

模流分析應用於進膠痕消除的策略：康舒科技的實踐

Application of Mold Flow Analysis on Gate Mark Elimination Strategies: Practice of AcBel Polytech Inc.

劉學安^{1*}、黃必輝¹、林家豪¹

¹ 康舒科技股份有限公司

*E-mail: Shane_Liu@acbel.com; allens920181@gmail.com

摘要

本研究中所討論的是一個聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)材質的歐規電源適配器的下蓋零件，通常這類零件都是於兩根插頭的中央設計針點進澆，使整體流動與壓力平衡傳遞至模穴內，但會在外觀面留下澆口痕。為追求市場上越來越高的外觀品質，此案例將進澆點設計在超音波特徵下緣以消除外觀上的澆口痕跡。不過這將導致充填末端發生在進澆點對側的外觀面上，產生困氣包封和表面刮傷等問題。康舒科技在進澆位置、外觀尺寸不變的前提下，在塑殼內部進行結構、厚度之設變。為了評估熔膠充填進模穴內部的流動變化，透過模流分析軟體內的流動波前結果來探討，其中運用軟體內的感測點功能擷取流經指定位置的時間來作為量化的評估因子。搭配田口方法(Taguchi method)的 L_9 直交表實驗模型，以最少分析組來評估設變趨勢，並在後續的設變提案中，將流速最慢處提升速率 22.91%；流速最快處降低速率 12.59%，有效改善熔膠會合在外觀面產生包封的走勢，也同時解決零件外觀面的刮傷問題。最後試模驗證分析結果與實務的一致性。此研究成果可為應用非典型進膠方式以追求外觀的相似需求產品提供參考方案。同時，也提出產業界應用模流分析評估流動波前現象時，一個能夠量化充填差異的研究方法。

關鍵詞：模流分析、厚度設變、流動量化分析、田口實驗設計法

1. 問題描述

消費市場對電源適配器產品之外觀品質的要求日益提高。以往因模具、產品設計的考量，無法避免在外觀面產生進澆痕。如本研究案例所討論的一款聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)材質的歐規電源適配器的下蓋零件，如圖 1(a)所示。這類產品通常於兩根插頭的中央進行針點進澆設計，使整體流動與壓力平衡傳遞至模穴內，雖然會在外觀面上留下澆口痕跡，但在使用時會被遮蓋，不影響使用時的外觀效果。

但為追求更高的外觀品質，此案例採用潛伏進澆的方式，將進澆點設計在如圖 1(b)所示的位置。在上下蓋零件透過超音波焊接製程來接合後，進澆點會位於產品內部，從而隱藏澆口痕跡，改善以往外觀面上的進澆痕跡所帶來的視覺瑕疵。

然而這樣的進澆方式會使得熔膠的流動走勢改變。熔膠不再從產品中心開始均勻向外擴散充填，而是從單一側往對側充填。由於零件幾何厚度的不一致，原始設計的充填末端最終會在進澆點對側的外觀面上，如圖 2(a)，後續會產生縫合線和包風等缺陷，若嘗試機台參數來優化，又可能延伸出開模時刮傷表面的問題，如圖 2(b)。

