

# 第一章 緒論

## 1.1 發泡產品之簡介

塑膠發泡產品由於其具有質輕、隔音、隔熱、能量吸收、耐衝擊吸收、熱/化學阻抗、電阻抗、低介電常數等特性，因此廣泛應用於工業及民生用途上。

而塑膠發泡依特質方面可分為軟質發泡及硬質發泡，依形狀方面又可分為片材、板材、管材、異形材；依重量區分又可分為低密度及高密度發泡；依氣泡尺寸又可分為一般發泡及微細發泡；而依製程又可分為押出成型及射出成型，在發泡產品中大部份的基材以 Polystyrene, Polyolefin, PET 及 PVC 為主。一般軟質的塑膠發泡產品均是屬於低密度發泡產品，其密度均在 0.1 之下，因此產品發泡比例很高，而要達到此種高發泡比例必須使用物理發泡劑。在押出製程中最重要的二個製程單元為螺桿及模頭。在高發泡比例的塑膠發泡產品，往往會造成材料出到模頭之後由於成長過度激烈，導致氣泡壁互相貫穿，使內部產生一些大氣泡造成產品機械強度不差不能使用，此為目前低密度發泡材料既要兼顧輕質又不要喪失太多的機械強度相當困難之處。

在膠料發泡過程中，氣泡的形成可區分成：成核 (nucleation)、氣泡成長 (bubble growth) 及氣泡合併 (bubble coalescence)。在押出發泡過程中若要達到微細發泡的目的，最重要的關鍵就是要產生很快速

的成核速率，而成核速率取決於膠料的過飽和度，因此要使膠料產生很大的過飽和度，則膠料系統的降壓速率必須很快，若降壓速率太慢則導致成核速率太慢。因此模頭設計上若模頭內部壓力(local die pressure)無法達到將所有氣體溶解在膠料內之飽和臨界壓力 $P_c$ 時則膠料會產生過飽和造成預發泡(prefoaming)的現象，這是所有押出發泡製程中所必須避免的，因為若膠料在模壓不足之下在模頭內部預發泡，因此膠料是在過飽和度不足之下產生成核，其成核速率會很慢，如此將會導致如前面所述的最後產品會產生一些數目少而且尺寸很大的氣泡在產品內部，造成產品機械強度顯著下降。

為了避免預發泡在模頭太早產生，最佳的模頭設計方式是使在模頭內開始達到飽和臨界壓力點儘量的靠近模頭。尤其是對於低密度軟性發泡產品，其使用的物理發泡劑的量較高，若模頭設計不當則預發泡現象更會在模頭內部提早產生，因此針對低密度之發泡押出製程，其模頭在靠近模頭出口處(亦即模唇，die land)會將流道深度加以壓縮造成一個壓縮的導角(taper)，以便增加模頭內部各點壓力使得其超過對應的飽和臨界壓力，一直到接近模頭出口處才由於壓力驟降導致膠料過飽和度在極短時間快速上升，造成很快的成核速率，因此產品最終的氣泡數目才會多而且尺寸會變小。但在模頭出口處附近流道深度亦不能過度壓縮，否則會造成模壓太高不但導致膠料押出量下降，而且會

造成膠料溫度過高使得膠料在出模頭後發泡太過激烈產生氣泡合併導致一些大氣泡在產品內部產生，使得產品機械性質變差。

因此在管狀押出模頭最佳化設計上所需考慮的因素如下：

(1)避免預發泡(prefoaming)在模頭太早發生：

讓膠料在模頭內部各點的壓力均大於開始產生發泡的飽和臨界壓力 $P_C$ ，亦即在設計上儘量使膠料開始要產生過飽和的臨界點儘量接近模頭出口。

(2)膠料在模頭出口處各點的流量及平均溫度必須均一。

(3)膠料在模頭出口沿著整個厚度方向溫差不可太大，如此才可避

免產生發泡產品在橫斷面產生氣泡大小不均之現象。

(4)設計出來的模頭總壓力降不可太高。

而螺旋軸心模頭(Spiral Mandrel Die)是最廣為製造此類產品的模頭，其構造如圖 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軸心部分，又稱內模頭，螺旋溝寬度與深度沿著螺旋溝方向逐漸變小，內外模頭間的狹縫稱為間隙(Gap)，外模頭常有一傾斜角之設計，稱為軸心傾斜角。螺旋溝上揚的角度稱為螺旋角。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。

在螺旋溝分布區域之後，還有鬆弛室及模唇，其構造如圖 2 所示。

鬆弛室由於流道擴大，可以鬆弛(relax)熔融膠料，因而減低熔膠經過螺旋溝及間隙後所產生的應力不均，而減少出模膨脹(die swell)。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，所以可產生高切變率(shear rate)和流動阻力並有穩壓的效果，故可維持流量均勻。

## 1.2 文獻回顧

### part 1. 發泡部份


在 1979 年，MIT 機械系教授 Nam P Suh 應美國工業界的需求開始研發微細發泡 (microcellular foam) [1]。Professor Suh 主要觀念是當發泡產品內部含有許多微細孔洞，這些孔洞的尺寸若小於材料本身已經存在的內部缺陷大小 (preexisting flaws) 時，機械性質即可大幅提昇。這些微細孔大小約在 10 $\mu$ m 左右。根據近年來有關微細發泡的研究報告 [1] 顯示微細發泡產品其 impact strength、韌性及耐疲勞等機械特性與未發泡產品相比均提升 5 倍以上。此外其尚具有低介電常數、低熱傳係數及高熱安定性等特性。許多關於非定型高分子 (amorphous polymer) 發泡的研究也陸續被提出，如 polystyrene (PS) [2]、poly(methyl methacrylate) (PMMA) [3]、polycarbonate (PC) [4] 等。對於會結晶的高分子，Dorouduani 等人 [5] 則提出結晶會對 CO<sub>2</sub> 的溶解及擴散會有不利的影響，因此高結

晶性的高分子通常會產生不規則的發泡型態。而對於解釋高分子的各種現象與性質，自由體積模型(free volume model)一直是一個相當重要的概念。此概念不論是針對熔融的高分子(polymer melt)、溶液(solution)或混煉的高分子(blend polymer)都十分適用[6]。而此概念也開始應用在 高分子與氣體的溶液上。Blyler 與Kwei 首先提出氣體溶解於高分子時會造成黏度下降的現象[7]，他們根據Doolittle's equation[8]進行分析討論。Lee等人[9]則探討有關PE/PS blends加入scCO<sub>2</sub>時的押出現象，提出scCO<sub>2</sub>能有效降低黏度。Kwag 等人[10]更是發現在 150°C、CO<sub>2</sub>溶解 4.5wt% 情形下，PS的黏度下降了一百倍。

而近年來發泡劑也逐漸由化學發泡劑—如azodicarbonamide(AZ)改為物理發泡劑—如supercritical carbon dioxide(scCO<sub>2</sub>)，原因是化學發泡劑容易在反應後產生殘留[11]，此殘留往往影響最後產品的性質與外觀。而scCO<sub>2</sub>不僅不會有殘留的現象，且較為安全，對環境也無甚影響；同時又擁有如液體般的密度及如氣體般的黏度的雙重性質[12]，此雙重性質能使CO<sub>2</sub>分子快速擴散到高分子中。陳明宏學長[13]則探討聚氯乙 烯其加工-發泡結構-機械性質之關係，以改善聚氯乙 烯之熔融強度及易脆的缺點。

## part 2. 螺旋式心軸模頭部份

許多關於螺旋式心軸模頭流動模擬的研究，其流動模式是根據整體參數法(Lumped parameter method)[14]所建立，其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[15]最早利用此一模式分析泛牛頓流體(Generalized Newtonian Fluid)的等溫流動。隨後Saillard 和 Agassant[16]推廣至非等溫的流動分析，而 Kalyon[17]等人進一步應用到黏彈性流體的流動分析。Rauwendaal[18]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[19,20]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[21]等人將這些模式加以相互比較，而且以實驗驗證[22,23]。Fahy 和 Gilmour[24]以有限元素法(Finite element method)解得壓力降和流率，而 Benkhoucha[25]等人則以流動分析網格法(Flow analysis network)分析流場。

許振鵬[26]學長根據 Vleck 等人所建立的有限體積法模式，探討一次改變一個模頭設計參數對流量均勻度的影響，而高雄應用科技大學黃俊欽[27]老師，則引用田口實驗法則，利用 L9 直交表以建立最佳的模頭幾何形狀。羅大偉[28]學長引用田口實驗法則，利用 L9 直交表搜尋不同膠料(LDPE、HDPE 及 PP)的最佳幾何形狀，並檢視其非等溫時

的性能表現。謝維賢[29]學長利用 L9 直交表搜尋 m-PE 的最佳模頭幾何形狀，並探討加上模唇段之後的性能表現。

過去雖然有不少高分子發泡押出的研究被提出來，但是大部份都集中在討論發泡孔洞的大小與分佈情形，或是單純討論高分子在加入氣體時對黏度的影響，對於押出製程，模頭內的發泡位置與壓力則很少被討論到。本文即是以數學模式直接預測含有溶解氣體但不發泡的膠料其剪切黏度  $\eta$ ，並以此為依據，再以計算流體力學建立其管狀模頭內的流動模式，並配合田口法引入較多設計參數，以流量均勻度及混合度為指標搜尋最佳模頭幾何形狀，並檢視其在非等溫狀況及加入模唇之後性能表現。建立一套供以使用物理發泡劑作為低密度發泡用的一套管狀模頭設計及分析軟體，以去進行此種模頭最佳化設計。

## 第二章 理論及研究方法之建立

### 2.1 系統假設

本論文是以下列的假設條件進行模擬：

- (1) 熔膠在模頭內之流動已達穩定狀態(steady state)。
- (2) 熔膠為不可壓縮流體(incompressible fluid)。
- (3) 熔膠之黏度與切變率關係符合冪次定律(Power Law model)。
- (4) 模頭內的流動均為普瓦醉(Poiseuille)流動。
- (5) 忽略溝道曲面的影響。

將模頭展開成 X-Y 平面，如圖 3 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(gap)及螺旋溝的深度則視為 Z 方向。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六個區域(螺旋溝數目)，其流動情形均一模一樣，是故可以一個區域進行分析。沿著 X 方向，將流場分割成數個單元(element)，再將每個單元細分成四個子單元(subelement)如下：

- (1) 子單元一為溝槽部分。
- (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。
- (4) 子單元四為鬆弛區與模唇部份。

圖 4 為單元構造圖。



## 2.2 理論基礎

### 2.2.1 建立含發泡劑但不發泡的膠料其剪切黏度 $\eta$ 之預測模式

假設熔膠的黏度  $\eta$  與剪切率的關係符合 Cross model：

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

其中  $\eta$  及  $\eta_0$  分別為剪切黏度及零剪切黏度 (zero-shear rate viscosity)， $\dot{\gamma}$  是剪切率， $n$ 、 $\tau$  是流變參數，在高剪切率下，式(1)可簡化為：

$$\eta(\dot{\gamma}) \cong \eta_0^n \left(\frac{\dot{\gamma}}{\tau}\right)^{(n-1)} \quad (2)$$

根據 Doolittle[8] 的理論，其含有溶解氣體但不發泡的膠料其自由體積  $f(T, P, W_g)$  與  $\eta_0$  之關係可由下列表示：

$$\eta_0 = A \exp\left(\frac{B}{f(T, P, w_g)}\right) \quad (3)$$

$W_g$  是氣體溶解在膠料中的體積分率。

將 (3) 式帶入 (2) 式，取自然對數後可得：

$$\begin{aligned} \ln(\eta) &= (n-1) \ln \dot{\gamma} + \frac{nB}{f(T, P, w_g)} + n \ln A - (n-1) \ln \tau \\ &= C_1 \ln \dot{\gamma} + \frac{C_2}{f(T, P, w_g)} + C_3 \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $C_1 = (n-1)$

$$C_2 = nB$$

$$C_3 = [n \ln A - (n-1) \ln \tau]$$

上式(4)中  $n$ ， $\tau$ ， $A$  及  $B$  只隨純高分子(neat polymer)膠料而變。

至於自由體積分率  $f(T,P,W_g)$  可根據 Stern 及 Fang[30,31] 等人的理論加以

求得如下式：

$$f(T,P,w_g) = \frac{V(T,P,w_g) - V^0(w_g)}{V(T,P,w_g)} \quad (5)$$

$$= f_r + \left( \frac{\partial f}{\partial T} \right)_{P_r, T_r, w_{gr}} (T - T_r) + \left( \frac{\partial f}{\partial P} \right)_{P_r, T_r, w_{gr}} (P - P_r) + \left( \frac{\partial f}{\partial w_g} \right)_{P_r, T_r, w_{gr}} (w_g - w_{gr})$$

$$= f_r + (1 - f_r) \alpha (T - T_r) + (1 - f_r) \beta (P - P_r) + \phi (w_g - w_{gr}) \quad (6)$$

其中：

$V(T,P,W_g)$  為溶解氣體但不發泡的膠料(氣體重量分率  $W_g$ ) 在溫度  $T$ ，壓力  $P$  之下的比體積

$V^0$  為氣體分子與高分子所佔據的體積(specific occupied volume)

$f_r$  為參考狀態下 (參考溶解氣體重量分率  $W_{gr}$ ，參考溫度  $T_r$ ，參考壓力  $P_r$ ) 的自由體積分率

$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P_r, w_{gr}}$  為自由體積熱膨脹係數

$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_{T_r, w_{gr}}$  為自由體積等溫壓縮係數

$\phi$  是氣體膨脹係數(gas expansion coefficient)

在以大氣壓力及氣體溶解度為 0(純的高分子亦即  $W_{gr}=0$ ) 做為參考狀態

式(6)簡化成下式

$$f = f_r + \alpha(1-f_r)(T-T_r) + \beta(1-f_r)(P-P_r) + \phi w_g \quad (7)$$

式(4)與式(7)中的  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $f_r$ 、 $P_r$ 、 $T_r$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\psi$  等參數值，Ohshima

等人[32]已計算出其值，列於表 1。

將已知的  $f_r$ 、 $P_r$ 、 $T_r$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\psi$  代入式(7)，再將  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  及式(7)計算

出的  $f(T, P, W_g)$  代入式(4)，即可得黏度  $\eta$  與溫度  $T$ 、壓力  $P$  及氣體溶解在膠

料中的體積分率  $W_g$  的關係式。

## 2.2.2 兩無限平行板間之流動

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。

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：

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (8)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (9)$$

因為為全展開流動，所以 $-\frac{\partial P}{\partial x}$ 、 $-\frac{\partial P}{\partial y}$ 為定值。積分式(8)、(9)可得：

$$\tau_{zx} = -\frac{\Delta P}{\Delta x} z + c_1 \quad (10)$$

$$\tau_{zy} = -\frac{\Delta P}{\Delta y} z + c_2 \quad (11)$$

代入邊界條件(boundary condition)：

$$z=0, \tau_{zx} = 0 \quad (12)$$

$$z=0, \tau_{zy} = 0 \quad (13)$$

可得 $c_1 = c_2 = 0$

所以式(10)、(11)變為

$$\tau_{zx} = -\frac{\Delta P}{\Delta x} z \quad (14)$$

$$\tau_{zy} = -\frac{\Delta P}{\Delta y} z \quad (15)$$

若將 $\Delta$ 改定義為大減小，及前減後，則式(14)、(15)可改寫為

$$\tau_{zx} = \frac{\Delta P}{\Delta x} z \quad (16)$$

$$\tau_{zy} = \frac{\Delta P}{\Delta y} z \quad (17)$$

所以壁切變應力為

$$(\tau_{zx})_w = \frac{\Delta P}{\Delta x} \frac{D_3}{2} \quad (18)$$

$$(\tau_{zy})_w = \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{D_3}{2} \quad (19)$$

假設流體的黏度(viscosity)與切變率(shear rate)的關係符合 Cross

model，即

$$\eta(\dot{\gamma}) \cong \eta_0^n \left( \frac{\dot{\gamma}}{\tau} \right)^{(n-1)} = \frac{\eta_0^n}{\tau^{n-1}} \dot{\gamma}^{n-1} = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (20)$$

$$\text{其中 } \dot{r} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad (21)$$

$r_1$  為 X 方向的切變率

$r_2$  為 Y 方向的切變率

$r$  為總切變率

$$m = \frac{\eta_0^n}{\tau^{n-1}} \quad (22)$$

將式(20)代入式(16)、(17)，積分化簡可得 X 與 Y 方向的壁切變率

(wall shear rate)  $r_{1w}$ 、 $r_{2w}$  與平均速率  $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$  的關係：

$$r_{1w} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{D_3} \bar{v}_x \quad (23)$$

$$r_{2w} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{D_3} \bar{v}_y \quad (24)$$

$$r_w = \sqrt{r_{1w}^2 + r_{2w}^2} \quad (25)$$

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 $q$ ，則體積流率與平均速率的關係如下：

$$\bar{v}_x = \frac{Q}{D_2 D_3} \quad (26)$$

$$\bar{v}_y = \frac{q}{D_1 D_3} \quad (27)$$

將式(23)、(24)、(25)、(26)、(27)代入式(18)、(19)，則可得壓力梯度(pressure gradient)與流量的關係式：

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2mr_w^{\bullet n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_2 D_3^2} Q \quad (28)$$

$$\frac{\Delta P}{D_2} = \frac{2mr_w^{\bullet n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_1 D_3^2} q \quad (29)$$

### 2.2.3 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：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau_{rz}) = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (30)$$

因為為全展開流動，所以 $-\frac{\partial P}{\partial z}$ 為定值。

積分式(30)可得：

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{\Delta z} \left( \frac{1}{2} r \right) \quad (31)$$

$\Delta$ 之定義為大減小，即前減後。

將式(20)代入式(31)，積分化簡可得壁切變率(wall shear rate)  $\dot{r}_w$  與平均速率 $\bar{v}_z$ 的關係：

$$\dot{r}_w = \frac{3+\frac{1}{n}}{R} \bar{v}_z \quad (32)$$

令流體流經Z方向的體積流率為Q，則體積流率與平均速率的關係如下：

$$\bar{v}_z = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (33)$$

將式(32)、(33)代入式(31)，則可得壓力梯度與流量的關係式：

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2mr_w^{n-1}}{R} \frac{(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q \quad (34)$$

#### 2.2.4 計算含發泡劑但未發泡的熔膠的臨界壓力( $P_c$ )

熔膠的臨界壓力( $P_c$ )可由Sanchez-Lacombe 狀態方程式(簡稱S-L Eqn.)[33,34]求得：

$$\tilde{\rho}^2 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[ \ln(1 - \tilde{\rho}) + (1 - \frac{1}{r})\tilde{\rho} \right] = 0 \quad (35)$$

$$\tilde{P} = \frac{P}{P^*} \quad \tilde{T} = \frac{T}{T^*} \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho^*} \quad \rho^* = \frac{\bar{M}_w}{v^*} \quad \gamma = \frac{P^* v^*}{RT^*}$$

其中 $\tilde{T}$ ,  $\tilde{P}$ ,  $\tilde{\rho}$ 分別為對比溫度、對比壓力、對比密度； $r$ 是尺寸參數； $R$ 為氣體常數； $\bar{M}_w$ 為平均分子量； $P^*$ ,  $T^*$ ,  $v^*$ 及 $\rho^*$ 為特性參數。至於 $P^*$ ,  $T^*$ ,  $v^*$ 及 $\rho^*$ 求法請參見appendix A[35]。高分子及發泡劑的特性參數、平均分子量一般可由文獻得知，茲列於表 2[32]。

## 2.3 數學模式

### 2.3.1 等溫情況

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

子單元一的形狀如圖 5 所示，(a)圖為溝槽接近入口的部分，其深

度大於半徑；(b)圖為溝槽接近出口的部分，其深度小於半徑；圖(c)為正視圖。圖中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<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>、P<sub>4</sub>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：

$$P - P^* - f(Q, q) Q = 0 \quad (36)$$

$$\left(\frac{P + P^*}{2}\right) - \left[\frac{1}{2}\left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{P_3 + P_4}{2}\right)\right] - g(Q, q) q = 0 \quad (37)$$

$$Q + q - Q^* = 0 \quad (38)$$

其中Q\*為進入此子單元的體積流率，q為洩流至子單元二的體積流率。



(i)深度大於半徑

如圖 5(A)，X方向的流量Q可分為流經半圓柱區域的流量Q<sub>1</sub>，以及流經長方體區域的流量Q<sub>2</sub>，即

$$Q_1 + Q_2 = Q \quad (39)$$

由式(34)可知半圓柱區域的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2mr_w^{n-1}}{R} \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_1 \quad (40)$$

由式(28)可知長方體區域的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{D_1} = \frac{2mr_w^{n-1}}{D_2} \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{HD_2^2} Q_2 \quad (41)$$



假設兩區域的壓力降相等，則由式(39)、(40)、(41)解聯立可得

$$Q_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{R}\right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{HD_2^2}{\pi R^3}\right)} Q \quad (42)$$

$$Q_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{D_2}\right)^n \left(\frac{2n+1}{3n+1}\right) \left(\frac{\pi R^3}{HD_2^2}\right)} Q \quad (43)$$

將式(42)代入式(40)可得

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2m}{R} \left[ \frac{2\left(3 + \frac{1}{n}\right)Q}{\pi R^3} \right]^n \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{R}\right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{HD_2^2}{\pi R^3}\right)} \right]^n \quad (44)$$

而圓管的壓力梯度為

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2m\gamma_{1w}}{R} \quad (45)$$

比較式(44)、(45)可知

$$\gamma_{1w} = \frac{2\left(3 + \frac{1}{n}\right)Q}{\pi R^3} \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{R}\right)^n \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{HD_2^2}{\pi R^3}\right)} \quad (46)$$

而洩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

$$\gamma_{2w} = \frac{2\left(2 + \frac{1}{n}\right)q}{D_1 D_2} \quad (38)$$

將式(44)、(41)分別代入式(36)、(37)，即可得  $f(Q, q)$  和  $g(Q,$

$q)$  分別為

$$f = \frac{2mD_1 r_w^{\bullet n-1}}{R} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} \right] \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{3n+1}{2n+1}\right) \left(\frac{HD_2^2}{\pi R^3}\right)} \right] \quad (48)$$

$$q = \frac{2m(H+R)r_w^{\bullet n-1}}{D_2} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{D_1 D_2^2} \right] \quad (49)$$

(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) 為

$$R_{eq} = \frac{2P_c}{C} \quad (50)$$

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  $D_2$  逐漸變為零，所以將兩平行板間的距離視為  $D_2/2$ 。流動阻力  $f(Q, q)$  和  $g(Q, q)$  如下所示：

$$f = \frac{2mD_1 r_w^{\bullet n-1}}{R_{eq}} \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R_{eq}^3} \quad (51)$$

$$q = \frac{4mD_3 r_w^{\bullet n-1}}{D_2} \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{D_1 \left(\frac{D_2}{2}\right)^2} \quad (52)$$

(2) 子單元二

子單元二的形狀如圖 6 所示。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：

$$\left(\frac{P_1 + P_3}{2}\right) - \left(\frac{P_2 + P_4}{2}\right) - f(Q, q) Q = 0 \quad (53)$$

$$\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right)-\left(\frac{P_3+P_4}{2}\right)-g(Q, q)q=0 \quad (54)$$

$$Q+q=Q^*+q^*+q^{**} \quad (55)$$

其中 $Q^*$ 、 $q^*$ 為鄰近子單元的體積流率， $q^{**}$ 為子單元一洩流至子單元二之體積流率。流動阻力 $f(Q, q)$ 和 $g(Q, q)$ 如下：

$$f=\frac{mD_1r_w^{n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_2D_3^3} \quad (56)$$

$$g=\frac{2mD_2r_w^{n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_1D_3^2} \quad (57)$$

### (3)子單元三

子單元三之形狀與子單元二相同，如圖 6 所示，以底面左下角的壓力代表該子單元的壓力，圖中 $P_1$ 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：

$$\left(\frac{P_1+P_3}{2}\right)-\left(\frac{P_2+P_4}{2}\right)-f(Q, q)Q=0 \quad (58)$$

$$\left(\frac{P_1+P_2}{2}\right)-\left(\frac{P_3+P_4}{2}\right)-g(Q, q)q=0 \quad (59)$$

$$Q+q=Q^*+q^* \quad (60)$$

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 $g(Q, q)$ 如下：

$$f=\frac{2mD_1r_w^{n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_2D_3^3} \quad (61)$$

$$g=\frac{2mD_2r_w^{n-1}}{D_3} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{D_1D_3^2} \quad (62)$$

#### (4)子單元四

一般在螺旋溝分布區域之後，還有鬆弛室及模唇。鬆弛室由於流道擴大，可以鬆弛(relax)熔融膠料，因而減低熔膠經過螺旋溝及間隙後所產生的應力不均，而減少出模膨脹(die swell)。模唇則為模頭的最後部分，此區域是用來控制產品的厚度，而由於模唇有狹小的間隙，所以可產生高切變率(shear rate)和流動阻力。

和螺旋軸心模頭的分析類似，以一個區域進行分析。沿著 X 方向和 Y 方向，將流場分割成數個子單元，子單元內的熔膠均為一維流動，為了討論方便，命其為子單元四。

子單元四之形狀和子單元三相同，差別在於以一維流動來進行子單元四的模擬，如圖 7 所示。圖中  $P_1$  為此單元的壓力， $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  為鄰近子單元的壓力。子單元四之控制方程式如下：

$$P_1 - P_3 - g(q)q = 0 \quad (63)$$

$$q = q^* \quad (64)$$

流動阻力  $g(q)$  則為

$$g = \frac{2mD_5 r_w^{n-1}}{D_6} \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{D_4 D_6^2} \quad (65)$$

其中  $D_4$ 、 $D_5$  和  $D_6$  分別為子單元四的長度、寬度及深度。

## (5) 模擬方法

### (i) 螺旋溝分布區域：

將式(36)、(37)、(38)、(53)、(54)、(55)、(58)、(59)、(60)寫入每一個單元，可得到一聯立方程組，由於此聯立方程組為非線性，故求解步驟如下：

- a. 猜  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值。
- b. 以步驟 a 中的猜值求  $f$ 、 $g$ 。
- c. 以步驟 b 求出的  $f$ 、 $g$  代入原聯立方程組，此時方程組為線性。
- d. 解出新的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值。
- e. 比較步驟 a 和步驟 d 的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值，若相當接近，則步驟 d 的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值即為所求，否則即以步驟 d 的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值當作新猜值，重覆 a 到 e 的步驟。

當  $n=1$  時，流體即為牛頓流體，則原方程組可簡化為線性，得到的解可作為步驟 a 的起始猜值。

### (ii) 螺旋溝分布區域加上模唇部分：

將式(36)、(37)、(38)、(53)、(54)、(55)、(58)、(59)、(60)、(63)、(64)寫入每一個單元，可得到一聯立方程組，由於此聯立方程組同樣為非線性，故求解步驟與前述螺旋溝分布區域相同。

### 2.3.2 非等溫情況

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 2.1 的系統假設外，非等溫情況的假設為軸心為一絕熱(adibatic)裝置，即熔融膠料與軸心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

$$\frac{dE_v}{dV} = -\tau : \nabla \mathbf{v} = m \left| \dot{\gamma} \right|^{n+1} \quad (66)$$

由式(21)、(23)、(24)可得

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_w \left| \frac{2z}{D_3} \right|^{\frac{1}{n}} \quad (67)$$

將式(67)代入式(66)，積分可得子單元內總消散能為

$$E_v = \left( \frac{n}{2n+1} \right) m \left| \dot{\gamma}_w \right|^{n+1} V \quad (68)$$

其中， $V$  為子單元的體積。

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(68)，累加可知子單元一的消散能亦可由式(68)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

$$\frac{E_T}{A} = h(T - T_w) \quad (69)$$

其中 $E_T$ 為傳送能

$A$  為傳送面積

$T_w$  為模壁溫度

$h$  為 heat transfer coefficient

$h$ 之值可由 $N_u$ (Nusselt number)求出：

$$N_u = \frac{hD_3}{k} \quad (70)$$

其中  $k$  為熱傳導係數(heat conductivity)

$D_3$  為子單元的深度

而 $N_u$ 之值可由 $G_z$ (Graetz number)求得

$$N_u = 1.75G_z^{1/2} \quad (71)$$

而 $G_z$ 定義如下：

$$G_z = \frac{\rho C_p \bar{v} D_3^2}{k D_1} \quad (72)$$

其中  $\rho$  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：

$$\text{子單元一：} (Q+q)T - Q^*T_{Q^*} = \frac{E_v}{\rho C_p} \quad (73)$$

$$\text{子單元二：} (Q+q)T - q^*T_{q^*} - Q^*T_{Q^*} - q^{**}T_{q^{**}} = \frac{E_v - E_T}{\rho C_p} \quad (74)$$

$$\text{子單元三：} (Q+q)T - q^*T_{q^*} - Q^*T_{Q^*} = \frac{E_v - E_T}{\rho C_p} \quad (75)$$

$$\text{子單元四：} qT - q^*T_{q^*} = \frac{E_v - E_T}{\rho C_p} \quad (76)$$

其中  $T_i$  表示體積流率為  $i$  的流體溫度

### 4. 模擬方法

將式(36)、(37)、(38)、(53)、(54)、(55)、(58)、(59)、(60)、(63)、(64)、(73)、(74)、(75)、(76)寫入每一個單元，可得到一聯立方程

組，由於此聯立方程組為非線性，故求解步驟如下：

- 猜一起始  $T$  值。
- 猜  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值。
- 以步驟 a、步驟 b 中的值求出  $f$ 、 $g$ 。
- 以步驟 c 中求出的  $f$ 、 $g$  代入式 (36)、(37)、(38)、(53)、(54)、(55)、(58)、(59)、(60)、(60)、(63)、(64)，解出新的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值。
- 比較步驟 b 和步驟 d 中的  $Q$ 、 $q$  值，若相當接近，則進行下一



步驟，否則以步驟 d 中求出的  $Q$ 、 $q$  及  $P$  值作為新的猜值，重覆 b 到 e 的步驟，直至收斂。

f. 以步驟 e 中求出的  $Q$ 、 $q$  值，代入式 (73)、(74)、(75)、(76)，解出新的  $T$  值。

g. 比較步驟 d 和步驟 f 的  $Q$ 、 $q$ 、 $P$ 、 $T$  值即為解答，否則以步驟 d 和步驟 f 的  $Q$ 、 $q$ 、 $P$ 、 $T$  值作為新猜值，重覆 a 到 g 的步驟。

## 2.4 直交表之搜尋

### 2.4.1 田口法之簡介

田口品質工程方法，主要是尋找設計參數的水準，又稱為參數設計或稱線外品管方法，參數設計在實際作業上是找變異性最小的產品或製程，即找出對環境不敏感的產品，此法不需使用高成本零件或材料，因此可達降低成本並提高品質之目的。

田口所提出的直交表，其特點是應用直交表的配置以解決因子與水準之多種組合實驗。所謂直交(Orthogonal)表係將各因子與水準，以直交排列的方式組合在一起的實驗計畫配置表。它被安排成有行與列的矩陣式(Matrix)數字，每一行代表一個特定實驗中因子的狀態，每一列表示特定因子或條件組合。

## 2.4.2 直交表在模頭最佳化設計上的應用

決定模頭幾何形狀的設計參數甚多，若依照一次改變一參數而固定其餘參數的傳統實驗方式進行設計，則不但費時且無法了解各參數間的影響。為了更有效率地尋找出一組最佳參數組合，特引入直交表，以減少數值模擬的次數。本文利用 L18 直交表做配置，見表 3[36]。其中 1、2、3 表示各因子的三個水準，而引入的各項參數為起始溝深 DEPTH、起始溝寬 WCHAN、起始間隙 GIBC、taper 分段高度 HBC、overlap 數 NOSEC、螺旋角  $\theta$ ，以及軸心傾斜角  $\alpha$ ，其中 overlap 數 NOSEC 指溝道繞行經過之 port 數目，即， $\text{NOSEC}/\text{NOSPI}(\text{溝道數})=\text{繞行圈數}$ 。上述各變數的示意圖如圖 8。雖然模頭直徑以及溝道數亦會影響幾何形狀，但通常模頭直徑在決定產品尺寸時就已決定，而溝道數亦僅會考慮某些特定數目，因此為配合搜尋流程以及因子數目，L18 直交表的第一行為空行，而這並不影響其餘各行間之直交性。本文探討上述七因子三水準形狀參數組合。再引入一個 L8 直交表作為不同起始水準的配置，以減少實驗次數，如表 4 所示。H 表示較高的起始水準，L 表示較低的起始水準，各因子的起始三水準及上下限如表 5 及表 6 所示。

在做完 18 次實驗後，針對每一不同因子之三水準作出響應值，選出三水準中最佳水準，再計算出該次所有因子最佳組合之流量均勻度以及壓降，若該次搜尋所得之流量均勻度符合要求，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)，否則將該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 $\lambda$ 來重新調整水準 1 及水準 3 (即水準 1=水準 2- $\lambda$ \*水準 2，水準 3=水準 3+ $\lambda$ \*水準 3)。當七個因子的水準重新設定後，重覆 L18 直交表來搜尋，直到流量均勻度符合要求。

## 2.5 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、最大壓力降及發泡位置。流量均勻度愈高，產品厚度愈均勻；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；發泡位置越接近出口處，則越符合我們的設計要求。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(UI)的定義如下：

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

其中 $q_i$ 為兩螺旋溝入口處間的區域中，位於模頭出口處子單元三(或子單元四)Y方向的體積流率。

$q_{avg}$ 為 $q_i$ 的平均值。

$N_1$ 為兩螺旋溝入口處間的區域中，位於模頭  
出口處子單元三(或子單元四在X方向上)  
的個數。

當 $q_i = q_{avg}$ 時，流量最均勻，此時流量均勻度為1。

混合度(MD)的定義如下：

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

其中 $Q_e$ 為一個螺旋溝入口的總體積流率。

$N_2$ 為子單元一的總數。

$L_t$ 為螺旋溝總長度。

$L$ 為行經螺旋溝的長度。

$Q(L)$ 為螺旋溝槽  $L$  長度處沿著螺旋溝方向  
的體積流率。

當螺旋溝槽內洩流至間隙的體積流率各處相等，即溝槽內沿著螺旋溝  
方向的體積流率，由入口至出口依線性逐漸遞減為零，則混合度愈好，  
此時混合度為1。

## 第三章 結果與討論

### 3.1 直交表搜尋之結果

模擬條件為：高分子流量為 12.9kg/hr，模頭直徑為 10 公分，溫度為 200°C，CO<sub>2</sub>的溶解度為 1.3 wt.%，材料則選用PP與LDPE，其材料性質列於表 7，分別計算以流量均勻度及混合度為指標的最佳形狀參數組合。

