

第一章 緒論

1.1 簡介

在 高 分 子 加 工 的 領 域 中 ， 吹 膜 (blown film) 用 於 包 裝 用 途 的 使 用 量 很 大 。 而 加 工 設 備 為 單 螺 桿 押 出 機 。 在 吹 袋 薄 膜 製 程 所 使 用 的 押 出 機 中 ， 最 重 要 的 元 件 一 為 螺 桿 、 一 為 模 頭 。 良 好 的 螺 桿 及 模 頭 設 計 ， 對 吹 膜 的 產 品 品 質 有 絕 對 性 的 影 響 。 我 們 常 會 遇 到 環 狀 產 品 的 生 產 ， 像 是 圓 管 、 吹 瓶 、 吹 袋 等 … ， 然 而 在 製 造 過 程 中 ， 膠 料 在 流 動 時 ， 容 易 在 會 合 處 產 生 如 縫 合 一 般 的 明 顯 界 面 ， 稱 為 縫 合 線 (welding line) 。 縫 合 線 的 存 在 不 但 造 成 產 品 外 觀 的 瑕 疵 ， 以 致 降 低 了 附 加 價 值 ， 同 時 該 處 亦 是 產 品 的 弱 點 ， 且 易 受 外 力 而 破 裂 ， 改 進 此 缺 點 便 成 了 首 要 目 標 。



理論上，各種熱塑性塑膠皆可用來吹壓成形，更希望具備良好的熱強度及延伸性質，才適合製成塑胚然後更進一步吹壓，一般用來吹壓成型的材料有：HDPE 可製成硬質瓶子，LDPE 可作成軟質物品，PP 用來生產具光澤性和抗熱性，韌度與強度俱佳的產品，耐衝擊性的 PS 和 PVC，用來做價格低且透明性一般的產品。

1.2 中心入料式螺旋式心軸模頭

在吹膜之製程中，膠料由押出機進入圓管型的模頭流道，流體在兩進料點之會合處將產生一縫合線。為了解決縫合線之問題，在模頭之流道上作各式之改良，其中最為成功之設計則首推螺旋心軸模頭 (spiral mandrel die)，如圖 1 所示。最外面為管狀模壁，又稱外模頭，內部則為刻有數個螺旋溝的心軸部分，又稱內模頭。螺旋寬度和深度以沿著螺旋溝的方向逐漸變小，內外模頭間的狹縫稱為間隙 (gap)，螺旋溝的上揚角度稱為螺旋角。熔融膠料出押出機後，由螺旋溝入口進入模頭，一面沿著螺旋溝流動，一面溢流至間隙中，往押出方向流動。傳統的中心式螺旋式心軸模頭，如圖 2(a) 的幾個設計參數有螺旋溝初始溝深(H)、螺旋溝初始溝寬(W)、螺旋角(θ)、螺旋溝的數目(N)、起始間隙(G)、螺旋溝環繞圈數(Nt)、心軸直徑(Dm)，至於其加工的方式是以洗床在圓柱形心軸刻出一最初深度，再由螺旋溝長度決定心軸與外模頭間的夾角 α ，並將心軸切削成具一導角 α 之錐形圓柱。因此幾何設計參數有 H、W、 θ 、N、G、Nt 及 Dm。而改良式的中心式螺旋式心軸模頭，如圖 2(b) 是讓 α 變成一個獨立的設計參數，因此此種模頭有設計參數 H、W、 θ 、N、G、 β 、Nt 及 Dm，具有較大彈性的幾何設計空間。

在螺旋溝分布區域之後，還有鬆弛室及模唇，其構造如圖 3 所示。鬆弛室由於流道擴大，可以鬆弛(relax)熔融膠料應力，因而減低熔膠經過螺旋溝及間隙後所產生的應變歷程(strain history)不均現象並減少模頭膨脹。模唇則為模頭的最後部分，此區域是用來控制產品的厚度，由於模唇有狹小的間隙，所以可產生高剪切率和流動阻力並有穩壓的效果，故可維持流量均一。螺旋式心軸模頭除了用於吹膜之製程，另外亦廣泛應用於圓管產品之製造，如水管等。

中心入料式螺旋式心軸模頭其最大缺點是膠料由押出機出來之後會先進入其內模頭中心處的分歧管均勻的分流至各螺旋溝的入口處，因此中心入料式螺旋式心軸模頭無法在圓柱形內模頭的內部裝設汽泡氣冷系統(internal bubble cooling system 簡稱 IBC)，膠料在出到模子之後只能由膜外部的冷卻風環的空氣加以外部冷卻，造成膜的冷卻速率下降導致生產速率下降，尤其是膜只有外部冷卻容易造成膜的內外冷卻不均導致熱的殘留應力產生，此會造成薄膜在後段切割成平模時造成翹曲變形以及產品兩邊厚度不均影響產品表面品質，因此為了改善這些缺點，模子必須在內部和外部加入冷卻才行，多層共押出吹膜過去各層所使用的內模頭均是以中心方式的入料方式入料，因此膜出模頭之後仍有上述無法進行模內部所造成的問題，而且如圖 4(a)所示，多層中心入料式螺旋式心軸模頭是做多個含螺

旋溝的心軸，由最內面，逐層擴張堆疊出去，因此若多層膜層數愈多，則整個模頭的本體外徑會很大，當愈多層的心軸直徑增加時，會增加膠料與模頭的接觸面積，導致較大模壓，導致在較外層的膠料有較長的居留時間而產生劣化導致物性下降。若做成側邊入料式螺旋式模頭，只要設計一個模頭外徑(根據產品尺寸)，就可以內層心軸逐漸往外堆疊而且外徑不會增加，如圖 4(b)所示，而且因為是以側邊方式入料，因此最內層的心軸部分是中空，可以很容易安置 IBC 系統，這也是側邊入料式螺旋式心軸模頭模擬在國外漸漸被大量使用的原因。



1.3 側邊入料式螺旋式心軸模頭

而側邊入料式螺旋式心軸由於外模頭與內模頭是平行的，如圖 4(b) 及圖 5 所示，因此間隙固定的，不會有間隙隨著螺旋溝的長度而增加的現象。此種型式的模頭將會取代過去吹袋製程所使用的中心入料式螺旋式心軸模頭。

良好的模頭設計在於須使流體流率很均勻地隨著入料溝槽螺旋溝槽均勻的由上游往下游遞減，所多出來的流率則往內模頭與外模頭之間隙均勻流出去，並同時與別的溝槽之流體產生混合，導致膠料的縫合線得以消除，而且料溫也可以達到均勻的目的。若螺旋心軸部份溝道設計不當使得膠料在螺旋溝槽中很快就溢流到內外模頭之間隙，使得膠料產生混合不均，此時不止縫合線無法消除，而且會有滯留區產生，導致材料產品裂解，造成產品外觀不良而且物性降低。反之若膠料在螺旋溝槽中太晚溢出則會造成混合及流量不均的現象。而膠料混合不均，會導致料溫出模頭不均勻，使出模頭後的結晶速率及結晶度不同，因此產品表面便會產生透明度不同的區域，影響外觀甚巨。此外膠料在螺旋溝槽內部除了需產生均勻的流動之外，其在最後出模頭部分必須整圈流量均勻，若流量不均勻則會導致生產的薄膜厚薄不均，而且在引取經過橡膠捏合輪時也會產生皺褶現象。

側邊入料式螺旋式心軸模頭設計最重要部份就是在入料溝道及螺

旋心軸處之設計，很多模頭往往因入料溝道及螺旋心軸設計不當而導致流量不均，因此必須藉助加長模唇數達到流量均勻化目的。但是加長模唇會導致背壓上升，因此會產生押出量下降及料溫上升的情形。若入料溝道及螺旋心軸處設計得宜則可以使膠料混合均勻並達到消除縫合線、料溫均勻及產品厚度均一的目的、此為側邊入料式螺旋式心軸模頭設計關鍵之處。



1.4 文獻回顧

近年來關於螺旋心軸模頭的研究已越來越多樣化，除了單純的設計外，也加入了應用的想法，Mavridis H[1]去找到一個模型來描述高分子熔膠在螺旋心軸模頭內的流動情形，並且試圖考慮熔膠的黏彈性行為，一般文獻中皆可獲得控制體積法的觀念，Mavridis H 以此為出發點去改善模型預測的準確度，並將牛頓流體之 3-D 計算之結果與實驗 LDPE 吹膜來相互佐證，發現預測的準確度確有提升。

M. Zatloukal[2]等人採用 3-D 有限元素法去分析高分子熔膠的流動並預測熔膠在平面螺旋溝分配系統的出口流動之變化情形，該平面螺旋溝多使用在“堆疊”樣式的模頭，發現非等溫下的模擬與實驗所得之結果，二者比較吻合，對於此種特別的平面螺旋式模頭，黏度的消散是非常明顯的，而且容易導致 hot spots 的產生，增加了流動變化的情形，最後作者考慮材料的黏彈性質對流場的影響，使用 CEF 本質方程式來模擬，發現因剪切破壞，是可以忽略掉黏彈性的影響。

因 HDPE 的分子量分布範圍較廣，所以是吹膜製程採用的重要材料之一，Hiroyuki Higuchi[3]等人傾向於吹膜厚度分布的研究，使用現有的吹膜模頭 NLM 押出機來進行實驗，研究壁滑動(wall slip)對厚度分布之影響，發現膜厚度分布會隨著壁滑動以及熔膠黏度的下降而降低，這種趨勢可用來解釋在螺旋心軸模頭內的流動分布和熔膠的

流動特徵。

在螺旋式心軸模頭的部分，過去一、二十年來，其流動模擬的研究，大部分的流動模式是根據整體參數法(Lumped parameter method)所建立，是將模頭中的環狀流場展開為平面，並切割成許多控制體積。Proctor 最早利用此一模式分析泛牛頓流體的等溫流動，Proctor 假設壓力沿著螺旋溝的方向以線性方式下降。隨後 Saillard 和 Agassant 推廣至非等溫的流動分析，而 Kalyon 等人進一步應用到黏彈性流體的流動分析。Rauwendaal 提出類似 Proctor 的模式，但假設垂直模頭軸心同一平面上的壓力相等。以上皆是一維流動的模式。

隨後 Vleck 等人提出二維模式，假設每一控制體積內有兩方向的流動，試圖減少一維模式所做的假設。Perdikoulis 等人將這些模式加以相互比較，而且以實驗驗證。Fahy 和 Gilmour 以有限元素法解得壓力降和流率，而 Benkhoucha 等人以流動分析網格法(Flow analysis network)分析流場。Huang 則以控制體積法在等溫條件下並引入田口實驗法，以建立最佳模頭幾何形狀。

上述關於螺旋式心軸模頭流動模擬的研究中，大部份的流動模式是根據整體參數法(lumped parameter method)，或控制體積法(control volume method)所建立，亦是將螺旋心軸處的流場展開為平面，並切割成許多控制體積。根據 Coyle 等人的研究指出，有限元素法雖然可

對螺旋式心軸模頭的流動做一詳盡的分析，但是根據有限元素法與控制體積法對此種模頭所做的主要流動特性分析結果卻是相似。此外因為有限元素法需要耗費大量的電腦計算的時間，因此目前從設計此種模具的角度而言有限元素法並不實際，而整體參數法或體積控制法則是目前設計與分析螺旋心軸式模頭之最實際方法，也是目前國外著名押出設計分析軟體最常採用的方法。

目前有關此種側邊進料式螺旋式心軸模頭尚未見到有關此種模頭的文獻報導，僅止於國外押出大廠的產品目錄介紹，因此本論文採用 Vleck 等人所提出二維控制體積法流動模式，以非牛頓流體去分析在側邊入料式螺旋式心軸模頭的流動，同時並配合田口法對側邊入料式螺旋式心軸模頭進行最佳化設計，找出模具之最佳幾何形狀，搭配田口法是相當重要的，因為整個如果照傳統方式進行設計，即一次改變一個設計參數而固定其它設計參數相當耗時，而且不一定可以找到最佳幾何形狀。因此搭配田口法可有效地尋找出一組最佳的設計參數組合，節省模頭設計時間。

第二章 理論及研究方法之建立

2.1 系統假設

本文是以下列的假設條件進行模擬：

1. 膠料在模頭內之流動已達穩定狀態。
2. 膠料為不可壓縮流體。
3. 膠料之黏度與剪切率關係符合冪次定律(Power Law model)。
4. 模頭內的流動均為 Poiseuille 流動。
5. 忽略溝道曲面的影響。

中心入料式心軸模頭的流動模式可將模頭展開成 X-Y 平面，如圖 6(a) 所示。X 為沿著溝槽流動的方向，Y 為軸向，而內外模頭的間隙及螺旋溝的深度則視為 Z 方向。過去中心式入料心軸模頭由於對稱性之故，兩螺旋溝入口之間的區域可視為一個完整的螺旋溝，而且以螺旋溝入口為分隔的區域(等於螺旋溝數目)，如圖 6(a) 所示，共對稱分隔區域為四個區域的情形所示其流動情形均一模一樣，是故可以一個區域進行分析。但由於側邊式入料螺旋式心軸模頭，兩螺旋溝之間的區域並不是完全對稱，因此並不能以中心入料式心軸模頭的流動模式，將兩個螺旋溝入口之間的區域稱為一個完整的螺旋溝，而是必須對整個模頭展成平面，如圖 6(b) 所示，並且對整個模頭流域分割成許多單元(element)，再將每個單元細分成三個子單元(subelement)，

如圖 7 所示。以此方式以控制體積法對整個流域進行流動模擬，茲將

上述三個子單元描述如下：

(1)子單元一為螺旋溝槽或螺旋入料溝槽部分。

(2)子單元二為間隙中鄰近溝槽的部分。

(3)子單元三為間隙中子單元二上方的部分。



2.2 基礎理論

熔膠在模頭內的流動可分為兩平行板間流動及半圓管流動兩種。

2.2.1 兩無限平行板間之流動

考慮兩個相隔 D_3 距離的無限平行板，垂直平板的方向為 Z 方向，流體於兩平板中為 X - Y 兩方向的二維流動，並且為全展開流動(fully developed flow)，則由運動方程式化簡可得：

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial Z} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial Z} \quad (2)$$

代入邊界條件(boundary conditions)：

$$z = 0, \tau_{zx} = 0 \quad (3)$$

$$z = 0, \tau_{zy} = 0 \quad (4)$$

積分式(1)、(2)可得

$$\tau_{zx} = -\frac{\Delta P}{\Delta x} z \quad (5)$$

$$\tau_{zy} = -\frac{\Delta P}{\Delta y} z \quad (6)$$

假設流體的黏度(viscosity)與剪切率(shear rate)的關係符合幕次定律

(Power Law model)，即

$$\eta = m (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (7)$$

$$\text{其中 } \dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2} \quad (8)$$

