

國立交通大學

機械工程研究所

碩士論文

微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

The Simulation of Temperature and Stress on
the Micro Hot-Embossing Process

研 究 生：許旭昌

指導教授：陳仁浩 教授

中 華 民 國 九 十 五 年 六 月

微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

The Simulation of Temperature and Stress on the Micro Hot-Embossing Process

研 究 生：許旭昌

Student : Hsu-Chang Hsu

指導教授：陳仁浩

Advisor : Ren-Haw Chen

國 立 交 通 大 學
機 械 工 程 學 系
碩 士 論 文



Submitted to Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

國立交通大學

博碩士論文全文電子檔著作權授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學機械工程系所

設計製造組，94學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文題目：微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

指導教授：陳仁浩

☒ 同意 ☐ 不同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學與台灣聯合大學系統圖書館：基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學及台灣聯合大學系統圖書館得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟或數位化等各種方法收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

本校及台灣聯合大學系統區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 96 年 06 月 30 日公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 中華民國 96 年 06 月 30 日公開

授權人：許旭昌

親筆簽名：許旭昌

中華民國 95 年 6 月 30 日

國立交通大學

博碩士紙本論文著作權授權書

(提供授權人裝訂於全文電子檔授權書之次頁用)

本授權書所授權之學位論文，為本人於國立交通大學 機械工程 系所
設計製造 組，94 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

指導教授：陳仁浩

■ 同意

本人茲將本著作，以非專屬、無償授權國立交通大學，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，與回饋社會與學術研究之目的，國立交通大學圖書館得以紙本收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行閱覽或列印。

本論文為本人向經濟部智慧局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：_____，請將論文延至____年____月____日再公開。

授權人：許旭昌

親筆簽名： 許旭昌

中華民國 95 年 6 月 30 日

國家圖書館博碩士論文電子檔案上網授權書

ID:GT009314518

本授權書所授權之論文為授權人在國立交通大學 工 學院 機械工程 系所
設計製造 組 94 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

指導教授：陳仁浩

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，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。

※ 讀者基於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：許旭昌

親筆簽名：許旭昌

民國 95 年 6 月 30 日

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校 機 械 工 程 學系碩士班 許 旭 昌 君

所提論文(中文) 微 熱 壓 成 形 之 溫 度 模 擬 與 應 力 分 析

(英文) The Simulation of Temperature and Stress
on the Micro Hot-Embossing process

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員： _____

洪 景 華

徐 瑞 坤

指導教授：

陳 仁 浩

系主任：

傅 武 雄

教授

中 華 民 國 95 年 6 月 22 日

微熱壓成形之溫度模擬與應力分析

研究生：許旭昌

指導教授：陳仁浩 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

近年來，如何以更大的面積成形具更高深寬比的微小結構一直是塑膠微成形的研究重點，然而在微成形過程的冷卻脫模階段中，往往由於模仁與塑膠成形品彼此的收縮率不同，導致在脫模時產生夾持的現象，造成脫模後微結構變形或受損等。本研究利用數值計算的方法，模擬在微熱壓成形過程中，塑膠成形品與矽模仁在冷卻脫模階段的溫度與應力變化。並且引入熱電阻的觀念，加入微加熱器條件，探討了發熱功率大小、發熱時間點與發熱時間長短對溫度場及熱應力場之影響。最後，整理製作出微熱壓製程中運用微加熱器時的操作窗，可供為選擇熱壓條件之參考。

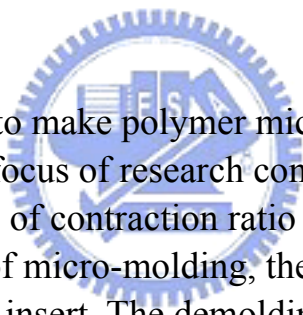
The Simulation of Temperature and Stress on the Micro Hot-Embossing Process

Student : Hsu-Chang Hsu

Advisor : Dr. Ren-Haw Chen

Institute of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract



In recent years, how to make polymer micro structures with higher aspect ratio is always the focus of research concerning polymer molding. Because of the differences of contraction ratio between polymer and mold insert in the cooling step of micro-molding, the patterned polymer grip the micro-structured mold insert. The demolding force due to gripping even causes deformation or break of the patterned polymer. The numeric simulation was used to simulate the temperature and stress performances between polymer and mold insert during the cooling and demolding step. Furthermore, resistor-heater was used as a micro-heater and was discussed about the heating power, the heating timing and the heating time during the heating process. Based on this, the operation window of micro-heater was developed and used as the parameter of embossing molding.

致謝

研究所二年來，感謝老師的照顧、教導與包容。打從找指導教授那刻起就受到老師的照顧，在我決定放棄，任憑命運安排時，老師收留了我。爾後求學過程，更是受到老師的照顧與教導，對於我差強人意的表見，也充滿了極度的包容。由衷地感謝老師，老師您辛苦了。

也對感謝實驗室的每個成員，安誠、明初、濬賢、訓國、坤宏學長，忠晉、沛原同學，以及振家、春貴、悅慈學弟妹，謝謝他們陪伴我渡過研究所的二年。在這更要特別感謝明初學長和忠晉，提供我在老師之後另一個學業討論的管道，還有濬賢學長在畢業過後仍專程回來教我使用實驗設備。還有也要謝謝在這段從小到大求學歷程所遇到的每個人，很高興能認識你們，謝謝你們伴我渡過求學歷程的每一刻。

最後要謝謝家裡的每一個成員，沒有他們的陪伴與關懷，也就沒有今日的我，很興奮要地對他們說聲，我畢業了。



目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
第一章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究動機與目的.....	4
1.4 研究方法.....	5
第二章 理論與基礎.....	8
2.1 高分子材料物性.....	8
2.1.1 高分子材之簡介與分類.....	8
2.1.2 高分子塑料之相關性質.....	8
2.2 塑料的流變行為.....	10
2.2.1 流變學簡介.....	10
2.2.2 流變之力學模型.....	10
2.3 熱分析.....	13
2.3.1 能量守恆.....	13
2.3.2 熱傳遞的形式.....	13
2.3.3 穩態傳熱與暫態傳熱.....	14
2.5 熱應力與熱應變.....	16
第三章 溫度量測與模擬.....	20
3.1 溫度量測實驗.....	20
3.1.1 熱壓步驟.....	20
3.1.2 模具冷卻量測.....	21

3.1.3 微加熱器發熱之量測.....	21
3.2 模型的建構.....	22
3.2.1 材料物性值的取得與決定方法.....	22
3.2.2 實體模型建構.....	22
3.3 模具冷卻的模擬.....	23
3.3.1 初始條件與邊界條件的設定.....	23
3.3.2 模擬結果與討論.....	24
3.4 微加熱器的模擬.....	25
3.4.1 初始條件與邊界條件的設定.....	25
3.4.2 模擬結果與討論.....	26
第四章 熱應力模擬	49
4.1 收縮模擬的假設.....	49
4.2 模型的建構.....	49
4.3 邊界條件的設定.....	50
4.4 模擬結果.....	50
第五章 結論與建議	55
參考文獻.....	57

表目錄

表 3-1 熱壓實驗參數表[17]	29
表 3-2 材料物性資料表 [14,15,16]	29
表 3-3 熱壓系統尺寸	30
表 3-4 對流係數參數設定	30



圖目錄

圖 1-1 冷卻脫模步驟會產生因收縮率不同而互相挾持之缺陷 [4].....	7
圖 1-2 熱壓步驟示意圖 [9]	7
圖 2-1 彈性模數與溫度關係圖 [20]	17
圖 2-2 爬杆效應 [21]	17
圖 2-3 模口膨脹效應 [21]	17
圖 2-4 流變之力學模型 [18]	18
圖 2-5 熱力學第一定律：能量守恆	18
圖 2-6 各種熱傳遞形式 [23]	19
圖 2-7 溫度變化與熱應力之關係 [25]	19
圖 3-1 熱壓機結構體 [26]	31
圖 3-2 熱控機控制系統 [26]	31
圖 3-3 熱壓系統示意圖 [26]	32
圖 3-4 模溫機 [26]	32
圖 3-5 溫度與力量控制變化以及微加熱器施加功率圖 [17].....	33
圖 3-6 模具實際冷卻過程中上、下模座表面以矽模仁表面的溫度變化	34
圖 3-7 微加熱器施加功率方式 [17]	34
圖 3-8 微加熱器發熱溫度量測	35
圖 3-9 熱壓系統模型圖	36
圖 3-10 三維的熱傳元素 Solid70 [28].....	37
圖 3-11 網格化的熱壓系統模型圖	37
圖 3-12 模具冷卻模擬所得之溫度變化	39
圖 3-13 模具冷卻實驗與模擬所得之溫度變化的比較	40
圖 3-14 微加熱器之不同定功率的發熱效果	40
圖 3-15 各種線寬之微加熱器在施加相同功率的發熱效果比較	42
圖 3-16 模具冷卻過程中，以不同定功率的四種施加功率方式下所得 的矽模仁表面溫度之模擬結果	44

圖 3-17 施加功率 45W 的矽模仁與成形品之厚度-溫度分佈.....	45
圖 3-18 施加功率 45W 的上下模具與矽模仁表面之時間-溫度變化.....	45
圖 3-19 微加熱器之操作窗(一).....	47
圖 3-20 將總施加功率時間偏移 10 秒的微加熱器之操作窗(二).....	48
圖 4-1 平面應力與平面應變 [29].....	52
圖 4-2 微結構立體示意圖.....	52
圖 4-3 八節點二維的結構元素 Plane82.....	53
圖 4-4 網格化後的局部成形品與矽模仁圖.....	53
圖 4-5 矽模仁冷卻收縮應力變化.....	54
圖 4-6 成形品冷卻收縮應力變化.....	54



第一章 序論

1.1 研究背景

微機電系統(micro-electro-mechanical systems, MEMS)發展至今有一、二十年的歷史，已經成為世界各工業國家努力鑽研的焦點，也是目前科技業公認為最具發展潛力與前瞻性的研究領域。所謂的微機電系統，係整合電子、生醫、資訊、機械、化學與光學等多種跨領域知識理論的新興科技，透過應用半導體製程技術與改善傳統加工技術，將機械元件、感測器、致動器與電子材料製做在一微小的區域內[1]。隨著製程不斷的進步，微機電系統愈做愈微小化，不僅大幅降低成本，並提高產品的競爭力與功能性，使得許多過去需要高精度和高穩定度之機構的產品得以充斥在市場上，如醫療保健、無線通訊、消費電子、汽車工業、航太工業與工業產品等[2]。

目前世界上常見的微機電製造技術，主要可分三種，有沿習傳統以矽為基材的半導體製程技術而演變出來的體型微加工技術(bulk micromachining)與面型微加工技術(surface micromachining)，還有後來由德國科學家發展用以製造微結構的微光刻電鑄模造技術(LIGA)。體型微加工主要是利用物理或化學方式，以等向或非等向的乾式或濕式蝕刻技術，在基材矽晶圓(silicon wafer)或矽晶片(chip)上去除材料以形成期望的三維幾何微結構。面型微加工主要是在基材上一層一層地沈積材料，透過選擇式蝕刻的方法來建構懸浮式的薄膜機械結構。LIGA 技術則是利用 X 光進行厚膜光阻之微影來製作出期望的圖案，接著利用電鑄各種金屬翻模製作母模，最後再以微成形技術大量生產各種微結構。這三項技術各有其優缺點，但由於 LIGA 技術可滿足微機電元件高深寬比且複雜的三維形狀之要求，致使它成為最被廣泛討論的技術[2,3]。

雖然 LIGA 技術可以製作高深寬比且複雜的微結構，但是由於使用的光源為同步輻射 X 光，是一種取得不易且價格昂貴的光源，而且用以遮擋 X 光之光罩的製作更是不易，因此才會有類 LIGA 技術的

開發。類 LIGA 技術係利用其他光源取代 X 光來進行光刻術，主要技術有紫外光微影、準分子雷射微加工(excimer laser micromachining)及反應離子蝕刻(reactive ion etching, RIE)等。這些替代性的技術可以降低成本，但同時也使得加工精度等級下降，光刻深度與深寬比降低，不過這些影響對於精度和深寬比不苛求的少數微元件就顯得不是那麼必要[3]。

此外，LIGA 技術的微成形工程也存在一些困難性，如：冷卻收縮與脫模的問題。就微成形工程而言，熱壓成形(hot embossing)與射出成形(injection)是目前普遍用於製作塑膠微結構的成形技術，其方法是將塑料加熱到玻璃轉換溫度(glass transition temperature, T_g)以上的高溫，然後施予一壓力把融熔的塑料充填入具有微結構的模仁中，待充填結束後通入冷卻液使模具、模仁與成形品冷卻，並同時維持壓力以防止成形品於冷卻過程中，因密度變化而產生收縮的現象，最後打開模具，脫模取出成形品。然而在冷卻脫模過程卻存在相當多的困難，成為決定成形品好壞的最重要關鍵，如在冷卻過程中，因為模仁與塑料的收縮率不同，使得模仁與成形品在微結構基部產生相對移動與側向的接觸應力，造成冷卻時基部的剪切應力與脫模時的摩擦力，因此導致模仁或成形品的微結構發生破損或是夾斷等缺陷，如圖 1-1[3,4]。

隨著成形結構越細，深寬比越高，在冷卻脫模過程所產生的收縮與缺陷問題也就越嚴重。如何有效的克服這個問題，使保有模仁的完整性與成形品的轉印性，這將會是微成形技術能否高深寬比化、大面積化的決定性關鍵，也會是促使 LIGA 技術或類 LIGA 技術可否邁入工業化的重要一環。

1.2 文獻回顧

1980 年代以來，LIGA 技術發展日趨成熟，相對帶動微機電系統在微結構成形技術的蓬勃發展，所以新型微結構成形技術之研究已成為現階段亟待研發之領域。過去用於傳統塑膠生產的熱壓成形技術與

射出成形技術，搖身一變成為塑膠微結構成形中最常被應用與討論的技術。

有關微熱壓成形技術方面，M. Heckeke 等人提出熱壓成形由於具備材料流動距離短(low material flow)與低流動速率(low flow rate)的優點，可避免成形過程中殘留應力的產生，以及可成形更細小的微結構，成為一種適合製造高精度與高品質塑膠微結構的成形技術。並可藉由加大成形面積與自動化生產的方式來提高生產量與降低成本，以彌補成形週期較長的缺點[5]。Holger Becker 等人針對高深寬比微結構的熱壓成形，提出了以下幾點注意：熱壓模仁之微結構在側壁上的粗糙度、微結構的側壁角、模仁和塑料間的化學介面與溫度係數四個注意要項[6]。

L. Lin 等人成功整合半導體製程與熱壓成形技術於 3D 微結構製作，利用半導體製程技術將寬 $31\mu\text{m}$ 、高 $21\mu\text{m}$ 金字塔型的微結構製作在矽晶片上，再利用熱壓成形法，以具有微結構的矽晶片當作模仁，重覆再生具有平滑表面的塑膠微結構[7]。S. Y. Chou 等人使用 $15\text{mm}\times 18\text{mm}$ 的矽晶模仁以熱壓成形法製作寬度 10nm 與深寬比為 4 的奈米結構，其製程的可重複性以及矽晶模仁的使用壽命可達 30 次以上。並提出若在更大面積的矽晶模仁上得到均勻熱壓成形微結構，表面黏滯問題、成形最佳化、熱膨脹效應與多層對準問題等都得更深入的研究[8]。

為了得到高精度與高品質的塑膠微結構，對於塑料在熱壓成形過程中的行為必須充分掌握。但由於市售的工程模擬軟體大都是針對大尺寸的結構進行模擬分析，對於微小尺寸的結構，因為尺寸效應的關係，無法透過比例縮放的方式，將微觀世界的微結構在軟體上進行模擬。對此，有學者提出將微熱壓成形過程的模擬分為二個部分，一是成形階段的模擬，另一是冷卻脫模階段模擬，如圖 1-2 所示[9]。

在成形階段的模擬，Y. Hirai 等人利用 MARC 軟體，假設被加熱到玻璃轉換溫度的高分子塑料呈現橡膠彈性體，為大形變且不可壓縮的物體，模擬在充填微結構中塑料的變形機制，討論微結構的深寬比

(aspect ratio)、塑料的初始厚度以及微結構的排列比例(duty ratio)對所需壓力大小的關係，並成功製做出寬 100nm 高 860nm 的微結構[10]。M. Worgull 等人基於熱壓成形製程與射壓成形製程有極相同的參數存在，所以藉由 MOLDFLOW MPI 軟體模擬成形過程中融熔塑料的流動行為、高收縮的區域、壓力分佈與殘留厚度[9]。

在冷卻脫模階段的模擬，M. Worgull 等人利用 ANSYS 軟體對熱壓脫模行為進行模擬，視塑料為一個黏彈性材料的物體，討論脫模過程中可能對微結構造成傷害的各種因素，包括模仁的熱行為、模仁與成形品間的摩擦係數、成形溫度、脫模溫度、冷卻時間、脫模速度以及熱壓力，並從模擬的結果證實摩擦係數是造成微結構在脫模過程主要傷害的原因[9]。N. Huber 等人藉由 ABAQUS 軟體，假設塑材是均質、線性等向熱彈性材料，以有限元素法模擬熱壓成形脫模時應力分佈，包括基板的配置與否、摩擦力、殘留層厚度以及基板種類對應力分佈的影響[11]。

此外，Y. Hirai 等人更進一步地利用數值模擬方法，考量塑料行為情形做不同的假設，模擬溫度對奈米熱壓過程中應力分佈的影響，從最開始的熱壓階段，到後來的冷卻與最後的脫模階段，並且提出保壓不宜持續到玻璃轉換溫度以下，且緩慢的冷卻將有助於殘留應力釋除的效果[4]。

