

# 壓鑄模具隨形冷卻管路設計之研究

## Study on Design of Conformal Cooling Channels for Die Casting Molds

莊水旺\*、簡梓洋

Shueiwan H. Juang\*, Chien-Tzu Yang

先進製造工程研究中心 國立臺灣海洋大學

Engineering Research Center for Advanced Manufacturing Processes

National Taiwan Ocean University

\*E-mail: shjuang@mail.ntou.edu.tw

### 摘要

壓鑄製程主要是由熔湯充填、增壓、凝固與冷卻、鑄件取出等四個階段組成，其中凝固與冷卻階段是利用冷卻管路將熱能導出。傳統壓鑄模具大都使用直線式的冷卻管路設計，具有加工容易、製作快速和製作成本低等優點，但因鑄件幾何形狀複雜，使得管路與模腔表面的距離差異甚大，很難獲得穩定且均勻的冷卻效果，進而衍生模具與鑄件出現缺陷。

本研究選用一個實際壓鑄件做為研究案例，接著規劃串聯型及平行型的隨形冷卻管路路徑，選擇三種不同的管路形狀，分別為圓形、方形及長方形，入水口流速與水管長邊至模腔表面的距離不變。使用模擬軟體分析傳統冷卻管路與隨形冷卻管路的冷卻效果。

分析結果顯示，相較於傳統冷卻管路，隨形冷卻管路可獲得較為均勻的溫度分佈，冷卻水流速增加 35%、雷諾數提升 34%，模具溫度較傳統水路降低 10℃，達到提高鑄件的良品率、縮減生產週期及延長模具壽命的目標。

**關鍵詞：**隨形冷卻管路、直線冷卻管路、壓鑄模具、3D 列印。

### Abstract

The die-casting process is mainly composed of four stages: molten metal filling, pressurization, solidification and cooling, and casting ejection. The solidification and cooling stages use cooling channels to remove heat. Traditionally, most die casting molds use a drilled through cooling channels, having the advantages of easy machining, fast production and low making cost. Due to the complex geometry of the castings, the distance of cooling channels cannot from the surface of the mold cavity is quite different. So, it is difficult to obtain a stable and uniform cooling effect.

In this paper, a real die-casting part is selected as a research case, and then a series-type and parallel-type conformal cooling channels path is planned, and three different cooling channels shapes are designed, namely circular, square and rectangular. Its distance from the cavity surface does not change. Finally, the simulation software is used to analyze the cooling effect of the drilled through cooling channels and the conformal cooling channels.

The analysis results showed that, compared with the drilled through cooling channels, the conformal cooling channels can obtain a more uniform temperature distribution, the cooling water flow rate is increased by 35%, the Reynolds number is increased by 34%, and the mold temperature is even and 10℃ lower than that of the drilled through cooling channels, which can improve the yield of castings, shorten the production cycle and prolong the life of the mold.

**Keywords:** Conformal Cooling Channels, Normal Cooling Channels, Die-casting mold, 3D printing

## 1. 前言

壓鑄為一種利用模具對熔融金屬施加高壓，使熔湯以高速充填模腔後，接著冷卻與凝固過程，讓鑄件成形的一種金屬鑄造工藝。壓鑄製程主要分為充填、增壓、冷卻、脫模等四個階段，其中，冷卻階段為最重要的部分，冷卻不良會使模具內的熔湯溫度分布不均，甚至使鑄件產生缺陷，例如：短填、裂痕，並嚴重影響後續的製程，增加多餘的生產時間及成本。

為加速鑄件冷卻與凝固，通常在模具內配置冷卻管路，一般傳統的模具是採貫穿式的冷卻管路設計，此種冷卻管路加工容易，卻無法為模具與鑄件提供高效率地冷卻。當鑄件為不規則的幾何形狀時，貫穿式冷卻管路無法等距離地貼近模腔表面，導致鑄件的溫度不均勻；**小林竜之、早藤哲典、深見尚男**對不同管路的模具進行了比較，因刀具加工方式的限制，**圖1(a)**的兩條冷卻管路無法連結，導致虛線框處無法進行冷卻，並產生熱量的集中使零件衍生相關缺陷[1]。在種種不良的冷卻情況下，會增加冷卻時間、延長生產週期，零件產生缺陷時也需要增加後續的處理製程，進而花費多餘的成本。

