

國立交通大學

應用化學研究所

碩士論文

分配式混合元件於單螺桿押出製程之
混合分析及最佳化設計



Optimal Design and Mixing Analyses of Distributive
Mixing Elements for the Single Screw Extrusion Process

研究生：林煜倚
指導教授：吳建興

中華民國九十四年七月

分配式混合元件於單螺桿押出製程之
混合分析及最佳化設計

Optimal Design and Mixing Analyses of Distributive Mixing Elements
for the Single Screw Extrusion Process

研究生：林煜倚

Student : Yu-Yi Lin

指導教授：吳建興

Advisor : Jiann-Shing Wu

國立交通大學
應用化學研究所



Submitted to Department of Applied Chemistry

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Department of Applied Chemistry

July 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

分配式混合元件於單螺桿押出製程之 混合分析及最佳化設計

學生：林煜倚

指導教授：吳建興

國立交通大學應用化學學系（研究所）碩士班



本論文之主旨在針對插門型混合元件，以改變不同的幾何形狀、插門數量的多寡及相對的排列位置關係，來探討與分析高分子流體於單螺桿押出製程的混合程度。

本文的研究方式為利用有限元素法(Finite Element Method)模擬高分子流體的流動，進行的模擬軟體採用的是ANSYS[®]，藉由從界面面積比(Interfacial Area Ratio)和能量消耗量(Energy Consumption)兩個指標，比較其混合程度與效益，進而達到最佳化設計。

Optimal Design and Mixing Analyses of Distributive Mixing Elements for the Single Screw Extrusion Process

Student : Lin Yu-Yi

Advisor : Dr. Wu Jiann-Shing

Department of Applied Chemistry
National Chiao Tung University



This study aims to investigate and analyses the mix level for polymer flow in single screw extrusion process with change the geometry shape, numbers, and relative location of arrangement of pins of the mixing pin elements.

This study use the finite element method to simulation polymer flow in the mixing section. The software adopted to simulate is ANSYS[®]. Comparison between mixedness and efficiency by interfacial area ratio and energy consumption. Furthermore, achieve optimal design.

誌 謝

從進入研究所到碩士論文的完成，在這短短兩年的學習旅程，由衷的感謝我的指導教授吳建興老師，從輸送現象、高分子物性以及高分子加工等課程的悉心教導，使我對這方面的領域有更深一層的啟發，此外在待人處世方面，老師事必躬親，謹言慎行的態度更是最佳的言教及身教，很感激在人生中最重要歲月裡有吳老師課業與生活上的指點與幫助。

感謝煥鋁學長在我來到實驗室後，一路帶領著我，耐心的指導我在課業上的問題，並讓我更深入的了解電腦模擬這個領域，使我受益良多。感謝實驗室同學文淵和志峰，一起渡過兩年的研究生活，一起學習、努力，對我的研究生涯有莫大的助益。還有感謝學弟妹名洋、俊弘、曼琳和芝穎，他們帶進實驗室的快樂及歡笑總能令人感受到活力，也希望他們在未來一年的研究路上順順利利。

感謝我的好朋友明華、瑋耿和月杏，在新竹求學的日子有你們的陪伴，一起分享生活點滴，彼此勉勵，更是豐富了我的生活，是很難得的回憶。

還有感謝最愛的玉婷，謝謝她陪我一路走來，從剛開始進入研究所前到畢業之際，多謝你在好多個夜晚分享我的喜怒哀樂，你時時刻刻的關心都將化做是我前進的原動力。

最後，也最要感謝的是我的父母、姊姊、弟弟和妹妹，感謝他們提供我多年來的生活所需，也默默的支持我、鼓勵我、陪伴著我，讓我能專心於學業的鑽研，否則無法有今天小小的成就，在此將本篇論文獻給他們。

謝謝所有曾經幫助過我的人，給我挫折的人我要謝謝你讓我茁壯，對我好的人，謝謝你的關心。

目 錄

| | |
|----------------------|------|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | II |
| 誌謝 | III |
| 目錄 | VI |
| 表目錄 | VII |
| 圖目錄 | VIII |
| 一、緒論 | 1 |
| 1.1 研究目的與動機 | 1 |
| 1.2 文獻回顧 | 2 |
| 二、混合元件概要 | 5 |
| 2.1 混合元件的設計摘要 | 5 |
| 2.2 分配式混合元件的發展 | 8 |
| 三、相關理論模式 | 17 |
| 3.1 混煉原理及模型概述 | 17 |
| 3.1-1 分配式混煉機構的推導 | 17 |
| 3.1-2 原始拉伸比與能量消耗量的應用 | 22 |
| 3.1-3 條痕厚度的表示 | 24 |
| 3.2 混煉相關原理回顧 | 26 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.3 | 理論模式 | 34 |
| 3.3-1 | 流動分析理論模式 | 34 |
| 3.3-2 | 有限元素法理論模式 | 36 |
| 四 | 、模擬方式介紹 | 42 |
| 4.1 | 有限元素法之概述 | 42 |
| 4.1-1 | 數值方法與高分子加工模擬 | 42 |
| 4.1-2 | 有限元素法在工程上之應用 | 45 |
| 4.2 | ANSYS [®] 輔助模擬分析 | 46 |
| 4.2-1 | ANSYS [®] 基本要件 | 47 |
| 4.2-2 | ANSYS [®] 介面概述 | 49 |
| 4.2-3 | ANSYS [®] 模擬用之方程式 | 51 |
| 4.3 | ANSYS [®] 處理流程 | 53 |
| 4.3-1 | 前處理 | 55 |
| 4.3-2 | 解題程式 | 59 |
| 4.3-3 | 後處理 | 59 |
| 4.3-4 | 常見錯誤及解決方法 | 59 |
| 4.4 | 分配式混合元件於 ANSYS [®] 之模擬 | 63 |
| 4.4-1 | 模擬之源起 | 63 |
| 4.4-2 | 模擬之流程 | 65 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 五、模擬結果與討論 | 79 |
| 5.1 安裝不同構形插門之混合元件的流動分析比較 | 80 |
| 5.2 安裝不同橫截面插門數量之混合元件的流動分析比較 | 85 |
| 5.3 安裝不同插門軸向間距之混合元件的流動分析比較 | 90 |
| 5.4 安裝混合元件於流道中的流動分析比較 | 95 |
| 5.5 最佳化設計 | 99 |
| 六、結論 | 100 |
| 參考文獻 | 101 |



表 目 錄

| | | |
|------|----------------------------------|----|
| 表 1 | 各種不同分配式混合元件之特性優劣比較..... | 16 |
| 表 2 | 高斯積分之權重值及取樣點..... | 41 |
| 表 3 | Free mesh 與 Mapped mesh 之比較..... | 57 |
| 表 4 | Mapped mesh 之限制條件..... | 58 |
| 表 5 | 各種 Solver 之比較..... | 61 |
| 表 6 | ANSYS®單位一覽表..... | 62 |
| 表 7 | 分配式混合元件變化之組合..... | 66 |
| 表 8 | 插門尺寸設計大小..... | 67 |
| 表 9 | 螺桿幾何參數及操作條件..... | 74 |
| 表 10 | LDPE 高分子融熔態之物理性質及流變參數表..... | 75 |
| 表 11 | 混合元件模型分割的節點與元素數目表..... | 77 |



圖目錄

| | | |
|------|--|----|
| 圖 1 | 分散式混合與分配式混合的效果 | 6 |
| 圖 2 | Pin mixing section | 8 |
| 圖 3 | Dulmage mixing section | 9 |
| 圖 4 | Saxton mixing section | 9 |
| 圖 5 | pineapple mixing section | 10 |
| 圖 6 | Turbo screw | 11 |
| 圖 7 | Cavity Transfer Mixer | 11 |
| 圖 8 | Twente Mixing Ring | 13 |
| 圖 9 | TMR non-return valve for injection molding | 13 |
| 圖 10 | CRD non-return valve for injection molding | 14 |
| 圖 11 | Pulsar mixing section | 14 |
| 圖 12 | Strata blend mixer | 15 |
| 圖 13 | 在簡單剪切流中介於位置向量 ρ_1 及 ρ_2 的表面元素變化 | 17 |
| 圖 14 | 在簡單剪切流中兩流體元素之混鍊情形 | 18 |
| 圖 15 | 單位面積的球座標 | 20 |
| 圖 16 | 在隨機起始方位向下界面面積與剪應變的函數圖 | 21 |
| 圖 17 | 在片層混合物中條痕厚度 s 示意圖 | 24 |
| 圖 18 | 在拖曳流下不同位置的條痕厚度 | 25 |
| 圖 19 | 在簡單剪切流下界面面積的增加變化圖 | 28 |
| 圖 20 | 螺桿模型 | 29 |
| 圖 21 | laminar mixing 下的效果 | 30 |
| 圖 22 | 不同的起始位向在混鍊過程中示意圖 | 31 |
| 圖 23 | 不同起始界面方位的比較 | 32 |
| 圖 24 | 不同混合元件效果比較 | 33 |
| 圖 25 | 一般假塑性流體黏度與剪切率示意圖 | 36 |
| 圖 26 | 電腦在產品生產流程所扮演的角色 | 43 |
| 圖 27 | ANSYS [®] FLOTRAN 慣用之元素 | 48 |
| 圖 28 | ANSYS [®] 使用者圖形介面 | 50 |
| 圖 29 | ANSYS [®] 分析處理作業流程圖 | 54 |
| 圖 30 | 自由網格與對應網格 | 56 |
| 圖 31 | 未安裝混合元件螺桿示意圖 | 68 |
| 圖 32 | 安裝 Blockhead 混合元件螺桿示意圖 | 68 |

| | | |
|------|--|----|
| 圖 33 | 安裝 Trapezoidal 混合元件螺桿示意圖 | 69 |
| 圖 34 | 安裝 Square Pineapple 混合元件螺桿示意圖 | 69 |
| 圖 35 | 橫截面安裝三支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖 | 70 |
| 圖 36 | 橫截面安裝九支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖 | 70 |
| 圖 37 | 橫截面安裝十二支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖 | 71 |
| 圖 38 | 安裝軸向間距為 $1/3 D$ 的 Square Pineapple 之螺桿幾何示意圖 | 71 |
| 圖 39 | 安裝軸向間距為 $1/6 D$ 的 Square Pineapple 之螺桿幾何示意圖 | 72 |
| 圖 40 | 安裝軸向間距為 $1/8 D$ 的 Square Pineapple 之螺桿幾何示意圖 | 72 |
| 圖 41 | 安裝繞溝道排列 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖 | 73 |
| 圖 42 | 安裝於溝道中垂直軸向 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖 | 73 |
| 圖 43 | 未安裝混合元件之溝道流線圖 | 80 |
| 圖 44 | 安裝 Blockhead 混合元件之溝道流線圖 | 81 |
| 圖 45 | 安裝 Trapezoidal 混合元件之溝道流線圖 | 82 |
| 圖 46 | 安裝 Square Pineapple 混合元件之溝道流線圖 | 83 |
| 圖 47 | 不同混合元件之界面面積比比較圖 | 84 |
| 圖 48 | 不同混合元件下之能量消耗量比較圖 | 84 |
| 圖 49 | 不同混合元件下流動時間比較圖 | 85 |
| 圖 50 | 橫截面三支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖 | 86 |
| 圖 51 | 橫截面九支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖 | 87 |
| 圖 52 | 橫截面十二支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖 | 88 |
| 圖 53 | 不同橫截面安裝數量之界面面積比比較圖 | 89 |
| 圖 54 | 不同橫截面安裝數量之能量消耗量比較圖 | 89 |
| 圖 55 | 不同橫截面安裝數量之流動時間比較圖 | 90 |
| 圖 56 | 軸向間距為 $1/3 D$ 的 Square Pineapple 插門螺桿之溝道流線圖 | 91 |
| 圖 57 | 軸向間距為 $1/6 D$ 的 Square Pineapple 插門螺桿之溝道流線圖 | 92 |
| 圖 58 | 軸向間距為 $1/12 D$ 的 Square Pineapple 插門螺桿之溝道流線圖 | 93 |
| 圖 59 | 不同軸向間距之界面面積比比較圖 | 94 |
| 圖 60 | 不同軸向間距之能量消耗量比較圖 | 95 |
| 圖 61 | 不同軸向間距之流動時間比較圖 | 95 |
| 圖 62 | Square Pineapple 平行軸方向安裝於溝道中之流線圖 | 96 |
| 圖 63 | Square Pineapple 垂直軸方向安裝於溝道中之流線圖 | 97 |
| 圖 64 | 不同的插門排列方位之界面面積比比較圖 | 98 |
| 圖 65 | 不同的插門排列方位之能量消耗量比較圖 | 98 |
| 圖 66 | 不同的插門排列方位之流動時間比較圖 | 99 |

第一章 緒論

1.1 研究目的與動機

高分子精密加工應用電腦輔助製程設計及改良，已經成為技術上非常重要的一環，藉由電腦模擬不僅可以大幅降低實作上的成本、減少時間的浪費，更可以依據模擬結果直接進行最佳化設計。在分子加工製程中，混煉加工設備有很多種，常用的包括單螺桿混煉機、雙螺桿混煉機、滾輪式混煉機以及批次式混煉機，可依照不同的加工需求而選擇比較合適的設備。然而，一般單螺桿押出機的混煉效果與其它押出機相較下仍不理想，但由於其構造簡單且價格亦不甚高，所以廣受業界的青睞。此外，再藉由混合元件的使用，不但能打散聚集的大顆粒，進而使添加劑能均勻分散在基材中，提高產品的性質，增進其附加價值。

由於高分子在加工過程中往往牽涉到複雜的三維流動，尤其是高分子流體在不同分配式混合元件的流道內，其流動狀態我們更是難以掌握。以往對於分配式的混合機構，專家學者所提出的研究都相當有限，原因是我們在討論混合機構的均一性上並沒有一個定量的標準用來判斷混合效益，也因此大家對於此類的研究上著墨均不甚多。近來隨著奈米材料的興起，高分子抑或添加劑的混煉如何達到有效地運用，便是我們在加工過程中需仔細考量的。由鑒於此，本文即利用電腦輔助工程技術（CAE）探討流體在配置分配式混合元件的流道內流動情形，另外針對不同的混煉指標（mixing index）對於混煉度（mixedness）作一詳述分析。

本研究的主要目的以有限元素分析的架構來模擬高分子流體在不同分配式混合元件及不同的插門排列組合下先做一初步的流動分析，再藉由文

獻上所提及的界面面積比 (interfacial area ratio) 與能量消耗量，此二混合效益的指標來評斷在不同的幾何構形下所設計出的混合元件，期望由此一定量的分析作為日後混合元件最佳化設計上的基準。

1.2 文獻回顧

分配式混合元件有許多種，一般而言均是在螺桿上增置插門為主，依據不同的幾何形狀，例如 rhomboidal(長斜方形、菱形)混合元件、pin 混合元件及 mixing ring 混合元件組合而成。歷年來針對分配式混合元件做研究探討的專家學者亦不在少數，以下為學者們對混合元件進行模擬所用的一些分析方法及成果。

我們回顧近幾年來關於單螺桿分配式混合元件的重要研究與模擬。首先 1991 年 Han 等以流動分析網格法 (FAN) 模擬預測出 Maddock 元件流量、背壓及螺桿轉速的關係，並以實際實驗證明模擬結果與其之吻合度[1]。東海大學王擘教授更以 modified FAN 模擬比較三種不同形式的混合元件內的流動情形、推進能力及壓降的損耗，此外更精準的表示出高分子遵守的冪次定律[2]。1994 年 C. Wang 以有限元素法來模擬三維 CTM (三個環面，每環面有六個凸起半圓球) 混合元件，以等溫的牛頓流體探討其流場的速度分佈、剪切應力及用參數 λ 來定量延伸流的成分。另一分析並以 PVC 做為等溫非牛頓流體來模擬不同幾何構形之 CTM (六個環面，每環面有四個凸起半圓球)，使用 power law model 的黏度模式，同樣模擬出速度側面圖像、壓力分布、剪切速度及剪切力，並且將模擬結果去對實驗數據做比較[3, 4, 5]。1996 年 I. Manas-Zloczower 模擬 HDPE 的三維流動，利用長度伸展分佈和平均值 (length stretch distribution and average values) 作為分配式混合的一種指標[6]。1997 年 Martin 對數種

不同的混合元件進行實驗，例如不同轉速下 HDPE 跟染料的混合，利用顯微攝影拍照觀察出不同的混合效果，此外也由實驗得出在相同轉速下，各混合元件所需的驅動功率大小，以及壓力降和融熔溫度變化的情形[7]。1996 年 Takahashi 針對一般傳統的 pin 混合元件提出了解決死角形成造成混合不均的辦法，即是在 pin 混合元件上貫穿孔動的想法，如此可提高高分子流體的重新排位 (reorientation)，形成更有效的混煉機構，促成更密切的介面接觸。此外更指出在橫斷面的混合區域的優劣可藉由局部混合效能 (local mixing efficiency) 來評斷，而完整混合效能 (integral mixing efficiency) 則可以跟其他的混合元件做一比較。並且利用有限差分法來模擬流體通過改良及未改良的元件前後來做比較，驗證所提出的新元件設計具有較高的混合效果，熔融高分子溫度上升較低，以及較低的驅動功率。最後更以追蹤粒子軌跡演化及粒子濃度準差分佈的實驗驗證 pin 的孔動貫穿元件在平行式的排列組合下與交錯式的排列在混合效果上的差異[8, 9, 10, 11]。2000 年 Rios 及其研究夥伴以三維的邊界元素法 (Boundary Element Method) 針對 rhomboidal 混合元件在相同螺桿上藉由不同的排位及數目的增加多寡找尋其最佳化的設計，並發現由於此種混合元件是藉由剪應力使材料變形，所以 rhomboidal (長方形、菱形) 混合元件在排列的選擇上採中立長菱形 (neutral rhomboidal)，以類似鳳梨狀 (pineapple) 的幾何形狀為最佳[12, 13]。2001 年 Rwei 藉由不同的螺桿設計及加工條件下，經由高分子化學的角度新提出的分配式混合指標做一驗證，發現轉速與分配效果間的關係[14]。2001 年 I. Manas-Zloczower 探討雙擋板 (twin flight) 單螺桿押出機從高分子化學理論基礎中提出 Renyi entropies 及統計學的觀點在不同元素的長度變化下評斷混合的優劣，並且與傳統的分離規模及強度 (scale and intensity of segregation) 做比較[15]。2001 年 P. G. M. Kruijt 及其研究夥伴利用

一種建立在混合物的局部平均濃度上對應（mapping）的方法描繪出不同的幾何形狀下的邊界條件，且從較原始的二維先著手，接下來再踏入三維的模型中，對於混合效果及一些參數做出定量的分析[16, 17]。2004 年 G. C. Chuang 與 A. I. Yeh 提出了藉由在螺桿末端除了 Pin 混合元件外，再加裝了混合圓盤(Mixing disc)，如此一來使得高分子流體在螺桿中的滯留時間增加，因此混合效果也因此得以提升[18]。



第二章 混合元件簡介

2.1 混合元件的設計摘要

一般混合元件設計上需注意下面列舉之要點：

1. 高分子流體通過混合元件時，須消耗較小的壓力降，以利高分子熔融液的輸送。
2. 高分子融熔液必須以流線流動，以順利通過混合元件，避免造成停滯(dead spot)現象發生，而使高分子產生劣化 (degradation) 降低品質。
3. 混合元件應該完全掠掃過套筒筒壁，如此以利熱流的傳導，以及清除附著於壁上的殘餘高分子。
4. 混合元件要容易拆裝清洗及不容易損壞。
5. 混合元件要容易製造及價格要合理且便宜。



由以上要點之敘述我們將混合元件大致分為二類，一種為分配式混合元件，一種為分散式混合元件。分配式混合元件的原理是藉由不斷的分割原有的流場，使高分子熔融體能獲得重新的流動方向 (orientation)，以利其界面面積比增加，提高混合效果。而分散式混合元件則是利用梯板與套筒壁間狹窄流道產生高剪切力，把聚集的大顆粒打碎，並阻擋尚未熔融的高分子顆粒通過，避免懸浮顆粒造成產品出現“魚眼”現象，導致外觀及產品品質不良。通常在兩個不同種類的高分子混合時，分配式混合通常藉著高的剪切率 (shear rate) 來增加高分子的界面面積比，達到混合的效果；而分散式混合藉由高剪切力 (shear stress) 能夠將高分子切成許多小段進而達到混合的效果，圖 1 即表示添加劑在分散式混合與分配式混合下達到的效果。

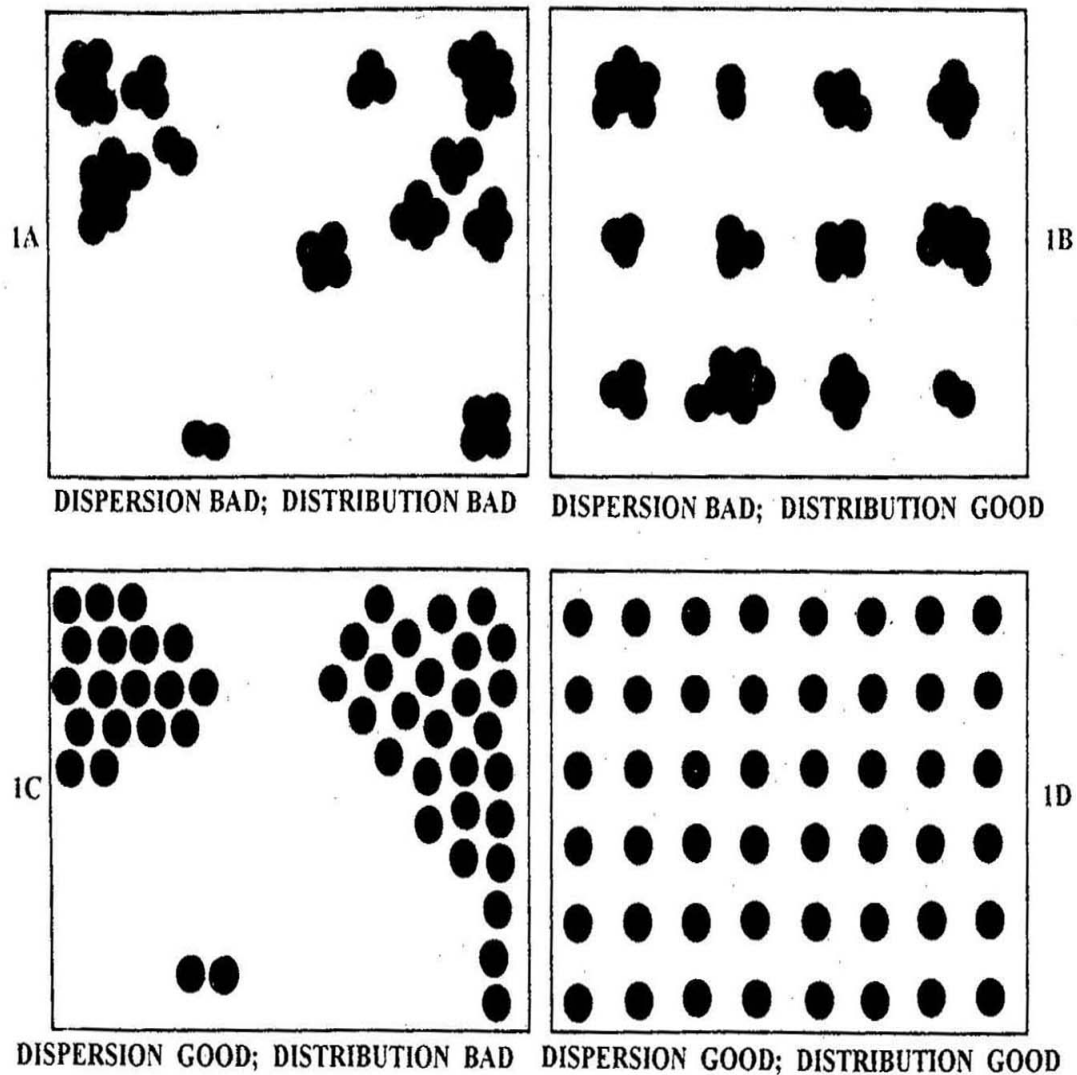


圖 1 分散式混合與分配式混合的效果

Ref.: Martin Gale, Adv. Polym. Technol., Vol. 16, No. 4, p. 251, 1997

由於分配式混合元件主要是藉由在流場中增加其流動的阻力，不斷的分割其流場，一方面可以讓主成分與添加成分達到均勻分配的效果，另一方面亦可以增加高分子熔融液在流道中滯留的時間，但相對的是會造成我們出料的減少，因此我們在壓降及推進高分子熔融液的能力上必須做一考慮，應避免選用太過於複雜或者是較易損耗壓降的混合元件。高分子流體是一種對溫度相當敏感的物料，在通過分配式混合元件時，我們必須使其

以流線流動，盡量避免停滯的產生，否則高分子物料會因為過度的加熱而超過其玻璃轉換溫度（glass transition temperature）進而產生劣化，最後影響到我們出料的品質。在加工過程中我們在乎的不僅是物料在成分上是否混合均一，更要考慮到在溫度上是否也達到受熱均一的效果，較佳的混合元件是要增加而不是降低熱傳效應，因此混合元件在選擇上應避免與套筒筒壁間有溝槽，應完整掠掃過套筒筒壁。在業界有許多不同的混合元件一直在推陳出新，但有一些仍無法進入實用的階段，原因是有些混合元件對操作員而言在使用上不容易上手，以致在組裝、清洗、試車、甚至是拆卸都過於繁雜，從經濟效益的觀點看來，任何的加工過程只要在時間上能掌握先機，就能夠獲得最大的利益，所以我們在選擇混合元件上也必須考量到機械的熟稔度。然而在成本的考量下，另一個關鍵便是混合元件的製作，原則上當然是以便宜、耐用為第一要件，因為過於精細的混合元件，往往單價都不斐，此外也不一定會達到更好的分配效果，需視情況而定。



2.2 分配式混合元件的發展

針對一個有效率的分配式混合元件而言必須要有兩項特性，一是流體須受到大量的剪切形變 (shear strain)，二是流體元素需高頻率的受到分裂而達到重新排列。因此，專家學者們掌握以上原則便發展了許多不同幾何形狀的混合元件，有些因為效果不佳所以僅只限於專利發表，但也有些已大量在業界中使用。

基本上任何可以擾動螺桿內的速度分布即會造成分配混合效應，一般分配式混合元件如 pin mixing section，如圖 2 所示，這些 pin 會擾亂速度分布而造成混合，現今已有很多不同關於 pin 混合元件的專利被發表，而大部分只有改變一些細部構造使其可發揮最大效率。

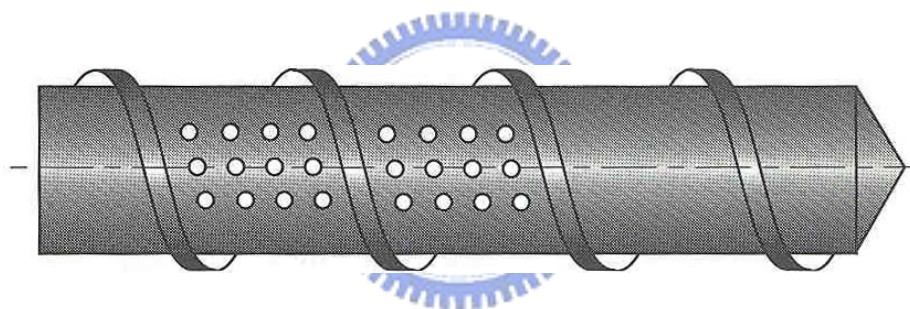


圖 2 Pin mixing section

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

另一種我們常見的 Dulmage mixing section，如下頁圖 3 所示，Dulmage 混合元件是一種多重板的混合器，周圍有許多擋板所形成的溝槽環繞於圓柱上，高分子融熔體被分割而後進入許多狹窄的溝道中再會合，而後再一次分割會合的步驟。這種混合專利是 40 年前 Dow chemical 公司所發展出來的[19]，但這混合元件的缺點是周圍環繞紋路的設計，讓擋板與擋板間間隙與與軸向垂直，使套筒上的高分子無法完全被螺桿所掃除，這將會造成高分子的滯留以及降低融熔高分子及套筒間的熱傳效應。

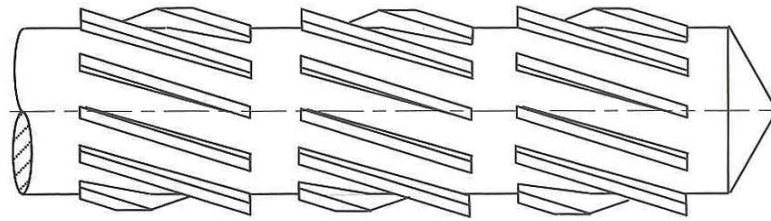


圖 3 Dulmage mixing section

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

有一種類似 Dulmage 混合元件構造的混合元件為 Saxton 混合元件，如圖 4 所示，而 Saxton 與 Dulmage 混合元件之不同處為 Saxton 之周圍溝槽分布較 Dulmage 的方向更為螺旋形，即擋板與擋板間的間隙與與軸向成螺旋形，其優點是 Saxton 比 Dulmage 更能完全掃除套筒表面，這樣大大降低高分子停滯，及融熔高分子與套筒間的熱傳導不良的機會，而這螺桿的專利時 1961 年時由杜邦公司發展出來的[20]。

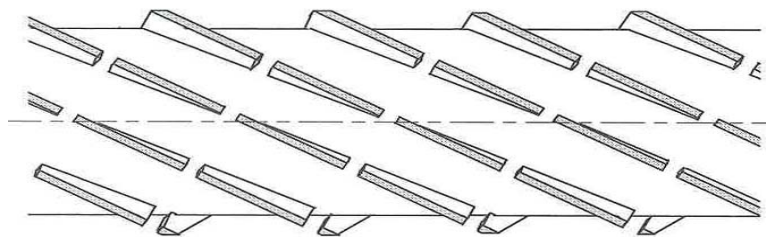


圖 4 Saxton mixing section

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990.

另外還有常用的混合元件為 pineapple mixer，如圖 5 所示，pineapple 混合元件是由 Saxon 混合元件改良過來的，其攪拌葉瓣呈現菱形，而 pineapple 混合元件是由 Rios 做實驗及經過邊界元素法 (boundary element method) 模擬其流動所發展出來的 [21, 22]。

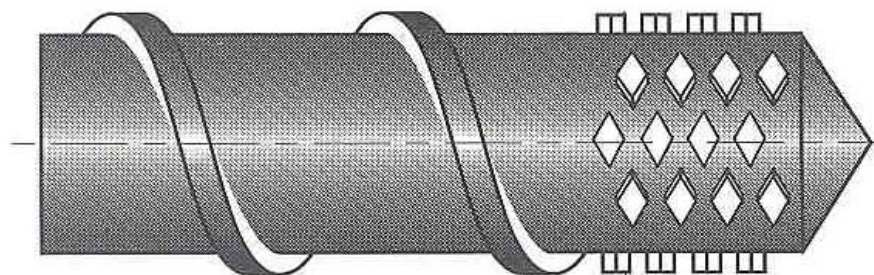


圖 5 Pineapple mixing section

Ref.: A. Rios, P. Grmann and T. Osswald, Int. Polym. Process., Vol. 9, No. 1, p. 12, 2000.