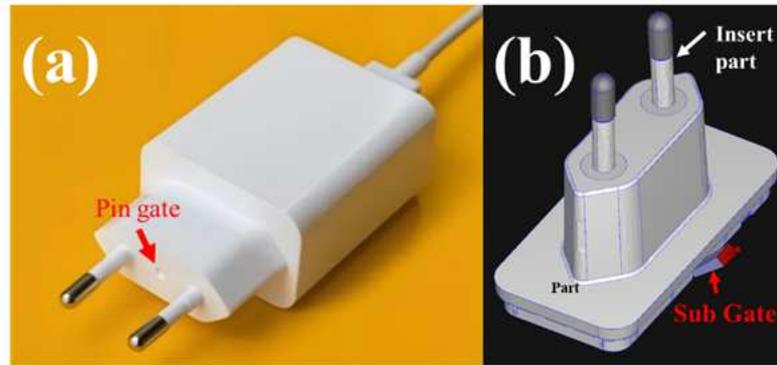


圖 1 不同的進澆方案(a)位於插頭中央的進澆痕跡(b) 位於超音波特徵下緣的潛澆設計

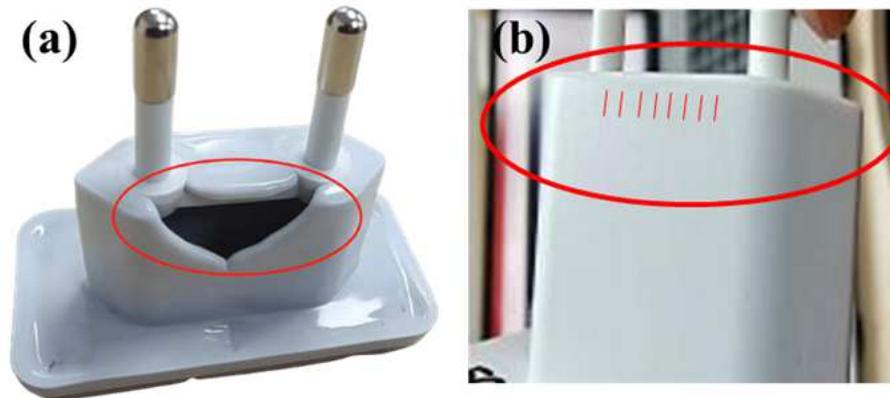


圖 2 (a)熔膠會合末端(b)開模刮傷

2. 方法對策

2.1 分析問題

本研究以模流分析技術來分析熔膠流動行為，分析模型如前述圖 1(b)所示。零件模型由機殼外型和內部嵌入件所組成；進澆為位於超音波特徵下緣的潛澆形式；進澆起始位置的邊界條件設定在潛澆特徵的末端；材料定義為 PC 材質。模流分析聚焦在充填階段中的「流動波前時間」項目，可以由判讀側邊的色桿中各顏色對應之時間，即可觀察流動的位置和時間的關係，進而描述熔膠的流動走勢。

在圖 3 中，顯示熔膠進入模穴後，不同充填比例下，熔膠的流動情形。圖 3(a)為熔膠充填至 25%時的情形，熔膠進入模穴時可分為底部和側邊兩個方向流動；圖 3 (b) 為熔膠充填至 50%時的情形，透過相同時間下，熔膠的流動距離得知，此時底部熔膠的流動速度大於側邊流動速度；圖 3 (c) 為熔膠充填至 93%時的情形，此時側邊區域才流過頂部區域，往下移動，而底部區域的熔膠已經與對側會合，這使得充填末段會在產品側壁上，這樣的分析結果與圖 2(a)中的實際試模結果相同。

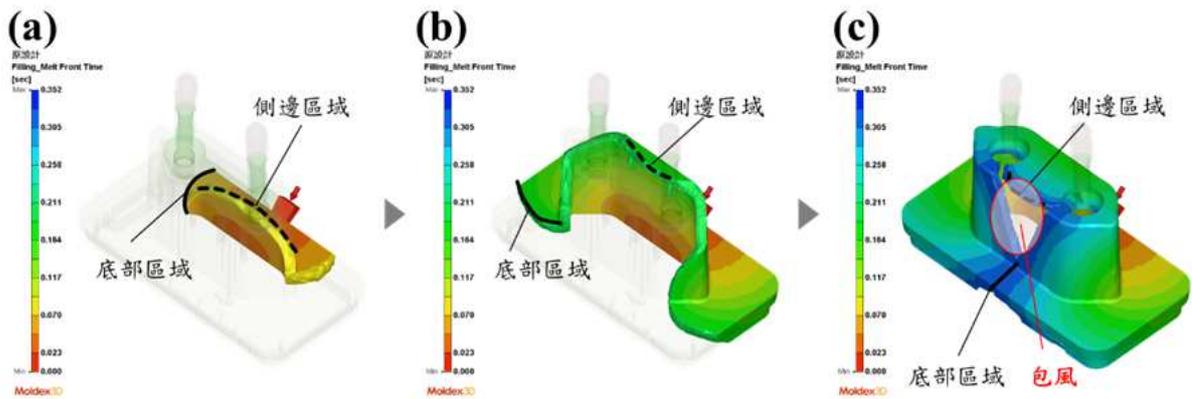


圖 3 模流分析的充填走勢(a)充填 25%(b)充填 50%(c)充填 93%

透過分析零件厚度,如圖 4 所示,底部平面的厚度為 2.7 mm;側邊環狀的厚度為 1.9 mm;位於兩插頭中心的平面位置的厚度為 1.4mm,這表示其厚度由產品外圍向產品中心越來越薄。在圖 3 (b)中,造成兩方向流動速度之差異是因底部區域的厚度大於側邊區域的厚度。

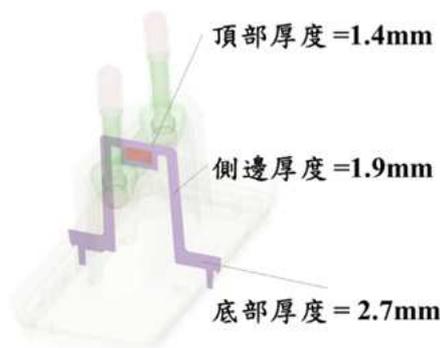


圖 4 產品厚度分佈之示意圖

2.2 設變目標

為了解決熔膠會合末端發生在側邊外觀面上的問題,在不變更進澆位置的條件下,修改底部和側邊區域的厚度,進而改變流速,是最有效益能調整熔膠走勢和會合位置的方式。本研究的目標是讓側邊區域先完成充填,底部區域的熔膠會合時機則要延至最後,並在進澆口對面的底部區域完成充填,每個區域的設變方式彙整如表 1 所示。具體而言,設變需要符合三個目標,首先,加快頂部和側邊區域的流動速度;接著,減慢底部區域的流動速度;最後,確保側邊區域的充填比底部先完成。