$\dot{\gamma}_1$ 為 X 方向的剪切率

$\dot{\gamma}_2$ 為 Y 方向的剪切率

$\dot{\gamma}$ 為總剪切率

將式(7)代入式(5)、(6)，積分化簡可得 X 與 Y 方向的壁剪切率(wall shear rate) $\dot{\gamma}_{1w}$ 、 $\dot{\gamma}_{2w}$ 與平均速率 \bar{v}_x 、 \bar{v}_y 的關係

$$\dot{\gamma}_{1w} = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3} \bar{V}_x = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3} \frac{Q}{D_2 D_3} \quad (9)$$

$$\dot{\gamma}_{2w} = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3} \bar{V}_y = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3} \frac{q}{D_1 D_3} \quad (10)$$

$$\dot{\gamma}_w = \sqrt{\dot{\gamma}_{1w}^2 + \dot{\gamma}_{2w}^2} \quad (11)$$

令流體流經 X 方向的長度為 D_1 ，體積流率為 Q ；而流經 Y 方向的長度為 D_2 ，體積流率為 q 。將式(7)、(8)、(9)代入式(5)、(6)，則可得壓力梯度(pressure gradient)與流量的關係式：

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m \dot{\gamma}_w^{n-1}}{D_3} \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_2 D_3^2} Q \quad (12)$$

$$\frac{\Delta P}{D_2} = \frac{2m \dot{\gamma}_w^{n-1}}{D_3} \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_1 D_3^2} q \quad (13)$$

2.2.2 圓管之流動

考慮一半徑為 R 的圓管，軸向為 Z 方向，且長度為 D_1 ，流體於圓管中為全展開流動(fully developed flow)，則由運動方程式化簡可得

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (14)$$

因為為全展開流動，所以 $-\frac{\partial P}{\partial z}$ 為定值。積分式(14)可得：

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{\Delta z} \left(\frac{1}{2} r \right) \quad (15)$$

將式(7)代入式(15)，積分化簡可得壁剪切率(wall shear rate) $\dot{\gamma}_w$ 與平均速率 \bar{v}_z 的關係：


$$\dot{\gamma}_w = \frac{3 + \frac{1}{n}}{R} \bar{v}_z \quad (16)$$

令流體流經 Z 方向的體積流率為 Q ，則壓力梯度與流量的關係式：

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m}{R} \frac{\dot{\gamma}_w^{n-1} \left(3 + \frac{1}{n} \right)}{\pi R^3} Q \quad (17)$$

2.2.3 側邊入料式螺旋式心軸模頭之流動模式

根據過去對模頭流動分析顯示，流體大部分是在螺桿內產生升溫，而膠料在模具內從入口平均溫度到出口斷面平均溫度差大約在 10°C 內，而且如前面所述側邊入料式螺旋式心軸模頭最重要的部分就是在入料溝道及螺旋心軸處溝道之設計，其設計必須達到出到螺旋溝出口處，如圖 6(b) 的 G-H 段的各點流量以及平均溫度均必須非常均勻。以等溫方式及二維控制體積法且以非牛頓流體去模擬分析進料溝道及螺旋心軸處之流動情形，並配合田口法去搜尋，以便對模具找出最佳幾何形狀。

1. 進料溝與螺旋溝分布區域：

本文係將整個模頭沿著溝槽方向細分計算單元，為符合普瓦醉流動，各子單元之幾何尺寸取其平均值。

(1) 子單元一

子單元一可分為深度大於半徑與深度小於半徑兩個部分。以流體入口面圓弧中間處的壓力當作子單元一的壓力，以 P 表示， P^* 則表示下一個子單元一的壓力，而 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 表示鄰近子單元二或三的壓力。子單元一的控制方程式如下，其中 $f(Q, q)$ 和 $g(Q, q)$ 表示流動阻力：

$$P - P^* - f(Q, q)Q = 0 \quad (18)$$

$$\left(\frac{P+P^*}{2}\right) - \left[\frac{1}{2}\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{P_3+P_4}{2}\right)\right] - g(Q, q)q = 0 \quad (19)$$

$$Q + q - Q^* = 0 \quad (20)$$

其中 Q^* 為進入此子單元的體積流率， Q 為此子單元的體積流率， q 為溢流至子單元二的體積流率。

(i) 深度大於半徑

X 方向的流量 Q 可分為流經半圓柱區域的流量 Q_1 ，以及流經長方體區域的流量 Q_2 ，即

$$Q_1 + Q_2 = Q \quad (21)$$

由式(17)可知半圓柱區域的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m \gamma_w \cdot^{n-1} 2 \left(3 + \frac{1}{n}\right)}{R \pi R^3} Q_1 \quad (22)$$

由式(16)可知長方體區域的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m \gamma_w \cdot^{n-1} 2 \left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_2 HD_2^2} Q_2 \quad (23)$$

假設兩區域的壓力降相等，則由式(21)、(22)、(23)解聯立可得

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m}{R} \left[\frac{2\left(3 + \frac{1}{n}\right)Q}{\pi R^3} \right]^n \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{R}\right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{\pi R^3}{HD_2^2}\right)} \right]^n \quad (24)$$

而圓管的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2m \dot{\gamma}_{lw}^n}{R} \quad (25)$$

比較式(24)、(25)可知:

$$\dot{\gamma}_{1w} = \frac{2(3+\frac{1}{n})Q}{\pi R^3} \frac{1}{1+(\frac{D_2}{R})^n (\frac{3n+1}{2n+1}) (\frac{\pi R^3}{HD_2^2})} \quad (26)$$

而溢流至子單元二的流動，即 Z 方向的流動，視為兩平板間的流

動，則:

$$\dot{\gamma}_{2w} = \frac{2(2+\frac{1}{n})q}{D_1 D_2^2} \quad (27)$$

將式(25)、(26)分別代入式(18)，即可得 f(Q, q)；而將式(27)、式(13)

中 D₂ 以 H+R 代替，而 D₃ 以 D₂ 代替代入式(19)則可得 g(Q, q)其分

別為：

$$f = \frac{2mD_1 \dot{\gamma}_w \cdot^{n-1}}{R} \left[\frac{2\left(3+\frac{1}{n}\right)}{\pi R^3} \left[\frac{1}{1+\left(\frac{D_2}{R}\right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{\pi R^3}{HD_2^2}\right)} \right] \right] \quad (28)$$

$$g = \frac{2m(H+R) \dot{\gamma}_w \cdot^{n-1}}{D_2} \left[\frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)}{D_1 D_2^2} \right] \quad (29)$$

(ii)深度小於半徑

將此情形視為半圓柱的溝槽，其相當半徑 (equivalent radius) R_{eq} 為

$$R_{eq} = \frac{2P_c}{C} \quad (30)$$

其中 P_c 為截面積，C 為沾濕週長 (wetted perimeter)。Z 方向的流

動視為兩平行板間的流動，只不過寬度由 D₂ 逐漸變為零，所以將

兩平行板間的距離視為 D₂/2。將計算圓管中的剪切率，式(16)中，

R 以 R_{eq} ，而 Q 以 $2Q$ 入可得：將圓管中的剪切率式(16)中 R 以 R_{eq}

而 Q 以 $2Q$ 代入可得：

$$\dot{\gamma}_{1w} = \frac{2\left(3 + \frac{1}{n}\right)Q}{\pi R_{eq}^3} \quad (31)$$

而將計算兩平行板剪切率式(10)中，兩板距離以 $D/2$ 代替，在代入

式(10)可得：

$$\dot{\gamma}_{2w} = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)q}{D_1\left(\frac{D_2}{2}\right)^2} \quad (32)$$

將式(17) 中 R 及 Q 分別以 R_{eq} 及 $2Q$ 代替，再代入式(18)則可求得

f，而將式(13)中 D_2 以 D 代替，而 D_3 以 $D_2/2$ 代替在代入式(19)求得

g，分別如下：

$$f = \frac{2mD_1 \dot{\gamma}_{1w}^{n-1} 2\left(3 + \frac{1}{n}\right)}{R_{eq} \pi R_{eq}^3} \quad (33)$$

$$g = \frac{4mD_1 \dot{\gamma}_{2w}^{n-1} 2\left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_2 D_1\left(\frac{D_2}{2}\right)^2} \quad (34)$$

(2)子單元二

由於子單元二 X 方向之流動會受到子單元一 X 方向流動的影響，

故視子單元二為原來間隙兩倍的平行板流動，即子單元一、二交界

面的應力為零。

子單元二的控制方程式如下：

$$\left(\frac{P_1 + P_3}{2}\right) - \left(\frac{P_2 + P_4}{2}\right) - f(Q, q)Q = 0 \quad (35)$$

$$\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right) - \left(\frac{P_3+P_4}{2}\right) - g(Q, q)q = 0 \quad (36)$$

$$Q + q = Q^* + q^* + q^{**} \quad (37)$$

其中 Q^* 、 q^* 為鄰近子單元流入此子單元的體積流率， Q 、 q 為此單元在 x 、 y 方向的流體積流率， q^{**} 為子單元一溢流至子單元二之體積流率。

將式(16)及(17)分別代入式(35)及(36)可得：

$$f = \frac{mD_1 \gamma_w \cdot^{n-1} 2 \left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3 D_2 D_3^2} \quad (38)$$

$$g = \frac{2mD_2 \gamma_w \cdot^{n-1} 2 \left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_3 D_1 D_3^2} \quad (39)$$

(3)子單元三

子單元三之形狀與子單元二相同，以底面左下角的壓力代表該子單元的壓力， P_1 為此子單元的壓力， P_2 、 P_3 、 P_4 則為鄰近子單元的壓力。子單元三的控制方程式如下：

$$\left(\frac{P_1+P_3}{2}\right) - \left(\frac{P_2+P_4}{2}\right) - f(Q, q)Q = 0 \quad (40)$$

$$\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right) - \left(\frac{P_3+P_4}{2}\right) - g(Q, q)q = 0 \quad (41)$$

$$Q + q = Q^* + q^* \quad (42)$$

其中 Q^* 和 q^* 表示鄰近子單元的體積流率。流動阻力 $f(Q, q)$ 和 $g(Q, q)$ 的推導與式(38)、(39) 相同如下：

$$f = \frac{2mD_1 \gamma_w \cdot^{n-1}}{D_3} \frac{2 + \frac{1}{n}}{D_2 D_3^3} \quad (43)$$

$$g = \frac{2mD_2 \gamma_w \cdot^{n-1}}{D_3} \frac{2 \left(2 + \frac{1}{n}\right)}{D_1 D_3^3} \quad (44)$$

2. 模擬方法

{等溫情況}

將式(18)、(19)、(20)、(35)、(36)、(37)、(40)、(41)、(42)寫入每一個單元，可得到一聯立方程組。每單元有三個子單元，每個子單元有三個變數：Q、q、P，且有三個 governing equations 其中兩個與 f、g 有關，此兩個方程式為運動方程式，另外一個 equation 為質量平衡方程式。在計算過程中，每一個子單元只需解這幾點壓力，至於在出口的最後一個 element 的各子單元之壓力，其中有一些必須設定為零，如圖 6(b) 的 G—H 段（因為為出口壓力）。側邊式入料螺旋式心軸模頭的入料溝有兩條溝道所以我們姑且假設兩螺旋溝之間的區域對稱，因此這兩條溝道會有相同的流量 Q_a 、 Q_b ：

$$0.5Q_{in} = Q_a = Q_b \quad (45)$$

其中 Q_{in} 為總流量。另外我們假設在圖 6(b) 中的 C 點沒有 x 方向的流動，亦即只有 y 方向的流動。

$$Q_x = 0$$

由於此聯立方程組為非線性，故必須以疊代方式求解。

{非等溫情況}

若考慮溫度的影響，則每個子單元的多了一個未知數溫度 T ，而由原來的三個未知數 (Q 、 q 、 P) 變為四個 (Q 、 q 、 P 、 T)，此時每個子單元必須多一個控制方程式，才可求解，此第四個控制方程式必須由能量平衡來獲得。除了前述的系統假設外，非等溫情況的假設為心軸為一絕熱(adibatic)裝置，即熔融膠料與心軸壁之間沒有能量傳送，但是外模壁與熔融膠料間有能量傳送。除了各子單元間因為對流所產生的能量傳送外，子單元一只有因摩擦而產生的消散能(dissipating energy)，子單元二、三有消散能以及與外模壁之間的能量傳送。



(1) 消散能

子單元二、三為長方體流道，對於長方體流道，單位體積的消散能為

$$\frac{dE_v}{dV} = -\tau : \nabla v = m \dot{\gamma}^{n+1} \quad (46)$$

由式(8)、(9)、(10)可得

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_w \left| \frac{2z}{D_3} \right|^{\frac{1}{n}} \quad (47)$$

將式(47)代入式(46)，積分可得子單元內總消散能為

$$E_v = \left(\frac{n}{2n+1} \right) m \dot{\gamma}_w^{n+1} V \quad (48)$$

其中，V 為子單元的體積，m 以下式隨溫度改變

$$m(T) = m(T_0) \exp[-b(T - T_0)] \quad (49)$$

式(49)中 b 為常數，T₀ 為參考溫度

子單元一可視為無限個長方形堆積而成，每一個長方形皆可適用式

(48)，累加可知子單元一的消散能亦可由式(48)計算。

(2)外模壁與熔融膠料間之傳送能

外模壁與熔融膠料間的能量傳送為

$$\frac{E_T}{A} = h(T - T_w) \quad (50)$$

其中 E_T 為傳送能

A 為傳送面積

T_w 為模壁溫度

h 之值可由 Nu(Nusselt number) 求出：

$$Nu = \frac{hD_3}{k} \quad (51)$$

其中 k 為熱傳導係數(heat conductivity)

D₃ 為子單元的深度

而 Nu 之值可由 G_z(Graetz number) 求得

$$Nu = 1.75 G_z^{1/2} \quad (52)$$

而 G_z 定義如下：

$$G_z = \frac{\rho C_p \bar{v} D_3^2}{k D_1} \quad (53)$$

其中 ρ 為密度

C_p 為比熱

\bar{v} 為平均速率

D_1 為特性長度(characteristic length), 即子單元長度。

(3) 各子單元之能量方程式

根據能量平衡可知各子單元之溫度控制方程式如下：

$$\text{子單元一: } (Q+q)T - Q^*T_{Q^*} = \frac{E_v}{\rho C_p} \quad (54)$$

$$\text{子單元二: } (Q+q)T - q^*T_{q^*} - Q^*T_{Q^*} - q^{**}T_{q^{**}} = \frac{E_v - E_T}{\rho C_p} \quad (55)$$

$$\text{子單元三: } (Q+q)T - q^*T_{q^*} - Q^*T_{Q^*} = \frac{E_v - E_T}{\rho C_p} \quad (56)$$

