

國立交通大學

機械工程學系碩士班

碩士論文

加熱分佈對於多晶矽太陽能電池裂縫的  
電子光斑干涉檢測之影響

Influence of Heating Profiles on Crack Inspection in  
Polysilicon Photovoltaic Cells Using Electronic Speckle  
Pattern Interferometry

研究 生：李劭遠

指 導 教 授：尹慶中 博 士

中華民國一〇二年七月

加熱分佈對於多晶矽太陽能電池裂縫的  
電子光斑干涉檢測之影響

Influence of Heating Profiles on Crack Inspection in Polysilicon  
Photovoltaic Cells Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

研 究 生：李 劻 遠

Student : Sau-Yuan Li

指 導 教 授：尹 慶 中 博 士

Advisor : Dr. Ching-Chung Yin

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系 碩 士 班



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

September 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 ○ 二 年 七 月

# 加熱分佈對於多晶矽太陽能電池裂縫的電子光斑干涉 檢測之影響

研究生：李劭遠

指導教授：尹慶中 博士

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

6 吋多晶矽太陽能電池的厚度很薄，兼具撓性及脆性，製程中難以肉眼發現的缺陷與裂縫在電池模組化後，將造成發電效率降低或電池失效，在產線上將含缺陷太陽能電池淘汰是一項重要課題。矽晶太陽能電池是矽、孔隙鋁材組成的積層複材結構，因熱膨脹係數相異，受熱會產生撓曲變形。本研究數值模擬 8 種熱通量分佈的暫態分析，歸納出適合裂縫檢測的加熱分佈，以電子光斑干涉術量測電池熱變形的面外位移。除了側緣  $1/4$  處之裂縫，由內而外遞減的熱通量分佈使裂縫附近的面外位移等高線及光斑干涉條紋發生明顯變化，V 形光斑條紋發生於表面裂縫附近，貫穿裂縫附近呈現斷裂條紋。採用不對稱及長條狀加熱分佈，能辨識側緣  $1/4$  處的裂縫特徵。本研究成果適合線上即時全域檢出太陽能電池的表面及貫穿裂縫。

關鍵字：裂縫檢測、電子光斑干涉術、多晶矽太陽能電池、熱變形

# Influence of Heating Profiles on Crack Inspection in Polysilicon Photovoltaic Cells Using Electronic Speckle Pattern Interferometry

Student: Sau-Yuan Li

Advisor: Dr. Ching-Chung Yin

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

The 6-inch polysilicon wafers for use of photovoltaic (PV) cells are thin enough, and possess both flexibility and brittleness. The latent defects which could not be found in PV cells by the unaided eye in the production line usually result in efficiency reduction and damage of solar panel. It remains an important issue to eliminate defective products before module process or end applications. Solar cell is a laminate structure mainly composed of silicon and porous aluminum. Thermal mismatch usually causes a bow of the cell exerted by temperature variation. This study numerically explores eight types of heat flux patterns and their influences on transient thermal deformation of the PV cell by the finite element method (FEM). The out-of-plane thermal deformation measurements were carried out by electronic speckle pattern interferometry (ESPI) with the suitable heat flux patterns that can induce clear fringes for identification of crack. Both the contour of out-of-plane displacement calculated by FEM and speckle fringe patterns detected by ESPI reveal the obvious changes near cracks due to heating profile gradually decreasing from periphery inwards. However, the crack initiated at one-quarter periphery off the center of edge can be only detected by use of unsymmetrical and long

stripe-like heating profiles. Speckle patterns for surface cracks at the edge of cells appear with chevron-shaped fringes. Broken fringes are found for the through-cracks. The outcome of this study can be implemented as a real-time, whole field, nondestructive testing system for detection of surface cracks and through cracks in PV cells in the production line.

**Keywords:** Crack detection, electronic speckle pattern interferometry, polysilicon photovoltaic cells, thermal deformation



## 誌謝

首先感謝我的指導教授 尹慶中博士在我碩士生涯中的諄諄教誨，讓本論文可以順利完成，在此獻上最誠摯的感謝。同時感謝楊哲化老師、廖駿偉老師、鄭泗東老師於百忙之中抽空擔任學生的口試委員，給學生許多建議與指正，讓學生的論文內容能夠更趨完整。

感謝非破壞評估實驗室的博士班學長王多聞、許世明、游泰和、溫子達及劉育翔給予研究上的指導與幫助。感謝碩士班學長蔡慶芳、黃室維、鄭智遠、湯士杰、吳家宇、王裕太及蔡曼軒於課業與研究上的幫助，不厭其煩的傳授儀器操作方法，讓我能很快的融入碩士生活。感謝同學梁均帆、吳曼修、鄒心慧在研究上的協助，我們也培養出了深厚的革命情感。學弟李柏勳、何家豪、黃仲平、張維霖、彭鈺原、陳勁希以及學妹吳雨倩、羅憶青，感謝你們讓實驗室充滿活力與歡樂，預祝你們研究順利，如期畢業。

最後感謝我最愛的父母親李光鏞先生、張麗玲女士，用心撫養我長大並且在求學上一路給予我照顧與支持，讓我能無後顧之憂的完成學業。感謝女友林宜庭從大學到研究所一路上的陪伴與關懷，並且不斷地給我鼓勵與幫助。謹以此論文獻給我摯愛的家人、師長與朋友。

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌謝 .....	iv
目錄 .....	v
表目錄 .....	viii
圖目錄 .....	xiv
第一章 緒論 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.2.1 太陽能電池與矽晶圓檢測 .....	2
1.2.2 電子光斑干涉術 .....	4
1.3 研究目的 .....	7
1.4 內容簡述 .....	8
第二章 理論與數值分析 .....	9
2.1 電子光斑干涉術 .....	9
2.2 太陽能電池熱變形 .....	12
2.3 太陽能電池上之熱傳導理論 .....	12
2.4 太陽能電池熱阻抗分析 .....	14
2.5 太陽能電池模型 .....	15
2.6 模型之固定方式與邊界條件 .....	17
2.7 有限元素法之暫態熱分析的設定與介紹 .....	18
第三章 數值分析結果與討論 .....	20
3.1 數值模擬結果 .....	20

3.1.1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量.....	20
3.1.2 由外而內遞減之高斯分佈熱通量.....	21
3.1.3 十字形分佈之熱通量.....	22
3.1.4 單對角形分佈之熱通量.....	23
3.1.5 雙對角形分佈之熱通量.....	23
3.1.6 空心大矩形分佈之熱通量.....	24
3.1.7 空心小矩形分佈之熱通量.....	25
3.1.8 實心矩形分佈之熱通量.....	26
3.2 結果討論 .....	27
<b>第四章 實驗量測結果與討論 .....</b>	<b>29</b>
4.1 面外 ESPI 實驗架構.....	29
4.2 量測試片之裂縫製作 .....	30
4.3 光源溫度與強度量測 .....	31
4.4 無光罩多晶矽太陽能電池的量測.....	31
4.4.1 無裂縫.....	31
4.4.2 表面裂縫.....	32
4.4.3 貫穿裂縫.....	33
4.4.4 結果討論 .....	33
4.5 實心矩形加熱分佈之多晶矽太陽能電池的量測.....	34
4.5.1 無裂縫.....	34
4.5.2 表面裂縫.....	34
4.5.3 貫穿裂縫.....	35
4.5.4 結果討論 .....	36

4.6 單對角形加熱分佈之多晶矽太陽能電池的量測.....	37
4.7 結果與討論.....	38
第五章 結論與展望.....	40
5.1 結論.....	40
5.2 未來展望.....	41
參考文獻.....	43
附表.....	46
附圖.....	127



## 表目錄

表 2.1 多晶太陽能電池之矽材料常數.....	46
表 2.2 多晶太陽能電池之金屬電極材料常數.....	46
表 2.3 多晶太陽能電池之鋁漿材料常數.....	46
表 2.4 各加熱分佈面積與熱通量.....	47
表 3.1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(無裂縫).....	48
表 3.2 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	49
表 3.3 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	50
表 3.4 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	51
表 3.5-1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	52
表 3.5-2 热通量由內而外遞減加熱分佈下之分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	53
表 3.6 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(無裂縫).....	54
表 3.7 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	55
表 3.8 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	56
表 3.9 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心	

處).....	57
表 3.10-1 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	58
表 3.10-2 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	59
表 3.11 十字形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	60
表 3.12 十字形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	61
表 3.13 十字形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	62
表 3.14 十字形分佈之熱通量結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	63
表 3.15-1 十字形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	64
表 3.15-2 十字形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	65
表 3.16 單對角形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	66
表 3.17 單對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	67
表 3.18 單對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	68
表 3.19-1 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	69
表 3.19-2 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	70
表 3.20-1 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	71
表 3.20-2 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	72
表 3.21 雙對角形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	73
表 3.22 雙對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	74
表 3.23 雙對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	75
表 3.24 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	76

表 3.25-1 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)	77
表 3.25-2 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)	78
表 3.26 多空心大矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	79
表 3.27 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	80
表 3.28 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	81
表 3.29 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	82
表 3.30-1 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	83
表 3.30-2 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	84
表 3.31 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	85
表 3.32 心小矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	86
表 3.33 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	87
表 3.34 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	88
表 3.35-1 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	89
表 3.35-2 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	90
表 3.36 實心矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫).....	91
表 3.37 實心矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	92

表 3.38 實心矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	93
表 3.39 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	94
表 3.40-1 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	95
表 3.40-2 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	96
表 3.41 各種分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(表面裂縫於邊緣中心處).....	97
表 3.42 各種分佈之熱通量於 1 秒時之分析結果比較(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	98
表 3.43 各種分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	99
表 3.44 各種加熱分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	100
表 3.45 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(表面裂縫於邊緣中心處)...	101
表 3.46 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	102
表 3.47 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(貫穿裂縫於邊緣中心處)...	103
表 3.48 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	104
表 3.49 各種分佈之熱通量於 1 秒最低與最高溫度值.....	105
表 4.1 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(無裂縫).....	106
表 4.2 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	107

表 4.3 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	108
表 4.4 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(表面裂縫於底部中心處).....	109
表 4.5 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	110
表 4.6 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處).....	111
表 4.7 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於底部中心處).....	112
表 4.8 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(無裂縫).....	113
表 4.9 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較(無裂縫).....	114
表 4.10 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於邊緣中心處).....	114
表 4.11 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於邊緣四分之一處).....	115
表 4.12 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較(表面裂縫).....	117
表 4.13 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於底部中心處).....	118
表 4.14 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於邊緣中心處).....	119

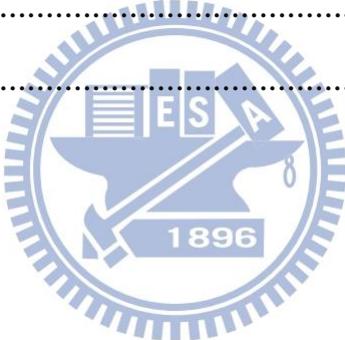
表 4.15 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於 邊緣四分之一處).....	120
表 4.16 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果 比較(貫穿裂縫) .....	121
表 4.17 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於 底部中心處).....	122
表 4.18 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(無裂縫)...	123
表 4.19 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於 邊緣四分之一處).....	124
表 4.20 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於 邊緣四分之一處).....	125
表 4.21 多晶太陽能電池於長條形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較	126



# 圖目錄

圖 1.1 (a) 多晶矽太陽能電池正面 (b) 多晶矽太陽能電池背面 .....	127
圖 1.2 (a) 單晶矽太陽能電池正面 (b) 單晶矽太陽能電池背面 .....	128
圖 1.3 太陽能電池模組.....	129
圖 1.4 RUV 量測系統[4].....	129
圖 1.5 光激發螢光量測系統[6] .....	130
圖 1.6 電致發光量測系統[7] .....	130
圖 2.1 ESPI 面外量測系統.....	131
圖 2.2 热流方向示意圖[21] .....	131
圖 2.3 一維熱傳導分析的體積元素[21] .....	132
圖 2.4 三維熱傳導分析的體積元素(直角座標) [21] .....	132
圖 2.5 元素 SOLID226[19] .....	133
圖 2.6 有限元素法所建立之多晶矽太陽能電池模型.....	133
圖 2.7 太陽能電池模型截面積式意圖 .....	134
圖 3.1 多晶矽太陽能電池裂縫位置示意圖(邊緣中心處).....	134
圖 3.2 多晶矽太陽能電池裂縫位置示意圖(邊緣四分之一處).....	135
圖 4.1 ESPI 量測系統實體架構圖.....	135
圖 4.2 ESPI 量測系統側面圖 .....	136
圖 4.3 波長 532nm 綠光半導體雷射 .....	136
圖 4.4 ESPI 程式介面 .....	137
圖 4.5 MATLAB 軟體影像處理介面 .....	137
圖 4.6 工業鑽石壓頭 .....	138

圖 4.7 Matsuzawa DXT-3 洛克式硬度測試 .....	138
圖 4.8 表面裂縫 .....	139
圖 4.9 貫穿裂縫 .....	139
圖 4.10 ZyTemp TN425LBE 紅外線溫度計 .....	140
圖 4.11 太陽能電池等距離九宮格示意圖 .....	140
圖 4.12 太陽能電池等距離九宮格升溫 1 秒結果( $^{\circ}C$ ).....	141
圖 4.13 Newport 1918-R Power Meter .....	141
圖 4.14 遮光布 .....	142
圖 4.15 矩形光罩 .....	142
圖 4.16 單對角形光罩 .....	143
圖 4.17 長條形光罩 .....	143



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

隨著人類文明的進步及生活需求的持續發展，天然能源如：天然氣、石油、媒礦等石化燃料的供應量逐漸減少，預測將不敷使用。因此找出能夠取之不盡、用之不竭、低汙染的可再生能源是勢在必行的，而太陽能又被列為重點發展的項目。

太陽足夠提供源源不絕的清潔能量，太陽能可以轉化成電力與熱能，供地球上大部分的生物使用，且不會在地球上造成汙染。太陽能的第一種利用方式是太陽能電池，將光能轉變為電力，當光的強度越強，電流會越大；第二種利用方式則是將陽光所攜帶的熱能用來產生蒸氣，推動渦輪機發電。目前先進國家如美國、德國、日本，都極力地推動太陽能政策，以政府的大量補助，建造太陽能發電廠以及在屋頂上裝設太陽能發電系統。太陽能發電系統或模組的基本單位就是太陽能電池，如圖 1.1、1.2 所示，太陽能電池的基本構造為 P 型與 N 型半導體接合而成，當光線照射於太陽能電池上時，P 型半導體的電洞與 N 型半導體的自由電子因電位差產生電流。太陽能電池的種類很多，可依照材料與結構分為結晶矽 (crystalline silicon)、非晶矽 (amorphous silicon)、III-V 族、II-VI 族、薄膜 (thin film) 太陽能電池 CIGS (copper indium gallium selenide) 等，其中多晶矽太陽能電池為本研究的重點。

太陽能在電池在生產過程中，會以人工方式將有明顯可見瑕疵的太陽能電池篩選掉，但是一些細小的裂縫卻無法以肉眼看，太陽能電池模組化後 (圖 1.3)，細小裂縫可能會繼續擴大，造成太陽能電池

模組的失效，導致良率的降低及成本的提高。因此，發展出一套即時、快速，又不會破壞太陽能電池的檢測方式是非常重要的。本研究利用鹵素燈泡作為加熱源，加熱太陽能電池並使之產生熱變形，並同時使用電子光斑干涉法(electronic speckle pattern interferometry，ESPI)，擷取太陽能電池表面位移的干涉影像，檢查太陽能電池裂縫處產生的位移不連續現象，以判斷裂縫的位置以及長度。此外，本研究使用有限元素套裝軟體 (ANSYS)，模擬太陽能電池模型受到各種的加熱圖樣下，太陽能電池的面外位移等高線變化情形，並與實驗結果對照，以增進研究的完整性與正確性。

## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 太陽能電池與矽晶圓檢測

太陽能電池是以半導體製程方式製作而成的，太陽能電池材料中矽佔了大部分，因此矽晶圓的檢測方式可做為本研究的參考。此節將介紹太陽能電池與矽晶圓檢測的相關文獻。

1985 年，Kasia 等人[1]提出使用自製(home-made)的聲光顯微鏡(photoacoustic microscopy, PAM)檢測矽晶圓的缺陷。PAM 有非破壞、可進行縱深分佈(depth profiling)研究、量測試片的光與熱性質這些優點。使用波長 488nm 的氬離子雷射經由聲光調制器(acousto-optic modulator)，產生一正弦波(sinoidal wave)調制光，照射於柴氏矽基板 Cz-Si (Czochralski grown silicon)，改變調制光的頻率，得到不同振幅大小的訊號。缺陷處的熱性質、材料性質與一般矽材料有所不同，產生的訊號也會有所差異，因此可由訊號的空間分佈判斷缺陷的位置。

1998 年，Breitenstein 與 Langenkamp [2]利用動態精度接觸熱 ( dynamic precision contact thermography,DPCT)檢測單晶矽太陽能電池的缺陷。DPCT 為一種鎖相熱影像法(lock-in thermography)，試片受到週期性的脈衝加熱，因此產生了週期性的電流，得到的熱影像中可看出局部增加的電流，也就是分流(shunts)，藉由此方法可檢測出太陽能電池的缺陷。

2000 年，Ostapenko 與 Tarasov [3]提出共振超音波振動法(resonance ultrasonic vibrations , RUV)，以一直徑 70mm 的共振超音波探頭激振尺寸大小為 200mm 的 Cz-Si 晶圓，再藉由聲波探頭(acoustic probe)配合鎖相放大器(lock-in amplifier)，量測晶圓振動的自然頻率與訊號響度，雖然當時尚未有完整的架構，但此概念可應用於生產線上的品質管制(quality control)。

2006 年，Ostapenko 等人[4]提出共振超音波共振法(RUV)實驗架構，如圖 1.4 所示。以一真空幫浦(vacuum pumps)製造 50kpa 的負壓，讓壓電換能器與矽晶圓能夠緊貼在一起。壓電換能器產生的超音波振動傳遞進入太陽能電池，並在共振頻率處產生駐波(standing waves)訊號，再藉由一寬頻的超音波探頭擷取分析此訊號。由實驗數據與有限元素分析軟體計算結果可以得知晶圓內部有裂縫存在時，共振頻率與無裂縫晶圓相比會發生變化，訊號的頻寬較寬，振幅峰值會較小。此方法優勢在於量測時間短，從一開始的壓電換能器接觸晶圓到資料擷取、分析只需要 2.4 秒，增加了此方法對於晶圓或太陽能電池在線上檢測、產品品質管制的可行性。

2007 年，Dallas 等人[5]使用 RUV 法檢測太陽能矽晶片，在實驗與

有限元素軟體模擬的配合下，分析矽晶片的共振模態與共振頻率，發現了某些共振模態對於特定位置的裂縫檢測靈敏度較高，而分析試片的共振模態數超過一個時，在試片上任何位置的裂縫皆能檢測出來，更增加了 RUV 此方法的靈敏度與速度。

圖 1.5 所示之藉由光激發螢光法(photoluminescence, PL)，對於太陽能電池照射高能量的光，使得太陽能電池內部電子吸收能量後，激發價帶電子跨過能隙到達導帶，而從激發狀態回到基態時會產生輻射放射。分析光激發螢光光譜，可估算與得知太陽能電池中化合物的組成成分、雜質活化能與缺陷[6]。另一種檢查矽晶圓摻雜質(doping)良窳的電激發螢光法(electroluminescence, EL)也經常應用於檢查矽晶太陽能電池模組，它的原理與太陽能電池相反，對於太陽能電池外加一電場，用電場之能量將電子從價帶到達導電帶，釋放出光能。如使用近紅外光 CCD 感光元件，於 950nm-1250nm 這區間能拍下試片的螢光密度分佈圖。分析螢光與光譜特徵，甚至可以得到奈米材料之量子點尺寸、載子運輸路徑以及生命周期這些重要訊息，但使用 EL 法檢測太陽能電池的缺陷時，也有可能會檢測出電池中的雜質，影響判讀結果[7]。

### 1.2.2 電子光斑干涉術

早在 1971 年時，Butters 與 Leendertz [8]就已提出電子光斑干涉術的基本理念，將雷射光分成參考光與物光，分別照射在參考物體與待測物體上，同時藉由攝影機擷取待測物變形前後的影像，再以影像相減技術獲得面外位移的干涉圖形，這項技術擺脫了傳統全像干涉術繁雜的底片沖洗過程，具備量測時間縮短、系統穩定度要求降低及可對

試體表面位移、應變及振動進行即時量測等優點。兩人於 1973 年再提出影像剪切光斑干涉條紋術 (image-shearing speckle pattern interferometer)，可用來量測物體表面的曲率及彎矩，此方法對於環境中的干擾有很大的容忍度 [9]。

1977 年，Høgmoen 與 Løkberg [10]提出了時間平均電子光斑干涉術 (time-average electronic speckle pattern interferometry)，此方法利用不同的調變頻率，可以進行即時檢測微小振動的振幅與相位，且不需要額外的條紋穩定系統，相對於普通的 ESPI 技術有更好的靈敏度，擷取到的影像也有更好的解析度。

1985 年，Creath [11]提出了平均雙重照射光斑干涉圖 (averaging double-exposure speckle interferograms)，使用電腦控制的步進馬達以改變雷射照射到物體上的角度，將這些不同照射角度所得到干涉圖形平均處理後，可以讓光斑干涉圖形的對比度增高與品質增加。

