應用異型水路管徑差異探索水路佈局對模具冷卻效益與射出成品精度之研究

Study on the waterway layout on mold cooling efficiency and accuracy of injection molded parts through the differences of the conformal cooling size design

陳雋岑 [1&3]、林健祥 [1]、黃柏傑 [2]、黃招財 [3*]
[1] 宗瑋工業股份有限公司
[2] 永燿有限公司
[3] 淡江大學化學工程與材料工程學系
[*]E-mail: cthuang@mail.tku.edu.tw

摘要

射出成型製程為現今不可或缺的產業量產製程之一，其中如何管理掌控模具冷卻機制與提升成品精度為本產業的首要目標。在傳統水路方面，受限於減法加工，使水路與成品距離較遠，且轉角處易出現死水區，導致冷卻品質下降，針對管理掌控模具冷卻機制，3D 金屬列印所製作之異型水路模具已被產業界認定能夠有效解決此需求。雖然，異型水路的設計靈活性是其重要關鍵要素，但若想提升異型水路冷卻效益，一般可採用加大管徑，提高冷卻液流量，或者採用增加水路密度的方式，前者使水路靈活性降低，後者則須考慮水路設計準則，確保模具機械強度。為此，本文根據縮小管徑水路設計概念，同時滿足設計靈活性與提高水路密度需求，應用 3D 金屬列印設計開發三套不同管徑結構之模具，探索管徑差異對於水路佈局效益。此等應用小直徑依產品結構調整水路佈局之異型水路模具之模擬分析結果可有效提升模溫均勻度 6%以上，模溫冷卻效率提升 20%以上，以及產品翹曲總變形量可改善 30%以上。再者，此等設計也經實際開模製作與試模，實驗結果，包括：模溫均勻度改善、模溫冷卻效率提升、以及產品翹曲總變形量可改善都與模擬分析結果相當吻合。

關鍵詞：射出成型、3D金屬列印、異型水路、水路管徑差異、CAE模擬分析

Abstract

The injection molding process is one of the indispensable industrial mass production processes today. Among them, how to manage and control the mold cooling mechanism and improve the accuracy of finished products is the primary goal of this industry. In terms of traditional water channels, they are limited by subtractive processing, which makes the water channel far away from the finished product, and dead water areas are prone to appear at corners, resulting in a decrease in cooling efficiency. In order to manage and control the mold cooling mechanism, special shaped water channel molds produced by 3D metal printing have been developed. It is recognized by the industry that it can effectively solve this need. Although the design flexibility of special-shaped waterways is an important key factor, if people want to improve the cooling efficiency of special shaped waterways, he can generally increase the pipe diameter and increase the coolant flow rate or increase the waterway density. The former reduces the flexibility of the waterway, the latter must consider the waterway design criteria to ensure the mechanical strength of the mold. To this end, this article uses 3D metal printing to design and develop three sets of molds with different pipe diameter structures

based on the concept of reducing pipe diameter waterway design while meeting the needs of design flexibility and increasing waterway density, and explores the benefits of pipe diameter differences on waterway layout. The simulation analysis results of these special shaped waterway molds that apply small diameter waterway and adjust the waterway according to the product structure can effectively improve the mold temperature uniformity by more than 6%, the mold temperature cooling efficiency by more than 20%, and the total product warpage deformation can be improved by 30%. Furthermore, these designs have also been subjected to actual mold manufacturing and trial testing. The experimental results, including: improvement in mold temperature uniformity, improvement in mold temperature cooling efficiency, and improvement in total product warpage deformation, are quite consistent with the simulation analysis results.

Keywords: injection molding, 3D metal printing, conformal cooling channels, differences in waterway diameters, CAE simulation analysis

