

塑膠射出製品微結構最佳化成型性之研究

陳志誠¹ 蘇寶林²

¹ 中州科技大學 機械與自動化工程系

E-Mail: jcchen@dragon.ccut.edu.tw

² 中州科技大學 機械與自動化工程系

E-Mail: sb1581@dragon.ccut.edu.tw

摘要

本研究主要探討楔形薄板微結構之成型性，利用反應曲面法進行實驗規劃，微結構幾何形狀為 V-溝槽，夾角 90 度。考慮射出條件有料溫、保壓力、射速和保壓時間。結果顯示，保壓力對於薄件製品重量和橫向尺寸縮收變異之影響最大；此外，並建構製程參數對於該兩項反應輸出之統計預測模式。在同時考慮薄板尺寸和微結構尖端圓弧最小化變異需求下， (T_m, P_p, V_i, t_p) 的最佳化條件分別為(290C, 20%, 23%, 3s)。此外，V-溝槽幾何形狀也呈現極佳的重現性。

關鍵詞: 微結構、反應曲面法

通訊作者

姓名: 陳志誠

E-mail: jcchen@dragon.ccut.edu.tw



壹、緒論

一般對於微小尺寸元件的定義，大致分成兩大類：一為整個製品外觀均縮小至微尺寸(micro scale)；另一種則是在正常尺寸元件上，內含部份屬於微特徵(micro feature)尺寸。目前產品設計趨勢，多朝小型化、輕量化和多功能方向發展，而塑膠材料具低成本和可大量生產之優勢，尤以射出成型加工技術較為廣泛被採用。整個塑膠射出成型基本製程包含：材料塑化(plasticization)、充填(filling)、保壓(packing)、冷卻(cooling)和頂出脫模(ejection)。其中常出現之產品缺陷有短射(short shot)、溢流(flushing)、尺寸收縮(shrinkage)、翹曲(warpage)、凹陷(sink mark)和殘留應力分佈不均等。

隨著科技進步，3C 產品中的顯示器品質要求項目，照明量度和均勻度更顯重要。在透明塑膠平板表面設計微結構，其目的乃為了增加導光效果，尤其是針對背光模組元件，當採側向光源時，則藉由光線在楔型板材內部連續反射和折射作用，進而將光線導向垂直面板的平行方向，達到照明目的。此外，對於微流體應用系統而言，微通道幾何結構穩定性，亦扮演關鍵角色。由於塑膠射出成形過程，當通道尺寸變狹隘時，除了不利充填流動外，加上金屬模具高熱傳係數作用，往往使得微結構快速固化，產生短射現象。因此，有效控制微結構重現性(replication)，一直是許多研究者投注的焦點。

貳、文獻探討

對於塑膠製品成型缺陷之研究甚多，文獻中多針對製程條件、模具設計和原料特性等對加工各階段影響進行探討，且提出不同的解決方式。Pantain (2005)等人針對加工 PP 材料成型後塑料流量和模溫對製品內部形態(morphology)變化進行探討[1]。為了了解塑膠在不同溫度和壓力作用下之特性，Chakravorty (2002)提出新式量測高分子 P-V-T 特性，並作為射出製程數值模擬分析參數設定之參考[2]。另外，Wang(2009)等人亦利用

射出機安裝測試模具之實際加工過程，進行高分子材料 PVT 線上量測，且建立相關材料資料庫，供模流分析材料選擇使用[3]。由於澆口(gate)位置對模穴充填之穩定性影響甚大，通常該處熔膠溫度最高，Hassan (2009)等人曾探討不同澆口處對冷卻效應影響之評估[4]。Shen(2008)等人[5] 利用數值分析法，探討澆口數量和位置設計對薄壁射出成型充填階段影響情形，提出雙側單點進澆口充模結果是較為恰當的。另外，Hasson(2009)等人[6]也提出不同澆口配置位置對非均勻厚度之成型品充模冷卻效果之影響，數值模擬結果說明澆口位置垂直於較小厚度區域之設計，則所需完全固化時間最少，且在熔融塑膠流動時，固化程度也最少，有利於模穴之填滿。而 Postawa(2005)等人[7]探討成型品收縮(shrinkage)和重量(weight)之變化與製程參數間之關係，並提出結晶材與非結晶材之成型品受到製程條件影響之程度有所差異。基本上，探討對象多以澆口位置、冷卻通道設計和加工參數設定為主要討論重點，再輔以數值模擬方法進行預測成型品之成功與否。

