

**國立高雄應用科技大學**

**碩士班**

**碩士論文**

**平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究**

**Design and Flow Visualization for The Planar  
Spiral Extrusion Die**

**研究生：陳明達**

**指導教授：黃俊欽 教授**

**中華民國九十三年六月**

**平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究**  
**Design and Flow Visualization for The Planar Spiral Extrusion**  
**Die**

**研究生:陳明達**

Student: Ming-Da Chen

**指導教授:黃俊欽 教授**

Advisor: Dr. Chung-Ching Huang

**國立高雄應用科技大學**  
**模具工程系碩士班**  
**碩士論文**

A Thesis  
Submitted to  
Institute of Mold and Die Engineering  
National Kaohsiung University of Applied Sciences  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Engineering  
In  
Mold and Die Engineering

June 2004  
Kaohsiung, Taiwan, Republic of China

## 博碩士論文授權書

(國科會科學技術資料中心版本 93.2.6)

本授權書所授權之論文為本人在國立高雄應用科技大學大學(學院)模塊工程系所  
組92學年度第一學期取得碩士學位之論文。  
論文名稱：平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究

☐ 同意 ☐ 不同意

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予行政院國家科學委員會科學技術資料中心(或其改制後之機構)、國家圖書館及本人畢業學校圖書館，得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或數位化等各種方式重製後散布發行或上載網路。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利(未申請者本條款請不予理會)的附件之一，申請文號為：\_\_\_\_\_，註明文號者請將全文資料延後半年再公開。

☒ 同意 ☐ 不同意

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予教育部指定送繳之圖書館及本人畢業學校圖書館，為學術研究之目的以各種方法重製，或為上述目的再授權他人以各種方法重製，不限地域與時間，惟每人以一份為限。

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未勾選，本人同意視同授權。

指導教授姓名：黃俊欽

研究生簽名：陳明達

學號：1091316101

(親筆正楷)

(務必填寫)

日期：民國 93 年 7 月 1 日

1. 本授權書(得自<http://sticnet.stic.gov.tw/sticweb/html/theses/authorize.html>下載或至<http://www.stic.gov.tw>首頁右下方下載)請以黑筆撰寫並影印裝訂於書名頁之次頁。

2. 授權第一項者，請確認學校是否代收，若無者，請自行寄論文一本至台北市(106)和平東路二段106號1702室國科會科學技術資料中心黃善平小姐。(本授權書諮詢電話：

02-27377606 傳真：02-27377689)

授權書  
(博碩士論文)

本授權書所授權之論文為本人在國立高雄應用科技大學大學(學院)模貝工程系所  
組92學年度第2學期取得碩士學位之論文。

論文名稱：平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究

☐同意 ☐不同意

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予行政院國家科學委員會科學技術資料中心、國家圖書館及本人畢業學校圖書館，得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或數位化等各種方式重製後散布發行或上載網路。

本論文為本人向經濟部智慧財產局申請專利的附件之一，請將全文資料延後兩年後再公開。(請註明文號： )

☒同意 ☐不同意

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予教育部指定送繳之圖書館及本人畢業學校圖書館，為學術研究之目的以各種方法重製，或為上述目的再授權他人以各種方法重製，不限地域與時間，惟每人以一份為限。

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未鉤選，本人同意視同授權。

指導教授姓名：黃俊敏  
研究生簽名：陳明達  
(親筆正楷)

學號：1091316101  
(務必填寫)

日期：民國 93 年 7 月 1 日

1. 本授權書請以黑筆撰寫並影印裝訂於書名頁之次頁。
2. 授權第一項者，請再交論文一本予畢業學校承辦人員或逕寄 106-36 台北市和平東路二段 106 號 1702 室 國科會科學技術資料中心 王淑貞。(本授權書諮詢電話：02-27377746)
3. 本授權書於民國 85 年 4 月 10 日送請內政部著作權委員會(現為經濟部智慧財產局)修正定稿。
4. 本案依據教育部國家圖書館 85.4.19 台(85)圖編字第 712 號函辦理。

國立高雄應用科技大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校模具工程研究所 碩士班 陳明達君

所提論文平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：吳建興 黃登(甘)  
黃俊欽 \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

指導教授：黃俊欽

研究所所長：楊慶煜

中華民國 93 年 6 月 8 日

# 平面式螺旋模頭之設計分析與可視化研究

學生:陳明達

指導教授:黃俊欽 教授

國立高雄應用科技大學模具工程研究所

## 摘要

螺旋式模頭主要用於高分子管膜的押出成形，其最大的優點是利用螺旋溝引導熔膠流動，在流動過程中相互混合，克服了傳統中央進料軸心式模頭因蜘蛛腳而產生的結合線，或側進料式模頭因軸心所產生的結合問題，結合線會造成管膜產品使用強度受到限制嚴重的限制。螺旋模溝的設計方式有軸心式及平面式兩種，本研究主要以平面式螺旋模頭為主，其幾何特徵在於螺旋溝槽分佈於同一平面上，螺旋溝幾何的設計影響押出製品的品質，本文以二維體積控制法進行此複雜流場分析並配合田口方法，以最適化之流場特性如:流量均勻度(UI)，總壓力損失(PD)，混合度(MD)等指標來搜尋流道之最佳設計幾何，分別為模頭起始間隙(G)、螺旋溝之起始深度(H)、螺旋收斂常數(A)、螺旋段漸縮角度( $\theta$ )，結果發現在螺旋溝之幾何組合( $G=0.1959\text{mm}$ ， $H=7.32\text{mm}$ ， $A=0.1115$ ， $\theta=1.4434^\circ$ )下有較佳之流場特性，將上述尺寸應用於實際模頭設計上，並結合一可觀測之玻璃視窗進行流動分析，採用不同顏色的色母進行流場觀測，探討不同起始間隙與鄰近螺旋溝內熔膠混合的情況，並討論不同模頭溫度、不同模唇間隙與不同剪薄性質之塑料對模頭出口處流量分佈的影響，並將模擬結果與流場可視化分析加以比較，藉以驗證模擬結果的正確性。

關鍵字：平面式螺旋模頭、體積控制法、可視化。

# Design and Flow Visualization for The Planar Spiral Extrusion Die

Student: Ming-Da Chen

Advisor: Professor Chung-Ching Huang

Institute of Mold and Die Engineering  
National Kaohsiung University of Applied sciences

## Abstract

The function of spiral mandrel die is mainly use for extrusion polymer pipes or thin films , the advantage of the process is to mix the flow of polymer melts inside the die well to solve the melting line and also enhance the strength .The spiral die could divide into mandrel and planar type. This study is mainly to investigated the flow distribution in planar spiral dies. The feature of die has eight helical grooves cut on the planar surface. Proper groove design can produce the beautiful and durable products. In this study we analyze through Lumped Parameter Method applied over a finite number of control volume , and associated with the Taguchi approach is applied to search several sets of die geometric parameters such as initial gap of die、

initial depth of spiral channel、 taper angle and converge constant of spiral , from which process the flow uniformity、 mixing degree and total pressure drop , finally , the optimal geometry of the die was determined.

Sequentially , the performance of the die with a glass window is developed to observe the flow distribution by digital video , and the images are cut out of for observe the mixing degree of the two polymers by Optical Microscopy. The effect of initial gap of die on the mixing degree of the two polymers is investigated , three initial gap of die 0.2 , 0.4 , 0.6mm were selected.

Finally , the effect of the mold temperature , gap of die lip and ratio of shear thinning on the flow uniformity of die lip are investigated , the experiment result can compare with simulation to valuate the correctness of the die design.

Key word: Planar spiral extrusion die、 Control volume method、 Visualization



## 誌謝

回顧研究所兩年來的生活，從剛進研究室的懵懂無知，到現在已經將論文完成，回首來時路要感謝的人真的太多了，首先，很幸運在研究所求學階段承蒙指導教授-黃俊欽老師的指導，老師除了在學術領域上的知識值得我學習外，在為人處事上更是我生活上的導師，在他的細心指導下使得本論文的內容能更加完備，接下來，也要感謝我的父母對於我的栽培，使我有能力完成研究所的學業，完成本論文特別要感謝啟賢學長、枝峰、勇志、宗宏、俊欽、優升機械-振成學長、龍盟機械-郭淑霞小姐、君牧-志強學長、金工中心-吳慶財先生，更要感謝我二姐-麗卿，對我生活上的照顧，也要感謝我的女朋友-意晴，對我的體諒與包容，沒有上述的各位就沒有這篇論文，總之，謝謝你們，認識你們真好！

明達 7.1.2004

## 目 錄

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 中文摘要.....               | i  |
| 英文摘要.....               | ii |
| 誌謝.....                 | iv |
| 目錄.....                 | v  |
| 表目錄.....                | v  |
| 圖目錄.....                | v  |
| 一、緒論.....               | 1  |
| 1.1 前言.....             | 1  |
| 1.2 模頭種類說明.....         | 2  |
| 1.3 文獻回顧.....           | 6  |
| 1.4 研究目的.....           | 9  |
| 二、模具設計.....             | 10 |
| 2.1 設計流程.....           | 10 |
| 2.2 設計概念.....           | 10 |
| 2.3 模具設計.....           | 11 |
| 2.4 模具強度考慮.....         | 13 |
| 2.5 模具材料選擇.....         | 14 |
| 2.6 流道尺寸最佳化.....        | 15 |
| 三、理論及研究方法建立.....        | 19 |
| 3.1 入料段、導流段、模唇段之流動..... | 19 |
| 3.2 螺旋段之流動.....         | 22 |
| 3.3 田口方法.....           | 40 |
| 四、模擬結果與討論.....          | 56 |
| 4.1 二維模擬.....           | 56 |
| 4.2 三維實體模擬.....         | 66 |
| 五、可視化押出實驗.....          | 77 |
| 5.1 實驗目的.....           | 77 |
| 5.2 實驗設備.....           | 77 |
| 5.3 實驗流程.....           | 81 |
| 5.4 實驗結果與討論.....        | 82 |
| 六、結論.....               | 89 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 6.1 研究成果說明..... | 89 |
| 6.2 未來研究方向..... | 90 |
| 參考文獻.....       | 91 |
| 自傳.....         | 95 |
| 附錄.....         | 96 |

## 表目錄

|      |  |    |
|------|--|----|
| 表 1  | L9 直交表.....                            | 41 |
| 表 2  | 控制因子及水準表.....                          | 47 |
| 表 3  | L9 直交表針對螺旋段出口處的流量均勻度<br>與壓力降之分析結果..... | 47 |
| 表 4  | 流量均勻度的望大特性響應表.....                     | 49 |
| 表 5  | 壓力損失的望小特性響應表.....                      | 50 |
| 表 6  | UI 所作 C&B 間之交互作用.....                  | 51 |
| 表 7  | UI 所作 D&B 間之交互作用.....                  | 52 |
| 表 8  | UI 所作 D&C 間之交互作用.....                  | 52 |
| 表 9  | 各因子的不同水準區間.....                        | 53 |
| 表 10 | 十六組不同起始水準值.....                        | 55 |
| 表 11 | 十六個設計點之流量均勻度、壓力降、混合度<br>與所搜尋出之幾何值..... | 58 |
| 表 12 | LDPE 熱性質參數表.....                       | 71 |
| 表 13 | 不同實驗塑料之熱性質參數表.....                     | 78 |

## 圖目錄

|      |                           |    |
|------|---------------------------|----|
| 圖 1  | 多岐管式共押模頭.....             | 4  |
| 圖 2  | 進料模組模頭.....               | 4  |
| 圖 3  | 巢穴式共押模頭.....              | 5  |
| 圖 4  | 堆砌式共押模頭.....              | 5  |
| 圖 5  | 模頭設計流程.....               | 10 |
| 圖 6  | 螺旋模頭之流道圖.....             | 11 |
| 圖 7  | 模塊螺栓位置圖.....              | 14 |
| 圖 8  | 零件轉檔、加工流程圖.....           | 17 |
| 圖 9  | 模頭之立體系統圖.....             | 18 |
| 圖 10 | 平面式螺旋模頭組合圖.....           | 19 |
| 圖 11 | 流道展開及控制體積示意圖.....         | 21 |
| 圖 12 | 子單元三之示意圖.....             | 22 |
| 圖 13 | 子單元一之示意圖.....             | 25 |
| 圖 14 | 子單元一，溝深大於半徑之示意圖.....      | 30 |
| 圖 15 | 子單元一，溝深小於半徑之示意圖.....      | 33 |
| 圖 16 | 子單元二之示意圖.....             | 35 |
| 圖 17 | 田口式實驗計劃流程圖.....           | 42 |
| 圖 18 | 螺旋段各幾何參數之示意圖.....         | 46 |
| 圖 19 | 流量均勻度的望大特性響應圖.....        | 50 |
| 圖 20 | 壓力損失的望小特性響應圖.....         | 51 |
| 圖 21 | 因子 B 與 C 的交互作用圖.....      | 52 |
| 圖 22 | 因子 B 與 D 的交互作用圖.....      | 52 |
| 圖 23 | 因子 C 與 D 的交互作用圖.....      | 52 |
| 圖 24 | 田口最佳化之搜尋流程圖.....          | 54 |
| 圖 25 | 十六個設計點之流量均勻度.....         | 59 |
| 圖 26 | 十六個設計點之混合度與壓力降之圖.....     | 60 |
| 圖 27 | 設計點四出口處之流量分佈圖(1/8 圈)..... | 61 |
| 圖 28 | 最佳設計點在螺旋段末端流量均勻度圖.....    | 61 |

|   |    |
|---|----|
| 圖 29 最佳設計點在螺旋溝內之壓力分佈圖.....                | 62 |
| 圖 30 最佳設計點在螺旋段之混合度圖.....                  | 63 |
| 圖 31 不同螺旋段起始間隙對流量均勻度的影響.....              | 64 |
| 圖 32 不同螺旋溝深對流量均勻度的影響.....                 | 64 |
| 圖 33 不同漸縮角度對流量均勻度的影響.....                 | 65 |
| 圖 34 不同螺旋常數對流量均勻度的影響.....                 | 65 |
| 圖 35 MOLDEX 3D 分析流程圖.....                 | 69 |
| 圖 36 模頭流道修正圖.....                         | 70 |
| 圖 37 模擬與實驗比較圖-充填流量 10%.....               | 72 |
| 圖 38 模擬與實驗比較圖-充填流量 12%.....               | 72 |
| 圖 39 模擬與實驗比較圖-充填流量 18%.....               | 73 |
| 圖 40 模擬與實驗比較圖-充填流量 19%.....               | 73 |
| 圖 41 模擬與實驗比較圖-充填流量 22%.....               | 74 |
| 圖 42 充填流量 22%-模唇放大圖.....                  | 74 |
| 圖 43 模頭螺旋溝內之壓力分佈圖.....                    | 75 |
| 圖 44 模頭內之剪應力分佈圖.....                      | 75 |
| 圖 45 模頭內之速度向量圖(上視圖).....                  | 76 |
| 圖 46 模頭內之速度向量圖(等角圖).....                  | 76 |
| 圖 47 不同塑料在 200 下的黏度曲線.....                | 79 |
| 圖 48 不同塑料在 220 下的黏度曲線.....                | 79 |
| 圖 49 共擠押系統圖.....                          | 80 |
| 圖 50 可視化模頭實體圖.....                        | 80 |
| 圖 51 可視化共押實驗流程圖.....                      | 81 |
| 圖 52 不同起始間隙對熔膠混合度的影響(模擬結果).....           | 83 |
| 圖 53 拆模後實際流場分佈圖.....                      | 83 |
| 圖 54 不同起始間隙對混合度的影響(可視化流場圖).....           | 84 |
| 圖 55 起始間隙, gap=0.2mm 層間混合度的情況(OM 圖).....  | 84 |
| 圖 56 不同模溫對流量均勻度的影響(Gap=1.5mm).....        | 85 |
| 圖 57 不同模溫對流量均勻度的影響(Gap=2.5mm).....        | 85 |
| 圖 58 不同押出速度對流量均勻度的影響.....                 | 87 |
| 圖 59 不同 power law 指數之塑料對流量均勻度的影響(模擬)..... | 87 |
| 圖 60 不同 power law 指數之塑料對流量均勻度的影響(實驗)..... | 88 |

## 一、緒論

### 1.1 前言：

近年來由於功能性薄膜之需求趨於多樣化，尤其是醫藥、3C 產品、食品等需長期保存或防潮時所使用的包裝用膜，但是因為單一之塑料所製備之薄膜性質無法同時滿足需求(防潮與阻氣)時，就會以共擠押成型技術來使其成為具有不同性質的多功能性產品，讓各種高分子材料的特異性質相互加成於同一產品中，例如、將氧氣阻隔特性極佳的尼龍（PA）與水氣阻隔特性極佳的聚乙烯（PE）以共擠押成型技術加工成型，即可得到同時阻隔水氣與氧氣之多層高分子薄膜，可應用在食品包裝上。另外為了節省成本，在多層複合平板或薄膜之中間層填入低成本之塑材，如 PP、PE 及一些回收料，或者混摻入低成本之補強劑，如碳酸鈣或碎木屑等，如此不但強度提升，且產製成本大為降低。而本論文所提出之平面式螺旋模頭即適用於多層吹膜製程所使用，其構造與傳統的軸心式螺旋模頭之差異在 1.2 節有更清楚地說明，在共押過程中塑料主要在各進料塊間流動，為適用不同押出材料其進料塊有各自獨立的加熱系統，當各層熔膠在經過螺旋段的混合後，再逐一地疊層在一起，經模唇段的穩壓、定型後即可製成多層的管膜或是通入壓縮空氣吹製成多層的功能性薄膜。

一般多層模頭的設計關鍵在於模頭內流道的幾何尺寸，良好的幾何設計可以產生優良的多層膜品質，除整體膜厚均勻外，各層厚間厚度也要求均勻一致，如此才可以達到預期的多層效果，相反的不良的流道設計會產生不佳的薄膜品質，除了可能產生的外觀結合線外，也容易使熔膠在圓周方向的產生數個高峰，其高峰數目與螺旋溝的數目相符，所以流道設計的好壞影響很大。目前國內業界對模頭的設計均採用經驗式，若遇到比較特殊的材料或是結構，經常容易產生上述的不良現象，如果能夠採用較科學化的方式即以數學模式所建立的程式進行電腦模擬，並經由最佳化方法進行模頭的電腦輔助設計，可縮短開發時程與降低設備、材料與人力成本。

## **1.2 模頭種類說明:**

本文所採用之薄膜產製方法為共押成形，所謂共押方式是將多種塑料由不同的押出機同時送入一多層模頭，塑料在模頭中被導流成厚度均勻的疊層，然後由模頭出口擠出並經冷卻固化、引伸、捲取等動作而成多層膠膜。依照不同共押製程方式可以區分為平膜法與吹膜法兩種；以平膜法而言，其最關鍵的技術在於模具流道的設計，一般按照不同熔膠在模頭內的接觸方式區分成二大類，多歧管式模頭(multi-manifold die)與進料模組模頭(feed block die)特點分述如下：

### **1.2.1 多歧管模頭(multi-manifold die):**

如圖 1、此類模頭熔膠是先在模頭內部藉著各自的歧管，獨立地在模頭內流動，直到接近模頭出口處(一般在模唇段前)才相互接觸，因各個歧管內之熔膠獨立流動，故可以個別地控制溫度，所製造的多層膜板各層間的厚度分部較均勻，所以特別適用於多種 MI 差異極大的膜板共押，但其缺點為模具成本高，且體積限制問題，最多僅能生產約 4-5 層的共押膜板。

### **1.2.2 進料模組模頭(feed block die):**

如圖 2、此類模頭在傳統之單層 T-Die 前加裝一組進料模組，原有的 T-Die 並不需更換，當各種塑料同時進入模組中，在內部同時相互接觸，並由內部流道之設計導流成適當的層化現象，隨後進入模頭再進行押出，此類模頭的優點為結構簡單，層數增加容易，但缺點為各層間的熔膠流變性質必須相似，否則在進入模頭後容易因為界面不穩定現象而導致包覆或層厚均勻性不佳的現象。

以吹膜法而言，是以多個押出機將塑料送入共押模頭中，利用模頭中流道設計的方式使得多種塑料在模頭內形成多層環狀的流動方式，在出模頭後經吹脹、冷卻風環冷卻、引取輪引取而得到多層薄膜，因製程中包括引取輪之縱向拉伸及吹脹時的徑向拉伸，形成雙軸向延伸效果，故所製備之薄膜機械強度會較佳，而且整體設備成本較低，其依據熔膠在模頭內的接觸方式可分為以下兩類：

### **1.2.3 巢穴式共押模頭(spiral mandrel die)**



如圖 3 所示，巢穴式多層模頭是由多組同心套管組成，每層膠料基本上都是中央進料經徑向流道引入螺旋溝後形成環狀流，然後於接觸區彼此接觸後由模唇出口押出，再經吹脹成形。巢穴式共擠押模頭最大優點是螺旋溝而形成無結合痕，但仍有下列缺點：

1. 層數的變換較沒有彈性，例如為 3 層膜設計的模頭很難修改或擴張到 5 層，而且各層膠膜的比例在成形時並無法作大幅度的更動，如：三層厚度比為 3:2:1，無法更動為 2:5:1
2. 因結構問題，當模頭直徑隨著層數增加，最內層的直徑與最外層的直徑相差很大，結果將導致流經外層的熔膠其滯流時間遠大於流經內層者，因此易造成外層熔膠發生熱劣解。
3. 各層相互的熱阻不佳，當使用加工溫度相差太多的塑料時，其溫度容易相互影響，造成層間品質不穩定。
4. 當層數增加時模具整體體積會變的十分龐大，不利於搬運與組裝。

#### **1.2.4 堆砌式共擠模頭(stacked type die)**

主要是由多個相似的進料塊堆砌而成，如圖 4，各層熔膠由各別的進料塊輸入，形成環狀後再相接，一般應用於吹膜成形，膜厚約在  $50\mu\text{m}$  以上，在共擠成形時層數可達 2~8 層，在構造上，出口直徑可由 50mm 至 650mm。其與巢穴式多層模頭的不同點包括：

1. 每層熔膠有各別的進料塊，且層數改變時模頭修改容易。
2. 每個進料塊有相同的直徑。
3. 側向進料，利用分配管將熔膠均勻分散至整個圓周。
4. 每個進料塊可獨立控溫，且組塊間可作適當的隔熱設計。
5. 層數增加時模具體積變化不大。

基本上堆砌式模頭的各層熔膠是沿模頭軸向依序逐一接觸，不像在巢穴式共擠押模頭中是各層熔膠同時接觸，至於何者較佳則無定論，但目前工業上的使用，吹膜成型以巢穴式為主，而堆砌式模頭則主要用於多層吹瓶成型。

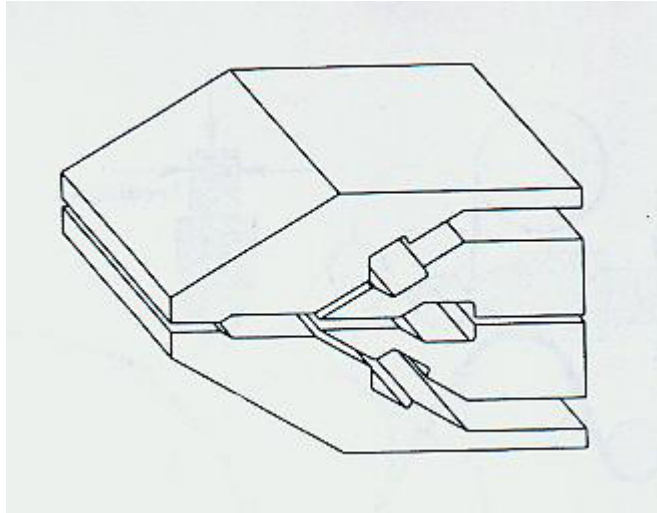


圖 1、多岐管式共押模頭[37]

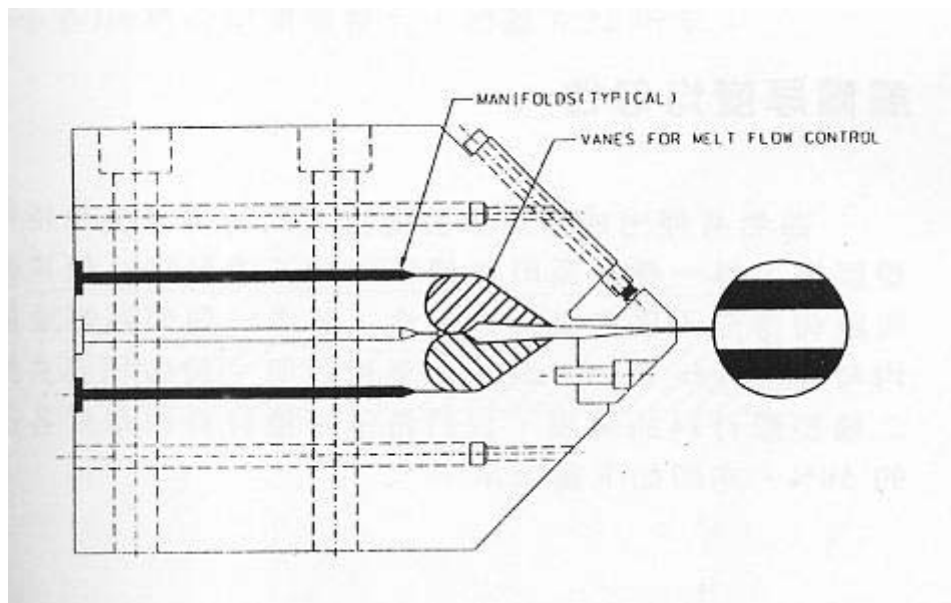


圖 2、進料模組模頭[37]

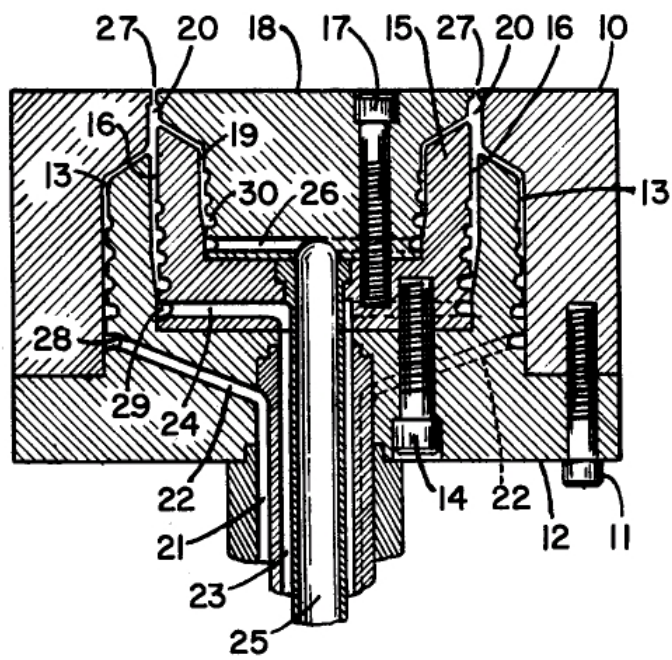


圖 3、巢穴式共押模頭[40]

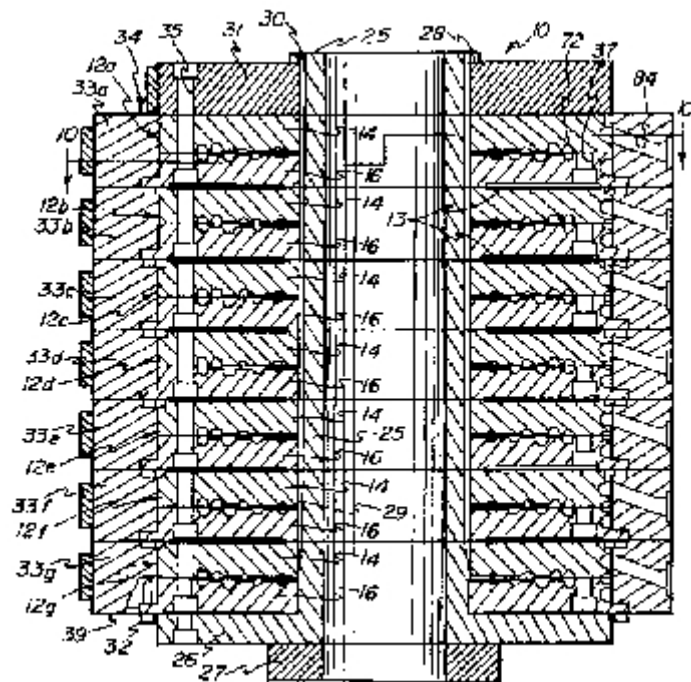


圖 4、堆砌式共押模頭[10]

### 1.3 文獻回顧:

共押方面之相關研究可以說已經發展了很長一段時間，故就本論文相關之內容分類並列舉數篇代表性文獻:

#### 1.3.1 與多層結構薄膜相關之文獻:

關於直接以模具來形成層化結構的研究相關文獻並不多，一般大多以平膜法(T-Die)居多，即利用靜態混合器方式形成多層結構，在文獻中 1994 年 Hiltner 等人[1]以 PC/KODAR60/40 之複材，層數 657 層，利用 DSC 量測其玻璃轉移點，並將試片退火後其兩種不同材料的玻璃轉移點(Tg)變成同一點，來探討多層高分子的內部擴散現象，並認為 Fick's Equation 可有效解釋一維非穩態的擴散現象，在 1997 年 Hiltner 等人[2, 3]利用一狹縫模(slit die)，在其前端裝置一個共押系統(靜態混合器結合餵給塊的結構)，當熔膠出押出機時會使用齒輪泵來控制進入的流量(確保進入模頭的流量比例)，由於類似靜態混合器的結構使熔膠層數能達到  $2^{n+1}$  層(當靜態混合元件為 n 個時)，他以此製備 Talc-Filled, PC/SAN, HDPE/LLDPE 之多層結構，並探討層間阻隔性及高分子內部擴散的特性；而 1999 年 Hedenqvist 等人[4]推導微米多層結構之層數與穿透速率的變化，可作為產品最終層數之決定，同年 T.Schuman 等人[5]以結晶性材料 LLDPE/HDPE (40:60 W/W)，層數 64 層，利用 DSC 來探討其分散系統中的擴散現象，藉此可以明白不同化學比例與擴散係數的關係，並以 OM 與 AFM 來觀測其內部擴散現象的形態，2001 年 Van Der Hoeven 等人[6]利用 3D 模擬與實驗方式來探討靜態混合器的排列順序與其層間均勻度的關係，其認為不平均的層厚與混合器中元件的壓力降有關，並有效地利用元件排列順序來改善層厚均勻問題，2002 年 D.Jarus 等人[7]以射出與押出所形成之多層化結構(PP/gPP/PA66)，來探討層化結構對氣體阻隔性的影響，提出形成阻氣效果因 PA 之高長徑比結構使氣體穿透之路徑變長所致，當應用在射出時因表層速度造成分子配向而形成高阻氣結構。

#### 1.3.2 多層模頭設計相關文獻:

目前一般的多層模頭設計方面之文獻都僅局限於幾何形狀之設計，大部份的文獻均以專利方式呈現[8]~[12]，將所有的設計概念圖形化，並未真

正對於對於所設計出之模頭進行流動模擬。

### 1.3.3 與模頭螺旋段模擬相關之文獻

關於模頭螺旋段模擬研究(僅限於單層)由於流場幾何形狀的複雜，大部份的研究仍局限於泛牛頓流體(GNF)的一維及二維模式等溫分析，基本上一維模式是將流場分成螺旋溝內部的管道流及狹縫間的平板流，假設兩者均為完全發展的一維壓力流動形態，且相互獨立，忽略其間之交互作用。

#### 1. 一維分析模式：

最早是 1972 年由 B.Proctor[13]提出，用以分析泛牛頓流體的等溫流動，Proctor 假設壓力沿螺旋溝方向採線性方面遞減，1984 年 P.Saillard 和 J.F.Agassant[14]擴展到非等溫流動分析，1987 年 D.M.Kalyon[15]等人則進一步應用到黏彈性流體(Zaremba- Fromm-Dewitt model)的模流分析，1987 年 C.Rauwendaal[16]提出類似 Proctor 之模式，但假設垂直於模頭軸心之同一平面上的壓力相等。

#### 2. 二維分析模式：

在 1984 年、1988 年 J.Vleck 和 J.Vlachoponlos[17, 18]修正上述模式，將螺旋段的流道展開，並切割成許多控制體積(control volume)，在每一個控制體積中以二個流動分量描述流體的流動行為，並藉著在管道流中引入一個垂直的流動分量來說明管流與平板流之間的關係，並以 Lumped parameter method 逐步計算每個控制體積的流量變化，進而完成整個流場分析；1986 年 E.J.Fahy 與 P.W.Gilmour[19]以有限元素法求得壓力降與流率，1987 年 J.Vlachoponlos[20]將文獻中曾發展過之三種流動模式加以比較；1989 年 J.Vlachoponlos[21]以透明壓克力流動實驗探討滯流時間問題；1989 年、1990 年 J.Vlachoponlos[22、23]將曾發展過之流動模式加以比較並採理論與實驗方式加以驗證；1989 年 K.Benkhoucha 和 D.H.Sebastian[24]以 Flow Analysis Network Method (FAN)對 Spiral Mandrel Die 的流場進行二維流動分析，但僅限於泛牛頓流體的等溫流動；1990 年交大許振鵬[25]採用 J.Vleck 和 J.Vlachoponlos 所發展之模式，探討一次改變一個模頭幾何參數對流量均勻度的影響。