還有一種新款式的混合螺桿由 J. Fogarty 所發展出來的 [23]，如下頁圖 6 所示。這種螺桿叫渦輪螺桿 (Turbo-Screw)，它擁有長方形開口建構於螺桿的擋板上，可以增強混合及熱傳效率的提昇。專利 [24] 提到這種螺桿的幾何形狀構造須考量到擋板的高度，而這種設計如要應用在押出操作上則擋板需要較深的考量，不然擋板上的開口過小會造成高分子融熔體無法通過開口，使其混合及熱傳的效率無法發揮。例如用於發泡塑膠的押出中，螺桿的擋板較深，被用於第二台押出機中來降低融熔高分子的溫度，現在渦輪螺桿已經被廣泛應用於發泡塑膠押出上，並已經改進大押出量時的混合效率及熱傳量。

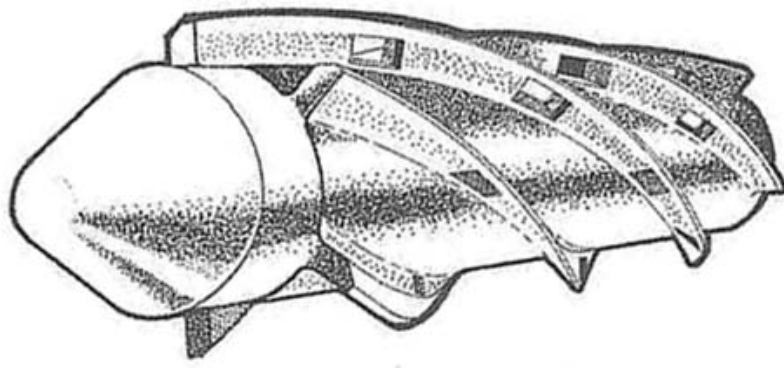


圖 6 Turbo screw

Ref.: J. Fogarty, C. J. Rauwendaal, D. Fogarty and A. Rios, Turbo-Screw Design for Foam Extrusion, SPE ANTEC Techn., 2001

另外還有一種不同的分配式混合機制叫孔洞傳送混合(cavity transfer mixing-CTM)，如圖 7 所示，這種混合方式是由 RAPRA 公司的 Gale 所研發出來的。早於 1961 年的專利中就有詳細探討橫向孔洞混合裝置的概念。CTM 混合裝置中孔洞分布於套筒殼表面及螺桿旋轉部分的表面上，它可使高分子融熔體做剪切及重新配向的效果很好。另一種混合元件類似 CTM 混合元件其比 CTM 更早由德國 Barmag 發展出來[25]，這種混合裝置據說擁有分散及分配混合的功能，可以將混合的顆粒材質降到 10^{-6}m 的範圍左右。

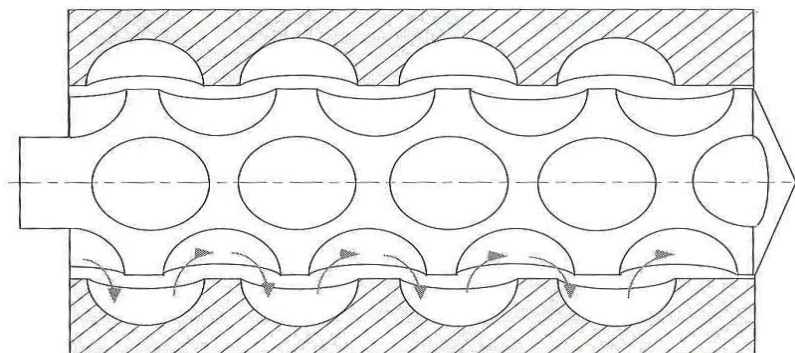


圖 7 Cavity transfer mixer

Ref.: C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

類似 CTM 混合裝置的元件我們稱為 Staromix，它的孔洞與 CTM 最大不同點為 Staromix 位於軸向的孔洞呈現橢圓形。德國另有一家押出機製造公司則將橢圓孔洞設計成在軸向呈螺旋形。其他也有數種混合裝置其特點與 CTM 相當類似，大部分皆是從 RAPRA 的專利所衍生出來的。CTM 跟之前一些分配式混合元件有著同樣的缺點，就是螺桿無法完全掃除套筒表面，還有 CTM 非常難清理並可能造成動作停滯。於此 CTM 這裝置不方便經常更換不同的物料，以及短時間的操作，因為更換一次物料的時間相當耗時，其清洗的時間大約就需花費兩至三個小時。除了以上的缺點外，CTM 裝置非常昂貴，且沒有產生壓力的能力，所以基於以上種種於是 CTM 的使用並不廣泛。

此外有一種特徵與 CTM 相當類似的混合裝置，由紐西蘭的大學所研發出來，且在多個國家擁有專利[26]。這種混合器叫做 Twente Mixing Ring or TMR。這種混合器在螺桿上也有與 CTM 相類似的半圓孔洞，然而它在套筒內表面並沒有孔洞[27, 28]，它的構造如下頁圖 8 所示，螺桿外有一套管，其套管與螺桿為一體之裝置，如下頁圖 9 所示，且套管與螺桿各鑿上孔洞，如此一來高分子流體便可藉由套管與螺桿間之空隙，以及套管與套筒間之空隙進行流動，如此一來便可增加切割流場的範圍與次數。環的運動在 TMR 中是靠螺桿給它的拖曳運動，但其轉速較慢，可是高分子流體通過螺桿、套管、套筒三者間的模式與 CTM 相類似。而 TMR 比 CTM 好的優點為 TMR 中其套筒內表面不須另外在上面鑿洞，這樣可以省下不少金錢，而且就可多運用在其他的壓出機上了，另一改善是是 TMR 的安裝簡單、清理方便。TMR 可以當成射出成型模組中的止回流閥，其混合及閥功能類似 CRD，如下二頁之圖 10 所示。由於它是一種新型的混合裝置，有人又稱它為環式混合器或套管混合器。

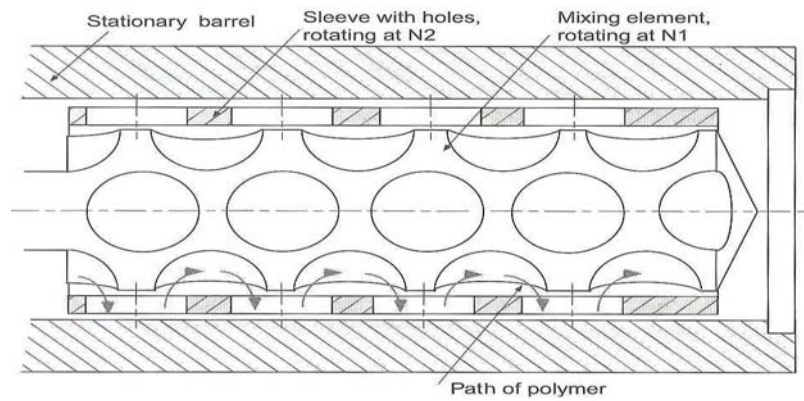


圖 8 Twente mixing ring

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

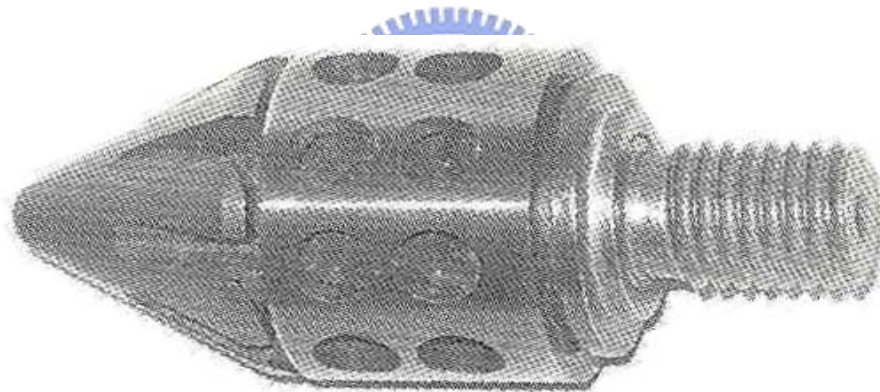


圖 9 TMR non-return valve for injection molding

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

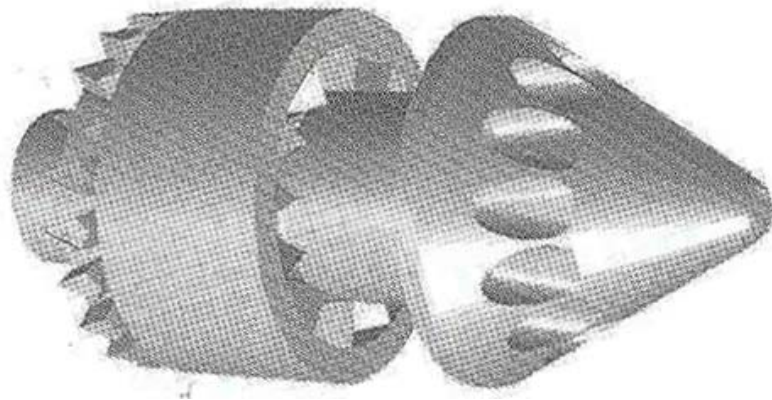
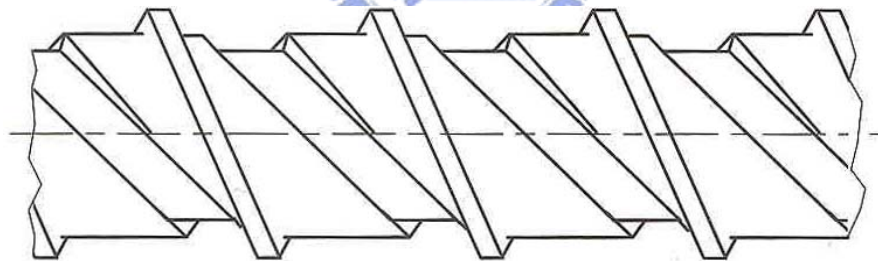


圖 10 CRD non-return valve for injection molding

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

另一種變溝深混合器利用溝深變化來改善混合情形，如 Pulsar 混合段，如圖 11 所示。它在螺桿底部有螺旋式溝槽，而溝槽螺旋角比擋板的螺旋角還大。



Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

此外還有一種類似的變溝深混合裝置為 Strata-blend 混合器，如下頁圖 12 所示。其每一擋板區間中有三個凹槽，特色為凹槽與擋板螺旋角相同，且凹槽並非連續的。絕大部分變溝深混合裝置皆有劇烈的小流動的現象，以及重新配向的能力，所以分配式分散的能力相當有限。而綜合上述所提到的不同分配式混合元件，經過多年來眾人的實驗可得到如下頁表

1 的分析情形。

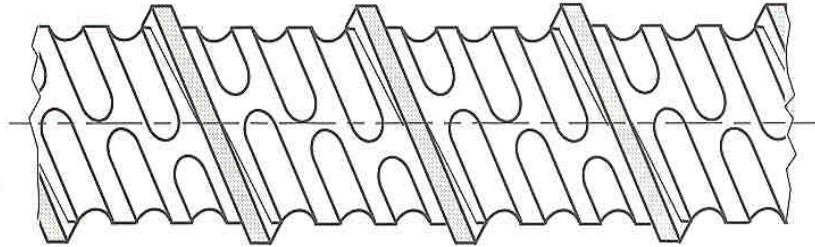


圖 12 Strata blend mixer

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990



表 1 各種不同分配式混合元件之特性優劣比較

| Mixer | Pressure drop | Dead spots | Barrel wiped | Operator friendly | Disp. mixing | Shear strain | Mixer cost | Splitting reorienting |
|--------------------|----------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------------------|
| Pins | High | Yes | Partial | Good | No | Low | Low | Fair |
| Dulmage | Low | No | Partial | Good | No | High | Fair | Good |
| Saxton | Low | No | Yes | Good | No | High | Fair | Good |
| CRD | Low | No | Yes | Good | Yes | High | Fair | Good |
| CTM | High | Yes | No | Bad | Some | High | High | Good |
| TMR | High | Yes | Yes | Fair | Some | High | Medium | Good |
| Axon | Low | No | Yes | Good | No | High | Low | Low |
| Double wave | Low | No | Yes | Good | Some | High | High | Low |
| Pulsar | Low | No | Yes | Good | No | Fair | Fair | Low |
| Stratablend | Low | Yes | Yes | Good | No | Fair | Fair | Low |

Ref.: C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Ch. 8, Hanser, New York, 1990

第三章 相關理論模式

3.1 混鍊原理及模型敘述

Spencer及Wiley[29]闡述當兩種不同的黏性流體相互混合時，其兩者界面面積會增加，而界面面積的增加率可做為在混鍊過程中一種定量的量測，亦即是一種混合的指標。而此種混鍊機構更與流體元素的起始方位（initial orientation）及加總形變（total strain）有著密不可分的關係。

3.1-1 分配式混鍊機構

考慮一個流體元素在簡單剪切（simple shear flow，即 $v_x = \dot{\gamma}_{yx}y$ ）流域中任意排位，可由任意兩個位置向量（position vector）限制出一面積，即為表面元素 A_0 （area of the surface element），如圖13所示，另外簡單剪切流可由下頁圖14示之。

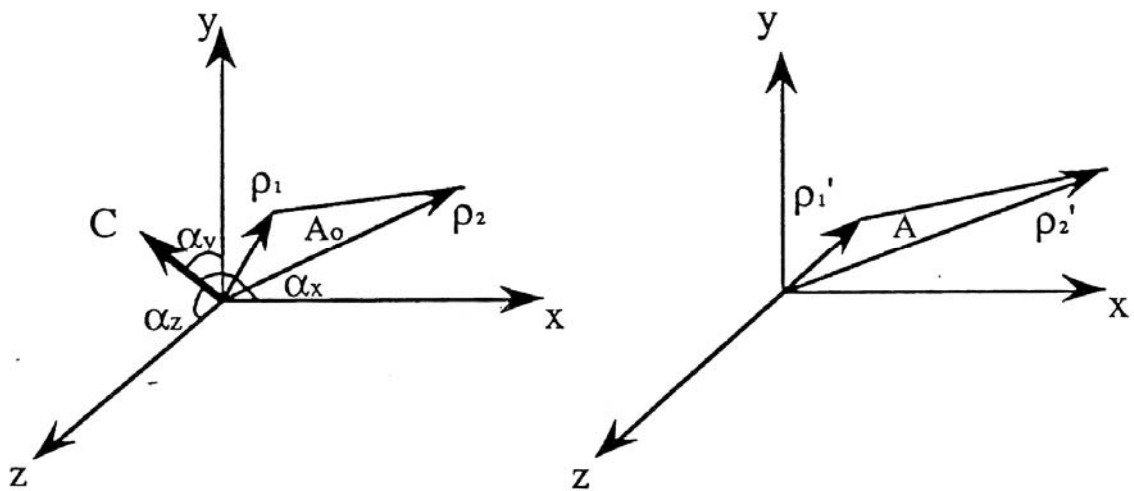


圖 13 在簡單剪切流域中介於位置向量 ρ_1 及位置向量 ρ_2 的流體表面元素，其中左圖為時間 t ，右圖為經過一段時間 t' 後之變化

Ref.: Z. Tadmor and G. Gogos, Principles of Polymer Processing, John Wiley & Sons, New York, 1979

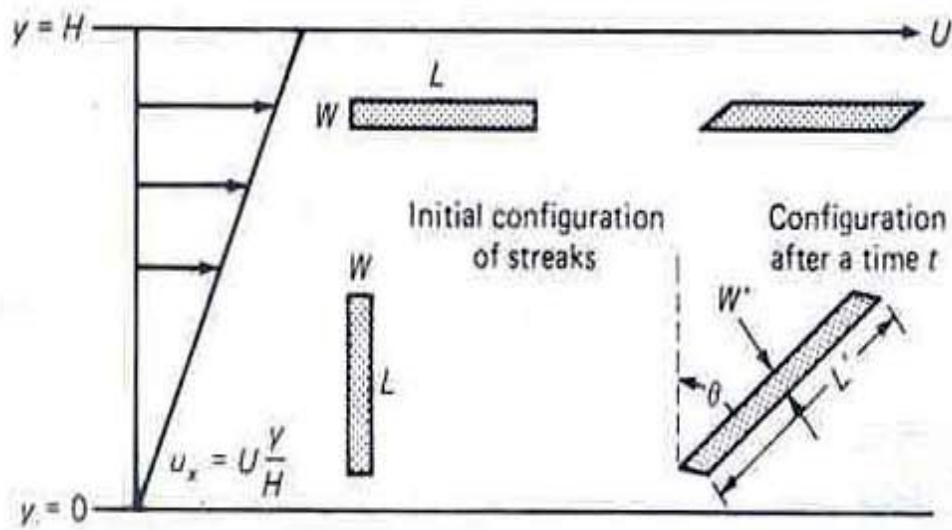


圖 14 在簡單剪切流中兩流體元素之混鍊情形

Ref.: Stanley Middleman, Fundamentals of Polymer Processing, McGraw-Hill, New York, 1977

在時間 t_0 時表面元素的初始面積為：

$$A_0 = \frac{1}{2} |c| = \frac{1}{2} |\rho_1 \times \rho_2| \quad (1)$$

其中 ρ_1 和 ρ_2 分別代表位置向量，向量 $C = \rho_1 \times \rho_2$ 和表面元素垂直，且可由與 x 軸、 y 軸、 z 軸夾角的方向餘弦（directional cosine）， $\cos \alpha_x$ 、 $\cos \alpha_y$ 、 $\cos \alpha_z$ 組成，並且遵循下列式子：

$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1 \quad (2)$$

$$\cos \alpha_x = \frac{c_x}{|c|} \quad \cos \alpha_y = \frac{c_y}{|c|} \quad \cos \alpha_z = \frac{c_z}{|c|} \quad (3)$$

其中 c_x 、 c_y 、 c_z 分別代表向量 C 在 x 、 y 、 z 方向的分量

而位置向量 ρ_1 和 ρ_2 可由三個分量來表示：

$$\rho_1 = x_1 \delta_x + y_1 \delta_y + z_1 \delta_z \quad (4)$$

$$\rho_2 = x_2 \delta_x + y_2 \delta_y + z_2 \delta_z \quad (5)$$

向量C可藉由 ρ_1 和 ρ_2 外積後表示：

$$c = \rho_1 \times \rho_2 = \begin{vmatrix} \delta_x & \delta_y & \delta_z \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} = (y_1 z_2 - z_1 y_2) \delta_x + (z_1 x_2 - x_1 z_2) \delta_y + (x_1 y_2 - y_1 x_2) \delta_z$$

$$= c_x \delta_x + c_y \delta_y + c_z \delta_z \quad (6)$$

將(6)式結果代入(1)式可得初始面積：

$$A_0 = \frac{1}{2} |c| = \frac{1}{2} (c_x^2 + c_y^2 + c_z^2)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

流體在經過 Δt 時間後，則會由 ρ_1' 和 ρ_2' 限制出來另一新的界面面積，而新的位置向量如下表示：

$$\rho' = \rho + v \Delta t \quad (8)$$

由於我們先前假設流體處於簡單剪切流動中，所以可將(8)簡化為

$$v = \dot{\gamma}_{yx} y \delta_x + (0) \delta_y + (0) \delta_z \quad (9)$$

$$v \Delta t = \gamma y \delta_x + (0) \delta_y + (0) \delta_z \quad (10)$$

(10)式中的 γ 為加總形變， $\gamma = \int_0^t \dot{\gamma}_{yx}(t') dt'$ ，而將上述之結果代入新的位置向量中後可得新向量C' 如下所示：

$$c' = \rho_1' \times \rho_2' = \begin{vmatrix} \delta_x & \delta_y & \delta_z \\ x_1 + \gamma y_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 + \gamma y_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} = c_x \delta_x + (c_y - \gamma c_x) \delta_y + c_z \delta_z \quad (11)$$

最後新的界面面積即可表示為

$$A = \frac{1}{2} (c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 - 2c_x c_y \gamma + c_x^2 \gamma^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

而經過 t_0 及 $t_0 + \Delta t$ 時間下的界面面積比可由(12)式與(7)式相除得到

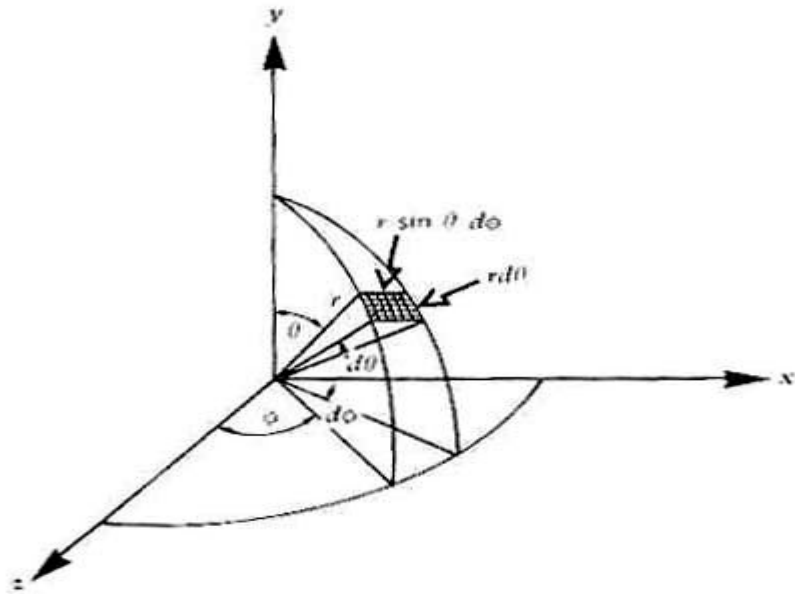
$$\frac{A}{A_0} = (1 - 2 \cos \alpha_x \cos \alpha_y \gamma + \cos^2 \alpha_x \gamma^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

由(13)式指出界面面積的增加是為起始方位以及加總形變的函數，若在較大形變的狀況下 ($\gamma \gg 1$)，(13)式可表示為：

$$\frac{A}{A_0} = |\cos \alpha_x| \gamma \quad (14)$$

從此式我們可以更明顯的看到界面面積比與加總形變是成一個正比的關係，於是乎加總形變為定量混鍊機構上一個決定性的變數。

除了加總形變外，另一個重要的變數一起始方位也是我們討論的重點。在 高分子加工過程中我們並無法強迫所有的高分子流體在進入混合器之前均是呈完美方位（即表面元素在yz平面上， $\cos \alpha_x = 1$ ），所以任何的方位都必須估計在內，為了方便起見，我們將流體元素的單位面積化作球座標表示如下，其圖示如圖15。



Ref.: Z. Tadmor and G. Gogos, Principle of Polymer Processing, John Wiley & Sons, New York, 1979

$$f(\theta, \phi) d\theta d\phi = \frac{1}{4\pi} \sin \theta d\theta d\phi \quad (15)$$

$$\frac{A}{A_0} = |\sin \theta \sin \phi| \gamma \quad (16)$$

經過下式積分運算之後可得

$$\frac{A}{A_0} = \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} |\sin \theta \sin \phi| \gamma \left(\frac{1}{4\pi}\right) \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\gamma}{2} \quad (17)$$

由(17)式得到一個結論，在一個任意方位表面元素的簡單剪切流動系統中當流體受到大量的形變下，總最末面積與和總最初面積的比率是與總形變成1/2的正比關係，圖16表示經數值計算後結果也如同上述之推導。

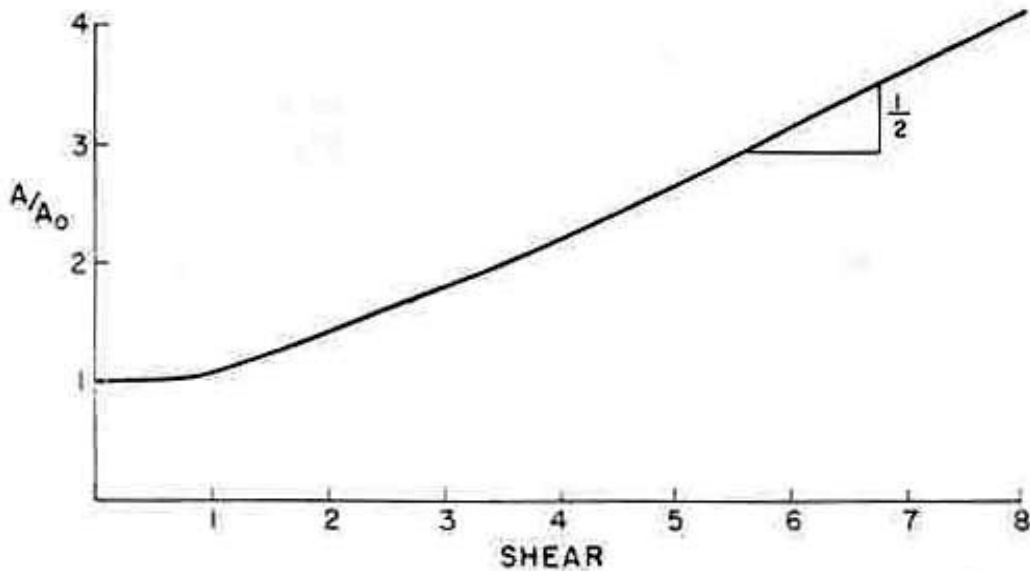


圖 16 在隨機起始方位下界面面積與剪應變的函數圖

Ref.: L. Erwin, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, No. 7, p. 572, 1978

3.1-2 原始拉伸比的應用

界面面積比除了以上推導外，Erwin[30]更引入原始拉伸比（principal elongation ratio）的觀念衍導出相同的結果，將在以下一一詳述之。

首先將新的兩位置向量化作以下表示：

$$\rho_1' = x_1 \lambda_x \delta_x + y_1 \lambda_y \delta_y + z_1 \lambda_z \delta_z \quad (18)$$

$$\rho_2' = x_2 \lambda_x \delta_x + y_2 \lambda_y \delta_y + z_2 \lambda_z \delta_z \quad (19)$$

其中 λ_x 、 λ_y 、 λ_z 即為原始拉伸比，而新的界面面積 A 可經由外積計算後得知：

$$A = \frac{1}{2} \left\{ [\lambda_y \lambda_z (y_1 z_2 - z_1 y_2)]^2 + [\lambda_z \lambda_x (z_1 x_2 - x_1 z_2)]^2 + [\lambda_x \lambda_y (x_1 y_2 - y_1 x_2)]^2 \right\}^{1/2} \quad (20)$$

$$A = \frac{1}{2} \left[(\lambda_y \lambda_z c_x)^2 + (\lambda_x \lambda_z c_y)^2 + (\lambda_x \lambda_y c_z)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

而界面面積比亦可表示如下：

$$\frac{A}{A_0} = \left[\frac{(\lambda_y \lambda_z c_x)^2 + (\lambda_x \lambda_z c_y)^2 + (\lambda_x \lambda_y c_z)^2}{|c|^2} \right]^{1/2} \quad (22)$$

$$\frac{A}{A_0} = \left[(\lambda_y \lambda_z \cos \alpha_x)^2 + (\lambda_x \lambda_z \cos \alpha_y)^2 + (\lambda_x \lambda_y \cos \alpha_z)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

假設形變在一個常態的體積下，而原始拉伸比則符合下式

$$\lambda_x \lambda_y \lambda_z = 1 \quad (24)$$

將(24)式代入(23)式中可得

$$\frac{A}{A_0} = \left[\left(\frac{\cos \alpha_x}{\lambda_x} \right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha_y}{\lambda_y} \right)^2 + \left(\frac{\cos \alpha_z}{\lambda_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (25)$$

則界面面積比可化為原始拉伸比與起始位方位方向餘弦的函數，針對不同的流動情形可以對上式做不同的應用。

此外，Erwin在此參考文獻也提出了以計算能量的損耗，來當作比較何種混合元件較受歡迎的參考項目。

$$p = \eta \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (26)$$

$$E = \int_0^t p \quad dt \quad (27)$$

其中 p = 每單位體積所消耗的功率， η 與 $V_{x,y,z}$ 則分別為流體的黏度與速度， E = 每單位體積所消耗的能量。

Lodge[31]分別說明了在平面延伸流 (plane strain elongational flow)、單純延伸流 (pure elongational flow) 及簡單剪切流 (simple shear flow) 下原始拉伸比 λ_x 、 λ_y 、 λ_z 與加總形變 γ 間的相互關係，由於本論文的理論基礎建構於簡單剪切流，故以下在此例舉簡單剪切流做為應用以驗證前列之結果。

首先，原始拉伸比之值為下式所示：

$$\lambda_x = \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$\lambda_y = \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (29)$$

$$\lambda_z = 1 \quad (30)$$

將(28)式、(29)式、(30)式代入(25)式中可得

$$\frac{A}{A_0} = \left\{ 1 + \cos^2 \alpha_x \left[\frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right] + \cos^2 \alpha_y \left[\frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \quad (31)$$

在較大形變的狀況下 ($\gamma \gg 1$)，同樣可到(14)式的結果。

3.1-3 條痕厚度的表示

另一項可做為混合指標的參數為條痕厚度 s ，其物理定義為總體積除以一半的總界面面積，詳圖17，表示如下：

$$s = \frac{V}{A/2} \quad (32)$$

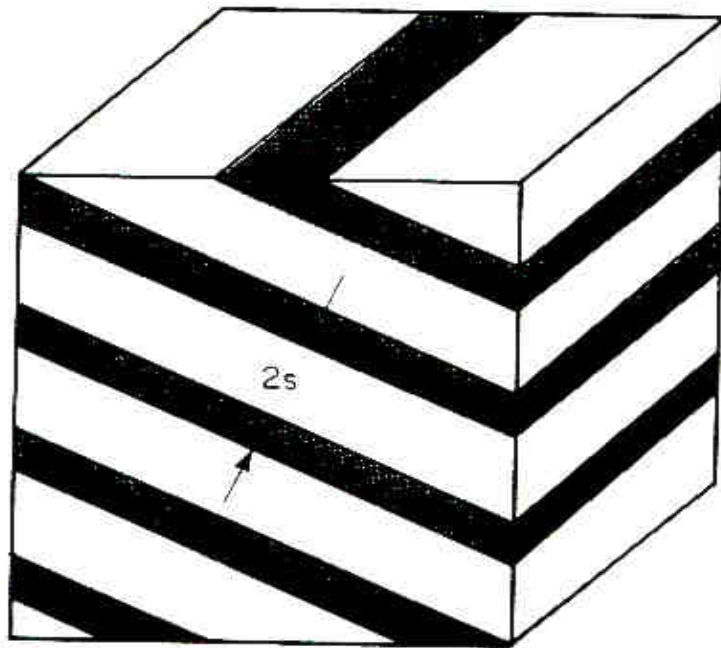


圖 17 在片層混合物中條痕厚度 s 示意圖

Ref.: C. Rauwendaal, Mixing in Polymer Processing, Marcel Dekker, New York, 1991

一般而言， s 所代表的是在混合物中每一個重複單元的距離，也就是說當 s 愈小混合物層與層間就愈薄，如下頁圖18所示，分配的效果也就愈佳，而在體積固定下界面面積也相對愈大，因此，界面面積比依然是在做定量分析時一個重要的物理量。另外，經過轉換後 s 可表示如下：

$$s = \frac{2}{(A/A_0)(A_0/V)} \quad (33)$$

將(17)式結果及次要相的體積分率 ($A_0/V = 6x_v/L$) 代入可得

$$s = \frac{2}{3} \frac{L}{\lambda x_v} \quad (34)$$

從上式知若對L較大， x_v 較小者需較多加總形變 γ 來維持分配效果。

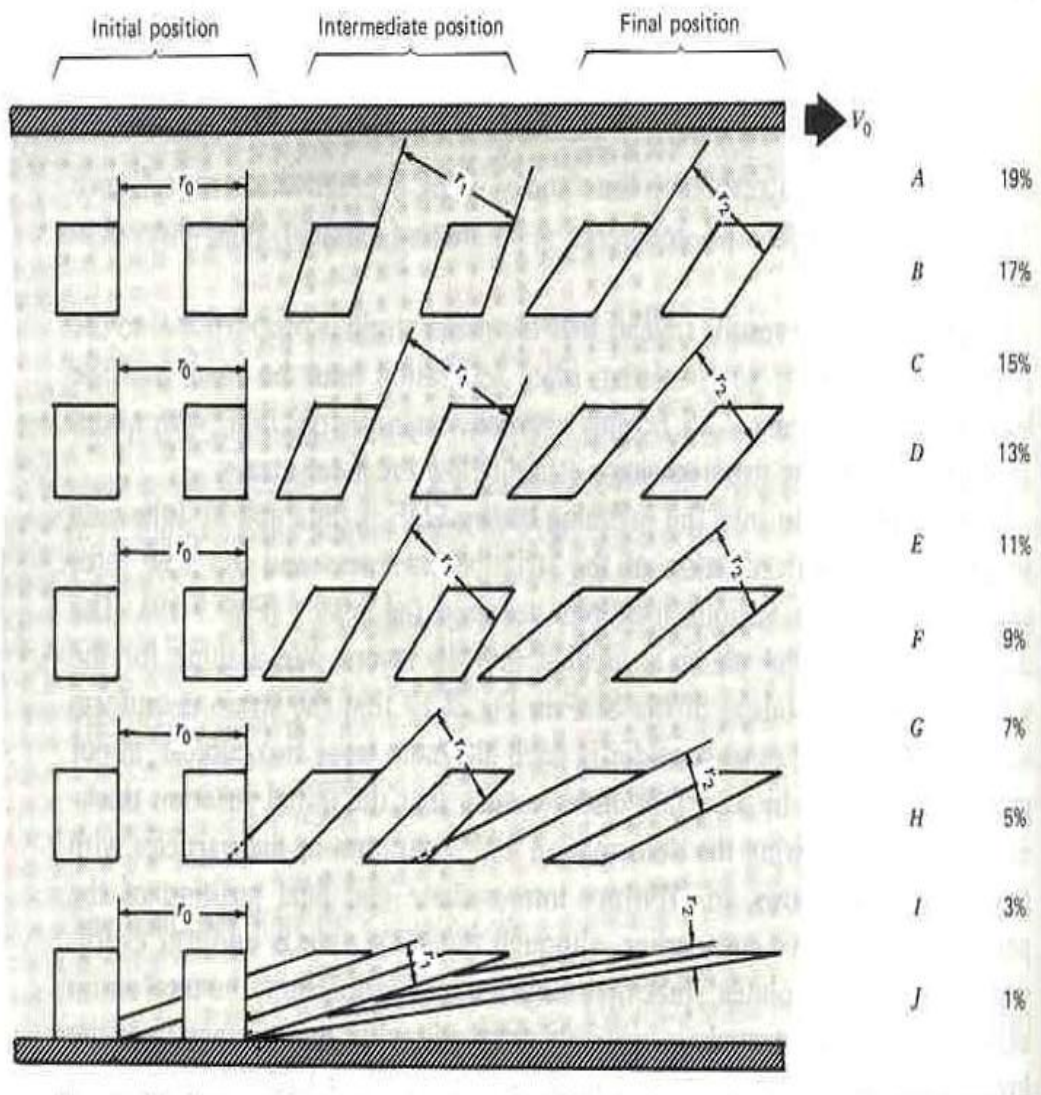


圖 18 在拖曳流下不同位置的條痕厚度

Ref.: Z. Tadmor and G. Gogos, Principle of Polymer Processing,
John Wiley & Sons, New York, 1979

