

國立交通大學

機械工程學系

碩 士 論 文

移動式熱源平板加工的微應力量測與分析

The Verification and Analysis of the Moving Heat Source
Working on a Plate using the Micro Stress Measurement

研 究 生：蔡耀嶸

指 導 教 授：鄭璧瑩 博士

中 華 民 國 九 十 五 年 六 月

移動式熱源平板加工的微應力量測與分析
The Verification and Analysis of the Moving Heat Source
Working on a Plate using the Micro Stress Measurement

研究生：蔡耀嶸

Student：Yau-Rung Tsai

指導教授：鄭璧瑩 博士

Advisor：Pi-Ying Cheng, PhD



Submitted to Institute of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of Master of Science

In

Mechanical Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

移動式熱源平板加工的微應力量測與分析

研究生：蔡耀嶸

指導教授：鄭璧瑩 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

摘要

雷射是 20 世紀人類重大的科技發明之一，由於雷射光的擴散角極小，所以光源能聚集在極小的面積範圍，因此雷射被廣泛地應用在材料的加工。材料在加工時，由於高能量的雷射會產生熱能，使得材料會產生熱應力與熱應變，若是當熱應力超過材料本身的強度時，則會發生破壞。

本文利用非接觸式微應力量測的方法，藉由光學顯微鏡配合智慧型影像擷取與分析系統，對試片特定點進行影像分析處理，求出熱應變量反推熱應力，目的在觀察平板試片在雷射加工時的應力變化，將量測結果歸納分析以做為平板雷射熱加工參數規劃的參考。此外，為驗證本研究微應力量測結果的正確性，本研究採用有限元素軟體 ANSYS，模擬動態熱源熱加工過程熱應變的變化情形。因為雷射切割是一種動態熱源負載，本研究的熱加工模擬採用 ANSYS 結合其參數化程式開發語言 APDL，針對動態熱源負載的邊界條件進行持續與反覆地定義與更新，使模擬得以進行連續式熱源負載的平板應力分析與模擬。熱源的模式定義方面，一般將雷射熱源的分佈簡化為單點式並不符合實際熱源型式，本文為了能更貼近實際的情

形，對於熱源的能量供應採用高斯函數分佈的區域熱源，同時也探討在分析過程中考慮熱焓參數對加工效果時的影響情形。

在實驗的規劃方面，本文裝置的微應力量測系統，目前可以量測到 $10\mu m$ 等級的變形量，若是調高檢測倍率則可以獲得更好的解析度。觀察實驗與模擬分析的結果，在連續熱加工的材料應變量的分析與檢測的定性分析結果均呈現相同變化的趨勢。此外，本研究在分析過程中有加入熱焓與對流效應的考慮，分析結果發現有考慮熱焓與對流效應的分析例中，其應變量與殘留應力有減小的趨勢，此結果符合參考資料所提供研究數據的變化趨勢。在實驗的規劃與實作中，本實驗室(NCTU CIDM Lab.)實際組裝了非接觸式微應力量測系統，並將此量測系統架設在雷射切割機台上實際進行線上的熱應力量測，以配合理論數值分析結果的評估，藉以探討熱加工的參數有效設定值的規劃法則，用以提高雷射熱加工在平板切割等加工應用方面的效率與品質。

關鍵字： 微應力量測、熱應變、ANSYS、APDL、移動式熱源、影像檢測系統

The Verification and Analysis of the Moving Heat Source
Working on a Plate using the Micro Stress Measurement

Student : Yau-Rung Tsai

Advisor : Pi-Ying Cheng, PhD

Institute of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

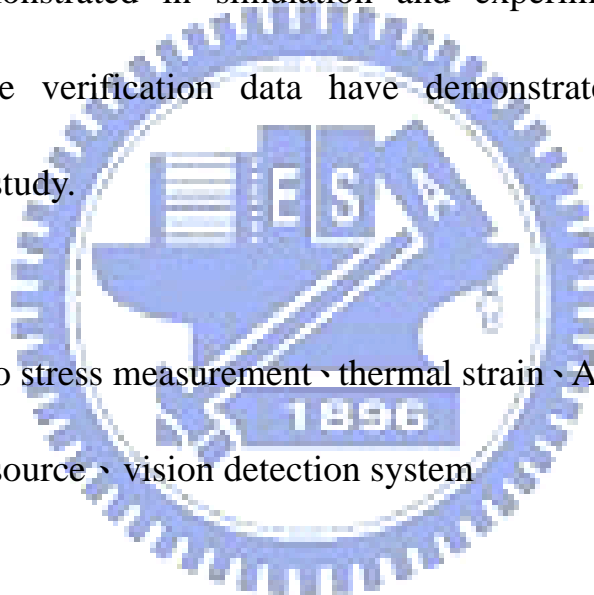
Abstract

The research proposed a novel thermal stress analysis methodology cooperated with new designed micro thermal stress vision detection system for investigating the optimal cutting parameters on laser machining with moving heat source. In the article, we adopted the finite element analysis numerical system ANSYS as the analysis kernel. As considering for the model of the moving heat source, we proposed the application development tool (APDL) to form a iteration processes for moving boundary and moving heat source. For improving the correctness of the stress evaluation of the distribution, the non-uniform mesh generation has been designed and implemented. Thus, the simulation results of some illustrative examples have been evaluated to be a very closed quality tendency in physical phenomenon as compared with the experiment detected data in the experiment.

While in the experiment process of plate cutting via laser beam, it is a challenge on the request of online detection of thermal stress and strain. In the

research, a easy-install and easy-use micro stress vision detection system has also been designed and installed. The vision detection system is composed of the microscope, DVT image measurement device, special light system, and the stress calculation software program which is also developed in the current research. The vision detection system has been upgraded to be a multi object simultaneously stress monitoring system. In the article, some typical examples have been demonstrated in simulation and experiment phases for further verification. The verification data have demonstrated the advantage that proposed in the study.

Key word : micro stress measurement 、 thermal strain 、 ANSYS 、 APDL 、 moving heat source 、 vision detection system



致謝

在將近兩年的研究生生活中，曾經遇到許許多多在研究上的瓶頸，也體驗到當突破瓶頸時的喜悅與快樂。即將畢業的我回首看看自己，確實比過去的自己成長的許多，而讓我能有如此成長進步的莫過於我的指導教授鄭璧瑩老師，感謝鄭老師在這兩年來辛苦的教誨與指導，鄭教授不僅在專業領域上給予我廣大的視野，教導我如何看待問題、思考問題進而解決問題，更在人生的道路上提供我多方面的思考，在此向鄭璧瑩教授致上我最深的謝意。

在研究期間非常感謝學長姐俊延、憲輝、聖珣，同學駿榮、俊廷、證凱，以及學弟宣穎、建堯、智杰、峻榕，不僅在生活中與研究上均給予我許多的幫助與鼓勵。

當然我最要感謝的是我的家人，能讓我在無後顧之憂下奮力的去努力完成每一個階段的學業，謝謝你們。

僅以此論文，獻給所有關懷我的人

蔡耀嶸 謹致

2006.06 於交大

目 錄

摘要	I
ABSTRACT	III
致謝	V
圖 目 錄	VIII
表 目 錄	XI
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究動機與目的	3
第二章 基本理論介紹	5
2.1 光學模式	5
2.1.1 光的傳遞	5
2.1.2 雷射的光斑與擴散角	7
2.1.3 雷射的模態	8
2.1.4 雷射與材料的關係	10
2.1.4.1 材料對雷射的吸收	10
2.1.4.2 材料的加熱	11
2.2 力學模式	12
2.2.1 應力與應變的關係	12
2.2.2 最大主應力理論	14
2.3 熱傳模式	15
2.3.1 系統的內能與焓	15
2.3.2 焓與相變的關係	16
第三章 模擬分析	18
3.1 ANSYS 基本架構與分析流程	18
3.1.1 APDL 在 ANSYS 中的應用	22
3.1.2 模型網格元素的規劃	25
3.2 完整平板的熱加工模擬分析	28
3.3 不完整平板的熱加工研究	34
3.4 冷熱源的分析模擬	40
3.4.1 變化冷熱源功率且固定負載間距	41
3.4.2 變化負載間距且固定冷熱源功率	45

第四章	微應力量測系統	48
4.1	實驗設備	48
4.1.1	單筒直立式顯微鏡	48
4.1.2	CCD 影像擷取器	49
4.2	加工品質實驗	50
4.2.1	試片的設計	50
4.2.2	加工品質實驗架構與流程	51
4.2.3	加工品質實驗結果	53
4.3	雷射單點加工型微應力量測實驗	56
4.3.1	試片的設計	56
4.3.2	雷射單點加工的應力量測實驗規劃與結果	57
4.4	雷射直線切割型微應力量測實驗	69
4.4.1	試片的設計	69
4.4.2	微應力量測實驗的架構	70
4.4.3	線上量測實驗規劃與結果	73
4.4.4	實驗數據的結果	74
第五章	結論與未來研究方向	83
5.1	結論	83
5.2	未來研究方向	86
參考文獻		87



圖目錄

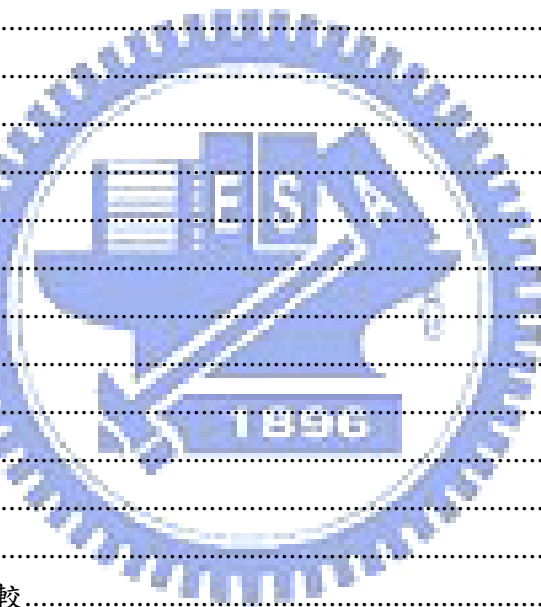
圖 2.1 球面波的傳遞.....	6
圖 2.2 平面波的傳遞.....	6
圖 2.3 高斯波的傳遞.....	6
圖 2.4 雷射光斑與擴散角示意圖.....	7
圖 2.5 各模態之強度分佈情形.....	10
圖 2.6 焓與溫度的關係圖.....	16
圖 2.7 潛熱與溫度的關係圖.....	17
圖 2.8 比熱容與溫度的關係圖.....	17
圖 3.1 PLANE13 耦合場 2-D 元素	19
圖 3.2 SOLID5 耦合場 3-D 元素	19
圖 3.2 動態熱加工之示意圖	26
圖 3.3 模型網格規劃圖	26
圖 3.4 P1 至 P2 路徑與不同網格規劃之應力曲線圖	27
圖 3.5 規劃後的對稱網格.....	27
圖 3.6 完整平板之量測點示意圖.....	28
圖 3.7 壓克力的焓與溫度的關係圖.....	29
圖 3.8 分析範例 1 溫度圖.....	30
圖 3.9 分析範例 1 溫度梯度圖.....	30
圖 3.10 分析範例 1 應力圖.....	30
圖 3.11 分析範例 1 應變圖.....	30
圖 3.12 位置 11_21_31 應力圖.....	30
圖 3.13 位置 11_21_31 應變圖.....	30
圖 3.14 位置 12_22_32 應力圖.....	31
圖 3.15 位置 12_22_32 應變圖.....	31
圖 3.16 位置 13_23_33 應力圖.....	31
圖 3.17 位置 13_23_33 應變圖.....	31
圖 3.18 分析範例 2 溫度圖.....	31
圖 3.19 分析範例 2 溫度梯度圖.....	31
圖 3.20 分析範例 2 應力圖.....	32
圖 3.21 分析範例 2 應變圖.....	32
圖 3.22 位置 11_21_31 應力圖.....	32
圖 3.23 位置 11_21_31 應變.....	32
圖 3.24 位置 12_22_32 應力圖.....	32
圖 3.25 位置 12_22_32 應變圖.....	32
圖 3.26 位置 13_23_33 應力圖.....	33
圖 3.27 位置 13_23_33 應變圖.....	33

圖 3.28 不完整平板的尺寸.....	35
圖 3.29 網格後的試片.....	35
圖 3.30 對稱性網格後的試片.....	36
圖 3.31 量測點的位置.....	36
圖 3.32 P1-P2 主應力(1ST)分布圖.....	36
圖 3.33 P1-P2 主應力(3RD)分布圖.....	36
圖 3.34 P3-P4 主應力(1ST)分布圖.....	37
圖 3.35 P3-P4 主應力(3RD)分布圖.....	37
圖 3.36 P1-P2 主應力(1ST)分布圖.....	37
圖 3.37 P1-P2 主應力(3RD)分布圖.....	37
圖 3.38 P3-P4 主應力(1ST)分布圖.....	37
圖 3.39 P3-P4 主應力(3RD)分布圖.....	37
圖 3.40 位置 11_21_31 應力圖.....	38
圖 3.41 位置 11_21_31 應變圖.....	38
圖 3.42 位置 12_22_32 應力圖.....	38
圖 3.43 位置 12_22_32 應變圖.....	38
圖 3.44 位置 13_23_33 應力圖.....	39
圖 3.45 位置 13_23_33 應變圖.....	39
圖 3.46 M1_M2_M3_M4 應力圖.....	39
圖 3.47 M1_M2_M3_M4 應變圖.....	39
圖 3.48 冷熱源模擬示意圖.....	42
圖 3.49 冷源百分比與壓應力圖.....	42
圖 3.50 冷源百分比與拉應力圖.....	42
圖 3.51 熱源百分比與壓應力圖.....	42
圖 3.52 熱源百分比與拉應力圖.....	42
圖 3.53 冷源百分比與壓應力圖.....	43
圖 3.54 冷源百分比與拉應力圖.....	43
圖 3.55 熱源百分比與壓應力圖.....	43
圖 3.56 熱源百分比與拉應力圖.....	43
圖 3.57 間距與拉應力關係圖.....	45
圖 3.58 間距與壓應力關係圖.....	45
圖 3.59 間距與拉應力關係圖.....	46
圖 3.60 間距與壓應力關係圖.....	46
圖 4.1 單筒直立式顯微鏡.....	48
圖 4.2 DVT SMART IMAGE SENSOR SERIES 600.....	49
圖 4.3 加工品質實驗之試片示意圖.....	51
圖 4.4 加工品質實驗的架構圖.....	51
圖 4.5 加工品質實驗之流程圖.....	52

圖 4.6 單點量測實驗之試片設計圖.....	56
圖 4.7 在 FRAME WORK 下觀測兩條定位線的關係.....	58
圖 4.8 微應力量測實驗之試片設計圖.....	69
圖 4.9 微應力量測實驗結構等角視圖.....	70
圖 4.10 微應力量測實驗前視圖.....	71
圖 4.11 微應力量測實驗上視圖.....	71
圖 4.12 微應力量測實驗右側視圖.....	71
圖 4.13 微應力量測實驗之局部組件圖.....	72
圖 4.14 微應力量測實驗之流程圖.....	73
圖 4.15 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 11.....	74
圖 4.16 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 12.....	74
圖 4.17 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 13.....	75
圖 4.18 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 21.....	75
圖 4.19 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 22.....	75
圖 4.20 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 23.....	76
圖 4.21 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 31.....	76
圖 4.22 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 32.....	76
圖 4.23 功率=21W 速率=1MM/SEC 量測點 33.....	77
圖 4.24 量測點 11_21_31.....	77
圖 4.25 量測點 12_22_32.....	77
圖 4.26 量測點 13_23_33.....	78
圖 4.27 雷射熱源在 T=0 秒時之應變圖.....	78
圖 4.28 雷射熱源在 T=5 秒時之應變圖.....	78
圖 4.29 雷射熱源在 T=10 秒時之應變圖.....	79
圖 4.30 雷射熱源在 T=15 秒時之應變圖.....	79
圖 4.31 雷射熱源在 T=20 秒時之應變圖.....	79
圖 4.32 雷射熱源在 T=25 秒時之應變圖.....	80
圖 4.33 雷射熱源在 T=30 秒時之應變圖.....	80
圖 4.34 雷射熱源在 T=35 秒時之應變圖.....	80
圖 4.35 雷射熱源在 T=40 秒時之應變圖.....	81

表 目 錄

表 3.1 壓克力的熱傳導係數、熱焓與溫度之關係.....	20
表 3.2 參數數值.....	42
表 3.3 熱源大於冷源-應力與負載間距之關係.....	45
表 3.4 冷源大於熱源-應力與負載間距之關係.....	46
表 4.1 單筒直立式顯微鏡之規格.....	49
表 4.2 加工品質分級表.....	53
表 4.3 雷射加工品質分級檢驗表.....	55
表 4.4 量測點為 A 點.....	59
表 4.5 量測點為 B 點.....	59
表 4.6 量測點為 C 點.....	60
表 4.7 量測點為 D 點.....	60
表 4.8 量測點為 E 點.....	61
表 4.9 量測點為 E 點.....	61
表 4.10 量測點為 E 點.....	62
表 4.11 量測點為 E 點.....	62
表 4.12 量測點為 A 點.....	63
表 4.13 量測點為 B 點.....	63
表 4.14 量測點為 C 點.....	64
表 4.15 量測點為 D 點.....	64
表 4.16 量測點為 E 點.....	65
表 4.17 量測點為 E 點.....	65
表 4.18 量測點為 E 點.....	66
表 4.19 量測點為 E 點.....	66
表 4.20 實驗結果的比較.....	67
表 4.21 微應力量測實驗之局部組件表.....	72



符 號 說 明

A : 吸收率

$C(T)$: 比熱容表示為溫度的函數

C_p : 固定壓力下的比熱容

C_{pf} : 材料在混合相時的比熱容

C_{pl} : 材料在液相時的比熱容

C_{ps} : 材料在固相時的比熱容

C_v : 固定體積下的比熱容

E : 楊氏係數

G : 剪力係數

H : 焓(Enthalpy)

$H_n(x)$: Hermite polynomial

$I_{m,n}$: 節點數為 m 、 n 時的雷射光源強度

\vec{k} : 波向量(wave vector)

m, n : 節點數(Node number)

n_1 : 材料折射率的實部

n_2 : 材料折射率的虛部

P : 壓力

R : 反射率



$R(z)$: 曲率半徑

T : 溫度

T_{ml} : 液態的溫度

T_{ms} : 固態的溫度

ΔT : 溫度差

U : 內能

U_L : 發生相變化時

u : 在空間 (x, y) 處的波形分佈狀態

u_0 : 在空間 (x_0, y_0) 處的波形分佈狀態

V : 體積

w_0 : 光腰(Beam Waist)

$w(z)$: 光斑(Spot Size)

α : 材料的吸收係數

β : 繞射角

ε_{ij} : 應變分量

$d\varepsilon_{ij}^c$: 相變應變增量

$d\varepsilon_{ij}^e$: 彈性應變增量

$d\varepsilon_{ij}^p$: 塑性應變增量

$d\varepsilon_{ij}^{th}$: 熱應變增量



λ : 拉梅常數(Lame's elastic constant)

ν : 泊松比(Poisson's ratio)

ρ : 密度

σ_{ij} : 應力分量

σ_u : 抗拉強度

ω : 頻率(frequency)



第一章 緒論

1.1 前言

雷射的英文為 LASER，它是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一個字母組成的縮寫，其意思是指光受激發輻射放大。雷射是由加州休斯實驗室的梅曼(T.H.Maiman) [1]在 1960 年 5 月 15 日利用光與共振腔產生雷射光，而發明了世界上第一台紅寶石雷射器，其雷射光的波長為 694.3nm。由於雷射能將光能(功率)集中在極小的區域內，所以人們就開始探索雷射在加工領域中的應用，雷射加工為一種非接觸、無污染、低噪音的綠色加工技術，因此雷射加工已經成為 21 世紀先進製造技術中不可缺少的一部份。在眾多的加工技術中又以雷射切割技術最常被使用，雷射切割是以連續或重複脈衝的方式進行加工，切割過程中雷射光束聚焦成很小的光點，使聚焦處達到極高的功率密度，使雷射輸入的能量遠遠超過被材料反射、透射或擴散的部份，因此被加工材料很快被加熱至熔化或是汽化溫度。而加工材料又以非金屬材料最常被使用，二氧化碳雷射很容易被非金屬材料所吸收，其光能幾乎全部傳入到材料內部並在瞬間引起汽化形成孔洞；然而若使用脆性材料如玻璃、陶瓷等進行雷射切割時，必須適當的控制雷射功率、速度與考慮斷裂成長方向，才能對於脆性材料進行有效的切割加工[2]。

1.2 文獻回顧

光學量測力學探討的是一項已經發展多年的光電影像式應力應變等的量測技術[3]。近幾年來，由於影像處理技術的急速進展，使得傳統上以肉眼判讀光學干涉條紋的費時費力且較不準確的困難得以大幅改進，不少商業化的軟硬體也隨之問世，使人們可以更便利及更準確地應用光學於工程力學的量測，這種結合光學應用與力學研究的量測方法即稱之為光測力學。依照不同的需求以及應用範圍，此光測技術可分為以下幾種方法。

(1) 光彈法：

光彈法(Photoelasticity Method)是一種光學式的全域性應力量測方法，採用具有雙折射性的透明材料，製成與實際加工試片形狀相似的模型，並在其上施加與實際負載相同的外力，放置於圓偏振光場裡。由於圓偏振光場的干涉，形成明暗相間的條紋，而這些條紋代表了模型內部各點的應力狀態，可用來確定模型各點的應力，再依據模型相似理論，換算成實際加工試片的應力[4]。

(2) 格子法：

格子法(Grid Method)用於量測變形、應力、應變等等，雖然格子法是量測力學最傳統的方法之一，但是其實用性、方便性與準確性卻是最普遍與較容易量測的。格子法的基本原理首先在試片表面製造出規律的細小方格子，當試片加工受力變形後，格子將會產生某些程度的位移或變形，將

變形前與變形後的格子點相對應後比較，即可獲得該位置的位移或應變狀態，進而求出應力分佈情形[5][6]。

(3) 繞射法：

繞射法(Diffraction Method)，其原理是利用當光通過很小的孔洞或是狹縫時，在觀察螢幕上會產生繞射圖形，如果當孔洞或是狹縫發生位移的變化時，則在螢幕上的繞射圖形也將隨之改變，利用前後繞射圖形的差異則可以求出試片受力後所變化的應變量，也可以反推材料所受的應力分佈情形[7]。

此外本研究室在近幾年來致力於發展微應力量測系統，目的在量測當平板試片利用雷射進行切割加工時，材料因受熱所產生的熱應力與熱應變。由鄭、何[8]所研發出的量測系統是利用光學繞射原理配合加裝反射鏡來減少繞射的距離，大幅精簡量測系統的體積並有效地與雷射加工機台作整合以進行線上加工的量測，透過對於加工試片的幾何設計不僅可避開雷射的切割路徑而且可量測到熱加工點附近的應力應變。而經由實際的實驗結果可得此量測微應力系統的應力量測解析度可達到 $\pm 20\text{kg}/\text{cm}^2$ ，可量測範圍達 $\pm 2184\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

1.3 研究動機與目的

雷射是 20 世紀人類重大的科技發明之一，因此在雷射發明不久後，便

漸漸的被使用在各種領域；在製造加工業裡，利用雷射具有高能量的加工特性，取代了傳統加工機台，但由於雷射加工時，控制加工參數對於材料的應力影響及加工時的成效不易觀察分析，所以本研究分別以理論模擬分析與實驗量測驗證方法加以討論。

本研究在平板熱應力的數值分析模擬方面，使用有限元素軟體 ANSYS，利用 ANSYS 分析軟體模擬動態熱源加工過程的熱應力分析與模擬。因為雷射切割是一種動態的熱源負載，而且雷射光的熱源通常是呈近似高斯函數的分佈，所以必須要利用到 ANSYS 裡的參數化程式開發語言 APDL，對模擬進行連續式熱源負載與高斯熱源函數分佈。在雷射加工過程中，試片從固體受熱熔化為液體，甚至為氣體，其變化的同時發生在一個很小的材料體積內，相的轉變伴隨著熱能，也就是潛熱(latent heat)的吸收與釋放，大多數的研究學者在分析以雷射為熱源的材料加工過程時，並未考慮熱焓性質。由於本文所選用的材料為具有彈性的壓克力試片，在雷射加工時有切出一條小細縫，故在模擬分析需考慮到其熱焓的性質，如此以來才能更加貼近實驗的數據。

為避免影響雷射加工材料的應力，本實驗的量測方法是採用光電影像式非接觸式量測技術。本實驗室建立的非接觸式光電影像式微應力量測系統，結合了光學顯微鏡與 DVT 影像擷取器，觀察試片在進行平板的雷射切割加工時應變量的變化。