由於各個因子的起始水準不同，所獲得的最佳設計點也不盡相同，是故利用選擇各個因子不同的任意配對，作為每一個搜尋設計點的起始水準，以這些起始水準來推算較佳的設計點，並且分別作 4、5、6 溝道下等溫情形之考量。以表 4 所列之八組起始水準搜尋分別以流量均勻度及混合度為指標狀況下之最佳化幾何形狀，可得八個設計點之流量均勻度、混合度與最大壓力降，其結果列於表 8 至表 19。希望從中找出流量均勻度最大及混合度最高的設計點。至於壓力降部份，以往都是希望最大壓力降愈小愈好，因為壓力降愈小，即螺桿的背壓愈小，表示製程所需的能源愈小。但是在發泡製程中，反而希望壓力降愈大愈好，這是因為要避免膠料在模頭內有預發泡的現象。

首先選取以混合度為指標之設計點。以 PP 於 4 溝道時為例，我們從表 8 選擇滿足流量均勻度最大、混合度最高及最大壓力降最大的設計點，因此我們選擇 design 5 為設計點。同理依據表 9 及表 10，我們

選擇 PP 在 5 溝道及 6 溝道時設計點為 design 3 及 design 5，結果列於表 20。由表 14 至表 16，選擇 LDPE 於 4、5 及 6 溝道時設計點分別為 design 5、design 4 及 design 5，結果列於表 21。

而在選擇以流量均勻度為指標之設計點時，依照上述選擇設計點之方法，即選取滿足流量均勻度最大、混合度最高及最大壓力降最大的設計點，若無法兼顧時則較選擇相對於其他設計點性能較佳之點。依據表 11 至表 13，我們選擇 PP 在 4、5 及 6 溝道時設計點為 design 8、design 8 及 design 3，結果列於表 22。由表 17 至表 19，選擇 LDPE 於 4、5 及 6 溝道時設計點分別為 design 6、design 8 及 design 4，結果列於表 23。



由以上之結果發現，在搜尋流量均勻度之同時所獲得的混合度與流量均勻度相去較遠，而搜尋混合度同時所獲得之流量均勻度較佳，吾人可以質量均衡之觀念解釋之。流量均勻度是指整圈位置上出模頭方向之流量均一，其關鍵在於控制同一模頭高度下整圈由溝道溢流至間隙以及間隙內熔膠往出模頭方向之流量和均等，而混合度是指溝道內流量線性遞減，因此達到高的流量均勻度並不一定會線性分配溢流，也就不一定會有高的混合度，但獲得高的混合度同時亦線性的分配膠料由溝道溢流至間隙，就等於提供了均勻的出模頭方向流量，因此自然有較佳的流量均勻度。結果也顯示了欲獲得較佳混合度普遍需

要較大壓降，而且所得到之設計點通常繞行圈數較少，關於此項結果則是因為欲線性分配溢流則模內需要較大阻力限制溢流，所以會有較大壓降，而繞行較少圈數意味模頭高度較低，較易達成線性分配。由不同溝道下的搜尋結果可得知，不同溝道狀況下皆可獲得良好之流量均勻度以及混合度之結果，因此十公分直徑之模頭作 4 溝道的設計即可，並無必要作 5、6 溝道之設計。因此我們以在 4 溝道時以混合度為指標所搜尋出的最佳設計點作為模頭之設計參數，結果如表 24。

### 3.2 各參數對混合度、流量均勻度及最大壓降的影響比例

將下來我們探討各參數對混合度、流量均勻度及最大壓降的影響程度。我們將各變數的高起始水準(如表 4 中的 H)引入 L18 直交表中(並不作搜尋程序)，計算在 4、5 及 6 溝道下的混合度、流量均勻度及最大壓降，結果如表 25 及表 26。再根據表 25 及表 26 計算出各變數的平方和(sum of squares, SS)、總平方和(total sum of squares, TSS)、誤差平方和(error sum of squares, SSE)及各變數的貢獻度[36]，公式如 Appendix B，計算結果列於表 27 至表 32，並將結果繪出，如圖 9 至圖 14。

### (1) 誤差項百分比

誤差項的百分比提供一實驗之適當性的估計，因為誤差是有關於不知道(或無法控制)的因子，因此表示誤差項的百分比可作為實驗是否充分之判斷。當此誤差百分比小於 15%時，可認為這實驗並沒有忽略掉一些重要的因子。以 4 溝道為例(表 26)，不論是 UNI、MD 或是 $\Delta P$ ，誤差所佔的百分比都相當小。因此吾人所選擇的七個變數的確可以完整涵蓋模頭內流動的變異。

### (2) 各變數的貢獻度

原則上我們可以利用響應表即可得知各變數的影響程度，但是進行變異數分析能提供不同因子相對效果一個更客觀的判斷方式，也能得到一量化的結果，用以判斷各變數的影響程度。由圖 9 至圖 14 可看出不論溝道數為何，影響 MD 的前三名變數分別為 DEPTH、WCHAN 及 GIBC；影響 UNI 最多的變數是 WCHAN 及 NOSEC；影響 $\Delta P$  最多的變數是 GIBC 及 ALFAR，且其貢獻度在 4、5 及 6 溝道時的變化都不大。

由此我們可以用另一個方法來解釋為何以流量均勻度為指標作搜尋時，無法同時得到高混合度。原因是最主要影響 UNI 的變數是 WCHAN (>60%)，但此變數在 MD 的貢獻度卻僅佔約 26%；反過來說，當以混合度為指標作搜尋時，由於主要在調整 DEPTH、WCHAN 及 GIBC 的值，連帶的將 UNI 提高。同理可証在調整 GIBC 以提高 MD 時， $\Delta P$  會隨著升高，



就是因為 GIBC 在 MD 與  $\Delta P$  中都有不小的貢獻度。

### 3.3 含CO<sub>2</sub>但未發泡的熔膠其臨界壓力與溫度、溶解度的關係

由 Sanchez-Lacombe eqn' 及 appendix 可知熔膠的飽和壓力(P)是溫度(T)及發泡劑溶解度(W<sub>g</sub>)的函數，因此我們將表 2 之參數代入 S-L eqn' 後，即可求得在 190°C~210°C 下，發泡劑溶解度對壓力的關係，結果如圖 15 及圖 16 所示。結果如我們所預期：熔膠的臨界壓力上升或是溫度的下降，都能使發泡劑溶解度上升。

### 3.4 加入模唇段



由之前的結果我們可以知道模頭內的壓力仍小於膠料的飽和壓力，因此必須在模頭的出口處加上一具有壓縮導角的模唇，而由於模唇有狹小的間隙，所以可產生高切變率(shear rate)和流動阻力以增加壓力。模唇之幾何參數有五個：外模半徑(DANNU)、內模半徑(DANNUI)、產品厚度(GFBC)、進料厚度(GMBC)及模唇長度(DIAN)，參數示意圖如圖 17。其中 GFBC 為產品厚度，可由 DANNU 及 DANNUI 決定；GMBC 為模頭出口厚度，厚度大小與模頭設計參數有關；DANNUI 如前述模頭直徑一樣設為一固定值。因此只有 DIAN 與 DANNU 為模唇之設計參數。

由於模唇段並沒有溝道與鬆弛區，因此我們可以假設模頭出口的

均勻度在模唇段並不會有太大的改變，因此我們在模唇段並不再作最佳設計點的搜尋。底下我們在等溫情況來討論模唇設計參數（DIAN 與 DANNUI）的影響，最後與非等溫情況作一比較。

### (1) 等溫情況

模擬條件為：高分子流量為 25kg/hr，模頭直徑為 10 公分，外模半徑(DANNUI)為 5 公分，溫度為 190°C，材料則同樣選用PP與LDPE，模頭幾何形狀如表 24 所示，CO<sub>2</sub>的溶解度為 3.0 wt.%，因此在PP熔膠中飽和壓力為 2.94MPa，在LDPE熔膠中飽和壓力為 1.74MPa。而由前面直交表搜尋出的幾何參數，我們可以算出熔膠為LDPE及PP時的GMBC寬度皆為 0.158cm，因此表示GFBC的寬度要小於 0.158cm模唇才會有壓縮的效果，亦即表示DANNUI的值要大於 4.842cm。

#### (i) 改變 DIAN

我們先固定 DANNUI 為 4.9 公分，改變各種不同的 DIAN 大小，探討其對發泡位置的影響。結果如圖 18、19 所示。圖中轉折點代表由模頭螺旋溝部份進入模唇的位置，因此壓力開始急速下降。虛線代表飽和壓力，因此虛線與實線的交點即表示開始發泡的位置。由圖 18、19 可知在固定 DANNUI 的情況下，隨著模唇壓縮段的增長，使得熔膠的模頭內的壓力也隨之上升，因此飽和壓力的位置也逐漸接近模唇出口位置。由於吾人希望發泡位置能越接近模唇出口處越

好，所以在此設計條件之下，熔膠為 LDPE 時我們選擇  $DIAN = 30$  公分作為模唇的長度；同樣的選擇  $DIAN = 40$  公分作為熔膠為 PP 時的模唇長度。

#### (ii) 改變 DANNUI

接著我們討論 DANNUI 對壓力的影響。根據前一小節所得到的結果，當熔膠為 LDPE 時我們選擇  $DIAN = 30$  公分作為模唇的長度；同樣的選擇  $DIAN = 40$  公分作為熔膠為 PP 時的模唇長度，並以此為依據改變 DANNUI 的大小，計算壓力的變化，結果如圖 20、21。由圖 20、21 可知隨著內模半徑越大，出口厚度就越小，使得模內壓力變大，但由於壓縮的幅度不大，因此壓力上升也十分有限，所以發泡位置也就只有稍微往出口處移動。

#### (2) 非等溫情況

由前述所決定的最佳設計點，皆是在等溫的假設之下。實際上高分子的流體在模頭內，由於摩擦產生的消散能，以及可控制改變模壁的溫度，使其為非等溫的流動。且我們也可由圖 15 及圖 16 知道發泡劑的臨界壓力對溫度相當敏感(溫度上升  $5^{\circ}\text{C}$ ，臨界壓力上升約  $3\text{MPa}$ )，對於在等溫的情況下所找出的設計點是否能適用於非等溫，為本節之討論重點。

模擬條件為：高分子流量為  $25\text{kg/hr}$ ，模頭直徑為  $10$  公分，

外模半徑(DANNU)為 5 公分，材料則同樣選用 PP 與 LDPE，模頭的幾何參數以前面直交表所搜尋出來的為依據，模唇方面當熔膠為 LDPE 時我們選擇 DIAN =30 公分作為模唇的長度；而選擇 DIAN =40 公分作為熔膠為 PP 時的模唇長度，並固定 DANNUI=4.9 公分來作為整個模頭的幾何形狀。

(i) 改變發泡劑重量百分比

接著我們固定進料溫度為 190°C，改變發泡劑的重量百分比，計算模內壓力與溫度的變化，計算的結果如圖 22~圖 41。在壓力變化圖中實線代表模內流道的壓力，虛線代表發泡劑所需的臨界壓力，兩條線交界處代表模內的壓力開始小於臨界壓力，即表示發泡開始產生。



由圖中可以看出溫度隨著熔膠在流道內的流動而上升，這是由於熔膠會與模壁摩擦產生消散能(dissipation energy)，若此熱量來不及經由模壁傳送出去—即消散能大於傳送能，則會使得模內的溫度上升。又由 Sanchez-Lacombe eqn' 計算的結果我們可以知道模內所需的臨界壓力會隨著溫度的上升，因此圖中的虛線是呈現上升的現象。而增加發泡劑的重量百分比也使得所需的臨界壓力升高，所以實線與虛線的交點—即發泡位置也跟著往前移動，這意味著模內的發泡現象提早發生。

(ii) 改變進料溫度

接著我們固定發泡劑的重量百分比為 1.3%，改變進料溫度，計算模內壓力與溫度的變化，計算的結果如圖 42~圖 49。在壓力變化圖中實線代表模內流道的壓力，虛線代表發泡劑所需的臨界壓力，兩條線交界處代表模內的壓力開始小於臨界壓力，即表示發泡開始產生。

由圖中可以看出由於進料溫度的提高，使得熔膠的黏度下降，因此壓力也跟著下降。但也由於進料溫度的提高，發泡劑所需的臨界壓力也跟著提高，所以實線與虛線的交點—即發泡位置也跟著往前移動，這意味著模內的發泡現象提早發生。



## 第四章 結論

一個好的模頭必須考量流量均勻度、混合度、最大壓力降，使得產品厚度最均勻、製程最省能源並可消除縫合線及皺痕。此三項標準藉由幾何參數之完整考量，可以在不同材料之設計皆同時達到，特別是引入繞行圈數之參數，藉由選擇較少繞行圈數之設計點可以獲得較低之壓力降，而引入間隙之分段點高度 HBC 可以增加間隙部分之幾何形狀變化，有效將混合度提升。

而因為螺旋式軸心模頭之設計參數共有八個(起始溝寬、起始溝深、軸心傾斜角、螺旋角、間隙、間隙分段高度、繞行圈數及溝道數)，若以一次改變一個參數的傳統設計方式，則不但耗時且無法了解各個參數相互影響之情形，亦無法有效增進模頭性能。引入田口法中的直交表配置並配合不同的起始水準，不同的指標(流量均勻度及混合度)進行搜尋可有效減少實驗次數，並達到良好模頭性能。在以混合度為指標搜尋時，獲得高的混合度同時亦線性的分配膠料由溝道溢流至間隙，就等於同時提供了均勻的出模頭方向流量，因此也獲得較佳的流量均勻度。

由變數分析表可知：不論溝道數為何，影響 MD 的前三名變數分別為 DEPTH、WCHAN 及 GIBC；影響 UNI 最多的變數是 WCHAN 及 NOSEC；影響  $\Delta P$  最多的變數是 GIBC 及 ALFAR，且其影響程度在 4、5 及 6 溝道時

的變化都不大，表示吾人所選擇的七個變數的確可以完整涵蓋模頭內流動的變異。

模唇為模頭的最後部分，增加模唇長度可使壓力降提高許多，因此在此在固定內模半徑的情況下，隨著模唇壓縮段的增長，使得熔膠的模頭內的壓力也隨之上升，因此飽和壓力的位置也逐漸接近模唇出口位置。但會導致製程上能源的消耗，所以應在模頭就做出最佳化設計，再藉由配合模唇長度及螺桿獲得適當壓力降，以及控制產品的厚度及直徑。而若固定模唇長度，內模半徑越大，出口厚度就越小，使得模內壓力變大，但由於壓縮的幅度不大，因此壓力上升也十分有限，所以發泡位置也就只有稍微往出口處移動。

由Sanchez-Lacombe eqn' 及appendix可知熔膠的飽和壓力(P)是溫度(T)及發泡劑溶解度( $W_g$ )的函數，計算結果也如我們所預期：熔膠的臨界壓力上升或是溫度的下降，都能使發泡劑溶解度上升。而由於我們知道模內溫度會因為摩擦熱而上升，因此臨界壓力也隨之上升；而增加發泡劑的重量百分比也會使所需的臨界壓力升高，所以，這意味著模內的發泡現象提早發生。

表 1 PP 與 LDPE 的黏度參數

Polymer	$f_r$ (-)	$\alpha$ (1/°C)	$\beta$ (1/MPa)	$\phi$ (1/wt. %)	$C_1$ (-)	$C_2$ (-)	$C_3$ (-)
LDPE	0.252	$9.3 \times 10^{-4}$	$-7.8 \times 10^{-4}$	$3.6 \times 10^{-3}$	-0.43	1.58	1.66
PP	0.235	$9.1 \times 10^{-4}$	$-1.2 \times 10^{-3}$	$4.3 \times 10^{-3}$	-0.47	1.49	1.64

表 2 PP、LDPE 與 CO<sub>2</sub> 的特性參數

Characteristic parameter	$\rho^*$ (g/cm <sup>3</sup> )	$P^*$ (MPa)	$T^*$ (K)	平均 分子量	Pressure range
CO <sub>2</sub>	1.253	369.1	341.2	44	0-20MPa
LDPE	0.9054	420.8	628.2	105,492	0-50MPa
PP	0.9032	336.5	630.6	330,000	0-50MPa



表 3 L18 直交表

Exp No.	empty	DEPTH (cm)	WCHAN (cm)	GIBC (cm)	HBC (cm)	NOSEC	$\theta$ (°)	$\alpha$ (°)
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 配置起始水準之 L8 直交表

Exp No.	DEPTH (cm)	WCHAN (cm)	GIBC (cm)	HBC (cm)	NOSEC	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$
1	H	H	H	H	H	H	H
2	H	H	H	L	L	L	L
3	H	L	L	H	H	L	L
4	H	L	L	L	L	H	H
5	L	H	L	H	L	H	L
6	L	H	L	L	H	L	H
7	L	L	H	H	L	L	H
8	L	L	H	L	H	H	L

表 5 各因子之不同起始水準

		LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
DEPTH (cm)	H	1.0	1.3	1.6
	L	0.4	0.7	1.0
WCHAN (cm)	H	0.7	0.95	1.2
	L	0.2	0.45	0.7
GIBC (cm)	H	0.3	0.4	0.5
	L	0.1	0.2	0.3
HBC (cm)	H	0.8	1.2	1.6
	L	0.	0.4	0.8
NOSEC	H	4	5	6
	L	2	3	4
$\theta(^{\circ})$	H	14.0	17.0	20.0
	L	8.0	11.0	14.0
$\alpha(^{\circ})$	H	2.0	2.75	3.5
	L	0.5	1.25	2.0

表 6 各因子之上下限

	minimum	maximum
DEPTH(cm)	0.4	1.6
WCHAN(cm)	0.2	1.2
GIBC(cm)	0.1	0.5
HBC(cm)	0.	1.6
NOSEC	2	6
$\theta(^{\circ})$	8.0	20.0
$\alpha(^{\circ})$	0.5	3.5



表 7 LDPE 及 PP 之材料性質

properties	LDPE	PP
$T_0(K)$	463	483
$m(T_0) (Pa \cdot s^n)$	8201.2	10404
$C_m (J/Kg-K)$	2300	1922
$\rho_m (Kg/m^3)$	750	750
$b (1/K)$	0.008	0.003
$K_m (W/m-K)$	0.24	0.13
$n (dimensionless)$	0.4986	0.4704

表 8 PP 於 4 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	1.12	1.6	1.33
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.7	0.69	0.72	1.17	1.01	0.93
GIBC(cm)	0.24	0.3	0.1	0.11	0.11	0.1	0.18	0.2
HBC(cm)	1.6	0.8	1.6	0.88	1.44	0.88	1.05	1.15
NOSEC	2	2	5	2	2	3	2	2
$\theta(^{\circ})$	17	11	11	15.3	20	9.7	20	20
$\alpha(^{\circ})$	1.62	0.5	0.5	1.6	0.54	1.76	0.95	0.5
UNI	0.88	0.832	0.87	0.876	0.897	0.907	0.868	0.904
MD	0.908	0.9	0.895	0.921	0.919	0.805	0.918	0.96
PD(MPa)	0.209	0.16	1.25	0.47	0.742	0.546	0.293	0.374



表 9 PP 於 5 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.44	1.6	0.98	1.05	1.56	1.33
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.63	0.63	0.71	0.88	0.96	0.93
GIBC(cm)	0.22	0.3	0.11	0.1	0.12	0.11	0.2	0.21
HBC(cm)	1.6	0.8	1.21	0.8	1.3	0.8	1.4	1.1
NOSEC	2	2	5	2	2	4	2	2
$\theta(^{\circ})$	16.83	11	11.62	20	20	8.02	19.4	20
$\alpha(^{\circ})$	1.46	0.5	0.57	1.46	0.5	1.46	1.08	0.5
UNI	0.902	0.805	0.901	0.849	0.881	0.865	0.842	0.891
MD	0.904	0.935	0.93	0.926	0.919	0.867	0.92	0.937
PD(MPa)	0.233	0.142	1.173	0.5	0.725	0.641	0.254	0.327

表 10 PP 於 6 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.44	1.44	1.04	1	1.46	1.46
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.6	0.68	0.65	1.2	0.92	0.92
GIBC(cm)	0.24	0.3	0.11	0.12	0.11	0.1	0.2	0.19
HBC(cm)	1.6	0.8	1.44	0.85	0.55	0.8	1.44	0.71
NOSEC	3	2	5	2	2	5	2	2
$\theta(^{\circ})$	18.7	11	9.9	17.2	20	11	20	20
$\alpha(^{\circ})$	1.62	0.5	0.55	2.02	0.55	2	1.08	0.65
UNI	0.9	0.785	0.814	0.839	0.886	0.838	0.843	0.844
MD	0.888	0.91	0.903	0.93	0.919	0.833	0.92	0.922
PD(MPa)	0.221	0.128	0.929	0.471	0.651	0.512	0.25	0.258



表 11 PP 於 4 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.43	1.27	1.3	1.6	0.4	0.4	1.13	0.4
WCHAN(cm)	0.3	0.469	0.2	0.45	0.62	0.33	0.44	0.2
GIBC(cm)	0.5	0.5	0.3	0.3	0.36	0.24	0.5	0.48
HBC(cm)	0.77	0.88	0.8	0.4	0.97	0.286	1.6	0.48
NOSEC	8	3	6	4	3	8	3	5
$\theta(^{\circ})$	8.6	13.3	14	17	15.15	8.18	15	13.86
$\alpha(^{\circ})$	1.31	1.13	0.55	3.5	0.5	1.31	2.75	2
UNI	0.977	0.969	0.955	0.948	0.976	0.976	0.974	0.983
MD	0.424	0.484	0.498	0.552	0.435	0.43	0.473	0.423
PD(MPa)	0.184	0.122	0.61	0.16	0.187	0.429	0.127	0.265

表 12 PP 於 5 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.4	1.6	0.9	1.6	0.4	0.4	1.06	0.4
WCHAN(cm)	0.27	0.95	0.2	0.3	0.27	0.27	0.41	0.2
GIBC(cm)	0.41	0.5	0.29	0.33	0.22	0.22	0.5	0.4
HBC(cm)	0.69	0.8	1.1	0.44	0.69	0	1.2	0.4
NOSEC	8	3	5	3	8	8	4	5
$\theta(^{\circ})$	10.5	8	12.6	16.8	9.6	9.1	11	12.6
$\alpha(^{\circ})$	0.96	1.25	0.55	3.15	0.5	0.96	2.75	0.55
UNI	0.973	0.906	0.979	0.976	0.973	0.973	0.96	0.981
MD	0.426	0.55	0.453	0.518	0.434	0.432	0.467	0.428
PD(MPa)	0.275	0.05	0.56	0.263	0.732	0.567	0.129	0.34



表 13 PP 於 6 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.4	1.6	1	1.6	0.4	0.4	1	0.4
WCHAN(cm)	0.271	0.577	0.2	0.2	0.3	0.27	0.43	0.2
GIBC(cm)	0.5	0.5	0.3	0.3	0.26	0.3	0.5	0.46
HBC(cm)	1.27	0.72	0.8	0.4	0.94	1.03	1.23	0.37
NOSEC	8	3	5	3	8	8	4	4
$\theta(^{\circ})$	10.63	10.12	14	17	11.69	12.23	0.97	12.6
$\alpha(^{\circ})$	0.96	1.09	1.25	3.5	0.5	1.07	11.6	0.55
UNI	0.967	0.908	0.97	0.974	0.965	0.966	0.94	0.957
MD	0.427	0.545	0.464	0.527	0.434	0.431	0.472	0.37
PD(MPa)	0.213	0.08	0.512	0.47	0.545	0.421	0.116	0.298

表 14 LDPE 於 4 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.52	1.6	1.07	1.1	1.6	1.6
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.664	0.693	0.724	1.2	1.01	1.08
GIBC(cm)	0.243	0.3	0.105	0.11	0.121	0.1	0.177	0.197
HBC(cm)	1.6	0.8	1.52	0.88	1.44	0.8	1.05	0.82
NOSEC	2	2	6	2	2	5	2	2
$\theta(^{\circ})$	17	11	10.44	15.3	20	9.9	20	20
$\alpha(^{\circ})$	1.62	0.5	0.53	1.58	0.5	1.8	0.77	0.526
UNI	0.876	0.826	0.863	0.872	0.891	0.902	0.86	0.862
MD	0.902	0.902	0.889	0.919	0.92	0.826	0.916	0.921
PD(MPa)	0.149	0.115	0.864	0.336	0.526	0.406	0.219	0.202



表 15 LDPE 於 5 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.44	1.6	0.98	1.08	1.46	1.55
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.63	0.63	0.71	0.87	1.02	1.05
GIBC(cm)	0.243	0.3	0.11	0.11	0.12	0.108	0.197	0.198
HBC(cm)	1.6	0.8	1.325	0.8	1.3	0.8	1.6	0.791
NOSEC	3	2	5	2	2	4	2	2
$\theta(^{\circ})$	15.3	11	10.69	20	20	9.11	20	20
$\alpha(^{\circ})$	1.8	0.5	0.59	1.46	0.54	1.46	1.05	0.57
UNI	0.901	0.812	0.904	0.851	0.886	0.858	0.845	0.83
MD	0.907	0.937	0.896	0.928	0.921	0.865	0.918	0.918
PD(MPa)	0.194	0.12	1.13	0.435	0.615	0.43	0.214	0.18

表 16 LDPE 於 6 溝道時以混合度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	1.6	1.6	1.4	1.44	1.07	1	1	1.29
WCHAN(cm)	1.2	1.2	0.61	0.62	0.72	1.2	0.45	1.16
GIBC(cm)	0.27	0.3	0.11	0.11	0.12	0.1	0.5	0.23
HBC(cm)	1.6	0.8	1.4	0.8	1.44	0.8	1.2	1.03
NOSEC	4	2	6	2	2	5	4	2
$\theta(^{\circ})$	17	11	9.64	18.51	20	11	11	18.07
$\alpha(^{\circ})$	1.8	0.5	0.56	1.92	0.54	2	3.5	0.5
UNI	0.895	0.793	0.831	0.842	0.894	0.832	0.933	0.85
MD	0.89	0.907	0.906	0.926	0.92	0.829	0.531	0.903
PD(MPa)	0.185	0.109	0.932	0.38	0.518	0.356	0.117	0.139



表 17 LDPE 於 4 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.43	1.21	1.28	1.57	0.4	0.4	1.19	0.4
WCHAN(cm)	0.3	0.44	0.2	0.44	0.62	0.46	0.41	0.2
GIBC(cm)	0.36	0.5	0.3	0.3	0.36	0.2	0.5	0.48
HBC(cm)	1.15	0.88	0.81	0.41	0.97	0.31	1.6	0.44
NOSEC	8	3	5	3	3	8	3	5
$\theta(^{\circ})$	8.61	14.04	13.77	17	15.15	11.23	14.17	13.86
$\alpha(^{\circ})$	1.06	1.13	0.5	3.5	0.55	1.62	2.75	2
UNI	0.977	0.973	0.95	0.927	0.976	0.977	0.972	0.983
MD	0.465	0.481	0.411	0.469	0.435	0.435	0.479	0.424
PD(MPa)	0.204	0.095	0.479	0.151	0.133	0.452	0.093	0.18



表 18 LDPE 於 5 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.4	1.6	0.9	1.6	0.4	0.4	1	0.4
WCHAN(cm)	0.27	0.47	0.2	0.3	0.27	0.27	0.41	0.2
GIBC(cm)	0.5	0.5	0.24	0.33	0.29	0.2	0.5	0.4
HBC(cm)	0.77	1.2	1.19	0.88	0.69	0	1.2	0.4
NOSEC	8	4	5	3	8	8	4	5
$\theta(^{\circ})$	9.57	8	12.6	16.8	10.5	9.09	12.1	12.6
$\alpha(^{\circ})$	0.86	0.98	0.55	3.15	0.5	1.06	2.75	0.55
UNI	0.975	0.927	0.979	0.976	0.974	0.974	0.96	0.981
MD	0.425	0.495	0.456	0.517	0.429	0.434	0.463	0.427
PD(MPa)	0.264	0.284	0.893	0.725	1.262	1.695	0.161	0.936



表 19 LDPE 於 6 溝道時以流量均勻度為指標搜尋之結果

	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPTH(cm)	0.48	1.6	1	1.6	0.4	0.4	1	0.4
WCHAN(cm)	0.33	0.57	0.2	0.2	0.27	0.46	0.45	0.2
GIBC(cm)	0.5	0.5	0.3	0.3	0.24	0.3	0.5	0.45
HBC(cm)	1.6	0.88	0.8	0.4	0.85	0.96	1.2	0.36
NOSEC	8	3	5	3	8	8	4	5
$\theta(^{\circ})$	11.8	9.9	14	17	10.5	12.5	11	12.6
$\alpha(^{\circ})$	0.96	1.13	1.25	3.5	0.5	1.8	3.5	0.55
UNI	0.959	0.906	0.969	0.974	0.966	0.952	0.933	0.968
MD	0.43	0.545	0.465	0.53	0.435	0.436	0.531	0.38
PD(MPa)	0.138	0.058	0.348	0.317	0.435	0.211	0.117	0.218

表 20 PP 以混合度為指標搜尋之設計點

PP for MD			
NOSPI	4	5	6
Design point	5	3	5
DEPTH(cm)	1.1	1.44	1.04
WCHAN(cm)	0.72	0.63	0.65
GIBC(cm)	0.11	0.11	0.11
HBC(cm)	1.44	1.21	0.55
NOSEC	2	5	2
$\theta(^{\circ})$	20	11.62	20
$\alpha(^{\circ})$	0.54	0.57	0.55
UNI	0.897	0.901	0.886
MD	0.919	0.93	0.919
PD(MPa)	0.742	1.173	0.651

表 21 LDPE 以混合度為指標搜尋之設計點

LDPE for MD			
NOSPI	4	5	6
Design point	5	4	5
DEPTH(cm)	1.07	1.6	1.07
WCHAN(cm)	0.724	0.63	0.72
GIBC(cm)	0.121	0.11	0.12
HBC(cm)	1.44	0.8	1.44
NOSEC	2	2	2
$\theta(^{\circ})$	20	20	20
$\alpha(^{\circ})$	0.5	1.46	0.54
UNI	0.891	0.851	0.894
MD	0.92	0.928	0.92
PD(MPa)	0.526	0.435	0.518

表 22 PP 以流量均勻度為指標搜尋之設計點

PP for UNI			
NOSPI	4	5	6
Design point	8	8	3
DEPTH(cm)	0.4	0.4	1
WCHAN(cm)	0.2	0.2	0.2
GIBC(cm)	0.48	0.4	0.3
HBC(cm)	0.48	0.4	0.8
NOSEC	5	5	5
$\theta(^{\circ})$	13.86	12.6	14
$\alpha(^{\circ})$	2	0.55	1.25
UNI	0.983	0.981	0.97
MD	0.423	0.428	0.464
PD(MPa)	0.265	0.34	0.512

表 23 LDPE 以流量均勻度為指標搜尋之設計點

LDPE for UNI			
NOSPI	4	5	6
Design point	6	8	4
DEPTH(cm)	0.4	0.4	1.6
WCHAN(cm)	0.46	0.2	0.2
GIBC(cm)	0.2	0.4	0.3
HBC(cm)	0.31	0.4	0.4
NOSEC	8	5	3
$\theta(^{\circ})$	11.23	12.6	17
$\alpha(^{\circ})$	1.62	0.55	3.5
UNI	0.977	0.981	0.974
MD	0.435	0.427	0.53
PD(MPa)	0.452	0.936	0.317

表 24 最佳模頭幾何設計參數

Polymer	NOSPI (-)	DEPTH (cm)	WCHAN (cm)	NOSEC (-)	GIBC (cm)	HBC (cm)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	$\alpha$ ( $^{\circ}$ )
PP	4	1.1	0.72	2	0.11	1.44	20	0.54
LDPE	4	1.07	0.724	2	0.121	1.44	20	0.5

表 25 以高起始水準計算熔膠為 PP 時之值

實驗編號	4 溝道之計算值			5 溝道之計算值			6 溝道之計算值		
	MD	UNI	$\Delta P$ (Mpa)	MD	UNI	$\Delta P$ (Mpa)	MD	UNI	$\Delta P$ (Mpa)
1	0.513	0.932	0.234	0.531	0.914	0.224	0.547	0.895	0.214
2	0.494	0.918	0.148	0.509	0.902	0.145	0.523	0.886	0.141
3	0.477	0.911	0.101	0.49	0.894	0.101	0.501	0.878	0.1
4	0.509	0.917	0.197	0.531	0.902	0.199	0.552	0.888	0.2
5	0.513	0.916	0.174	0.532	0.897	0.169	0.55	0.867	0.163
6	0.519	0.887	0.083	0.537	0.861	0.079	0.555	0.83	0.076
7	0.489	0.927	0.147	0.505	0.913	0.147	0.521	0.899	0.147
8	0.528	0.903	0.111	0.55	0.888	0.106	0.571	0.87	0.101
9	0.66	0.88	0.172	0.71	0.838	0.169	0.752	0.844	0.165
10	0.462	0.932	0.145	0.47	0.918	0.14	0.48	0.905	0.135
11	0.511	0.919	0.201	0.533	0.904	0.203	0.553	0.89	0.203
12	0.516	0.885	0.106	0.532	0.849	0.102	0.547	0.833	0.099
13	0.504	0.924	0.164	0.523	0.911	0.161	0.541	0.899	0.157
14	0.486	0.906	0.09	0.499	0.883	0.087	0.512	0.845	0.084
15	0.61	0.904	0.217	0.65	0.885	0.214	0.686	0.862	0.209
16	0.478	0.929	0.13	0.492	0.912	0.127	0.505	0.891	0.124
17	0.614	0.896	0.164	0.658	0.873	0.164	0.698	0.836	0.162
18	0.579	0.891	0.137	0.611	0.873	0.132	0.64	0.851	0.128