隨著3D列印技術日新月異，成品的精度與日俱增，對壓鑄業而言，隨形冷卻管路的出現勢必也會為壓鑄生產帶來巨大的效益。3D列印技術以加法堆疊材料來製造，不會受到加工刀具的限制影響，隨形管路的模具，運用金屬3D列印的技術，可將**圖1(b)**的兩條管路連結起來，避免熱量的集中所造成的缺陷[1]，使零件的冷卻效果更好且更均勻，大大提升壓鑄生產的速度與確保零件的品質。

如何快速且有效地冷卻鑄件乃是壓鑄生產的重要課題之一，由於隨形冷卻管路具有更高的設計自由度，惟其需要考量的因素也隨之增加，例如：路徑規劃、管徑、管路間距、管路與模腔表面距離等。仔細考量變化參數之間的關聯性及其對冷卻效率的影響，才可滿足模具與鑄件所需之冷卻效果、模具強度的要求。本研究使用繪圖軟體Solidworks建構含隨形冷卻管路的模具模型，再以分析軟體FLOW-3D模擬不同冷卻媒介參數對鑄件冷卻效果的影響，以期建立隨形冷卻管路之設計準則。

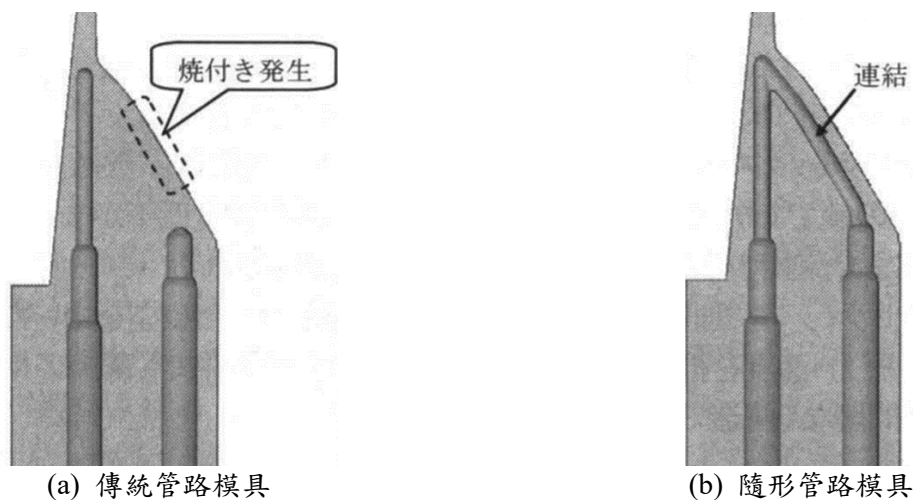


圖1 傳統水路與隨形水路模具 [1]

## 2. 隨形水路

### 2.1 隨形冷卻管路尺寸

冷卻管路的位置決定其冷卻效果與均勻性，若冷卻管路與鑄件的距離太近，將導致冷點的出現，同時也會造成冷卻不均勻；距離太遠，溫度較均勻，但效率較差，S. Mayer從DMLS的製造過程中，提出冷卻管路的設計參數建議值[2]，如圖2及表1所示。

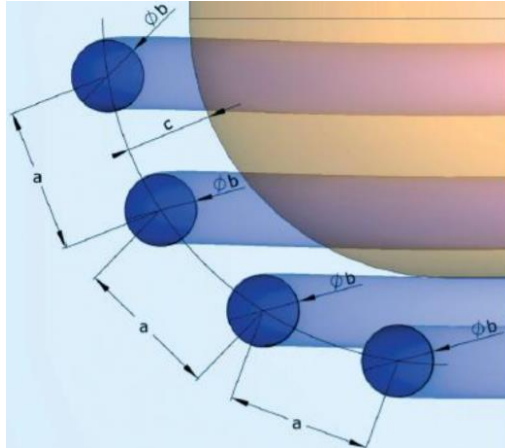


圖2 隨形冷卻管路的優化設計 [2]

