

射出成型於聚丙烯及其複合材料翹曲變形之研究
Research on polypropylene and its composite material warpage deformation of injection molding

胡董墨、吳宇宸、劉士榮*

長庚大學機械系高分子材料與加工實驗室

Chung Gung University Department of Mechanical Engineering

Polymer Materials and Processing Lab

*E-mail: shihjung@mail.cgu.edu.tw

摘要

射出成型是精加工製程較少的技術，其可快速生產完整度高的複雜成品，並具備高度自動化等特性，故其成為最主要的塑膠材料成型的加工方法。雖然射出成型優點很多，但其開模成本高是一大缺點，隨著科技進步，模流分析及田口法的結合使用可大大的降低模具的失敗率。模流分析可以模擬射出成型的整個過程，分析其充填、保壓、冷卻情況以及預測產品的縫合線位置、應力分佈、翹曲量等眾多問題，進而優化設計並且提升產品品質。而田口法利用最少的實驗數據來建構最精確的實驗模式是其最核心的價值。

本研究主要以實驗設計法來探討解決實務加工成型的問題，以幾何形狀、熔膠溫度、最大射出壓力、最大保壓壓力、保壓時間等射出成型的條件設定對於聚丙烯(PP)及含重量百分比20%玻璃纖維的聚丙烯(PP+20%Glass Fiber)材料對產品翹曲量的影響。首先利用田口法建立控制因子及水準，接著按照直交表進行參數的處理，而兩種材料各做18組，每組射出十次產品，再用測量出的翹曲量計算S/N雜訊比以得到最佳化參數組合及對翹曲量影響最大的參數，最後使用模流分析軟體Moldex 3D以分析其如何影響翹曲量。

關鍵詞：射出成型、翹曲變形、田口法、模流分析

Abstract

Injection molding is a less finishing process technology, which can quickly produce complicated products of high integrity with a high degree of automation. Although injection molding has many advantages, the production process is yet to be optimized.

This study employed on the experimental Taguchi design was used to investigate experimentally the influence of various processing parameters including part geometry, melt temperature, injection pressure, holding pressure, holding time etc. On the warpage of injection molded polypropylene (PP) and 20% glass fiber filled polypropylene (PP + 20% glass fiber) materials warpage amount of the product. An L18 matrix was designed in accordance with the orthogonal array proposed by Taguchi. Injection molded part warpage was measured and calculated to acquire their S/N ratios, which eventually give the optimal combination of parameters for minimum warpage. Additionally, the maximum warpage was simulated using theMoldex 3D mold flow analysis software. The influence of various parameters was also analyzed and compared to the experimental data.

Key words: Injection molding, warpage deformation, Taguchi method, mold flow analysis.

壹、緒論

一、研究背景

由於射出成型法需要較少的精加工方式，可以快速大量生產出完成度高的複雜成品，並且具備著高度自動化等特性，故其成為最主要的塑膠成型加工法。射出成型運用多變，例如多材料射出成型、共射射出成型、包覆成型等，可將不同材料同時射出塑型。此外，產品的複雜結構與精細程度可依據模具設計和製造的改變而提升。藉由這種方式所製成的塑膠成品已普遍使用於日常生活中。

雖然射出成型優點很多，但模具成本高是一大缺陷。隨著科技進步，模流分析的存在大大削弱了模具的失敗率。模流分析可以模擬射出成型的整個過程，分析其充填、保壓、冷卻情況以及預測產品的縫合線位置、應力分佈、翹曲量等眾多問題，進而優化設計並且提升產品品質。

二、研究目的

幾何形狀、熔膠溫度、最大射壓壓力、最大保壓壓力、保壓時間等均為射出成型的成型條件，為瞭解射出成型之成型條件設定及含玻璃纖維對產品品質的影響，本專題以翹曲量為主要考量目標，利用田口實驗設計法結合模流分析以尋求射出成型製成條件的優化，並且探討翹曲量差異的原因。

三、田口式品質工程

(一)、決定各種因子及變動水準

在實驗過程中，作系統化變動的設計參數稱為控制因子[8]。利用控制因子去設計不同的水準如表 1-1 所示，再套入直交表內進行實驗。其中 A_1 為在水準 1 下 A 控制因子的參數，其它以此類推。

