

DT  
446  
0043  
100  
225300

# 壓縮彈簧之模擬分析與熱處理參數研

## A Study on the Simulation and Heat-treatment parameters of Helical Compression Spring

指導教授：連得銘博士

研究生：高世滋

國立勤益科技大學

機械工程學系碩士班



A Thesis (first version) submitted to the  
Department of Mechanical Engineering  
National Chin-Yi University of Technology  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

August 2011

Taipei, Taiwan, Republic of China  
國立勤益科技大學圖書館



225300

中華民國 一 百 年 八 月

國立勤益科技大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校 機械工程學系 碩士班 高世滋 君

所提論文 螺旋壓縮彈簧之模擬分析與熱處理參數研究  
合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：連得銘 \_\_\_\_\_

潘吉祥 \_\_\_\_\_

王珉敏 \_\_\_\_\_

指導教授：連得銘 \_\_\_\_\_

系(所)主管：陳正和 \_\_\_\_\_

中華民國 100 年 7 月

# 國家圖書館

## 博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在勤益科技大學機械工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：壓縮彈簧之模擬分析與熱處理參數研究

指導教授：連得銘

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

上列論文為授權人向經濟部智慧財產局申請專利之附件或相關文件之一（專利申請案號：\_\_\_\_\_），請於\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日後再將上列論文公開或上載網路。

因上列論文尚未正式對外發表，請於\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：高世澆

親筆簽名及蓋章：

高世澆



民國 100 年 8 月 23 日

電話：04-24910011 傳真：04-24912020

聯絡地址：台中市大里區工業 11 路 146 號

E-Mail：kao\_kyle@yahoo.com.tw

勤 益 科 技 大 學

博碩士論文全文上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在勤益科技大學  
機械工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。  
論文題目：壓縮彈簧之模擬分析與熱處理參數研究  
指導教授：連得銘


■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，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與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印：

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路  立即公開  
校外國際網路  立即公開

授 權 人：高世法

簽 名：高世法 

中 華 民 國 100 年 8 月 23 日

# 壓縮彈簧之模擬分析與熱處理參數研究

學生：高世滋

指導教授：連得銘

國立勤益科技大學機械工程學系碩士班

## 摘要

本研究以螺旋壓縮彈簧為對象，使用琴鋼線與油淬回火線為材料，經 CNC 彈簧成型機加工製成熱處理前尺寸，再施以 5 種不同溫度的一般大氣壓與真空加熱硬化(Bake hardening)處理，接著研磨其端面。首先探討材料性質、微觀組織，並以田口法尋求最佳熱處理參數組合(得溫度 300°C、時間 5 分鐘、油冷卻之組合)與網格化參數組合(使用 ANSYS©軟體，得 Relevance = 100；Relevance Center = Fine；Shape Checking = Aggressive Mechanical；Smoothing = Medium；Transition = Slow 之組合)，並藉以模擬分析該彈簧的機能特性。另外進行應力衰緩(stress relaxation)實驗：組裝以 PLC 控制的油壓機台，將熱處理過的彈簧反覆施加外力，探討當彈簧的作動行程超過彈性區域的臨界點後，其降伏狀況。並比較各種加熱硬化溫度下，彈簧承載反覆荷重的情況。其中以 300°C 處理的衰減幅度最小。最後選定承載荷重衰減率最小的彈簧，黏貼三軸式應變規，再以 NI©設備測量其應變、荷重、壓縮行程間的關係，得以驗證虎克定律。

關鍵詞：加熱硬化、螺旋壓縮彈簧、琴鋼線、微觀組織、田口法、網格化參數、  
應力衰緩、應變規

# **A Study on the Simulation and Heat-treatment parameters of Helical Compression Spring**

**Student: Shih Hung Kao**

**Adviser: Der Ming Lian**

**Department of Mechanical Engineering  
National Chin-Yi University of Technology**

## **Abstract**

The object of the study is the helical compression spring (HCS) that material is the piano wire and oil-tempered wire were fabricated into as-coiled scale by a CNC-spring-former, then utilized the bake hardening processes with 5 different temperatures at common pressure and in vacuum, then ground its two end-sides. First, the properties and microstructure were observed. The Taguchi method was applied to search the optimal heat-treatment parameters that were temperature-300°C, time-5 minutes and cooling by oil. The functional feature of the HCS was also simulated in ANSYS©. The optimal meshing parameters were Relevance = 100 ; Relevance Center = Fine ; Shape Checking = Aggressive Mechanical ; Smoothing = Medium ; Transition = Slow. The stress relaxation experiment was performed by an oil-hydraulic apparatus controlled by PLC, a stroke force that exceeded the critical point of elastic region was applied to the vacuum heat-treated springs cyclically. Next, the yielding phenomenon was discussed separately. The stress relaxation of the cyclic loading in each treated temperatures were compared, the smallest relaxed span of the 5 springs is treated in 300 °C. Finally, tri-axial strain gauges were adhered to the least loading recession rate of HCS, and the Hook's relations among the strain, load, stroke were measured in NI© equipment.

Keywords : bake hardening, helical compression spring, piano wire,  
micro-structure, Taguchi method, meshing parameters,  
stress relaxation, strain gauge

## 誌 謝

感謝我的 雙親、內人及可愛的孩子們!

感恩所有教導過世滋的師長們!

敬謝天地萬物!

*Prajñāpāramitā*



# 目 錄

中文摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	VII
圖目錄	VIII
符號說明	XIII
<b>第一章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	2
<b>第二章 文獻回顧與理論基礎</b>	<b>3</b>
2.1 文獻回顧	3
2.1.1 材料	3
2.1.2 設計	5
2.1.3 熱處理	8
2.1.4 應力分析	20
2.1.5 模擬分析	22
2.1.6 失效分析	28
2.1.7 量測分析	36
2.2 理論基礎	43
2.3 田口工程	46
<b>第三章 實驗設計與執行流程</b>	<b>48</b>
3.1 研究流程	49
3.2 傳統彈簧設計手法	50
3.2.1 彈簧設計流程	50
3.2.2 本研究實際計算例	51
3.3 彈簧實物製作流程	53



3.3.1	材料選擇	53
3.3.2	電腦數控彈簧成型設備	53
3.3.3	調機與編寫彈簧製造程式	54
3.3.4	彈簧成型	54
3.3.5	一般氣壓下熱處理與真空熱處理	55
3.3.6	端面研磨	57
3.4	彈簧 CAE 模擬分析	58
3.4.1	彈簧電腦繪圖	59
3.4.2	匯入幾何圖形進行前處理	60
3.4.3	建立彈簧材料的工程性質資料	61
3.4.4	網格化	61
3.4.5	田口法探求最佳的網格化模擬參數	63
3.4.6	定義分析型態	64
3.4.7	求解	65
3.4.8	後處理	65
3.5	試驗流程	66
3.5.1	機械性質試驗	66
3.5.2	金相試驗	68
3.5.3	應力衰緩實驗	70
3.5.4	荷重試驗	71
3.6	應變量測	73
<b>第四章</b>	<b>結果與討論</b>	<b>75</b>
4.1	最佳網格參數與 $k$ 值比對	75
4.1.1	最佳網格參數	75
4.1.2	田口法實驗所得之最佳網格參數	78
4.1.3	實驗用彈簧設計的 $k$ 值比對	80
4.2	彈簧設計的模擬	82
4.2.1	總變形量	82
4.2.2	側向變形量	82
4.2.3	等效應力	83
4.2.4	法向應力	83
4.2.5	剪應力	84

4.2.6 應力強度	84
4.2.7 最大剪應力	85
4.2.8 剪彈性應變	86
4.2.9 最大主應力	86
4.2.10 材料斷面主應力向量	87
4.2.11 線材表面主應力向量	87
4.2.12 材料斷面主彈性應變向量	88
4.2.13 材料表面主彈性應變向量	88
4.2.14 安全係數	89
4.2.15 挫曲分析	90
4.3 抗拉強度與硬度	91
4.3.1 拉伸試驗	91
4.3.2 硬度測試	95
4.4 金相顯微組織	97
4.5 應力衰緩實驗	103
4.6 應變、荷重、壓縮行程間的關係	104
4.7 彈簧外徑變化與處理溫度的關係	106
4.8 最佳熱處理參數的組合	107
<b>第五章 結 論</b>	<b>112</b>
5.1 結論	108
5.2 未來研究方向	114
<b>參考文獻</b>	<b>115</b>

## 表 目 錄

表 2.1 各種鋼變態	10
表 2.2 各種純鐵及鋼的變態	11
表 2.3 各種硬度測試原理	38
表 3.1 試材化學成分(wt.%)與抗拉強度	53
表 3.2 各熱處理參數代入 $L_8$ 直交表的實驗組合	56
表 3.3 實驗組合與測試值紀錄及 S/N 比	56
表 3.4 Workbench 的部分預設網格參數	62
表 3.5 擬調整的網格參數群	62
表 3.6 各網格參數代入 $L_{18}$ 直交表的實驗組合	63
表 4.1 調整不同網格參數的結果	75
表 4.2 分析彈簧最佳的網格參數	76
表 4.3 各模擬參數的網格斷面樣式	77
表 4.4 各網格參數組合的 $k$ 值模擬結果	78
表 4.5 ANOVA 分析結果	79
表 4.6 兩種探尋最佳網格參數的比較	79
表 4.7 各種彈簧 $k$ 值公式與 Sayre 式的比較	81
表 4.8 各種溫度下的拉伸試驗數據	91
表 4.9 各種溫度下的硬度試驗數據	95
表 4.10 彈簧外徑變化與熱處理溫度的關係	106
表 4.11 熱處理因子的 ANOVA 分析表	107
表 5.1 網格化參數	108

## 圖 目 錄

圖 1.1 各種不同功能彈簧的樣式	1
圖 2.1 熱處理最佳化設計的典型程序	9
圖 2.2 鐵—碳平衡圖	10
圖 2.3 共析鋼恆溫變態圖	11
圖 2.4 恆溫變態圖上的任意時間-溫度路徑	12
圖 2.5 不同熱處理參數對彈簧機能的影響	15
圖 2.6 時間和溫度對回火鋼硬度的影響(0.82%碳, 0.75%錳)	18
圖 2.7 中子繞射測量彈簧之殘留應力	21
圖 2.8 各製程導入彈簧的殘留應力示意圖	21
圖 2.9 ANSYS 分析處理作業流程圖	24
圖 2.10 MBS-Springprocessor 動態分析圖	25
圖 2.11 典型筒狀螺旋彈簧的立體幾何形狀	25
圖 2.12 螺旋彈簧的有限元素幾何圖形	26
圖 2.13 應力與應力振幅及疲勞強度的關係	27
圖 2.14 各種不同外型的壓縮彈簧的網格	27
圖 2.15 斷裂的彈簧實物(左)含氧化雜質的 100 倍斷面光學顯微組織(右)	28
圖 2.16 回火麻田散鐵 SEM(左) 破斷處的凹窩與氧化雜質 SEM(右)	28
圖 2.17 疲勞破壞過程	29
圖 2.18 陽極腐蝕(anodic dissolution)破壞過程示意圖	29
圖 2.19 腐蝕疲勞破壞面的 SEM	29
圖 2.20 材料內部含雜質、成分不均勻、表層脫碳	31
圖 2.21 彈簧因雜質導致斷裂	31
圖 2.22 正常的波來鐵顯微組織(左)波來鐵基地中參雜有變韌鐵(右)	31
圖 2.23 材料表層裂紋(左)及製造時刮損的傷痕(右)	32
圖 2.24 不良的珠擊加工導致的表面瑕疵	32
圖 2.25 淬火裂縫導致的晶粒間破裂面(intergranular fracture surface)	32
圖 2.26 淬火油滲入裂縫於回火時生成氧化物覆蓋住裂紋	33
圖 2.27 熱處理不良(左) vs. 正常的熱處理(右)	33
圖 2.28 變韌鐵組織	34
圖 2.29 腐蝕引起的破裂	34
圖 2.30 表層過度脫碳引發的斷裂	35
圖 2.31 分析各種失效的模擬用 FEA 模型	35
圖 2.32 拉伸試驗	36

圖 2.33	菊花座應變規示意圖	39
圖 2.34	本研究黏貼菊花座應變規實體圖	39
圖 2.35	直角坐標上 3 個立體面的應力	40
圖 2.36	XY 平面上的主應變、主應力與主應力方向	41
圖 2.37	圓形斷面螺旋彈簧 (左)與橫截面的應力分布(右) 示意圖	43
圖 2.38	素材承受力距之微量扭轉	43
圖 2.39	線材受外力的應力分布圖	44
圖 2.40	應變能解說示意圖	45
圖 3.1	研究流程圖	49
圖 3.2	彈簧設計流程圖	50
圖 3.3	PC-580 型 CNC 彈簧機	53
圖 3.4	CNC 彈簧機運轉狀況實體圖與示意圖	54
圖 3.5	一般氣壓實驗式箱型爐(左)與實驗型管式真空熱處理爐(右)	55
圖 3.6	未研磨前彈簧	57
圖 3.7	研磨完成彈簧	57
圖 3.8	未研磨彈簧發生挫曲現象	57
圖 3.9	研磨後彈簧無挫曲現象	57
圖 3.10	Workbench 軟體說明文件	58
圖 3.11	模擬精靈方塊	59
圖 3.12	彈簧單品	59
圖 3.13	上下壓板做負載施力面	59
圖 3.14	彈簧幾何正視圖	60
圖 3.15	彈簧幾何等角視圖	60
圖 3.16	匯入圖形的操作畫面	60
圖 3.17	輸入材料機械性質的操作畫面	61
圖 3.18	建立網格	61
圖 3.19	靜態結構分析與設定拘束邊界條件	64
圖 3.20	模擬分析求解項目設定	65
圖 3.21	電腦式萬能試驗機	66
圖 3.22	試件夾持狀況	66
圖 3.23	試件拉斷狀況	66
圖 3.24	頸縮斷裂狀況	66
圖 3.25	斷面放大圖	66
圖 3.26	洛氏硬度計	67

圖 3.27	試片受鋼球之壓痕	-----	67
圖 3.28	金相試片	-----	68
圖 3.29	光學金相顯微鏡	-----	69
圖 3.30	油壓測試台	-----	70
圖 3.31	彈簧荷重測試機台	-----	71
圖 3.32	測試至下死點	-----	71
圖 3.33	測試顯示部	-----	72
圖 3.34	量測軟體之荷重與應變記錄圖	-----	72
圖 3.35	彈簧內外側黏貼應變規與應變規放大圖	-----	73
圖 3.36	NI <sup>®</sup> 應變資料擷取硬體設備	-----	73
圖 3.37	FleXense <sup>®</sup> 量測軟體操作介面	-----	74
圖 3.38	應變菊花座規格圖說	-----	74
圖 4.1	最佳的網格樣式	-----	76
圖 4.2	最差的網格樣式	-----	76
圖 4.3	各種彈簧 $k$ 值公式與 Sayre 式的比較	-----	81
圖 4.4	最大變形量	-----	82
圖 4.5	X 方向變形量	-----	82
圖 4.6	等效應力	-----	83
圖 4.7	法向應力	-----	83
圖 4.8	剪應力	-----	84
圖 4.9	應力強度	-----	84
圖 4.10	最大剪應力	-----	85
圖 4.11	最大剪應力區域放大圖	-----	85
圖 4.12	剪彈性應變	-----	86
圖 4.13	最大主應力	-----	86
圖 4.14	材料斷面主應力向量	-----	87
圖 4.15	線材表面主應力向量	-----	87
圖 4.16	材料斷面主彈性應變向量	-----	88
圖 4.17	材料表面主彈性應變向量	-----	88
圖 4.18	安全係數	-----	89
圖 4.19	應力比	-----	89
圖 4.20	最大挫曲變形量	-----	90
圖 4.21	Z 軸最大挫曲變形量	-----	90
圖 4.22	應力 VS 應變圖(200 °C)	-----	92

圖 4.23	應力 VS 應變圖(250 °C)	-----	92
圖 4.24	應力 VS 應變圖(300 °C)	-----	93
圖 4.25	應力 VS 應變圖(350 °C)	-----	93
圖 4.26	應力 VS 應變圖(400 °C)	-----	94
圖 4.27	溫度與硬度關係圖-1	-----	95
圖 4.28	溫度與抗拉強度關係圖	-----	96
圖 4.29	溫度與硬度關係圖-2	-----	96
圖 4.30	各溫度代表金相圖	-----	97
圖 4.31	200°C (邊緣) 1500X	-----	98
圖 4.32	200°C (中心) 600X	-----	98
圖 4.33	200°C (中間部) 1500X	-----	98
圖 4.34	250°C (邊緣) 1500X	-----	99
圖 4.35	250°C (中心) 1500X	-----	99
圖 4.36	250°C (中間部) 1500X	-----	99
圖 4.37	300°C (邊緣) 300X	-----	100
圖 4.38	300°C (中心) 1500X	-----	100
圖 4.39	300°C (中間部) 1500X	-----	100
圖 4.40	350°C (邊緣) 300X	-----	101
圖 4.41	350°C (中心) 600X	-----	101
圖 4.42	350°C (中間部) 1500X	-----	101
圖 4.43	400°C (邊緣) 300X	-----	102
圖 4.44	400°C (中心) 600X	-----	102
圖 4.45	400°C (中間部) 600X	-----	102
圖 4.46	荷重衰緩趨勢	-----	103
圖 4.47	荷重衰減率	-----	103
圖 4.48	應變、荷重、行程的關係	-----	104
圖 4.49	行程與荷重關係圖	-----	105
圖 4.50	彈簧內側應變與行程關係圖	-----	105
圖 5.1	真空熱處理與普通熱處理之外觀圖	-----	108
圖 5.2	總變形量	-----	109
圖 5.3	橫向挫曲量	-----	110
圖 5.4	剪應力及其細部放大圖	-----	110
圖 5.5	法向應力	-----	111
圖 5.6	最大主應力	-----	111

圖 5.7 等效應力 ----- 112  
圖 5.8 內外側應變量與彈簧荷重的關係圖 ----- 113





## 符號說明 (List of Symbols)

- C : 彈簧指數 (spring index)  
d : 線徑 (wire diameter)  
 $\delta$  : 壓縮行程 (deflection)  
D : 平均徑 (mean diameter)  
E : 彈性係數(縱彈性係數) (modulus of elasticity)  
F : 圓截面係數(=10/9)  
G : 剛性係數(橫彈性係數) (shear modulus of elasticity)  
I : 面積慣性矩  
J : 極慣性矩  
K : 扭轉剛性係數  
k : 彈簧常數 (spring rate)  
L : 有效展開長  
n : 有效卷數 (active coils)  
P : 荷重 (Load)  
p : 間距 (pitch)  
 $\kappa_B$  : 貝氏應力修正係數 (Bergsträsser factor)  
 $\kappa_C$  : 曲率應力修正係數 (curvature correction factor)  
 $\kappa_S$  : 剪應力修正係數 (shear-stress augmentation factor)  
 $\kappa_W$  : 華氏應力修正係數 (Wahl factor)  
 $\alpha$  : 間距角 (pitch angle =  $\tan^{-1}(p/\pi D)$ )  
 $\nu$  : 蒲松比 (Poisson's Ratio)  
 $\tau_{al}$  : 容許應力 (allowable stress)  
 $\tau_{max}$  : 彈簧內側最大應力值 (the maximum shear-stress of the inside coil)  
 $S_{ut}$  : 抗拉強度 (tensile strength)  
 $S_{sy}$  : 剪切降伏強度 (shearing yield strength)  
 $n_s$  : 安全係數(design factor)  
 $S_{ca}$  : 安全係數(design factor)

# 第一章 序 論

## 1.1 前言

人類之得以文明進步神速，實乃過去數百年來之科學家與工程實踐家(理論與應用)的縝密通力合作。人類藉由各式機械與工具，逐步發展創造出各式各樣改善精進人類幸福生活的器具。論語衛靈公篇一子曰：「工欲善其事，必先利其器。」身為工程學門的機械系學子們，《機械設計原理》乃必修的基本課程之一，此類各版書籍皆有專章論述「彈簧」一節。彈簧是各式機構與用品常使用的基本元件，它可以儲能與適時釋能，吸收外來衝擊，減緩震動等。吾人運用其彈性變形之特性，設計出甚多不同用途與形式的彈簧 [1]，如泛用壓縮彈簧、汽車用的避震懸吊彈簧、引擎的汽門彈簧、扭力桿、薄板彈片彈簧、扭轉彈簧、卡車載重疊板彈簧、引張拉伸彈簧、碟片彈簧、形狀記憶合金彈簧、薄板筍形彈簧等等。

另從彈簧使用的材料而言，冷間成型製造彈簧常用的素材如硬鋼線、琴鋼線、不銹鋼線、矽鉻鋼線、鉻釩鋼線、矽錳鋼線、磷銅線等。線材經彈簧製造設備加工成型後，須加以適當地熱處理，即加熱硬化(Bake hardening)處理後，方能符合工程師所設計的尺寸規格與性能需求。

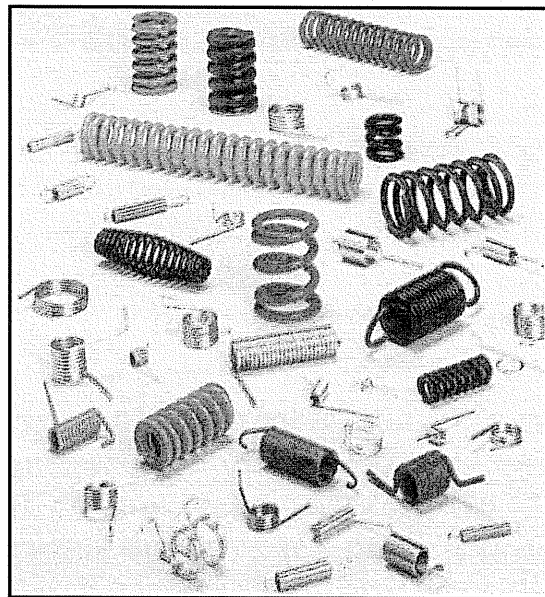


圖 1.1 各種不同功能彈簧的樣式(Diamond Wire Spring Company)

## 1.2 研究動機與目的

彈簧屬於其他各種機械設備或產品的附屬零件，因此該產業的生產模式多為依循客戶所設計的彈簧圖面而製造生產(OEM)的形態。但許多設計人員對彈簧此一細微單品不甚通曉，另彈簧製造業界從現場生產人員上至經營層級，多偏重製造技術、成本管控、生產效率等，而忽略了學理的應力分析與尋求最佳熱處理製程參數。故本研究

- (1)藉由搜尋文獻，整理得到數種計算彈簧 $k$ 值的方程式，可供業界參考應用。
- (2)再以電腦輔助工程(Computer Aided Engineering--CEA)軟體工具上，富有盛名的 ANSYS Workbench<sup>®</sup>軟體，嘗試探究模擬彈簧的最佳網格化(meshing)模擬參數。並用以分析壓縮彈簧的變形、應力、應變等機能特性。
- (3)最後設計一個接近臨界降伏應力的彈簧案例，在其內外側黏貼三軸向應變規(rossette)，測量其應變與荷重的關係。
- (4)在熱處理製程方面，分為一般與真空兩種方式，探討不同熱處理溫度，對彈簧壓縮行程略微超越臨界應力時，所導致的應力衰緩現象的影響。並運用實驗設計的田口方法(Taguchi Method)尋求最佳熱處理製程參數。

## 第二章 文獻探討

### 2.1 文獻回顧

本章節將蒐集到的相關主題研究文獻，按各類別摘要記述如下。文獻回顧將分類為材料、設計、熱處理、應力分析、模擬分析、失效分析、測量分析，逐一探討。

#### 2.1.1 材料

日本ばね(彈簧)技術研究会[1]專書—ばね用材料とその特性中，提供了選擇彈簧用材料的各種要領，包括：

- ①該材料是否符合設計品質，以滿足顧客的品質要求；
- ②材料取得的容易性；
- ③材料與彈簧加工製程的經濟性；
- ④廢棄容易性，資源回收的可能性；
- ⑤從彈簧製造到廢棄(再回收)的無公害性，遵守安全性與法規制度。

而彈簧須考量的基本機能包括：

- ①外力除去時回復原先位置或形狀的機能；
- ②運用或隔絕其振動的機能；
- ③緩和衝擊的機能；
- ④儲藏或釋放能量的功能；
- ⑤測量力的功能。

彈簧常用的材料包括：

#### 1. 金屬材料：

##### A. 鋼鐵類：

- (1) 熱間成型用鋼材(SUP3~SUP13)
- (2) 冷間成型用鋼材
  - (a) 琴鋼線(SWPA、SWPB、SWPV)
  - (b) 硬鋼線(SWA、SWB、SWC)
  - (c) 油淬回火線(又細分多種)

- ①一般用(SWO-A,B、SWOSC-B、SWOSM-A,B,C)
  - ②閥用線材(SWO-V、SWOCV-V、SWOSC-V)
  - ③三村真吾[2]等開發具備高耐疲勞強度，含高量矽元素(2.05%)的油淬回火線，製成  $\phi 3.2 \times \phi 21.2 \times 6 \times 50$  的彈簧，施以珠擊及滲氮工法後驗證其耐久性可提高25%，抗縮短性提升6%。
  - ④Fujino[3]等則開發高強度、熱阻性及韌性均佳的油淬回火線，成分含Si(2.2%)、Cr(1.2%)、V(0.15%)。
  - (d) 不鏽鋼線(SUS-302,-304,-304N1,-316,-631J1)
  - (e) 麻田時效鋼：航太用料
  - (f) 彈簧鋼帶(種類繁多)
- B. 超耐熱、耐腐蝕材料：
- (1) 合金工具鋼
  - (2) 鐵基超合金
  - (3) 鎳基超合金
  - (4) 鈷基超合金
- C. 恒彈性[Elasticity Invariable,簡稱為 Elinvar(エリンバー)合金]材料
- (1) Fe-Ni 系エリンバー合金
  - (2) Fe-Co 系エリンバー合金
- D. 高彈性彈簧材料(含 35~45%Co 的 Co-Ni 基合金)
- E. 銅合金系彈簧材料
- (1) 黃銅
  - (2) 磷青銅·洋白
  - (3) 鈹銅
  - (4) 其他銅合金(約有 133 種)
- F. 彈簧用鈦合金
- (1) 純鈦
  - (2)  $\alpha$  合金
  - (3)  $\alpha - \beta$  合金
  - (4)  $\beta$  合金
- G. 鎳鈦系形狀記憶合金與超彈性合金

2. 高分子彈簧材料
  - A. 塑膠材料
  - B. 橡膠材料
  - C. 複合材料
3. 無機材料
  - A. 陶瓷材料
  - B. 碳纖維強化之碳素複合材料(C/C composite)
4. 日本ばね學會[4]所組成的ばね材料データベース(Data Base)委員會，蒐集了 878 篇論文，建置彈簧材料相關的資料庫。

### 2.1.2 設計

1. Walsh[5]建議的彈簧設計考量要項為：
  - A. 選擇材料以供後續的設計建構
    - (1)空間限制
    - (2)經濟性
    - (3)抗腐蝕
    - (4)導電性
    - (5)使用溫度範圍
    - (6)突發負荷、高疲勞限度與高強度
  - B. 設計通則
    - (1)座卷形狀
    - (2)間距(Pitch)
    - (3)彈簧指數  $C(D/d)$  盡量介於 6.5~10 之間。C 若太小，會有應力過大問題；  
C 若太大，則彈簧會糾結(entanglement)及浪費材料。
    - (4)不可電鍍，除非電鍍後施加以烘烤適當時間，否則會發生氫脆現象。  
(hydrogen embrittlement)
  - C. 製程中或製程後的特殊處理
  - D. 應力考量

2. DeFord [6]用實際數值計算範例，以並聯型"巢式閥門彈簧組"(Nested springs，意指小外徑彈簧套入大內徑彈簧內，成並聯方式使用)的設計流程為例，逐步導引壓縮彈簧的設計流程。並建議可將此流程，設計成邏輯程式(利用VB或EXCEL)，減輕連串反覆煩人的試誤計算過程。其設計步驟如下：

- A. 選定材質(方便定義用以計算的各項係數)
- B. 第一段高度(通常指裝配的高度)的荷重需求
- C. 第二段高度(通常指行程的最低點高度)的荷重需求(有此兩項參數，便可計算該彈簧的K值)
- D. 外側彈簧須承受多少百分比的總荷重(確認外側彈簧的K值)
- E. 應力限制
- F. 彈簧的外徑
- G. 最大密著高度(定義總圈數，會受端面研磨狀況影響)

其次，檢驗應力是否符合疲勞限度內，若否，則須重新上述步驟另行設計微量差異的尺寸。沒問題後，再依上述流程設計內側彈簧之尺寸，須注意內側彈簧的外徑須小於外側彈簧的內徑，且兩者的卷向須相反，避免發生交錯糾結。

3. Xiao [7]等運用"粒群最佳化"—Partical Swarm Optimization (PSO)演算法，以螺旋彈簧的重量最輕量化為例，探求快速解出最佳的設計方案。其所設參數如下：

- A.目的函數(Objective functions)：最輕的彈簧重量
- B.設計變數(Design variables)： $d$ (線徑),  $D_2$ (平均徑),  $n$ (有效卷數)
- C.限制條件(Constrain conditions)：剪應力、最大軸向變形量、臨界自然頻率、挫曲、疲勞強度、線圈不可密著、空間與尺寸。

並建構MATLAB的M檔，給予限制條件後，便可得模擬運算結果。此種建構數學模式，並運用模擬的方法，可供其他從事最佳化機械設計的參考。

4. Parsopoulos 與 Vrahatis [8]則運用"聯合式粒群最佳化方法"—Unified Particle Swarm Optimization (UPSO)探討工程最佳化方法，其中亦舉彈簧設計為例。

5. Cagnina 與 Esquivel [9]提出"簡單限制的粒群最佳化方法"—Simple Constrained Particle Swarm Optimizer, SiC-PSO) 探討工程最佳化方法，其中亦舉彈簧設計例(但與前篇的限制條件似乎一樣)。
  
6. Martikka 與 Pöllänen [10] 從疲勞破裂失效的觀點，探討端面研磨彈簧的最佳設計方法。目標是極小化線材的體積、空間限制、必要的彈簧 K 值、避免顫動頻率(surging frequency)、達成可靠的耐長期疲勞壽命。估算疲勞的方法採用平均應力振幅與 S-N 曲線。最後並以 3D 的 FEM 分析，獲取應力、應變、變形量、自然頻率。





### 2.1.3 熱處理

1. 金重勳[11]指出：熱處理(Heat-treatment)是藉著溫度的變化—包括加熱與冷卻，使材料特性改變—包括強化、軟化或具有特殊物理的處理方法。
2. 黃振賢[12]認為：金屬材料的特性，主要會受到本身化學成分和內部組織的影響而產生各種各樣的變化。對相同成分的金屬材料來講，對它實施塑性加工或者熱處理時，通常材料內部或者表面層的組織會發生變化，因此可以改變材料的特性。
3. 機械工程手冊八—熱處理與表面處理[13]論述：熱處理是將固態金屬及合金以適當方式進行加熱、保溫和冷卻，獲得所需要的組織結構與性能的熱加工工藝。從冶金學觀點來看，熱處理過程應伴隨有固態相變和/或擴散。熱處理的目的不是改變材料的形狀，而是通過改變和控制金屬材料的組織和性能，來滿足工程中對材料的服役性能或加工要求。熱處理是機械製造的重要組成部分。它的主要作用在於改變金屬的性能，來滿足零件服役和加工時的要求。選擇正確和先進的熱處理工藝，可以充分發揮材料的潛力，提高產品質量和使用壽命，增加機械加工效益，降低機械加工廢品率，降低成本。反之，若熱處理不當，就可能使材料達不到設計預定的性能，造成早期失效，甚至引起重大事故和生命財產損失。材料的熱處理工藝性能，包括淬透性、裂紋敏感性、畸變敏感性、脫碳敏感性和晶粒成長傾向性等，這些都易於被設計師所忽略。熱處理工藝優化設計的基本要求是達成技術和經濟的均衡，即在滿足對零件的組織和性能要求的前提下，用最少的材料與能源消耗，以最高的勞動生產力進行熱處理生產。由於熱處理工藝過程的複雜性，工藝參數和處理後材料的性能之間，經常不是簡單的線性關係，此令試驗大費周章。為簡化及縮短實驗過程，可採用實驗設計—正交設計法，對工藝進行優選。利用迴歸分析等數學模型，以電腦運算進行工藝優化設計，其流程方法如圖 2.1。

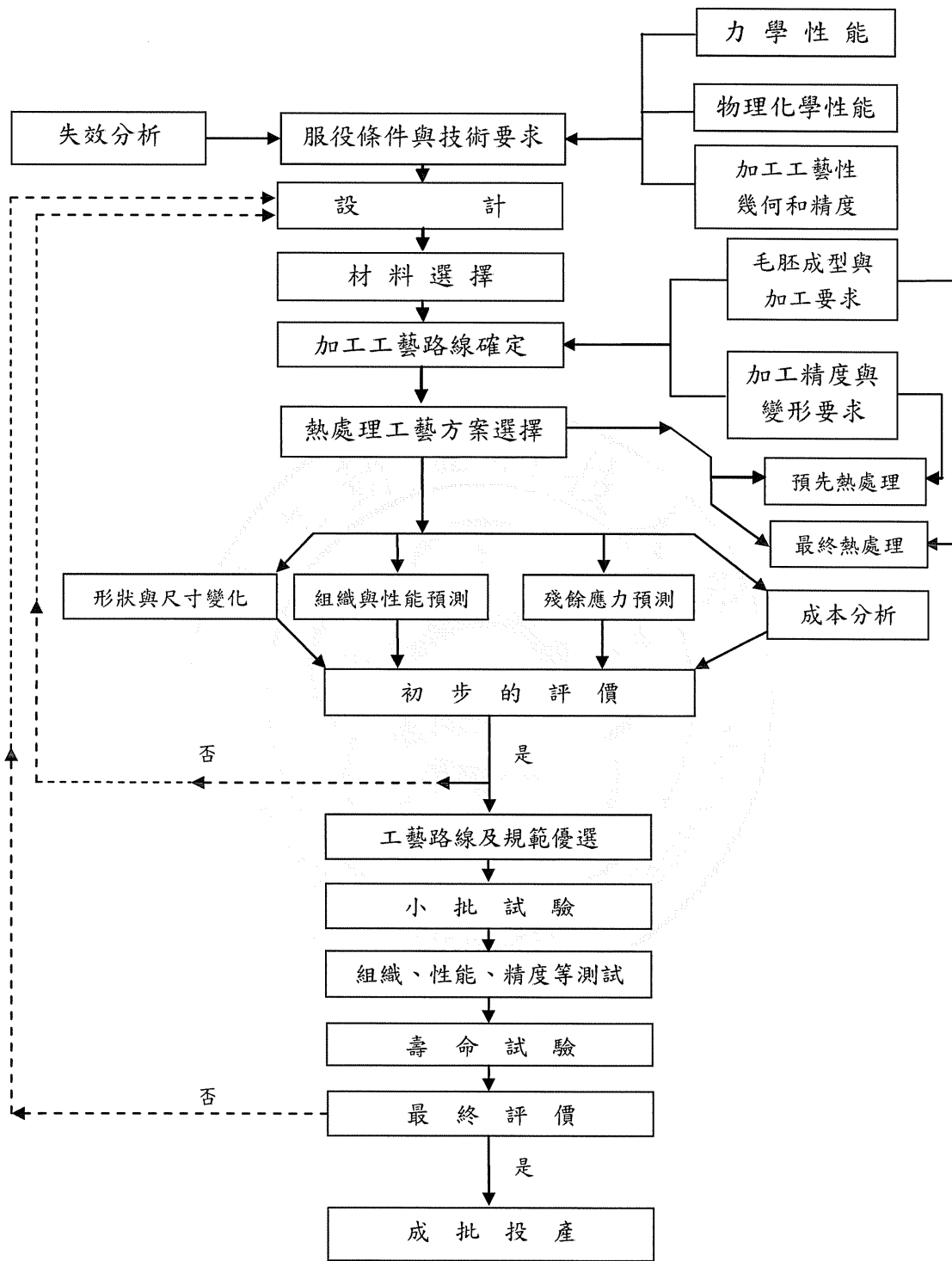


圖 2.1 熱處理最佳化設計的典型程序

4. 李正國等[14]述說：了解鐵—碳平衡圖是研究鋼鐵熱處理的第一步。

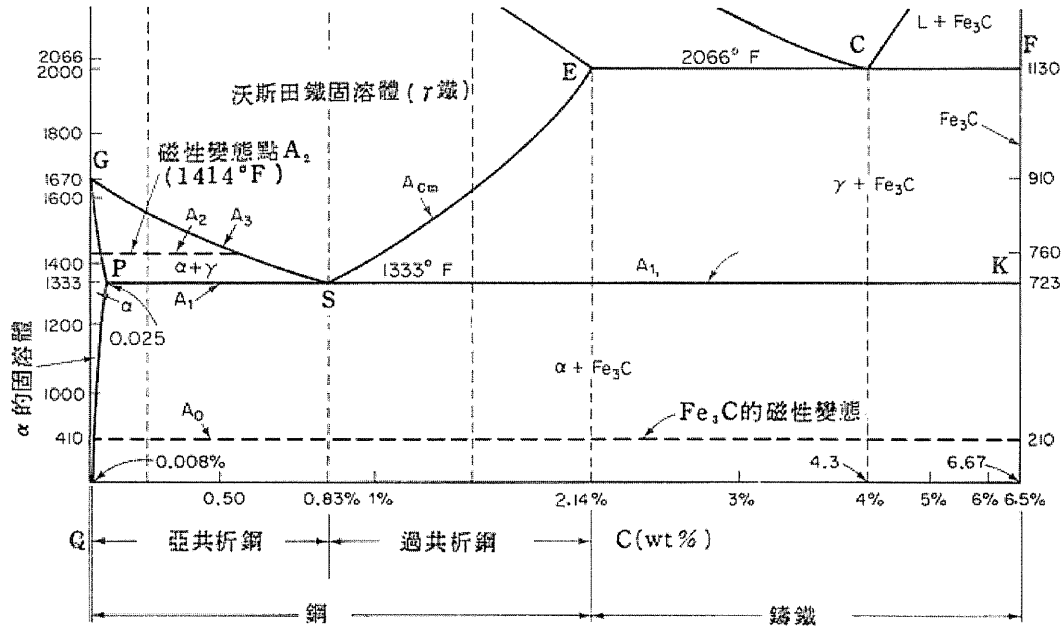


圖 2.2. Fe - Fe<sub>3</sub>C 平衡圖含碳量到 6.67 %

表 2.1 各種鋼變態

變態	變態點	變態之內容
加熱之變態	A <sub>c1</sub> * A <sub>c3</sub> A <sub>cm</sub>	波來鐵→沃斯田鐵 肥粒鐵固溶於沃斯田鐵內 雪明碳鐵固溶於沃斯田鐵內(過共析鋼)
冷卻之變態(連續)	A <sub>r1</sub> ** A <sub>r3</sub> A <sub>r'</sub> A <sub>r''</sub> M <sub>s</sub> M <sub>f</sub>	沃斯田鐵→波來鐵 由沃斯田鐵析出肥粒鐵 沃斯田鐵→波來鐵 沃斯田鐵→麻田散鐵 沃斯田鐵→麻田散鐵之開始點 沃斯田鐵→麻田散鐵之終止點
冷卻之變態(恒溫)	A <sub>n</sub>	沃斯田鐵→變韌鐵
其他	M <sub>D</sub> M <sub>s'</sub>	沃斯田鐵因加工引起麻田散鐵變態開始點 安定化沃斯田鐵之麻田散鐵變態開始點

\* 表示 A<sub>c</sub> 變態加熱時之變態時則加一 C 之符號。 \*\* 冷卻時則加一 r 之符號。

表 2.2 各種純鐵及鋼之變態

變態點	溫度 (°C)	變態之內容
A <sub>0</sub>	210	雪明碳鐵之磁性變態
A <sub>1</sub>	723	鋼之共析變態，波來鐵 ⇌ 沃斯田鐵
A <sub>2</sub>	760	純鐵之磁性變態，居里點
A <sub>3</sub>	912	純鐵及鋼之同素變態，α 鐵 ⇌ γ 鐵
A <sub>4</sub>	1400	純鐵及鋼之同素變態，γ 鐵 ⇌ δ 鐵
A <sub>cm</sub>	723~1130	過共析鋼中雪明碳鐵之析出或固溶
Ae		平衡狀態時之變態

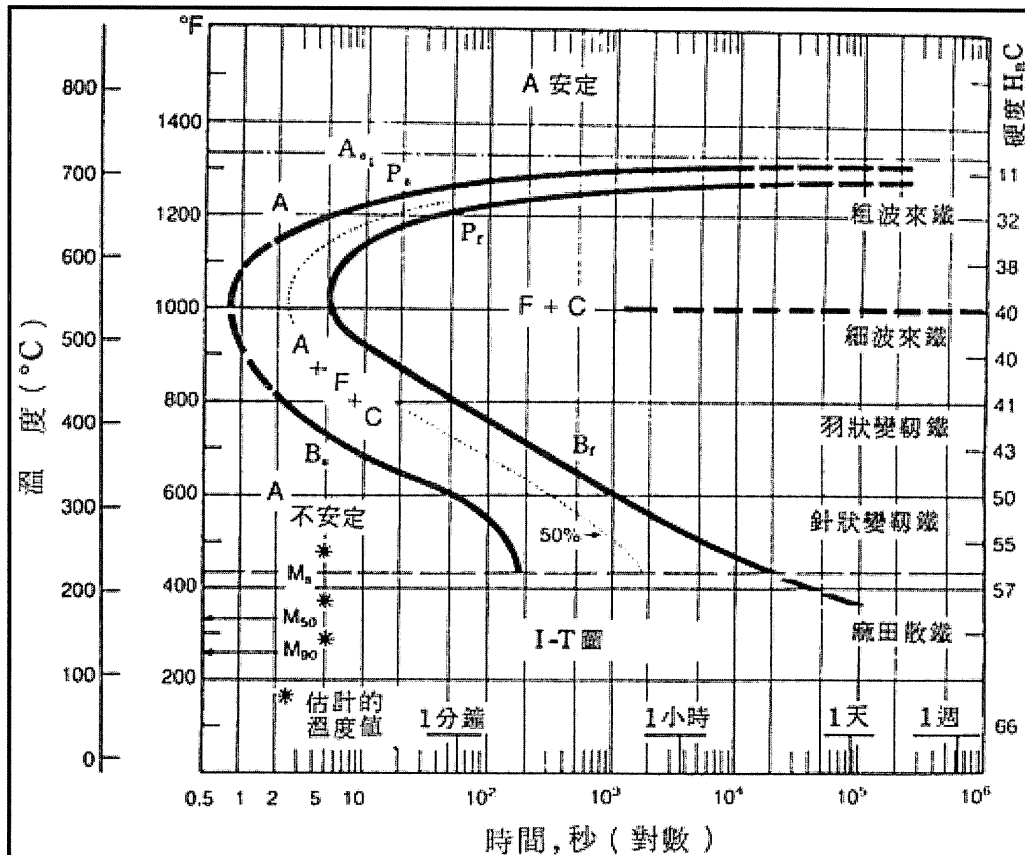


圖 2.3 1080 共析鋼的恆溫變態圖含 0.79% 碳，0.76% 錳。試片在 900°C 沃斯田鐵化，具有沃斯田鐵晶粒大小為 ASTM 晶粒號 6 號。(圖上 A：沃斯田鐵，F：肥粒鐵，C：雪明碳鐵)。