3.2 混鍊相關原理回顧

在分配式混合中根據以上的敘述我們可以歸納出界面面積的增加若不考慮流體元素的起始方位在大量形變下將與加總形變成正比，而Bigg[32]指出另外可由滯留時間分佈（residence time distribution, RTD）的曲線討論高分子流體在主要流動方向的分佈。從前頁圖18我們另可由RTD的角度分析流動狀態，在愈靠近上方板壁的流體其受到拖曳的能力較下方流體強，故愈靠近板壁下方的流體其RTD愈長，界面面積的增加也相對提高。

除了由RTD的方向討論外，亦有專家提出在起始方位做最佳化的設計。首先將(13)式對 γ 微分可得下式

$$\frac{dA}{d\gamma} = A_0 \frac{-\cos\alpha_x \cos\alpha_y + \gamma \cos^2\alpha_x}{(1 - 2\gamma \cos\alpha_x \cos\alpha_y + \gamma^2 \cos^2\alpha_x)^{1/2}} \quad (35)$$

將 $\gamma=0$ 代入上式可得初始值 $\frac{dA}{d\gamma}$ 如下所示：

$$\frac{dA}{d\gamma} = -A \cos\alpha_x \cos\alpha_y \quad (36)$$

此時流體尚未受到任何形變故 $A=A_0$ ，且瞬時界面面積會因為起始方位的兩個方向餘弦值增加或減少，假設 $\cos\alpha_z=0$ 的狀況下， $\cos\alpha_x$ 及 $\cos\alpha_y$ 乘積若為最大值則可得到最大的界面面積，而 $\cos\alpha_x$ 及 $\cos\alpha_y$ 的決定必須符合(2)式，故不能令其中之一為1，否則另一項即為0。而為了讓(34)式等號右邊為正極大值，即假設 $\cos\alpha_z=0$ ， $\alpha_x=135^\circ$ ， $\alpha_y=45^\circ$ ，也就是界面面積與剪切方向夾角成 45° ，因此可簡化如下：

$$\frac{dA}{d\gamma} = \frac{A}{2} \quad (37)$$

經過積分後可得

$$A = A_0 e^{\gamma/2} \quad (38)$$

我們可與(17)式相互比較，(38)式所呈現界面面積的增加是與 γ 呈冪次函數，而(17)式僅與 γ 呈線性關係。由此可見，若在分配式混合中能有效掌握起始方位的話，亦能增加不少混合效果，只可惜在高分子加工中混合元件通常裝置在螺桿的最尾部，故對於起始方位的控制似乎並不如預期中那樣簡單。

下頁圖20說明在給予相同的 γ ($\gamma=4$)下且流體處於簡單剪切流域中，圖20-a擁有先前假設的極大初始方位並且經過一次剪切後再往後旋轉45°，其最終界面面積比量測值為6.1，直接代入(36)式可得理論值為7.3。圖20-b則為流體元素在無旋轉下具有最佳起始方位的最終界面面積比，其值為4.1與直接代入(13)式相同，由此彰顯出流體元素的旋轉與初始方位的相互重要性。



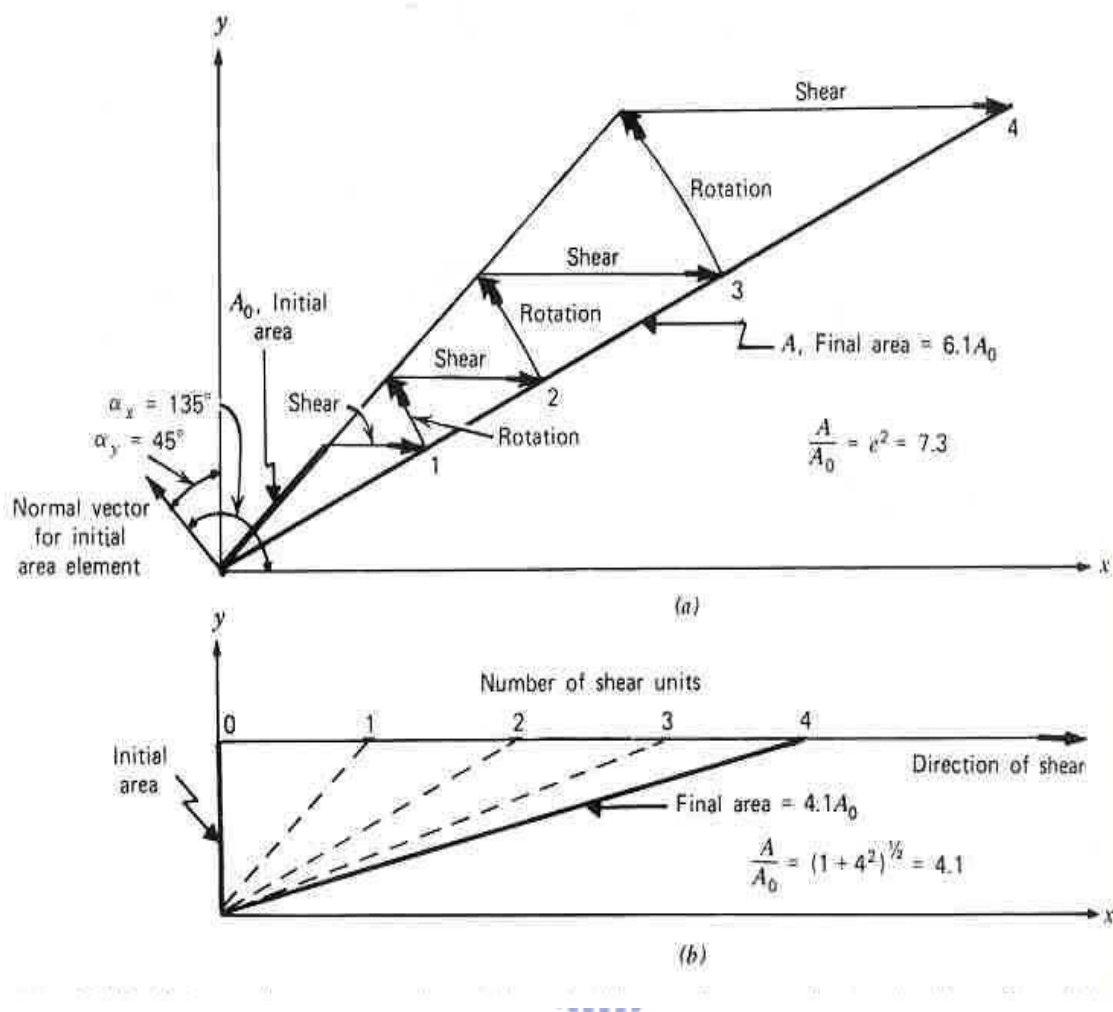


圖 19 在簡單剪切流下界面面積的增加變化圖

- (a) 起始位向跟剪切方向呈 45° ，經過每單位剪面積後再旋轉 45°
- (b) 擁有最佳的起始位向在無旋轉下

Ref.: Z. Tadmor and G. Gogos, Principle of Polymer Processing, John Wiley & Sons, New York, 1979

然而，Erwin[33]利用先前(17)式推導出的結果發現到混合區段的多寡，會直接影響到界面面積比。首先同樣假設在大量形變下可將(17)式的界面面積比化為 γ 的函數，表示如下：

$$f(\gamma) = \frac{1}{2}\gamma \quad (39)$$

再將一般押出機在任意界面下擁有N-1個混合區段，以及在相同剪切量（ γ/N ）下擁有N個剪切區段的模型推導出另一適用於混合區段的公式，表示如下：

$$\frac{A_f}{A_0} = \left[f\left(\frac{\gamma}{N}\right) \right]^N \quad (40)$$

從圖20可以明顯的看到，圖20-a是沒有混合區段，圖20-b加了一個混合區段後會造成兩個剪切區段，若假設流體歷經同樣的 γ 則經由(38)式的結果可推之，N值愈大代表界面面積比愈大，且往往N是呈冪次為度而相距甚大。

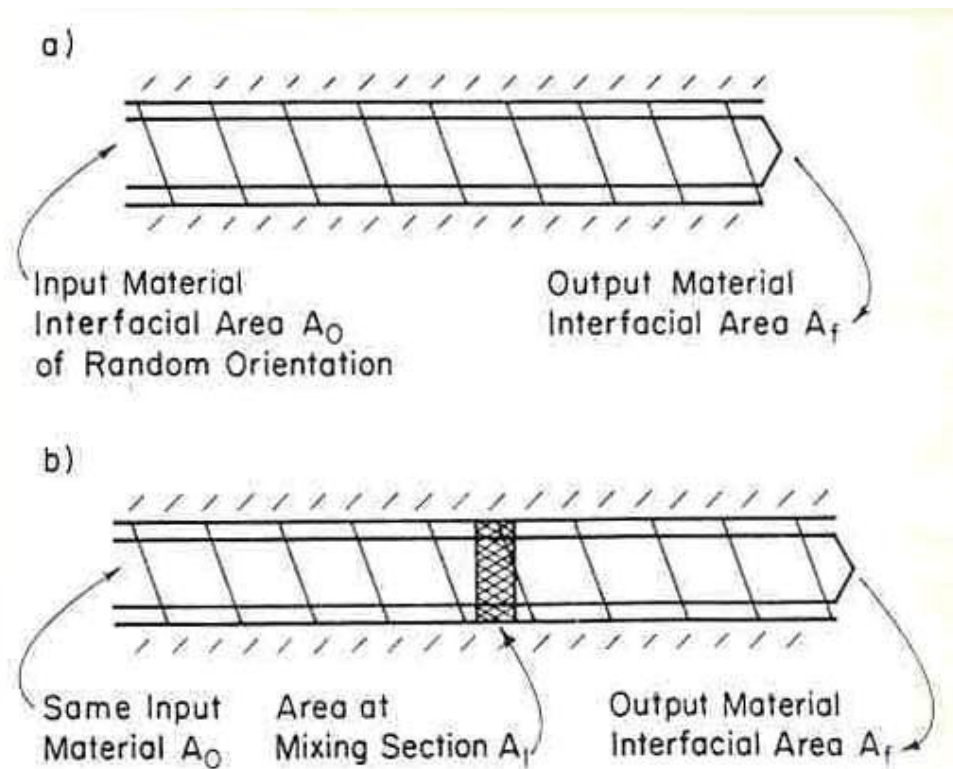


圖 20 螺桿模型

(a) 沒有混合區段 (b) 有混合區段

Ref.: L. Erwin, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, No. 7, p. 572, 1978

另外，Erwin也探討了起始方位的問題，我們可以由圖21清楚看到，

考慮兩流體元素擁有相同的 γ 但由於起始方位的不同界面面積會差異如此甚大，若起始方位與剪切方向愈平行者其界面面積的增加十分有限。相對的，若流體元素的起始方位與剪切方向採相互垂直的話將可發揮最大的混合效益。

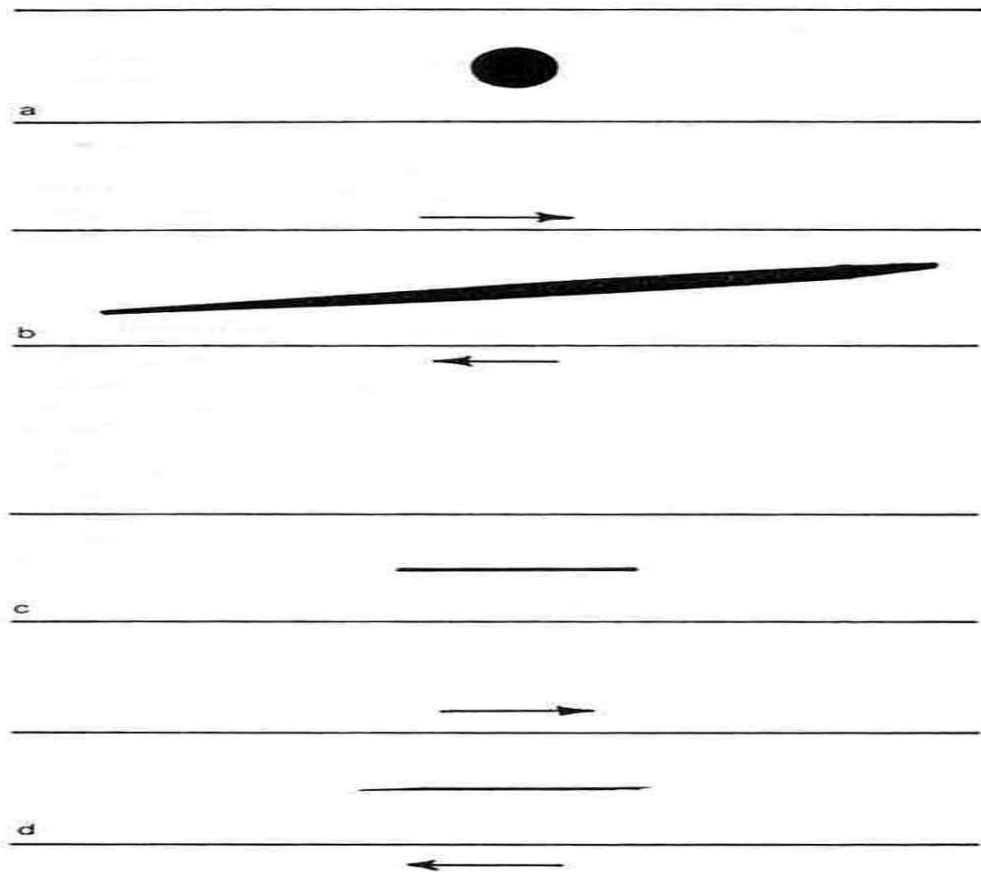


圖 21 laminar mixing 下的效果

(a) 起始流體元素擁有均勻的界面面積分佈； (b) 與(a)同樣的流體元素經過剪切後； (c) 同(a)擁有相同界面面積的量； (d) 與(c)同樣的流體元素經過剪切後
 Ref.: L. Erwin, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, No. 7, p. 572, 1978

同樣是在Erwin[34]的發表中即便更明確的由假擬三維模式 (pseudo-three-dimensional model) 的定量分析來討論起始方位跟分配式混合的關係，如圖22所示，將流體元素分為垂直、水平及任意排列三種情形分析，由於流體粒子的流動是複雜的三維流動，所以在下溝道方向筆者僅利用

二維的時間差做動態分析簡之。從下頁圖23明顯得知在起始方位與剪切方向垂直的狀態下界面面積比為最大，另外可發現到在任意排列與平行排列下的結果相去不遠，也就是說流體元素在進入混合器前，起始方位的排列主宰著未來界面面積的增加率。

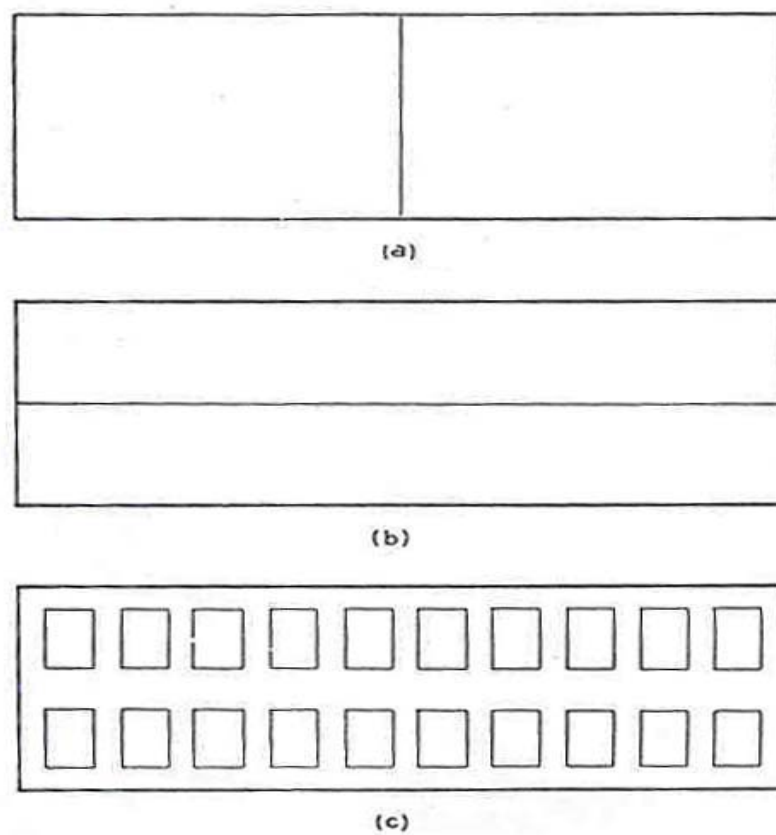


圖 22 不同的起始方位在混鍊過程中示意圖

(a)呈垂直排列；(b)呈平行排列；(c)呈任意排列

Ref. : L. Erwin and F. Mokhtarian, Polym. Eng. Sci., Vol. 23, No. 2, p. 49, 1983

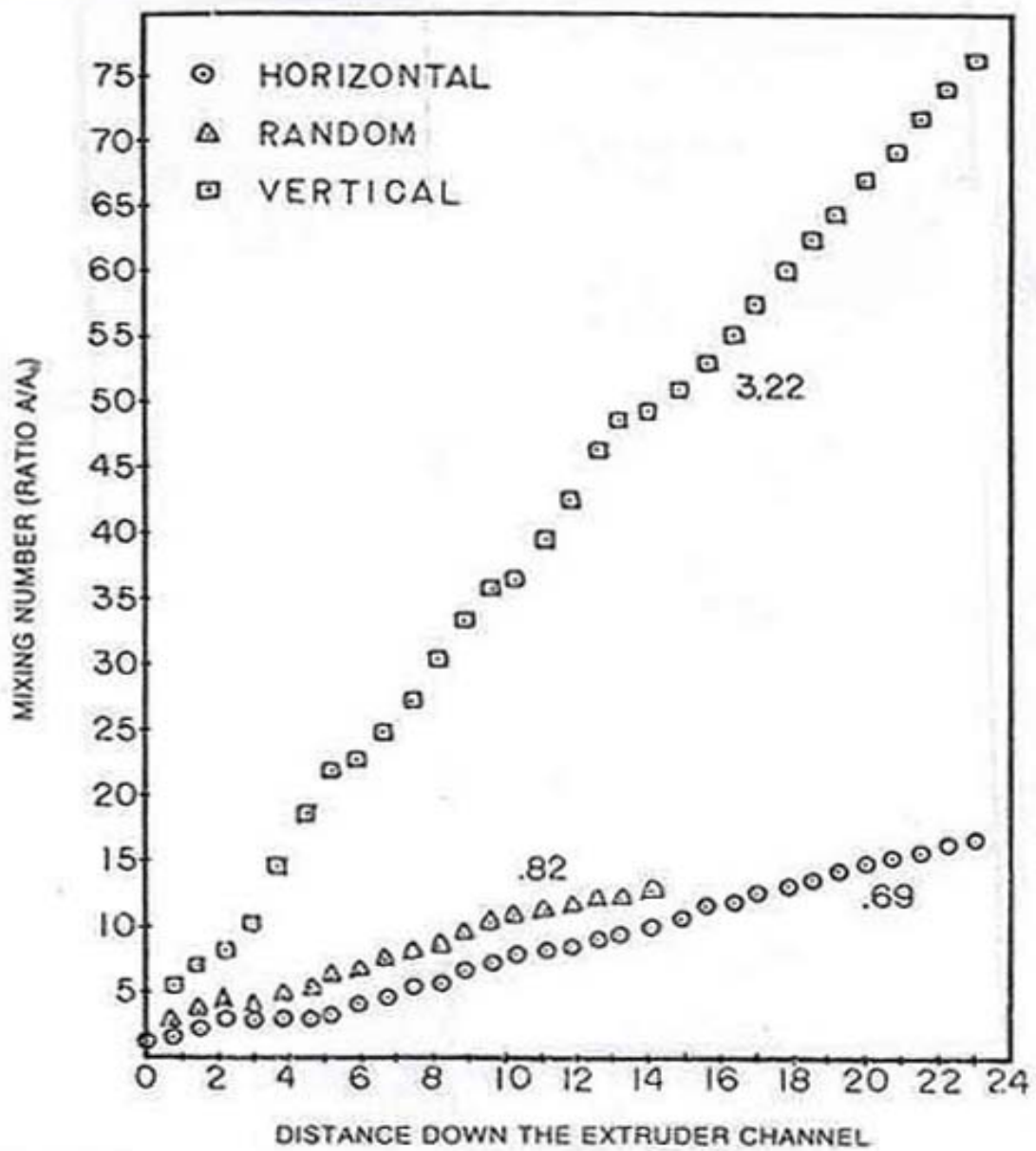


圖 23 不同起始界面方位的比較

Ref. : L. Erwin and F. Mokhtarian, Polym. Eng. Sci., Vol. 23, No. 2, p. 49, 1983

除此之外，筆者也針對不同構形的混合元件做了比較分析，詳圖24。流體在進入混合元件後隨即呈現不同的變化，我們從斜率上的表現看來 single pin 的分配效果最佳，而 double flight 反之。

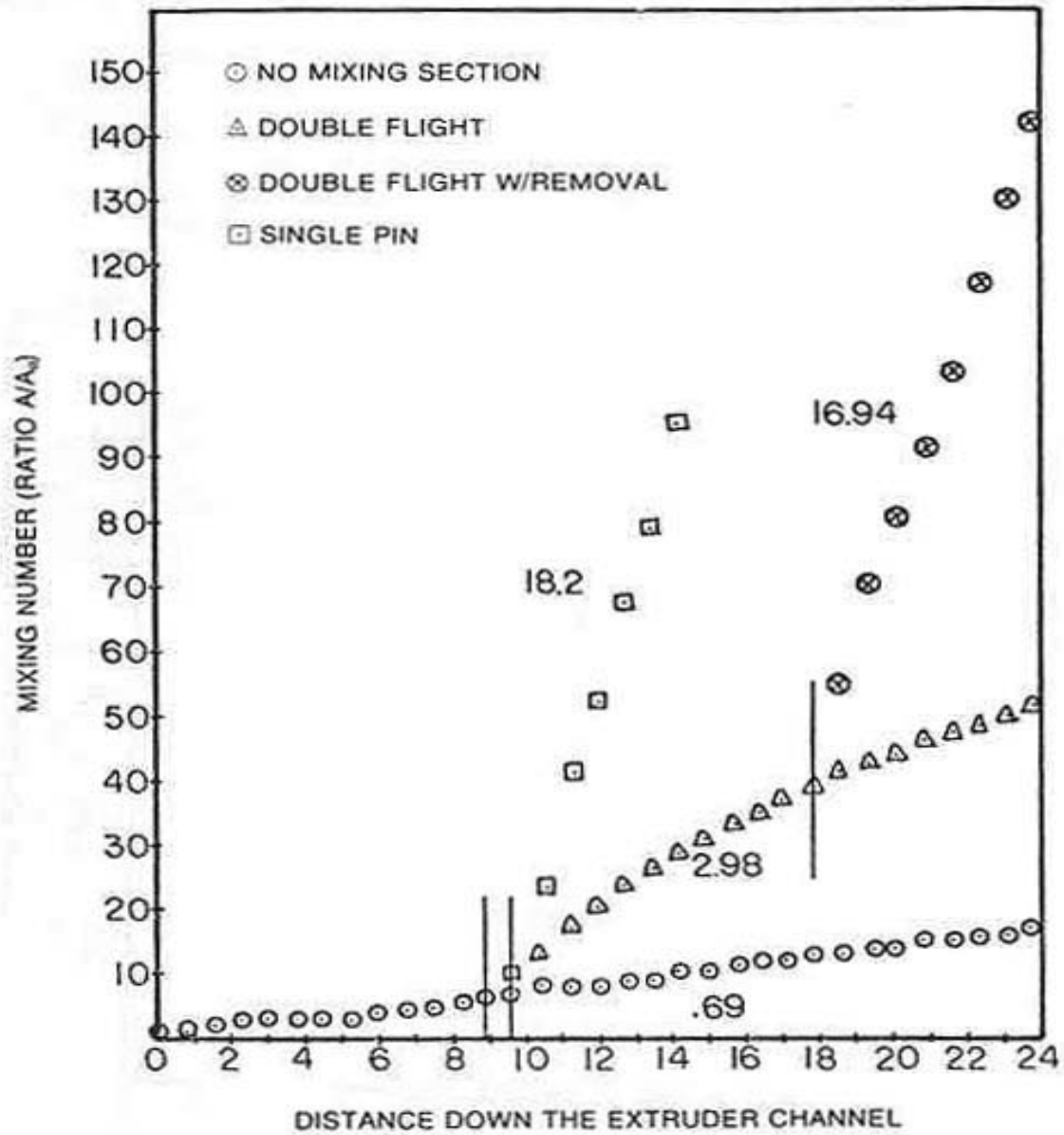


圖 24 不同混合元件效果比較

Ref.: L. Erwin and F. Mokhtarian, Polym. Eng. Sci., Vol. 23, No. 2, p. 49, 1983

3.3 理論模式

高分子流體在混合元件中因為受到擾動所以整個流動情形更顯的複雜而多變，而在求解統御方程式 (governing equation) 的過程當中，由於許多項次也不是單純的線性 (linear) 組合，例如黏度項，故以下先針對統御方程式做理論上的流動分析，接著再由有限元素法 (finite element method) 分析之。

3.3-1 流動分析理論模式

採用Tadmor-Klein model為基礎，並做以下的假設來合理簡化整個流動問題：

1. 假設螺桿不動，套筒壁相對轉動
2. 不可壓縮流體
3. 壁上無滑動現象
4. 流體黏度以截型冪次定理 (truncated power law) 表示
5. 流體已達穩定狀態 (steady state)
6. 重力因素不考慮
7. 流道深度比起曲面半徑要小很多且為小區域的全流發展 (locally fully developed)，可用潤滑近似 (lubrication approximation) 處理



根據上述條件，可簡化相關方程式。

連續方程式 (equation of continuity)：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (41)$$

運動方程式 (equation of motion)：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (42)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0 \quad (43)$$

其中

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad \tau_{yz} = -\eta \frac{\partial v_z}{\partial y}$$

因此運動方程式成為：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = 0 \quad (44)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (45)$$

黏度以等溫截型冪次定理，如下頁圖25表示，且符合下式：

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 e^{-a(T-T_0)} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} & (\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0) \\ \eta_0 e^{-a(T-T_0)} & (\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0) \end{cases} \quad (46)$$

$$\eta_0 = m_0 \dot{\gamma}_0^{n-1}$$

且剪切率表示如下：

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2} \quad (47)$$

邊界條件：

$$v_x = v_b \sin \theta_b \quad v_z = v_b \cos \theta_b \quad \text{at the barrel surface}$$

$$v_x = 0 \quad v_z = 0 \quad \text{at the channel wall}$$

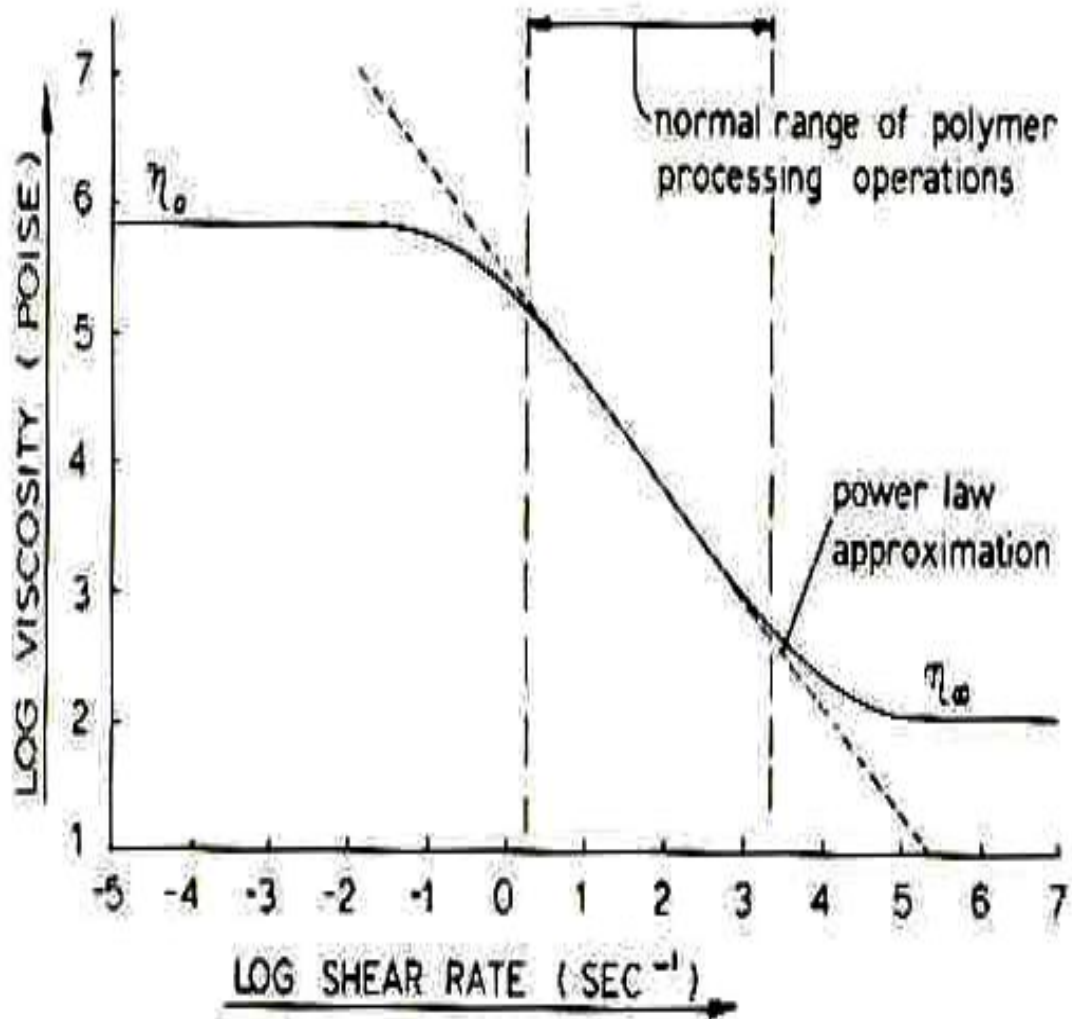


圖 25 一般假塑性流體黏度與剪切率示意圖

Ref. : C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Hanser, New York, 1990