其中 T_i 表示體積流率為 i 的流體溫度

將式(18)、(19)、(20)、(35)、(36)、(37)、(40)、(41)、(42)、(54)、(55)、(56)寫入每一個單元，可得到一聯立方程組。每單元有三個子單元，每個子單元有四個變數： Q 、 q 、 P 、 T ，且有四個 governing equations 其中兩個與 f 、 g 有關，此兩個方程式為運動方程式，另外一個 equation 為質量平衡方程式，另一個為能量平衡方程式。在計算過程中，每一個子單元只需解這幾點壓力，至於在出口的最後一個 element 的 3 個單元中各子單元之壓力，其中有一些必須設定為零，如圖 6(b) 的 G—H 段（因為為出口壓力）。另外在圖 6(b) 的 B 點還需給定一起始溫度 T_{in} 。由於此聯立方程組為非線性，故以疊代求解。

3. 判斷模頭優劣之依據

判斷模頭優劣的依據，包括流量均勻度、混合度及最大壓力降。流量均勻度愈高，產品厚度愈均勻；混合度愈高，表示混料均勻，可消除縫合線。最大壓力降愈小，即螺桿的背壓愈小，表示製程所需的能源愈小。因為在模擬過程中是以出模頭的壓力為零當作邊界條件，所以第一個子單元一的壓力即可視作最大壓力降。茲將流量均勻度及混合度分別定義如下：

流量均勻度(FUI)的定義如下：

$$FUI = 1 - \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{q_i}{q_{avg}} - 1 \right)^2} \quad (57)$$

其中 q_i 為位於模頭螺旋段最終出口處(如圖 6(b)G-H 段)中的子單元三 Y 方向的體積流率。

q_{avg} 為 q_i 的平均值。

N_1 為位於模頭出口螺旋段最終出口處各子單元三的個數。

當 $q_i = q_{avg}$ 時，流量最均勻，此時流量均勻度為 1。

關於混合度方面，由於膠料流入螺旋溝道內，除了不斷往螺旋溝下溝道方向流，另一部份亦會往內模頭（即心軸）及外模頭間隙走。但若沿螺旋溝的方向走太少，而大部分的膠料均往內外模間隙流則會造成膠料縫合線無法消除。至於膠料往螺旋溝走一段長度之後就不在繼續往螺旋溝走，如此會導致膠料在螺旋溝內產生滯留，造成膠料劣化

之現象，因此流入螺旋溝內的膠料必須很均勻的一方面往下溝道流，另一方面亦必須很均勻的流到子單元二，亦即內外模頭間隙，如此才能使膠料混合均勻並達到消除縫合線的目的。至於膠料流入螺旋溝內是否可以均勻的由子單元三再進而流入下一個螺旋溝以便產生混合作用而達到消除縫合線而且同時增加溫度均勻化的目的，此種混合度必須用如下的指標作為混合度好壞的依據：

混合度(MD)的定義如下：

$$MD = 1 - \frac{1}{Q_e} \sqrt{\frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} (Q(L) - Q_e(1 - \frac{L}{L_i}))^2} \quad (58)$$

其中 Q_e 為流入一個螺旋溝槽的總體積流率。

N_2 為一個螺旋溝槽子單元一的總數。

L_i 為螺旋溝槽總長度。

L 為行經螺旋溝的長度。

$Q(L)$ 為螺旋溝槽 L_i 長度處沿著螺旋溝方向的體積流率。

當螺旋溝槽內溢流至間隙的體積流率越均勻則表示混合度越好，即表示可膠料混合均勻，此時混合度為 1。

因為在模擬過程中是以螺旋段最終出口處的壓力為零當作邊界條件，所以第一個子單元的壓力即可視作最大壓力降。

平均溫度均勻度(TUI):

$$TUI = 1 - \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{T_{b,i}}{T_{b,avg}} - 1 \right)^2}$$

其中 $T_{b,i}$ 為位於模頭出口處中各子單元三的溫度

T_{avg} 為 $T_{b,i}$ 的平均值

N_1 為出口處子單元三的總數

2.3 田口法之搜尋

側邊入料式模頭幾何形狀的參數甚多，螺旋溝部分包括起始溝寬(W)、起始溝深(H)、螺旋角(θ)、螺旋溝道數目(NOSPI)、螺旋溝道繞行圈數(NOSEC)、螺旋溝中內外模頭傾斜角(α)、內外模頭間隙(G)等七個，進料溝道部分則包括起始溝寬(W_1)、起始溝深(H_1)、螺旋角(θ_1)、內外模頭分段高度(HBC)等四個，如果以一次改變一個參數而固定其他參數的傳統方式進行設計則會相當耗時，而且不見得可以找到最佳幾何形狀。為了有效尋找出一組最佳的參數組合，在每一回搜尋步驟中引入田口法，以減少數值模擬的次數。

今以一實例說明搜尋過程，首先對每個因子(W、H、 θ 、G、NOSEC、NOSPI、 α 、HBC、 W_1 、 H_1 、 θ_1)選定三個水準(Level)，如表 1 所示。則系統共有 $11*(3-1)$ 個自由度。將 11 個變數配置直交表中，如表 2 表 3 所示。針對每一組水準組合(即某種模頭形狀)計算其流量均勻

度，並且求得每個因子中每個水準的響應值，例如在直交表中，求出含有因子 W 水準 1 的各組流量均勻度(共九組)，加以平均，即為因子 W 水準 1 的響應值，以此類推。接著由響應值建立響應表。由響應表的分析決定這些因子的最佳水準組合，由於最佳水準的決定是以提高流量均勻為準，若均勻度符合設計要求，則該最佳組合所決定之模頭形狀即為所求，而此組合稱為最佳設計點(Design Point)。否則將本次搜尋的最佳組合當成下次搜尋的中間水準，然後引入一常數 λ 來重新調整水準 1 及水準 3，即水準 1=水準 2- λ *水準 2、水準 3=水準 2+ λ 水準 2。 λ 表示搜尋範圍，若本次搜尋的流量均勻度小於上一次搜尋的流量均勻度，則表示 λ 太大，必須降低 λ 值以縮小搜尋範圍。當 W、H、 θ 、G、HBC、NOSEC、NOSPI、 α 、 W_1 、 H_1 、 θ_1 等八個因子的水準重新設定後，重覆直交表來搜尋，直到流量均勻符合要求。

第三章 結果與討論

等溫模擬條件: 高分子流量 25Kg/hr, 模頭直徑 10 公分, 溫度 200°C。

3.1 直交表之搜尋結果

先設置所有進料溝與螺旋溝的參數及各水準, 如表 1 所示, 總共有十一個因子, 每一因子具有三個水準, 本文將進料溝與螺旋溝的參數分開設計: 因進料溝的主要目的希望能讓膠料均勻地進入螺旋溝中, 至於螺旋溝除了流量均勻度之外, 也希望混合度能達到產品要求。

3.1.1 進料溝之搜尋與流動分析

側邊入料式心軸模頭的進料溝主要設計點在於要能使膠料均勻地進入螺旋溝中, 進料溝的參數我們設有 HBC 、 W_1 、 H_1 、 Θ_1 , 如圖 5 所示。用兩種方式去搜尋進料溝的幾何形狀: 方法一: 以流量均勻度當做指標進行搜尋, 結果如表 6 所示, 以此計算出來的流量均勻度 $UNI=0.909$ (圖 6 的 ACE 段面), 混合度 $MD=0.46$ (指沿進料溝那一段的 MD), 壓降 $PD=1025KPa$, 這邊的壓力降是指進料溝所需的壓降, 也就是如圖 6b 的入料溝槽到 ACE 段面。

方法二: 以混合度當做指標進行搜尋, 結果如表 10 所示, 以此計算出來的流量均勻度 $UNI=0.822$, 混合度 $MD=0.623$, 壓降 $PD=945KPa$ 。

比較方法一和方法二之結果: 發現若是以 UNI 為指標來搜尋的話, MD 會偏低; 但以 MD 為指標來搜尋的話, UNI 的結果並不會太差, 關於

此現象我們試著從 UNI 與 MD 的定義來解釋該情形: 流量均勻度是指最後整圈出口段流出模頭方向的流量均一; 混合度 MD 則是溝道內膠料流量呈現線性遞減, 所以有高混合度時通常流量均勻度不會太差; 但若是均勻度很高, 就無法保證混合度會有好的表現。因為進料溝部份只有一條溝道, 很難有混合的效果, 故計算此時的 MD 指標較不具代表性意義, 僅可作為一個參考值。

圖 10 和圖 11 (其中的縱軸 Q 和 q 分別表示 ACE 段面 element 中 X 與 Y 方向的流量, Q_{in} 為進口總流量) 分別為膠料出進料溝時 (指 ACE 段面) 的 X 方向與 Y 方向的流率分佈, 由圖 11 可看出膠料在每個 element 中 Y 方向流量是相近的, 且由圖 10 看出幾乎無 X 方向的流量, 跟所期望進料溝的作用: 均勻地將膠料送進螺旋溝中, 是接近理想的結果。若是進料溝設計不良會使得膠料在螺旋溝的 port 與 port 之間流量分配不均, 導致產品厚度不一。

圖 14 為膠料在進料溝內的體積流率分佈, 我們是將進料溝部分的高度, 如圖 5 所示, 約是相當於 HBC 的長度, 取幾個縱切面, 端看其流量的大小, 如此可大略看出膠料在進料溝內的流動情形。

3.1.2 螺旋溝之搜尋與分析

上一節提到用兩種方法去搜尋進料溝，先找到進料溝的最佳設計點，作為螺旋溝的起始條件，但只以流量均勻度 UNI 為搜尋螺旋溝的指標，不用混合度 MD 為指標，因為在計算 MD 的式子中 eqn(58)，其中的 Q_e 為流入一個螺旋溝槽的總體積流率，但側邊入料式模頭的螺旋溝的入料並非像中心入料式一樣來自單純的進料口，它的膠料是由螺旋溝道的側邊溢入，所以在計算 Q_e 上會有困難，因此不以 MD 為搜尋指標，接續方法一的前提下，結果如表 8 所示，模頭最終出口的 $UNI=0.911$ ，而接續方法二的話，結果如表 12 所示， $UNI=0.958$ 。

接著我們將檢視在螺旋溝入口附近來自進料溝的膠料如何地流動，圖 12 與圖 13 縱軸中的 q^* 為子單元一流向子單元二的流量，而 q 是指在 ACE 段面中介於兩個 port 之間子單元四所流出之流量總和。在進料溝的 $UNI=0.909$ 時，圖 12 是膠料在螺旋溝道的流動情形：由圖看出，因為均勻度佳，所以任兩個 port 之間的流動情形相似：在某一長度時流量呈現負值代表說有逆流現象發生，關於此現象我們提出下面解釋：膠料在中心入料式模頭時，會從溝道溢流至間隙中，而側邊入料式模頭是膠料在要進入螺旋溝時，膠料剛開始最先接觸到的是螺旋溝間隙的模壁，再往溝道流進去，跟從溝道溢流出來的情況剛好相反。也就是說，膠料先流進螺旋溝道中，先行走一段距離，再往間隙

溢流出來，這樣的動作可確保縫合線的消除以及出口料溫能混合均勻。在進料溝的 $UNI=0.822$ 時，圖 13 為膠料在螺旋溝道的流動情形，雖然一樣有膠料先進溝道再冒出間隙的情形，但由於出進料溝時的均勻度只有 0.822，所以 port 與 port 之間的流動有明顯的差異。



3.2 非等溫情形之討論

設定非等溫下膠料的進料溫度 200°C ，模壁溫度 220°C ；等溫下皆 200°C ，上一節所進行的搜尋過程，是在等溫的假設下進行，實際上高分子熔膠在模頭內流動時，由於黏滯熱的產生使其為非等溫的流動。

由圖 15 可發現到，在非等溫時的模內溫度上升幅度不太，可說明不管等溫與非等溫，所獲得的變化相去不遠，因此以等溫所搜尋到的幾何參數是可以應用在非等溫上的。接著我們改變膠料的進料溫度，依序改為 190°C 、 200°C 、 210°C 、 220°C ，如圖 16 所示，結果像預期般的：進料溫度如果越高的話，黏度下降，所以壓降會降低。圖 17 將等溫與非等溫的壓降相互比較，發現等溫的壓降會稍大。但與非等溫曲線比較起來，相差不多，也就是說膠料在模頭內所產生的黏滯熱有限，影響程度小。

3.3 不同進料溝的幾何形狀

本節主要想探討的重點是放在進料溝參數部分，想了解參數分別對進料溝出口的流程均勻度及壓降的影響。

由圖 19 和圖 21 分別是進料溝起始溝寬和起始溝深對流量均勻度關係:改變起始溝寬和起始溝深的話，影響到的都是溝道截面積變化的程度，截面積變化太劇烈時，如圖 18 所示，膠料往間隙溢流的量會突然增多，以致膠料多走間隙，所以流量均勻度會降低，相反地，若設計太小，截面積變化不太，膠料多走溝道難以溢流出間隙，這樣對流量均勻度也不好。至於壓降，如圖 20 和圖 22 溝寬或溝深越大的話，越容易流動，所以壓降可望降低。

由圖 23 得知，螺旋角越大的話，溝道的長度會隨之增長，其截面積變化緩和，未有大幅度壓縮，膠料流量更有機會能夠均勻，但若螺旋角過大，溝道越接近垂直，膠料反而會難溢流出溝道，所以流量均勻度便下降。如圖 24 所示，螺旋角越大，溝道長度隨之增長，膠料行走的距離也越長，所以需要有更大的壓降來推動。

圖 25 和圖 26 顯示分段點高度 HBC 對流量均勻度與壓降之關係: HBC 越大的話，壓降會上升，因為整個模頭長度變長，膠料需要更大的壓力來推進，HBC 影響到的也是溝道的長度，溝道越長，通常流量均勻度會上升。

第四章 結論

1. 一般進料溝出口的情況不管是 UNI 或 MD 都不是很理想，因為進料溝本身只有一條溝道，所以還須仰賴螺旋溝的幫忙，若螺旋溝沒有發揮作用，膠料從進料溝出來之後，只走內外模頭間隙，沒有走溝道再溢流出間隙，這樣便無法消除縫合線。
2. 螺旋溝部分的設計與中心入料式模頭幾無差別，但因為多了一段進料溝部份，所以側邊入料式模頭的壓力降比中心式的大一點。
3. 就單一模頭的性能評估，也許側邊入料式模頭不若中心入料式模頭來的好，但在生產多層膜吹袋產品時，就可能要放棄原有的螺旋心軸模頭的設計方式，再加上現在都需要較複雜的機械性質、物性，所以有了側邊入料式模頭的產生。
4. 本文以二維的流動分析，再配合直交表的搜尋方法，可減少實驗次數，亦可訂定出模頭的設計參數，以流量均勻度和壓力降為考量條件，可使產品的厚度均勻提升附加價值，製程最節省能源。
5. 若進料溝出口的 UNI 不佳，在經過螺旋溝之後，依然可將 UNI 提升。
6. 提高進料的溫度有助於降低壓降，是由於溫度上升讓膠料的黏度下降，流體更易流動，壓力降自然下降。
7. 由於在模頭內膠料並不會產生巨大的黏滯熱，所以用等溫時所搜尋到的幾何參數是可以應用在非等溫。