### 3. 三維分析模式：

實體的三維分析，因流場幾何尺寸複雜，所需計算時間長，所發表的論文不多，在 1991 年 Coyle 和 Perdikoulis[26]以商業軟體 FIDAP，採用完整的 Navier-Stokes equations 進行牛頓流體的等溫流動分析。文中發現 3D 與 2D 的分析結果，差異性頗大，尤其在流量分佈方面，3D 的分析結果比 2D 更接近實驗數據；2001 年 M.Zatloukal et al[27]以套裝軟體 FIDAP 進行三維流場分析，除探討等溫與非等溫模式對螺旋段出口處之流量差異外，並說明在不同押出速度、不同模溫對流動均勻度與螺旋溝中壓力降的影響，同時，比較模擬與實驗的差異，結果發現非等溫情況與實驗結果較一致。

### 4. 最佳化模式：

以上所使用之模擬若應用於實際設計上，需採用傳統模擬方式，利用一次改變一個參數並同時固定其他設計參數之方式，這樣十分耗費時間，故需採用最佳化模擬，1998 年黃俊欽老師[28]提出在模擬過程中引入田口法，利用 L9 直角表來建立模頭之最佳幾何形狀，其假設系統為等溫，並採取不同起始水準來作為搜尋區間，避免因水準不同所造成的搜尋誤差。

#### 1.4 研究目的:

目前國內發展共押製程技術的廠商主要分成兩類，一類為供應共押製程設備廠商，包括核心設備如:單層、多層模頭、單螺桿與相關的周邊設備如:冷卻系統、引取系統、裁切系統等，另一類為生產押出製品廠商，其中核心設備廠商之設計原則一般均傾向於泛用型，即所設計之模頭與螺桿均適用於加工大部份之塑料，以節省訂購廠商的設備成本，但從流場模擬的角度來看這樣的設計方式是不正確的，因為無論在模頭或是螺桿的設計過程中，所設計的幾何形狀與整體的流場特性有很大的關係，而影響流場特性也與所使用的塑料流變性質有關，如:黏度、剪切率、流動性...等，而且目前國內廠商所設之模頭大部份皆以經驗值為主，設計時無法將實際操作條件如:押出機之壓力，流量，螺桿轉速..等因素結合，故在完成模頭組裝後必須經過一連串測試，因此要達到穩定製程，必須花費許多測試時間，相關尺寸的調整與塑料成本的浪費。

近幾年電腦計算能力大幅提升及電腦設備的普及，使得高分子加工的電腦輔助工程分析（CAE Computer-Aided Engineering）成為學術界及工業界不可或缺的工具。將所設計的模頭形狀經由 CAE 的分析找出最佳的設計幾何，並可在電腦上模擬實際押出之操作條件找出較佳之實際操作視窗，可節省產品開發時時間的損耗及大幅減少材料的浪費。

本論文目的在利用電腦輔助工程分析針對共押模頭進行最佳尺寸設計，將所設計之模頭實際加工完成，並結合 CAE 分析找出穩定操作視窗，並應用於現場製程中，因為在模擬過程有針對模頭的流場特性如：模頭出口處之流量均勻度、模頭內部之壓力降、模頭螺旋段之混合度，來進行模擬，最後期望由押出實驗能針對模擬結果作實際驗證，藉以證明上述的開發設計流程的正確性，可提供相關業界開發類似產品的參考。

## 二、模具設計

### 2.1 設計流程：

一個模頭的產生從設計、分析、製造到零件組立，所需考慮的因素有很多，因本文所設計的模頭完成後須安裝在實驗室現有押出機上，故除了本身模頭各部零件的尺寸公差與配合外，對於所裝配的押出機高度與接合尺寸都必須要考量進去，因此以下介紹本文所設計的模頭從無到有的整個過程。

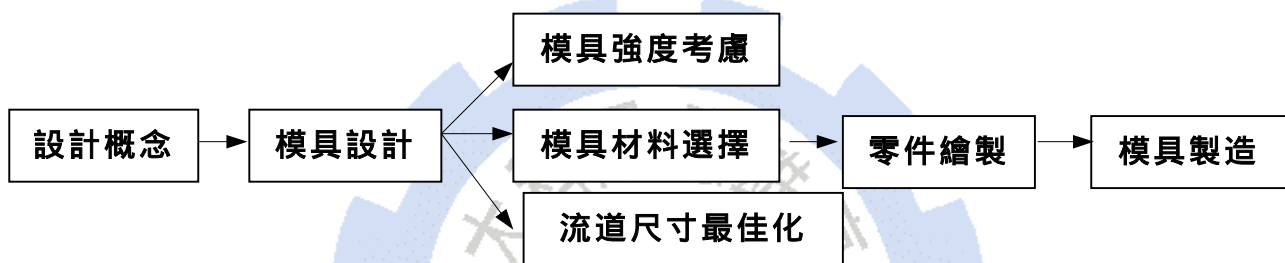


圖 5、模頭設計流程

### 2.2 設計概念

本論文所設計之平面式螺旋模頭，並非第一次出現，在 1958 年 R.Colombo[29]首先提出，將所有的分流流道都在模塊平面上加工，利用模塊堆疊所形成的空間來引導熔膠在模頭內分流，若欲達到不同塑料共押的效果，可將模塊增加數量，故又稱為堆疊式(stacked type)模頭，本次設計時為了利用可視化技術來觀測熔膠在模頭螺旋段的流動情況，故設計成兩個進料的區域，首先將塑料由不同押出機送進模塊中，再利用模塊之上下高度差異，在導流段將塑料引導至螺旋段，並使其從螺旋溝之起點(溝深最深處)開始進入螺旋段，其中不同塑料是以交錯之形式由螺旋溝中漸漸湧出，在螺旋段區域加裝一安全玻璃，藉由混合不同色母的塑料觀察在模頭內實際流動的情況，藉以分析整個流場特性。



### 2.3 模具設計：

有關設計押出模頭的資料並不多，除了許多專利中有對於其幾何形狀進行說明，相關的幾何尺寸配置與設計公差，裝配裕度等資料有參考龍盟機械股份有限公司之設計圖、由圖 6 中可看出，平面式螺旋模頭分為入料段、導流段、螺旋段、鬆弛段及模唇段等，各區段之功能說明如下：

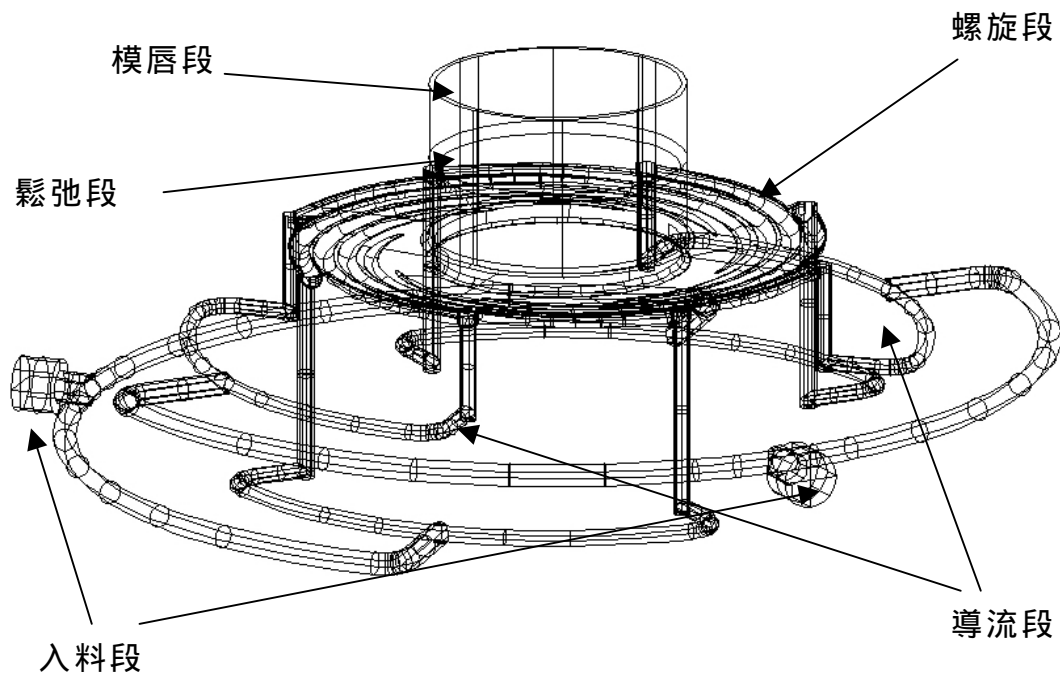


圖 6、螺旋模頭之流道圖

#### 2.3.1 入料段：

在入料段中因為必須接受螺桿所提供的塑料，因此在模頭設計時在曲面模塊上需銑銷出一平面，做為法朗板的定位用，法朗板的作用在於接合螺桿前端的彎管與模頭，在入料口必須有一段為螺紋段，當法朗板定位後可將彎管旋接於模頭上。

#### 2.3.2 導流段：

導流段顧名思義即在將熔膠導引至螺旋段之入口處，本次設計也是利用導流的方式使不同的塑料得以形成交錯的形式，因為模具尺寸的考量，

故所設計的流動長(L/D)很長，可能導致在導流段形成較大的壓力損失，因此在流道中鍍鉻 0.03mm，目的為減低熔膠對模具的摩擦，避免流道中壓損過大與形成磨擦生熱問題。

### 2.3.3 螺旋段:

螺旋段的功能是用於熔膠的形狀轉型，由入料段的圓形斷面轉換成進入鬆弛段的環形斷面，利用螺旋溝深的設計得以消除熔膠結合線達到良好的混合效果。

### 2.3.4 鬆弛段:

其主要功能用來鬆弛因經過螺旋段所造成的熔膠內部應力不均的現象，避免過高的內應力造成的模口膨脹(die swell)現象。

### 2.3.5 模唇段:

在模唇段最主要用於決定薄膜的厚度，因間隙較小具有產生高剪應力與穩定壓力的效果，使出口處的流量穩定，為方便校定厚度，在出口處設計一個可活動式模唇，利用八支螺栓來微調圓周方向的間隙均勻度，方便往後拆模後組裝完成校正薄膜厚度使用。

一般此類的模頭基本的目的都是以擠出吹製的方式產生厚度均勻的薄膜，在結構及設計時有以下的設計準則需遵守[30]:

1. 模頭的模唇段出口處間隙，一般約控制在 0.4~1.2mm 之間，此值不可過大也不可過小，因為太小會造成模頭內的壓力增加，使產能受到影響，當太大時則容易影響薄膜厚度的均勻性。
2. 模頭之模唇段部份其功用在於產品尺寸定型用，故一般設計時應為出口處間隙的 15 倍以上，以便確保出料的穩定性。
3. 為使出螺旋段的熔膠其內部應力可以舒緩，通常在模唇段之前會設計一個鬆弛室，降低薄膜的內應力，減少出口膨脹(die swell)現象。
4. 設計時應儘量減少熔膠在模頭內部之滯流時間差異，過大的時間差容易造成熔膠受熱歷程不一，而造成熔膠熱裂解現象。
5. 在鬆弛段之流道斷面積必須大於模唇段出口處斷面積約 1~2 倍，以確保模頭內有一定的擠出壓力(穩壓)。
6. 在模唇段應設計調節區，用來調節薄膜之均勻度，調節區所使用的螺釘

數目，視模頭大小而定，一般出口間隙在 100mm 以下的模頭，數量約 3~4 根，出口間隙在 100mm 以上的模頭，數量約 6 根，螺絲選定必須有足夠的力學性能。

7. 模頭軸心應具備有一定的強度以便克服在擠出過程中熔膠對軸心的偏移。
8. 模頭各部零件必需有良好的公差配合，以克服生產過程中的熱脹冷縮所造成的漏料缺失。
9. 模頭內流道的最低表面粗糙度  $R_a$  值不應過大，最好可以鍍硬鉻 0.02~0.03mm，以減少熔膠在流道中的摩擦生熱現象。
10. 在設計各部零件時需使結構緊湊，利用結構間的搭配來達到結構補強的效果。
11. 零件間的結合面需接觸良好，最好可設計定位裝置，以便日後拆卸、組裝。

## 2.4 模具強度考慮：

本次設計的模頭，其主要結構為圓形模塊堆疊而成，較無法利用自體結構來增加模具強度，因此各模塊固定的作用都是以螺栓進行鎖緊，因模塊所使用的材料為 SCM440(鉻鉬鋼)，其材料特性較耐高溫，本身強度佳，故當來自於押出機的壓力進入流道時，模塊所承受的壓力皆為由內向外的正向作用力，之前提過因結構問題，模塊本身無法利用結構設計來吸收這些壓力，故為了結合上下模塊與承受正向作用力，需在各模塊間加上大量的螺栓，由圖 7 中可看出，螺栓位置皆位於流道間，螺栓直徑由外往內縮小，這樣的設計有利於組裝，而且在流道分佈的上下模塊間皆設計有兩根定位銷，方便定位用，避免因組裝誤差造成押出成形時熔膠外漏的現象產生；在熔膠入口處因壓力較高，故又增加兩根螺栓固定，因押出模頭相關設計文獻很少，故所設計之模頭之各模塊高度、螺栓位置、螺栓尺寸與螺栓個數皆採用設計經驗值，為避免所設計之結構無法承受熔膠所給予之壓力，故用於固鎖之螺栓皆經熱處理，增加其強韌度。

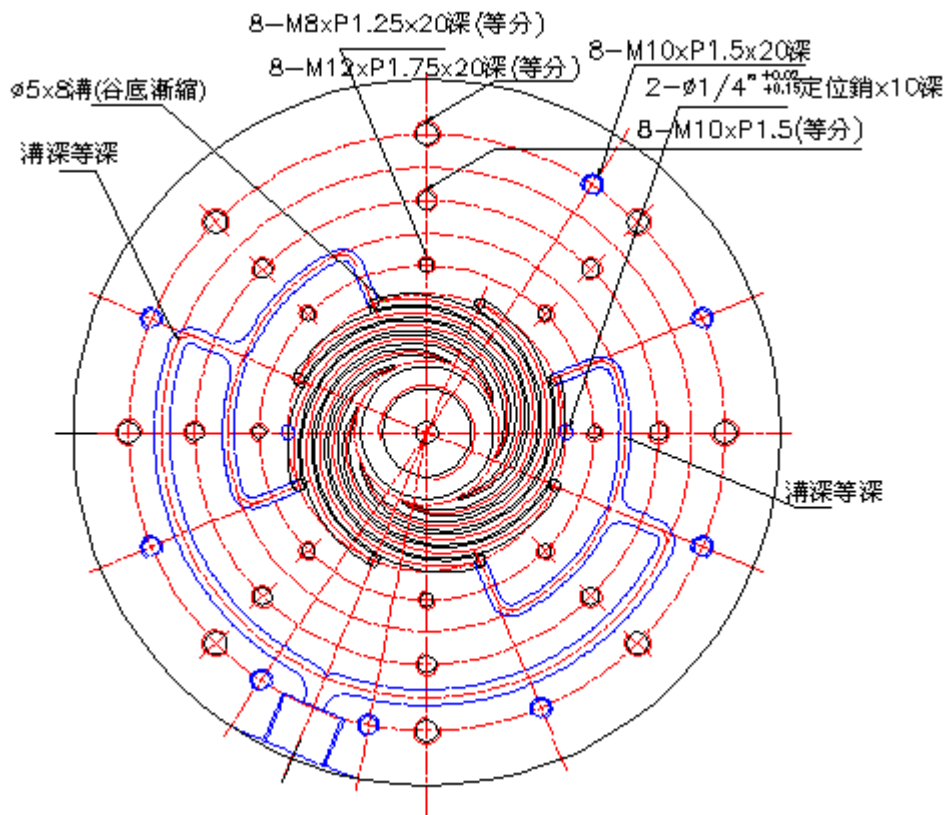


圖 7、模塊螺栓位置圖

## 2.5 模具材料選擇：

模具材料的選用適當與否，不但會直接影響到模具壽命、精度、加工性、價值與成本等有很大之影響，而且也會影響到製成品的品質。

在設計模具時，設計人員需先對目前市面上及廠內現有的模具材料，徹底的有所了解。模具所用的材料通常大部都是屬於金屬材料，但或許也會用到非金屬材料，所以在選用模具材料時應考慮到產品的壽命，所採用的塑料、模具的構造、零件的設計、製造價格、成形品的外觀、物性、尺寸精度以及物理與化學性能等因素。因此在選用模具材料有以下幾個原則：

### 2.5.1 機械加工性好

銑削加工、研磨加工、放電加工等模具主要加工的加工性良好，對於未來成品裝配的公差可以做很好的控制。

#### **2.5.2 耐摩耗性佳**

此為影響模具壽命及模具精度的主要因素，模具精度佳可以使製品品質穩定，避免成本浪費。

#### **2.5.3 韌性好**

模具零件薄肉部分或受衝擊部分需具此特性，可表現出模具的設計本意，不致在長時間製程後造成模具變形，因而造成漏料的情況。

#### **2.5.4 耐蝕性優**

有時模具所使用的成形材料有些在製程中會產生腐蝕性氣體，故模具須能耐這些氣體。

#### **2.5.5 熱處理特性**

模具鋼材需經熱處理強化材料，但在熱處理過程時熱處理變形要小，避免造成尺寸失真。

#### **2.5.6 價廉**

模具材料價格佔模具成本很大，故所挑選材料需具市場性，能快速而便宜地購得，但若於特殊用途則希望將所佔體積比降低，減少成本負擔。

#### **2.5.7 表面加工性良好**

研磨性好，容易獲得鏡面、刻字等加工性佳的效果，例如模頭中流道部分需有高光滑表面，且不會有鋼材組織不一、硬度不均等缺點。

### **2.6 流道尺寸最佳化：**

本文所設計的平面式螺旋模頭，因為所產製的薄膜性質與模頭流道的幾何形狀(主要以螺旋段為主)有很大的關係，為了使設計出的模頭所生產的薄膜能達到使用要求，故針對螺旋段的幾何尺寸做最佳化的設計，有關流道最佳化的設計與分析過程，為了有更完整的闡述，因此於第三章有詳細的說明。

### 2.1.6 零件繪製與加工：

由程式所搜尋出的最佳化幾何參數組合，必須與實際所設計的模頭尺寸結合，故將程式中所分析出的流道幾何形狀的二維點資料，匯入套裝軟體 **Rhinoceros**，並將所有的點資料連結成線架構，再將線架構鋪成曲面，進而轉成實體模型，以所分析出的流道為基礎，逐一建構出模頭的各模塊與相關零件，各部零件繪製完畢後，可以繪製模頭的立體系統圖，如圖 9 所示，並可將 3D 圖檔以 **Rhinoceros** 自動產生 2D 圖檔功能，來產生每個實體圖的三視圖，再將檔案另存成 **AutoCad** 圖檔，在 **AutoCad** 中將所需之尺寸及公差標註完畢，即完成所有零件的繪製，由 **AutoCad** 轉檔(\*.dxf)，可匯入套裝軟體 **MasterCam**，由所繪的幾何圖形產生各種刀具尺寸的刀具路徑，並且產生 NC 碼(Numerical Control code)並將產生的程式碼載入數控工具機上即可進行各部零件之加工，圖 8 為零件加工流程圖。

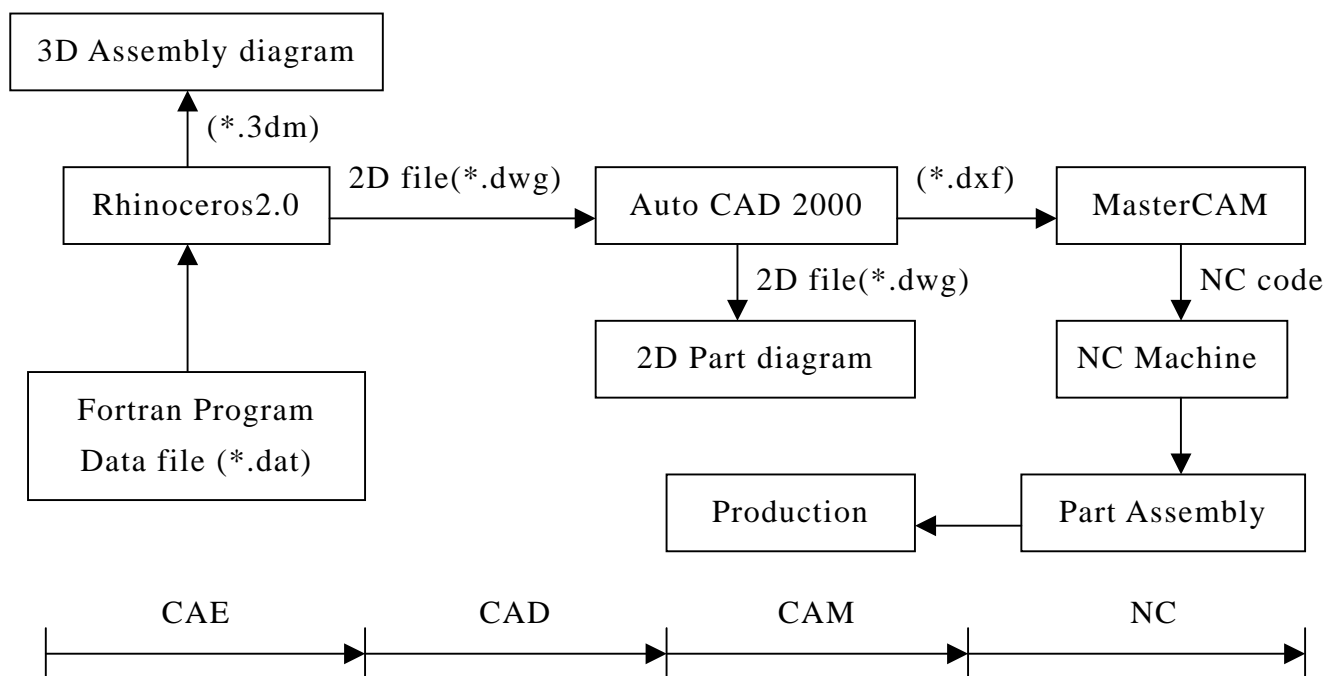


圖 8、零件轉檔、加工流程圖

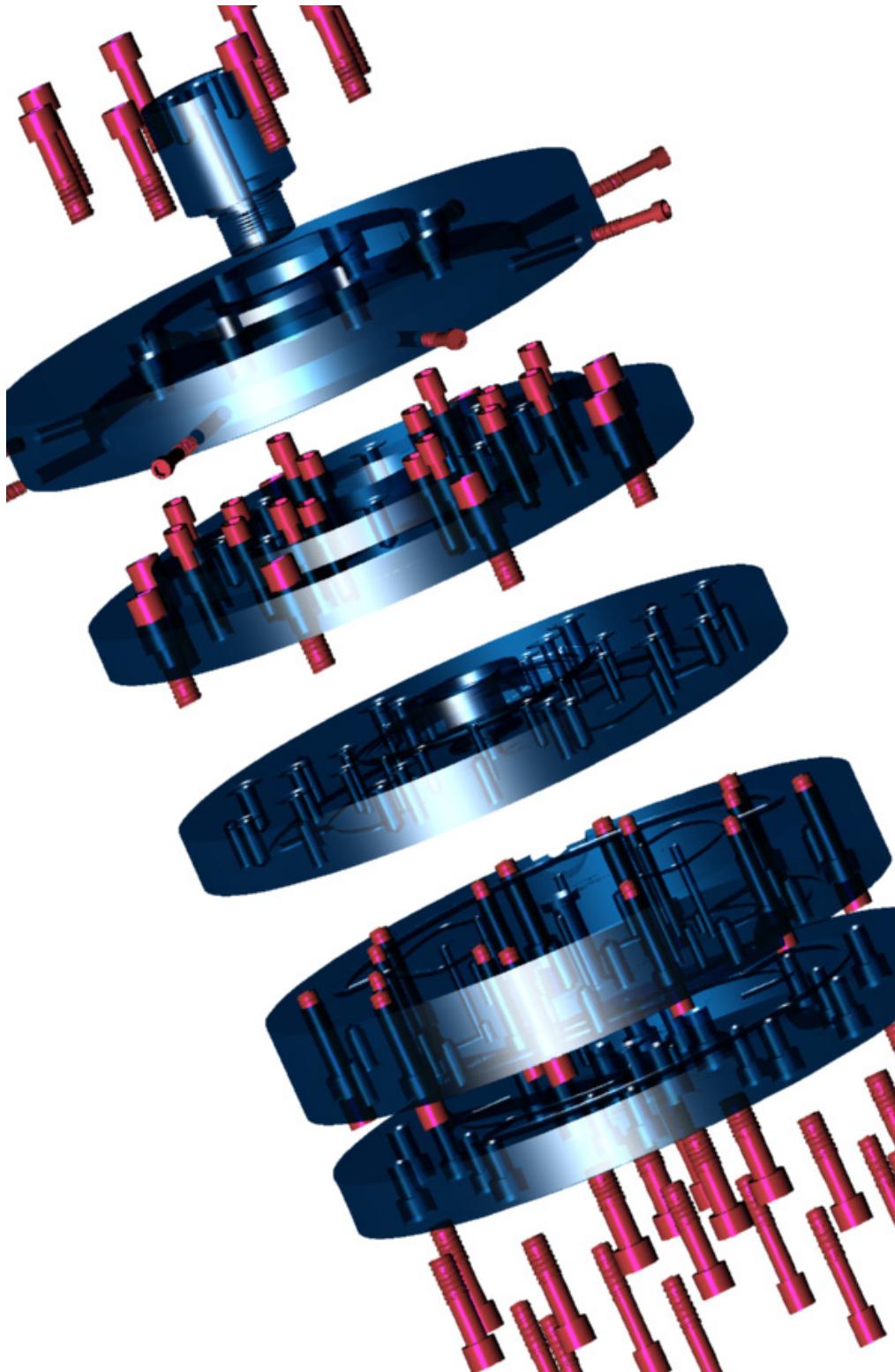


圖 9、模頭之立體系統圖



### 三、理論及研究方法建立

模頭整個流場範圍主要分為幾個部份，計有導流段、螺旋段、鬆弛段及模唇段(圖 10 所示)，各部份的流動行為並不盡相同，因此，以下就依不同區段之不同流動特性來加以說明：

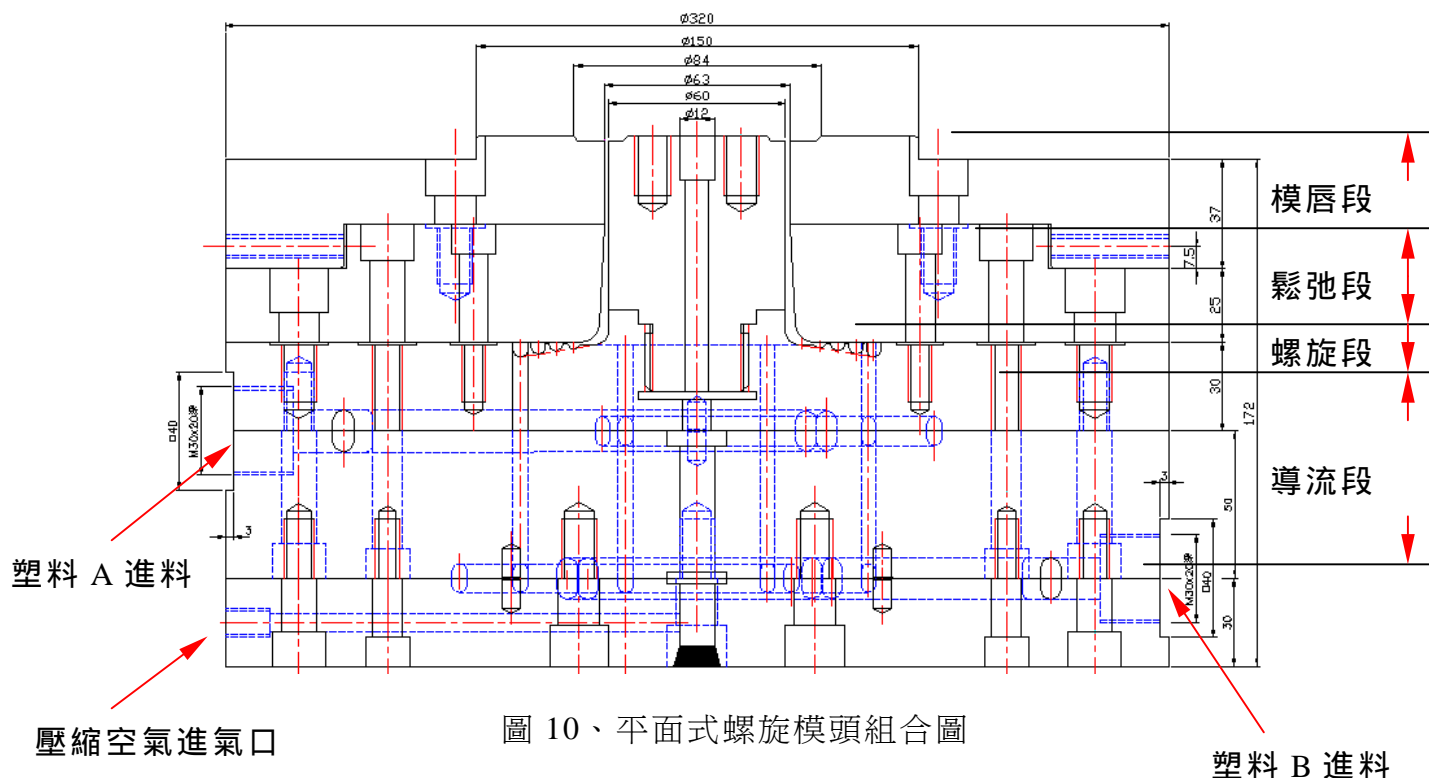


圖 10、平面式螺旋模頭組合圖

#### 3.1 入料段、導流段、模唇段之流動：

在入料段、導流段與模唇段可假設為一維流動模式，其流量與壓降之間關係式可用下式描述之[32]：

$$Q = KG^n \Delta P^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

其中  $K = m^{\frac{1}{n}}$ ，黏度模式以 power law model  $\eta = m\dot{r}^{n-1}$ ，G 為流道之形狀因子，其形式如下：

##### 3.1.1 入料段、分流段-圓斷面

$$G_{cir} = \left( \frac{\pi}{4} \right)^n \frac{R^{3n+1}}{2L} \quad (2)$$

### 3.1.2 模唇段-環狀斷面

$$G_{annul} = \left(\frac{\pi}{6}\right)^n \frac{(R_o + R_i)^n \cdot (R_o - R_i)^{2n+1}}{2L} \quad \text{when } \frac{\pi(R_o + R_i)}{(R_o - R_i)} \geq 37 \quad (3)$$

若  $\frac{\pi(R_o + R_i)}{(R_o - R_i)} < 37$  則形狀因子  $G$  必須乘上修正因子  $F_p$ ，其定義如下：

$$F_p = 1.008 - 0.7474 \left( \frac{R_o - R_i}{\pi(R_o - R_i)} \right) + 0.1638 \left( \frac{R_o - R_i}{\pi(R_o - R_i)} \right)^2 \quad (4)$$

當熔膠在不同形狀之流道中流動時，其視剪切率(apparent shear rate)與流量之關係如下：

圓斷面  $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$  (5)

環狀斷面  $\dot{\gamma} = \frac{6Q}{\pi(R_o + R_i) \cdot (R_o - R_i)^2}$  (6)

#### 1. 求解方法

在計算流量與壓降間之關係，其求解步驟如下：

- (1)由流量  $Q$  計算出視剪切率  $\dot{\gamma}$
- (2)由視剪切率  $\dot{\gamma}$  經黏度曲線找出黏度  $\eta$  與  $n$  值，並利用 power law model 計算出  $m$  與  $k$  值
- (3)由式(2)(3)(4)計算形狀因子，代入式(1)即可求得壓降  $\Delta P$ ，以流量與壓降之關係做為流道設計尺寸之依據。

