

國立交通大學

應用化學研究所

碩士論文

延伸流動對於單螺桿製程分散式混合元件
之分散影響探討



Studies of the Effect of Elongation Flow on the Dispersive
Mixing Elements For the Single Extrusion Process

研究生：何誌峰
指導教授：吳建興

中華民國九十四年七月

延伸流動對於單螺桿製程分散式混合元件之
分散影響探討

Studies of the Effect of Elongation Flow on the Dispersive Mixing
Elements For the Single Extrusion Process

研究生：何誌峰

Student：Zi-Fun Hual

指導教授：吳建興

Advisor：Jiann-Shing Wu



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

延伸流動對於單螺桿製程分散式混合元件 之分散影響探討

學生：何誌峰

指導教授：吳建興

國立交通大學應用化學研究所



對於分散混和元件的研究，由於以往的專家學者大都分析模擬曲面楔形螺牙所產生的楔形流動，對於將套筒和螺牙面緊密結合的楔形螺牙，以及更進一步的探討環狀插栓對楔形流動的影響著墨的並不多。

本論文主要的研究目的，便是利用有限元素法(Finite element method)來模擬高分子流體於分散式混合元件流動時，幾何形狀的改變對於混合效益之影響。藉由改變螺牙表面斜度，和環狀插門 (pin) 的軸向長度改變、橫截面安裝數量做一個探討與分析，並以拉伸率(strain rate)界面面積比 (interfacial area ratio) 和能量消耗量(energy consumption)做為混合標的藉此研究其混合程度。

Studies of the Effect of Elongation Flow on the Dispersive Mixing Elements For the Single Screw Extrusion Process

Student : Zi-Fun Hual

Advisor : Dr. Wu Jiann-Shing

Department of Applied Chemistry
National Chiao Tung University



Most scholar and experts formerly put forward dispersive mixing element of the curved flight which generate elongation flow as the main research, but not many of them worked out their essays about dispersive mixing element of the flat flank which is without any gap between the flight and the jacket and the changes which are the length of the pin and the amount of the pins in simulation.

The goal of my essay is to use finite element method to simulation high molecular polymer flow in the dispersive mixing elements. With changing the configuration of the pins, the gradient of the flight and the distance between two pins along the circumferential direction, making quantitative analyses. Moreover, the strain rate, interfacial area ratio and energy consumption are employed to indicate the mixing effect.

誌 謝

在進入研究所到完成論文的兩年時間裡，承蒙指導教授，吳建興老師在學業上的諄諄教誨，讓我在這兩年有所成長和茁壯。

研究所生涯裡，有學長啟賢、煥鋁、政勛、弘德及憲明在生活上和課業上的種種幫助，使我獲益良多，這不僅僅在課業上的指導，也在待人處世方面給予方向，並且教導我該用什麼態度以便能順順利利的度過兩年的研究生涯。在此，我十分的感謝和感恩，能有機會有這麼不錯的學長陪伴著我在這兩年裡。也感謝同窗的同學文淵和煜倚在這兩年一起努力和進步，不但在課業方面相互指導，也在日常生活中相互的加油打氣，使我這兩年不會太孤單。還有感謝學弟妹名洋、俊宏、曼琳和芝穎，由於他們的活潑，使我在研究室裡也不會太無聊，期許他們在往後一年能順順利利及快快樂樂的完成研究所的學業。

感謝我的好友希韋、志忠、秉翰、俊吉可以分享生活點滴，以及幫助我生活上的種種問題，這使我在研究所裡可以找到談心解悶的對象，讓我更順利的度過這兩年研究所生活。

最後，最感謝我的家人，不但讓我在物質生活上不虞匱乏，也讓我可以在不順心的時候有個避風港可以依靠，更感謝我的父母從小到大對我的栽培和教誨，沒有你們就沒有線在的我，因此將本篇論文獻給你們。



目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
一、緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究動機.....	4
二、混合元件概要.....	5
2.1 混合的特點.....	5
2.2 混合元件的設計.....	6
2.3 CRD 混合元件概述.....	7
2.3-1 好的混合器的條件.....	8
2.3-2 CRD 混和器與傳統混合元件的比較.....	9
2.3-3 CRD 技術的優勢.....	9
三、相關理論模式.....	10
3.1 混鍊原理及模型敘述.....	10
3.1-1 分配式混練機構.....	10
3.1-2 原始拉伸比的應用.....	12
3.1-3 混合器功率消耗式.....	15
3.1-4 延伸流動混合器數學表示式.....	16
3.3 理論模式.....	19

3.3-1 流動分析理論模式.....	19
3.3-2 有限元素法理論模式.....	21
四、模擬方式介紹.....	25
4.1 有限元素法之概述.....	25
4.1-1 數值方法與高分子加工模擬.....	25
4.1-2 有限元素法在工程上之應用.....	32
4.2 ANSYS®輔助模擬分析.....	33
4.2-1 ANSYS®基本要件.....	35
4.2-2 ANSYS®介面簡述.....	34
4.2-3 ANSYS®模擬用之方程式.....	36
4.3 ANSYS®處理流程.....	37
4.3-1 前置處理.....	38
4.3-2 解題程式.....	39
4.3-3 後置處理.....	40
4.3-4 常見錯誤及解決方法.....	40
4.4 分配式混合元件於 ANSYS®之模擬.....	41
4.4-1 模擬之源起.....	41
4.4-2 模擬之流程.....	42
五、模擬結果與討論.....	49
5.1 未安裝插混合元件之溝道流動分析比較.....	50
5.2-1 不同構形插門以及數目的流動分析比較.....	50
5.2-2 以局部範圍及三種參數分析不同構形插門以及數目.....	51
5.3 不同螺牙斜度之混合元件的流動分析比較.....	53
5.4 有插門楔行螺牙之混合元件的流動分析比較.....	54
5.5 最佳化設計的探討.....	55

六、結論.....	56
參考文獻.....	122



表目錄

表 1	各種混合元件的價錢 (美元)	57
表 2	高斯積分之權重值及取樣點	58
表 3	Free mesh 與 Mapped mesh 之比較	59
表 4	Mapped mesh 之限制條件	60
表 5	各 Solver 之比較	61
表 6	ANSYS® 單位一覽表	62
表 7-1	分散式混合元件變化	63
表 7-2	分散式混合元件代號	64
表 8	插門尺寸大小	65
表 9	螺桿幾何參數及操作條件	66
表 10	螺桿幾何參數及操作條件(續)	67
表 11	LDPE 高分子融熔態之物理性質及流變參數表	68
表 12	PIN 的長度與數目與能量/黏度的長條數據	69
表 13	無 PIN 楔形螺牙與能量/黏度的長條數據	70
表 14	有 PIN 楔形螺牙與能量/黏度的長條數據	71
表 15	PIN 的長度與數目與拉伸比的長條數據	72
表 16	無 PIN 楔形螺牙與拉伸比的長條數據	73

表 17	有 PIN 楔形螺牙與拉伸比的長條數據	74
表 18	無 PIN 插栓(0P-0L)面積拉伸比變化表	75
表 19	無 PIN 插栓 (20SSP-0L)延伸率變化表	75
表 20	無 PIN 插栓 (20SSP-0L) 面積拉伸比變化表	76
表 21	無 PIN 插栓 (20SSP-0L)能量消耗變化表	76
表 22	無 PIN 插栓 (10SP-0L)延伸率變化表	77
表 23	無 PIN 插栓 (10SP-0L) 面積拉伸比變化表	77
表 24	無 PIN 插栓 (10SP-0L)能量消耗變化表	78
表 25	無 PIN 插栓 (20SP-0L)延伸率變化表	78
表 26	無 PIN 插栓 (20SP-0L) 面積拉伸比變化表	79
表 27	無 PIN 插栓 (20SP-0L)能量消耗變化表	79
表 28	無 PIN 插栓 (20MP-0L)延伸率變化表	80
表 29	無 PIN 插栓 (20MP-0L) 面積拉伸比變化表	80
表 30	無 PIN 插栓 (20MP-0L)能量消耗變化表	81
表 31	無 PIN 插栓 (20LP-0L)延伸率變化表	81
表 32	無 PIN 插栓 (20LP-0L) 面積拉伸比變化表	82
表 33	無 PIN 插栓 (20LP-0L)能量消耗變化表	82

圖目錄

圖 1	(a) 單螺桿押出機與 (b) 雙螺桿押出機的內部構造	83
圖 2	簡切流動和延伸流動的不同	83
圖 3	一次高壓區示意圖	84
圖 4	多次高壓示意圖	84
圖 5	整隻螺桿加上 CRD mixer 的圖	85
圖 6	CRD mixer 的圖	85
圖 7	Barrier screw 的圖解	86
圖 8	標準 Barrier flight 與 CRD Barrier flight 比較圖	86
圖 9	隨時間改變位置向量變化圖	87
圖 10	在簡單剪切流中兩流體元素之混鍊情形	88
圖 11	單位面積的球座標	88
圖 12	在隨機起始方位下界面面積與剪應變的函數圖	89
圖 13	一般假塑性流體黏度與剪切率示意圖	89
圖 14	電腦在產品生產流程所扮演的角色	90
圖 15	ANSYS®R FLOTRAN 慣用之元素	91
圖 16	ANSYS®R 使用者圖形介面	92
圖 17	ANSYS®R 分析處理作業流程圖	93

圖 18	自由網格與對應網格	94
圖 19	無 PIN 垂直流道(org)	94
圖 20	10PIN 垂直流道(10SP)	95
圖 21	20PIN 垂直流道(20SP)	95
圖 22	20PIN 垂直流道(20MP)	96
圖 23	20PIN 垂直流道(20LP)	96
圖 24	無 PIN 垂直流道(0L)	97
圖 25	無 PIN 楔形流道(0.1L)	97
圖 26	無 PIN 楔形流道(0.2L)	98
圖 27	無 PIN 楔形流道(0.3L)	98
圖 28	無 PIN 楔形流道(0.4L)	99
圖 29	無 PIN 楔形流道(0.5L)	99
圖 30	20PIN 垂直流道(20SSP-0L)	100
圖 31	20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)	100
圖 32	20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)	101
圖 33	20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)	101
圖 34	20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)	102
圖 35	20PIN 楔形流道(20SSP-0.5L)	102
圖 36	無 PIN 垂直流道(org)斜視圖	103

圖 37	無 PIN 垂直流道(org)正視圖	103
圖 38	10PIN 垂直流道(10SP)斜視圖	104
圖 39	10PIN 垂直流道(10SP)正視圖	104
圖 40-1	20PIN 垂直流道(20SP)斜視圖(1)	105
圖 40-2	20PIN 垂直流道(20SP)斜視圖(2)	105
圖 41	20PIN 垂直流道(20SP)正視圖(1)	106
圖 42-1	20PIN 垂直流道(20MP)斜視圖(1)	106
圖 42-2	20PIN 垂直流道(20MP)斜視圖(2)	107
圖 43	20PIN 垂直流道(20MP)正視圖(1)	107
圖 44-1	20PIN 垂直流道(20LP)斜視圖(1)	108
圖 44-2	20PIN 垂直流道(20LP)斜視圖(2)	108
圖 45	20PIN 垂直流道(20LP)正視圖(1)	109
圖 46	無 PIN 垂直流道(0L)斜視圖	109
圖 47	無 PIN 垂直流道(0L)正視圖	110
圖 48	無 PIN 楔行流道(0.1L)斜視圖	110
圖 49	無 PIN 楔行流道(0.1L)正視圖	111
圖 50	無 PIN 楔型流道(0.2L)斜視圖	111
圖 51	無 PIN 楔型流道(0.2L)正視圖	112
圖 52	無 PIN 楔形流道(0.3L)斜視圖	112

圖 53	無 PIN 楔形流道(0.3L)正視圖	113
圖 54	無 PIN 楔形流道(0.4L)斜視圖	113
圖 55	無 PIN 楔形流道(0.4L)正視圖	114
圖 56	無 PIN 楔形流道(0.5L)斜視圖	114
圖 57	無 PIN 楔形流道(0.5L)正視圖	115
圖 58	20PIN 垂直流道(20SSP-0L)斜視圖	115
圖 59	20PIN 垂直流道(20SSP-0L)正視圖	116
圖 60	20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)斜視圖	116
圖 61	20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)正視圖	117
圖 62	20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)斜視圖	117
圖 63	20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)正視圖	118
圖 64	20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)斜視圖	118
圖 65	20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)正視圖	119
圖 66	20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)斜視圖	119
圖 67	20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)正視圖	120
圖 68	20PIN 楔形流道(20SP-0.5L)斜視圖	120
圖 69	20PIN 楔形流道(20SP-0.5L)正視圖	121

第一章、緒論

1.1 研究背景

目前常見的高分子加工方法有押出成型、射出成型、吹壓成型、熱壓成型、發泡成型、壓延加工、塗布等，依照不同的產品需求，選擇適當的加工方法與設備。押出成型是最常用的高分子加工方法，主要是利用押出機把粉狀、粒狀或丸狀的高分子材料與添加劑，加熱熔融後經由螺桿的輸送，再把這熔融物質從定型模頭裡連續不斷地擠出，經過冷卻以後，可以形成連續的產品。這些產品包括膠管、膠片、各種異型剖面製品等。押出機是押出成型的最重要設備，一般可以分為單螺桿式和雙螺桿式 2 種(圖 1)。

螺桿是押出機的最重要元件，高分子材料從供料筒進入螺桿後，先到達進料段，再經由押出機的加熱系統與螺桿的運轉輸送，進入壓縮段，高分子材料在這一個區段中已經逐漸熔融變成熔融態。然後，再經由螺桿繼續往前輸送，進入計量段，在這一個區段中高分子材料已經完全熔融，並且和添加劑完全混煉均勻，螺桿把這些熔融態的塑料，穩定地傳送到模頭，經由不同設計的模頭和適當的冷卻處理，可以製造出不同形狀的押出產品。一般來說，添加劑和高分子材料，可以在供料筒中一起加入押出機進行摻混加工。但是如果混煉不均勻，則可以利用側供料系統把添加劑調整在螺桿的其他區段中加入，只要能和高分子材料混煉均勻，做出好的產品，都是合適的加工方式。押出機是最常用來摻混不同種類高分子材料與添加劑的加工設備，利用押出機摻混好的塑料，再用其他的加工設備製造出最後成品的形狀和規格。射出成型是把粒狀或丸狀的高分子材料加熱熔融後，經由單螺桿的輸送機制，把高分子熔體送到模頭以後，螺桿停止旋轉進料，但急速往前運動把高分子熔體射入一個空的模具中後，螺桿自動退後，並再度進行旋轉進料的動作。打

入模具的高分子熔體，在高壓下冷卻固化後，形成和模穴同一形狀的成品。因此，一般的射出機與押出機有相似的螺桿設計。有時為了使高分子材料與添加劑達到最佳的混煉效果，可以先利用單螺桿或雙螺桿押出機，把高分子材料和添加劑加熱熔融摻混、冷卻製造成顆粒後，再用適當的射出成型機把摻混好的粒狀塑射出形成所需要的產品。

在分子加工的領域裡，螺桿是非常重要的關鍵裝置。無論押出、射出或中空成形，用錯螺桿就無法製造出好的產品，即使勉強具有產品形狀，物理性質與機械性質也很難達到要求。因此螺桿的設計非常重要，從早期一體成型的螺桿，演變到現在可以拆卸重新組裝積木式的螺桿，顯示分子加工的研究人員對於螺桿設計的注重，而螺桿表面的螺紋設計更是非常多樣化。

目前研究人員可以依照不同的高分子材料，利用電腦設計出適合的螺桿，以達到最佳的混煉效果。應用電腦輔助設計分子加工零件的時間已經有一段時間了，利用電腦的設計除了可以事先知道該配件的優劣，更可以自行嘗試設計出新種的配件，以增加配件的混合效率。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，依照不同的加工需求而選擇其設備。然而，一般單螺桿押出機的混合效果與其他押出機相較下仍不理想，但其中因其構造簡且單價格亦不甚高，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，增加產品的性質。由鑒於此，本文即以電腦輔助工程技術(CAE)探討分散和分配式兼備的CRD混合元件流道內流體之流動情形，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。

一般將混合元件分為分配式(distributive)與分散式(dispersive)兩種混合元件。分配式混合元件的原理是藉由不斷的另用孔隙分流原有的流場，增加主成分(major component)與添加成分(minor component)的接觸面積使分子熔融體能獲得重新的流動方向(orientation)，以利於添加成分均勻分布在主成分中。而分散式混合元件則是利用梯板與套筒壁間狹窄

流道產生高延伸應力，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孔隙分流來增加兩相間的接觸面積達到分配混合的效果，而分散式混合藉由高延伸應力（extension stress）能夠將高分子切成許多小段進而達到混合的效果。

1.2 文獻回顧

以往單螺桿混合元件的研究往往都只能注重在分配式混合元件（distributive mixing element）其特色為：

1. 以減切流動為主，延伸流動為副，如圖 2 所示
2. 塑膠進料只有經過一次高壓力區域的混合動作，如圖 3 所示

相較於雙螺桿押出機，由於雙螺桿產生較佳的延伸流動，以及多次高壓力區域，因而產生較單螺桿押出機較佳的分散效果，所以對於分散的混合元件在單螺桿押出機中著墨不多，所以分散方面往往由以分散佳著稱的雙螺桿押出機所取代，不過直到近幾年，自從 Chris Rauwendaal 提出 CRD 混合元件的時候，使得單螺桿押出機的分散能力可以大幅提升，甚至直逼雙螺桿押出機的分散能力。而它的特色如上述所言，不但以延伸流動為主，更因為有多重楔形區域，因而產生多次高壓的效果，如圖 4 所示。

CRD mixer(圖 5 和圖 6)主要的構想是以由大而小的楔形(taper)產生楔形流動 (elongation flow)，來有效分散高分子團，以及設計螺牙孔隙產生分流的效果，來有效分配高分子團群，這是種兼具備分配和分散的混合元件。

然而事實上，一個混合元件的分配性(distribute)和分散性(dispersive)其實是有限的，有好的分散效果相對的其分配效果自然也比較差，有好的分配效果可以預期的其分散效果自然就低落，所以沒有絕對的好混合元件，元件的選定也要看材料，以及所需的其他要求來使用，如果目的

主要是要打散分子內的聚合鍵 (intensive mixing with cohesive resistance) 那選用分散式混合元件是比較好的選擇，假如目的是要打散分子團間的聚合力 (extensive mixing without cohesive resistance) 那用分配式混合元件則是最佳的決定。

1.3 研究動機

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。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。以往對於分散式的混合機構，專家學者所提出的研究都相當有限，原因是我們在討論傳統單螺押出機時，由於分散效果相對於雙螺桿押出機其實很差，所以探討分配混合元件居多，也因此大家對於此類分散式混合元件的研究上著墨均不甚多。而本論文的主旨即便是利用有限元素分析的架構來模擬高分子流體在不同 CRD 混合元件下先做一初步的流動分析，再藉由文獻上所提及的條痕厚度 (striation thickness) 或者是界面面積比 (interfacial area ratio) 等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，並藉由此一定量的分析作為日後元件設計上的基準。

第二章、混合元件概要

2.1 混合的特點

混合是高分子加工過程中是一道相當重要的程序，從字面上解釋可以是混合物 (mixture) 也可以是混合 (mixing)。前者所表示的是在一個擁有二種或二種以上以一定成份或者是任意比例組合而成的狀態，而後者則是降低混合不均勻性 (nonuniformity) 的一種操作過程，兩者的差別在於一種是狀態 (state) 而另一是一種程序 (mechanism)。然而，要達到混合的效果可經由以下途徑：

1. 分子擴散 (molecular diffusion)：通常發生在氣相或黏度較小的液相為主要相且具有濃度梯度 (concentration gradient) 的程序中。
2. 渦流擴散 (eddy diffusion)：此種狀況發生在紊流 (turbulent flow) 流動下，藉由分子與分子間密集的碰撞所產生的渦流來達到彼此混合的目的。
3. 整體擴散 (bulk diffusion)：由於流體粒子在流動系統下從空間中的某一位置移動到另一位置所帶來主要成份相與添加成分相兩者界面面積增加的一種機制。

從以上三點看來，一般由於高分子流體本身是一種黏度相當高的物質且在加工過程中我們均以層流混合 (laminar mixing) 來處理，若從分子擴散及渦流擴散的角度去分析似乎無法達成，所以若是以能將次要相均勻分佈在主要相中做分配式混合的話，我們是採流體通過一靜止混合器 (motionless mixer) 造成流體的重新排列 (rearrangement) 為一原則以達整體擴散。

2.2 混合元件的設計

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. 高分子熔融液必須以流線流動，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。

簡單來說，依據以上之敘述我們可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。

而在混合元件的設計歷程中，最早可溯及 1950 年當時已有混合元件的專利發表。如 Braibanti 等人在 1952 年做出數種 Pin mixing elements；Dulmage 於 1956 年申請了 Dulmage mixing element 的專利；Saxton 於 1961 年製造出 Saxton mixing element；Barr 等人也在 1970 年做出數種 Pin mixing elements 的改良混合元件。而 Rauwendaal 將各種不同的分配式混合元件根據壓降、流線流動、套筒掠掃、操作員熟稔、機械成本、剪切形變及分裂重新位向等不同的程度做一歸納比較，而得到表 1。總評上看來 Saxton 為最佳的混合元件，此外，Double blockhead 亦有不錯的分散能力。

直至九十年代左右，由 Chris Rauwendaal 提出 CRD 混合元件方打破了傳統單螺押出機分散不佳的迷思，CRD 混合元件跟以往探討的分配是混合元件不同，它不主張剪切應力 (shear stress) 對於分配或分散的重要性，它反而認為剪切應力 (shear stress) 過大反而會造成不必要的能源浪費，並且會容易使押出機本身產生過熱的現象，所以它主張以延伸應力 (elongation stress) 為主的高分子流動。

2.3 CRD 混合元件概述

CRD 混合元件是近幾年才提出的新的混和器 (mixer)，它是由 Chris Rauwendaal 及其所屬團體 Madison 所發展出來的。CRD 混合是首先利用分析上 數值上和實驗上 等技術所發展出來的混合裝置 在市場上僅僅一年的時間 CRD 裝置藉可以提供更高水平的分散和分配混水準已經成功地取代了傳統單螺桿的地位(如 Maddock, rhomboid 以及其他混合區域)。

2.3-1 好的混合器的條件

在介紹 CRD 混合器與傳統混合器優劣的比較之前，我們首先來分析一個好混合器所應具備的條件，如此方能更深刻的了解 CRD 混合器優劣程度。

混和一直在塑料加工裡扮演重要腳色 可以發現的是混和在低壓的時候，分配效果明顯，在高壓的時候分散效果比較明顯，這是由於在分散混和時，會破壞高分子間的共價鍵的力作用（cohesive force）導致高分子團可以變成較小團或者變成變成粒子，因此產生品質更一致的混煉效果。在製出的高分子產品為了因應各種需求，往往都會摻入其他的高分子材料來增加不同的性能，諸如：絕熱、UV、增加可塑性、有機或無機的顏料色素、可再研磨、或藉由吹氣動力分配成均勻結構等等。為了達到更有效益的性能，這些添加物必須進可能的分散 以達到均勻分布的效果，然而有系統的設計螺桿是可以達到上述的要求的。

此外，設計一隻好螺桿是要根據他特殊的應用需求來加以設計的 所以螺桿的設計著眼點往往在物料的混合成份，以及設備的情況，還有最終的應用情形，因此在設計上會出現許多技術上的不確定性。

比如：要將新的物料成分以 injection machine 來加以加工 則混和時間不足會是重要的問題，因為在可塑區（熔化區和傳送區）的時間是非常的短，因此最終會因為時間不足產生分散效果不佳的情況。如此對於產品影響很大，而且往往是失敗的產品。一個好螺桿的設計是要能使目標物料的分散和分配效果均佳，如此才會產生出期望的產品品質。（ideal quality of product）。

研究顯示，在螺桿混煉過程中所產生的剪切流動是一種極沒效率分散混和方式，取而代之的延伸流動是一種以楔行延展，並且不產生轉動的流動，它可以增進分散混和的效率。好的螺桿設計不但可以增加產品的耐撞能力，並且也可以在不提高生產成本下增加生產力提高效能。另外可以從表一知道

其實 CRD 螺桿的造價其實有不會算太貴，所以在產品需求分散效果好的情況下 CRD 混合元件是個不錯的選擇。

2.3-2 CRD 混和器與傳統混合元件的比較

以 Barrier Screw(圖 7)為基準螺桿用以往的標準 Barrier flight 曲面，和 CRD Barrier flight 曲面(圖 8)加以比對其幾何形狀，可以發現到與現存的舊混和器 Barrier flight Screw 的比較下，新的 CRD Barrier flight 技術展現出一種根本改變是一種新的思維方式，不難看出它的曲面是帶有斜度的槓行曲面，這和以往以不帶斜度的 Barrier flight 有很大的不同，而這種帶有斜度的曲面就是使 CRD 混合器產生楔形流動(亦稱延伸流動)的主要原因，也正因如此 CRD 混何器也是第一個針對增進延展流動設計出來的混和器。在現存大部份的混何器都是以減切流動為主，然而 CRD 則否，這是因為延伸流動比起剪切流動來得更容易切斷剛分子凝聚物和小滴群，並且也產生較少的摩擦損耗。另外 CRD 混和器具有在單一裝置時同時結合分散和分配的能力，這種結合也是 CRD 混和器具有高混和效果的原因。此外 CRD 混和器提供物質多次經過高壓區藉此達到更佳的分散效果。在許多傳統的單螺桿往往物質也只經過一個高壓區就結束了。可以從 Barrier Screw 和 CRD screw。

2.3-3 CRD 技術的優勢

利用延伸流動達到不錯混和效果 使物料多次曝入在高壓區進而達到步錯的分散程度 減少因摩擦生熱以及熔化溫度的能量損耗 成本低廉以及容易合併入現今的螺桿裝置中 可以分散膠狀物料(傳統以減切流動為主的則不行)。

第三章、相關理論模式

3.1 混鍊原理及模型敘述

Spencer及Wiley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9所示，另外簡單剪切流可由圖10示之。

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：

$$\begin{aligned} c = \rho_1 \times \rho_2 &= \begin{vmatrix} \delta_x & \delta_y & \delta_z \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix} = (y_1 z_2 - z_1 y_2) \delta_x + (z_1 x_2 - x_1 z_2) \delta_y + (x_1 y_2 - y_1 x_2) \delta_z \\ &= c_x \delta_x + c_y \delta_y + c_z \delta_z \end{aligned} \quad (6)$$

將(6)式結果代入(1)式可得初始面積：

$$A_0 = \frac{1}{2} |c| = \frac{1}{2} (C_x^2 + C_y^2 + C_z^2)^{1/2} \quad (7)$$

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

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

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

(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：

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

最後新的界面面積即可表示為

$$A = \frac{1}{2} (C_x^2 + C_y^2 + C_z^2 - 2C_x C_y \gamma + C_x^2 \gamma^2)^{1/2} \quad (12)$$

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

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

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。在聚合物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，其圖示為圖11。

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

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

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12表示經數值計算後結果也如同上述之推導。

3.1-2 原始拉伸比的應用

界面面積比除了以上推導外，Erwin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：

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

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

而界面面積比亦可表示如下：

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

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

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。Lodge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，由於本論文的理論考慮簡單剪切流動、平面延伸流，以及純延伸流動，故以下分別敘述這三種模式所得結果。

a. 簡單剪切流動：

簡單剪切流動拉伸理論值為下式所示：

$$\lambda_x = \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (26)$$

$$\lambda_y = \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$\lambda_z = 1 \quad (28)$$

將(26)式、(27)式、(28)式代入(25)式中可得

$$\frac{A}{A_0} = \left\{ 1 + \cos^2 \alpha_x \left[\frac{\gamma^2}{2} - \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right] + \cos^2 \alpha_y \left[\frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma}{2} (4 + \gamma^2)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \quad (29)$$

在較大延伸形變的狀況，可得

$$\frac{A}{A_0} = s \cos \beta \quad (30)$$

b. 平面延伸流：

在平面延伸流動拉伸理論值如下式所示：

$$\lambda_x = \lambda_0 \quad (31)$$

$$\lambda_y = \frac{1}{\lambda_0} \quad (32)$$

$$\lambda_z = 1 \quad (33)$$

將(31)式、(32)式、(33)式代入(23)式中可得

$$\frac{A}{A_0} = \left[1 + \left(\frac{1}{\lambda_0^2} - 1 \right) \cos^2 \alpha_x + (\lambda_0^2 - 1) \cos^2 \alpha_y \right]^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

在較大延伸形變的狀況，且 $\cos \alpha \neq 0$ 下，可得

$$\frac{A}{A_0} = \lambda_0 \cos \alpha_y \quad (35)$$

假如交介面正交時，得最小程序值時 ($\cos \alpha = 1$)

$$\frac{A}{A_0} = \lambda_0 \quad (36)$$

用數值化的方式將第(34)式用積分解，在 λ_0 很大的情況下，可以得到

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} \lambda_0 \quad (37)$$

c. 純延伸流動：

在純延伸流動拉伸理論值如下式所示：

$$\lambda_x = \lambda_0 \quad (38)$$

$$\lambda_z = \lambda_y \quad (39)$$

$$\lambda_y = \frac{1}{\lambda_0^2} \quad (40)$$

將(38)式、(39)式、(40)式代入(23)式中可得

$$\frac{A}{A_0} = \left[\lambda_0 + \cos^2 \alpha \left(\frac{1}{\lambda_0^2} - \lambda_0 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

假如交介面平行時，得最大理論值 ($\cos \alpha = 0$)

$$\frac{A}{A_0} = \lambda_0^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

用數值化的方式將第(41)式用積分解，在 λ_0 很大的情況下，可以得到

$$\frac{A}{A_0} = 0.8 \lambda_0^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

上式的解並未包含 $\lambda_0 = 1$ 的情況，假如流動系統是建立在二維流動 λ_0 遞減的情況下，而且 λ_0 在遠小於 1 的情況下(41)式可以被解成

$$\frac{A}{A_0} = 0.8 \frac{1}{\lambda_0} \quad (44)$$

3.1-3 混合器功率消耗式

在進入混合器數學表示式之前，對於混合器能量的消耗的表達式也要一併討論以便可以在下節一起應用。

在混合加工過程中，能量的消耗一直在加工過程中扮演重要角色，要設計出一個好的混合器，能量損耗的因素是不可或缺的，如此才能在要設計出好的混合器的前提下，也可以避免不必要的能量損耗，浪費多餘的資源，以及避免可能在加工過程過熱進而造成產品的變質等等。

在考慮一個牛頓流體的流動的情況下，每單位體積的功率表達式可以以下式來表達：

$$P = \eta \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (45)$$

P =每單位體積的功率， η =黏度， V =各成分物流的速度。

3.1-4 延伸流動混合器數學表示式

以上是討論各種流動的拉伸比和能量消耗式，本節要討論延伸流動混合器，也就是CRD混合器的數學式以及其相關應用。

引用之前純延伸流動(38)式、(39)式、(40)式作為起始式，

$$\lambda_x = \lambda_0 \quad (38)$$

$$\lambda_z = \lambda_y \quad (39)$$

$$\lambda_y = \frac{1}{\lambda_0^{\frac{1}{2}}} \quad (40)$$

並且根據(45)式流加以轉換(31)式、(32)式、(33)式

$$\frac{1}{\lambda_0} \frac{\partial \lambda_0}{\partial t} = G \quad (46)$$

其中 G 是解上式所設的一個常數。(45)式亦可以積分轉換成(46)式：

$$\ln \lambda_0 = Gt_0 \quad (47)$$

如此，可得純延伸流動三軸流速的數學式：

$$V_x = G * x \quad (48)$$

$$V_y = -\frac{1}{2}G * y \quad (49)$$

$$V_z = -\frac{1}{2}G * z \quad (50)$$

接下來將(47)式、(48)式、(49)式帶入上節的(45)式，來求解純延伸流動的能量消耗式：

$$p = \eta 2 \left(G^2 + \frac{G^2}{4} + \frac{G^2}{4} \right) = 3G^2 \eta \quad (51)$$

因為 P 是每單位體積的功率，所以要求解能量消耗值 E 的話，就要先對時間積分方可得到下式：

$$E = \int_0^{t_0} p dt = 3\eta G^2 t_0 \quad (52)$$

考慮純延伸流動 λ_0 很大的情況下，引用(43)式並帶入先前的(47)式，可以得到下式：

$$\frac{A}{A_0} = \frac{4}{5} \lambda^{\frac{1}{2}} = \frac{4}{5} e^{Gt_0/2} \quad (53)$$

利用(51)式和(52)式將 G 換掉，就以可得能量消耗值 E ：

$$E = \frac{12\eta}{t_0} \left[\ln \left(\frac{5}{4} \frac{A}{A_0} \right) \right]^2 \quad (54)$$

考慮純延伸流動 λ_0 很小的情況下，引用(44)式並帶入先前的(47)式，可以得到下式：

$$\frac{A}{A_0} \cong 0.8 \frac{1}{e^{-Gt_0}} = 0.8 e^{Gt_0} \quad (55)$$

一樣利用(52)式和(55)式將 G 換掉，就以可得能量消耗值 E ：

$$E = \frac{3\eta}{t_0} \left[\ln \left(\frac{5}{4} \frac{A}{A_0} \right) \right]^2 \quad (56)$$