8. 混合度 MD 對於進料溝而言，膠料要混合的話，最好溝道數目能大於 1 以上，這樣進行混合度指標搜尋時，才比較具意義。



表 1:各因子與起始水準設定

level factors		Level 1	Level 2	Level 3
		螺	W	0.2
旋	H	0.4	1.0	1.6
溝	Θ	8.0	14.0	20.0
	G	0.1	0.3	0.5
	α	0.5	2.0	3.5
	NOSEC	2	4	6
	NOSPI	4	5	6
進	HBC	0.0	0.8	1.6
料	W_i	0.5	1.2	1.9
溝	H_i	0.5	1.2	1.9
	Θ_i	2	4	6

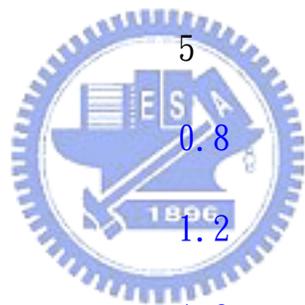


表 2:L9 直交表水準配置 針對進料溝參數

Factors Exp. No.	HBC	W_i	H_i	Θ_i
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

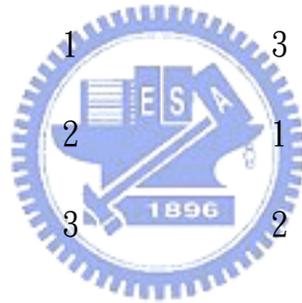


表 3:L18 直交表水準配置 針對螺旋溝參數

factors exp no.	empty	W	H	Θ	G	NOSEC	NOSPI	α
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

表 4:各因子之上下限

level		minimum	maximum
factors			
螺	W	0.2	1.2
旋	H	0.4	1.6
溝	Θ	8.0	20.0
	G	0.1	0.5
	α	0.5	3.5
	NOSEC	2	6
	NOSPI	4	6
進	HBC	0.0	1.6
料	W_i	0.5	1.9
溝	H_i	0.5	1.9
	Θ_i	2	6

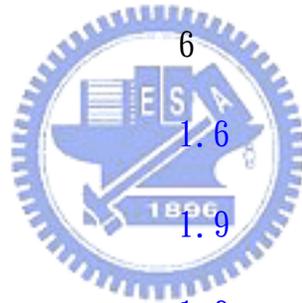


表 5: 針對進料溝 以 UNI 為指標之搜尋結果

Factor No.	HBC(cm)	W _i (cm)	H _i (cm)	Θ _i (cm)	UNI	MD	PD (KPa)
1	1.43	0.78	1.27	2.3	0.894	0.41	1012
2	1.06	0.69	1.13	3.5	0.885	0.43	956
3	1.12	0.71	1.05	4.1	0.909	0.46	1025
4	1.32	0.51	0.95	3.1	0.910	0.41	1233
5	1.25	0.55	0.84	2.6	0.908	0.44	952
6	1.44	0.62	0.96	4.1	0.896	0.43	1037
7	1.29	0.63	1.16	2.1	0.903	0.48	946
8	1.16	0.75	1.30	4.0	0.901	0.42	1125
9	1.05	0.66	1.45	3.6	0.892	0.42	973

表 6: 以 UNI 為指標 搜尋進料溝之設計點

HBC(cm)	W _i (cm)	H _i (cm)	Θ _i (°)	UNI	MD	PD(KPa)
1.12	0.71	1.05	4.1	0.909	0.46	1025

表 7: 針對螺旋溝 以 UNI 為指標之搜尋結果

Factors no.	W	H	Θ	G	NOSEC	NOSPI	α	UNI	MD	PD
1	0.44	0.58	9.5	0.35	2	4	1.08	0.905	0.87	12.5
2	0.45	0.51	8.7	0.41	3	4	2.00	0.902	0.88	11.5
3	0.47	0.58	11.2	0.29	3	4	2.02	0.878	0.85	14.0
4	0.48	0.61	10.6	0.33	2	5	2.75	0.906	0.84	12.4
5	0.44	0.64	7.6	0.25	4	4	1.32	0.890	0.85	14.9
6	0.46	0.54	13.5	0.26	4	5	1.13	0.902	0.87	10.1
7	0.48	0.55	9.4	0.26	2	4	0.55	0.900	0.87	15.0
8	0.50	0.68	8.6	0.27	4	4	1.16	0.909	0.85	10.6
9	0.49	0.53	10.5	0.30	2	5	1.07	0.871	0.81	11.0
10	0.48	0.57	11.4	0.34	3	6	1.25	0.894	0.88	11.4
11	0.46	0.59	13.6	0.42	4	4	1.09	0.880	0.87	16.2
12	0.45	0.56	15.1	0.25	2	4	0.55	0.897	0.88	10.7
13	0.44	0.62	8.18	0.19	2	4	0.96	0.911	0.86	12.0
14	0.48	0.54	13.3	0.41	4	4	1.89	0.901	0.88	10.2
15	0.46	0.63	10.1	0.38	3	5	3.11	0.865	0.85	15.3
16	0.42	0.61	11.6	0.29	2	4	0.59	0.895	0.86	14.2
17	0.46	0.48	12.2	0.31	4	4	1.25	0.887	0.82	11.6
18	0.52	0.61	8.5	0.29	4	4	0.96	0.886	0.83	10.8

表 8: 以 UNI 為指標 搜尋螺旋溝之設計點

W(cm)	H(cm)	$\Theta(^{\circ})$	G(cm)	NOSEC	NOSPI	α ($^{\circ}$)	UNI	MD	PD(MPa)
0.44	0.62	8.18	0.19	2	4	0.96	0.911	0.86	12.0



=====

表 9: 針對進料溝 以 MD 為指標之搜尋結果

Factors	HBC	W_1	H_1	Θ_1	UNI	MD	PD
Exp. No.	(cm)	(cm)	(cm)				(KPa)
1	0.89	1.23	1.44	3.5	0.816	0.582	894
2	0.80	1.15	1.44	2.3	0.808	0.598	975
3	1.14	1.65	1.38	4.6	0.809	0.628	1053
4	0.55	1.54	1.32	5.1	0.813	0.566	1012
5	0.94	1.02	1.48	3.4	0.810	0.586	994
6	0.97	1.09	1.66	3.8	0.822	0.623	945
7	1.02	1.77	1.08	2.5	0.817	0.619	1045
8	0.88	1.69	1.22	4.6	0.832	0.620	957
9	0.59	1.24	1.04	5.0	0.805	0.614	986

表 10: 以 MD 為指標 搜尋進料溝之設計點

HBC(cm)	W_1 (cm)	H_1 (cm)	$\Theta_1(^{\circ})$	UNI	MD	PD(KPa)
0.97	1.09	1.66	3.8	0.822	0.623	945

表 11: 針對螺旋溝 以 UNI 為指標之搜尋結果

factors exp no.	W	H	Θ	G	NOSEC	NOSPI	α	UNI	MD	PD
1	0.61	1.23	13.5	0.50	4	4	2.34	0.948	0.70	12.8
2	0.77	0.98	14.2	0.50	4	4	2.65	0.955	0.76	15.8
3	0.76	1.11	15.6	0.30	4	4	3.41	0.954	0.74	18.0
4	0.61	0.84	13.1	0.35	5	5	1.80	0.926	0.71	13.9
5	0.52	1.26	12.4	0.36	5	5	2.06	0.951	0.73	19.8
6	0.66	1.27	13.4	0.28	4	4	1.9	0.943	0.72	11.8
7	0.49	1.44	14.6	0.50	6	4	3.10	0.923	0.72	19.0
8	0.89	1.13	10.4	0.26	4	4	2.10	0.932	0.69	10.2
9	0.92	1.24	16.3	0.30	6	4	1.50	0.954	0.74	15.6
10	0.84	1.33	10.4	0.26	5	5	0.96	0.956	0.69	15.7
11	0.87	0.95	9.9	0.46	5	4	1.09	0.922	0.72	18.1
12	1.01	0.91	11.0	0.30	6	4	1.25	0.939	0.75	12.7
13	0.69	1.01	13.6	0.38	4	4	1.69	0.907	0.73	10.2
14	0.91	0.89	14.0	0.30	4	5	2.41	0.948	0.71	17.6
15	0.88	0.96	17.1	0.44	5	4	2.11	0.934	0.65	18.5
16	0.65	1.04	15.3	0.29	4	4	1.84	0.947	0.70	20.1
17	0.67	1.16	9.4	0.41	4	4	1.95	0.958	0.72	10.4
18	0.93	1.43	16.4	0.26	5	5	2.00	0.915	0.75	14.5

表 12: 以 UNI 為指標 搜尋螺旋溝之設計點

W(cm)	H(cm)	$\Theta(^{\circ})$	G(cm)	NOSEC	NOSPI	α ($^{\circ}$)	UNI	MD	PD(MPa)
0.67	1.16	9.4	0.41	4	4	1.95	0.958	0.72	10.4



表 13: 側邊入料式心軸模頭之最佳設計點(方法一)

	material	HDPE
factors		
螺	W(cm)	0.44
旋	H(cm)	0.62
溝	Θ ($^{\circ}$)	8.18
	G(cm)	0.19
	α ($^{\circ}$)	0.96
	NOSEC	2
	NOSPI	4
進	HBC(cm)	1.12
料	W_1 (cm)	0.71
溝	H_1 (cm)	1.05
	Θ_1 ($^{\circ}$)	4.1
	UNI	0.911
	MD	0.86
	PD(MPa)	12.0

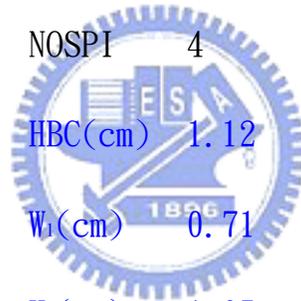


表 14: 側邊入料式心軸模頭之最佳設計點(方法二)

	material	HDPE
factors		
螺	W(cm)	0.67
旋	H(cm)	1.16
溝	Θ ($^{\circ}$)	9.4
	G(cm)	0.41
	α ($^{\circ}$)	1.95
	NOSEC	4
	NOSPI	4
進	HBC(cm)	0.97
料	W_1 (cm)	1.09
溝	H_1 (cm)	1.66
	Θ_1 ($^{\circ}$)	3.8
	UNI	0.958
	MD	0.72
	PD(MPa)	10.4

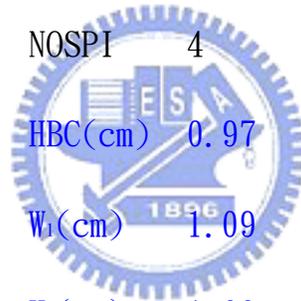


表 15:HDPE 之材料參數

Properties	HDPE
$T_0(K)$	503
$m(T_0)(Pa*s^n)$	2799.6
$C_p(J/Kg-K)$	2500
$\rho (Kg/m^3)$	750
$b(1/K)$	0.02
$K_s(W/m-K)$	0.18
$n(\text{power index})$	0.4122