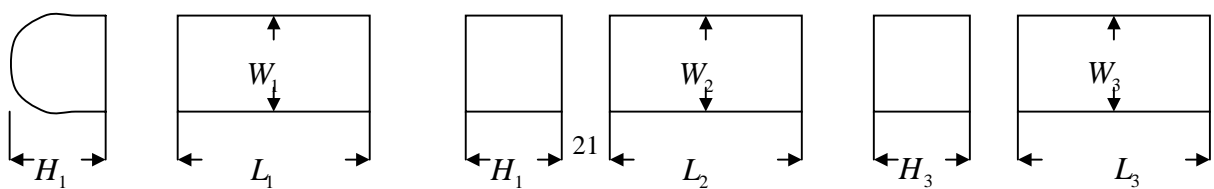
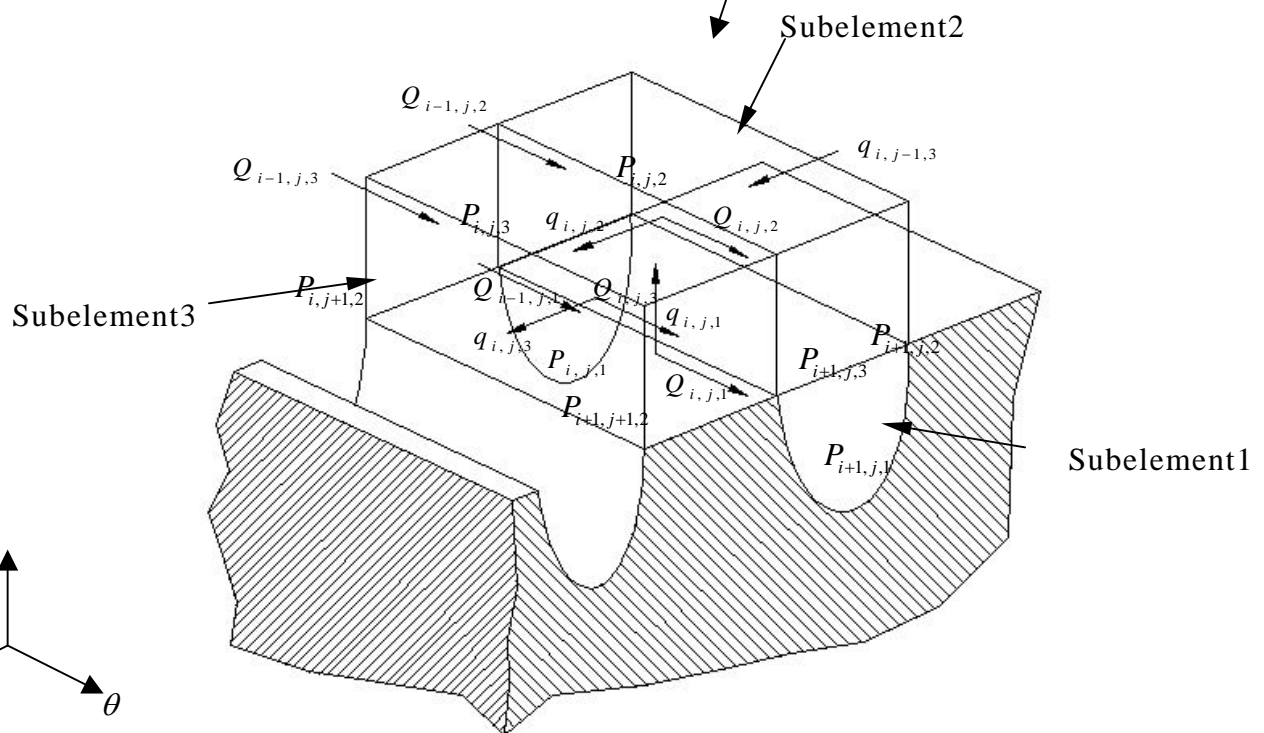
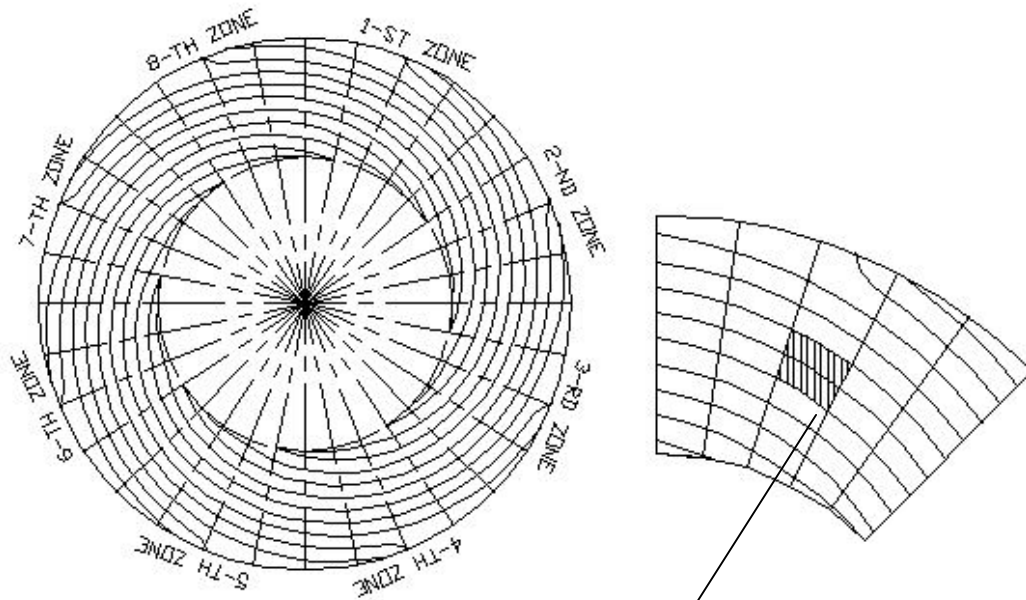


圖 11、流道展開及控制體積示意圖

註:推導公式時將  $r$  方向之尺寸訂為  $W_i$ ， $\theta$  方向之尺寸訂為  $L_i$ ， $z$  方向之尺寸訂為  $H_i$ ，在程式中將  $r$  方向之尺寸訂為  $D_2$ ， $\theta$  方向之尺寸訂為  $D_1$ ， $z$  方向之尺寸訂為  $D_3$ ， $P_{i,j,n}$ 、 $q_{i,j,n}$ 、 $Q_{i,j,n}$  ( $n=1, 2, 3$  代表所屬之子單元)

### 3.2 螺旋段之流動:

#### 3.2.1 理論推導:

由圖 11 中可看出，模頭螺旋段之流道主要以類似兩無限平板間及半圓管的流動兩種，故先針對兩種流動的模式進行理論上的推導:

##### 1. 兩無限平板之流動:

以子單元三為例，圖 12 所示

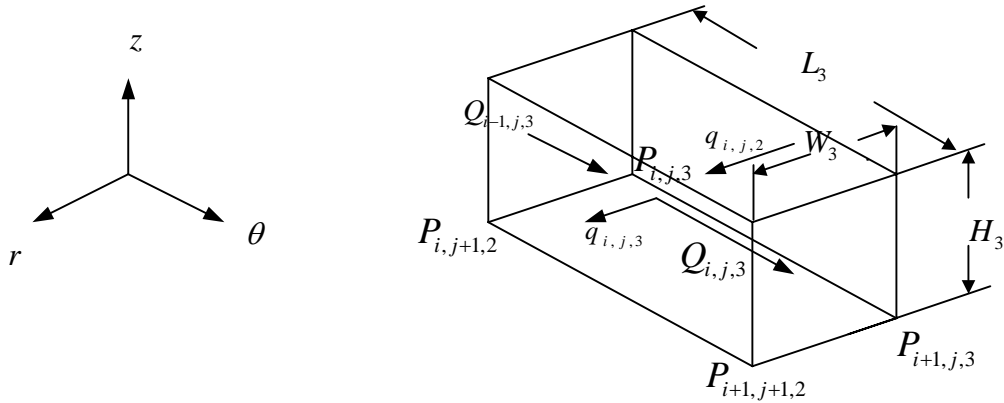


圖 12、子單元三之示意圖

由動量方程式(Equation of motion)加以假設化簡，化簡後得:

$$-\frac{\partial}{\partial Z} \tau_{zr} = \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7)$$

$$-\frac{\partial}{\partial Z}\tau_{z\theta} = \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (8)$$

上式中之  $P$  為壓力， $\tau_{z\theta}$ 、 $\tau_{zr}$  為剪應力

先由流量  $q$  來推導，假設流體為全展流(fully developed flow)，故

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \text{constant}$$

將(7)式積分：

$$\tau_{zr} = -\frac{\Delta p}{\Delta r} z + C \quad (9)$$

代入邊界條件：

$$Z=0 \quad , \quad \tau_{zx} = 0$$

得  $C=0$ ，故(3)式為

$$\tau_{zr} = -\frac{\Delta p}{\Delta r} z \quad (10)$$

本系統假設流體黏度與剪切率之關係符合幂次定律模式(power law model)，其公式如下：

$$\eta = m\dot{r}^{n-1} \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad \dot{r} = \sqrt{\dot{r}_i^2 + \dot{r}_j^2} \quad (12)$$

上式中之  $\dot{r}$  為總剪切率， $\dot{r}_i$  為  $\theta$  方向之剪切率， $\dot{r}_j$  為  $r$  方向之剪切率

將(10)式代入(11)式中，得：

$$v_r = \left(\frac{\Delta p}{\Delta r \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+n}\right) z^{\frac{1+n}{n}} + c$$

代入邊界條件：

$$z = \frac{H}{2} \quad , \quad v_r = 0$$

$$\text{故} \quad c = -\left(\frac{\Delta p}{\Delta r \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+n}\right) \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1+n}{n}}$$

$$\text{得 } v_r = \left( \frac{\Delta p}{\Delta r \times m} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{n}{1+n} \right) \left[ z^{\frac{1+n}{n}} - \left( \frac{H}{2} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \quad (13)$$

由(13)式推導出平均速度之關係式：

$$\overline{v_r} = \left( \frac{\Delta p}{\Delta r \times m} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{n}{1+2n} \right) \left( \frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{H}{2} \right) \quad (14)$$

由(11)式中得知

$$\tau = m \dot{r}^n$$

而由(10)式中得  $\tau_{zr} = \frac{\Delta p}{\Delta r} z$

綜合上式，可得在 r 方向之壁上剪切率(wall shear rate)爲：

$$\left( \frac{\Delta p}{\Delta r \times m} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}} = \dot{r}_{jw} \quad (15)$$

將(14)式與(15)式比較得到 r 方向之壁上剪切率  $\dot{r}_{jw}$  與平均速度  $\overline{v_r}$  的關係：

$$r_{jw} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H} \overline{v_r} \quad (16)$$

由子單元三來看，當流量 q 所流經的斷面積爲  $L_3 \times H_3$ ，則流量與平均速度的關係式如下：

$$q = \overline{v_r} \times A \quad (17)$$

將 (11)(15)(16)(17)式代入(10)式中可得到壓力梯度

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = \frac{2m \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 L_3} q_{ij3} \right] \quad (18)$$

同理以流量 Q 來加以推導，可得平均速度之關係式：

$$\overline{v_\theta} = \left( \frac{\Delta p}{\Delta \theta \times r \times m} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{n}{1+2n} \right) \left( \frac{H}{2} \right)^{\frac{1}{n}} \left( \frac{H}{2} \right) \quad (19)$$

在  $\theta$  方向之壁上剪切率爲：

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta \theta \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}} = \dot{r}_i \quad (20)$$

$\theta$  方向之壁上剪切率  $r_{iw}$  與平均速度  $\bar{v}_\theta$  的關係：

$$r_{iw} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H} \bar{v}_\theta \quad (21)$$

流量與平均速度的關係式如下：

$$Q = \bar{v}_\theta \times A \quad (22)$$

壓力梯度

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 W_3} Q_{ij3} \right] \quad (23)$$

註： $r$  表示爲螺旋軌跡之起始半徑(可用來決定螺旋段之範圍)

## 2. 圓管之流動：

由以子單元一爲例來加以說明，圖 13 所示

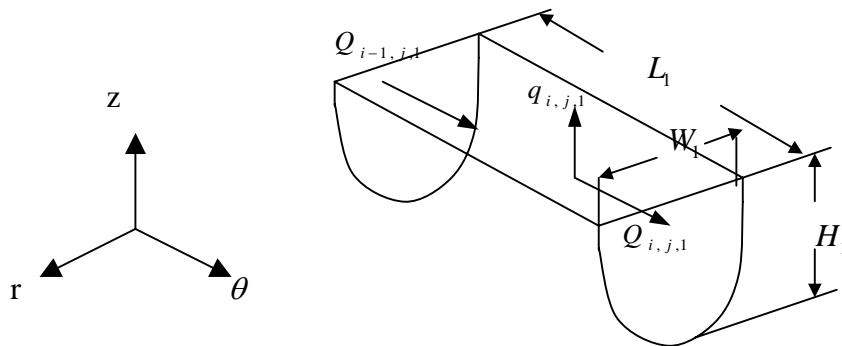


圖 13、子單元一之示意圖

由動量方程式(Equation of motion)加以假設化簡，系統之假設與無限平板流動時相同，將上式化簡得：

$$\frac{1}{r} = \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (24)$$

假設流體為全展流(fully developed flow)，故  $\frac{\partial p}{\partial z} = \text{constant}$

將(24)式積分：

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta p}{\Delta z} \frac{r}{2} + c \quad (25)$$

代入邊界條件：

$$r = 0, \quad \tau_{rz} = 0$$

得  $C=0$ ，故(9)式為

$$\tau_{rz} = -\frac{\Delta p r}{2\Delta z} \quad (26)$$

$$\text{當 } r=R(\text{在壁上}), \text{此時之壁剪應力 } \tau_{(rz)w} = \frac{\Delta p R}{2\Delta z} \quad (27)$$

將(26)式代入幂次定律(power law)得下式：

$$v_z = \left(\frac{\Delta p}{2\Delta z \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+n}\right) r^{\frac{1+n}{n}} + c \quad (28)$$

代入邊界條件：

$$r = R, \quad v_z = 0$$

$$\text{故 } c = -\left(\frac{\Delta p}{2\Delta z \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+n}\right) R^{\frac{1+n}{n}}$$

$$\text{得 } v_z = \left(\frac{\Delta p}{2\Delta z \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+n}\right) \left(r^{\frac{1+n}{n}} - R^{\frac{1+n}{n}}\right) \quad (29)$$

由(29)式推導出平均速度之關係式：

$$\bar{v}_z = \left(\frac{\Delta p}{2\Delta z \times m}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{n}{1+3n}\right) R^{\frac{1}{n}} \quad (30)$$

由(11)式中得知



$$\tau = m \dot{r}^n$$

而由(26)式中得  $\tau_{zr} = \frac{\Delta p r}{2\Delta z}$

綜合上式，可得在  $z$  方向之壁上剪切率為：

$$\left(\frac{\Delta p}{2\Delta z \times m}\right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{1}{n}} = \dot{r}_{iw} \quad (31)$$

將(30)式與(31)式比較得到  $z$  方向之壁上剪切率  $r_{iw}$  與平均速度  $\bar{v}_z$  的關係：

$$r_{iw} = \frac{(3 + \frac{1}{n})}{R} \bar{v}_z \quad (32)$$

由子單元一來看，當流量  $Q$  所流經的斷面積為  $\pi R^2$ ，則流量與平均速度的關係式如下：

$$Q = \bar{v}_z \times A \quad (33)$$

將(33)式代入(32)式中得：

$$r_{iw} = \frac{(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_{ij1} \quad (34)$$

將 (31)(32)(33)式代入(26)式中可得到壓力梯度與流量  $Q$  之關係

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{2m \dot{r}_w^{n-1}}{R} \left[ \frac{(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_{ij1} \right] \quad (35)$$

註：此處之  $\Delta z$  為子單元一之  $L_1$  方向之尺寸， $R$  為溝槽半徑

### 3.2.2 系統說明：

由圖 11 中可以看出，本文將整個平面螺旋模頭之流場由螺旋溝入口來對整個流場做分割，流道設計有八條螺旋溝故分割為八個區域，因每個分

割區域之流動情形皆相同，為節省計算時間以其中一個區域來進行細分，即模擬 1/8 流場即可，以  $\theta$  方向進行分割，斜線部分為一個計算單元，每個單元中包括三個子單元(Subelement)，其分別為：

1. 子單元一為螺旋溝部份
2. 子單元二為螺旋溝正上方之間隙部分
3. 子單元三為相鄰兩螺旋溝之間的區域

圖 12 為單元之詳圖

### 3.2.3 數學模式：

本研究是將整個模頭以放射狀切個成數十個計算單元，為了符合 Poiseuille type 流動，各子單元之幾何尺寸以其平均值來加以計算，以下即為各子單元之流場說明：

#### 1. 子單元一之控制方程式：

圖 13 中顯示，由動量方程式所推導出在  $\theta$  及  $z$  方向之壓力降分別為：

$$P_{i,j,1} - P_{i+1,j,1} - f(Q,q)Q_{i,j,1} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,1} + P_{i+1,j,1}) - \frac{1}{4}(P_{i,j,2} + P_{i,j,3} + P_{i+1,j,2} + P_{i+1,j,3}) - g(Q,q)q_{i,j,1} = 0 \quad (37)$$

其中  $f(Q,q)Q_{i,j,1}$  與  $g(Q,q)q_{i,j,1}$  表示為流動阻力

由連續方程：

圖 13 中顯示，子單元一之流動，乃是由前一個子單元沿溝槽方向流動所形成故其方程式為：

$$Q_{i,j,1} + q_{i,j,1} = Q_{i-1,j,1} \quad (38)$$

因子單元一為分割螺旋溝槽的部分，而螺旋溝在設計時，希望其溝深隨著螺旋溝的方向逐漸遞減，故必須將溝深尺寸分以下列兩種情況來加以說明：

**(1) 溝深大於半徑時：**

由示意圖(圖 14)看出在  $\theta$  方向的流量可以分為半圓柱區域  $Q_1$  及長方體區域  $Q_2$ ，故其流量關係式為：

$$Q_\theta = Q_1 + Q_2 \quad (39)$$

<1>在長方體區域中之壓力梯度如下：

由之前所推導之兩無限平板流動公式中得知：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{W_1} \dot{r}_w^{n-1} \left[ \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 H} Q_2 \right] , \quad \dot{r}_w = \sqrt{\dot{r}_{iw}^2 + \dot{r}_{jw}^2} \quad (\text{兩個方向})$$

因在子單元一中僅有  $\theta$  方向之一維流動，故：

$$\dot{r}_w = \dot{r}_{iw}$$

由  $\dot{r}_{iw} = \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 H} Q_2$

代回上式得：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{W_1} \frac{\dot{r}_w^n}{\dot{r}_w} \left[ \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 H} Q_2 \right]$$

所以

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{W_1} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{W_1^2 H} Q_2 \right]^n \quad (40)$$

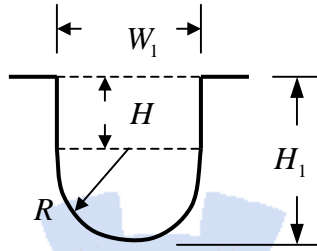


圖 14、子單元一，溝深大於半徑之示意圖

<2>在半圓柱中之壓力梯度如下：

由之前所推導之圓管流動公式

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m}{R} \dot{r}_w^{n-1} \left[ \frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi R^3} Q_1 \right], \quad \dot{r}_w = \frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi R^3} Q_1$$

在圓管中流動時所推導出之上式，但目前所使用的為半圓柱，故  $Q_1$  必須以  $2Q_1$  來取代，因為流動阻力上升之緣故，所以上式改寫成：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m}{R} \dot{r}_w^{n-1} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_1 \right]$$

與(34)式相同理由推導出其壓力梯度與流量  $Q_1$  之關係式：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{R} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_1 \right]^n \quad (41)$$

假設上述兩區域之壓降相等，將(39)(40)(41)式聯立解出  $Q_1$ 、 $Q_2$   
由(40)=(41)得：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{W_1} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{W_1^2 H} Q_2 \right]^n = \frac{2mr}{R_1} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} Q_1 \right]^n$$

化簡得：

$$Q_2 = \frac{3 + \frac{1}{n}}{2 + \frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} \left( \frac{W_1}{Rr} \right)^{\frac{1}{n}} Q_1 \quad (42)$$

將(36)代入(33)式中，得：

$$Q_1 = Q_\theta \left[ 1 + \frac{3 + \frac{1}{n}}{2 + \frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} \left( \frac{W_1}{Rr} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{-1} \quad (43)$$

將(43)代入(41)式中，得：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr}{R} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} \right]^n \left[ \frac{1}{1 + \frac{3 + \frac{1}{n}}{2 + \frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} \left( \frac{W_1}{Rr} \right)^{\frac{1}{n}}} Q_\theta \right]^n \quad (44)$$

由(35)式  $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{R} \dot{r}_w$ ，把(44)式代入得在圓管內之壁剪切率與流量  $Q_\theta$  之關係：

$$\dot{r}_{iw} = \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} \frac{1}{1 + \frac{3 + \frac{1}{n}}{2 + \frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} \left( \frac{W_1}{Rr} \right)^{\frac{1}{n}}} Q_\theta \quad (45)$$

而洩流至子單元二之  $q$  可將之視為平板流動

$$\text{由(18)式 } \frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{W_1} \left[ \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 L_1} q \right] \quad (46)$$

$$\text{故 } \dot{r}_{jw} = \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 L_1} \quad (47)$$

將所求出之  $\dot{r}_{iw}$  代入  $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{R} \dot{r}_w$  得下式:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{R} \left[ \frac{2(3+\frac{1}{n})}{\pi R^3} \left( \frac{1}{1 + \frac{3+\frac{1}{n}}{2+\frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} (\frac{W_1}{Rr})^{\frac{1}{n}}} \right) \right] Q_\theta \quad (48)$$

由(36)式與(48)式比較得下式:

$$f(Q, q) = \frac{2m\Delta\theta\dot{r}_w^{n-1}}{R} \left[ \frac{2(3+\frac{1}{n})}{\pi R^3} \left( \frac{1}{1 + \frac{3+\frac{1}{n}}{2+\frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} (\frac{W_1}{Rr})^{\frac{1}{n}}} \right) \right] \quad (49)$$

將(46)式與(37)式比較

$$g(Q, q) = \frac{2mH_1\dot{r}_w^{n-1}}{W_1} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{W_1^2 L_1} \quad (50)$$

註:  $H_1 = H + R$

**(2) 溝深小於半徑時:**

如圖 15，在此種情況下須將半圓溝槽之半徑轉換成相當半徑(Equivalent Radius)如下式:

$$R_{eq} = \frac{2 \times (\text{cross-section area})}{\text{wetted perimeter}} \quad (51)$$

在圓管中之流動，將  $R$  轉換成  $R_{eq}$ ，而  $Q_1$  必須以  $2Q_1$  來取代，因為流動阻力上升之緣故。

$$\dot{r}_{iw} = \frac{2(3+\frac{1}{n})}{\pi R_{eq}^3} Q_1 \quad (52)$$

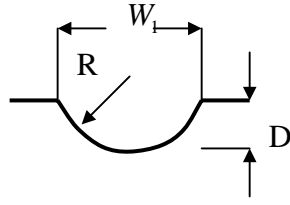


圖 15、子單元一，溝深小於半徑之示意圖

在  $z$  方向之流動可將曲率忽略，而視為一個厚度有變化的平板間之流動，因寬度由  $W_1$  漸縮至零，故兩平板間之距離取其平均值  $\frac{W_1}{2}$

$$\dot{r}_{jw} = \frac{2(2+\frac{1}{n})}{(\frac{W_1}{2})^2 L_1} q \quad (53)$$

由(35)式  $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{R} \dot{r}_w$ ，把(52)式代入得在圓管內之壁剪切率與流量  $Q_\theta$  之關係：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{R_{eq}} \frac{2(3+\frac{1}{n})}{\pi R_{eq}^3} Q_\theta \quad (54)$$

將(54)式與(36)式比較

$$f(Q, q) = \frac{2m\Delta\theta\dot{r}_w^{n-1}}{R_{eq}} \frac{2(3+\frac{1}{n})}{\pi R_{eq}^3} \quad (55)$$

$$\text{由 } \frac{\Delta P}{\Delta z} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{(W_1/2)} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{(W_1/2)^2 L_1} q \quad (56)$$

將(56)式與(37)式比較得：

$$g(Q, q) = \frac{2mD\dot{r}_w^{n-1}}{(W_1/2)} \frac{2(2+\frac{1}{n})}{(W_1/2)^2 L_1} \quad (57)$$

## 2. 子單元三之控制方程式：

圖 12 中顯示，由動量方程式所推導出在  $\theta$  及  $r$  方向之壓力降分別為：

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,3} + P_{i,j+1,2}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j+1,2} + P_{i+1,j,3}) - f(Q, q)Q_{i,j,3} = 0 \quad (58)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,3} + P_{i+1,j,3}) - \frac{1}{2}(P_{i,j+1,2} + P_{i+1,j+1,2}) - g(Q, q)q_{i,j,3} = 0 \quad (59)$$

其中  $f(Q, q)Q_{i,j,1}$  與  $g(Q, q)q_{i,j,1}$  表示為流動阻力

由連續方程：

子單元三之流動乃是由前一個子單元之溝槽方向流動與鄰近子單元二之流動所造成，故其方程式為：

$$Q_{i-1,j,3} + q_{i,j,2} = Q_{i,j,3} + q_{i,j,3} \quad (60)$$

$Q_{i-1,j,3}$  與  $q_{i,j,2}$  表鄰近子單元之體積流率，在程式中所分割之單元，將第一個子單元三之流量假設為：

$$Q_{i-1,j,3} = 0 \text{ 、 } q_{i,j,3} \neq 0$$

將式(23)與式(58)比較：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{2mr \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2+\frac{1}{n})}{H_3^2 W_3} Q_{ij3} \right]$$

由式(58)得



$$f(Q, q) = \frac{2mr\Delta\theta \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 W_3} \right] \quad (61)$$

將式(18)與式(59)比較：

$$\frac{\Delta P}{\Delta r} = \frac{2m\dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 L_3} q_{ij3} \right]$$

由(59)式得：

$$g(Q, q) = \frac{2m\Delta r \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 L_3} \right] \quad (62)$$

### 3. 子單元二之控制方程式：

因子單元二與子單元三之形狀完全相同，圖 16 所示，但兩者間最大之差異在於子單元二  $\theta$  方向之流動會受到子單元一  $\theta$  方向流動之影響，故本文將子單元二之流動視為原來兩倍間隙之平板流動。

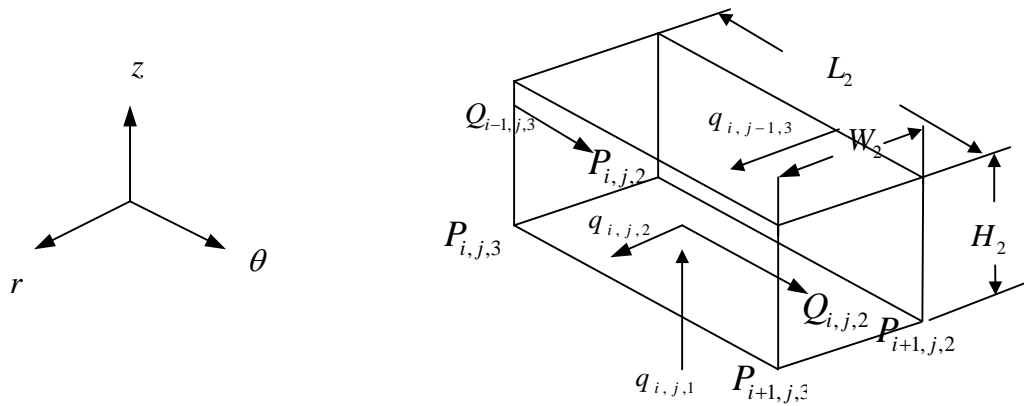


圖 16、子單元二之示意圖

將(21)式以(22)式代入得：

$$r_{iw} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_2} \frac{Q_{i,j,2}}{H_2 W_2} \quad (63)$$

將  $H_2$  以  $2H_2$  取代， $Q_{i,j,2}$  以  $2Q_{i,j,2}$  取代得下式：

$$r_{iw} = \frac{(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2} \frac{Q_{i,j,2}}{W_2} \quad (64)$$

而  $r_{jw}$  與式(16)相同：

$$r_{jw} = \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2} \frac{q_{i,j,2}}{W_2} \quad (65)$$

由圖 16 可知，在  $\theta$ 、 $r$  方向之壓力降：

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,2} + P_{i,j,3}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j,3} + P_{i+1,j,2}) - f(Q, q)Q_{i,j,2} = 0 \quad (66)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,2} + P_{i+1,j,2}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j,3} + P_{i,j,3}) - g(Q, q)q_{i,j,2} = 0 \quad (67)$$

連續方程：

由圖 16 可知，子單元三之流動係由子單元一之洩流、前一子單元之溝槽方向流動與子單元三之軸向流動，故其平衡方程式如下：

$$q_{i,j,1} + Q_{i-1,j,2} + q_{i,j-1,3} = Q_{i,j,2} + q_{i,j,2} \quad (68)$$

由式(23) 將  $H_2$  以  $2H_2$  取代， $Q_{i,j,2}$  以  $2Q_{i,j,2}$  取代得下式：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{mr \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 W_2} Q_{ij2} \right]$$

$$\text{故} \quad \Delta P = \frac{mr\Delta\theta \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 W_2} Q_{ij2} \right] \quad (70)$$

由式(70)與式(66)比較得：

$$f(Q, q) = \frac{mr\Delta\theta \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 W_2} \right] \quad (71)$$

同理，將(19)式與(67)式比較得：

$$g(Q, q) = \frac{2m\Delta r \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 L_2} \right] \quad (72)$$

#### 4.求解方式：

由上述所推導之各子單元控制方程式如下：

(1)子單元一之控制方程式：

$$P_{i,j,1} - P_{i+1,j,1} - f(Q, q)Q_{i,j,1} = 0 \quad (36)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,1} + P_{i+1,j,1}) - \frac{1}{4}(P_{i,j,2} + P_{i,j,3} + P_{i+1,j,2} + P_{i+1,j,3}) - g(Q, q)q_{i,j,1} = 0 \quad (37)$$

$$Q_{i,j,1} + q_{i,j,1} = Q_{i-1,j,1} \quad (38)$$

〈1〉深度大於半徑時：

$$f(Q, q) = \frac{2m\Delta\theta \dot{r}_w^{n-1}}{R} \left[ \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R^3} \left( \frac{1}{1 + \frac{3 + \frac{1}{n}}{2 + \frac{1}{n}} \frac{W_1^2 H}{\pi R^3} (\frac{W_1}{Rr})^{\frac{1}{n}}} \right) \right] \quad (49)$$

$$g(Q, q) = \frac{2mH_1 \dot{r}_w^{n-1}}{W_1} \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{W_1^2 L_1} \quad (50)$$

〈2〉 深度小於半徑時：

$$f(Q, q) = \frac{2m\Delta\theta \dot{r}_w^{n-1}}{R_{eq}} \frac{2(3 + \frac{1}{n})}{\pi R_{eq}^3} \quad (55)$$

$$g(Q, q) = \frac{2mD \dot{r}_w^{n-1}}{(W_1/2)} \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{(W_1/2)^2 L_1} \quad (57)$$

(2) 子單元二之控制方程式：

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,2} + P_{i,j,3}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j,3} + P_{i+1,j,2}) - f(Q, q)Q_{i,j,2} = 0 \quad (66)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,2} + P_{i+1,j,2}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j,3} + P_{i,j,3}) - g(Q, q)q_{i,j,2} = 0 \quad (67)$$

$$q_{i,j,1} + Q_{i-1,j,2} + q_{i,j-1,3} = Q_{i,j,2} + q_{i,j,2} \quad (68)$$

$$f(Q, q) = \frac{mr\Delta\theta \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 W_2} \right] \quad (70)$$

$$g(Q, q) = \frac{2m\Delta r \dot{r}_w^{n-1}}{H_2} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_2^2 L_2} \right] \quad (71)$$

(3) 子單元三之控制方程式：

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,3} + P_{i,j+1,2}) - \frac{1}{2}(P_{i+1,j+1,2} + P_{i+1,j,3}) - f(Q, q)Q_{i,j,3} = 0 \quad (58)$$

$$\frac{1}{2}(P_{i,j,3} + P_{i+1,j,3}) - \frac{1}{2}(P_{i,j+1,2} + P_{i+1,j+1,2}) - g(Q, q)q_{i,j,3} = 0 \quad (59)$$

$$Q_{i-1,j,3} + q_{i,j,2} = Q_{i,j,3} + q_{i,j,3} \quad (60)$$

$$f(Q, q) = \frac{2mr\Delta\theta \times \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 W_3} \right] \quad (61)$$

$$g(Q, q) = \frac{2m\Delta r \dot{r}_w^{n-1}}{H_3} \left[ \frac{2(2 + \frac{1}{n})}{H_3^2 L_3} \right] \quad (62)$$

將式(36)~(38)， (49)、(50)、(55)、(57)~(62)、(66)~(68)、(70)、(71)寫入每一個控制體積，並將壓力梯度以差分展開後聯立求解，即可計算出整個流場的流量及壓力分佈。綜觀上述分析及模頭形狀，可以發現當熔膠物性(n, m)固定後，模頭的設計即在於適當地調配  $G, H, A, \alpha$  等四個幾何參數以滿足設計要求，包括流量均勻度、混合度與總壓力降、。

由於式(36)~(38)， (49)、(50)、(55)、(57)~(62)、(66)~(68)、(70)、(71)為非線性之聯立方程式組，故其求解之步驟如下：

- (1)猜  $Q$ 、 $q$  值
- (2)以步驟(1)中的  $Q$ 、 $q$  求  $f$ 、 $g$
- (3)以步驟(2)中之  $f$ 、 $g$  代入原聯立方程式組，此時方程組為線性
- (4)解出  $P$  及新的  $Q$ 、 $q$  值
- (5)比較步驟(1)和步驟(4)中之  $Q$ 、 $q$  值，若相當接近則步驟(4)中之  $P$ 、 $Q$ 、 $q$  即為解答，否則必須以步驟(4)中求出的  $Q$ 、 $q$  值當做新的猜值，重覆(1)到(5)的步驟。

### 3.3 田口方法

#### 3.3.1 簡介

田口方法是一種在工業界中用來改善產品品質特性的方式，是日本的田口博士所創，在日本已經行之有年，對於日本工業界傳統的生產方式與品質定義有很大的改革，由於在工業界推廣已經十分普遍，而且成效斐然，因此各國的消費者對於日製產品一致給予高度的評價；田口方法在我國已經推廣有十幾年的時間，但是成效仍有限，原因與目前工業界對於研發產品的意願與效率不彰所致，並經常採取與國外技術合作的方式來發展，因此對於在現有的設備及人力之下，如何節省成本而創造出更高品質的產品，是我們在面臨國外強大競爭力下，所應該努力的方向。