以上是討論純延伸流動的能量數學表示式，接下來討論平面延伸流的能量數學表示式，引用之前純延伸流動(32)式、(33)式、(34)式作為起始式：

$$\lambda_x = \lambda_0 \quad (32)$$

$$\lambda_y = \frac{1}{\lambda_0} \quad (33)$$

$$\lambda_z = 1 \quad (34)$$

在此情況的流動數學轉換式為：

$$\frac{1}{\lambda_0} \frac{d\lambda_0}{dt} = H \quad (57)$$

如此，可得平面延伸流動三軸流速的數學式：

$$V_x = xH \quad (58)$$

$$V_y = -yH \quad (59)$$

$$V_z = 0 \quad (60)$$

如同之前的做法，帶入功率消耗式(45)式，並加以積分可得平面延伸流動能量消耗式：

$$E = 4\eta H^2 t_0 \quad (61)$$

考慮平面伸流動 λ_0 很大的情況下，引用(37)式並帶入先前的(56)式的積分式，可以得到下式：

$$\frac{A}{A_0} \cong \frac{\lambda_0}{2} = \frac{e^{Ht_0}}{2} \quad (62)$$

一樣利用(61)式和(62)式將 G 換掉，就以可得能量消耗值 E ：

$$E = \frac{4\eta}{t_0} \left[\ln \left(2 \frac{A}{A_0} \right) \right]^2 \quad (63)$$

為了比較平面延伸流動和簡單剪切流動的能量消耗值 E ，因此特地加入了簡單剪切流動的能量消耗值 E 的表達式。

簡單剪切流動三軸流速的數學式為：

$$V_x = Gz \quad (64)$$

$$V_y = 0 \quad (65)$$

$$V_z = 0 \quad (66)$$

如同之前的做法，帶入功率消耗式(45)式，並加以積分可得簡單剪切流動能量消耗式：

$$E = \eta G^2 t \quad (67)$$

考慮平面伸流動 λ_0 很大的情況下，引用(30)可以轉換成：

$$\frac{A}{A_0} = \frac{Gt}{2} \quad (68)$$

一樣利用(67)式和(68)式將 G 換掉，就以可得能量消耗值 E ：

$$E = \frac{4\eta}{t} \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \quad (69)$$

本論文採用的是第(45)式和第(54)式來作為分析ANSYS數據的方法。

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 (incompressible fluid)
3. 壁上無滑動現象 (no slip)
4. 流體黏度以截型幂次定理 (truncated power law) 表示
5. 流體已達穩定狀態 (steady state)
6. 重力因素不考慮 (no gravity)
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)：

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

運動方程式 (equation of motion):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (71)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0 \quad (72)$$

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：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = 0 \quad (73)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (74)$$

黏度以等溫截型冪次定理，如圖13表示，且符合下式：

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 e^{-a(T-T_0)} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} & (\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0) \\ \eta_0 e^{-a(T-T_0)} & (\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0) \end{cases} \quad (75)$$

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

且剪切率表示如下：

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2} \quad (76)$$

邊界條件：

$$\begin{array}{lll} v_x = v_b \sin \theta_b & v_z = v_b \cos \theta_b & \text{at the barrel surface} \\ v_x = 0 & v_z = 0 & \text{at the channel wall} \end{array}$$

3.3-2 有限元素法理論模式

利用有限元素法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：

$$p = \sum_{k=1}^m p_k M_k \quad (77)$$

$$v_x = \sum_{j=1}^n v_{xj} N_j \quad (78)$$

$$v_z = \sum_{j=1}^n v_{zj} N_j \quad (79)$$

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：

$$x = \sum_{i=1}^n x_i N_i \quad (80)$$

$$y = \sum_{i=1}^n y_i N_i \quad (81)$$

$$z = \sum_{i=1}^n z_i N_i \quad (82)$$

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(42)、(43)式展開後乘

上內插函數 N_i ，再將(39)式乘上內插函數 M_k ，並對該元素作體積分，則如下所示：

$$\iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) dV = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (83)$$

$$\iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial v_z}{\partial y} - \eta \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) dV = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (84)$$

$$\iiint_{\Omega} M_k \left(\frac{\partial v_x}{\partial v_x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (85)$$

其中 Ω 為體積分之範圍。

而以下由於(83)、(84)及(85)式的推導有些許雷同處，故僅以(83)式之推導替代之。首先將(83)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(77)式代入化簡為以局部座標 (ξ, η, ζ) 及 inverse Jacobian 表示之，如下所示：

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial p}{\partial x} dV &= \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{k=1}^m p_k M_k \right) dV = \sum_{k=1}^m p_k \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial x} dV \\ &= p_k \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial M_k}{\partial \xi} \hat{j}_{11} + \frac{\partial M_k}{\partial \eta} \hat{j}_{12} + \frac{\partial M_k}{\partial \zeta} \hat{j}_{13} \right) dV \end{aligned} \quad (86)$$

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：

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (87)$$

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \text{adj}(J) \quad (88)$$

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

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

$$= -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n v_{xj} \iiint_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial N_j}{\partial \xi} \hat{J}_{21} + \frac{\partial N_j}{\partial \eta} \hat{J}_{22} + \frac{\partial N_j}{\partial \zeta} \hat{J}_{23} \right) dV \quad (89)$$

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：

$$\begin{aligned} -\iiint_{\Omega} N_i \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} dV &= -\eta \left(\iiint_{\Omega} -\frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial v_x}{\partial y} dV + \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \right) \\ &= \eta \sum_{j=1}^n \left(v_{xj} \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} dV - \eta \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \right) \end{aligned} \quad (90)$$

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(54)式亦可化為如下所示：

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega} M_k \left(\frac{\partial v_x}{\partial v_x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dV &= \iiint_{\Omega} M_k \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{j=1}^n v_{xj} N_j \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{j=1}^n v_{zj} N_j \right) \right] dV \\ &= \sum_{j=1}^n \left[\left(\iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial x} dV \right) v_{xj} + \left(\iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \right) v_{zj} \right] \end{aligned} \quad (91)$$

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：

$$\begin{bmatrix} K & C \\ D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (92)$$

$$v = [v_{x1}, v_{x2}, v_{x3}, \dots, v_{xn}, v_{z1}, v_{z2}, v_{z3}, \dots, v_{zn}]^T \quad (93)$$

$$p = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_m]^T \quad (94)$$

$$K = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} dV + & & & 0 \\ \eta \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} dV & & & \\ & & & \\ 0 & & -\frac{\partial \eta}{\partial y} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} dV + & \\ & & \eta \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} dV & \end{bmatrix} \quad (95)$$

$$C = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial x} dV \\ \sum_{k=1}^m \iiint_{\Omega} N_i \frac{\partial M_k}{\partial z} dV \end{bmatrix} \quad (96)$$

$$D = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial x} dV & \sum_{j=1}^n \iiint_{\Omega} M_k \frac{\partial N_j}{\partial z} dV \end{bmatrix} \quad (97)$$

$$f = \begin{bmatrix} \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_x}{\partial n} dA \\ \iint_{\Gamma} N_i \frac{\partial v_z}{\partial n} dA \end{bmatrix} \quad (98)$$



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

拜電腦科技及軟體工程之進步，電腦輔助工程技術，如電腦輔助設計、製造及工程分析（CAD/CAM/CAE）技術等，已經成為國內甚至全世界業界產品設計、分析及製造之基礎。有效的運用這些先進電腦輔助工程技術以輔助其產品設計，可大量縮短產品開發乃至最終上市之時間，進而提升產品之競爭性。傳統產業可藉由電腦輔助工程技術輔助其高階產品之設計開發以朝向更精緻化、高品質發展，進而尋求轉型契機；因此高分子加工的產業，可於更短開發時程內研發出強調高精密、高可靠度、高性能、多功能的螺桿押出機，以及混合元件等等配件。所以近年來不論是政府或產業均投入大量資金建構相關軟硬體設施、建置相關研發能量及培育高級電腦輔助工程技術人才。

a. 製造技術及其發展特徵

製造技術是使原材料成為人們所需產品而使用的一系列技術和裝備的總稱，是涵蓋整個生產製造過程的各種技術的集成。從廣義來講，它包括設計技術、加工製造技術、管理技術等三大類。其中設計技術是指開發、設計產品的方法；加工製造技術是指將原材料加工成所設計產品而採用的生產設

備及方法；管理技術是指如何將產品生產製造所需的物料、設備、人力、資金、能源、資訊等資源有效地組織起來，達到生產目的的方法。傢俱作為人類維持正常生活、從事工作學習和開展社會活動必不可少的、供人科坐、臥、躺、或支承與貯存物品的一類產品，在其生產製造過程中，也同樣需要採用上述的一三類製造技術。

從社會發展的角度來看，人類社會已經經歷了農業經濟時代和工業經濟時代，正在進入資訊經濟時代（也稱後工業經濟社會或工業資訊化時代）。在農業經濟時代，產品的製造主要是家庭作坊式的手工技藝，是依靠人類本身的器官和力氣來完成的；蒸汽機的出現和應用使人類進入了工業經濟時代，機器開始代替人做各種工作，把人類從繁重的重複性勞動中解放出來，而且機械化和自動化技術使社會生產力得到了迅速發展，現代化大工業也迅速成長起來，實現了產品的專業化和大批量生產；隨著人類社會進入資訊經濟時代，資訊日益成為最重要的戰略資源和決定性生產力、競爭力及經濟增長的關鍵因素，產品的價值主要來源於產品中科學技術知識的資訊含量，以電腦和資訊技術為基礎的現代先進製造技術已逐步發展起來。

b. 先進製造技術及其內涵

現在，人們在各種媒體上，經常可以看到或聽到“先進製造技術”這一詞。所謂先進製造技術，是指集機械工程技術、電子技術、自動化技術、資訊技術等多種技術為一體，用於製造產品的技術、設備和系統的總稱。

從廣義上來說，先進製造技術包括：

(1) 電腦輔助產品開發與設計（如電腦輔助設計 CAD、電腦輔助工程 CAE、電腦輔助工藝設計 CAPP、並行工程 CE 等）；

(2) 電腦輔助製造與各種電腦集成製造系統（如電腦輔助製造 CAM、電腦輔助檢測 CAI、電腦集成製造系統 CIMS、數控技術 NC/CNC、直接數控技術 DNC、柔性製造系統 FMS、成組技術 GT、準時化生產 JIT、精益生產 LP、敏捷製造 AM、虛擬製造 VM、綠色製造 GM 等）；

(3) 利用電腦進行生產任務和各種製造資源合理組織與調配的各種管理技術(如管理資訊系統 MIS、物料需求計畫 MRP、製造資源計畫 MRPII、企業資源計畫 ERP、工業工程 IE、辦公自動化 OA、條碼技術 BCT、產品資料管理 PDM、產品全生命週期管理 PLM、全面品質管制 TQM、電子商務 EC、客戶關係管理 CRM、SCM 供應鏈管理等)。

從狹義上來說,它是指各種電腦輔助製造設備和電腦集成製造系統。如果說機械化和自動化技術代替了人的四肢和體力的話,那麼以電腦輔助製造技術和資訊技術為中心的先進技術,則在某種程度和某些部分代替了人的大腦而進行有效的思維與判斷,它對傳統製造業所引起的是一場新的技術變革。上述先進製造技術所包含的各種技術,目前在我國傢俱製造業中,已經或正在實施應用,預計在不久的將來,在我國將會廣泛採用這些先進製造技術來改造和提升傳統的傢俱業。為了使我們傢俱行業的有關人員進一步瞭解上述相關技術及其理念,現逐一簡要敘述如下:

電腦輔助設計(CAD):

在設計過程中,利用電腦作為工具,幫助設計師進行設計的一切實用技術的總和稱為電腦輔助設計(Computer Aided Design, CAD)。電腦輔助設計包括的內容很多,如:概念設計、優化設計、有限元分析、電腦仿真、電腦輔助繪圖、電腦輔助設計過程管理、幾何建模等。其中,電腦輔助繪圖是 CAD 中電腦應用最成熟的領域。而幾何建模技術是 CAD 系統的核心技術,因為幾何建模是從人們的想像出發,根據現實世界中的物體,利用交互的方式將物體的想像模型輸入電腦後以一定的方式將模型存儲起來的過程,它是分析計算的基礎,也是實現電腦輔助製造的基本手段。

在設計中,一般包括兩種內容:帶有創造性的設計(方案的構思、工作原理的擬定等)和非創造性的工作,如繪圖、設計計算等。創造性的創造出以前不存在的設計方案,這項工作一般應由人來完成。非創造性的工作是一般應由人來完成。非創造性的工作是一些繁瑣行重複性的計算分析和資訊檢索,完全可以借助來完成。一個好的電腦輔助設計系統能充分發揮人的高速

分析計算能力即要找到人和電腦的最佳結合點。早期的 CAD 技術只能進行一些分析，計算和檔編寫工作，後來發展到電腦輔助繪圖和設計結果模擬，目前的 CAD 技術正朝著人工智慧和知識工程方向發展，即所謂的 ICAD (Intelligent CAD)。另外，設計和製造一體化技術即 CAD/CAM 技術以及 CAD 作為一個主要單元技術的 CIMS 技術都是 CAD 技術發展的重要方向。

電腦輔助工程 (CAE)：

長期以來，產品的力學強度分析與計算一直沿用材料力學、理論力學和彈性力學所提供的公式來進行。由於有許多的簡化條件，因而計算精度很低。為了保證產品的強度和質量，常採用加大安全係數的方法。結果使結構尺寸加大，浪費材料，有時還會造成結構性能的降低。現代產品正朝著高效、高速、高精度、低成本、節省資源、高性能等方面發展，傳統的計算分析方法遠遠無法滿足要求。近 20 年來，伴隨著電腦技術的發展，出現了電腦輔助工作分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 這一新興技術。採用 CAE 技術以及有限元分析法 (Finite Element Method, FEM)，可實現對質量、體積、慣性力矩、強度等計算分析；對產品的運動精度，動、靜態特徵等的性能分析；對產品的應力、變形等的結構分析。即使在進行複雜的產品和工程分析時也無須作很多簡化，並且計算速度快、精度高。

電腦輔助工藝過程設計 (CAPP)：

CAD 的結果能否有效地應用於生產實踐，數控機床 NC 能否充分發揮效益，CAD 與 CAM 能否真正實現集成，都與工藝設計的自動化有著密切的關係，於是，電腦輔助工藝規程設計 (Computer Aided Process Planning, CAPP) 就應運而生，並且受到愈來愈廣泛的重視。工藝規程設計的難度極大，因為要處理的信息量大，各種資訊之間的關係雙極為錯綜複雜，以前主要靠工藝師多年工作實踐總結出來的經驗來進行。因此，工藝規程的設計質量完全取決於工藝人員的技術水平和經驗。這樣編制出來的工藝規格一致性差，也不可能得到最佳方案。另一方面熟練的工藝人員日益短缺，而年輕的工藝人員

則需要時間來積累經驗，再加上老工藝人員退休時無法將他們的“經驗知識”留下來，這一切原因都使得工藝設計成為傢俱製造過程中的薄弱環節。CAPP 技術的出現和發展使利用電腦輔助編制工藝規程成為可能。

一個完善的 CAPP 系統一般應具有以下功能：檢索標準工藝檔；選擇加工方法；安排路線；選擇機床、刀具、量具、夾具等；選擇裝夾方式和半夜夾表面；優化選擇切削用量；計算加工時間和加工費用；確定工序尺寸和公差及選擇毛坯；繪製工序圖及編寫工序卡。有的 CAPP 系統還具有計算刀具軌跡，自動進行 NC 編程和進行加工過程模擬等 CAM 的功能範疇。CAPP 系統其工作原理來分，有檢索式、派生式、創成式、半成式、廣義綜合式、柔性化開發平臺式、智慧式等 7 種類型的 CAPP 系統。

CAPP 工藝過程設計是連接產品設計與製造的橋樑，是整個製造系統中的重要環節，對產品質量和製成成本具有極為重要的影響。同時企業為了在增強市場競爭力和快速回應市場的變化而採用多種技術的環境下，改革傳統的工藝設計手段，採用以電腦為工具的現代化工藝設計和管理方式是企業上水平、上臺階的關鍵之一，也是企業發展的必由之路。應用 CAPP 技術，可以使工藝人員從繁瑣重複的事務性工作中解脫出來，迅速編制出完整而詳細的工藝檔，縮短生產準備擊週期，提高產品製造質量，進而縮短整個產品的開發週期。

並行工程（CEO）：

長期以來，新產品的已經形成一套固定的模式，即市場調研、產品計畫、產品設計、試製樣機、修改設計、工藝準備、正式投產。在這咱開發模式中，在產品計畫和產品設計階段，儘管設計人員也考慮到產品的製造問題。但這種考慮是零碎的、不系統的。設計人員考慮的主要是如何滿足產品的功能問題。儘管實踐證明；對於指較大、市場壽命較長的產品而言，這是一種行之有效的開發模式。但對於指不大，更新換代又快的產品，這種模式就遠遠不能滿足要求了。在今天，產品的指愈來愈多，而市場生命週期愈來愈短。在這種形式下，傳統的產品開發方式已遠遠不能滿足要求了。於是，出現了並

行工程 (Concurrent Engineering, CE) 的概念。

所謂並行工程，就是集成地、并行地設計產品及其部件和相關各種過程的一種系統工作模式。這種模式要求產品開發人員與其他人員一起共同工作，在設計一開始就考慮產品報廢處理的所有因素，包括質量、成本、進度計畫和用戶的要求。並行工程有時稱為並行設計，它是指在新產品設計階段，就引進生產準備工作，并行地進行產品設計、工藝和生產準備（也可以包括後續過程）。並行工程是伴隨著電腦技術和網路通訊技術發展起來的一門新技術、它側重於管理方面，具有強調團隊工作 (Team work)、強調設計過程的並行性、強調設計過程的系統性、強調設計過程的快速反饋等特點。目前，普遍認為，並行工程技術是面向 21 世紀的技術，是企業贏得市場競爭的有利武器。採用並行工程技術可以大大縮短產品投放市場的時間、降低成本、提高質量、減少廢品率、保證了功能的實用性，從而增強企業的市場競爭能力。

2.5 電腦輔助製造 (CAM)

電腦輔助製造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 的狹義概念指的是從產品設計到加工製造之間的一切生產準備活動，它包括 CAPP、NC 編程、工時定額的計算、生產計畫的制訂、資源需求計畫的制訂等。這是最初 CAM 系統的狹義概念。到今天，CAM 的狹義概念甚至更進一步縮小為 NC 編程的同義詞。CAPP 已被作為一個專門的子系統，而工時定額的計算、生產計畫的制訂、資源需求的制訂則劃分給 PMRR II/ERP 系統來完成。CAM 的廣義概念包括的內容則多得多，除了上述 CAM 狹義內容外，它還包括製造活動中與物流有關的所有過程（加工、裝配、檢驗、存貯、輸送）的監視、控制和管理。

在實際應用中，一般意義上的 CAM 主要是指利用電腦直接進行加工製造、生產程序控制的技術系統，其主體是由數控機床 (NC/CNC/NDC)、機器人 (Robot)、自動物料儲運系統 [運輸設計 AGV (Automated Guide Vehicle) + 存儲系統 AS/RS (Automated Storage & Retrieval System)] 等設計而構成。其中，數控機床 (Numerical Control, NC) 是一種能夠根據預先編好

的一系列指令，實現對各種尺寸或各種形狀的複雜工件進行鋸、銑、刨、磨、鑽、車等多種不同加工方式的大型機床。經過幾十年的發展，NC 已經從識讀器時代進入了電腦數控（Computer Numerical Control，CNC），它是一台獨立的微型電腦來控制其運行，又稱加工中心（Machining Center，MC）；另一種是直接數控（Direct Numerical Control，DNC），它是一台中心電腦對台數控機床同時控制，控制各台機床的加工程式都編入一個中央資料庫內，通過中心電腦傳送到各個機床，而每台機床的加工情況，又通過附屬控制器反饋到中心電腦。隨著技術的不斷發展，DNC 的含義由簡單的直接數位控制發展到分散式數位控制（Distributed Numerical Control），它不但具有直接數位控制的所有功能，而且有系統狀態監視以及系統控制等功能；它開著眼於車間的資訊集成，針對車間生產計畫，技術準備，加工操作等基本作業進行集中監控與分散控制，把生產任通過局域網分配給各個加工單元，並使之資訊相互交換。而對物流等系統可以在條件成熟時再擴充既適用於現有的生產環境，提高生產率，又節省了成本。所以說現代意義上的 DNC，不僅指單個機床的控制而且在某種意義上是車間級通訊風格的代名詞。DNC 已演變成生產準備和製造過程中設備資訊互連的一種技術，是實現 CAD/CAP/CAM 一種技術最關鍵的紐帶，是現代化製造車間實現 CIMS 資訊集成和設備集成的有效途徑。如圖 14 所示。

總之，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、電磁學等等均已發產完備。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溶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。在聚合物加工處理方面，由於聚合物流體的黏度與溫度及剪切率有關，如(44)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，如圖 15 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。

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，如圖 16 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。

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (99)$$

2. Momentum equation：根據任何流體動量守衡原理所得

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -(\nabla \cdot \pi) + \rho g \quad (100)$$

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：

$$\pi_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \delta_{ij}\lambda \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (101)$$

其中 π_{ij} = stress tensor

u_i = orthogonal velocity

μ = dynamic viscosity

λ = second coefficient of viscosity

再將(70)式代入(69)式後簡化，以下列舉 x 方向之關係式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} \\ + R_x + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z}) &+ T_x \end{aligned} \quad (102)$$

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

$$M_\phi = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k - \phi_i^{k-1}|}{\sum_{i=1}^N |\phi_i^k|} \quad (103)$$

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®—FLOTRAN 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®分析之流程如圖 17 所示，一般完整的有限元素分析程式(finite element program)主要包括三個部分：前處理模組(preprocessing)，分析計算模組(solution)和後處理模組(postprocessing)。其內容概要敘述如下：

1. 前處理模組(preprocessing)

前處理模組提供了一個強大的實體建模及網格劃分工具，使用者可以方便地構造有限元模型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. 分析計算模組(solution)

分析計算模組包括結構分析（可進行線性分析、非線性分析和高度非線性分析）、流體動力學分析、電磁場分析、聲場分析、壓電分析以及多物理場的耦合分析，可類比多種物理介質的相互作用，具有靈敏度分析及優化分析能力

經由前處理模組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. 後處理模組(postprocessing)

後處理模組可將計算結果以彩色等值線顯示、梯度顯示、向量顯示、粒子流跡顯示、立體切片顯示、透明及半透明顯示（可看到結構內部）等圖形方式顯示出來，也可將計算結果以圖表、曲線形式顯示或輸出，例如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。

4.3-1 前置處理

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 中如圖 15 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問。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) 如圖 18 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。

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 後置處理

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，如表 6 所示。

2. 選擇不適當的元素類型

在 FLOTTRAN 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。

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

本論文是承襲以往在分析分配式混合元件利用 ANSYS®來模擬高分子流體在元件中的流動情況，加上 CRD 混合元件的構想，因而初步的對分散式混合元件用 ANSYS®軟體來加以模擬流動情形，從引入界面面積比的觀念相互比較之，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。

儘管 Fortran 程式在切割元素上並沒有 ANSYS®軟體來的方便，但在設計程式之時可藉由內部參數設定的改良來提升準確性，例如針對元素的類型。一般在 FLOTAN 中提供的三維元素為每邊均為線性共

八節點的六面體，而在 Fortran 程式語言中可設計為每邊均為二次 (quadratic) 分佈共二十七節點的六面體，如此一來亦可增加有限元素在近似實體模型的準確性。

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並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[®] 在前置步驟中的 Modeling 部分提供一個布林運算 (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，且依據不同的排列組合和不同的緊密程度做變化，其規格尺寸如表 7-1 至表 8，幾何形狀如圖 19 至 35 共十七種組合，由於分散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 10 所示，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表 11 所示。

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 (MKS 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，但在分析時仍依所需而定。

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 Amellal[38]所提之觀念，可將先前推導所得(3-17)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：

$$\frac{dA}{A_0 dt} = \frac{1}{2} \dot{\gamma} \quad (104)$$

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} \int \dot{\gamma} dt \quad (105)$$

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

$$= \sqrt{2\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2} \quad (106)$$

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。

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。



第五章、模擬結果與討論

本論文將以 LDPE 為模擬用之高分子基材，進行其在溝道內改變螺牙斜度，改變其插門橫截面安裝數量，以及插門(pin)的大小和共 17 種不同分散式混合元件的模流分析。依據上述之條件，本論文將分成三組來比較，第一組比較不同幾何形狀的插門和插門數減半的影響，第二組比較不同螺牙斜度的影響，第三組則是比較在插入固定插門的情況下螺牙斜度的影響，將其互相作為對應及比較，並了解各參數的改變對流動情形之影響，之後再引入界面面積比增加率及能量消耗量的觀念插門數減半的混和元件來加以突顯 PIN 數對械行流動的影響，並且再添加上一個完全無插門對照組以便加以比較，再將其混煉效果最佳者作為後續模擬的對象。在改變螺牙斜度上，亦置入以往沒有斜度的螺牙作為對照組，再來就是藉由插入固定的插門的情況下，改變螺牙斜度，再來看看其結果是否和沒插入插門只改變螺牙斜度的模擬情況是否有一致或者衝突，最後綜合各組表現最佳的條件，作為本論文中分散式混合元件最佳化的設計基準。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，總長度為 25.2cm(4D)，混合元件長度為 6.3cm(1D)，安裝於中間位置，流道之下溝道長度計有 61.8cm，流道之溝深為 0.45cm。此外在本論文中，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，來獲得 20 條完整的流線，收集此 20 條流線的數據，經過分析處理得到界面面積比及能量消耗量的數值，並以此二數值代表熔融高分子在不同流場中比較衡量的依據。而在操作軟體時，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 制和 K.G.S 制並用。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 ，對於能量楚以粘度的值 Kg^2/s^3 。

5.1 未安裝混合元件之溝道流動分析比較

在未進入探討主題前，吾人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對照，如圖 24。一般而言高分子流體在螺桿內的流動通常受到二種驅動力，一是由於溝道內高分子流體相互擠壓所產生的壓力流 (pressure flow)，另一是套筒轉動對高分子流體產生拖曳造成的拖曳流 (drag flow)。對套筒轉速而言愈高的轉速會帶來愈高的拖曳力，一方面也增加高分子流體往前推進 (pumping) 的能力，反之，背壓所造成的壓力流則會迫使熔融高分子產生迴流，綜合上述二點，所以高分子流體在溝道內會呈現一螺旋狀的流動，而由於這樣往覆式的流動在流場內亦造成流體粒子於空間中位置的移動，如同先前所提之整體擴散，進而達到分配式混合的效果。首先，以平均分佈的方式，找尋 20 條完整的流線，並處理數據求得界面面積比及能量消耗量。由於一次觀察多條流線，其展現出來的圖樣過於複雜，無法區分個別流線流經的路徑，故僅取一代表性的流線。

5.2-1 不同構形插門以及數目的流動分析比較

本節討論不同構形的插門對流體在溝道內流動的影響，模型幾何示意圖，如圖 19、20、21、22、23。

1. 無插插門(0P-0L)：由圖 36 和圖 37 可以知道無插門的流線顏色較固定，這一方面代表流速穩定，因此能量消耗上理應也不會太大，但是也因流速如此的穩定起伏不大是代表流體流經混合元件沒有任何太大的阻礙，所以可以想像的是流體被擠壓的程度也應當不大，所以它的拉伸比理應不大，我們可以從表 12 和表 15 可以明顯看出 0P-0L 這組的能量消耗和拉伸比都是最小，這也印證圖 36 和圖 37 的流線圖。

2. 插門(10SP-0L)：由圖 38 和圖 39 可以發現到此流線圖相較於前一組 (ORG) 在顏色上比較有多種的變化，這代表流速受阻礙的因素增加了，我們可以由圖 19 和圖 20 的幾何圖形不難明顯看出，增加留宿受阻礙的因素就是置入了 10 個插門所造成的，不過雖然顏色有多變化，但是流速的範圍大都在 17cm/s 附近變化，就算有顏色相差很大的，但是也都不多，而且在顏色變化上都是在 15cm/s 到 17cm/s 左右，所以即使置入 10 個插門，但是對於流體阻礙的程度仍是有限，因此可以推測流體所受的阻礙也不大，因此其能量消耗和拉伸比雖然比沒插門的來的大，但是理應也不會大很多，我們可以從表 12 和表 15 可以知道 10SP-0L 這組的能量消耗和拉伸比的確比 0P-0L 這組來的大，不過在這幾組比較裡屬於數值較小的。
3. 插門(20SSP-0L)：由圖 20 和圖 30 不難看出此組插門的數目比上組多一倍，因此可以推測出此組 20SSP-0L 的阻礙應當比 10SP-0L 這組來的大，所以在能量消耗上也理應比較大才是，再看流線圖，如圖 58 和圖 59 所示可以看出在中間楔形插門處流速有明顯下降，這也代表流體有受阻礙，因此面積拉伸比和能量消耗也在此提升許多，不過對於面積拉伸比 20SSP-0L 是否比 10SP-0L 來的大卻是不能定論的，雖然 10SP 的阻礙較小所耗的能量比較大，從圖 38 和圖 39 可以看出它的楔型流道比較長，並且更可以將此區域與圖 58 和圖 59 兩者間相互比較，此時不難看出 10SP-0L 這組由於楔形流道比較長，所以低速流體在楔形流道呆的時間比較久，這代表流體在此受阻礙的時間比較長，因此在面積拉伸比上 20SSP-0L 也沒因插門數多一倍比 10SP-0L 來的有利的多，我們從表 12 和表 15 可以看出 20SSP-0L 的能量消耗的確比 10SP-0L 大一點，不過在拉伸比方面 20SSP-0L 卻比 10SP-0L 小一點，從這點可以看出由於 20SSP-0L 由插門產生楔形流道的距離實在太短，因而造成流體在楔形流道的時間比較短，所以才產生面積拉伸比比較低的情況產生，由於這兩者間各有利有

弊，所以造成兩者數值上的相近。

4. 插門(20SP-0L):由圖 40-1 和圖 41 來看可影明顯看出此組的流線變化極其大，流速從 7cm/s 到 25cm/s 的極端變化，這代表流體受的阻礙變的相當大了，而且更重要的是紅色的那一圈的路徑接近是圓形自轉，螺線流行並不明顯，這傳達了重要的意涵，這代表流體不易流過插門，因而造成流體在插門門口打轉一圈才進入楔行插門裡，這就可以明顯表達出流體所受的阻礙變的相當大了，因此在能量上的消耗和拉伸比理應比 10SP-0L 和 20SSP-0L 這兩組來的大多了，我們可以由實驗數據結果整理的表 12 和表 15 可以看出 20SP-0L 這組的數值的確比前兩組高，而且在能量消耗上 20SP-0L 和 10SP-0L 差了快兩倍，和 0P-0L 相差更高達快四倍了，這也印證了流線所傳達的意思。
5. 插門(20MP-0L):此組要和上組比較的話需要多一組的流線才能將兩組的優缺加以說明，因此此時要參考圖 40-1、40-2、41、42-1、42-2、43 這六張圖來加以分析其流線分布情形，從 40-1 和 40-2 兩者的比較明顯的可以看出 40-2 少了一圈，雖然藍色的比較多（流速低的多），可是大部份都應該繞四圈，現在 40-2 少了一圈的路徑，這使滯留時間明顯的縮短許多，所以流體在混合元件裡面的時間變短，自然所受到混合元件的阻力自然就少了，所以能量消耗和拉伸比理應比較小，因此也不用列入與 20MP-0L 的來比較，從圖 21 和圖 22 的可以明顯看出插門長度有明顯的差異，從插門的大小不難看出在相同插門數的情況下越長的插門阻礙性越大，所以流體有越難流過插門間的楔行區域，從圖 40-1 和 41-2 來比較，可以看出兩者的圖形是差不多的，除了中間的楔行長度有差外大致上是相似的，在楔形長度比較長的流線圖裡，可看出流體的轉折會比楔形長度短的還多，轉折是代表速度的方向一直改變，這種方向的改變越明顯就代表流體速度變化也越大，因此可以知道受到楔形區域的阻礙是比

較大的，所以流體所消耗的能量也就越大的多，阻礙大擠壓自然比較大所以這種情況下 20MP-0L 拉伸比自然比 20SP-0L 來的大，所以 20MP-0L 理論上會比 20SP-0L 來的大，這主要是因為 20MP-0L 的插門長度比較長的原因，我分從表 12 和表 15 可以看出 20MP-0L 的確是略勝一籌，但是也是相差不大就是了。

6. 插門(20LP-0L): 這 20LP-0L 這組是在所有組別中插門最長的一個，因此其延伸流動影響也為最大，由圖 44-1、圖 44-2、圖 45 可發現到此組最大的問題是在於繞的圈數不足，路徑明顯的都是繞了三圈後就結束的，所以流體在混合元件的滯留時間自然也不長了，這主要是因為中間插門的路徑過長，在楔型流道中流體往往受限於狹隘的空間，因此導致流體在這段時間不能以螺旋線的方式流動，只能照著溝道的空間做軸向的直線前進，因此會產生繞的圈數不足也是合理中的事，可是也因為楔形流道的變長，這導致流體在此時受限的機會變大，因此延伸流動加強，這不但造成能量消耗的上昇，也造成拉伸比的上昇，再從圖 44-1 和圖 44-2 比較中可以發現流線在中間楔行區域中的速度變化是圖 44-2 變化比較大，至於圖 44-1 在楔行區域的流速都一直維持高速流動，這不但代表流體所受阻礙較小，也因為高速流動，導致流體的滯留時間更加縮短了，所以在這裡可以明顯看出圖 44-2 的能量消耗值和面積拉伸比是比圖 44-1 來的大的，由於之前提及因為楔行區域過長導致流體繞行時間變短，因此在這裡可以推斷出，面積拉伸比應該會因此降低一些，至於能量消耗的話由於 20LP 的插門是最大的，所以阻礙自然也就最大，可以預期它的能量消耗應該也不小才是，我們從表 12 和表 15 可以明顯看出此組的拉伸比雖然很高，但是相較於其他組別 20LP-0L 的拉伸比上一組還低些，至於能量消耗則是全組別之最高的，雖然此組的拉伸比不是最高，但是因為有這種現象，所以可以推測出在適當的插門長度下，可以造成最大的拉伸比。