表 1 設變目標

區域	厚度	設變方式	目標
頂部	1.4mm	增加厚度	流動速度加快
側邊	1.9mm	增加厚度	流動速度加快
底部	2.7mm	減少厚度	流動速度減慢

2.3 觀測指標

為了客觀判斷熔膠走勢的變化是否符合三個設變目標，將使用模流分析軟體內的感測探針點，擷取不同設變下，模型中熔膠流至特定位置的時間值，以評估不同設變下的變化趨勢。

根據設變目標，在模型上設置五個點，如圖 5(a)，其中 P1 位於頂部區域和側邊區域的交接處，用以描述頂部流動的速度變化；P2 位於進澆口對側的側邊區域上，偏一側的位置，用以描述側邊區域流動的速度變化；P4 位於進澆口對側的底部區域上，偏一側的位置，用以描述底部區域流動的速度變化；P3 位於進澆口對側的側邊區域上的中心位置；P5 位於進澆口對側的底部區域上的中心位置，兩點為了描述融澆會合末端的先後順序差異。

在進行模流分析後，流動波前時間的結果中會呈現每個感測點的時間數值，如圖 5(b)，以 P1 為例，熔膠流至 P1 點的時間是 0.323 秒，表示熔膠流至該位置所花費時間為 0.323 sec。

所有設變方案都設定在相同時間完成充填，若某感測點記錄的時間比其他設變方案更短，則表示該設變的流動速度更快。這些感測點的數據需要反映三個設變指標：P1,P2 和 P3 量值降低、P4 和 P5 量值增加、P3 量值需要小於 P5。

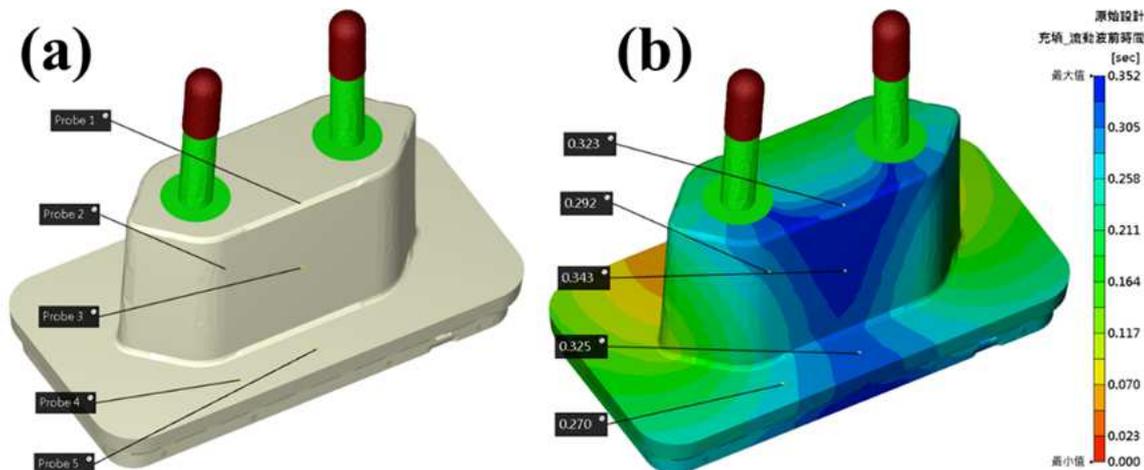


圖 5 感測點(a)位置(b)所紀錄之流經該點的時間

2.4 影響因子評估

雖然已設定設變目標，但在考慮設變方案時，如何選取特徵和設變尺寸仍然具有一定的離散性。為了解決這個問題，本研究採用田口方法(Taguchi method)中的實驗設計方法，這可大幅降低設計變更和分析的時間。本研究依四因子三水準的實驗架構，選取四個產品區域作為主要因子，分別是側壁平面的進膠側區域及轉角處、底部平面和頂部平面。每個因子設定三個設變尺寸作為三個因子水準，所對應的設變位置與尺寸如表 2。

根據實驗架構設定 L₉ 直交表，進行共九組的模流分析，結果如圖 6 所示，並將 P1 至 P5 的感測點作為品質因子的分析結果列出，如表 3 所示。

以第 8 組分析序為例，其因子組合為 A₃、B₂、C₁、D₃，對應的設變分別為：側壁平面（進澆側）增加肉厚 0.7mm，側壁平面（轉角處）減少肉厚 0.5mm，底部平面減少肉厚 0.3mm，頂部平面增加厚度 0.7mm。並以 P1 的分析結果為例，熔膠流至 P1 點的時間為 0.257 秒。其他不同分析組和 P1 至 P5 的結果同理得出。

表 2 設變因子與水準表

因子編號	因子名稱	因子圖示	因子水準(設變尺寸[mm])		
A	側壁平面 (進澆側)		1(+0.2)	2(+0.4)	3(+0.6)
B	側壁平面 (轉角處)		1(-0.2)	2(-0.4)	3(-0.6)
C	底部平面		1(-0.2)	2(-0.4)	3(-0.6)
D	頂部平面		1(+0.2)	2(+0.4)	3(+0.6)