田口方法一種技術工具，可用直接、經濟的方式一次可做許多控制因子的實驗，與傳統的實驗方法最大的不同是，將十分繁複的實驗步驟利用直交表的作法來簡化實驗取樣次數，並將實驗方式所得到的結果，經過分析找出製程中最佳化的操作條件，與好的實驗再現性，藉以生產出品質穩定度高，生產成本低的產品。

#### 3.3.2 步驟

田口方法是由經實驗的手段來決定所設計的參數，為了簡化傳統實驗上所操作的模式，必須配合控制因子及其水準的數目來選用適當的直交表，基本理論是經由實驗尋求最佳的產品機能，並且維持此一機能的穩定度，使得產品品質更佳更穩定，減少生產成本，以下是其主要的實驗步驟：

1. 先選定品質特性，即模擬結果所表現出的流場特性，本次研究是針對螺旋模頭所做的多項分析，判定品質特性的理想機能，即希望得到的最佳品質特性，如：模擬時模頭出口處的流量均勻度希望能得到較高的均勻值(望大)；在模頭螺旋溝中的壓力損失能得到較低值(望小)，必須要先確認模擬的目標函數，再套用適當的公式來加以分析。
2. 列出對於實驗中所有能影響品質特性的因子，最好有理論基礎的支持，通常必須經過十分周詳的考慮。
3. 從上述的所有影響因子中決定其中幾個主要的控制因子，並訂出它們的水準，水準的定訂有時需要多嘗試，除了需考慮到模具設計時尺寸的

大小，也必須要從加工刀具的合理性做參考(如銑刀尺寸有 6mm，但取水準時避免取 5.5mm 作為水準)

4. 依據控制因子及其水準的數目選定適當的直交表，典型的直交表是以  $L_a(b^c)$  來命名，代表有 a 組實驗，最多可容納 b 個水準的因子 c 個，並且安排出完整的實驗計劃，首先對每個自由參數( $G, H, A, \alpha$ )選定三個水準(level)，如表 1 所示。則實驗共有  $1+4 \times (3-1)$  個自由度，故選取 L9 直交表來配置各個參數的水準，直交表為  $L9(3^4)$  配合控制因子(4 個控制因子)及其水準的數目(3 個水準)。

表 1、L9 直交表

| Exp. No. | A | B | C | D |
|----------|---|---|---|---|
| 1        | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2        | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3        | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 4        | 2 | 1 | 3 | 3 |
| 5        | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 6        | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 7        | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 8        | 3 | 2 | 1 | 3 |
| 9        | 3 | 3 | 2 | 1 |

5. 執行模擬，記錄模擬數據。
6. 資料分析，資料分析必須要使用許多統計學上的計算，目的在於了解每個控制因子的變動對品質特性的影響大小，進而統合影響因子，減少操作條件，得到各主要控制因子的影響程度與使品質最佳化的控制因子組合。
7. 確認實驗，對於所得的最佳化組合先行計算出理論上的預測值，再將最佳組合實際做確認實驗，所得的實驗值與先前的預測值做比較，若非常接近表示實驗成功，即可將所得的最佳組合推展至生產線上使用，若預測值與實驗值相差太大，可能必須要重新來過，直到找出最佳組合而得到最佳的產品品質為止。

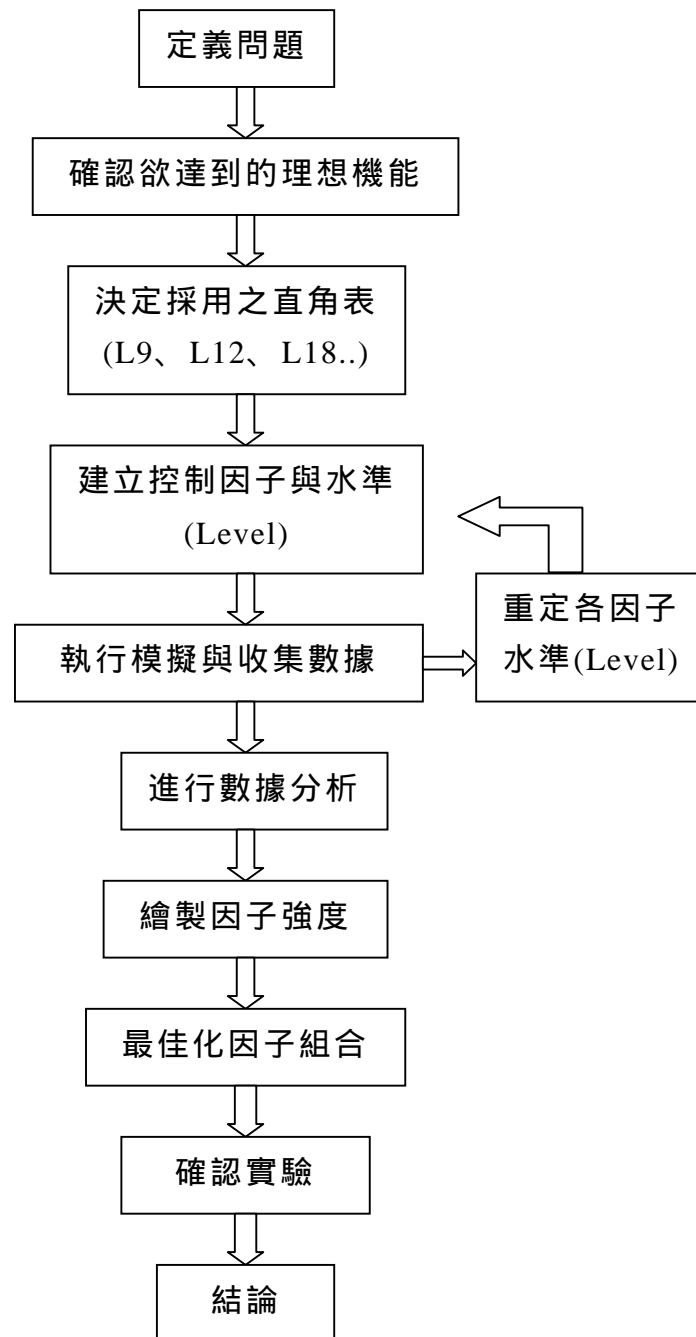


圖 17、田口式實驗計劃流程圖



### 3.4 田口搜尋設計

#### 3.4.1 目的:

本次研究是針對平面式螺旋模頭螺旋段流場進行模擬分析，一般螺旋模頭的設計要求的重點在於當塑料在螺旋溝中流動時，希望熔膠在螺旋溝中的流量與洩流量呈現一線性關係比，使得來自相鄰之螺旋溝的熔膠有很好的混合效果，除了可以消除熔合線外，同時希望在螺旋溝末端的圓周方向具備均勻的流量分佈，並為顧及產能損耗，期望所設計的模頭的壓力損失不可過高，以下就分別說明各設計要求之定義：

##### 1. 流量均勻度(Uniformity)

係指針對螺旋段出口處之流量(子單元三之  $q$ )，當流量均勻度越高時，表示所產製之薄膜在徑向之均勻度越高，即可得較等厚度之薄膜，其定義如下：

$$UI = 1 - \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} \left( \frac{q_i}{q_{avg}} - 1 \right)^2} \quad (66)$$

其中  $q_i$  為兩螺旋溝間之區域中，位於子單元三之  $r$  方向的體積流率  $q_{avg}$  為  $q_i$  之平均值； $N_1$  為兩螺旋溝之間的區域中，位於螺旋段出口處子單元三之單元個數；當模擬結果之  $UI$  值越趨近於 1 時，表示在模頭出口之軸向流量分佈越均勻。

##### 2. 混合度(Mixing Degree)

在本文中所設計之模頭，當塑料自螺溝中逐漸湧出之流量維持定量時，熔膠在圓周方向才會有均勻之厚度，故為預估螺溝中之流量與洩流量間之流量比為線性與否，以混合度來加以評估，其定義如下：

$$MD = 1 - \frac{1}{Q_e} \sqrt{\frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} \left( Q(L) - Q_e \left( 1 - \frac{L}{L_i} \right) \right)^2} \quad (67)$$

其中  $Q_e$  為一螺旋溝入口的總體積流率

$N_2$  為子單元一的總數

$L_i$  為螺旋溝總長度

$L$  為行經螺旋溝的長度

$Q(L)$  為螺旋溝槽  $L$  長度處沿著螺旋溝方向之體積流率

當 MD 值越趨近於 1 時，表示各溝道間的熔膠混合情況越佳

### 3. 壓力降(Pressure Drop)

在模頭入口處之壓力一般為最大，其壓力來源係由押出機所供應，而在模頭出口處之壓力均假設為零，故當壓力降越大時即表示模頭入口處至出口間熔膠所造成的壓力損失越大，意即製程中能源損失越嚴重，故一般希望壓損不可過高。

為求實驗更高效率與科學化，將傳統的改變控制因子的實驗方法(一次一因子法)改為採用田口方法，藉以簡化模擬的次數。

#### 3.4.2 訂定控制因子及水準:

##### 1.控制因子:

由上述三個目標函數中，可以看出，在程式中可將每個子單元中的主流量  $Q$ 、洩流量  $q$  及壓力  $P$  求出，可代回上述目標函數中藉以判斷流場特性之情況，而每個子單元中的變數  $Q$ 、 $q$ 、 $P$  與子單元的幾何形狀有關，故決定控制因子時必須考慮模頭的幾何參數如:螺旋溝的數目、溝深、溝寬、螺旋溝的漸縮角度、螺旋與本體間的間隙等，本文所設計的螺旋模頭固定出口處直徑(60mm)，螺旋溝數八條，螺旋溝繞行角度為 225 度，為使設計出的模頭能達到設計要求，選定了以下的幾何參數做為田口式的控制因子，各因子的水準都是根據一般模頭設計的經驗值而定，表 2 所示，本次所訂定的因子為：螺溝與本體起始間隙( $G$ )、螺旋溝起始溝深( $H$ )、螺旋軌跡收斂常數( $A$ )、螺旋段漸縮角度( $\alpha$ )，各因子之性質如下：

##### (1)螺溝與本體之起始間隙( $G$ ):

由圖 18 中顯示此幾何參數在於螺旋溝槽與本體之間，從文獻中[39]

已有相關探討，在螺旋溝前段會影響洩流量的大小，當此參數沒有考慮或是值很小時，大部份的流量會留在溝槽中，會造成溝道間熔膠混合效果變差，進而產生結合痕，而且此值也會對模頭內的壓力降造成影響，當起始間隙越大時壓力降有遞減的趨勢，表示模頭內的流動阻力越小。

## (2) 螺旋溝起始溝深(H):

螺旋溝起始溝深必須與起始溝寬配合，本次設計因尺寸考量故將寬度固定，從文獻中[39]可看出當螺旋溝的寬度/深度比值愈大(即較寬或較淺)時流量分佈較均勻，當螺旋溝的寬度/深度比值愈大時壓降較大，這主要是因為較淺的流道阻力較大之故，螺旋溝的寬度/深度比值愈大時，螺旋溝有較長的有效長度，即熔膠流經模頭時的混合效果較好。而且該比值的影響是非常明顯的。

## (3) 螺旋軌跡收斂常數(A):

圖 18 中顯示，因形成螺旋溝槽的軌跡在同一平面上，在程式中必須找出一曲線方程式來描述此一軌跡，故由幾何繪製的過程中找出以阿基米德螺旋線來定義其軌跡，其方程式如下：

$$R = R_0(1 - A\theta) \quad (68)$$

其中  $R_0$  為螺旋軌跡的起點半徑，可用來決定螺旋段的範圍

$A$  為阿基米德螺旋常數

由式(68)中，看出當  $A$  值越大其軌跡收斂越快速，不僅會影響最後到達的位置(模頭的出口直徑)，也會使子單元三有負值的可能(兩相鄰螺旋溝產生交錯)，故須適當的調整而得到適合的值，來決定螺旋段的範圍，在程式中因需要得知螺旋線的軌跡長度(L)，來決定每個子單元  $\theta$  方向的長度，故將式(68)積分得下式：

$$L = R_0\theta - \frac{1}{2}R_0A\theta^2 \quad (69)$$

$R_0$  為螺旋軌跡的起點半徑

$\theta$  為螺旋軌跡總繞行的角度

#### (4) 螺旋段漸縮角度( $\alpha$ ):

從文獻中[39]可得知、當軸心傾斜角 $\alpha$ 愈小時壓力損失較大，這主要是因為 $\alpha$ 值愈小時模頭外殼與軸心間的通道較小所以流道阻力較大的緣故。在與混合度的關係中，當軸心傾斜角 $\alpha$ 愈小時，熔膠較能沿螺旋溝流動，而不致於有較快的洩流現象，所以將有較好的混合效果，但此值過小溝中的熔膠便無法進入子單元三與鄰近熔膠混合，混合度會變差。

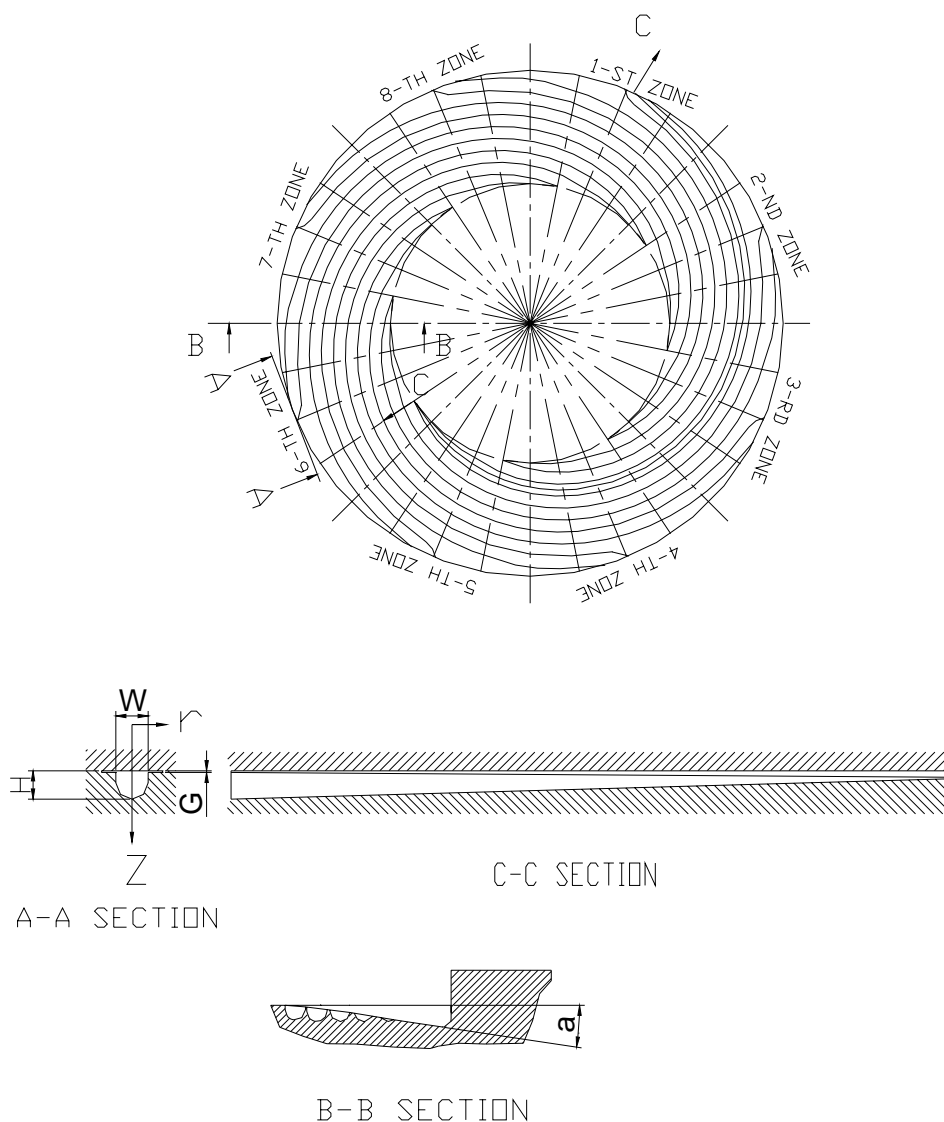


圖 18、螺旋段各幾何參數之示意圖

表 2、控制因子及水準表

| 因子 | 說明                  | 水準一 | 水準二   | 水準三  |
|----|---------------------|-----|-------|------|
| A  | 螺溝與本體起始間隙(G)        | 0.1 | 0.3   | 0.5  |
| B  | 螺旋溝起始溝深(H)          | 5   | 6     | 7    |
| C  | 螺旋軌跡收斂常數(A)         | 0.1 | 0.125 | 0.15 |
| D  | 螺旋段漸縮角度( $\alpha$ ) | 1   | 1.5   | 2    |

## 2.數值分析

在完成實驗數據的記錄後，我們必須經過一系列的數值分析過程來了解這些數據背後所代表的意義，也就是我們引入田口方法的主要目的，因此必須要了解我們所即將分析的各個欄位中所代表的意義及其理論基礎。

表 3 所示為模頭螺旋段的流場特性模擬，以螺旋段出口處的流量均勻度與壓力降來進行說明：

表 3、L9 直交表針對螺旋段出口處的流量均勻度與壓力降之分析結果

| EXP\PAR | G   | H | A     | $\alpha$ | UI    | PD    | S/N(UI)   | S/N(PD)    |
|---------|-----|---|-------|----------|-------|-------|-----------|------------|
| 1       | 0.1 | 5 | 0.1   | 1        | 0.872 | 339.3 | -1.18967  | -50.611677 |
| 2       | 0.1 | 6 | 0.125 | 1.5      | 0.873 | 172   | -1.179715 | -44.710569 |
| 3       | 0.1 | 7 | 0.15  | 2        | 0.869 | 114.1 | -1.219604 | -41.145713 |
| 4       | 0.3 | 5 | 0.125 | 2        | 0.905 | 96.4  | -0.867028 | -39.681541 |
| 5       | 0.3 | 6 | 0.15  | 1        | 0.838 | 177.4 | -1.53512  | -44.979072 |
| 6       | 0.3 | 7 | 0.1   | 1.5      | 0.882 | 126.8 | -1.090628 | -42.062385 |
| 7       | 0.5 | 5 | 0.15  | 1.5      | 0.879 | 90.2  | -1.120222 | -39.104131 |
| 8       | 0.5 | 6 | 0.1   | 2        | 0.907 | 69.3  | -0.847854 | -36.814665 |
| 9       | 0.5 | 7 | 0.125 | 1        | 0.851 | 119.6 | -1.401409 | -41.554624 |

一般在工業界中常用的品質計量方法至少有三種：

(1) 不良率(defect rate)，

(2) 製程能力(process capability,  $c_p$ ) ,

(3) 田口方法的 S/N 比(signal to noise ratio, 信號雜訊比)

本研究所採用的是田口方式來設計實驗流程，因此對於品質的計量方式採 S/N 比的計算方式，S/N 比的定義為：

$$\eta = S / N = \frac{\text{有用的輸出(Useful Output)}}{\text{有害的輸出(Harmful Output)}}$$

S/N 值越高，表示品質越好，以 S/N 比來作因子反應分析，找出一組最佳的製程參數，使得 S/N 比是最大的，因此為了找出最佳化的過程中需要有單一的目標函數，故 S/N 比對於不同品質特性依據理想機能的不同有分為三種常見的形態：

(1)望目特性(nominal-the-best)

實驗設計上有一個特定目的的理想機能，其基本公式為：

$$S / N = -10 \log \left[ \left( \bar{y} - m \right)^2 + S^2 \right]$$

因理想機能的不同又有分為三類，但因本實驗不會使用到相關公式，故不贅述。

(2)望小特性(small-the-better)

希望所預測的品質特性越小越好，換言之即理想機能為零，在模擬流場特性時將螺旋段的壓力損失設定為望小特性，期望能夠有較低的產能損耗，其公式為：

$$S / N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = -10 \log \left( \bar{y}^2 + S^2 \right)$$

(3)望大特性(large-the-better)

期望品質特性越大越好，換言之品質特性的理想機能為無限大，在模擬流場特性時將螺旋段的出口流量均勻度設定為望大特性，期望出口均勻度高，可得到較均勻厚度分佈的薄膜，其公式如下：

$$S/N = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}$$

由表 3 所計算出的 S/N 比，並且求得每個參數中每個水準的 S/N 響應值，由響應值建立響應表，如表 4 所示。由響應表的分析決定這些參數的最佳位階組合，例如以流量均勻度來說，因最佳水準的決定是以提高流量均勻度為目標，所以  $G2, H2, A1, \alpha1$  為本次搜尋的最佳組合。以此組合計算其流量均勻度，若均勻度符合設計要求，則該最佳組合所決定之模頭形狀即為所求。而四個幾何參數對流量均勻度的影響之順序為：螺旋軌跡收斂常數(A)、螺旋段漸縮角度( $\alpha$ )、螺旋溝起始溝深(H)、螺溝與本體之起始間隙(G)，從響應圖中顯示直線的斜率越高，表示該參數對流量均勻度的影響越大。

表 4、流量均勻度的望大特性響應表

| level\factor      | A         | B         | C         | D         |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1( average S/N)   | -1.19633  | -0.904945 | -0.652552 | -0.779942 |
| 2( average S/N)   | -1.088783 | -0.770078 | -1.314798 | -0.800716 |
| 3( average S/N)   | -1.207251 | -1.058974 | -0.766646 | -1.153338 |
| delta(S/N)        | 0.1184682 | 0.2888961 | 0.662246  | 0.3733956 |
| RANK              | 4         | 3         | 1         | 2         |
| Meaning of factor | G         | H         | A         | $\alpha$  |

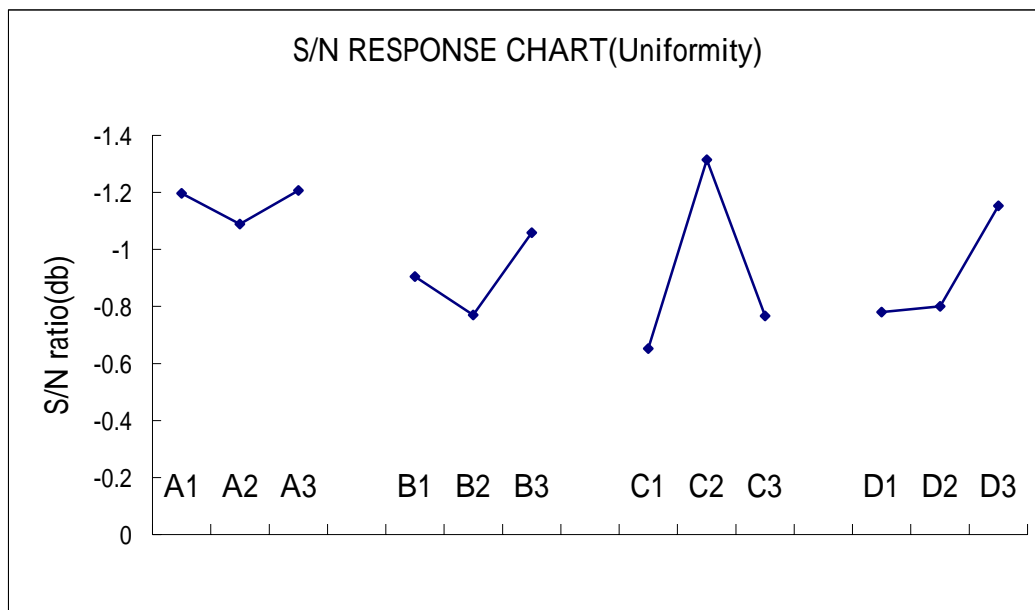


圖 19、流量均勻度的望大特性響應圖

以壓力損失來說，因最佳水準的決定是以降低壓力損失為目標，所以  $G2, H2, A1, \alpha1$  為本次搜尋的最佳組合。此組合所計算出的壓力降為最小，恰巧與計算流量均勻度的組合相同。而四個幾何參數對壓力降的影響之順序為：螺旋段漸縮角度( $\alpha$ )、螺旋軌跡收斂常數(A)、螺旋溝起始溝深(H)、螺溝與本體之起始間隙(G)，從響應圖中顯示直線的斜率越大，表示該參數對流量均勻度的影響越大。

表 5、壓力損失的望小特性響應表

| level\factor      | A         | B         | C         | D         |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1( average S/N)   | -45.48932 | -29.89655 | -27.24798 | -26.74995 |
| 2( average S/N)   | -41.84594 | -27.73603 | -45.57882 | -28.22020 |
| 3( average S/N)   | -41.93544 | -43.13245 | -27.93823 | -45.79488 |
| delta(S/N)        | 3.6433788 | 15.396417 | 18.33085  | 19.044929 |
| RANK              | 4         | 3         | 2         | 1         |
| Meaning of factor | G         | H         | A         | $\alpha$  |



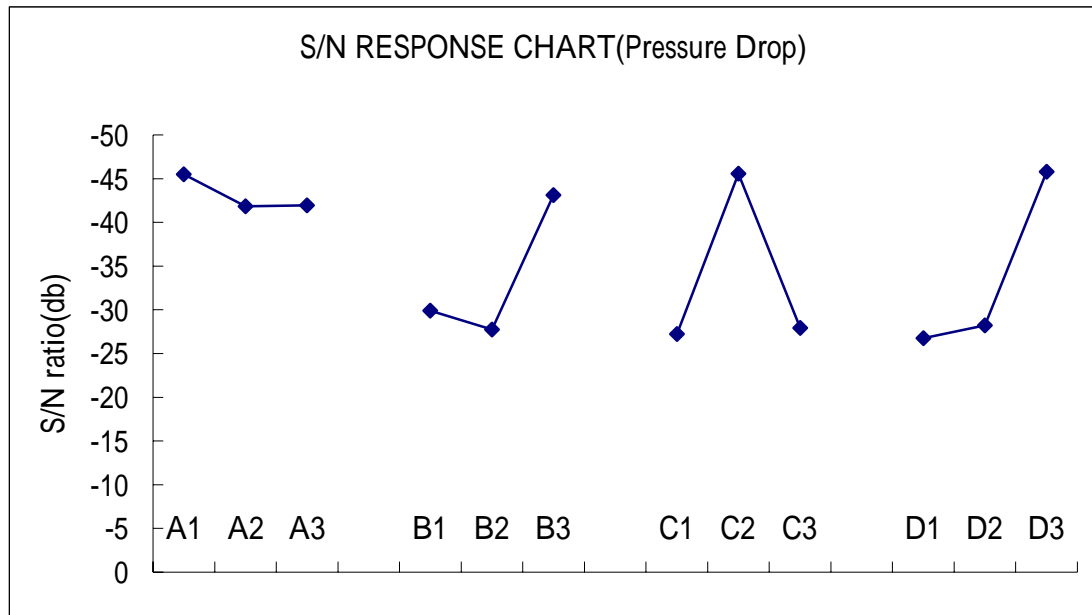


圖 20、壓力損失的望小特性響應圖

因決定的各控制因子間有可能存在交互作用的情況，會影響水準的判定，故針對上述分析中前三個對目標函數較重要的因子，以流量均勻度來說，即為：螺旋軌跡收斂常數(A)、螺旋段漸縮角度( $\alpha$ )、螺旋溝起始溝深(H)，分析其交互作用的程度，表 6、7、8 分別為因子 C 與 B、D 與 C、D 與 B 的 S/N 比平均均勻值，其計算方式如下：

例如以 C1 與 B1 之欄位來說

$$S/N \text{ ratio} = ((-0.904945) + (-0.652552)) / 2 = -0.778749(\text{db})$$

表 6、UI 所作 C&B 間之交互作用

|    | C1        | C2        | C3        |
|----|-----------|-----------|-----------|
| B1 | -0.778749 | -1.109872 | -0.835796 |
| B2 | -0.711315 | -1.042438 | -0.768362 |
| B3 | -0.855763 | -1.186886 | -0.91281  |

表 7、UI 所作 D&B 間之交互作用

|    | D1        | D2        | D3        |
|----|-----------|-----------|-----------|
| B1 | -0.842443 | -0.852833 | -1.029143 |
| B2 | -0.775009 | -0.785399 | -0.961709 |
| B3 | -0.919457 | -0.929847 | -1.106157 |

表 8、UI 所作 D&C 間之交互作用

|    | D1        | D2        | D3        |
|----|-----------|-----------|-----------|
| C1 | -0.716246 | -0.726236 | -0.902946 |
| C2 | -1.047369 | -1.057759 | -1.234069 |
| C3 | -0.773293 | -0.783683 | -0.959993 |

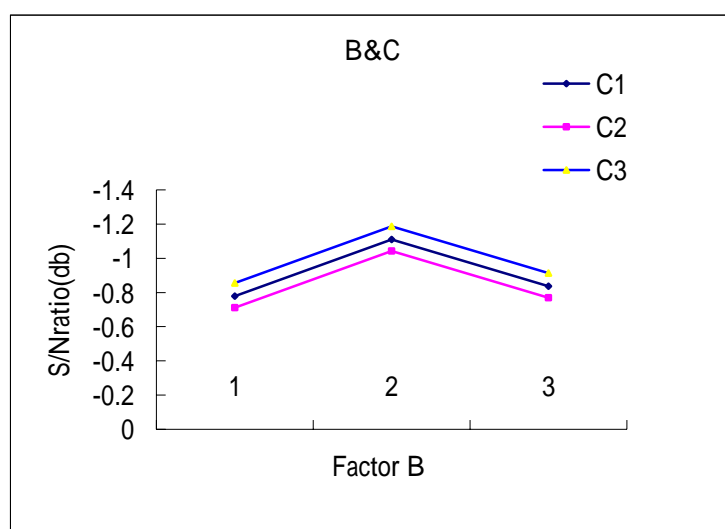


圖 21、因子 B 與 C 的交互作用圖

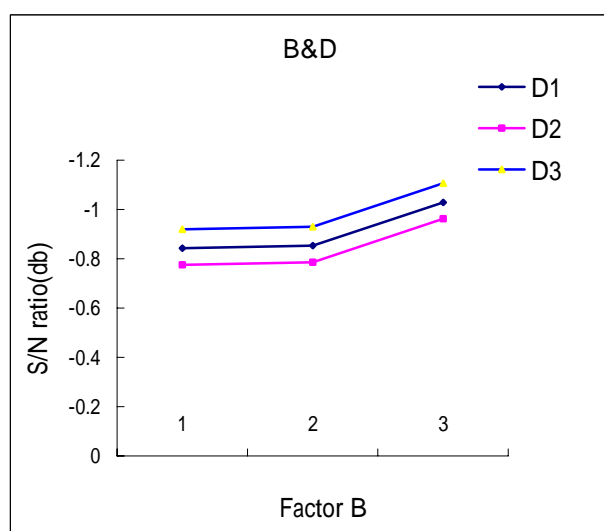


圖 22、因子 B 與 D 的交互作用圖

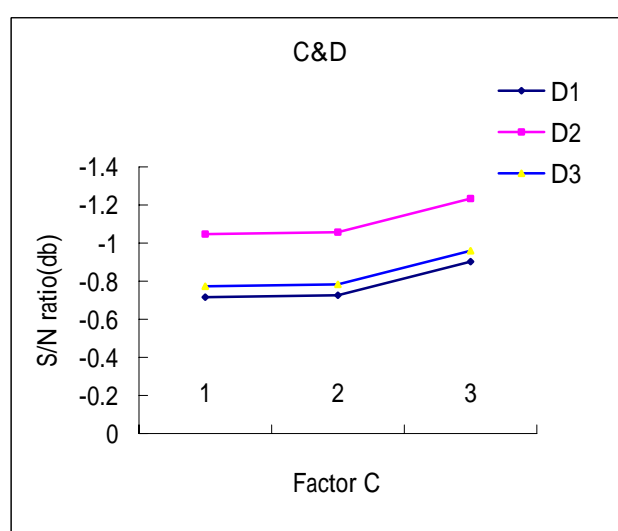


圖 23、因子 C 與 D 的交互作用圖

觀察上述各因子間的交互作用圖表中發現，本次田口方法所選定的控制因子間並沒有存在交互作用，即表示所模擬的各項流場特性不會因為因子間的交互作用現象而造成最佳組合的誤判現象，然而上述所作的田口方法所做的流場特行分析所找出的最佳參數組合，只是在所選定的各項控制因子的水準區間下所得到的局部最佳化組合，相信依最佳組合所進行模擬的結果也是局部的最佳流場特性，但在改變不同的水準區間後所找出的最佳組合也不會是目前所找出的，故為了降低因水準區間所造成的搜尋誤差，故採取多組不同的水準幾何(表 9)來進行田口式搜尋，其搜尋的流程[28]如圖 24 所示：

表 9、各因子的不同水準區間

| Parameter         | min | max  | level1 | level2 | level3 |
|-------------------|-----|------|--------|--------|--------|
| G(mm)             | 0.1 | 0.9  | 0.3    | 0.5    | 0.7    |
| H(mm)             | 3   | 7    | 4      | 5      | 6      |
| A                 | 0.1 | 0.24 | 0.135  | 0.17   | 0.205  |
| $\alpha (^\circ)$ | 1   | 3    | 1.5    | 2      | 2.5    |