表1 鑄件壁厚與冷卻管路設計參數 [2]

鑄件壁厚 [mm]	管徑, d [mm] (b)	冷卻管之間的中心距 離, P [mm] (a)	冷卻管中心到模腔表面 的距離, L [mm] (c)
0 - 2	4 - 8	$2d - 3d$	$1.5d - 2d$
2 - 4	8 - 12	$2d - 3d$	$1.5d - 2d$
4 - 8	12 - 14	$2d - 3d$	$1.5d - 2d$

### 2.2 隨形冷卻管路路徑

根據H.S. Park與N.H. Pham的研究，隨形冷卻管路有三種基本路徑設計 [3]，即串聯型、平行型、螺旋型，如圖3所示，分別說明如下。

圖3(a)表示串聯型冷卻管路，適合使用於尺寸較小的零件，但當零件的尺寸過大時，靠近冷卻管路入口及出口部位的鑄件會產生較大的溫度差，導致溫度不均。

圖3(b)表示平行型冷卻水路，由主要的冷卻管路進入歧管分支成數個小形冷卻管路後，平行分散在模具內。

圖3(c)表示螺旋型冷卻管路，一般使用於具有圓弧面或球形的零件。

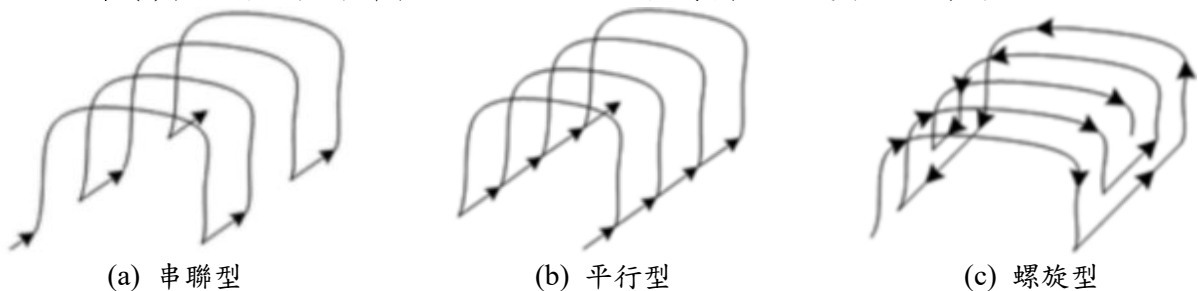


圖3 隨形冷卻管路的三種基本路徑 [3]

### 2.3 冷卻管路雷諾數

圖4顯示當水在流動狀態時會產生層流及紊流，層流為單一方向的流動，流動時的雷諾數小於2300；紊流為隨機方向的流動，流動時的雷諾數大於10000，紊流的熱傳效果會比層流還要好，熱傳效果的增加也能提高管路的冷卻效果，由式(1)計算冷卻水流動時的雷諾數。

