

國立高雄應用科技大學
模具工程系碩士班
碩士論文

楔形導光板冷卻水路最佳化
配置之研究

**Optimization of Cooling Channel Lay-out for
Wedge-Shaped Light Guide Plate**

研究生：謝一帆

指導教授：黃俊欽 教授

中華民國一百年七月

楔形導光板冷卻水路最佳化配置之研究

Optimization of Cooling Channel Lay-out for Wedge-Shaped Light Guide
Plate

研究生：謝一帆

指導教授：黃俊欽 教授

國立高雄應用科技大學
模具工程系碩士班
碩士論文

A Thesis

Submitted to

Institute of Mold and Die Engineering
National Kaohsiung University of Applied Sciences
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering
in
Mold and Die Engineering

July 2011

Kaohsiung, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

博碩士論文電子檔案上網授權書

(填妥列印紙本一份簽署後，請裝訂於紙本論文書名頁之次頁)

本授權書所授權之論文為授權人在 國立高雄應用科技大學 模具工程系 不分組 99 學年度第二學期取得 碩士學位之論文。

論文題目：楔形導光板冷卻水路最佳化配置之研究

指導教授：黃俊欽

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要)，非專屬、無償授權國家圖書館及本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

- 讀者基非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：謝一帆

簽名：

謝一帆

中華民國 100 年 07 月 24 日

指導教授簽名：

黃俊欽

楔形導光板冷卻水路最佳化配置之研究

研究生：謝一帆

指導教授：黃俊欽 教授

國立高雄應用科技大學模具工程系碩士班

摘要

在射出成形過程中，冷卻階段的時間約占 50~70%，是影響生產效率最重要的關鍵。目前射出成形模具的冷卻水路設計，一般都依賴設計人員的工作經驗或是使用經驗法則設計原則，搭配試誤法的程序來設計冷卻水路，經由多次反覆的測試雖然能找出符合設計的需求，但卻有降低模具強度與因加工或修模之往返而造成閒置時間過多的缺點，尤其對於厚度不均的產品更是無法保證得到最佳的冷卻效果。

近年來由於電腦輔助工程分析技術(CAE)已被廣泛應用於各種產業領域，有助於改善產品與模具設計，可以使工程師於開模前即可得知產品或模具設計不良之處，並加以改善以縮短修模時間，本研究以一 3C 產業之 14 吋楔形導光板為例，使用材料為光學級壓克力(PMMA)，厚度為 0.54mm~1.36mm 之肉厚不均產品，以射出成形冷卻理論計算公式為基礎，以模具強度與均勻冷卻為限制條件，進行冷卻水路排列之最佳化設計，在使用既定的模具與不更改製程參數之原則下，使用最佳化之水路排列設計可以讓厚度不均之產品達到最短冷卻時間之目的，最後搭配 CAE 模流分析軟體 Moldflow 分析以驗證計算結果，期望可以以縮短生產週期為前提，得到肉厚不均產品於射出成形模具冷卻水路最佳化之配置方法，提供設計者不同的冷卻水路設計選擇，達到提高冷卻水路的設計效率，進而提升產品品質與降低成本耗費，增加經濟效益。

本研究結合了理論公式與 CAE 分析發展了一套水路最佳化排列流程，利用水路的排列、流量的控制以及不同區域溫度的改變，可以把冷卻時間大幅度的縮短，且可以滿足成形品於頂出時的溫度均勻，以本實驗之楔形導光板為例，原本需要冷卻時間為 50.09 秒，經過最佳化流程排列水路之後可以縮短至 28.46 秒，且翹曲量可以由 1.43mm 縮減至 0.51mm，若是搭配不同區域溫度改變的形式，雖然變形量些微增加至 1.65mm，但卻可以將冷卻時間縮短至 7.98 秒。

關鍵字：射出成形、楔形導光板、冷卻水路配置、最佳化



Optimization of Cooling Channel Lay-out for Wedge-Shaped Light Guide Plate

Student : Yi-Fan Hsieh

Advisors : Dr. Chung-Ching Huang

Institute of Mold and Die Engineering
National Kaohsiung University of Applied Sciences

ABSTRACT

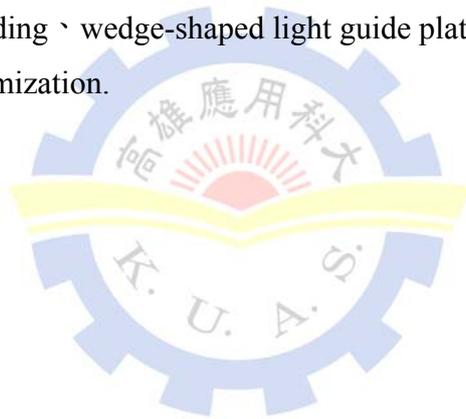
In the injection molding process, the time for cooling stage is about 50 ~ 70% of the cycle time, which is the impact of the most important key to productivity. The current cooling channels design of injection molding, designers usually depends experience rules or design principles with trial and error method to design the cooling channels layout, Although test again can find out the design requirements, but it will be make mold strength lower and spend too much idle time of wait mold repair. Especially for varying thickness product is no guarantee that the best cooling effect.

In recent years, as computer-aided engineering analysis (CAE) has been widely used in various industrial fields, help to improve the product and mold design. Let engineers to know where the poorly design in product or mold, help to shorten repair mold time and idle time. This study use a 14 inches wedge-shaped light guide plate, materials is optical grade acrylic (PMMA), and have varying thickness of 0.54mm ~ 1.36mm. Use based on the injection molding cooling theoretical formula, with the boundary conditions of mold strength and uniform cooling to find the optimal design of the cooling channels lay-out. In determine mold, use the optimization of cooling channels design can make the varying thickness products to achieve the purpose of the shortest cooling time without change any restructuring process parameters. Finally, use the computer-aided engineering analysis software(Moldflow) to verify results. Hope to shorten the production cycle as the goal, find the optimization cooling channels design method for varying thickness products in the injection molding. Provide designers different Cooling channels design options to improve the design efficiency of the

cooling channels and then improve product quality and reduce costs, increase economic benefits.

This study combines the theoretical formula and the CAE analysis to development of a optimization cooling channels lay-out process. It is can significantly shorten the cooling time and meet the temperature uniformity by channels layout, flow control, and temperature changes in different regions. This research with a 14 inches wedge-shaped light guide plate original needs 50.09s to cooling but optimized arrangement of cooling channels can be reduced to 28.46s after. Warpage can be reduced from 0.51mm to 1.43mm. If the temperature changes with the form of different regions, although the warpage increased to 1.65mm, but the cooling time can be shortened to 7.98 seconds.

Keywords: injection molding 、 wedge-shaped light guide plate 、 cooling channels lay-out 、 optimization.



誌謝

論文順利完成，由衷感謝指導教授 黃俊欽教授在研究所期間不斷的栽培與細心指導，無時無刻指導我正確的學習與思考方向，並培養獨立研究的能力，除了授予豐富的專業知識外，亦提供豐富的資源及良好的學習環境以供學習，使學生在研究所期間有著充實的生活，獲益良多，在此致上最高的敬意與謝意。

此外特別感謝口試委員王珉玟教授、鐘文仁教授、黃聖杰教授與李輝煌教授於口試期間給予專業的建議與指導，增加學生見聞，使論文能夠更加完善。

在研究期間，感謝成功及易庭在論文上大大的幫忙，學長耀竣、威珽、坤霖、裕峰、君達，同窗好友宏偉、鈺鈞、試閔、乙玄，學弟宗模、易承、文旺、晨鋒在學業的互相砥礪與協助，以及許許多的朋友們在精神上的支持與鼓勵，有你們的幫忙及陪伴，使我在研究所這兩年的生活顯得更加多采多姿，謝謝你們。

最後，僅將本文獻給我最摯愛的父母、家人與美秦，感謝你們在我求學期間的關心與鼓勵，你們的支持是我努力前進最大的動力，讓我可以無後顧之憂地完成學業，謝謝你們。



目錄

摘要	i
ABSTRACT	iii
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	ix
符號說明	xii
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 導光板簡介	2
1.3 研究動機	3
1.4 文獻回顧	4
1.5 論文架構	5
第二章 射出成形與模具冷卻系統基本原理	11
2.1 射出成形	11
2.2 冷卻系統對於射出成形的重要性	12
2.3 模具冷卻水路設計考慮事項	13
2.4 影響冷卻時間的因素	16
第三章 基本假設與研究方法	26
3.1 基本假設	26
3.2 研究方法-冷卻時間計算公式	26
3.3 熱傳導之幾何形狀因子	29
第四章 設計規劃與分析	35
4.1 成形品外形、模座與水路數目確認	35
4.2 成形材料	36
4.3 產品依厚度分級	36
4.4 模具變形量上限(f_{max})	37
4.5 研究規劃執行步驟	38

4.6 冷卻時間之定義	39
4.7 理論公式與 CAE 分析求冷卻時間	40
第五章 結果與討論	49
5.1 平板形與楔形導光板之冷卻時間差異性	49
5.2 縮短冷卻時間的有效方法	50
5.3 單變數對冷卻時間的影響	50
5.4 最佳化水路排列與經驗法則之 CAE 分析比較	51
5.5 改變整體水路溫度對冷卻時間之影響	52
5.6 改變冷卻液流速對冷卻時間之影響	53
5.7 搭配不同水路溫度對冷卻時間之影響	53
第六章 結論	79
6.1 結論	79
6.2 未來展望	80
參考文獻	81
附錄 1、MALAB 計算程式碼	83



表目錄

表 1-1 導光板組件功能.....	7
表 1-2 楔形與平板形導光板的比較.....	7
表 2-1 產品平均厚度與水路管徑對照表[28]	18
表 2-2 冷卻液的流動方式與相對的雷諾數(Re)範圍[28]	18
表 4-1 冷卻水路位置尺寸對應表.....	41
表 5-1 水路最佳化排列與經驗法則排列對冷卻時間及變形量之比較.....	55
表 5-2 改變參數對冷卻時間及變形量之影響.....	55



圖目錄

圖 1-1 全球 FPD 產業產值[1].....	8
圖 1-2 台灣與其他國家平面顯示器產能佔有率比較[2]	8
圖 1-3 背光模組結構展開圖.....	9
圖 1-4 導光板的應用.....	9
圖 1-5 模具表面溫差對產品造成扭曲或翹曲影響[9]	10
圖 1-6 T 形成形品包含四支冷卻水路的模具架構[13].....	10
圖 2-1 射出成形流程示意圖.....	19
圖 2-2 射出成形冷卻系統示意圖.....	20
圖 2-3 模具冷卻週期與射出成形循環週期關係圖.....	20
圖 2-4 均勻及非均勻冷卻對產品冷卻時間與翹曲之影響 [28]	21
圖 2-5 簡易模具冷卻系統架構圖.....	21
圖 2-6 冷卻水路位置示意圖.....	22
圖 2-7 鑽孔冷卻法[28]	22
圖 2-8 溝槽冷卻法[28]	23
圖 2-9 套管冷卻法[28]	23
圖 2-10 隔板冷卻法[28]	24
圖 2-11 間接冷卻法[28]	24
圖 2-12 水路排列方式(並聯法).....	25
圖 2-13 水路排列方式(串聯法).....	25
圖 3-1 成形品邊界條件.....	32
圖 3-2 模具熱量傳遞方式.....	32
圖 3-3 模具熱量平衡圖.....	33
圖 3-4 單向熱流曲線分析元素圖.....	33
圖 3-5 熱傳導之幾何形狀因子.....	34
圖 4-1 設計流程圖.....	43
圖 4-2 本研究產品尺寸示意圖.....	45
圖 4-3 本研究模座選用示意圖.....	45
圖 4-4 本例原始水路配置圖.....	46

圖 4-5 本研究案例成形品區分示意圖.....	46
圖 4-6 代號參照圖.....	47
圖 4-7 成形品厚度方向溫度曲線圖.....	47
圖 4-8 厚度中心層之溫度隨時間之變化(CAE 分析).....	48
圖 4-9 厚度中心層之溫度隨時間之變化(公式計算).....	48
圖 5-1 均勻厚度 0.54mm 中心層之溫度隨時間之變化.....	56
圖 5-2 均勻厚度 1.36mm 中心層之溫度隨時間之變化.....	56
圖 5-3 厚度不均 0.54mm~1.36mm 中心層之溫度隨時間之變化.....	57
圖 5-4 型式一水路排列關係圖.....	57
圖 5-5 產品厚度與冷卻時間關係圖.....	58
圖 5-6 冷卻水路管徑間距與冷卻時間關係圖.....	58
圖 5-7 冷卻水路至模穴距離與冷卻時間關係圖.....	59
圖 5-8 冷卻液溫度與冷卻時間關係圖.....	59
圖 5-9 冷卻液雷諾數(Re)與冷卻時間關係圖.....	60
圖 5-10 水路間距 20mm 時水路排列關係圖.....	60
圖 5-11 水路間距 30mm 時水路排列關係圖.....	61
圖 5-12 水路間距 40mm 時水路排列關係圖.....	61
圖 5-13 水路間距 50mm 時水路排列關係圖.....	62
圖 5-14 不同厚度取樣示意圖.....	62
圖 5-15 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(型式一).....	63
圖 5-16 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式一排列).....	63
圖 5-17 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 20mm).....	64
圖 5-18 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 30mm).....	64
圖 5-19 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 40mm).....	65
圖 5-20 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 50mm).....	65
圖 5-21 坐標軸示意圖.....	66
圖 5-22 成形品厚度斷面圖(特徵尺寸放大 10 倍).....	66
圖 5-23 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 50°C).....	67
圖 5-24 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 60°C).....	67

圖 5- 25 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 70°C)	68
圖 5- 26 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 80°C)	68
圖 5- 27 型式三改變冷卻液流速與冷卻時間關係圖	69
圖 5- 28 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 8000)	69
圖 5- 29 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 6000)	70
圖 5- 30 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 4000)	70
圖 5- 31 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 2300)	71
圖 5- 32 兩區水路溫度調變圖	71
圖 5- 33 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(兩區水路溫度)	72
圖 5- 34 三區水路溫度調變圖	72
圖 5- 35 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(三區水路溫度)	73
圖 5- 36 分區水溫排列示意圖	73
圖 5- 37 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(40°C/80°C分區排列)	74
圖 5- 38 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(50°C/80°C分區排列)	74
圖 5- 39 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(60°C/80°C分區排列)	75
圖 5- 40 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(70°C/80°C分區排列)	75
圖 5- 41 型式三搭配分區水路溫度與冷卻時間關係圖	76
圖 5- 42 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(40°C/80°C分區排列)	76
圖 5- 43 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(50°C/80°C分區排列)	77
圖 5- 44 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(60°C/80°C分區排列)	77
圖 5- 45 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(70°C/80°C分區排列)	78

符號說明

$C_p = C_p(T)$: 塑膠比容

ρ : 塑膠密度

k : 塑膠熱傳導係數

$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$: 分別代表成形品之三個傳熱方向

a : 塑膠熱擴散係數

t_k : 冷卻時間

T_M : 熔膠溫度

T_w : 模穴表面溫度

T_E : 脫模溫度

S : 成形品平均厚度

π : 圓周率

Q_{ab} : 熔膠傳導到冷卻水路中心之熱量

Q_w : 在冷卻時間內(t_k)從冷卻液中所帶走的熱量 C_{ps}

C_{ps} : 熔膠比熱

im : 熔化潛熱

Q_m : 熔膠密度

X : 冷卻水路之管路間距

λ_{st} : 模具熱傳導係數

S_e : 熱傳導形狀因子

R_e : 雷諾數

α : 冷卻水之熱擴散係數

T_i : 內側溫度

T_o : 外側溫度

$\frac{q_n}{L}$: 單位管長之熱傳率

L : 管之長度

q_n : 通過一熱流線之熱傳率

q_o : 為系統的熱傳率

N : 為系統的徑向熱流



K ：塑膠熱傳導係數

M ：曲線正方形個數

d ：為冷卻管直徑

Y ：冷卻水路中心與成形品表面之距離

$T_{w(max)}$ ：模穴表面溫度上限

H ：模板厚度

μ ：冷卻液動態黏性

v ：冷卻液流速

P ：成形壓力

E ：模具彈性係數

G ：模具剪切係數

f_{max} ：模具因水路排列而產生之最大變形量

A_e ：成形品總熱傳面積

A_c ：有效水管長度之總表面積



第一章 緒論

1.1 前言

在塑膠材料發展之前，大部份工業材料還是以金屬材料為主，十九世紀之後隨著科技潮流發展各種塑膠原料至今，近年來工程塑膠的開發成功，加上塑膠材料成本低、重量輕、成形性質佳、可大量生產、且可回收再利用的特性，使塑膠製品隨處可見，成爲生活中最普遍的產品，從各種產業設備之機械裝置及其零配件，到食、衣、住、行各方面，塑膠製品不勝枚舉並廣泛的被運用，且有日益增加之趨勢。

對於消費者而言，輕、薄、短小、多功能，一直是3C產業的發展目標，在所有科技產業爲了迎合需求以及不斷的開發創新情況下，產品的設計也幾乎已經朝著多元化設計方向發展，然而在多元化的高性能產品不斷推陳出新之下，產品設計往往伴隨著高成本以及冗長的研發與製程時間，因此如何提高生產力、確保產品品質、及降低成本將成爲未來設計產品的重點所在。

由於射出成形可以大量複製、生產週期短，可以一次成形多個複雜形狀的產品，因此已成爲目前塑膠產業中最廣泛被應用的加工技術，其應用範圍涵蓋了電子工業、家電工業、汽車工業、光電儀器產業乃至於航太業等，而其成品品質的優劣有賴於良好的模具設計與製程技術的互相配合；一個最佳的冷卻系統設計與冷卻過程操作條件對於射出成形製程是非常重要的[1]，因它們同時影響成形品的品質與製程的生產效率，有效率的冷卻系統可以改善成形品的不良收縮、翹曲變形與殘留應力等缺陷，因此一個最佳化的冷卻系統設計必需要能達到最短的冷卻時間與均勻冷卻等目標。

過去的塑膠射出成形產品大部分都以使用功能爲導向，因此在厚度設計與變化上較爲單純，在成形方面的問題藉著工程師或是現場師傅憑藉著多年的經驗都可以順利解決，但仍必須等到模具製作完成，試模之後才能發現問題；隨著電腦迅速蓬勃發展，電腦輔助工程分析(Computer-Aided Engineering, CAE)已經有長足的進展，因此在製程設計可以省去猜測與試誤工作的時間，電腦輔助工程分析軟體融合材料商所提供詳細的材料特性，並配合不同製程參數、模具設計進行模擬分析，幫助工程師在設計階段準確的預測與分析，發現問題點與產生原因，結合豐富的現場經驗進行設計變更之後，能更有效率的預知設計缺陷方向並解決問題，

即使多次修改也不會造成任何製程設備及成本的損耗，也縮短了產品開發的時間，有效的降低成本與增加利潤。

電腦輔助工程分析技術發展完備，近年來隨著產品形狀多元化的需求，產品外形也日漸複雜，若是只仰賴設計者的經驗或是傳統水路設計原則來安排冷卻水路的配置，對於幾何形狀複雜與肉厚變化性高的產品其速度場、溫度場、壓力場的變化更是複雜，尤其對於高精密度的射出成形產品或是光學產品，必須要有更加精密的限制考量，因此若是繼續依照經驗與傳統規則來設計冷卻水路的配置位置，似乎已經越來越不可靠，由於肉厚不均的產品，常常在冷卻時造成產品的冷卻不均，而冷卻不均又伴隨著因為溫度的差異影響而使產品收縮不均產生翹曲，造成業界為了降低翹曲量而使產品滯留於模具內，待穩定後才取出成形品的情況，因而使生產週期拉長。

因此本論文以一3C產業常見之肉厚不均楔形導光板為例，使用整合電腦輔助工程分析軟體－Moldflow 模流分析軟體，配合冷卻理論公式尋找最佳冷卻水路配置方法，提供設計者一種有效率的冷卻水路配置參考，進而縮短製程時間與降低資源及成本的耗費。

1.2 導光板簡介

平面顯示器(Flat Panel Display,FPD)產業是近年來最令人矚目的產業，根據全球知名顯示器產業研究單位Display Search的調查，全球FPD產值將於 2015 年達到 1 千 4 百億美金，如圖 1- 1所示。另外在 2007 年台灣平面顯示器產業的產值已達到 350 億美金，已經成為全世界最大的平面顯示器及關鍵零組件的主要生產國，且產能已經達到全世界的 45%高於其他兩個主要生產地區日本與韓國，同時是下游應用產品採購面板最主要的來源，如圖 1-2 所示[2]。

背光模組(Backlight Module)是整個顯示器光源亮度的來源組件，由於液晶顯示器本身不發光，必須藉由外部裝置提供光源，一般皆使用背光模組提供液晶面板光線來源，基本原理是把線光源或點光源，透過導光板將有效光轉化成高亮度且均勻性良好的面光源。背光模組主要由發光源、導光板、反射板、擴散片、增亮膜及外框所組成構造，如圖 1-3 所示，組件功能如表 1-1 所示。

導光板為將點或線光源引導成平面光源的零組件，其厚度佔背光模組總厚度

的 50%以上，成本約佔背光模組總成本的 17%，導光板一般使用的塑料為壓克力 (PMMA)、聚碳酸樹脂(PC)或是新世代工程塑膠環烯烴共聚合物(COC)，大型尺寸之導光板目前以 PMMA 為主要材料，中小尺寸則為 PC，應用範圍包括數位相機、液晶投影機、高階筆記型電腦、液晶顯示器等高階產品，如圖 1-4 所示，平板式導光板之背光模組一般適用在桌上型電腦、監視器等大尺寸產品；而楔形導光板之背光模組，一般適用在筆記型電腦、手機、PDA 等需輕薄化的產品上，楔形導光板與平板形導光板之技術需求，如表 1-2 所示；導光板作用原理是在平面上以微細之微結構分佈來破除光線的全反射，造成擴散的效果，使整個背光模組之光線柔和且輝度均勻，因此導光板成形的好壞對背光模組影響甚鉅，是影響光效率的關鍵零組件之一。

1.3 研究動機

導光板為目前 LCD 顯示器所不可或缺的重要零件，小型產品從手機、mp4、GPS 導航、數位車用影音螢幕至大型產品筆記型電腦、液晶顯示器等等皆可見其存在，可見導光板的重要性，導光板的作用為將側光式背光模組之光源，在側邊入光的條件下將光導向光源遠端，使光線經過導光板擴散點擴散或利用微結構特徵的疏密分佈使光線均勻分佈，破壞全反射條件後再將光線導向正向視線方向出光，單就導光板外形而言分為兩種形式：楔形導光板與平板形導光板，而為了增進導光板之效能，目前已有許多文獻探討導光板上之微結構設計、導光板光學設計、導光板微結構之轉寫性與導光板本身之成形性等，而在導光板射出成形之冷卻方面研究較少。

平板式導光板因為外形的因素，導致其微結構設計技術門檻較高，需要較佳的光學設計與較佳微結構轉寫性，才能將光線均勻分佈導向於正向視線方向，且因平板式導光板之肉厚較薄，因而在射出成形時需要較高之射出速度與射出壓力，如此亦將導致導光板內部之殘留應力過高、模板變形、及成品翹曲等問題產生。

楔形導光板因為外形的條件，可以較簡易將光導向正向視線方向出光，因此其微結構及光學之設計技術門檻較低，但楔形導光板屬於肉厚不均之產品，早期模具的製造皆憑藉著直覺與經驗，經由無數次的「Trial and error」後製造出來，往往造成經濟上與時效成本的負擔，而目前業界之模具水路設計皆仍遵循傳統水路

設計規範，或憑藉經驗與直覺設計，傳統水路設計規範以肉厚均勻之產品為主要考量，顯然不適用於楔形導光板這類肉厚不均之產品，以至於傳統水路設計用於生產楔形導光板時，因為厚肉不均之成形品外形而產生冷卻不均勻的情形，若沒有足夠長的冷卻時間很容易使成形品產生翹曲，因此業界一般皆以延長冷卻時間來改善，可是如此將導致生產效率變差而使生產週期拉長，導致產能無法提升，成為面板廠搶攻市場占有率之阻力，所以本研究想開發一套水路設計最佳化之流程，讓冷卻不均的問題可以改善，達到縮短冷卻時間的目的，期能解決業界所遇到之問題，提升單位時間之產能，增加企業競爭力。

1.4 文獻回顧

Catic[3]於 1979 年曾提出模具溫度會影響產品生產率，若冷卻系統效率提高，則生產率也會相對提高，而冷卻系統的配置方式與位置，正是影響模具溫度達到平衡、均勻與冷卻的重要因素。

Ries[4]於 1992 年曾在對塑膠產品的收縮實驗中發現，較長的冷卻時間有助於產品收縮率的下降。

Park and Know[5]等人於 1998 年模擬射出過程中模具的溫度變化，並加入敏感度分析找出最佳的製程條件，由熱分析結果可以預估冷卻所需要的時間與模具表面的溫度差異，間接說明了敏感度分析為一種獲得最佳模具設計的適合方法，尤其是冷卻水路的直徑與尺寸大小。

周明和[6]於 1999 年以一矩形平板及一不同空間平面之 L 形平板為研究對象，引入長度展開等效面積轉換概念，利用 Holonic 製造系統理念搭配成形邊界條件，來處理簡化形狀變化較緩之非矩形平板成形品的冷卻水路管路的配置問題，得到結果建議一般較簡單且變化不大之平板熱傳導幾何因子 S_e 在 1.00735~2.700888 之間，且對於較複雜的幾何形狀，須以較小元素區塊為基準加以探討。

Sachs[7]等人於 2000 年曾利用電腦軟體設計模具之公模、母模並製作為模具，結合理論與實驗比較冷卻水路對於模具溫度的影響，分析結果顯示有加冷卻水路的模具能夠快速的達到頂出操作溫度，並可獲得較高的熱傳效率與較均勻的溫度分佈。

Zollner[8]於 2001 年曾針對塑膠平板建構一公模與母模水路位置不均勻分佈

之模具進行冷卻，結果發現造成產品因為公模與母模間之冷卻溫度不均勻，使塑膠平板兩側之溫度產生差異而造成不均勻收縮產生變形的情况，甚至可能會造成產品有嚴重的扭曲或翹曲情况發生。

Dimla[9]等人曾於 2005 年提出冷卻水路的位置必須使公模、母模有均勻的溫度分佈，如果模穴內的溫度差異太大，則會造成產品嚴重的扭曲與翹曲，如圖 1-5。

曾義晃[10]於 2006 年用一模兩穴之導光板為例，成形塑料為奇美公司壓克力 (PMMA CM-207)，藉由田口氏實驗法以不同的澆口數，不同的澆口面積及不同的水路配置為因子探討最佳製程條件，結論中明確指出冷卻水路設計及澆口數在設計模具時非常重要，冷卻水路設計可使塑件得到均勻的溫度分佈。

施家興[11]於 2007 年以一 2.5 吋導光板，產品長度 49.5mm，寬度 35.6mm，平均厚度 0.35mm，採取的是一模二穴的設計，成形塑料為 PC/LEXAN SP6400R，應用 CAE 模流分析(Moldex3D)，探討薄化的產品在射出成形過程在製程上會遇到哪些的成形問題，由結果得知大部分的冷卻時間都在等待流道的冷卻，流道的冷卻時間最長佔整體冷卻時間的 1/3。

林忠泰[12]於2010年以一肉厚為1.5~0.8mm之楔形導光板為例，成形塑料為 PMMA，採取一模一穴設計，應用CAE模流分析(Mold flow)，探討水路位置對於楔形導光板之翹曲影響，由結論得知適當調整水路間距及冷卻液溫度，可縮短成品到達溫度均勻的時間，但各水路溫差太大會對成品均勻降溫帶來反效果，另外縮短水路間距及降低冷卻液溫度可縮短成品冷卻至頂出溫度之時間，尤其改變水路與成品間的距離使成品均勻冷卻效果最顯著。

Hamdy Hassan[13]於 2010 年曾以一 T 形塑膠產品為例，於內外側排列四支冷卻水路，使用有限容積法探討二維方向冷卻水路位置對於產品溫度與收縮率的影響，如圖 1-6，結果顯示當水路位置越接近成形品時，對於冷卻曲線的影響效果會增加，且冷卻位置的不同會使產品內外兩側因為冷卻速度的不同而產生不同的收縮率，因此而造成產品的收縮不均而增加變形或翹曲量。

1.5 論文架構

本論文分為六章以下分別簡述之

第一章：緒論

簡介高分子近年來的應用狀況與冷卻對射出成形的影響，並簡述射出成形的週期，及導光板形狀在背光模組中的功能，並針對塑膠模具冷卻水路方面相關文獻做探討，最後說明本文研究動機。

第二章：模具冷卻系統

敘述肉厚不均產品會造成射出週期拉長的原因，進一步延伸至冷卻水路設計的考慮事項與設計準則，並簡述射出成形週期中冷卻過程的重要性。

第三章：基本假設與理論公式

敘述本論文之基本假設、邊界條件，爲了簡化產品冷卻時所牽涉到的複雜問題，本章使用基本假設將冷卻過程的問題簡化，考慮影響冷卻時間的因素，透過熱傳原理來探討熱傳與模具的關係與冷卻時間之計算公式，最後並介紹冷卻水路之熱傳幾何因子理論。

第四章：分析模擬

本章將以一肉厚不均(0.54mm~1.36mm)之楔形導光板爲例，材料使用 PMMA，將經由計算求得最佳化水路排列之數據結果建構 3D 模型並做 CAE 分析，並與經驗法則冷卻水路設計互相分析比較，另外以與經驗法則相同管路數之排列，針對整體區域水路溫度、部分區域水路溫度以及流量之雷諾數進行調變，並 CAE 分析觀察參數調變對於冷卻時間的影響

