

# 金屬粉末射出成型之隨形水路模具開發研究

## On the Development of a Mold with Conformal Cooling Channel for Metal Injection Molding

周韋辰<sup>1</sup>、宋培溥<sup>1</sup>、蔡耀震<sup>2</sup>、林建宏<sup>2</sup>、許嘉翔<sup>2</sup>、賴景義<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 國立中央大學機械系

<sup>2</sup> 科盛科技股份有限公司

\*E-mail: jylai@ncu.edu.tw

### 摘要

金屬粉末射出成型之喂料由金屬粉末與黏結劑混煉而成，射出成品僅為兩種材料固化的形態，傳統 2D 冷卻水路可能不容易解決多模腔模具溫度分佈不均勻的問題，而造成產品的成型缺陷。本研究發展一整合模流分析、金屬積層製造和 CNC 加工之 MIM 隨形水路模具開發技術，並透過實際射出成型試驗與分析，探討此一整合性技術的可行性。此一研究主要貢獻為藉由模流分析優化模具冷卻系統，並結合金屬積層製造與 CNC 加工製作 3D 水路模仁，最後證明此一模具在製程參數設定上更容易達到穩定的成型品質。

**關鍵詞：**金屬粉末射出成型、隨形水路、模流分析、金屬積層製造

### Abstract

Conventional 2D cooling channels may not be easy to deal with the problem of non-uniform temperature distribution for multi-cavity molds in metal injection molding, and may cause shaping defects of the product. We develop an integrated technology for the MIM product shaping and manufacturing, including mold flow analysis, conformal cooling channel design, metal additive manufacturing and CNC processing. Through the design, manufacturing and testing of a four-cavity MIM mold, the feasibility of this integrated technology is discussed. Also, the cooling efficiency of the MIM product and the uniformity of the mold temperature is discussed.

**Keywords:** MIM, conformal cooling channel, mold flow analysis, metal additive manufacturing

## 1. 前言

金屬粉末射出成型(Metal injection molding, MIM)為一種結合塑膠射出成型與粉末冶金的製程技術，適合成型高精度、高強度、幾何形狀複雜的金屬零件。其製程由粉末與黏結劑之混煉、模具設計製造、射出成型、至後製程之脫脂、燒結，涵蓋技術範圍甚廣[1]。而模具設計的成敗直接影響MIM生產技術的效率及品質。在MIM射出成型上主要面臨以下問題。首先，模流分析(Mold flow analysis)在此一產業的應用尚不普遍，由於大部份屬於中小企業，尚不具規模引進模流分析相關技術，並且，一般模流分析軟體不具有現成的材料資料庫，因此對於初次生產的產品，往往需要較多時間進行試模與修模工作。其次，模具的冷卻對於產品品質與成型週期有相當明顯的影響，傳統上採用2D水路的設計，往往由於模仁冷卻不均勻，導致於成型參數設定上較困難，容易發生成型週期較長，或長期運轉時模仁溫度逐漸增加的現象。

現有之模具絕大部分採用傳統 2D 水路，主要因為 2D 水路為平行型式的管路組成，可使用鑽孔加工，但是此類型的水路無法滿足 MIM 製程之冷卻需求。隨形水路(Conformal cooling)為位於模板內部的彎曲管路，其設計可讓水路更貼近模仁，達到更均勻的冷卻效果，不僅可改善胚件的收縮與變形，也可避免常期運轉模仁溫度升高的問題，縮短整體的成型週期，但是隨形水路為一新的設計，在模具設計與加工上均需要引進新的方法[2]。

近年來，金屬積層製造(Metal additive manufacturing, MAM)技術的進步，增加隨形水路模具製造的可行性，事實上，也唯有使用 MAM 技術，才有可能製造隱藏於模板內部的隨形水路。由於隨形水路需要通過公、母模仁內部，因此，公、母模仁全部(含模穴、澆口、流道等)均需要以 MAM 製造。此一需求衍生出另外的問題，大部分 MAM 之精度仍無法達到 CNC 加工的水準，因此 MAM 製造之公、母模仁後續仍然需要進行二次加工。此外，MAM 成品之殘留應力、表面品質與剛性等，均會影響是否適合作為模仁使用。大部分現有 MAM 製造技術以樣品、原型或離型之製作為主，於隨形水路模仁的製造，為其另一個重要的應用。