在微射出成形技術方面，Y.C. Su 等人以微射出成形技術，將具有金字塔型微結構的矽模仁成功轉印在高分子塑料上，並且利用模擬結果與實驗相互對照，研究融熔高分子塑料在模穴內的流動行為，結果發現溫度是影響成形品質的重要關鍵[12]。L. Yu 等人亦使用實驗與數值模擬的方式研究微射出成形技術，使用結合了動量方程式(momentum equation)與 Hele-Shaw 模型(Hele-Shaw model)的混合模擬方法，增加模擬結果的正確性，並提出模具與融熔塑料的熱傳係數與射速將會是決定充填深度的重要因素[13]。

1.3 研究動機與目的

本研究室利用半導體製程的蝕刻與摻雜之技術，並同時引入電阻發熱的觀念，發展一項具有微結構且可透過施加電壓產生自我發熱功能的矽基材模仁，冀望能在熱壓成形或射出成形的冷卻脫模階段，施加電壓使模仁產生發熱的效果，藉此釋除殘留在微結構中的熱應力，並且減少在冷卻過程中模仁因為不同收縮率而產生的夾持問題，讓模仁與成形品能順利進行脫模。利用這樣的概念不但沒有 LIGA 技術中使用昂貴 X 光光源與光罩製作不易的問題，並且也可省去電鑄翻模的過程，更可減少成形不佳的產生。

然而對於微加熱器的適當發熱功率大小、發熱時間長短以及最佳脫模溫度條件等的獲得，仍無法單憑實驗以確切掌握。因此本研究的目的在於利用數值模擬的方式，模擬在微成形冷卻過程中，模具、模仁與成形品之溫度場變化，以及分析微加熱器的發熱功率大小、發熱時間長短對溫度、熱應力的關係。藉由這些結果以掌握成形品的應力變化，並找出最佳的脫模溫度條件，以做為實驗以及實際應用矽基模仁技術進行微行成時的參數。



1.4 研究方法

本研究使用市售的工程分析軟體—ANSYS 進行微成形過程中冷卻脫模階段的數值模擬研究。在開始做模擬之前，有關於材料性質資料的獲得，如模具、矽基材模仁與成形品的材料(如：PMMA)物性，基本上是利用文獻資料搜尋來取得[14,15,16]。在條件參數的設定方面，如：矽基材模仁的發熱功率、冷卻過程時熱壓系統當時的模溫與水路的溫度、空氣對流係數，係假設系統環境處於自然狀態之下並且引入實驗室學長與自行實驗的資料做設定[17]。

模型的建構與模擬的流程，首先是模擬三維的熱壓系統之溫度變化與分佈，透過實驗數據資料與熱傳理論計算的方式，計算冷卻模擬之水路對流係數參數，並比對模擬與實驗的結果，然後再利用這個對流係數當作邊界條件參數，模擬在熱壓的冷卻階段中，晶片通電發熱過程之晶片與成形品隨時間的溫度變化，藉此求出晶片的發熱功率、

發熱時間點與發熱時間長短三者之間的關係，以便利用在實際的實驗。

在脫模模擬部分，針對由於冷卻過程以及矽基材模仁和成形品之收縮率所造成的收縮夾持進行研究。觀察隨溫度變化下，模仁與成形品的應力分佈，期能推算模仁可能的壽命與成品形可能產生的變形或斷裂。



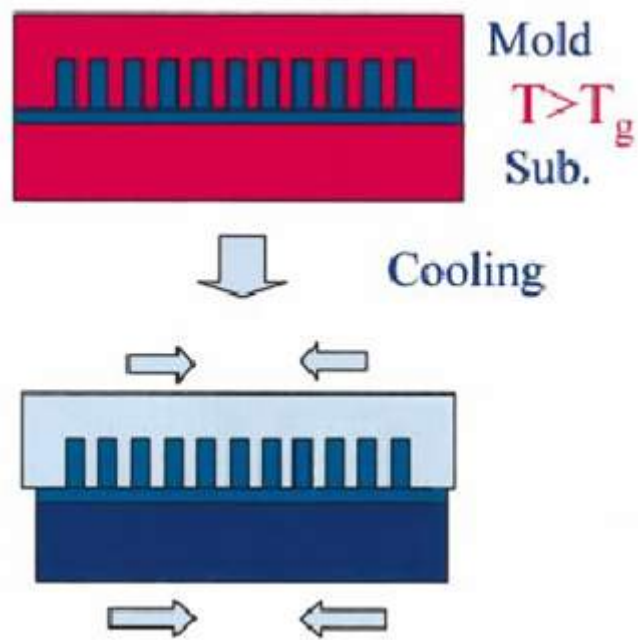


圖 1-1 冷卻脫模步驟會產生因收縮率不同而互相挾持之缺陷 [4]

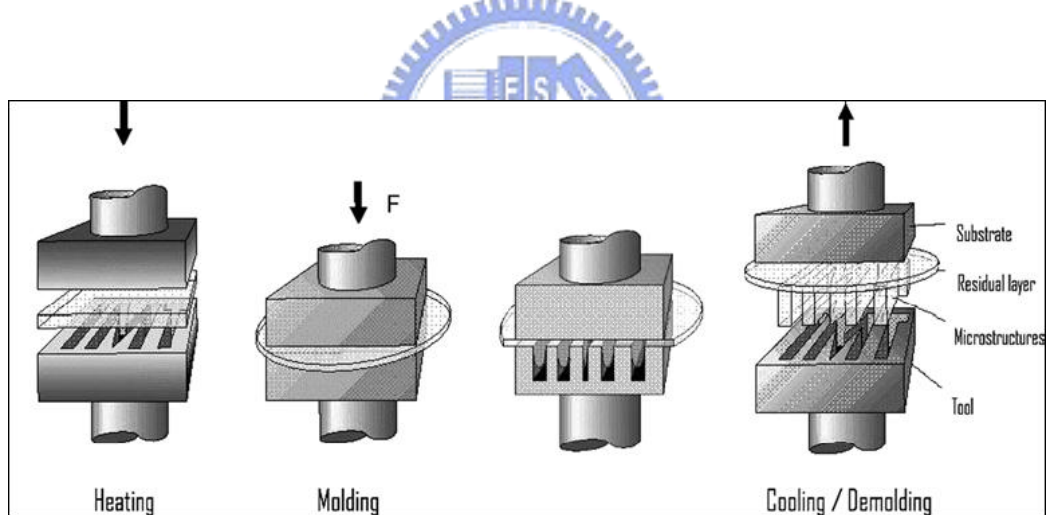


圖 1-2 熱壓步驟示意圖 [9]

第二章 理論與基礎

2.1 高分子材料物性

2.1.1 高分子材之簡介與分類

高分子(polymer)這個名稱衍生於希臘語中”poly”和”mer”，原意為”許多的單位”。以現今的科學方法解釋，高分子是一種由許多單體以共價鍵的方式組合而成的巨大分子量之物質。在自然界中也有很多天然的高分子，如：蛋白質、澱粉、纖維、橡膠、石墨等。此外，科學家也透過人工合成方式製得各種高分子物質，如：各種合成橡膠、塑膠、纖維等[18]。

在這麼多的高分子物質中，有關其分類依觀點的不同而有不同，通常分成橡膠(elastomer)、熱固性塑膠(thermoset)以及熱塑性塑膠(thermoplastics)三大類[19]。橡膠的分子鏈屬於輕度交聯的網狀結構，在室溫下有很好的彈性，即使在很小的外力作用下，也可產生很明顯的變形效果，外力釋除後，可迅速恢復原狀。熱固性塑膠的分子鏈結構經加熱產生交聯反應，形成緊密的網狀結構，並且固化定型，冷卻後即使再次受熱也不會軟化，若溫度過高則會裂解。熱塑性塑膠的分子鏈結構屬於線型或分枝型，可依其三次結構細分為結晶性或不定形兩類。在室溫下熱塑性塑膠呈固體狀態，經加熱會軟化流動，冷卻則成型固化，具有可逆性。

2.1.2 高分子塑料之相關性質

高分子塑料在熱壓過程中，經歷複雜的溫度與壓力變化歷程，導致塑料不僅有相變化發生，也有變形、材料性質的改變。以下列出了幾種在加工過程中需注意的材料性質[18,20]。

1. 比熱(specific heat)

比熱代表材料儲存熱量的能力，也代表欲使單位質量的材料提高單位溫度所需能量，SI 單位為 $J/(kg \cdot K)$ 。若比熱愈大，則材料溫度愈不容易變化，反之亦然。在加工過程中，可利用這個性質加以計算材料欲達到需求溫度需再加多少熱量或是需移走多少熱量。不僅如此，

當比熱與溫度做圖時，將可求出該材料的玻璃轉移溫度。

2. 熱傳導係數(thermal conductivity, T_c)

熱傳導係數是材料熱傳導的能力。熱傳導係數高的高分子，其熱傳導的效果愈佳，在加工過程中溫度也會比較均勻，較不會有熱量局部堆積而造成的熱點產生。高分子塑料的熱傳導係數較一般材料來的低，當發生相變化時會有明顯的變化，通常會隨著溫度上升而增加，對於結晶性塑料會特別明顯；對於不定形塑料的熱傳係數則隨溫度變化較為平緩。

熱傳係數與比熱攸關高分子的熱傳、冷卻性質，同時也會對冷卻時間長短產生影響。

3. 熱膨脹係數(thermal expansion)

指在一定溫度變化下，當試片受加熱或冷卻時，試片會有相對於原長度增加或減少的改變量，而這改變量將會隨著溫度變化的程度而呈正比。以數學式表示膨脹係數 α ，則


$$\alpha = \frac{\delta}{L(T_f - T_i)} \quad (2-1)$$

式中 δ 為伸長量， L 為試片原長度， T_i 和 T_f 分別為初始溫度與後來溫度。

4. PVT 關係(PVT relationship)

壓力-比容-溫度關係，簡稱 PVT 關係，是在加工過程中另一項重要的材料性質。比容為密度的倒數，在加工過程中，會隨著相變化、溫度、壓力而改變。高分子的 PVT 關係卻可透過 PVT 量測儀取得，並由數據取得決定 PVT 方程式的參數而加以定量化。

5. 彈性模數(elastic modulus)

彈性模數定義為

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2-2)$$

式中 σ 與 ε 分別代表應力與應變。一般而言，只要材料不超過其彈性區域，則這原理都可成立。然而，高分子塑料的彈性模數是溫度的函數，隨著溫度升高而下降，如圖 2-1。

2.2 塑料的流變行為

2.2.1 流變學簡介

流變學(rheology)是一門研究物質的變形與流動特性關係的科學，提供物質在變形及流動過程中的持續性、動量與能量等之關係。絕大多數的高分子加工過程都要經歷溫度與壓力變化，受熱後的熔融高分子物性介於固體與流體間，具有複雜流變行為的黏彈體，對於想要研究高分子之材料特性或加工特性的人來說，流變學成了不可缺少的工具。

高分子流體有一些典型的流變現象，如：爬杆效應、模口膨脹[21]。爬杆效應如圖 2-2，將高分子流體置於燒杯中，以一攪拌器攪拌時，接近攪拌器的液面會較高，周圍較低，且流體有向上爬上攪拌器的現象產生，當攪拌速度愈快則爬上的高度也就愈高。模口膨脹現象是在當高分子流體被從一管中擠出後，流體為了平衡應力而產生膨脹的現象，如圖 2-3 所示，有時膨脹程度可高達 400%。其他像是虹吸管現象、迴流現象等，也都是在高分子流體中可觀察到的現象。

2.2.2 流變之力學模型[18,22]

1. Maxwell 模型與一般化 Maxwell 模型

Maxwell 模型是由一個彈簧與一個阻尼兩者串連而成，如圖 2-4(a)。當模型受到外應力 σ 作用時，彈簧與阻尼將同時受到與外應力大小相同的應力，即

$$\sigma = \sigma_{Spring} = \sigma_{damping} \quad (2-3)$$

而模型的總應變 γ 會等於彈簧與阻尼的應變和，即

$$\gamma = \gamma_{Spring} + \gamma_{damping} \quad (2-4)$$

將(2-4)對時間微分

$$\frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)_{Spring} + \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)_{damping} = \dot{\gamma}_{Spring} + \dot{\gamma}_{damping} \quad (2-5)$$

又彈簧和阻尼的應力-應變關係各可表示成

$$\sigma_{Spring} = G\gamma_{Spring} \quad (2-6)$$

$$\sigma_{damping} = \eta\dot{\gamma}_{damping} \quad (2-7)$$

利用(2-6)、(2-7)改寫(2-5)得到 Maxwell 模型的微分方程式

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2-8)$$

假設在時間為 $t=0$ 時施加起始應力 σ_0 ，並保持應變不變，即 $\gamma = \gamma_0$ 或 $d\gamma/dt=0$ 的情形下，則(2-8)可改寫成

$$\frac{1}{G} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0 \quad (2-9)$$

並解得應力緩和 $\sigma(t)$ (stress relaxation)為

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t(G/\eta)} = \gamma_0 G e^{-t/\lambda} \quad (2-10)$$

式中 $\lambda = \eta/G$ ，其單位為時間，稱為緩和時間(relaxation time)。因而模型的緩和模數(relaxation modulus)可表示成

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} = G e^{-t/\lambda} \quad (2-11)$$

而一般化的 Maxwell 模型則是並聯 n 個以上的 Maxwell 模型構成，如圖 2-4(b)，每一各別 Maxwell 模型的緩和模數可以表示為

$$G_i(t) = G_i e^{-t/\lambda_i} \quad (2-12)$$

其緩和時間可表示成 $\lambda_i = \eta_i/G_i$ 。於是，總模數 $G(t)$ 等於 n 個模數的總和，可表示成

$$G(t) = \sum_{i=1}^n G_i(t) = \sum_{i=1}^n G_i e^{-t/\lambda_i} \quad (2-13)$$

假如 n 很大時，則每一各別模數的總和可以用連續緩和時間分佈 (continuous distribution of relaxation time) $G(\lambda)$ 的積分形式來表示，

$$G(t) = \int_0^{\infty} G(\lambda) e^{-t/\lambda} d\lambda \quad (2-14)$$

2. Voigt 模型與一般化 Voigt 模型

Voigt 模型是由一個彈簧與一個阻尼兩者並聯而成，如圖 2-4(c)，有時也稱為 Kelvin-Voigt 模型。當模型受外應力 σ 作用時，假設有一

對橫桿支撐著彈簧與阻尼，使得兩者的應變量永遠相同，並等於模型所受的應變 γ ，即

$$\gamma = \gamma_{Spring} = \gamma_{damping} \quad (2-15)$$

而模型所受的外應力將由彈簧與阻尼分別承擔，即

$$\sigma = \sigma_{Spring} + \sigma_{damping} \quad (2-16)$$

利用(2-6)、(2-7)改寫(2-16)得到 Voigt 模型的微分方程式

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} + G\gamma \quad (2-17)$$

假設在時間為 $t = 0$ 時施加固定荷重而產生固定應力 $\sigma = \sigma_0$ ，可解得(2-16)的蠕變函數

$$\gamma(t) = \frac{\sigma_0}{G} (1 - e^{-t(G/\eta)}) \quad (2-18)$$

又彈簧的順應性(compliance) J 可表示成

$$J = \frac{1}{G} \quad (2-19)$$

所以(2-18)可改寫成

$$\gamma(t) = \sigma_0 J (1 - e^{-t/(J\eta)}) = \sigma_0 J (1 - e^{-t/\theta}) \quad (2-20)$$

模型的蠕變柔量函數 $J(t)$ 可表示成

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma_0} = J(1 - e^{-t/\theta}) \quad (2-21)$$

式中 $\theta = J\eta$ ，其單位為時間，稱為遲延時間(retardation time)。

而一般化的 Voigt 模型是由 n 個 Voigt 模型串聯而成，如圖 2-4(d)，每一各別 Voigt 模型的蠕變柔量為

$$J_i(t) = J_i(1 - e^{-t/\theta_i}) \quad (2-22)$$

其遲延時間可表示成 $\theta_i = J_i\eta_i$ 。於是總蠕變柔量 $J(t)$ 於 n 個蠕變柔量的總和，表示成

$$J_i(t) = J_i(1 - e^{-t/\theta_i}) \quad (2-23)$$

當 n 很大時，可以積分形式來表示

$$J(t) = \int_0^{\infty} J(\theta)(1 - e^{-t/\theta})d\theta \quad (2-24)$$

$J(\theta)$ 即為連續遲延時間分佈(continuous distribution retardation time)。

2.3 熱分析

2.3.1 能量守恆

在熱分析裡，熱力學第一定律—能量守恆是一項重要且有用的工具。當應用能量守恆時，必須先定義控制體積，在空間中產生一被控制表面所包圍的區域，能量與物質可以進出這表面，如圖 2-5。圖中的符號 \dot{E}_{in} 和 \dot{E}_{out} 代表在瞬間進出控制體積的熱能與機械能。 \dot{E}_{gen} 代表能量產生，將在控制體積內，其他形式的能量(如：化學能、電能、電磁能或核能)轉換為熱能。 \dot{E}_{st} 代表在控體積內的能量變化率。因此，能量守恆的通式可表示成

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_{gen} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2-25)$$

亦可改寫成在一區段時間 Δt 的表示式

$$E_{in} + E_{gen} - E_{out} = \Delta E_{st} \quad (2-26)$$

2.3.2 熱傳遞的形式

在自然界中，只要物體中或物體間有溫度差的存在，則熱傳遞就會發生。熱傳遞的形式有三種[23,24]：熱傳導(conduction)、熱對流(convection)與熱輻射(radiation)，如圖 2-6。

1. 熱傳導

當物體內具有一溫度梯度的存在時，該物體內就會藉由分子的活動行為產生能量輪送之現象，使能量由較高溫區域傳遞到較低溫區域，此種能量傳遞的方式稱為熱傳導。以二維座標為例，由 Fourier 的定律中得知透過傳導之熱傳率為：