表 1-1、水準表

	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	因子 E
水準 1	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1
水準 2	A_2	B_2	C_2	D_2	E_2
水準 3	A_3	B_3	C_3	D_3	E_3

(二)、設計實驗直交表

根據控制因子以及其水準的數目選定適當的直交表進行實驗。

表 1-2、直交表

組別	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	因子 E
1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁
2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂
3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	E ₃
4	A ₂	B ₁	C ₁	D ₂	E ₂
5	A ₂	B ₂	C ₂	D ₃	E ₃
6	A ₂	B ₃	C ₃	D ₁	E ₁
7	A ₃	B ₁	C ₂	D ₁	E ₃
8	A ₃	B ₂	C ₃	D ₂	E ₁
9	A ₃	B ₃	C ₁	D ₃	E ₂
10	A ₁	B ₁	C ₃	D ₃	E ₂
11	A ₁	B ₂	C ₁	D ₁	E ₃
12	A ₁	B ₃	C ₂	D ₂	E ₁
13	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	E ₁
14	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	E ₂
15	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂	E ₃
16	A ₃	B ₁	C ₃	D ₂	E ₃
17	A ₃	B ₂	C ₁	D ₃	E ₁
18	A ₃	B ₃	C ₂	D ₁	E ₂

貳、研究方法

一、實驗步驟

(一)、產品設計

影響產品翹曲量的因素有很多，比如產品的幾何形狀設計，本專題針對幾何形狀展開研究。以厚度為 1mm 的平板薄件作為參照組，設計由薄（1mm）到厚（2mm）和由厚（2mm）到薄（1mm）為兩組對照組如圖 2-1 所示：

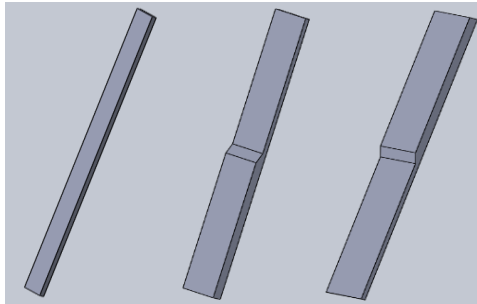


圖 2-1、薄件（左）和薄到厚（中）以及厚到薄（右）

(二)、田口法與射出成型

1. 決定品質特性

本專題是希望能得到較小的翹曲量，故其品質特性為望小性質，S/N 雜訊比：

$$S/N = -10 \log_{10}(\bar{y}^2 + S_n^2) \quad (1)$$

2. 決定控制因子及水準

其中 $\bar{y}$ 為平均值， S_n 為標準差。

本專題選用幾何形狀、熔膠溫度、冷卻溫度、最大射壓壓力、最大保壓壓力這五個為主要控制翹曲量的因子作為控制因子，每個因子對應三個水準如表 2-1 所示：

表 2-1、本專題水準表

	幾何形狀	料溫 (°C)	射壓 (MPa)	保壓 (MPa)	保壓時間 (s)
1	薄	180	60	60	1
2	薄變厚	190	70	70	1.5
3	厚變薄	200	80	80	2

參、結果與討論

一、實際操作數據與分析

表 3-1 和表 3-2 記錄由 PP 和 PP+20%玻璃纖維射出成型的產品兩個端點的翹曲量。

表 3-1、產品翹曲量 (PP)

