

高分子融膠在微流道中流變特性之研究

李平惠
機械工程系

摘要

微成型目前吸引相當多注意，而決定高分子融膠在微結構幾何中之流變性質對於正確模擬微成型是非常重要的。而缺乏商用設備是研究微融膠流變最困難之處。研究中，建立 PS 融膠流經微流道之流變性質之量測系統，由壓力降與體積流率之量測搭配毛細管流動模型與狹縫流動模型來求得黏度。發現在測試範圍內所測得之黏度值明顯低於傳統流變儀所測得之結果（在 200°C 時，低約 1.4 到 4.1 倍）。當微流道尺寸愈小，黏度值降的愈多；滑動速度相較於平均速度則隨微流道尺寸降低而增加。當融膠流過微流道，滑動速度扮演一決定性角色，導致當微流道尺寸愈小時，表觀黏度愈低。由本研究中，我們可知融膠在微觀尺度中之流變行為是不同於巨觀尺度之行為。因此如不考慮此差別，以目前之模擬軟體來模擬微成型是不適合的。

關鍵字：微流道、黏度、流變

Abstract

Micro molding is attracting more attention nowadays and determination of the rheological behavior of the polymer melt within micro structured geometry is considered to be very important for the accurate simulation modeling of micro molding. The lack of commercial equipment is one of main hurdles in the investigation of micro melt rheology. In this study, the melt viscosity measurement system for PS (Polystyrene) melt flowing through micro channel was established using a micro channel mold operated at a mold temperature as high as the melt temperature. From measured pressure drop and volumetric flow rate both capillary flow model and slit flow model were used for the calculation of viscosity utilizing Rabinowitsch and Walters corrections. It was found that the measured viscosity values in the test ranges are significantly lower (decreased by a factor of about 1.4 to 4.1) than those obtained from traditional capillary rheometer at melt temperature of 200 °C using both, capillary flow model and slit flow model. As micro channel size decreases, the reduction in viscosity value increases when compared with data obtained from traditional capillary rheometer. The ratio of slip velocity relative to mean velocity was also found to increase with decreasing size of micro channels. It seems that wall slip plays a dominant role when melt flows through micro-channels and would result in a greater percentage in apparent viscosity reduction when the size of micro channel decreases. In addition, the wall-slip effect becomes more significant as melt temperature increases. In the present study we emphasize that the rheological behavior of the melt in microscopic scale is different from that of macroscopic scale and that current simulation packages are not suitable for micro molding simulation without considering this difference.

Keyword: micro-channel, viscosity, rheology

一、簡介

隨著塑膠材料的發展，以及加工成型技術的進步，使得塑膠製品從早期日常生活中的應用，逐漸使用於工業的重要零組件上。射出成型製程因其生產成本低、且量產迅速，使其在塑膠加工技術上佔有不可取代的地位。尤其是近年來，隨著科技的進步與生活品質的提升，諸多產品逐漸對於外觀上的體積、厚度和產品本身重量上要求越趨嚴苛，特別是在 3C 產業上，產品的輕、薄、小，以現今的成型技術而言只能算是基本要求，除了產品的品質與精密度的提升之外，更要求產品量產的速度。在此訴求下，縱使射出成型已廣泛應用於各個領域上，但隨著產品的特殊功能應用及微機電 (Micro-Electro-Mechanical Systems, 簡稱 MEMS) 技術的興起，射出成型的技術層次也漸漸藉由 MEMS 技術及超精密加工技術向上提升到微特徵、微尺寸成型技術。在微模具的加工技術上，藉著 MEMS 技術的運用以及超精密加工技術的進步，有著顯著的發展。但最基本的，對於塑膠高分子在如此嚴苛成形條件下的微觀的流變行為則很少拿來被研究討論，一方面是因為微成形技術還在起步階段，此問題很少有被人討論到，另一方面則是因為塑膠高分子的流變實驗不論是實驗設備的建立或著是數據的量測上都有相當的困難度，尤其是在微觀下的高分子的流變行為量測更是困難的。

而在與金屬、陶瓷和半導體材料相比，高分子基材料具有價位低、可大量生產製造和生物相容性等優點，因此近年來以高分子為主要之微製造技術已廣泛應用於生醫和光學等微結構產品上，特別是塑膠射出成型在微系統產品上已逐漸顯現其商業上之潛能。許多微小產品或微結構之元件如微電池、微熱交換器、微幫浦、生物晶片和微光柵元件等已成功被射出成型。

高分子融膠於壁上之剪應力超過某一臨界值[1-3]會產生打滑現象。此一現象可歸因於分子鏈於接觸壁時產生解開作用。滑移速度正確的獲得對於製程真實模擬是相當需要的。傳統滑移速度是利用毛細管流變儀數據與 Mooney 方法而取得。另一方面，眾所皆知黏性熱 [4] 會在融膠流動過程中產生。在 Rosenbaum et al.[5]研究中，其利用 3 種不同毛細管直徑(0.508, 0.762 和 1.27 mm)與定 L/D 比值在高剪切率下考慮黏性熱效應來求得滑移速度，發現直徑愈小愈偏離傳統流變儀所得之曲線，直徑愈大黏性熱效應愈大。隨著微成型技術愈來愈吸引人們的注意，利用電腦模擬解決成型上之困難點變成不可避免之趨勢。最近研究[6-9]指出現有模擬軟體不足以描述所有微成型之效應，特別是微元件中具有微特徵尺寸時。這是由於現有軟體只適用於一般的成型，因為軟體所使用的流變數據是取自大尺寸裝置下的量測資料。然而巨觀下所量測之黏度，並不適用於描述微小尺寸下之融膠流動行為。此外微尺寸表面的效應在微成型是相當重要的[7]，而融膠在流道上的黏彈性也是不可忽視的[9]。在之前的薄片射出研究中已證明，以現有的模擬軟體在壓力的預測上會有高達 50% 的差異[10]，這是由於成型過程中，材料的每一時間之暫態性質與量測平衡態的性質存在相當的差異。由於缺乏適當的裝置，評估微小融膠之流變性質是相當困難，目前在相關研究中只有在相當小的剪應變率下，以微熱壓結構量測暫態的融膠拉伸黏性[8]。

本研究將對融膠於微小尺寸中之黏度做一研究，利用具有方形橫斷面微流道之模具在相同模溫與料溫情況下做實驗，量測壓力與融膠流量，最後分別應用 Rabinowitsch 與 Walters 之修正方式，以毛細管與狹縫流動模式來量測黏度值[11]，並與傳統的毛細管流變儀所量測之黏度作一比較。同時融膠流經微流道之滑移現象並做一分析與討論，希望藉由實驗結果可提供在微成型時達到更正確模擬之目標。

本研究的結果可以提供塑膠成型業者在使用微射出成型技術時，對融膠在微流道中流變特性有一初步的了解。同時對於發展精密微射出成型模具、或產品設計、試模時的一個參考依據，以方便在進行產品設計時有更好的考量。此計畫之執行，對於微射出成型技術之發展將有一定之貢獻。

二、流變儀流動模式描述

以下兩種流動模型（毛細管流動與狹縫流動模型）用以分析流變行為與計算高分子融膠流經方形截面微流道之黏度。

毛細管流動模型 (Capillary Flow Model)

毛細管流變儀是一種最常用以量測融膠黏度依剪切率與溫度而變之儀器。測試時，在活塞槽中之融熔高分子藉由活塞在給定之壓力下令其通過毛細管。由每單位時間通過毛細管之融膠流量 Q 與通過毛細管之壓力降 (ΔP)，可求得在特定之剪切率下其黏度值。對牛頓流體在管壁處之表觀剪切率 ($\dot{\gamma}_{w(app)}$) 與表觀剪應力 ($\tau_{w(app)}$) 分別為 [11]

$$\dot{\gamma}_{w(app)} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

和

$$\tau_{w(app)} = \frac{\Delta P}{2L} R \quad (2)$$

在此方程式中， R 為毛細管半徑且其長度為 L ， Q 為沿毛細管在壓力降為 ΔP 情況下之體積流率。另外，兩修正方法一般用以修正毛細管所得之數據以得到正確之高分子黏度。羅比諾威志修正(Rabinowitsch correction) [11] 用以修正非牛頓流體在管壁處之剪切率。經修正後方程式(1)變為

$$\dot{\gamma}_{w(real)} = \frac{4Q}{\pi R^3} \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} b \right) \quad (3)$$

