

國立交通大學

機械工程學系

博士論文

光硬化樹脂 SL 模具於射出成形的  
脫模特性與流動行為研究



Study on Demolding Characteristics and Flow Behavior of  
Stereolithography Mold in Polymer Injection Molding

研究生：安超群

指導教授：陳仁浩 教授

中華民國九十七年一月

光硬化樹脂 SL 模具於射出成形的

脫模特性與流動行為研究

Study on Demolding Characteristics and Flow Behavior of  
Stereolithography Mold in Polymer Injection Molding

研究生：安超群  
指導教授：陳仁浩

Student : Chao-Chyun An  
Advisor : Ren-Haw Chen

國立交通大學



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Doctor of Philosophy  
in

Mechanical Engineering

January 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年一月

# 光硬化樹脂 SL 模具於射出成形的脫模特性與流動行為研究

研究生：安超群

指導教授：陳仁浩

國立交通大學機械工程研究所

## 摘要

本論文是以光硬化樹脂 SL(Stereo-lithography)材料製作之快速模具，應用於塑膠射出成形為探討對象，內容包括 SL 模具的脫模特性與模穴內的材料流動行為研究。利用光硬化方法所製作的射出成形用 SL 模具的缺點是，模具之強度、熱傳導性與耐磨耗性不及金屬模具；根據過去的研究發現，模具壽命約在百模以下，而且模具之破壞多在成形脫模時發生。因此，本研究設計製作一套模擬保壓與冷卻狀況的壓縮實驗裝置，而以射出成形時的溫度、壓力與冷卻時間為實驗參數，進行脫模特性實驗，調查脫模力與模具表面粗度的變化，用以分析 SL 模具的破壞機制，以作為延長使用壽命及模具壽命評估的參考。實驗結果發現脫模力之大小與模溫、保壓與冷卻時間有關。而且 SL 模仁的表面粗糙度不至於因脫模次數的增加而有太大的變化。

對於 SL 模具中的高分子材料流動及缺陷生成特性研究，設計了基本的長直平板狀流路，以實際射出充填來實驗模擬各種條件下平板流路內的材料流動狀況。此 SL 模仁流路射出成形研究，係針對高分子材料流變特性且著重於充填、保壓與冷卻參數的探討，且藉由壓力分布量測，據以分析材料內部的剪切應力特性。另一方面，對充填後成品試片，觀察是否有融合線或流痕等缺陷生成，進行分析，以作為將來 SL 模仁薄流路射出成形模具設計及成形條件的參考。實驗與分析結果證實，射速低、模溫低時易生成流痕現象；對射出後成品試片之表面粗度量測值分析發現提高模具溫度與射出速度，將會改善射出成品的表面粗度。而對於 SL 模具的熱傳導性不佳與溫度分布不均，造成的殘餘熱應力，可以從射出成品試片的光彈相片得到驗證。對模穴壓力影響方面，改變射出壓力、塑料溫度與模具溫度有明顯的影響。

# Study on Demolding Characteristics and Flow Behavior of Stereolithography Mold in Polymer Injection Molding

Student : Chao-Chyun An

Advisors : Dr. Ren-Haw Chen

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

This dissertation is concerned with the demolding characteristics and flow behavior of Stereolithography(SL) mold in polymer injection molding. The drawbacks of SL mold are that the tool strength, thermal conductivity and erosion resistance are lower than those of the conventional metal mold. Previous study has shown that the SL tool life was limited under 100 shots and tool damage often occurs during part ejection. In this study, a compression test fixture was designed to simulate hold pressure and cooling conditions in the injection process. The experiments were performed using various cooling time, hold pressure and temperatures. The demolding force and surface roughness were measured to evaluate tool life and failure mechanism. The experimental results showed that the demolding force has close relation with cooling time and mold temperature. The surface roughness of the SL mold plate does not change dramatically with the increase of the demolding times.

As to the defects of injection molded parts, there exists weld line, flow mark and solid skin. Flow behavior of polymer in thin wall cavity is investigated by the injection molding on flow channel of SL mold. The experiments were performed with various process parameters to investigate the defects occurrence in the injection molded parts. Moreover, the injection molded parts were examined whether the defects occurred and analyzed as the reference for the future SL mold design. The experimental results showed that defects occurrence has close relation with injection speeds and mold temperatures. Flow marks of SL mold occur more easily when the mold temperature and the injection speed are low. There was no significant change on surface roughness of SL mold insert after injection molding. By increasing the mold temperature and the injection speed, the surface roughness of the molded part can be improved. The CAE mold flow analysis and results of pressure distribution measurement results indicate that the injection pressure, melt and mold temperature have substantially effect on cavity pressure and shear stress.

## 誌 謝

感謝恩師陳仁浩教授，在博士班求學期間的耐心教誨與指導，不僅在論文研究方向與題目給予引導、實驗的設計及規劃、實驗結果的解析，乃至期刊或會議論文的投稿，以及最後論文的撰寫及修正等，均付出全心的關懷，讓我順利完成博士學業，在此謹獻上我最誠摯的謝忱。

此外，感謝論文口試委員清華大學陳楚驤教授、中興大學陳昭亮副教授、臺灣科技大學陳炤彰副教授及本系洪景華教授等師長，於論文口試時提供許多寶貴的意見與指正，使論文能更臻完善。實驗室的學弟安誠、明初、兆珉、振銓、威宇、濬賢、沛原、智翔和聰連等，謝謝他們在模具設計加工與實驗各方面的幫助。亦感謝神基科技公司產品造型中心總監何勝雄先生於研究期間在SL模仁製作上給予的協助。

還要在此感謝前工研院航太中心經理吳以正博士、中心主任林渝寰博士的鼓勵與推薦，才能順利考取本校博士班。

還有，感謝父親安長榮、母親胡玉蘭的愛與關心，特別感謝妻子純人在研究期間默默的支持，使我無後顧之憂！也謝謝親愛的孩子安怡、安雯陪我走過這漫長的研究道路。最後，感謝上帝賜給我智慧與信心，得以完成博士論文。

# 目 錄

	頁次
中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻回顧	3
1.3 研究動機與目的	6
1.4 研究方法	7
第二章 快速成形與快速模具技術	12
2.1 快速成形技術	12
2.2 快速模具技術	15
2.3 RP/RT 未來展望	18
第三章 光硬化樹脂 SL 模具之脫模特性	27
3.1 導論	27
3.2 實驗材料與設備	28
3.2.1 實驗材料之選定	28
3.2.2 實驗設備	29
3.3 實驗方法與參數	30
3.4 量測設備及方法	31
3.4.1 脫模力之量測	31
3.4.2 表面粗度量測儀	32
3.5 SL 模具的脫模力與模具破壞之分析	33
3.5.1 成形參數之影響	33
3.5.2 熱性質的影響	35
3.5.3 SL 模具的設計	36
3.5.4 結果討論	37
第四章 SL 模具中的材料流動及缺陷生成特性	49
4.1 簡介	49
4.2 流變理論	50
4.2.1 黏度與溫度壓力的關係	51

4.2.2	流動分析.....	52
4.3	實驗設計.....	53
4.3.1	模具設計.....	53
4.3.2	壓力量測法.....	54
4.4	實驗設備與材料.....	56
4.4.1	射出成形機.....	56
4.4.2	壓力感測器.....	56
4.4.3	資料擷取系統.....	57
4.4.4	實驗材料.....	57
4.5	實驗方法與參數.....	58
4.5.1	射出成形缺陷生成實驗.....	58
4.5.2	壓力分布量測實驗.....	59
4.5.3	實驗進行方式.....	60
4.6	模擬分析.....	61
4.6.1	模擬分析流程.....	61
4.6.2	模流分析設定與結果.....	62
4.7	SL 模具內的壓力分佈特性.....	63
4.7.1	射出成形參數之影響.....	63
4.7.2	溫度的影響.....	64
4.8	SL 模具內的缺陷生成.....	65
第五章	結論與建議.....	93
5.1	結論.....	93
5.2	未來研究建議.....	94
參考文獻	.....	96
附錄一	SL 5510 材料性質表.....	101
附錄二	著作目錄.....	104

## 表 目 錄

	頁次
表 1.1	SL 模具射出成形參數表.....3
表 1.2	RTTB 射出成形研究結果.....5
表 1.3	金屬模仁與 SL 模仁之比較.....7
表 2.1	著名 RP 系統發展史.....14
表 2.2	射出成形及測試結果.....18
表 3.1	CIBATOOL SL 5510 樹脂性質.....28
表 3.2	ACES 樹脂成型參數.....29
表 3.3	精密熱壓機規格.....30
表 3.4	熱壓實驗參數.....31
表 4.1	射出成形機規格.....56
表 4.2	壓力感測器規格.....57
表 4.3	PP 與 PC 材料物性.....58
表 4.4	缺陷生成實驗參數.....59
表 4.5	壓力量測實驗參數.....60
表 4.6	流痕產生的實驗結果.....67

## 圖目錄

	頁次
圖 1.1 SLA 工作原理.....	9
圖 1.2 液態光硬化樹脂固化機制.....	9
圖 1.3 RP 技術原理.....	10
圖 1.4 階梯效應(Stair-stepping effect).....	10
圖 1.5 SL 複合模具(Direct AIM™ Tooling).....	11
圖 2.1 快速成形基本原理.....	20
圖 2.2 RP 加工流程.....	20
圖 2.3 STL 所繪製的圖形.....	20
圖 2.4 以右手定則規定之 STL 平面.....	21
圖 2.5 違反頂點接頂點規則無法構成 STL 模型.....	21
圖 2.6 (a) SLA 系統 US Patent4575330.....	21
圖 2.6 (b) SLA 系統加工示意圖.....	22
圖 2.7 SGC 系統加工示意圖.....	22
圖 2.8 FDM 系統加工示意圖.....	23
圖 2.9 3DP 系統加工示意圖.....	23
圖 2.10 SLS 系統加工示意圖.....	24
圖 2.11 LOM 系統加工示意圖.....	24
圖 2.12 快速成形技術應用.....	25
圖 2.13 快速成型精密鑄造.....	25
圖 2.14 樹脂射出成型模具.....	26
圖 2.15 SL 複合模具.....	26
圖 2.16 燒結碳化 RP 薄層(Seed layer 黑色部分).....	26
圖 3.1 樹脂成形參數說明.....	38
圖 3.2 整個保壓—脫模特性實驗的系統架構.....	38
圖 3.3 (a)壓縮實驗裝置示意圖.....	39
圖 3.3 (b)壓縮實驗裝置.....	39
圖 3.4 成形脫模實驗流程圖.....	40
圖 3.5 脫模力量測結果圖.....	41
圖 3.6 表面粗度量測儀.....	41
圖 3.7 校正用標準試片.....	42

圖 3.8	保壓與脫模應力關係.....	42
圖 3.9	錨定或黏固效應(anchor effect) .....	43
圖 3.10	界面黏著(Interfacial adhesion)的分類.....	43
圖 3.11	保壓時間與脫模應力關係.....	44
圖 3.12	模溫與脫模應力關係.....	44
圖 3.13	冷卻時間脫模應力關係.....	45
圖 3.14	表面粗度量測(a)無施用脫模劑 (b)施用脫模劑.....	45
圖 3.15	在不同溫度下 SL 材料壓縮應力與應變曲線.....	46
圖 3.16	脫模應力與 SL 模具材料的降服應力比較(a)脫模應力(x100 倍)與模 具材料的降服應力隨溫度的變化(b) 脫模應力對模具材料的降服 應力比值之變化.....	46
圖 3.17	(a)模壁表面材料的剝離(b) 模壁表面變粗糙.....	47
圖 3.18	脫模次數與表面粗度變化.....	47
圖 3.19	冷卻時間對脫模應力對模具材料的降服應力比值之變化.....	48
圖 3.20	SL 模板與固定孔破壞情形.....	48
圖 3.21	SL 模板在模座上的固定方法.....	48
圖 4.1	射出成形原理.....	68
圖 4.2	噴水流模式.....	68
圖 4.3	流動不平衡模式造成表面缺陷.....	68
圖 4.4	理想型牛頓流體受剪切應力之變形示意圖.....	69
圖 4.5	非理想型牛頓流體之剪切應變率和剪應力關係.....	69
圖 4.6	(a)無限平板間之剪切流動平衡(b)二維平形板剪流示意圖.....	70
圖 4.7	SL 模具之模穴鑲塊與流路關係示意圖.....	70
圖 4.8	SL 模具之外觀.....	71
圖 4.9	壓力感測器之實際配置.....	71
圖 4.10	射出成形件(a)3D 圖形與(b)尺寸.....	72
圖 4.11	壓力感測器之配置.....	73
圖 4.12	典型模穴壓力時序圖.....	73
圖 4.13	德國 ARBURG 270S 型號之射出成形機.....	74
圖 4.14	壓力感測器 PT465XL-10M 外觀尺寸.....	74
圖 4.15	射出塑件網格元素圖.....	75

圖 4.16	射出塑件與冷卻水管實體模型.....	75
圖 4.17	(a)SL 模具流動波前圖(b)金屬模具流動波前圖.....	76
圖 4.18	(a)SL 模具溫度分布圖.....	77
圖 4.18	(b)金屬模具溫度分布圖.....	78
圖 4.19	(a)SL 模具模穴壓力曲線圖(b)金屬模具模穴壓力曲線圖.....	79
圖 4.20	Excel 軟體顯示之模穴壓力曲線圖.....	80
圖 4.21	模穴內的壓力分佈.....	80
圖 4.22	改變射出速度之壓力分佈圖.....	81
圖 4.23	改變射出壓力之流路壓力分佈圖.....	81
圖 4.24	(a)改變保壓時間之壓力分佈圖(b)保壓時間的影響比較.....	82
圖 4.25	改變塑料溫度之模穴壓力分佈圖.....	83
圖 4.26	改變模具溫度之模穴壓力分佈圖.....	83
圖 4.27	SL 模具之流痕外觀.....	84
圖 4.28	(a)典型射出件(b)流痕區(c)明亮區.....	85
圖 4.29	金屬模之模擬壓力分佈圖.....	85
圖 4.30	射出件之尾端產生波紋(ripples).....	86
圖 4.31	波紋缺陷的產生模型[C-mold Design Guide].....	86
圖 4.32	SL 模具之模擬壓力分佈圖.....	87
圖 4.33	翻滾流痕生成模型(Go-over flow mark generation model).....	87
圖 4.34	SL 模具射出件之光彈相片與模流分析之溫度分布比較.....	88
圖 4.35	金屬模具射出件之光彈相片與模流分析之溫度分布比較.....	89
圖 4.36	(a)不同射速 10 cm <sup>3</sup> /sec, 30 cm <sup>3</sup> /sec, 50 cm <sup>3</sup> /sec 的流痕變化(b)不同射速流痕顯微照相 10 cm <sup>3</sup> /sec (c) 30 cm <sup>3</sup> /sec.....	90
圖 4.37	不同模溫的流痕顯微照相(a) 40 °C(b) 60 °C.....	91
圖 4.38	不同射速時之表面粗度變化.....	92
圖 4.39	模溫不同時之表面粗度變化.....	92

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

快速成形(Rapid Prototyping, 簡稱 RP)是一種利用積層增料(Layer Additive)方法,將材料由下往上(或由上往下)層層堆疊出各層輪廓(Profile)以產生實體形狀的加工技術,而有別於一般傳統切削之去除材料加工(Subtractive Fabrication)的方法。

最早 RP 概念是 1980 年代由日本 Kodama 先生提出的光造形技術論文 [ 1 ],發表在 Reviews of Scientific Instruments 期刊上,第二位是美國 3M 公司的 Alan J. Herbert (1982)發表的實體成形“Solid Object Generation”論文[ 2 ]。而在 1986 年美國 Charles W. Hull 完成了一個能自動製造 3D 零件的完整系統,稱為 Stereo-Lithography Apparatus (SLA),並且獲得專利[ 3 ],這是 RP 發展的一個重要里程碑。接著由美國 3D Systems 公司在 1987 年將此技術商品化成為 SLA -1 機器,在底特律 AutoFact 展覽上正式發表,這是世界上第一台的商業化快速成形機。

SLA 工作原理是以液態光硬化樹脂(Photo-curing Polymer)為基本材料,利用雷射光照射達到固化,生成厚度約 0.1mm 薄層,未被照射處仍保持液態,依此方式層層堆疊出實體形狀,而殘留之液體可輕易去除,如圖 1.1 所示[ 3, 4 ]。有關光硬化樹脂的固化機制模型(Curing mechanism model),如圖 1.2 所示,當雷射光照射到樹脂表面時,樹脂固化區域將成為子彈般的形狀,而且雷射光的強度決定反應的程度與子彈形狀的大小。若定義固化深度(Cure depth)為  $C_d$ ,則工作曲線方程式(Working curve equation)可表示如下:

$$C_d = D_p \ln(E_{\max}/E_c) \quad (1-1)$$

其中,  $D_p$  為雷射光穿透深度(The depth of penetration),  $E_{\max}$  為雷射光照射到

樹脂表面最大能量(The power of laser at resin surface)， $E_c$  為樹脂臨界曝光量 (Critical Exposure)。

分析 RP 的技術原理乃是利用層加工之概念，說明如圖 1.3 所示之 x-y-z 座標系統上的增料加工。將一種能量源(Energy Source)掃描在材料表面，該表面與 x-軸及 y-軸組成的平面平行，而且掃描方向即為 x-軸方向；而 z-軸垂直於掃描方向，即成為材料疊層，其中最重要的參數即為層厚度(Layer Thickness)，通常是 0.075mm~0.250mm。此層厚度即是造成 RP 最為常見的“階梯效應”(Stair-stepping effect)，如圖 1.4 所示，尤其在曲面(Curved surface)時特別明顯。所以，這些座標軸十分重要，可以表達不同的材料性質，例如：降服強度與表面特徵，一般而言，RP 的材料性質是有方向性(Anisotropic)且強度減弱在 z-軸方向上。

早期 RP 應用，由於材料強度較差、表面粗糙，多被當作產品開發的原型(Prototype)，包括有造形展示、設計確認、功能測試...等等，目前因 RP 技術漸趨成熟，已廣泛應用於工業產品雛型，成為產品開發階段最佳的工具[5]。

近年來台灣資訊電子、3C 類及汽機車開發新產品速度很快，且塑膠零件比例愈來愈高，所以模具業蓬勃發展，已躍居世界重要模具生產國之一，例如著名的鴻海精密工業公司，即是以精密塑膠模具起家，成為世界級 3C 電子產品大廠。在先進電腦輔助設計及製造 3D CAD/CAM 與 RP 技術發展下，塑膠產品開發業者如何在最短時間及低成本下爭取訂單，快速模具(Rapid Tooling, RT)技術應運而生。

快速模具是應用 RP 材料特性，快速翻製暫用模具或永久模具；依模具製造法，一般可分為：直接造模法(Direct tooling)與間接造模法(Indirect tooling)，故為滿足新產品開發之小量快速生產及製模的需求，本研究即是應用直接造模法以立體光刻成形(Stereo-lithography, SL)材料製作的塑膠射出成形模具為探

討對象。

## 1.2 文獻回顧

1996年，美國 3D Systems 公司為推廣 SLA 技術在快速模具應用，開發 Direct AIM™ Tooling 及 3D Keltool 模具[ 6, 7]，將 RP 不再侷限於少量產品之原型製作，而跨入生產百件甚至於千件或萬件塑膠原型產品，正式將 RP 產業帶入快速模具 RT 的新領域。

其中”Direct AIM™ (ACES Injection Molding)”實際應用是利用立體光刻成型 SL 技術製作公母模仁(Core/Cavity)原型，其模仁厚度 1.5~2.0mm，並且以含金屬粉樹脂為公母模仁背材，組合標準模座成為複合模具（圖 1.5），作為塑膠射出成形模具。該研究建議的射出成形參數如表 1.1 所示[ 6]，相較於使用傳統金屬模具的射出成形，SL 模具的適用射出壓力較低，而且所需的冷卻時間較長。

表 1.1 SL 模具射出成形參數表

Parameter/Material	LDPE	HDPE	PS	PP	ABS
Injection Pressure (MPa)	11	16	17	13	22
Injection Temperature (°C)	180	220	200	205	240
Cycle Time (Mins)	3.5	4.5	4.0	4.0	5.0

但是，該模具亦有下列幾項缺點：熱傳導性差、機械強度不佳、耐磨耗性不良，所以經射出測試結果，模具壽命大約在 200 模以下。而在射出成品尺寸精度測試結果(200 模)發現： 99%量測值在±0.005 inch (0.127mm)平均值以內，95%量測值在±0.003 inch (0.076mm)平均值以內，而 85%量測值在±0.002 inch (0.050mm)平均值以內，正是符合一般塑膠射出生產成品的尺寸精度範圍標準

之內 $\pm 0.002$  inch (0.050mm)。因此，SL 複合模具(SL Composite Tooling)被視為小量生產塑膠原型的一種快速模具。

其後 1997 年，在英國 University of Nottingham 的 P.M. Dickens 等人之研究團隊，對於 SL injection mold tooling [ 8, 9 ]有一系列的案例研究，內容主要是 SL 模具的強度與破壞分析(Failure analysis)。最大次數之塑膠射出成形結果至 200 模後，模具破壞。其中射壓與射溫對模具破壞影響較大。在所有的射出成形實驗中，模穴(cavity)從未破壞而公模模仁(core)在射出或頂出時產生破壞。

而英國 De Montfort University 的 Neil Hopkinson 等人之 Rapid Manufacturing Group (RMG)在 Direct AIM™ Process 也有一系列的研究，探討不同射出材料、頂出力量(Ejection force)及成品形狀精度等[ 10 ]。基於 Dr. Jacobs[ 7 ]的研究，SL 模具破壞多發生在脫模時期，故射出成形實驗設計出兩種頂出方法，包括頂出墊 (ejector pad)與傳統頂出銷(ejector pin)。綜整實驗結果發現：頂出力量之理論計算值與實驗值接近，頂出墊比傳統頂出銷的頂出力為大，而且冷卻時間愈長頂出力較大。

在美國方面喬治亞理工(Georgia Institute of Technology)的 RP&M 學院，有一 RTTB (Rapid Tooling TestBed)計畫，對於 SL 快速模具應用研究，發表了許多相關論文[11-13]，有熱應力分析、破壞分析等研究。其中 Colton 等人的熱影響分析[12]，探討了 SL 模仁(Mold insert) 在射出成形時受熱的影響，其模仁厚度 3.8mm，實驗結果顯示，射出 10 模後模溫達到穩態之 73°C，故建議模溫保持在 50~70°C；而頂出力量隨射出次數增加而降低，引起另一發現，SL 模仁固化(Cure)愈完全，頂出力愈低，故建議欲提高模具壽命，SL 模仁需要加熱固化(Cure)愈完全，以 UV 光照射 1 小時和加熱 150°C 達 30 分鐘為最佳的條件。另外，Colton 等人的破壞分析[13]，探討 SL 模具在射出成形之理論模型分析與實驗結果，該研究提出一類似懸臂樑的模型，以有限元素分析驗證基本

應力公式( $\sigma=Mc/I$ )與脫模力公式( $F_{Ejection}$ )，並實際射出成品量測值以比較，發現理論與實驗結果良好誤差在 10%以內。有限元素熱分析與應力分析提供一個溫度預測方法，因溫度會降低模具機械性質，故玻璃轉移點溫度( $T_g$ )是一個關鍵溫度， $T_g$  以下為脆性表現(Brittle fracture)，例如脫模時，模具溫度因冷卻降低；而  $T_g$  以上為降伏表現(Yield stress)，例如射出時，模具表面溫度達 120°C。最後，該 RTTB 實驗計畫，對於 SLA 模仁的高分子材料射出成形部分的研究結果，綜整列表如表 1.2 所示：

表 1.2 RTTB 射出成形研究結果

項目	模具結果(如何降低破壞,提高射出次數)
拔模角(Draft Angle)	較大
製程參數	低壓、長冷卻時間
Height Ratio	低比值
深寬比(Aspect Ratio: L/t)	高比值

其他，還有美國 M. Geiger 等人的 SL 模具之開發應用研究[14]，以 SL 樹脂製作厚度 1.5~2.0 mm 的模仁，低熔點合金為模仁背材，埋入銅管冷卻水路，組合標準模座成為射出模具，以驗證快速模具之可行性。

美國 Yun Li 等人的 SL 模具之熱特性研究[15]，分為兩部分。第一部分：設計六種形式模仁，包括(1)熱傳導率 0.2W/mK 的 SL 模仁，(2) 1.2W/mK 的 SL 薄殼模仁含 60%金屬粉樹脂為背材，(3)噴塗金屬鍍層的 SL 模仁，(4)具冷卻流路的 SL 模仁，(5) SL 模穴配合鋁上模仁，及(6) 250W/mK 的純鋁模仁。實際射出 PP 塑膠材料，試片尺寸 82.5mm\*25.4mm\*2.54mm，分別以熱電偶量測模穴溫度，得到溫度-時間曲線，分析實驗結果發現：除純鋁模仁外，具冷卻流路的熱傳效率最好。第二部分：驗證複雜幾何形狀與生產用模具實驗，冷

卻時間分別為 24, 48, 99 秒，發現冷卻時間長射出件品質較好，而比較射出件變形(收縮與翹曲)，發現 SL 薄殼模仁品質精度較佳。

在 SL 模具的模擬分析研究方面，有 Aluru 等人提出 Three-step simulation 方法[16]，利用 IDEAS、Moldflow 套裝軟體進行射出成形流動分析、有限元素結構分析及變形(Distortion)分析，以平板與複雜形狀兩種模型做變形分析，並且與 Yun Li 等人的實驗結果[15]比對發現有合理的結果。

最近的研究，則是英國 R.A.Harris 等人對於 SL 射出成形品之收縮量(Part shrinkage)的分析與研究[17,18]，研究中設計了桿狀與圓盤狀兩種試片模仁，使用射出材料為 PA66 與 ABS，模仁材料分別為 SL 與 AL(鋁)。實驗結果發現：PA66 收縮量在使用 SL 模仁時約兩倍於使用 AL 模仁者，而 ABS 的收縮量在使用不同模具下之差異較不明顯。推測乃因 PA66 為結晶類(Crystalline)材料，而 ABS 為非定型(Amorphous)材料之故。

綜合上述文獻，過去對於 SL 模具的研究，大多為模具製作技術、熱性質對模具的影響、實際射出成形時之溫度與壓力的影響、射出成品精度等，但是，對於 SL 模具破壞與脫模性質，塑膠材料流動及缺陷生成特性等則探討不足。

### 1.3 研究動機與目的

各種模具均以量產性要求為前提，因此提高模具壽命，乃為模具開發之重點。傳統的模具多為金屬模具，且傳統的射出成形原理為：高分子聚合物加熱塑化→高壓射入模穴→冷卻固化後脫模；其中加熱塑化的溫度一般在 200°C 左右（工程塑膠可能高達 300°C），模具溫度約為 40°C，射出壓力 40 MPa，成形週期(Cycle time)為 10~60 秒，精密度則達 0.1%。然而，本研究是以光硬化樹脂 SL 材料製作之塑膠射出成形模具為主，由於 SL 模具強度、耐磨耗性與熱傳導性不及金屬模具如表 1.3 所示，根據前述文獻[6]射出成形參數表 1.1，故

射出壓力應較低約 10~20 MPa，成形週期較長約為 240~360 秒，這是其缺點。根據過去的研究發現，SL 模具的使用壽命約在百模以下，而且模具之破壞多在成形脫模時發生[ 7 ]，因此有必要針對使用 SL 模具時的脫模行為與模具破壞之間的關係進行探討，以作為延長 SL 模具的使用壽命的方法之參考。

表 1.3 金屬模仁與 SL 模仁之比較

材料性質	SL (SL5510)	Steel (S55C)
拉伸強度 (MPa)	66	355
硬度 (Hardness, Shore D)	88	183
熱傳導率 (cal/cm·sec·°C)	0.0006	0.110

另外，常見一般射出成形品缺陷，如：融合線(Weld line)、流痕(Flow mark)、固化層(Solid skin)...等，大都是在「流動」過程時發生，對 SL 模具而言，將可能因為模具材料特性的改變，其發生條件和形成狀態會產生變化。因此，若能掌握材料在 SL 模具內的基本流動和固化特性，則可以針對塑膠缺陷產生的原因，提出改進方法，決定最佳成形條件，避免缺陷生成，提高成形品精度。

本研究之目的主要包括兩部份，其一為探討光硬化樹脂 SL 模具的脫模特性，另一則是欲調查了解 SL 模具中的材料流動及缺陷生成特性。

#### 1.4 研究方法

對於脫模特性，本研究設計一套可以模擬射出成形的保壓與冷卻狀況的實驗裝置，並以射出成形時的材料溫度、模具溫度、壓力與冷卻時間為實驗參數，以進行脫模特性實驗，調查脫模應力與模具表面粗度的變化，用以分析 SL 模具的破壞機制，以作為延長使用壽命及模具壽命評估的參考。

對於射出成形品缺陷的問題，針對 SL 模具中的材料流動及缺陷生成特

性，設計基本的長直平板狀流路，以實際射出充填來實驗模擬各種條件下平板流路內的材料流動狀況。實驗時一方面將進行壓力分布量測，據以分析材料內部的剪切應力特性。另一方面，對充填後成品試片，觀察是否有缺陷的融合線或流痕生成，進行分析，以作為將來 SL 模仁薄流路射出成形的模具設計以及成形條件之選擇的參考。



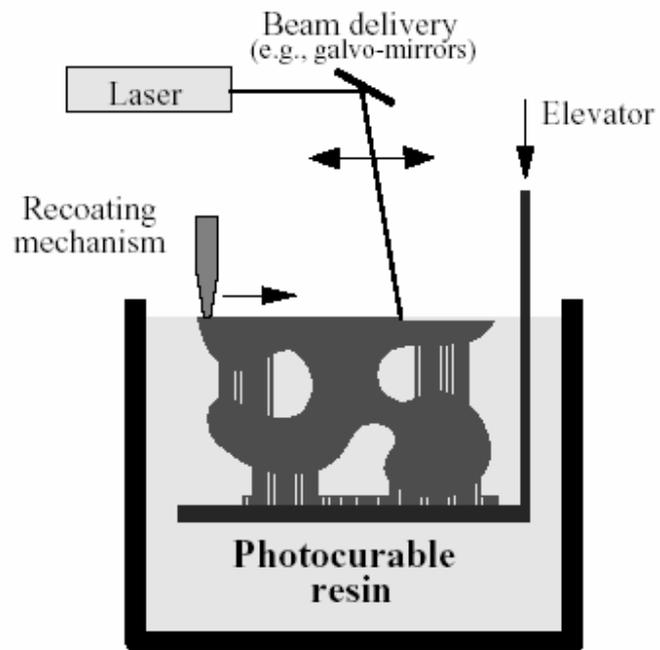


圖 1.1 SLA 工作原理[2]

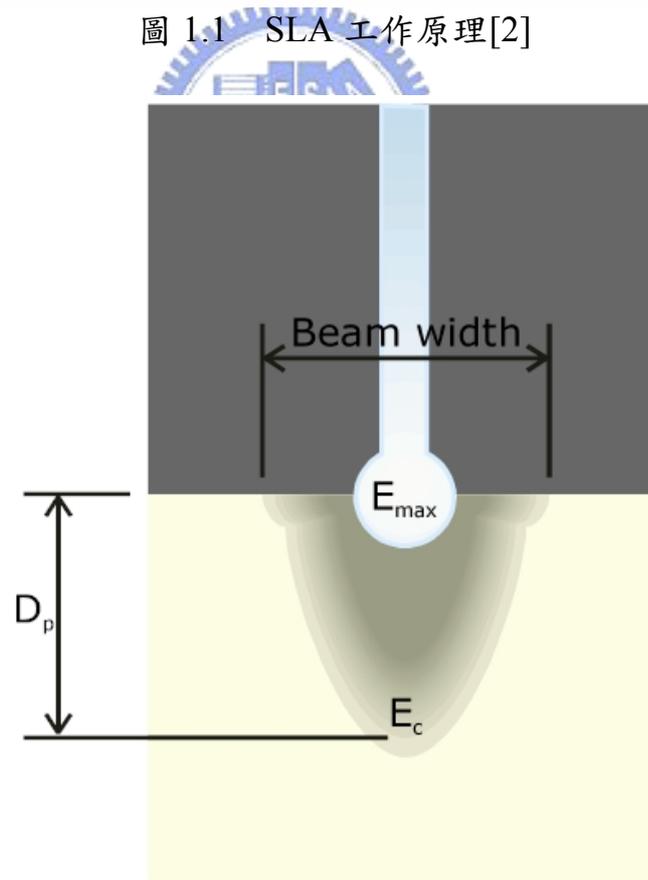


圖 1.2 液態光硬化樹脂固化機制[4]