5. Reed-Hill and Abbaschian [15] 解說共析鋼的恆溫變態如圖 2.4 :

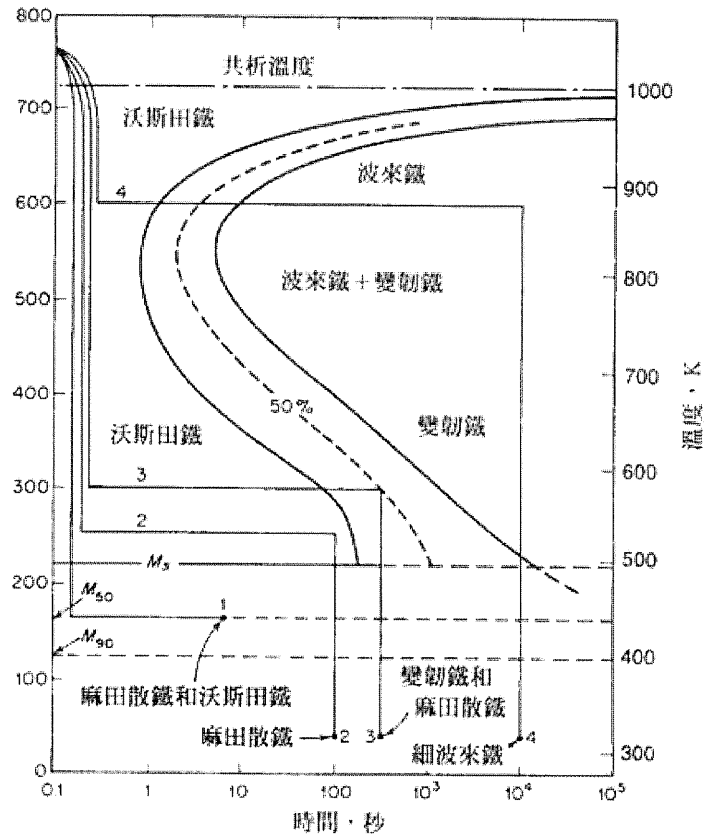


圖 2.4 在恆溫變態圖上的任意時間-溫度路徑

6. Honeycombe and Bhadeshia [16] 詳細解說變韌鐵的反應。

研究共析碳鋼的 TTT 圖時，波來鐵本質上是發生在 550-720°C 的高溫範圍，而麻田散鐵的形成為低溫反應，因此介於約 250-550°C 間呈現一個異於波來鐵及麻田散鐵相的寬廣範圍的相變態區域。這個範圍可形成細的肥粒鐵平板（或板條）及雲明碳鐵顆粒聚集體。這個中間相結構通稱為變韌鐵 (bainite)，此名稱乃因 Edgar Bain 及 Davenport 有系統的研究沃斯田鐵恆溫分解實驗中，首次發現這些組織。變韌鐵因此可以在冷卻速率快到波來鐵無法形成，並且冷速不足以產生麻田散鐵的兩條件間之滯溫熱處理下發現。變韌鐵的種類會隨著相變態溫度降低而改變，可區分為兩種主要的形式：上變韌鐵 (upper bainite) 及下變韌鐵 (Lower bainite)。

A. 上變韌鐵：(溫度範圍 550-400°C)

上變韌鐵的顯微組織由厚約 0.2 $\mu\text{m}$  及約長 10 $\mu\text{m}$  之細肥粒鐵平板所組成。平板以群聚的方式成長並將此稱之為束(sheaves)。每一束內之平板為互相平行且具有相同的晶體學方位關係，並且此晶體學關係有一明確的慣方位。在束內的獨立平板稱為變韌鐵的次單位(sub-unit)平板。它們常被「低錯方位」(low-misorientation) 邊界或雪明碳鐵顆粒所分隔。雪明碳鐵顆粒的析出和沃斯田鐵有「Pitsch」的方位關係，即：

$$[001]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [\bar{2}25]_{\gamma}$$

$$[100]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [5\bar{5}4]_{\gamma}$$

$$[010]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [\bar{1}10]_{\gamma}$$

B. 下變韌鐵：(溫度範圍 400-250°C)

下變韌鐵之顯微組織及晶體學特徵和上變韌鐵非常相似。主要的差異是下變韌鐵內的雪明碳顆粒會析出在肥粒鐵平板內。因此有兩種雪明碳鐵析出物：第一種是從隔離變韌肥粒鐵平板之富碳沃斯田鐵上形成；另一種是由過飽和肥粒鐵上析出。後者之碳化物具有「回火」方位關係，這種關係可於麻田散鐵做熱處理時之碳化物中觀察到，通常將此描述為 Bagaryatski 方位關係：

$$[001]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [\bar{1}01]_{\alpha}$$

$$[100]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [111]_{\alpha}$$

$$[010]_{\text{Fe}_3\text{C}} \parallel [\bar{1}2\bar{1}]_{\alpha}$$

藉由恆溫相變態也可能獲得上變韌鐵及下變韌鐵的混合組織。當上變韌鐵先形成，此時殘餘沃斯田鐵富碳程度會變得較高，並且當相變態持續進行時，殘餘沃斯田鐵則傾向形成下變韌鐵。

7. 鈴木健與古原忠[17]研究 SUP12 彈簧鋼施以 250 至 500°C 間六種不同沃斯回火處理後，發現 300°C 以下，形成片狀下變韌鐵 (plate-like lower bainitic ferrite)；400°C 以上形成條狀上變韌鐵(lath-like upper bainitic ferrite)；而 350°C 則兩者混合存在。

8. Waterschoot等[18]研究雙相鋼(Dual phase steels)中麻田散鐵的回火動力學發現：一般回火過程的微觀組織變化有五個階段：
  - A. 碳原子重新分佈
  - B.  $\eta$  或  $\varepsilon$  碳化物析出
  - C. Hägg碳化物的形成
  - D. 殘留沃斯田鐵的分解
  - E. 暫態碳化物變態成雪明碳鐵
  
9. Zhao等[19]論述：碳在鐵內的擴散，具有三個影響機械性質的機制：
  - A. 由插入介於格隙間(interstitial sites)的碳原子之的分佈機率所引發的應力
  - B. 碳偏析至差排內(dislocation)而形成的柯特瑞氛圍(Cottrell atmosphere)
  - C. 碳化物的析出。以上各種碳溶質再擴散分佈的現象，均可能發生於碳鋼進行應變時效(strain aging) (即加熱硬化)的過程。
  
10. Soenen 等[20]研究超低含量碳鋼的連續退火(continuous annealing-CA)熱處理過程中，碳原子偏析至晶界(grain boundaries)與差排(dislocations)的比較模擬。他們運用Monte-Carlo模擬法建構碳原子偏析的模型，亦以不同的鹽浴時間及冷卻速率進行連續冷卻實驗，以2kHz的torsion pendulum測量內部摩擦力(internal friction)得到碳原子的頻率變化，間接得其含量。結果發現：晶界所能儲存的碳原子，比以往的研究多出近四倍。這也顯示傳統的加熱硬化循環，忽視碳原子偏析至晶界的現象，是因其偏析至差排的動力學(kinetics)快甚多。
  
11. 王學等[21]研究以消除應力(SR)退火處理對WB36鋼粗晶性能的影響指出：SR處理脆化傾向，確定脆化敏感溫度，分析脆化機制。研究結果闡明，在590-620°C進行SR處理時，WB36鋼粗晶區具有較好的抗回火穩定性，組織精細，結構雖有一定變化，但仍保持較明顯的板狀麻田散鐵組織型態。隨著回火溫度的升高，粗晶區硬度逐漸降低，沒有出現二次硬化現象。粗晶區有明顯的SR處理脆化傾向，韌性損失率超過66%，脆化敏感溫度在590°C附近。超過620°C後，脆化程度明顯減輕。粗晶區SR處理脆化原因是起因於高溫回火脆性。

12. 日本ばね技術研究会[1]指出：應用於彈簧的回火(tempering)或退火(annealing)作業，稱為發藍處理(bluing)。彈簧施以熱處理的目的在於：
- 提高彈性限度等機械性質，改善潛變特性
  - 消除彈簧的加工殘留應力，改善耐疲勞性
13. Llano-Vizcaya等[22]曾以傳統不同加熱溫度的熱處理參數，探討消除應力對壓縮彈簧的疲勞與機能衰退的影響。

1st Group: 190 °C – 5 min      5<sup>th</sup> Group: 280 °C – 15 min  
 2nd Group: 280 °C – 5 min      6<sup>th</sup> Group: 400 °C – 5 min  
 3rd Group: 280 °C – 10 min  
 4th Group: 400 °C – 20 min

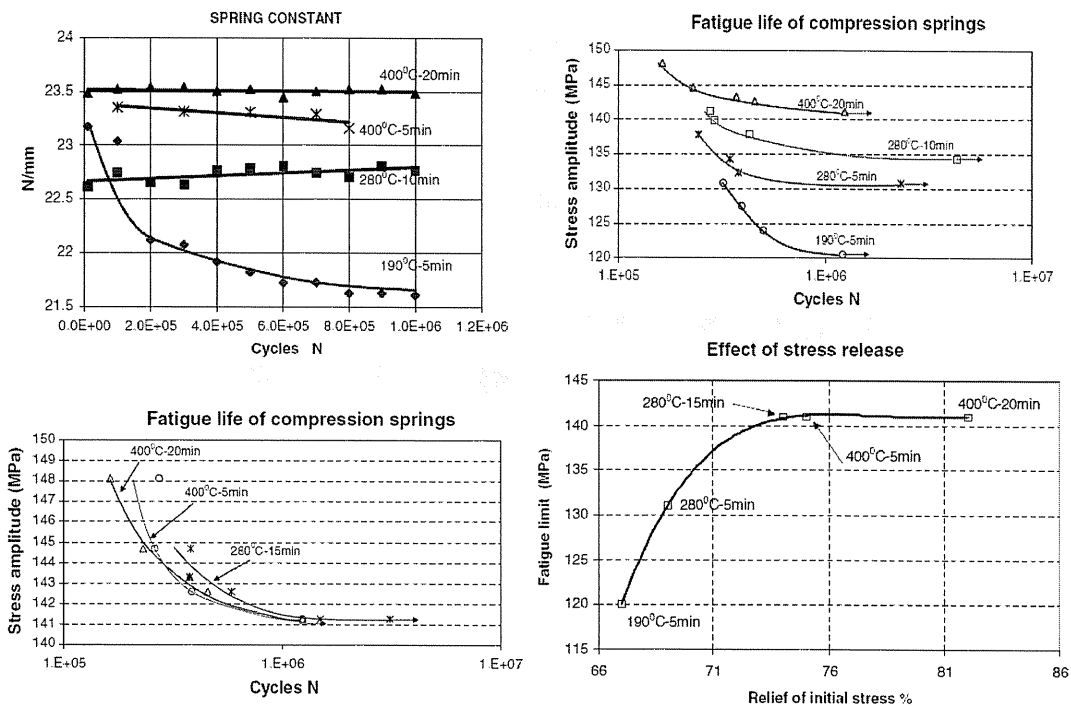


圖 2.5 不同熱處理參數對彈簧機能的影響 [22]

14. 真空學會[23]的網頁建構有真空的基本歷史知識(<http://www.tvstvs.org.tw>)

15. 機械工程手冊八—熱處理與表面處理[13]論述真空熱處理：

金屬在一定的真空度下進行加熱時，除可避免氧化燒損、得到光亮的表面質量外，還有脫脂、表面氧化物分解及合金原素的蒸發等效應。在真空中加熱，



可清除金屬表面的油質和切削液，使氧化物分解，表面達到活化狀態，以改善表面質量和促進化學熱處理的初期反應。合金原素的蒸發，尤其是Cr、Mn等易蒸發元素的減少會降低鋼的常溫和高溫力學性能。因此，高合金鋼要避免在高溫、高真空下長時間保持，若必須長期保持時須通入一定量的惰性氣體至爐中。一般真空加入時間應為氣氛爐的2倍，為鹽浴爐的6倍。金屬製品在真空中加熱後要以適當的速度冷卻才能達到所要求的熱處理質量。真空加熱後工件仍需在氣體或液體介質中冷卻。

16. 林衍志等[24]論述真空熱處理的技術與應用，指出：

真空熱處理(Vacuum Heat Treatment)是目前台灣熱處理界的主要技術，應用對象涵蓋了模具、刀具、工具、零件…等之退火、硬化、固溶與時效、硬焊等製程。有別於早期的鹽浴爐與氣氛爐，真空熱處理是在抽除空氣後，讓被處理物在氮氣的保護下進行升溫與持溫，然後採用高壓氣淬或油冷方式急遽冷卻，達到麻田散鐵化的目的，因此被處理物的表面具有金屬光澤。由於作業環境佳、品質的再現性穩定與被處理物的色澤優良，因此已成為刀、工、模具的主要處理方式。真空熱處理，顧名思義，好像就是在真空當中進行熱處理，其實並不然。較先進的真空熱處理爐備有熱風循環加熱功能，也就是在抽除工件進爐時腔體內保留下來的空氣後，由供氣系統灌入一大氣壓以上的氮氣，藉著攪拌風扇的轉動讓工件在氮氣的循環保護下升溫，此項功能除了讓被處理物不受氧化或脫碳之外，最大的效益是讓被處理物能夠快速且均勻的升溫。其原理乃在於低溫階段中，熱風循環加熱方式的熱量傳遞效率遠高於真空中的輻射傳導。

17. 包耳等[25]：

真空熱處理以其所具有的無氧化、無脫碳、脫氣、脫脂、表面質量好，變形微小，綜合力學性能優異，無污染無公害，自動化程度高等一系列突出優點，正在逐步取代傳統的空氣加熱常規熱處理手段。制定真空熱處理工藝的主要內容是：確定加熱制度(溫度、時間及方式)；決定真空度和氣壓調節；選擇冷卻方式和介質等。

A. 加熱溫度

真空加熱有兩大特點，一是在極稀薄的氣氛中加熱，避免了在空氣中加熱的氧化、脫碳、浸蝕等現象；另一特點是真空狀態下的傳熱是單一幅射傳熱，其傳熱能力  $E$  與絕對溫度  $T$  的四次方比成正比，即  $E = C(T/100)^4$ 。由此可知，真空狀態下尤其在低溫階段的升溫緩慢。從而易於使工件表面與心部之間的溫差小，熱應力小，工件變形也小。

B. 保溫時間

保溫時間長短與下列因素有關：

- (1) 裝爐量
- (2) 工件擺放形式
- (3) 加熱溫度

C. 冷卻時間

- (1) 預冷
- (2) 空冷
- (3) 抽冷

18. 溫東成等[26]：

選擇優良性質之模具材料時，除須考慮需具有良好之加工性、強韌性、耐磨耗性、良好之熱處理性質與變形少等優點，以提高模具壽命之外，又由於模具在使用時，受到連續不斷的衝擊與磨耗之作用，其作用結果更是造成模具壽命簡短之主因。其用以實驗之熱處理材料係採用模具業界廣用之真空熱處理法，經過  $1030^{\circ}\text{C}$  溫度淬火硬化，提升其硬度，再予以  $430^{\circ}\text{C}$  溫度回火處理，以消除殘餘之應力及沃斯田鐵。

19. 真空熱處理法之優劣比較於下[11]：

A. 優點：

- (1) 保持真空狀態只需供給動力即可
- (2) 沒有滲碳、脫碳及氣體融入金屬等副作用：反之金屬的脫氣效果良好，表層的氣體 ( $\text{N}_2, \text{H}_2, \text{O}_2$  等) 易逸出，氮化物、氫化物在真空加熱時會分解。
- (3) 若只需維持適當真空度，則操作十分簡單。
- (4) 真空熱處理可得光輝外表，尺寸變化少，可省機械加工費用，此外材料

之衝擊值也比其他熱處理者高。

B. 缺點：設備昂貴

- (1) 熱傳導緩慢，因此加熱冷卻速度很慢，均熱性也不好。
- (2) 急冷等熱處理操作很不方便，連續作業非常困難。
- (3) 由於真空加熱爐的構造所限，大規模及大量生產較費事。

20. 金重勳[11]論述氧化及脫碳：鋼鐵在空氣、失效的保護劑或氧化性鹽浴內會氧化，產生回火色（Temper color）或鏽皮（Scale）；氧化會伴生脫碳，含碳量越高之鋼料脫碳越嚴重。還原性氣氛也會導致脫碳。氧化與脫碳都會導致材料外表之劣化，為熱處理作業中需積極預防者。

21. 金重勳[11]論述熱處理過程產生之應力有兩個主因：

- A. 內外溫度差導致脹縮量不同，引起的熱應力，
- B. 變態所生體積變化引起的變態應力。這些應力有大有小，若大到超過材料的降伏強度，則材料會變形，甚至於破裂。

22. Reed-Hill and Abbaschian [15]解說回火時間和回火溫度間的相互關係：

時間和溫度對鋼料回火有相對的影響，尤其在雪明碳鐵和肥粒鐵群集的階段。

圖 2.7 中各曲線對應於所設定的各不同的回火溫度，每條曲線顯示在特定的回火溫度下，硬度視回火時間而定。

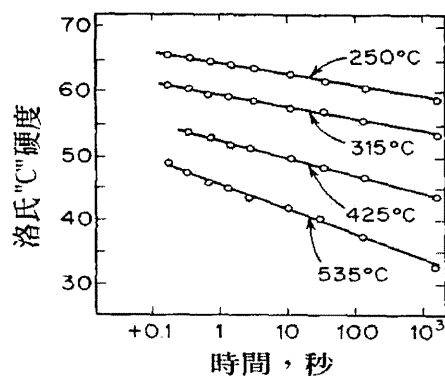


圖 2.6 時間和溫度對回火鋼硬度的影響(0.82%碳，0.75%錳)[15]

23. Grenier 與 GIngras[27]論述彈簧快速消除應力的製程：

傳統上，冷間或熱間成型後的彈簧皆以固定的溫度及時間，消除其製造時所導入的加工應力，這往往需耗費不少時間，減低生產的經濟性。且傳統的回火爐內溫度的均質性亦不是很理想，重要的是必須控制回火處理時的熱傳導 (Heat transfer)，而非執著於固定的溫度或時間。再以 Larsen Miller equation 來論， $[TE = T^{\circ} \times (\text{LOG } t + R)]$ 式中最重要參數也是溫度。製程愈快速，越需要精密控制熱傳。文獻中亦舉 Pyromaitre 發展的“Pyrograph”與“Pyrotemp”熱傳模擬軟體，求取消除應力的最佳快速回火製程，以提升整體熱處理的生產力。



## 2.1.4 應力分析

### 1. Matejcek 等[28]論述彈簧成型時鄰近表層所導入的切線應力：

此應力可能起因於包興格效應(Bauschinger effect—其機制與冷作金屬內的差排有關，當變形發生時，差排會侷聚在障礙處，並逐漸堆疊交纏起來)或塑性應變硬化；欲消除彈簧的加工殘留應力，須求取下述因素的最佳化：加熱溫度、線材強度、珠擊強度與預壓條件。研究中又以中子繞射(neutron diffraction)量測個別製程中的殘留應力：

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (1)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{d - d_0}{d_0} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{aa} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{aa} + \nu(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{tt})] \\ \sigma_{rr} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{rr} + \nu(\varepsilon_{tt} + \varepsilon_{aa})] \\ \sigma_{tt} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_{tt} + \nu(\varepsilon_{aa} + \varepsilon_{rr})] \end{aligned} \quad (3)$$

- A. 剛加工成型的彈簧具有近乎單軸向的殘留應力，峰值約  $\pm 900\text{MPa}$ ，且所在位置與繞曲位置(coil position)無關。
- B. 經彈簧工廠施以應力消除(stress relieved)熱處理後的彈簧，其殘留應力的形式與前者相同，但峰值降至  $\pm 200\text{MPa}$ 。另外兩個同批製造彈簧，則送至實驗室的試驗爐做熱處理，比工廠熱處理溫度各高 28K 與 56K；提高 28K 並無太大不同，但提高 56K 時，殘留應力的峰值下降約 35%。
- C. 經預壓(preset 又稱 bulldozed)至密著長度後的彈簧，縮短了約 40mm(原自由長約 390mm)，但其切線方向的主應力值與熱處理過的彈簧差異不大，因為預壓的軸向力對彈簧施以扭距，故預壓是導入剪應力，並不會對主應力有太大影響。

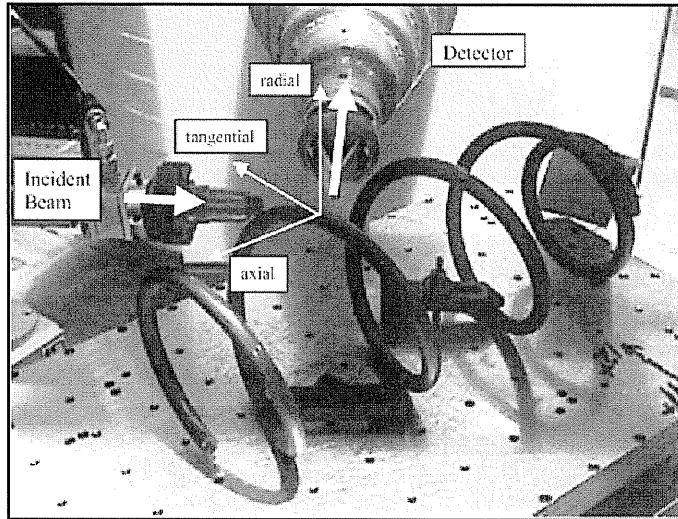
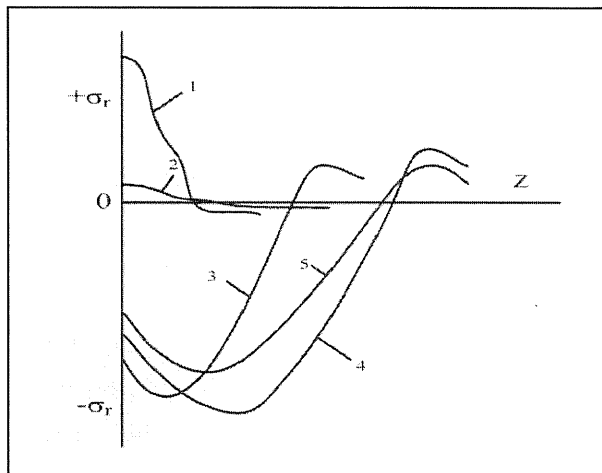


圖 2.7 中子繞射測量彈簧之殘留應力[28]

2. Wang[29]探討彈簧施以冷作成型製程中的殘留應力：

彈簧於冷間成型時因塑性變型後所導入的殘留應力，在內側為張應力 (Tensile residual stress-TRS)，在外側為壓應力 (Compressive residual stress-CRS)。TRS 可用回火製程予以降低，而 CRS 是特意另以滲氮珠擊製程導入彈簧於彈簧表層。又預壓 (prestressed, setting) 製程的效果在：抗應力衰緩的穩定化及彈簧尺寸的穩定化。故控制了殘留應力，便可控制彈簧的抗疲勞 (fatigue resistance)、抗應力衰緩 (stress relaxation resistance) 與抗永久變形 (permanent deformation resistance)。



製程說明：

1. 冷間成型
2. 回火
3. 滲氮
4. 珠擊
5. 預壓

圖 2.8 各製程導入彈簧的殘留應力示意圖[29]

3. 日本彈簧學會[30] 提出計算螺旋彈簧應力的簡易方法主要是針對彈簧計算應力的修正係數(日本使用wahl's公式，而歐洲多採用Bergsträssens公式)提出比較。這些公式不太適用於計算間距角(pitch angle)較大的避震器彈簧。因為當pitch角增大時，除了須考量彈簧內側的剪應力外，更需注意外側因彎曲力矩所引發的最大主應力。
4. Todinov[31]研究彈簧指數較大的壓縮彈簧指出：在外側區域的最大應力易導致疲勞裂紋起點的產生。並推導最大主拉伸應力與裂紋起點的方程式，若運用珠擊工法可有效降低裂紋傳播。

$$\sigma_t(\varphi, P) = \frac{PRr}{2I\sqrt{1+(a-bP)^2}} \left( (a-bP) \left( \cos\varphi - \frac{1}{4C} \right) + \sqrt{1 + \left( \frac{M^2}{C^2} + (a-bP)^2 \right) \cos^2\varphi - 2 \frac{M}{C} \cos\varphi \cos 2\varphi + \frac{(a-bP)^2}{2C} \left( \frac{1}{8C} - \cos\varphi \right)} \right) \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_t^{max} = \max_{\varphi} \{ \sigma_t(\varphi, P_{max}) - \sigma_t(\varphi, P_{min}) \} \quad (5)$$

5. 王仁智[32]

闡述了殘餘應力與彈簧高周疲勞極限間的關係，討論了表層殘餘應力在改善彈簧疲勞品質的重要性以及製造流程中引入彈簧內殘餘應力的各種加工工藝，建立了殘餘應力場特性參量與彈簧高周疲勞極限間的定量關係。以內部疲勞極限理論為基礎，提出了彈簧表面優化噴丸殘餘應力場的工程計算方法。

為獲得疲勞品質優良的彈簧，一要優良的結構設計，二要合理的選材，三要先進的加工工藝。在設計和選材完成之後，加工工藝就是決定其疲勞品質優劣的關鍵環節。所謂加工工藝，這裡主要指能有效的引入或消除彈簧殘餘應力的各種加工工藝，其中主要有：①引入殘餘拉/壓應力的冷捲成形工藝；②消除殘餘拉應力的回火工藝；③引入殘餘壓應力的表面形變強化工藝(其中包括表面噴丸形變強化，表面離子滲氮等)；④熱預壓工藝。

$$\sigma_t = \sigma_{t,max} + \sigma_{t,ap} = \frac{\sigma_{rs}Z_e + \sigma_{t,max} \cdot Z_o}{2(b-Z_o)} + \sigma_{ap} \left( 1 - \frac{Z_o}{b} \right) \quad (6)$$

採用其提出的優化殘餘應力場工學計算法，可迅速便捷的找到符合準據要求的表徵優化殘餘應力場的四個特徵參數，然後再從工藝上調整、選擇導入符合特徵參數要求的表面強化工藝規範。由此可見，提出工程計算法可使強化工藝規範的確定性，並減少盲目性，提高科學性和預見性。

## 2.1.5 模擬分析

### 1. 康淵、陳信吉[33]指出：

電腦具有快速運算能力，常被工程師用來計算分析其設計的產品，進而達到輔助設計分析的目的。使用電腦輔助分析可在電腦上模擬結構物受外力後所產生的應力及應變情況，在動態方面，如共振頻率或其他方面的特性。從分析的特性資料中，可判斷設計的可行性。因此可快速驗證產品的設計，加快產品的上市時間，提高生產時的良率與品質。有限元素法發展上從 Matrix Structural Analysis 的方法開始，首先應用於 Beam 及 Truss 為主的鋼構上，而後將理論引用至各個物理領域，例如熱傳、流力等。其計算法則，是將這些小單元轉換成彈簧與質量點相連接之剛性系統，而後使用虎克定律來進行求解。這些小單元稱為元素 (Element)，而組成元素的參考點稱為節點 (Node)。剛性強度矩陣，牽涉到不同的假設與數值方法，例如能量法、Rayleigh-Ritz 法等。

ANSYS 軟體架構：在結構上，電腦輔助分析軟體大多具有前處理器，分析器及後處理器等三個基本模組。另外 ANSYS 也包含有最佳化設計等特色的模組。

#### A. 前處理器的角色：

- (1) 選用適當的元素，定義元素特性及材料性質。
- (2) 建立被分析結構物的實體模型。
- (3) 產生有限元素模型：當實體模型建立完成後，需將其加以網格化而建立有限元素模型，

#### B. 分析器：

前項所產生的有限元素模型，在此模組中設定邊界條件並進行分析。

- (1) 確立分析方式及其解法選項。
- (2) 設定拘束邊界條件。
- (3) 設定外力或能量源的邊界條件。
- (4) 設定輸出入控制與求解。

#### C. 後處理器：

將分析的結果以圖形或文字的形式表現出來，以做為判斷分析之用。



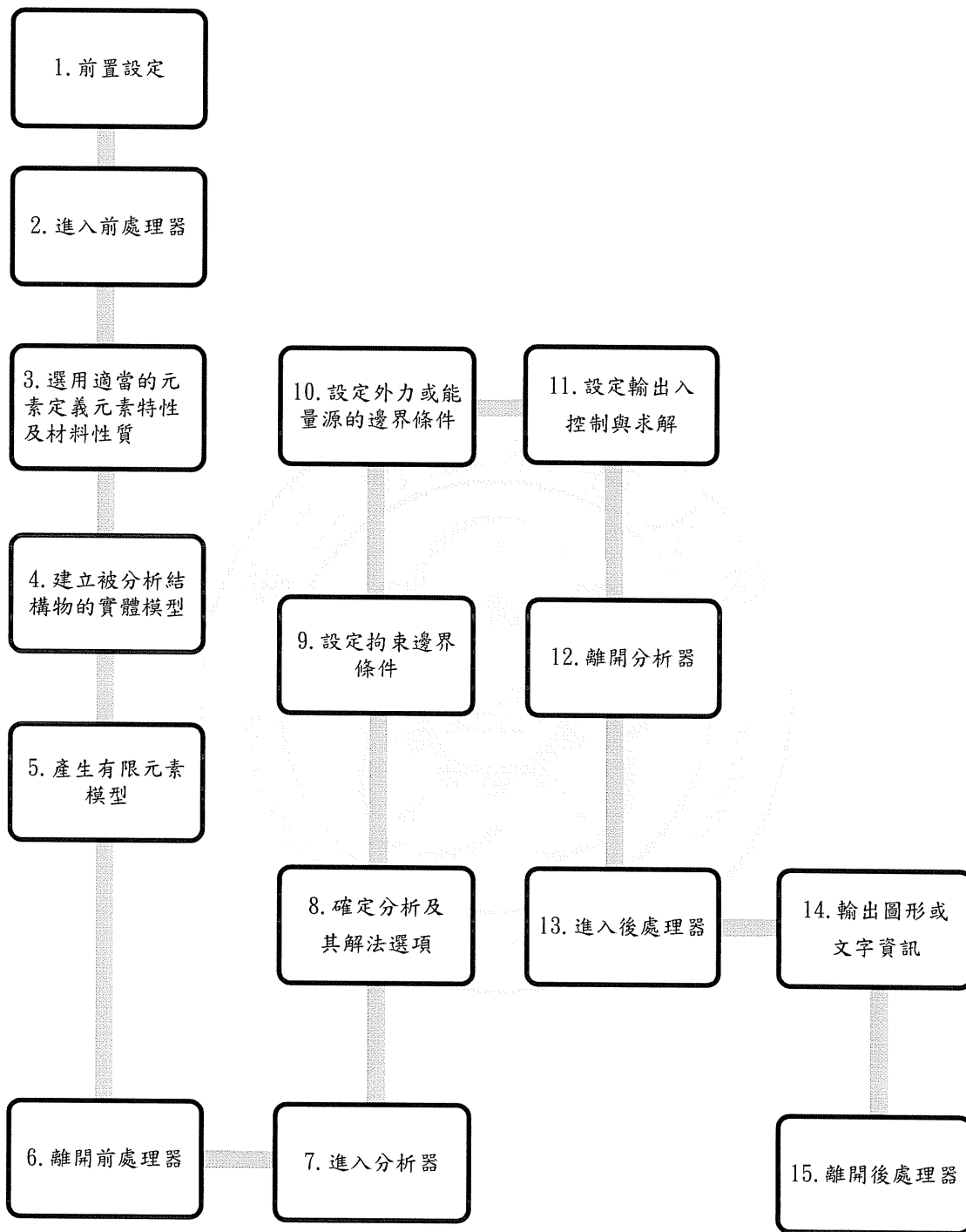
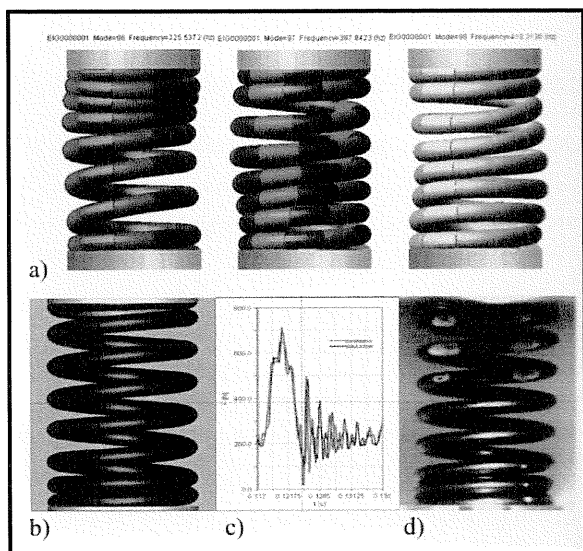


圖 2.9 ANSYS 分析處理作業流程圖[33]

2. Klelzin 與 Welss[34]論述數值彈簧設計(Numerical Spring Design)的方法：

彈簧具有複雜的幾何外觀，作動時發生很大的彈性變形。在動態作動環境下，彈簧的自然共振頻率所導致的高壓力水準、摩擦力、噪音及橫向移動，大大提高分析的困難度。且若以實際試驗做分析，是曠費時日的工程。因此，使用數值模擬程式足以克服上述困難，提供具經濟效益的設計流程。因此他們發展兩套功能



強大的物件導向(object-oriented)程式：

FEM – Spring processor 與 MBS – Spring processor，使用者不需具備特殊的數值方法知識，如有限元素法(Finite Element Method)，多重物體系統(Multi-Body System)，且其圖形化的使用者介面十分容易上手。

- (a) 閥門彈簧的自然頻率動畫
- (b) MBS-Model 的凸輪驅動動畫
- (c) 彈簧動態模擬結果與量測的比較
- (d) 與(b)同步的高速攝錄影像

圖 2.10 MBS-Springprocessor 動態分析圖[34]

3. Yu, Yang 與 Nie[35]研究斷面均勻且呈自然彎曲及扭曲形狀的樑之自由振動狀況：他們以 Washizu 的空間彎曲樑模型為基礎，對兩端固定且承受彎曲、剪切、扭轉之複合力矩的撓曲變形進行研究。並以 Mathematica 軟體計算其自然頻率。再以 ANSYS 模擬驗證比較數學模型及計算軟體，三者間的結果相當吻合，最後，將該模型套入圓斷面，固定兩端，驗證其自然頻率與理論及實驗的結果。

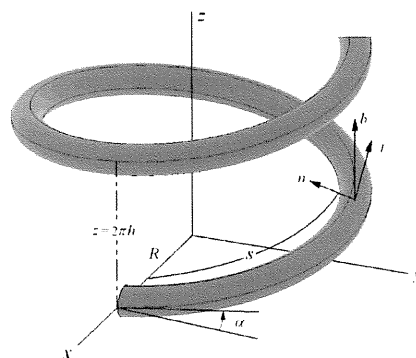


圖 2.11 典型筒狀螺旋彈簧的立體幾何形狀[35]

4. Jiang 與 Henshall [36] 建構一個承受軸向負荷(張力、扭力)的螺旋彈簧之泛用且正確的有限元素模型。由於其設定精密的邊界條件，故僅需稍微調整建置線材截面的模型便可，並舉一圓截面的彈簧作為分析對象。

$$\begin{pmatrix} u'_x \\ u'_y \\ u'_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s + \delta\theta_s) & -\sin(\theta_s + \delta\theta_s) & 0 \\ \sin(\theta_s + \delta\theta_s) & \cos(\theta_s + \delta\theta_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2r \sin(\delta\theta_s/2) \sin(\theta + \theta_s + (\delta\theta_s/2)) \\ 2r \sin(\delta\theta_s/2) \cos(\theta + \theta_s + (\delta\theta_s/2)) \\ \delta z_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

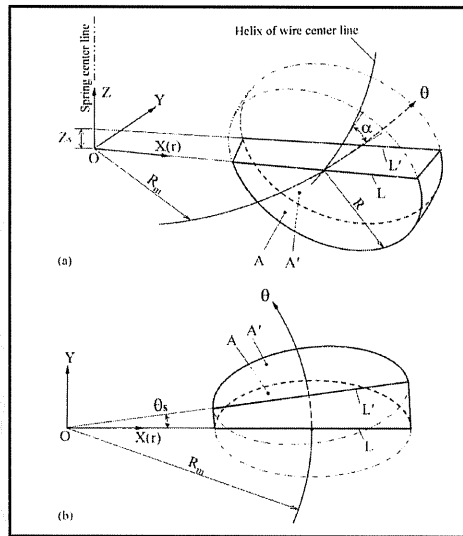


圖 2.12 螺旋彈簧的有限元素幾何圖形[36]

5. Pöllänen 與 Martikka [37] 運用模糊(FUZZY)理論設計螺旋彈簧，其最佳化目標在尋求以最小的線材體積、空間限制，達成需要的彈簧常數、避免顫動頻率、可靠的疲勞壽命；並以 MCS Nastran FEM 程式驗證其結論。

$$\begin{aligned} G = & G_1(\text{cost}) \bullet G_2(\text{goodm}) \bullet G_3(\text{misch}) \bullet \\ & G_4(\text{spott}) \bullet G_5(\text{taul}) \bullet G_6(\text{lifeA}) \bullet \\ & G_7(\text{surge}) \bullet G_8(\text{spring}) \bullet G_9(\text{height}) \end{aligned} \quad (8)$$

$G$  為設計事件(design event)， $G_1$  考慮成本， $G_2$  考慮 Goodman 安全係數， $G_3$  考慮 Shigley-Mischke 安全係數， $G_4$  考慮 Spotts 安全係數， $G_5$  考慮珠擊工程安全係數， $G_6$  考慮疲勞限， $G_7$  考慮自然頻率， $G_8$  考慮彈簧常數， $G_9$  考慮彈簧長度。總滿足函數( $P$ )即以上各設計事件的乘積。

$$P(G) = P(G_1) \bullet P(G_2) \bullet P(G_3) \bullet \dots \bullet P(G_7) \bullet P(G_8) \bullet P(G_9) \quad (9)$$

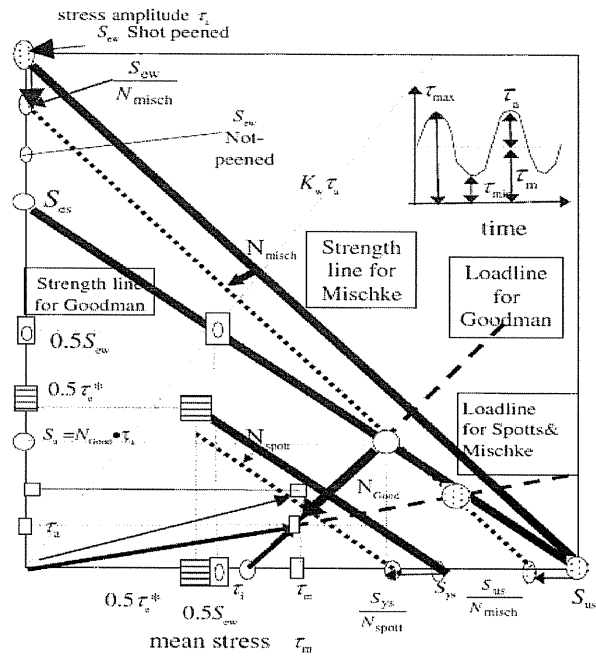


圖 2.13 應力與應力振幅及疲勞強度的關係[37]

6. 方亮賓等[38]研究非圓柱形螺旋壓縮彈簧的特性：需考量因彈簧大變形導致線圈與線圈接觸所造成的影響。

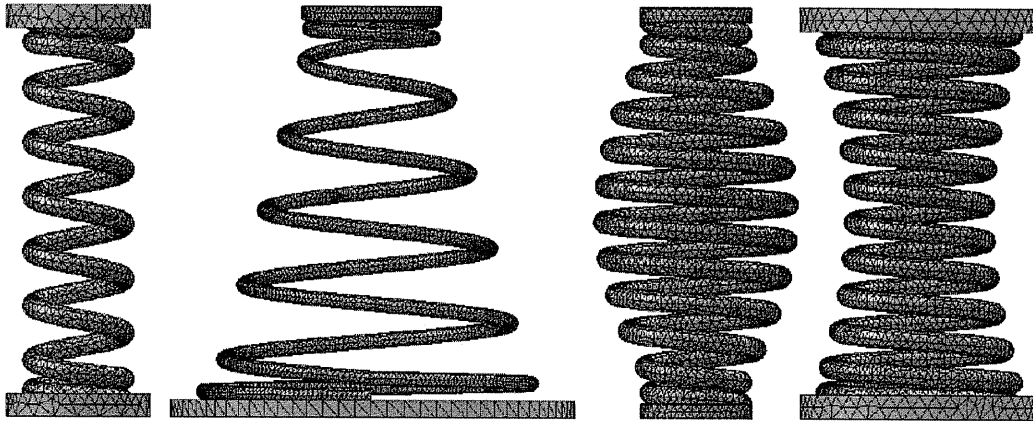


圖 2.14 各種不同外型的壓縮彈簧的網格[38]

## 2.1.6 失效分析

1. Das[39]等指出：材料缺陷與製程不良是導致彈簧故障、失效(failure)的主因。其研究方法包括：用 SEM 探討顯微組織，OM 探討雜質的額定值(inclusion rating)，硬度試驗，以 XRD 測量殘留應力，儀器化學分析。

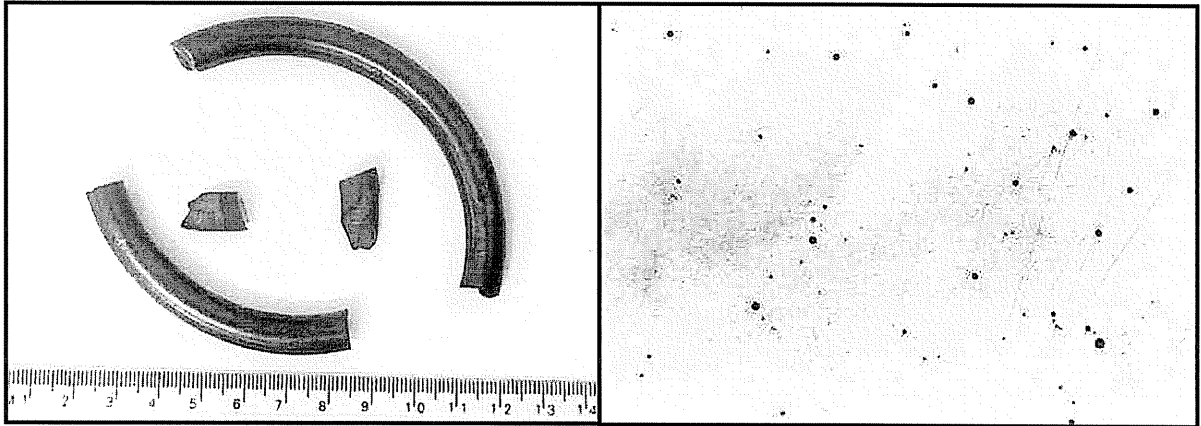


圖 2.15 斷裂的彈簧實物(左) 含氧化雜質的 100 倍斷面光學顯微組織(右)[39]