	第 1 片		第 2 片		第 3 片		第 4 片		第 5 片	
第 1 組	-1.53	-1.38	-1.14	-1.41	-1.00	-0.97	-1.36	-1.28	-1.00	-1.09
第 2 組	-1.53	-1.54	-1.81	-1.92	-1.03	-1.39	-1.12	-1.05	-1.92	-1.77
第 3 組	-0.59	-0.58	-0.66	-0.58	-0.65	-0.60	-0.83	-0.76	-0.76	-0.66
第 4 組	-3.46	-3.53	-3.31	-3.35	-2.20	-2.20	-2.61	-2.38	-2.59	-2.58
第 5 組	-1.35	-1.05	-1.48	-1.46	-1.03	-1.03	-1.65	-1.64	-1.49	-1.42
第 6 組	-2.97	-2.96	-2.77	-2.60	-3.06	-3.02	-2.91	-2.88	-2.90	-2.83
第 7 組	-2.40	-2.39	-2.01	-1.99	-2.29	-1.94	-2.53	-2.40	-2.43	-2.39
第 8 組	-1.37	-1.05	-2.60	-2.40	-2.04	-2.04	-1.70	-1.68	-1.88	-1.89
第 9 組	-1.65	-1.29	-2.40	-2.39	-1.88	-1.62	-2.61	-2.61	-2.05	-1.90
第 10 組	0.78	0.66	1.12	0.88	1.32	1.13	1.04	1.04	0.85	0.84
第 11 組	-0.82	-1.10	-0.60	-0.60	-0.49	-0.20	-0.40	-0.39	-0.95	-0.94
第 12 組	-0.76	-0.76	-0.72	-0.71	-0.61	-0.60	-0.85	-0.83	-0.79	-0.87
第 13 組	-0.72	-0.65	-0.78	-0.77	-1.64	-1.46	-1.67	-1.56	-1.50	-1.36
第 14 組	-1.65	-1.59	-1.22	-1.15	-2.20	-1.80	-1.56	-1.57	-2.12	-2.07
第 15 組	-0.75	-0.74	-0.85	-0.83	-0.74	-0.73	-1.12	-1.16	-0.54	-0.53
第 16 組	-1.25	-1.19	-1.99	-1.88	-2.43	-2.51	-4.62	-4.62	-4.14	-4.12
第 17 組	-3.10	-3.10	-2.84	-2.83	-3.04	-3.02	-2.71	-2.70	-2.61	-2.60
第 18 組	-2.19	-1.79	-1.75	-1.64	-1.15	-0.84	-1.12	-1.10	-1.08	-1.08

表 3-2、產品翹曲量 (PP+20%玻璃纖維)

	第 1 片		第 2 片		第 3 片		第 4 片		第 5 片	
第 1 組	5.67	6.17	5.24	5.59	5.99	5.85	5.32	5.61	5.30	5.73
第 2 組	3.05	2.96	4.40	4.22	4.33	4.48	4.54	4.57	4.53	4.58
第 3 組	5.57	5.66	5.45	5.49	3.35	3.72	5.38	5.07	4.98	4.76
第 4 組	9.51	9.58	8.33	8.33	7.86	7.76	7.39	7.45	8.74	8.88
第 5 組	4.52	4.84	4.62	4.61	4.00	4.40	4.69	4.67	4.69	4.77
第 6 組	4.88	4.84	4.66	4.81	4.60	4.35	4.87	4.94	5.12	5.21
第 7 組	3.80	4.10	2.85	2.90	2.77	2.81	3.15	3.38	3.79	4.11
第 8 組	2.39	2.41	2.39	2.50	2.32	2.22	2.07	2.27	2.22	2.30
第 9 組	1.50	1.41	1.95	2.07	1.56	1.37	1.53	1.28	1.40	1.53
第 10 組	3.30	3.80	3.80	3.94	3.05	3.80	4.15	4.19	3.18	3.15
第 11 組	6.56	6.50	6.48	6.80	6.76	7.04	6.39	6.52	6.57	7.08

第 12 組	3.98	4.14	4.55	4.80	4.79	4.46	4.16	3.60	3.65	3.72
第 13 組	6.24	6.41	6.01	5.84	5.50	5.78	7.12	7.07	6.20	6.30
第 14 組	8.37	8.45	8.89	9.12	7.13	6.98	9.01	9.11	8.37	8.61
第 15 組	3.38	3.67	4.05	4.23	4.23	4.20	3.83	3.79	5.31	5.14
第 16 組	2.72	2.84	2.47	2.77	2.92	2.98	2.22	2.47	2.49	2.51
第 17 組	2.33	2.14	2.75	2.89	2.50	2.48	2.03	1.89	2.60	2.55
第 18 組	3.38	3.22	3.96	3.98	3.46	3.47	2.52	2.55	2.22	2.61