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2-27)$$

$$q_Y = -kA \frac{\partial T}{\partial Y} \quad (2-28)$$

其中負號代表能量由高溫傳送到低溫， q_X 和 q_Y 分別為表示熱傳率在 X 方向與 Y 方向上之分量， k 為該物體的熱傳導係數， A 是物體的截面積， $\partial T/\partial X$ 和 $\partial T/\partial Y$ 為溫度梯度。若以每單位面積熱傳率表示，Fourier 定律也可寫成：

$$q_X'' = -k \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2-29)$$

$$q_Y'' = -k \frac{\partial T}{\partial Y} \quad (2-30)$$

式中 $q_X'' = q_X/A$ 和 $q_Y'' = q_Y/A$ 分別是 X 方向和 Y 方向的熱通量(heat flux)。

2. 熱對流

熱對流是當一流體流經某個物體表面，由於流體與物體間存有溫度差，因而產生能量由流體傳遞到物體表面(或由物體表面傳遞到流體)的現象。假定介於流體和表面的熱對流係數為 h ，根據牛頓的冷卻定律，則熱對流的方程式可表示成

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (2-31)$$

其中 T_s 和 T_f 分別為物體表面的溫度與流體的溫度。

3. 熱輻射

熱輻射是由於物質具有有限溫度而發生連續放射能量的行為。當具有不同溫度的兩個物體相接近時，能量可以透過輻射的方式進行傳遞，即便是在真空的環境下。簡單來說，表面上所有散出的能量為：

$$q'' = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2-32)$$

q'' 是表面上單位面積的熱能率， ε 是表面的輻射率，介於 $0 < \varepsilon < 1$ ， σ 是 Stefan-Boltzman 常數，($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)。

2.3.3 穩態傳熱與暫態傳熱

在熱分析的問題裡，依時間因素可以區分為穩態傳熱與暫態傳熱兩大類。在穩態傳熱分析裡，系統內任一節點溫度均不隨時間而變化，且此時系統內之淨熱傳率為零，即流入系統內的熱量與系統內產生的能量等於流出系統外的能量。運用能量守恆原理和有限元素概念，將穩態熱分析的能量平衡方程式以矩陣形式表示，

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (2-33)$$

式中 $[K]$ 代表傳導矩陣，包括熱傳導係數、對流係數及輻射率等；

$\{T\}$ 代表節點溫度向量；

$\{Q\}$ 為節點熱傳率向量，包括熱生成。

在暫態傳熱分析裡，系統內的任一節點溫度、任一節點熱傳率、系統邊界條件以及系統內能均會隨時間而產生變化，這個變化會一直持續，直到穩態為止。常見的暫態傳熱分析多為加熱過程與冷卻過程之問題，例如：一鋼錠放入熱爐內進行加熱，然後再由熱爐內移出且暴露於大氣中，鋼錠的能量將透過對流或是輻射方式由其表面傳到大氣和周圍環境，並且能量也同時以傳導的方式由鋼錠內部傳到表面。同樣地，運用能量守恆原理和有限元素概念，將暫態熱分析的能量平衡方程式以矩陣形式表示，

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (2-34)$$

式中 $[C]$ 代表比熱矩陣，考慮系統內能的增加；

$\{\dot{T}\}$ 代表溫度對時間的導數；

$[K]$ 代表傳導矩陣，包括熱傳導係數、對流係數及輻射率等；

$\{T\}$ 代表節點溫度向量；

$\{Q\}$ 為節點熱傳率向量，包括熱生成。

然而在很多工程問題裡，材料的性質與系統的邊界條件也往往會受到各種因素影響，因此必須考量非線性。以熱分析而言，主要有下列幾種情況必須考慮做非線性的熱分析：

- (1) 材料的熱性質會隨溫度產生變化，如比熱、熱傳導係數等；
- (2) 邊界條件隨溫度變化，如對流係數等；

(3) 含有非線性單元；

(4) 考慮熱輻射。

而非線性熱分析的能量平衡方程式以矩陣型式表示為，

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (2-35)$$

2.5 熱應力與熱應變

在熱分析結束後，除了觀察溫度變化、能量的損失或獲得、溫度梯度與熱通量外，亦可能希望知道溫度變化的結果將對系統產生何種影響。在材料力學[25]裡，當溫度變化時，考慮一置於光滑水平面之上的均勻斷面均質桿件，如圖 2-7(a)所，因為不受任何限制，所以當溫度發生變化 ΔT ，則可發現桿件伸長或縮短了 δ_T ， δ_T 與溫度變化 ΔT 及長度成正比，以數學式表示，

$$\delta_T = \alpha(\Delta T)L \quad (2-36)$$

式中 α 為材料之熱膨脹係數(coefficient of the expansion)。

由於溫度變化時，亦同時產生一應變 $\varepsilon_T = \delta_T/L$ ，

$$\varepsilon_T = \alpha \times \Delta T \quad (2-37)$$

因為應變 ε_T 是隨溫度變化所產生，故稱之為熱應變(thermal strain)。

假定相同材料，相同長度的桿件，將兩端限制，如圖 2-7(b)所示。在開始情況，桿件並未受到任何應力或應變，當溫度發生變化 ΔT 但桿件因受限制而無法變形，故桿件之變形量 δ_T 為零，且其內部即產生壓應力或張應力 σ_T ，以數學式來表示，則

$$\sigma_T = -E\varepsilon_T = -E\alpha(\Delta T) \quad (2-38)$$

式中負號表示，當溫度升高時，材料膨脹受到限制，材料的熱應力為負值；反之，當溫度降低時，材料收縮受到限制，材料收縮受到限制，材料的熱應力為正值。這種因為溫度變化但受限制而產生的應力 σ_T ，即稱為熱應力(thermal stress)。

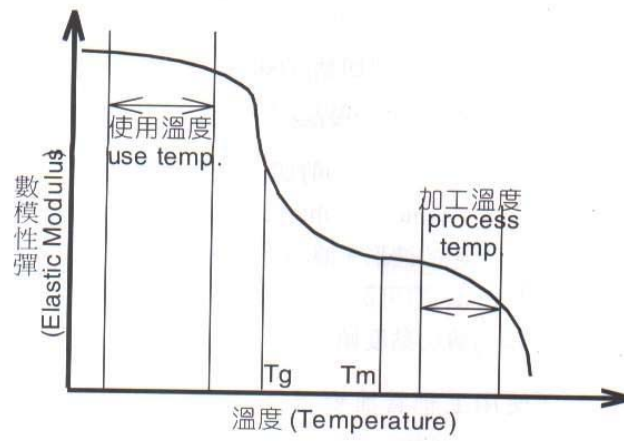


圖 2-1 彈性模數與溫度關係圖 [20]

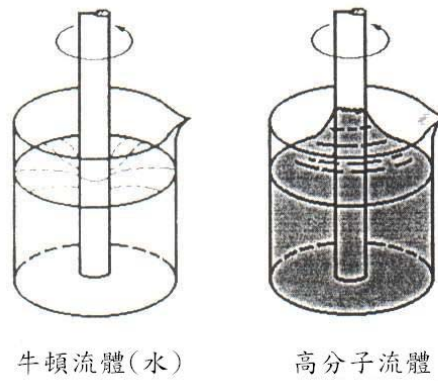


圖 2-2 爬杆效應 [21]

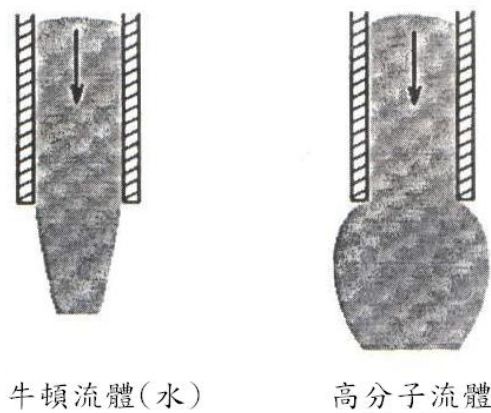


圖 2-3 模口膨脹效應 [21]

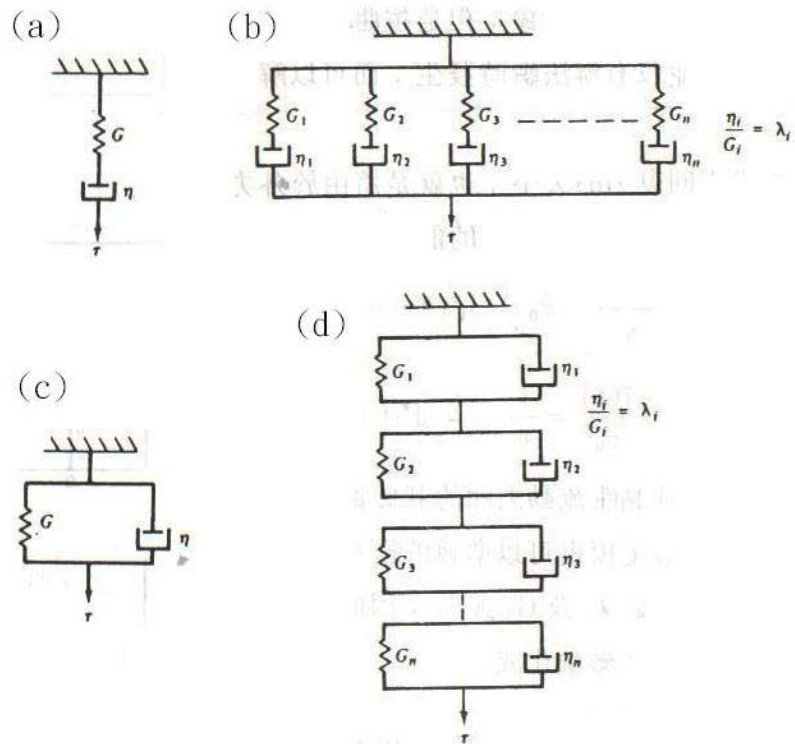


圖 2-4 流變之力學模型 [18]

- (a)Maxwell 模型；(b)一般化 Maxwell 模型；
(c) Voigt 模型；(d)一般化 Voigt 模型

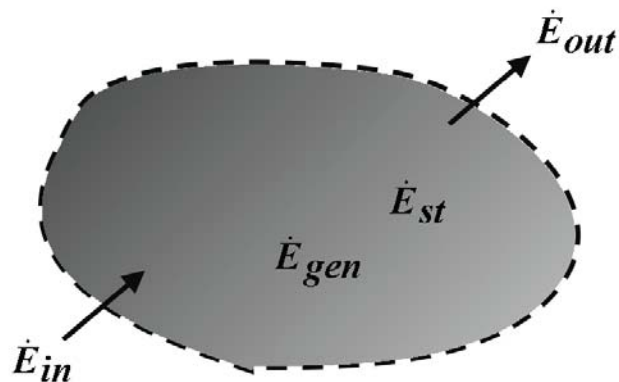


圖 2-5 熱力學第一定律：能量守恆

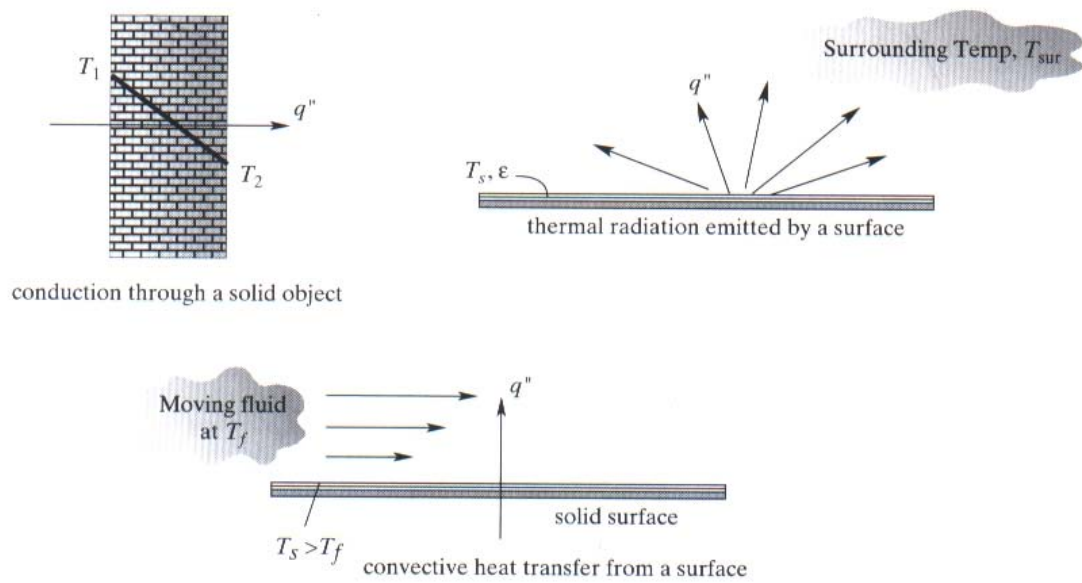


圖 2-6 各種熱傳遞形式 [23]

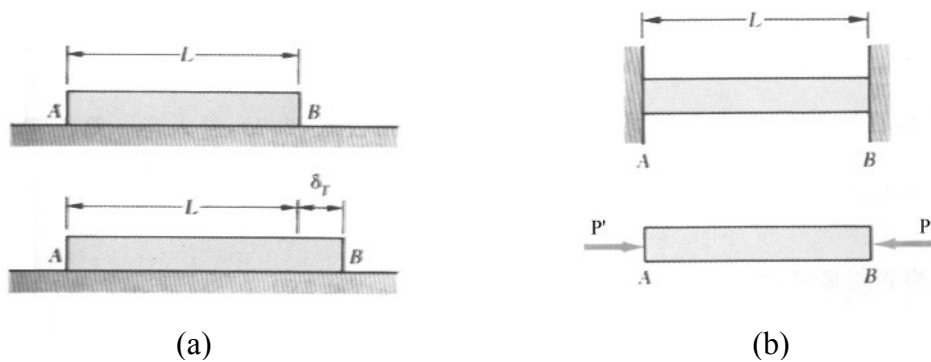


圖 2-7 溫度變化與熱應力之關係 [25]

第三章 溫度量測與模擬

3.1 溫度量測實驗

在開始進行模具冷卻與微加熱器發熱的溫度變化量測前，將先針對所使用的熱壓機以及熱壓的過程做簡單的介紹，然後才開始進行各種溫度的量測。

3.1.1 熱壓步驟

微熱壓成形的實驗裝置是使用實驗室自行開發組裝的熱壓機，其實體如圖 3-1、3-2 所示，系統的示意圖如圖 3-3 所示，而熱壓實驗的操作主要是由溫度與力量控制程式來執行。在熱壓機系統的實驗前檢查工作以及塑料與矽模仁的準備工作就緒後，便可啟動程式進行塑膠微結構的熱壓。

熱壓的步驟共可分為四個步驟[17,26]：

- a. 塑料加熱與初始力量施加：在這階段中，首先將熱壓的塑料放置在具有微結構的矽模仁之上，並且放入熱壓機系統內，固定塑料與模仁於模具中心位置。然後加熱模具，使塑料與模仁均勻受熱直到熱壓溫度 140°C 。在加熱過程中，須施加一初始力量 100kgf 在塑料的表面，以防止塑料因受熱而產生形變。當溫度達到熱壓溫度時，需持溫數秒以使系統溫度能平均分佈，然後才進行熱壓成形。
- b. 熱壓成形階段：在這階段中進行塑膠微結構的熱壓成形，以持溫持壓的狀態，施加 5MPa 的壓力將經加熱融熔的塑料擠壓充填入具有微結構的矽模仁之內，而溫度與施加力量的控制全由熱壓控制程式來即時監控，確保這階段內的溫度與力量能保持在與實驗設定參數相同的條件下。
- c. 冷卻保壓階段：當熱壓成形階段結束後，熱壓控制程式會自動發出音訊通知即將進入冷卻保壓階段，同時自動切斷模具加熱棒的電源，然後透過手動方式開啟模溫機(圖 3-4)進行熱壓系統冷卻。

此時，熱壓機也會以 5MPa 的壓力施加在成形品的表面，對成形品進行保壓的動作，防止其在冷卻過程因密度變化而造成收縮的現象。在冷卻保壓階段的同時依冷卻的溫度變化，通電施加功率在具有微加熱器的矽模仁上，使模仁產生局部發熱的效果，進而解決脫模時因收縮夾持而造成模仁或成形品的微結構受損與破壞之問題。

- d. 開模：當到達冷卻保壓的時間 30 秒後，持續通入冷卻水使熱壓系統到達開模設定溫度 60°C，熱壓控制程式便會自動開模以方便取出具有微結構的塑膠成形品。

熱壓微成形實驗的操作過程大致如上所述，在整個操作過程之各種實驗參數設定，統一系列於表 3-1 中，溫度與力量控制變化如圖 3-5 所示。

3.1.2 模具冷卻量測

由於在熱壓過程中，冷卻脫模階段扮演決定成形品成功與失敗的重要關鍵，透過實際量測熱壓過程之模具系統的溫度變化，進而可計算在冷卻模擬的水路對流係數參數，並可比較模擬與實驗結果的正確性，以便增加後續發熱模擬之正確性。

在這量測中，主要量測溫度的變化量測點共有三個，分別位於上模座與塑料接觸之上模座表面、塑料與矽模仁接觸之模仁表面以及下模具與矽模仁接觸之下模座的溫度變化。在量測過程中，為避免受到來自接觸面但非量測點的溫度變化影響，使用大小比溫度感測器大約五倍的絕熱膠帶來作隔絕之用途，並同時可固定溫度感測器在量測點之上，實驗結果如圖 3-6 所示。

3.1.3 微加熱器發熱之量測

考慮矽模仁上之微加熱器實際工作狀態和之後與模擬結果比較的需要，所以進行微加熱器發熱之溫度量測實驗，觀察微加器發熱對熱壓系統在冷卻過程的溫度變化。採用與模具冷卻量測之相同的方

法，主要量測微加熱器對模仁表面溫度變化。然而在量測的過程中，溫度感測器可能會受到矽模仁表面的微加熱通電之電路導通影響，於是在量測點上使用一薄層的鐵氟龍當作絕緣層，以隔絕電路導通之困擾。首先進行一次熱壓與冷卻，目的在與模具冷卻結果比較，確保鐵氟龍不對量測結果造成影響，接著再將模具只做加熱但不熱壓，防止再度熱壓造成導通現象。然後在之後的冷卻過程中，施予不同的定電壓大小，觀察在適當電壓下可產生明顯的效果，接著再利用這適當功率進行不同施加電壓的方式，如圖 3-7。實驗的結果如圖 3-8(a)和 3-8(b)所示。