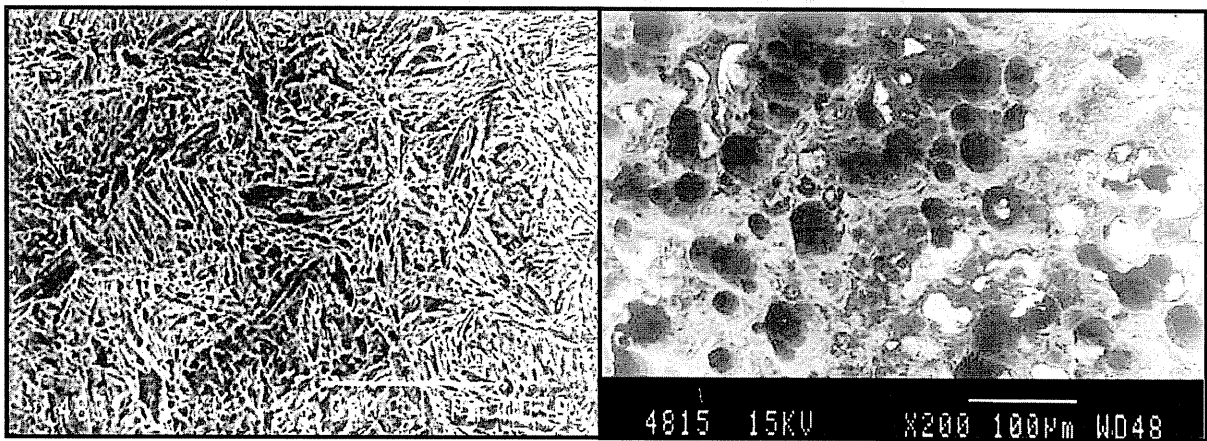


圖 2.16 回火麻田散鐵的 SEM(左) 破斷處的凹窩(dimple)與氧化雜質 SEM(右)[39]

2. Kimura[40]使用抗拉強度 1900MPa 的彈簧鋼，表面施以珠擊後，加以腐蝕及刻以人工凹痕(pit)，再進行扭轉疲勞試驗。發現彈簧鋼添加 Cu 與 Ni 時的耐腐蝕壽命，比添加 Cr 與 V 時較佳。因為後兩者會使得彈簧鋼凹痕加深，且腐蝕反應時招致更低下的 pH 值。

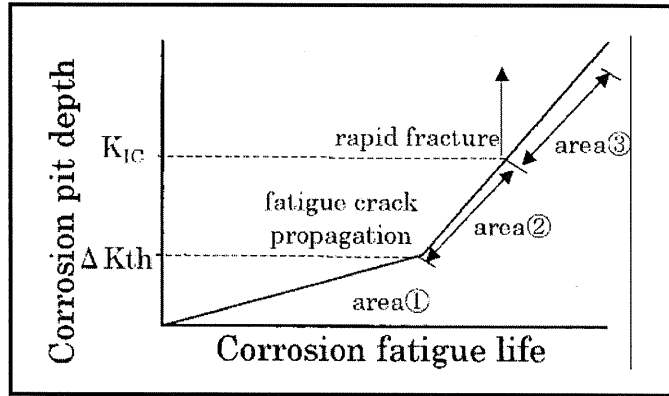


圖 2.17 腐蝕疲勞破壞過程[40]

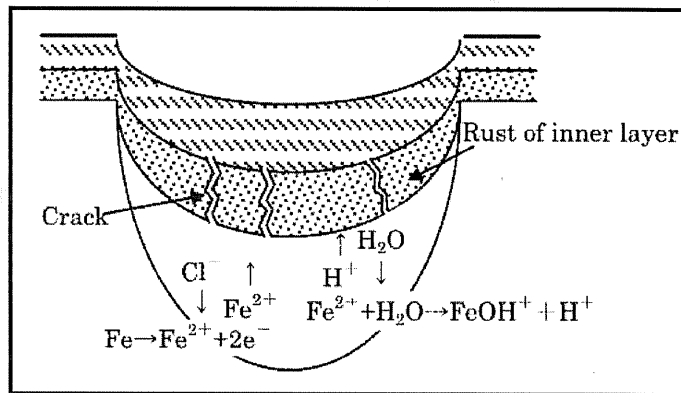


圖 2.18 陽極腐蝕(anodic dissolution)破壞過程示意圖[40]

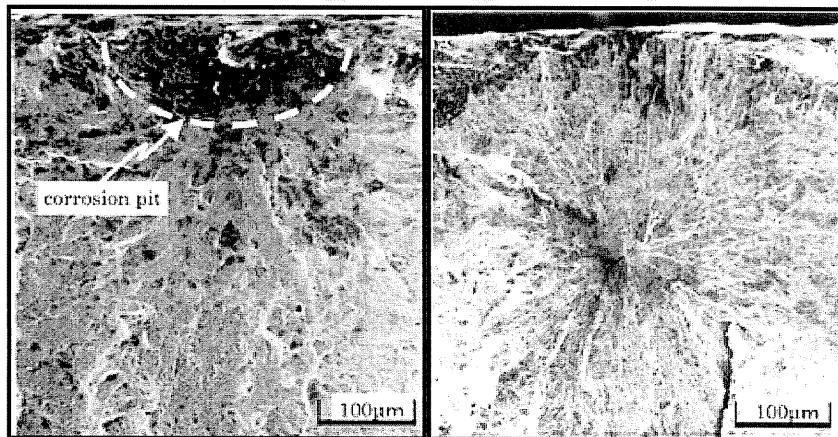
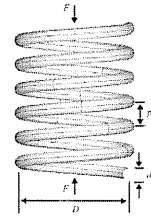


圖 2.19 腐蝕疲勞破壞面的 SEM[40]

3. Llano-Vizcaya[41] 運用多軸向疲勞準則(multi-axial fatigue criteria)預測壓縮彈簧的疲勞壽限，並以實際實驗比較之。應力分析使用 ANSYS 軟體；而多軸向疲勞準則則以 nCode 疲勞軟體預測。預測結果以 Fatemi-Socie 法則最佳；而 Wang-Brown 法則的評估過度樂觀；Coffin-Manson 法則的預測較保守。

4. Nohut 與 Schneider [42]以分析及數值計算方法，研究陶瓷螺旋彈簧(Ceramic coil springs)失效的機率指出：內部立體及表面的裂縫(flaws)是導致破壞的主因。



(1)由內部立體裂縫(volume flaws)引起的破壞機率：

$$P_{F,V}(\tau_{l,max}) = 1 - \exp\left(-\frac{4S_V(m)V_{spring}}{\pi^2 V_0} \left(\frac{\tau_{l,max}}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (10)$$

(2)由表面裂縫(surface flaws)引起的破壞機率：

$$P_{F,S}(\tau_{l,max}) = 1 - \exp\left(-\frac{S_S(m,C)S_{spring}}{\pi^2 S_0} \left(\frac{\tau_{l,max}}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (11)$$

5. 伍懷強[43]研究汽門彈簧疲勞斷裂的失效分析，指出彈簧破壞的主要原因為：線材內部存在非金屬的夾雜物，又鋼絲表面有裂紋或皺摺。

6. 何邦弘、龔志明、高海英[44] 研究因火災事故導致 SV126 安全閥彈簧斷裂失效分析：

彈簧經高溫加熱，使得材料晶粒粗大化，晶粒邊晶氧化，有害的間隙成分順勢在晶界偏析，使晶界的強度脆弱。在事故搶救過程中，高溫的彈簧受到極冷水勢降溫，令其產生較大的熱應力，使得晶界已脆弱的彈簧產生沿晶界發展的裂紋，最終形成貫穿彈簧表面的網狀裂紋，引發了彈簧的全面斷裂。

7. 白明遠，江濤[45]探討 II<sub>a</sub> 彈簧斷裂失效分析：確定彈簧的失效性質為過載斷裂，製程中彈簧的內圈產生了錫脆裂紋，裂紋降低彈簧的承載能力，錫脆現象有三個前置條件，存在錫元素、適當的拉應力、較高的溫度，故可推估錫脆發生於除氫工序中。

8. Prawoto 等[46] 探討車輛用避震彈簧的失效模式指出:隨著全球運輸產業對輕量化與節能需求的趨勢,各種汽車零組件承受著比以往更大的應力,若材料內部成分不均勻或含有矽酸鹽(silicate)等雜質、缺陷、或表面瑕疵,熱處理不當、遭受腐蝕、表層脫碳等等皆是導致彈簧斷裂失效的潛在惡因。

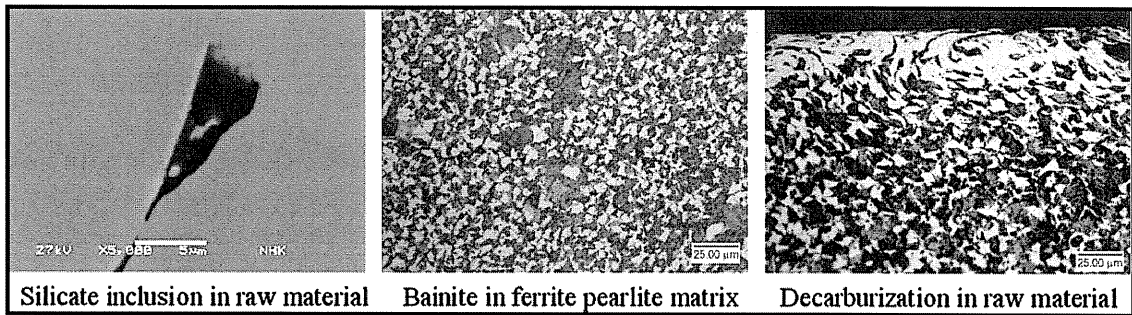


圖 2.20 材料內部含雜質、成分不均勻、表層脫碳[46]

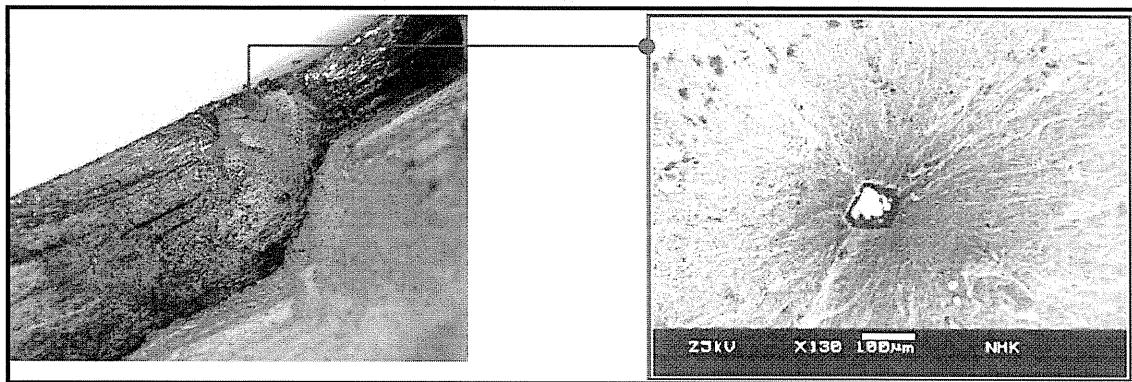


圖 2.21 彈簧因雜質導致斷裂[46]

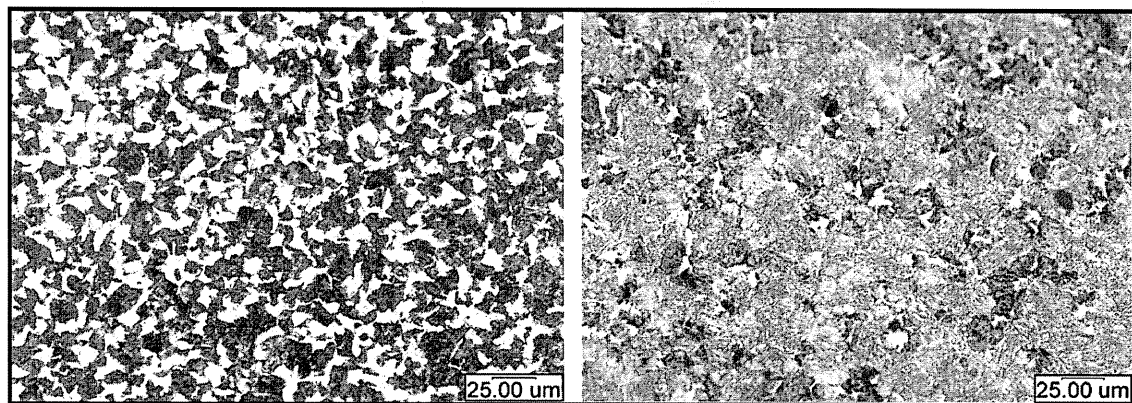


圖 2.22 正常的波來鐵顯微組織(左)波來鐵基地中參雜有變韌鐵(右)[46]



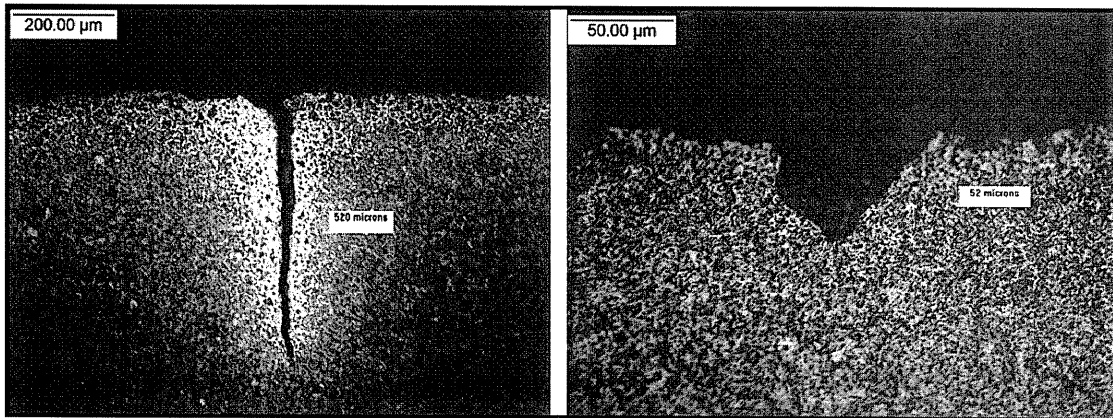


圖 2.23 材料表層裂紋(左)及製造時刮損的傷痕(右)[46]

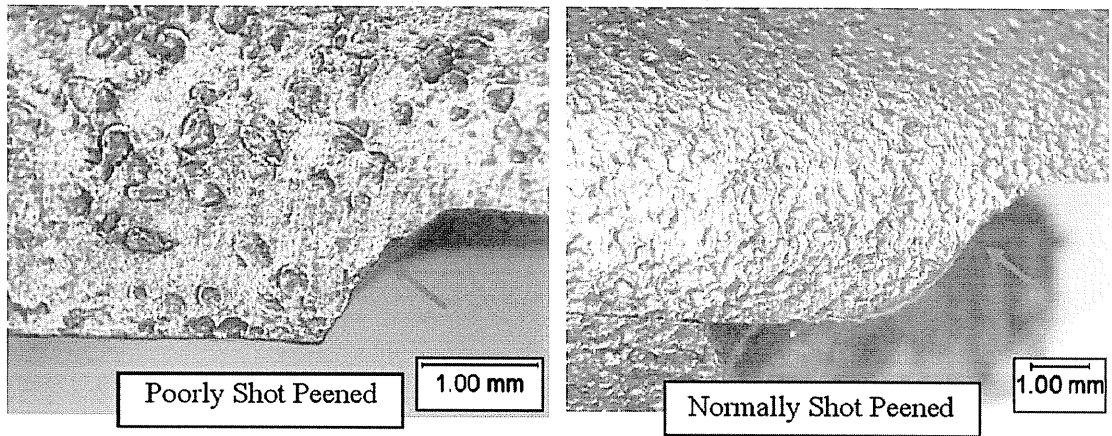


圖 2.24 不良的珠擊加工導致的表面瑕疵[46]

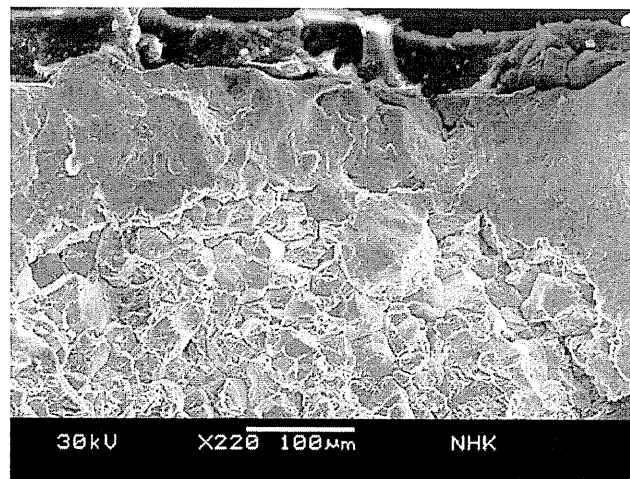


圖 2.25 淬火裂縫導致的晶粒間破裂面(intergranular fracture surface)[46]

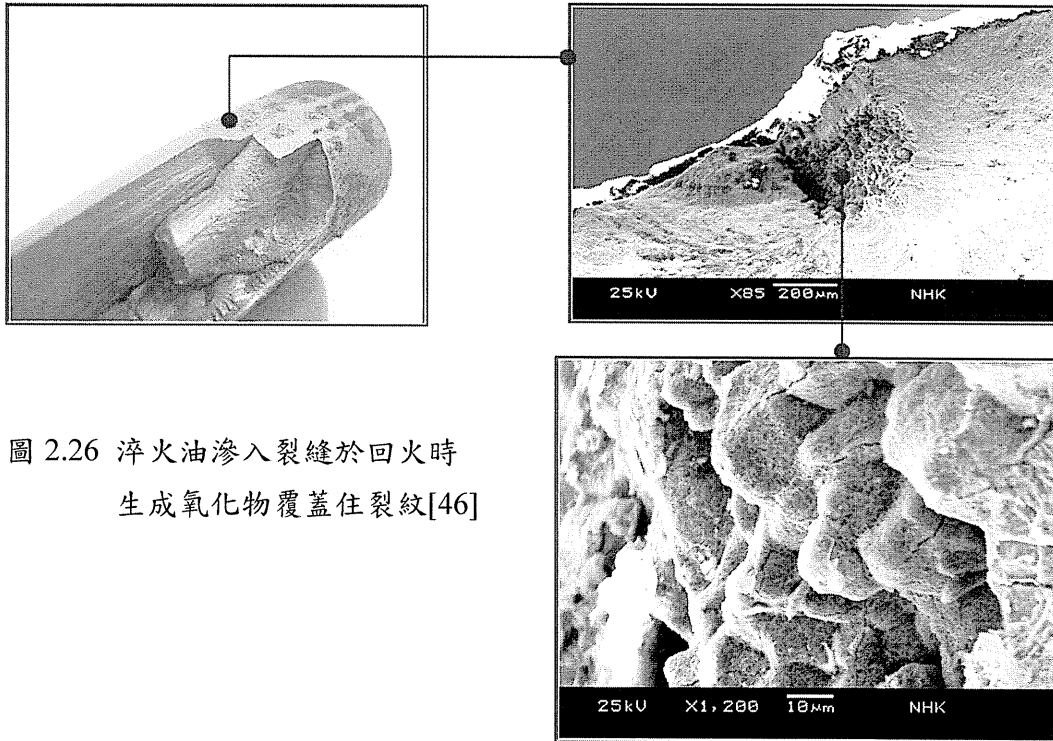


圖 2.26 淬火油滲入裂縫於回火時  
生成氧化物覆蓋住裂紋[46]

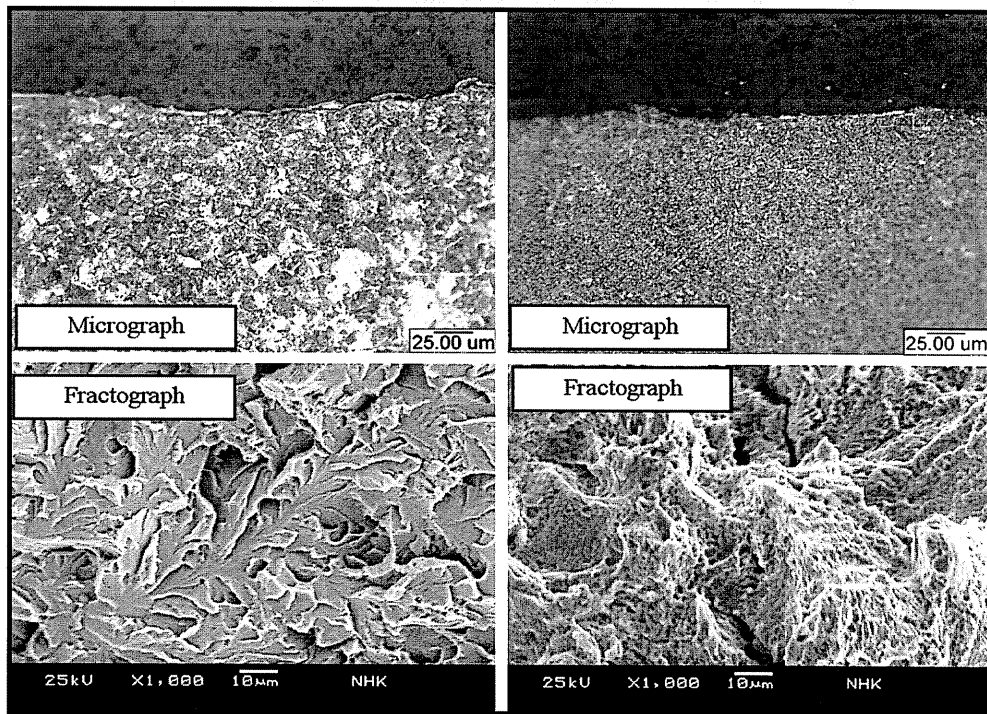


圖 2.27 熱處理不良(左) vs. 正常的熱處理(右)[46]

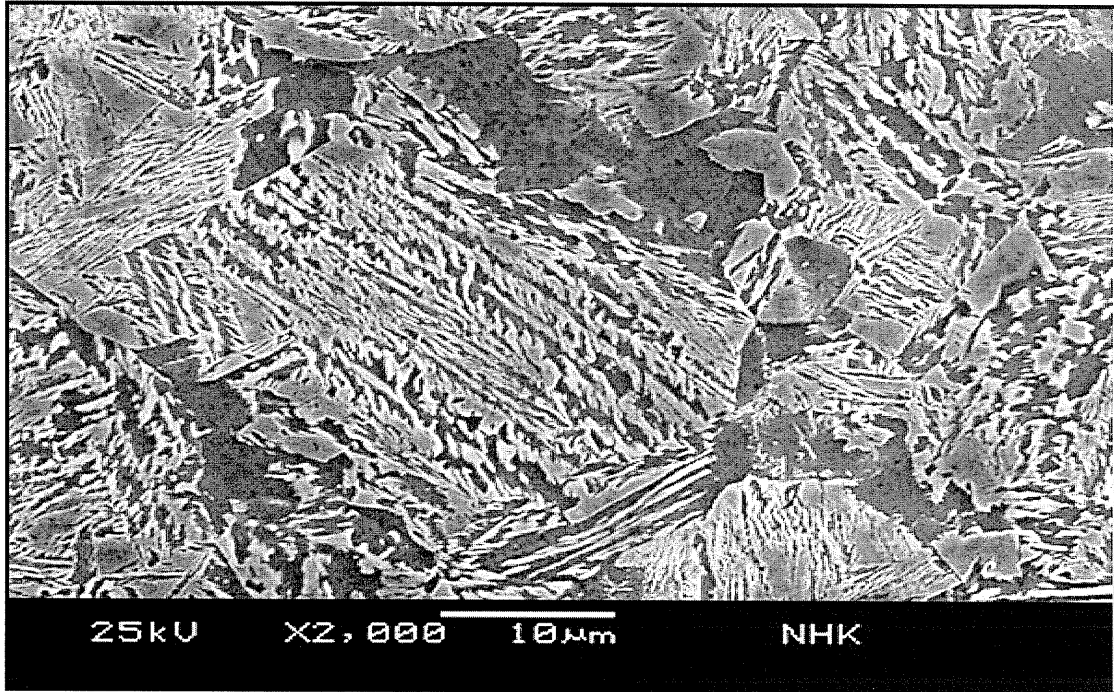


圖 2.28 變韌鐵組織[46]

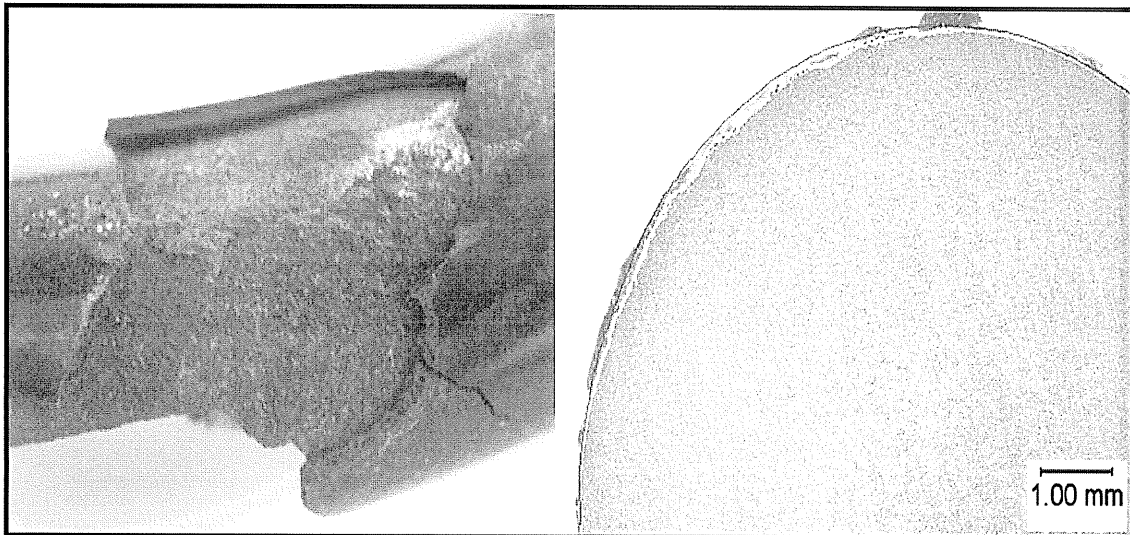


圖 2.29 腐蝕引起的破裂[46]

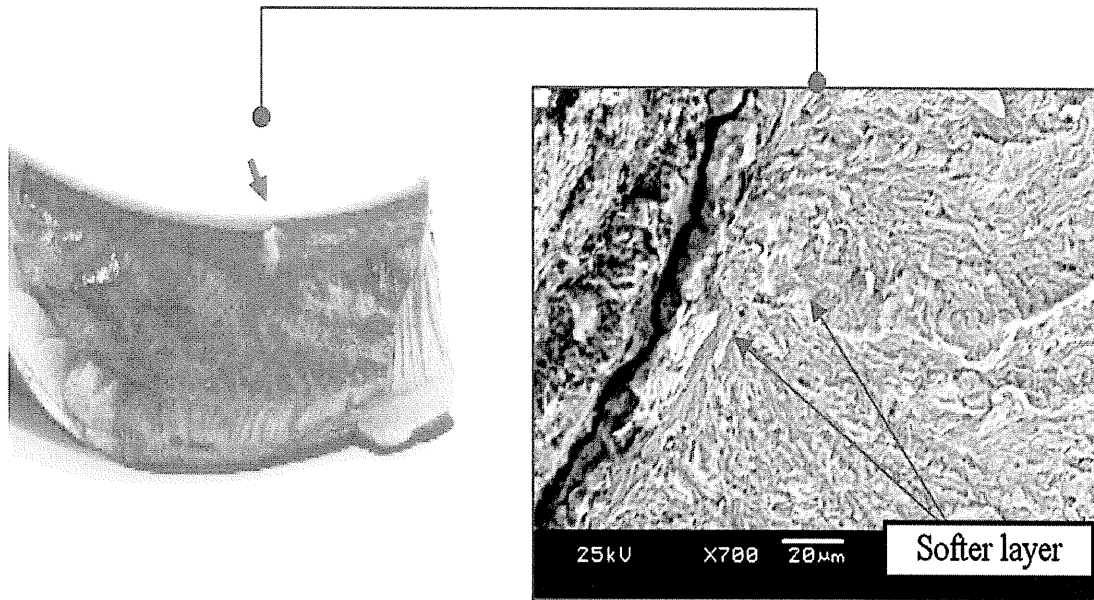


圖 2.30 表層過度脫碳引發的斷裂[46]

Prawoto 等也建置有限元素模型，運用 ABAQUS 軟體以分析各種瑕疵、裂紋、腐蝕、脫碳、傷痕所在的應力分布狀況。

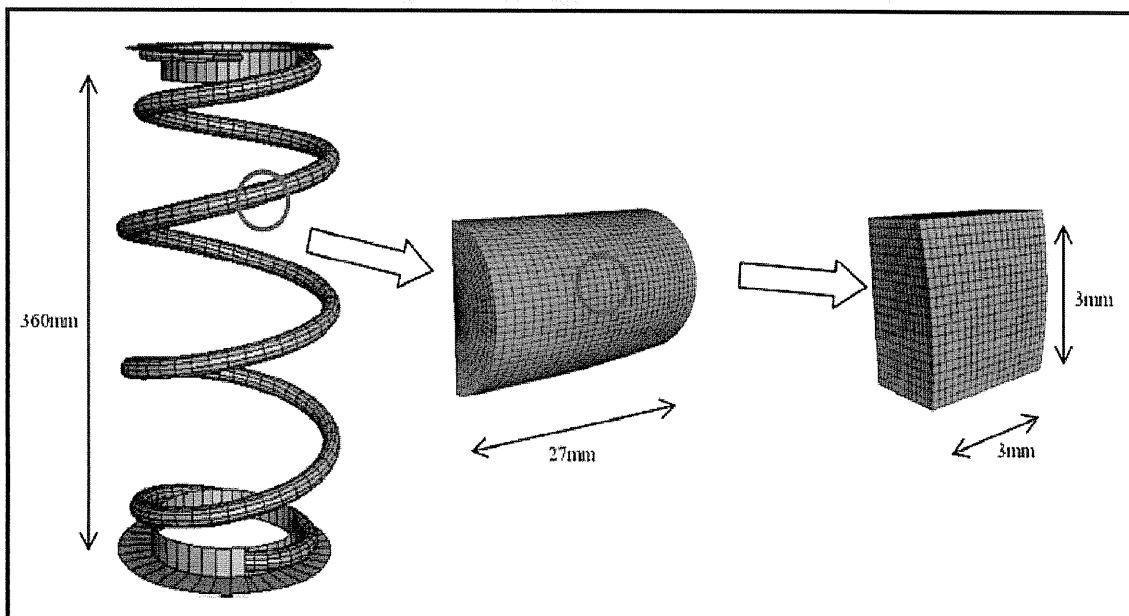


圖 2.31 分析各種失效的模擬用 FEA 模型[46]

## 2.1.7 測量分析

Fitzpatsick[47]指出：

量測結果的呈現方式必須包含三個要項：數值(numerical)、單位(units)與不準度(uncertainty)。除了量測前儀器校正作業(calibration)的不準度外，操作儀器時尚有其他一些系統的(systematic)及隨機的誤差來源(random error sources)發生。例如：雜訊(noise)、應答時間(response time)、設計侷限(design limitations)、系統所需能源(energy required by the system)、訊號傳輸(signal transmission)、系統劣化(system deterioration)與環境週遭的影響(ambient influences)等。

以下就本研究運用的幾種量測方法略做說明：

### (一) 抗拉測試[48]

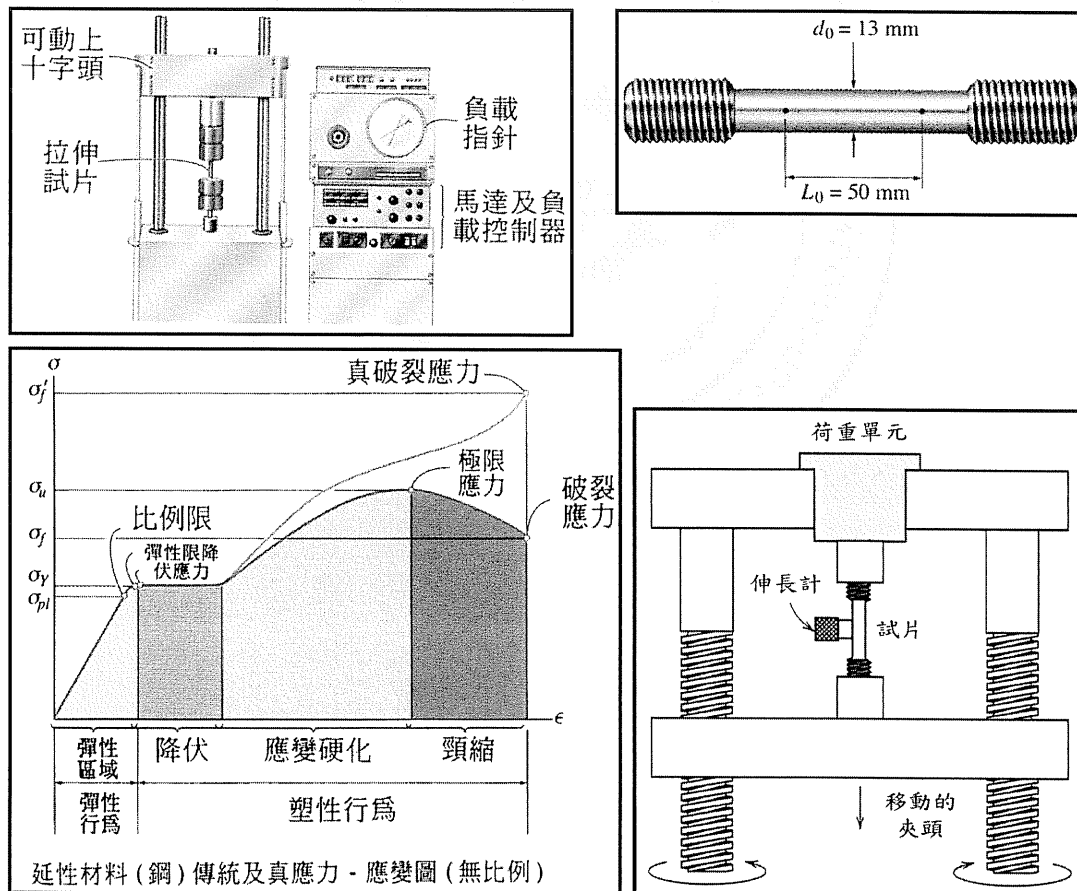


圖 2.32 拉伸試驗[48]

## (二) 硬度量測[49]

硬度(Hardness)是衡量金屬材料軟硬程度的一種性能。它代表在金屬材料表面局部體積內抵抗彈性變型、塑性變型或破斷的能力，是表徵材料性能的物理量。

### (1) 勃氏硬度試驗

用一定直徑的鋼球或硬質合金球，以相應的試驗力  $F$  壓入式樣表面，經規定保持時間後，卸除試驗力，測量式樣表面的壓痕直徑  $d$ 。計算出壓痕球型表面積  $S$  所承受的平均應力值，再乘以 0.102，及是勃氏硬度值，以 HB 表示

$$HB = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{F}{\pi D h} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (12)$$

式中  $F$ —試驗力(N)； $D$ —球體直徑(mm)； $d$ —壓痕直徑(mm)。

### (2) 洛氏硬度試驗

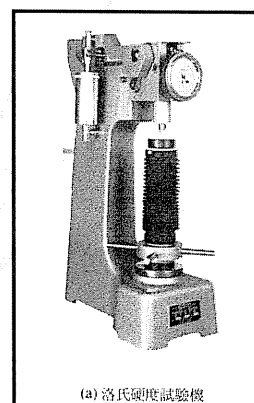
以規定的鋼球或錐形  $120^\circ$  的金剛石圓錐體作壓頭，在初試驗力  $F_0$  及總試驗力  $F$  分別作用下，將壓頭壓入試樣表面，然後卸除主試驗力  $F_1$ ，在初試驗力下測定殘餘壓入深度

$$HR = \frac{K-h}{0.002} \quad (13)$$

$$e = \frac{h}{0.002} \quad (14)$$

$$HRC (HRA) = 100 - e \quad (15)$$

$$HRB = 130 - e \quad (16)$$



### (3) 維氏硬度試驗

以兩相對面夾角  $136^\circ$  的金剛石正四菱錐體為壓頭，在選定式測驗力  $F$  作用下壓入式樣表面，經規定保持時間後，卸除試驗力，測定壓痕兩對角線的長度  $d_1$ 、 $d_2$ ，取其均值  $d$ ；計算出壓痕表面所承受的平均應力值在乘以 0.102，即為維氏硬度值，以 HV 表示。算計公式為

$$HV = 0.102 \frac{F}{S} = 0.102 \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2} \quad (17)$$

式中  $F$ —試驗力(N)； $d$ —壓痕兩對角線長度， $d_1$ 、 $d_2$  的算術平均值(mm)。

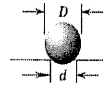



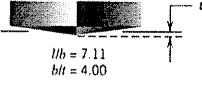

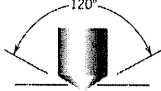



(4) 蕭氏硬度測驗

蕭氏硬度又名回跳硬度，是以標準的衝頭(鑲金剛石圓錐體或鋼球)，從固定初始高度  $h_0$  自由下落在試樣表面上，根據衝頭回跳的高度  $h$  來衡量材料硬度的高低，用 HS 表示

$$HS = K \frac{h}{h_0} \quad (18)$$

式中 K-蕭氏硬度係數，其值與蕭式硬度計類型有關。

表 2.3 各種硬度測試原理

試驗法	壓痕器	壓痕的形狀		負荷	硬度值之數學公式 <sup>u</sup>
		側視圖	上視圖		
勃氏	10-mm 鋼球或碳化鎢			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
維克氏微硬度	鑽石錐體			$P$	$HV = 1.854P / d_1^2$
諾普微硬度	鑽石錐體			$P$	$HK = 14.2P / l^2$
洛氏和表面洛氏	<ul style="list-style-type: none"> <li>鑽石圓錐</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in.</li> <li>直徑鋼球</li> </ul>	 	 	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>洛氏</li> <li>表面洛氏</li> </ul>

<sup>u</sup> 對硬度數學式而言， $P$  (所施加之負荷) 是 kg，而  $D, d, d_1$  和  $l$  都是以 mm 來表示。

資料來源：取自 H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

### (三) 應變量測[48]

電阻應變規 (electrical-resistance strain gauge) 可用來量測拉伸試驗中試桿之正向應變，其係由金屬線格子或金屬箔黏貼在試桿上而構成。對於物體上一般負載，在其自由表面上某點之正向應變通常利用一組具三個電阻應變規，安置在一特定模式下而定出。此模式稱之為應變菊花座 (strain rosettes)。這些應變僅在同平面之量規下作量測，而且因物體在垂直於量規方向係無應力的，故量規仍承受平面應力而不是平面應變。

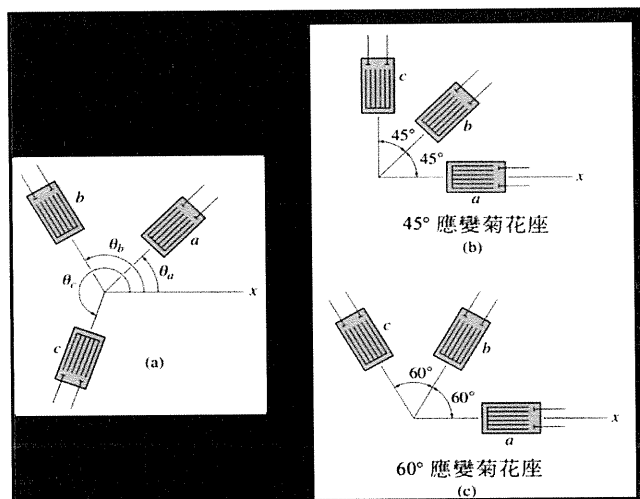


圖 2.33 菊花座應變規示意圖[48]

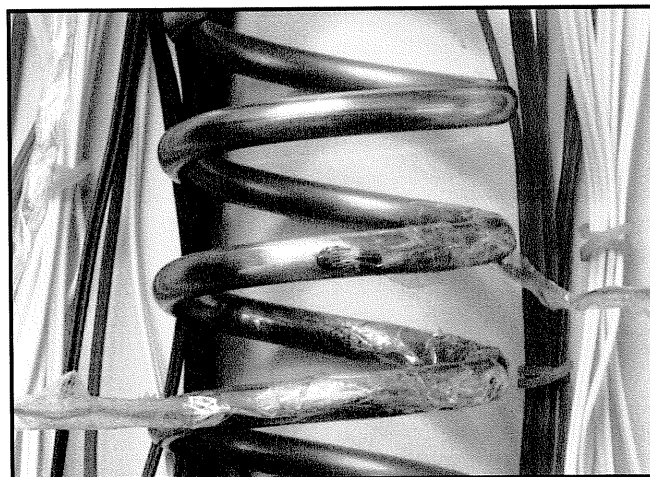


圖 2.34 本研究黏貼菊花座應變規實體圖



對於線性的(linear)，均質的(homogeneous)，等向性的(isotropic)材料而言，其承受外力時的應變與應力的關係，可適用虎克定律(Hooke's law)表示之。

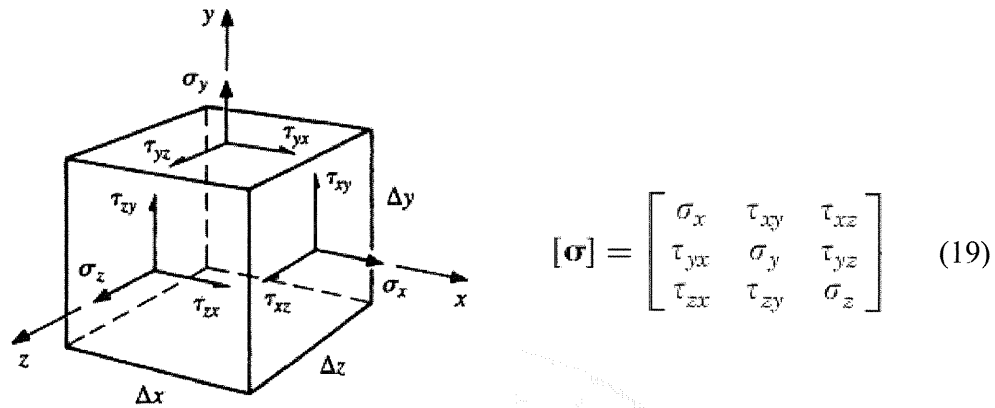


圖 2.35 直角坐標上 3 個立體面的應力[48]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (20)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad (21)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (22)$$