1986 年，Nakadate [12]提出相位平移光斑干涉圖形 (phase-shifting speckle-pattern interferometry)，藉由計算干涉圖形繪出振幅大小的等高線圖形，此方法也可以使得干涉圖形的對比度與品質增加。

1996 年，Wang 等人 [13] 提出振幅變動電子光斑干涉術 (amplitude-fluctuation ESPI, AF-ESPI)，與以往 ESPI 影像處理方式不同之處在於參考物在拍攝過程中是振動狀態，多了時間平均與相位平移的優點，可提升條紋清晰度與解析度。

2005 年，Zarate 等人 [14] 將鋁板加熱至  $225^{\circ}\text{C}$  產生面外變形，利用裂縫處與鋁板其他位置的面外變形量不相等的關係，由 ESPI 面外量測系統，得到鋁板加熱前後的影像，相減之後得到干涉條紋圖，再依條

紋的不連續找出裂縫所在的區域。

2011 年，鄭智遠[15]發展出一套量測矽基板試片面內共振頻率及模態的實驗系統，以套裝軟體 ANSYS 模擬分析矽基板的振動響應，使用電子光斑干涉術面內架構，實驗驗證模擬與拍攝模態的結果準確度，發現試片厚度不均會造成電子光斑干涉條紋的多寡，此研究奠定了本實驗室檢測太陽能電池缺陷的可行性。

2012 年，溫子達[16]提出一套有效檢測太陽能電池裂縫之方法，利用太陽能電池厚度方向材料熱膨脹係數不均勻之特性，以套裝軟體 ANSYS 數值分析矽晶太陽能電池有、無裂縫情形下之熱變形，並以電子光斑干涉術之面外架構進行實驗量測。朝厚度方向延展之裂縫停止於破壞韌性較高之共晶結構，會形成表面裂縫，表面裂縫處之光斑干涉條紋呈現 V 形，裂縫處兩側的條紋數相等；貫穿裂縫處的干涉條紋則有斷開的現象，兩側條紋數會不同，此方法可判斷裂縫的種類、長度及位置，在表面裂縫及貫穿裂縫上皆能得到非常好的辨識效果，屬於一種非破壞的檢測方式，可於太陽能電池生產線上做非常有效、迅速的即時檢測。

除了電子光斑干涉術外，還有另一種以 ESPI 架構為基礎的時間序列光斑干涉術(temporal speckle pattern interferometry，TSPI)。傳統的 ESPI 為拍攝物體變形前與變形後之靜態影像，進行影像處理得到物體的位移干涉條紋，所得到的實驗是與時間參數無關的。TSPI 則是拍攝連續不斷變形，如熱變形或是持續振動的物體，拍攝得到每一個像素相位皆為時間的函數，因此得到一系列含時間參數的圖片，而透過時間序列標準差法(temporal standard deviation)減少雜訊而得到高解析度、

高品質的干涉條紋影像。

2001 年，Li 等人[17]使用 TSPI 中的掃描相位法(scanning phase method，SPM)與時間序列相位法(time sequence phase method，TSPM)兩種演算法配合傳統的 ESPI 量測系統，量測車子燈罩的熱變形。與傅立葉轉換法相比，SPM 與 TSPM 能使用更少的圖片數量進行影像處理，得到物體的位移等高線圖。

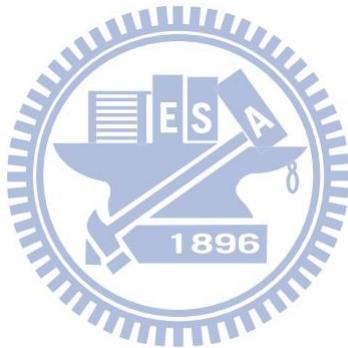
2011 年，Ma 與 Chang [18]使用 ESPI 面內架構拍攝一收到激振的壓電基板，使用 CCD 記錄下壓電板在共振頻率驅動下的整個過程，拍攝了 50 張序列式影像後，將影像圖片經過時間序列標準差(temporal standard deviation，TSTD)演算法處理，有效的減少了光斑以及背景雜訊，得到清楚的壓電平板模態影像圖。而 TSTD 演算法另外的優點是可以讓拍攝圖片之數量越多，達到減少雜訊效果越好，大幅提高影像的穩定度與解析度，但在這套系統中至少需要拍攝 5 張影像，才能進行影像處理。由有限元素分析軟體與實驗結果互相驗證，發現分析與實驗結果吻合，應用 TSPI 有效地量測壓電平板的模態

### 1.3 研究目的

本研究希望能發展出一套可供線上檢測太陽能電池裂縫的方法，太陽能電池邊界為無拘束(free)的情況下，使用鹵素燈泡的熱能以非接觸之方式加熱太陽能電池。利用多晶矽積層結構材料熱膨脹係數不同的特性，受熱會產生彎矩熱變形，再結合電子光斑干涉術量測太陽能電池的面外干涉條紋圖，判斷太陽能電池上裂縫所在的位置，以達到快速、即時、非破壞檢測太陽能電池裂縫的目的。

## 1.4 內容簡述

本文共分成五章，第一章為研究背景與動機、文獻回顧及論文研究目的。第二章為理論分析，介紹電子光斑干涉術面外量測之理論及太陽能電池熱彈性力學與熱傳導的理論基礎，並計算出太陽能電池的熱阻抗。第三章應用 ANSYS 套裝軟體建立含裂縫之多晶矽太陽能電池模型，於模型上施予熱負載(熱通量)，以不同的加熱分佈進行暫態模擬分析並進行討論。第四章介紹本研究所採用的面外量測架構及量測結果，將實驗結果與數值模擬分析做比較。第五章為則為本研究結論與未來展望。



## 第二章 理論與數值分析

本研究探討矽晶太陽能電池受熱產生彎曲變形及全域量測技術，本章先介紹電子光斑干涉術面外量測原理，再介紹太陽能電池受熱所產生的熱彈性變形及熱傳導的基本理論。最後，介紹太陽能電池熱阻抗分析與太陽能電池模型，及數值模擬分析設定與介紹。

### 2.1 電子光斑干涉術

電子光斑干涉術為一種光電整合量測物體表面變形的方法，可以量測表面粗糙、非常微小的變形，且具有非接觸與全域(whole field)量測的優點，對於量測物尺寸的限制也有很大的彈性。

圖 2.1 所為 ESPI 面外量測系統的示意圖，利用分光鏡 (beam splitter) 將雷射光分成物光及參考光，經過空間濾波器(spatial filter)擴束後成為球面波，物光垂直照射在待測物體上，參考光則垂直投射在參考物體上，物光及參考光皆漫射回 CCD 元件(charge-coupled device)。若是待測物表面發生變形，表面各點的位置產生相對的變化，光源到各點之光程發生了改變，也就是所謂的光程差，光就會在空間中互相干涉，最後由 CCD 相機擷取光斑影像。

由物光與參考光的干涉強度可以推導面外位移最小的量測值，參考圖 2.1 所描述的面外量測系統，照射於物體上某一點的物光及參考光之電場強度表示為

$$E_o = a_o e^{i\phi_o} \quad (2.1)$$

$$E_r = a_r e^{i\phi_r} \quad (2.2)$$

$E_o$  與  $E_r$  為物光與參考光的電場強度， $a_o$  與  $a_r$  為物光與參考光的振幅，而  $\phi_o$  與  $\phi_r$  是待測物變形前的初始相位。變形前物光及參考光干涉的強度可以  $I_1$  表示，

$$\begin{aligned} I_1 &= |E_o + E_r|^2 = a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi_o - \phi_r) \\ &= a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi) \end{aligned} \quad (2.3)$$

在(2-3)中， $\phi = \phi_o - \phi_r$ 。當待測物體受到外力或熱負載而變形後，物光相位會有一改變量  $\Delta\phi_o$ ，電場的強度改寫成為

$$E_o' = a_o e^{i(\phi_o + \Delta\phi_o)} \quad (2.4)$$

因物光的相位改變造成相位差  $\delta$ ，干涉後的光強度變成  $I_2$

$$I_2 = a_o^2 + a_r^2 + 2a_o a_r \cos(\phi + \delta) \quad (2.5)$$

由(2-3)及(2-5)式可以得知，當  $\delta = 2n\pi$ ，則  $I_1 = I_2$ ，此情況下，變形前後，CCD 兩次所拍下之光強度會是一樣的。假若  $\delta = (2n+1)\pi$  時，則變形前後兩次的光強度就會不一樣。將相位相同的各點連接起來，就構成光般條紋，相位的變化可對應到光斑條紋的變化，在(2-5)式中，

$$\delta = (k_2 - k_1) \cdot d_z \quad (2.6)$$

$d_z$  為面外位移，而  $k_1$  和  $k_2$  為入射光的波傳方向向量，表示為

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \mathbf{i} - \cos \theta \mathbf{k}) \quad (2.7)$$

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \mathbf{i} + \cos \theta \mathbf{k}) \quad (2.8)$$

將(2-7)式與(2-8)式代入(2-6)式中，可得到變形產生的相位變化  $\delta$ ，

$$\delta = (k_2 - k_1) \cdot d_z = \frac{4\pi d_z}{\lambda} \quad (2.9)$$

將變形前後光的光強度相減，可以得到  $I_{sub}$

$$\begin{aligned}
I_{sub} &= I_2 - I_1 \\
&= 2a_o a_r [\cos(\phi) - \cos(\phi + \delta)] \\
&= 4a_o a_r \sin[(\phi + \delta/2)] \sin(\delta/2)
\end{aligned} \tag{2.10}$$

在(2-10)式中， $4a_o a_r$  是一個不會直接影響光強度變化的常數項，當相位差  $\delta$  變化的過程中， $\sin(\delta/2)$  的值會落在-1 至 1 之間，負數的部分可能會造成我們無法獲得完整的訊號， $\sin(\delta/2)$  代表是低頻的變化項，為物體變形引起的電子光斑干涉條紋，而  $\sin[(\phi + \delta/2)]$  則是代表快速變化的高頻項，為光斑雜訊 (speckle noise)。如果想消除高頻雜訊，需要利用傅立葉光學法結合影像處理技術，這樣才不會因為變形前後光強度相減只有出現光斑強度圖形，而沒有干涉條紋。由(2-10)式，可以獲得干涉影像的最大與最小灰度值分別為

$$\delta = 2n\pi \quad n=0,1,2\cdots \quad \text{最小值} \tag{2.11}$$

$$\delta = \frac{(2n+1)}{2}\pi \quad n=0,1,2\cdots \quad \text{最大值} \tag{2.12}$$

由(2-9)式與(2-11)式，可以得到

$$\frac{4\pi d_z}{\lambda} = 2n\pi$$

整理移項過後，可得

$$d_z = \frac{n\lambda}{2} \tag{2.13}$$

所以，由(2-13)式可以知道，電子光斑干涉術之面外架構所能量測的最小面外位移為  $\lambda/2$ 。

## 2.2 太陽能電池熱變形

矽晶太陽能電池是矽、鋁構成的積層複材結構，因組成材質的熱膨脹係數不同，受熱產生彎曲變形，是屬於熱彈性力學的範疇。熱彈性力學也稱作熱彈性理論，為固體力學的一個分支，是在彈性力學的基礎上考慮溫度的影響。主要研究探討物體因為受熱造成的非均勻溫度場在彈性範圍內產生的應力與應變問題。當太陽能電池受熱負載時，由於本身材料的熱膨脹係數不同，導致熱變形並發生面外位移，干涉光也因此有了相位的變化。再藉由變形前後的不同光強度影像，經影像處理後得到干涉條紋，以判別待測太陽能電池的面外位移的改變量以及位移的等高線分佈。

## 2.3 太陽能電池上之熱傳導理論

當太陽能電池存在溫度梯度( temperature gradient )時，熱能會由熱傳導從溫度高的區域傳遞至溫度低的區域，而每單位面積的熱傳遞速率( heat transfer rate)與法線溫度梯度( normal temperature gradient)成正比，

$$q = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.23)$$

方程式(2-23)稱為熱傳導的傅立葉定律( Fourier law)，方程式中  $q$  為熱傳遞速率， $\partial T / \partial x$  是熱流方向的溫度梯度， $k$  為材料的熱傳導係數( thermal conductivity)，式子中加上負號是為滿足熱力學第二定律，熱由高溫傳至低溫，如圖 2.2 所示。

考慮太陽能電池溫度隨時間變化，對於厚度為  $dx$  的太陽能電池元

素，如圖 2.3 所示，可列出下列能量平衡

$$\text{傳入左面的能量 } q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$\text{元素內所產生的能量} = \dot{q}Adx \quad (2.25)$$

$$\text{內能的改變量} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \text{傳出右面的能量} &= q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} \\ &= A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

以上式子中  $\dot{q}$  = 每單位體積所產生的功率 ( $W / m^3$ )

$c$  = 材料比熱 ( $J / Kg \cdot {}^{\circ}\text{C}$ )

$\rho$  = 密度 ( $kg / m^3$ )

將以上式子合併可得到一維熱傳導方程式

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}Adx = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \quad (2.28)$$

或是

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.29)$$

如需考慮三維熱傳導，可由圖 2.4 所示與能量平衡式得到

$$q_x + q_y + q_z + q_g \equiv q_x + q_{x+} + q_{y+} + q_{y+} + \frac{dE}{d\tau} \quad (2.30)$$

(2-30)式中的各項能量為

$$q_x = -kdydz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = \dot{q} dx dy dz$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c dx dy dz \frac{dT}{d\tau}$$

因此，可以得到三維熱傳導的通式為

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.31)$$

如熱傳導係數  $k$  為常數時，可將(2-32)式改寫為

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2.32)$$

(2-32)式中的  $\alpha$  為材料之熱擴散率(thermal diffusivity)， $\alpha$  的值越大，則表示材料有越高導熱性，也就是有越高的熱傳導速率。

## 2.4 太陽能電池熱阻抗分析

熱阻抗( Thermal resistance)代表一物體阻止熱流通過的能力，由傅立葉熱傳導公式(2.23)可推導出熱阻抗方程式

$$R = \frac{x}{Ak} \quad (2.33)$$

上式中，R 是各種材料的熱阻抗，單位為 K/W，x 是熱流(heat flow)所經過的路徑長度，單位為公尺(m)，A 是熱流經過的截面積大小，單位為平方公尺( $m^2$ )，k 代表各種材料的熱傳導係數，單位為(W/(K·m))。如圖所示，太陽能電池結構可視為一複材平板(Composite plate)，則在厚度方向的總熱阻為矽材料層的熱阻抗加上鋁材料層的熱阻抗，也就是串聯的概念，套用 2.33 式及表 2.1-2.3 所列之參數，則可得到熱阻抗為  $6.217 \times 10^{-5}$ (K/W)。而在太陽能電池面內方向的總熱阻抗則是矽材料層熱阻並聯鋁材料層熱阻，套用式 2.33 及表 2.1-2.3 所列之參數可得到熱阻抗為 18.18(K/W)。由以上結果可明顯看出厚度方向的熱阻抗比面內方向的熱阻抗小，也就是說熱流在厚度方向傳遞明顯的比在面內方向容易得多，這也說明了決定太陽能電池加熱分佈的重要性，藉由給予不同形式的加熱分佈，讓熱量在厚度方向能快速傳遞，而太陽能電池又因為矽材料與鋁材料的熱膨脹係數的不同，會出現彎曲變形的現象，因此我們可互相比較不同的加熱分佈對於檢測裂縫的效果。

## 2.5 太陽能電池模型

矽晶太陽能電池基板是以線切割方式自晶錠上切片而來，邊緣凹凸處容易延伸成裂縫。受到負載時，裂縫面兩側的變形位移不需滿足連續條件，本研究即利用此特性，偵測矽晶太陽能電池裂縫的位置。本節將介紹含有基本無裂縫的太陽能電池有限元素模型，及如何在基本模型上建立表面裂縫(surface crack)與貫穿裂縫(through crack)，說明

模型所使用的元素種類、元素特性，模型的架構與所使用的材料係數，再介紹模型的固定方式、位置以及模型的邊界條件，而 ANSYS 套裝軟體之暫態分析設定也是一個重要的步驟。本章最後將介紹不含裂縫與含裂縫之多晶矽太陽能電池在各種不同的溫度分佈下的暫態熱分析與面外位移結果。

本研究以有限元素套裝軟體 ANSYS 作模擬分析，因需要給予結構熱通量，使熱量進行熱傳導後，觀察溫度變化、熱變形以及面外位移，為了符合這些條件與功能，太陽能電池模型選定高階的三維 20 節點耦合( 3-D 20-node coupled-field ) 元素(element) SOLI226 所建立，藉由在軟體中設定 KEYOPT 值，使得元素有熱-固(structural-thermal)耦合之功能。如圖 2.5 所示，每個節點皆有 X、Y、Z 三方向自由度，除此之外，還多了溫度的自由度，可進行熱的傳遞與溫度的變化，在本研究中，可用於三維的暫態熱分析，元素特性方面則具有彈性、熱膨脹、大變形等性質。

參考文獻上的材料係數(楊氏係數、密度、熱膨脹係數、柏松比、熱傳導係數、比熱)如表 2.1 至 2.3 所列，建立 6 吋的多晶矽太陽能電池模型，尺寸為  $156 \times 156\text{mm}$ ，模型中有  $170\mu\text{m}$  厚的矽材料層，此材料層占了太陽能電池架構的大部分體積，此外還有厚度  $30\mu\text{m}$  的鋁材料層，以及  $12\mu\text{m}$  厚的正面電極與背面電極(busbar)，而厚度過薄的抗反射層以及共晶結構則沒有建立於模型中，建立模型的方法為先建立二維模型，再往三維方向延展出厚度成為三維的模型，模型如圖 2.6 所示，而太陽能電池之截面積(cross-sectional area)示意圖如 2.7 所示。由於多晶矽材料為等向性，晶格排列無特定方向，因此裂縫的方向多呈現出水

平或垂直的直線方向，裂縫依照貫穿深度的不同，可主要分為表面裂縫(surface crack)與貫穿裂縫(through crack)，表面裂縫的定義為裂縫初始於矽材料層的上表面，而裂縫深度為貫穿整個矽材料層，最後停止於矽-鋁共晶結構處，建立表面裂縫的方式是先選取裂縫兩端的節點，再將裂縫兩端原本的同一點分割成不同的兩個節點，而形成裂縫線段，因此在同一個座標處有了兩個不同的節點，而貫穿裂縫的做法與表面裂縫相似，差異處在於貫穿裂縫的深度較深，直接貫穿整個太陽能電池的厚度，在本研究中多晶矽模型使用了 2,6228 個元素，而在模型厚度方向使用了 4 個元素。

## 2.6 模型之固定方式與邊界條件



為了達到符合線上檢測太陽能電池裂縫的目的，在模擬太陽能電池熱變形的過程中，原先的想法為讓模型是無受到固定的，但是一個不受固定的模型，在受熱變形的情況下，整個模型是會產生剛體運動(rigid body motion)的現象，這會讓 ANSYS 在求解過程中得到過大的位移值，系統判定無法順利解出合理的位移值，導致最後出現 Error 的訊息，因此為了不讓模型在分析過程中產生剛體運動，必須給予模型一個固定的區域或位置，但固定的區域不能太大以至於與真實情形差距過多，最後決定固定住太陽能電池模型的中心處( $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0$ )節點，也就是模型中心處  $U_x = U_y = U_z = 0$ ，在設定完成固定的方式與位置後，進入求解階段的模型即不會產生剛體運動與過大的位移，最後也能順利得到我們所需的結果。

為了模擬鹵素燈泡的光直接照射於太陽能電池之矽材料層的情況，

在進行模擬分析時，選定模型的矽材料最上層面之節點直接給予熱通量，讓熱量隨著時間往太陽能電池的厚度與面內方向傳遞，除了矽材料層頂面之外，在太陽能電池模型其餘的 5 個面上，皆設定為熱量不會往模型外傳遞，亦即這 5 個面的熱傳遞量是固定為 0 的

## 2.7 有限元素法之暫態熱分析的設定與介紹

暫態熱分析用於計算一個系統隨時間變化的溫度場、熱變形、熱應力，以及其他熱參數。太陽能電池在僅有中心點固定的情況下，用暫態熱分析計算溫度場，並進行應力應變分析。在太陽能電池的矽材料面上施予不同形狀之熱通量，在暫態分析的研究中，有一些參數設定非常重要，設定太陽能電池的初始溫度(initial temperature)以及參考溫度(reference temperature)，此代表著太陽能電池一開始沒有熱變形、熱應力的溫度。此外，因為一個暫態分析，是需要在時間區間上作數值積分的，因此需要指定積分時間點的區間(integration time step)  $\Delta T$ 。而總共要積分到什麼時間也是需要設定的。在本研究中，設定太陽能電池模型之參考溫度與初始溫度為  $20^{\circ}\text{C}$ ，為了符合實際線上所需要快速檢測，因此設定積分時間點的距離設定為 0.1 秒，總共的積分時間為 1 秒，這表示有 10 個積分時間點，而每一個積分時間點都能得到數值結果。