本研究以 MIM 射出成型之零件為例，利用 CAD 與 CAE，設計一模四穴的成型模具，其結合隨形水路加隔板式水路，藉由模流分析探討其與原始傳統 2D 水路設計之冷卻效果差異，並利用金屬積層製造技術進行模仁加工完成，以及後續整座模具的設計與加工製造，最後經由實際試模與成型分析，探討其對產品品質與製程週期的影響。

## 2. MIM零件模流分析

### 2.1 鎖類零件隨形水路設計

#### 2.1.1 原一模一穴 2D 水路模具

本研究之產品為 MIM 製程生產之鎖類零件，生胚與燒結件外觀如圖 1(a)所示，生胚尺寸為 28.8×26.5×28.8 mm，主要幾何特徵為一中空圓柱體，其外直徑為 20 mm，中心為直徑 9.5 mm 的內孔；上側為一扇形特徵，其肉厚為 2.7 mm，為該產品之肉厚最薄處。左側為澆口處，其肉厚為 3.2 mm。材料方面喂料組成以蠟基為黏結劑成分，金屬粉末原料則為 Fe<sub>2</sub>Ni 合金鋼粉末，比例由廠商自行混煉生產。此一 MIM 零件原 2D 水路模具為一模一穴設計，採兩板模，模具尺寸為 230×230×250 mm，圖 1(b)為原模具公、母模仁 CAD 模型，圖 1(c)為 2D 水路 CAD 模型，2D 水路使用鑽孔加工，水路直徑為 8 mm，公、母模仁各自擁有獨立的 1 進 1 出冷卻水路。原 2D 水路模具由於產品本身特徵處肉厚較大，2D 水路之模具設計僅能將水路環繞於模仁周圍，距離成型模腔太遠，且模具內的型芯因長時間進行射出作業，造成溫度上升，甚至會熱變形，導致產品內孔處發生龜裂與翹曲變形量變大的趨勢。

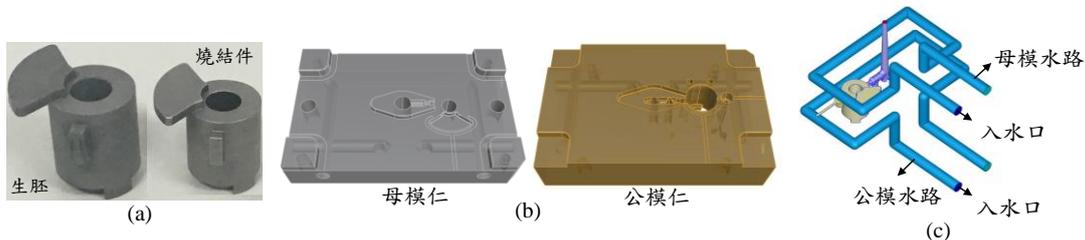


圖 1 原模具之設計，(a)鎖類零件生胚，(b)母模仁、(c)公模仁、(d)水路 CAD 模型

#### 2.1.2 一模四穴隨形水路加隔板水路設計

本研究參考原一模一穴模仁的配置，擴充為一模四穴的配置，並且將水路由 2D 改為 3D 的隨形水路設計。此一設計必須重新設計冷流道系統、澆口的尺寸，增加喂料的充填量，並決定冷流道系統、澆口與四個模穴的配置，並藉由模流軟體之充填分析的模擬結果，確保射出過程中，喂料能夠均衡地充填到每一個模穴內，以及協助設置溢料井，其可改變產品縫合

線的位置，改善產品的品質與強度。為探討原 2D 水路對新設計的影響，也將原一模一穴 2D 水路修改為適用於一模四穴之型式，圖 2(a)為一模四穴之流道、產品與溢料井配置的關係，水路直徑仍為 8 mm，此一設計主要應用於模流分析，以便與隨形水路的設計進行比較。

本研究之產品成型時，中空圓柱之內部表面有深孔積熱的問題，此處之模具結構為細長之活動式模仁型芯，因其直徑之尺寸過小，且須有抽芯機構協助型芯先退出成型之產品，才能利用頂出機構順利地將產品頂出。因此，本研究於模仁型芯設計獨立之隔板式水路系統，其冷卻水路為直徑 5 mm，隔板厚度為 1 mm，隔板水路與距離剩餘模仁之厚度為 5 mm，圖 2(b)為配置原先設計之冷卻水路直徑 4 mm 之隨形水路，圖 2(c)為隨形水路與隔板水路結合的 CAD 模型圖。