5.2-2 以局部範圍及三種參數分析不同構形插門以及數目

本節主要根據表 18 到表 33 來作深入的探討，分散效果好壞主要取決於分散過程中應力是否有瞬間上升的現象，因此用利 strain rate(拉伸率)對軸向距離來做圖表就可以明顯的表示出應力是否有瞬間上升的現象，也由於是考慮對軸向距離作圖表，所以面積拉伸比也不失為一個判斷分散效果優劣的一種方式，另外本節也加入能量消耗對軸向距離所做的圖表來加以比較。

1. 無插插門(0P-0L)：針對表 18 的面積拉伸比對軸向距離的圖表來看，可以明顯知道面積拉伸比都維持在 0.8 左右，這是因為此混合元件在中間沒有置入插門所造成的，這也代表此時延伸應力維持不變。
2. 插門(10SP-0L)：針對表 19、20、21 所示，可以不難發現在 11.8cm 和 12.6cm 處出現了瞬間上升的跳動，在 12.6cm 處會瞬間上升是因為此時是楔形流道最窄之處所造成的原因，然而在 11.8cm 處則是因為流線的折返現象所造成的，當流線碰到螺牙壁時，會產生折返現象，造成方向上的大改變進而產生速度差變大的現象，此時也由於套筒會加速流體的速度，因此在和套筒加速同向時會加速反向時會減速這一增一減間使速度差更大，因此在此處的瞬間跳動也不小。有表可知，不論是延伸率和面積拉伸比對軸向距離作圖都可以發現起伏的位置很接近，能量消耗也是在此兩處有明顯的能量消耗。
3. 插門(20SSP-0L)：針對表 22、23、24 所示，不難看出延伸率的起伏似乎特別劇烈，這是由於插門由 10 個跳到 20 個了，不過看到面積拉伸比只有 12.6cm 處跳的特別高，這可以說明由於此插栓因為長度最小所以延伸距離不夠，因此沒能像之前有足夠距離產生折返

現象，所以才造成只有一個起伏點，至於能量消耗方面也是只有 12.6cm 處消耗的特別多。

4. 插門(20SP-0L):針對表 25、26、27 所示，可以發現主要是在 12.6cm 處產生較大的起伏其他地方很不明顯，值得注意的是和之前同一尺寸不同插門數的 10SP-0L 比較來說，少了 11.6cm 處的起伏，這是由於由於 20 個插栓導致插栓間的距離變小，因此就算有折返現象，流體也沒有足夠的時間利用套筒的加減速產生更的速度差，所以才導致此時很不明顯，不過這是相對表叫產生的差異，對於絕對的物理量來說，其實此時的延伸率和面積拉伸比有明顯的變大許多，能量的消耗也上升許多。
5. 插門(20MP-0L):針對表 28、29、30 來說，可以發現與上一個混合劍最大的差異是此時折返現象明顯話，但是在 12.6cm 處反而相對的不明顯了，這是由於插門的長度變大了，導致延伸距離變長，如此流體折返距離變大了，因此折返現象反而明顯了，不過值得注意的是此時拉伸率和面積拉伸比數值的大小都比上一個混合元件小多了，而且在 12.6cm 處變小許多，這是因為因為拉伸距離變長，導致流體滯留愛此區域的時間變長，進而使流速下降許多，如此在最窄處所產生的速度變化變小了，因此拉伸率和面積拉伸比都明顯變小了，不過由於差門長度變長，反而使流體更難流過混合元件，所以能量消耗反而更大。
6. 插門(20LP-0L):針對表 31、32、33 來說我們可以發現因折返現象產生的延伸率和面積拉伸比變的小了這是因為由於插門雖然距離變長但是卻也造成流體從元件入口到插門間的加速距離變小了，所以因折返現象產生的速度差變小了，對於在 12.6cm 處的起伏也是不明顯甚至不見，這也如同上個混合元件是因為流體滯留在楔形區域變場所造成的，能量消耗上則是最大。

5.3 不同螺牙斜度之混合元件的流動分析比較

本節討論不同螺牙斜度對流體在溝道內流動的影響，在模型的選擇上，選擇了 0L、0.1L、0.2L、0.3L、0.4L、0.5L，模型幾何示意圖，如圖 24、25、26、27、28、29，其中圖 24 世空白對照組，所以共有六種形式來探討。

1. 無 PIN 垂直流道(0L): 首先由圖 24 可以明顯知道此對照組是單純沒有斜角的螺線圖，在看流體流線圖，如圖 46、圖 47，可以看出流體流速一開始比較快，大約是在 12cm/s，後來在大約轉了一圈螺距後，速度降為 9cm/s，從這種單純的跡象看來，流體所受的阻礙自然也就不大，所以能量消耗和拉伸比理應不大，由表 13 和表 16 可以的確看到此組的能量消耗大約在 10000Kg²/s³ 左右，面積拉伸比在 140 左右，比較之前的組別顯然小很多的，不過在此組數據卻是裡面中最高的，這就要討論到流體流動範圍的比較了，因為此組在傾斜螺牙是在封閉空間裡，因此對於改變傾斜角的情況下，此組混合元件封閉面積是最小的，所以可以有此推斷出此組數據在綜數據中是最高也是合理的。
2. 再來就直接將以下五組數據直接拿來做比較，其原因是因為從圖 48、49、50、51、52、53、54、55、56、57 上可以不難看出分布曲線其實頗接近的，顏色上的變化也不大，因此不論對於能量消耗或者面積拉伸比理應是很接近的，我們可以從表 13 和表 16 可以看出依點端睨來，這五組的差異似乎不大，其實若以較大的範圍來考量，其實加上對照組總共六組，這六組的能量消耗和面積拉伸比其實變化不是很大，這也表示有斜度的螺牙在封閉無楔行空間中其實是一種無用的方式，所以設計上應以開分的楔形溝道空間來表示。

5.4 有插門楔行螺牙之混合元件的流動分析比較

在本節跟上節最大的不同是多置入了固定的 20 個插門來後，再用不同的螺牙傾斜角度來討論對流體在溝道內流動的影響，選擇的組別有 20SP-0L、20SP-0.1L、20SP-0.2L、20SP-0.3L、20SP-0.4L、20SP-0.5L 這六組，其中第一組也是空白對照組，模型幾何示意圖，如圖 30、31、32、33、34、35 所示，共有六種不同的組別。

觀察其流線流動情形，由圖 58 和圖 59，不難看出的確是有受到插門的影響，導致流體流速變化比沒插門來的大，因而造成不論是能量上的消耗，或者是面積拉伸比均比沒插門來的大，如同上一小節對於不同螺牙斜度之混合元件的流動分析比較，此節也是在所有條件固定下，只改變螺牙斜度來加以比較，所以在結論上理應和上一小節所產生的結果相同，如圖 58、59、60、61、62、63、64、65、66、67、68、69 所顯示，不難看出此組最大的特點是繞圈數大都有偏低的現象，這一點可以從上一組 0L、0.1L、0.2L、0.3L、0.4L、0.5L 也看出一點端倪，這兩組的螺旋流線也大都少繞一圈，這可能是因為流體所受的元件幾何的阻礙不大，進而造成流體太快通過流道所導致的結果，由這點可以知道，在設計混合元件時，對於插門的長度不僅僅考慮因長度越長產生更大延伸應力，也須考慮插門不夠長會導致流體太快通過混合元件，進而造成流體滯留在混合元件的時間不足，進而導致面積拉伸比的數值部會太高。

如表 14 和表 17 所示，我們不難看出雖然在此組的能量消耗數據是高高低低低的起伏不定，但是這並不影響模擬結果，因為最重要的是面積拉伸比的值如同預期的一般，是沒有多大變化的，這和上一組所得出的結論是相同的，因此兩者可以相互的對應。

5.5 最佳化設計的探討

綜合上述 4 節，在插門構形、橫截面數量以及在有無插門的螺牙斜度的比較上，我們可以插門形式來設計最佳化混合元件，由之前的組別我們可以很輕易的挑出 20SP-0L 這組模具設計來作為我們最佳化設計的一個方向，對於傾斜螺牙的設計由於螺牙表面與套統緊密接觸，因此造成蟹行流動的效果不彰，所以不拿來列入最佳化的設計條件。不過，在 10SP 和 20SSP 的數據顯示，插門數目多寡並不是影響面積拉伸比的絕對因素，如果插門數太多這樣反而會造成流體能量消耗的負擔，這一點也須考量進去。



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要考量插門的長度是否不足，否則會導致流體太快通過混合元件，進而導致分散效果不彰。
2. 安裝在橫截面的插門數量也並不是多就是好，在之前 10SP 和 20SP 的結果展現反而是 10SP 的拉伸比比較好，能量的消耗也比較少。
3. 適當的改變插門本身的長度可以使該混合元件的面積拉伸比有一定程度的成長，長度越長面積拉伸比也就越大，不過到了一定長度以後反而會造成拉伸比下降，這是因為流體在溝道裡面繞行距離不夠所造成的，所以對於流體縱向的螺旋繞行空間的大小也應該要有所考量。
4. 如果螺牙面與套筒內表面緊密接和的話，這會使傾斜角度的螺牙產生不了楔形流動的現象，所以如果兩者間空隙不大時，可以不用刻意去改變螺牙的傾斜角度。
5. 為了要達到更高的面積拉伸比，進而加長了插門的長度，雖然面積拉伸比的確上升了，但是這也導致流體更難流過混合元件，反而更增加能量消耗的負擔，所以不但要考慮面積拉伸比的主要因素，另外也得考量能量使用的因素，這樣才會做出不止分散效果不錯，而且經濟效益也不錯的好的混合元件。
6. 插門不可無限制的加長，除了因為增加能量消耗外，也因為流體滯留時間變長，會導致流速變慢，反而造成在 12.6cm 處的拉伸率和面積拉伸比明顯下降。

表一、各種混合元件的價錢（美元）

PRICES				
SIZE	GENERAL PURPOSE	SAXTON MIXER ONLY	PLUS SPIRAL MADDOCK	CRD MIXER
3/4"	SC-107 -- \$1931	SC-207 -- \$2072	SC-307 -- \$2350	SC-607 -- \$4726
1"	SC-110 -- \$2072	SC-210 -- \$2353	SC-310 -- \$2775	SC-610 -- \$4726
1 1/4"	SC-112 -- \$2212	SC-212 -- \$2493	SC-312 -- \$2650	SC-612 -- \$4726
1 1/2"	SC-115 -- \$2283	SC-215 -- \$2564	SC-315 -- \$2775	SC-615 -- \$4980
2"	SC-120 -- \$2375	SC-220 -- \$2695	SC-320 -- \$3475	SC-620 -- \$5562
2 1/2"	SC-125 -- \$2493	SC-225 -- \$3477	SC-325 -- \$3850	SC-625 -- \$5973
3 1/2"	SC-135 -- \$4033	SC-235 -- \$4461	SC-335 -- \$5565	SC-635 -- \$8121

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

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

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。

參考文獻：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。

參考文獻：康淵、陳信吉，“ANSYS 入門”，台北全華，民國 91 年

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

參考文獻：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	$W/m-K$	$W/cm-K$	$Btu/ft-s-^{\circ}R$	$Btu/in-s-^{\circ}R$
Specific heat	$J/kg-K$	$J/g-K$	$Btu/slug-^{\circ}R$	$Btu-in/lb_f-s^2-^{\circ}R$
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	$Btu/ft^2-s-^{\circ}R$	$Btu/in^2-s-^{\circ}R$

參考文獻：康淵、陳信吉，“ANSYS 入門”，台北全華，民國 91 年

表 7-1、分散式混合元件變化

比較組合 比較項目	一	二	三	四	五	六
PIN 的長度及數目 (PIN 數/短對角線/ 長對角線)	無 PIN	10 個 PIN	20 個 PIN	20 個 PIN	20 個 PIN	20 個 PIN
	0	0.6594	0.6594	0.6594	0.6594	0.6594
	0	0.9891	0.9491	0.9891	1.4891	1.9891
無 PIN 楔行螺牙 (扣除長度/斜率)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	無窮 (垂直)	0.2222 (循環小數)	0.4444 (循環小數)	0.6666 (循環小數)	0.8888 (循環小數)	1.1111 (循環小數)
有 PIN 楔行螺牙 (斜率/PIN 數 /長對角線長)	無窮	0.2222	0.4444	0.6666	0.8888	1.1111
	20	20	20	20	20	20
	0.9491	0.9491	0.9491	0.9491	0.9491	0.9491

註：對角線是指菱形 PIN 的對角線；短對角線均固定在 0.6594cm；螺牙牙高為 0.45cm 牙寬 0.63cm，斜率=(螺牙寬-扣除長度)/螺牙牙

表 7-2、分散式混合元件代號

組別	一	二	三	四	五	六
PIN 的長度 及數目	0P-0L	10SP-0L	20SSP-0L	20SP-0L	20MP-0L	20LP-0L
無 PIN 楔行 螺牙	0L	0.1L	0.2L	0.3L	0.4L	0.5L
有 PIN 楔行 螺牙	20SP-0L	20SP-0.1L	20SP-0.2L	20SP-0.3L	20SP-0.4L	20SP-0.5L

表 8、插門尺寸大小

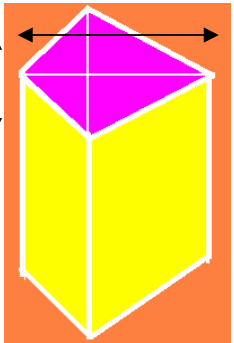
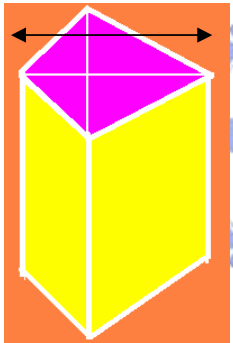
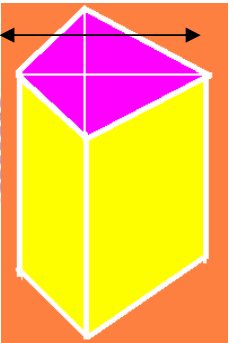
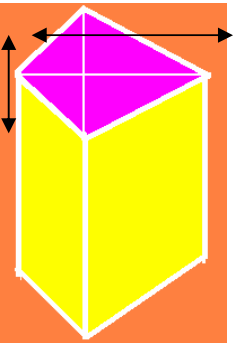
菱形(SSP)		菱形(SP)		菱形(MP)		菱形(LP)	
							
a : 0.6594cm b : 0.9491cm	高度 : 0.45 cm	高度 : 0.45 cm	a : 0.6594cm b : 0.9891cm	高度 : 0.45 cm	a : 0.6594cm b : 1.4891cm	高度 : 0.45 cm	a : 0.6594cm b : 1.9891cm

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、螺桿幾何參數及操作條件(續)

套筒內徑， D_S (cm)	6.35
螺距， L_S (cm)	6.35
溝深， H (cm)	1
溝寬， W (cm)	5
螺旋角， θ_b ($^\circ$)	17.66
套筒溫度 T_b ($^\circ\text{C}$)	180
混合元件長度 l (cm)	12.1
下溝道長度 z (cm)	40
螺桿轉速，(rpm)	80

表 11、LDPE 高分子融熔態之物理性質及流變參數表

(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).