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1)$$

$Re$  = 雷諾數

$\rho$  = 流體密度

$V$  = 流速

$D$  = 水管直徑

$\mu$  = 流體黏度

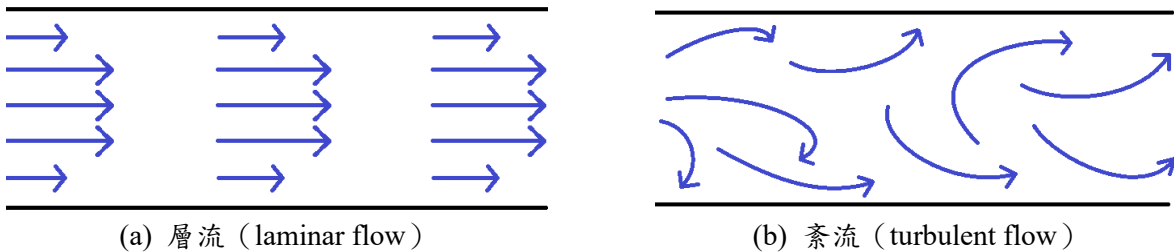


圖4 水流動時產生之層流及紊流示意圖。

表2 層流及紊流的雷諾數

流動狀態	雷諾數 $Re$
層流	$2300 < Re$
過渡流	$2300 < Re < 10000$
紊流	$10000 < Re$

### 2.4 隨形冷卻管路表面積

在壓鑄生產過程中，金屬熔湯帶入的熱量會傳給模具，再由冷卻管路吸收並排出模具。讓管路帶走最多熱量是水路設計的一大考量，式(2)用於計算從冷卻水管表面至冷卻介質的熱傳量，從式中得知水管表面積 $A$ 越大，水管與模具接觸的面積越大，水管的熱傳量 $Q_h$ 越多，從模具中吸收更多熱量，冷卻效果也會連帶提升。

$$Q_h = h \times A \times (T_w - T_c) \quad (2)$$

$Q_h$  = 熱傳量

$h$  = 熱傳係數

$A$  = 水管表面積

$T_w$  = 冷卻水管面的平均溫度

$T_c$  = 冷卻水的平均溫度

### 3. 實驗方法

本研究選用一個實際壓鑄件做為研究案例，如圖5所示。首先使用Solidworks建構不同設計的冷卻管路模型，以鋁合金ADC12作為熔湯材料，使用Flow-3D進行壓鑄冷卻階段的模擬，根據模擬的結果，分析不同設計水路對產品帶來何種變化，從中得出最佳的水路設計。

#### 3.1 鑄件資料

- 長：197.2 mm
- 寬：67.8 mm
- 高：261.1 mm
- 體積：229,067.5 mm<sup>3</sup>

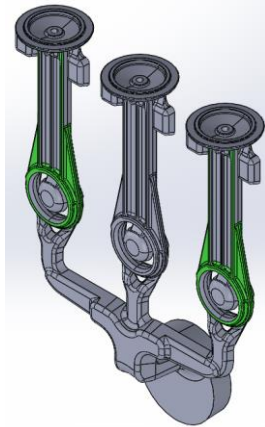


圖5 壓鑄件等角圖

#### 3.2 冷卻管路規格

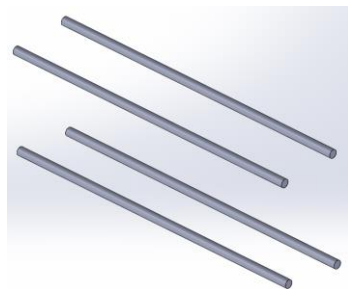
研究將以S. Mayer所提出的冷卻水路參數建議值及H.S. Park與N.H. Pham提出的水路路徑設計為基礎，設計出兩種路徑型式及三種管路截面的隨形冷卻水路，並與傳統水路進行冷卻分析的結果比較，觀察出不同冷卻管路對冷卻效果帶來何種影響。

##### 3.2.1 傳統冷卻管路 (Traditional Cooling Channels, TCC)

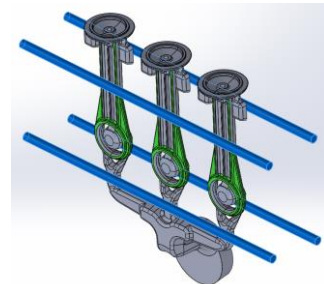
傳統水路的設計為原始模具配置的四條貫穿式管路，如圖6所示。

水路尺寸如下所示：

- 水管直徑：8 mm
- 水管中心與零件的距離：26 mm (母模側)、24 mm (公模側)
- 水管與水管之間的距離：11 mm (母模側)、10 mm (公模側)