若三個方向的應變皆已知，則三個方向的應力值便可計算而得。

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (23)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] \quad (24)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad (25)$$

若在某平面上黏貼(0°-45°-90°)應變菊花座量測二維的應力，則可得主應變、主應力與主應力方向如下。

(1)主應變(principal strains)

$$\varepsilon_{p1} = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{p2} = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \quad (27)$$

(2)主應力(principal stresses)

$$\sigma_{p1} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{1 - \nu} + \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right] \quad (28)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{1 - \nu} - \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_C)^2 + (2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C)^2} \right] \quad (29)$$

(3)主應力方向(principal angle)

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\varepsilon_B - \varepsilon_A - \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C} \right) \quad (30)$$

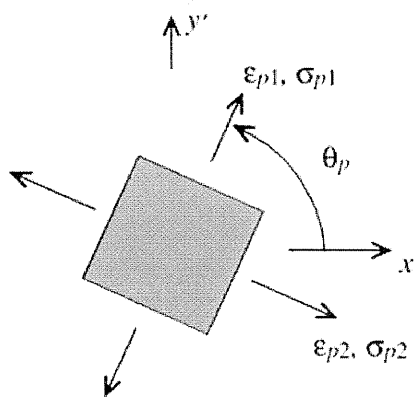


圖 2.36 XY 平面上的主應變、主應力與主應力方向[48]

#### (四) 金相組織觀察[50]

光學金相分析是以光學顯微鏡 20~1500X 之倍率下，針對拋光過或蝕刻過的材料表面，觀察與分析其狀態或顯微結構特質的方法。此法有下述用途：

- (1) 追溯產品製作和熱處理的歷史
- (2) 破損分析的依據
- (3) 尋求製程對微結構和性能之影響因素
- (4) 剖析焊接接點原貌等。

光學金相的解相力不低於  $0.2\mu\text{m}$ ，視野深度有限，故試片準備相當重要，表面須平滑且經拋光，蝕刻處理可顯現其內部細微組織，但是不能直接獲得化學或結晶學資訊。金相檢查的程序包括：

- (1) 切割取樣
- (2) 粗磨
- (3) 鑲埋
- (4) 細磨
- (5) 拋光
- (6) 蝕刻
- (7) 金相觀察等步驟

正確的金相組織研判，其先決條件是要有正確的試片準備，需注意以下幾點：

- (1) 試片須具有代表性
- (2) 試片表面層在切割、研磨及拋光過程中所引起的機械變形減至最小，而且蝕刻處理能顯現其原始的金相微結構
- (3) 在拋光處理後，試片無刮痕、洞孔或液體斑點殘留
- (4) 試片表面保持平坦，在高倍率下觀察才能得到很清晰的影像
- (5) 材料內部介在物仍保存，不脫落。

## 2.2 理論基礎

### 2.2.1 彈簧 $k$ 值之簡易式[51]

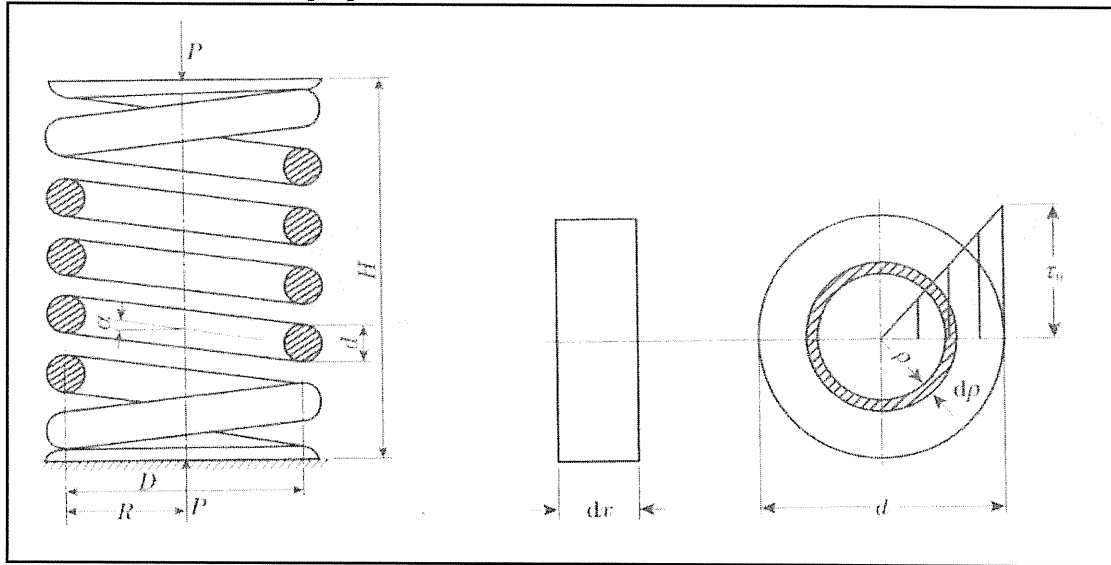


圖 2.37 圓形斷面螺旋彈簧(左)與橫截面的應力分布(右)示意圖[51]

(一) 解析：若從螺旋彈簧截取一小段長度  $dx$ ，則其承受  $P$  外力產生的扭距  $PR$ ，

$$PR = \int_0^{d/2} \frac{2\rho\tau_0}{d} 2\pi\rho^2 d\rho = \frac{4\pi\tau_0}{d} \int_0^{d/2} \rho^3 d\rho = \frac{\pi d^3}{16} \tau_0 \quad (31)$$

$$\therefore \tau_0 = \frac{16PR}{\pi d^3} = \frac{8PD}{\pi d^3} \quad (32)$$

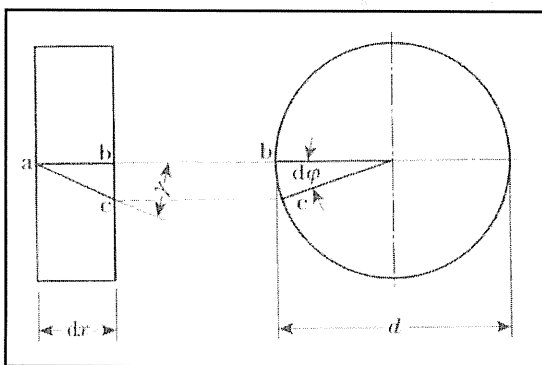
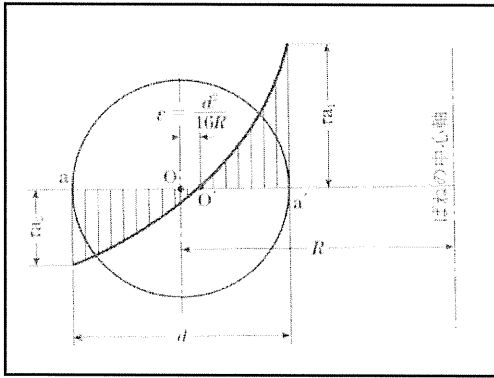


圖 2.38 素材承受力距之微量扭轉[51]

$$\begin{aligned} \varphi &= \int_0^{2\pi Rn} \frac{2y}{d} dx \\ &= \int_0^{2\pi Rn} \frac{32PR}{\pi d^4 G} dx \\ &= \frac{64nR^2 P}{Gd^4} \quad (33) \end{aligned}$$

$$\delta = R\varphi = \frac{64nR^3 P}{Gd^4} = \frac{8nD^3 P}{Gd^4} \quad (34)$$

$$\therefore k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (35)$$



$$\tau_{a1} = \frac{8PD}{\pi d^3} \cdot \frac{4C-1}{4C-4} \quad (36)$$

$$\tau_{a2} = \frac{8PD}{\pi d^3} \cdot \frac{4C+1}{4C+4} \quad (37)$$

Wahl 依彈性力學理論

$$\tau_s = \frac{1+2\nu}{1+\nu} \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{8PD}{\pi d^3} \frac{1+2\nu}{2(1+\nu)} \frac{d}{D} = \frac{8PD}{\pi d^3} \frac{0.615}{c} \quad (38)$$

$$\therefore \tau_{max} = \kappa \frac{8PD}{\pi d^3} \quad (39)$$

圖 2.39 線材受外力的應力分布圖[51]

(二) 應力修正係數：

$$(1) \text{ Göhner 式 } \kappa = 1 + \frac{5}{4C} + \frac{7}{8C^2} + \frac{1}{C^3} \quad (40)$$

$$(2) \text{ Bergsträsser 式 } \kappa = \frac{C+0.5}{C-0.75} \quad (41)$$

$$(3) \text{ Wahl 式 } \kappa = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (42)$$

常見的螺旋彈簧常數 (spring rate) 為 (35) 式，在 Shigley[52] 的 Mechanical Engineering Design 書中，亦可發現相同的方程式。本研究另行搜尋了以下四種不同的  $k$  值方程式。

2.2.2 Ancker 式[53]：

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{64nR^3} \left[ 1 - \frac{3}{64} \left( \frac{d}{R} \right)^2 + \frac{3+\nu}{2(1+\nu)} (\tan \alpha)^2 \right]^{-1} \quad (43)$$

2.2.3 Yildirim 式[54]：

$$k = \frac{P}{\delta} = \left\{ \frac{2n\pi R \cos \alpha}{EI} + \frac{2n\pi R \sin \alpha \tan \alpha}{EA} + \frac{2n\pi R^3 \sin \alpha \tan \alpha}{GI} + \frac{2n\pi R^3 \cos \alpha}{GJ} \right\}^{-1} \quad (44)$$

### 2.2.4 Sayre式[53] :

$$k = \frac{P}{\delta} = \left\{ \left[ \frac{R^2 L}{GK} - \frac{R^2 H_0^2}{GKL} \left( 1 - \frac{GK}{EI} \right) + \frac{FL}{AG} \right] - \left[ \frac{R^2}{3GKL} \left( 3 - \frac{2GK}{EI} \right) (H^2 + HH_0 - 2H_0^2) \right] \right\}^{-1} \quad (45)$$

### 2.2.4 清水麻衣[55]式 :

$$k = \frac{P}{\delta} = \left\{ \frac{L}{AG} \cos \alpha + \frac{L \sin^2 \alpha}{AE \cos \alpha} + \frac{LD^2}{4GJ} \cos \alpha + \frac{LD^2 \sin^2 \alpha}{4EI \cos \alpha} \right\}^{-1} \quad (46)$$

以應變能推導而得。分為軸向力、剪切力、彎距、扭距四大部分探討。

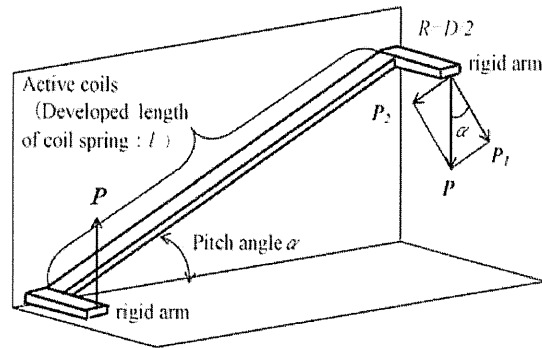


圖 2.40 應變能解說示意圖[55]



$$U = \frac{P_1^2 l}{2AG} + \frac{P_2^2 l}{2AE} + \frac{M_t^2 l}{2GJ} + \frac{M_b^2 l}{2EI}$$

$$= \frac{P^2 l}{2AG} \cos^2 \alpha + \frac{P^2 l}{2AE} \sin^2 \alpha + \frac{P^2 R^2 l}{2GJ} \cos^2 \alpha + \frac{P^2 R^2 l}{2EI} \sin^2 \alpha \quad (47)$$

カスチリアーノの定理より, (Castigliano Theorem)

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{Pl}{AG} \cos^2 \alpha + \frac{Pl}{AE} \sin^2 \alpha + \frac{PR^2 l}{GJ} \cos^2 \alpha + \frac{PR^2 l}{EI} \sin^2 \alpha \quad (48)$$

## 2.3 田口工程

(一)鄭崇義[56]論述：

田口博士 (Dr. Genichi Taguchi)於 1982 年獲得戴明個人獎(Individual Deming Award)，他的主要貢獻就是發展出堅耐(強韌)設計(Robust Design)方法而提升了日本產品品質及日本產業界之研發設計能力，由於此一方法可以應用在相當廣的領域中，如電機、汽車、光電、化工及電子計算機等產品之設計開發工作中，因此其推廣應用非常迅速。今日若要設計製造低成本、高品質的產品很少不引用田口博士的堅耐設計方法。一般俗稱的田口品質工程方法，主要是指其堅耐設計方法而言，由於此一方法主要是尋找設計參數的水準，因此又稱為參數設計或稱線外品管(Off-Line Quality Control)方法，參數設計在實際作業上是找變異性(Variability)最小的產品或製程，換句話說就是要找出對環境有堅耐性或不敏感的產品，而其手段並不需要使用最高級昂貴的零件或材料，因此可以在低成本之狀況下達成高品質的目的。堅耐設計之執行過程中，係應用統計實驗設計法(Statistical Experimental Design)規劃實驗，以獲得各參數有關的資訊，供工程決策(Engineering Decision)之用。

(二)戴國政等[57]以線材生產製程為例，說明其研究的田口品質工程之步驟如下：

- (1)彙整產品和製程的工程知識，並提出問題點、目的，以利進行品質的設計與改善。
- (2)品質特性的選擇：線材產量。
- (3)找出可能影響線材產量的因子與其水準，並選擇適合的直交表以進行實驗配置。
- (4)執行實驗：依直交表上因子的水準組合，進行實驗並記錄每組眼模所能生產之線材產量。
- (5)分析資料：
  - (A)由實驗所得的數據轉換成信號雜訊比(Signal-to-noise ratio, S/N ratio)。
  - (B)繪製各個因子的反應表(Response Table)與反應圖(Response graph)，用以判斷各因子在不同水準的影響。

(C)製作變異數分析表(Analysis of variance, ANOVA),提供不同因子相對效果,以評估各因子的影響,並作貢獻度分析。

(6)預測與確認實驗:對所得的最佳化之參數組合做預測,並進行最後的確認實驗,若實驗結果與預測數據在實驗誤差範圍內,可確定此最佳化的可靠性,否則表示有重要因子被忽略或實驗測試的誤差太大,得另從長計議。

(三)蔡有藤等[58]以工具機加工的製程參數最佳化之研究架構為:

(1)設定成型過程中之品質特性目標,取其特性為望大、望小或望目等。

(2)選擇製程控制因子

依據製品成型過程中相關因素,分析加工條件對其品質之影響並設定為控制因子。

(3)選定其控制因子之水準值,及相關各項加工條件範圍之設定

控制因子之水準值以原始加工條件材料性質或製程參數等條件,來設定其各項加工條件之範圍。

(4)建立直交表

將設定為控制因子之各項加工條件如旋壓速度、進給率、運動軌跡、工作壓力、有無潤滑等,依照田口方法直交表配置各項加工條件之測試組合。

(5)按照直交表所提供各項加工條件之測試組合,進行實驗數據蒐集

(6)實驗數據化成信號雜音比  $S/N$ ,並計算其變異數分析

依據田口方法將目標品質之實驗數據計算出其信號雜音比  $S/N$ ,

$$\frac{S}{N} = -10 \log(M.S.D) \quad (37)$$

此處  $M.S.D.$  為各項測試組合之目標品質的結果數據之均平方偏差值(the mean square deviation)。

(7)依據信號雜音比  $S/N$  計算其變異數分析,求得製程最佳化加工參數

(8)產生  $S/N$  回應表或回應圖檢視各控制因子之貢獻率及找出調整因子

各控制因子之貢獻率為各控制因子對目標品質的影響程度,可提供設計者調整較顯著控制因子作為提升其目標品質之參考,而變更較不顯著控制因子作為降低成本之依據。



### 第三章 實驗設計與執行流程

本研究首先藉由搜尋文獻，整理得到數種計算彈簧  $k$  值的方程式。再應用傳統彈簧設計方法，推算出使用作動行程條件超越該彈簧臨界負荷 (critical load) 彈性區域的彈簧；同時以電腦輔助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 分析軟體—ANSYS<sup>®</sup> 的 Workbench，模擬分析該彈簧各種的機能特性，以便與實物的測量值比對分析。並以田口法探求最佳的網格化模擬參數。

彈簧設計的初始階段，為考量未來黏貼三軸式應變規的方便性與確實度，選定較粗線徑 5mm 的琴鋼線(SWPB)素材。而彈簧實品的製作係使用 5 軸 CNC 壓縮彈簧成型設備，經調機、設定各項加工數值、並微調修改後，製成熱處理前尺寸。

熱處理分別使用一般大氣壓下泛用實驗爐，另以小型研究用真空熱處理爐，施以 5 種不同溫度的真空加熱硬化處理。接著研磨其兩端座卷面，研磨目的在使彈簧的垂直度盡量端正，將來受外力作用的方向，較能保持在中心軸向上，不致發生偏移。

其次同步執行檢驗與實驗。測試片段材料的機械性質—抗拉強度與硬度。微觀組織則製作金相觀察試片，再以不同倍率的光學顯微鏡觀察之。並組裝可程式控制器(PLC)控制的油壓機台，進行彈簧往覆加壓實驗：將 5 種受不同真空溫度熱處理過的彈簧，同時反覆施加外力至超過彈性區域的臨界點(作動行程為 55mm)之後，每間隔百次(一千次前)與每間隔千次(一萬次止)分批量測記錄荷重數值。藉以分析其降伏狀況；並比較各種加熱硬化溫度下，彈簧承載反覆荷重的應力鬆弛(stress relaxation)情況。並以迴歸分析之趨勢線推估其未來衰緩狀況。

最後，選定承載荷重衰減率最小的彈簧，分別在其內緣與外側沿著彈簧成型的軸向，黏貼三軸式(0°- 45°- 90°)應變規。再以 NI<sup>®</sup> 的資料擷取硬體設備，搭配巨克富公司的 FleXense<sup>®</sup> 量測軟體，測量其三軸向的應變、彈簧荷重與壓縮行程三者間的關係。

整個研究流程如圖 3.1。

### 3.1 研究流程

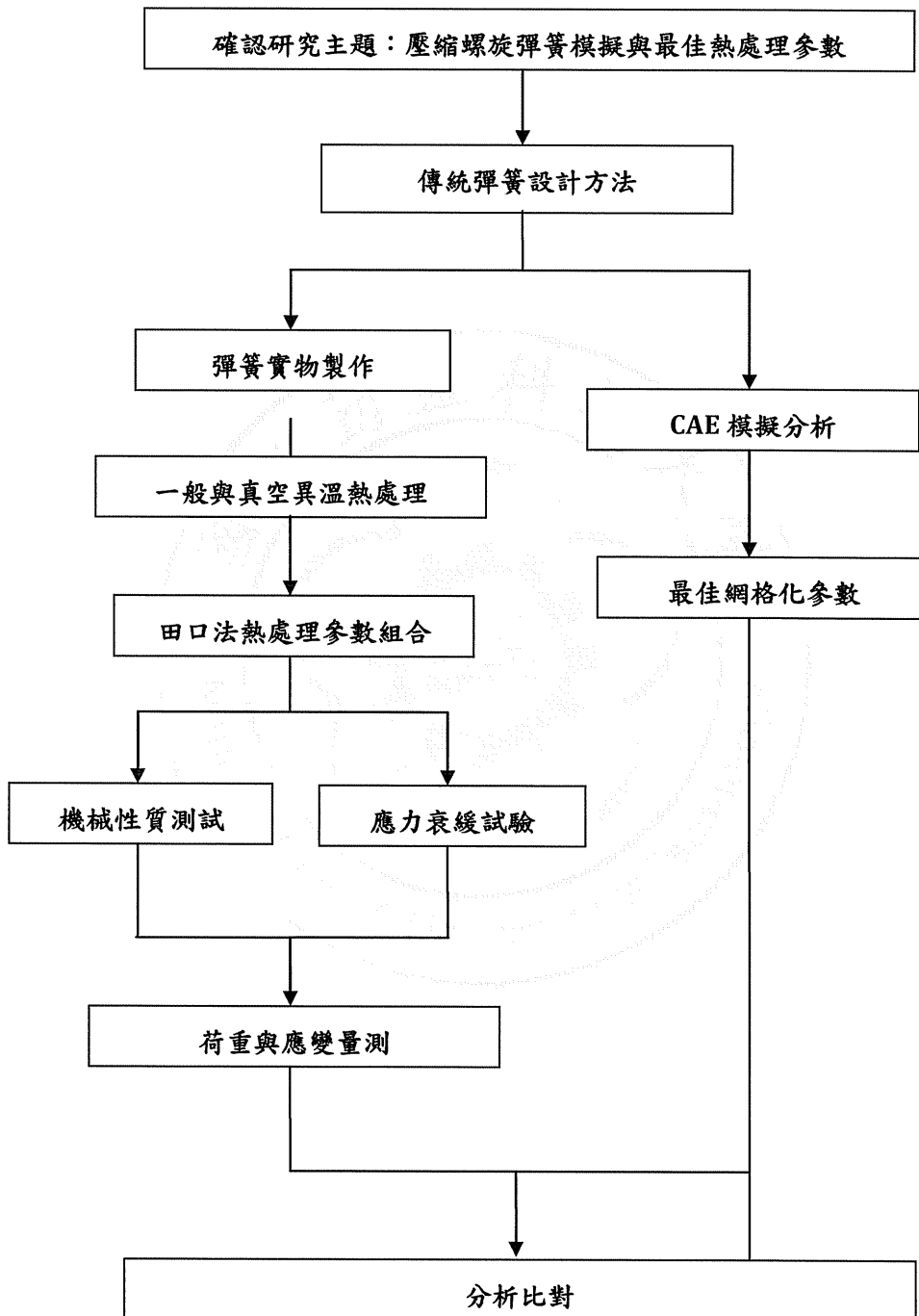


圖 3.1 研究流程圖

## 3.2 傳統彈簧設計手法

### 3.2.1 彈簧設計流程

傳統上，機械工程師設計彈簧的程序，大致如圖3.2

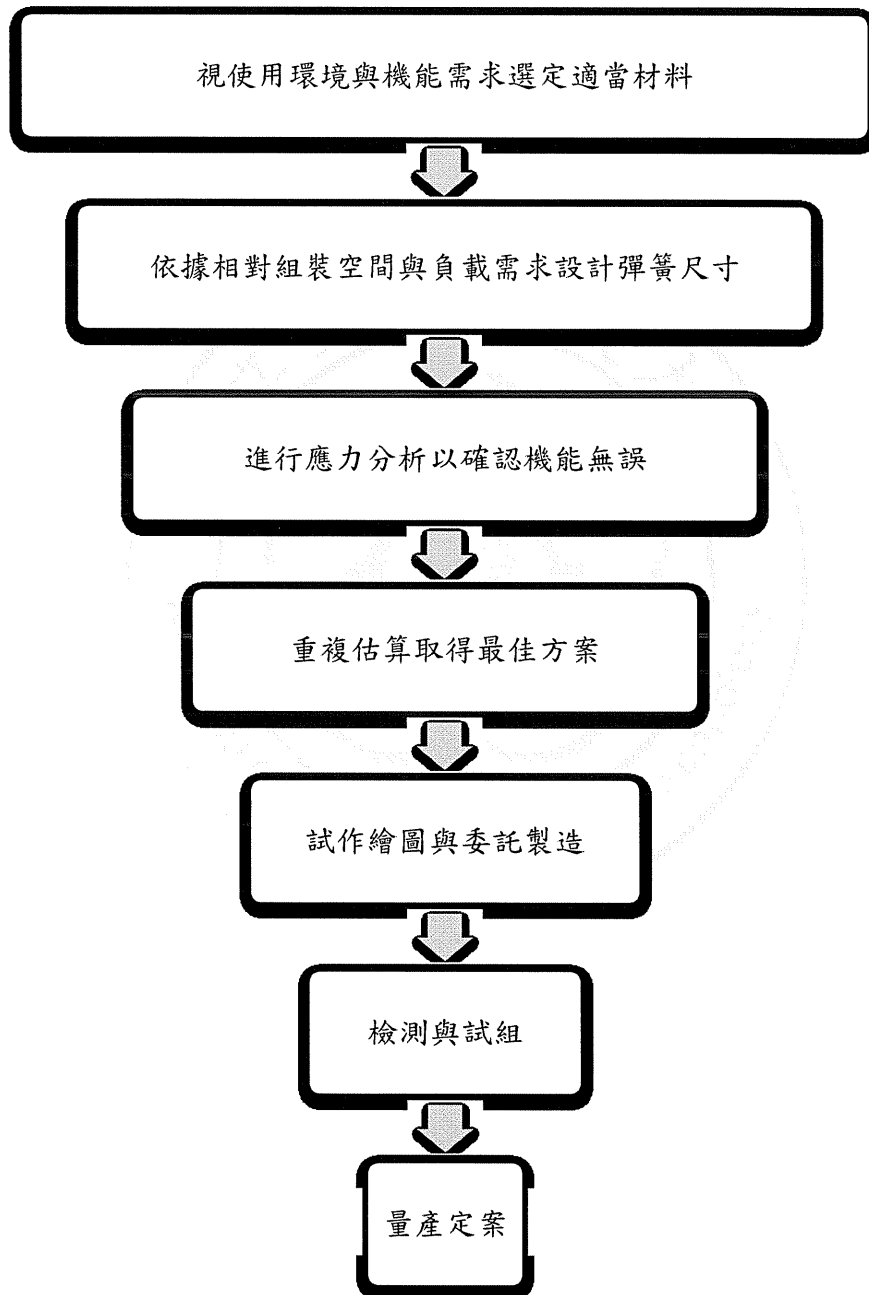


圖3.2 彈簧設計流程圖

### 3.2.2 本研究實際計算例

彈簧設計的初始階段，為考量未來黏貼三軸式應變規的方便性與確實度，選定線徑 $\phi 5\text{mm}$ 的琴鋼線(SWPB)素材。依第二章所論之各個設計圓形斷面素材的壓縮彈簧公式，及設計步驟，試估算實驗用彈簧的尺寸如下：

(一) 基本計算：

假設尺寸條件為：

琴鋼線( $d$ ) =  $\phi 5\text{mm}$ ，平均徑( $D$ ) =  $\phi 41\text{mm}$ ，有效卷數( $n$ ) = 6，自由長( $L$ ) = 105 mm，作動行程( $\delta$ ) = 55 mm。則計算可得：

$$\textcircled{1} \text{ 負載荷重：} P = \frac{G \cdot d^4 \cdot \delta}{8 \cdot n \cdot D^3} = \frac{78.4 \cdot 10^3 \cdot 5^4 \cdot 55}{8 \cdot 6 \cdot 41^3} = 814.6 \text{ (N)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 彈簧指數：} C = \frac{D}{d} = \frac{41}{5} = 8.2$$

$$\textcircled{3} \text{ 應力修正係數：} \kappa = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} = \frac{4 \cdot 8.2 - 1}{4 \cdot 8.2 - 4} + \frac{0.615}{8.2} \cong 1.18$$

$$\textcircled{4} \text{ 內側最大剪應力：} \tau_{max} = \kappa \cdot \frac{8 \cdot P \cdot D}{\pi d^3} = 1.18 \cdot \frac{8 \cdot 814.6 \cdot 41}{\pi \cdot 5^3} \\ = 802.86 \text{ (MPa)}$$

(二) 判別最大使用應力是否超越彈性區域的臨界點？

① 依 JIS G 3522 材料規範， $\phi 5\text{mm}$ 的SWPB線材的 $S_{ut}$ (抗拉強度)介於1765~1912 ( $\text{N/mm}^2$  即 MPa)，取平均值 1838.5 MPa比較之。

$$\frac{\tau_{max}}{S_{ut}} = \frac{802.86}{1838.5} = 0.437 \cong 44\%$$

JIS B 2704 (壓縮·拉伸螺旋彈簧設計基準)訂有各種彈簧材質與線徑的規定。日本彈簧學會建議：彈簧使用於靜態負載時， $\tau_{al}$  (容許應力)應低於抗拉強度的50%；Shigley則建議：琴鋼線與硬鋼線宜低於45%，矽鉻鋼與鉻釩鋼及油回火線等低合金鋼線則宜低於50%。亦即本設計的 $\tau_{max}$  (44%)若運用於靜態負載狀況，都已經超越彈性區域的臨界點，更遑論使用於越重視疲勞強度的動態負載。

② 另外再從設計安全係數的立論點探討之。Shigley 與 Mischke 認為安全係數應大於等於1.2。 $S_{sy} = 0.45 S_{ut}$ ， $S_{sy}$  即  $\tau_{al}$ 。計算如下：

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} = \frac{0.45 \cdot 1838.5}{803.95} = 1.03 \leq 1.2$$

結果仍然不是穩健的作動狀態。

③ 再以黃祖德等提出的「疲勞強度的安全係數法」驗證之：

$$S_{ca} = \frac{\tau_0 + 0.75 \cdot \tau_{min}}{\tau_{max}} \geq [S_F]$$

假設彈簧安裝妥當(未作動)的預壓行程為15mm，則此時會有最小的荷重值  $P_{min}$  與最小的應力值  $\tau_{min}$ 。計算過程如下：

$$P_{min} = \frac{G \cdot d^4 \cdot \delta}{8 \cdot n \cdot D^3} = \frac{78.5 \cdot 10^3 \cdot 5^4 \cdot 15}{8 \cdot 6 \cdot 41^3} = 222.5 \text{ (N)}$$

$$\tau_{min} = \kappa \cdot \frac{8 \cdot P_{min} \cdot D}{\pi d^3} = 1.18 \cdot \frac{8 \cdot 222.5 \cdot 41}{\pi \cdot 5^3} = 219.3 \text{ (MPa)}$$

$$\therefore S_{ca} = \frac{\tau_0 + 0.75 \cdot \tau_{min}}{\tau_{max}} = \frac{0.3S_{ut} + 0.75 \cdot 219.3}{803.95} = 0.89$$

此值仍低於其建議的 $S_{ca}$  應在1.3以上。

故綜合上述各家理論，可以確定該彈簧的最大作動應力已經超越彈性區域的臨界點，必須進行下一步實驗以提供最佳熱處理參數的確認工作。

### 3.3 彈簧實物製作流程

#### 3.3.1 材料選擇

材料使用  $\phi 5\text{mm}$  的日製琴鋼線(SWPB)，其特性諸元如表3.1。

表3.1 試材化學成分(wt.%)與抗拉強度

C	Si	Mn	P	S	Cu	抗拉強度
0.82	0.17	0.49	0.007	0.005	0.01	1813 MPa

#### 3.3.2 電腦數控彈簧成型設備

製作彈簧採用自如行自動化有限公司的PC—580型五軸CNC。

圖 3.3 為該機器的外觀照片。

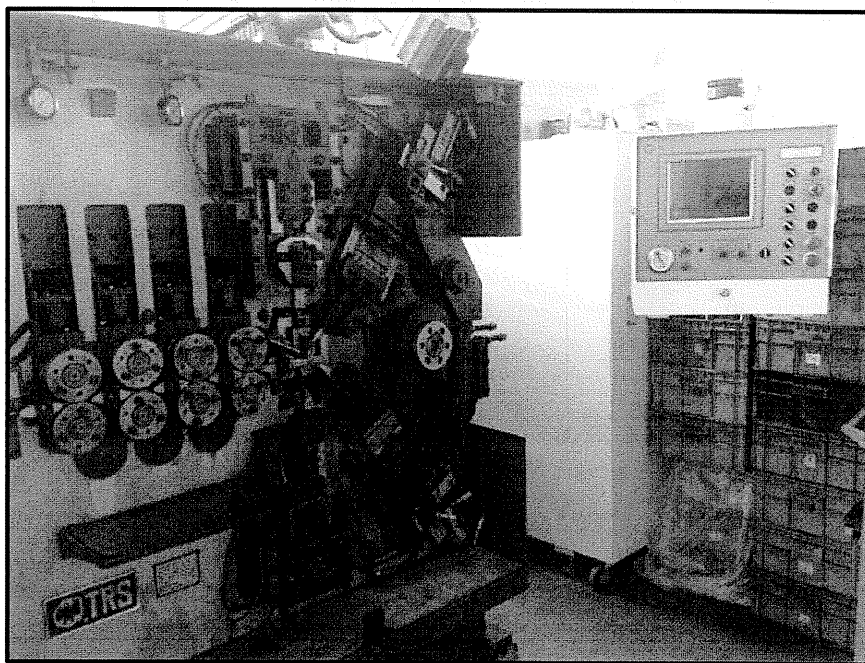


圖 3.3 PC—580 型 CNC 彈簧機

### 3.3.3 調機與編寫彈簧製造程式

一般生產壓縮彈簧的調機(set up)流程如下：

- ①依製造圖面的材質規格取用該材料，並擺置於線架轉盤上。
- ②更換送線輪、導線板、曲線規、適當的半圓軸心(裁切受力刀具)。
- ③以手動(JOG)模式配合人工純熟技巧，調整各個機構與刀具，微調出彈簧未熱處理前的內外徑，並使各圈依序平順密合。
- ④編寫程式：按行號次序，除基本設定外，從起始座卷→漸進前推卷→本體固定節距卷部→漸回後縮卷→尾端座卷，給予凸輪軸、送線軸、節距軸與切刀軸適當數值，設定速度、輔助功能等之後，運轉試作一條。再據此更改加工程式的各項數值，直到概略尺寸完備。
- ⑤彈簧須以小型箱型加熱爐設定適當溫度熱處理之，再據其偏差量回頭調整原先尺寸，重新試作。反覆此步驟直至彈簧符合規格。

### 3.3.4 彈簧成型

圖 3.4 為壓縮彈簧加工成型的情況。

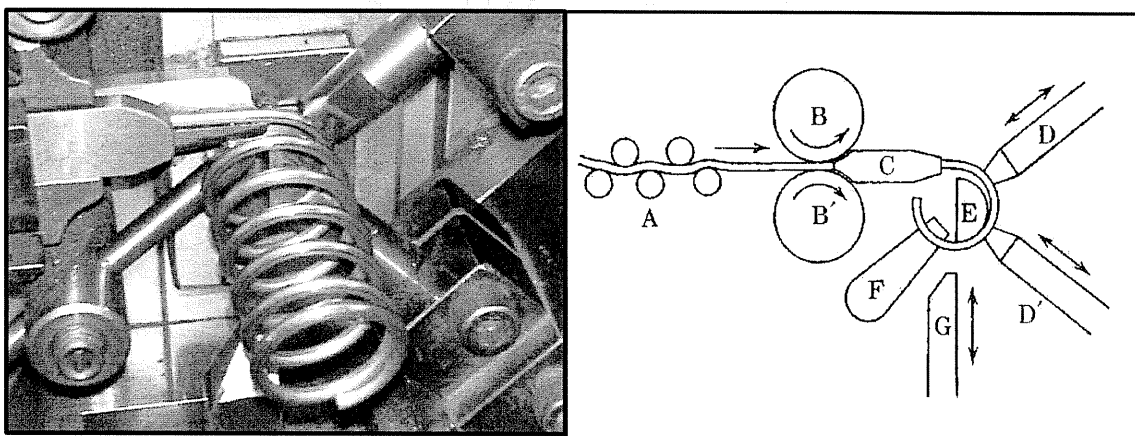


圖 3.4 CNC 彈簧機運轉狀況實體圖與示意圖

### 3.3.5 一般氣壓下熱處理與真空熱處理

傳統上，一般於大氣壓下使用開放型熱風循環連續輸送帶式爐，或密閉式箱型的電氣熱處理爐，來進行低溫燒焯熱處理，以消除彈簧內部因塑性加工所引入的殘留應力，並提供彈簧穩定的彈簧特性。但因為其爐內氛圍仍會接觸到空氣，較易發生表層氧化、脫碳現象。為避免上述不良點，也有運用真空熱處理方式，藉以探討兩者的差異。

將琴鋼線素材與成型後的彈簧，分別置入密閉式箱型的電氣熱處理爐及實驗型管式真空熱處理爐，進行五種不同溫度的回火作業，回火溫度分別設為 200°C、250°C、300°C、350°C、400°C，處理過程依設備操作程序執行之。當真空熱處理時，置入彈簧試件後需要充氮氣、抽真空至  $10^{-2}$  Torr、加溫速度為 30 分鐘升至設定溫度。接著持溫 10 分鐘後，斷絕熱源，爐冷至室溫再行取出試件。

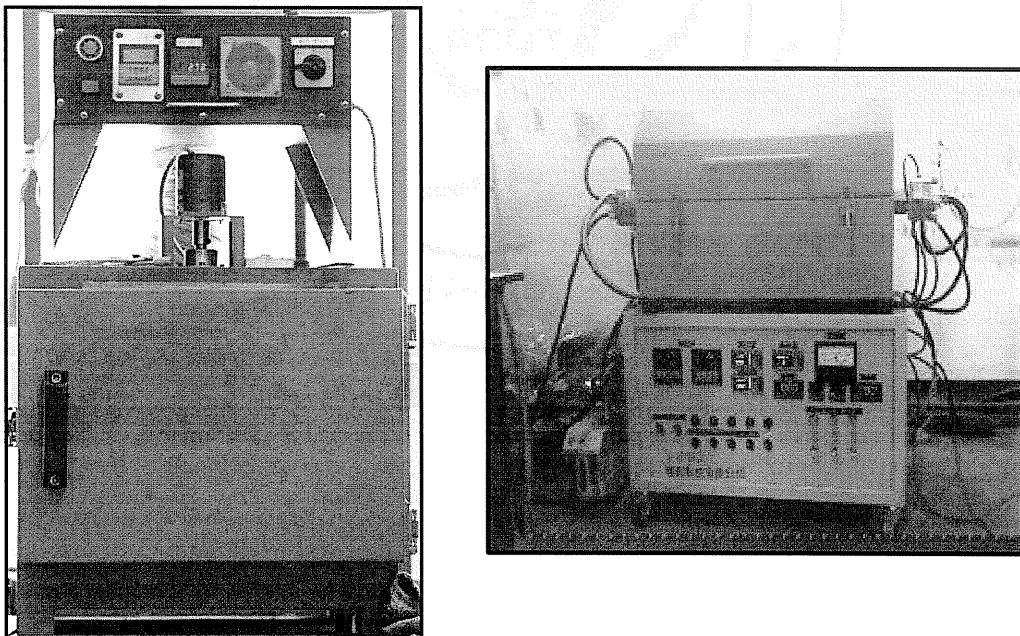


圖 3.5 一般氣壓實驗式箱型爐(左)與實驗型管式真空熱處理爐(右)



本研究同時以田口法探求最佳的熱處理參數組合。由於有 3 個因子：溫度、時間、冷卻方式，且各配置 2 個水準，故選定  $L_8$  直交表執行實驗。

表 3.2 各熱處理參數代入  $L_8$  直交表的實驗組合

具體實驗內容		A	B	AxB	C	AxC	BXC	e
A1=300°C A2=400°C B1=5 分 B2=10 分 C1=油冷 C2=空冷	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	2	2	2	2
	3	1	2	2	1	1	2	2
	4	1	2	2	2	2	1	1
	5	2	1	2	1	2	1	2
	6	2	1	2	2	1	2	1
	7	2	2	1	1	2	2	1
	8	2	2	1	2	1	1	2

表 3.3 實驗組合與測試值紀錄及 S/N 比

實驗組合代號	隨機實驗次序	實測值 1 N/mm	實測值 2 N/mm	實測值 3 N/mm	平均值	標準差	S/N
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	4	9.38	9.36	9.40	9.3800	0.0200	53.4235
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	2	9.42	9.50	9.48	9.4667	0.0416	47.1351
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	7	9.38	9.36	9.44	9.3933	0.0416	47.0676
A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	8	9.50	9.56	9.46	9.5067	0.0503	45.5236
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	6	9.56	9.52	9.56	9.5467	0.0231	52.3270
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	1	9.50	9.52	9.62	9.5467	0.0643	43.4340
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	5	9.60	9.56	9.58	9.5800	0.0200	53.6067
A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	3	9.52	9.46	9.48	9.4867	0.0306	49.8419

### 3.3.6 端面研磨

為確保彈簧作動時，外力負載的方向與彈簧中心軸線的同軸性，並減少因偏斜而發生側向分力，導致挫曲(bulking)現象，壓縮彈簧的兩側密合端面於熱處理後，會進行研磨作業以保持其垂直度。測量的方法是將研磨後的彈簧直立，量測其與垂直軸的間隙，亦即測量其傾斜度，通常要求在 $2^{\circ}$ 內。又研磨面約為整圈座卷面的 $300^{\circ}$ 左右，即被研磨卷數在 $5/6$ 圈到 $9/10$ 圈之間。如圖 3.6 製圖 3.9 所示。

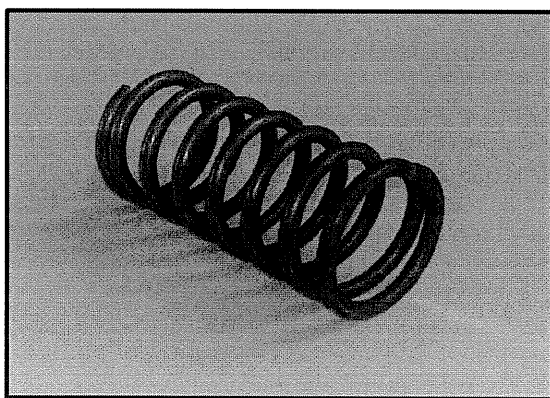
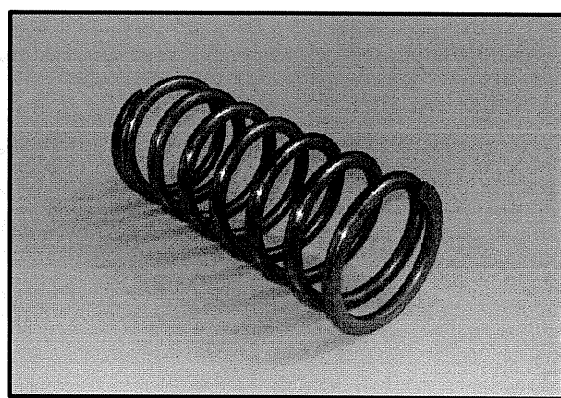