表 3- 3、S/N 雜訊比（PP）

	第 1 片	第 2 片	第 3 片	第 4 片	第 5 片	平均值	標準差	S/N 比
第 1 組	-1.53	-1.41	-1.00	-1.36	-1.09	-1.28	0.223763	-2.26175
第 2 組	-1.54	-1.92	-1.39	-1.12	-1.92	-1.58	0.346583	-4.16674
第 3 組	-0.59	-0.66	-0.65	-0.83	-0.76	-0.70	0.095760	3.04191
第 4 組	-3.53	-3.35	-2.20	-2.61	-2.59	-2.86	0.561231	-9.27971
第 5 組	-1.35	-1.48	-1.03	-1.65	-1.49	-1.40	0.232594	-3.04081
第 6 組	-2.97	-2.77	-3.06	-2.91	-2.90	-2.92	0.106160	-9.31933
第 7 組	-2.40	-2.01	-2.29	-2.53	-2.43	-2.33	0.199299	-7.38618
第 8 組	-1.37	-2.60	-2.04	-1.70	-1.89	-1.92	0.455137	-5.90346
第 9 組	-1.65	-2.40	-1.88	-2.61	-2.05	-2.12	0.387905	-6.66180
第 10 組	0.66	0.88	1.13	1.04	0.84	0.91	0.182757	0.64745
第 11 組	-1.10	-0.60	-0.49	-0.40	-0.95	-0.71	0.302605	2.27067
第 12 組	-0.76	-0.72	-0.61	-0.85	-0.87	-0.76	0.105214	2.27888
第 13 組	-0.72	-0.78	-1.64	-1.67	-1.50	-1.26	0.472250	-2.59035
第 14 組	-1.65	-1.22	-2.20	-1.57	-2.12	-1.75	0.407026	-5.09898
第 15 組	-0.75	-0.85	-0.74	-1.16	-0.54	-0.81	0.226650	1.52283
第 16 組	-1.25	-1.99	-2.51	-4.62	-4.14	-2.90	1.431667	-10.20000
第 17 組	-3.10	-2.84	-3.04	-2.71	-2.61	-2.86	0.209404	-9.15054
第 18 組	-2.19	-1.75	-1.15	-1.12	-1.08	-1.46	0.493224	-3.74571

表 3- 4、S/N 雜訊比（PP+20%玻璃纖維）

	第 1 片	第 2 片	第 3 片	第 4 片	第 5 片	平均值	標準差	S/N 比
第 1 組	6.17	5.59	5.99	5.61	5.73	5.82	0.253	-15.304
第 2 組	3.05	4.40	4.48	4.57	4.58	4.22	0.656	-12.602
第 3 組	5.66	5.49	3.72	5.38	4.98	5.05	0.782	-14.162
第 4 組	9.58	8.33	7.86	7.45	8.88	8.42	0.840	-18.549
第 5 組	4.84	4.62	4.40	4.69	4.77	4.66	0.169	-13.381
第 6 組	4.88	4.81	4.60	4.94	5.21	4.89	0.221	-13.791
第 7 組	4.10	2.90	2.81	3.38	4.11	3.46	0.627	-10.922
第 8 組	2.41	2.50	2.32	2.27	2.30	2.36	0.094	-7.465

第 9 組	1.50	2.07	1.56	1.53	1.53	1.64	0.242	-4.380
第 10 組	3.80	3.94	3.80	4.19	3.18	3.78	0.372	-11.596
第 11 組	6.56	6.80	7.04	6.52	7.08	6.80	0.261	-16.657
第 12 組	4.14	4.80	4.79	4.16	3.72	4.32	0.466	-12.764
第 13 組	6.41	6.01	5.78	7.12	6.30	6.32	0.509	-16.048
第 14 組	8.45	9.12	7.13	9.11	8.61	8.48	0.813	-18.612
第 15 組	3.67	4.23	4.23	3.83	5.31	4.25	0.640	-12.673
第 16 組	2.84	2.77	2.98	2.47	2.51	2.71	0.218	-8.700
第 17 組	2.33	2.89	2.50	2.03	2.60	2.47	0.319	-7.926
第 18 組	3.38	3.98	3.47	2.55	2.61	3.20	0.609	-10.252

然後再將每組的 S/N 比代入公式，計算各控制因子在不同水準下的 S/N 比的平均反應值，表 3-5 和表 3-6 為列出的 S/N 比的因子反應表，並且標註其影響排名。其中在每個控制因子下範圍越大，意味著該控制因子對翹曲量的影響越大，即排名越靠前；反之，若範圍越小，意味著該控制因子對翹曲量的影響越小甚至可以忽略，即排名靠後。