第五章：結果與討論。

說明分析比較之結果與討論。

第六章：結論

總結本文之研究結論，探討未來的方展趨勢並針對外來研究方向提出建議。

表 1-1 導光板組件功能

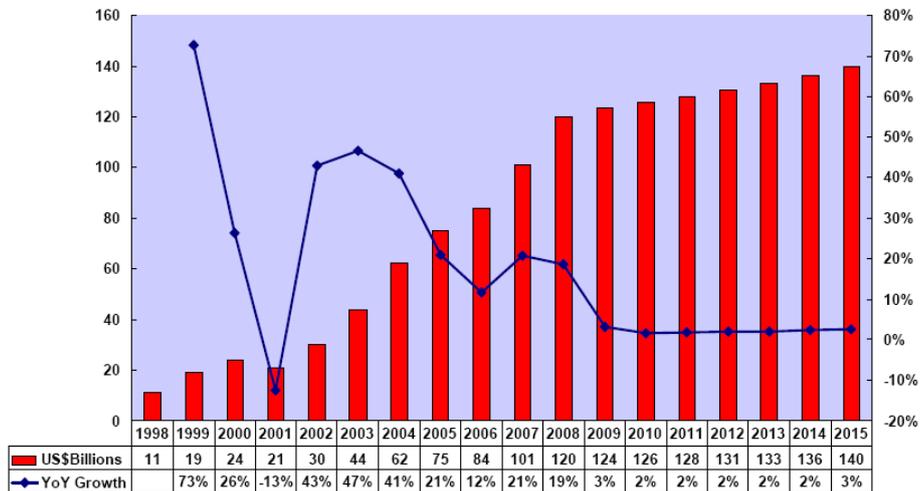
組件名稱	功能 / 要求	材料
光源	高輝度、高效率、色再現性、壽命	熱陰極陰極螢光燈(HCFL) / 冷陰極螢光燈(CCFL) ; LED
導光板	控制光的方向、提高輝度，且使面板輝度均一化	板面上施予光學特徵之壓克力板或 PC 板
擴散板	將來自導光板之光源加以擴散	PET 或 PC 樹脂
稜鏡片	將經擴散板之散漫光，透過稜鏡之折射使光向垂直向上，亦即有聚光作用	透鏡材料、3M 專利"BEF"光學膜
反射板	防止冷陰極螢光燈光源外漏之遮蔽板	PC 樹脂、鋁板、發泡 PET 膜

表 1-2 楔形與平板形導光板的比較

	優點	缺點
楔形導光板	<ol style="list-style-type: none"> 1. 較易充填 2. 微結構設計技術較低 3. 成本較低 4. 微結構轉寫性較不要求 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 較不節省材料 2. 成形品冷卻不均
平板導光板	<ol style="list-style-type: none"> 1. 較省材料 2. 成形品冷卻均勻 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 微結構轉寫性要求高 2. 微結構設計技術較高 3. 充填較不易 4. 成本較高

1998~2015 年全球平面顯示器產業規模

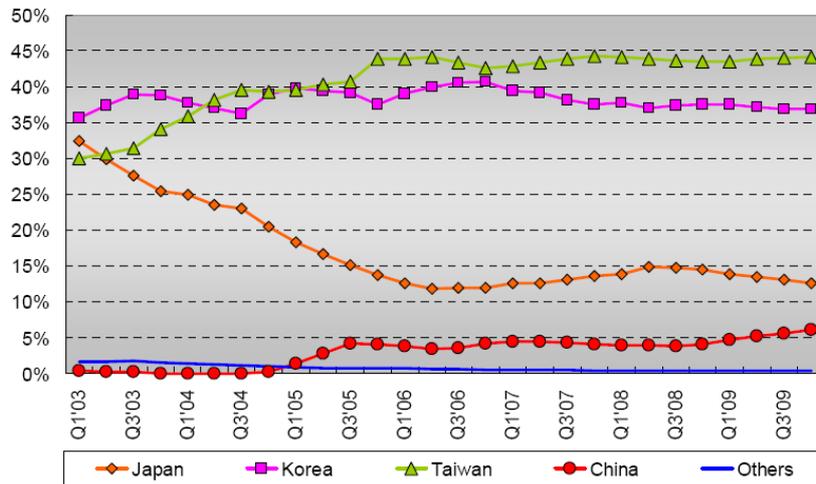
單位：十億美金



Source: DisplaySearch, 2008 年 1 月

圖 1-1 全球 FPD 產業產值[1]

2003~2009 年台灣 TFT LCD 面版產能佔有率



Source: DisplaySearch, 2008 年 1 月

圖 1-2 台灣與其他國家平面顯示器產能佔有率比較[2]

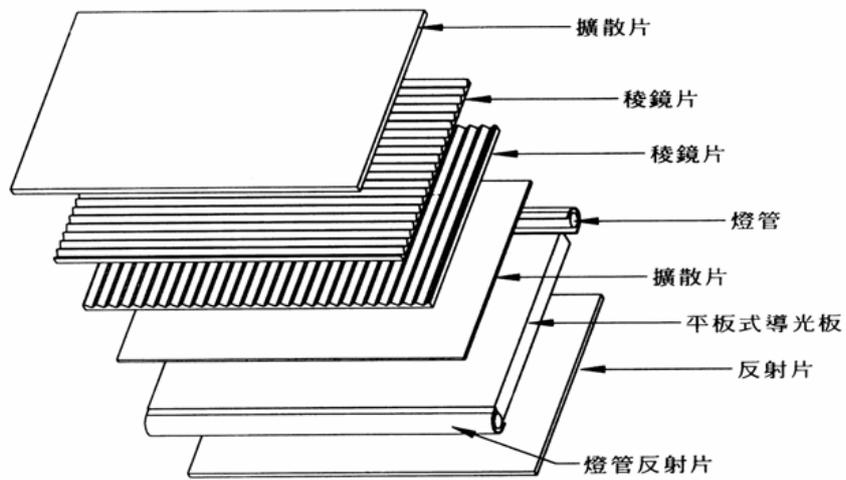


圖 1-3 背光模組結構展開圖



圖 1-4 導光板的應用

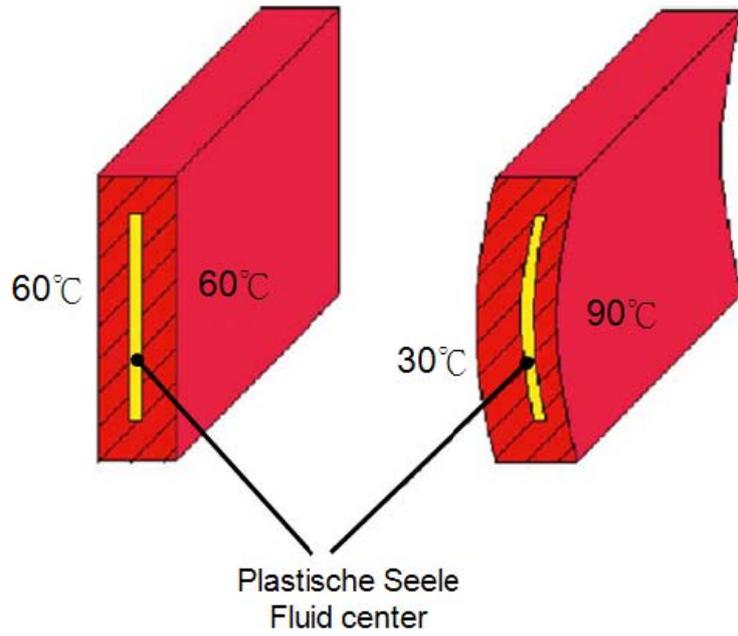


圖 1-5 模具表面溫差對產品造成扭曲或翹曲影響[9]

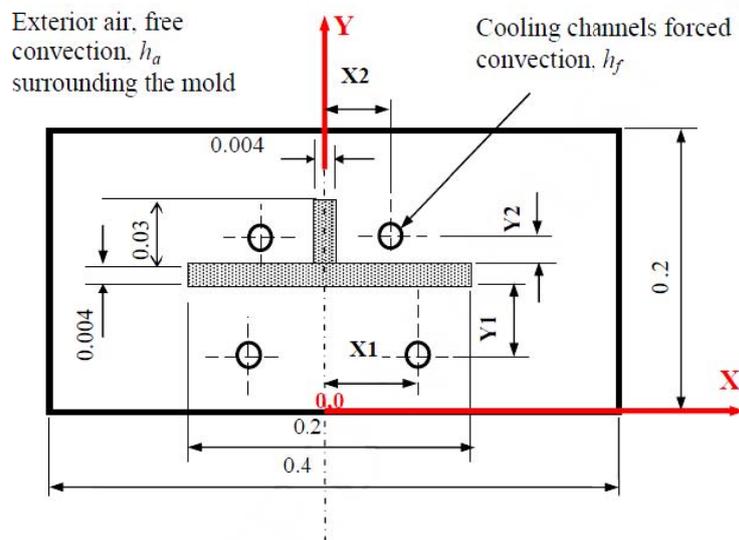


圖 1-6 T 形成形品包含四支冷卻水路的模具架構[13]

第二章 射出成形與模具冷卻系統基本原理

2.1 射出成形

射出成形是目前最廣泛應用於塑膠成品的製程，其原理是利用螺桿將顆粒狀塑料擠壓、旋轉產生摩擦熱而成熔融態，再以高壓推動熔融塑料注入模穴內，待成品冷卻固化後再開模將成品頂出。射出成形常用於熱塑性塑膠，因其可生產複雜性較高的製品，且射出成形較符合大量生產的經濟效應，在產品設計上的自由度亦高，更可採用活動與固定式接頭來將製品互相接合，但上述各項優點的先決條件是：產品與模具必須有適當的設計，且要能搭配適當的射出成形機。目前產品與模具的開發已可用電腦模流分析軟體來輔助，更可預測不同的成形參數對於射出成形的影響，讓設計者在設計時可了解塑料流動過程，使塑膠產品的設計開發更加快速。

射出成形會隨塑料種類與成品形狀的不同而須做調整，但其原理不外乎是塑化、流動、保持、凝固四個基本變化，因此將整個射出成形過程分為五個階段如圖 2-1 所示：

1. 塑化與合模階段：

在進行射出成形前，須先將塑料預熱烘乾，排出塑料內的水分，以避免產品成形後因為含有水氣，而產生氣泡、銀條、表面光澤不良、模糊甚至還有可能因而造成產品產生破裂；烘料結束後，將塑料倒入料桶內，並設定料管溫度；模具溫度是由模溫機所控制，可在進行射出成形前先設定，使其逐漸加溫。當準備好這些動作後，模具關閉，將射座向模具移動，使噴嘴與注道襯套互相接合。

2. 充填階段：

塑料在料管中被加熱到一定的溫度，因螺桿前進的推擠壓力而往模穴進行射出動作，高溫之熔膠經由料管(barrel)、射嘴(nozzle)、注道(sprue)、流道(runner)、澆口(gate)射進模穴，進入模穴的熔融塑膠以流體型態在模穴內不斷擴充，直到填滿整個模穴空間，此過程約佔一射出成形週期時間的5%。

3. 保壓階段：

充填階段完成後若不續加壓力即讓其冷卻，會因冷卻收縮的關係造成成形品會有許多凹陷，因此在充填完成後，為補充因冷卻而收縮的部分，需施加保

壓過程。一般而言射出過程有速度控制，保壓過程則要控制壓力。射出機可以對充填過程設定多段射出壓力，也可對保壓過程設定速度，但欲得較大速度時油壓驅動時要驅動大量的動作油；保壓過程時不要求速度，可限制動作油的吐出量，以達到自動節約能源的效果。保壓階段可視為前冷卻階段，雖其時間短暫，但塑件已開始定形，此時塑料密度上升、比容下降，塑件重量更接近預定重量。此階段決定成品的輪廓外形，只是可能因為保壓過度而發生成形品有毛邊或損壞模具，故須注意保壓壓力的調整，保壓階段約佔整個成形週期時間的 15%。

4. 冷卻階段：

成品的冷卻動作在保壓階段便已開始，保壓結束後澆口雖已冷卻，但成形品尚處於高溫，因此以模具內的冷卻水路經由熱傳導持續冷卻帶走熱量，惟因冷卻須維持一段時間，待成形品表面固化到相當的程度之後，有足夠的強度可以承受頂出力而不破裂或變形。塑件固化至頂出溫度，持續將塑件置於模穴中冷卻收縮造成壓力下降，當模穴壓力降至常壓時，塑件體積與模穴體積相同，此時塑件開始模內收縮。此階段會影響產品的翹曲變形與平均厚度，且若不均勻的厚度將會導致需要更長的冷卻時間，故須設計適當的冷卻水路，以使產品達到均勻冷卻，此階段約佔整個成形週期時間的 80% 的時間為最多。

5. 開模與頂出階段：

成品完成冷卻後，射出機便開始進行開模動作，但因成品冷卻收縮的關係，須以頂出機構來使成品與模穴分離，此階段須注意頂出機構的設計，因不均勻的頂出會導致成品嚴重變形。

2.2 冷卻系統對於射出成形的重要性

射出成形冷卻系統通常包括模溫機、管路、冷卻水路、軟管、幫浦，如圖 2-2 所示為射出成形冷卻系統示意圖。在射出成形週期中，模具本身可視為一熱交換器，一般對冷卻時間的定義為：「當熔膠射入模具之後即開始冷卻，在整個成形週期從充填、保壓到冷卻階段持續冷卻，直到成形品凝固硬化到可以頂出時，冷卻時間才結束」，一般而言冷卻週期時間約佔整個射出成形循環週期的 70~80%，如

圖 2-3 所示為模具之冷卻週期與射出成形循環週期關係圖，因此有效率的冷卻水路設計將減少冷卻週期的時間，只要縮短冷卻時間幾個百分比，就可以提升產品生產效率，且均勻的冷卻可以防止產品因熱應力產生變形、扭曲等現象，使成形品的穩定性與精度提高，改善成形品品質，如圖 2-4 所示為均勻及非均勻冷卻對產品冷卻時間與翹曲之影響。

2.3 模具冷卻水路設計考慮事項

熔融材料的熱量約 5% 會因輻射及熱對流而喪失於空氣之中，而有 95% 傳導於模具[14]，因此本文在進行冷卻分析時假設熱傳導只發生在厚度方向，亦即無熱量從成形品邊緣所散失，並假設熱量傳遞不考慮由熱對流、熱傳導與熱輻射所傳導到模具外散失之熱量，模具冷卻系統一般包含模具本體、熔膠與冷卻水路三部分，如圖 2-5 所示為一簡易模具冷卻系統架構圖。

模具設計工程師一般在設計冷卻水路時須考慮到下列事項：

1. 冷卻水路位置

包含管與管之間的間距(X) 及模穴至冷卻水路的距離(Y)，如圖 2-6 所示。

2. 冷卻水路的種類(噴泉法、隔板法、冷卻棒)

冷卻水路的加工大致可分為鑽孔、溝槽、套管(Bubblers)、隔板(Baffles)、以及間接冷卻等方法，可依據加工的方便性以及產品外形特徵搭配使用不同的冷卻方式，以下分別說明之：

(1) 鑽孔冷卻法

鑽孔法大部分都是以鑽頭直接鑽孔，再以懸臂鏟床修整，因為容易加工的特性，此為最常見的水路加工方式，在模具外部可採用軟管將水路加以連接，或是使用軟塞防止洩漏，適合使用於無頂出系統之母模側，如圖 2-7 所示。

(2) 溝槽冷卻法

此種水路方式一般是由嵌塊組合而成，在嵌塊設計水路溝槽，再以 CNC 銑削加工，經組合後可以形成管道，以達到鑽孔法無法加工位置的冷卻，適用於淺而寬的平板成品或箱形品內側的冷卻，

唯須注意因爲水路是經由嵌塊組合而成，所以需搭配 O 環使用以防冷卻水洩漏，如圖 2-8 所示。

(3) 套管冷卻法

又稱爲噴泉法，其加工方式是在冷卻水道內加裝一套管，使冷卻水由套管內進入，然後將冷卻水由套管與水道間噴流出，達到產品內側之冷卻，可以有效冷卻深槽形產品內側，避免內部角隅處因爲積熱而產生冷卻不均導致不正常收縮、變形及扭曲等的現象，如圖 2-9 所示。

(4) 隔板冷卻法

在水道內加裝金屬隔板使水路分開，適用於細長的公模心冷卻或使用套筒頂出的場合，注意其加工時須注意剩餘模板厚度距離產品模穴以最小值 5mm 爲原則，以免強度不足造成充填過程時因爲射出壓力而產生變形，如圖 2-10 所示。

(5) 間接冷卻法

亦可稱爲冷卻棒冷卻法，將鈹銅安置在水路不易到達之處，利用鈹銅能夠迅速導熱的特性，將熱量傳導出來，再由冷卻水將熱量帶走，適用於細長的公模心或是成形品構造複雜的部分，如圖 2-11 所示。

3. 冷卻水路的尺寸

(1) 冷卻水管之管徑：

冷卻水路的管徑以及長度對產品的冷卻效率有著密不可分的關係，一般冷卻水路的管徑選擇會依照產品的厚度做爲參考的依據，對照表如表 2-1 所示，一般爲了保持紊流，使熱效率較高，因此以 $d_{\max} \leq 14 \text{ mm}$ 爲原則。

(2) 冷卻管之位置：

一般爲了獲得較佳的冷卻效率，冷卻水路的排列須盡量靠近模穴表面，水路之間距也需要盡量的小，如圖 2-6 所示。

<1>管徑與管徑間之距離(X)：

水管中心以能覆蓋模穴面的方法較佳，一般而言加工範圍

建議在 3d~5d 之間。

<2>水管於成形品之間的距離(Y)：

一般冷卻水路的設置愈接近成形品的表面其冷卻效率越好，但當 $Y \leq 16\text{mm}$ 時，易產生明顯的溫度變異，因此一般加工範圍建議在 1.5d~3d 之間，其加工邊界條件最小值不可小於 10mm[15]。

<3>水管長度(L)與排列數量(N)：

水管的長度與數量，一般以有效水管長度之總表面積(A_c)與成形品之總熱傳面積(A_e)相同為較佳之配置，即 $A_c \geq A_e$ [16]，另外需注意因為水管數太多常導致壓損而造成流量降低，會影響冷卻效果，所以水管數不能一味增加。

4.冷卻水路的連結方式

並聯法的特色

- (1)冷卻時模具表面溫度較均勻。
- (2)水路管路支數較多時，冷卻水速度會變慢，冷卻效益變差。
- (3)無法維持長時間各流路之流量相等，會導致模穴表面冷卻不均。
- (4)若其中某一水道有阻塞的情況發生，較不會影響全體冷卻效果。

串聯法的特色：

- (1)冷卻水出入溫差較大，易造成模具表面溫度不均勻。
- (2)若有阻塞管路的情形發生，會影響全體流動，明顯降低冷卻效果。
- (3)冷卻水路流速較快，熱傳效果較佳。

並聯法與串聯法的排列方式如圖 2-12、2-13 所示。

5.冷卻液的流量

冷卻液以層流流動時，傳熱效果很差，為了使冷卻液有較佳的熱傳效果，必須使冷卻液成紊流狀態，使雷諾數 $Re = \left(\frac{\rho v d}{\mu}\right) > 4000$ ，當 Re 大於 10000 時其熱傳效果改善有限，但相對幫浦的成本卻會增加很多，因此一般設計約在 8000~10000 之間，而管徑過大則會造成不易產生紊流，而使熱傳效率降低，因此管徑通常不得超過 14mm，層流與紊流的邊界範圍如表 2-2 所示。

在此必須注意的是應使用標準規格的冷卻孔道尺寸，以便使用標準

規格的加工工具製作水路，一般常用的標準規格孔徑為 6mm~14mm，其中又以 10mm~12mm 尺寸冷卻效果最好。

一般模具冷卻水路大致遵守下列兩項設計原則：

(1)迅速冷卻：

由於冷卻時間佔整個射出成形循環週期的 70~80%，因此如果能在水路設計上讓產品快速的冷卻，必可改善整個射出成形循環週期的時間，在單位時間內提升總生產量。

(2)均勻冷卻：

成形品在冷卻過程中，若有不平衡的冷卻情況發生，將會使產品產生內應力，導致頂出後發生收縮、翹曲及變形的情况，因此爲了降低產品的內應力，減少收縮、翹曲與變形的產生，必須維持成形品達到均勻的冷卻後才可以做頂出的動作，也就是說必須使成形品兩側之溫差變小，使模具溫度達到均一，依經驗法則規範一般而言民生用品不可超過 10°C，而精密度高之產品則須在 5°C 以內。

2.4 影響冷卻時間的因素

模具設計時以較短的冷卻時間爲目標，而影響冷卻時間長短的因素有很多，在此對於影響冷卻時間之相關因素簡易的列出，以便作爲設計時的考量依據，影響冷卻時間的因素如下[17]：

1. 成形品厚度

成形品的厚度越厚，則所需的冷卻時間越長，冷卻時間與厚度的平方成正比。

2. 成形品形狀

若成形品的形狀越複雜則可能導致有些部位的冷卻效果可能較差，因此會影響整個成形品之冷卻時間。

3. 熔膠性質

因不同的塑膠材料其熱傳導係數不同，因此熱傳效果也會有所差異，熱傳導係數較大之塑膠材料其熱傳導較快，所需冷卻時間較短。

4. 射出溫度與脫模溫度

射出溫度越高則所需之冷卻時間越長，脫模溫度越低所需冷卻之時間亦越長，冷卻時間、射出溫度與脫模溫度具有自然對數上之比例關係。

5. 模具材料

不同金屬之模具材料，其熱傳導係數不同，因此其熱傳效果會有所差異，熱傳導係數高之金屬其散熱較快，相對的冷卻時間會較熱傳導係數低之金屬短。

6. 冷卻水路的數目、位置與大小

冷卻水路的設計對成形品冷卻時間具有決定性的影響，一般若冷卻水路數目越多、管路與成形品之間距越小或管徑越大，其冷卻效果會較為顯著，冷卻時間亦較短。

7. 冷卻液之性質

不同的冷卻液其熱傳導係數、熱比容、密度與黏度將有所差異，因此會影響冷卻水路之熱傳效果。

8. 冷卻液之流量及溫度

欲使冷卻水路之熱傳效果增加，冷卻液之流量必須達到紊流(turbulent flow)狀態，且冷卻液溫度越低，將可減少成形品之冷卻時間。



表 2-1 產品平均厚度與水路管徑對照表[28]

產品平均厚度(mm)	水路管徑(mm)
1	6~8
2	8~10
4	10~12
6	12~14

表 2-2 冷卻液的流動方式與相對的雷諾數(R_e)範圍[28]

雷諾數(R_e)	流動方式
$10000 < R_e$	紊流
$2300 < R_e < 10000$	紊流與層流轉換區的流動
$100 < R_e < 2300$	層流
$R_e < 100$	靜止流

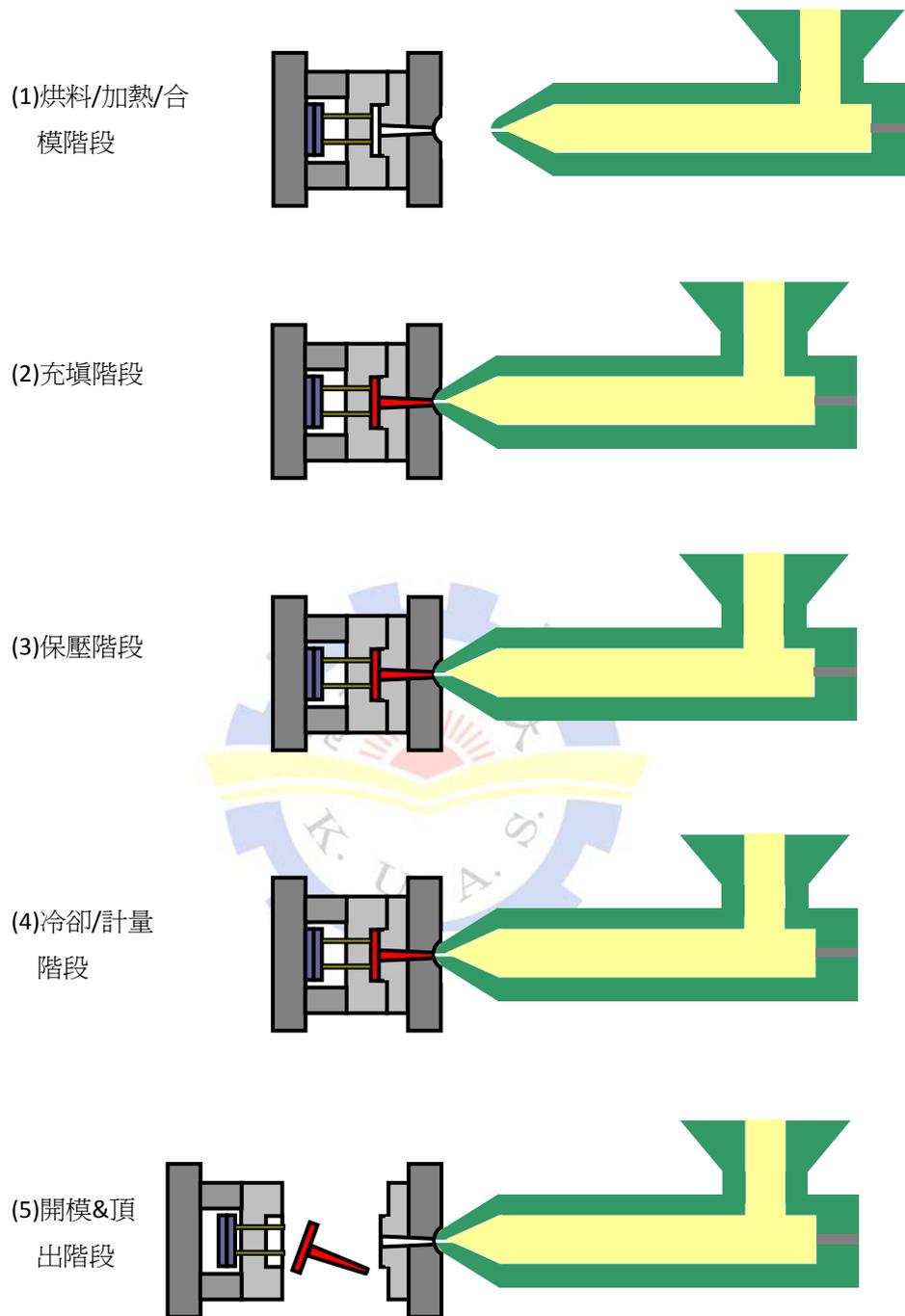


圖 2-1 射出成形流程示意圖

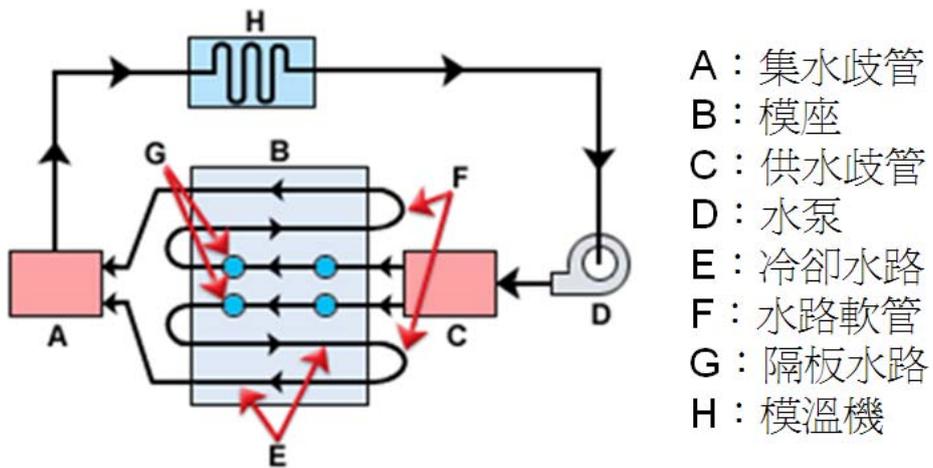


圖 2-2 射出成形冷卻系統示意圖

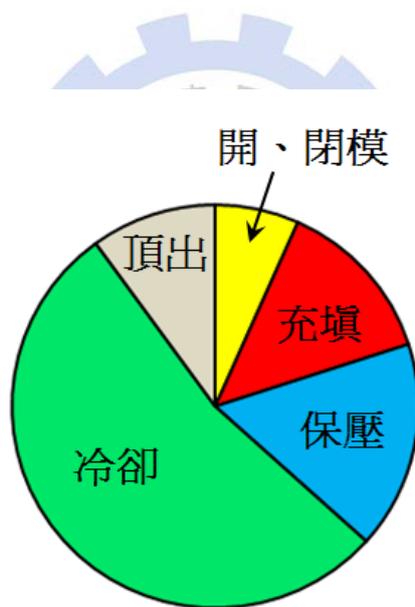


圖 2-3 模具冷卻週期與射出成形循環週期關係圖

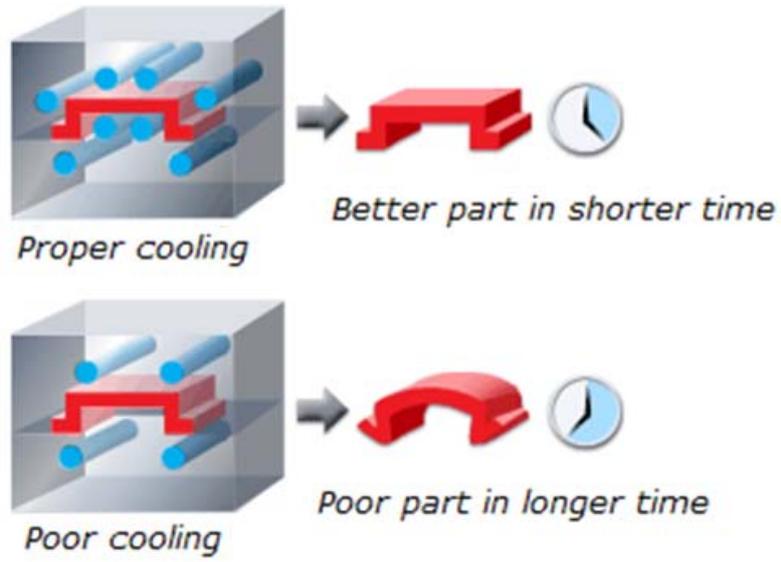


圖 2-4 均勻及非均勻冷卻對產品冷卻時間與翹曲之影響 [28]

