

國立交通大學

機械工程研究所 碩士論文

微結構射出成形過程的數值模擬分析

Simulation of the injection molding of microstructures



研究生：陳正剛

指導教授：陳仁浩 教授

中華民國九十七年七月

微結構射出成形過程的數值模擬分析

研究生：陳正剛

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，如何成形更細小、更高深寬比的微結構一直是塑膠微成形的重點，然而在微射出成形過程高溫、高壓的環境中，要直接觀察到熔融塑料的流動情形或量測內部狀態非常困難。本研究的目的是要利用數值模擬分析的方式，模擬在微射出成形中，結晶型與非結晶型熔融塑料(PP 與 PMMA)的流動情況，並且得到在不同時間點，指定區域的溫度場、壓力場等，以及在實際微射出成形中無法直接量測的資訊，以提供作為微射出成形過程中材料高次構造的形成之分析的參考。

模擬結果顯示，利用數值模擬的方式可以明確得到微射出成形時熔融塑料的各項狀態資訊。在模穴充填方面，熔融塑料會因模壁冷卻與流體特性的關係，由模壁至模穴中央可明顯分辨出表面固化層、剪切層與核心層三部分；在微結構模穴充填方面，可發現在微結構尺寸為 $10\ \mu\text{m}$ 時，PP 與 PMMA 皆是以噴泉流的方式充填微結構。微結構入口處模穴厚度方向的壓力分佈並不對稱於微結構模穴厚度的中間線；而熔膠在進入微結構後，冷卻速率會大幅提高，使熔膠很快就降至熔點或是 T_g 之下；微結構充填速度約為主流道內的百分之一，但是其最大剪應變率卻高達主流道的四倍。

Simulation of the injection molding of microstructures

Student : Cheng-Kang Chen

Advisor : Ren-Haw Chen

Institute of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

In recent years, how to form smaller and higher-aspect-ratio of micro structures has been the focus of plastic-forming. It is hard to directly observe the flow condition and measure the internal state of molten plastic in the process of micro-injection molding, because of high temperature and high pressure. The purpose of this study is to obtain the information which can not be directly obtained in the process of micro- injection molding by numerical simulation analysis.

The information of molten plastic in the process of micro-injection molding can be obtained in numerical simulation result. The simulation results show that it, consist of the surface layer, the middle layer, and the core layer formed from the lateral surface to the interior, can be found in the base-plate of the injection molded. In the microstructure with 10 μm thickness, the flow condition of molten plastic is fountain flow. The pressure distributions in thickness direction in a micro-cavity are not symmetrical to the center line of the thickness. The temperature of molten plastic decreases fast, and becomes lower than melting temperature or T_g in a short time after the melt filling into the micro-cavity. Although the filling speed of the molten plastic in the micro-cavity is low to be

about 1% of that in the major cavity, the maximum shear rate of the melt in the micro-cavity is high to be four times of that in the major cavity.



誌謝

轉眼之間，就讀研究所的時光也即將邁入尾聲了，首先要感謝指導教授 陳仁浩老師，在兩年間悉心的教導與不時的討論並指點我正確的方向，老師對學問的嚴謹和做研究的態度皆深深的影響了我，使我在對問題的探討上比以前增進了不少，在此對老師獻上最誠摯的敬意。

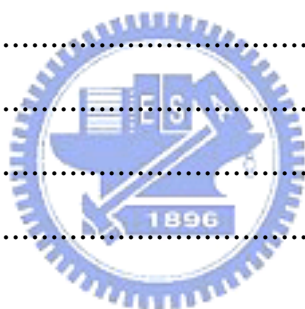
感謝劉安誠、蔡毓斌學長在規劃實驗時給予了不少實用的資訊、建議與經驗，幫助我在實驗上順利進行。感謝振家、春貴學長與悅慈學姐在碩一時的照顧，讓我這初入研究所的新生，很快的適應研究所生活。智翔、亞平、子敬與偉強在這兩年中，生活中互相扶持與對彼此實驗內容的討論，都讓我滿懷感激。實驗室的聰連、立偉、偉銘、國銓學弟及琳瑋學妹，有他們的陪伴，使我的研究生活更為豐富，他們的幫助更使我銘感於心。

最後在此感謝我最敬愛的雙親 陳建煌先生與 陳阿桂女士，感謝他們多年來的養育與栽培之恩，使我能順利完成學業，也感謝姐姐即時的關懷與支持。女朋友尚雲的體諒、包容並在背後默默支持更是我前進的動力。再次感謝所有於生活上與學業上曾幫助過我的家人與朋友們，謝謝他們的付出與支持。

目錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝	iv
目錄	v
表目錄	vii
圖目錄	viii
第一章 序論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究動機與目的	5
1.4 研究方法.....	7
第二章 理論與基礎.....	8
2.1 高分子材料簡介.....	8
2.1.1. 高分子材料分類.....	8
2.1.2. 高分子流變性質	9
2.1.3. 高分子材料的熱學性質	11
2.2 微射出成形流動分析的理論基礎.....	12
2.2.1. 黏度模型 Carreau model.....	12
2.2.2. 統御方程式.....	13
第三章 微結構射出成形模擬流程	19
3.1 電腦輔助工程軟體	19
3.1.1 流體動力分析軟體 FLOW-3D	19
3.2 數值模擬流程.....	20
3.2.1 基本假設.....	20
3.2.2 模型之建構.....	22

3.2.3	模擬的材料與其物性質	22
3.2.4	數值模擬擷取	23
第四章	模擬過程與結果討論	29
4.1	初始條件與邊界條件設定	29
4.1.1	初始條件	29
4.1.2	邊界條件	29
4.2	PP 微結構射出充填的數值模擬結果與討論	29
4.2.1	模穴充填模擬	29
4.2.2	PP 微結構充填模擬	31
4.3	PMMA 數值模擬結果	35
4.3.1	模穴充填模擬	35
4.3.2	模溫對 PMMA 微結構充填的影響	35
第五章	結論	55
5.1	結論	55
5.2	未來發展方向	57
	參考文獻	58



表目錄

表 3.1	NAK80 性質	24
表 3.2	Si 性質	24
表 3.3	PP 性質	24
表 3.4	PMMA 性質	24



圖目錄

圖 2.1(a)(b)(c)黏彈性流體行為[25]。	15
圖 2.2 剪切黏度對剪切率圖形[25]。	16
圖 2.3(a)楊氏係數 G 隨溫度變化的關係[25]。	16
圖 2.3(b)高分子應力張弛主要曲線[25]。	16
圖 2.4 黏彈性之力學模型[27]。	17
圖 2.5 射出成形充填過程中噴水流現象[26]。	17
圖 3.1 模擬分析流程。	25
圖 3.2 模擬模型圖(單位：mm)。	26
圖 3.3 模仁與單一微結構圖(單位：mm)。	27
圖 3.4PP 單位分子結構。	28
圖 3.5PMMA 單位分子結構。	28
圖 4.1 PP 在充填過程中接近模仁處的模穴厚度方向上的熔膠溫度分佈及其 時間變化。	37
圖 4.2 PP 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上的速度分佈變化情形。	37
圖 4.3 PP 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上的剪應變率分佈變化情形。	37
圖 4.4 模溫 50°C 時, PP 微射出成形品在垂直於材料流動方向的截面的偏光 顯微照片。	38
圖 4.5 模溫為 50°C 與 110°C 時, PP 在充填過程中在接近模仁處的模穴厚度 方向上的熔膠溫度分佈。	38
圖 4.6 模溫 110°C 時, PP 微射出成形品在垂直於材料流動方向的截 面的偏 光顯微照片。右側為微結構。	38
圖 4.7 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar, 微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分 佈圖。	39
圖 4.8 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar, 充填過程中在微結構模穴入口的厚度	

方向上溫度分佈變化情形。	39
圖 4.9 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。	39
圖 4.10 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。	40
圖 4.11 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。	40
圖 4.12 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，微結構內與部分基板模穴壓力分佈圖。	40
圖 4.13 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口的厚度方向上壓力分佈變化情形。	41
圖 4.14 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口的厚度方向上溫度分佈變化情形。	41
圖 4.15 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。	41
圖 4.16 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。	42
圖 4.17 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上壓力分佈變化情形。	42
圖 4.18 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段的厚度方向上溫度分佈變化情形。	42
圖 4.19 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上速度分佈變化情形。	43
圖 4.20 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。	43
圖 4.21 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段的厚度方向上溫度分佈變化情形。	43
圖 4.22 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方	

向上速度分佈變化情形。	44
圖 4.23 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。	44
圖 4.24 PP 在模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。	44
圖 4.25 PP 模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。	45
圖 4.26 PP 模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上溫度分佈變化情形。	45
圖 4.27 PP 在模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。	45
圖 4.29 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分佈圖。	46
圖 4.30 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。	46
圖 4.31 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。	47
圖 4.32 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。	47
圖 4.33 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。	47
圖 4.34 PP 在模溫 110°C、射壓 400bar 微結構模穴充填 3D 模擬圖。	48
圖 4.35 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar 微結構模穴充填 3D 模擬圖。	48
圖 4.36 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上溫度分佈變化情形。	49
圖 4.37 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上速度分佈情形。 ..	49
圖 4.38 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上剪應變率分佈情形。	49

圖 4.39 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分佈圖。.....	50
圖 4.40 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。.....	50
圖 4.41 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。.....	50
圖 4.42 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。.....	51
圖 4.43 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。.....	51
圖 4.44 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。.....	51
圖 4.45 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。.....	52
圖 4.46 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。.....	52
圖 4.47 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。.....	52
圖 4.48 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上溫度分佈變化情形。.....	53
圖 4.49 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上速度分佈變化情形。.....	53
圖 4.50 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。.....	53
圖 4.51 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。.....	54
圖 4.52 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。.....	54

圖 4.53 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段
厚度方向上剪應變率分佈變化情形。..... 54



第一章 序論

1.1 研究背景

微機電系統是繼半導體產業後世界各國相繼研究的新興整合型產業，也是科技業公認最具有發展潛力的整合型科技產業。隨著製程技術不斷的在進步，微機電系統尺寸越做越微小化，不僅在成本上能大幅降低，產品的競爭力和功能性也能夠大幅提升，可以應用在更多需要高精度的產業上，如：生醫工程、工業產品、無線通訊、航太工業等。

目前微機電的製造技術分為三類，分別是利用矽為基材的半導體製程技術所加以演變的體型微加工技術(bulk micromachining)和面型微加工技術(surface micromachining)，以及是微光刻電鑄模造技術(LIGA)。而這三類中，LIGA 技術可以滿足微機電元件高深寬比和複雜三維形狀的需求，所以是最廣泛討論且應用的技術。LIGA 技術是另用 X 光進行厚膜光阻的微影製造出所需的圖案，再利用電鑄金屬翻模製作母模，最後以微成形加工的技術來進行大量生產微結構。

由於石化工業快速的發展，塑膠產品的市占率大幅的提升，工業上和日常生活中，許多產品中的結構或是外觀構件都是由塑膠製成的，也因為應用上越來越普遍，對於成形上技術的研究也越來越多。在微成形方面，熱壓成形(Hot embossing)與射出成形(Injection molding)是目前最普遍用於製作塑膠結構的成形技術，其過程是將塑膠加熱至玻璃轉換溫度(Glass transition temperature, T_g)以上，並施予壓力將熔融的塑料填充入具有微結構的模仁中，等待充填結束後，利用冷卻液將模具和模仁以及成形品降溫，並且維持一個壓力以防冷卻過程中因為密度變化造成產品收縮，最後脫模並且取出成形品。在熱壓成形方面，具有材料流動距離短(low material flow)和低流動速率(low flow rate)的優點，在成形過程中可以有效降低殘留應力的產生，適合製造高精度且特徵尺寸小的塑膠微結構，但成形週期比較長，

需要利用加大成形面積和自動化生產的方式來降低成本並且提高生產量。

微射出成形和傳統的射出成形加工最大的差別在於模具的設計，微射出成形必須確保模穴能夠保持真空，以防止微結構填充不完全的狀況，因此在設計真空排氣方面需要特別的注意。射出成形製成因為模穴的封閉性高，使材料的流動率高(high flow rate)、流動距離長、循環時間短、低損失功率、各項量測準確、壓力高等特點，適合應用在高深寬比的微細結構成形。射出成形對於微成形也具備了其它優點，在成形品的形狀上，比熱壓成形具有更多樣的變化性，也因為成形循環時間短，配合上自動化就能夠大量的生產以降低成本。

射出成形是我國重要之塑膠加工產業，過去學術界及產業界對於射出成形相關技術的研究有良好的進展，但對於微量射出成形有系統的研究仍十分欠缺。目前在微射出成形仍有許多問題存在，如成形微量製品時，所需的射出量小，以至於塑料滯留在料管裡的時間過久造成裂解現象及因射出行程太短而塑化不均等問題，如搭配多模穴勉強進行，使用多模穴成形方式，雖可分攤機器射出量太大，藉以生產微成形品，但有品質不易掌握、成形後廢料過多、成形週期過長等缺點。

除了製造上的問題外，塑料在模穴內的變形流動以及冷卻情況是決定成形品好壞的重要因素，因應各種不同塑料的物性值，成形參數的設定也各有不同。目前電腦輔助工程分析軟體(CAE) 在模擬塑膠模流方面都能夠進行準確的預測，利用軟體進行數值模擬，可以清楚的了解塑料在模穴中的流動等情況。

1.2 文獻回顧

M.S. Despa 等人以射出成形的各項參數進行探討，認為在微射出成形中模具溫度和射速是能否成功填充微模穴的主要原因，在高深寬比(約 8/1) 尺寸為數十微米的微結構中，分別以不同的模溫和射速進行實驗，結果發現模溫若高於高分子的熔點，則都可以順利的填滿微結構，而較低的模溫則可能會發生熔融塑料因為散熱太快，而形成過早固化。實驗中也提到提高射出速度也對微成形有幫助，但是提高射速並不像提高模溫一樣，保證能夠完成填充。文中也提到了模具的精度、密封程度或是模具排氣設置也是成形成功與否的因素[1][2]。J. Dininger 探討射出成形的模穴壓力、塑料流速、料溫以及冷卻溫度等四個變數對微射出成形結果的影響，其中提到加快塑料流速，可以降低塑料分子黏度，有助於填充微結構[3]。E. Ruiz 等人研究中利用流體波前的毛細數(Capillary number)來找尋最佳的射出速率[4]。

熔融塑料在小於微米尺寸的微結構中流動時，流體的黏度會受到流道尺寸的影響，並隨著尺寸的縮小而增加，其原因是尺寸越小，塑料溫度降低得越快，使得塑料填充的距離變短，而有可能無法填滿微結構。在 Wen-Bin Young 的研究中，模溫、材料性質和模穴厚度是影響填充距離的因素，在模溫低於塑料玻璃轉換溫度的情況下，模溫越高塑料填充的距離也越長，此外對於微結構深寬比的探討，除了提高模溫和使用較低的熱傳係數材料能夠增加成形深寬比外，也提到了微結構的尺寸也影響了可填充深寬比。尺寸越大的微結構能夠達到的深寬比也越大，而微結構尺寸和深寬比的關係圖呈現非線性關係，當微結構尺寸越大時能夠達到的深寬比較線性關係來的大[5]。Guojun Xu, M.E.以實驗與模擬的方式進行研究，當使用的材料熱傳係數較高時，因為塑料所含的熱散發得較快，使得熔融塑料溫度更快降至熔點附近，導致過快固化，塑料的填充距離也會隨之下降，也提出了當微結構的位置離澆口越近，其充填的效果越好[6]。S.C. Chen 等人在研究中

提出，塑料在流經微流道的時候，流體的黏度明顯比在一般毛細管流變儀低許多。而流體在流過毛細管和方形橫切面的微流道時，所測量到的黏度值相當的接近，方形橫切面微流道所量測到的黏度又較毛細管低一點，約2%-6%[7]。B. Xu 等人提到流體在微流道裡流動時，帶有極性的流體在尺寸為次微米時，流體的黏度會改變，並且流體為水的時候，也能夠發現此性質，但是當流體為非極性時，並無法發現一樣的現象發生[8]。

而在最近研究指出，並非提高模溫就能確保能夠得到滿意的成形品，在劉安誠的研究中指出，PMMA，在模溫高於 155°C 的情況下會發生微結構內部以及基板部分有殘留的空洞，薄壁結構的部分為空心，甚至會造成微結構壁厚局部的膨大，並且越高溫此種情況越嚴重。其原因是塑料進入微結構模穴時會受到劇烈的剪切作用發熱，但因為模溫太高而無法迅速將成形材料的熱排出，導致成形材料受溫度升高過高而部分氣化，冷卻時保壓使得這些氣體受到壓縮並且殘留在成形品中。文中也提到了射出壓力和主射出壓力對成形品的影響，前者是預防結合線的產生，後者的射速較緩慢，主射出壓力太大或是射速太快會造成短射甚至是導致溢料的狀況，嚴重的話會導致模仁或模具損傷，使其壽命降低[9]。

在聚合物材料的射出成形數值模擬中，最重要的就是黏度模型的使用，而模型內各項參數的設定更是影響了數值模擬的真實度，這些參數的取得需要由實驗數據來求得，目前用來量測黏度的流變儀所能夠測得黏度的溫度範圍比射出成形實際的操作溫度都高出許多。有研究利用了直接在射出成形機上安裝了儀器進行實際量測[10][11]。利用動態量測的方式和 Cox-Merz rule 也能夠對低溫高分子黏度進行預測[12]。Johanna Aho 等人利用了 Carreau-Yasuda 黏度模型和 WLF equation 來表示非結晶型高分子的黏度與溫度關係，也能合理的表示無法量測之溫度與剪應變的黏度值[13]。

對於微射出成形的數值模擬，流變方程式、成形參數、初始值與邊界條件和物性值的設定等決定了數值模擬的準確度，而在這其中物性值的設定是最為重要的，而在高分子的物性值中，流變性質對於模擬微射出成形有最大的影響[14][15]。P.F. Bariani 等人利用了同軸的量測方法對高分子的

黏度進行量測，期盼能夠更準確的找出高分子的流變特性，進而讓數值模擬的精準度能更加提升[16]。

高分子熔膠於壁上之剪應力超過某一個臨界值時會發生滑動的現象，其原因可能為分子鏈於接觸模壁時產生解開作用[17][18][19]。Yu L.等人在研究中指出熔膠在流動的過程中會產生黏性熱。Ramamurthy A. V.的研究中指出熔膠在流道中的黏彈性是不可忽視的[20]。李平惠在研究中指出壁滑動微影響熔膠黏度下降最重要的因素。滑動現象較易發生於微流道當中，同時滑動速度相對於平均速度之百分比隨微流道尺寸減小而增加。熔膠溫度越高，沿壁滑動效果越明顯[21]。

1.3 研究動機與目的

以高分子為材料的微成形產品在應用上越來越多元化，從過去的民生工業、機械零件到生醫材料、光電元件、電子產品等都能夠找得到高分子材料應用的蹤影，所以如何使產品能達到更高精度、少缺陷、並且能夠有效應用在工業上的研究就很有意義。在現有的對微成形的研究中，大部分都是著重在模仁製程技術或是微成形產品的應用方面，少有是針對材料在成形過程中的流變行為進行觀察。

射出成形過程中因為壓力大、溫度高的關係，要直接量測到其內部各參數變化非常困難。在之前的文獻中，大多都是在模具上裝上熱感測器、壓力感測器或是利用紅外線的方式來進行量測[23][24]，但這些方式都只能量測到塑料的表面溫度與壓力，而對塑料內溫度與壓力的分佈無法得知。此外是否能夠成功填充微結構亦決定了微射出成形成功與否，因此可以藉由數值模擬的方式了解在填充過程中流體的行為，並得到微結構附近的剪應力、溫度、壓力的變化，再經由各項理論探討在微射出成形中，高分子所可能產生的變化，藉此了解微射出成形過程中，高分子的流動情況。

數值模擬在工業上越來越受到重視，可以藉由模擬的結果對於模具設

計、參數設定和材料選取等進行最佳化的設計，而市售的商用軟體對於數值模擬的精確度也是越來越進步，只要能夠將物性值、初始條件、邊界條件以符合實際情況的數據輸入，就可以完整的預測成形過程中的流動情況。因此本研究希望能夠使用商業軟體 FLOW-3D 來進行高分子流體在微射出成形過程時，在模穴中流動的情況。