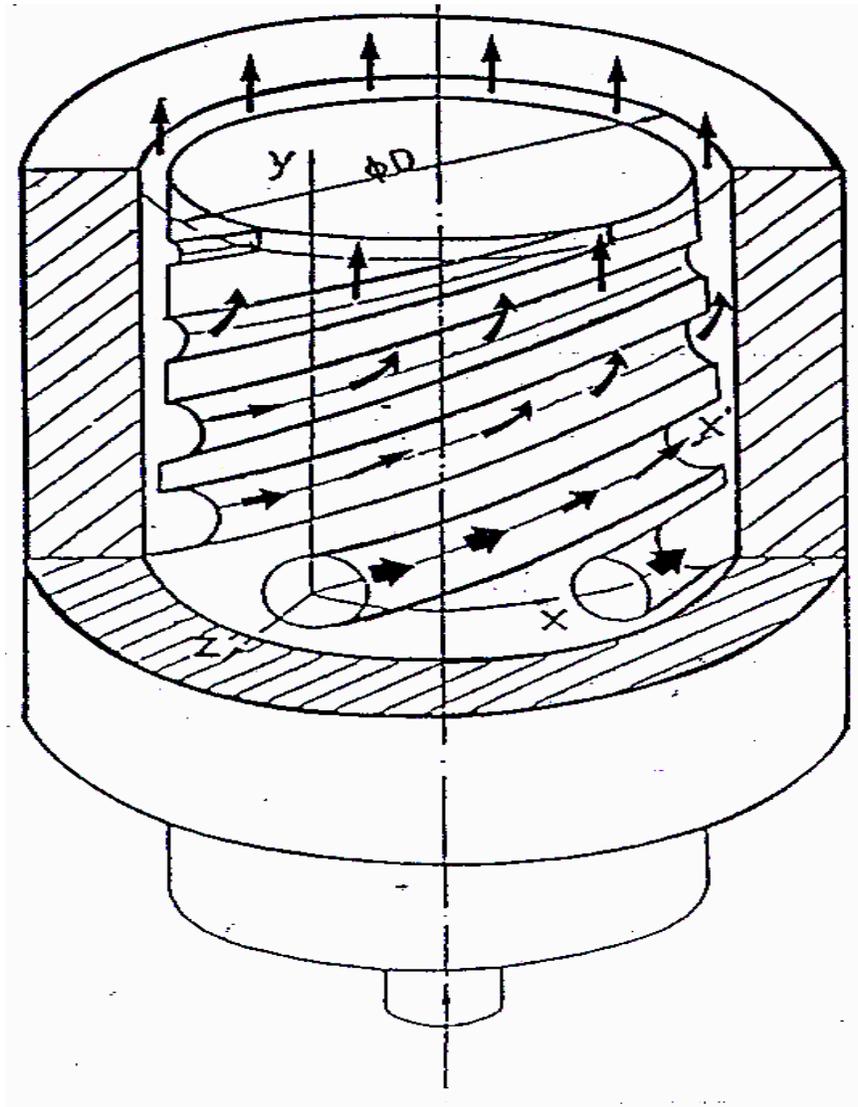


圖 1 中心入料式螺旋心軸模頭構造圖

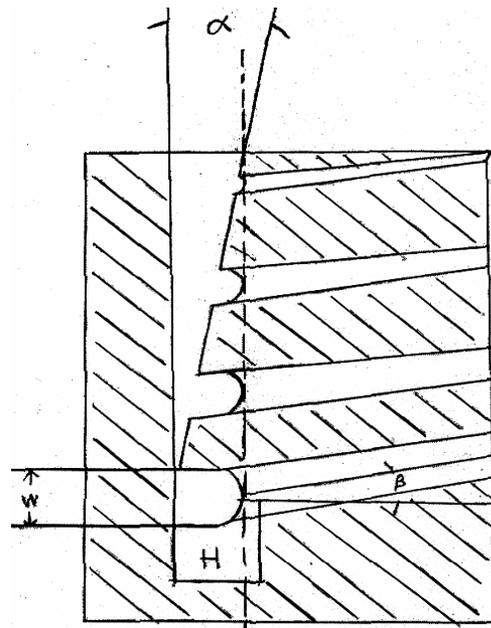


圖 2a 傳統螺旋式心軸模頭構造圖

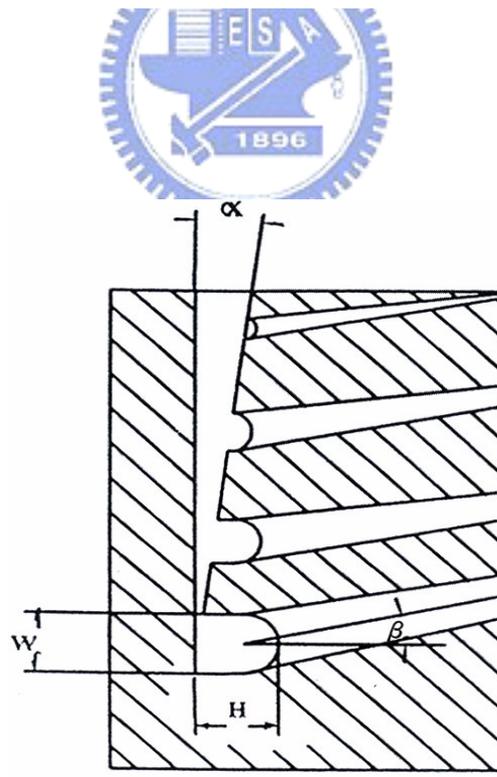


圖 2b 改良式螺旋式心軸模頭構造圖

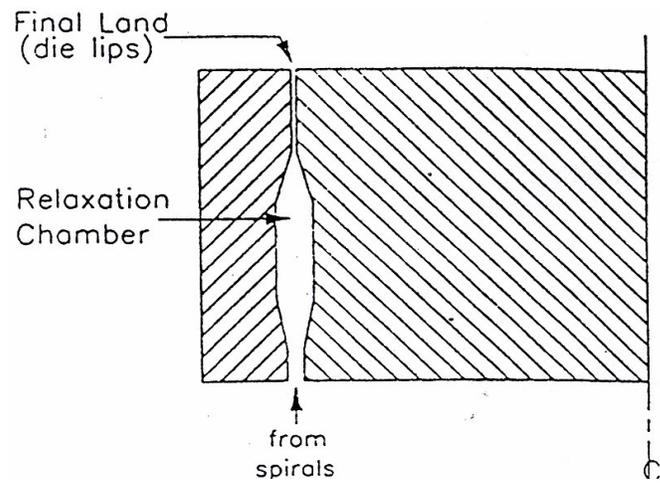


圖 3 鬆弛室和模唇之構造



圖 4a 多層中心入料式螺旋式心軸模頭

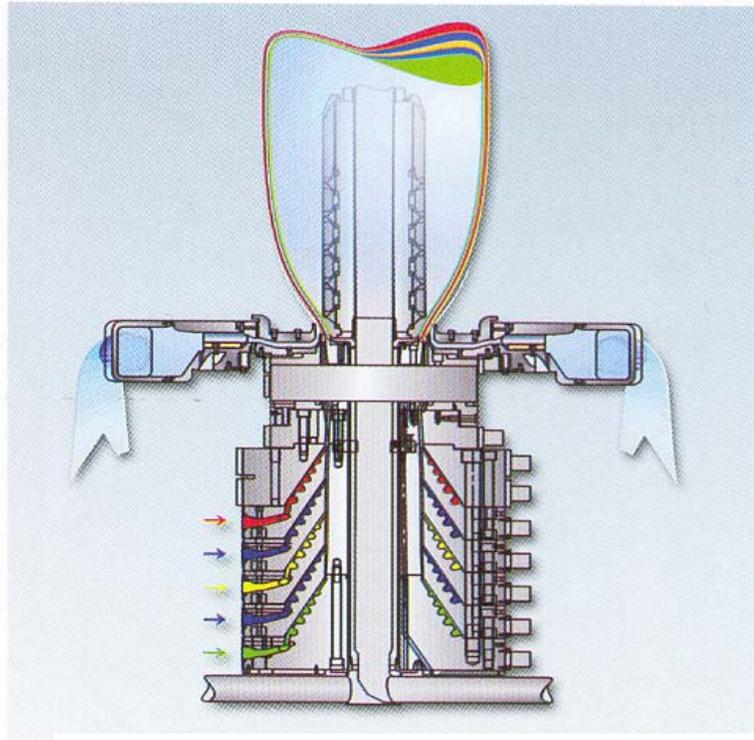


圖 4b 多層側邊入料式螺旋式心軸模頭

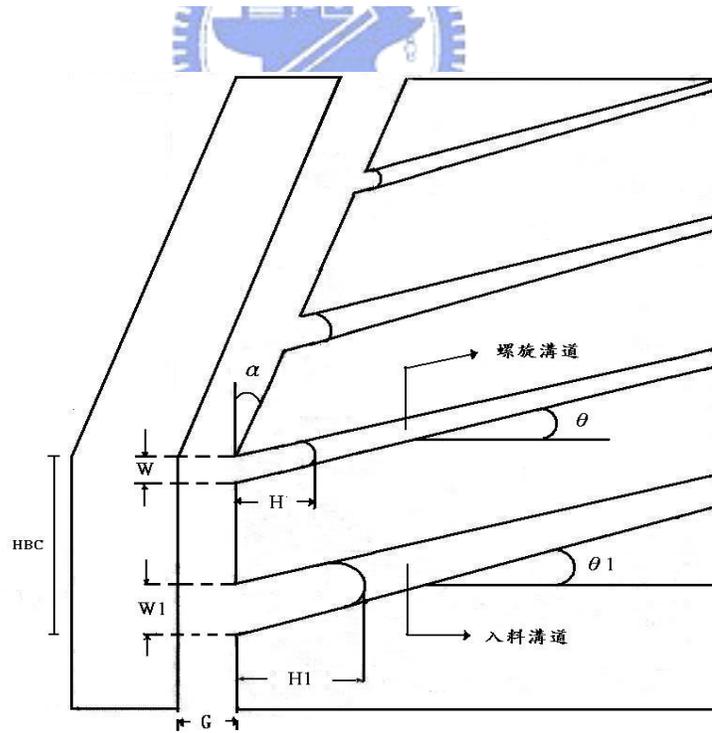


圖 5 單層側邊入料式螺旋式心軸模頭示意

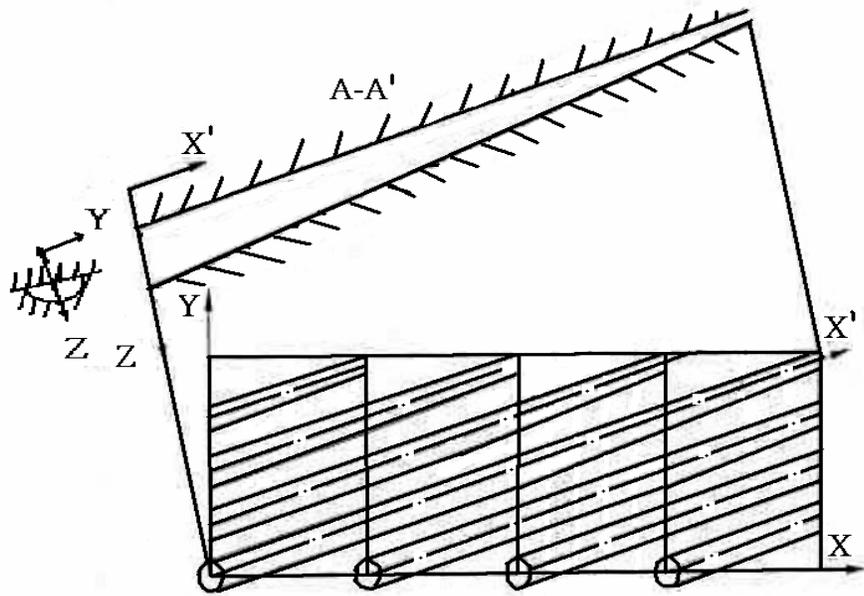


圖 6a 中心入料式螺旋式心軸模頭

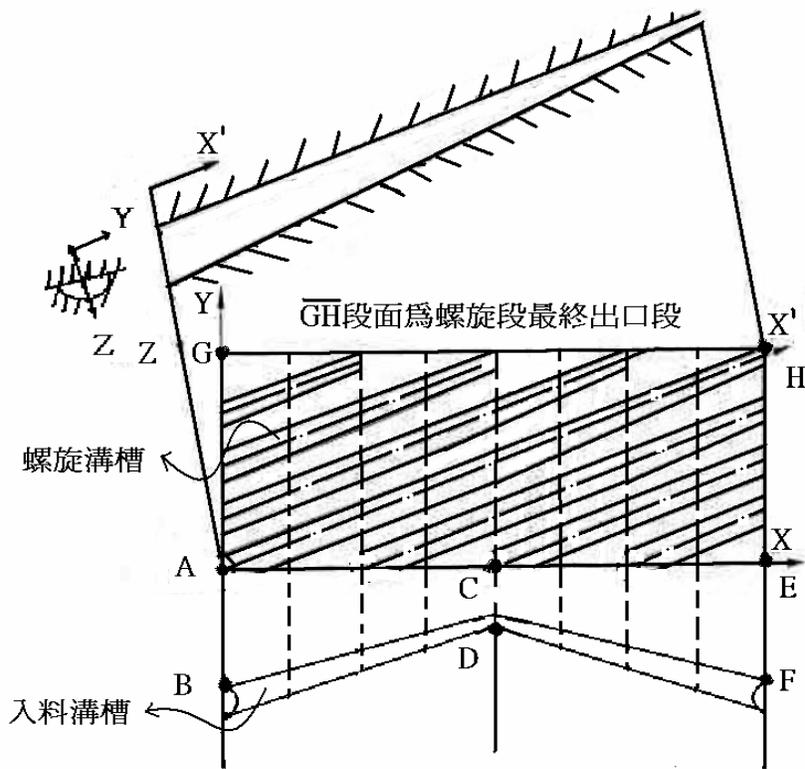


圖 6b 側邊入料式螺旋式心軸模頭

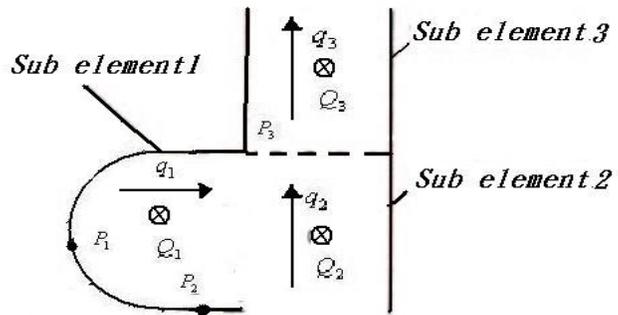
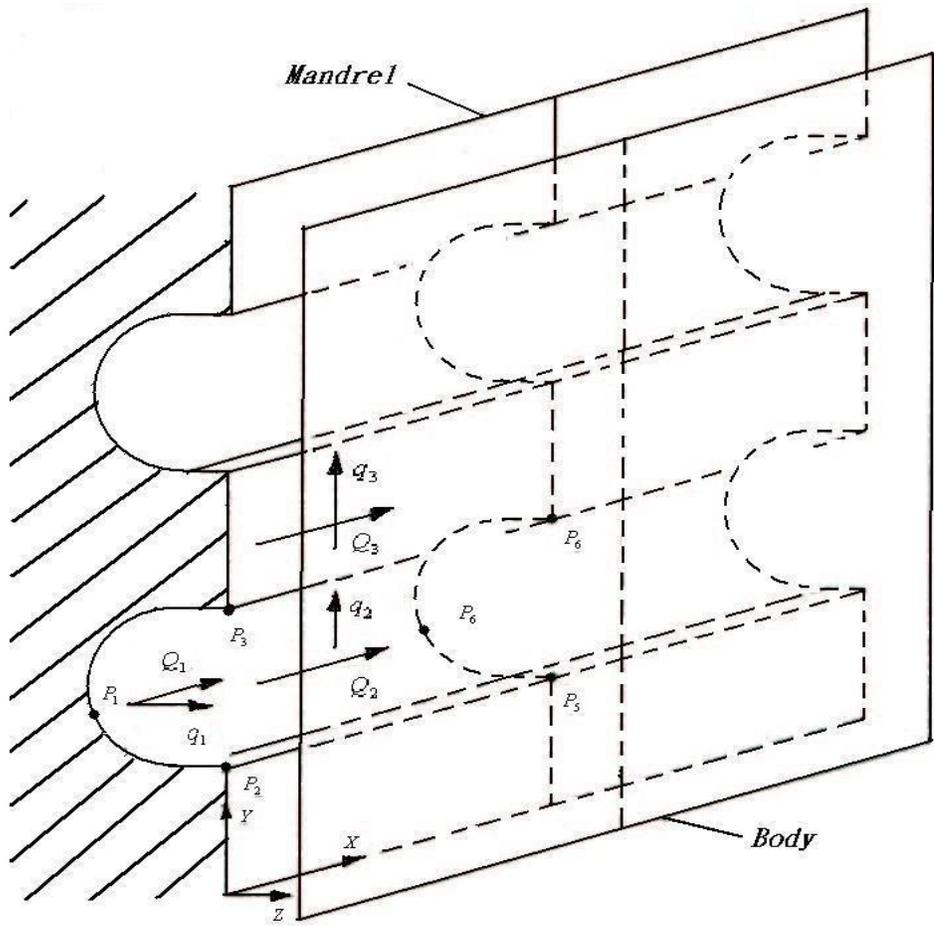