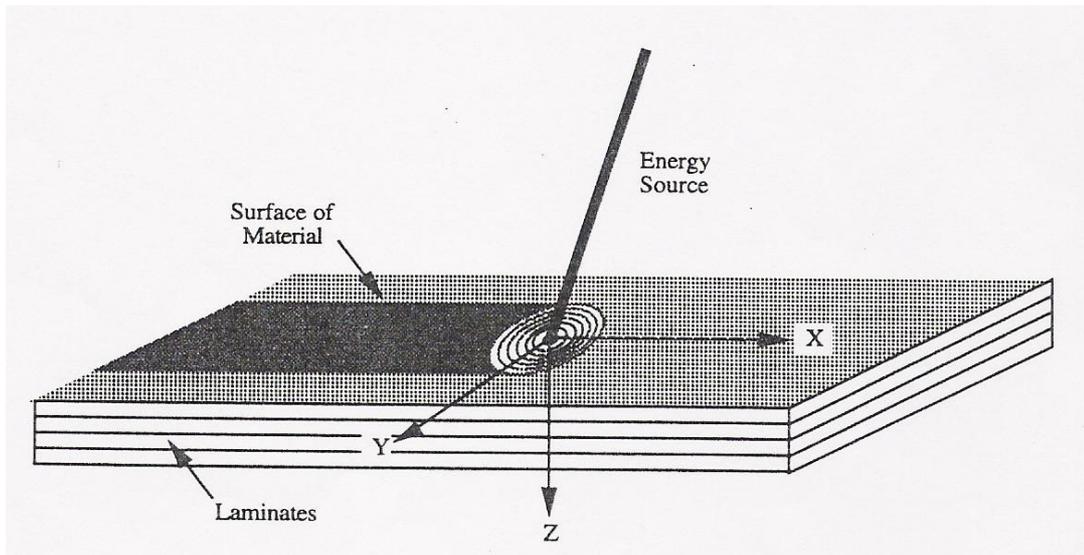


圖 1.3 RP 技術原理[4]

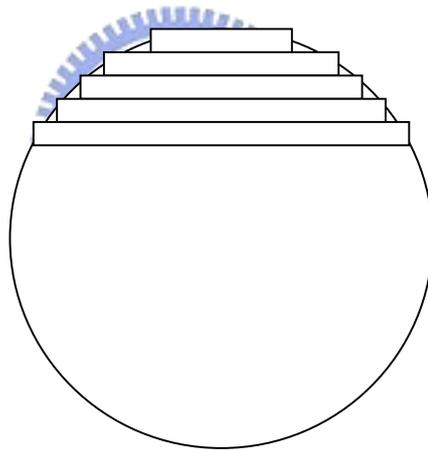
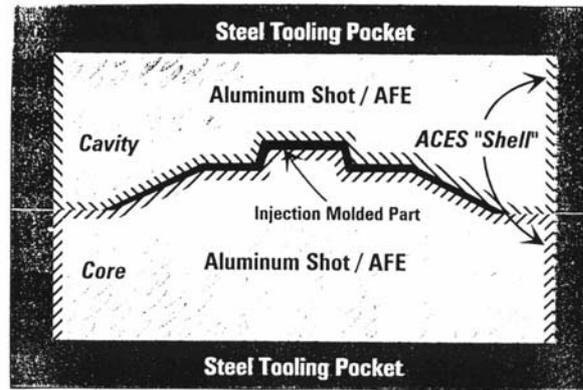


圖 1.4 階梯效應(Stair-stepping effect)



•Direct ACES\* Injection Molding

圖 1.5 SL 複合模具(Direct AIM™ Tooling) [7]



## 第二章 快速成形與快速模具技術

### 2.1 快速成形

自從電腦輔助設計與製造(Computer-Aided Design and Manufacturing, 簡稱 CAD/CAM)成為今日工業產品生產週期(Product cycle)中最重要技術[19], 伴隨著電腦與自動化的快速進步, 結合電腦輔助設計資料與自動化製造的快速成形(Rapid Prototyping, RP)技術, 自 1980 年日本 Kodama 先生發表 RP 論文後, 直到 1988 年由美國 3D Systems 公司將此技術商品化成為 SLA (Stereo-Lithography Apparatus)機器問世以後, 這十多年來, 即在世界各國形成一股應用與研究風潮, 不論是工業界、醫學界、學術研究界等, 都將 RP 視為二十一世紀最重要的製造技術[20]。

快速成形基本原理是一種利用積層增料(Layer Additive)方法, 將材料由下往上(或由上往下)層層堆疊出各層輪廓(Profile)以產生 3D 實體形狀的加工技術(圖 2.1), 而有別於 CNC(Computer Numerical Control)或傳統切削之去除材料加工的方法。所以, RP 在完全擺脫傳統切削、沒有傳統夾具與模具的情況下, 快速製造出任意複雜形狀而又具有一定功能的三維實體模型或零件, 對製造加工而言實在是一項重大的突破。

RP 加工流程, 如圖 2.2 所示, 可分為下列四個步驟:

1. 3D CAD 設計。
2. STL (STereoLithography)檔案轉換。
3. 分層切薄片(Slicing)加工程式。
4. 實體原型建構。

其中前三個步驟為軟體技術, 欲將一個建立好的 CAD model 運用在 RP 機器上製作成實體原型, 必須經過檔案轉換與產生加工程式, 而目前最被接受的檔

案轉換即為 STL 格式。

STL 檔案內容為許多小三角形平面，所以是以一堆三角網格(Tessellation)來逼近工件之曲面與輪廓，典型的 STL 所繪製的圖形，如圖 2.3 所示。三角網格越多工件解析度越佳，而三角網格越少將失去精度與某些微小特徵，這也是 RP 精度(Accuracy)無法提昇的原因之一。STL 它包含了每個三角形的單位法線向量及頂點 X,Y,Z 座標；而 STL 檔案有好、壞分別，好的 STL 檔案所有面之法線向量(Facet orientation)須一致朝外，而且遵守右手定則之規定(如圖 2.4 所示)，相鄰三角形間須頂點接頂點(Vertex-to-vertex rule, 如圖 2.5 所示)。3D CAD 實體模型軟體產生的 STL 檔案通常是正確的，曲面架構軟體產生的 STL 檔案大都有問題(Gaps 或破洞)，要經 STL 修補軟體(Repair software)處理後才可使用。

STL 的檔案格式有 ASCII 碼與 Binary 碼兩種，ASCII 碼的檔案大小比 Binary 碼檔案大，但較容易解讀，以下為 ASCII 碼的檔案格式範例：



```
solid example
facet normal 0.00000e+00 1.00000e+00 0.00000e+00
  outer loop
    vertex 0.00000e+00 0.00000e+00 2.00000e+01
    vertex 0.00000e+00 0.00000e+00 0.00000e+00
    vertex 1.00000e+00 0.00000e+00 2.00000e+01
  endloop
endfacet
.....
endsolid
```

在 solid example 與 endsolid 內之資料代表三角網格模型，其中第一行和最後一行只是文字資訊，並不重要，其餘每七行為一週期，代表一個三角網格

的資料。每一個三角網格起始於 facet normal，終止於 endfacet，紀錄的資訊包括網格法向量以及三個頂點的座標。

切片化(Slicing)目的是將 STL 檔案轉換成加工程式，切片厚度即為層厚度 (Layer Thickness)，通常是 0.075mm~0.250mm。此層厚度是影響表面粗糙度 (Surface Roughness) 的主要因素；因為切片厚度越大，則造成“階梯效應”(Stair-stepping effect)越明顯，尤其是在非垂直或水平的表面上(圖 1.3)。

目前市面上各種 RP 系統，除了 SLA 之外，其中較著名且具代表者有 FDM(Fused Deposition Modeling)、SLS(Selective Laser Sintering)、SGC(Solid Ground Curing)、LOM(Laminated Object Manufacturing)、3DP(3D Printing)... 等，每一系統的製程原理都相當類似，只是堆疊材料與成型方式不同。RP 系統發展史如下表 2.1 所示：

表 2.1 著名 RP 系統發展史



名稱	簡稱	發展時間
Stereolithography	SLA	1986-1988
Solid Ground Curing	SGC	1986-1988
Laminated Object Manufacturing	LOM	1985-1991
Fused Deposition Modeling	FDM	1988-1991
Selective Laser Sintering	SLS	1987-1992
3D Printing	3DP	1985-1997

若以成型方式來分，RP 系統大致可以分為兩類：光硬化樹脂成型 (Photopolymer Solidification)與材料堆積成型(Material Deposition)。

(1) 光硬化樹脂成型：以雷射光或紫外線照射光硬化樹脂達到硬化成型的目的，以 SLA、SGC 為代表。

(2) 材料堆積成型：有半液態類，以擠製熔化熱塑性材料層層疊疊堆積成型，FDM、3DP 屬之；而粉末類，以雷射光照射粉末層層硬化黏合堆積成型，以 SLS 為代表；固態類，以雷射或刀片切割紙薄片材料輪廓後，層層黏合堆積成型，LOM 為代表。

以上六種系統加工示意圖如圖 2.6 至圖 2.11。

至於，快速成形技術的應用如圖 2.12 所示，主要分為五類：

- (1)造形展示：工業設計實體模型。
- (2)設計確認：組裝及干涉檢驗。
- (3)功能測試：氣動或流體性質，操作性。
- (4)醫療領域：手術前模擬，齒模，人工骨骼。
- (5)快速模具：鑄造模，翻製模，直接造模。

所以，快速成形技術已不只是原型(Prototyping)製作，而是進步到許多製造領域的應用，快速成形與製造 (Rapid Prototyping and Manufacturing, RP&M) 技術的推廣應用，將明顯縮短新產品的上市時間，節省新產品開發和模具製造的費用，成為產品開發階段最佳的工具。

在面對產品創新與競爭的時代，何時使用 RP？歸納為三點：

- (1)少量多樣化需求。
- (2)具有電腦數位化資料(3D CAD data, CT and MRI scan data, 3D digitizing data)。
- (3)形狀極複雜不易以其他方式製成。

## 2.2 快速模具

快速模具(Rapid Tooling, RT)技術，是一種由快速成形技術所衍生的技術；簡言之，即是一種直接或間接以快速成形製作模具的技術。1994 年世界著名的普惠引擎公司(P&W)應用 RT 精密鑄造技術開發 2000 件引擎鑄件，結果較以往節省十倍經費(美金 700 萬→美金 70 萬)，而且工時節省 70%。由此

可見，有了快速模具技術，產品可以快速的被製造出來，使 RP 在研發階段的利益，直接延伸到生產階段的利益，不僅縮短產品生產週期，而且實現同步工程(Concurrent engineering)。

快速模具技術的發展很快，以模具製造方法來分類，可分為三大類：鑄造模(Casting mold)、原型翻製模具(Master mold，即間接造模法，Indirect tooling)、直接造模法(Direct tooling) [21-23]。

(1) 鑄造模：在鑄造模具的應用上，可分成兩大類：砂模鑄造(Sand casting)及精密鑄造(Investment casting)。

砂模鑄造主要是以 RP 原型取代傳統木模，其中 LOM 原型因為使用紙材料製造，與木材原型的質感很接近，故國外著名車廠 GM、Ford 均普遍使用開發製作複雜的汽車進排氣歧管原型。另外，德國 EOS 公司的 EOS-S 機器可以直接製作砂模，但是尺寸較小，未普遍使用。

至於精密鑄造的應用，以脫蠟鑄造(Lost wax)為主；直接以 RP 原型取代傳統蠟模型，精密鑄造製作金屬零件。德國賓士汽車公司以 SLA QuickCast™ 精密鑄造技術開發引擎，縮短時間 2~3 月，並節省成本約美金 15 萬，可見 RT 在產品開發之效益。國內業者如三陽、光陽、啟特、型態科技公司也在 1995 年與工研院航太中心合作開發 RT 精密鑄造技術，其後也陸續成立 RP/RT 技術交流會，使得國內產業能趕上國際產品開發腳步，縮短研發時間，爭取 OEM/ODM 訂單。

(2) 間接造模法：由 RP 加工出所需要的零件形狀或以現成零件，經翻製得到模具。從生產數十件的矽膠模(Silicon rubber mold)、數百件的樹脂模(Epoxy mold)，到數千件的噴塗金屬模(Spray metal mold)，及數萬件的 3D Systems Keltool 製模技術。

(3) 直接造模法：直接由 RP 加工出所需要的模仁形狀，經後處理即可使用。

例如 Direct AIM(3D Systems)、SLS RapidTool(DTM)、DMLS(EOS)等。

有關工研院在快速模具一系列研究的文獻回顧，分述如下：

快速成型精密鑄造[24]：本文闡述一種取代脫蠟精密鑄造的技術，應用 RP 原型直接精密鑄造，製作航太金屬零件(圖 2.13)，並且比較不同 RP 原型之測試結果及優缺點。結果發現 SLA QuickCast™ 鑄造件精度及表面光度最佳，SLS PC 表面光度稍差，而 FDM Wax 製程與原精密鑄造最相容，但精度及表面光度普通。

樹脂射出成型模具技術與應用[25]：本研究應用 RP 及 CAM 製作基準模型 (Master mold)，以 MRM(Mitsubishi Chemical Rapid Molding System)翻製樹脂模具(圖 2.14)。此種金屬樹脂含有 70%鋁粉及 30%環氧樹脂 Epoxy，當加入硬化劑均勻攪拌後使金屬樹脂硬化而達成。結果指出樹脂模強度不如金屬模，因此其注射量應先不足，再逐次調整適量。注射壓力也應從計算之壓力約 20~30% 開始調整，逐次增加至適當之壓力。

快速模具在塑膠射出之應用[26]：本研究係應用光造形法之雷射立體成型 (Stereolithography, SL)技術製作複合模具(圖 2.15 )，以開發生產百件塑膠產品的快速原型模。同時，設計者在同步工程精神下，參予並掌握整個設計、製模與生產流程。選定電子類塑膠產品外殼為模型，應用 3D CAD 完成產品與公母模設計，SLA 製作公母模仁，樹脂硬化成形完成射出模具。本研究之關鍵有快速成型技術，真空成型技術，模具設計與組裝技術，塑膠射出成型與測試技術。結果顯示此複合模具，可適用如 ABS、PP、PE、PS 等工程塑膠之射出成形產品。

光硬化樹脂模具之射出成形特性研究[27]：本研究是使用標準化模座將 SL 模仁固定於模框內，進行塑膠射出成形，以測試 SL 模具特性參數，其中射

出溫度、壓力與冷卻時間是實驗參數。實驗材料為 PP 塑料，射出成形設備為交通大學機械系之德國製 ARBURG 270S。

射出成形及測試結果，如下表 2.2：

表 2.2 射出成形及測試結果

射壓(bar)	155
射溫(°C)	205
模溫(°C)	50
冷卻時間(Mins)	4

實驗結果顯示；模溫與冷卻時間，對成品均有顯著影響，而且射出後保壓與冷卻時間要較一般射出成型時間長，約 3~4 分鐘。

再以最大數目射出驗證與評估模具壽命，發現射出至百模，且模具之破壞多在成形冷卻之脫模時發生。因此可確認 SL 模具是一個可行的快速製模方法且可得到百模之射出成品。

3D 微模具可行性研究[28]:本研究即是以光硬化樹脂 SL 材料翻製的電鑄模具為探討對象。首先藉由高溫燒結碳化高分子樹脂 RP 薄層，形成電鑄種子層(圖 2.16)，再以模具表面電鍍方式，作為電鑄微模具可行性評估參考，實驗結果歸納如下兩點：(1)燒結實驗結果，400°C/10min 試片表面已完全碳化。(2)電鍍實驗結果發現電鍍效果不佳，需要改進製程。

### 2.3 RP/RT 未來展望

RP/RT 的發展趨勢可分為四方面來分析：

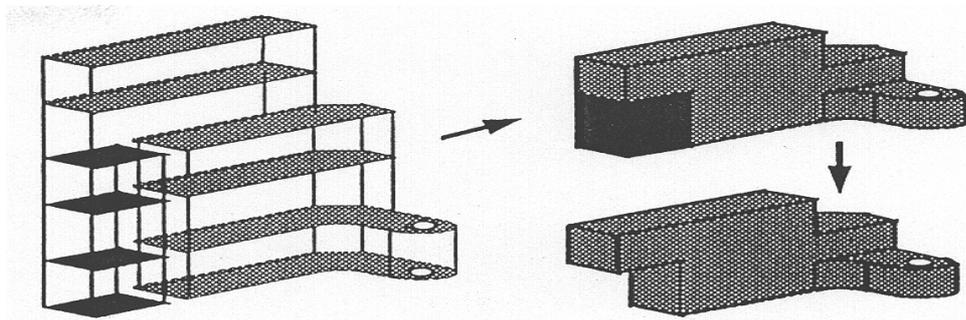
(1)創意與概念模型(Concept Model)：RP 朝低價、高性能之桌上型發展，像是一般印表機成為辦公室標準配備，即稱為 3D Printers。產品設計者在完成 3D

CAD, 立即可以作 3D 原型輸出, 實現產品開發人員的夢想, 達到從虛擬(Virtual)到實際(Reality)的理想環境。

(2) 功能性模型(Function Model) : RP 原型材質將朝向真正與產品材料相同的方向發展, 即塑膠或金屬(Plastic or Metal)原型。而且陶瓷或複合材料(Ceramics or Composites)也將逐漸成為重點。

(3) 快速製模(Rapid Tooling, RT) : RT 朝生產型模具發展, 不再是一般少量生產的暫用模, 即直接造模法(Direct Tooling or Master Mold), 其中以塑膠射出成形模具為最主要, 壓鑄模、鍛造模等為次要。

(4) 微模具(Micro RP) : 因現今微機電(MEMS)技術例如 ; 體型微加工(Bulk micromaching)、面型微加工(surface micromaching)、LIGA 製程、晶片壓合(Wafer bonding)...等, 皆為製造平面型 2D 或 2.5D 微結構(Microstructures)技術。對於複雜 3D 微結構, 這些製程有許多加工的限制, 所以 Micro RP 製造高深寬比和複雜的 3D 微元件(MEMS Scale or Bio-molecular Modeling), 漸成為未來微模具發展方向。



Layer-additive process

圖 2.1 快速成形基本原理

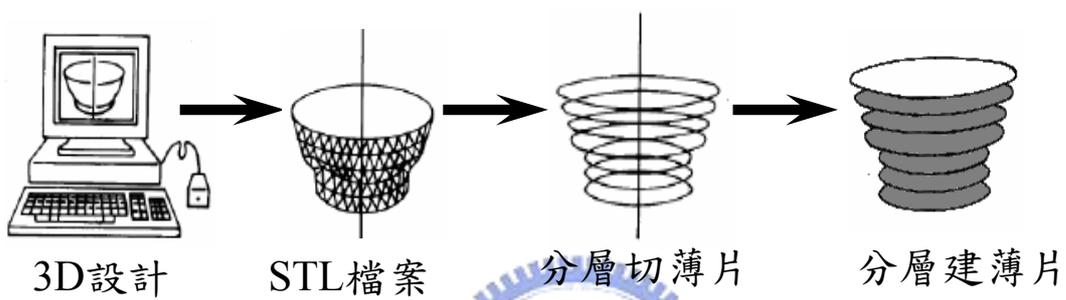


圖 2.2 RP 加工流程

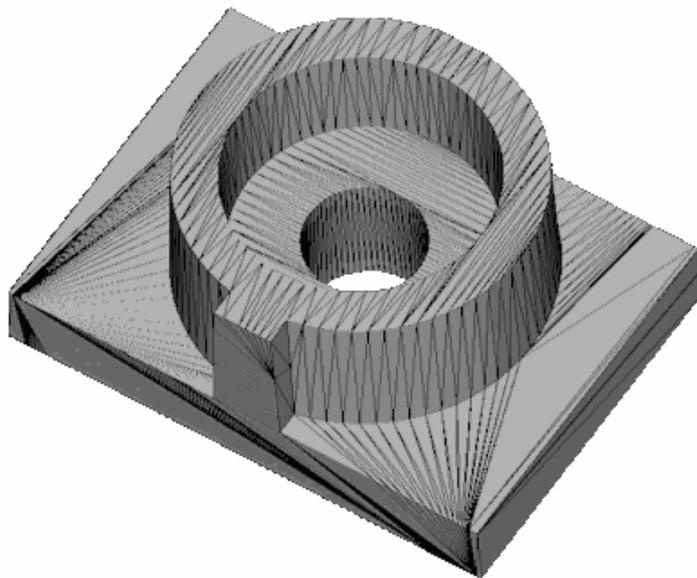


圖 2.3 STL 所繪製的圖形

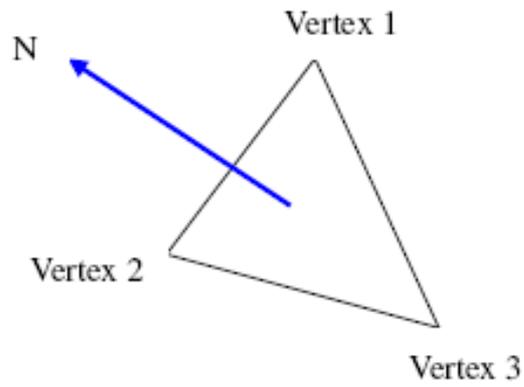


圖 2.4 以右手定則規定之 STL 平面

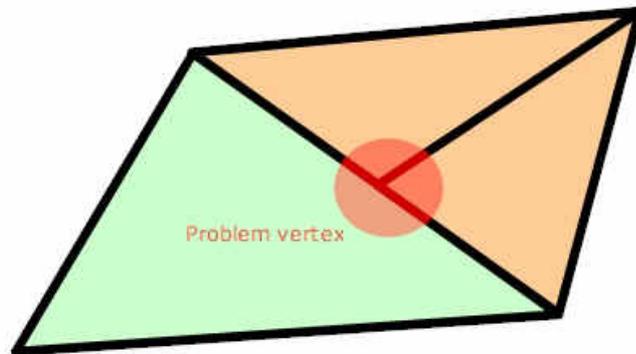


圖 2.5 違反頂點接頂點規則無法構成 STL 模型

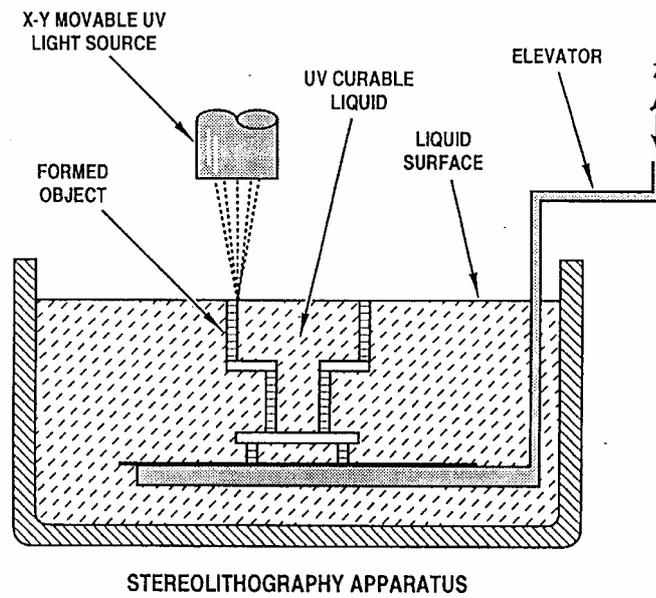


圖 2.6 (a) SLA 系統 US Patent 4575330

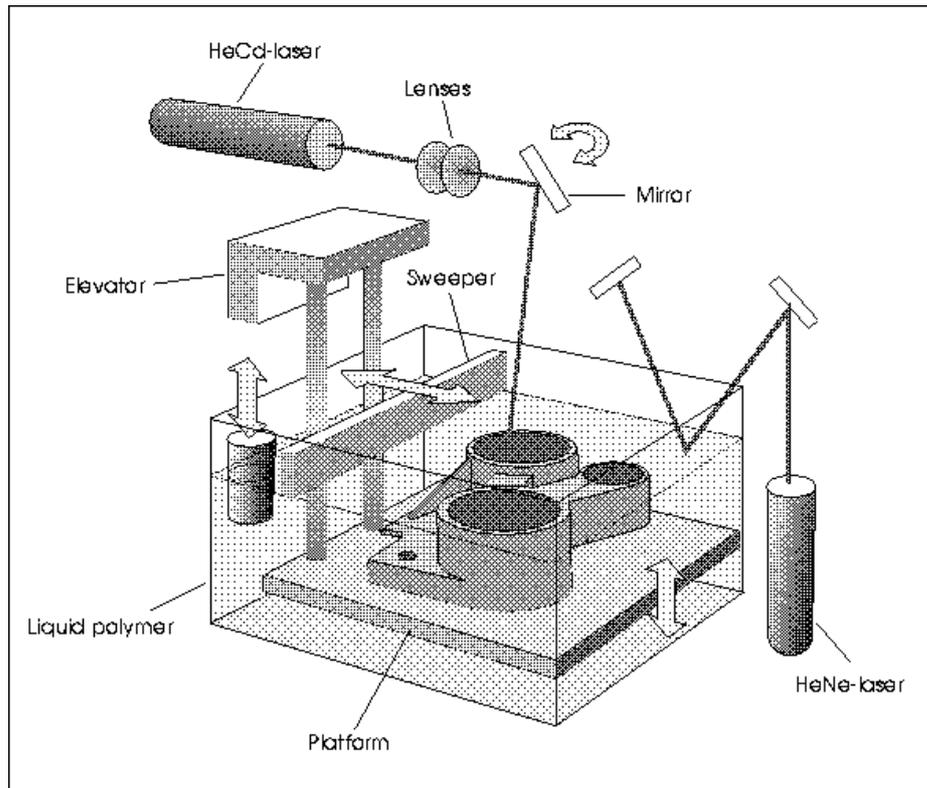


圖 2.6(b) SLA 系統加工示意圖[4]

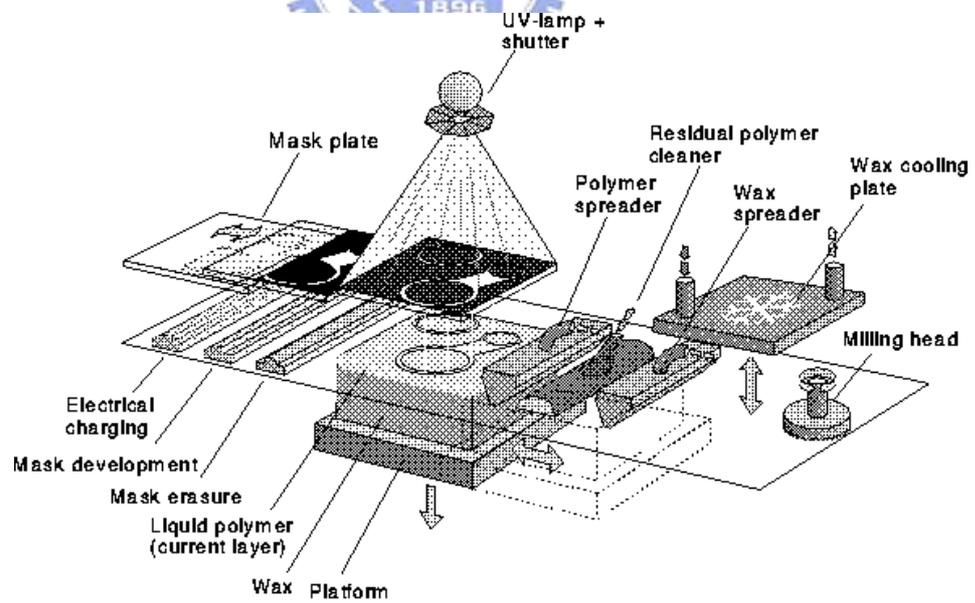


圖 2.7 SGC 系統加工示意圖[4]

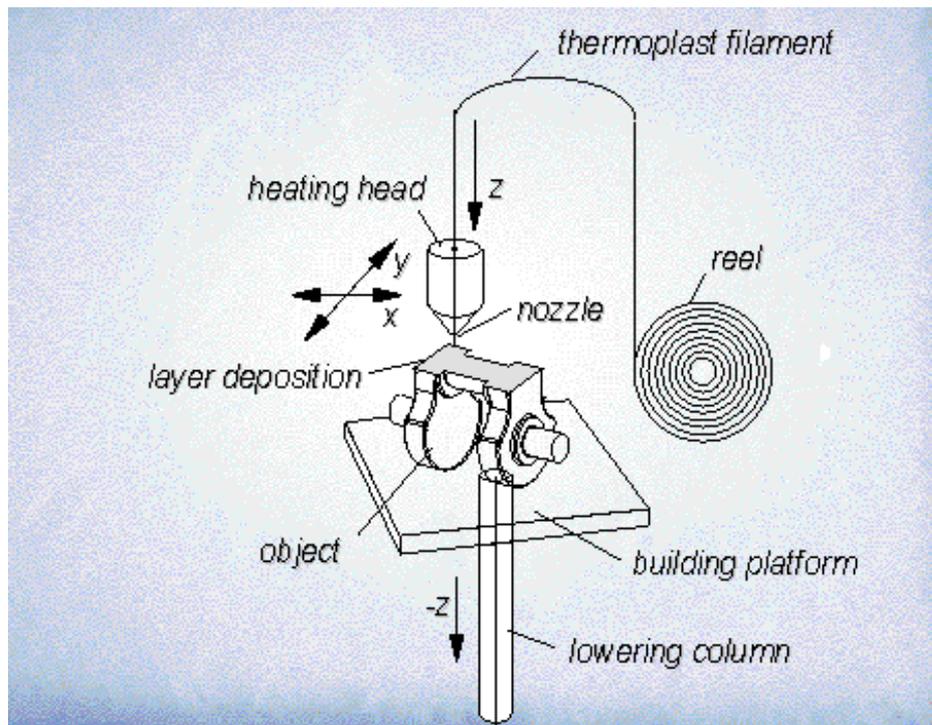


圖 2.8 FDM 系統加工示意圖[4]

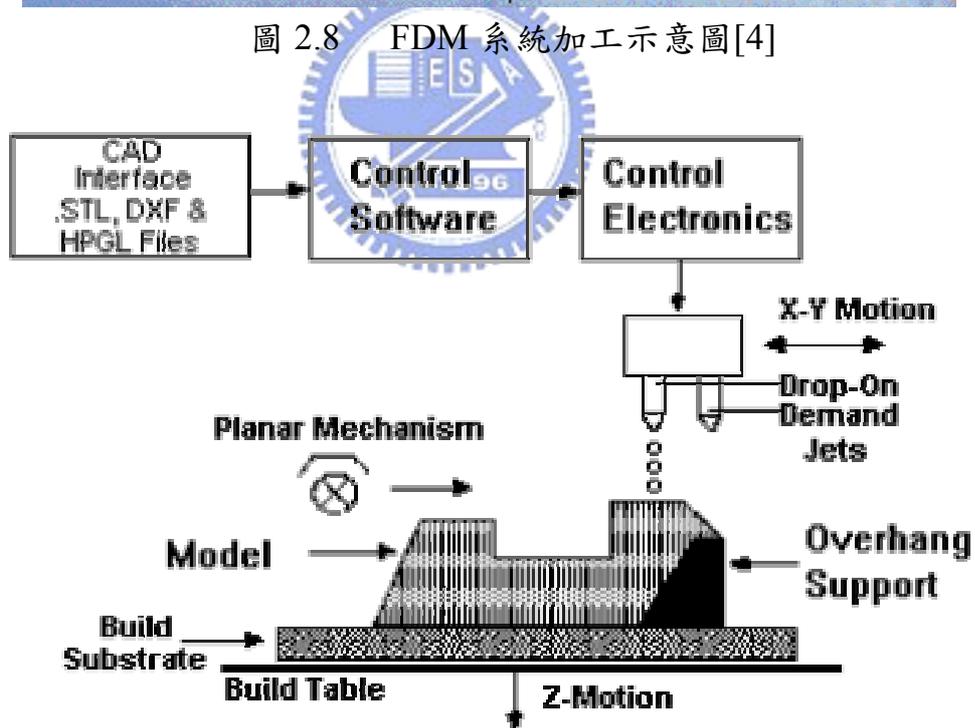


圖 2.9 3DP 系統加工示意圖[4]