1. 前言

射出成型製程為塑膠加工產業中最被廣泛應用的工藝之一，但在此製程中，如何減少產品生產週期所花時間，同時提高產品精度成為射出成型產業的重要課題。再者，近年來應用金屬3D列印技術提供射出成型產業一新型模具製造方案，克服傳統模具製造上的的種種限制，其中採用3D列印之異型水路模仁製作，在模具中能更貼近產品表面，並能深入產品內部的水路設計之優勢逐漸取代傳統水路模仁，此種經異型水路優化之產品，可大幅改善其翹曲變形現象。1998年Xu 等人[1]針對異型水路設計方法，建立數學模型探索其熱傳關係，藉由數值分析與3D印刷成型製作模具，探討水路對於模具溫度與其機械強度影響。2000年Sachs 等人[2]透過實驗與數值分析探討傳統鑽孔減法製作與加法製造模具，以及產品成型品質與模具溫度分佈之差異，結果顯示異型水路於模具表面，有較均勻的溫度分佈，且較快達到工作溫度。2018年Liu 等人[3]比較鑽孔與列印之模具效益，若在列印階段無法給予模具足夠支撐力，導致水路變形，將使冷卻液流量降低，而雷射燒結造成的粗糙表面，則會降低冷卻液流速，連帶影響模具導熱性能，此情形在小管徑水路更為明顯，隨著金屬列印技術與機台設備成熟，在機械強度方面得到加強，同時提升製程穩定性，實現更加多元的水路設計。時至今日，許多文獻針對不同水路型式進行研究，希望將水路效益最大化[4-6]，但關於水路管徑探討仍不夠完善。因此，本研究透過縮小管徑的方式，使水路更加貼進產品表面並加密水路分佈，希望藉此提升異型水路效益。為此，先透過水路管徑差異設計三組不同水路型式之模具構思，一方面透過CAE模流分析進行模擬分析，另一方面進行實際試模，深入進行射出成型引發之模具溫差進行內部探索，之後，再從成品尺寸差異變化與應力分佈量測，進一步驗證此水路管徑差異解決方案是否符合預期。

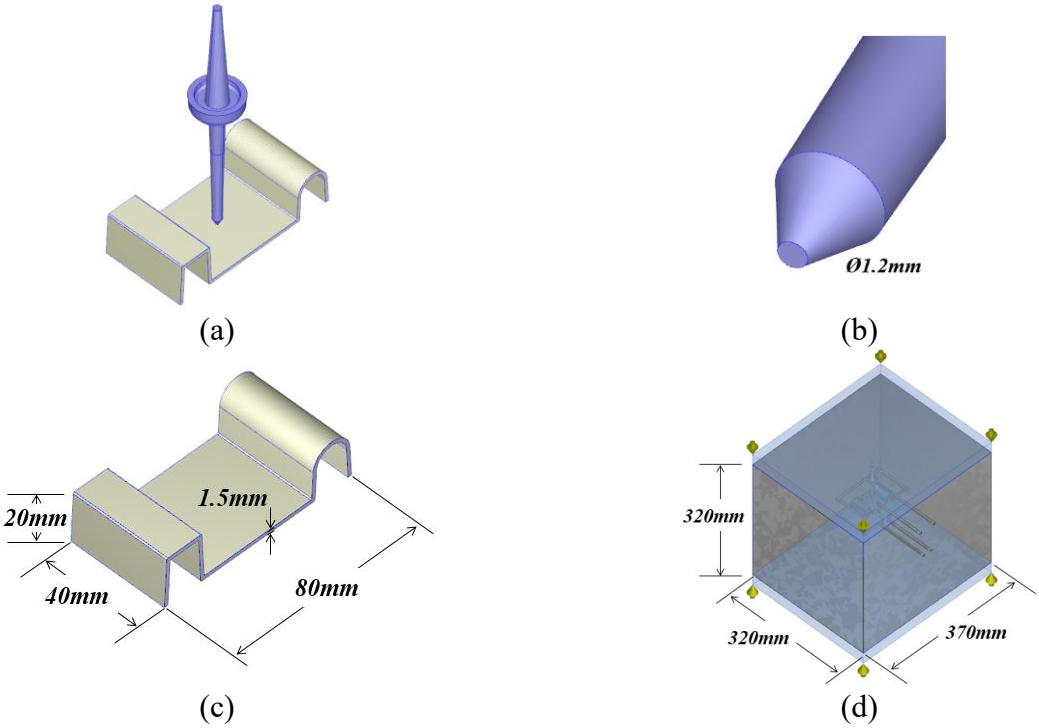
2. 模型與相關資訊

為探索目前射出成型冷卻效應問題，本研究主要採用CAE模擬分析與實驗驗證兩種方法進行。具體而言，將透過一個含殼狀之幾何模型，應用縮小水路管徑設計概念，完成三種不同水路型式設計模具系統，再經一系列之射出成型製程變化，透過CAE模擬分析進行預測與探討，再經實際實驗著實驗證，最後以其模具冷卻效益與射出成品精度作為量化比較。