1.4 研究方法

本研究使用商業軟體 FLOW-3D 進行微射出成形過程的模擬。由於此軟體內建材料資料庫並無塑膠，必須自行建立材料參數進行模擬。而有關材料的參數設定，部分參考塑料製造商所提供數據，如：比重、熱膨脹係數和熱傳係數等，其他數據，如：黏度特性，將以平板流變儀、毛細管流變儀測量黏度與剪應變的關係來得到必要的數據與曲線，藉此求得軟體內所需要的各項有關黏度的參數。至於比熱、玻璃轉換溫度和熔點等，則將利用熱差掃描熱卡計 DSC(Differential Scanning Calorimeter)進行量測。而在成形參數設定方面，如：模溫、射速和壓力等，將參考目前工業上使用的參數值範圍，並且朝降低成本和成形最佳化的目標進行修正，如：以更低的模溫進行模擬。模型建立的方法參考目前實驗室所進行中的實驗來加以建構，在微結構的尺寸上希望能夠到達微米等級。模擬對象的材料為工業上、生醫工程等常用的非結晶性的聚甲基丙烯酸甲脂(Polymethylmethacrylate, PMMA)，與結晶性的聚丙烯 PP(polypropylene)來進行模擬。期望能藉由實驗得到準確的物性值，並應用軟體內所建構的各項模型，得到塑料在成形過程中填充的行為，以及成形塑料內部的溫度、壓力與應力分佈。

第二章 理論與基礎

2.1 高分子材料簡介

高分子材料特性是介於固體和流體間，流體的幾何形變是屬於流動，而固體的幾何形狀改變是屬於變形，而高分子特性介於其中間，稱之為黏彈體，並且以流變來描述此種材料特性。黏彈性流體有許多特殊的行為，爬竿效應(Rod Climbing)、模口膨脹(Swell)、黏彈性流體往下流動時，若被截斷，上端會有回彈的行為和無管虹吸等特性，如圖 2.1。

2.1.1. 高分子材料分類

高分子區分為三類：彈性體(Elastomer)、熱固性(Thermoset)和熱塑性(Thermoplastics)，後兩項通稱塑膠。橡膠是典型的彈性體，分子為網狀結構，其材質具有高度的可恢復性(Recoverability)。熱固性塑膠經過加溫加壓使其固化(Curing)，固化後即使再加溫加壓亦無法再使材料軟化或熔融。熱塑性塑膠會隨著溫度升高而熔化，並隨溫度降低而凝固，可藉由溫度的變化來改變形態，而這種類型又分為兩種：不定形體(Amorphous)與半結晶體(Semi-Crystalline)，對不定形高分子而言，存在一個玻璃轉移溫度 T_g (Glass Transition Temperature)，當低於此溫度時其特性會屬於類似玻璃般的堅硬而脆，高於此溫度時不定形高分子會熔化。而結晶形高分子也有 T_g 的存在，但是相當的不明顯，因為結晶性的關係，導致其流動性極差，結晶性高分子存在熔融溫度 T_m (Melting Temperature)，在高於此溫度才會熔融，而隨著結晶性的增加，強度會上升並且透明度會隨之降低，故結晶性的高分子大多都屬於不透明的(Opaque)。

2.1.2. 高分子流變性質

高分子流體屬於非牛頓流體(Non-Newtonian Fluids)，因為其黏度很大所以在塑膠加工時屬於層流。黏度對於流體流動產生抵抗，對於牛頓流體來說是一個常數，而對於高分子熔融體而言，黏度會隨著剪應變率(Shear rate)增加而減少，故其黏度的定義為

$$\text{黏度} = \text{剪應力(Pa)} / \text{剪應變率(1/s)} \quad (2-1)$$

高分子熔融體在剪應變率極低的情況下黏度為一個常數，但隨著剪應變率增大，就會發生剪稀薄特性(Shear Thinning)。剪稀薄特性的發生，其原因和高分子結構有關，高分子是由無數分子以長鏈組成，在低剪應變率時，分子隨機的絞纏在一起，隨著剪應變率變大時，絞纏的長分子鏈會被解開呈現直線的排列，黏度因此降低。現在最簡單且普遍用來了解高分子黏度/剪應變率關係的方法為指數率模式(Power Law)

$$\mu = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2-2)$$

其中 m 為一致係數(Consistency Coefficient)，黏度越大， m 值越大。 n 值用以描述高分子流體非牛頓流的程度，當 $n = 1$ 時，流體為牛頓流體，當 $n < 1$ 時，流體具備剪稀薄特性。而高分子的黏度/剪應變率曲線也和溫度有關，當溫度越高時，分子和分子間的運動速率增加，使對流阻力減少，黏度會下降，在指數率模式中，Arrhenius 提出了修正的模式

$$m = m_0 e^{-b(T-T_0)} \quad (2-3)$$

其 T_0 為參考溫度， m_0 為 T_0 時的一致係數， b 為實驗而得到的常數。

如圖 2.2。

用以描述高分子彈性行為的楊氏係數 G 會隨著溫度的變化而改變，因此高分子的黏彈性分為四個部分：玻璃狀態區(Glass zone)、玻璃轉移區(Glass transition zone)、橡膠態高原區(Rubbery plateau)(半結晶高分子)或熔融區(Melting zone)(不定形高分子)、熔液區(Liquid melt)，如圖 2.3(a)。除了和溫度有關，楊氏係數也會隨著受應力時間變化分為四區：彈性區(Elastic)、黏彈性區(Viscoelastic)、橡膠態區(Rubbery)、黏性流區(Viscous flow)，如圖

2.3(b)

黏彈性流體之行為可以利用彈簧和阻尼器串聯和並聯來描述線性黏彈體流體承受剪應力 σ 和變形量 γ 的關係，如圖 2-4，彈簧和阻尼的剪應力(τ)-應變(γ)圖可以表示成

$$\tau_{\text{Spring}} = G\gamma_{\text{Spring}} \quad (2-4)$$

$$\tau_{\text{damping}} = \mu\dot{\gamma} \quad (2-5)$$

而此模型下黏彈性流體的應力-應變可以下式表示

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} + \frac{\tau}{G_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_1}{\mu_1}t\right) \right] + \frac{\tau}{\mu_0}t \quad (2-6)$$

當時間 t 很小，黏彈性流體受到剪應變力 τ 的變形量主要為彈性元件 G_0 控制，故此時是類似彈性固體的行為，並且在應力消失的時候會回復原本的狀態。當時間逐漸增加，黏性單元的效應會逐漸增加，流體分子間的鍵結逐漸的斷裂，當時間很長後，主要的變形行為是由黏性單元所控制，並且因為分子間鍵結受力過久斷裂的影響，而呈現類似牛頓流體的行為，黏度漸趨為一常數[27]。

一般聚合物在模穴中流動時，最常見的流動行為噴泉流(fountain flow)，當薄流路厚度減少，聚合物熔融液體的流動就更加困難，所需要用來克服剪切流動所需要的射出壓力就要增加，如果射出的速度不變，那麼會導致聚合物在模壁上面產生滑動(slip)的現象而形成缺陷，如圖 2.5。

2.1.3. 高分子材料的熱學性質

塑膠的熱學性質大概有下列幾種：容積性質、熱卡性質、轉移溫度。

1. 容積性質包括了比容、密度、PVT 等特性。比容跟密度成倒數，會隨著溫度、壓力和相的狀態而不同，當低溫時分子鏈間排列比較緊密，自由體積較小，比容較小，高溫時，提供了分子鏈活動，比容較大。對於結晶性的塑料來說，低溫時分子鏈節只會再平衡位置小範圍的震動，只有提高溫度才能夠提供足夠的能量破壞結晶排列，才能有移動、轉動和滑動等的行為發生，在玻璃轉移溫度時，可以從 PVT 圖中，固定壓力值，觀察出有明顯的轉折點，如圖 2.6，而非結晶塑料就不會出現明顯的轉折點，如圖 2.7。PVT 關係圖亦可以提供成形時的體積膨脹率以及成形後冷卻收縮率的參考。
2. 熱卡性質方面包含了比熱、熱傳導係數、熔化熱等，比熱代表了材料儲存熱量的能力，也表示單位質量的材料提高單位溫度所需要的能量，SI 的單位為 $J/(kg \cdot K)$ 。比熱越大，材料溫度越不容易改變。熱傳導係數是材料熱傳導的能力，其數值越高，熱傳效果越佳，加工過程中會使溫度均勻分佈，比較不會有熱量局部堆積而有熱點產生。
3. 轉移溫度包括了玻璃轉移溫度、熔點，當塑料溫度低於玻璃轉換溫度時，不論是半結晶高分子或是非結晶高分子，高分子材料的性質就如同玻璃般呈現出硬而易脆的性質，當溫度高於玻璃轉換溫度時，其形態呈現橡膠態，軟而易變形。半結晶的高分子材料在溫度高於玻璃轉換溫度時，非結晶區域可塑性流動，減少高分子的剛性，溫度在玻璃轉換溫度與熔點之間，是由硬直的結晶區域分散在軟的非結晶區域中。非結晶性的材料並無明顯的熔點，當溫度超過玻璃轉換溫度後，就喪失了其機械性質。

2.2 微射出成形流動分析的理论基礎

2.2.1. 黏度模型 Carreau model

黏度 μ 和剪應變率 $\dot{\gamma}$ 的曲線圖在工業材料應用上有很大的幫助，非牛頓流體黏度/剪應變率的關係曲線除了在 2.1.2 提到的指數率模式(Power Law) 外，Carreau model 是一個多參數的流體模型。在本研究中所使用的 Carreau model 為：

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 E_r - \mu_{\infty}}{\lambda_{\infty} + [\lambda_0 + (\lambda_1 E_r)^2 e_{ij} e_{ij}]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (2-7)$$

其中

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2-8)$$

$$E_r = \exp \left[a \left(\frac{T^*}{T-b} - c \right) \right] \quad (2-9)$$

其中 μ_0 是零剪切率時的黏度， μ_{∞} 是剪切率為無限大時的黏度， λ_0 和 λ_1 為時間常數， n 是指數率模式的指數， a, b, c, T^* 是常數， T 是流體溫度。

Carreau 在 1968 年所發表的博士論文提到的原始模型為：

$$\mu_{app} = m [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (2-10)$$

當剪應變率很大時，中括弧內的 1 可以忽略，則此模型就跟指數率模式相同，當剪應變率很小時，則 μ_{app} 會得到為一個常數 m ，因此 Carreau model 修正了指數率模式在低剪切應變率時，黏度會趨近於無限大的不合理現象，當剪應變率很低時，高分子黏度會為一個常數。而此模型中的 n 值和指數率模式相同，當 $n = 1$ 時，所表示出黏度會和牛頓流體一樣為一個常數， $n < 1$ 時，所表示出的黏度會出現剪稀薄(shear thinning)的現象，也就是擬塑流(pseudoplastic)， $n > 1$ 時，其流體表現的黏度特性是剪切厚(shear thickening)、膨脹(dilatant)。因此 Carreau model 可以用來表示牛頓流體與非牛頓流體的黏度/剪應變率曲線。

2.2.2. 統御方程式

2.2.2.1 連續方程式

連續方程式是從能量守恆而來，質量守恆方程式可以表示為：

$$\frac{DM_{\text{sys}}}{Dt} = 0 \quad (2-11)$$

M_{sys} 是系統的質量，而又可以表是為：

$$M_{\text{sys}} = \int_{\text{sys}} \rho \, dV \quad (2-12)$$

將(2-12)式代入(2-11)中，可得：

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{sys}} \rho \, dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{cv}} \rho \, dV + \int_{\text{cs}} dV \cdot \hat{n} \, dA \quad (2-13)$$

其中等號右式第一項為控制體積(Control Volume)的質量時變率，等號右式第二項是質量流出率和質量流入率的差值。在一個固定並且形狀固定的控制體積中，由(2-11)、(2-12)、(2-13)式得到連續方程式為：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{sys}} \rho \, dV + \int_{\text{cs}} dV \cdot \hat{n} \, dA = 0 \quad (2-14)$$

在本實驗中所用到的微分連續方程式如下式：

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = 0 \quad (2-15)$$

其中 V_F 為可流動的體積分率， A_x 、 A_y 、 A_z 為 x 、 y 、 z 方向可流動的面積分率， u 、 v 、 w 為 x 、 y 、 z 方向的速度分率， R 、 ξ 為座標轉換常數，如：Cartesian coordinate 中， $R=1$ 、 $\xi=0$ 。

2.2.2.2 動量方程式

下列的運動方程式為 Navier-Stokes 方程式加上了幾個添加項， (u, v, w) 為三軸上流體速度的分量：

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\
\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y \\
\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z
\end{aligned}
\tag{2-16}$$

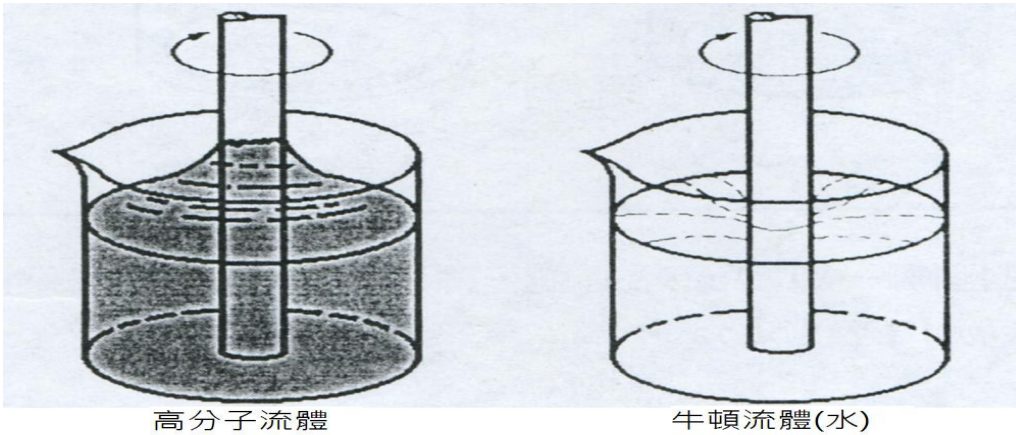
其中(G_x, G_y, G_z)是物體在(x, y, z)加速度，(f_x, f_y, f_z)是(x, y, z)黏滯項加速度，又可以用下式表示：

$$\begin{aligned}
\rho V_F f_x &= wsx - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_x \tau_{yy}) \right\} \\
\rho V_F f_y &= wsy - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x + A_y \tau_{xy}) \right\} \\
\rho V_F f_z &= wsz - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\}
\end{aligned}
\tag{2-17}$$

其中

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{yy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi x}{x} \right\} \\
\tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
\tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}
\end{aligned}
\tag{2-18}$$

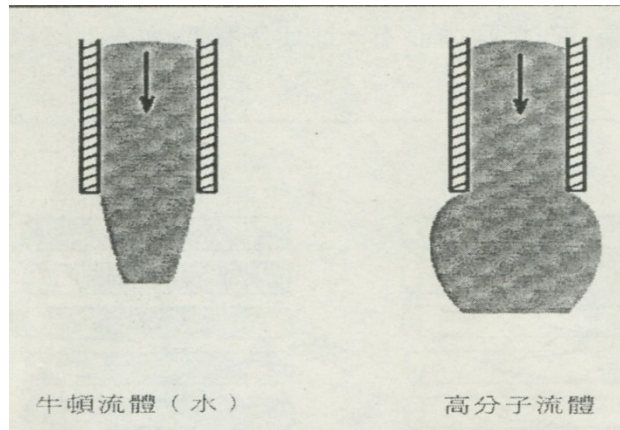
而其中 μ 為 Carreau model(2-7)式中的黏度



高分子流體

牛頓流體(水)

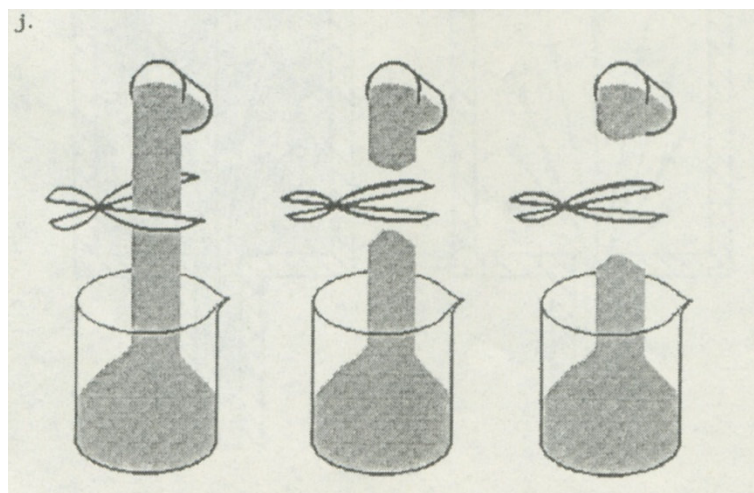
(a)爬竿效應



牛頓流體 (水)