表 26 以高起始水準計算熔膠為 LDPE 時之值

實驗編號	4 溝道之計算值			5 溝道之計算值			6 溝道之計算值		
	MD	UNI	$\Delta P(\text{Mpa})$	MD	UNI	$\Delta P(\text{Mpa})$	MD	UNI	$\Delta P(\text{Mpa})$
1	0.513	0.931	0.167	0.532	0.918	0.189	0.547	0.899	0.182
2	0.493	0.916	0.108	0.511	0.906	0.118	0.523	0.89	0.116
3	0.476	0.908	0.075	0.491	0.898	0.081	0.501	0.883	0.08
4	0.51	0.914	0.143	0.531	0.905	0.165	0.552	0.892	0.167
5	0.511	0.913	0.128	0.535	0.901	0.139	0.55	0.873	0.135
6	0.519	0.883	0.062	0.539	0.867	0.064	0.555	0.837	0.061
7	0.489	0.925	0.108	0.504	0.916	0.121	0.521	0.903	0.121
8	0.528	0.9	0.082	0.55	0.892	0.086	0.571	0.875	0.082
9	0.656	0.876	0.127	0.716	0.844	0.138	0.752	0.849	0.136
10	0.462	0.929	0.106	0.471	0.921	0.115	0.48	0.909	0.111
11	0.51	0.917	0.148	0.535	0.908	0.166	0.553	0.894	0.167
12	0.515	0.882	0.078	0.535	0.855	0.084	0.547	0.839	0.081
13	0.505	0.922	0.119	0.523	0.914	0.133	0.541	0.903	0.131
14	0.486	0.903	0.066	0.5	0.887	0.07	0.512	0.851	0.069
15	0.607	0.901	0.16	0.656	0.889	0.175	0.686	0.868	0.172
16	0.479	0.926	0.096	0.491	0.916	0.104	0.505	0.895	0.102
17	0.613	0.893	0.12	0.661	0.878	0.135	0.698	0.842	0.134
18	0.577	0.888	0.102	0.615	0.878	0.106	0.64	0.857	0.103

表 27 PP 於 4 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		$\Delta P$	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.011761	23.594672	0.0004263	8.9641155	0.0005373	1.6616672
WCHAN	0.013752	27.589643	0.0034343	72.210541	0.003457	10.69054
GIBC	0.019044	38.206342	3.433E-05	0.7218951	0.023209	71.772273
HBC	0.001564	3.1383327	3E-06	0.0630782	6.633E-05	0.2051314
NOSEC	0.001445	2.8995974	0.0005763	12.118026	0.001053	3.2563318
CITA	0.000569	1.1421846	3.033E-05	0.6377909	4.333E-06	0.0134005
ALFAR	0.001119	2.2449143	0.000109	2.2918419	0.003801	11.754337
誤差	0.00059	1.1843144	0.0001428	3.003224	0.0002085	0.6447722
總和	0.049846	100	0.0047565	100	0.0323365	100

表 28 PP 於 5 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		△P	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.017771	24.298843	0.000588	6.3601947	0.0005018	1.5484101
WCHAN	0.019051	26.048983	0.006091	65.884262	0.0034281	10.578631
GIBC	0.028983	39.628976	0.0001423	1.5395709	0.0239574	73.929039
HBC	0.002464	3.3691717	2.433E-05	0.2632053	8.811E-05	0.2718975
NOSEC	0.001835	2.5086861	0.0011223	12.139895	0.0013801	4.2588135
CITA	0.000707	0.9672867	0.0005623	6.0825672	4.811E-05	0.1484636
ALFAR	0.001453	1.9872902	0.0003403	3.6812692	0.0028601	8.825869
誤差	0.000871	1.1906878	0.0003738	4.0436272	0.0001418	0.4376762
總和	0.073137	100	0.0092445	100	0.0324056	100



表 29 PP 於 6 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		△P	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.024	24.993867	0.001024	9.4186902	0.0004488	1.4107185
WCHAN	0.023857	24.844599	0.006697	61.598602	0.0033921	10.662992
GIBC	0.038736	40.340378	3.733E-05	0.3433897	0.0239688	75.345083
HBC	0.003323	3.4607089	4.233E-05	0.3893794	8.044E-05	0.2528745
NOSEC	0.002272	2.3661909	0.0012853	11.822418	0.0016308	5.1262976
CITA	0.000919	0.9575153	0.0008563	7.8765023	0.0001334	0.4194783
ALFAR	0.001782	1.8559018	0.0004923	4.5284523	0.0020831	6.5481929
誤差	0.001134	1.1813019	0.0004378	4.0271646	7.433E-05	0.2336644
總和	0.096024	100	0.0108725	100	0.0318118	100

表 30 LDPE 於 4 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		△P	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.011628	23.32807	0.000479	10.066816	0.000226	1.3618131
WCHAN	0.012824	25.72746	0.00364	76.53724	0.001561	9.3922984
GIBC	0.018447	37.00754	2.74E-05	0.5770489	0.012028	72.370638
HBC	0.001465	2.938606	5.78E-06	0.121484	4.13E-05	0.2486963
NOSEC	0.001515	3.038915	0.000587	12.337632	0.000673	4.0493381
CITA	0.000521	1.044773	3.24E-05	0.6821792	4.33E-06	0.026073
ALFAR	0.001028	2.062575	0.000115	2.4273432	0.002008	12.083835
誤差	0.000567	1.138507	0.00017	3.5779366	7.82E-05	0.4703169
總和	0.047995	100	0.004756	100	0.01662	100



表 31 LDPE 於 5 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		△P	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.017841	24.39364	0.000561	6.0657412	0.000397	1.7242709
WCHAN	0.020844	28.50055	0.005605	60.624962	0.002731	11.850084
GIBC	0.030341	41.48577	0.000135	1.4578451	0.016931	73.452398
HBC	0.002617	3.578824	2.74E-05	0.2968572	5.34E-05	0.2318631
NOSEC	0.001879	2.569303	0.001037	11.221681	0.00083	3.6013497
CITA	0.000811	1.108574	0.000496	5.3698696	1.48E-05	0.0641118
ALFAR	0.001631	2.229758	0.000322	3.4805601	0.001987	8.6223186
誤差	0.000922	1.261104	0.000355	3.8453218	0.000105	0.4548084
總和	0.076887	100	0.008539	100	0.02305	100

表 32 LDPE 於 6 溝道時之變數分析表

變異來源	MD		UNI		△P	
	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)	SS	貢獻度(%)
DEPTH	0.024	24.99387	0.000931	8.5632818	0.000374	1.6184076
WCHAN	0.023857	24.8446	0.006181	56.855531	0.002777	12.012363
GIBC	0.038736	40.34038	3.9E-05	0.3587196	0.017321	74.929823
HBC	0.003323	3.460709	3.6E-05	0.3311258	5.08E-05	0.2196651
NOSEC	0.002272	2.366191	0.001226	11.27974	0.00099	4.2832285
CITA	0.000919	0.957515	0.000804	7.3982095	5.28E-05	0.2283171
ALFAR	0.001782	1.855902	0.000476	4.3812853	0.001477	6.3914364
誤差	0.001134	1.181302	0.000398	3.662313	7.37E-05	0.3186826
總和	0.096024	100	0.010092	100	0.023116	100