3.3-2 有限元素法理論模式

利用有限元素法[35, 36]的觀念及基礎可將欲分析的流動系統利用有限的元素體 (element) 近似整個物理範圍 (physical domain)。假使採欲分析的單元體有 n 個節點及 m 個頂點，則在每一個節點上均有 v_x 、 v_z 等二個未知數，在各個頂點上則有 P 的未知數。對每一個單元體而言我們可利用內插函數表示如下：

$$p = \sum_{k=1}^m p_k M_k \quad (48)$$

$$v_x = \sum_{j=1}^n v_{xj} N_j \quad (49)$$

$$v_z = \sum_{j=1}^n v_{zj} N_j \quad (50)$$

其中 v_{xj} 、 v_{zj} 分別為單元體上之 x 分量速度、 z 分量速度之近似值， N_j 為單元體邊界上之內插函數 (interpolation function) 或稱為形狀函數 (shape function)。而 P_k 為頂點上的壓力近似值， M_k 為其內插函數。而內插函數的表示與選定的元素體有相關，一般而言均是將流動分析的真實座標 (x 、 y 、 z) 化做以範圍為 -1 至 1 的局部座標 (ξ 、 η 、 ζ) 為原則，目的是方便爾後在做數值計算同時能以高斯積分簡化之。而有限元素法於描述真實元素座標有三種不同之方法可採用，分別為等變數元素 (isoparametric element)、次變數元素 (subparametric element) 和超變數元素 (superparametric element)。以下便採行描述真實座標時所用之內插函數與未知數 v_x 、 v_z 、 P 所用之內插函數相同的等變數元素進行操作，即：

$$x = \sum_{i=1}^n x_i N_i \quad (51)$$

$$y = \sum_{i=1}^n y_i N_i \quad (52)$$

$$z = \sum_{i=1}^n z_i N_i \quad (53)$$

其中 x_i 、 y_i 、 z_i 為節點 i 之真實座標值。

以 Galerkin 有限元素法來處理控制方程式，將(44)、(45)式展開後乘上內插函數 N_i ，再將(41)式乘上內插函數 M_k ，並對該元素作體積分，則如下所示：

$$\iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) dV = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (54)$$

$$\iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_z}{\partial y} - \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) dV = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (55)$$

$$\iiint_{\Omega} M_k \left(\frac{\partial v_x}{\partial v_x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (56)$$

其中 Ω 為體積分之範圍。

而以下由於(54)、(55)及(56)式的推導有些許雷同處，故僅以(54)式之推導替代之。首先將(54)式中的每個微分項分為三部分做討論，對 $\frac{\partial p}{\partial x}$ 此項而言，可將(48)式代入化簡為以局部座標 (ξ 、 η 、 ζ) 及 inverse Jacobian 表示之，如下所示：

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial p}{\partial x} dV &= \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{k=1}^m p_k M_k \right) dV = \sum_{k=1}^m p_k \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial x} dV \\ &= p_k \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial M_k}{\partial \xi} \hat{j}_{11} + \frac{\partial M_k}{\partial \eta} \hat{j}_{12} + \frac{\partial M_k}{\partial \zeta} \hat{j}_{13} \right) dV \end{aligned} \quad (57)$$

其中， $\frac{\partial M_k}{\partial x} = \frac{\partial M_k}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial M_k}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial M_k}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ ； \hat{j}_{11} 、 \hat{j}_{12} 、 \hat{j}_{13} 分別代表 inverse

Jacobian 在第一列，第一、二、三行的元素，而其完整表示如下：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \text{adj}(J) \quad (59)$$

同理， $\frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y}$ 項推導如下：

$$-\iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} dV = -\iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{j=1}^n v_{xj} N_j \right) dV = -\sum_{j=1}^n \frac{\partial \eta}{\partial y} v_{xj} \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} dV$$

$$= -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n v_{xj} \iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial \xi} \hat{J}_{21} + \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \hat{J}_{22} + \frac{\partial N_j}{\partial \zeta} \hat{J}_{23} \right) dV \quad (60)$$

最後針對 $\eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}$ 此項可加上利用部份積分技巧推導得：

$$\begin{aligned} -\iiint_{\Omega} N_i \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} dV &= -\eta \left(\iiint_{\Omega} -\frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} dV + \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \right) \\ &= \eta \sum_{j=1}^n \left(v_{xj} \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} dV - \eta \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \right) \end{aligned} \quad (61)$$

其中 Γ 為面積分之範圍， $\frac{\partial v_x}{\partial n}$ 為 v_x 與法向量 n 之內積值。

而(56)式亦可化為如下所示：

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} M_k \left(\frac{\partial v_x}{\partial v_x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV &= \iiint_{\Omega} M_k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{j=1}^n v_{xj} N_j \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{j=1}^n v_{zj} N_j \right) \right] dV \\ &= \sum_{j=1}^n \left[\left(\iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial x} dV \right) v_{xj} + \left(\iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) v_{zj} \right] \end{aligned} \quad (62)$$

經過以上化簡為高斯積分 (Gauss integral) 之方程式可合併成一個解速度及壓力的大型矩陣，並且代入高斯點及權重值，如下二頁之表二，之後利用數值積分並解出所要的參數值，其表示如下：

$$\begin{bmatrix} K & C \\ D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$v = [v_{x1}, v_{x2}, v_{x3}, \dots, v_{xm}, v_{z1}, v_{z2}, v_{z3}, \dots, v_{zm}]^T \quad (64)$$

$$p = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_m]^T \quad (65)$$

$$K = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} dV + & & & 0 \\ \eta \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} dV & & & \\ & & & -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} dV + \\ & 0 & & \eta \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} dV \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial x} dV \\ \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial z} dV \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$D = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial x} dV & \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$f = \begin{bmatrix} \eta \oint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \\ \eta \oint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_z}{\partial n} dA \end{bmatrix} \quad (69)$$



表 2 高斯積分之權重值及取樣點

$$\int_{-1}^1 I(\xi) d\xi \cong \sum_{l=1}^n w_{nl}(\xi_{nl})$$

| Number of Gauss points, n | Accuracy of quadrature | Gauss points, ξ_{nl} | Weights, w_{nl} |
|---------------------------|------------------------|--|--|
| 1 | $0(h^2)$ | $\xi_{11} = 0$ | $w_{11} = 2$ |
| 2 | $0(h^4)$ | $\xi_{21} = -\frac{1}{\sqrt{3}}$ $= -0.57735\dots$ $\xi_{22} = -\xi_{21}$ | $w_{21} = 1$ $w_{22} = w_{21}$ |
| 3 | $0(h^6)$ | $\xi_{31} = -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{5}}$ $= -0.77460\dots$ $\xi_{32} = 0$ $\xi_{33} = -\xi_{31}$ | $w_{31} = 5/9$ $= 0.55555\dots$ $w_{32} = 8/9$ $= 0.88888\dots$ $w_{33} = w_{31}$ |
| 4 | $0(h^8)$ | $\xi_{41} = -\frac{\sqrt{15+2\sqrt{30}}}{\sqrt{35}}$ $= -0.86113\dots$ $\xi_{42} = -\frac{\sqrt{15-2\sqrt{30}}}{\sqrt{35}}$ $= -0.33998\dots$ $\xi_{43} = -\xi_{42}$ $\xi_{44} = -\xi_{41}$ | $w_{41} = \frac{49}{6(18+\sqrt{30})}$ $= 0.34785\dots$ $w_{42} = \frac{49}{6(18-\sqrt{30})}$ $= 0.65214\dots$ $w_{43} = w_{42}$ $w_{44} = w_{41}$ |
| 5 | $0(h^{10})$ | $\xi_{51} = -\frac{\sqrt{35+2\sqrt{70}}}{\sqrt{63}}$ $= -0.90617\dots$ $\xi_{52} = -\frac{\sqrt{35-2\sqrt{70}}}{\sqrt{63}}$ $= -0.53846\dots$ $\xi_{53} = 0$ $\xi_{54} = -\xi_{52}$ $\xi_{55} = -\xi_{51}$ | $w_{51} = \frac{5103}{50(322+13\sqrt{70})}$ $= 0.23692\dots$ $w_{52} = \frac{5103}{50(322-13\sqrt{70})}$ $= 0.47862\dots$ $w_{53} = 128/225$ $= 0.56888\dots$ $w_{54} = w_{52}$ $w_{55} = w_{51}$ |

Ref.: David S. Burnett, Finite Element Analysis: Form Concepts to Applications, Addison-Wesley, Reading Mass., 1987

第四章 模擬方式介紹

4.1 有限元素法之概述

在聚合物加工中由於流域為複雜的三維流動，所以通常利用有限元素法將實體流域系統分割成不同的大小、種類、區域的元素體，利用元素體近似整個流動範圍。根據不同的統御方程式，推導出以每一個元素組成的矩陣，再統整此流動系統元素構成系統矩陣，最後將系統矩陣的每一係數解求出得到想要的物理參數，以下便對有限元素法做一初步之介紹。

4.1-1 數值方法與高分子加工模擬

隨著工商社會的日新月異，電腦科技有著長足的進步且在工程上佔有相當重要的地位。而電腦軟體的應用也得力於電腦科技的蓬勃發展，將電腦與電腦軟體用於產品的開發、設計、分析與製造，已成為提昇近代工業競爭力的代名詞，故經由電腦輔助從事生產，如圖 26 所示，儼然成為主流。而電腦輔助分析的技巧可分為以下三類：

1. 電腦輔助設計(Computer-aided Design ; CAD)：即使用電腦軟體直接從事於圖形的繪製與結構體的設計。
2. 電腦輔助工程(Computer-aided Engineering ; CAE)：將工程上分析的過程及計算方法來輔助工程師做設計後的分析或進行同步工程。
3. 電腦輔助製造(Computer-aided Manufacturing ; CAM)：是直接利用電腦來輔助操縱各式各樣的精密工具機器以製造不同的零組件。

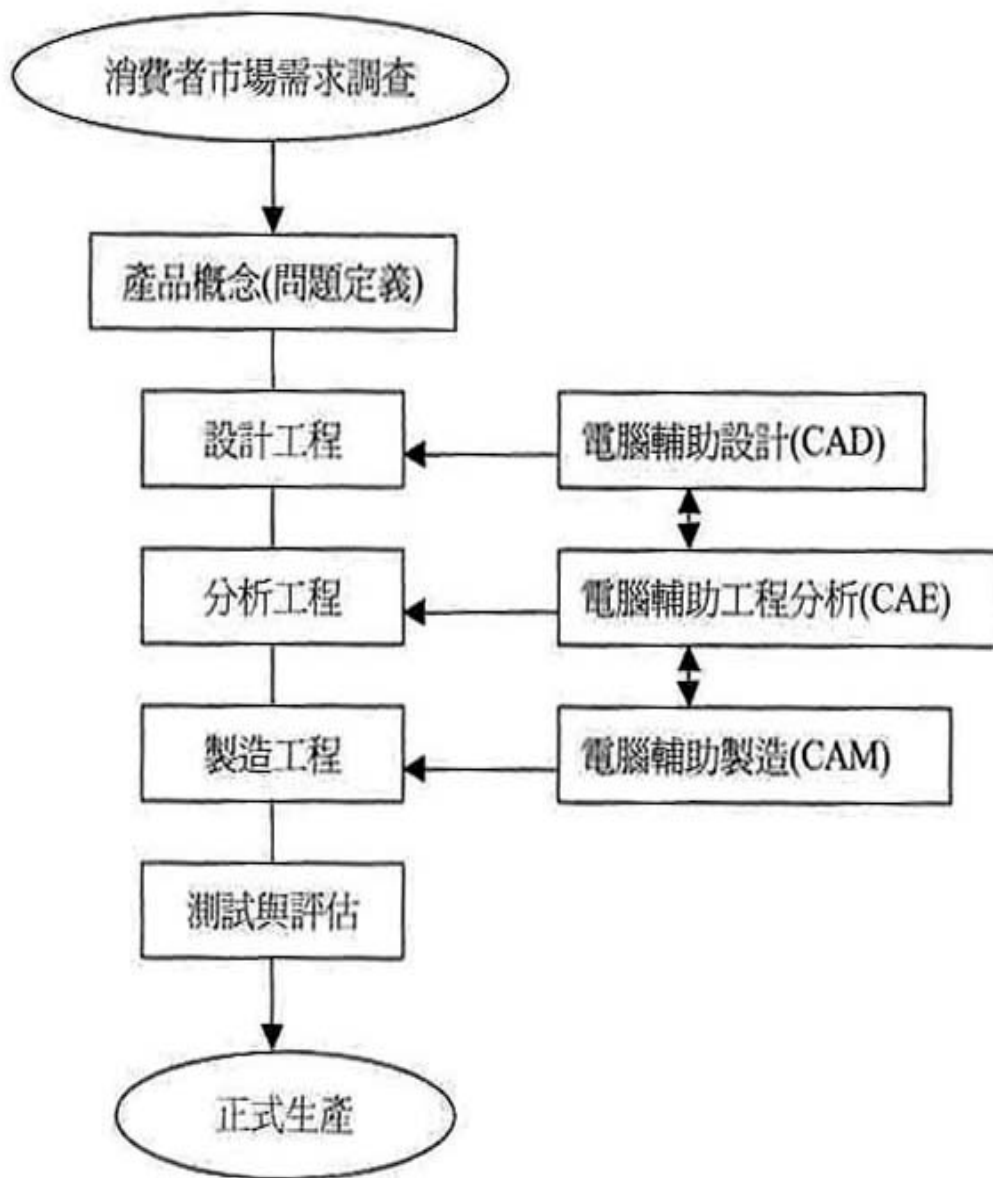


圖 26 電腦在產品生產流程所扮演的角色

Ref. : 龔皇光、黃柏文、陳鴻雄, ANSYS 與電腦輔助工程分析, 台北全華, 民國 91 年

電腦輔助分析運用了電腦快速運算的能力，可以即時的判斷出產品設計的優劣並迅速的驗證產品在此設計下的品質，除了可免去在時間成本及原物料上的耗費外，更可促進生產的良率與產品的品質，加快產品上市的時間。因此，電腦輔助分析不僅漸漸獲得業界的認同並予以採用。近幾年有限元素法已經漸成主流，而且被應用的領域也越來越廣。從早期的應用於土木工程方面的結構力學（包含線性及非線性）、結構動力學到機械工程方面的熱力學、流體力學甚至於電子工程方面的電路學、電磁學等等均已發達完備。然而，計算流體力學(Computational Fluid Dynamics；CFD)的有限元素法軟體在模擬靜態及動態下流體的行為以及結構體間的關係更比其他數值模擬方法的軟體來的精準又迅速，所以大部分專家學者仍偏愛使用有限元素法軟體做為分析之工具。

應用於 CAE 的數值方法很多，其中包括有限元素法 (Finite Element Method；FEM)，邊界元素法 (Boundary Element Method；BEM)，有限差分法 (Finite Difference Method；FDM)，流動分析網路法 (Flow Analysis Network；FAN) 等等。而歷年來利用以上數值方法進行螺桿及混合元件分析的研究亦不在少數，而本論文即是利用有限元素法預測高分子融熔液在不同幾何構形混合元件內的流動情形，並藉由流體粒子的追蹤及界面面積的變化，針對膠料在混合元件中做一混鍊的量化。


4.1-2 有限元素法在工程上之應用

一般而言，工程問題即物理狀態下的數學模組，藉由基礎法則和自然原理對系統取控制體積，可得到統御方程式，而數學模組的應用即是一套對應邊界條件和初始條件的微分方程式。由物理現象觀察得到的統御方程式各代表著質量（equation of continuity）、動量（equation of motion）或能量（equation of energy）的平衡。而由於真正的工程問題分析通常是隱含著許多非線性項而且通常呈現不規則的模組形態，故在求解方面利用傳統的計算方法也無法獲得精確的解析解（analytic solution），所以有限元素法利用數值計算的方法在求解的過程中扮演了一個重要的角色。一般來說，解析解由兩個部分組成，分別為通解（general solution）跟特解（particular solution）。在任何工程問題中，有兩組參數會影響到系統的行為。第一，是提供關於系統自然運作下所得資料的參數，而這些參數包括應用於材料力學的彈性係數、熱傳學的熱傳導係數和非牛頓流體力學的黏度函數…等等。第二，亦有參數會在系統內產生「擾動」，這類型的參數如外界給予的壓力、力矩或者是介質本身的差異造成溫度分佈及流體進出的壓力差異…等等，而這些經由系統的自然運作支配的特性則統一包含在統御方程式的通解裡，相同地，造成擾動的參數則出現在特解裡。

實際上許多工程問題在處理複雜的統御微分方程式，或是難以處理的邊界和初始條件甚至是不規則的模組形態時，通常藉數值解來近似，與解析解不同的是，解析解顯示系統內任一點精確（accurate）的值，而數值解卻只存在於分離不連續（separated discontinuous point）的點，我們稱之為節點（node）。因為此種特性的關係所以任何一種數值程序的第一步驟即是做分離，其過程是將介質分成很多區域和節點。在數值方法有

兩者使用較為普遍，一是有限差分法，另一則是有限元素法。使用有限差分法，每個節點都會被賦予一個微分方程式，且導式會被差分方程式所取代，經由上述處理後會產生一組聯立線性方程式，最後藉由求解聯立方程式得到所要的參數值。雖然有限差分法易於了解，且能套用於一些流動情形較為簡單的問題，但一碰上複雜的幾何形狀或是邊界條件時，有限差分法的解決能力就略顯不足。相反地，有限元素法先切割不規則的幾何形狀為有限個元素體，再使用 Galerkin 的積分公式法建立一個由代數方程式組合而成的大型矩陣系統，而不是單純的微分方程式，利用數值方法求解除了可用一個近似的連續函數來表示每個元素的解答，並藉由連結或組合個別的解而得到整個欲分析系統的物理量。

4.2 ANSYS®輔助模擬分析



ANSYS®是目前業界經常使用的電腦輔助分析套裝軟體，而且能同時分析系統受到靜力、動力、熱傳及流力等多重物理現象，因此在電子封裝、微機電、汽車、航太甚至是模流分析等多種產業領域都適用。其根據有限元素法的理論背景，當系統模型在軟體中被建立好且網格化離散後，加諸邊界條件或起始條件即可經由電腦高速運算得到所求的系統物理特性。一般在處理計算流體力學的問題時，ANSYS®提供了完整的介面，如暫態（transient state）或穩態（steady state）、可壓縮流體（compressible fluid）或不可壓縮流體（incompressible fluid）、層流（laminar flow）或紊流（turbulent flow）、絕熱（adiabatic）或熱流（thermal）··等，故對於一些航太工程及土木工程均可利用此軟體進行分析。在分子加工處理方面，由於分子流體的黏度與溫度及剪切率有關，如(46)式所示，在統御方程式的處理上也會呈現非線性關係而難以處理，且針對系統模型離散為有限個數元素時會由於元素採取個數的多寡

影響到系統處理難易度及模擬結果，因此藉由 ANSYS®的完整分析流程將有助於本論文在實際應用上的準確性及方便性。

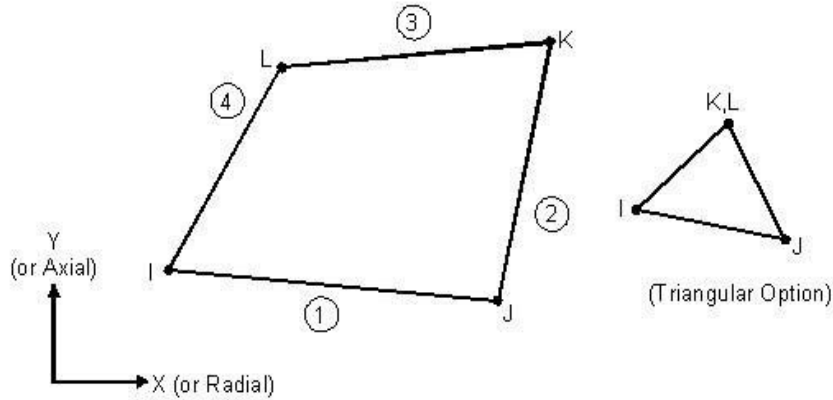
4.2-1 ANSYS®基本要件

在 ANSYS®軟體中，一般欲分析系統可歸納為下列四個要件：

1. 節點 (node)：工程系統中模組的點座標位置，為構成有限元素系統的最基本物件，其具有物理意義之自由度，且該自由度為結構系統受到外力後之反應。
2. 元素 (element)：由節點與節點相互連接而成。ANSYS®提供一百多種元素讓使用者在不同特性之工程系統可選用不同種類之元素，故在使用時必須慎選元素形式種類並了解元素特性才能得到正確的計算。而在處理計算流體力學的問題時 ANSYS®中 FLOTRAN 提供了二種元素供使用，如下頁圖 27 所示。
3. 自由度 (degree of freedom; DOF)：表示該工程系統受到外力後反應之結果。系統任一節點均具有某種程度之自由度，而任何元素的物理量在數學模式轉換時將依其自由度而定。以本論文而言，節點的自由度包含三個方向位移、速度及壓力，若在非恆溫系統下則有溫度的自由度存在。
4. 負載 (load)：由外力或者是系統本身條件限制所構成。一般可分為邊界條件(boundary condition)和實際外力(external force)兩大類，依照問題分析針對不同需要可在 ANSYS®中施加負荷。在不同的領域中負載的類型如以下所示：
 - (a) 流體力學：速度、壓力。
 - (b) 熱力學：溫度、熱流率、熱源、對流、無限表面。

有限元素系統的建立乃是利用節點與節點相連接而成的元素所組成，且外型與工程系統相同。但對於複雜的曲面或者三維幾何構型而言，因為節點與節點間採直線方式相連接會造成模型不平滑的現象，故在切割模型時元素宜愈多為佳。

FLUID141 2-D Fluid-Thermal Element



FLUID142 3-D Fluid-Thermal Element

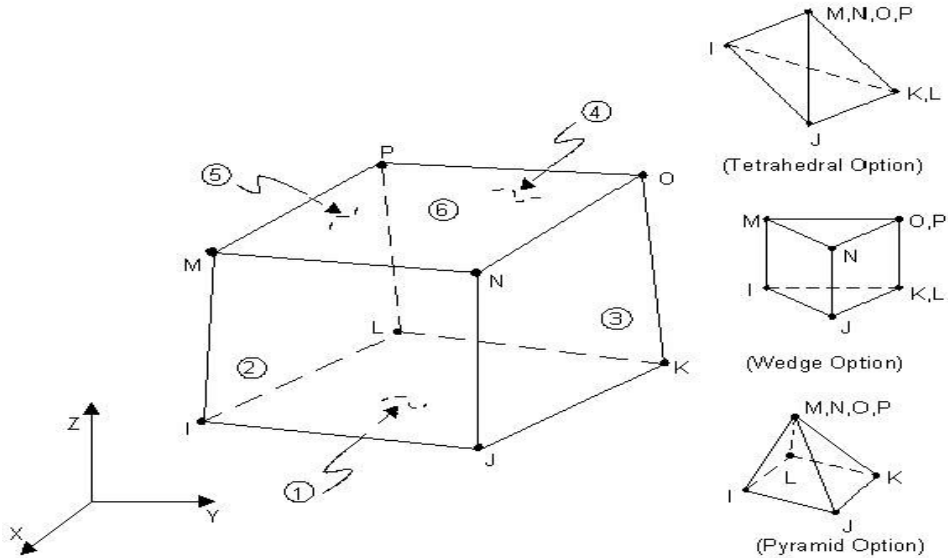


圖 27 ANSYS FLOTTRAN 慣用之元素

Ref.: ANSYS On-Line Help > Element Reference > Chapter 3. Element Characteristics > 3.2. Pictorial Summary

4.2-2 ANSYS®介面簡述

對於初接觸 ANSYS®的使用者最直接操作方法是利用 ANSYS®選單系統，此系統稱為使用者圖形介面（Graphic User Interface；GUI），其為使用者與 ANSYS®程式之間一個連接介面，目的是當使用者在輸入指令後經由 ANSYS®系統內部執行而進行運算。除此之外亦可由文字輸入視窗鍵入所需之指令，惟此技巧須對 ANSYS®軟體有一定程度之熟悉方可操作之。

整個 GUI 由六個區域所組成，如下頁圖 28 所示，而以下將其配置做一詳述說明：

1. 輔助功能選單（Utility menu）：包含各種應用指令，主要用於輔助模型建立及系統檔案管理，如檔案的控制（File）、選擇物件（Select）、資料列示（List）、物件圖形顯示（Plot）、圖形顯示控制（PlotCtrls）、工作面設計（WorkPlane）··等。
2. 主功能選單（Main menu）：統合分析過程主要指令所在之位置，如建立模組（Modeling）、切割元素（Meshing）、外力負載（Load）、求解過程（Solution）··等。
3. 工具列視窗（Toolbar menu）：執行快速指令之捷徑，可依照各人喜好自編輯。
4. 文字輸入視窗（Input window）：顯示程式提示訊息，並可直接鍵入指令。
5. 圖形繪製區（Graphics area）：顯示使用者所建立之模組及檢視分析後之結果。
6. 文字輸出視窗（Output window）：顯示使用者所下的每一道指令的結果，通常可由此確定執行指令正確與否並檢示錯誤原因。

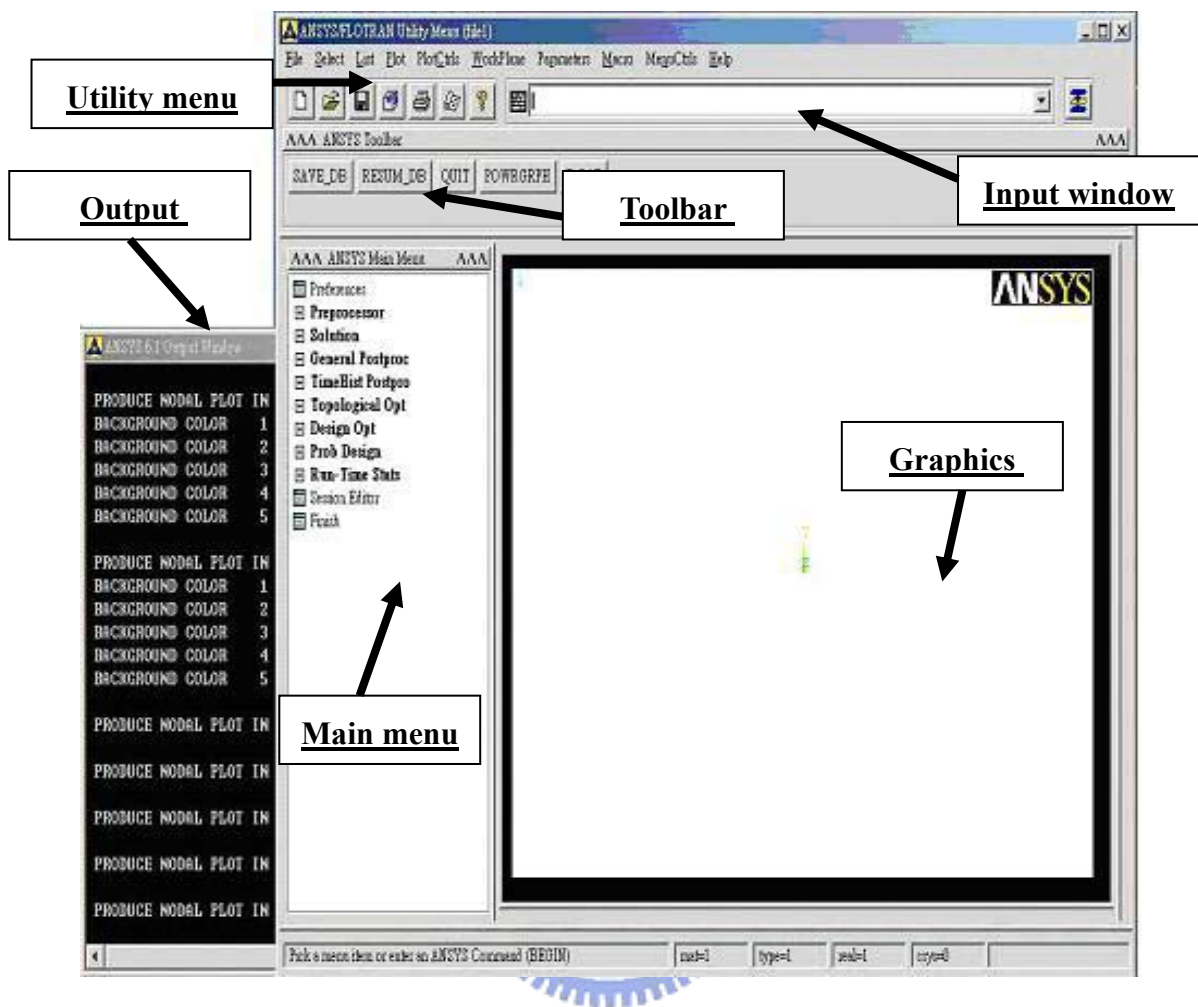


圖 28 ANSYS 使用者圖形介面

Ref. : ANSYS 軟體畫面截圖

4.2-3 ANSYS®模擬用之方程式

ANSYS®內建的指令選項相當健全，對流體的流動模型描述也相當完整，相較於前面所導證之理論基礎，ANSYS®則針對連續方程式、動量方程式採取完整的三維流動模式，故與先前第三章提及之方程式有些許不同，以下便列舉出在 ANSYS®中常駐之方程式：

1. Continuity equation：根據質量守衡原理所得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (70)$$

2. Momentum equation：根據任何流體動量守衡原理所得

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -(\nabla \cdot \pi) + \rho g \quad (71)$$

針對任何流體而言，其應力張量（stress tensor）及剪切率（rate of deformation）的關係式如下：

$$\pi_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (72)$$

其中 π_{ij} = stress tensor

u_i = orthogonal velocity

μ = dynamic viscosity

λ = second coefficient of viscosity

再將(72)式代入(71)式後簡化，以下列舉 x 方向之關係式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &+ T_x \end{aligned} \quad (73)$$

其中 μ_e = effective viscosity

R_x = distributed resistance

T_x = viscous loss terms

一般來說，高分子在加工過程中均為層流流動故 μ 項僅只為 dynamic viscosity，又因為高分子流體為不可壓縮流體，而 T_x 項不存在，至於 R_x 項則為使用者欲添加之來源項，例如流體通過某多孔介質（porous media）時欲分析流域本身散佈阻礙（resistances）即為添加之來源項。

3. Convergence factor— M_ϕ ：對於許多非線性的問題分析由於疊代的關係收斂值顯的格外重要。而 ANSYS® 針對各項物理量自由度的疊代關係式符合如下

$$M_\phi = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k - \phi_i^{k-1}|}{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k|} \quad (74)$$

其中 M_ϕ = convergence monitor for degree of freedom Φ

N = total number of finite element nodes

Φ = degree of freedom

κ = current global iteration number

通常 ANSYS®—FLOTTRAN 在做三維數值運算時會因為壓力所受到的擾動較速度來的大，所以會將 P 值設定較小一些，另一方也可由此收斂值來牽制 V_x 、 V_y 、 V_z 等物理量，如此一來在做疊代運算時方可較為精準。

4.3 ANSYS®處理流程

ANSYS®分析之流程如下頁圖 29 所示，一般完整的有限元素分析程式 (finite element program) 包含前處理 (preprocessing)、解題程式 (solution) 和後處理 (postprocessing) 三大部分。其內容概要敘述如下：

1. 前處理 (preprocessing)

此為問題分析最重要的一環，首要為建立有限元素模型後切割為有限元素，最後再給予邊界條件，通常結果分析的準確與否決定在此。

2. 解題程式 (solution)

經由前置處理後的有限元素模型透過此單元可組合成系統矩陣，並藉由 ANSYS® 內建處理系統求解之。



3. 後處理 (postprocessing)