表 3 L₉ 直交表與分析結果

分析序	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	P1	P2	P3	P4	P5
1	1	1	1	1	0.285	0.293	0.355	0.285	0.345
2	1	2	2	2	0.265	0.294	0.350	0.289	0.350
3	1	3	3	3	0.245	0.296	0.331	0.295	0.353
4	2	1	2	3	0.260	0.283	0.339	0.299	0.353
5	2	2	3	1	0.254	0.279	0.335	0.301	0.353
6	2	3	1	2	0.258	0.299	0.350	0.290	0.348
7	3	1	3	2	0.254	0.270	0.330	0.307	0.353
8	3	2	1	3	0.257	0.288	0.339	0.299	0.351
9	3	3	2	1	0.251	0.285	0.335	0.300	0.352

單位: 秒

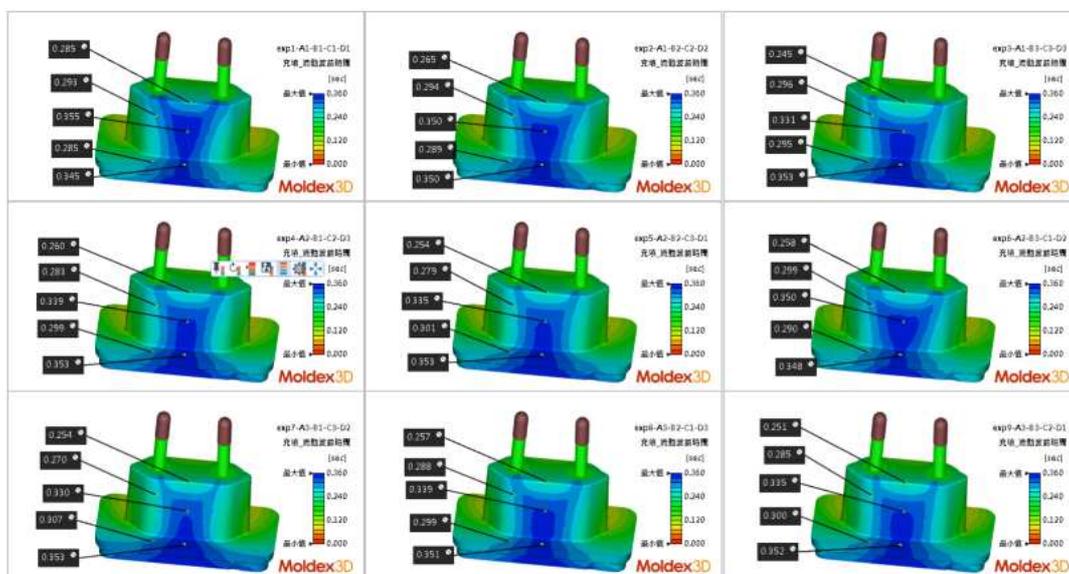


圖 6 L₉ 直交表分析結果之時間紀錄

將直交表中的分析結果整理得出如圖 7 的均值的主效應圖(Main effects plot)，每張圖表分別代表有每個因子、水準對 P1~P5 所造成的影響和變化趨勢；其中，圖表的 X 軸列出每個因子水準，Y 軸代表實驗中有該因子水準的實驗結果相加後除以有該因子水準的數量，所得的平均時間，數值越高，表示此因子水準平均而言，流至該點的時間越晚。五個感測點 P1 至 P5 分別，其中 P1、P3、P5 符合表 1 所訂的方向與目標但 P2 和 P4 在因子 B 的設變條件下，趨勢與設變目標相反。這表示減少轉角處之側邊厚度的設變因子非合適的設變方案。另外 A、C、D 因子設變後的趨勢都符合所設定目標，其中 A 和 C 因子對整體 P1~P4 的影響最為顯著。

由圖 7 分析，在 A3、C3、D3 以及 B 因子無設變尺寸時的因子水準組合為較佳方案，以此方案進行分析驗證並與原設計相比，如表 4 所示，P1~P3 的時間有顯著的下降；P4~P5 有增加；P5 的量值大於 P3，符合本研究的設變目標。

另外，此研究的信噪比主效應圖(Main effects plot of S/N ratio)趨勢與均值主效應圖完全一致，是因為本研究是透過模擬軟體分析所得，沒有不可控的實驗誤差。