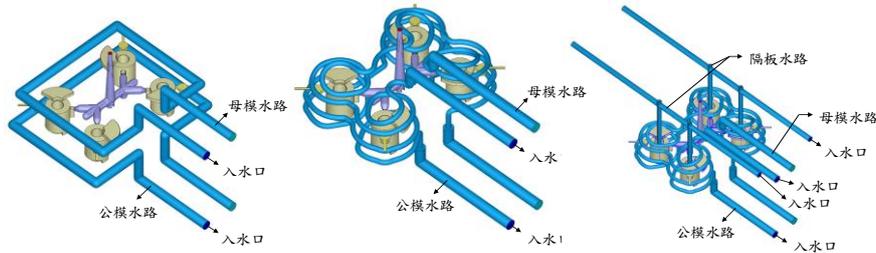


圖 2 一模四穴之三種水路設計，(a)2D 水路，(b)隨形水路、(c)隨形水路加隔板水路

## 2.2 模具實體網格建構與模流分析成型條件設置

### 2.2.1 實體網格建構

本研究使用模流分析軟體 Moldex3D Studio R17 版本[3]之內建網格生成工具，生成之網格為邊界層網格(Boundary Layer Mesh, BLM)，同時包含邊界層之三角柱網格(Prism)與內部之四面體網格(Tetrahedron)。本研究之分析需製作三個模具實體網格，分別為傳統 2D 水路模具、隨形水路模具以及隨形水路添加隔板式水路之模具。在流道、產品、溢料井皆使用邊界層實體網格(BLM)，其邊界層數為 5 層；模座皆使用四面體實體網格；水路的部分，傳統冷卻水路與隨形水路使用六面體實體網格(Hexahedron)與三角柱實體網格，隔板式水路因其幾何結構較複雜，則使用邊界層實體網格，其邊界層數為 5 層。表 1 左側為各種冷卻水路型式之產品、流道、溢料井、模座與冷卻水路之網格資訊，右側為體積資訊。

表 1 各種冷卻水路型式之產品、流道、溢料井、模座與冷卻水路之網格與體積資訊

冷卻水路型式	水路直徑 (D)	產品之實體網格數	流道之實體網格數	溢料井之實體網格數	模座之實體網格數	冷卻水路之實體網格數	冷卻水路型式	水路直徑 (D)	產品體積	流道體積	溢料井體積	模座體積	冷卻水路體積
傳統水路	8 mm	423779	85496	21166	373929	35584	傳統水路	8 mm	27.89 cm <sup>3</sup>	5.06 cm <sup>3</sup>	0.95 cm <sup>3</sup>	12282.3 cm <sup>3</sup>	58.76 cm <sup>3</sup>
隨形水路	4 mm	423370	85496	21139	718038	122226	隨形水路	4 mm					43.4 cm <sup>3</sup>
隨形水路 + 隔板水路	4 mm & 5 mm	426840	85496	21340	880437	363110	隨形水路 + 隔板水路	4 mm & 5 mm					66.84 cm <sup>3</sup>

### 2.2.2 成型材料與成型參數設定

本產品之金屬粉末原料為 Fe<sub>2</sub>Ni 合金鋼，喂料為廠商自行開發的配方，由蠟為主的蠟基黏結劑與 Fe<sub>2</sub>Ni 金屬粉末混煉而成，其中，金屬粉末與黏結劑之重量比為 93.8：6.2。為了解此喂料之性質，委託科盛科技進行材料量測，其主要量測內容為黏度曲線、PVT 曲線、比熱曲線以及熱傳導係數曲線，並將其量測資訊將製作為材料檔供模流分析軟體使用。

於 Moldex3D 的成型參數設定時，選擇之設定介面為機台模式，射出機台型號為 ARBURG 320C GOLDEN EDITION 500-170-30，可將目前使用之機台及成型參數直接導入模擬軟體。射出參數之設定主要區分為三個部分，分別為充填、保壓、冷卻。關於充填與保壓階段之參數

設定，使用 Moldex3D 之參數預設值，確保其模擬結果為滿射。充填與保壓階段的成型參數設定如下：喂料料溫為 168°C，模具溫度為 60°C，進料量為 44.8 cm<sup>3</sup>，射出速率為 65 cm<sup>3</sup>/sec，射出壓力之段數為 1 段，其設定值為 1400 bar，轉壓容量為 9.2 cm<sup>3</sup>，保壓壓力之段數為 4 段，其設定值為 400/200/200/50 bar，保壓時間為 1/1/1/0.5 sec。