表 12、PIN 的長度與數目與能量/黏度的長條數據

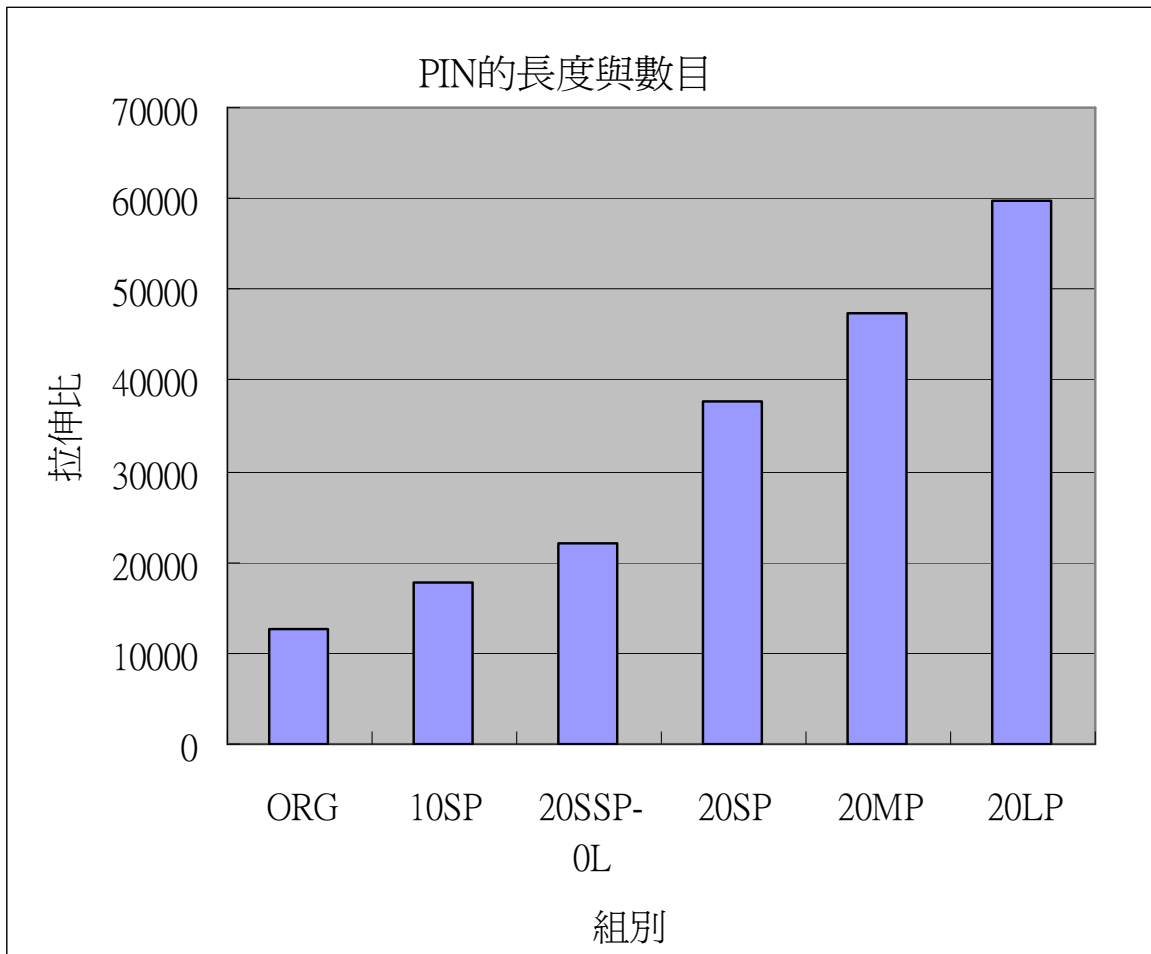


表 13、無 PIN 楔形螺牙與能量/黏度的長條數據

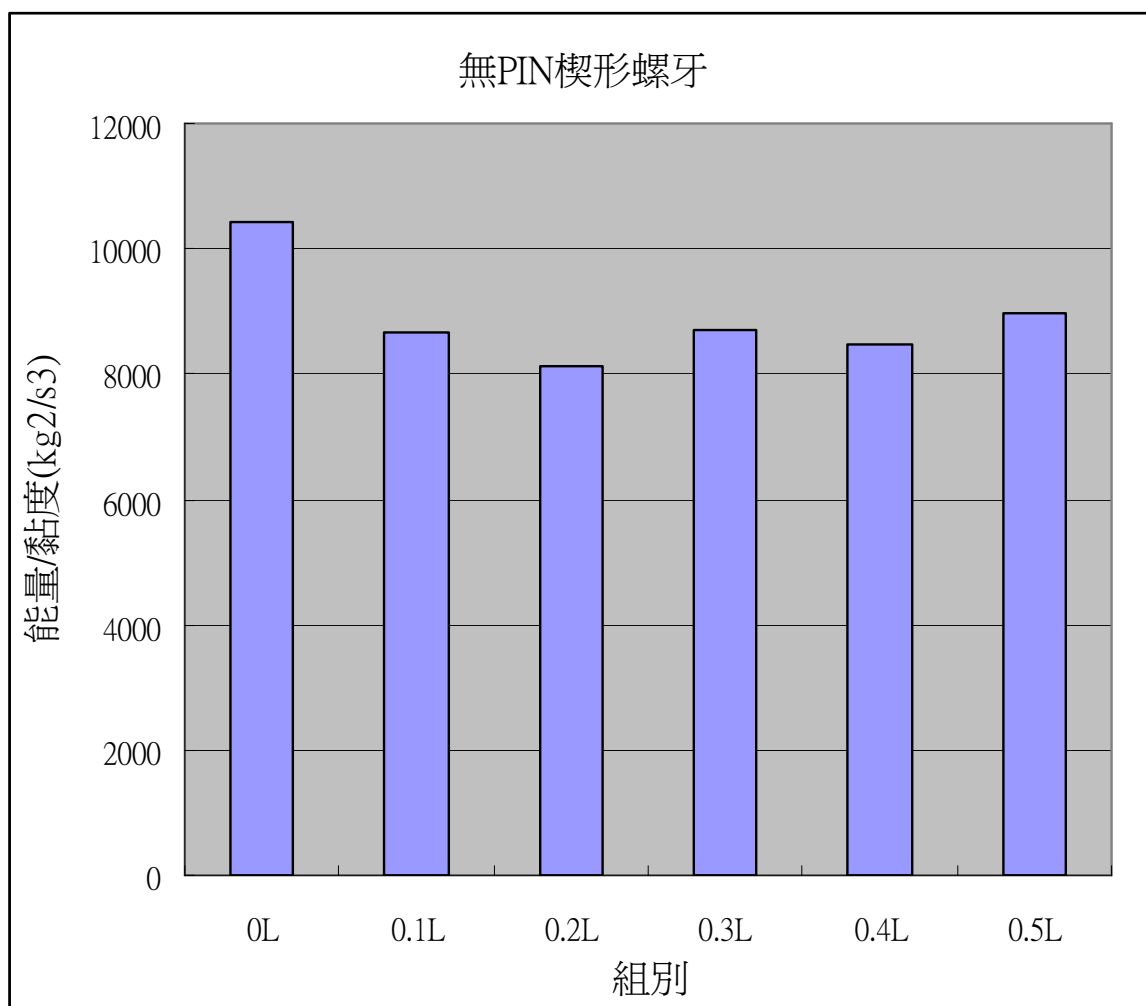


表 14、有 PIN 楔形螺牙與能量/黏度的長條數據

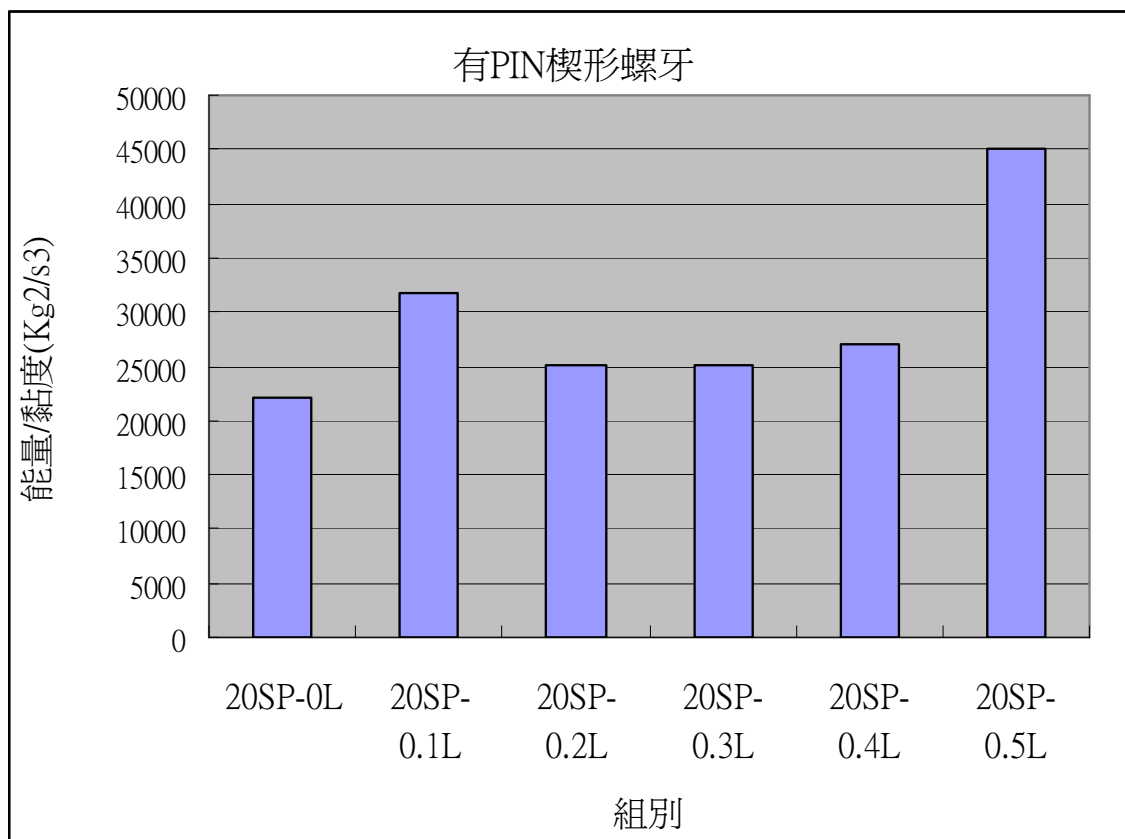


表 15、PIN 的長度與數目與拉伸比的長條數據

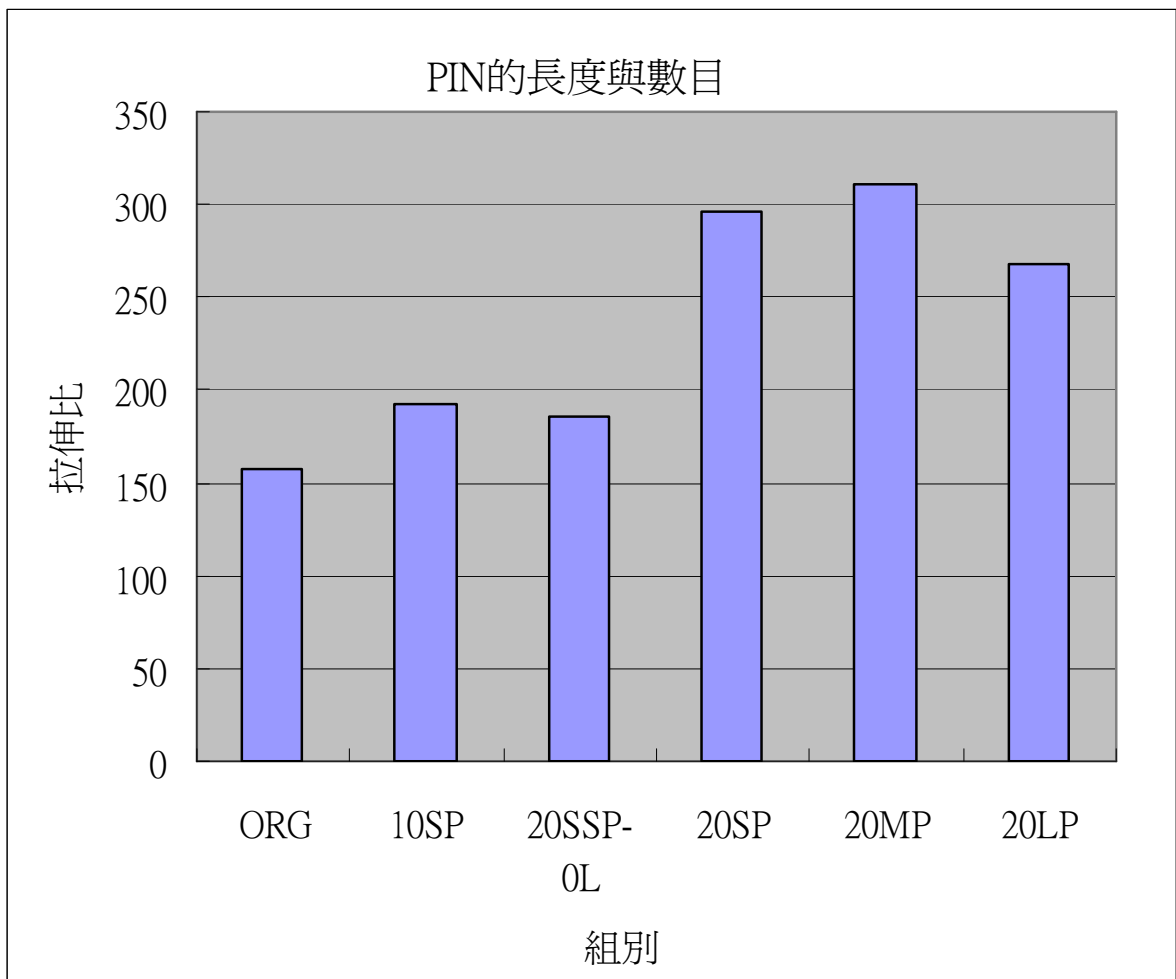


表 16、無 PIN 楔形螺牙與拉伸比的長條數據

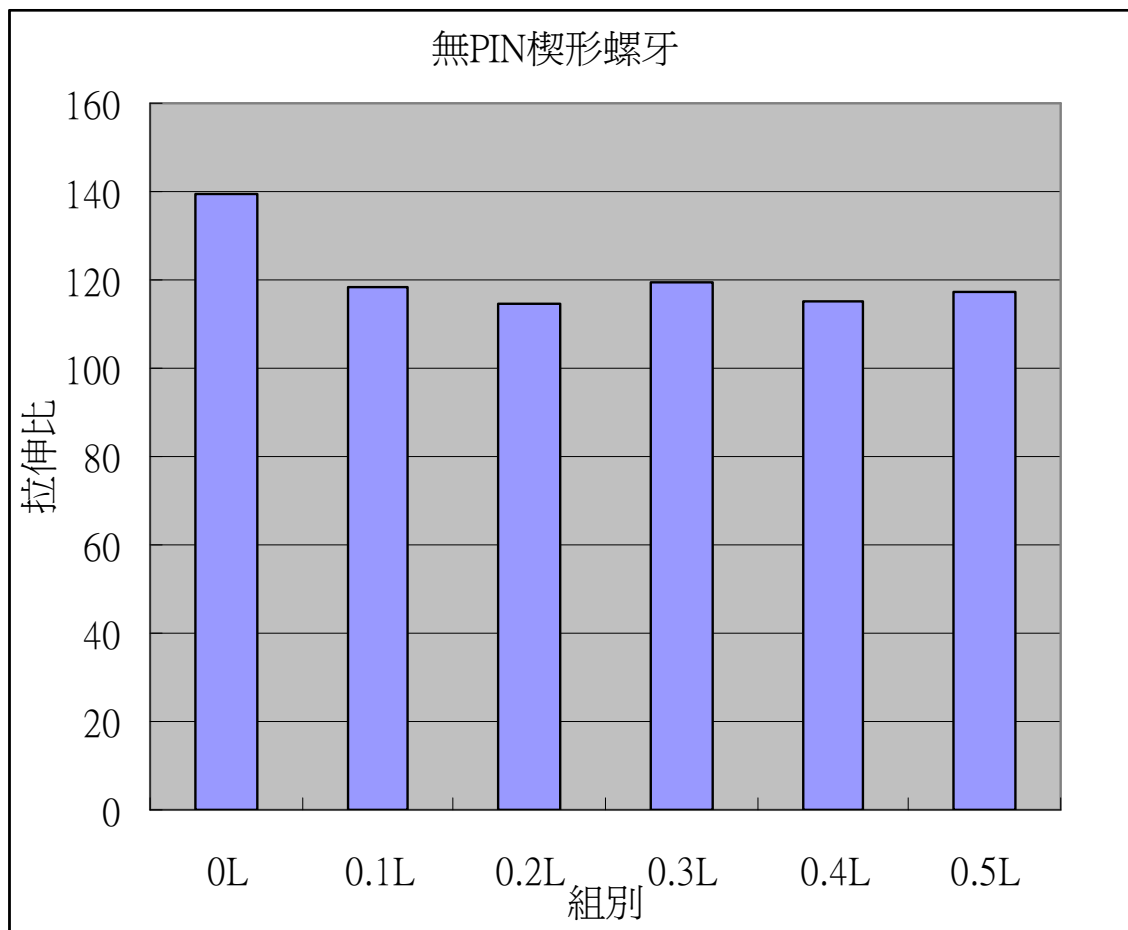


表 17、有 PIN 楔形螺牙與能量/黏度的長條數據

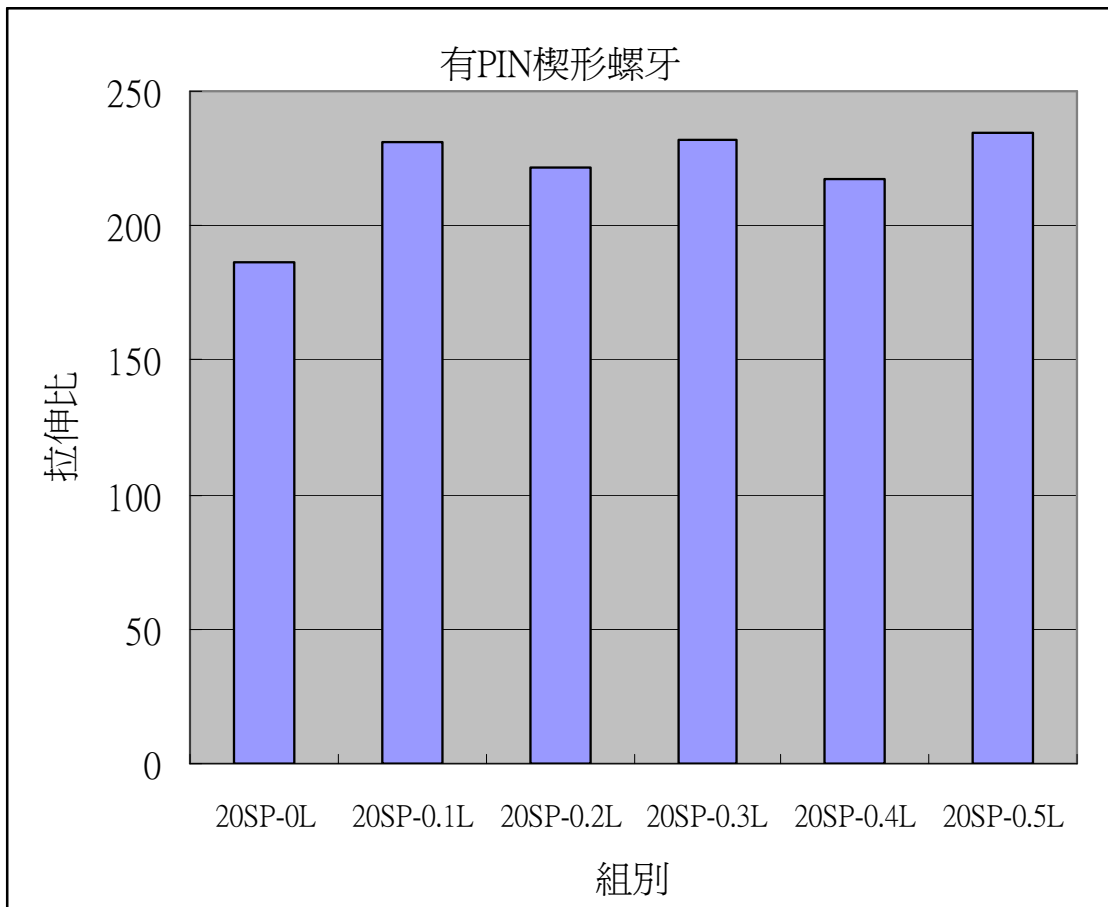


表 18、無 PIN 插栓(OP-0L)面積拉伸比變化表

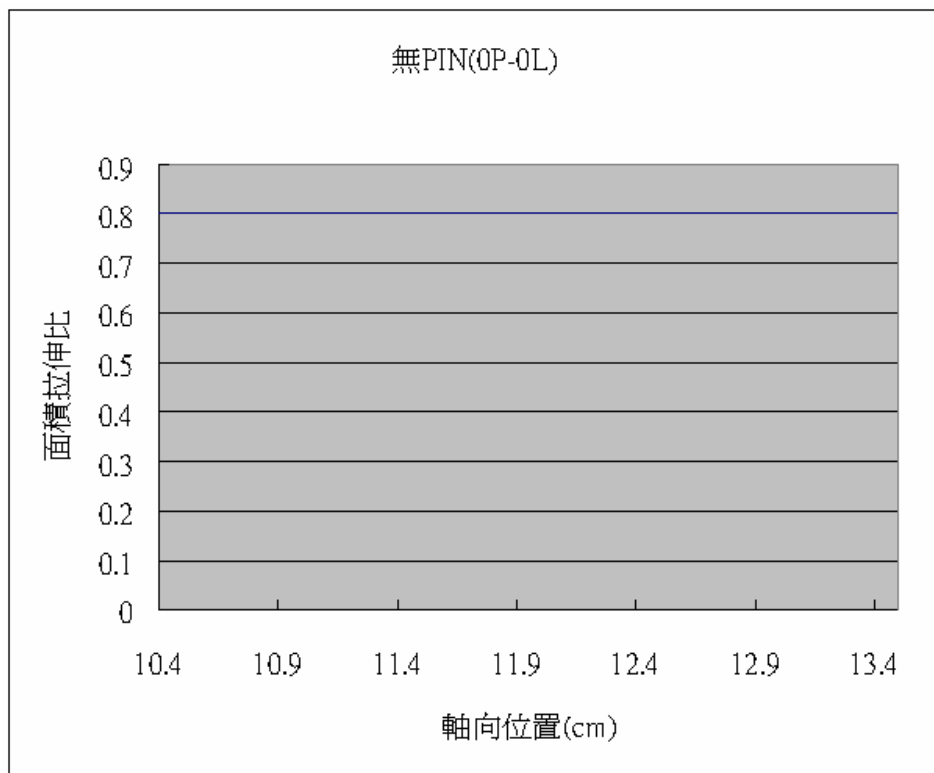


表 19、無 PIN 插栓 (20SSP-0L)延伸率變化表

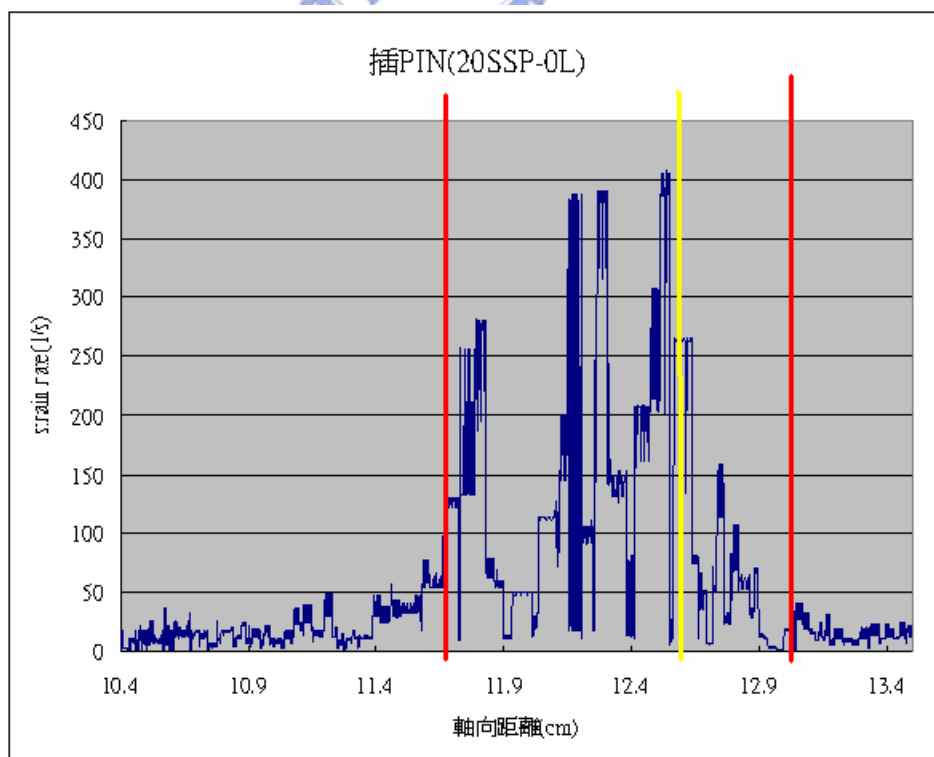


表 20、無 PIN 插栓 (20SSP-0L) 面積拉伸比變化表

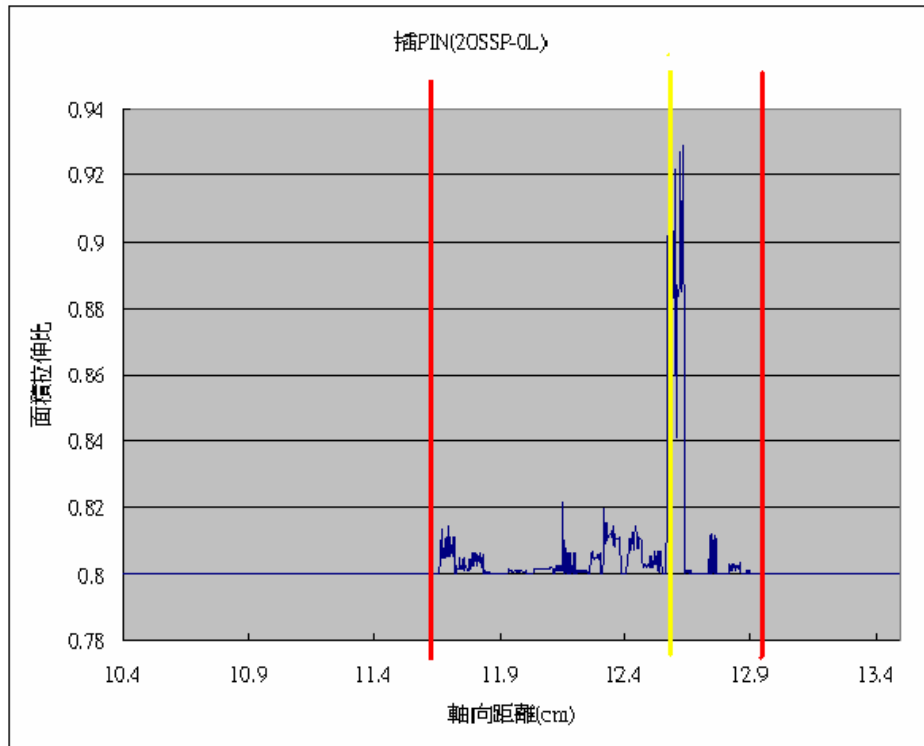


表 21、無 PIN 插栓 (20SSP-0L) 能量消耗變化表

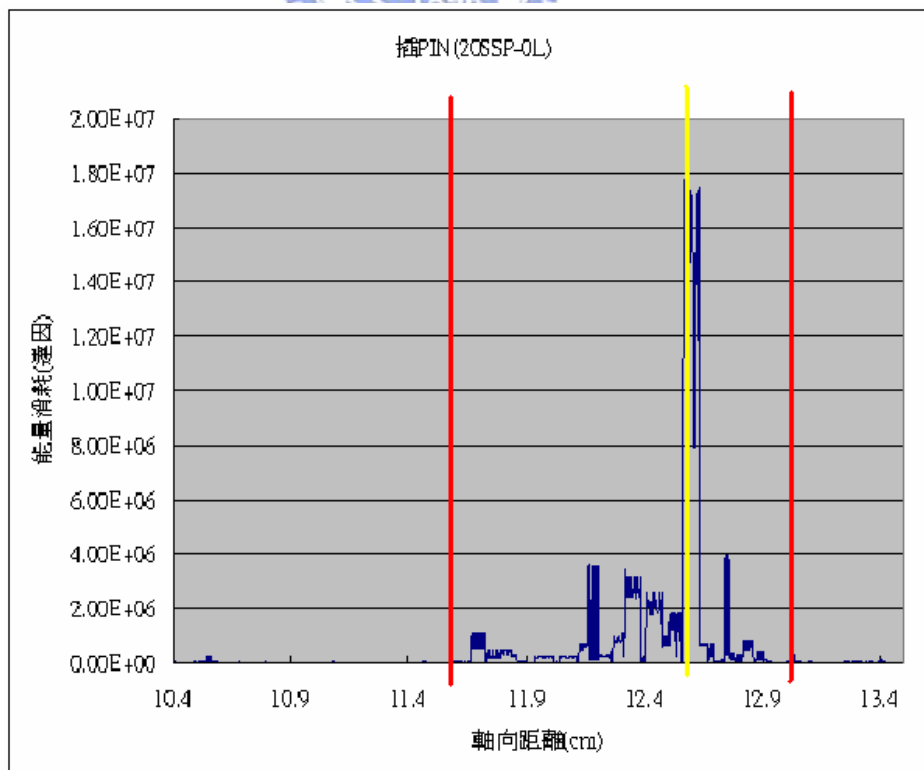


表 22、無 PIN 插栓 (10SP-0L) 延伸率變化表

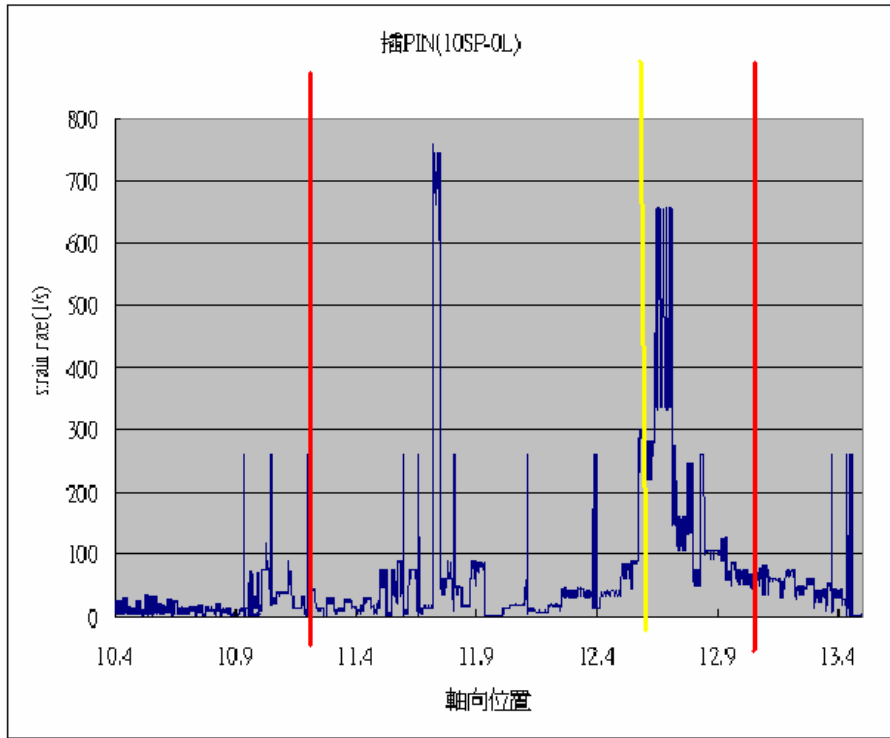


表 23、無 PIN 插栓 (10SP-0L) 面積拉伸比變化表

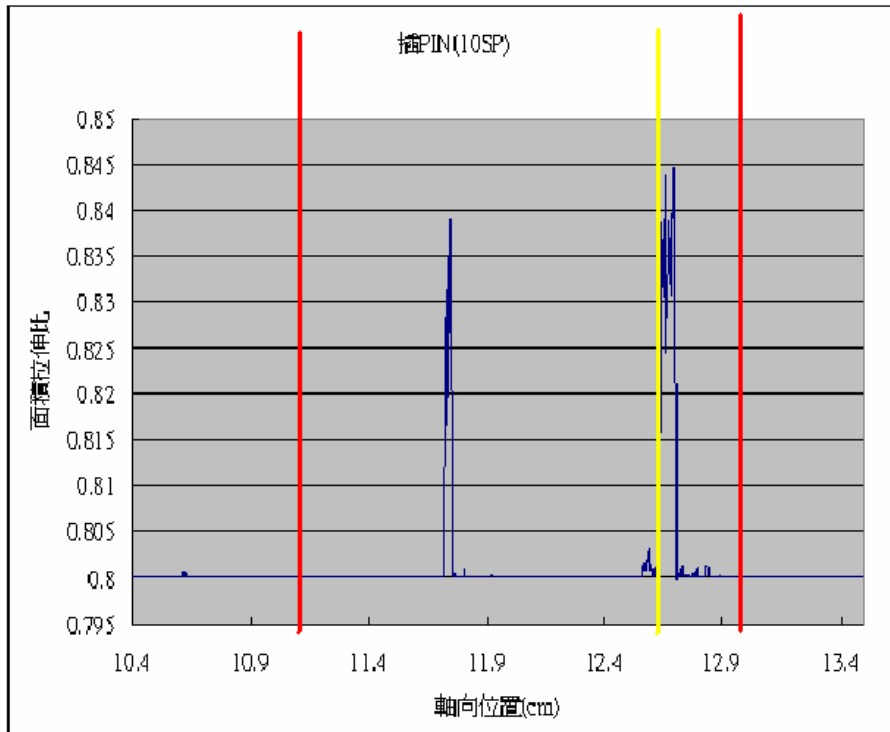


表 24、無 PIN 插栓 (10SP-0L) 延伸率變化表

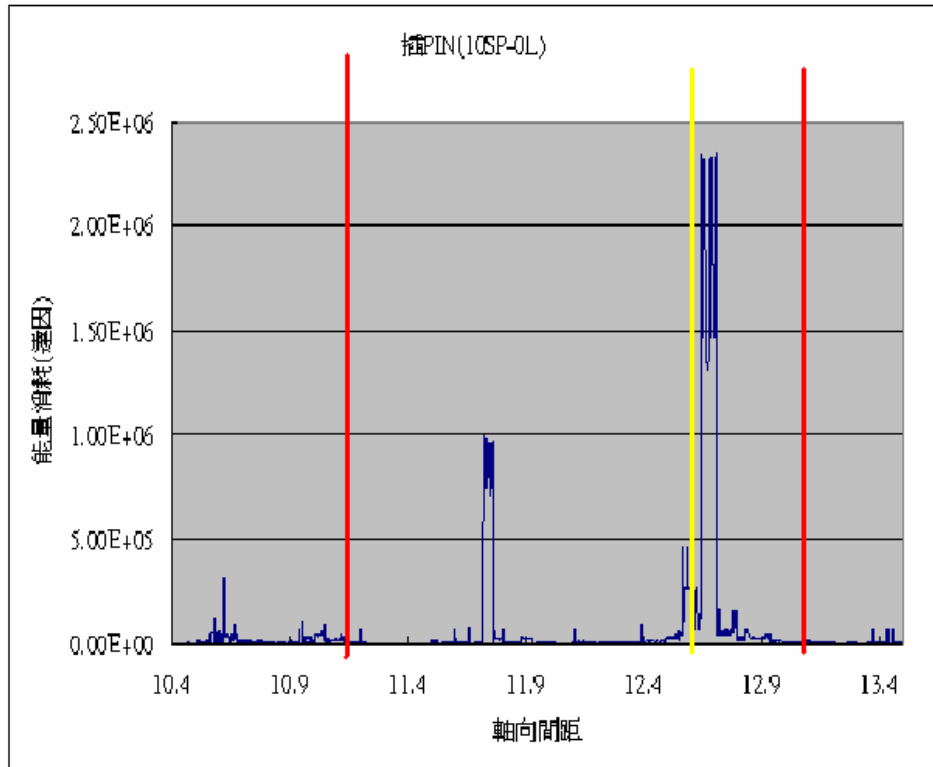


表 25、無 PIN 插栓 (20SP-0L) 延伸率變化表

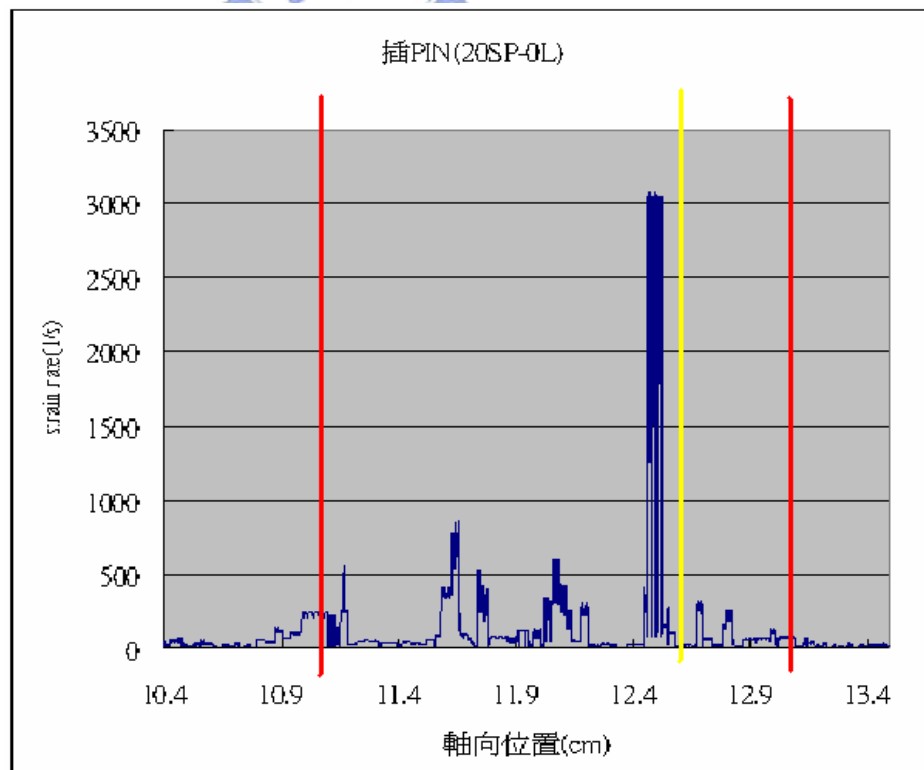
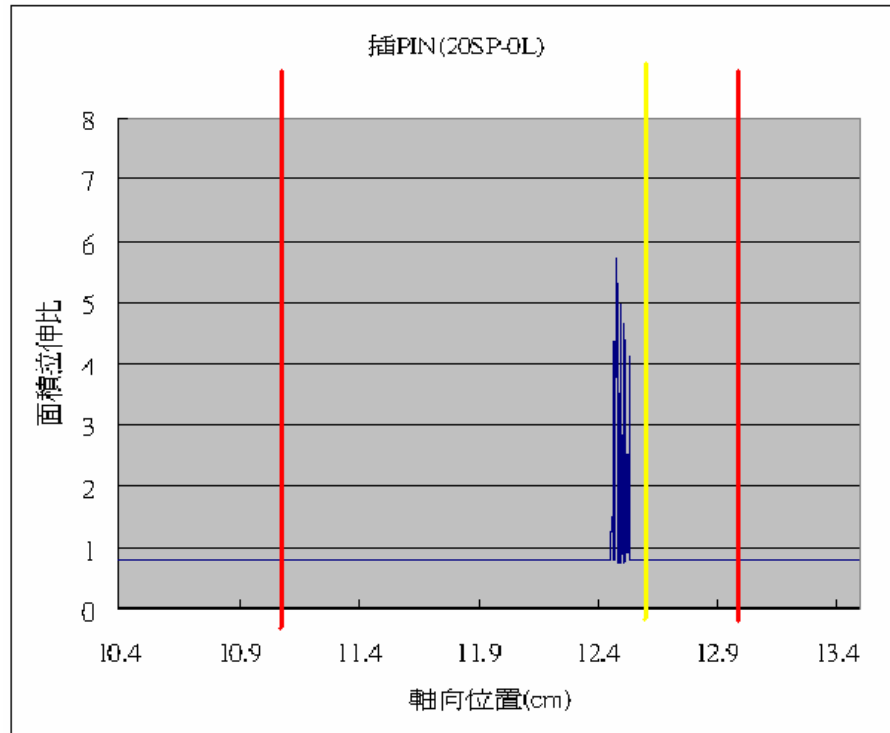