圖 3.6 未研磨彈簧圖



3.7 研磨完成彈簧

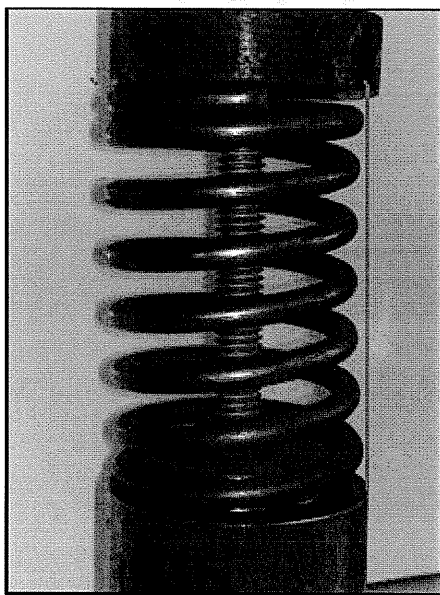


圖 3.8 未研磨彈簧發生較大挫曲現象

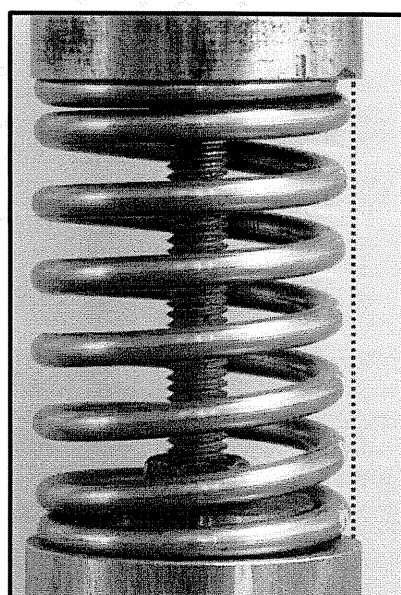


圖 3.9 研磨後彈簧較無挫曲現象

### 3.4 彈簧 CAE 模擬分析

本研究運用 ANSYS© Workbench 11.0 進行彈簧的模擬分析。相關操作程序皆可從軟體說明文件，獲得即時輔助(如圖 3.10)。

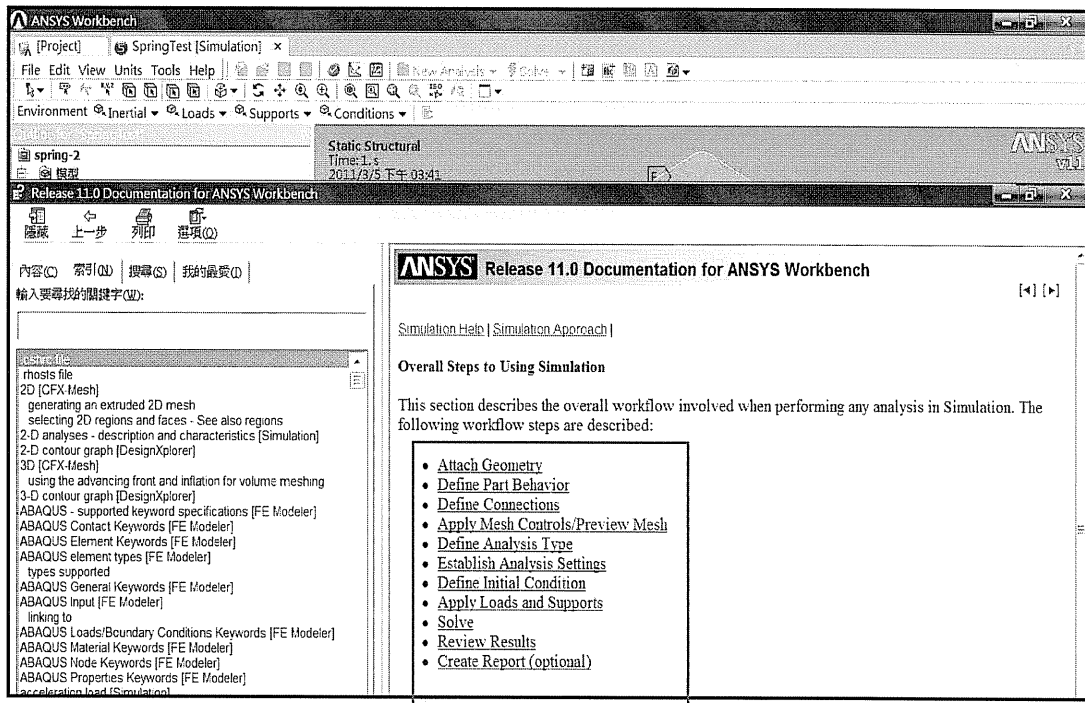


圖 3.10 Workbench 軟體說明文件

上圖指出模擬的程序：

- 前處理步驟：
  - ① 匯入幾何圖形
  - ② 定義零件性質
  - ③ 定義零件間的關聯
  - ④ 加以網格化
  - ⑤ 定義分析型態
  - ⑥ 細部分析設定
  - ⑦ 定義起始邊界條件
  - ⑧ 施以外力及固定面
- 求解：須先選定所需的求解項目，再行費時運算求解。

• 後處理：判讀結果與建立報表

亦可開啟模擬精靈(simulation wizard)(如圖 3.11)，取得該單元詳細說明。圖中係有關進行應力分析的技巧。

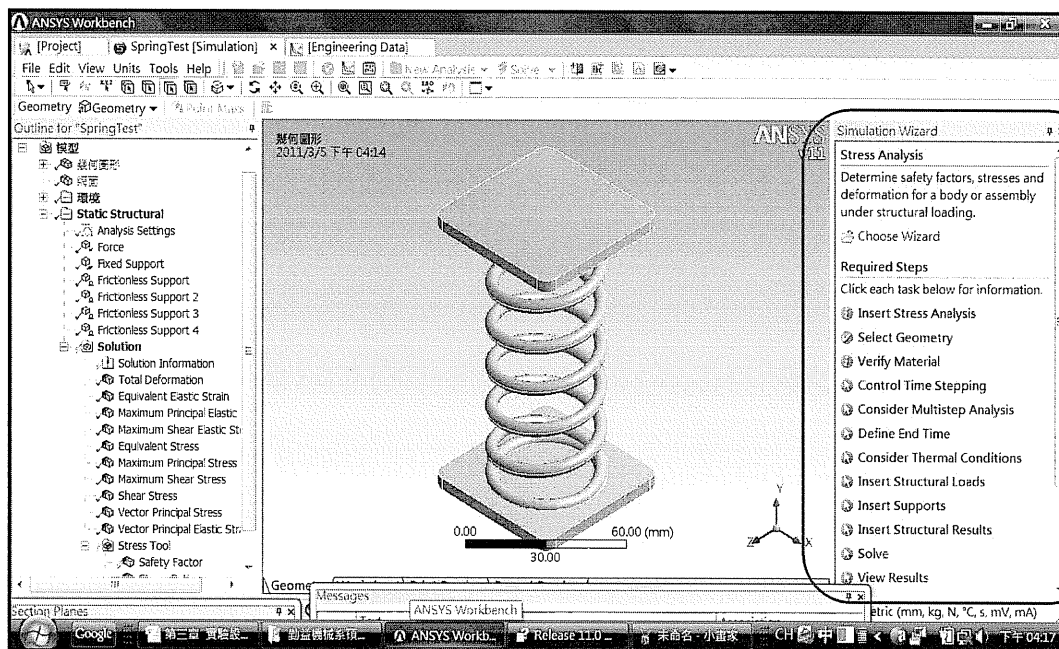


圖 3.11 模擬精靈方塊

### 3.4.1 彈簧電腦繪圖

ANSYS© Workbench 模擬分析作業的第一步驟，須先建構實體模型。本研究以 Inventor©繪圖軟體繪製該彈簧尺寸並轉化為 3D 圖。

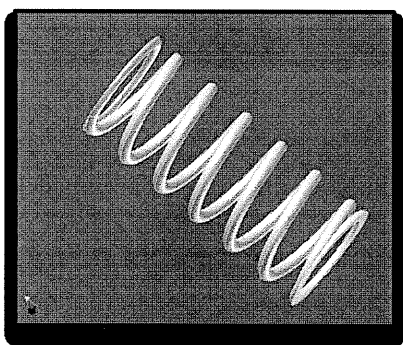


圖 3.12 彈簧單品

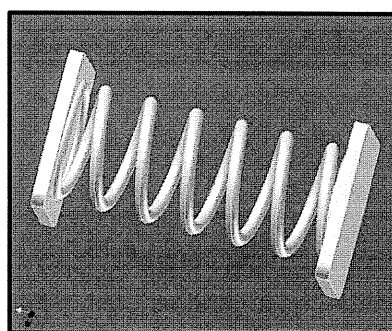


圖 3.13 上下壓板做負載施力面

### 3.4.2 匯入幾何圖形進行前處理

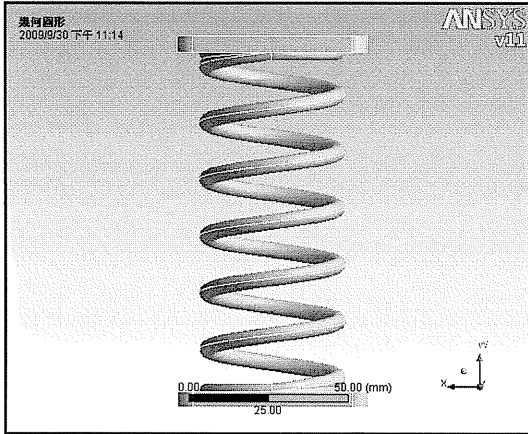


圖 3.14 彈簧幾何正視圖

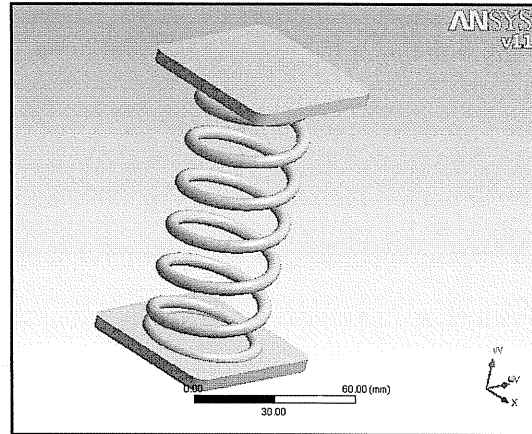


圖 3.15 彈簧幾何等角視圖

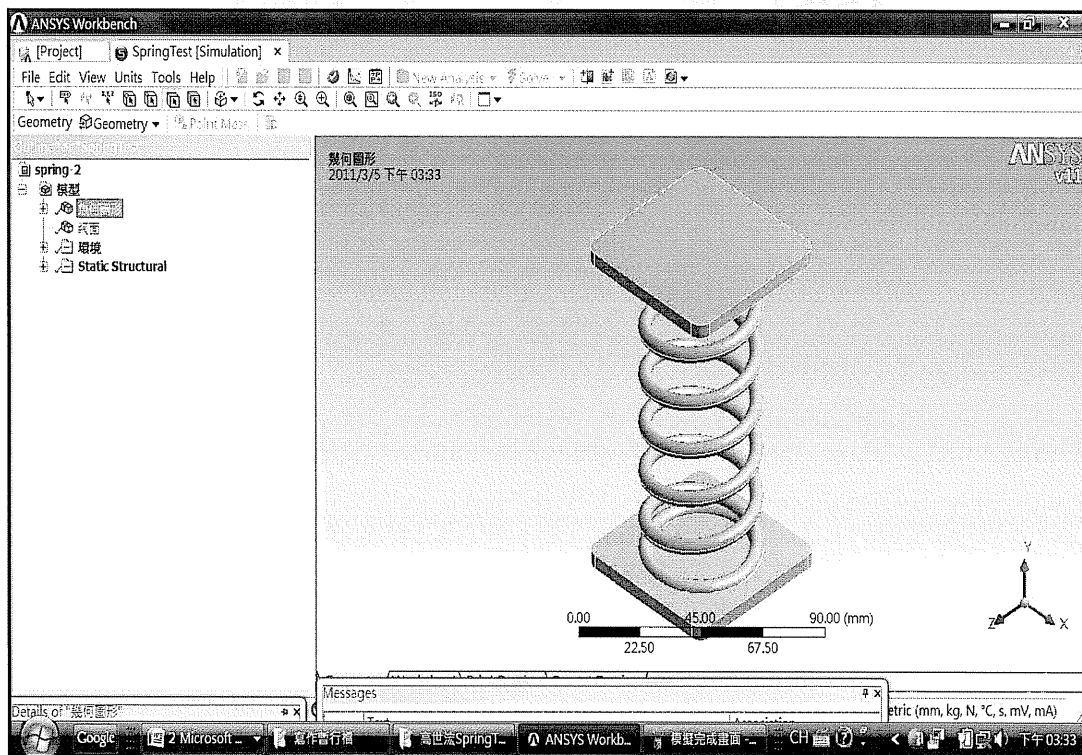


圖 3.16 匯入圖形的操作畫面

### 3.4.3 建立彈簧材料的工程性質資料

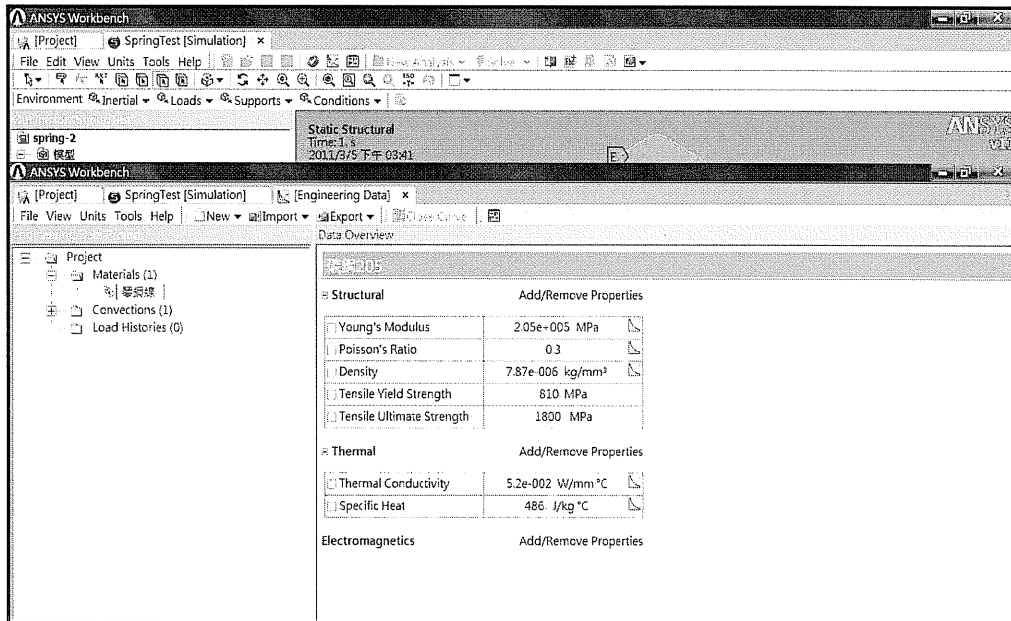


圖 3.17 輸入材料機械性質的操作畫面

### 3.4.4 網格化(meshing)

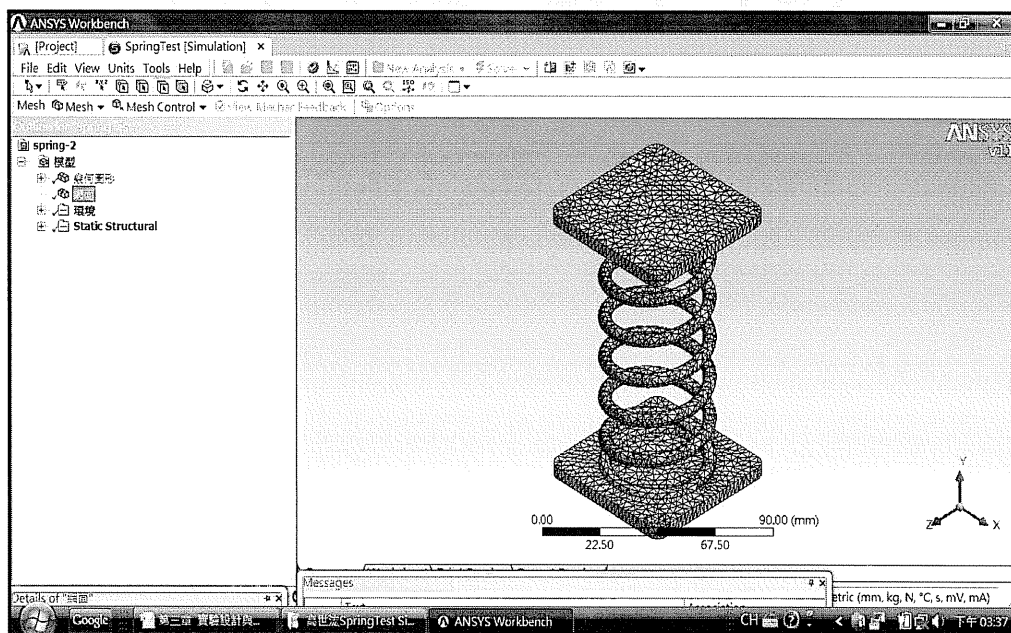


圖 3.18 建立網格

定義被分析結構物的材料機械性質(engineering data)。再將實體模型網格化(meshing)，以建立有限元素模型。運用電腦輔助工程分析軟體進行設計彈簧的應力分析時，前處理作業階段的網格化，十分重要，不同的參數設定會有不同的分析結果。因此本研究除原先之琴鋼線外，另使用矽鉻鋼線為材料，設計尺寸為  $\phi 3.2 \times \phi 25.8 \times 8 \times 66$  的彈簧，並以 ANSYS Workbench©軟體為 CAE 工具，專用於探討不同網格化參數，對分析彈簧  $k$  值的差異，尋求模擬分析彈簧最佳的網格化參數。當進行模擬之初，Workbench 會根據我們選擇欲模擬的物理模型(Physics Preference)，自動設定預設(default)的網格參數。分析機械元件時，此項選定 Mechanical。其後，Workbench 自動預設如表 3.4 的參數。

表 3.4 Workbench 的部分預設網格參數

Relevance	0
Relevance Center	Coarse
Shape Checking	Standard Mechanical
Smoothing	Low
Transition	Fast

首先依預設的網格參數求解網格的節點(nodes)與元素(elements)數目及總變形量，解得  $k$  值。接著依表 3.5 調整參數，每回只變更一項，其餘固定設為原預設值，再逐次求解上述三項結果，共執行 11 次。另外 6 次，係調整 2 項參數再模擬。前後共計進行 17 次的調整，供未來選定最佳的網格參數參考。

表 3.5 擬調整的網格參數群

Relevance	0	50	100
Relevance Center	Coarse	Medium	Fine
Shape Checking	Standard Mechanical	Aggressive Mechanical	
Smoothing	Low	Medium	High
Transition	Fast	Program Control	Slow

### 3.4.5 田口法探求最佳的網格化模擬參數

除了上節以簡單邏輯試誤法尋求最佳網格參數外，本研究亦以田口法，實驗比較兩者的差異。因為我們有一個因子(factor)具 2 水準(levels)，另四個因子具 3 水準，故選定  $2^1 \times 3^4$  配置各因子之水準，即運用  $L_{18}$  直交表。

表 3.6 各網格參數代入  $L_{18}$  直交表的實驗組合

編號	A(Shape Checking)	B(Relevance)	AXB	C(Relevance Center)	AXC	D(Smoothing)	BXD	E(Transition)
1	Standard	0		Coarse		Low		Fast
2	Standard	0		Medium		Medium		Prog. Control
3	Standard	0		Fine		High		Slow
4	Standard	50		Coarse		Medium		Slow
5	Standard	50		Medium		High		Fast
6	Standard	50		Fine		Low		Prog. Control
7	Standard	100		Medium		High		Slow
8	Standard	100		Fine		Low		Fast
9	Standard	100		Coarse		Medium		Prog. Control
10	Aggressive	0		Fine		Medium		Fast
11	Aggressive	0		Coarse		High		Prog. Control
12	Aggressive	0		Medium		Low		Slow
13	Aggressive	50		Medium		Low		Prog. Control
14	Aggressive	50		Fine		Medium		Slow
15	Aggressive	50		Coarse		High		Fast
16	Aggressive	100		Fine		High		Prog. Control
17	Aggressive	100		Coarse		Low		Slow
18	Aggressive	100		Medium		Medium		Fast



### 3.4.6 定義分析型態

選用靜態結構(static structure)分析。

設定拘束邊界條件：

- ①施力方向朝下及大小 814.6 N
- ②底板為固定支撐面
- ③上板的四個側面為無磨擦支撐面

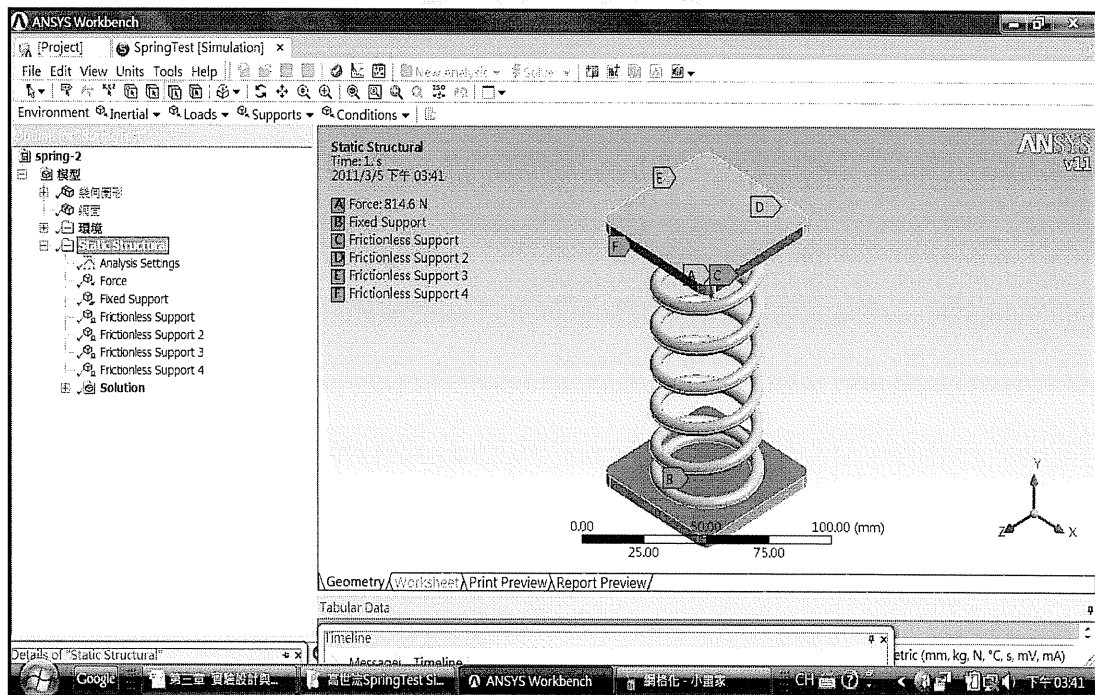


圖 3.19 靜態結構分析與設定拘束邊界條件

### 3.4.7 求解(Solution)

進入分析流程，接著選擇求解項目：總變形量、等效彈性應變、最大主彈性應變、最大剪彈性應變、等效應力、最大主應力、最大剪應力、剪應力、主應力向量、主彈性應變方向、安全係數等。軟體計算時間視電腦硬體、分析項目多寡與網格細緻程度有關。

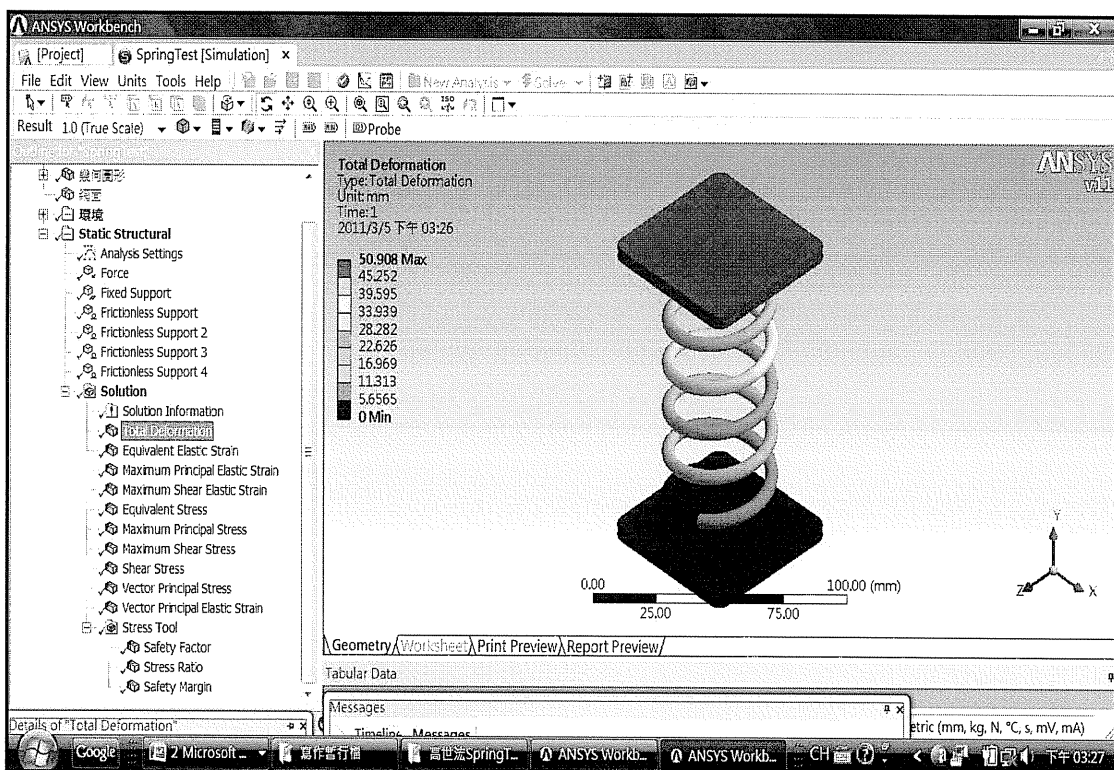


圖 3.20 模擬分析求解項目設定

### 3.4.8 後處理

後處理器將各項求解結果顯示於視窗中，可做成動畫(Animation)播放以增加視覺效果，亦可另行輸出報告文件，供未來分析研判之用。

### 3.5 試驗流程

#### 3.5.1 機械性質試驗

##### 3.5.1.1 抗拉強度測試：

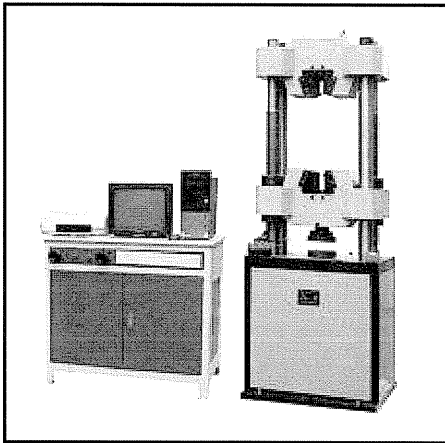


圖3.21 電腦式萬能試驗機

材料的抗拉強度測試實驗使用電腦式萬能試驗機(如圖 3.21)，試件受力引伸作用後，先經過彈性區域，若超過降伏點會發生頸縮現象、再達抗拉強度時便導致破斷。

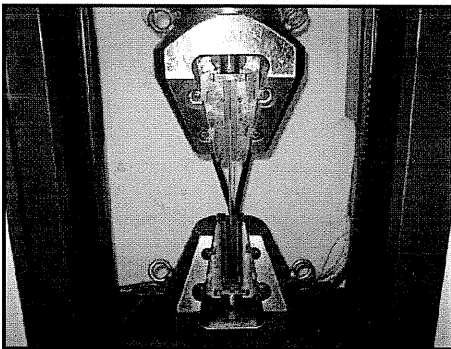


圖 3.22 試件夾持狀況

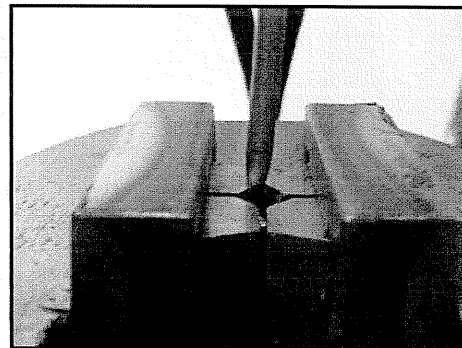


圖 3.23 試件拉斷狀況

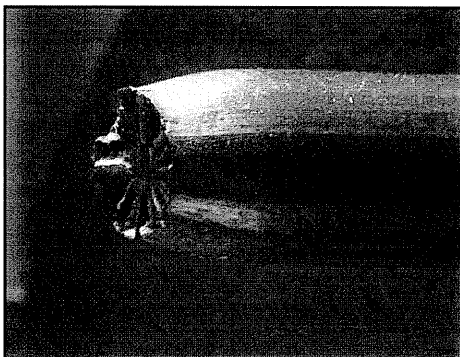


圖3.24 頸縮斷裂狀況

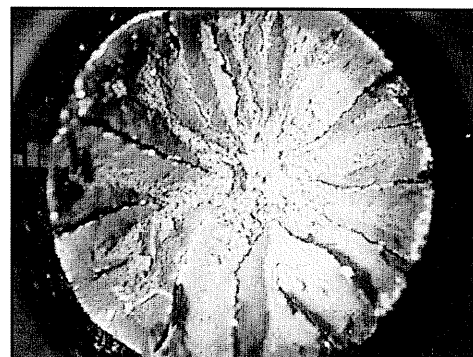


圖3.25 斷面放大圖

### 3.5.1.2 量測表面硬度：

本研究以洛氏硬度計量測其硬度。試片受鋼球壓痕如圖3.27。

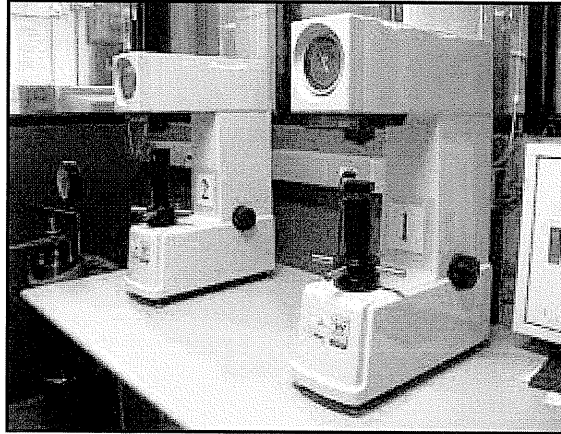


圖 3.26 洛氏硬度計

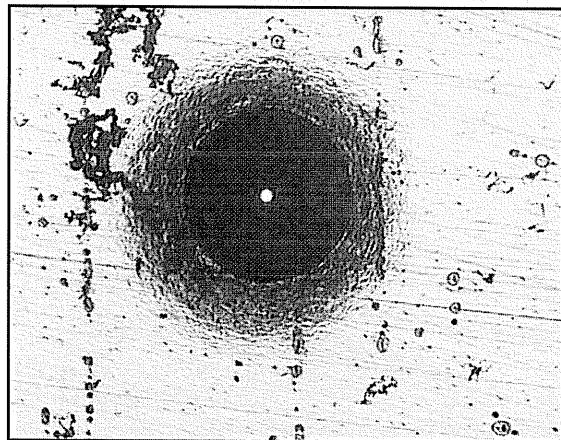


圖 3.27 試片受鋼球之壓痕

### 3.5.2 金相試驗

#### 3.5.2.1 製作試片

金相實驗試片經裁切後以冷鑲埋方式固化之，先以粗細號數不同(#100~#1500)之砂紙研磨，再用含顆粒  $0.3\ \mu\text{m}$  與  $0.05\ \mu\text{m}$  的氧化鋁溶液分別拋光細磨之，最後以 5% 濃度的硝酸腐蝕觀察面 1~2 秒。再拍攝 OM。(如圖 3.28)

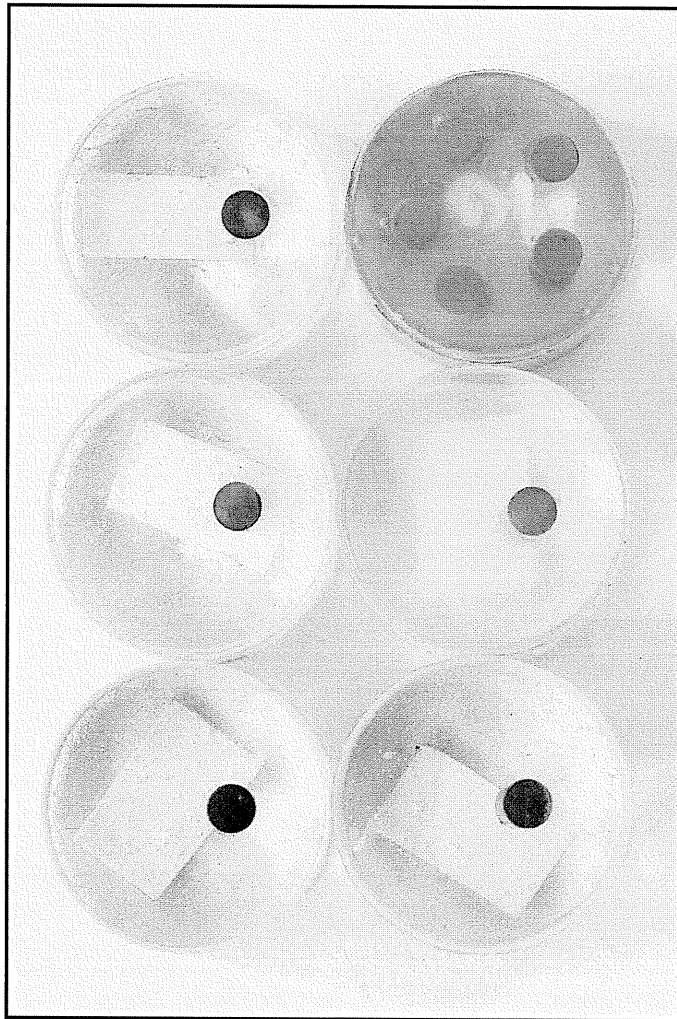


圖 3.28 金相試片

### 3.5.2.2 拍攝光學(OM)金相組織

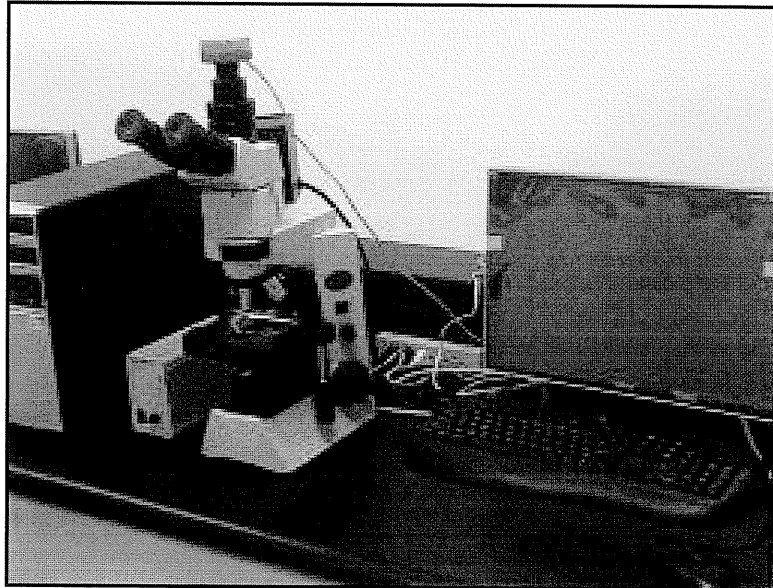


圖 3.29 光學金相顯微鏡

光學顯微鏡的試片準備和觀察次序：

要檢查金屬材料的顯微鏡組織時，先從材料切取適當大小的試驗片，然後把試驗片的檢查面用砂輪磨平，再用研磨紙磨光。最後用迴轉研磨機研磨。研磨機的圓盤上裝有絨布或其他適當的研磨布。研磨時把用水稀釋的研磨粉，例如氧化鋁 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 或者氧化鉻 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) 灑在研磨布上以利研磨。經過研磨的試驗片檢查面，用適當的腐蝕液（酸或鹼的溶液）腐蝕後，洗乾淨，吹乾就可以用顯微鏡檢查試片的組織。因為材料的組織不相同，腐蝕液的作用情形也不同，所以在顯微鏡下可以明顯的看出腐蝕性的差異所現出的組織。

### 3.5.3 應力衰緩實驗

彈簧承受高外應力時，必須將因高應力引發的彈性衰緩失效問題列入考量。本實驗組裝以 PLC 控制的油壓機台，將真空熱處理過的彈簧反覆施加外力，進行應力衰緩實驗。對螺旋彈簧往覆壓縮 55mm，並於適當間隔(受壓一千次前每百次，一萬次前每千次)，取下彈簧測量記錄其荷重，供後續的分析比較。

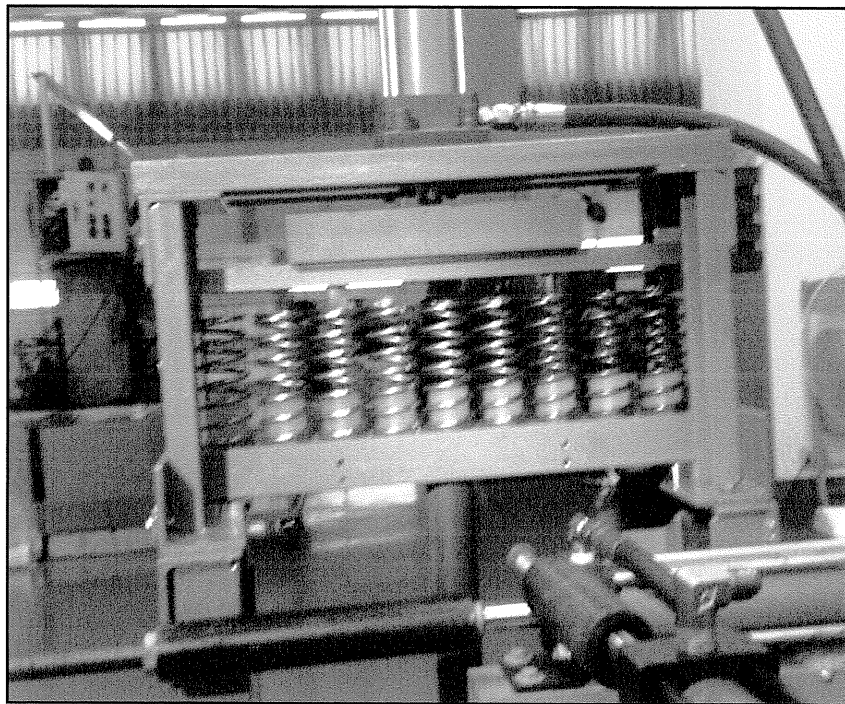


圖 3.30 油壓測試台

### 3.5.4 荷重試驗

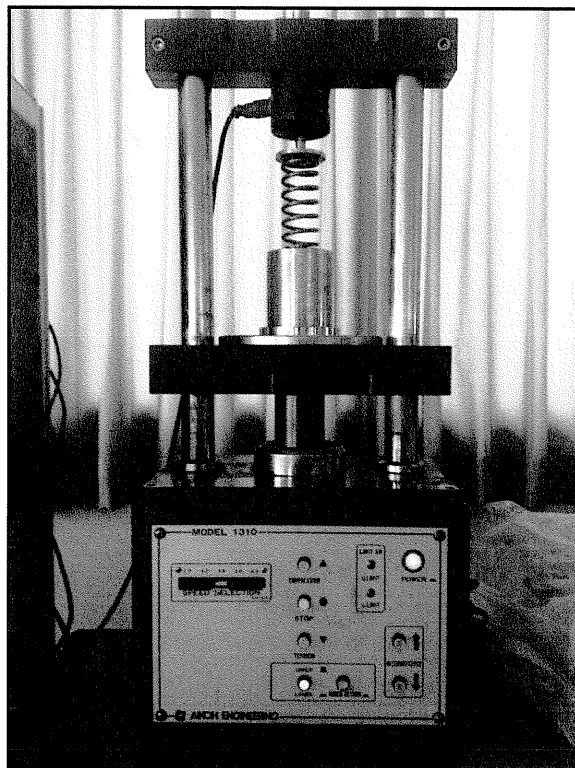


圖 3.31 彈簧荷重測試機台

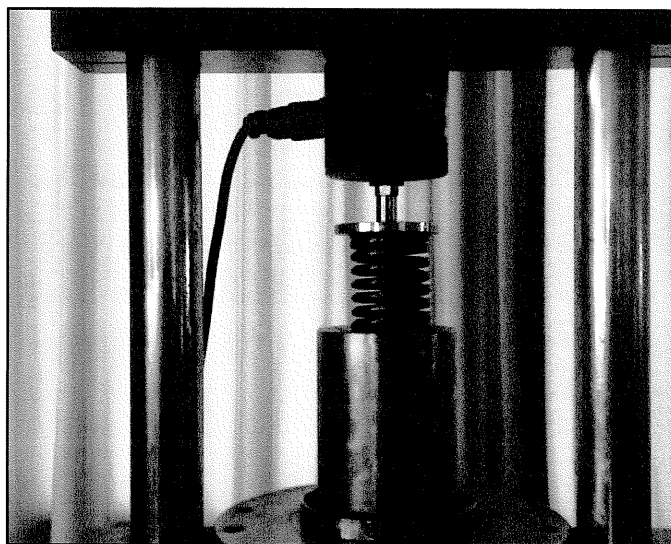


圖3.32 測試至下死點



測量過程如圖 3.32 與圖 3.33。與電腦連線的實驗紀錄表如圖 3.34。



圖 3.33 測試顯示部

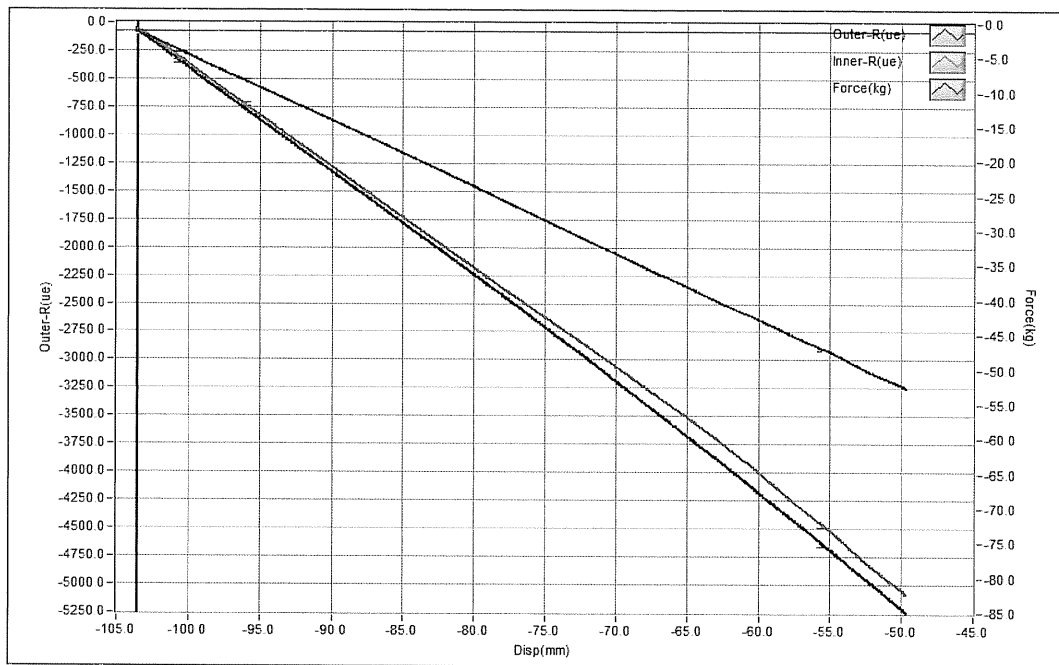


圖 3.34 量測軟體之荷重與應變記錄圖

### 3.6 應變量測

傳統認為壓縮彈簧的最大剪應力位於成型內徑，且疲勞裂紋起點(fatigue crack origin)亦始於此處。但Todinov認為：設計承受高疲勞應力HCS時，應考量發生於成型外側表面的最大拉伸主應力區域(the maximum region of the principal tensile stress)，是它引起裂紋發生→傳播→成長→破損。故在彈簧成型徑的內外側皆黏貼三軸式應變規(圖3.35)，測量應變值藉以比較釐清之(圖3.36)。而Flexense©量測軟體的操作介面(圖3.37)；應變菊花座(Strain Rosette)規格圖說(圖3.38)。