第二章 基本理論介紹

2.1 光學模式

雷射光與其他光源所發出來的光不同，其具有優良的特性[9]：

- (1) 指向性：雷射光具有良好的方向性，即直線前進。可運用在光筆、光路準直、測量距離等方面。
- (2) 高亮度：由於雷射光的擴散角極小，所以光源能聚集在極小的面積範圍，因此可以用來做加工等處理。
- (3) 單色性：雷射光具有很高的單色性，也就是單一的頻率。由於這方面的特性，雷射可用於探測信號、通訊等方面。
- (4) 同調性：由於雷射為單一頻率，而且其光譜的線寬非常的窄，因此其同調性佳，可用於干涉、繞射、精密量測等方面。

以下分別敘述有關雷射的一些數學模式。

2.1.1 光的傳遞

由於光的傳遞可以分為三種情形：球面波、平面波、高斯波。以下介紹各種波在空間中傳遞的電場。

如圖 2.1 所示為球面波的傳遞波形示意圖，其行徑方向為 \vec{r} ，則球面波在空間的電場強度為經推導得之為(2.1)式所示[10]

$$\vec{E}(\vec{r}) = \left(\frac{\vec{E}_0}{r} \right) e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.1)$$

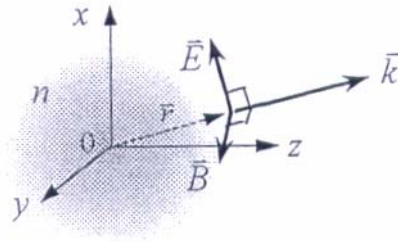


圖 2.1 球面波的傳遞

如圖 2.2 所示為平面波的傳遞波形示意圖，其行徑方向為 \vec{z} ，則平面波在空間的電場強度為經推導得之為(2.2)式所示[10]

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} \quad (2.2)$$

圖 2.2 平面波的傳遞

如圖 2.3 所示為高斯波的傳遞波形示意圖，其行進方向為 \vec{z} ，則高斯波在空間的電場強度經推導得之為(2.3)式所示[10]

$$E(\vec{z}) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{w(z)^2}} e^{-ik \frac{(x^2+y^2)}{2z}} e^{i(\omega t - kz)} \quad (2.3)$$

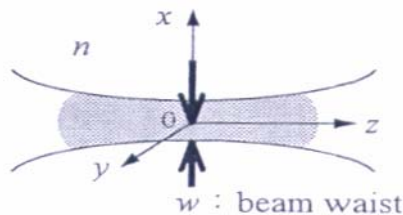


圖 2.3 高斯波的傳遞

2.1.2 雷射的光斑與擴散角

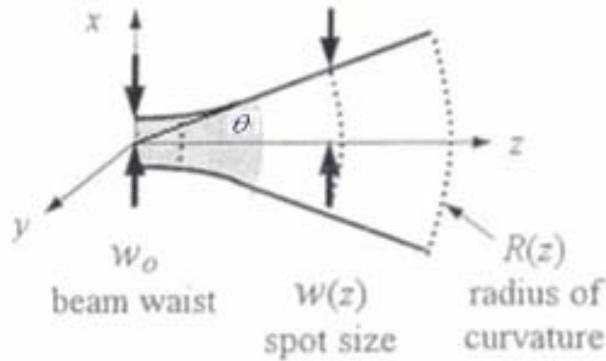


圖 2.4 雷射光斑與擴散角示意圖

由夫瑞斯奈 (Fresnel) 繞射積分[11]可得

$$u(x, y) = \frac{ie^{-ik(z-z_0)}}{\lambda(z-z_0)} \iint u_0(x_0, y_0) e^{-i\frac{k}{2} \left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)} \right]} dx_0 dy_0 \quad (2.4)$$

其中

$$u_j(x_j, y_j) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_j(z)} e^{-ik \frac{(x_j^2 + y_j^2)}{2\tilde{q}_j(z)}}$$

$$\frac{1}{\tilde{q}(z)} \equiv \frac{1}{R(z)} - \frac{i\lambda}{\pi w(z)^2}$$

若高斯球面波在 z 的位置時，則波型分佈狀態為

$$u(x, y) = \frac{ie^{-ik(z-z_0)}}{\lambda(z-z_0)} \iint u_0(x_0, y_0) e^{-i\frac{k}{2} \left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{(z-z_0)} \right]} dx_0 dy_0$$

$$= \dots \dots (\text{change variables})$$

$$= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\frac{1}{w_0 \left(1 - \frac{i\lambda z}{\pi w_0^2} \right)} \right] e^{-i\frac{k}{2} \frac{(x^2 + y^2)}{(\tilde{q}_0 + z)}} e^{-ikz} \quad (2.5)$$

而高斯光束的電場強度為(2.3)式所示

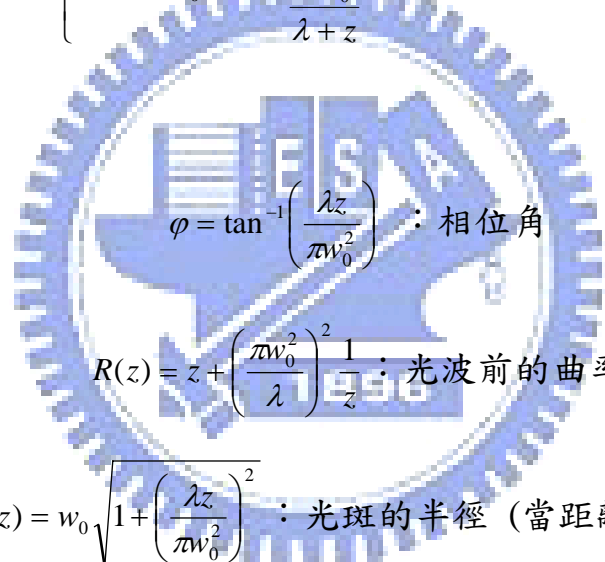
$$E(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\frac{1}{w(z)} \right] e^{-i \frac{k(x^2+y^2)}{2 \tilde{q}(z)}} e^{-ikz} \quad (2.6)$$

由於雷射光源的電場強度相同，所以由以上(2.3)與(2.5)兩式比較後可得(2.7)

式的關係式[11]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{w(z)} = \frac{1}{w_0 \left(1 - \frac{i\lambda z}{\pi w_0^2} \right)} = \frac{e^{i\varphi}}{w(z)} \\ \frac{1}{\tilde{q}(z)} = \frac{1}{\tilde{q}_0 + z} = \frac{1}{\frac{i\pi w_0^2}{\lambda + z}} = \frac{1}{R(z)} - \frac{i\lambda}{\pi w(z)^2} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

其中



$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)$: 相位角

$R(z) = z + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{z}$: 光波前的曲率

$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2}$: 光斑的半徑 (當距離為 z 時)

$\theta \approx \frac{w(z)}{R(z)} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \propto \frac{1}{w_0}$: 擴散角

2.1.3 雷射的模態

雷射在共振腔裡可分為橫向與縱向的振盪，因此其模態就會有橫向模態與縱向模態的區別。橫向模態會影響雷射擴散角的大小、光斑的大小與輸出功率的最大值；而縱向模態會直接影響到雷射的單色性，也就是光譜

線寬的大小。

橫向模態通常以 TEM_{mn} 表示，討論電場在空間位置的分佈，TEM 是 (Transverse Electromagnetic wave) 縮寫，代表橫向電磁波， m 、 n 為節點數，其電場隨空間位置的變化如下[11]

$$E_{m,n}(\bar{z}) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{1}{2^{m+n} m! n!}} \frac{1}{|w(z)|} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right) e^{-ik\frac{(x^2+y^2)}{2q(z)}} e^{-ikz+i(m+n+1)\varphi(z)} \quad (2.8)$$

其中

$$H_n(x) \equiv (-1)^n e^{x^2} \frac{\partial^n}{\partial x^n} e^{-x^2} : \text{Hermite polynomial}$$

$$m, n = 0, 1, 2, \dots, \infty : \text{mode number}$$

當 $m = n = 0$ ，也就是 TEM_{00} (Gaussian Beam) 時，即

$$E_{0,0}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{e^{i\varphi(z)}}{|w(z)|} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{|w(z)|^2}} e^{-ik\frac{(x^2+y^2)}{2R(z)}} e^{-ikz} \quad (2.9)$$

然而雷射光的強度就可以表示為[11]

$$\begin{aligned} I_{m,n}(x, y, z) &= |E_{m,n}(\bar{z})|^2 \\ &= \frac{2}{\pi} \frac{1}{2^{m+n} m! n!} \frac{1}{|w(z)|^2} H_m^2\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) H_n^2\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right) e^{-2\frac{(x^2+y^2)}{|w(z)|^2}} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$I_{0,0}(r, z) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{|w(z)|^2} e^{-2\frac{r^2}{|w(z)|^2}} \quad (2.11)$$

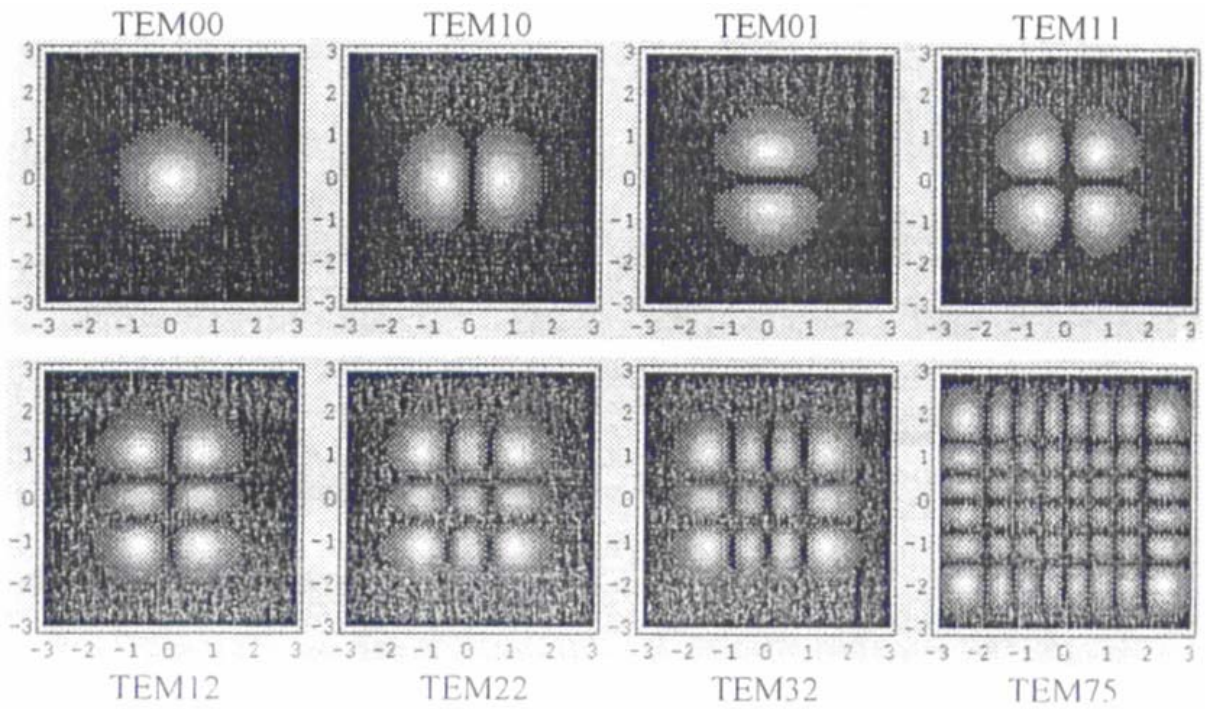


圖 2.5 各模態之強度分佈情形

2.1.4 雷射與材料的關係

對於雷射光與材料的相互作用過程的物理描述，可以分為材料對雷射的吸收與材料的加熱等兩方面來做介紹。

2.1.4.1 材料對雷射的吸收

雷射加工時首先發生的是材料對雷射光能量的吸收。雷射光照射在材料表面時，除了一部份被材料表面反射外，其餘的部份透射至材料內部由材料所吸收，不同材料對不同波長雷射光的吸收率不同。假設材料表面反射率為 R ，則其吸收率為[12]

$$A = 1 - R \quad (2.12)$$

對於大部分的金屬來說，反射率在 70%~90% 之間，當雷射光由空氣垂直射入到平板材料上時，根據 Fresnel 公式，反射率為

$$R = \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2 = \frac{(n_1-1)^2 + n_2^2}{(n_1+1)^2 + n_2^2} \quad (2.13)$$

(2.13) 式中， n_1 和 n_2 分別為材料折射率的實部和虛部，非金屬材料的虛部為零。實際上，金屬對雷射光的吸收還與溫度、表面粗糙度、有無塗料、雷射光的偏振特性等等許多原因有關。

二氧化碳雷射很容易被非金屬材料所吸收，其低反射率使吸收的雷射光能幾乎全部傳入到材料內部，並且在瞬間引起汽化形成孔洞。塑膠、橡膠、木材、皮革等有機材料都可以利用雷射來切割加工，但是材料的厚度需有所限制。而石英、陶瓷、玻璃等材料亦可以利用雷射進行切割，需注意的是在切割脆性材料過程中，雷射的功率必須受到控制，否則會產生破壞性的切割。

2.1.4.2 材料的加熱

材料的加熱是由光能轉變為熱能的過程。假設入射的雷射光束其功率密度為 I_0 ，材料表面所吸收的功率密度為 I ，則

$$I = AI_0 = I_0(1-R) \quad (2.14)$$

而雷射光在材料內部傳遞過程中，其光的能量是以指數的形式做規律的衰減。雷射光從材料表面入射到材料內部的深度為 z 處，其處的光功率密

度 $I(z)$ 為[12]

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.15)$$

(2.15)式中， α 為材料的吸收係數。

2.2 力學模式

2.2.1 應力與應變的關係

彈性體中一點的應力狀態和應變狀態之間存在著一定的聯繫，這種聯繫與如何達到這種應力狀態和應變狀態的過程無關，即應力和應變之間存在相互對應的關係[13]

已知應變求應力：

For 1D

$$\sigma_x = 2G\varepsilon_x - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T \quad (2.16)$$

For 2D

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2G\varepsilon_{xx} - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T_x \\ \sigma_{yy} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + 2G\varepsilon_{yy} - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T_y \\ \sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (2.17)$$

For 3D

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2G\varepsilon_{xx} - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T \\ \sigma_{yy} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2G\varepsilon_{yy} - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T \\ \sigma_{zz} = \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) + 2G\varepsilon_{zz} - \alpha(3\lambda + 2G)\Delta T \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \sigma_{yz} = 2G\varepsilon_{yz} \\ \sigma_{zx} = 2G\varepsilon_{zx} \\ \sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} \end{cases} \quad (2.19)$$

已知應力求應變：

For 1D

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \alpha\Delta T \quad (2.20)$$

For 2D

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu \cdot \sigma_{yy}) + \alpha\Delta T_x \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu \cdot \sigma_{xx}) + \alpha\Delta T_y \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2G}\sigma_{xy} \end{cases} \quad (2.21)$$

For 3D

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E}[\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha\Delta T \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E}[\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha\Delta T \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E}[\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha\Delta T \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2G}\sigma_{yz} \\ \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2G}\sigma_{zx} \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2G}\sigma_{xy} \end{cases} \quad (2.23)$$

其中 λ 、 G 、 E 和 ν 四個常數之間存在下列聯繫：

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.24)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.25)$$

當物體進行雷射切割時，所產生的總應變量 $d\varepsilon_{ij}$ 可以表示為

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^c + d\varepsilon_{ij}^{th} + \dots \quad (2.26)$$

其中 $d\varepsilon_{ij}^e$ 為彈性應變增量， $d\varepsilon_{ij}^p$ 為塑性應變增量， $d\varepsilon_{ij}^c$ 為相變應變增量， $d\varepsilon_{ij}^{th}$ 為

熱應變增量。

2.2.2 最大主應力理論

由材料的拉伸試驗可以得知，脆性材料的破裂通常是由張力所造成。所以可以以最大主應力 σ_1 與材料本身的抗拉強度 σ_u 來比較，當超過此值就表示已經達到破壞的準則

$$\sigma_1 > \sigma_u \quad (2.27)$$

假設材料為等向性且均質，則受熱後各方向之應力為[13]

$$\sigma_{xx} = \lambda e + 2G\varepsilon_{xx} - (3\lambda + 2G)\Delta T \quad (2.28)$$

$$\sigma_{yy} = \lambda e + 2G\varepsilon_{yy} - (3\lambda + 2G)\Delta T \quad (2.29)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda e + 2G\varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2G)\Delta T \quad (2.30)$$

$$\sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} \quad (2.31)$$

$$\sigma_{xz} = 2G\varepsilon_{xz} \quad (2.32)$$

$$\sigma_{yz} = 2G\varepsilon_{yz} \quad (2.33)$$

$$e = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (2.34)$$

經由上式可求出最大主應力為

$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma \end{vmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow \sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (2.35)$$

其中

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

$$I_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{xx}\sigma_{zz} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{xz}^2 - \sigma_{yz}^2$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

藉由上面三個式子就可以分別求出三個主應力 σ_1 、 σ_2 與 σ_3 ，假如其最大主應力大於材料之抗拉強度則可認定材料已發生破壞。

2.3 熱傳模式

2.3.1 系統的內能與焓

系統之任一熱力狀態性質可由兩獨立的性質所決定，假設焓為壓力與溫度所決定，而內能由體積與溫度所決定，即[14] [15]

$$H = H(P, T) \quad (2.36)$$

$$U = U(V, T) \quad (2.37)$$

則可得

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV \quad (2.38)$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT \quad (2.39)$$

一般的熱傳過程均在一大氣壓下進行，而且固體或液體在熱傳過程中體積幾乎保持定值，即 $dV = dP = 0$ 。

而且因為

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \equiv C_V \quad (2.40)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \equiv C_P \quad (2.41)$$

所以可得到

$$dU = C_V dT \quad (2.42)$$

$$dH = C_P dT \quad (2.43)$$

由焓的定義[16]

$$H \equiv U + PV \quad (2.44)$$

為分後可得

$$\begin{aligned} dH &= dU + PdV + VdP \\ \Rightarrow dH &= dU \end{aligned} \quad (2.45)$$

2.3.2 焓與相變的關係

由焓與比熱容之間的關係為[17]

$$H = \int_{T_0}^T \rho c(T) dT \quad (2.46)$$

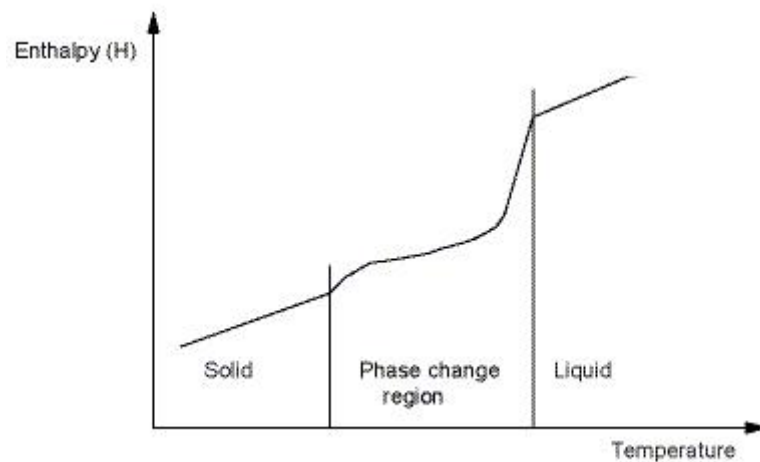


圖 2.6 焓與溫度的關係圖

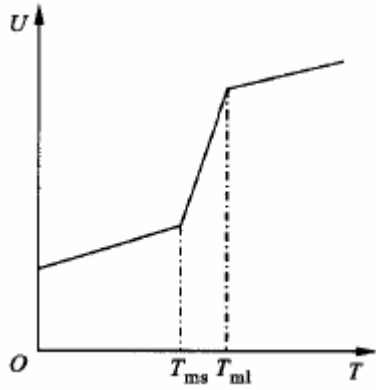


圖 2.7 潛熱與溫度的關係圖

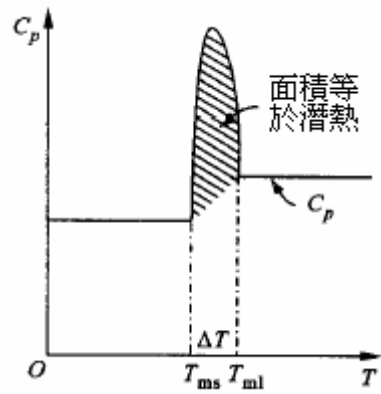


圖 2.8 比熱容與溫度的關係圖

相變的問題也就是考慮潛變，可以用焓的表示來描述，當材料發生相

的變化溫度在 T_{ms} 與 T_{ml} 之間，由(2.46)式則焓可以表示為[18]

$$H(T) = \int_{T_0}^{T'} \rho C_{ps}(T) dT, \quad T' \leq T_{ms} \quad (2.47)$$

$$H(T) = \int_{T_0}^{T_{ms}} \rho C_{ps}(T) dT + \int_{T_{ms}}^{T'} \left[\rho \left(\frac{dU_L}{dT} \right) + \rho C_{pf}(T) \right] dT, \quad T_{ms} < T' \leq T_{ml} \quad (2.48)$$

$$H(T) = \int_{T_0}^{T_{ms}} \rho C_{ps}(T) dT + \rho U_L + \int_{T_{ms}}^{T_{ml}} \rho C_{pf}(T) dT + \int_{T_{ml}}^{T'} \rho C_{pl}(T) dT, \quad T' > T_{ml} \quad (2.49)$$

其中 C_{ps} 、 C_{pf} 、 C_{pl} 分別為在固相、混合相與液相的比熱容， U_L 為相變化時的潛熱。由(2.46)式對其作微分可得到

$$\rho C_p(T) = \frac{dH}{dT} \quad (2.50)$$

考慮相變的問題時，可以用比熱容與溫度之間的關係，也可以用熱焓與溫度之間的關係。但由於熱焓法比比熱容法較為平滑與精確的溫度函數[19]，所以在相變問題裡，會考慮熱焓與溫度的關係。

第三章 模擬分析

本章節內容重點在介紹模擬時所使用的有限元素軟體之基本架構與分析流程。在實際加工時，不完全均是完好無破損的加工試片，因而在此也對於不完整之試片做簡單的介紹與在分析上應注意的地方。

3.1 ANSYS 基本架構與分析流程

本文所使用的 CAE(Computer Aided Engineering)軟體為 ANSYS，其經由下列六個主要的步驟定義問題[20] [21]，並進行分析。

1. 元素、截面、及材料定義

此步驟主要定義以下元素形式、實體常數以及材料性質的資料。元素形式是定義問題將要以甚麼元素模形來分析，包括0-D 的質點及空隙等元素、1-D 的樑及柱等元素、2-D 的板及殼等元素以及3-D 的四面體及六面體等元素。實體常數是定義分析模形的截面特性，在2-D 模形中，必須定義厚度，在1-D 模形中，則必須定義樑或桁架的截面尺寸否則無法進行分析。在材料性質部份，必須定義的參數包括剛性係數 E_x 及 E_y 、剪彈性模數 G_{xy} 和泊松比 ν 及剪應力模數等，依材料類形而定。對於等向(Isotropic)材料而言，必須定義楊氏係數 E ，程式內建泊松比為0.3，剪彈性模數之值為 $G_{xy} = E/(2(1+\nu))$ 。在彈性分析中，泊松比不可以設定為0.5，因為這樣會使體

剛性係數變成無限大程式將無法執行。對於Orthotropic 材料而言，必須定義 E_x 及 E_y 。對於非等向(Anisotropic)材料而言，每個方向的材料參數都不同，因此必須定義所有方向的數值。

然而對於本文所要分析之模型，因為所要分析為平面與立體模型的耦合場，故選用『PLANE13』的2-D元素，其節點數為4；『SOLID5』的3-D元素，其節點數為8，兩元素的自由度均有：溫度、位移、電場、磁場，如下圖所示

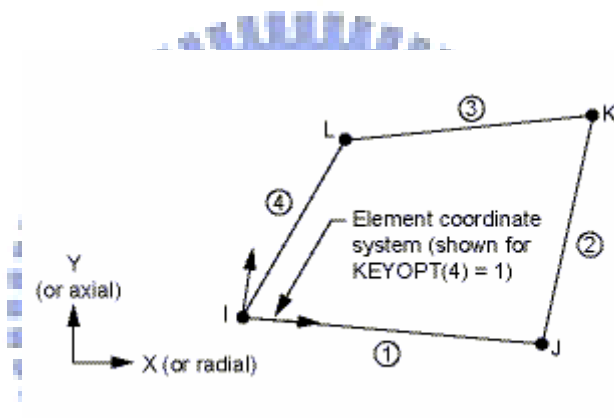


圖 3.1 PLANE13 耦合場 2-D 元素

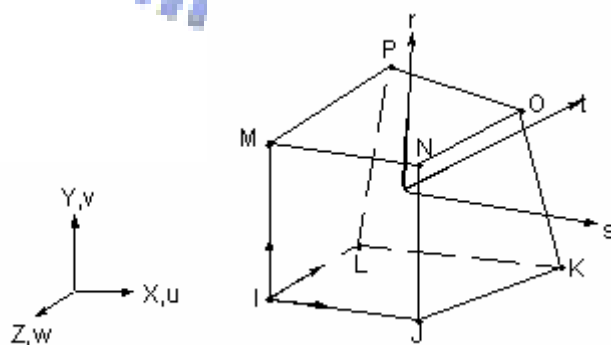


圖 3.2 SOLID5 耦合場 3-D 元素

而材料是使用壓克力材料性質，可參照文獻[21][22]。在 ANSYS 中必須要統一所有材料性質與幾何的單位，所以參考附錄一、二，轉換後的材

料性質如下：

楊氏係數(Young's Modulus)， $E_X=6974500000$ (pa)