表 26、無 PIN 插栓 (20SP-0L)面積拉伸比變化表



表

27、無 PIN 插栓 (20SP-0L)能量消耗變化表

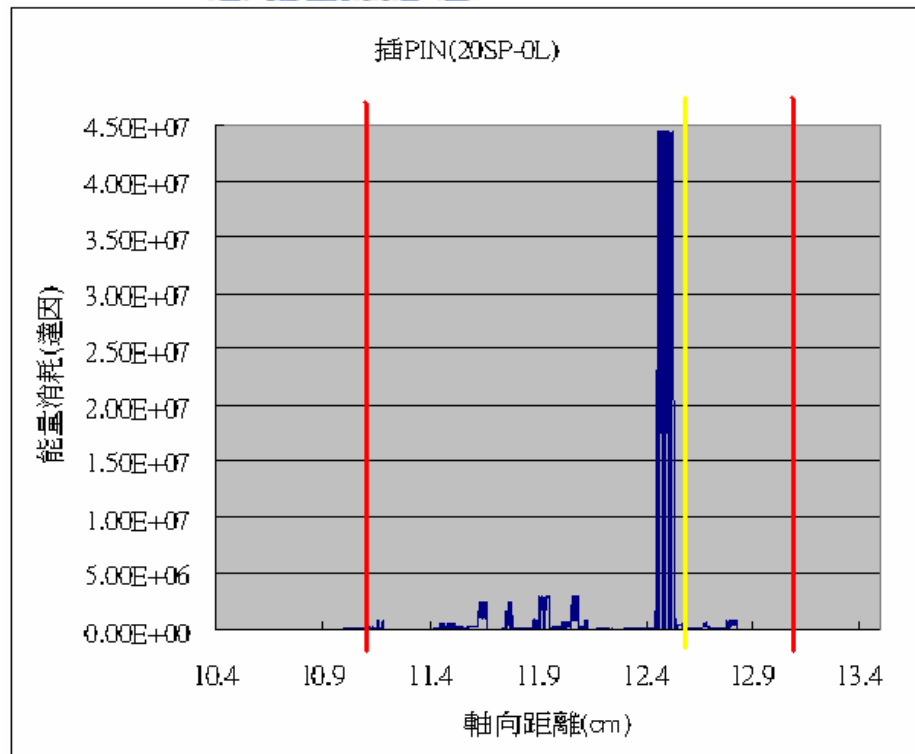


表 28、無 PIN 插栓 (20MP-0L) 延伸率變化表

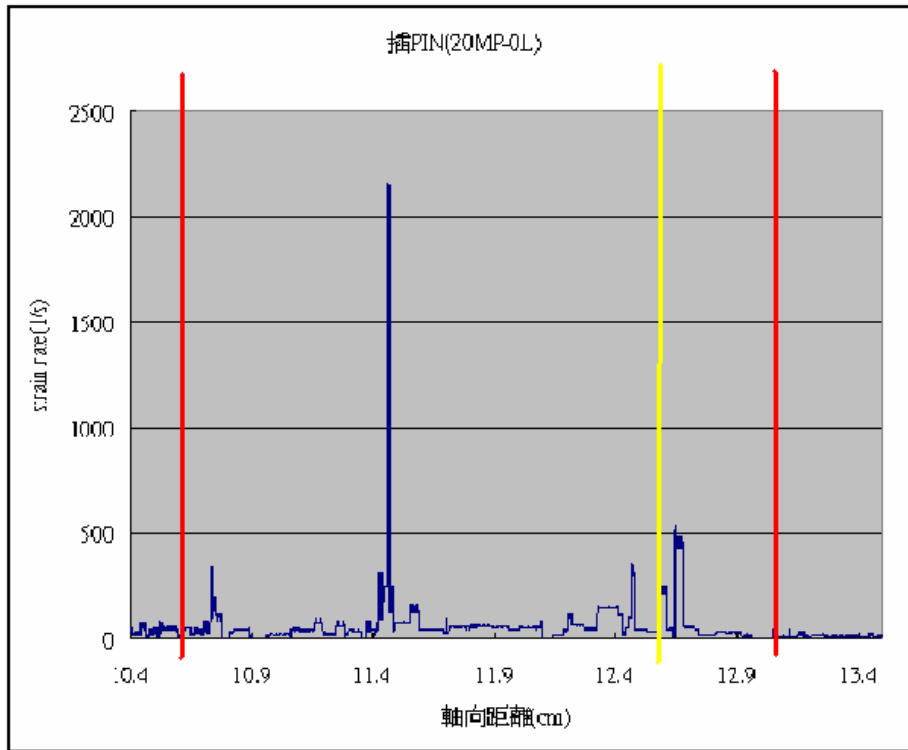


表 29、無 PIN 插栓 (20MP-0L) 面積拉伸比變化表

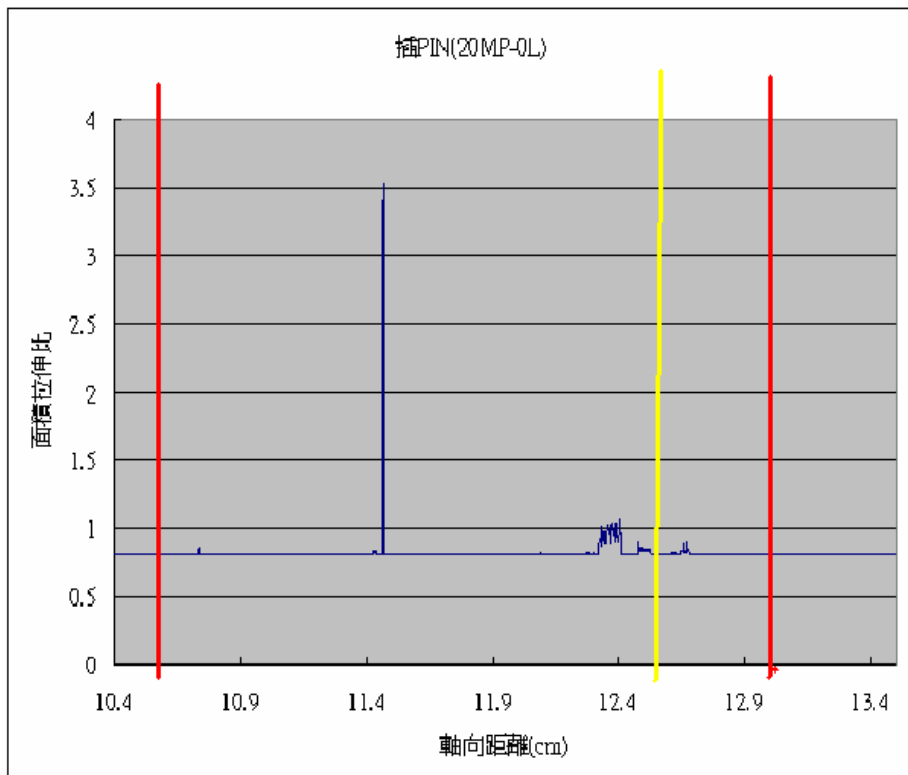


表 30、無 PIN 插栓 (20MP-0L) 能量消耗變化表

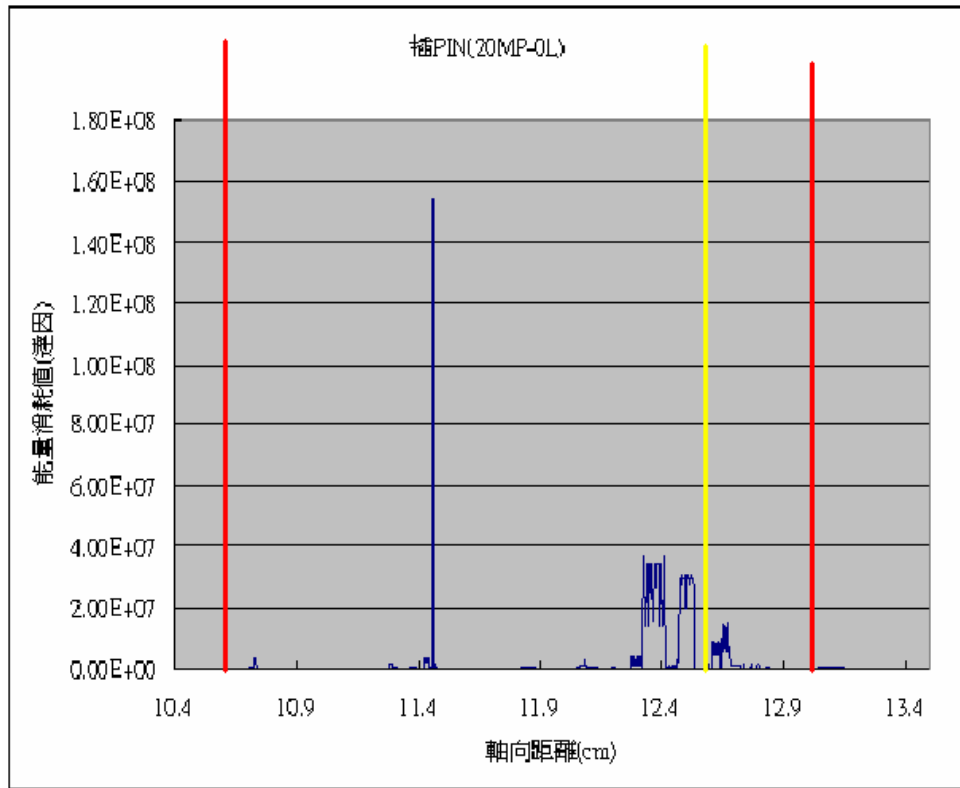


表 31、無 PIN 插栓 (20LP-0L) 延伸率變化表

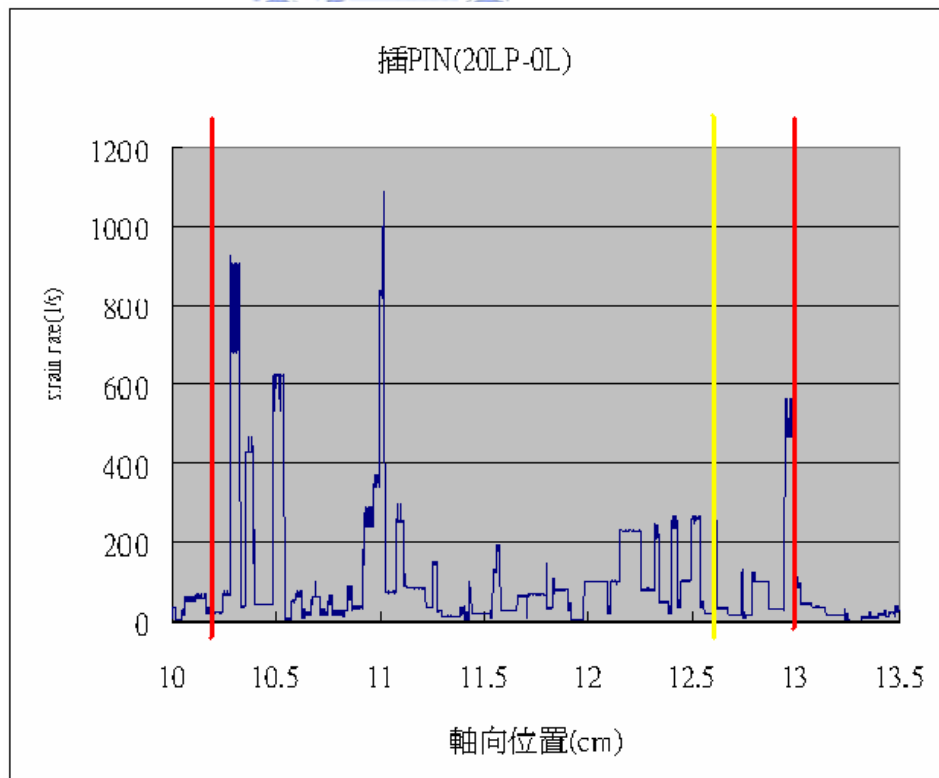


表 32、無 PIN 插栓 (20LP-0L)面積拉伸比變化表

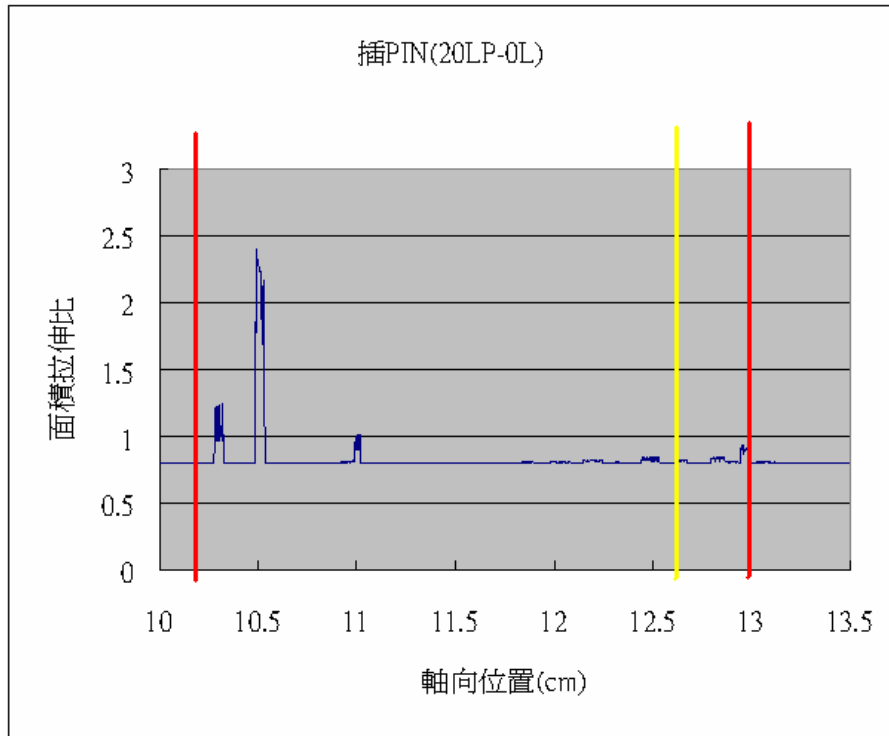
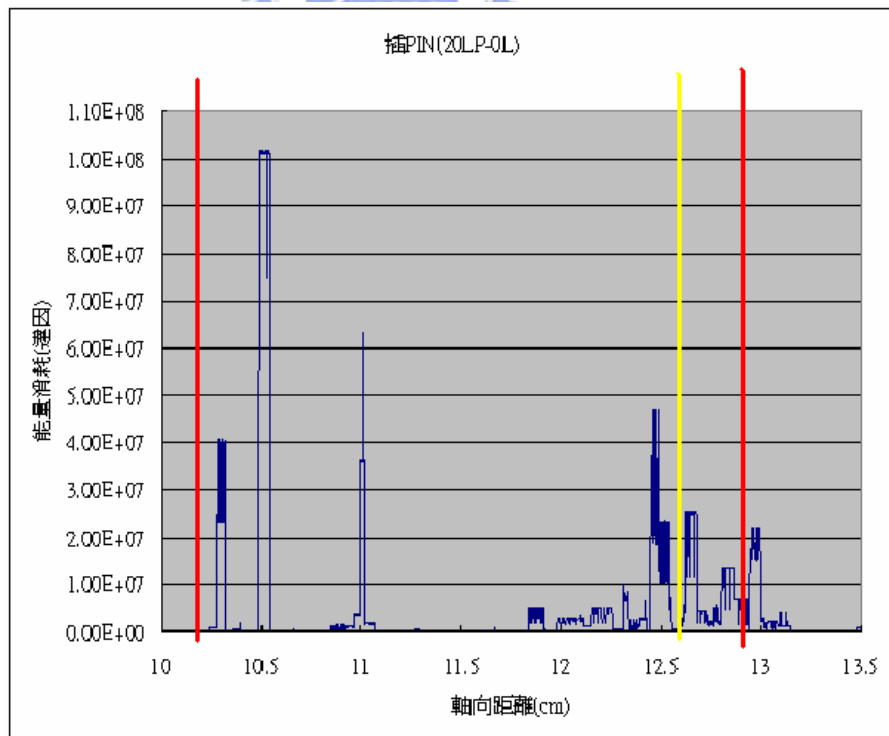


表 33、無 PIN 插栓 (20LP-0L)能量消耗變化表



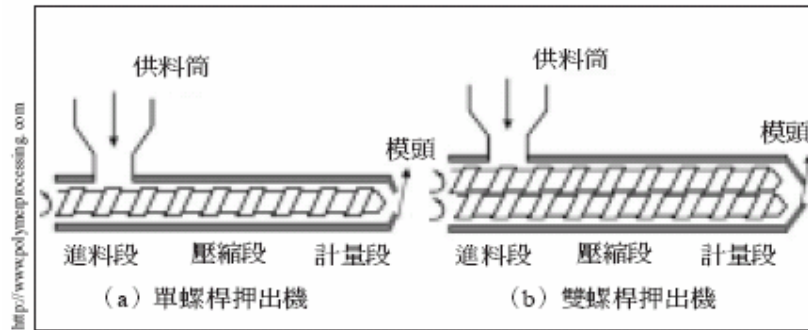


圖1、(a) 單螺桿押出機與 (b) 雙螺桿押出機的內部構造

Ref : Chris Rauwendaal, “Extruder principles and operation/Stevens”, M.

J. ,London/Elsevier Applied Science Publishers, c1985

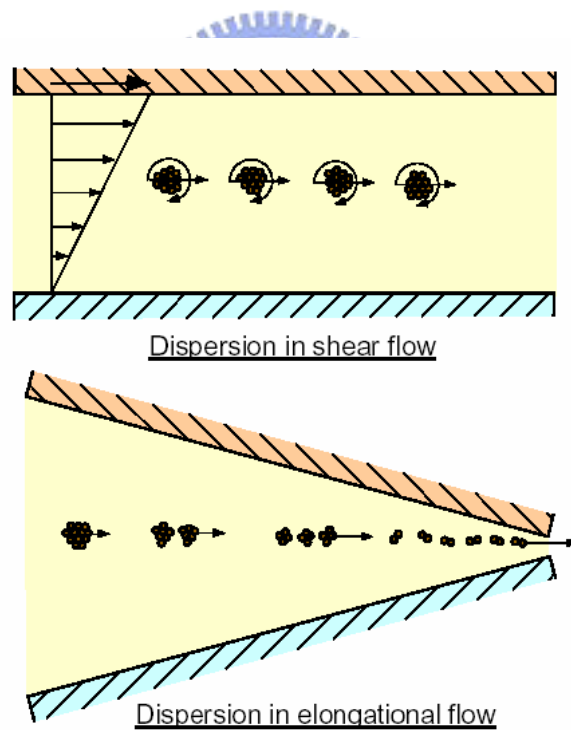


圖 2、簡切流動和延伸流動的不同

Ref : C. Rauwendaal, “New Dispersive Mixers Based on Elongational Flow”,

Plastics Additives and Compounding, August/September, (1999).

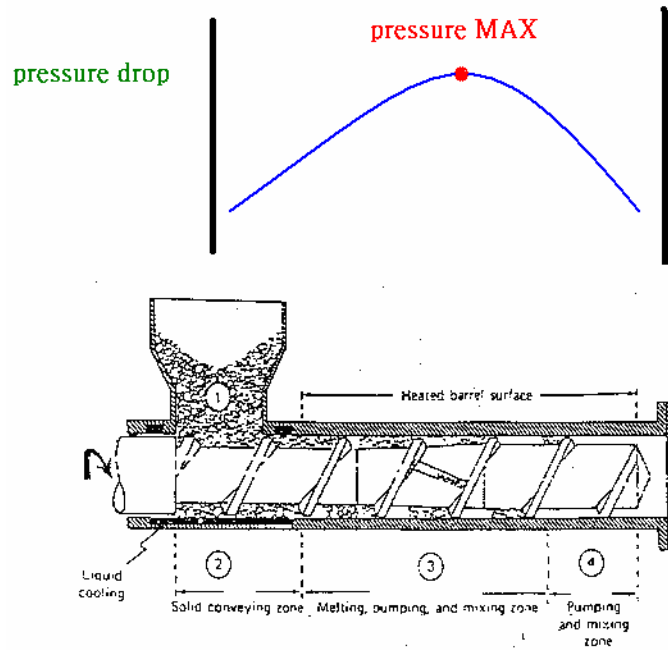


圖 3、一次高壓區示意圖

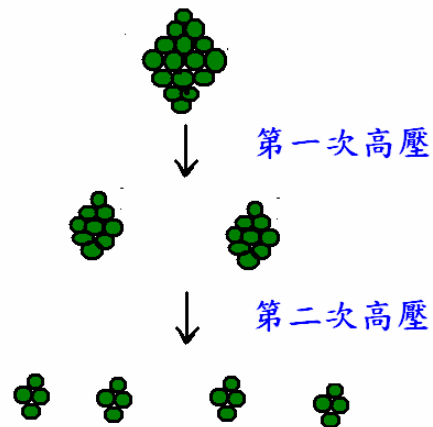


圖 4、多次高壓示意圖

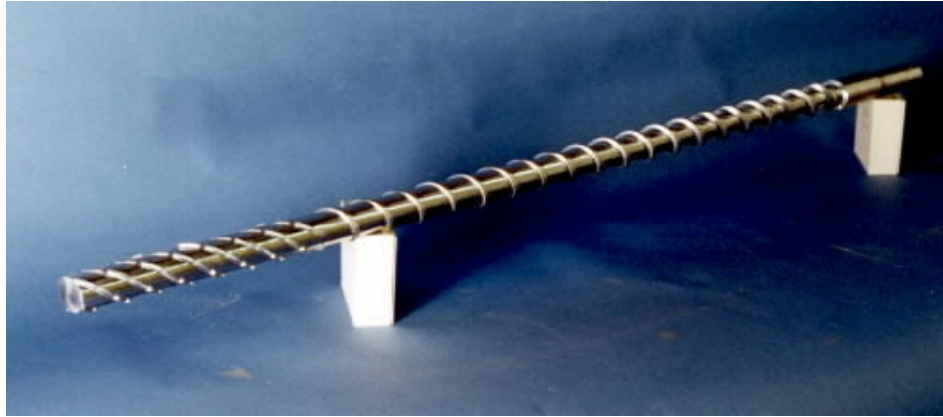


圖 5、整隻螺桿加上 CRD mixer 的圖

Ref : C. Rauwendaal, “Non-Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability” ,SPE ANTECTechnical Papers, 638-641,(2000)

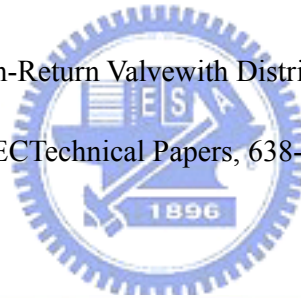


圖 6、 CRD mixer 的圖

Ref : Chris Rauwendaal, “Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability” , ANTEC, (2000)

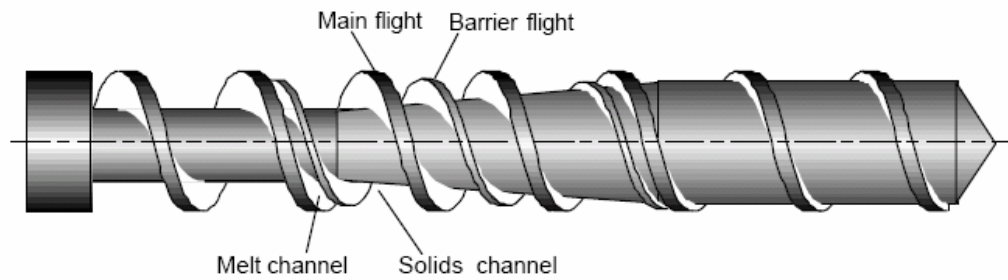


圖 7、Barrier screw 的圖解

Ref : Chris Rauwendaal, “Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability”, ANTEC, (2000)

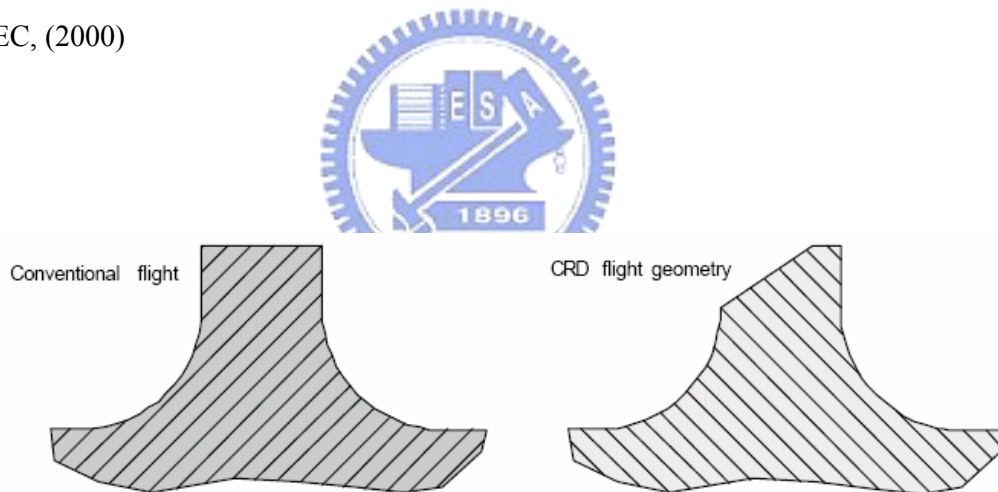


圖 8、標準 Barrier flight 與 CRD Barrier flight 比較圖

Ref : Chris Rauwendaal, “Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability”, ANTEC, (2000)

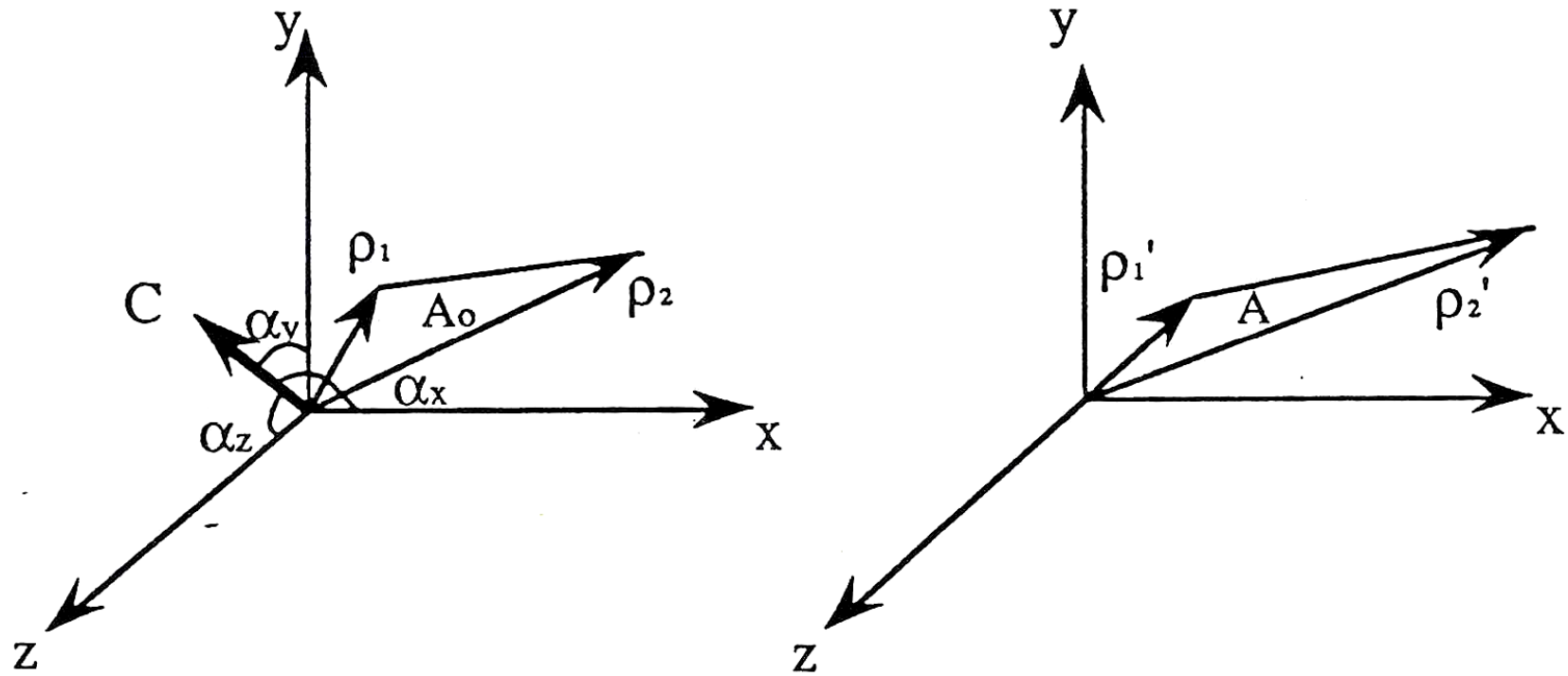


圖 9、在簡單剪切流域中介於位置向量 ρ_1 及位置向量 ρ_2 的流體表面元素，其中(A)為時間 t 及(B)經一段時間 t' 後之變化

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

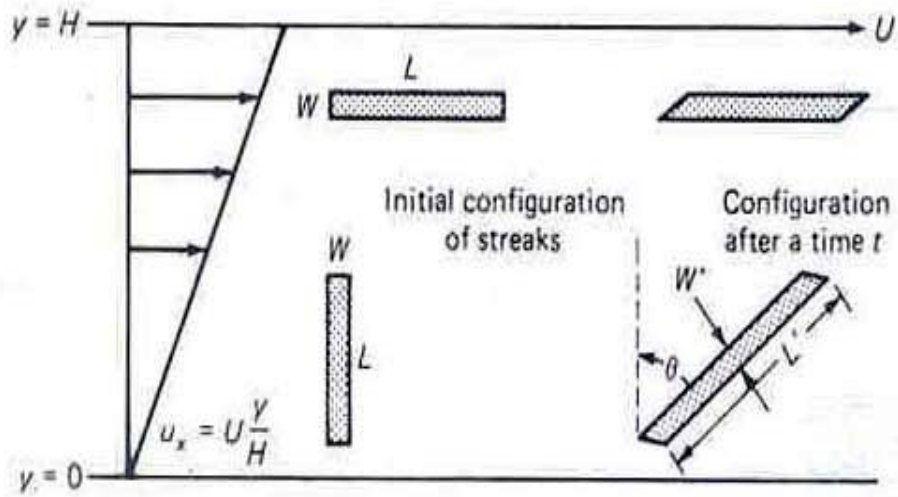


圖 10、在簡單剪切流中兩流體元素之混鍊情形

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

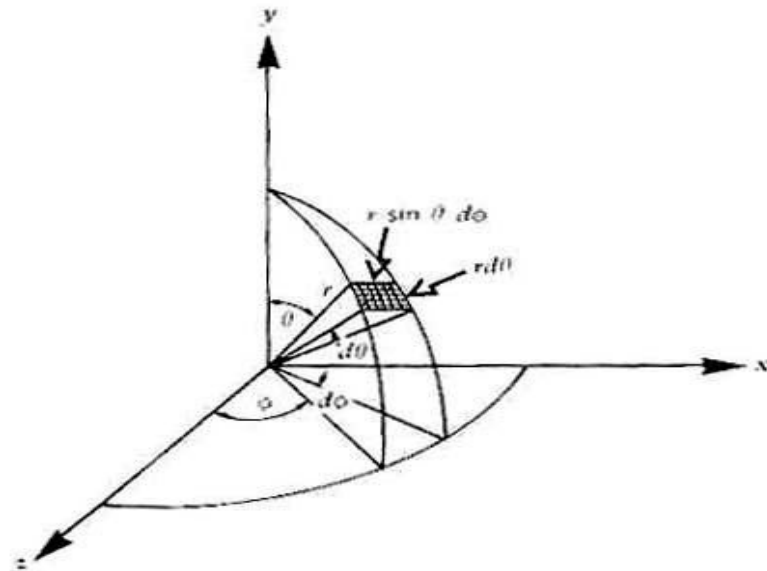


圖 11、單位面積的球座標

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

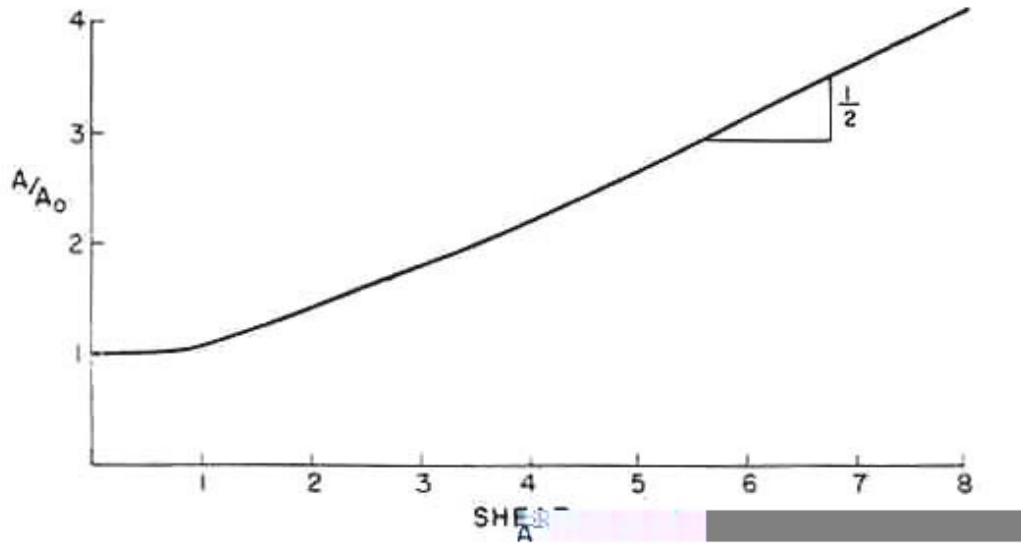


圖 12、在隨機起始方位下界面面積與剪應變的函數圖

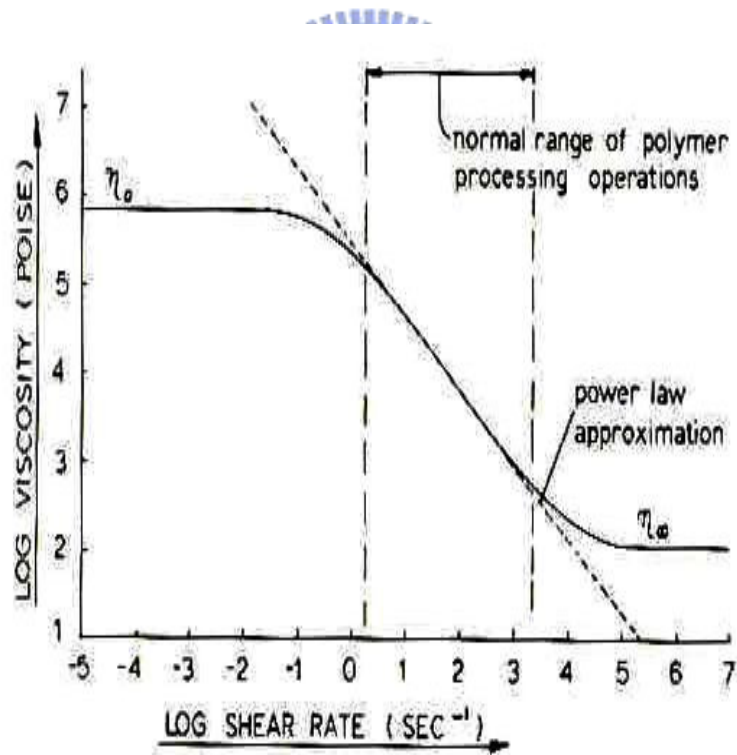


圖 13、一般假塑性流體黏度與剪切率示意圖

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

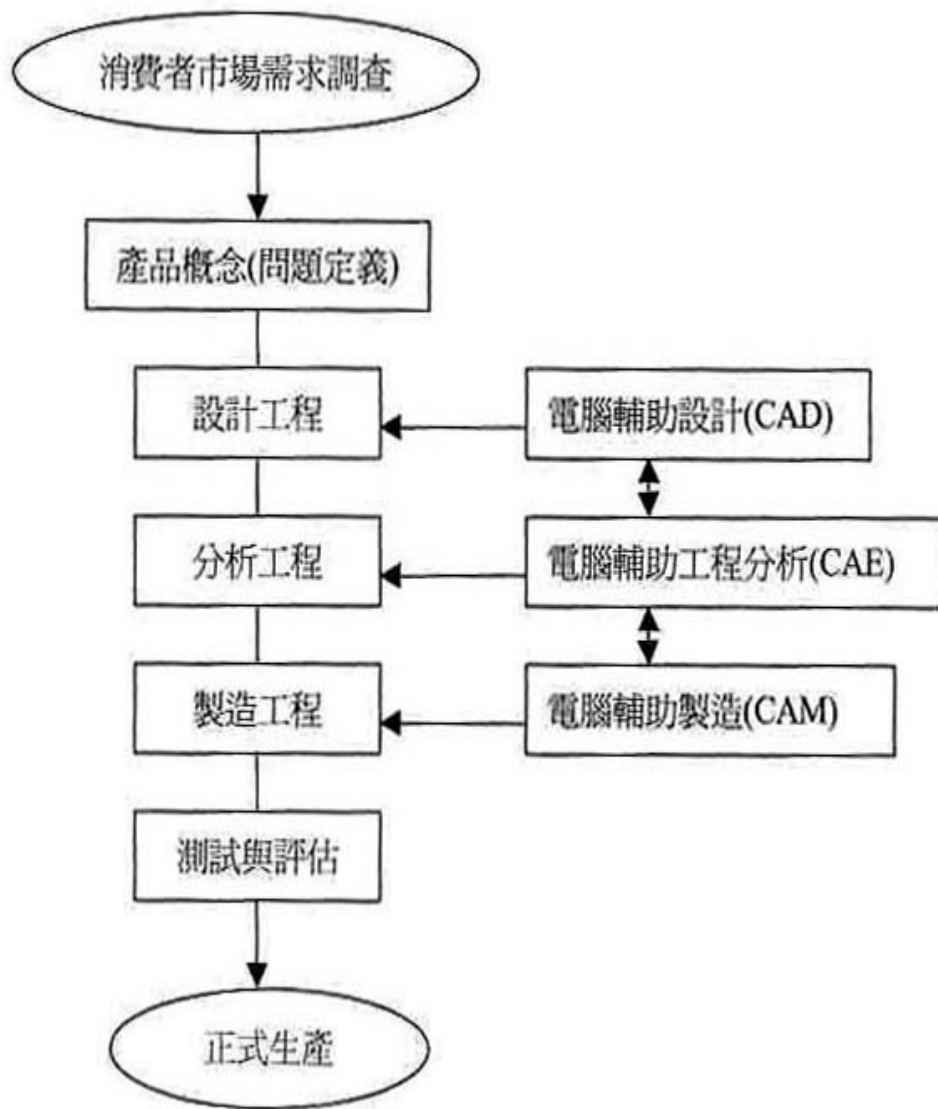
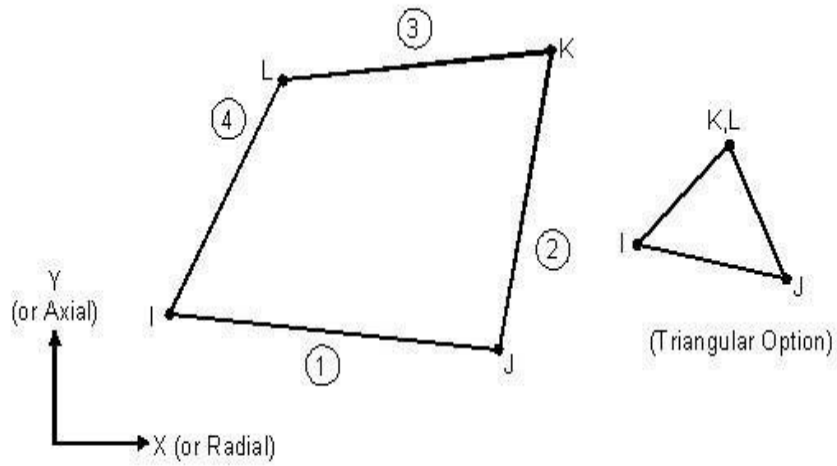


圖 14、電腦在產品生產流程所扮演的角色

FLUID141 2-D Fluid-Thermal Element



FLUID142 3-D Fluid-Thermal Element

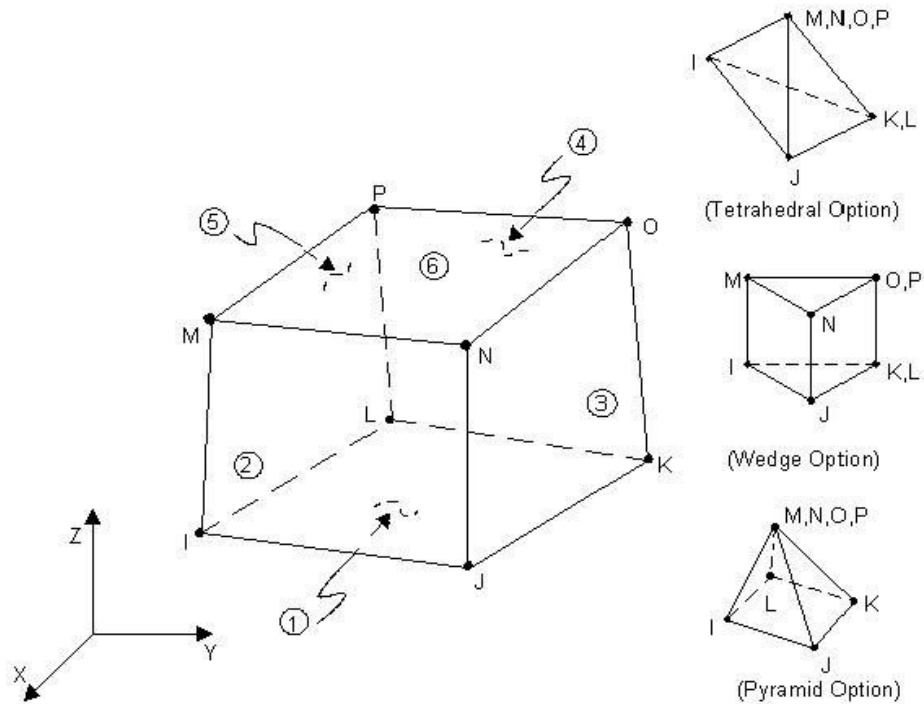


圖 15、ANSYS® FLOTAN 慣用之元素

Ref. : ANSYS On-Line Help>Element Reference>Chapter 3.