關於冷卻階段參數設定，則依據廠商提供之相關參數進行設定，並使用暫態冷卻方式進行模擬分析，主要探討在不同時間點下產品與模具溫度變化之情形。冷卻階段的成型參數設定如下：初始模具溫度與環境溫度皆為 25°C，頂出溫度為 96°C，冷卻時間為 20 sec，開模時間為 34 sec，此模具之冷卻液為油，其溫度為 60°C，流率為 120 cm<sup>3</sup>/sec。

### 2.3 模流分析結果分析與討論

為證明所設計之冷卻水路能夠改善產品品質與冷卻效率，藉由三組不同的冷卻水路之設計來進行分析與比較，第一組為傳統 2D 水路之設計，稱為 Type1；第二組為隨形水路之設計，稱為 Type2；第三組為隨形水路加隔板水路之設計，稱為 Type3，以此三組的分析結果來比較，了解各式水冷水路之設計對於冷卻水路之冷卻液流動趨勢、模具之溫度變化、產品所需冷卻時間、產品溫度變化與產品品質的影響，以下就分析結果進行探討。

本研究所使用之喂料其建議頂出溫度為 96°C，故需使本產品之中心層各部分溫度皆低於 96°C 以下，才能將產品頂出，以確保頂出時產品強度能夠承受頂出之力量。根據模擬分析結果可得知 Type1 之產品冷卻至頂出時間為 21.820 sec；Type2 為 20.145 sec；Type3 為 12.678 sec。若以 Type1 為基礎來比較另外兩種水路型式設計，Type2 冷卻效率提高 7.68%，而 Type3 冷卻效率提高 41.90%。由結果可得知，因產品之特徵限制，使用 Type3 之水路設計對於整體產品之冷卻效果較優異，可有效地降低冷卻時間，並提高產品的生產率。

由產品冷卻至頂出溫度所需時間的分析結果，分別對於三種水路設計之冷卻時間 14 sec 時進行結果的探討，了解產品的溫度分布及變化歷程。根據圖 3 各式水路型式於冷卻時間 14 sec 之產品溫度分析結果，Type1 的產品溫度其內部高溫處為 108.1°C，其表面之溫度範圍為 64.5~101.9°C；Type2 的內部高溫處為 106.1°C，表面之溫度範圍為 61.9~100.3°C；Type3 的內部高溫處為 92.4°C，表面之溫度範圍為 61.5~75.1°C。可發現 Type3 之水路設計，已冷卻至喂料的頂出溫度(96°C)下，且其產品內部積熱處最少，有最佳的冷卻效果。

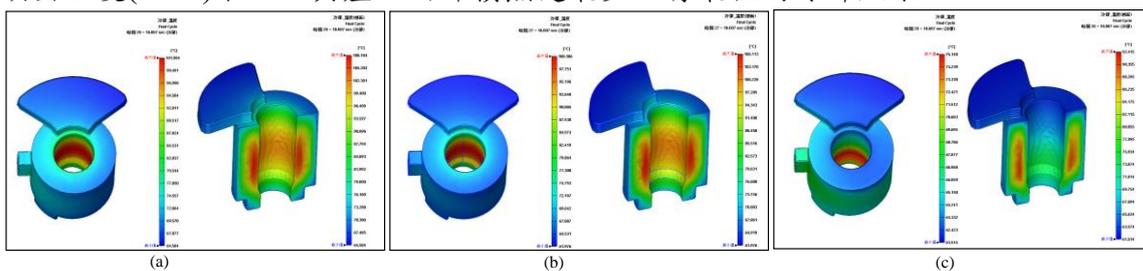


圖 3 各式水路型式於冷卻時間 14 sec 之產品溫度分析結果，(a)Type1，(b) Type2，(c) Type3

### 2.4 隨形水路模具設計與模仁製造

模具之模板型式採用二板模，每個模穴採用單點式側澆口，進行喂料之充填，以確保產品成型時，品質缺陷較少，圖 4(a)左圖為公模座之結構，右圖則為公模仁設計，相關脫模機構於圖上標示。公模仁尺寸為 150 mm × 140 mm，厚度為 35 mm，且參考原模具之設計，於合模面上四周設計虎口定位，以確保模具能夠精準地合模，預防射出成品出現錯位的缺陷。母模仁尺寸相同，厚度則為 20 mm，此處未顯示。為了將模穴內的空氣排出，保證喂料在充填過程中的正常流動，於兩個模仁的合模面各設計兩段排氣槽，第一段排氣槽與模穴相通，