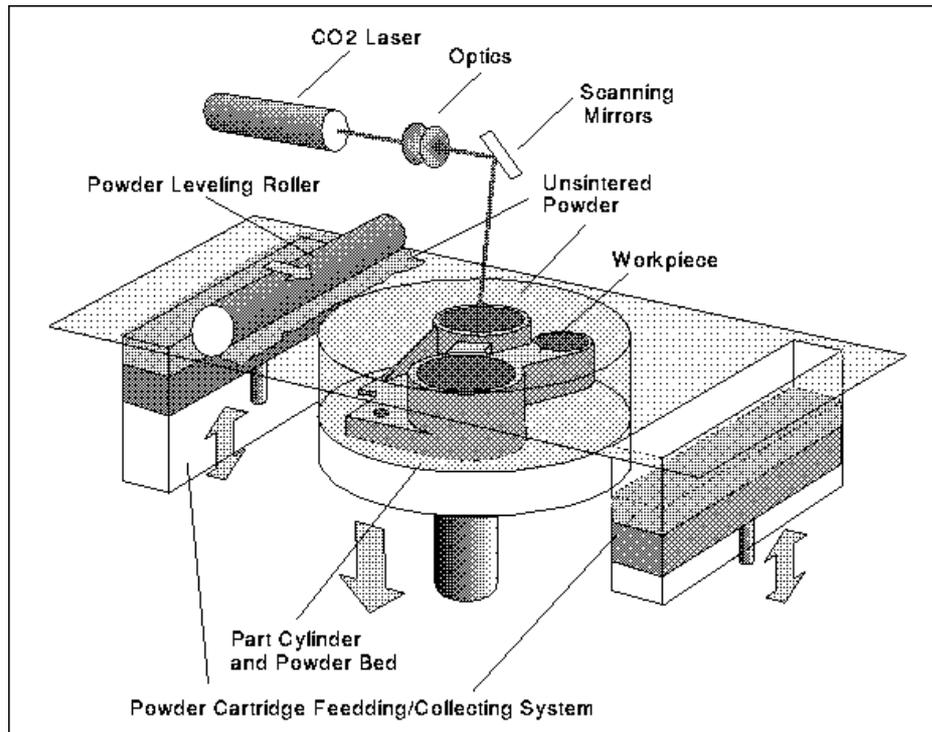


圖 2.10 SLS 系統加工示意圖[4]

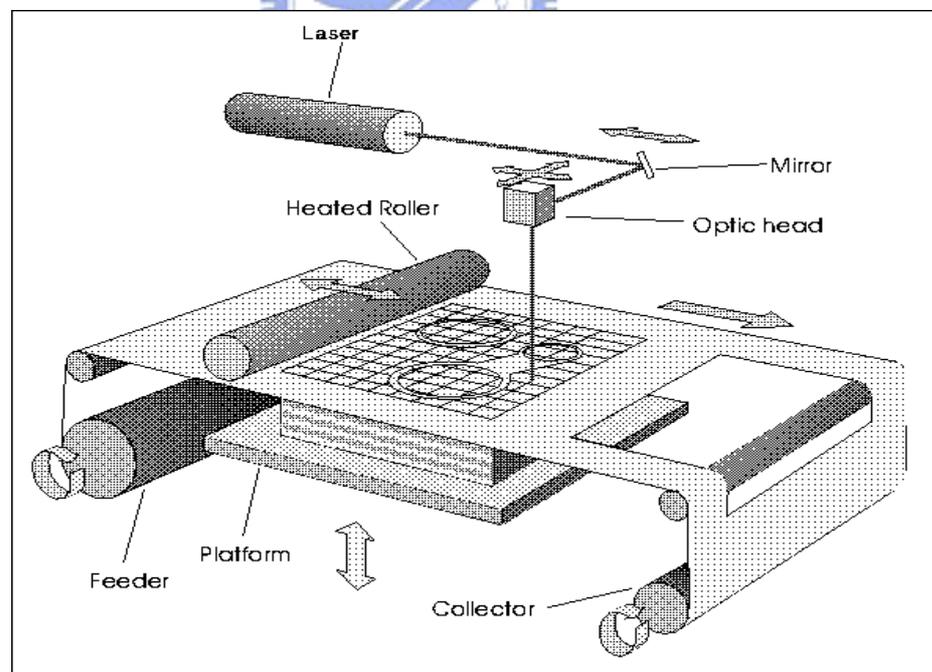


圖 2.11 LOM 系統加工示意圖[4]

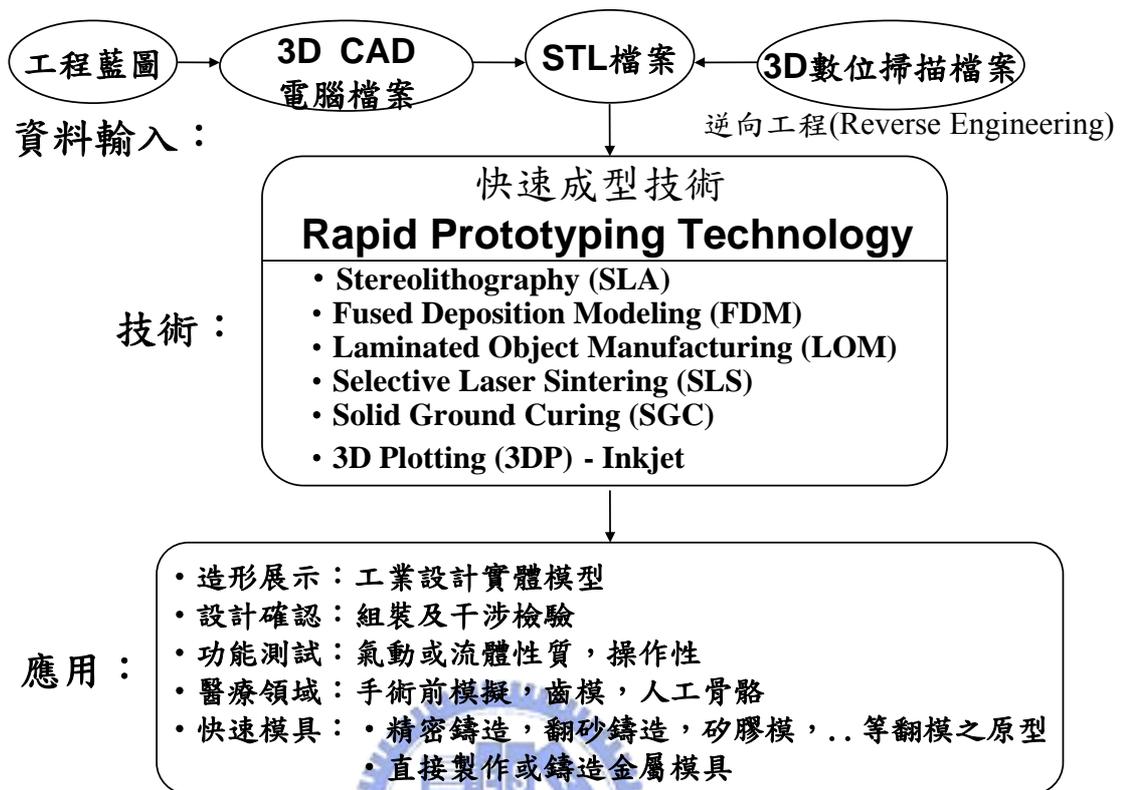
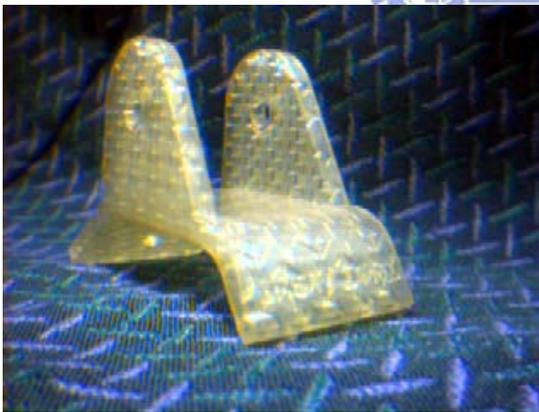


圖 2.12 快速成型技術應用

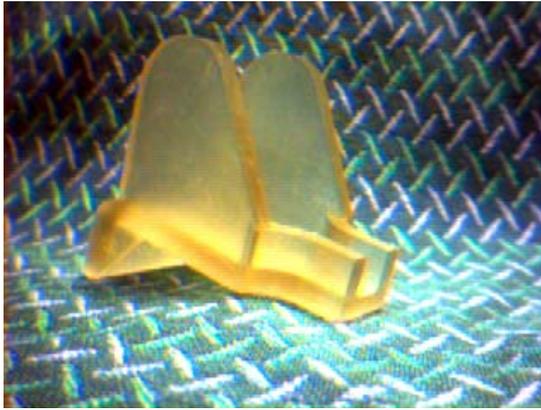


SLA QuickCast™原型

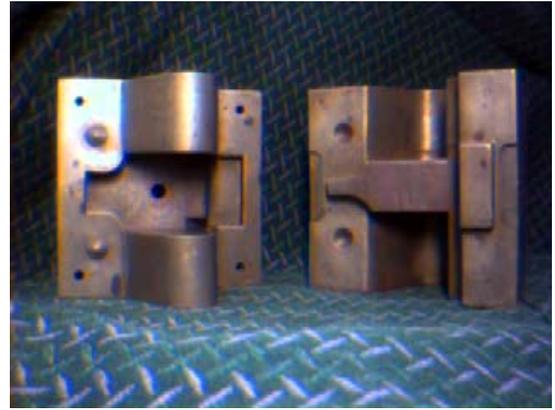


航太金屬鑄造件

圖 2.13 快速成型精密鑄造



RP基準模型



樹脂模具

圖 2.14 樹脂射出成型模具

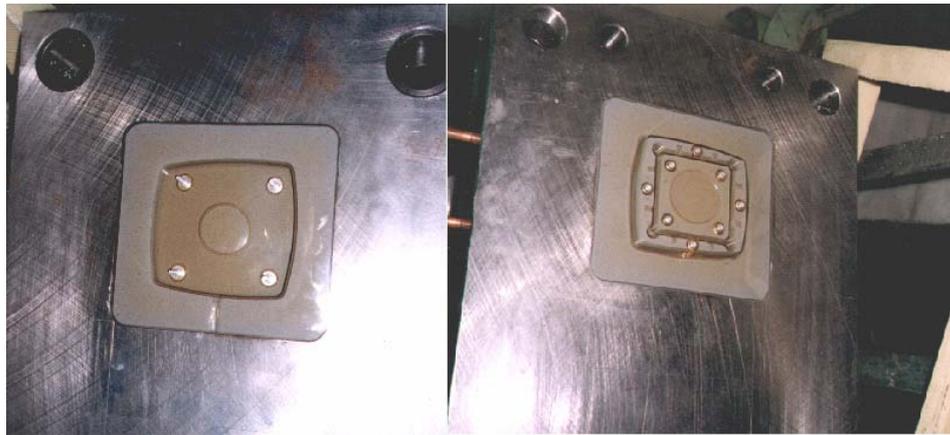


圖 2.15 SL 複合模具



圖 2.16 燒結碳化 RP 薄層(Seed layer 黑色部分)

## 第三章 光硬化樹脂 SL 模具之脫模特性

### 3.1 導論

以光硬化樹脂 SL 材料製作之快速模具(Rapid Tooling)非常適合於新產品開發之小量快速生產及製模的需求。其中 Direct AIM™ (ACES Injection Molding) Tooling 實際應用是利用立體光刻成型 SL 技術製作公母模仁(Core/Cavity)原型，以含金屬粉樹脂為公母模仁背材，組合標準模座成為複合模具，作為塑膠射出成形模具[6, 7]。因為射出成形工程包括射出材料之熔化、流動、固化，而 SL 模仁所能承受的壓力與耐溫性較差，所以 SL 模具主要缺點有：模仁熱傳導性較差，射出時溫度、壓力不易控制，模仁強度與耐磨耗性不及金屬模具，故而限制了模具壽命。根據過去的研究發現，模具壽命約在百模以下，而且模具之破壞多在成形脫模時發生[7, 10, 29, 30]。其中英國的 Hopkinson 等之實驗結果發現頂出力量(ejection force)與冷卻時間有關，最大與最小頂出力量分別是在最長與最短的冷卻時間量測到；而且，冷卻時間對模具溫度的影響很重要，所以建議提早頂出脫模是可行的[10]。

各種模具均以量產性要求為前提，因此提高模具壽命，乃為模具開發之重點。對於塑膠射出成形模具而言，模具壽命或生產量都是主要考量因素之一，因此與模具壽命極相關的脫模性質(De-molding characteristics)，對 SL 模具就非常的重要。本研究設計製作了一套壓縮實驗裝置(Compression test fixture)，用以模擬使用 SL 模具的射出成形的冷卻、保壓及脫模過程，而且，以射出成形時的溫度、壓力與冷卻時間為實驗參數，進行脫模特性實驗以調查脫模力與模具表面粗度的變化，用以分析 SL 模具的破壞機制，以作為延長使用壽命及模具壽命評估的參考。

## 3.2 實驗材料與設備

### 3.2.1 實驗材料之選定

(1) 塑膠材料：選用與射出成形時相同等級的 PP (Polypropylene) 塑料，作為進行脫模特性實驗的成形材料，係採用福聚公司生產的高流動性之編號 6331 製品，其基本物性為：熔融流動率 MFI 14，密度  $0.904\text{g/cm}^3$ ，降伏點抗張強度  $364\text{ kg/cm}^3$ ，熱變形溫度  $95^\circ\text{C}$  ( $4.6\text{ kg/cm}^2$ )，收縮率 1.2%。

(2) 模仁材料：光硬化性模仁材料為 CIBATOOL SL 5510 樹脂，材料性質如表 3.1 所示(詳細資料如附錄一)。SL 模仁是以 SLA 機器特殊加工方式，ACES(Accurate Clear Epoxy Solid)方式成型，產生類似玻璃鏡面(glass-like)表面光度。ACES 加工成型，其中較重要參數有，每一層厚度(Layer Thickness)、最小表面角度(MSA)、過硬化(Overcure)深度、網格交錯(Staggered Hatch)、交錯順序(Alternate Sequencing)、網格收縮(Retracted Hatch)等，如圖 3.1 所示，依據樹脂成形說明[30]內的參數設定如表 3.2 所示。製作出正方形的 SL 模仁試片厚度為 3mm，表面積為  $16\text{cm}^2$  ( $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ )。

表 3.1 CIBATOOL SL 5510 樹脂性質

Density( $\text{g/cm}^3$ )	1.13
Viscosity(cps)	180
Layer Thickness(mm)	0.05/0.10/0.15
Hardness, Shore D	86
Glass Transition, $T_g$ ( $^\circ\text{C}$ )	68
Heat Deflection Temp. ( $^\circ\text{C}$ )	62

表 3.2 ACES 樹脂成型參數

雷射線直徑(mm)	0.20
疊層厚度(mm)	0.15
過硬化深度(mm)	0.18
最小表面角度(MSA)	40°
網格交錯	on
交錯順序	on

### 3.2.2 實驗設備

脫模特性實驗所使用的動力設備為交通大學機械系流變實驗室自行開發之精密熱壓機，為一可程式化並可大量擴充設備之成形機，其主要規格列於表 3.3，而整個保壓－脫模特性實驗的系統架構如圖 3.2 所示。熱壓機的輸出力量可高達 5 噸，並且可以作力量控制（馬達扭矩控制）、壓板下壓速度控制（馬達轉速控制）以及壓板位置控制，並且具有加熱控制與水冷卻裝置。控制系統由 Labview 程式語言架構之程式、數據擷取卡以及周邊的訊號處理裝置建構而成。

模擬保壓與冷卻狀況所設計的壓縮實驗裝置示意圖如圖 3.3(a)(b)所示，模具分為上、下模，在上模結構中元件①、② 及 ③是接合在一起，而元件④是作為元件②之導塊，SL 模仁固定於上模為移動側，PP 塑料置於下模為固定側。在熱壓實驗中所需要進行的監控為溫度、力量及壓板位置控制。溫度控制的設計部份，溫度控制器設定模具與塑料溫度，下模以加熱棒熔融 PP 塑料，水循環模溫機作為模溫控制單元，分別與上下模連接成為循環流路，並以熱電偶量測模溫。力量控制的設計，保壓力由熱壓機設定提供，脫模力則由安裝於上模之負荷計(Load cell)量測獲得結果。

表3.3 精密熱壓機規格

驅動方式	交流伺服馬達驅動滾珠導螺桿直壓式
負荷控制方式	荷重計直接回饋控制
最大壓縮力	50KN
壓縮力控制精度	±200N
最大模版高度	110mm
導柱間距	430mm × 270mm
壓板位置控制方式	光學尺回饋控制（解析度1μm）
壓板位置控制精度	±10μm
加熱方式/加熱能力	電熱式/4kW

### 3.3 實驗方法與參數

本實驗將量測脫模力之大小與成形前後 SL 模仁試片表面粗度，用以分析 SL 模具的破壞機制。經由先前射出成形特性研究結果[27]，以射出成形時固化過程的成形條件，模具溫度、保壓力、保壓時間與冷卻時間等四個作為實驗參數，最佳之射出成形條件作為固定參數，如下所示：

- 保壓力/保壓時間 = 10 MPa/5 sec
- 模具溫度 = 50°C
- 冷卻時間 = 240sec

其參數變動範圍如表 3.4 所示。

實驗進行方式，以簡化模型之壓縮實驗模擬保壓與冷卻狀況，將 SL 模仁試片與 PP 塑料在不同實驗參數條件下，進行成形脫模實驗，負荷計(Load cell)將測出脫模力之大小，而成形前後模仁試片表面粗度量測則使用 Mitutoyo

SURFTEST MST-211 表面粗度儀。成形脫模實驗的流程圖，如圖 3.4 所示。

其他特性探討將著重於溫度效應影響，進行 SL 試片壓縮降伏強度實驗，以瞭解模具溫度對 SL 材料應力－應變性質的變化。

表3-4 實驗參數

實驗參數	參數範圍
模具溫度(°C)	30, 40, 50, 60
保壓力(MPa)	5, 10, 15, 20
保壓時間(sec)	1, 3.5, 5, 10, 20
冷卻時間*(sec)	120, 180, 240,300

註： 固定參數為料溫 205°C

\* 變化條件為有或無噴佈離型劑



### 3.4 量測設備及方法

#### 3.4.1 脫模力之量測

力之量測系統，由感測器(負荷計—Load cell)與資料擷取系統(含數據擷取卡以及周邊的訊號處理裝置)所組成。相關規格如下所示：

- 負荷計：KYOWA LM-20KA，規格為 Rated Capacity: 20 Kgf， Rated Output: 0.985 mV/V±1%， Accuracy:±1%RO。
- 數據擷取卡：PCI-6024E，National Instrument 製。規格為 2AO / 8AI / 8DIO，12bit，可擷取±10V 內之電壓，gain 值為 100。外加兩組 Timer/Counter。
- 訊號處理模組：SC-2345，National Instrument 製。外掛溫度模組 TC-01、TC-02。

控制程式為實驗進行的重要部分，具有對熱壓機台命令的下達與監控以及對操作人員的警告與提示的功用，也能夠相當精確的執行實驗任務。控制程式由圖控式軟體 LabView 所架構，透過數據擷取系統送出、擷取類比訊號，執行監控、計算以及判斷等。在熱壓實驗中所需要進行的監控為力量、溫度以及壓板位置控制，而量測部份則為脫模力，當保壓與冷卻的過程後離模，將由負荷計(Load cell)測出脫模力之大小。量測完成之視窗畫面顯示之脫模力圖形，如圖 3.5 所示。

### 3.4.2 表面粗度量測儀

表面粗度的量測採用日本 MITUTOYO 公司型號 SURFTTEST MST-211 的手提式數字顯示面粗度量測儀（如圖 3.6 所示），本量測儀其主要結構為一驅動器加上一可移動之探針頭，利用鑽石探針在工件上的移動，得到工件表面上凹凸程度不同的訊號，加以處理後，再由液晶面版顯示量測數據而得到量測值。本儀器量測範圍為平均面粗度 ( $R_a$ ) 0.05~40 $\mu\text{m}$ ，量測取樣長度 (cutoff length) 區分為 0.25 mm、0.8 mm 及 2.5 mm，量測儀器上可選擇公制及英制單位，也可選擇採用平均面粗度 ( $R_a$ ) 或十點平均面粗度 ( $R_z$ )。在每次使用面粗度量測儀之前，須用儀器廠商所提供之標準試片（試片編號 178-602， $R_a$  2.95 $\mu\text{m}$ ， $R_{\text{max}}$  9.5 $\mu\text{m}$ ，如圖 3.7 所示）先量測一次，以此來校正面粗度量測儀。

本研究採用之面粗度量測取樣長度為 0.8 mm，工件為 40 mm×40 mm，每工件取 12 處量測點，考慮各個方向均量測 3~4 點，再將 12 個面粗度值加以平均得到所量測之數據。

### 3.5 SL 模具的脫模力與模具破壞之分析

#### 3.5.1 成形參數之影響

本實驗的重點是測試不同製程參數對脫模特性的影響，所以實驗的目的是要找出製程參數趨勢與有效範圍。

因模具破壞多在成形冷卻之脫模時發生，評估破壞機制(Failure mechanism)應與脫模力之大小有關係。在模具設計的技術文獻，關於脫模力( $F_e$ )的計算公式，如下所示：

$$F_e = \mu \times P_c \times A_c \quad (3-1)$$

其中， $P_c$ 為施加於模仁表面之接觸壓力(Contact pressure)， $A_c$ 為接觸面積， $\mu$ 則為脫模時材料與模具間之黏著係數。此黏著係數於脫模時是一個重要影響因素，過去的研究顯示，黏著係數被表面粗度、接觸溫度、冷卻時間與保壓力等所影響。

依據脫模力計算公式，評估保壓力參數，實驗結果符合保壓應與脫模力成正比關係，結果如圖 3.8 所示之保壓力與脫模應力(即脫模力除以 SL 模仁試片之接觸面積)關係，隨著保壓增大脫模應力增加；但是，脫模應力的增加率隨著保壓增加而降低，這是與金屬模具相當不同的[31]。脫模應力隨保壓增大顯示高保壓力狀態時，塑料被更壓緊至 SL 模仁，造成微觀表面之粗糙與不平，這個機制是致使脫模應力增加之原因。這機制被稱為錨定或黏固效應(anchor effect)，而且表面之粗糙度會強化錨定效應，如圖 3.9 所示。錨定效應是高分子材料成型過程中與模具表面產生機械黏著(Mechanical adhesion)的現象，是屬於界面黏著(Interfacial adhesion)的一種[32]，關於界面黏著，主要可區分為機械黏著與吸附黏著(Absorptive adhesion)，其分類方式如圖 3.10 所示。

評估保壓時間參數影響，有 5 MPa、10MPa 與 20MPa 三個應力水準，實驗結果如圖 3.11 所示，當在較低保壓力 5 MPa、10MPa 時，保壓時間愈長，

脫模力愈小。而在高保壓力 20MPa 時，保壓時間愈長，脫模力也愈大，顯然是高保壓力增加了接觸面積，故脫模力也較大。這是因隨著冷卻的進行，塑膠材料會收縮，而在沿模壁面上產生剪切應力。該剪切應力具有破壞塑膠材料表面與 SL 模具表面之間的機械嚙合(Mechanical attachment)或黏著(Surface adhesion)的傾向。在保壓力較大的情況下，塑膠材料與 SL 模具表面間的摩擦力會大於前述的剪切應力，而使塑膠材料與 SL 模具表面間的嚙合或黏著狀況不受破壞，且隨著保壓時間的增長，能維持良好表面間的嚙合狀態越久、越完整。因此脫模應力乃隨著保壓時間的增長而變大。而在保壓力較小的情況下，塑膠材料與 SL 模具表面間的摩擦力亦會變小。當保壓力值小到使該摩擦力小於塑膠材料因冷卻而產生的收縮剪切應力時，塑膠材料與 SL 模具表面間的嚙合或黏著的狀況就會開始受到剪切作用的破壞，且時間越長或保壓力越小，該表面間嚙合或黏著狀況受到破壞的情況就越嚴重，其脫模應力也就越小。

評估模具溫度參數影響，設定模溫 30°C、40°C、50°C、60°C 皆低於 SL 材料  $T_g$ (68°C) 以下，如圖 3.12 所示，模具溫度愈高，脫模應力愈小。評估冷卻時間參數影響，以射出成形參數之保壓 10MPa/5sec，模溫 50°C 與料溫 205°C 為測試條件，實驗結果如圖 3.13 所示的冷卻時間與脫模應力關係。以冷卻時間為橫軸觀察，不論模面有無噴佈離型劑(Release agent)，脫模應力之大小呈現上升的趨勢，顯示較長冷卻時間需要較高脫模力量。另外，在模仁表面噴佈離型劑，由圖中可看出較未噴佈時的脫模應力為小。假設，離型劑之使用是阻止 SL 模具與成形材料間的表面黏著；而在有或無離型劑之脫模應力大小之差距，可以約略視為模具與成形材料間的表面黏著應力，而且差距是隨著冷卻時間而增加。此外，在有噴佈離型劑時的脫模應力，可以視為打斷 SL 模具與成形材料間的機械嚙合。較長的冷卻時間，相當於降低溫度與提供成形材料較大的變形抵抗能力，因此，隨冷卻時間增加而要打斷機械嚙合較為困難，故脫模

應力增加。對於圖 3.12 模溫實驗結果的破壞機制也可參照如此的解釋。另外，如圖 3.14(a)、(b)所示，為冷卻時間參數實驗之模仁試片於實驗前後表面粗度量測值，略為增加，平均增值小於  $0.05\mu\text{m}$ 。

### 3.5.2 熱性質的影響

綜上所述，溫度效應，將降低模具機械強度，因此脫模應力對於模具的影響，與模具材料的特性有關。圖 3.15 是本研究所用的 SL 模具材料 epoxy 的壓縮試驗結果，圖中顯示 epoxy 具有典型的塑膠之應力—應變特性，在一定溫度下當應力增大到某一值以後，材料會產生塑性流動的現象。且該被稱為降服應力的應力限界值會隨溫度的上升而大幅降低。此意味著隨著模溫的提高，SL 模具抵抗破損的能力會大大地減弱。圖 3.16(a)是 SL 模具的材料降服應力以及脫模應力隨時間的變化之比較。顯然，在使用範圍的模具溫度條件下，雖然隨著模溫的提高，脫模應力對於 SL 模具的不良影響會大增(如圖 3.16 (b)所示)，惟脫模應力均遠小於模具材料的降服應力。因此由於脫模而導致 SL 模具的模穴壁面表層剝落(Peeling)的模具破損現象(如圖 3.17(a)所示)不大可能發生，模穴壁面變粗糙(Roughening)的效應(如圖 3.17(b)所示)亦應輕微。圖 3.18 是 SL 模具的模穴表面粗度隨脫模次數的變化，模仁試片在實驗前後表面粗度量測值，略為增加，實驗前  $0.20\text{-}0.22\mu\text{m}$ ，實驗後  $0.23\text{-}0.25\mu\text{m}$ ，應為脫模應力造成模仁表面塑性變形關係。果然，如預測般，模穴表面僅在初期使用的數次會稍微變粗糙，但在使用 15 次以後其表面粗度就大約維持在可接受的一定值左右，而不再隨使用次數的增加而有明顯的變化。圖 3.19 顯示冷卻時間對於脫模作用相對於 SL 模具的破壞性的影響。冷卻時間越長，脫模作用相對於 SL 模具的不良影響越大。這是因為冷卻時間越長，脫模應力會越大(如圖 3.13)，但 SL 模具降服強度上升比率相對地較小之故。

### 3.5.3 SL 模具的設計

雖然在正常的使用條件下脫模應力相對於 SL 模具材料的降服應力的比值 (Stress ratio) 最大不超過 0.5%，不至於直接造成模壁表面的破損，但是值得注意的是由成形品與模仁的接觸面積所形成的整體脫模力的作用，如圖 3.20 是 SL 模板與其固定部位之破壞情形。由於 SL 模具通常是以螺絲或壓板來將具有模穴形狀的 SL 模板夾持固定於模座上(如圖 3.21 所示)，因此 SL 模板在被固定處的部位的強度與整體脫模力的大小之間必須滿足以下的關係：

$$S > F \quad (3-2)$$

式(3-2)中，S 為 SL 模板固定部的強度，F 為整體的脫模力。

又因

$$\begin{aligned} S &= \tau_y \times A_{C''} = 0.5\sigma_y \times h \times l \\ F &= \sigma_d \times A \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中， $\tau_y$  與  $\sigma_y$  分別為 SL 模具材料的剪切降服強度與壓縮降服強度( $\tau_y=0.5\sigma_y$ )， $A_{C''}$  為 SL 模板固定部的截面”C”的截面積， $h$  為截面”C”的高度， $l$  為 SL 模板被壓板挾持固定部位的總長度(或截面”C”的總長度)， $\sigma_d$  為脫模應力， $A$  為成形品與 SL 模板的接觸面積。將式(3-3)代入式(3-2)可得下式：

$$0.5\sigma_y \times h \times l > \sigma_d \times A \quad (3-4)$$

根據圖 3.16(b)與圖 3.19 的結果，假設  $\sigma_d \doteq 0.005\sigma_y$ ，則可知 SL 模具設計上必須遵守

$$h \times l > 0.01A \quad (3-5)$$

才能免除 SL 模板受脫模力而破斷。實際上，由於考慮 SL 模具材料的潛變與疲勞等特性，式(3-5)必須修正為

$$n \times h \times l > 0.01A \quad , \quad n > 1 \quad (3-6)$$

其中  $n$  為設計係數。因此設計 SL 模具時，視 SL 模板與成形品的接觸面積的

大小，來決定前述最可能發生破壞的部份的最小容許截面積，以獲得較長的模具壽命。

#### 3.5.4 結果討論

根據實驗結果，此 SL 模具行為與傳統金屬模具材料行為有很大之差異，尤其是熱傳導較差，強度與壽命有限，以脫模特性實驗以瞭解其破壞機制，發現脫模力之大小與保壓、模具溫度及冷卻時間有關，模溫高且冷卻時間較長而脫模力大，易造成模仁表面塑性變形與表面粗度增加，將使模具使用壽命降低，因此 SL 模具溫度佔有極重要影響程度。本研究設計製作了一套實驗裝置，用以模擬了使用 SL 模具的射出成形的冷卻、保壓及脫模過程，並量測了脫模負荷。根據這些實驗結果，我們分析了 SL 模具在常用工程塑膠 PP 的平板的射出成形時的脫模應力，並探討了脫模應力對於 SL 模具的破損的影響，得到的結論歸納如下：

- (1) 使用 SL 模具時，保壓力越大、模溫越低、冷卻時間越長都會造成脫模應力的增加。
- (2) 當保壓力在 10 MPa 以上時，脫模應力會隨保壓時間的增長而增大。
- (3) SL 模板的表面粗糙度不至於因脫模次數的增加而有太大的變化。
- (4) 脫模力對於 SL 模板的破壞，最可能發生在於 SL 模板的被固定部位，或者 SL 模板上具有最小截面積的截面。因此設計 SL 模具時，視 SL 模板與成形品的接觸面積的大小，來決定前述最可能發生破壞的部份的最小容許截面積，以獲得較長的模具壽命。

因為模具壽命與射出次數相關，未來在實用上應朝向測試不同塑料之脫模力與模仁表面粗度，以簡化理論分析模擬，建立成形加工物理模型及製程參數資料庫，如此對提升 SL 模具壽命極為重要。

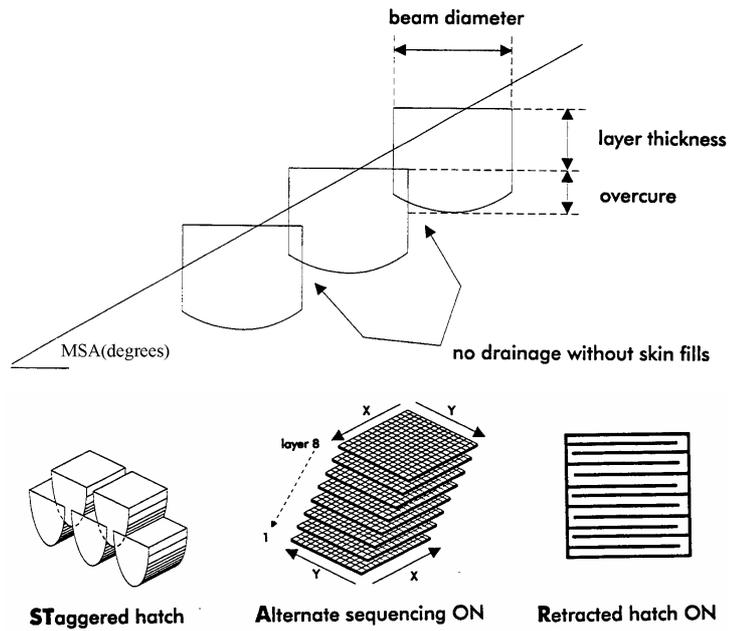


圖 3.1 樹脂光硬化成形參數說明[30]