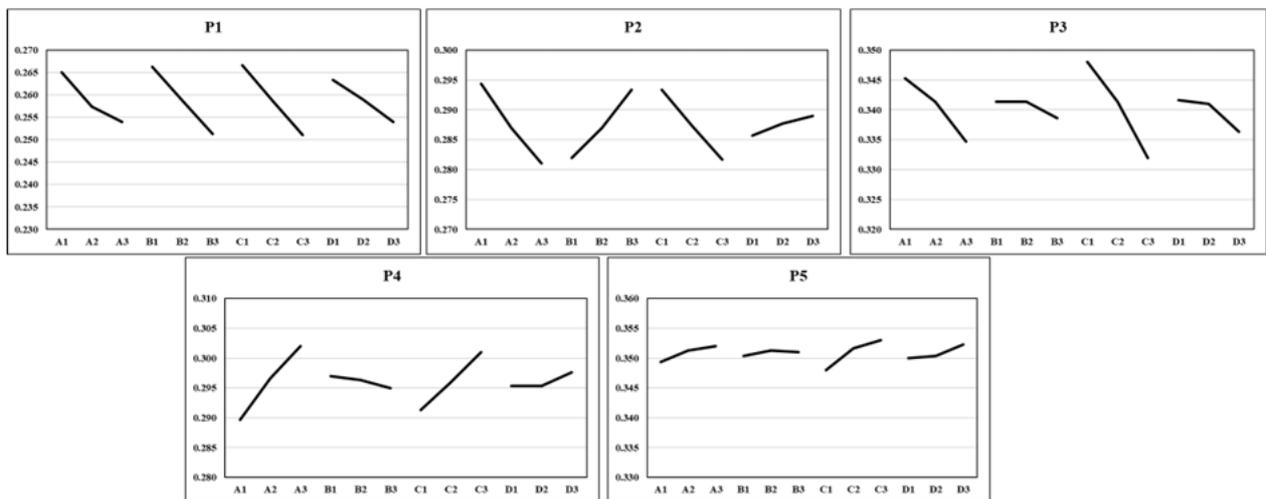


圖 7 各因子水準的均值主效應圖

表 4 原設計與最佳化因子組合的分析結果

方案	因子 A	因子 B	因子 C	因子 D	P1	P2	P3	P4	P5
原設計	-	-	-	-	0.323	0.292	0.343	0.270	0.325
驗證組	Level 3	-	Level 3	Level 3	0.254	0.266	0.330	0.306	0.353

單位：秒

2.5 設變方案

根據上述影響因子的評估以及模具加工和內部空間的綜合考量後，提出如下圖 8 的三個設變方案。其中圖 8(a)的方案一中，紅色箭頭所指的灰色區域增加 0.6 mm；圖 8 (b)的方案二中，紅色箭頭所指的紫色區域減少 0.6 mm；圖 8(c)的方案三中，與方案一相同的側邊區域增加 0.6 mm；與方案二相同的底部區域減少 0.6 mm，另外將頂部的金屬 Pin 的銜接處銑除 1.4 mm 厚、5 mm 寬的材料，使得頂部塑件厚度增加 1.4 mm，從而加快流動速度，在圖 8(c)中，由於視圖關係，紅色箭頭只標示出金屬 Pin 的設變位置。

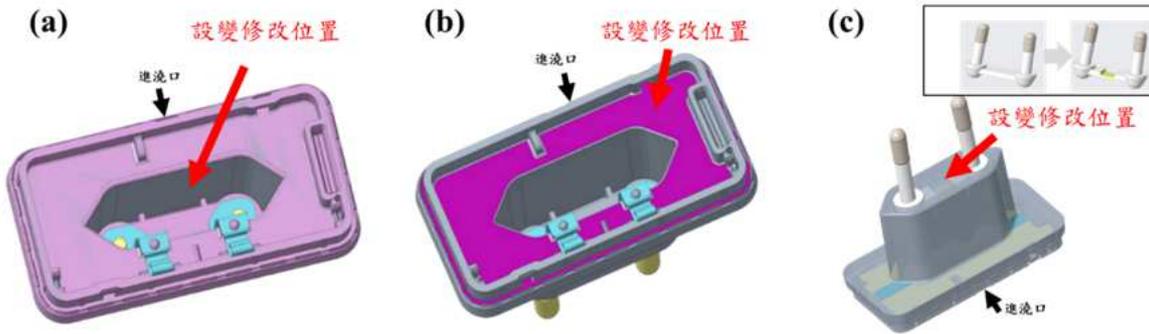


圖 8 設變方案(a)方案一(b)方案二(c)方案三之示意圖

3. 問題解決

3.1 模流分析結果

依上述所提設變方案進行充填階段的模流分析。分析完成後，透過流動波前結果來比較原始設計、方案一、方案二和方案三的走膠情形。如圖 9 所示，當熔膠充填至模穴體積的 93% 時，可以觀察到熔膠會合前的流動波前形狀。圖 9(a) 的原始設計中會合形狀呈現倒三角形，會合末端明顯會落在外觀面上；圖 9(b)的方案一和圖 9(c)的方案二中的波前形狀較為平行，但下緣仍略微靠近；圖 9(d)的方案三顯示會合末端位於正下方的底部區域邊界。透過圖 10 中提取的感測點數值，可以更客觀描述熔膠流到特定位置的時間。