將求解部分得到的結果如：速度、壓力、溫度等資料，經由圖形介面以各種不同表示方式呈現。

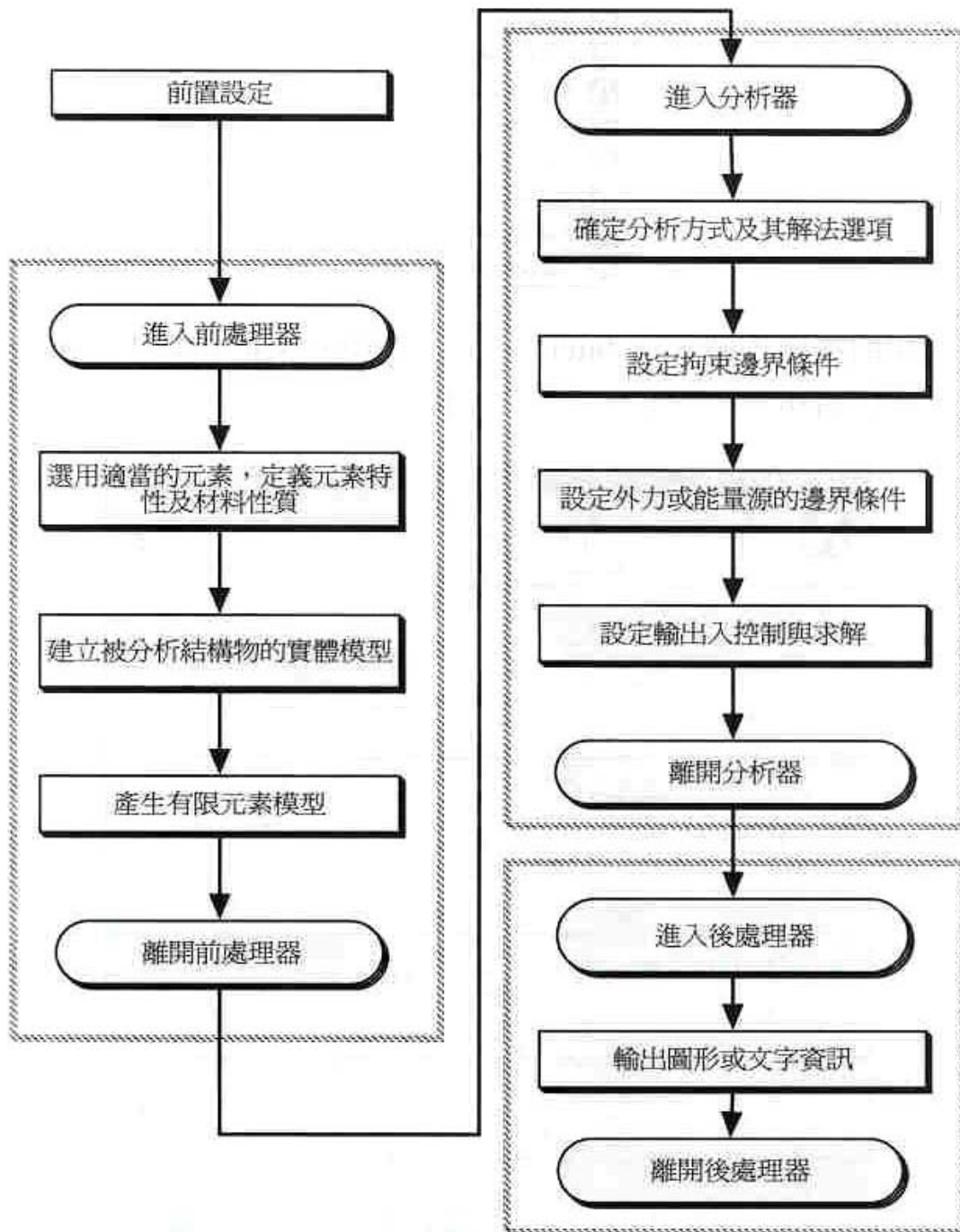


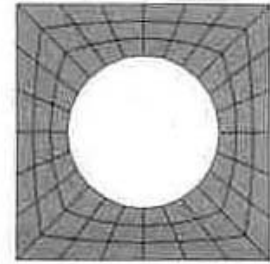
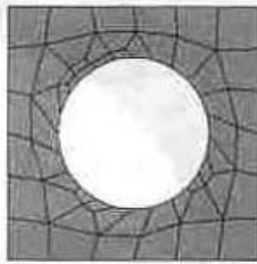
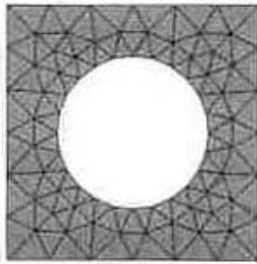
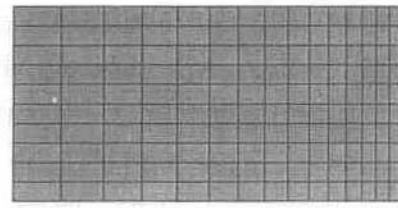
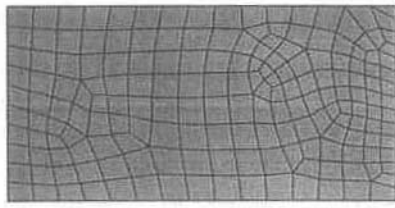
圖 29 ANSYS 分析處理作業流程圖

Ref. : 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年

4.3-1 前處理

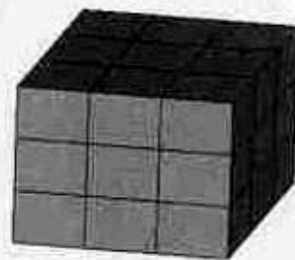
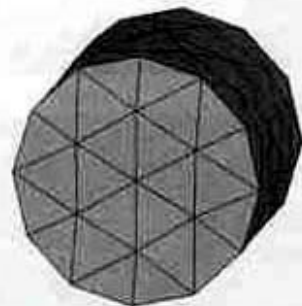
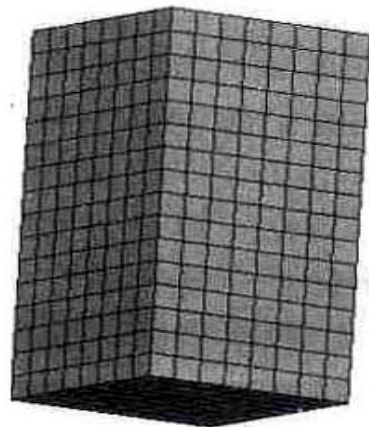
對於工程問題的分析經由觀察後可由以下步驟逐一代入 ANSYS® 軟體分析之，以下一一說明：

1. 了解分析題型：在 ANSYS® 軟體中包含許多不同的模組，使用者針對不同的工程問題選用適當的模組，如本論文即討論分配式混合元件內的高分子流動情形其模組選定為 FLOTRAN。
2. 選定元素類型：在 ANSYS®—FLOTRAN 中如之前圖 27 所示僅有二維的 Fluid 141 及三維的 Fluid 142 供選擇。
3. 收集材料性質：本論文所選用的流體為高分子流體，且在流變性質上符合等溫截型冪次定律。
4. 幾何尺寸建立：有限於素模型的建立可由下列三途徑
 - (a) 直接由實體建立模型
 - (b) 利用所需之節點及元素構成有限元素模型
 - (c) 經由其他電腦繪圖軟體匯入，如 Pro/E、Parasolid 等
5. 元素網格化：繪置好的幾何圖形網格化最主要在於定義物件邊界元素的大小與數目，且網格的大小與否將牽扯到電腦運算分析的時間。一般而言 ANSYS® 在網格化處理中提供自由網格 (Free mesh) 及對應網格 (Mapped mesh) 如下頁圖 30 二種供使用，其比較如表 3 所示。而由於對應網格較多限制如表 4，故實際應用上均以自由網格居多。
6. 定義邊界條件：在計算流體力學的領域當中最重要兩個自由度為速度及壓力，在處理過程中可以施加流體進出口的壓力或者也可設進口為速度而出口為壓力，端看工程問題的分析為何。



Area Free Mesh

Area Mapped Mesh



Volume Free Mesh

Volume Mapped Mesh

圖 30 自由網格與對應網格

Ref.: 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年

表 3 Free mesh 與 Mapped mesh 之比較

| Free mesh | Mapped mesh |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 面積的網格使用三邊形元素或三邊形與四邊形元素聯用。 2. 體積的網格只能使用四面體元素。 3. 可快速的產生有限元素模型，可處理複雜的實體模型。 4. 元素及節點的數量都會很多。 5. 體積的網格，只能使用 higher-order (10 個節點) 的元素，因此自由度的總數會變大，計算時間會拉長。 6. 可使用一局部網格加密的工具，如 Refine。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 面積的網格使用四邊形元素。 2. 體積的網格使用的是六面體元素。 3. 需要的元素與節點較少。 4. 允許使用 lower-order 的元素，所以自由度的總數較少。 5. 實體的形狀必須符合某些限制，且分割的設定也有限定。 6. 當時體模型較複雜時，需分割模型，有時會很難處理。 7. 無法使用 Refine 的功能於體積的網格。 |

Ref.: 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年

表 4 Mapped mesh 之限制條件

| 面積 | 體積 |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 必須是由 3 或 4 條線段所組成的面積。 2. 三邊形的分割必須是偶數。 3. 四邊形，除了一些特殊的分割方式外，基本上對邊的元素分割數量必須相同。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 必須是由 4, 5, 6 個面積所組成的體積，組成體積的面積也必須可做 Mapped mesh。 2. 四面體的分割必須是偶數。 3. 六面體除了一些特殊的分割方式外，對邊的分割必須相同。 |

Ref.: 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年

4.3-2 解題程式

經由前置處理後的有限元素模型在施加邊界條件後可組合成一大型系統矩陣，而 ANSYS® 本身提供數種數值方法如下二頁之表 5 供選擇，除了 Frontal 及 Sparse 的方法為直接消去法 (direct elimination) 外，其餘的 PCG (Pre-conditioned Conjugate Gradient)、ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 及 JCG (Jacobi Conjugate Gradient) 均為疊代法 (iterative)。此外，針對不同的工程分析在選用不同的解題程式上亦會在收斂時間上產生快慢。

4.3-3 後處理

經由解題程式的處理後所得到的物理量 (如速度、壓力) 可由圖形上來表示之，也可將其一一列出，若針對不同的需要亦可將資料做一數學處理後再輸出。



4.3-4 常見錯誤及解決方法

在 ANSYS® 中不正確的參數輸入或過於龐大的計算經常會造成系統矩陣發散，而以下針對易發生錯誤之來源歸納為四種情形：

1. 物理特性及尺寸上的輸入錯誤

在 ANSYS® 進行任何分析前須對流體的流變參數及幾何尺寸做一詳細校對，因為 ANSYS® 在處理過程中的任何物理量均無表示出單位，使用者在分析上必須採取一致的度量單位，基本上將其大約分為公制及英制二種單位，如下三頁之表 6 所示。

2. 選擇不適當的元素類型

在 FLOTRAN 中僅兩種元素供選擇，大致上以分析流域的維度做基準即可，倘若工程問題分析為其他領域則須針對問題所需慎選之。

3. 網格化後粗劣的元素外型 and 大小

一般而言 ANSYS® 在網格化中提供對應網格及自由網格二種選擇，而元素切割的大小及數目將主宰整個工程分析的精確性，越緻密的元素則越接近原幾何形狀，計算後的準確性也愈佳，但過元素切割過多反而會造成電腦 CPU 處理負荷過重因而耗費許多時間，故在分析上需視情況而定。

4. 施加錯誤的邊界條件和負載

模組化的過程當中此步驟為重要的部分，例如在處理計算流體力學的問題時，針對造成流動的驅動力 (driving force) 可給予前後壓力梯度 (pressure gradient)，但若給予進口端速度，出口端為壓力者的話則並不一定會得到分析結果，原因由於 ANSYS® 本身可能會因物理現象造成衝突而導致系統矩陣發散。

表 5 各 Solver 之比較

| Solver | 適用範圍 | 模型大小(DOFs) | 記憶體需求 | 硬碟需求 |
|---------|---|------------|-------|------|
| Frontal | 非線性分析需要較高的穩定性，準確性或是因記憶體不足 | <50k | 低 | 高 |
| Sparse | 非線性分析時與 Frontal 有相同的穩定性及準確性，但是解題的速度快很多，如果用 Iterative Solver 求解很難收斂時，可以考慮使用 Sparse Solver，尤其是因為網格做的太差的時候。  | 10k-500k | 中等 | 高 |
| PCG | 需要快速的解決問題，尤其是當模型很大且大都是實體元素時 (solid element) 時。 | 50k-1000k | 高 | 低 |
| ICCG | 需要快速的解決問題，較適用於多重物理現象的問題，或當其他的 Iterative Solver 都不能收斂時。 | 50k-100k | 高 | 低 |
| JCG | 需要快速的解決問題，適用單一種物理現象的問題。 | 50k-1000k | 中等 | 低 |

Ref.: 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年

表 6 ANSYS 單位一覽表

| ANSYS 之表示 | MKS | CGS | BFT | BIN |
|---------------------|---------------|------------|-------------------|---------------------|
| 度量制 物理量 | M-K-S (SI) | C-G-S | English (feet) | English (inches) |
| Mass | kg | g | slug | lb |
| Length | m | cm | ft | in |
| Velocity | m/s | cm/s | ft/s | in/s |
| Pressure | Pa | $g/cm-s^2$ | lb_f/ft^2 | psi |
| Density | kg/m^3 | g/cm^3 | $slug/ft^3$ | lb_f-s^2/in^4 |
| Viscosity | $kg/m-s$ | $g/cm-s$ | $slug/ft-s$ | lb_f-s/in^2 |
| Conductivity | $W/m-K$ | $W/cm-K$ | $Btu/ft-s-R$ | $Btu/in-s-R$ |
| Specific heat | $J/kg-K$ | $J/g-K$ | $Btu/slug-R$ | $Btu-in/lb_f-s^2-R$ |
| Heat flux | W/m^2 | W/cm^2 | $Btu/s-ft^2$ | $Btu/s-in^2$ |
| Heat source | W/m^3 | W/cm^3 | $Btu/s-ft^3$ | $Btu/s-in^3$ |
| Film coefficient | W/m^2-K | W/cm^2-K | Btu/ft^2-s-R | Btu/in^2-s-R |

Ref. : ANSYS 電腦軟體

4.4 分配式混合元件於 ANSYS®之模擬

本論文針對不同幾何構形的分配式混合元件利用 ANSYS®軟體在相同的操作條件下比較其界面面積比做為混合之標的，以便日後設計出最佳混合效果之分配式混合元件。

4.4-1 模擬之源起

本論文最初構想之來源依據為 Erwin[34]發表假擬三維流動模式對不同分配式混合元件之觀念，但 Erwin 當時之模擬可能礙於電腦軟體科技並不如現在進步，且在做高分子加工模擬時三維的流動分析往往就比二維的分析困難許多，故藉以此方法來觀察高分子流體在混合元件內的流動情形，而如今本論文則藉由 ANSYS®軟體直接觀察模擬之三維結果。通常在流域中不同幾何形狀的障礙物均可對高分子塑料產生分配效果，然而過於複雜的幾何形狀則會造成使用者在建立有限元素模型時困擾，而且三維模擬下的流域在觀察上也不甚方便，故本論文以改變不同的插門幾何形狀（Blockhead、Trapezoidal、Square pineapple）以及改變插門的排列方式（橫截面安裝數量、軸向間距、在溝道中的排列方位等）加以模擬分析之。此外，利用 Erwin 先前所提到的觀念針對流體粒子做流動追蹤（particle flow trace）可得到完整之流線，最後引入界面面積比與能量消耗的觀念相互比較之，進而尋找出最佳幾何設計。

此外，本論文捨棄以往傳統 Fortran 程式語言而引用 ANSYS®有限元素分析軟體如以下之說明：

1. 利用 ANSYS®軟體進行有限元素分析在幾何形狀切割為元素時系統均可自動執行，而在 Fortran 程式語言中此點為最困難之處，原因

為過於複雜之幾何形狀在利用有限元素法時需將此模型切割數目較多才能近似實體，而如此一來在程式的編點上會造成龐大的負荷，進而連同整個系統矩陣也會增大許多，在此情況下導致矩陣散的機率也相對提高，故切割有限元素及編點上為 Fortran 程式之速率決定步驟。相反地，ANSYS[®]軟體提供一個較為方便的操作介面，在建立有限元素模型後可以依照觀察所需進行網格化，甚至是在一些特殊的區域（如流體的入口區）還可進行網格改良（refine），在使用上的確比傳統的 Fortran 程式語言方便及準確許多。

2. 高分子流體在分配式混合元件內的分析不論由 Fortran 程式語言或者 ANSYS[®]軟體，在經由數值計算處理後所得之值均為當初切割元素每一節點的物理量，如三個方向的速度 V_x 、 V_y 、 V_z 及壓力等。如此之數值分析對於觀察上也僅能以圖表來表示且較不易了解高分子流體在混合元件的流動情形，然而若使用 ANSYS[®]軟體做分析探討，在後處理部份便提供了一連串的圖形介面方便使用者使用及觀察，其中更以流體的流線最為重要，而此部分也是 Fortran 程式語言所望塵莫及之處。此外，ANSYS[®]亦可對模擬結果之數值直接做數學運算再繪製成圖，如此可省去使用者需再次寫另一計算程式之麻煩。

4.4-2 模擬之流程


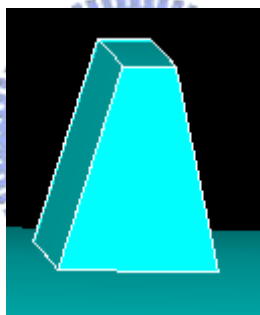
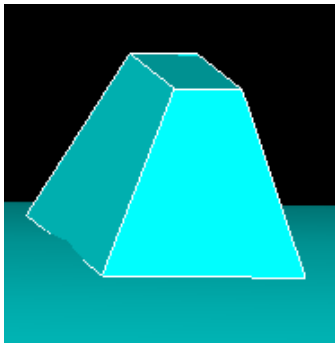
因為本論文探討主旨為高分子流體在混合元件內的流動情形，在實體模型的建立方面所描述的即是流體的流域而不是混合元件的幾何形狀，如此在建立模型時所有的插門均不包含在流域內而需移除，此時 ANSYS® 在前處理步驟中的 Modeling 部分提供一布林運算 (Booleans) 的功能，即便是使用者可先建立模型的主體外觀，再利用內建體積或面積相加 (Add)、相減 (Subtract)、黏合 (Glue) … 等功能完成細部的修飾。但假使往後須對 Dulmage, Saxton 等較為複雜的幾何形狀做分析探討時，理論上由其他 CAD 軟體繪製後再匯入 (import) ANSYS® 中會來的方便許多。

另外，混合元件的幾何尺寸及設計是以在溝道內增置不同幾何構形的插門為原則，且依據不同的橫截面安裝數量和不同的插門軸向間距在溝道中的排列方位等做變化，如下頁表 7，其規格尺寸如下二頁之表 8，幾何形狀如表 8 頁後之圖 31 至 43 共十四種組合。

表 7 分配式混合元件變化之組合

| 比較類別 | | 種類 | | | |
|---------------------|------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 一 | 二 | 三 | 四 |
| 插門構型 | 形 狀 | Blockhead | Trapezoidal | Square pineapple | No pin |
| | 排列方式 | 6×3 | 6×3 | 6×3 | --- |
| | 軸向間距 | 1/4 D | 1/4 D | 1/4 D | --- |
| 插門橫截面 之數量 | 形 狀 | Square pineapple | Square pineapple | Square pineapple | Square pineapple |
| | 排列方式 | 3×3 | 6×3 | 9×3 | 1 2×3 |
| | 軸向間距 | 1/4 D | 1/4 D | 1/4 D | 1/4 D |
| 插門之軸向 間距 | 形 狀 | Square pineapple | Square pineapple | Square pineapple | Square pineapple |
| | 排列方式 | 6×3 | 6×3 | 6×3 | 6×3 |
| | 軸向間距 | 1/3 D | 1/4 D | 1/6 D | 1/8 D |
| 插門於溝道 中之排列方 位 | 形 狀 | Square pineapple | Square pineapple | Square pineapple | |
| | 排列方位 | Vertical | horizontal | 6×3 | |
| | 軸向間距 | | | 1/4D | |

表 8 插門尺寸設計大小

| | |
|--|----------------------------|
| Blockhead | |
|  | |
| 邊長：0.3545 cm | 高度：0.45 cm |
| Trapezoidal | |
|  | |
| 上邊長：0.1182 cm 底邊長：0.3545 cm | 寬度：0.2826 cm 高度：0.45 cm |
| Square pineapple | |
|  | |
| 上邊長：0.1182 cm 下邊長：0.5645 cm | 寬度：0.3307 cm 高度：0.45 cm |