3.2 模型的建構

3.2.1 材料物性值的取得與決定方法

熱壓機的上下模座具有加熱與冷卻通道設計，其材質為無氧銅，加熱的設計是使用加熱棒，材質主要為鎳-鉻絲的合金材料，而冷卻通道的設計是使用經過模溫機控制溫度的一般自來水。透過文獻資料的搜尋，將模擬過程所需的各種材料之材料性質一一找出。

在矽模仁部份，採用<110>的矽晶片，經過各種半導體製程的技術，製作出具微結構的陣列與微加熱線路的矽基材模仁。從文獻的資料中發現，不同類型的矽之基本材料性質相差不多，所以採用最一般的矽材質做為模擬的考慮對象。

熱壓的材料部分，由於在市面上壓克力材料的種類繁多且依功能目的也大不相同，因此採用一般通用的壓克力材料之材料性質當作在模擬時高分子材料的設定參考。其材料性質是透過文獻資料獲得。模擬過程所需使用的各種材料之材料性質統一系列在表 3-2 中。

3.2.2 實體模型建構

根據熱壓機設備的上下模座、加熱棒與冷卻通道之實際尺寸與相對位置，建立起三維熱壓機系統的實體模型。並且加入矽模仁與塑料的實體於熱壓機上下模座之中心位置，詳細繪出模仁表面的微加熱線

路實驗有的線長與線寬。建立後的模型尺寸大小列在表 3-3，模型圖如圖 3.9 所示。

使用三維的熱傳元素 Solid70(圖 3-10)，輸入各種材料之材料性質，然後分別設定在各對應的實體上，並且利用 ANSYS 的 free mesh 功能將實體模型網格化，完成整個實體模型的建構，如圖 3-11。

3.3 模具冷卻的模擬

3.3.1 初始條件與邊界條件的設定

模擬過程採用暫態溫度分析的設定，根據模具冷卻實驗量得的溫度變化，模擬開始冷卻降溫到開模溫度前之溫度變化，設定暫態模擬的總時間為 100 秒，時間步進最大為 5 秒，最小為 2.5 秒。觀察在這段時間內矽模仁與成形材料的溫度變化，並且比較模擬結果與實驗量測結果之差異。而模具冷卻模擬的初始條件與邊界條件設定為：

- 初始條件

根據表 3-1 實驗參數所示，將熱壓系統加熱到 140℃後以持溫持壓的狀態進行熱壓成形階段，然後再進行冷卻保壓階段。因此在冷卻保壓階段的開始，熱壓系統係以 140℃的溫度開始冷卻，即模擬時設定熱壓系統的初始條件為溫度 140℃。

- 邊界條件

1. 空氣：由於在實驗過程中，模具與大氣皆保持在自然狀態下的接觸，並未使用風扇迫使空氣產生強制對流。根據熱傳書本[24]的內容資料顯示，氣體在自然對流的對流係數($2\sim 25\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)相對於液體在強制對流($100\sim 20000\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)顯得甚小，且在熱壓過程中，矽模仁與成形品位於模具的中心處，與空氣的接觸面積相對的很小，空氣對其影響甚小。因此假設系統處於絕熱的條件下，忽略空氣對模仁與成形品的影響。
2. 絕熱板：在模具與熱壓機基座的接觸面上設置有隔熱板，以防止模具升溫時熱量由模具傳到熱壓機機台或是避免溫度分佈

不均等問題。假設使用的絕熱板可完全絕熱，設定絕熱條件在模型之絕熱板所對應的位置。

3. 冷卻水路：假設冷卻水快速通過熱壓系統，設定冷卻水路與模具的表面溫度，以定溫 30°C 取代實際應有的入口與出口溫度差。而對流係數的設定，根據熱傳學的理論，對流係數是一個會受流體本身的性質(例如：密度、黏度、導熱度與比熱)、流經物體的表面幾何以及流體流動狀況影響的變化函數。所以利用在模具冷卻實驗量測的各種數據資料，取模具開始冷卻到開模溫度之時間溫度變化歷程，利用 3 種時間分段的方式：0~100 秒、每 50 秒以及每 25 秒，以熱傳理論計算平均對流係數(表 3-4)。而設定冷卻水路之對流邊界條件在冷卻水路管的管壁面上。

3.3.2 模擬結果與討論

從模具冷卻實驗量測的結果(圖 3-6)與模擬分析的結果(圖 3-12)中發現，上下模具與砂模仁表面在冷卻過程的溫度變化均很相近，可見在成形品和砂模仁各自為 0.5mm 的厚度下，溫度變化並無太大的差別。

以砂模仁與成形品接觸面上之模仁溫度的實驗量測結果以及在模擬分析的模仁與成形品接觸面上之中心數值結果做為實驗與模擬比較的參考，如圖 3-13 所示。從圖形上可以發現，模擬的結果與實驗結果仍有些許的誤差，推斷造成這誤差可能有以下幾種：

1. 材料性質：首先，模具材料設定是參考在模具製造時所使用的材料做為設定，但其本身的材料性質是否能真正符合文獻搜尋的數據資料。在加熱棒部分，其本身是一合金材料，外圍受到氧化物或是陶瓷等多種材料的包覆，而造成對該材料性質的設定就變成非常困難。最後，在壓克力材料部分上，由於採用一般通用的壓克力之材料性質做設定當作參考，其實可再透過實驗方式求得材料本身更正確的資料以增加模擬

過程的精確性。

2. 對流係數：在計算模擬所需的對流係數參數值時，會使用到實驗量測數據資料，但這些實驗數據資料亦有可能受到在實驗時人為或儀器造成的誤差或量測點與模擬比較點不對等的影響，而使得結果不同。另外像是邊界條件的水路入口與出口溫度設定，還有冷卻通道表面可能有的氧化層、冷卻水的流動狀況等，也均可能造成實際對流係數與推算的對流係數不同，使得模擬與實驗有不同的原因。
3. 網格：網格類型、網格尺寸與網格密度的改變均會對模擬結果的正確性造成影響。然而對於提高元素的數目也將造成計算所需時間以及空間使用相對提高。

雖然模擬結果與實驗結果不盡相同，但透過將實驗量測到的數據資料以分段方式計算平均對流係數參數值之模擬結果發現，當分段的數目提高將可增加與實驗結果的相似性。因此選擇以每 25 秒分段方式的平均對流係數參數做為之後在微加熱器的模擬之冷卻水路的邊界條件設定。

3.4 微加熱器的模擬

3.4.1 初始條件與邊界條件的設定

微加熱器的模擬一樣採用暫態溫度分析的設定，條件設定成與模具冷卻之溫度模擬的初始條件與邊界條件相同，使用每 25 秒分段方式的平均對流係數當做冷卻水路條件，額外再施加一個微加熱器的負載。而微加熱器的發熱是以使用熱通量的負載當作設定，設定在矽模仁表面的微加熱線路面積上。設定三種不同功率(15W、30W 和 45W)做為微加熱器之發熱功率設定，和三種不同類型的微加熱線路(線寬為 100 μ m、200 μ m、300 μ m，線長均為 85.40mm)，依各種不同線寬的微加熱線路，對原模型做適當的修正，然後將功率除以線寬求得各對應的熱通量參數值，施加邊界條件在矽模仁的微型加熱線路上。之後再以四種不同施加功率的方式，如圖 3-7，模擬微加熱器在不同發熱

功率、不同發熱時間點與不同發熱時間長短對模仁與成形品的溫度影響。

3.4.2 模擬結果與討論

以矽模仁表面為量測與觀察點，由微加熱器發熱之量測結果(圖 3-8(a))與模擬分析結果(圖 3-14)中皆可以看到，當電壓提升或是功率提高，可使得微加熱器在冷卻過程中所產生的升溫效果愈明顯，然而在這電壓或功率的施加同時也需注意其對微加熱器線路的影響，避免因電壓或功率施加過大而導致微加熱器受損，降低了矽模仁的使用壽命。

針對三種不同線寬相同線長，施加相同功率所造成的升溫效果做討論，發現雖然線寬不同，但所造成的升溫效果差異不大，如圖 3-15。但如果以電阻定義式


$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (3-1)$$

式中 R 為電阻， ρ 為電阻率， L 為線長， A 為截面積。探討各線寬對應的電阻大小。在不考慮實際晶片製作上的誤差與不穩定因素，將 ρ 設定為定值，且將植佈的深度考慮為相同， A 會與線寬成正比，所以隨著線寬愈大，微加熱器的電阻值會愈小。然後再考慮與電阻(R)、電壓(V)、功率(P)之關係式

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3-2)$$

若以施加相同定電壓的條件，則線寬較大的微加熱線路將可以得到較大的功率，進而有較大的升溫效果。

在四種不同施加電壓(功率)的方式中，同樣以矽模仁表面為量測與觀察點，由實驗結果圖(3-8(b))與模擬分析結果(圖 3-16)裡均可以觀察到相同的趨勢，在施加後的數秒，矽模仁表面均會產生出比冷卻降溫而加熱器不發熱時較高的溫度，且其變化的曲線也會與施加電壓(功率)的四種方式接近。更可以在模擬的結果中發現，第(2)、(3)、(4)三種施加功率所產生的溫度變化會落在冷卻降溫與第(1)種施加功率

的溫度變化之間，並不會因為在冷卻過程的中途才施加而有較低的溫度。然而在實驗量測的過程中並有沒這樣的情形產生，這主要是由於定電壓與定功率的差別，在實驗裡是採用定電壓的方式給予微加熱器產生熱量，但受微加熱線路品質的關係，當微加熱線路在冷卻過程中，會因為溫度不斷的變化而產生阻值的改變，進而影響了功率的穩定性，而且隨著矽模仁不斷重覆的使用後，微加熱器的阻值也會漸漸改變，因此就會如同實驗的結果一樣，曲線並不一致，不過當關閉電壓的施加後，溫度變化的曲線則又會回到與冷卻的曲線一致。

進一步地從模擬的結果觀察當微加熱器發熱過程對矽模仁與成形品的溫度分佈影響。以定功率 45W 之第(1)種施加功率方式為例，圖 3-17 為微加熱器在施加功率之第 50 秒的矽模仁與成形品的厚度-溫度分佈，和圖 3-18 為下模具(相當於矽模仁底部)、矽模仁表面與上模具(相當於成形品底部)的時間-溫度變化。很清楚地看到因為矽的熱傳導係數 124 W/m-K 比壓克力的 0.2 W/m-K 相差甚大，造成微加熱器在發熱的過程中，成形品具有很大的溫度梯度，且在成形品底部的溫度變化幾乎與在微加熱器不施加功率下的上模具冷卻溫度變化相近。

利用冷卻過程中微加熱器之發熱會在成形品產生溫度梯度的現象，藉由數值模擬結以製作三種不同功率條件下之操作窗[27]。在繪製操作窗之前，必須先設定所要控制的兩項重要操作參數，以及所要觀察的現象或結果。所以針對微加熱器在冷卻過程的施加功率，選定控制的兩項重要參數為施加功率時模具所對應的溫度，以及施加功率以後的總施加功率時間。而所要觀察的現象為微加熱器發熱效果，此效果能造成成形品與矽模仁接觸的表面之材料呈現融熔(高於 PMMA 的玻璃轉移溫度)，但成形品底面卻已開始慢慢固化，造成塑膠微結構彷彿有種被黏貼在底材壓克力上的效果。完成後的操作窗，如圖 3-19 所示。由於施加功率較大，可造成升溫的效果愈明顯，因此可操作的範圍也就愈大；反之，當施加率較小時，則可操作的範圍也就愈小。最後考慮微加熱器在施加功率達最大可產生的溫度差所需的時

間，所以將總施加功率時間的臨界線由 0 秒偏移到 10 秒位置，完成最終的微加熱器操作窗，如圖 3-20。



表 3-1 熱壓實驗參數表[17]

熱壓壓力 (MPa)	保壓壓力 (MPa)	熱壓溫度 (°C)	熱壓時間 (s)	保壓時間 (s)	開模溫度 (°C)	接觸力 (kgf)
5	5	140	30	60	60	100

表 3-2 材料物性資料表 [14,15,16]

	材料	材料性質	數值
模具	無氧銅	熱傳導係數	391 W/m-K
		比熱	0.385 J/g-°C
		密度	8.94 g/cm ³
加熱棒	鎳鉻絲	熱傳導係數	11.3 W/m-K
		比熱	0.46 J/g-°C
		密度	8.41 g/cm ³
矽模仁	矽	熱傳導係數	124 W/m-K
		比熱	0.702 J/g-°C
		密度	2.329 g/cm ³
		彈性係數	112.4 GPa
		Poisson' s ratio	0.28
		熱膨脹係數,20°C	2.49×10 ⁻⁶ mm/mm-°C
		熱膨脹係數,250°C	3.61×10 ⁻⁶ mm/mm-°C
成形品	壓克力	熱傳導係數	0.2 W/m-K
		比熱	1.5 J/g-°C
		密度	1.18 g/cm ³
		彈性係數	3200 MPa
		Poisson' s ratio	0.35
		熱膨脹係數,0~50°C	70×10 ⁻⁶ mm/mm-°C

表 3-3 熱壓系統尺寸

熱壓機	模座	長	180 mm
		寬	180 mm
		高	50 mm
	加熱棒	直徑	10 mm
	水路	直徑	8 mm
矽模仁		長	14.5 mm
		寬	14.5 mm
		厚	0.5 mm
成形品		長	14.5 mm
		寬	14.5 mm
		厚	0.5 mm

表 3-4 對流係數參數設定

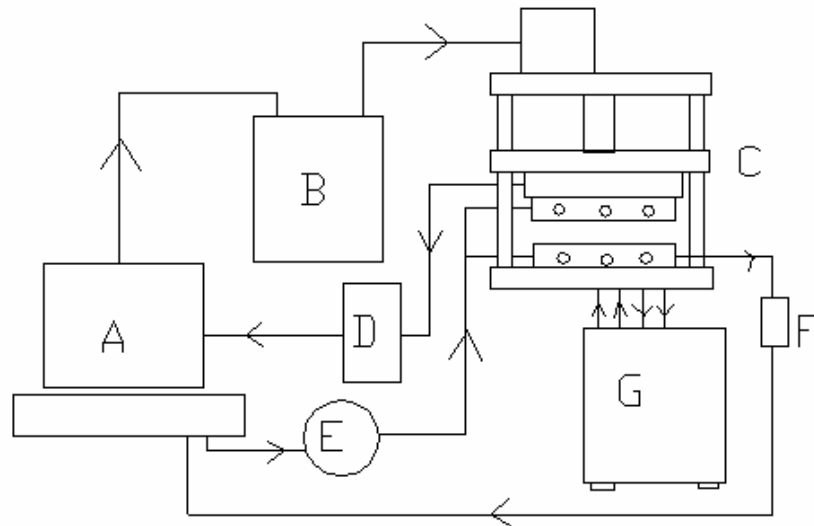
		時間(秒)	對流係數(W/mm ²)
1	0~100 秒	0~100	3023.3×10^{-6}
2	每 50 秒	0~50	3549.8×10^{-6}
		50~100	2923.4×10^{-6}
3	每 25 秒	0~25	3977.8×10^{-6}
		25~50	3279.1×10^{-6}
		50~75	2610.3×10^{-6}
		75~100	3322.6×10^{-6}



圖 3-1 熱壓機結構體 [26]



圖 3-2 熱控機控制系統 [26]



- A. 個人電腦：數據擷取系統、溫度與力量控制程式以及訊號處理模組。
- B. 馬達控制箱：將電腦送出之訊號進行放大與編碼。
- C. 熱壓機結構體。
- D. 動態應變放大計：接收負荷計受壓之訊號，進行濾波放大。
- E. 達林頓電路：引入更大之電流以驅動繼電器控制加熱棒。
- F. K-type 溫度感測器。
- G. 模溫機：進行水冷卻。

圖 3-3 熱壓系統示意圖 [26]



圖 3-4 模溫機 [26]

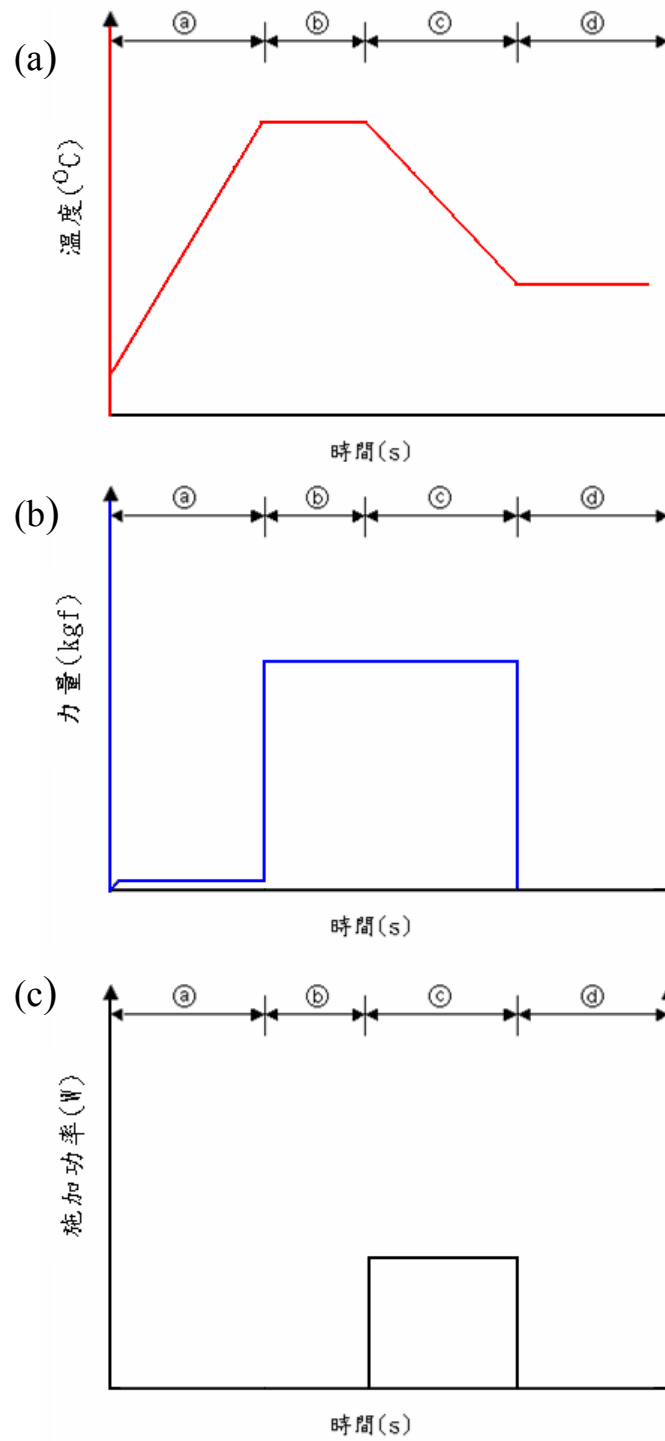


圖 3-5 溫度與力量控制變化以及微加熱器施加功率圖 [17]