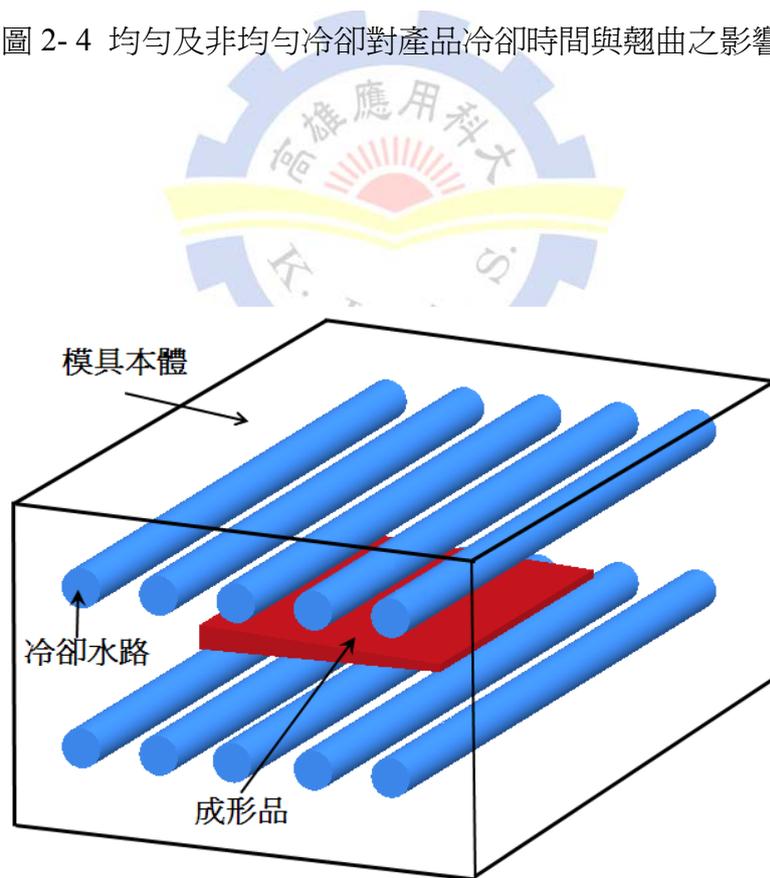


圖 2-5 簡易模具冷卻系統架構圖

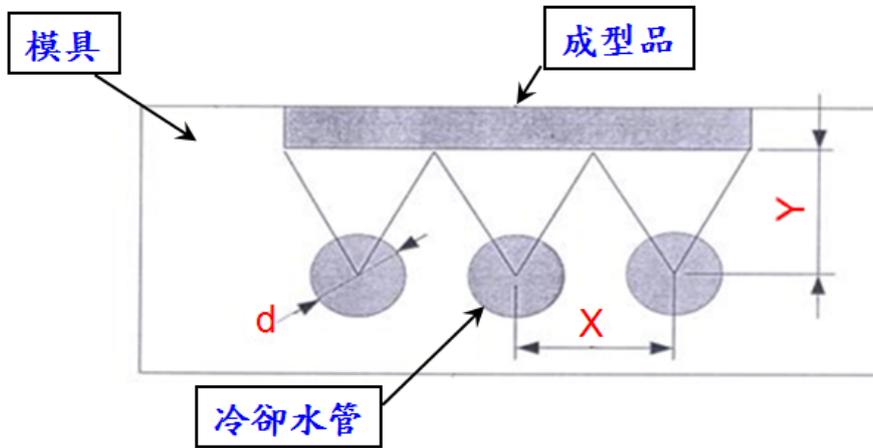


圖 2-6 冷卻水路位置示意圖

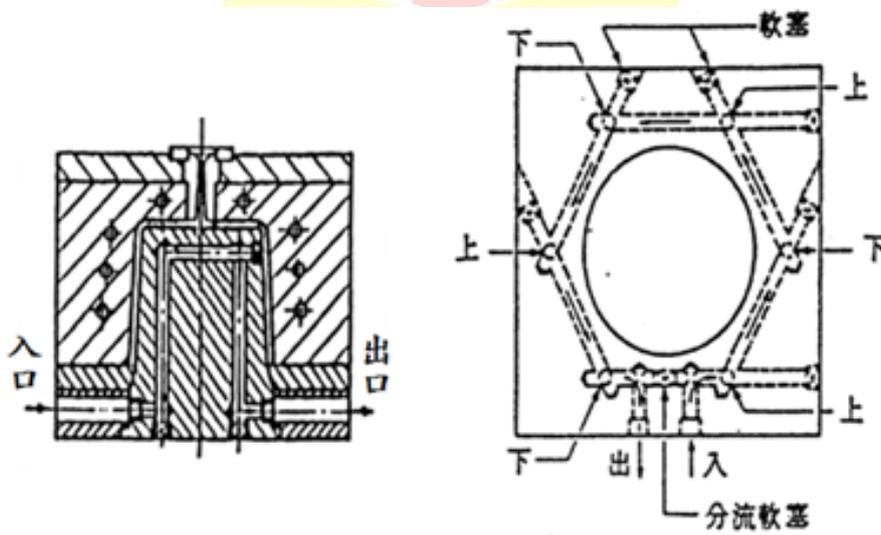


圖 2-7 鑽孔冷卻法[28]

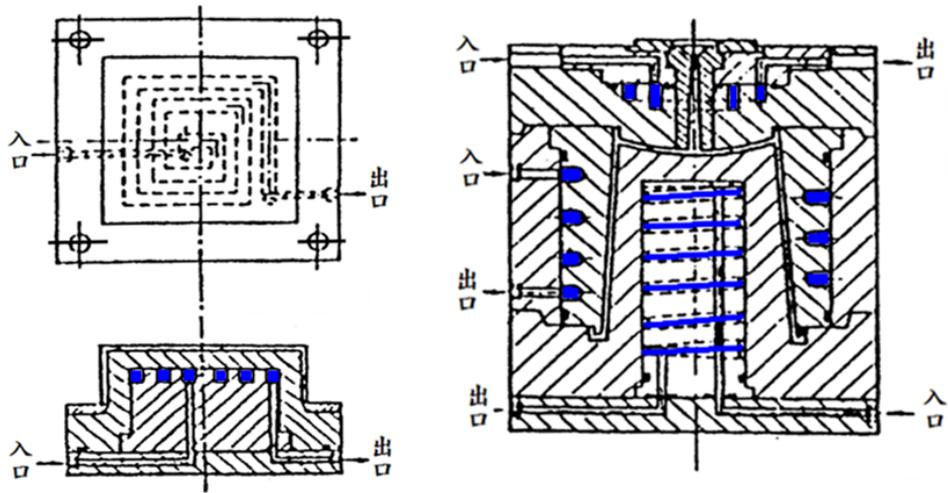


圖 2-8 溝槽冷卻法[28]

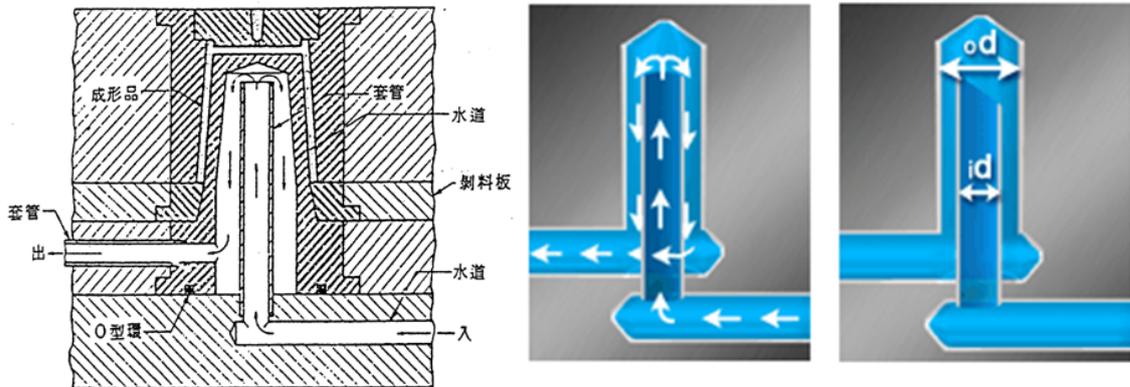


圖 2-9 套管冷卻法[28]

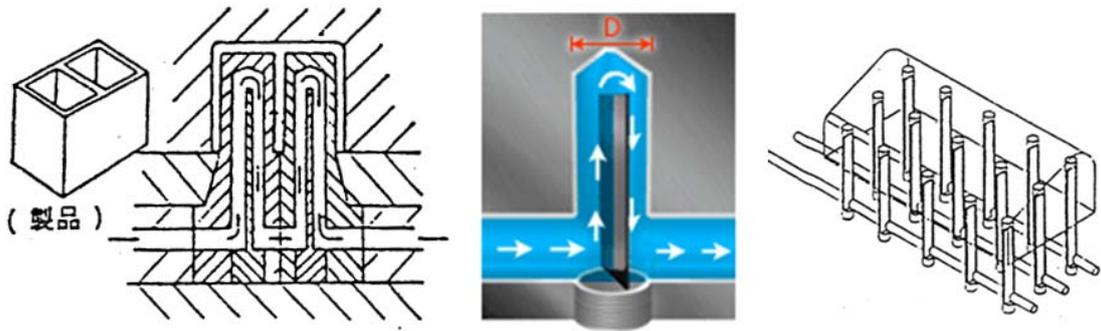


圖 2-10 隔板冷卻法[28]

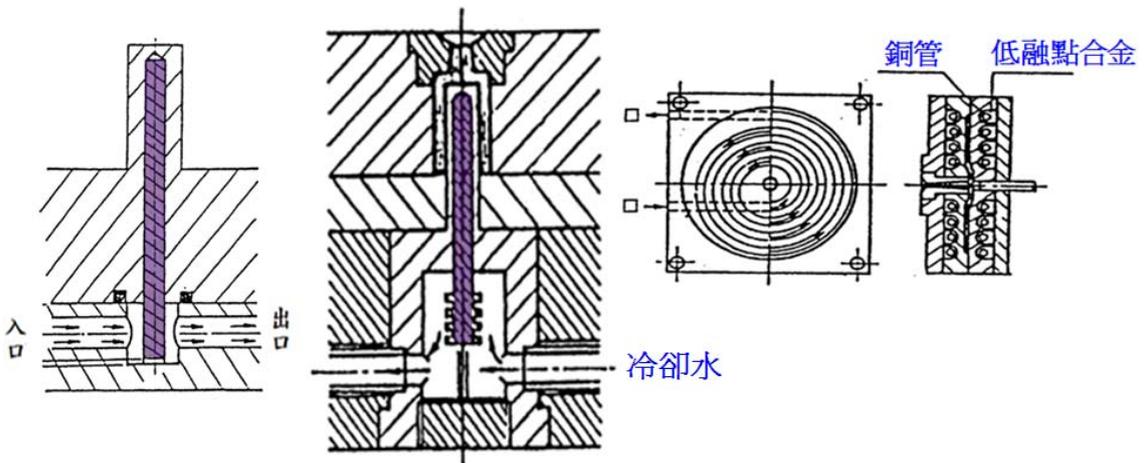


圖 2-11 間接冷卻法[28]

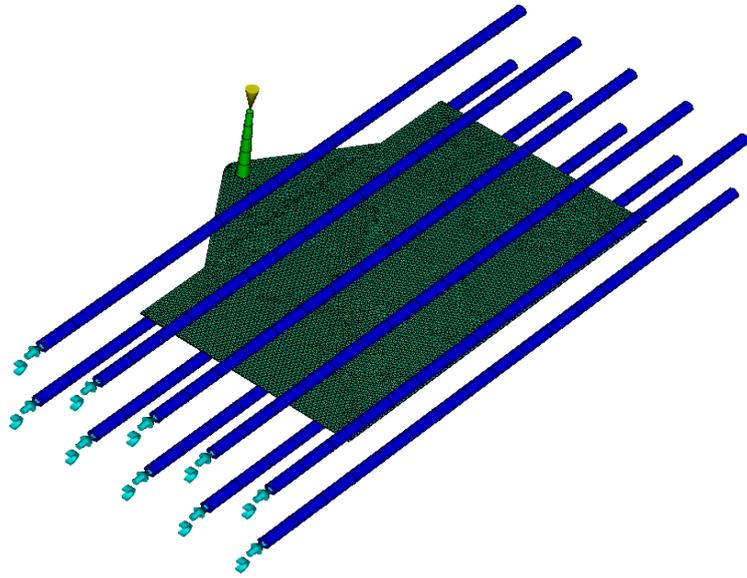


圖 2-12 水路排列方式(並聯法)

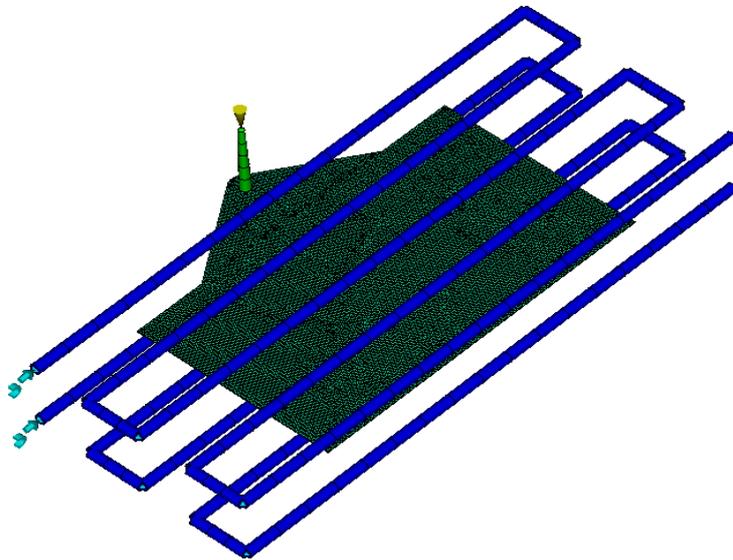


圖 2-13 水路排列方式(串聯法)

第三章 基本假設與研究方法

3.1 基本假設

在射出成形的成形週期中，當熔融狀態的塑膠材料充填進入模穴之後、經由保壓、冷卻，一直到產品頂出，每一個階段都包含了冷卻過程，由於冷卻階段所涉及的問題相當複雜，因此做了以下的假設以簡化其運算過程。

1. 高分子塑料所釋放出之熱量，假設全部皆由模具材料與冷卻液所吸收。
2. 假設初始狀態時，模具與高分子塑料各有其均勻之溫度，且高分子塑料均勻熔融無固化部分殘留。
3. 模具材料之物理性質隨著溫度與壓力的變化並不明顯，因此假設為常數。
4. 假設模具之表面溫度為一定值，冷卻水路管壁之溫度為一定值。
5. 將固化潛熱併入比熱計算，且不考慮邊界層之移動現象。
6. 假設模具內之壓力為一定值，固不考慮邊界層之壓降效應，且固化過程中高分子塑料之體積維持不變。
7. 不考慮在結晶過程中所衍生出之熱效應。
8. 假設在整個冷卻過程中，高分子塑料處於靜態(static state)，因此不考慮塑料因流動所產生之熱效應。

3.2 研究方法-冷卻時間計算公式

高分子材料於模具內冷卻時間的計算，曾在Ballman及Shusman[18]的研究工作中被考慮到，而更進一步的研究則由[19]和由[20]等人發表，就模具內之冷卻及固化的問題可以用一三維暫態熱傳導方程式表示如下：

$$\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial X_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial X_3^2} \right] \quad (3-1)$$

其中 $C_p = C_p(T)$ 為塑膠比容

ρ ：塑膠密度

k : 塑膠熱傳導係數(kcal/mm-sec-°C)

$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$: 分別代表成形品之三個傳熱方向，其中 X_2 為厚度方向。

在此不考慮聚合物之結晶化速率 $\frac{dX_1}{dt}$ 、 $\frac{dX_2}{dt}$ 、 $\frac{dX_3}{dt}$ 與熔解潛熱 ΔH ，則在大部份的情況下，冷卻主要沿著厚度方向，亦即 X_2 方向發生，而在射出成形中最主要的熱量是由冷卻過程中移去，因此可忽略充填過程中短時間之冷卻，而假設塑膠在冷卻過程中是從一均勻溫度冷卻下來，因此可得一簡易方程式如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial X_2^2} = a \frac{\partial^2 T}{\partial X_2^2} \quad (3-2)$$

其中 $a = \frac{k}{\rho C_p}$ 為塑膠熱擴散係數 (mm^2/sec)

其邊界條件如圖 3-1[21]所示，利用傅利葉展開式取第一項時可得到冷卻時間關係式(3-3)與式(3-4) [22]。

1. 成形品厚度方向平均溫度冷卻到 T_E 的時間關係式為：

$$t_k = \frac{S^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{8}{\pi^2} \left(\frac{T_w - T_M}{T_w - T_E} \right) \right] \quad (3-3)$$

2. 成形品厚度方向中心點之溫度冷卻到 T_E 的時間關係式為：

$$t_k = \frac{S^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_w - T_M}{T_w - T_E} \right) \right] \quad (3-4)$$

其中

t_k : 冷卻時間(sec)

T_M : 熔膠溫度(°C)

T_w : 模穴表面溫度(°C)
 T_E : 脫模溫度(°C)
 S : 成形品平均厚度(mm)
 π : 圓周率
 a : 熱擴散係數

在此公式(3-4)所敘述的原理是當熔膠以初始膠溫 T_M 進入模穴之後，模具便以模穴表面溫度 T_w 對於熔膠持續冷卻，待成形品冷卻到了頂出溫度 T_E 時，即可做頂出的動作將成形品脫模頂出。

本研究以公式(3-4)所得之冷卻時間，搭配能量平衡原理 $Q_{ab} = Q_w$ 來做為冷卻過程計算之數學理論，模具熱量傳遞方式如圖 3-2，在此不考慮 5% 因熱輻射或熱對流而散失之熱量，如模具熱量平衡圖 3-3 所示。

Q_{ab} : 熔膠傳導到冷卻水路中心之熱量

$$Q_{ab} = 10^{-3} \cdot [(T_M - T_E)C_{ps} + im]Q_m \cdot \frac{S}{2} \cdot X \quad (3-5)$$

Q_w : 在冷卻時間內(t_k)從冷卻液中所帶走的熱量

$$Q_w = 10^{-3} \cdot t_k \left[\frac{1}{\lambda_{st}S_e} + \frac{1}{\alpha \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi R} \right]^{-1} \cdot (T_w - T_{water}) \quad (3-6)$$

其中

C_{ps} : 熔膠比熱

im : 熔化潛熱

Q_m : 熔膠密度

X : 冷卻水路之管路間距

λ_{st} : 模具熱傳導係數

S_e : 熱傳導形狀因子

α : 冷卻水之熱擴散係數

3.3 熱傳導之幾何形狀因子

就單方向熱傳導系統而言，一熱管覆蓋一層絕熱材料如圖 3-4 所示，圖中 T_i 為內側溫度， T_o 為外側溫度， $T_i > T_o$ 即表示熱流流動方向，由內向外流動；第一象限中共有四個由等溫線(isothermal line)及垂直等溫線相交所得的等距線(uniformly spaced line)形成之熱流線(heat flow lane)。由於對稱的關係，因此其它三個象限與第一象限相同，因此可由一個熱流線的熱傳率得到總熱傳率。

由傅利葉定律知：

$$\frac{q_n}{L} = \frac{kl_2(T_{ad}-T_{bc})}{l_1} \quad (3-7)$$

其中

$\frac{q_n}{L}$ ：為單位管長之熱傳率

L ：為管之長度

q_n ：為通過一熱流線之熱傳率

$$l_1 = \frac{(ab - cd)}{2}$$

$$l_2 = \frac{(ab - cd)}{2}$$

l_1 為形狀因子，若取面積 $abcd$ 為曲線正方形(curvilinear square)，則 $l_1 = l_2$ ，因此：

$$\frac{q_n}{L} = k(T_{ad} - T_{bc}) \quad (3-8)$$

對溫度差而言若等溫線為等空間而且在熱流線中共有 M 個曲線正方形，則橫過每一個小正方形面積之溫度差為：

$$\Delta T = \frac{T_i - T_o}{M} \quad (3-9)$$

由(3-6)與(3-7)式得：

$$\frac{q_0}{L} = \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{L} = NK \frac{(T_i - T_0)}{M} = S_e K (T_i - T_0) \quad (3-10)$$

其中

q_0 ：為系統的熱傳率

N ：為系統的徑向熱流

K ：塑膠熱傳導係數(kcal/mm-sec-°C)

S_e ： $\frac{N}{M}$ 為傳導之幾何形狀因子(Conductive shape factor)

M ：曲線正方形個數

公式(3-8)為一單向熱流系統之熱傳率，而對於二維或三維的熱流系統其傳導形狀因子可以表示為：

$$Q = K S_e \Delta T_{overall} \quad (3-11)$$

其中 $Q = q_0$ 或 q_0/L

S_e 為無因次，圖 3-5 為兩種最常用之幾何形狀因子[21]，圖(a)與圖(b)分別為單支水路排列與多支水路排列之情況。

圖(a)中 $S_e = \frac{2\pi}{\cosh^{-1}\left(\frac{2Y}{d}\right)} \quad Y \approx d$

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln\left[\frac{2Y}{d} + \sqrt{\left(\frac{2Y}{d}\right)^2 - 1}\right]} \quad Y > 2d$$

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4Y}{d}\right)} \quad Y \gg d$$

圖(b)中

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \left[\frac{2X \sinh\left(\frac{2\pi Y}{X}\right)}{\pi d} \right]} \quad Y > d$$

其中

d：為冷卻管直徑。

Y：冷卻水路中心與成形品表面之距離。

X：冷卻管路之間距。



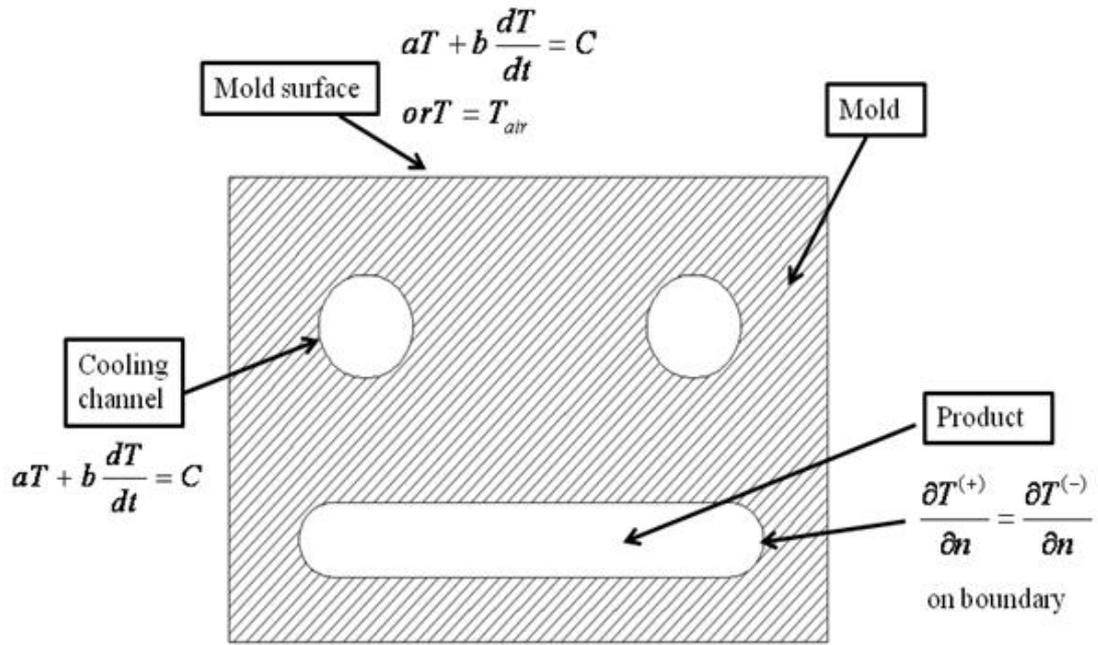


圖 3-1 成形品邊界條件

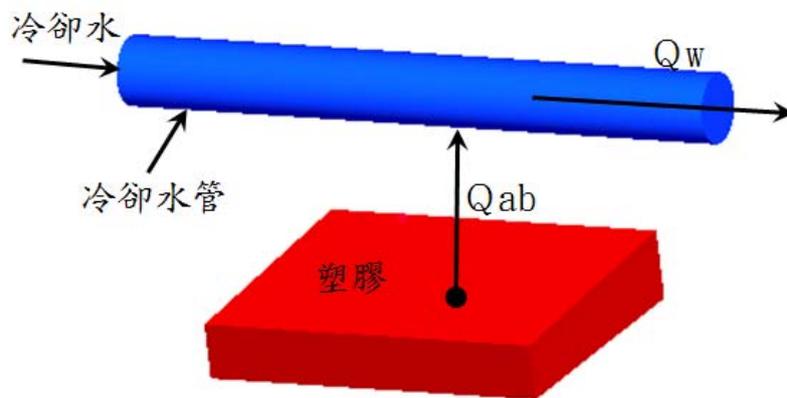


圖 3-2 模具熱量傳遞方式

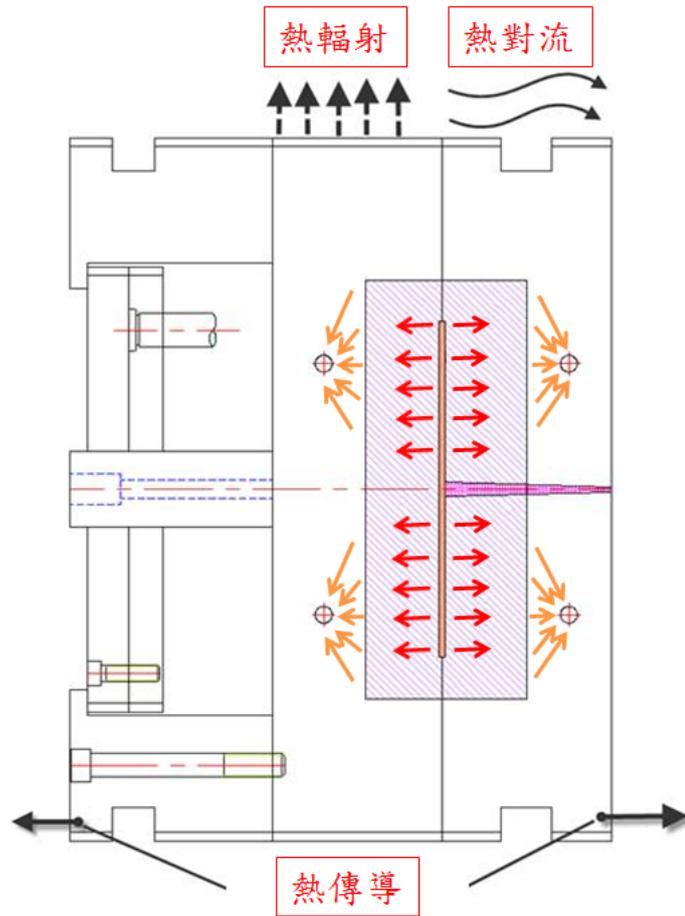


圖 3-3 模具熱量平衡圖

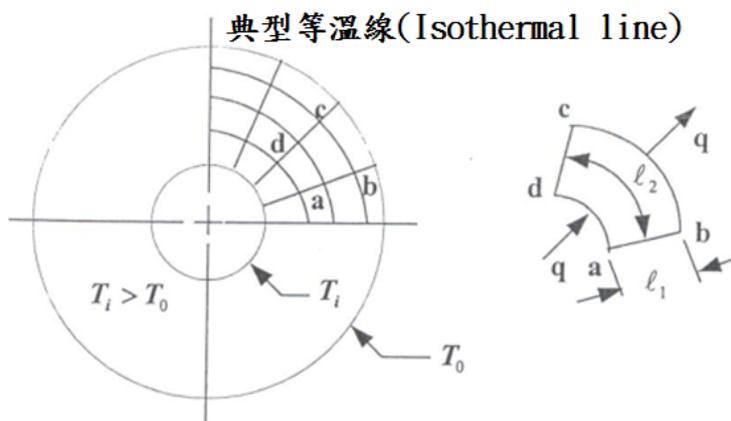


圖 3-4 單向熱流曲線分析元素圖

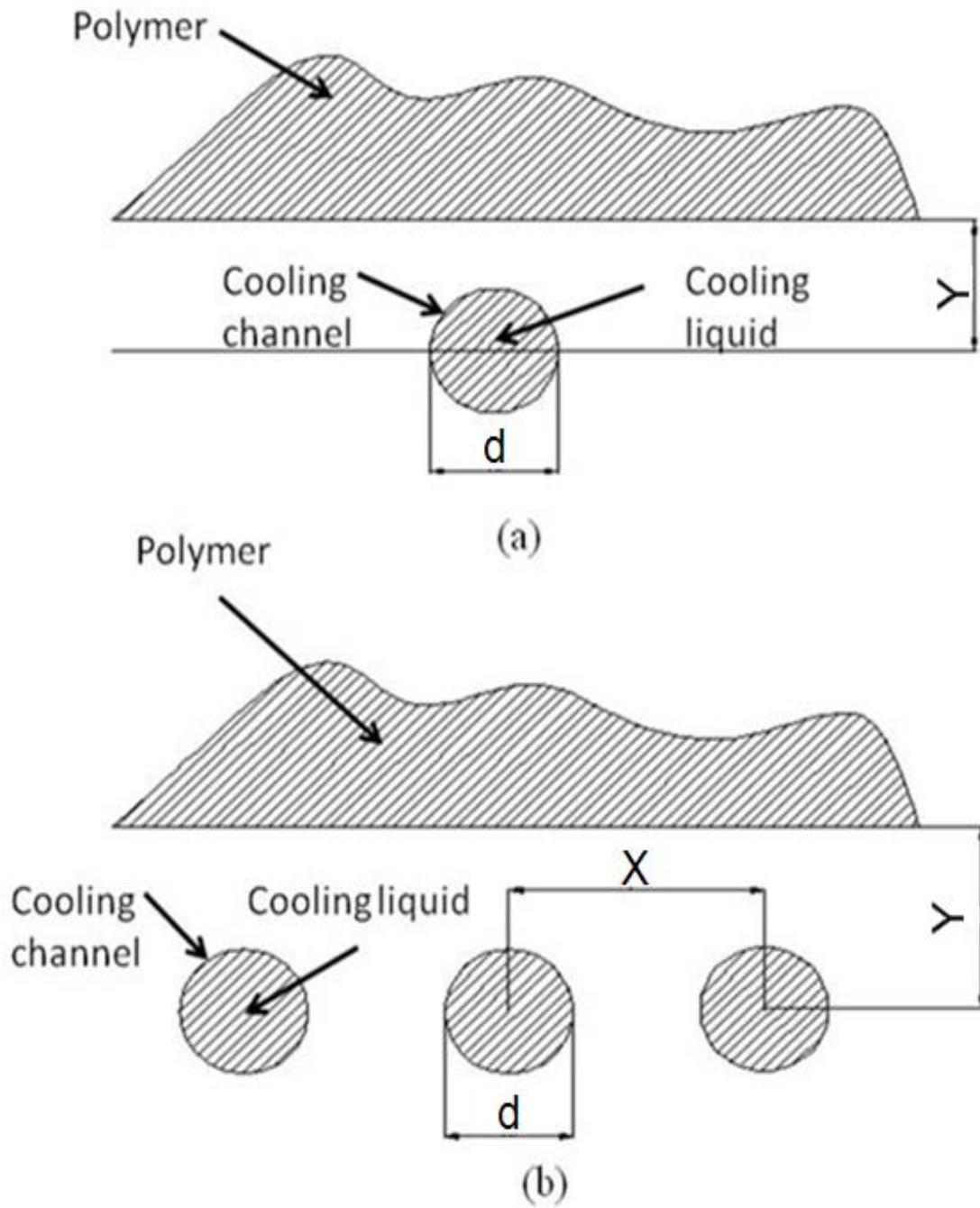


圖 3-5 熱傳導之幾何形狀因子

第四章 設計規劃與分析

本研究以一3C產業之14吋楔形導光板為例，產品尺寸為長315mm，寬185mm，厚度為0.54mm~1.36mm漸變產品，使用材料為光學級壓克力(PMMA)，在使用既有的模具與不更改製程參數之原則下，以模具強度與均勻冷卻為限制條件，並用射出成形理論公式為基礎，目標為使厚度不均的產品達到均勻冷卻及中間層之溫度差異小於5°C之最短冷卻時間，並以MATLAB軟體進行計算，以進行冷卻水路最佳化排列設計，程式碼如附錄1所示，設計流程如圖4-1所示，以下分別就各步驟詳細敘述。