Element Characteristics>3.2. Pictorial Summary

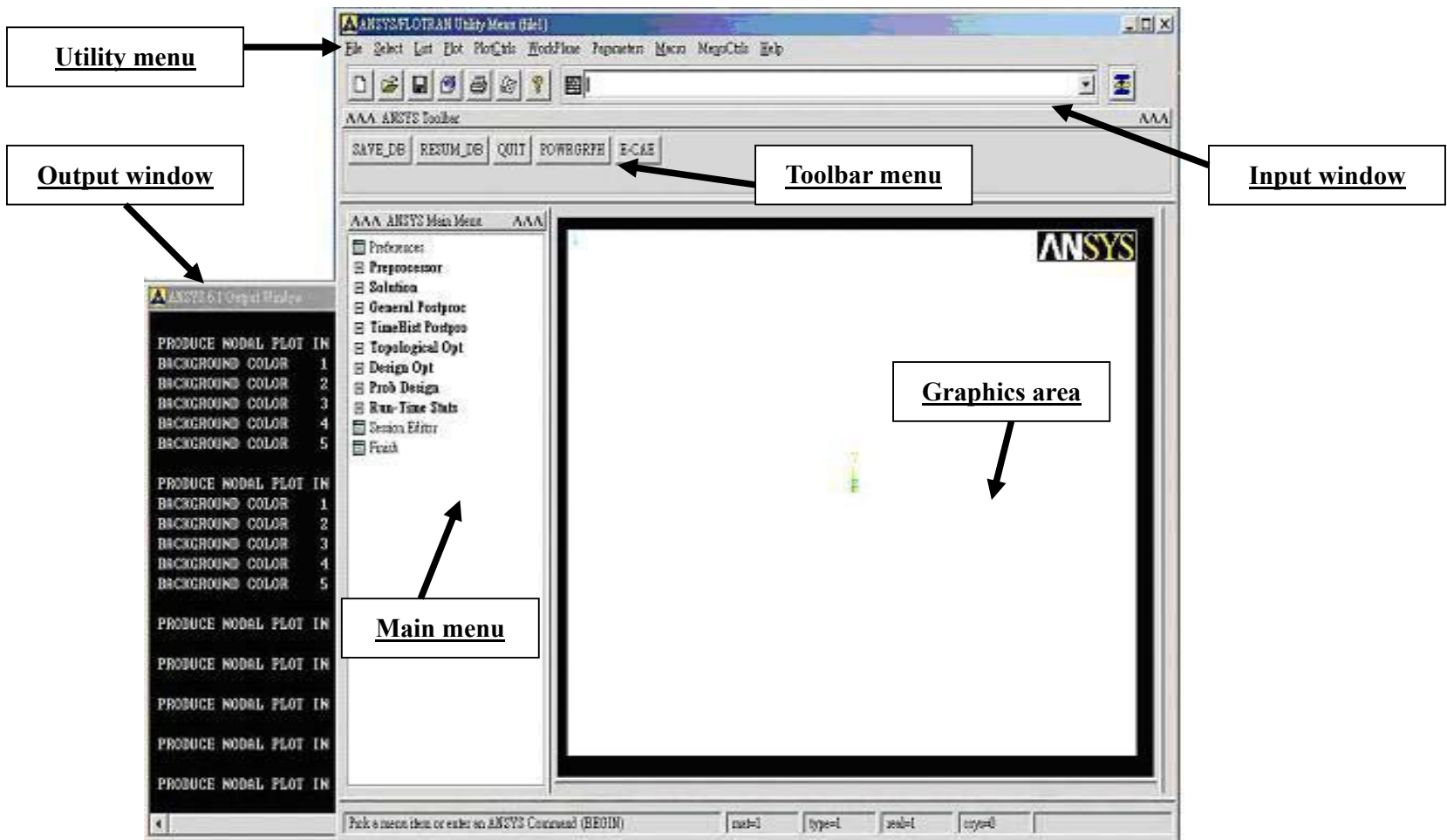
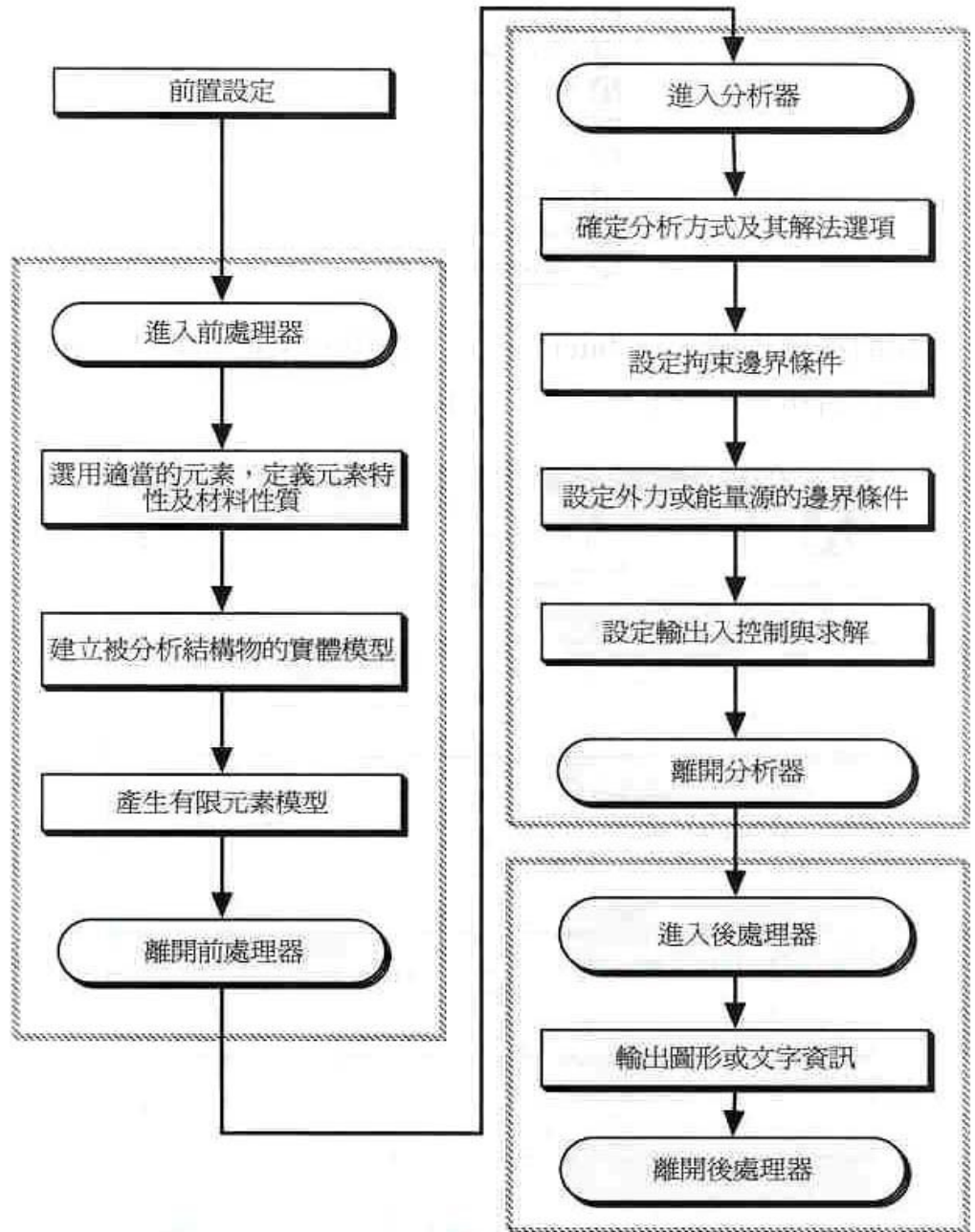


圖 16、ANSYS®使用者圖形介面

圖 17、ANSYS®分析處理作業流程圖

參考
文
獻：康
淵、陳
信吉，
“ANS
YS入
門”，
台北
全華，
民國
91年



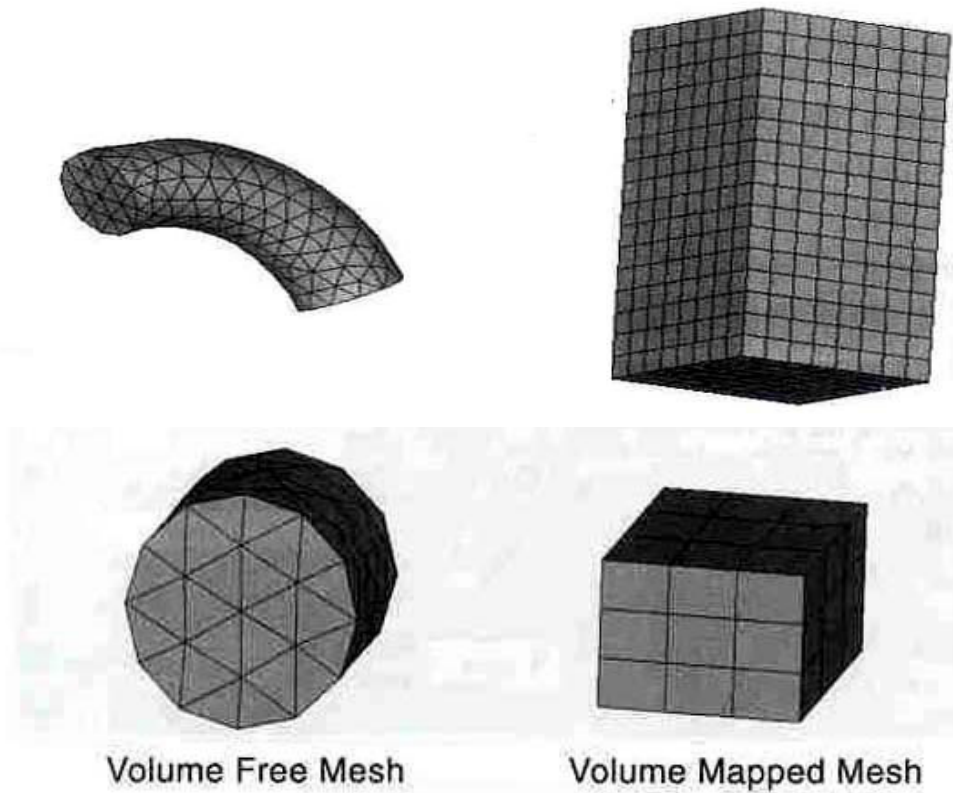


圖 18、自由網格與對應網格

參考文獻：康淵、陳信吉，“ANSYS 入門”，台北全華，民國 91 年

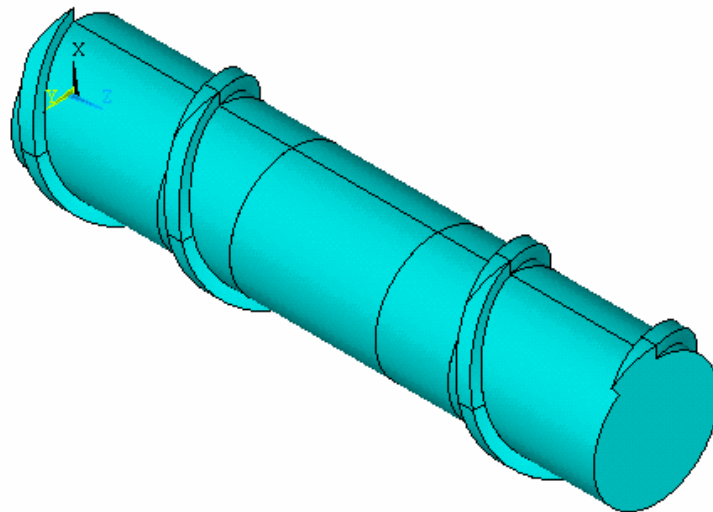


圖 19、無 PIN 垂直流道(org)

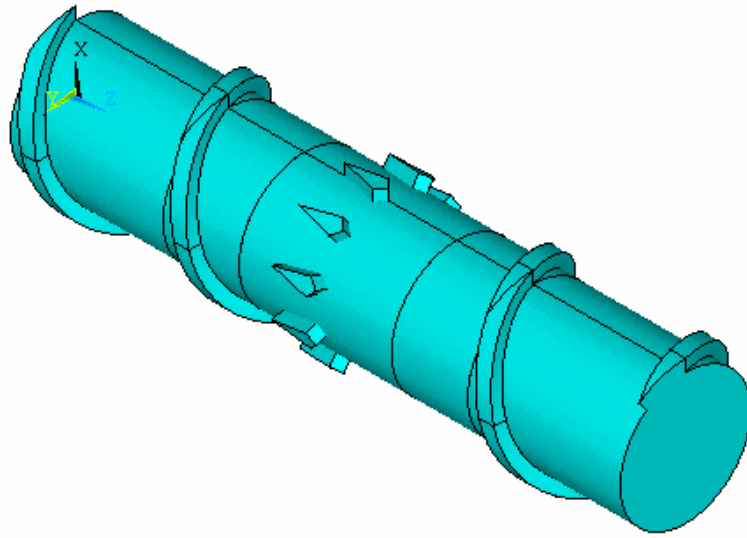


圖 20、10PIN 垂直流道(10SP)

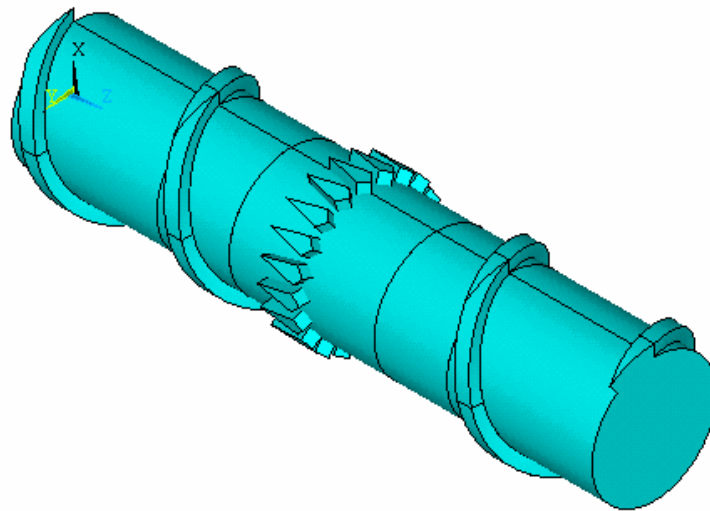


圖 21、20PIN 垂直流道(20SP)

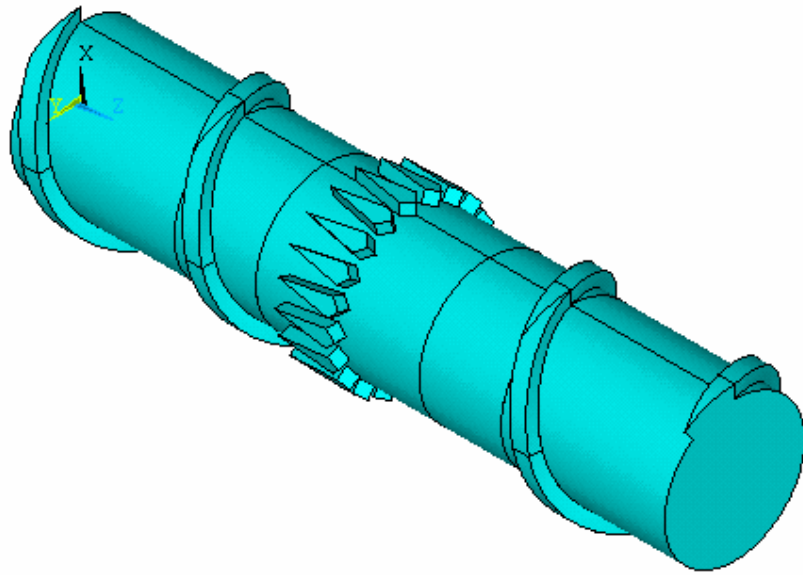


圖 22、20PIN 垂直流道(20MP)

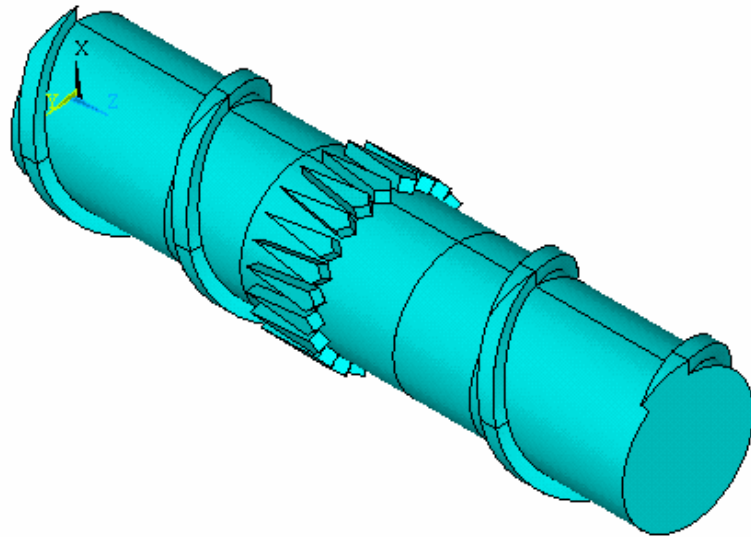


圖 23、20PIN 垂直流道(20LP)

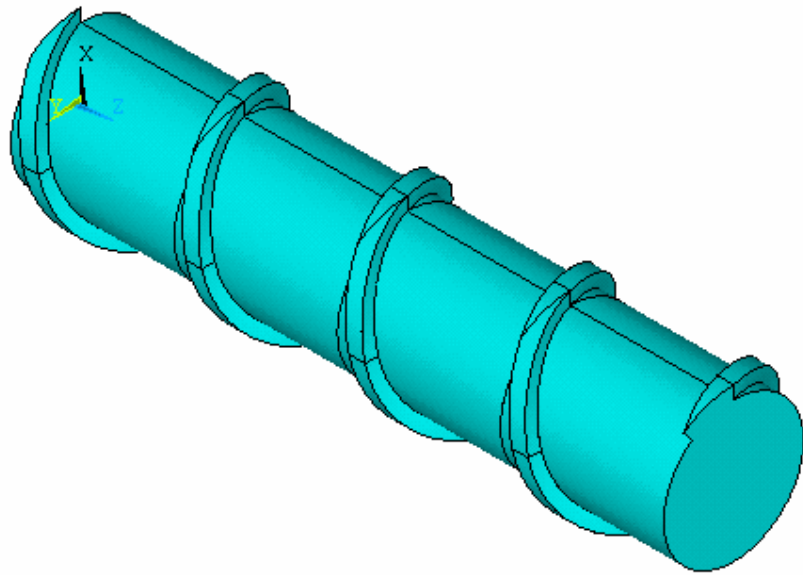


圖 24、無 PIN 垂直流道(0L)

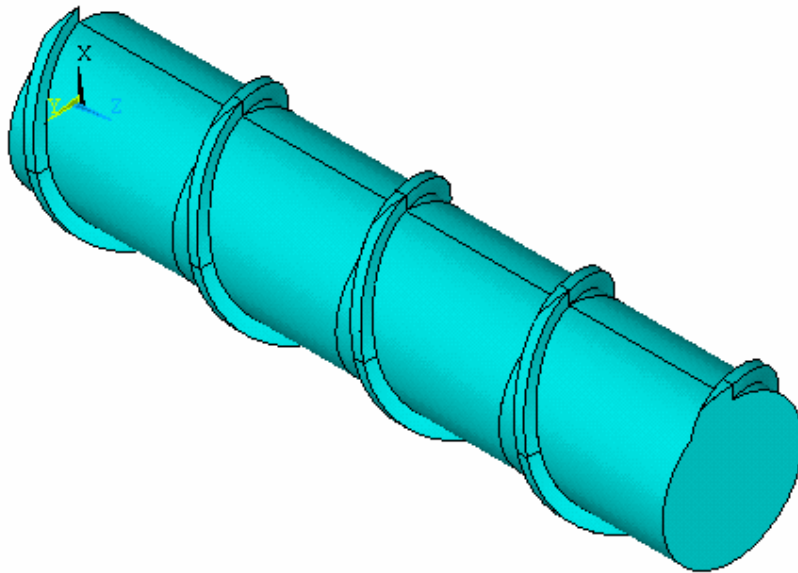


圖 25、無 PIN 楔形流道(0.1L)

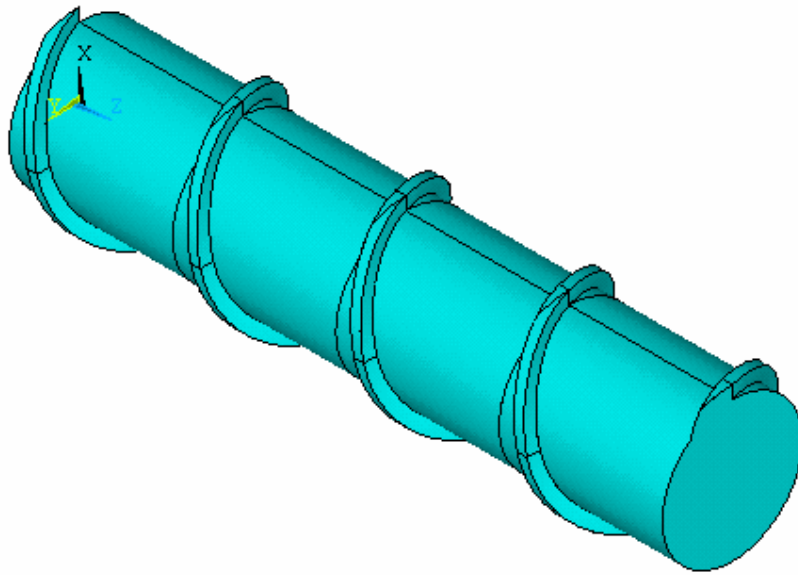


圖 26、無 PIN 楔型流道(0.2L)

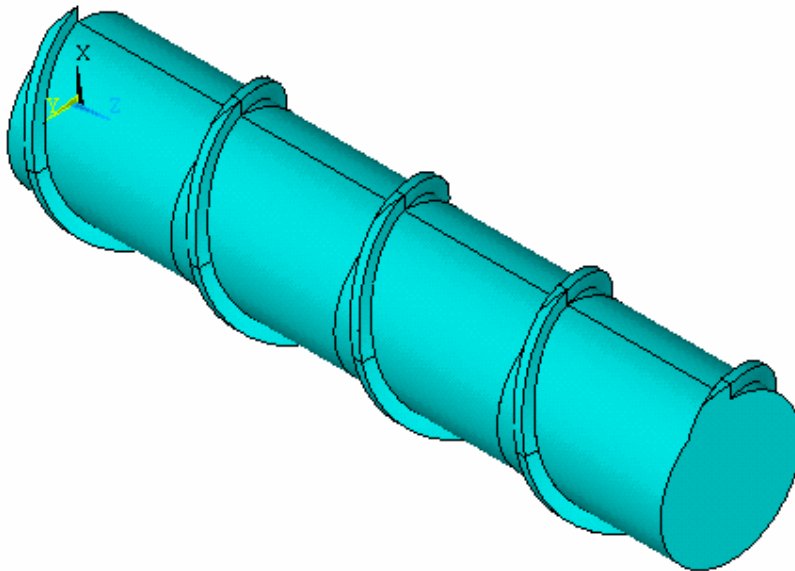


圖 27、無 PIN 楔形流道(0.3L)

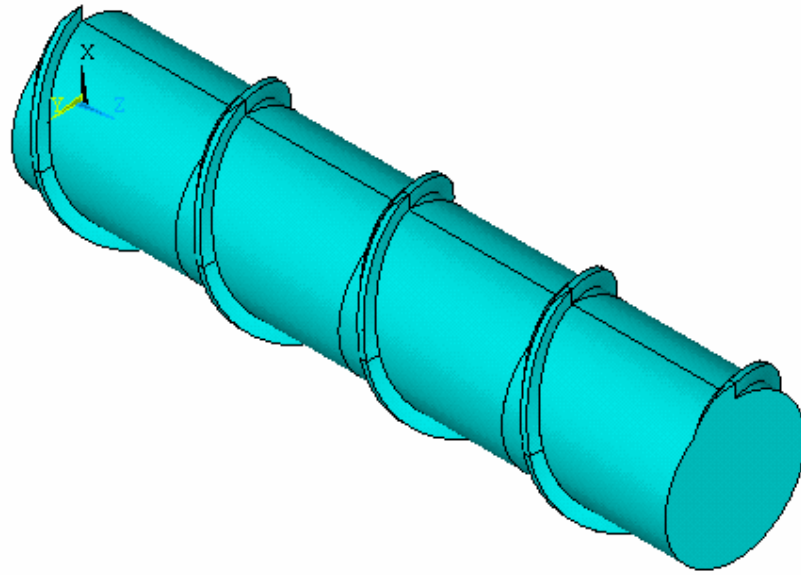


圖 28、無 PIN 楔形流道(0.4L)

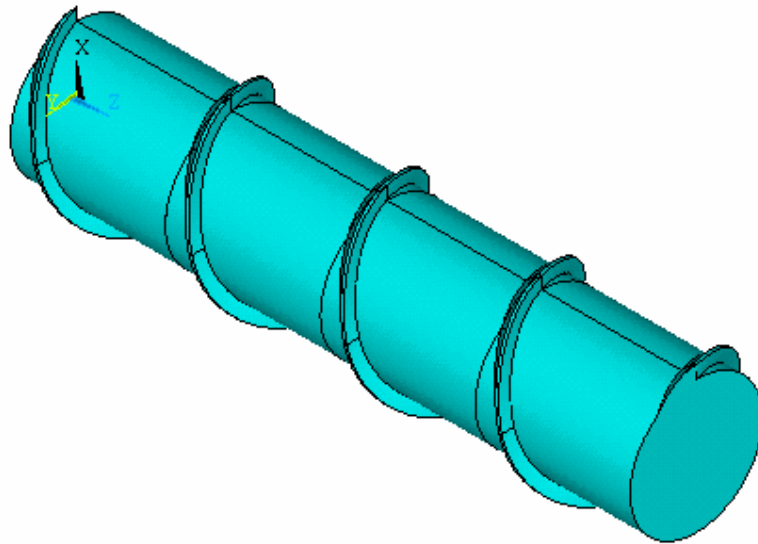


圖 29、無 PIN 楔形流道(0.5L)

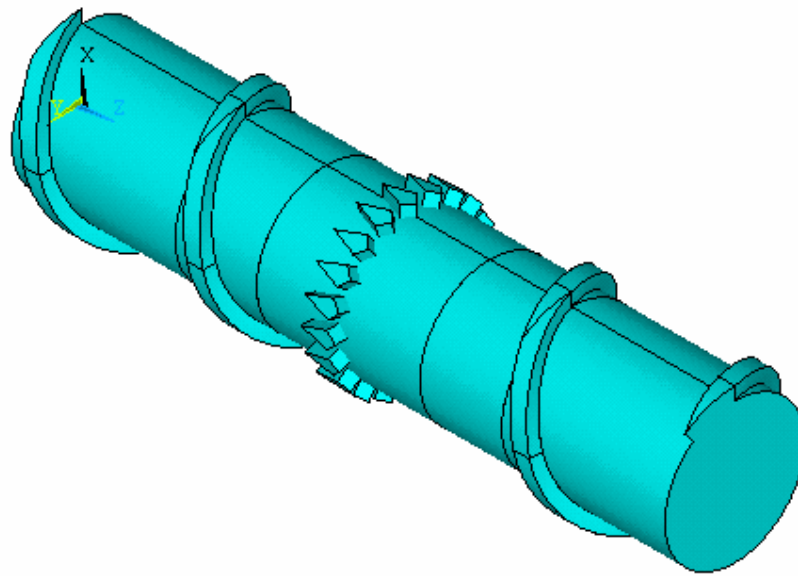


圖 30、20PIN 垂直流道(20SP-0L)

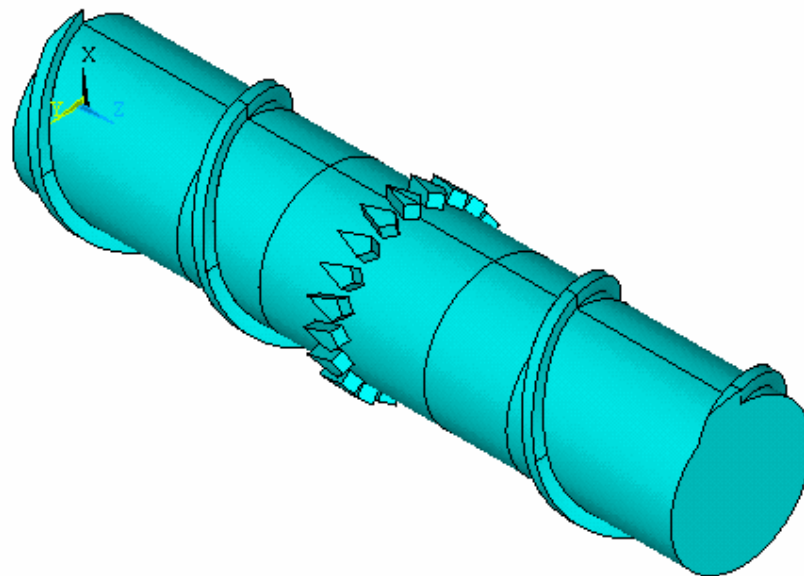


圖 31、20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)

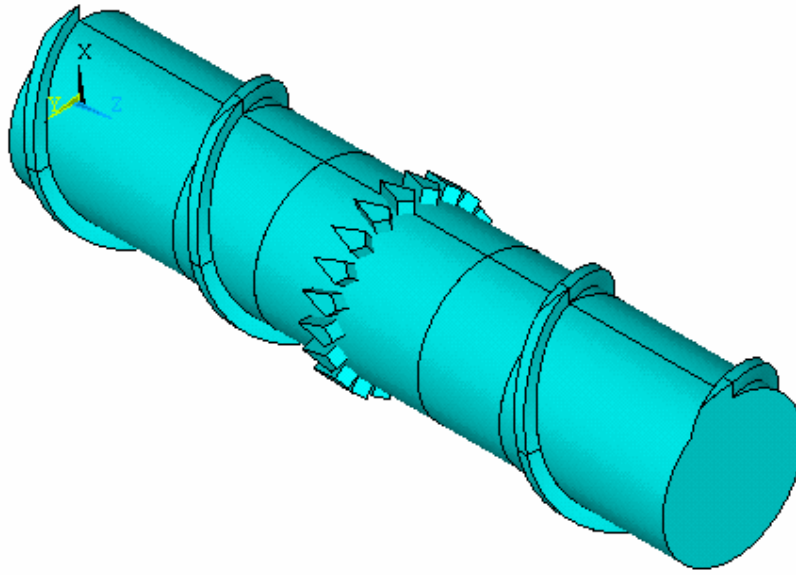


圖 32、20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)

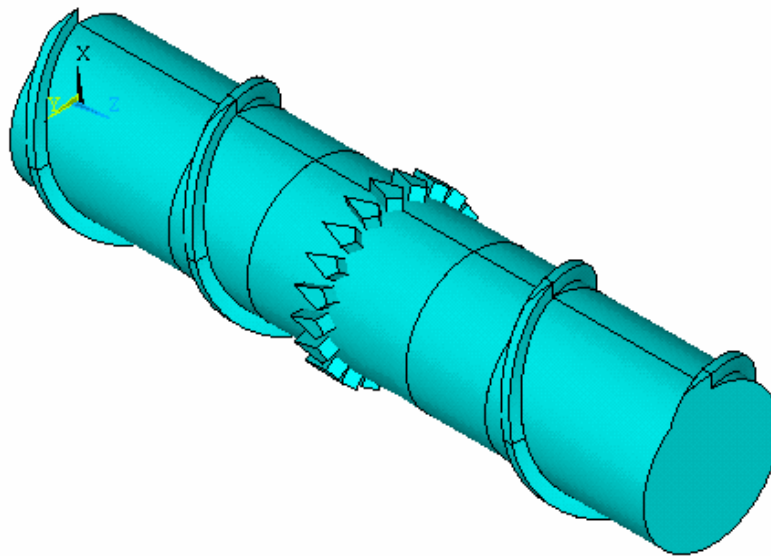


圖 33、20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)

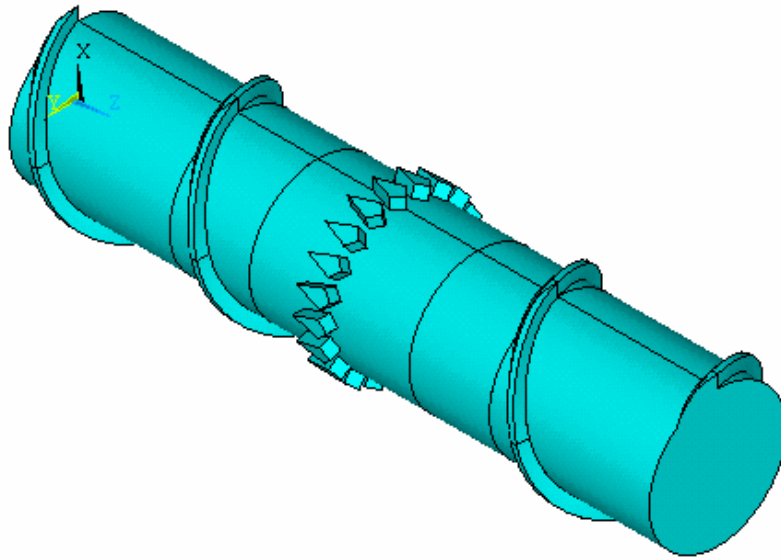


圖 34、20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)

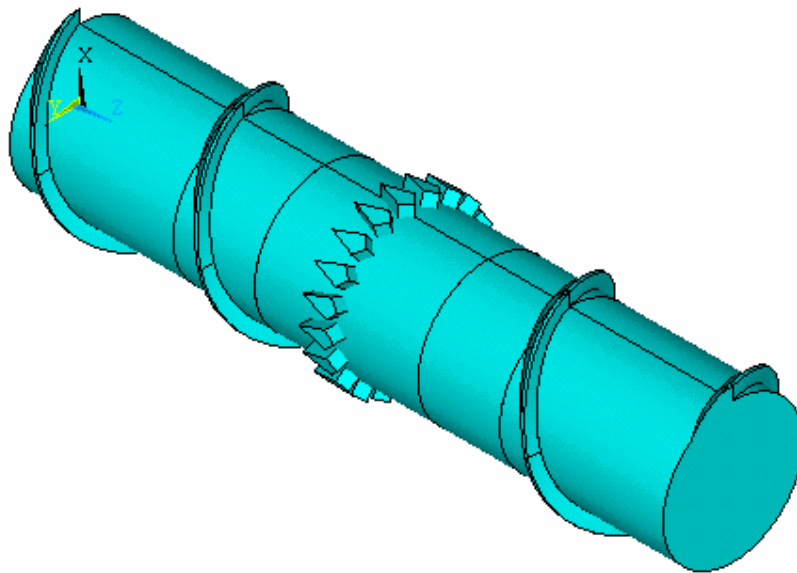


圖 35、20PIN 楔形流道(20SSP-0.5L)