泊松比(Poisson Ratio)， $PR_{XY}=0.3$

材料密度= 1190 (kg/m^3)

熱膨脹係數(Thermal Expansion coeff.)， $ALPX=0.000063$ ($m/(m) \cdot K$)

比熱(Specific Heat)， $C=1465$ ($J/(kg) \cdot K$)

為了能更逼近實際的情況，除了以上的材料性質外，在模擬中另外考慮到壓克力的熱傳導係數與熱焓性質隨著溫度而變化，其相互之關係如表 3.1 所示[23]：

表 3.1 壓克力的熱傳導係數、熱焓與溫度之關係

材料性質	值	溫度	符號	單位
熱傳導係數	0.201224	23°C	k	$W/m^{\circ}C$
	0.20125	47°C		
	0.20254	49°C		
	0.20476	67°C		
	0.20305	79°C		
	0.205154	85°C		
	0.203634	93°C		
	0.204946	103°C		

	0.19574	148°C		
熱焓	87.6E6	40°C	H	J/m^3
	143.4E6	60°C		
	198.7E6	80°C		
	253.9E6	100°C		
	296.2E6	110°C		
	340.6E6	120°C		
	385.4E6	130°C		

2. 繪出幾何圖形

幾何圖形可由軟體提供之功能繪出，也可以經由CAD軟體(例如Pro-E、Solidworks等等)輸入，幾何的圖形包括點、線、面、及體。

3. 網格劃分(Meshing)

分析結構體外形定義完畢後，再將它分成小網格以供後續分析計算。網格分的越細，所計算之結果誤差越小，但所需要的分析時間會越長。在非線性分析中，分析時間是個很重要的問題，因此網格的大小須適當不可太小而浪費時間。網格可直接分格或是自動分格，若為提高分析的精確度，可使用網格細分法、高次元素法或是混合並行法。

4. 負載及邊界條件

在這步驟主要定義邊界條件以及負載，邊界條件是定義一個結構固定

的部份，來進行下一步分析。而負載可以包括集中力、分佈力、加速度及預存應變。對於線性問題中多重負載狀況可以分別定義，並於後處理程序中以各種比例組合輸出結果。

5. 分析求解(Solution)

進行分析前的各步驟，稱為前處理，包括前述四個部份，分析以後的各步驟，稱為後處理，提供應力、應變、位移等資料的圖示及列示。

6. 後處理(Post-Processing)

可提供程式執行結束後，了解查看模型內各部分應力圖、應變圖、位移圖，應力、應變隨時間改變之變化圖及隨位置改變之變化圖等。

3.1.1 APDL 在 ANSYS 中的應用

藉由有限元素軟體的利用，可以模擬並計算出熱加工對材料應力與應變的影響。其中，ANSYS軟體可以使用APDL設計分析指令，進而簡化命令流。

APDL的用處是用來寫FEA(Finite Element Analysis)程式。其功能可以自動建造模型，並直接解析。得到結果後，再利用結果轉做其他錯綜複雜的行動和計算。透過使用這種程式，FEA在設計實驗方面即可成為一件強有力的工具，並且可達到設計最佳化。

FEA已經在近年被廣泛地用來模擬元件行為，並且證明是可得到更好的

元件性能的工具。通常人們在從事FEA工作時，都是針對關於一個問題即建立一個模型，再進行交互運算。也就是針對一個規定的問題則必須在電腦前面坐下(例如：一個元件裡有固定的幾何條件，需要得到其他的工作條件，如溫度和壓力等等)。建造固定模型來解析它，並且得到被要求的結果。這已經證明可以在很多應用中是有用的。

當FEA正得到越來越受歡迎，而新的需求也不斷地被提升。而使用FEA做實驗設計和設計最佳化是最方便的。在這些應用過程中，元件有著相似的幾何，但是組成參數(尺寸和材料特性)是可變的。通常，即使是一個簡單的實驗設計，也經常超10次的運算(運算一次可得到一組參數)。如果仍舊在針對一種問題建立一個模型的模式下工作，需要建造很多模型再行分析，這將非常費時。

APDL程式是一次命令模式的發展。即使用交互模式，ANSYS可以採用兩種模式工作。一種方法是透過點擊選單和對話視窗，直接告訴系統目前所想要進行的動作。這是一種容易，但是慢的模式。實際上，以上的行為都可以透過在指令輸入欄鍵入指令行，這是一種命令模式。現在，並不是只能在螢幕的前面，以指令輸入欄鍵入指令行和執行命令行。在ANSYS中它允許使用者寫一套命令指令在任何的文書編輯軟體內，然後利用讀取的形式把全部命令輸入和運算以批次模式(Batch Mode)。這是APDL程式的主要想法。

APDL 代表的是 ANSYS 參數設計語言 (ANSYS Parametric Design Language)，這種語言允許使用者在建立分析模型時，以參數或是變數的組合形式建立。這種形式的建立，可以輕易的進行模型的設計修改。APDL 是程式語言的一種，而且只可以運用在 ANSYS 系統中。這種程式語言的格式與語言 FORTRAN 十分類似。但是 APDL 可以立即被執行而不需經由編輯 (Compiling)。


現在 ANSYS 所有的命令都像是子程式或者預定功能的方程式。像其他計算機語言一樣，APDL 也涵蓋其他特徵範圍(例如重複命令，巨集)，如分歧 (branching)，迴圈 (do-loops)，以及純量，向量和矩陣運算。以上的功能使 APDL 程式比交互模式更強大。特別是下列方面：

1. 藉由整套變數參數(可能稍後需要改變的值)的表達，模型變得非常靈活。如果使用者想要改變尺寸或者特性，只需要改變程式裡的數據，系統將為使用者再造模型。這個特徵特別適用於試驗的設計 (DOE) 與設計最佳化。
2. 像其他計算機程式一樣，APDL 能重複或者錯綜複雜操作和計算。使用者能寫自己所需的程式，並且執行他們，可視為一個巨集。
3. 儲存模型於一般文字編輯文件裡(一般只要一點點 kb 的儲存空間大小)，而不是用 db 文件。(db 為分析模組的檔案格式，需要至少幾 Mb 的保留空間。)

4. 執行模型的批次檔可以充分利用FEA 系統。

這裡的關鍵在於如何能寫出模型核心。可以利用參數建立模型，並且運算結果。這需要對ANSYS指令和一些程式編輯的技能有一定程度的熟悉。幸好，APDL是一種立即可執行的語言。使用者可以先測試並且修改單一程式命令。在完成後，再合併到整個程式之中。

3.1.2 模型網格元素的規劃



當幾何模型建構完畢時，不論是幾度空間的模型，元素的大小與數目多以設定模型的邊界為主。在進行模擬分析時，網格設定所需要的參數將決定網格的大小與形狀，也將影響分析時的正確性與經濟性，所以此步驟非常重要。網格太密雖然會得到較佳的結果，但並非網格細就是最佳的結果，反而會因為網格太密，造成佔用大量的分析時間與硬體空間。有時候太細的網格與較粗的網格比較起來，較細的網格分析的精確度只會增加幾個百分點，但是所佔用的電腦資源比起較粗的網格，可達數倍甚至數十倍之多；同時較密的網格在複雜的結構中，常常會造成不同網格尺寸劃分時連接的困難。

如圖 3.2 為模擬雷射動態熱加工之示意圖，圖中為加工路徑。在此所關心的是在加工路徑周圍的應力應變值，如果對於試片周圍也畫分相同之網格大小，則不僅會花費太長的分析時間，也會耗損太多的電腦資源。

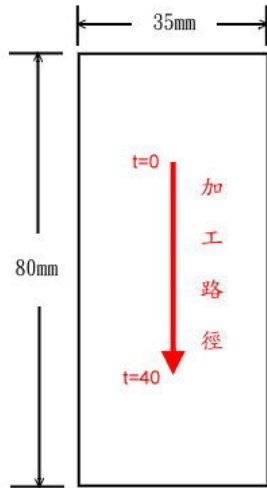


圖 3.2 動態熱加工之示意圖

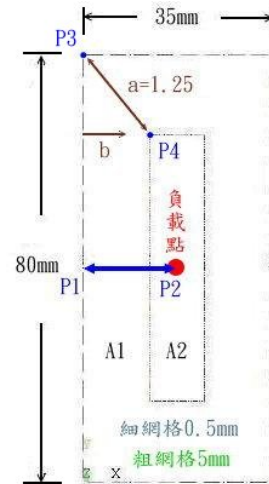


圖 3.3 模型網格規劃圖

因此在模擬動態熱源前首先將針對網格的規劃做進一步討論。網格規劃如圖 3.3 所示，在長方形區域 A1 中切割出一長方型區域 A2，而(A1-A2)為利用粗網格尺寸為 5mm 切割；A2 利用細網格尺寸為 0.5mm 切割，a 為 $\overline{P3P4}$ 的斜率假設為一定值“1.25”，b 為一變數表示 P3 與 P4 距離長投影在 X 軸的分量。為了預先檢驗並尋找適當的網格模型，增加分析過程的效率與精確度，在此先以單點熱源為負載，當隨著變數 b 的變化時，分析量測路徑 P1 至 P2 各點應力值的數據曲線，做為評估觀測的依據與參考，分析的模型可分類為 Case1 至 Case5 等五項。

Case 1 : b=0mm ;

Case 2 : b=5mm ;

Case 3 : b=7.5mm ;

Case 4 : b=10mm ;

Case 5 : b=12.5mm ;

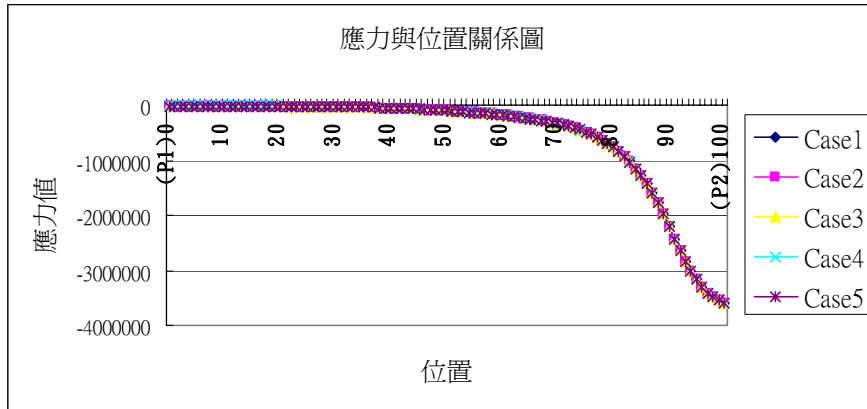


圖 3.4 P1 至 P2 路徑與不同網格規劃之應力曲線圖

不同網格的規劃對於路徑 P1 至 P2 的應力變化曲線，隨著變數 b 的變化會造成不同模型網格的劃分，也將影響分析過程中的精確性與經濟性。參考圖 3.3 的網格規劃方式，Case1 所劃分的元素最均勻，格點個數最多，而 Case5 所劃分的元素格點個數最少。由圖 3.4 的應力值比較結果分析曲線可知，對於量測路徑 P1 至 P2 而言，其應力值的誤差比較而言，最大誤差比率約 1/1000，但對於分析所需耗費的時間以及所需硬體儲存空間卻大了約兩倍，為了增加分析的效率以及降低分析時間因此選擇 Case5 做為本研究後續熱加工的網格模型，圖 3.5 為 Case5 的網格模型。

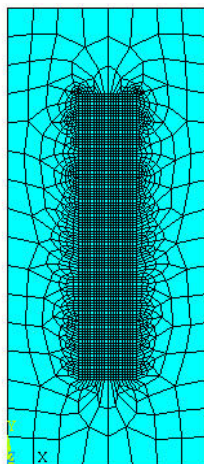


圖 3.5 規劃後的 Case5 對稱網格

3.2 完整平板的熱加工模擬分析

在本節將利用 ANSYS 軟體對完整平板做熱加工的分析模擬，而熱加工路徑與分析模型分別如圖 3.2、3.5 所示。在完整平板上取出共九個量測點其量測點位置分別標記為 11、12、13、21、22、23、31、32 與 33 如圖 3.6 所示。在此分析模擬中將討論有無考慮熱焔與空氣對流對模擬分析所造成的影響。

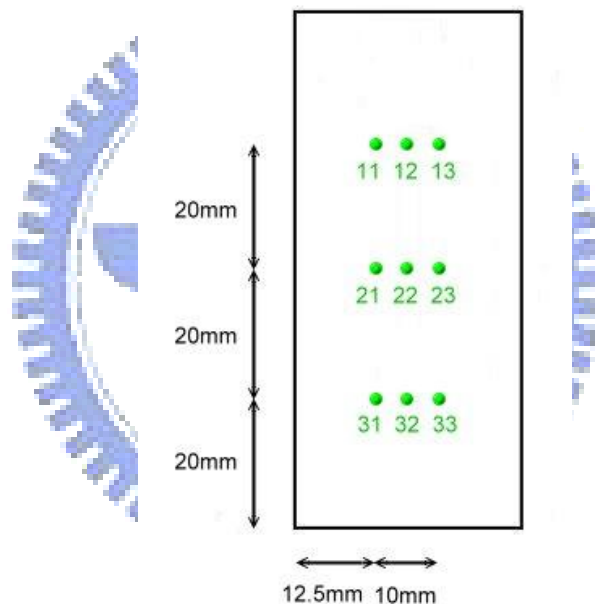


圖 3.6 完整平板之量測點示意圖

在實際的加工情況中雷射雖然其負載半徑極小，但是仍為一區域負載，因此以下將以局部的熱源負載與考慮熱焔，來做分析模擬以接近實際的情況。在局部熱源部份，先以橢圓方程式模擬

$$\frac{(x-x_0)^2}{a} + \frac{(y-y_0)^2}{b} = 1 \quad (3.1)$$

在 ANSYS 軟體中模擬熱源為雷射光源 TEM_{00} ，其能量呈高斯分佈，經

過聚焦鏡後雷射光成圓形或橢圓型光源，而聚焦後的能量仍為高斯分佈，因此在平面上不同點的能量密度 $I_{0,0}$ 可以表示為[11]

$$I_{0,0}(x, y) = \frac{2(1-R) \times P}{\pi \times a \times b} e^{-\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)} \quad (3.2)$$

R ：材料反射係數，假設為 0.2[12]；

P ：雷射功率；

a ：雷射光源之短軸；

b ：雷射光源之長軸；

由於是利用雷射切割機 (ILS-II-30W) 其雷射源為 CO_2 雷射，而最大的加工功率為 30W。由加工品質實驗可知，在 70% 的最大功率與 DVT 的觀察下有較佳的筆直度，因此對於在 ANSYS 模擬時，取雷射熱源的功率為 21W。