4.1 成形品外形、模座與水路數目確認

為了使塑料較易充填與保壓的實施，因此選擇從厚邊進澆，產品尺寸示意如圖4-2所示。另由成形品之尺寸選擇適合的模座來搭配使用，考慮模穴採用一模一穴的配置，因此採用標準模座A型5050-150-150-100-s，其標註方式為：型號-頂出板寬度及模座長度-母模板厚度-公模板厚度-間隔塊高度-S:標準款，如圖4-3所示。

模具參數為：

1. 管徑(d)：10 mm
2. 模穴表面溫度(T_w)：45°C
3. 模穴表面溫度上限($T_{w(max)}$)：85°C
4. 模具熱傳導係數(λ_{st})：45 W/m·k
5. 模板厚度(H)：150 mm

另以本文厚度不均之楔形導光板為例，成形品總熱傳面積(A_e)：

$$(185 \times 315 \times 2) + (0.54 \times 315) + (1.36 \times 315) + (0.54 + 1.36) \times 185 = 117500 \text{ mm}^2$$

有效水管長度之總表面積(A_c)：

$$\pi \times d \times L = \pi \times 10 \times (315 + 60) = 11780.97 \text{ mm}^2,$$

因此總水管數為 $117500 \div 11780.97 = 9.97 \approx 10$ ，而為了達到公、母模的熱平衡，因此採用公、母模各5支水路的配置方式，水路配置圖如圖4-4所示。

冷卻液參數為：

1. 水路溫度：40 °C
2. 冷卻液動態黏性(μ)： $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
3. 冷卻液流速(v)：1 m/s
4. 冷卻液雷諾數上、下限值： $2300 < R_e < 10000$
5. 水路溫度上限值($T_{\text{water max}}$)：45 °C

4.2 成形材料

通常不同的塑膠材料有其不同的熱傳導特性，一般料商皆有提供塑料資料，本實驗所擬定輸入之材料參數為：

1. 產品厚度資料(s)：0.54mm~1.36mm
2. 熔膠溫度(T_M)：250°C
3. 頂出溫度(T_E)：85°C
4. 熔膠潛熱(i_m)：130 kJ / kg
5. 高分子比熱(C_{p_s})：2.27 kJ/kg · °C
6. 熔膠密度(Q_m)：1.06 g/cm³
7. 熔膠熱擴散係數(a)： $8.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$
8. 頂出時中心線溫度差異 (ΔT)：5°C

4.3 產品依厚度分級

本研究設計流程爲了區分產品厚度以方便計算，必須將產品依照厚度分級，因此先將產品平分爲寬度等寬約61.67mm之三個區塊，再取此三區塊之平均厚度分爲三個尺寸1.22mm、0.95mm、0.68mm，以做爲各區厚度計算之基準，如圖4-5所示。

本研究設計流程以成形品最厚之厚度爲計算初始厚度，因爲爲了達到均勻冷卻的目標，在冷卻水路以成形品較厚處厚度爲基準厚度的排列方式下，成形品其餘部份之冷卻水路會以成形品較厚處之冷卻時間爲基準做排列，而爲了使成形品厚度較薄處達到均勻冷卻的目的之下，其成形品厚度較薄處之水路排列距離必然將會遠離模穴，才不致使成形品厚度較薄處冷卻過快；因爲冷卻水路遠離模穴，當塑料充填與保壓階段實施時，模具的變形量相對較少，因此可以確保成形品擁有較佳的品質。

如果以成形品最薄處之厚度爲基準厚度進行計算，則成形品厚度較厚處之冷

卻時間爲了達到與基準厚度之冷卻時間一致之均勻冷卻目的，此時成形品最厚處之水路排列距離必然的將離模穴非常非常近，才能達到效果，如此近的水路加工距離將造成當成形品實施充填與保壓階段時，模具的變形量會因爲射出壓力或保壓壓力的施加，而造成模具變形，因而影響到成形品的變形量甚至成形品品質。

因此爲了達到均勻冷卻目標的前提之下，使用厚處之冷卻時間爲計算基準，以期能保有較少的模具變形量以及較佳的產品品質。

4.4 模具變形量上限(f_{max})

成形品在充填與保壓階段實施時，可能會因爲射出壓力與保壓壓力的持續而造成模具變形，甚至影響成形品的厚度及重量[23]，因此本研究在規劃設計流程時亦考量模具因爲水路加工對於模具強度的影響，水路加工離模穴如果越近，則模具強度越弱，反之若水路加工距離模穴越遠，則模穴可以有較強的強度，因此本研究除了設有水路加工之邊界條件外，對於因爲水路排列而造成的模具變形亦有所限制，模具變形量之計算方程式表示如下[19]：

$$f_{max} = \frac{1000 \cdot P \cdot d^2}{L} \left(\frac{d^2}{32EL^2} + \frac{0.15}{G} \right) \quad (4-2)$$

其中

P：成形壓力(N/mm²)

d：冷卻水路之管徑(mm)

L：冷卻水路距離模穴表面之距離(mm)

E：彈性係數(N/mm²)

G：剪切係數(N/mm²)

f_{max} ：模具因水路排列而產生之最大變形量(μm)

在本研究中，成形壓力P從Moldflow分析中可得爲201.2Mpa \cong 201.2N/mm²，而由模具鋼材料特性可得彈性係數E = 70588 N/mm²與剪切係數G = 27147 N/mm²，另由參照圖4-6所示，L = d = 10mm，經過計算

$$\begin{aligned}
 f_{max} &= \frac{1000 \cdot P \cdot d^2}{L} \left(\frac{d^2}{32EL^2} + \frac{0.15}{G} \right) \\
 &= \frac{1000 \times 201.2 \times 10^2}{10} \left(\frac{10^2}{32 \times 70588} + \frac{0.15}{27147} \right) \\
 &\cong 100.19\mu\text{m}
 \end{aligned}$$

可得本研究因為水路排列而產生最大變形量 $f_{max} = 100.19\mu\text{m}$ 。

4.5 研究規劃執行步驟

- 步驟一：決定成形品之使用材料、模具以及冷卻液使用參數，及限制條件。
- 步驟二：將成形品依厚度分級，並將成形品做區塊區分。
- 步驟三：使用成形品最厚處之厚度為計算基準，給與冷卻時間計算初始值。
- 步驟四：由方程式(3-4)計算所需之模穴表面溫度，並判斷是否合乎模穴表面溫度高於水路溫度之限制條件。
- 步驟五：由方程式(3-5)及(3-6)計算形狀因子函數值 $S_e = f(X, Y)$ ，再由表4-1選取X、Y之排列；其中 S_e 為形狀排列因子、X為冷卻水路管徑與管徑之間的距離、Y為冷卻水路與模穴之間的距離。
- 步驟六：由選取之X、Y值進行水路排列，並計算使用此種排列方式在成形品於充填及保壓階段實施時，模具所產生之變形量。
- 步驟七：比較選擇之X、Y水路排列所產生之模具變形量是否高於模具所能承受之最大變形量，如果超過即表示此種水路排列方式已造成模具強度削弱太多，如果以此種水路排列方式成形，恐怕會造成模具過度變形而使產品的厚度或變形量加，因此必須重新考量選取新的水路排列組合或是增加冷卻時間以改善。
- 步驟八：經過上述步驟可得到最厚處之冷卻時間(t_{kc})，並以此冷卻時間為基準時間，繼續對第二區段尋找水路排列之形狀因子，目標為使第二區域之冷卻速率趨近於第一區，使成形品之整體冷卻時間趨於一致並達到中心層溫度差異趨於一致，小於 5°C 之溫差。
- 步驟九：針對第二區域經過步驟五、六、七得到水路排列值(X、Y)之後，對Y值做檢查，其Y值最大不可超過140mm(模座最大厚度-1d)，若Y值符合於此模座邊界條件之內，即表示已找到第二區域之適當水路

排列。

步驟十：檢查是否有下一區段需要進行水路排列，如果尚有下一區段需要排列，則針對下一區段重複步驟八、九以尋求最佳水路排列位置，直到全部的區域皆找到最適當的排列組合。

步驟十一：檢查步驟九時，其Y值最大不可超過140mm(模座最大厚度-1d)，如果Y值大於140mm，即表示選擇之模座厚度無法匹配Y值之排列，在不更改模座尺寸且爲了達到使第二區域均勻冷卻的情況下，必須考慮：

1. 在紊流範圍之內修正降低第二區冷卻液的流量(Q)，使此區域冷卻較慢而達到均勻冷卻的目的。
2. 若模穴表面溫度在上限值之內，則可修正提升模穴表面溫度，使第二區模溫較高，延遲此區之冷卻時間以達到均勻冷卻的目的。
3. 若各區域之中心線溫度差異(ΔT)尚未達 5°C 之上限，則可在容許範圍之內放寬溫度差異續做計算。

步驟十二：若已更改冷卻水路之冷卻液流量、模具表面溫度及中心線溫度差異皆已達到上限值，仍無法得到最適當之冷卻水路排列，則代表在此模座厚度之下無法找到適當之X、Y匹配值，則需再增加模板厚度以對應水路排列之需求。

4.6 冷卻時間之定義

冷卻時間需要滿足以下條件：

1. 中心層溫度小於 85°C ：

以本研究所使用之塑膠材料光學級壓克力GH-1000S爲例，頂出溫度爲 85°C ，亦即成形品於冷卻期間必須等待中心層溫度下降至 85°C 以下時，才可接續做頂出的動作，以確保成形品之剛性，於表層至中間層截面方向皆已冷卻到有足夠的強度可以承受頂出之力道而不於造成成形品的損壞。

2. 成形品厚度方向厚處與薄處之中心層溫度差異小於 5°C ：

成形品在冷卻中，若有不平衡冷卻的情況發生，產品將會產生熱應力，

造成成形品於頂出之後產生收縮、翹曲變形的情況發生，因此爲了改善此種現象的產生，一般有兩種方法：

(1).使成形品於模具內留滯於更久的時間，待成形品之尺寸穩定之後，模具才做開模頂出的動作，但是此一方式會造成延長生產週期的結果。

(2).使成形品均勻冷卻，亦即使成形品厚處與薄處兩側的溫差變小，達到均勻冷卻的目的，本文以平面顯示器之14吋楔形導光板爲例，訂定中心層溫度差異不可超過 5°C 爲原則。

4.7 理論公式與 CAE 分析求冷卻時間

於 CAE 方面由 3D 分析之成形品厚度方向溫度曲線圖，如圖 4-7 所示，尋找每一時間點中間層之相對應溫度，彙整成數據之後繪出各厚度中心層溫度隨時間變化之冷卻曲線圖，再由其數據以內插的方式，找出成形品厚處與薄處中心層溫度差異小於 5°C 之時間點如圖 4-8，即爲本研究 CAE 分析所得到之冷卻時間。

而研究流程公式計算方面爲先計算形狀排列因子(Se)，繼而排列冷卻水路管徑與管徑之間的距離(X)及冷卻水路管徑至模穴的距離(Y)之相對位置，分別求得成形品厚處與薄處中心層溫度隨時間變化之冷卻曲線圖，如圖 4-9 所示，再由內插計算的方式尋找成形品厚度方向厚處與薄處中心層溫度差異小於 5°C 之點，來求得符合於本研究邊界條件成形品厚處與薄處之中間層溫度皆冷卻達到頂出溫度 85°C ，且彼此溫度差異小於 5°C 之冷卻時間。

表 4-1 冷卻水路位置尺寸對應表

管徑間距(X)	第一區間(1.22mm)		第二區間(0.95mm)		第三區間(0.68mm)	
	Se1	Y1	Se2	Y2	Se3	Y3
10	0.38	28.27	0.23	44.42	0.16	64.19
11	0.42	27.96	0.26	44.1	0.18	63.87
12	0.47	27.62	0.29	43.77	0.19	63.54
13	0.51	27.28	0.31	43.43	0.21	63.19
14	0.56	26.92	0.33	43.07	0.23	62.83
15	0.61	26.55	0.37	42.69	0.25	62.47
16	0.65	26.17	0.39	42.32	0.27	62.09
17	0.71	25.78	0.42	41.93	0.28	61.69
18	0.76	25.38	0.45	41.53	0.31	61.29
19	0.81	24.97	0.48	41.12	0.32	60.89
20	0.87	24.56	0.51	40.71	0.34	60.47
21	0.92	24.13	0.54	40.28	0.36	60.05
22	0.98	23.71	0.57	39.85	0.38	59.62
23	1.04	23.26	0.61	39.41	0.39	59.18
24	1.11	22.82	0.63	38.97	0.42	58.73
25	1.17	22.36	0.66	38.51	0.44	58.28
26	1.23	21.91	0.69	38.05	0.46	57.82
27	1.29	21.44	0.73	37.59	0.48	57.35
28	1.37	20.97	0.76	37.12	0.49	56.882
29	1.44	20.49	0.79	36.64	0.52	56.41
30	1.52	20.01	0.83	36.16	0.54	55.92
31	1.59	19.52	0.87	35.67	0.56	55.44
32	1.67	19.03	0.91	35.18	0.58	54.94
33	1.76	18.54	0.94	34.68	0.61	54.45
34	1.84	18.04	0.98	34.18	0.63	53.94
35	1.93	17.53	1.02	33.67	0.65	53.44

(續)表 4-1 冷卻水路位置尺寸對應表

管徑間距(X)	Se1	Y1	Se2	Y2	Se3	Y3
36	2.02	17.03	1.06	33.16	0.67	52.93
37	2.12	16.52	1.11	32.64	0.69	52.41
38	2.22	16.01	1.14	32.12	0.72	51.89
39	2.32	15.49	1.18	31.59	0.74	51.36
40	2.43	14.98	1.23	31.07	0.76	50.84
41	2.54	14.47	1.27	30.54	0.79	50.3
42	2.66	13.96	1.31	30.01	0.81	49.77
43	2.78	13.45	1.36	29.46	0.84	49.23
44	2.91	12.94	1.41	28.92	0.86	48.68
45	3.04	12.45	1.45	28.37	0.89	48.13
46	3.18	11.95	1.5	27.82	0.91	47.58
47	3.33	11.47	1.55	27.27	0.94	47.03
48	3.48	10.99	1.61	26.71	0.97	46.47
49	3.64	10.54	1.65	26.15	0.99	45.91
50	3.81	10.09	1.71	25.59	1.02	45.34

註：單位(mm)

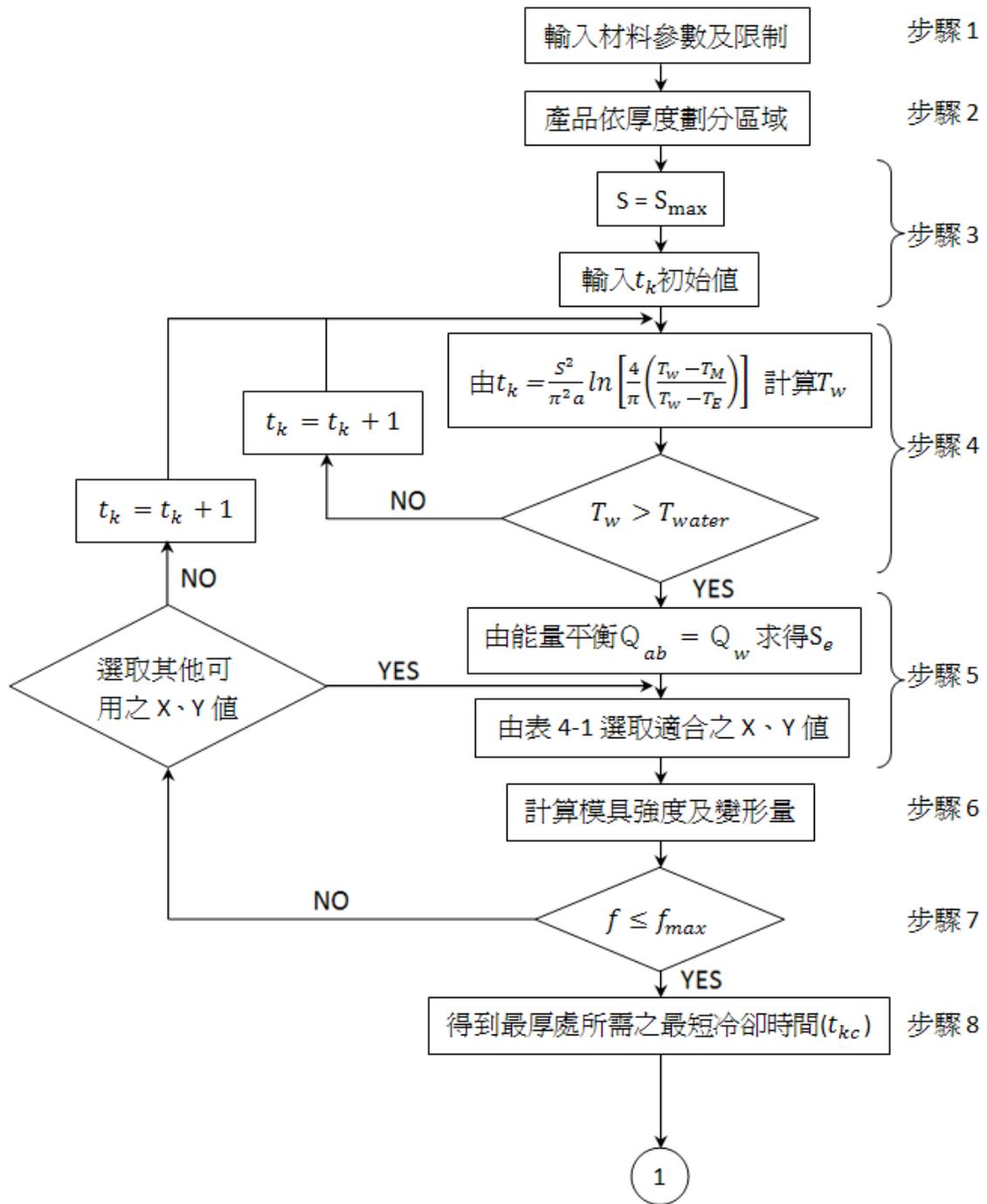


圖 4-1 設計流程圖

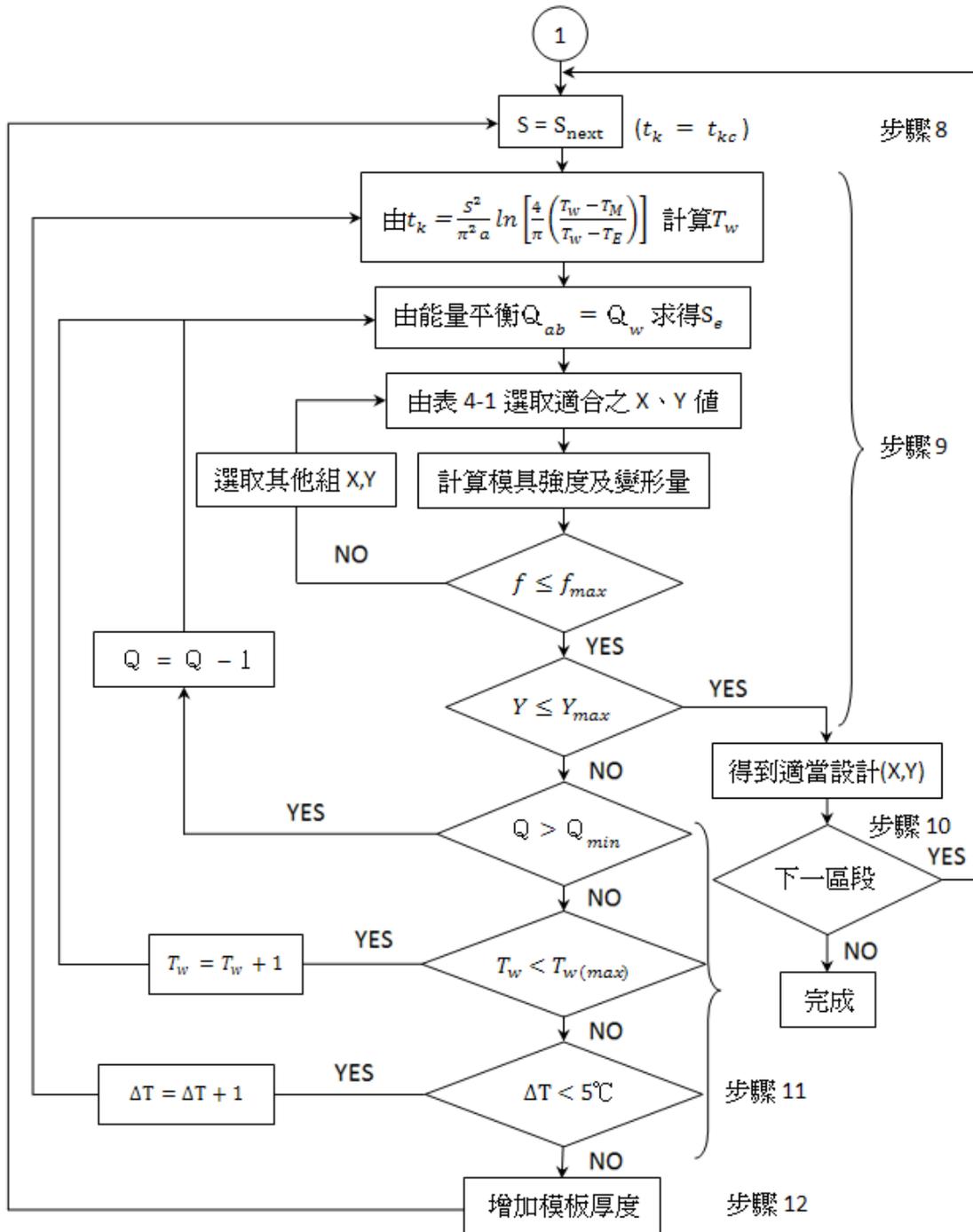


圖 4-1 設計流程圖(續)

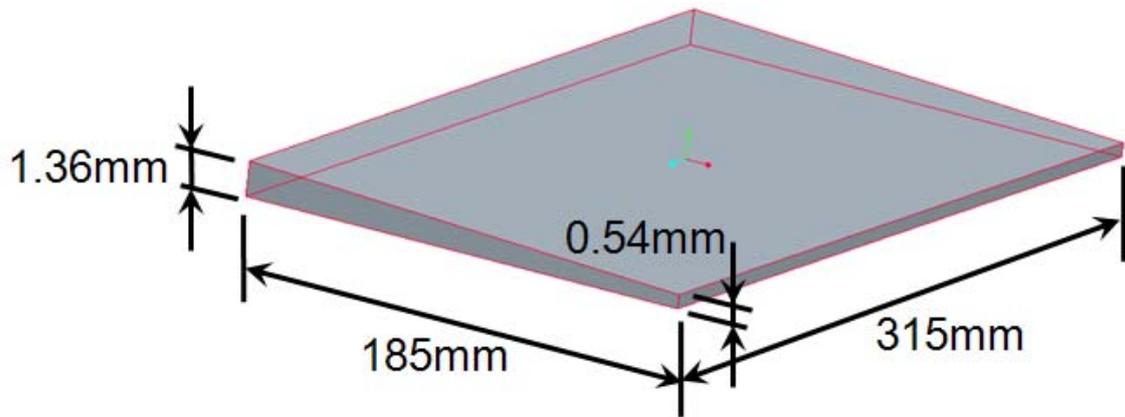


圖 4-2 本研究產品尺寸示意圖

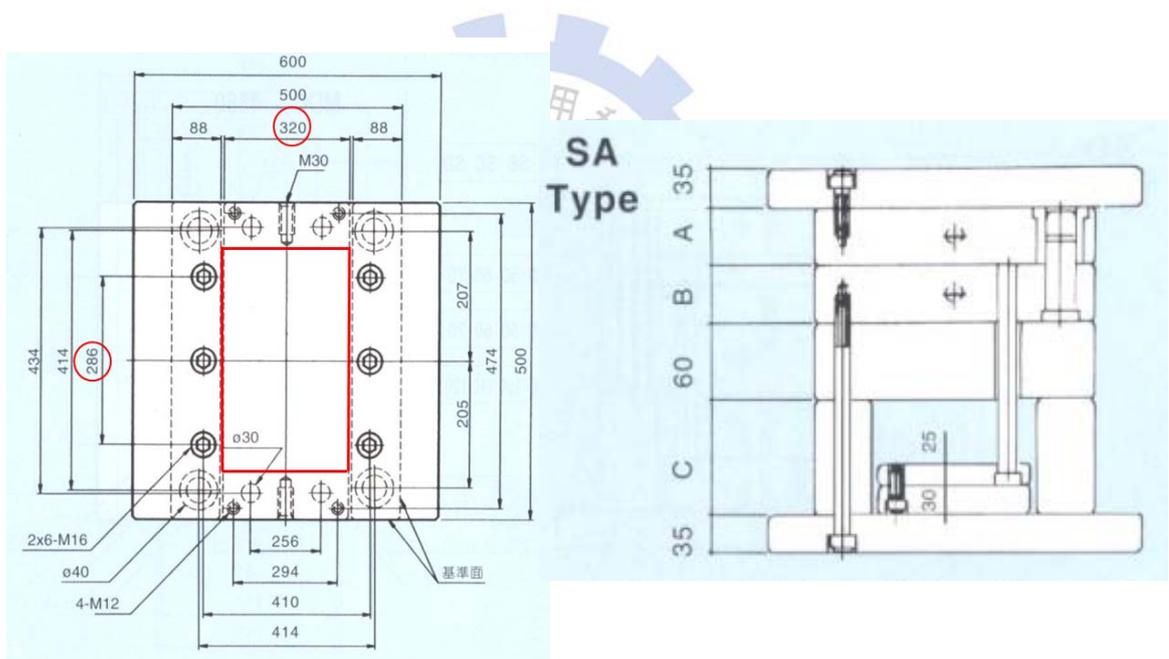


圖 4-3 本研究模座選用示意圖

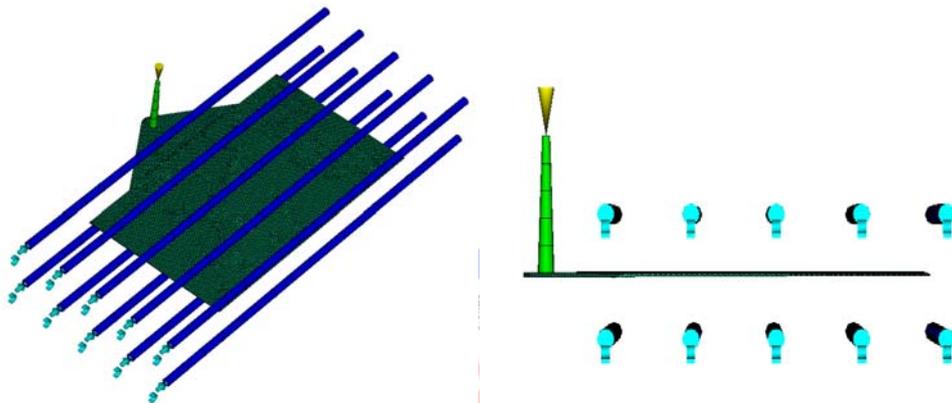
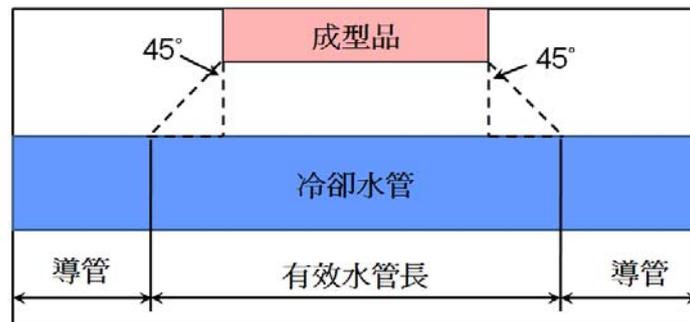