其中 b 為 $\log \dot{\gamma}_{w(app)}$ 對 $\log \tau_w$ 之斜率。除此之外，白哥利修正(Bagley correction) [12] 用以修正毛細管在入口處之黏彈效應，因此毛細管有效長度將大於其真實之長度。方程式(2)在管壁處之剪應力將變成

$$\tau_{w(real)} = \frac{\Delta P}{2 \left(\frac{L}{R} + e \right)} = \frac{\Delta P - P_0}{\frac{2L}{R}} \quad (4)$$

其中 e 為白哥利修正因子， P_0 為在特定剪切率下毛細管長度為零時之壓力降。修正之後，高分子融膠之真實黏度可由真實剪應力除以真實剪切率而得到，如下式

$$\eta_{(real)} = \frac{\tau_{real}}{\dot{\gamma}_{real}} \quad (5)$$

狹縫流動模型(Slit Flow Model)

另一種量測融膠高分子流變性質之裝置為狹縫流變儀(slit viscometer)，其與毛細管流變儀之量測原理相同。測試時，在活塞槽中之融熔高分子藉由活塞在給定之壓力下令其通過狹縫模。由每單位時間通過狹縫模之融膠流量與通過狹縫模之壓力降，可求得在特定之剪切率下其黏度值。對牛頓流體而言，在管壁處之表觀剪切率與真實剪應力分別為 [11]

$$\dot{\gamma}_{w(app)} = \frac{6Q}{wh^2} \quad (6)$$

和

$$\tau_{w(real)} = \frac{h}{2} \left(\frac{-\Delta P_{real}}{L} \right) \quad (7)$$

在方程式中， w 與 h 為具有長度 L 之狹縫槽的寬度與厚度。 Q 為融膠在壓力降為 ΔP 情況下通過狹縫槽之體積流率。另外，兩修正方法一般用以修正狹縫槽所得之數據以得到正確之高分子黏度。Walter correction 提供非牛頓流體在管壁處之剪切率的修正。方程式 (6) 變成

$$\dot{\gamma}_{w(real)} = \frac{6Q}{wh^2} \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}b \right) \quad (8)$$

其中 b 類似毛細管流動中之羅比諾威志修正為 $\log \dot{\gamma}_{w(app)}$ 對 $\log \tau_w$ 之斜率值。另外，當狹縫槽之寬厚比小於 10 時，剪應力之邊緣效應必須列入考慮，則方程式 (7) 中在管壁處之剪應力變為

$$\tau_{w(real)} = \frac{wh}{2(w+h)} \left(\frac{-\Delta P_{real}}{L} \right) \quad (9)$$

修正之後，高分子融膠之真實黏度可如同方程式 (5) 由真實剪應力除以真實剪切率而得到。

三、實驗

決定融膠流經微流道之流變行為是一件非常困難之工作，主要是因為微流道裝置需要高強度，以承受融膠被強迫通過微流道所需之高壓。除此之外，壓力必需大到足以驅動融膠流過微流道，傳統流變儀並無法滿足這樣的需要。因此，利用射出機當作柱塞且以具微流道之金屬模倣線上量測即為實際可行之方法；然而，仍需解決量測時高模溫之

問題。在我們的研究中，為決定融膠流經微流道之流變行為，設計可由 $300\text{ }\mu\text{m}$ 改變至 $200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $150\text{ }\mu\text{m}$ 方形橫斷面微流道之模具（圖 1），且微流道表面粗糙度在 0.2 至 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 之間。Sodick EH30 微射出機結合可加熱至 300°C 之模溫控制機當作壓力源，由奇美公司生產具有高流動性等級之 PS (Polystyrene) 融膠(PG-22)為使用之材料。高分子融膠之測試溫度為 200°C 、 225°C 和 250°C ，而螺桿速度使得表觀剪切率由大約 3×10^3 至 $3\times 10^5\text{ s}^{-1}$ （射壓分別為 15 、 30 和 45 MPa ）。具微流道之模具溫度在同於料溫下操作；除此之外，模仁包覆 石綿板以確保模具溫度之穩定性。而在模仁內側，兩個壓力感測器(Kisler, type 6159A) 置於如圖 2 微流道進口與出口處以量測高分子融膠流經微流道之壓力降。當融膠通過出口時，壓力會達到最大值（圖 3a），總壓力降 (ΔP_{total}) 包含入口壓力降 (ΔP_{inlet})，在微流道內之壓力降 ($\Delta P_{micro-channel}$) 和出口壓力降 (ΔP_{outlet})。如圖 3a 所示，融膠在進入微流道時由於流動阻力增加因此壓力會急速上升。假設進口壓力降 ΔP_{inlet} 等於出口壓力降 ΔP_{outlet} ，則在微流道內之壓力降 $\Delta P_{micro-channel}$ ，可以由總壓力降減去 ΔP_{inlet} 和 ΔP_{outlet} 而得。最後由流率與壓力降，利用毛細管流動模型與狹縫流動模型，則可得到在測試溫度下真實融膠剪切黏度(η_w) 與剪切率($\dot{\gamma}_w$) 之關係。

四、結果與討論

如果使用毛細管流動模型，則方形橫段面之微流道必須先轉換成等效半徑。除此之外，由於方形斷面較圓形斷面有較高之流動阻力因此必須再乘以一形狀因子 1.128。表 1 和 2 分別為 Rabinowitsch 修正和 Walter 修正 b 值，其為表觀剪切率與壁剪應力之斜率值。圖 4 為利用毛細管流動模型在料溫 200°C 情況下黏度隨剪切率之變化情形，由此圖可看出融膠在 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、 $200\text{ }\mu\text{m}$ 和 $150\text{ }\mu\text{m}$ 微流道尺寸下其黏度較傳統流變儀所測得之黏度分別下降約 1.4 到 1.6，1.7 到 2.3 和 2.3 到 4.1 倍左右，同時融膠在微流道中之黏度隨微流道尺寸減小而降低。而圖 5 與圖 6 則為運用毛細管流動模型分別在 225°C 和 250°C 時黏度隨減切率之變化圖，亦顯現有較傳統流變儀所測得之黏度為低。圖 4、5 與 6 亦分別有利用狹縫流動模型與 Walter 修正在 200°C 、 225°C 和 250°C 所得到之黏度曲線，結果顯示具有與利用毛細管流動模型相同之趨勢。詳細比較兩種模型所得之結果，毛細管流動模型僅較狹縫流動模型高約 4%~10%。且一般而言，融膠在 $150\text{ }\mu\text{m}$ 之微流道中於相同剪切率下之黏度較傳統流變儀低約 2.3 到 4.1 倍。此表示高分子融膠在微流道中之流變特性明顯不同於在傳統流變儀中所量測得到之流變行為。依照前人對融膠在微流道中流變行為之研究，有 4 個因素將扮演重要角色，即(1)表面張力、(2)受尺寸影響之黏度、(3)黏性熱和(4)壁之滑動。在微流道中黏度與這些因素之關係是一相當複雜的議題。依 Yao et al. [12] 之研究，當流道在 $150\text{ }\mu\text{m}$ 至 $300\text{ }\mu\text{m}$ 之間時，表面張力與受尺寸影響之黏度皆可安全忽略不計。雖然由傳統流變儀所得之黏度值可能不適合於微成型之模擬，但模擬結果顯示融膠在微流道中僅升高 2°C 。WLF 方程式[17]用以檢驗因此 2°C 溫度改變所造成黏度之改變，當融膠溫度由 250°C 變化至 252°C 、 225°C 至 227°C 和 200°C 至 202°C ，黏度分別下降 10%、14%和 19%。這些值與前述 1.4 至 4.1 因子比較極小。同時由於微流道長度短，因此黏性熱可忽略。同時依照 Yao et al. [12]之模擬結果，增加熱擴散效果導致微模穴與模具溫度非常接近。因此在微成型中黏性熱效應是可忽略的，且融膠在微模穴中可假設是