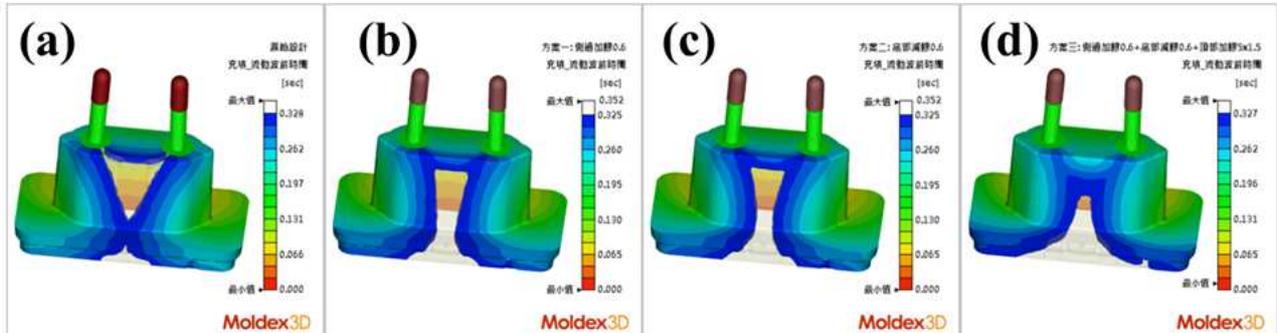


圖 9 模流分析充填至 93%之示意圖(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

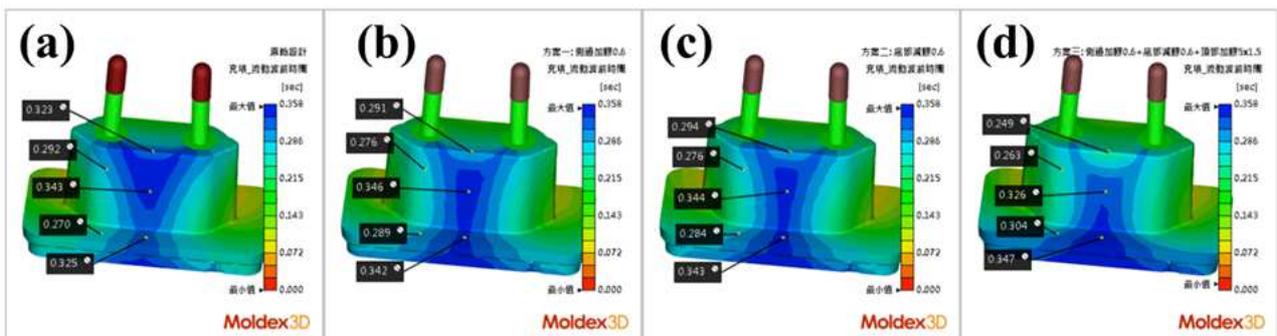


圖 10 充填至探針之時間紀錄(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

各設變中各感測點的時間詳見表 5，另外，繪製成圖 11 可以觀察到不同設變方案下，同一感測點位置的流動速度變化趨勢。圖表的 Y 軸代表流經感測點的時間，數值越高，表示流至該點的時間越晚；X 軸列出五個感測點 P1 至 P5，每個感測點的範圍中有四個數值，從左到右分別對應的是原始設計、方案一、方案二和方案三。從圖 11 可觀察到原始設計改成方案三時，P1, P2 和 P3 的量值有所降低，表示流速最慢處提升速率 22.91%；P4 和 P5 的量值有所增加，表示流速降低速率 12.59%，另外在方案三中，P3 的量值小於 P5。顯示方案三完全符合 2.3 節的文章末尾所提到的設變目標。

表 5 充填至探針之時間記錄表

描述	P1	P2	P3	P4	P5
原始設計	0.323	0.292	0.343	0.270	0.325
方案 1	0.291	0.276	0.346	0.289	0.342
方案 2	0.294	0.276	0.344	0.284	0.343
方案 3	0.249	0.263	0.326	0.304	0.347