在相變化的部份，考慮熱焓與溫度的關係，參考表 3.1 可得到壓克力的熱焓與溫度關係圖。

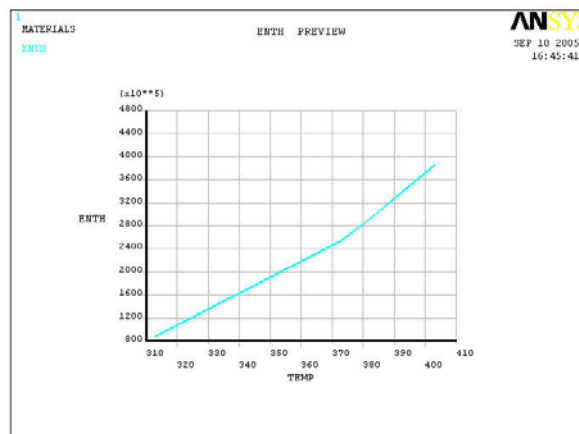


圖 3.7 壓克力的焓與溫度的關係圖

分析範例 1：不考慮熱焓。

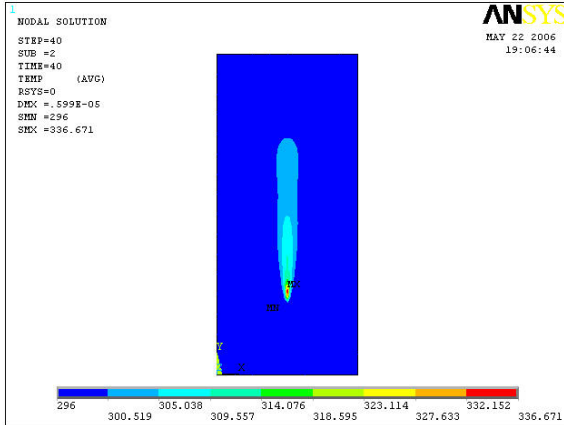


圖 3.8 分析範例 1 溫度圖

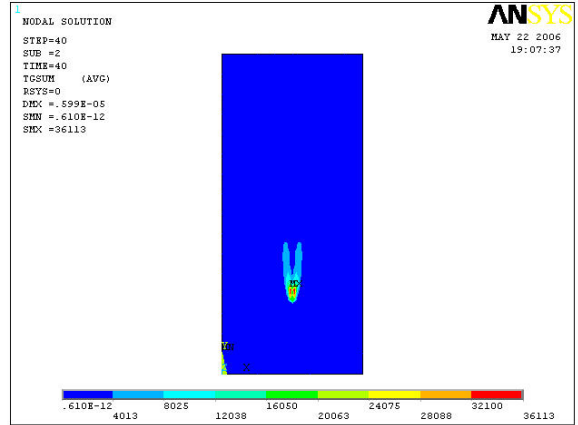


圖 3.9 分析範例 1 溫度梯度圖

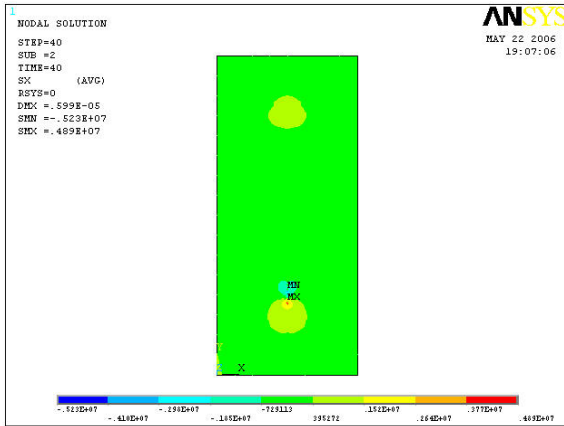


圖 3.10 分析範例 1 應力圖

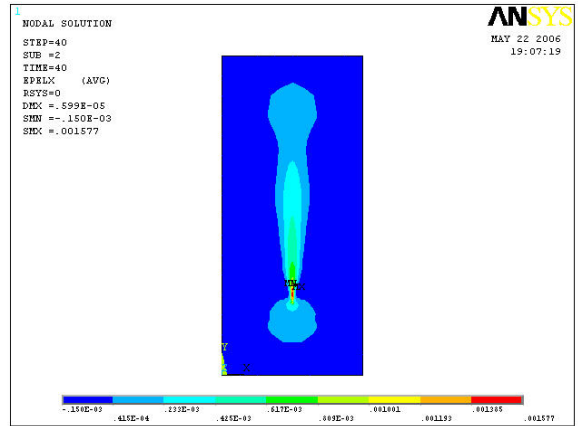


圖 3.11 分析範例 1 應變圖

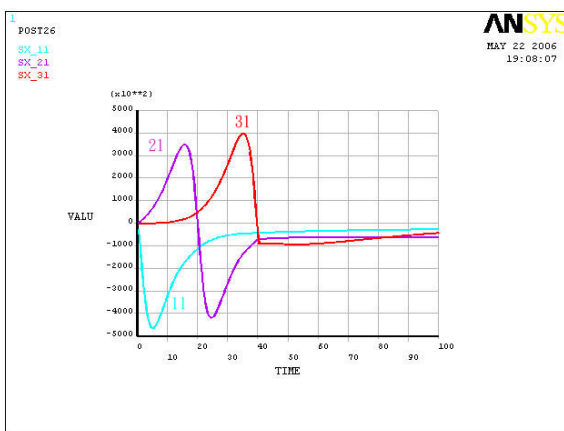


圖 3.12 位置 11_21_31 應力圖

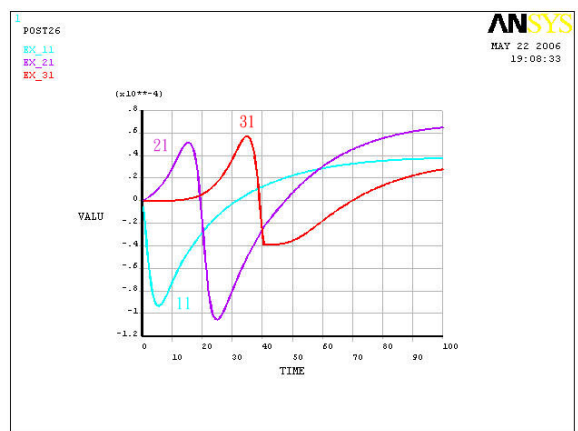


圖 3.13 位置 11_21_31 應變圖

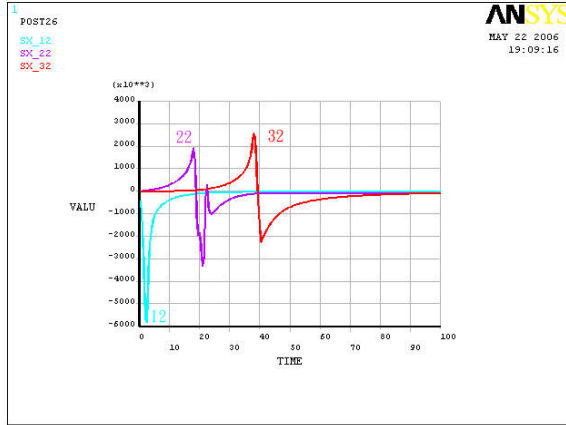


圖 3.14 位置 12_22_32 應力圖

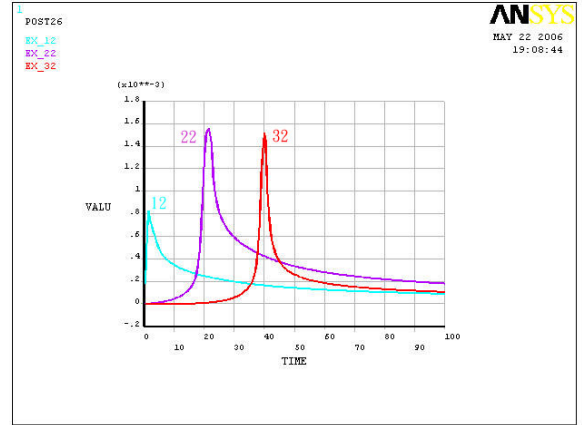


圖 3.15 位置 12_22_32 應變圖

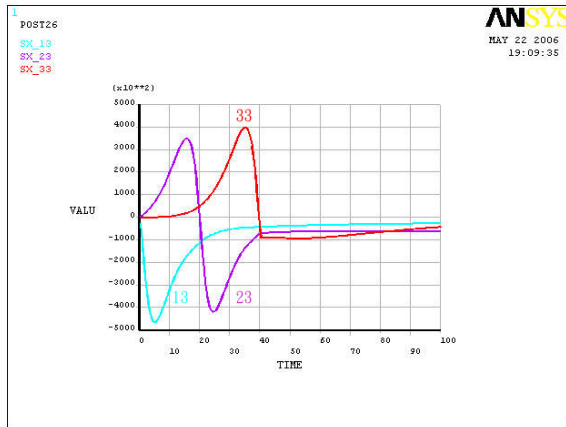


圖 3.16 位置 13_23_33 應力圖

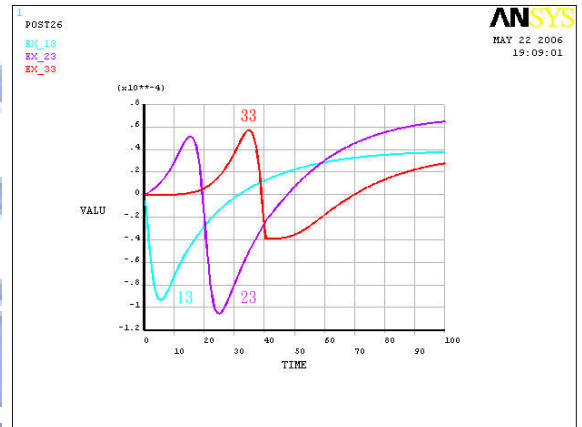


圖 3.17 位置 13_23_33 應變圖

分析範例 2：考慮熱焔。

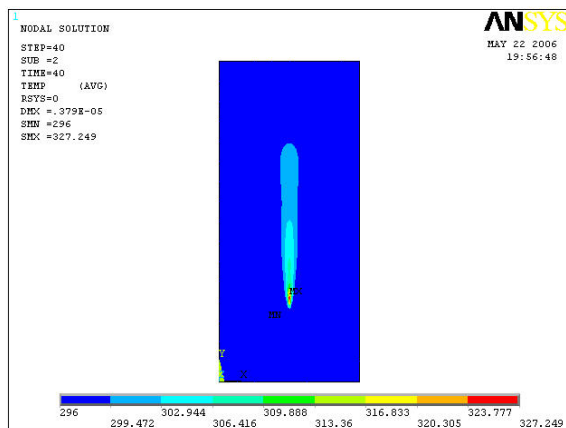


圖 3.18 分析範例 2 溫度圖

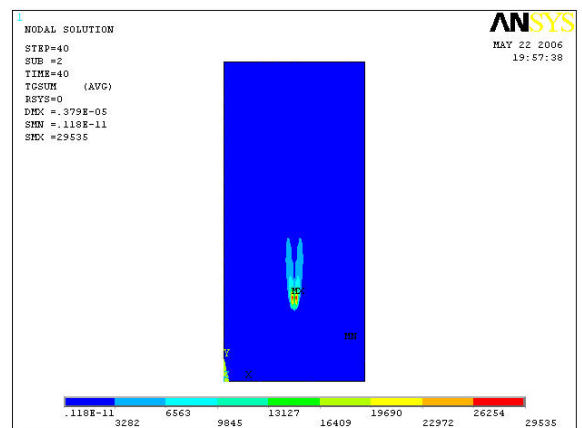


圖 3.19 分析範例 2 溫度梯度圖

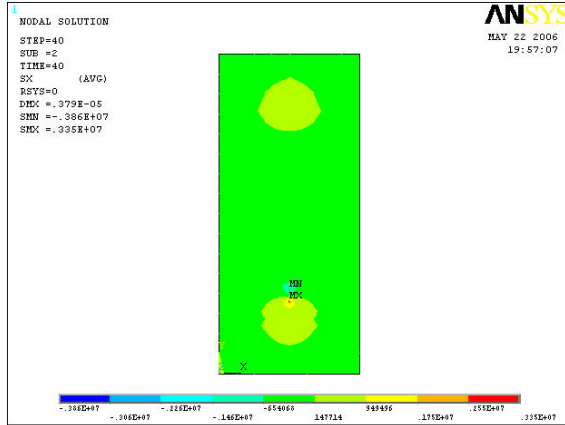


圖 3.20 分析範例 2 應力圖

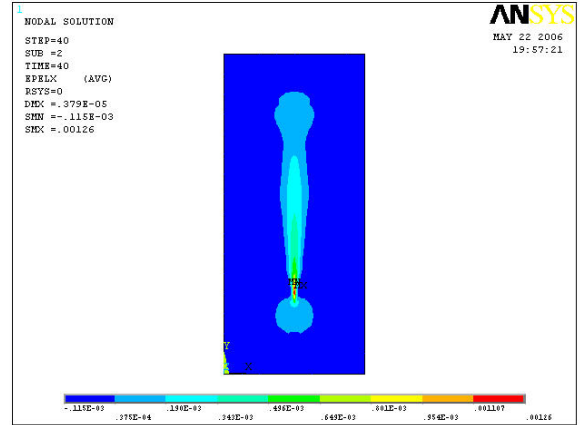


圖 3.21 分析範例 2 應變圖

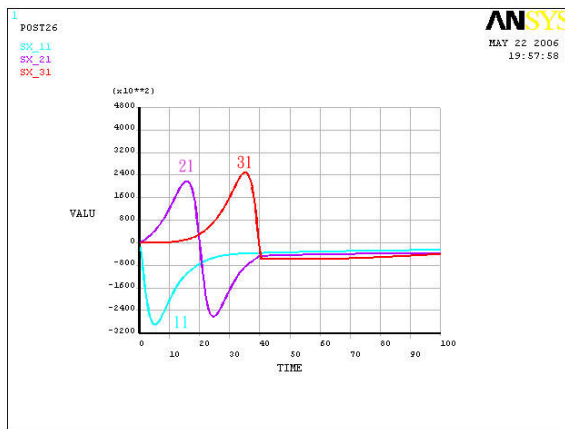


圖 3.22 位置 11_21_31 應力圖

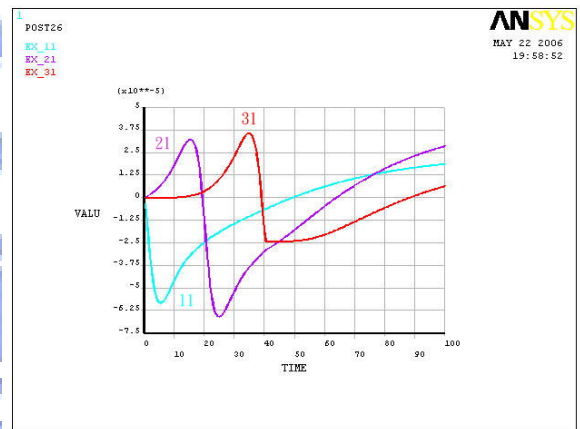


圖 3.23 位置 11_21_31 應變圖

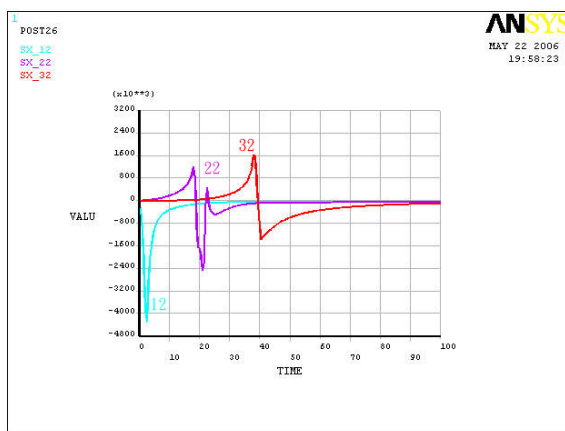


圖 3.24 位置 12_22_32 應力圖

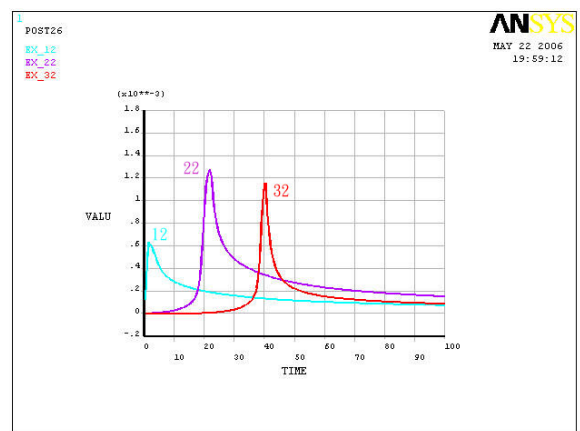


圖 3.25 位置 12_22_32 應變圖

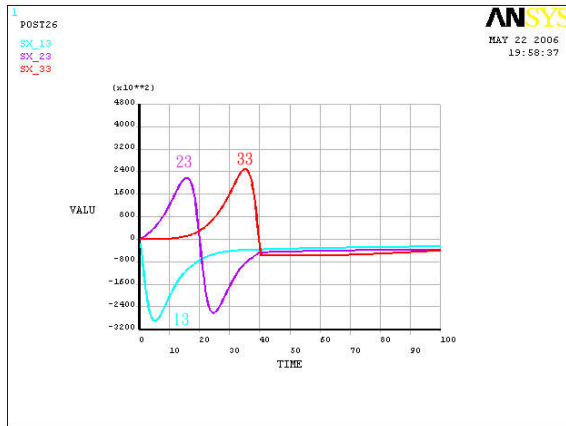


圖 3.26 位置 13_23_33 應力圖

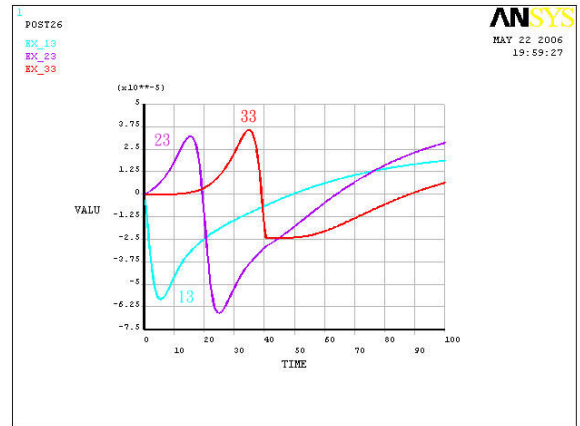


圖 3.27 位置 13_23_33 應變圖

熱焓為一物體的重要性質之一，由(2.49)式可知如果在分析時考慮物體的熱焓性質，也就能考慮到相的變化。當物體受高功率的雷射加工時，有一部分的能量會拿來當作相變化的改變，此時溫度並不會升高。因此若是有考慮相變化，則分析結果會得到較低的最高溫度、溫度梯度、熱影響區與殘留應力。上述分析的結果與文獻[24]相符合。由圖 3.12 至 3.17 與圖 3.22 至 3.27 可得出以下的結論：

1. 比較位置11_12_13的應變量：

當雷射熱源經過量測位置 12 時，此三點量測點明顯受到壓縮的應變量。位置 11 與 13 在熱源遠離後，其應變量逐漸恢復。而位置 12 則是迅速恢復並且轉變成張應變，其原因是由於下一個熱源所產生的壓縮應變量，迫使位置 12 受到張應變，然而位置 11 與 13 距離較遠因此影響較小。

2. 比較位置 21_22_23 的應變量：

由模擬的曲線可知，在雷射熱源開始移動但是尚未達到位 22 時，位置

21、22、23 的曲線呈現張應變。熱源經過時，則會稍微降低張應變，使曲線往下滑落。而在熱源經過位置 22 後，又持續呈現張應變，直到雷射熱源的遠離。

3. 比較位置 31_32_33 的應變量：

此三點位置位於加工路徑的末端，因此應變曲線只有在最後熱源即將到達前產生張應變，但是到達位置 32 時，應變曲線又往下滑落。

3.3 不完整平板的熱加工研究

在軟體分析時通常為了方便，大多都將試片視為完整無缺的情形。然而在實際情況，當在做加工處理時，加工物件不完全均為完整無缺的試片，有時為了節省材料的浪費，也會將有缺口、缺陷的試片拿來加工。以下分為幾種情形作為討論：

分析範例 1：

對於分析不完整平板的研究，在有限元素軟體 ANSYS 先建立不完整平板之模型，其尺寸如圖 3.28 所示。對模型做網格化與施加熱源負，而邊界條件是在平板中心上下兩端各取一點拘束 x 方向，再於平板中心上端加入 y 方向的拘束，邊界條件與加工路徑如圖 3.28 與 3.29 所示

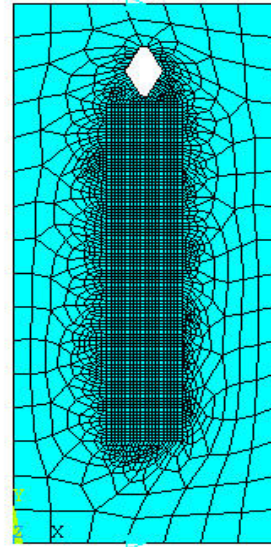
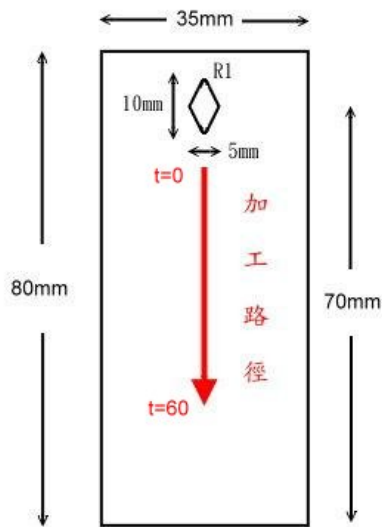


圖 3.28 不完整平板的尺寸

圖 3.29 網格後的試片

如圖 3.28 所示，雖然此平板為不完整試片，但是對於加工路徑來說，此試片為對稱平板，因此在分析結果上來說應為左右對稱。然而在此例子的結果並不為左右相互對稱，此原因如圖 3.29 所示，其網格對於加工路徑來說就不是左右對稱的。由於軟體對於有缺口物體的網格劃分，並不能自行判別其是否為對稱物體，而對物體作對稱性的網格劃分。

分析範例 2：

在此分析範例中，將以熱源加工路徑視為對稱軸線，對於試片做對稱性的網格劃分，而對於熱源負載及邊界條件的假設皆與範例 1 相同，如圖 3.30 所示。移動式熱源加工路徑示意圖如圖 3.28，而在加工路徑周圍取九個點與裂縫周圍取四個點，做為觀察分析結果的節點，其節點的位置關係如圖 3.31 所示，以下結果均用節點的位置表示。

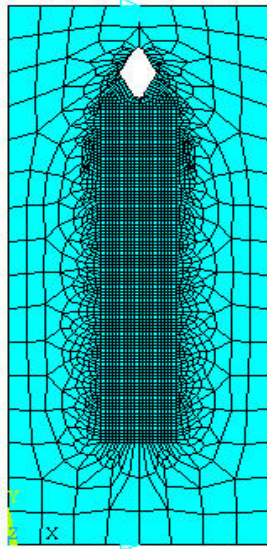


圖 3.30 對稱性網格後的試片

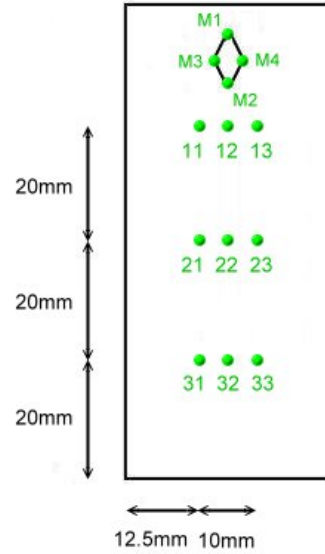


圖 3.31 量測點的位置

在 ANSYS 軟體裡，將整個移動式熱加工過程設定總時間為 60 秒，由於每個時間點的應力應變值會承接上個時間點的值而有加成的效果，因此我們分別取出在 $t=1$ 秒與 $t=60$ 秒時裂縫周圍的應力分布圖，其量測點位置參考圖 3.31。

$t=1$ 秒：

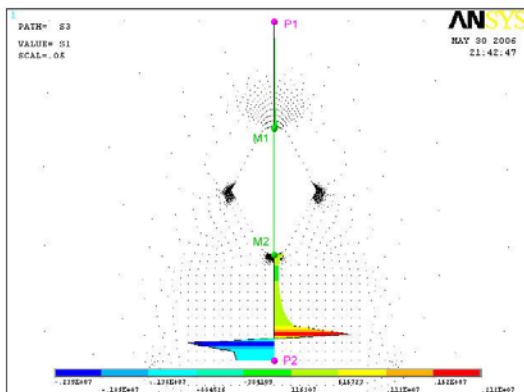


圖 3.32 P1-P2 主應力(1st)分布圖

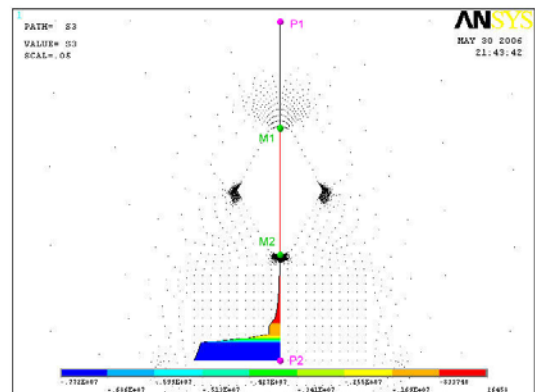


圖 3.33 P1-P2 主應力(3rd)分布圖

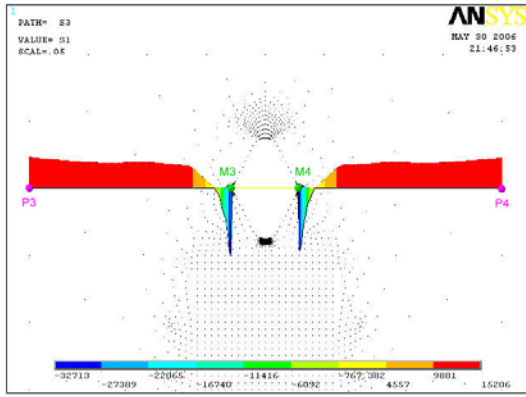


圖 3.34 P3-P4 主應力(1st)分布圖

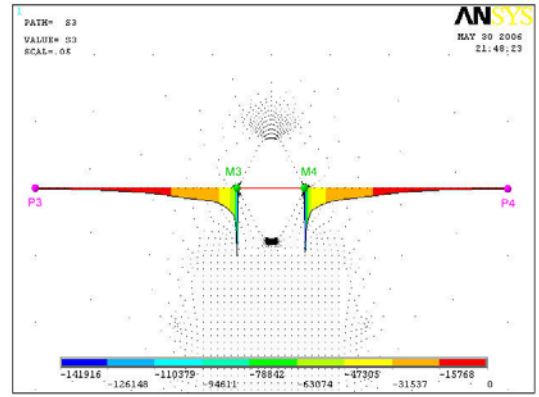


圖 3.35 P3-P4 主應力(3rd)分布圖

t=60 秒：

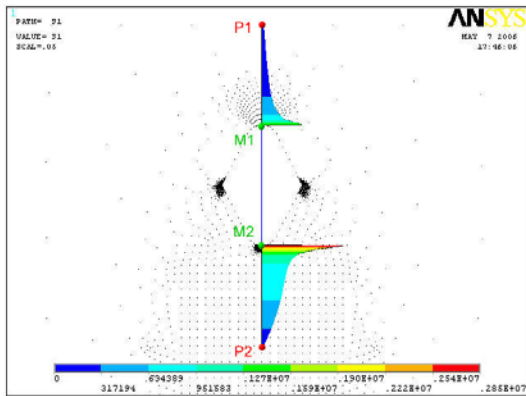


圖 3.36 P1-P2 主應力(1st)分布圖

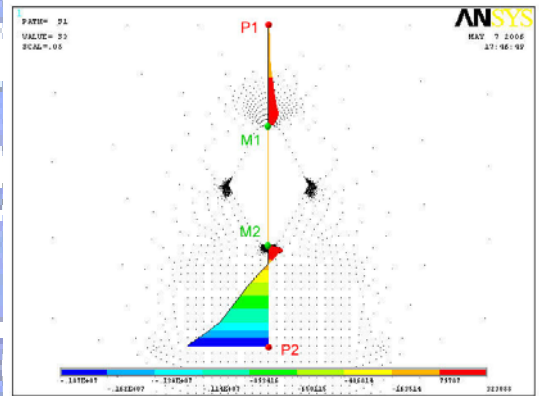


圖 3.37 P1-P2 主應力(3rd)分布圖

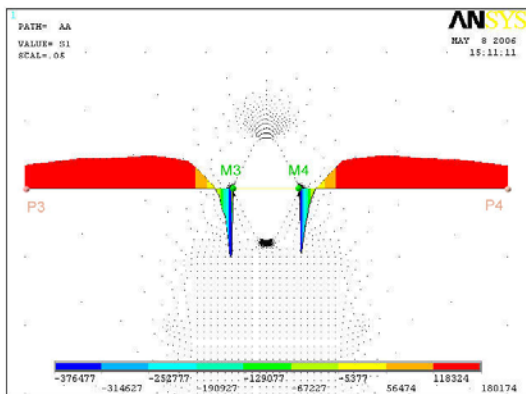


圖 3.38 P3-P4 主應力(1st)分布圖

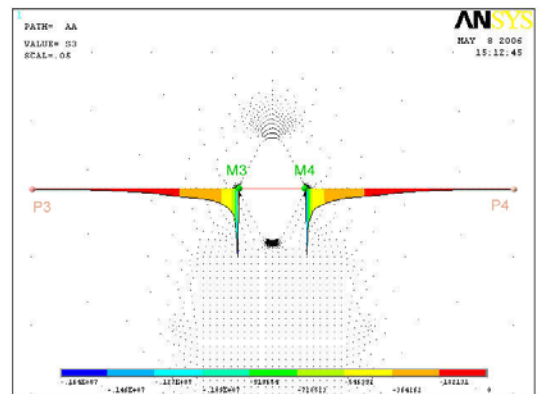


圖 3.39 P3-P4 主應力(3rd)分布圖

如圖 3.32、3.34 與圖 3.36、3.38 所示，分別為 $t=1$ 秒與 $t=60$ 秒時量測路徑 P1 到 P2、P3 到 P4 的主應力(1st)分布圖；而圖 3.33、3.35 與圖 3.37、3.39 分別為 $t=1$ 秒與 $t=60$ 秒時量測路徑 P1 到 P2、P3 到 P4 的主應力(3rd)分布圖。以下將探討在整個分析過程中，各量測點的應力應變圖與時間的關係。

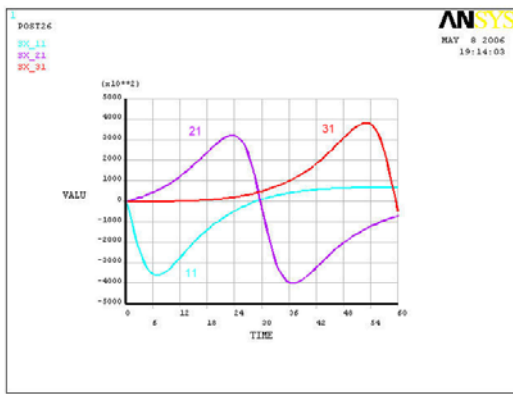


圖 3.40 位置 11_21_31 應力圖

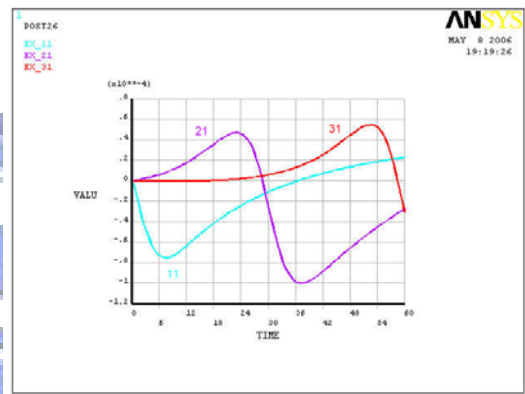


圖 3.41 位置 11_21_31 應變圖

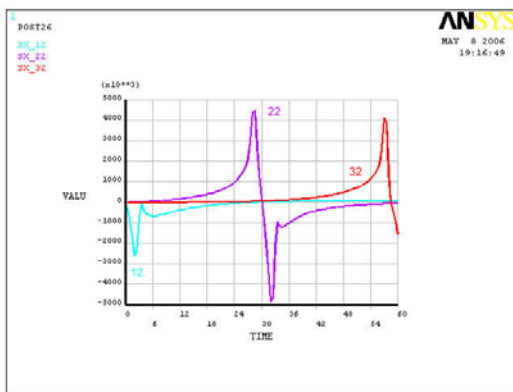


圖 3.42 位置 12_22_32 應力圖

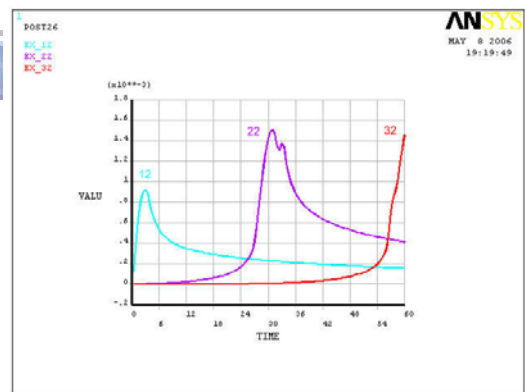


圖 3.43 位置 12_22_32 應變圖

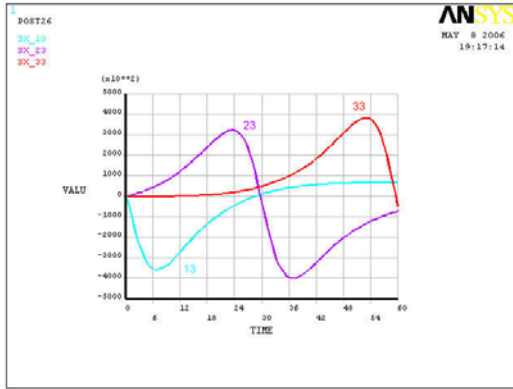


圖 3.44 位置 13_23_33 應力圖

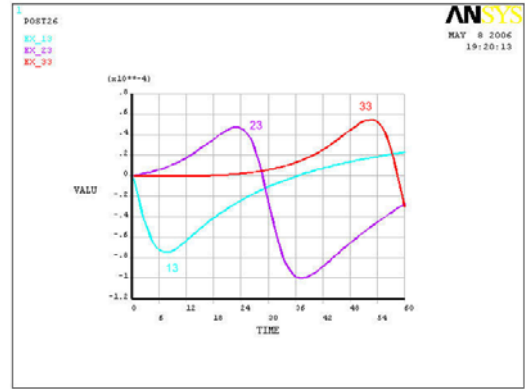


圖 3.45 位置 13_23_33 應變圖

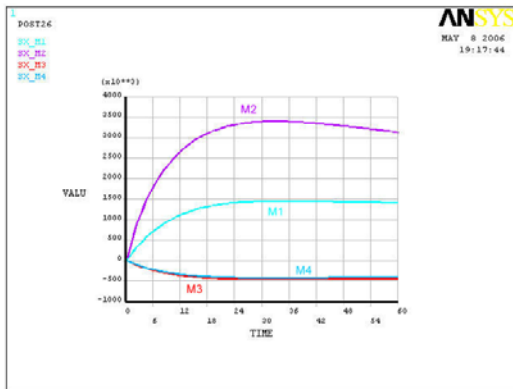


圖 3.46 M1_M2_M3_M4 應力圖

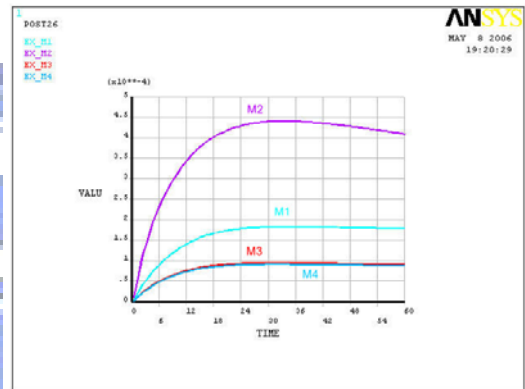


圖 3.47 M1_M2_M3_M4 應變圖

由以上的應力應變圖可得出以下的結論：

1. 比較位置 11_21_31 與 13_23_33：

由於位置 11_21_31 與 13_23_33 對於加工路徑為左右對稱，因此其應力應變曲線圖均相同，所以在此僅討論位置 11_21_31。如圖 3.40、3.41 所示，位置 11 在熱源一開始移動時就產生壓應力而造成壓應變，而後隨著熱源的遠離，應力值慢慢趨近於零，甚至最後會有些微張應變的產生。位置 21 在熱源經過前會先產生張應力，當熱源經過時就轉變成壓應力，而隨著