- (a)：加熱升溫，材料軟化
- (b)：熱壓階段
- (c)：保壓階段

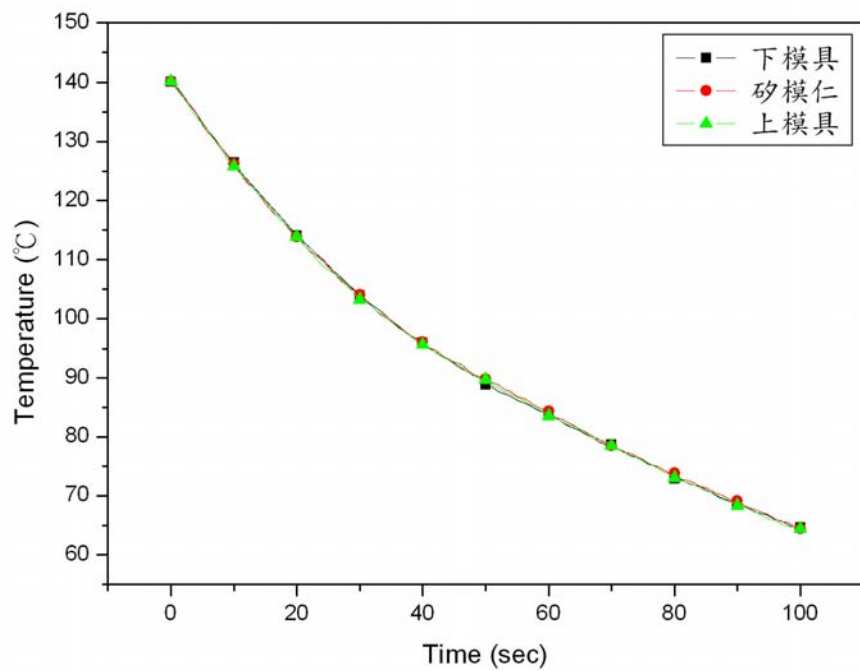


圖 3-6 模具實際冷卻過程中上、下模座表面以矽模仁表面的溫度變化

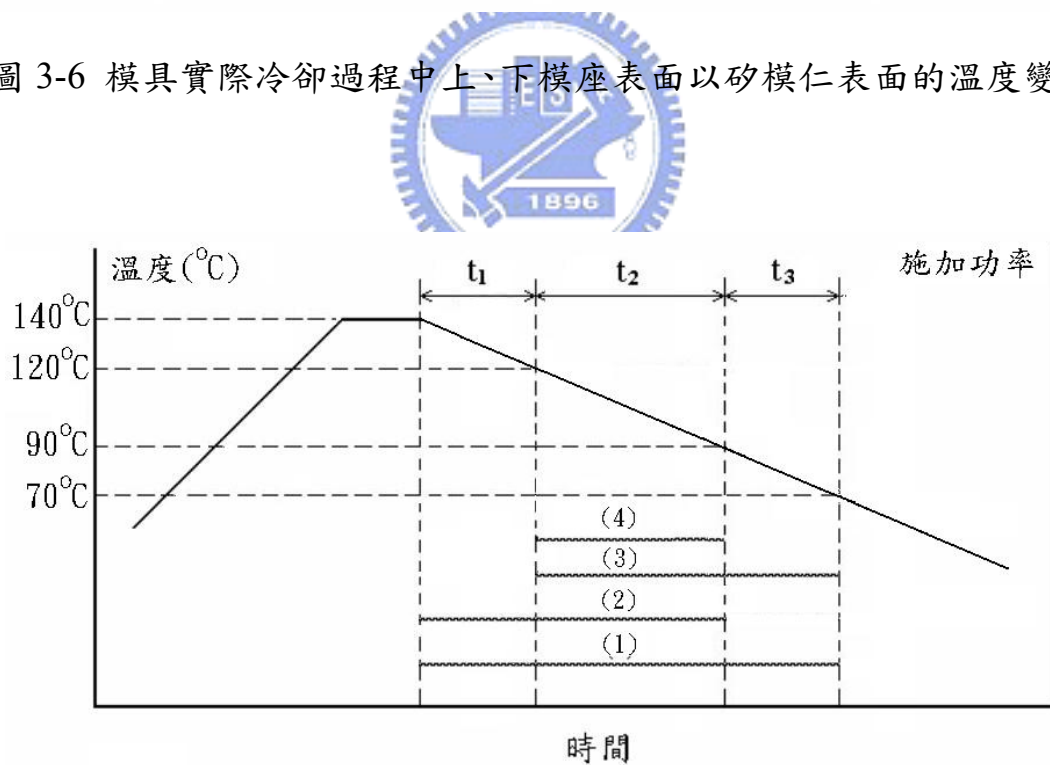
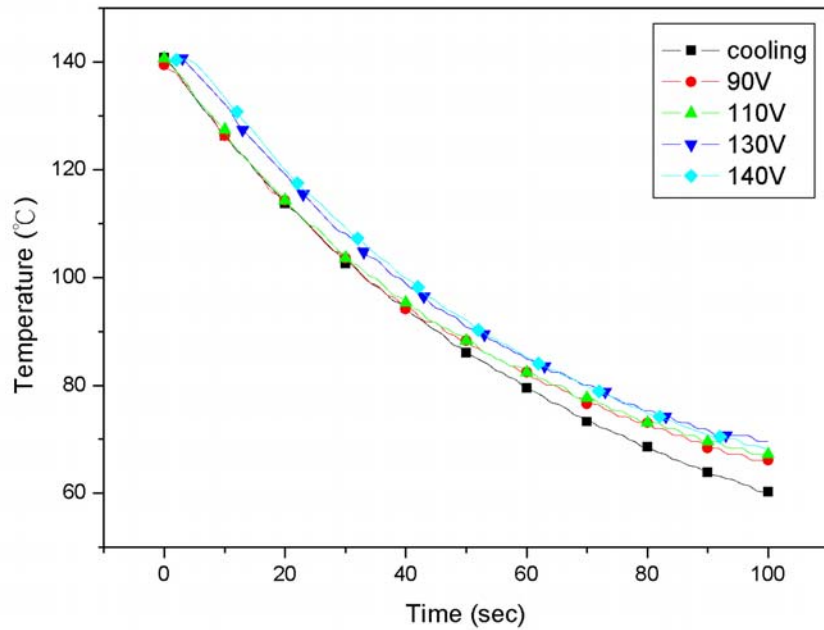
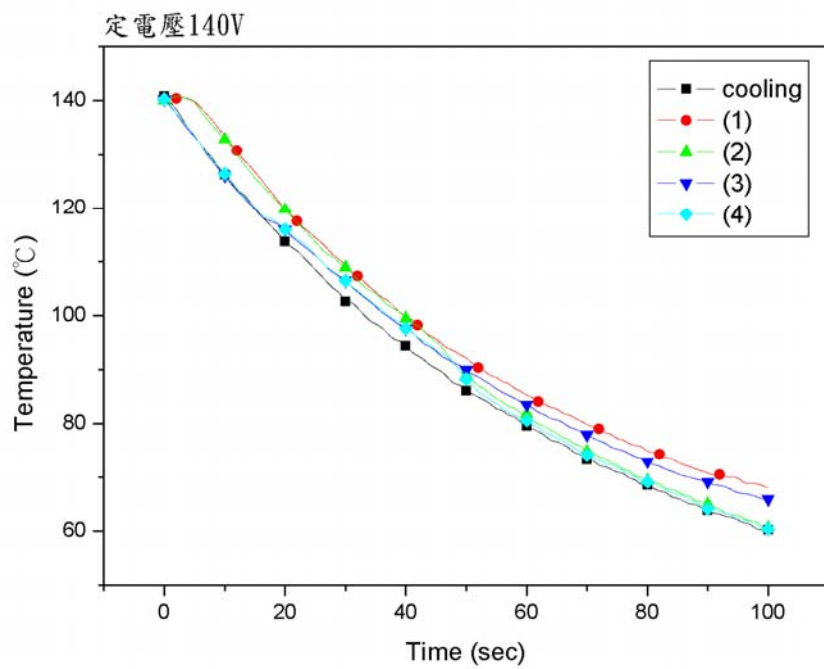


圖 3-7 微加熱器施加功率方式 [17]



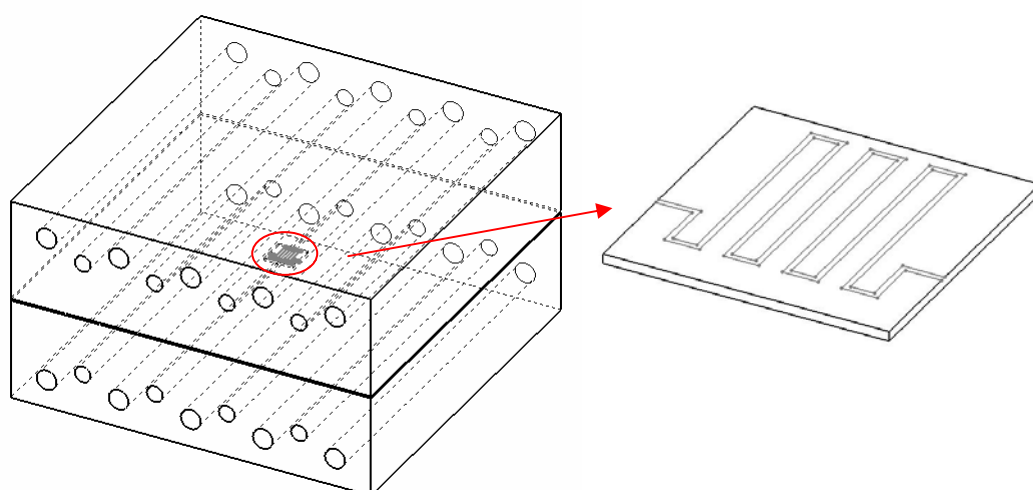
(a)



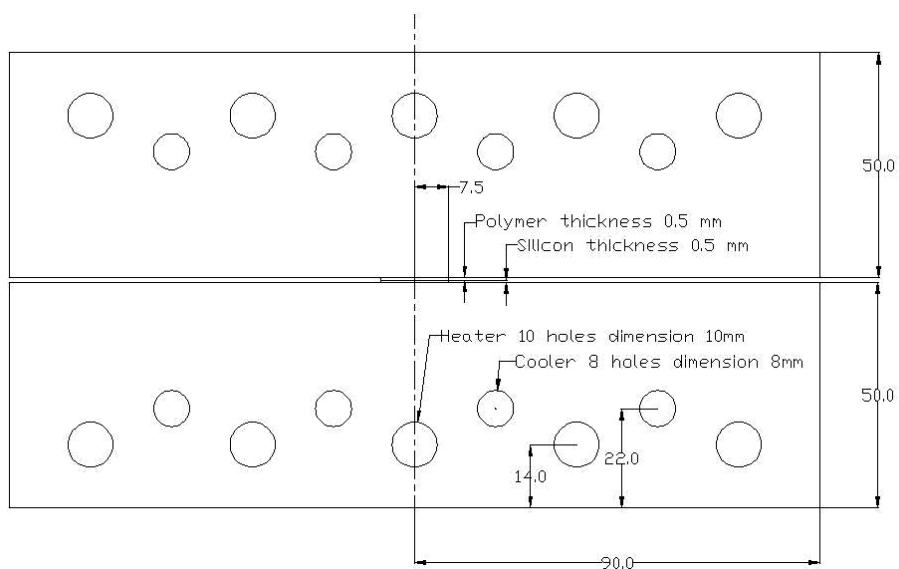
(b)

圖 3-8 微加熱器發熱溫度量測

(a)不同定電壓之發熱效果；(b)四種施加電壓方式(電壓 140V)



(a)



(b)

圖 3-9 熱壓系統模型圖

(a)模型立體圖與矽模仁放大圖；(b)模型剖面圖

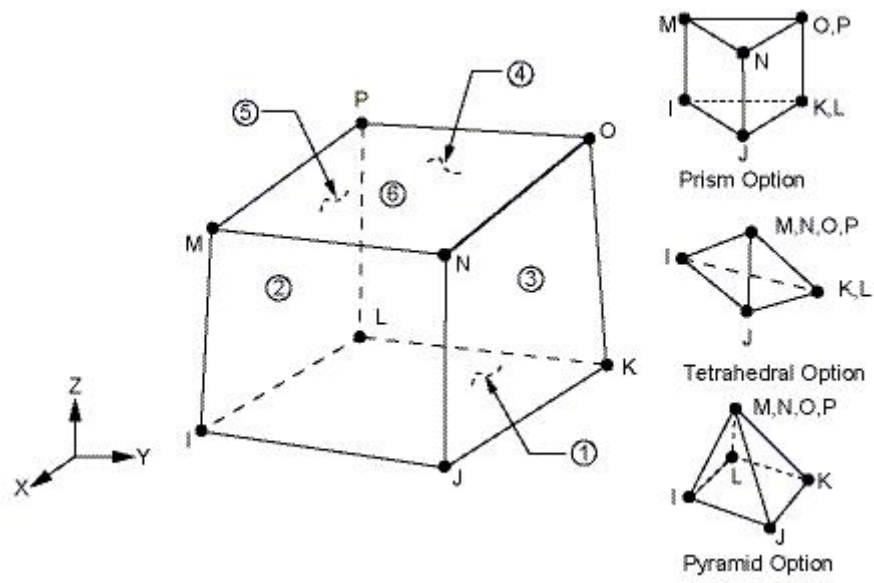


圖 3-10 三維的熱傳元素 Solid70 [28]