圖 7 子單元的透視圖與側視圖

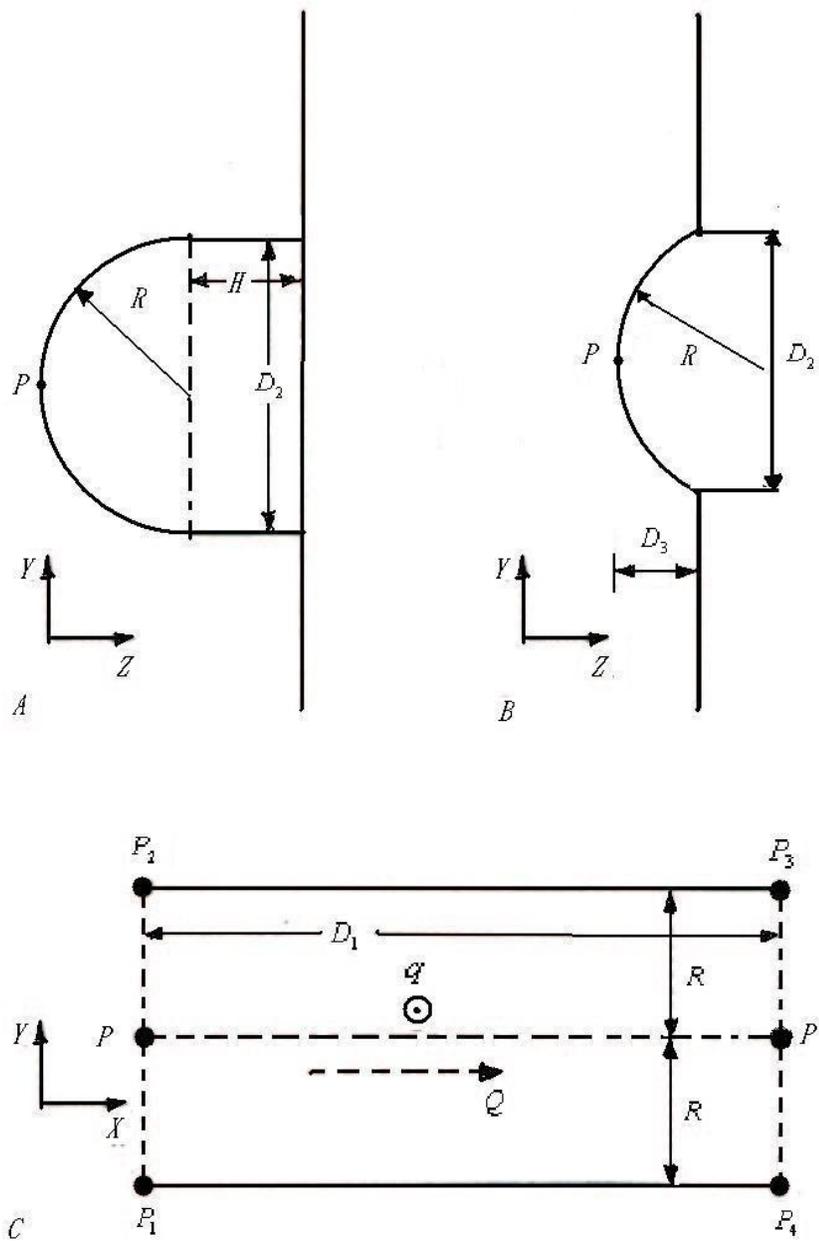


圖 8 子單元一在(A)溝道前段, 在 Y-Z 平面; (B)溝道後段, 在 Y-Z 平面; (C)溝道在 X-Y 平面; 的幾何圖形

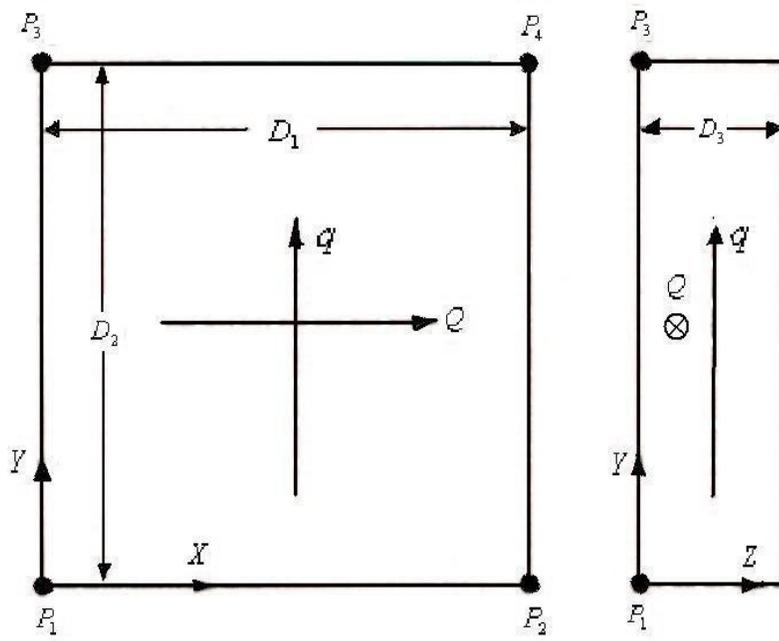


圖 9 典型子單元二, 子單元三分別在 X-Y 平面與 Y-Z 平面的幾何形狀



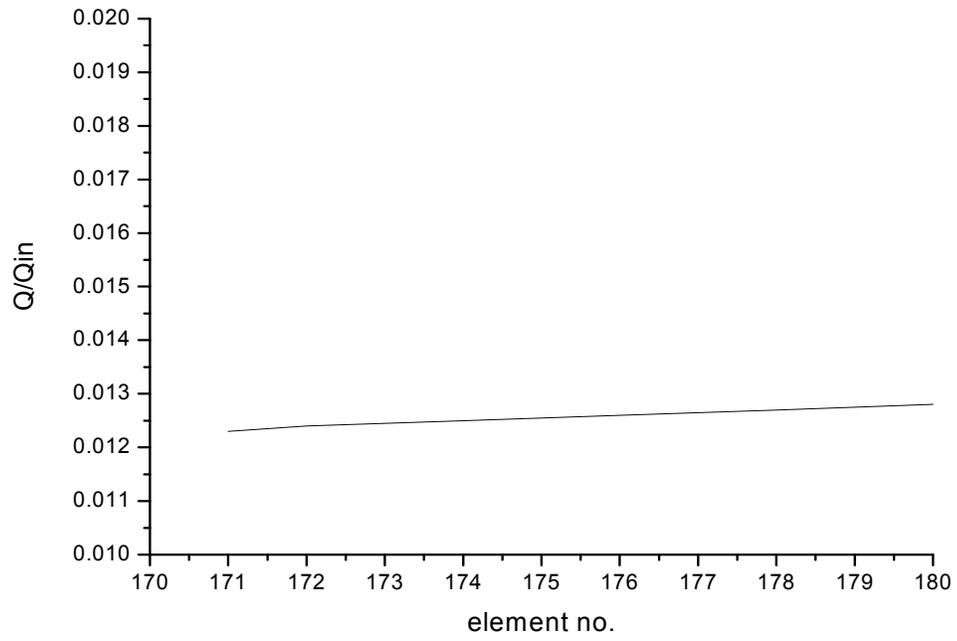


圖 10 膠料出進料溝時的 X 方向體積流率分佈

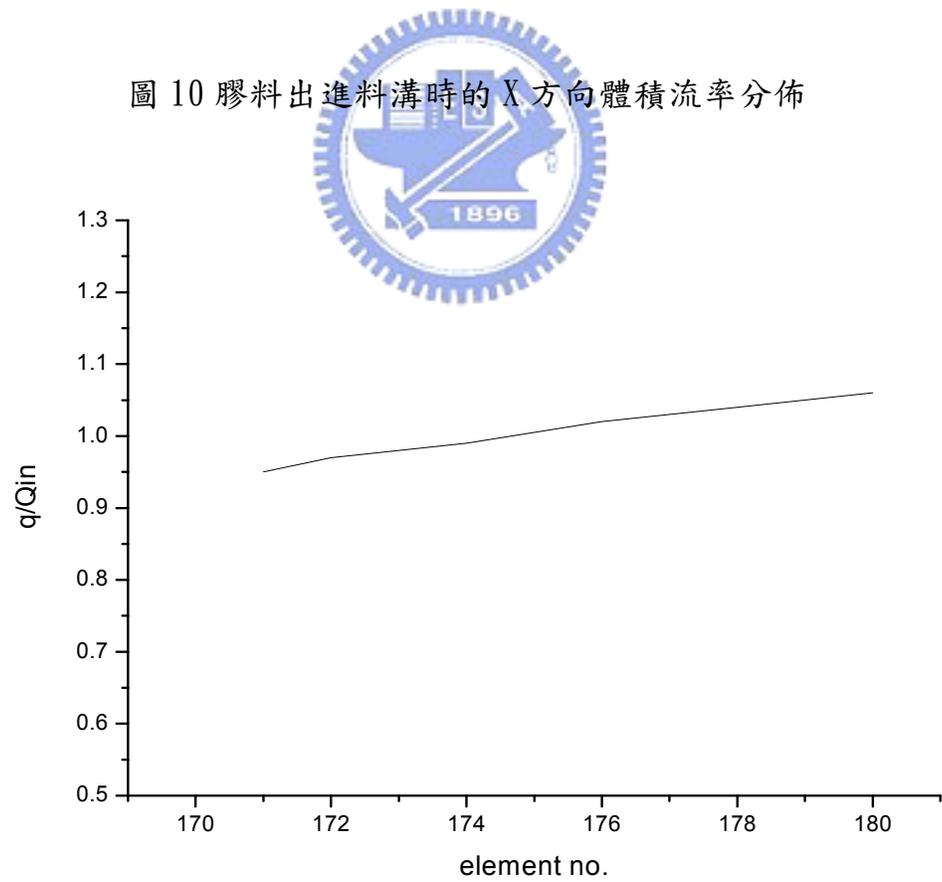


圖 11 膠料出進料溝時的 Y 方向體積流率分佈

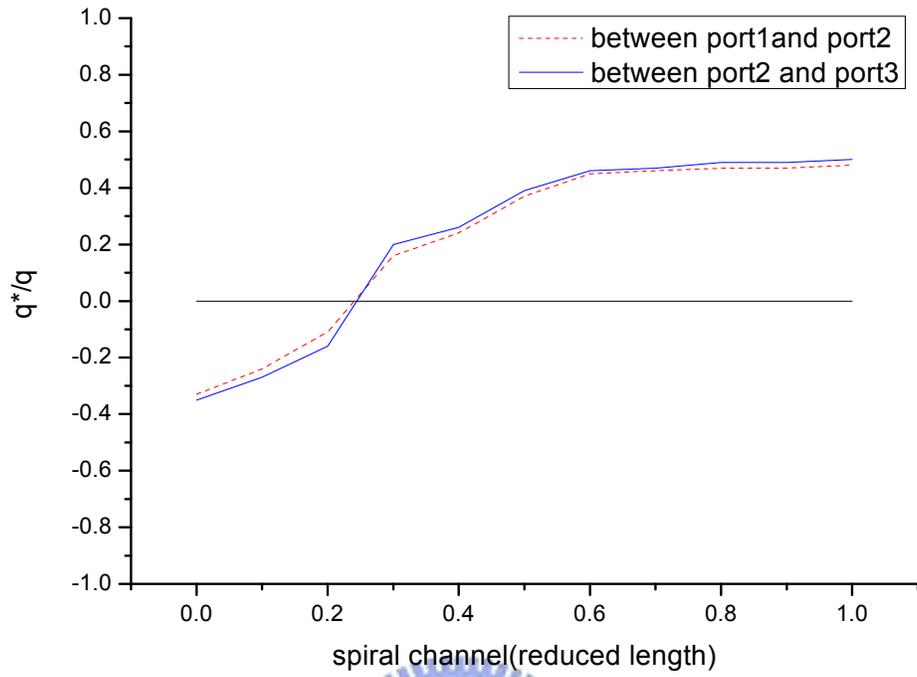


圖 12 進料溝 UNI=0.909，膠料在螺旋溝道的流量分布情形

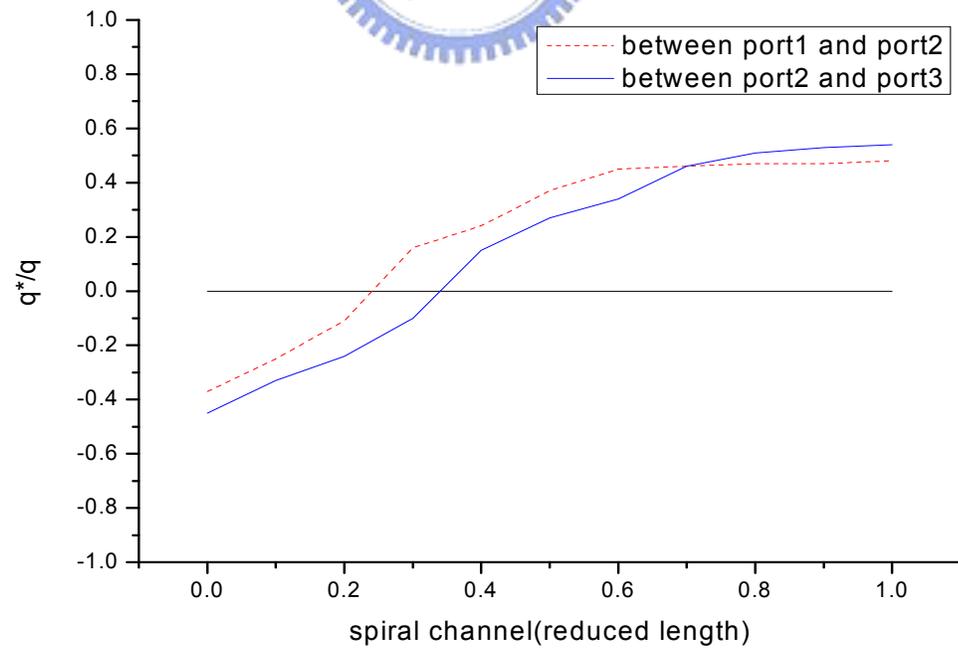


圖 13 進料溝 UNI=0.822，膠料在螺旋溝道的流量分布情形

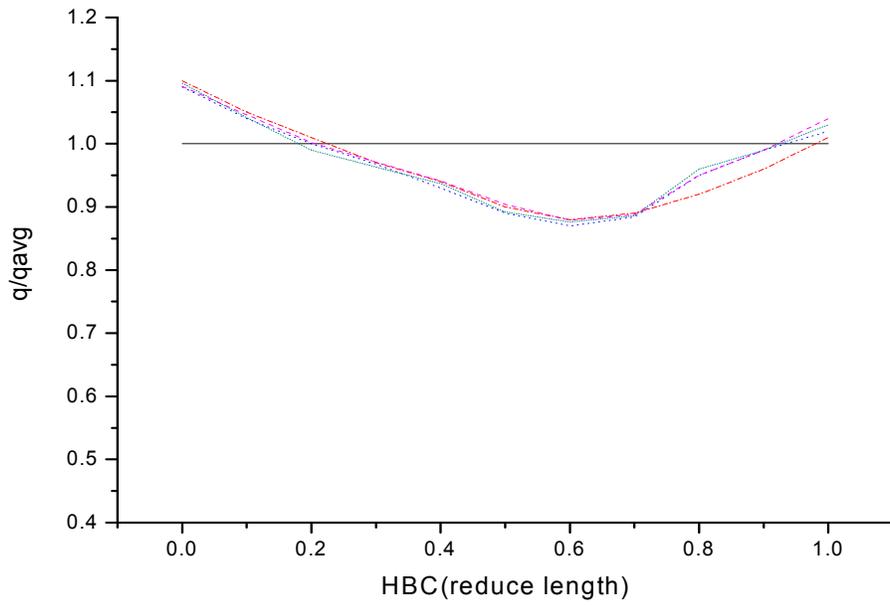


圖 14 膠料在進料溝時的流量分布情形

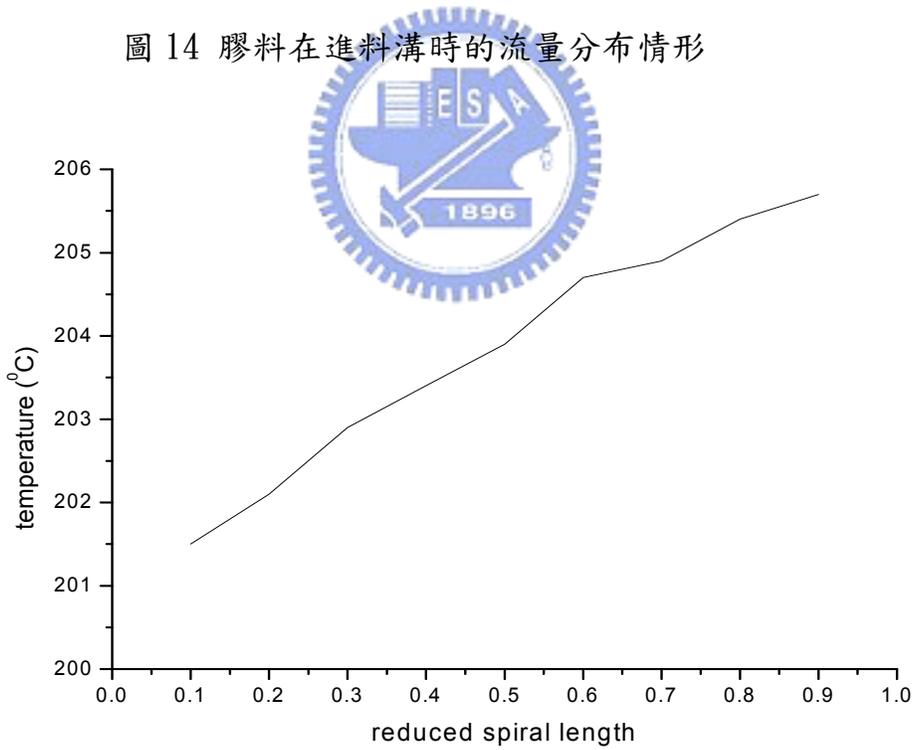


圖 15 非等溫情況下，膠料在模頭內沿著螺旋溝道的溫度分布

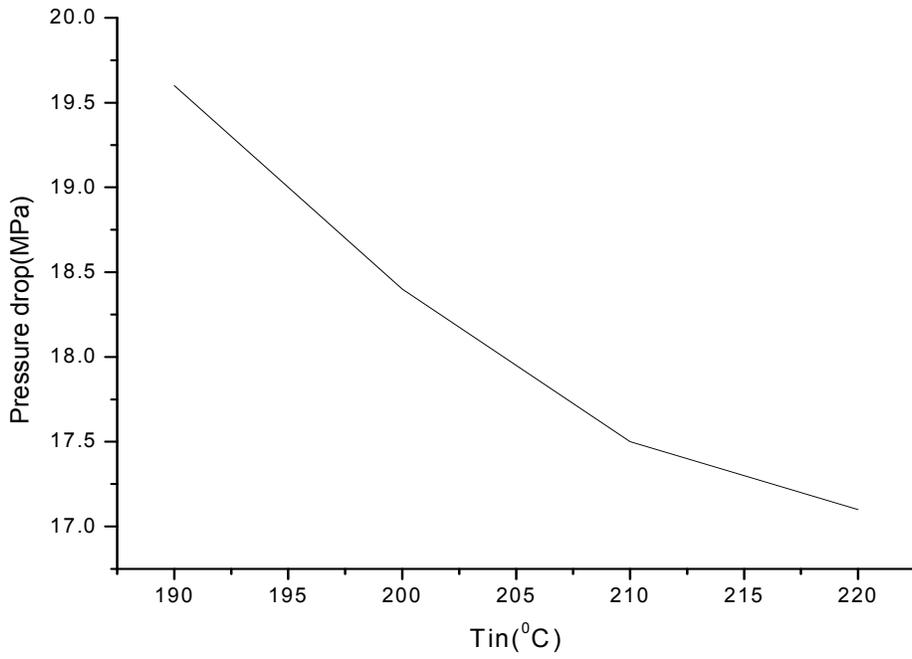


圖 16 改變進料溫度對壓降的影響

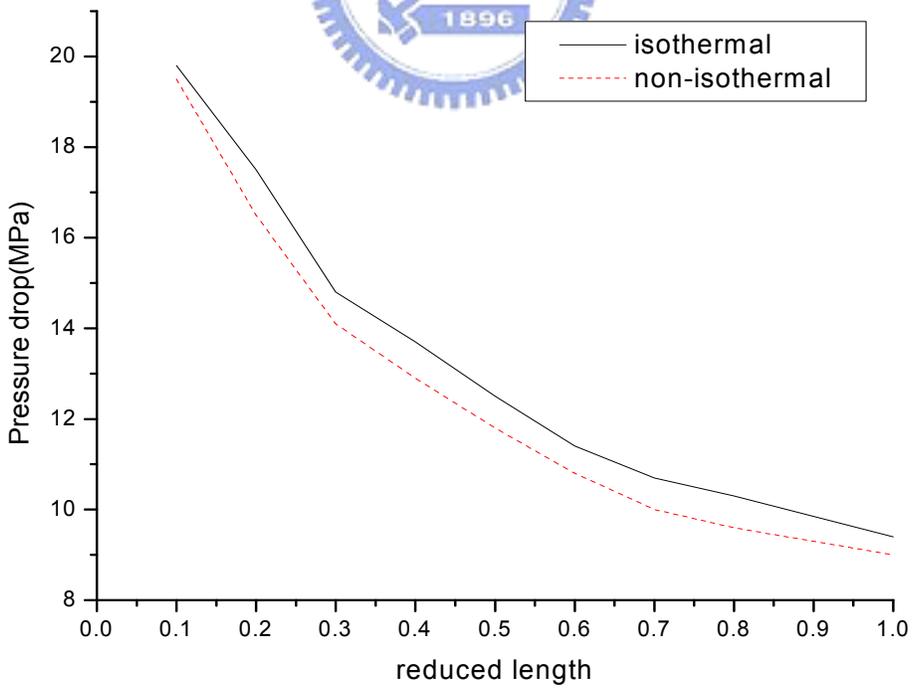


圖 17 等溫與非等溫的壓力降比較圖

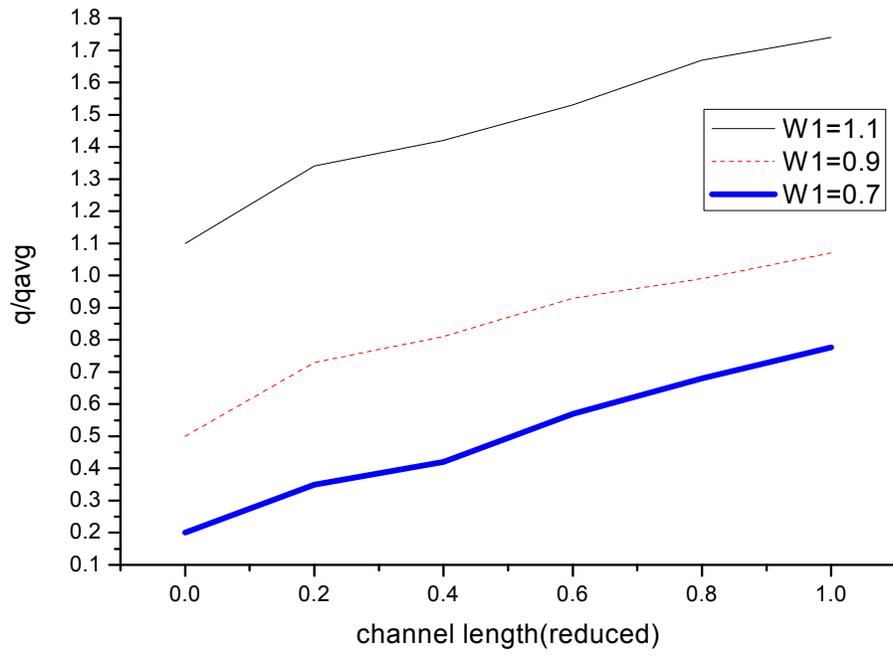


圖 18 膠料在進料溝溝道在不同起始溝寬下的流量溢流情形



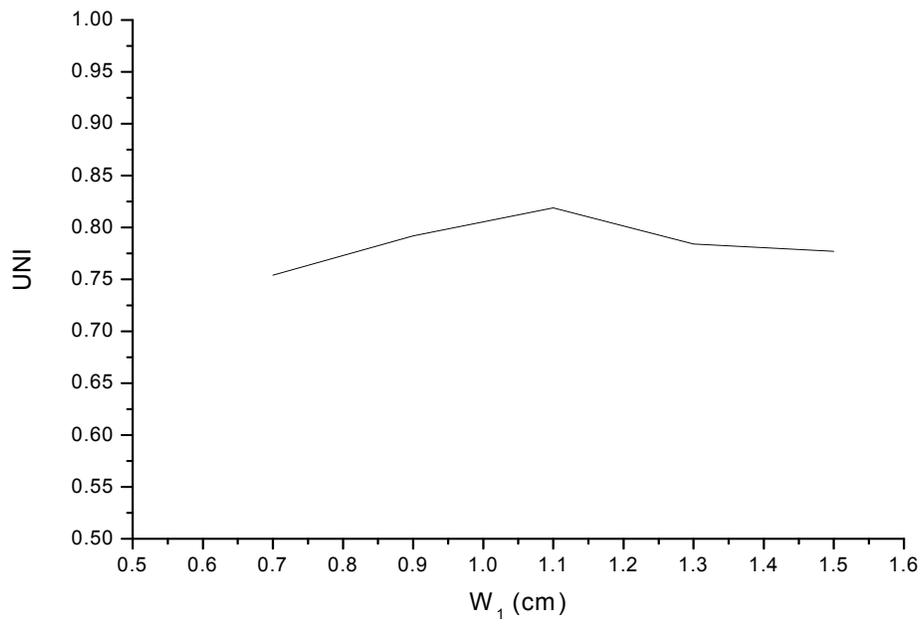


圖 19 進料溝起始溝寬與流量均勻度之關係

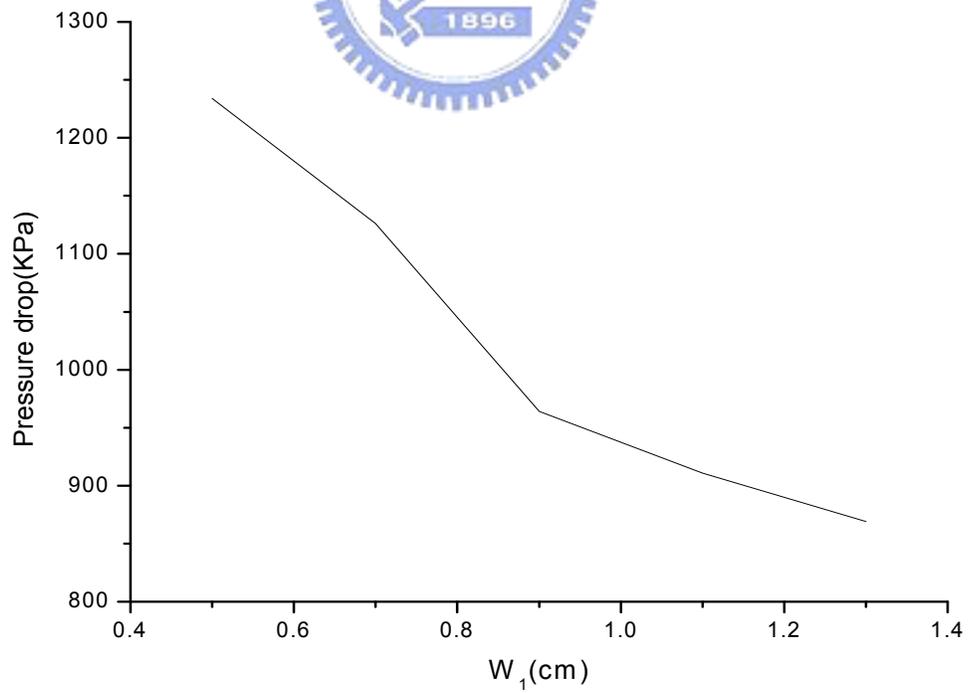


圖 20 進料溝起始溝寬與壓降之關係

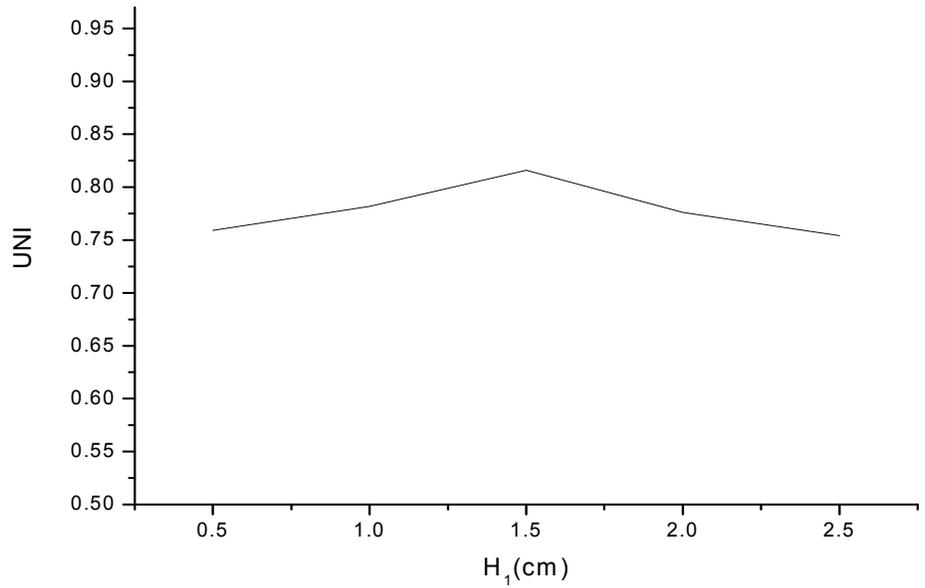


圖 21 進料溝起始溝深與流量均勻度之關係

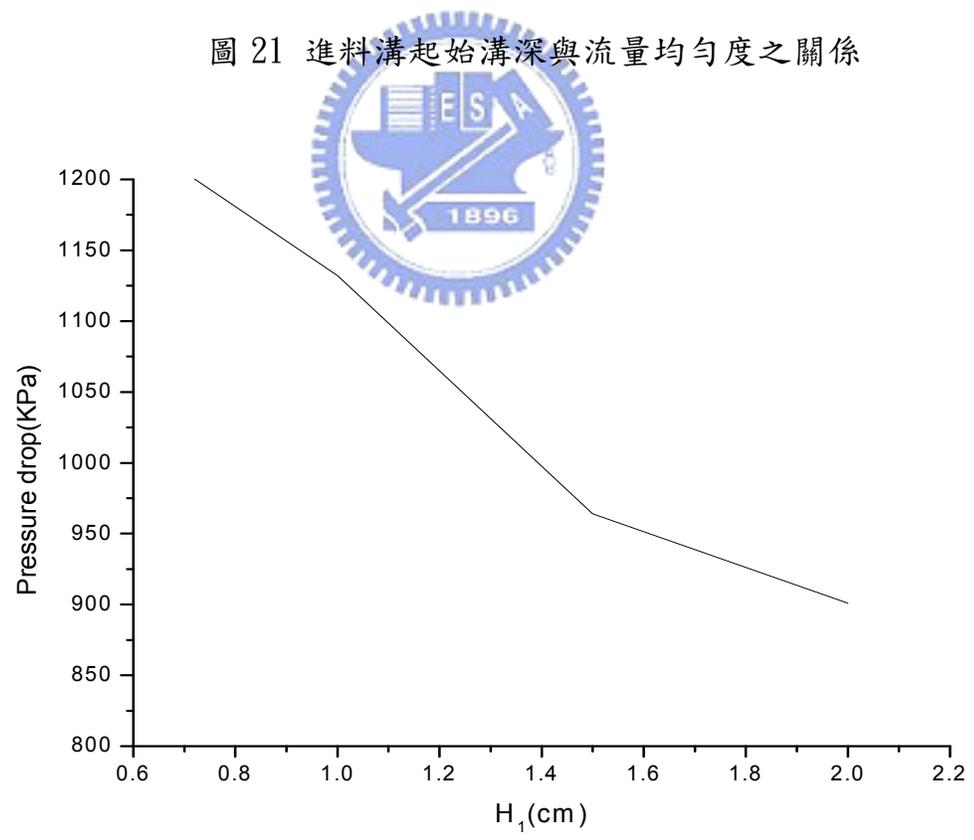


圖 22 進料溝起始溝深與壓降之關係

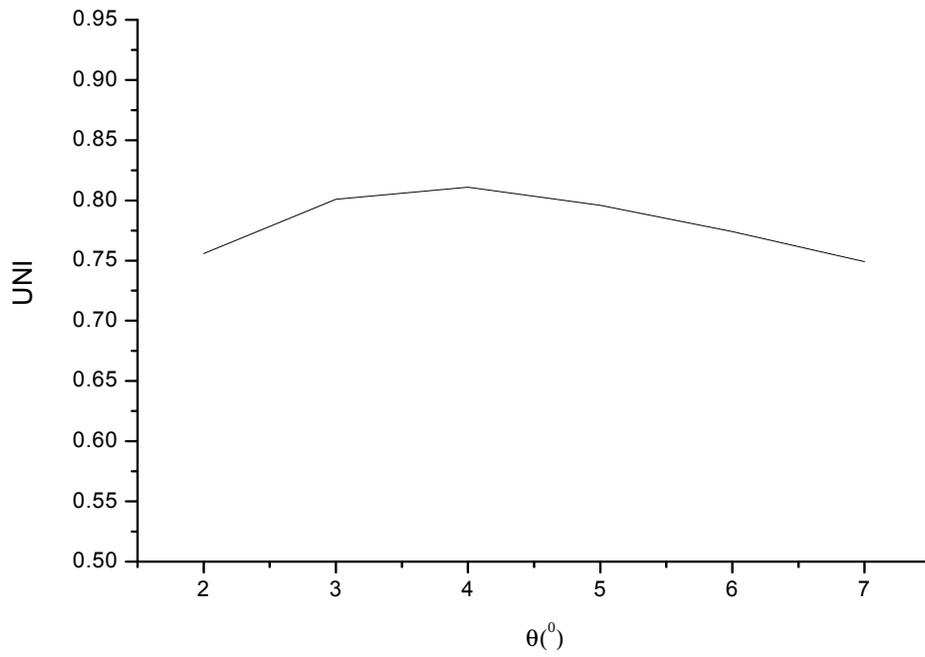


圖 23 進料溝螺旋角與流量均勻度之關係

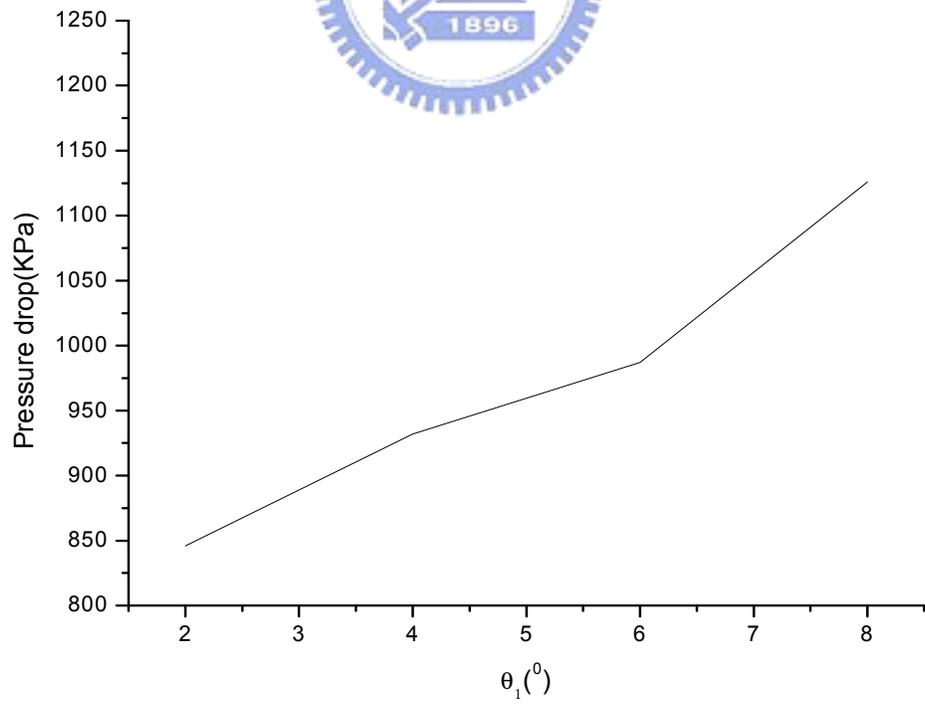


圖 24 進料溝螺旋角與壓降之關係

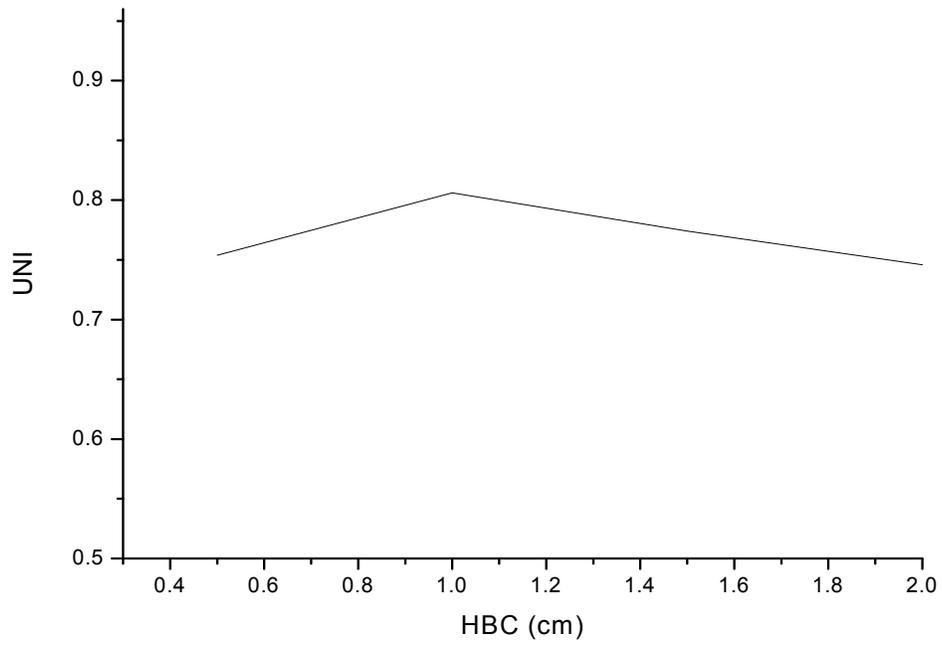


圖 25 進料溝 HBC 與流量均勻度之關係

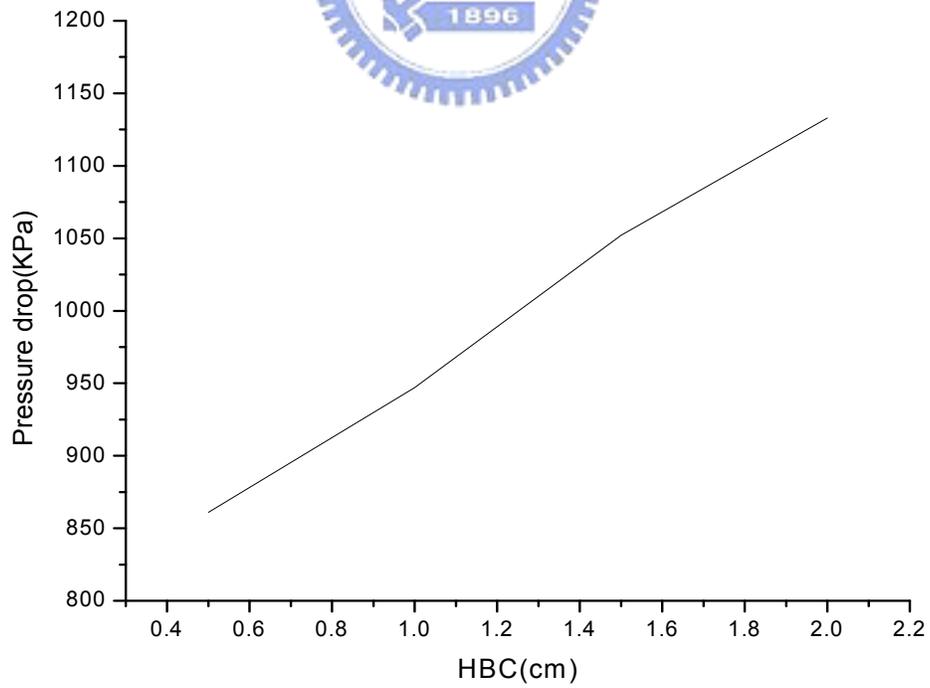


圖 26 進料溝 HBC 與壓降之關係

参考文献：