2.1 產品幾何模型尺寸與模座資訊

本研究採用Moldex3D 2022軟體(科盛科技公司, 新竹, 台灣)進行射出成型模擬分析，其中產品幾何與澆口設計，如圖1 (a)所示；澆口進點尺寸設定直徑1.2 mm，如圖1 (b)所示；成品幾何，包含方殼狀與圓殼狀結構，底部以平板連接，整體幾何尺寸；長×寬×高分別為80×40×

20 mm，肉厚為1.5 mm，如圖1 (c)所示；另外，模座尺寸370 × 320 × 320 mm，如圖1 (d)所示。

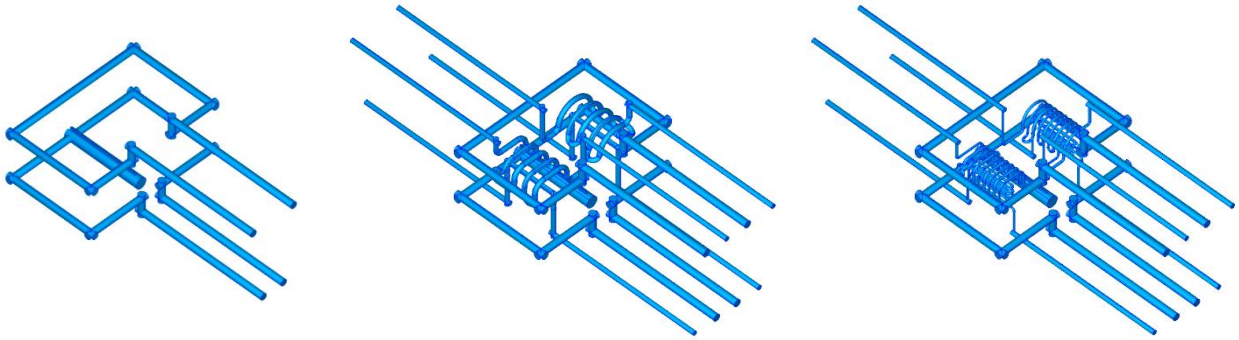


(a) (b) (c) (d)

圖1. 產品幾何模型與模座尺寸: (a)澆口設計； (b)澆口尺寸； (c)成品幾何與尺寸；(d)模座尺寸

2.2 水路型式設計與其資訊

本研究主要構思三種水路型式，說明如下；水路型式(Ⅰ)採用水路管徑6 mm，因較大管徑無法深入成品內部，公/母模側僅採用一傳統水路進行冷卻，如圖2 (a)所示；水路型式(Ⅱ)，保留水路型式(Ⅰ)設計，並加入4 mm管徑異型水路，如圖2 (b)所示；水路型式(Ⅲ)，同樣保留水路型式(Ⅰ)設計，並加入2 mm管徑異型水路，如圖2 (c)所示；其中，水路型式(Ⅲ)相較於水路型式(Ⅱ)，採用更加貼近模穴且更高水路分佈密度的方式繞行。另外，水路與成品之間距如圖3所示，其中在水路型式(Ⅰ)顯示冷卻水路距離產品表面為10至15 mm，如圖3(a)-(b) 所示；在水路型式(II)增加直徑4 mm 冷卻水管，該等水管距離產品表面為6 mm，在40 mm 產品寬度下，擺設5次迴路，如圖3(c)-(e) 所示；在水路型式(III)增加直徑2 mm 冷卻水管，該等水管距離產品表面為3 mm，在40 mm 產品寬度下，擺設9次迴路，如圖3(c)-(e) 所示。



(a) (b) (c)

圖2. 水路型式圖: (a) 水路型式(Ⅰ)；(b) 水路型式(Ⅱ)；(c) 水路型式(Ⅲ)