高分子流體

(b)模口膨脹



(c)截斷回彈

圖 2.1(a)(b)(c)黏彈性流體行為[25]。

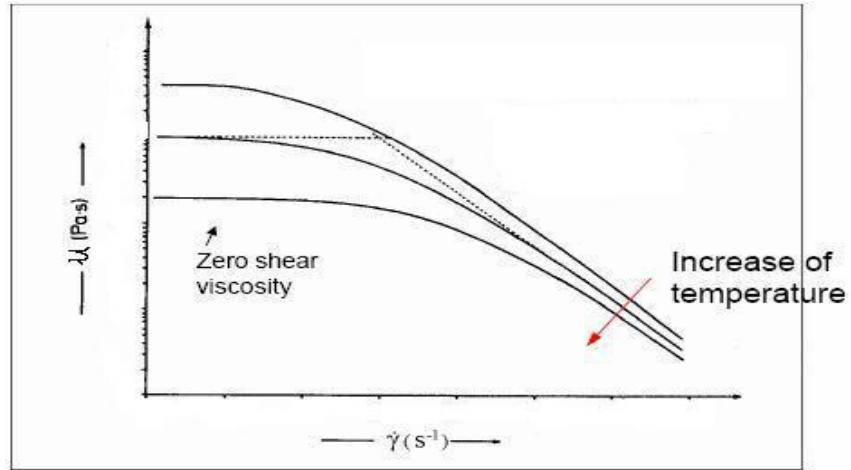


圖 2.2 剪切黏度對剪切率圖形[25]。

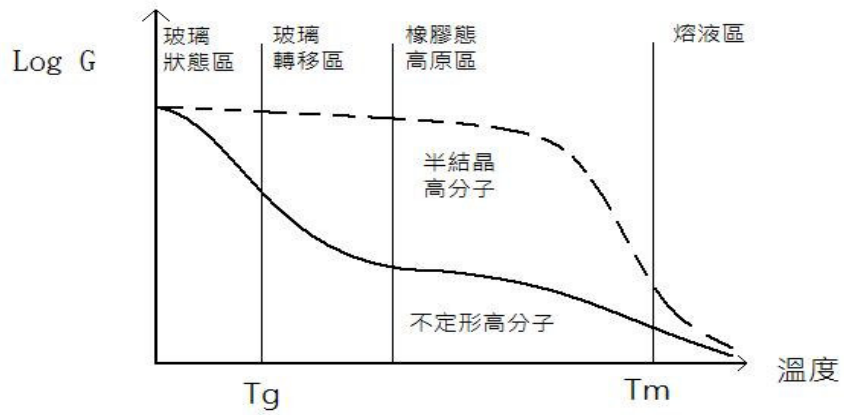


圖 2.3(a)楊氏係數 G 隨溫度變化的關係[25]。

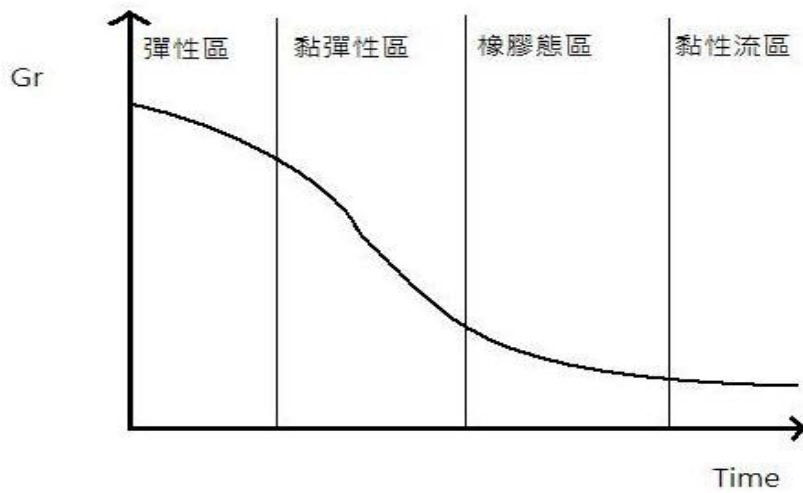


圖 2.3(b)高分子應力張弛主要曲線[25]。

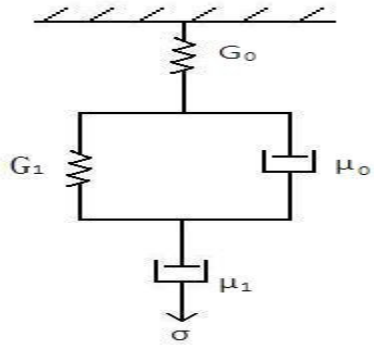


圖 2.4 黏彈性之力學模型[27]。

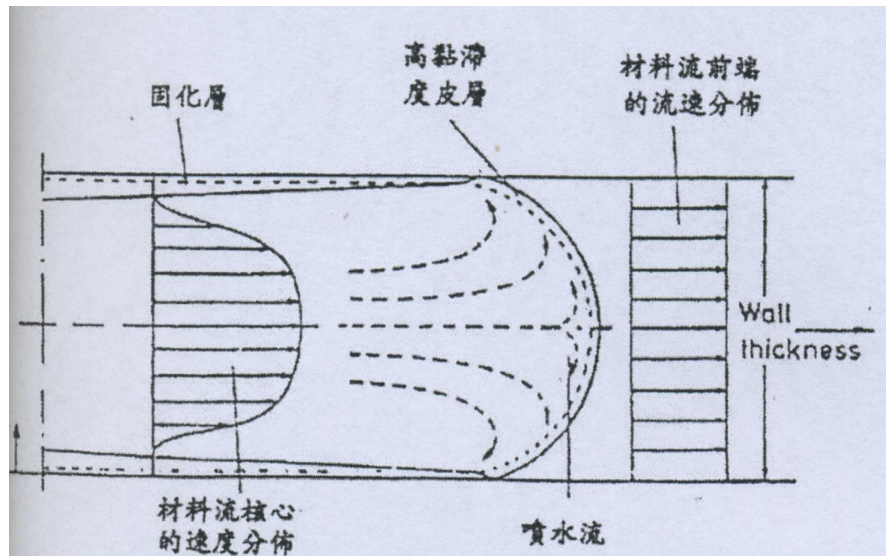


圖 2.5 射出成形充填過程中噴水流現象[26]。

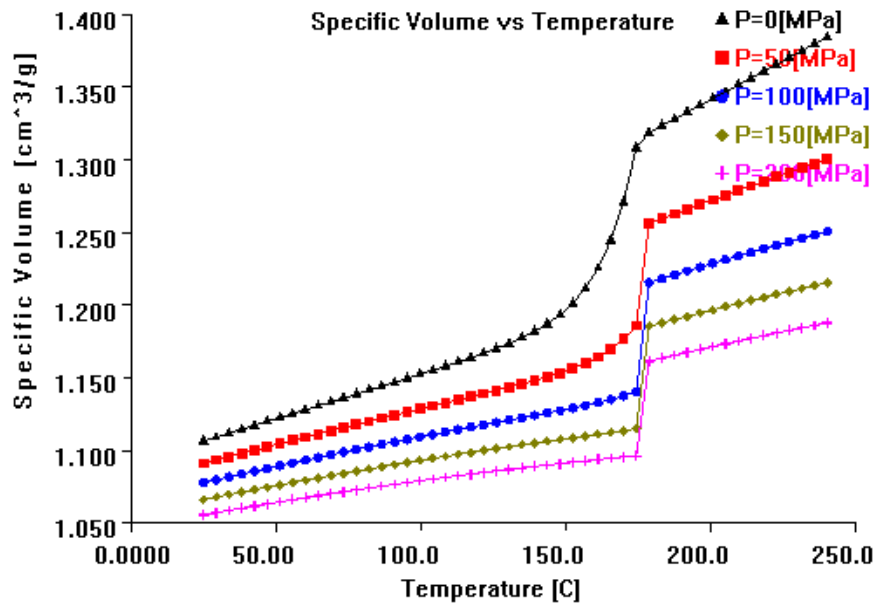


圖 2.6 結晶性的塑料 PVT 圖。

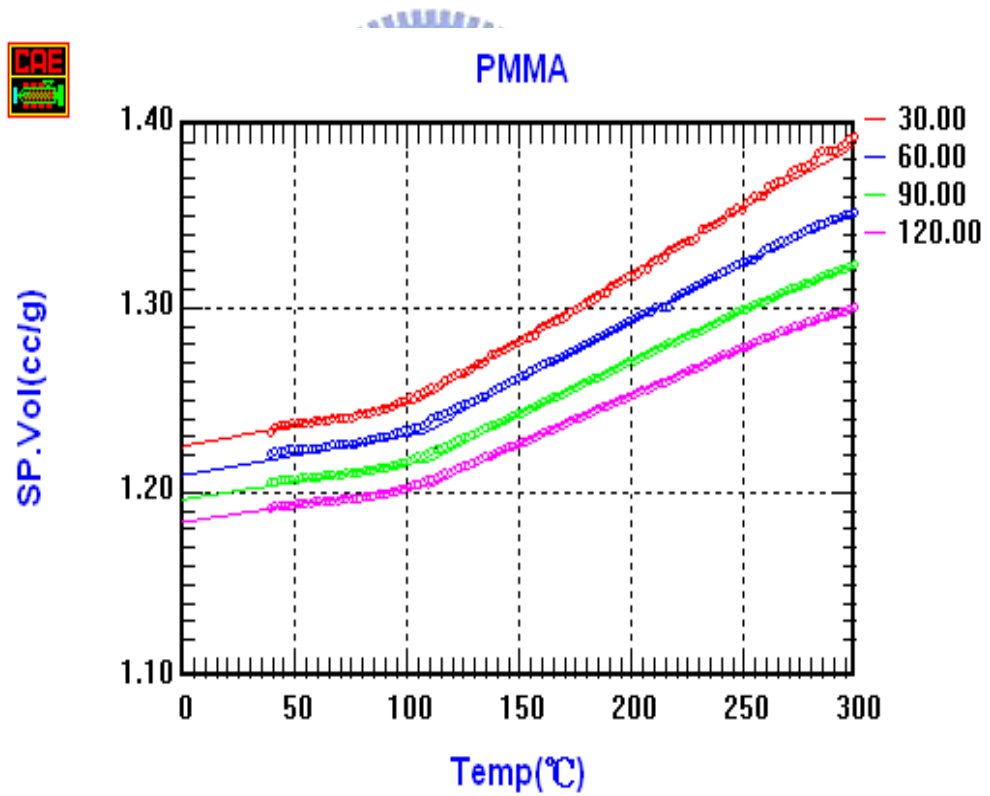
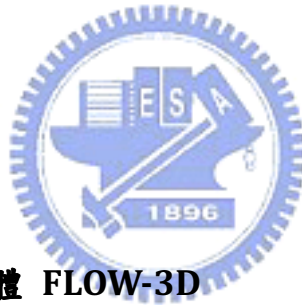


圖 2.7 非結晶的塑料 PVT 圖。

第三章 微結構射出成形模擬流程

隨著電腦科技的突飛猛進，將電腦以及電腦軟體應用於產品的開發、設計、分析與製造，已經成為近代工業提升競爭力的主要方法。國內最早引進的電腦輔助軟體是 CAD，然後是 CAM，最晚的則是 CAE。電腦輔助設計(Computer-aided Design, CAD)即使用電腦軟體直接從事於圖形的繪製與結構體的設計。電腦輔助製造(Computer-aided Manufacturing, CAM)則是直接用電腦輔助操縱各種精密工具機器以製造不同的零組件。電腦輔助分析軟體(Computer-aided Engineering, CAE)在工程上的應用已經十分普及，不僅能夠提供設計者相當多的資訊、節省相當多的時間和成本，也能達到準確的分析和預測。隨著電腦運算的速度不斷的提升，數值分析也被應用於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)上，也從一維的計算轉變為二維和三維。



3.1 電腦輔助工程軟體

3.1.1 流體動力分析軟體 FLOW-3D

FLOW-3D 是由美國的 Flow Science Inc.所開發，可以模擬液體和氣體的動態行為，是專門用來計算流體力學的軟體，也因為其對於流體流動優異的模擬能力，因此廣泛的應用在各種流體分析的研究，例如：水利工程、鑄造、噴墨頭研究、船舶設計，甚至在微機電領域的流體分析。FLOW-3D 的理論基礎是根據流體力學的連續方程式、動量方程式等，因此可以應用在各種流體的流動。在計算流體的自由表面時採用 Volume Of Fluid Method (VOF)，能夠大量的節省記憶體的使用並且縮短計算的時間，數值方法為有限差分法(Finite Difference Method, FDM)。此軟體已經有設置前處理器，可以建立簡單的幾何圖形，並且擁有建立網格的功能。網格的切割法是矩形網格，並且搭配專利計算方式-FAVOR(部分面積/體積)，可以用矩形的網格來描述曲面的模型，使分析不會失真，相較於傳統的 FDM 技術，可

以用較少的網格達到一樣的要求。

FLOW-3D 是採用矩形網格和有限差分法，因此存在一些優缺點：

優點：

- ◆ 矩形網格建立簡單。
- ◆ 簡單的網格計算較容易。

缺點：

- ◆ 有限差分法在複雜的幾何圖形的邊界條件處理上無法有效近似。
- ◆ 處理邊界條件的難度較高。
- ◆ 六面體的矩形切割要盡量使長寬高等長度，否則求得的結果會有相當大的誤差。

3.2 數值模擬流程

先利用 CAD 軟體建立模穴模型，並且將圖形匯出成 FLOW-3D 可以使用的 STL 圖檔格式。在 FLOW-3D 內建立模擬所使用的材料，並且輸入所需要的參數。黏度部分由平板流變儀和毛細管流變儀所測得的數據，經過計算後得到軟體內各項有關黏度的參數。再將符合實際實驗操作的參數代入後，完成微射出成形充填過程的模擬。模擬分析流程如圖 3.1。

3.2.1 基本假設

1. 層流：

雷諾數(Reynolds number)可視為慣性力和黏滯力之比。雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中流速的擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定，為層流；反之，若雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展、增強，形成紊亂、不規則的紊流流場。雷諾數可以下式表示：

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (3-1)$$

其中 ρ 為流體密度、 V 為流體流速、 d 為管徑、 μ 為流體黏度，因為高分子黏度很高，因此雷諾數很小，屬於層流。

2. 黏彈性體：

高分子變形會因為溫度變化或是隨著受到剪應力的時間增加，所展現出的特性可能為彈性體或是受黏度單位控制，因此設熔融高分子為黏彈性體。

3. 模穴內抽真空：

微射出成形中，模穴中必須要保持真空以避免殘留的空氣造成微結構填充不完全，甚至是會產生缺陷。現在工業上常使用抽真空幫助成形製程，因此假設模穴內為真空狀態是很符合實際的情況。

4. 假設模具周遭為絕熱的情況，亦即不會受到室溫的影響，在模擬時也不為此多設定條件，呈絕熱的設定。

5. 假設在模具、加熱棒、矽模仁、水路、成形品彼此間是貼合接觸，因此可忽略界面熱阻抗的影響。

6. 熱輻射必須是在物體具有很高的溫度才會有比較明顯的影響，因此假設在模具溫度 110°C 及其以下的熱輻射效應並不明顯，所以忽略不計。

7. 不可壓縮流：

流體某種程度上而言都是可壓縮的，換言之，壓力或溫度的改變會造成流體密度的改變。然而，許多情況下，熔融高分子的壓力或溫度改變所造成的密度改變相當微小，是可以被忽略的。

3.2.2 模型之建構

圖 3.2、圖 3.3 為模擬時所用的模型圖，在微結構部分，微流道寬度為 $10\mu\text{m}$ ，深寬比為 5 比 1。模穴材料為 NAK80 其材料物性值表如表 3.1 所示。模仁部分所使用的材料為 Si，其材料物性值如表 3.2 所示，將這些物性值代入 FLOW-3D 中，建立起材料的資訊，以供模擬運用。

3.2.3 模擬的材料與其物性質

3.2.3.1 PP

聚丙烯(polypropylene；PP)，其化學結構式如圖 3.4。綜合性能優良，並且可以利用射出成形、熱壓、擠出、吹塑、層壓、中空成形、雙向拉伸等工藝加工成形。生產成本較低，因此用途廣泛，可以用於製作容器、薄膜、包裝紙等，並大量用於建築、汽車、化工、醫療、家庭用品等。也因為成纖性良好，可以經由熔融紡絲製成纖維或是不織布，其強度與尼龍相仿，可以用來製作蚊帳、地毯、衣料等。特別是它比水輕，有浮力，不吸濕，適用於製作水上用品，如纜繩、漁網等。其材料物性質表如表 3.3。

3.2.3.2 PMMA

聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate；PMMA)，是俗稱的壓克力材料，其化學結構式如圖 3.5。由甲基丙烯酸甲酯 MMA 聚合而製得的熱塑性塑膠，經常用來當作玻璃的替代品，但在物理或是化學性質上，都有比玻璃更佳的特性。PMMA 的密度約為 $1150\text{-}1190\text{kg/m}^3$ ，相同大小的材料，重量只有玻璃的一半；抗拉伸和抗衝擊的強度約比普通玻璃高 7~18 倍；熔點約為 $240\text{-}250^\circ\text{C}$ ，比玻璃 1000°C 的高溫低很多；其透光性是高分子材料中最優良的，透光率達 92%，亦比普通玻璃的透光度高。易於加工，可利用

車床切削，鑽床鑽孔，也可利用吹塑、射出成形、熱壓等塑料成形的方法加工大到飛機的座艙蓋，也可以製作假牙、牙托等小型產品。其材料物性質表如表 3.4。

3.2.4 數值模擬擷取

軟體模擬結束後的數據資料可以選取需要的時間點，可以得到指定位置的速度場、壓力場、溫度等，並且在微結構部位做切面或是透明度不同的切面觀察。最後再由以上的數值分析結果，進一步探討高分子微射出成形的充填過程。



表 3.1 NAK80 性質

密度 (20°C)g/cm ³	7.8
熱膨脹係數(20°C) 10 ⁻⁶ /°C	11.3
熱膨脹係數(200°C) 10 ⁻⁶ /°C	12.5
熱傳導係數 (20°C)W/m°C	26.1
比熱 (20°C)J/g°C	0.46

表 3.2 Si 性質

密度 (20°C)g/cm ³	2.329
熱膨脹係數(20°C) 10 ⁻⁶ /°C	2.49
熱膨脹係數(250°C) 10 ⁻⁶ /°C	3.61
熱傳導係數(20°C)W/m-K	11.3
比熱(20°C)J/g°C	0.702

表 3.3 PP 性質

密度 (20°C)g/cm ³	0.903
熱膨脹係數(20°C) 10 ⁻⁶ /°C	3.1
熱傳導係數 (20°C)W/m°C	0.21
比熱 (20°C)J/g°C	3.140

表 3.4 PMMA 性質

密度 (20°C)g/cm ³	1.039
熱膨脹係數 (20°C)10 ⁻⁶ /°C	0.6
熱傳導係數 (20°C)10 ⁶ W/m°C	0.12
比熱 (20°C)10 ⁷ J/g°C	1.707