第二段為半月型排氣槽，直接通至外部模板。其包含上固定板、母模板、公模板、間隔塊及公模背板。

隨形水路模仁的主要加工方式分為兩大部分，前段加工為金屬積層製造，後段加工為高精度之切削加工。隨形水路公母模仁前段的加工方式為金屬積層製造技術，由於金屬積層製造所得到的產物，其形狀、精度及表面粗糙度皆不好。因此本研究原始模仁之網格模型沿網格法向量向外偏置 0.5 mm，當作後續加工的預留量。模仁製造方式為金屬 3D 列印，使用之機器為 Sodick OPM250L，材料為不鏽鋼 SUS420J2，表 3-1 為金屬積層製造之加工參數。模仁積層製造完成後，則進行二次低溫回火之熱處理以消除內部的殘留應力，並使其增加強度與使用壽命，其硬度可達 HRC51 +/- 1，圖 4(b) 上圖為公模仁金屬積層製造之 CAD 模型，下圖則為金屬積層製後之模仁外觀，其表面仍過於粗糙。

隨形水路公母模仁後段的加工方式則為高精度之切削加工，以金屬底板導角側為加工的基準軸，首先針對模仁內部曲面處，使用放電加工方式進行鏡面加工，再利用 CNC 機台切削模仁的外圍整體尺寸及排氣槽的位置，最後利用線切割加工方式將模仁與金屬底板做切割分離，並將整體模仁進行拋光處理，以確保得到高加工精度的成型模仁。圖 4(c) 為高精度之切削加工後之公、母模仁外觀。

本研究所製作之 MIM 鎖類零件一模四穴模具，經過設計人員、合作廠商以及製造人員等多方共同討論，進行整體模具的加工製造，再將模具與各部零件組裝完畢，提供成型試模。

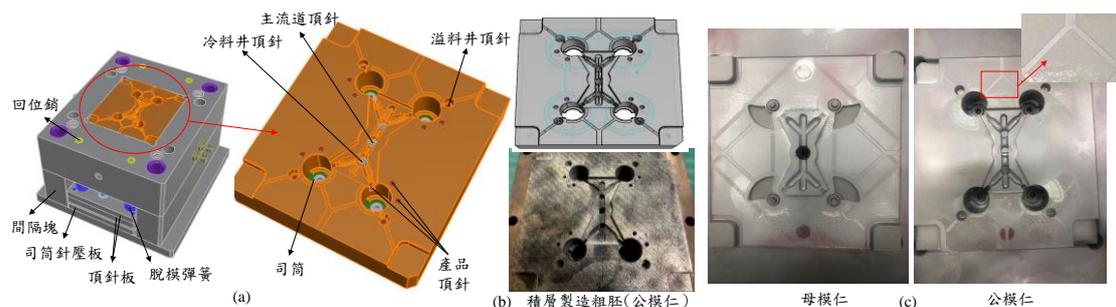


圖4 模具設計與製造，(a)公模座與模仁設計，(b)公模仁金屬積層製造粗胚，(c)公母模仁CNC二次加工成品

## 2.6 成型試驗與結果分析

成型試驗使用射出成型機為 Arburg 320C GOLDEN EDITION 500-170-30，採用液壓式控制，最大鎖模力為 500 kN，螺桿直徑為 30 mm，最大射出流率為 130 cm<sup>3</sup>/sec，最大射出壓力與最大保壓壓力為 200 MPa。使用之模具溫度控制機為架陞機械有限公司(JSM)所生產，使用的導熱媒介為油，模溫設為 50°C。喂料是由蠟為主的蠟基黏結劑與 Fe<sub>2</sub>Ni 金屬粉末混煉而成，為合作廠商自行開發的配方，其溫度設定為 195°C。

為探討本研究產品於模腔中之細部流動行為，先進行實際短射的實驗，後續則使用模流分析軟體 Moldex3D 依照相同射出參數進行模擬短射的流動趨勢，並將實際短射與模擬結果進行比對，驗證模流分析預測流動波前的精確性。短射實驗射出速度為 30 cm<sup>3</sup>/sec，射出壓力為 2 段，其設定值分別為 650 bar 與 857 bar，冷卻時間設定為 20 sec，VP 轉壓容量則在各次實驗中變動。短射實驗第 1~4 組為充填前期，於產品的中空圓柱體特徵處，實際射出與模擬結果有近似的趨勢；短射實驗第 5、6 組為充填後期，於產品的扇形特徵處，模擬的流動波前結果有開始稍微落後實際射出的趨勢；短射實驗第 7 組，由於模流分析軟體是透過網格進行數值運算分析，當喂料充填至模腔內的體積達到 100%時，軟體將會終止充填分析，故無法模擬喂料充填量過多的情況；而短射實驗第 8 組，最終充填完成的情況下，實際射出和模擬結果其整體流動趨勢相當近似，圖 5(a) 為四組射出成品與模擬結果之比較。