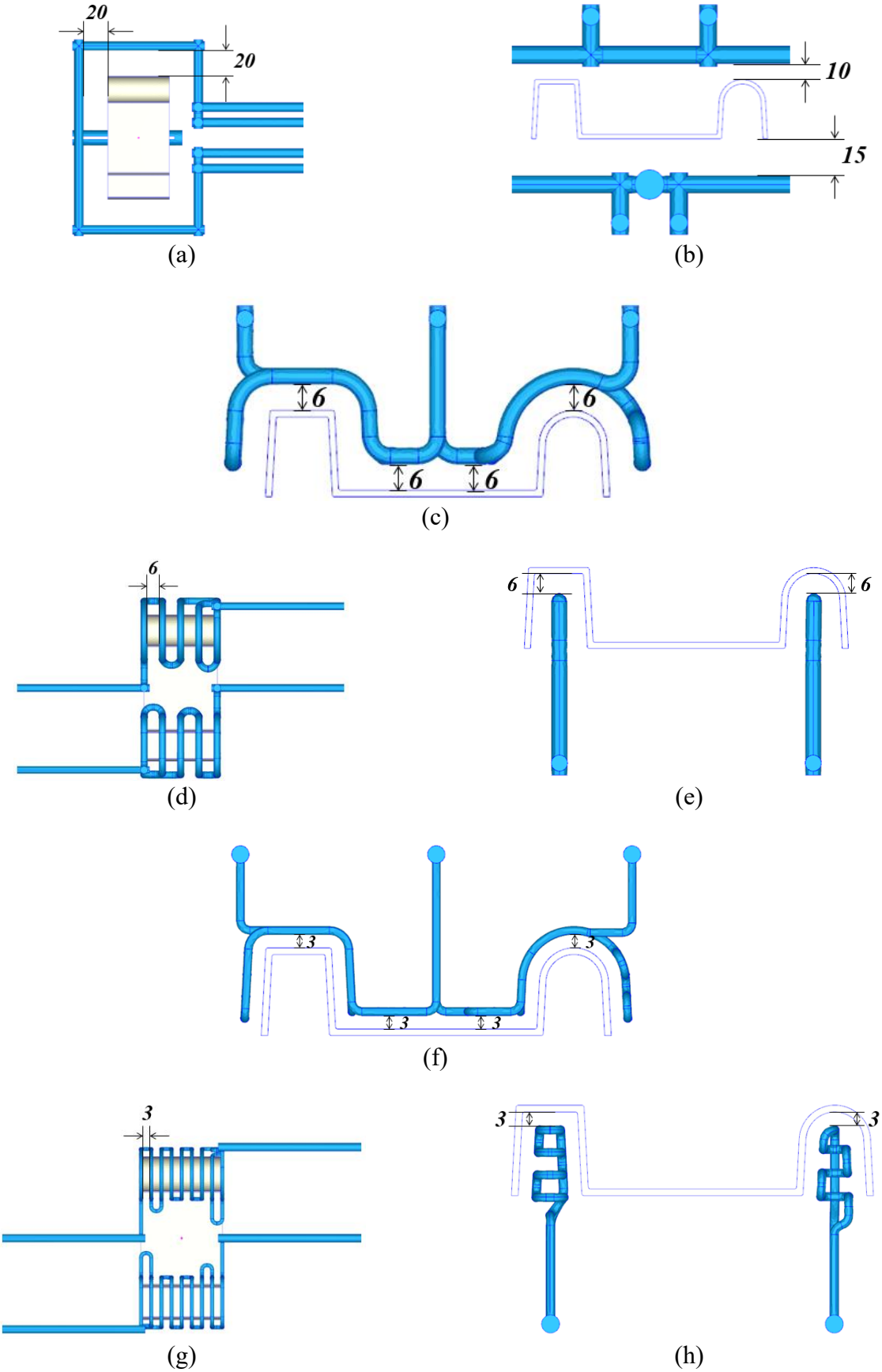


圖3. 水路設計圖: (a)傳統水路上視圖；(b)傳統水路側視圖；(c)水路型式(II)母模側側視圖；

(d)水路型式(II)母模側上視圖；(e) 水路型式(II)公模側側視圖；(f)水路型式(III)母模側側視圖；(g)水路型式(III)母模側上視圖；(h)水路型式(III)公模側側視圖。

2.3 CAE模擬專案設定與其資訊

此處採用材料由Covestro公司提供，型號為PC Makrolon 2407(以下簡稱PC材料)，成型條件如表1所示，主要包括：充填時間1.5 s、熔膠溫度300℃、模具溫度100℃、射出壓力150 MPa、保壓時間2 s、保壓壓力80 MPa、冷卻時間30 s。