在下一章將詳細介紹無裂縫與含裂縫之多晶矽太陽能電池上施予 8 種不同形式的熱通量暫態模擬結果，此八種加熱分佈依照形狀依序分類為：

1. 由內而外遞減之高斯分佈熱通量

2. 由外而內遞減之高斯分佈熱通量
3. 十字形分佈之熱通量
4. 單對角形分佈之熱通量
5. 雙對角形分佈之熱通量
6. 空心大矩形分佈之熱通量
7. 空心小矩形分佈之熱通量
8. 實心矩形分佈之熱通量

因為以上 8 種加熱分佈在太陽能電池模型上所佔的面積大小不盡相同，而為了在最後的比較結果中，能夠有一個比較的基準點，因此本研究在設定此八種加熱分佈時，依照加熱分佈所佔模型的面積比例，給予設定不同的熱通量，熱通量之定義為：單位面積上的熱量( $\text{W} / \text{m}^2$ )，但是每個加熱分佈的總熱量會是一致的。各加熱分佈之面積與熱通量如表 2.4 所列。其中，以空心小矩形之加熱面積為最小，因此有最大的熱通量值。

## 第三章 數值分析結果與討論

### 3.1 數值模擬結果

本節將介紹無裂縫與含表面裂縫與貫穿裂縫之多晶矽太陽能電池在各種類型加熱分佈下 0.2 秒至 1 秒之暫態數值分析結果，無裂縫之太陽能電池模型可提供一個基準的應變分佈，可與含有裂縫之模型做比較，也可與實驗所拍攝之光斑干涉圖比對。在 2.1 節中推導出電子光斑干涉術之面外架構所能量測到的待測物最小面外位移為  $\lambda/2$ ，而本研究中所使用之雷射波長為 532nm，因此為了讓分析結果能夠與實驗結果作準確的對照，接下來所呈現的等高線圖每條線之間距皆為 266nm。

圖 3.1、圖 3.2 為裂縫位置示意圖

#### 3.1.1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池之分析結果如表 3.1 所列，此熱量採用高斯分佈算式，模擬燈泡照射於太陽能電池上，熱量分佈在模型中心點有最大值之熱量，而熱量沿著半徑方向往外依高斯分佈遞減呈現同心圓樣貌。將分析所得之多晶太陽能電池面外變形等高線，以等間距 266nm 繪出。無裂縫模型面外變形等高線呈現對稱的碗狀變形，類似同心圓，而隨著受熱時間增加造成面外變形量增加，等高線數量也會增加，等高線分佈會越密。表 3.2 所列為表面裂縫位於邊緣中心處的分析結果，裂縫處等高線位移分佈產生 V 形特徵，類似 chevron 輪廓。在 0.2 秒時，面外位移小，裂縫處只有 1 條等高線，到了 1 秒時，裂縫處已有 10 條等高線通過，由裂縫處數據也可發現 1 秒時，裂縫初

始端與裂縫間端面外位移差將近  $3\mu\text{m}$ 。表 3.3 所列為表面裂縫位於邊緣四分之一處分析結果，在裂縫位置等高線同樣出現 V 形輪廓，但是變形量相較於裂縫位於邊緣中心處小，裂縫處等高線數量也較少，但還是能清楚的看出裂縫種類、位置與長度。表 3.4 所列為貫穿裂縫位於邊緣中心處之分析結果，裂縫處 V 形輪廓不明顯，角度極小，而與表面裂縫相比，變形量也較小。表 3.5 所列為貫穿裂縫位於邊緣四分之一處之分析結果，貫穿裂縫處位移等高線出現兩側斷裂的現象，而由裂縫處數據，證實裂縫兩側位移的確不一致。

此加熱分佈造成的面外位移能夠有效檢測出表面裂縫的位置與長度。而貫穿裂縫的等高線特徵不明顯，雖能夠辨識出裂縫位置，但在判斷裂縫種類與長度則有難度。

### 3.1.2 由外而內遞減之高斯分佈熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池之分析結果如表 3.6 所列，此熱量同樣採用高斯分佈，但是與由內而外遞減之分佈熱通量相反，在模型最外圈具有最大值熱量，熱量往模型中心逐漸遞減呈同心圓樣貌。無裂縫等高線分佈稀疏，且因為矽晶圓材質的不均勻性，造成面外位移等高線呈現分段連續的變形。表 3.7 所列為表面裂縫於邊緣中心之分析結果，整體面外位移量會比無裂縫的模型大，但裂縫處的位移量極小，加熱 1 秒後裂縫處才看得到 1 條位移等高線，對於檢測裂縫位置與種類的效果不佳。而如表 3.8 所列，當表面裂縫位於邊緣四分之一處時，需要到時間 0.8 秒時才能看到裂縫處有一條等高線呈現 V 形輪廓，但因為裂縫處條紋數太少，因此在判斷裂縫長度時會比較不理想。表 3.9 所列為貫穿裂縫於邊緣中心之分析結果，模型整體位移仍不大，於

1秒時裂縫上有2條等高線分佈，但等高線變化特徵不明顯，不足以明確判斷裂縫種類與位置。邊緣四分之一處含貫穿裂縫之分析結果如表3.10所列，裂縫處特徵為等高線兩側斷裂不連續。

此加熱分佈對於檢測表面裂縫與貫穿裂縫的能力皆不佳，因為由外而內的熱量傳遞方向，使得面外位移量小，而在裂縫處的位移小、等高線分佈稀疏，且因為矽晶圓材質不均勻，所以等高線會呈現分段連續的形式。

### 3.1.3 十字形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池之分析結果如表3.11所示，此十字形熱量分佈寬度占了太陽能電池邊長的1/3，為5.2公分。無裂縫情況下之面外位移等高線呈現碗狀變形分佈，表3.12所列為表面裂縫位於邊緣中心處之分析結果，裂縫處等高線數量為8條，且呈現V形輪廓，足以由此特徵得知裂縫位置與長度。表3.13為表面裂縫位於邊緣四分之一處之面外位移等高線分布結果，加熱1秒後，裂縫位置只有2條位移等高線經過，雖有V形輪廓特徵出現，但是角度較小。表3.14為貫穿裂縫於邊緣中心處的分析結果，位移等高線為類似同心圓的碗狀分佈，與無裂縫的分析結果相近，幾乎無法在裂縫處觀察出裂縫特徵。邊緣四分之一處貫穿裂縫分析結果如表3.15所列，裂縫處等高線斷開不連續。

此加熱分佈除了在邊緣中心處的貫穿裂縫難以藉由等高線特徵辨識之外，皆有不差的檢測裂縫能力。

### 3.1.4 單對角形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池之分析結果如表 3.16 所示，此加熱圖形為靠近裂縫處之角落，延伸至對角的不對稱單邊對角形分佈。無裂縫分析結果面外等高線圖形因為加熱分佈的影響，與由內而外遞減之高斯分佈熱通量造成的碗狀變形相比，有一順時針變形的偏移。表 3.17 為表面裂縫於邊緣中心處的分析結果，可以看出原本就已經為不對稱的等高線分佈，因為表面裂縫的關係，在裂縫處又會出現 V 形輪廓。而在加熱 1 秒時，裂縫處有數量 7 條的等高線。表 3.18 為表面位於邊緣四分之一處之分析結果，在裂縫處的等高線同樣出現 V 形輪廓，但是與邊緣四分之一處的表面裂縫結果相比，裂縫處變形量更大，裂縫處等高線更密，加熱 1 秒時有 9 條的等高線通過裂縫處。表 3.19 所列為貫穿裂縫位於邊緣中心處的分析結果，模型整體變形較小，在貫穿裂縫處的變形量也比表面裂縫來的少，於加熱 1 秒時，裂縫處只有 4 條等高線的分佈，但是仍可由等高線斷裂的特徵，可以辨識出貫穿裂縫的位置。表 3.20 為貫穿裂縫於邊緣四分之一處的分析結果，裂縫處變形量一樣偏小，1 秒時有 4 條面外等高線分佈，裂縫處等高線有斷裂情形。

當裂縫位於邊緣四分之一處時，會比在其他位置的裂縫有更大的面外位移，原因是因為此加熱分佈讓整體模型往順時針方向偏移，更有利於檢測邊緣四分之一處的裂縫。

### 3.1.5 雙對角形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池之分析結果如表 3.21 所示，為一個對稱加熱分佈，由模型兩個角落延伸至對角，讓無裂縫的太陽能

電池模型受熱變形後，面外位移等高線同樣出現對稱的碗狀分佈。表 3.22 所列的是邊緣四分之一處含表面裂縫的分析結果，面外位移等高線於裂縫處出現 V 形輪廓，且在裂縫處的完整長度上，皆有出現 V 形的等高線特徵，非常易於檢測辨識裂縫的位置、種類與長度。表 3.23 呈現的是邊緣四分之一處表面裂縫分析結果，裂縫處出現 V 形特徵的等高線，而裂縫處長度上也都有等高線的分佈，可順利辨識裂縫種類與位置。當貫穿裂縫位於邊緣中心處時，面外位移結果如表 3.24 所列，裂縫處等高線並未出現斷裂的特徵，只有角度非常小的 V 形特徵，因此，只能判斷裂縫所在的位置，並無法順利辨識出裂縫種類。表 3.25 所列為貫穿裂縫於邊緣四分之一處的分析結果，裂縫處等高線有斷裂特徵，但是非每一條通過裂縫的等高線皆有此特徵，因此在辨識裂縫種類之外，並無法判斷完整的裂縫長度。

加熱分佈在模型上呈現對稱的形式，能讓無裂縫模型產生碗狀的面外位移變形。而在檢測表面裂縫方面，可以由裂縫處的 V 形輪廓辨識出裂縫種類與位置。而貫穿裂縫的等高線特徵並不明顯，雖能從特徵辨識出裂縫位置，但判斷裂縫長度的效果並不佳。

### 3.1.6 空心大矩形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫太陽能電池分析結果如表 3.26 所列。熱量分佈之實心部分寬度皆為 10mm，與由外而內遞減之高斯分佈熱通量有相同的概念，讓熱量由模型邊緣處往模型中心傳遞，無裂縫模型受熱後，同樣因為矽晶圓材質的不均勻性，造成面外位移等高線呈現分段連續的變形。表 3.27 所列為表面裂縫位於邊緣中心處的分析結果，表面裂縫處等高線出現了 V 形輪廓的特徵，雖然在加熱 1 秒時，裂縫處

只有 2 條等高線，但是由等高線的特徵，可以判斷裂縫的種類與位置。表 3.28 所列為邊緣四分之一處含表面裂縫的分析結果，由面外位移等高線發現分段連續變形的現象更為明顯，而裂縫處等高線並沒有出現 V 形輪廓，且裂縫處也沒有出現較密的等高線分佈，完全無法由等高線特徵辨識出裂縫位置、種類與長度。表 3.29 為貫穿裂縫於邊緣四分之一處的分析結果，面外位移等高線呈現分段連續變形，模型整體面外位移量非常的小，總共只出現 3 條等高線，且裂縫處並沒有任何的等高線分佈，因此，無法由等高線分佈辨識出裂縫種類、位置、長度。而當貫穿裂縫位於邊緣四分之一處時，裂縫處等高線有出現斷列特徵，如表 3.30 所列。雖然整體模型與裂縫處的面外位移量皆小，但由斷裂特徵可判斷裂縫種類與位置。

此加熱分佈檢測裂縫的效果不佳。因為矽晶圓材質的不均勻性，造成面外位移等高線呈現分段連續的變形，裂縫處等高線分佈稀疏或是根本無等高線通過，因此對於檢測裂縫來講，為無法達到目的之加熱分佈。

### 3.1.7 空心小矩形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫分析結果如表 3.31 所列，熱量分佈之實心部分寬度同樣為 10mm。而與由內而外遞減之高斯分佈熱通量有相同概念，皆為讓熱量由模型中心向外傳遞。當無裂縫模型受熱變形後，面外位移等高線呈現馬鞍形的變形分佈。含表面裂縫於太陽能電池模型邊緣中心時分析結果如表 3.32 所列，在加熱到 0.2 秒時，裂縫處即有 6 條面外位移等高線的分佈了，且等高線出現 V 形輪廓，所以在 0.2 秒時就能明確的由等高線特徵判斷裂縫的種類、位置與長度了。而到了

加熱時間為 1 秒時，裂縫處初始處與裂縫間端的位移差將近有  $4\mu m$ ，等高線分佈非常密集。表 3.33 所列為表面裂縫於邊緣四分之一處的分析結果，裂縫處的面外位移等高線同樣出現 V 形輪廓，在 0.6 時裂縫處有 4 條等高線的分佈，能夠清楚的檢測出裂縫。貫穿裂縫於邊緣中心處分析結果如表 3.34 所列，裂縫處等高線只有出現角度很小的 V 形輪廓，並沒有斷裂的現象，因此可能將此裂縫判斷為表面裂縫，而非貫穿裂縫。表 3.35 為貫穿裂縫於邊緣四分之一處分析結果，裂縫處等高線出現斷裂特徵，且裂縫兩側等高線數目不同。

此加熱分佈讓無裂縫的太陽能電池受熱後，產生馬鞍形的面外位移變形，而當分析含裂縫模型時，能夠由面外位移等高線分佈特徵，迅速的在短時間內判斷裂縫的種類與位置，達到檢測裂縫的目的。

### 3.1.8 實心矩形分佈之熱通量

此加熱分佈圖與無裂縫分析結果如表 3.36 所列，圖形中心位於模型中心，為邊長 68mm 的正方形。無裂縫模型受熱後，面外位移等高線呈現馬鞍形變形分佈。當表面裂縫於邊緣中心時，加熱 0.4 秒時即有 7 條等高線分佈於裂縫長度上，且有明顯的 V 形輪廓，可清楚辨識表面裂縫的位置與長度。時間到了 1 秒時，裂縫尖端與裂縫初始處面外位移差將近  $5\mu m$ ，等高線分佈極密，如表 3.37 所列。表 3.38 所列為表面裂縫於邊緣四分之一處分析結果，在加熱到達 1 秒時，裂縫處等高線數量有 9 條，且等高線特徵出現同樣出現 V 形輪廓。當貫穿裂縫位於邊緣中心時，裂縫處等高線只有出現微小角度的變形特徵，如表 3.39 所列。而貫穿裂縫位於邊緣四分之一處時，裂縫處會有等高線斷裂、兩側數目不均的現象，如表 3.40 所列。

實心矩形分佈之熱通量讓無裂縫的太陽能電池模型產生馬鞍形面外位移，且能夠讓含裂縫之太陽能電池模型在短時間內，由面外位移等高線的特徵辨識出裂縫的種類與位置，而檢測裂縫的效果比空心小矩形與由內而外遞減之高斯分佈熱通量兩種加熱分佈好。

### 3.2 結果討論

本研究中，8種加熱分佈的熱通量與面積皆不相同，而熱通量值越高的加熱分佈在同樣的加熱時間會有較高的上升溫度。隨著時間增加而模型受熱越多，面外位移越大，面外等高線分佈會越密，且裂縫處數據曲線的斜率會越大。含裂縫之模型又比無裂縫模型有更密的等高線分佈。而含表面裂縫的太陽能電池模型，於裂縫處之等高線分佈連續且呈現V型特徵，貫穿型裂縫會使等高線分佈於裂縫面兩側產生斷裂的特徵，且兩側等高線不相等。各加熱分佈於加熱1秒時面外位移等高線比較結果如表3.41至3.44所列加熱1秒溫度比較結果如表3.45至3.48所列，表3.49為各加熱分佈1秒時模型上溫度最高與最低值。由比較結果中發現，當熱量由模型中心向外傳遞的形式會讓太陽能電池模型產生碗狀或是馬鞍形的面外位移變形，如：由內而外遞減之高斯分佈、空心小矩形、實心矩形，這三種熱通量分佈皆為讓熱量從模型中心往外逐漸傳遞，也就是模型中心溫度會較高，而遠離中心或加熱區域處的溫度則逐漸降低，造成太陽能電池模型中心與外圍的溫度差異，因此模型受熱後面外位移會呈碗狀、馬鞍形這兩種形式，而這兩種面外位移變形對於裂縫檢測會有很好的效果，表面裂縫處面外位移等高線呈現V形輪廓，貫穿裂縫處等高線斷裂。此外，當熱量由遠離

模型中心處向內傳遞時，面外位移變形量較小，且裂縫處等高線分佈稀疏。由外而內遞減之高斯分佈、空心大矩形、這兩種熱通量分佈會讓模型中心溫度較低，而遠離中心處的溫度較高，模型受熱後面外位移等高線呈現分段連續的變形，且含裂縫模型等高線特徵無法明顯辨識出裂縫種類與位置。而在這 8 種熱通量分布中，實心矩形之熱通量能夠在最短的時間內讓模型有足夠的等高線分佈數量以及明確的等高線特徵，以準確判斷裂縫的種類與位置，因此接下來會有一部分實驗會在光源為實心矩形的形式下進行實驗。



## 第四章 實驗量測結果與討論

本章介紹以設計的面外量測裝置，量測有、無裂縫之多晶矽太陽能電池，並呈現裂縫檢測的實驗結果。檢測結果包含位於太陽能電池邊緣四分之一處、邊緣中心處、以及底部中心處的表面裂縫與貫穿裂縫，並將實驗與數值分析結果比對，驗證拍攝結果之準確性，也能更加確認裂縫存在之位置與裂縫類型。

### 4.1 面外 ESPI 實驗架構

本研究利用太陽能電池受熱產生熱變形，溫度的傳遞於裂縫處會產生不連續之情形，會導致裂縫處的熱變形位移也會有不連續的情況發生，有、無裂縫之太陽能電池在裂縫處位移變化會有所不同。因此，藉由面外 ESPI 量測系統拍下加熱中的太陽能電池光斑影像，由干涉光強度不同造成的相異干涉條紋特徵去辨別裂縫所在區域與裂縫種類。

為了符合太陽能電池生產線上的真實情況，一開始就設定待測太陽能電池是不能有任何拘束邊界條件的，讓待測太陽能電池在受熱過程中，能夠自由地變形而無受到拘束，期能夠得到最真實的光斑圖形，因此實驗架構必須讓待測太陽能電池能夠利用自身的重量而固定在架構上，實體實驗架構如圖 4.1 所示，且由圖 4.2 所呈現的側面角度可看出整體架構有一個傾斜角  $10^\circ$ ，讓待測太陽能電池能夠在不需要任何人為固定的情況下，穩定的置於此架構中。而在此電子光斑面外檢測實驗中所另外使用的實驗設備如下：

1. 波長 532nm 之綠光半導體雷射(Spectra-Physics Excelsior-532-50)，實體圖如圖 4.3 所示。

2. 60X 物鏡與 10X 針孔(pin hole)所組成之空間濾波器(spatial filter)。
3. 分光鏡(bean-splitter)
4. CCD 相機(Basler sca1300-32gm，1280×960 畫素)。
5. 球形鹵素燈泡(東亞照明，70W)與燈罩。
6. 多晶矽太陽能電池(Polycrystalline silicon solar cells)。
7. Labview 圖形化程式與 MATLAB 軟體。

雷射光經過物鏡與針孔組成之空間濾波器後，會變成一球面光，球面光再被45°分光鏡分為物光與參考光，物光照射於待測物表面，參考光照射在參考物上，皆產生了散射光斑。使用鹵素燈泡加熱太陽能電池，使用 Labview 程式設定 CCD 拍攝張數與每張照片的時間間隔，擷取太陽能電池受熱變形前、後之光斑圖形，再以 Matlab 軟體將進行影像處理與濾掉高頻雜訊後，獲得光斑干涉圖形。Labview 與 Matlab 程式介面如圖 4.4、4.5 所示。

## 4.2 量測試片之裂縫製作

本研究使用的試片為向台灣元晶太陽能科技股份有限公司(TSEC Corporation)所購買之多晶矽太陽能電池，使用自製的金字塔狀工業鑽石壓頭，裝在 Matsuzawa DXT-3 洛克式硬度測試(Rockwell hardness test)機上(圖 4.6、4.7)，控制硬度機將太陽能電池邊緣壓開成缺陷，再使用鉛筆後端之橡皮擦沿著缺陷處輕輕敲擊，讓缺陷延展成自然裂縫(natural crack)，如圖 4.8、4.9 所示。表面裂縫在厚度方向延伸並停止於矽-鋁共晶結構，而貫穿裂縫則貫穿於整個試片厚度，因此含貫穿裂縫的太陽能電池試片的正面與背面皆可由肉眼觀察到裂縫的痕跡。

### 4.3 光源溫度與強度量測

在進行面外量測實驗之前，先使用 ZyTemp TN-425LB 紅外線溫度計(圖 4.10)量測燈泡與太陽能電池的溫度，量測得到燈泡最高溫度為  $148^{\circ}\text{C}$ ，太陽能電池初始溫度  $25^{\circ}\text{C}$ ，得到太陽能未加熱前的溫度後，進行太陽能電池等距離九宮格之升溫實驗，將多晶太陽能電池劃分為九宮格，如圖 4.11 所示，同樣使用紅外線溫度計量測 1 秒後太陽能電池的溫度，結果如圖 4.12 所示，5 號位置因為在燈泡加熱的中心，所以 1 秒後會比試片上其他位置的溫度略高一些。接著使用 Newport 1918-R 光功率計(power meter)配合 884-SL 衰減器(圖 4.13)量測鹵素燈泡之光強度。將面積為之光偵測器放置於距離燈泡 15cm 處與 20cm 處，可分別得到  $0.014\text{W}$  與  $0.01\text{W}$  之光強度數據。