(a) 傳統冷卻管路



(b) 傳統冷卻管路

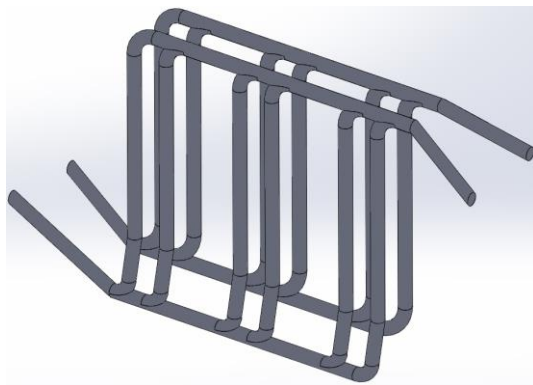
圖6 傳統冷卻管路 TCC

### 3.2.2 隨形冷卻水路1 (Conformal Cooling Channels 1, CCC1)

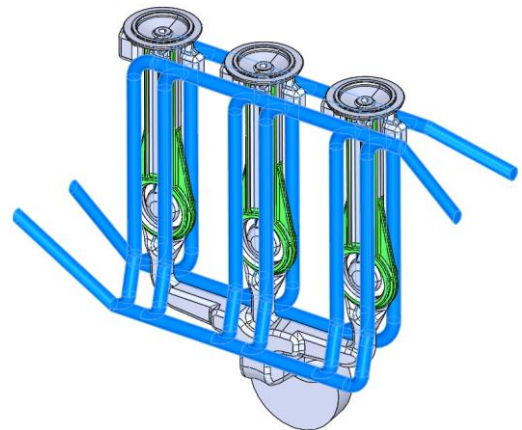
CCC1的設計為平行型的冷卻管路，配置於零件的兩側，由一條主管路進水後，分支成六條支歧管，再匯集於一條主管路排出模具，如圖7所示。

水路尺寸如下所示：

- 水管直徑：8 mm
- 水管與水管之間的距離：11 mm (母模側)、10 mm (公模側)
- 水管中心與零件的距離：26 mm (母模側)、24 mm (公模側)