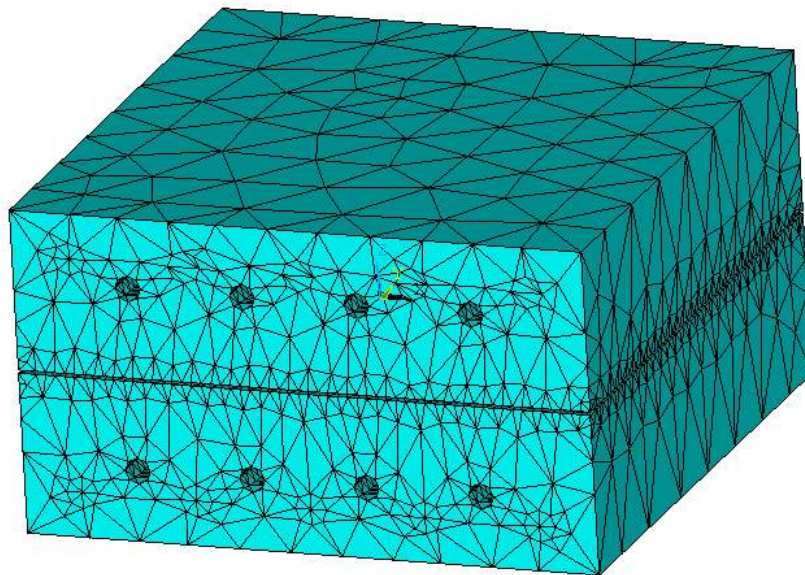
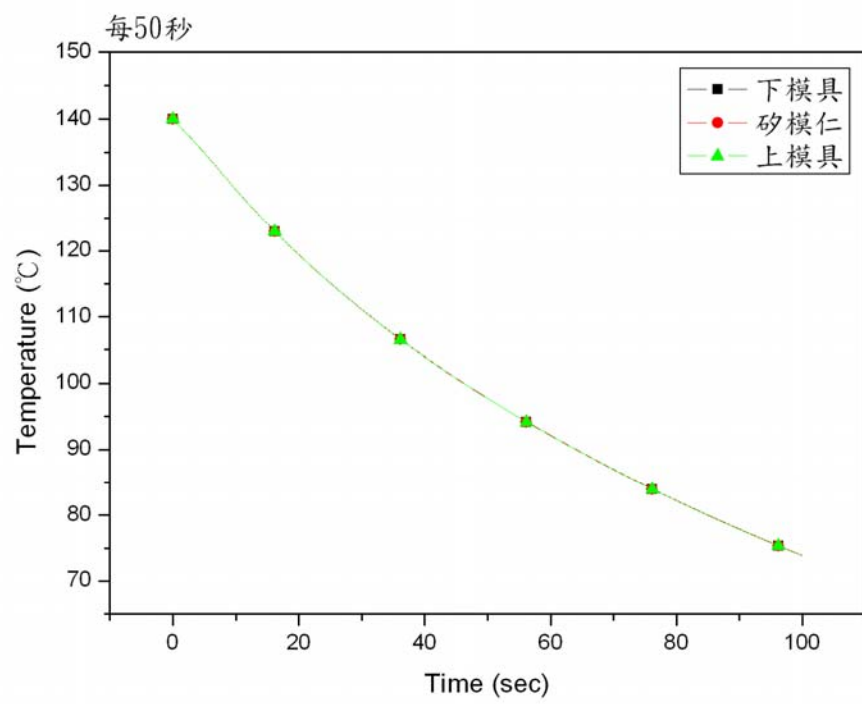
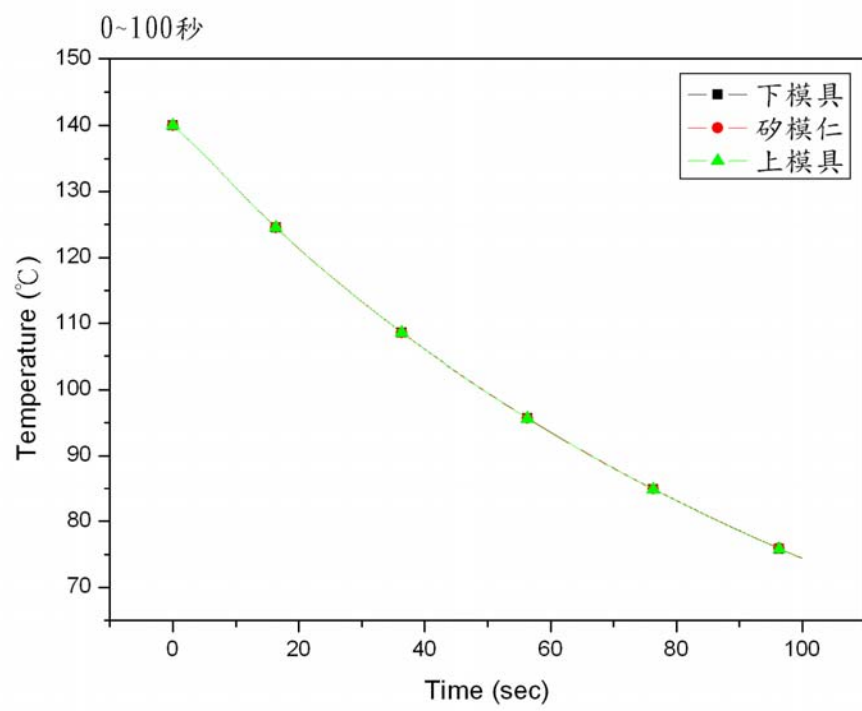
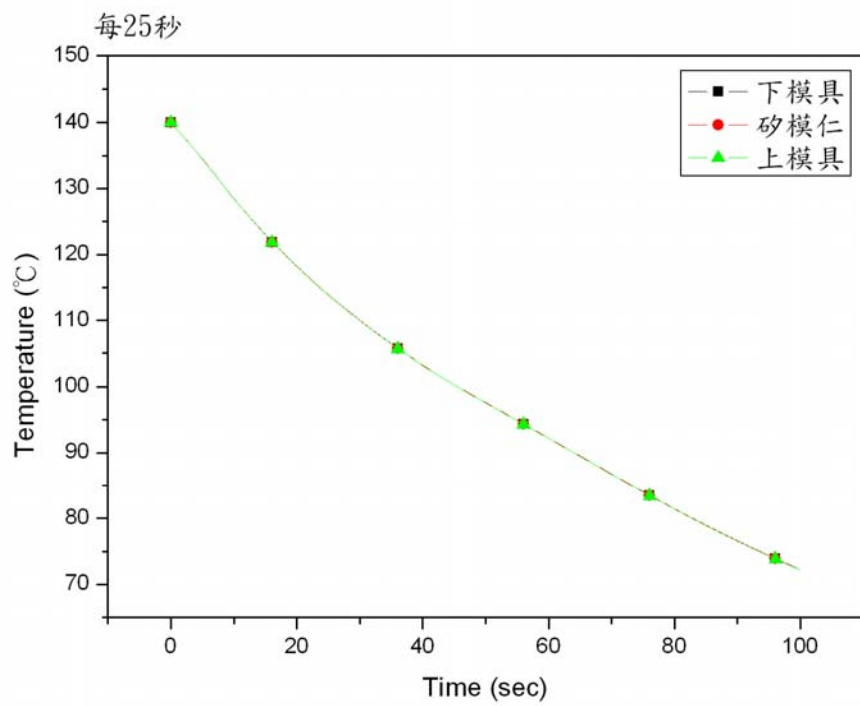


圖 3-11 網格化的熱壓系統模型圖



(b)



(c)

圖 3-12 模具冷卻模擬所得之溫度變化

(a)0~100 秒；(b)每 50 秒；(c)每 25 秒

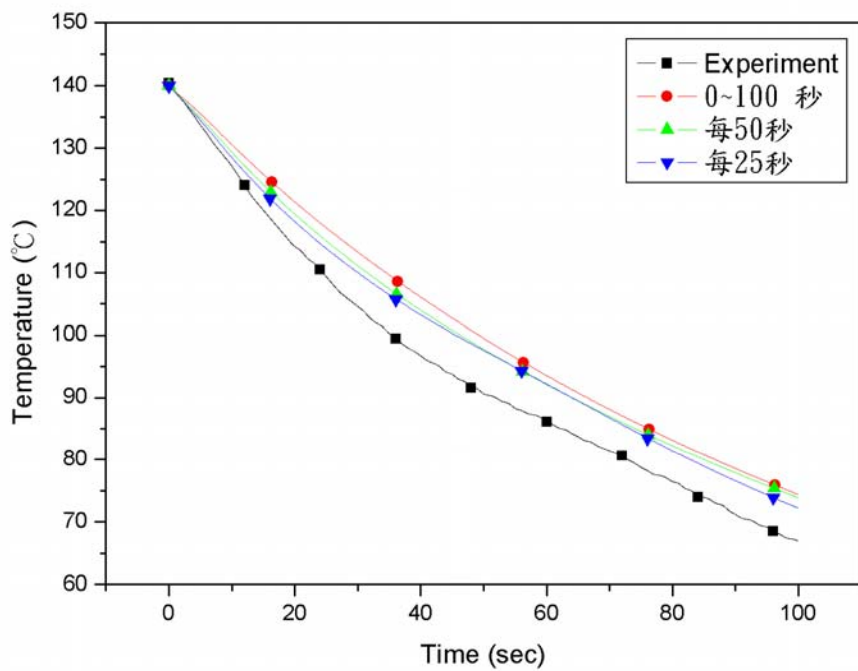


圖 3-13 模具冷卻實驗與模擬所得之溫度變化的比較

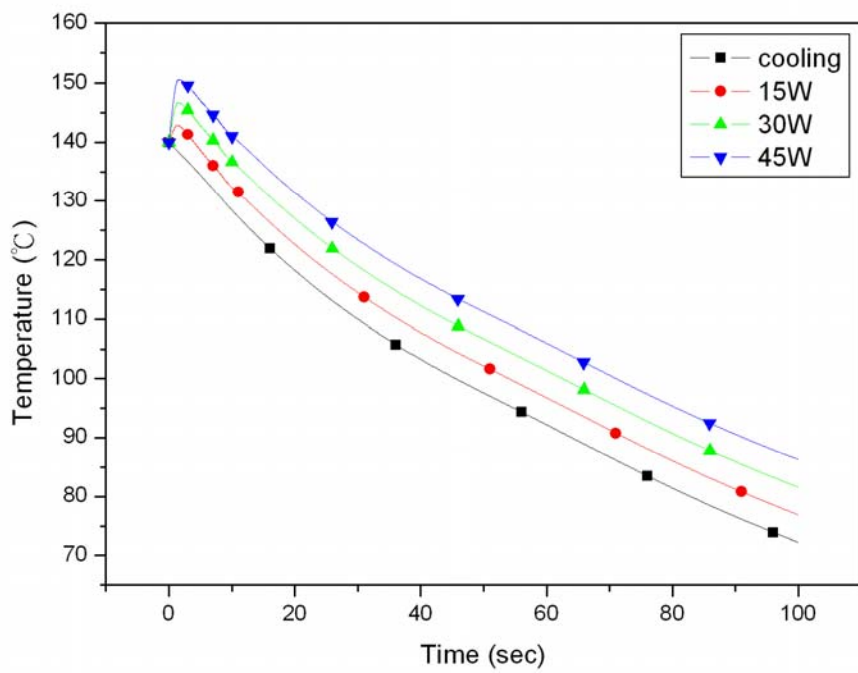
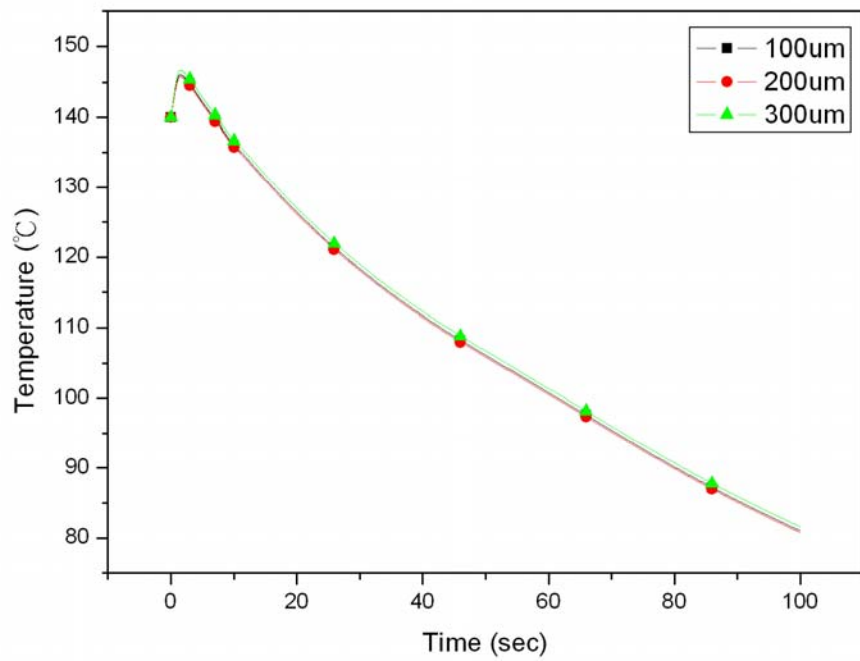
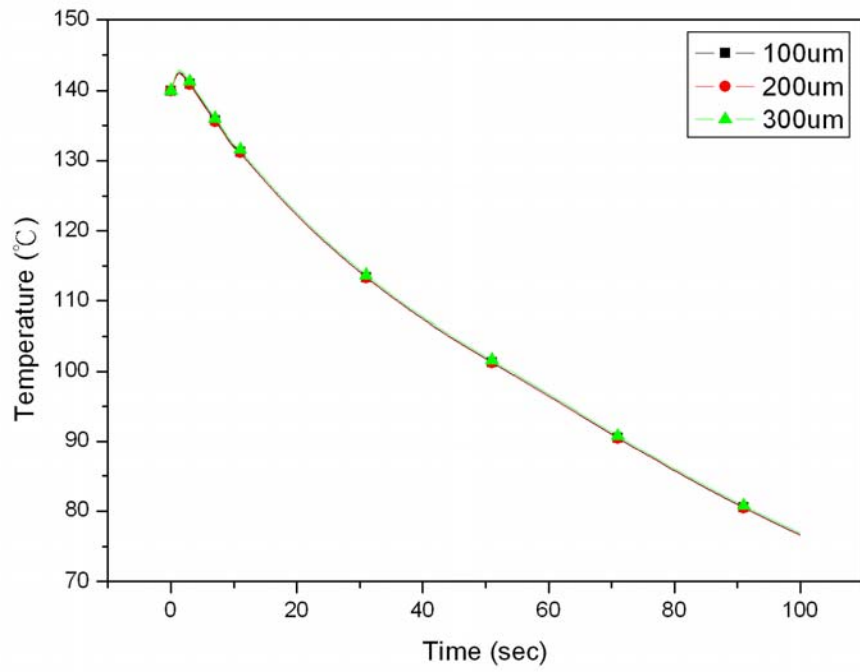
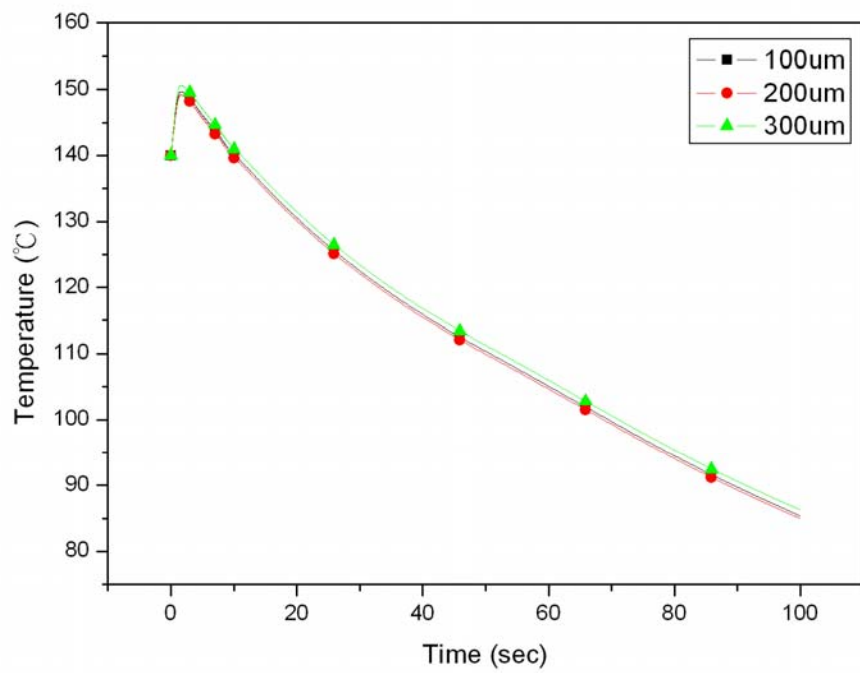


圖 3-14 微加熱器之不同定功率的發熱效果



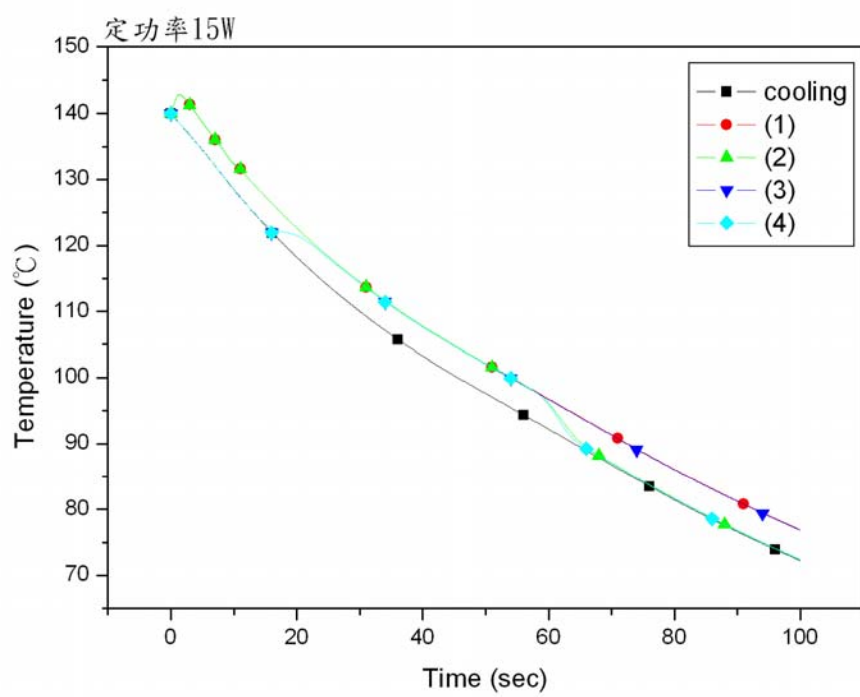
(b)



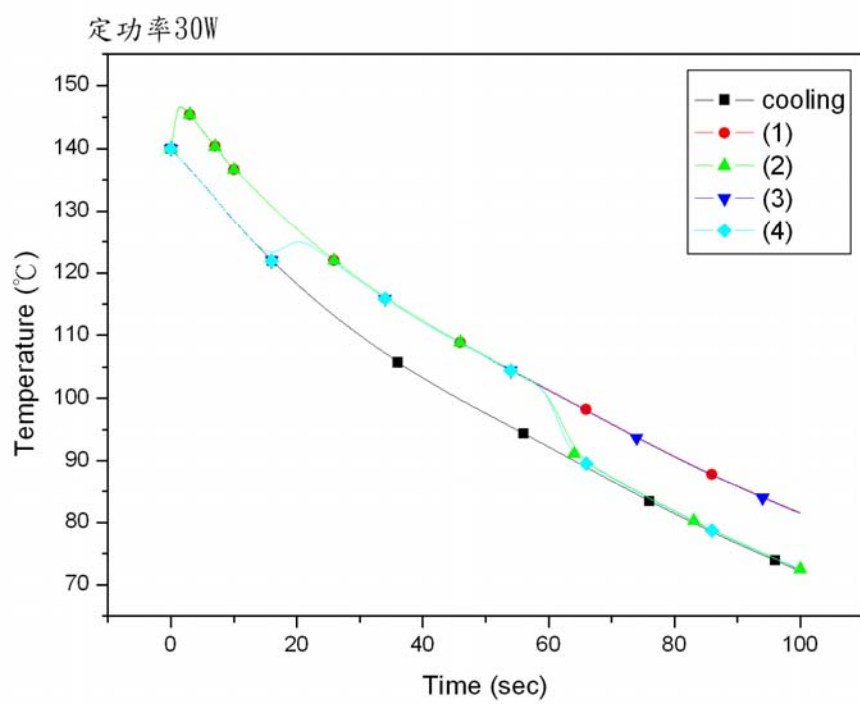
(c)