國內(外) 對於塑膠應用於 3C 產品中顯示器的背光模組導光板(light guide plate)元件的相關加工技術，也積極投入探討，另外，針對塑膠射出製品微特徵或微射出元件之成型性，也提供許多改善對策。由於微小零件的應用日益增加，故針對微射出(micro injection molding)和元件微特徵之成型相關研究，則有增加之趨勢。一般多以傳統射出成型為基礎，再針對微結構特性予以作適度修正，使製品品質獲得穩定 [8-10]。

一般楔型薄板表面含微溝槽特徵的成型品，該微特徵的重現性，更是導光效果的關鍵。因此，本研究乃利用反應曲面法(RSM)進行實驗規劃，搭配電腦輔助工程分析(CAE)，預測充填製程模穴內部模流狀態，有效控制製程條件，以降低或避免上述缺陷問題，並將微結構尖端幾合形狀和薄板尺寸變異量等，做為評估薄板品質之重要指標。

參、研究方法

3.1 反應曲面法

反應曲面法(Response surface methodology, RSM)是一種結合實驗設計(DOE)和統計分析特點之方法，且被廣泛應用於不同領域之預測模式之建構[11-14]。它可有效解析在一個反應過程中，數個輸入變數對輸出反應值(response)可能產生的影響程度，並將擬合函數結合最佳化求解技巧，即可獲得最佳反應之輸入參數組合。其函數關係如下：

$$Y = f(x_1, x_2, \dots) + \varepsilon \quad (1)$$

改以矩陣形式表示如下：

$$Y = X\alpha + \varepsilon \quad (2)$$

其中，Y 為反應變數， x_1 、 x_2 ... 為輸入變數、 ε 代表在反應 Y 中所觀測的誤差， $\alpha = (X^T X)^{-1} X^T Y$ 。透過逐次實驗量測，再配合統計迴歸(regression)和變異數分析(ANOVA)技巧，確立有效的影響參數，及其重要性排序，並利用需求函數(desirability function)方法建構出微結構最佳化成型性的預測模式。最後，求出考慮多重反應需求之最佳化微結構成型條件。

3.2 模流分析

適時地採用電腦輔助工程模流分析技巧，除了可節省材料與時間的浪費外，亦可提供資訊予以模具工程師，提高模具設計和加工的可靠度。本研究中，利用文獻整理和實務經驗，選用日本帝人公司生產之 PC 塑膠材料(Panlite_L_1225L)，並決定影響射出微結構成型性的幾項重要製程關鍵因素(料溫、保壓力、射速、保壓時間)，再藉由 RSM 規劃的實驗設計，依序模擬射出成形製程的條件，並記錄成型品之品質特性(如重量、尺寸變異等)加以分析；另外，再利用高速射出機(鏈發公司、LF107HSS 型、最高射速為 2000mm/s)進行實驗，並與 CAE 預測趨勢相比較，作為理論分析和實務加工相互修正和驗證之參考。



3.3 模具設計

一般短射問題的發生，原因不外乎(1)材料方面：若塑料熔融溫度較低，則其黏度高且流動性差 (2)機器方面：若射出機器動力或射壓力不足，則無法克服塑料流動摩擦和模穴內部壓縮空氣的反作用力 (3)模具方面：若模具排氣位置設計欠妥當，則無法迅速排除模穴內壓 (4)製程條件方面：充填、保壓、冷卻各階段的調配設定不恰當。因此，為減低上述因素的干擾，本研究中，針對模具部份，如 Fig.1 所示，其中採用扇形澆口，並在模穴周圍增設排氣，以減少高溫塑料的流動阻力。