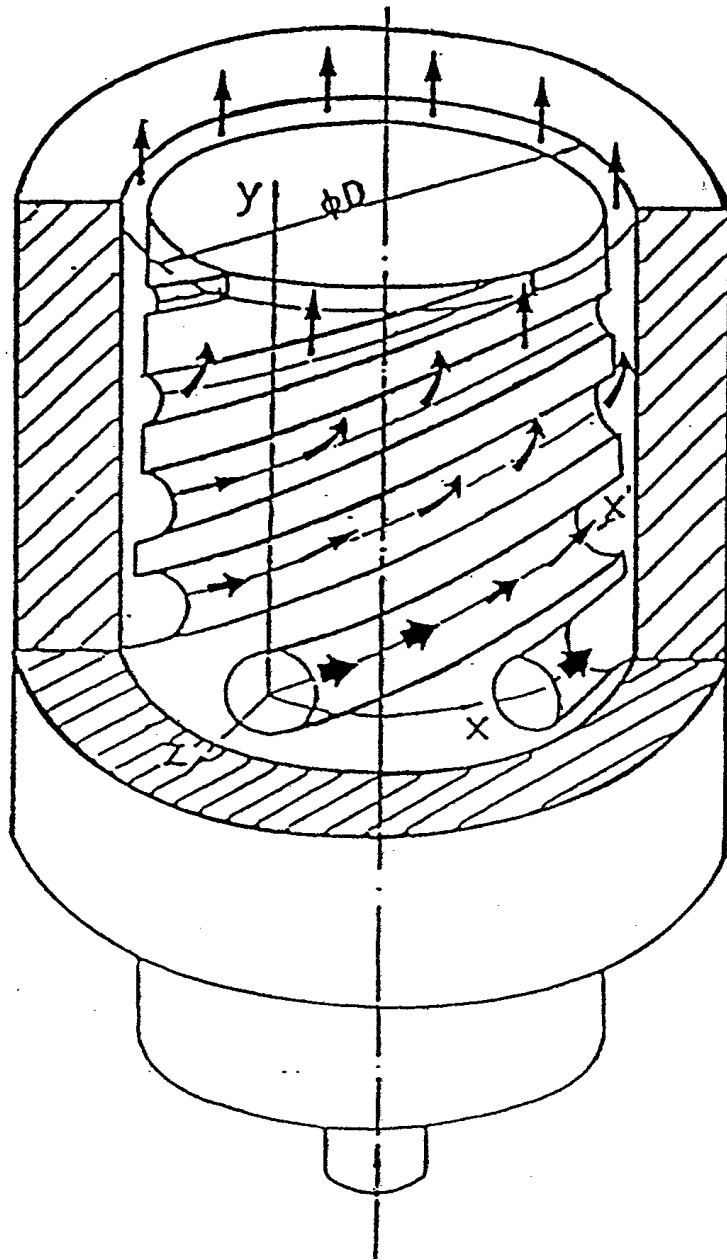


圖 1 螺旋式軸心模頭

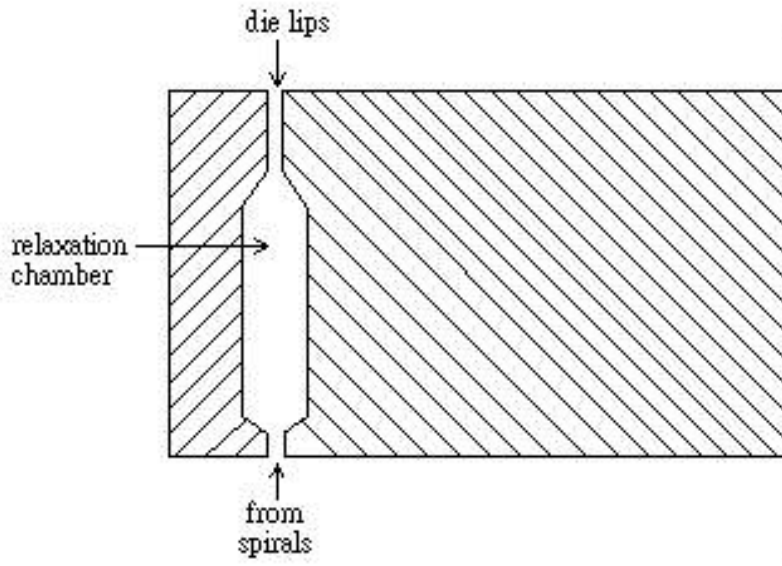


圖 2 鬆弛室和模唇之構造圖

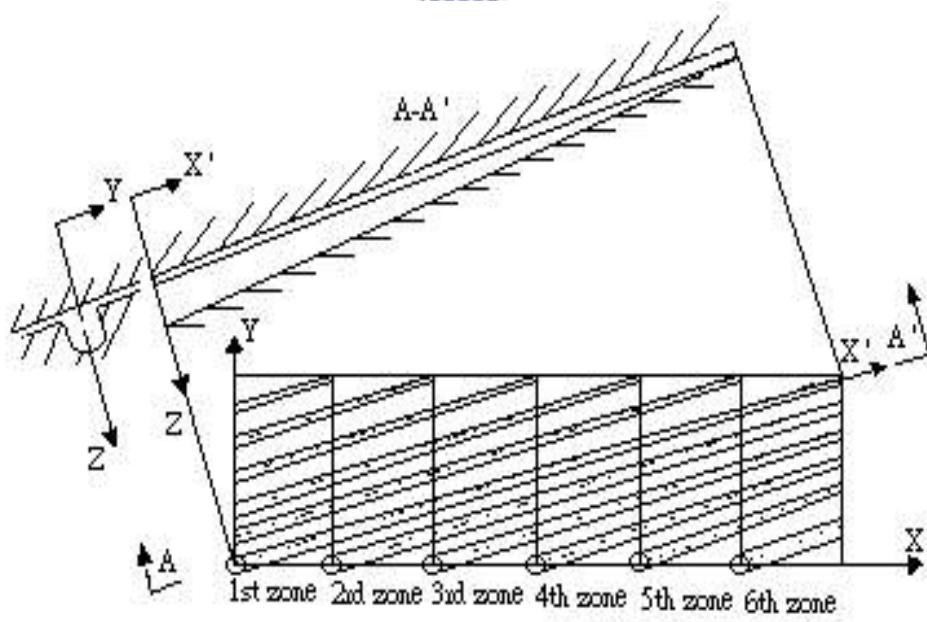


圖 3 模頭之展開圖

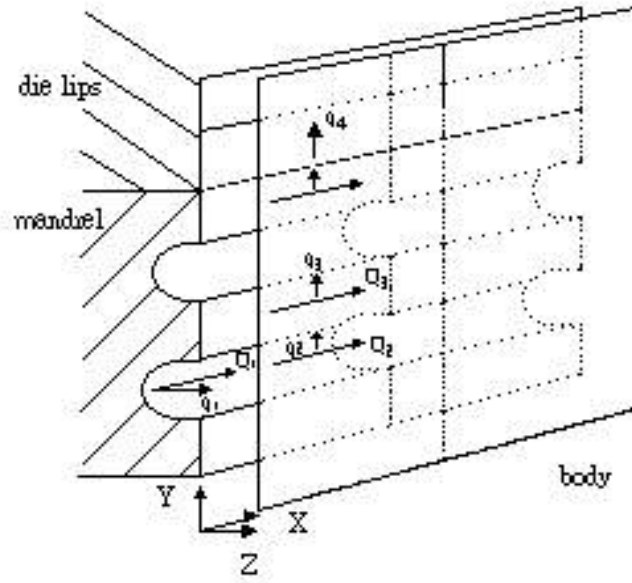


圖 4 單元之構造圖

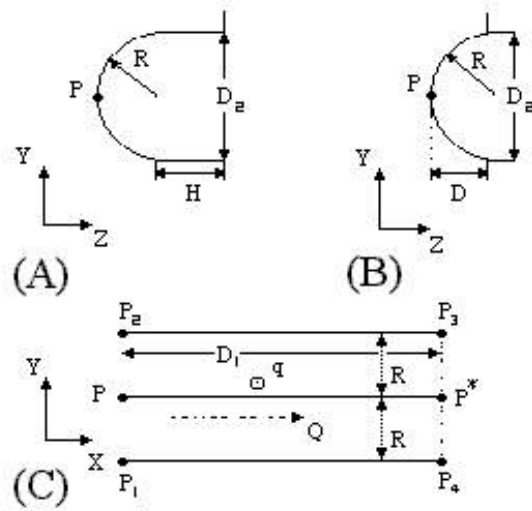


圖 5 子單元一之形狀

(A)深度大於半徑時的側視圖

(B)深度小於半徑時的側視圖

(C)正視圖

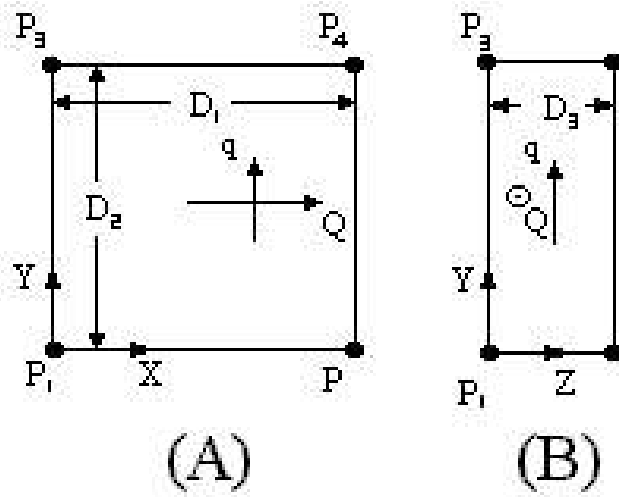


圖 6 子單元二、三之形狀

(A)正視圖

(B)側視圖

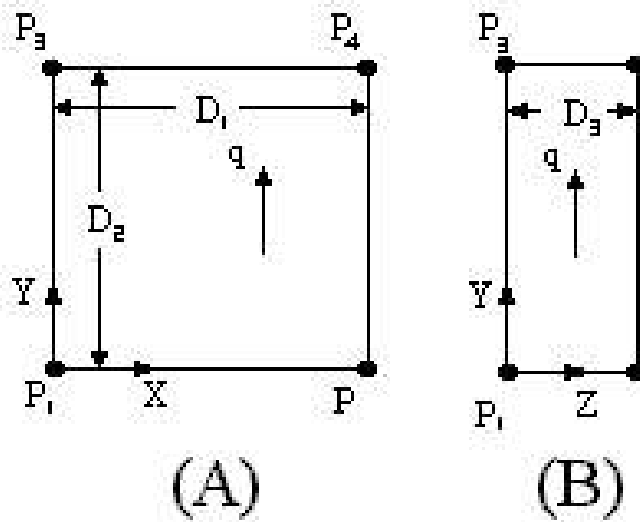


圖 7 子單元四之形狀

(A)正視圖

(B)側視圖

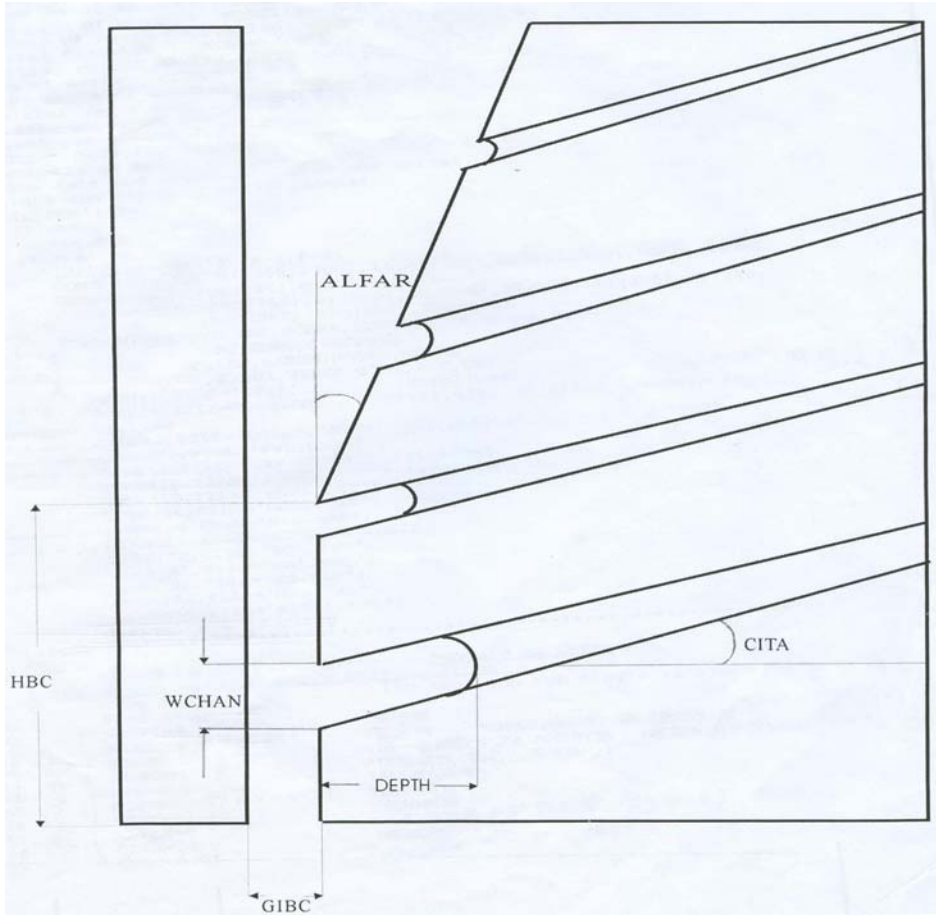


圖 8 各參數示意圖

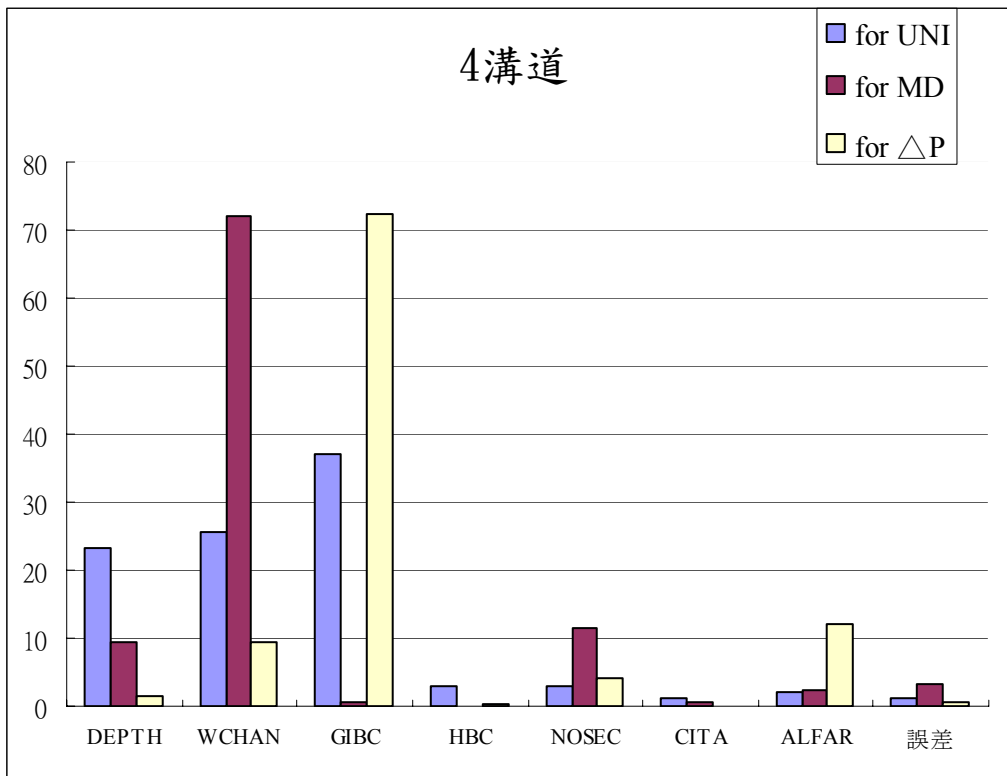


圖 9 LDPE 在 4 溝道時各變數的貢獻度

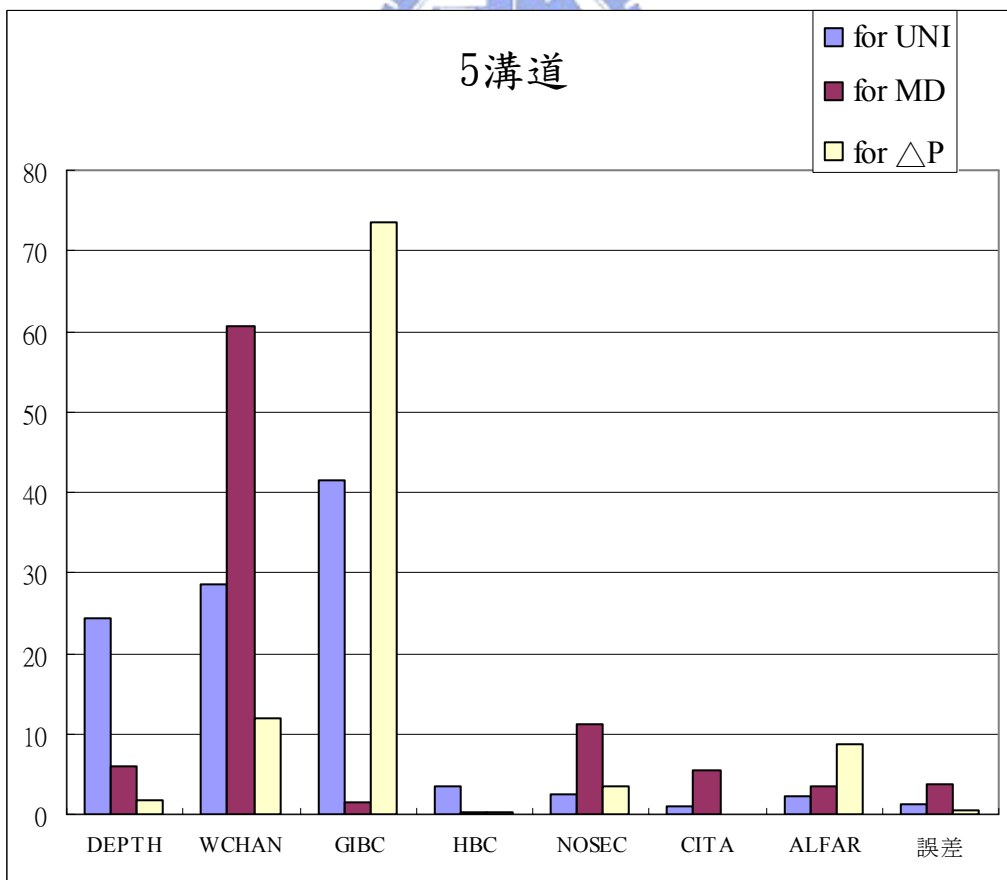


圖 10 LDPE 在 5 溝道時各變數的貢獻度

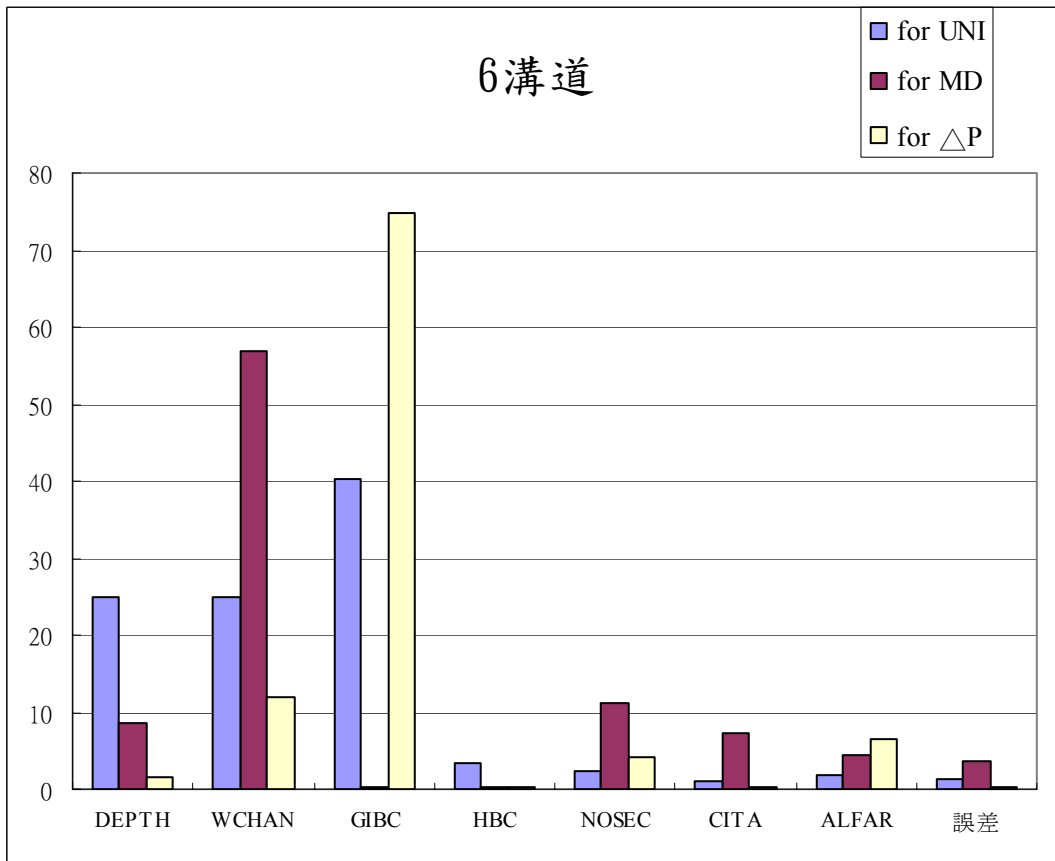


圖 11 LDPE 在 6 溝道時各變數的貢獻度

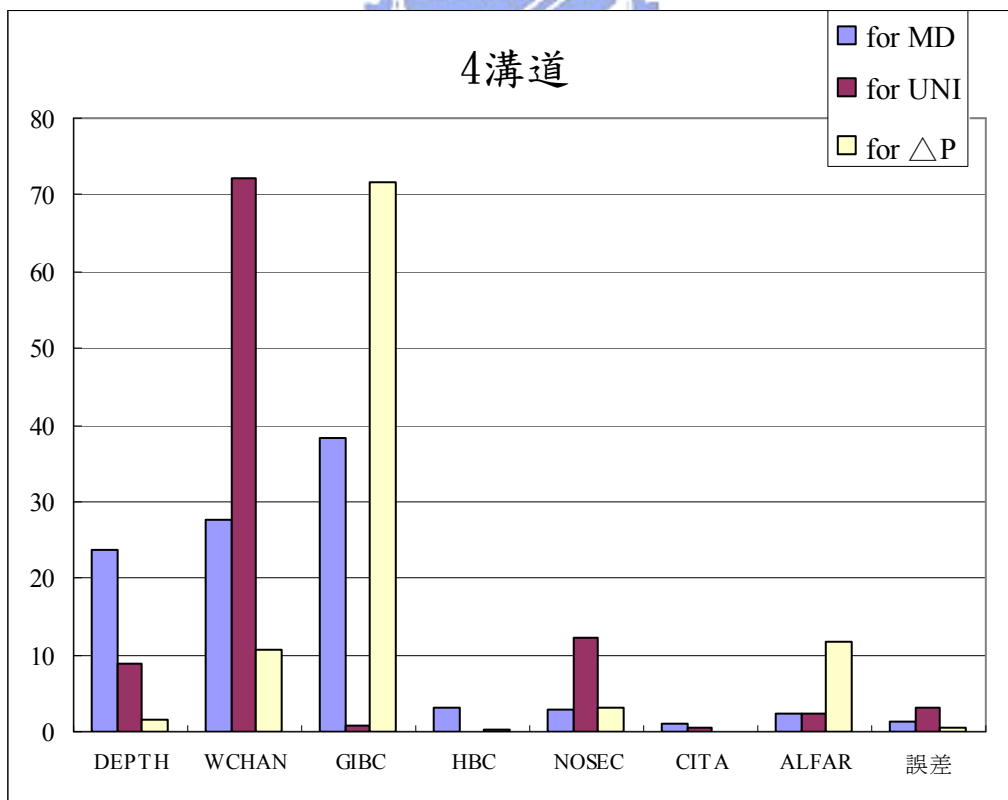


圖 12 PP 在 4 溝道時各變數的貢獻度

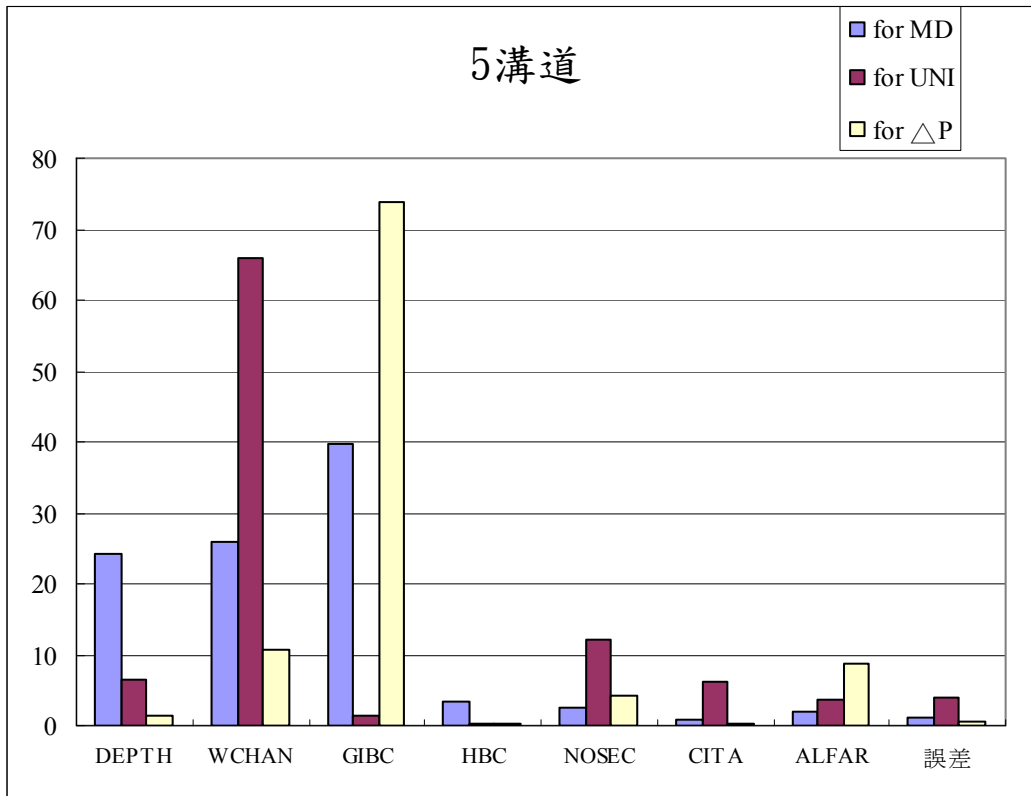


圖 13 PP 在 5 溝道時各變數的貢獻度

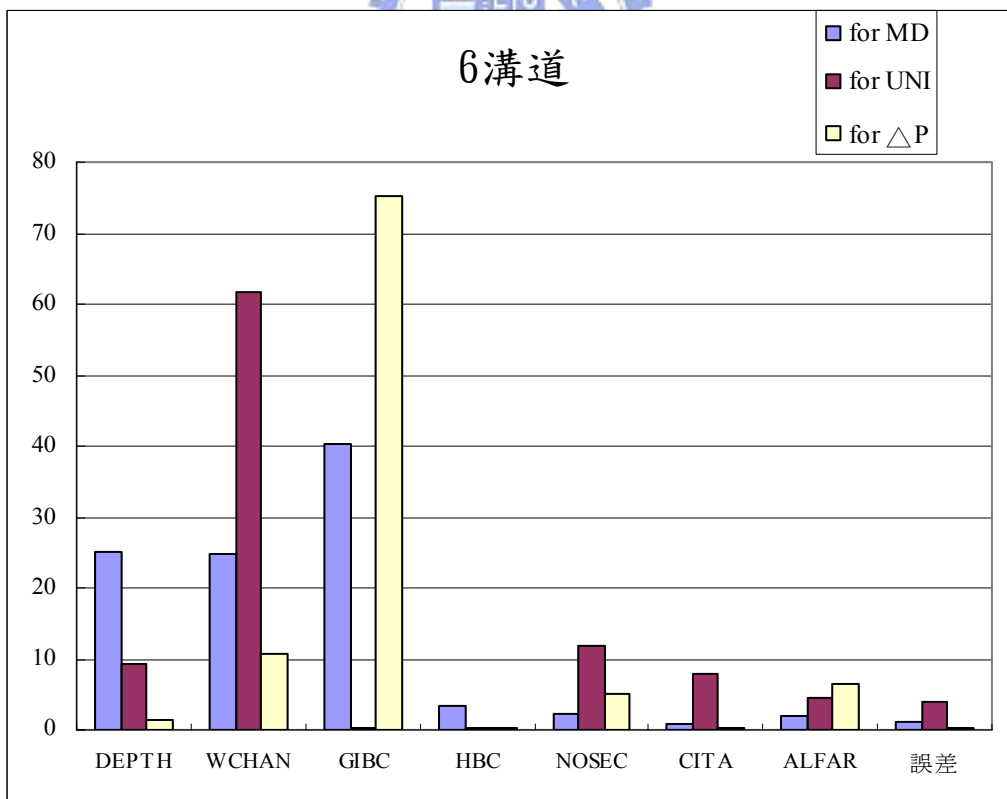


圖 14 PP 在 6 溝道時各變數的貢獻度



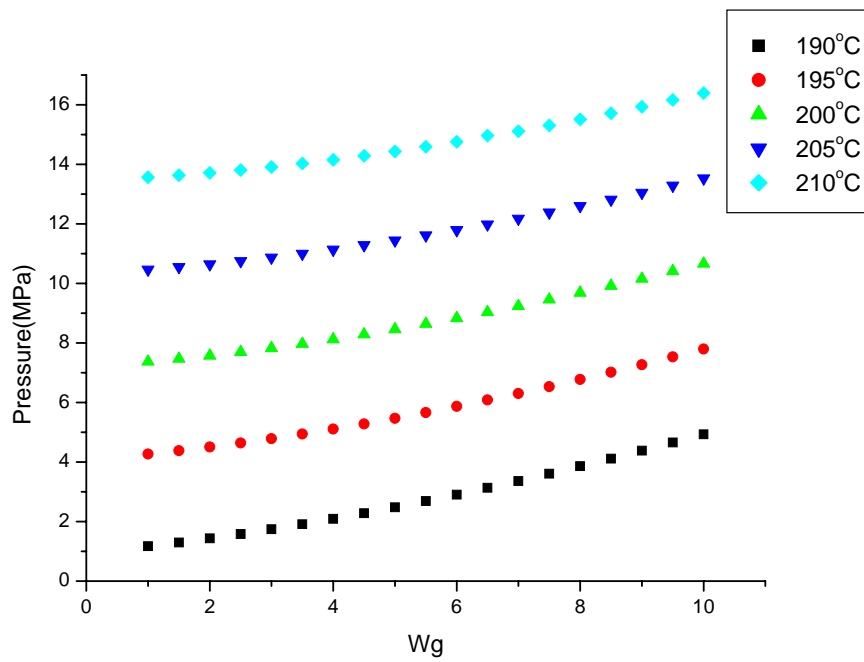
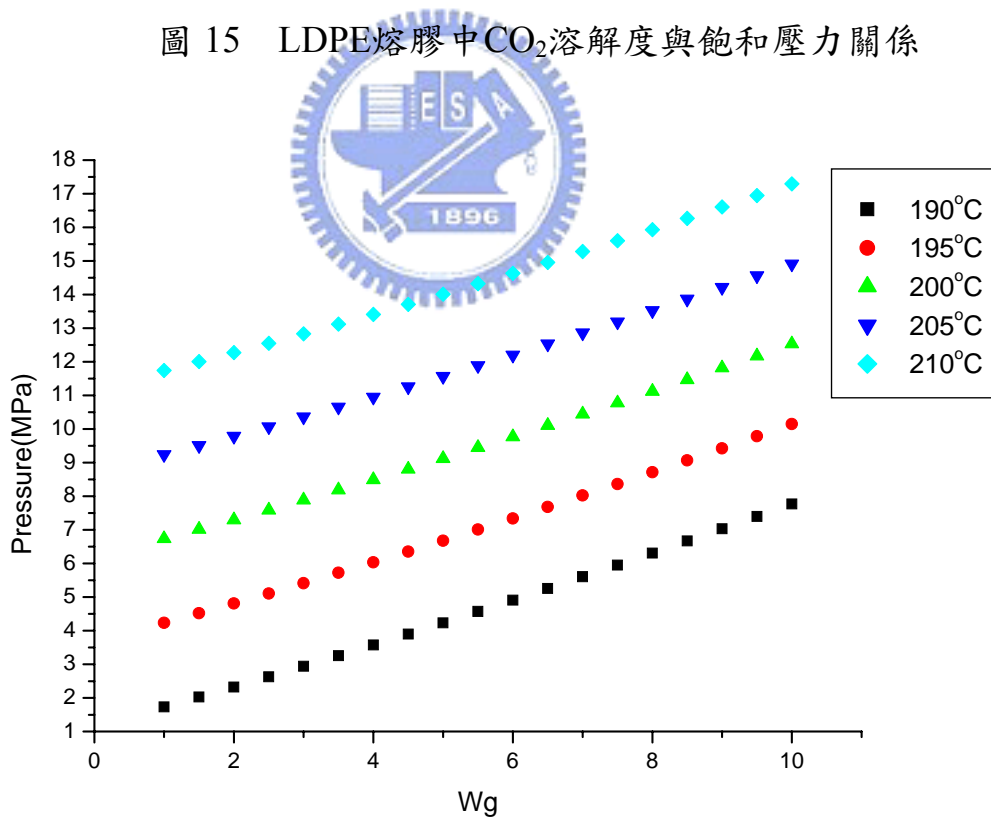


圖 15 LDPE熔膠中CO<sub>2</sub>溶解度與飽和壓力關係



圖

圖 16 PP熔膠中CO<sub>2</sub>溶解度與飽和壓力關係

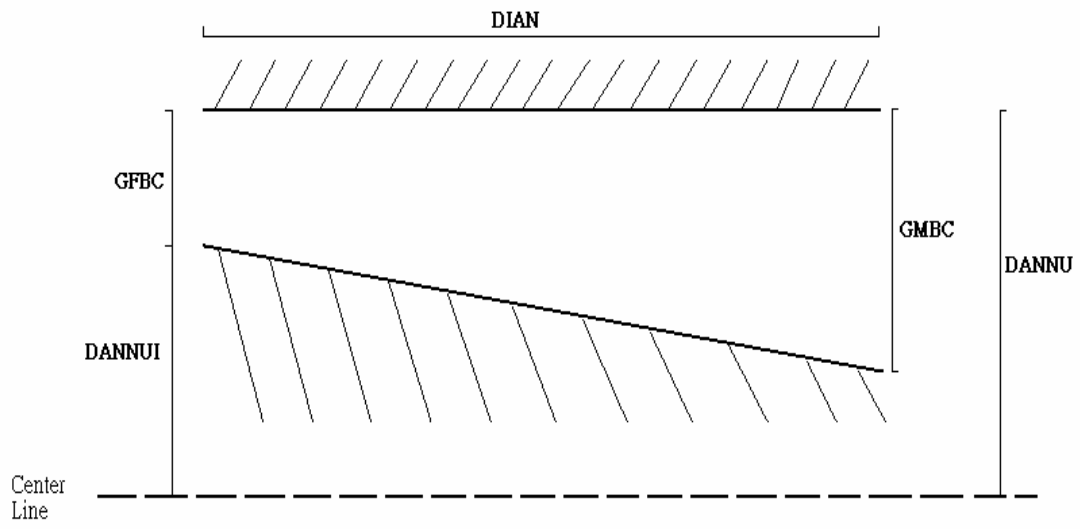


圖 17 模唇參數示意圖



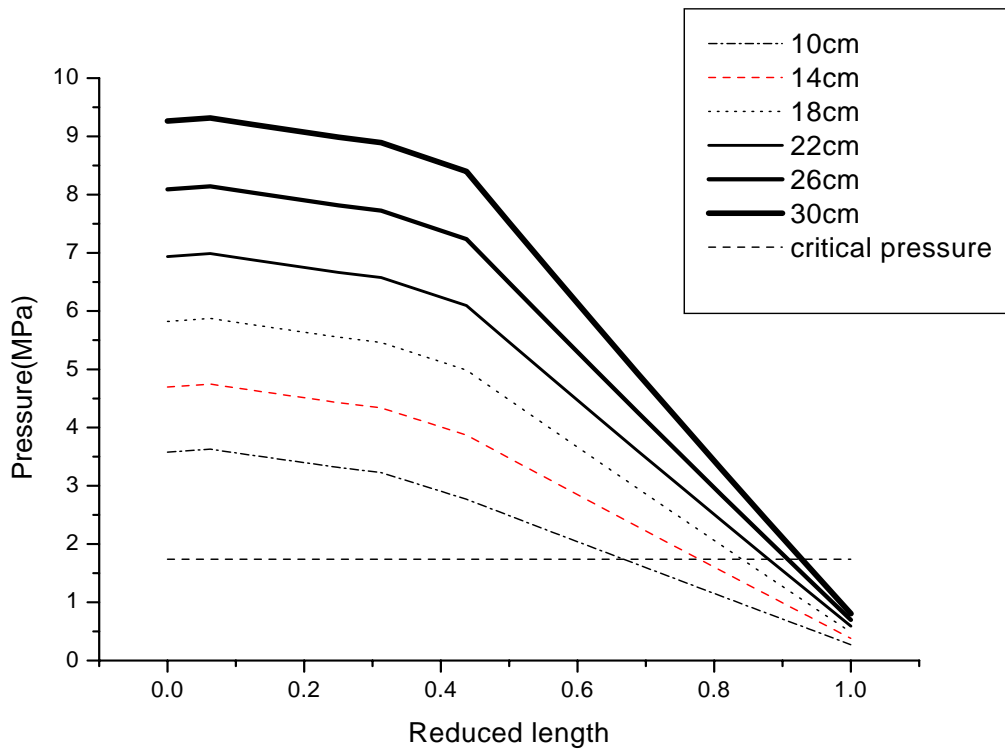


圖 18(a) 等溫清況下，熔膠為 LDPE 時，

不同模唇長度的壓力變化

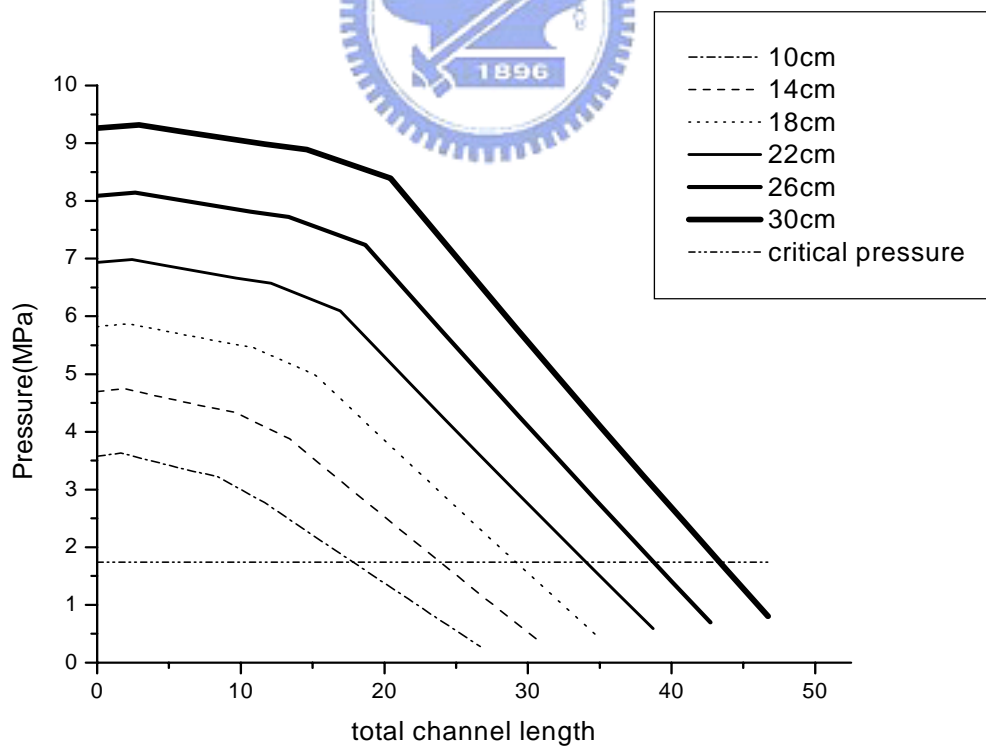


圖 18(b) 等溫清況下，熔膠為 LDPE 時，

不同模唇長度的壓力變化

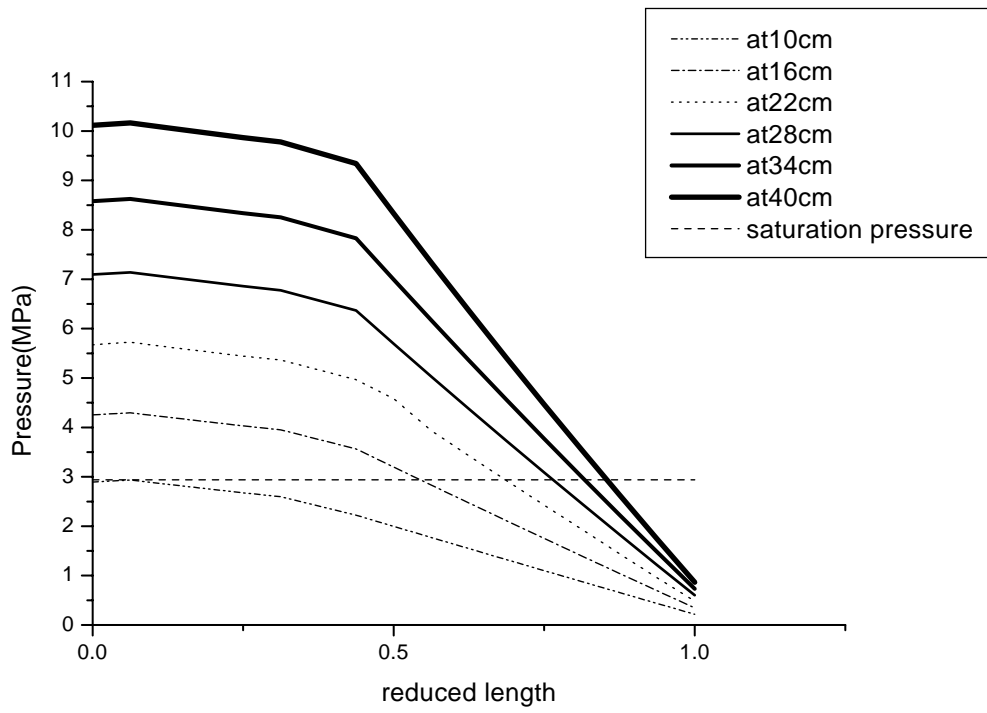


圖 19(a) 等溫情況下，熔膠為 PP 時，

不同模唇長度的壓力變化

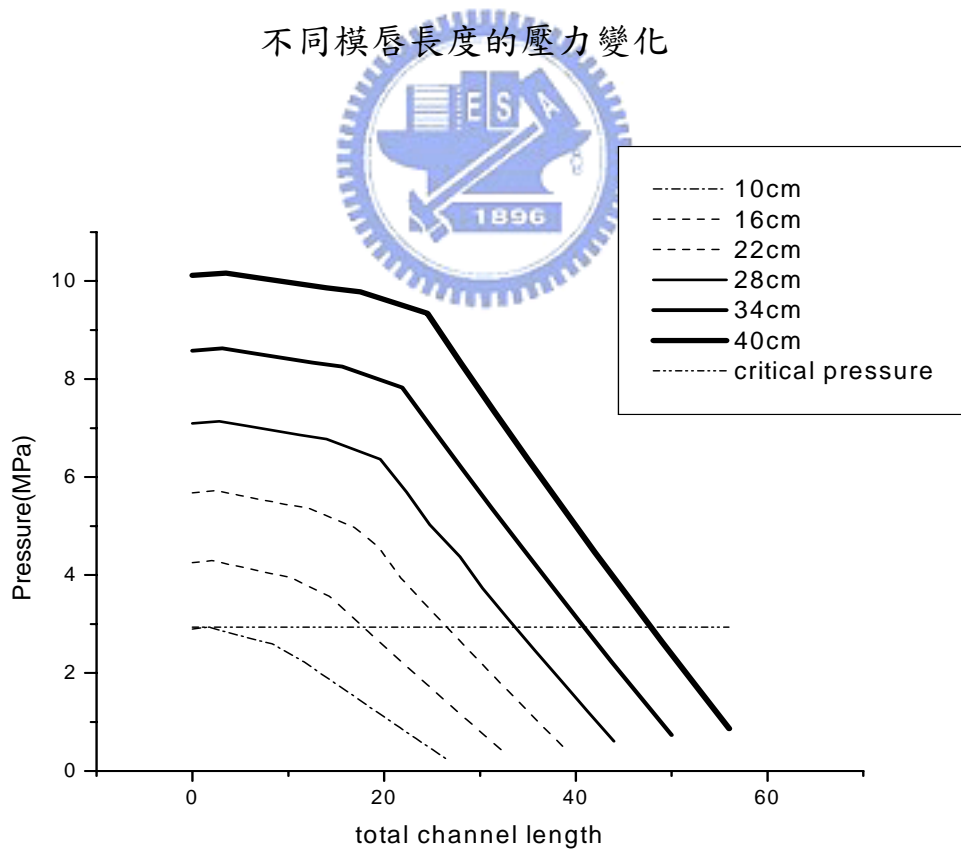


圖 19(b) 等溫情況下，熔膠為 PP 時，

不同模唇長度的壓力變化

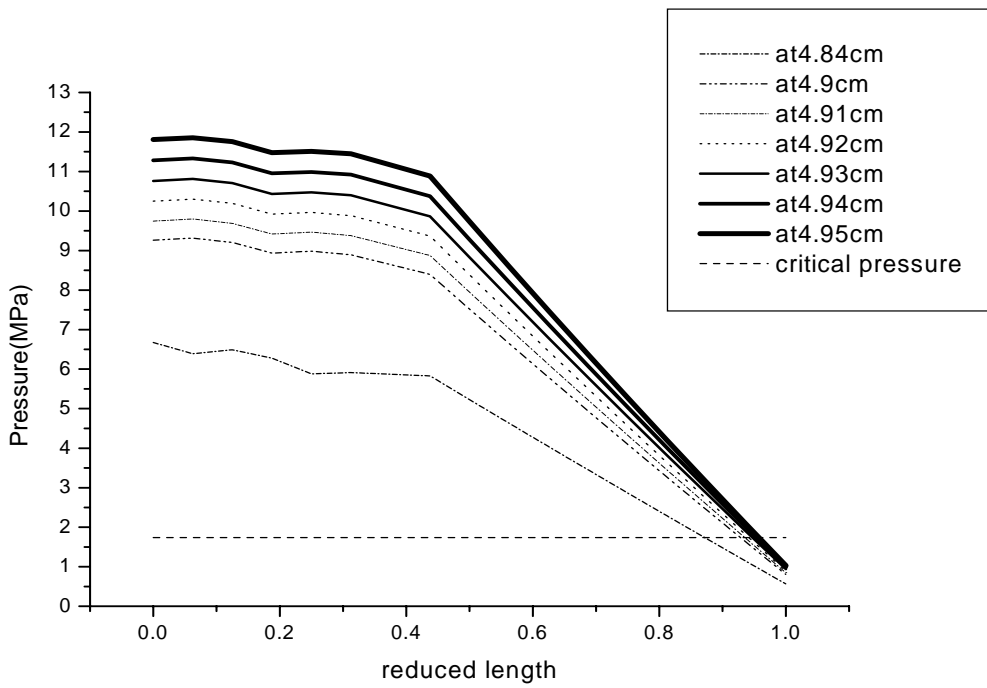


圖 20(a) 等溫情況下，熔膠為 LDPE 時，

不同內模半徑的壓力變化

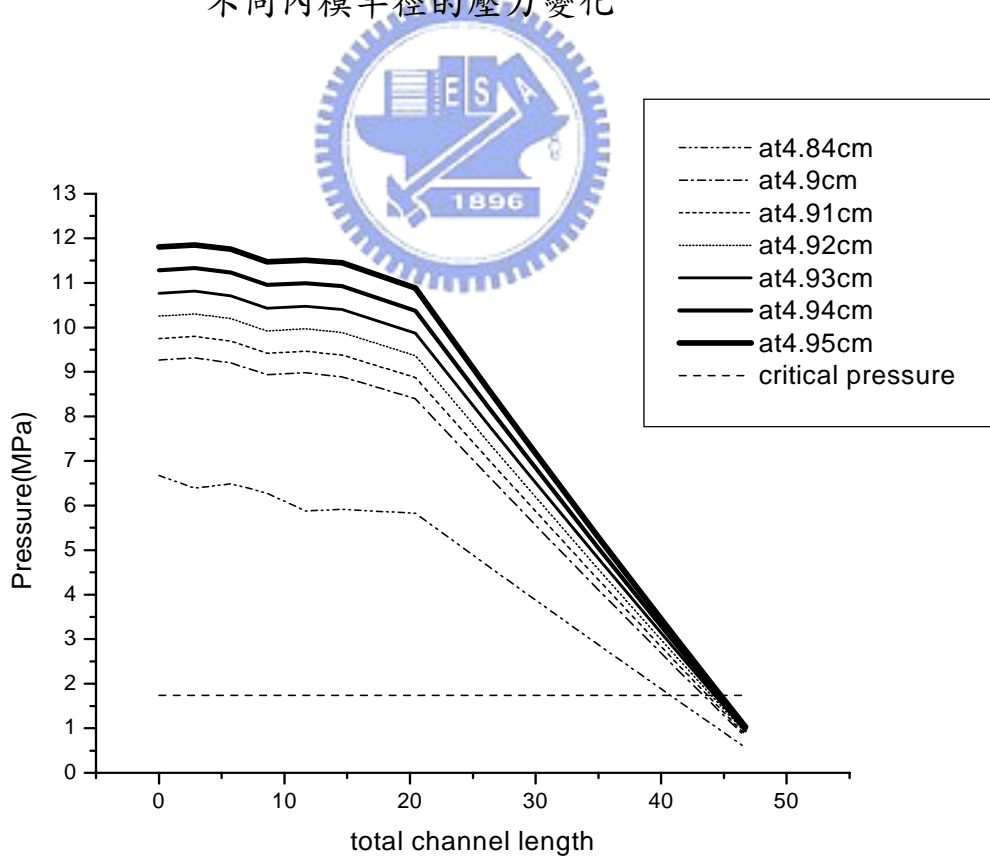


圖 20(b) 等溫情況下，熔膠為 LDPE 時，

不同內模半徑的壓力變化

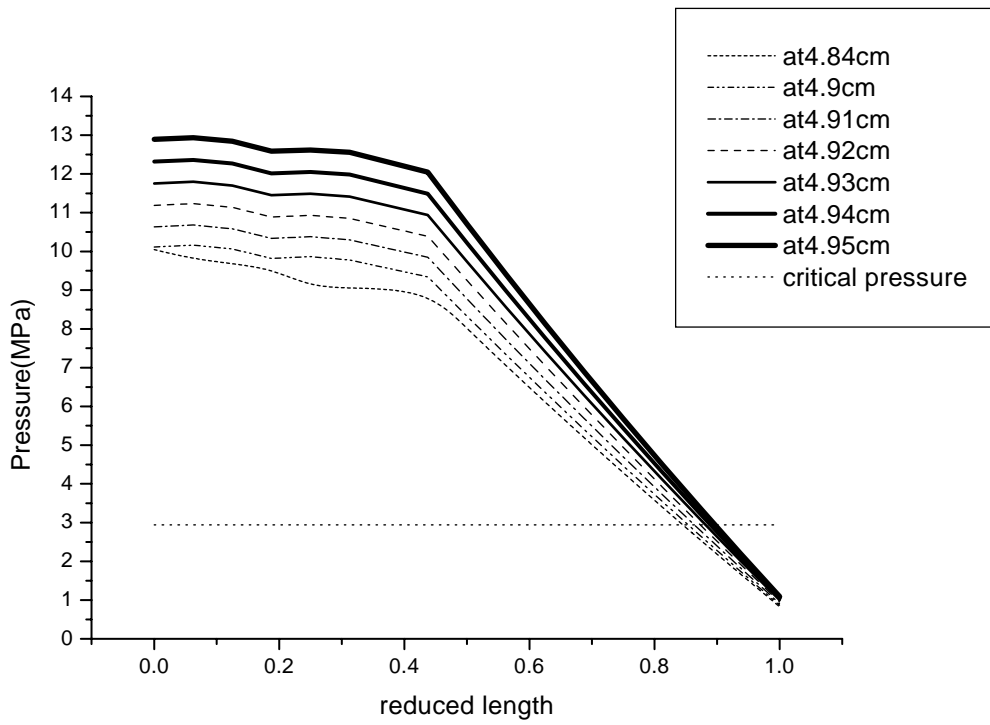


圖 21(a) 等溫清況下，熔膠為 PP 時，

不同內模半徑的壓力變化

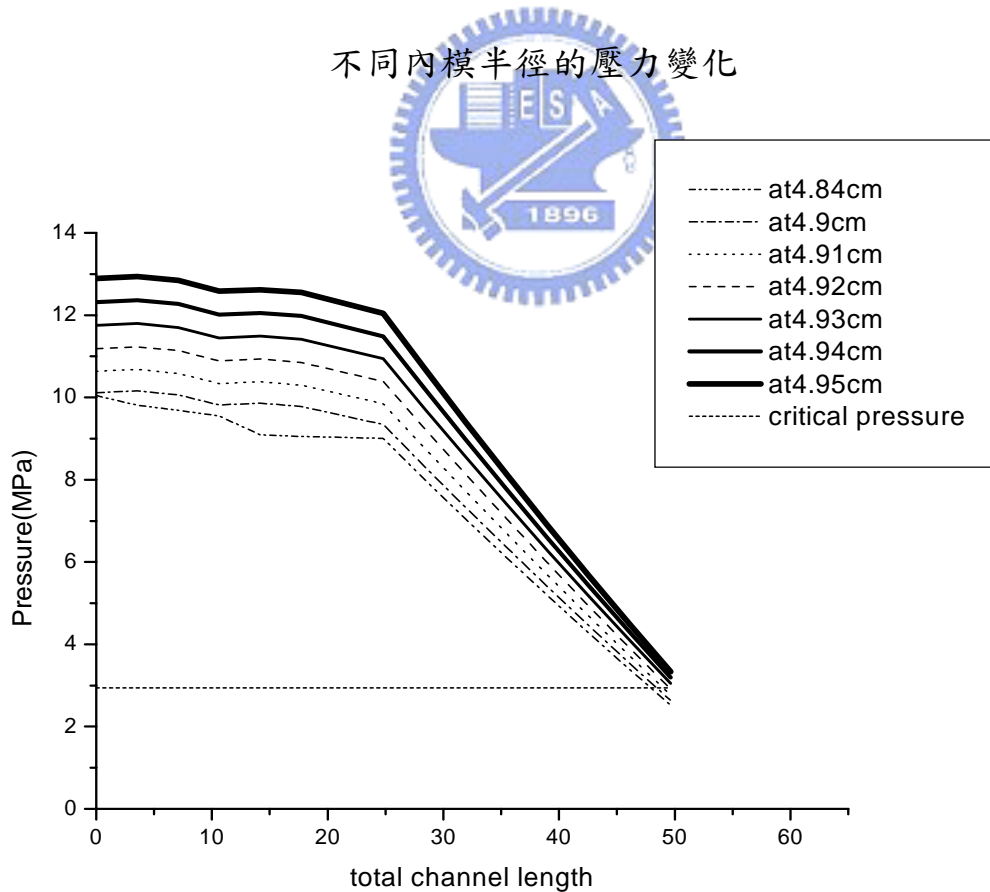


圖 21(b) 等溫度清況下，熔膠為 PP 時，

不同內模半徑的壓力變化

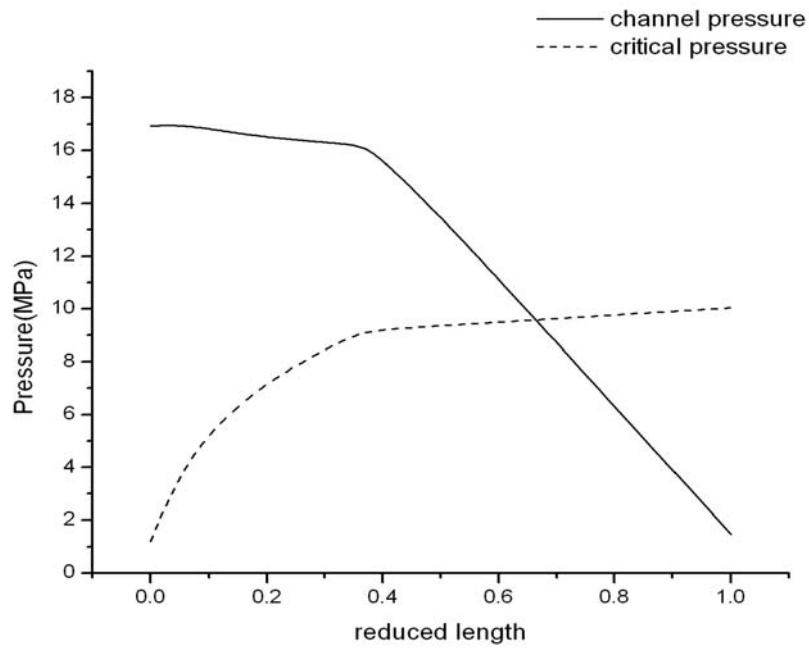


圖 22(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=1%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

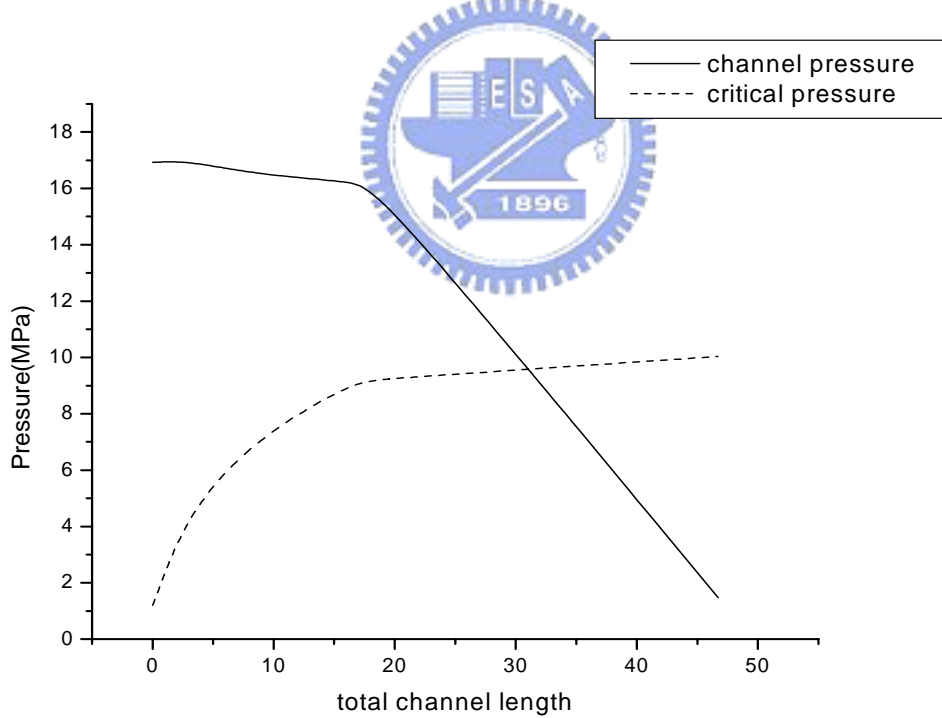


圖 22(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=1%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