VSUM
SMX =26.6

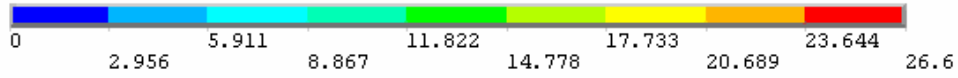
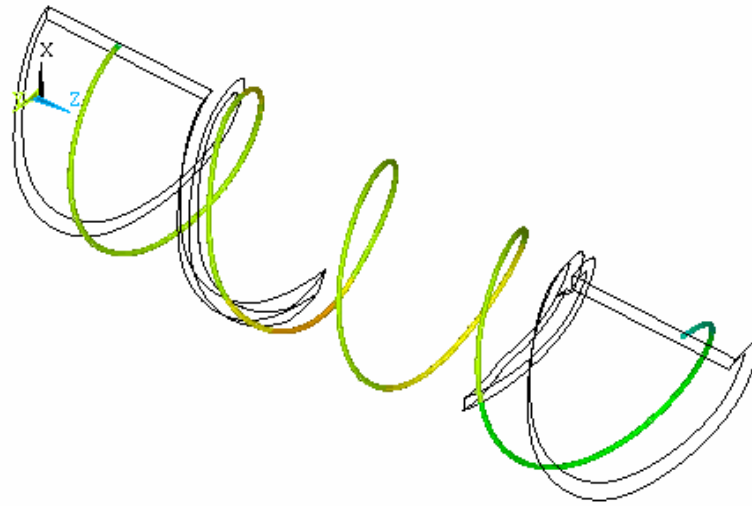


圖 36、無 PIN 垂直流道(org)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

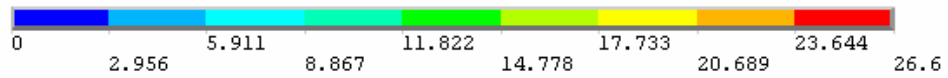
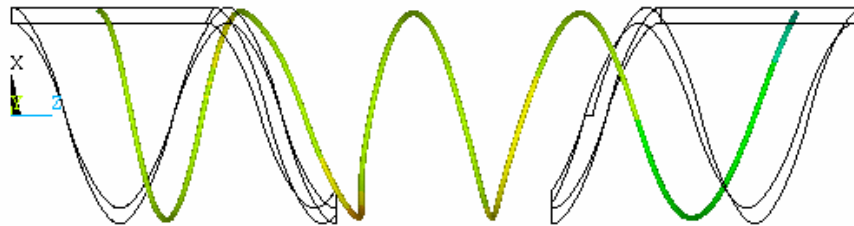


圖 37、無 PIN 垂直流道(org)正視圖

VSUM
SMX =26.6

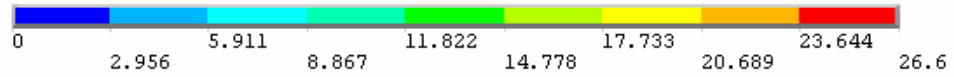
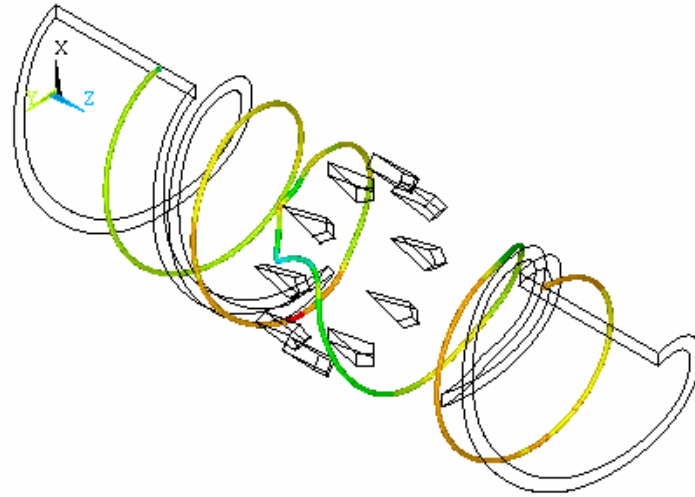


圖 38、10PIN 垂直流道(10SP)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

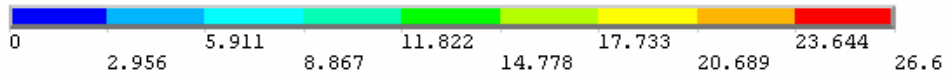
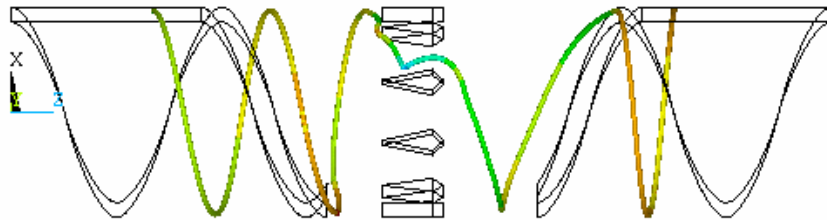


圖 39、10PIN 垂直流道(10SP)正視圖

VSUM
SMX =26.6

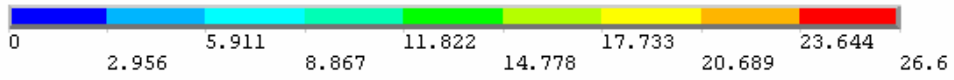
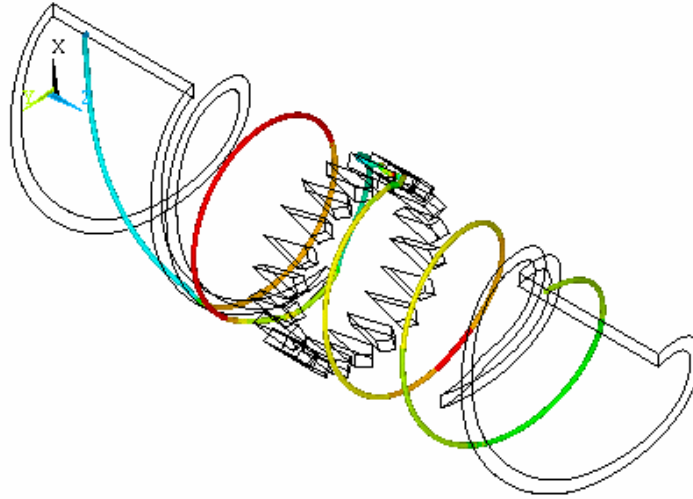


圖 40-1、20PIN 垂直流道(20SP)斜視圖(1)

VSUM
SMX =26.6

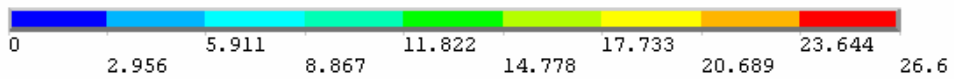
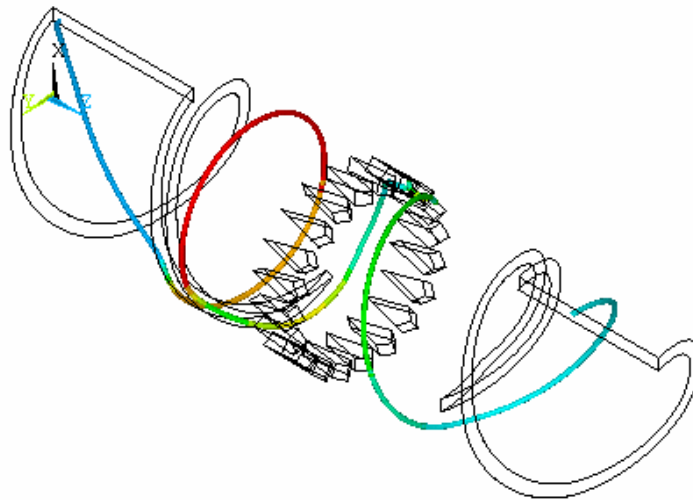


圖 40-2、20PIN 垂直流道(20SP)斜視圖(2)

VSUM
SMX =26.6

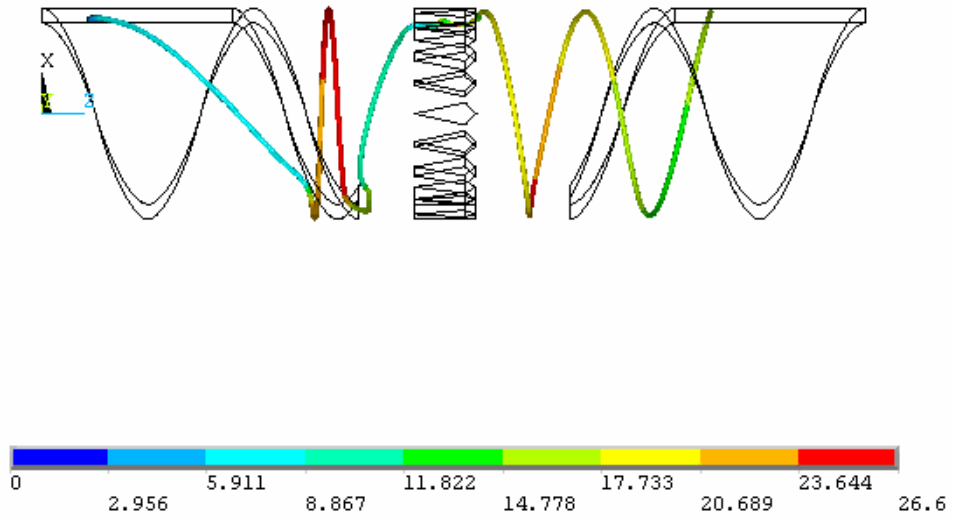


圖 41、20PIN 垂直流道(20SP)正視圖(1)

VSUM
SMX =26.6

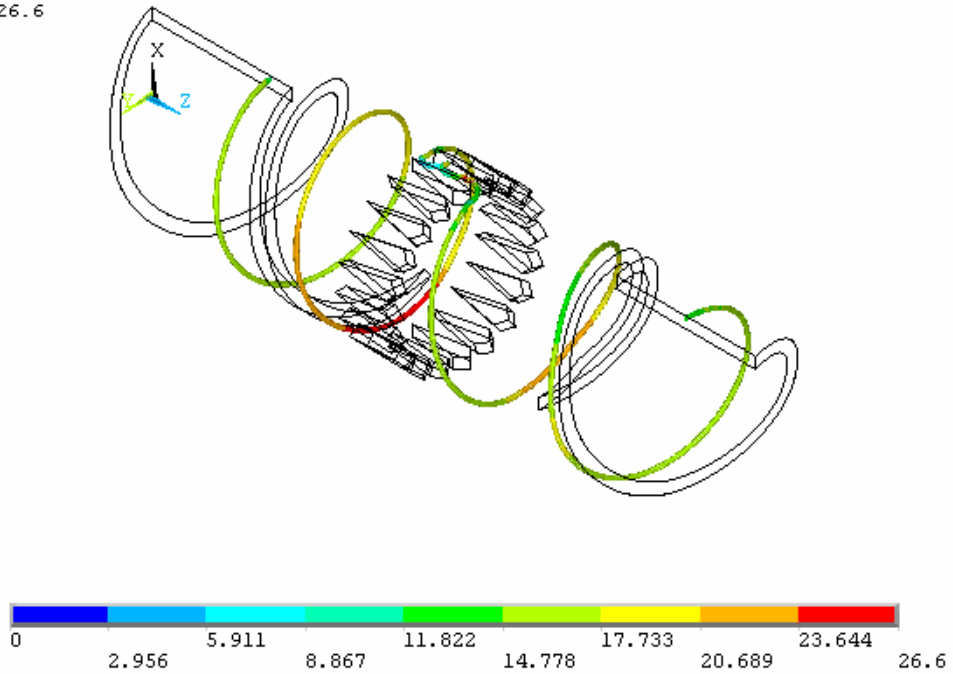


圖 42-1、20PIN 垂直流道(20MP)斜視圖(1)

VSUM
SMX =26.6

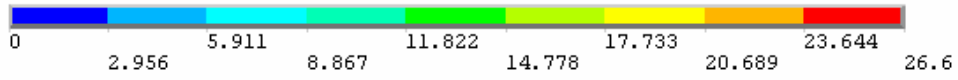
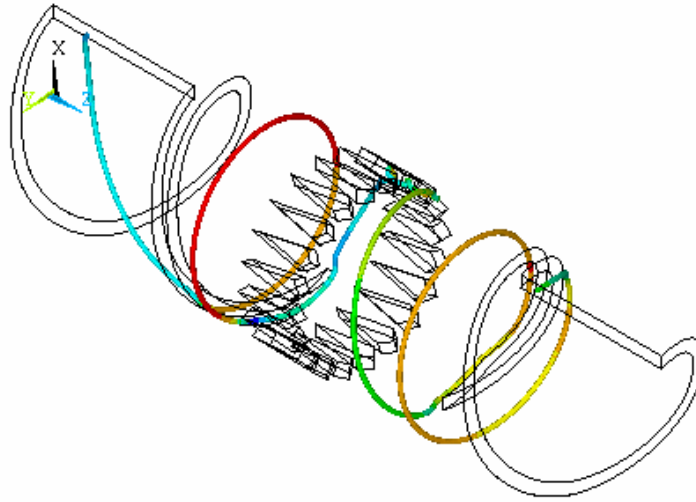


圖 42-2、20PIN 垂直流道(20MP)斜視圖(2)



VSUM
SMX =26.6

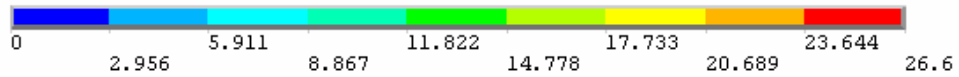
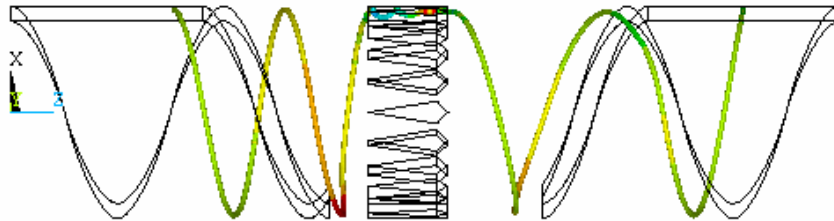


圖 43、20PIN 垂直流道(20MP)正視圖(1)

VSUM
SMX =26.6

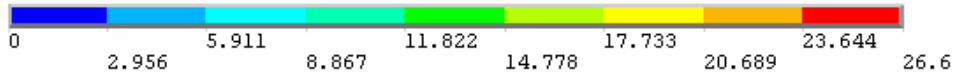
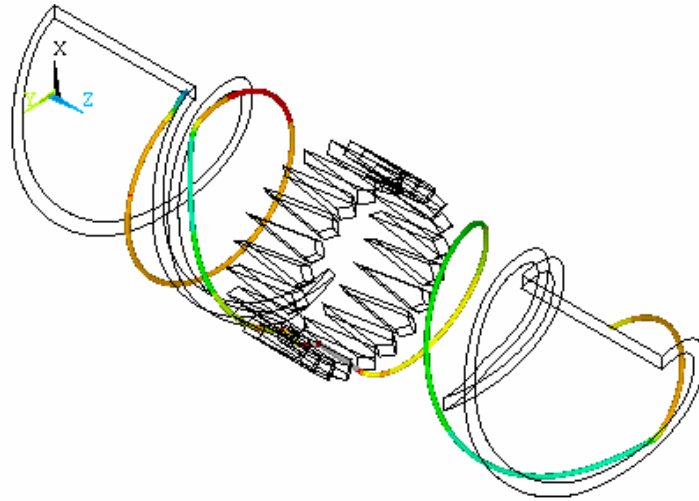
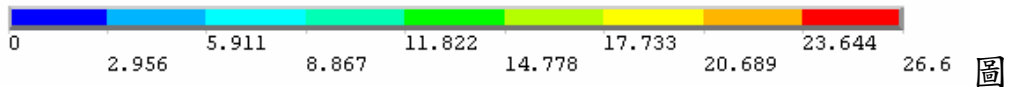
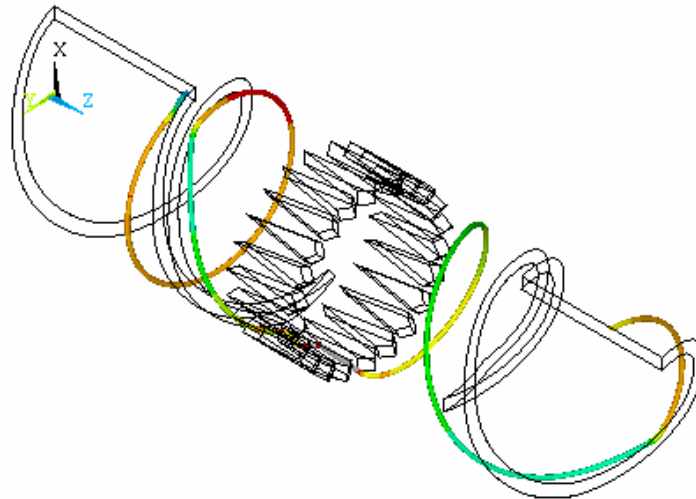


圖 44-1、20PIN 垂直流道(20LP)斜視(1)



VSUM
SMX =26.6



圖

44-2、20PIN 垂直流道(20LP)斜視圖(2)

VSUM
SMX =26.6

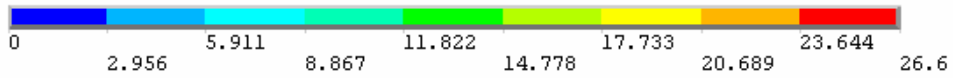
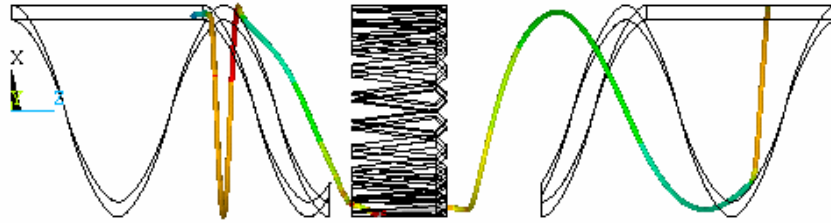


圖 45、20PIN 垂直流道(20LP)正視圖(1)