(a) 隨形冷卻水路1



(b) 隨形冷卻水路1

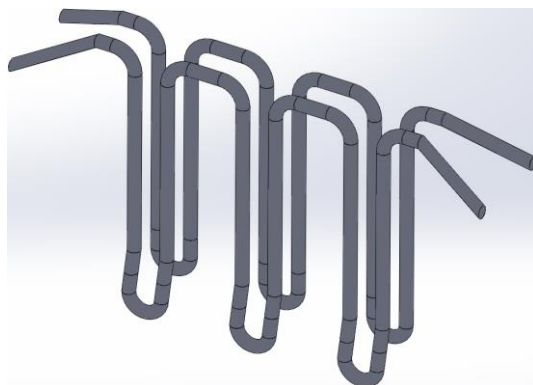
圖7 隨形冷卻水路1 CCC1

### 3.2.3 隨形冷卻水路2 (Conformal Cooling Channels 2, CCC2)

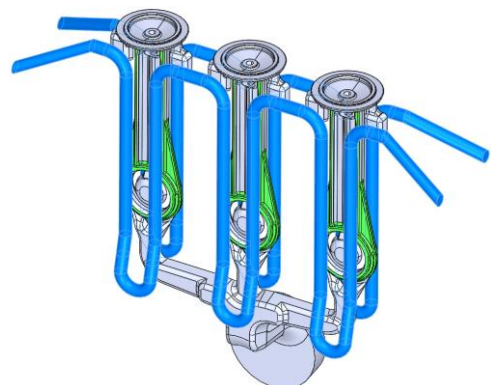
CCC2的設計為串聯型的冷卻水路，配置於零件的兩側，如圖8所示。

水路尺寸如下所示：

- 水管直徑：8 mm
- 水管與水管之間的距離：13 mm
- 水管與鑄件的距離：10 mm



(a) 隨形冷卻水路2



(b) 隨形冷卻水路2

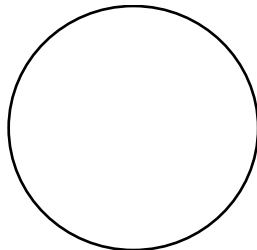
圖8 隨形冷卻水路2 CCC2

### 3.2.4不同的冷卻管路形狀

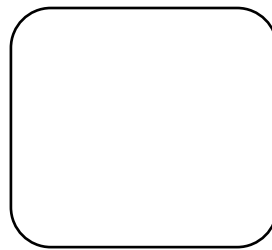
根據式(2)，增加表面積會增加水路的熱傳量，研究中以三種不同的形狀來設計CCC2的串聯型冷卻管路，分別為一般常見的圓形水管、方形及矩形，尺寸均已8 mm為主，如圖9所示，圓形水管的表面積為三者中最小，再進行冷卻分析及比較彼此之間的差異及分析結果。

水管截面尺寸如下：

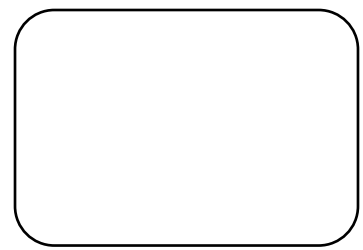
- 圓形水管直徑：8 mm
- 表面積：59755 mm<sup>2</sup>
- 方形水管邊長：8 mm
- 表面積：67848 mm<sup>2</sup>
- 矩形水管長：12 mm
- 矩形水管寬：8 mm
- 表面積：88039 mm<sup>2</sup>



(a) 圓形管路截面



(b) 方形管路截面



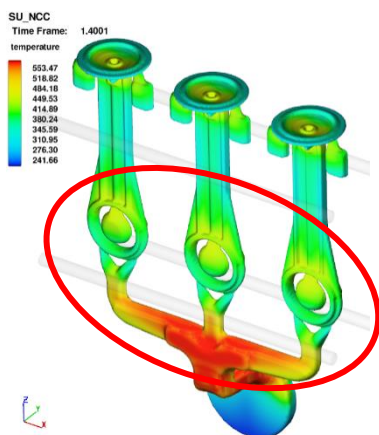
(c) 矩形管路截面

圖9 三種管路形狀

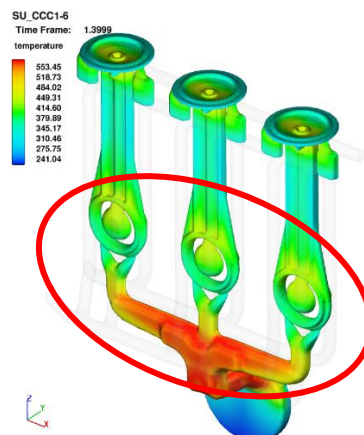
## 4. 結果與討論

### 4.1 鑄件溫度

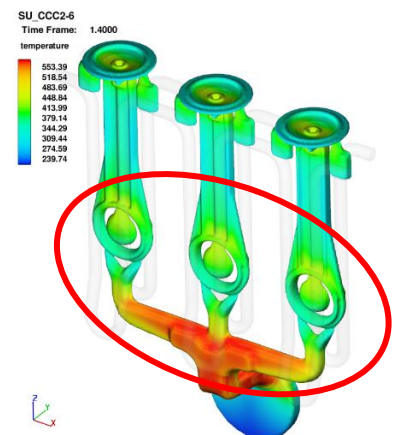
圖10表示三種冷卻管路的鑄件溫度分析結果，當冷卻時間約1.4秒時，NCC的鑄件溫度為241.7 ~ 553.5°C，CCC1的鑄件溫度為241.0 ~ 553.5°C，CCC2的鑄件溫度為239.7 ~ 553.4°C，可觀察出三者的鑄件溫度非常接近，但CCC2零件區域的溫度最均勻，紅色圓圈處的溫度明顯比NCC與CCC1低。