處於等溫狀態。

如前所述，高分子融膠流經微流道之黏度低於由傳統流變儀所測得之黏度，這其中融膠沿壁滑移扮演一重要角色。分析此滑移現象，我們可做一合理之推測為流經微流道之總體積流率等於無滑動之體積流率與因滑動體積流率之總合，即

$$Q_{total} = Q_{no-slip} + Q_{slip} \quad (11)$$

圖 7 為比較由實驗與傳統流變儀量測之黏度值。為分析此壁滑動效應，茲假設體積流率可分為柱塞流動 Q_{slip} 與層流 $Q_{no-slip}$ （圖 8）。柱塞流動將不會產生任何剪切率，然而在圖 7 中， η_c 以及其對應位於實線之 $\dot{\gamma}_t$ 乃基於方程式(3)假設為完全層流情況，此即傳統流變儀所測得之結果。現在當融膠流經微流道滑動現象發生時，真正體積流率必需減去柱塞分量 Q_{slip} 。因此， $\dot{\gamma}_t$ 應該修正為真正之剪切率。滑動效應可假設在微流道中黏度之降低，因此在傳統情況($\dot{\gamma}_t$)與滑動情況($\dot{\gamma}_c$)不同剪切率下有相同之黏度歸因於 Q_{slip} 。由此差距我們可求出壁滑動速度。依照方程式(3)，由 $\dot{\gamma}_c$ 所產生之體積流率（層流）為

$$Q_{no-slip} = \frac{\pi R^3}{4(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}b)} \dot{\gamma}_c \quad (12)$$

而體積流率（假設沒有壁滑動）由表觀剪切率 $\dot{\gamma}_t$ 所得為

$$Q_{total} = \frac{\pi R^3}{4(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}b)} \dot{\gamma}_t \quad (13)$$

在相同 η_c 值下， Q_{total} 與 $Q_{no-slip}$ 的差值來自於壁滑動。則 Q_{slip} 變為

$$Q_{slip} = Q_{total} - Q_{no-slip} = \frac{\pi R^3}{4(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}b)} (\dot{\gamma}_t - \dot{\gamma}_c) \quad (14)$$

融膠在微流道中之平均速度定義為 $V_{mean} = Q_{total} / A$ 。因此由 $\dot{\gamma}_t - \dot{\gamma}_c$ 與 $\dot{\gamma}_t$ 之比值，我們可求得壁滑動速度(V_{slip})與平均流速(V_{mean})之比值。圖 9、10 和 11 表示融膠流經微流道尺寸 $300 \mu m$ 、 $200 \mu m$ 和 $150 \mu m$ 且溫度分別為 $200^\circ C$ 、 $225^\circ C$ 和 $250^\circ C$ 時滑動速度佔平均速度之百分比。由圖可看出，滑動速度相對於平均速度所佔之百分比隨微流道之尺寸減小而增加，此表示當微流道尺寸降低時滑動速度越發重要。圖 12、13 和 14 比較融膠分別在微流道尺寸 $300 \mu m$ 、 $200 \mu m$ 和 $150 \mu m$ 時且溫度在 $200^\circ C$ 、 $225^\circ C$ 和 $250^\circ C$ 下之黏度。當融膠溫度由 $200^\circ C$ 增加至 $250^\circ C$ 時，壁滑動速度相對於平均速度之百分比亦增加。

五、結論

在本研究中，建立一融膠流經微流道之流變性質之量測系統，並利用毛細管流動模型與狹縫流動模型二者用以分析量測所得之數據，藉以探討微流道尺寸對融膠黏度之影響。在不同融膠溫度下利用兩種模型所求得之結果並與傳統流變儀所得之結果做一比

較，同時探討高分子融膠流經微流道之滑動現象。基於量測結果，可做出下列結論：

1. 雖然目前尚未有解析模型適合描述融膠於方形橫斷面微流道中之流動性質，我們可運用毛細管流動模型與狹縫流動模型結合相關修正因子，來得到在某些特定溫度下之之剪切黏度。兩種模型所得之結果相當接近，差別僅約 4%到 10%。
2. 高分子融膠在微流道中之黏度低於由傳統流變儀所測得之黏度。對 PS 高分子融膠在 200°C 情況下，流過 300 μm 、200 μm 和 150 μm 微流道時，由毛細管流動模型分析所得之黏度約略較傳統流變儀所得之結果分別少 1.4 至 1.6、1.7 至 2.3 和 2.3 至 4.1 倍。在微流道中融膠黏度之降低情況，隨尺寸減小而更明顯。
3. 在本研究使用之微流道尺寸，實驗結果顯示壁滑動為影響融膠黏度下降最重要之因素。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。融膠溫度越高，沿壁滑動效果越明顯。
4. 本研究指出適當描述融膠在微結構幾何形狀中之流變行為對於正確模擬微成型是非常重要的。

參考文獻

1. Yao D 2001 Rapid thermal response injection molding for microfabrication *Ph.D Thesis* University of Massachusetts, Amherst, MA pp114-28
2. Harris C, Despa M S and Kelly K W 2000 Design and fabrication of a cross flow micro heat exchanger *J. Microelectromech. Syst.* **9** 502-8
3. Weber L and Ehrfeld W 1999 Micromoulding-market position and development *Kunststoffe* **89** **10** 192-202
4. Yu L, Juang Y J, Koelling K W and Lee L J 2000 Thin wall injection molding of thermoplastic microstructures *SPE Tech. Papers.* **46** 468-73
5. Friedl R W 2000 Injection molding of sub- μm grating optical elements *J. Injection Molding Technol.* **4**, 78-83
6. Nielsen L E 1977 Polymer rheology *Marcel Dekker* New York
7. Hatzikiriakos S G and Dealy J M 1991 Wall slip of molten high density polyethylene I. Sliding plate rheometer studies *J. Rheol.* **35** 497-523
8. Kalika D S and Denn M M 1987 Wall slip and extrudate distortion in linear low-density polyethylene *J. Rheol.* **31** 815-834
9. Ramamurthy A V 1986 Wall slip in viscous fluids and influence of materials of construction *J. Rheol.* **30** 337-57
10. Winter H H 1977 Viscous dissipation in shear flows of molten polymers *Adv. Heat Transfer*

13 205-212

11. Rosenbaum E E and Hatzikiriakos S G 1997 Wall slip in the capillary flow of molten polymers subject to viscous heating *AIChE J.* **43** 598-608
12. Yao D and Kim B 2002 Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials *J. Micromech. Microeng.* **12** 604-610
13. Yu L, Kuo C G, Lee L J, Keolling K W and Madou M J 2002 Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro-features *Polym. Eng. Sci.* **42** 871-86
14. Juang Y J, Lee L and Koelling K W 2002 Hot embossing in microfabrication. Part II: Rheological characterization and process analysis *Polym. Eng. Sci.* **42** 551-66
15. Lee L 2003 Molding and Mold Technology, September 1, Chung-Li, Taiwan
16. Chen S C 1998 Annual Report of Thin-Wall Injection Molding of National Science Council
17. Dealy J M 1982 *Rheomers for Molten Plastics*, Van Nostrand Reinhold, New York

表 1 毛細管流動之 Rabinowitsch 修正值

Channel size Temperature	150 μm	200 μm	300 μm
200 °C	1.10	1.41	1.47
225 °C	1.40	1.36	1.37
250 °C	1.46	1.40	1.35