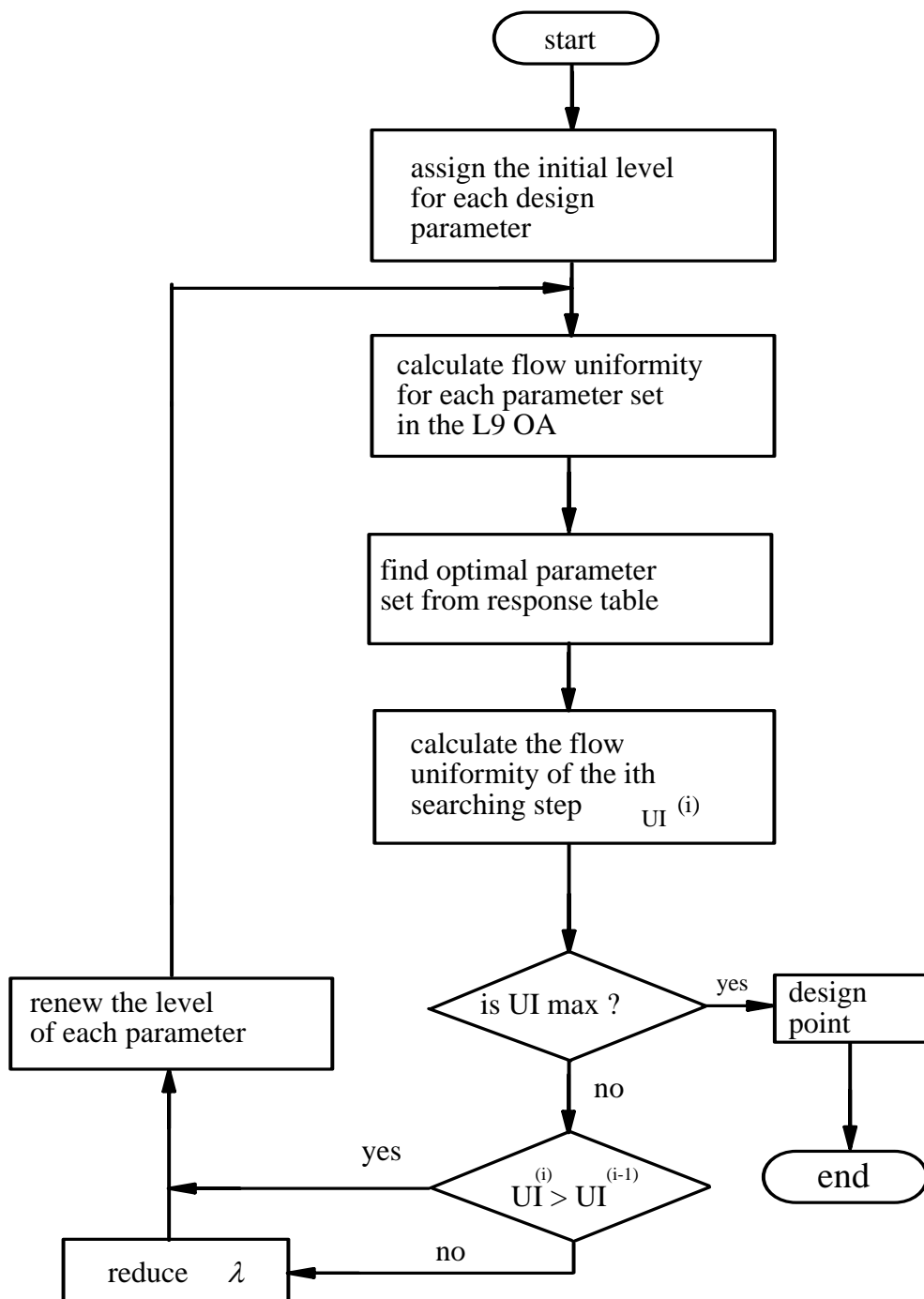


圖 24、田口最佳化之搜尋流程圖[28]

表 10、十六組不同起始水準值

| PAR.         | G(mm)  |        |        | H(mm)  |        |        | A-VALUE |        |        | AIFAR  |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dsign<br>No. | level1 | level2 | level3 | level1 | level2 | level3 | level1  | level2 | level3 | level1 | level2 | level3 |
| 1            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 3      | 4      | 5      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 1      | 1.5    | 2      |
| 2            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 3      | 4      | 5      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 2      | 2.5    | 3      |
| 3            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 3      | 4      | 5      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 1      | 1.5    | 2      |
| 4            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 3      | 4      | 5      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 2      | 2.5    | 3      |
| 5            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 5      | 6      | 7      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 1      | 1.5    | 2      |
| 6            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 5      | 6      | 7      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 2      | 2.5    | 3      |
| 7            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 5      | 6      | 7      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 1      | 1.5    | 2      |
| 8            | 0.1    | 0.3    | 0.5    | 5      | 6      | 7      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 2      | 2.5    | 3      |
| 9            | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 3      | 4      | 5      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 1      | 1.5    | 2      |
| 10           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 3      | 4      | 5      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 2      | 2.5    | 3      |
| 11           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 3      | 4      | 5      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 1      | 1.5    | 2      |
| 12           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 3      | 4      | 5      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 2      | 2.5    | 3      |
| 13           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 5      | 6      | 7      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 1      | 1.5    | 2      |
| 14           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 5      | 6      | 7      | 0.1     | 0.135  | 0.17   | 2      | 2.5    | 3      |
| 15           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 5      | 6      | 7      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 1      | 1.5    | 2      |
| 16           | 0.5    | 0.7    | 0.9    | 5      | 6      | 7      | 0.17    | 0.205  | 0.24   | 2      | 2.5    | 3      |

## 四、模擬結果與討論

### 4.1 二維模擬

1. 利用上述田口搜尋方式，選擇採取 16 組位階組合，由程式搜尋出各設計點所計算出之流量均勻度在圖 25，因本研究所訂之目標值有三個(流量均勻度、混合度、壓力降)，故將各設計點的位階組合再針對混合度與壓力降作圖(圖 26)，希望從中找出較符合各目標值之幾何參數組合，從圖 25、圖 26 中可看出設計點 4( $G=0.1959\text{mm}$ ， $H=7.32\text{mm}$ ， $A=0.1115$ ， $\alpha=1.4434^\circ$ )較符合需求，故此參數組合為最佳幾何組合。
2. 圖 27 係由最佳幾何所模擬出在螺旋段末端之流量均勻度，由於將模頭出口處切割為 80 個元素，但因重覆緣故，所以圖中代表之流量均勻度為出口處之 1/8 圈，若綜觀全週(圖 28)則發現其出口處的流量分佈有產生 8 個波峰，恰與螺溝數相同，而模擬結果流量均勻度達 0.947，若再經後段鬆弛室及模唇段之穩定效果，相信厚度均勻性會更高。
3. 圖 29 為描述螺旋溝段之壓力降情形，從溝深最深處進入沿著螺旋溝呈線性遞減之關係，此值與進入螺旋段的流量及塑料性質有關(本研究採用  $Q=15\text{ Kg/hr}$ ， $m=10000\text{pa.s}^n$ ， $n=0.4$ )，在模具設計時需考量實際共押製程時押出機之噸位大小，當壓力損失越大時，意即在製程設備上需提供更大噸數之押出機始可達需求，此時相對設備成本會增加。
4. 由圖 30 所顯示為單一螺旋溝中之流量( $Q$ )與洩流量( $Q_e$ )之情況，紅虛線所繪為理想值( $MD=1$ )，在螺旋溝長之前 1/2 處(I 區)，雖然洩流量稍低於理想值，但流動行為呈線性關係，洩流量與溝中流量比相等，混合度較佳，在 II 區螺溝中之熔膠大量洩流出來，此時可能造成局部流量分佈高峰，到 III 區因螺溝末端溝深變淺已經無法將熔膠留於溝中，故此處之洩流量( $Q_e$ )幾乎為零，大都已在 II 區洩流完畢。
5. 接下來我們將驗證所搜尋出的最佳化幾何參考對流場特性而言是否誠如搜尋結果，確為最佳之流道幾何尺寸，故以最佳參數組合採用其中三個參數固定，變動其中一個的方式來探討各因子對流場特性的影響：
  - (1)將最佳組合其中三個參數固定為最佳值，變動起始間隙( $G$ )，針對

流量均勻度所做的影響情況，圖 31 中顯示，當  $G$  值由 0.1 逐漸變動至 0.7 時，在值 0.1959 時有一最高值，在大於 0.1959 時流量均勻度即逐漸變差，故與所搜尋之最佳值相符。

- (2) 圖 32 顯示為螺溝溝深( $H$ )對出口處流量均勻度的影響，流量均勻度在  $H=7.32\text{mm}$  時有一最大值，小於或大於所模擬出之流量均勻度均非最佳，故可斷定  $H=7.32$  為最佳幾何。
- (3) 圖 33 顯示不同漸縮角度( $\alpha$ )對流量均勻度的影響，在  $\alpha=1.44^\circ$  流量均勻度達 0.947 與程式搜尋出之最高流量均勻度吻合，當角度大於 2.5 度時，對流量均勻度的影響即趨緩。
- (4) 圖 34 顯示不同螺旋常數( $A$ )對流量均勻度的影響，當  $A=0.1115$  時產生最高的流量均勻度，但是當值大於 0.16 後所計算出之流量均勻度值變的很差，原因是這時的子單元三已經因螺旋收斂太快，相鄰兩溝交錯在一起而變成負值，因此所計算出之流量均勻度很差。

表 11、十六個設計點之流量均勻度壓力降混合度與所搜尋出之幾何值

| EXP | UI    | DP     | MD    | G      | H      | A      | ALFAR  |
|-----|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 0.94  | 76.42  | 0.631 | 0.1844 | 5      | 0.1    | 1.0105 |
| 2   | 0.916 | 27.838 | 0.651 | 0.1973 | 5.995  | 0.0981 | 1.6274 |
| 3   | 0.936 | 71.31  | 0.616 | 0.159  | 6.05   | 0.1115 | 1.0781 |
| 4   | 0.947 | 32.887 | 0.686 | 0.1959 | 7.3205 | 0.1115 | 1.4434 |
| 5   | 0.916 | 62.407 | 0.673 | 0.2656 | 6.93   | 0.099  | 1.1979 |
| 6   | 0.919 | 19.287 | 0.645 | 0.1984 | 6.63   | 0.0992 | 1.9674 |
| 7   | 0.933 | 63.974 | 0.618 | 0.1729 | 6.237  | 0.1115 | 1.0781 |
| 8   | 0.947 | 35.429 | 0.607 | 0.2656 | 7      | 0.1115 | 1.4434 |
| 9   | 0.87  | 33.197 | 0.644 | 0.2952 | 6.655  | 0.1089 | 0.729  |
| 10  | 0.892 | 19.257 | 0.633 | 0.2952 | 7      | 0.1    | 1.181  |
| 11  | 0.863 | 38.442 | 0.619 | 0.2952 | 5.9895 | 0.1227 | 0.6561 |
| 12  | 0.902 | 19.119 | 0.626 | 0.2952 | 7      | 0.1004 | 1.181  |
| 13  | 0.874 | 18.469 | 0.632 | 0.3609 | 7.7    | 0.099  | 0.99   |
| 14  | 0.844 | 10.707 | 0.659 | 0.3973 | 7      | 0.0981 | 1.5892 |
| 15  | 0.868 | 33.064 | 0.655 | 0.2952 | 7.2    | 0.1115 | 0.729  |
| 16  | 0.902 | 19.24  | 0.626 | 0.2952 | 7      | 0.1004 | 1.18   |

註:著色區域為最佳設計點幾何組合



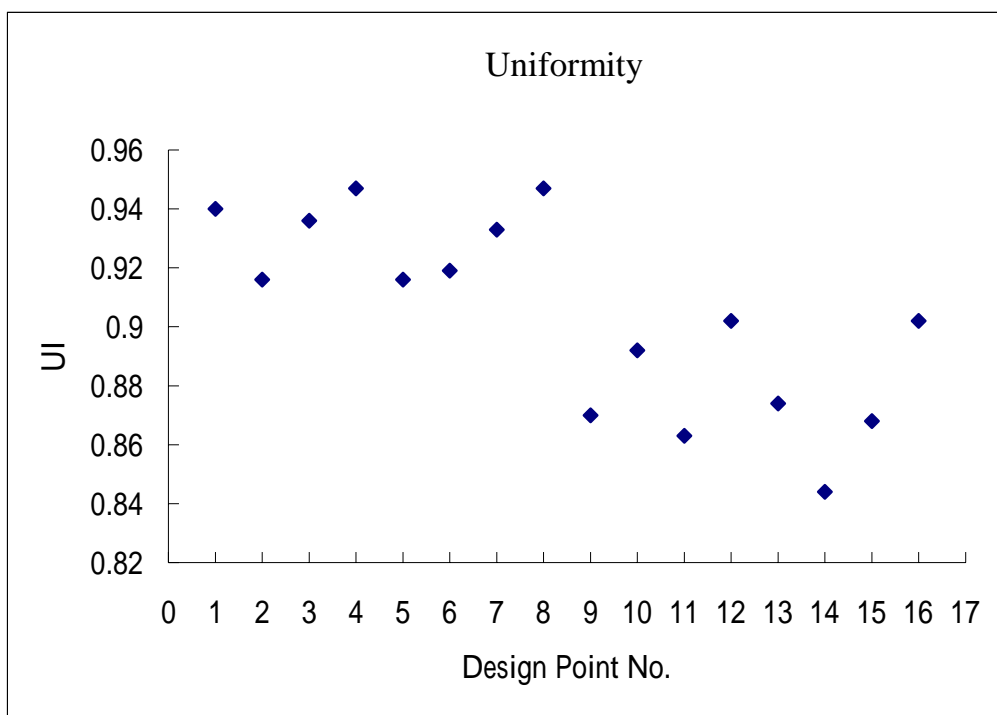


圖 25、十六個設計點之流量均勻度

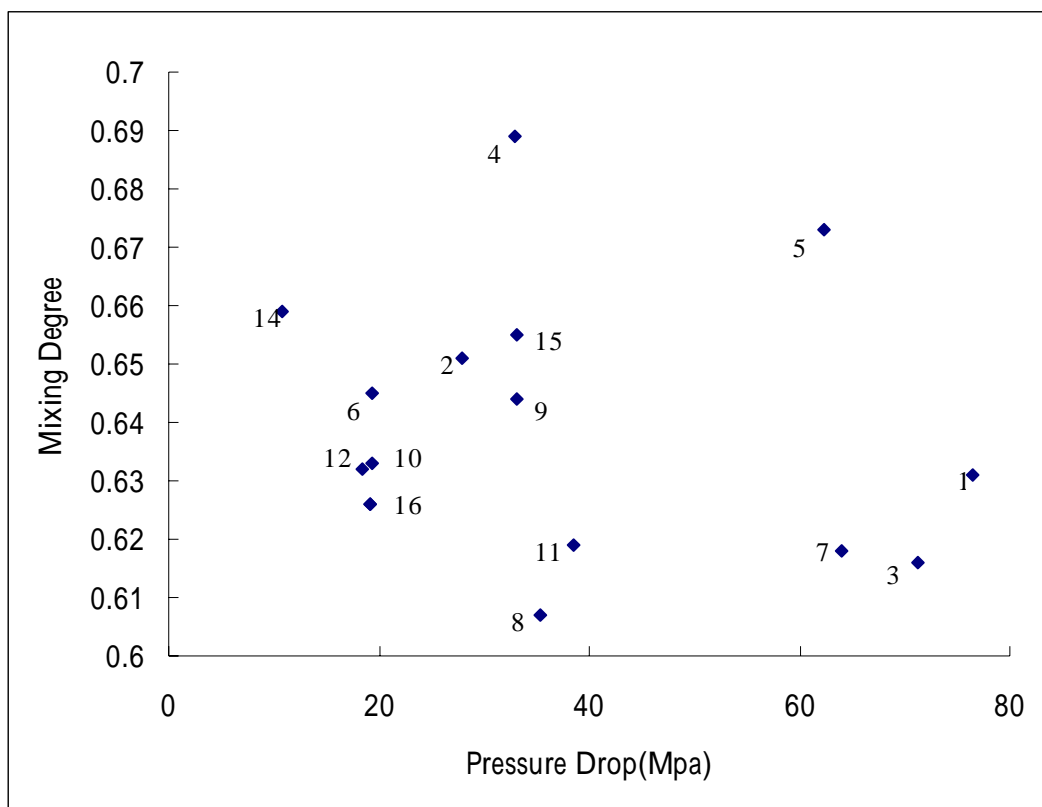


圖 26、十六個設計點之混合度與壓力降之圖

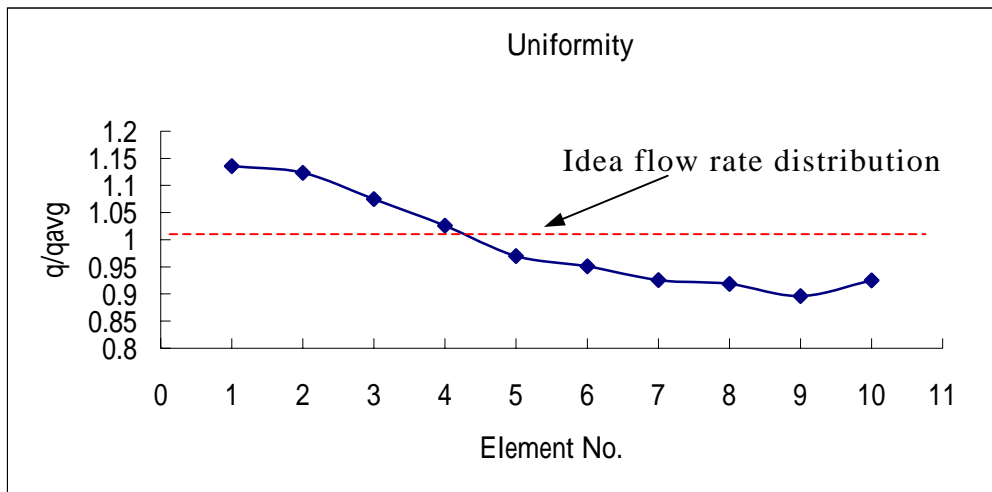


圖 27、設計點四出口處之流量分佈圖(1/8 圈)

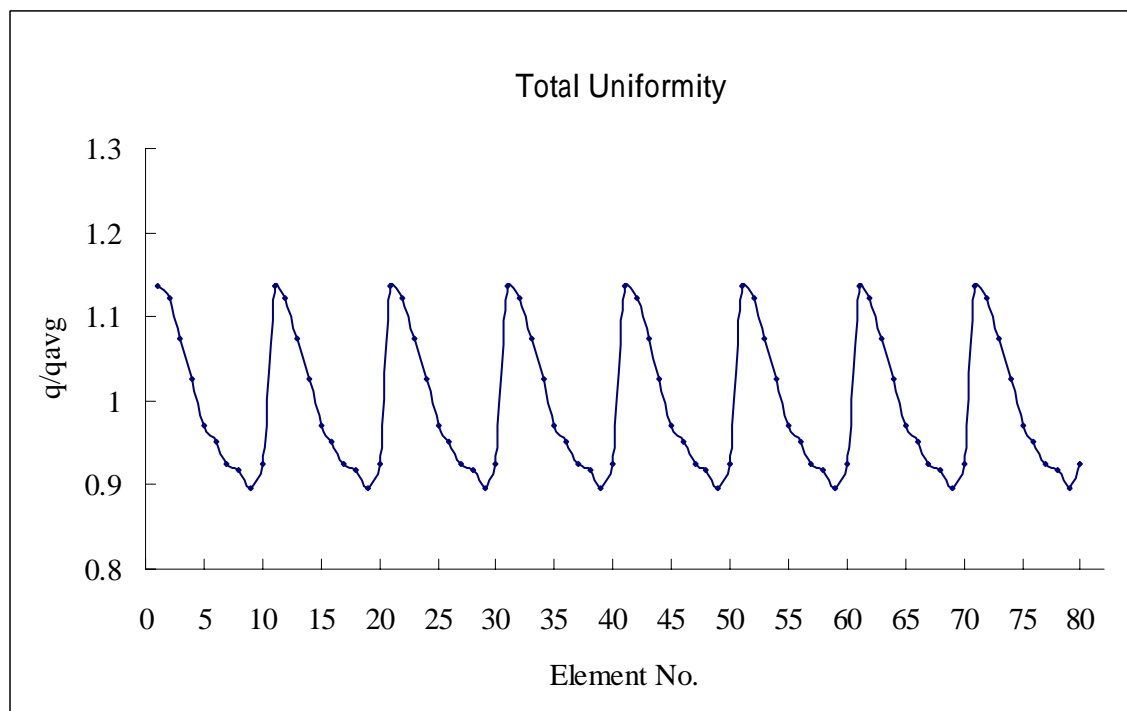


圖 28、最佳設計點在螺旋段末端流量均勻度圖

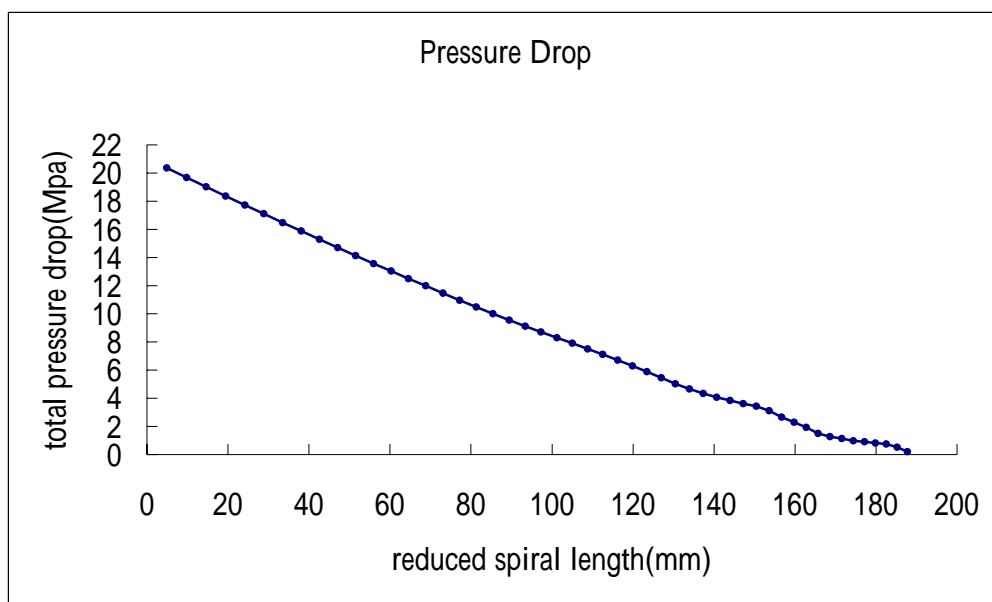


圖 29、最佳設計點在螺旋溝內之壓力分佈圖

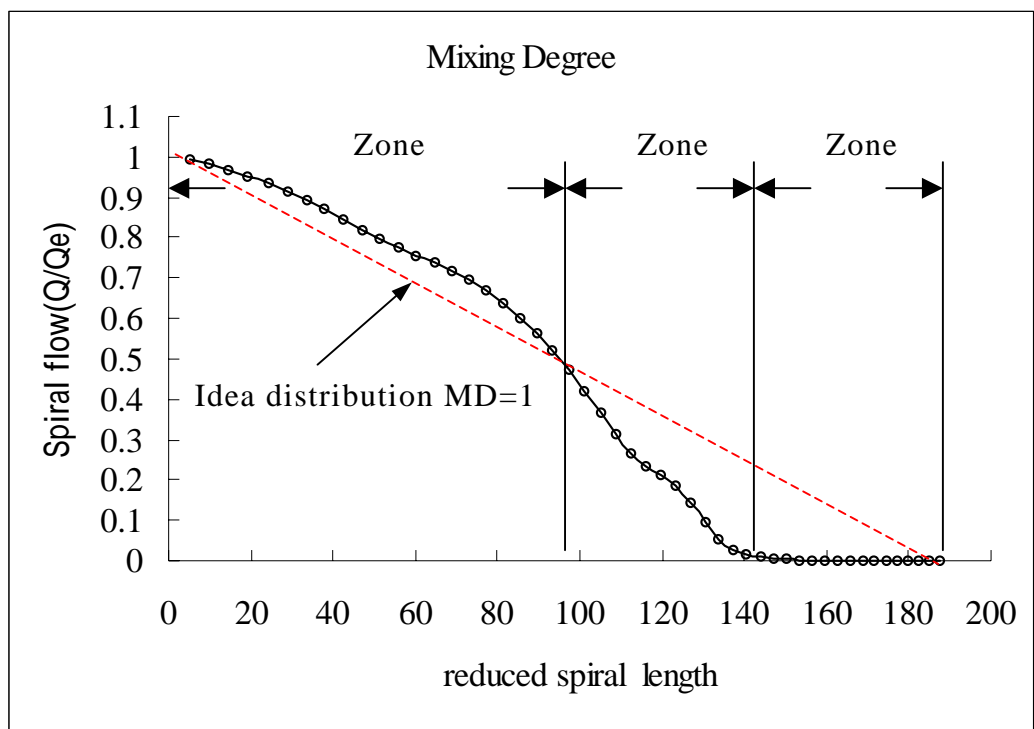


圖 30、最佳設計點在螺旋段之混合度圖

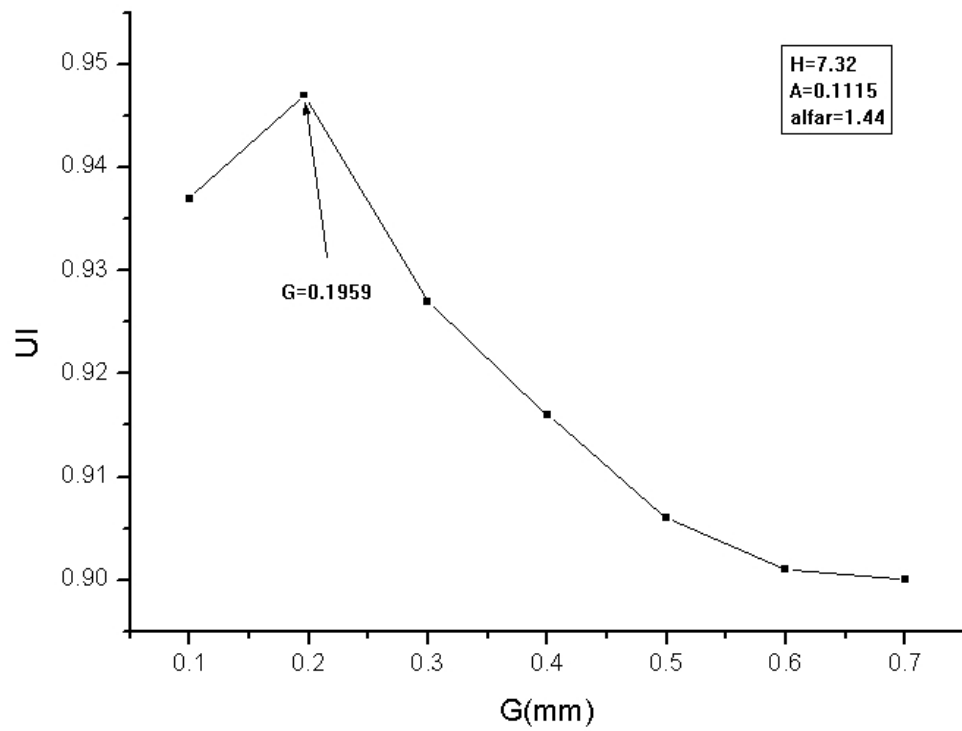


圖 31、不同螺旋段起始間隙對流量均勻度的影響

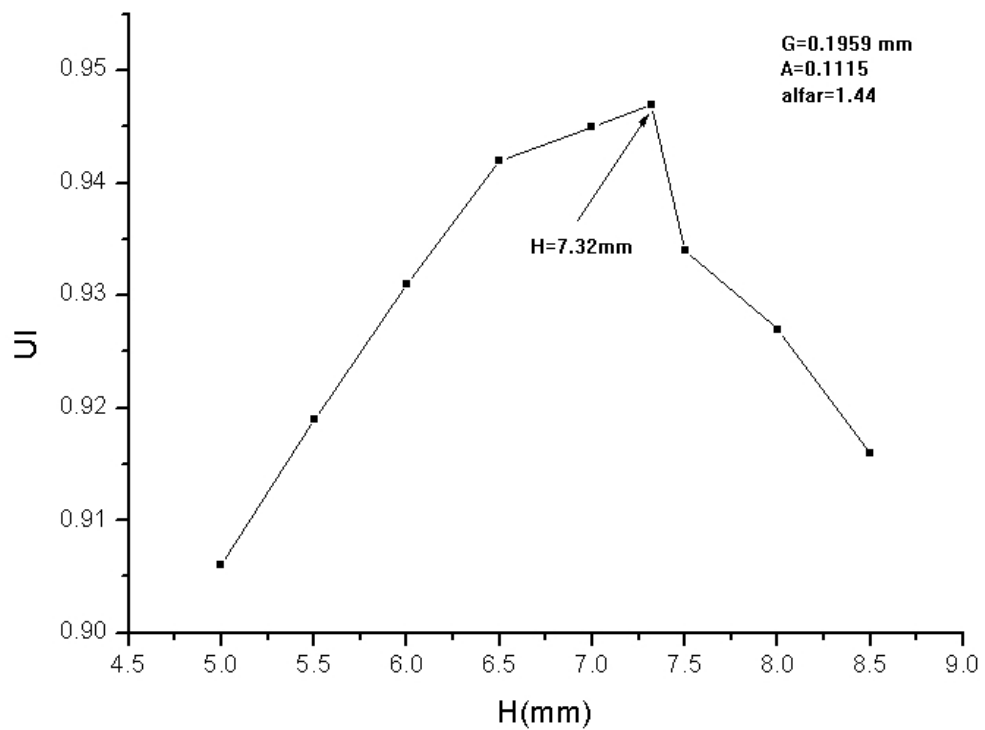


圖 32、不同螺旋溝深對流量均勻度的影響

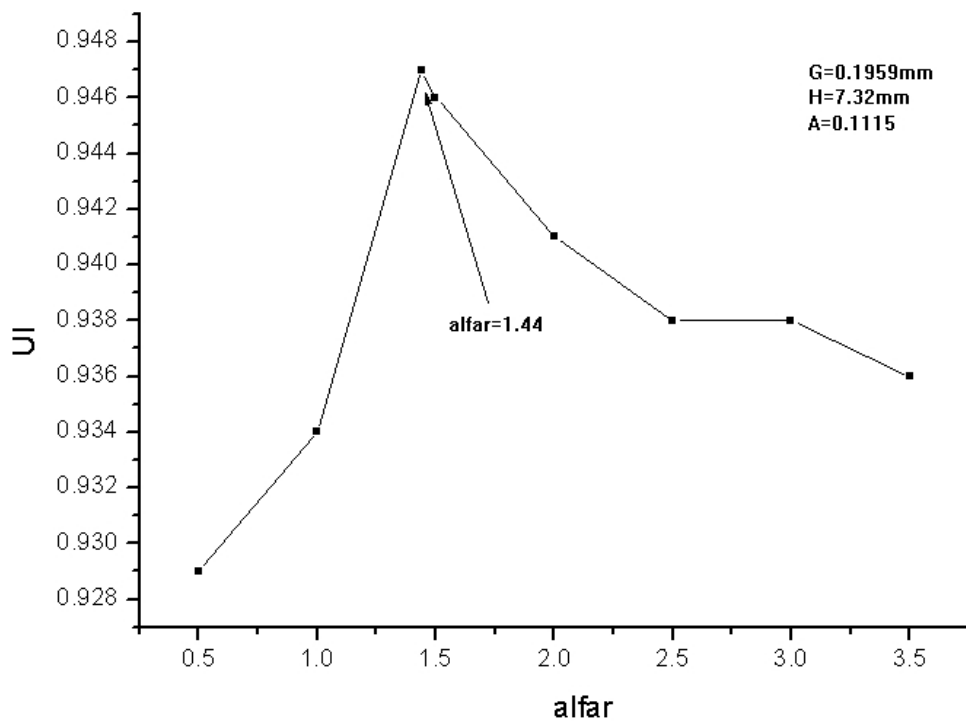


圖 33、不同漸縮角度對流量均勻度的影響

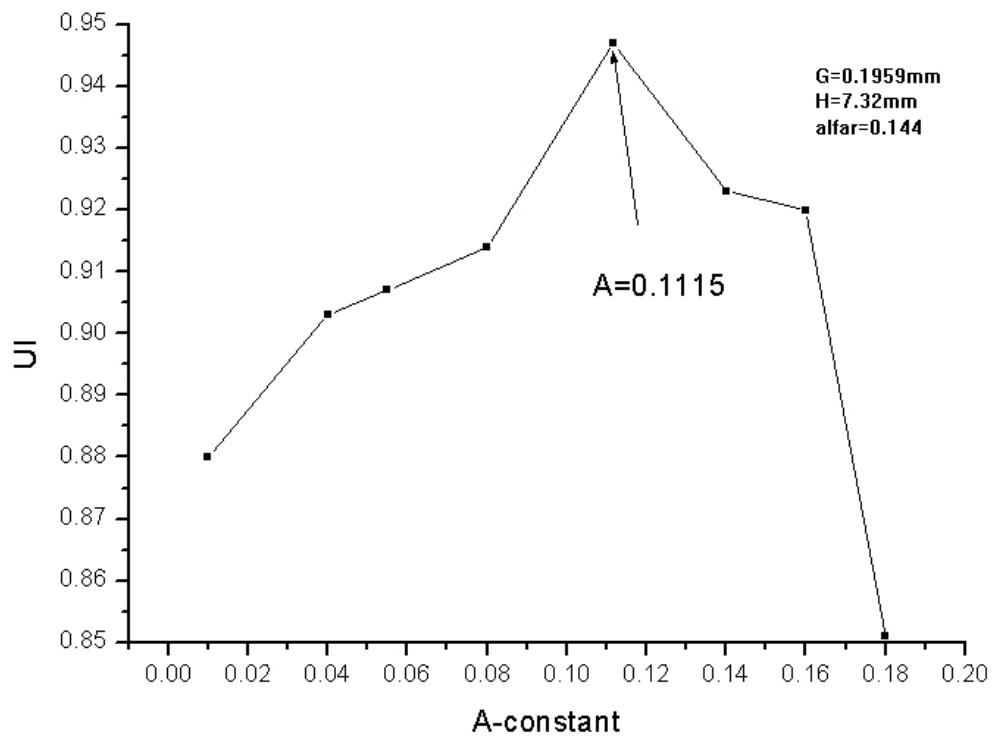


圖 34、不同螺旋常數對流量均勻度的影響

## 4.2 三維實體模擬

在經過前一章利用數值方法來進行模頭螺旋段之流場模擬，雖然系統假設為二維且等溫，其分析之結果必然與實際模頭加工的流場情況有差異，但前一章分析流程的價值在於可以利用程式配合最佳化方法搜尋出最符合設計要求之幾何形狀，接下來我們採用套裝軟體 MOLDEX 3D 來模擬模頭流道的三維流動情況；首先來介紹 MOLDEX 3D 的模擬流程，其模擬前需在前處理軟體 Rhinoceros 中將幾何模型建立表面網格，並進行網格破面之修補與幾何各部特徵之屬性設定，將所完成之 FEM(Finite Element Mesh)轉檔(將表面網格轉成實體網格)成 MOLDEX 可以相容的格式，在 MOLDEX 中必須具備網格檔、使用材料檔、成形條件檔始可進行求解，其分析流程如圖 35 所示，由於 MOLDEX 3D 軟體是國人自行研發的模流分析軟體，主要應用於一般塑膠射出成形模具的流動分析，與本文的押出流動情況不同，而本論文僅希望藉由三維實體分析來了解其與二維分析的差異，為了使分析的相關條件盡量與押出分析一致，故在進行 MOLDEX 3D 模擬時做以下的改變。

