

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 物理發泡衣架型模頭之流動模擬及最佳化設計

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2216-E-009-020-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學應用化學系(所)

計畫主持人：吳建興

計畫參與人員：曾煥錫 李名洋 彭曼琳

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 27 日

## (1) 中文摘要

衣架型模具已廣泛地應用於薄膜及板材押出製程之中，在許多製程中甚至必須添加發泡劑以因應產品需求。本研究針對押出物理發泡製程提出兩種不同型式的衣架型模頭，並採用二維控制體積法之流動模式去模擬非等溫、非牛頓型流體於兩種物理發泡衣架型模具內之流動。其中包括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 $\eta$ ，及在某溫度及某氣體溶解度下之發泡臨界壓力值，並以此為依據，利用上述控制體積法搭配田口法，建立膠料在模頭內之流動模式，成功地建立供以使用物理發泡劑做為高發泡倍率用之一套衣架型模具設計及分析軟體，以便對模具幾何形狀進行最佳化設計。並以LDPE/CO<sub>2</sub>之系統為例，模擬預測不同模具幾何下模具內之預發泡位置、壓力分佈、流量均勻度與溫度均勻度，以進行模具最佳化設計。

**關鍵詞：**押出發泡製程、物理發泡劑、衣架型模具、Sanchez-Lacombe 方程式、發泡臨界壓力、控制體積法、流動模擬、田口法、低密度聚乙烯、二氧化碳。

## (2) 英文摘要

Coat-hanger dies were widely used in the production of films and sheets. In many cases, foam extrusion was necessary to be utilized. In this thesis, two different types of coat hanger die was proposed for the extrusion foaming process with a physical blowing agent. A flow model of two-dimensional control volume method was utilized to simulate the non- isothermal and non-Newtonian flow behavior in a coat-hanger die used for the extrusion foaming process. The research works included the development of mathematical models for the direct prediction of shear viscosity of a molten polymer containing a dissolved gas and of the critical pressure under a certain temperature and solubility of gas in the melt. Based on this prediction, the aforementioned control volume method is then used to establish the flow model of a coat hanger die. In addition, a Taguchi method was coordinated to establish a software for the analysis and optimal design of a coat-hanger die for the foam extrusion which requires a high foaming ratio with a physical blowing agent. Finally, in this report, an optimal design of coat-hanger die used for the

LDPE/CO<sub>2</sub> system will be also investigated to predict the position of pre-foaming, pressure distribution, flow homogeneity and temperature homogeneity.

**Keywords** : Extrusion foaming process, Physical foaming agent, Coat-hanger die, Sanchez-Lacombe equation, Critical pressure, Control volume method, Flow simulation, Taguchi method, Low density polyethylene, Carbon dioxide.

### (3) 報告內容

#### 3.1 前言

在 高 分 子 精 密 加 工 製 程 中 ， 應 用 電 腦 輔 助 工 程 來 設 計 及 改 良 加 工 條 件 ， 已 成 為 技 術 上 非 常 重 要 之 一 環 ， 且 依 據 模 擬 結 果 進 行 最 佳 化 設 計 可 大 大 地 降 低 實 作 成 本 ， 提 升 加 工 技 術 及 應 用 價 值 。 其 中 ， 平 膜 押 出 成 型 製 程 在 現 今 高 分 子 加 工 中 是 不 可 或 缺 的 。

在 高 分 子 產 品 中 ， 塑 膠 發 泡 產 品 因 可 具 備 質 輕 、 隔 音 、 隔 熱 、 能 量 吸 收 、 耐 衝 擊 吸 收 、 熱 阻 抗 、 化 學 阻 抗 、 電 阻 抗 、 低 介 電 常 數 等 特 性 ， 為 高 分 子 押 出 產 品 中 重 要 一 環 ， 並 廣 泛 地 應 用 於 工 業 及 民 生 用 途 上 。 其 中 ， 於 材 料 應 用 方 面 可 涵 蓋 如 隔 熱 材 、 防 水 材 、 成 型 材 、 包 裝 材 、 保 護 材 、 輕 材 、 車 材 及 建 材 等 ； 於 產 品 領 域 類 別 可 涵 蓋 如 建 築 裝 潢 、 電 子 工 業 、 機 械 工 業 、 包 裝 工 業 、 醫 療 器 材 及 日 用 百 貨 等 。

#### 3.2 研究目的

根 據 近 年 來 有 關 微 細 發 泡 的 研 究 報 告 顯 示 [1-4] ， 微 細 發 泡 產 品 其 Charpy 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，因此近年來國外有關發泡的技術，無論在押出或射出都朝微細發泡方向來發展。

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 提 高 成 核 速 率 ， 而 成 核 速 率 取 決 於 膠 料 的 過 飽 和 度 。 另 外 ， 在 模 具 設 計 上 ， 若 模 具 內 部 壓 力 無 法 達 到 可 將 所 有 氣 體 溶 解 在 膠 料 內 之 飽 和 臨 界 壓 力 時 ， 則 膠 料 會 產 生 過 飽 和 而 提 前 造 成 預 發 泡 的 現 象 。 此 現 象 會 造 成 產 品 機 械 強 度 顯 著 下 降 ， 為 押 出 發 泡 製 程 中 所 必 須 避 免 的 。

為了避免預發泡在模具太早產生，最佳的模具設計方式，是使在模具內開始達到飽和臨界壓力點的位置，儘量的靠近模具出口。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，若模具設計不當則預發泡現象更會在模具內部提早產生。但在模具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，使得膠料在出模具後發泡太過激烈，致使氣泡壁破裂產生氣泡合併，導致一些大氣泡在產品內部產生，因而使得產品機械性質變差。

因此塑膠物理發泡衣架型模具在最佳化設計上所需考慮的因素如下：

- (1) 避免預發泡在模具太早發生，使預發泡位置儘量接近模具出口。
- (2) 膠料在模具出口處沿寬度方向之流量分佈必須均一。
- (3) 膠料在模具出口處沿寬度方向之溫度分佈必須均一。