表1. 成型條件參數

參數	條件
充填時間	1.5 s
熔膠溫度	300 ℃
模具溫度	100 ℃
射出壓力	150 MPa
保壓時間	2 s
保壓壓力	80 MPa
冷卻時間	30 s

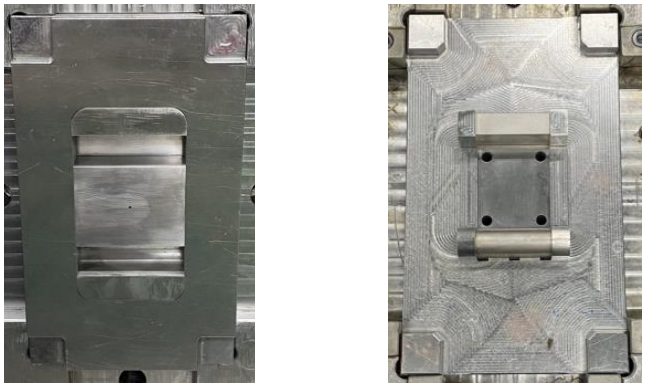
2.4 實務實驗專案設定與其相關資訊

針對實驗專案所採用之機台型號為 SE100EV-A-C360，如圖 4 所示。另外，模穴構造，如圖 5 所示。再者，相關模型幾何資訊、水路型式設計與成型條件設定都與 CAE 模擬分析系統相同，如 2.1～2.3 小節所描述。

2.5 成型及產品特性量測系統建立

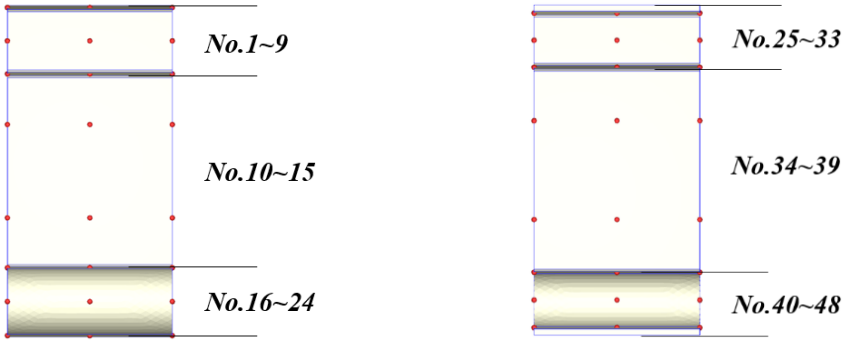
為針對模具內不同水路形式之冷卻效益進行深入探索，各別在 CAE 模擬分析系統內公(簡稱 COR)/母模側(簡稱 CAV)加入量測節點，如圖 6 所示，其中母模側編號 1 至 24，共 24 點；同理，公模側編號 25 至 48，共 24 點，作為模擬分析研究及探索之依據。再者，為了掌握射出成品精度，特別選定 9 個標定尺寸量測位置，如圖 7 所示，作為量測比較之依據。另一方面，針對實務實驗量測之執行，包括：模溫量測採用 FLIR 紅外線熱像儀進行量測，如圖 8 (a)所示。射出成品精度量測 2D 影像量測儀與 3D 量測儀器，如圖 8 (b)與 8 (c)所示。

圖 4. 射出成型機台



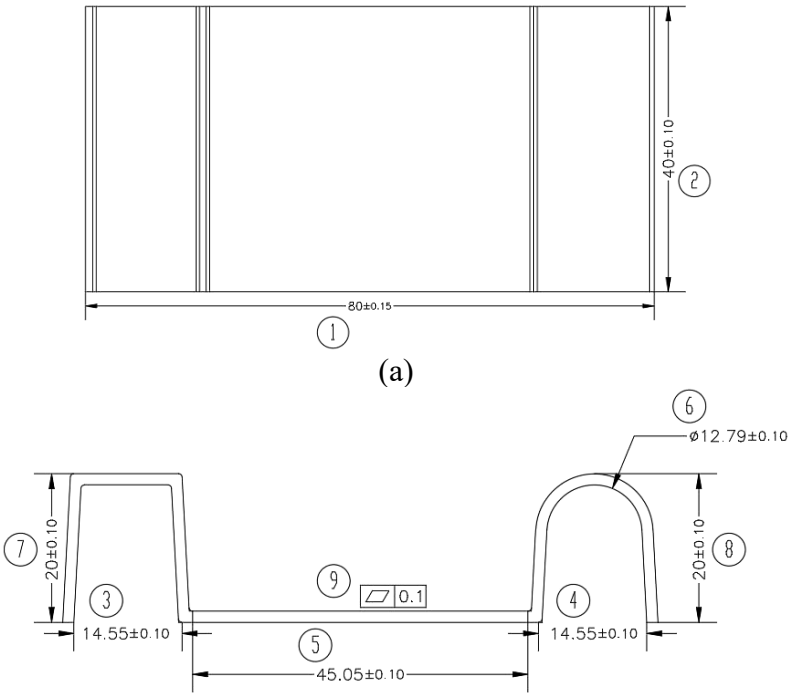
(a) (b)