熱源的遠離應力值漸漸地恢復歸零。位置 31 其應力值的變化情形，類似位置 21。

2. 比較位置 12_22_32：

分析結果可從圖 3.42、3.43 可以更明顯看出熱源的移動所造成的影響，在熱源到達之前呈現張應力的狀態，當熱源移動至量測點的位置時則呈現壓應力，然而當熱源遠離量測點時，其所受的應力馬上又轉成張應力。

3. 比較位置 M1_M2_M3_M4：

由圖 3.46、3.47 可看出裂縫周圍量測點其應力應變與時間的分布曲線圖。當熱源一開始作用在分析模型時，沿著加工路徑的位置 M1 與 M2 呈現張應力的狀態，隨著熱源的遠離應力曲線逐漸趨近平緩，但仍然是張應力；而位置 M3 與 M4 在一開始熱源移動時，呈現壓應力的狀態，隨著熱源的遠離應力曲線會逐漸趨近平緩。此外由圖 3.32 至 3.39 可得知，當模型有裂縫時在裂縫的周圍會有集中應力的產生。

3.4 冷熱源的分析模擬

近年來有相當多的雷射切割技術，在雷射熱源負載的後方加入類似冷源的水柱冷卻，如 Hoekstra B.L.[25]、Choo D.H.[26] 等人的研究都在雷射熱源的負載處後方噴上冷卻水柱，目的在增加張應力達到較佳的切割效率。在本節將利用 ANSYS 有限元素分析軟體，在雷射熱源後方施加一冷源，並

變化冷熱源的參數，如冷熱源的功率、負載的間距，以了解在加工過程中最容易產生破裂的地方。

熱源的描述如(3.2)式所示；而冷源為一冷卻水，假設冷卻水的溫度為 T_f ，室溫為 T_r ，由牛頓冷卻方程式(Newton law of Cooling)可知

$$q = h \times (T_f - T_r) = h \times \Delta T \quad (3.3)$$

其中 h 為熱對流係數(空氣為 0.028W/K)。假設 T_r 為 23°C 、 T_f 為 3°C 則 ΔT 為 -20°C ， q 為 -0.56W 。由於冷源的負載面積裡總共包含了30個節點，因此在ANSYS模擬冷源之功率 Q_{total} 為 -16.8W 。

3.4.1 變化冷熱源功率且固定負載間距

本節將討論當在雷射熱源後方加入冷源時，變化冷源與熱源之功率，由於在此將冷熱源的功率分別分為100%、70%、40%、10%以及0%且將冷熱源的負載分為重疊、相接與分離的情況。為了有效的處理如此龐大的比較，在此假設冷熱源只負載一個時間點，亦即冷熱源不移動的情況，並討論對於加工過程中應力的影響。上述的情況皆為熱源的最大功率大於冷源的最大功率(絕對值)，在此亦將討論當冷源的最大功率(絕對值)大於熱源的最大功率。示意圖與參數如圖3.48與表3.2所示。

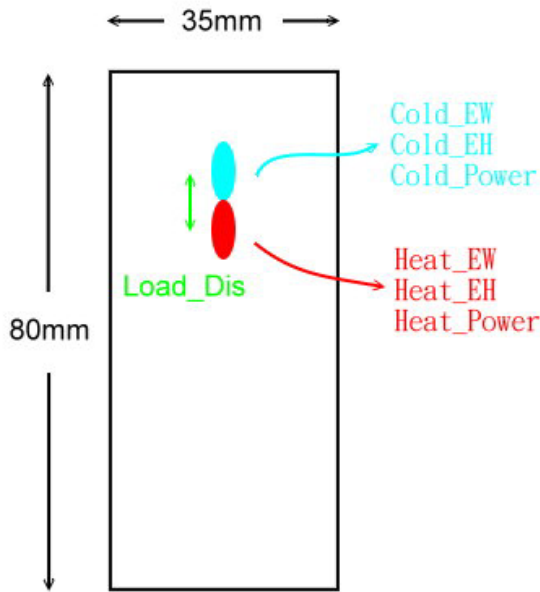


表 3.2 參數數值

參數名	數值
Cold_EW	0.3mm
Cold_EH	3mm
Heat_EW	0.3mm
Heat_EH	3mm

圖 3.48 冷熱源模擬示意圖

分析範例 1：熱源功率(21W)大於冷源功率(-16.8W)

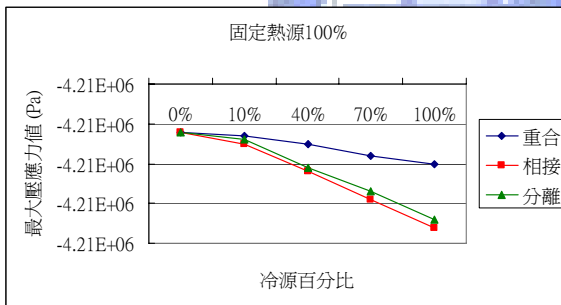


圖 3.49 冷源百分比與壓應力圖

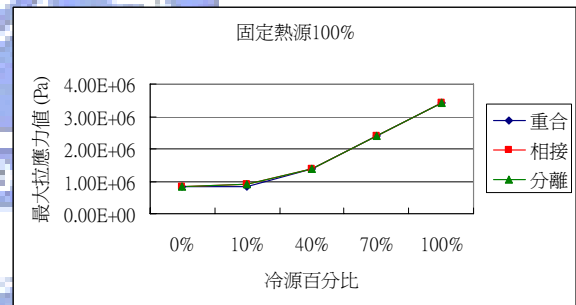


圖 3.50 冷源百分比與拉應力圖

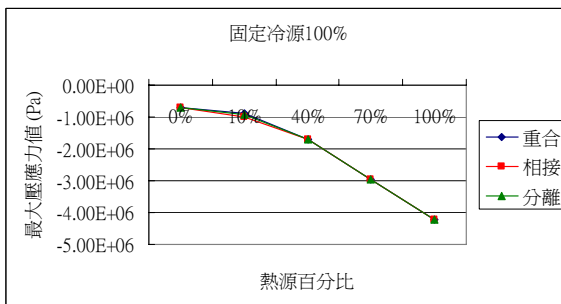


圖 3.51 熱源百分比與壓應力圖

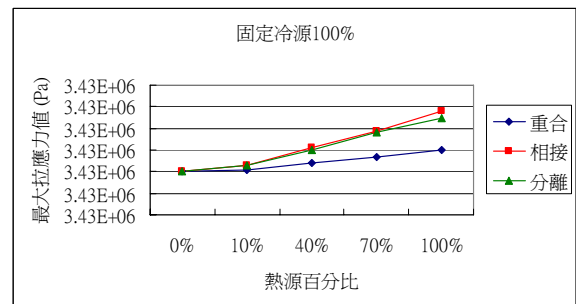


圖 3.52 熱源百分比與拉應力圖

分析範例 2：熱源功率(16.8W)小於冷源功率(-21W)

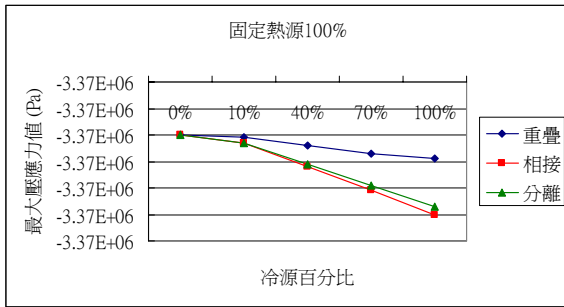


圖 3.53 冷源百分比與壓應力圖

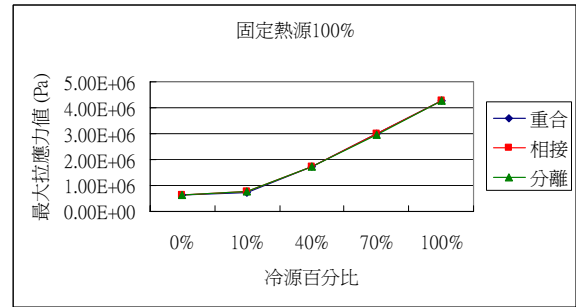


圖 3.54 冷源百分比與拉應力圖

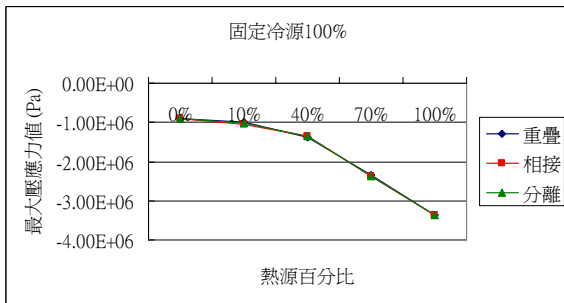


圖 3.55 熱源百分比與壓應力圖

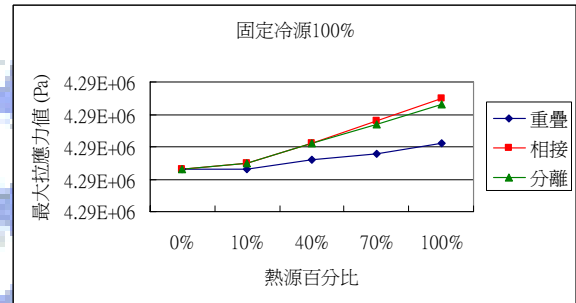


圖 3.56 熱源百分比與拉應力圖

由以上的分析結果可得到以下的結論：

1. 熱源功率固定時，其最大壓應力值，隨著冷源功率的遞減而呈現絕對值的遞減。由於在冷源負載的周圍成壓應力，其壓應力的絕對值隨著冷源之功率呈正相關，因此當冷源功率越大，則最大壓應力的絕對值也越大，如圖 3.49 與 3.53 所示。
2. 熱源功率固定時，其最大拉應力值，隨著冷源功率的遞減而降低。因為拉應力值與冷源相關，所以其變化會隨著冷源功率呈正相關的變化，斜率幾乎接近直線，如圖 3.50 與 3.54 所示。

3. 冷源功率固定時，其最大壓應力值，隨著熱源功率的遞減而呈現絕對值的降低。因為壓應力值與熱源相關，所以其變化會隨著熱源功率呈正相關的變化，斜率幾乎接近直線，如圖 3.51 與 3.55 所示。
4. 當冷源功率固定時，其最大拉應力值，會隨著熱源功率的遞減而遞減。由於在熱源負載的周圍成拉應力，其拉應力的值會隨著熱源之功率呈正相關，因此當熱源功率越大，則最大拉應力值也越大，如圖 3.52 與 3.56 所示。
5. 固定冷源與熱源的功率時，最大壓應力會隨著負載間距而變化，當兩負載重合時，熱源所造成的壓應力會因為與冷源相互抵消而降低壓應力值(絕對值)；當兩負載分離時，冷熱源不相互影響使得最大壓應力值沒有加乘的效果；如圖 3.49、3.51、3.53 與 3.55 所示，當冷熱源相接時有最大壓應力值(絕對值)。



$$|\sigma_{c\text{相接}}| > |\sigma_{c\text{分離}}| > |\sigma_{c\text{重合}}|$$

6. 固定冷源與熱源的功率時，最大拉應力會隨著負載間距而變化，當兩負載重合時，冷源所造成的拉應力會因為與熱源相互抵消而降低拉應力值；當兩負載分離時，冷熱源不相互影響使得最大拉應力值沒有加乘的效果；如圖 3.50、3.52、3.54 與 3.56 所示，當冷熱源相接時其最大拉應力值最大。

$$\sigma_{\text{相接}} > \sigma_{\text{分離}} > \sigma_{\text{重合}}$$

3.4.2 變化負載間距且固定冷熱源功率

本節將討論當固定冷源與熱源的功率，變化冷源與熱源負載中心的距離時，對於加工過程中應力的影響。在此亦討論當冷源功率(絕對值)大於熱源功率的情況。示意圖與參數如圖 3.48 與表 3.2 所示。

分析範例 1：熱源功率(21W)大於冷源功率(-16.8W)

表 3.3 熱源大於冷源-應力與負載間距之關係

Item Dis	最大拉應力值	最大壓應力
0mm	3.42762e6	-7.1091e5
1mm	3.4283e6	-3.4106e6
2mm	3.429e6	-3.9908e6
3mm	3.430e6	-4.1720e6
4mm	3.43115e6	-4.1734e6
5mm	3.4318e6	-4.2136e6
6mm	3.4318e6	-4.2136e6
7mm	3.4317e6	-4.1735e6
8mm	3.4316e6	-4.1435e6
9mm	3.4315e6	-4.1434e6
10mm	3.4314e6	-4.1333e6

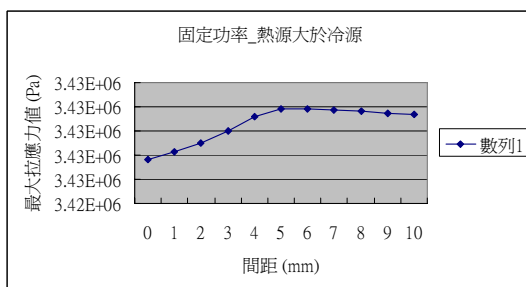


圖 3.57 間距與拉應力關係圖

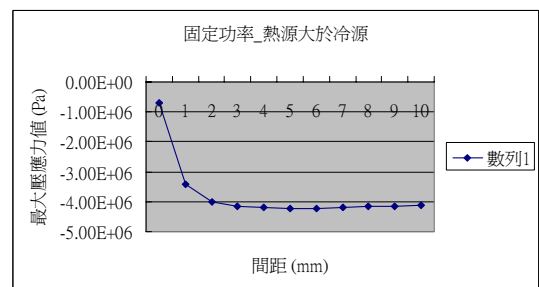


圖 3.58 間距與壓應力關係圖

分析範例 2：熱源功率(16.8W)大於冷源功率(-21W)

表 3.4 冷源大於熱源-應力與負載間距之關係

Item Dis	最大拉應力值	最大壓應力
0mm	4.28515e6	-8.8858e5
1mm	4.2857e6	-2.6747e6
2mm	4.2862e6	-3.1554e6
3mm	4.2871e6	-3.3099e6
4mm	4.28815e6	-3.3718e6
5mm	4.2885e6	-3.4319e6
6mm	4.28858e6	-3.462e6
7mm	4.28846e6	-3.4319e6
8mm	4.2884e6	-3.3818e6
9mm	4.2883e6	-3.3717e6
10mm	4.28834e6	-3.3716e6

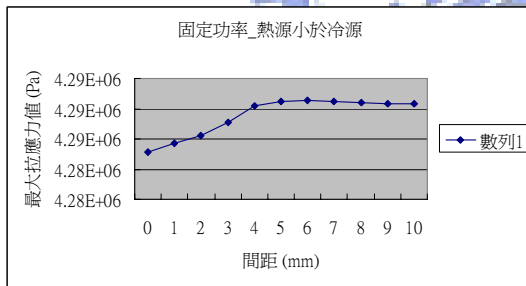


圖 3.59 間距與拉應力關係圖

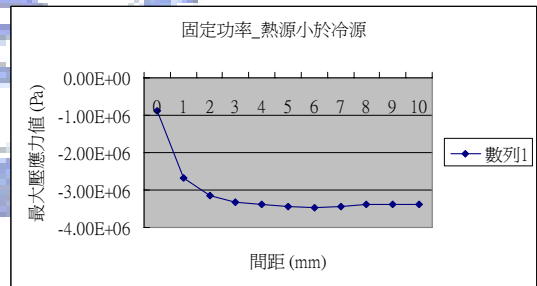


圖 3.60 間距與壓應力關係圖

由以上的分析結果可得出以下的結論：

1. 當負載間距為 0mm(兩負載重合)時，由於冷熱源互相抵消其作用，使得拉應力值與壓應力的絕對值為最小。
2. 當負載間距介於兩負載完全重合(0mm)與兩負載完全脫離(6mm)的情

況，隨著間距的增加，負載重合的面積越小，使得拉應力值與壓應力的絕對值均隨之漸增。

3. 當負載間距大於兩負載完全脫離(6mm)時，隨著間距的遞增，兩負載間相互作用的影響越小，使得拉應力值與壓應力值趨近穩定的漸近線。



第四章 微應力量測系統

本章節主要介紹在進行微應力量測實驗之前，先探討雷射加工參數，如加工功率與速度與切割壓克力品質的關係，即加工品質實驗。以下分節介紹實驗所需的儀器，包括影像擷取及分析裝置、顯微觀測裝置，和實驗的架構、流程、規劃與結果。

4.1 實驗設備

本節先介紹加工品質實驗與微應力量測實驗所使用的設備儀器，包含單筒直立式顯微鏡、CCD 影像擷取器(DVT)，以下分別說明。

4.1.1 單筒直立式顯微鏡



圖 4.1 單筒直立式顯微鏡

如圖 4.1 所示，為本實驗所使用的顯微鏡，規格如表 4.1 所示：

表 4.1 單筒直立式顯微鏡之規格

型號	WP1745BN
鏡筒	單管直筒式，360°旋轉
調焦	鏡筒上下移動焦點調節，具大型單調節輪
CCD 連接管	0.5X
物鏡	調焦旋轉物鏡 0.7X~4.5X
載物台	長方形 380mm x 260mm 大型底座
光源	環形光源

4.1.2 CCD 影像擷取器

如圖 4.2 所示，為本實驗所使用的 CCD 影像擷取器 (DVT Smart Image Sensor Series 600，以下簡稱 DVT)。DVT 感測器的硬體架構為獨立型設計功能整合齊備，安裝及配線相當容易，無需影像擷取卡，其軟體功能強大操作簡單。



圖 4.2 DVT Smart Image Sensor Series 600

藉由乙太網路(Ethernet)通訊，在 DVT Frame Work 平台上可藉由 TCP/IP

通訊協定輕易連接多台裝置或其他設備，透過區域網路(LAN)或網際網路，達成遠距監控的功能。DVT 感測器發展系統更提供相關的程式撰寫元件，程式設計師可藉由其提供之開發工具(DVT Active)，開發相關之整合性影像量測系統。

4.2 加工品質實驗

加工品質實驗主要在探討雷射加工參數，如加工功率與速度與切割壓克力品質的關係。本節將介紹加工試片的設計、加工品質實驗的架構、步驟流程與實驗結果。

4.2.1 試片的設計

加工品質實驗是利用雷射切割機 (ILS-II-30W) 其雷射源為 CO₂ 雷射，而最大的加工功率為 30W、最大加工速率為 1000 mm/sec，其加工平台為一個可調式的升降平台；首先利用雷射切割機作出實驗用所需的試片，試片的材質為厚度大約為 2mm、大小約為 40mm×40mm 的正方形壓克力試片，如圖 4.3 所示。在試片上利用雷射切割機刻劃出兩條 25mm 的直線，切割時需調整的雷射加工功率與切割速率二參數，由於功率與速率的不同在試片上會雕刻或切穿出直線，接著利用顯微鏡配合 CCD 影像擷取器觀察試片上的形狀，觀察切割線是否有較佳的筆直度，調校出能加工出品質最佳的功

率以及速度，這樣一來便能使 CCD 智能感測器容易達到物體形追蹤的效果。

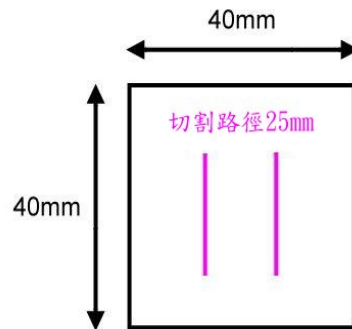


圖 4.3 加工品質實驗之試片示意圖

4.2.2 加工品質實驗架構與流程

本實驗架構為將欲觀察之試片，利用雷射切割機調整其加工功率與加工速率並對壓克力試片做加工。將加工完成的試片放置於顯微鏡配合 CCD 影像擷取器之下觀察，如圖 4.4 所示，連結到電腦並且利用 DVT Framework 軟體擷取影像以進行分析，實驗的流程如圖 4.5。



圖 4.4 加工品質實驗的架構圖

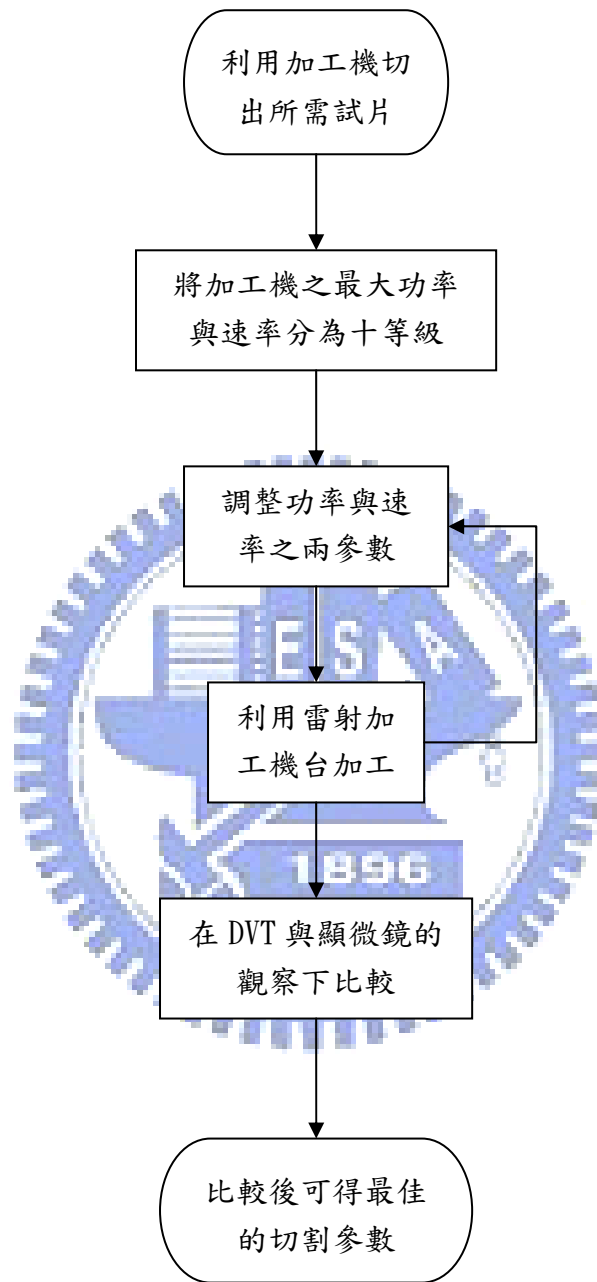
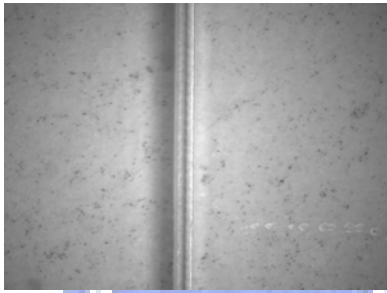
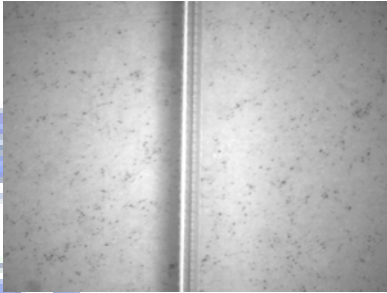
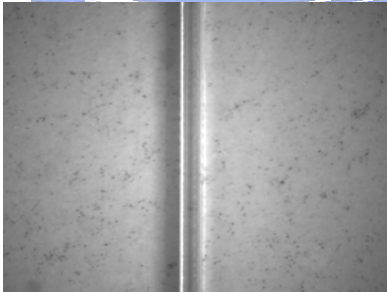
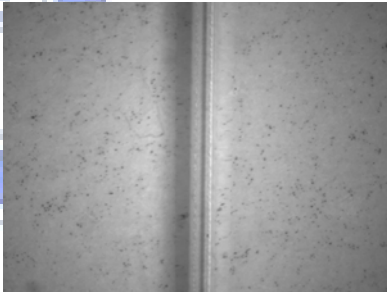
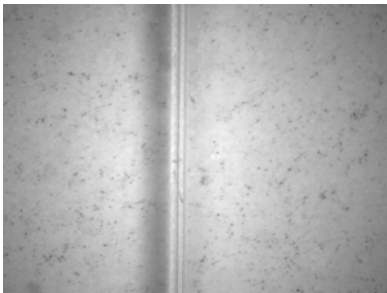
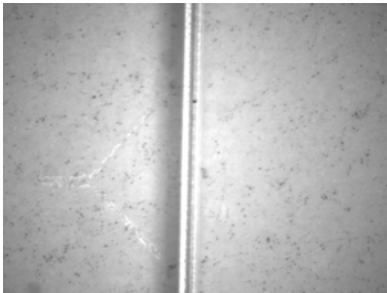