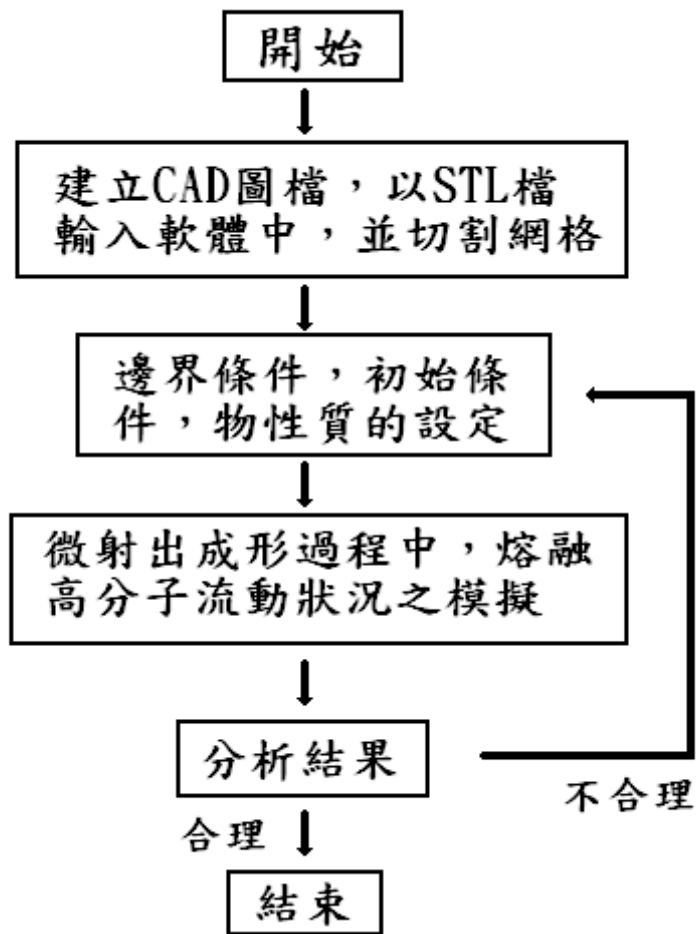


圖 3.1 模擬分析流程。

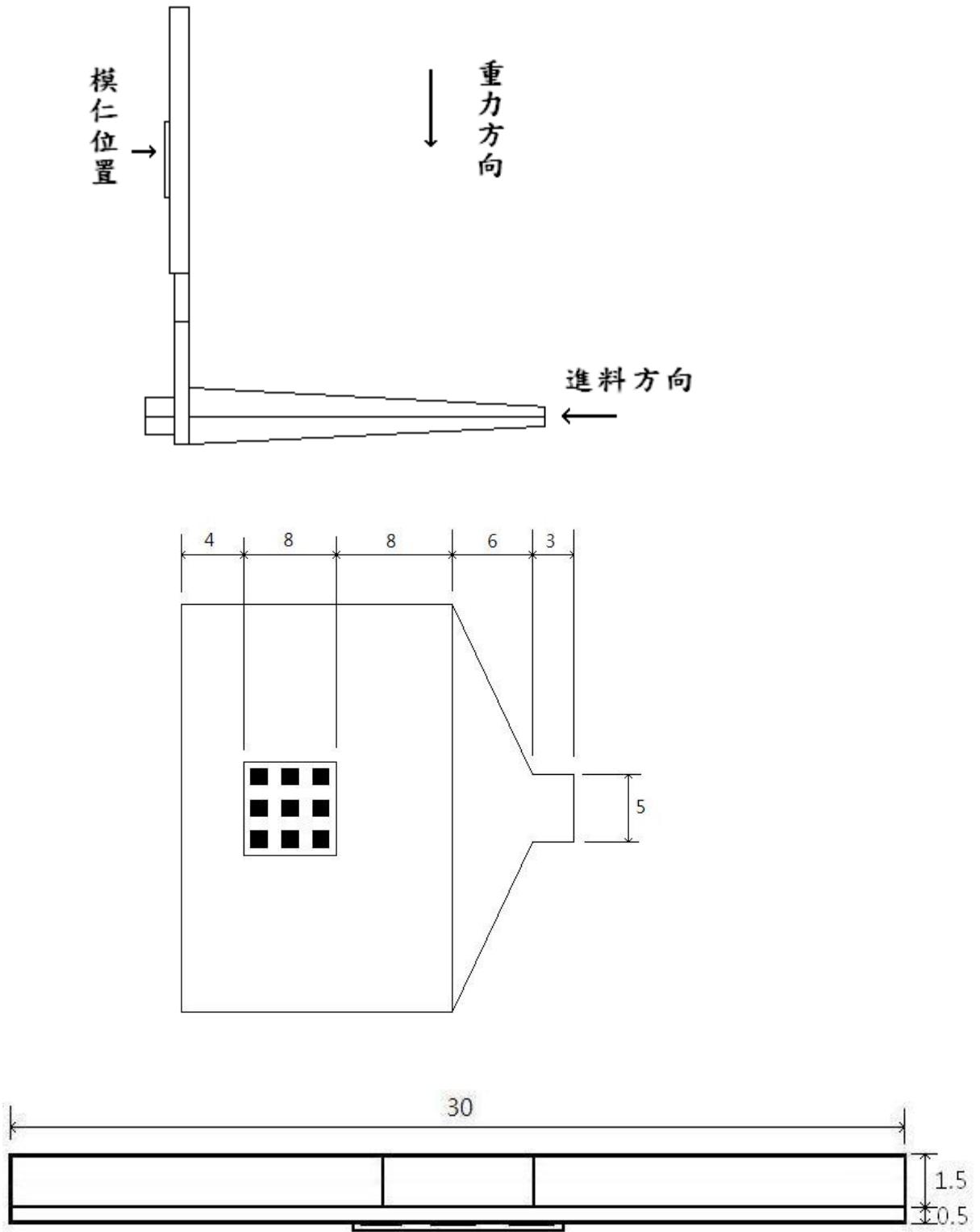


圖 3.2 模擬模型圖(單位：mm)。

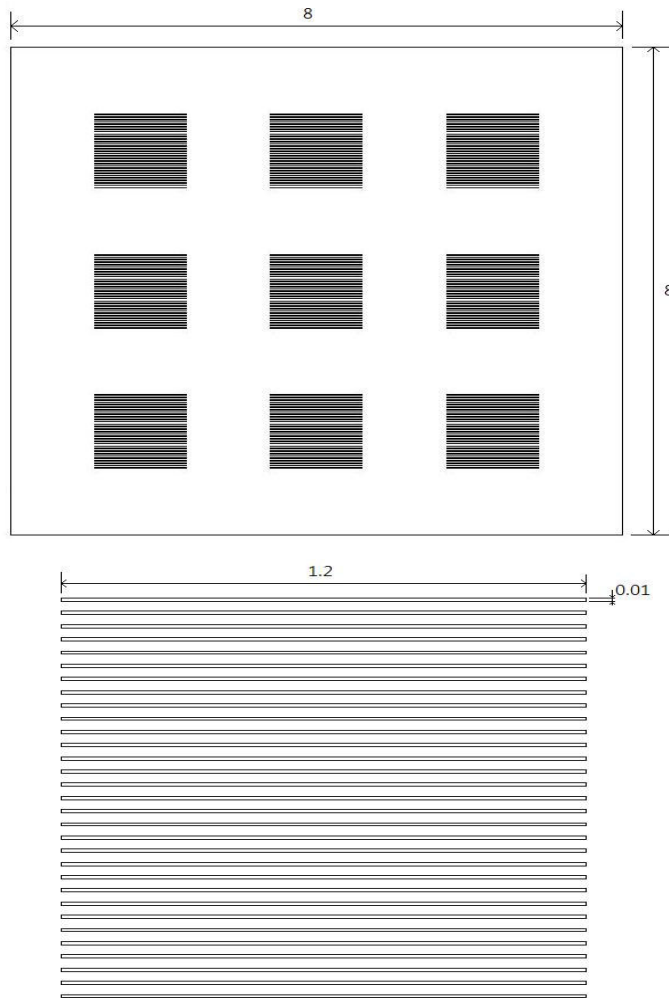


圖 3.3 模仁與單一微結構圖(單位：mm)。

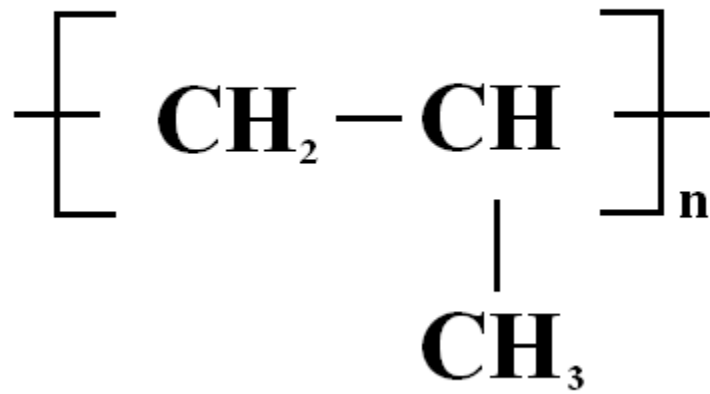


圖 3.4PP 單位分子結構。

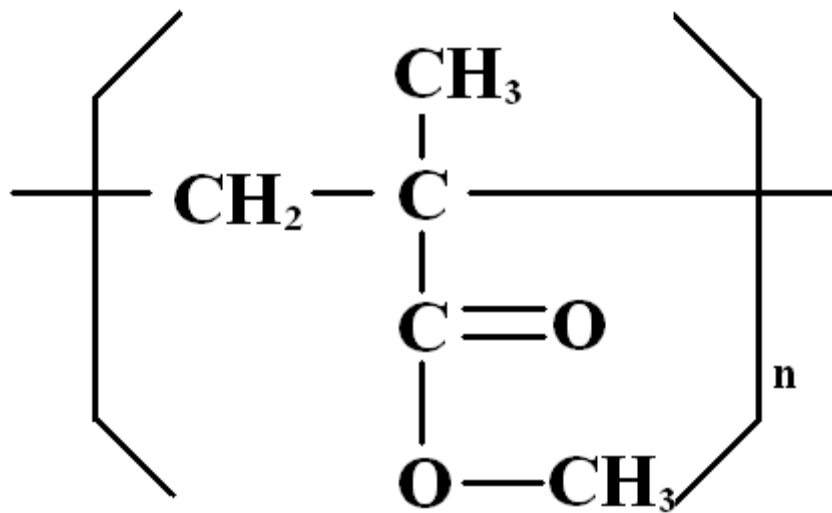


圖 3.5PMMA 單位分子結構。

第四章 模擬過程與結果討論

4.1 初始條件與邊界條件設定

4.1.1 初始條件

射出成形的參數：PP 的料溫為 270°C、射出速度 50cc/s、射出壓力為 40MPa、140MPa；PMMA 的料溫為 270°C、射出速度為 50cc/s、射出壓力為 170MPa，直到模穴填充完畢。

4.1.2 邊界條件

分別以模具溫度 50°C、80°C、110°C 進行模擬。模具周遭為絕熱的情況，亦即不會受到室溫的影響。

4.2 PP 微結構射出充填的數值模擬結果與討論

4.2.1 模穴充填模擬

圖 4.1 是模具溫度為 50°C 時，充填過程中在接近模仁埋設處的模穴厚度方向上的熔膠溫度分佈及其時間變化，由圖可得知接近模穴壁面的兩側熔膠的溫度在充填過程中會急速的下降，造成黏度劇增而使得流動性變差，形成表面固化層。圖 4.2、圖 4.3 是與上圖同位置處的熔膠速度分佈及剪應變率分佈變化情形，由圖可得知流速劇增的區域受到很大的剪切力作用，此區域應是熔膠在模穴厚度中心部形成層流的部分與表面固化層相鄰接的區域，俗稱剪切層。而模穴中央的部分，熔膠溫度最高，並且受剪切力作用大為減低，稱為核心層的部分。圖 4.4 是由同學范智翔的實驗中在相同的參數下所觀測到的偏光顯微鏡照片，由圖可得表面固化層、剪切層和核心層所佔的比例約為 2:3:5，在表面固化層的部分只有在靠近模壁的部分有些

微明顯的結晶，在鄰近剪切層的部分，結晶的程度明顯的減低。對照圖 4.3 可發現剪切層出現在熔膠達穩定流動時其剪切速率約達 600s^{-1} 以上的部分，其剪切應變率最大值的部分約在剪切層的中央部分。圖 4.5 為在不同模具溫度下模穴充填時的溫度分佈圖，由圖可知模溫為 50°C 時，越接近模壁的熔膠溫度下降的速率比模溫為 110°C 時快很多。對照圖 4.6 仍明顯看出模溫 110°C 也有固化層、剪切層和核心層的構造，但因為模溫較高，模具對熔膠的冷卻作用減弱，表皮層明顯的變薄，且各層的結晶狀況也都比模溫為 50°C 時明顯發達。



4.2.2 PP 微結構充填模擬

I. 固定射壓時，不同模溫條件下的結果

a). 模溫50°C、射壓400bar

由圖 4.7 是微結構內與部分基板模穴(垂直基板模穴方向)的溫度分佈圖，可以觀察到熔膠在填入微結構的過程中，溫度會急速的下降，也能從圖中發現在射出的充填階段無法將微結構模穴填滿。圖 4.8 是微結構模穴入口處厚度方向的溫度分佈圖，圖中更可以清楚觀察到熔膠進入微結構後約 0.09 秒的時間熔膠的溫度就降至熔點以下，且在厚度方向的溫度分佈因模壁冷卻的關係，中央約比靠近兩側模壁處高約 5 至 10°C。圖 4.9 是微結構模穴入口處厚度方向的壓力分佈圖，顯示出壓力並不對稱於微結構模穴厚度的中間線，在熔膠剛充填入微結構模穴時，靠主流路(基板模穴)下游的半側其壓力較主流路上游處高，而在流動趨於穩定的狀況下，靠主流路上游的半側其壓力反而較主流路下游的半側壓力高，推測應該是受到主流路內的熔膠流動影響所致。圖 4.10 是微結構模穴厚度方向的速度分佈圖，從圖中可發現熔膠是以噴泉流方式在充填微結構，並且在充填的過程中，隨著溫度快速下降，有些微收縮的現象發生(速度為負值)。圖 4.11 是微結構模穴厚度方向的剪應變率分佈圖，雖然熔膠在微模穴內的充填速度很小約僅及在主流路內的百分之一，但其最大剪應變率卻高達主流路內者的四倍。結果證明微模穴內的熔膠在充填的時候承受了相當大的變形作用。

b). 模溫80°C、射壓400bar

圖 4.12 是微結構內與部分基板模穴(垂直基板模穴方向)的壓力分佈圖，由圖可以發現當微結構填滿的狀態下，除了入口處壓力仍會受到主流道內熔膠流動影響，微結構內中段與末段的壓力為相等的數值，其原因是模具對熔膠所造成的壓力。圖 4.13 是微結構模穴入口處厚度方向壓力分佈圖，在流動趨於穩定的狀況下，微結構兩側模壁的壓力明顯較微結構中央處高，

與模溫為 50°C 時有截然不同的情形，其原因可能是此處的熔膠固化的情況不同所致。圖 4.14 是微結構模穴入口處厚度方向溫度分佈圖，和圖 4.10 比較下，模溫 80°C 時，當熔膠剛進入微結構模穴時的溫度較模溫為 50°C 高約 20°C，但約 0.09 秒後，熔膠溫度降至熔點以下，和模溫為 50°C 的情形類似。圖 4.15、圖 4.16 是微結構模穴入口處厚度方向的速度與剪應變率分佈圖，和圖 4.10、圖 4.11 比較，熔膠剛充填入微結構時速度提高了 1.5 倍，剪應變率也高出了約 1.33 倍，其原因可能為熔膠溫度較高，使得熔膠流動性較好，在靠近微結構模壁處受到了更大的剪切作用，因此使得剪應變率大幅提高。

圖 4.17 是微結構模穴中段厚度方向的壓力分佈圖，在此處得壓力分佈大致是呈現均勻分佈的情況，顯示此處熔膠流動行為已不受主流道內流動行為所影響。圖 4.18、圖 4.19 和圖 4.20 分別為微結構模穴中段厚度方向的溫度、速度、剪應變率分佈圖，圖中可以觀察到當熔膠通過中段後($t=0.0040$)，溫度較入口處高了約 10°C，推測可能是充填過程中受到極大的剪切應力作用而產生的熱量，導致熔膠的溫度會提高。當微結構模穴仍在充填階段時($t=0.0020$)，除了速度稍微下降，速度分佈與入口處的情況幾乎相同，代表熔膠在入口與中段處都是以噴泉流的方式充填微結構，當溫度冷卻時，也有些微收縮的情況發生，但其程度並不如模溫為 50°C 時明顯。從剪應變率圖中發現，其最大值約為微結構模穴入口處的一半，推測的原因是當熔膠自基板模穴進入微結構模穴的瞬間，尺寸差異過大導致熔膠承受相當大的變形作用，而當熔膠順利充填入微結構模穴後，入口處的剪應變率值也降至和微結構模穴中段相等。

圖 4.21、圖 4.22 與圖 4.23 分別為微結構模穴末段厚度方向的溫度、速度、剪應變率分佈圖，和圖 4.18 比較可以發現，當微結構模穴充填完畢後，末段的冷卻速率較中段的慢，推測是因為末端的形狀為弧形(如圖 4.36f)，且微結構模穴內熔膠冷卻固化後會有些微的收縮，導至末端與微結構模壁接觸面積極小，又微結構內為真空的情況，使得末段的冷卻速率小於中段。當 $t=0.0030$ 時，微結構模穴已經接近填滿的狀況，熔膠溫度也接近熔點，中

段與末段速度值與剪應變率已經相當的小，充填微結構的行為已經趨近於靜止的狀況。

c). 模溫110°C、射壓400bar

圖 4.24 是微結構模穴入口厚度方向的壓力分佈圖，與圖 4.9、圖 4.13 比較可發現熔膠剛進入微結構時，壓力最大值皆出現在主流路下游，隨著冷卻程度不一樣，入口處的壓力在各模溫所呈現的狀況也不盡相同，而在中段與末段的壓力圖中皆呈現均勻分佈的情況，顯示只有入口處的壓力受到主流路內熔膠流動狀況所影響。圖 4.25 是微結構模穴入口厚度方向的溫度分佈圖，可以觀察到熔膠的冷卻速率相對於模溫 50°C 與 80°C 時慢了許多，經過了 0.5 秒後熔膠溫度才接近熔點。而圖 4.26、圖 4.27 分別為微結構模穴中段與末段厚度方向的溫度分佈圖，與模溫為 80°C 時相同，當充填行為穩定時，微結構模穴末段的冷卻速率較中段緩慢。而這兩段溫度最後穩定時的溫度較模溫 80°C 時高約 20°C，其充填過程中熔膠的冷卻速率較慢，再與圖 4.28 微結構在偏光顯微鏡 200x 的倍率下觀測情形結果比較，模溫 110°C 時微結構內有明顯的結晶情形，且因微結構模穴在充填過程中，熔膠受到的剪切作用力很大，故形成密集細碎的結晶相，但因為冷卻速率相較於基板模穴仍是相當快速，並且受限於微結構尺寸的影響，因此並未形成球晶式的高次結構。

II. 模溫固定時，射壓對微結構充填的影響

a). 模溫50°C、射速1400bar

上述提到在模溫 50°C、射壓 400bar 時，射出的充填階段無法將微結構模穴填滿，而在微結構成形中，除了模溫之外，射出壓力也是影響微結構成形的主要原因之一，因此將射壓提高為 1400bar 再進行模擬。圖 4.29 是微結構內與部分基板模穴(垂直基板模穴方向)的溫度分佈圖，由圖可以發現

充填的情形較模溫 50°C、射壓 400bar 時的深寬比上升，但仍無法完整填滿微結構模穴。也可以觀察到微結構模穴內，熔膠後段在充填階段時溫度會應該受到極大剪切力作用造成溫度上升，而當穩定時，熔膠後段因與模壁沒有接觸(如圖 4.35)，且因為模穴內為真空狀態，使熔膠後段只能透過與熔膠前段傳導的方式散熱，而在入口處的熔膠因為與微結構模壁接觸面積大，並因為主流路內熔膠快速冷卻的關係，使其冷卻速率較其它部位來的快。圖 4.30 至圖 4.33 分別為微結構模穴入口厚度方向的溫度、壓力、速度、剪應變率分佈圖，與圖 4.8 至圖 4.11 比較，從壓力圖可以發現熔膠剛進入微結構時所受到的壓力，在射壓 1400bar 時明顯比射壓 400bar 高出許多，使得熔膠在充填微結構時能有較好的流動性，充填微結構的距離增長，微結構內熔膠與模具接觸的表面積增加，使得熔膠冷卻速率較快，並從比較剪應變率圖發現，在熔膠剛進入微結構的瞬間，射壓 1400bar 的剪應變率明顯高於射壓 400bar。因此提高射壓可以有效提昇微結構充填的深寬比，但是過高的射壓可能會導致基板模穴短射及溢料的情況發生，也可能因為過高的剪切應變率導致材料劣化的情形發生。



4.3 PMMA 數值模擬結果

4.3.1 模穴充填模擬

圖 4.36 至圖 4.38 分別為模具溫度為 50°C 時，充填過程中在接近模仁埋設處的模穴厚度方向上的熔膠溫度、速度、剪應變率分佈及其時間變化，與圖 4.1 至圖 4.3 比較，由溫度圖中發現，PMMA 因為熱傳導率較 PP 差，靠近模壁熔膠的冷卻速率較慢。由速度圖仍可看出 PMMA 與 PP 熔膠皆是以噴泉流的方式充填模穴，而 PMMA 由於分子的枝鏈較大，因此其黏度較高，充填模穴速度較緩慢，因此其充填過程中的剪應變率也較低，但兩者的剪應變率分佈仍屬相似，推測充填過程中仍會形成剪切層與核心層，而因 PMMA 散熱較慢，在此階段可能並未形成。

4.3.2 模溫對 PMMA 微結構充填的影響

a). 模溫 50°C、射壓 1700bar

圖 4.39 是微結構內與部分基板模穴(垂直基板模穴方向)的溫度分佈圖，由圖可觀察到 PMMA 在模溫 50°C 微結構模穴充填是相當困難的，其充填的深寬比甚至較 PP 在射壓 400bar、模溫 50°C 時來的差，顯示 PMMA 塑料極難充填入模穴微結構中。圖 4.40 至圖 4.43 分別為 PMMA 在微結構模穴入口厚度方向的壓力、溫度、速度、剪應變率分佈圖，與圖 4.8 至 4.11 比較，由於 PMMA 射壓較高，因此微結構模穴充填時入口處的壓力值明顯較 PP 高出許多，並從速度圖與剪應變率圖中得知，高壓並未使得 PMMA 有比 PP 更好的流動性，而從溫度圖中發現，PMMA 熔膠進入微結構模穴後冷卻速度較快，其原因是其黏度較高，使得熔膠流動性差，主流道內溫度高的熔膠與微結構入口處溫度低的熔膠藉由對流方式傳遞熱量的效果較差所導致。

b). 模溫110°C、射壓1700bar

圖 4.44 是微結構模穴入口厚度方向的壓力分佈圖，與圖 4.24 比較，當熔膠有較好的流動性時，壓力值最大值出現在主流路下游，並與圖 4.13 比較，當微結構模穴能完整充填時，入口壓力在充填階段分佈情形皆相同。圖 4.45 至圖 4.47 分別是微結構模穴入口厚度方向的溫度、速度、剪應變率分佈圖，由圖可知熔膠是以噴泉流的方式充填微結構，而其剪應變率最大值較模溫為 50°C 時高約 2.5 倍，原因是熔膠流動性好導致靠近微結構模壁處產生較大的剪切應力。圖 4.48 至圖 4.50 分別是微結構模穴中段厚度方向的溫度、速度、剪應變率分佈圖，圖 4.51 至 4.53 分別為微結構模穴末段厚度方向的溫度、速度、剪應變率分佈圖，由圖中可知在中段時熔膠仍是以噴泉流方式充填微結構，到末段時速度和剪應變率都已經相當的低。而從溫度圖中可以觀察到和 PP 充填時相同的情況，熔膠充填過程中會產生熱量導致中段和末段溫度會暫時較入口處高，但不同的是末段冷卻速度較入口與中段快，其原因可能是模溫高於 PMMA 的玻璃轉移溫度(105°C)，使塑料能一直保持在液體狀態，因此能完整的充填滿微結構模穴，使末端熔膠與模壁接觸面積較大，加上距離熱源較遠，使得末段冷卻的速率較中段與入口處快。