在滿射實驗中，主要透過成型參數的調整，了解喂料於模腔中成型時壓力變化的趨勢，最終改善產品的瑕疵，並獲得較佳的尺寸精度。射出參數設定的部分，主要的成型參數為充填階段與保壓階段，充填階段參數為：VP 轉壓容量，需找尋 VP 轉壓容量切換的理想時機，確保模腔內的壓力為穩定變化的狀態。保壓階段的成型參數為：保壓壓力與保壓時間，當保壓壓力太高或保壓時間太長時，則產品容易產生毛邊且有較高的殘餘應力；而當保壓壓力太低或保壓時間太短時，則產品容易發生收縮、凹痕等缺陷。於滿射實驗的過程中，總共實作 20 個組別，最終獲得無成型缺陷的生胚產品。滿射實驗的第 1 組，其前 2 段保壓壓力皆設定為 420 bar，導致產品扇形處為斷裂；滿射實驗的第 3~6 組，其主要對於豎流道斷裂的問題，將保壓壓力與保壓時間的成型參數進行調整，而成型缺陷依舊存在；滿射實驗的第 8~19 組，主要針對豎流道斷裂和產品內孔縮水的成型缺陷，找尋較佳的成型參數；滿射實驗的第 20 組，其成型參數設定為：VP 轉壓容量為 8.5、保壓壓力為 150/100/50/25 bar 與保壓時間為 0.3/0.5/0.3/0.2 sec，此組實驗的成型參數，經過三次的實際射出，其豎流道均為無斷裂，且四個模腔內的产品均無出現內孔縮水的情形，故於滿射實驗中，已獲得穩定的製程參數，圖 5(b) 為主要瑕疵的種類，圖 5(c) 為最終成行生胚的結果。

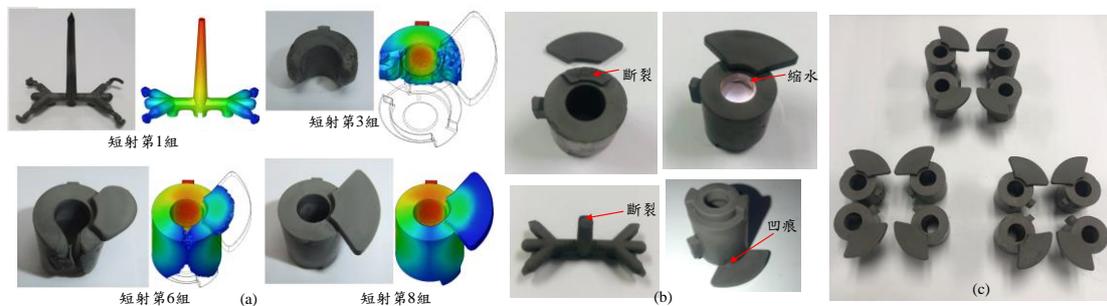


圖5 成型試驗結果，(a)四組短射實驗與模擬結果比較，(b)滿射實驗成品瑕疵，(c)成型生胚結果

### 3. 結論

本研究結合模流分析與金屬積層製造技術發展金屬粉末射出成型之隨形水路模具，主要在解決傳統 2D 水路模具在冷卻時，對模仁核心高溫處無法適度冷卻的問題。本研究之主要貢獻為，首先，應用模流分析進行水路之設計，設計一結合隨形與隔板之混和水路，冷卻階段最高溫處溫度可降低 15.7°C；其次，結合金屬積層製造與 CNC 二次加工進行模仁製作，證明經由此一製程模仁表面品質可符合精密模具之應用需求；最後，完成一模四穴模具之製造與成型試驗，證明此一模具在製程參數設定上更容易達到品質穩定的成品。

### 4. 誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST 108-2218-E-008 -005 之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。此外，感謝文生真空公司在模具設計與成型實驗對於本研究之協助。

### 5. 參考文獻

1. S. C. Hu and K. S. Hwang, *Powder Metallurgy*, Vol. 43, 2000, pp. 239-244.
2. F. H. Hsu, K. Wang, C. T. Huang, and R. Y. Chang, "Investigation on conformal cooling system design in injection moulding," *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 8, No. 2, 2013, pp. 107-115.
3. Moldex3D: <http://www.moldex3d.com/ch/>