1. Mavridis H, “A Model of Polymer Melt Flow in Spiral Mandrel Dies” , Journal of Reinforced Plastics and Composites 18 (10): 906-913 1999.
2. M. Zatloukal, C. Tzoganakis, J. Perdikoulis, P. Saha “Numerical Simulation of Polymer Flow in Flat Spiral Dies” Polymer Engineering and Science , October 2001, Vol. 41, No. 10
3. Hiroyuki Higuchi, Mikio Sato, Kiyohito Koyama, “Effect of Wall Slip on Blown Film Thickness Distribution” Polymer Engineering and Science , November 2003, Vol. 43, No. 11
4. Product Bulletin, Basell Polyolefins Corp.
5. J. Parnaby, G. A. Hassan, A. A. Helmy and A. Ali, Plast. Rubber Process, 1(4), p. 303, 1981.
6. B. Proctor, SPE J., 28, p. 34, 1972.
7. J. Perdikoulis, C. Tzoganakis & J. Vlachopoulos, “Flow visualization and residence time distribution in spiral mandrel dies” , Plastics and Rubber Processing and applications vol. 11, NO. 1, 1989.
8. P. Saillard and J. F. Agassant, Polym. Process. ,2(4) p.37, 1984.
9. D. M. Kalyon, J. S. Yu and C. Du, Polym. Process. Eng., 5, p. 179, 1987.
10. C. Rauwendaal, Polym. Eng. Sci., 27, P. 186, 1987.

11. J. Vlcek, V. Kral and K. Kouba, *Plast. Rubber Process.* , 4(4), p. 309, 1984.
12. J. Vlcek, J. Vlachopoulos and J. Perdikoulis, *Int. Polym. Process.*, 2, p. 174, 1988.
13. J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *Adv. Polym. Technol.*, 7, p. 333, 1987.
14. J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *Adv. Polym. Technol.*, 10, p. 111, 1990.