表 3- 5、S/N 比的因子反應表（PP）

	幾何形狀 A	料溫(°C) B	射壓(MPa) C	保壓(MPa) D	保壓時間(s) E
水準 1	0.302	-5.178	-3.927	-4.257	-4.491
水準 2	-4.634	-4.182	-3.108	-4.291	-4.718
水準 3	-7.175	-2.147	-4.472	-2.959	-2.299
範圍	7.476	3.031	1.364	1.332	2.419
影響排名	1	2	4	5	3

表 3- 6、S/N 比的因子反應表（PP+20%玻璃纖維）

	幾何形狀 A	料溫(°C) B	射壓(MPa) C	保壓(MPa) D	保壓時間(s) E
水準 1	-13.847	-13.520	-12.581	-14.256	-12.216
水準 2	-15.509	-12.774	-12.661	-12.126	-12.665
水準 3	-8.274	-11.337	-12.388	-11.249	-12.749
範圍	7.235	2.183	0.274	3.007	0.533
影響排名	1	3	5	2	4

將表格分別繪製成圖以便觀察最佳參數組合：

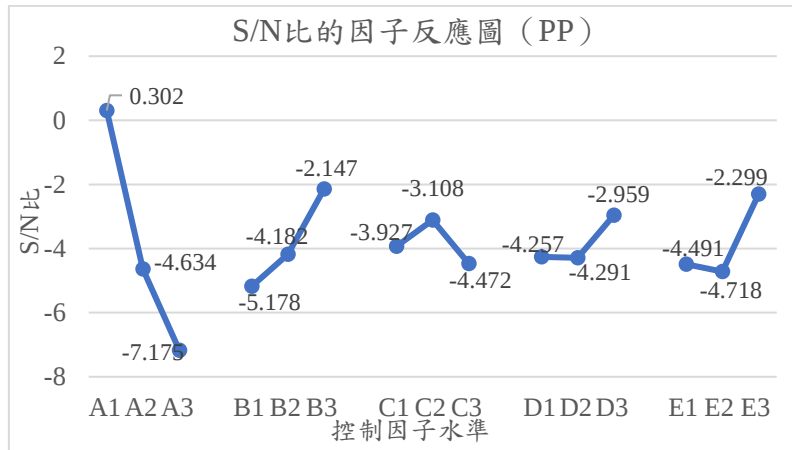


圖 3- 1、S/N 比的因子反應圖（PP）

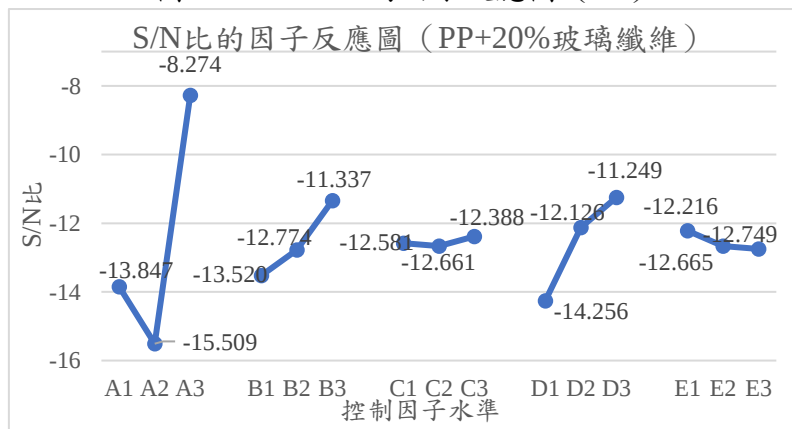


圖 3- 2、S/N 比的因子反應圖（PP+20%玻璃纖維）

對照圖表，每個控制因子在不同水準下的 S/N 比的平均反應最大值即為最佳參數。故可以得到當材料為 PP 時，最佳參數組合為在水準 1 下的幾何形狀：薄、水準 3 下的料溫：200°C、水準 2 下的射壓：70MPa、水準 3 下的保壓：80MPa、水準 3 下的保壓時間：2s；當材料為 PP+20%玻璃纖維時，最佳參數組合為在水準 3 下的幾何形狀：厚變薄、水準 3 下的料溫：200°C、水準 3 下的射壓：80MPa、水準 3 下的保壓：80MPa、水準 1 下的保壓時間：1s。並且從圖 3-2 和圖 3-3 中發現，無論是使用材料 PP 還是 PP+20%玻璃纖維，幾何形狀都是影響本次實驗翹曲量的最大控制因子。