單位: sec

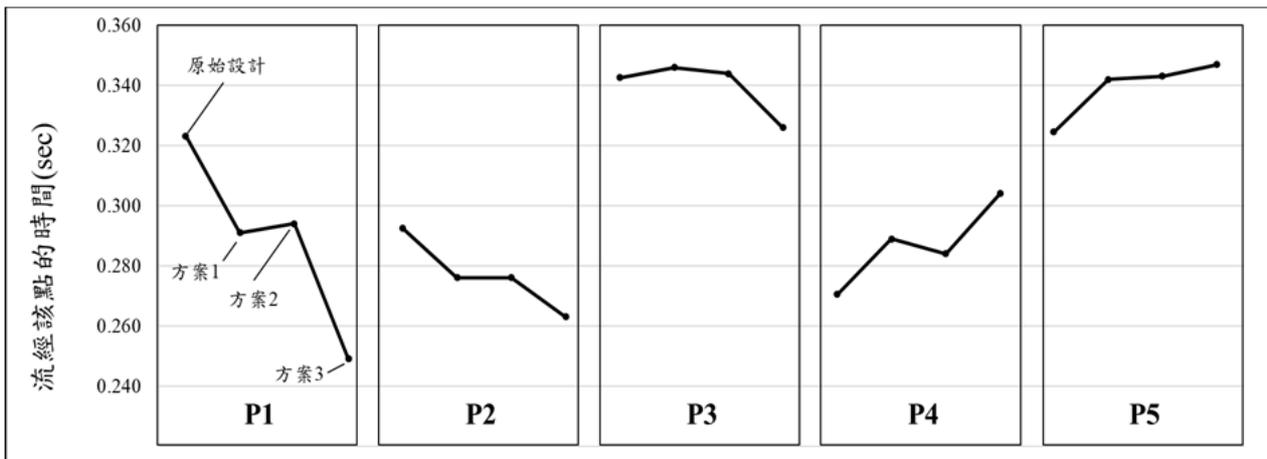


圖 11 不同設變方案中充填至探針之時間趨勢圖

3.2 保壓與翹曲的影響

由於各方案的厚度進行了調整，可能會產生縮水痕跡和不均勻翹曲的風險。在每個方案的成型參數一致的條件下，保壓後的表面縮水痕如

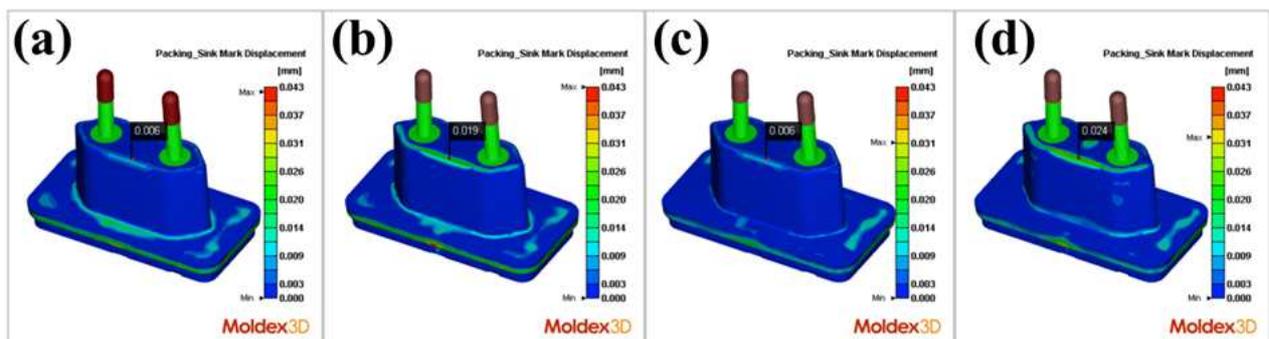


圖 12 所示。在方案二和方案三中，側邊單側增加了 0.6mm 的厚度，頂部區域的邊緣處可見較大的凹痕位移，但其量值分別為 0.019mm 和 0.024mm，這在實務上不會產生明顯的縮水痕。此外，圖 13 所示的翹曲分佈結果顯示，這些方案中的厚度改變對翹曲影響不大。

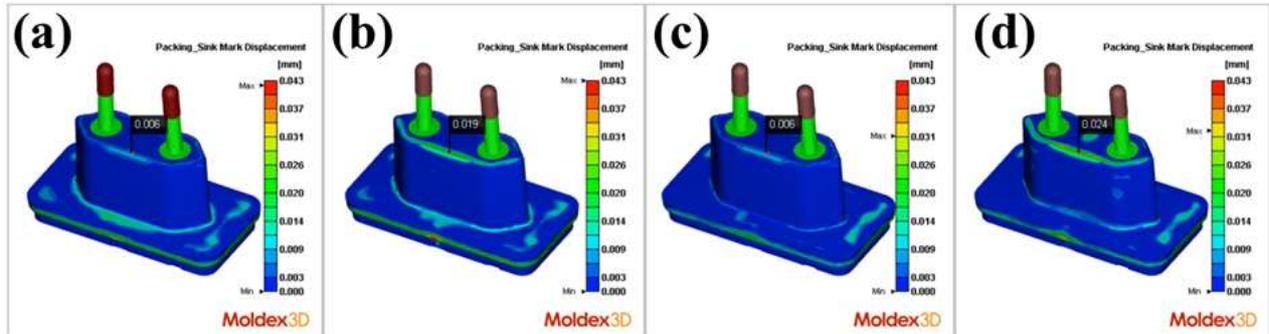


圖 12 凹痕位移分佈(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

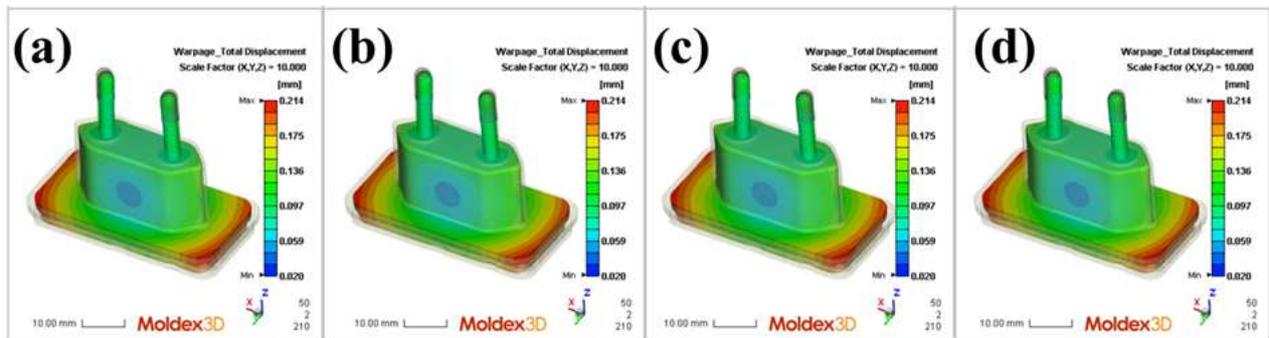


圖 13 翹曲分佈(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

3.3 實際驗證

本研究案例的模具是一模四穴，其中三個模穴按照方案一、方案二和方案三來進行修模，並以實際試模來驗證其趨勢，試模結果如圖 14，圖中結果顯示在模穴接近充填時所取出的短射樣品，其流動波前形狀與圖 9 中的模流結果相似，證實分析與實際的相似性。在圖 14(d)中也驗證了設計方案三能改善包封現象。