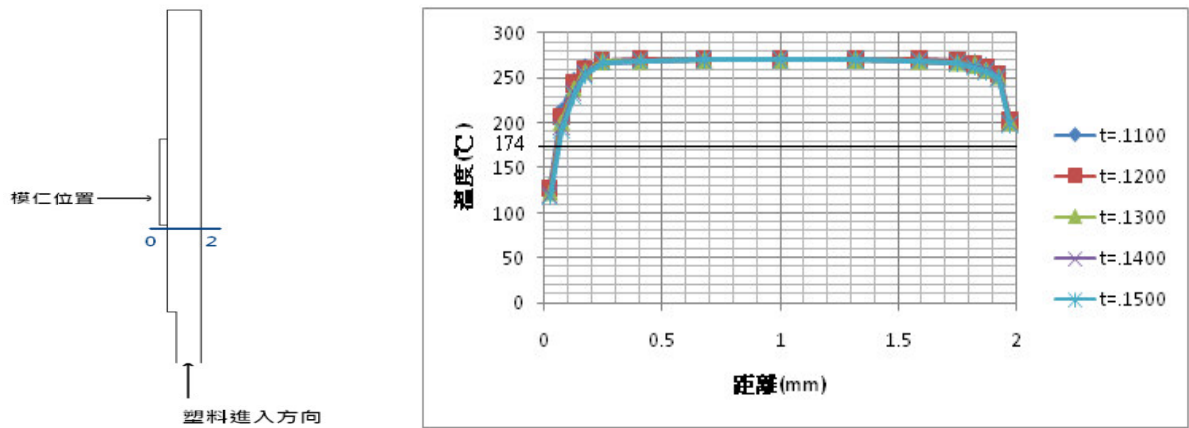


圖 4.1 PP 在充填過程中接近模仁處的模穴厚度方向上的熔膠溫度分佈及其時間變化。

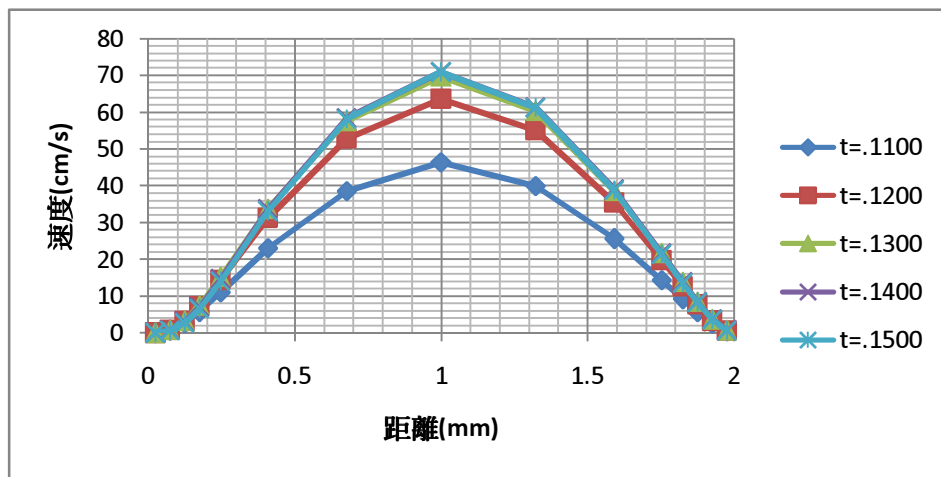


圖 4.2 PP 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上的速度分佈變化情形。

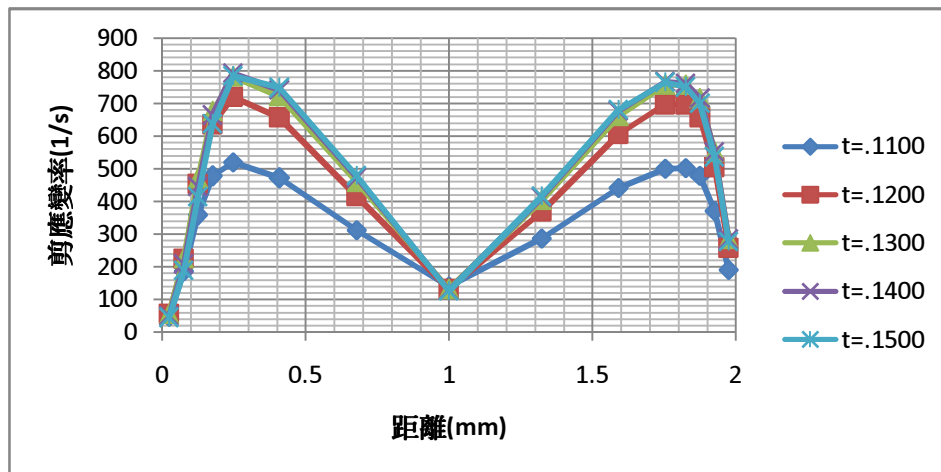


圖 4.3 PP 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上的剪應變率分佈變化情形。

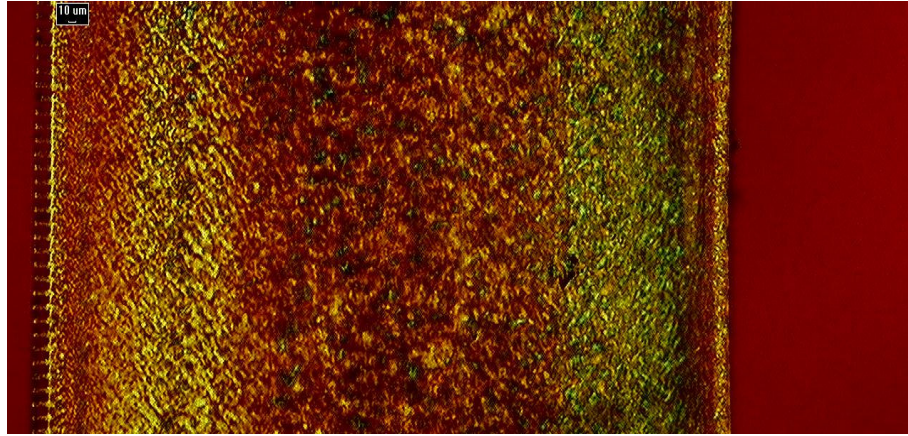


圖 4.4 模溫 50°C 時，PP 微射出成形品在垂直於材料流動方向的截面的偏光顯微照片。

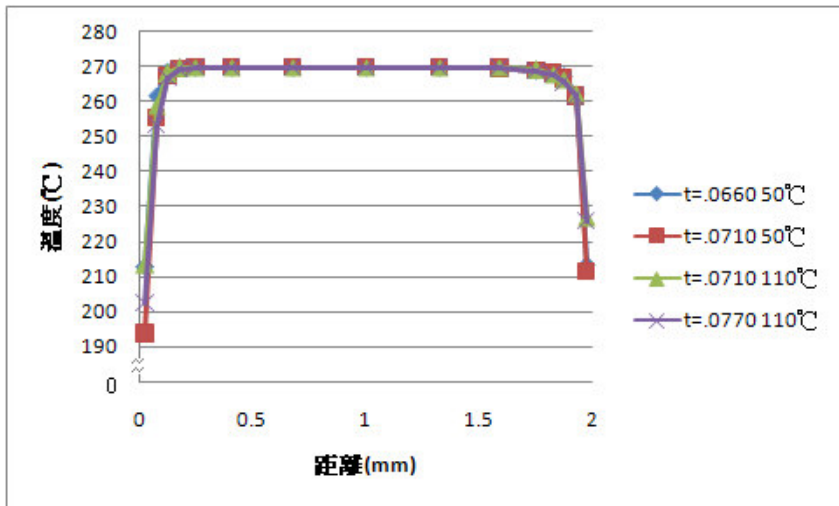


圖 4.5 模溫為 50°C 與 110°C 時，PP 在充填過程中在接近模仁處的模穴厚度方向上的熔膠溫度分佈。

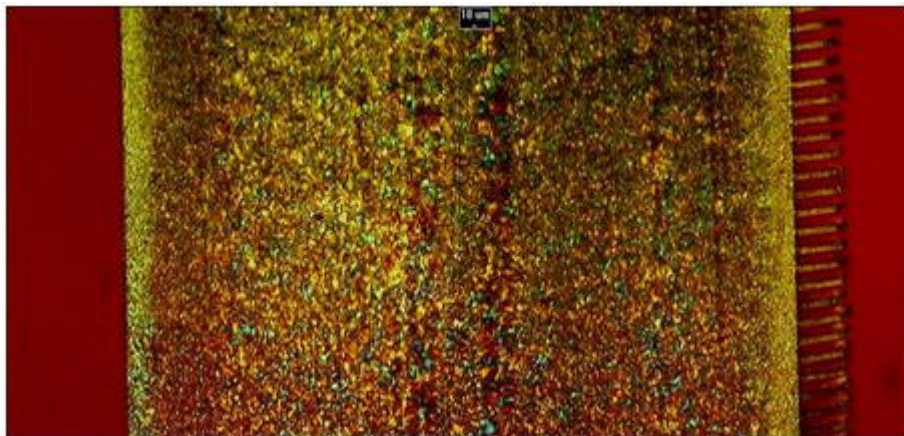


圖 4.6 模溫 110°C 時，PP 微射出成形品在垂直於材料流動方向的截面的偏光顯微照片。右側為微結構。

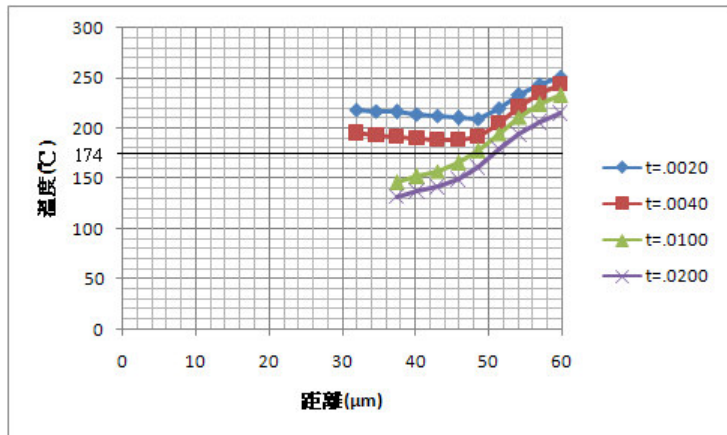
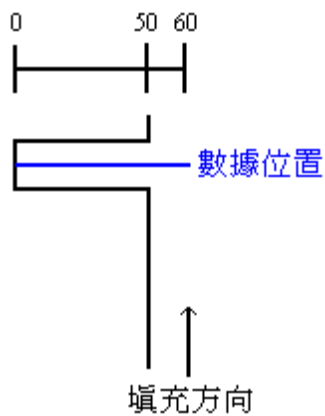


圖 4.7 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分佈圖。

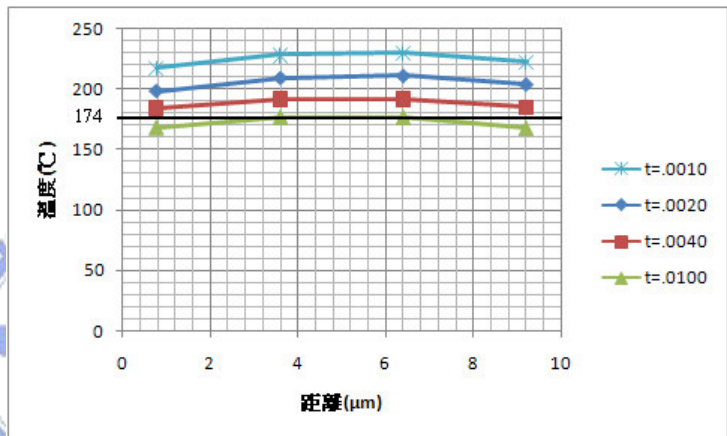
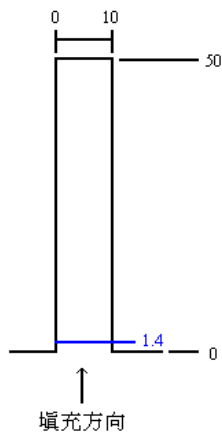


圖 4.8 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口的厚度方向上溫度分佈變化情形。

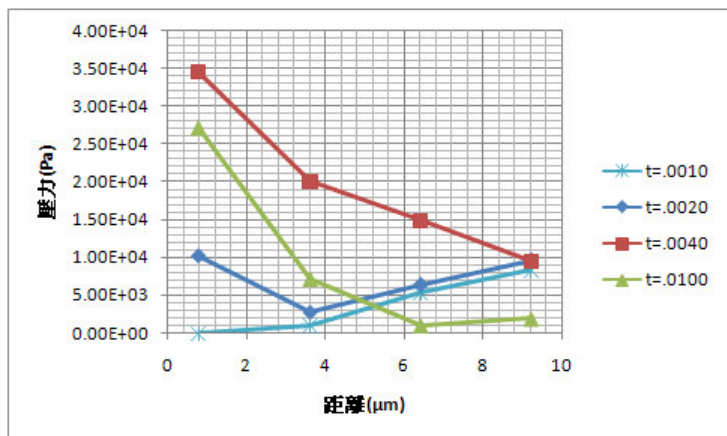
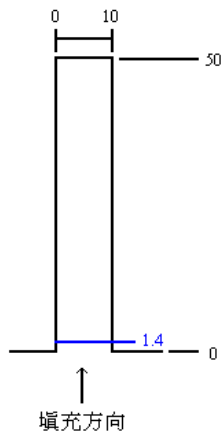


圖 4.9 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。

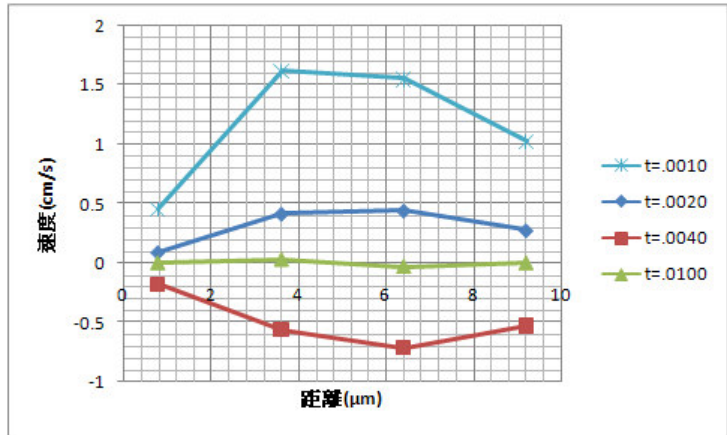
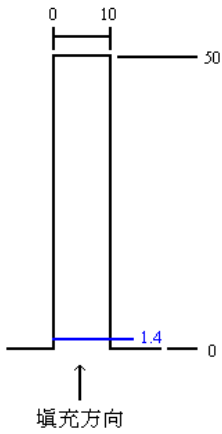


圖 4.10 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。

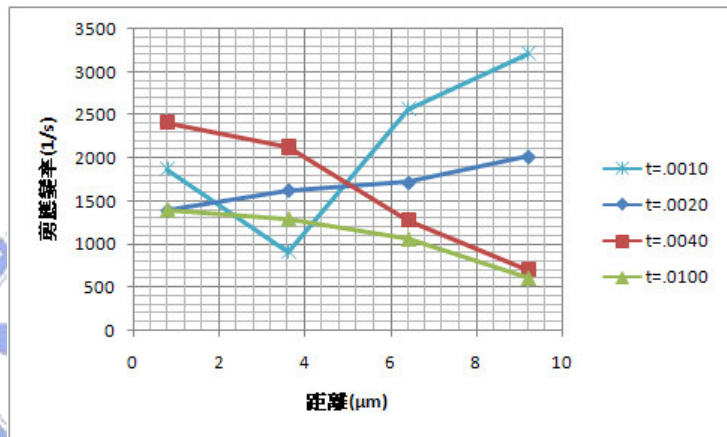
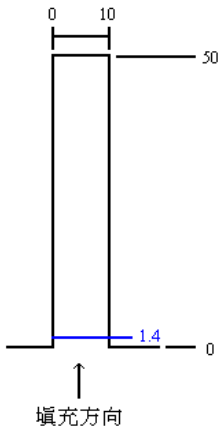


圖 4.11 PP 在模溫 50°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

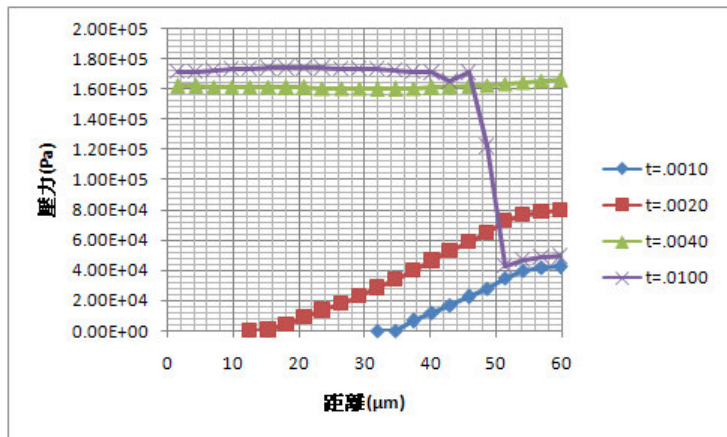
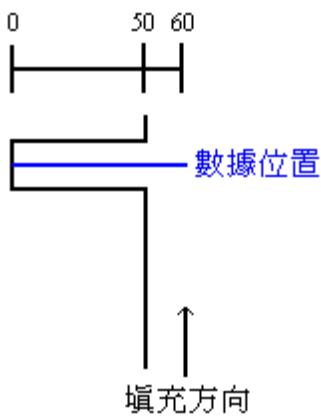


圖 4.12 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，微結構內與部分基板模穴壓力分佈圖。

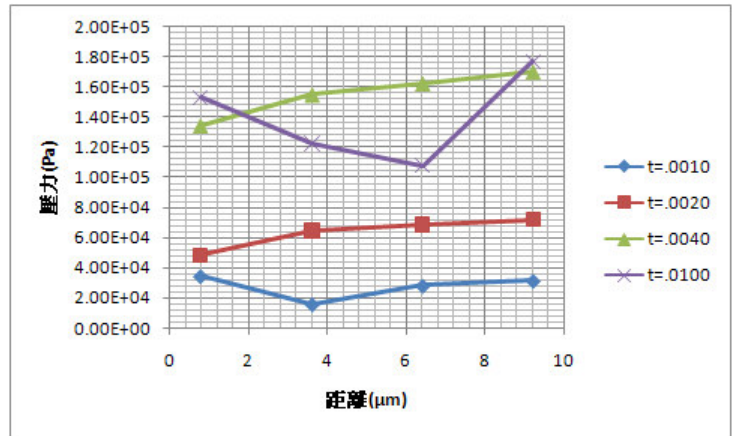
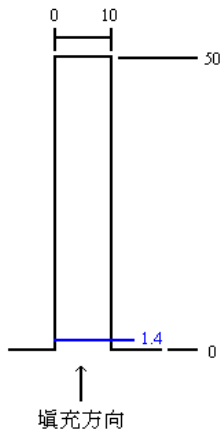


圖 4.13 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口的厚度方向上壓力分佈變化情形。

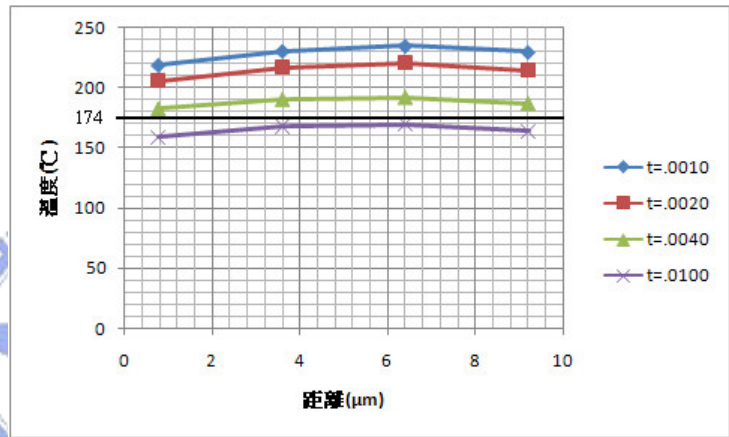
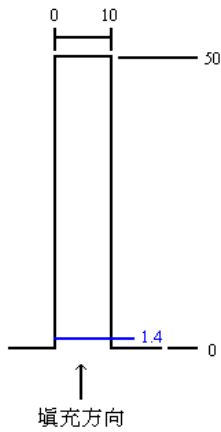


圖 4.14 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口的厚度方向上溫度分佈變化情形。

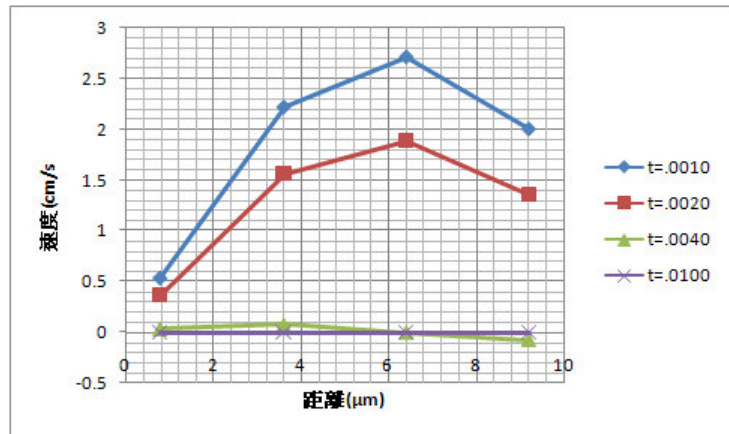
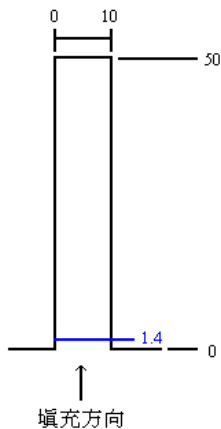


圖 4.15 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。

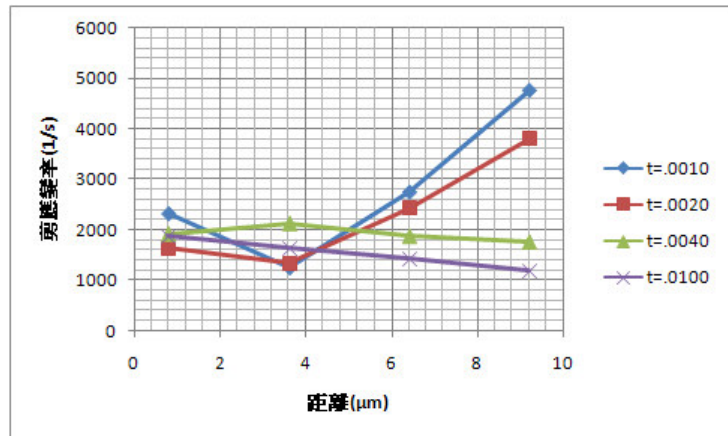
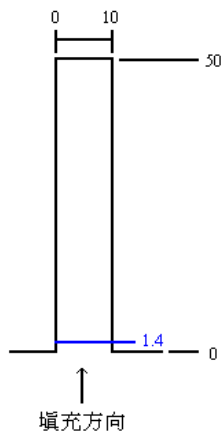


圖 4.16 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

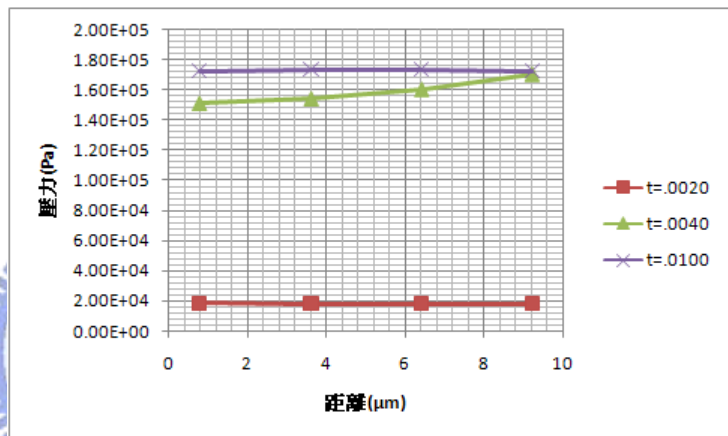
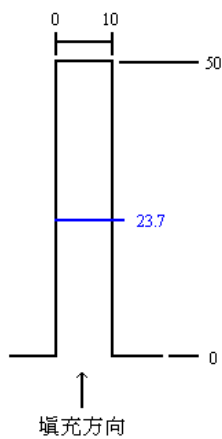