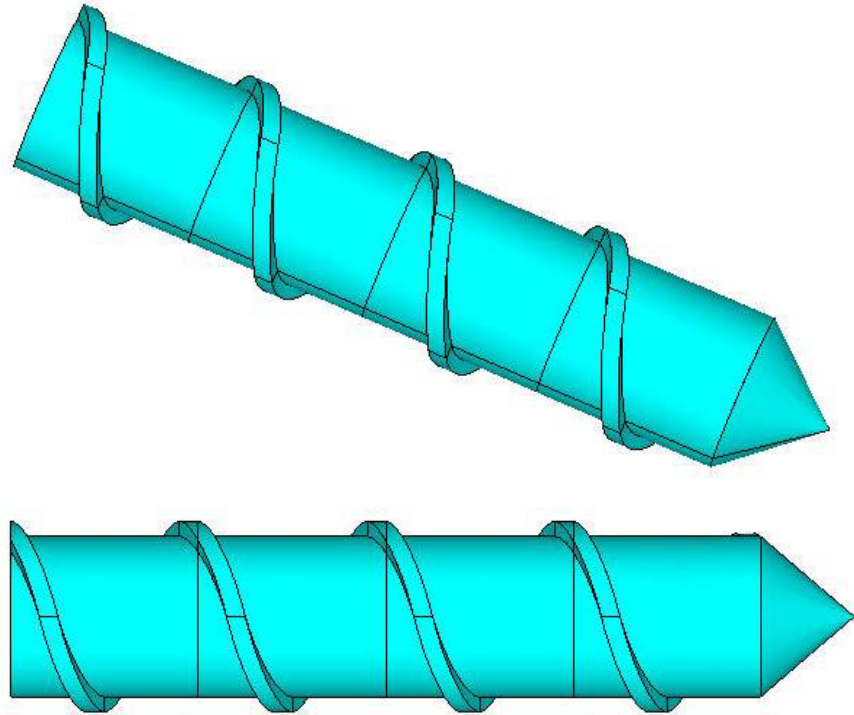


圖 31 未安裝混合元素螺桿之示意圖

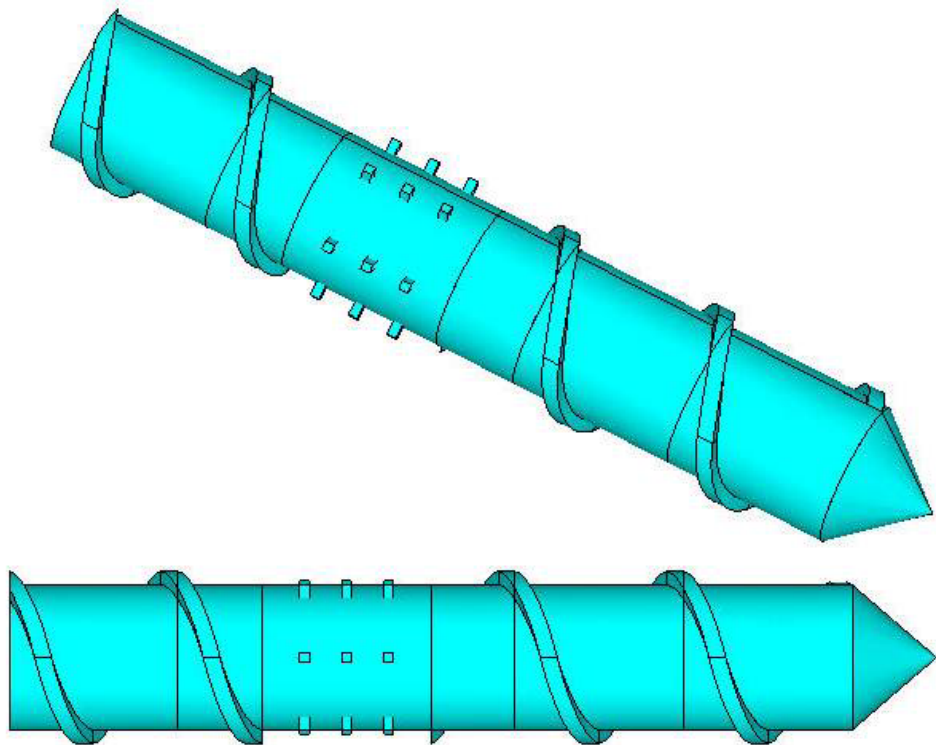


圖 32 安裝 Blockhead 混合元素螺桿示意圖

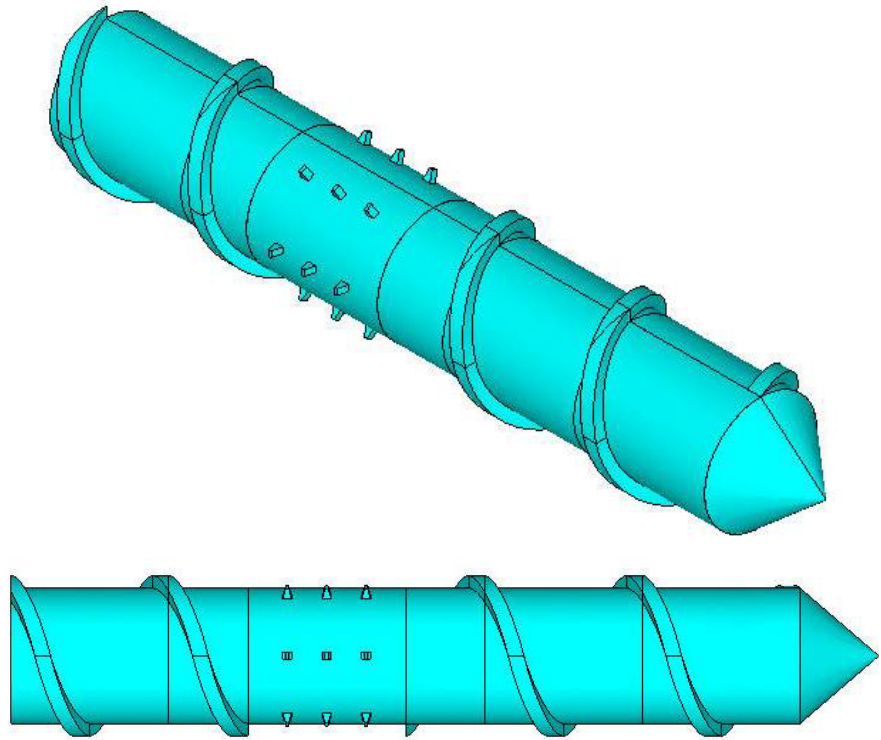


圖 33 安裝 Trapezoidal 混合元件螺桿示意圖

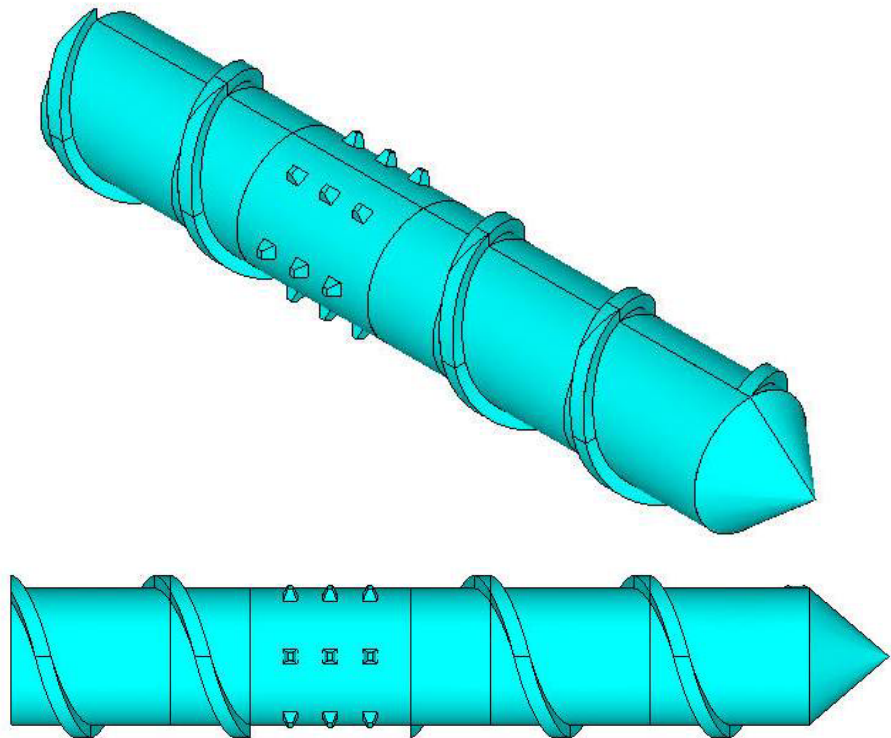


圖 34 安裝 Square Pineapple 混合元件螺桿示意圖

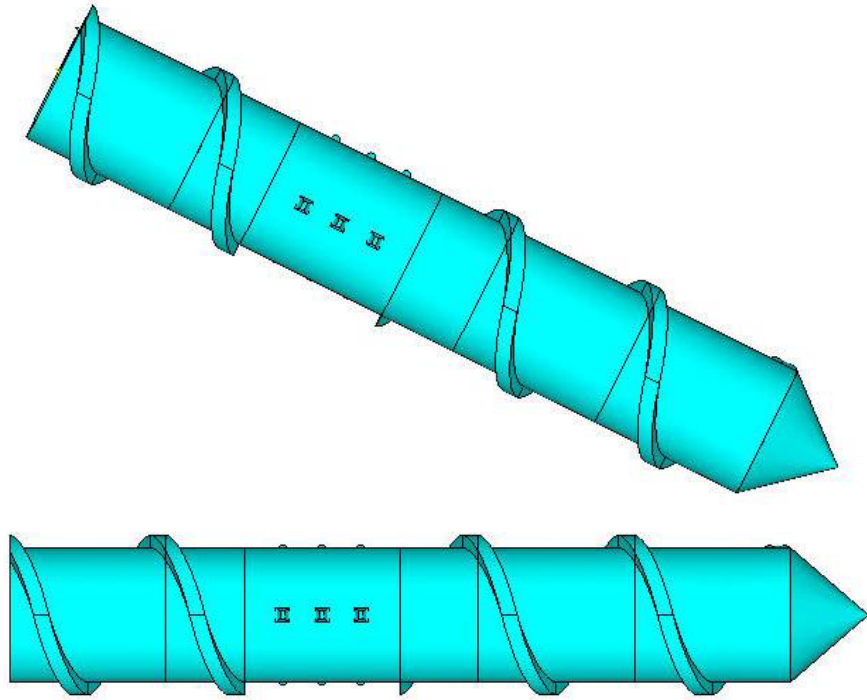


圖 35 橫截面安裝三支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖

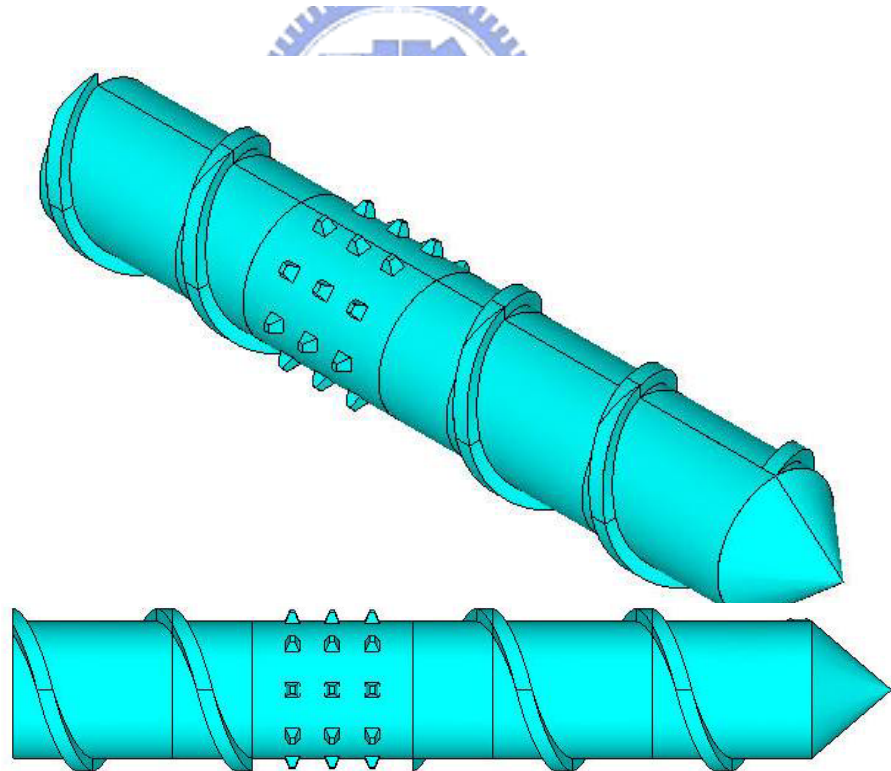


圖 36 橫截面安裝九支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖

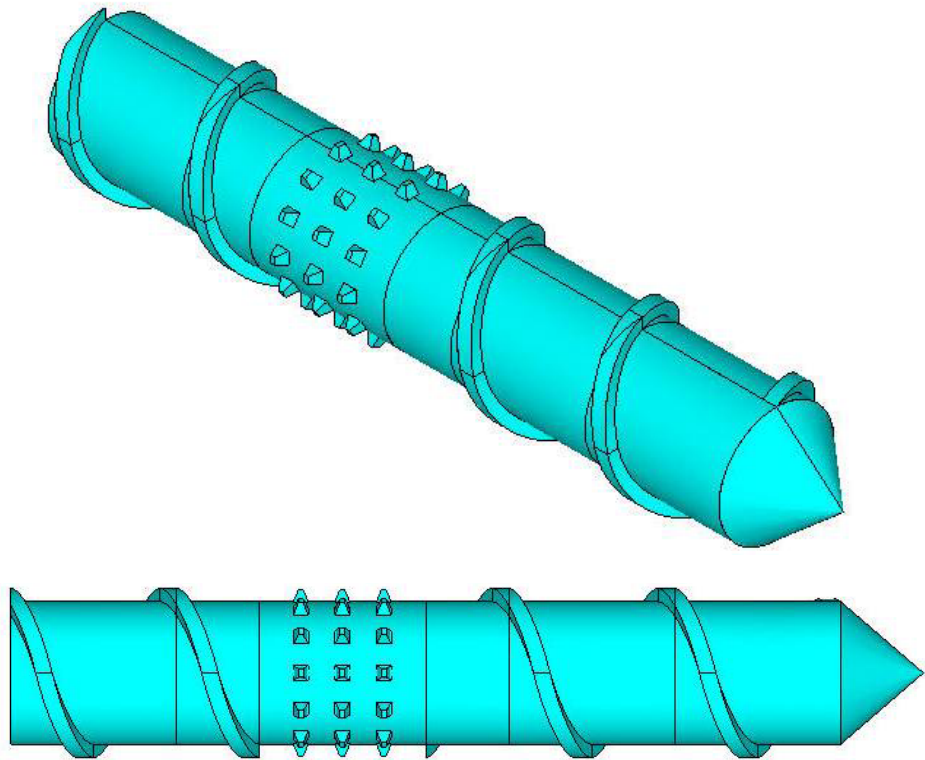


圖 37 橫截面安裝十二支 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖

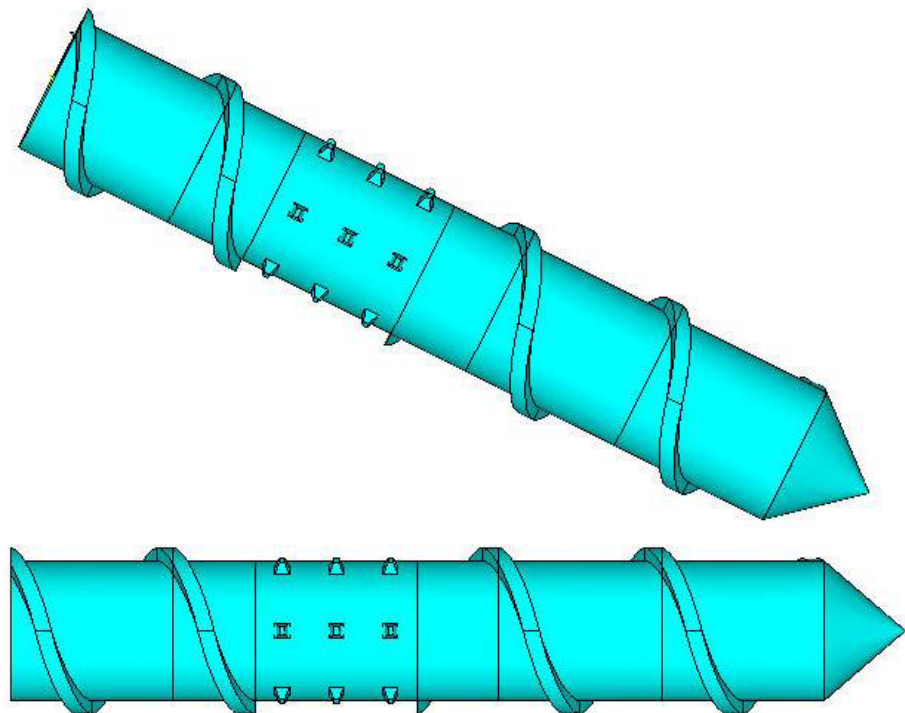


圖 38 安裝軸向間距為 $1/3D$ 的 Square Pineapple 螺桿示意圖

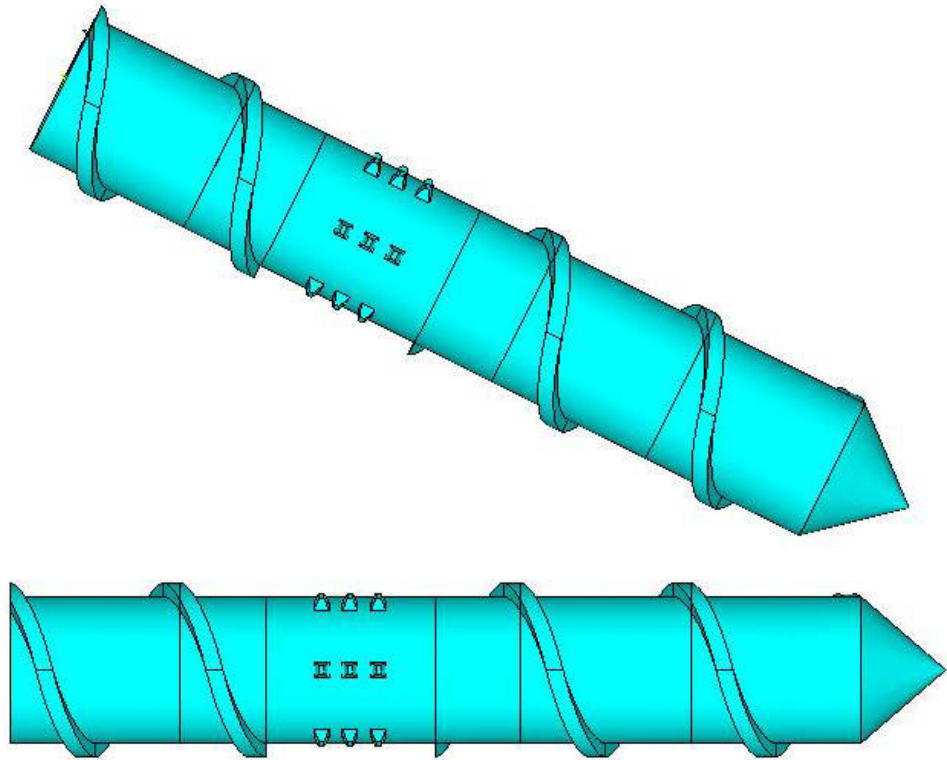


圖 39 安裝軸向間距為 $1/6D$ 的 Square Pineapple 螺桿示意圖

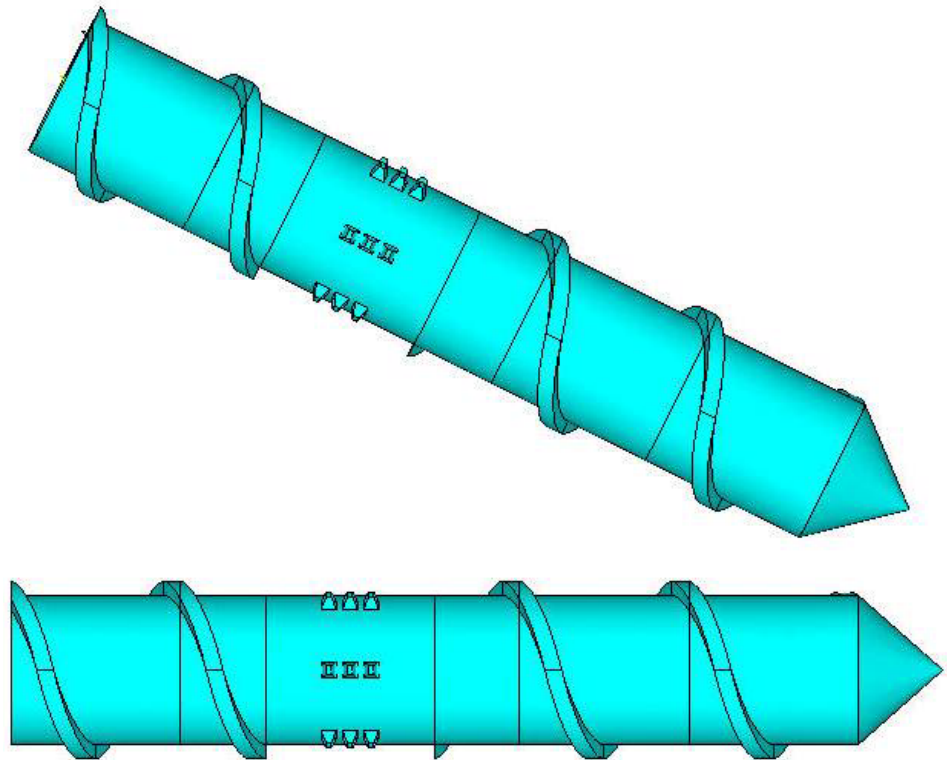


圖 40 安裝軸向間距為 $1/8D$ 的 Square Pineapple 螺桿示意圖

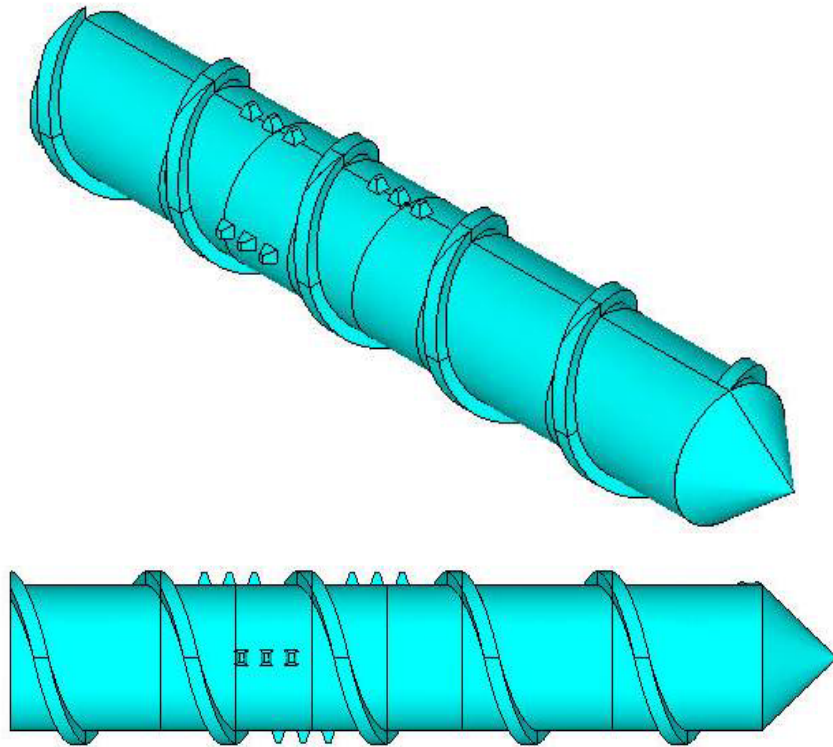


圖 41 安裝繞溝道排列 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖

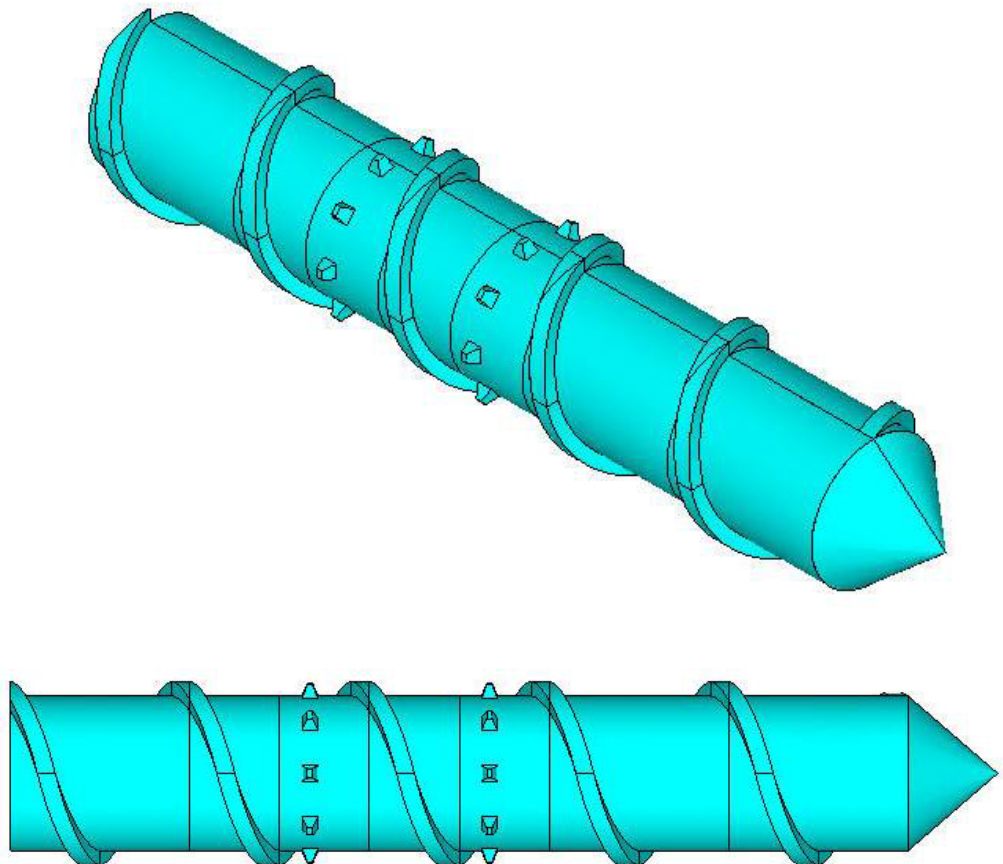


圖 42 安裝於溝道中垂直軸向 Square Pineapple 插門之螺桿示意圖

由於分配式混合元件均裝置在螺桿尾端的部份，參照先前本實驗室學長姊的論文大略訂定出整個分配式混合元件的尺寸及螺桿的幾何參數，如表 9 所示，整個混合區段的軸向長度為 6.3cm，而沿下溝道方向展開後總長度為 61.8cm。另外假設高分子塑料通過混合區段時仍然維持恆溫，與套筒設定之溫度 200°C 相同。在模擬物料方面，本論文採用 LDPE 作為討論的高分子材料，黏度模式則符合等溫截形冪次定律，其詳細之物理性質和流變參數如下頁表 10[37]所示。

表 9 螺桿幾何參數及操作條件

| | |
|----------------------------------|-------|
| 套筒內徑， D_S (cm) | 6.3 |
| 螺距， L_S (cm) | 6.3 |
| 溝深， H (cm) | 0.45 |
| 溝寬， W (cm) | 5.67 |
| 螺旋角， θ_b ($^\circ$) | 17.66 |
| 套筒溫度 T_b ，($^\circ\text{C}$) | 200 |
| 混合元件長度 l ，(cm) | 6.3 |
| 下溝道長度 z ，(cm) | 61.8 |
| 螺桿轉速，(rpm) | 80 |

表 10 LDPE 高分子融熔態之物理性質與流變參數表

| (A) 物理性質 | |
|---|--------|
| 固體顆粒密度， ρ_s (Kg/m ³) | 915 |
| 熔體密度， ρ_m (Kg/m ³) | 770 |
| 固體顆粒之熱傳係數， K_s (W/m-K) | 0.335 |
| 熔體之熱傳係數， K_m (W/m-K) | 0.182 |
| 固體顆粒之比熱， C_s (J/Kg-K) | 2272 |
| 熔點， T_m (°C) | 110 |
| 密度壓縮係數， c (1/psi) | 0.0015 |
| (B) 流變參數 | |
| $K_0 \times 10^{-8}$ (Pa · s ⁿ) | 1.96 |
| $a \times 10^2$ (1/K) | 2.33 |
| $\dot{\gamma}_0$ (1/s) | 1.00 |
| n (dimensionless) | 0.5 |

truncated power law model 表示如下：

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 e^{-a(T-T_0)} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} & (\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0) \\ \eta_0 e^{-a(T-T_0)} & (\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0) \end{cases}$$

$$\eta_0 = m_0 \dot{\gamma}_0^{n-1}$$

Ref : C. D. Han, K. Y. Lee and N. C. Wheeler, Polym. Eng. Sci.,
Vol. 31, No. 11, p. 836, 1991

有鑒於混合元件溝深及下溝道長度比例之關係，為了方便觀察起見，本論文所用之單位一律採用 CGS 制，詳細內容可參照表 6，如此因所用單位與 ANSYS®內定值（SI 制）不一致故須稍做修改，而最重要的部份為整個流域的參考條件（reference conditions of flow environment），例如參考壓力項（reference pressure）方面單位的修正則會影響到驅動力的大小，假使所分析的問題有牽涉到熱傳，則須額外調整溫度調校（temperature offset），此點為分析時需格外注意之處。

通常在建立有限元素模型後下一步驟是進行幾何形狀的分割，先前提到在網格化當中可採自由網格及對應網格，由於目前所用之幾何形狀均為不規則狀，若要強制使用對應網格則須針對每一邊做分割達到 ANSYS®的限制要求，所花費的時間自然不在話下。然而在節省時間成本下，本論文在做網格化處理時均採用自由網格的方式。而模型切割為元素後大部份均以三角錐體呈現，因此在曲線上的表現如圓形較不盡理想，然而對於此問題可從另一方面改善：當切割的元素愈多時，每一個元素的邊就愈能夠近似模型中較不平滑的區域，雖然如此可以使網格切割較為接近真實模型，但計算的時間也會相對增大，在分析時仍依所需而定。本論文之模型分割之節點與元素數目如下頁表 11。

表 11 混合元件模型分割的節點與元素數目表

| 不同插門構形 | | |
|------------------|-------|---------|
| | Node | Element |
| 未安裝混合元件 | 69318 | 313771 |
| Blockhead | 85742 | 394341 |
| Trapezoidal | 78378 | 357228 |
| Square Pineapple | 85845 | 393834 |
| 不同橫截面安裝數量 | | |
| 3 支 | 77793 | 353086 |
| 9 支 | 85939 | 392701 |
| 12 支 | 89622 | 410466 |
| 不同軸向間距 | | |
| 1/3 D | 87387 | 401761 |
| 1/6 D | 84702 | 388053 |
| 1/8 D | 83293 | 380302 |
| 溝道中不同排列方式 | | |
| Horizontal | 79457 | 360853 |
| Vertical | 76567 | 345575 |

經由上述處理後接下來即便是加諸於各邊界的邊界條件，依據先前學長姊論文研究發現，高分子塑料在螺桿溝道內的流動是呈螺旋狀的分佈，因此在進入混合元件內每一點所呈現的速度分佈也不盡相同，然而若以此方式處理在輸入邊界條件時亦會造成困擾，故參考一合理數值定為入口速度，而出口背壓數值則依照學長姊論文從中取一，另外在套筒壁上的速度則可依照螺桿的轉速經由計算得知。

在解題程式的部份沿用 ANSYS®之內定選項 Sparse，一般而言只要邊界條件設定無誤在此部份通常均可達到一收斂值，若發生系統矩陣發散而自動暫停執行的問題時，須重新確定施加之邊界是否有誤再重新執行或參照前述 4.3-4 進行修正。

經由 FLOTRAN 計算後得到的分析結果可以很輕易地藉由圖形表示之，在此首先針對流體粒子做追蹤找出所需流線，之後經由參數轉換將此流線的基本參數做數學處理，根據 Amella[38] 所提之觀念，可將先前推導所得(17)式等號兩邊對時間做微分，將每一小塊界面面積化為剪切率 ($\dot{\gamma}$) 的函數，隨即再令等號兩邊同時積分得最終之界面面積比，其數學式表示如下：

$$\frac{dA}{A_0 dt} = \frac{1}{2} \dot{\gamma} \quad (75)$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} \int \dot{\gamma} dt \quad (76)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\dot{\gamma} : \dot{\gamma})}$$

$$= \sqrt{2\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2} \quad (77)$$

由於高分子流體在分配式混合元件內為複雜的三維流動，故在做分析時亦將延伸流 (elongational flow) 帶來之影響包含在內，所以仍保有前三項。

第五章 模擬結果與討論

本篇論文將以 LDPE 為模擬用高分子基材，進行在溝道內增置不同幾何構形插門，並改變其軸向排列間距以及於溝道中不同之排列方位進行共 13 種不同分配式混合元件的模擬。依據上述之條件，分成四組對應及比較，首先於第一組先比較加入不同形狀之分配式混合元件的影響，第二組則比較改變橫截面混合元件數量的影響，第三組比較改變插門軸向間距的影響，第四組比較改變混合元件在溝道中之排列方位，並了解各參數的改變對流動情形之影響，並引入界面面積增加率的觀念做為混鍊之指標。首先在插門幾何形狀上吾人以文獻上所列出的 Blockhead、Trapezoidal、Square pineapple 三種插門，並與未安裝混合元件之螺桿相互比較之，找出混煉效果最佳者作為後續模擬的對象。在橫截面安裝數量的安排上，選擇三個、六個、九個、十二個共四種排列方式，對於插門間的軸向間距則以 $1/3D$ 、 $1/4D$ 、 $1/6D$ 、 $1/8D$ 此四種類。在模擬過程當中，本論文主要針對改變不同混合元件的幾何參數為探討，故在每種混合元件如套筒轉速、進出口壓力等邊界條件輸入上均保持一致，此外螺桿模型設計成與實物構形相仿，螺桿總長度為 $25.2\text{cm}(4D)$ ，混合元件長度為 $6.3\text{cm}(1D)$ ，裝置於模型中間位置。流道總長度為 61.8cm ，流道之溝深為 0.45cm 。吾人在做流體粒子追蹤時，以均勻分佈的方式選擇 20 個追蹤點，獲得 20 條完整流線並收集此流線的數據，經過分析處理而得到界面面積比及能量消耗量之數值。為了方便觀察起見以及參數輸入的方便性，在 ANSYS[®] 模擬過程中所有單位均採 C.G.S 制。然而 ANSYS[®] 在模擬結果圖中所有物理量皆以長條形顏色區分其大小，就流動形分佈而言其討論之物理量為速度，單位為 cm/s 。

5.1 安裝不同構形插門之混合元件的流動分析比較

本節討論不同構形的插門以及未安裝混合元件對流體在溝道內流動的影響，在混合元件選擇的構形有 Blockhead、Trapezoidal 與 Square Pineapple，模型幾何示意圖，如圖 31、32、33、34。

1. 未安裝混合元件：首先我們先針對一般單螺桿在未增置任何混合元件下討論其流動情形，並以此為一基準，了解在增設混合元件後對混合效率的改變。此部分的流體流線圖如圖 43。

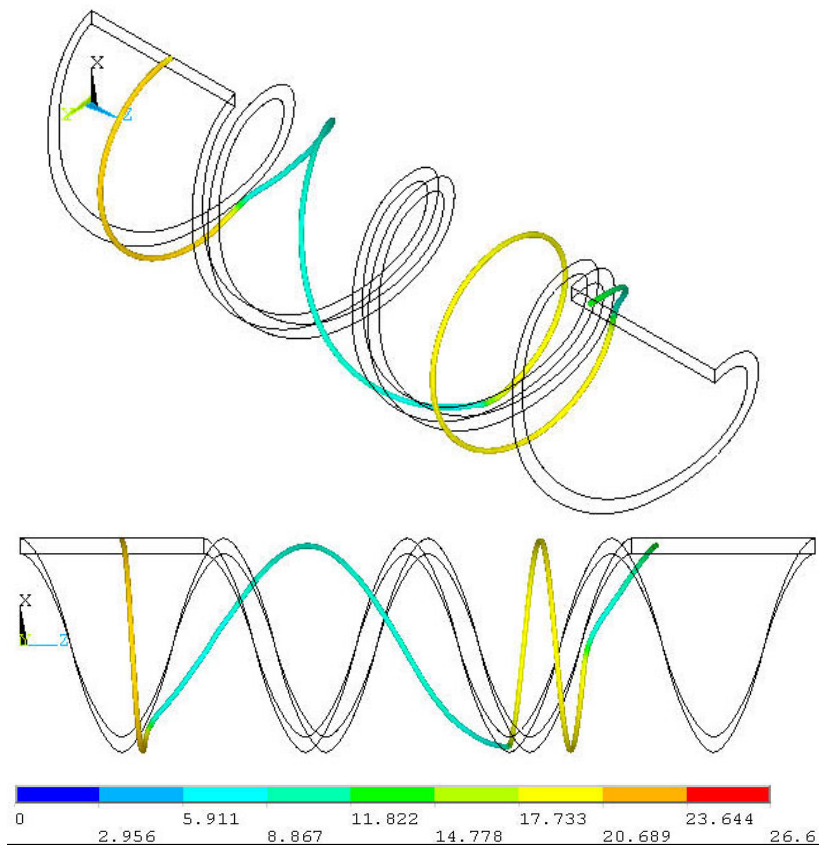


圖 43 未安裝混合元件之溝道流線圖

此流線在流道中出現如此的速度變化，可以由高分子流體在螺桿內流動所受到的驅動力影響來解釋。此驅動力有兩種，一種為在溝道內的高分子相互擠壓所產生的壓力流 (pressure flow)，另一種則是套筒轉動而對高分子流體所造成的拖曳流 (drag flow)。拖曳流會增加高分子流體往前推進的動力，但又因為背壓所造成的壓

力流卻會迫使熔融態高分子產生迴流現象，而造成了高分子在流道內是呈現一螺旋狀的流動。

2. Blockhead 插門：由圖 44 可以看到高分子在進入混合元件區域後，在 Z 方向約 1.5D 及 2D 處，由於受到 Blockhead 混合元件的阻礙，而造成高分子迴流，速度也因此有了變化，此一加速減速的動作即可增加高分子的混合效率。

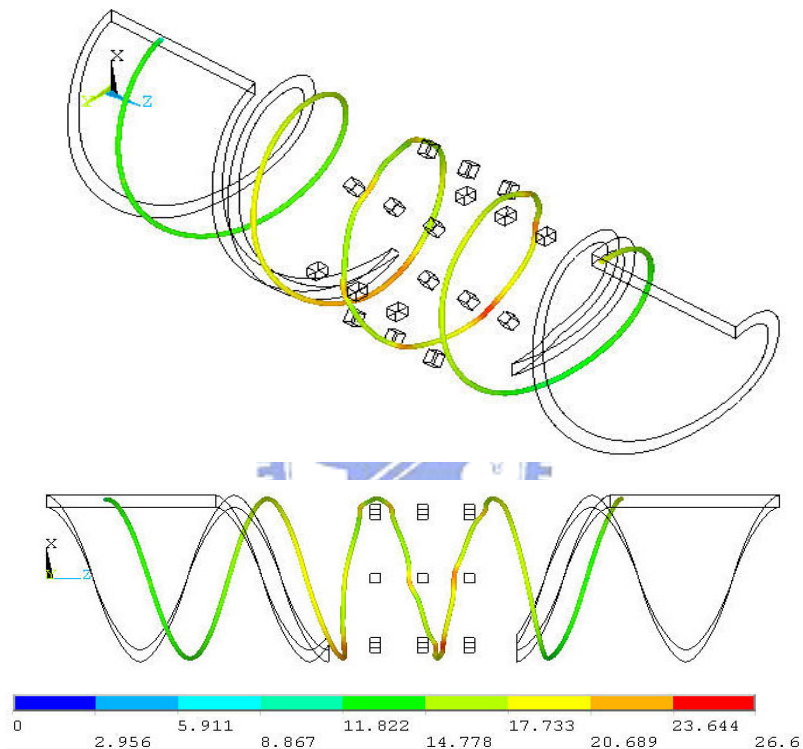


圖 44 安裝 Blockhead 混合元件之溝道流線圖

3. Trapezoidal 插門：由下頁圖 45 中，我們可觀察流線流動的情形，其狀況與 Blockhead 插門混合元件相似，在 Z 方向 1.5D 及 2.5D 處，也就是混合元件前後交界處都有迴流的現象，在靠近梯板及插門處，流線也都會產生轉折，速度也跟著變化。

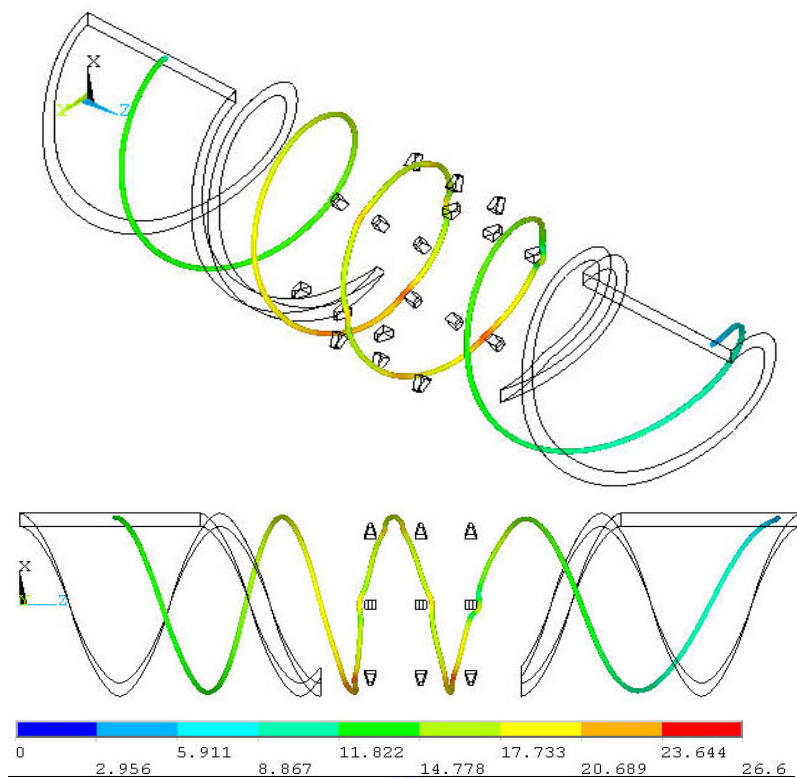


圖 45 安裝 Trapezoidal 混合元件之溝道流線圖

4. Square Pineapple 插門：由流線在溝道內的流動情形，如下頁圖 46，在混合元件前後交界處，皆出現迴流現象，流動情形大致與前兩者相似。

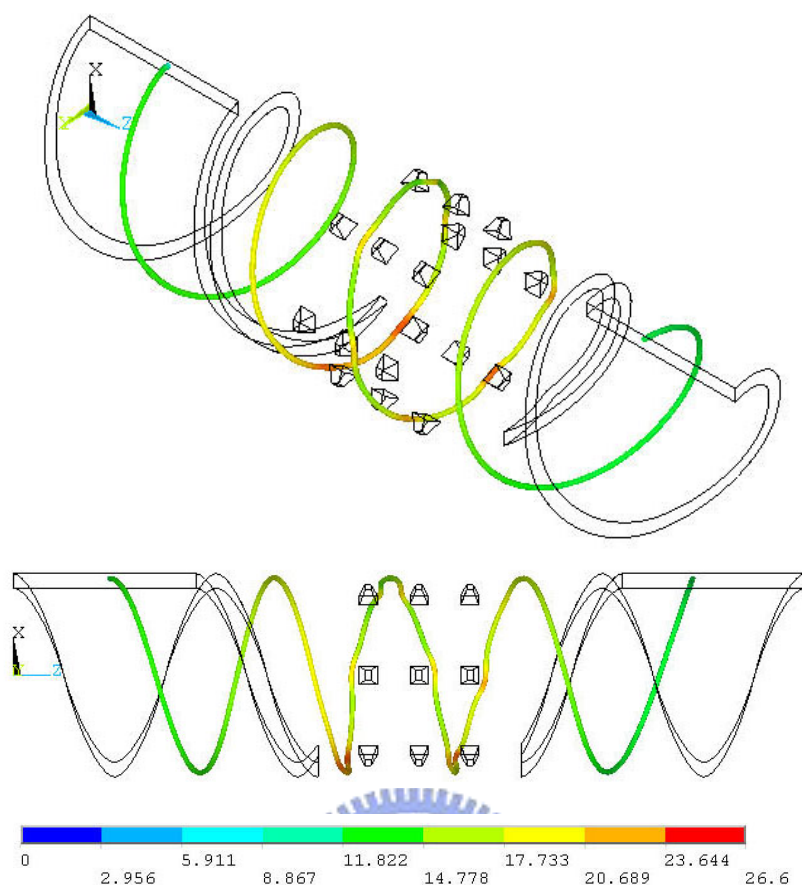


圖 46 安裝 Square Pineapple 混合元件之溝道流線圖

比較這三種不同構形的插門優劣好壞，以其流線流動情形來看，三者情況大同小異。那麼以下頁圖 47 界面面積比較圖、下頁圖 48 能量消耗比較圖以及下頁圖 49 流動時間比較的結果來看，Square Pineapple 插門最佳，Trapezoidal 插門次之，Blockhead 插門最差。這是由於其個別的構形，所產生出的差異，可利用圖 44、圖 45、圖 46 來討論。這是由於不同的插門形狀，在流場中會產生不同大小的死角或停滯區，由三者的插門構形可以了解，雖然無法正確地界定停滯區的範圍，但停滯區通常在速度慢的區域出現，以 Square Pineapple 插門來說，在三者中較不阻礙流體的流線，而 Trapezoidal 次之，Blockhead 最差，符合界面面積比的比較結果。而由理論得知，能量消耗量與界面面積比成正比關係，因此插門所消耗的能量也是三者之中最多者。在插門構形最佳化設計上，以混合效率為最優先考量，因此吾人挑選界面面積比最大的 Square Pineapple 插門，