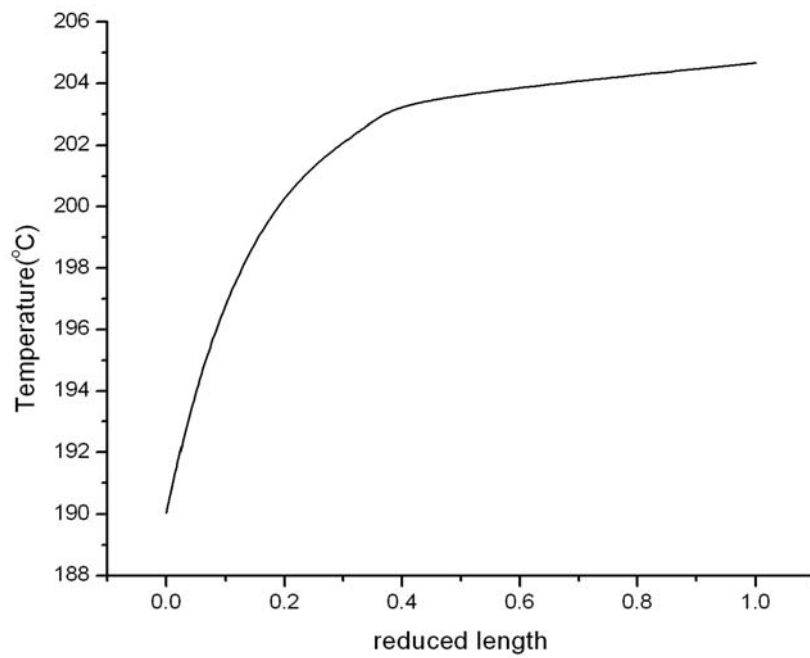


圖 23(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=1%時，

溫度隨溝道的變化

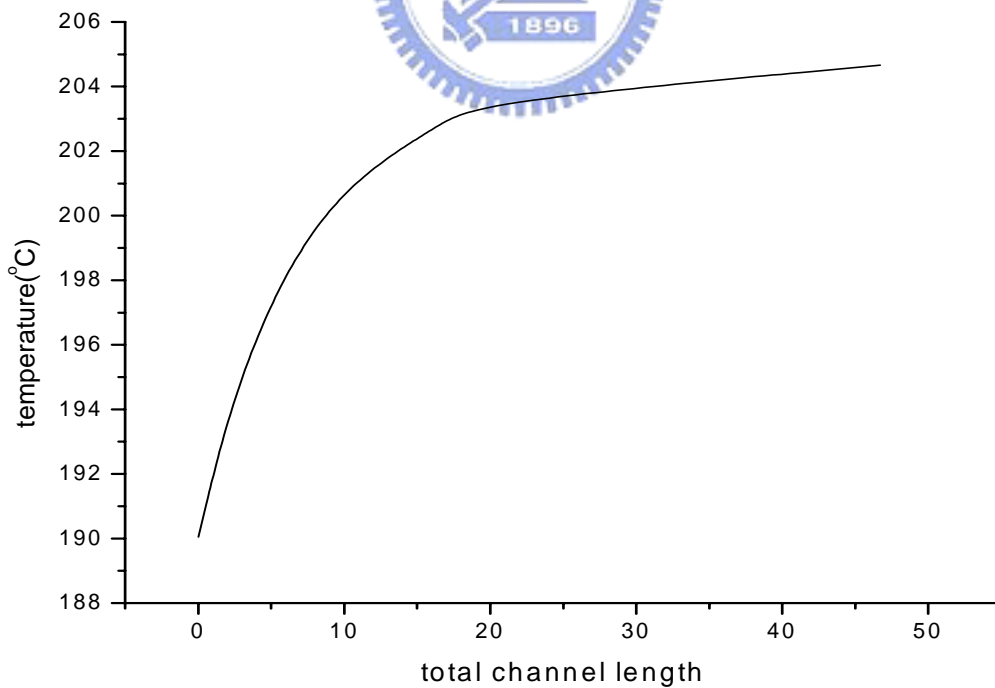


圖 23(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=1%時，

溫度隨溝道的變化



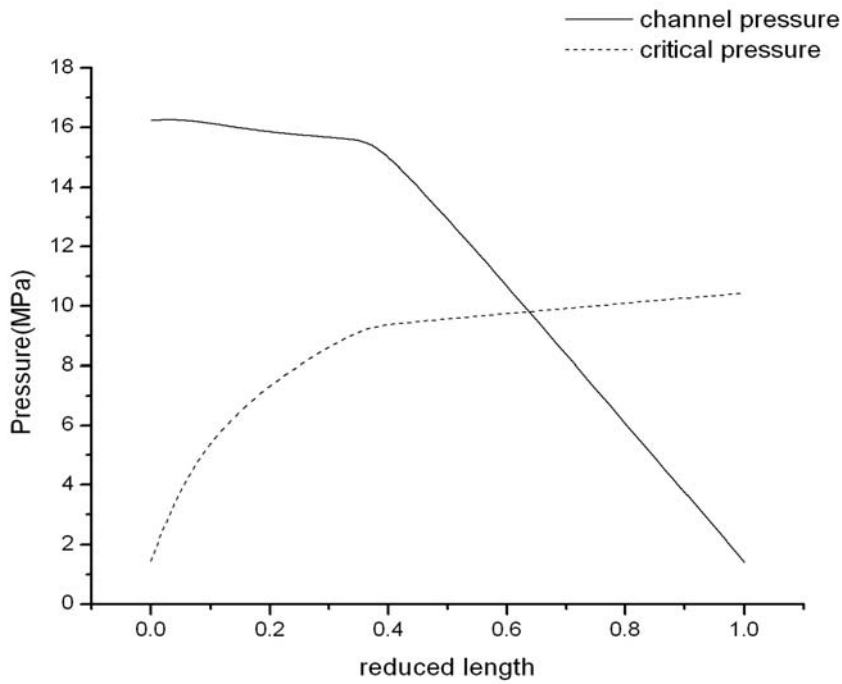


圖 24(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=2%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

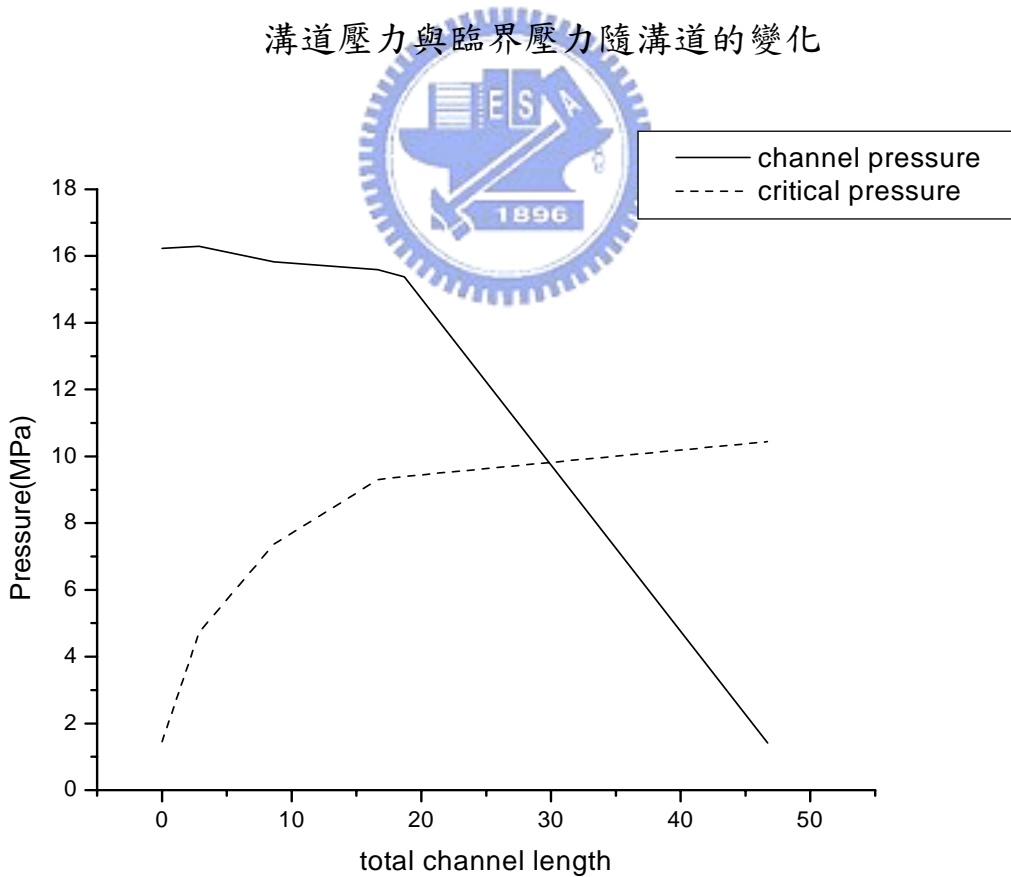


圖 24(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=2%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

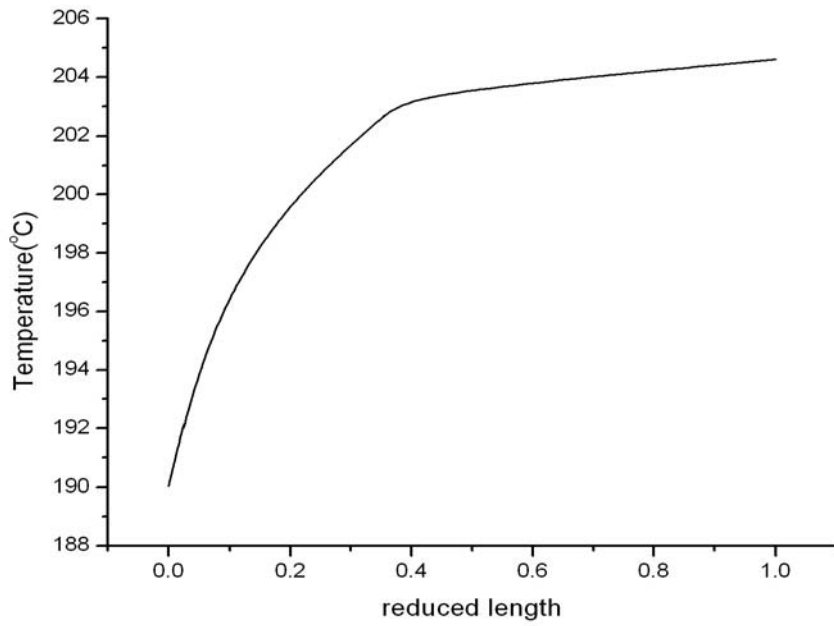


圖 25(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=2%時，

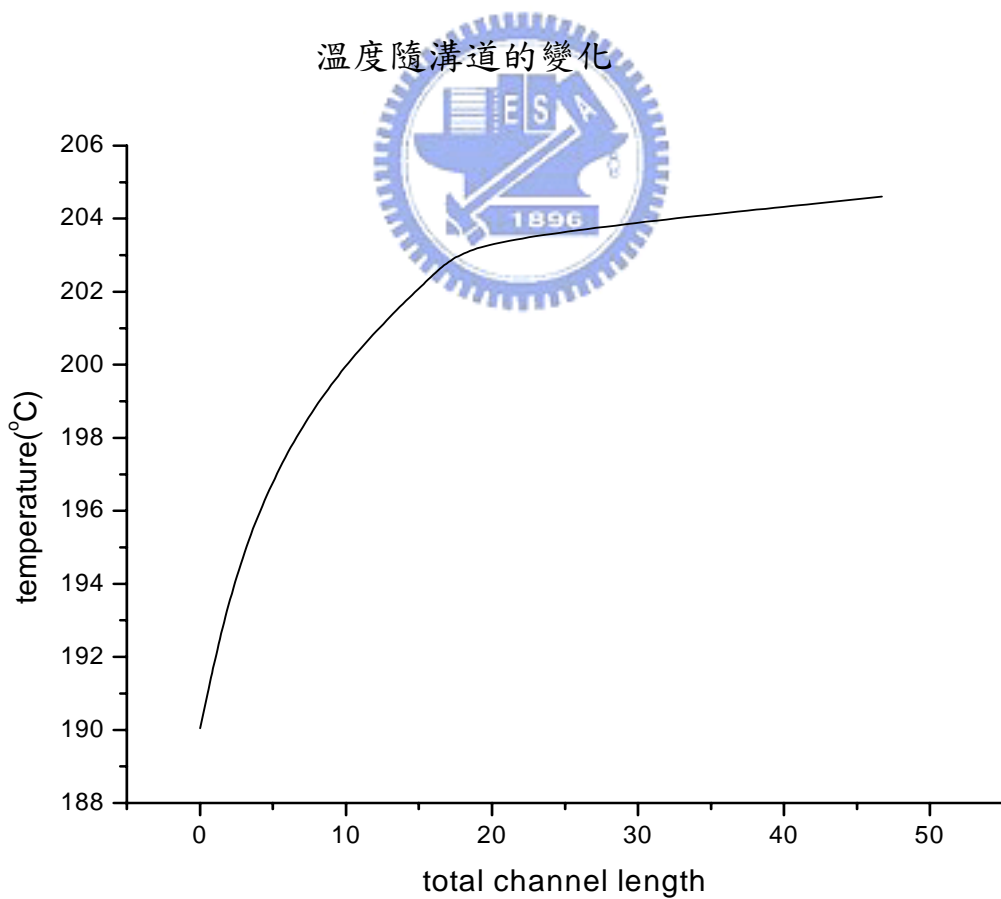


圖 25(b) LDPE 發泡劑重量百分比=2%時，

溫度隨溝道的變化

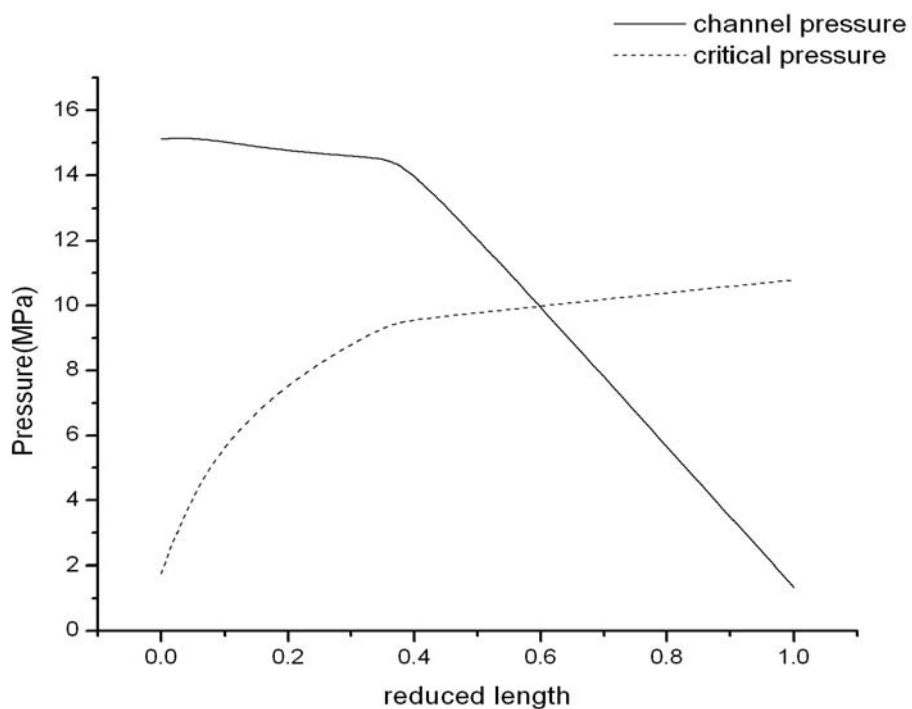


圖 26(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=3%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

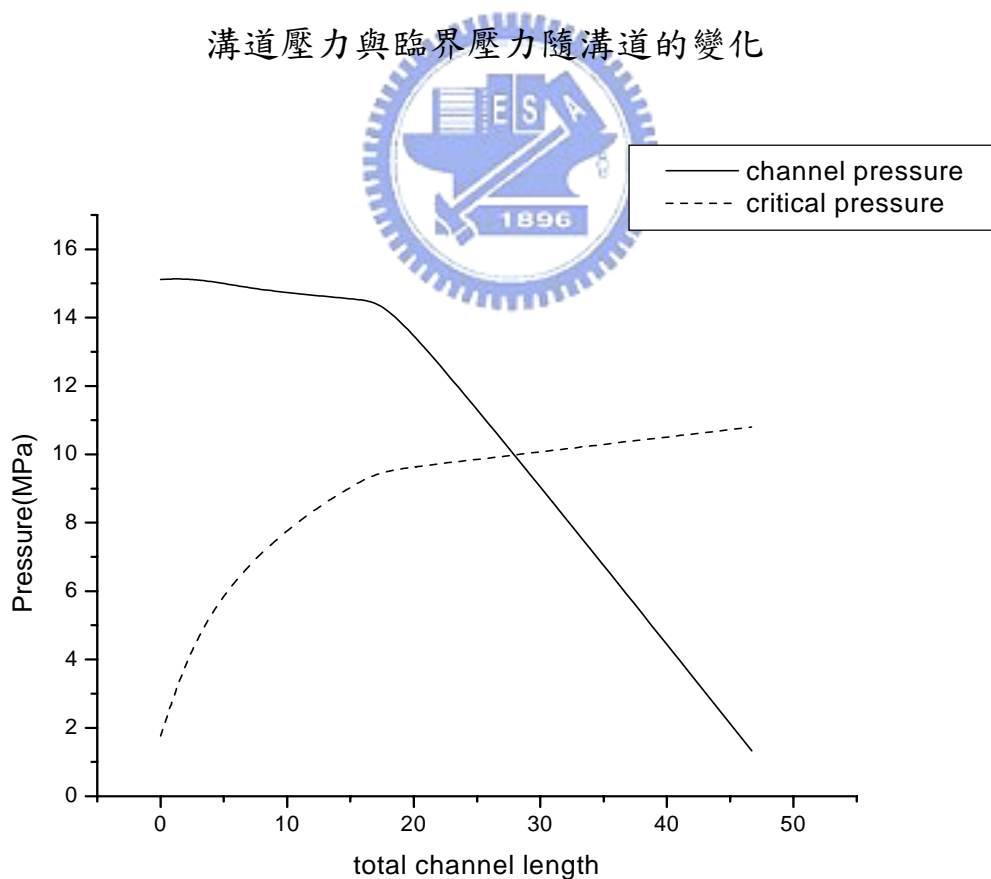


圖 26(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=3%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

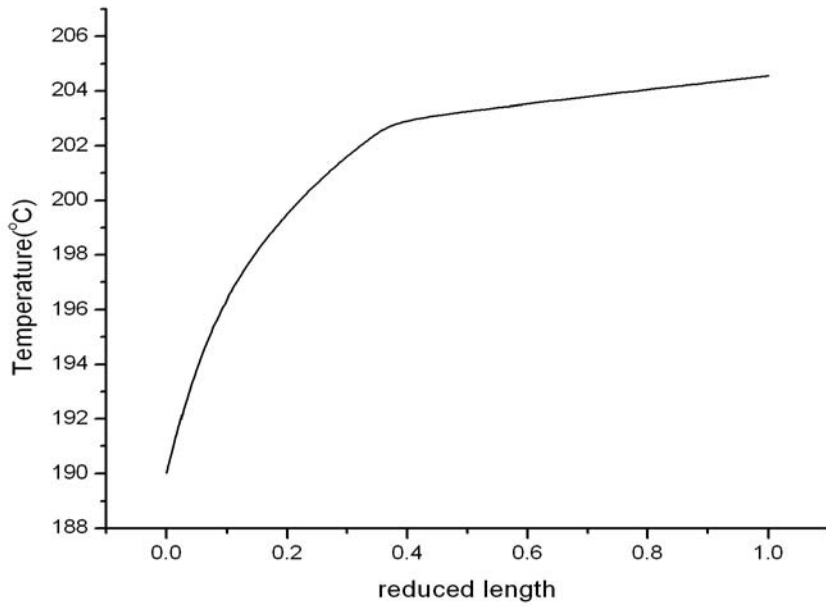


圖 27(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=3%時，

溫度隨溝道的變化

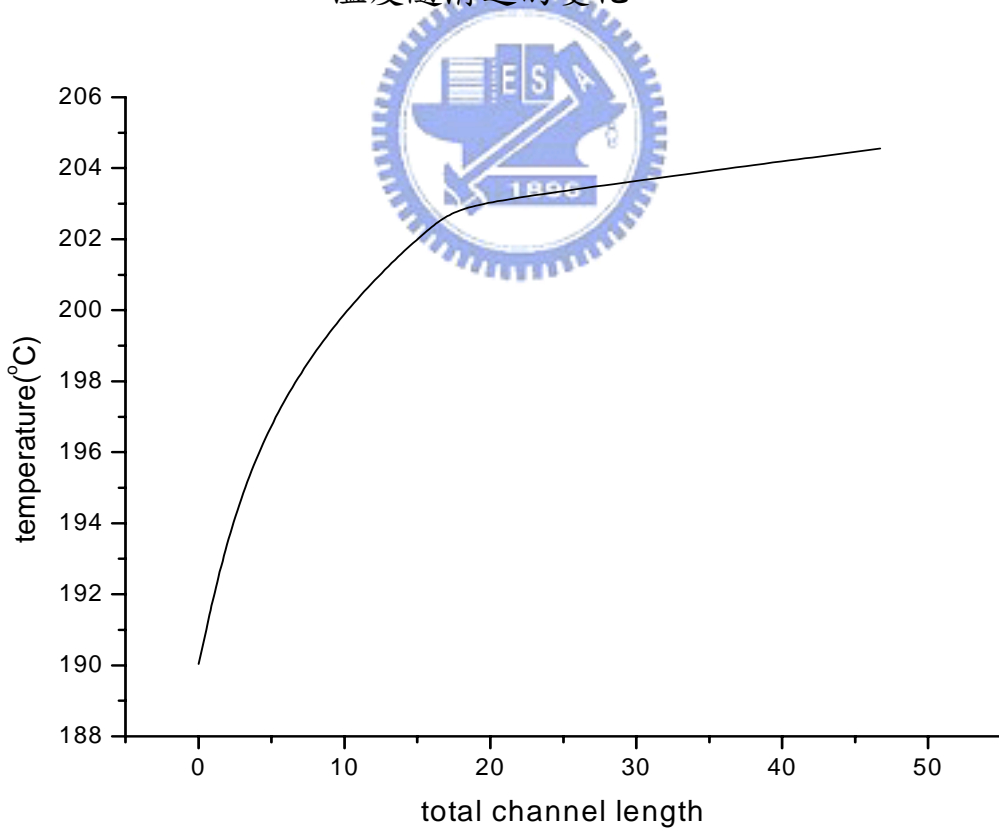


圖 27(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=3%時，

溫度隨溝道的變化

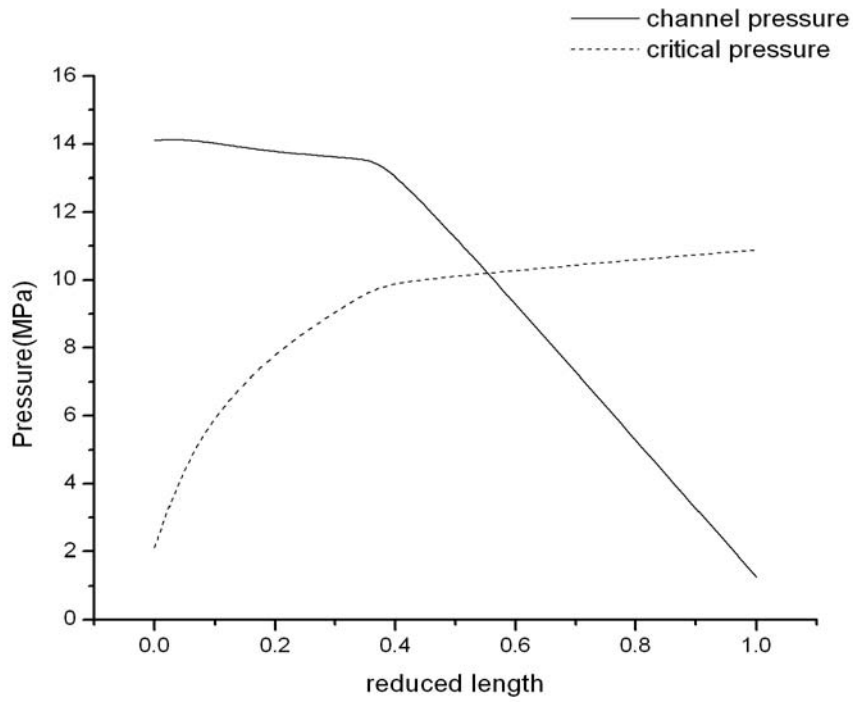


圖 28(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=4%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

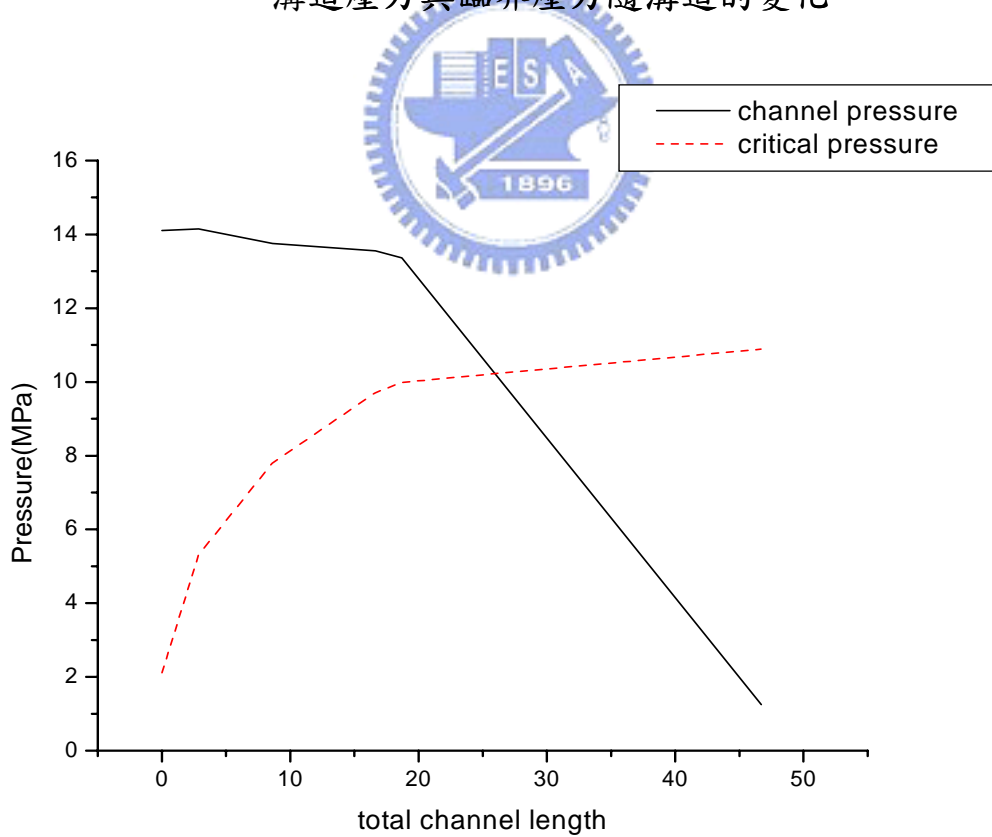


圖 28(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=4%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

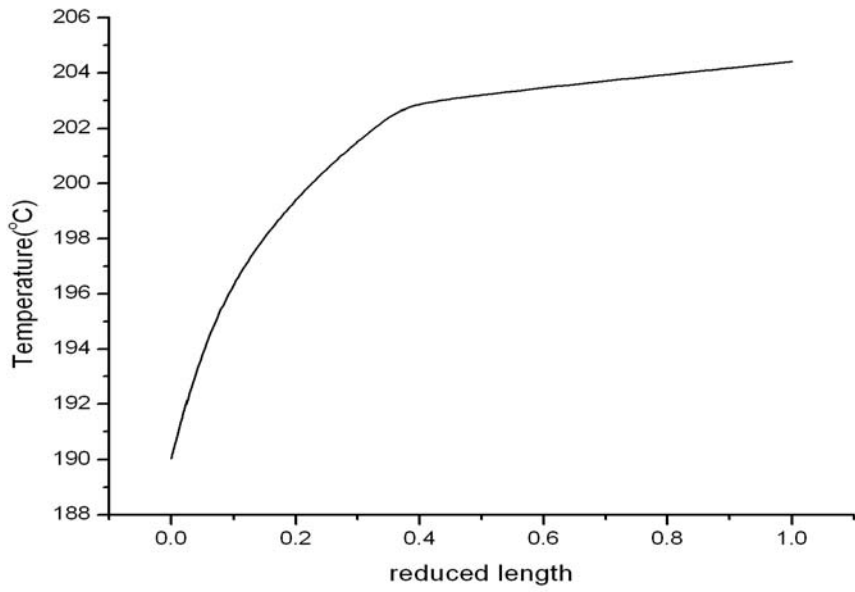


圖 29(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=4%時，

溫度隨溝道的變化

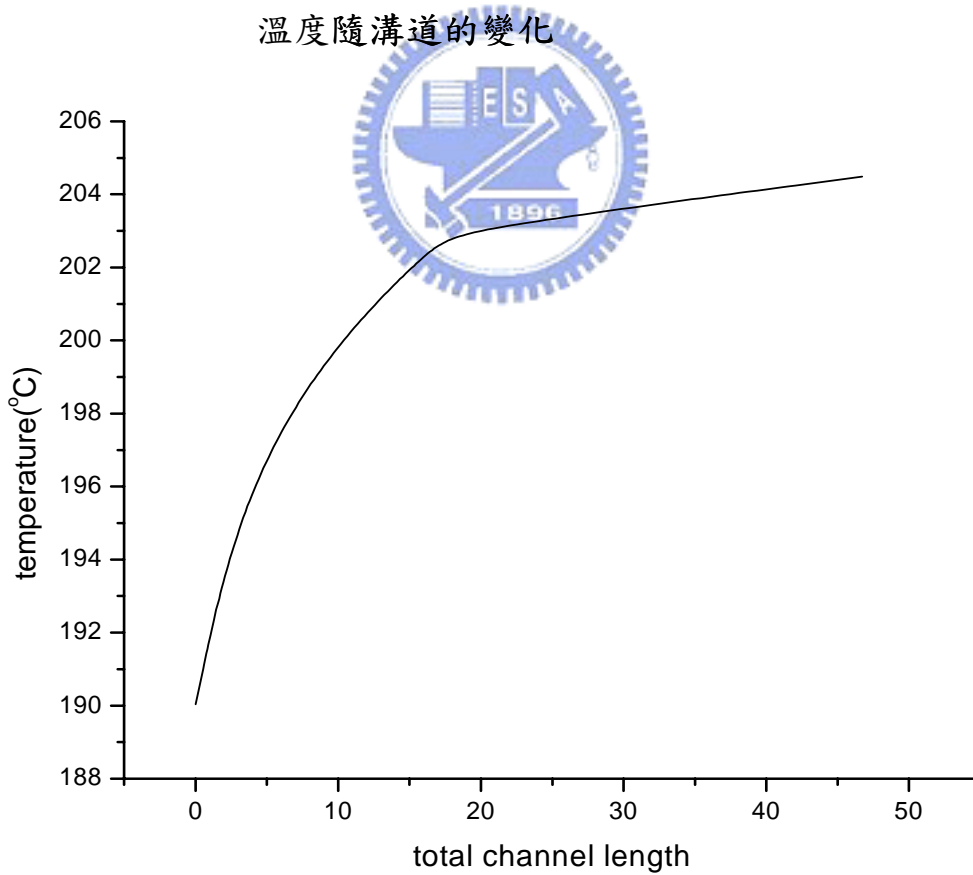


圖 29(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=4%時，

溫度隨溝道的變化

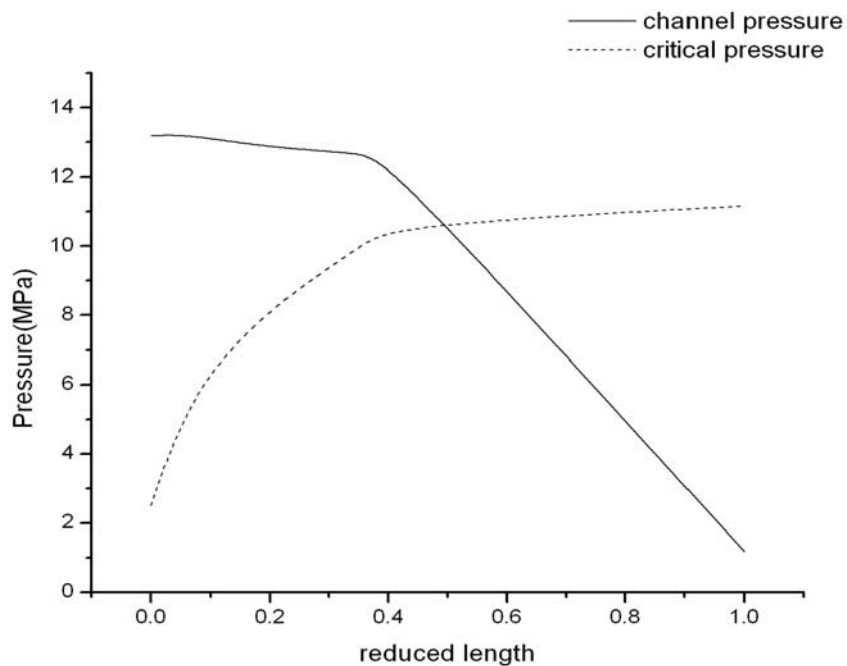


圖 30(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=5%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