### 4.4 無光罩多晶矽太陽能電池的量測

本節介紹多晶矽太陽能電池於無光罩情形下，有、無裂縫之實驗結果。首先設定 Labview 程式，讓 CCD 於實驗過程中，每 0.1 秒拍攝 1 張影像圖，實驗過程持續 1 秒，因此總共能得到 10 張試片面外變形影像圖，最後以 0.2 秒之影像圖為基準，利用影像處理程式將各個時間之影像與 0.2 秒影像圖相減，得到面外干涉條紋圖。本研究之實驗結果皆使用同一套影像處理流程所得到。

#### 4.4.1 無裂縫

首先，必須先知道無缺陷多晶矽太陽能電池試片在受熱情況下產生的光斑干涉條紋，之後將無缺陷試片與含缺陷試片光斑結果進行比

較，由光斑特徵才能辨識裂縫的位置。將一片完整無裂縫多晶矽太陽能電池待測試片，放置於 ESPI 面外量測系統中，讓鹵素燈泡之光源不會經過任何光罩、光阻的阻擋，完整的照射於抗反射層面上，且讓試片於無拘束的情況下進行熱變形。量測結果如表 4.1 所列。由實驗結果發現，無裂縫試片變形後，面外位移之電子光斑條紋會呈現馬鞍形，而隨著不斷加熱，試片熱變形量逐漸增大，因此電子光斑條紋數也會逐漸增加。雖然考慮到檢測的解析度為條紋數越多，解析度會越高，但是到了 0.7 秒圖片中試片邊緣的條紋已經開始模糊了，清晰度也較差。

#### 4.4.2 表面裂縫

首先將完整無缺陷的多晶矽太陽能電池試片，分別於邊緣四分之一處、邊緣中心處、底部中心處，使用鉛筆尾端橡皮擦輕敲，讓裂縫停止於矽-鋁共晶結構，製作出自然表面裂縫。同樣讓光源不經過任何光罩的阻擋而直接照射於待測試片上。表 4.2 為表面裂縫於試片邊緣中心處的實驗結果，虛線標示區域為表面裂縫的位置，ESPI 影像的干涉條紋分佈呈現馬鞍形，與無裂縫試片實驗結果相同，裂縫處干涉條紋也與無裂縫試片無相異特徵，因此無法由實驗有效判斷出裂縫的位置。表 4.3、表 4.4 所列為表面裂縫於試片邊緣四分之一處與底部中心的實驗結果，ESPI 干涉條紋影像皆同樣為馬鞍形分佈，且干涉條紋都與無裂縫試片有同樣的形狀，因此無法判斷裂縫位置。

含表面裂縫試片於無光罩的情況下受熱變形後，ESPI 影像干涉條紋與無裂縫實驗結果相同，表面裂縫無法使面外位移的光斑干涉條紋

產生不連續之特徵，因此無法由干涉條紋特徵清楚辨識出裂縫位置。

#### 4.4.3 貫穿裂縫

同樣使用鉛筆尾端橡皮擦敲擊待測試片邊緣中心處、邊緣四分之一處、底部中心處三個位置，讓裂縫貫穿整個太陽能電池厚度方向，製作出貫穿裂縫試片。表 4.5 為貫穿裂縫於試片邊緣中心處的實驗結果。ESPI 影像的面外干涉條紋除了呈現馬鞍形的分佈外，在裂縫處光斑干涉條紋產生了不連續之特徵與小角度的 V 形輪廓。而表 4.6 所列為貫穿裂縫於試片邊緣四分之一處與底實驗結果，貫穿裂縫並沒有使 ESPI 影像面外干涉條紋產生不連續特徵，裂縫處干涉條紋形狀與無裂縫試片實驗結果相似，無法判斷裂縫位置。表 4.7 為貫穿裂縫於試片底部中心實驗結果，由虛線標示的區域可以看出貫穿裂縫造成干涉條紋產生不連續且斷裂的情形，可以很清楚的從干涉條紋特徵辨識裂縫位置。

#### 4.4.4 結果討論

完整無裂縫之多晶太陽能電池試片，受到無光罩阻擋的鹵素燈加熱變形後，ESPI 影像干涉條紋會呈現出對稱的馬鞍形分佈，且受熱越長時間，試片變形量越大，干涉條紋數量分佈越密。含表面裂縫的太陽能電池試片受熱變形後，皆無法清楚的辨識出條紋不連續特徵，無法準確判斷裂縫位置。含貫穿裂縫於邊緣中心與底部中心之試片，裂縫處干涉條紋會出現 V 形輪廓與條紋斷裂的情形，可以由這些條紋特徵判斷出裂縫的位置與長度。於此實驗結果顯示，當裂縫位於試片邊緣四分之一位置時，ESPI 影像的干涉條紋皆無出現不連續特徵，沒有辦法辨識裂縫的存在。

## 4.5 實心矩形加熱分佈之多晶矽太陽能電池的量測

在無光罩實驗中發現含表面裂縫與無裂縫之試片，ESPI 影像的面外位移干涉條紋並無明顯差異，無法從條紋特徵判別出裂縫位置，也就代表著表面裂縫部分的檢測效果並無法達到預期，因此選用了在數值分析模擬中效果最好的實心矩形，再次進行 ESPI 實驗，希望藉由此加熱分佈，造成試片上的溫差變大，順利檢測出表面裂縫。

### 4.5.1 無裂縫

為了先瞭解加上矩形光罩後與無光罩情況下之光斑干涉條紋有何差異，首先進行無裂縫之待測試片試驗。將一遮光布(圖 4.14)裁剪成實心矩形光罩的形式，如圖 4.15 所示，再將光罩固定於電池試片與光源中間，讓光源通過光罩後只有中心一實心矩形部分能夠照射於電池試片上，其餘部分之光與熱皆被阻擋下來。實驗結果如表 4.8 所列。光斑干涉條紋與無光罩時同樣呈現為馬鞍形，ESPI 影像的干涉條紋數也同樣隨著加熱時間而增加，但是光罩阻擋了一部份的光，試片的受熱面積變小，試片熱變形量較小，所以在同樣加熱時間下的干涉條紋圖，含實心矩形光罩與無光罩相比有較少的干涉條紋數。表 4.9 比較無裂縫電池面外位移的 ESPI 影像與無裂縫電池模形面外位移等高線的數值結果。

### 4.5.2 表面裂縫

由於含表面裂縫的試片於無任何光罩下熱變形後，無法使 ESPI 影像的面外干涉條紋產生異於無裂縫試片的條紋特徵，從 ESPI 影像判斷

不出裂縫的位置，因此將含表面裂縫的試片放置於含實心矩形加熱分佈光罩下，讓光源經過光罩後成為實心矩形照射於待測太陽能電池試片上，期望不同的加熱分佈改變太陽能電池試片的熱變形，再由 ESPI 面外干涉條紋的特徵檢測出裂縫的位置。表 4.10 所列為含表面裂縫於邊緣中心處的太陽能電池試片實驗結果，裂縫位於虛線標示區域，ESPI 影像發生了偏移，且裂縫處干涉條紋產生 V 形輪廓的特徵，與數值模擬結果相符，有效判斷出裂縫的位置。表 4.11 為表面裂縫位於邊緣四分之一處時的實驗結果，ESPI 影像為馬鞍形，但是裂縫處的干涉條紋會與裂縫幾乎平行，因此表面裂縫無法使面外干涉條紋產生 V 形輪廓或是不連續的特徵，無法有效判斷出裂縫的位置，表 4.12 為數值分析與實驗結果比較，當表面裂縫位於邊緣中心處時，數值模擬與實驗 ESPI 影像於裂縫處皆有出現 V 形特徵，但當表面裂縫位於邊緣四分之一處，實驗結果與數值模擬不相符，沒有出現裂縫特徵。

當表面裂縫位於試片的底部中心處時，ESPI 影像除了呈現馬鞍形外，在虛線標示的裂縫區域處，干涉條紋產生 V 形輪廓，由此特徵可以清楚辨識出裂縫存在的位置(如表 4.13 所列)。

#### 4.5.3 貫穿裂縫

在無光罩的實驗中，除了在試片邊緣四分之一處的貫穿裂縫無法由干涉條紋特徵判別出來之外，試片另外兩處位置的貫穿裂縫皆會使干涉條紋出現不連續或斷裂的特徵。因此，在此實心矩形加熱分佈實驗中，主要是希望能藉由改變加熱分佈，檢測出試片邊緣四分之一處的貫穿裂縫，可是也會進行其他兩處位置的 ESPI 影像拍攝實驗，以期

能得到更好的結果。表 4.14 為貫穿裂縫位於試片邊緣中心處之實驗結果，ESPI 影像發生了偏移，裂縫處兩側干涉條紋產生不連續且斷裂特徵。當貫穿裂縫位於試片邊緣四分之一時，如表 4.15 所列，ESPI 影像為馬鞍形，與無裂縫試片實驗結果類似。裂縫處干涉條紋與裂縫平行，無不連續或斷裂特徵，無法有效判斷出裂縫位置，表 4.16 為數值模擬與實驗結果比較，當裂縫位於邊緣中心時，數值模擬面外位移等高線出現不明顯的 V 型特徵，而實驗結果 ESPI 影像的干涉條紋會在裂縫處出現斷裂特徵，而當裂縫位於邊緣四分之一處時，數值模擬面外位移等高線出現斷裂特徵，但是實驗結果無法判斷裂縫。表 4.17 所列為貫穿裂縫於試片底部中心處之實驗結果，裂縫處出現干涉條紋斷裂的特徵，且裂縫兩側條紋數目不相等，裂縫處條紋特徵明顯，能有效辨識出裂縫位置。



#### 4.5.4 結果討論

在受到光罩阻擋一部份光源的情況下，太陽能電池受熱集中於試片中心的矩形區域，與無光罩實驗相比，在同樣加熱時間下，此矩形加熱分佈造成的熱變形量小，面外干涉條紋數量較少，但是光斑干涉條紋的清晰度與實驗的重現性較好，且除了位於試片邊緣四分之一處的裂縫無法清楚辨識外，其餘兩處的表面裂縫與貫穿裂縫皆能從干涉條紋特徵成功地判斷出位置。因此在下一個實驗中，將單獨針對試片邊緣四分之一位置的裂縫進行檢測，由不對稱的加熱分佈改變干涉條紋在試片邊緣四分之一處與裂縫平行的現象，讓干涉條紋能於裂縫處順利產生不連續的特徵，才能判斷出裂縫的存在。

## 4.6 單對角形加熱分佈之多晶矽太陽能電池的量測

因為在前兩個無光罩與矩形光罩加熱實驗中，位於邊緣四分之一處之裂縫量測結果皆不理想，因此在這此實驗中，選擇了不對稱的單對角形加熱分佈進行實驗，期望藉由不對稱之加熱分佈，使得原本位於試片邊緣中心的光斑干涉條紋，能夠順時針的偏轉至試片邊緣四分之一處，裂縫能夠與干涉條紋垂直，試片在受熱變形後，裂縫能夠讓干涉條紋產生不連續的情況，進而順利判斷出裂縫，單對角形光罩圖如圖 4.16 所示。首先將一片完整無裂縫的待測太陽能電池試片，放置於含單對角形光罩的 ESPI 面外量測架構中進行試驗。表 4.18 所列為實驗結果，此加熱分佈成功地使得 ESPI 影像產生順時針的偏轉，能夠與裂縫垂直的干涉條紋影像偏移至靠近試片的邊緣四分之一處，因此接著進行含裂縫試片的實驗。表 4.19 為含表面裂縫試片的實驗結果，雖然 ESPI 影像已有順時針的偏轉，但是表面裂縫仍然無法使干涉條紋產生不連續的特徵，故 ESPI 量測實驗無法有效判斷出表面裂縫的位置。而含貫穿裂縫的試片實驗結果如表 4.20 所列，ESPI 影像除了因為加熱分佈產生了順時針的偏轉之外，也因為貫穿裂縫而導致了影像的變形與偏移，裂縫處干涉條紋斷裂且裂縫兩側條紋數不同，能由條紋特徵有效判斷出裂縫位置。

雖然在使用了單對角形加熱分佈後，成功地使得 ESPI 影像產生了順時針的偏轉與偏移，但是試片邊緣四分之一處的表面裂縫仍無法讓干涉條紋產生任何能讓我們看出裂縫存在的特徵變化，因此，最後嘗試未包含於第三章數值分析 8 種分佈內的熱通量進行實驗，主要目的為檢測出試片邊緣四分之一處的表面裂縫。加熱分佈如圖 4.17 所示，

為通過試片中心、寬度為 10mm 的長條形分佈。表 4.21 為數值模擬與實驗結果比較，從實驗 ESPI 影像可以看出，表面裂縫處的干涉條紋產生了小角度彎折變化，與數值分析結果有些差異，但是從彎折的干涉條紋特徵，可以判斷出裂縫的位置。

## 4.7 結果與討論

於無任何光罩的情況下，無裂縫之多晶矽太陽能電池試片實驗後得到的 ESPI 光斑干涉條紋呈現馬鞍形，而在含裂縫試片實驗中，表面裂縫之 ESPI 影像的光斑干涉條紋與無裂縫試片干涉條紋無異，並無法成功辨識出表面裂縫之位置與長度。但貫穿裂縫則可以清楚檢測出，貫穿裂縫兩側干涉條紋會呈現斷裂且條紋數不同的特徵。

在光罩為實心矩形的加熱分佈實驗中，無裂縫試片 ESPI 影像為馬鞍形分布，與數值模擬結果類似，而加熱分佈會使得太陽能電池試片上的溫差變大，除了試片邊緣四分之一處裂縫依舊無法由條紋成功辨識外，邊緣中心與底部中心之表面裂縫與貫穿裂縫皆能清楚檢測出，且干涉條紋清晰度較好。表面裂縫處之光斑條紋呈現 V 形輪廓，而貫穿裂縫處兩側干涉條紋則呈現斷裂不連續情形，與數值分析結果相同。

單對角形光罩為不對稱加熱分佈，讓試片受熱後造成不對稱的面外變形，ESPI 影像的干涉條紋會有一順時針偏轉，與數值模擬中面外位移等高線順時針偏轉的情況相同，使得原本位於邊緣中心處條紋往上偏移至靠近四分之一的地方，較有利於邊緣四分之一處的裂縫檢測效果。而由實驗結果證實的確可由干涉條紋的特徵順利檢測出試片邊

緣四分之一處之貫穿裂縫，但是邊緣四分之一處之表面裂縫仍無法清楚辨識。最後嘗試的長條形加熱分佈則成功的讓邊緣四分之一處表面裂縫附近的干涉條紋產生了小角度的彎曲變形，可判斷出裂縫的位置。

總和以上實驗結果，本研究利用在數值分析中有最好結果的實心矩形加熱分佈進行 ESPI 實驗，能夠大幅改善實驗的結果，ESPI 影像的干涉條紋能夠有更好的清晰度，而不對稱的單對角形加熱分佈讓試片受熱變形後能得到偏轉的 ESPI 影像，進而順利檢測出試片邊緣四分之一處的貫穿裂縫，最後的長條形加熱分布，則讓試片邊緣四分之一處的表面裂縫附近的干涉條紋發生了小角度的彎曲變化，此干涉條紋的改變在前面的實驗是無法被發現的，因此，本研究使用了這 3 種加熱分佈圖形，最後成功地檢測出試片邊緣中心、邊緣四分之一、底部中心處的表面裂縫及貫穿裂縫。



## 第五章 結論與展望

本研究應用電子光斑干涉術(ESPI)為檢測方法，以鹵素燈泡為非接觸熱源，成功地分析矽晶太陽能電池熱變形的光斑干涉條紋，判斷裂縫存在的區域與裂縫種類。數值分析上採用有限元素套裝軟體，計算不同加熱分佈之太陽能電池面外撓曲等高線分佈，歸納出適合偵測裂縫的加熱圖形。

### 5.1 結論

本研究以溫子達[16]實驗架構為基礎，改良偵測多晶矽太陽能電池裂縫之加熱方式，以鹵素燈泡取代加熱板，非接觸加熱太陽能電池試片，將固定試片方式改為無拘束，符合線上量測需求之快速、即時、非破壞檢測的目的。矽晶太陽能電池是由矽、鋁所構成的積層複材結構，因組成材質的熱膨脹係數不同，受熱會產生彎曲變形。利用此特性，先以有限元素分析軟體 ANSYS 建立 6 吋多晶太陽能電池數值模型，並在模型的節點上給予不同分佈之熱通量，進行暫態的結構與熱傳分析，熱量隨著時間變化在模型的面內方向進行傳遞。依據 8 種不同熱通量分佈的面外變形分析結果，篩選出檢測裂縫速度最快、能清楚辨識裂縫位置的實心矩形分佈之熱通量進行 ESPI 面外變形量測實驗。將待測電池試片以自重，不加拘束的方式置於 ESPI 面外量測架構，加熱產生撓曲變形。

矽基太陽能電池的裂縫是以工業鑽石頂針擠壓試片產生的自然裂縫，分別位於試片側緣四分之一處、試片側緣中心、試片底緣中心。採用 3 種不同熱量分佈加熱表面裂縫與貫穿型裂縫試片。完整無裂縫

的太陽能電池的 ESPI 面外光斑條紋與數值分析結果有些許差異，皆為碗狀變形或馬鞍形變形。在無光罩情況下加熱電池試片，表面裂縫的檢測效果不佳，貫穿裂縫處的干涉條紋則會有斷裂不連續的現象。於實心矩形熱量分佈試驗中，表面裂縫處之干涉條紋有 V 形輪廓，貫穿裂縫處的干涉條紋會斷開，由 ESPI 影像發現貫穿裂縫會讓條紋出現偏移的情形。無光罩與實心矩形熱量分佈實驗皆無法清楚檢測出位於試片側緣四分之一處的裂縫。輸入不對稱的單對角形熱量分佈，能夠成功地拍攝側緣四分之一處的貫穿裂縫特徵。長條形熱量分佈實驗可以成功地讓試片側緣四分之一處裂縫的干涉條紋產生了彎折變形，成功辨識出表面裂縫的確切位置。

本研究先分析歸納出適合檢測裂縫的溫度分佈，應用於辨識太陽能電池裂縫檢測的實驗。數值分析及實驗結果顯示裂縫會造成太陽能電池熱變形的面外位移不連續，表面裂縫及貫穿裂縫的光斑條紋分別出現 V 形輪廓或是斷裂的特徵。第四章的 ESPI 實驗與第三章數值分析結果存在些許差異，推測可能是因為太陽能電池在製造過程存有殘留應力，影響試片的均勻性(homogeneity)。數值分析得知易於檢測裂縫的熱通量分佈為何，之後的 ESPI 實驗才能成功檢測多晶太陽能電池試片上的裂縫。

## 5.2 未來展望

多晶矽太陽能電池背面的矽鋁共晶結構具有很高的破壞韌性，故電池製造或運送過程中形成的缺陷以表面裂縫為主，不易由肉眼觀察透光與否檢出裂縫。貫穿裂縫則能由肉眼觀察辨識。本研究於多晶

矽太陽能電池之裂縫檢測效果明顯且再現性高，因此未來可依循此方式，主要應用於檢測表面裂縫缺陷，往後如能加強光斑條紋的自動化光學辨識能力，發展出辨識干涉條紋特徵的機器視覺方法，成為一套完整的實用自動化光學檢測技術。

實驗方面可以對鹵素光源進行周期性亮度調制，改善加熱程序。在數值分析改進方面，太陽能電池不單純只有熱傳導(heat conduction)，可分析數值模型與空氣接觸的熱對流(convection)及熱輻射(radiation)，讓整個加熱過程更接近真實情形。



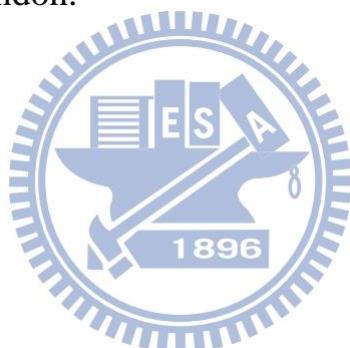
## 參考文獻

- [1] M. Kasai, H. Shimizu, T. Sawada, and Y. Gonhshi (1985), “Non-destructive observation of stacking faults of silicon-wafer by means of photoacoustic microscopy,” *Analytical Science*, Vol.1, pp.107-109.
- [2] O. Breitenstein and M. Langenkamp (1998), “Lock-in contact thermography investigation of lateral electronic inhomogeneities in semiconductor devices ,” *Sensors and Actuators A*, 71 , 46-50.
- [3] S. Ostapenko and I. Tarasov (2000), “Nonlinear resonance ultrasonic vibration Czochralski-silicon wafers,” *Applied Physic Letters*, 76(16), 2217-2219.
- [4] S. Ostapenko, W. Dallas, D. Hess, O. Polupan, and J. Wohlgemuth (2006), “Crack detection and analysis using resonance ultrasonic vibrations in crystalline silicon wafers,” *Proceedings of the 2006 IEEE 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*,920-923.
- [5] W.Dallas, O. Polupan, and S. Ostapenko (2007), “Resonance ultrasonic vibrations for crack detection in photovoltaic silicon wafers,” *Measurement Science and Technology*, **18**, 852-858.
- [6] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahashi, and Y. Uraoka (2005), “Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon cells by electroluminescence,” *Applied Physic Letters*, Vol. 86, 262108.
- [7] T. Trupke, E. A. Bardos, M. C. Schubert, and W. Warta, (2006), “Photoluminescence imaging of silicon wafers, ” *Applied Physic*

*Letters*, Vol. 89, 044107.