### 4.2.1 模頭流道幾何修正：

將欲分析的流場幾何形狀做些許的改變以符合流動特性，圖 36，為實際模頭流道圖與經修正後之模頭流道圖，實際流道設計為兩個熔膠進口利用模塊高度差來使熔膠導流成兩種塑料交錯形式，在初步使用 MOLDEX 3D 進行模擬時因兩個熔膠進口的流動長不一致，導致熔膠進入螺旋段的時間不一(射出成形製程與時間函數有關，故時間差將影響模擬結果)，如此的流動情況與實際押出情況不同，所以將流道的高低差消除，因模流分析必須具備單一進膠點，故將八個螺旋段入料口以一流道系統(如框選處)結合起來，如此熔膠進入螺旋段的時間即相同，另外因押出製程基本流動形態為穩態穩流(steady state)，為了將射出製程(與時間函數有關)趨近於穩態穩流情況，在模頭出口處加上一很大的空間，將之視為自由邊界，使模擬情況為半穩態狀態，如此即可將射出製程模擬軟體應用於押出製程上。

### 4.2.2 材料流變性質差異：

在二維模擬時所使用之材料為 LDPE( $Q=15 \text{ Kg/hr}$ ， $m=10000 \text{ pa.s}^n$ ，



$n=0.4$ )，以冪次定律(power law)來描述其流變性質，因系統假設為等溫，故材料之相關熱參數並無說明，而 MOLDEX 3D 用來描述流變性質所採用之黏度曲線方程式 modified-cross model 其物性係數與熱性質參數如表 12 所列，因此在兩種不同非牛頓流體間即存在流變性質差異。

#### 4.2.3 製程條件

##### 1. 模溫

射出製程中模具溫度係由冷卻系統的冷卻液(水或油)來進行溫度控制與達到成品冷卻的效果，在押出製程中模具溫度係由電熱片控制，保持均溫加熱，故在分析時模具溫度需設定成料溫溫度(設定溫度  $200^{\circ}\text{C}$ )，以符合押出時的實際情況。

##### 2. 押出速度

二維分析時採用流量為每小時 15 公斤，即押出流率為  $4.17\text{cc/s}$ ，將此條件用於射出機上。

##### 3. 押出力量

在押出製程中螺桿的壓力是由所掛上的模頭所給予，但是射出成形中射出的壓力是由油壓機所控制，先利用 FLOW2000 找出螺桿與模頭之特徵曲線，在  $15\text{kg}$  的流量下，螺桿轉速  $200\text{rpm}$ ，可產生  $35\text{Mpa}$  的背壓，故將此條件用於射出機上。

#### 4.2.4 模擬結果討論：

由於 MOLDEX 3D 針對分析模型的網格處理方式是以先產生表面網格後再由轉檔過程中自動建構內部實體網格，因此分析結果所呈現的流場特性，諸如溫度、壓力、速度等，均以圖像方式表現，若使用者想在某些重要位置取得相關流場資料，僅能在表面網格上設置感測節點(Sensor node)，但所能擷取的數據資料代表性通常不足，舉例來說，若欲知某一位置之流場速度，將感測節點設置後，所得到之位置速度為表面速度，由平均速度分佈的觀點來看，表面速度通常假設為零，所以本次針對三維流動模擬，其模擬結果僅能以定性的角度，即以圖像來進行流場特性說明，無

法與二維模擬進行定量的比較。

### 1. 模頭三維流動情況：

由圖 37~圖 41 中可看出當兩種熔膠以交錯形式同時到達螺溝起點(溝深最深處)，在進入後不久隨即往兩螺溝間洩流出去，證明設計的螺溝與間隙尺寸可以引發熔膠同時往螺溝方向( $\theta$ -direction)與模頭出口方向( $\gamma$ -direction)的二維流動行為，此種流動行為之目的在於使兩鄰近溝中的熔膠能充份混合，消除內部結合線，製作出使用強度佳、表面性質良好的產品，在與可視化實驗比較之結果其流動行為十分相似。

### 2. 模頭出口處之流量分佈情況

由圖 42 中可看出在模頭出口處之流量分佈情況並非完全的平整，當分佈情況愈均勻所生產的製品其徑向均勻度亦愈佳，從放大圖(圖 42)中可以看出其分佈情況，有出現八個波峰的現象，乃是因為螺旋溝數有八條，螺旋溝進入的流量較高於兩螺溝間區域所導致，這樣的模擬結果與二維模擬相吻合。

### 3. 螺旋溝中壓力分佈情況

由壓力分佈圖(圖 43)中顯示，如同二維模擬時以螺旋段 1/8 區域來說明，入口的壓力最高，隨著螺旋溝的行進距離增加，溝內的壓力也逐漸遞減，模擬結果與二維相仿，但螺旋溝中壓力降約在 15Mpa 較低於二維模擬的 20Mpa，從模頭內之剪應力分佈圖(圖 44)中顯示，在溝槽段的剪應力較低，但若僅以溝槽中之剪應力分佈來說，剪應力最大處發生在模壁處，與二維模擬時邊界條件假設相符，若以模唇段之剪應力分佈情形來看，其剪應力分佈範圍窄，相較於螺旋段有較高之剪應力發生，其原因為模唇段間隙較小，具穩壓效果，使出口處的流量穩定。

### 4. 流場內之速度分佈情況

從速度向量圖(圖 45、46)中顯示，融膠在進入螺旋溝後行進約 1/5 溝長後即有向子單元三方法洩流，此二維流動方式使熔膠由柱狀流場轉換成環狀流場，並使得分子鏈間混合情況良好，在模唇段因間隙較小，故其流動速度較快，速度向量分佈較少。

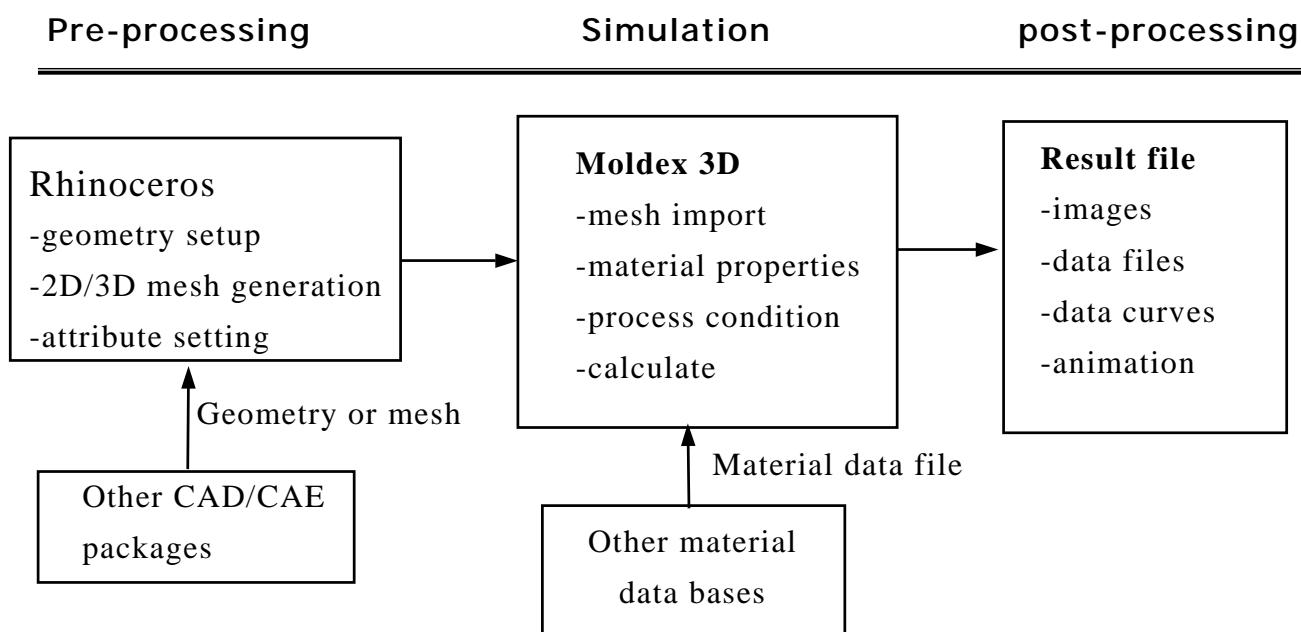


圖 35、MOLDEX 3D 分析流程圖

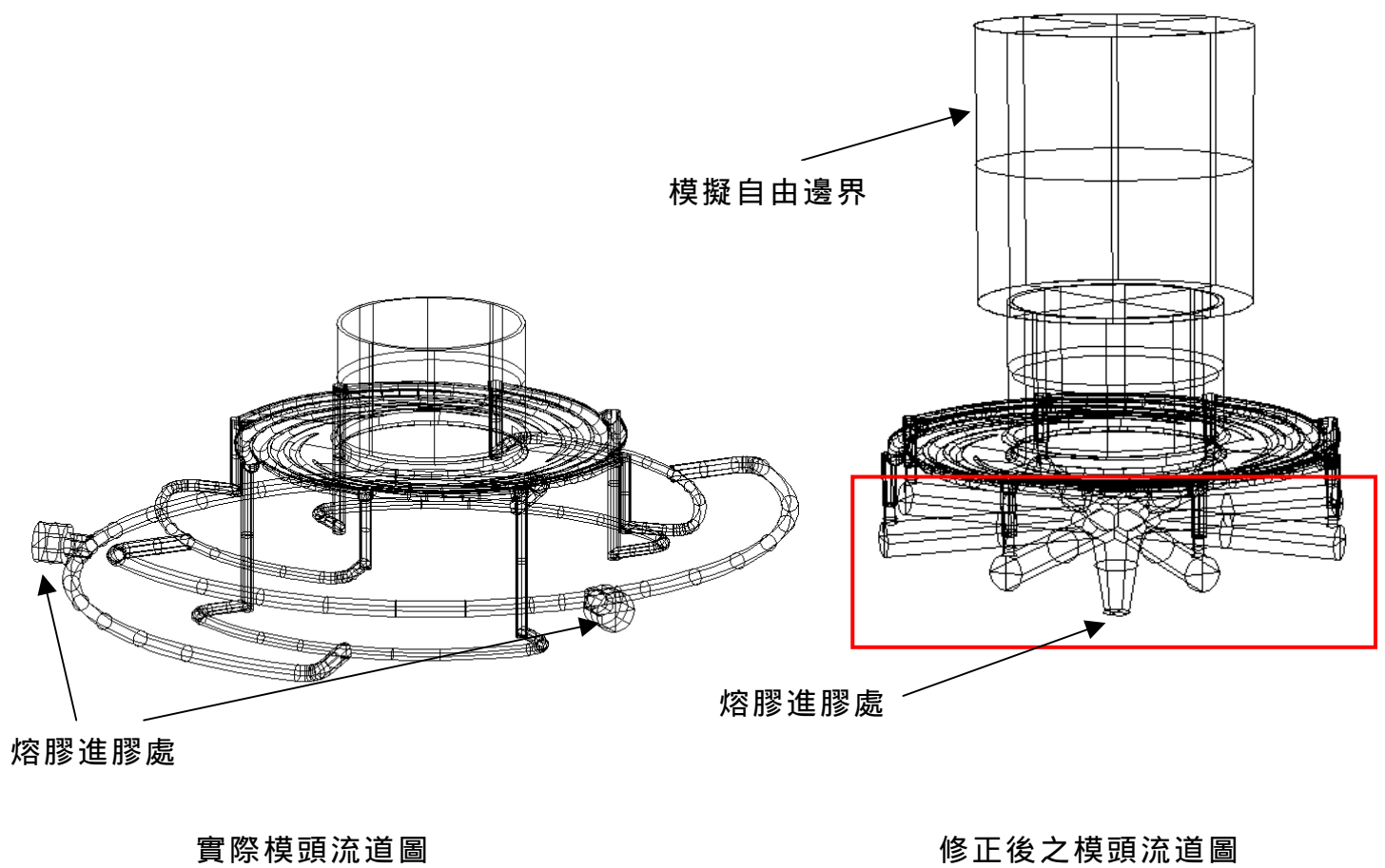
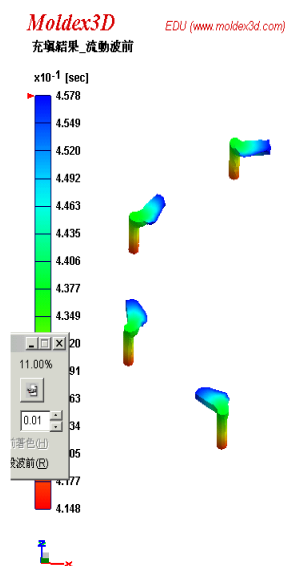


圖 36、模頭流道修正圖

表 12、LDPE 熱性質參數表

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| 材料型號:UNITHENE(射出級)    |        |
| 供應商:台聚                |        |
| ※熱性質參數                |        |
| 固體密度 $\rho_s(Kg/m^3)$ | 954    |
| 熔融密度 $\rho_m(Kg/m^3)$ | 770    |
| 固體比熱 $C_s(J/Kg/C)$    | 2500   |
| 熔體比熱 $C_m(J/Kg/C)$    | 2250   |
| 固體之熱傳係數 $K_s(W/m/C)$  | 0.3    |
| 熔體之熱傳係數 $K_m(W/m/C)$  | 0.25   |
| 熔點 $T_m(C)$           | 133    |
| 熔化熱 $H_f(J/kg)$       | 180000 |
| ※cross model 係數       |        |
| 常數 $K(pa \cdot s^n)$  | 37961  |
| 參考溫度 $T_r(C)$         | 200    |
| 溫度敏感度 $b(1/C)$        | 0.0151 |
| 常數 $r$                | 47.817 |
| $n$                   | 0.409  |

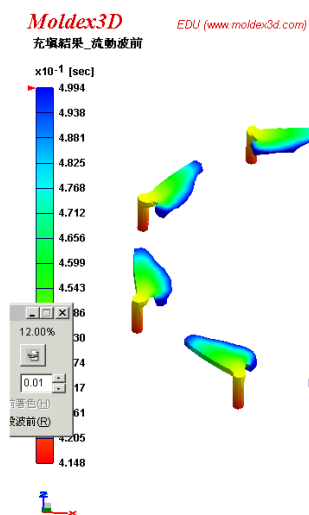


三維流動模擬圖

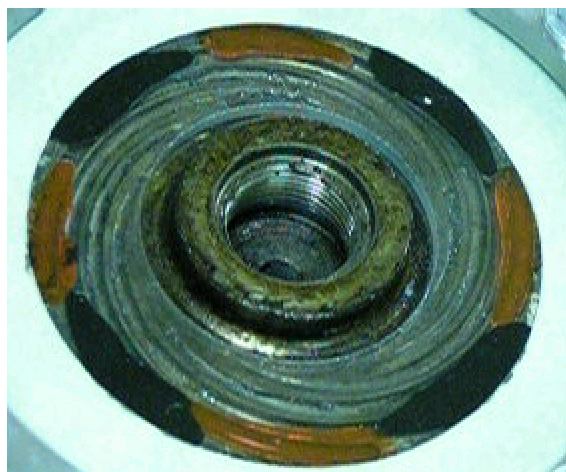


流場實體圖

圖 37、模擬與實驗比較圖-充填流量 10%

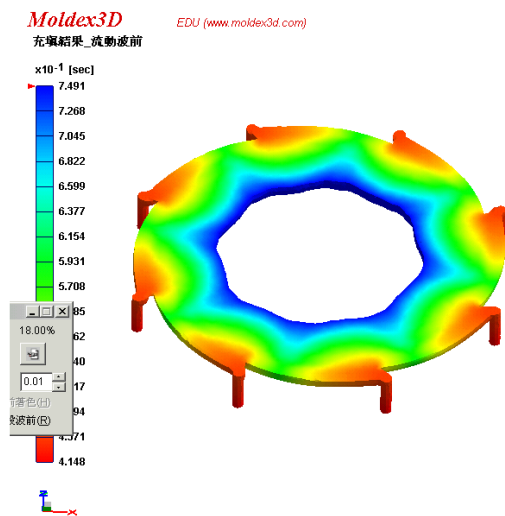


三維流動模擬圖

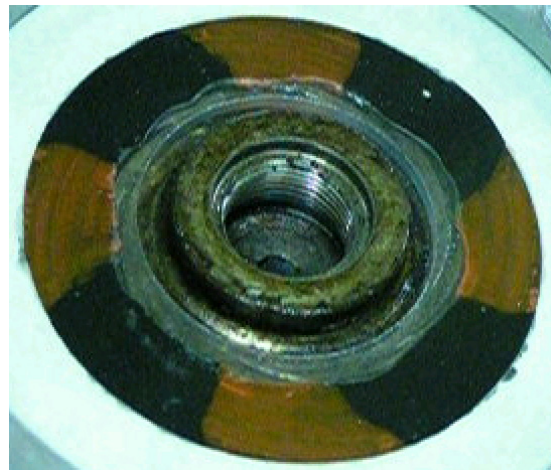


流場實體圖

圖 38、模擬與實驗比較圖-充填流量 12%

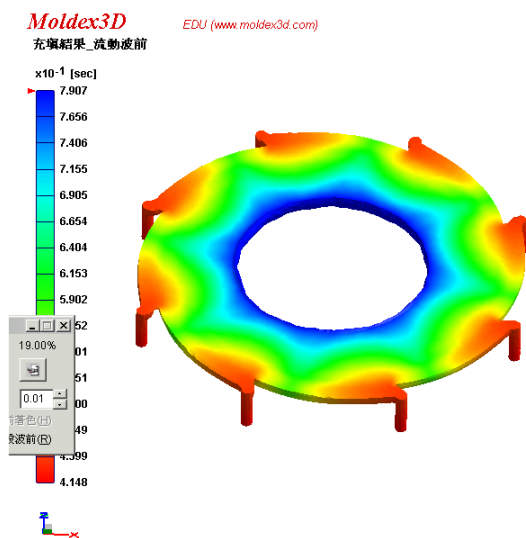


三維流動模擬圖



流場實體圖

圖 39、模擬與實驗比較圖-充填流量 18%

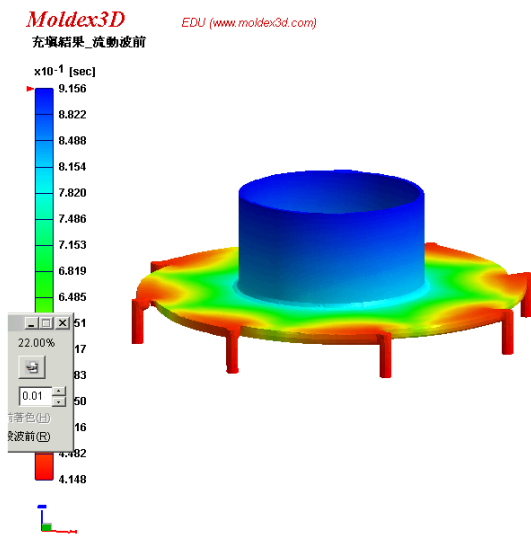


三維流動模擬圖



流場實體圖

圖 40、模擬與實驗比較圖-充填流量 19%



三維流動模擬圖



流場實體圖

圖 41、模擬與實驗比較圖-充填流量 22%

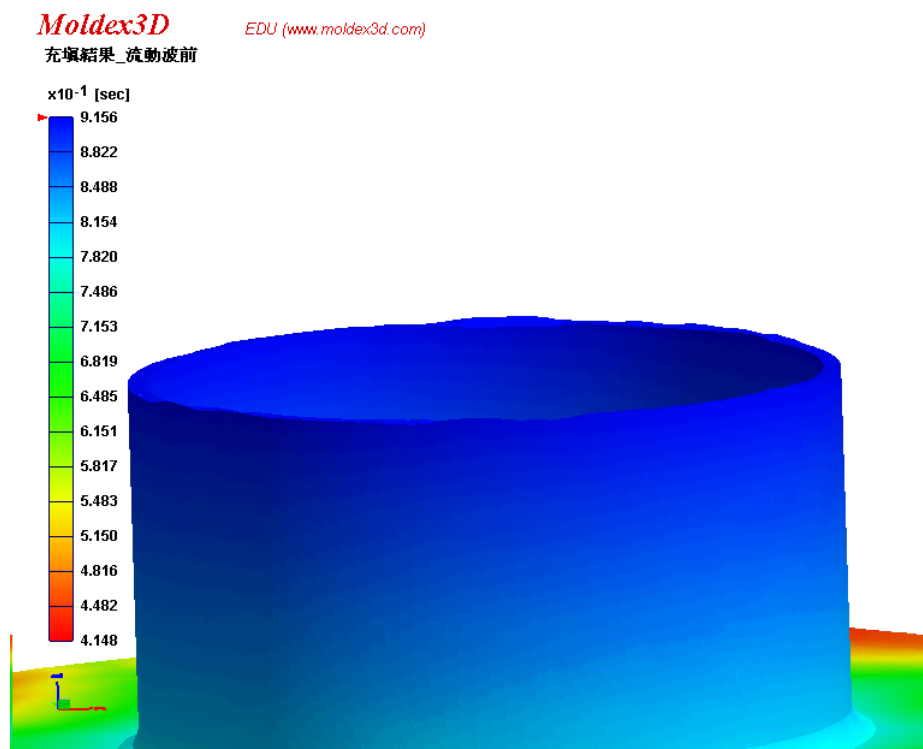


圖 42、充填流量 22%-模唇放大圖



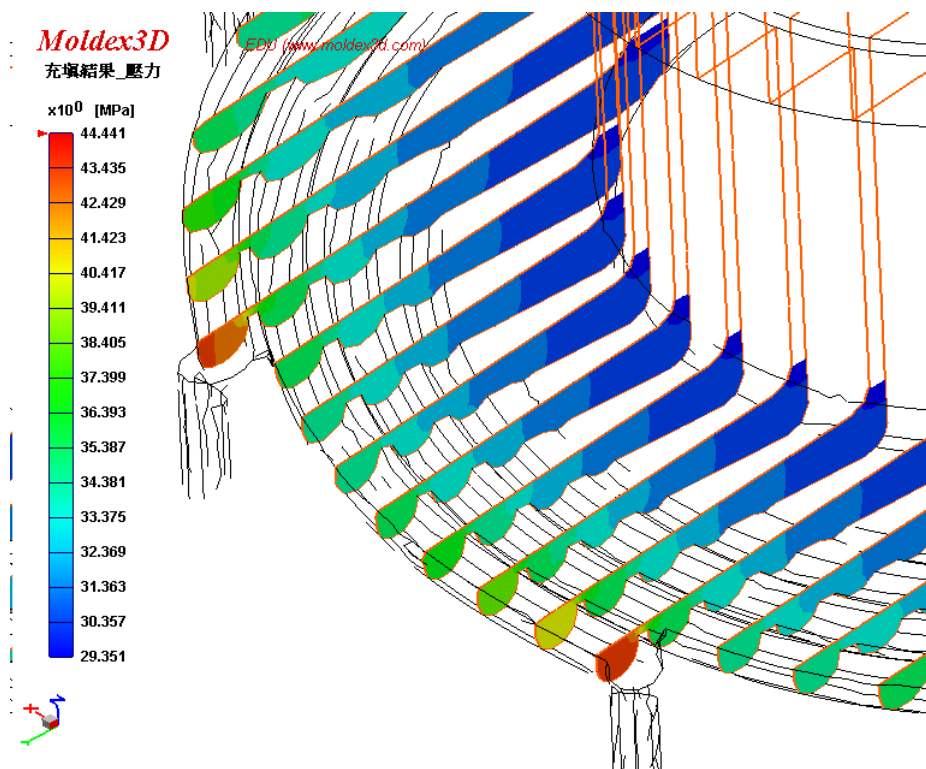


圖 43、模頭螺旋溝內之壓力分佈圖

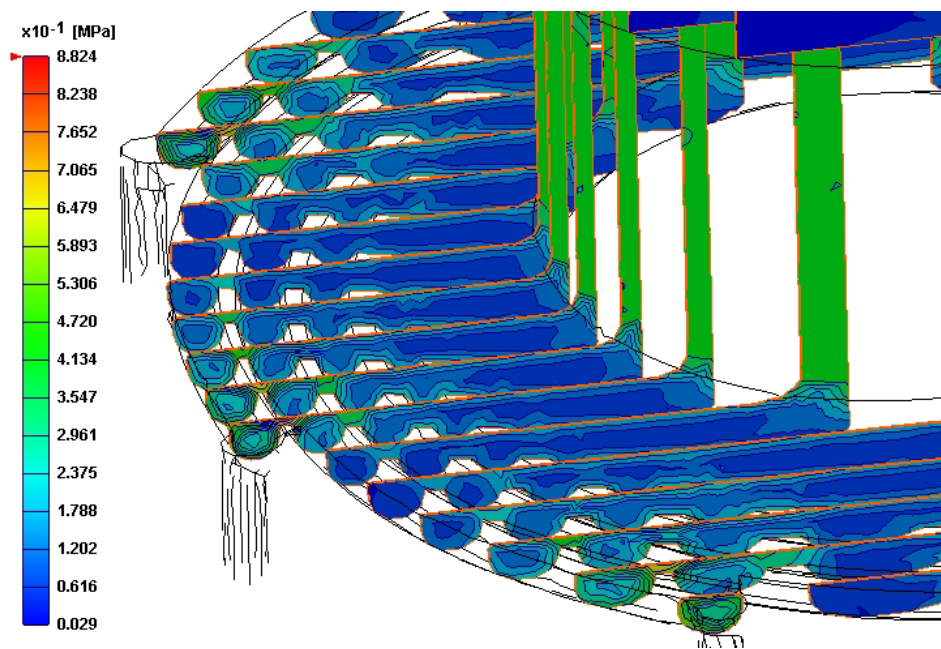


圖 44、模頭內之剪應力分佈圖

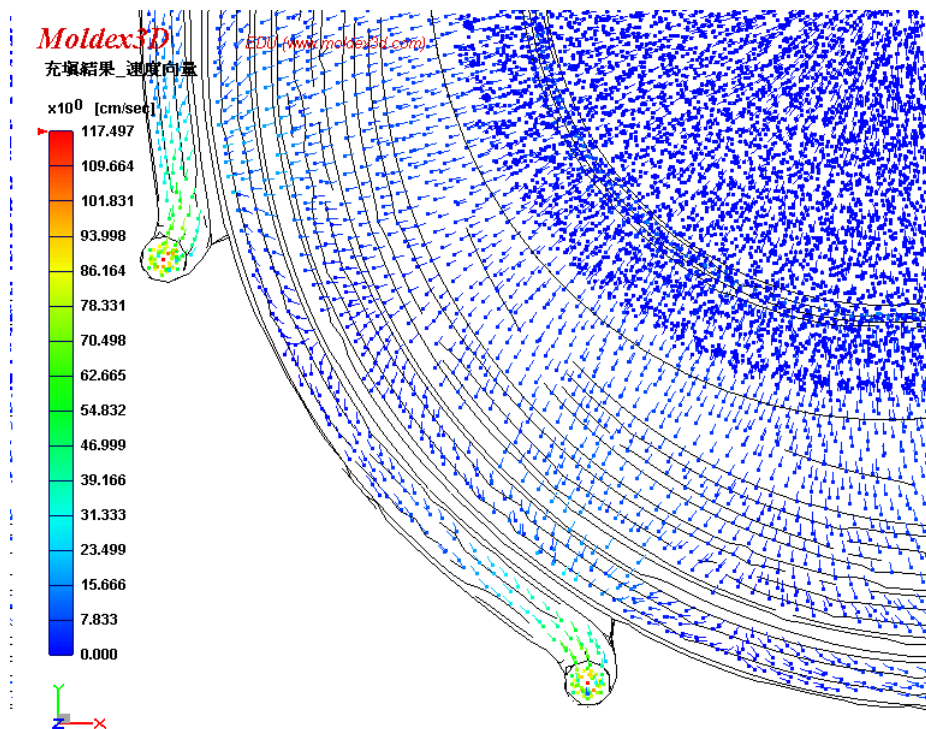


圖 45、模頭內之速度向量圖(上視圖)

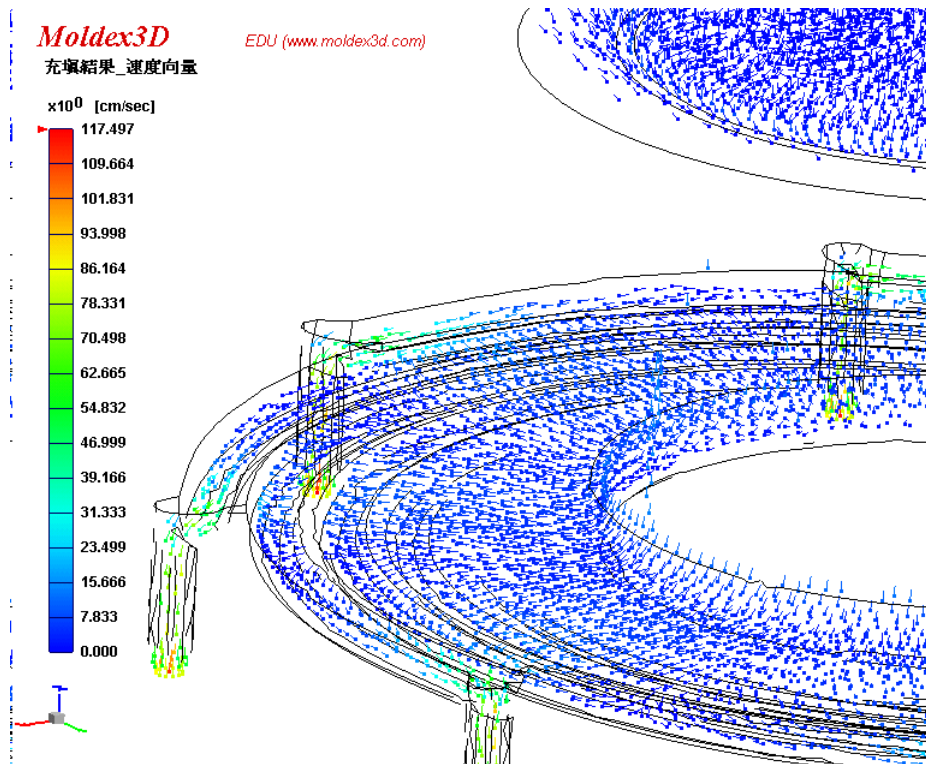


圖 46、模頭內之速度向量圖(等角圖)

## 五、可視化押出實驗

### 5.1 實驗目的

藉最佳化過程所設計出的模頭，經由實際共押的實驗與可視化技術觀測，來確認模擬時所預設之諸多流場特性是否與實際押出結果相符。

### 5.2 實驗設備

#### 1. 共擠押出設備(圖 49)

具玻璃視窗之平面螺旋模頭 ( Planar Spiral Die With Glass Window，圖 50)、單螺桿押出機 ( Single Screw Extruder，兩台，D=25mm)

#### 2. 光學顯微鏡(Optical Microscopy)

#### 3. 數位攝影機(Digital Video)

#### 4. Protech 軟體(影像擷取軟體)

#### 5. 毛細管流變儀 ( Götffert Capillary Rheometer，Model Rheo-Tester 100)

#### 6. 熔融指數儀(Melt Index)

#### 7. 使用材料

(1) 高密度聚乙烯(UNITHENE)，台灣聚合股份有限公司產品 (射出級)

(2) 高密度聚乙烯(HDPE-9007)，台塑股份有限公司產品 (押出級)

(3) 低密度聚乙烯，亞洲聚合股份有限公司產品 (押出級)