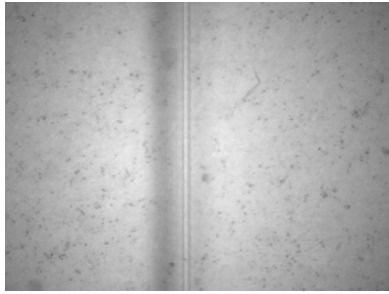
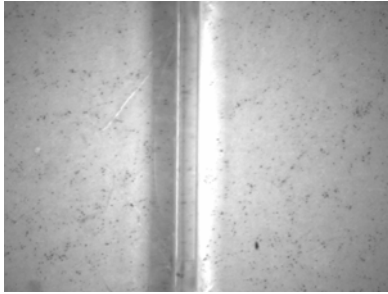
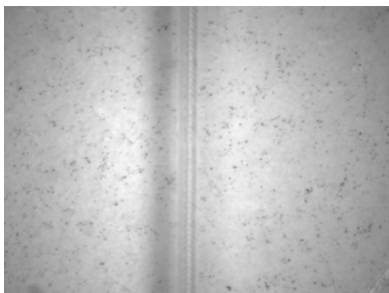
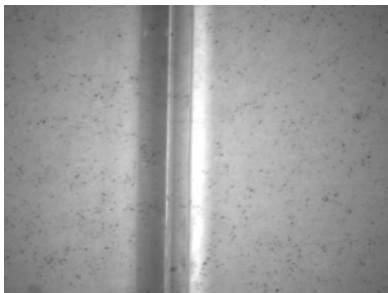
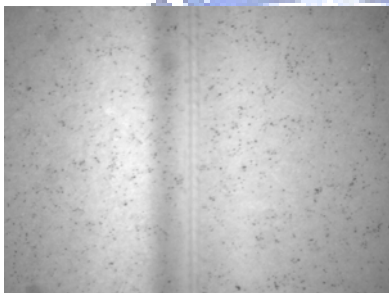
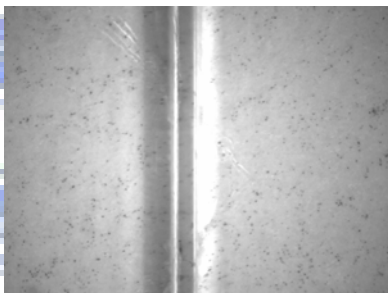
圖 4.5 加工品質實驗之流程圖

4.2.3 加工品質實驗結果

由於雷射功率與速率均分為十等級，如此一來則會產生一百種不同的加工參數，為了降低資料分析的時間，在此將所擷取的影像圖片總共分為六種等級，為 A(優)到 F(劣)，如表 4.2 所示

表 4.2 加工品質分級表

A (優)		
B		
C		

<p>D</p>		
<p>E</p>		
<p>F (劣)</p>		

將由雷射加工機加工後的試片，經由量測系統觀察後發現雷射源加工的焦距、加工功率與加工速率對試片的品質有很大的影響。故須先固定加工的雷射焦距再加以探討其加工功率與加工速率產生的影響，由表4.3可以看出較高的功率，需使用較快的加工速率；而較低的加工功率，需要使用較低的加工速度，必須在加工速率以及加工功率之間做好的分配，以達到參考點的較佳品質。

表 4.3 雷射加工品質分級檢驗表

$V(\%)$ $P(\%)$	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
100%	E	E	F	F	F	F	F	F	F	F
90%	C	D	D	E	E	E	E	E	E	E
80%	B	B	B	C	C	C	D	D	D	D
70%	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C
60%	B	A	A	A	B	B	B	B	C	C
50%	C	C	B	B	B	B	A	A	A	B
40%	C	C	C	B	B	B	B	A	A	A
30%	D	D	D	D	C	C	C	B	B	B
20%	E	E	E	E	E	E	E	D	D	C
10%	F	F	F	F	F	F	F	F	E	E

由於在加工品質的實驗過程中，調整雷射的功率與速率對試片加工。如上表所示，當雷射之功率太小速率太快時，則會無法切穿壓克力試片而造成在顯微鏡的觀測下較不明顯；若是雷射之功率太大速率太慢時，雖然會將壓克力試片切穿，但是在顯微鏡的觀察下其切割線的邊界其筆直度會變的很差。經由觀察後可得，當雷射之功率較大而切割速率較快或是雷射之功率較小切割速率較慢時，在顯微鏡的觀測下均會有較佳的筆直度，而功率大速率低的加工組合在觀察下不僅較明顯而且也可以節省時間，所以本研究選擇功率為 70% 與速率為 100% 的組合做為線上量測與 ANSYS 模擬之參數。

4.3 雷射單點加工型微應力量測實驗

4.3.1 試片的設計

本實驗試片為 80mm*35mm*2mm 的壓克力板，在試片板中央利用雷射加工機事先切割出量測刻痕，再利用 DVT 接上單筒直立式顯微鏡的觀察下可以得到量測刻痕相互之間的距離。此時利用雷射加工機加工試片，由於材料受熱會產生膨脹，再利用 DVT 觀測加工前後刻痕相對位置的變化。試片設計如下：

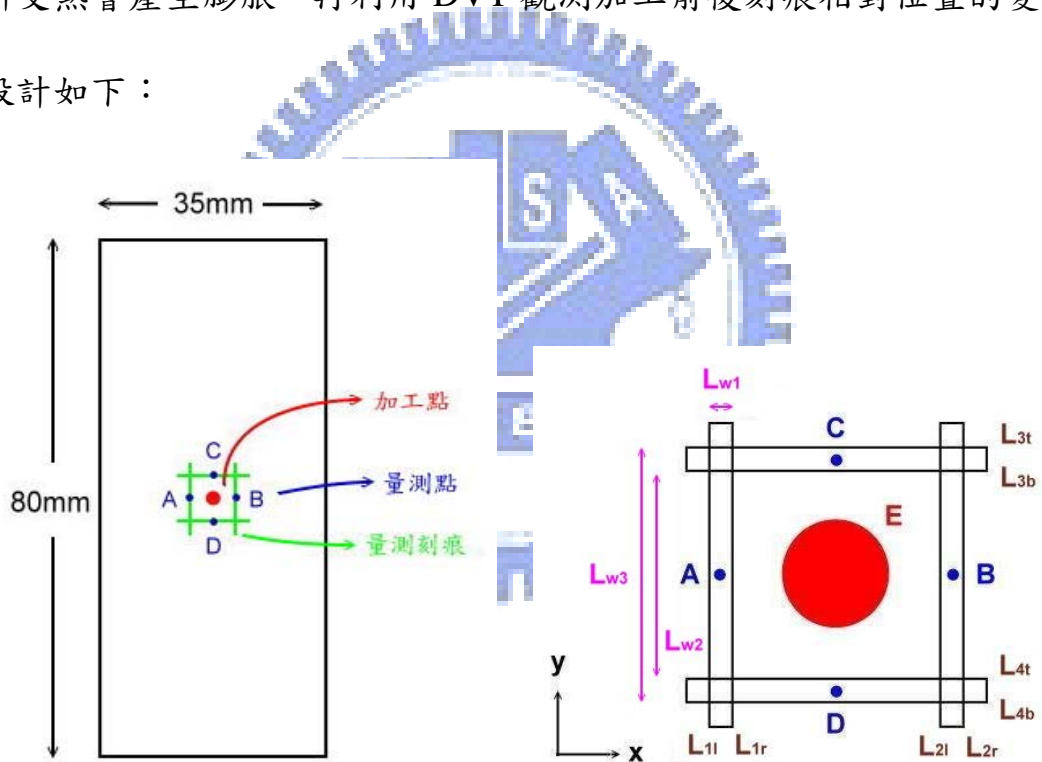


圖 4.6 單點量測實驗之試片設計圖

利用以下的關係式即可推算出試片經由雷射加工後，在加工點周圍的應變值，進而利用前章所述之公式則可求出應力值。

$$\frac{L_{1r} - L_{1l}}{L_{w1}} = \varepsilon_{xxA} \quad (4.1)$$

$$\frac{L_{2r} - L_{2l}}{L_{w1}} = \varepsilon_{xxB} \quad (4.2)$$

$$\frac{L_{3t} - L_{3b}}{L_{w1}} = \varepsilon_{yyC} \quad (4.3)$$

$$\frac{L_{4t} - L_{4b}}{L_{w1}} = \varepsilon_{yyD} \quad (4.4)$$

$$\frac{L_{2l} - L_{1r}}{L_{w2}} = \varepsilon_{xxE_{in}} \quad (4.5)$$

$$\frac{L_{2r} - L_{1l}}{L_{w3}} = \varepsilon_{xxE_{out}} \quad (4.6)$$

$$\frac{L_{3b} - L_{4t}}{L_{w2}} = \varepsilon_{yyE_{in}} \quad (4.7)$$

$$\frac{L_{3t} - L_{4b}}{L_{w3}} = \varepsilon_{yyE_{out}} \quad (4.8)$$

4.3.2 雷射單點加工的應力量測實驗規劃與結果

本節的重點在於對單點量測實驗的規劃與結果，分茲以下做說明。對於本實驗的規劃做了以下兩種範例：

實驗一：像素與實際單位的轉換

因為本研究量測系統是利用 Frame Work 軟體做分析，而在 Frame Work 是以 Pixel 表示距離的單位，所以在實驗一裡將研究 Pixel 與實際長度之間的關係。首先利用雷射切割機切出兩條距離為 1mm 的細線當做定位線，再由影像分析軟體 Frame Work 觀測兩條定位線

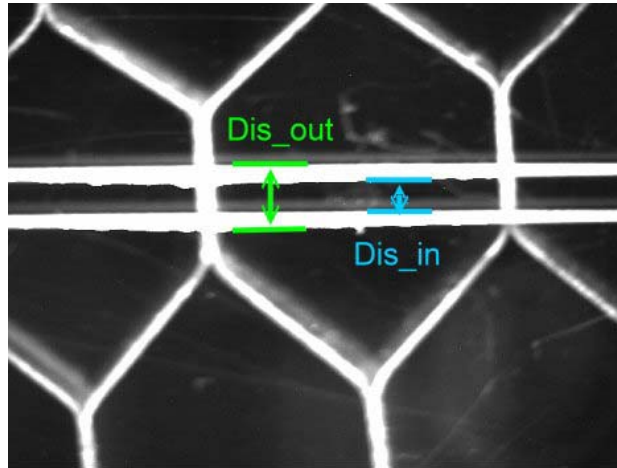


圖 4.7 在 Frame Work 下觀測兩條定位線的關係

如圖 4.7 所示為加工前在 Frame Work 觀測到兩條定位線的關係，定義 Dis_out 為兩外緣線的間距， Dis_in 為兩內緣線的間距，由於切割的距離為 $1mm$ ，所以可以得到 $1mm$ 相當於 $\frac{1}{2}(Dis_out + Dis_in)$ ，平均距離量得 $48.93Pixel$ 的數據，因此獲知影像解析比例值為 $1mm$ 相當於 $48.93Pixel$ ，亦即

$$1Pixel = 2.0438 \times 10^{-2} mm = 20.438 \mu m \quad (4.9)$$

由以上的轉換關係式可以知道 $Pixel$ 與實際單位之間的關係。由於外在環境的變化，例如光源的亮暗、機台的震動等等會影響定位線在 Frame Work 觀測下 $Pixel$ 值的變化，因此在往後每次的實驗裡，都必須經過此步驟的處理，以保證量測的應變量較為精準。

實驗二：單點量測實驗

實驗二在於對如圖 4.6 所式的試片進行加工量測，相同的在每次量測過程中均先經過像素與實際單位的轉換，確保所量測的應變量較為精準。

實驗結果(第一組)： $\frac{1}{2}(L_{w2} + L_{w3}) = 4mm$

A 點：

表 4.4 量測點為 A 點

<p>加工前平均距離：28.8675 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：26.6587 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 ε_{xxA}：-0.076515112</p>	<p>應力值 σ_{xxA}：-53365464937 pa</p>

B 點：

表 4.5 量測點為 B 點

<p>加工前平均距離：28.4257 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：26.553 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 ε_{xxB}：-0.065880524</p>	<p>應力值 σ_{xxB}：-459483711.9 pa</p>

C 點：

表 4.6 量測點為 C 點

<p>加工前平均距離：29.468 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：27.1701 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyC}：-0.077979503</p>	<p>應力值 σ_{yyC}：-543868045 pa</p>

D 點：

表 4.7 量測點為 D 點

<p>加工前平均距離：28.6374 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：26.4542 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyD}：-0.076235971</p>	<p>應力值 σ_{yyD}：-531707780.7 pa</p>

E 點(x 方向 inner) :

表 4.8 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：186.5347 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：188.5863 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 $\varepsilon_{xxE_{in}}$: 0.01099849</p>	<p>應力值 $\sigma_{xxE_{in}}$: 76708967.28 pa</p>

E 點(x 方向 outer) :

表 4.9 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：245.304 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：246.525 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 $\varepsilon_{xxE_{out}}$: 0.004977497</p>	<p>應力值 $\sigma_{xxE_{out}}$: 34715554.98 pa</p>

E 點(y 方向 inner) :

表 4.10 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：186.7365 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：190.4982 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyE_m} : 0.009434149</p>	<p>應力值 σ_{yyE_m} : 65798473.51 pa</p>

E 點(y 方向 outer) :

表 4.11 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：245.502 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：246.657 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0184842 mm = 18.4842 μm</p>	
<p>應變值 $\varepsilon_{yyE_{out}}$: 0.004704646</p>	<p>應力值 $\sigma_{yyE_{out}}$: 32812553.46 pa</p>

實驗結果(第二組)： $\frac{1}{2}(L_{w2} + L_{w3}) = 2mm$

A 點：

表 4.12 量測點為 A 點

<p>加工前平均距離：$23.537 Pixel$</p>	<p>加工後平均距離：$20.422 Pixel$</p>
<p>$1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 \mu m$</p>	
<p>應變值 ε_{xxA}：-0.132344819</p>	<p>應力值 σ_{xxA}：$-923038938.7 pa$</p>

B 點：

表 4.13 量測點為 B 點

<p>加工前平均距離：$23.749 Pixel$</p>	<p>加工後平均距離：$20.589 Pixel$</p>
<p>$1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 \mu m$</p>	
<p>應變值 ε_{xxB}：-0.133058234</p>	<p>應力值 σ_{xxB}：$-928014653.3 pa$</p>

C 點：

表 4.14 量測點為 C 點

<p>加工前平均距離：23.716 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：20.786 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyC}：-0.123545286</p>	<p>應力值 σ_{yyC}：-861666596.4 pa</p>

D 點：

表 4.15 量測點為 D 點

<p>加工前平均距離：23.616 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：20.484 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyD}：-0.132621951</p>	<p>應力值 σ_{yyD}：-924971798.8 pa</p>

E 點(x 方向 inner) :

表 4.16 量測點為 E 點

<p>加工前</p>	<p>加工後</p>
<p>加工前平均距離：87.629 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：91.052 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 ε_{xxE_m} : 0.039062411</p>	<p>應力值 σ_{xxE_m} : 272440784.4 pa</p>

E 點(x 方向 outer) :

表 4.17 量測點為 E 點

<p>加工前</p>	<p>加工後</p>
<p>加工前平均距離：132.372 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：134.176 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 $\varepsilon_{xxE_{out}}$: 0.01362826</p>	<p>應力值 $\sigma_{xxE_{out}}$: 95050297.61 pa</p>

E 點(y 方向 inner) :

表 4.18 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：87.901 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：91.368 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 ε_{yyE_m} : 0.0394421</p>	<p>應力值 σ_{yyE_m} : 275088923.9 pa</p>

E 點(y 方向 outer) :

表 4.19 量測點為 E 點

<p>加工前平均距離：132.997 Pixel</p>	<p>加工後平均距離：134.854 Pixel</p>
<p>1 Pixel = 0.0180235 mm = 18.0235 μm</p>	
<p>應變值 $\varepsilon_{yyE_{out}}$: 0.013962721</p>	<p>應力值 $\sigma_{yyE_{out}}$: 97382997.35 pa</p>

實驗結果比較：

表 4.20 實驗結果的比較

量測點	第一組 $\frac{1}{2}(L_{w2} + L_{w3}) = 4mm$	第二組 $\frac{1}{2}(L_{w2} + L_{w3}) = 2mm$
ε_{xxA}	-0.076515112	-0.132344819
ε_{xxB}	-0.065880524	-0.133058234
ε_{yyC}	-0.077979503	-0.123545286
ε_{yyD}	-0.076235971	-0.132621951
$\varepsilon_{xxE_{in}}$	0.01099849	0.039062411
$\varepsilon_{xxE_{out}}$	0.004977497	0.01362826
$\varepsilon_{yyE_{in}}$	0.009434149	0.0394421
$\varepsilon_{yyE_{out}}$	0.004704646	0.013962721

從上述的實驗結果可歸納出以下的結論：

1. 藉由如實驗二的試片設計，可量測出在加工點周圍的應變值 ε_{xx} 與 ε_{yy} ，進而推算出應力值 σ_{xx} 、 σ_{yy} 。
2. 在加工前先利用雷射在加工點周圍切割出四條細線，由於切割出的細線在為應力量測系統的觀測下，有兩條邊緣線如圖 4.6 所示。當加工點在 A 與 B 之間，邊緣線則會因受熱而往外膨脹，由於靠近加工點的邊緣線熱受影響較大，因此膨脹量也較大，藉由加工前後的變化可算出其應力應變值，如表 4.4 至表 4.19 所示。

3. 如圖 4.6 所示，藉由 $L1r$ 與 $L2l$ 加工前後的變化可推算出 $\varepsilon_{xxE_{in}}$ ，如表 4.8 所示；由 $L1l$ 與 $L2r$ 加工前後的變化可推算出 $\varepsilon_{xxE_{out}}$ ，如表 4.9 所示；而由 $L3b$ 與 $L4t$ 加工前後的變化可推算出 $\varepsilon_{yyE_{in}}$ ，如表 4.10 所示；由 $L3t$ 與 $L4b$ 加工前後的變化可推算出 $\varepsilon_{yyE_{out}}$ ，如表 4.11 所示。此外由於 $\varepsilon_{xxE_{in}}$ 與 $\varepsilon_{yyE_{in}}$ 較靠近加工點，受熱膨脹變化較明顯，因此其應變量均較 $\varepsilon_{xxE_{out}}$ 與 $\varepsilon_{yyE_{out}}$ 大。
4. 兩組實驗的差別在於切割線相互之間的距離，亦即 $\frac{1}{2}(L_{w2} + L_{w3})$ 的距離。第一組為 4mm；第二組為 2mm，由表 4.20 實驗結果比較可知，當間距越小時，加工點周圍的 A、B、C 與 D 量測點其應變值亦越大(絕對值)，而 $\varepsilon_{xxE_{in}}$ 、 $\varepsilon_{xxE_{out}}$ 、 $\varepsilon_{yyE_{in}}$ 與 $\varepsilon_{yyE_{out}}$ 亦相同結果。因此可知如果切割線相互的間距越小，則越能更精確的量測出加工點周圍的應力應變值。



4.4 雷射直線切割型微應力量測實驗

4.4.1 試片的設計

本實驗試片為 $80\text{mm} \times 35\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的壓克力板，在試片板中央附近利用雷射加工機事先切割出量測刻痕，再利用 DVT 接上單筒直立式顯微鏡的觀察下可以得到加工過程中量測刻痕相互之間的距離變化，在藉由(4.1)式到(4.8)式則可推算出各量測點的應變值。

雷射從時間 $t = 0 \text{ sec}$ 開始對試片，進行加工，加工過程中雷射皆以 1mm/sec 的速度等速移動，在 $t = 40 \text{ sec}$ 雷射停止加工並返回原位。試片設計與加工路徑如圖 4.8 所示。

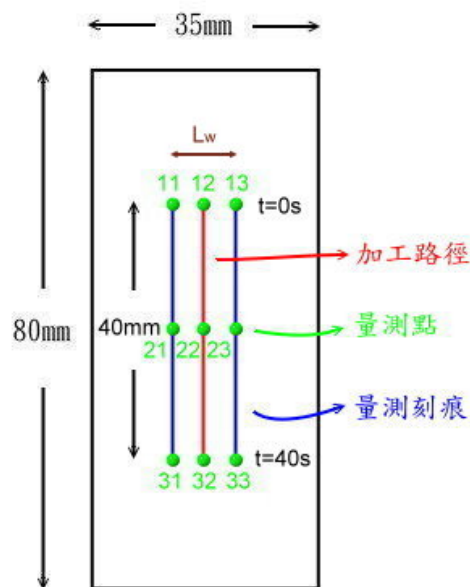


圖 4.8 微應力量測實驗之試片設計圖

4.4.2 微應力量測實驗的架構

本微應力量測實驗利用 DVT 影像擷取器、單筒直立式顯微鏡、量測載台與反射鏡搭配雷射加工機，進行在雷射加工過程中應力應變值的量測。其實驗的架構如圖 4.9 至圖 4.13 所示。