肆、研究結果與討論

本研究中探討小尺寸楔形平板(30x25x0.6mm)表面含微結構幾何形狀為 V-溝槽(600x300 μ m, 90 $^\circ$)的成型性，其產品設計、模流分析和實驗製品，如 Fig.2 所示。藉由 RSM 進行實驗規劃，如 Table 1 所示，其中採 4 因子 3 水準，輸出反應為薄板橫向尺寸變異(dX)和微結構尖端圓弧尺寸(TR)。由於楔型薄板表面設計微結構，使得充填過程熔膠流道變窄，加上金屬模具熱傳效應，塑膠製品固化速度加速，容易造成微結構尖端圓弧殘缺，故除了適當增加模穴排氣功能外，射出加工製程參數控制，更顯重要。Fig.3 所示為微結構尖端圓弧半徑尺寸之誤差值(TR)分佈，由該圖可知，約 80%之微結構具可重現性(repeatable)。

另外，楔型薄板橫向尺寸(dX)和表面微結構(TR)重現性之統計預測模式，若以編碼(code)形式，則分別如式(3)、式(4)所示：

$$dX = 0.92 - 0.046 * A - 0.11 * B - 0.025 * C - 0.021 * D + 0.038 * B^2 \quad (3)$$

$$TR = 0.058 + 5.2 \times 10^{-3} * A - 6.8 \times 10^{-3} * B + 1.6 \times 10^{-4} * C + 1.7 \times 10^{-3} * D - 1.4 \times 10^{-3} * AB + 1.5 \times 10^{-4} * AC - 7.9 \times 10^{-3} * AD - 1.35 \times 10^{-3} * BC + 4.1 \times 10^{-3} * BD - 2.85 \times 10^{-3} * CD \quad (4)$$

其中，經由 ANOVA 分析，如 Table 2 和 Table 3 所示，保壓力(Pp)為最重要影響因子。最後，在同時考慮薄板尺寸和微結構尖端圓弧最小化變異下，(Tm,Pp,Vi,tp)的最佳化條件分別為(290C,20%,23%,3s)，其中，在高料溫和高保壓力下，其需求函數值(Desirability)約趨近於 1，如 Fig.4 所示。此外，由 Fig.2 亦可見 V-溝槽幾何形狀也呈現極佳的重現性。

伍、結論與建議

經由上述之探討，本研究可獲取之結論如下：

1. 保壓力(Pp)對於薄板尺寸變異和微結構重現性兩者之影響最為顯著。
2. 熔融塑料之料溫愈高且在較高保壓力條件下，需求函數值愈趨近於 1；亦即，越能滿足薄板尺寸和微結構幾何形狀雙重品質的穩定性。

3. 藉由 RSM 方法所建構之統計預測模式，其 AP(adequate precision)值均大於 4，說明該模式對於 S/N 具足夠的辨識能力，且適用於整個實驗設計範圍。

誌謝

本論文為中州科技大學編號 CCUT-101-ME01 之專題研究計畫，由於中州科技大學的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

1. R. Pantani, I. Coccorullo, V. Speranza, G. Titomanlio, Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers, *Prog. Polym. Sci.* 30 (2005) 1185–1222
2. S. Chakravorty, PVT testing of polymers under industrial processing conditions, *Polymer Testing* 21 (2002) 313–317
3. J. Wang, P. Xie, Y. Ding, W. Yang, On-line testing equipment of P–V–T properties of polymers based on an injection molding machine, *Polymer Testing* 28 (2009) 228–234
4. H. Hassan, N. Regnier, G. Defaye, A 3D study on the effect of gate location on the cooling of polymer by injection molding, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 1218–1229
5. Y.K. Shen, C.W. Wu, Y.F. Yu, H.W. Chung, Analysis for optimal gate design of thin-walled injection molding, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 35 (2008) 728–734
6. P. Postawa, J. Koszkul, Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions, *Journal of Materials Processing Technology* 162–163 (2005) 109–115
7. G. Xu, L. Yu, J. Lee, K.W. Koelling, Experimental and numerical studies of injection molding with microfeatures, *polymer engineering and science* (2005) pp.866-875
8. L. Yu, J. Lee, K.W. Koelling, Flow and heat transfer simulation of injection molding with microstructures, *polymer engineering and science* (2004) pp.1866-1876
9. Huang-Ya Lin, Wen-Bin Young, Analysis of the filling capability to the microstructures, in micro-injection molding, *Applied Mathematical Modelling* 33 (2009) 3746–3755
10. B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths, M.S. Packianather, Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 183, 2-3, (2007), 284-296
11. Ko-Ta Chiang, Modeling and analysis of the effects of machining parameters on the performance characteristics in the EDM process of Al₂O₃+TiC mixed ceramic, *Int J Adv*