- [8] J. N. Butters and J. A. Leendertz (1971), “Speckle patterns and holographic techniques in engineering metrology,” *Optics Laser Technol.*, **3**(1), 26-30.
- [9] J. A. Leendertz and J. N. Butters (1972), “An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments,”
- [10] K. Høgmoen and O. J. Løkberg (1977), “Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry,” *Applied Optics*, **16**(7), 1869-1875
- [11] K. Creath. (1985), “Averaging double-exposure speckle interferograms,” *Optics Letters*, **10**, 582-4.
- [12] S. Nakadate (1986), “Vibration measurement using phase-shifting speckle-pattern interferometry,” *Applied Optics*, **25**(22), 4162-4167
- [13] W.-C. Wang, C.-H. Hwang, and S.-Y. Lin (1996), “Vibration measurement by the time-average electronic speckle pattern interferometry methods,” *Applied Optics*, **35**(22), 4502-4509.
- [14] E. A. Zarate, E. Custodio, C. G. Trevino -Palacios, R. Rodriguez-Vera, and H. J. Puga-Soberanes (2005), “Detect detection in metals using electronic speckle pattern interferometry,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **88**, 217-225.
- [15] 鄭智遠(2011), 砂基板面內共振的電子光斑干涉量測, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 新竹市, 台灣。
- [16] 溫子達(2012), 電子光斑干涉術應用與矽晶太陽能電池之裂縫檢測, 國立交通大學機械工程學系博士論文, 新竹市, 台灣。
- [17] Xide Li, Gang Tao, and Yizhang Yang (2001), “Continual deformation analysis with scanning phase method and time sequence phase

- method in temporal speckle pattern interferometry," *Optics & Laser Technology*, **33**, 53 -59.
- [18] C.-C. MA and C.-Y. Chang (2011), "Mode-shape measurement of piezoelectric plate using temporal speckle pattern interferometry and temporal standard deviation," *Opt Lett*, Vol. **36**, No. **21**, 4281-4283.
- [19] ANSYS, *Release 11.0 Documentation for ANSYS : Element Library*. SAS IP, Inc., USA, 2007.
- [20] ANSYS, *Release 11.0 Documentation for ANSYS:Structural Analysis Guide, Transient Dynamic Analysis*, SAS IP, Inc., USA, 2007.
- [21] J. P. Holman (1992), Heat Transfer, 7<sup>th</sup> Metrc edition, McGraw-Hill Book Company, London.



## 附表

表 2.1 多晶太陽能電池之矽材料常數

彈性常數(GPa)	160
熱膨脹係數(ppm/k)	2.6
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2330
柏松比	0.28
熱傳導係數(w/m-k)	124
比熱(J/kg - °c)	700

表 2.2 多晶太陽能電池之金屬電極材料常數

彈性常數(GPa)	76
熱膨脹係數(ppm/k)	18.9
密度(kg/m <sup>3</sup> )	10500
柏松比	0.28
熱傳導係數(w/m-k)	419
比熱(J/kg - °c)	234

表 2.3 多晶太陽能電池之鋁漿材料常數

彈性常數(GPa)	43
熱膨脹係數(ppm/k)	3.7
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2700
柏松比	0.35
熱傳導係數(w/m-k)	210
比熱(J/kg - °c)	900

表 2.4 各加熱分佈面積與熱通量

加熱分佈	加熱面積( $\text{m}^2$ )	熱通量( $\text{W}/\text{m}^2$ )
熱通量由內而外遞減	$2.4336 \times 10^{-2}$	4106.69
熱通量由外而外遞減	$2.4336 \times 10^{-2}$	2363.16
十字形	$1.352 \times 10^{-2}$	2700
單對角形	$1.0647 \times 10^{-2}$	3428.57
雙對角形	$1.8252 \times 10^{-2}$	2000
空心大矩形	$5.04 \times 10^{-3}$	7242.86
空心小矩形	$2.24 \times 10^{-3}$	16296.43
實心矩形	$4.624 \times 10^{-3}$	7894.5

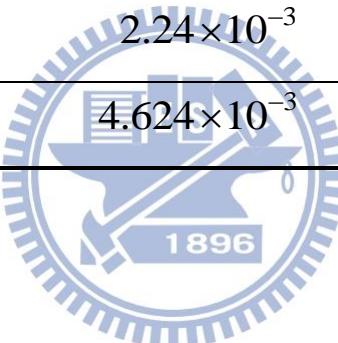


表 3.1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(無裂縫)

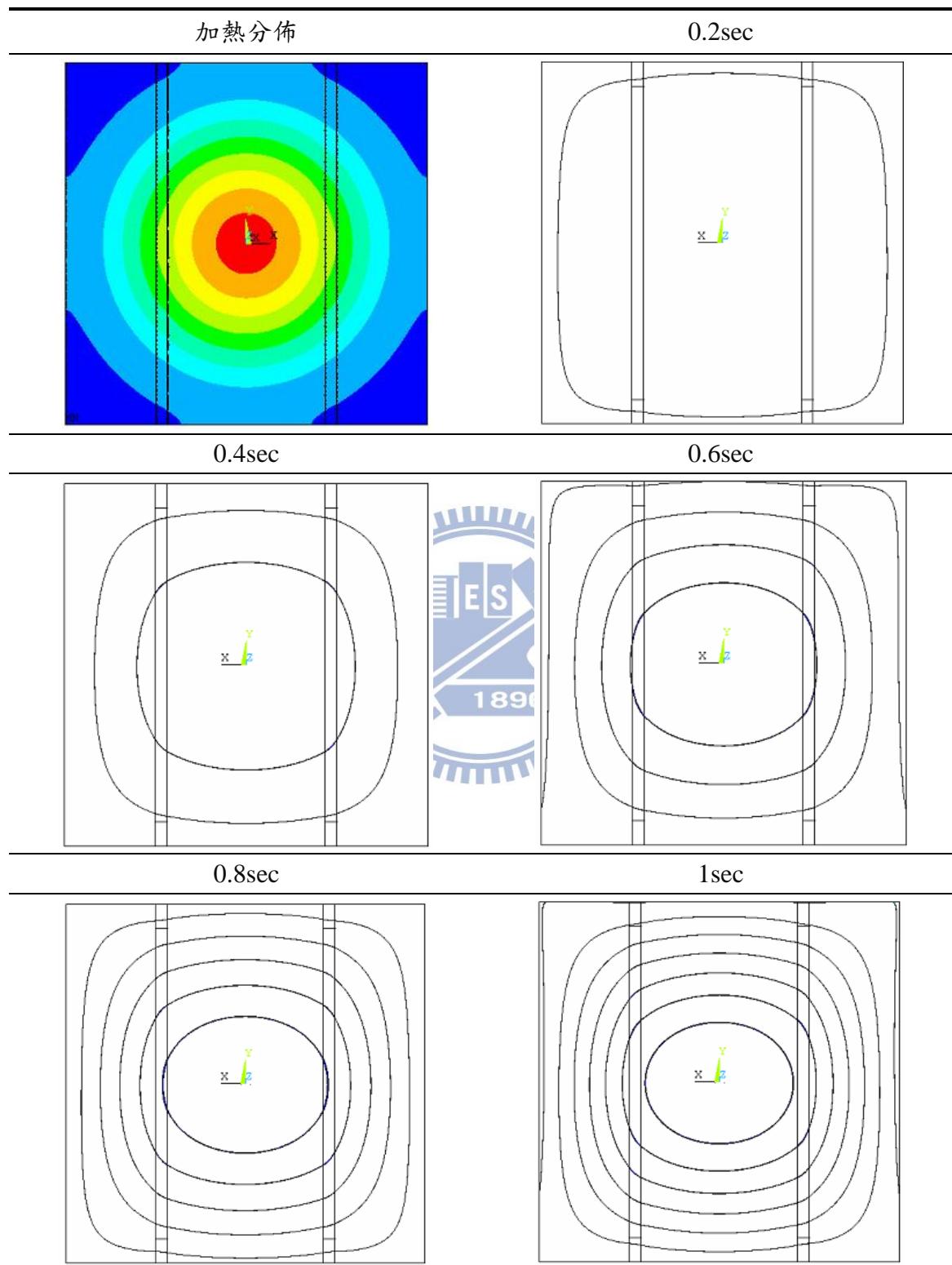


表 3.2 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

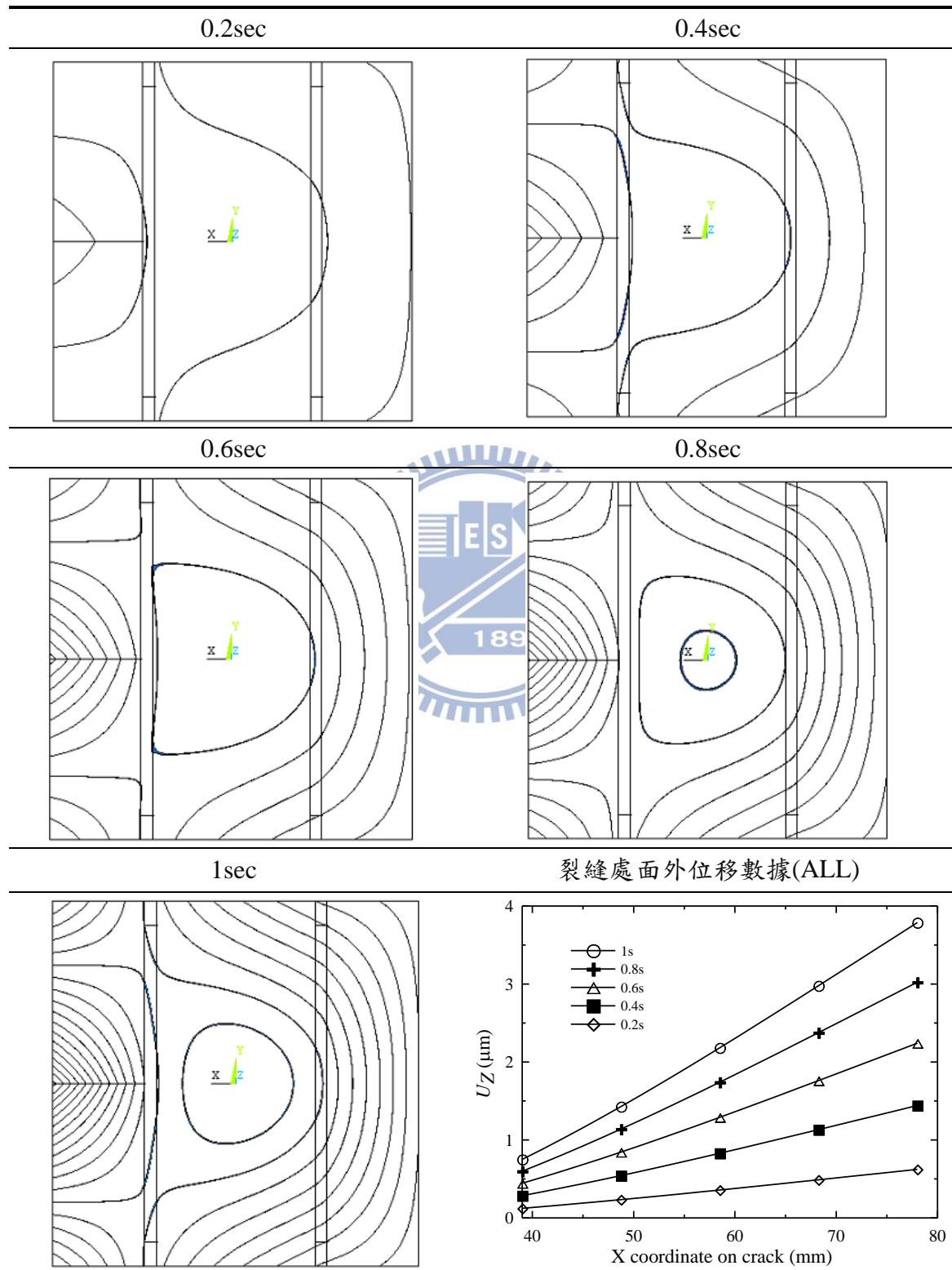


表 3.3 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

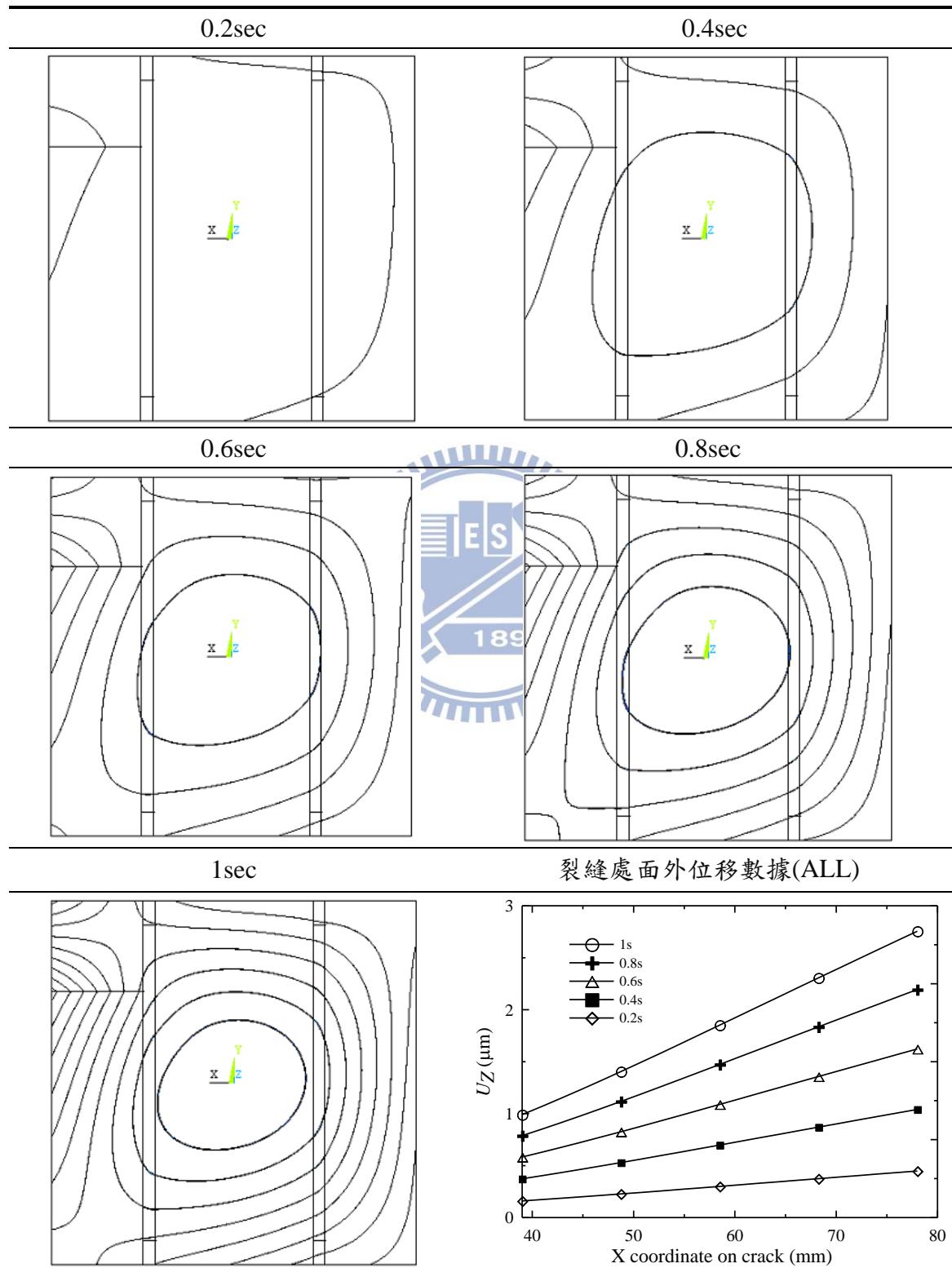


表 3.4 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

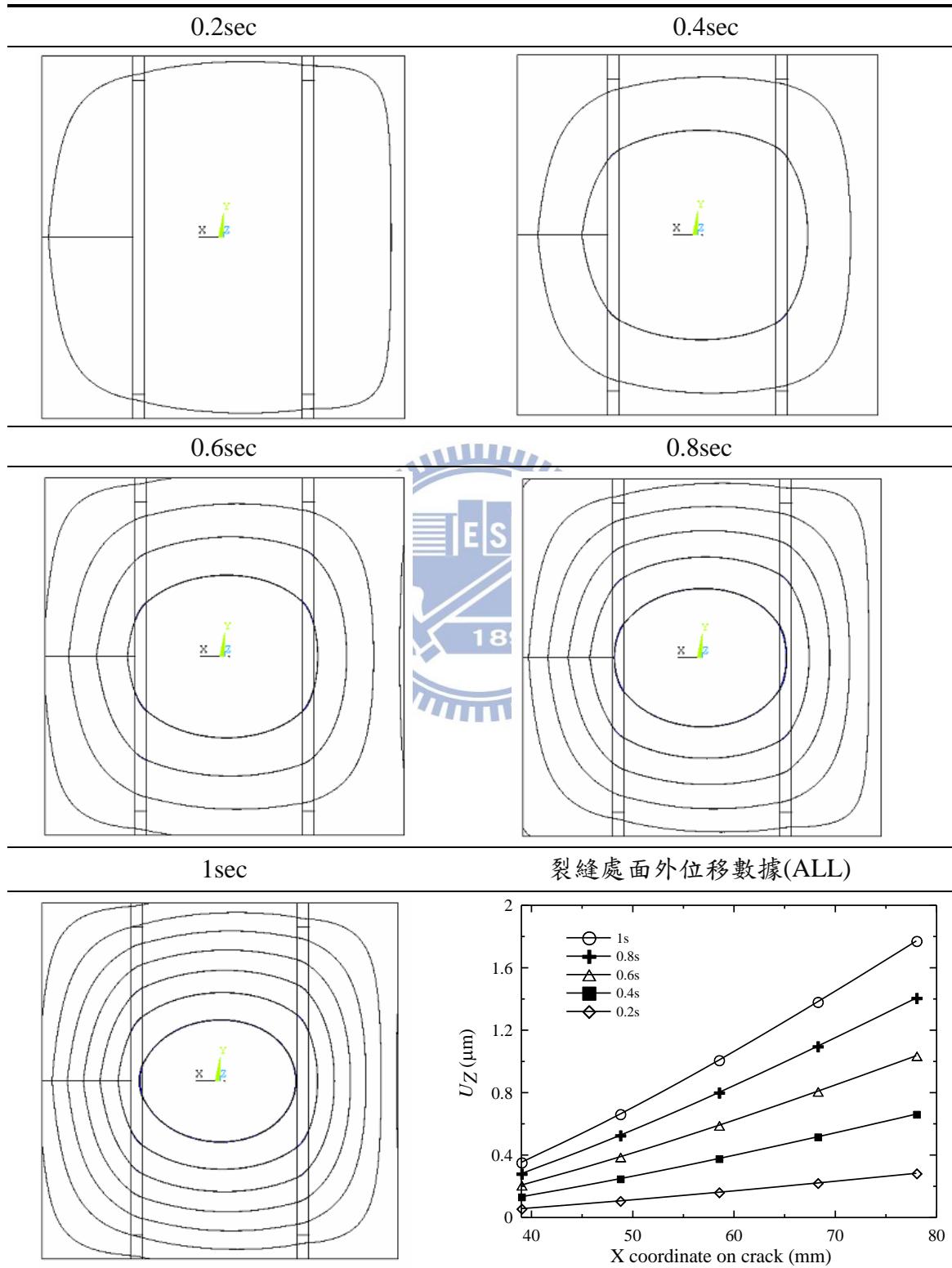


表 3.5-1 由內而外遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

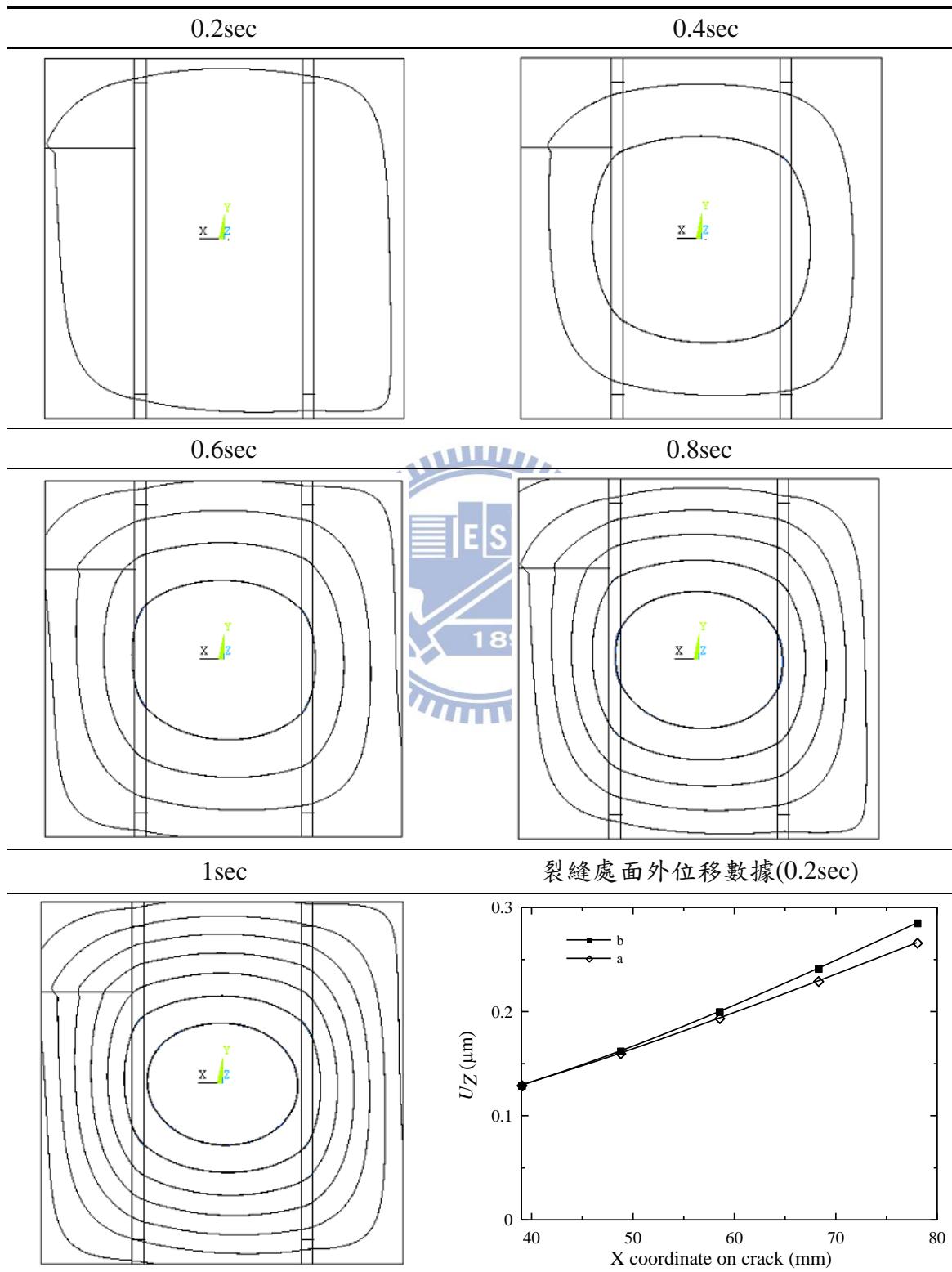


表 3.5-2 热通量由内而外遞減加熱分佈下之分析結果(貫穿裂縫於邊緣  
四分之一處)