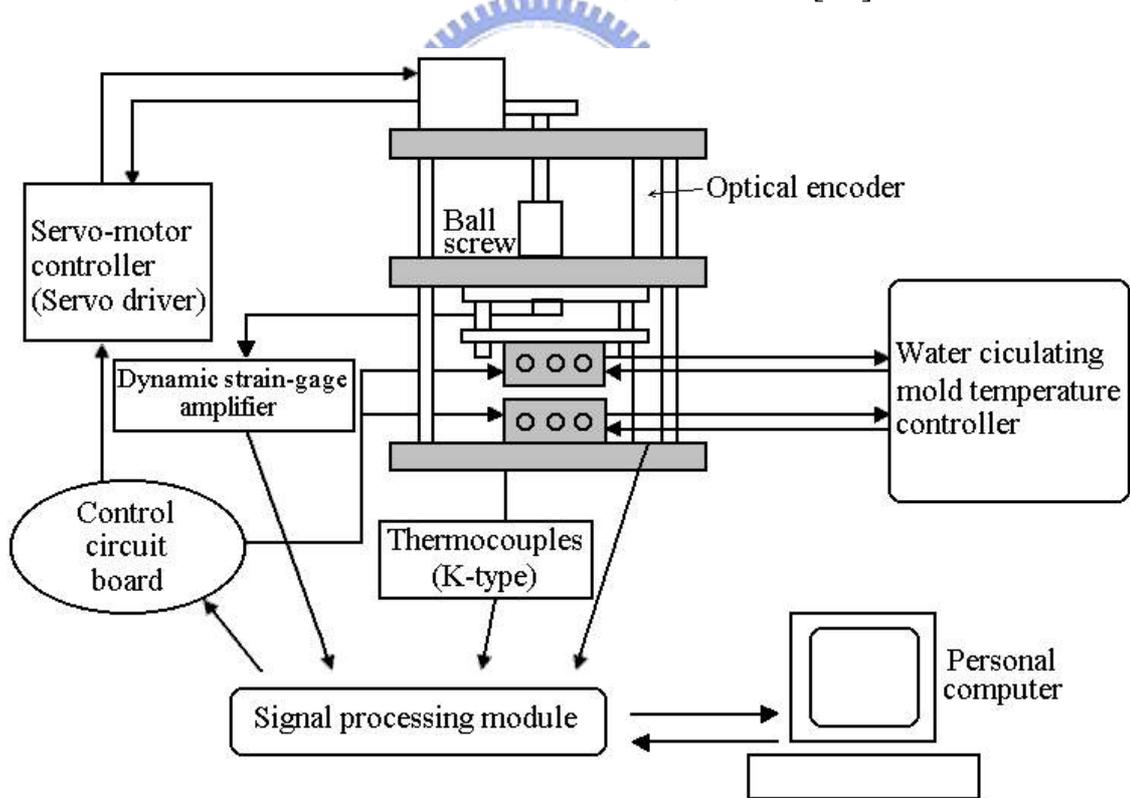


圖 3.2 保壓－脫模特性實驗架構

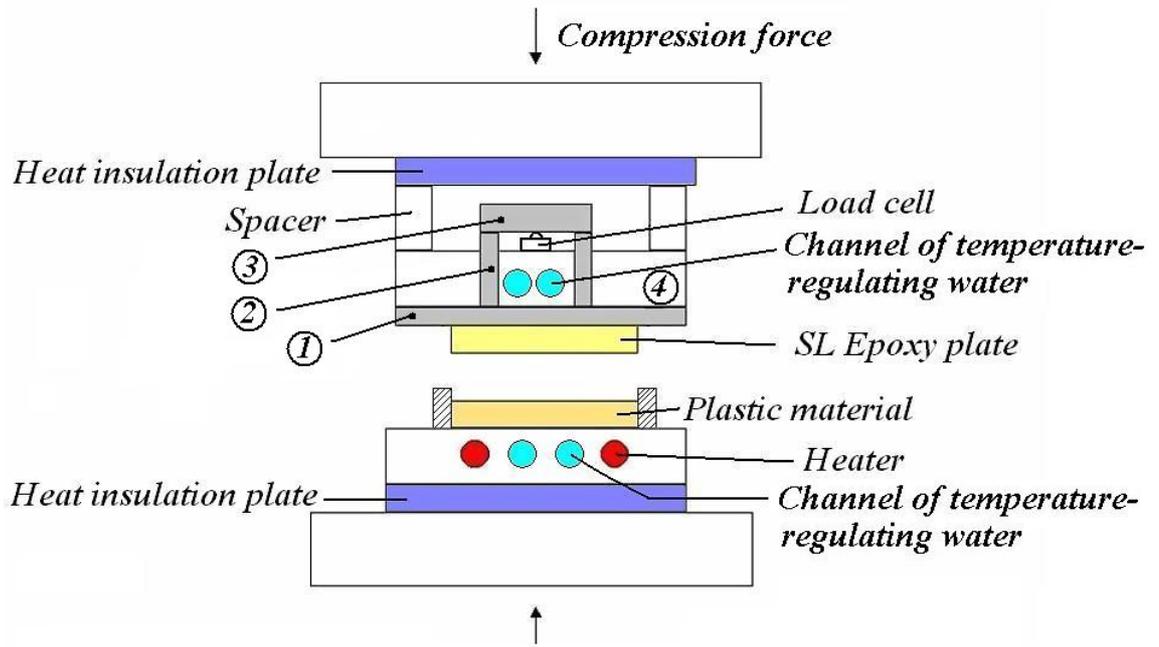


圖 3.3 (a) 壓縮實驗裝置示意圖



圖 3.3 (b) 壓縮實驗裝置

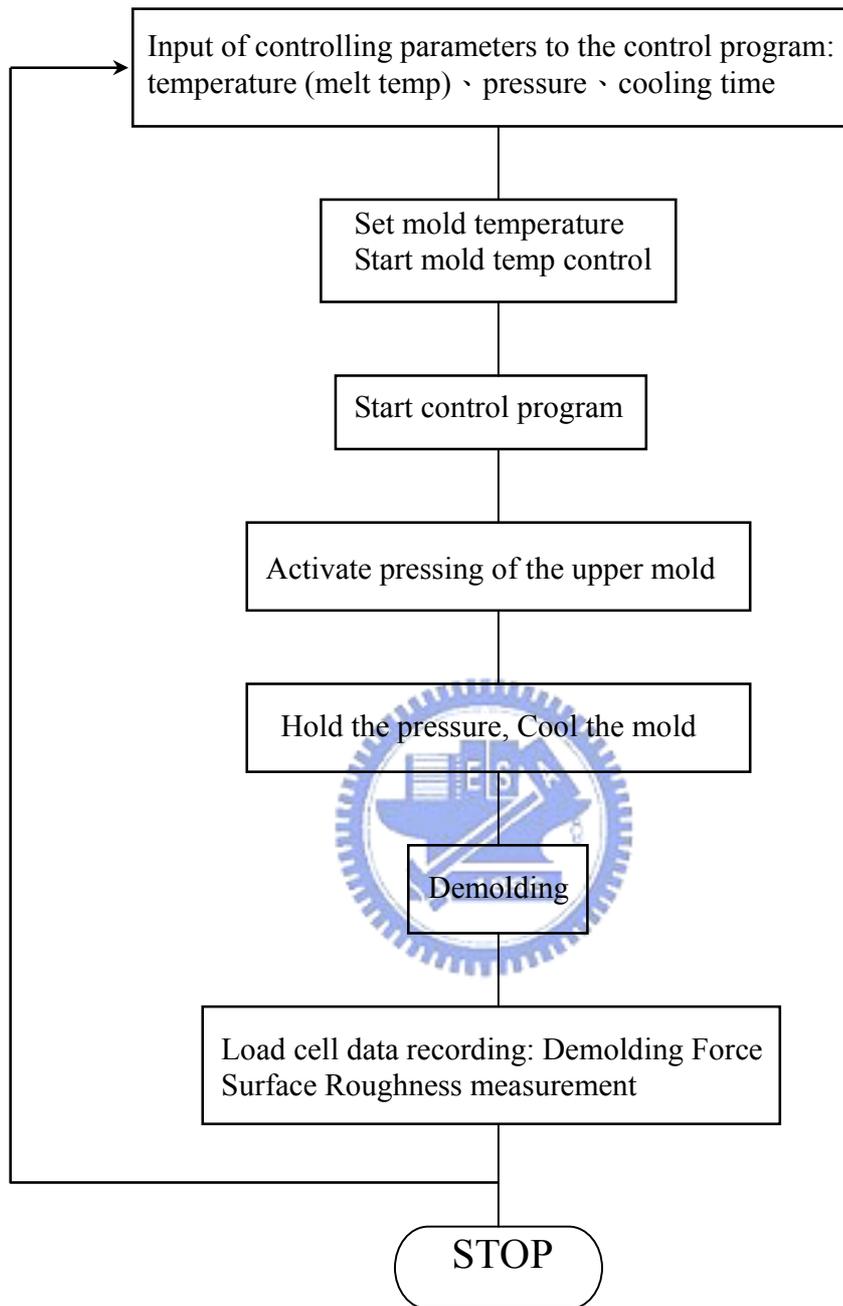


圖 3.4 成形脫模實驗流程圖

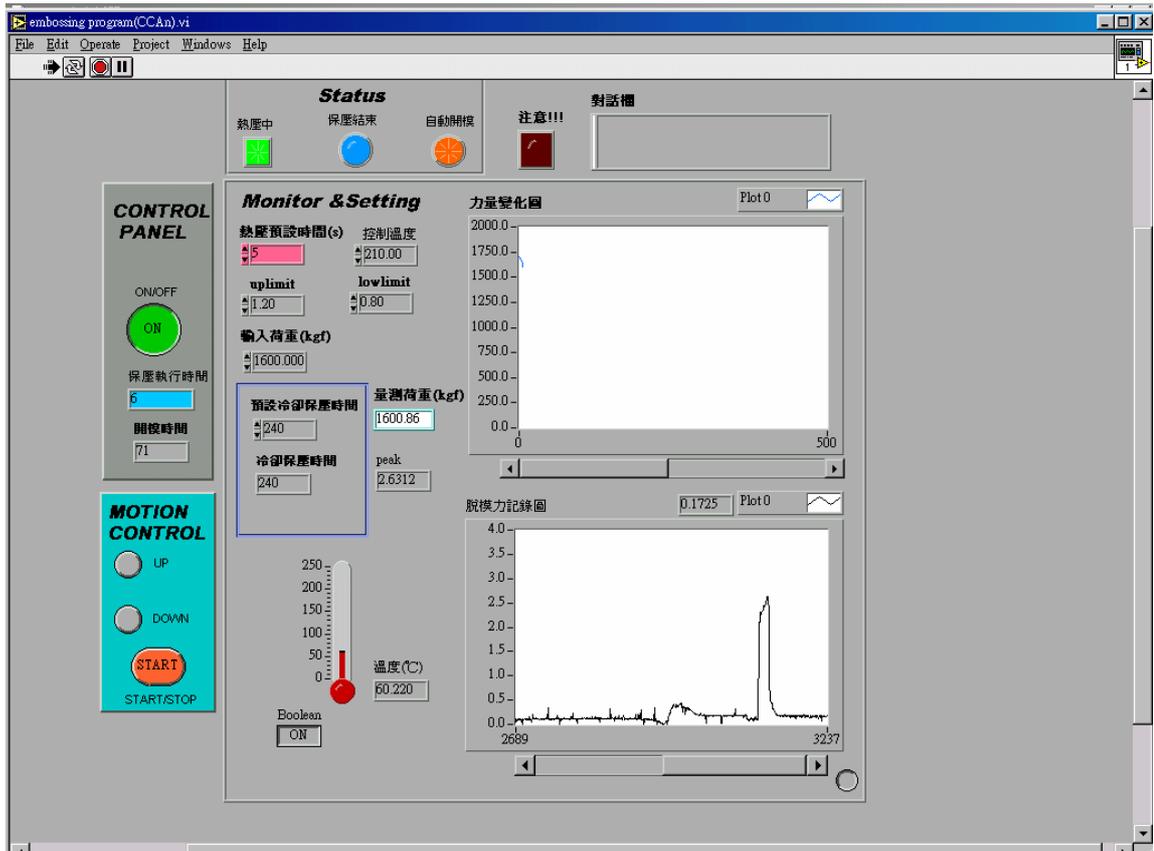


圖 3.5 脫模力量測結果



圖 3.6 表面粗度量測儀



圖 3.7 校正用標準試片

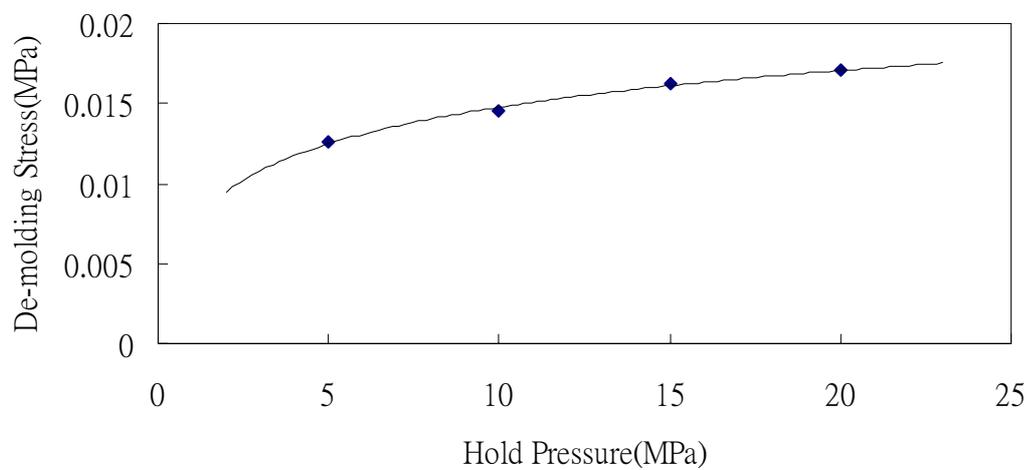


圖 3.8 保壓力與脫模應力的關係

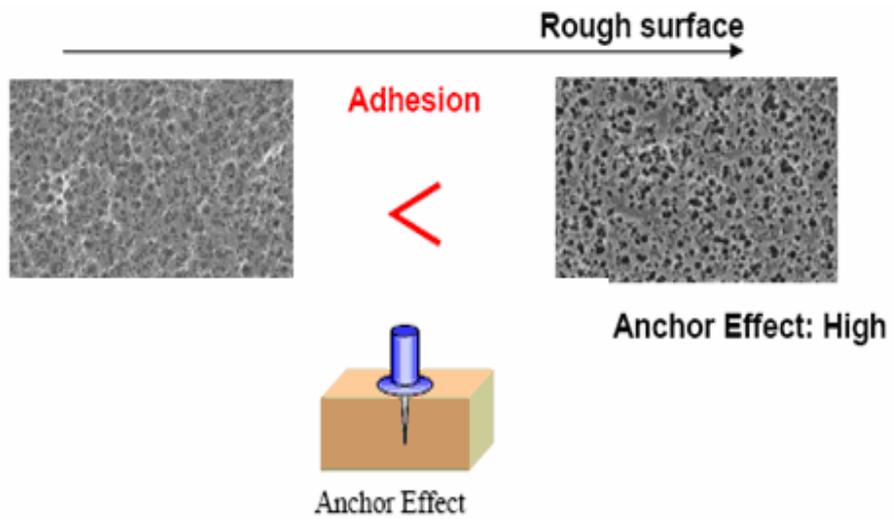


圖 3.9 錨定或黏固效應(anchor effect)

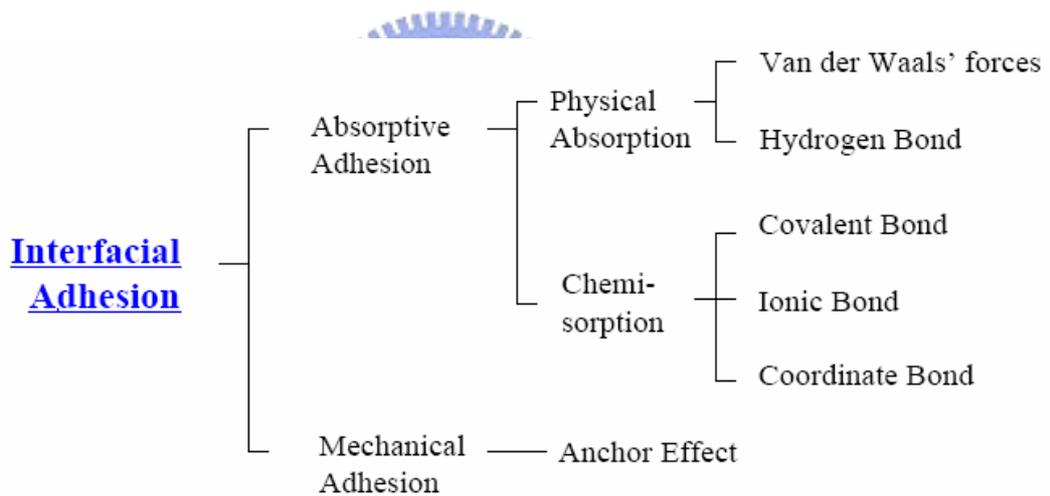


圖 3.10 界面黏著(Interfacial adhesion)的分類

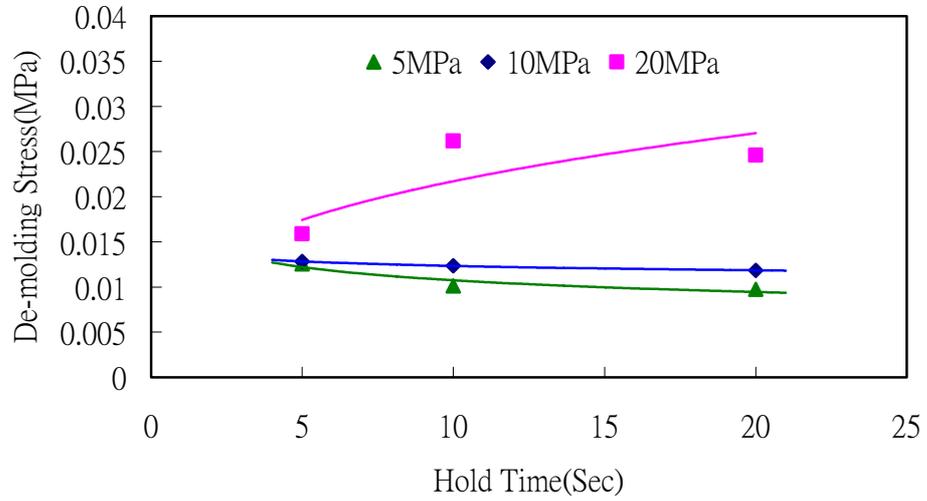


圖 3.11 保壓時間與脫模應力的關係

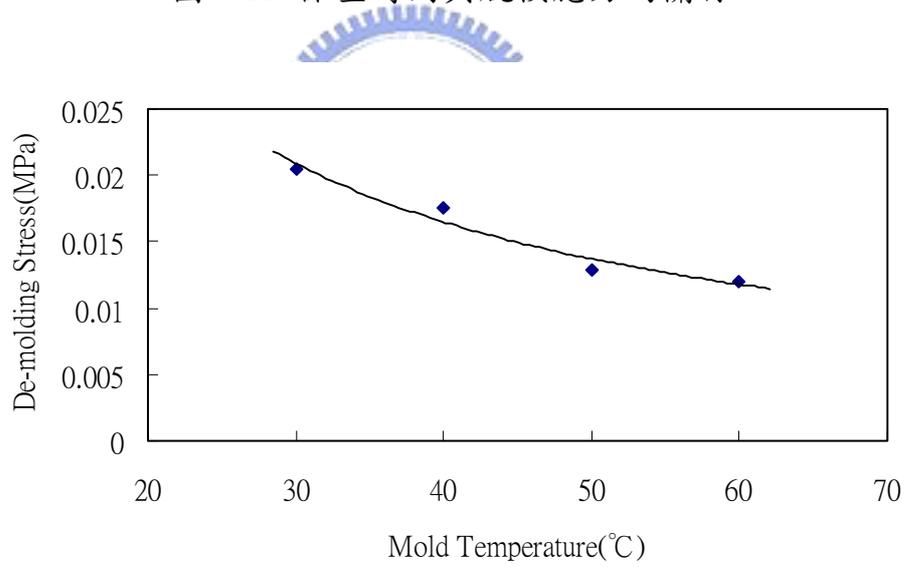


圖 3.12 模溫與脫模應力的關係

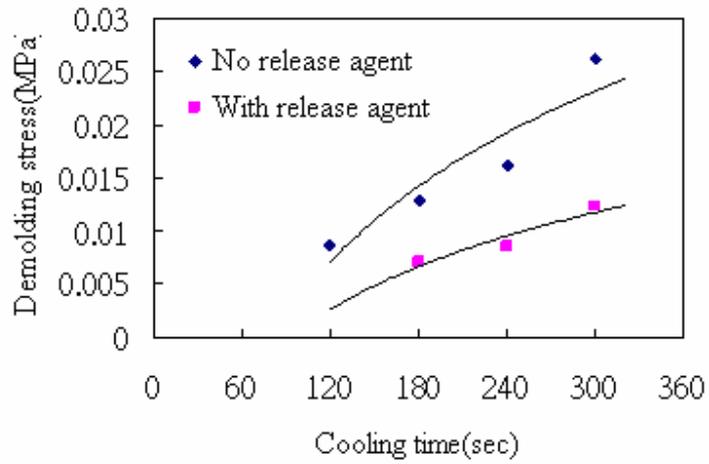
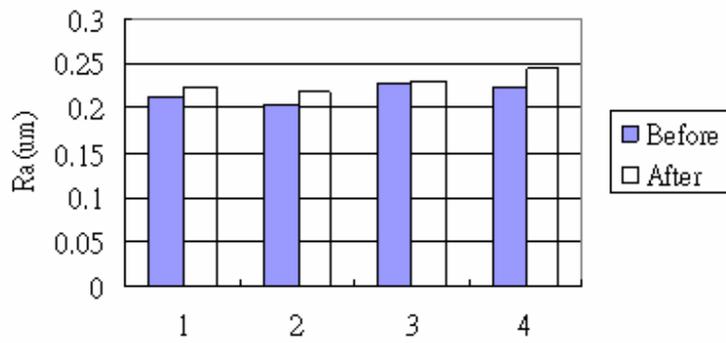
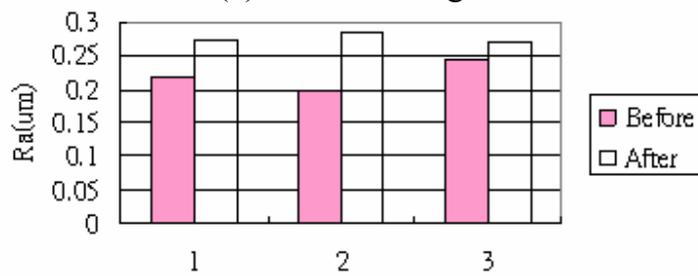


圖 3.13 冷卻時間對脫模應力的關係



(a) No release agent



(b) With release agent

圖 3.14 表面粗度量測(a)無施用脫模劑 (b)施用脫模劑

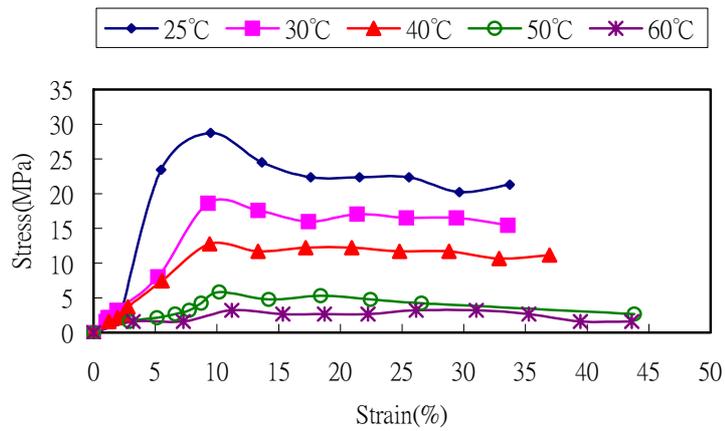
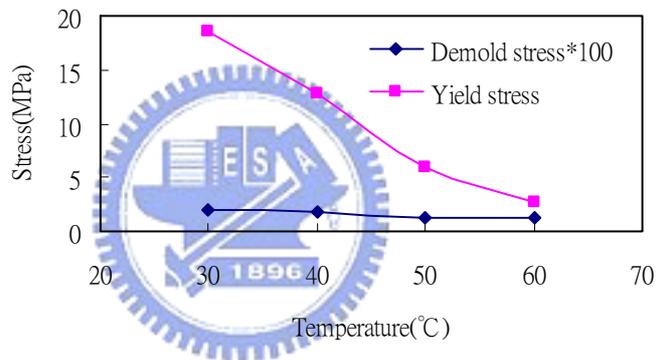
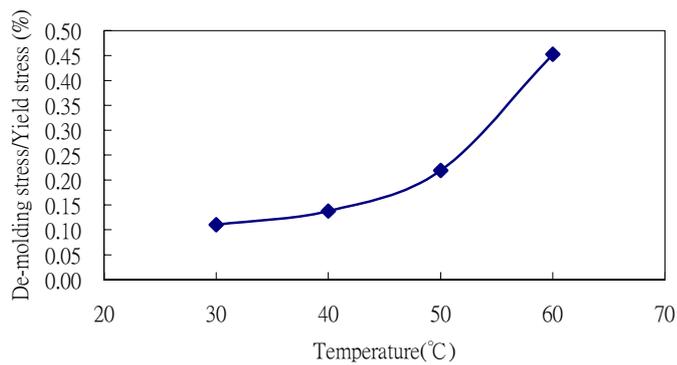


圖 3.15 在不同溫度下 SL 材料的壓縮應力與應變曲線



(a)



(b)

圖 3.16 脫模應力與 SL 模具材料的降服應力的比較：(a)脫模應力(x100 倍)與模具材料的降服應力隨溫度的變化，(b)脫模應力對模具材料的降服應力比值之變化。

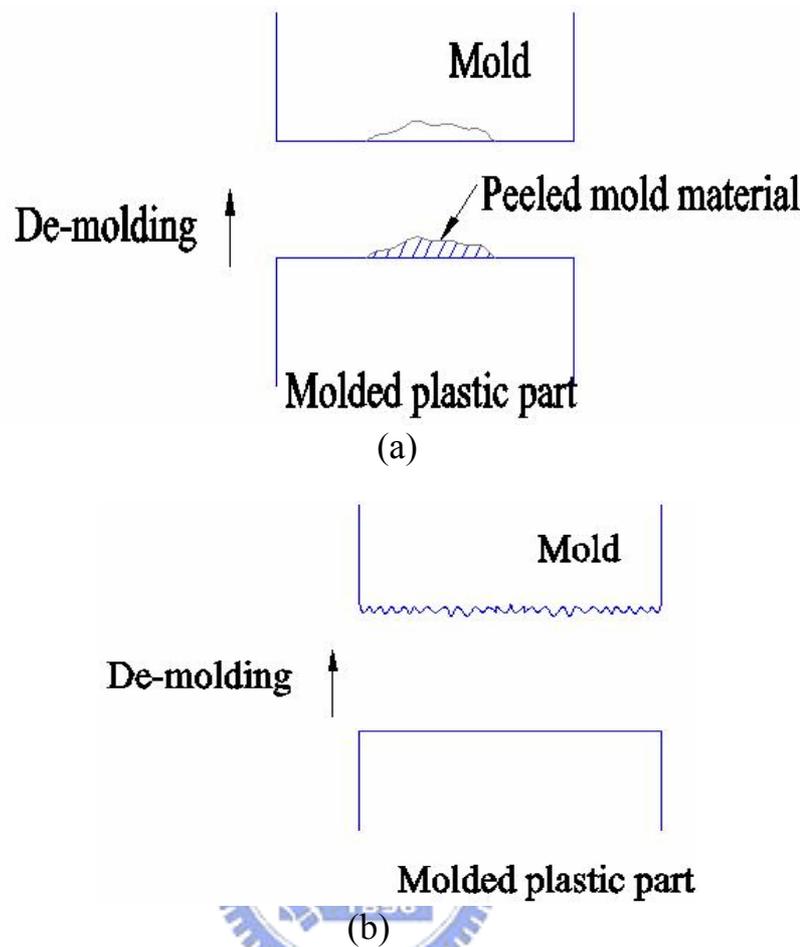


圖 3.17 (a)模壁表面材料的剝離(b)模壁表面變粗糙

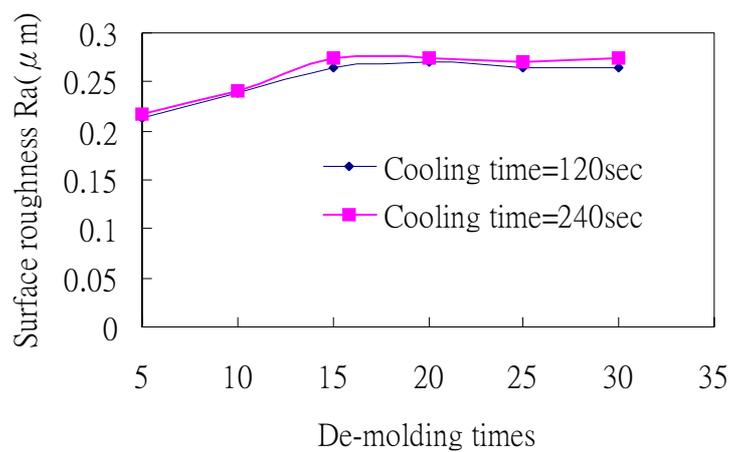


圖 3.18 脫模次數與模具表面粗度變化的關係

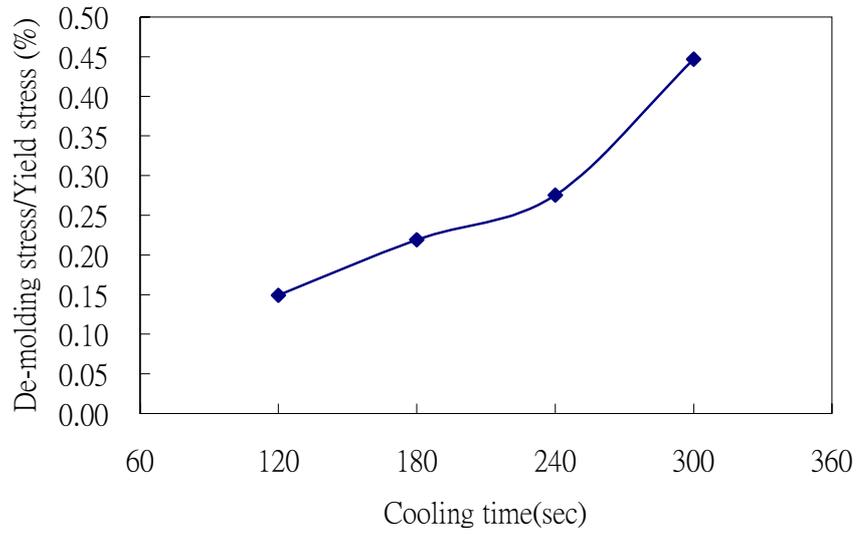


圖 3.19 模具材料的降服應力對脫模應力的比值隨冷卻時間之變化

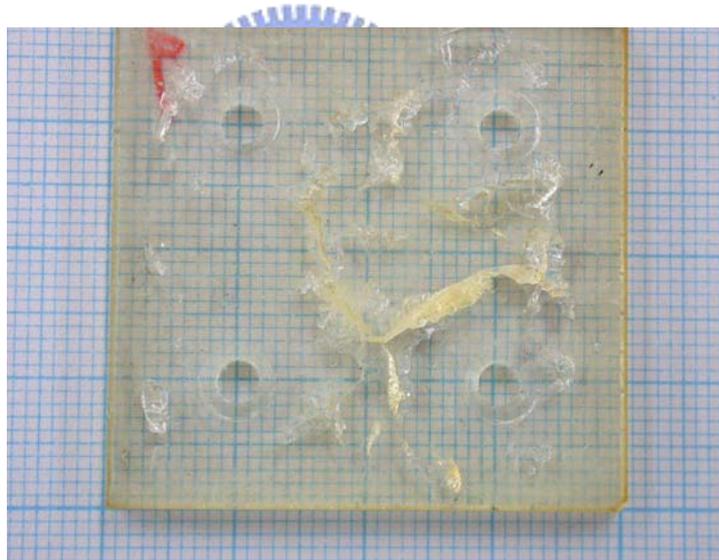


圖 3.20 SL 模板與固定孔破壞情形

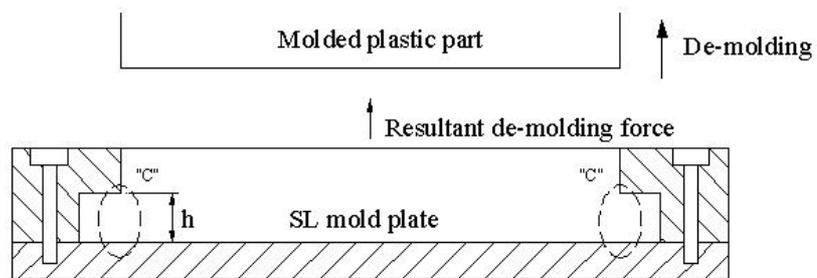


圖 3.21 SL 模板在模座上的固定方法

## 第四章 SL 模具中的材料流動及缺陷生成特性

### 4.1 簡介

傳統的射出成形原理為：高分子聚合物加熱塑化→高壓射入模穴→冷卻固化後脫模(圖 4.1)。其中加熱塑化的溫度一般在 200°C 左右(工程塑膠可能高達 300°C)，模具溫度約為 40°C，射出壓力 40 MPa，成形週期(Cycle time)為 10~60 秒，精密度則達 0.1%。然而，由於 SL 模具的強度、耐磨耗性與熱傳導性不及金屬模具，故射出壓力較低約 10~20MPa，成形週期較長約為 240~360 秒。