Manuf Technol DOI 10.1007/s00170-007-1002-3 (2007)

12. A.M.K. Hafiz¹, A.K.M.N. Amin¹, A.N.M. Karim¹, M.A. Lajis, Development of Surface Roughness Prediction Model Using Response Surface Methodology in High Speed End Milling of AISI H13 Tool Steel, Proceedings of the 2007 IEEEEM (2007)
13. K. Koyamada¹, K. Sakai¹, T. Itoh, Parameter Optimization Technique Using The Response Surface Methodology, Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS (2004)

Myers RH, Montgomery DH (1995) Response surface methodology, Wiley, USA

Study on optimal processing conditions for plastic injection molded part with micro structures

Chih-Cherng, CHEN¹ Pao-Lin, SU²

¹ Chung Chou University of Science and Technology, Department of Mechanical and Automation Engineering, Email: jcchen@dragon.ccut.edu.tw

² Chung Chou University of Science and Technology, Department of Mechanical and Automation Engineering, Email: sb1581@dragon.ccut.edu.tw

Abstract

In this study, a 0.6-mm-thick wedge plate with micro V-grooves is produced through plastic injection molding process. Response surface methodology is adopted for design of experiments. The processing parameters such as melt temperature(T_m), packing pressure (P_p), injection velocity (V_i) and packing time (t_p) are selected according to practiced experiences. Results show that packing pressure has more significant effects on both variations of the part weight and dimension shrinkage. Moreover, the statistical models for prediction of the replication of V-grooves and part dimension variation in the transverse direction are also developed. Based on desirable function approach and consideration of both responses, the optimum condition of (T_m , P_p , V_i , t_p) settings are (290C, 20%, 23%, 3s), respectively. Furthermore, the micro structures also show well replications on the surface of thin-wall molded plate.

Keywords: micro structure, RSM



Table 1 RSM 實驗設計規劃表

Exp. No.	料溫	保壓力	射速	保壓時間	薄板尺寸	尖端圓弧
	A: Tm	B: Pp	C: Vi	D: tp	dX	TR
	C	%	%	sec	%	mm
1	290	20	30	2	0.806	0.06
2	290	20	10	2	0.8438	0.058
3	290	10	30	6	0.9436	0.061
4	270	20	10	6	0.8916	0.068
5	290	10	10	6	1.047	0.065
6	270	10	30	2	1.135	0.075
7	270	20	30	6	0.8465	0.0716
8	270	10	10	2	1.157	0.0512
9	270	15	20	4	0.9491	0.051
10	290	15	20	4	0.8821	0.0818
11	280	10	20	4	1.027	0.0648
12	280	20	20	4	0.8436	0.0512
13	280	15	10	4	0.9356	0.0512
14	280	15	30	4	0.8916	0.0989
15	280	15	20	2	0.9089	0.085
16	280	15	20	6	0.9153	0.075
17	280	15	20	4	0.9186	0.058
18	280	15	20	4	0.9186	0.058
19	280	15	20	4	0.9186	0.058
20	280	15	20	4	0.9186	0.058
21	280	15	20	4	0.9186	0.058

Table 2 薄板橫向尺寸變異數分析表

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.156772	6	0.026129	93.76247	< 0.0001	significant
A	0.020857	1	0.020857	74.84686	< 0.0001	
B	0.11623	1	0.11623	417.0899	< 0.0001	
C	0.006366	1	0.006366	22.84263	0.0003	
D	2.05E-05	1	2.05E-05	0.073492	0.7903	
B2	0.007622	1	0.007622	27.35213	0.0001	
AB	0.001424	1	0.001424	5.111594	0.0402	
Residual	0.003901	14	0.000279			
Lack of Fit	0.003901	10	0.00039			
Pure Error	0	4	0			
Cor Total	0.160673	20				