VSUM
SMX =26.6

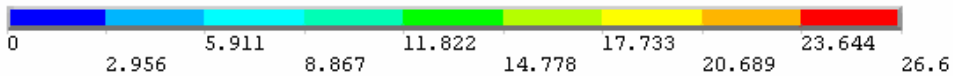


圖 46、無 PIN 垂直流道(0L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

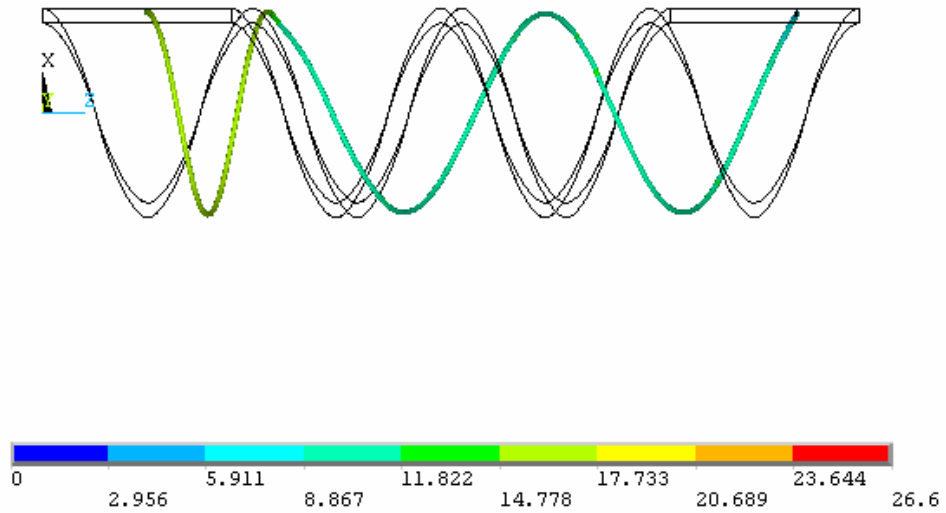


圖 47、無 PIN 垂直流道(0L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

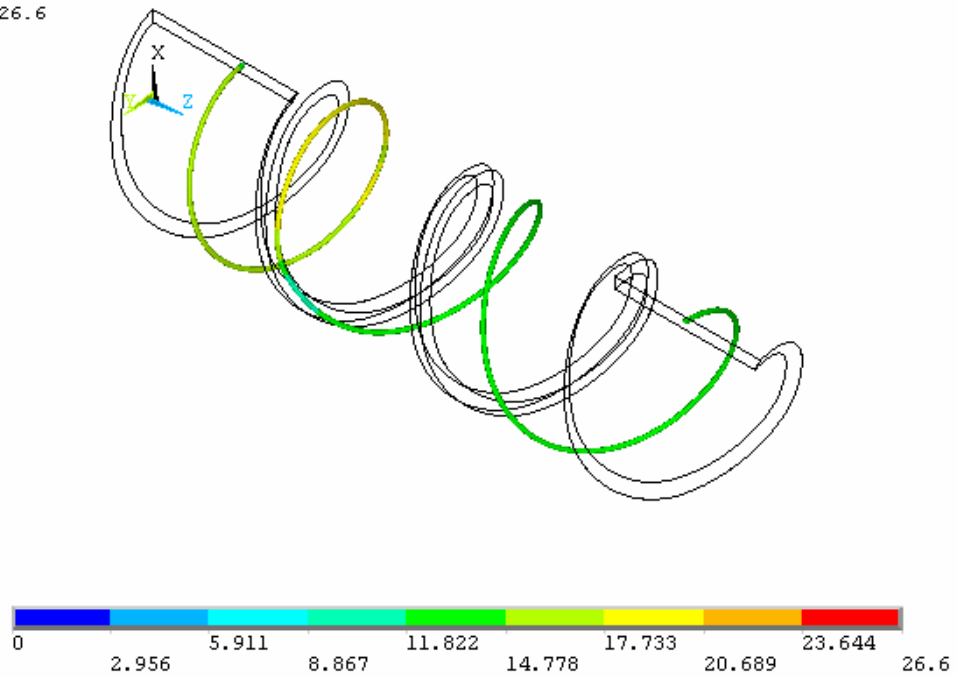


圖 48、無 PIN 楔行流道(0.1L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

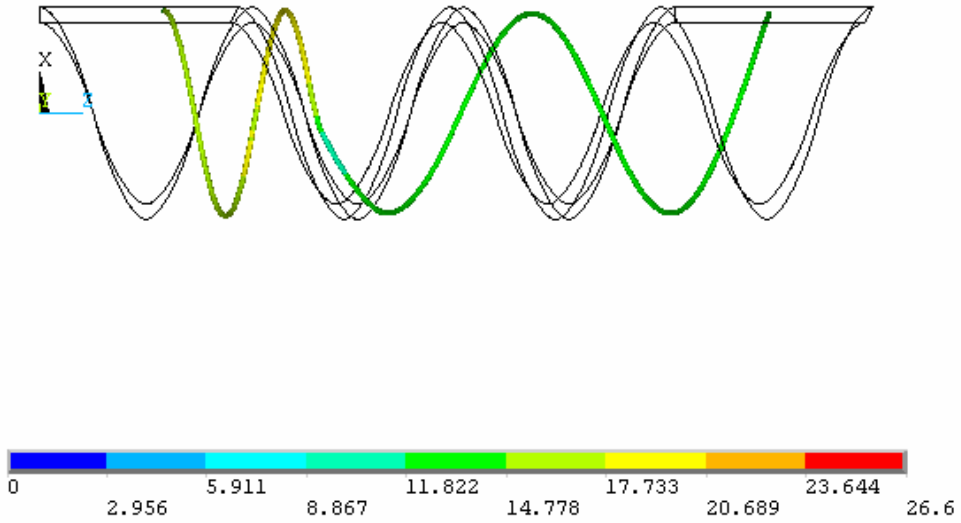


圖 49、無 PIN 楔形流道(0.1L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

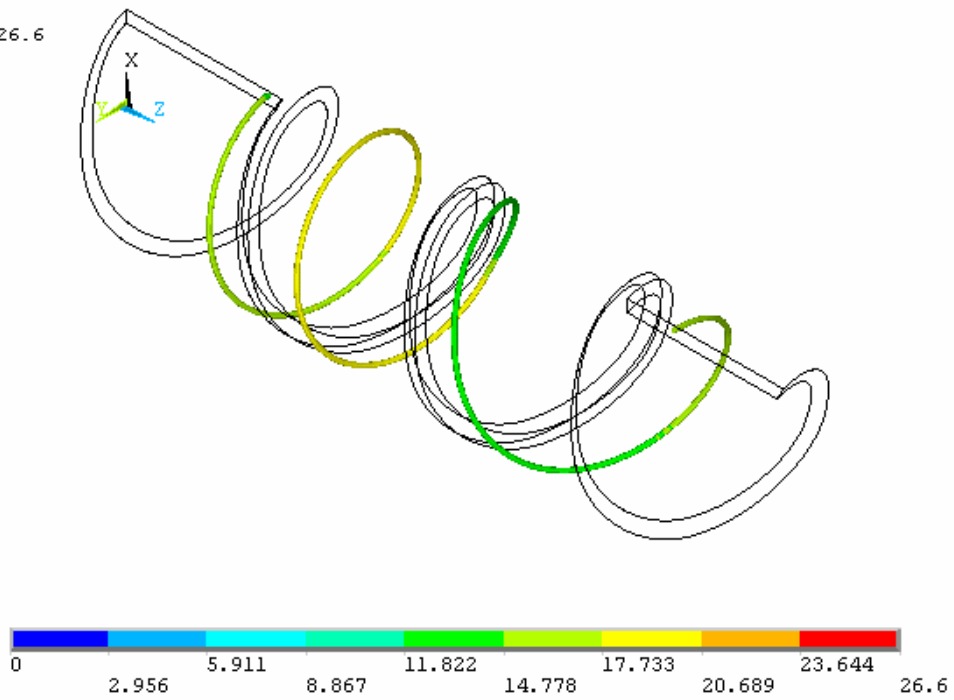


圖 50、無 PIN 楔型流道(0.2L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

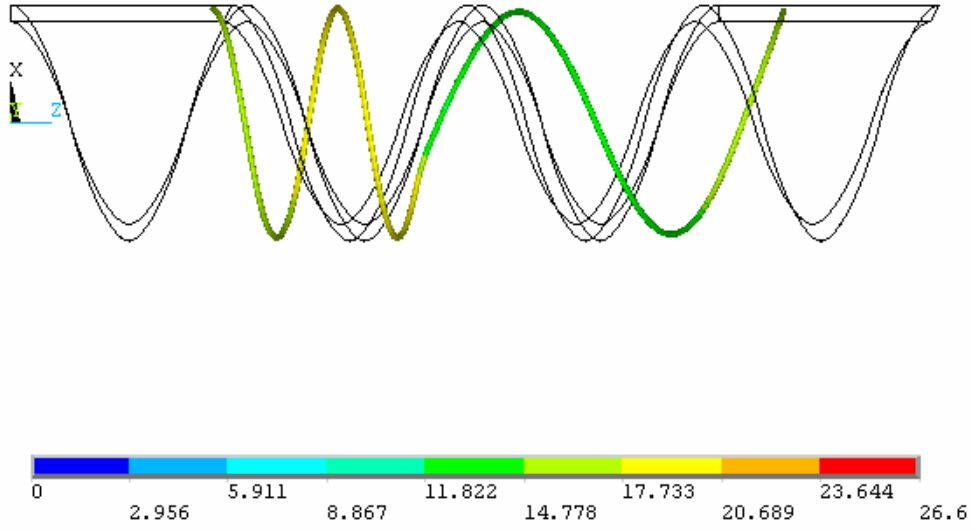


圖 51、無 PIN 楔型流道(0.2L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

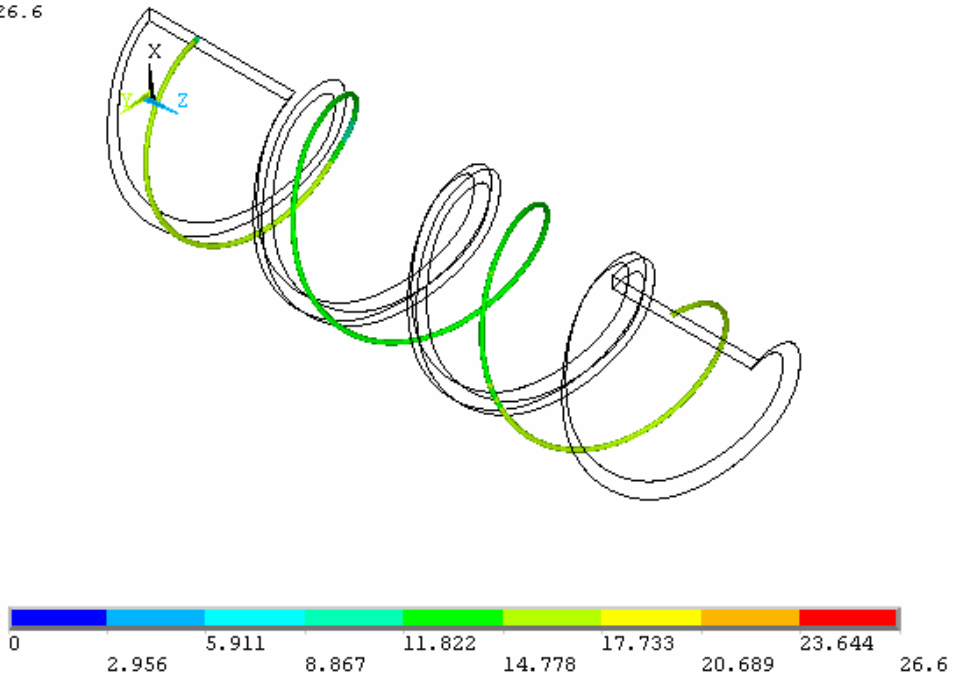


圖 52、無 PIN 楔形流道(0.3L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

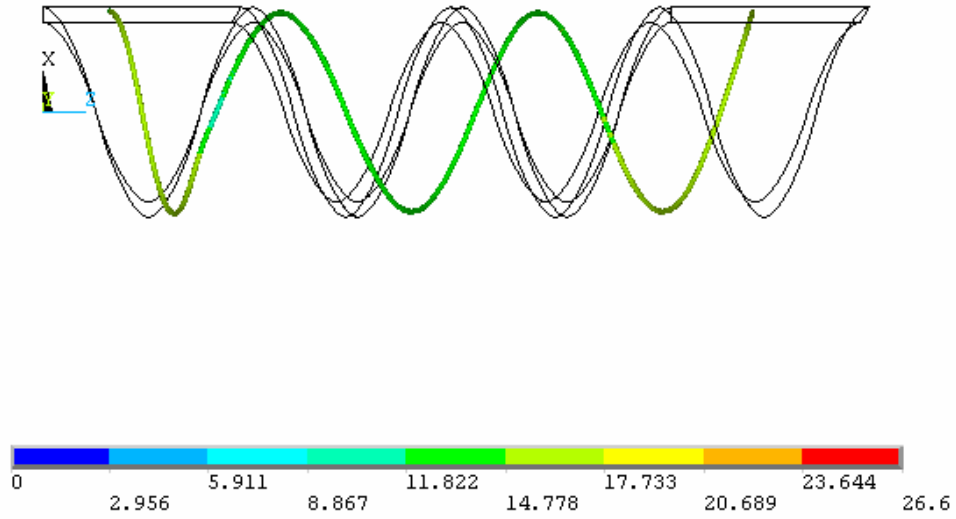


圖 53、無 PIN 楔形流道(0.3L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

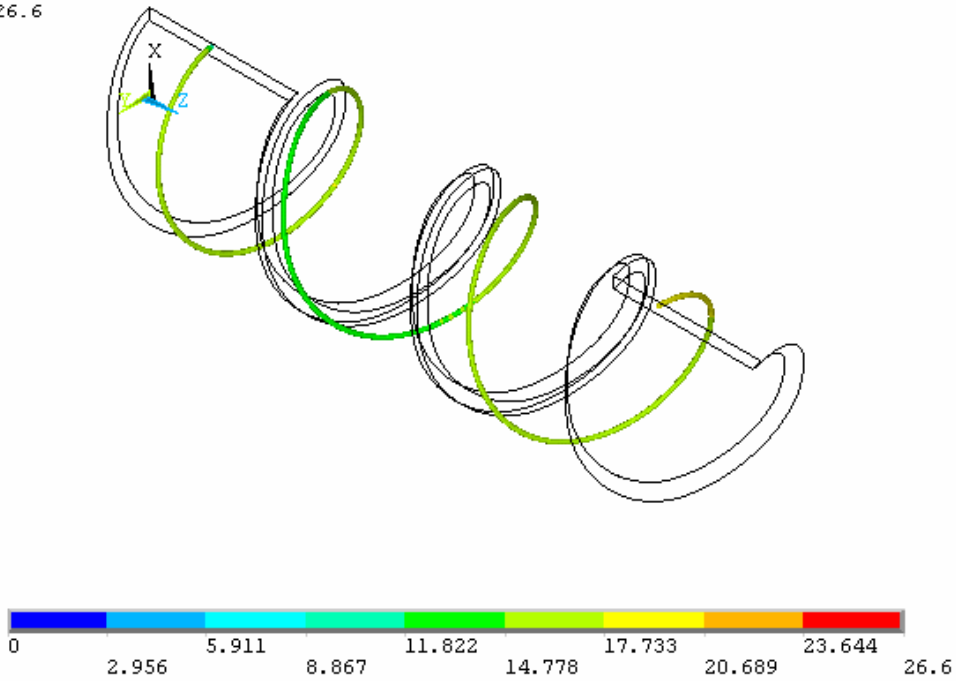


圖 54、無 PIN 楔形流道(0.4L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

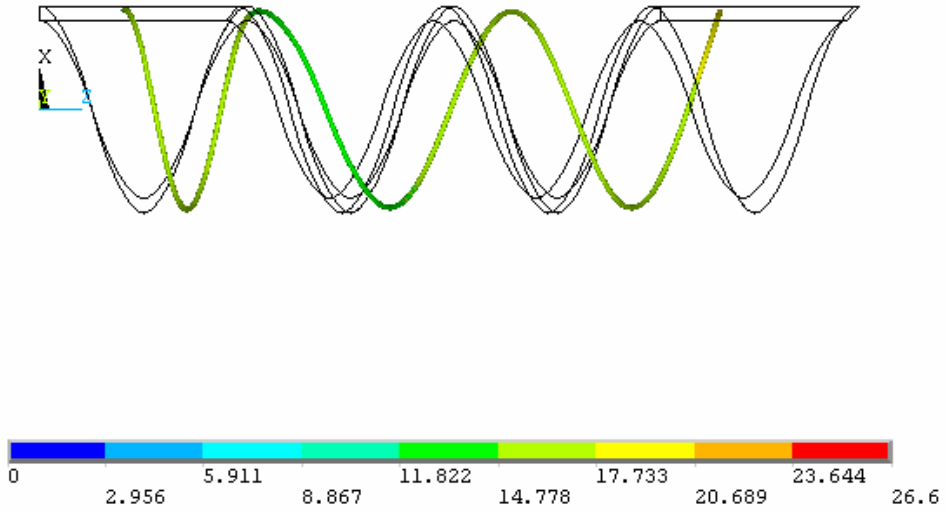


圖 55、無 PIN 楔形流道(0.4L)正視圖

VSUM
SMX =30.742

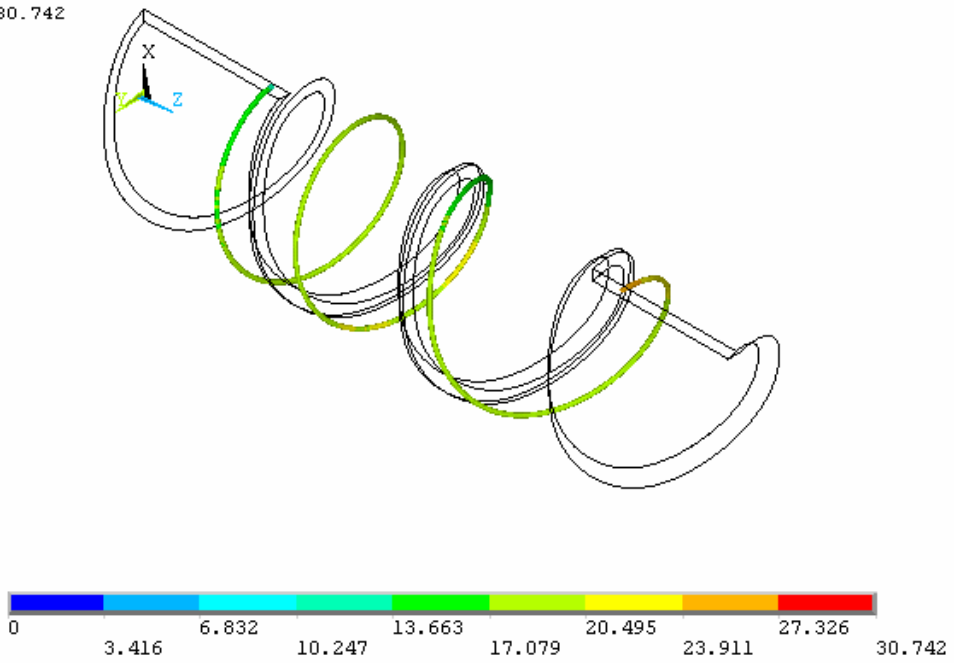


圖 56、無 PIN 楔形流道(0.5L)斜視圖

VSUM
SIX = 30.742

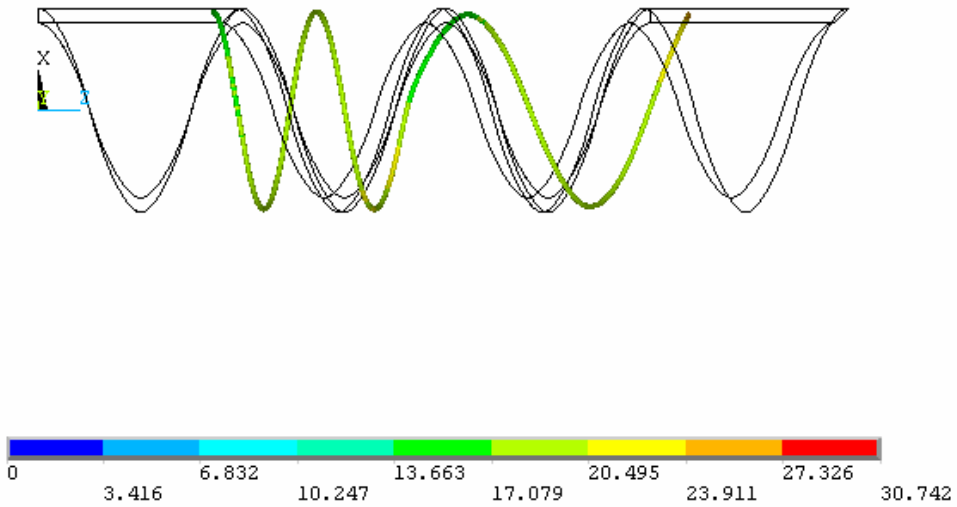


圖 57、無 PIN 楔形流道(0.5L)正視圖

VSUM
SIX = 26.6

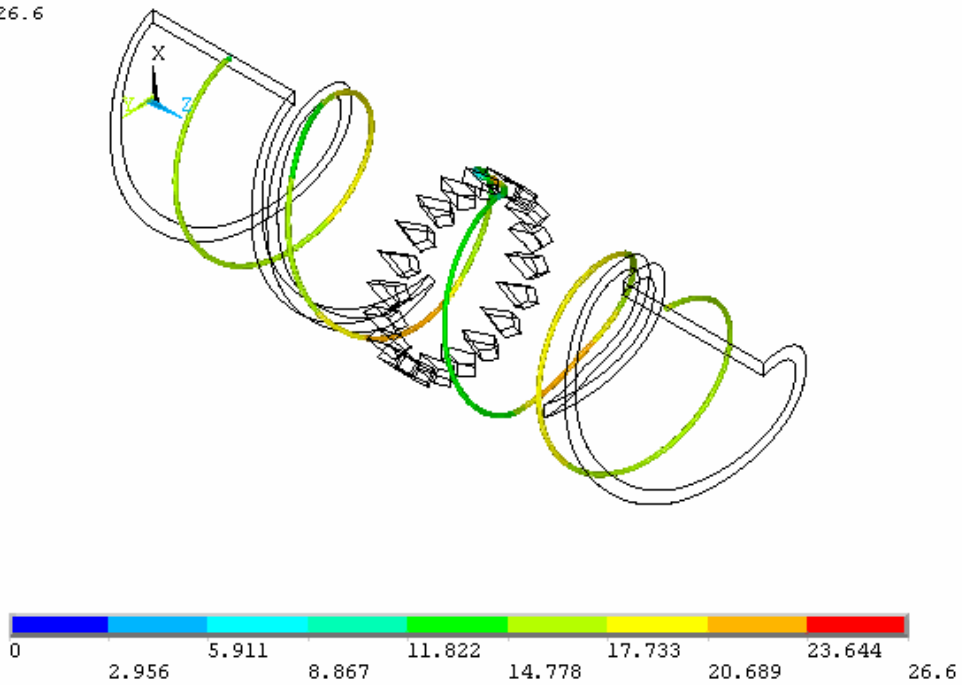


圖 58、20PIN 垂直流道(20SSP-0L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

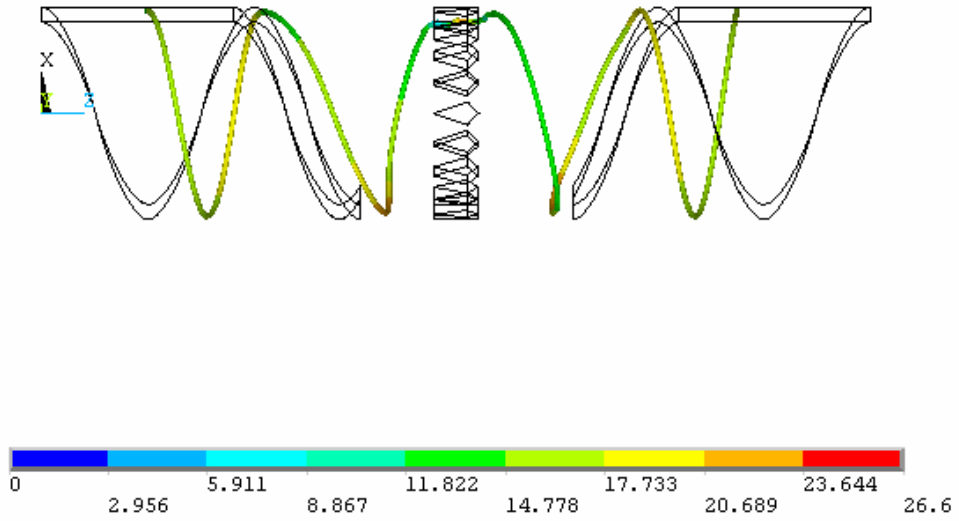


圖 59、20PIN 垂直流道(20SSP-0L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

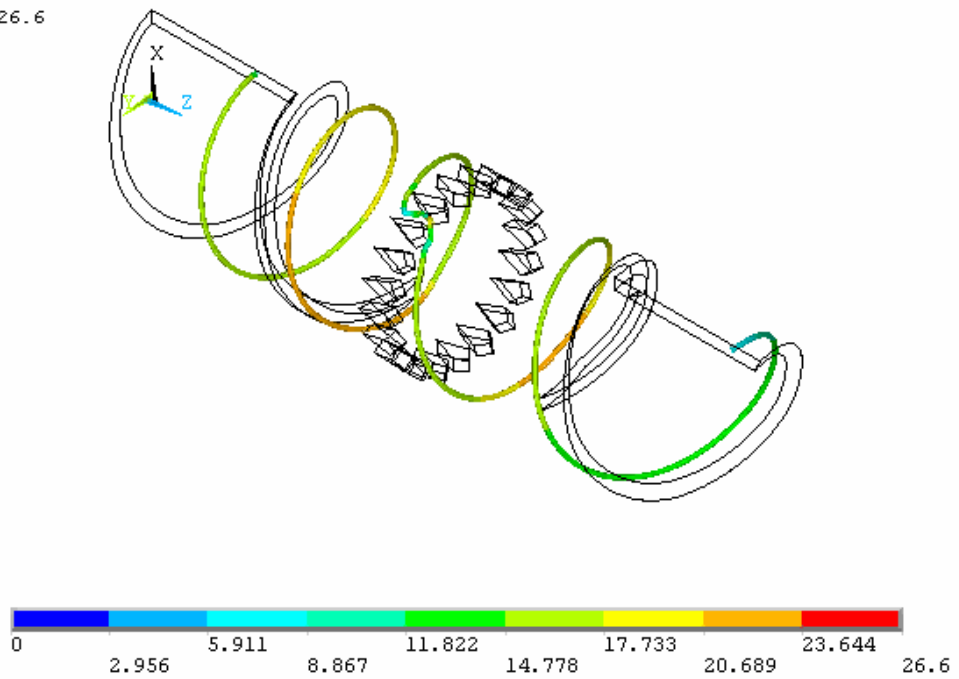


圖 60、20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

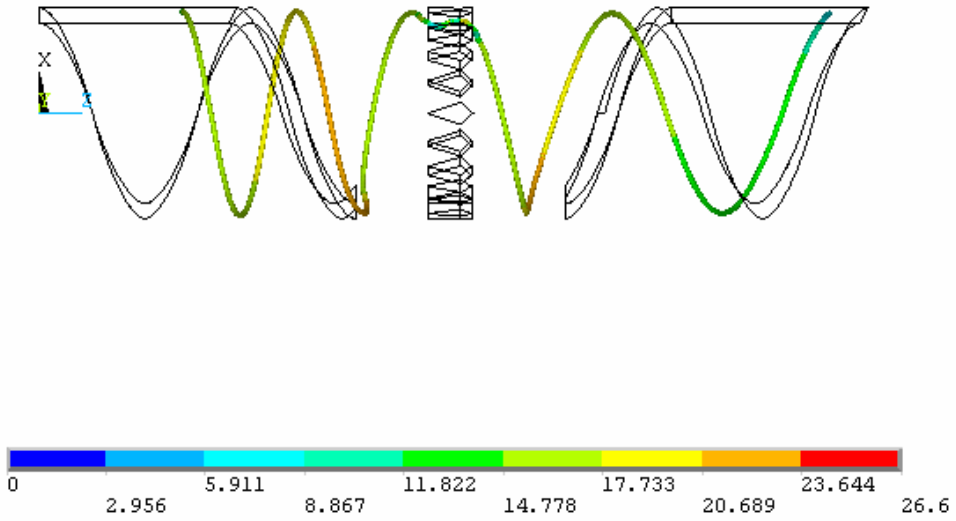


圖 61、20PIN 楔形流道(20SSP-0.1L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

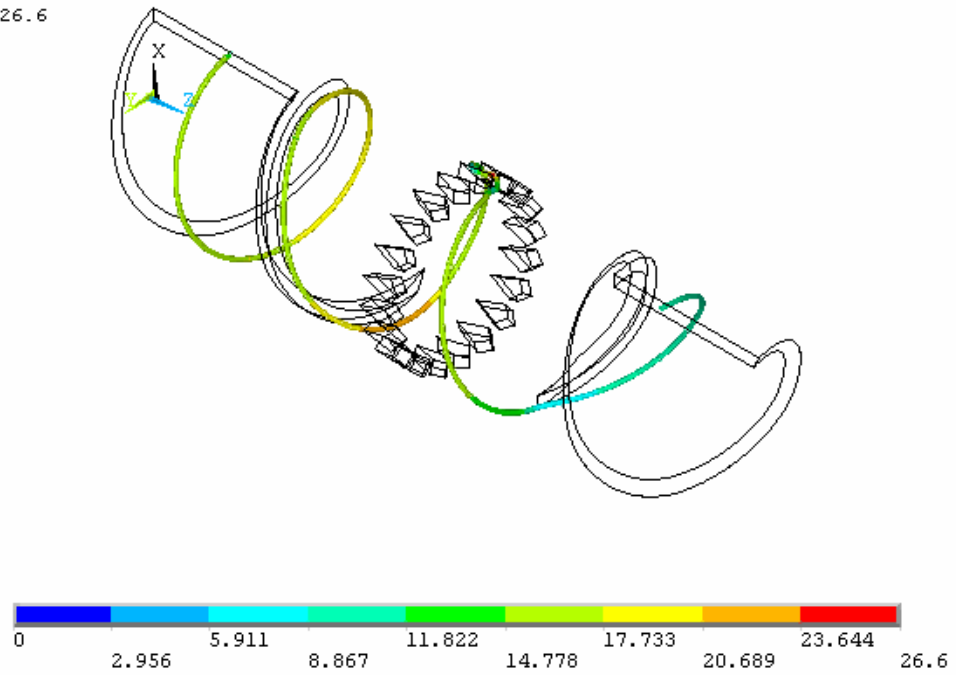


圖 62、20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

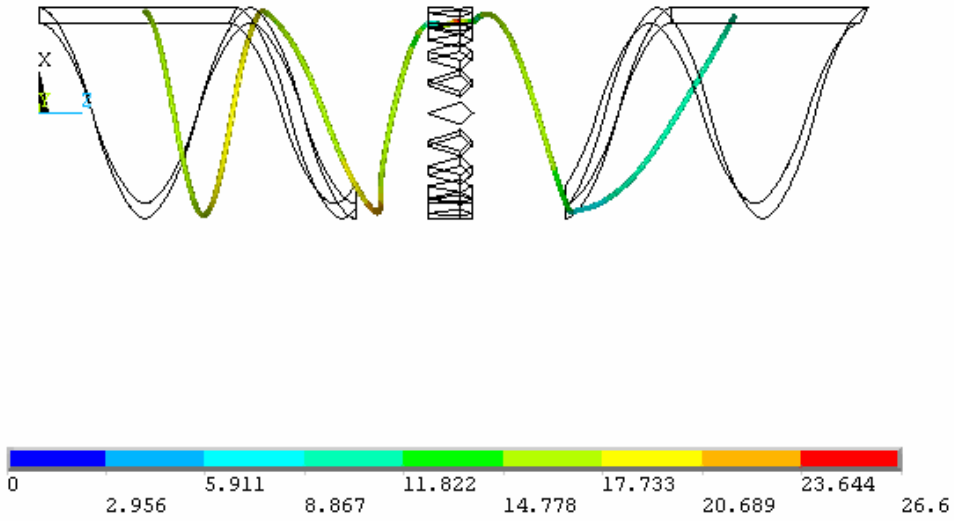


圖 63、20PIN 楔形流道(20SSP-0.2L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

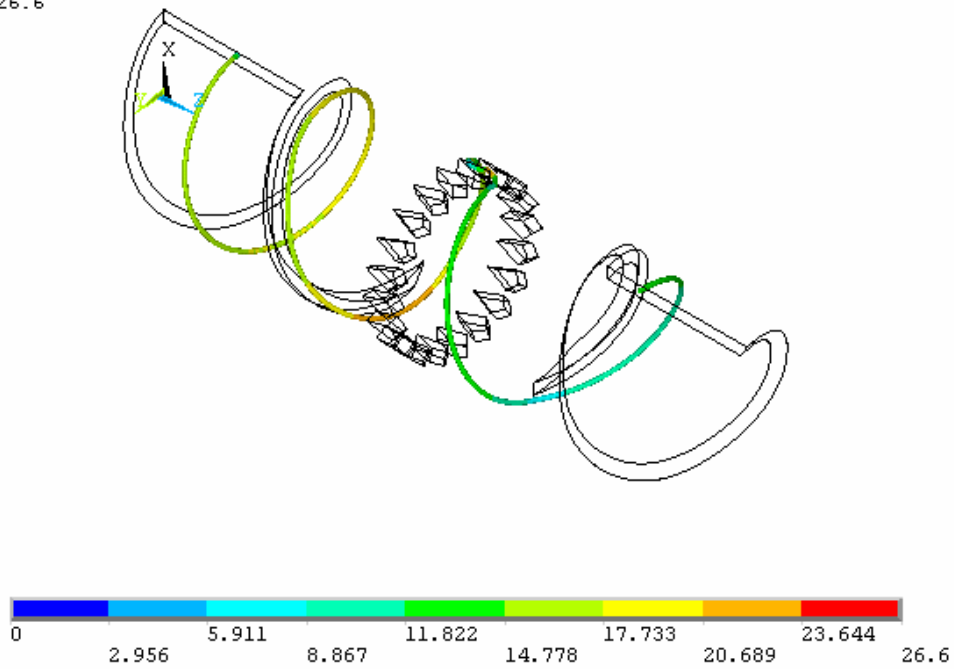


圖 64、20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)斜視圖

VSUM
SMX =26.6

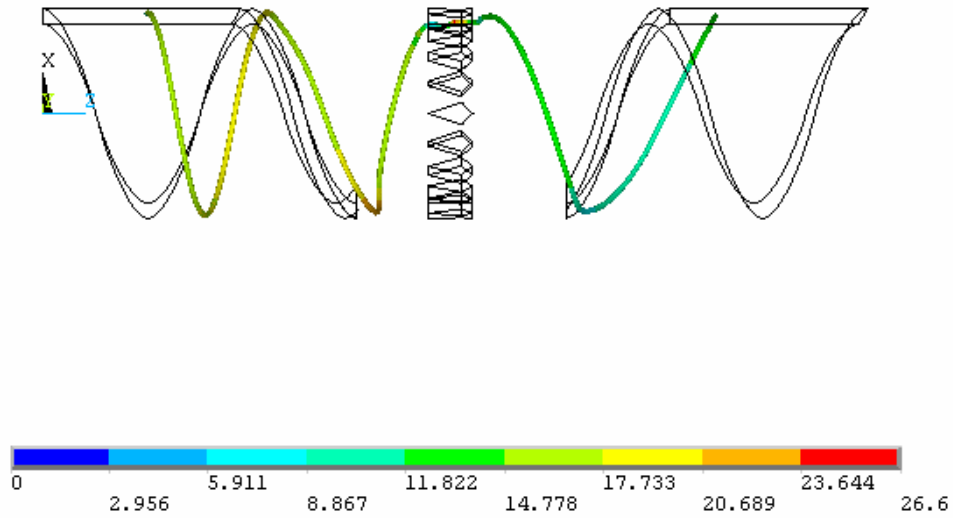


圖 65、20PIN 楔形流道(20SSP-0.3L)正視圖

VSUM
SMX =26.6

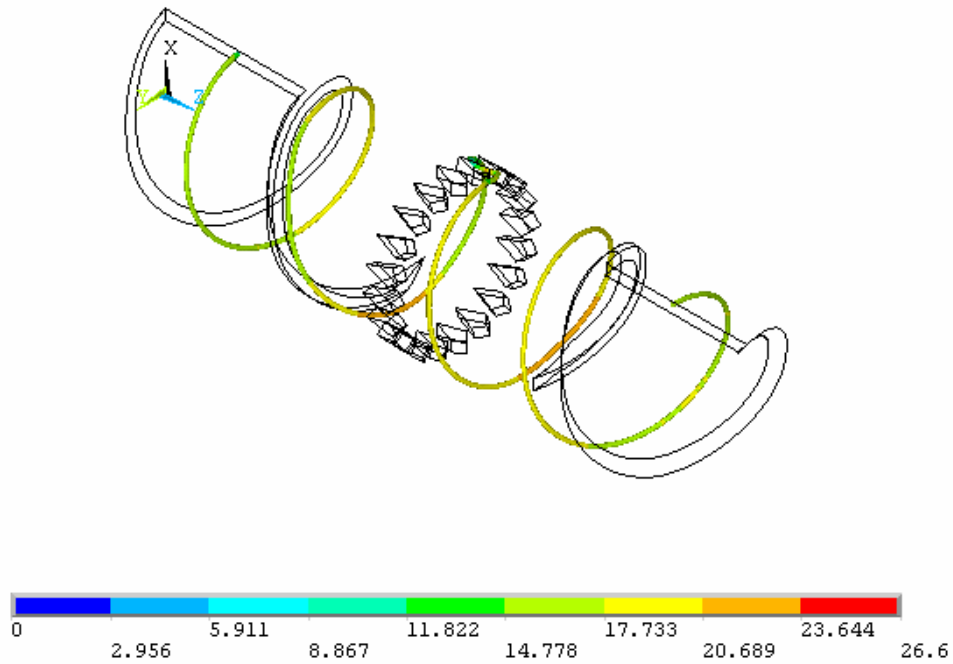


圖 66、20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)斜視圖

VSUM
SIX =26.6

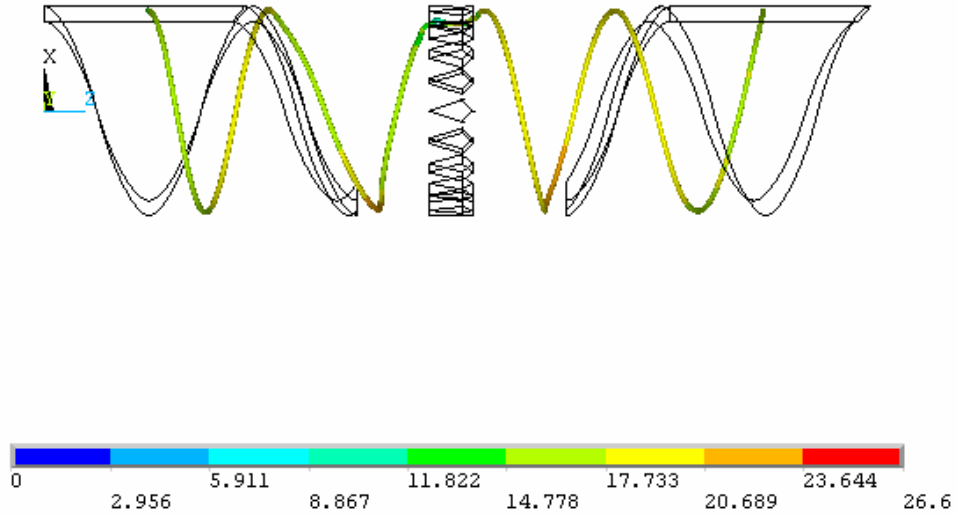


圖 67、20PIN 楔形流道(20SSP-0.4L)正視圖

VSUM
SIX =26.763

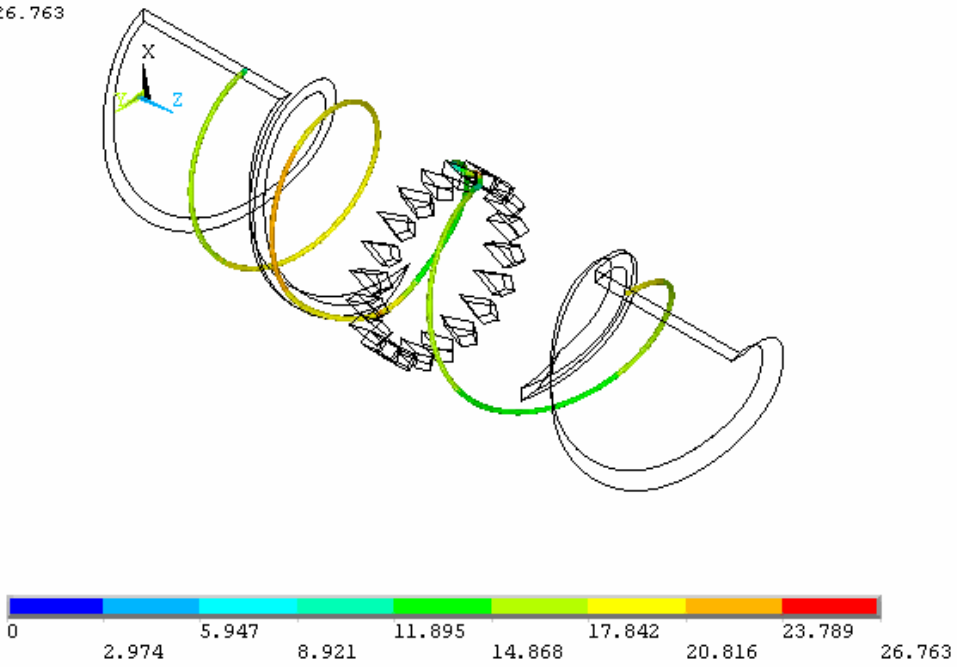


圖 68、20PIN 楔形流道(20SSP-0.5L)斜視圖

VSUM
SMDX =26.763

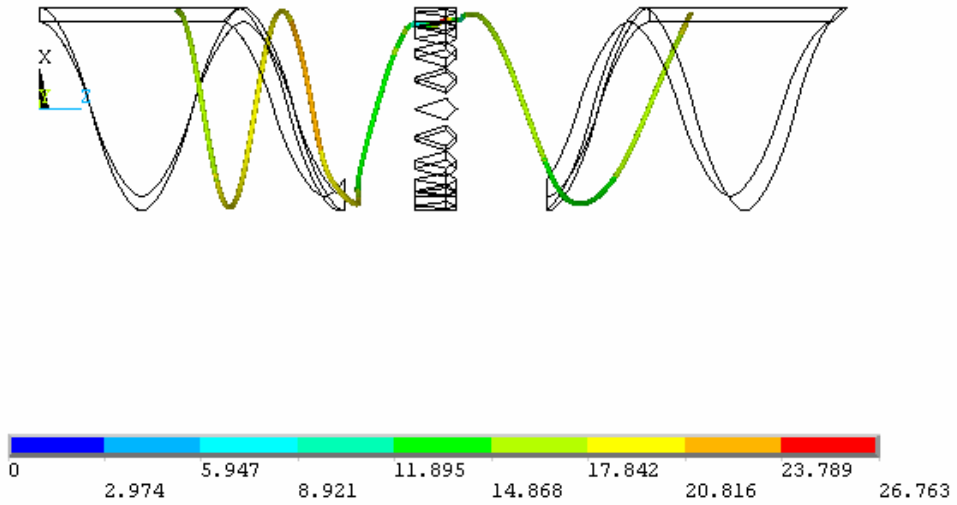


圖 69、20PIN 楔形流道(20SSP-0.5L)正視圖



參考文獻

1. C. Rauwendaal, New Dispersive Mixers Based on Elongational Flow, *Plastics Additives and Compounding*, August/September, (1999).
2. C. Rauwendaal, Comparison of Two Melting Models, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 15, No. 2, p.135-144, (1996).
3. C. Rauwendaal, Non-Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability, *SPE ANTEC Technical Papers*, 638-641, (2000)
4. Chris Rauwendaal, "Polymer Mixing, A Self-Study Guide", Hanser Publishers, Munich, Germany, (1998).
5. C. Rauwendaal and J Anderson, *Finite Element Analysis of Flow in Extruders*, 52nd SPE ANTEC, 298-305, San Francisco, CA (1994)
6. C. Rauwendaal, "Polymer Extrusion", Hanser, New York, 1990.
7. Gramann, P.J., B.A. Davis, T. A. Osswald, C. Rauwendaal, A New Dispersive and Distributive Static Mixer for the Compounding of Highly Viscous Materials, ANTEC Conference – New York, (1999).
8. Rauwendaal, C., New dispersive mixers based on elongational flow, *Plastics Additives & Compounding*, p. 21-23, (1999).
9. Rauwendaal, C., T.A. Osswald, P.J. Gramann and B.A. Davis, A New Dispersive Mixer for Single Screw Extruders, ANTEC, 1998.
10. C. Rauwendaal, P. Gramann, B. Davis, T. Osswald, "A New Dispersive and Distributive Static Mixer for the Compounding of Highly Viscous Materials," 57th SPE ANTEC, New York, 162-166, (1999).
11. C. Rauwendaal and P.J. Gramann, Why Corrosion Resistant Screws Can Bind in the Extruder Barrel, (1998). ANTEC.
12. Chris Rauwendaal, Tim Osswald, Paul Gramann, Bruce Davis, Maria del Pilar Noriega, and O. A. Estrada, "Experimental Study of a New Dispersive Mixer", 57th SPE ANTEC, New York, 167-176 (1999).
13. Chris Rauwendaal, Tim Osswald, Paul Gramann, and Bruce Davis, A New Dispersive Mixer for Single Screw Extruders, 56th SPE ANTEC, Atlanta, GA, 277-283, (1998).
14. The Extensional Flow Mixer, A. Luciani and L. A. Utracki, *Intern. Polymer Processing XI*, 4, 299-309, (1996).
15. Chris Rauwendaal, Return Valve with Distributive and Dispersive Mixing Capability, ANTEC, (2000)

16. P.J. Gramann and C. Rauwendaal, "Backmixing in Screw Extruders", ANTEC, (2000)..
17. Rios, A.C., E. Santanach, P.J. Gramann, and C.J. Rauwendaal, "Extruder Breaker Plate Offers More Efficient Mixing", *Plastics Additives & Compounding*, Elsevier, p 30-33, (2000).
18. Fogarty, Jim, Dave Fogarty, Chris Rauwendaal and Antoine Rios, "Turbo-Screw™, New Screw Design for Foam Extrusion", SPE, ANTEC(2001).
19. Chris Rauwendaal, Extruder principles and operation/Stevens, M. J. ,London/Elsevier Applied Science Publishers, c1985
20. ——— , SPC/statistical process control in extrusion, Munich /Hanser Publishers,New York, c 1993
21. ——— , Polymer extrusion, Munich/Hanser Publishers/c1990
22. Chris Rauwendaal , M. Dekker, Mixing in polymer processing ,c1991
23. 劉大傑, 高分子加工原理與應用/Fundamentals and applications of polymer processing, 臺中市,滄海書局,民 94
24. 劉士榮, 塑膠押出成形/Polymer Extrusion, 台北市,洪秀婉,民89
25. 劉士榮, 高分子流變學/Polymer rheology,臺北市,揚智文化,1997[民86],二版
26. 陳精一, ANSYS 6.0電腦輔助工程分析, 臺北市,全華,2002[民91],初版
27. 陳精一,蔡國忠, 電腦輔助工程分析/ANSYS使用指南,臺北市,全華,2000[民89],初版
28. 龔皇光, ANSYS與電腦輔助工程分析, 臺北市,全華,2002[民91],初版
29. 賴育良, 林啓豪, 謝忠祐, ANSYS 電腦輔助工程分析,台北市,儒林,1997