當聚合物於模穴內流動時，是以層流與最常見之噴水流(Fountain flow)模式 [33]，如圖4.2所示，充填過程中，中間區域的塑料被帶至波前前端後，向模壁兩側甩出，固化於模壁區域。此時，材料波前的兩側的固化速度以及波前的前進速度兩者之間的關係會決定成形品表面上流痕(Flow mark)的生成狀況。當流路之厚度逐漸減少，所需之射出壓力亦會增加。而聚合物與模壁間剪切應力產生滑動(Slip)，將造成成形品缺陷。另外由於溫差產生之固化層(Solid skin)，也將使充填過程中流動性不佳，而產生缺陷。

根據過去的研究發現，充填過程中之流動不平衡(Flow instability)是造成表面缺陷(Surface defects)產生的主要原因[34]，如圖4.3所示，尤其是流痕的生成，已經在結晶形(Crystalline)與不定形(Amorphous)材料的射出實驗中觀察到，包括PP(Polypropylene)、ASA (acrylonitrile-styrene-acrylate)及PC/ABS blends [34-36]。

由此可知，聚合物在模穴內之流動特性將對於射出成形性質有極大的影響。常見一般射出成形品缺陷：融合線(Weld Line)、流痕、固化層...等，不論是傳統的金屬模具或是SL模具，若可以掌握此流動特性，則可以針對塑膠結構缺陷產生原因，提出一套完整且有系統的解釋，進而從聚合物本身或加工環

境參數加以改進，決定最佳成形條件，避免缺陷生成，提高成形品品質。

## 4.2 流變理論

先前章節係針對一般尺寸射出成形與脫模特性研究，而對於射出成形品缺陷的問題，SL模具中的高分子材料流動及缺陷生成特性，是屬於流變學(Rheology)的探討範圍。

一般而言，高分子聚合物通常具有複雜的流變性質，這其中牽涉到聚合物本身的黏彈特性、剪稀薄性、溫度與壓力等。對於標準的理想型牛頓流體(Newtonian)，其黏度不會隨剪切率而改變，如圖4.4所示。若以剪切應力對剪切應變率( $\tau$ - $\dot{\gamma}$ )作圖，則為一直線，可依據(4-1)(4-2)(4-3)試推導彼此關係。

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4-1)$$

$$\gamma = \frac{S}{D} = \text{Tan} \theta \quad (4-2)$$

$$\eta = \frac{\tau}{d\gamma/dt} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4-3)$$



其中， $\tau$ ：剪切應力(shear stress)， $\gamma$ ：剪切應變(shear strain)， $\dot{\gamma}$ ：剪切應變率(shear strain rate) 而 $\eta$ ：黏度( shear viscosity)。

上面的數學模式同樣的可解釋非牛頓流體(Non-Newtonian)，差別只在黏度為函數形式，而高分子正屬非牛頓型流體，剪切應力對剪切應變率作圖為一曲線，如圖 4.5 所示，並且可以指數律方程式(Power law model)表示。

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (4-4)$$

$$\text{或 } \tau = \eta \dot{\gamma} \text{ ; 所以 } \eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4-5)$$

式中K及n均為常數，當為牛頓流體時 $n=1$ ， $K=\eta$ ；對於非牛頓高分子熔融體，n值小於1。

#### 4.2.1 黏度與溫度壓力的關係

高分子流體的黏度除了對剪切率的變化十分敏感外，也會因溫度上升而導致黏度下降；溫度下降則使黏度上升。當溫度遠高於玻璃轉移溫度( $T_g$ )或熔點時，高分子流體之粘度( $\eta$ )，係遵循 Andrade 方程式：

$$\eta = K \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (4-6)$$

其中 K 為常數，E 為固定剪切應力時所估計的流動活化能，

R 為氣體常數，T 為絕對溫度

壓力也會影響高分子流體的黏度，數種理論建議流體的粘度係決定於其自由體積[37-41]。自由體積可以不同方式來定義，但普通的定義是真實體積與分子發生緊密堆積而不能運動時的體積之差。自由體積越大，越容易發生流動。因為熱膨脹，所以自由體積會隨著溫度而增加，不過大部份直接影響自由體積的應該是壓力，增加靜壓會減少自由體積，而增加液體的粘度。Litovitz[37]和 Macedo[38]等人認為只有溫度對粘度效應的 Andrade 方程式在加入壓力因素時，必須修正為下式

$$\eta = K \exp\left(\frac{E}{RT} + \frac{CV_0}{V_f}\right) \quad (4-7)$$

其中  $V_0$  為緊密堆積的體積；而  $V_f$  為自由體積，定義為  $(V - V_0)$ ，且 V 為觀察的體積；常數 C 一般介於 0.5~1.0 之間。緊密堆積的體積  $V_0$  與玻璃轉移溫度( $T_g$ )時的體積相似如(4-8)式。

$$V_f \cong \alpha V_0 (T - T_g) \quad (4-8)$$

$\alpha$ : 熱膨脹係數

#### 4.2.2 流動分析

針對SL模具中的高分子材料流動及缺陷生成特性，本研究設計基本的長直平板狀流路實驗，以實際射出充填來模擬各種條件下平板流路內的材料流動狀況。由於熔融塑料的流體性質屬非牛頓流體，其黏度會隨流動剪切率的變化而變化，而且其流動特性一般均屬於層流，因此可在層流架構下，建立聚物流變模式[42]。

首先，所有流體的分析均從動量守恆方程式(Equation of Conservation of Momentum)開始：

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla \bar{V} \right) = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho g \quad (4-9)$$

其中 $\rho$ 密度， $t$ 時間， $\bar{V}$ 速度向量， $p$ 壓力， $\bar{\tau}$ 剪切應力張量，而 $g$ 重力加速度。左邊兩項為慣性力(Inertia Force)，右邊第一項為壓力項，第二項為應力項，第三項為重力項。聚合物在高壓流動下，我們可以忽略慣性力與重力所造成之影響，因此上述方程式可演變成一剪切應力與壓力變化的平衡方程式：

$$0 = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} \quad (4-10)$$

在討論一流體於薄板內流動情形時，假如流動分析限定在二維平面流體，則可得到如圖4.6(a)之力平衡圖，以數學式表示為：

$$P \cdot \Delta y \Delta z - (P + \alpha P / \alpha x \Delta x) \Delta y \Delta z + (\tau + \alpha \tau / \alpha y \Delta y) \Delta x \Delta z - \tau \Delta x \Delta z = 0 \quad (4-11)$$

簡化後數學式表示為：

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (4-12)$$

換言之，在單純剪切流體中，其流動模式是一流體壓力梯度與反方向剪切應力之平衡關係。上式亦可將之寫成為文字形式：

$$0 = -\alpha(\text{壓力})/\alpha(\text{流向方向座標}) + \alpha(\text{剪切應力})/\alpha(\text{流動之垂直方向}) \quad (4-13)$$

因為考慮單純二維平形板剪流(如圖4.6(b))，上式可寫成為：

$$-\frac{dP}{dx} + \frac{d\tau_y}{dy} = 0 \Rightarrow \int_0^y \left(-\frac{dP}{dx} + \frac{d\tau_y}{dy}\right) dy = 0 \quad (4-14)$$

$$\tau_y = 0 \text{ 在 } y = 0 \text{ 處} \Rightarrow \tau_y = \frac{dP}{dx} y \quad (4-15)$$

因此，藉由量測射出成形充填過程中的模穴壓力，可計算出剪切應力。

綜合言之，本 SL 模仁流路射出成形研究，係針對高分子材料流變特性且著重於充填、保壓與冷卻參數的探討，壓力分布量測，據以分析材料內部的剪切應力特性。另一方面，對充填後成品試片，觀察是否有缺陷的融合線或流痕生成，進行分析，以作為將來 SL 模仁薄流路射出成形模具設計及成形條件選擇的參考。

### 4.3 實驗設計

目前對 SL 模具中的材料流動及缺陷生成，並不清楚，因此希望藉由實驗來獲知其部分特性。對於黏彈性材料而言，流動時剪切應力的分佈情況會直接影響成品的成形特性，因此若能得到此一資料，將對分析聚合物與模壁間是否產生滑動現象，掌握成形品殘留應力分布等，有正確的判斷。

#### 4.3.1 模具設計

為達實驗預定目標，在設計基本的流路尺寸、配置的同時，必須配合以下幾項條件：

- (1) 流路厚度可視實驗之需要而加以調整。
- (2) 提高流路寬度與厚度之比例，以避免模穴左、右兩側模壁對流路中央部份的干擾，以減少壓力量測的誤差。
- (3) 壓力量測裝置將沿著流動方向設置，因此流路之長度必須要能滿足量測

上的需求。

(4)設計所得的模具尺寸，必須能配合射出機與標準模座之規格。

根據這些要求，本實驗模具之設計，係在可動側模板中由模具邊緣向內部加工一長 105mm、20mm、30mm 之凹槽，並在凹槽內設置一固定厚度之鑲塊，藉由鑲塊與固定側模板之間的高度差異，以便形成實驗所需之流路。並可依照實驗需要，更換含 SL 模仁鑲塊或金屬鑲塊。模穴、鑲塊與流路三者間之關係示意圖，如圖 4.7 所示。SL 模仁尺寸為 90.0 mm\*30.0 mm\*3.0 mm，由 SLA5000 機台製作，使用 CIBATOOL SL 5510 樹脂，材料性質如第三章的表 3.1 所示。而金屬模仁之尺寸同 SL 模仁。

模具之選定為台灣富得巴(FUTABA)所生產之型號 MDC SA 2023 60 60 60 S 之標準模座，其材質相等於 S55C 中碳鋼，降服強度  $35.5 \text{ kgf/mm}^2$ 、熱傳導率  $0.110 \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ 。此模具除上述流路設計外，尚須配合其他設計理念，以利實驗之進行。一為運用扇形澆口(Fan gate)，當聚合物熔融液導入模穴時，利用廣面積之澆口可以使澆口附近的成形缺陷減至最少，並可降低澆口附近之應力，均勻充填模穴，避免聚合物在流路前段流動不均之現象發生。其二為模溫控制系統，為改善聚合物在流路內流動性，需適當提高模具溫度，因此採用具有溫度控制器的模溫機來調整溫度。

圖 4.8 為 SL 模具之外觀，圖 4.9 為配合壓力量測實驗所設計的鑲塊與感測器之實際配置，圖 4.10 則為射出成形件之 3D 圖形與尺寸。

#### 4.3.2 壓力量測法

欲瞭解聚合物在模穴內之流動特性，我們需知道其剪切應力的變化。前節曾提到，剪切應力可以藉由充填過程中流路壁面之壓力變化得知，因此必須設法量測充填過程中聚合物對壁面產生之壓力。

本實驗的量測方法為在模穴內埋入小型膜片(Diaphragm)式壓力感測器，其感測面直接與材料接觸，當材料通過感測面時會對感壓膜片造成應變；在轉換成直流電壓後，讀取其電壓大小再換算成壓力值。壓力感測器之配置如圖 4.11 所示。

射出成形過程之典型的模穴壓力時序曲線如圖 4.12 所示，可區分為充填階段(Filling phase)、壓縮階段(Compression phase)、保壓階段(Holding Phase)及冷卻階段(Cooling phase)。A 點為開始進行射出，熔融塑料經射嘴、流道及澆口進入模穴，B 點接觸到感測器後持續充填，在 C 點充填階段結束，此時塑料熔融充飽整個模穴但並未壓實，該點又稱為充滿點( $P_{fill}$ )；之後開始進入壓縮階段，模內熔融塑料受持續壓縮而壓力陡升，D 點為最大壓力點( $P_{max}$ )；此後熔融塑料開始進行靜態保壓階段，在 E 點為保壓結束，位於澆口熔融塑料已凝固，模穴內外的塑料被隔絕；之後進入冷卻階段，一直到開模為止。整體而言，從 A→B→C 所需時間為充填時間( $t_{fill}$ )，從 C→D 為壓縮時間( $t_{compression}$ )，從 D→E 為保壓時間( $t_{hold}$ )，從 E 以後到開模為冷卻時間( $t_{cooling}$ )，這四階段的時間總和加上開模、頂出與關模時間即為射出成形的全週期[43, 44]。

## 4.4 實驗設備與材料

### 4.4.1 射出成形機

本實驗所使用之射出成形設備，為德國 ARBURG 270S 型號之射出成形機 (圖 4.13)，其主要之規格：最大鎖模力 500KN，液壓直壓式鎖模，最大射出量 30cm<sup>3</sup>，最大射出壓 2320bar，液壓幫浦功率 11kw。詳細之規格如表 4.1 所示。

表 4.1 射出成形機規格

	項目	單位	數值
射出 單元	螺桿直徑	mm	22
	理論射出容量	cm <sup>3</sup> / shot	30
	最大射出壓力	MPa	232
	最大射出速率	cm <sup>3</sup> /sec	78
	最大射出力	kN	30
	射出馬力	kW	13.7
鎖模 單元	鎖模力	ton	50
	最大鎖模行程	mm	350
	最大容許模高	mm	525
	最大容許模板尺寸	mm	270X270

### 4.4.2 壓力感測器

由於實驗之模具溫度較高，故一般量測模穴壓力之感測器並不適合，而挑選 DYNISCO 公司生產之 PT465XL-10M 型膜片式耐高溫壓力感測器，此為專門設計用來量測高溫下之模穴內之壓力感測器，外觀尺寸如圖 4.14 所示，其規格如下表 4.2 所示。

表 4.2 壓力感測器規格

項目	單位	數值
量測範圍	bar (psi)	0~700 (0~10,000)
超載極限	bar (psi)	2450 (35,000)
精確度	%FSO	±0.5
重現性	%FSO	±0.2
料溫範圍	°C	≤400
重量	lbs	1.5

#### 4.4.3 資料擷取系統

本實驗使用之資料擷取系統硬體為美國 GW INSTRUMENTS 生產之 #iNet-100B 資料擷取盒，它可以直接感測電流、熱電偶、應變規、電阻、電壓、熱敏電阻等訊號，具有 8 channel 類比訊號輸出與 8 條數位訊號 I/O 線。另附有光電耦合絕緣器，可降低外部電源雜訊干擾，並有內建式放大器，適用於 MS-Windows 及麥金塔等電腦作業系統。控制軟體則為 instruNet World，可提供含有長條圖及示波圖之顯示，而且每一頻道可提供獨立之類比濾波、積分時間、取樣率及數位訊號之設定，亦可供其他軟體(如 Labview、DASYLab、Excel... 等)下載使用。

#### 4.4.4 實驗材料

實驗材料選用之塑料有：聚丙烯 (Polypropylene, PP) 與聚碳酸酯 (Polycarbonate, PC)。PP 為結晶形 (Crystalline) 材料，而 PC 為不定形 (amorphous) 材料。PP 為福聚高流動性之 6331 型，PC 則採用德國 Bayer 公司的塑料，相關材料的物性如下表所示。

表 4.3 PP 與 PC 物性

Engineering Plastics	PC	PP
Tensile strength (MPa)	55~70	21~40
Hardness (Rockwell)	R115~125	R50~110
Heat conductivity ( $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ )	0.46	0.28
Thermal expansion ( $*10^{-5}\text{C}^{-1}$ )	6~7.0	11.0
Heat resistance (continuous)( $^{\circ}\text{C}$ )	121	88~115

#### 4.5 實驗方法與參數

本實驗分為兩部分來進行，第一部分、射出成形缺陷生成實驗，第二部分、壓力分布量測實驗。



##### 4.5.1 射出成形缺陷生成實驗

選定與射出成形特性相關的射出速度、模具溫度為主要實驗參數；至於，冷卻時間、保壓力、保壓時間及鎖模力等參數(劃底線)皆設為固定值。其參數變動範圍如表4.4所示。

實驗後進行試片觀察與分析，除肉眼觀察外，細部或特定區域則使用 SEIWA Optical MS-512-T 電子式顯微鏡(Optical Microscope)對於表面的形態觀察並照相。另外，模仁試片與射出成品之表面粗度量測，採用平均面粗度 $R_a$  (Roughness Average)為量度值，使用Mitutoyo SURFTEST MST-211表面粗度儀(如圖3.5所示)。而且，表面粗度量測，皆沿著模仁試片與射出成品之流動方向。

表4.4 缺陷生成實驗參數

成形參數	SL insert 參數範圍	Metal mold 參數範圍
塑料溫度(°C)	<u>210</u> (PP) / <u>300</u> (PC)	<u>210</u> (PP) / <u>300</u> (PC)
模具溫度(°C)	30, 40, 50, 60, 70	30, 40, 50, 60, 70
射出速度(cm <sup>3</sup> /sec)	20, 30, 40, 50, 70	20, 30, 40, 50, 70
保壓/保壓時間 (MPa/sec)	<u>40 / 5</u>	<u>40 / 5</u>
冷卻時間 (sec)	<u>200</u>	<u>50</u>

註： a. 流路厚度(Cavity thick)：3 mm

b. 使用模仁尺寸：90\*30\*3mm

c. SL insert材料性質：

CTE 108ppm/°C (<T<sub>g</sub>), 221 ppm/°C (>T<sub>g</sub>), T<sub>g</sub> 63°C,

Tensile Modulus 2854MPa,  $\alpha$  (heat transfer coefficient)= 0.2 W/m<sup>2</sup>K

#### 4.5.2 壓力分布量測實驗

本實驗選定與 SL 模具之流路壓力特性相關的射出壓力、射出速度、保壓時間、模具溫度、塑料溫度等五個主要實驗參數，因這幾個參數對於材料充填、保壓與冷卻時之流動特性影響最大；至於其他參數，由於本實驗不對成形品之收縮翹曲問題探討，因此將冷卻速率、保壓力(40MPa)、冷卻時間(200sec)及鎖模力等皆設為固定值。將整理之實驗參數如下表所示：

表 4.5 壓力量測實驗參數

成形參數	參數範圍	備註
塑料溫度(°C)	295, <u>300</u> , 305, 310	PC 塑膠
模具溫度(°C)	30, <u>40</u> , 50, 60	
射出速度(cm <sup>3</sup> /s)	10 ,30, <u>50</u> , 70	
射出壓力(bar)	300, <u>400</u> , 450, 500	
保壓時間(sec)	3, <u>5</u> , 7, 10	

註：a.劃底線之數值為參數變化時的固定參數

b.流路厚度：2 mm (或 3mm)

#### 4.5.3 實驗進行方式

在實驗研究中，射出成形參數中之射出壓力、射出速度、模具溫度、塑料溫度、鎖模力和保壓力等皆可藉由射出機本身軟體來設定，而模具溫度則另外由模溫機來作溫度控制，並以熱電偶量測溫度。模穴內部之壓力感測器量測值是唯一需要擷取的部分，充填過程中需要注意訊號擷取頻率及儀器之零點校正。充填結束後，利用模溫機之循環水來對模具冷卻，待溫度降至玻璃轉移點以下溫度時，打開模具將成品頂出，並結束壓力訊號之擷取。最後對成品外觀觀察，以了解缺陷生成情形，或以顯微照相觀察表面形態。更進一步，則使用偏光彈性法(Photoelastic method)量測全場的殘留應力的實際分佈情形[45]。藉由比較射出成品上的光學干涉(Interference)紋階顏色及階數變化，分析應力分佈的情形。根據應力光學定律(Stress-optic law):

$$\Delta n = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4-16)$$

其中 $\Delta n$  為光學雙折射率差， $C$  為應力光學係數(m<sup>2</sup>/N)， $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 為第一與第二主應力差。通常應力光學係數較高時有較明顯的光學干涉條紋變化，利於

應力分佈的觀察。

## 4.6 模擬分析

電腦輔助工程分析(CAE)應用在塑膠射出成形之模擬，可獲得流動分析結果如壓力分佈、溫度分佈等，本研究利用模流分析軟體 Moldflow 進行 3D 模流分析，將模擬分析與實驗結果作一比對。

其理論基礎為在非等溫泛牛頓流體充填過程中，以質量守恆(連續方程式)、動量守恆與能量守恆控制方程式，配合高分子材料之流變理論與數值求解，模擬非牛頓流體於模穴內充填、保壓、冷卻等行為[46]。

### 4.6.1 模擬分析流程

本模擬分析係利用 Moldflow 軟體來模擬射出成型之塑件射出，Moldflow 使用控制體積有限元素法來求解融膠於模穴內的流動，且針對不同的使用者需求提供不同的分析功能模組來執行模擬過程[47, 48]。依模擬步驟可分為如下部分：

#### 1. 建模

利用市面上常用的3D CAD繪圖軟體(如UG、Solidwork、Pro/E...等)先行建構所設計的塑件實體模型。

#### 2. 轉檔並匯入Moldflow軟體

將實體模型轉換成Moldflow軟體所能接受的模型格式(如STL、IGES、STEP...等)。

#### 3. 產生Mesh 網格

對實體模型產生三角形網格元素，並檢查分割網格的品質，並進行修補改善網格的工作。

#### 4. 選擇射出模態與分析模組

針對不同射出成型的方法，選擇所需的射出模態，並選擇所要模流分析的模組。

#### 5. 選擇材料

Moldflow軟體有內建塑膠材料的資料庫，也可自行匯入所需塑膠材料的性質。

#### 6. 設定流道系統

進行澆口、橫流道、豎澆道的形式、位置與大小設定，並設置冷卻水管。

#### 7. 設定加工條件

設定射出成型加工的條件，如模溫、料溫、充填速率、保壓壓力....等大小。

#### 8. 進行分析並產生結果報告

以上述所輸入的條件開始進行分析，分析完成後可針對分析的結果(如壓力分佈、溫度分佈、翹曲變形....等)再來進行調整修正參數。

#### 4.6.2 模流分析設定與結果

首先將建好的 3D 電腦圖檔(圖 4.10)進行 Mesh 網格作業，切三角形網格元素結果如圖 4.15 所示，其元素(Elements)及節點(Nodes)數目如下：



```
TITLE =
NUMBER OF ELEMENT TYPES =      1
  MAX ELEMENT NUMBER =    10860
  MAX NODE NUMBER =      18534
  MAX KEYPOINT NUMBER =      354
  MAX LINE NUMBER =        196
  MAX AREA NUMBER =         19
  MAX VOL. NUMBER =         1
MAXIMUM LINEAR PROPERTY NUMBER      =      1
ACTIVE COORDINATE SYSTEM              =      0 (CARTESIAN)
```

將 CAD 圖檔匯入 Moldflow 後，以一模一穴的模具設計，流道為傳統之豎澆道，並設置冷卻水管，完成流道系統設定後，如圖 4.16 所示之射出塑件與冷卻水管實體模型。

選擇材料為 PC 塑膠。

加工成形條件之設定，係以參考表 4.4 條件輸入，包括：

Mold Temp=30°C, Melt temp=300°C, Cycle time=200 sec, Hold Pressure= 32 MPa,  
Fill time=1.7 sec

至於，SL 模仁則選擇資料庫中高熔點之 PP 替代，僅需要輸入 Thermal conductivity (K) = 0.164 W/m°C。金屬模仁選擇 P20 Steel, Thermal conductivity =36.5 W/m°C。

執行分析(Analysis)指令，Run Default condition，分析結果的比較：如圖 4.17(a)、4.18(a)、4.19(a) 分別為 SL 模具之流動波前圖、溫度分布圖(模穴表面溫度)、模穴壓力曲線圖。圖 4.17(b)、4.18(b)、4.19(b)分別為金屬模具之流動波前圖、溫度分布圖(模穴表面溫度)、模穴壓力曲線圖。比較 SL 模具與金屬模具溫度分佈圖發現，金屬模具溫度在近澆口附近較高達 32.58°C，SL 模具則有溫度分佈不均勻的局部積熱現象，溫度最高處達 48.84°C，可證實是 SL 模仁熱傳導係數較低造成；至於模穴壓力模擬結果，SL 模具壓力值較低為 25MPa，金屬模具為 32.5MPa。

## 4.7 SL 模具內的壓力分佈特性

### 4.7.1 射出成形參數之影響

先前論文有關傳統金屬模具之成形參數對流路中壓力分佈的影響[49]，包括改變射出壓力、射出速度、模具溫度、塑料溫度四個參數，其中以改變模具溫度影響最大，隨著模具溫度的提高，流路中所量測到的壓力值越小；觀察成形品發現當模具溫度越高時，材料流動性越好，流出流路的材料也多。究其原因溫度越高，材料黏度越低、所受剪切應力也越小。射出壓力提高，流路中所量測到的壓力值只有些微的增加。射出速度及塑料溫度對流路中的壓力分佈

則沒有明顯的影響。

實驗測得的典型之模穴壓力曲線經 Excel 軟體輸出如圖 4.20 示，由於模穴壓力曲線特性受感測器埋設的位置影響，感測器設在近澆口與遠澆口彼此會有時間差與壓降的現象，近澆口(S1)壓力大於遠澆口(S2)，如圖 4.21 示。

充填參數包括改變射出速度與射出壓力，圖 4.22 為改變射出速度所量得之模內壓力分佈圖，射速分別由 10, 30  $\text{cm}^3/\text{s}$  提高到 70 $\text{cm}^3/\text{s}$ ，充填模穴時間會縮短，圖中顯示模穴內的壓力梯度(S1 與 S2 兩 Sensor 間)由 1.4 MPa, 1.87 MPa 變成 1.8 MPa。所以，改變射出速度所得之流路壓力分佈，隨射速增加充填時間較短，其壓力差增加，故剪切應力變大。圖 4.23 為改變射出壓力所量得之模內壓力分佈圖，射壓分別由 300, 400 bar 提高到 500bar，充填模穴時間也會縮短，但是 300bar 因射壓小，會有短射現象，而模穴內的壓力梯度隨射出壓力之提高由 4.3MPa 變成 6.6MPa。所以，射壓提高，壓差由 4.3MPa 增加至 6.6MPa，故剪切應力變大。但是，若射出壓力太大時，保壓結束後，殘餘應力大，容易過充填且造成模仁破壞。

保壓參數係改變保壓時間，圖 4.24(a)為改變保壓時間所量得之模內壓力分佈圖，保壓時間分別由 5s, 7s 提高到 10s，近澆口(S1)壓力值逐漸升高，且模穴內的壓力梯度由 4.3MPa, 4.4MPa 變成 5.4MPa，故剪切應力變大。比較保壓時間的影響如圖 4.24(b)示，保壓時間越短，模穴壓力降低越快，最終模穴壓力越低。

#### 4.7.2 溫度的影響

溫度效應影響包括塑料溫度與模具溫度，提高塑料溫度可使黏度減少、壓降少，有助於塑料在模具內之流動性，但是會使冷卻時間拉長增加生產週期，而且料溫提高也易使塑料劣化，降低成品強度。在模具溫度方面，

也有相似的結果，但應有適當的模溫。

在塑料溫度對模穴壓力影響方面，如圖 4.25 所示，當提高料溫從 295°C、305°C 到 310°C，由壓力曲線圖觀察到模穴壓力最大值逐漸升高，S1 最大壓力值由 28.1, 29MPa 逐漸升高至 30.1MPa，S2 最大壓力值也由 24.7, 25.3MPa 逐漸升高至 27MPa。壓力梯度由 3.4, 3.7MPa 降至 3.1MPa，故流動剪切應力變小。這是因為料溫高導致較大的流動截面積(Flow cross-sections)，模穴內流體狀熔融塑料具有較高的溫度而黏度降低，所以壓降(Pressure drop)減少，造成感測器有較高的壓力，但也意味著流動剪切應力小。此外，入口塑料溫度越高，澆口越不易封口，補料時間長，壓降小，故模穴壓力也較高。

在模具溫度對模穴壓力影響方面，如圖 4.26 所示，當模溫越高，流路中量測到的壓力值會越小，壓力降也越小，S1 最大壓力值由 34.5MPa 降低至 29.2MPa，S2 最大壓力值也由 29.8MPa 降低至 25.8MPa。壓降值由 4.9MPa 降低至 3.4MPa，故剪切應力也越小。這是因為溫度越高，材料的黏度越低，熔膠與模具接觸部位，固化層較薄而造成材料流動性好，故模穴壓力較小，而且壓力降越小，剪切應力也越小。

#### 4.8 SL 模具內的缺陷生成

對充填後成品試片觀察，金屬模具無明顯的缺陷生成，而SL模具則有明顯流痕缺陷的生成，而且PC的透明性比PP更容易以肉眼觀察到波紋狀的流痕；分析其生成原因，它是流動前端的模穴接觸部固化收縮，然後重複地出現超越前者的新流動前端而產生的波紋狀“流動痕跡”，如圖4.27所示。典型之流痕缺陷的射出成品，如圖4.28示，在流動方向的表面可觀察到明顯的流痕區與明亮區的波紋形狀。

金屬模具壓力梯度大，如圖4.29示，所以僅在射出件之尾端產生波紋

(ripples)，即是指接近流動長度末端的指紋般的小漣波，如圖4.30示。波紋缺陷的產生是由於熔膠流動波前部份在模穴壁面冷卻，並且與後到熔膠的持續翻滾冷卻之效應，且(1)正常充填不發生波紋；(2)冷模溫和低熔膠波前速度造成波紋[50]，如圖4.31。實驗結果發現，當使用金屬模具時，射速 $20\text{ cm}^3/\text{sec}$ 、模溫 $70^\circ\text{C}$ 與射速 $70\text{ cm}^3/\text{sec}$ 、模溫 $30^\circ\text{C}$ ，觀察到尾端波紋或鯊魚皮(Sharkskin)缺陷。

SL模具的壓力梯度小，如圖4.32示，再加上模穴壓力低，熱傳不佳，溫度分布不均，兩側的固化速度快及波前的前進速度影響，熔膠流動造成擠壓模具，因此噴泉流(Fountain flow)效應比金屬模具明顯，故易生成流痕(Flow mark)的缺陷，如圖4.33之翻滾流痕生成模型(Go-over flow mark generation model)，熔融塑料超越固化區域造成間隙，形成山谷形狀之流痕[51,52]。MoldFlow 模流分析與實驗結果證實，射速低、模溫低時易生成流痕現象；而冷卻時間若低於70sec則易產生模仁破壞(Mold failure)。當射速低時，波前的前進速度慢，固化層將增厚而增加後面進入塑料的流動阻力，因此易在表面生成流痕。至於，模溫低時，壓力降越大，剪切應力也越大，加上SL模具熱傳不佳，殘餘熱應力(Residual thermal stress)高，造成與剪切應力相互拉扯固化層而影響波前的前進速度變慢，也易生成流痕。

對於SL模具的熱傳導性不佳與溫度分布不均，造成的殘餘熱應力，可以從射出成品試片的光彈效應相片(Photoelastic photography)得到驗證，如圖4.34(a)所示，從彩色的條紋觀察出全場的殘留應力的實際分佈情形，而且條紋越密集的地方，表示應力愈大，亦即是應力集中的地方。對照MoldFlow 模流分析之溫度分佈圖，也有十分相似的結果，如圖4.34(b)所示，其中兩處高溫的發生區域，在光彈相片也顯示出有兩處應力集中的明顯彩色條紋。比較金屬模具之射出成品的光彈相片與溫度分佈圖，殘餘熱應力與溫度較高處皆發生在近澆口附

近，如圖4.35示，這顯然與SL模具不同。

流痕的表面形態隨實驗參數射出速度、模具溫度的變化，如圖4.36與圖4.37示。當射出速度愈高，剪切應力增加致使表面流痕較少，當模溫愈高，將減緩聚合物固化致使表面缺陷消失，則表面流痕較不明顯。

SL模仁在實驗前後表面粗度量測值，稍微增加，實驗前 $0.24-0.26\ \mu\text{m}$ ，實驗後 $0.28-0.30\ \mu\text{m}$ ，所以模仁壁面輕微變粗糙的效應並非為表面缺陷(Surface defects)產生的主要原因。

對射出後成品試片之表面粗度量測值分析，發現射出速度愈高，表面粗度值較低，如圖4.38所示，當模溫為 $50\ ^\circ\text{C}$ ，射出速度為 $50\ \text{cm}^3/\text{s}$ 或更高時，表面粗度 $R_a$ 值改善至 $0.18\ \mu\text{m}-0.23\ \mu\text{m}$ 。另外，如圖4.39所示，當模溫愈高，則表面粗度值較低，當模溫高於 $50\ ^\circ\text{C}$ 時，表面粗度 $R_a$ 值改善至 $0.20\ \mu\text{m}-0.22\ \mu\text{m}$ 。所以，提高模具溫度與射出速度，將會改善射出成品的表面粗度。

根據實驗結果(整理如下表4.6)，此SL模具行為與傳統金屬模具材料缺陷生成行為有很大之差異，流痕的產生與射出速度及模具溫度的變化有關，提高模具溫度與射出速度將可以改善流痕的現象。