本研究針對押出物理發泡提出二種不同型式的衣架型模具（如圖 1 及圖 2 所示），利用上述方法分別對此二種模具發展出設計及分析軟體，以便對此二種模具進行最佳化設計。由於此兩種物理發泡衣架型模具之幾何設計參數甚多，因此必須搭配田口法去找尋最佳幾何形狀，以期建立快速設計及分析之模流軟體，最後本研究並將以 LDPE/CO<sub>2</sub> 為例探討此一系統之模具之最佳化設計。

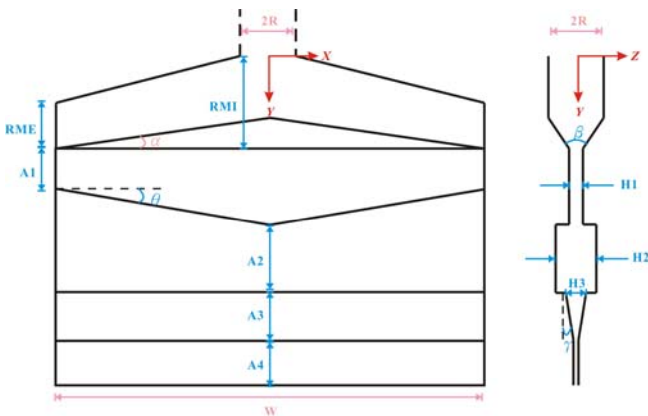


圖 1. 第一種物理發泡衣架型模具示意圖

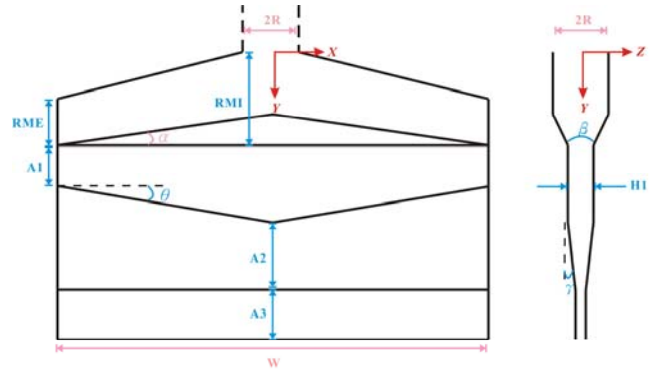


圖 2. 第二種物理發泡衣架型模具示意圖

### 3.3 文獻探討

#### 3.3.1 衣架型模具文獻回顧

過去關於押出成型之模具模流研究相當之多，如 T 型模具的一維流動分析首先被提

出，學者們針對T型模具之均勻度作了一系列之分析探討<sup>[5-8]</sup>。但由於T型模具之流量分佈效果不是非常好，而逐漸發展出衣架型模具，學者們陸續針對衣架型模具做一維流動分析之研究<sup>[9-13]</sup>。

Vrahopoulou<sup>[14]</sup> 則提出一種新的模式來修正上述之一維理論，主要內容仍維持一維流動假設於分流管中，但是狹縫區則改成二維流動模式，可解決較複雜的模具流動問題。Huang及Wang等人<sup>[15-17]</sup> 以三維有限元素法進行非牛頓流體在衣架型模具之流動模擬。Kim<sup>[18]</sup> 也以三維流動模式，模擬並探討模具各種幾何參數對流量和壓力之影響。

Kanai<sup>[19]</sup> 指出，由於衣架型模具其內部流道的間隙比其流道寬度及長度小很多，因此以二維及三維模式做出來的流動分析通常其結果是差不多的。但由於三維流動分析需要耗費大量的電腦計算時間，因此二維的流動分析亦廣被使用於衣架型模具設計分析上。

戴郡良同學<sup>[20]</sup> 引用了田口實驗法則，利用L9直交表搭配二維有限元素流動分析，進行衣架型模具幾何形狀最佳化設計。莊孟屏同學<sup>[21]</sup> 則再改良模具幾何形狀，加入了鬆弛區，並利用L18直交表引入較多的設計參數，而且利用二維控制體積的方法，搜尋更準確的幾何形狀，並探討其性能表現。

### 3.3.2 物理發泡文獻回顧

Suh首先因應美國工業界的需求開始研發微細發泡 (microcellular foam) <sup>[11]</sup>。Suh主要的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時，機械性質即可大幅提昇。這些微細孔大小約在  $10\ \mu\text{m}$  左右。

自由體積模型 (free volume model) 為解釋高分子性質之重要概念，可應用於高分子熔融物之理論探討<sup>[22]</sup>。而此概念也開始陸續應用在高分子與氣體之溶液上，其中Blyler與Kwei根據Doolittle之理論首先提出氣體溶解於高分子時會造成黏度下降的現象<sup>[23,24]</sup>。

而近年來發泡劑也逐漸由化學發泡劑改為物理發泡劑<sup>[25]</sup>，原因是化學發泡劑容易在反應後產生殘留，此殘留往往影響最後產品的性質與外觀。而物理發泡劑不僅不會有殘留的現象，較為安全且對環境也較不會造成污染，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，使得物理發泡劑分子 (如 $\text{CO}_2$ ) 可快速擴散到高分子中。

Sanchez-Lacombe狀態方程式被提出可應用於計算高分子與溶劑間超臨界狀態下之壓力與溫度<sup>[26-30]</sup>。Oshima則致力於研究溶解於高分子中之 $\text{CO}_2$ 氣體，除應用Doolittle之理論

以自由體積模型計算含CO<sub>2</sub>氣體之高分子溶液黏度<sup>[31-38]</sup>，並且應用Sanchez-Lacombe狀態方程式去計算CO<sub>2</sub>溶解度與壓力、溫度間之關係<sup>[36-38]</sup>。Han等人則再將Sanchez-Lacombe狀態方程式應用於PS之CO<sub>2</sub>發泡押出製程上，並以Fluent軟體模擬毛細管模具內之壓力分佈<sup>[39]</sup>。

目前尚未有將Sanchez-Lacombe狀態方程式應用於押出物理發泡衣架型模具之模擬文獻報導，本研究除將首先針對含有物理發泡劑CO<sub>2</sub>之LDPE膠料，進行膠料於物理發泡衣架型模具內之流動模擬分析，在模具形狀設計上更採用L27直交表以便引入更多的設計參數，可做更完整的模具幾何最佳化設計探討。

### 3.4 研究方法

#### 3.4.1 預測含有溶解氣體但不發泡的膠料其剪切黏度 $\eta$ <sup>[33-38, 40]</sup>

對於含有溶解氣體但不發泡的膠料，其剪切黏度 $\eta$ 則無法以毛細管流變儀量測，其主要因是膠料在毛細管流變儀量測過程會發泡。為了解決此問題，本研究改以理論方式去計算並求取其值，茲將其理論方法簡述如下：

含有溶解氣體但不發泡的膠料其自由體積 $f(T, P, w_g)$ 與剪切黏度 $\eta$ 之關係可由下式表示：

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

其中

$$C_1 = (n-1)$$

$$C_2 = nB$$

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

$w_g$ 為氣體溶解在膠料中之重量分率，即膠料之氣體溶解度。

$$\begin{aligned} f(T, P, w_g) &= \frac{V(T, P, w_g) - V^0(w_g)}{V(T, P, w_g)} \\ &= f_r + (1-f_r)\alpha(T-T_r) + (1-f_r)\beta(P-P_r) + \phi(w_g - w_{gr}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $V(T, P, w_g)$ 為溶解氣體但不發泡的膠料之比體積

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

$f_r$ 為參考狀態下之自由體積分率

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{Pr, w_g} \quad \text{為自由體積熱膨脹係數}$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_{Tr, w_g} \quad \text{為自由體積等溫壓縮係數}$$

$$\phi = \frac{\partial f}{\partial w_g} \quad \text{為氣體膨脹係數 (gas expansion coefficient)}$$

以大氣壓、溫度 150°C 及純高分子膠料做為參考狀態，則式(2)可簡化為：

$$f = f_r + \alpha(1 - f_r)(T - T_r) + \beta(1 - f_r)(P - P_r) + \phi w_g \quad (3)$$

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $f_r$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\Phi$ 等參數值，請參考文獻及本研究相關論文[36-38, 40]。

將 $P_r$ 、 $T_r$ 、 $f_r$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\Phi$ 等參數值代入式(3)可計算得到 $f(T, P, w_g)$ ，再將 $f(T, P, w_g)$ 及 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 等參數值代入式(1)，即可計算得到：含有溶解氣體但不發泡的膠料，在某一溫度 $T$ 、壓力 $P$ 及氣體溶解度 $w_g$ 下之剪切黏度 $\eta$ 。

### 3.4.2 預測含有溶解氣體之膠料在某溫度及某氣體溶解度下之發泡臨界壓力值 [26-27, 36-38, 40]

含有溶解氣體但不發泡的膠料在某溫度及某氣體溶解度下之發泡臨界壓力值，可由 Sanchez-Lacombe 狀態方程式求得：

$$\tilde{\rho}^3 + \tilde{P} + \tilde{T} \left[ \ln(1 - \tilde{\rho}) + \left(1 - \frac{1}{r}\right) \tilde{\rho} \right] = 0 \quad (4)$$

$$\text{其中 } \tilde{P} = \frac{P}{P^*} \quad \tilde{T} = \frac{T}{T^*} \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho^*} \quad \gamma = \frac{P^* V^*}{RT^*}$$

$\tilde{P}$ 、 $\tilde{T}$ 、 $\tilde{\rho}$  分別為對比壓力、對比溫度、對比密度 (reduced properties)

$r$  為尺寸參數 (size parameter)；

$R$  為氣體常數；

$P^*$ 、 $T^*$ 、 $V^*$  及  $\rho^*$  為特徵參數 (characteristic parameters)。

$P^*$ 、 $T^*$ 、 $V^*$  及  $\rho^*$  之求法請參考本研究相關論文[40]。

依序計算得到某氣體溶解度下之膠料其  $\rho^*$ 、 $V^*$ 、 $P^*$  及  $T^*$  值。再將  $\rho^*$ 、 $V^*$ 、 $P^*$  及  $T^*$  值與

膠料溫度  $T$ 、膠料密度  $\rho$  代回式(4)之 Sanchez-Lacombe 狀態方程式中，即可計算得到含有溶解氣體但不發泡的膠料在某溫度及某氣體溶解度下之發泡臨界壓力值。

### 3.4.3 以二維控制體積法，建立含有溶解氣體但不發泡的膠料於衣架型模具內之等溫及非等溫流動模式及模擬分析<sup>[40-44]</sup>

分別將兩種物理發泡衣架型模具展開為 X-Y 平面。將模具切割為許多流動子單元，子單元內之流動可視為平行板間之流動，其中 X 為寬度方向，Y 為長度方向，Z 為深度方向。

上述 3.4.1 及 3.4.2 節之研究步驟，建立了一系列數學模式，可直接預測含有溶解氣體但不發泡的膠料其剪切黏度  $\eta$ ，及預測在某一溫度及氣體溶解度下之發泡臨界壓力值。以此為依據，再進一步以二維控制體積法，進行含有溶解氣體但不發泡的膠料於衣架型模具內之等溫及非等溫流動模式及模擬分析。同時配合田口法，建立一套設計分析軟體以便對衣架型模具進行最佳化設計。詳細之建立流程請參考本研究相關論文<sup>[40]</sup>。

## 3.5 結果與討論

### 3.5.1 含CO<sub>2</sub>但未發泡之LDPE熔膠其發泡臨界壓力與溫度、溶解度之關係

本研究之高分子材料選用常用於押出成型之低密度聚乙烯LDPE，進行物理發泡衣架型模具之最佳化設計。茲將其材料黏度流變參數與物理性質列於表 1<sup>[36-38, 45]</sup>。

圖 3 為在 190°C~220°C 下，發泡劑溶解度對飽和臨界壓力的關係，如所示，當發泡劑溶解度增加或是模具內溫上升時，熔膠發泡所需之臨界壓力會隨之增加。

表 1. LDPE 之黏度流變參數與物理性質

Properties	LDPE
$T_o$ (K)	423
$n$ (-)	0.57
$C_1$	-0.43
$C_2$	1.58
$C_3$	1.66
$C_m$ (J/Kg-K)	2300
$\rho_m$ (Kg/m <sup>3</sup> )	750

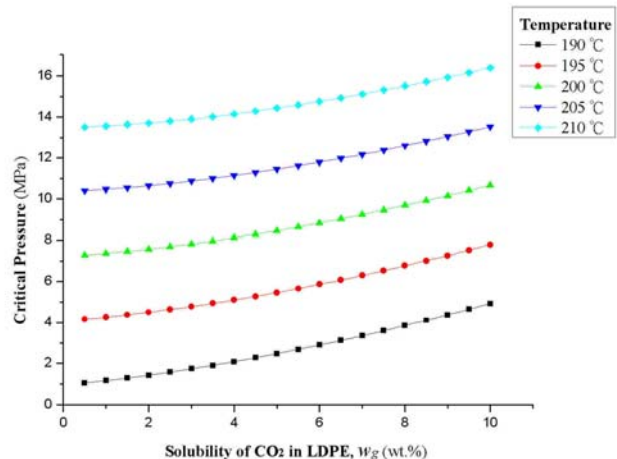


圖 3. 不同溫度下，LDPE 熔膠中 CO<sub>2</sub> 溶解度與飽和臨界壓力之關係



### 3.5.2 第一種物理發泡衣架型模具之最佳化設計

(註：本精簡報告以第一種模具之分析結果為主，第二種模具請詳見相關論文<sup>[40]</sup>)

#### 3.5.2.1 等溫田口法之搜尋結果及最佳設計點之選取

本研究之模擬條件：高分子流量為 160 kg/hr，模具入口直徑為 5 公分，模具寬度為 150 公分，模具內溫假設為 190°C 等溫，CO<sub>2</sub>溶解度  $w_g$  為 1 wt.%。

針對第一種物理發泡衣架型模具（如前述圖 1），搜尋 12 個因子（包括分歧管區起始長度 RMI、分歧管區末端長度 RME、限流區導角  $\theta$ 、限流區深度 H1、限流區長度 A1、鬆弛區長度 A2、鬆弛區深度 H2、壓縮區長度 A3、壓縮區起始深度 H3、分歧管區導角  $\beta$ 、壓縮區導度  $\gamma$ 、模唇區長度 A4），尋找訂定範圍內之最佳流量均勻度。利用本研究訂定之起始水準值<sup>[40]</sup>，並以田口法搭配自行編寫之程式進行搜尋程序，可得到 16 個設計點，以及其出口流量均勻度與總壓力降，計算結果如表 2 所示。

表 2. 第一種模具：16 個設計點之幾何因子搜尋結果、流量均勻度與總壓力降

	RMI (cm)	RME (cm)	$\theta$ (°)	H1 (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	A3 (cm)	$\beta$ (°)	$\gamma$ (°)	A4 (cm)	FUI (-)	Total Pressure (MPa)
1	6.600	2.000	3.566	0.299	2.928	1.000	0.405	0.203	1.000	60.531	1.001	3.000	0.975	3.568
2	6.600	2.000	3.566	0.272	2.420	1.100	0.405	0.248	1.000	55.028	3.704	3.000	0.942	3.421
3	7.920	1.458	3.566	0.350	2.700	2.700	0.630	0.182	1.100	40.020	1.001	3.000	0.980	3.356
4	9.900	3.564	8.023	0.299	2.928	1.968	0.400	0.164	1.000	71.911	1.001	3.000	0.959	5.518
5	8.800	2.000	3.602	0.350	3.000	3.300	0.770	0.275	1.000	40.020	1.001	3.000	0.936	2.397
6	7.920	1.782	3.242	0.315	2.700	2.700	0.630	0.223	1.000	40.020	1.101	2.050	0.956	2.978
7	10.000	3.960	9.000	0.303	2.200	2.970	0.400	0.225	1.100	59.430	3.704	3.000	0.929	5.142
8	9.801	2.598	5.908	0.350	2.635	1.771	0.440	0.150	1.000	71.192	1.211	3.000	0.986	4.594
9	14.000	1.299	7.294	0.242	3.000	4.348	0.800	0.177	1.100	59.430	1.772	3.000	0.928	5.677
10	14.000	2.406	5.616	0.333	2.700	2.916	0.405	0.164	1.100	65.373	1.101	3.000	0.983	4.805
11	12.600	1.000	8.023	0.299	1.464	2.624	0.400	0.197	1.000	71.911	1.001	3.000	0.941	4.664
12	10.206	1.000	6.564	0.350	1.611	2.887	0.440	0.177	1.000	64.720	1.001	3.000	0.976	3.964
13	13.200	2.406	5.055	0.315	2.700	2.624	0.446	0.164	1.100	64.720	1.101	2.500	0.970	4.514
14	12.880	3.036	5.798	0.253	1.800	3.300	0.450	0.315	1.000	55.028	3.704	2.600	0.985	5.360
15	11.340	1.000	7.221	0.315	1.318	2.624	0.440	0.197	1.100	64.720	1.001	2.500	0.941	4.089
16	14.000	2.970	6.303	0.302	1.980	2.970	0.450	0.346	1.000	55.028	3.704	2.500	0.975	4.189

為了比較各個設計點，將流量均勻度對總壓力降作圖，如圖 4 所示。為了進一步比較模具內之壓力分佈，挑出圖 4 中出口流量均勻度相對較高的設計點（包括設計點 1、3、4、8、10、12、13、14 及 16），並針對此 9 個設計點，計算沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，可得到圖 5。

圖 5 中，實線表示各設計點所得到的模具內壓力分佈，虛線則表示本操作條件下 LDPE 之發泡臨界壓力值，當模具內壓力低於臨界值時，模具內的膠料便會開始發泡。可觀察出最早發泡的為設計點 1，且在鬆弛區內已提前產生預發泡，在模具設計上應避開此狀況。發泡時間最晚且預發泡位置在模唇區的為設計點 10，故設計點 10 為田口法搜尋出之第一種物理發泡衣架型模具最佳設計點。

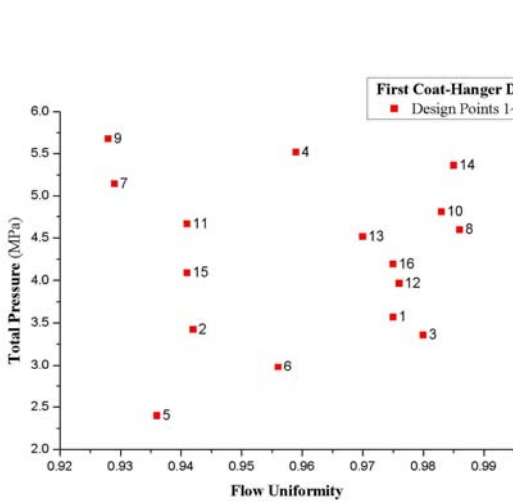


圖 4. 第一種模具：16 個設計點之出口流量均勻度與總壓力降分佈示意圖

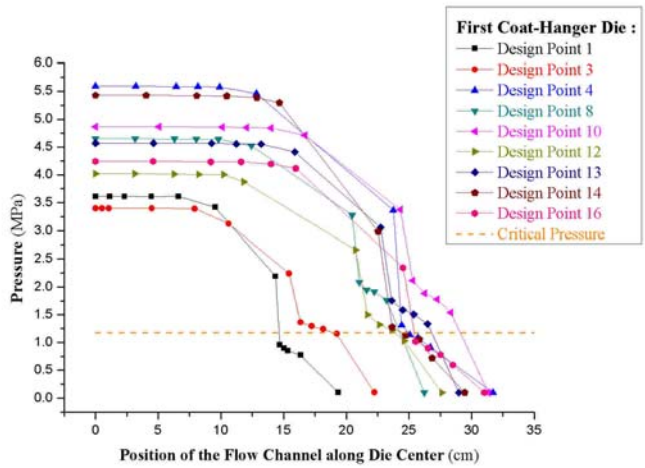


圖 5. 第一種模具：流量均勻度較佳之設計點，沿模具中心線之壓力分佈比較

### 3.5.2.2 第一種模具：最佳設計點之流動分析

選定前述之設計點 10 為第一種物理發泡衣架型模具之最佳設計點，並於本節作一系列最佳設計點之流動分析探討。

再次觀察與分析沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，如圖 6 所示。由圖 6 中可觀察出，當流體進入分歧管區後，因截面積由小漸大且深度相對其他區域較大，壓力變化幅度並不大；進入狹縫區後，流道深度較狹窄，由於截面積固定，壓力呈現遞減；在進入鬆弛區後，由於其流道深度再度變大，會有釋放壓力的作用，造成壓力下降趨勢更為加快；出了鬆弛區後，當流體進入壓縮區，由於流道深度被壓縮，壓力下降趨勢有減緩的現

象；進入模唇區後，壓力則線性遞減至模唇出口。

觀察流體在模具各區出口截面之流量均勻度變化，如圖 7 所示，比較起分歧管區內部時較低的流量均勻度，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈高的流量均勻度。

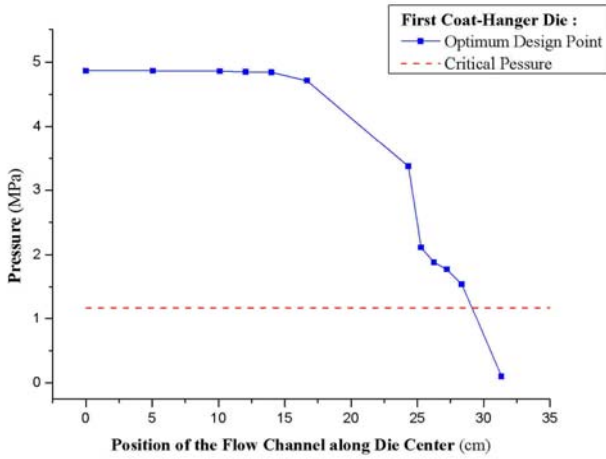


圖 6. 第一種模具：最佳設計點，沿模具中心線之壓力分佈

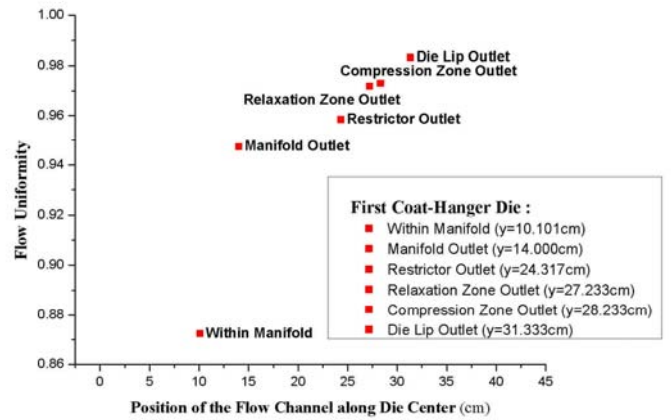


圖 7. 第一種模具：最佳設計點，模具內各區出口截面之流量均勻度

為了探討第一種模具其壓縮區之功效，將最佳設計點其幾何條件中之壓縮區改為鬆弛區之延伸（控制除壓縮區外之幾何設計條件相同）以形成一不含壓縮區之模具。並將此不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具做一系列比較，如圖 8 與圖 9 所示。

圖 8 為不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之壓力分佈比較，可看出本研究設計之第一種模具可增加總壓力降，延遲預發泡時間，達到使膠料發泡位置更接近模具出口位置的目的。圖 9 為不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之出口截面流量分佈比較，可看出本研究設計之第一種模具其出口流量均勻度，優於不含壓縮區之模具。

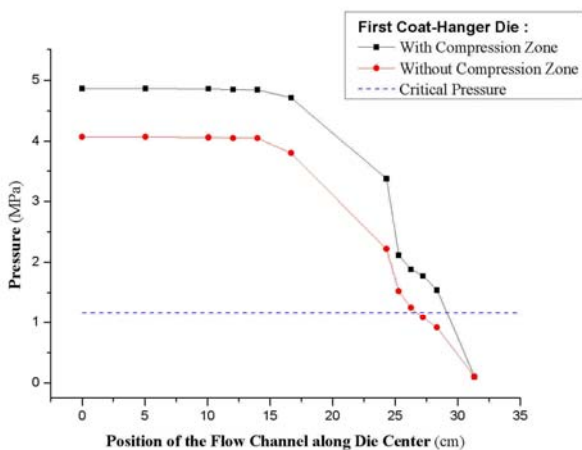


圖 8. 不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之模具中心線壓力分佈比較

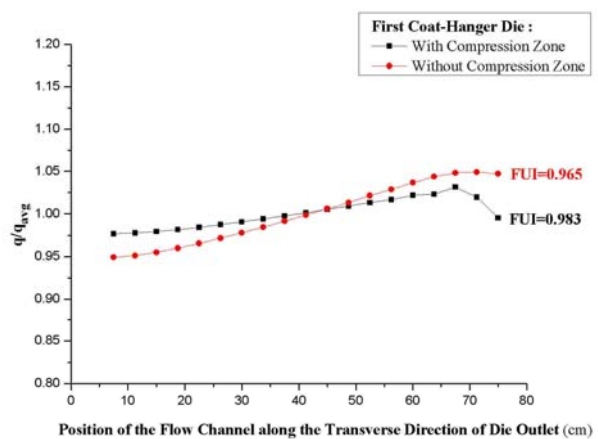


圖 9. 不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具出口截面之流量分佈比較

### 3.5.2.3 第一種模具：改變模具幾何形狀之分析比較

本研究於物理發泡衣架型模具中引入了壓縮區的設計，減緩了傳統模具之壓力下降趨勢。增加壓縮區之導角角度、增加壓縮區長度與減少壓縮區起始深度，皆能有效延後預發泡時間，使膠料發泡位置能更接近模具出口。詳細之分析結果請參考本研究相關論文[40]。

### 3.5.2.4 第一種模具：改變氣體發泡劑溶解度之分析比較

由圖 10 可知氣體發泡劑溶解度 $w_g$ 對總壓力降具有顯著的影響，當氣體發泡劑溶解度 $w_g$ 增加，總壓力降則會隨之遞減，至於發泡臨界壓力值卻隨之遞增。這是因為氣體發泡劑溶解度 $w_g$ 的增加會降低黏度值，造成流動阻力變小，因而造成較低的壓力降值；然而氣體發泡劑溶解度 $w_g$ 的增加也會提高發泡臨界壓力值，熔膠中氣體發泡劑含量愈多，預發泡愈容易提前發生，也導致發泡位置遠離了模具出口。圖 11 為各種氣體發泡劑溶解度 $w_g$ 下之第一種模具出口截面流量分佈比較，可看出隨著氣體發泡劑含量的增加，出口均勻度會隨之遞減。

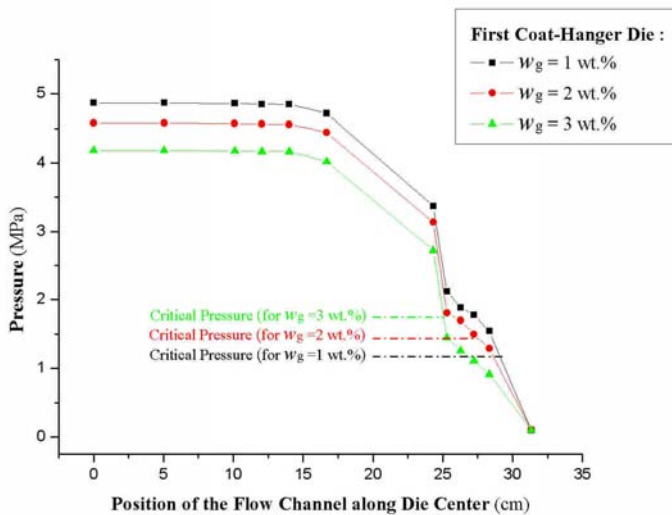


圖 10. 第一種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，沿模具中心線之壓力分佈比較

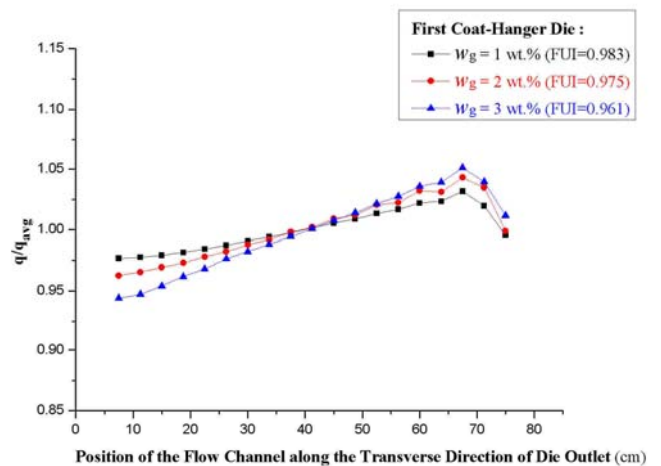


圖 11. 第一種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，出口截面之流量分佈比較

### 3.5.2.5 考慮溫度效應下之非等溫流動分析

前述 3.5.2.1 至 3.5.2.4 節將模具內溫假設為 190°C 等溫，探討第一種物理發泡衣架型模具內之等溫流動分析，本節則探討考慮溫度效應下之非等溫流動分析。將模具入口截面料

溫以及模具壁溫設定為 190°C，其餘模擬條件同於前述第一種模具之等溫模式最佳設計點。

圖 12 可觀察出流體於第一種模具中心線之內部溫度變化情形。當流體流經限流區及壓縮區時會有較明顯之升溫現象，這是因為當熔膠流到厚度較狹小的區域時，因剪切率增加而導致黏滯熱亦隨之增加，而造成的結果。由此模具中心線溫度分佈圖亦可觀察出，入口端的 190°C 料溫，至出口時已升溫至 204.5°C。圖 13 可觀察到模具內部在各區出口截面之溫度分佈，比較起分歧管區出口時較不均一的溫度分佈，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈高的溫度均勻度。其中，流體於模具出口處之溫度分佈，溫度均勻度值可達到 0.9986。

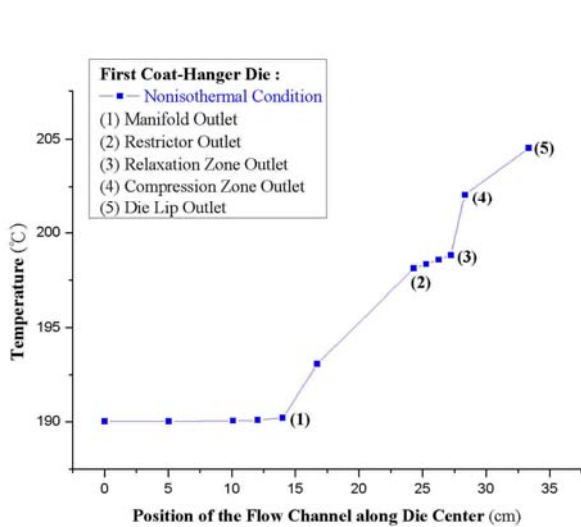


圖 12. 第一種模具：考慮非等溫情況下，沿模具中心線之溫度分佈

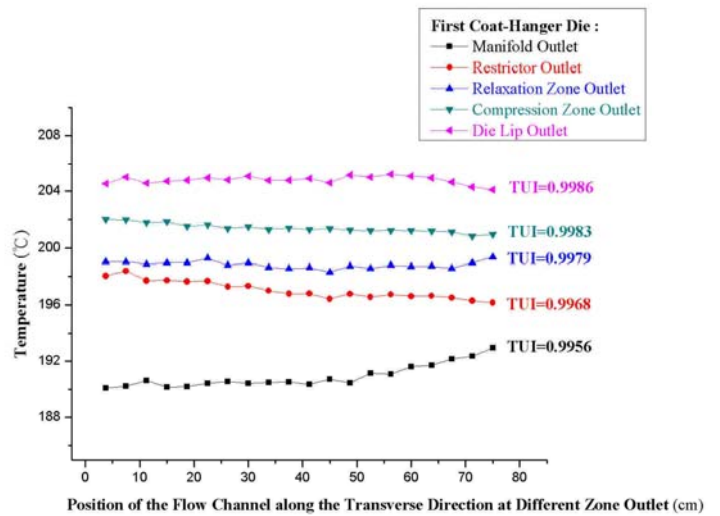


圖 13. 第一種模具：考慮非等溫情況下，模具內各區出口截面沿寬度方向之溫度分佈

### 3.6 結論

塑膠物理發泡衣架型模具在最佳化設計上所需考慮的因素包括接近模具出口的預發泡位置、良好的出口流量均勻度及良好的出口溫度均勻度。本研究建立出可供以高發泡倍率使用之一套發泡型衣架型模具設計及分析軟體，可模擬預測不同模具幾何形狀下模具內之預發泡位置、壓力分佈、流量均勻度與溫度均勻度，以進行模具最佳化設計。

本研究引入了田口法，針對兩種物理發泡衣架型模具，尋找訂定範圍內之最佳流量均勻度，減少了數值模擬次數，也提升了找出最佳模具參數組合之效率。

本研究預測了含有 CO<sub>2</sub>發泡劑之 LDPE 膠料於某溫度及某氣體溶解度下之發泡臨界壓力值，當發泡劑溶解度增加或是溫度增加時，熔膠發泡所需之臨界壓力會隨之增加。

本研究於兩種物理發泡衣架型模具中引入了壓縮區的設計，減緩了傳統模具之壓力下降趨勢。增加壓縮區之導角角度、增加壓縮區長度與減少壓縮區起始深度，皆能有效延後預發泡時間，使膠料發泡位置能更接近模具出口。

本研究設計之第一種模具因於限流區與壓縮區之間設計一段適當的鬆弛區，有效提高了流量均勻度與溫度均勻度，就出口流量均勻度及出口溫度均勻度的觀點，第一種模具是優於第二種模具的；第二種模具則因不含鬆弛區而有較高之總壓力降，使膠料發泡位置能更接近模具出口，故就壓力分佈與膠料發泡位置的觀點，第二種模具是優於第一種模具的。

#### (4) 參考文獻

1. "Foam Extrusion, Principle and Practice", Edited by S.T. lee, Technomic Pub. Inc., Lancaster (2000)
2. S.K. Goel and E.J. Beckman, *Cell Polym.*, **12**, 251 (1993)
3. V. Kumar, Weller Je., "Polymeric Foams: Science and Technology" Washington, Americal Chemical Society (1997)
4. A.H. Behraves, C.B. Park, R.D. Venter, ANTEC 1998
5. J.F. Carley, *J. Appl. Phys.*, **25**, 1118 (1954)
6. J.M. McKelvey and K. Ito, *Polym. Eng. Sci.*, **11**, 258 (1971)
7. Y. Matsubara, *Polym. Eng. Sci.*, **20**, 212 (1980)
8. W. K. Leonard, *Polym. Eng. Sci.*, **25**, 570 (1985)
9. Y. Matsubara, *Polym. Eng. Sci.*, **19**, 3, 169 (1979)
10. Y. Matsubara, *Polym. Eng. Sci.*, **23**, 1, 1 (1983)
11. T. J. Liu, C.N. Hong and K.C. Chen, *Polym. Eng. Sci.*, **28**, 1517 (1988)
12. B. Vergnes, P. Saillard and J.F. Sgassant, *Polym. Eng.Sci.*, **24**, 980 (1984)
13. H.H. Winter and H.G. Fritz, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 543 (1986)
14. Vrahopoulou, *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 629 (1991)
15. 黃俊欽, "三維有限單元法在非牛頓流體流動分析之研究", 博士論文, 國立成功大學, 民國 81 年
16. Y. Wang, *Polym. Eng. Sci.*, **31**, 204 (1991)
17. Y. Wang, *Polym. Processing*, **4**, 311 (1991)
18. D.H. Kim, *J. Chem. Eng. of Japan*, **29**, 1 (1996)
19. "Film Processing", Edited by T. Kanai and G.A. Campbell, Hanser Pub. Inc., Munich (1999)
20. 戴郡良, "衣架型模具最佳化設計", 碩士論文, 國立交通大學, 民國 88 年
21. 莊孟屏, "平膜押出製程其衣架型模具飛等溫流動模擬及最佳化設計", 碩士論文, 國立交通大學, 民國 92 年
22. F.N. Kelly and F. Bueche, *J. Polym. Sci.*, **50**, 549 (1961)



23. L.L. Blyler and T.K. Kwei, *J. Polym. Sci.*, **35**, 165 (1971)
24. M.H. Lee, C.B. Park, C. Tznganakis, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 1112 (1998)
25. J.L. Throne, “Thermoplastic Foams”, Sherwood Publishers, Hinckley, Ohio (1996)
26. I.C. Sanchez and R.H. Lacombe, *J. Phys.Chem.*, **80**, 2352 (1976)
27. R.H. Lacombe and I.C. Sanchez, *J. Phys.Chem.*, **80**, 2568 (1976)
28. K. Gauter and R. Heidemann, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 1116 (2000)
29. K. Gauter, R.A. Heidemann, *Fluid Phase Equilibria*, 183–184, 87 (2001)
30. I. Nagy, R.A. Krenz and R.A. Heidemann, *J. of Supercritical Fluids*, **37**, 115 (2006)
31. M.M. Cross, *Rheol. Acta*, **18**, 609 (1979)
32. R.B. Bird, R.C. Armstrong and O. Hassager, “Dynamic of Polymeric Liquids”, Vol.1, Fluid Mechanics, 2nd, Wiley, New York (1987)
33. A.K. Doolittle, *J. Appl. Chem.*, **22**, 1471 (1951)
34. S.A. Stern, S.M. Fang and H.L. Frisch, *J. Polym. Sci. A-2.*, **10**, 201 (1972)
35. S.S. Kulkatni and S.A. Stern, *J. Polym. Sci. Polym Phys.*, **21**, 441 (1983)
36. S. Areerat, T. Nagata and M. Ohshima, PPS18, Portugal (2002)
37. S. Areerat, K. Taki and M. Ohshima, PPS Asia, Taipei (2002)
38. S. Areerat, T. Nagata and M. Ohshima, *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 2234 (2002)
39. X. Han, K. Koelling, D. Tomasko and L. Lee, *Polym. Eng. Sci.*, **42**, 2094, (2002)
40. 李名洋, “平膜物理發泡製程之衣架型模具：流動模擬及最佳化設計”, 碩士論文, 國立交通大學, 民國 95 年
41. J. Vlcek, G. N. Mailvaganam, J. Vlachopoulos and J. Perdikoulis, *Adv. Polym. Technol.*, **10**, 319 (1990)
42. J. Vlcek, J. Vlachopoulos and J. Perdikoulis, *Int. Polym. Process.*, **2**, 174 (1988)
43. J. Vlcek, V. Kral and K. Kouba, *Plast. Rubber Process Process.*, **4**, 309 (1984)
44. C.C. Huang, *Polym. Eng. Sci.*, **38**, 573 (1998)
45. Flow2000<sup>®</sup> software, Compulastic

## (5) 計畫成果自評

### 5.1 研究內容與原計畫相符程度及達成預期目標情況：

本研究成果與原計畫相符程度達 95% 以上，並成功地達成所有預期目標。

### 5.2 研究成果之學術或應用價值：

整個研究計劃牽涉到高分子加工理論、高分發泡理論、高分子發泡系統之熱力學及流變特性、模流分析、田口法、計算流力等方面之探討，是一相當具學術研究價值之研究專題。又由於國內目前對物理發泡衣架型模頭的設計技術仍很缺乏，基本上設計仍憑經驗，且因模頭本身幾何設計參數很多，更是造成只憑經驗式來設計模頭會倍感困難。由於本計畫所發展的設計及分析的軟體，可對此模頭做快速的最佳化設計及性能評估，因此可供作為提升產品的附加價值及競爭力參考，對國內從事押出物理發泡之業界會有相當的助益。

### 5.3 是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等：

本研究成果適合在學術期刊發表，亦可供國內從事押出物理發泡之業界做參考。