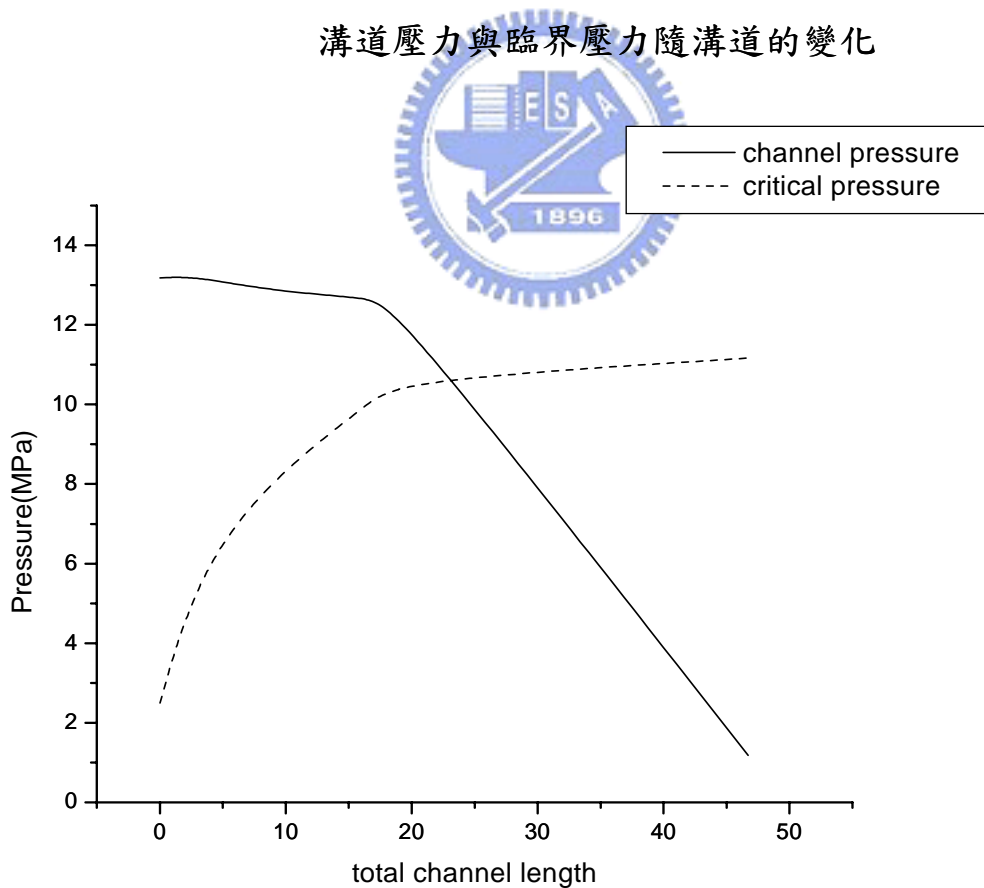


圖 30(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=5%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