表4.6 流痕產生的實驗結果

流痕	模具溫度	射出速度
大(Large)	低(室溫).	低
中(Middle)	中	中
小(Small)	高	高

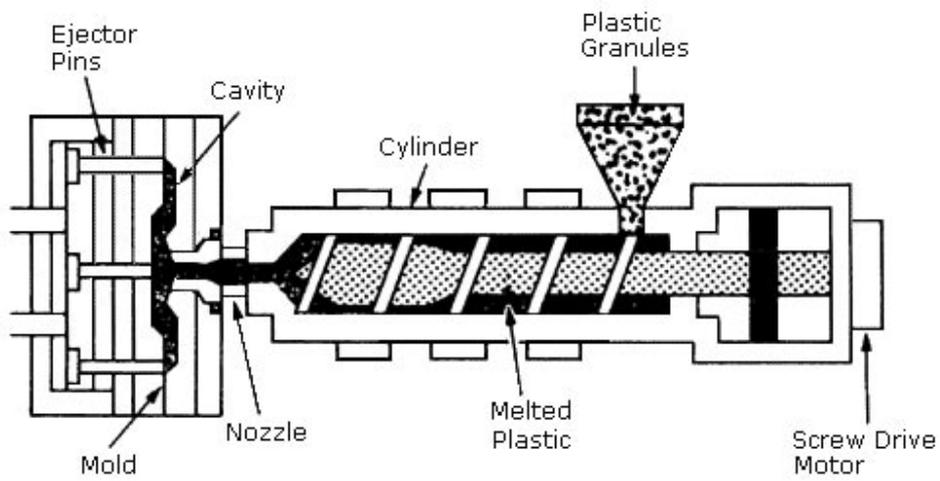


圖 4.1 射出成形原理[31]

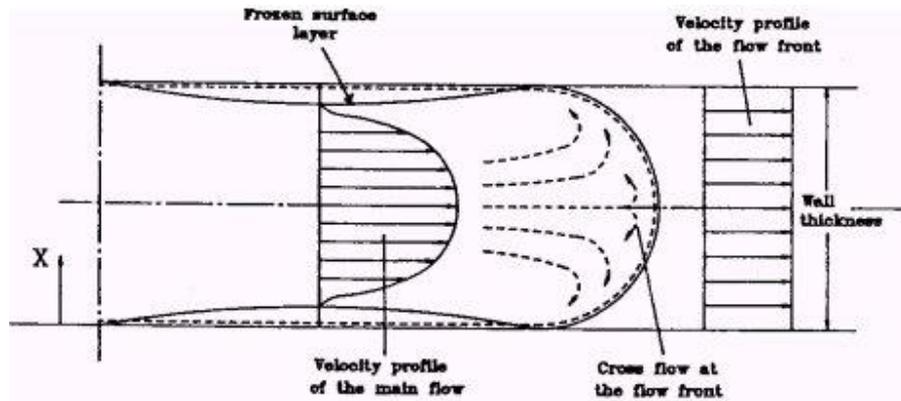


圖 4.2 噴水流模式[33]

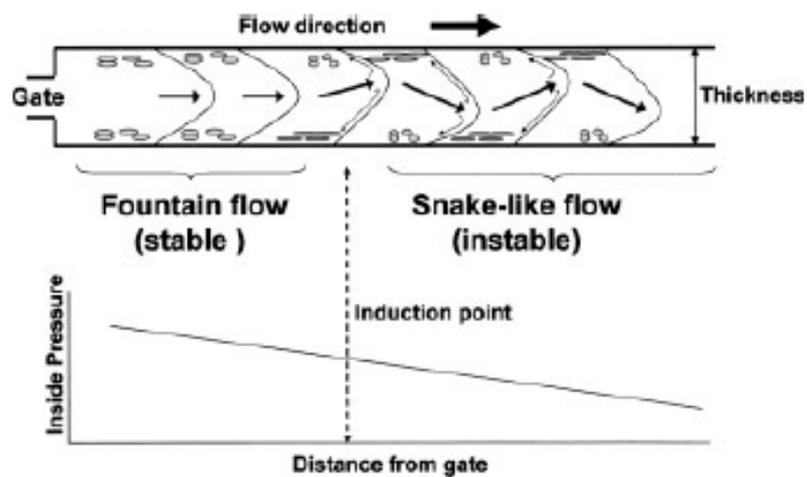


圖 4.3 流動不平衡模式造成表面缺陷[34]

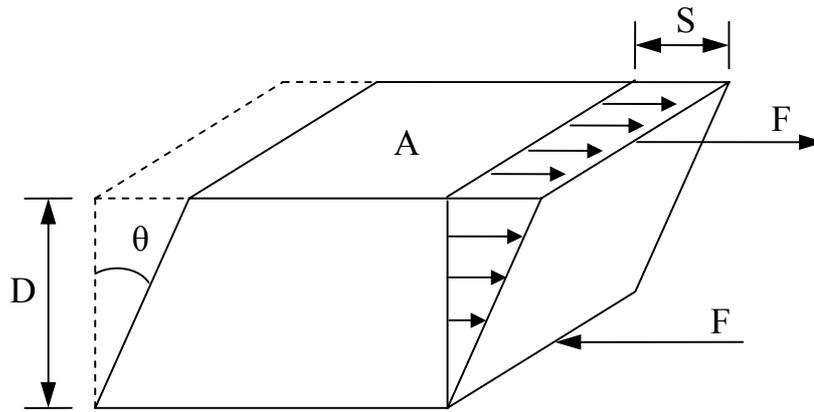


圖 4.4 理想型牛頓流體受剪切應力之變形示意圖。

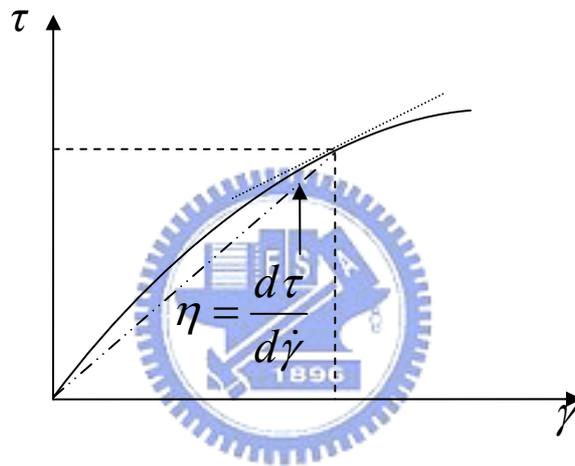
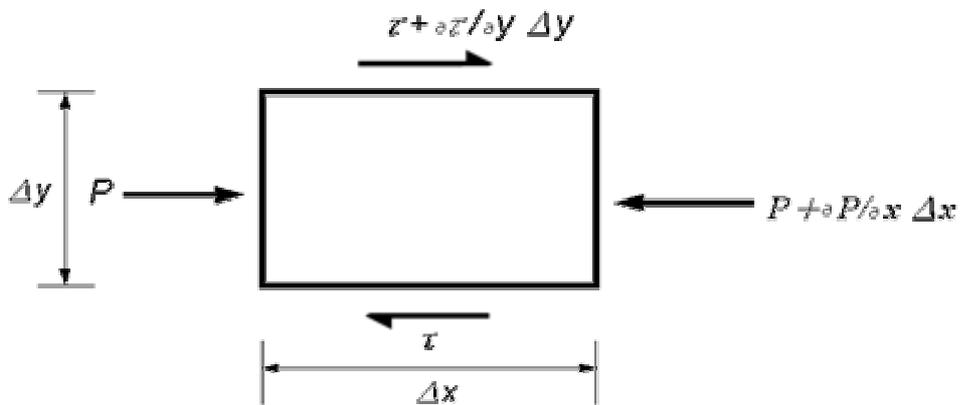
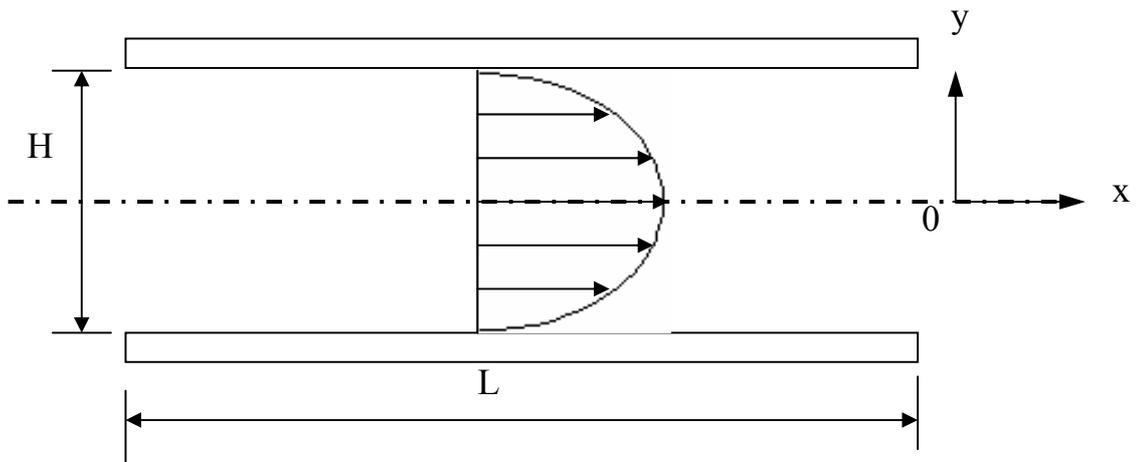


圖 4.5 非理想型牛頓流體之剪切應變率和剪應力關係



(a)無限平板間之剪切流動平衡



(b)二維平行板剪流示意圖

圖 4.6 (a)無限平板間之剪切流動平衡 (b)二維平行板剪流示意圖

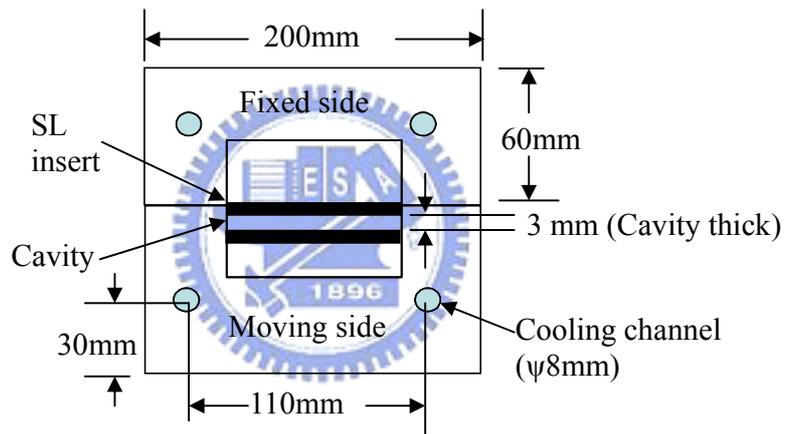


圖 4.7 SL 模具之模穴鑲塊與流路關係示意圖



圖 4.8 SL 模具之外觀

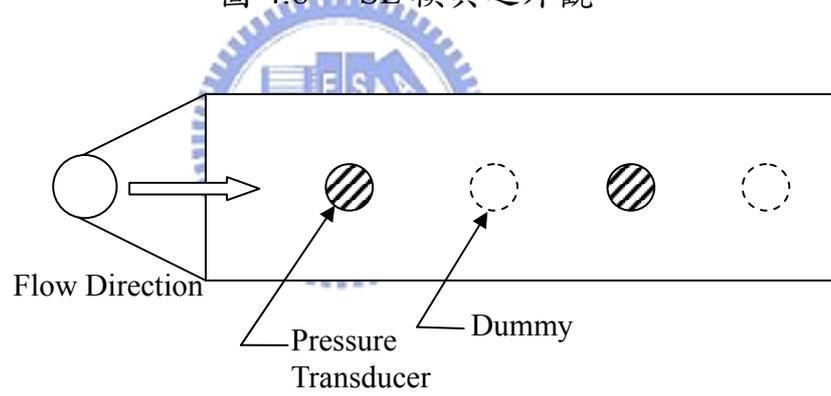
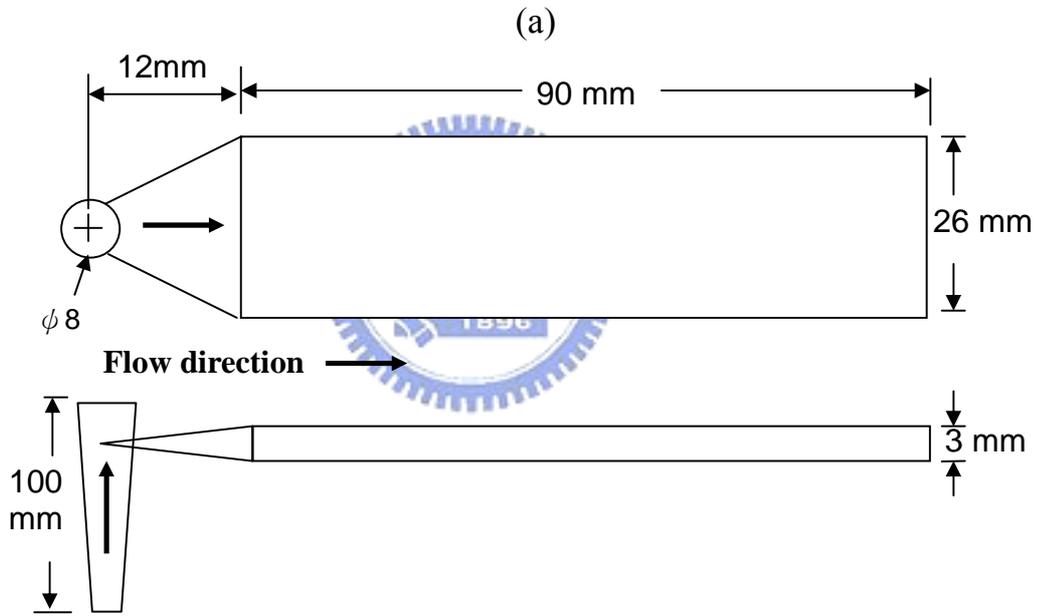
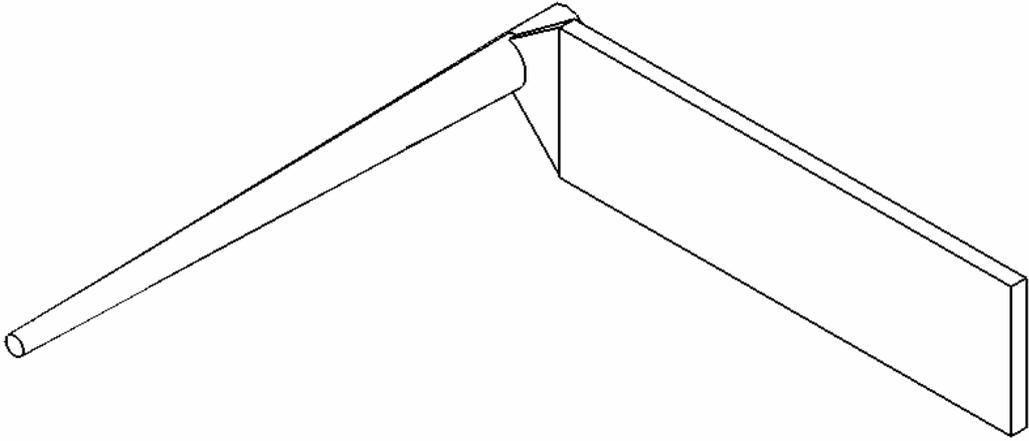


圖 4.9 壓力感測器之實際配置



(b)  
圖 4.10 射出成形件(a) 3D 圖形與(b)尺寸

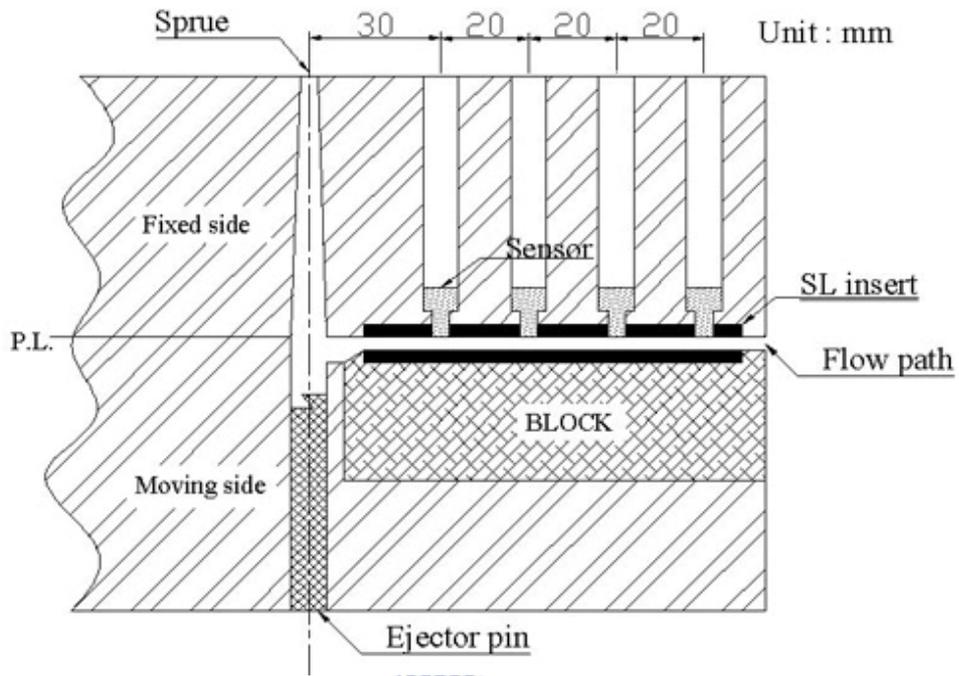


圖 4.11 壓力感測器之配置

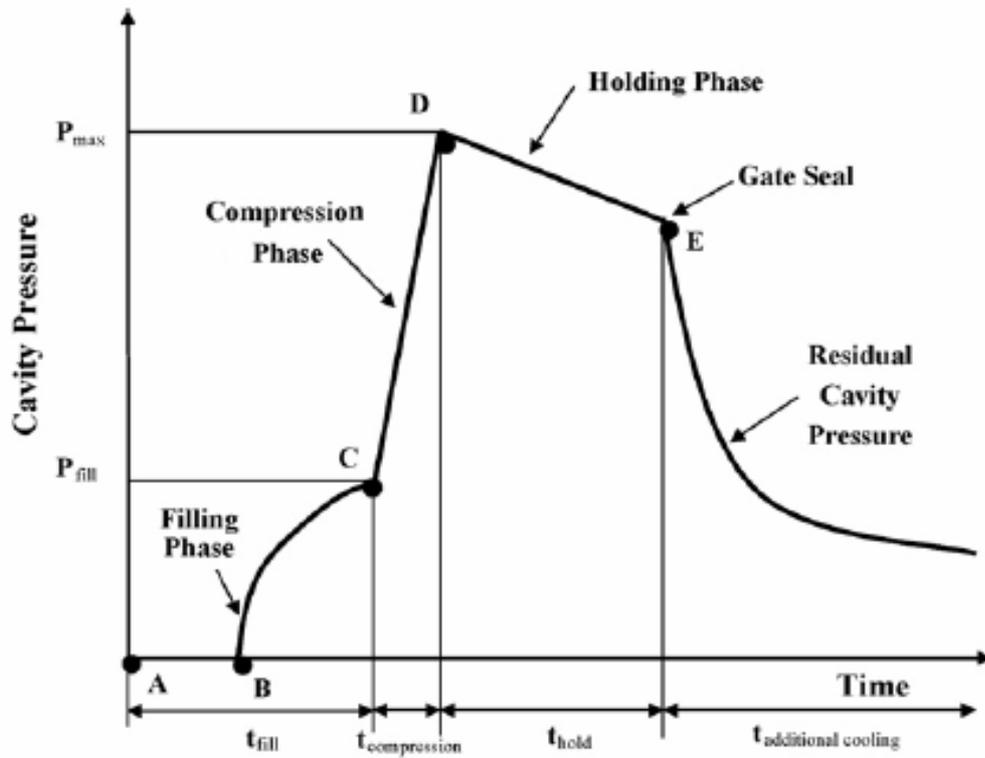
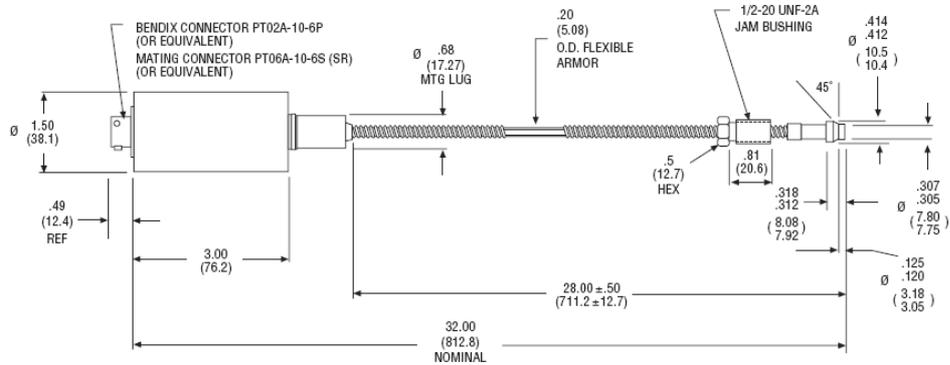


圖 4.12 典型模穴壓力時序圖[43]



圖 4.13 德國 ARBURG 270S 型號之射出成形機



All dimensions are in inches (millimeters) unless otherwise specified

圖 4.14 壓力感測器 PT465XL-10M 外觀尺寸

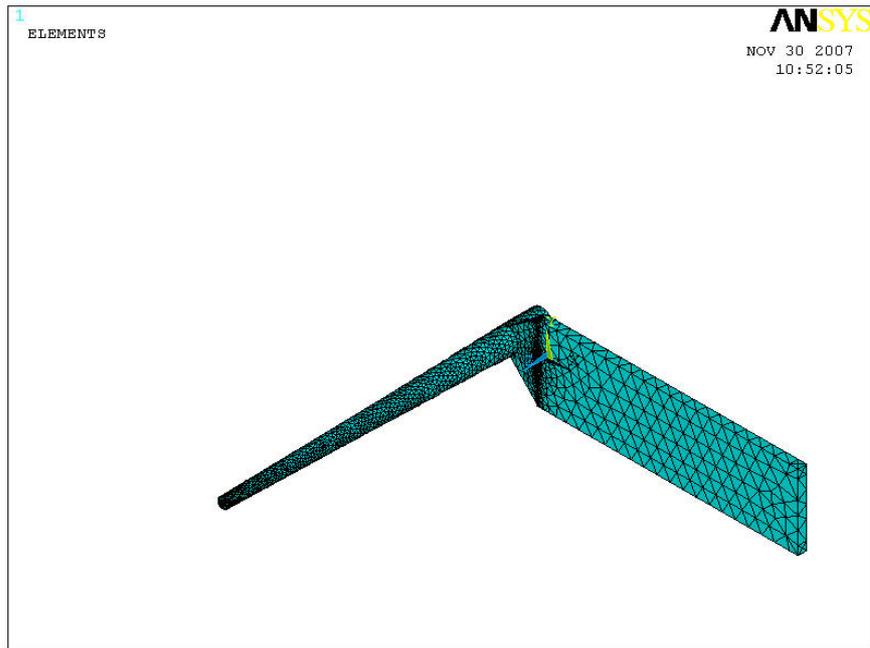


圖 4.15 射出塑件網格元素圖

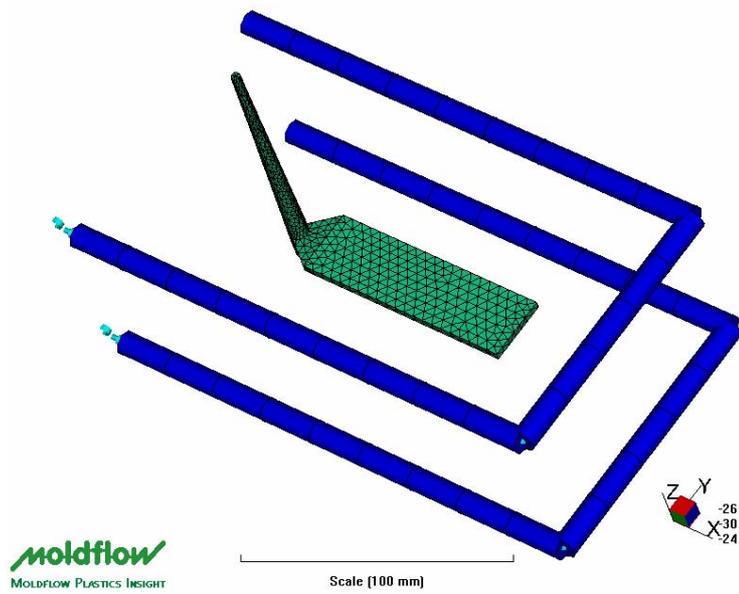


圖 4.16 射出塑件與冷卻水管實體模型

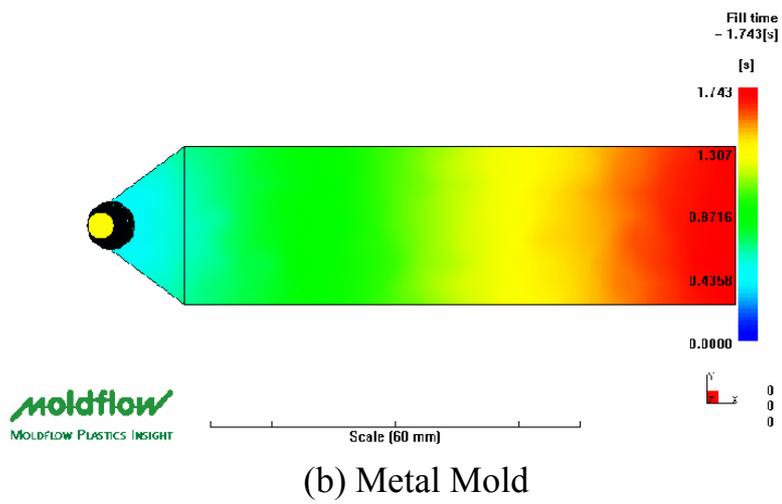
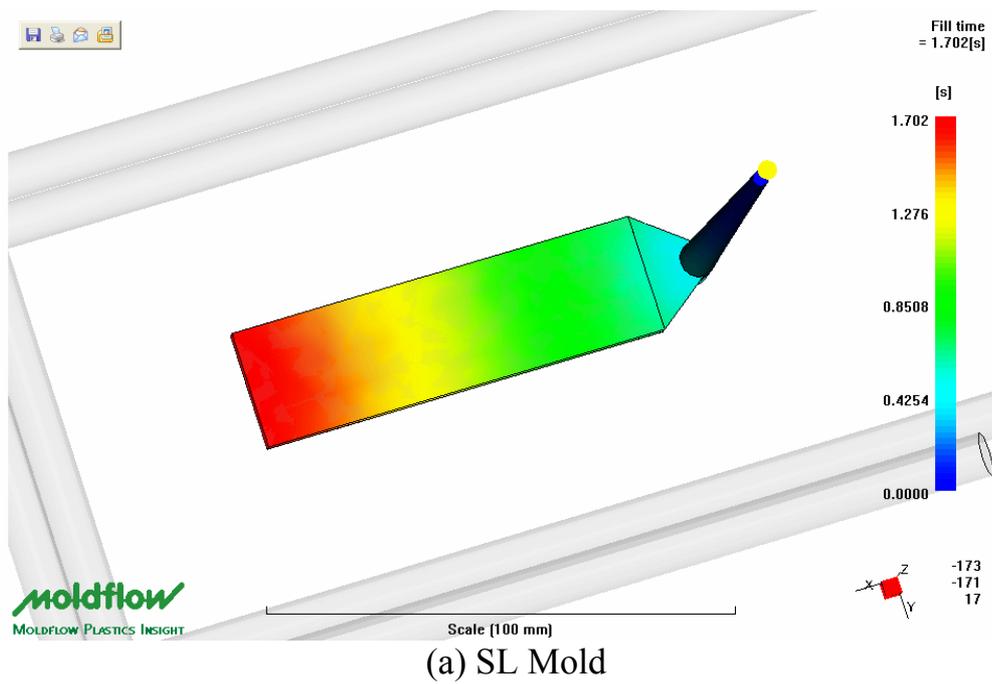
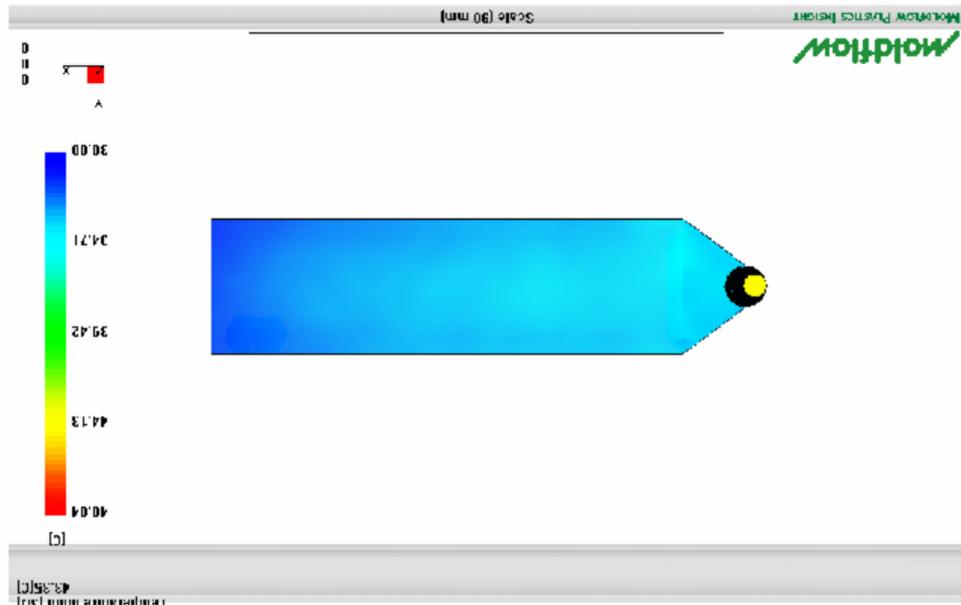
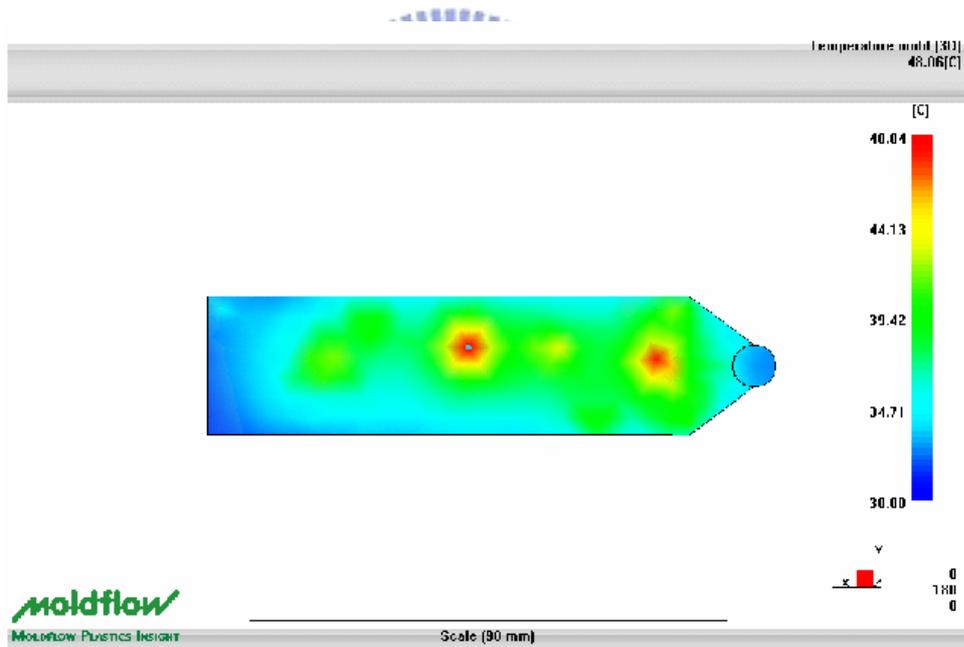


圖 4.17 (a)SL 模具流動波前圖(b)金屬模具流動波前圖

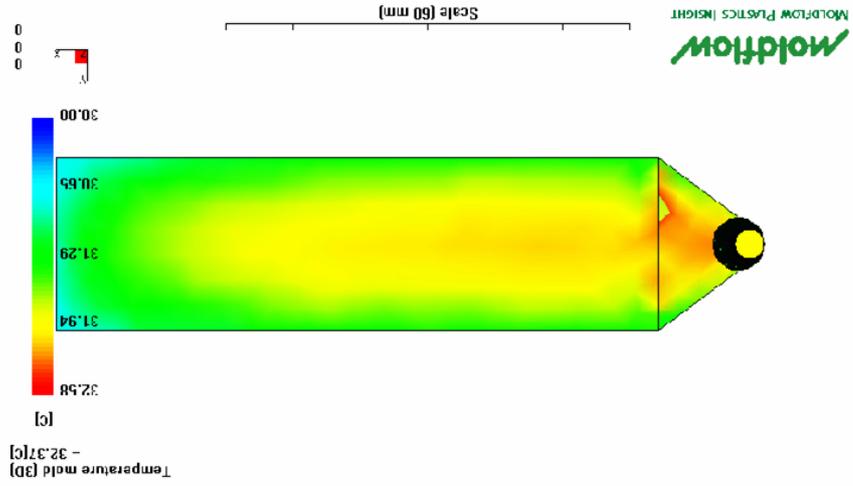


Top view (SL Mold)