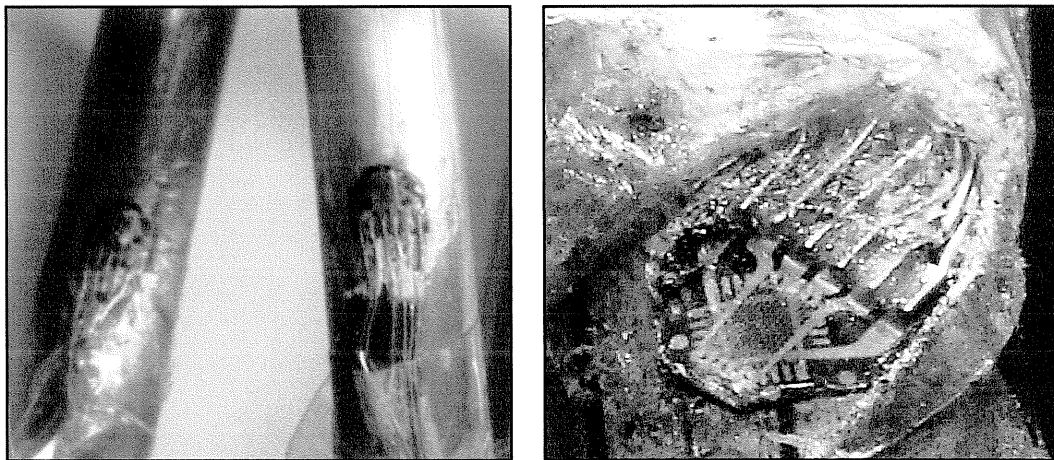


圖3.35 彈簧內外側黏貼應變規與應變規放大圖

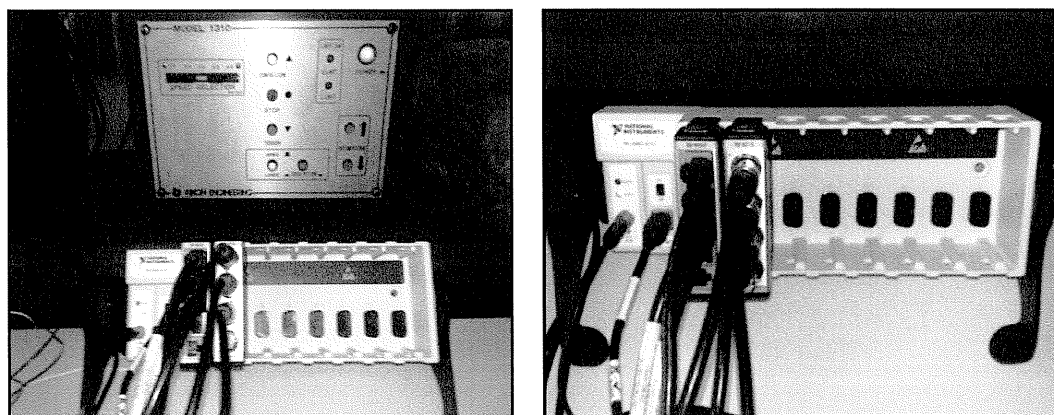


圖3.36 NI©應變資料擷取硬體設備

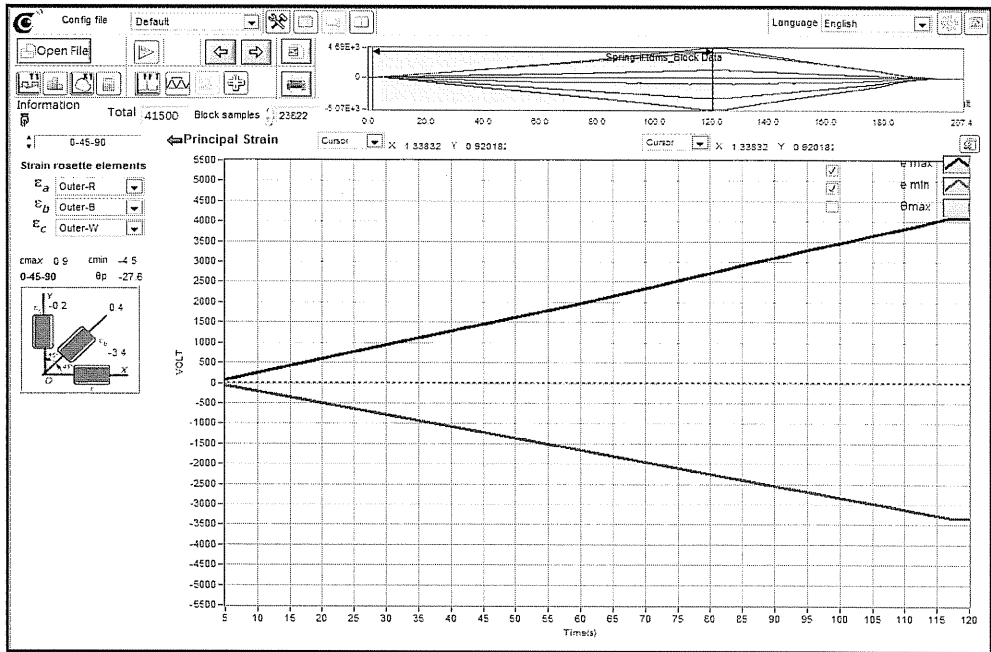


圖3.37 FleXense©量測軟體操作介面

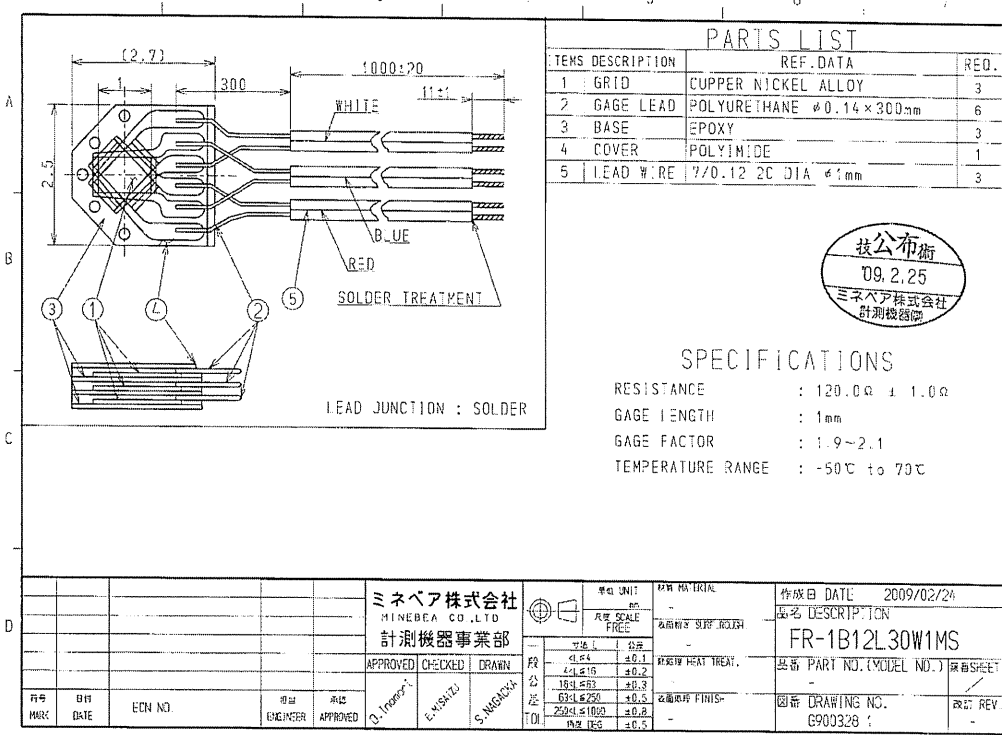


圖3.38 應變菊花座規格圖說

## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 最佳網格參數與 $k$ 值比對(以 $d=\phi 3.2\text{mm}$ 矽鉻鋼為例)

#### 4.1.1 最佳網格參數

以試誤法調整參數 17 次並執行模擬，當其節點數與元素數越多者，CPU 運算的時間越長。各模擬結果的變形量、 $k$  值、結點與元素數目記錄於表 4.1。因為 Young 認為 Sayre 方程式是精密公式(Precise formula)，故本研究從其論點以它做為計算誤差的基準，其  $k$  值為 9.84 N/mm；又選擇最佳網格參數的評估基準亦為模擬  $k$  值與該理論最接近者。第 1 次模擬數據的誤差最大(11.74%)其節點與元素數目恰也最少，亦即太粗糙的網格，其分析結果越糟。

表 4.1 調整不同網格參數的結果

	變形量(mm)	$k$ 值 (N/mm)	誤差	Nodes	Elements
1	18.185	11.00	11.74%	5550	2338
2	19.349	10.34	5.04%	11704	5053
3	19.411	10.30	4.63%	9635	4078
4	19.344	10.34	5.04%	8878	3917
5	19.300	10.36	5.24%	7425	3213
6	19.496	10.26	4.23%	12076	5839
7	19.551	10.23	3.92%	15816	6983
8	19.643	10.18	3.41%	32592	15788
9	19.283	10.37	5.34%	9862	4351
10	19.449	10.28	4.43%	15577	6996
11	19.819	10.09	2.50%	220321	131250
12	19.743	10.13	2.91%	195161	114749
13	19.719	10.14	3.01%	108299	63369
14	19.502	10.26	4.23%	17142	8599
15	19.676	10.16	3.21%	32339	16500
16	19.678	10.16	3.21%	60552	34411
17	21.772	9.19	-6.64%	219214	130793

第 11 次模擬數據的誤差最小(2.5%)，其產生的節點與元素數目恰巧也最多，因此判定其參數(如表 4.2)為分析彈簧的最佳網格化參數。第 17 次的節點與元素數目雖然與最佳參數的結果相近，但模擬數據的誤差卻是負向最大(-6.64%)，原因是網格化時允許模擬器在側面產生直條狀元素，這對圓形斷面的彈簧線材並不適合。表 4.3 為各參數模擬下的網格斷面樣式，最佳的斷面樣式(如圖 4.1)與最差者(如圖 4.2)獨立呈現之。

表 4.2 分析彈簧最佳的網格參數

Relevance	100
Relevance Center	Fine
Shape Checking	Aggressive Mechanical
Smoothing	Medium
Transition	Slow

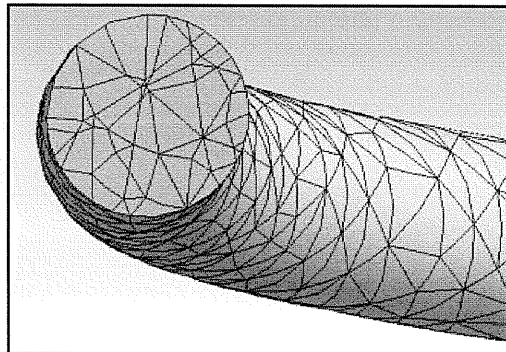


圖 4.1 最佳的網格樣式

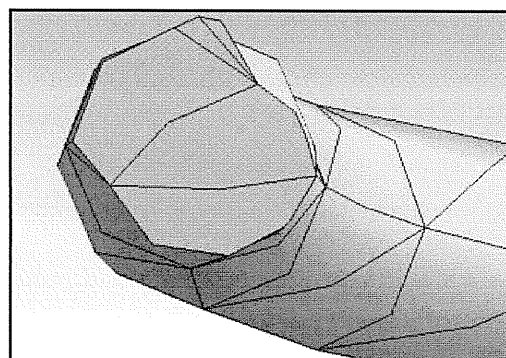
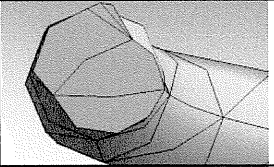
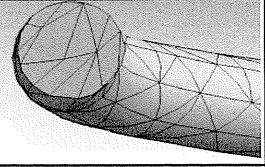
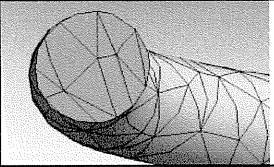
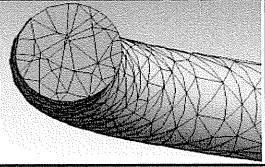
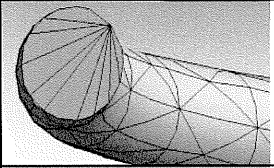
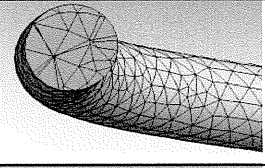
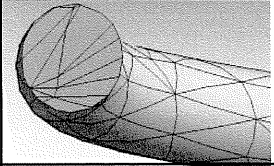
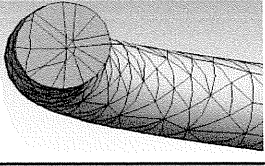
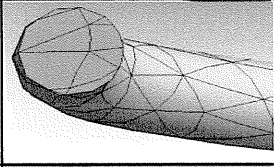
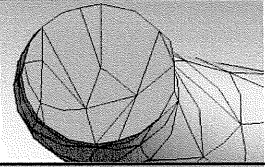
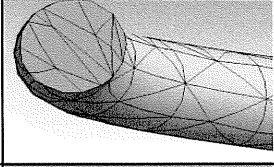
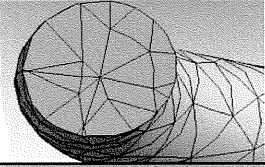
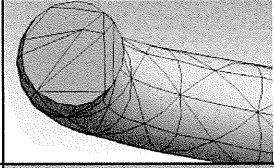
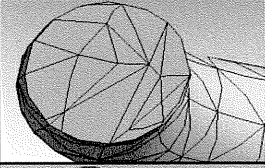
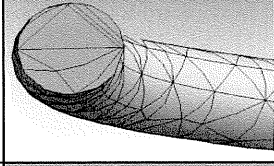
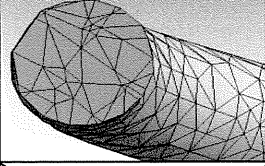
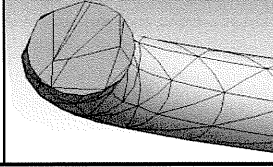
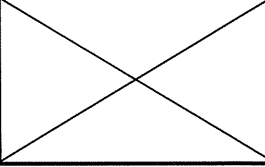


圖 4.2 最差的網格樣式

表 4.3 各模擬參數的網格斷面樣式

1		10	
2		11	
3		12	
4		13	
5		14	
6		15	
7		16	
8		17	
9			

4.1.2 田口法實驗所得之最佳網格參數 (以  $d=\phi 3.2\text{mm}$  矽鉻鋼為例)

表 4.4 各網格參數組合的  $k$  值模擬結果

編號	Stroke (mm)	$k$ (spring rate) (N/mm)	Error	Nodes	Elements
1	19.2780	10.3745	6.41%	9635	4078
2	19.3520	10.3348	6.00%	15129	7031
3	19.6310	10.1880	4.49%	70527	40405
4	19.3510	10.3354	6.00%	15272	6901
5	19.3450	10.3386	6.04%	18699	8851
6	19.6100	10.1989	4.60%	60989	34308
7	19.6320	10.1874	4.49%	71552	40717
8	19.6570	10.1745	4.35%	109519	64062
9	19.2780	10.3745	6.41%	14156	6503
10	19.6210	10.1932	4.55%	32421	16492
11	19.1860	10.4243	6.92%	8147	3679
12	19.7060	10.1492	4.09%	27619	13942
13	19.5400	10.2354	4.98%	29603	14745
14	19.6670	10.1693	4.30%	146907	86604
15	19.2670	10.3804	6.47%	11442	5319
16	19.6710	10.1673	4.28%	95494	54915
17	19.5400	10.2354	4.98%	29044	15028
18	19.5960	10.2062	4.68%	42390	22917

表 4.5 ANOVA 分析結果

變因	SS	$\phi$	V	F <sub>0</sub>	F <sub>0.05</sub>	F <sub>0.01</sub>	純變動 SS'	貢獻率 %
A	0.0067	1	0.00670	13.40	5.3177	11.2586	0.0062	4.29%
B	0.0111	2	0.00555	11.10	4.4590	8.6491	0.0101	6.99%
<b>C</b>	0.0917	2	0.04585	<b>91.70</b>	4.4590	8.6491	0.0907	<b>62.81%</b>
D	0.0093	2	0.00465	9.30	4.4590	8.6491	0.0083	5.75%
E	0.0216	2	0.01080	21.60	4.4590	8.6491	0.0206	14.27%
error	0.0040	8	0.00050				0.0085	5.89%
Total	0.1444	17					0.1444	100.00%

由 ANOVA 分析結果可知：所選定的各網格參數中，對模擬皆有非常顯著的影響，其中又以 C 因子(Relevance Center)影響最巨大 (達 62.81%)。

兩種探尋最佳網格參數的差異，僅僅在於 Smoothing 此項因子。且分析所得的結果(彈簧常數)亦十分相近。

表 4.6 兩種探尋最佳網格參數的比較

Factors	Trial & Error	Taguchi method
Relevance	100	100
Relevance Center	Fine	Fine
Shape Checking	Aggressive Mechanical	Aggressive Mechanical
<b>Smoothing</b>	<b>Medium</b>	<b>Low</b>
Transition	Slow	Slow
Spring rate	<b>10.09</b>	<b>10.16</b>



### 4.1.3 實驗用彈簧設計的 $k$ 值比對(以 $d=\phi 5.0\text{mm}$ 琴鋼線為例)

①於 3.2.2 節中的壓縮彈簧簡易公式，所設計的彈簧常數為

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{8N_a D^3} = 14.81 \text{ (N/mm)}$$

再以第二章所蒐集到的另外三種公式及運用應變能和卡式定理推導而得的算式，與 ANSYS 模擬分析數值相互比較分析。

②Ancker 式：

$$\begin{aligned} k &= \frac{P}{\delta} = \frac{Gd^4}{64N_a R^3} \left[ 1 - \frac{3}{64} \left( \frac{d}{R} \right)^2 + \frac{3+\nu}{2(1+\nu)} (\tan \alpha)^2 \right]^{-1} \\ &= \frac{78.4 \times 10^3 \times 5^4}{64 \times 6 \times 20.5^3} \left[ 1 - \frac{3}{64} \left( \frac{5}{20.5} \right)^2 + \frac{3+0.3}{2(1+0.3)} (\tan 7.74^\circ)^2 \right]^{-1} \\ &= 14.51 \text{ (N/mm)} \end{aligned}$$

③Sayre 式：

$$L = N_a \pi D = 6\pi \times 41 = 772.8318 \quad ; F = \frac{10}{9} \quad ; H_0 = 105 \quad ; H = 1$$

$$K = \frac{1}{2} \pi r^4 = \frac{\pi}{2} \times \left( \frac{5}{2} \right)^4 = 61.3592$$

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4 = \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{5}{2} \right)^4 = 30.6796$$

$$A = \pi(r)^2 = \pi \left( \frac{5}{2} \right)^2 = 19.635$$

$$\begin{aligned} \therefore k &= \left\{ \left[ \frac{R^2 L}{GK} - \frac{R^2 H_0^2}{GKL} \left( 1 - \frac{GK}{EI} \right) + \frac{FL}{AG} \right] - \left[ \frac{R^2}{3GKL} \left( 3 - \frac{2GK}{EI} \right) (H^2 + HH_0 - 2H_0^2) \right] \right\}^{-1} \\ &= 14.62 \text{ (N/mm)} \end{aligned}$$

④Yildirim 式：

$$\begin{aligned} k &= \frac{P}{\delta} = \left[ \frac{2n\pi R \cos \alpha}{EI} + \frac{2n\pi R \sin \alpha \tan \alpha}{EA} + \frac{2n\pi R^3 \sin \alpha \tan \alpha}{GI} + \frac{2n\pi R^3 \cos \alpha}{GJ} \right]^{-1} \\ &= \left\{ n\pi D \left[ \left( \frac{1}{EI} + \frac{R^2}{GJ} \right) \cos \alpha + \left( \frac{1}{EA} + \frac{R^2}{GI} \right) \sin \alpha \tan \alpha \right] \right\}^{-1} \\ &= 14.39 \text{ (N/mm)} \end{aligned}$$

⑤清水麻衣式：

$$\begin{aligned}
 k = \frac{P}{\delta} &= \left[ \frac{L}{AG} \cos \alpha + \frac{L}{AE} \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} + \frac{LD^2}{4GJ} \cos \alpha + \frac{LD^2}{4EI} \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right]^{-1} \\
 &= \left\{ n\pi D \left[ \left( \frac{1}{AG} + \frac{D^2}{4GJ} \right) \cos \alpha + \left( \frac{1}{AE} + \frac{D^2}{4EI} \right) \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right] \right\}^{-1} \\
 &= \left\{ n\pi D \left[ \frac{1}{G} \left( \frac{1}{A} + \frac{D^2}{4J} \right) \cos \alpha + \frac{1}{E} \left( \frac{1}{A} + \frac{D^2}{4I} \right) \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right] \right\}^{-1} \\
 &= 14.63 \text{ (N/mm)}
 \end{aligned}$$

以上各種運算結果整理於表 4.7。因 Sayre 是精密公式(precise formula)故以它為基準來比較其他的理論式。本研究與 Ancker 式的相對誤差皆小於 1%；簡易式與 Yildirim 式相對誤差皆小於 2%；但模擬數據誤差約在 3%，其原因是繪圖時，座卷漸進收縮線不易掌握，又設定網格化參數及邊界拘束條件也都會影響模擬結果。

表 4.7 各種彈簧  $k$  值公式與 Sayre 式的比較

	簡易式	Ancker	Sayre	Yildirim	本研究	ANSYS
$k$ 值 (N)	14.81	14.51	14.62	14.39	14.63	15.06
差異	+1.29%	-0.75%	0%	-1.6%	+0.06%	+2.98%