圖 5. 模穴構造: (a)母模面；(b)公模面。



(a) (b)

圖 6. 量測節點位置圖: (a)母模側；(b)公模側。



(a)

(b)

圖 7. 標定尺寸量測位置: (a)上視圖；(b)前視圖。

(a)

(b)

(c)

圖 8.實務實驗量測系統：(a) FLIR 紅外線熱像儀；(b) 2D 影像量測儀；(c) 3D 量測儀器。

3. 結果和討論

3.1 水路佈局對模具冷卻效益探索

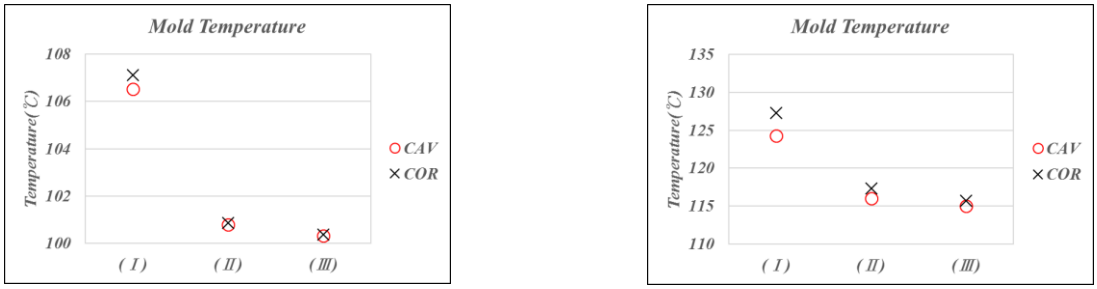
為探討三種水路型式的模具冷卻效益，分別針對公模側(COR)/母模側(CAV)模溫進行量測，實際採用FLIR紅外線熱像儀器量測，如圖8 (a)所示，結果如表2與表3所列，該等結果可以進一步彙整成圖9。由CAE模擬分析結果可看出模溫在水路型式(Ⅰ)約介於106.52～107.12 ℃，公/母模兩側溫差約為0.6 ℃；另外，採用水路型式(Ⅱ)後，模溫降至100.79～100.87 ℃，兩側溫差相較於水路型式(Ⅰ)改善86.7 %；如果改採用水路型式(Ⅲ)後，模溫降至100.32 ~ 100.36 ℃，兩側溫差相較於水路型式(Ⅰ)改善93.3 %。另一方面，進行實務實驗，結果同樣能觀察到隨水路型式(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)之改變，公模側或母模側模溫趨勢遞減，兩側溫差改善來到56.7 %與76.7 %。

表2. CAE模擬分析：模溫量測結果

	水路型式(Ⅰ)		水路型式(Ⅱ)		水路型式(Ⅲ)	
	母模側	公模側	母模側	公模側	母模側	公模側
平均(℃)	106.52	107.12	100.79	100.87	100.32	100.36
溫差(℃)	0.60		0.08		0.04	
改善(%)	-		86.7		93.3	

表3.實務實驗：模溫量測結果

	水路型式(Ⅰ)		水路型式(Ⅱ)		水路型式(Ⅲ)	
	母模側	公模側	母模側	公模側	母模側	公模側
平均(℃)	124.3	127.3	116.0	117.3	115.0	115.7
溫差(℃)	3.0		1.3		0.7	
改善(%)	-		56.7		76.7	



(a) (b)