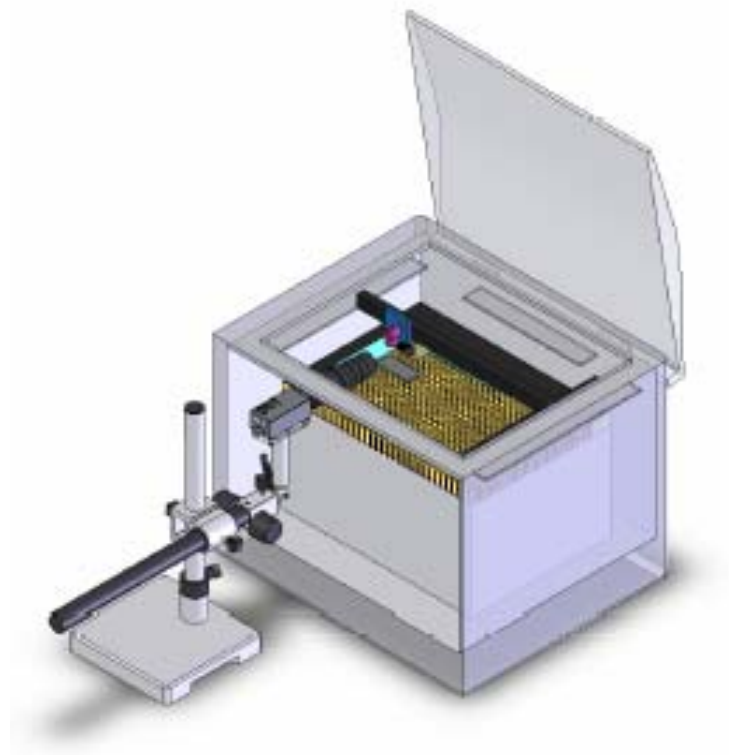


圖 4.9 微應力量測實驗結構等角視圖

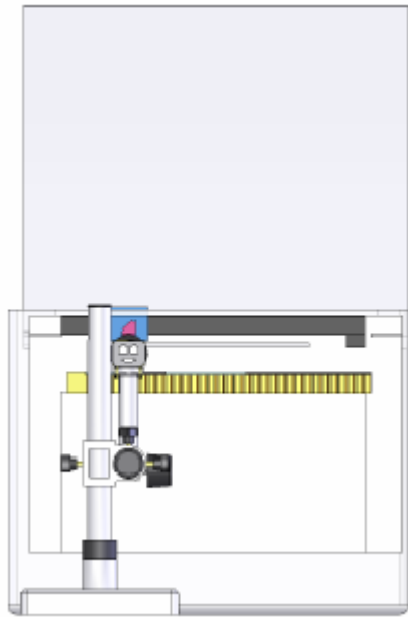


圖 4.10 微應力量測實驗前視圖

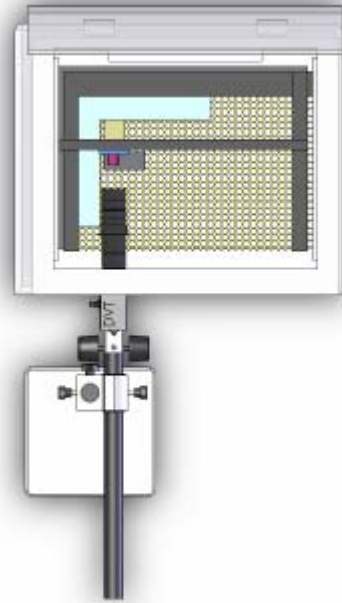


圖 4.11 微應力量測實驗上視圖

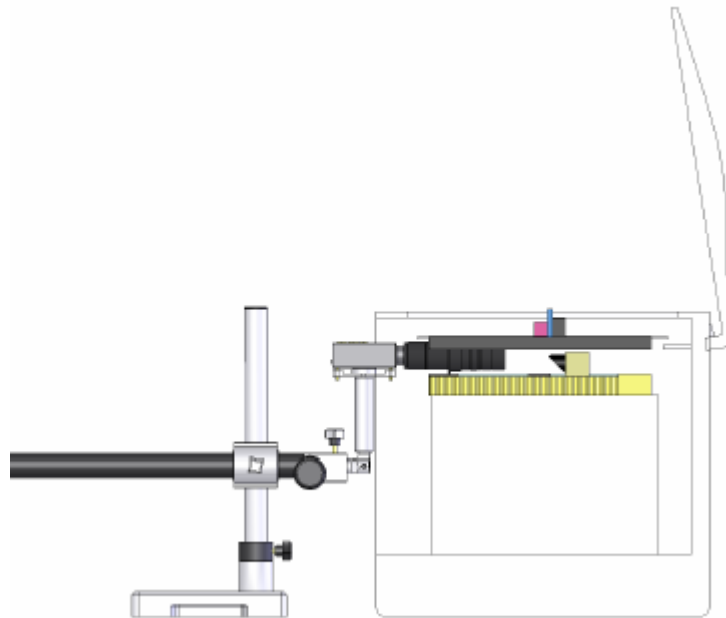


圖 4.12 微應力量測實驗右側視圖

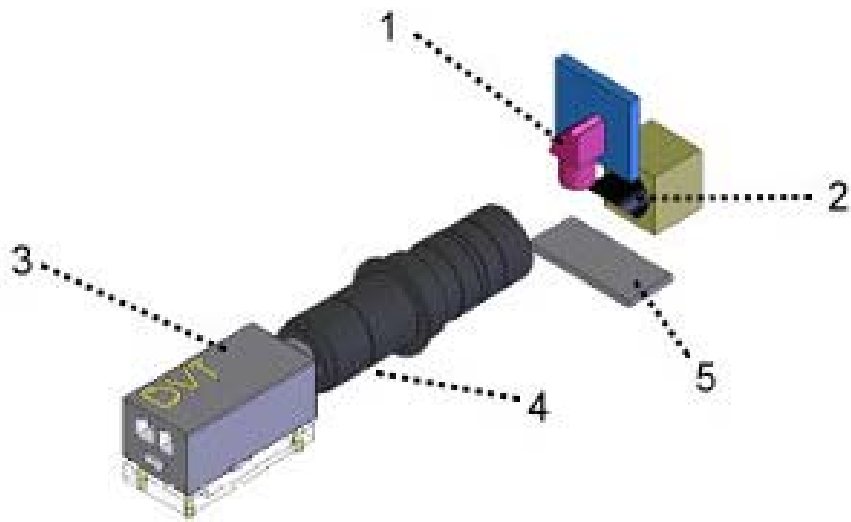


圖 4.13 微應力量測實驗之局部組件圖

表 4.21 微應力量測實驗之局部組件表

組件代號	組件名稱
1	加工雷射頭
2	反射鏡
3	DVT 影像擷取器
4	單筒直立式顯微鏡
5	待測試片

4.4.3 線上量測實驗規劃與結果

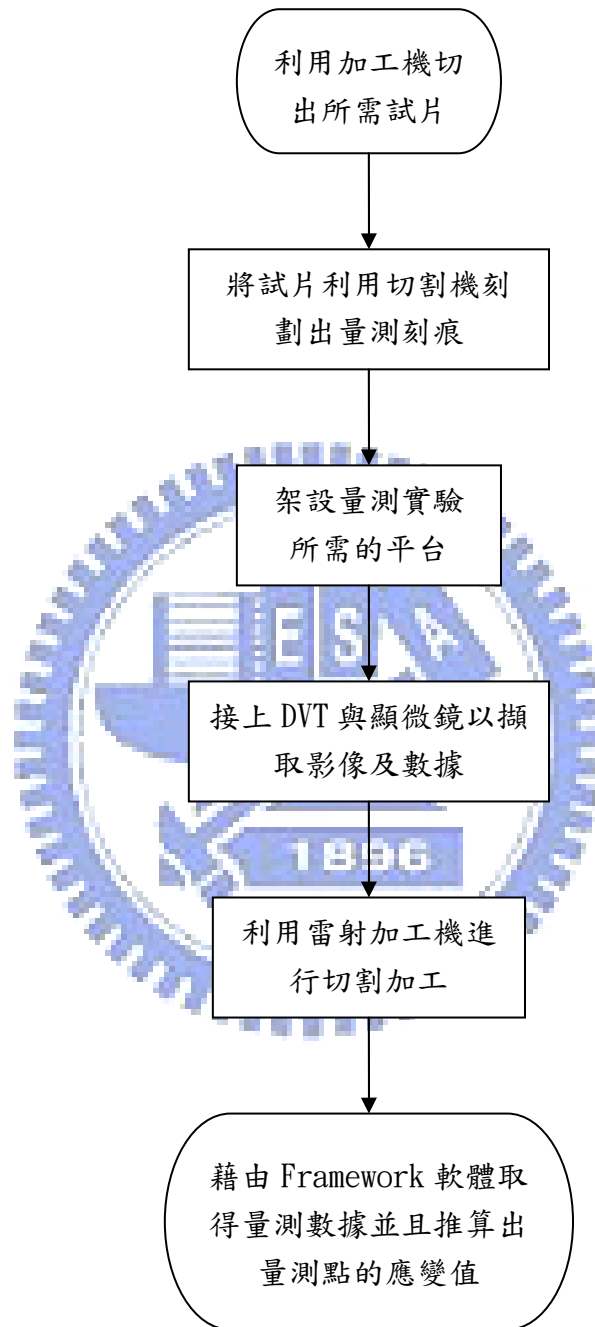


圖 4.14 微應力量測實驗之流程圖

4.4.4 實驗數據的結果

藉由上述的試片設計、微應力量測實驗的架構、規劃與流程，即可量測出在加工過程中位置 11、12、13、21、22、23、31、32 與 33 各量測點的應力應變值，功率=21W、速率=1mm/sec、 $L_w = 1mm$ ，其數據結果將在本節討論。

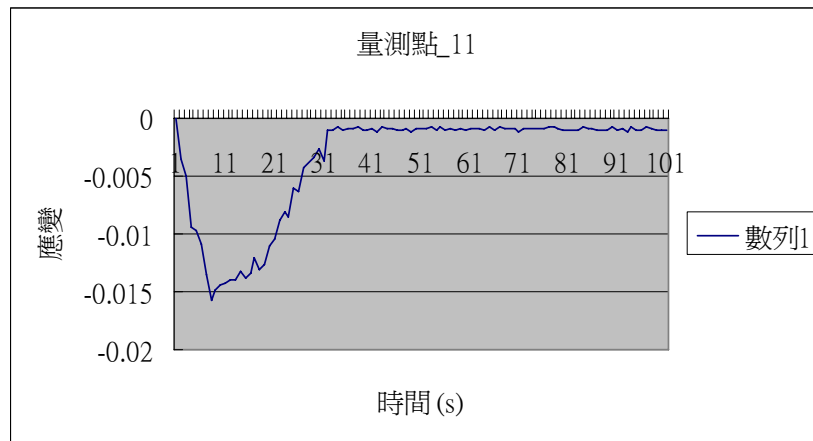


圖 4.15 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 11

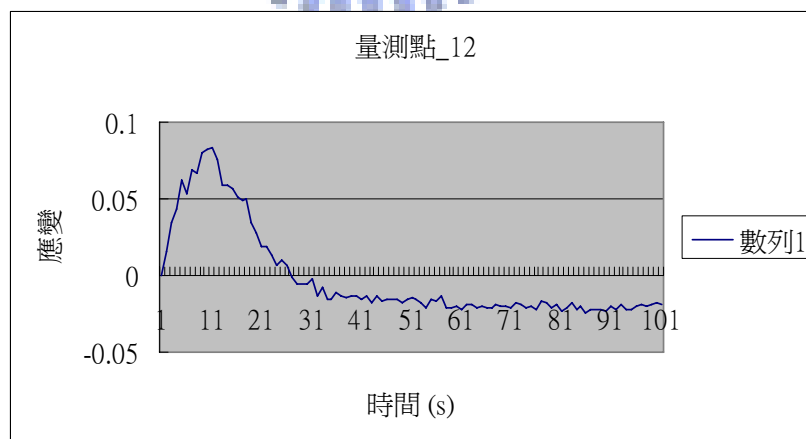


圖 4.16 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 12

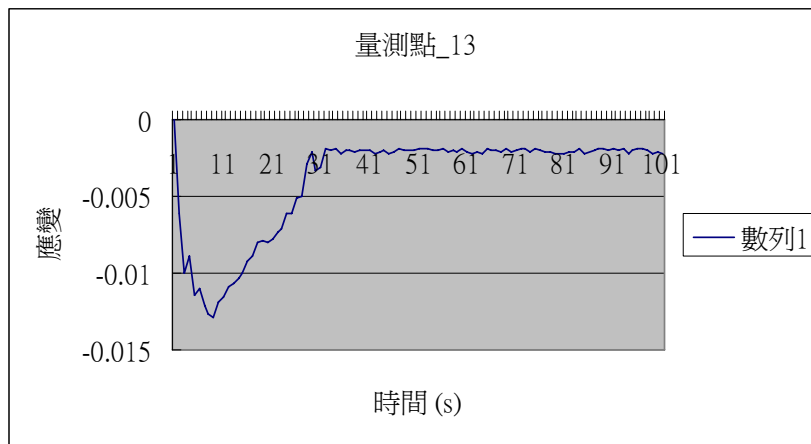


圖 4.17 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 13

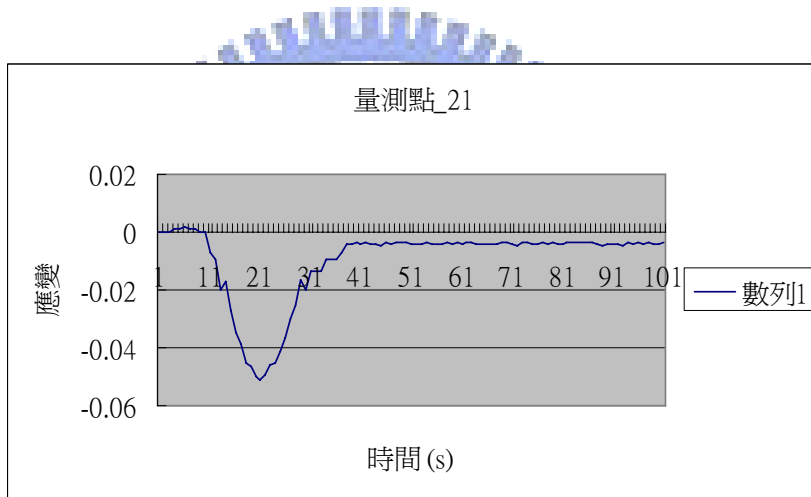


圖 4.18 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 21

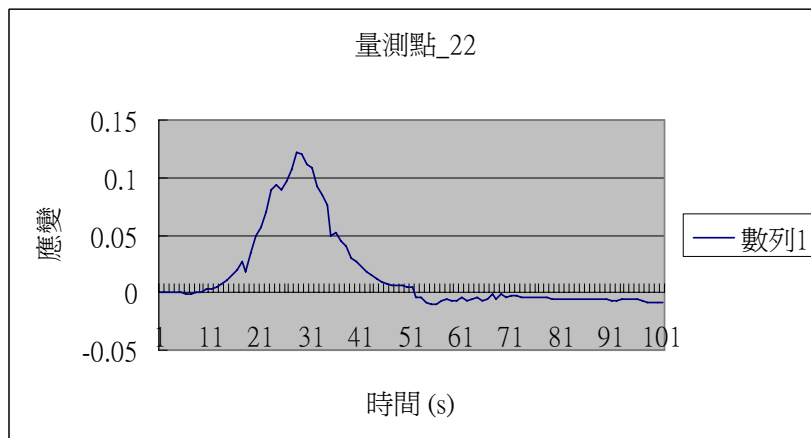


圖 4.19 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 22

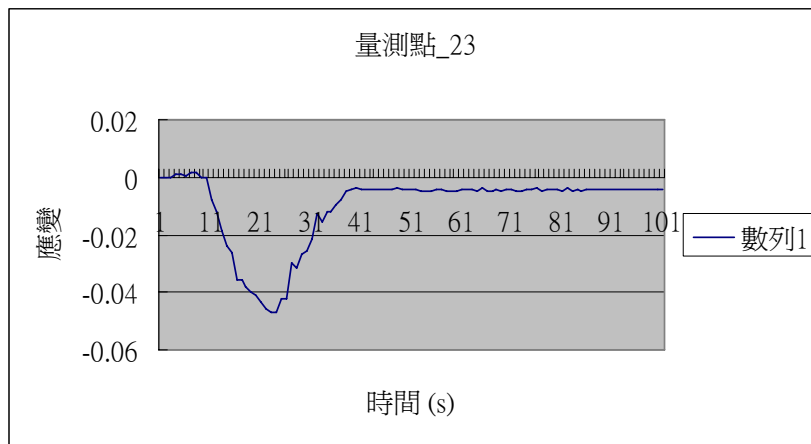


圖 4.20 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 23

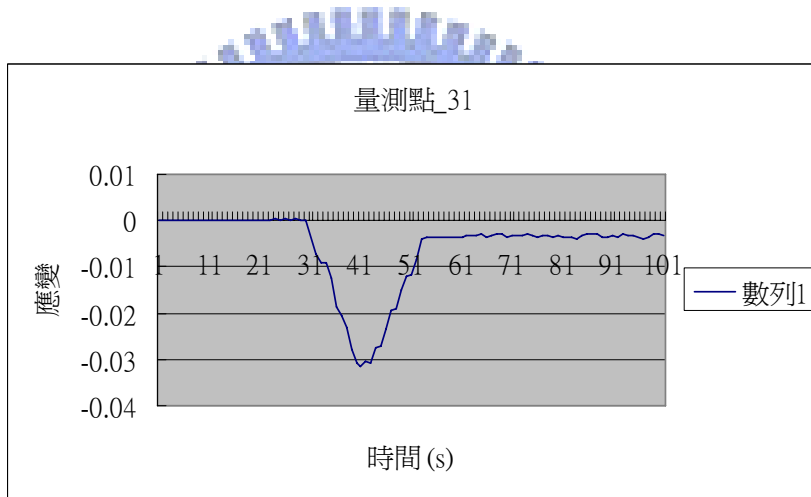


圖 4.21 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 31

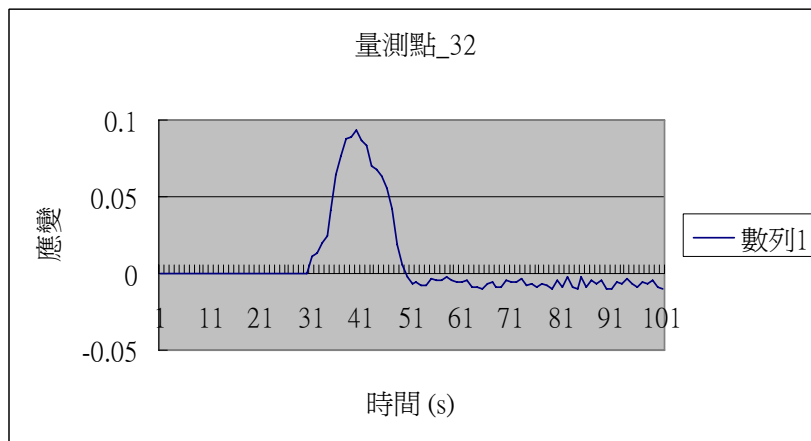


圖 4.22 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 32

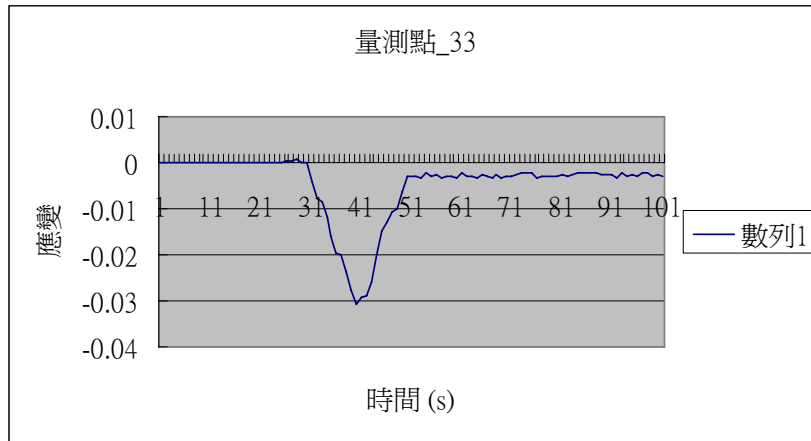


圖 4.23 功率=21W 速率=1mm/sec 量測點 33

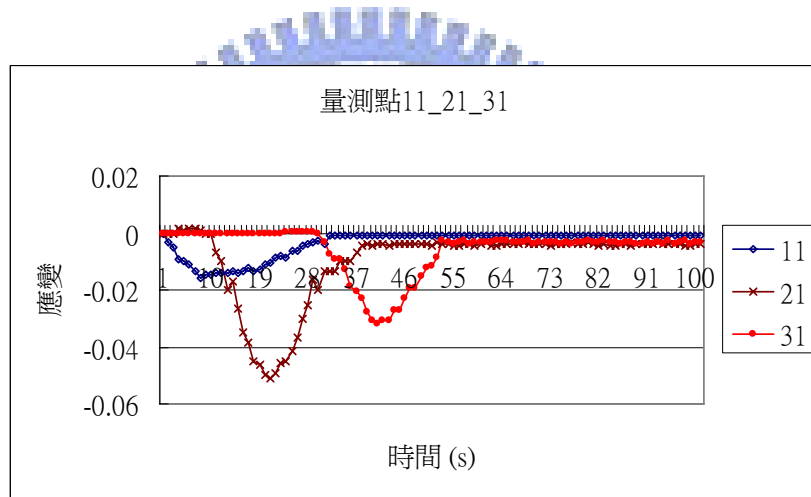


圖 4.24 量測點 11_21_31

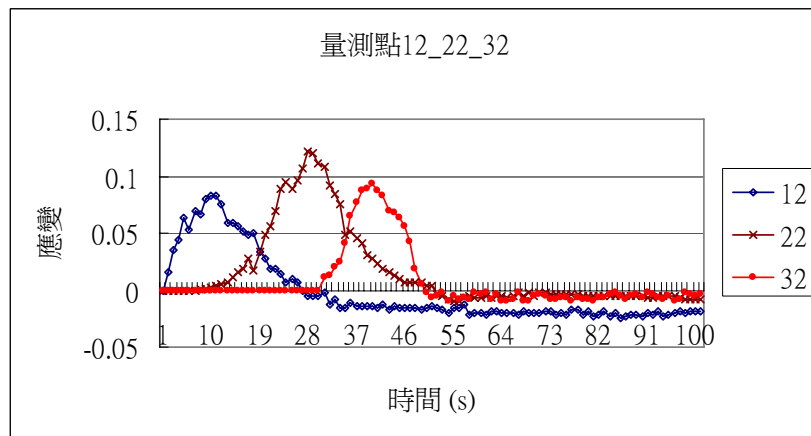


圖 4.25 量測點 12_22_32

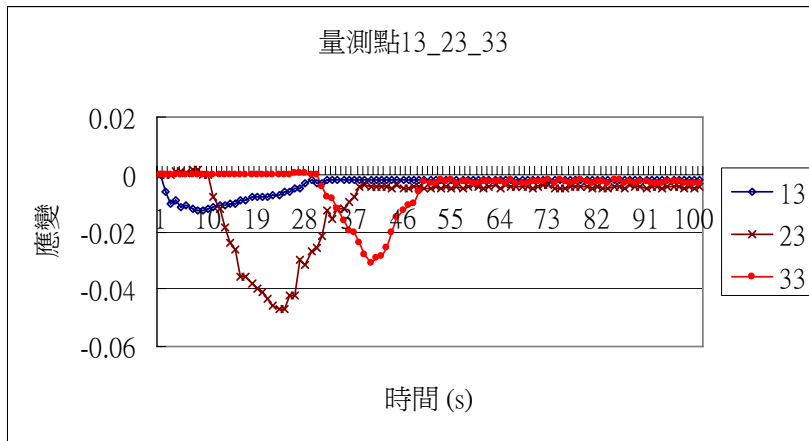


圖 4.26 量測點 13_23_33

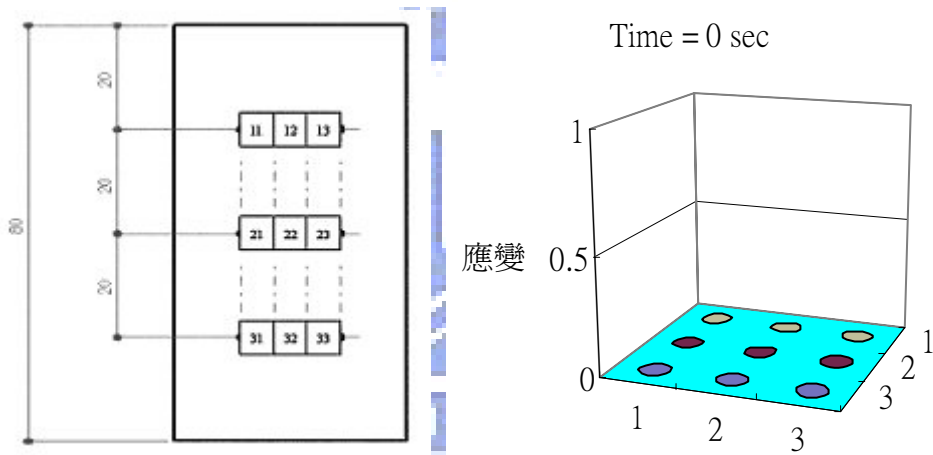


圖 4.27 雷射熱源在 t=0 秒時之應變圖

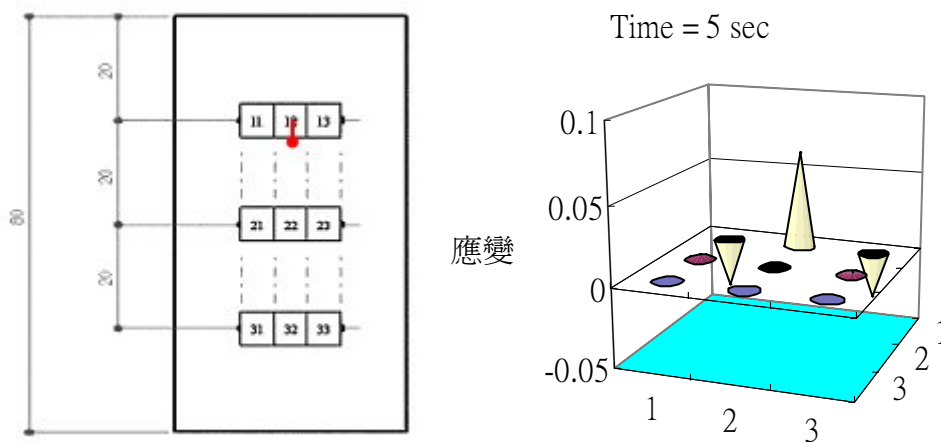


圖 4.28 雷射熱源在 t=5 秒時之應變圖

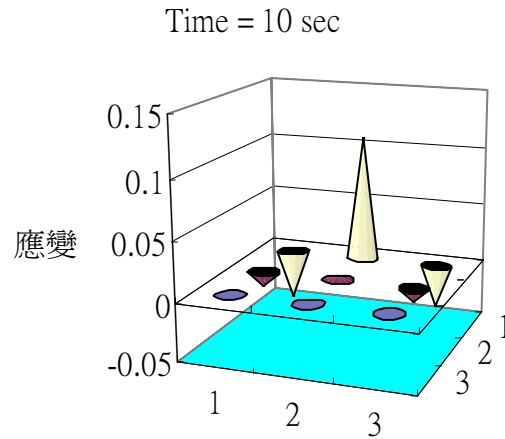
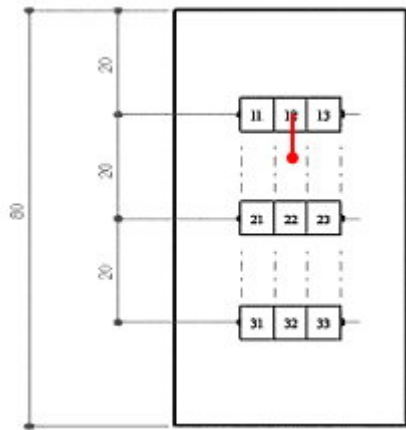