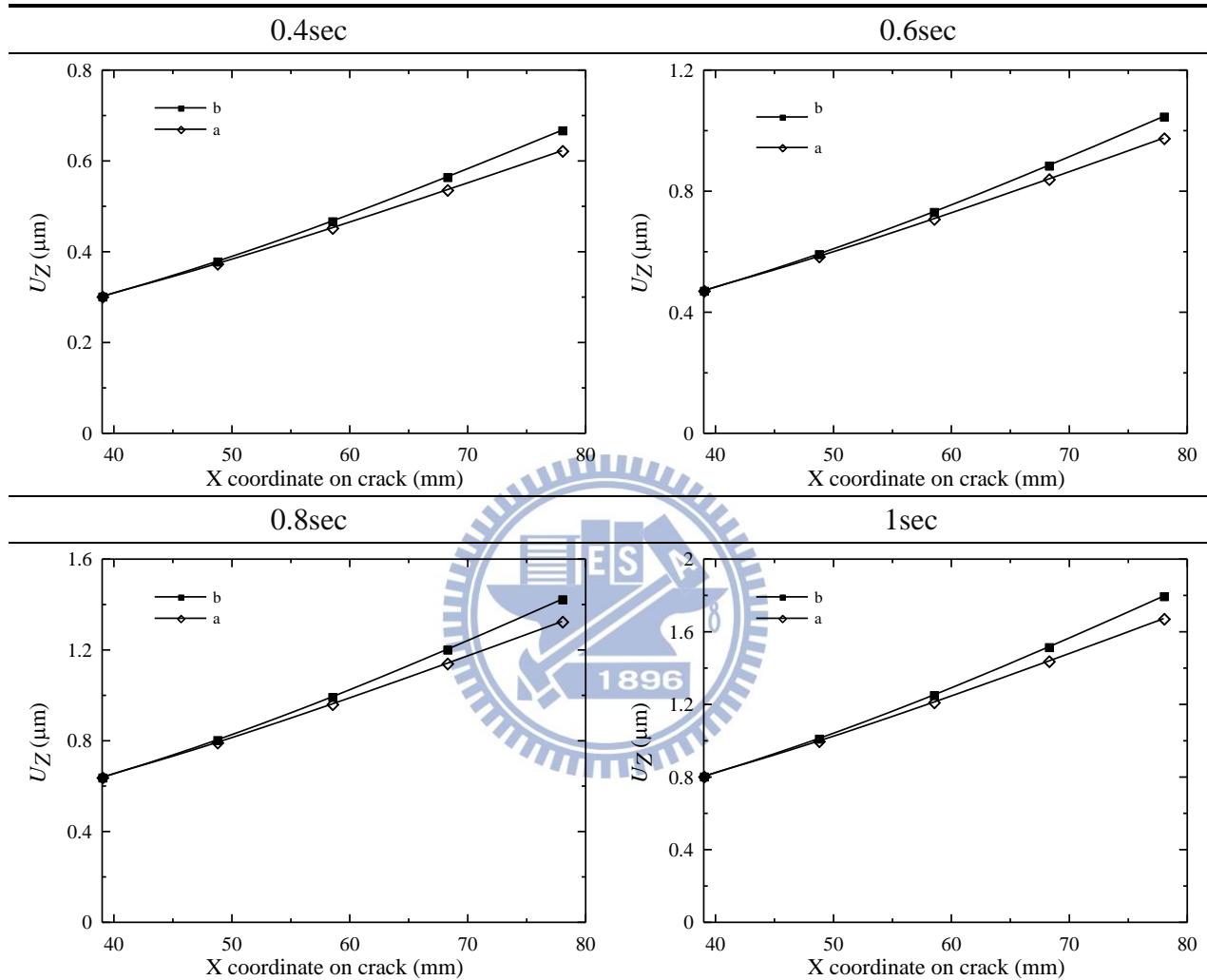


表 3.6 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(無裂縫)