表 2 狹縫流動模型之 Walter 修正值

Channel size Temperature	150 μm	200 μm	300 μm
200 °C	1.13	1.54	1.56
225 °C	1.52	1.47	1.53
250 °C	1.59	1.56	1.45

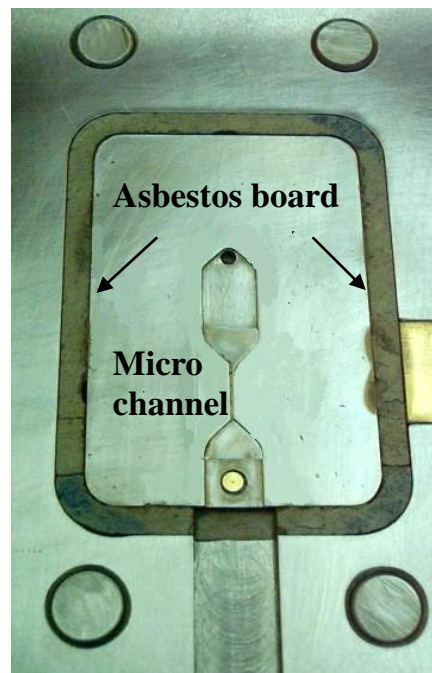


圖 1 具有微流道之模具