圖 4-4 本例原始水路配置圖

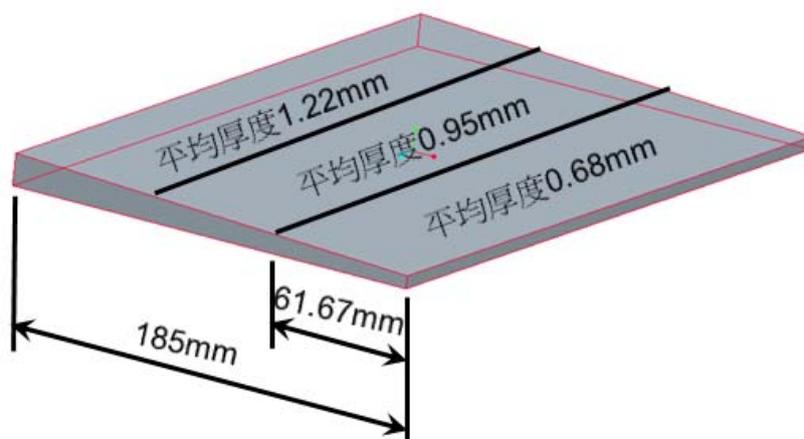


圖 4-5 本研究案例成形品區分示意圖

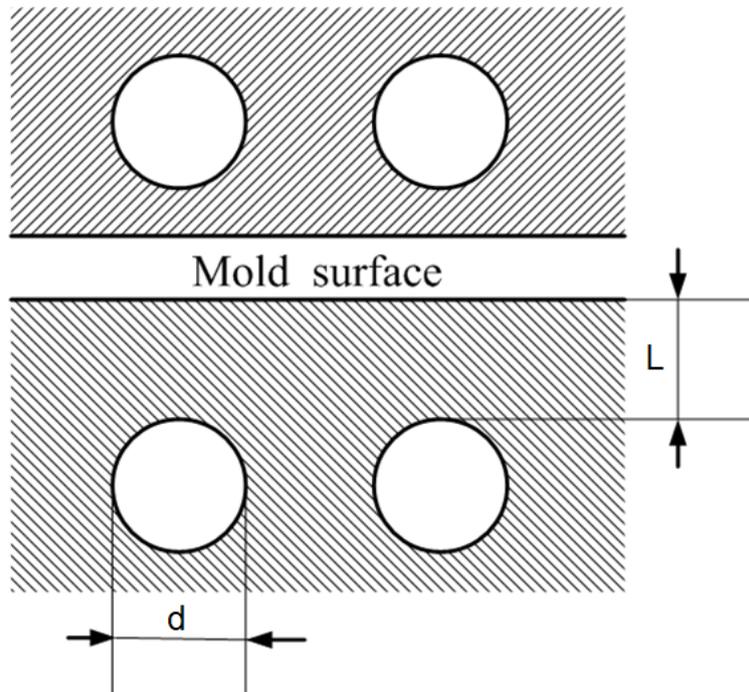


圖 4-6 代號參照圖

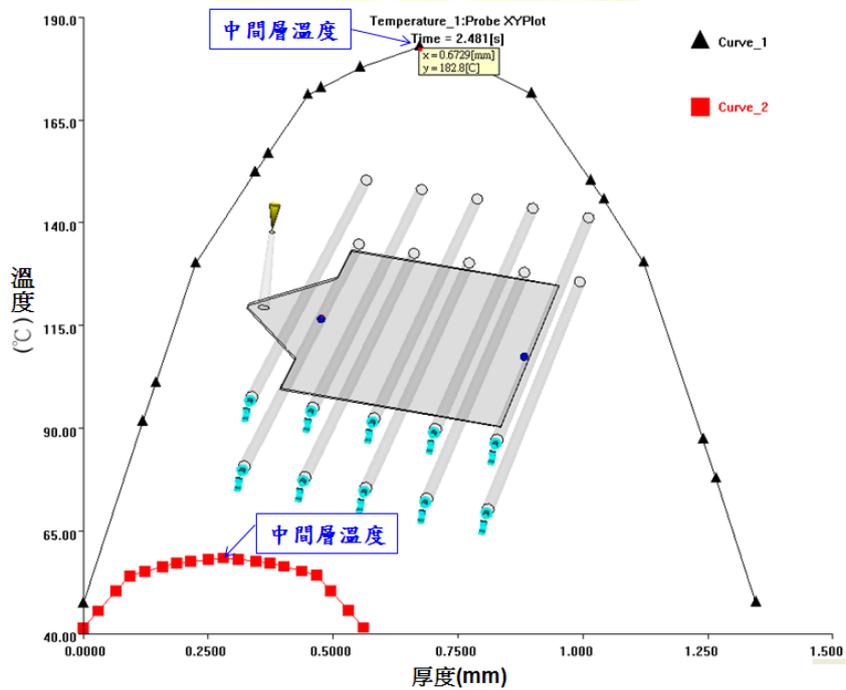


圖 4-7 成形品厚度方向溫度曲線圖

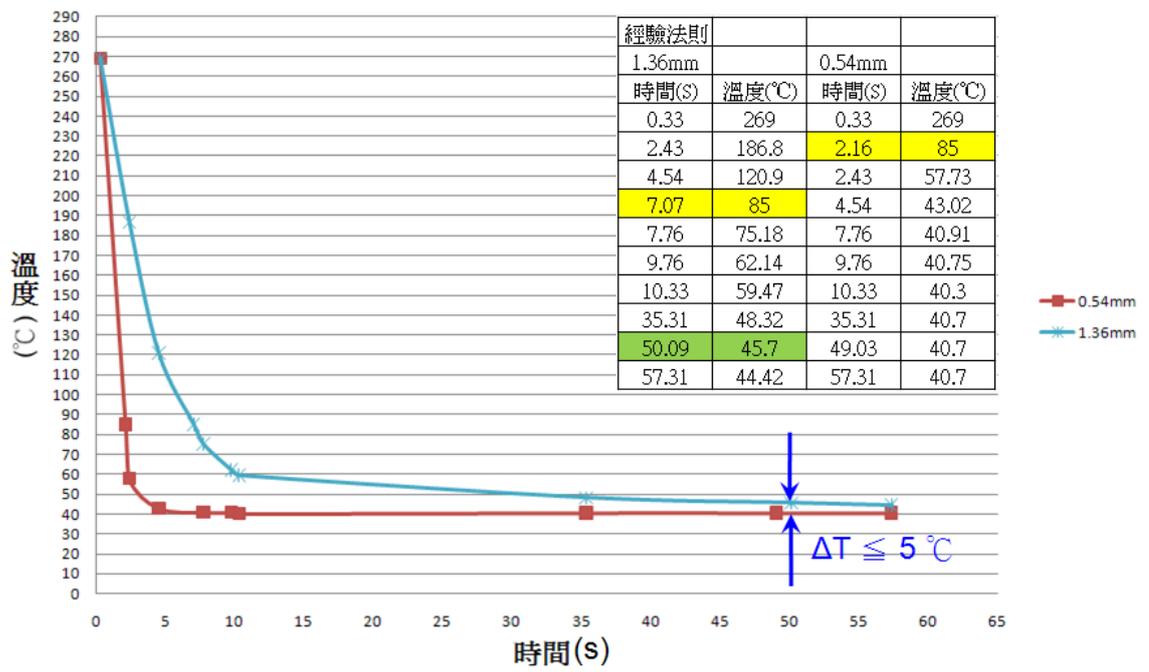


圖 4-8 厚度中心層之溫度隨時間之變化(CAE 分析)

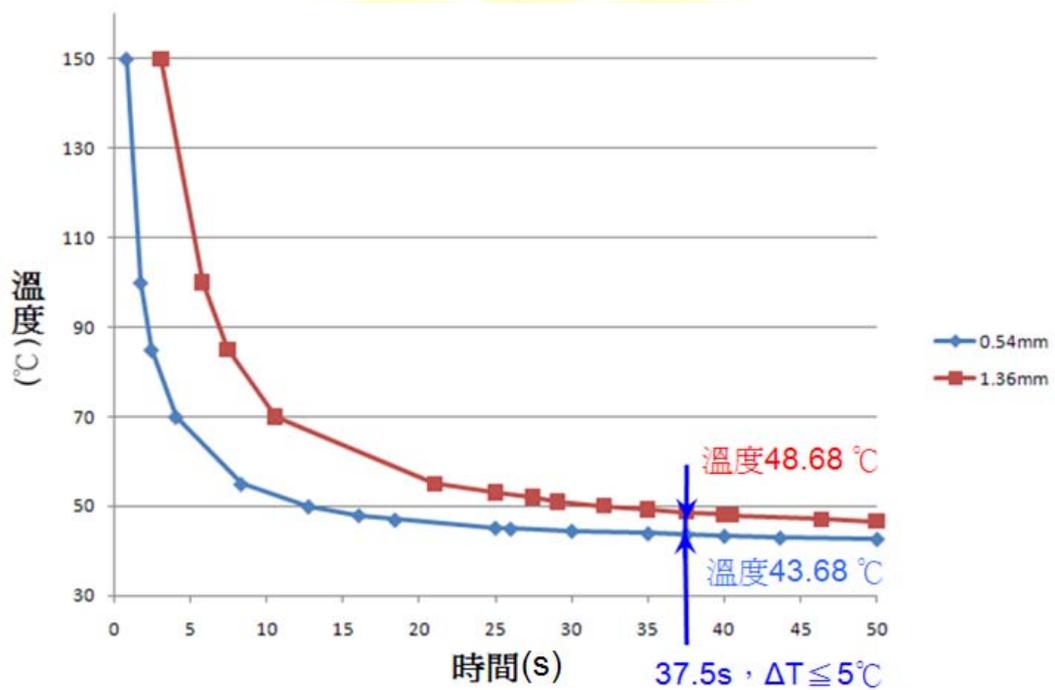


圖 4-9 厚度中心層之溫度隨時間之變化(公式計算)

第五章 結果與討論

5.1 平板形與楔形導光板之冷卻時間差異性

本研究案例為一厚薄不均之楔形導光板，厚度為 0.54mm~1.36mm，分別建構均勻厚度 0.54mm、均勻厚度 1.36mm 與本文厚度不均之案例，以冷卻水路管徑：管徑中心至模穴距離：管徑之間距=(1：3：5)排列進行分析比較，說明厚度不均之產品於射出成形製程中，造成冷卻時間拉長導致產能降低的原因。

1.模型一(均勻厚度 0.54mm)

如圖 5-1 所示，冷卻時間約 1.8 秒時即已達到頂出溫度(85°C)，此時位於產品進膠處與產品充填末端之溫度差異最小，爾後有漸漸變多之趨勢，待成形品冷卻到 5 秒時之 ΔT 為 3.27°C，符合經驗法則規範之產品溫度差異於 5°C 以內，因此對於厚度 0.54mm 之模穴而言，最適合的冷卻時間為 1.8 秒，表示冷卻時間約 1.8 秒時即可將產品頂出。

2.模型二(均勻厚度 1.36mm)

如圖 5-2 所示，冷卻時間約 5.1 秒時達到頂出溫度(85°C)，此時位於產品進膠處與產品充填末端之溫度差異最小，待產品冷卻到 10 秒時之 ΔT 為 2.35°C，而冷卻到 50 秒時 ΔT 為 2.99°C 有漸漸變多之趨勢，然而都符合經驗法則規範之產品溫度差異於 5°C 以內，因此對於厚度 1.36mm 之模型二而言，最適合的冷卻時間為 5.1 秒，表示冷卻時間約 5.1 秒時即可將產品頂出。

3.模型三(厚度不均由 0.54mm~1.36mm)

如圖 5-3 所示，產品充填末端厚度(0.54mm)處於 1.9 秒時已達到頂出溫度(85°C)，此時進膠口厚度較厚(1.36mm)處之溫度尚未達到頂出溫度，須等到 5.1 秒時較厚處才達到頂出溫度，然而此時亦不適合將產品開模頂出，因為 5.1 秒時雖然兩點皆已到達頂出溫度，但是其溫度差異為 41.46°C，差異太大不合乎經驗法則之 5°C 差異範圍，如果於此時開模取出成品，必會造成產品因為冷卻不均而造成收縮變形甚至翹曲，因此須再將產品置留於模具內，待產品厚度較厚處與較薄處之溫度差異符合經驗法則 $\Delta T < 5^\circ\text{C}$ 時才可開模頂出，而見圖冷卻時間於 25 秒時其溫差值為 6.12°C，於 50 秒時為 6°C，有漸漸縮短差異之趨勢，但仍未達到差異於 5°C 內之標

準，由此可知與厚度均一之產品相比，厚度不均之產品於冷卻時，爲了使不同厚度處之溫度差異達到趨於平衡所耗費等待的時間非常長。

5.2 縮短冷卻時間的有效方法

本研究共有三種縮短冷卻時間的方法，分別爲：

1. 調整形狀因子(Se)：即針對冷卻水路管徑與管徑之間間距X、管徑與模穴之間的距離Y，以本研究之研究流程進行水路位置的運算排列，找出各區段所適合的水路相對位置關係之後，進行CAE分析以得到冷卻時間。
2. 調整水路溫度：利用本文之研究流程找出適當的水路排列之後，再藉由不同的水路溫度來改變模穴表面溫度，藉以縮短冷卻週期的時間，其中又分爲，整體水路溫度的改變與分區水路溫度改變兩種方式。
3. 調整冷卻水路之雷諾數(Re)：調整冷卻水路雷諾數即改變冷卻液之流量，經由不同的流量搭配適當的水路排列以探討縮短冷卻週期時間的效果。

本文所謂之經驗法則排列即冷卻水路之管徑：冷卻水路至模穴表面的距離：冷卻水路管徑與管徑之間距=(1：3：5)之排列，如圖5-4所示，後續皆以型式一代替敘述，而經由本文最佳化過成排列之水路爲型式二，取型式二中水路間距爲50mm做爲改變參數之基準排列則爲型式三。

本章將先藉由改變單變數來探討CAE與本研究計算之間的趨勢與差異，然後針對型式二排列結果進行CAE分析，進而與型式一比較縮短冷卻時間的效果，再以型式三之排列針對整體水路溫度、區域水路溫度，以及流量的調變以找出最短的冷卻時間，最後比較各種縮減冷卻時間方式之翹曲變形量。

5.3 單變數對冷卻時間的影響

此節以型式一爲基準，針對改變的參數，分別爲成型品之厚度(S)、冷卻水路與水路之間間距(X)、冷卻水路距離模穴的距離(Y)、冷卻水路之溫度(T_{water})、冷卻液之雷諾數等與冷卻時間之關係，做單變數的計算與 CAE 分析比較，如圖 5-5 ~5-9 所示，藉此判斷各項參數對冷卻時間的影響，以及對照 CAE 分析與本研究計算冷卻時間的準確性，發現在探討所有單變數的影響當中，當水路間距彼此間越靠近、冷卻水路距離模穴的距離越短、冷卻液流速越快時，會有較佳的熱傳效

率因此可得到較短的冷卻時間，而當冷卻液的溫度越高時，可以縮短成形品厚處與薄處中心層溫度之差異，因此亦可以縮短冷卻時間，且每一項次的改變經由本研究計算的結果與 CAE 分析結果皆有相似的曲線趨勢，而彼此間冷卻時間的數值亦相互趨近，顯示本研究計算與 CAE 分析的結果相似，因此也顯示本研究計算針對水路相對位置之排列與改變參數的分析結果有可參考之價值。

5.4 最佳化水路排列與經驗法則之 CAE 分析比較

本研究之冷卻水路加工邊界條件，在冷卻水路與冷卻水路間距(X)方面為 $2d \sim 5d$ ，在冷卻水路與模穴之距離(Y)方面為 $1d \sim (\text{模板厚度} - 1d)$ 之範圍，因此經由本研究最佳化流程計算結果，可以分別在冷卻水路管徑與管徑間距(X)之變化範圍內得到相對應之冷卻水路至模穴距離(Y)，如表 4-1 冷卻水路位置尺寸對應表所示，因為本研究計算流程是以三個區段中較厚區段之冷卻時間為基準，計算找出形狀排列因子(Se)，再去排列剩餘區段冷卻水路之相對位置關係，因此三個區段之冷卻時間將為一致，且每更改一冷卻水路與冷卻水路間距之變數(X)，將對應產出得到一冷卻水路相對於模穴之距離(Y)，因此為了簡化實驗分析，本研究將取冷卻水路間距(X)為 20mm、30mm、40mm、50mm 時之位置排列數據來做 CAE 分析，並與型式一冷卻時間之比較。

由表 4-1 可得知當冷卻水路間距為 20mm 時，冷卻水路與模穴之距離第一區段 $Y_1=24.56\text{mm}$ ，第二區段 $Y_2=40.71\text{mm}$ ，第三區段 $Y_3=60.47\text{mm}$ ，排列關係圖，如圖 5-10 所示，圖 5-11、5-12、5-13 分別為冷卻水路與水路之間距為 30mm、40mm、50mm 時之冷卻水路位置排列關係圖。

經過最佳化排列及 CAE 分析之後，每一組分析分別取不同厚度，如圖 5-14 分別取 1.36mm、1.16mm、0.95mm、0.75mm、0.54mm 等五點觀察其厚度方向中間層溫度隨時間之變化，如圖 5-15 所示，而比較結果如表 5-1 所示，型式一之冷卻時間經 CAE 分析為 50.09 秒，而經由最佳化水路排列之型式二分析結果，如表 5-1 所示，平均約 29.39 秒，當水路間距越大時可以得到越短的冷卻時間，與型式一排列比較結果約可縮短冷卻時間約 20.7 秒。

造成成形品產生變形的原因有不均勻的收縮、分子配向性與不均勻的冷卻，而經由 CAE 分析之後發現，成形品的變形主要由發生在 Z 方向之不均勻的冷卻所

造成，如表 5-1 之經驗法則排列所示；而經由最佳化後的水路排列，X 方向變形量平均略為減少 0.09mm，Y 方向變形量平均略為增加 0.05mm，對於總變形量影響不大，而在 Z 方向主要由冷卻不均所影響之變形量則由 2.26mm 縮減到約 0.29mm 幅度較大，改善了成形品因為冷卻不均而產生變形的問題，使總變形量縮小到約 0.52mm，與型式一相比較有明顯之改善，如表 5-1 及圖 5-16~5-20 所示；變形量座標軸示意如圖 5-21 所示，由此可知經由本研究最佳化流程所排列之冷卻水路不僅可以縮短冷卻時間，對於成形品因為水路最佳化的排列使其冷卻均勻，亦可以改善總變形量。

經由研究發現，一般射出成形塑件的產品厚度皆為均一，熔膠於模穴內部冷卻時，當中間層達到頂出溫度時，即可做產品頂出的動作，而本研究之例為一肉厚不均之楔形導光板產品，如圖 5-22 所示，假設產品薄處之中間層為 A 點，產品厚處中間層為 B 點，因為 A 點之厚度很薄，因此 A 點降溫很快，B 點較厚降溫較慢，當成形品欲滿足本研究 $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ 之邊界條件時，則需要較長的冷卻時間，因為當 A 點降溫太快時，B 點須要追趕的溫度梯度非常大，因此試想如果可以讓 A 點處降溫慢一點，使 A 點處之模穴表面溫較高，或許可以減緩 A、B 兩點間之溫度差異，甚而使冷卻時間更加縮短，而為了觀察模具表面溫度升高對冷卻時間的影響，取與型式一相同冷卻水路數目，水路間距為 50mm 之排列(型式三)，進行水路溫度以及流量的改變探討後續之研究。

5.5 改變整體水路溫度對冷卻時間之影響

本節以型式三水路間距 $X=50\text{mm}$ 時之水路排列為基準，分別針對水溫於 50°C 、 60°C 、 70°C 、 80°C 時，探討水路溫度對冷卻時間的改善，由表 5-2 及圖 5-23~5-26 所示，隨著冷卻水路溫度為越來越高時，冷卻時間有縮短的趨勢，但是在變形量卻有因水路溫度升高而使變形量增加的現象，其中由收縮不均與分子配向性所影響之變形量雖然些微增加但是幅度不大，但在 Z 方向主要由冷卻不均所影響之變形量明顯隨著水路溫度的升高而增加；觀察發現當水路溫度越高時，其冷卻時間可以縮短，因為當水路溫度越高時，會將模具表面的溫度提高，如此可以縮短圖 5-22 中 A、B 點之溫度差異，使 A 點溫度保持在較高的溫度，而 B 點所需追趕之溫度差異亦因此縮短，因而改善了冷卻時間，然而較高的水溫導致較高的模具表

面溫度，雖然縮短了冷卻時間，但是開模時越高的水路溫度意味著成形品也將在水路溫度附近被開模取出，因此越高的水路溫度會使開模時成形品的溫度與室溫相差太多而導致變形量的增加，因此藉由型式三搭配改變整體水路溫度來縮短冷卻時間的方式有明顯的效益，但是卻會增加成形品的總變形量。

5.6 改變冷卻液流速對冷卻時間之影響

本節以型式三水路間距 $X=50\text{mm}$ 時之水路排列為基準，分別針對冷卻液雷諾數於 8000、6000、4000、2300 時，探討冷卻液流速對冷卻時間的改善，由表 5-2 所示，當雷諾數在 10000~6000 範圍之內時，其冷卻時間平均在 28.73 秒，但是如果雷諾數之值再小一點，約 4000~2300 之範圍時，其熱傳效率會明顯的降低，隨著冷卻液流速越來越慢，而使冷卻時間漸漸拉長，如圖 5-27 所示；但分析顯示此組由收縮不均與分子配向性對變形量之影響皆與型式一相近，唯在 Z 方向由冷卻不均所影響之變形量明顯縮減至平均 0.34mm 左右，因此總變形量明顯降低至約為 0.52mm，如圖 5-28~5-31 所示，是所有改變參數中變形量與最佳化排列比較變化最少的組別，因此由表 5-2 觀察得知，藉由型式三排列搭配改變冷卻液流速來縮短冷卻時間的方式，並沒有比最佳化水路排列有明顯的效益，但是所需之冷卻時間已經比型式一排列縮減，而其總變形量亦是所有改變參數之中變化量最少的。

5.7 搭配不同水路溫度對冷卻時間之影響

在 5.5 節的分析中發現，改變水路溫度確實可以使成形品明顯快速的冷卻，但發現不論使用整體冷卻水路溫度的改變或是整體冷卻水路流量的改變，皆是做整體區域的參數改變，成形品厚處皆冷卻較慢，而成形品薄處皆冷卻較快，如圖 5-15 所示，因此本節將針對特定區域的水路溫度進行調整，使成形品厚處之水路溫度較低，有較快的冷卻速度，而成形品厚度較薄處給予較高之水路溫度使其冷卻速度較慢，藉以縮短成形品厚處與薄處之溫度差異，以獲得較短之冷卻時間。

因為本研究之邊界條件為成形品最厚處與最薄處中間層之溫度差異 ΔT 必須小於 5°C ，因此將針對此兩區域之水路溫度進行改變，如圖 5-32 所示，而其五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化，如圖 5-33 所示，藉由冷卻分析發現，成形品於 7.94 秒時完全符合本研究定義之冷卻時間邊界條件：產品厚處與薄處中心層

溫度皆低於頂出溫度 85°C 且其溫度差異 ΔT 小於 5°C；但是發現水路溫度經過區域改變之後，厚度 1.16mm 處之中心層溫度與厚度 1.36mm 處之中心層溫度差異已經大於 5°C，即代表部分區域水路溫度的改變方式雖然可以讓成形品於短時間之內符合頂出之邊界條件，但卻會讓成形品其他區域之溫度差異變大，亦即有可能因此而影響變形量。

因此爲了讓成形品之整體溫度差異變小，所以將溫度調配改爲三區變化調整水路溫度，如圖 5-34 所示，而其五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化，如圖 5-35 所示，結果發現與只針對兩區域調整溫度有相同的現象，成形品於 7.71 秒時就已符合本文之頂出條件，但在厚度 0.95mm 處之中心層溫度差異 ΔT 亦會高於 5°C。

所以接下來只針對成形品最厚處之溫度進行改變，如圖 5-36 所示，圖 5-37~5-40 爲各水路溫度分區排列中心層溫度隨時間變化之冷卻曲線圖，由表 5-2 觀察得知，藉由型式三搭配分區水路溫度來縮短冷卻時間的方式有明顯的效益趨勢，如圖 5-41 所示，但雖然各組皆已達到本研究定義之冷卻時間條件，但是於厚度方向 1.16mm 處之中心層溫度仍有可能會有成形品內部溫差大於 5°C 的情況發生，唯有在水路溫度(70°C/80°C)分區排列時，所有厚度之中心層溫度差異完全在 5°C 內爲較佳之設計，但是其總變形量卻是分區溫度排列中最高爲 3.32mm，判斷產生此搭配水溫越高變形量越多的現象與 5.5 節整體水路溫度改變之情況相同，較高的水溫產生較高的模具表面溫度，因此越高的水路溫度會使開模時成形品的溫度太高而與室溫相差太多導致變形量增加，此趨勢在 Z 方向由冷卻不均所影響之變形量更加明顯，如表 5-2 及圖 5-42~5-45 所示。

此外在此節的分析中發現，冷卻時間即爲最適當之開模時間點，因爲不論在此時間點之前或之後其中心層溫度差異皆較冷卻時間點大，因此如果開模錯過此時間點的話，則成形品之中心層溫度差異會變大，亦有可能因此造成成形品之變形量增加。

本研究爲一厚度不均楔形導光板，考慮成形性質因此需限制邊界條件成形品中心層溫度差異範圍在 5°C 以內，但若成形品爲一般民生用品時，則溫度差異限制條件範圍可爲 10°C 以內，則此種冷卻水路設計方式搭配冷卻水路溫度分區的改變可以大幅減少冷卻時間。

表 5-1 水路最佳化排列與經驗法則排列對冷卻時間及變形量之比較

	冷卻時間	縮短時間	X 方向變形	Y 方向變形	Z 方向變形	總變形量
經驗法則排列	50.09	0	1.27	0.88	2.26	1.43
水路間距 X=20	30.35	19.74	1.19	0.92	0.38	0.52
水路間距 X=30	29.57	20.52	1.19	0.95	0.27	0.51
水路間距 X=40	29.17	20.92	1.16	0.92	0.23	0.52
水路間距 X=50	28.46	21.63	1.18	0.94	0.27	0.51

表 5-2 改變參數對冷卻時間及變形量之影響

	冷卻時間	縮短時間	X 方向變形	Y 方向變形	Z 方向變形	總變形量
經驗法則排列	50.09	0	1.27	0.88	2.26	1.43
水溫 50°C	28.29	21.8	1.2	0.86	0.83	0.67
水溫 60°C	26.97	23.12	1.58	1	4.55	2.79
水溫 70°C	26.29	23.8	1.84	1.12	5.83	3.51
水溫 80°C	25.11	24.98	1.77	1	7.8	4.71
雷諾數 8000	28.63	21.75	1.2	0.95	0.36	0.52
雷諾數 6000	28.82	21.27	1.19	0.92	0.29	0.51
雷諾數 4000	32.67	17.42	1.19	0.96	0.35	0.52
雷諾數 2300	35.26	14.83	1.2	0.95	0.36	0.53
分區水溫 40/80	7.98	42.11	1.63	1.09	2.7	1.65
分區水溫 50/80	8.63	41.46	1.61	0.97	3.38	2.08
分區水溫 60/80	10.33	39.76	1.75	1.05	5.2	3.17
分區水溫 70/80	16.49	33.6	1.81	1.12	5.55	3.32