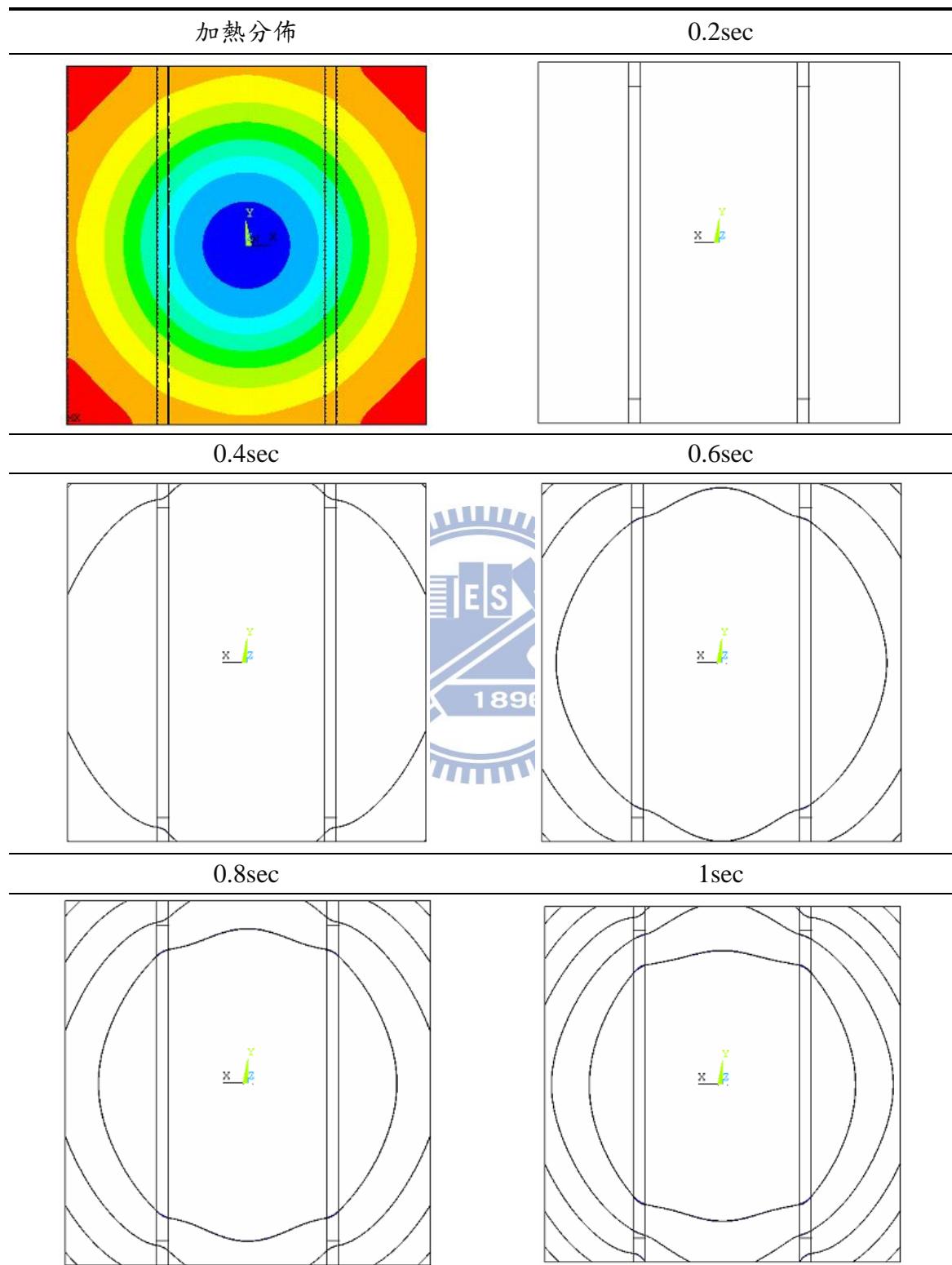


表 3.7 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

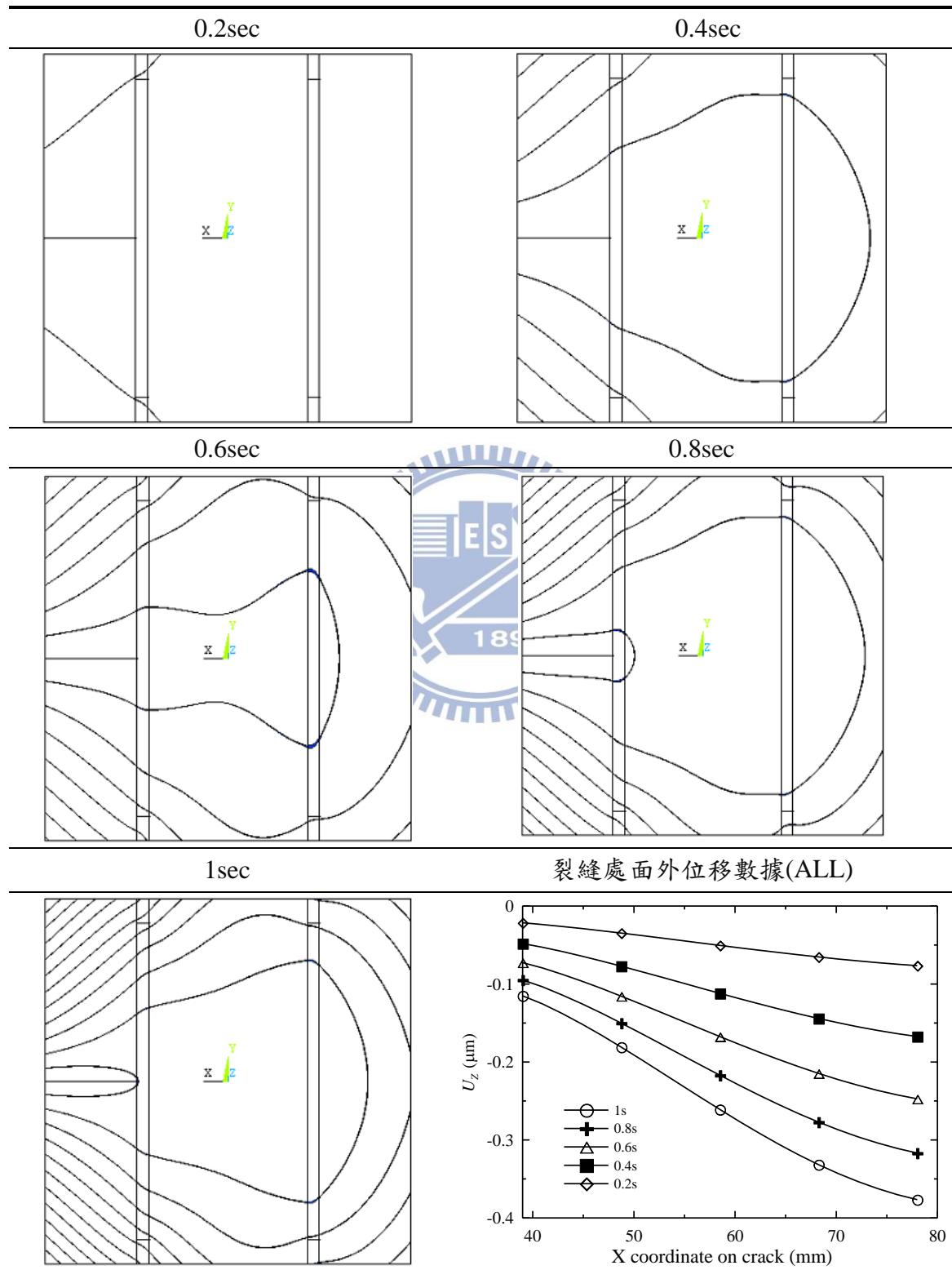


表 3.8 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

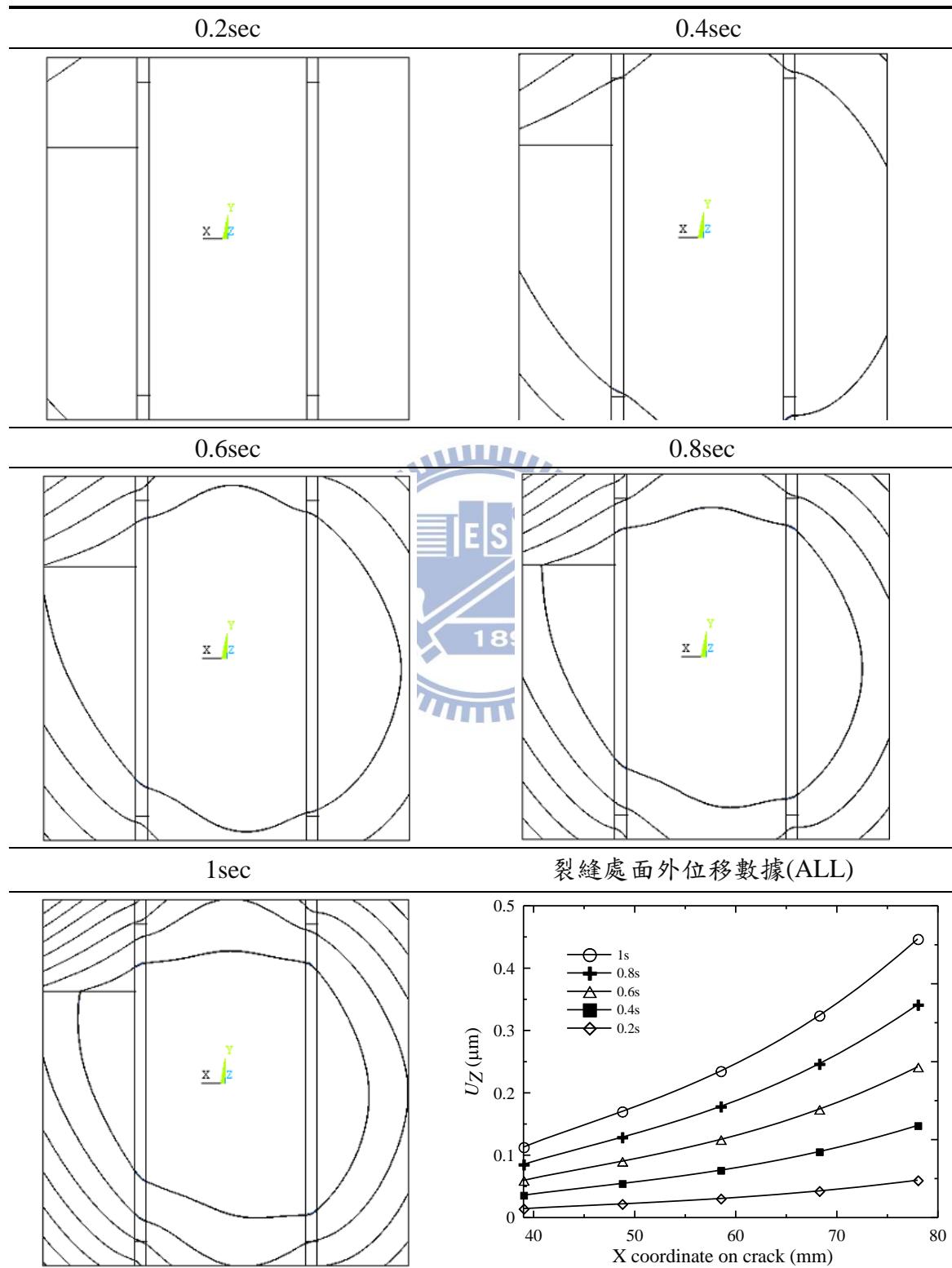


表 3.9 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

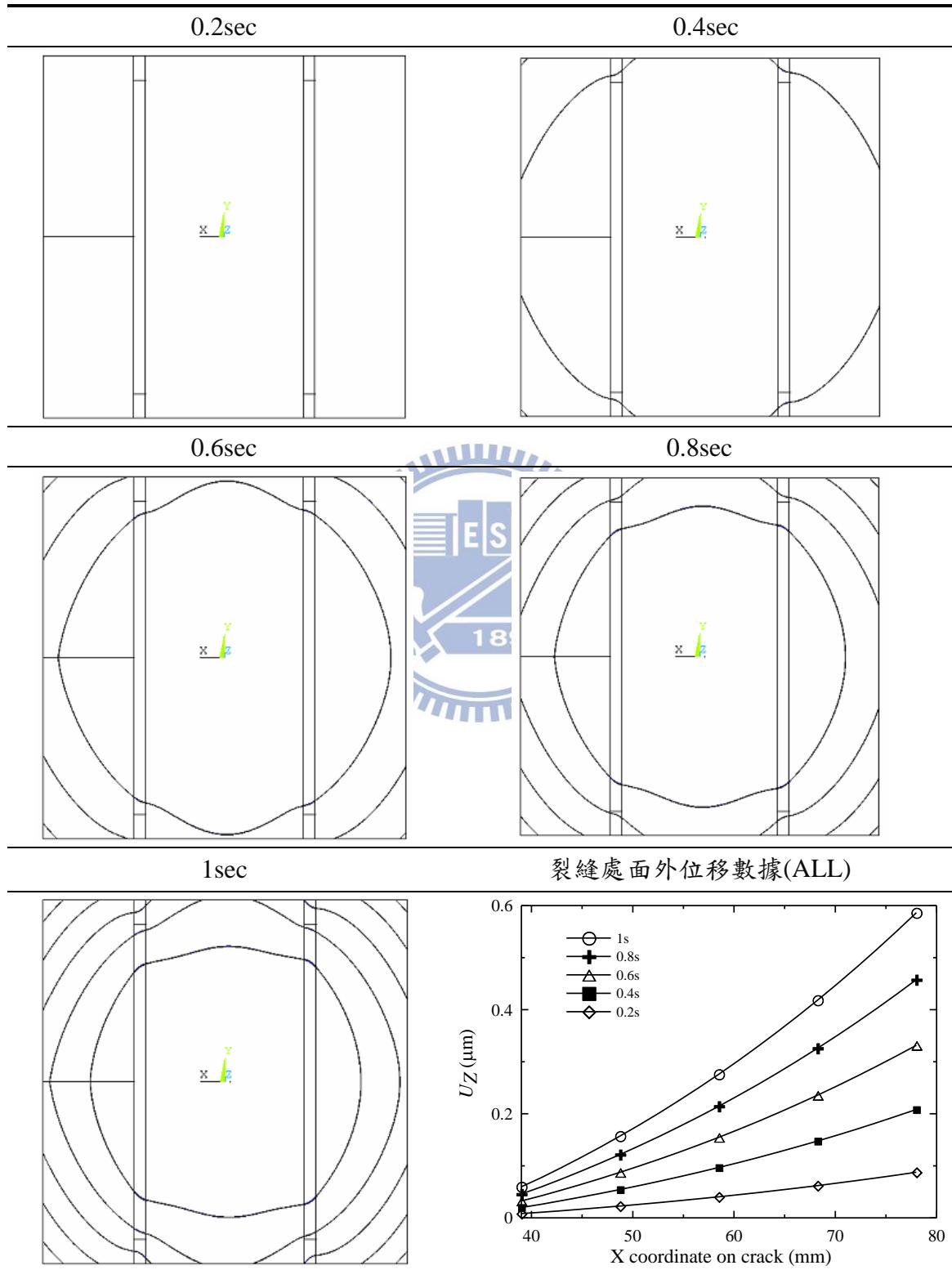


表 3.10-1 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

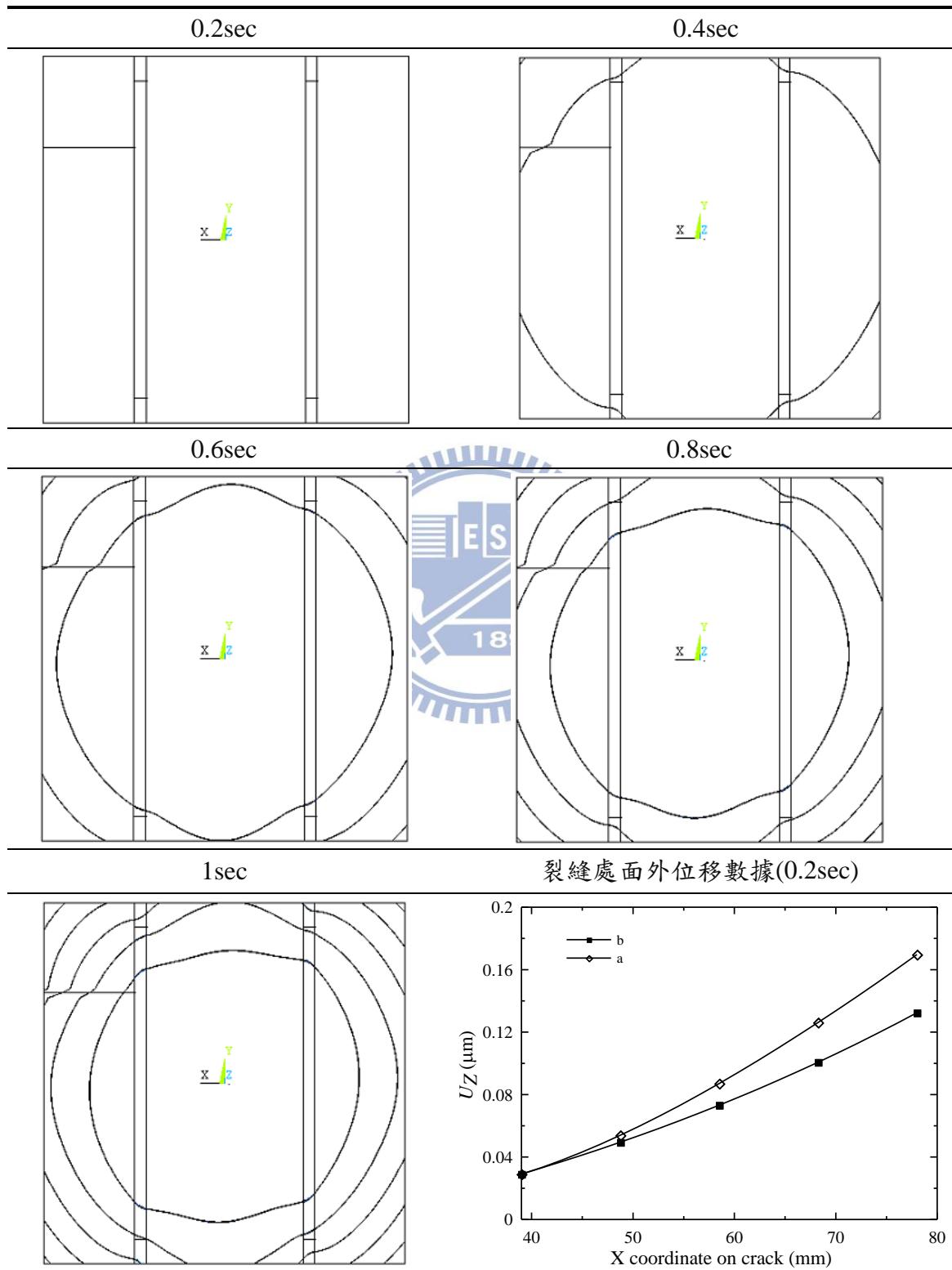


表 3.10-2 由外而內遞減之高斯分佈熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

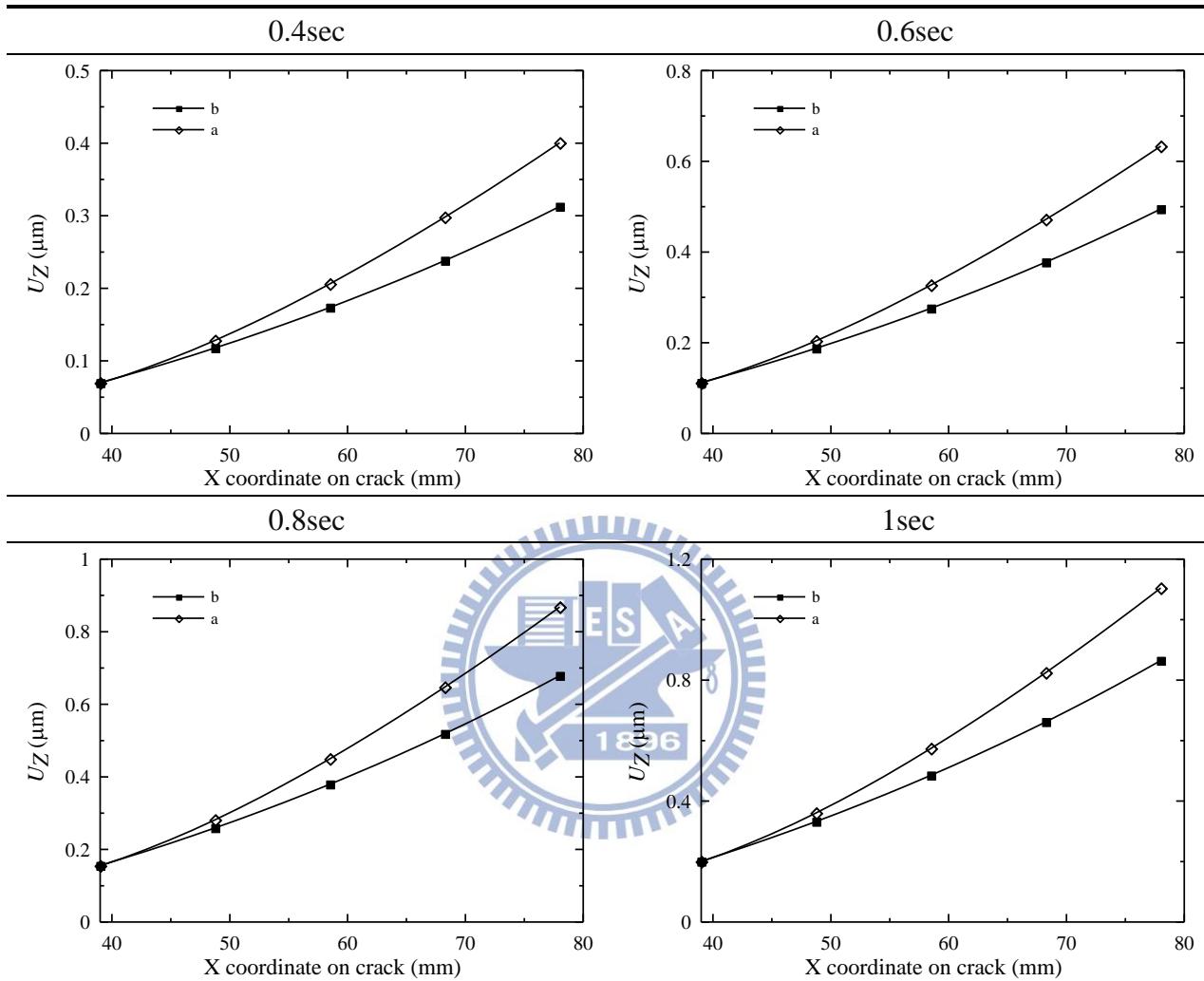


表 3.11 十字形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

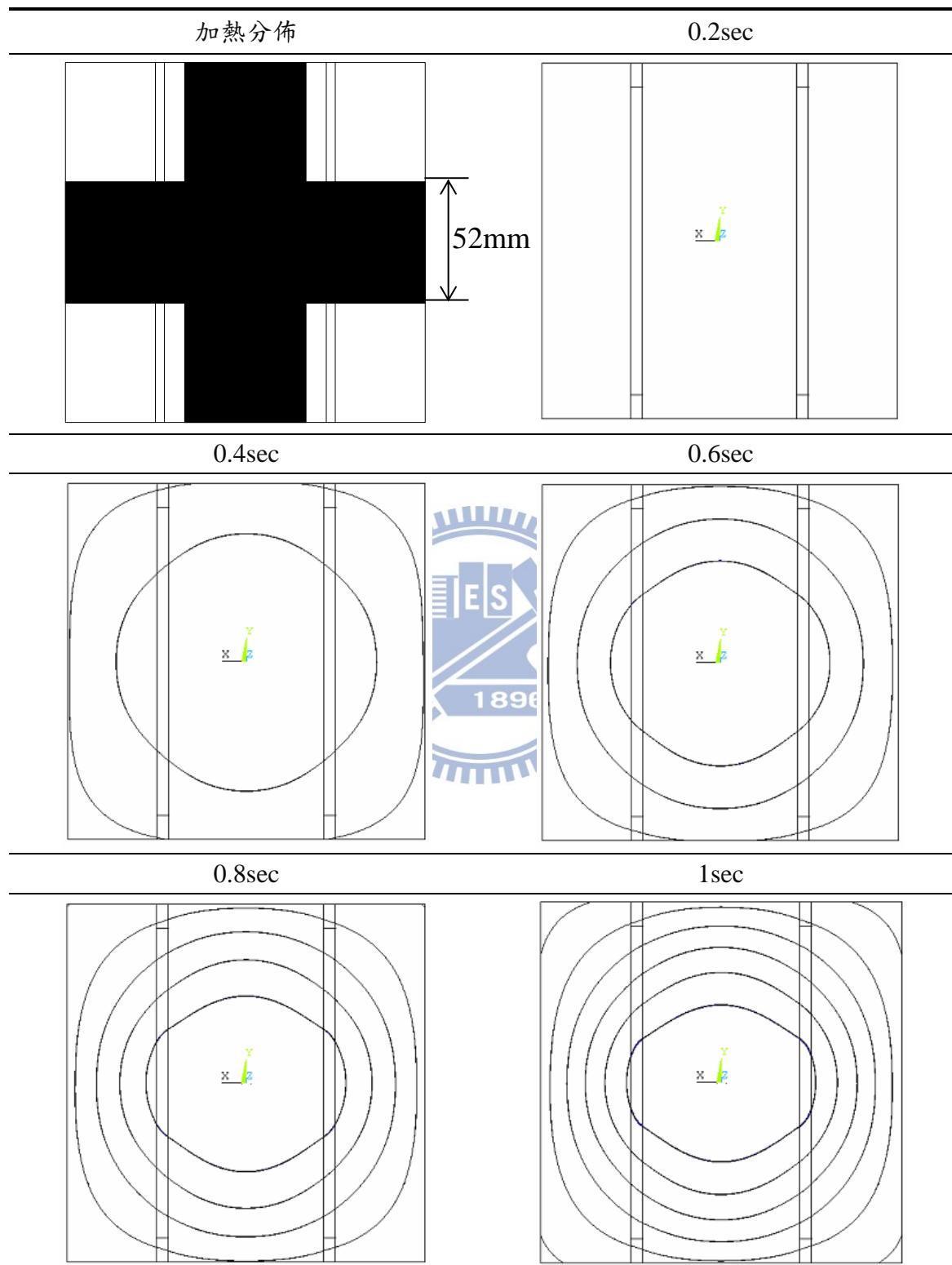


表 3.12 十字形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

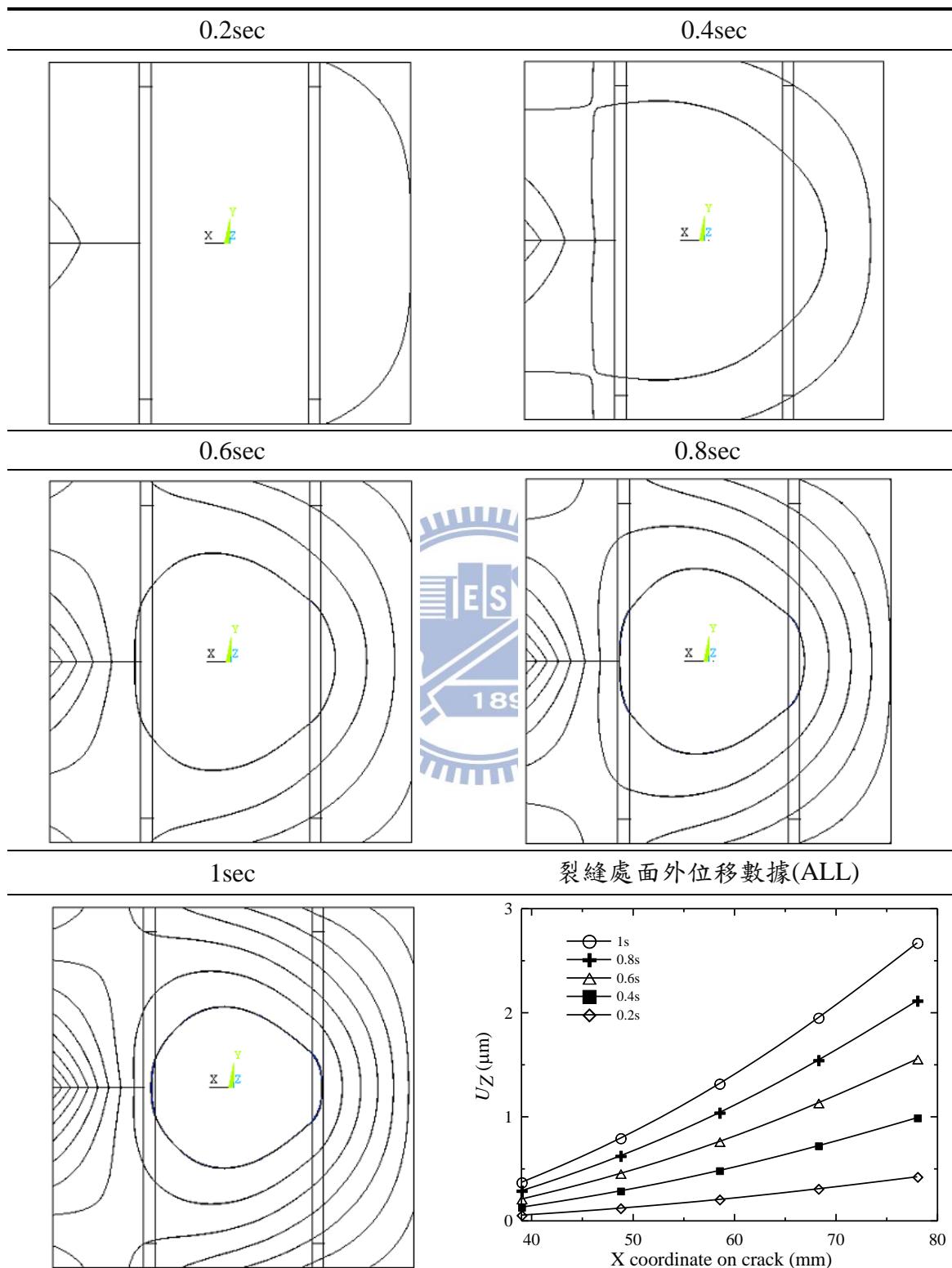