作為後續模擬的對象。

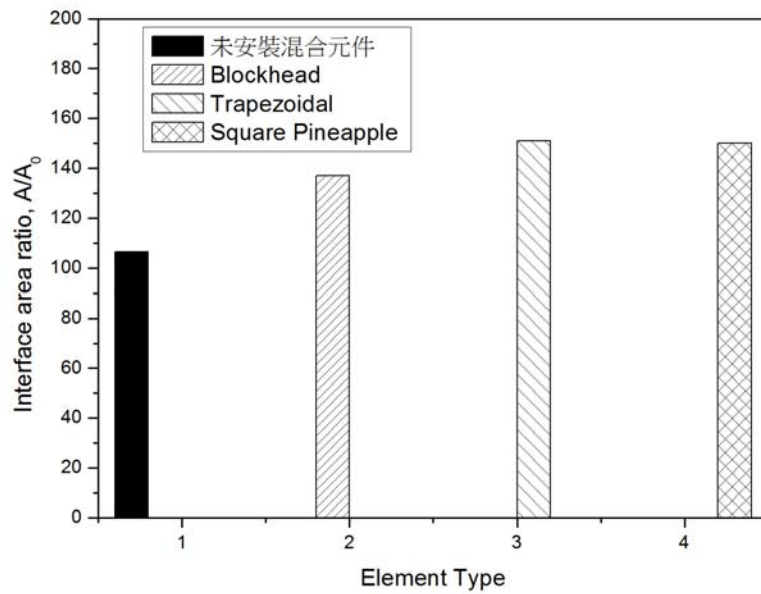


圖 47 不同混合元件之界面面積比比較圖

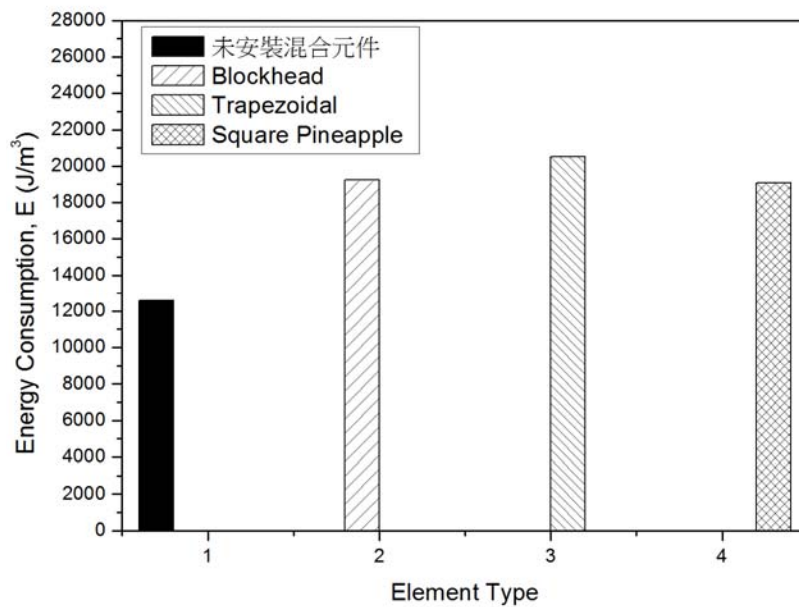


圖 48 不同混合元件下之能量消耗量比較圖

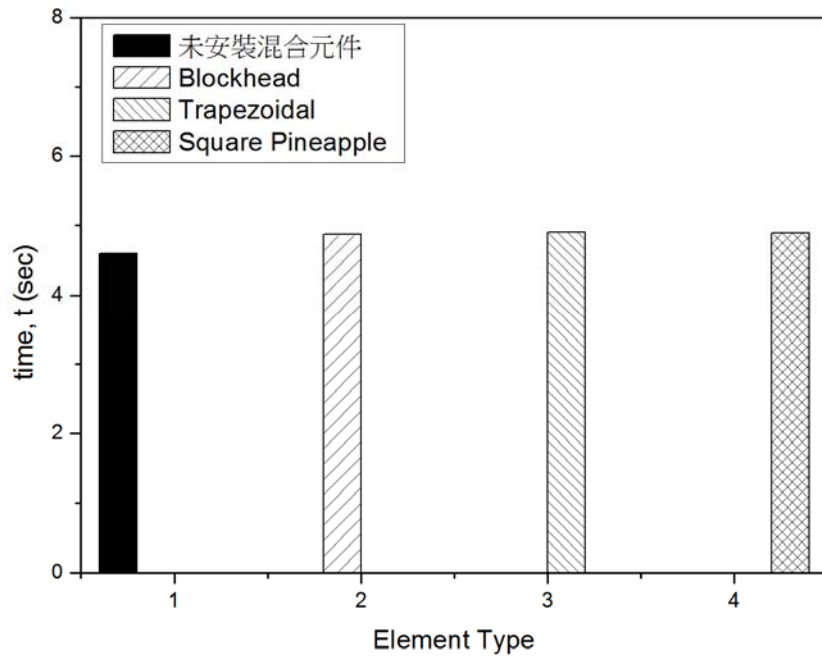


圖 49 不同混合元件下流動時間比較圖

5.2 安裝不同橫截面插門數量之混合元件的流動分析比較

本節討論橫截面安裝不同數量的插門對流體在溝道內流動的影響，在數量的選擇上，有三支、九支及十二支，模型幾何示意圖，如圖 35、36、37，再加上 5.1 節橫截面安裝六支 Square Pineapple 插門的部分，共有四種形式來探討。

1. 橫截面安裝三支插門：由圖 50 來看，流線在流經混合元件時，受到的擾動情形較上述比較插門構形的流線減弱了許多，也因插門較少，流動阻礙降低，但也由於流線被破壞的程度較低，也沒有什麼迴流效果。

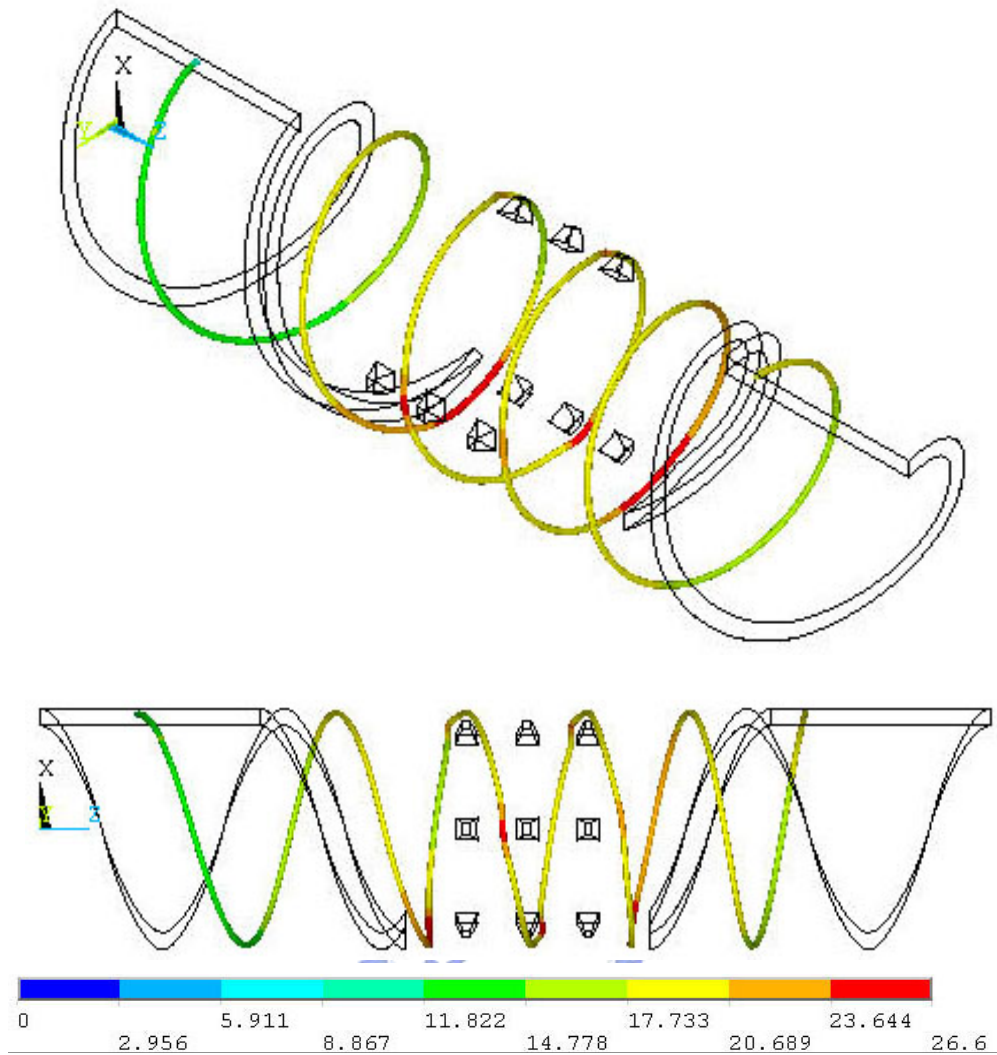


圖 50 橫截面三支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖

2. 橫截面安裝六支插門：此部分已於 5.2 節中討論，因此本節不再贅述。
3. 橫截面安裝九支插門：在圖 51 中發現流線受到擾動的情形增加了許多，流線在經過插門之間的空間時，也有加速的效果，但因為插門彼此之間的空隙變小，當流體通過時遇到插門阻擋機會也變高，需要較大之驅動力迫使其繼續前進，所以此時能量消耗的速度也提高了。

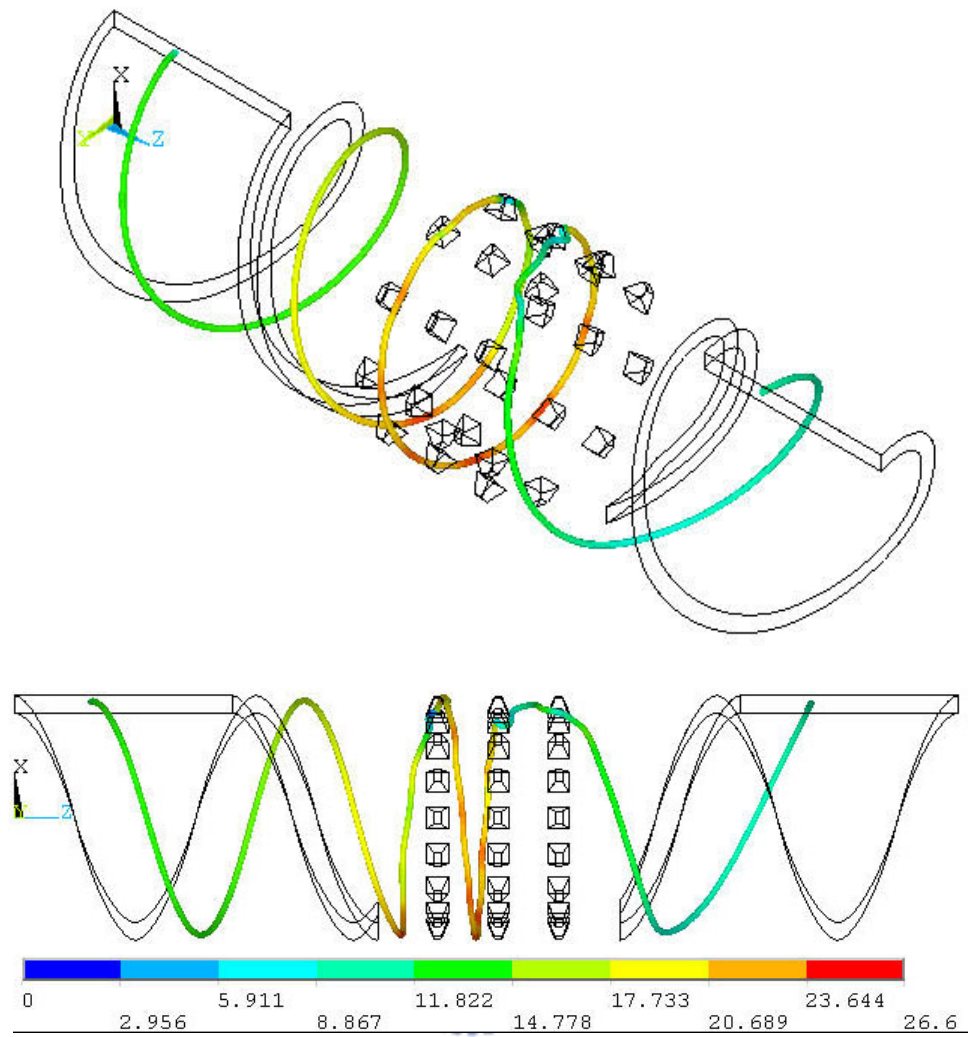


圖 51 橫截面九支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖

4. 橫截面安裝十二支插門：觀察下頁圖 52 的流線發展，由於所安裝的插門最多，流線受插門的影響，擾動的情況也最多。

接下來我們再由下頁之圖 53、54、55，從界面面積比來定量其混合效果。由圖 53 可以發現，當橫截面混合元件的數量為 6 支、9 支與 12 支時，混合效果數量 6 支的最好，但三者其實數值差不多，顯示在增加橫截面安裝數量上，超過一定的數量對混合的效果增加有限。這主要可能是因為雖然插門安裝數量增加可以增加流體的混合，但也因為流體流動的空間減少，相對來說已不易大幅提升其混合的效果。而從能量消耗量上來看也是如此，故吾人在最佳化設計點上，選擇橫截面 6 支插門為最佳設計點即可。

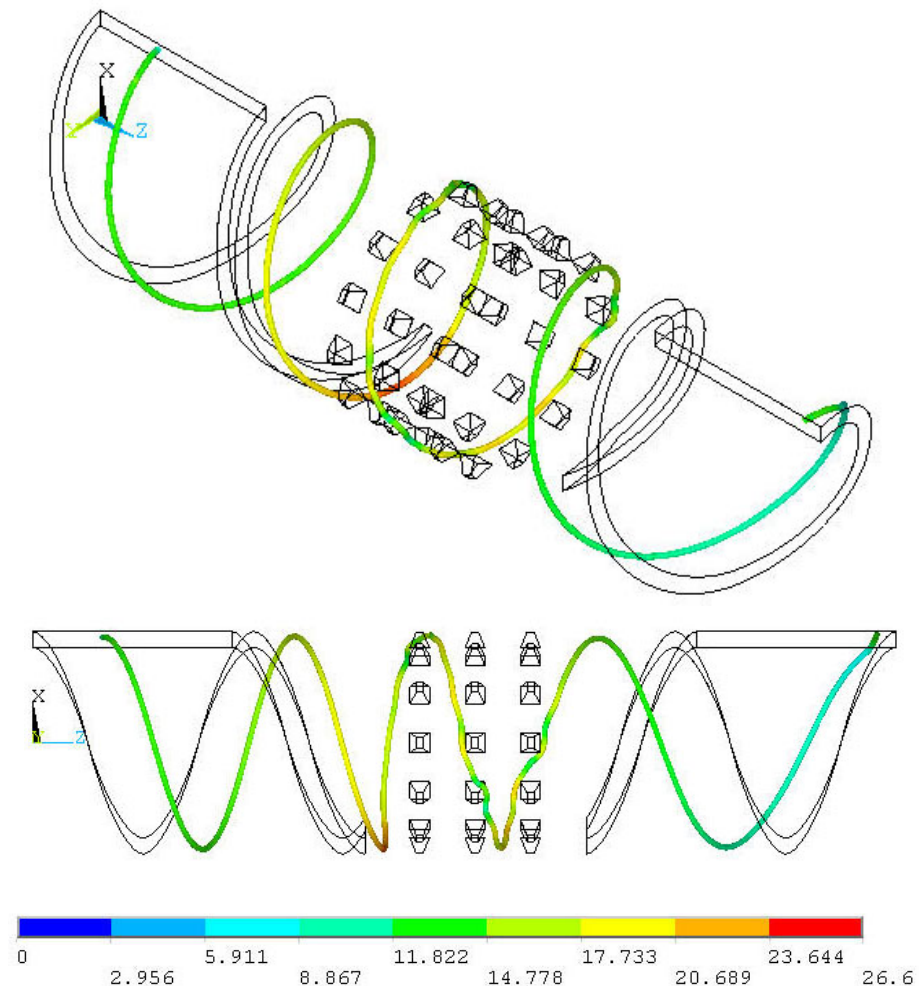


圖 52 橫截面十二支 Square Pineapple 插門之溝道流線圖

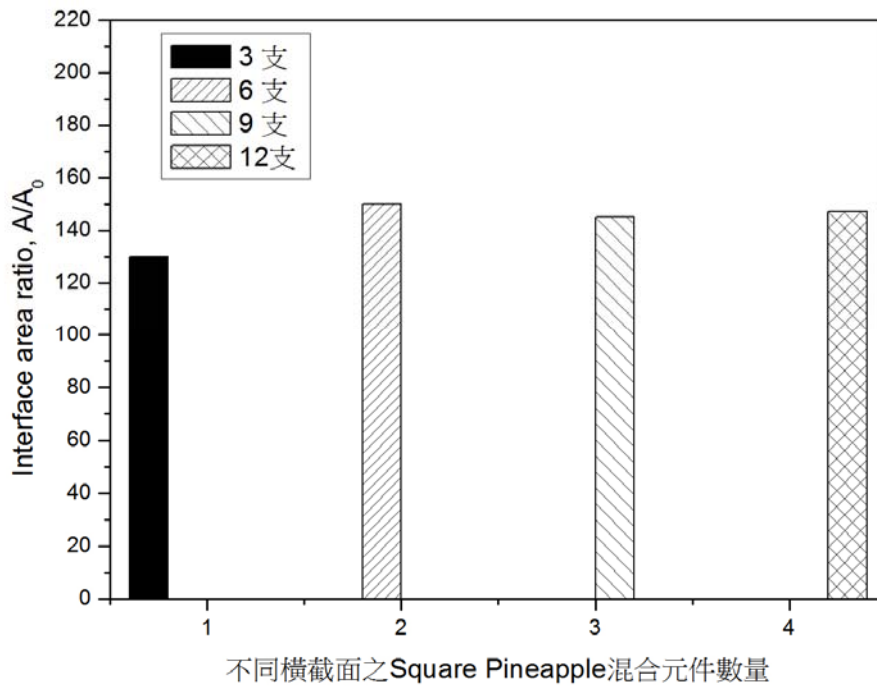


圖 53 不同橫截面安裝數量之界面面積比比較圖

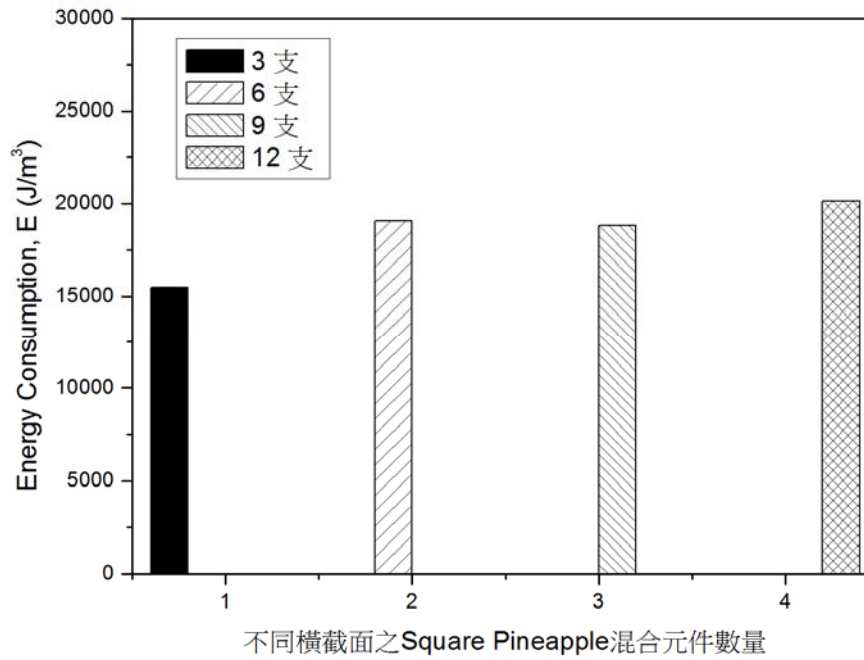


圖 54 不同橫截面安裝數量之能量消耗量比較圖

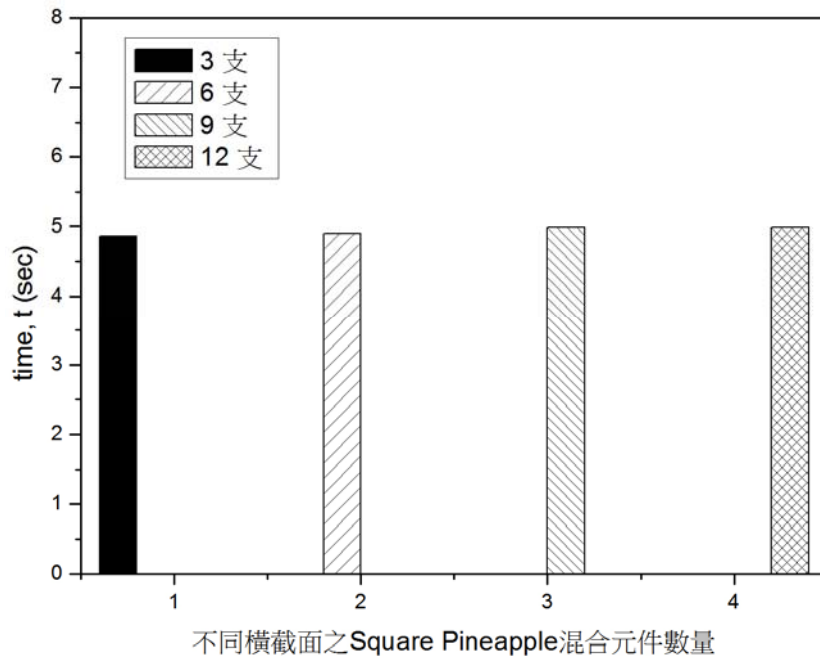


圖 55 不同橫截面安裝數量之流動時間比較圖



5.3 安裝不同插門軸向間距之混合元件的流動分析比較

在本節以不同的插門軸向間距來討論對流體在溝道內流動的影響，模型幾何示意圖，如圖 39、40、41，間距分別有 $1/3 D(2.1\text{cm})$ 、 $1/6 D(1.05\text{cm})$ 與 $1/8 D(0.7875\text{cm})$ ，連同 5.2 節（軸向間距 $1/6 D$ ）的部分，共有四種不同的間距。

1. 軸向間距 $1/3 D$ ：觀察其流線流動情形，如圖 56，與 5.1 節間距為 $1/4D$ 的流線圖比較，其流動情形相仿，皆在混合元件附近有較大的迴流和拉伸情況。

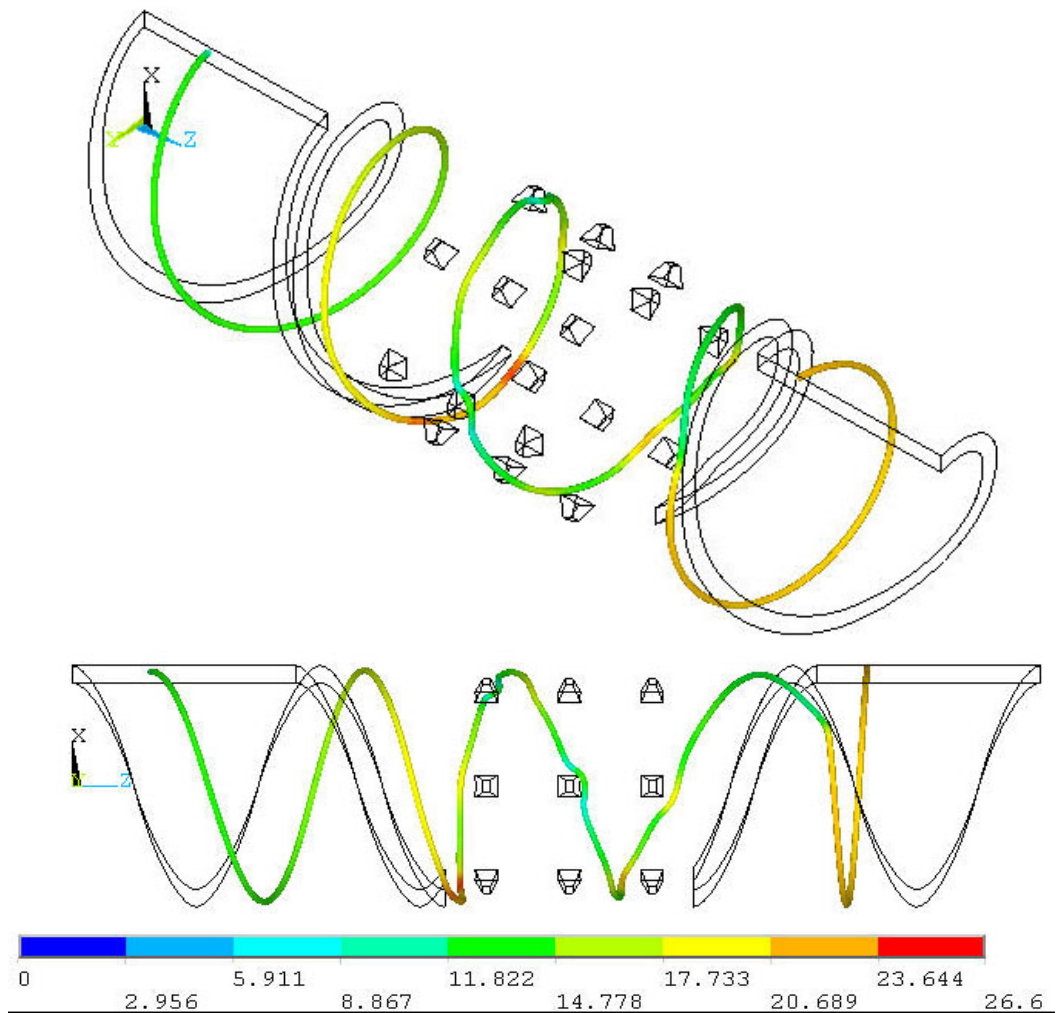


圖 56 軸向間距為 $1/3D$ 的 Square Pineapple 插門螺桿之溝道流線圖

2. 軸向間距 $1/4 D$ ：此部分已於 5.1 節中討論，因此本節不再贅述。

3. 軸向間距 $1/6 D$ ：觀察其流線流動情形，如圖 57，可看到與 5.1 節間距為 $1/4D$ 的流線圖的流動情形相仿。

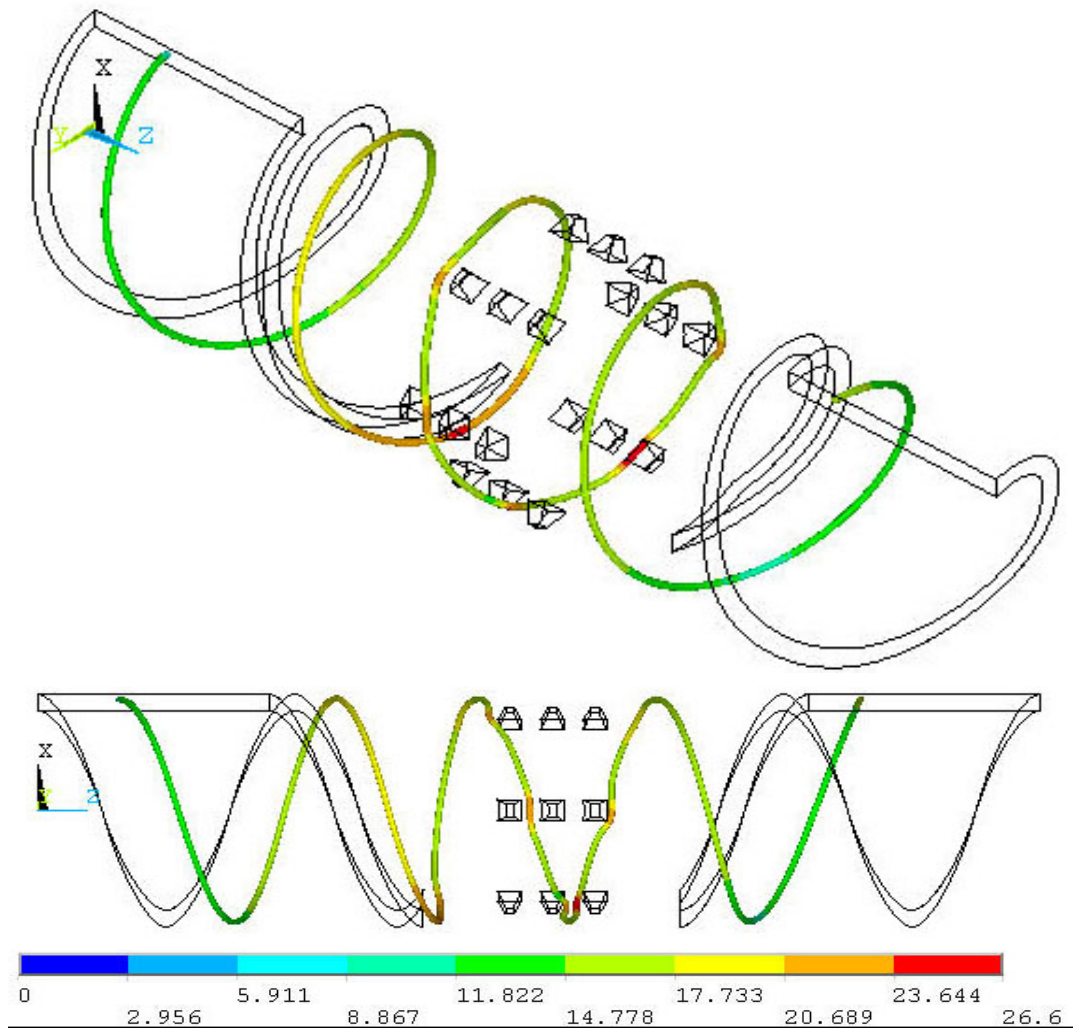


圖 57 軸向間距為 $1/6D$ 的 Square Pineapple 插門之溝道流線圖

4. 軸向間距 $1/8 D$ ：從流線圖來看，如圖 58，可明顯看出流線流經插門區時，由於插門軸向間距過短，流線不容易流過，因此一次越過兩支插門，使流線受到插門擾動的情形更是減少了許多，其混合效果也就不好。