圖 3-15 各種線寬之微加熱器在施加相同功率的發熱效果比較

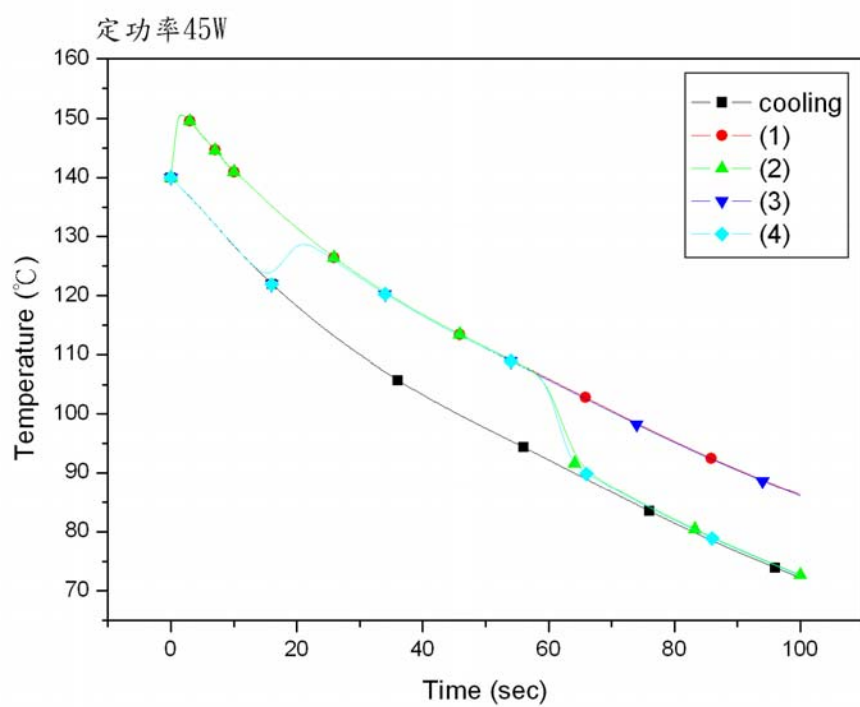
(a) 定功率 15W；(b) 定功率 30W；(c) 定功率 45W



(a)



(b)



(c)

圖 3-16 模具冷卻過程中，以不同定功率的四種施加功率方式下所得的砂模仁表面溫度之模擬結果

(a)定功率 15W；(b) 定功率 30W；(c) 定功率 45W

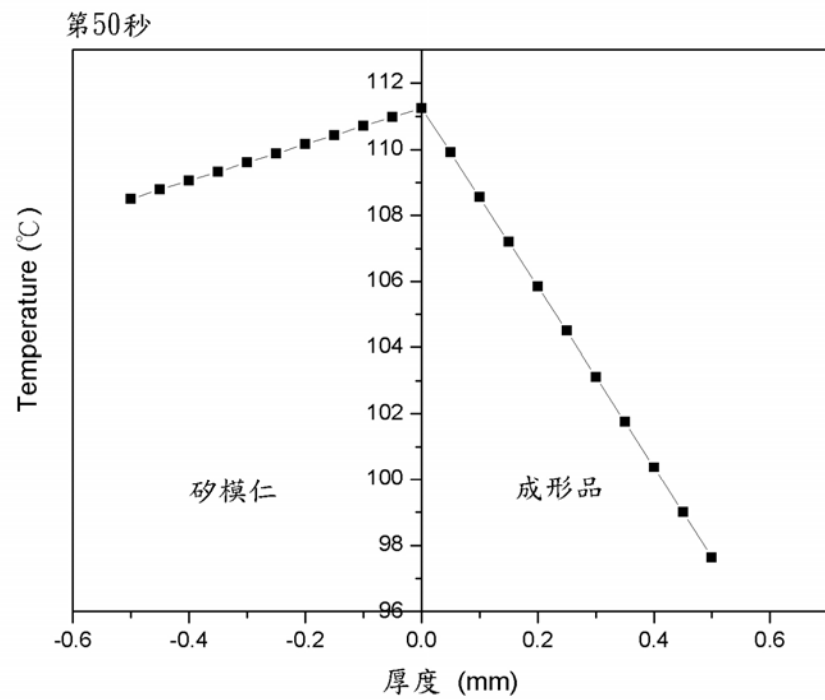


圖 3-17 施加功率 45W 的砂模仁與成形品之厚度-溫度分佈

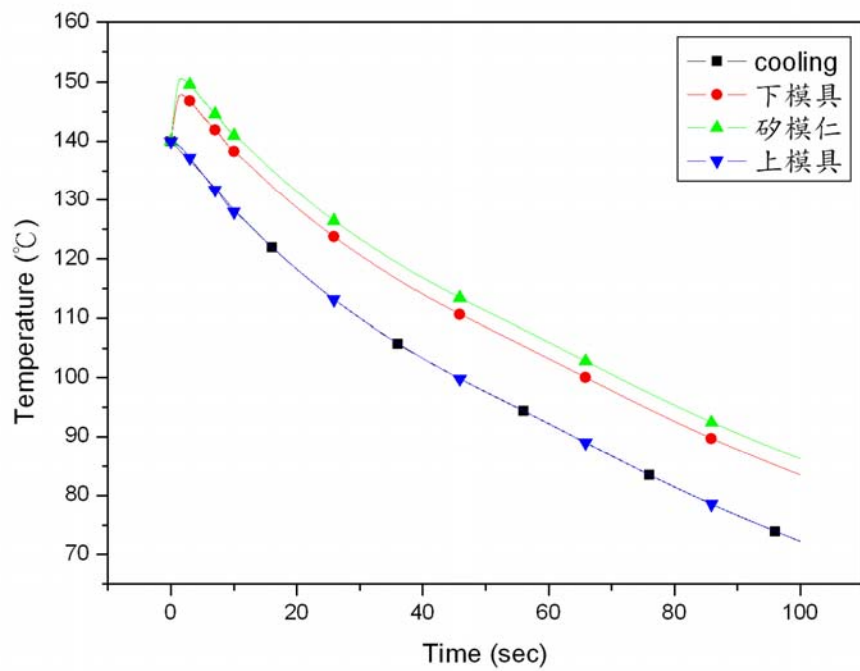
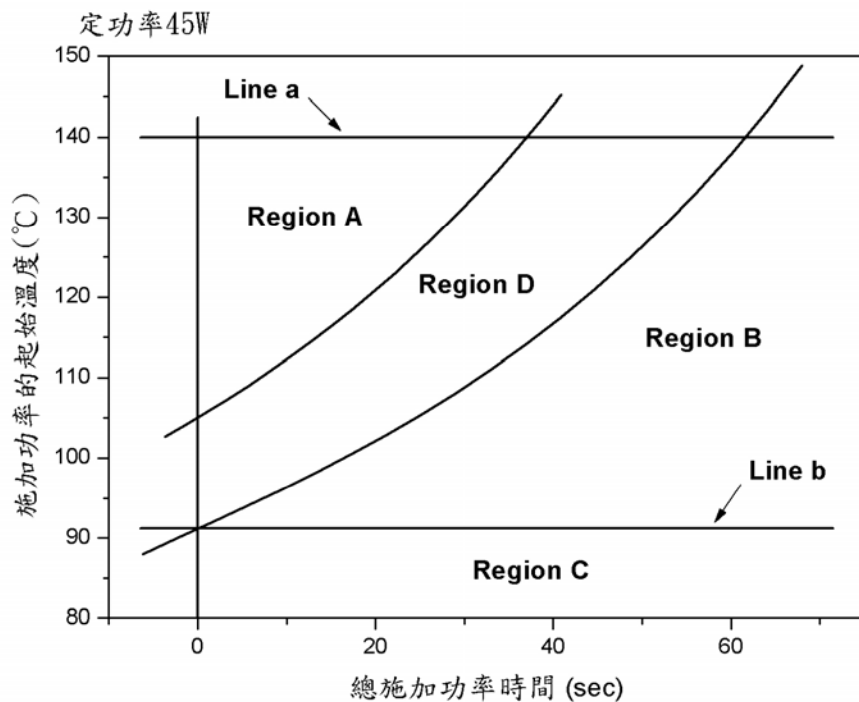


圖 3-18 施加功率 45W 的上下模具與砂模仁表面之時間-溫度變化



Region A：加熱時間過短，成形品底部尚未開始固化前就停止施加功率。

Region B：加熱時間過長，微加熱器造成矽模仁表面升溫的效果已逐漸降至低於塑料之玻璃轉移溫度。

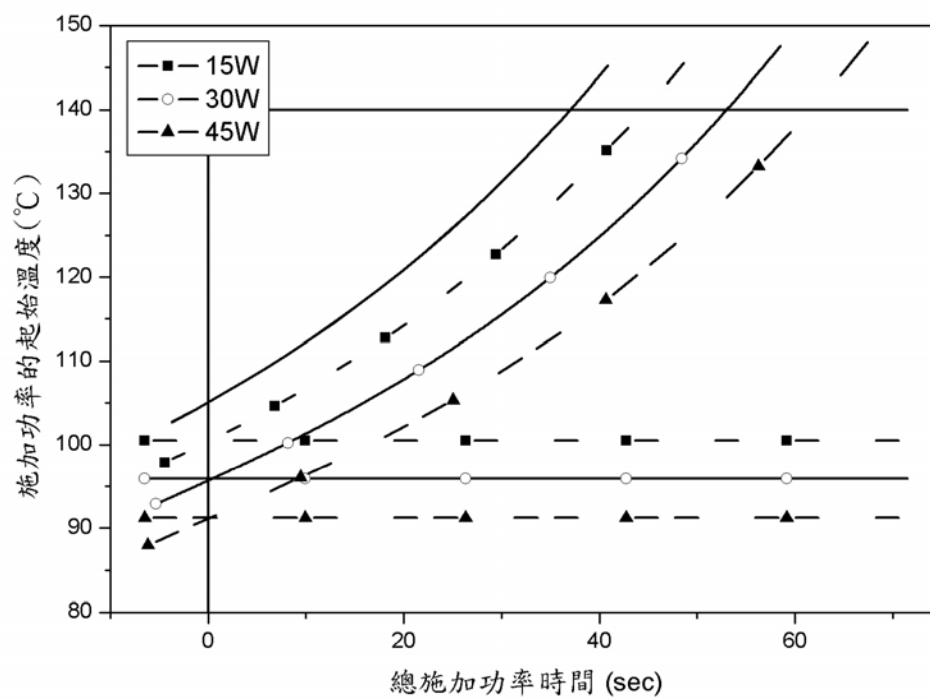
Region C：施加功率的起始溫度過低，無法使矽模仁表面達塑料之玻璃轉移溫度。

Region D：微加熱器的發熱作用恰可達釋除收縮應力的效果之範圍。

Line a：熱壓成形溫度 140°C，可隨熱壓成形溫度設定而偏移。

Line b：可使矽模仁表面再達塑料之玻璃轉移溫度的臨界線。

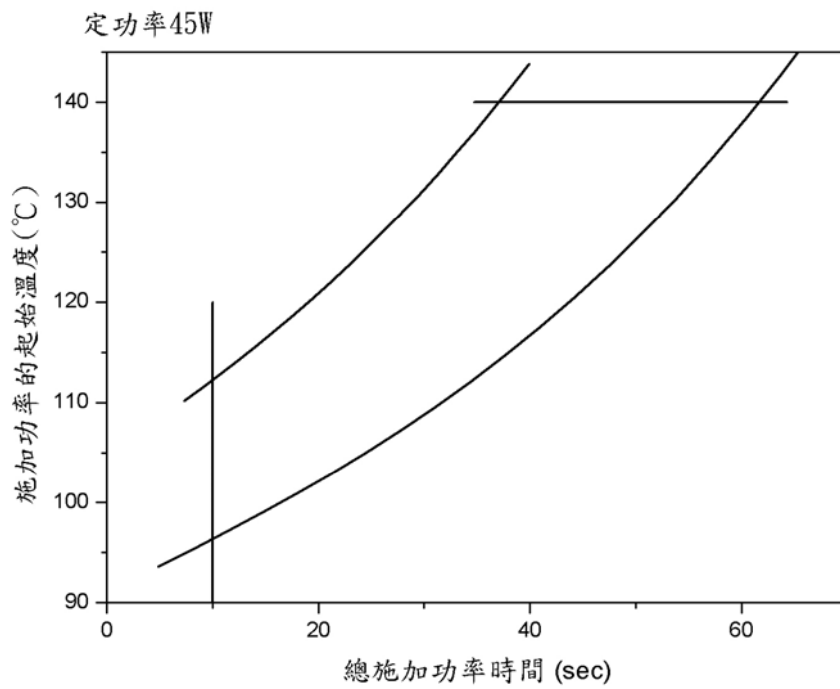
(a)



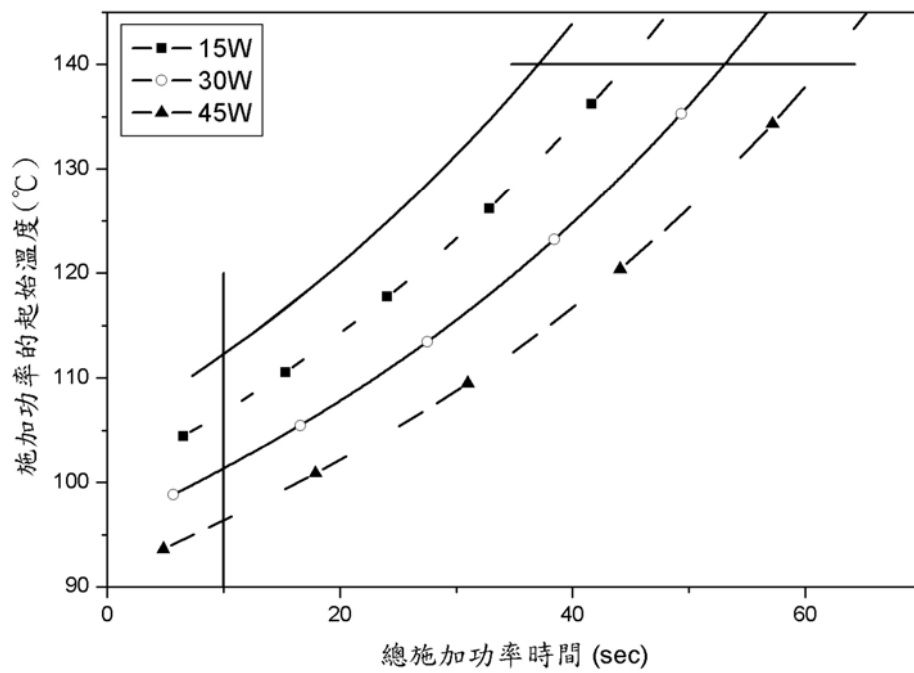
(b)

圖 3-19 微加熱器之操作窗(一)

(a)定功率 45W；(b)定功率 15W、30W、45W 的整合圖



(a)



(b)

圖 3-20 將總施加功率時間偏移 10 秒的微加熱器之操作窗(二)

(a)定功率 45W；(b)定功率 15W、30W、45W 的整合圖

第四章 熱應力模擬

4.1 收縮模擬的假設

在開始進行微結構的收縮模擬之前，為簡化模型與提高計算的運算速度，對脫模模擬做了以下一些在熱壓成形過程與脫模模擬模型上的條件設定：

1. 假設在熱壓成形階段，塑膠微結構完全充填進入具有微結構的矽模仁之中，且矽模仁的微結構並未在充填時受到壓擠而斷裂。
2. 在模型的建構上，使用平面應變(圖 4-1)的觀念，將三維的微結構(如圖 4-2 所示)以二維的型式做模擬，並且使用距離收縮中心不同長度的局部矽模仁與成形品之模型，假設在收縮過程中，模仁與成形品均對其中心產生收縮，模擬微結構在冷卻收縮過程的應力狀況。
3. 假設在收縮的過程中，溫度場的溫度變化並未受到結構場的收縮變化影響。且假設矽模仁與成形品在收縮過程中受到保壓與熱壓控制程式對模具的位置固定，模仁與成形品能永遠保持在接觸的狀態下。

4.2 模型的建構

在材料物性質的取得與決定上，由於成形與冷卻的過程中，成形的溫度與冷卻的溫度變化並未高到造成矽模仁產生材料性質上的變化，所以將矽模仁的各項材料性質設定為常數。但對玻璃轉移溫度為 105°C 的塑膠材料壓克力來說，這樣的溫度已使其產生了在力學之材料性質上的變化，性質介於彈性與流體之間，具有複雜流變行為的黏彈體，所以格來說，應在模擬的過程中將成形品設定為黏彈性材料才易獲得接近實際行為之結果，惟本研究因初次嘗試微熱壓之模擬，在考慮各方因素之下，初步先將材料以彈性體來予以處理，了解冷卻對夾持應力的影響。

實體模型的建構，共建立數種距離收縮中心不同長度(0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm)的局部矽模仁與成形品之模型，而微結構的大小設定為高 $8\mu\text{m}$ 、寬 $2\mu\text{m}$ 。然後輸入各種材料之材料性，並使用八節點、四邊形的結構元素 Plane82(圖 4-3)網格矽模仁，和使用模擬黏彈性材料的黏彈性元素網格化成形品，網格後的模型圖如圖 4-4。另外由於在冷卻的過程中，成形品與矽模仁之接觸的地方又會產生相對性的滑動行為，所以在相互接觸的表面上也加入了用來模擬各種接觸行為的接觸元素。最後給定邊界條件進行求解，探討在冷卻的過程中，成形品與矽模仁在冷卻時所受到的應力變化情形

4.3 邊界條件的設定

利用前一章的模具冷卻模擬的結果，藉由 ANSYS 程式內的數據擷取功能，以及溫度場與結構場耦合分析的功能，設定在冷卻收縮模擬的各種邊界條件：

1. 假設溫度場的溫度變化不受結構場的結構變化影響，將擷取到的溫度與間時的變化數據當成邊界條件，分別設定在成形品底部、成形品與矽模仁接觸面以及模仁底部。
2. 設定矽模仁與成形品在接觸面為接觸對(Contact pair)，使成形品收縮時在模仁的接觸面上產生水平滑動。同時在模仁與成形品的微結構上亦設定接觸對，使微結構產生滑動。
3. 假設收縮過程中，矽模仁與成形品均對中心產生收縮，所以在模仁與成形品的收縮中心設定只可垂直方向變形。