圖9. 模溫量測結果比較：(a)CAE模擬分析；(b)實務實驗。

3.2 水路佈局對射出成品精度探索

在3.1小節中得知，縮小管徑之水路設計概念能夠有效提升模具冷卻效益，本節進一步探討冷卻效益提升後，對於射出成品精度影響為何。實際量測採用2D影像量測儀器，如圖8(b)所示，將成品擺正對齊X或Y軸向後，進行二維平面量測；平坦度部分，量測儀器如圖8(c)。三種不同水路型式進行射出成型製程後之成品的尺寸精度量測結果，如表4與表5。其中在尺寸①、③、④當中相較於圖面尺寸有較大變形量，故選擇此三項尺寸進行重點比較，並計算其變形率，再以變形率作為圖，如圖10所示。從圖10可知，隨水路型式(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)的變化，整體變形率趨勢逐步改善。其中變形率定義，如方程式(1)所述。

(收縮)變形率(%)=((模具尺寸-量測尺寸)/(模具尺寸))×100% (1)

表4. CAE模擬：射出成品精度量測

單位: mm；縮水率: 1.005%

	圖面尺寸	水路型式(Ⅰ)	水路型式(Ⅱ)	水路型式(Ⅲ)
①	80.00	79.22	79.56	79.64
②	40.00	39.91	39.91	39.91
③	14.55	14.17	14.33	14.39
④	14.55	14.23	14.41	14.44
⑤	45.05	44.94	44.96	44.96
⑥	12.79	12.69	12.73	12.74
⑦	20.00	20.08	20.04	20.02
⑧	20.00	20.09	20.05	20.03
⑨	0.10	0.12	0.03	0.01

表5. 實務實驗：射出成品精度量測

單位: mm；縮水率: 1.005%

	圖面尺寸	水路型式(Ⅰ)	水路型式(Ⅱ)	水路型式(Ⅲ)
①	80.00	79.04	79.49	79.62
②	40.00	39.94	39.95	39.95
③	14.55	14.18	14.37	14.44

④	14.55	14.21	14.42	14.47
⑤	45.05	44.95	44.96	44.99
⑥	12.79	12.66	12.71	12.73
⑦	20.00	19.97	19.98	19.98
⑧	20.00	19.99	20.00	20.00
⑨	0.10	0.04	0.03	0.01