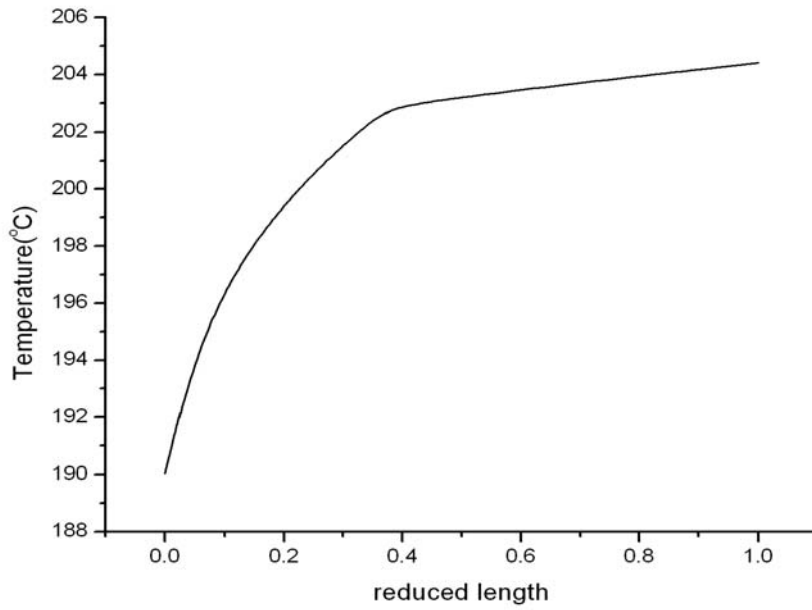


圖 31(a) LDPE 中發泡劑重量百分比=5%時，

溫度隨溝道的變化

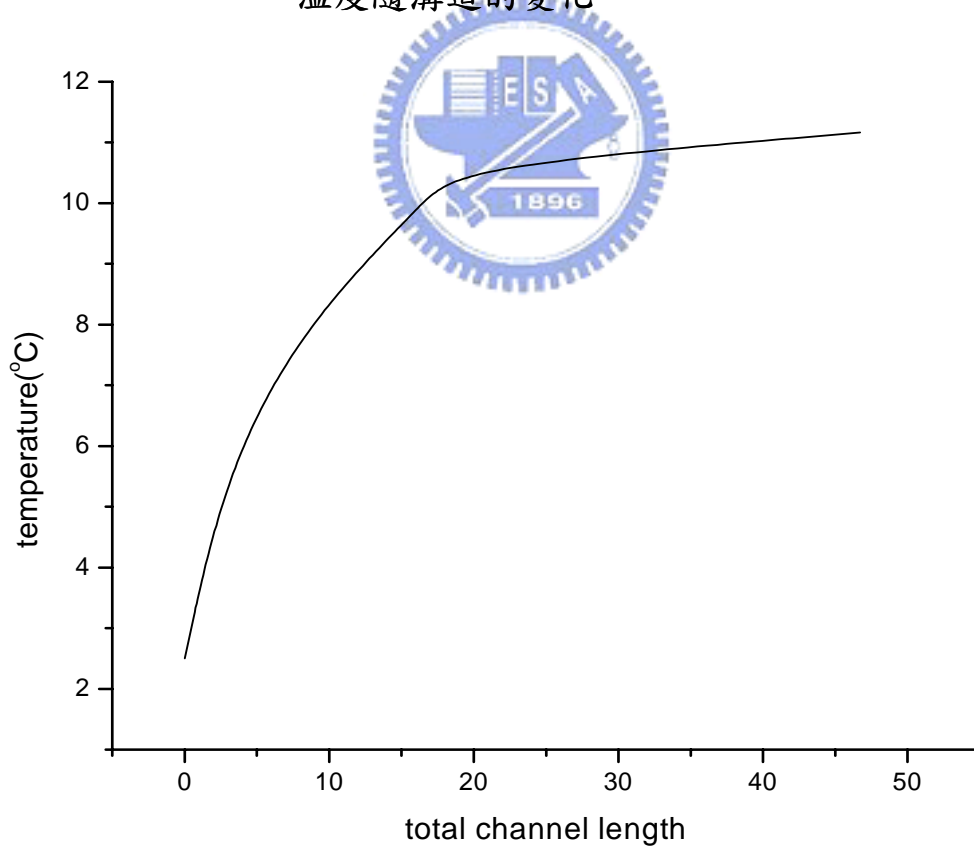


圖 31(b) LDPE 中發泡劑重量百分比=5%時，

溫度隨溝道的變化



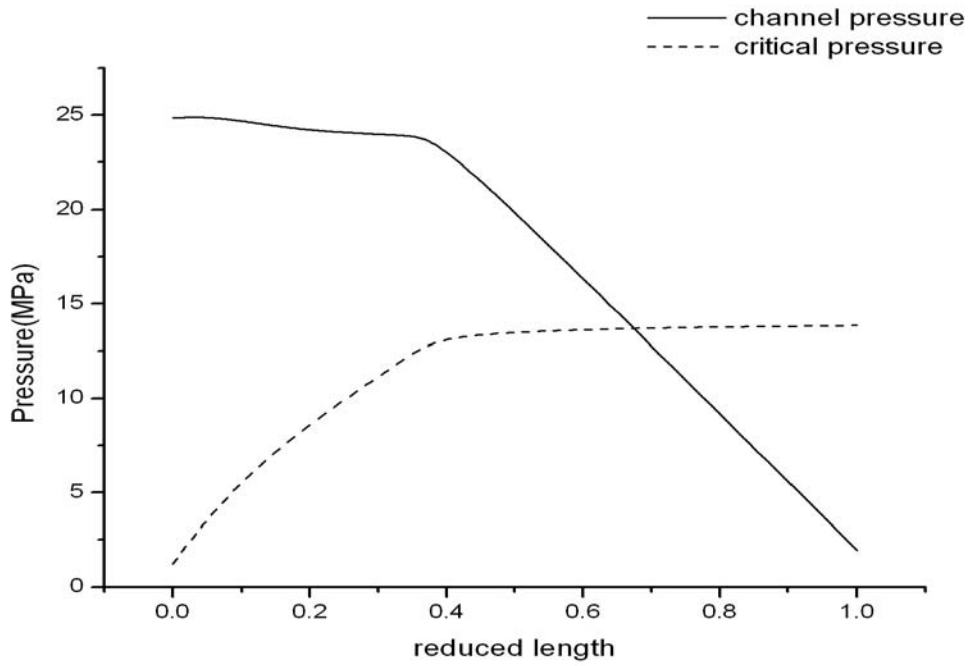


圖 32(a) PP 中發泡劑重量百分比=1%時，

溝道壓力與臨界壓力隨著溝道的變化

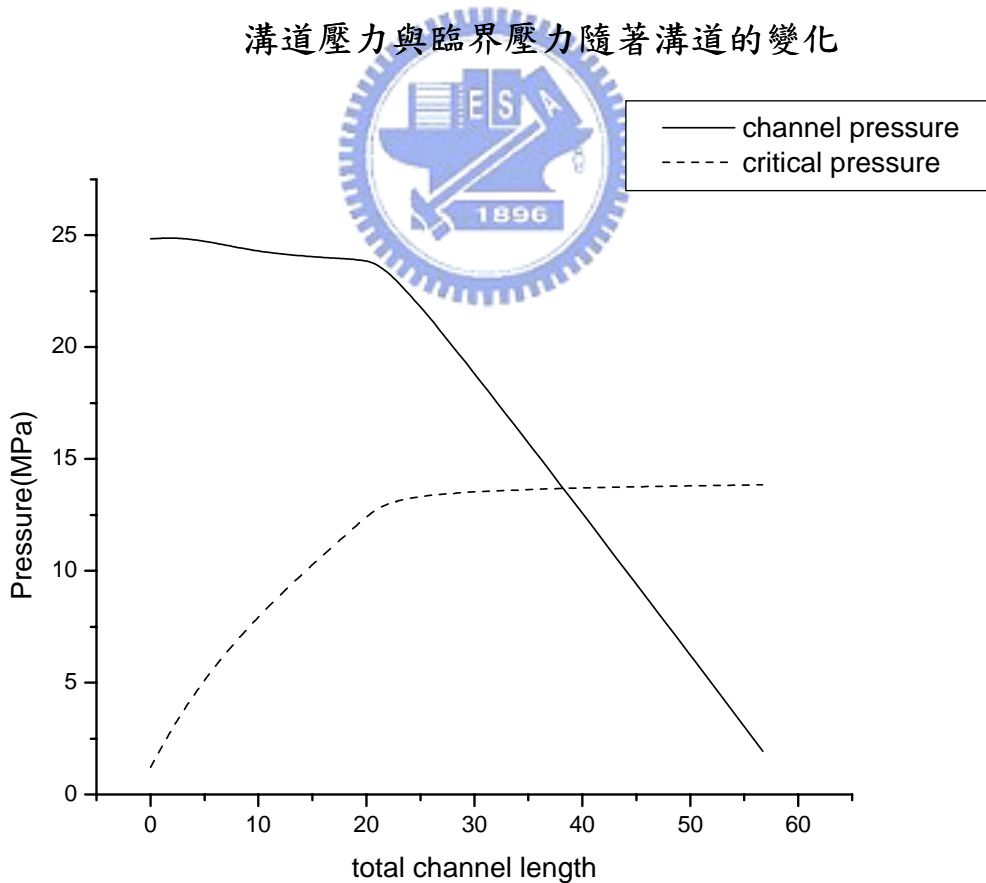


圖 32(b) PP 中發泡劑重量百分比=1%時，

溝道壓力與臨界壓力隨著溝道的變化

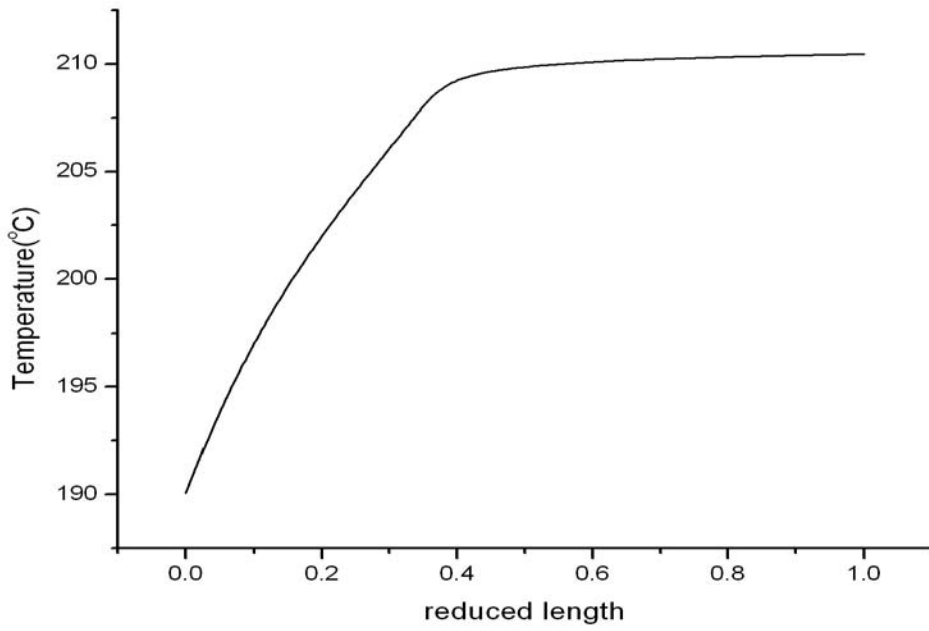


圖 33(a) PP 中發泡劑重量百分比=1%時，

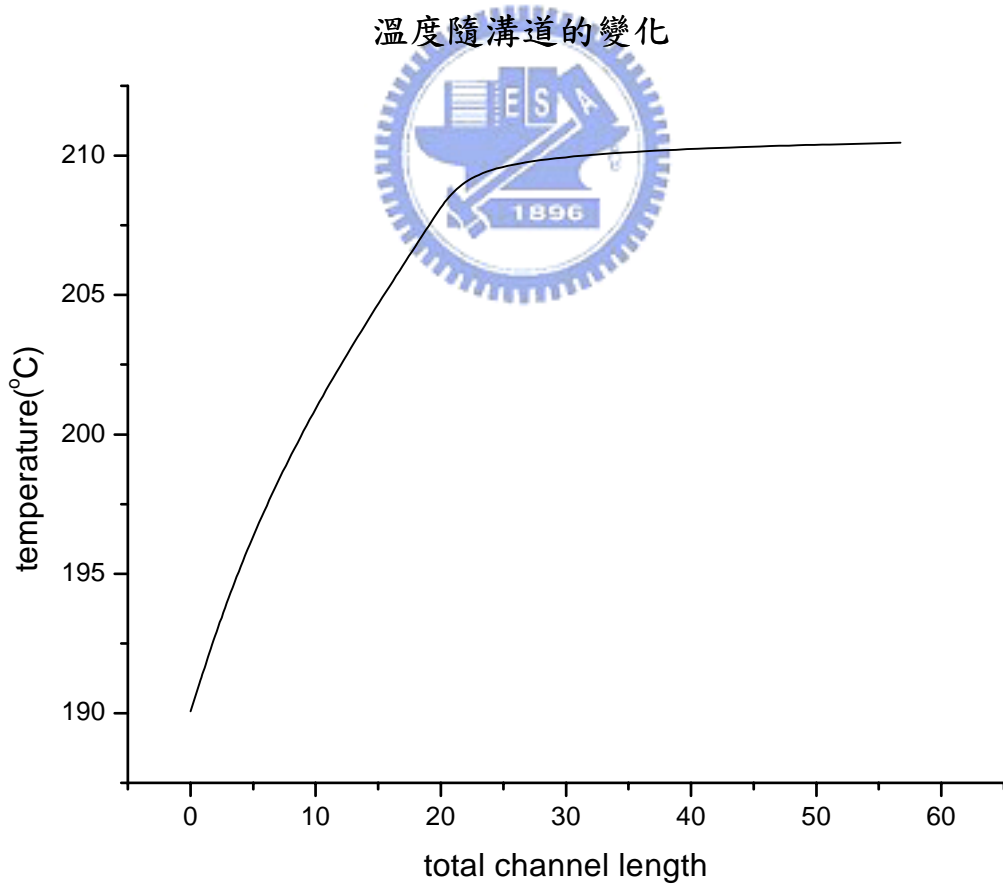


圖 33(b) PP 中發泡劑重量百分=1%時，

溫度隨溝道的變化

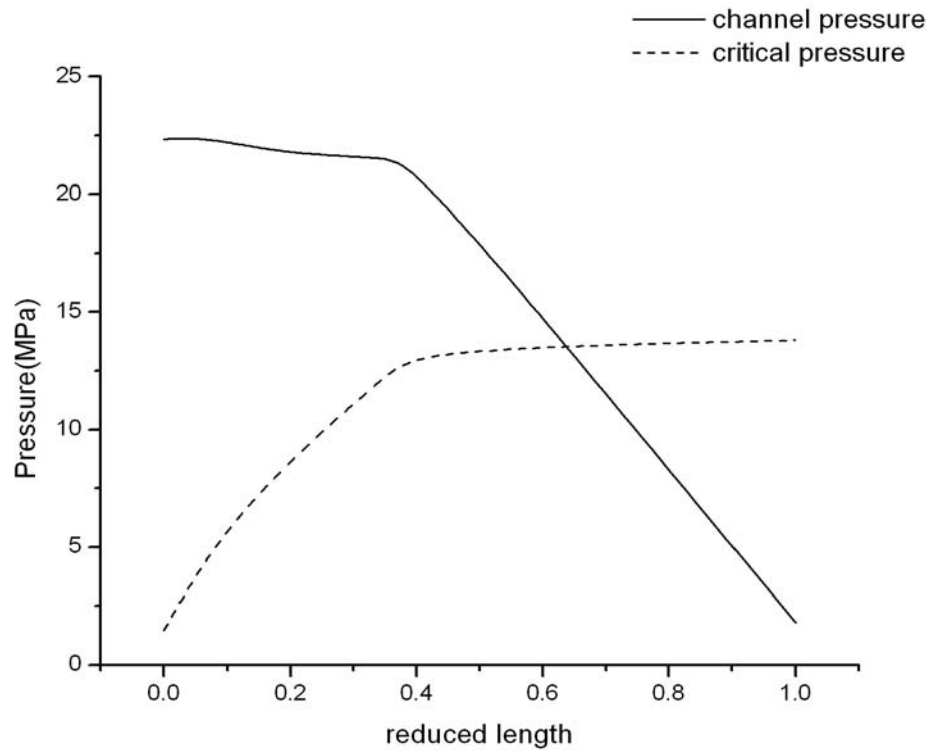


圖 34(a) PP 中發泡劑重量百分比=2%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

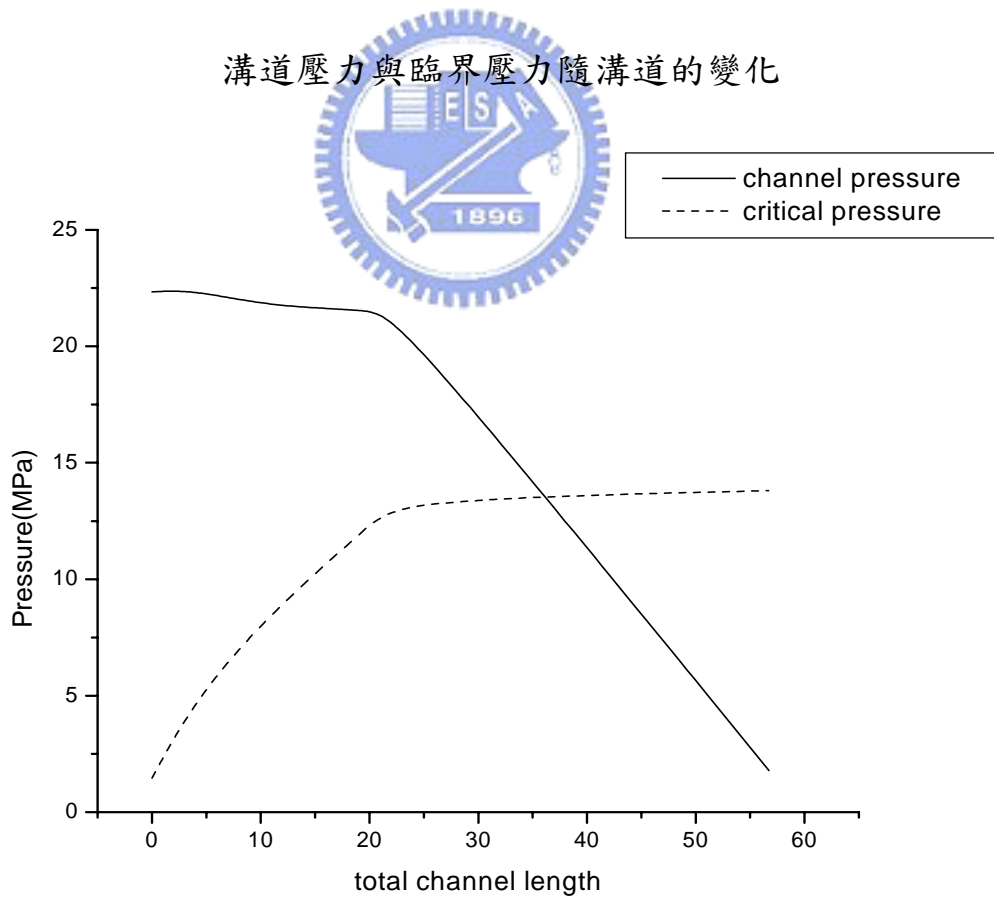


圖 34(b) PP 中發泡劑重量百分比=2%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

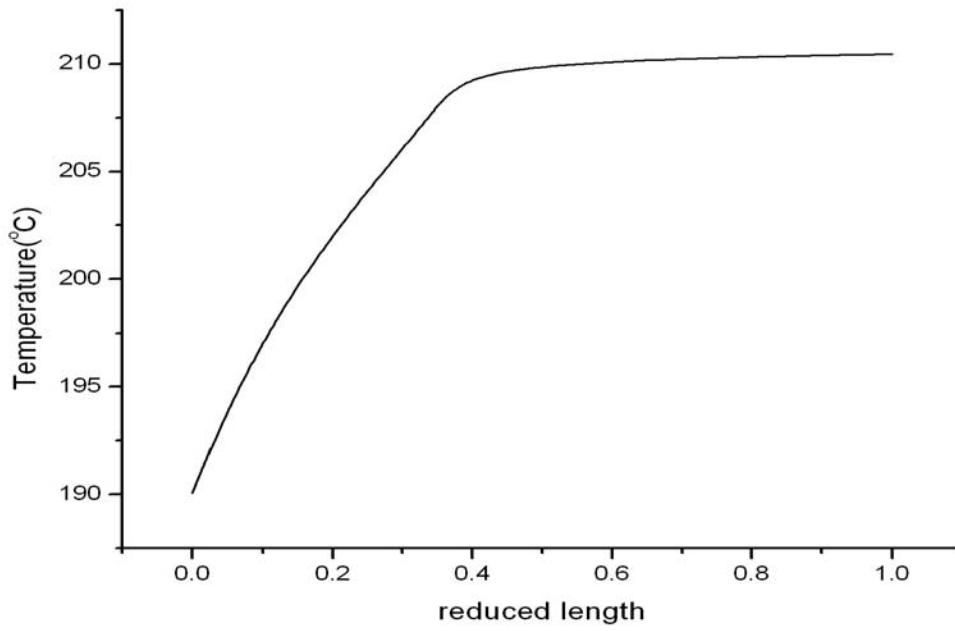


圖 35(a) PP 中發泡劑重量百分=2%時，

溫度隨溝道的變化

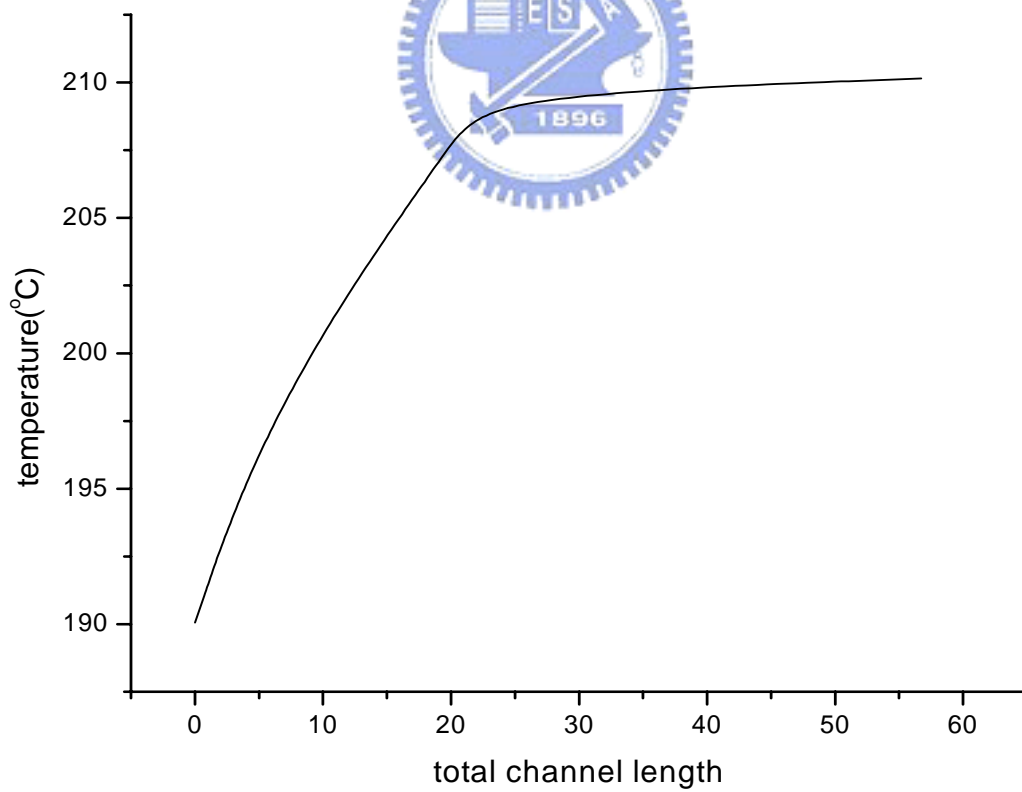


圖 35(b) PP 中發泡劑重量百分比=2%時，

溫度隨溝道的變化

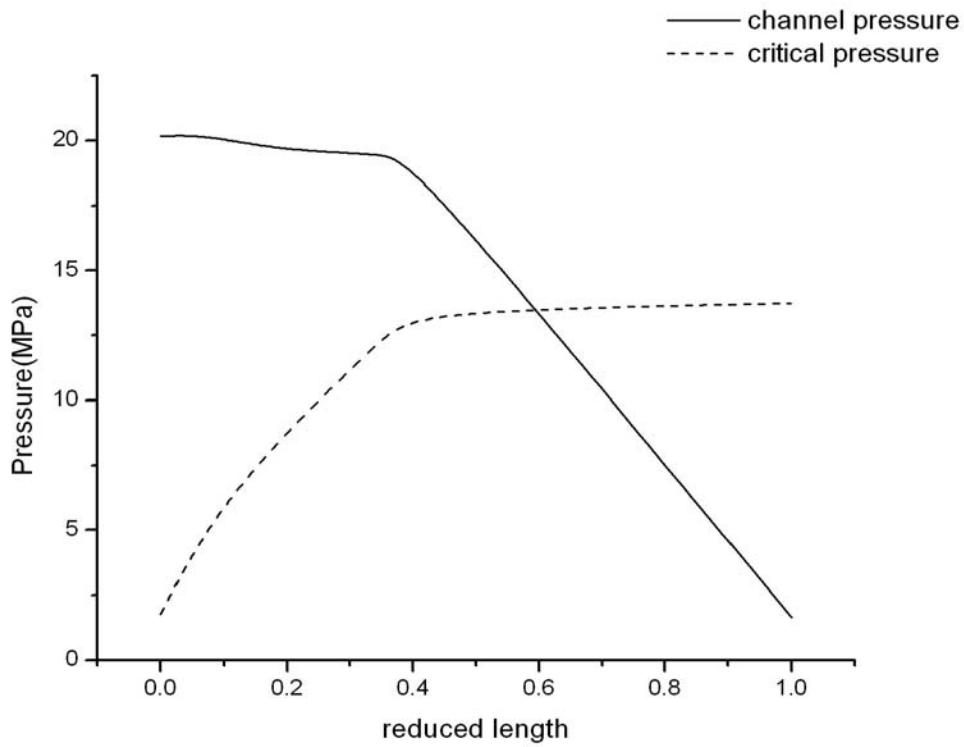


圖 36(a) PP 中發泡劑重量百分比=3%時，

溝道壓力與臨界壓力的變化

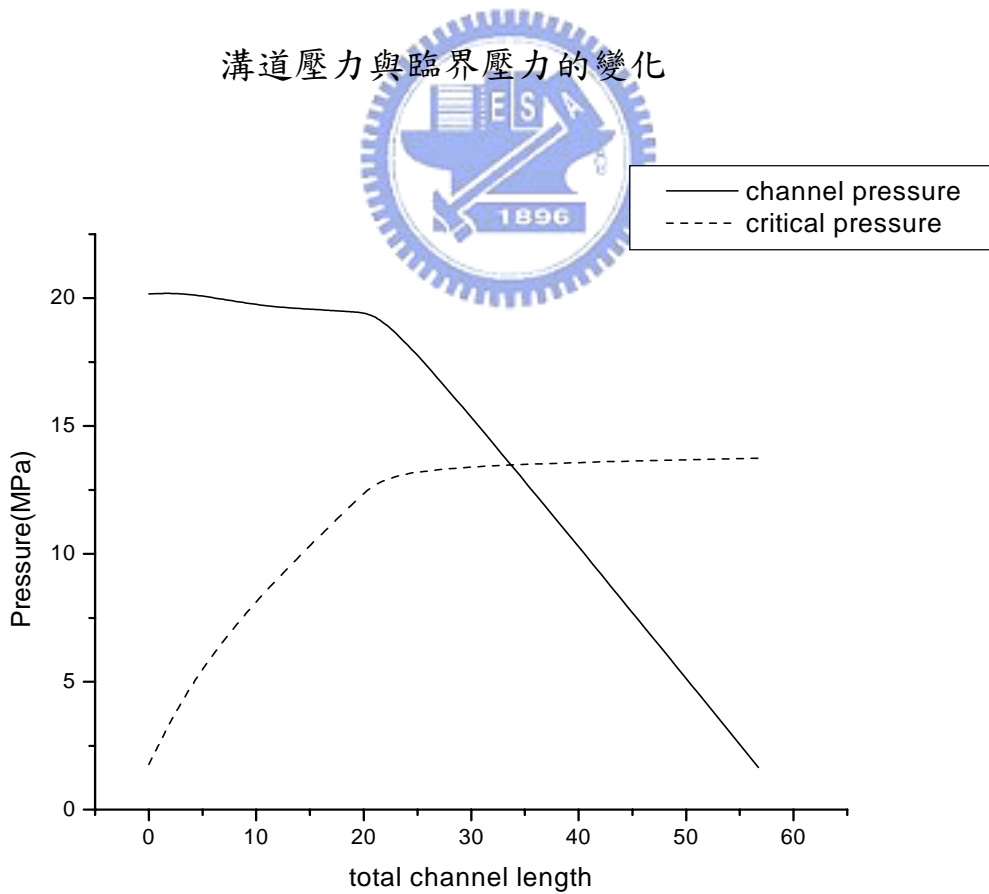


圖 36(b) PP 中發泡劑重量百分比=3%時，

溝道壓力與臨界壓力的變化

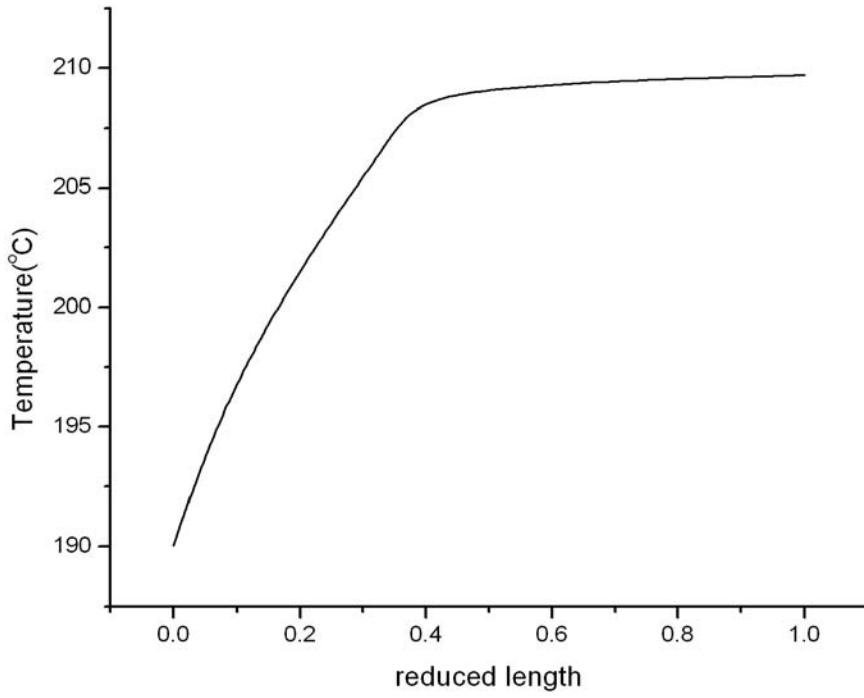


圖 37(a) PP 中發泡劑重量百分比=3%時，

溫度隨溝道的變化

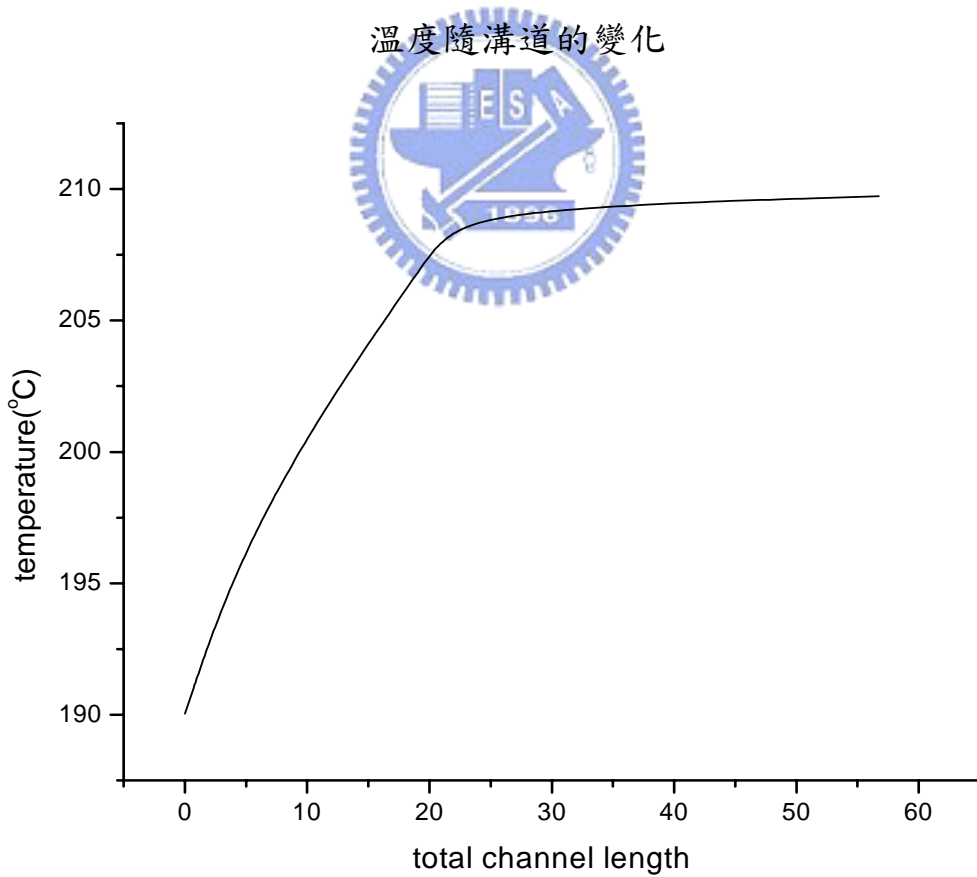


圖 37(b) PP 中發泡重量百分比=3%時，

溫度隨溝道的變化

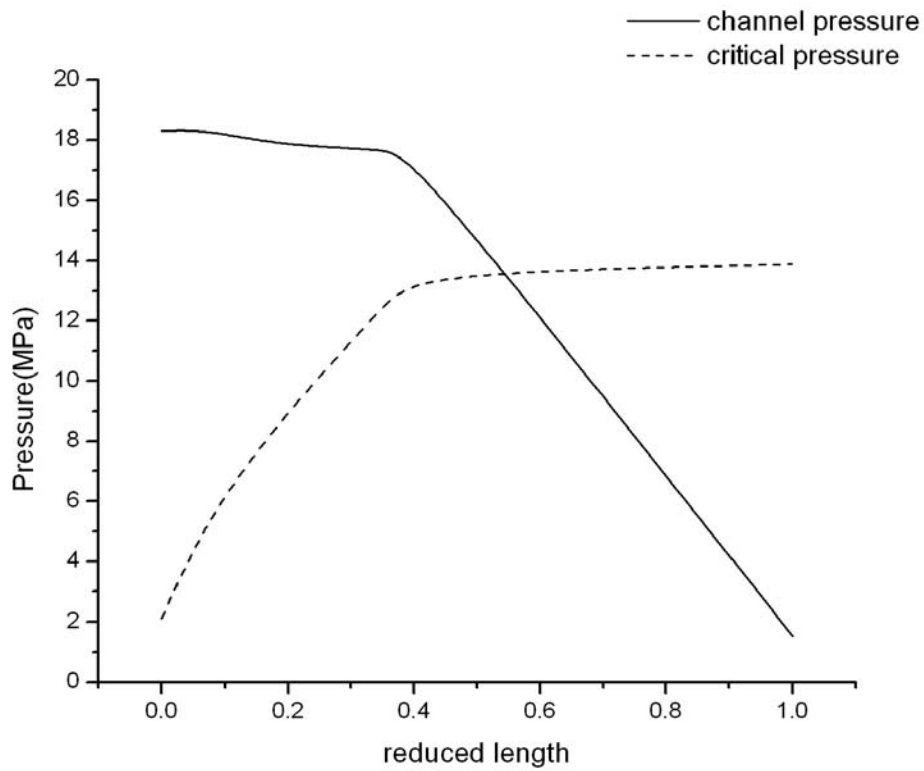


圖 38(a) PP 中發泡劑重量百分比=4%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

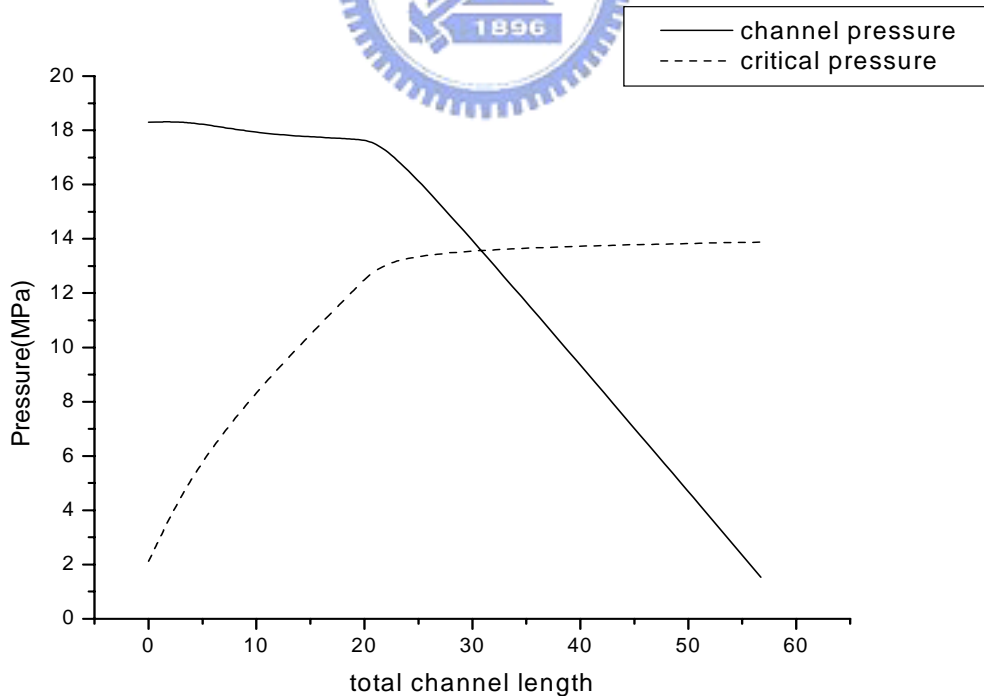


圖 38(b) PP 中發泡劑重量百分比=4%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

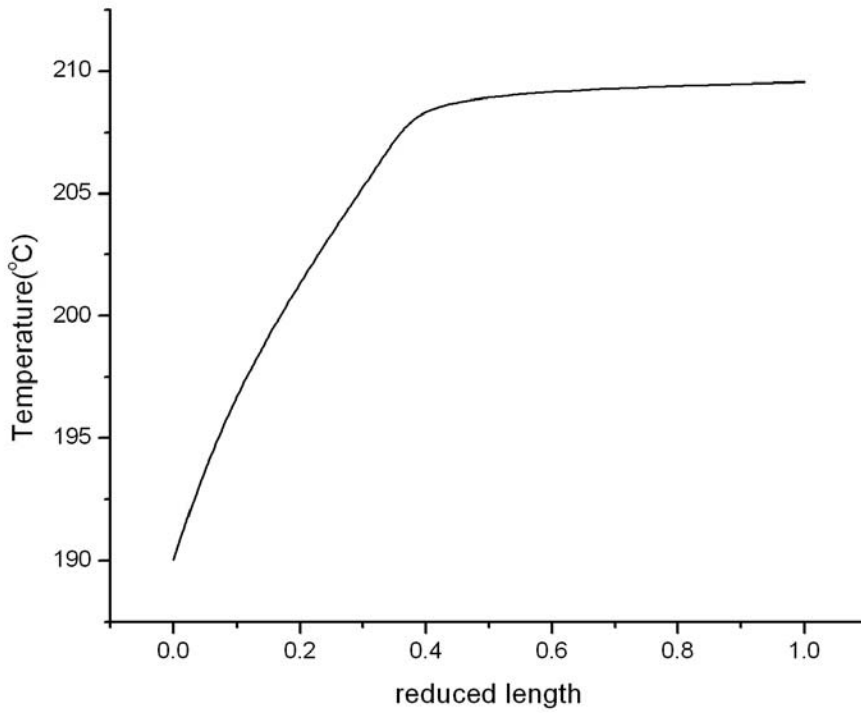


圖 39(a) PP 中發泡劑重量百分比=4%時，

溫度隨溝道的變化

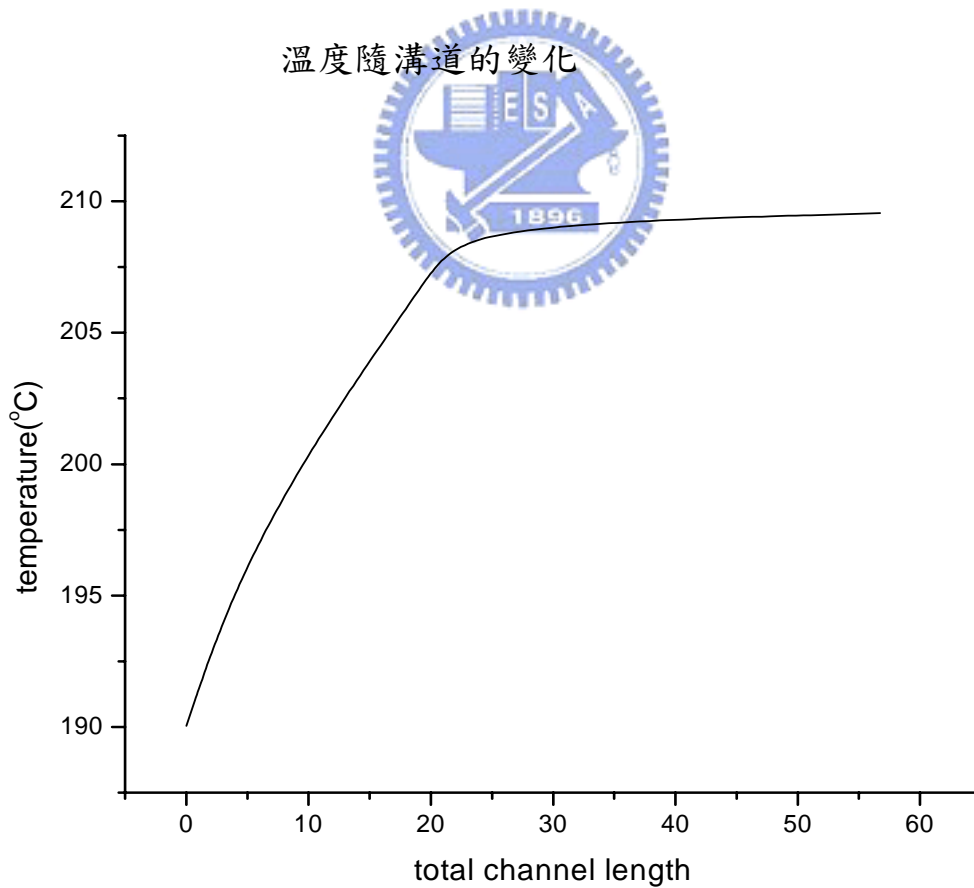


圖 39(b) PP 中發泡劑重量百分比=4%時，

溫度隨溝道的變化



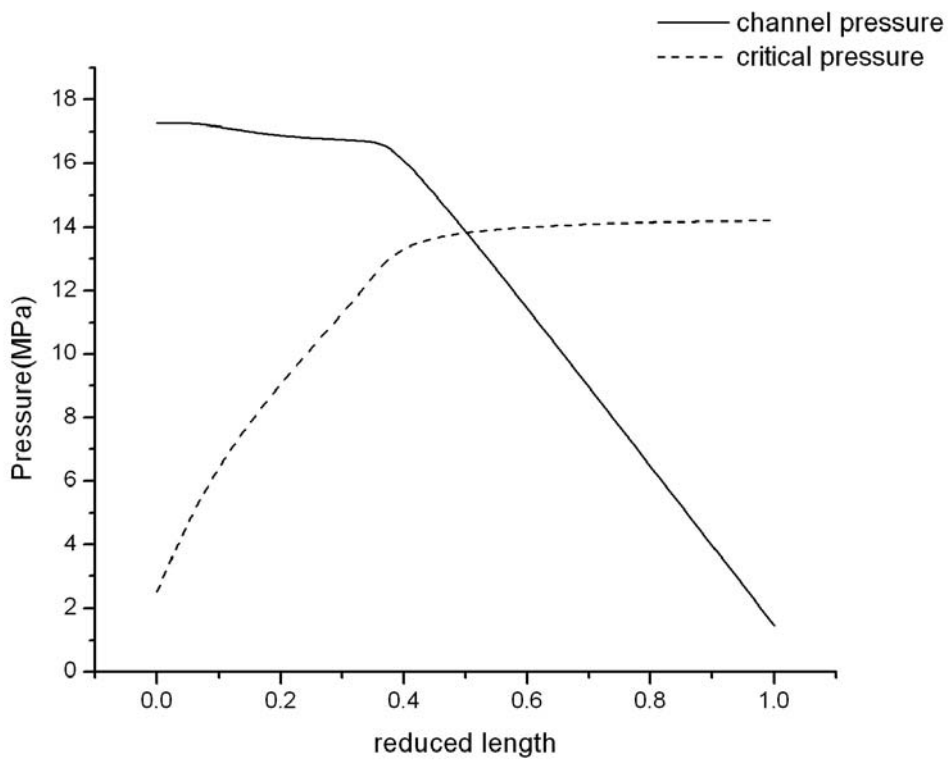


圖 40(a) PP 中發泡劑重量百分比=5%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

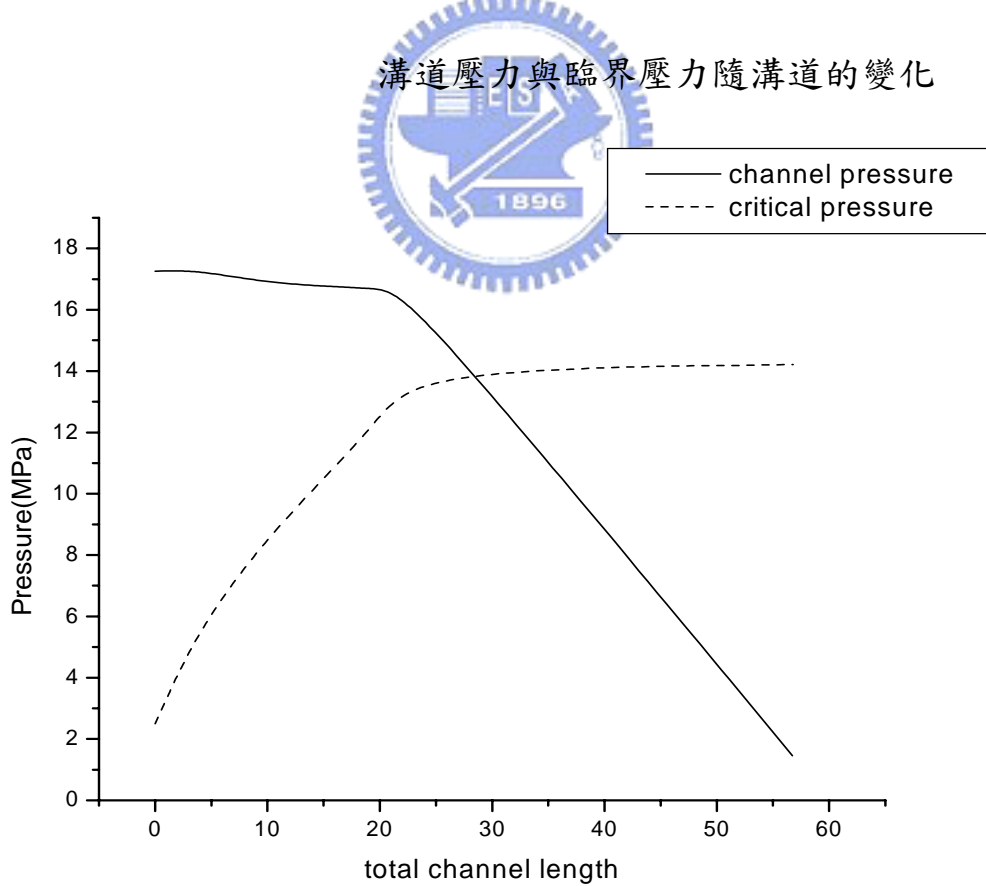


圖 40(b) PP 中發泡劑重量百分比=5%時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

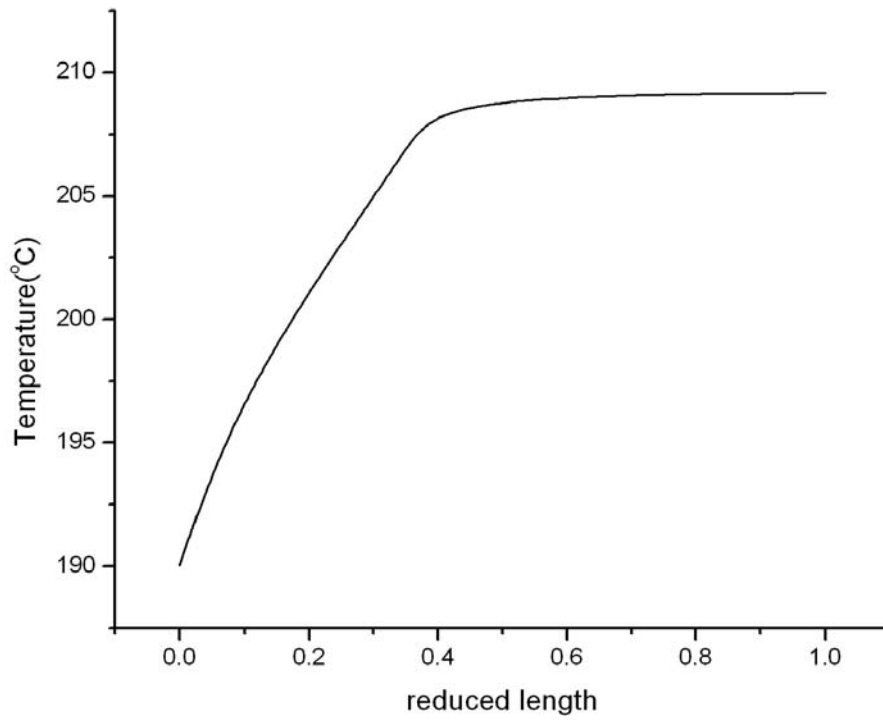


圖 41(a) PP 中發泡劑重量百分比=5%時，

溫度隨溝道的變化

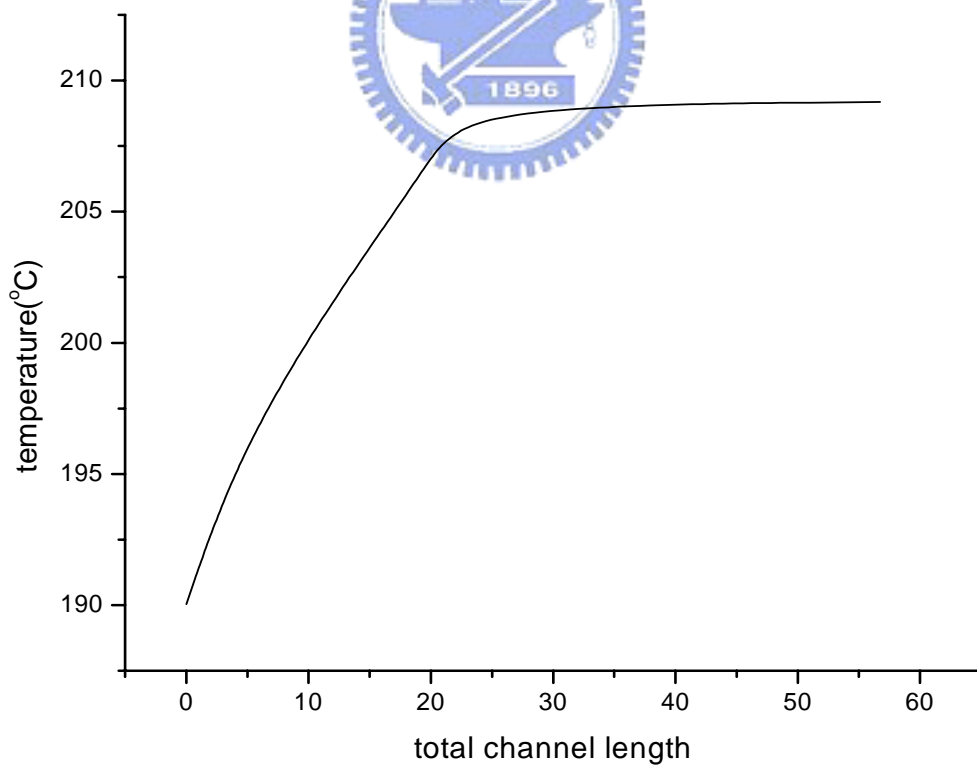


圖 41(b) PP 中發泡劑重量百分比=5%時，

溫度隨溝道的變化

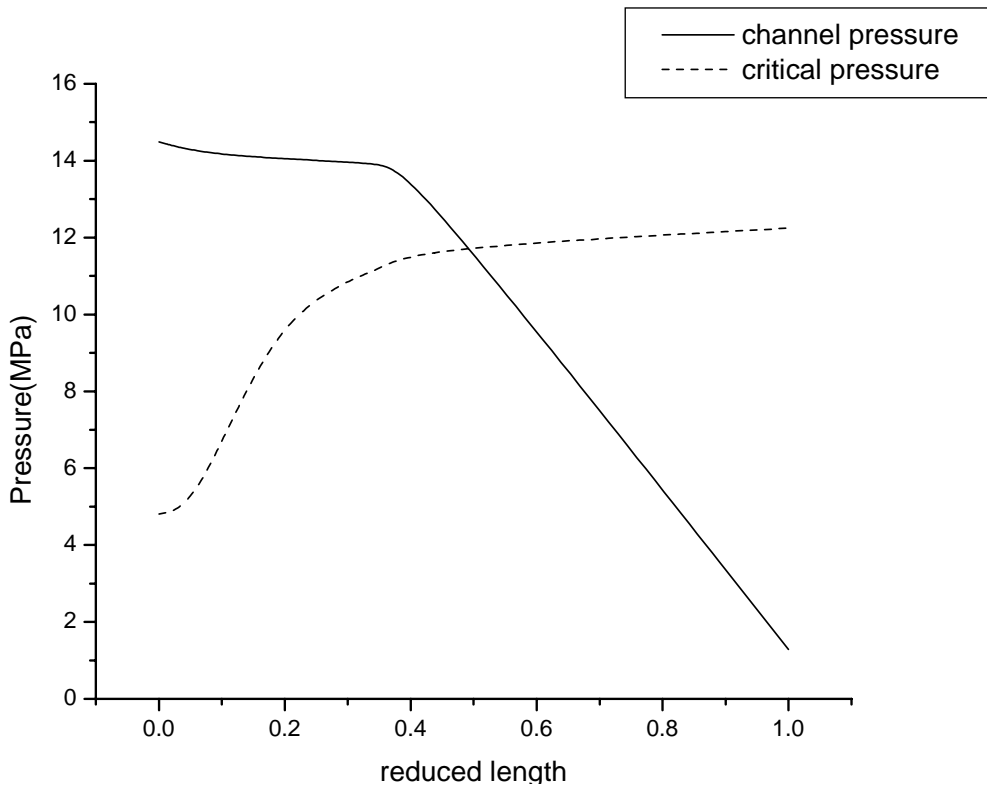


圖 42(a) LDPE 進料溫度為 195°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

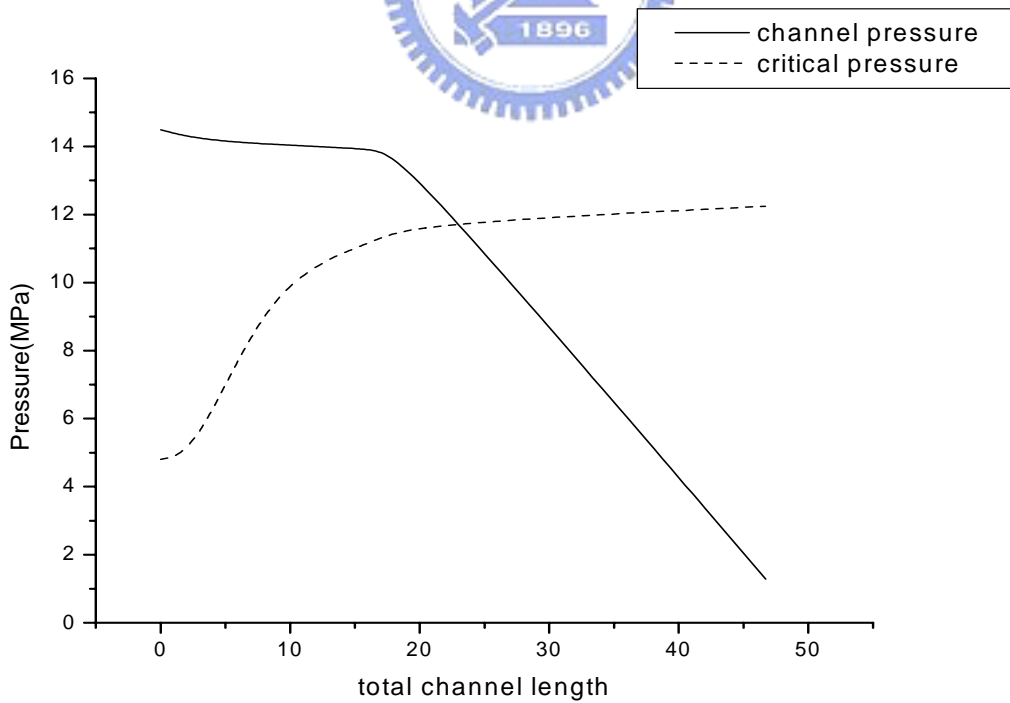


圖 42(b) LDPE 進料溫度為 195°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

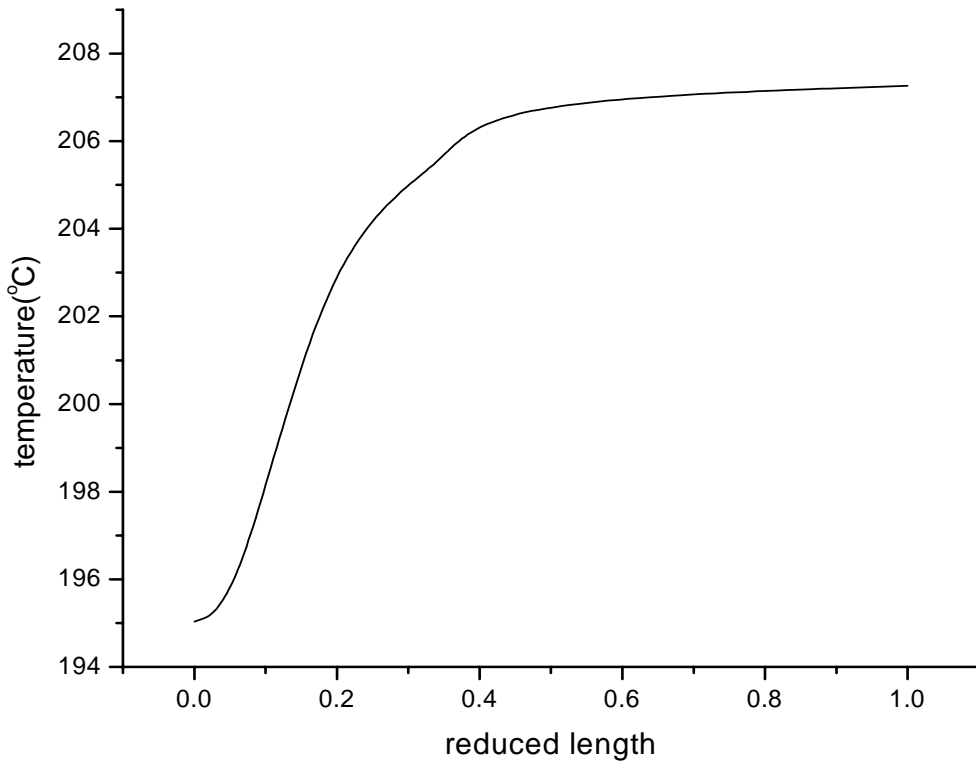


圖 43(a) LDPE 進料溫度為 195°C 時，

溫度隨溝道的變化

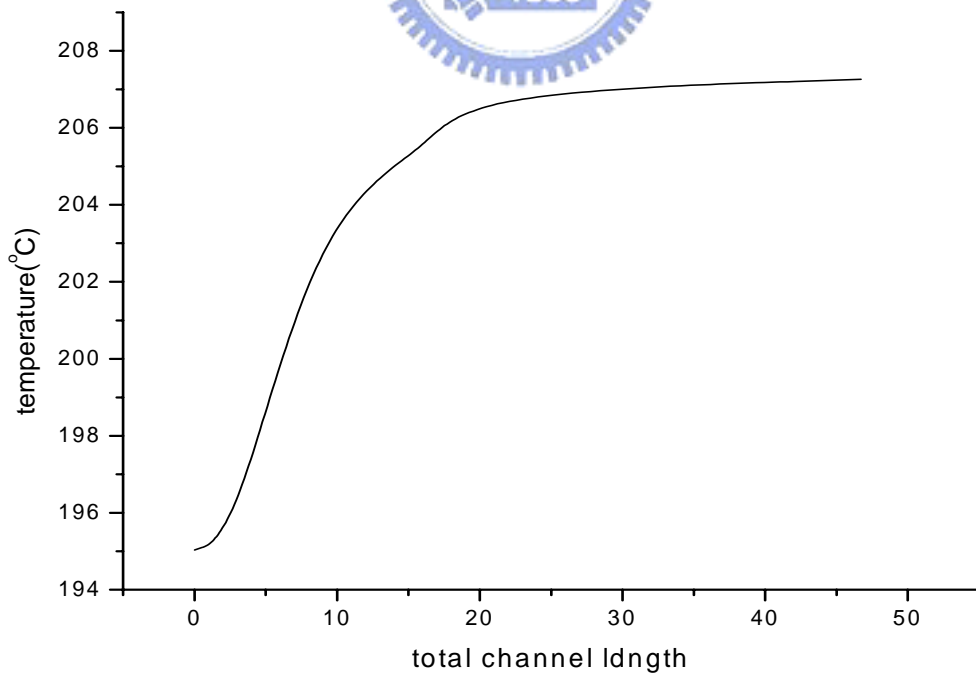


圖 43(b) LDPE 進料溫度為 195°C 時，

溫度隨溝道的變化

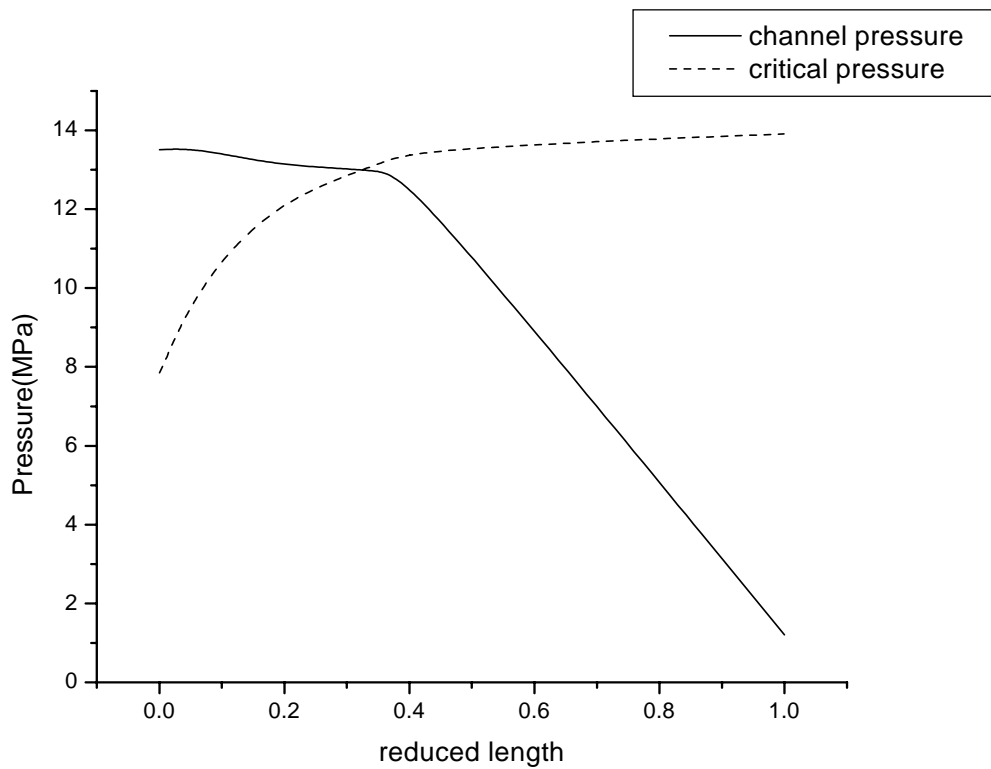


圖 44(a) LDPE 進料溫度為 200°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

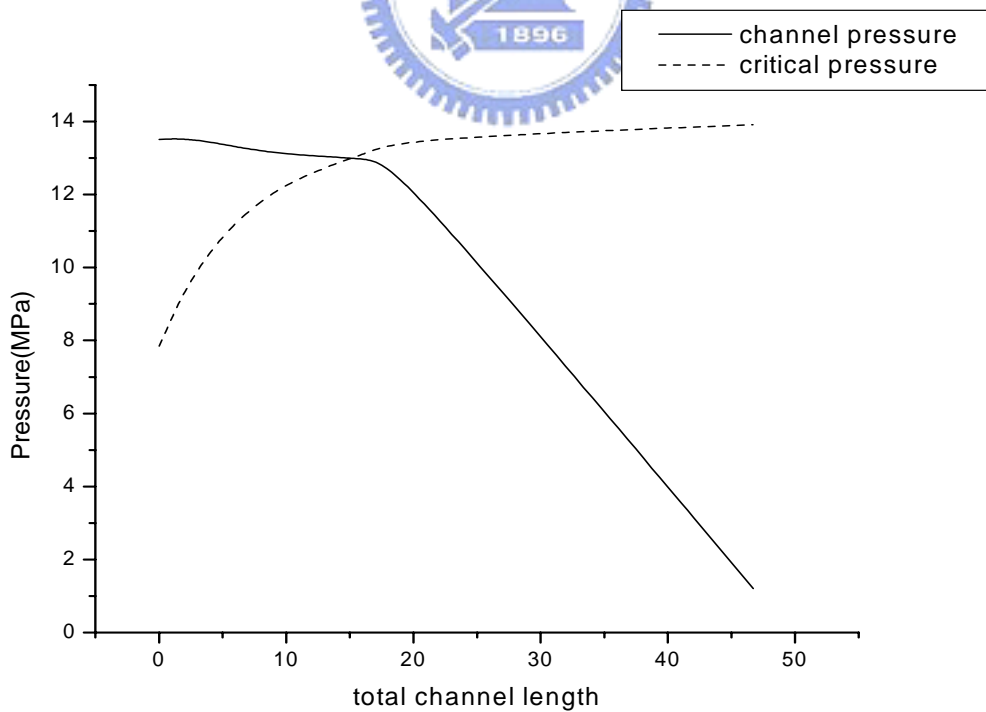


圖 44(b) LDPE 進料溫度為 200°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

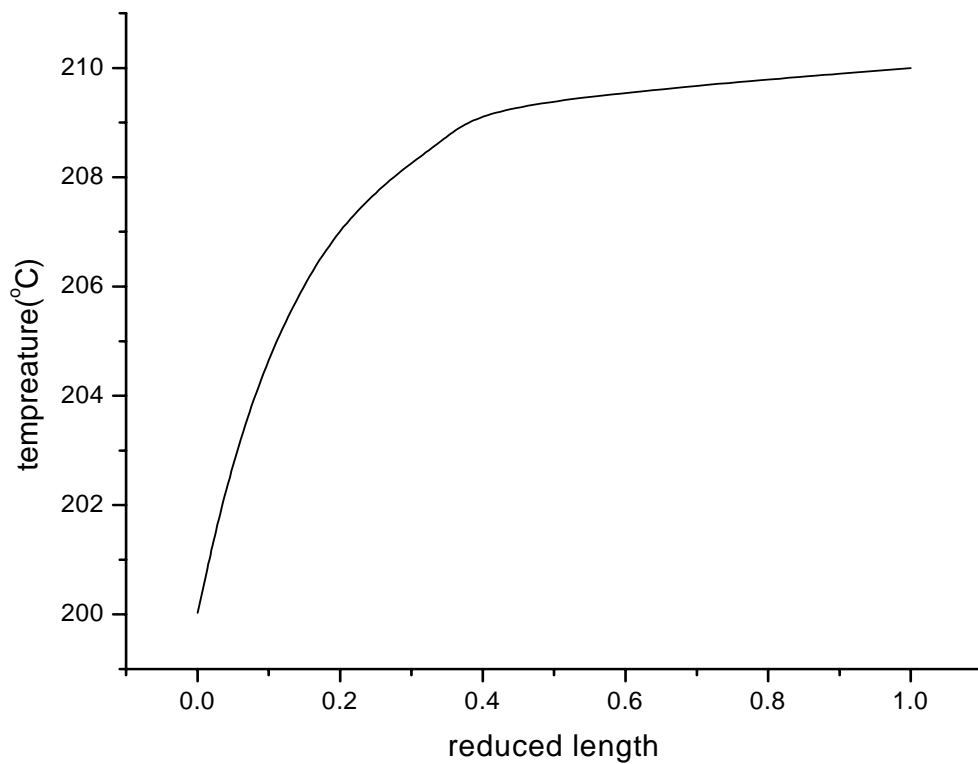


圖 45(a) LDPE 進料溫度為 200°C 時，

溫度隨溝道的變化

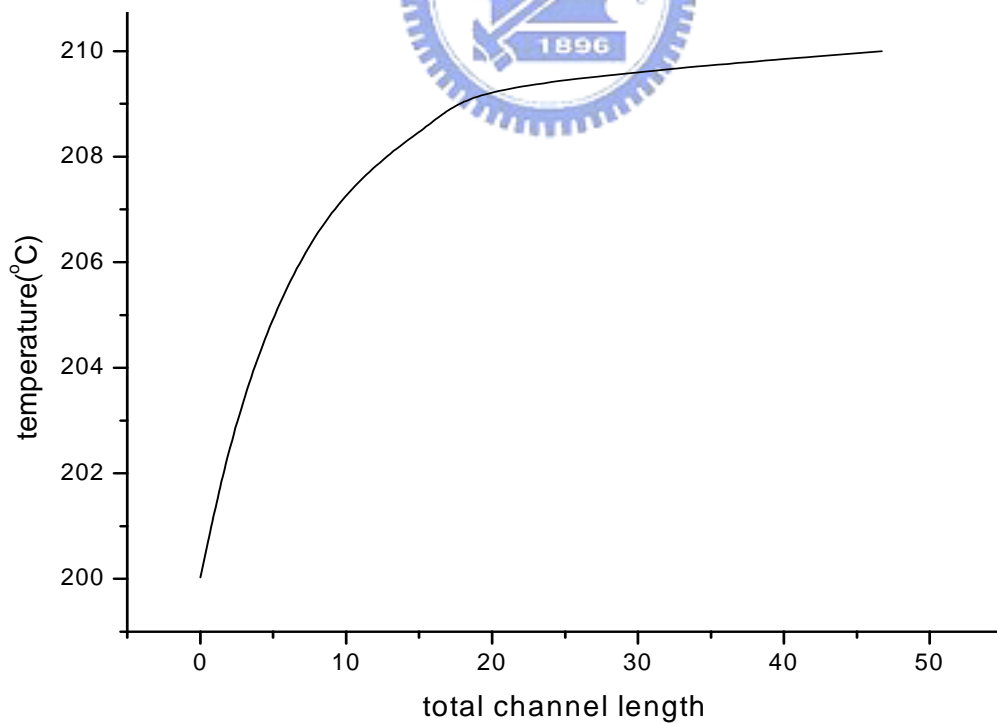


圖 45(b) LDPE 進料溫度為 200°C 時，

溫度隨溝道的變化

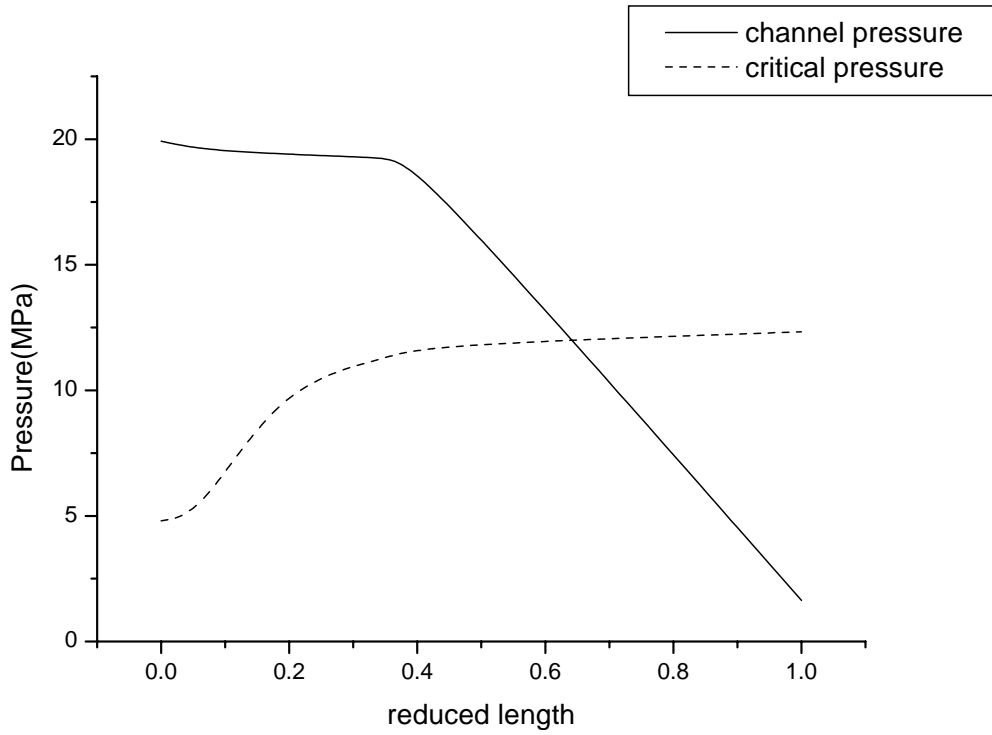


圖 46(a) PP 進料溫度為 195°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

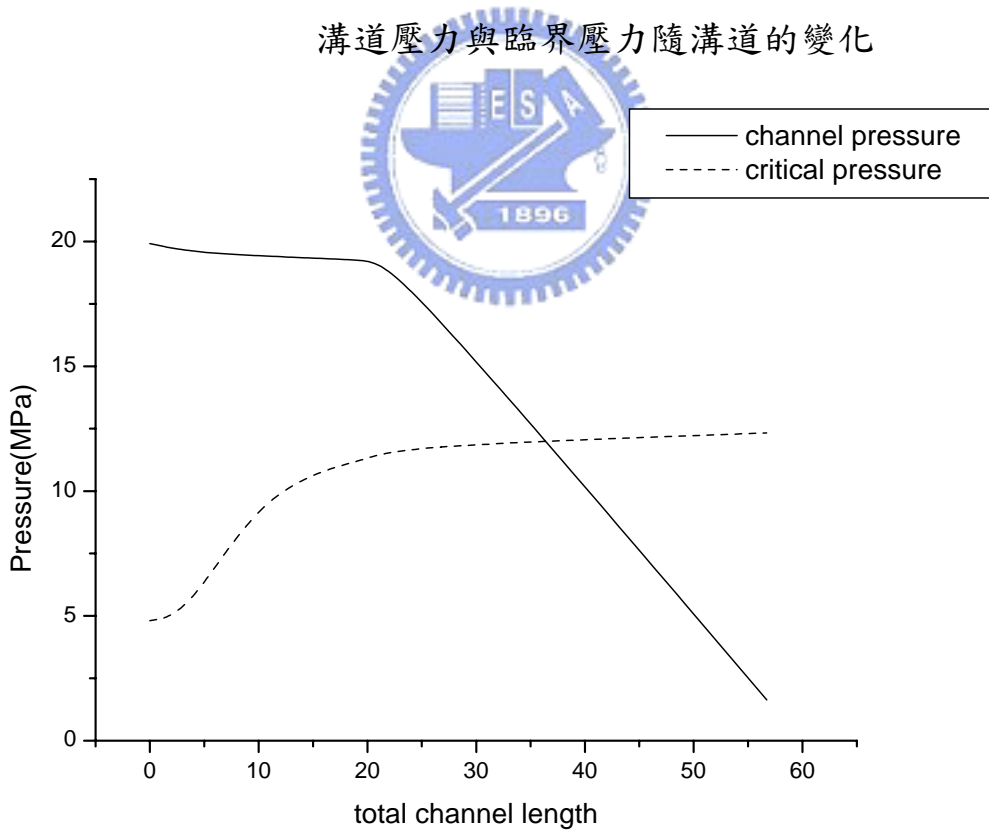


圖 46(B) PP 進料溫度為 195°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

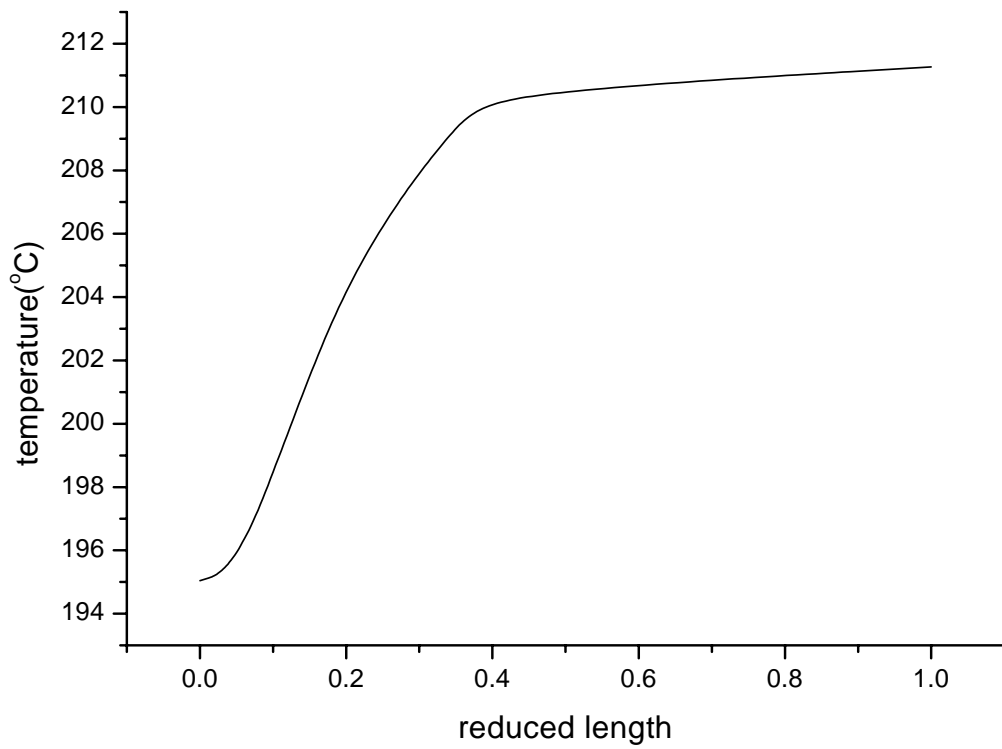


圖 47(a) PP 進料溫度為 195°C 時，

溫度隨溝道的變化

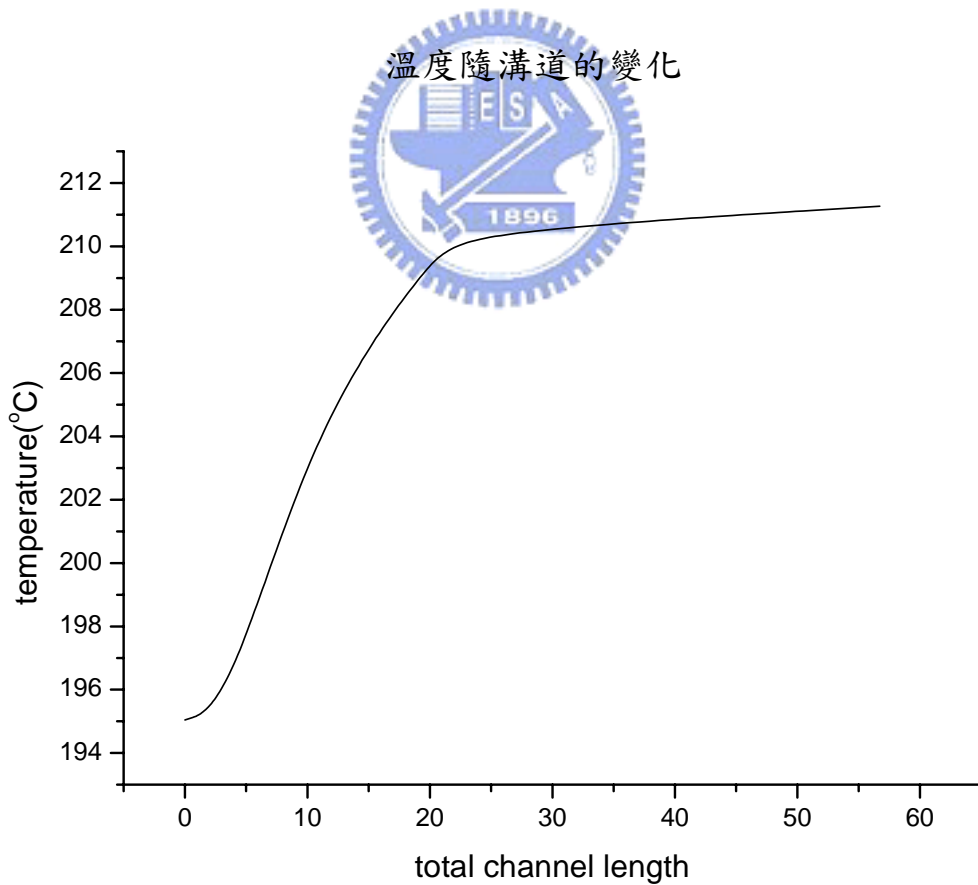


圖 47(b) PP 進料溫度為 195°C 時，

溫度隨溝道的變化



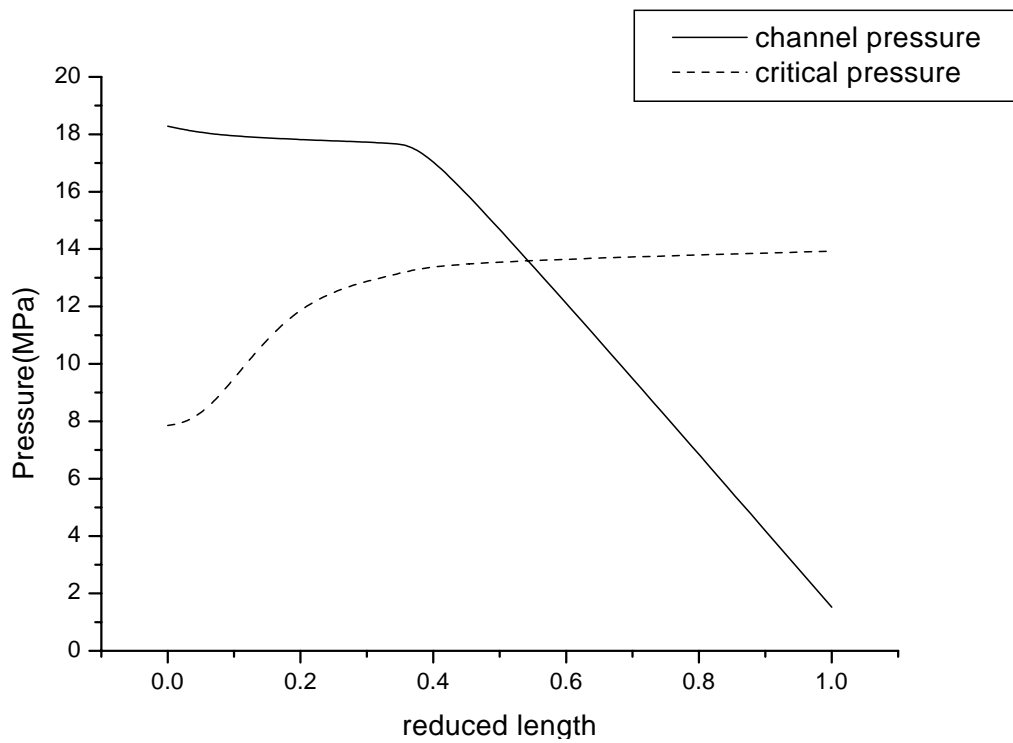


圖 48(a) PP 進料溫度為 200°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

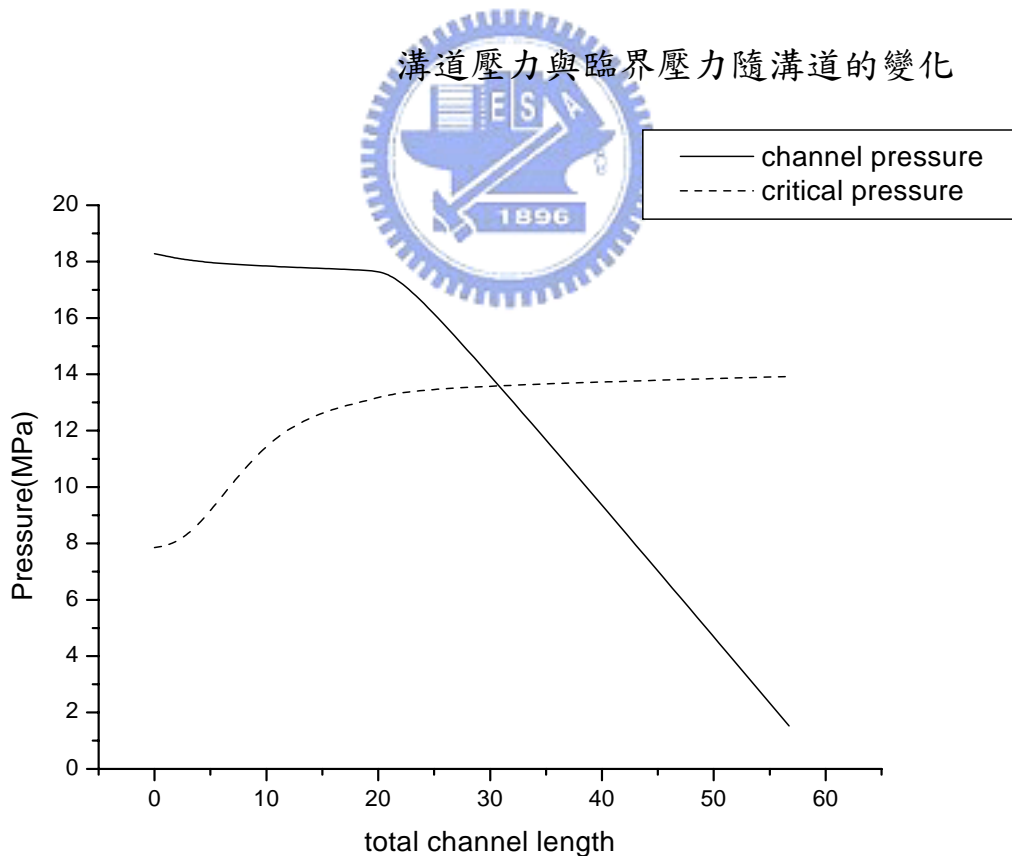


圖 48(b) PP 進料溫度為 200°C 時，

溝道壓力與臨界壓力隨溝道的變化

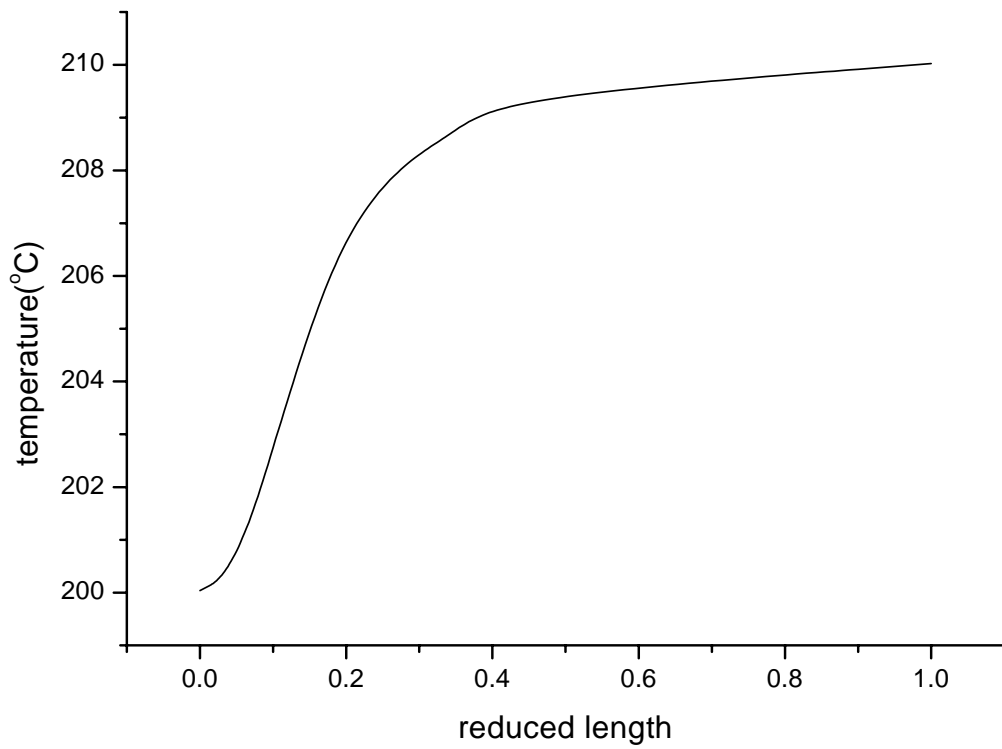


圖 49(a) PP 進料溫度為 200°C 時，

溫度隨溝道的變化

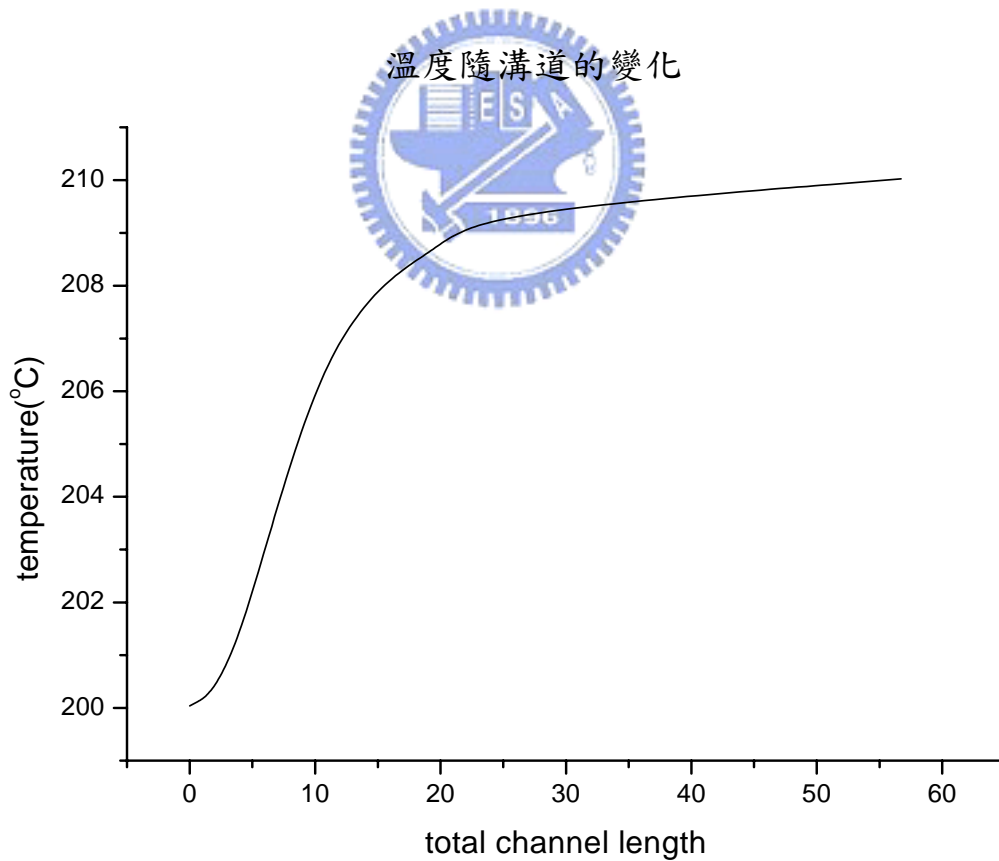


圖 49(b) PP 進料溫度為 200°C 時，

溫度隨溝道的變化

## Appendix A

對含溶解氣體之高分子溶液，其特性莫耳體積(characteristic molar volume) $V^*$ ，特性壓力(characteristic pressure) $P^*$ 及特性溫度(characteristic temperature) $T^*$ ，和尺寸參數(size parameter)分別根據混合規則用在下列方程式中。在下列方程式中 $V_i^*$ 、 $P_i^*$ 、 $T_i^*$ 分別為氣體及純高分子個別的特性莫耳體積、特性壓力及特性溫度。而下標 $i=1$ 代表氣體，下標  $i=2$  代表純高分子。

$$v^* = \phi_1^O v_1^* + \phi_2^O v_2^* \quad (\text{a-1})$$

$$\phi_i^O = \frac{\phi_i}{\phi_1 + \left(\frac{v_1^*}{v_2^*}\right)\phi_2} \quad \text{for } i=1 \text{ and } 2 \quad (\text{a-2})$$