15. J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *J. Plastic Film & Sheeting*, 5, p. 18, 1989.
16. E. J. Fahy and P. W. Gilmour, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 23, p. 1, 1986.
17. K. Benkhoucha and D. H. Sebastian, *Proc. ANTEC*, p. 1774, 1989.
18. Chung-Ching Huang, *Polym. Eng. Sci*, 38, p. 573, 1998.
19. D.J.Coyle and J.perdikoubias, paper presented at the 7th annual meeting of the Polymer Processing society, Hamilton, Ontario, Canada April (1991)
20. D.J. Coyle and J. perdikoubias, *Proc. Spk ANTKC Montreal, Ouebec, Canada*, p.2245, May, 1991

21. Y. Wang, Polym. Eng. Sci., 31, 204 (1991).
22. Y. Wang, Polym. Processing, 4, 311 (1991).
23. YEH WANG and HOH-YIH TSAY, “Computer-Aided Geometric Design of the Perform Dies for Flat Film Extrusion Through 3-D Finite Element Flow Analysis” , Polymer Engineering and Science, Vol. 34, NO. 13 , Mid-July 1994.
24. S. Y. Na and D. H. Kim, Journal of chemical Engineering of Japan, 29, 1 (1996).
25. J. Y. Chiou, P. Y. Wu, C. C. Tsau and T. J. Liu, Polym. Eng. Sci., 38, 49 (1998).
26. W. A. Gifford, Polym. Eng. Sci., 37, 315 (1997)
27. 許振鵬, “吹袋模頭之流動模擬” ,國立交通大學,碩士論文,民國 79 年
28. 羅大偉, “吹袋模頭之電腦輔助設計” ,國立交通大學,碩士論文,民國 86 年
29. 陶文鈺, “吹膜製程之螺旋心軸模頭之最佳化設計” ,國立交通大學,碩士論文,民國 90 年
30. 黃俊欽, “共擠壓多層吹膜模頭的介紹” ,塑膠資訊學,NO.71, p.56,2002.

31. 蘇朝墩, “品質工程”, 中華民國品質學會發行, 民國 91 年
32. 陳劉旺, 丁金超, “高分子加工”, 高立圖書有限公司出版, 民國 88 年 1 月 1 日四版六刷