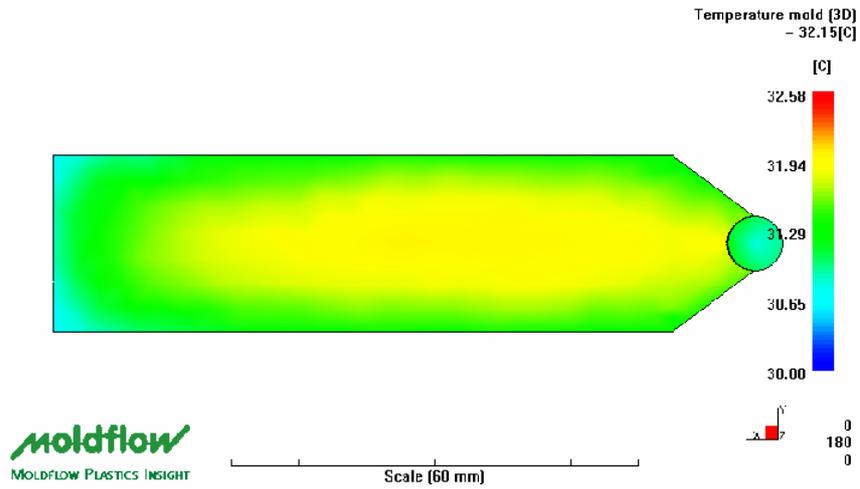


Bottom view (SL Mold)

圖 4.18 (a) SL 模具溫度分布圖

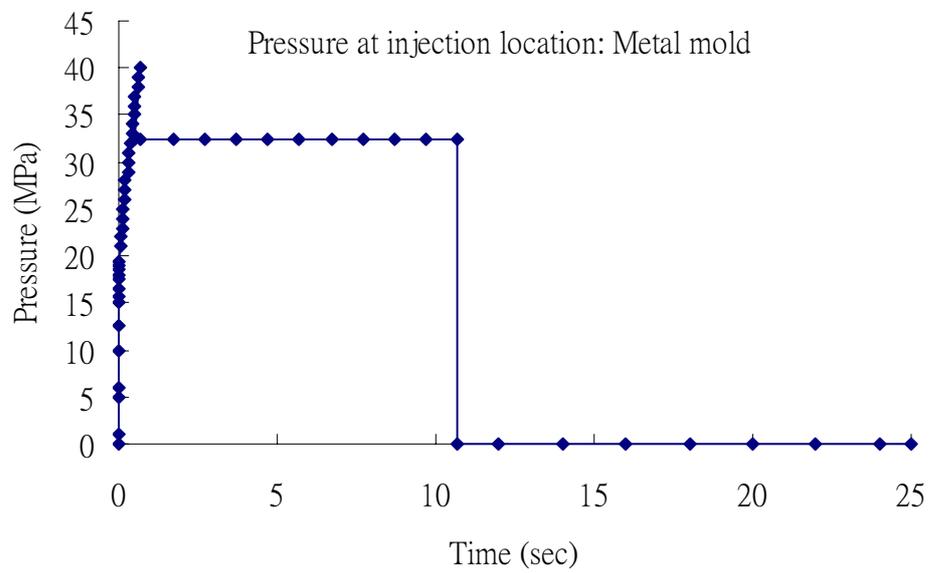
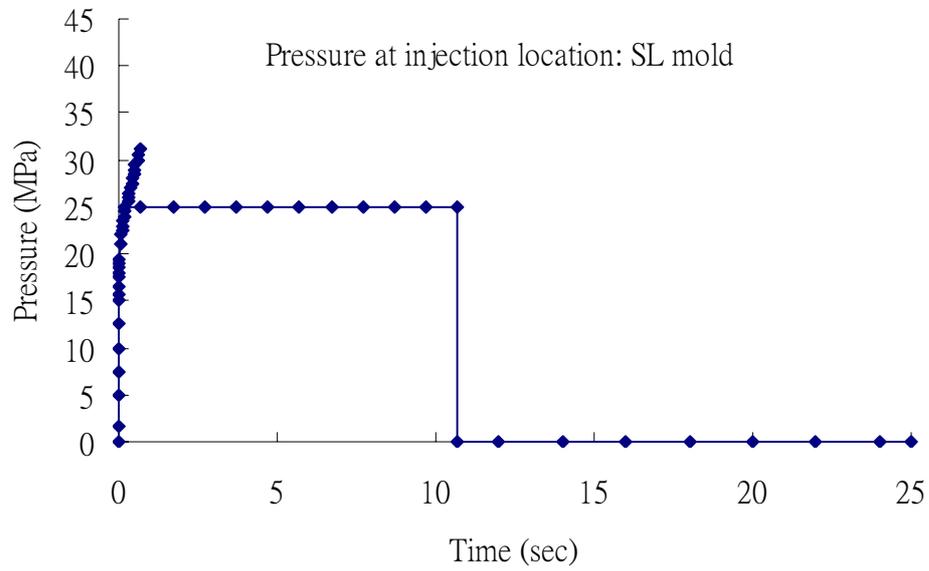


Top view (Metal Mold)



Bottom view (Metal Mold)

圖 4.18 (b)金屬模具溫度分布圖



(b)

圖 4.19 (a)SL 模具模穴壓力曲線圖 (b)金屬模具模穴壓力曲線圖

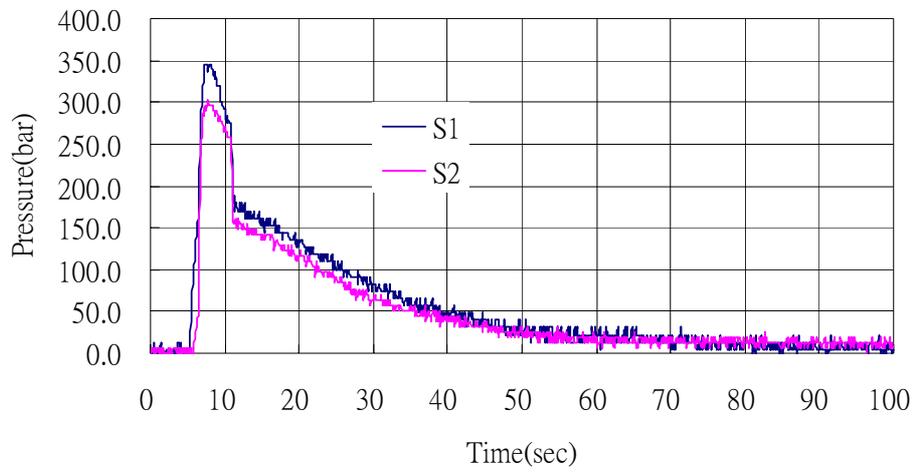


圖 4.20 Excel 軟體顯示之模穴壓力曲線圖

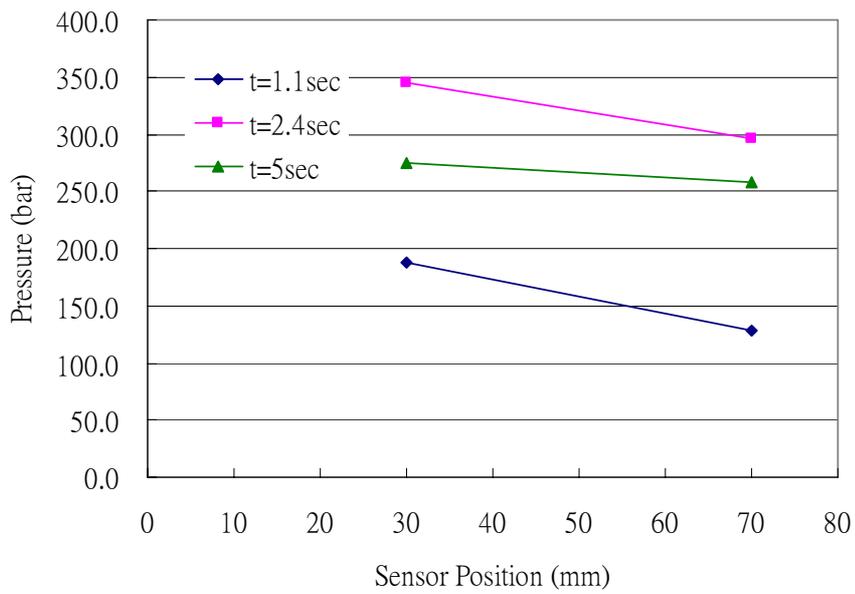


圖 4.21 模穴內的壓力分佈

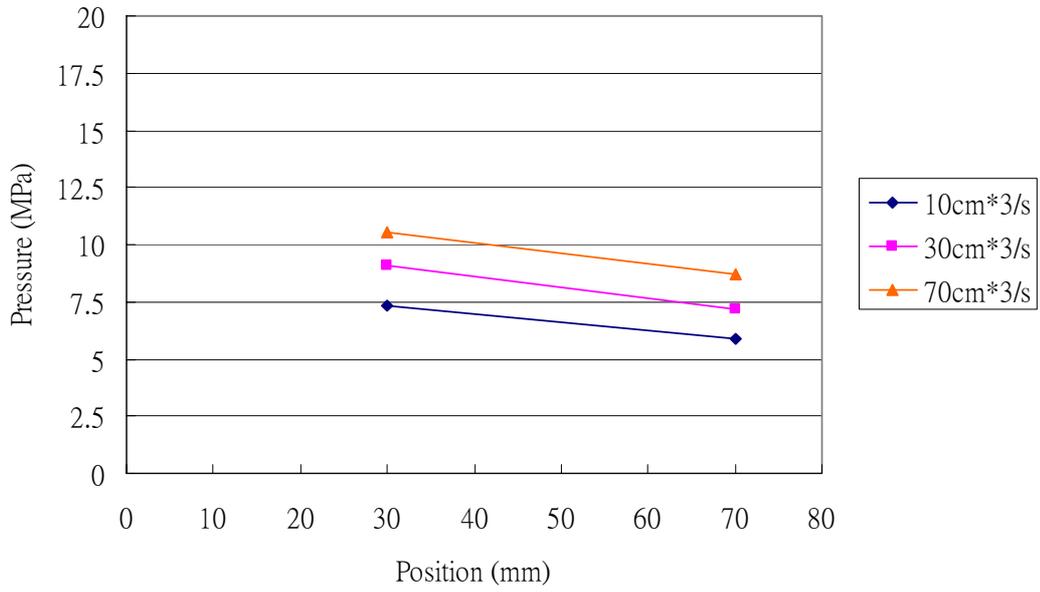


圖 4.22 改變射出速度之壓力分佈圖

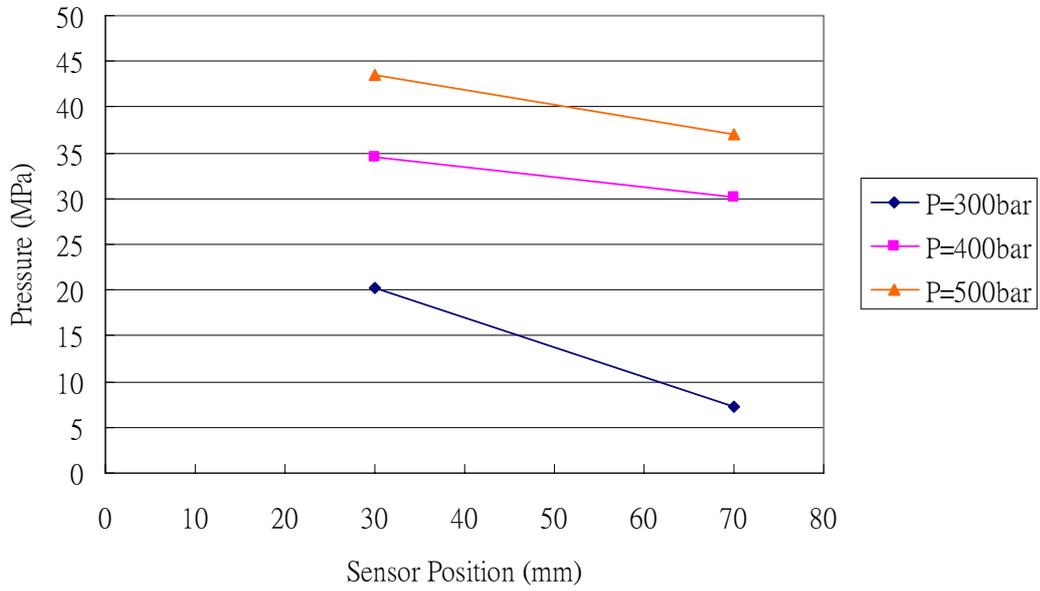
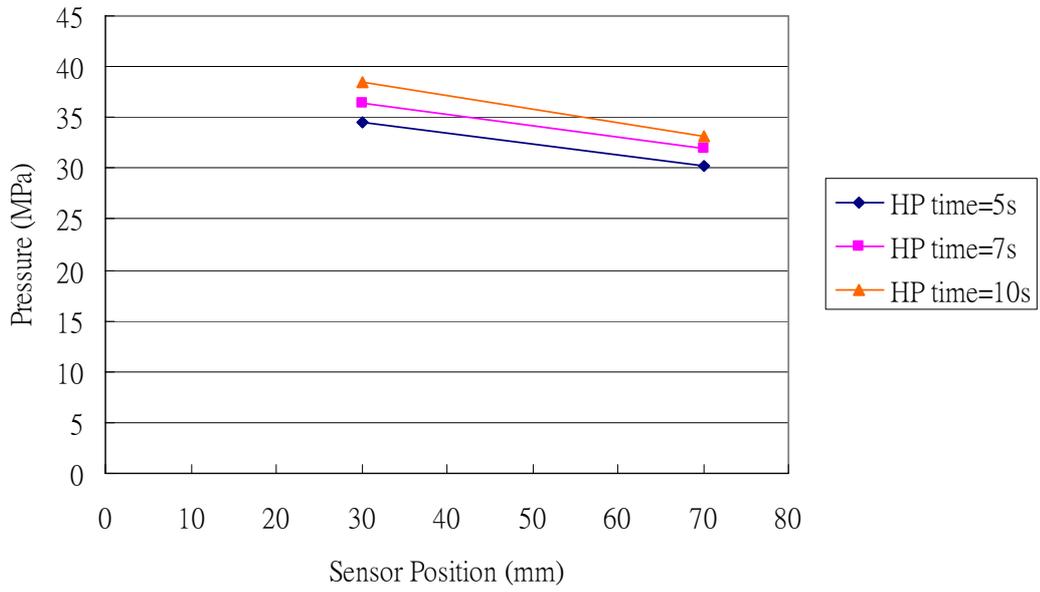
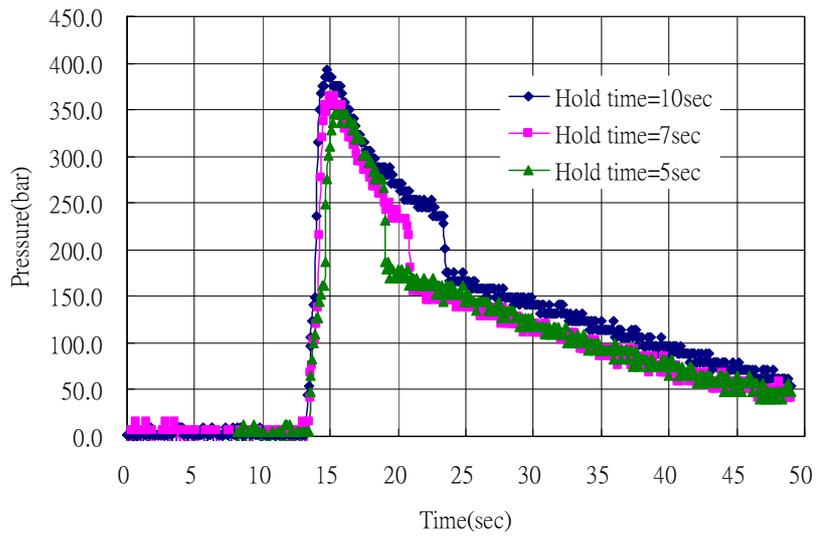


圖 4.23 改變射出壓力之流路壓力分佈圖



(a)



(b)

圖 4.24 (a)改變保壓時間之壓力分佈圖(b)保壓時間的影響比較

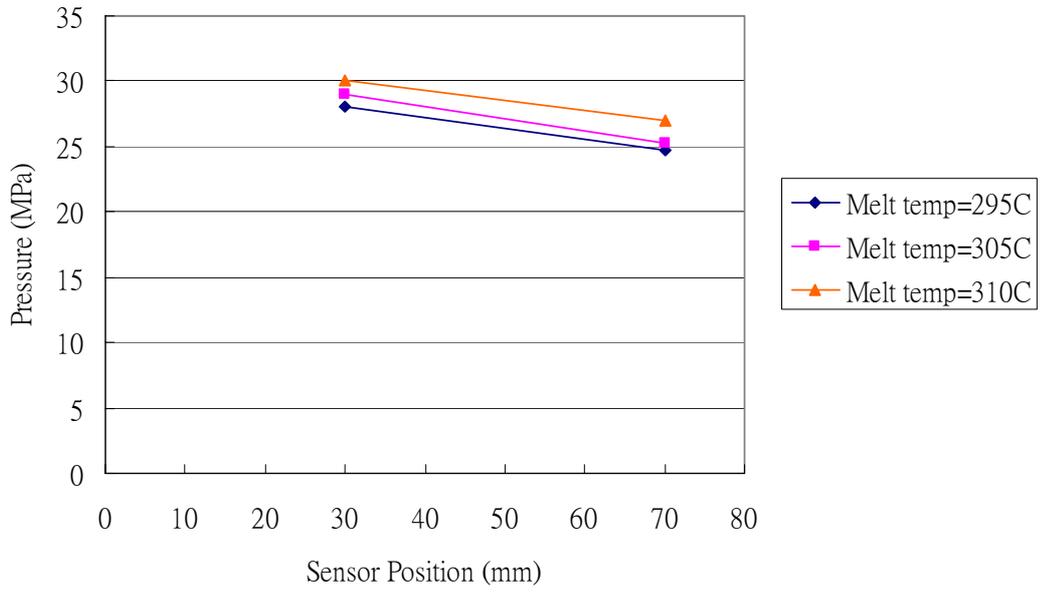


圖 4.25 改變塑料溫度之模穴壓力分佈圖

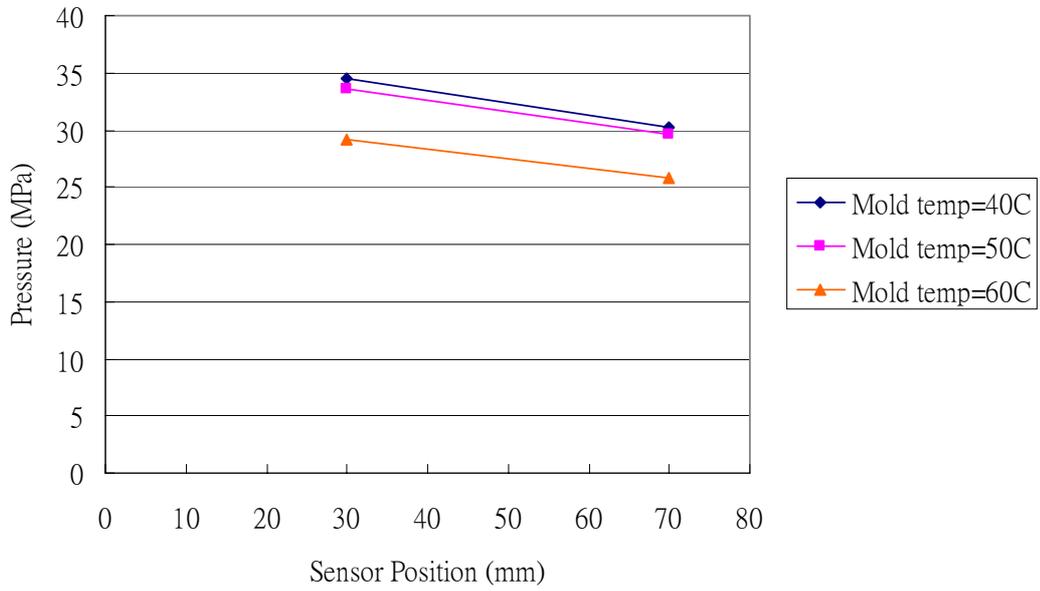


圖 4.26 改變模具溫度之模穴壓力分佈圖

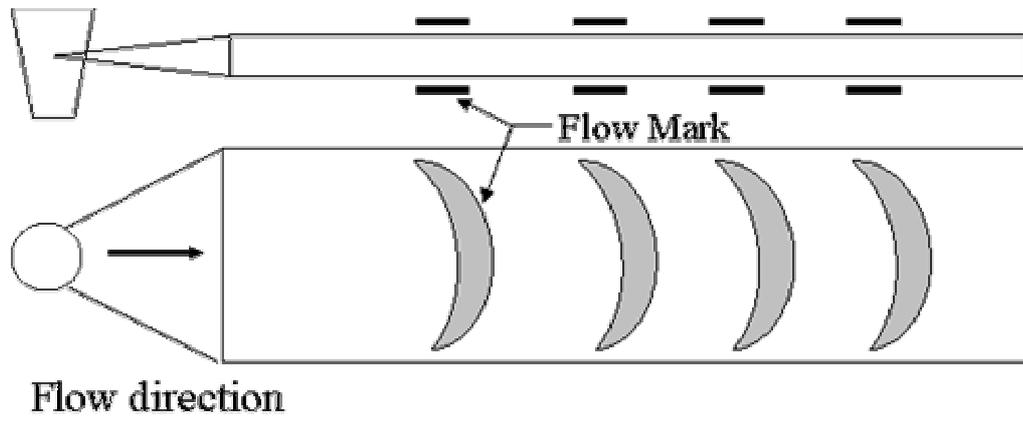
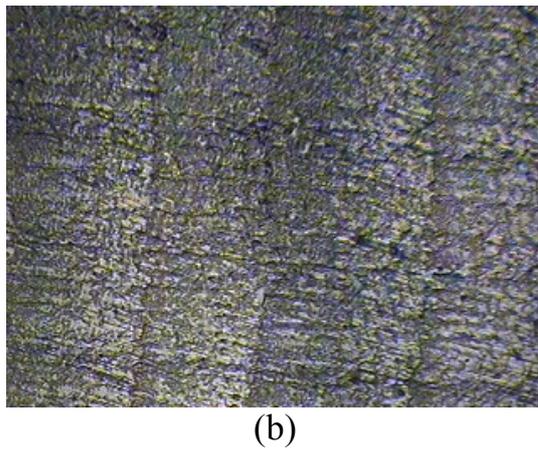
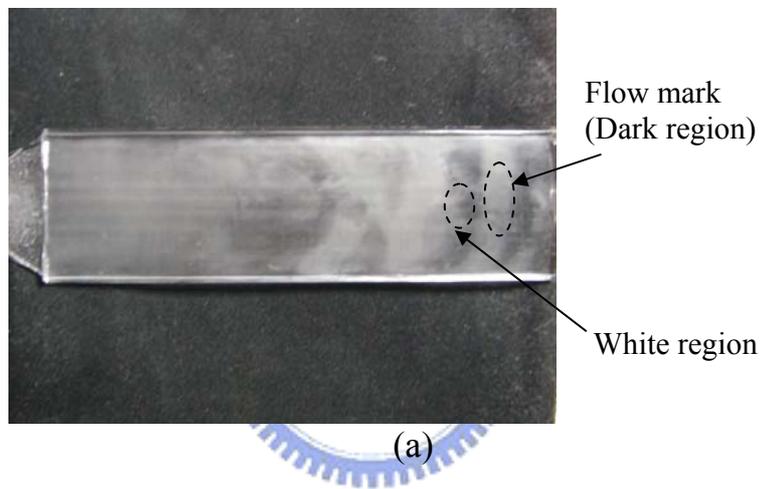
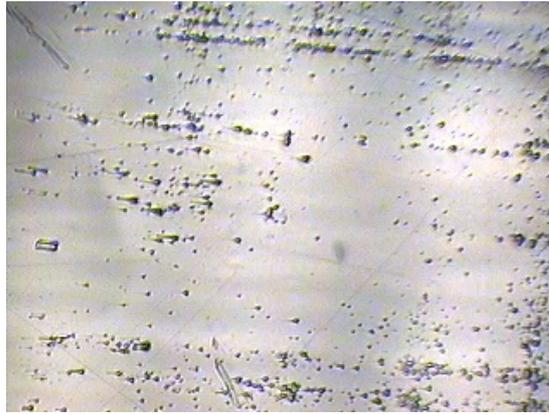


圖 4.27 SL 模具之流痕外觀





(c)

圖 4.28 (a) 典型射出件(b)流痕區(c)明亮區

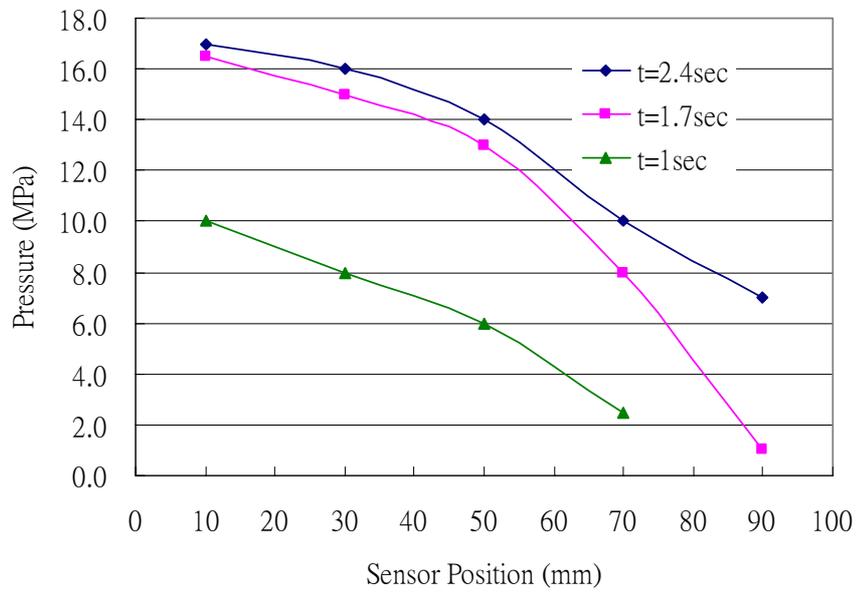


圖 4.29 金屬模之模擬壓力分佈圖

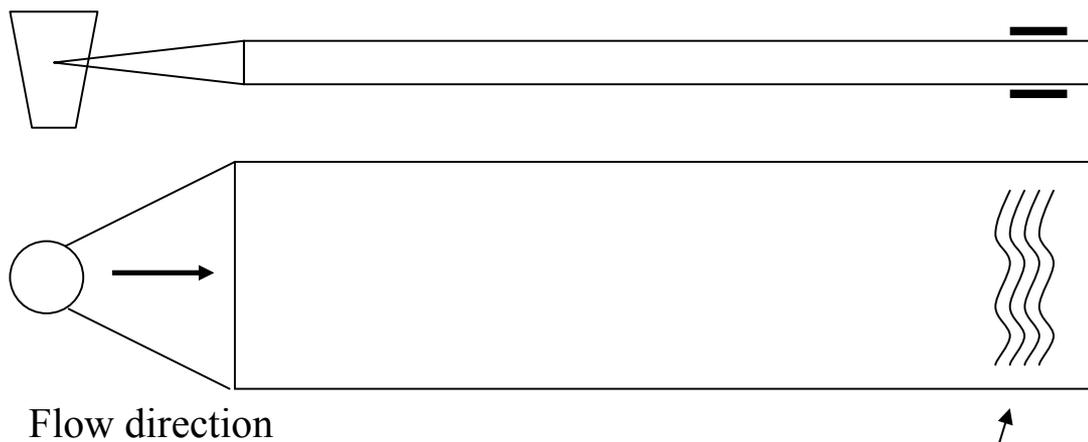


圖 4.30 射出件之尾端產生波紋(ripples)

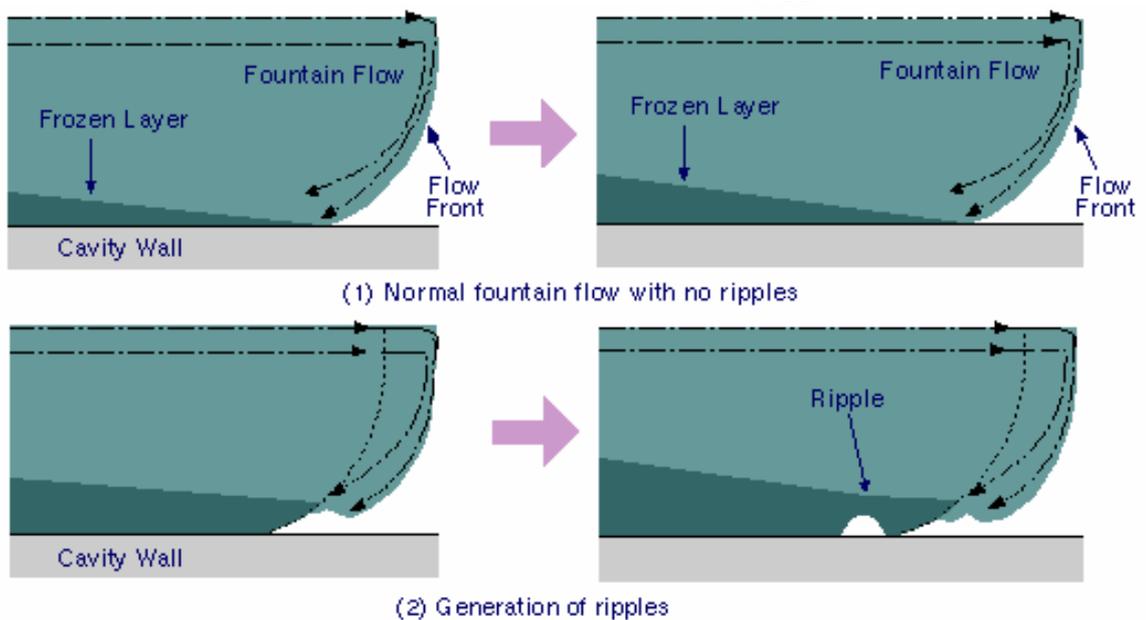


圖 4.31 波紋缺陷的產生模型[C-mold Design Guide]