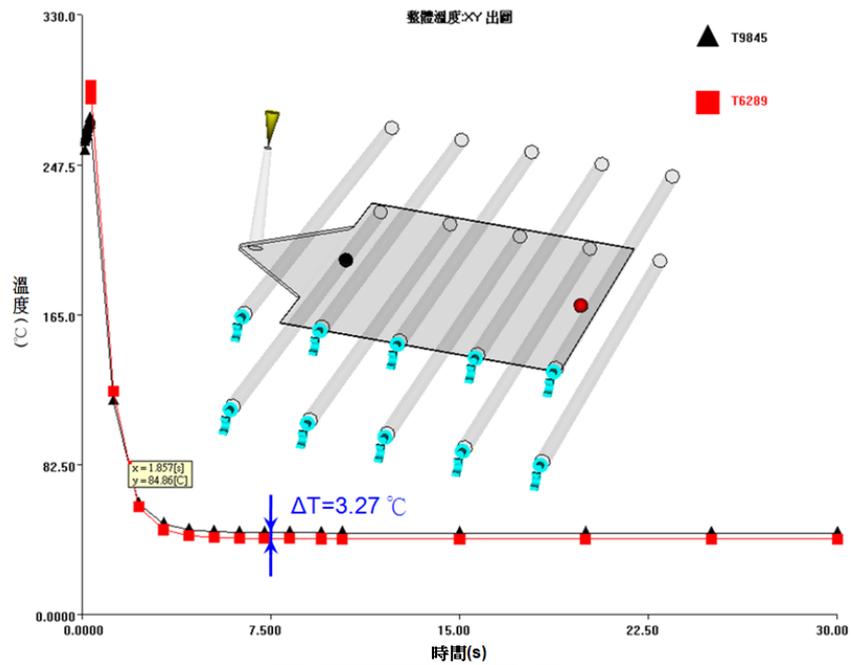


圖 5-1 均勻厚度 0.54mm 中心層之溫度隨時間之變化

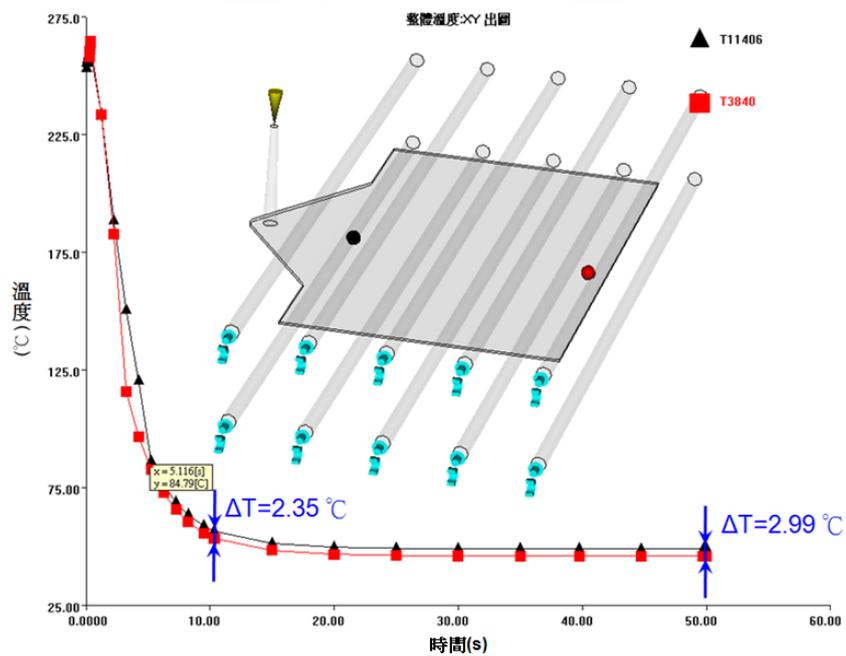


圖 5-2 均勻厚度 1.36mm 中心層之溫度隨時間之變化

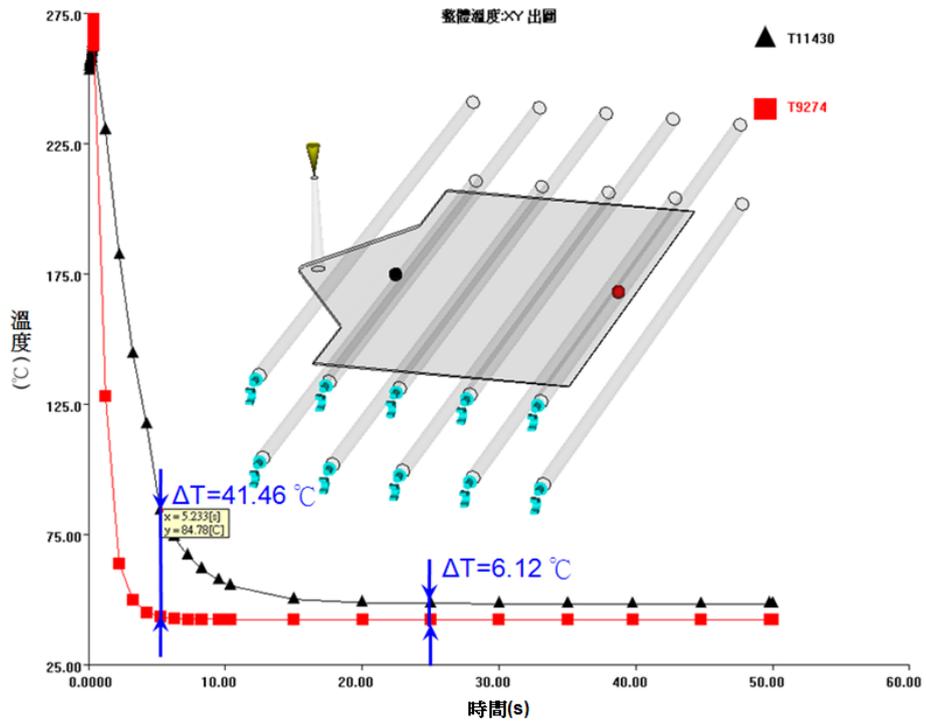


圖 5-3 厚度不均 0.54mm~1.36mm 中心層之溫度隨時間之變化

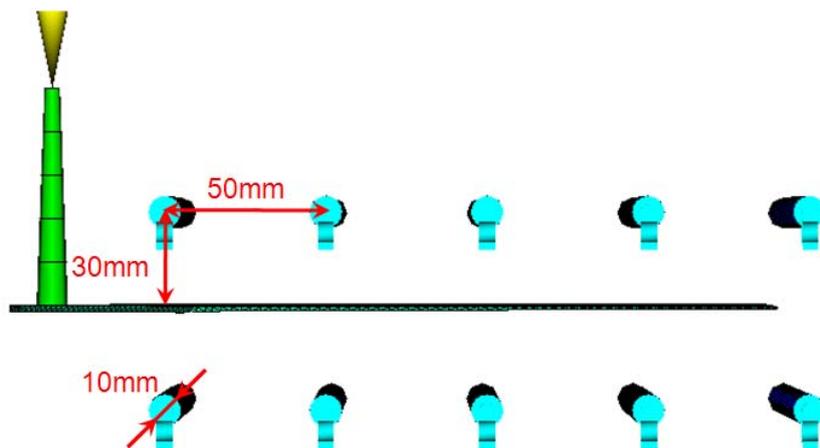


圖 5-4 型式一水路排列關係圖

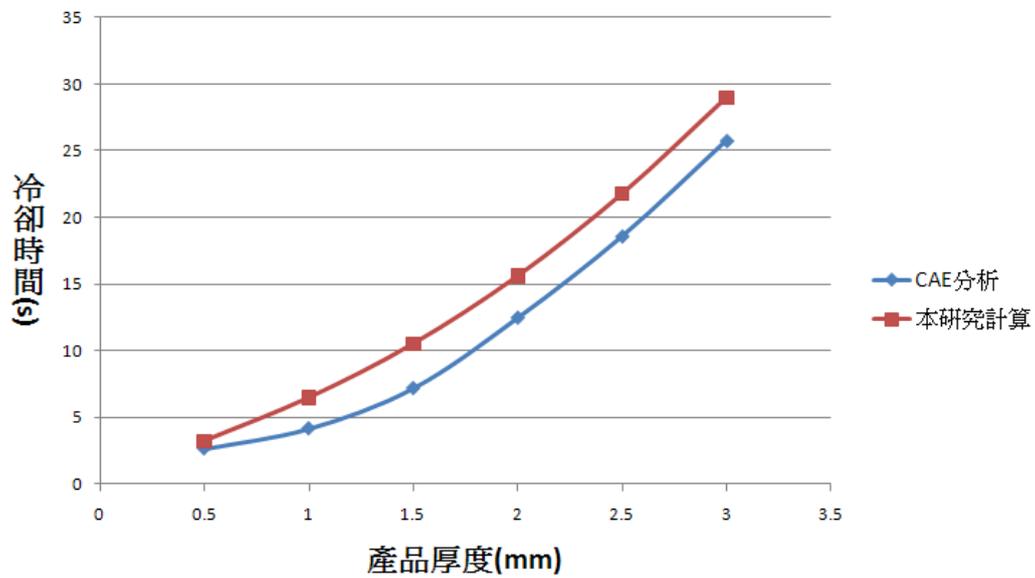


圖 5- 5 產品厚度與冷卻時間關係圖

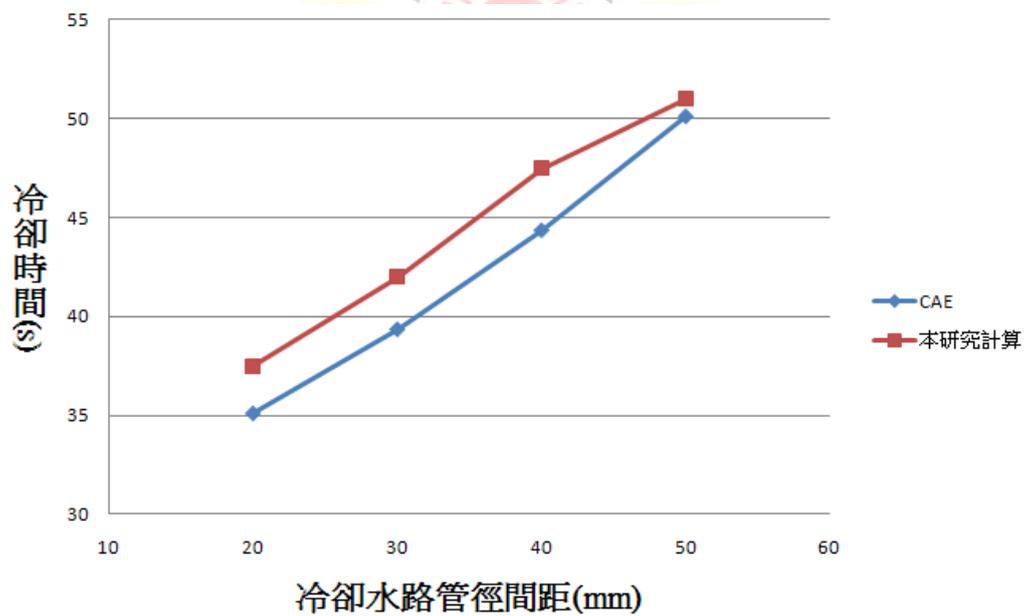


圖 5- 6 冷卻水路管徑間距與冷卻時間關係圖

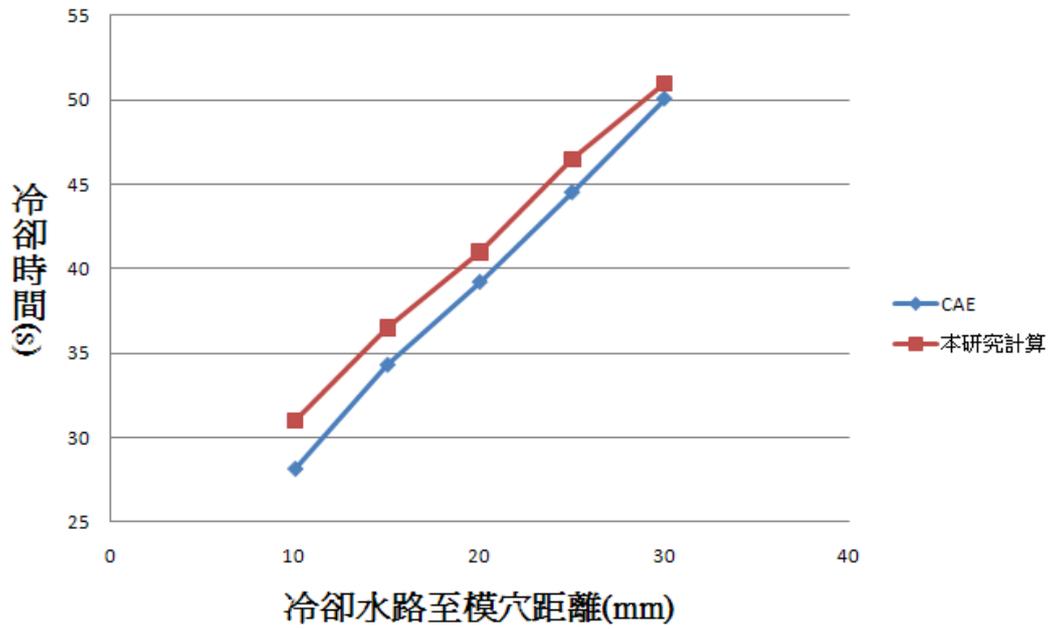


圖 5-7 冷卻水路至模穴距離與冷卻時間關係圖

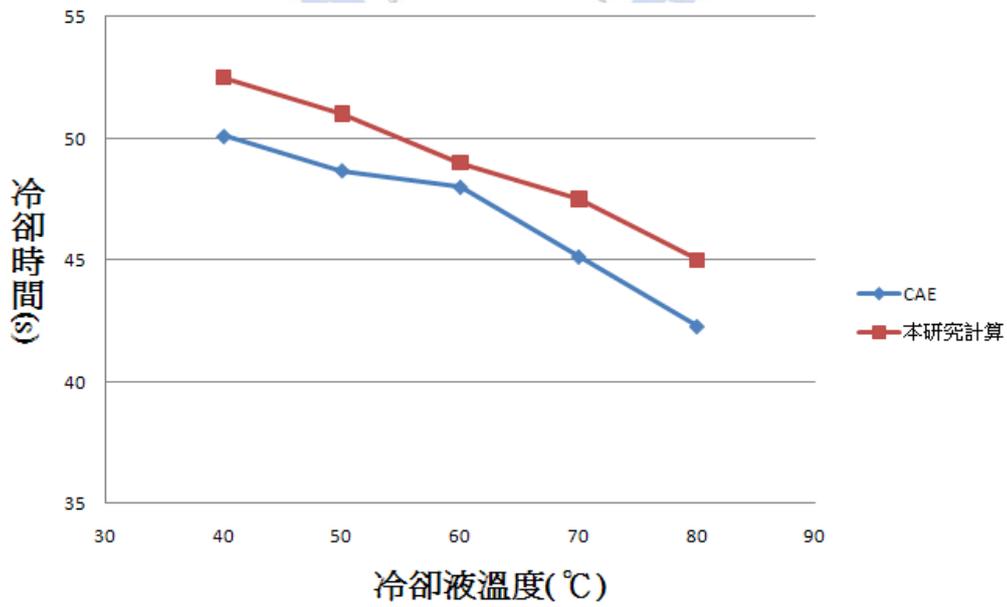


圖 5-8 冷卻液溫度與冷卻時間關係圖

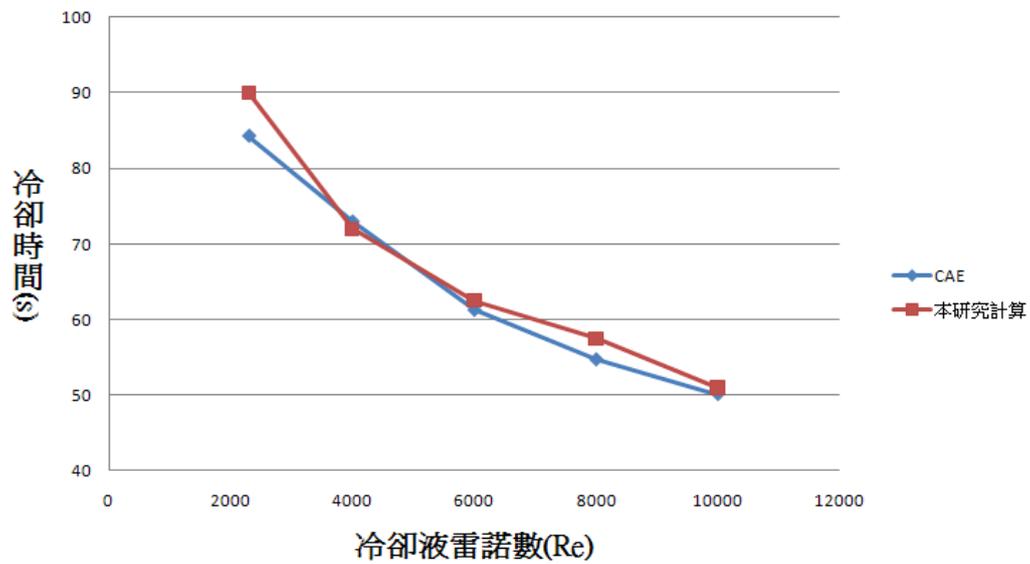


圖 5-9 冷卻液雷諾數(Re)與冷卻時間關係圖



圖 5-10 水路間距 20mm 時水路排列關係圖

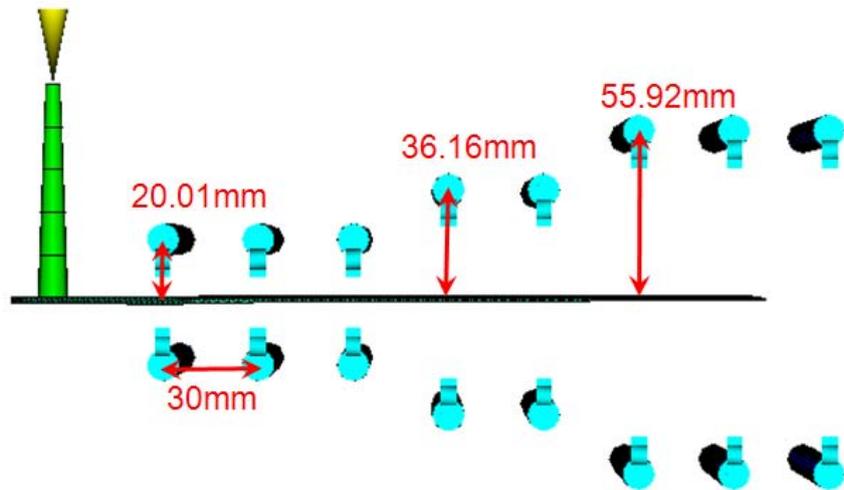


圖 5- 11 水路間距 30mm 時水路排列關係圖

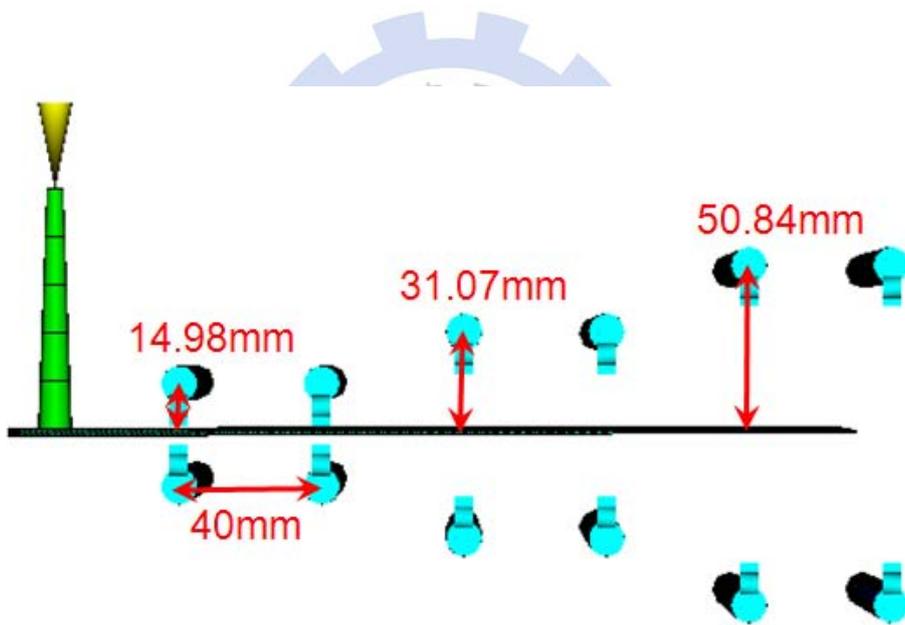


圖 5- 12 水路間距 40mm 時水路排列關係圖

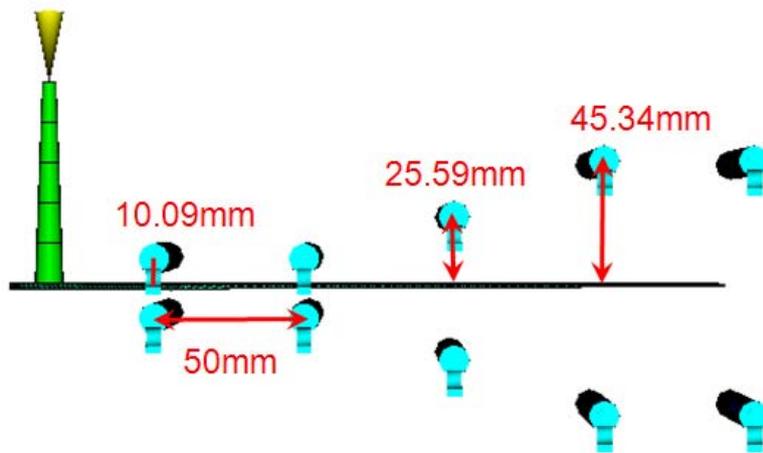


圖 5- 13 水路間距 50mm 時水路排列關係圖

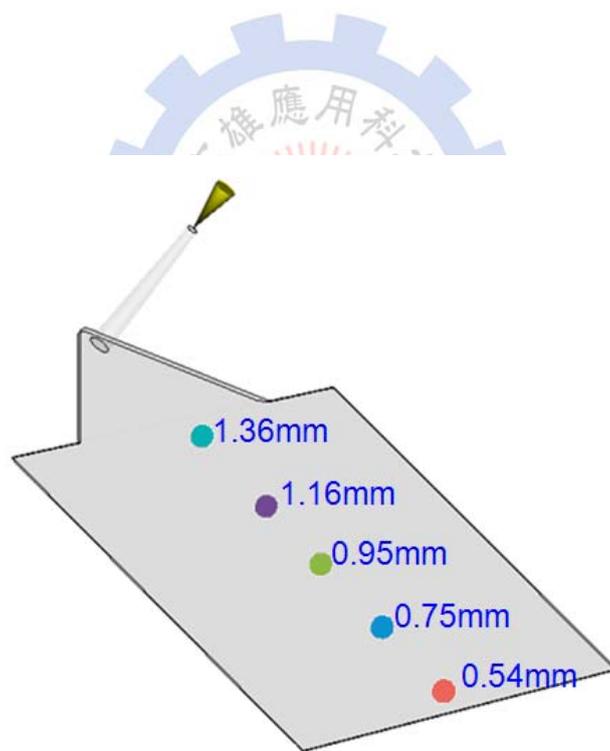


圖 5- 14 不同厚度取樣示意圖

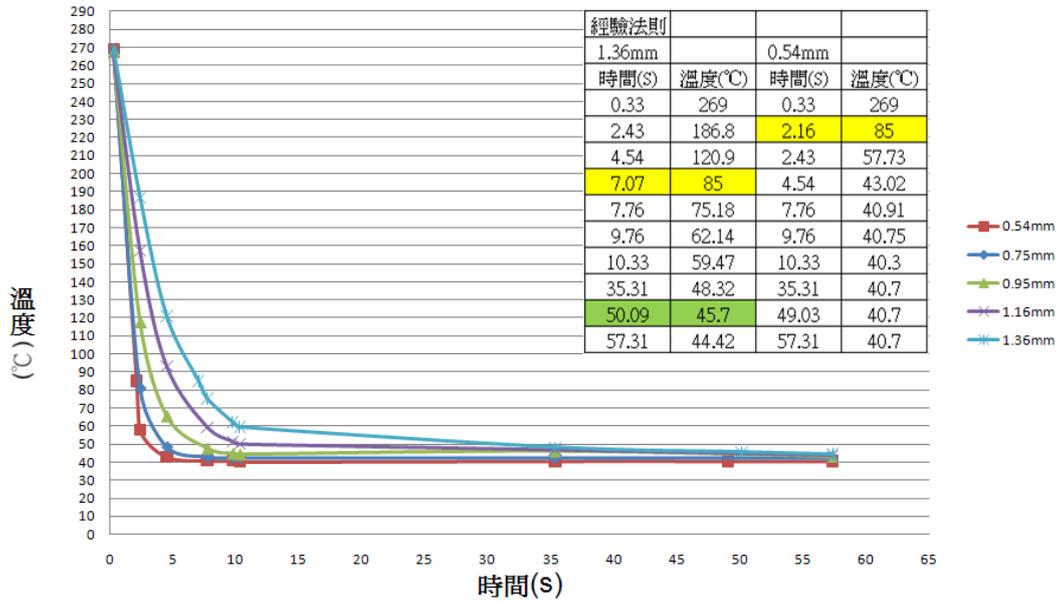


圖 5- 15 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(型式一)

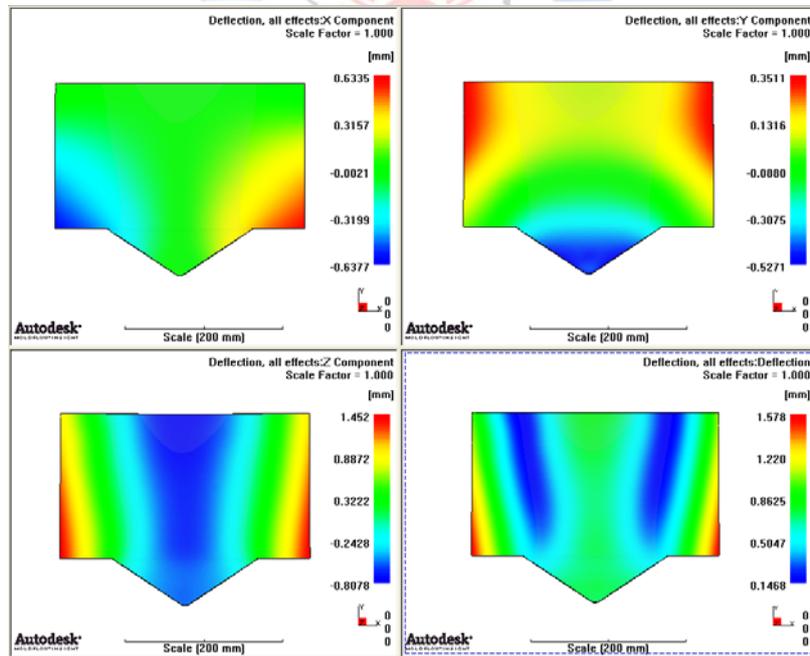


圖 5- 16 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式一排列)

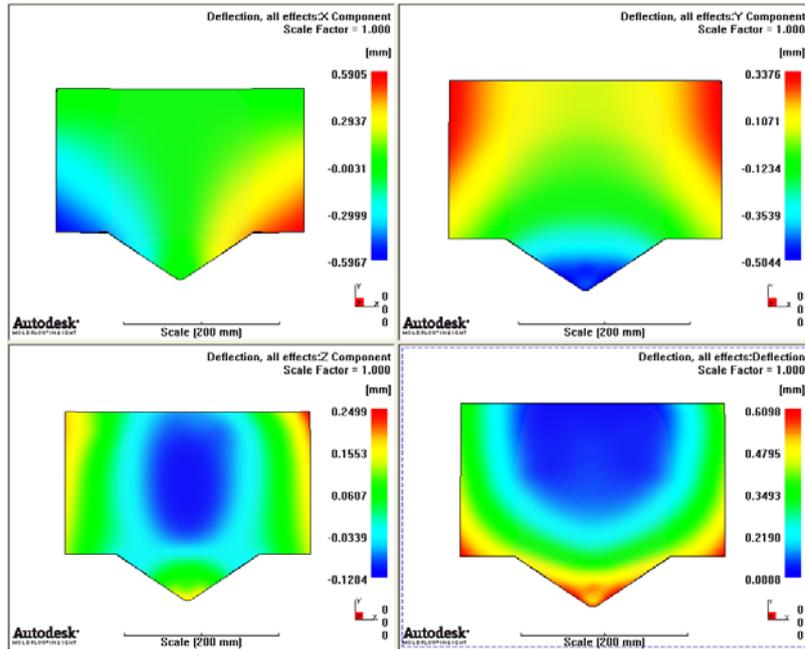


圖 5- 17 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 20mm)

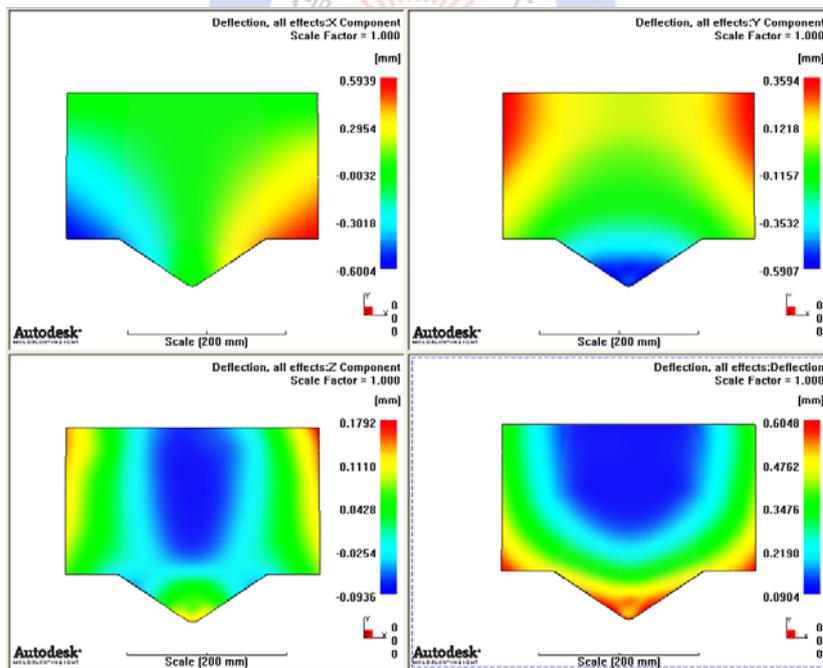


圖 5- 18 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 30mm)

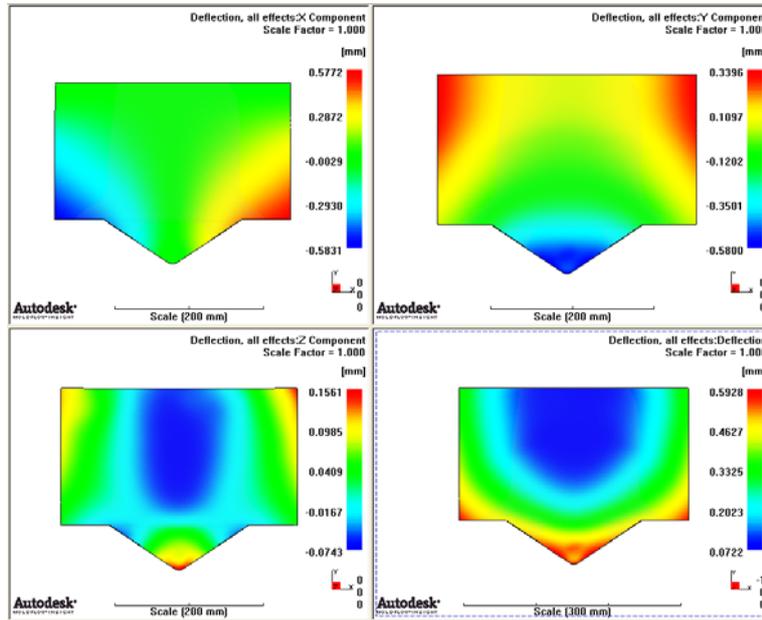


圖 5- 19 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 40mm)