二、 模擬結果

針對影響最大的參數——幾何形狀，將在模流分析中選擇實驗得到的最佳參數，改變幾何形狀以分析其如何影響翹曲量。產品的溫度是造成翹曲的主要原因，所以截取保壓結果中的溫度截面分佈並觀察，圖 3-4 至圖 3-6 為 PP 材料，圖 3-7 至圖 3-9 為 PP+20%玻璃纖維材料。

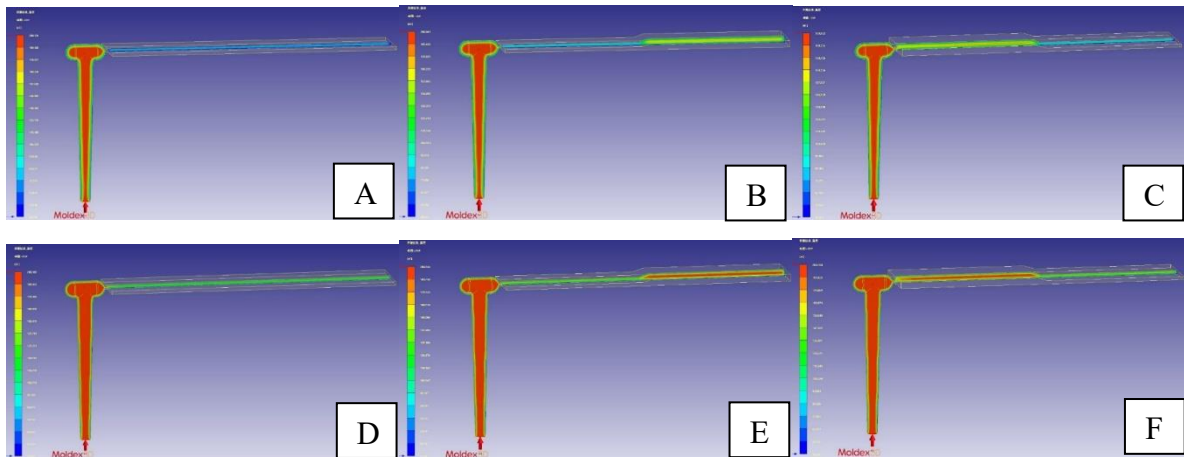


圖 3-3、溫度截面分佈 (A) PP 薄板 (B) PP 薄變厚板 (C) PP 厚變薄板 (D) PP+20%玻璃纖維薄板 (E) PP+20%玻璃纖維薄變厚板 (F) 厚變薄板

圖 3-4 (A) 中可觀察到因為厚度較薄，產品中間切面的溫度分佈很均勻，翹曲較小。而對比圖 3-4 (B) 和圖 3-6 (C)，厚度差使得產品較厚的部分溫度較高，厚變薄板因厚的部分在前與澆口接觸，會導致翹曲量更大，如圖 3-10。由此可見，與田口法實驗得到的趨勢相同。

另一種加了玻璃纖維的 PP 材料可以明顯觀察到溫度較未添加的 PP 材料高(紅色區域)，故含玻璃纖維的 PP 材料翹曲量更大。

肆、 結論與未來展望

一、 結論

本專題利用田口法找出射出成型的最佳化參數組合，當材料為 PP 時，參數選擇：幾何形狀為薄、料溫為 200℃、射壓為 70MPa、保壓為 80MPa、保壓時間為 2s；當材料為 PP+20% 玻璃纖維時，選擇參數：幾何形狀為厚變薄、料溫為 200℃、射壓為 80MPa、保壓為 80MPa、保壓時間為 1s。並且無論是使用材料 PP 還是 PP+20% 玻璃纖維，幾何形狀都是影響本次實驗翹曲量的最大控制因子。

二、 未來展望

最佳化參數組合進行實際實驗，未來可以再射出成型驗證其準確性。然後實驗過程中，部分產品存在溢料的情況，可能是控制因子的水準設置存在偏差，之後可以在本次實驗的基礎上調整水準再進行田口法實驗，對比兩次的結果。