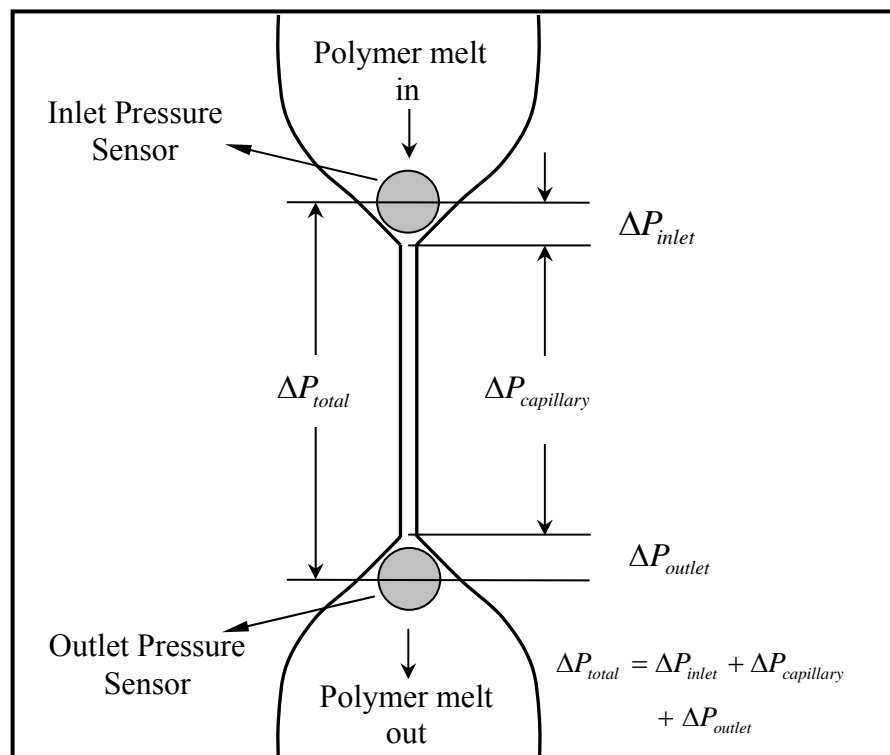


圖 2 融膠流經微流道時壓力降之示意圖

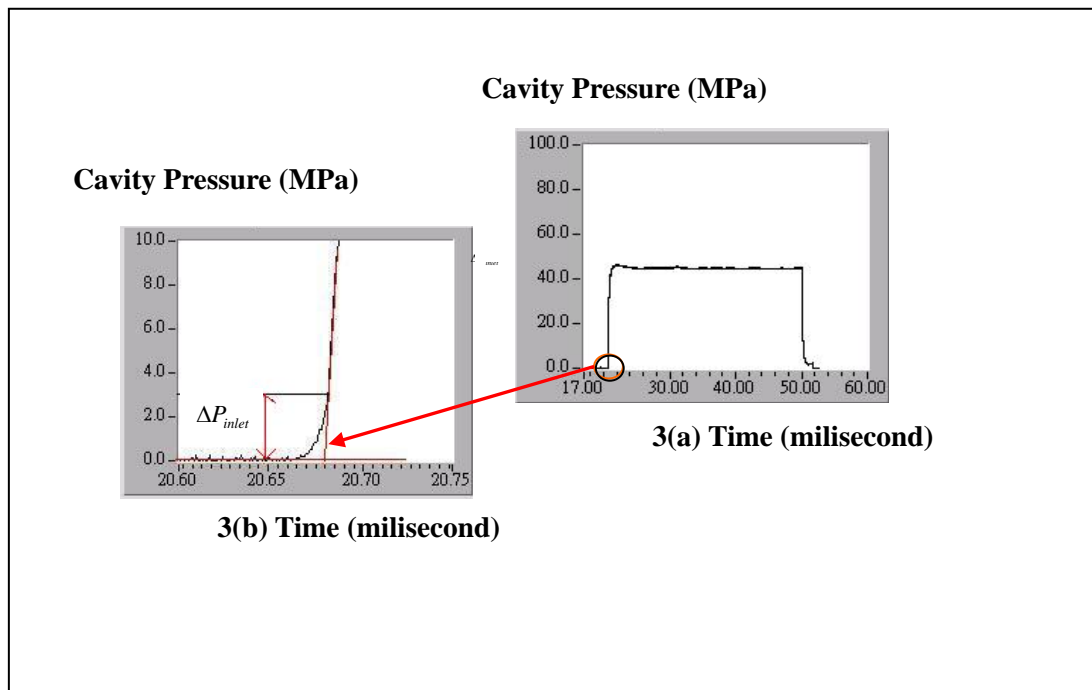


圖 3 (a) 進口處模穴壓力曲線；(b) 圖(a)之局部放大圖。

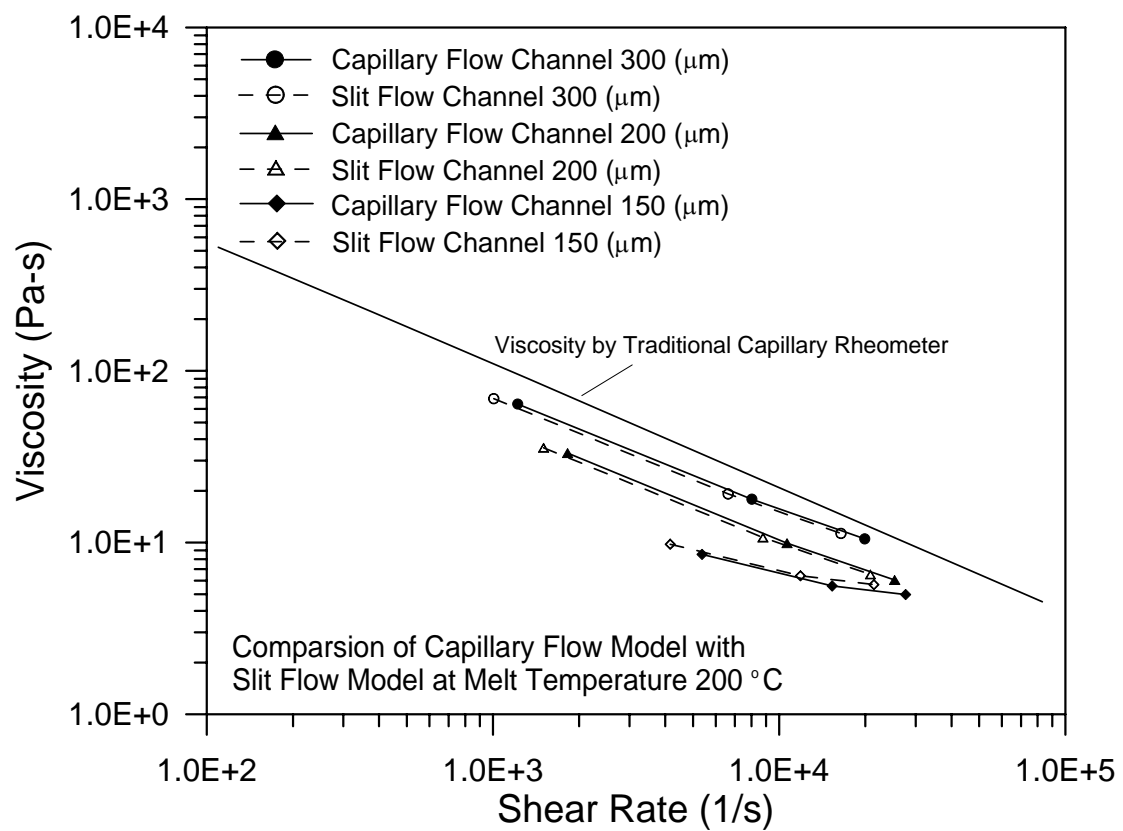


圖 4 融膠在 200°C 所測得之黏度曲線圖