(4) 色母(黑色、紅色各一種，PE 系列)

所使用塑料的相關熱性質參數列表於表 13

表 13、不同實驗塑料之熱性質參數表

| 材料名稱                   | HDPE-台塑 9007<br>押出級 | HDPE-聯聚烯<br>(台聚)射出級 | LDPE-亞聚<br>押出級 |
|------------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| ※熱性質參數                 |                     |                     |                |
| 固體密度 $\rho_s(Kg/m^3)$  | 954                 | 954                 | 920            |
| 熔融密度 $\rho_m(Kg/m^3)$  | 770                 | 770                 | 750            |
| 固體比熱 $C_s(J/Kg/C)$     | 2500                | 2500                | 2300           |
| 熔體比熱 $C_m(J/Kg/C)$     | 2250                | 2250                | 2300           |
| 固體之熱傳係數 $K_s(W/m/C)$   | 0.3                 | 0.3                 | 0.24           |
| 熔體之熱傳係數 $K_m(W/m/C)$   | 0.25                | 0.25                | 0.28           |
| 熔點 $T_m(C)$            | 133                 | 133                 | 110            |
| 熔化熱 $H_f(J/kg)$        | 180000              | 180000              | 130000         |
| ※power law model 係數    |                     |                     |                |
| 常數 $K(pa \cdot s^n)$   | 30475               | 6770.3              | 4949.2         |
| 參考溫度 $T_r(^{\circ}C)$  | 200                 | 200                 | 200            |
| 溫度敏感度 $b(1/^{\circ}C)$ | 0.0057              | 0.009               | 0.0131         |
| n                      | 0.3821              | 0.5956              | 0.508          |

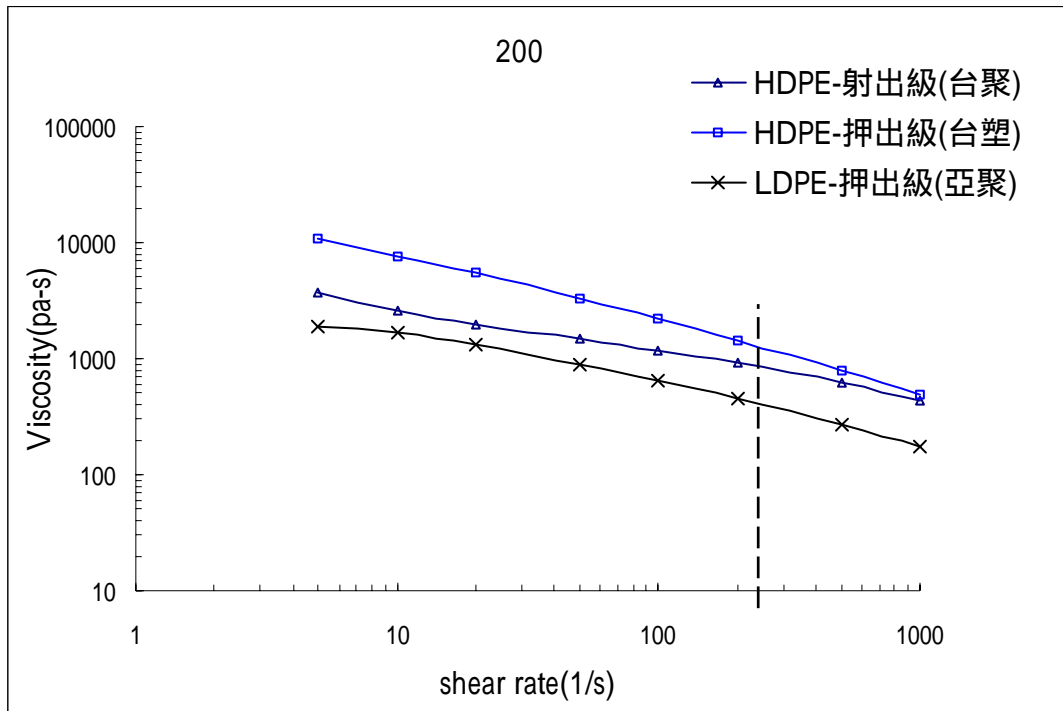


圖 47、不同塑料在 200 °C 下的黏度曲線

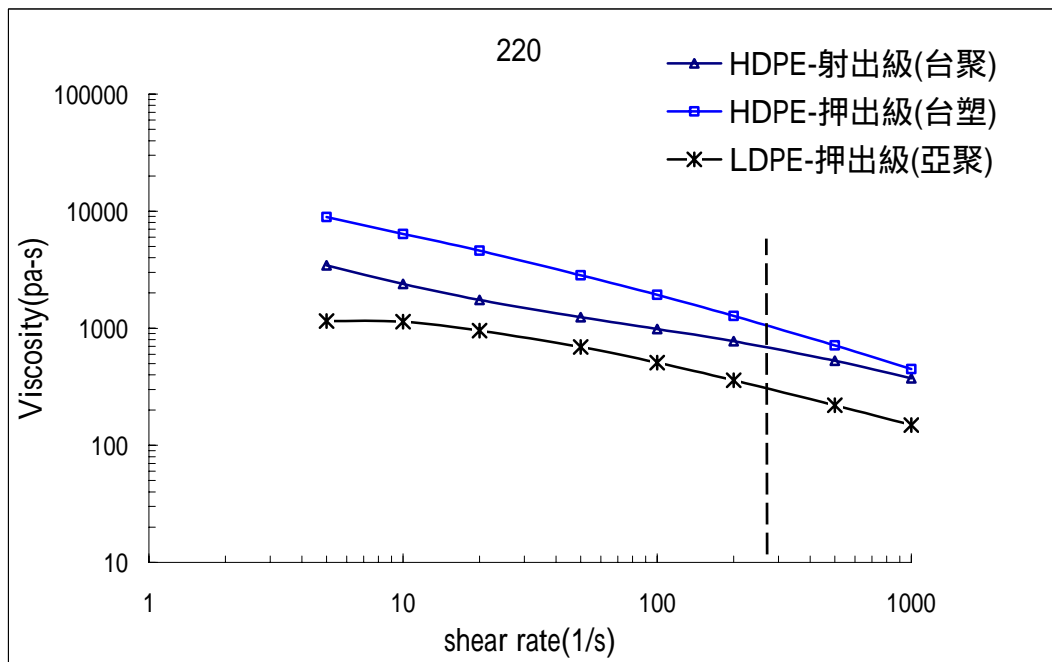


圖 48、不同塑料在 220 °C 下的黏度曲線



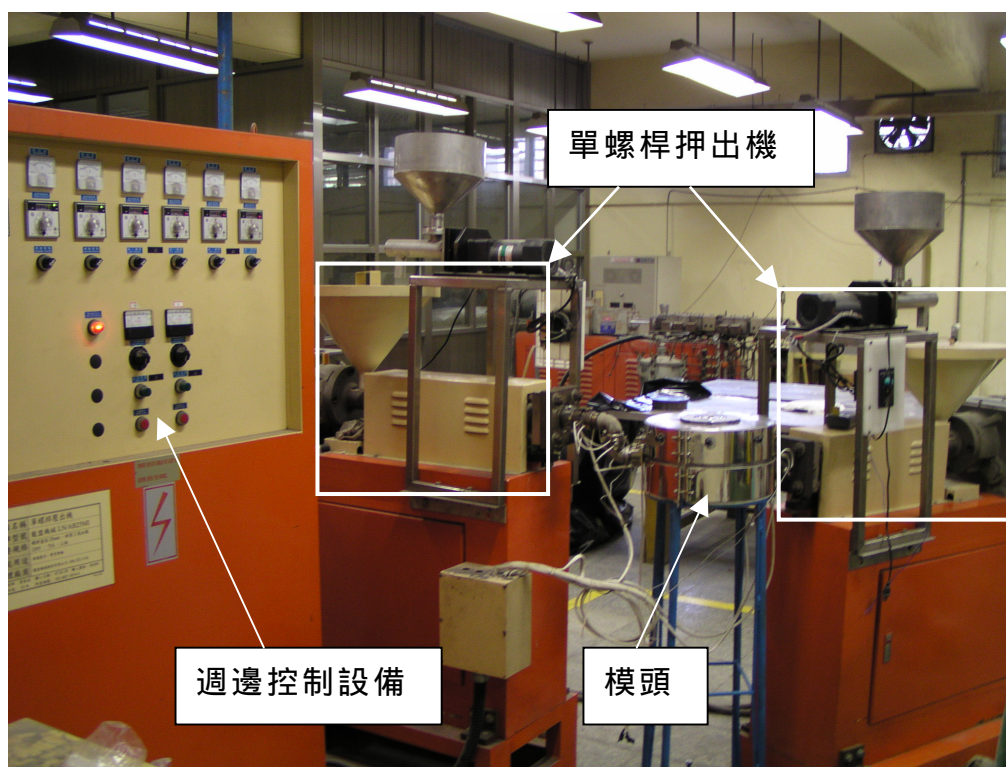


圖 49、 共擠押系統圖



圖 50、 可視化模頭實體圖

### 5.3 實驗流程：

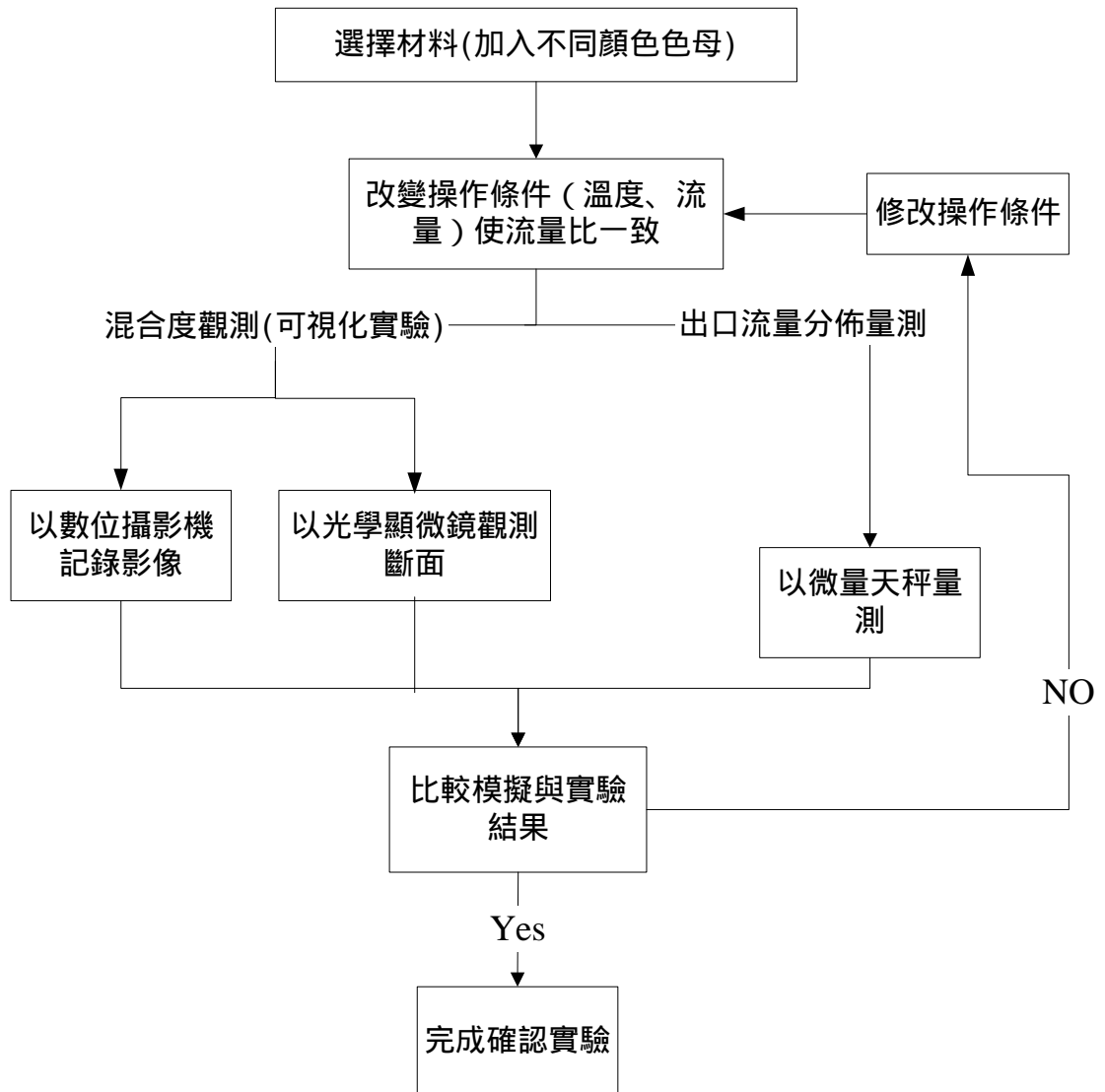


圖 51、可視化共押實驗流程圖

#### 5.4 實驗結果與討論：

- (1) 圖 52 顯示在最佳化模擬下所實驗出的實際流場分佈情況，以單一螺旋溝的熔膠洩流情況來看，圖 52 中 initial gap=0.2mm(最佳化幾何)的流場繞行角度約 190 度，而實際流場(圖 53)觀測約 112 度，實驗結果較模擬差，原因可能為熔膠混合造成的遮蓋情況使得完整的繞行角度無法全貌觀察，或是模擬時系統假設為等溫，等溫的情況下所做的模擬結果會比非等溫情況佳[27]，在實驗時模頭溫度對流場造成的影響所致。
- (2) 圖 52 顯示以不同起始間隙(initial gap)對螺旋段混合度的影響，當混合度為 1 時(虛線)螺旋溝中熔膠混合度為最佳，模擬結果發現 gap=0.2mm 時，熔膠從溝中冒出範圍約 85%(繞行角度 190 度)，從圖 55 薄膜之橫斷面 OM 圖中可看出相鄰溝槽間的實際混合情況良好，而 gap=0.6mm 時熔膠的繞行角度約 50 度，此時熔膠已大部份湧出，如此的流動行為將造成結合線(因兩相鄰螺旋溝相差 45 度)，從圖 54 中即可明顯看出，gap=0.6mm 產生一明顯結合痕跡(圈選處)，將對薄膜製品強度與外觀造成影響。
- (3) 從押出實驗結果，圖 56、57 顯示不同模唇間隙對出口流場均勻度的影響，在不同模溫下無論是 gap=1.5mm 或 gap=2.5mm 時，隨著模溫越高，流量均勻度的分佈變化情況並不明顯，其分佈差異大都為實驗誤差所造成。
- (4) 若比較不同模唇間隙對出口處流量均勻度的影響，當間隙為 2.5mm 時，因空間較大，對熔膠較不產生穩定壓力與定型效果，故產生的流量分佈與在螺旋段出口處之流量分佈較相似，當間隙為 1.5mm 時，間隙較小理論上會造成較大的壓力降，對熔膠造成定型效果，流量均勻分佈應該較 2.5mm 時為佳，但實驗結果並不然。
- (5) 從押出實驗結果，圖 58 顯示不同押出速度對出口流量均勻度的影響，當押出速度分別以 200、300 與 400RPM 時模唇出口流量均勻度差異不大，因押出速度並未引發之熔膠黏滯升溫現象，故速度造成的流量分佈



差異並不明顯。

- (6) 從押出實驗結果，圖 59、圖 60 顯示，比較不同塑料之 power law 指數( $n$  值)對出口流量均勻度之影響，以模擬結果顯示，當  $n$  值越高，出口的流量分佈越均勻，這是因為流變性質越趨近於牛頓流體，熔膠的剪薄性質不明顯的緣故，分子間黏度差異不大，產生較平均的流動分佈，而以實驗結果看來，似乎也有與模擬相同的趨勢，但因實驗誤差的影響，呈現出較紊亂的分佈曲線(應該有 8 個分佈波峰)，理論上實驗值應該比模擬值更佳，因為取樣的位置有加上模唇段，經模唇段的分子重列與定型可得更佳的流量分佈。

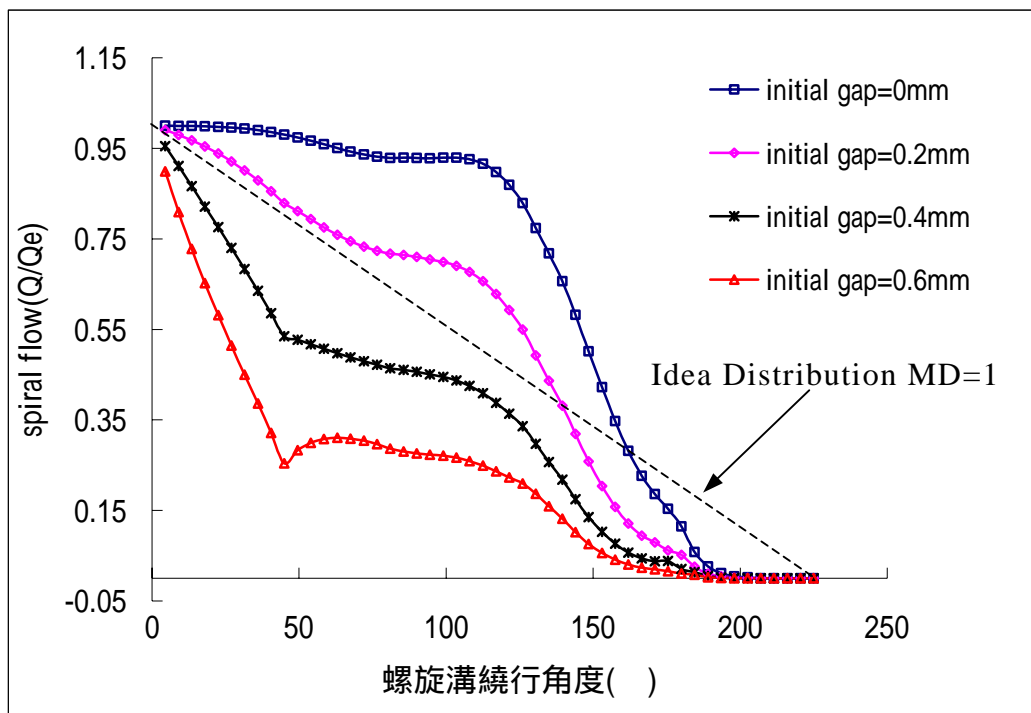


圖 52、不同起始間隙對熔膠混合度的影響(模擬結果)

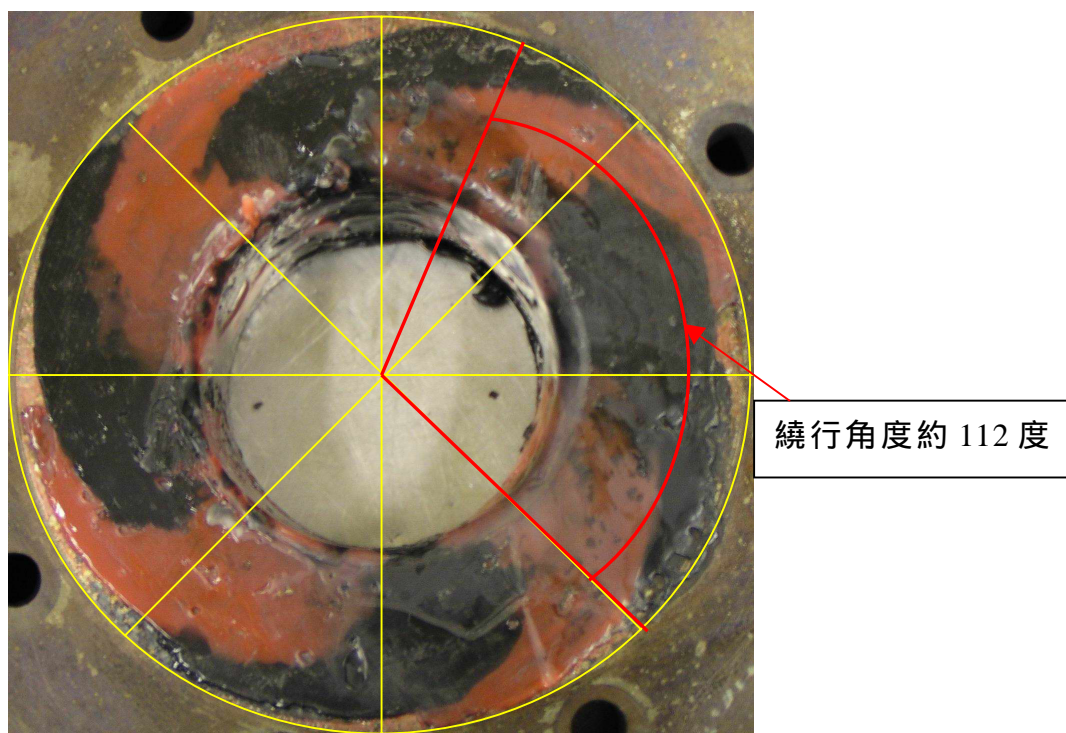
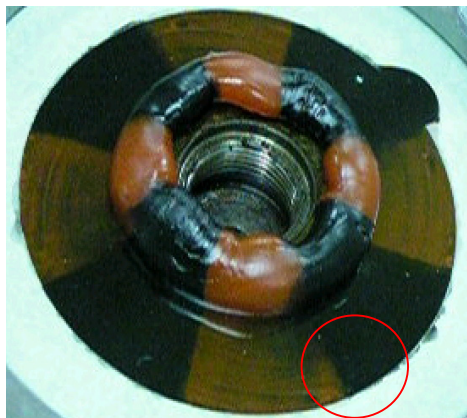


圖 53、拆模後實際流場分佈圖



(A) Initial gap=0.2mm



(B) Initial gap=0.4mm



(C) Initial gap=0.6mm

圖 54、不同起始間隙對混合度的影響(可視化流場圖)

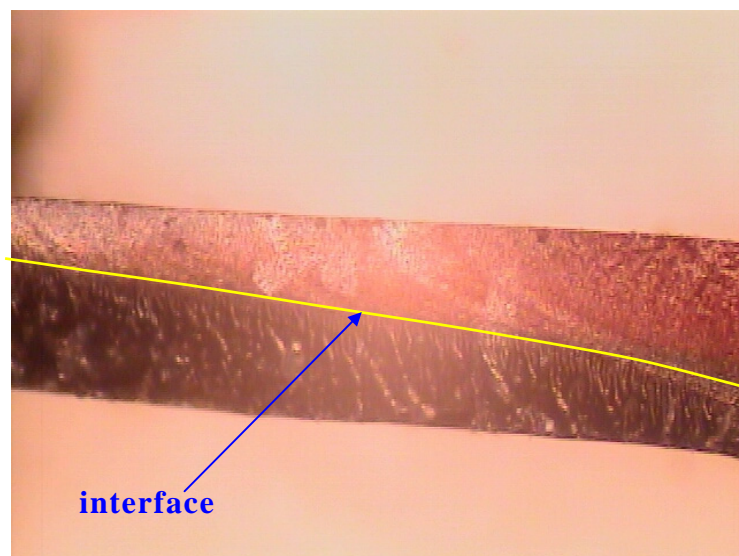


圖 55、起始間隙，gap=0.2mm 層間混合度的情況(OM 圖)

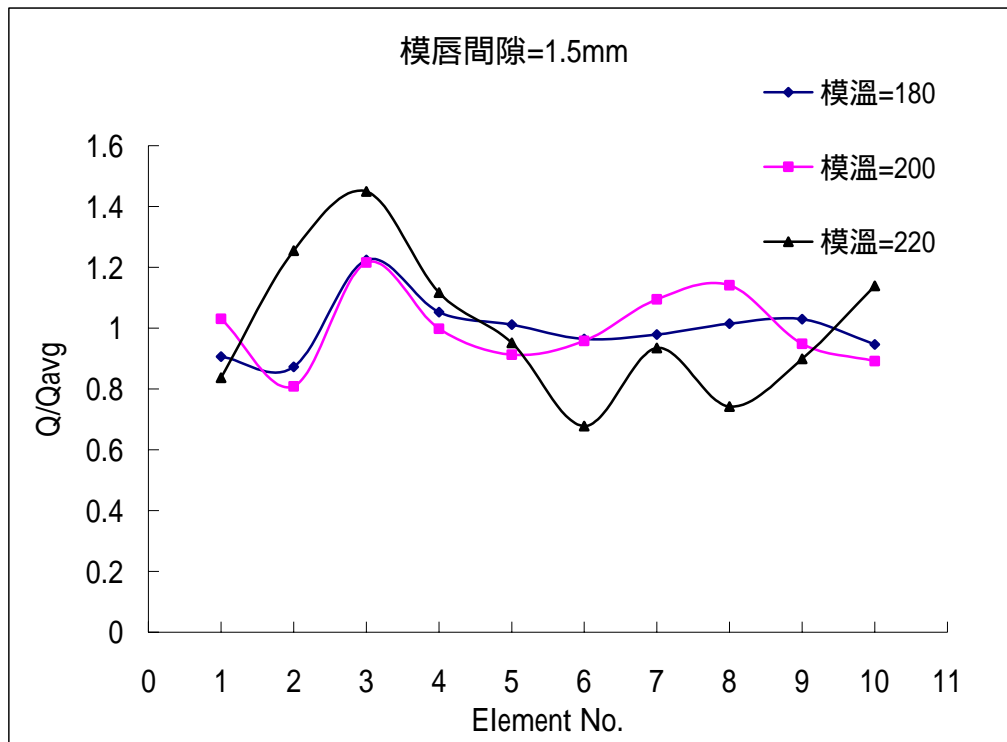


圖 56、不同模溫對流量均勻度的影響(Gap=1.5mm)

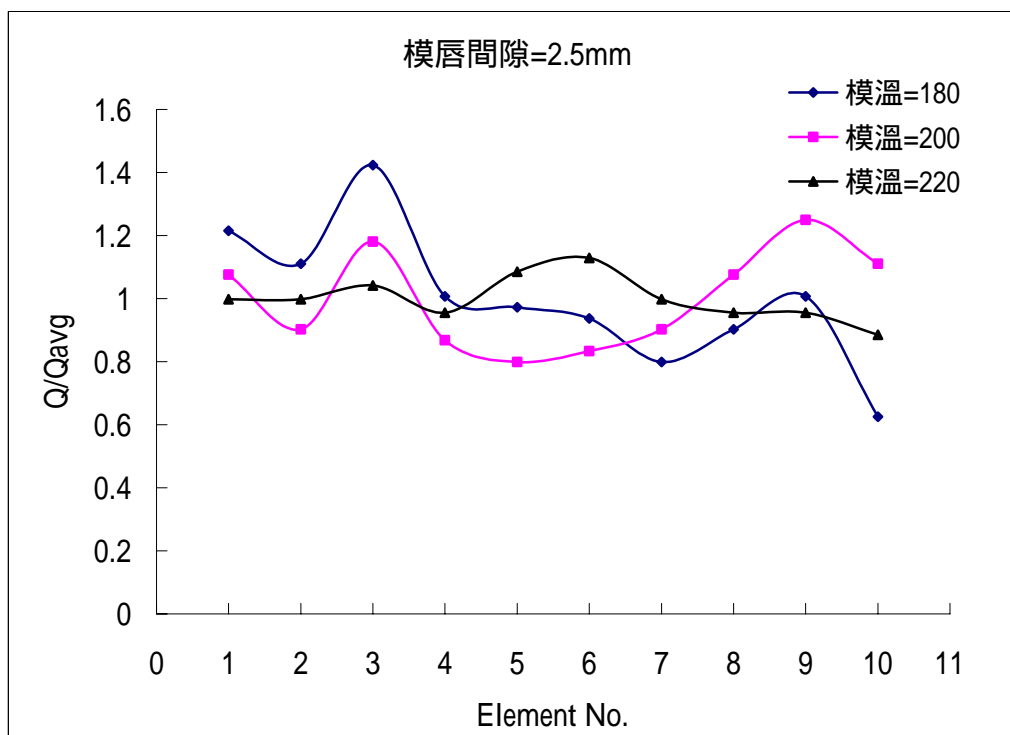


圖 57、不同模溫對流量均勻度的影響(Gap=2.5mm)

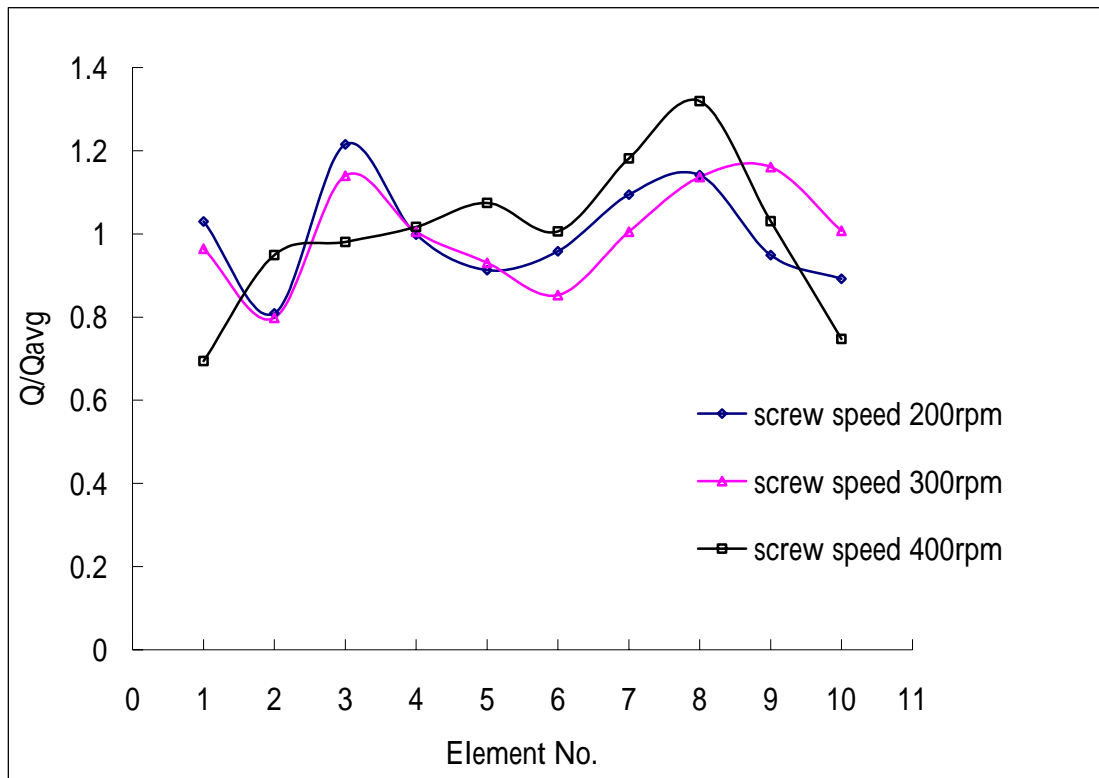


圖 58、不同押出速度對流量均勻度的影響

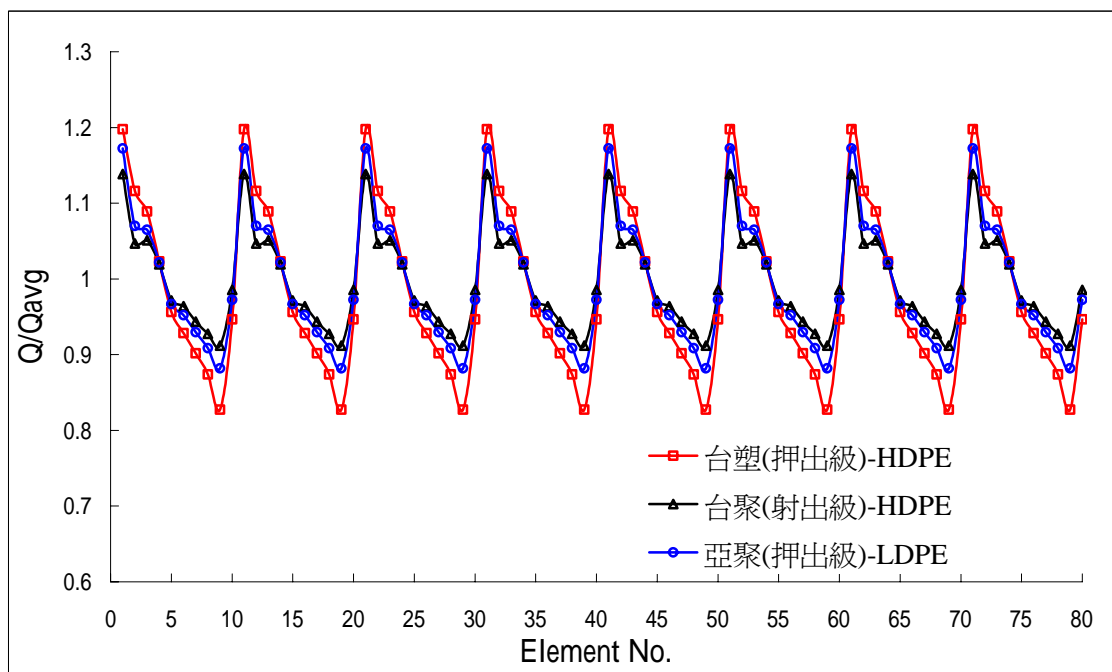


圖 59、不同 power law 指數之塑料對流量均勻度的影響(模擬)