$$\phi_i = \frac{\frac{m_i}{\rho_i^*}}{\left(\frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*}\right)} \quad \text{for } i=1 \text{ and } 2 \quad (\text{a-3})$$

$$\phi_1 + \phi_2 = 1 \quad (\text{a-4})$$

$$P^* = \phi_1 P_1^* + \phi_2 P_2^* - RT\phi_1\phi_2\chi_{12} \quad (\text{a-5})$$

$$\chi_{12} = \frac{P_1^* + P_2^* - 2(P_1^* P_2^*)^{1/2}(1 - k_{12})}{RT} \quad (\text{a-6})$$

$$T^* = \frac{P^* v^*}{R\gamma} \quad (\text{a-7})$$

$$r = x_1 r_1 + x_2 r_2 \quad x_1 + x_2 = 1 \quad (\text{a-8})$$

$$\frac{1}{\rho^*} = \frac{m_1}{\rho_1^*} + \frac{m_2}{\rho_2^*} \quad (\text{a-9})$$

其中 $k_{12}$ 為氣體與高分子作用的參數， $x_1, x_2$ 是分別為氣體和高分子

莫耳分率，而 $m_1, m_2$ 分別代表含氣體的高分子溶液中其個別成份的重量百分率，至於 $\phi_1, \phi_2$ 分別是溶液中氣體和高分子體積分率。



## Appendix B

### 1. 總平方和(Total Sum of Squares),TSS :

$$TSS = \sum_{j=1}^N y_j^2 - CF$$

校正係數(correction factor),CF :

$$CF = \left( \sum_{j=1}^N y_j \right)^2 / N \quad ,N \text{ 為所有觀測值的數目}$$

### 2. 主效果的平方和(Sum of Squares),SS :

對一因子A，具有p水準，而 $A_i$ 為因子在水準i之觀測值總和，如果每一水準的觀測值數目不同，設為 $m_i$ ， $i=1,2\dots p$ ，則：

$$SS_A = \frac{(A_1)^2}{m_1} + \frac{(A_2)^2}{m_2} + \dots + \frac{(A_p)^2}{m_p} - CF$$

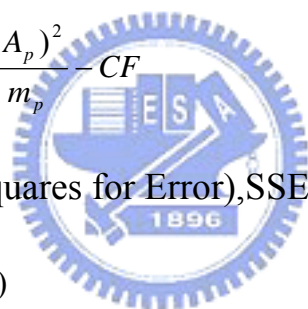
### 3. 誤差平方和(Sum of Squares for Error),SSE :

$$SSE = TSS - (SS_A + SS_B + \dots)$$

### 4. 貢獻度

(主效果平方和/總平方和)\*100%

(誤差平方和/總平方和)\*100%



## 參考文獻

- [1] "Foam Extrusion", Principle and Practice, Technomic Pub. Co. Inc., ed by S.T. Lee Lancaster, Pennsylvania, 2000
- [2] Behraves AH, Park CB, Venter RD. Proceedings of ANTEC'98, 1958-67
- [3] Goel SK, Beckman EJ., Cell Polym, 12,251,1993
- [4] Kumar V, Weller Je., Polymeric foams: science and technology. Washington, DC: Americal Chemical Society;1997
- [5] Doroudiani S, Park CB, Kortschor MT., Polym Engng Sci, 38,1205,1998
- [6] F. N. Kelly and F. Bueche, J. Polym. Sci., **50**,549,1961
- [7] L. L. Blyler Jr. and T. K. Kwei, J. Polym. Sci., Part C, **35**,165,1971
- [8] A. K. Doolittle, J. Appl. Phys., **22**,1471,1951
- [9] Lee MH, Park CB, Tznganakis C., Polym. Engng. Sci,38,1112,1998
- [10] C. Kwag, L. J. Gerhardt, V. Khan, E. Gulari, and C. W. Manke, Meeting of the ACS, Polymeric Materials Science and Engineering Div., 183,1996
- [11] J. L. Throne, Thermoplastic Foams, Sherwood Publishers, Hinckley, Ohio,1996
- [12] Goel SK, Beckman EJ., Cell Polym, 12,251,1993
- [13] 自由發泡程序加工聚氣乙烯摻合物之研究，國立交通大學碩士論文，民國八十五年
- [14] J. Parnaby, G. A. Hassan, A. A. Helmy and A. Ali, Plast. Rubber process. Appl., 1,303,1981
- [15] B. Proctor, SPE J.,28,34,1972
- [16] P. Saillard and J. F. Agassant, Polym. Process. APPL., 2,37, 1984
- [17] D. M. Kalyon, J. S. Yu and C. Du, Polym. Process. Eng., 5,179,1987
- [18] C. Rauwendaal, Polym. Eng. Sci., 27,186(1987)
- [19] J. Vlcek, V. Kral and K. kouba, Plast. Rubber Process. Appl., 4,309,1984
- [20] J. Vlcek, J. Vlachopoulos and J. Perdikoulis, Int. Polym. Process., 2,174,1988

- [21] J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *Adv. Polym. Technol.*, 7,333,1987
- [22] J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *Adv. Polym. Technol.*, 7,111,1990
- [23] J. Perdikoulis, J. Vlcek and J. Vlachopoulos, *J. Plastic Film & Sheeting*, 5,18,1989
- [24] E. J. Fahy and P. W. Gilmour, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*,23,1, 1986
- [25] K. Benkhoucha and D. H. Sebastian, *Proc. ANTEC*, 1774,1989
- [26] 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。
- [27] Chung-Ching Huang, *Polym. Eng. Sci.*,38,573,1998
- [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] 謝維賢,“茂金屬聚乙烯吹袋模頭之最佳化設計”, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 90 年。
- [30] S.A. Stern, S.M. Fang, and H.L. Frisch, *J. Polym. Sci. A-2.*,**10**, 201,1972
- [31] S.S.Kulkatni,and S.A. Stern, *J. Polym. Sci. Polym Phys.*,**21**, 441,1983
- [32] *Proceedings of Polymer Proceeding Society -18<sup>th</sup> international meeting*, CD-ROM, Portugal,2002
- [33] I.C. Sanchez; and R.H. Lacombe, *J. Phys.Chem.*,**80**,2352,1976
- [34] I.C. Sanchez; and R.H. Lacombe, *J. Phys.Chem.*,**80**,2568,1976
- [35]L. J. Gerhardt, A. Garg, C. W. Manke,and E.Gulari, *J. Polym. SciB:Polym. Phys.*,36,1911,1988
- [36]蘇朝墩,“品質工程”,中華民國品質學會,民國 91 年。