圖 4.17 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上壓力分佈變化情形。

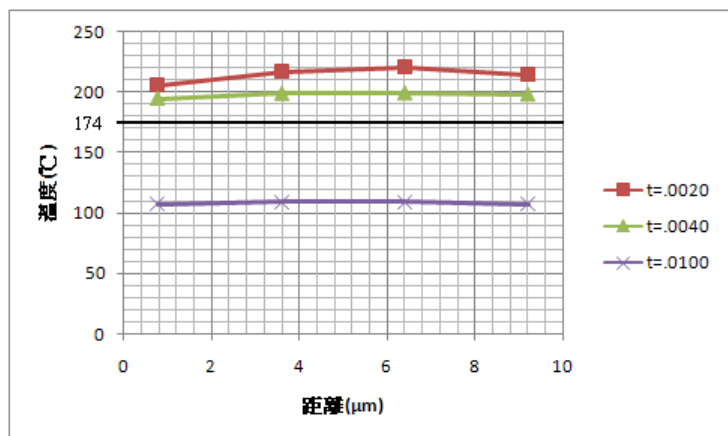
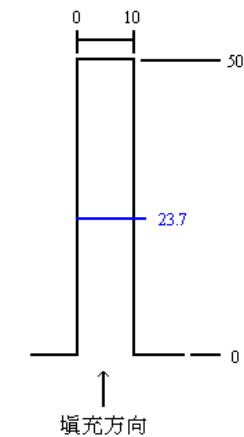


圖 4.18 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段的厚度方向上溫度分佈變化情形。

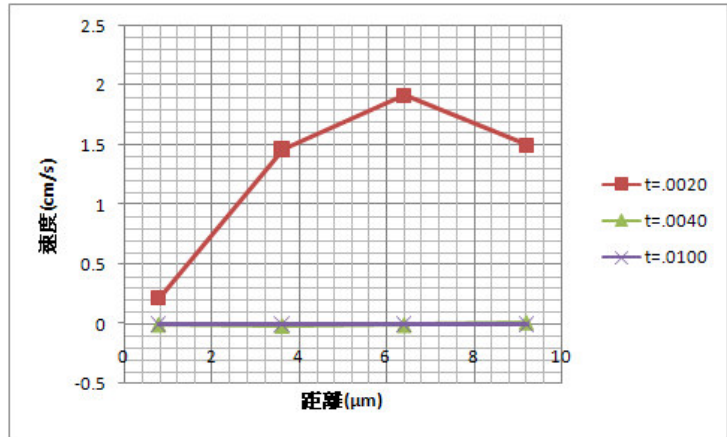
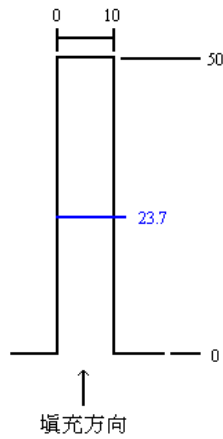


圖 4.19 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上速度分佈變化情形。

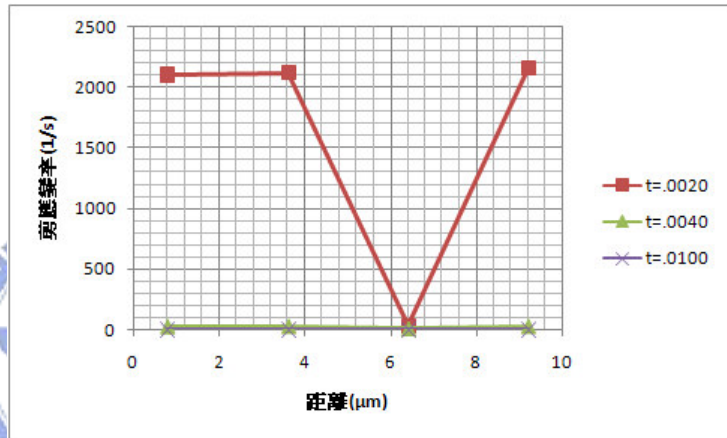
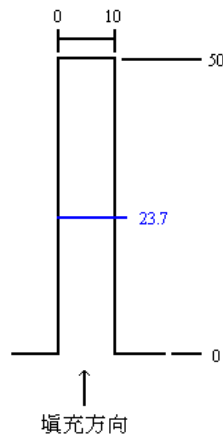


圖 4.20 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

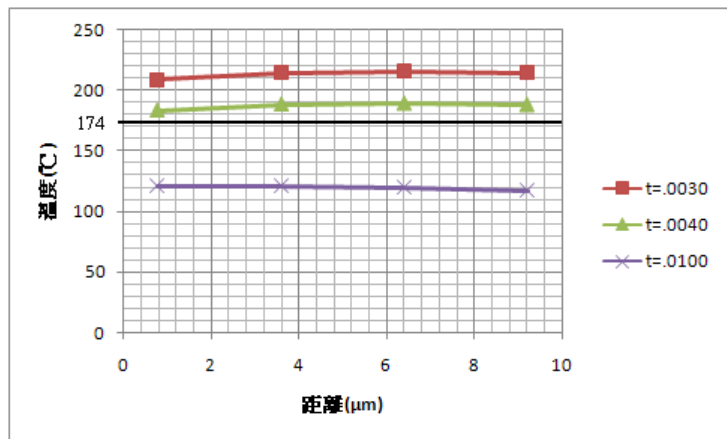
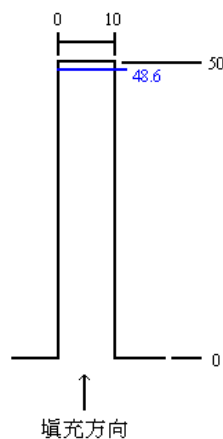


圖 4.21 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段的厚度方向上溫度分佈變化情形。

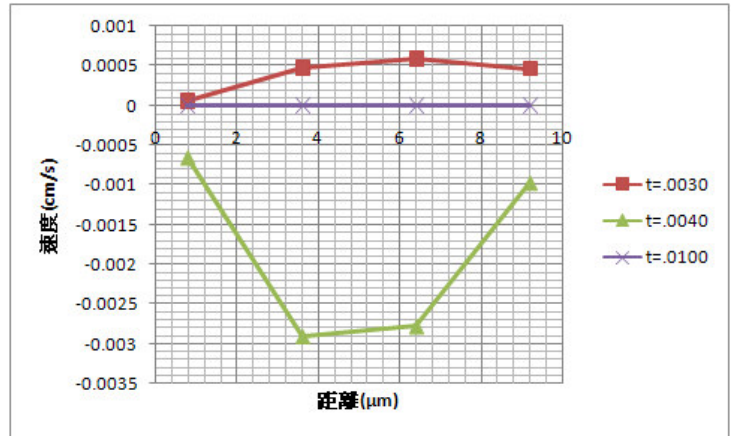
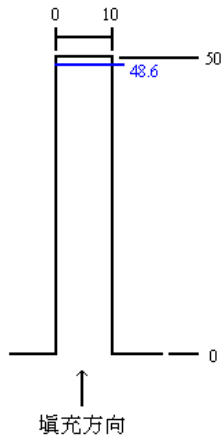


圖 4.22 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上速度分佈變化情形。

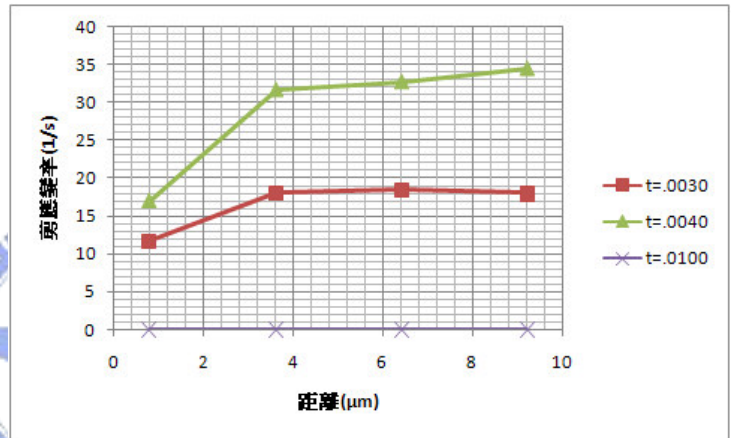
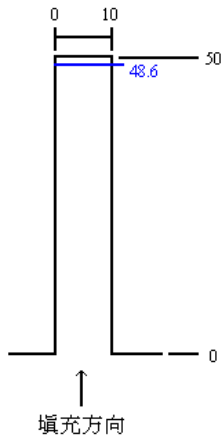


圖 4.23 PP 在模溫 80°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

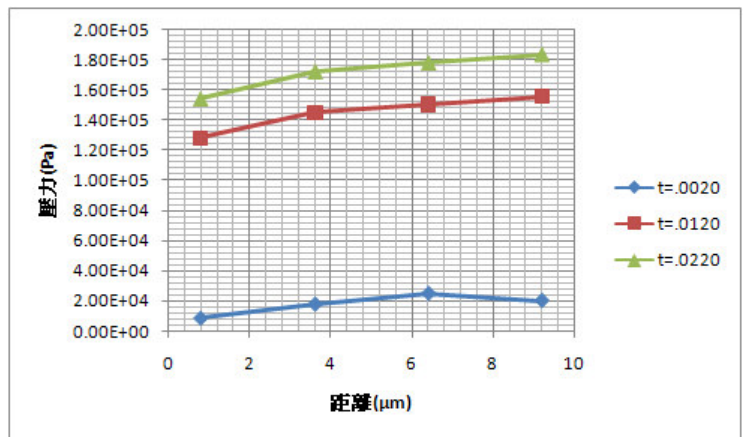
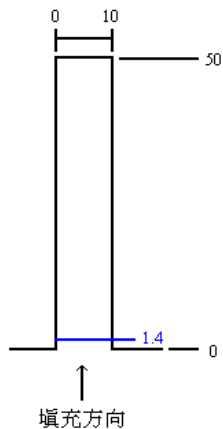


圖 4.24 PP 在模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。

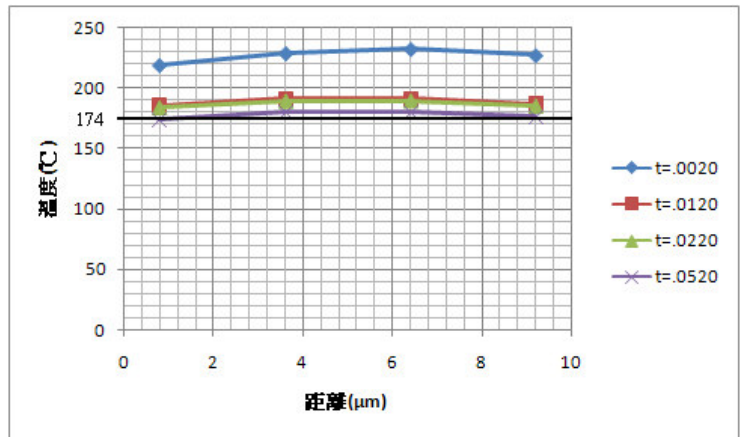
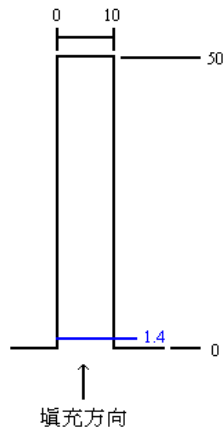


圖 4.25 PP 模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。

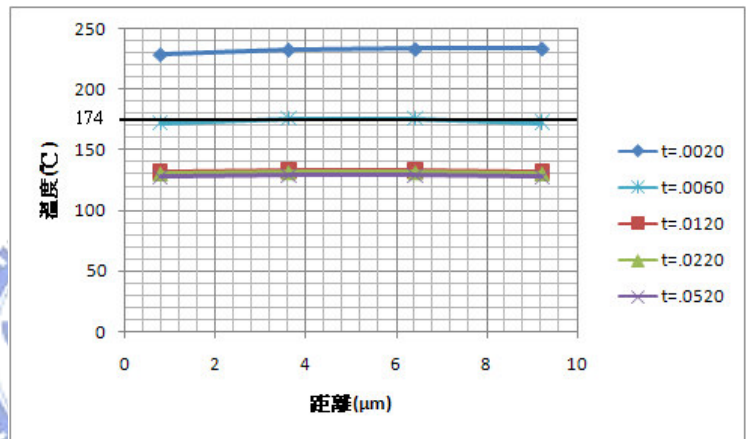
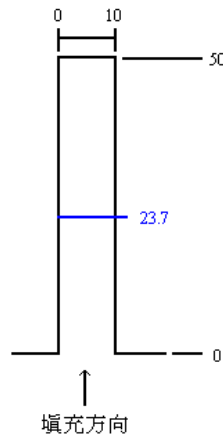


圖 4.26 PP 模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上溫度分佈變化情形。

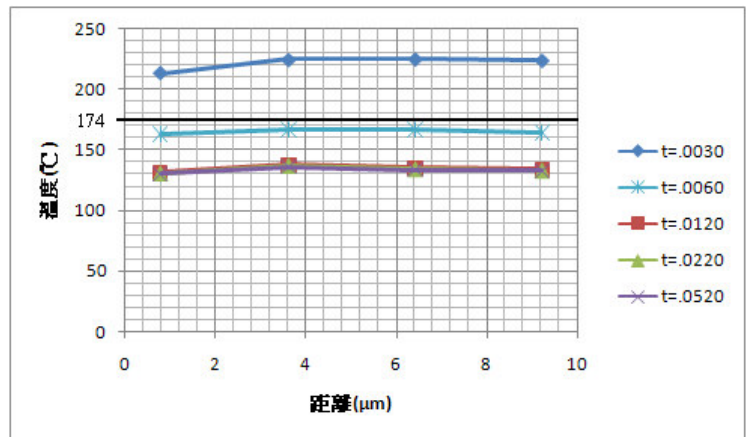
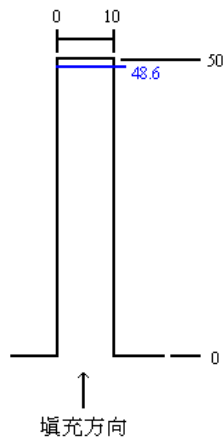


圖 4.27 PP 在模溫 110°C、射壓 400bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。

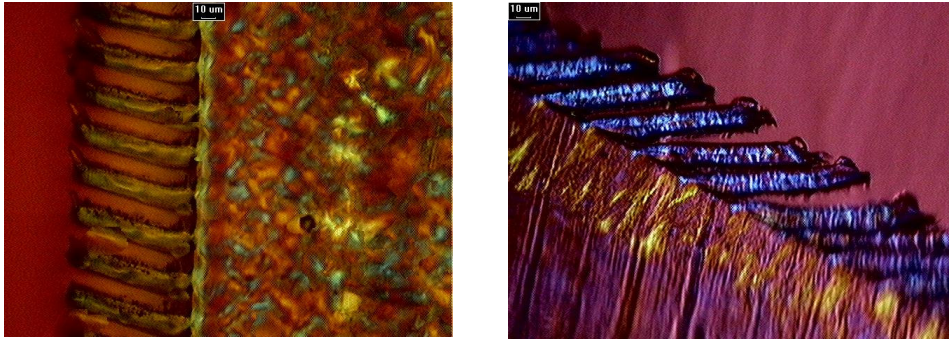


圖 4.28 微結構在偏光顯微鏡 200x 的倍率下觀測情形，左圖為模溫 80°C，右圖為模溫 110°C(材料為 PP)。

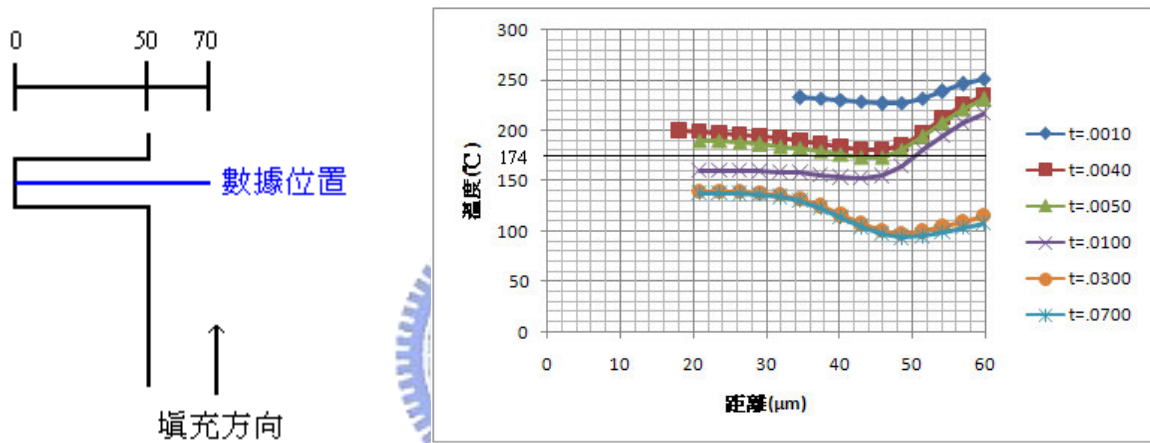


圖 4.29 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分佈圖。

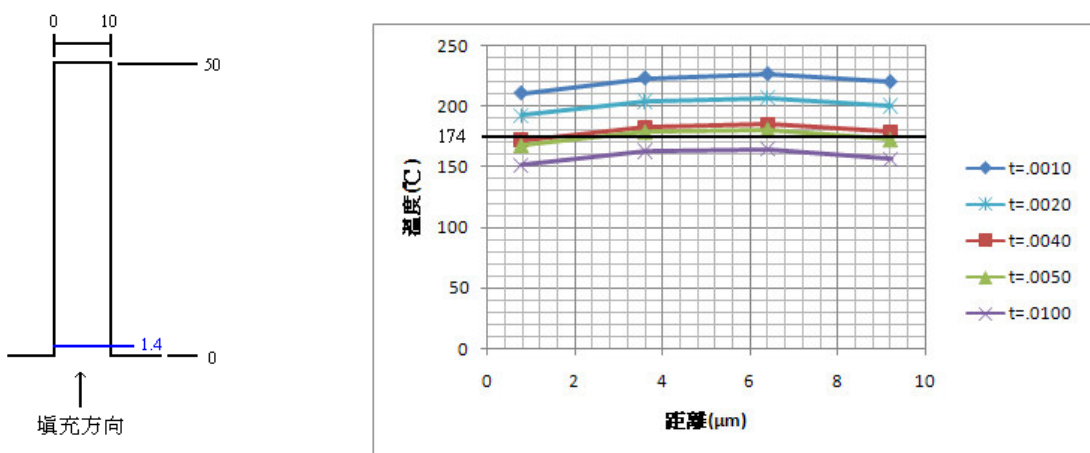


圖 4.30 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。

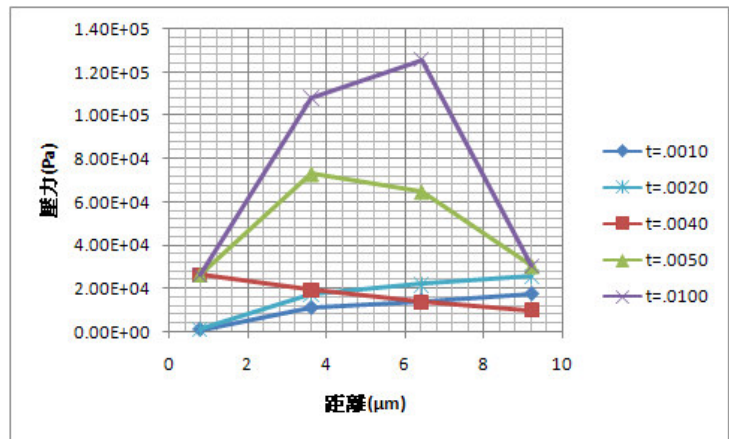
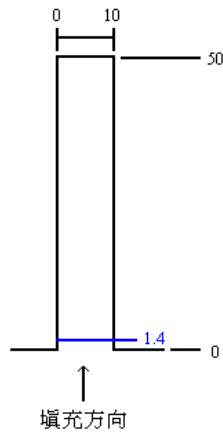