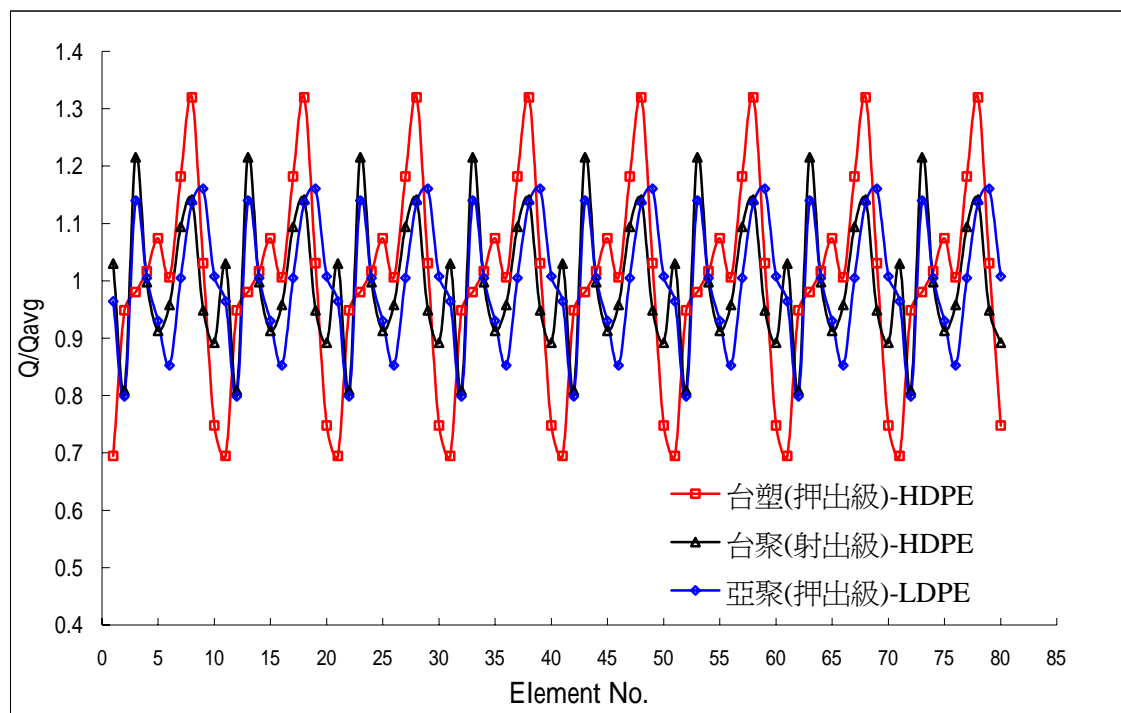


圖 60、不同 power law 指數之塑料對流量均勻度的影響(實驗)

## 六、結論

### 6.1 研究成果說明：

- (1) 以二維體積控制法進行此複雜流場分析並配合田口方法，以最適化之流場特性如：流量均勻度(UI)、總壓力損失(PD)、混合度(MD)等指標(但上述三種標準並無法同時符合最佳原則)來搜尋流道之最佳設計幾何，分別為模頭起始間隙(G)、螺旋溝之起始深度(H)、螺旋收斂常數(A)、螺旋段漸縮角度( )，結果發現在螺旋溝之幾何組合( $G=0.1959\text{mm}$ ， $H=7.32\text{mm}$ ， $A=0.1115$ ， $=1.4434^\circ$ )下有較佳之流場特性。
- (2) 模擬分析結果必須結合資料處理能力將所分析的數據有系統地圖形化，將點資料轉成線資料，進而鋪成曲面，始可確實地將模擬結果應用於實際模具設計上，故設計者本身需具備程式撰寫能力，二維、三維繪圖與數控程式轉檔能力，即可有效的將 CAD/CAM/CAE 製程整合應用。
- (3) 模頭幾何參數-螺旋段起始間隙(G)對成形過程中熔膠的混合度影響很大，經模擬與可視化實驗印證，當起始間隙大於  $0.6\text{mm}$  所產製之薄膜即會產生結合線，此情況會影響薄膜製品的外觀與使用強度。
- (4) 以押出實驗進行不同模唇段間隙與不同模頭溫度對出口流量均勻度比較，結果發現其相互影響不大，均在誤差範圍中。
- (5) 以押出實驗進行不同押出速度對出口流量均勻度的影響，結果速度對均勻度的影響不大。
- (6) 以押出實驗進行不同剪薄性質的塑料對模唇出口處之流量均勻度的影響，經過與模擬結果比較得到以下結果：模擬結果顯示，當 power law 指數  $n$  值越大時，出口之流量分佈越均勻(但差異不大)，而實驗結果顯示不同塑料間差異不大，可能與材料選擇有關(應取  $n$  值等級差異較大之塑料)。



- (7) 在設計平面式螺旋模頭過程中，利用電腦模擬以二維流動分析結合田口最佳化方式可有效應用於押出模頭之輔助設計。

## 6.2 未來研究方向

本文所設計之平面式螺旋模頭，在經過模擬與實驗之確認後，顯示利用二維模擬配合田口最佳化可有效地輔助類似模頭的設計開發，但是所設計出模頭流道尺寸，並非真正的最佳化幾何尺寸，因為模擬時是以在某些固定的幾何尺寸下，設定在牛頓流體的情況時固定進入模頭的總流量，而求出每個子單元中之主流量  $Q$  與洩流量  $q$ ，並以  $Q$ 、 $q$  值當做猜值求解出收斂後每個子單元中的  $Q$ 、 $q$ 、 $P$  值，再以這些量做為判斷模頭設計的標準，所求之判斷標準與子單元幾何尺寸有很大的關係，故結合田口最佳化將起始的幾何組合範圍擴大，減少搜尋的誤差，以求出在某些要求的流場特性下較合適之幾何設計；若往後希望設計出真正最佳化的幾何尺寸，必須要以固定螺旋溝中每個子單元的主流量  $Q$  與洩流量  $q$  的值與遞減的壓力  $P$ ，在此  $Q$ 、 $q$ 、 $P$  下每個子單元所求出幾何尺寸必定不盡相同，故所分析出的流場特性必為最佳值，但整體流場的幾何尺寸可能不是一個單一曲面，因此，在分析後之資料處理與設計繪圖能力上要更高，模具製作時所需的工具機設備的等級要更好，可能需 4 軸或 5 軸以上，以應付多重曲面的加工精度，若能夠使電腦輔助模具設計的能力提高，對於相關業界的模頭設計水平也會有很大的提升。



## 參考文獻

1. E.Bare , G.Pollock , S.Nazarenko , A.Hiltner , 1994 , ” Interdiffusion in Microlayers Polymer Composites of Polycarbonate and a Copolyester” Journal of Applied Polymer Science , vol.**52** , P163-176.
2. A.Hiltner et al , 1997 , ”Novel Structures by Microlayer Coextrusion --Talc-Filled PP , PC/SAN , and HDPE/LLDPE “ , polymer engineering and science , vol.**37** , pp355-362 , February.
3. D.Jarus , A.Hiltner , and E.Bare , 2001 , “Microlayer Coextrusion as a Route to Innovative Blend Structures” Polymer Engineering and science , vol.**41** , P2162-2171 , December.
4. M.S.Hedenquvist , U.W.Gedde , 1999 , “Prediction of Permeability of laminate film; new method for ultra-thin layers and system with solute concentration dependent diffusivity” Packaging Technology and Science , vol.**12** , p131 –141.
5. T.Schuman et al , 1999 , ”Solid state structure and melting behavior of interdiffused polyethylenes in microlayers” , polymer , vol.**40** , p 7373 -7385.
6. J.C.Ven Dar Hoeven et al , 2001 , ” Homogeneity of Multilayers Produced With a Static Mixer” polymer engineering and science , vol.**41** , P32-42.
7. D.Jarus et al , 2002 , “Barrier properties of polypropylene/polyamide blends produced by microlayer coextrusion” polymer , vol.**43** , p2401-2408.
8. Peter.C.Gates , 1996 , ”Spiral Fed Multi-layer Tubular Die” , U.S. Patent 5538411 , July.
9. Planeta et al. , 1997 , ”Annular Co-extrusion Die” U.S. Patent 5690972 , November.
10. Mavridis , 1998 , ” Multilayer Modular Extrusion Die” U.S. Patent 5716650 , February.
11. Sagar , 1998 , ” Annular Co-extrusion Die” U.S. Patent 5738881 , April.

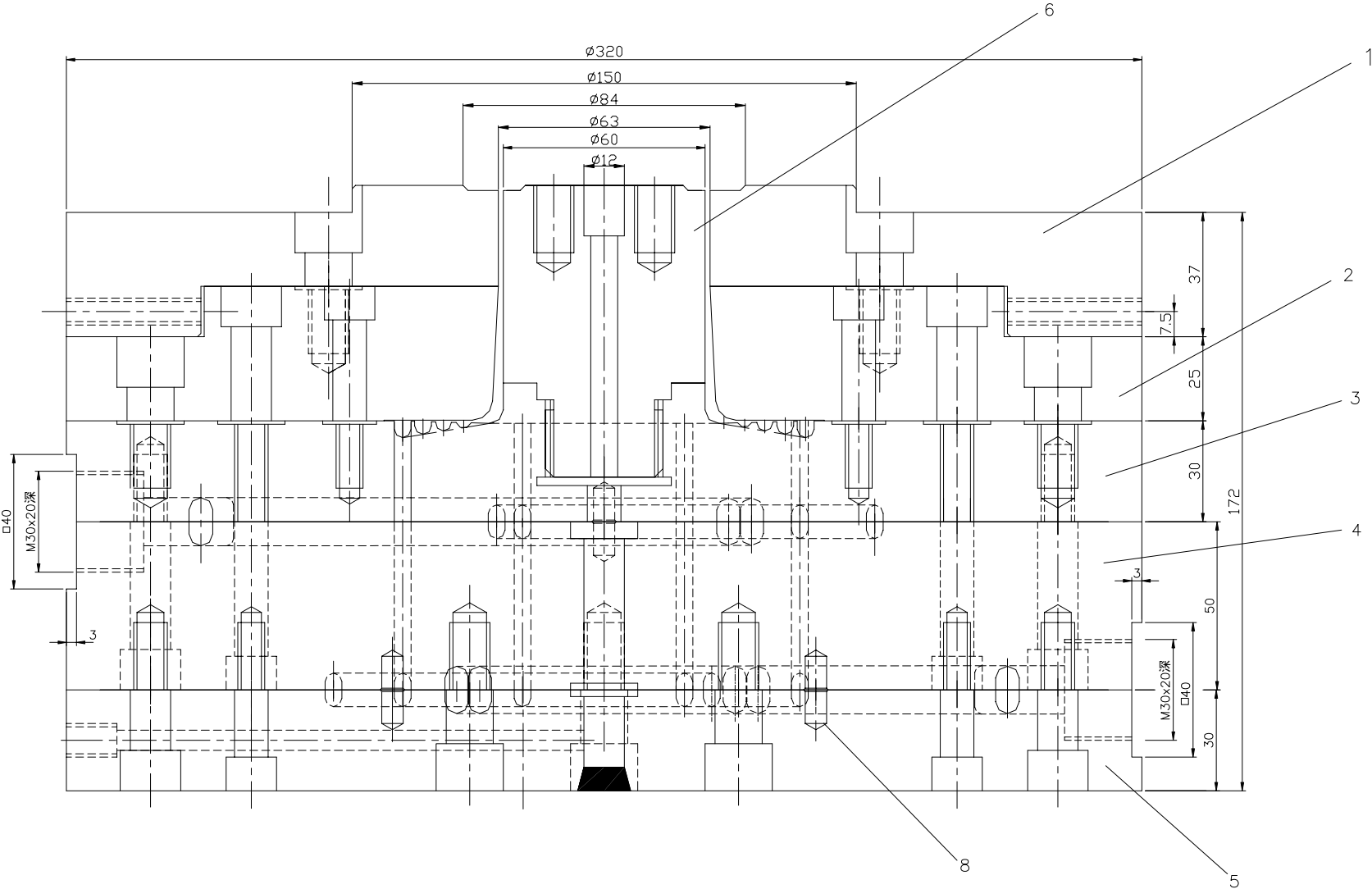
12. Bentivoglio , 1999 , "Multi-layer Blown-Film Extrusion Die" , U.S. Patent 5984657 , November.
13. B. Proctor , 1972 , "Flow Analysis in Extrusion Dies" , SPE Journal vol.**28** , p34-41.
14. P. Saillard and J. F. Agassant , 1984 , "Polymer Flow in Spiral Mandrel Die For Tubular Films" , polymer process engineering , vol.**2** , p37-52
15. D. M. Kalyon , J. S. Yu , and C. C. Du , 1987 , " Distributed Model Of Flow in Spiral Mandrel Die" , Polymer Process Engineering , vol.**5** , p179-207
16. C. Rauwendaal , 1987 , " Flow Distribution in Spiral Mandrel Die" , Polymer Engineering and Science , vol.**27** , p186-191 , Mid-February
17. J. Vleck , V. Kral and K. Kouba , 1984 , "The Calculation of The Form of a Spiral Mandrel" , plastic and rubber processing and application vol.**4** , p309-315 , April.
18. J. Vleck , J. Vlachopoulos , and J. Perdikoulis , 1988 , "Determination of Output Uniformity From Spiral Mandrel Dies" , Intern. Polymer Processing II , vol.**2** , p174-181.
19. E. J. Fahy and P. W. Gilmour , 1986 , " Finite Element Analysis of Generalized Newtonian Fluids Through Spiral Mandrel Dies" , Int. J. Numer. Meth. Eng. , vol.**23** , p1-11 , January.
20. J. Perdikoulis , J. Vleck , and J. Vlachopoulos , 1987 , "Polymer Flow Through Spiral Mandrel Dies: A Comparison of Models" , Advanced in polymer Technology , vol.**7** p333-341.
21. J. Perdikoulis , C. Tzoganakis , and J. Vlachopoulos , 1989 , "Flow Visualization and Residence Time Distribution in Spiral Mandrel Dies" , Plast. Rubber Process. Appl. , Vol.**11** , p59-66.
22. J. Perdikoulis , J. Vleck , and J. Vlachopoulos , 1989 , "Predicting Flow Performance of Spiral Mandrel Dies" , Journal of Plastic Film and Sheeting. , vol.**5** , p18- 30 , January.

23. J.Perdikoulis , J.Vleck , and J. Vlachopoulos , 1990 , "An Experimental Distribution Models for Spiral Mandrel Dies" , advance in polymer technology , vol.10 , p111-123.
24. K. Benkhoucha and D. H. Sebastian , 1989 , "Design and analysis of spiral blown film dies" , SPE/ANTEC , p1774-1778 , May.
25. 許振鵬 , 1989 , 吹袋模頭之流動模擬 , 國立交通大學 , 碩士論文。
26. D. J. Coyle and J. Perdikoulis , 1991 , "Flow simulation and visualization in spiral mandrel dies" , SPE/ANTEC , vol.37 , p 2445-2447 , May.
27. M.Zatloukal et al. , 2001 , " Numerical Simulation of Polymer Flow in Flat spiral Dies" , Polymer Engineering and Science , Vol.41 , P1683-1694.
28. C.C.Huang , 1998 , "A Systematic Approach For The Design of a Spiral Mandrel Die" , Polymer Engineering and Science , vol.38 , p533-582 , April.
29. R.Colombo , 1958 , "Apparatus for Coating Article With Multi-layer Linings" , U.S. Patent 2820249 , January.
30. 盧少忠 , 胡淑芬 , 王淳 編著 , 塑料擠出機頭設計經驗點評 , 機械工業出版社。
31. W.Michaeli , 1992 , "Extrusion Dies for Plastics and Rubber" Munich:Hanser Publishers
32. Natti S.Rao , 1991 , "Design Formulas for Plastics Engineers" Munich:Hanser Publishers.
33. 彭國倫 , 1995 , Fortran95 程式設計 , 碁峰 , 台北。
34. 李輝煌 , 2001 , 田口方法-品質設計的原理與實務 , 高立圖書有限公司
35. 鍾清章 , 1989 , 田口式品質工程導論 , 中華民國品質學會
36. 丁志華 , 戴寶通 , 2001 , 田口實驗計劃法簡介( I )、( II ) , 毫微米通訊 , 8 卷 , 3 期 , 頁 7~37 , 八月。
37. 劉士榮 , 1995 , 塑膠加工學:塑膠之加工特性 , 台北市
38. 劉大佼 , 1997 , 高分子加工原理與應用 , 國立編譯館主編

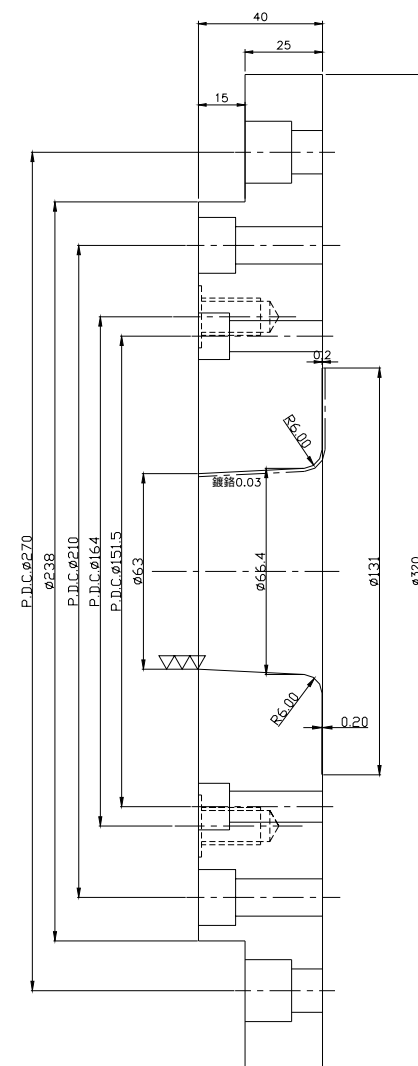
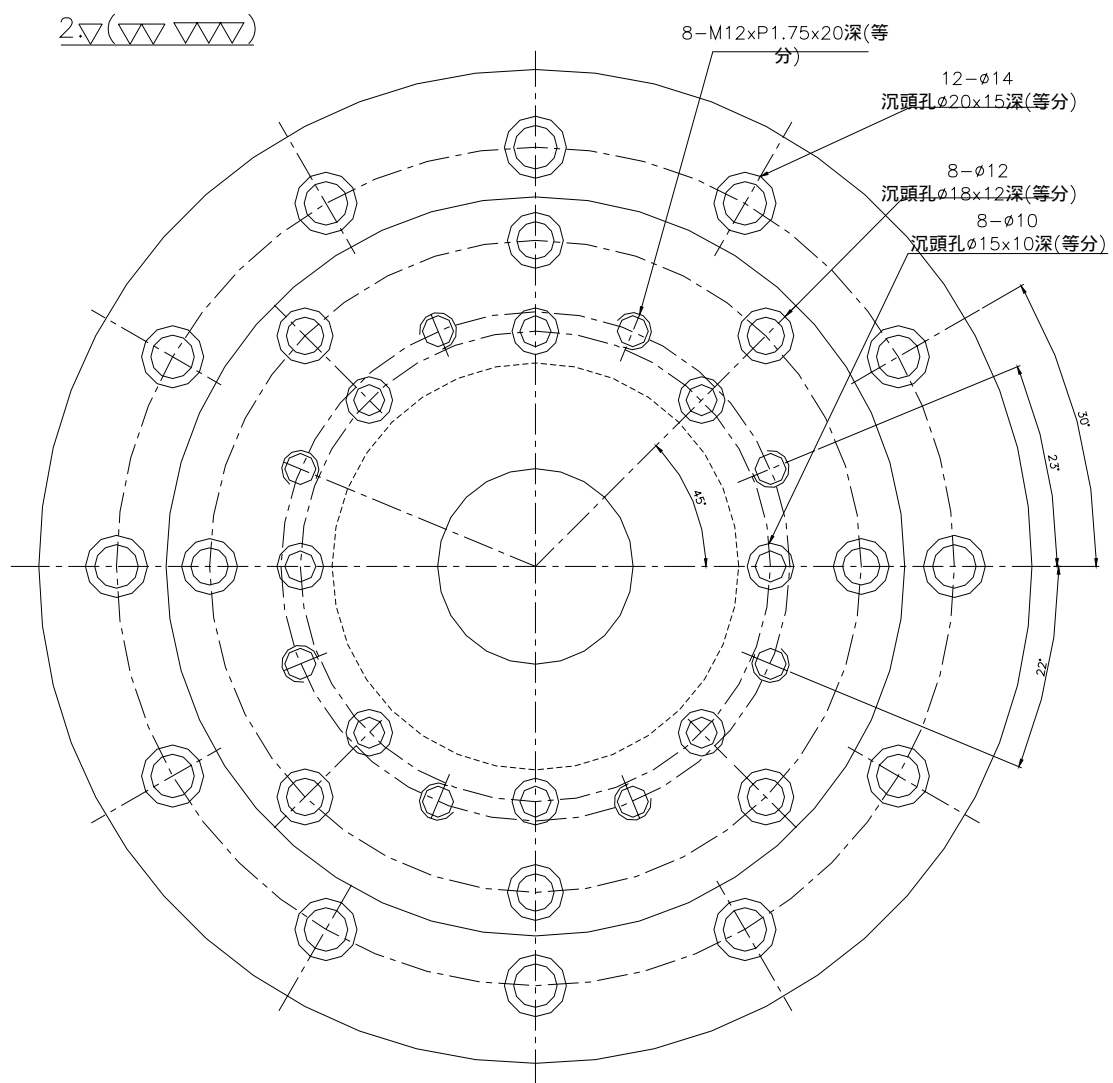
39. 陶文鈺，2001，吹膜製程之螺旋軸心模頭最佳化設計，國立交通大學，碩士論文。
40. Knittel et al.，1980，”Multilayer Tubular Extrusion Die”，U.S. Patent 4182603，January.

## 自 傳

| 個人基本資料  |  |     |   |
|---|--|-----|---|
| 姓 名   | 陳明達  |     |  |
| 性 別   | 男  |     |   |
| 出生年月日   | 68 年 10 月 7 日  |     |   |
| E-Mail  | <a href="mailto:a091316101@cc.kuas.edu.tw">a091316101@cc.kuas.edu.tw</a> |     |   |
| 通 訊 處(S)  | 高雄市三民區建工路 415 號  | 電 話 | 07-3814526-5445   |
| 通 訊 處(H)  | 台中縣太平市育英街 59 號 3 樓   | 電 話 | 04-23912708   |
| 戶 籍 地 址   | 台中縣太平市新坪里 13 鄰<br>育英街 59 號 3 樓   | 電 話 | 04-23912708   |
| 自 傳   |  |     |   |
| <p>本人出生於一個簡單的家庭，家住台中縣太平市，是一個有山有水的好地方，家中成原有父母親,三個姐姐、一個哥哥，我在家中排行老么，父親在模具廠工作，母親為家庭主婦，目前尚有哥哥與父母同住，民國八十七年我獨自一人負笈南下就讀於高雄應用科技大學，求學期間承蒙指導教授-黃俊欽老師的照顧與指導，他對學問的看法對我的影響甚鉅，他認為除了本身學理專業知識的充實外，對於產業界的動態也必須時常關切，因此在研究所求學期間除了本身研究領域的充實外，並十分鼓勵我與產業界多接觸，因此能將自己所學協助廠商解決問題，也從廠商及現場經驗中獲得許多寶貴的知識，也因此結識了許多產業界的朋友,使我的人生歷練更豐富。</p> |  |     |   |

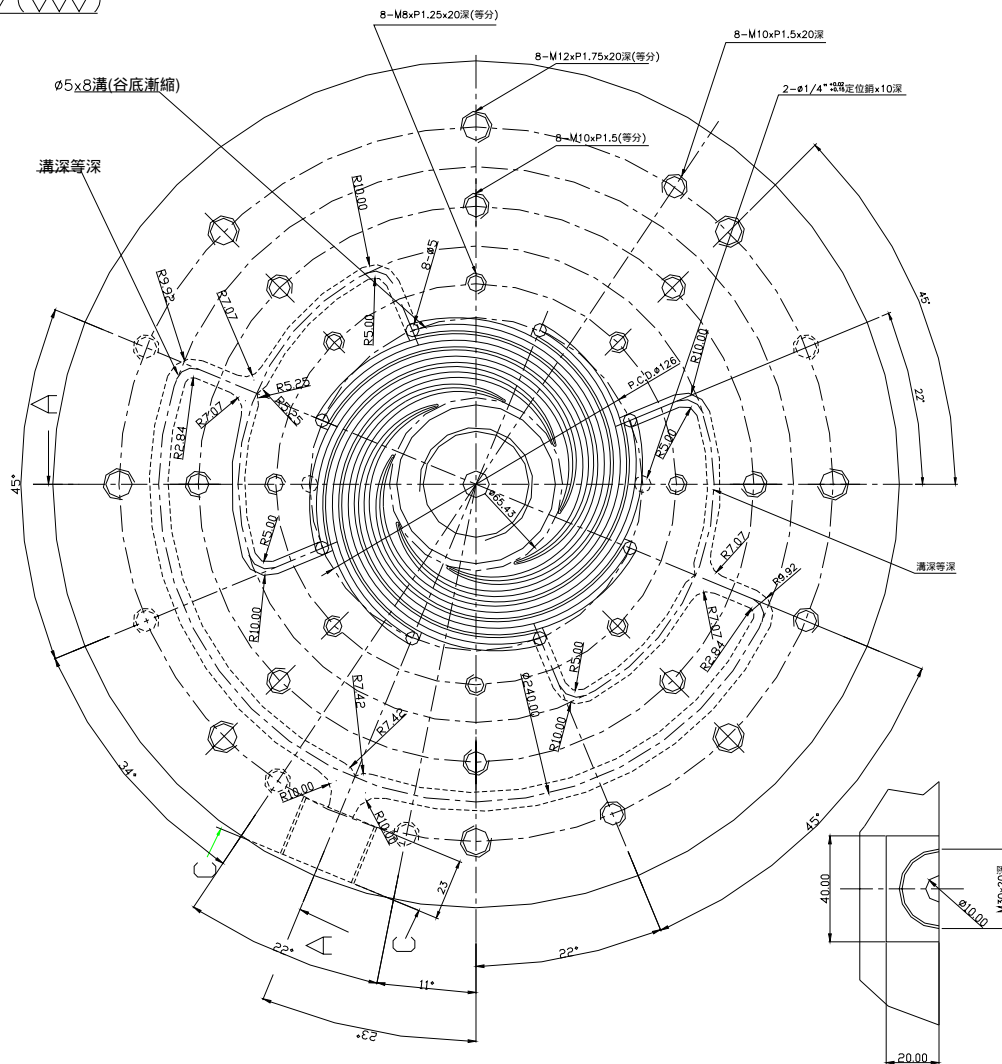




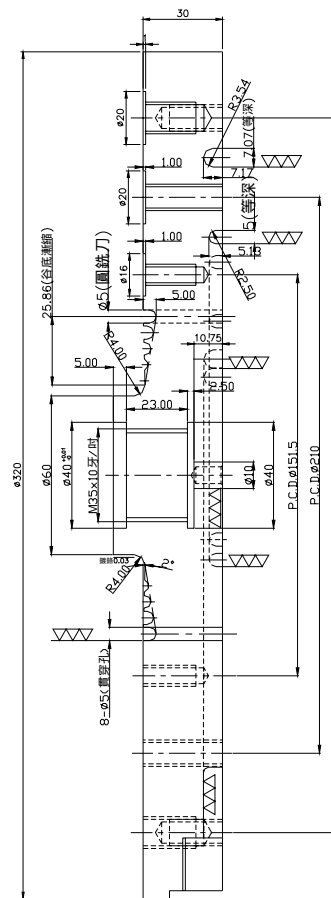




3.  $\nabla \nabla (\nabla \nabla \nabla)$





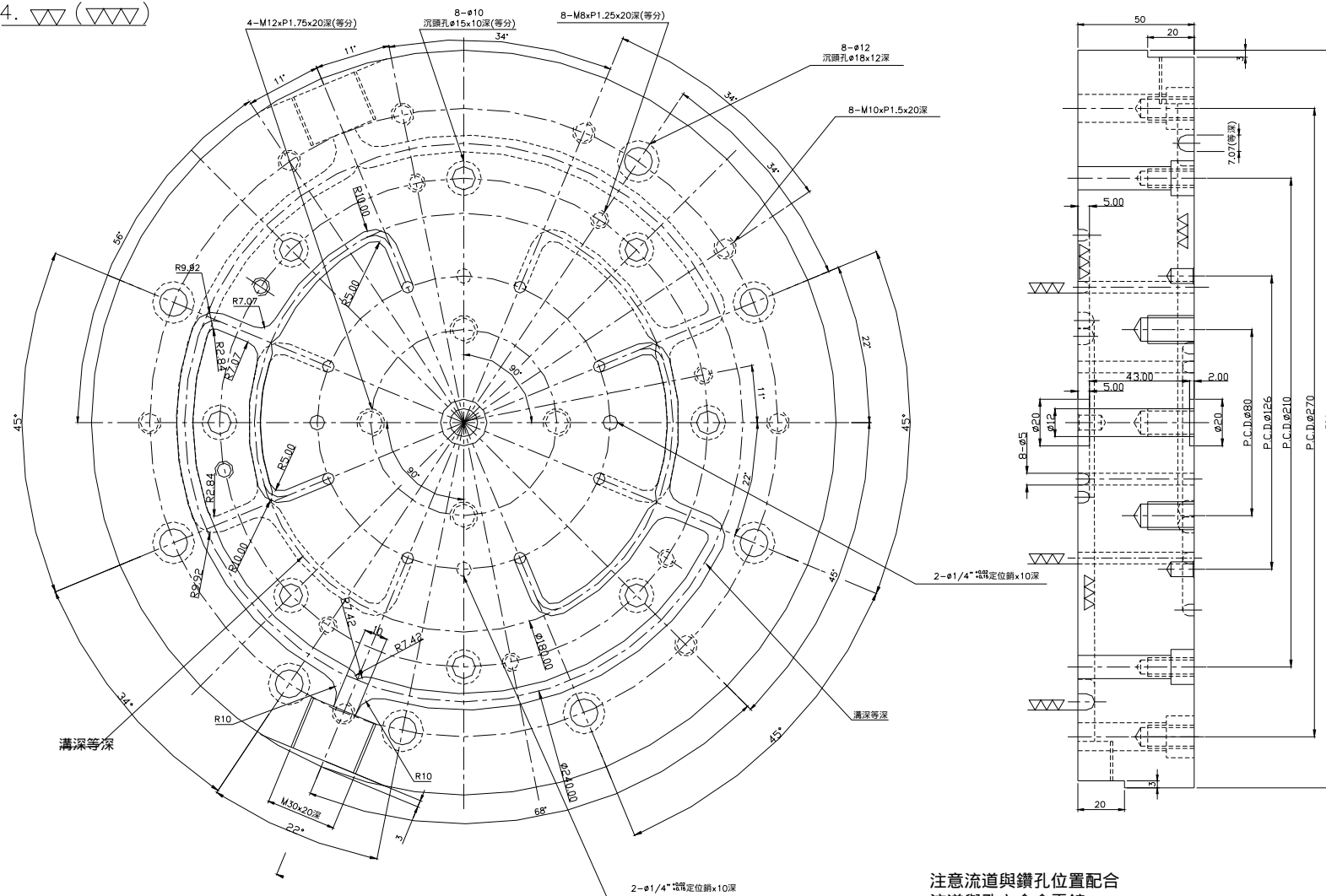
C-C SECTION



注意流道與鑽孔位置配合  
流道與孔內合金電鍍


A-A SECTION

4.  

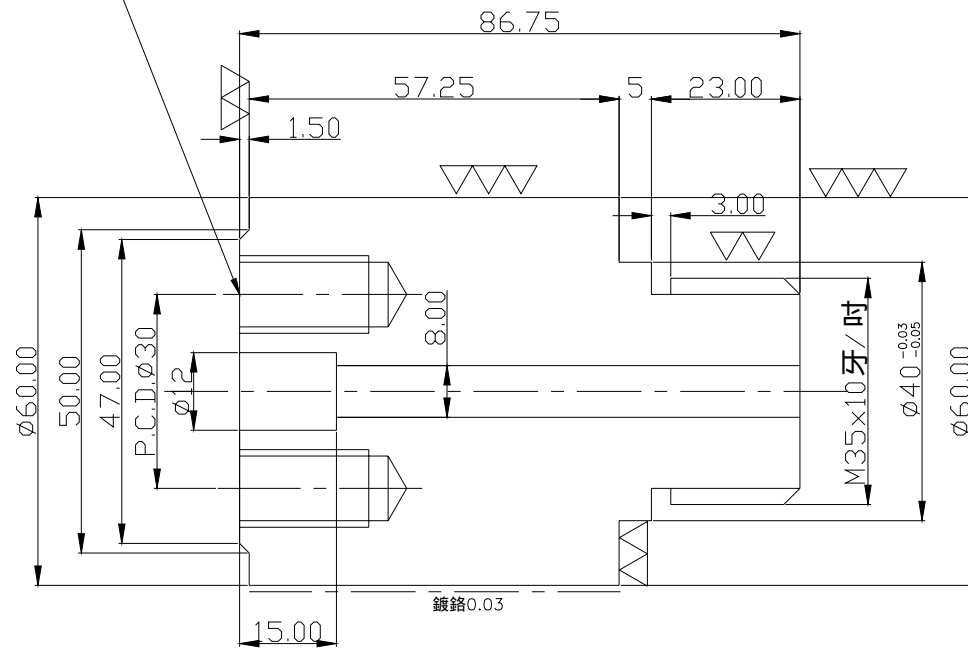


注意流道與鑽孔位置配合  
流道與孔內合金電鍍



6. 

2-M12xP1.75x20深



7.  ()