圖 4.29 雷射熱源在 t=10 秒時之應變圖

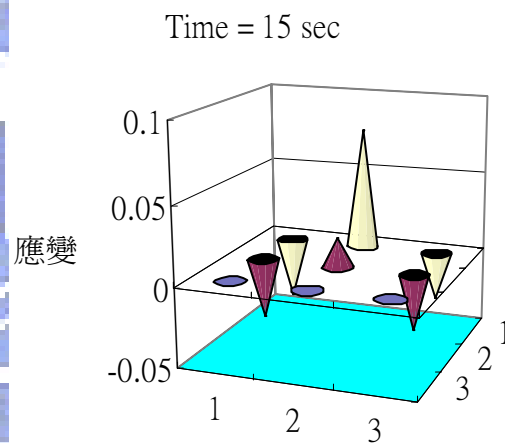
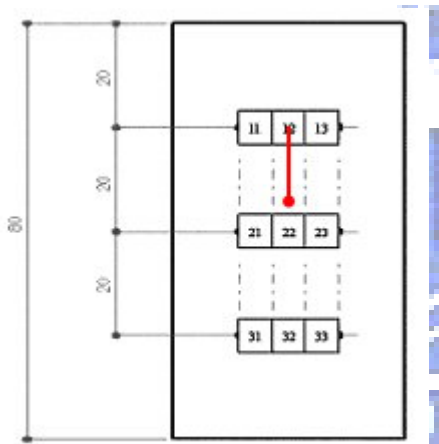


圖 4.30 雷射熱源在 t=15 秒時之應變圖

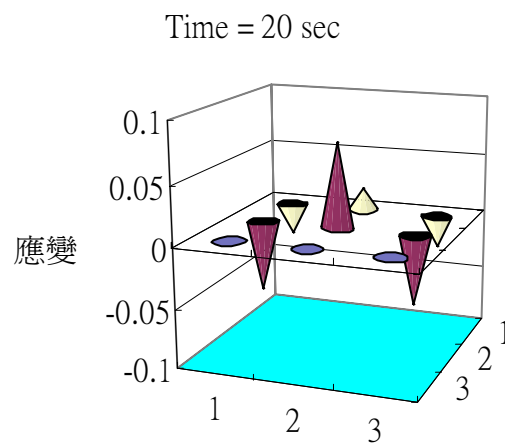
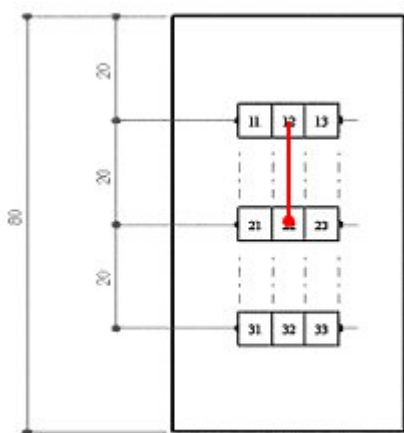


圖 4.31 雷射熱源在 t=20 秒時之應變圖

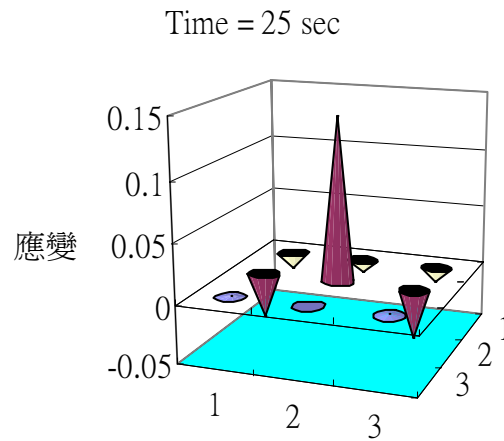
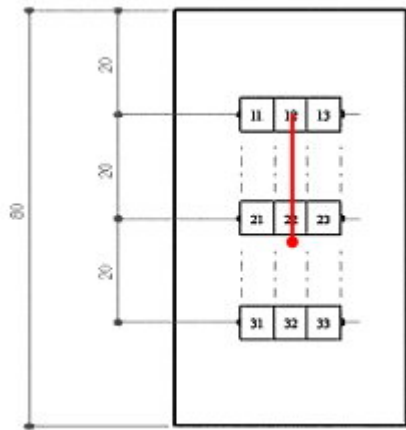


圖 4.32 雷射熱源在 $t=25$ 秒時之應變圖

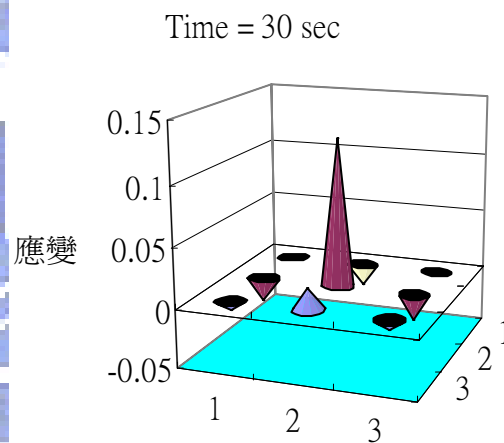
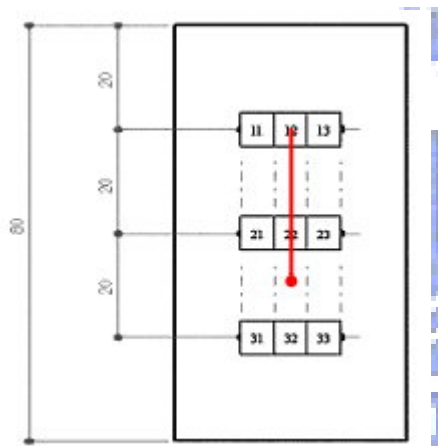


圖 4.33 雷射熱源在 $t=30$ 秒時之應變圖

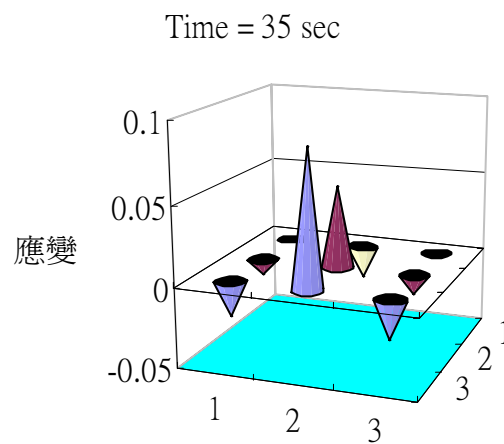
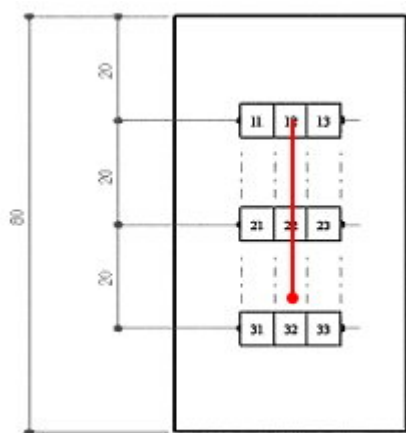


圖 4.34 雷射熱源在 $t=35$ 秒時之應變圖

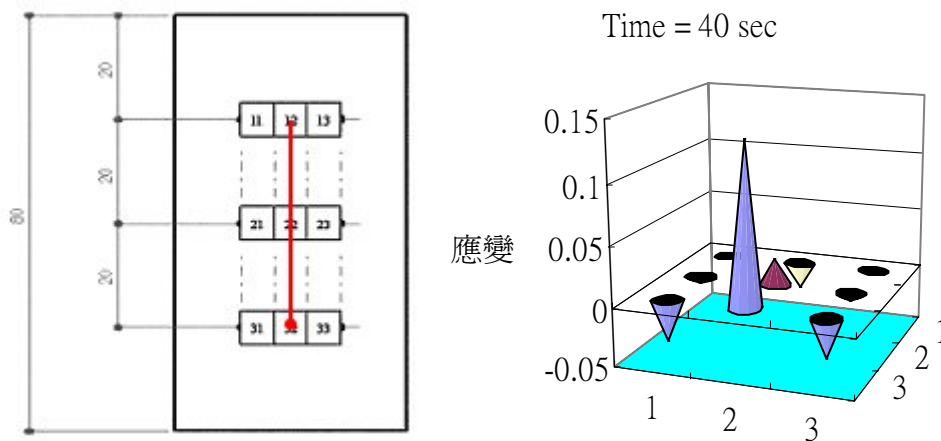


圖 4.35 雷射熱源在 $t=40$ 秒時之應變圖

由以上所量測的數據可歸納出以下的重點：

1. 量測點位置 11 與 13 的實驗數據如圖 4.15 與 4.17 所示，當雷射熱源開始作用在試片時，由於壓克力受熱膨脹使得在加工路進兩側的量測點 11 與 13 受到壓縮的應變量，大約在 $t=8$ 秒時有最大的壓應變。隨著熱源的遠離與溫度的降低，使位置 11 與 13 往張應變的方向成長，然而最後會產生永久的壓應變。
2. 位置 21 與 23 的應變曲線如圖 4.18 與 4.20 所示，當雷射熱源接近量測位置 21 與 23 時，會有些微的張應變的產生，但是非常的不明顯。加工路徑兩側的量測點 21 與 23 隨著雷射的接近，受熱膨脹而產生壓應變，然而當熱源漸漸的遠離，量測位置 21 與 23 的應變曲線會往張應變的方向成長，最終也是產生永久的壓應變，相同情形如量測位置 31 與 33，其圖形如圖 4.21 與 4.23 所示。

3. 在加工路徑上的量測點位置 12、22 與 32，其應變分布曲線如圖 4.16、4.19 與 4.22 所示。當雷射熱源一開始施加在試片上時，壓克力因受熱膨脹而使位置 12 產生張應變量，當熱源漸漸的遠離量測點 12 時，應變曲線會因為溫度的下降而往壓應變的方向成長，最終產生永久的壓縮應變量，相同情形如量測位置 22 與 32。
4. 由圖 4.27 至圖 4.35 可看出量測點位置 11、12、13、21、22、23、31、32 與 33，在各時間點其相對應的應變值。



第五章 結論與未來研究方向

5.1 結論

本文利用非接觸式的方法，藉由單筒直立式顯微鏡配合智慧型影像擷取與分析系統，目的在觀察試片在加工時的變化，再對其進行影像分析處理，量測出熱應變量，並進而推測出熱應力。此外，本研究採用 CAE 有限元素分析軟體 ANSYS，模擬熱源熱加工過程的熱應變分析與驗證。本實驗以壓克力當作實驗的材料，在加工前先利用雷射加工機在加工路徑旁刻劃出兩條細線作為量測定位線的功能，將其置於影像擷取器 DVT 的觀察下，推算出像素與實際長度的關係，再利用雷射切割試片，使材料產生的微小應變量，觀察加工路徑與定位線的變化情形。

由結果顯示，在利用本系統的量測下可以量測到約 $10\mu m$ 左右的微小應變量，若是使用更高倍率的物鏡，則可以量測更微小的應變。由實驗的數據與模擬分析的結果可知，當材料在切割加工時，在施加熱源處材料因受熱膨脹而產生壓應力；然而在移開熱源時，應力值會因為冷卻效應使溫度下降而逐漸有往張應力方向增長的趨勢。

本實驗室所建立的非接觸光電影像式微應力量測系統與傳統所使用應變規量測應變的方法有很大的差異性，傳統的的方法是將應變規貼於待測物體上，由於應變規是與待測物體接觸的，所以應變規有受待測物影響的

缺點，如果應變規貼於導熱性不良的待測物體時，如木材、塑膠或玻璃等，則會發生誤差而且安裝較費時。而格子法量測應變雖然使用普遍，但是在量測之前須事先在試片上畫出小方格，而本研究的量測系統不需要此步驟。穿透式光彈法在進行量測之前試片必須先經過處理，由於試片本身是不透明的，因此必須在試片和光彈材料間塗上一層反射面，使通過光彈材料的光線反射出來。相較之下，本研究所探討的量測系統，不僅儀器架設較簡便且效率高，在量測前試片的處理也較省時。

雷射切割機(ILS-II-30W)有功率與速率兩種切割參數可以變化，利用不同的功率與速率切割壓克力試片，在 DVT 的觀測下會有不同的切割情形，亦即切割線邊緣的筆直度。而由加工品質實驗的可知，當雷射功率為 70% 與切割速率為 100% 時，切割厚度為 2mm 的壓克力在 DVT 的觀測下切割線會有較佳的筆直度。

藉由本研究的微應力量測系統與壓克力試片的規劃，可測得在加工過程中各量測點位置的應變變化曲線。參考試片規劃圖 4.8 所試，量測位置 11、21、31 與 13、23、33 對於加工路徑為左右對稱，而由實驗結果也發現其應變分布曲線大致都相同。量測點 11 在雷射熱源一開始移動時即產生壓縮應變量，隨著熱源的遠離其應變量會往張應變的方向成長；而在雷射熱源逐漸靠近量測點 21 時，會有極微小的張應變產生，當熱源經過量測點時會有明顯的壓縮應變產生，相同情形如量測點 31。由圖 3.13 與圖 4.24 可知，

藉由本研究的量測系統所測得的應變曲線圖與模擬的結果定性趨勢相同。

圖 3.15 與圖 4.25 分別為量測點 12、22、32 實驗與模擬結果的應變曲線變化圖，比較實驗與模擬其數據變化的曲線十分相似。對於模擬的結果來說，在熱源靠近量測點之前會呈現張應變，當雷射熱源到達量測點時應變值會急速地減少降低；而對於實驗的結果來說，由於壓克力受熱源的作用使左右兩側的定位線膨脹而產生張應變，其影響由熱源移動靠近量測點到遠離，隨著雷射逐漸地遠離量測點，應變值會因為溫度的下降而往壓縮應變的方向成長。

若單只有施加一熱源負載，在負載內承受壓應力而在負載外則承受拉應力；相反的若只有施加一冷源，在冷源負載內會承受拉應力而在負載外將承受壓應力。因此本文也探討若在雷射熱源後方施加一冷源時，對於加工過程所產生的效果。由模擬的結果可發現對於固定負載間距且變化冷熱源功率的情形來說，固定熱源功率時，最大壓應力值，隨著冷源功率的遞減而呈現絕對值的遞減；然而其最大拉應力值，隨著冷源功率的遞減而降低。當冷源功率固定時，最大壓應力值，隨著熱源功率的遞減而呈現絕對值的降低；而其最大拉應力值，會隨著熱源功率的遞減而遞減。而對於固定冷熱源功率時，應力會隨著負載間距而有所變化。由模擬的結果可發現，最大壓應力： $|\sigma_{c\text{相接}}| > |\sigma_{c\text{分離}}| > |\sigma_{c\text{重合}}|$ 、最大拉應力： $\sigma_{t\text{相接}} > \sigma_{t\text{分離}} > \sigma_{t\text{重合}}$ 。

5.2 未來研究方向

本研究利用 DVT 影像擷取器結合單筒直立式顯微鏡，搭配實驗所需的固定載台與試片的設計，發展出一套非接觸式微應力量測系統。該系統對於量測雷射熱加工所產生的應力應變是一種創新的方法，而且藉由 CAE 有限元素分析軟體相互驗證其可行性，不過尚還有一些方向在未來值得進一步研究的目標。

1. 本量測系統是與加工機台整合在一起以便進行線上量測，機台作動時產生的振動將會直接影響到量測的精度。如何加入適當的隔振系統有效的降低振動是值得研究的。
2. 加工機台所輸出的功率是利用電腦所控制，然而若輸出的功率不穩定時則會造成在量測時有誤差的產生，因此未來可以利用光纖的方法來測量雷射輸出功率的穩定與否。
3. 對於模擬有裂縫的壓克力試片之熱加工，在未來的研究可將試片換成脆性材料，如玻璃、陶瓷等等，並且考慮其裂縫成長的方向與速度。
4. 本研究在模擬雷射熱源後方加入一冷源中，均將熱源與冷源的負載範圍假設為一致，在往後的研究可變化冷熱源的負載作用範圍，觀察應力變化的情況再搭配本文的結果以尋求最佳的加工參數。

參考文獻

- [1] Maiman T. H., “Stimulated Optical Radiation in Ruby Masers” ,
Nature, Vol.187, pp.493, 1960.
- [2] Ugural A.C., Mechanics of Materials , McGraw-Hill, 1991.
- [3] 王偉中, 「光測力學方法及應用實例概述」, 科儀新知, 第十七卷
四期, 1996年。
- [4] [http://pplnt.me.ncku.tw/research/power/ying-tsung/030721/
030721.files/frame.htm#slide0003.htm](http://pplnt.me.ncku.tw/research/power/ying-tsung/030721/030721.files/frame.htm#slide0003.htm)
- [5] Barone S., Berghini M., Bertini L., “Grid Pattern for in Plane
Strain Measurements by Digital Image Processing” , Journal of
Strain Analysis, Vol.36, No.1, pp.55-59, 2001.
- [6] 張其偉, 「光彈法及格子法於表面應力的研究」, 科儀新知, 第十
七卷四期, 1996年。
- [7] Jenkins F. A., White H. E., Fundamentals of Optics, McGraw,
Singapore, 1984.
- [8] 鄭璧瑩、何信政, 「非接觸式微應力量測系統的研發與應用」, 中
華民國第28屆力學會議, 2004年。
- [9] Siegman A. E., An Introduction to Lasers and Masers, McGraw Hill,

1971.

- [10] Piepmeier Edward H., Analytical Applications of Lasers, Wiley, 1986.
- [11] David P., Applications of Lasers and Laser System, PTR Prentice Hall, 1993.
- [12] Holswade, Scott C., Laser Beam Shaping Applications, Taylor & Francis, 2005.
- [13] 黃立政，材料力學，全華出版社，1998年。
- [14] Boley B. A., Weiner J. H., Theory of Thermal Stress, 1977.
- [15] Fletcher A. J., Thermal Stress and Strain Generation in Heat Treatment, 1990.
- [16] Zhou Y. C., Zhu Z. M., “Thermal fracture characteristics induced by laser beam”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, No. 32-33, pp.5647-5660, 2001.
- [17] ANSYS Advanced Analysis Technology, SAS, Inc. @.
- [18] 張主聖，「雷射鍍覆層在考慮相變因素下之殘留應力有限元素分析」，國立中正大學機械工程研究所，2002年。
- [19] Tamma K. K., Namburu R. R., ” Recent Advances, Trends and New Perspectives Via Enthalpy-Based Finite Element Formulations

for Applications to Solidification Problems” , International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.30, pp. 803-820, 1990.

[20] ANSYS Commands Reference, SAS, Inc. @.

[21] 鄭璧瑩、林聖珣，「移動式熱源在平板加工的耦合熱應力分析與模擬」，中華民國第29屆力學會議，2005年。

[22] 伊藤公正，塑膠材料手冊，台灣文源書局，1983年。

[23] 林建中，高分子材料性質與應用，高立圖書，1998年。

[24] 趙桂平、趙鍾斗、金在道，「潛熱對激光塗敷過程中溫度場的影響」，西安交通大學學報，第38卷第5期，2004年。

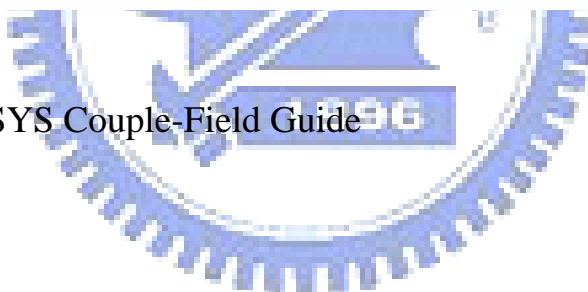
[25] Hoekstra B. L., Glebow L.B., ”Method and Apparatus for Separating Non-metallic Substrates Utilizing a Laser Initiated Scribe” , U.S. Patent No.6211488, Apr.3, 2001.

[26] Choo D. H., Kim B. I., Jung S. J., Lee W. S., and Kim B. s., “Laser Cutting Apparatus and Method” , U.S. Patent No. 6407360, Jun.18, 2002.

附錄一 有限元素分析軟體ANSYS 機械性質參數公制單位與轉換表

Mechanical Parameter	MKS Unit	Dimension	Multiply by This Number	To Obtain μ MKSv Unit	Dimension
Length	m	m	10^6	μm	μm
Force	N	$(\text{kg})(\text{m})/(\text{s})^2$	10^6	μN	$(\text{kg})(\mu\text{m})/(\text{s})^2$
Time	s	s	1	s	s
Mass	kg	kg	1	kg	kg
Pressure	Pa	$(\text{kg})/(\text{m})(\text{s})^2$	10^{-6}	MPa	$(\text{kg})/(\mu\text{m})(\text{s})^2$
Velocity	m/s	m/s	10^6	$\mu\text{m}/\text{s}$	$\mu\text{m}/\text{s}$
Acceleration	$\text{m}/(\text{s})^2$	$\text{m}/(\text{s})^2$	10^6	$\mu\text{m}/(\text{s})^2$	$\mu\text{m}/(\text{s})^2$
Density	$\text{kg}/(\text{m})^3$	$\text{kg}/(\text{m})^3$	10^{-18}	$\text{kg}/(\mu\text{m})^3$	$\text{kg}/(\mu\text{m})^3$
Stress	Pa	$\text{kg}/(\text{m})(\text{s})^2$	10^{-6}	MPa	$\text{kg}/(\mu\text{m})(\text{s})^2$
Young's Modulus	Pa	$\text{kg}/(\text{m})(\text{s})^2$	10^{-6}	MPa	$\text{kg}/(\mu\text{m})(\text{s})^2$
Power	W	$(\text{kg})(\text{m})^2/(\text{s})^3$	10^{12}	pW	$(\text{kg})(\mu\text{m})^2/(\text{s})^3$

資料來源：ANSYS Couple-Field Guide



附錄二 有限元素分析軟體ANSYS 熱參數公制單位與轉換表

Thermal Parameter	MKS Unit	Dimension	Multiply by This Number	To Obtain μ MKSv Unit	Dimension
Conductivity	W/m ^{°K}	(kg)(m)/(°K)(s) ³	10 ⁶	p W/(μ m) ^{°K}	(kg)(μ m)/(°K)(s) ³
Heat Flux	W/(m) ²	kg/(s) ³	1	p W/(μ m) ²	kg/(s) ³
Specific Heat	J/(kg) ^{°K}	(m) ² /(°K)(s) ²	10 ¹²	pJ/(kg) ^{°K}	(μ m) ² /(°K)(s) ²
Heat Flow	W	(kg)(m) ² /(s) ³	10 ¹²	p W	(kg)(μ m) ² /(s) ³
Heat Generation Per Volume	W/m ³	(kg)/(m)(s) ³	10 ⁻⁶	p W/(μ m) ³	kg/(μ m)(s) ³
Convection Coefficient	W/(m) ² °K	kg/(s) ²	1	p W/(μ m) ² °K	kg/(s) ²
Dynamic Viscosity	kg/(m)(s)	kg/(m)(s)	10 ⁻⁶	kg/(μ m)(s)	kg/(μ m)(s)
Kinematic Viscosity	(m) ² /s	(m) ² /s	10 ¹²	(μ m) ² /s	(μ m) ² /s

資料來源：ANSYS Couple-Field Guide