圖 4.31 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。

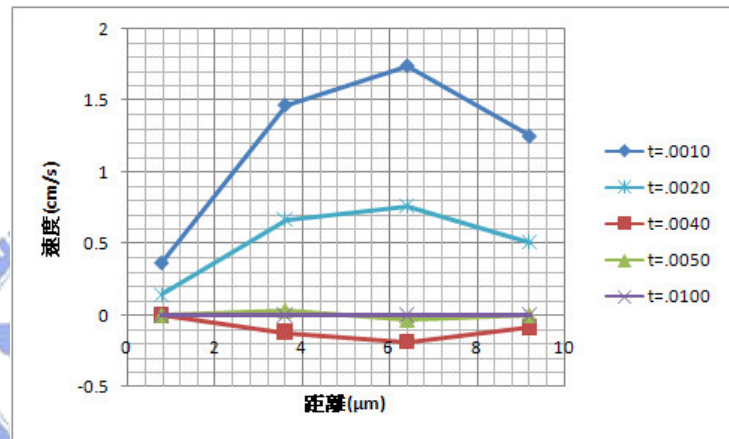
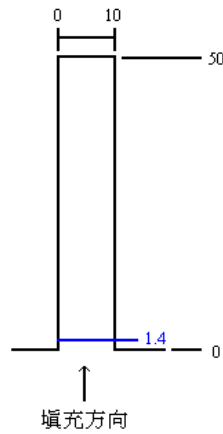


圖 4.32 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。

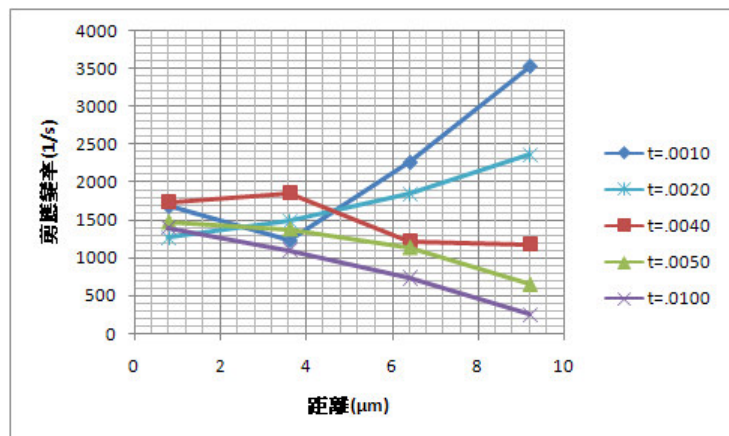
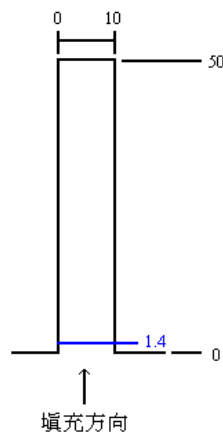


圖 4.33 PP 在模溫 50°C、射壓 1400bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

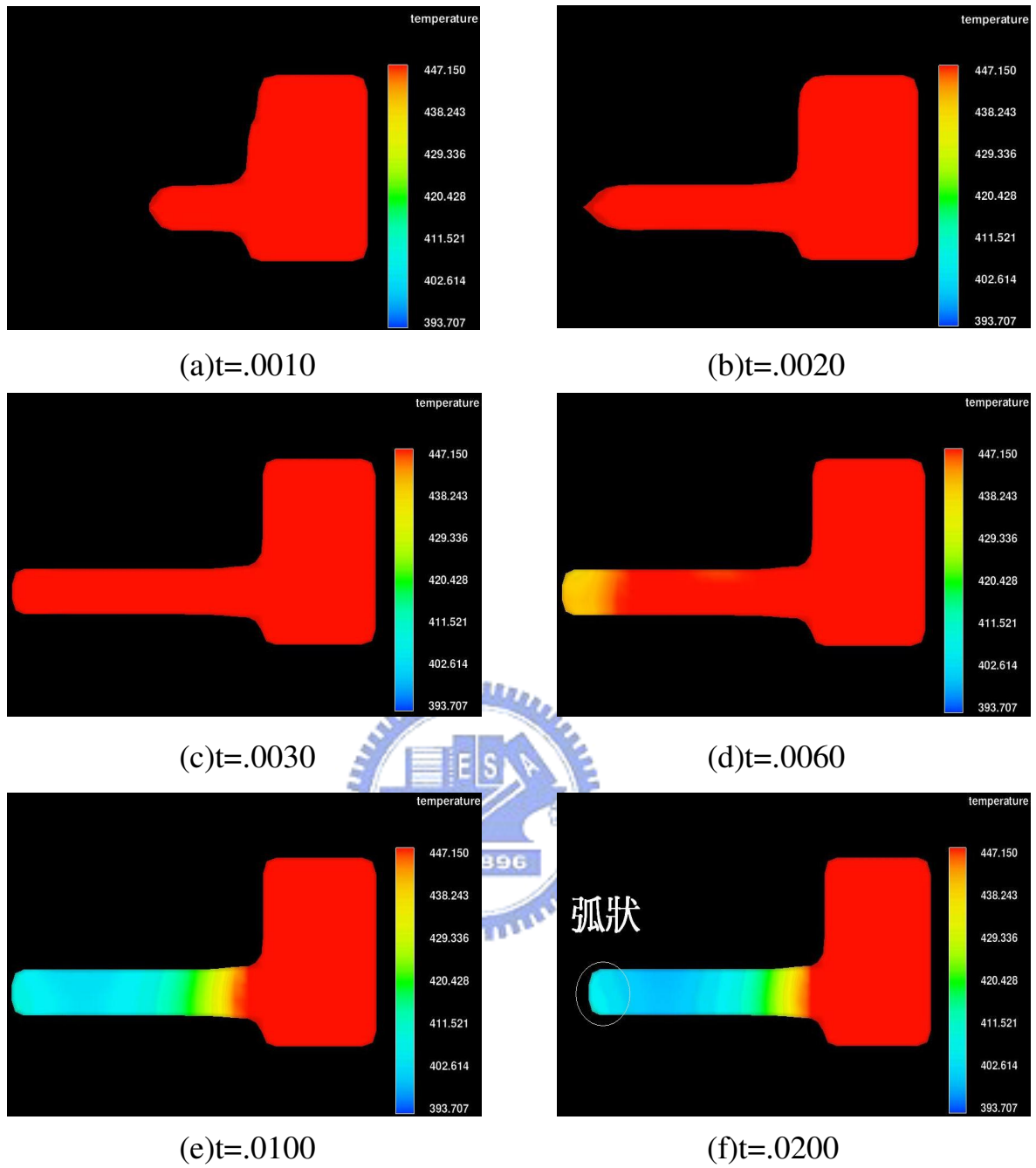


圖 4.34 PP 在模溫 110°C 、射壓 400bar 微結構模穴充填 3D 模擬圖。

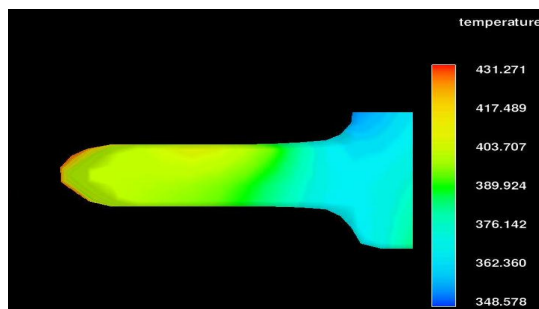


圖 4.35 PP 在模溫 50°C 、射壓 1400bar 微結構模穴充填 3D 模擬圖。

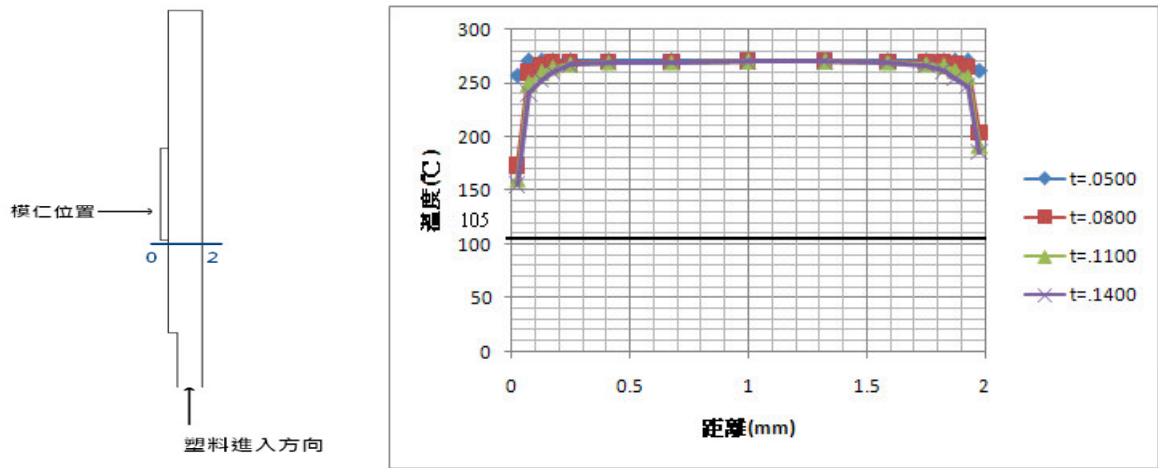


圖 4.36 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上溫度分佈變化情形。

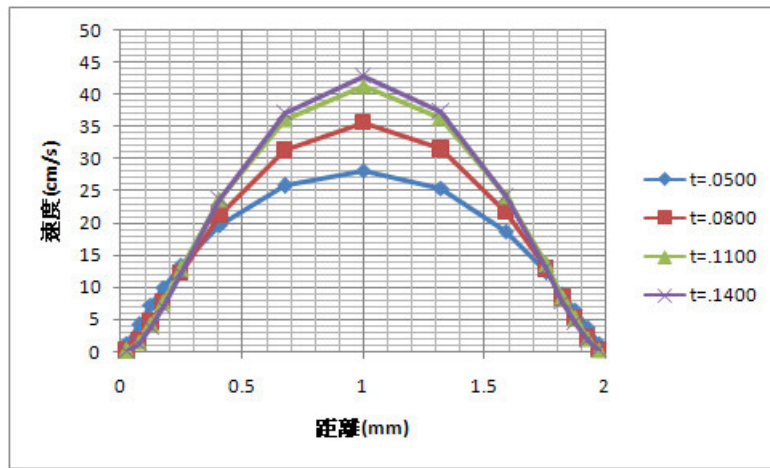


圖 4.37 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上速度分佈情形。

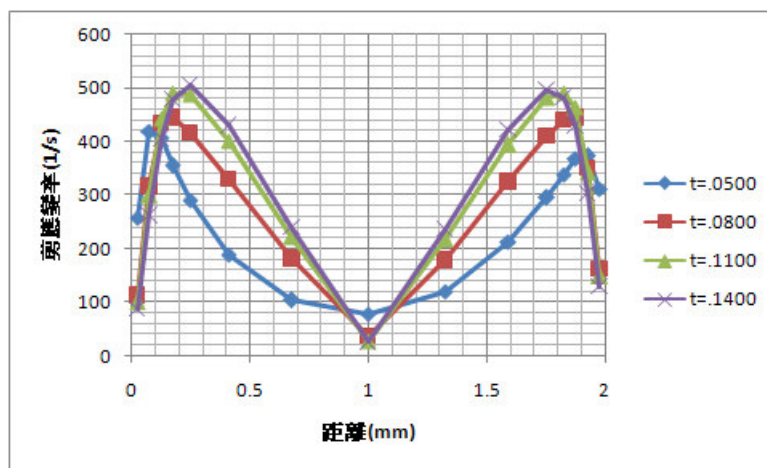


圖 4.38 PMMA 在充填過程中微結構模穴的厚度方向上剪應變率分佈情形。

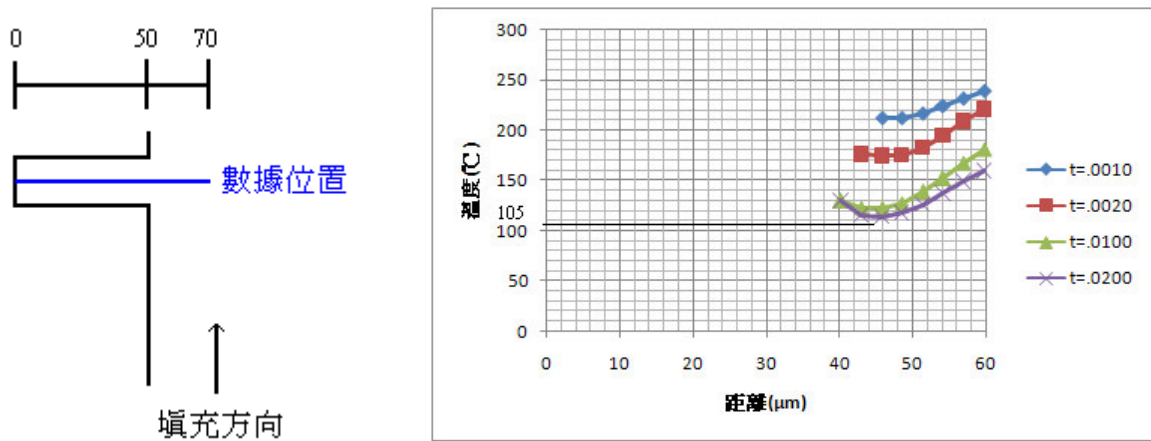


圖 4.39 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，微結構內與部分基板模穴熔膠溫度分佈圖。

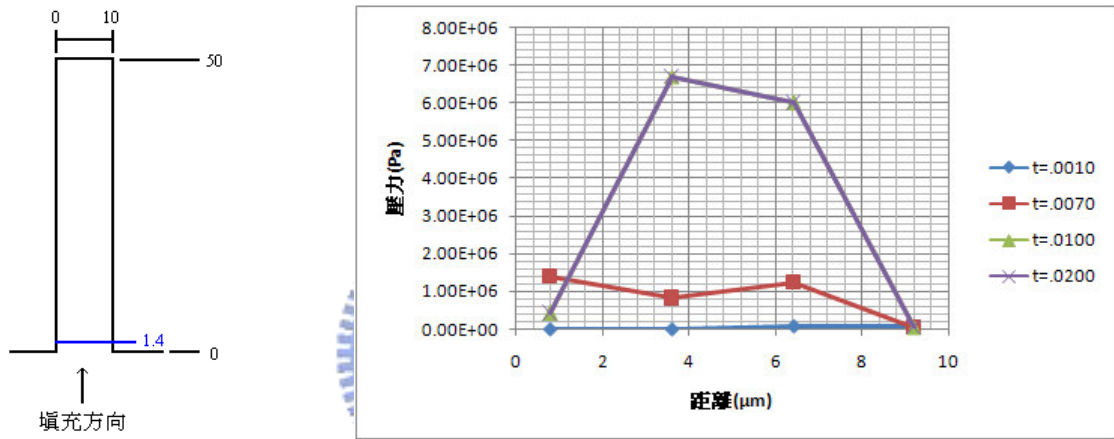


圖 4.40 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。

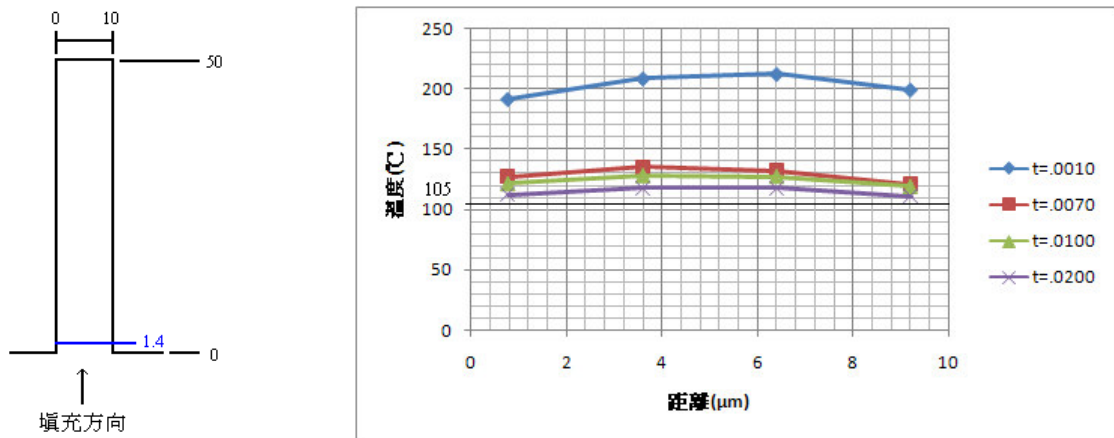


圖 4.41 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。

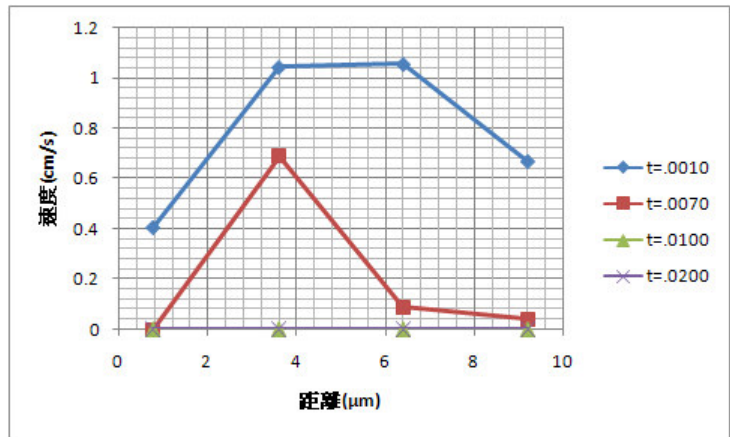
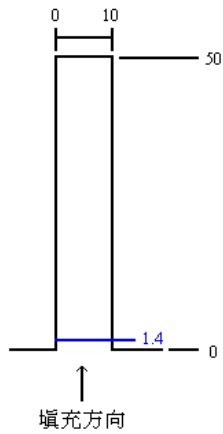


圖 4.42 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。

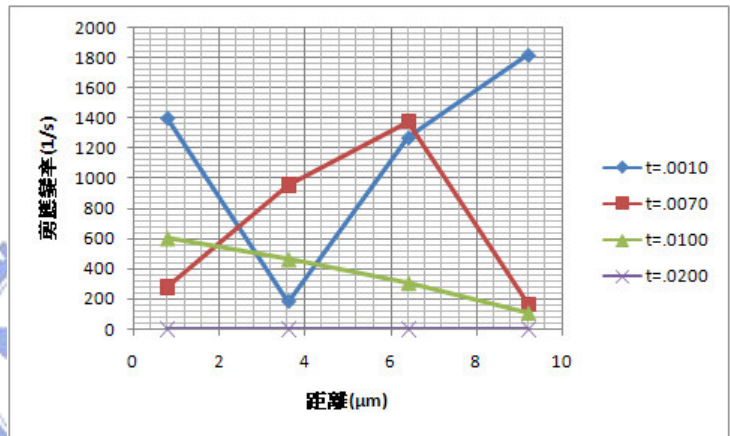
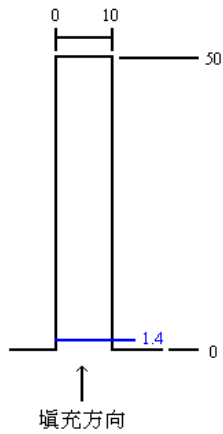


圖 4.43 PMMA 在模溫 50°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

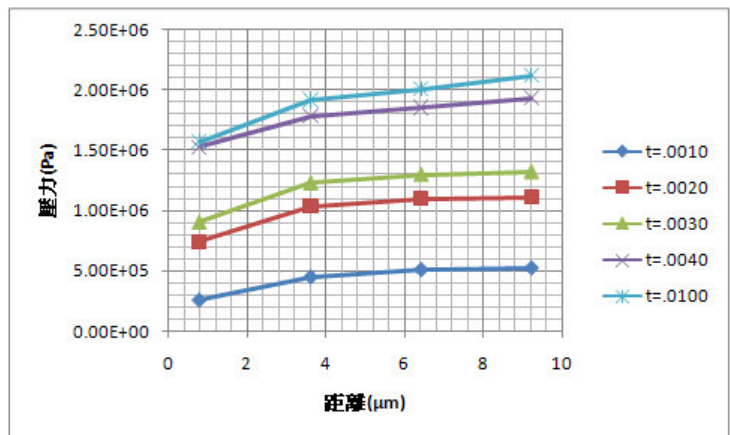
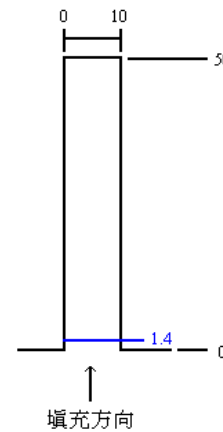