Table 3 V-溝槽重現性變異數分析表

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.000329	10	3.29E-05	3.634261	0.0269	significant
A	5.41E-05	1	5.41E-05	5.981595	0.0345	
B	9.25E-05	1	9.25E-05	10.22888	0.0095	
C	2.56E-07	1	2.56E-07	0.028315	0.8697	
D	5.78E-06	1	5.78E-06	0.639305	0.4425	
AB	3.14E-06	1	3.14E-06	0.346862	0.5690	
AC	1.8E-07	1	1.8E-07	0.019909	0.8906	
AD	9.99E-05	1	9.99E-05	11.04471	0.0077	
BC	1.46E-05	1	1.46E-05	1.612642	0.2329	
BD	2.69E-05	1	2.69E-05	2.97487	0.1153	
CD	6.5E-05	1	6.5E-05	7.187205	0.0231	
Residual	9.04E-05	10	9.04E-06			
Lack of Fit	9.04E-05	6	1.51E-05			
Pure Error	0	4	0			
Cor Total	0.000419	20				

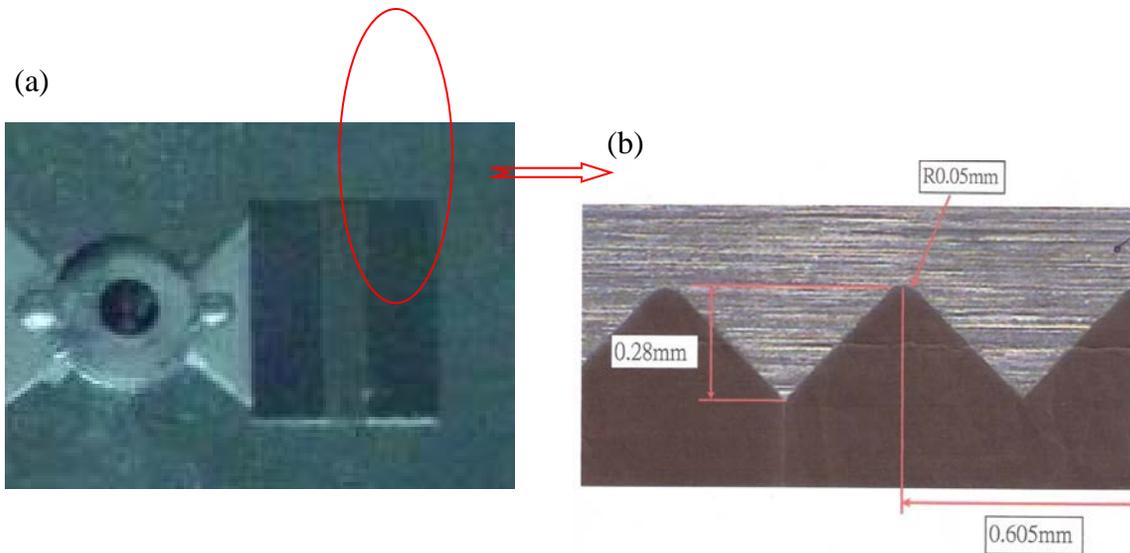


Fig.1 (a)楔型薄板模仁 (b)微結構幾何尺寸



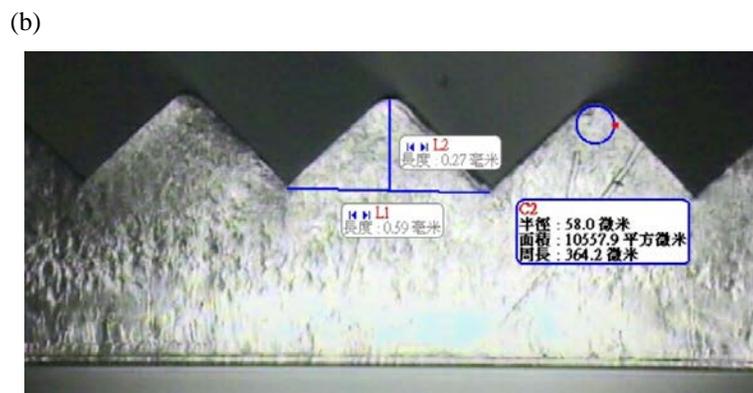
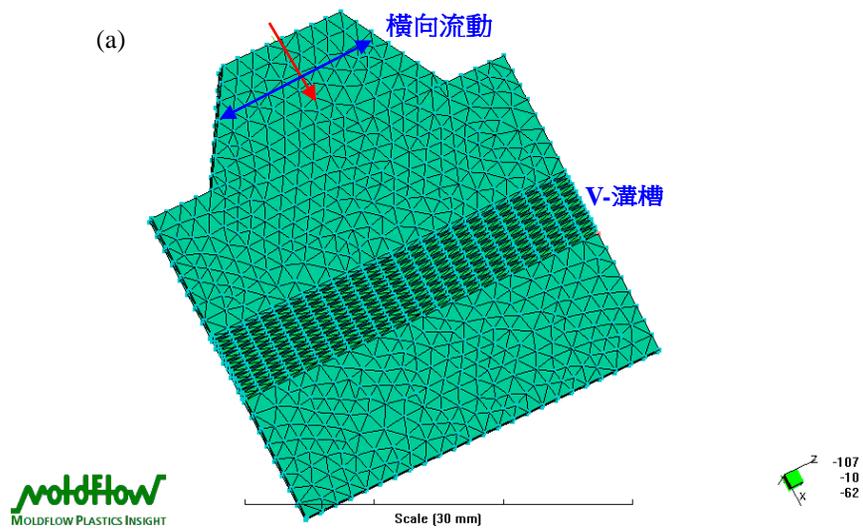


Fig.2 表面具 V-溝微結構楔型薄板 (a)成品設計 (b)微結構重現

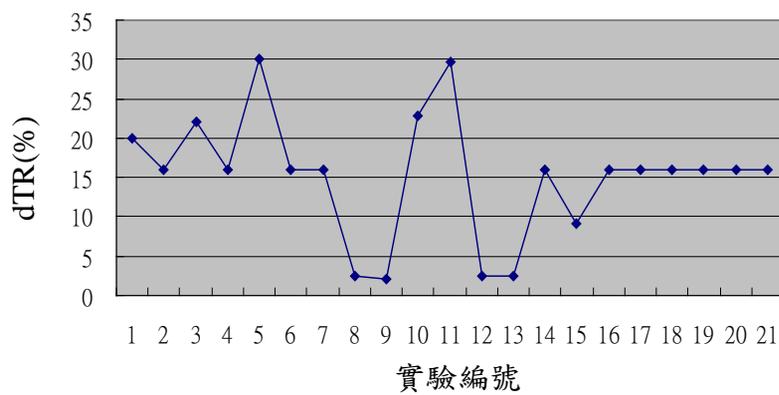


Fig.3 微結構尖端圓弧尺寸重現之誤差值分佈

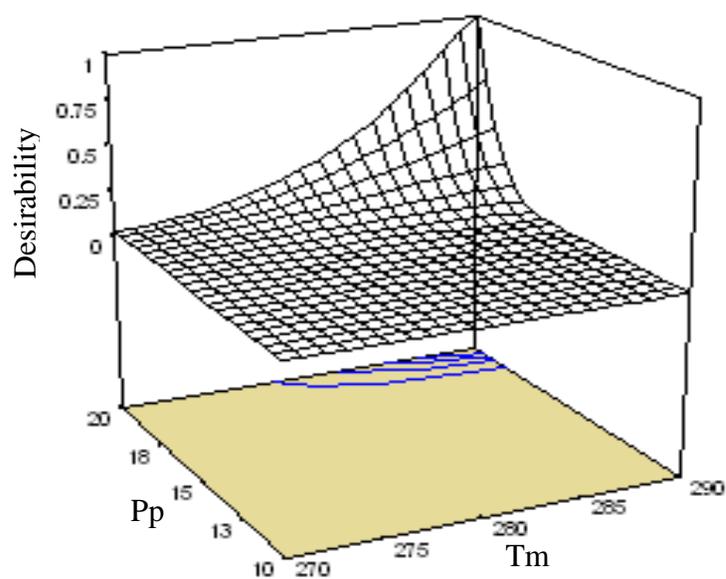


Fig.4 料溫與保壓力相對於需求函數值之關係