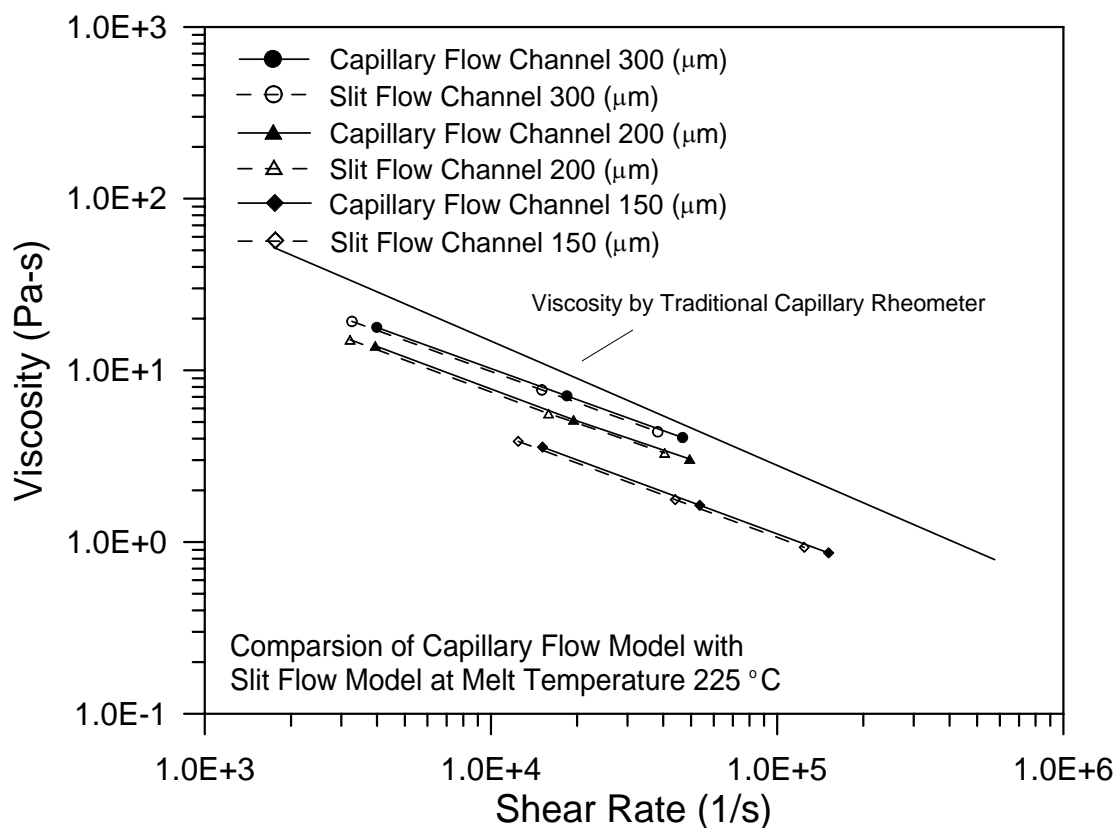


圖 5 融膠在 225°C 所測得之黏度曲線圖

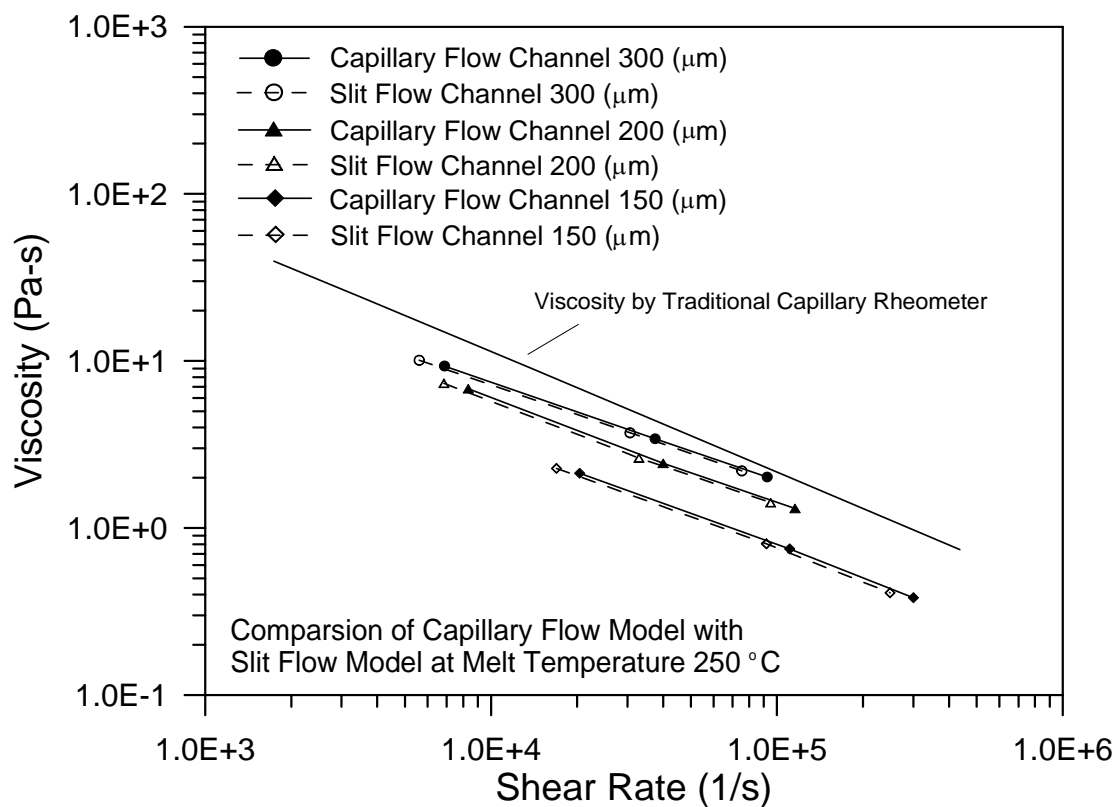


圖 6 融膠在 250°C 所測得之黏度曲線圖

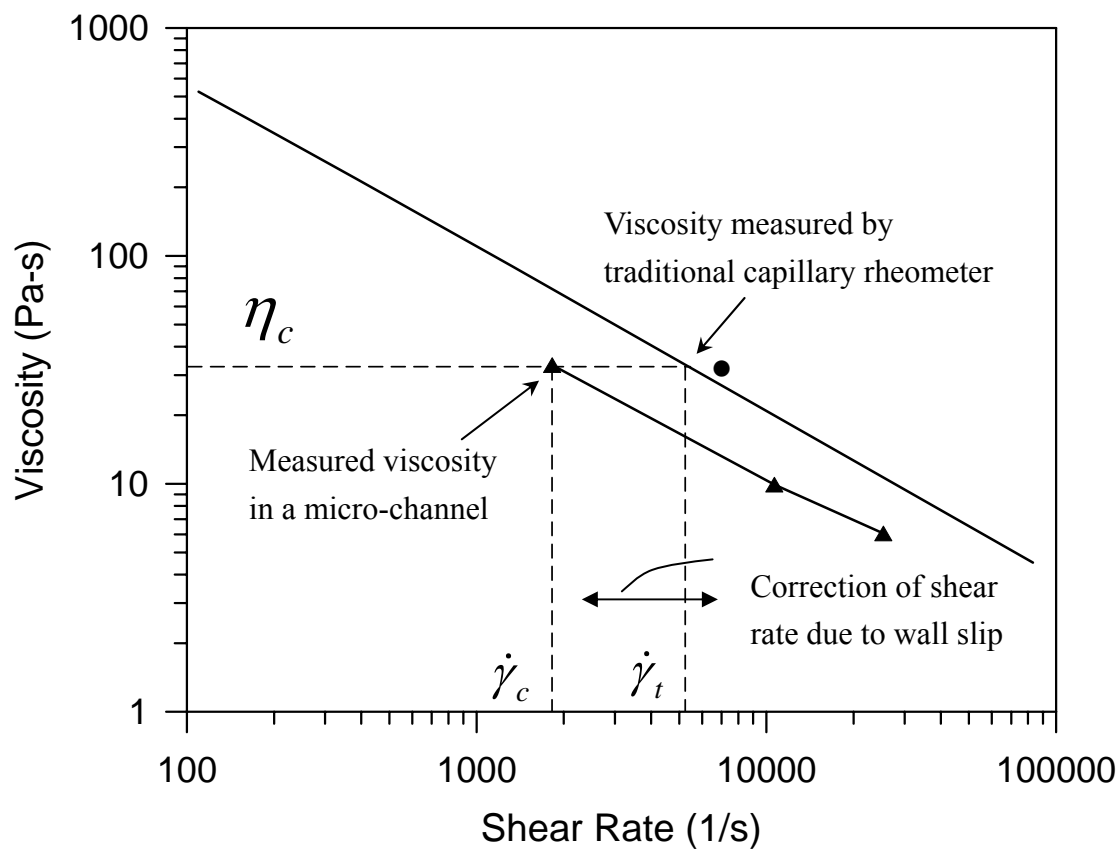


圖 7 $\dot{\gamma}_t$ 和 $\dot{\gamma}_c$ 取值示意圖