另以圖 4.3 顯示各理論的誤差度。

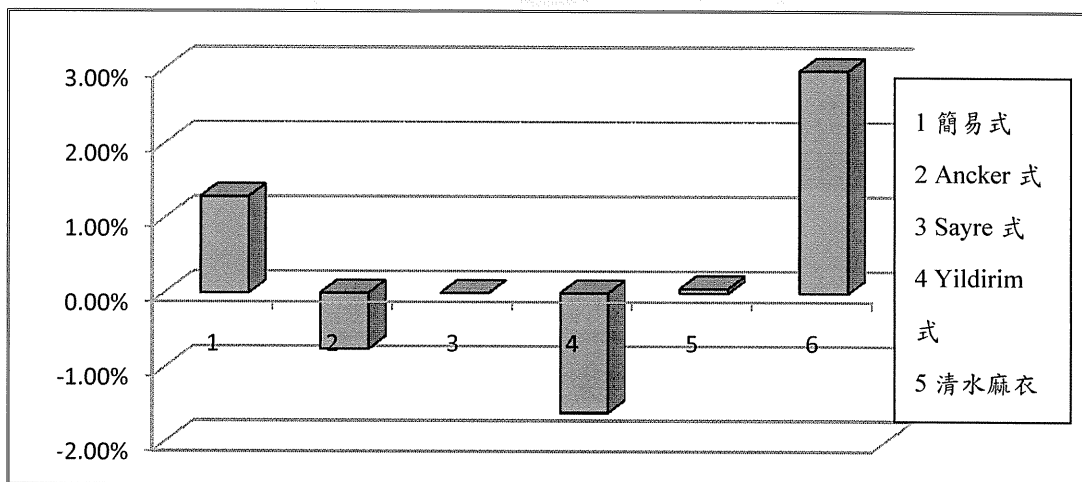


圖 4.3 各種彈簧  $k$  值公式與 Sayre 式的比較

## 4.2 彈簧設計的模擬

施以各項邊界條件並選定分析項目後，求解結果如下：

### 4.2.1 總變形量(Total Deformation)

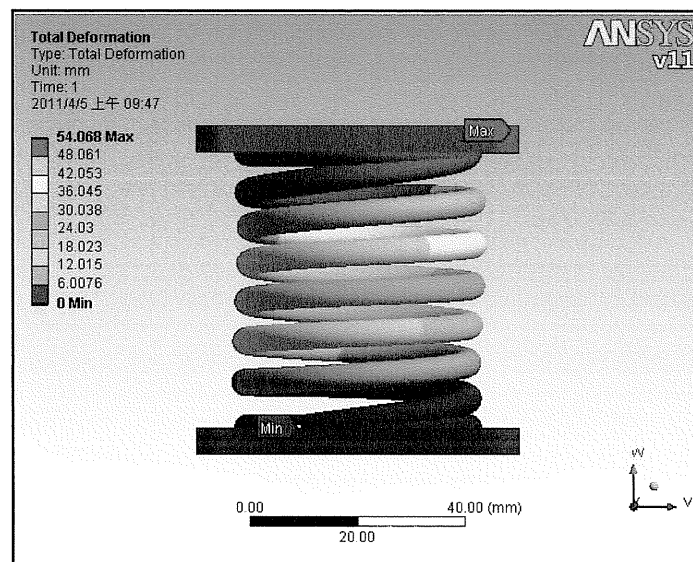


圖 4.4 最大變形量

### 4.2.2 側向變形量

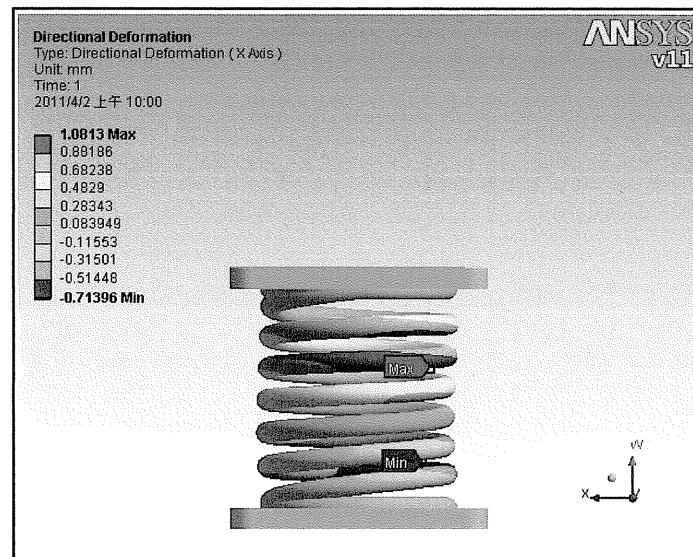


圖 4.5 X 方向變形量

### 4.2.3 等效應力

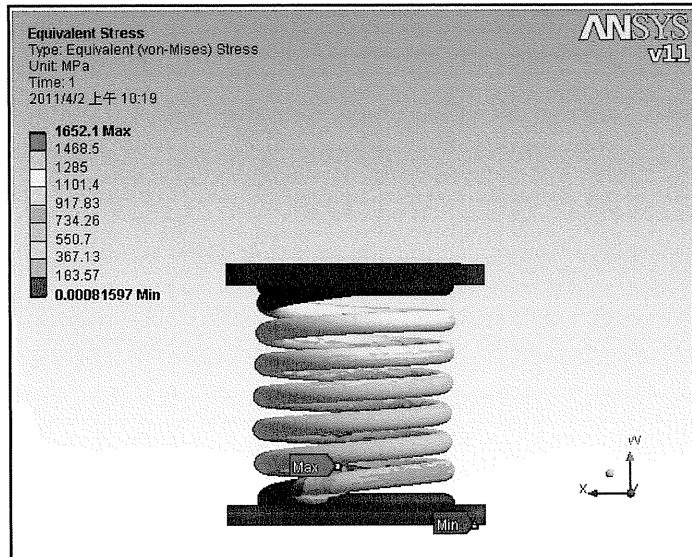


圖 4.6 等效應力

### 4.2.4 法向應力

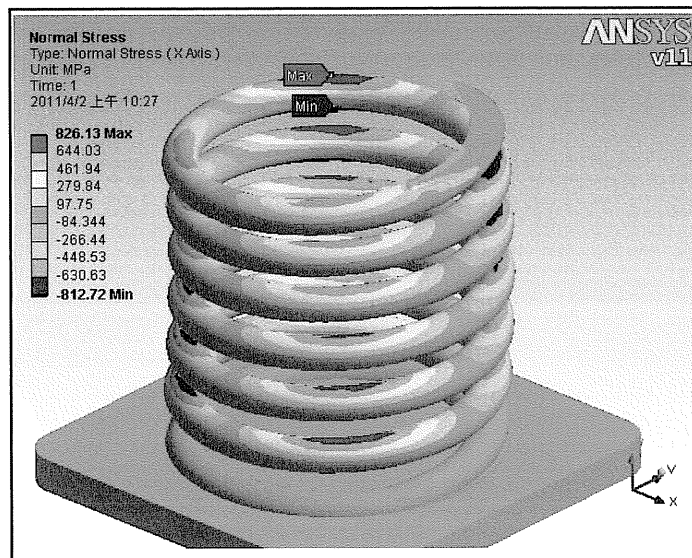


圖 4.7 法向應力

#### 4.2.5 剪應力

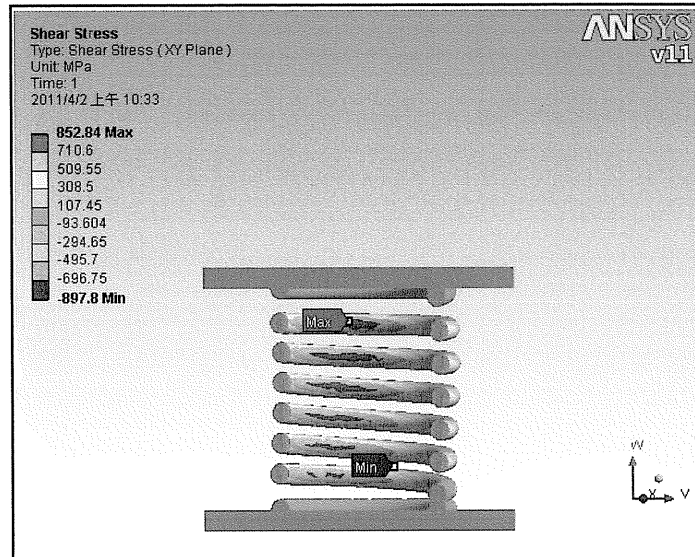


圖 4.8 剪應力

#### 4.2.6 應力強度

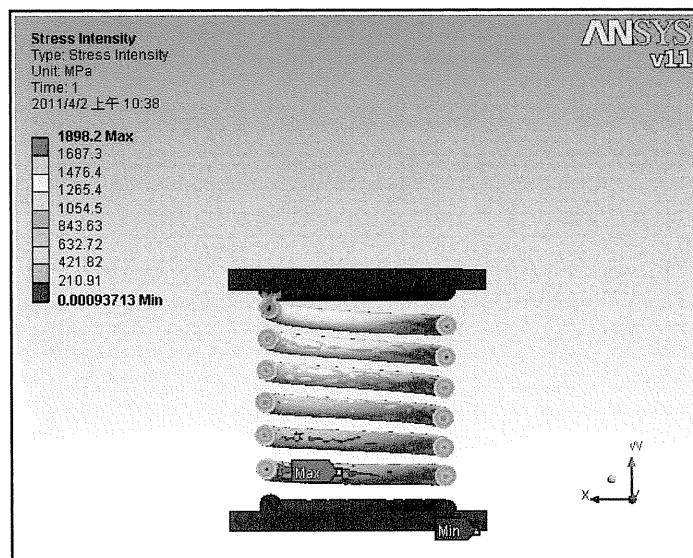


圖 4.9 應力強度

#### 4.2.7 最大剪應力

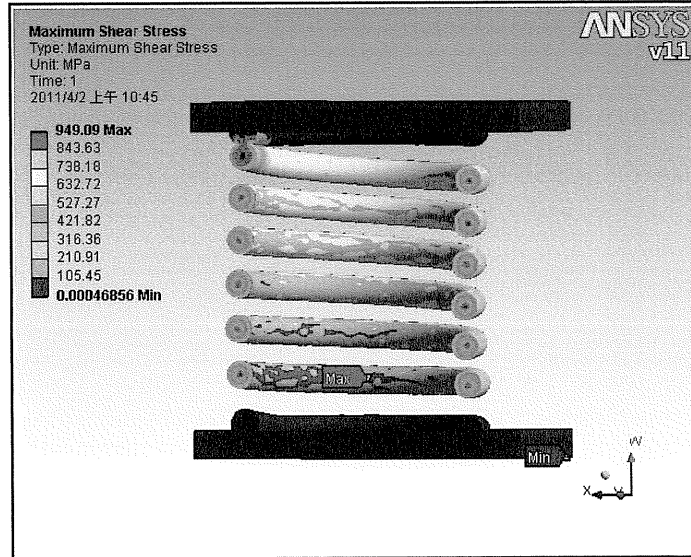


圖 4.10 最大剪應力

最大剪應力發生於底座卷往上第二圈的內側中心部。

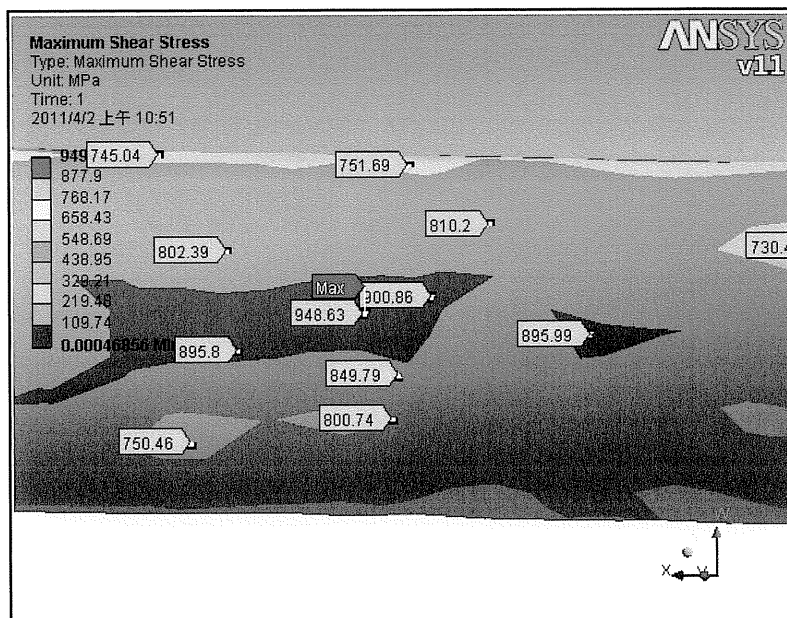


圖 4.11 最大剪應力區域放大圖

#### 4.2.8 剪彈性應變

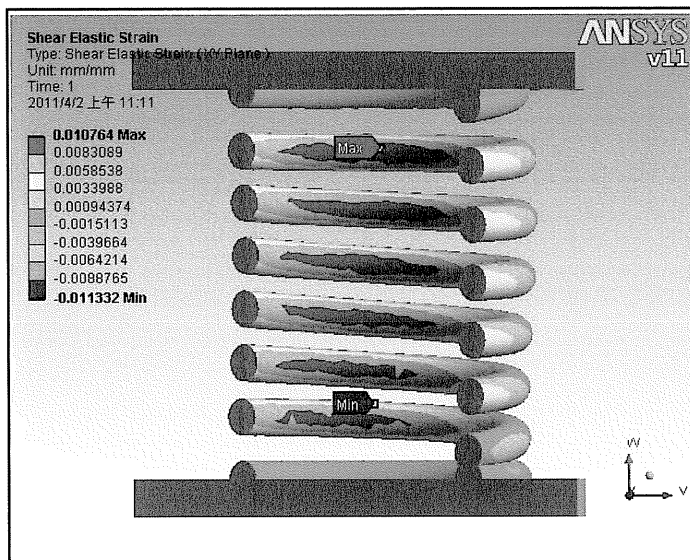


圖 4.12 剪彈性應變

#### 4.2.9 最大主應力

最大主應力發生於座卷密接觸面，須避免之。

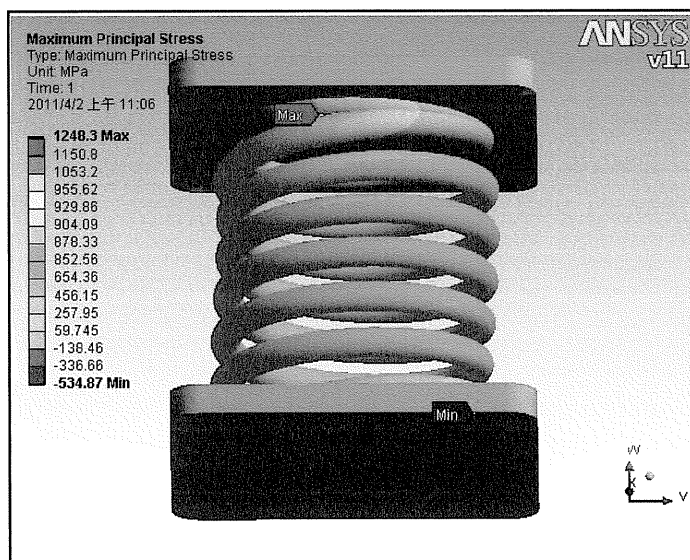


圖 4.13 最大主應力

#### 4.2.10 材料斷面主應力向量

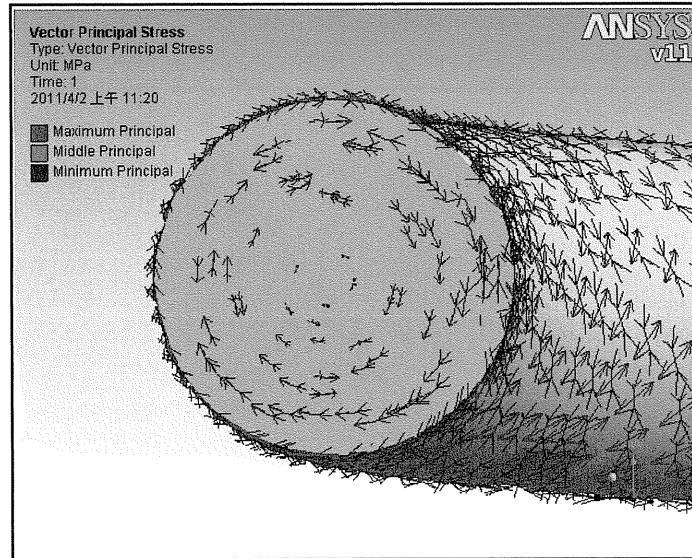


圖 4.14 材料斷面之主應力向量

#### 4.2.11 線材表面主應力向量

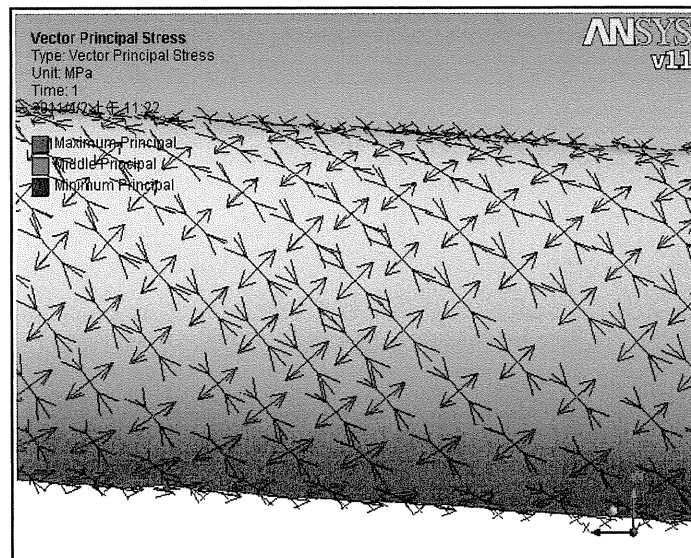


圖 4.15 線材表面上主應力向量



#### 4.2.12 材料斷面主彈性應變向量

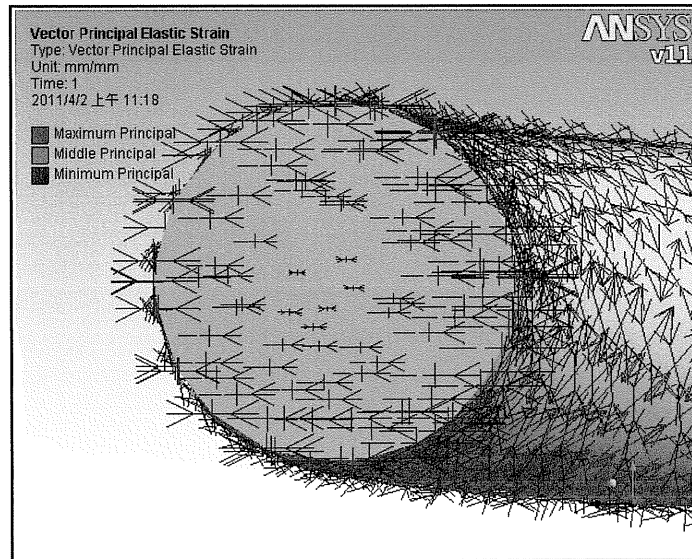


圖 4.16 材料斷面主彈性應變向量

#### 4.2.13 材料表面主彈性應變向量

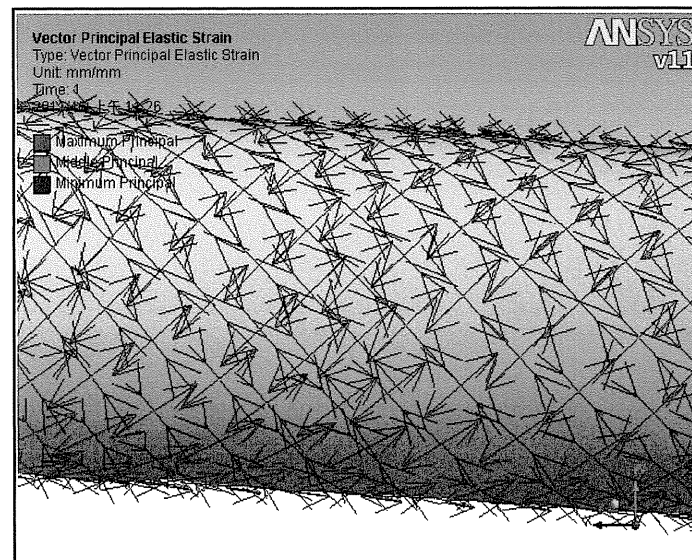


圖 4.17 材料表面主彈性應變向量

#### 4.2.14 安全係數

整個安全係數皆不足，從應力比的模擬亦可驗證此彈簧位於彈性區域外。

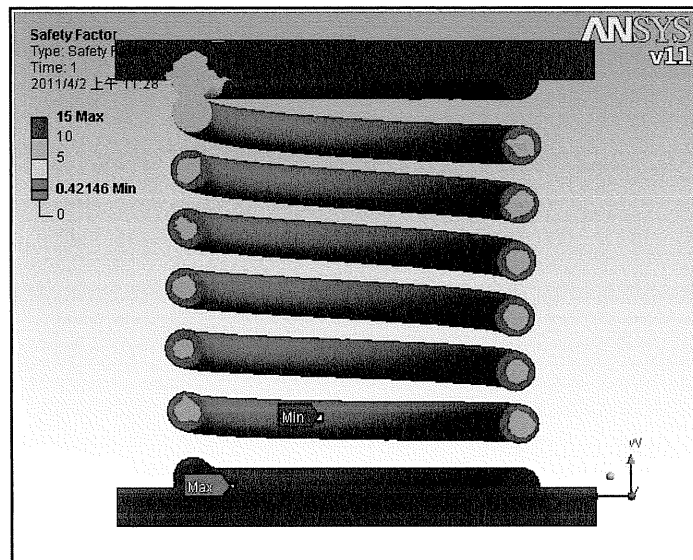


圖 4.18 安全係數

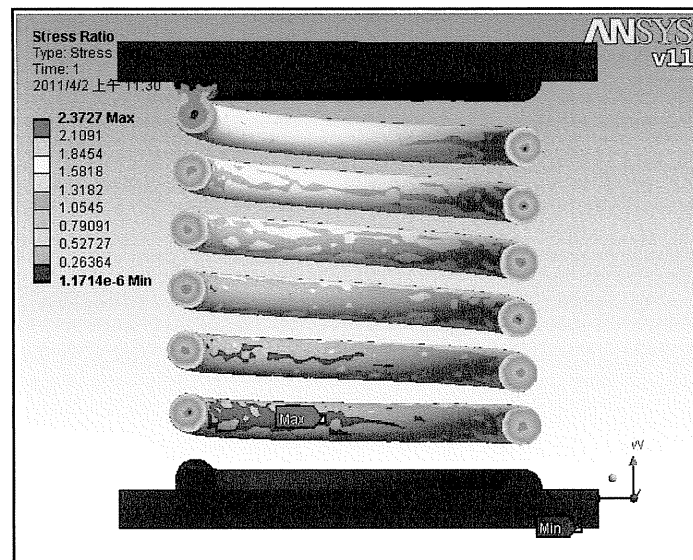


圖 4.19 應力比

#### 4.2.15 挫曲分析

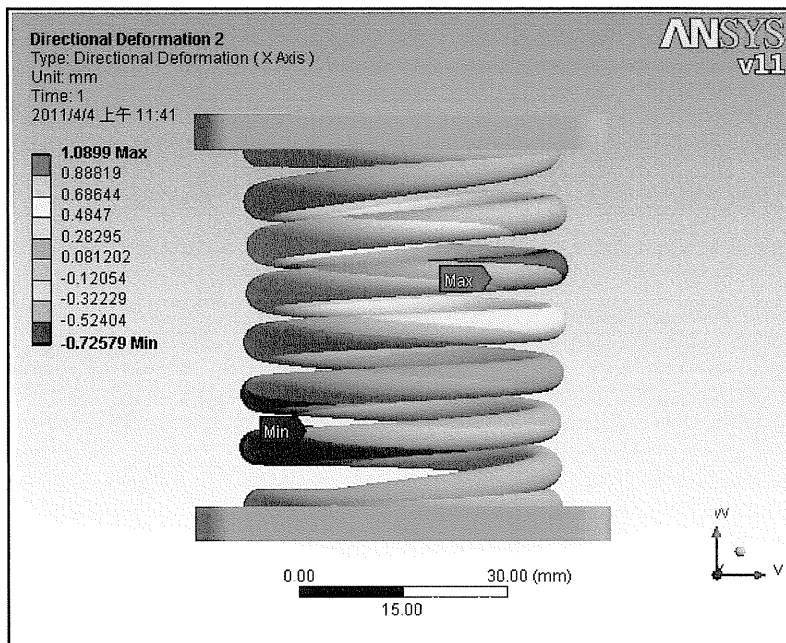


圖 4.20 X 軸最大挫曲變形量

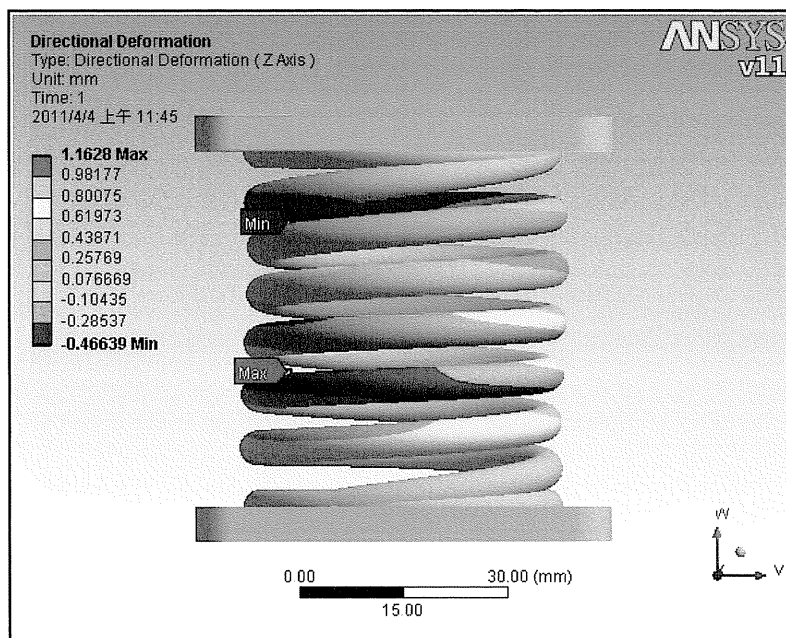


圖 4.21 Z 軸最大挫曲變形量

### 4.3 抗拉強度與硬度

#### 4.3.1 拉伸試驗

將不同熱處理溫度試片的拉伸試驗結果表列如下：

表 4.8 各種溫度下的拉伸試驗數據

試片編號	最大抗拉 kgf/mm <sup>2</sup>	斷裂強度 kgf/mm <sup>2</sup>	降伏強度 kgf/mm <sup>2</sup>	楊氏係數 kgf/mm <sup>2</sup>
W1-200C	197	140	196	1811.5
W3-250C	191	162	188	1711.8
Y2-300C	188	136	178	1669.0
R1-350C	181	134	166	1476.4
R3-400C	168	133	145	1609.1

試片編號	最大抗拉延伸 mm / 應變		斷裂延伸 mm / 應變		降伏延伸 mm / 應變	
W1-200C	5.49	10.98	6.84	13.68	5.24	10.48
W3-250C	6.13	12.26	6.92	13.84	4.94	9.88
Y2-300C	8.45	16.9	10.63	21.26	5.6	11.2
R1-350C	9.05	18.1	10.87	21.74	5.61	11.22
R3-400C	9.12	18.24	10.66	21.32	4.74	9.48

各熱處理溫度下的拉伸試驗結果如圖 4.22 至圖 4.26。(應力 VS 應變)

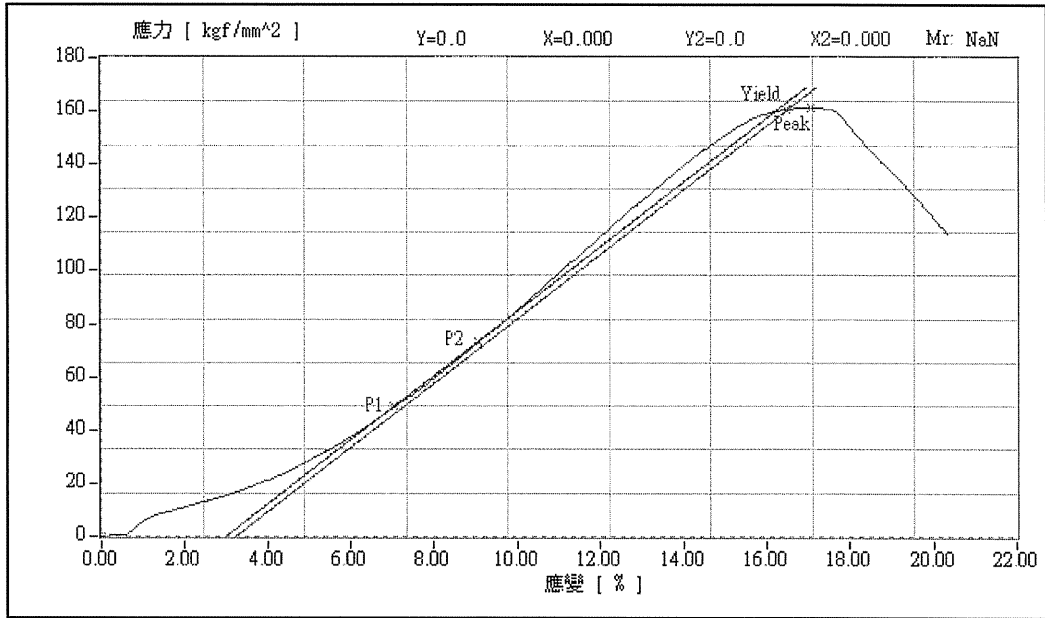


圖 4.22 應力 VS 應變圖(200 °C)

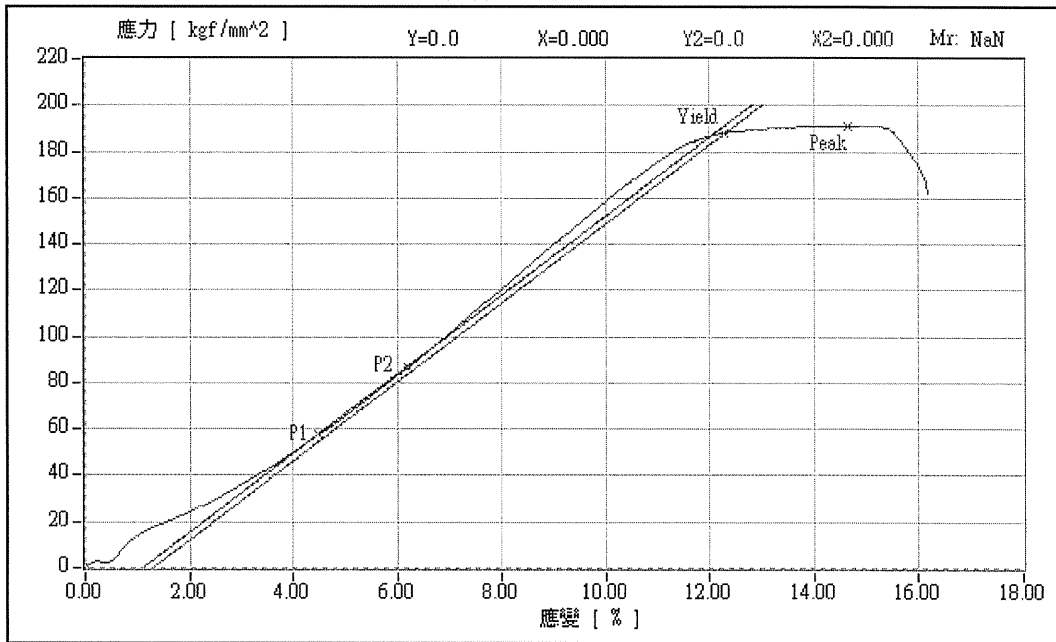


圖 4.23 應力 VS 應變圖(250 °C)

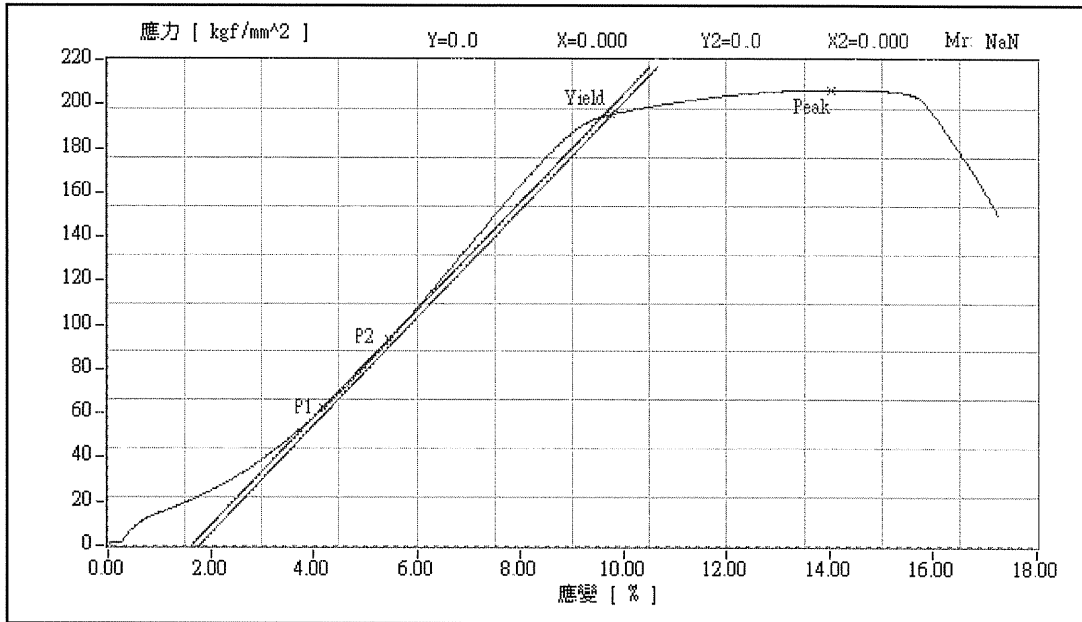


圖 4.24 應力 VS 應變圖(300 °C)

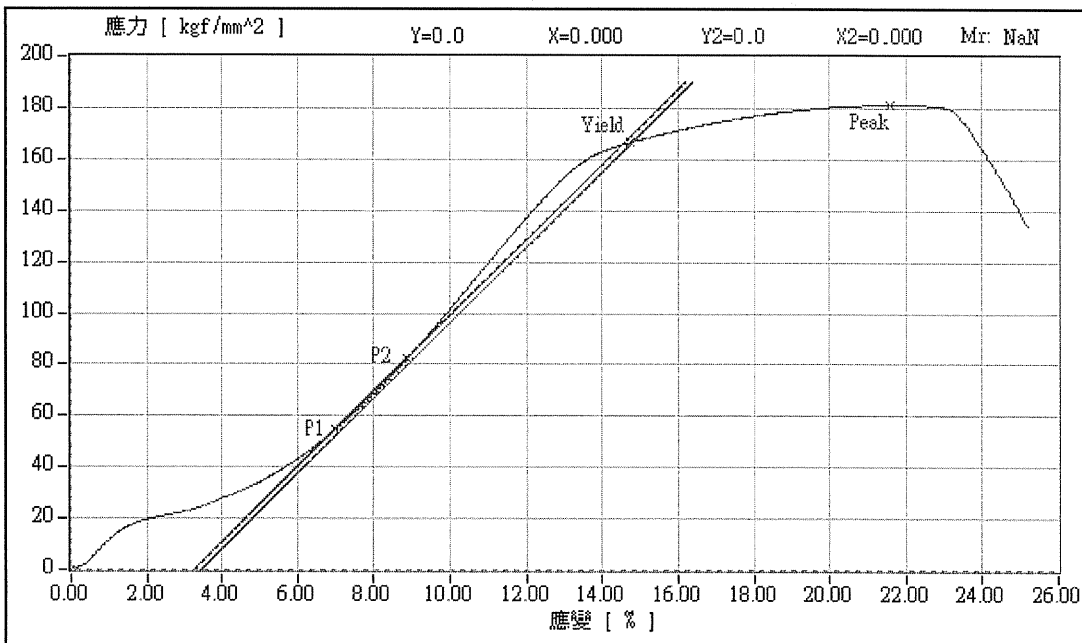


圖 4.25 應力 VS 應變圖(350 °C)

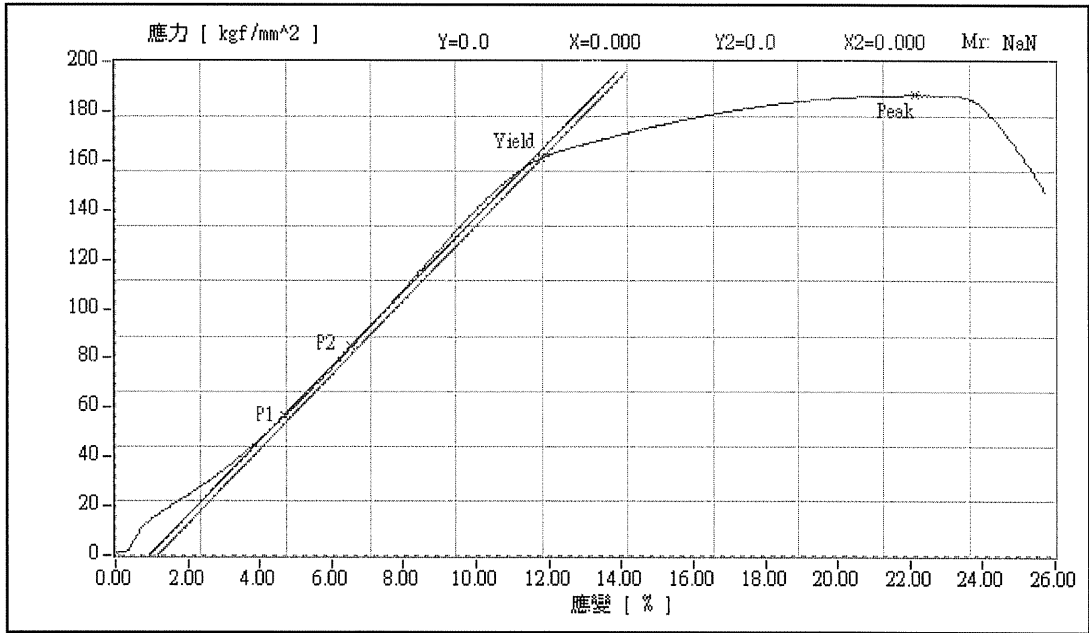


圖 4.26 應力 VS 應變圖(400 °C)

### 4.3.2 硬度測試

表 4.9 各種溫度下的硬度試驗數據(單位 HRa)

	素材	200°C	250°C	300°C	350°C	400°C
點 1	68	77.5	76	72.5	73.5	72
點 2	72	73.5	74.5	74.5	71.5	71
點 3	74.5	78.5	74	75	73.5	73
點 4	71.5	73.5	73	74	72	72.5
點 5	71	75	76.5	74	74.5	71
平均值	71.4	75.6	74.8	74	73	71.9

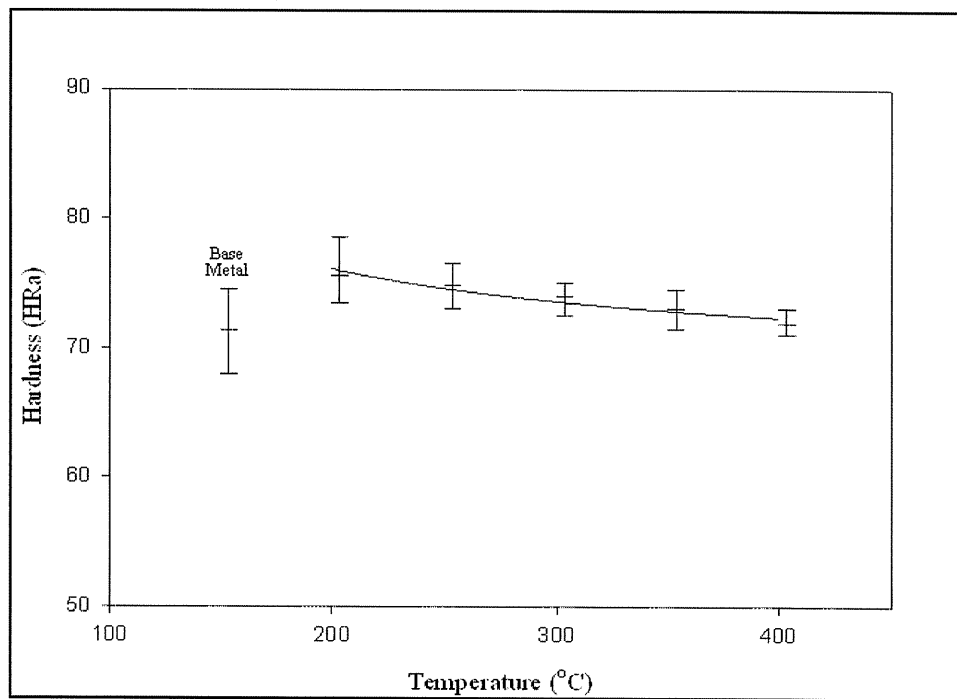


圖 4.27 溫度與硬度關係圖-1



原先素材未處理前的抗拉強度與硬度分別為184.9kgf/mm<sup>2</sup>與71.4HRa。圖4.28顯示以200°C處理過的抗拉強度與圖4.29硬度皆增大且最高。但隨著回火溫度上升，抗拉強度與硬度皆大致隨之下降。特別是400°C時，其硬度雖然仍稍大於素材，唯抗拉強度低於素材約9.2%，若最大使用應力接近臨界區域，則須考量疲勞特性。

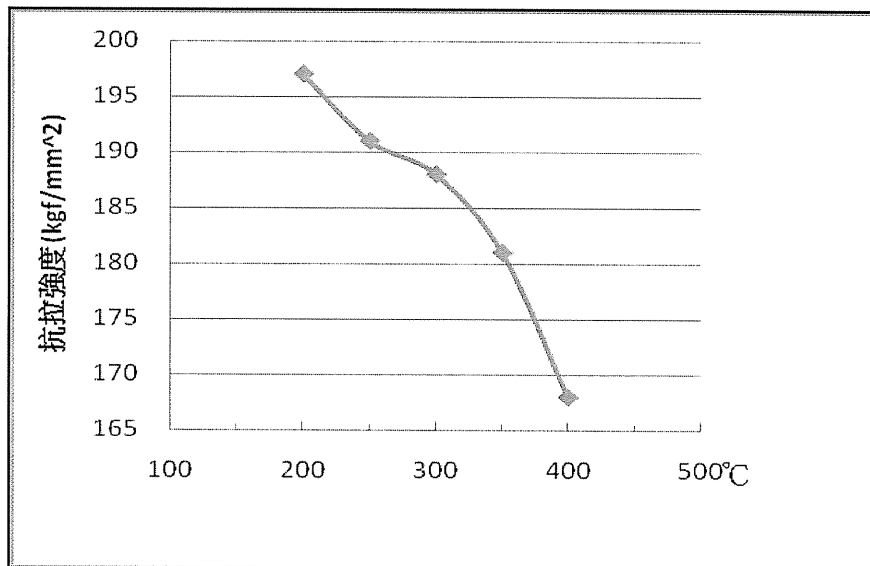


圖 4.28 溫度與抗拉強度關係圖

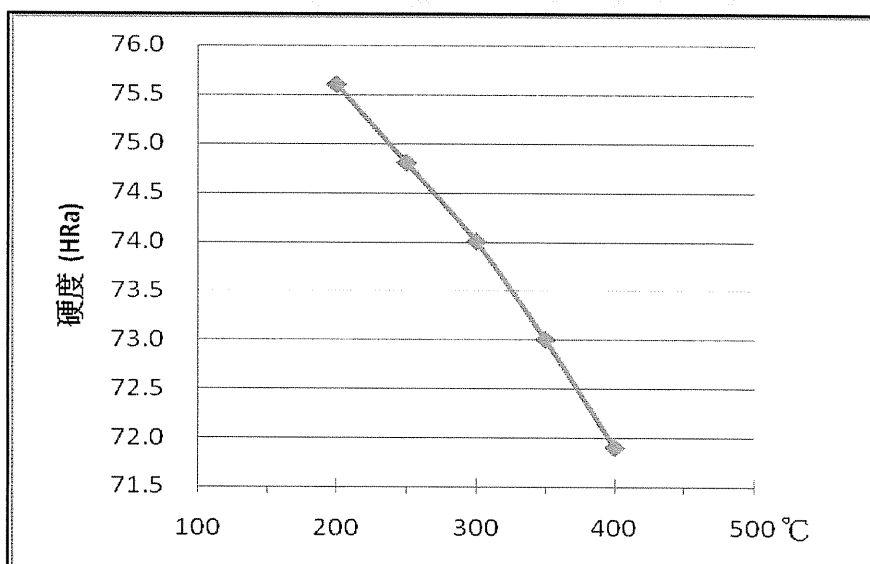


圖 4.29 溫度與硬度關係圖-2

#### 4.4 金相顯微組織

鈴木健研究SUP12彈簧鋼施以250至500°C間六種不同沃斯回火處理後，發現300°C以下，形成片狀下變韌鐵 (plate-like lower bainitic ferrite)；400°C以上形成條狀上變韌鐵(lath-like upper bainitic ferrite)；而350°C則兩者混合存在。素材為施以韌化退火(patenting)的琴鋼線，故其組織應為利於彈簧成型加工的球化鐵(spheroidite)。而各熱處理溫度的組織則仍應是變韌鐵，本實驗所拍得的光學顯微組織各種金相如圖4.30至圖4.40，拍攝倍率為300倍、600倍、1500倍，擇優列示。

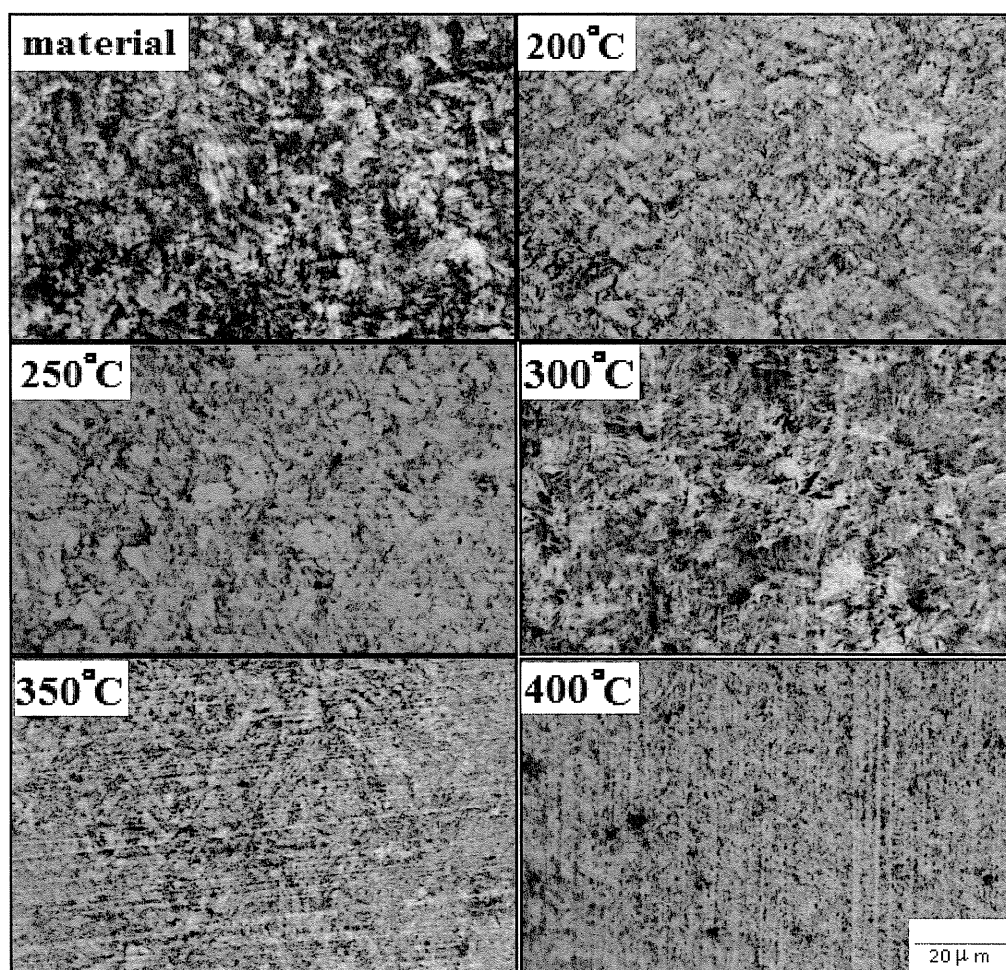


圖 4.30 各溫度代表金相圖

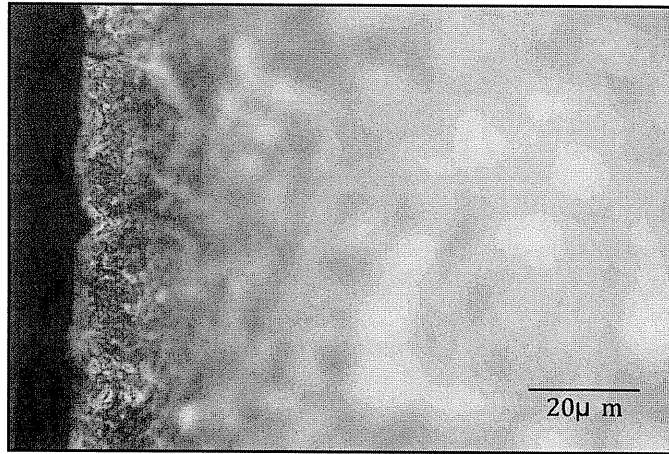


圖 4.31 200°C (邊緣) 1500X

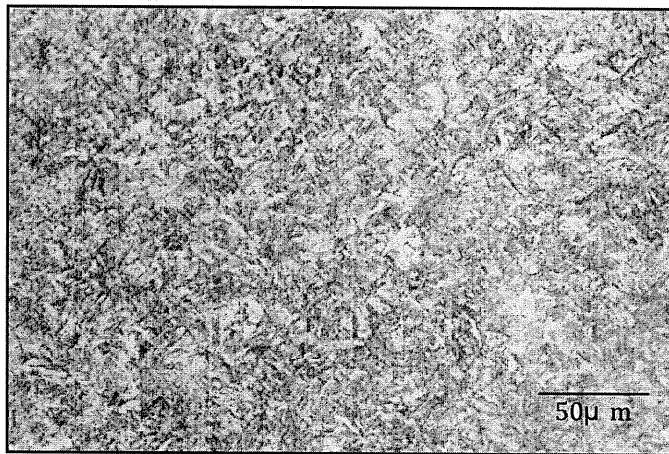


圖 4.32 200°C (中心) 600X

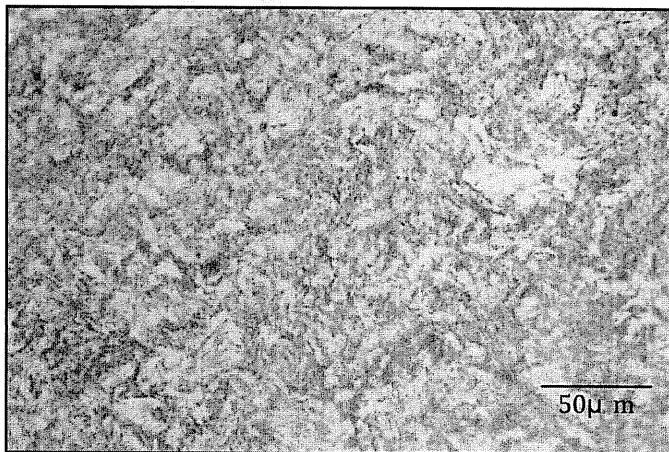


圖 4.33 200°C (中間部) 1500X

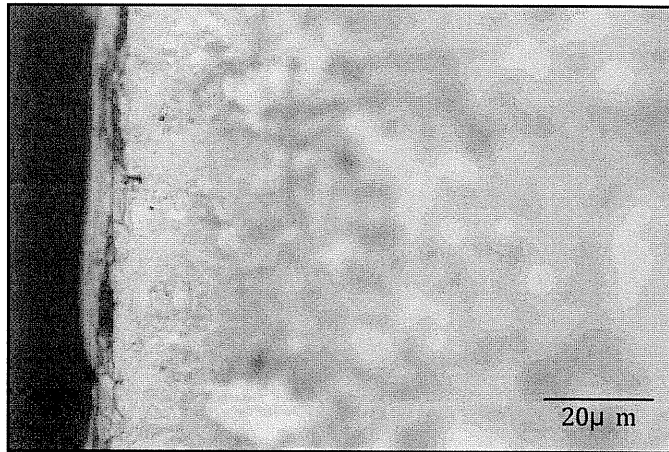


圖 4.34 250°C (邊緣) 1500X

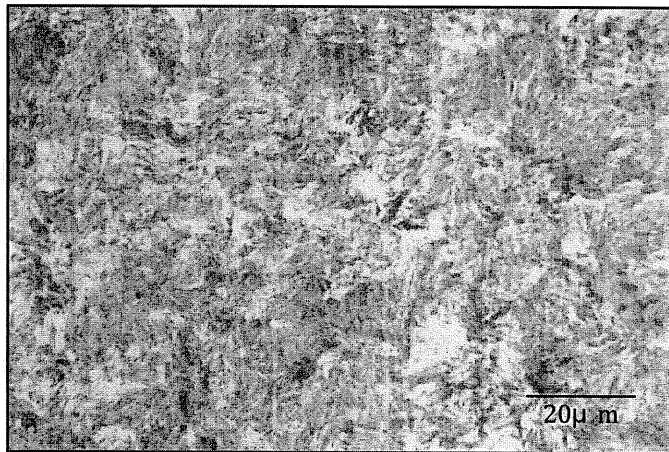


圖 4.35 250°C (中心) 1500X

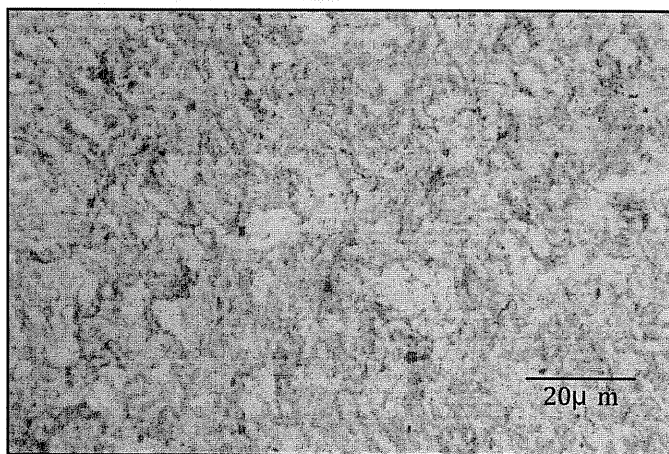


圖 4.36 250°C (中間部) 1500X

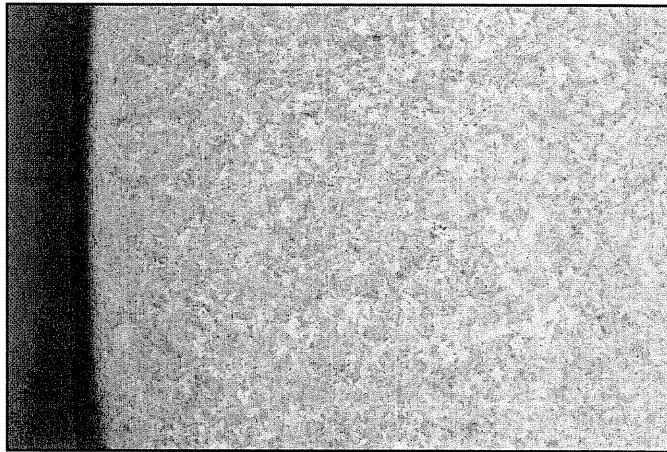


圖 4.37 300°C (邊緣) 300X

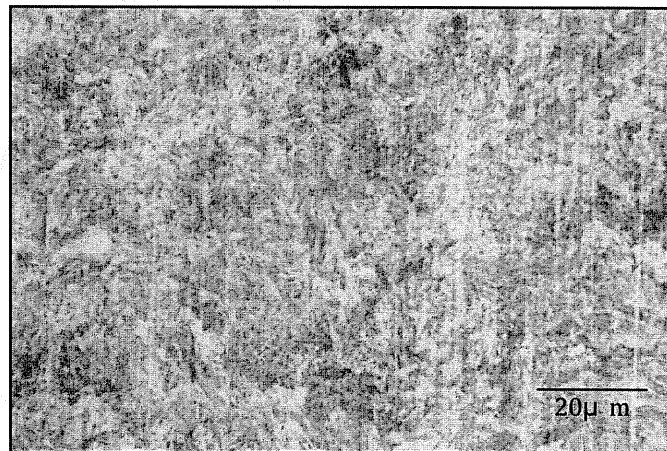


圖 4.38 300°C (中心) 1500X

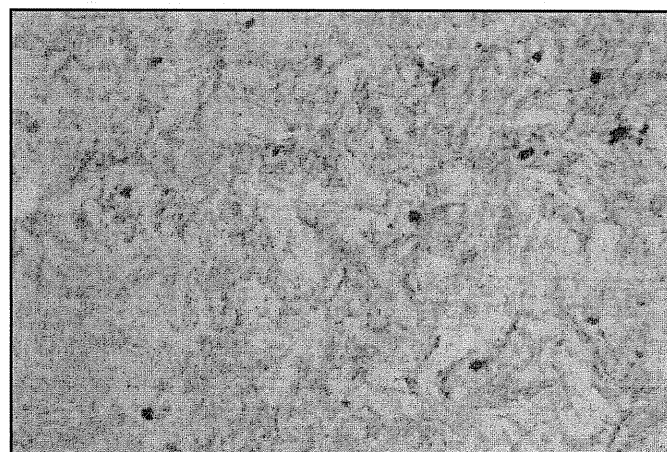


圖 4.39 300°C (中間部) 1500X

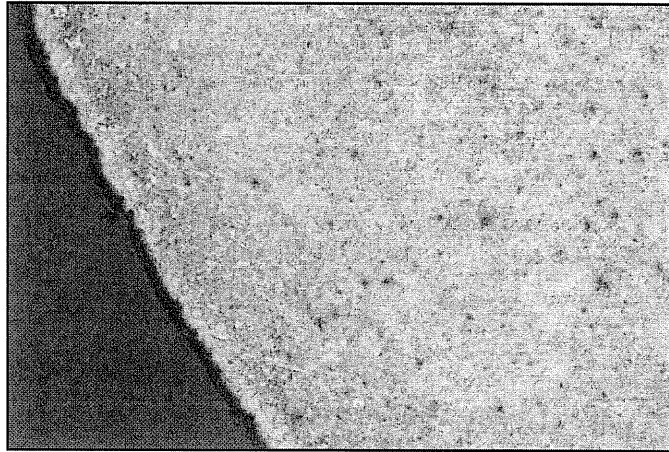


圖 4.40 350°C (邊緣) 300X

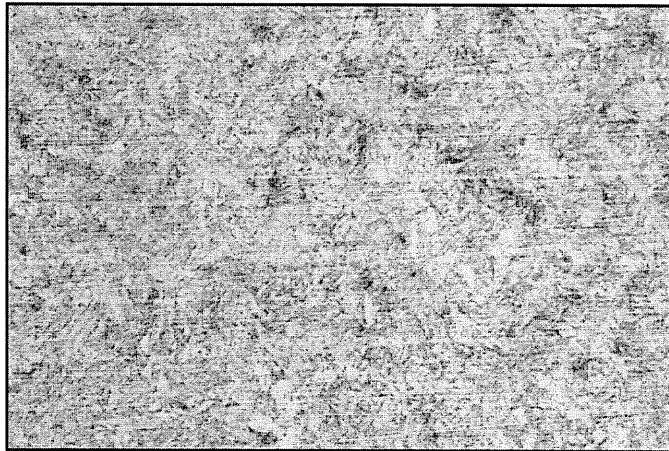


圖 4.41 350°C (中心) 600X

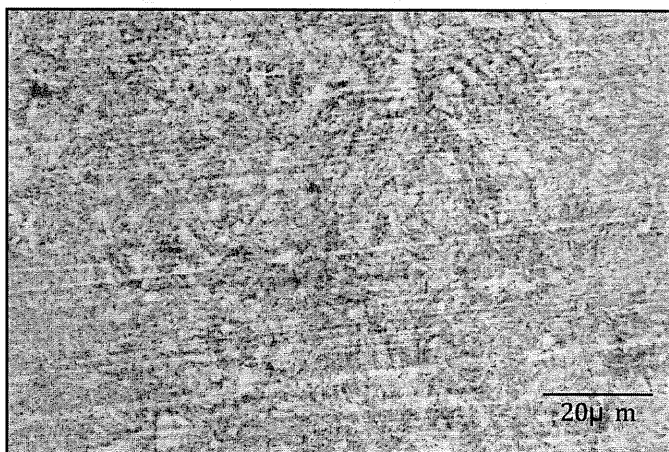


圖 4.42 350°C (中間部) 1500X

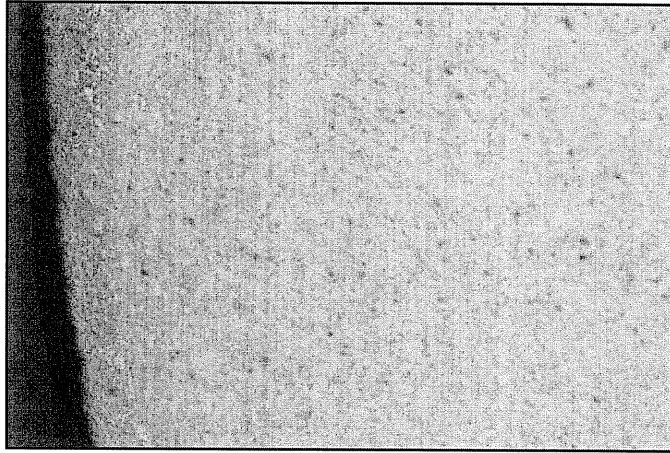


圖 4.43 400°C (邊緣) 300X

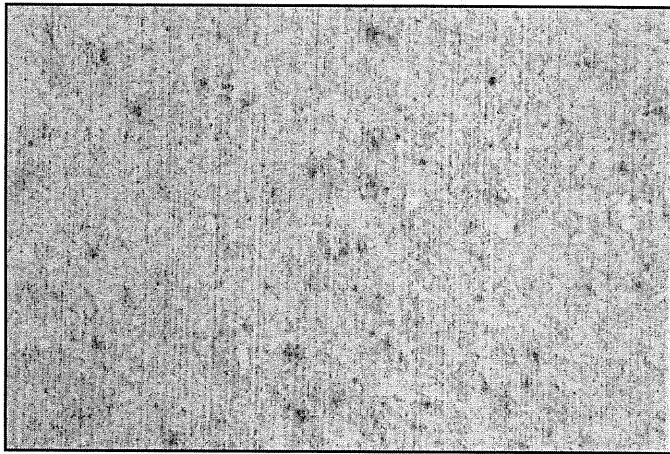


圖 4.44 400°C (中心) 600X

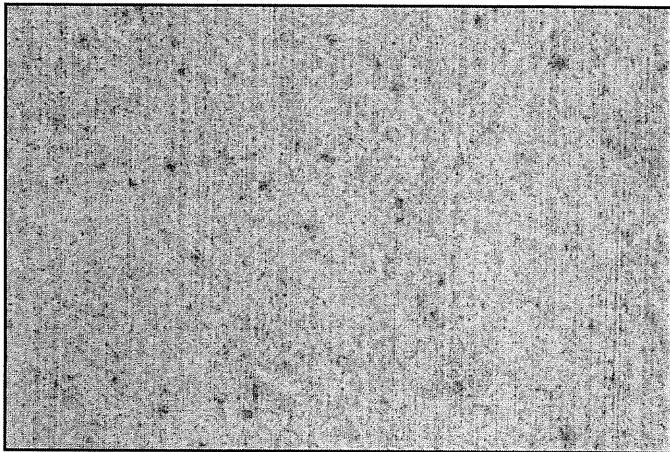


圖 4.45 400°C (中間部) 600X

## 4.5 應力衰緩實驗

本研究定義荷重衰減率為：反覆施加超越臨界應力點 10000 次後(圖 4.46)，初始荷重與最終荷重差異，對初始荷重的比值( $\Delta P/P_0$ )。其中以 300°C 時的衰退率最小，250°C 者次之(圖 4.47)。

