參數組合中，其料溫雖然提高至 290°C 但卻有效降低最大射出的壓力至 94.07MPa，對於射出機與模具來說是一大利基點，不僅能降低機台與模具損壞機率，也可以選擇更低的鎖模力機台來進行射出，達到節能與降低生產

成本，另一方面也促使射出成形時之剪切率值降低約 18%，材料內部的剪切應力亦低於原始設計組，大大的降低鏡框內部的殘留應力，有效提升鏡框強度與壽命。

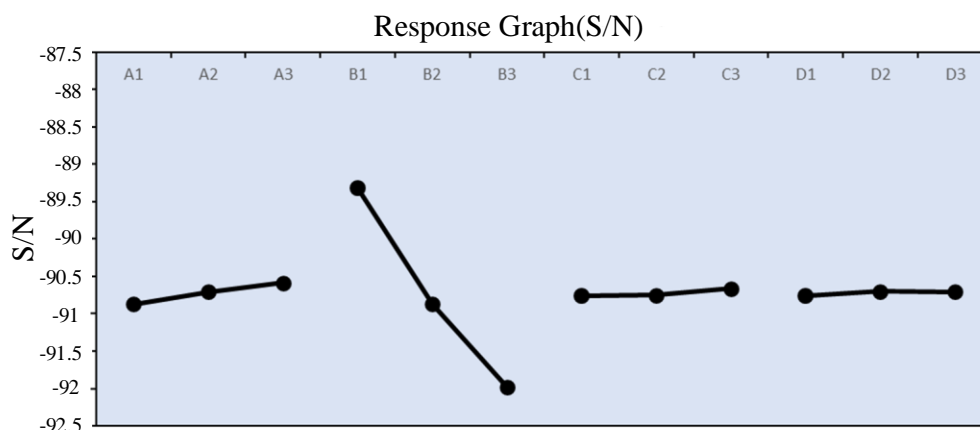


圖 7 S/N 因子反應圖

表 7 成型參數對照表

名稱	射出壓力 (MPa)	剪切率 (s <sup>-1</sup> )	剪切應力 (MPa)	翹曲變形 (mm)	包封 (個)	循環時間 (s)
original	128.43	35000	0.52	0.56	60	24.3
Exp.7	94.07	28506	0.44	0.59	54	24.4

## 肆、結論

本研究主要是針對運動鏡框進行強度優化之設計探討，整合逆向工程技術 (RE)、3D 列印技術、田口方法 (TM)、電腦輔助設計 (CAD) 與電腦輔助分析 (CAE) 等技術，對市售常見之運動鏡框進行設計變更、品質分析與模流分析探討，提出精準且快速的開發出新式又具高品質之運動鏡框技術流程。透過技術整合並以品質與因子效應分析，快速的取得參數範圍中可行又具效能的參數組合 (料溫 290°C、平均流率 20%、保壓壓力 40%、模溫 95°C)，兼顧低成形壓力與低剪切率，其中成形壓力優於原始設計約 26.7%，而剪切率值則也減少約 18%，更驗證了流率參數值是直接影響剪切率值的重要因素，因而可讓開發設計者在考量鏡框設計與其結構強度下，又可取得合理的射出成形參數組合，有助於降低模具開發設計之成本，進而獲得研發穩定且具有產業競爭性之運動型鏡框。

## 參考文獻

- [1] Kurt, M., Kaynak, Y., Kamber, O.S., Mutlu, B., Bakir B., & Koklu, U. (2010). Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts. *Int J Adv Manuf Technol*, 46, 571–578.
- [2] Liao, S.J., Chang, D.Y., Chen, H.J., Tsou, L.S., Ho, J.R., Yau, H.T., Hsieh, W.H., Wang, J., & Su, Y.C. (2004). Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. *Polym. Eng. Sci.*, 44(5), 917–928.
- [3] Tyler, M., Jacob, T., & Bradley, J. (2018). Effect of mold temperature on injection time and injection pressure. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 2018.
- [4] Toth, G., Nagy, D., Bata, A., & Belina, K. (2018). Determination of polymer melts flow-activation energy a function of wide range shear rate. *J. Phys.*, 1045(1), 1–6.



- [5] Mattia, C., Emanuele, F., Gianluca, C., Tiziano, B., & Marco, S. (2022). Effects of temperature, strain and strain rate on shape memory thermoplastic polyurethane processed by injection molding. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 34(7), 751–765.
- [6] Ganesh, J., Vivek, G., Mahesh, D., & Nandkishor, D. (2022). Effect of packing pressure on stagnation weld-line strength for thermoplastic semicrystalline glass fiber reinforced material. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* <https://doi.org/10.1177/08927057221142244>
- [7] Lladó, J. & Sanchez, B. (2008). Influence of injection parameters on the formation of blush in injection molding of PVC. *J. Mater. Process. Technol.*, 204(1–3), 1–7.
- [8] Shin, H. & Park, E.S. (2009). Analysis of crack phenomenon for injection-molded screw using moldflow simulation. *J. Appl. Polym. Sci.*, 113(4), 2702–2708.
- [9] Liang, J.Z. (2002). Effects of extrusion conditions on rheological behavior of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer melt. *J. Appl. Polym. Sci.*, 85(3), 606–611.
- [10] Smith, J.B. (1999). Shear rate—cause and effect. <https://pcn.org/wp-content/uploads/Injection-Moulding-Gates-and-Runners-J-Barry-Smith-1.pdf>