(a) TCC



(b) CCC1



(c) CCC2

圖10 鑄件溫度

## 4.2 冷卻水流速

圖11表示三種冷卻管路的冷卻水流速分析結果，流速越快冷卻效果越好。當冷卻時間約1.4秒時，TCC的冷卻水流速最高為2.03 m/s，CCC1的冷卻水流速最高為2.38 m/s，CCC2的冷卻水流速最高為2.73 m/s，可觀察出CCC2的冷卻水流速最高，而CCC1的冷卻水無法進入及排出歧管，導致部分歧管內的冷卻水呈靜止狀態，無法將熱量排出模具。

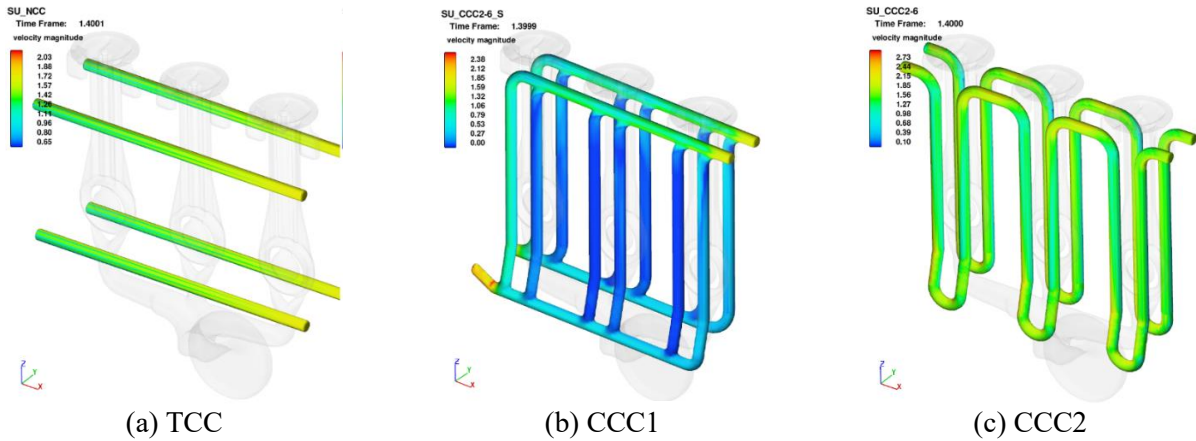


圖11 冷卻水流速

## 4.3 冷卻水雷諾數

表3表示三種冷卻管路的冷卻水雷諾數之計算結果，雷諾數越高，冷卻效果越好，通過式(1)計算出冷卻水在管路內流動時的雷諾數，當冷卻時間約1.4秒時，可得知TCC的冷卻水雷諾數為20294，CCC1的冷卻水雷諾數為23794，CCC2的冷卻水雷諾數為27293，三者的冷卻水皆有達到紊流狀態，且CCC2的冷卻水雷諾數最高，冷卻效果最佳。

表3 冷卻水雷諾數

	TCC	CCC1	CCC2
雷諾數 ( $Re$ )	20294	23794	27293

## 4.4 模具溫度

圖12表示三種冷卻管路的模具溫度分析結果，模具的溫差衍生模具熱應力，降低模具的壽命。當冷卻時間約1.4秒時，TCC的模具溫差為365.7°C，CCC1的模具溫差為366.6°C，CCC2的模具溫差為355.8°C，可觀察出兩種隨形管路的模具溫度都比傳統管路低，CCC2的模具溫差則比NCC降低了約10°C。