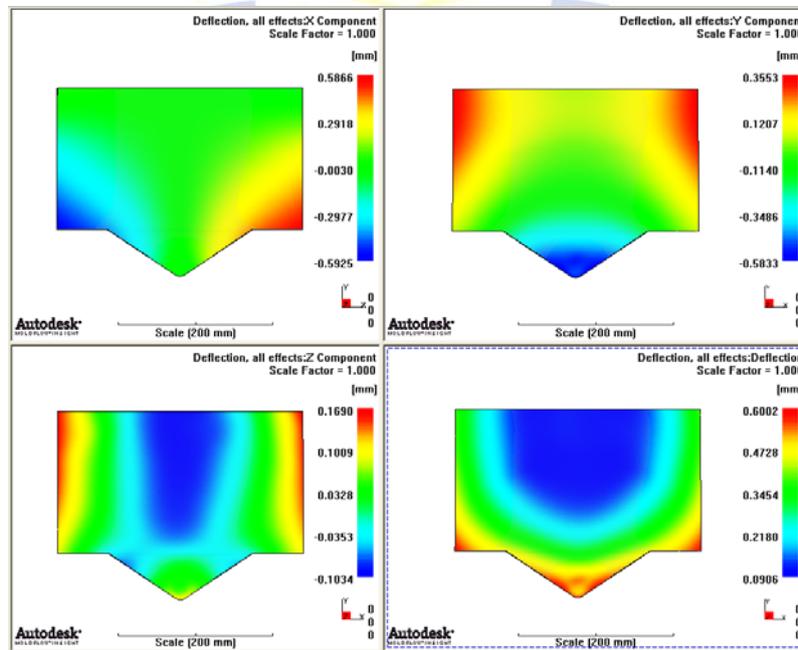


圖 5- 20 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式二水路間距 50mm)

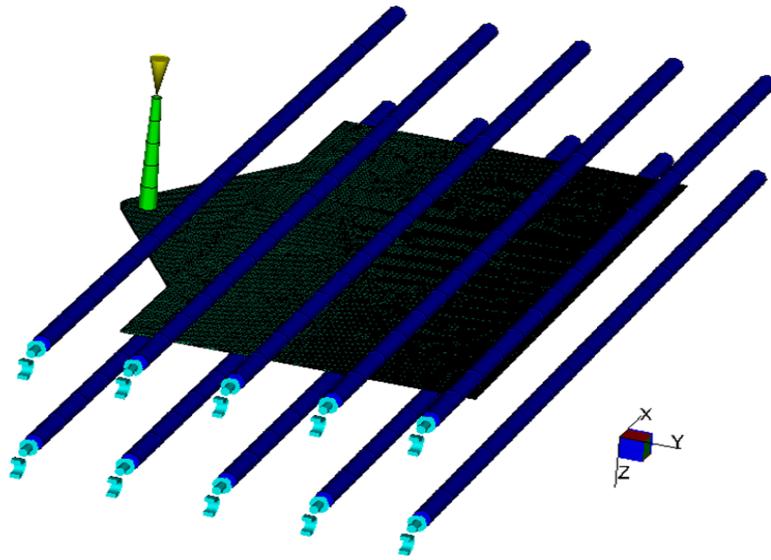


圖 5- 21 坐標軸示意圖

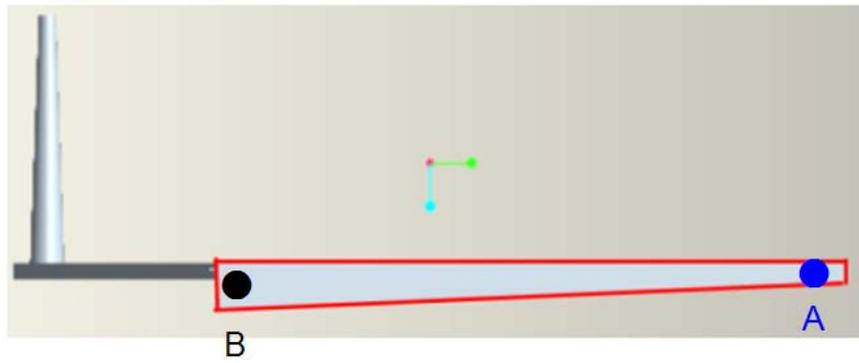


圖 5- 22 成形品厚度斷面圖(特徵尺寸放大 10 倍)

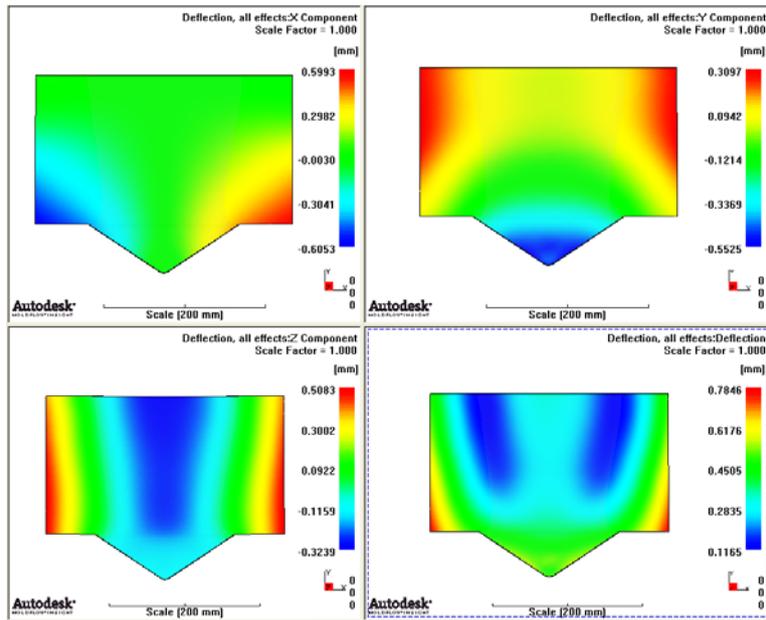


圖 5- 23 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 50°C)

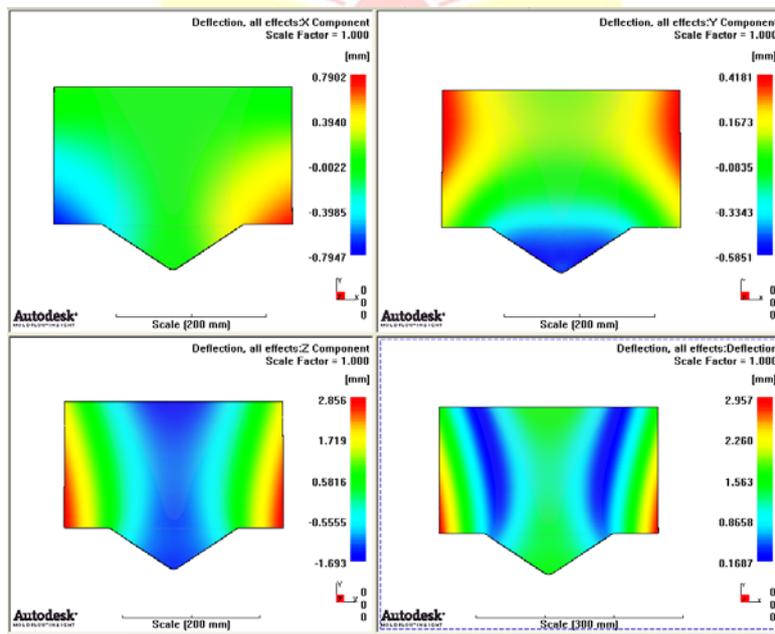


圖 5- 24 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 60°C)

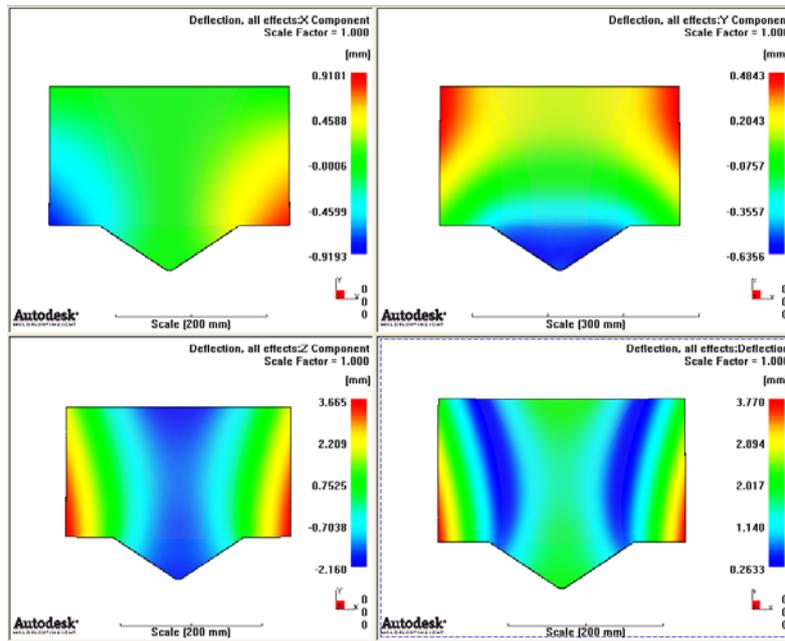


圖 5- 25 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 70°C)

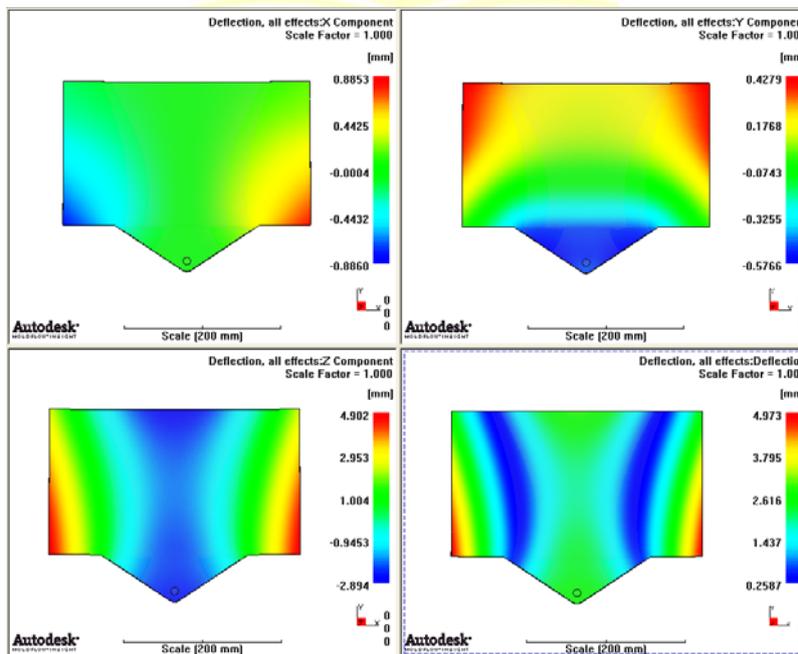


圖 5- 26 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三整體水溫 80°C)

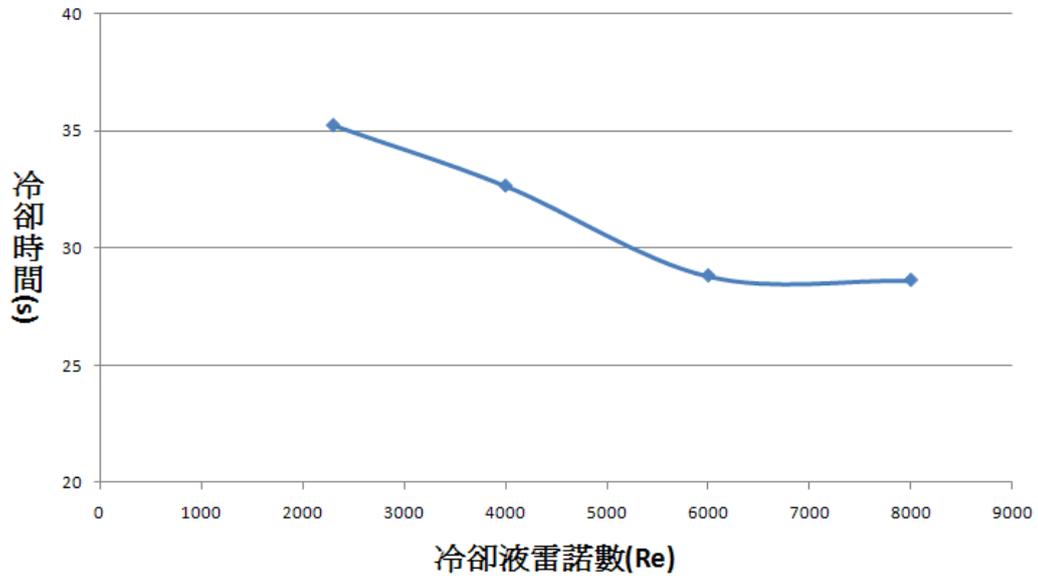


圖 5- 27 型式三改變冷卻液流速與冷卻時間關係圖

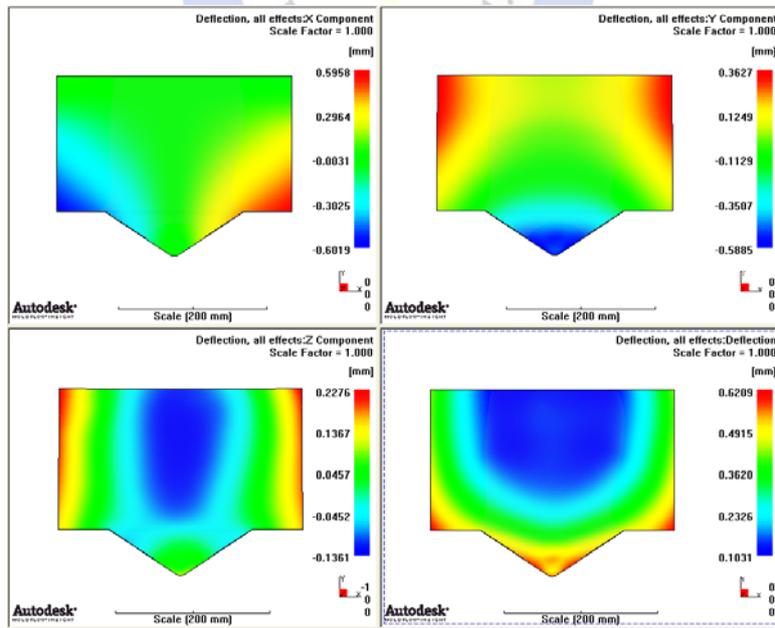


圖 5- 28 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 8000)

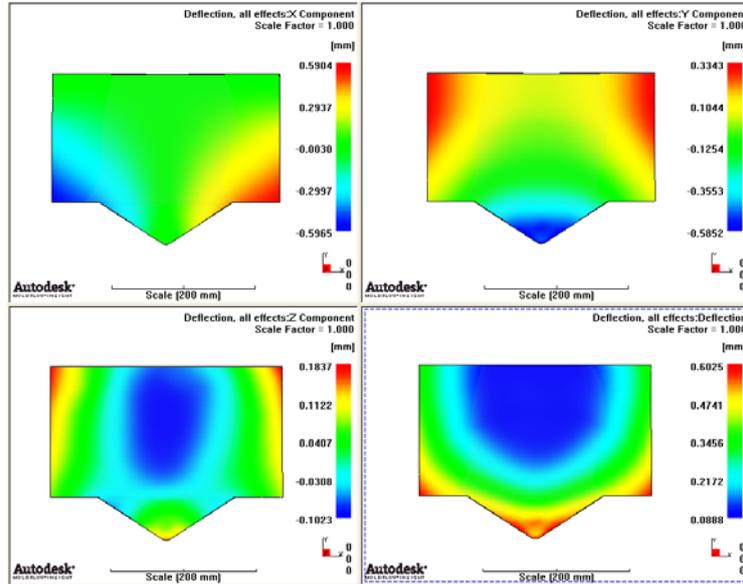


圖 5- 29 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 6000)

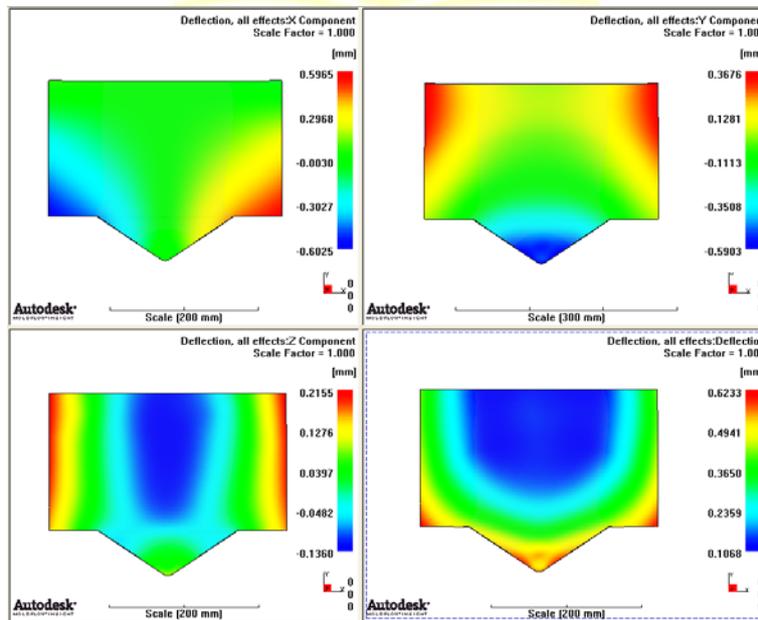


圖 5- 30 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 4000)

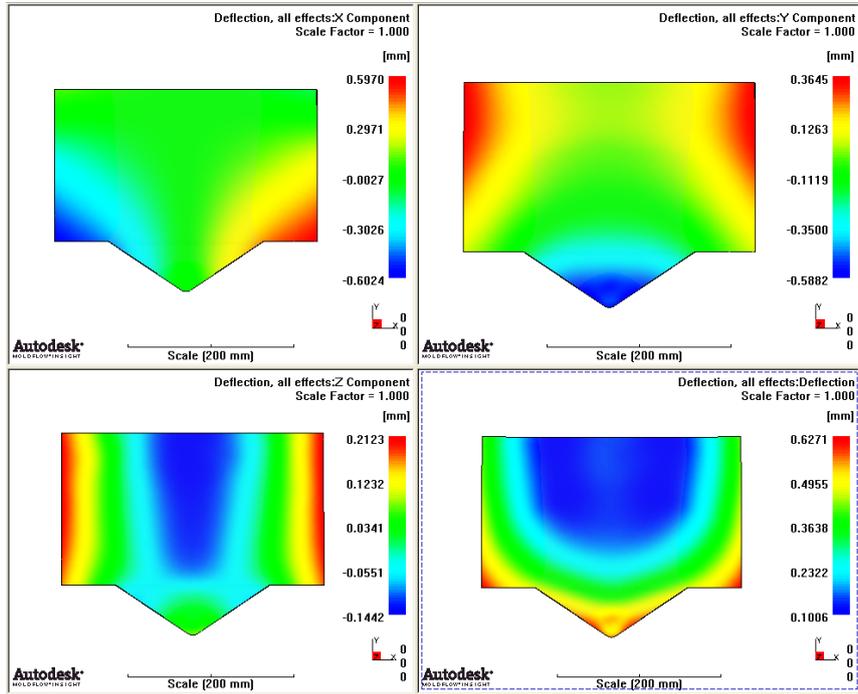


圖 5-31 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(型式三雷諾數 2300)

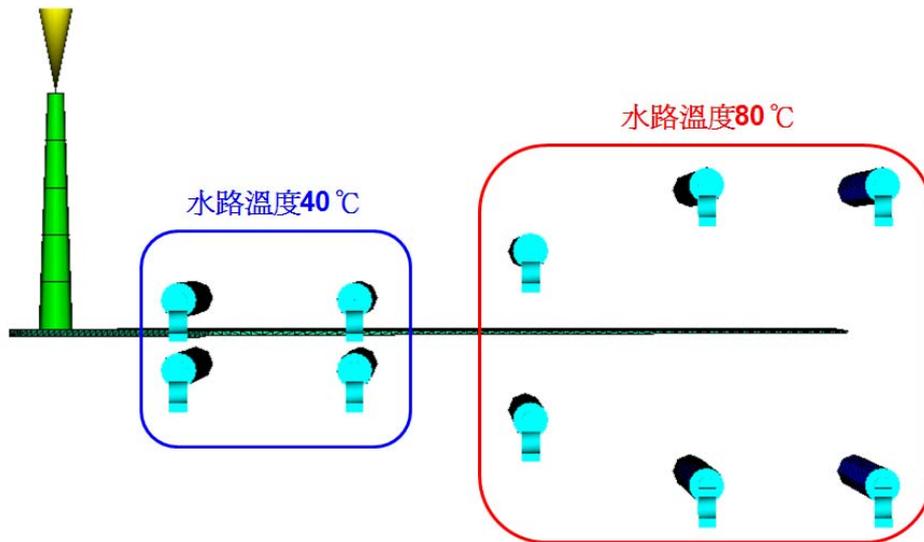


圖 5-32 兩區水路溫度調變圖

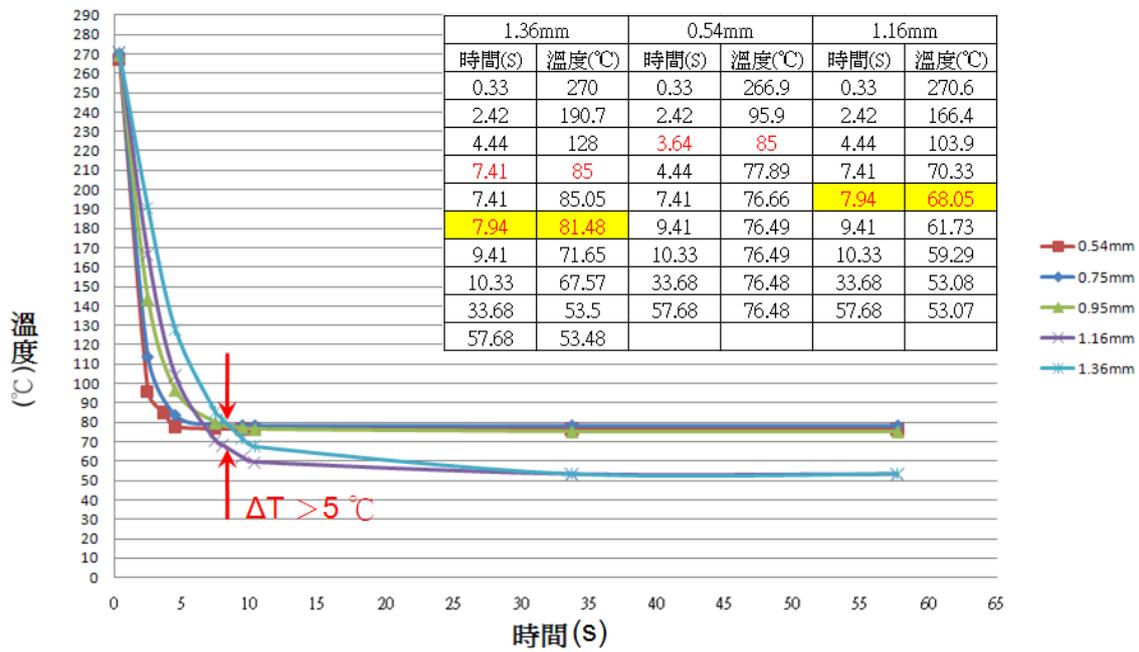


圖 5- 33 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(兩區水路溫度)

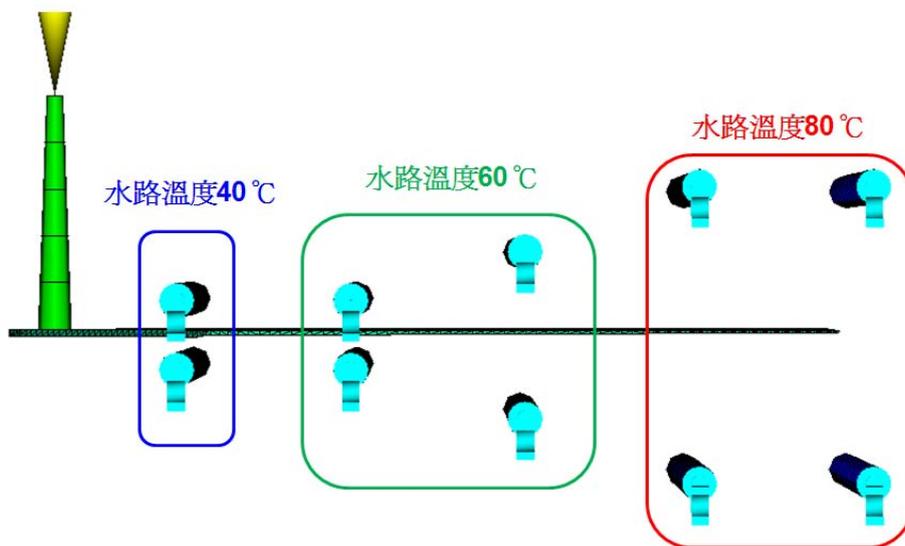


圖 5- 34 三區水路溫度調變圖

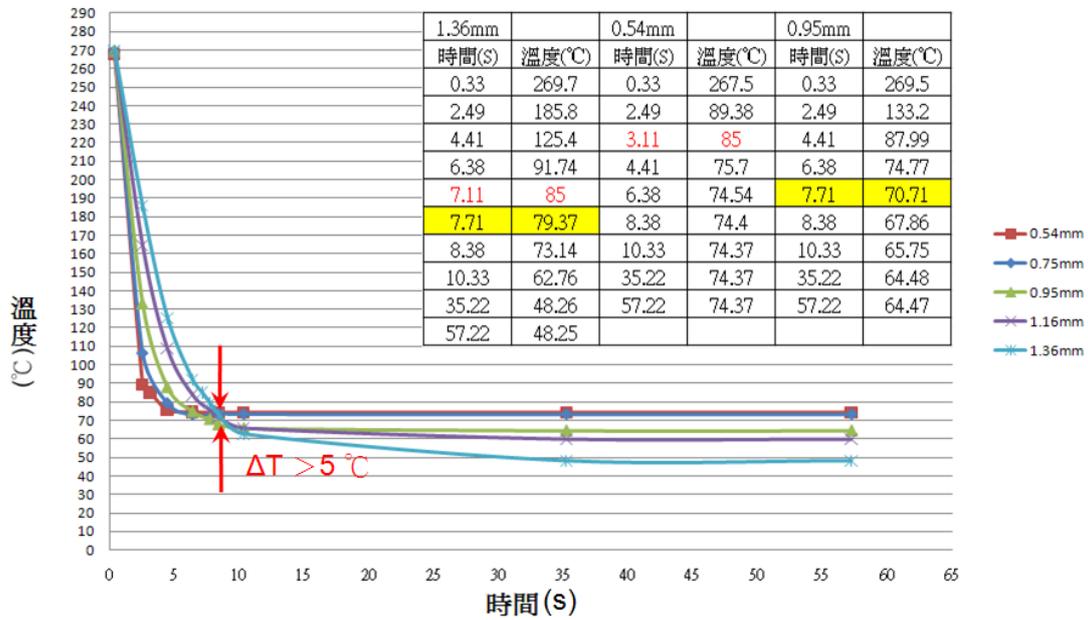


圖 5- 35 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(三區水路溫度)

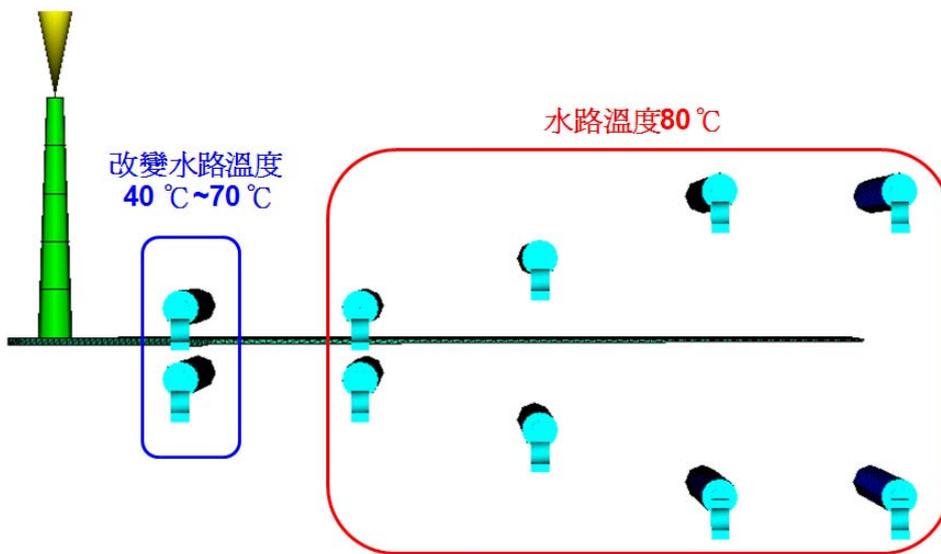


圖 5- 36 分區水溫排列示意圖

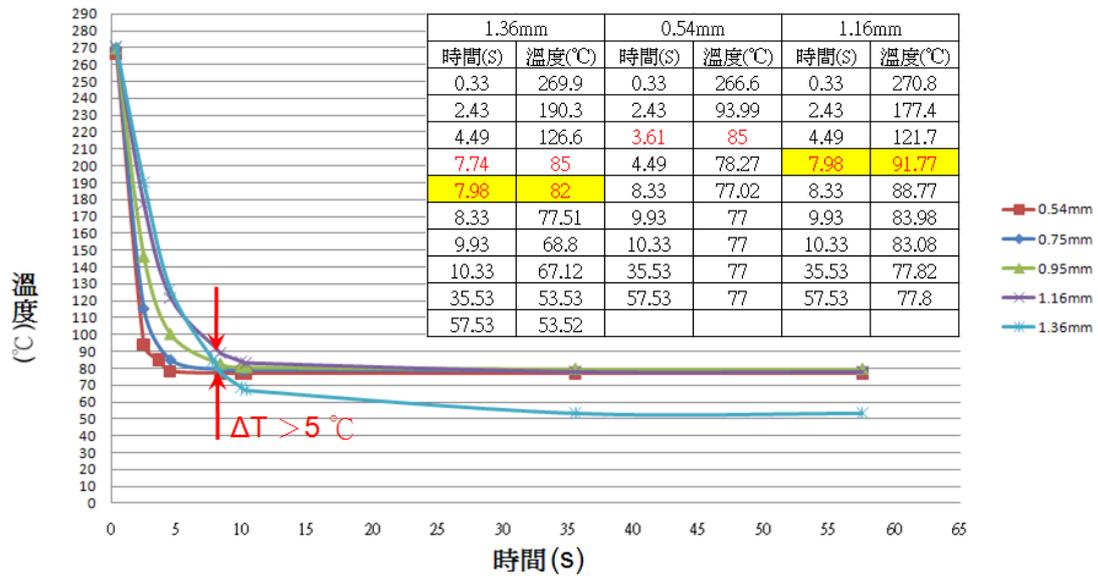


圖 5- 37 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(40°C/80°C分區排列)

