

國立交通大學

工學院精密與自動化工學程

碩士論文

應用田口方法探討大平面薄壁鎂合金 AZ91D
鑄件壓鑄製程條件之研究

**Study on the Process Conditions of Magnesium Alloy
AZ91D in Die Casting of a Thin-walled Plane Component
with Taguchi Method**

研究生：曾重誌

指導教授：徐瑞坤教授

中華民國九十三年六月

應用田口方法探討大平面薄壁鎂合金 AZ91D 鑄件 壓鑄製程條件之研究

研究生：曾重誌

指導教授：徐瑞坤 博士

國立交通大學工學院

摘 要

鎂合金壓鑄產品經常容易發生充填不足、熱裂、表面流紋與變形等缺陷，這些缺陷和射出壓力、射出速度、射出溫度與模具溫度等製程條件有密切關係。鎂合金製品之開發試作，一般係利用試誤法來求得較適當的製程條件之組合，但是，試誤過程既費時又無法保證獲得最佳的製程條件。近幾年，田口實驗設計法成了改善產品品質的有利工具，本研究結合 Flow-3D 模流分析軟體與田口實驗設計法規劃實驗分析條件，進行大平面薄壁鎂合金 AZ91D(筆記型電腦底蓋產品)的模流分析，應用直交表和信號雜訊比來求出最佳的製程條件。模流分析之條件組合是以 L9 直交表進行規劃設計，選擇射出壓力、射出速度、射出溫度、模具溫度為控制因子，每一因子皆選擇三個實驗水準，品質目標設定為在模穴內必須具有最少固溶率、最小壓力差與最小溫度差。

由變異數分析求得最佳製程條件組合為射出壓力 17Mpa、射出速度 100m/s、射出溫度 625°C、模具溫度 250°C，再經由 Flow-3D 模擬結果，三目標值均有明顯改進，可有效改善壓鑄件缺陷，提昇產品的穩健性。

關鍵詞：壓鑄、鎂合金、田口實驗設計法

Study on the Process Conditions of Magnesium Alloy AZ91D in Die Casting of a Thin-walled Plane Component with Taguchi Method

Student: Tzeng Chorng-Jyh

Advisor: Dr. Ray-Quen Hsu

Institute of Mechanical Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Die casting products of magnesium alloys very often show non-filling, hot cracking, apparent flow mark and deformation etc. These defects are closely related with process conditions of filling time, fusion temperature, cooling temperature of die and maintaining pressure etc. Generally, in the development of magnesium die casting products, trial and error method was used to find the suitable combination of process conditions. It is time consuming and not necessarily assure the best results. Recently TAGUCHI experiment design methods are adopted for improving product quality. In this study, we combine TAGUCHI experiment design method with Flow-3D flow analysis package for simulation of making large plane thin wall workpiece of magnesium alloys. L9 orthogonal table was used, and filling time, fusion temperature, cooling temperature of die, maintaining pressure, viscosity was chose as control parameters. Three levels of each parameter were selected for the experiment. Minimum solid fraction and most homogeneous temperature and pressure distribution in the die cavity, were set as the best casting conditions.

From variance analysis, we found out the combination of optimum process condition are, fusion pressure-17Mpa, fusion speed-100m/s, fusion temperature-625°C, cooling temperature of die-250°C. An independent analytical process parameters combination was selected based on the result found for die-casting simulation, and the result shows the improvement of the product.

Keywords : Die Casting, Magnesium alloys, TAGUCHI experiment design

誌 謝

首先，誠摯感謝我的指導教授徐瑞坤博士，在我研究所求學期間，對我耐心的指導與教誨，使得研究進行非常順利；在他溫文儒雅的態度薰陶下，待人處世方面更是受益良多，由於他新穎的理念及創新的作法，使我得以順利完成此篇論文，再次感謝徐博士“恩同再造”。

感謝我的內人易珊小姐勤儉持家，使得家庭生活非常融洽，更由於妳對家人無怨無悔的付出與照顧，使我無後顧之憂，我才能夠早出晚歸，得以全力以赴，而且兩個小孩之學業都能按部就班地成長。非常感謝她的支持與照顧，這個成果與榮耀也是屬於她的。

還有很多的同事及親朋好友，由於你（妳）們的關懷與支持，使我順利完成研究所的求學過程，實難一一列名，只能感激在心中，永銘肺腑。

非常感謝交大洪景華教授、陳仁浩教授，給予本論文的建議與指導，使本文更臻於完整，有助於爾後之研究工作，謝謝他們。



目錄

摘要	ii
ABSTRACT	iii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	ix
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 研究之背景、動機與目的	4
1-4 論文大綱	5
第二章 壓鑄方法與鎂合金、模具鋼材料特性	7
2-1 壓鑄方法	7
2-2 壓鑄用鎂合金AZ91D之材料特性	8
2-3 鎂合金薄壁鑄件常見的缺陷及成因	8
2-4 模具	9
第三章 Flow-3D與模流理論	13
3-1 模流分析軟體	13
3-2 牛頓流體	14
3-3 特殊技巧	14
3-3-1 流體通過的比例面積法 (FAVOR)	14
3-3-2 流體體積法 (VOF)	16
第四章 田口實驗設計法	17
4-1 品質損失函數	18
4-1-1 望目特性	18
4-1-2 望小特性	18
4-1-3 望大特性	18

4-2	直交表	19
4-3	變異數分析	19
第五章	研究方法與分析條件	22
5-1	研究對象	22
5-2	分析方法	23
5-3	基本假設	23
5-4	壓鑄製程條件	24
5-5	模擬參數之選定	24
5-6	Flow-3D解析步驟	25
5-6-1	建立幾何模型	25
5-6-2	熱物性質與製程參數指定	25
5-6-3	邊界條件與材料物性之設定	25
5-6-4	網格分割	26
5-6-5	電腦模擬分析	26
第六章	田口式參數分析與模擬結果及討論	47
6-1	單一品質分析	47
6-2	綜合品質討論	48
6-3	單一控制因子對目標值之影響	48
第七章	結論與未來展望	63
7-1	結論	63
7-2	未來展望	63
	參考文獻	64
	附件一：三年內參考著作	66
	附件二：學經歷	67

表目錄

表 2-1	熱室壓鑄法與冷室壓鑄法之差別	10
表 2-2	常用壓鑄鎂合金錠種類與化學成分	10
表 2-3	常用壓鑄鎂合金的材料性質	11
表 2-4	模具鋼SKD61 之性質	12
表 5-1	扇形澆口設計方案	27
表 5-2	控制因子與水準	28
表 5-3	簡化之 $L_9(3^4)$ 直交表 (一)	28
表 5-4	簡化之 $L_9(3^4)$ 直交表 (二)	29
表 5-5	詳細實驗規劃之 $L_9(3^4)$ 直交表	29
表 5-6	FRECH公司技術手冊中建議的澆口速度	30
表 5-7	FRECH公司技術手冊中建議的鎂合金鑄造壓力 (熱室機)	30
表 5-8	總體資料輸入表	31
表 5-9	物理性質輸入表	32
表 5-10	邊界條件的設定值	33
表 5-11	模擬分析時之輸入數值表	34
表 5-12	實驗計畫與結果(固溶率、壓力差、溫度差)	35
表 6-1	參數設計與實驗結果分析(固溶率)	50
表 6-2	變異數分析表(S/N of 固溶率)	50
表 6-3	S/N回應表(S/N of 固溶率)	51
表 6-4	參數設計與實驗結果分析(壓力差)	51
表 6-5	變異數分析表(S/N of 壓力差)	52
表 6-6	S/N回應表(S/N of 壓力差)	52
表 6-7	參數設計與實驗結果分析(溫度差)	53
表 6-8	變異數分析表(S/N of 溫度差)	53
表 6-9	S/N回應表(S/N of 溫度差)	54
表 6-10	實驗結果的(正規化)S/N比之回應表(固溶率、壓力差、溫度差)	54
表 6-11	田口實驗設計法最佳化組合	54

表 6-12	改變射出壓力的實驗結果 (一)	55
表 6-13	改變射出壓力的實驗結果 (二)	55
表 6-14	改變射出速度的實驗結果	56
表 6-15	改變射出溫度的實驗結果	56
表 6-16	改變模具溫度的實驗結果	57



圖目錄

圖 1-1	充填不完全	6
圖 1-2	表面流紋	6
圖 2-1 (a)	Cold Chamber Die Casting 冷室法	12
圖 2-1 (b)	Hot Chamber Die Casting 熱室法	12
圖 5-1	模擬物件工程圖	36
圖 5-2	壓鑄模具的 3D 模擬圖	37
圖 5-3	扇形澆口詳圖	38
圖 5-4	研究架構流程圖	39
圖 5-5	AZ91 及 AM50 鎂合金的黏度對溫度及固相率的關係	40
圖 5-6	(15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之壓力分佈圖	41
圖 5-7	(15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之溫度分佈圖	42
圖 5-8	(15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之固溶率分佈圖	43
圖 5-9	X軸長度與壓力關係圖	44
圖 5-10	X軸長度與溫度關係圖	44
圖 5-11	各角點之壓力圖	45
圖 5-12	各角點之溫度圖	46
圖 6-1	S/N 比的回應圖(S/N of 固溶率)	58
圖 6-2	S/N 比的回應圖(S/N of 壓力差)	58
圖 6-3	S/N 比的回應圖(S/N of 溫度差)	59
圖 6-4	實驗結果的 S/N 比	59
圖 6-5	射出壓力與目標值之因子效果圖一	60
圖 6-6	射出壓力與目標值之因子效果圖二	60
圖 6-7	射出速度與目標值之因子效果圖	61
圖 6-8	射出溫度與目標值之因子效果圖	61
圖 6-9	模具溫度與目標值之因子效果圖	62

第一章 緒論

1-1 前言

近幾年來，由於資訊科技的不斷推陳出新，資訊產品功能設計上突飛猛進，出現了許多攜帶型的電子產品，帶給使用者更多方便性、與時效性。電腦資訊產品除了提昇功能多樣化，在產品的設計上也朝向輕、薄、短、小來發展，擺脫過去既大又笨重的產品設計。在材料的選用上，逐漸以輕合金來取代，鎂合金的比重為所有結構用合金中最輕者（鎂比重 1.7，鋁 2.8，鈦 4.5，鋅 7.1，鐵 7.9），若與工程塑膠在輕量化上做比較，則非鎂金屬莫屬。且鎂合金具有質輕、高比強度、高剛性、高散熱能力、高電磁遮蔽效果、高制震性和高回收率等諸多優點。近年來因應輕量化及環保的要求下，廣受青睞。鎂合金在 3C（電腦、通訊、消費性電子）可攜式產品機殼，及汽機車非結構件材料上被認為是最佳選擇，尤其是筆記型電腦、手機、PDA 等機殼上，被稱為「二十一世紀金屬」。因此鎂合金薄壁壓鑄件的需求量與日激增。

近年來筆記型電腦採用鎂合金為外殼及結構體材料的熱潮，是有其工程上的剛強、散熱性、及環保上的實質需要，其他材料未能與鎂合金相抗衡。未來，筆記型電腦採用鎂合金外殼及結構體的比率將只會越來越高，且都大幅遽增。因此產業界研發了多種生產鎂合金薄壁件的方法，常見的有壓鑄法（Die Casting）又分為熱室壓鑄法（Hot Chamber Die Casting），冷室壓鑄法（Cold Chamber Die Casting），及半固態射出的方法來成形的觸變成形（Thixo-Molding）和流變成形（Rheo-Molding）。

鎂合金薄壁件必須尺寸精確外，最重要的是要外觀品質優良。以目前國內產業界生產鎂合金薄壁件的方法，仍然以壓鑄為最主要的方法。因其具有低成本、高生產率及品質穩定等優點。過去壓鑄模具的設計，主要依靠的是經驗法則，經常需要經過多次現場試模與修模的試誤程序（Trial and Error），方能完成模具設計，改善壓鑄品之缺陷，對新產品之開發，往往是關鍵之時程，欲縮短開發所需時程，唯有利用模流分析軟體，加速模具設計時間，改善製程條件，提高生產效率一途。

目前國內引進之模流軟體，應用於壓鑄模流分析之商用軟體有多種，其中 Flow-3D 模流軟體操作介面人性化，及功能強大等特性，很適合作為學術研究方面使用，因此本研究選擇 Flow-3D 來作為模擬分析的工具。然而調整壓鑄之製程參數過程中，實驗次數太過繁多為其主要缺點。因此如何運用較少的實驗

次數，調整壓鑄之控制參數便是一門學問；本研究結合 Flow-3D 模流分析軟體，以及運用田口實驗設計法，先行決定壓鑄製程參數範圍能使熔湯完全充填模穴，再藉由對系統特性的瞭解，來決定壓鑄製程參數範圍與影響控制系統之雜訊因子，經由參數設計，針對所選擇的控制因子及雜訊因子配置合適的直交表，經由 Flow-3D 進行模擬，最後依模擬所得之觀測值計算出信號雜訊比 (Signal-to-Noise Ratio, S/N Ratio)，透過 S/N 比的回應表及回應圖分析，最後決定最佳製程參數組合，以達到系統性能的最佳化。

綜合如上所述，鎂合金是當前最被廣泛使用在薄壁壓鑄件上的材料，適用領域不斷擴大，世界各國對其研究、生產、應用爭相投入，是當代最為矚目的工程材料。壓鑄製程最能夠提供大量且經濟的生產方式。模流分析的技術，對於模具的設計，產品的品質，有越來越大的影響力。田口實驗設計法又能以較少的實驗次數，快速得到最佳化製程參數的組合。

1-2 文獻回顧

過去對於壓鑄的研究不乏其人，有些材料專家從事壓鑄合金材料之研究，有些研究者是對於壓鑄板改良的研究，有些研究者是對於壓鑄模具之澆流道最佳設計之研究。由於本研究的對象是大平面薄壁鎂合金於壓鑄時之製程條件之研究，因此與本研究有相關的加以說明。

從[1~4]之中可以發現，近年來輕金屬的使用，有越來越廣泛的趨勢，並且大量推廣進入 3C (電腦、通訊、消費性電子) 產業，鎂合金具有耐高溫、比重小、熱導性佳及具電磁波遮蔽效果，有著相當優異的性質，因此引起廣大對鎂合金研究的熱潮，包含對於產品製程中的每一個步驟。

現今以及未來的 3C 產品特徵為輕、薄、短、小，因此薄壁化的構件，勢必成為研發的重點，但因為鎂合金本身具有六方最密堆積 (Hexagonal Close Packed, HCP) 之晶體結構，此材料性質目前無法以塑性成形方式，大量又快速的生產，其薄壁件大多以壓鑄法為最主要的生產方式，但以壓鑄的生產方式仍有許多課題有待克服。

由[5-14]可瞭解到現今對於壓鑄產品，在生產前進行模流分析，已經是必經的過程了，因為模流分析可以預測壓鑄件與流道的設計，及壓鑄時可能會發生的種種問題，在產品生產之前就發現缺陷並加以修改，如此就可以提高壓鑄的效率，同時提昇了產品的品質。

Z.koren [21]以鎂合金 AZ91 於溫度 575 °C ~ 595 °C 之黏度測試，得到溫度 585

°C 是最佳的密度和機械性質，由圖 5-1 所示，575°C ~ 583°C 黏度明顯急遽降低。溫度在 583°C 以上時黏度幾乎不變。

劉展光 [24] 以薄壁鎂合金筆記型電腦上蓋為例，探討扇形澆口與錐型澆口，做澆流道的設計分析。扇形澆口的部分採用不同澆口長度澆口寬度比與面積縮減率，探討這兩因子對充填情況的影響。增加截面積的縮減率可以滿有效的增加熔湯進入模穴，並且流動一段距離之後的穩定度；扇形長度的增加，對於熔湯流動的穩定度與熔湯寬度的增加均有很大的助益，最後充填的部位均位於鑄件的左下角，因此在鑄件的左下角處設置溢料槽有其必要性；但扇形長度的增加，將產生極大的廢料。錐形澆口無三角洲（第三型）的熔湯充填情形與扇型澆口的充填情形極為類似，有相當良好的充填效果，也可大幅降低扇型澆口在澆流道系統所產生大量廢料的問題。

余順達 [26] 以筆記型電腦底座下蓋，探討鎂合金大平面薄板之壓鑄條件及多澆口式扇形澆口之最佳化。經由熔湯充填過程順序的比較，與壓力的分佈，溫度分佈的模擬結果，得到下列結論：

1. 面積縮減率對於壓鑄過程的影響：以扇形長度對寬度比值 1 為分界點，超過這個比值以上面積縮減率的遞增對於熔湯的流動影響並不明顯，反之在低於這個比值的時，隨著面積縮減率的增加，會使得熔湯流動較不連續，有較激烈的分叉現象出現，可能造成捲氣、氣孔等缺陷。
2. 扇形長度對於壓鑄過程的影響：當面積縮減率較小時，扇形長度的縮短會使得經過澆口後的熔湯有明顯的往兩側流動的現象，而較長扇形長度會使得熔湯的流動較為集中往模穴內側充填，當面積減縮率較大時，較短的澆口長度會使得熔湯的擴散劇烈，有著明顯的分叉出現，使得熔湯充填方向較不易掌控，容易發生缺陷。較高的扇形長度對寬度比值，即時在較大的面積減縮率其合金熔湯有足夠的距離可以使流動穩定充填。
3. 壓鑄條件的探討中，選用充填完成瞬間固相率在 0.1 以下，溫度差在 65°C 以下，壓力分佈沒有高壓集中的模擬結果。充填完全時較低的固相率及較低溫度差可以使得在凝固過程中，模穴內金屬熔液的凝固速率可以十分的接近，亦可以避免冷卻速率不同與溫差過大所造成的熱變形及縮孔，同時配合田口方法求得最佳化的壓鑄條件為（射出壓力 100Mpa、射出速度 110m/s、射出溫度 630°C、模具溫度 240°C）。文

中並未詳述田口方法如何求得最佳化壓鑄條件。

本文乃延續余順達 [26] 之研究，結合 FLOW-3D 模擬軟體與田口方法，應用 L9 直交表和雜訊比，配合回應表與變異數分析，找出最大貢獻度，綜合求得壓鑄製程條件之最佳化組合。

1-3 研究之背景、動機與目的

壓鑄技術發展至今已有百年歷史，傳統的模具設計方法，多為經驗傳承，對於藍圖上完成之模具，不經試製，難以掌握其壓製品可能產生之缺陷及問題。開發過程並需不斷試模、修模，達成壓鑄模具的設計與製作。如此純粹以實驗法則來解決壓鑄問題，完成壓鑄件成品，不但效率低，也需花費龐大的經費。

科技不斷的進步，現今鎂合金的零組件多用在注重產品外觀與表面品質的 3C 產品上，故對壓鑄品質要求相對提高。因此，國內外學者、專家已爭相投入研究生產及應用，大都以流動理論為基礎、數值分析(有限差分法及有限元素法)的方法，來建構壓鑄過程的模流分析軟體，引進電腦輔助工程(CAE)分析的技術，以期縮短產品開發時間，提昇產品品質。

目前，產業界對於鎂合金壓鑄件的研究並不順利，面臨到相當大的良率問題，主要是壓鑄件表面常見的缺陷，包括有：表面冷紋(流紋)、氧化、氣孔、多孔性、鑄後翹曲變形、收縮孔、冷界等，如圖 1-1、圖 1-2。必須依靠研磨、補土、塗裝等後加工方式，耗費相當大的成本與時間。從文獻中，可以知道影響薄壁壓鑄件品質的因素，不光是壓鑄模具的澆流道設計單方面的問題，另一方面，壓鑄條件的選定也是個相當重要的課題，因此希望能從模具設計的觀點，以模流軟體的分析技術，探討壓鑄製程參數最佳化，提供這方面問題的解決方案。