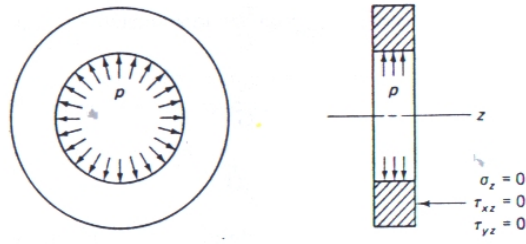
4.4 模擬結果

模擬的結果可以發現，由於成形品的熱膨脹係數與矽的熱膨脹係數不同，導致在冷卻過程中，塑膠微結構冷卻收縮而夾持矽模仁，造成成形品的微結構基部與矽模仁的微結構溝槽頂部有明顯的夾持應力存在。而這夾持應力值隨著距離收縮中心愈遠時會不斷的提升，且隨著冷卻到達的溫度愈低時也會愈大。圖 4-5、圖 4-6 為模擬後的結

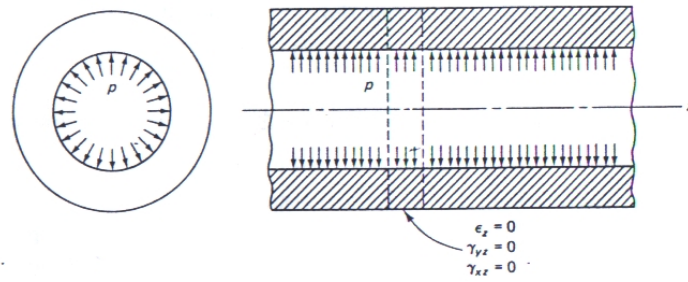
果。

然而，在成形與冷卻的過程中，因為成形溫度與冷卻溫度均有超過塑膠材料的玻璃轉移溫度，所以塑膠材料具有可流動的特性。倘若在這段過程中，成形品的微結構所受之夾持應力達到可使其產生偏移的力量時，成形品的微結構將有會偏移並且在新的偏移位置點上產生再接黏的現象。但是在低於玻璃轉移溫度後，未到達開模溫度前，如果成形的微結構所受之夾持應力超過其所能承受的最大抗拉強度時，則微結構就可能因此產生變形或是斷裂的可能。同樣地，對矽模仁的微結構溝槽來說，如果冷卻的溫度仍在塑膠的玻璃轉移溫度之上時，矽模仁可以因為其本身的強度比起融熔的塑膠來得高，所以可以承受比較高的夾持應力影響。但是當溫度低於玻璃轉移溫度之後，成形品固化，其強度比起在融熔狀態下時來得高，就可能因夾持應力的作用，在反複幾次的成形過後受損，降低了矽模仁的壽命。

另外，由於塑膠成形品因為超過了玻璃轉移溫度，在成形過程中，塑膠材料受壓力擠壓後的配向性(orientation)，以及在冷卻過程中，塑膠材料的結晶程度(crystallinity)，均有可能會造成模擬與實際所產生的夾持應力之結果不相等的可能。



(a) 平面應力



(b) 平面應變

圖 4-1 平面應力與平面應變 [29]

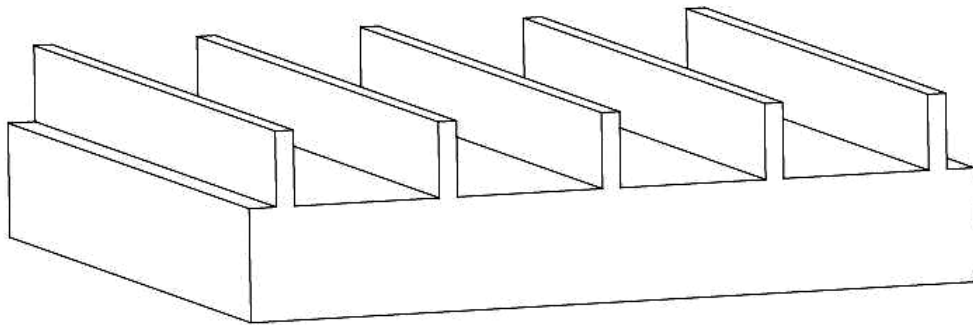


圖 4-2 微結構立體示意圖

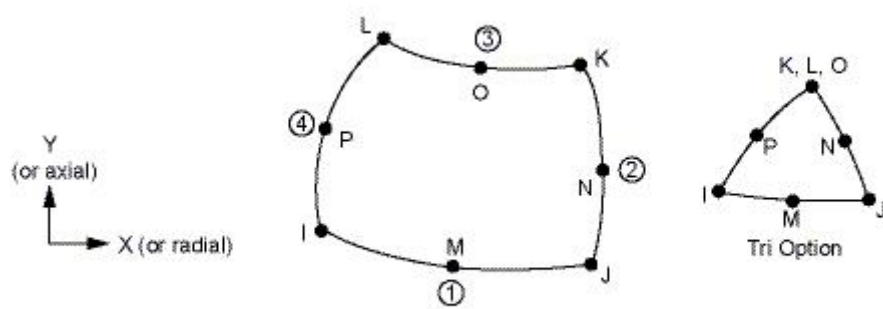


圖 4-3 八節點二維的結構元素 Plane82

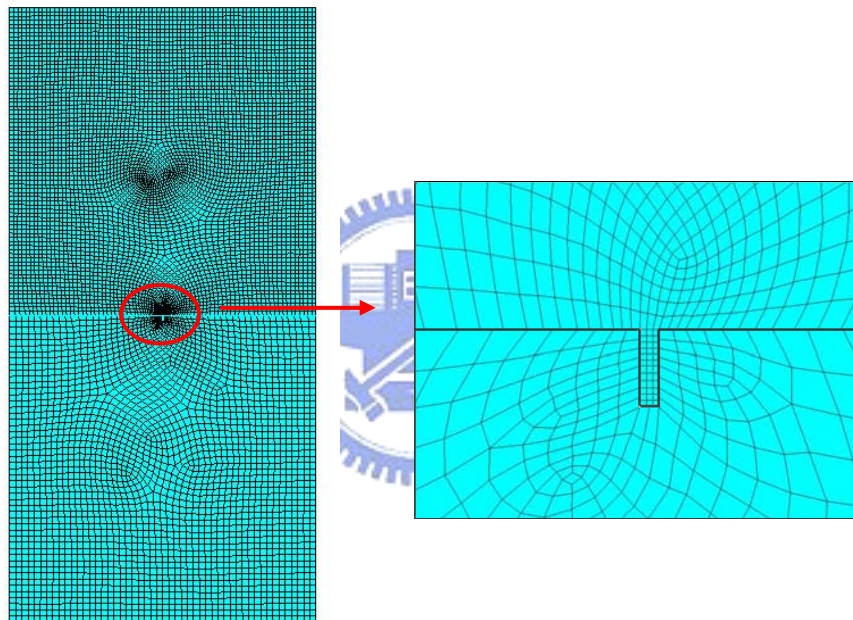


圖 4-4 網格化後的局部成形品與砂模仁圖

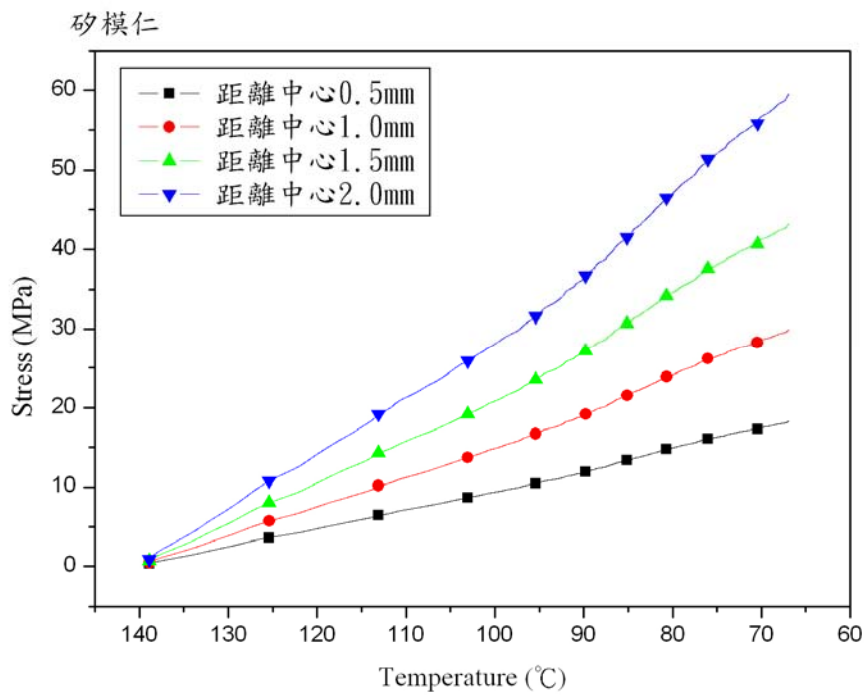


圖 4-5 矽模仁冷卻收縮應力變化

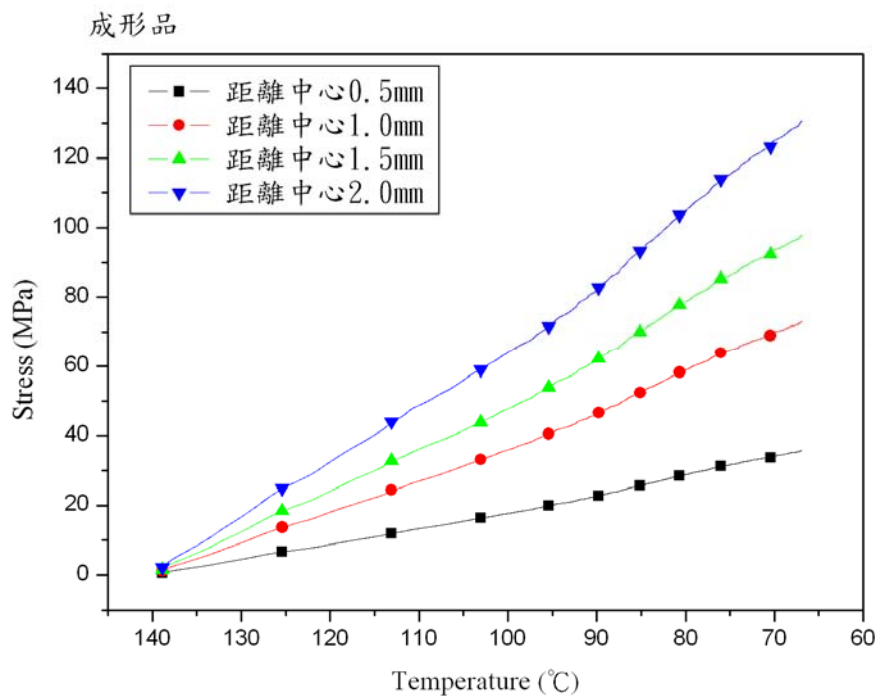


圖 4-6 成形品冷卻收縮應力變化

第五章 結論與建議

本研究對於微加熱器的通電發熱效果造成矽模仁與塑膠成形品溫度變化情形，以及微結構在冷卻過程中微結構的破壞行為進行數值模擬探討，並有了初步的了解。詳細研究結果已在前面各章裡就有討論與途述，在此歸納出具體的結論如下：

1. 在熱壓成形的冷卻過程中，透過對微加熱器施加功率，使模仁與成形品接觸的表面可產生升溫效果。隨著功率的提升，可產生的升溫效果也就愈明顯，配合使用適當的功率、加熱時間點(即施加功率時模具所對應的溫度)與總施加功率時間，可使得成形品在冷卻過程中充分釋除塑膠微結構的殘餘應力。
2. 由於塑膠的熱膨脹係數($70 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$)相對於矽的熱膨脹係數($2.46 \times 10^{-6} \sim 3.61 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}^\circ\text{C}$)來得高許多，導致塑膠微結構冷卻收縮而夾持矽模仁，造成成形品與矽模仁的微結構產生夾持應力。隨著距離收縮中心愈遠，夾持應力也會愈大，嚴重的話，甚至會發生成塑膠微結構或矽模仁微結構斷裂或破損的缺陷。
3. 本研究模擬結果可提供實際微成形時的各項參數設定的參考，且已被證實非常有用。

有了上述的結論，為了使模擬結果更能實際應用在實際中，以及在幾個量測實驗的過程所遭遇的困難與現象，提出了以下幾項建議：在模擬方面：

1. 在溫度與熱應力的模擬裡，材料的材料性質均是使用一般通用的壓克力材料當做設定，難而對於其性質與實驗裡所使用的材料是否相符成了一大疑問。如果透過材料實驗[30]，將熱壓實驗所使用的壓克力材料性質與力學特性一一求出，然後再代入有限元素軟體以使模擬結果更為正

確。

2. 在溫度模擬的部分，將網格尺寸變小，增加網格密度，並且以六面體的網格取代目前所使用的四面體網格，而且將每次暫態的時間增加量縮小，提高模擬的結果正確性。
3. 在熱應力模擬部分，由於探討塑膠材料由成形溫度降溫到開模溫度的冷卻過程之熱應力變化屬於一種非線性的材料分析，可將冷卻的溫度變化範圍分段，考慮結構場與溫度場的交互影響。

在實驗方面：

1. 掌控完成後的矽模仁品質，例如：微結構的大小與深寬比、微加熱線路的阻值。另外就是改善晶片表面微加熱線路導通的問題，使在通電壓後，電流能確實走在設計的加熱線路上。
2. 在決定給予微加熱器的功率大小、發熱時間點與發熱時間長短前，除了可先應用模擬的方式對結果做出初步的了解外，同時也要積極開發在矽模仁表面上的溫度感測器，使實驗的參數更能明確以獲得最佳的成形結果。
3. 在微加熱器通電的過程中，微加熱器會隨著溫度的變化而產生功率的變化，因此在實驗的設備上將可考慮加裝一個功率回饋裝置，使功率能保持在一定。

畢竟模擬只是一個工具，在於提供實驗者能對實驗的結果有初步的了解。然而，如果當模擬結果愈能與實驗結果愈接近時，這將對後續繼續研究的人來說，無疑是件好事，並且更可以將模擬時所製做出的微加熱器操作窗拿來實際應用，徹底將操作範圍區以實驗後的成形結果再做更細微的畫分。

參考文獻

- [1] 黃楓台，二十一世紀科技趨勢報告－奈米與微機電，行政院國家科學委員會科學技術資料中心，民國九十一年二月。
- [2] Tai-Ran Hsu, “MEMS and microsystems : design and manufacture”, McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] 伍秀菁，汪若文，林美吟，微機電系統技術與應用，行政院國家科學委員會精密儀器發展中心，民國九十二年七月。
- [4] Yoshihiko Hirai, Satoshi Yoshida, Nobuyuki Takagi, “Defect analysis in thermal nanoimprint lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.21, pp.2765-2770, 2003.
- [5] M. Hecke, W. Bacher, K. D. Muller, “Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures”, Microsystem Technologies, Vol.4, pp. 122-124, 1998.
- [6] Holger Becker, Ulf Heim, “Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures”, Sensors and Actuators, Vol.83, pp. 130-135, 2000.
- [7] L. Lin, C.J. Chiu, W. Bacher, M. Hecke, “Microfabrication using silicon mold inserts and hot embossing”, Micro Machine and Human Science, pp. 67-71, 1996.
- [8] Stephen Y. Chou, Peter R. Krauss, “Imprint lithography with sub-10nm feature size and high through”, Microelectronic Engineering, Vol.35, pp. 237-240, 1997.
- [9] M. Worgull, M. Hecke, “New aspect of simulation in hot embossing”, Microsystem Technologies, Vol.10, pp. 432-437, 2004.
- [10] Yoshihiko Hirai, Takashi Yoshikawa, Satoshi Yoshida, “Simulation and experimental study of polymer deformation in nanoimprint lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.22, pp.3288-3293, 2004.

- [11] N. Huber, Ch. Tsakmakis, "Finite element simulation of microstructure demolding as part of the LIGA process", *Microsystem Technologies*, Vol.2, pp. 17-21, 1995.
- [12] Y.C. S, J. Shah, L. Lin, "Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding", *J. Micromech. Microeng.*, Vol.14, pp. 415-422, 2004.
- [13] L. Yu, G. Xu, L. J. Lee, K. W. Koelling, "Experiments and simulation of injection molding with microstructures", *AIP Conf. Proc.*, Vol.712, pp. 186-191, 2004.
- [14] MatWeb, <http://www.matweb.com>.
- [15] WATLOW, "WATLOW HEATERS".
- [16] Brandrup, J. & Immergut, E. H. ed., "Polymer handbook", John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [17] 蘇濬賢，微機電系統化的模仁及其配套熱壓成形技術的開發，國立交通大學碩士論文，2005。
- [18] 陳劉旺，丁金超，高分子加工，高立圖書有限公司，民國八十六年十二月。
- [19] R. J. Young and P. A. Lovell, "Introduction to Polymers", Chapman & Hall, 1991.
- [20] 科盛科技著，CAE 模流分析技術入門與應用/一天學會 Moldex3D 模流分析軟體，全華科技圖書股份有限公司，民國九十一年十一月。
- [21] 劉士榮，高分子流變學，第二版，滄海書局，民國九十四年二月。
- [22] 王玉忠，鄭長義，高聚物流變學導論，四川大學出版社，民國八十二年七月。
- [23] Saeed Moaveni, "FINITE ELEMENT ANALYSIS THEORY AND APPLICATION WITH ANSYS", second edition, Prentice Hall, 2003.

- [24] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer, fifth edition”, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [25] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr., John T. DeWolf., “Mechanics of Materials”, fourth edition, McGraw-Hill Higher Education, Boston, 2006.
- [26] 林威宇，動態壓力控制對微結構熱壓特性的影響暨加工過程中聚丙烯的結晶特性的初步探討，國立交通大學碩士論文，2003。
- [27] 張哲豪，流體微熱壓製程開發研究，國立台灣大學博士論文，2004。
- [28] ANSYS Analysis System User Guide Documentation, Version 9.0, 2004.
- [29] T.R. Chandrupatla, A. D. Belegundu, “Introduction to Finite Elements in Engineering”, Prentice-Hall, New Jersey, 1991.
- [30] 林佳榮，聚合物熱壓成形之有限元素分析研究，國立交通大學博士論文，2003。