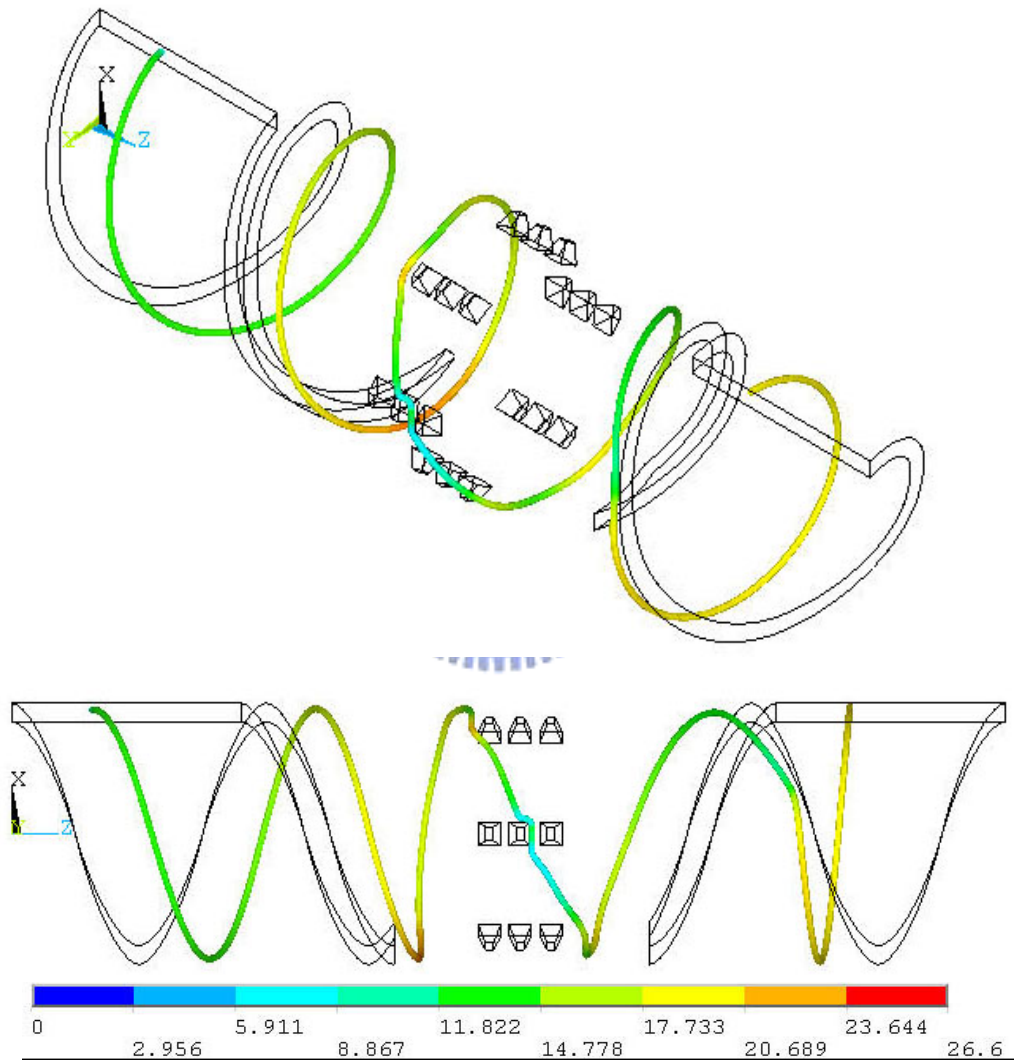


圖 58 軸向間距為 $1/8D$ 的 Square Pineapple 插門螺桿之溝道流線圖

我們再由界面面積比和能量消耗量和流動時間來看，如圖 59、60、61，不難發現插門的軸向間距，對混合效率有很大的影響，如圖 59，軸向間

距由 $1/8 D$ 逐漸拉長到 $1/3 D$ 對混合效率有愈來愈著顯著的影響，距離越長，界面面積比越大。造成此種現象的原因，應是高分子在流道中，藉助混合元件的幫忙，提高混合效果，但在插門兩兩之間也需要一定的距離，才能讓每個插門發揮其對高分子流體最大的改變，如此流體得到被切割及產生重新排列的助益將最大。因此於本節中，我們選擇 $1/3 D$ 為最佳設計點。

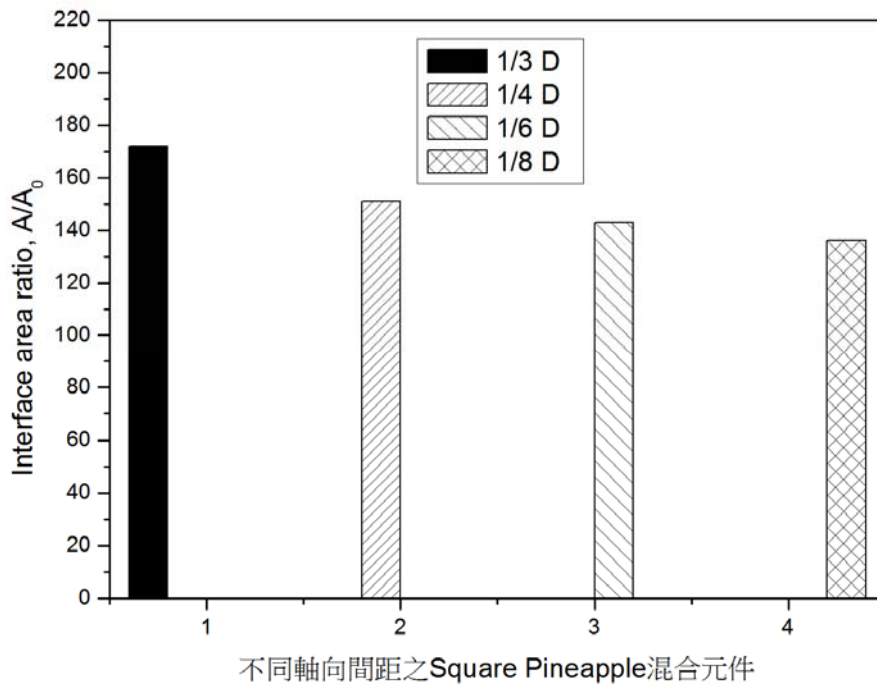


圖 59 不同軸向間距之界面面積比比較圖

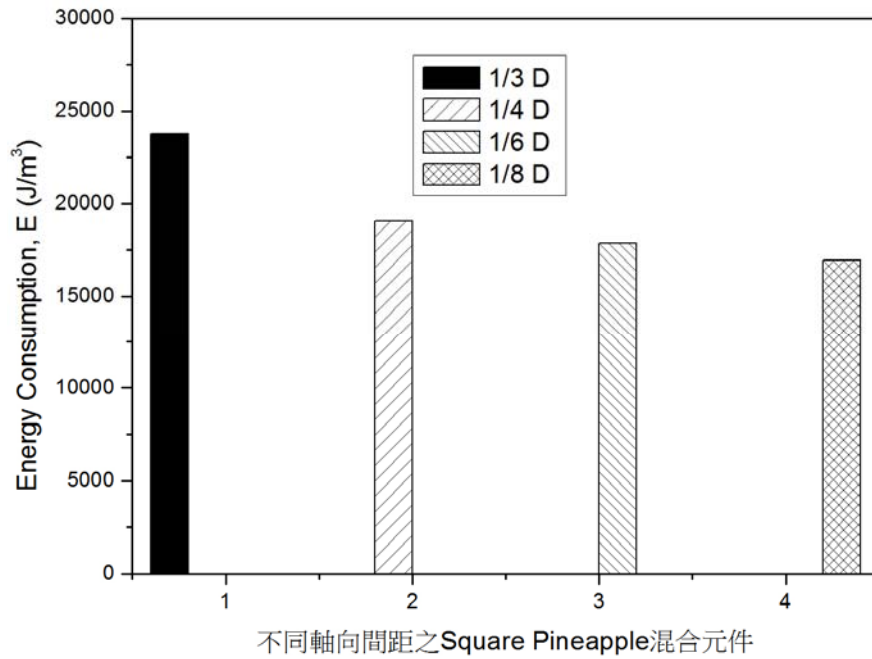


圖 60 不同軸向間距之能量消耗量比較圖

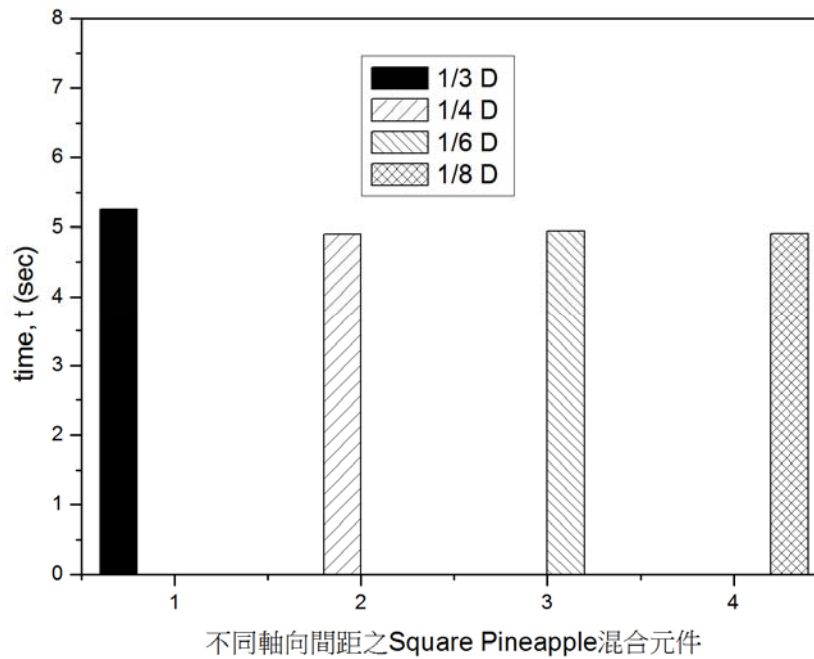


圖 61 不同軸向間距之流動時間比較圖

5.4 安裝混合元件於流道中的流動分析比較

在此節中，我們由文獻中所提出針對混合元件在溝道中排列的改良作另一種形式的分析比較。我們將之前討論的混合元件，直接安排於螺桿的

溝道中，其排列的方式為 Horizontal(混合元件平行軸方向插置在溝道中)及 Vertical(混合元件以橫截面的方向直接插置在溝道中)，其示意圖如圖 41、42。並與 5.1 節中所使用的 Square Pineapple 之結果做比較：

1. Horizontal 排列：由其流線圖，如圖 62，流體於插門附近有些許迴流，由圖可以看出流體受到的擾動並不大。

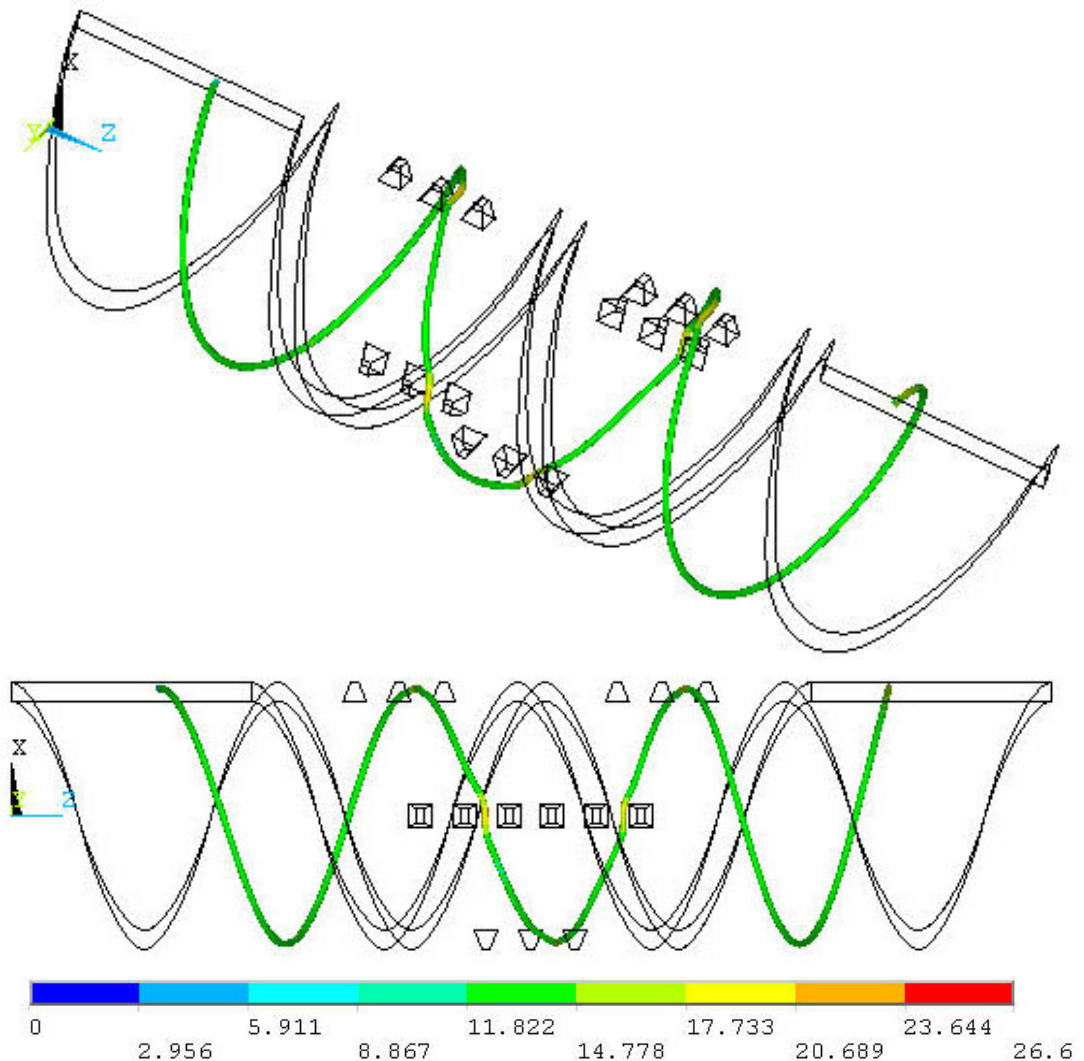


圖 62 Square Pineapple 平行軸方向安裝於溝道中之流線圖

Vertical 排列：由其流線圖，如圖 63，由圖可以看出所受到的擾動不大。

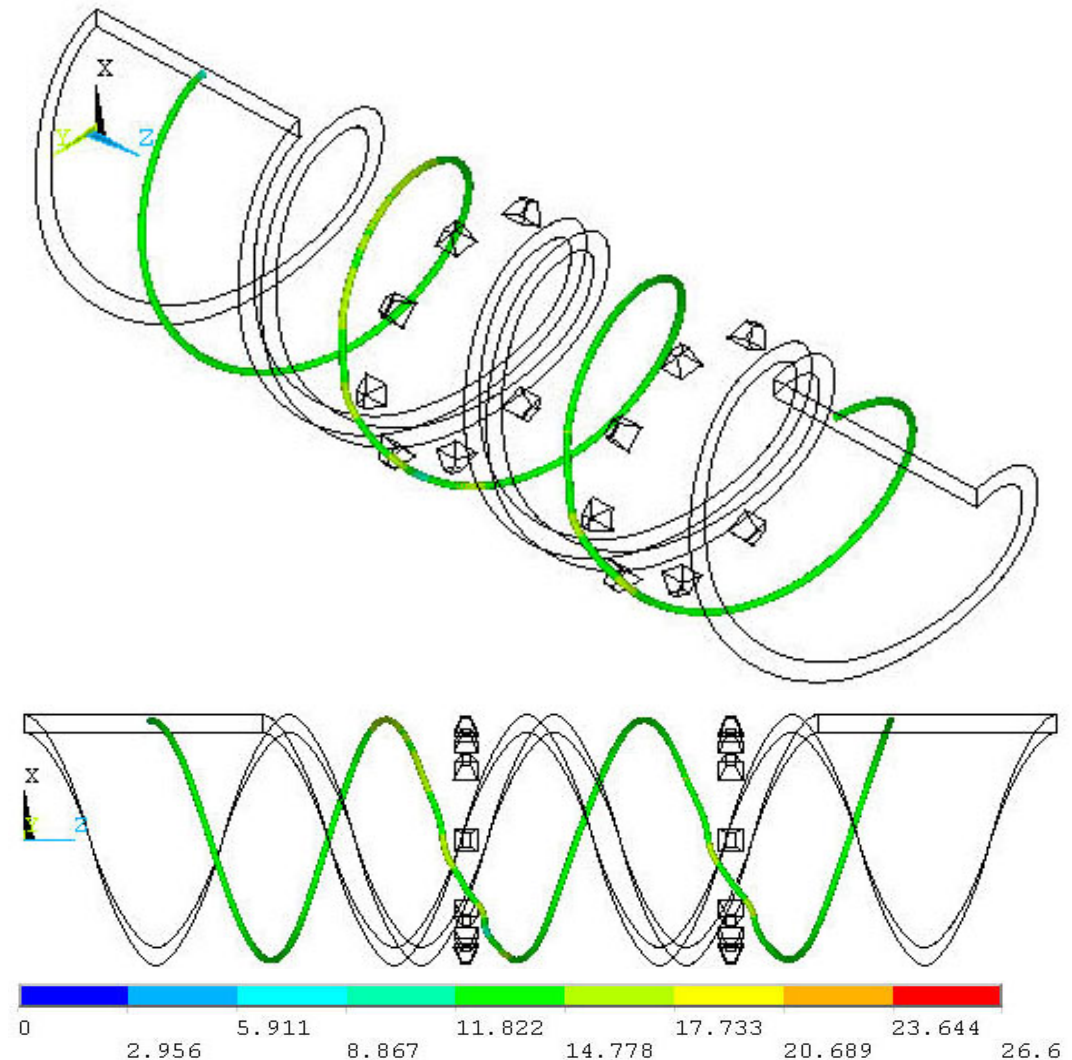


圖 63 Square Pineapple 垂直軸方向安裝於溝道中之流線圖

將混合元件排列在溝道之中，在界面面積比與能量消耗量的比較上，如下頁圖 64、65，兩種排列方式在界面面積比與能量消耗量在數值上相去不遠，而其混合的效果無法比的上於混合元件區域安置插門的螺桿，而顯示如此的排列並無法得到有效的混合效果。

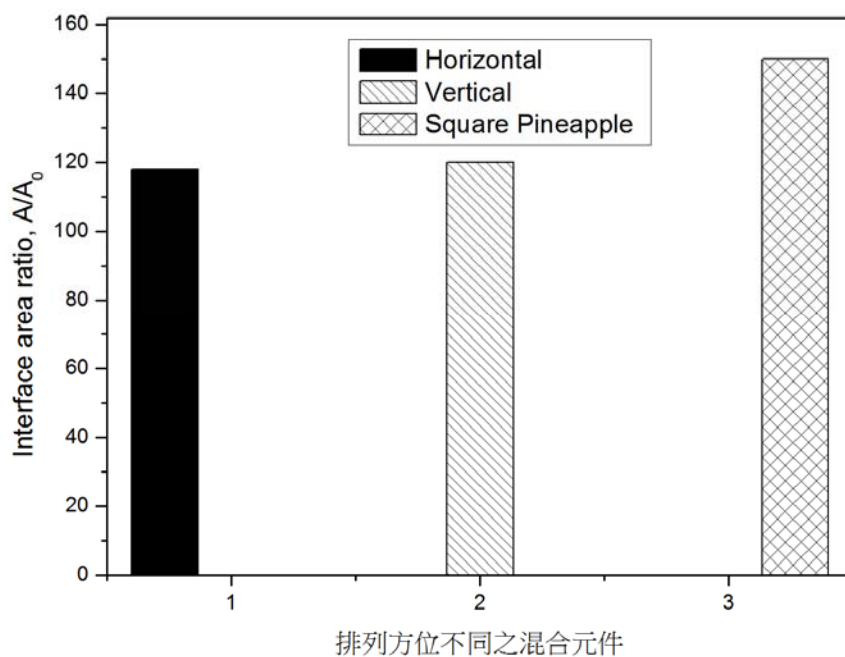


圖 64 不同的插門排列方位之界面面積比比較圖

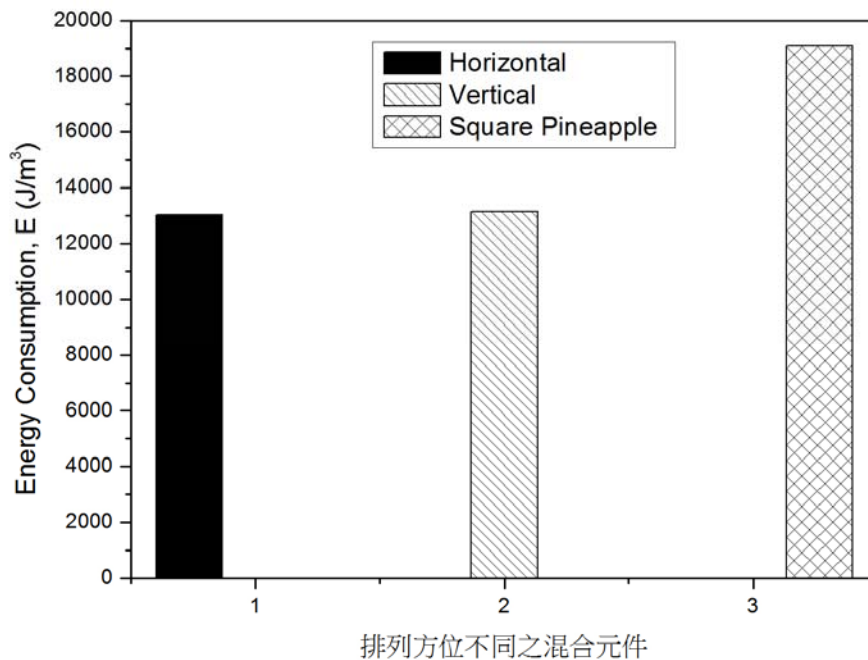


圖 65 不同的插門排列方位之能量消耗量比較圖

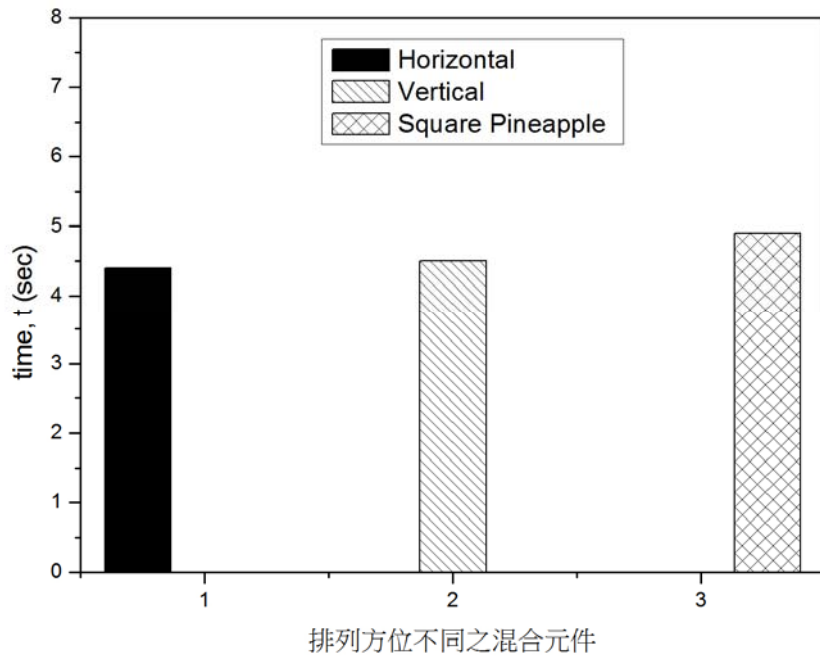


圖 66 不同的插門排列方位之流動時間比較圖



5.5 最佳化設計

綜合上述四節，在插門構形、橫截面數量和軸向間距的比較上，我們挑選了以 Square Pineapple、橫截面安裝六支插門和插門軸向間距 $1/3 D$ 作為最佳化設計的條件，其流線圖如圖 56。經由計算而得到的界面面積比為最高的 172，與未安裝混合元件相比，增加了約 61%，而和其它組合相比，也都至少再多出 13%，其混合的效果最佳。但由於界面面積比和能量消耗量成正比的關係，其能量消耗量也相對增加了不少。經由計算而得的能量消耗量為 23896 J/m^3 ，與未安裝混合元件相比，增加了約 90%，和其它組合相比則約增加了 20% 左右。

第六章 結 論

1. 在選取插門混合元件時，在幾何形狀大小上的配置需根據流域做調整，以 Blockhead 及 Trapezoidal 插門來說，由於其幾何構造，易造成流體粒子在通過時流線不平滑的現象，也容易在插門背後造成迴流甚至死角的情形，將會在產品上造成不良的影響，此部分需要特別考量。
2. 對於任何種類插門在排列組合上絕不是以數量多取勝，不可能單純想以大量而錯雜的插門來改變流道內的流動情形，尚需考慮到流體粒子的流動空間相對減少，所要負擔的壓力也就較大，則須增加較大的驅動力迫使其流動達到混合的目的，相對來說將會提高成本。
3. 改變兩根插門在軸方向排列的緊密程度大大影響了混合效率，由於流體流過插門會有拉伸的情形，若下一個插門排列過於緊密，則會影響拉伸的效果，降低了混合效率，故此為了找出最佳化之設計，此一設計要點必須特別計算在內。



參考文獻

1. C. D. Han and K. Y. Lee, Polym. Eng. Sci., Vol. 31, No. 11, p. 813, 1991.
2. Y. Wang and C. C. Tsay, Polym. Eng. Sci., Vol. 25, No. 5, p. 643, 1996.
3. C. Wang and I. Manas-Zloczower, Int. Polym. Proc., Vol. 9, No. 1, p. 46, 1994.
4. C. Wang and I. Manas-Zloczower, Polym. Eng. Sci., Vol. 34, No. 15, p. 1224, 1994.
5. C. Wang and I. Manas-Zloczower, Int. Polym. Proc., Vol. 11, No. 2, p. 115, 1996.
6. I. Manas-Zloczower and Hongfei Cheng, Macromol. Symposia., Vol. 112, p. 77, 1996.
7. Martin Gale, Adv. Polym. Technol., Vol. 16, No. 4, p. 251, 1997.
8. W. G. Yao, K. Takahashi, and Y. Abe, Int. Polym. Process., Vol. 9, No. 3, p. 222, 1996.
9. W. G. Yao, K. Takahashi and K. Koyama, Polym. Eng. Sci., Vol. 37, No. 3, p. 615, 1997.
10. W. G. Yao, K. Takahashi, K. Koyama, and G. C. Dai, Chem. Eng. Sci., Vol. 52, No. 1, p. 13, 1997.
11. W. G. Yao, K. Takahashi, K. Koyama, and G. C. Dai, J. Chem. Eng. Jpn., Vol. 30, No. 4, p. 748, 1997.

12. A. C. Rios, P. J. Gramann, T. A. Osswald, M. del P. Noriega and O. A. Estrada, Int. Polym. Proc., Vol. 15, No. 1, p. 12, 2000.
13. A. C. Rios and T. A. Osswald, Eng. Anal. Bound. Elem., Vol. 24, No. 1, p. 89, 2000.
14. Syang-Peng Rwei, Polym. Eng. Sci., Vol. 41, No. 10, p. 1665, 2001.
15. W. Wang, I. Manas-Zloczower and M. Kaufman, Int. Polym. Proc., Vol. 16, No. 4, p. 315, 2001.
16. P. G. M. Kruijt, O. S. Galaktionov, P. D. Anderson, G. W. M. Peters, and H. E. H. Meijer, AICHE. J., Vol. 47, No. 5, p. 1055, 2001.
17. O. S. Galaktionov, P. D. Anderson, P. G. M. Kruijt, G. W. M. Peters, and H. E. H. Meijer, Comput. Fluids., Vol. 30, No. 3, p. 271, 2001.
18. G. C. Chuang, Yeh, An-I, Journal of Food Engineering, 63, 21-31., 2004
19. F. E. Dulmage, U. S. Patent 2,753,595.
20. Saxton, U. S. Patent 3,006,029.
21. A. Rios, P. Grmann and T. Osswald, Int. Polym. Process., Vol. 9, No. 1, p. 12, 2000.
22. P. Gramann, M. Noriega, A. Rios and T. Osswald, SPE ANTEC Techn., Vol. 27, No. 14, p. 1123, 1997.
23. J. Fogarty, C. J. Rauwendaal, D. Fogarty and A. Rios, Turbo-Screw Design for Foam Extrusion, SPE ANTEC Techn., 2001

24. J. Fogarty, U. S. Patent 6,015,227.
25. British Patent 930,339.
26. G. Semmekrot, U. S. Patent 5,013,233
27. M. Esseghir et al., Adv. Polym. Tech., Vol. 17, NO. 1, 1998
28. A. J. Ingen Housz and S. A. Norden, Int. Polym. Process., Vol. 10, NO. 120, 1995
29. R. S. Spencer and R. M. Wiley, J. Coll. Science, Vol. 6, p. 133 , 1951.
30. L. Erwin, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, No. 13, p. 1044, 1978.
31. A. S. Lodge, Elastic Liquids, Academic Press, New York , 1964.
32. D. M. Bigg, Polym. Eng. Sci., Vol. 15, No. 9, p. 684, 1975.
33. L. Erwin, Polym. Eng. Sci., Vol. 18, No. 7, p. 572, 1978.
34. L. Erwin and F. Mokhtarian, Polym. Eng. Sci., Vol. 23, No. 2, p. 49, 1983.
35. David S. Burnett, Finite Element Analysis : Form Concepts to Applications, Addison-Wesley, Reading Mass., 1987.
36. C. Taylor and T. G. Hughes, Finite Element Programming of the Navier-Stokes Equations, Pineridge, Swansea U. K., 1981.
37. C. D. Han, K. Y. Lee and N. C. Wheeler, Polym. Eng. Sci., Vol. 31, No. 11, p. 836 , 1991.
38. K. Amellal and B. Elbirli, Polym. Eng. Sci., Vol. 28, No. 5, p. 311, 1988.
39. C. Rauwendaal, Mixing in Polymer Processing, Marcel Dekker, New York, 1991.

40. Saeed Moaveni, Finite Element Analysis : Theory and Applications with ANSYS, Prentice Hall, Upper Saddle River N. J., 1999.
41. Swanson Analysis Systems, ANSYS user's manual for revision 5.7. Commands, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, 2001.
42. Swanson Analysis Systems, ANSYS user's manual for revision 5.0. Elements, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, 2001.
43. Z. Tadmor and G. Gogos, Principles of Polymer Processing, John Wiley & Sons, New York, 1979.
44. C. Rauwendaal, Polymer Extrusion, Hanser, New York, 1990.
45. I. Manas-Zloczower and Z. Tadmor, Mixing and Compounding of Polymers, Hanser, New York, 1994.
46. Stanley Middleman, Fundamentals of Polymer Processing, McGraw-Hill, New York, 1977.
47. 賴育良, ANSYS 電腦輔助工程分析, 台北儒林, 民國 86 年
48. 陳精一、蔡國忠, 電腦輔助工程分析-ANSYS 使用指南, 台北全華, 民國 89 年
49. 康淵、陳信吉, ANSYS 入門, 台北全華, 民國 91 年
50. 龔皇光、黃柏文、陳鴻雄, ANSYS 與電腦輔助工程分析, 台北全華, 民國 91 年
51. 陳精一, ANSYS 6.0 電腦輔助工程分析, 台北全華, 民國 91 年