田口方法的中心目標是應用統計方法與工程技術，探討影響製程應變數的關鍵變數(因子)及其水準，以最少的實驗次數，兼具整個計劃的代表性，可決定製程的最佳製造組合的因素與水準。其中，參數設計是一種可以改善品質而又不增加成本的設計。因其運用控制因子與雜訊比之關係，使產品或製程達到穩健性(Robustness)。因此本研究結合鎂合金 AZ91D、壓鑄方法、Flow-3D 模流分析軟體，以田口實驗設計法，不更改模具情況下，運用參數設計方法，找出一最佳製程參數水準組合，可降低系統對各種雜訊之敏感度，提昇產品穩健性，為本研究的動機與目的。

1-4 論文大綱

- 第一章 緒論：針對本論文研究主題的緣由與目標加以說明，包含前言、文獻的回顧、與研究的動機及目的。
- 第二章 壓鑄方法與鎂合金材料特性：本章節內容包括壓鑄法、壓鑄常見的缺陷與成因、鎂合金材料的介紹。
- 第三章 FLOW-3D 與模流理論：本章節內容包括 FLOW-3D 模擬軟體與模流理論，本研究模擬分析所需輸入參數資料。
- 第四章 田口實驗設計法：田口實驗設計法之概述，品質損失函數，望目特性、望小特性、望大特性，直交表、變異數分析、貢獻度。
- 第五章 研究方法與分析條件：本論文的研究對象、研究方法、基本假設、壓鑄製程條件、及模擬參數之選定，Flow-3D 解析步驟，田口實驗設計法，均作說明。
- 第六章 田口式參數分析與模擬結果及討論：本章節針對研究所得到的結果，做單一品質分析、綜合品質分析、參數分析與實驗結果分析、回應表與變異數分析、最佳化製程參數組合的獲得和驗證，及未來展望。
- 第七章 結論與未來展望：對本研究結果做結論及未來展望。

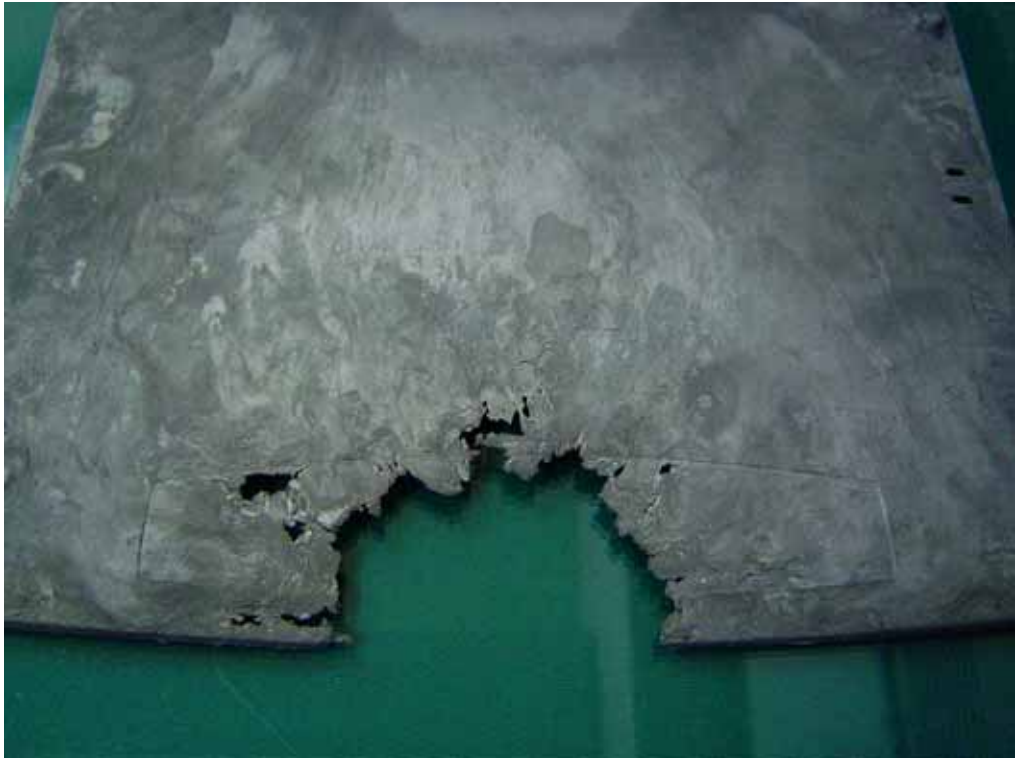


圖 1-1 充填不完全



圖 1-2 表面流紋

第二章 壓鑄方法與鎂合金、模具鋼材料特性

壓鑄 (Die Casting) 是在高溫下將熔融的合金熔液 (熔湯) 以高壓、快速壓入壓鑄模穴內，在熔湯充填過程，模具必須緊閉。雖然機器設備昂貴，但其生產率高、精度好、品質優、壽命長...等諸多優點，在短時間內能大量生產高精度且表面優良的產品，使得壓鑄成為大量生產合金零件最經濟的方法，如汽、機車、飛機...等所需零件，尤以近年 3C 產品的外殼，多以此法製作，逐漸取代工程塑膠之產品。

2-1 壓鑄方法

壓鑄方法可分為冷室法與熱室法兩種，冷室法主要用於高溫壓鑄合金，如鋁、銅、鎂等合金；熱室法用於低溫壓鑄合金，如鋅、鉛、錫等合金。以下大略介紹這兩種壓鑄方法。

1. 冷室壓鑄法 (Cold Chamber)

冷室壓鑄法的熔化爐與壓鑄機分離，熔湯以杓子或其他進料裝置送入射料套筒內，再以柱塞 (Piston) 採高壓力注入模穴中，等待熔湯凝固之後頂出。因其射料套筒機構採水平式，致密性良好，然在柱塞推擠過程容易產生捲氣，產品易有氣孔缺陷。

此法適用於壓鑄較大的鑄件。如圖 2-1 (a) 所示，可瞭解冷室壓鑄機的基本構造。

2. 熱室壓鑄法 (Hot Chamber)

熱室壓鑄法的熔化爐裝置在壓鑄機本體內，合金熔液浸漬於爐內，在注射缸 (Injection Cylinder) 以高溫將合金熔液經鵝頸管送入模穴中，待合金凝固後頂出。因其注射缸機構採仰角傾斜設計，致密性較差，所需壓力較冷室壓鑄法為小，適用於鑄造較小及薄肉的鑄件。

如圖 2-1 (b) 所示，可瞭解熱室壓鑄機的基本構造。

這兩種壓鑄方法最大的不同，在於合金熔化爐的位置，熱室與冷室壓鑄法分別主要適用於高溫與低溫壓鑄合金，如表 2-1 所示。

本研究所要探討的鑄件材料為鎂合金，其本身屬於高溫壓鑄合金，因此工業上多採用冷室壓鑄法來鑄造，但由於鎂合金對於模具鋼材並不會形成嚴重的腐蝕現象，加上熱室機的循環週期較短。因此也有廠商使用熱室壓鑄機來生產鎂合金之薄肉與小型鑄件。

2-2 壓鑄用鎂合金 AZ91D 之材料特性

鎂合金是所有合金中比重最輕的金屬,其比重為 1.81,僅僅是鋁合金比重的 2/3、鉛的 1/4、鋼的 1/5。鎂合金又以 AZ91D 的流動性最佳,導熱度亦高,因此 AZ91D 為壓鑄中最通用的材料,AZ91D 的壓鑄件有下列優越的特性[14]:

1. 輕量化,強度高,剛性強,優於鐵、鋁。
2. 極佳的防震性,耐衝擊,耐磨性良好。
3. 優良的熱傳性,可以改善電子產品散熱問題。
4. 非磁性金屬,抗電磁波干擾,電磁遮蔽性佳。
5. 材料可回收,符合環保法規。

因為鎂合金 AZ91D 有上述幾項優點,使得原本廣泛的使用在攜帶式電子資訊產品框架、結構部分的金屬材料或是工程塑膠材料,正逐漸地被 AZ91D 所採用,因此鎂合金的需求大量的增加。

表 2-2 為壓鑄用 AZ91D 鎂合金材料化學成分表,表 2-3 為 AZ91D 鎂合金材料機械性質與物性(表內的機械性質與物性質為試棒值,非鑄件切片所得),研究中模擬時所需之各種參數也以表中記載之數據為依據。

2-3 鎂合金薄壁鑄件常見的缺陷及成因

一般而言,壓鑄件厚度在 1.5mm 以下即為薄壁鑄件。本研究所探討的對象為大平面薄壁鎂合金,其主要用途為筆記型電腦之框體等。以下列舉了鎂合金壓鑄品最基本的幾項缺陷及成因:

1. 未完成填充:由於熔湯流速太慢、射出溫度不足、模溫太低、金屬液溫太低、進模口設計不當、排氣不良等所造成。
2. 氣孔:熔湯快速噴射充填,碰到模壁改變流向,容易產生氣窩、漩渦,使壓鑄件凝固後形成氣孔。
3. 流紋:模具設計時,澆道設計不良,轉角太直,熔湯流經轉角容易造成氣流,冷卻不均勻,及噴灑離形劑不足,均很容易產生流紋。
4. 變形翹曲:可能原因有兩種
 - (1) 頂出變形:多發生在頂出銷附近,鑄件頂出時,不均勻的頂出力造成,尤其薄壁壓鑄件,更容易發生。
 - (2) 形狀變形:壓鑄件成品經過一段時間產生變形翹曲,熔湯冷卻速度不同,造成不均勻的熱分佈,及太大的壓力差所形成殘留應力

不同，造成薄壁壓鑄件的翹曲變形。

5. 縮孔：由於合金熔湯補充不足，在熱點產生縮孔。
6. 熱裂：熱裂大都發生於鑄件斷面明顯改變處或凹角處，因為這些部位易受模具的侷限而產生壓力，倘若此部份恰為較晚凝固處，則易形成鬆散組織，造成材料強度降低，產生熱裂。
7. 鑄縮：鑄品剖面厚度變化大、孔之附近、加肋之處，易造成此缺陷。

又大平面薄壁鎂合金壓鑄件，由於表面積大、厚度薄，在生產時已經有相當的困難度，再加上這類壓鑄件屬高品質產品，客戶對於表面品質與尺寸精度都相當的要求。

2-4 模具

壓鑄用模具鋼採用 SKD61，屬熱加工模具鋼，其化學成分(%) C 0.32~0.42、Si 0.80~1.20、Mn <0.5、Cr 4.50~5.50、Mo 1.00~1.50、V 0.30~0.50。工具鋼內添加 Cr、Mo、V、Mn、Si 等，增加硬化能，析出特殊碳化物、以增加耐磨耗性、增加回火時的軟化抵抗、增加高溫強度、增加抗腐蝕性及防止脆性等，在 500~600°C 之高溫處使用也不容易軟化，又有耐熱耐氧化性，機械性質佳，其材料性質如表 2-4 所示。



表 2-1 熱室壓鑄法與冷室壓鑄法之差別[6]

項目	壓鑄機 冷室法	熱室法
熔化爐位置	與壓鑄機分開	與壓鑄機同一體
壓鑄溫度	600°C 以上 (用於高溫壓鑄合金)	450°C 以下 (用於低溫壓鑄合金)
壓鑄壓力	170~2000kg/cm ²	90~500kg/cm ²
壓鑄速率	小	大
鑄件重量	較大 (宜於大鑄件)	較小 (宜於小鑄件)
溶液吸鐵量	小	大 (因鋼質鵝頸管浸於熔液中)

表 2-2 常用壓鑄鎂合金錠種類與化學成分[6] [26]

合金名	類別	化學組成 (wt%)								
		Al	Zn	Mn	RE	Si	Cu	Ni	Fe	其他
AZ91D	鑄錠	8.5~9.5	0.45~0.9	0.17~0.40	-	≤0.05	≤0.025	≤0.001	≤0.004	≤0.01
	壓鑄品	8.3~9.7	0.35~1.0	0.15~0.50	-	≤0.01	≤0.030	≤0.002	≤0.005	≤0.02
AM60B	鑄錠	5.6~6.4	≤0.20	0.26~0.50	-	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004	≤0.01
	壓鑄品	5.5~6.5	≤0.22	0.24~0.6	-	≤0.10	≤0.010	≤0.002	≤0.005	≤0.02
AM50A	鑄錠	4.5~5.3	≤0.20	0.28~0.50	-	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004	≤0.01
	壓鑄品	4.4~5.4	≤0.22	0.26~0.6	-	≤0.10	≤0.010	≤0.002	≤0.004	≤0.02
AM20	鑄錠	1.7~2.5	≤0.20	≥0.20	-	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004	≤0.01
AS41B	鑄錠	3.7~4.8	≤0.10	0.35~0.6	-	0.60~1.4	≤0.015	≤0.001	≤0.0035	≤0.01
	壓鑄品	3.5~5.0	≤0.12	0.35~0.7	-	0.5~1.5	≤0.02	≤0.002	≤0.0035	≤0.02
AS21	鑄錠	1.9~2.5	0.15~0.25	≥0.20	-	0.7~1.2	≤0.008	≤0.001	≤0.004	≤0.01
AE42	鑄錠	3.6~4.4	≤0.20	≥0.10	2.0~3.0	-	≤0.04	≤0.001	≤0.004	≤0.01

表 2-3 常用壓鑄鎂合金的材料性質 [28]

性質		AZ91D	AM60B	AS41B
Density, g/cm ³		1.81	1.79	1.77
Tensile strength ksi(MPa)	Room temperature	34(230)	32(220)	31(215)
	177°C	22(150)	19(131)	18(124)
Tensile yield ksi(MPa) ^a	Room temperature	23(160)	19(130)	20(140)
	177°C	17(115)	13(90)	12(85)
compressive strength ksi(MPa)	Room temperature	58(400)		53(365)
	177°C	50(210)		29(200)
compressive yield ^a ksi (MPa)	Room temperature	24(165)	19(130)	21(150)
	177°C	19(130)		19(130)
Elongation, %		3	6~8	6
Young's modulus, ksi(GPa)		6.5(45)	6.5(45)	6.5(45)
Poisson's ratio		0.35	0.35	0.35
Shear strength, ksi (MPa)		20(140)		
Fatigue strength ^b , ksi (MPa)		10(70)	10(70)	
Impact strength ^c , ft-lb(J)		1.6(6.2)	45(6.1)	3.0(4.1)
Creep strength ^d , ksi (MPa)		2.8(20)		3.0(21)
Hardness, Brinell		63~75	55~70	60~90
Thermal conductivity ^e , W/m-K		72	62	68
Thermal expansion coeff. , ×10 ⁻⁶ m/m-K		25	25.6	26.1
Specific heat, kJ/kg-K		1.05	1.05	1.02
Latent heat of fusion, kJ/kg		373	373	373
Electrical resistance, μΩ-cm		14.1	12.5	
Solidus temperature, °C		470	540	565
Liquidus temperature, °C		595	615	620
Casting temperature, °C		625~700	650~695	660~695

a-0.2% offset b-DIN 50113

c-ASTM E2(unnotched)

d-0.1% creep extension at 147°C

e-at 100~300°C

表 2-4 模具鋼 SKD61 之性質 [24] [26]

物理性質		材料名稱	SKD61	
		單位		
熱傳導係數		$\text{g-cm/s}^3\text{-K}$	2.717E06	
比熱		$\text{cm}^2/\text{s}^2\text{-K}$	5.43E06	
密度		g/cm^3	7.80	
熱傳係數	模具-熔湯	$\text{g/s}^3\text{-K}$	2.0E07	
	模具-外界		0.1	

註：以上單位為 FLOW-3D 內建單位 CGS 制

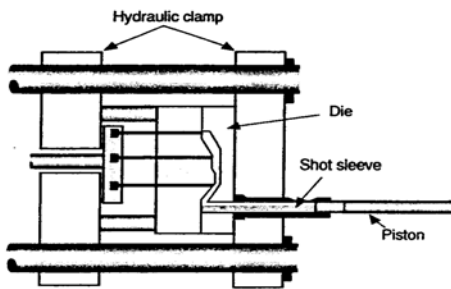


圖 2-1 (a) Cold Chamber Die Casting [3] 冷室法

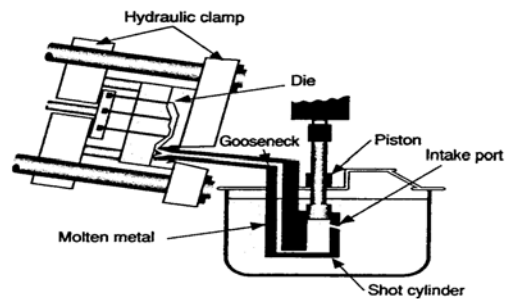


圖 2-1 (b) Hot Chamber Die Casting [3] 熱室法

第三章 Flow-3D 與模流理論

3-1 模流分析軟體

Flow-3D[22][23]是由美國 Flow Science Inc.所發展的一套軟體，被提供用來從事液體以及氣體在動態行為上面的研究，因此可以藉由不同的物理狀態，諸如熱傳導、固化現象、表面張力等，來模擬流體流動的過程。Flow-3D 的理論基礎在於質量守恆方程式、動量方程式以及能量不減方程式等，因此它可以被使用在絕大部分任何型態的流動過程。在當前的壓鑄產業之中，Flow-3D 與其它諸如 MAGMAsoft、JSCAST 等軟體，皆被使用來模擬不同的壓鑄條件下，合金熔液在模穴內的流動以及充填情形。

Flow-3D 在與其它的模流軟體有幾個基本上的差異，它所採用的數值方法為有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)，並以一種特別的技巧，稱之為 FAVOR 法 (Fractional-Area-Volume-Obstacle-Representation) 來定義在四邊形網格內一般幾何形狀的區域，這兩種方法的結合，除可以使得網格建立容易、減少記憶體的使用量、縮短計算時間，也可以使得網格元素可以有效的適應一般的幾何形狀。

雖然 Flow-3D 有著如上所述的種種優點，但是它在本質上還是擺脫不了採用矩形網格以及使用有限差分法上的一些缺點，例如在定義一個極為複雜的幾何形狀時，就無法非常有效的去適合它，如此一來就會對模擬結果產生了影響，因此通常需要增加網格的數目來彌補形狀的偏差，然而這卻也增加了運算的時間。此外，為了能夠得到較佳的精度以及減短計算時間，在切割網格時也必須儘量做均勻等長度的切割。這是在使用 Flow-3D 時所必須注意的兩個事項。

依據使用者所給予的輸入條件，在經由 Flow-3D 的模擬後，使用者可以得到流體充填模穴的順序、速度場的分佈、壓力場的分佈、溫度的分佈以及凝固時間曲線等等，使用者可以根據這些資料，去判斷在壓鑄上有什麼缺失，並且加以改正。

壓鑄的模流分析是以流體力學、熱傳、凝固理論和應力學為基礎，應用數值分析的方法來解析壓鑄過程的一些物理現象，其理論基礎還是建構在流體力學的三個基礎拘束方程式，FLOW-3D 的基礎理論亦不例外。其方程式如下列所示：

1. 質量不減方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-1)$$

2. 動量不減方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + g_x \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g_y \quad (3-3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g_z \quad (3-4)$$

3. 能量不減方程式

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3-5)$$

其中 ρ : 密度, t : 時間, u 、 v 、 w : x 、 y 、 z 方向之速度, p : 壓力, T : 溫度, ν : 黏滯係數, k : 熱傳導率, g : 重力加速度, C_p : 比熱, f_s : 固相率, L : 潛熱。

3-2 牛頓流體

流體在一方向持續受一剪應力而產生的連續變形, 可將此稱之為牛頓流體 (Newtonian Fluids), 反之, 如果流體受一剪應力而不會發生連續性變形, 則稱他為非牛頓流體 (Non-Newtonian Fluids), 如 (3-6) 式。

$$\tau_{xy} \propto \frac{du}{dy} \quad (3-6)$$

3-3 特殊技巧

FLOW-3D 模擬分析軟體使用時, 採用如下兩項方法, 將更順暢。

3-3-1 流體通過的比例面積法 (FAVOR)

FAVOR 它的起源, 在於以四邊形磚塊元素所構成的網格中, 如何定義一般視為障礙物形體的一種方法, 它的概念為定義每一個磚塊元素的六個面能夠被

流體通過的比例面積，以及出入自由的體積。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中，例如，在兩個元素的公共面上，對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數，若沒有可讓流體自由通過的面積，則不可能有對流的通量。FAVOR 具有力量之處在於它提供建立模型時的彈性，對於流體與固體間的熱傳，FAVOR 法以在每個磚塊元素中，提供了一個良好的流體與障礙物交界面面積的決定方法，而能夠給予高精度的解[5]。

對於不可壓縮、黏性流而言，FAVOR 方程組利用以下形式：

$$\nabla \cdot (\vec{A}\vec{u}) = 0 \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{V} (\vec{A}\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho V} (\nabla \vec{A}) \cdot (\mu \nabla) \vec{u} + g \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{V} (\vec{A}\vec{u} \cdot \nabla) H = \frac{1}{\rho V} (\nabla \vec{A}) \cdot (k \nabla T) \quad (3-9)$$

其中：

$$\vec{A} \vec{u} = (A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z) \quad (3-10)$$

$$(\nabla \vec{A}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} A_x, \frac{\partial}{\partial y} A_y, \frac{\partial}{\partial z} A_z \right) \quad (3-11)$$

$$H = \int C(T) dT + (1 - f_s) \cdot L \quad (3-12)$$



這些方程式中的 A_i 是相關於流體在第 i 個方向可自由通過的部分面積， V 表示可自由進出的部分體積， ρ 是密度， p 是壓力， u_i 表示 i 方向的速度， μ 是流體的黏滯係數， g 表重力， H 是流體的焓， T 是溫度， f_s 是固相率， L 是潛熱，以及 C 與 k 分別表示流體的比熱和熱傳導係數。

對於模具而言，能量方程式具有以下的形式：

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_m V_c} (\nabla \vec{A}_c) \cdot (k_m \nabla T_m) \quad (3-13)$$

其中下標 m 表示模具的相關參數，下標 c 表示部分體積與部分面積的補數，在金屬與模具界面的熱通量，定義為 q ，其形式如下：

$$q = h (T - T_m) \quad (3-14)$$

其中： h 為熱傳導係數。

3-3-2 流體體積法 (VOF)

流體體積法 (Volume Of Fluid, VOF) 提供了經由固定控容網格追蹤明顯流體界面的方法，其非常重要的部分為動態準確的建立了界面的邊界條件，換句話說，流體體積法是對自由表面或兩種流體界面的一種數值處理方法。

流體體積法的基礎在於部分流體體積 F ，它包含在每一個控容之中，控容可以是空的、部分充填或完全充填，部分充填的元素通常包含自由表面。

對於界面的處理必須相當小心，才可免於雜亂，為了達到這一個目標，使用所謂的捐贈者-接受者對流的方式來處理得到 F ，根據這些方法，在計算的元素中，界面的形態是從其中以及周圍元素的 F 值來計算的，然而贈與元素或接受元素的對流方式，是根據相關正交於界面的對流方向來應用的。方程式 F 為

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V} \nabla \cdot (\vec{A}uF) = 0 \quad (3-15)$$

自由表面的邊界條件設定為不考慮方向與切線方向的應力。



第四章 田口實驗設計法

隨著科技的發展，對產品性能的要求越來越高，如何尋求高品質及快速的生產技術，以符合最佳設計與經濟效益雙贏的需求。因此各種新技術陸續被開發，其中一種「製程設計最佳化技術」，亦即穩健設計的品質工程（Quality Engineering of Robust Design），是一種以源頭製程為導向的工程與管理方式的設計技術，在工業先進國家許多產業之產品設計與研發工作上，一直擔任重要角色，也是先進國家眾多優良產品設計背後原因之一。田口實驗法由田口玄一（Genichi Taguchi）所提倡[10]，其基本方法是實驗設計（Experimental Design），屬於統計的應用，其思想方法是工程，結合統計及工程的優點，成為一種工程分析工具，應用於工程或設計能力的提昇，因此能在花費極少成本的考量上，達到改善產品的品質技術，正是本研究的動機與目的。

「製程設計最佳化技術」利用直交表，以少數的實驗來研究眾多的決策變數，同時也以一個新的品質指標，稱為信號雜訊比（Signal-To-Noise Ratio, S/N Ratio），可從顧客的角度來預測產品品質、性能和成本，是一種符合經濟效益並能兼顧製造者與消費者雙方權益的產品，「製程設計最佳化技術」或稱「田口實驗設計法」，深具實用價值，在工業先進國家之產業界樂於採用。

田口方法的中心目標是應用統計方法與工程技術，探討影響製程應變數的關鍵變數（因子）及其水準，以最少的實驗次數，兼具整個計劃的代表性，可決定製程的最佳製造組合的因素與水準。田口也提出直交表和點線圖，來設計有效率的實驗設計及分析；回應表和回應圖則顯示各因素的效果強弱，來決定最佳製造組合的因素與水準。穩健性（Robustness）的概念，田口玄一博士強調回應圖降低外在雜音因素對產品製程應變數的影響至最低。

品質管制可分為兩種：一種是產品在製造階段所用的線上（On-Line）品質管制，另一種是產品在設計階段所用的線外（Off-Line）品質管制，線外品質管制是線上品質管制的源流。本研究所介紹重點將放在製程參數設計，其目的是尋求產品與製程的生產條件之組合，其在經濟的考量下，產品的穩健性很高。

事實上，任何產品有可能必須同時被考慮一個以上的製程應變數；如何選取最佳的組合因素來生產最好的產品，是本研究的目的。

4-1 品質損失函數

傳統上，一般認為產品品質特性只要在界限範圍內即視為良品，但田口博士認為產品品質特性應儘量保持在目標值上，若離目標值越遠，損失越大。因此田口博士提出其著名的品質損失函數。

1950 年代田口博士提出田口方法，係一種以工程角度出發的實驗計劃法，其基本精神在於應用直交實驗的統計分析，並以訊號雜訊比(S/N Ratio)作為品質評估的指標，S/N 比愈大則表示損失愈少，代表品質特性愈好。利用直交表及 S/N 比的觀念，以參數設計的方法求得一參數最佳的水準組合。

基本上，S/N 比的計算方式有三種：望目特性、望小特性、望大特性。分述如下：

4-1-1 望目特性

望目特性是指品質特性有一目標值，其品質特性是越接近目標值越好，品質特性的理想機能是此目標值，例如壓力、速度、尺寸等。品質損失函數可以用 (4-1) 式表示：

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{nS} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (4-1)$$

其中： y 為產品品質特性值。

S 為標準差(Standard Deviation)，

y_i 為評估的實驗值和 n 為每組實驗的樣本數。

4-1-2 望小特性

望小特性是指其品質特性是越小越好，換句話說，品質特性的理想機能是零，例如翹曲變形、裂紋、收縮等。假設品質特性是望小，其理想目標值 $m = 0$ ，所以望小情況的品質損失函數可以用 (4-2) 式表示：

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log(\bar{y}^2) \quad (4-2)$$

4-1-3 望大特性

望大特性是指品質特性越大越好，換句話說，品質特性的理想機能是無窮大，例如壽命、抗拉強度、防震等。假設品質特性是望大，其理想目標值 $m = \infty$ ，

我們可以將品質特性取倒數 ($1/y$)，後以望小特性來處理。將代入 (4-2) 式，所以望大情況的品質損失函數可以用 (4-3) 式表示：

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4-3)$$

4-2 直交表

直交表實驗的目的是利用所取得的實驗數據，來建構一個數學模式，這個數學模式可以用來預測任何控制因子組合下（包含最佳的組合）的反應值，而實驗的目的是在證實這個數學模式的合理性。任一產品品質特性有不少變數影響其製程的結果，這些變數又分為可以被製程掌握的控制因子，與無法掌握的雜訊因子。若雜訊因子的影響被降至最低，即為田口所言的穩健性。因子的水準一般都設計兩個或三個水準，來涵蓋該因素的變動範圍。實驗進行前先決定好因子及其水準，再設計兼顧時效性與經濟性之實驗。實驗之目的在尋找影響製程品質特性之最佳因子與水準的各變數組合。此法是將所有因子與水準的組合，考慮因子間可能有交互作用（Interactions）的存在，進行完整的因子實驗，稱為實驗計畫（Design of Experiments）。

4-3 變異數分析

變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)是統計上所應用的方法之一，由於實驗數據或資料會受到各種不同的因素所影響，因此常會利用變異數分析來探討各因素所造成的差異。利用田口方法中的 S/N 比，只能做為評估各控制條件好壞的一項指標，但無法判斷各控制因子對於品質特性的差異程度，也無法得知何種控制因子的影響程度，因此選擇利用變異數分析來瞭解各控制因子的貢獻度，藉此得知如何改善和變換何種控制因子，以得到最大的效益。

變異數分析主要是利用各實驗值之間的差異程度，以統計的方法加以判斷和解釋。其內容包含了實驗數據列表和回應表、自由度、總平方和、各因子平方和、均方(Mean Square)、貢獻度和合併誤差。

變異數分析主要是利用各實驗值之間的差異程度，以統計的方法加以判斷和解釋。下面就本文所使用的變異數分析加以說明計算公式和步驟：

1. 實驗數據列表和回應表

在進行變異數分析時，必須延用直交表和 S/N 比的計算值，將其繼續計算。

例如： y_{ij} (i 為實驗組數， j 為重覆次數) 為原始的實驗數據，求得各實驗組之 S/N 比 η_i 與整體 S/N 比之平均值 $\bar{\eta}_i$ 。

2. 自由度計算

一般而言，各因子的自由度(Degree of Freedom)為因子水準數減一，而整體的自由度即為整體之評估數據減一。

3. 總平方和 (SS_T)

總平方和也稱為總變動或是全變動(Total sum of Square, SS_T)，另外也可稱為總變異(Total Variation)。

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \bar{\eta}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \eta_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \eta_i \right)^2 \quad (4-4)$$

其中 n ：實驗評估值的總數。

4. 均方(Mean Square)

均方即為變異數(V_{factor})，是各因子之變異除以各因子之自由度。

$$V_{factor} = \frac{SS_{factor}}{f_{factor}} \quad (4-5)$$

也就是若對於因子 A ，則公式如下：

$$V_A = \frac{SS_A}{f_A} \quad (4-6)$$

另外，誤差項均方為 $V_e = \frac{SS_E}{f_e}$ 。

5. 淨平方和 (SS'_{factor})

又稱為純變動，即各因子之變異數減去誤差項的變異數與各因子自由度的乘積。

$$SS'_{factor} = SS_{factor} - f_{factor} \times V_e \quad (4-7)$$

也就是若對於因子 A ，則 A 因子的淨平方和為：

$$SS'_A = SS_A - f_A \times V_e \quad (4-8)$$

6. 合併誤差 (Error)

當使用某些直交表進行實驗情況下，會造成沒有誤差項，因此會結合一些平方和較小的因子以進行變異數的分析。

7. 貢獻度

使用貢獻度(Contribution)來進行評估。即為各因子的純變動佔總變動的百分比：

$$\rho_{factor} = \frac{SS'_{factor}}{SS_T} \times 100\% \quad (4-9)$$

也就是若對於因子 A，則 A 因子的貢獻度為：

$$\rho_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \quad (4-10)$$



第五章 研究方法與分析條件

鎂合金是當前最被廣泛使用在薄壁壓鑄件上的材料，適用領域不斷擴大，是當代最為矚目的工程材料；而壓鑄法最能夠提供大量且經濟的生產方式，因大平面薄壁鎂合金壓鑄件，由於表面積大、厚度薄，在生產時已經有相當的困難度，再加上這類鑄件屬高品質產品，現今鎂合金的零組件多用在注重產品外觀與表面品質的 3C 產品上，客戶對於表面品質與尺寸精度都相當要求。

本研究探討鎂合金 AZ91D 大平面薄壁的壓鑄件，以射出壓力、射出速度、射出溫度、和模具溫度等四個參數，對於大平面薄壁鎂合金 AZ91D 材料壓鑄製程之影響。藉由 FLOW-3D 模流分析軟體，針對上述壓鑄製程條件進行模擬，接著運用田口實驗設計法，以最少實驗次數，最經濟方法，求得最佳化的壓鑄製程條件參數組合。其詳細研究方法與分析條件，分述如下：

5-1 研究對象

1. 製品形狀尺寸

本文所探討的對象為大平面薄壁鎂合金，選擇筆記型電腦底座外型，即應用鎂合金 AZ91D 的大平面薄壁壓鑄件。其原型的形狀尺寸如圖 5-1 所示，模擬物件的尺寸為 272mm X 227mm X 17mm，厚度為 1mm，其壓鑄模具的 3D 模擬圖，如圖 5-2 所示。接著參考劉展光[24]之研究，其扇形澆口採用不同澆口長度/寬度比、面積縮減率，及扇形長度的增加，對熔湯流動之穩定度均有很大的助益；並延續余順達[26]之模擬分析，模具及澆口採用其最佳之雙澆口式扇形澆口，其詳細的扇型澆口設計內容與形狀尺寸如表 5-1 所示，其扇形澆口如圖 5-3 所示。

2. 澆口設計

又本研究所採用的澆口面積與長度配置，係參考劉展光 [24]，說明如下：壓鑄所需的澆口面積可由下列公式求得：

$$A_g = \frac{\nabla}{V_g \cdot t_f} \quad (5-1)$$

其中 A_g ：澆口面積

∇ ：通過澆口之鑄件總體積 = 成品體積 + 溢流井體積

V_g ：澆口速度

t_f ：充填時間

充填時間的設定可由 NACDA[24]所推導的方程式來求得鎂合金充填時間(t_f):

$$t_f = 0.0346((T_m - T_f + 2.5S)/(T_f - T_d))t \quad (5-2)$$

其中 T_m ：為鎂合金熔液溫度 (°C)。

T_f ：為可流動之最低溫度 (°C)。

T_d ：為壓鑄模具溫度 (°C)。

S：為可流動最大固相率。

t：為鑄件平均厚度 (mm)。

壓鑄後廢料的切除，澆口的厚度與寬度的決定則有以下兩類說法：

(1) 基本上澆口的厚度不要超過鑄件壁厚的一半。 [4]

(2) $\frac{\text{澆口寬度}}{\text{鑄件寬度}} = \frac{4}{6} \sim \frac{5}{6}$ ；可拆成數個澆口，使得澆口寬度不超過 80mm。

$$\frac{\text{澆口厚度}}{\text{鑄件厚度}} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{6} \quad [3]$$

5-2 分析方法

為了能以最少的實驗次數，兼具整個計劃的代表性，快速求得最佳的壓鑄條件組合。因此，結合 FLOW-3D 模流分析軟體，以及運用田中實驗設計法。首先做控制因子分析、水準數的選定，及規劃模擬實驗之 L9 直交表。再經由 FLOW-3D 模擬軟體，依 L9 直交表的控制因子及水準依序模擬分析，求出固溶率、壓力差、溫度差之數據、及 S/N 比，再用變異數分析求得因子的貢獻度、以及主效果、最佳加工條件組合，接著探討各因子單獨對目標值的影響，獲得結論。其研究架構流程如圖 5-4 所示。

5-3 基本假設

由於所選取的鑄件為對稱的形狀，因此以二分之一的模型來做模擬。熔湯的邊界速度，是以預期的澆口速度，參照面積減縮率，往回推算。以此範例來說，面積縮減約 33%，推算的結果，邊界速度應設定為選定參數之 0.66 倍。在實際的壓鑄情況下，有許多的因子會影響到壓鑄的結果，但通常在模擬分析的過程當中，本研究為了配合 FLOW-3D 模擬分析軟體，做以下的假設：

1. 合金熔液屬於不可壓縮流。
2. 合金熔液屬於牛頓流體。

3. 黏度為常數。

4. 在模穴中只考慮熔湯的存在，即忽略空氣的影響。

鎂合金熔湯的體彈性模數大，受外力作用不易變形，可視為不可壓縮流。

壓鑄時，熔湯流速極快速，充填時間極為短暫，必須在 0.1 秒內完成，亦即流速接觸模壁極為短暫；請教軟體代理商之工程師，熔湯可設為牛頓流體。

根據 Z.Koren 的文獻[21]中，其鎂合金 AZ91 的黏度與溫度之間的關係如圖 5-5 所示，藉由圖表可以發現其溫度高於 583°C 以上時，其黏度幾乎成一固定值，而低於 583°C 以下其黏度才會有明顯的變化，因此在模擬壓鑄過程中，由於澆鑄溫度高於 583°C 許多，且充填時間只有幾毫秒即可完成，故將黏度假設為常數。

模具均設有逃氣孔，當熔湯充填模穴，空氣被熔湯排擠，空氣由逃氣孔排出，因此，忽略空氣的影響。

5-4 壓鑄製程條件

依據 彭世寶 著 壓鑄模具設計與製作 [3]，書本中之敘述，壓鑄件發生不良的原因，不外乎與壓鑄件的設計、壓鑄模具、壓鑄機的性能、壓鑄製程條件作業有關。壓鑄件的設計、壓鑄模具，較適用於新壓鑄模具的研發設計。

本文進一步參考 劉展光 [24]、余順達 [26] 的研究，亦針對壓鑄製程條件之探討；壓鑄產品品質之優劣，製程參數是重要的關鍵，因此選擇 A 射出壓力、B 射出速度、C 射出溫度、D 模具溫度為控制因子及三水準，如表 5-2 所示，以涵蓋該因子的變動範圍，做模擬實驗，選用簡化之 L9(3⁴) 直交表，如表 5-3、表 5-4。回應之目標值選擇固溶率、壓力差、溫度差，詳細規劃實驗之 L9(3⁴) 直交表，如表 5-5 所示。

固相率：模穴內熔湯固體所佔比例，固相率會影響熔湯完全充填，故越小愈好。

壓力差：模穴內最大壓力與最小壓力之差，壓力差易產生壓鑄件的內壓力，造成產品的缺陷，故越小越好。

溫度差：模穴內最大溫度與最小溫度之差，溫度差易產生壓鑄件的變形翹曲，故越小越好。

5-5 模擬參數之選定

模擬參數數據的選用，射出壓力 14Mpa~21Mpa、射出速度 50 m/s~90 m/s，

是依據 FRECH 公司技術手冊 [4] 所建議，如表 5-6、表 5-7 所示；射出溫度 625°C~700°C，依據表 2-3 常用壓鑄鎂合金的材料性質 [28] 所建議；模具溫度 200°C~250°C，依據壓鑄模具設計與製作 [3] 所建議。依據上述資料，本研究模擬製程參數選用射出壓力 15~19 MPa，射出速度 80~100 m/sec，射出溫度 625~655°C，模具溫度 210~250°C。三個水準的數據，採用各因子選用範圍之均值法。

5-6 Flow-3D 解析步驟

本軟體功能強大，分析範圍很廣，依不同的分析項目，所需輸入之資料亦隨之不同，遵照 Flow-3D 的應用，本研究採用下列解析步驟：

5-6-1 建立幾何模型

Flow-3D 有四種方式可以建立所要分析物件的幾何模型，分別為 Flow-3D 內建方式、以 STL 檔格式輸入、以 I-DEAS 檔案輸入以及 ANSYS 檔案格式輸入。由於 Flow-3D 所提供的幾何模型建構模組屬簡略的 CAD 系統，對於較複雜的幾何形狀不易建構、因此本研究使用 Solid Works 3D 實體 CAD 軟體建構出所欲模擬的物件模型，與所設計的澆流道系統，以 STL 格式檔儲存，再載入 Flow-3D 軟體，完成幾何模型建立。

5-6-2 熱物性質與製程參數指定

Flow-3D 分析軟體必須有壓鑄合金材料的基本熱物性質，我們所輸入的總體資料，如表 5-8 所示；物理性質所輸入的資料，如表 5-9 所示。這些包含材料的密度、熱傳係數、比熱、潛熱、熔點溫度、凝固點溫度等資料，壓鑄材料為鎂合金 AZ91D，材料物性如表 2-3、表 2-4，空模穴的初始壓力設定為一大氣壓力。

5-6-3 邊界條件與材料物性之設定

所給予的邊界條件模式，是在網格分割空間以實體模型長方體座標軸為基準的六個面，分別為 Xmax、Xmin、Ymax、Ymin、Zmax、Zmin。產品中線邊界為左右對稱，本研究採用二分之一的對稱模型來模擬，中線邊界條件設定為 Symmetry，澆口處設定為射出速度，其餘四個面的邊界條件均指定為 Wall。

邊界條件設定如表 5-10 所示，模擬時之輸入數值如表 5-11 所示。

壓鑄模具材料為模具鋼 SKD61，其詳細的材料物性如表 2-4 所示。

5-6-4 網格分割

Flow-3D 採用有限差分法，在網格的分割是磚塊網格，很難以少數的網格數將模型呈現得很完整。雖然配合 FAVOR 法來提昇網格建立後的模型精確度。但對於較複雜的曲面及圓弧的地方，仍須相當多的網格數，才能精確的表達出模型外觀的細緻處。本模擬的對象為對稱模型，為了讓模擬計算的時間不會過於冗長，因此以二分之一的模型來做模擬，三軸分別為 $X_{min}=-146\text{mm}$ ， $X_{max}=146\text{mm}$ ， $Y_{min}=-42.8\text{mm}$ ， $Y_{max}=244\text{mm}$ ， $Z_{min}=-3\text{mm}$ ， $Z_{max}=7\text{mm}$ ，並將網格數控制在約 41 萬個（ $112\times 230\times 16$ ）。

5-6-5 電腦模擬分析

經過以上的步驟，接下來輸入邊界條件、熱物性質、及製程參數等，依表 5-11 參數，Flow-3D 軟體依序模擬，得到熔湯充填完全後的三個目標值，如表 5-12 所示。熔湯充填後之各種分佈情形，如圖 5-6 壓力分佈圖、圖 5-7 溫度分佈圖、圖 5-8 固溶率分佈圖等。分析這些分佈圖可以推知熔湯充填情況及流動的平穩性，熔湯不易產生紊流，並能完全充填。比對圖 5-9 X 軸長度與壓力關係圖、圖 5-10 X 軸長度與溫度關係圖、圖 5-11 各角點之壓力關係圖、圖 5-12 各角點之溫度關係圖，驗證熔湯能完全充填模穴，得知選用壓鑄製程參數是合理的。再進一步採用田口實驗設計法中望小特性、變異數分析、貢獻度、回應表等，求得最佳化製程參數組合。

表 5-1 扇形澆口設計方案[26]

方案設計		
項目	量值	註解
充填時間	8.9ms	由 NADCA 的方程式
充填速度	100m/s	
鑄件體積	55515.3 mm ³	
鑄件厚度	1.0 mm	
澆口數目	2 個	此模型採用雙澆口
澆口面積	31.18mm ²	$A_g = \frac{V}{V_g \cdot t}$ (單一澆口的澆口面積)
澆口厚度	0.6mm	
澆口寬度	51.98mm	
流道面積	46.77mm ²	流道面積：澆口面積=1.5：1 [4]
扇形長度	69.65mm	扇形長度：澆口寬度=1.34：1 [4]
流道寬度	11.85mm	流道寬度：流道厚度=3：1 [4]
流道厚度	3.95mm	

<p>面積與扇形長度之比</p>	<p>厚度與扇形長度之比</p>	<p>寬度與扇形長度之比</p>
<p>扇形澆口之扇形長度 對面積變化圖</p>	<p>扇形澆口之扇形長度對 厚度變化圖</p>	<p>扇形澆口之扇形長度對寬度 變化圖</p>

表 5-2 控制因子與水準

水準	控制因子			
	A	B	C	D
	(射出壓力) MPa	(射出速度) m/s	(射出溫度)	(模具溫度)
1	15	80	625	210
2	17	90	640	230
3	19	100	655	250

表 5-3 簡化之 $L_9(3^4)$ 直交表 (一) [10] [25]

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度)	D (模具溫度)
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C1	D3
9	A3	B3	C2	D1

表 5-4 簡化之 $L_9(3^4)$ 直交表 (二) [10] [25]

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度)	D (模具溫度)
1	15	80	625	210
2	15	90	640	230
3	15	100	655	250
4	17	80	640	250
5	17	90	655	210
6	17	100	625	230
7	19	80	655	230
8	19	90	625	250
9	19	100	640	210

表 5-5 詳細實驗規劃之 $L_9(3^4)$ 直交表

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	固溶率 %	壓力差 MPa	溫度差 °C
1	15	80	625	210			
2	15	90	640	230			
3	15	100	655	250			
4	17	80	640	250			
5	17	90	655	210			
6	17	100	625	230			
7	19	80	655	230			
8	19	90	625	250			
9	19	100	640	210			

表 5-6 FRECH 公司技術手冊中建議的澆口速度[4]

	厚壁鑄件	正常壁厚鑄件	薄壁鑄件
澆口速度 (m/s)	30 (25~35)	50 (35~50)	75 (50~90)

表 5-7 FRECH 公司技術手冊中建議的鎂合金鑄造壓力 (熱室機) [4]

鑄件要求品質	壓力 kg/cm^2	(Mpa)
要求機械強度	140~210	(14~21)
要求氣密性 or 大面積的薄鑄件	200~300	(20~30)

對於冷室機，鑄造壓力約在 $350 \sim 550 \text{ kg/cm}^2$ 。對薄壁鎂合金鑄件，鑄造壓力的影響較小，通常鑄造壓力不需要太大。

表 5-8 總體資料輸入表

The image shows a software dialog box titled "Model Building" with several tabs: Global, Physics, Props, Meshing & Geometry, Boundaries, Initial, Output, and Numerics. The "Initial" tab is selected. The dialog contains the following elements:

- Finish Time:** A text input field containing "0.1".
- Restart:** A button with a grey square icon and the text "Restart".
- Finish Condition:** A group box containing three radio buttons: "Finish Time", "Fill Fraction" (which is selected), and "Solidified Fluid Fraction". Below these is a "Finish Fraction" text input field containing "1.0".
- Interface Tracking:** A group box containing two radio buttons: "Free Surface or Sharp Interface" (selected) and "No Sharp Interface".
- Number of Fluids:** A group box containing two radio buttons: "One Fluid" (selected) and "Two Fluids".
- Flow Mode:** A group box containing three options: "Incompressible" (selected), "Compressible", and "Steady State Accelerator (Non-Physical Transients)" (with an unchecked checkbox).
- Mentor Options:** A group box containing three radio buttons: "No Mentor Help", "Offer Suggestions" (selected), and "Offer Suggestions and Take Action".
- Notes:** A text area with a scroll bar containing the text: "Title" followed by "This is a sample input file".
- Buttons:** A row of buttons at the bottom: "Save As...", "Save", "Ok", "Cancel", "Edit File", and "Help".

表 5-9 物理性質輸入表

Model Building

Global | **Physics** | Props | Meshing & Geometry | Boundaries | Initial | Output | Numerics

<input checked="" type="checkbox"/> Viscosity	<input checked="" type="checkbox"/> Wall Shear	<input type="checkbox"/> Particles
<input checked="" type="checkbox"/> Energy Equation	<input checked="" type="checkbox"/> Gravity	<input type="checkbox"/> Surface Tension
<input type="checkbox"/> Shallow Water	<input type="checkbox"/> Drift-Flux	<input type="checkbox"/> Cavitation
<input type="checkbox"/> Density Evaluation	<input type="checkbox"/> Porous Media	<input type="checkbox"/> Bubble Models
<input checked="" type="checkbox"/> Defect Tracking	<input type="checkbox"/> Thermal Die Cycling	<input checked="" type="checkbox"/> Solidification
<input type="checkbox"/> Scalars	<input type="checkbox"/> Electro-statics	<input type="checkbox"/> Compressibility
<input type="checkbox"/> Sediment Scour		

Save As... Save Ok Cancel Edit File Help

表 5-10 邊界條件的設定值

主要邊界的方向	邊界條件類型	澆口速度(m/s)			模具溫度(°C)			熱傳係數 (g/s ³ -K)
					210	230	250	
Xmax	Wall				210	230	250	2e07
Xmin	Symmetry							-
Ymax	Wall				210	230	250	2e07
Ymin	Wall				210	230	250	2e07
Zmax	Specified Velocity	80	90	100	210	230	250	2e07
Zmin	Wall				210	230	250	2e07

註：此處的熱傳係數單位採用 FLOW-3D 內建單位



表 5-11 模擬分析時之輸入數值表[28]

條件名稱		數值		
射出速度 (m/s)		80	90	100
射出壓力 (MPa)		15	17	19
熔湯溫度 (°C)		625	640	655
模具溫度 (°C)		210	230	250
預估充填時間(ms)		8.5		
熔湯密度 (g/cm ³)		1.81		
熔湯黏滯係數 (g/cm-s)		0.01643		
熔湯熱傳導係數(g-cm/s ³ -K)		7.19648e06		
熱傳導係數 (g/s ³ -K)	模具-熔湯	2.0e07		
	模具-外界	0.1		
熔湯比熱 (cm ² /s ² -K)		1.0465e07		
液相溫度 (°C)		595		
固相溫度 (°C)		470		
潛熱 (cm ² /s ²)		3.72554e09		
模穴壓力(MPa)		0.101325		

表 5-12 實驗計畫與結果(固溶率、壓力差、溫度差)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	固溶率 %	壓力差 MPa	溫度差 °C
1	15	80	625	210	15.70	262	46
2	15	90	640	230	8.62	1974	53
3	15	100	655	250	1.57	3294	58
4	17	80	640	250	9.30	182	54
5	17	90	655	210	5.70	115	63
6	17	100	625	230	10.70	908	42
7	19	80	655	230	6.56	568	64
8	19	90	625	250	11.50	224	42
9	19	100	640	210	7.72	427	50

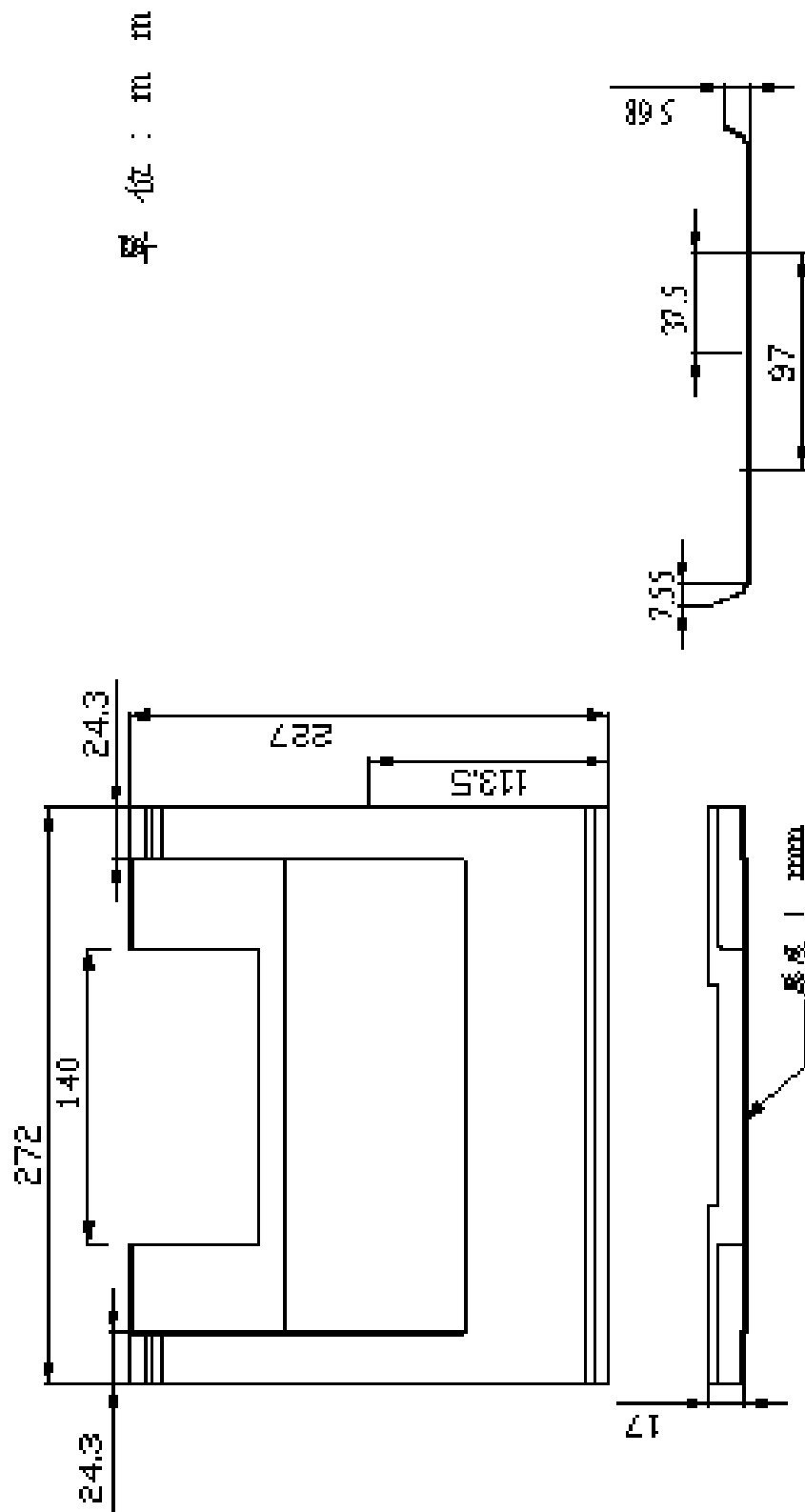


圖 5-1 模擬物件工程圖

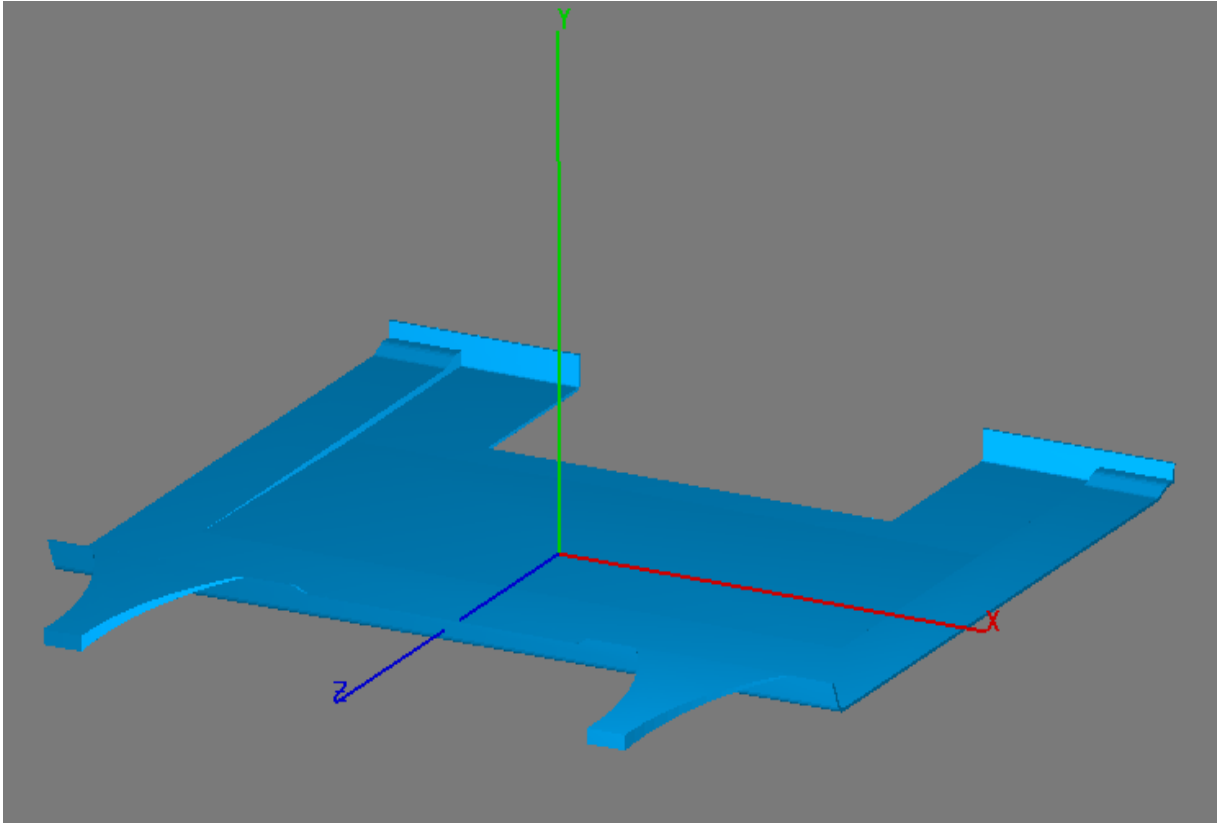


圖 5-2 壓鑄模具的 3D 模擬圖

澆口厚度 0.6mm
 澆口寬度 51.98mm
 扇形長度 69.65mm
 流道寬度 11.85mm
 流道厚度 3.95mm
 流道面積：澆口面積=1.5：1
 扇形長度：澆口寬度=1.34：1
 流道寬度：流道厚度=3：1

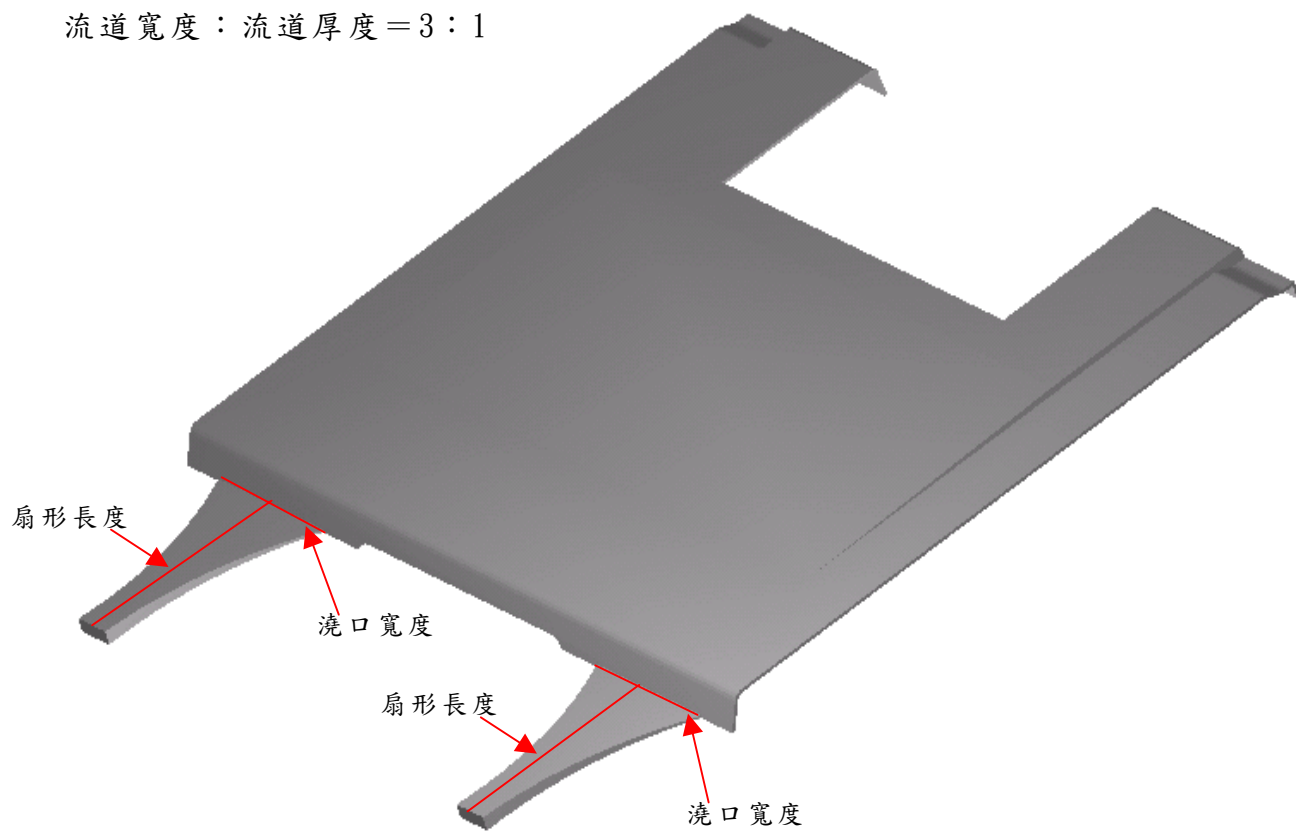


圖 5-3 扇形澆口詳圖

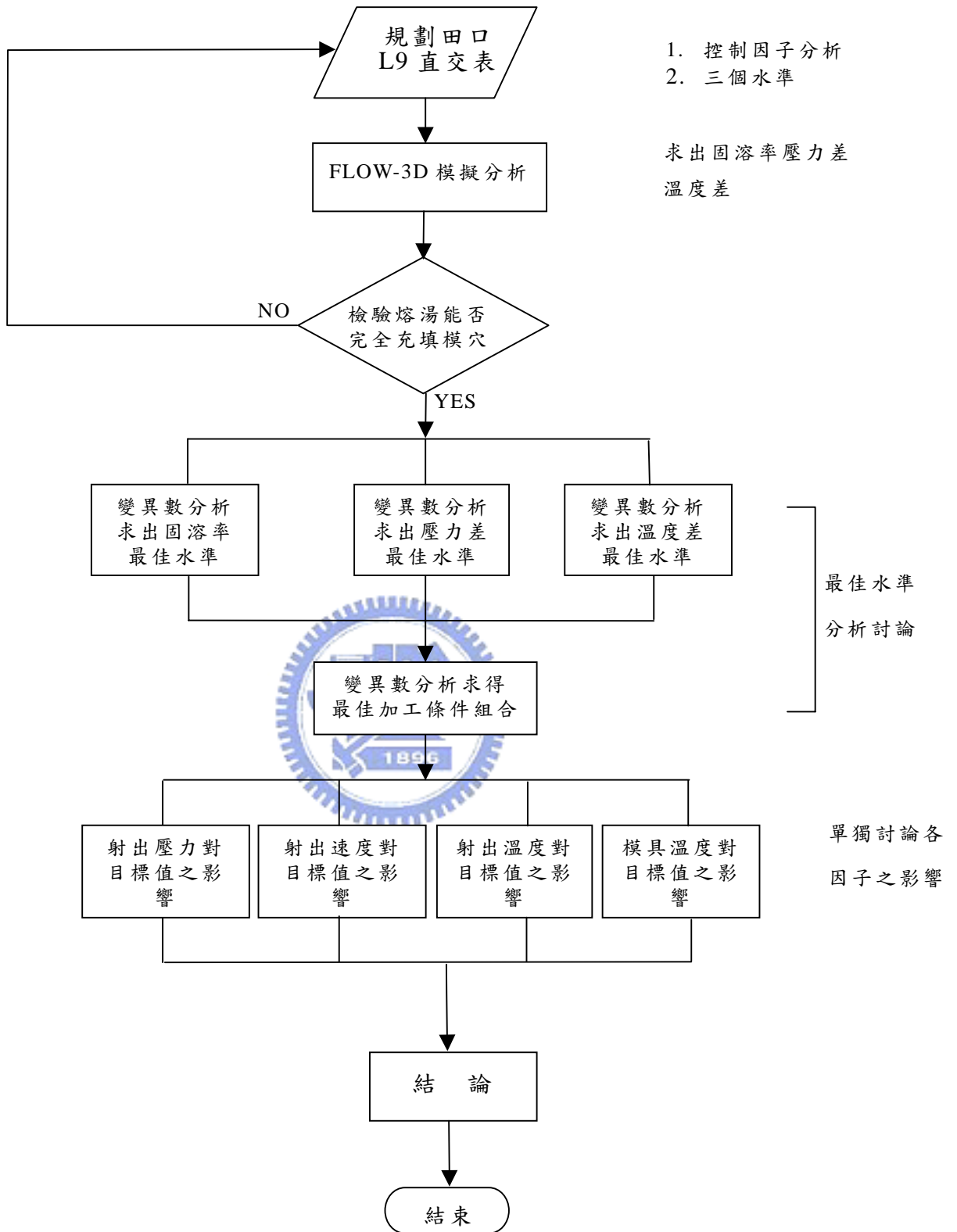


圖 5-4 研究架構流程圖

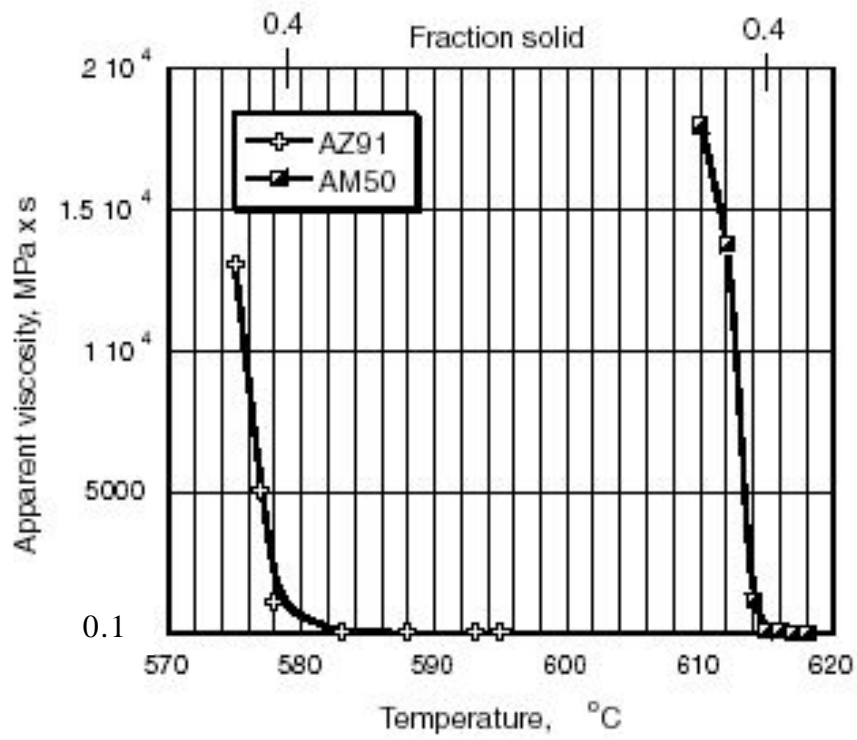
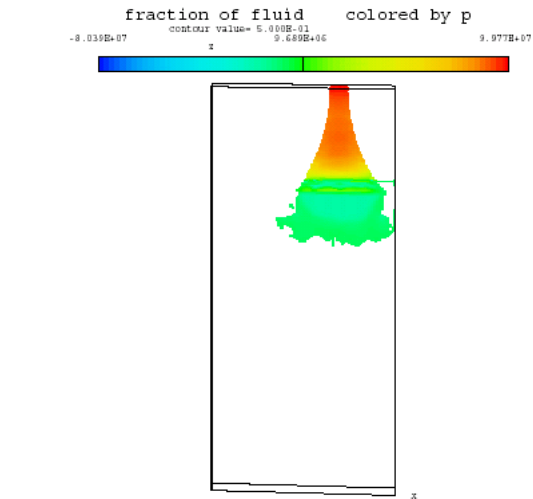
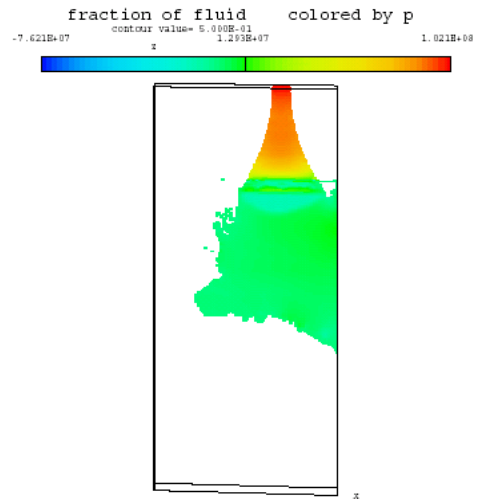


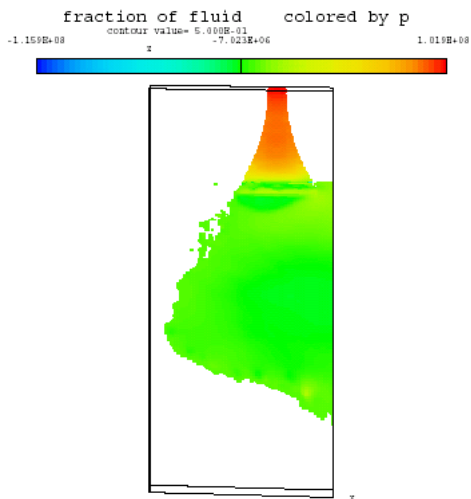
圖 5-5 AZ91 及 AM50 鎂合金的黏度對溫度及固相率的關係[21]



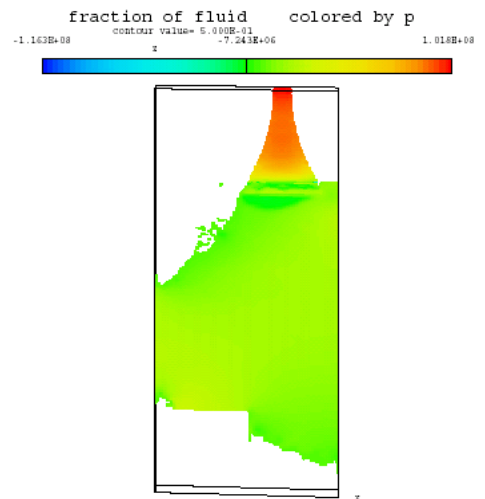
FLOW-3D[®] t=1.455E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 20% 壓力分佈



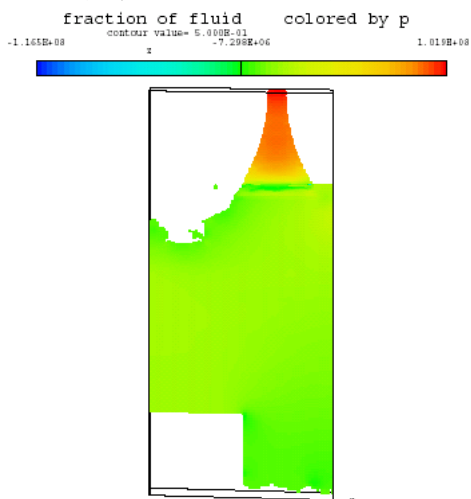
FLOW-3D[®] t=3.404E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 40% 壓力分佈



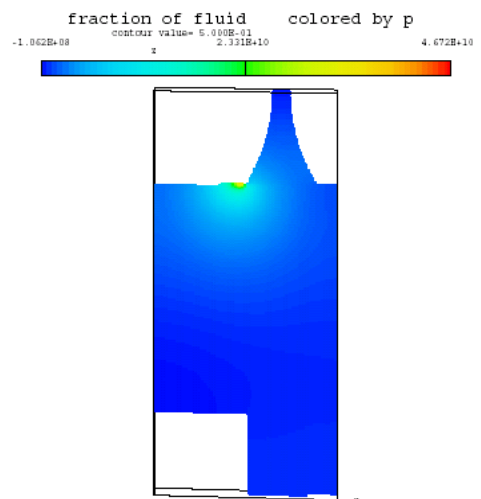
FLOW-3D[®] t=5.355E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 60% 壓力分佈



FLOW-3D[®] t=7.318E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 80% 壓力分佈



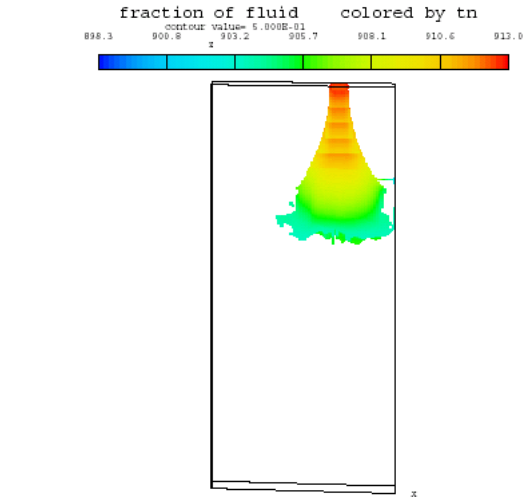
FLOW-3D[®] t=8.285E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 90% 壓力分佈



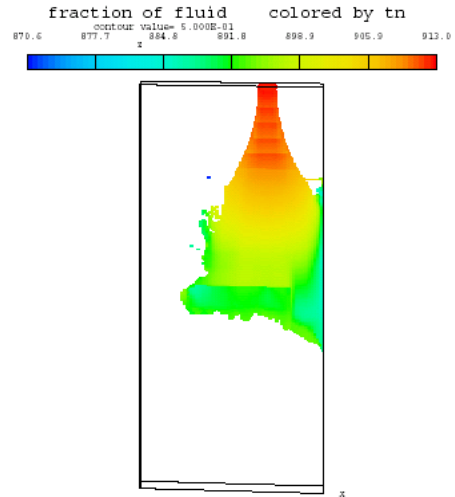
FLOW-3D[®] t=9.236E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfb hydr3d version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 100% 壓力分佈

圖 5-6 (15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之壓力分佈圖

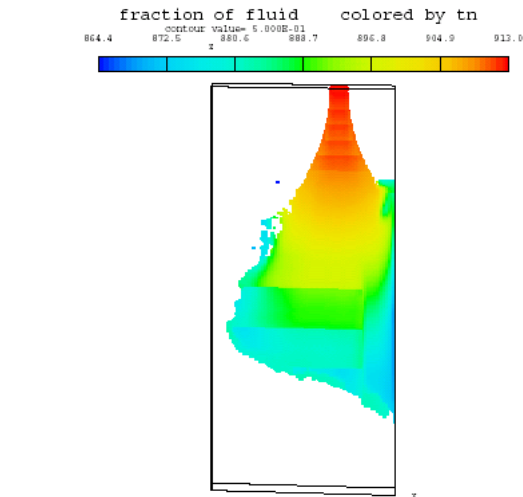




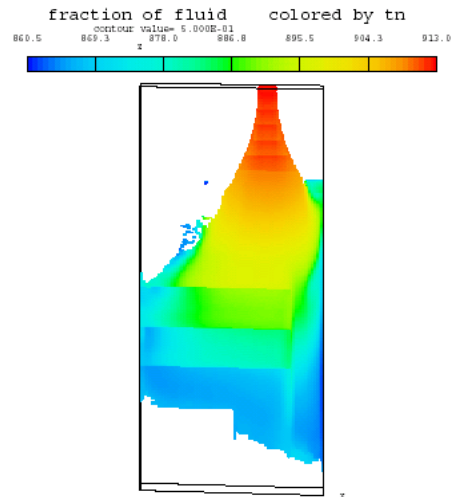
FLOW-3D[®] t=1.455E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 20% 溫度分佈



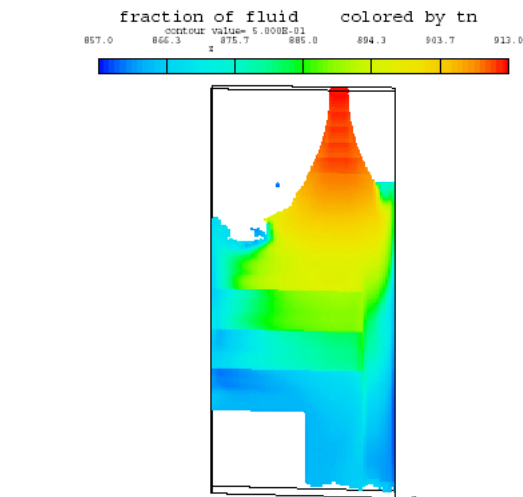
FLOW-3D[®] t=3.604E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 40% 溫度分佈



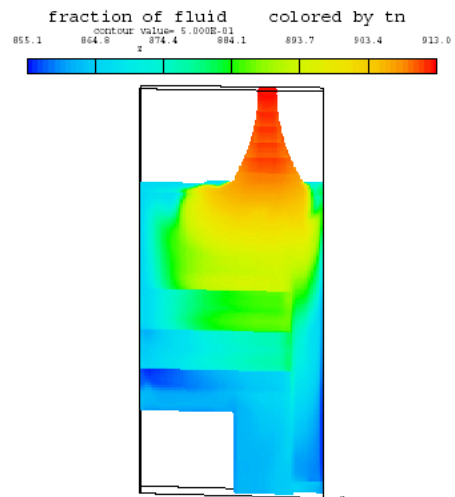
FLOW-3D[®] t=5.355E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 60% 溫度分佈



FLOW-3D[®] t=7.318E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 80% 溫度分佈



FLOW-3D[®] t=8.285E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 90% 溫度分佈



FLOW-3D[®] t=9.216E-03 (ix=2 to 89, jy=2 to 21 kz=2 to 221)
 19:56:17 12/22/2003 trfh hydr3d: Version 8.0.1 win32 2002
 Title 充填率 100% 溫度分佈

圖 5-7 (15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之溫度分佈圖

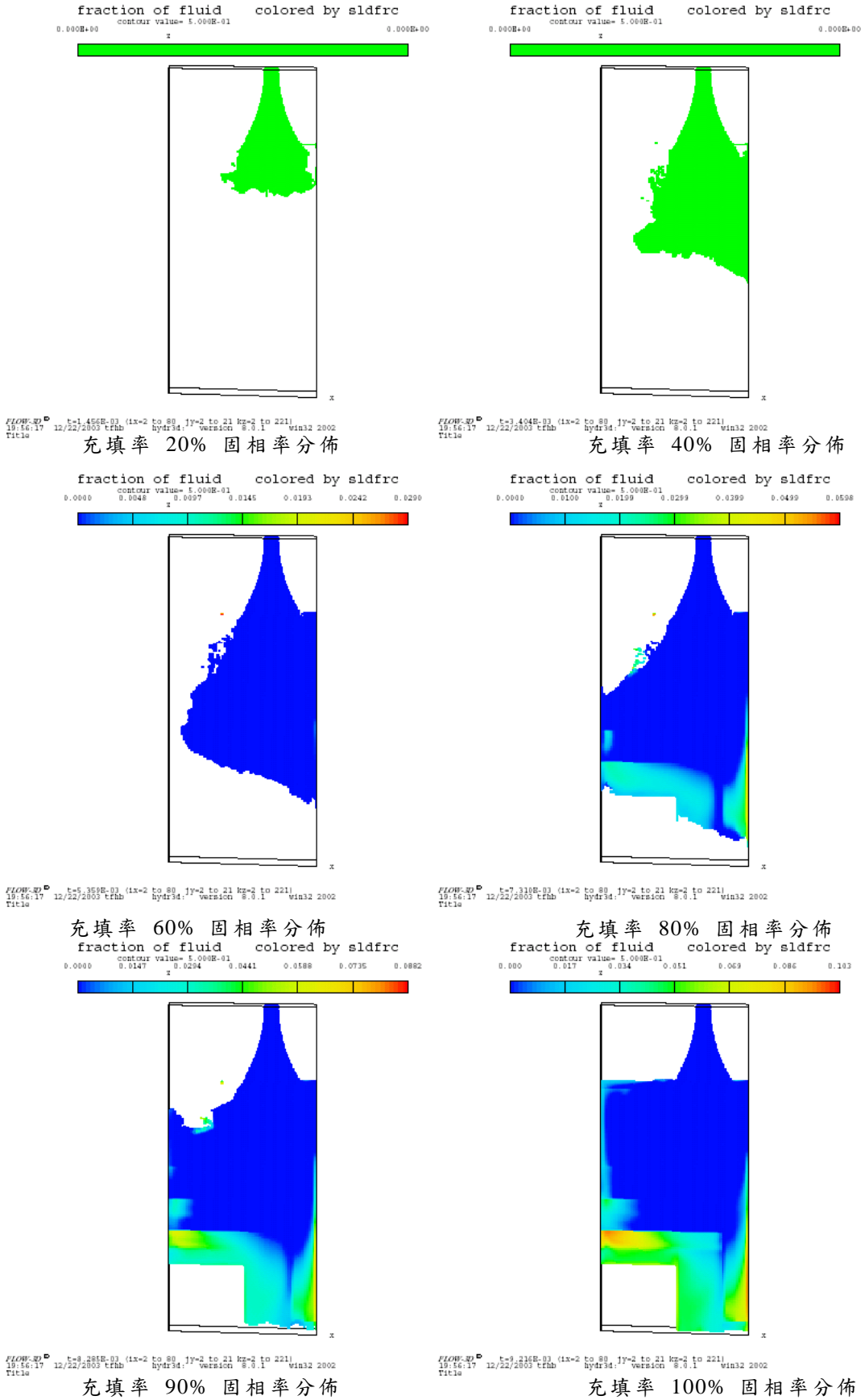


圖 5-8 (15Mpa、90m/s、640°C、230°C) 充填測試之固溶率分佈圖

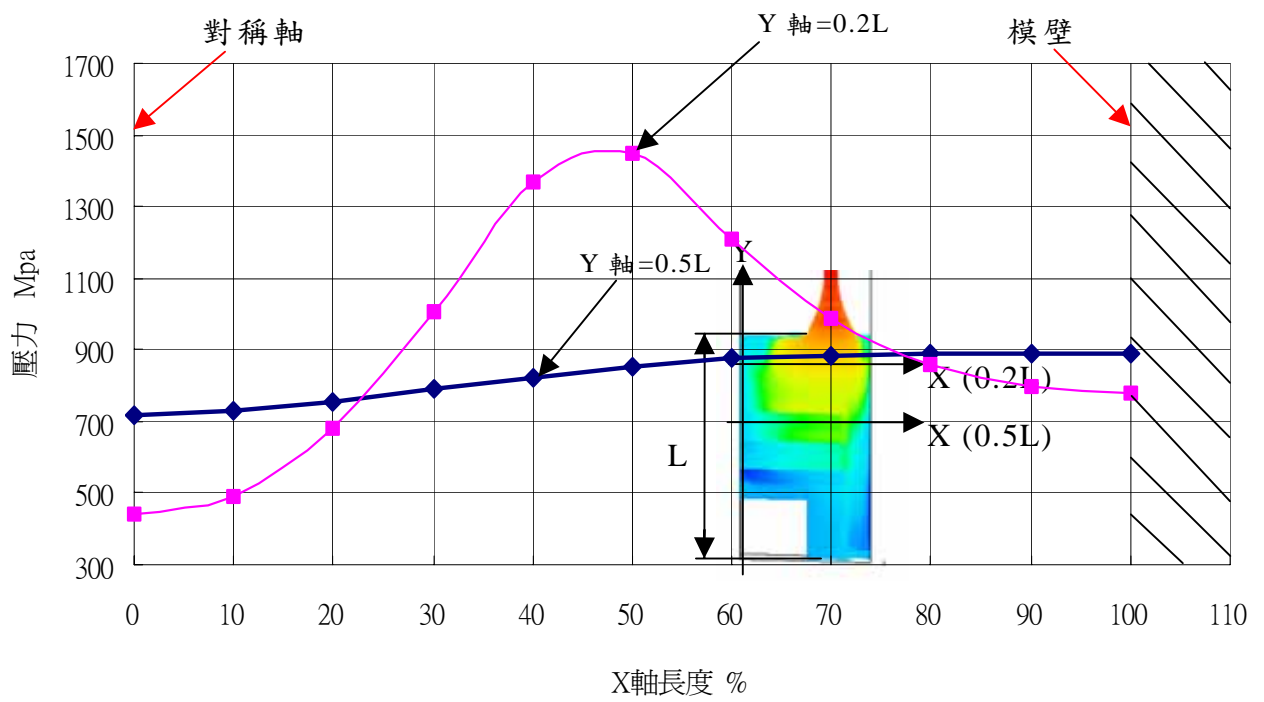


圖 5-9 X 軸長度與壓力關係圖

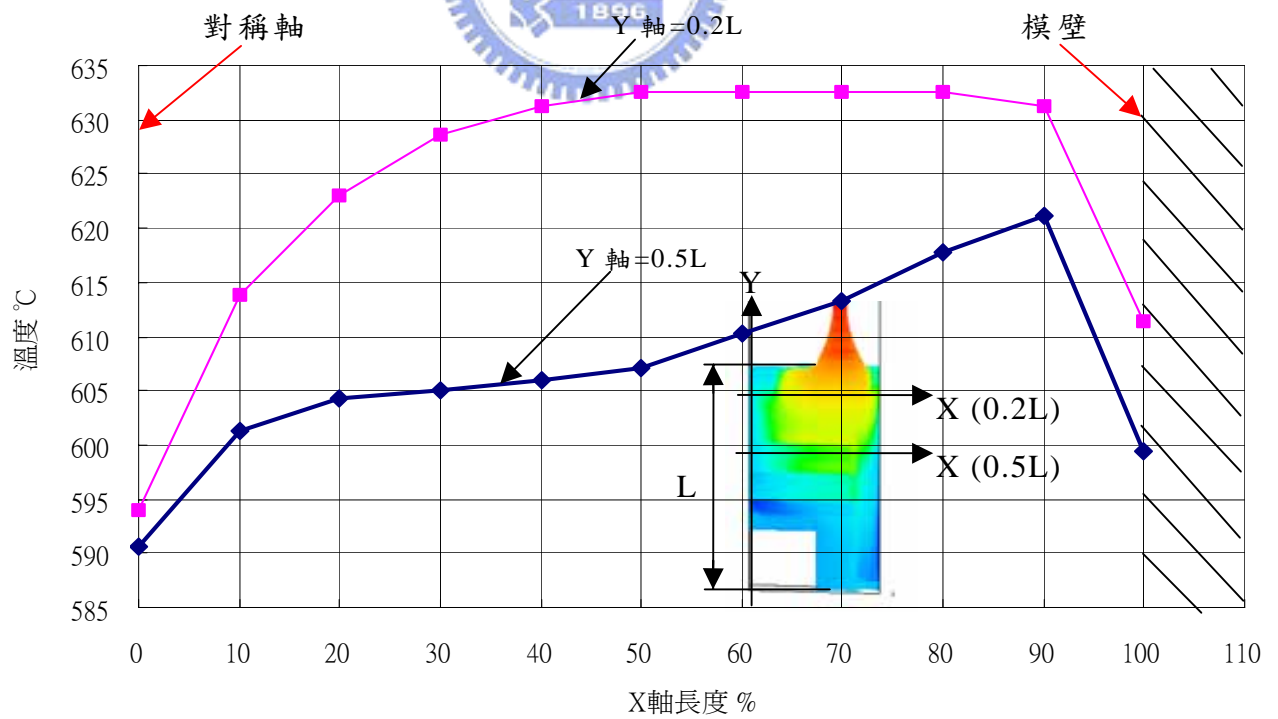


圖 5-10 X 軸長度與溫度關係圖

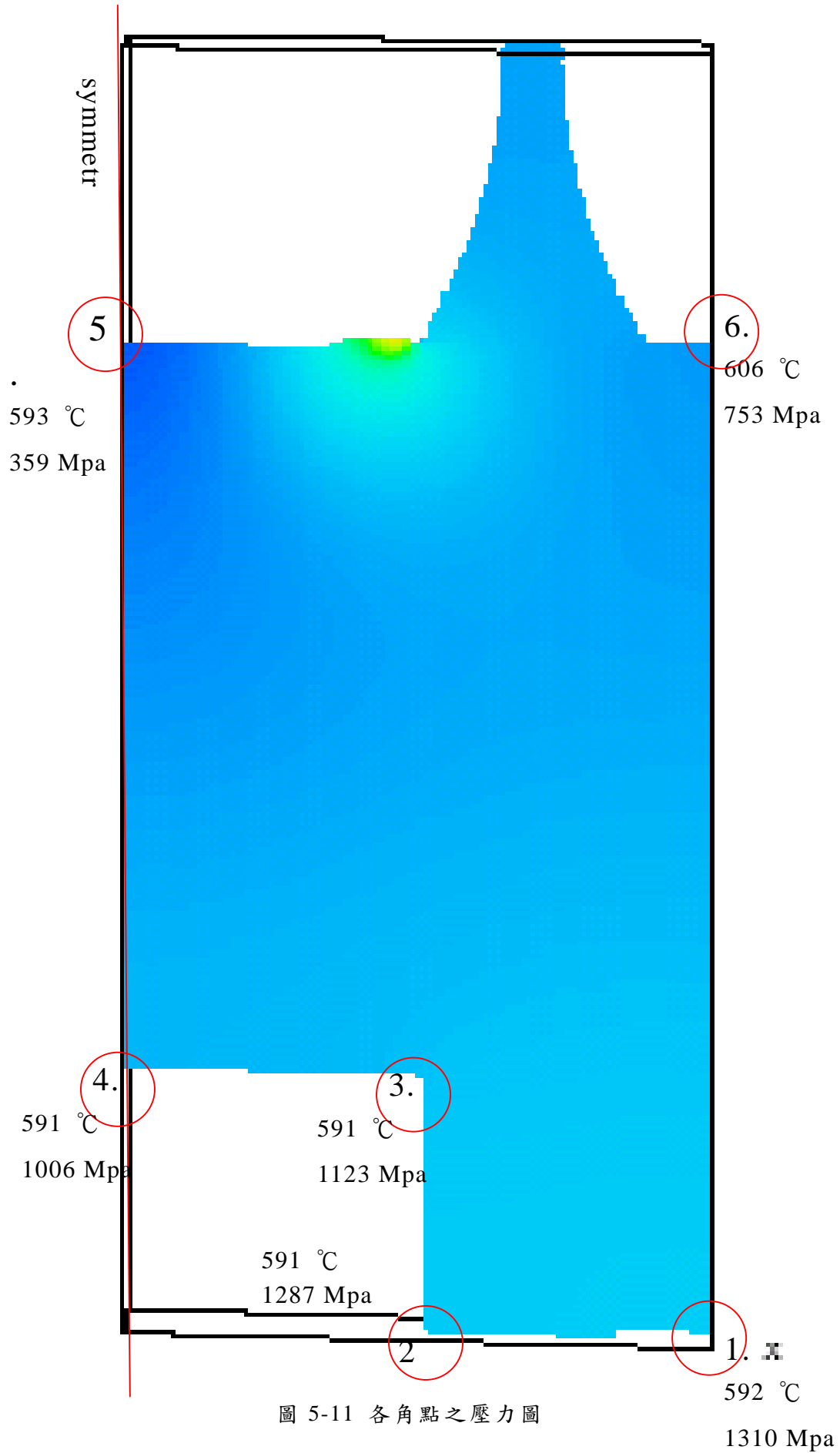


圖 5-11 各角點之壓力圖

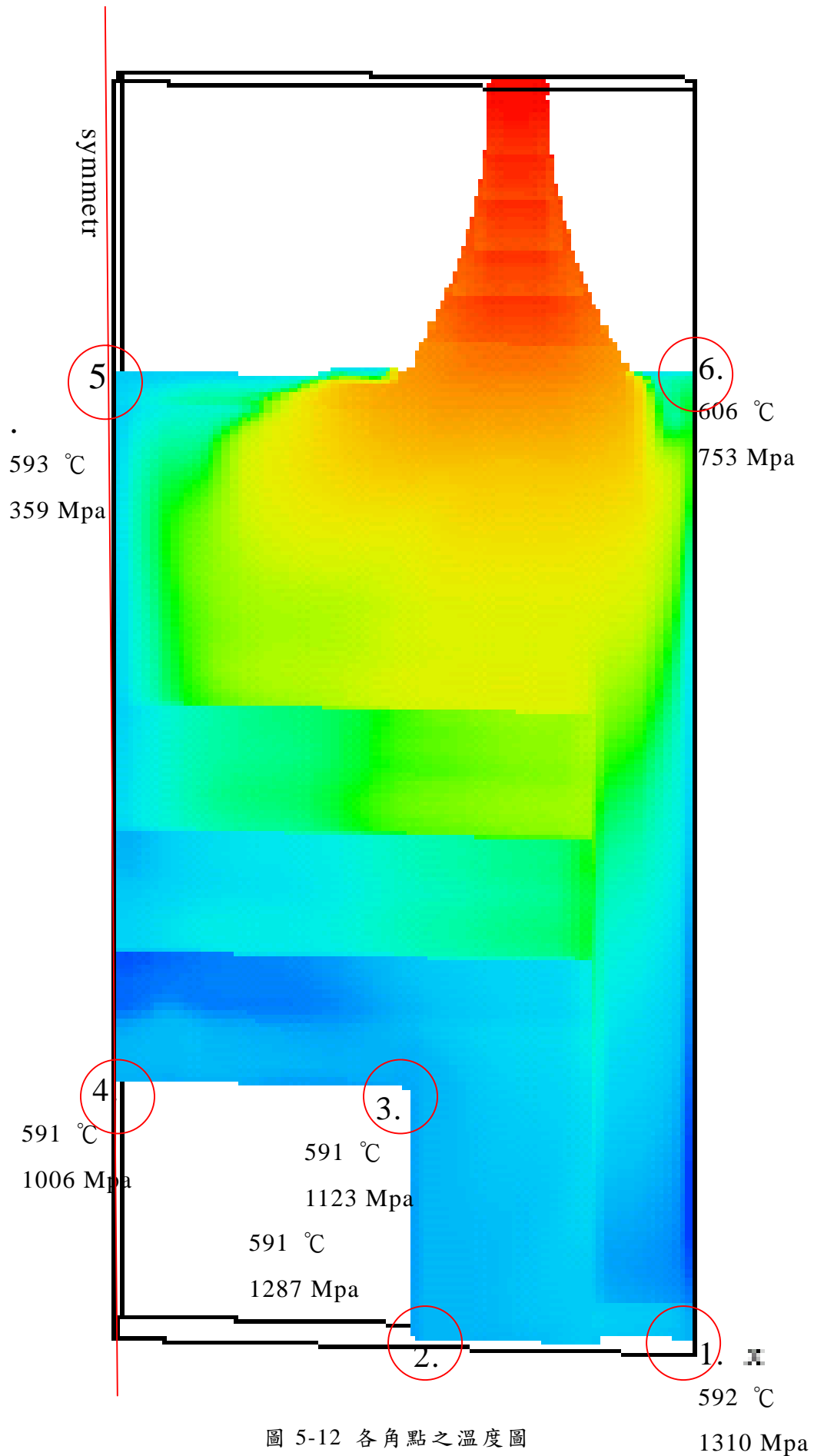


圖 5-12 各角點之溫度圖

第六章 田口式參數分析與模擬結果及討論

本研究最主要的目的，在對於鎂合金大平面薄壁之筆記型電腦底座外殼，以最少的實驗次數，最經濟的方法，兼具整個計劃的代表性，快速求得最佳的壓鑄條件組合，可解決鎂合金壓鑄所面臨的問題，最終能夠生產出品質優良的壓鑄製品。因此選擇固溶率、壓力差、及溫度差三種回應值為評估的目標值。

6-1 單一品質分析

如就考慮單一品質特性，田口方法可以分別求得各品質之最佳的壓鑄製程條件，並使用 S/N 比來評估品質，且期望求得最大的 S/N 比，再做 S/N 比正規化，為了除去單位的問題，因為單位的不同，其量值也就不一樣，所以要做正規化，將其範圍縮到 0~1 之間，如此會比較客觀。另外採用變異數分析(ANOVA)來瞭解何種控制因子最具影響，亦即貢獻度最大。從 S/N 回應表中找出主效果、及最佳水準，從 S/N 比的回應圖中，可分析因子效果的趨勢。其分述如下：

1. **固溶率**：由於壓鑄件必須擁有最小的固溶率，因此，選擇望小型式的公式來計算 S/N 比，其結果如表 6-1 所示；變異數分析如表 6-2 所示，由表 6-2 中得知 C 射出溫度的貢獻度 54.819% 為最大，其次 B 射出速度的貢獻度 14.328%，其餘 A、D 貢獻度皆小；S/N 比回應如表 6-3 及圖 6-1 所示，由表中可得到各因子的主效果、及最佳水準為 $A_1B_3C_3D_3$ ，由圖中可得知因子效果的趨勢。因此，得到結果：在建議值範圍內，射出壓力愈小愈好、射出速度愈大愈好、射出溫度愈大愈好、模具溫度愈大愈好。
2. **壓力差**：壓鑄件也必須擁有最小的壓力差，同樣選擇望小型式的公式來計算 S/N 比，其結果如表 6-4 所示；變異數分析如表 6-5 所示，由表 6-5 中得知 A 射出壓力的貢獻度 33.078% 為最大，其次是 D 模具溫度的貢獻度 28.144%，第三是 B 射出溫度的貢獻度 24.755%，C 的貢獻度較小；S/N 比回應如表 6-6 及圖 6-2 所示，由表中可得到各因子的主效果、及最佳水準 $A_2B_1C_1D_1$ ，由圖中可得知因子效果的趨勢。因此，得到結果：在建議值範圍內，射出壓力 17Mpa 最佳、射出速度愈小愈好、射出溫度愈小愈好、模具溫度愈小愈好。
3. **溫度差**：壓鑄件也必須擁有最小溫度差，同樣選擇望小型式的公式來計算 S/N 比，其結果如表 6-7 所示；變異數分析如表 6-8 所示，由表中

得知C射出溫度的貢獻度 90.51% 為最大，其餘A、B、D皆小；S/N比回應如表 6-9 及圖 6-3 所示，由表中可得到各因子的主效果、及最佳水準為 $A_3B_3C_1D_3$ ，由圖中可得知因子效果的趨勢。因此，得到結果：在建議值範圍內，射出壓力愈大愈好、射出速度愈大愈好、射出溫度愈小愈好、模具溫度愈大愈好。

6-2 綜合品質討論

若只考慮單一品質時，在壓鑄製程條件中的一個控制因數可能對某一品質擁有重大的影響，但卻可能在考慮其他品質時，卻不是那麼地重要。但是在工業應用上，通常是需要同時多種品質的，且產品的各種品質特性通常也因不同的製程條件而受影響。因此在製程條件最佳化時，必須考慮多個品質的情況，因此同時考慮四個控制因子對固溶率、壓力差、溫度差三種目標值作綜合品質評估。

在 6-1 節中，經過多次的分析，結合表 6-3、表 6-6、表 6-9，分別得到固溶率的最佳水準為 $A_1B_3C_3D_3$ 、壓力差的最佳水準為 $A_2B_1C_1D_1$ 、溫度差的最佳水準為 $A_3B_3C_1D_3$ ，參考圖 6-1、圖 6-2、圖 6-3，可得到各因子效果的趨勢，同時考慮固溶率、壓力差、溫度差時，其權值比重各佔 1/3，即將上述三個表之最佳水準，研判哪幾個因子對三目標值影響最大，加以交叉分析整理，得到最佳水準組合，亦即最佳化製程條件組合為 $A_2B_3C_1D_3$ (17MPa、100m/S、625°C、250°C)，如表 6-10 及圖 6-4 所示。進一步將本組合參數重新經由Flow-3D模擬分析，得到其充填完成之三目標值，固溶率為 9.7%、壓力差為 255MPa、溫度差為 40.43°C，如表 6-11 所示，其結果確實優於表 5-10 中任何一組的數據，故 $A_2B_3C_1D_3$ 為本研究的最佳製程條件組合。

6-3 單一控制因子對目標值之影響

由上述的討論已經獲得最佳的製程參數之組合，現進一步討論，單獨改變一個因子參數值，其餘三個因子不變，來觀察其對三種目標值之影響。

1. 射出壓力之影響：

改變射出壓力，其值限定在表 5-2 FRECH 公司技術手冊中建議的射出壓力範圍，而 B (射出速度 100m/s)、C (射出溫度 625°C)、D (模具溫度 250°C) 三個因子不變，模擬結果如表 6-12 及圖 6-5 所示，發現改變射出壓力對充填完全之結果並無影響。因此，進一步設定射出壓力為

1Mpa 和 100Mpa，模擬實驗結果，發現對固溶率及溫度差有些微的改變，但對壓力差有明顯的改變，如表 6-13 及圖 6-6 所示。

2. 射出速度之影響：

改變射出速度，其值限定在表 5-1 FRECH 公司技術手冊中建議的射出速度範圍，而 A (射出壓力 17MPa)、C (射出溫度 625°C)、D (模具溫度 250°C) 三個因子不變，模擬結果如表 6-14 及圖 6-7 所示，發現改變射出速度對充填完全之結果影響為：射出速度遞增，固溶率會遞減，溫度差亦遞減，但壓力差卻遞增；因模穴內的熔湯射出速度的增加而縮短充填時間。

3. 射出溫度之影響：

改變射出溫度，其值限定在表 2-3 常用壓鑄鎂合金的材料性質建議的射出溫度範圍，而 A (射出壓力 17MPa)、B (射出速度 100m/s)、D (模具溫度 250°C) 三個因子不變，模擬結果如表 6-15 及圖 6-8 所示。發現改變射出溫度對充填完全之結果影響為：當射出溫度增加，高於熔湯之凝固溫度(470°C)甚多，因完全充填之時間極短，所以固溶率極低，溫度差隨之增大；壓力差明顯增大。

4. 模具溫度之影響：

改變模具溫度，其值依 5-2 節之建議的模具溫度範圍，而 A (射出壓力 17MPa)、B (射出速度 100m/s)、C (射出溫度 625°C) 三個因子不變，模擬結果如表 6-16 及圖 6-9 所示。發現改變模具溫度對充填完全之結果影響為：當模具溫度增加時，熔湯受模壁冷卻效果減低，造成固溶率降低、溫度差亦降低、對壓力差亦降低；但模穴中熔湯之溫度不易散失，壓鑄件易生氣孔。

表 6-1 參數設計與實驗結果分析(固溶率)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) ℃	D (模具溫度) ℃	固溶率 %	S/N 比	S/N 比 (正規化)
1	15	80	625	210	15.70	16.0820	0.0000
2	15	90	640	230	8.62	21.2899	0.2604
3	15	100	655	250	1.57	36.0820	1.0000
4	17	80	640	250	9.30	20.6303	0.2274
5	17	90	655	210	5.70	24.8825	0.4400
6	17	100	625	230	10.70	19.4123	0.1665
7	19	80	655	230	6.56	23.6619	0.3790
8	19	90	625	250	11.50	18.7860	0.1352
9	19	100	640	210	7.72	22.2477	0.3083

註： $S/N = -10\log(y_1^2)$

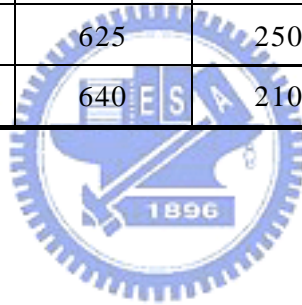


表 6-2 變異數分析表(S/N of 固溶率)

Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Degree of freedom	Sum of Square	Mean Square	SS'	Contribution (%)
A	0.420	0.278	0.274	2	0.042	0.021		
B	0.202	0.279	0.492	2	0.135	0.068	0.093	14.328
C	0.101	0.265	0.606	2	0.399	0.200	0.358	54.819
D	0.249	0.269	0.454	2	0.077	0.038	0.035	5.396
(Error)				2		0.021	0.166	25.457
Total				8	0.653			100.00

表 6-3 S/N 回應表(S/N of 固溶率)

水準 因子	levels 1	levels 2	levels 3	Main effects	Optimum factor levels
A	0.420	0.278	0.274	0.420	A1
B	0.202	0.279	0.492	0.492	B3
C	0.101	0.265	0.606	0.606	C3
D	0.249	0.269	0.454	0.454	D3

表 6-4 參數設計與實驗結果分析(壓力差)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	壓力差 MPa	S/N 比	S/N 比 (正規化)
1	15	80	625	210	262	31.6340	0.7546
2	15	90	640	230	1974	14.0931	0.1526
3	15	100	655	250	3294	9.6455	0.0000
4	17	80	640	250	182	34.7986	0.8632
5	17	90	655	210	115	38.7860	1.0000
6	17	100	625	230	908	20.8384	0.3841
7	19	80	655	230	568	24.9130	0.5239
8	19	90	625	250	224	32.9950	0.8013
9	19	100	640	210	427	27.3914	0.6090

註: $S/N = -10\log(y_i^2)$

表 6-5 變異數分析表(S/N of 壓力差)

Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Degree of freedom	Sum of Square	Mean Square	SS'	Contribution (%)
A	0.302	0.749	0.645	2	0.328	0.164	0.296	33.078
B	0.714	0.651	0.331	2	0.253	0.127	0.222	24.755
C	0.647	0.542	0.508	2	0.031	0.016		
D	0.788	0.354	0.555	2	0.283	0.142	0.252	28.144
(Error)				2	0.031	0.016		14.024
Total				8	0.896		0.896	100.000



表 6-6 S/N 回應表(S/N of 壓力差)

水準 因子	levels 1	levels 2	levels 3	Main effects	Optimum factor levels
A	0.302	0.749	0.645	0.749	A2
B	0.714	0.651	0.331	0.714	B1
C	0.647	0.542	0.508	0.647	C1
D	0.788	0.354	0.555	0.788	D1

表 6-7 參數設計與實驗結果分析(溫度差)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	溫度差 °C	S/N 比	S/N 比 (正規化)
1	15	80	625	210	46	6.7448	0.7840
2	15	90	640	230	53	5.5145	0.4477
3	15	100	655	250	58	4.7314	0.2337
4	17	80	640	250	54	5.3521	0.4034
5	17	90	655	210	63	4.0132	0.0374
6	17	100	625	230	42	7.5350	1.0000
7	19	80	655	230	64	3.8764	0.0000
8	19	90	625	250	42	7.5350	1.0000
9	19	100	640	210	50	6.0206	0.5861

註： $S/N = -10\log(y_i^2)$

表 6-8 變異數分析表(S/N of 溫度差)

Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Degree of freedom	Sum of Square	Mean Square	SS'	Contribution (%)
A	0.489	0.480	0.529	2	0.004	0.002		
B	0.396	0.495	0.607	2	0.067	0.033		
C	0.928	0.479	0.090	2	1.054	0.527	1.027	90.511
D	0.469	0.483	0.546	2	0.010	0.005		
(Error)				6	0.081	0.013		9.489
Total				8	1.135			100.000

表 6-9 S/N 回應表(S/N of 溫度差)

水準 因子	levels 1	levels 2	levels 3	Main effects	Optimum factor levels
A	0.489	0.480	0.529	0.529	A3
B	0.396	0.495	0.607	0.607	B3
C	0.928	0.479	0.090	0.928	C1
D	0.469	0.483	0.546	0.546	D3

表 6-10 實驗結果的(正規化)S/N 比之回應表(固溶率、壓力差、溫度差)

水準 因子	A	B	C	D
Level 1	1.2110	1.3118	1.6752	1.5064
Level 2	1.5073	1.4249	1.2860	1.1048
Level 3	1.4476	1.4292	1.2047	1.5547

表 6-11 田口實驗設計法最佳化組合

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G 溫度差 °C
	17	100	625	250	9.7	255	40.43

表 6-12 改變射出壓力的實驗結果 (一)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G. 溫度差 °C
1	14	100	625	250	9.7	255	40.43
2	15.5	100	625	250	9.7	255	40.43
3	17	100	625	250	9.7	255	40.43
4	18.5	100	625	250	9.7	255	40.43
5	21	100	625	250	9.7	255	40.43



表 6-13 改變射出壓力的實驗結果 (二)

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G. 溫度差 °C
1	1	100	625	250	9.7	1487	42.1
2	100	100	625	250	9.6	12239	42.0

表 6-14 改變射出速度的實驗結果

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G 溫度差 °C
1	17	60	625	250	19.9	156	50.83
2	17	70	625	250	16.5	224	47.00
3	17	80	625	250	13.2	255	44.00
4	17	90	625	250	11.5	454	42.00
5	17	100	625	250	9.7	621	40.43



表 6-15 改變射出溫度的實驗結果

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G 溫度差 °C
1	17	100	625	250	9.7	255	40.43
2	17	100	645	250	4.2	736	53.00
3	17	100	665	250	0	1576	65.00
4	17	100	685	250	0	2086	68.00
5	17	100	705	250	0	5658	71.00

表 6-16 改變模具溫度的實驗結果

實驗 次數	A (射出壓力) MPa	B (射出速度) m/s	C (射出溫度) °C	D (模具溫度) °C	E 固溶率 %	F 壓力差 Mpa	G. 溫度差 °C
1	17	100	625	210	11.8	4121	43.00
2	17	100	625	220	11.2	2247	42.00
3	17	100	625	230	10.7	908	42.00
4	17	100	625	240	10.2	460	41.00
5	17	100	625	250	9.7	255	40.43



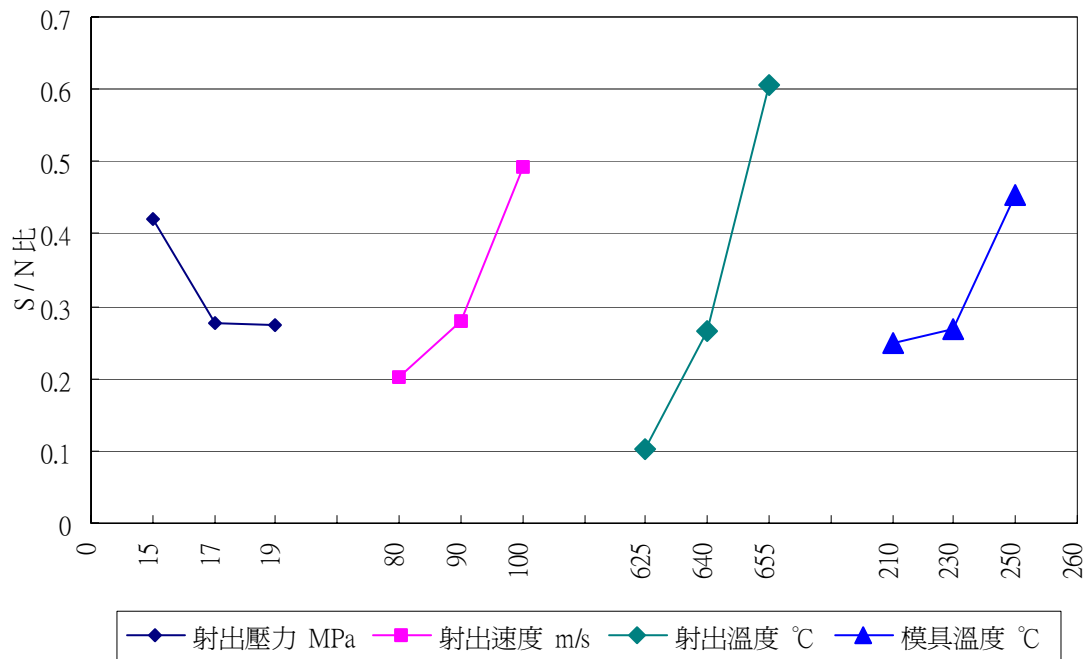


圖 6-1 S/N 比的回應圖(S/N of 固溶率)

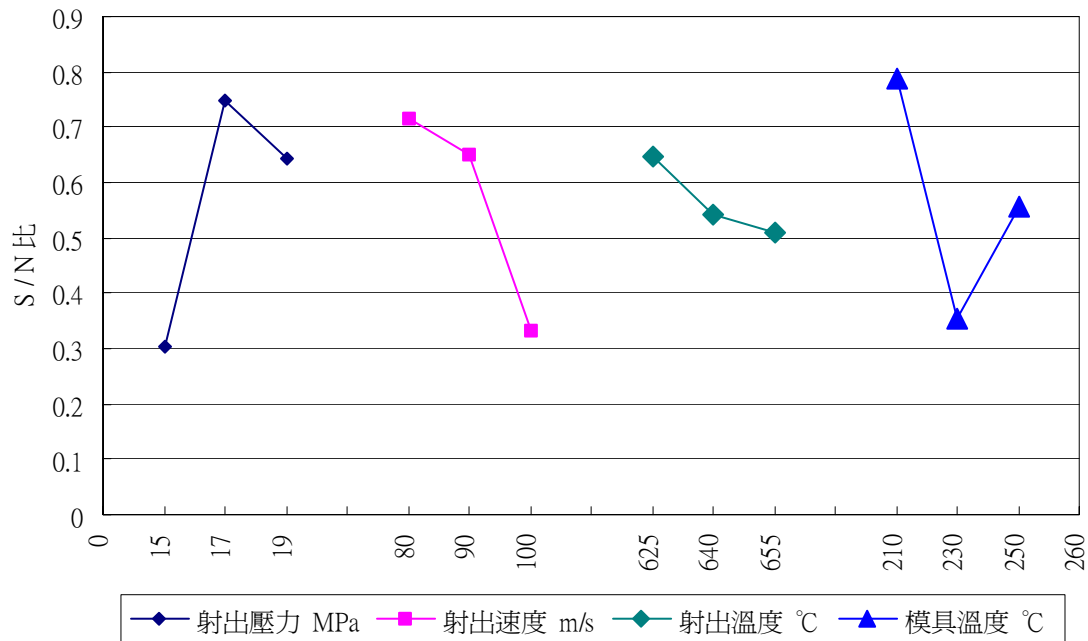


圖 6-2 S/N 比的回應圖(S/N of 壓力差)

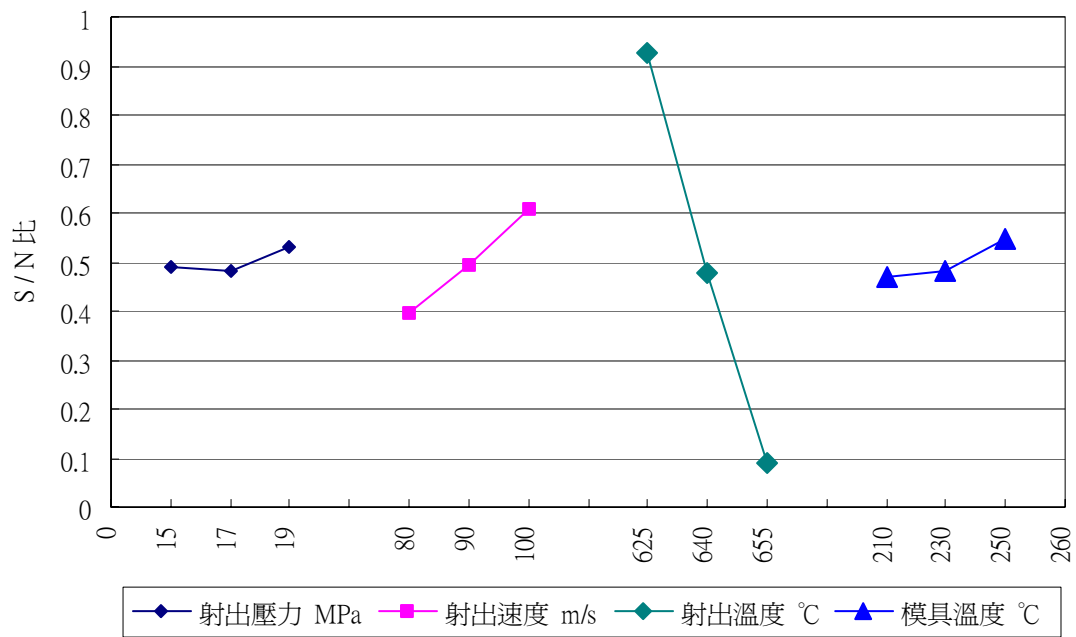


圖 6-3 S/N 比的回應圖(S/N of 溫度差)

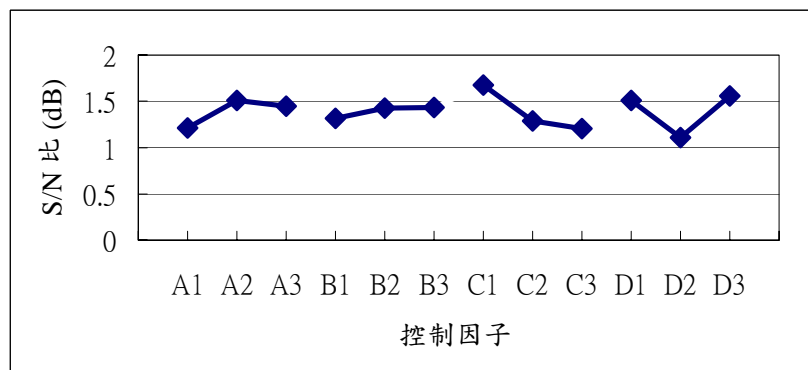


圖 6-4 實驗結果的 S/N 比

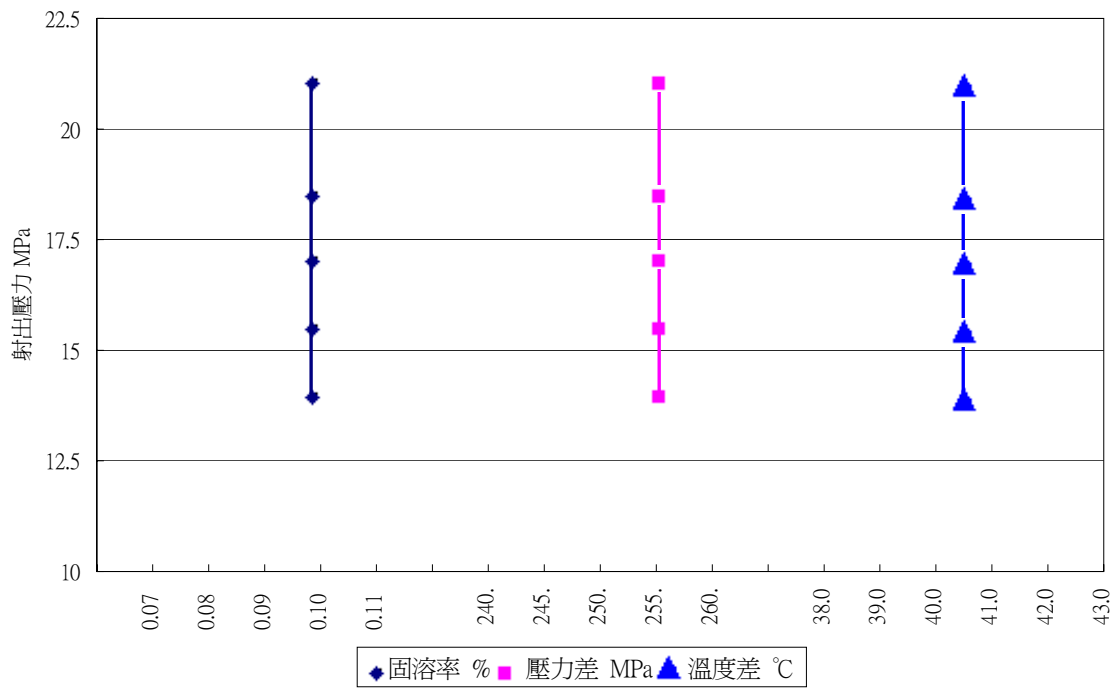


圖 6-5 射出壓力與目標值之因子效果圖一

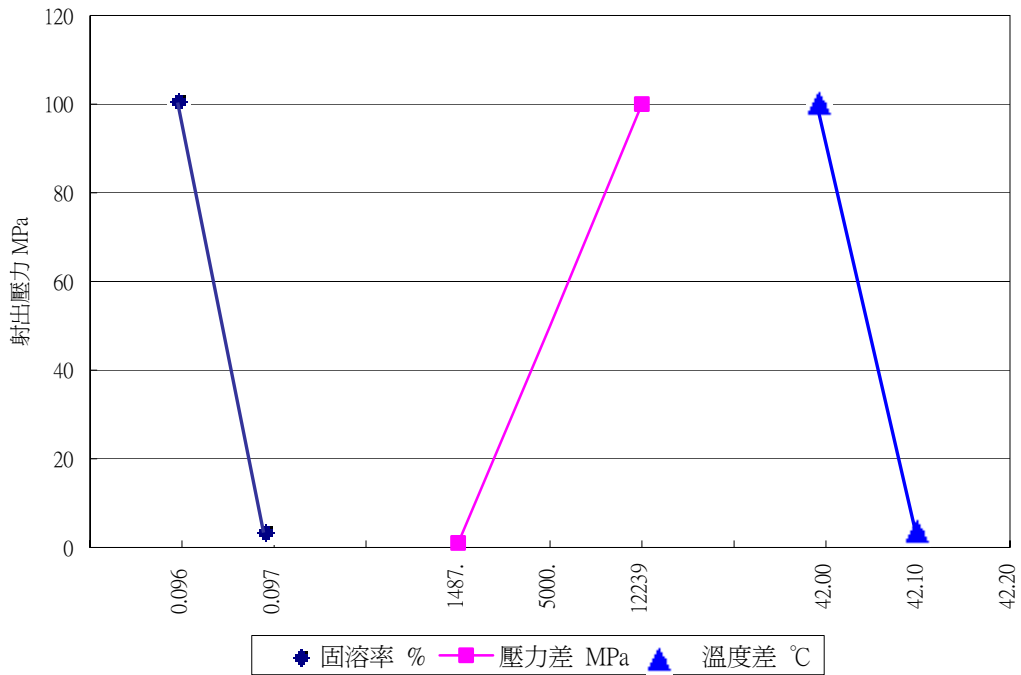


圖 6-6 射出壓力與目標值之因子效果圖二

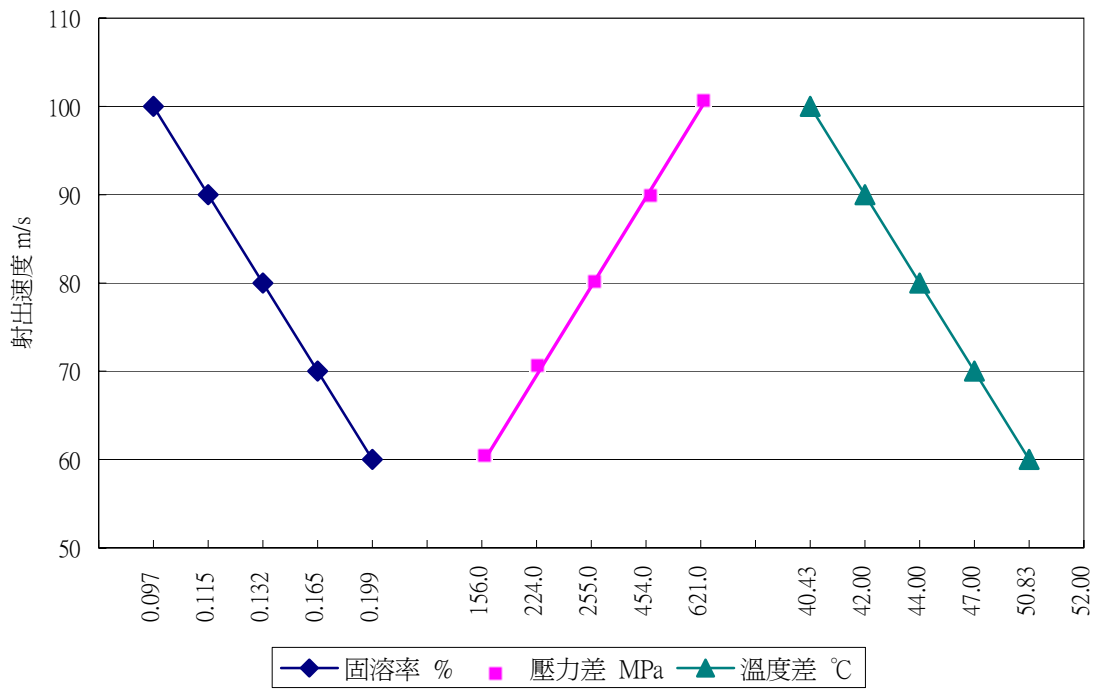


圖 6-7 射出速度與目標值之因子效果圖

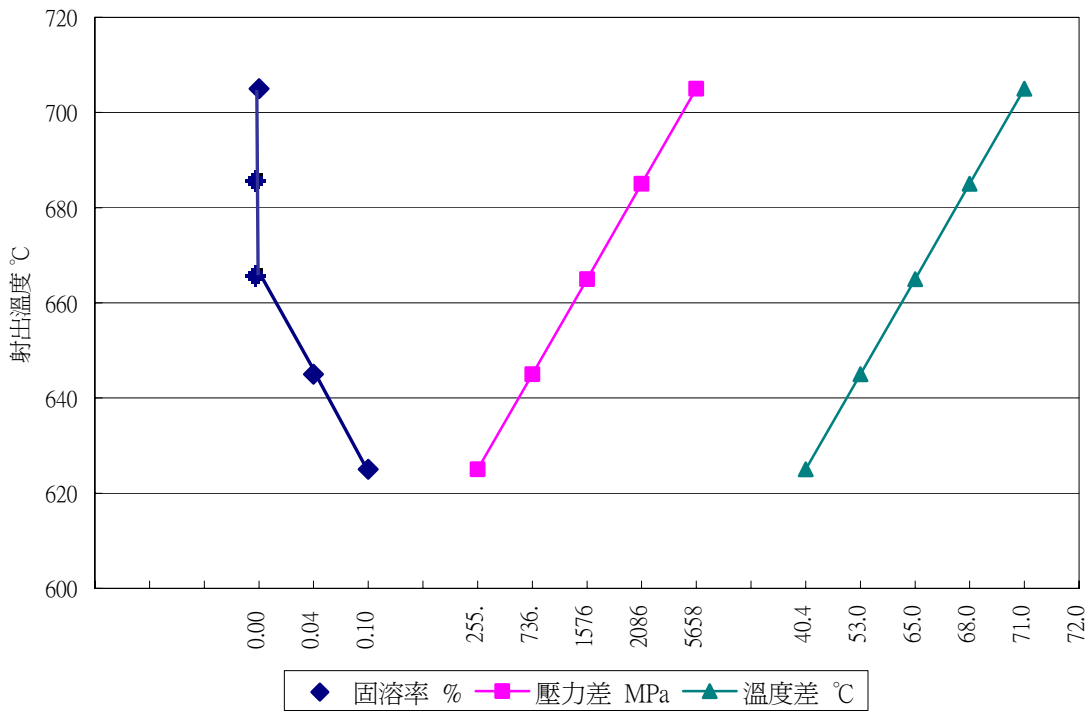


圖 6-8 射出溫度與目標值之因子效果圖

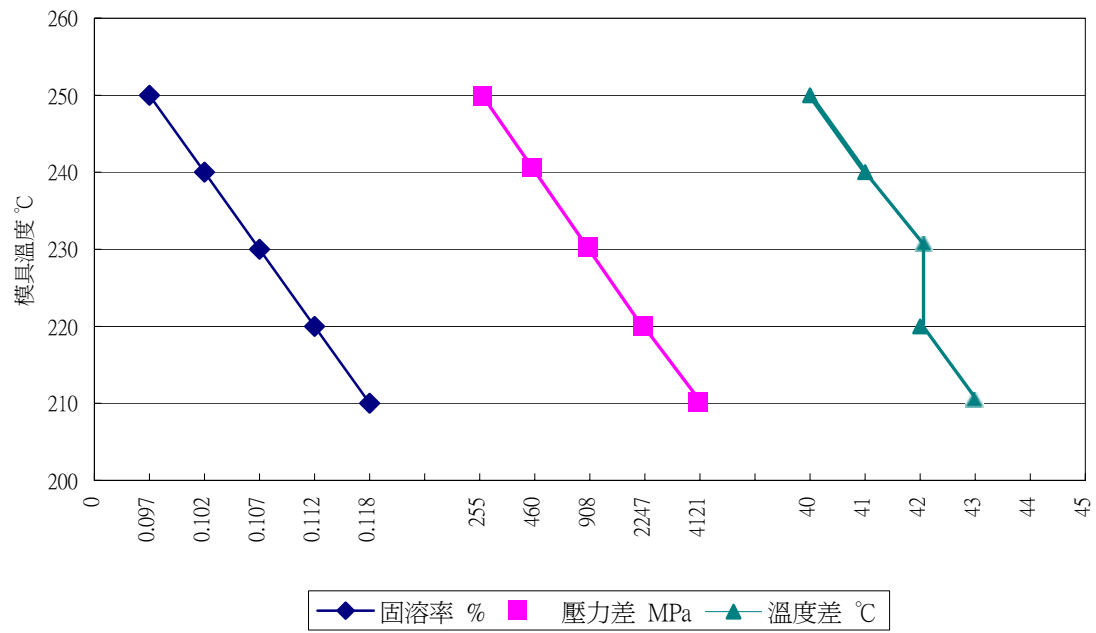


圖 6-9 模具溫度與目標值之因子效果圖



第七章 結論與未來展望

7-1 結論

經由 6-1 節、6-2 節、及 6-3 節的分析探討，最佳製程條件組合 $A_2B_3C_1D_3$ (17MPa、100m/S、625°C、250°C)，經由 Flow-3D 的模擬結果，其目標值分別為固溶率 9.7%、壓力差 255MPa、溫度差 40.43°C，與多組比較後，其三目標值為最優，因此驗證 $A_2B_3C_1D_3$ 製程條件組合，對壓鑄件缺陷的改善有助益，亦達到改善壓鑄件產品的穩健性。

7-2 未來展望

1. 到目前為止所得到的研究成果均是以軟體模擬及田口設計統計方式為主，未來若能夠輔以真正的壓鑄實驗過程，無論對於軟體模擬及統計計算方式的驗證，或者對模擬參數的調整，都更能有所助益。
2. 在本研究中，估計因充填時間很短的緣故，因此熔湯黏度是以定值的方式作計算，但以薄壁鑄件來說，由於表面積廣大，熱量的傳遞是非常的快，尤其是在接近模壁處的熔湯溫度降的很快，因此在未來期望能夠以隨著溫度而變化的黏度值來計算，且繼續朝向凝固模擬的計算，以得到更進一步的結果。
3. 在未來模擬的過程中，應該可以再加入冷卻水管的設計，使得模擬可以更為接近實際的狀態。

參考文獻

- [1] 洪榮哲 編譯，壓鑄模具設計與製造，初版，全華科技圖書股份有限公司，民國 85 年 12 月。
- [2] 彭暄、徐文敏、蔡浪富，「鎂合金壓鑄的省思與前瞻」，機械工業，民國 86 年 5 月，pp.186-192。
- [3] 彭世寶 編著，壓鑄模設計與製作，初版，正文書局有限公司，民國 86 年 6 月。
- [4] 唐乃光 主編，壓鑄模具設計手冊，初版，金屬工業研究發展中心，民國 87 年 6 月。
- [5] Nahed A.El-Mahallawy, Mohamed A.Taha, Engenius Pokora, Friedrich Klein, “On the influence of process variables on the thermal conditions and properties of high pressure die-cast magnesium alloys”, Journal of Materials Processing Technology vol.73, 1998, pp.125-138.
- [6] 楊智超，「鎂合金壓鑄成形技術」，工業材料147 期 1999 年 3 月，pp.157-164。
- [7] 張士行，「田口實驗設計與灰色關聯分析法應用於製程最佳化設計之研究」，國立中央大學機械工程學系，博士論文，民國 88 年 6 月。
- [8] 蔡幸甫，「筆記型電腦應用鎂合金的幾個重大理由」，工業材料154 期 1999 年 10 月，pp.116-120。
- [9] B.H. Hu, K.K.Tong, X.P.Niu, I.Pinwill, “Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thin-wall magnesium telecommunication parts through numerical simulation”, Journal of Materials Processing Technology vol.105, 2000, pp.128-133.
- [10] 蘇朝墩，產品穩健設計-田口品質工程方法的介紹和應用，中華民國品質學會。
- [11] 葉俊麟，「模擬分析於鑄造製程技術之應用」，金屬工業35 卷 1 期，民國 90 年 1 月，pp.40-47。
- [12] 黃振東，「鎂合金壓鑄模流分析介紹」，工業材料174 期，民國 90 年 6 月，pp.161-168。
- [13] 莊水旺、王志名，「CAE模流軟體在壓鑄模具設計之應用」，工業材料174 期，民國 90 年 6 月，pp.113-117。
- [14] 藍峰昌，「鎂合金於薄壁鑄件之模流分析」，國立交通大學機械工程學系，

- 碩士論文，民國 90 年 6 月。
- [15]黃士宗、楊哲勛、王惠森、黃文星，「電腦輔助壓鑄方案設計系統之開發及其應用」，鑄工，民國 90 年 6 月，pp.48-62。
- [16]卓學淵、黃士龍、林惠娟，「AZ91D 鎂合金壓鑄件之表面缺陷分析—NB 上蓋」，工業材料178 期，民國 90 年 10 月，pp.115-120。
- [17]莊水旺、鄭智昌，「計算鎂合金壓鑄件縮水率之新方法」，模具技術資訊第 80 期，民國 90 年 11 月，pp.2-7。
- [18]卓學淵、黃士龍、林惠娟，「NB 上蓋之鎂合金壓鑄件缺陷分析」，鑄工，民國 91 年 3 月，pp.25-32。
- [19]洪啟銘、黃昆明，「鎂合金壓鑄製程與壓鑄模具電腦 CAE 模擬於 3C 薄壁殼件產品之應用研究」，機械月刊，民國 91 年 6 月，pp.120-125。
- [20]卓學淵、林惠娟，「模流分析軟體於鎂合金壓鑄製程上之應用」，工業材料186 期，民國 91 年 6 月，pp.112-117。
- [21]Z.Koren,H.Rosenson,E.M.Gutman,Ya.B.Unigovski,A.Eliezer， “Development of semisolid casting for AZ91 and AM50 magnesium alloys”，Journal of Light Metals, 2002, pp.81-87.
- [22]FLOW-3D User's Manual, vol.1, Version 8.0.1,Flow Science Inc, 2002.
- [23]FLOW-3D User's Manual, vol.2, Version 8.0.1,Flow Science Inc, 2002.
- [24]劉展光，「薄壁鎂合金筆記型電腦上蓋之壓鑄模澆流道設計分析」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文，民國 91 年 6 月。
- [25]李輝煌 編著，田口方法品質設計的原理與實務，高立圖書有限公司，民國 92 年 3 月。
- [26]余順達，「鎂合金大平面薄板之壓鑄條件的研究」，國立交通大學機械工程學系，碩士論文，民國 92 年 6 月。
- [27]楊永光，徐偉勛，「田口方法應用於電氣—液壓伺服力量控制的控制器設計」，CSME，第二十屆全國學術研討會 B 冊，(2003 年 12 月 5-6 日)，pp.587-594。
- [28] <http://www.Noranda.com>

附件一：三年內參考著作

一、期刊：

曾重誌，”CAD/CAM 於瓶型模具之設計”，明新學報 27 期，pp.1~10（90 年 12 月）。

二、著作：

曾重誌，”電腦輔助設計與製造”，高立圖書公司，（91 年 8 月 1 日）。



附件二：學經歷

學歷：

明新工專機械科畢業（68年9月~71年6月）。

交通大學機械所暑期研究所四十學分進修班結業（79年7月~82年8月）。

經歷：

- 1、 67年2月~71年10月，大同公司，技術員。
- 2、 71年10月~72年8月，吳日麗公司，工程師。
- 3、 72年8月~82年7月，明新工專，助教。
- 4、 82年8月~ 明新技術學院，技術教師。
- 5、 中華民國電腦數值控制銑床乙級技術士（85年8月通過）。
- 6、 中華民國電腦數值控制車床乙級技術士（86年8月通過）。
- 7、 中華民國車床工乙級技術士（87年8月通過）。
- 8、 中華民國乙級廢水處理專責人員（87年12月通過）。
- 9、 中華民國電腦數值控制銑床甲級技術士（90年10月通過）。
- 10、 中華民國電腦數值控制銑床技術士技能檢定監評人員（88年3月）。
- 11、 中華民國鉗工技術士技能檢定監評人員（90年1月）。