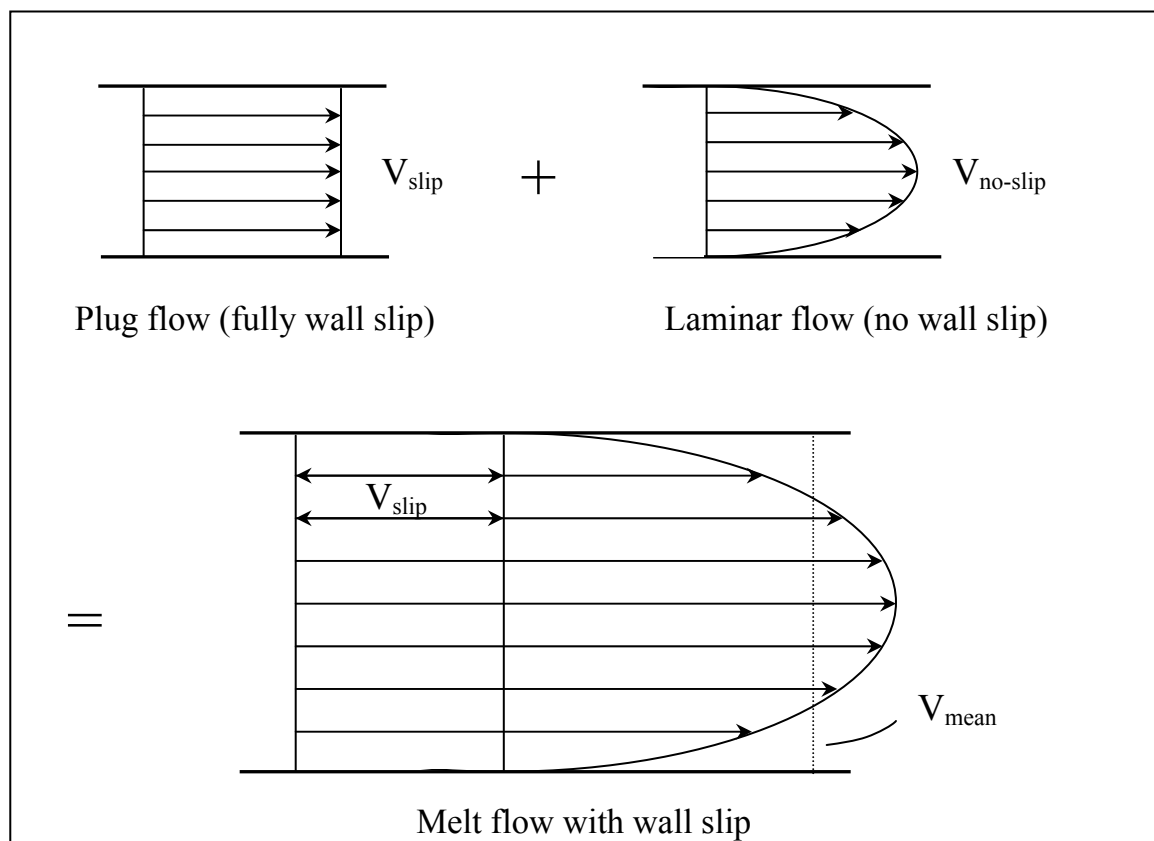
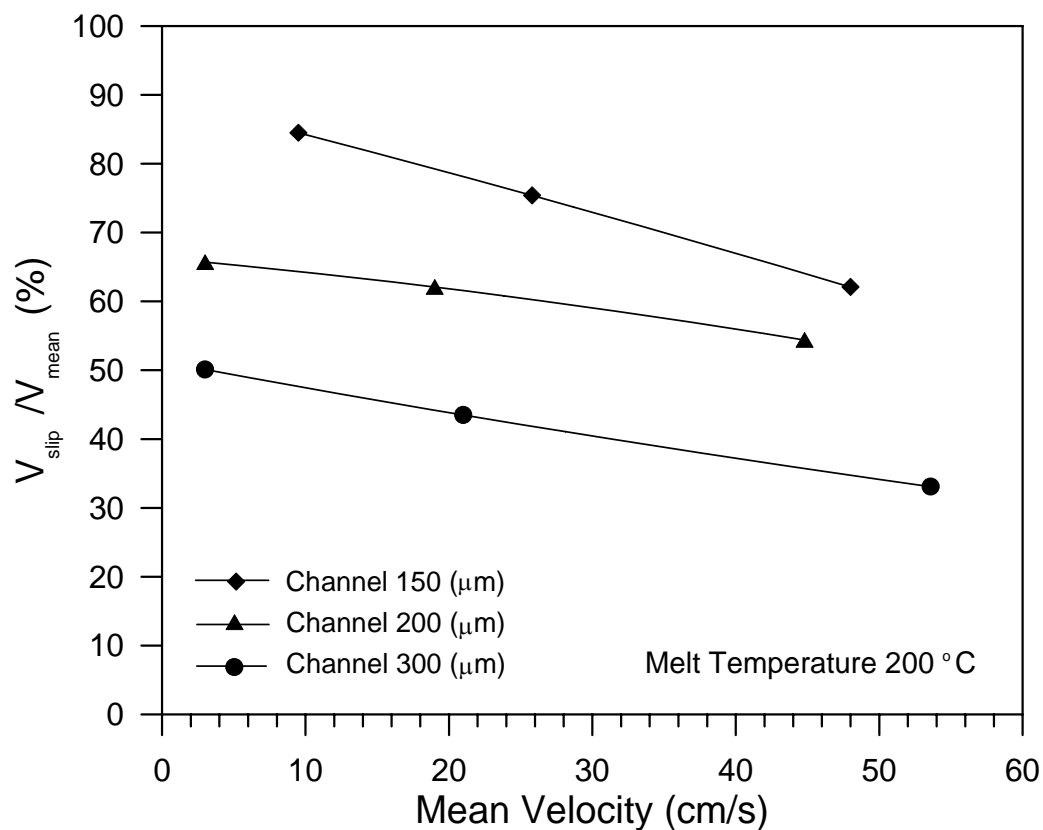
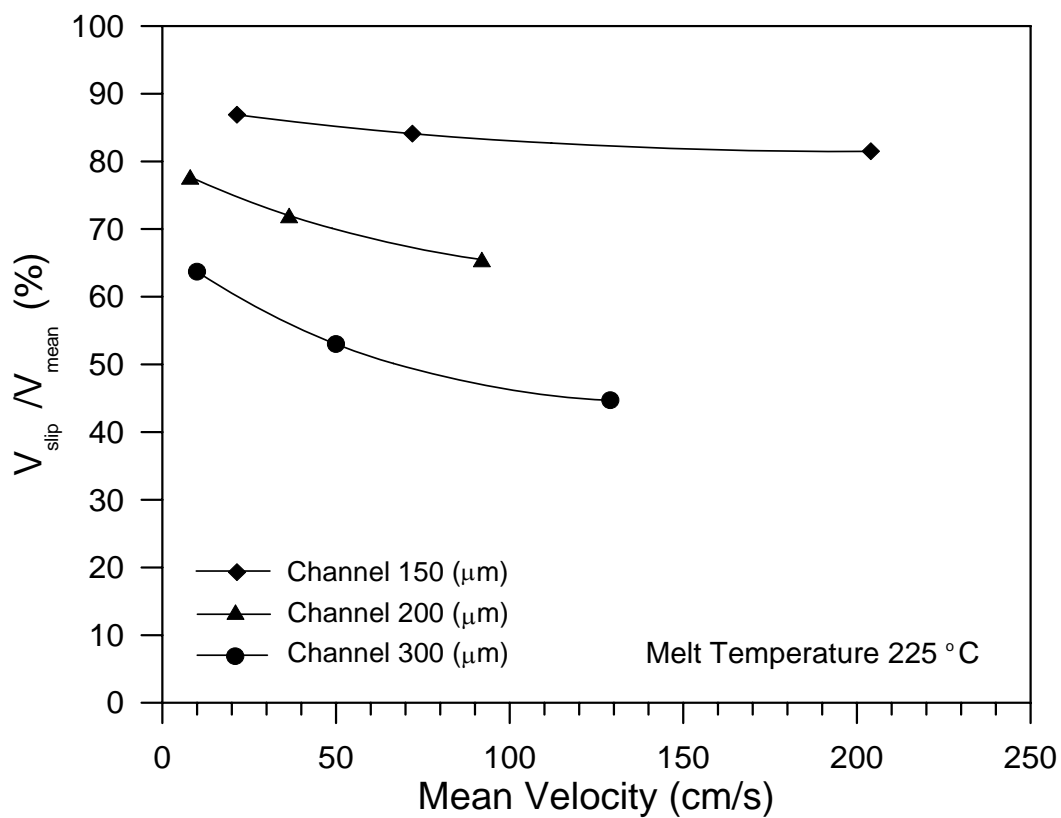
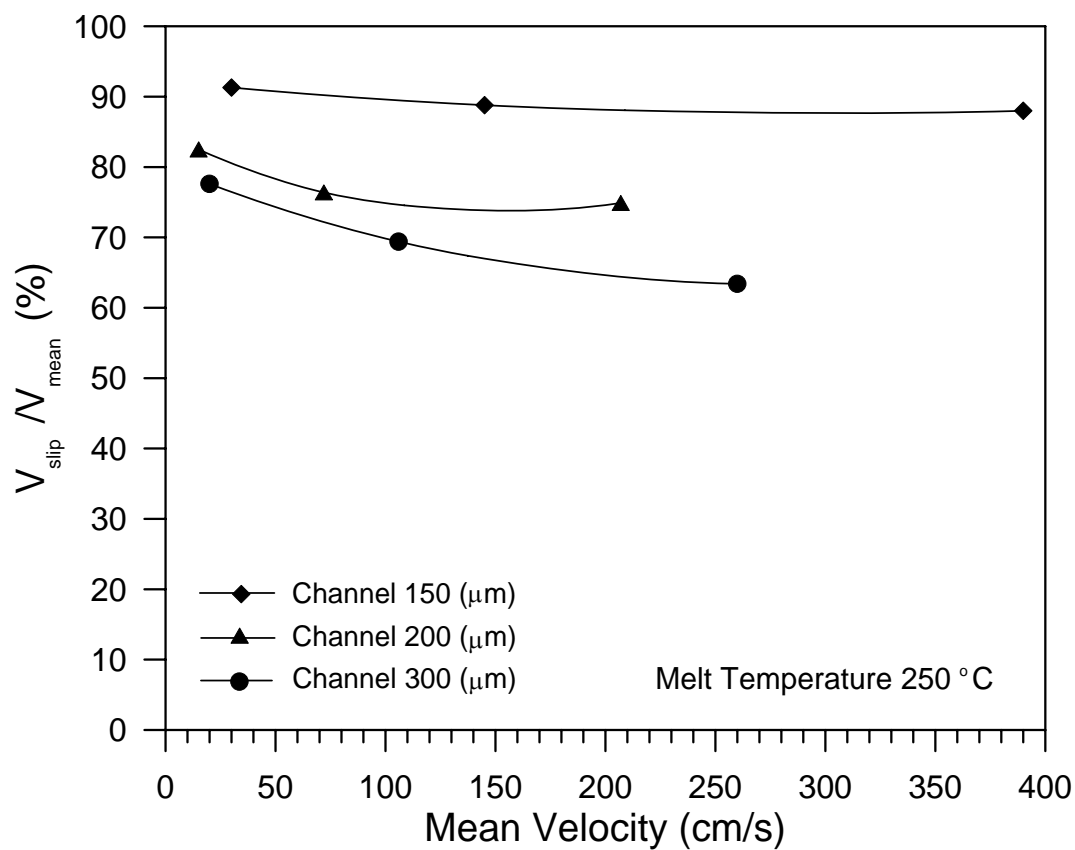
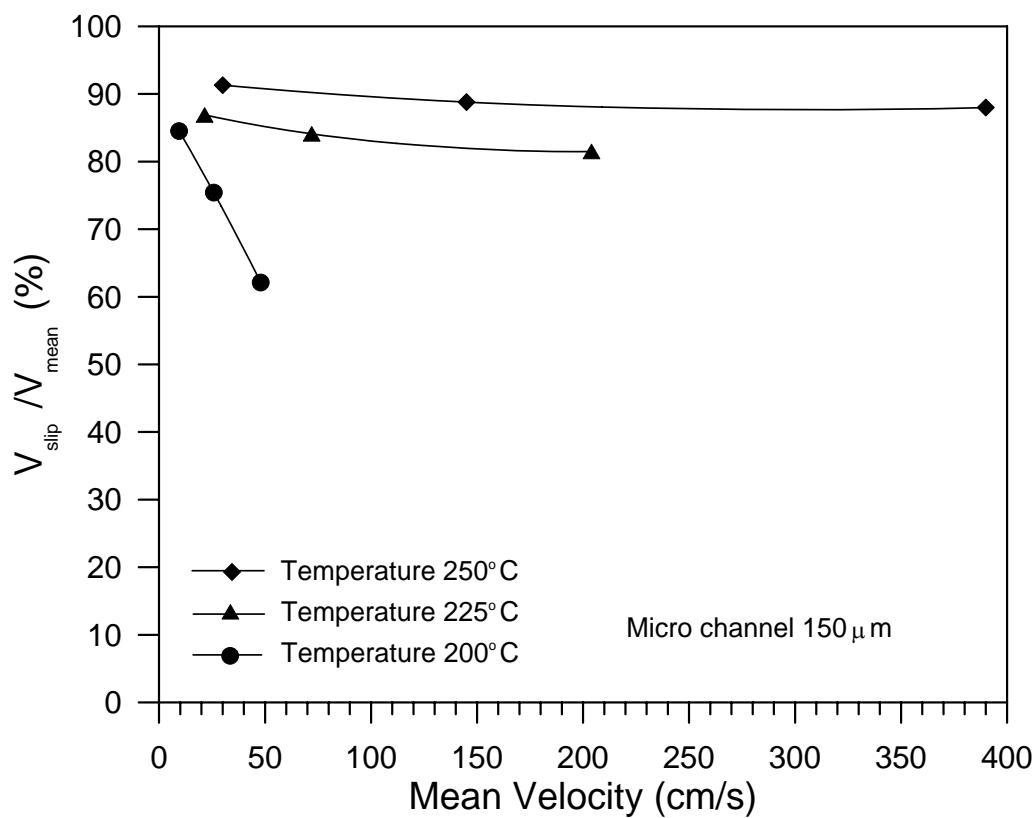