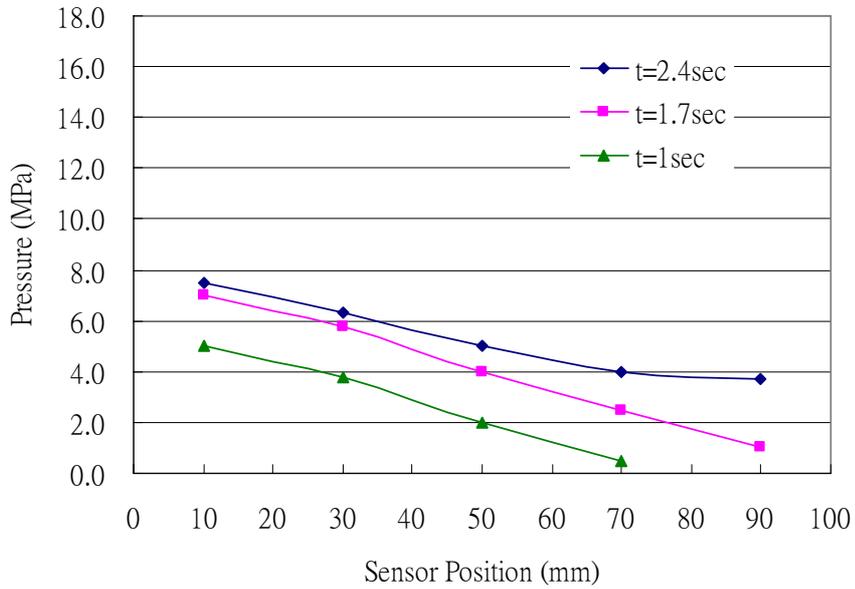


圖 4.32 SL 模具之模擬壓力分佈圖

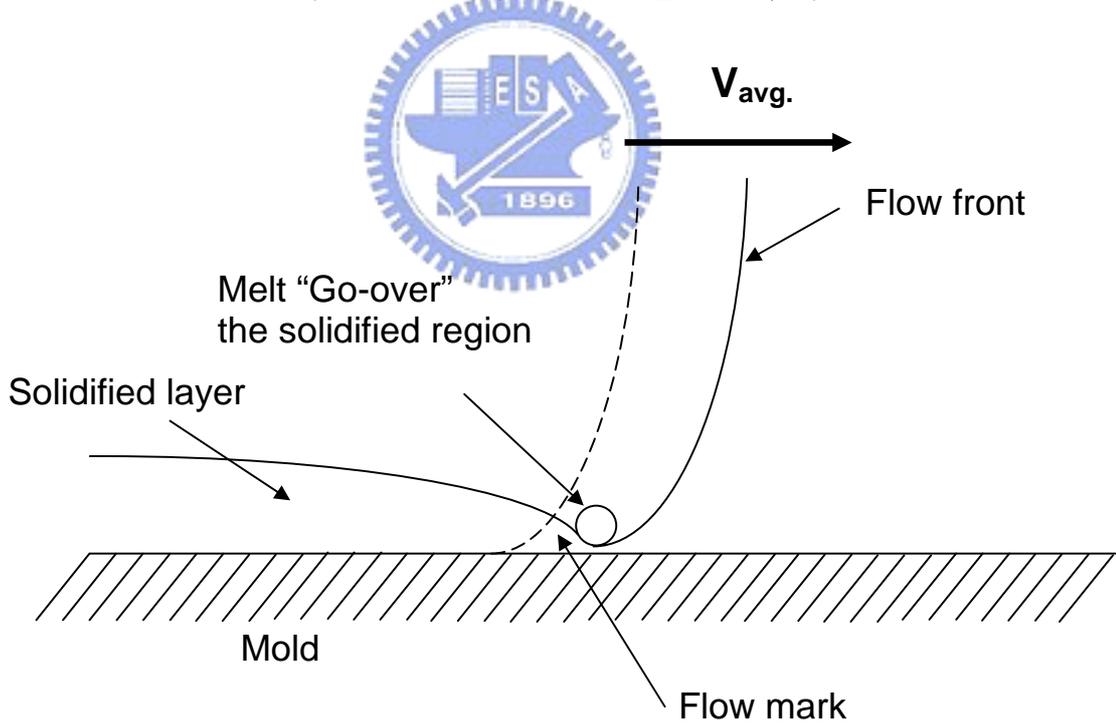
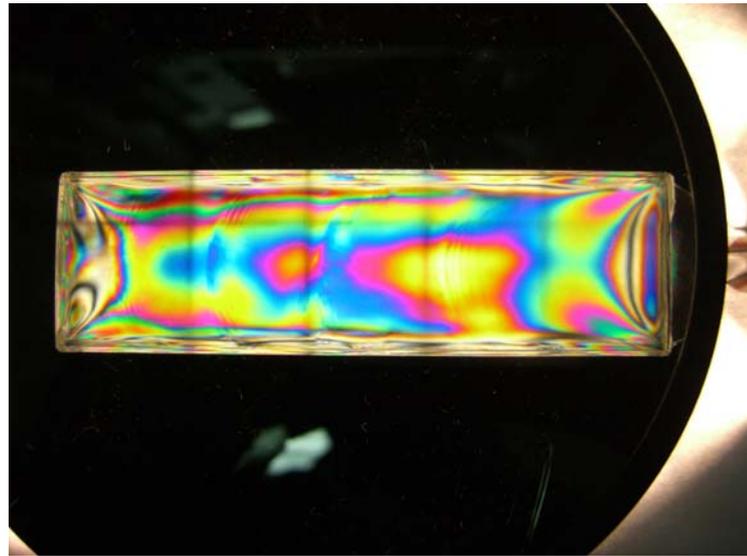
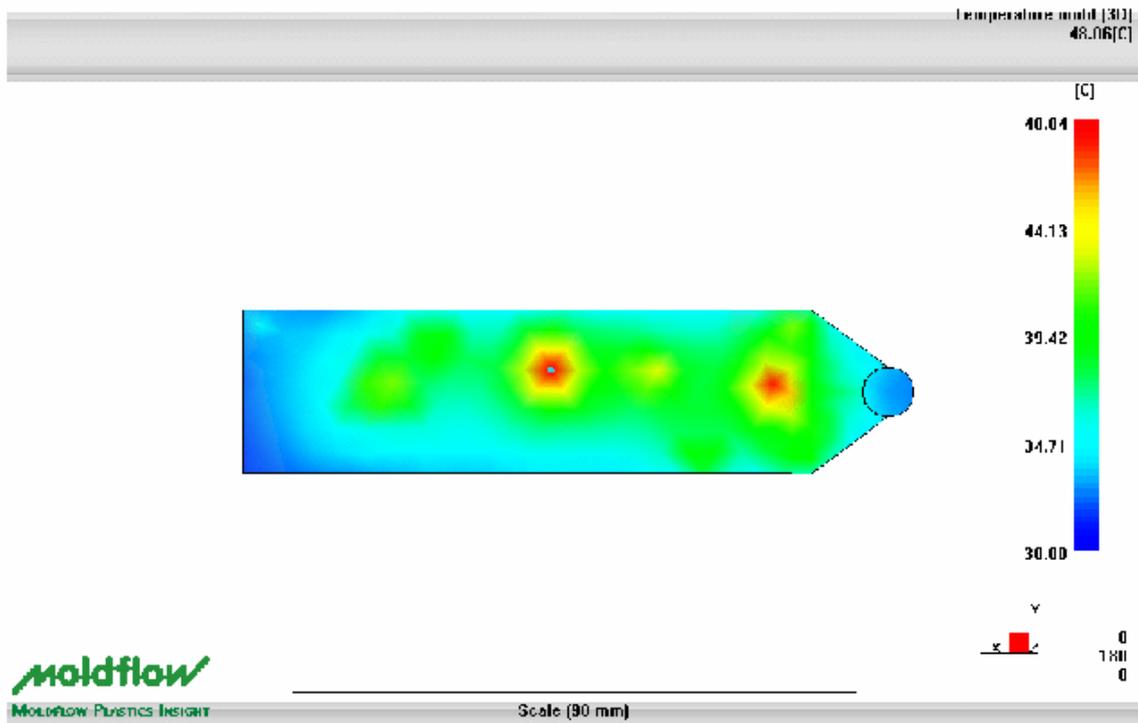


圖 4.33 翻滾流痕生成模型(Go-over flow mark generation model)

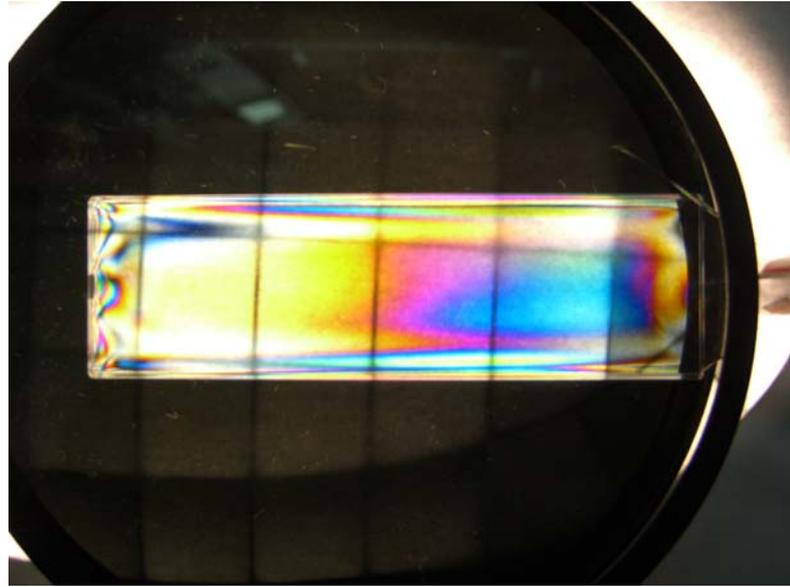


(a)

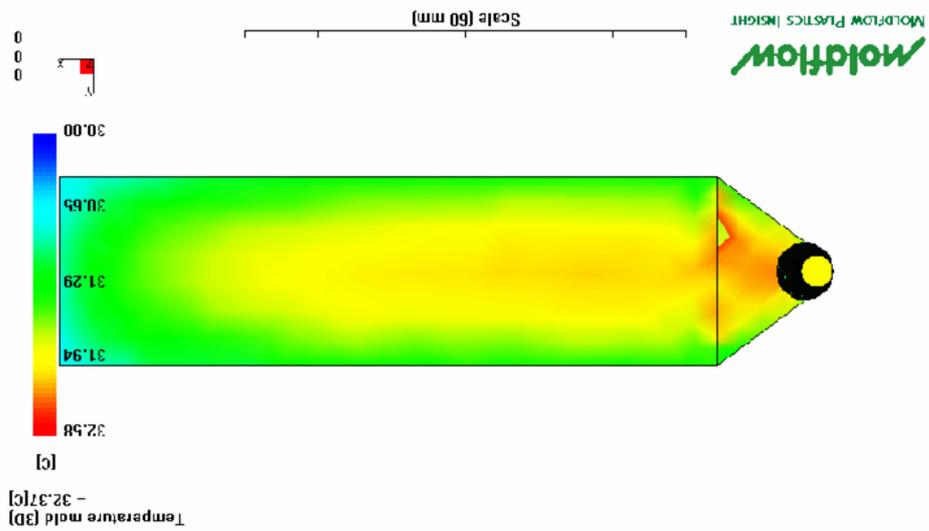


(b)

圖 4.34 SL 模具射出件之光彈相片與模流分析之溫度分布比較



(a)

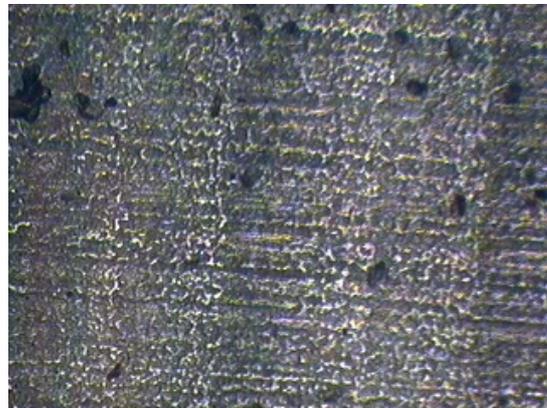


(b)

圖 4.35 金屬模具射出件之光彈相片與模流分析之溫度分布比較



(a)

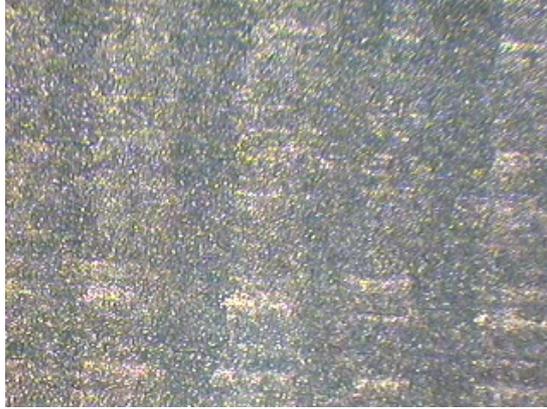


(b)



(c)

圖 4.36 (a)不同射速  $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $30 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $50 \text{ cm}^3/\text{sec}$  的流痕變化  
(b)不同射速流痕顯微照相  $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$  (c)  $30 \text{ cm}^3/\text{sec}$



(a)



(b)

圖 4.37. 不同模溫的流痕顯微照相(a) 40 °C(b) 60 °C

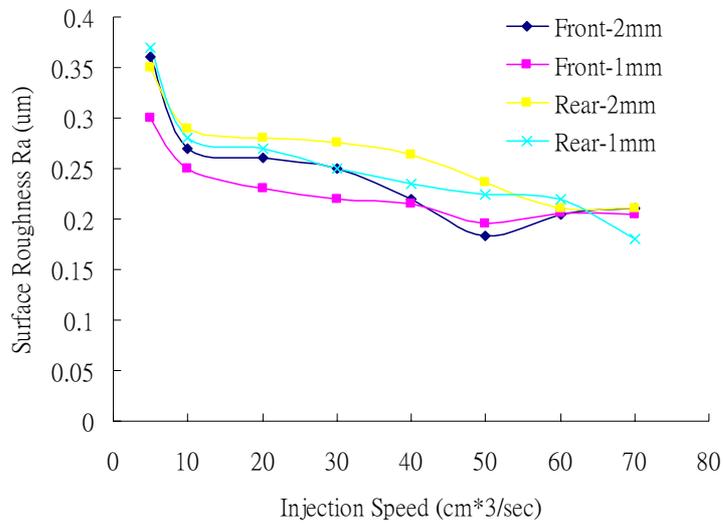


圖 4.38 不同射速時之表面粗度變化

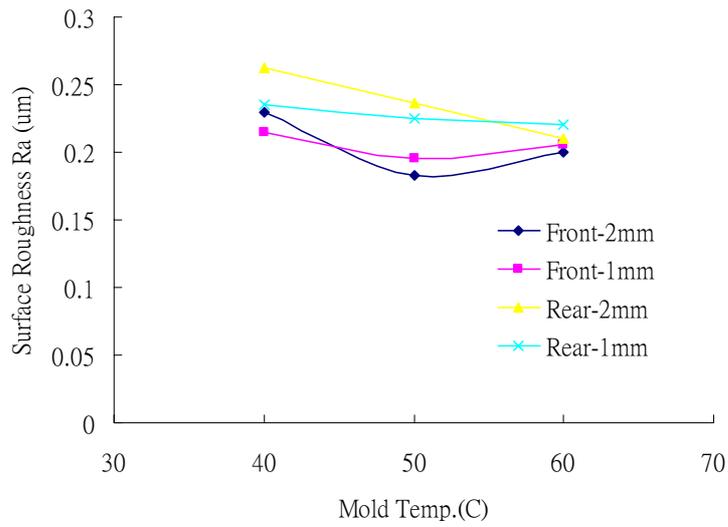


圖 4.39. 模溫不同時之表面粗度變化

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本研究是以光硬化樹脂 SL 材料製作之快速模具，應用於塑膠射出成形為探討對象。研究內容主要包括兩部份：光硬化樹脂 SL 模具之脫模特性，SL 模具中的材料流動及缺陷生成特性。經由實驗與分析結果，得到下列結論：

第一部份、光硬化樹脂 SL 模具之脫模特性

- (1) 藉由脫模特性實驗以瞭解破 SL 模具壞機制，發現脫模力之大小與保壓、模具溫度及冷卻時間有關，模溫高且冷卻時間較長而脫模力大，易造成模仁表面塑性變形與表面粗度增加，將使模具使用壽命降低，因此 SL 模具溫度佔有極重要影響程度。
- (2) 使用 SL 模具時，保壓力越大、模溫越低、冷卻時間越長都會造成脫模應力的增加。當在高保壓力時，SL 模具之脫模應力會隨保壓時間的增長而增大。
- (3) SL 模板的表面粗糙度不至於因脫模次數的增加而有太大的變化。
- (4) 脫模力對於 SL 模板的破壞，最可能發生在於 SL 模板的被固定部位，或者 SL 模板上具有最小截面積的截面。因此設計 SL 模具時，視 SL 模板與成形品的接觸面積的大小，來決定前述最可能發生破壞的部位的最小容許截面積，以獲得較長的模具壽命。

第二部份、SL 模具中的材料流動及缺陷生成特性

- (1) 改變射出速度所得之流路壓力分佈，隨射速增加充填時間較短，其壓力差增加，故剪切應力變大。
- (2) 當射壓提高，流路內壓力差增大，故剪切應力變大。但是，若射出壓力太大時，保壓結束後，殘餘應力大，容易過充填且造成模仁破壞。
- (3) 保壓時間越短，模穴壓力降低越快，最終模穴壓力越低。

- (4)提高塑料溫度可使黏度減少、壓降少，造成感測器有較高的壓力，但也意味著流動剪切應力小。此外，入口塑料溫度越高，澆口越不易封口，補料時間長，壓降小，故模穴壓力也較高。
- (5)當模溫越高，流路中量測到的壓力值會越小，壓力降也越小，故剪切應力也越小。這是因為溫度越高，材料的黏度越低，而造成材料流動性好，故模穴壓力也較小。
- (6)MoldFlow 模流分析與實驗結果證實，射速低、模溫低時易生成流痕現象；而冷卻時間若太短時則容易造成模仁破壞。
- (7)流痕的表面形態隨射出速度、模具溫度的變化而改變。當射出速度愈高，剪切應力增加致使表面流痕較少，當模溫愈高，將減緩聚合物固化致使表面缺陷消失，則表面流痕較不明顯。
- (8)對射出後成品試片之表面粗度量測值分析結果顯示，提高模具溫度與射出速度，將會改善射出成品的表面粗度。
- (9)對於 SL 模具的熱傳導性不佳與溫度分布不均，造成的殘餘熱應力，可以從射出成品試片的光彈效應相片(Photoelastic photography)得到驗證，其中兩處高溫的發生區域，在光彈相片也顯示出有兩處應力集中的明顯彩色條紋。

## 5.2 未來研究建議

- (1)設計改善：為增強 SL 模具壽命與提高成形品精度，可在模仁表面噴塗金屬鍍層(Spray metal coating)，以改善模仁熱傳導性與表面粗度。
- (2)模流分析：應用 CAE 電腦輔助工程的模流分析(Mold flow analysis)，模擬充填、保壓及冷卻階段，探討成品的融合線或流痕生成，翹曲或收縮等缺陷之問題與原因，來印證、模擬及改善，求得最佳的模具設計與成形條件，以期能滿足產品設計需求、提高品質及縮短開發時程。如此將對 SL 模具實

用性研究將極為重要。

- (3) 應力分析：對於冷卻與溫度分布不均，造成的殘餘熱應力，除了以光彈量測應力變化外，配合 CAE 電腦輔助軟體之熱應力分析(Thermal stress analysis)，預測成形品的應力集中、收縮或翹曲變形，作為整體性的模具與加工參數的修改，以獲得最佳之成品。



## 參考文獻

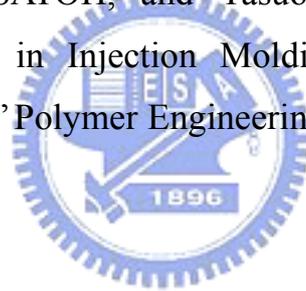
1. H. Kodama, "Automatic Method for Fabricating a Three-dimensional Plastic Model with Photo-hardening Polymer," Rev. Sci. Instrum., Vol. 52, No.11, pp. 1770-1773, Nov. 1981.
2. Alan J. Herbert, "Solid Object Generation," Journal of Applied Photographic engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 185-188, Aug. 1982.
3. Charles W. Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography," US Patent 4575330, 1986.
4. Paul F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereo-lithography," Society of Manufacturing Engineers, 1992.
5. J.P. Kruth, M.C. Leu, and T. Nakagawa, "Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping," Annals of the CIRP Vol. 47/2/1998.
6. Paul Decelles and Michael Barritt, "Direct AIM™ Prototype Tooling Procedural Guide," 3D Systems, 1996.
7. Paul F. Jacobs, "Recent Advances in Rapid Tooling from Stereo-lithography," Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Rapid Prototyping, pp. 338-354, 1997.
8. S. Rahmati and P.M. Dickens, "Stereolithography for Injection Mould Tooling," Rapid Prototyping Journal, Vol.3, No.2, pp. 53-60, 1997.
9. S. Rahmati and P.M. Dickens, "Stereolithography Injection Mould Tool Failure Analysis," 8<sup>th</sup> Annual Solid Freeform Fabrication, Texas, pp. 295-305, August 1997.
10. Neil Hopkinson and Phill Dickens, "Study of Ejection Forces in the AIM™ Process," Materials and Design, Vol.20, pp. 99-105, 1999.
11. D. W. Rosen, J. K. Allen, J. S. Colton, T. R. Kurfess, F. Mistree, T. L. Starr, R.M. Fujimoto, and K. Schwan, "A Rapid Tooling TestBed for Injection Molding," NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Long Beach, CA, Jan.

- 5-8, 1999.
12. J.S. Colton and Y. LeBaut, "Thermal Effects on Stereolithography Injection Mold Inserts," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 40, No.6, pp. 1360-1368, June 2000.
  13. J.S. Colton, J. Crawford, G. Pham, and V. Rodet, "Failure of Rapid Prototype Molds During Injection Molding," *Annals of the CIRP* Vol. 50/1/2001.
  14. M. Geiger and T. Özel, "Development of Rapid Tooling for Injection Molding using Metal Filled Stereolithography (SLA) Cavity Inserts," 2<sup>nd</sup> International Conference on Design and Production of Dies and Molds, June 21-23, 2001, Kusadasi, Turkey.
  15. Yun Li, Edward P. Gargiulo, and Michael Keefe, "Studies in Direct Tooling Using Stereolithography," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol.122, pp. 316-322, May 2000.
  16. Rajitha Aluru, Michael Keefe, and Suresh Advani, "Simulation of Injection Molding into Rapid-Prototyped Molds," *Rapid Prototyping Journal*, Volume 7, Number 1, pp. 42-51, 2001.
  17. R.A. Harris, H.A. Newlyn, R.J.M. Hague, and P.M. Dickens, "Part Shrinkage Anomalies from Stereolithography Injection Mould Tooling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue 9, pp. 879–887, July 2003.
  18. R.A. Harris, R.J.M. Hague, and P.M. Dickens, "The Structure of Parts Produced by Stereolithography Injection Mould Tools and the Effect on Part Shrinkage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 59–64, 2004.
  19. I. Zeid, *CAD/CAM Theory and Practice*, McGraw-Hill, New York, 1991.
  20. D. Kochan, C.C. Kai, and Z. Du, "Rapid Prototyping issues in the 21<sup>st</sup> century," *Computers in Industry*, Vol. 39, pp. 3-10, 1999.

21. 安超群, “快速模具技術”, 設計, Vol. 76, pp. 78-79, Aug. 1997.
22. C.K. Chau, K.H. Hong, and S.L. Ho, “Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study,” Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 604-608, 1999.
23. A. Rosochowski and A. Matuszak, “Rapid Tooling: the state of the art,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 106, pp. 191-198, 2000.
24. 安超群, 鄧澤民, “快速成型精密鑄造”, 中國機械工程學會第十二屆全國學術研討會, pp. 707-710, 1995。
25. 安超群, 邱家祥, 劉永隆, “樹脂射出成型模具技術與應用”, 1998 模具技術成果暨論文集, pp. 227-229。
26. 安超群, 邱家祥, 劉永隆, “快速模具在塑膠射出之應用”, 1999 模具技術成果暨論文集, pp. 231-233。
27. 安超群, 陳仁浩, “光硬化樹脂模具之射出成形特性研究”, 第六屆亞洲模具研討會論文集, 台北, 2001 年 7 月 20 至 21 日。
28. 安超群, “3D 微模具可行性研究”, 2004 航太學會/民航學會聯合學術研討會, 2004 年 12 月 12 日。
29. P.D. Hilton and P.F. Jacobs, Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications, Marcel Dekker, New York, 2000.
30. 3D Systems User Guide, July 1995.
31. Georg Menges and Paul Mohren, “How to Make Injection Molds,” SPE books, Hanser Publishers, USA, pp. 388-389, 1993.
32. S. Wu, “Polymer Interface and Adhesion,” Marcel Dekker, New York, p. 630, 1982.
33. D. J. Coyle, J. W. Blake, and C. W. Macosko, “The Kinematics of Fountain Flow in Mold-Filling,” AIChE J., Vol. 33, pp.1168-1177, 1987.

34. M. Bulters and A. Schepens, "The origin of the surface defect 'slip-stick' on injection moulded products," Paper IL-3-2, in *Proceedings of the 16th Annual Meeting of the Polymer Processing Society*, Shenghai, China, 2000a, pp. 144–145.
35. M. C. O. Chang, "On the study of surface defects in the injection molding of rubber-modified thermoplastics," ANTEC '94, pp. 360–367, 1994.
36. H. Hamada and H. Tsunasawa, "Correlation between flow mark and internal structure of thin PC/ABS blend injection moldings," *J. Appl. Polym. Sci.*, 60, pp. 353–362, 1996.
37. T. A. Litovitz and P. B. Macedo, "Physics of Non-crystalline Solids," *J. Prins*, Ed., Inter-science, p. 220, 1965.
38. P. B. Macedo and T. A. Litovitz, "On the relative roles of free volume and activation energy in the viscosity of liquids," *J. Chem. Phys.*, 42, pp. 245-256, 1965.
39. J. H. Hildebrand and R. H. Lamoreaux, "Fluidity: A general theory," *Proc. Nat. Acad. Sci., USA.*, 69, pp. 3428-3431, November 1972.
40. I. C. Sanchez, "Towards a theory of viscosity for glass-forming liquids," *J. Appl. Phys.*, 45(10), pp. 4204-4215, October 1974.
41. M. Cohen and D. Turnbull, "Molecular transport in liquids and glasses," *J. Chem. Phys.*, 31, pp. 1164-1169, 1959.
42. 劉士榮, "高分子流變學-塑膠之加工特性", 民國 84 年。
43. D.V. Rosato and D.V. Rosato, *Injection Molding Handbook*, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapman & Hall, New York, p. 513, 1995.
44. "塑膠射出成型機-使用者手冊", 塑膠世界雜誌社編譯, 民國 86 年。
45. James W. Dally and William F. Riley, *Experimental Stress Analysis*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc., p. 447, 1986.
46. Moldflow training manual release 4.1, Jan. 2004.

47. 林瑞璋，“塑膠模電腦輔助設計 Moldflow 軟體應用”，全威圖書公司，2003 年。
48. 陳良相，黃子健，劉昭宏，“Moldflow MPI 實用基礎”，全華科技圖書公司，2005 年。
49. 陳俊豪，“薄殼射出成型之模穴壓力分佈量測”，交通大學，碩士論文，民國 89 年。
50. C-MOLD Design Guide, 1998 Advanced CAE Technology, Inc.
51. Masaki Yoshii, Hiroki Kuramoto, and Kazunori Kato, “Experimental Study of Transcription of Smooth Surfaces in Injection Molding,” Polymer Engineering and Science, Vol. 33, Issue 19, pp. 1251-1260, 1993.
52. Louis Tredoux, Isao SATOH, and Yasuo KUROSAKI, “Investigation of Wavelike Flow Marks in Injection Molding: A New Hypothesis for the Generation Mechanism,” Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No. 10, pp. 2161-2174, Oct. 2000.



# 附錄一：SL 5510 材料性質表



Accurate, humidity resistant material for precision applications

# SL 5510

CIBATOOL® BUILD MATERIAL FOR THE VIPER si2™ SLA® SYSTEM

A versatile stereolithography material, SL 5510 material lets you bring part accuracy to your most demanding applications. SL 5510 material is well suited for many of the high accuracy and high precision applications capable with the Viper si2 system.

**MAXIMIZE YOUR PART BUILDING PRODUCTIVITY** A great complement to the dual mode feature on the Viper si2 system, SL 5510 is easy to use and offers high green strength to maintain part accuracy during processing.

**ENJOY EASIER FINISHING; MAINTAIN PART INTEGRITY.** SL 5510's sidewall quality yields parts with smooth surfaces, right out of the vat, that require minimal finishing. And its humidity resistance preserves your parts' integrity during shipping and storage.

**USE FOR A WIDE VARIETY OF APPLICATIONS.** Build accurate prototype parts, master patterns, and mold inserts. The material's excellent optical clarity also makes it ideal for flow testing and inspection of complex internal passages. And for QuickCast™ build style applications, SL 5510's low viscosity means fast drainage and easy cleanup.



si<sup>2</sup>  
SLA® SYSTEM

## Use SL 5510 material for:

- MULTI-PURPOSE MODELS
- PROTOTYPES
- FORM/FIT/FUNCTION TESTING
- QUICKCAST PATTERNS FOR INVESTMENT CASTING
- MASTER PATTERNS FOR SECONDARY PROCESSES
- PROTOTYPE TOOLING INSERTS
- HIGH HUMIDITY APPLICATIONS
- FLUID FLOW VISUALIZATION

si<sup>2</sup>  
SLA® SYSTEM

## SL 5510 Typical Properties

for the Viper si2 SLA system



### Liquid Material

MEASUREMENT	CONDITION	VALUE
Appearance		Clear amber
Density	@ 25°C (77°F)	1.13 g/cc
Viscosity	@ 30°C (86°F)	180 cps
Penetration depth (Dp)		4.8 mils
Critical exposure (Ec)		8.9 mJ/cm <sup>2</sup>
Part building layer thickness*		0.05 mm (0.002 in) 0.10 mm (0.004 in) 0.15 mm (0.006 in)

\*Dependent upon part geometry and build parameters.

### Post-Cured Material

MEASUREMENT	TEST METHOD	VALUE	
		90-minute UV post-cure	90-minute UV + 80°C Thermal
Tensile strength	ASTM D 638	66 MPa (9,500 PSI)	73 MPa (10,600 PSI)
Tensile modulus	ASTM D 638	2,854 MPa (414 KSI)	2,820 MPa (409 KSI)
Elongation at break	ASTM D 638	5.4%	7.9%
Flexural strength	ASTM D 790	103 MPa (14,900 PSI)	101 MPa (14,600 PSI)
Flexural modulus	ASTM D 790	2,896 MPa (420 KSI)	2,792 MPa (405 KSI)
Impact strength, notched Izod	ASTM D 256	26 J/m (0.48 ft - lbs/in)	30 J/m (0.57 ft - lbs/in)
Heat deflection temperature	ASTM D 648 @ 66 PSI @ 264 PSI	54°C (129°F) 47°C (117°F)	78°C (172°F) 70°C (158°F)
Glass transition, Tg	DMA, E'' peak	63°C (145°F)	64°C (147°F)
Coefficient of thermal expansion	TMA (T < Tg) TMA (T > Tg)	108ppm/°C 221ppm/°C	97ppm/°C 186ppm/°C
Thermal conductivity		NA	
Hardness, Shore D	DIN 53505	88	88
Density		NA	

**MATERIAL UPGRADE PROGRAM** Upgrade your existing material and take advantage of a substantial discount off the regular purchase price with 3D Systems Material Upgrade Program. To place an order, contact your local sales office or in the US call toll free 800.889.2964.

Like all our stereolithography materials, SL 5510 is developed and manufactured by Vantico (formerly Ciba Specialty Chemicals, Performance Polymers Division), for exclusive distribution by 3D Systems. Vantico and 3D Systems collaborate continually to develop faster, more durable, and more accurate materials for all our SLA solid imaging systems, and for your solid imaging applications.

### 3D Systems

26081 Avenue Hall  
Valencia, CA 91355 USA  
*telephone* 661.295.5600 ext. 2882  
*fax* 661.294.8406  
*toll-free* 888.337.9786  
*email* [moreinfo@3dsystems.com](mailto:moreinfo@3dsystems.com)

[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)

Nasdaq: TDSC

#### FRANCE

*telephone* +33 1 69 35 17 17

#### GERMANY

*telephone* +49 6151 357 303

#### HONG KONG

*telephone* +852 2923 5077

#### ITALY

*telephone* +39 039 68 904 00

#### JAPAN

*telephone* +03 5288 5951

#### SPAIN

*telephone* +34 93 754 04 00

#### UK

*telephone* +44 1442 282600

© Copyright 2001 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Subject to change without notice. The 3D logo and SLA are registered trademarks and 3D Systems, si2 and QuickCast are trademarks of 3D Systems. CibaTool is a registered trademark and the Vantico logo is a trademark of Vantico Inc. All other product names or services mentioned are trademarks or registered trademarks of their respective companies.

P/N 70431

vantico

## 附錄二：著作目錄

### 期刊論文：

1. Chao-Chyun An, Ren-Haw Chen, “Experimental Study of Demolding Properties on Stereolithography Tooling,” ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 129, pp. 843-847, Aug. 2007.
2. Chao-Chyun An, Ren-Haw Chen, “The Experimental Study on the Defects Occurrence of SL Mold in Injection Molding,” Journal of Materials Processing Technology. (Article in Press, Nov. 2007)

### 國際會議論文：

1. Chao-Chyun An, Ren-Haw Chen, “An Experimental Study of Demolding Properties on SL Tooling,” Proceedings of McMat2005 : 2005 Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics & Materials, Baton Rouge, Louisiana, USA, June 1-3, 2005.
2. Chao-Chyun An, Ren-Haw Chen, “The Experimental Study on the Defects Occurrence of SL Mold in Injection Molding,” AMPT 2007 Conference, Riviera Hotel, Daejeon, Korea, Oct. 7-11, 2007.
3. Chao-Chyun An, Ren-Haw Chen, “Pressure Distribution and Flow analysis of Stereolithography Mold in Injection Molding,” PPS-24 Annual Meeting, Salerno, ITALY, June 15-19, 2008. (Accepted)

### 國內會議論文：

1. 安超群，陳仁浩，「光硬化樹脂模具之射出成形特性研究」，第六屆亞洲模具研討會，臺灣，台北，pp. 13-17, July 20-21, 2001。
2. 陳仁浩，安超群，「光硬化樹脂 SL 模具之脫模特性研究」，第二十屆中國機械工程師研討會，臺灣，台北，No. D02-24, pp. 369-374, Dec. 5-6, 2003。