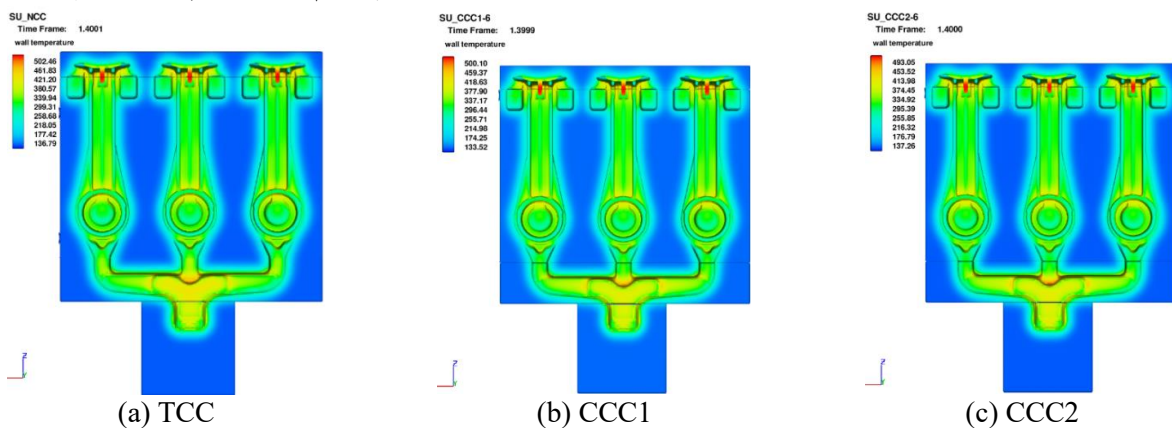


圖12 模具溫度



#### 4.5 冷卻管路截面

表4表示將CCC2的管路形狀更改為方形及矩形後的分模流分析及計算結果，三者的零件溫度非常接近，約239.6℃，但可觀察出方形水管的零件溫度最均勻，冷卻水的流速為矩形管路最快，約3.1 m/s，冷卻水的雷諾數也是矩形管路最高，約42136，模具溫度為矩形管路最低，約124.8℃，但高低溫差也是三者最高。

表4 水管表面積差異

	圓形管路	方形管路	矩形管路
零件最低溫度 (°C)	239.7	239.6	239.6
冷卻水流速 (m/s)	2.7	3.0	3.1
冷卻水雷諾數 ( <i>Re</i> )	27293	33729	42136
模具最低溫度 (°C)	137.3	134.6	124.8

### 5. 結論

本研究對隨形冷卻管路進行深層的探討，實驗可得知不同的冷卻管路設計帶來的影響，隨形管路擁有更均勻的冷卻效果，CCC1因管路的設計不良導致分支的歧管作用有限，無法獲得良好的冷卻效果，CCC2的冷卻水流速比傳統水路增加了35%、雷諾數提升了34%、模具的最高溫降低了約10℃；改變管路的形狀增加吸收熱量的面積經分析結果可得知，相較於普遍使用的圓形管路，方形的管路可獲得更均勻的冷卻效果，矩形的冷卻管路的冷卻水流速增加了15%、雷諾數提升了54%、模具溫度則降低了9%。

隨形水路可以顯著提高鑄件的品質、降低生產成本，並延長模具的使用壽命，增加管路表面積也可增加冷卻效果。相較於傳統冷卻管路，清楚知道隨形冷卻管路帶來的效果，如何正確的設計水路相當重要，不良的設計也會導致冷卻效果變差，另外，冷卻管路的尺寸必須經過仔細地計算，方能設計具有均勻冷卻效果的冷卻管路。

儘管金屬3D列印技術尚未普及，尺寸精度仍有待改善，金屬粉末的高額成本，模具列印的時間過長等，均為目前亟待克服的問題，相信在產、學等集力研究下，隨形冷卻管路的設計理論逐漸成熟後，不遠的將來即可克服這些技術困難，應用在壓鑄產業是指日可待。

### 6. 參考文獻

1. 小林竜之，早藤哲典，深見尚男，2018. ダイカスト金型における三次元冷却回路の実用化，アイシン精機側(株)。
2. S. Mayer, “Optimised mould temperature control procedure using DMLS,” EOS GmbH.
3. H.S. Park, N.H. Pham, 2009, “Design of Conformal Cooling Channels for An Automotive Part,” School of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea.