

第一章 緒論

1.1 研究背景與文獻回顧

1.1.1 衣架型模具文獻回顧

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 ， 押 出 成 型 製 程 在 現 今 高 分 子 加 工 中 是 一 項 不 可 或 缺 的 。

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 [1~4]。 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 [5~9]。

Vrahopoulou [10] 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 [11~13] 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 [14] 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 [15] 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。

戴郡良學長 [16] 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。莊孟屏學姊 [17] 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。

1.1.2 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) [18]。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 (preexisting flaws) 時，機械性質即可大幅提昇。這些微細孔大小約在 10 μ m左右。根據近年來有關微細發泡的研究報告顯示 [18-21]，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。

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 [22]。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 [23,24]。

而近年來發泡劑也逐漸由化學發泡劑改為物理發泡劑 [25]，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CO₂）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 [26~30]。Oshima則致力於研究溶解於高分子中之CO₂氣體，除應用Doolittle之理論以自由體積模型計算含CO₂氣體之高分子溶液黏度 [31~38]，並且應用Sanchez-Lacombe狀態方程式去計算CO₂溶解度與壓力、溫度間之關係 [36~38]。Han等人則再將Sanchez-Lacombe狀態方程式應用於PS之CO₂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 [39]。

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CO₂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。茲將研究動機與目的詳述於1.2節。

1.2 研究動機與目的

塑膠發泡產品可具備質輕、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，茲將其功能、市場及使用材料列於表 1 [18]。

表 1. 塑膠發泡產品之市場及應用範圍

Functions	Markets	Attributes	Polymers
Cushioning	Furniture Transportation Construction	Energy absorption	Flexible PU PE ABS
Insulations	Construction Automotive	Low thermal conductivity Sound absorption	Rigid PU PS, PE Rigid vinyl
Protection	Packaging	Soft and flate surface Cushioning	RIM PU PS bead PE, PP sheet
Strength Weight	Athletic Construction Medical Decoration Household	Strength Softness	RIM PU x-linked PE PS, PVC Flexible PU Phenolics, Acrylics
Impact Absorption	Automotive Athletic	Sharp energy absorption	Bead PP x-linked PE
Thermal Chemical Electrical	Thermoforming Packaging Electrical	Thermal strength Chemical inertness Electrical inertness	PS, Silicones x-linked PE Flexible vinyl Epoxy, Rubber

由於塑膠發泡產品具有上列各種特性，因此廣泛地應用於工業及民生用途上，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

由於塑膠發泡產品用途非常廣泛，全世界平均每年使用量及銷售額分別以 3~4% 及 6% 之成長率在攀升^[18]。而當前在每天的民生及工業活動中，均會直接或非直接的接觸到塑膠產品，因此塑膠發泡產品是塑膠產品中極重要之一環。

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、管材及異形材；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；而依製程方式又可分為押出成型及射出成型。發泡產品中大部份的基材以 Polystyrene、Polyolefin、PET 及 PVC 為主，製程方式則以押出發泡產品為主。押出發泡製程中，異形押出發泡是使用異形押出模具用以製造異形發泡產品，而對於硬質發泡片材及板料，或厚度在 3.0mm 以上的軟質發泡片材及板材，均使用衣架型平板模具製造；另外厚度在 3.0mm 以下但厚度要求嚴格之軟質發泡片材亦需使用衣架型平板模具製造。

一般高發泡倍率的塑膠產品必須使用物理發泡劑才能達到高發泡比例。在押出製程中最重要之二個製程單元為螺桿及模具。在高發泡比例的押出塑膠發泡產品，往往會造成材料出到模具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，而造成產品機械強度太差而

不能使用，此為低密度發泡材料既要兼顧輕質卻又不希望喪失太多的機械強度之極困難處。

在膠料發泡過程中，氣泡的形成可區分成：成核 (nucleation)、氣泡成長及氣泡合併 (bubble coalescence)。當膠料中的氣體達到足夠的過飽和 (supersaturation) 程度時，成核作用開始發生，形成許多氣泡微胞 (bubble cell)，膠料中的氣體濃度因而逐漸降低。當氣體過飽和程度不足時，成核停止。膠料中氣體濃度繼續減低。當到達新的飽和濃度後，平衡重新建立，此後氣泡靠合併作用 (氣體由小氣泡擴散進入大氣泡) 或膠料本身的應力緩和而繼續成長。

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，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，最後會產生一些尺寸較大的氣泡在產品內部，而造成產品機械強度變的很差。

另外，在模具設計上，若模具內部壓力 (local die pressure) 無法達到可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而提前造成預發泡 (prefoaming) 的現象。此為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具內部提前預發泡，膠料便會開始產生成核作用，且成核速率會很慢，而將會導致如前述之產生尺寸較大的氣泡於

產品內部的問題，造成產品機械強度顯著下降。

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，如此才可避免預發泡太早發生的情形。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，因此針對低密度之發泡押出製程，其模具在靠近模具出口處(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)，以便增加模具內部各點壓力使得其超過對應的飽和臨界壓力，一直到接近模具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，如此機械性質才不會顯著變差。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：

讓膠料在模具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。

考慮因素(1)~(3)，目的在使膠料在模具出口沿著寬度方向發泡均勻，如此產品不致因為發泡不均導致產品厚度不均勻，而且產品內部氣泡大小也會均勻，且可避免因出口平均溫度太高導致發泡太過激烈，產生大氣泡及氣泡壁破裂產生合併之現象，導致產品表面產生下陷以及機械性質顯著下降，如此才可獲得機械強度良好之低密度發泡產品。

一般塑膠平膜以及板材製程中最重要的加工設備為單螺桿押出機，而押出機最重要的二個加工元件為螺桿及模具。在未發泡塑膠平膜中以衣架型模具效果最好而最被重視。傳統衣架型模具的構造如圖 1 所示。

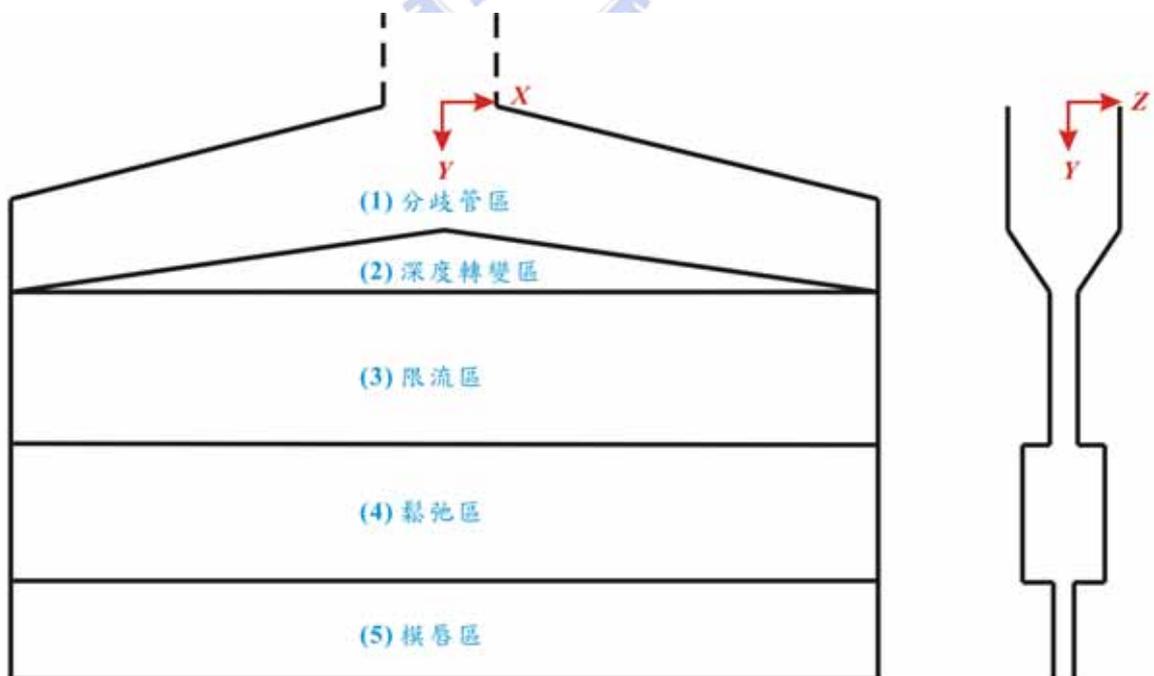


圖 1. 傳統衣架型模具示意圖

流體在進入模具後先通過分歧管區 (manifold) 入口，因為平膜及板材均是平面狀而且寬度很大，因此分歧管的目的是要將原來來自押出機而且尺寸較小成圓柱狀的塑膠膠料流動轉換成平面流。

為了使膠料可以很均勻的流往分歧管區兩邊，在分歧管之後必須再設計一個限流區 (restrictor)，此區的主要功能是限制塑膠流體往前的速度。限流區的間隙一般較小，如此才可使原來在分歧管中央部分由於壓力較大因此導致中央部分膠料流量較大的現象受到抑制，因此限流區的主要目的就是如同設計一個流動障礙物使膠料流過此障礙物時較不容易流動。由於受到限流區的阻擋，因此膠料便可以很均勻的流向分歧管兩側，使得整個分流通管全部被充滿之後，整體膠料再往前流動以達到流體分布均勻的目的。

由於膠料流進分歧管區及限流區時所經過的流動路程不同，因此其分子所承受的順向性亦有所不同，當膠料在模具內部的順向性不同時，會使得膠料在被後續滾輪碾壓或延伸時產生不同程度的拉伸，導致產品厚薄不均。此外，當膠料被強迫通過間隙極小之限流區時，由於產生高溫及高剪切力，所以極易造成塑膠材料裂解。

為了消除塑膠材料所產生之高順向性及高溫高剪切所產生之高剪切熱而會有裂解之虞，以及為了避免膠料經過分歧管及限流區之後仍有流量不均之現象，在設計上會在限流區之後讓膠料通過一段鬆弛區 (relaxation zone)，其流道深度較深。經過鬆弛區之後，膠料會經過最後一段模唇區 (die

lip)，在模唇區的主要功用在於膠料定型以及調整產品厚度，其間隙沿寬度方向均成一定值。

至於在塑膠物理發泡衣架型模具的設計考量上，如前面所描述的，以出口處各點的流量及溫度均一性和避免預發泡在模具內太早發生為最主要考量因素。因此，本研究在模具設計上採取兩種形式的模具加以探討，並分別對每種模具進行最佳化設計，並比較何者對押出發泡性能較佳。

第一種物理發泡衣架型模具型式為：

膠料從模具出口沿著整個寬度其各點的流量必須很均勻，如此產品厚度才會均勻，基本上在設計時需使膠料在進入模唇區時沿寬度方向各點流量一定，為了達到此目的，將模具分歧管流道做成衣架型，同時限流區做成島狀三角形如圖 2 所示。

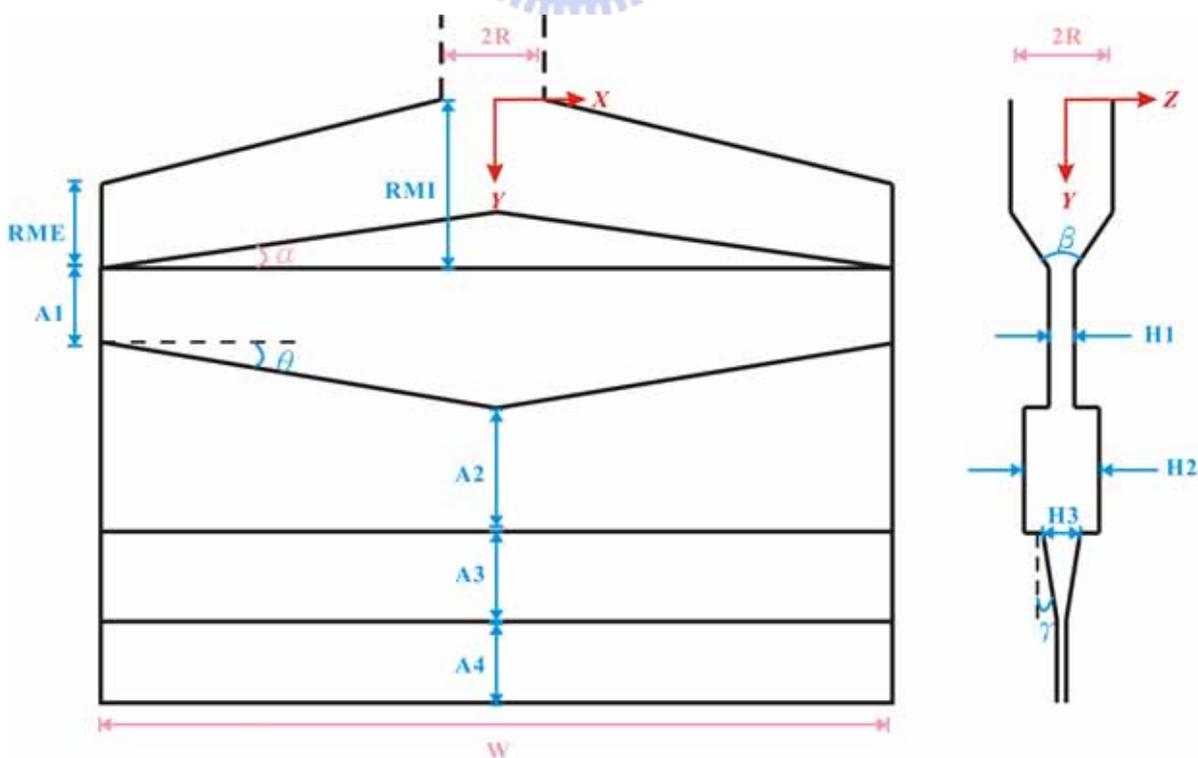


圖 2. 第一種物理發泡衣架型模具示意圖

如此做的目的是要讓膠料由模具入口處的小口徑圓形通道通往分歧管兩側分散時，在分歧管中心部分由於膠料在進入模具的入口處此處壓力最大而分歧管兩側其壓力最小，因此為了避免此種壓力不同所造成的流量不均勻，所以我們故意讓分歧管中心處的膠料在限流區的流動路徑最長，而讓其在鬆弛區的流動路徑最短。由於限流區的深度最淺，而鬆弛區次之，分歧管最深，因此經由此種設計讓在模具兩側的膠料在經過分歧管及鬆弛區的路徑最長而經過限流區的長度最短，如此方可使膠料在進入模唇時從模具左側到右側各點壓力都很平均，如此才可確保各點流量都很均勻。因此才可達到使產品厚度均勻的效果。此外為了避免預發泡在模具太早發生，本研究在鬆弛區之後設計了一段壓縮區，此區會將流道深度加以壓縮，造成一個壓縮的導角，以便增加模具內部各點壓力使得其超過對應的飽和壓力。本研究希望一直到出壓縮區之後，於模唇區才使預發泡發生，接近模具出口處壓力驟降也因而導致膠料過飽和度在極短時間內快速上升，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，如此機械性質才不會變差。

第二種物理發泡衣架型模具型式為：

與第一種型式衣架型模具不同處在於第二型式衣架型模具不具鬆弛區，而是在限流區之後直接接具有壓縮導角的壓縮區，如圖 3 所示。

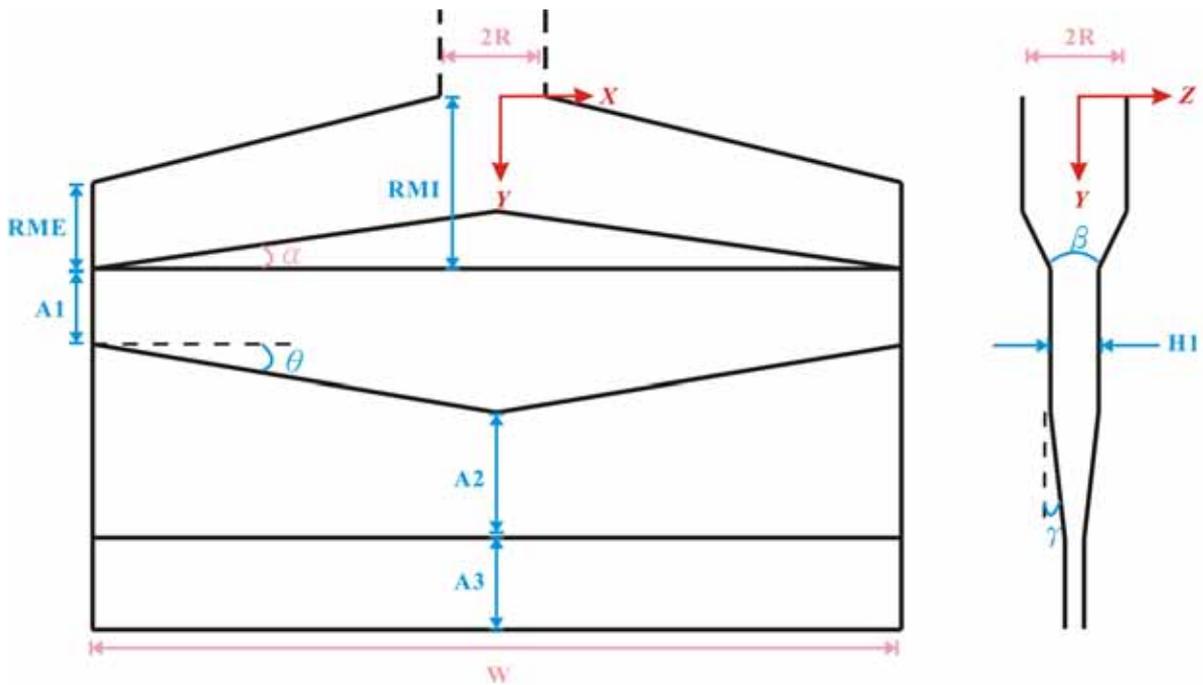


圖 3. 第二種物理發泡衣架型模具示意圖

由於含有溶解氣體但不發泡的膠料其黏度顯著降低，分子在流動時不會產生太大的順向性及剪切熱，因此有鬆弛區的好處是其會增加流量均勻度，但是其缺點是由於鬆弛區深度較深，會有因壓力下降導致預先發泡產生之虞。

目前有關押出物理發泡衣架型模具尚未見到有關此種模具的模擬文獻報導，僅止於國外押出大廠的產品目錄介紹。因此本研究採用 Vleck [40~42] 等人所提出二維控制體積法(control volume method)流動模式去模擬非等溫、非牛頓型流體於押出物理發泡衣架型模具內流動。其中包括以數學模式 [31~38] 直接預測含有溶解氣體但不發泡的膠料其剪切黏度 η ，及在某一溫度及壓力下氣體於膠料之溶解度，並以此為依據，利用上述控制體積法建立膠料在模具內之流動模式，並搭配田口法 [43] 建立供以使用物理發泡劑做為

高發泡倍率用的一套衣架型模具設計及分析軟體，以便對此模具進行最佳化設計。搭配田口法是相當重要的，因為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是相當耗時，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找尋出最佳設計參數組合，節省模具設計時間。

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，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/CO₂為例探討此一系統之模具之最佳化設計。