圖 4.44 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上壓力分佈變化情形。

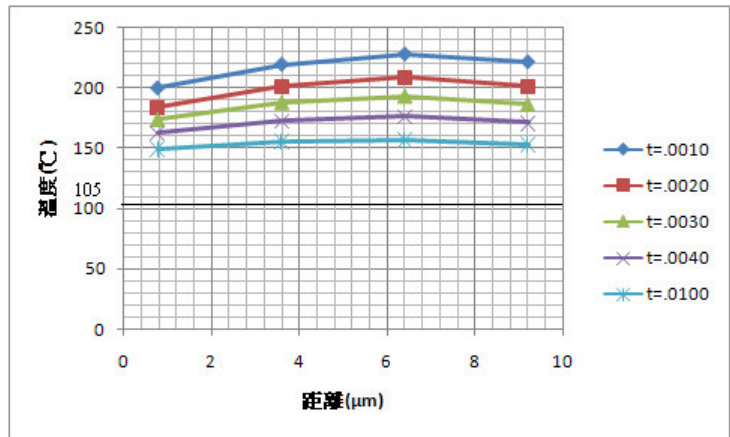
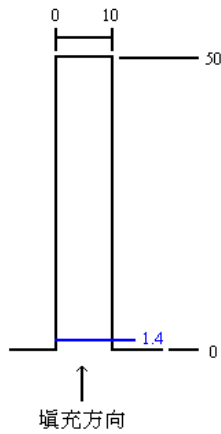


圖 4.45 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上溫度分佈變化情形。

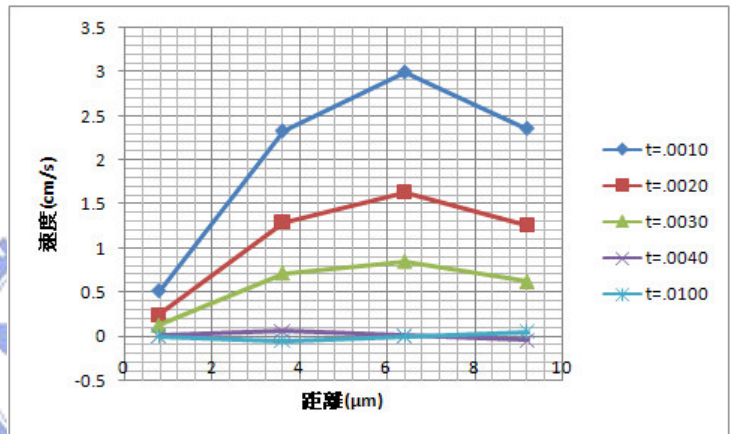
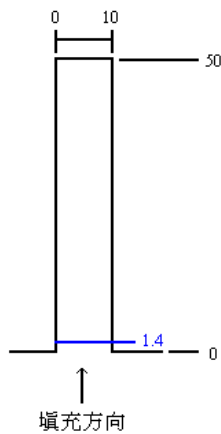


圖 4.46 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上速度分佈變化情形。

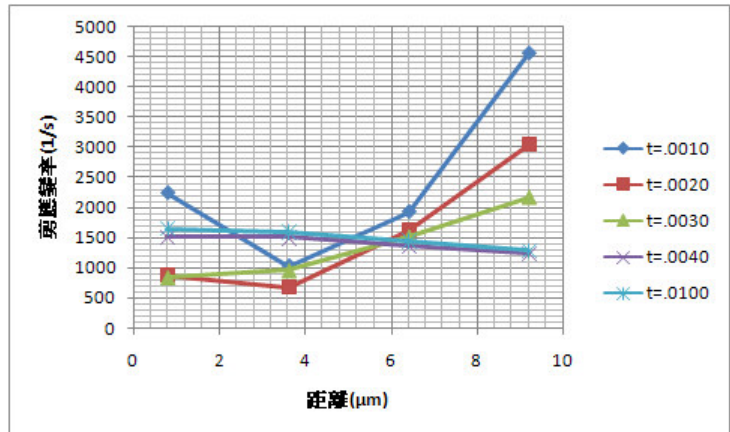
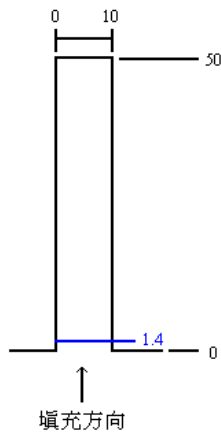


圖 4.47 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴入口厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

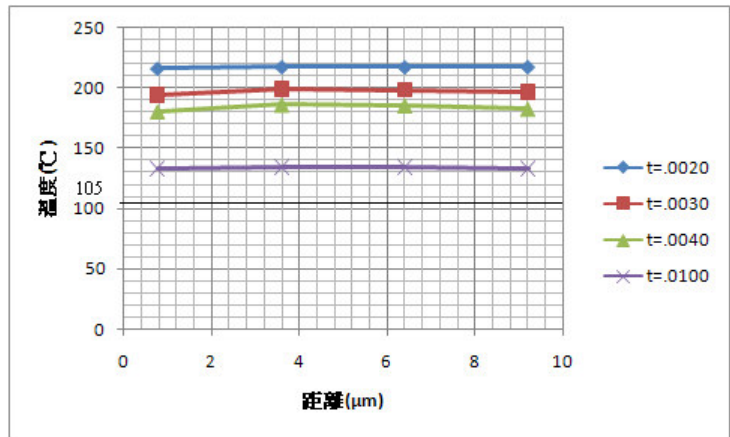
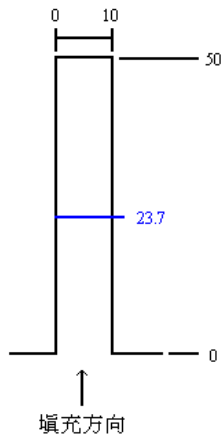


圖 4.48 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上溫度分佈變化情形。

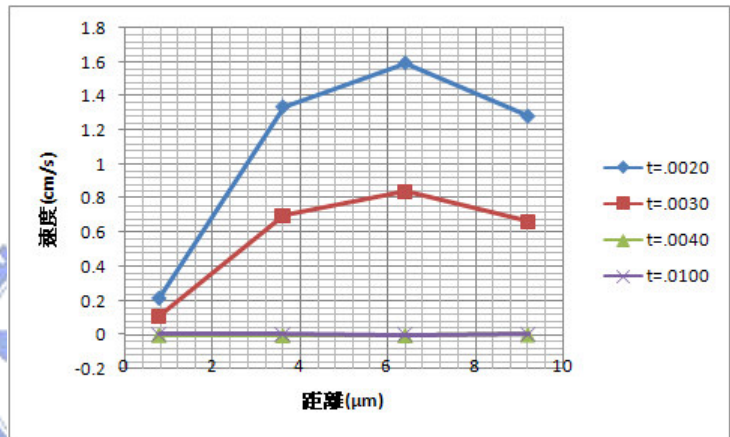
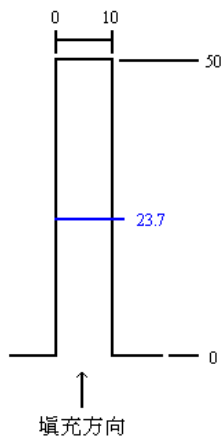


圖 4.49 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上速度分佈變化情形。

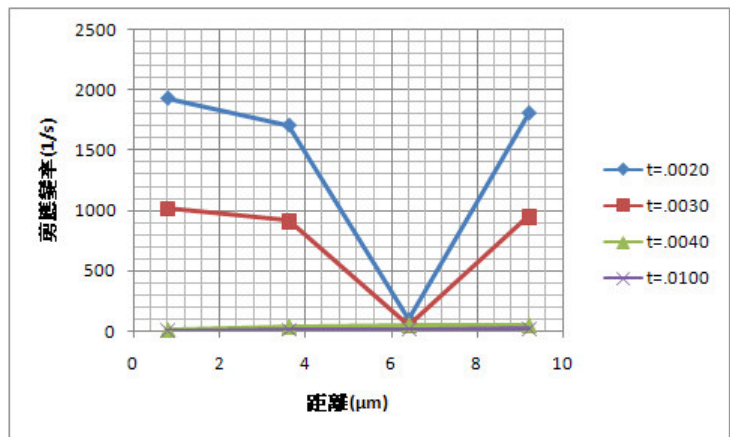
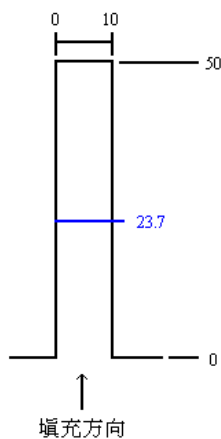


圖 4.50 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴中段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

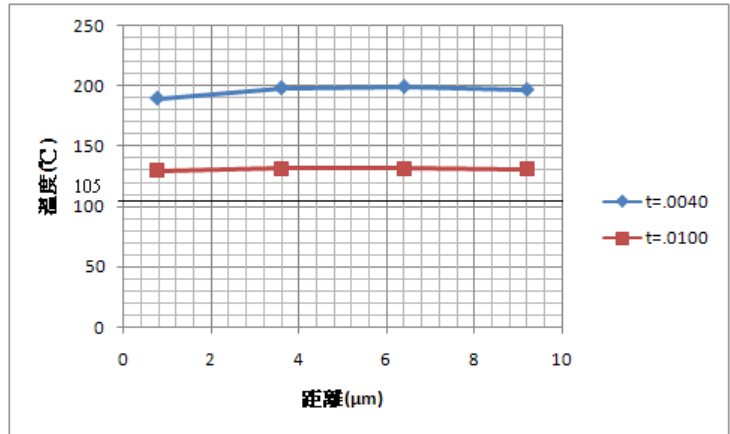
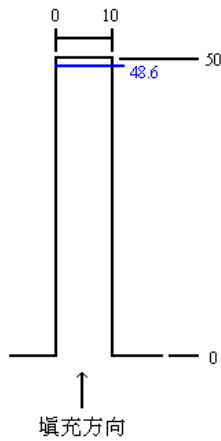


圖 4.51 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。

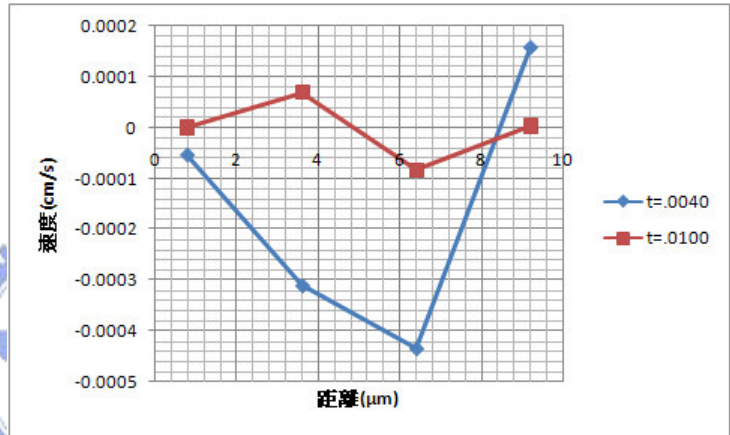
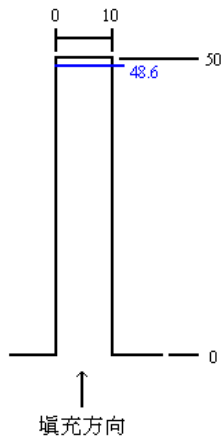


圖 4.52 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上溫度分佈變化情形。

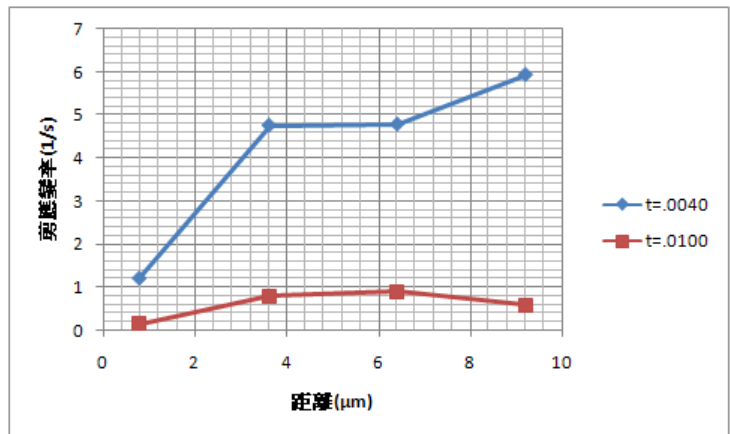
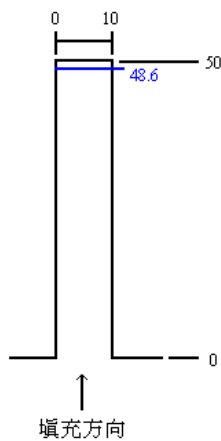


圖 4.53 PMMA 在模溫 110°C、射壓 1700bar，充填過程中在微結構模穴末段厚度方向上剪應變率分佈變化情形。

第五章 結論

5.1 結論

本研究藉由數值模擬的方式得到微射出成形時高分子流體的內部壓力場、溫度場、速度場與剪應變率等資訊。研究中使用結晶型與非結晶型塑料(PP 與 PMMA)進行數值模擬，並比較其流變行為的差異。成形參數則是以改變模具溫度與射出壓力為主，探討兩者對於高分子流體流動行為的影響。經過分析討論後歸納出以下幾點結論：

1. 在模溫微 50°C、80°C 與 110°C 時，PMMA 因為分子的支鏈較大，使其黏度遠高於 PP，因此在微結構射出成形過程中 PMMA 會較 PP 來的難以成形。
2. 在與同學范智翔的實驗結果比較中，也能觀察到冷卻速率、剪應變率與結晶性材料的結晶行為有相當大的關連性。接近模穴壁面的兩側熔膠的溫度在充填過程中會急速的下降，造成黏度劇增而使得流動性變差，形成表面固化層。在流速劇增的區域受到很大的剪切力作用，此區域應是熔膠在模穴厚度中心部形成層流的部分與表面固化層相鄰接的區域，俗稱剪切層。而模穴中央的部分，熔膠溫度最高，並且受剪切力作用大為減低，稱為核心層的部分。
3. 模溫為 50°C 與 80°C 時，PP 熔膠進入微結構後約 0.009 秒的時間熔膠的溫度就降至熔點以下；當模溫為 110°C 時，PP 熔膠進入微結構後經過了 0.05 秒後熔膠溫度才接近熔點，並與同學范智翔的實驗結果比較中，模溫 110°C 有較明顯的結晶出現。
4. 提高射出壓力可以使微結構模穴充填的深寬比上升，但其效果並不如提高模溫明顯。當射出壓力提高時，會使得模穴內壓力、剪應變率上升，過高的壓力可能會導致材料模穴基部的短射及溢料發生，過高的剪應變率可能會導致材料的劣化。
5. 熔膠在微模穴內的充填速度很小約僅及在主流路內的百分之一，但其最

大剪應變率卻高達主流路內者的四倍。結果證明微模穴內的熔膠在充填的時候承受了相當大的變形作用。

6. 微結構尺寸為 $10\mu\text{m}$ 時，PP 與 PMMA 皆是以噴泉流的方式充填微結構模穴。微結構入口處的流動行為與主流道內熔膠流動有相當大的關係，而在距入口 $5\mu\text{m}$ 後的流動行為就幾乎不受主流道內熔膠流動的影響。
7. 利用 CAE 軟體模擬，的確可以有效了解塑膠高分子在微射出成形時的流動行為。而對於 FLOW-3D 等計算流體力學軟體來說，取得精準的材料參數如：熱傳性質、黏度模型等流體及固體特性具有相當大難度，且在尺寸極小的微射出成形模擬中，為了追求更精確的模擬結果使網格數量大增的情況下，所耗費的計算時間會因此而大量增加。



5.2 未來發展方向

1. 本實驗所使用的微結構尺寸為 $10\ \mu\text{m}$ ，但因受限於電腦硬體設備與軟體限制的影響，導致當尺寸縮減時，無法得到準確的結果。硬體方面以更快的運算速度與容量更大的儲存設備進行模擬，可解決因為網格數大量增加所導致的計算時間過長的問題，並且提升模擬的精準度。軟體方面，目前專門應用於模擬塑膠充填的軟體與一般泛用型之計算流體力學的軟體，對於尺寸皆有限制，過於微小的尺寸會導致運算結果偏差過大甚至於無法進行運算，在這部分仍有很大的進步空間。若未來能夠針對更小尺寸的微結構進行模擬，則可得知在更微小的尺寸中高分子塑料是否會有不同流變行為，如：充填更微小結構時邊界是否有明顯的滑動現象或是塑性變形等情況發生。
2. 以更精準的儀器與更熟練的手法量測實驗材料的物性質，並且在材料參數轉換、邊界條件與初始條件設定等問題都還有很大的進步空間，有待於 CAE 軟體的整合來做出改善。
3. 以數值模擬的方式對於不同的材料、成形參數、微結構尺寸、形狀與深寬比等進行模擬，分析在不同情況下高分子塑料的流變行為，以得到結果對微射出成形進行最佳化的設定，提升微精密成形的品質，並應用到需求的產業上。

參考文獻

- [1] M.S. Despa, K.W. Kelly, J.R. Collier, “Injection molding of polymeric LIGA HARMS”, *Microsyst. Technol.*, Vol. 6, pp. 60-66, 1999
- [2] V. Piotter, K. Mueller, K. Plewa, R. Ruprecht, J. Hausselt, “Performance and simulation of thermoplastic microinjection molding”, *Microsyst. Technol.*, Vol. 8, pp. 387-390, 2002
- [3] J. Dininger, “Three critical measurements on injection molding processes”, *IEEE Conf. Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, USA*, Vol. 3, pp. 2159-2164, 1994
- [4] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, J. Bréard, “Optimization of injection flow rate minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites”, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, pp. 475-486, 2006
- [5] W.B. Young, “Analysis of filling distance in cylindrical microfeatures for microinjection molding”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, pp. 1798-1806, 2007
- [6] G. Xu, M.E., “STUDY OF THIN-WALL INJECTION MOLDING”, *The Ohio State University, Ph.D Thesis*, 2004
- [7] S.C. Chen, R.I. Tsai, R.D. Chien, T.K. Lin, “Preliminary study of polymer melt rheological behavior flowing through micro-channels”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 501-510, 2005
- [8] B. Xu, K. T. Ooi, T. N. Wong and C. Y. Liu, “Study on the viscosity off the liquid flowing in microgeometry”, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 9, pp. 377-384, 1999
- [9] 劉安誠, “微/次微米結構的射出成形特性暨可自發熱模仁的發展與應用”, 交通大學, 博士論文, 民國九十六年。

- [10]W. Michaeli, B. Rotter, “Measurement and modeling of flow behavior of thermoplastic polymers at low temperatures”, J. Polym. Eng., Vol. 21, pp. 281-291, 2001
- [11]G. Sherbelis, C. Friedl, “The importance of low temperature viscosity to CAE injection molding simulation”, SPE ANTEC Tech. Pap., Vol. 38, pp. 954-957, 1992
- [12]W.P. Cox, E.H. Merz, “Correlation of dynamic and steady flow viscosities”, J. polym. Sci., Vol. 28, pp. 619-622, 1958
- [13]Johanna Aho, Seppo Syrjälä, “On the measurement and modeling of viscosity of polymers at low temperatures”, Polymer Testing
- [14]J.P. Beaumont, R. Nagel, R. Sherman, “Successful Injection Molding: Process, Design and Simulation”, Hanser, 2002
- [15]K. Ainoya, O. Amano, “Accuracy of filling analysis program”, ANTEC Tech. Papers, pp. 726-730, 2001
- [16]P.F. Bariani, M. Salvador, G. Lucchetta, “Development of a test method for the rheological characterization of polymers under the injection molding process conditions”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, pp. 119-122, 2007
- [17]D. Yao, “Rapid thermal response injection molding for microfabrication” University of Massachusetts, Amherst, Ph.D Thesis, pp. 114-128, 2001
- [18]C. Harris, M.S. Despa, K.W. Kelly, “Design and fabrication of a cross flow micro heat exchanger”, J. Microelectromech. Syst., Vol. 9, pp. 502-508, 2000
- [19]L. Webber, W. Ehrfeld, “Micromoulding-market position and development Kunststoffe”, Vol. 89, pp. 192-202, 1999
- [20]A.V. Ramamurthy, “Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction”, J. Rheol., Vol. 30, pp. 337-357, 1986
- [21]李平惠, “高分子熔膠在微流道中流變特性之研究”, 南亞技術學院,

教專研究成果報告，95P-001

- [22]L. Yu, Y.J. Juang, K.W. Koelling, L.J. Lee, “Thin wall injection molding of thermoplastic microstructures”, SPE Tech. Papers., Vol.46, pp. 468-473, 2000
- [23]G.Y. Lai, J.X. Rietveld, “Role of polymer transparency and temperature gradients in the quantitative measurement of process stream temperature during injection molding via IR pyrometry”, Polym. Eng. Sci., Vol. 26, 1996
- [24]C. Maier, “Infrared temperature measurement of polymer”, Polym. Eng. Sci., Vol. 36 ,1995
- [25]劉士榮，高分子流變學 Polymer Rheology，第二版，滄海書局，中華民國九十四年二月
- [26]W. Michael, Extrusion Dies of Plastics and Rubber, 2nd, Hanser, New York, 1992
- [27]呂維明、呂文芳，過濾技術，高立圖書有限公司，1994