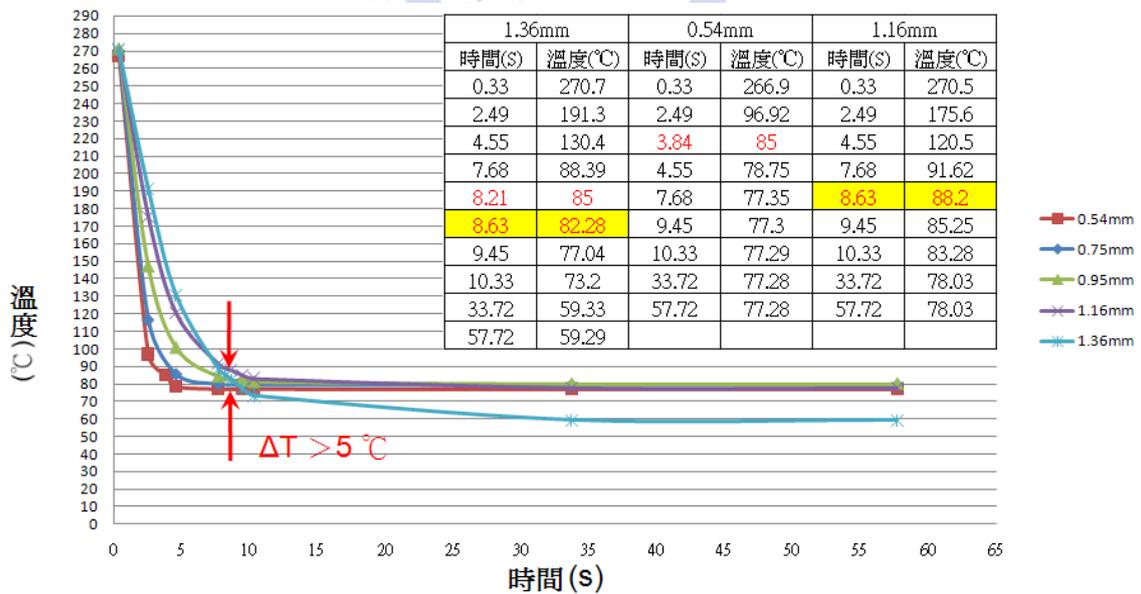


圖 5- 38 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(50°C/80°C分區排列)

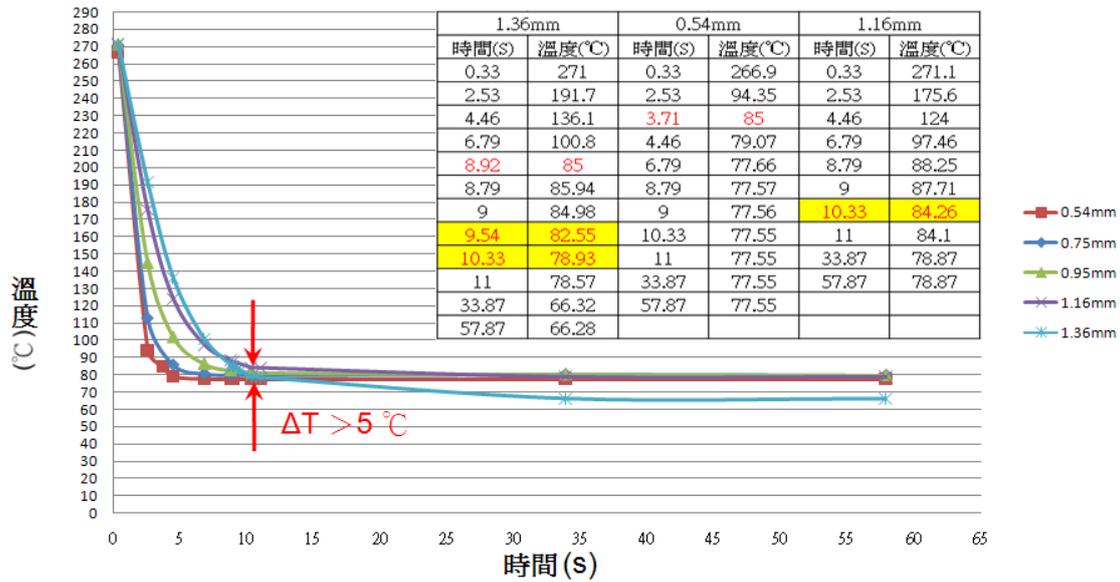


圖 5- 39 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(60°C/80°C分區排列)

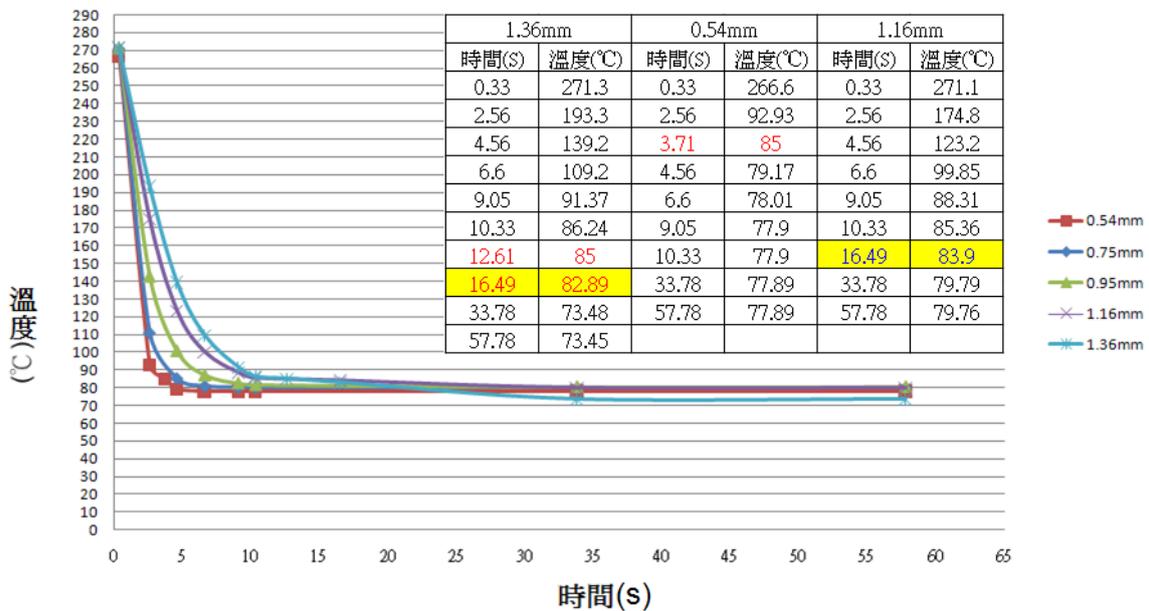


圖 5- 40 五點不同厚度處中心層溫度隨時間之變化(70°C/80°C分區排列)

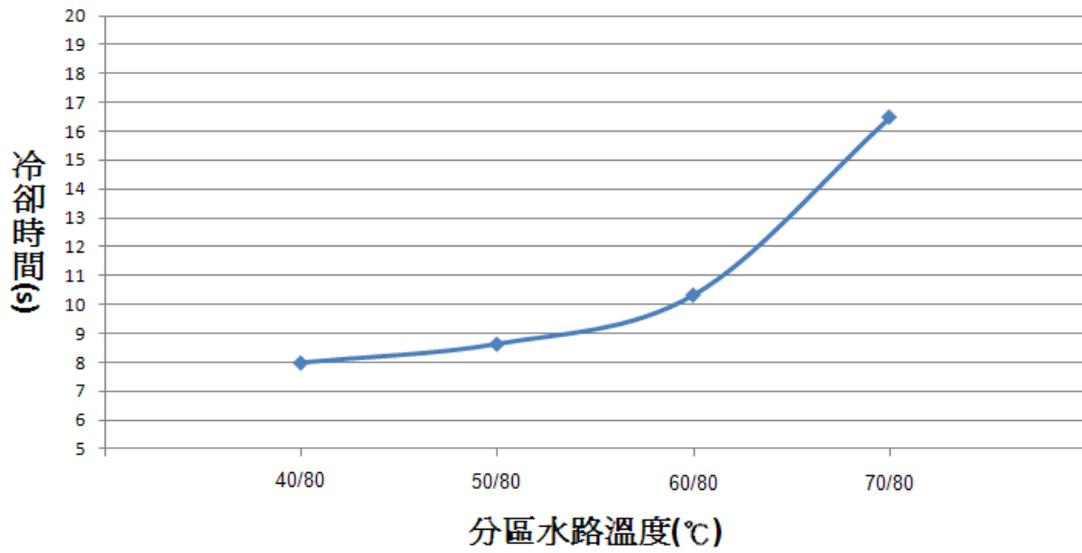


圖 5- 41 型式三搭配分區水路溫度與冷卻時間關係圖

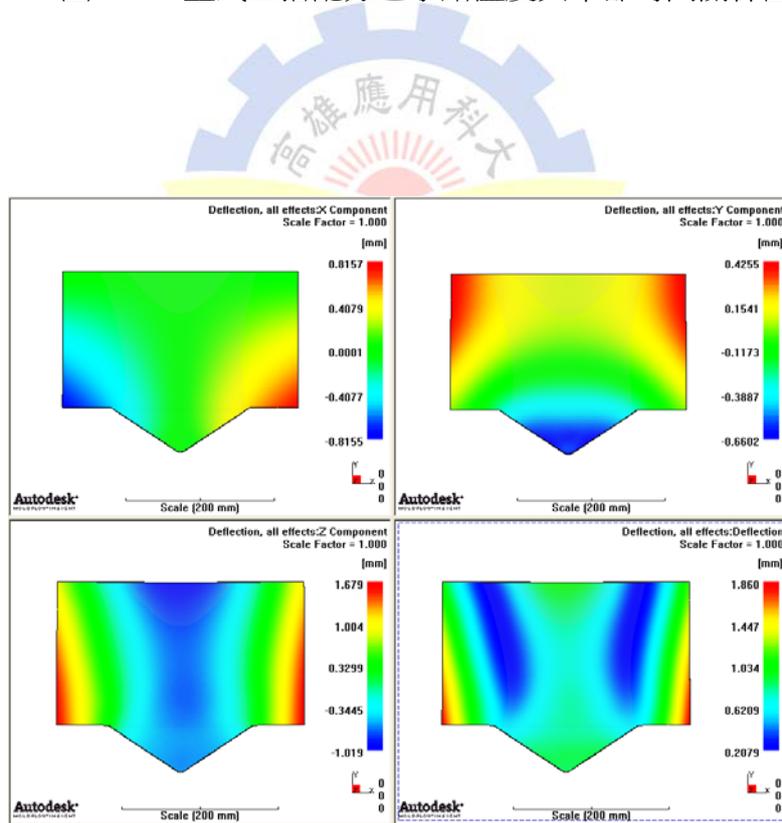


圖 5- 42 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(40°C/80°C分區排列)

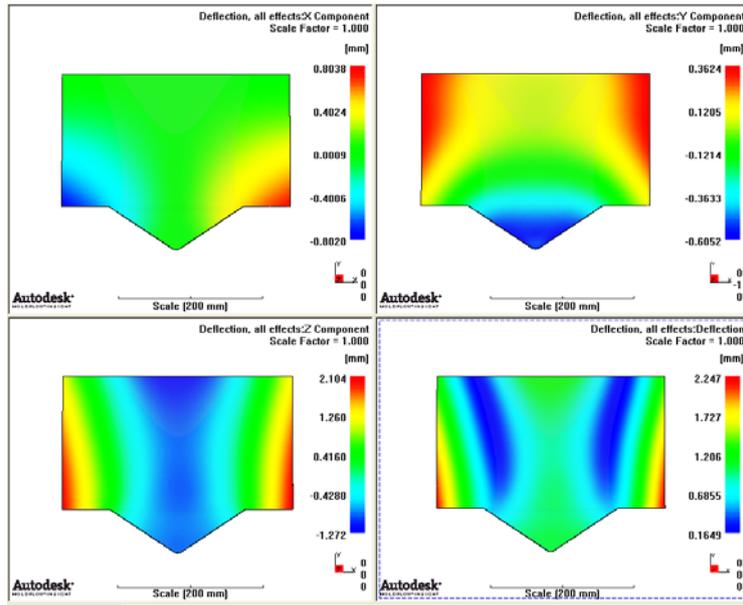


圖 5- 43 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(50°C/80°C分區排列)

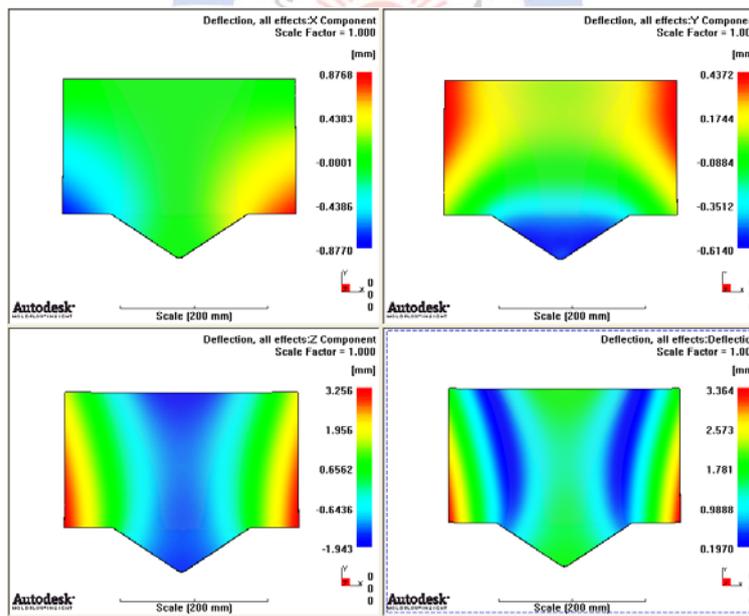


圖 5- 44 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(60°C/80°C分區排列)

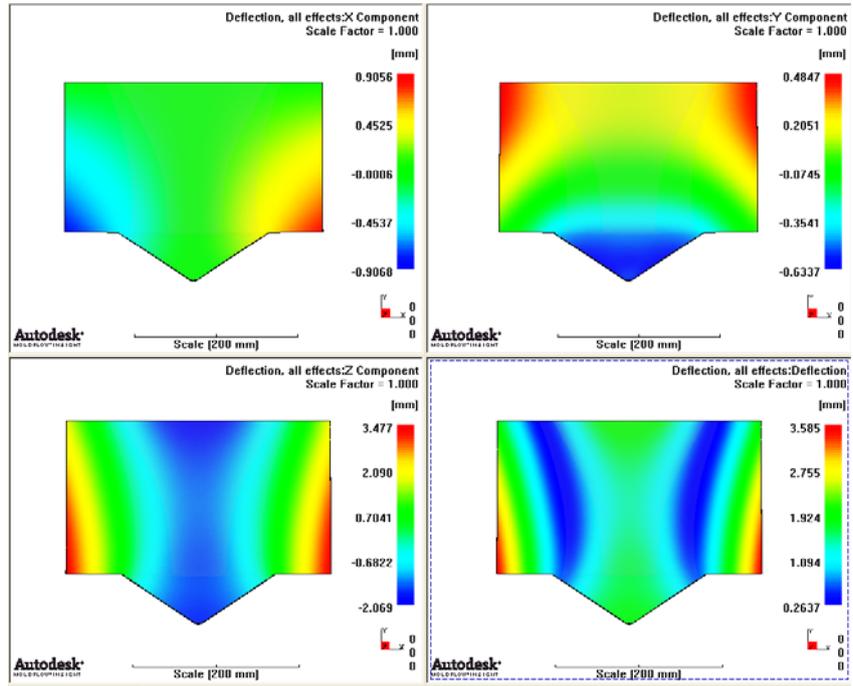


圖 5-45 X.Y.Z 方向變形量及總變形量(70°C/80°C 分區排列)

第六章 結論

本研究以射出成形冷卻理論計算公式為基礎，以模具強度及均勻冷卻為限制條件，進行冷卻水路最佳化之排列設計，希望讓厚度不均成形品可以達到最短的冷卻時間，另外使用與經驗法則相同冷卻水路數目之排列進行整體冷卻水路溫度、冷卻液雷諾數、分區水路溫度之 CAE 分析，找到其冷卻時間並觀察總變形量，希望可以在均勻冷卻條件下更加縮減冷卻時間，經分析整理數據之後，可歸納出以下結論：

6.1 結論

1. 經本研究流程所得到最佳化水路排列位置並經CAE分析之後，確實可以比傳統經驗法則之排列，冷卻水路直徑：冷卻水路與模穴距離：冷卻水路與水路間距(1：3：5)有更佳的效果，從經驗法則排列之冷卻時間50.09秒到本研究最佳化水路排列約29.39秒，共約縮減了約20秒，且其總變形量從經驗法則排列之1.43mm縮減到本研究之0.54mm，顯示本研究流程所排列之冷卻水路不僅可以縮短冷卻時間，對於成形品因為經由最佳化的水路排列使其冷卻均勻，亦可以改善總變形量。
2. 以水路間距 $X=50\text{mm}$ 之最佳化排列搭配整體水路溫度調整縮減冷卻時間的方式雖然可以有效縮減冷卻時間，但是開模時越高的水路溫度意味著成形品也將在水路溫度附近被開模取出，因此越高的水路溫度會使開模時成形品的溫度與室溫相差太多而導致變形量的增加。
3. 以水路間距 $X=50\text{mm}$ 之最佳化排列搭配調整冷卻液流速來改善冷卻時間的方式結果顯示效益與最佳化排列相似，但是如果與傳統經驗法則排列方式比較，已達到縮減冷卻時間的目的及保持較低總變形量，且使雷諾數保持在10000仍是較佳的狀況。
4. 以水路間距 $X=50\text{mm}$ 之最佳化排列搭配分區水溫的排列方式，可以大幅度縮減冷卻時間，但是分區水溫排列的方式雖然可以讓成形品於短時間內符合頂出邊界條件，但卻會讓成形品其他區域溫度差異變大，有可能因此讓成形品整體之變形量增加。
5. 以水路間距 $X=50\text{mm}$ 之最佳化排列搭配分區水溫的排列方式，必須使冷卻時間即為開模時間點，因為如果開模錯過此時間點的話，不論在此時間點

- 之前或之後其溫度差異皆會變大，有可能因此造成成形品之變形量增加。
6. 最佳化排列中水路間距 $X=50\text{mm}$ 之排列與分區溫度($70^{\circ}\text{C}/80^{\circ}\text{C}$)之排列雖皆有達到均勻冷卻的目的，但分區溫度排列於開模後其成形品溫度與室溫相差較大，雖然有均勻冷卻，但於頂出之後可能因此而又使變形量增加。

6.2 未來展望

目前一般射出成形塑件皆為均一的產品厚度，而本研究之例為一肉厚不均之楔形導光板產品，在研究中發現，不同厚度之處其冷卻時間曲線皆不相同，因此若能將整體的冷卻曲線經由可程式控制系統搭配模糊控制發展自動調變功能，使冷卻曲線趨近一致，除了可以縮短冷卻時間外對於產品的變形量或許能更有效的改善。

本研究公式計算之排列流程並未有判斷產品厚度方向溫度差異的功能，因此若能增加邊界條件判斷溫度差異的功能，將能讓本研究流程趨近於更加完美。

本研究之冷卻時間的計算與 CAE 分析僅侷限於成形品，而對於此種厚度較薄產品，為了達到更好充填的目的，其澆口厚度一般皆比成形品厚度還要厚，因此在實際狀況下澆口的冷卻會比成形品本身需要更多的冷卻時間，因此針對澆口部分的冷卻設計亦是研究發展的方向。

參考文獻

- [1] D. V. Rasato and D. V. Rosato, "Injection Molding Handbook", Van Nostrand Reinhold Company, NY, 1985.
- [2] 經濟部投資業務處, 平面顯示器產業分析及投資機會, 2008 年 2 月.
- [3] I.J. Catic, 1979, "Cavity Temperature-an Important Parameter in the Injection Molding Process", Polym Eng Sci, vol.19, p.893.
- [4] H. Ries, Marl 1992, "Preconditions for the Determination of Practically Oriented Shrinkage Values", Kunststoffe German Plastics vol. 82, p.50.
- [5] S. J. Park and T. H. Know, 1998, "Thermal and design sensitivity analyse for cooling system of injection mold", Manuf. Sci. Eng., vol.120, pp. 287-305.
- [6] 周明和, 1999, 射出成形模具冷卻水道管路設計之研究, 國立台灣科技大學碩士論文.
- [7] E. Sachs, 2000, "Production of injection molding with conformal cooling channels using the three dimensional printing process", Polym Eng Sci, vol. 40, pp. 1232-1247.
- [8] Zollner, 2001, "Optimised mould temperature control", Appl.Technol. Inform., p. 1104.
- [9] D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, 2005, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools", Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, pp. 1294-1300.
- [10] 曾義晃, 2006, 導光板模具及製程參數設計之研究, 大華技術學院機電工程研究所碩士論文
- [11] 施家興, 2007, 應用 CAE 改善導光板品質, 科盛科技股份有限公司.
- [12] 林忠泰, 2010, 冷卻水路位置對楔形導光板翹曲影響之研究, 國立高雄應用科技大學模具系碩士論文.
- [13] H. Hassan, N. Regnier, C. Pujos, E. Arquis, and G. Defaye, 2010, "Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding", Applied Thermal Engineering, vol. In Press, Accepted Manuscript.

- [14] P. Ioannis and Z. Qin, 1990, "Optimization of Injection Molding Design", Polymer Engineering and Science Vol.30, No.15, P875, Mid-August.
- [15] Rao, Natti S.,1991, "Design Formulas for Plastics Engineers", Carl Hanser Verlag, New York.
- [16] 王文廣 田寶善 田雁晨, 2004, 塑膠注射模具設計技巧與實例, 化學工業出版社.
- [17] 章秀鑫, 2002, TFT-LCD 模組設計概論, 全華科技圖書股份有限公司.
- [18] S. J. Park and T. H. Know, 1998, "Thermal and design sensitivity analyse for cooling system of injection mold", Manuf. Sci. Eng., vol. 120, pp. 287-305.
- [19] S. Kening and M. R. Kammal, 1970, "Cooling Molded Parts A Rigorous Analysis", Society of Plastics Engineers Journal, p. 50.
- [20] M. R. Kamal and P. G. Lafleur, 1984, "Heat Transfer in Injection Molding of Crystallizable Polymers", Polymer Engineering and Science, vol. 24, pp. 692-697.
- [21] 張榮語, 1995, 射出成形模具設計, 台北, 高立圖書, ISBN 957-584-324-X.
- [22] M. Ring, 2002, "An investigation of effectiveness of conformal cooling channels and selective laser sintering materials in injection moulding tools", RPD, pp. 1-5.
- [23] 周文祥, 1999, C-Mold 射出成形模具設計, 台北文京圖書, AC Technology , ISBN 957-512-164-3.
- [24] 張永彥, 2007, 塑膠模具設計學, 全華科技圖書股份有限公司.
- [25] 林威廷, 2010, 利用模板變形與回彈克服塑品收縮不均之研究, 國立高雄應用應科技大學模具系碩士論文.
- [26] 周岳鋒, 2010, 射出成形用之環氧樹脂添加金樹粉末快速模具開發與冷卻水路設計, 國立高雄應用科技大學模具系碩士論文.
- [27] Johannaber, F., "Injection Molding Machines a User's Guide" Hanser, 1985
- [28] 黃俊欽, 2010, 塑膠射出模具-講義, 國立高雄應用科技大學.

附錄 1、MALAB 計算程式碼

```
clear all
close all
clc
format long
nel=input('How many segments do you want? = ');

s=zeros(nel,1);
for i=1:nel
    fprintf('Input Thickness of Segment %g \n',i);
    s(i,1)=input('Thickness of Segment = ');
end
Tw=zeros(nel,1);
tk=zeros(nel,1);
d=10;
R=d/2;
Tm=250;
Te=85;
Twater=40;
Twmaw=Te;
im=130;
cps=2.27;
rhom=1.06;
a=8.5e-4;
nuy=1.2e-6;
u=1;
lamdast=45;
H=150;
ymax=H-d;
fmax=15;
Qmin=10;
Remin=2300;
Remax=10000;
P=201.2;
```



```

tk_init=2;
E=70588;
G=27147;
deltaX=1e-2;
deltaY=1e-2;
deltaTk=1e-2;
deltaTw=1e-6;
x_init=10;
x_max=50;
nx=(x_max-x_init);
X=zeros(nx,1);
Y=zeros(nx,1);
f=zeros(nx,1);
Qab=zeros(nx,1);
Se=zeros(nx,1);

```

```

x=x_init;
X(1,1)=x_init;
for i=1:nx
    X(i+1)=X(i)+1;
end

```



```

Secompletedata = [X, zeros(nx+1, nel)];
fcompletedata = [X, zeros(nx+1, nel)];
Ycompletedata = [X, zeros(nx+1, nel)];

```

```

Twcompletedata=[1, zeros(1,nel)];
tkcompletedata=[1, zeros(1,nel)];

```

```

Re=0.001*u*(d/nuy);
anpha=(0.031395/(0.001*d))*Re^(0.8);
k=1;
for j=1:nel

```

```

sel=s(j,1);
for i=1:nx+1
    x=X(i);
    Qab(i)=0.001*((Tm-Te)*cps+im)*rhom*(sel/2)*x;
end
flag=0;
fferror=10;
while flag==0
    [Tw,tk]=calcTwtk(Tm,Te,Twater,sel,a,tk_init,deltaTk);
    Se=calcSe(Qab,Tw,Twater,anpha,R,lamdast,tk);
    [X,Y]=calcXY(X,Se,x_init,d,nx);
    if min(Y)>1*d
        f=calcfmax(P,Y,d,E,G); % (micro meter)

        fferror=100*((max(f)-fmax)/max(f));
    end
    if fferror<5
        Secompletedata((1:nx+1)',j+1) = Se;
        fcompletedata((1:nx+1)',j+1) = f;
        Ycompletedata((1:nx+1)',j+1) = Y;

        Twcompletedata(1,j)=Tw;
        tkcompletedata(1,j)=tk;
        flag=1;
    end
    tk_init=tk+deltaTk;
end

end
xlswrite('completedata.xls',Secompletedata,'Se Data');
xlswrite('completedata.xls',fcompletedata,'f Data');
xlswrite('completedata.xls',Ycompletedata,'X_Y Data');
xlswrite('completedata.xls',Twcompletedata,'Tw Data');
xlswrite('completedata.xls',tkcompletedata,'tk Data');

```

計算模穴表面溫度(T_w)與冷卻時間(t_k)

```
function[Tw,tk]=calcTwtk(Tm,Te,Twater,sel,a,tk_thin,deltaTk)
```

```
Tw=0;
```

```
tk=tk_thin;
```

```
while Tw<Twater
```

```
    aa=tk*((pi^2*a)/(10^-1*sel)^2);
```

```
    bb=exp(aa);
```

```
    cc=(pi/4)*bb;
```

```
    Tw=abs((cc*Te-Tm)/(cc-1));
```

```
    tk=tk+deltaTk;
```

```
end
```

計算排列形狀因子(S_e)

```
function[Se]=calcSe(Qab,Tw,Twater,anpha,R,lamdst,tk)
```

```
for i=1:length(Qab)
```

```
    Qw=Qab(i);
```

```
    aa=(10^-3*tk*(Tw-Twater))/Qw;
```

```
    bb=aa-1/(10^-3*anpha*2*pi*R);
```

```
    Se(i)=1/(lamdst*bb);
```

```
end
```

```
Se=Se';
```

計算模具變形量(f)

```
function[fmax]=calcFmax(P,Y,l,E,G)
```

```
n=length(Y);
```

```
fmax=zeros(n,1);
```

```
for i=1:n
```

```
    fmax(i)=((1000*P*l^2)/Y(i))*((l^2/(32*E*Y(i)^2))+0.15/G);
```

```
end
```

計算水路間距(X)與水路至模穴距離(Y)

```
function[X,Y]=calcXY(X,Se,x_init,d,nx)
```

```
for i=1:nx
```

```
    X(i+1)=X(i)+1;
end
for i=1:nx+1
    aa=2*pi/Se(i);
    bb=exp(aa);
    cc=(pi*d*bb)/(2*X(i));
    dd=asinh(cc);
    Y(i)=(X(i)*dd)/(2*pi);
end
Y=Y';
```



作者簡歷

姓名	謝一帆	性別	男	
生日	71/02/22	手機	0937788338	
E-mail	1098316112@cc.kuas.edu.tw			
地址	台中市南區工學一街232號			
求 學 經 歷				
起迄年月	學 校 名 稱	科 系	學 位	
98/9~100/6	國立高雄應用科技大學	模具工程所	碩 士	
90/9~95/6	國立彰化師範大學	工業教育與 技術學系	學 士	
86/9~89/6	國立台中高工	機械科	副學士	
論 文 與 專 題				
1	楔形導光板冷卻水路最佳化配置之研究 (研究所論文)			
2	行動型噴水涼風扇(大學專題)			