圖 8 由柱塞流和層流所合成之融膠流動

圖 9 流體平均流速與滑動速度比較(200 $^{\circ}\text{C}$)圖 10 流體平均流速與滑動速度比較(225 $^{\circ}\text{C}$)

圖 11 流體平均流速與滑動速度比較(250 $^{\circ}\text{C}$)圖 12 在微流道尺寸 150 μm 且不同融膠溫度下時，滑移速度與平均流速之比值

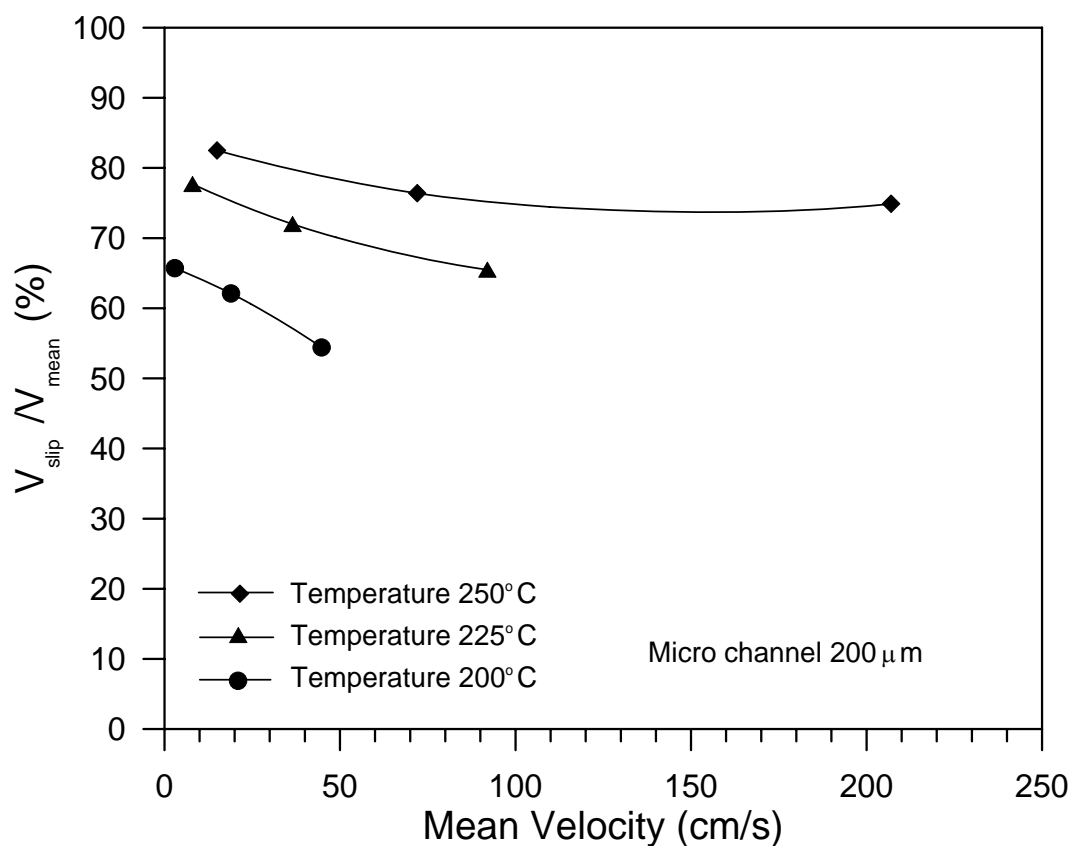


圖 13 在微流道尺寸 200 μm 且不同融膠溫度下時，滑移速度與平均流速之比值

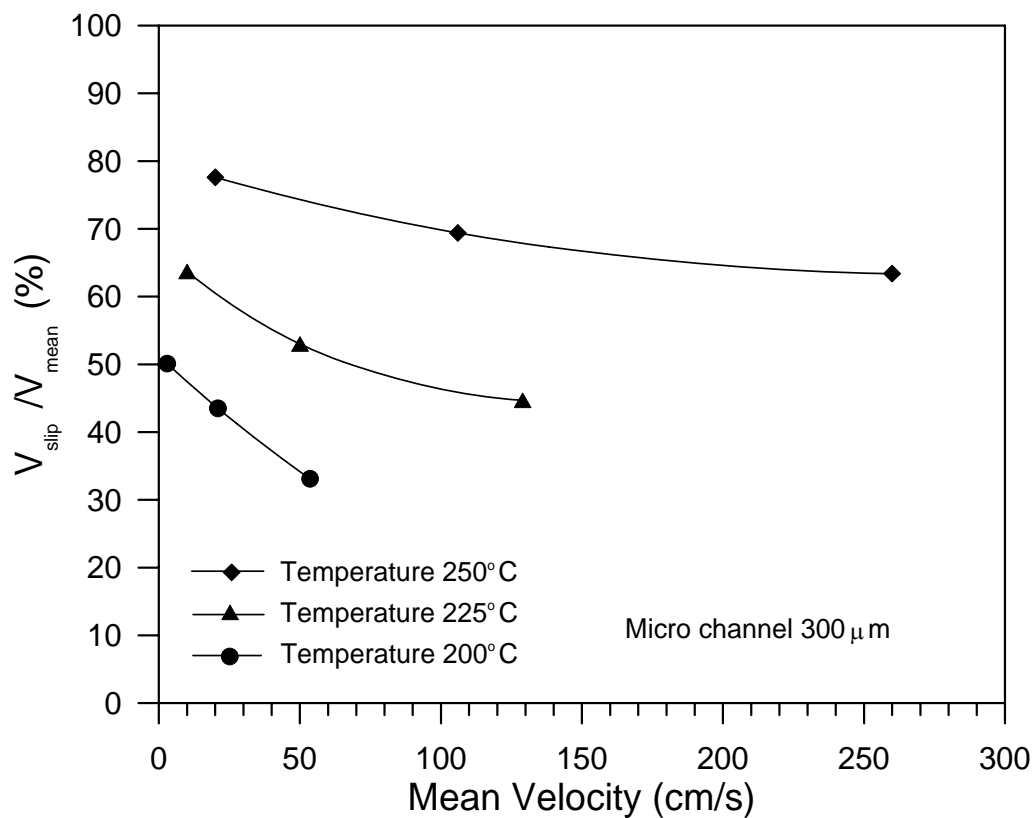


圖 14 在微流道尺寸 300 μm 且不同融膠溫度下時，滑移速度與平均流速之比值