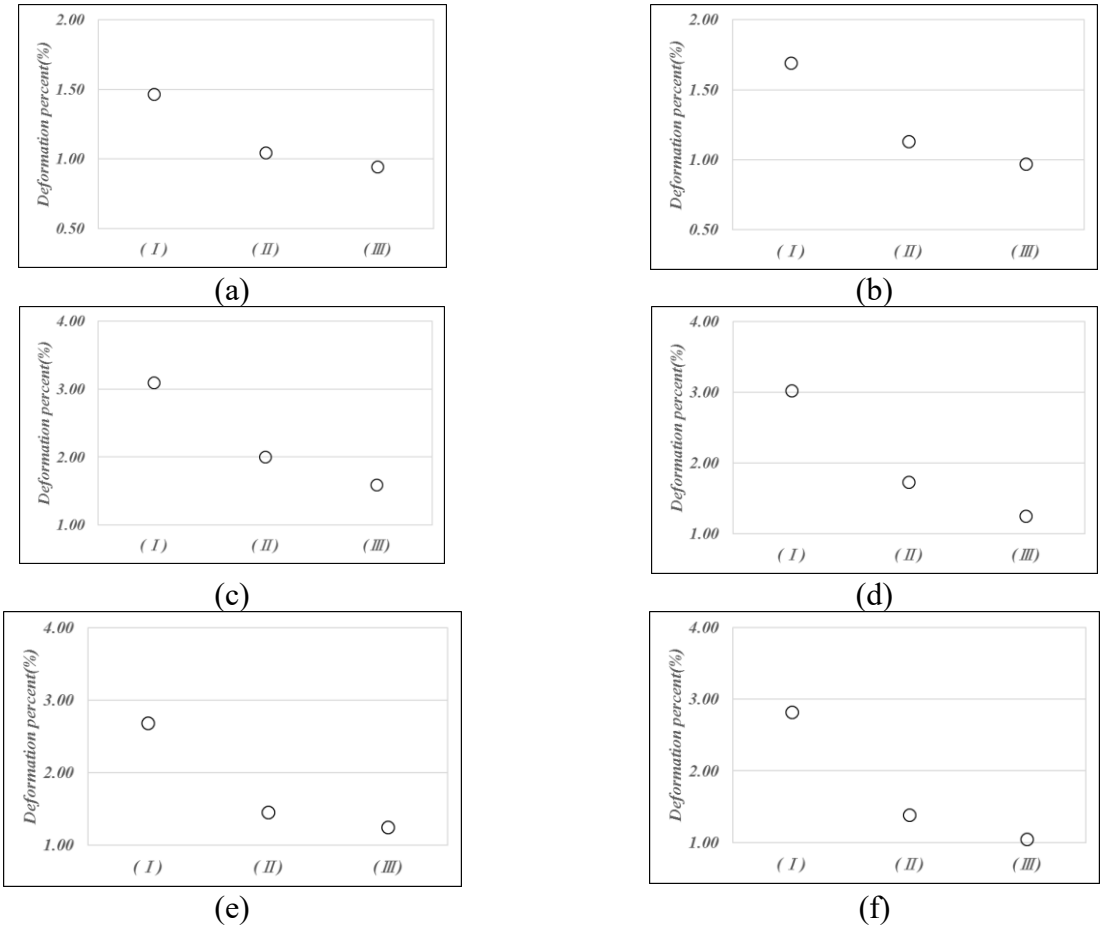


圖10. 射出成品變形率比較(以PC材料為例): (a)尺寸① (模擬分析)， (b)尺寸① (實驗)，(c)尺寸③ (模擬分析)， (d)尺寸③ (實驗)， (e)尺寸④ (模擬分析)， (f)尺寸④ (實驗)

4. 結論

本研究透過3D列印技術嘗試應用細小管徑之異型水路設計概念於射出成型系統中，經此研究獲得具體結論如下：

(1) 在模具冷卻效益方面，經CAE模擬分析結果顯示，水路型式(Ⅱ)與水路型式(Ⅲ)相較於水路型式(Ⅰ)，整體模溫下降，且公/母模兩側模溫改善率分別為86.7％與93.3％；再經實務實驗驗證結果與CAE模擬分析趨勢相當一致，實際改善率分別為56.7 ％與76.7％。

(2) 在射出成品精度效益方面，經CAE模擬分析結果顯示，射出成品變形率隨水路型式(Ⅰ)、水路型式(Ⅱ)、水路型式(Ⅲ)之改變，變形率依序為 3.10％、2.00％、1.59％；

再經實務實驗驗證結果與CAE模擬分析趨勢相當一致，實際變形率分別為 3.03 %、1.73 %、1.25 %。當然，實務上應用2D 及3D 系統量測標準誤差值都在0.05%範圍，可信度很高。

此研究透過細小管徑之異型水路設計概念之實現化，特別是將它應用於更加微小且複雜的成品幾何當中，能提高模具冷卻效益，同時提高射出成品精度，我們深信對於當今難以進行冷卻之模具系統應該可以提供有效的解決方案。

(本文節錄自陳雋岑. (2024).淡江大學化學工程與材料工程學系碩士班技術報告[7])

5. 誌謝

承蒙宗瑋與永燿公司的支持與協助使本案例得以順利解決，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. Xu, X., Sachs, E., Allen, S., & Cima, M. (1998). Designing conformal cooling channels for tooling.
2. Sachs, E., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M., & Guo, H. (2000). Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. Polymer Engineering & Science, 40(5), 1232-1247.
3. Liu, C., Cai, Z., Dai, Y., Huang, N., Xu, F., & Lao, C. (2018). Experimental comparison of the flow rate and cooling performance of internal cooling channels fabricated via selective laser melting and conventional drilling process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96, 2757-2767.
4. Tuteski, O., & Kočov, A. (2018). Conformal cooling channels in injection molding tools–design considerations. Machines. Technologies. Materials., 12(11), 445-448.
5. Wang, Y., Yu, K. M., Wang, C. C., & Zhang, Y. (2011). Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling. Computer-Aided Design, 43(8), 1001-1010.
6. Park, H. S., & Dang, X. P. (2017). Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. Procedia Manufacturing, 10, 48-59.
7. 陳雋岑. (2024). 宗瑋工業公司實習技術報告與透過異型水路管徑差異探索水路佈局對模具冷卻效益與射出成品精度之研究. 淡江大學化學工程與材料工程學系碩士班技術報告