在完整充填的樣品開模後，觀察原先開模時的拉傷表面問題是否改善。由圖 15(a),(b)和(c)可見，原始設計、方案一和方案二中仍存在開模拉傷的缺陷，這是因為熔膠會合末端位於側邊的顯著外觀面上。若要改善外觀痕跡，需要提高模具溫度或增加保壓，但這會造成些微撐模，連帶導致開模時產品拉傷，即使進行極端參數調整，仍有顯著痕跡。

方案三中，充填末端位於底面區域的邊緣，外觀痕跡明顯減少。參數設置在常規成型條件下即可，不會出現拉傷痕跡，如圖 15(d)所示。

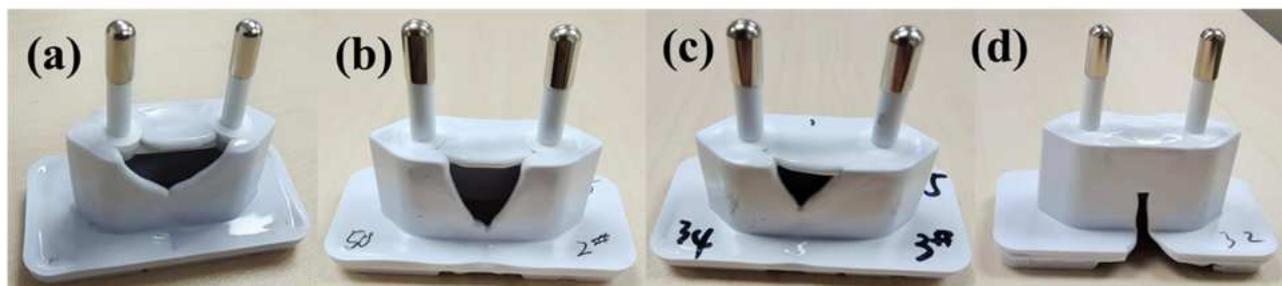


圖 14 熔膠會合末端(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

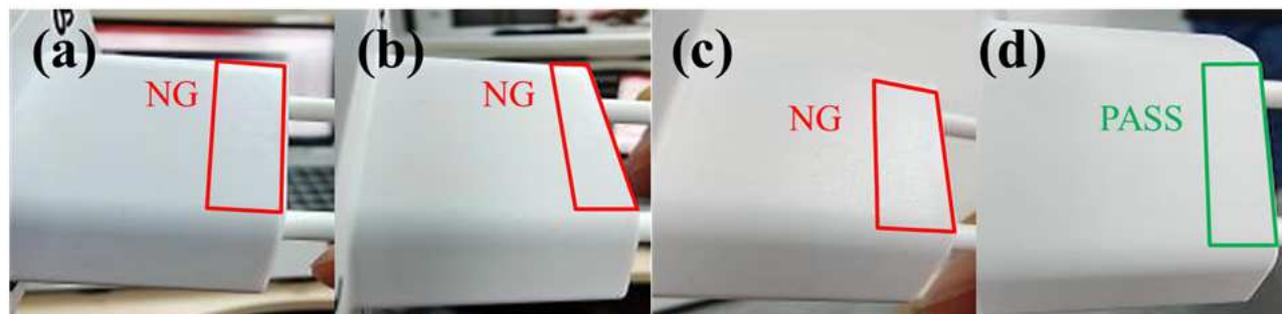


圖 15 開模後產品外觀(a)原始設計(b)方案一(c)方案二(d)方案三

4. 產業應用

這項研究提出了一種改進常規產品進澆方式的模具優化方案，透過調整產品厚度與進澆口位置，能去除進澆點在外觀上的瑕疵，提升外觀品質。

此外，本研究使用模流分析評估不同設變的流動情形時，不再僅依靠模流分析的結果畫面進行比較，而是利用感測點記錄不同設定的流動時間來評估各設定對流動效果的影響，搭配實驗設計法，可以更全面的評估設變對流動行為的影響，從而更客觀地量化流動趨勢。這為產業界提供了一種具有實際效益的研究方法。

目前，我司已將研究中提出的量化評估流動趨勢的方法及厚度設計概念導入現行產品開發中，證實了此方法與設計的通用性。

5. 誌謝

承蒙東莞晉原電子有限公司協助進行模具的加工與試模，使本案例得以進行實務驗證，以及科盛科技股份有限公司提供技術諮詢，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. 王茂齡, 張榮語, 許嘉翔, 2018. 模流分析理論與實務, 五南出版社, 台北, 台灣P59-P90
2. Su, T. M., Liu, Y. C., Huang, C. T., & Hsu, D., 2012. Product Design Optimization through Seamless Integration of CAD and CAE.
3. Longzhi, Z., Binghui, C., Jianyun, L., & Shangbing, Z., 2010, June. Optimization of plastics injection molding processing parameters based on the minimization of sink marks. 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE pp. 593-595.



4. Villarreal, Maria G., et al. 2008. Simulation optimization applied to injection molding. 2008 Winter Simulation Conference, IEEE. p. 1995-2003.