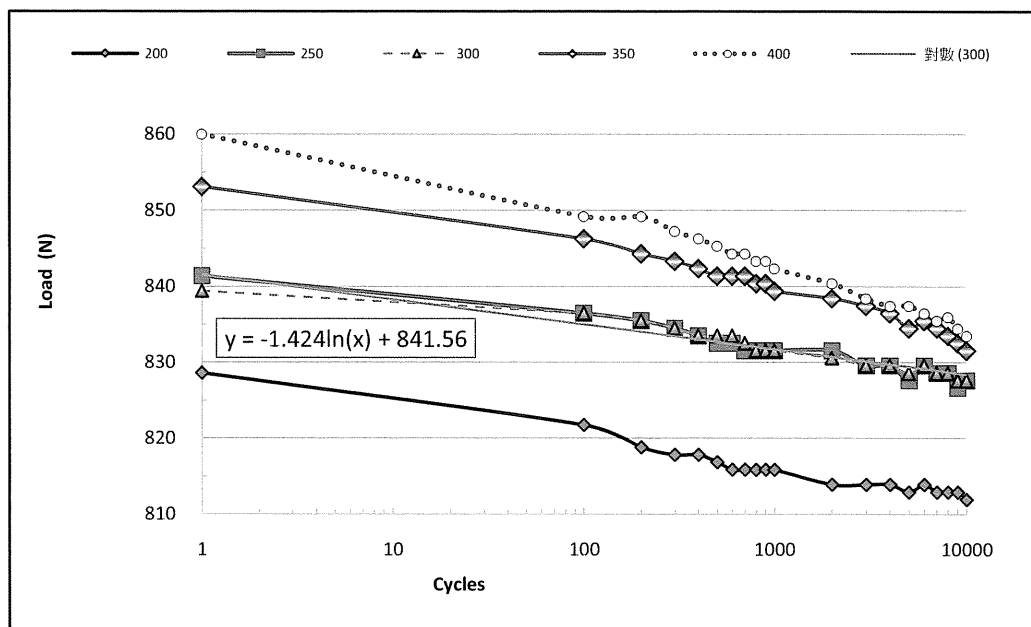


圖4.46 荷重衰緩趨勢

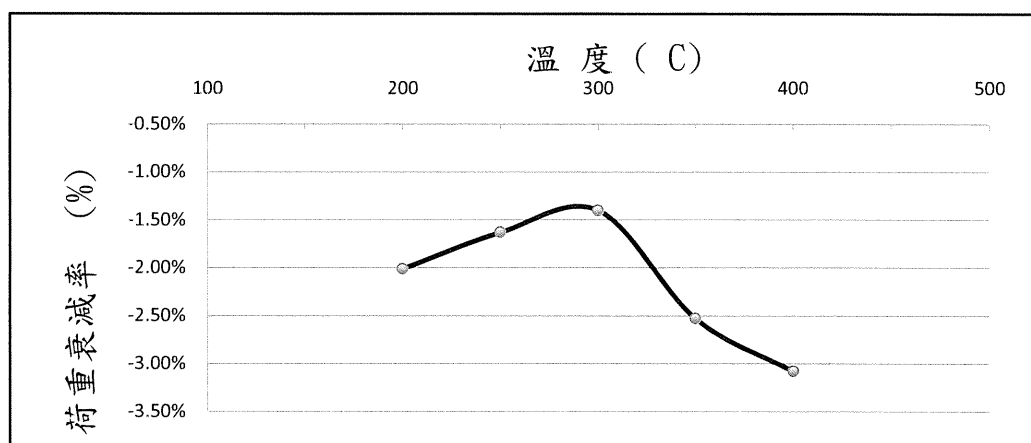


圖 4.47 荷重衰減率



#### 4.6 應變、荷重、壓縮行程間的關係

使用NI©硬體及Flexense©軟體同步量測彈簧受力時的應變、力量、位移。測試結果如圖4.48。內側應變規之0°應變量最大(橙線)。它與內側90°應變量(灰線)皆比外側0°(紅線)與90°(黑線)者大；內外45°應變量(兩藍線)則約略近似但方向相反且最小。原因係黏貼時此軸與線材平行。又圖中綠線為荷重曲線，行程超過全長60mm後，進入非線性彈簧常數(K值)區域。

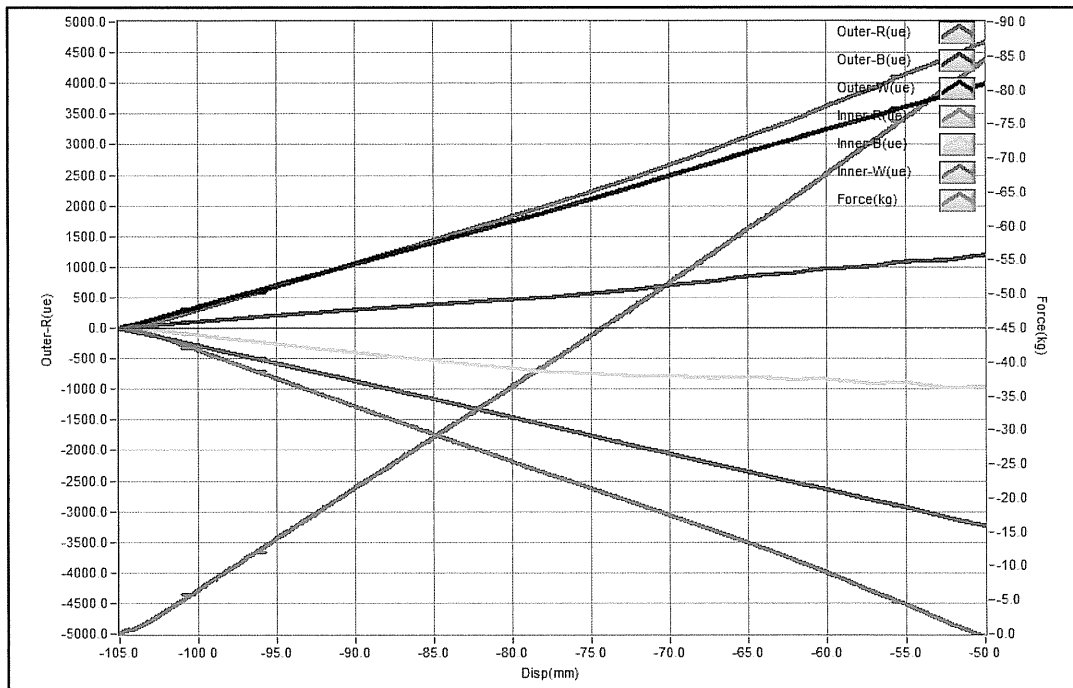


圖 4.48 彈簧內外側應變、荷重、行程的關係

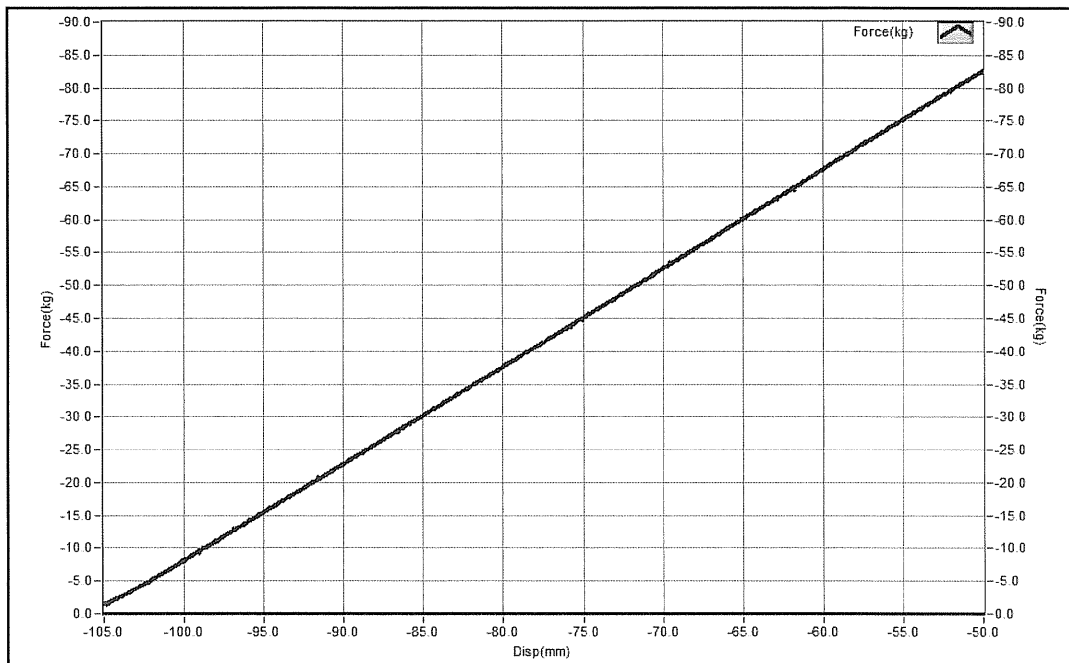


圖 4.49 行程與荷重關係圖

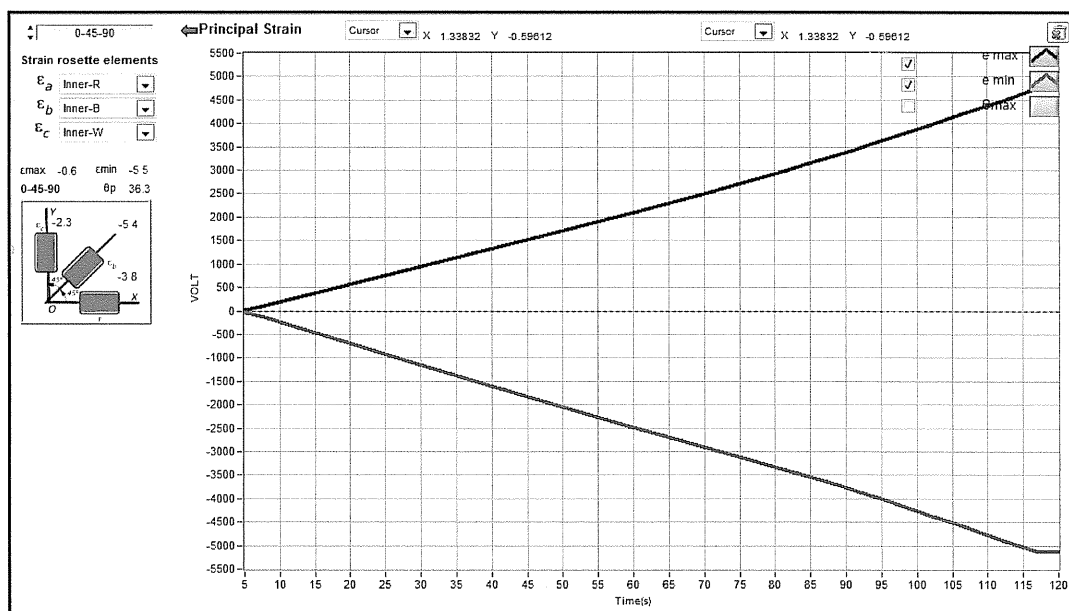
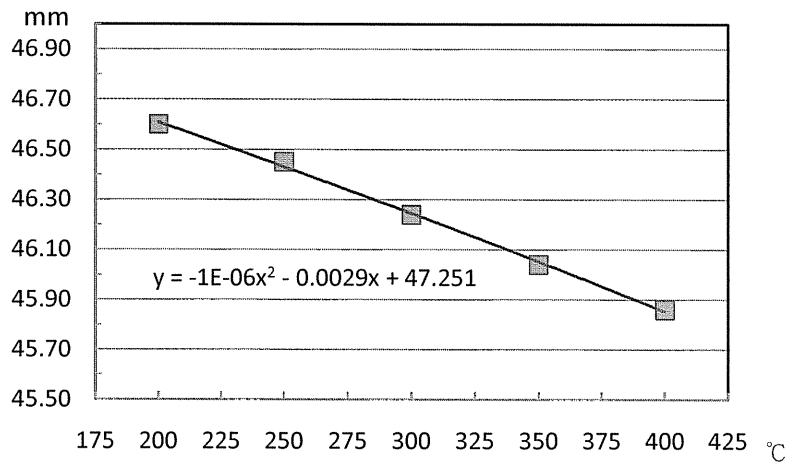


圖 4.50 彈簧內側應變與行程關係圖

## 4.7 彈簧外徑變化與熱處理溫度的關係

表4.10 彈簧外徑變化與處理溫度的關係



熱處理時，琴鋼線材質的彈簧內外徑會發生收縮現象，實驗結果發現  $d = \phi 5$ ； $OD = \phi 46$  的彈簧外徑變化與處理溫度的關係，約略成為近乎線性的趨勢。

$$y = -10^{-6}x^2 - 0.0029x + 47.251$$

$y$  表外徑值， $x$  表溫度值。但收縮量大小與線徑及成型平均徑皆有關係。

#### 4.8 最佳熱處理參數的組合

表 4.11 熱處理因子的 ANOVA 分析表

變因	SS	$\phi$	V	$F_0$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	純變動 SS'	貢獻率 %
A	4.5903	1	4.5903	4.6857	10.1280	34.1162	3.6107	3.51%
AXB	30.6345	1	30.6345	31.2714	10.1280	34.1162	29.6549	28.84%
C	52.4805	1	52.4805	53.5716	10.1280	34.1162	51.5009	50.08%
BXC	12.1836	1	12.1836	12.4369	10.1280	34.1162	11.2040	10.90%
e	2.9389	3	0.9796				6.8574	6.67%
Total	102.8278	7					102.8278	100.00%

從 ANOVA 分析表的貢獻率可知：冷卻方式對彈簧常數的影響高達 50.08%，而溫度與時間的交互作用達 28.84%，又熱處理時間與冷卻的交互作用亦有 10.9% 的影響。此三者總共影響程度高達 90% 左右，足以顯示熱處理的重要因素原本就非此三者莫屬。田口方法須執行驗證實驗，但本實驗僅在確認何項因子的影響性最大，故將驗證實驗留待未來再行執行。

## 第五章 結 論

### 5.1 結論

(一) 真空熱處理物的外觀面貌(如圖 5.1 上側彈簧),較一般大氣壓下的熱處理物(圖 5.1 下側彈簧)為佳且無脫碳或氧化現象。

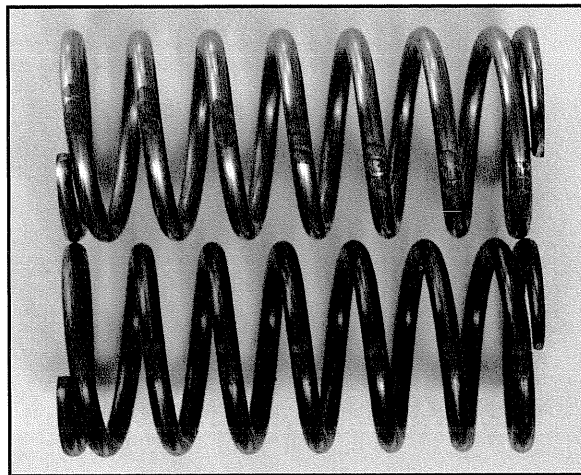


圖 5.1 真空熱處理與普通熱處理之外觀圖

(二) 以 200°C 處理的抗拉強度與硬度皆增大且最高。但隨著回火溫度上升，兩者皆大致隨之下降。

(三) 金相組織為上變韌鐵組織。

(四) 電腦輔助分析部分：

(1) 最佳網格化的各項參數：

表 5.1 最佳網格化參數

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	100
Advanced	
Relevance Center	Fine

Element Size	None
Shape Checking	Aggressive Mechanical
Solid Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
<b>Statistics</b>	
Nodes	210629
Elements	123982

(2) 總變形量：

理論計算值 55mm；而模擬值為 54.068 mm，換算成  $k$  值為 15.065 N/mm，與簡易式理論值相差 1.7%；與精密理論值相差 2.98%。此時彈簧承載 814.55N 的荷重。如圖 5.2。

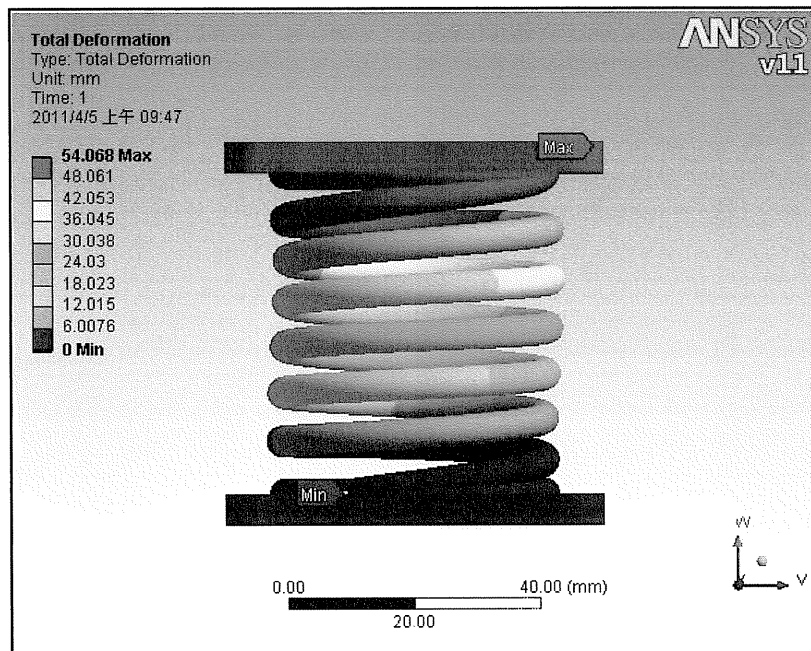


圖 5.2 總變形量

(3) 挫曲量：

X 軸模擬值為 1.09 mm；Z 軸 1.163 mm(如圖 5.3)而實物挫曲量為 1.38 mm。兩者差異原因為①模擬是將彈簧與上下壓版結成一體；而實物的上下接觸面是可滑動的②模擬的兩端研磨面垂直度是準確的 90° 直角，但實物的研磨面角度難以控制。

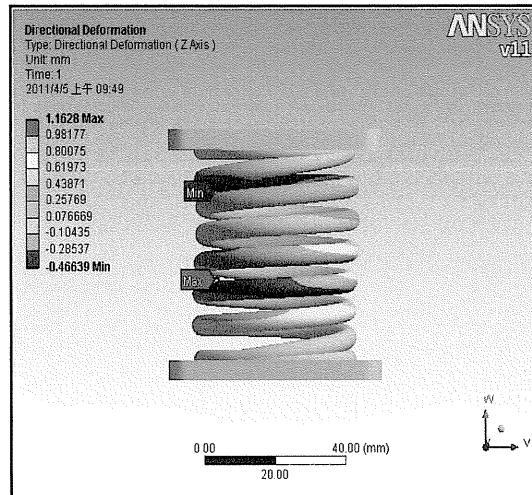


圖 5.3 橫向挫曲量

(4) 剪應力：

理論計算值為 819.29MPa；而模擬最大值为 848.79MPa，兩者相近。又旋轉彈簧一周發覺：最大剪應力發生在挫曲處內部順時針 90° 處，如圖 5.4。一般認為疲勞損壞常發生於內側最大應力集中處，但未明確指出何處。

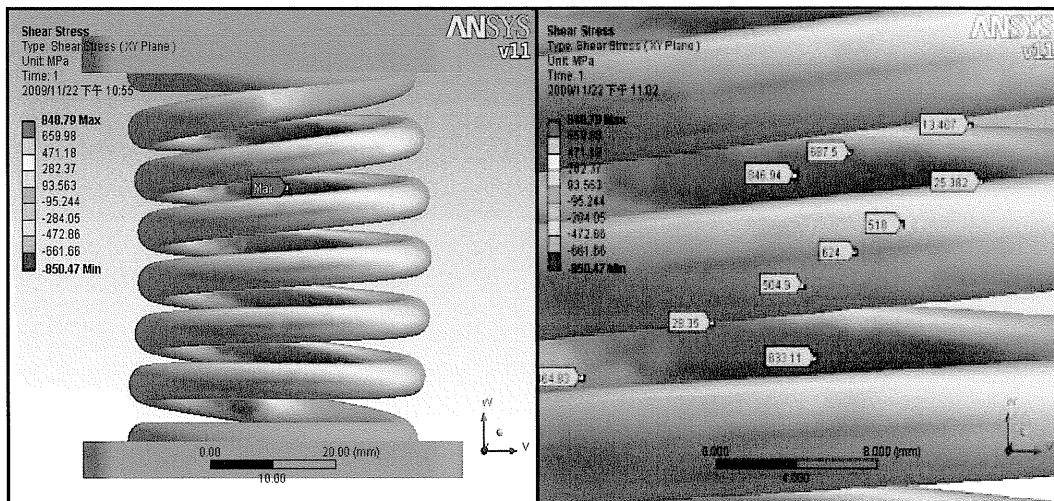


圖5.4 剪應力及其細部放大圖

(5) 法向應力：

模擬值最大為891.27MPa，位於中間處(如圖5.5)。法向應力大於剪應力大於主應力，故預測疲勞裂紋應始於法向應力最大處。又最大法向與最大主應力極值皆發生在彈簧線圈開始密著處，此撞擊點是發生損傷最可能的起始點。安全係數模擬亦同。應避免將彈簧操作至此衝程。

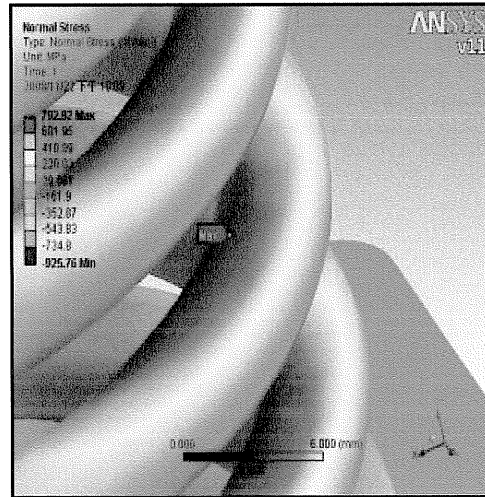


圖5.5 法向應力

(6) 主應力：

模擬探針(probe)偵測位於外側最大主應力為796.53 MPa 且方向與線材呈逆時針45°(圖5.6)。

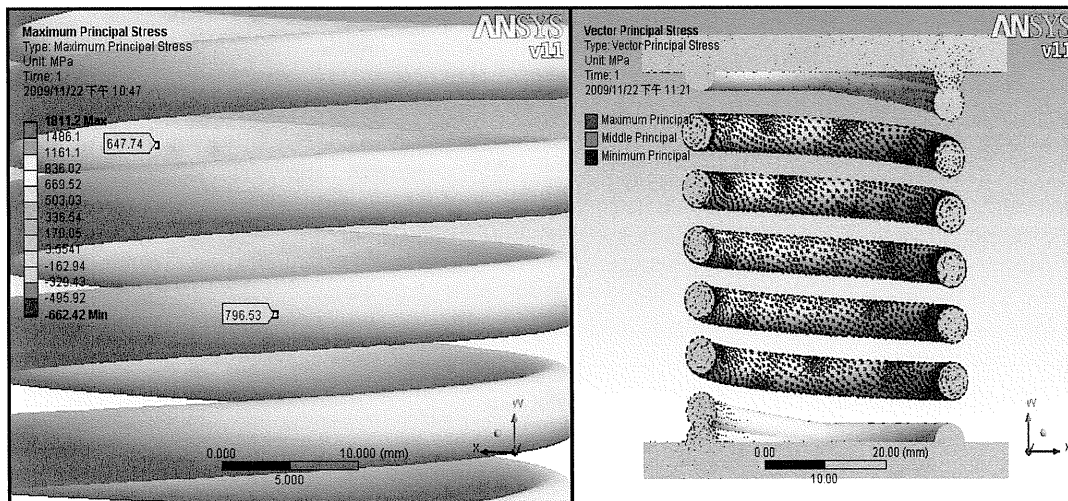


圖5.6 最大主應力



(7) 等效應力：

以探針偵測得外側等效應力為 1209 MPa；內側等效應力為 1383.7MPa (如圖 5.7)。

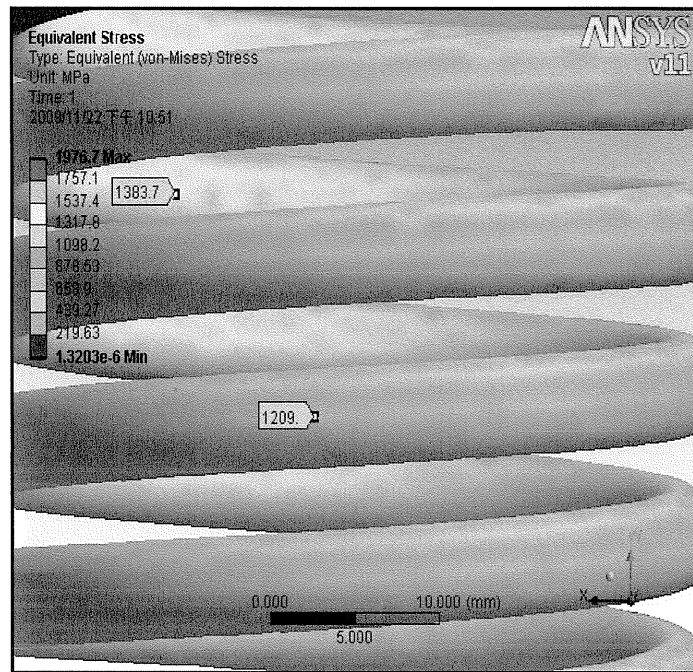


圖 5.7 等效應力

(五) 荷重衰緩實驗：

以 300°C 時的荷重衰退率最小(-1.4%);200°C(-2.01%)與 250°C(-1.63%)則稍可；過高的回火溫度 350°C(-2.53%)並不適合；400°C(-3.01%)則最差。300°C 的衰緩趨勢線為：

$$y = -1.424 \times \ln(x) + 841.56$$

(六) 冷卻方式對彈簧常數的影響高達 50.08%，而溫度與時間的交互作用達 28.84%，又熱處理時間與冷卻的交互作用亦有 10.9% 的影響。此三者總共影響程度高達 90% 左右，足以顯示熱處理的重要因素原本就非此三者莫屬

(七) 應變菊花座：

黏貼於曲面上所量得之應變與黏貼平面者應有差異。但內外側  $0^\circ$  最大應變實測值之比為 1.56；與模擬等效應力之內外徑曲面最高點，所偵測者之比 1.51，兩者相對比例相近，顯見黏貼曲面尚屬可行。荷重線(圖 5.8 中綠線)則大致與內側  $0^\circ$  最大應變量(紅線)成正比，亦即內側  $0^\circ$  應變量影響彈簧特性最大。

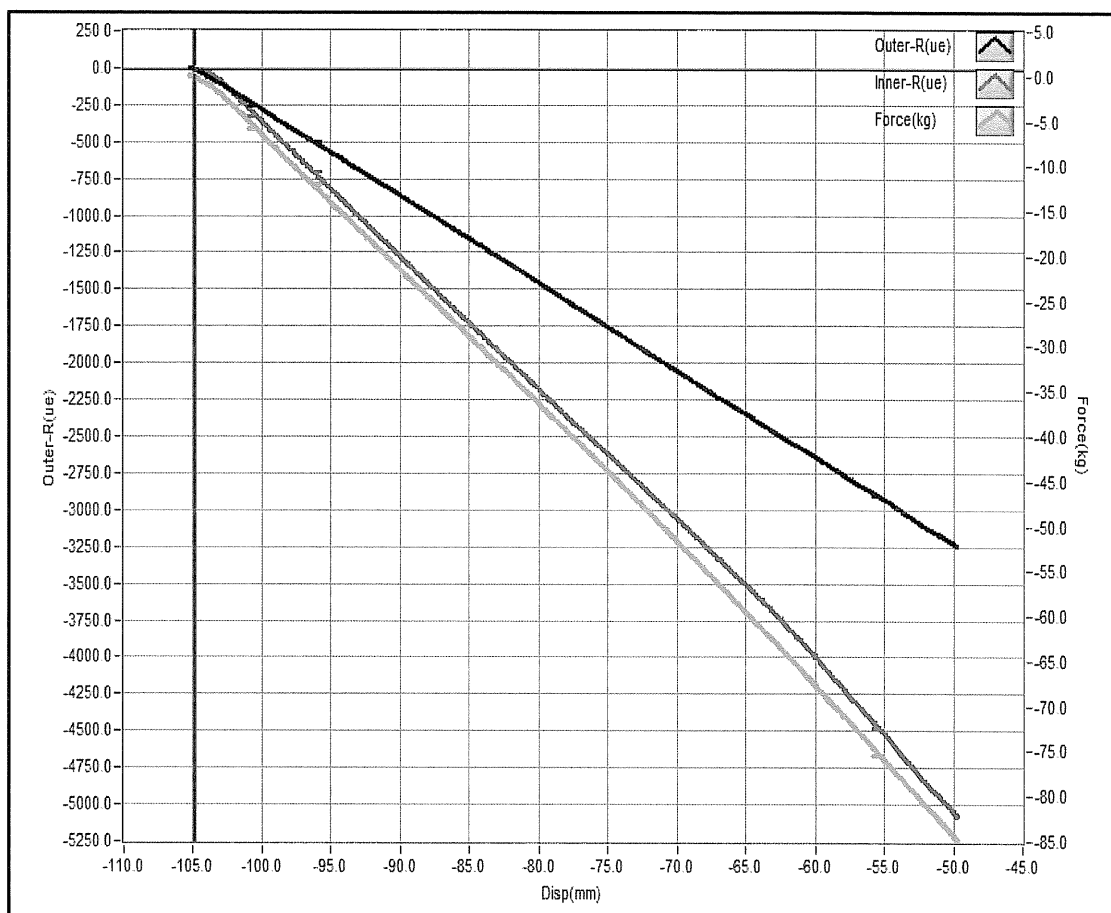


圖 5.8 內外側應變量與彈簧荷重的關係圖

## 5.2 未來研究方向

本研究選定琴鋼線為材料，其實常用材料尚有硬鋼線、不銹鋼線、油回火矽鉻鋼線、磷青銅線等材質。又材料斷面除常用的圓形截面外、另有正方形、矩形、橢圓形、特殊截面等。彈簧種類也分為多項形式結構，除壓縮彈簧外，如拉力彈簧、扭力彈簧、錐狀彈簧、疊板彈簧、渦旋彈簧、扭桿彈簧、皿形彈簧等，均值得研究探討。

珠擊製程所導入於彈簧表面層增生的壓應力薄層，可增大其疲勞強度，故珠擊製程參數也是值得開發的問題。

彈簧內外徑變化與處理溫度有相對關係，但收縮量大小與線徑及成型平均徑皆有影響，需要廣泛研究之。

電腦輔助分析關鍵在於繪製彈簧原型尺寸時，前座卷三分之二後逐漸推至最高間距角，及尾端從最高間距角逐漸後縮至後座卷的三分之二時，皆須非常平順地加以連續成型。又網格化的各項參數亦須謹慎設定，模擬結果方能逼近理論數據。凡此種種均是值得深入鑽研思索的題目。

## 参考文献

- [1] 日本ばね技術研究会，2000，ばね用材料とその特性，日刊工業新聞社，初版，東京。
- [2] 三村真吾，青木利憲，榊原隆之，脇田將見，2001，“高Si鋼オイルテンパ線を用いた高耐疲労ばねの開発”，ばね論文集，第46号，pp.1-6
- [3] Y. Fujino, T. Shiwaku, N. Kawabe, T. Murai, 2006, “Development of High-strength Oil-tempered Wire for Valve Springs”, *SEI TECHNICAL REVIEW*, VOL. 63, pp.27-32, December
- [4] ばね材料データベース委員会，2010，“ばね材料データベース委員会報告”，ばね論文集，No.55，pp. 63-94。
- [5] Walsh Ronald A., 2000, Electromechanical Design Handbook, 3<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- [6] R. DeFord, 2003, “Iterative Logic for Nested Compression Spring Design”, *SPRING*, pp.2-3, April
- [7] Xiao Qimin, Liu Liwei, Xiao Qili, 2009, “The Optimal Design and Simulation of Helical Spring based on Particle Swarm Algorithm and MATLAB”, *WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS*, Vol. 8, pp.84-93, January
- [8] K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis, “Unified Particle Swarm Optimization for Solving Constrained Engineering Optimization Problems”, ICNC 2005, LNCS 3612, pp. 582–591
- [9] Leticia C. Cagnina and Susana C. Esquivel, 2008, ” Solving Engineering Optimization Problems with the Simple Constrained Particle Swarm Optimizer”, *Informatica*, Vol.32, pp.319–326
- [10] Heikki Martikka and Ilkka Pöllänen, 2007, “Optimal Design Fundamentals of Fatigue Loaded Machine Springs”, *Faculty of Technical Sciences, 47<sup>th</sup> Anniversary of the Faculty*, MACHINE DESIGN, pp.325-332
- [11] 金重勳，2004，熱処理，15版，復文書局，台南。
- [12] 黃振賢，2000，金屬熱處理，18版，新文京開發出版股份有限公司

- [13] 機械工程手冊·電機工程手冊編輯委員會，2005，機械工程手冊8／熱處理與表面處理—精密製造，初版，五南圖書，台北。
- [14] 熱處理編輯委員會，李正國等主編，2006，熱處理，五版，高立圖書，台北。
- [15] Robert E. Reed-Hill and Reza Abbaschian, 1992, Physical Metallurgy Principles(物理冶金), 劉偉隆、林淳杰、曾春風、陳文照編譯，3版，全華科技圖書，台北。
- [16] R.W.K. Honeycombe and H.K.D.H. Bhadeshia, 1995, Steels Microstructure and properties (鋼顯微組織與性質)，蔡明欽譯，2版，五南圖書，臺北市。
- [17] 鈴木健，古原忠，2009，”ばね鋼SUP12におけるベイナイト組織と機械的性質”，ばね論文集,第54号，pp. 27-33
- [18] T. Waterschoot, K. Verbeken and B.C. De Cooman, 2006, ”Tempering Kinetics of the Martensitic Phase in DP Steel”，*ISIJ International*, Vol.46, No.1, pp.138-146
- [19] J.Z. Zhao, A.K. De, B.C. De Cooman, 2000, ”Kinetics of Cottrell atmosphere formation during strain aging of ultra-low carbon Steels ”, *Materials Letters*, Vol.44, pp.374-378
- [20] B. Soenen, A.K. De, S. Vandeputte, B. C. De Cooman, 2004, “Competition between grain boundary segregation and Cottrell atmosphere formation during static aging in ultra low carbon bake hardening steels”, *Acta Materialia*, Vol.52, pp.3483-3492
- [21] 王學，常建偉，黃關政，李朝志，2008，“消除應力退火處理對WB36鋼粗晶區性能的影響”，*材料熱處理學報*，第29卷，第4期，頁127~130，8月
- [22] L. d. Llano-Vizcaya, C. Rubio-Gonzalez, G. Mesmacque, A. Banderas-Hernández, 2007, ”Stress relief effect on fatigue and relaxation of compression springs”, *Materials & Design*, Vol.28, pp.1130-1134
- [23] <http://www.tvstvs.org.tw>
- [24] 林衍志、林士凱、林長毅，2008年，“真空熱處理技術與應用”，*機械工業*，7月
- [25] 包耳，任慧遠，張天強，姚鳳臣，田紹洁，2002，“真空熱處理工藝參數的選取”，*真空*，第六期，頁35~37，12月

- [26] 溫東成，許正勳，施議訓，周碩彥，2003，”真空熱處理對模具沖蝕磨耗之影響”， *Journal of China Institute of Technology*， Vol.28， 頁 279~289， 10 月
- [27] Mario Grenier and Roger Gingras, 2007, "Rapid Stress Relief and Tempering : process description", *Proceedings of Advanced Spring Technology JSSE 60<sup>th</sup> Anniversary International Symposium*, pp.81~96, Fukiage Hall, Nagoya, Japan, November 2<sup>nd</sup>.
- [28] J. Matejicek, P.C. Brand, A.R. Drews, A. Krause, C. Lowe-Ma, 2004, "Residual stresses in cold-coiled helical compression springs for automotive suspensions measured by neutron diffraction", *Materials Science and Engineering A*, Vol.367, pp.306-311
- [29] Renzhi Wang, 2007, "Review on the residual Stress in through the Course of Manufacture Technique for Cold Formed Coil Spring", *Proceedings of Advanced Spring Technology JSSE 60<sup>th</sup> Anniversary International Symposium*, Fukiage Hall, Nagoya, Japan, pp.1~15。
- [30] コイルばね解析法の研究委員会，2004，”コイルばねばね解析法の研究委員会報告”， ばね論文集，No.49， pp. 35-75。
- [31] M.T. Todinov, 1999, "Maximum principal tensile stress and fatigue crack origin for compression springs", *International J. of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 357-370
- [32] 王仁智， 2005， “殘餘應力與彈簧的疲勞性能”， 理化檢驗—物理分冊， 41 卷， 頁 541~548
- [33] 康淵，陳信吉，2006，ANSYS入門，4版，全華科技圖書，台北市。
- [34] Ulf Kletzin, Mathias Weiss, 2007, "State of the Art Methodologies for Numerical Spring Design", *Proceedings of Advanced Spring Technology JSSE 60<sup>th</sup> Anniversary International Symposium*, Fukiage Hall, Nagoya, Japan, pp.63~65。
- [35] A.M. Yu, C.J. Yang, G.H. Nie, 2010, "Analytical formulation and evaluation for free vibration of naturally curved and twisted beams", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp.1376~1389
- [36] W.G. Jiang, J.L. Henshall, 2000, "A novel finite element model for helical springs", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp.363-377

- [37] I. Pöllänen, H. Martikka, 2010, "Optimal re-design of helical springs using fuzzy design and FEM", *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, pp. 410-414.
- [38] 方亮彬,張恭翰,呂明芳,陳威廷, 2009, "非圓柱形螺旋壓縮彈簧特性研究", 建國科大學報, 第二十九卷, 第一期, 頁23-40。
- [39] S.K. Das, N.K. Mukhopadhyay, B.R. Kumar, D.K. Bhattacharya, 2007, "Failure analysis of a passenger car coil spring", *Engineering Failure Analysis*, Vol.14, pp.158-163
- [40] Kazuyoshi Kimura, Toshimitsu Kimura, and Tomoki Hanyuda, 2004, "Influence of Alloy Element on Corrosion Fatigue Life of Spring Steel", *電氣製鋼*, 第 75 卷 1 号, pp.19-25.
- [41] L. Del Llano-Vizcaya, C. Rubio-Gonzalez, G. Mesmacque, T. Cervantes-Hernandez, 2006, "Multiaxial fatigue and failure analysis of helical compression spring", *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, vol.13, pp.1303-1313.
- [42] S. Nohut, G.A. Schneider, 2009, "Failure probability of ceramic coil springs", *Journal of the European Ceramic Society*, vol.29, pp.1013-1019
- [43] 伍懷強, 2007, "汽門彈簧疲勞斷裂失效分析", *金屬製品*, 第33卷, 第6期, 37-39頁。
- [44] 何邦弘、龔志明、高海英, 2008, "SV126安全閥彈簧斷裂失效分析", *石油化工設備技術*, 第29卷, 第2期, 20-25頁。
- [45] 白明遠, 江濤, 2007, "彈簧斷裂失效分析", *金屬熱處理*, 第 32 卷, 頁 346~348, 10 月 17 日
- [46] Y. Prawoto, M. Ikeda, S.K. Manville, A. Nishikawa, 2008, "Design and failure modes of automotive suspension springs", *Engineering Failure Analysis*, vol.15, pp.1155-1174
- [47] Gerald J. Fitzpatsick, MEASUREMENTS AND INSTRUMENTS, Downloaded from Digital Engineering Library @ McGraw-Hill ([www.digitalengineeringlibrary.com](http://www.digitalengineeringlibrary.com)) Copyright © 2006, The McGraw-Hill Companies.
- [48] R. C. Hibbeler, 2007, Mechanics of Materials, 6/e, 吳黎明, 鄭祥成, 簡國雄, 蘇金洽譯, 高立圖書, 台北。

- [49] 機械工程手冊·電機工程手冊編輯委員會，2002，機械工程手冊5／材料測試與分析，初版，五南圖書，台北。
- [50] 汪建民主編，2006，材料分析，中國材料科學學會，新竹。
- [51] 日本ばね学会，2008，ばね，第4版，丸善株式會社，東京。
- [52] J.E. Shigley, C.R. Mischke, 2001, Mechanical Engineering Design, ver.6,
- [53] Warren C. Young, Richard G. Budynas, 2002, Roark's Formulas for Stress and Strain, 7<sup>th</sup> Edition, *McGraw-Hill*, New York.
- [54] V. Yildirim, 2009, "NUMERICAL BUCKLING ANALYSIS OF CYLINDRICAL HELICAL COIL SPRINGS IN A DYNAMIC MANNER", *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, Vol.1, Issue 1, pp.20-32
- [55] 清水麻衣，櫻井宏美，久納孝彦，" ピッチ角を考慮した角ばねのばね定数と応力" ，ばね論文集，第51号，pp. 27-34，2006。
- [56] 鄭崇義，2000，田口品質工程技術理論與實務，中華民國品質學會，台北。
- [57] 戴國政、李明賢、林暉斌、莊其峰，2005，" 利用田口方法提高SUS304不銹鋼線材之產量" ，技術學刊，第20卷，第四期，333-338頁。
- [58] 蔡有藤、陳永增、蔡建章，2008，" 旋壓成型可靠度分析之研究" ，技術學刊，第23卷，第一期，29-37頁。