表 3.13 十字形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

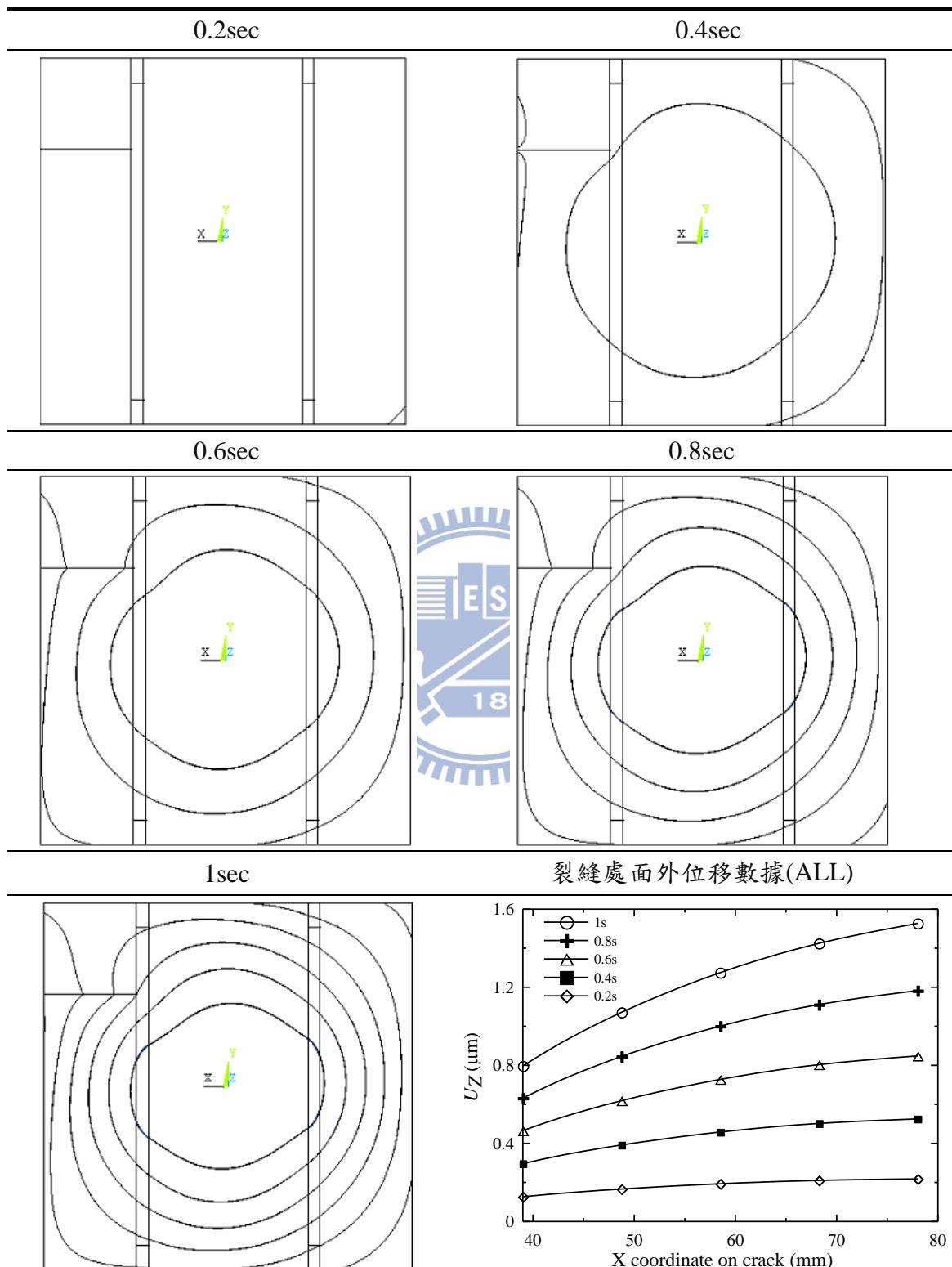


表 3.14 十字形分佈之熱通量結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

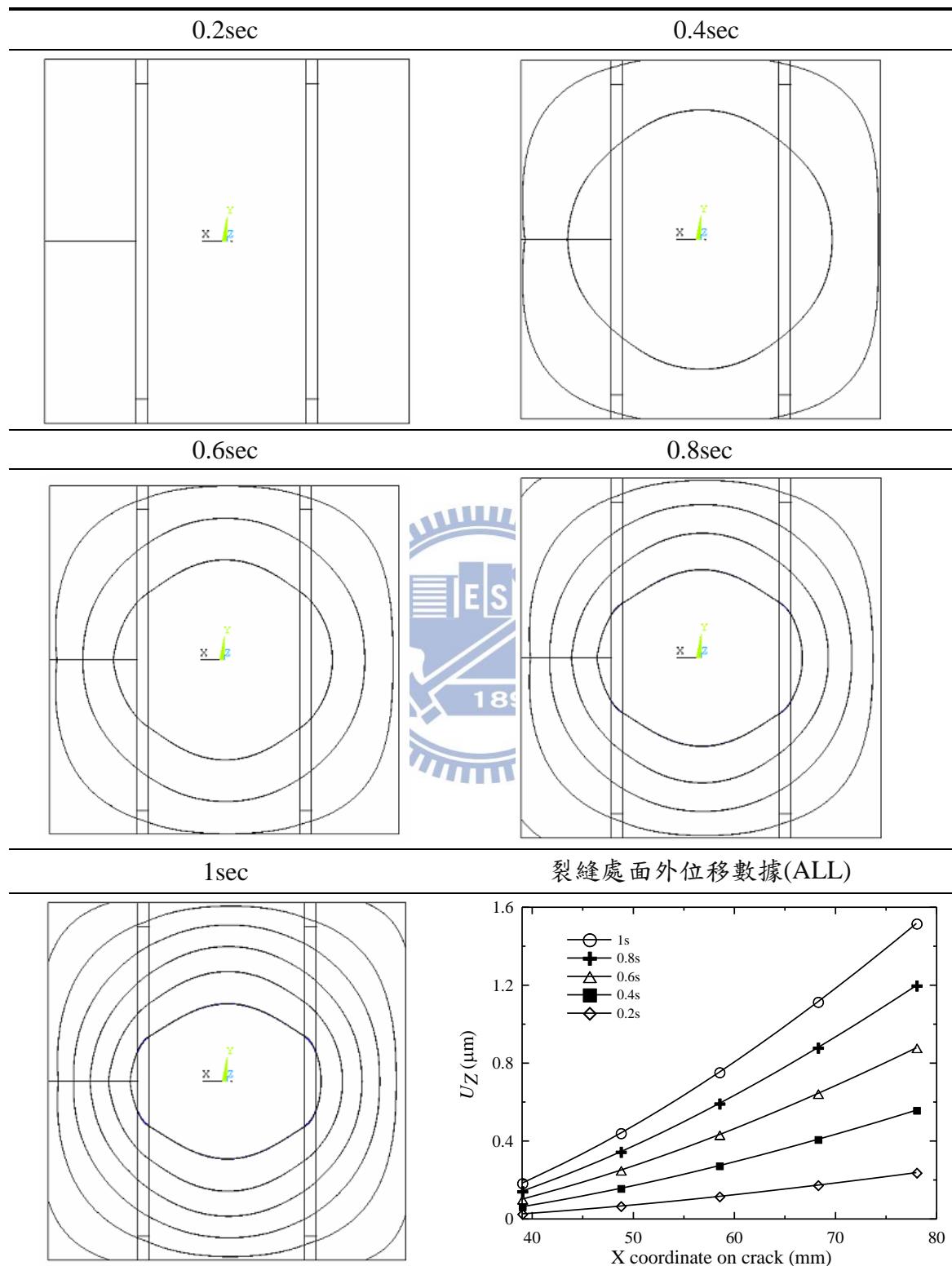


表 3.15-1 十字形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

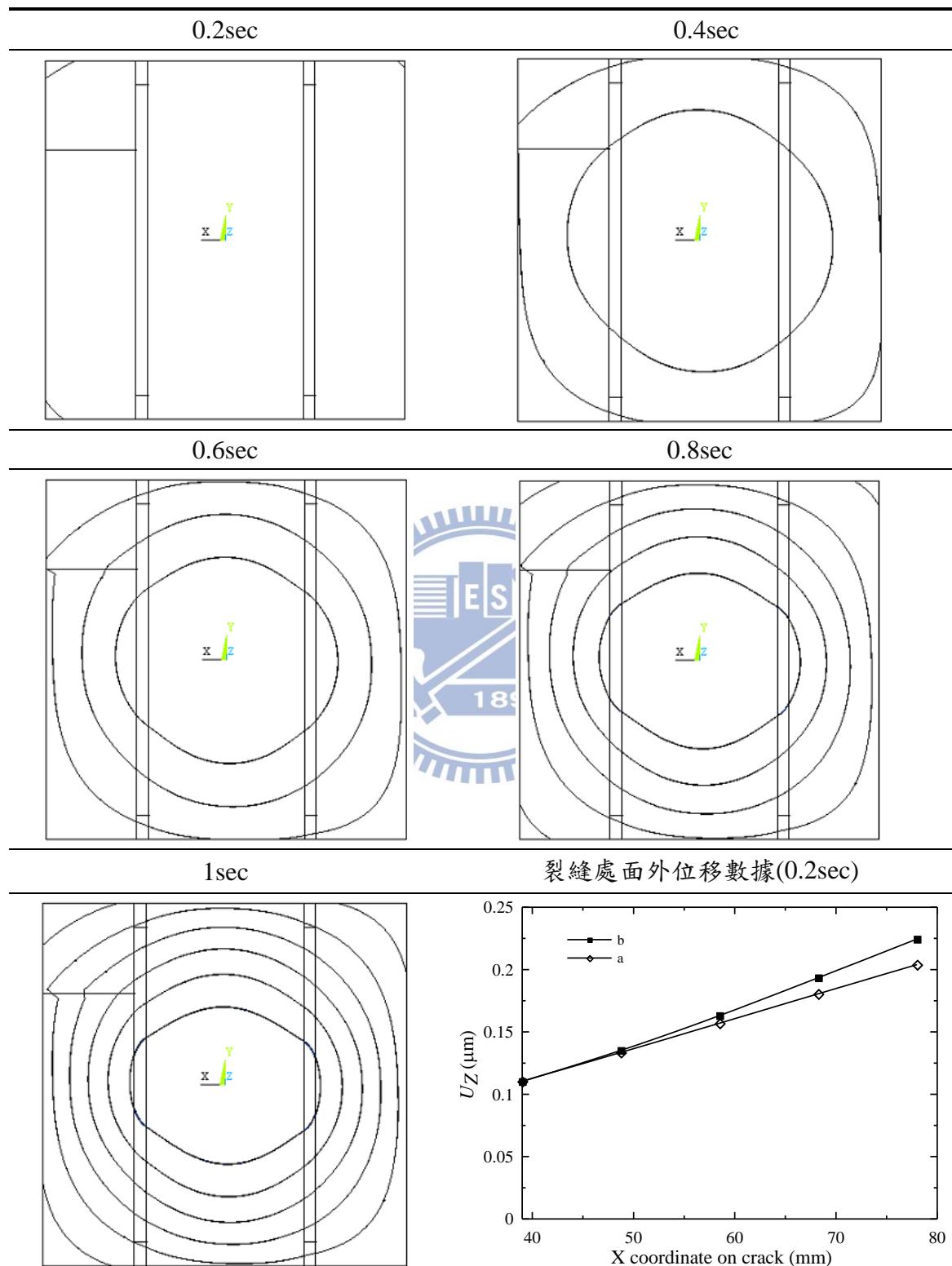


表 3.15-2 十字形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

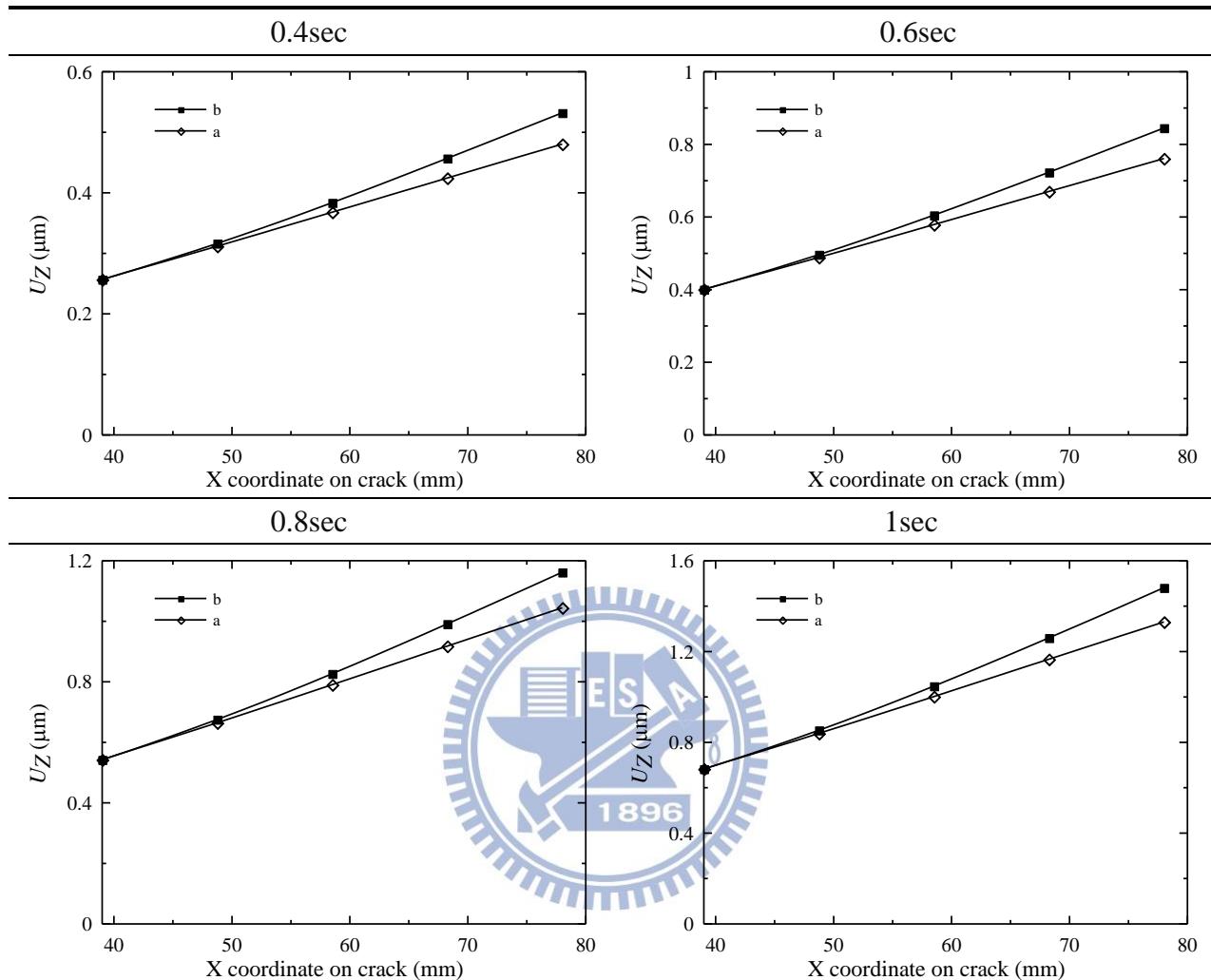


表 3.16 單對角形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

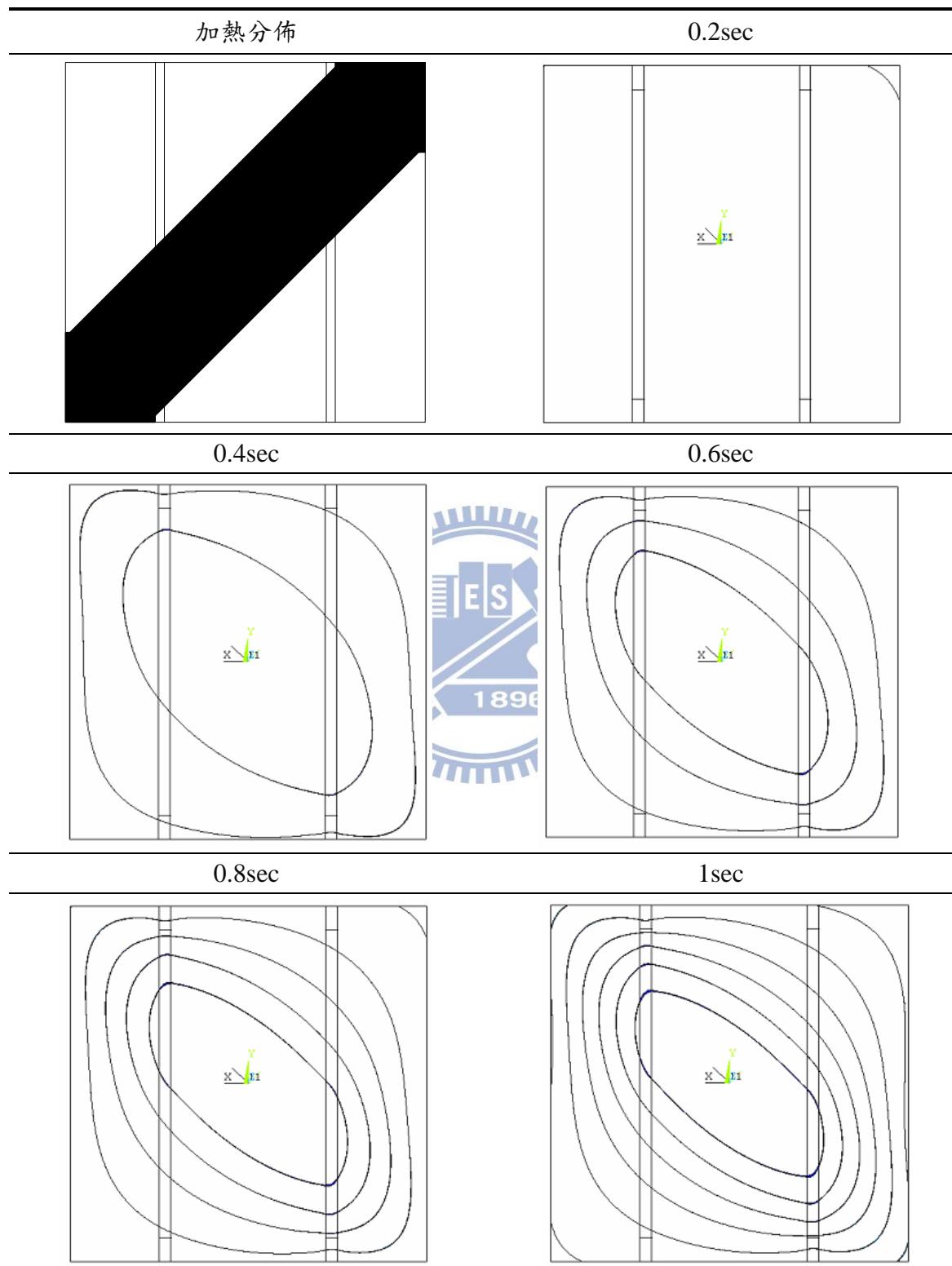


表 3.17 單對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

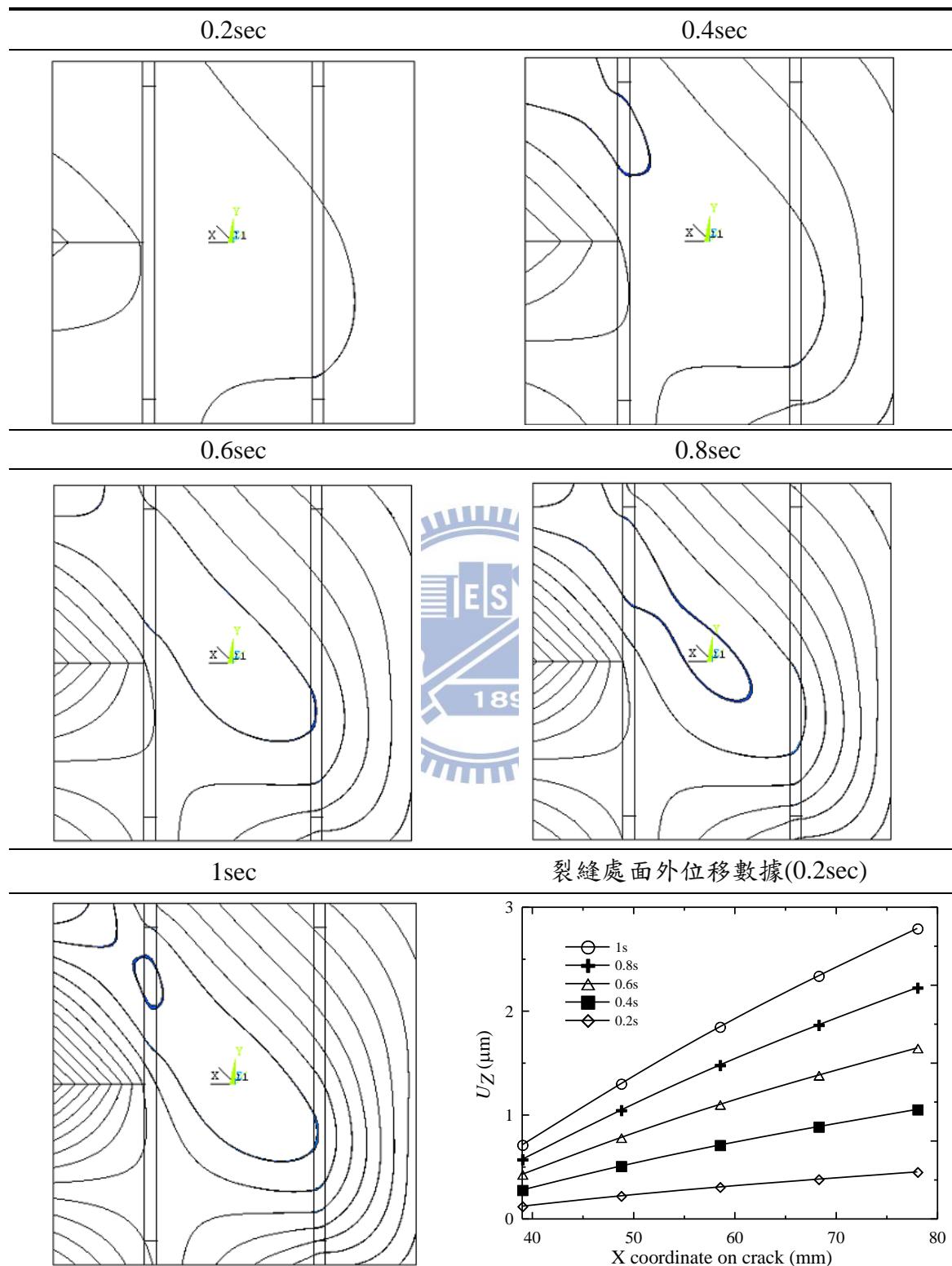


表 3.18 單對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

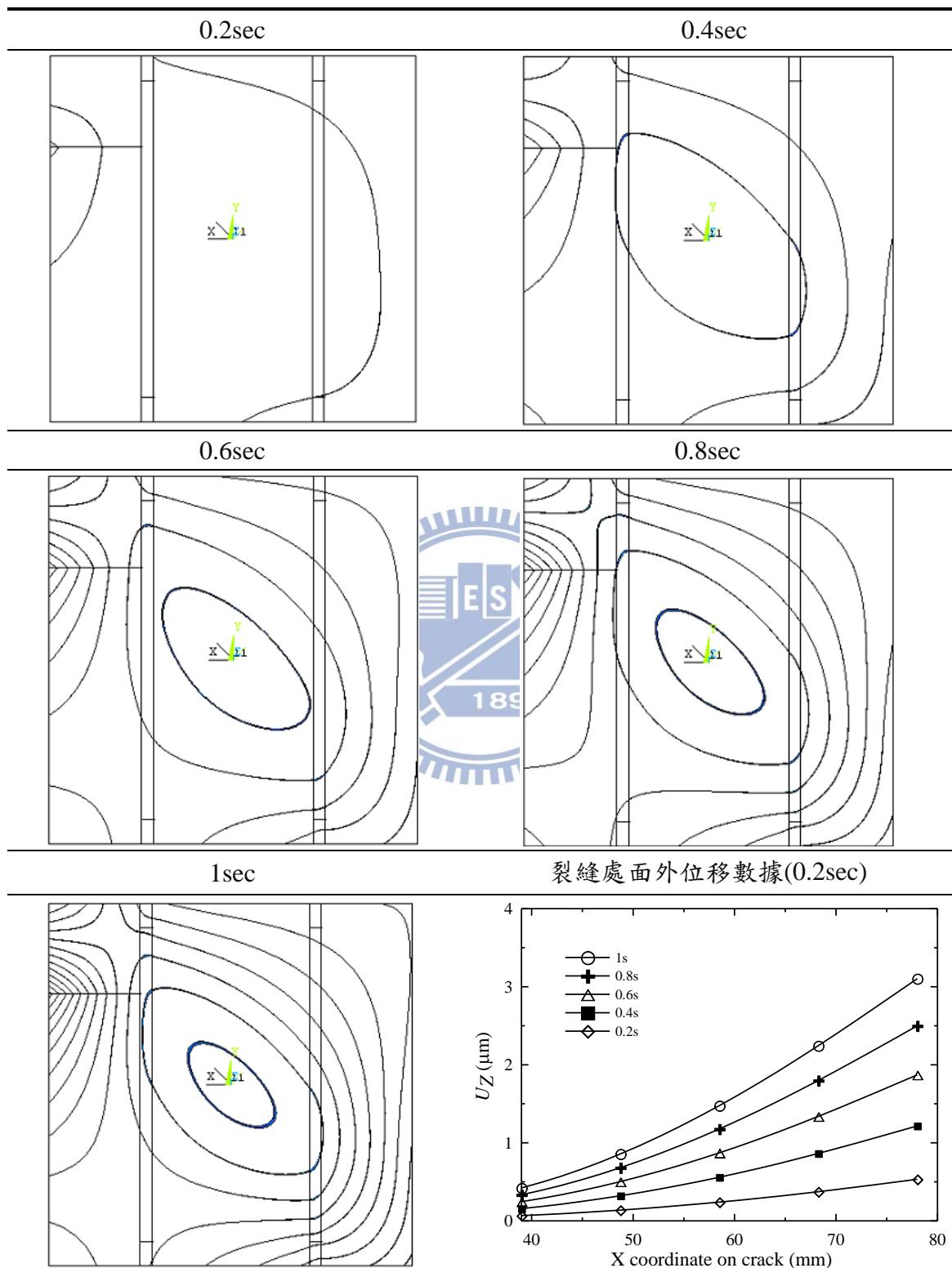


表 3.19-1 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

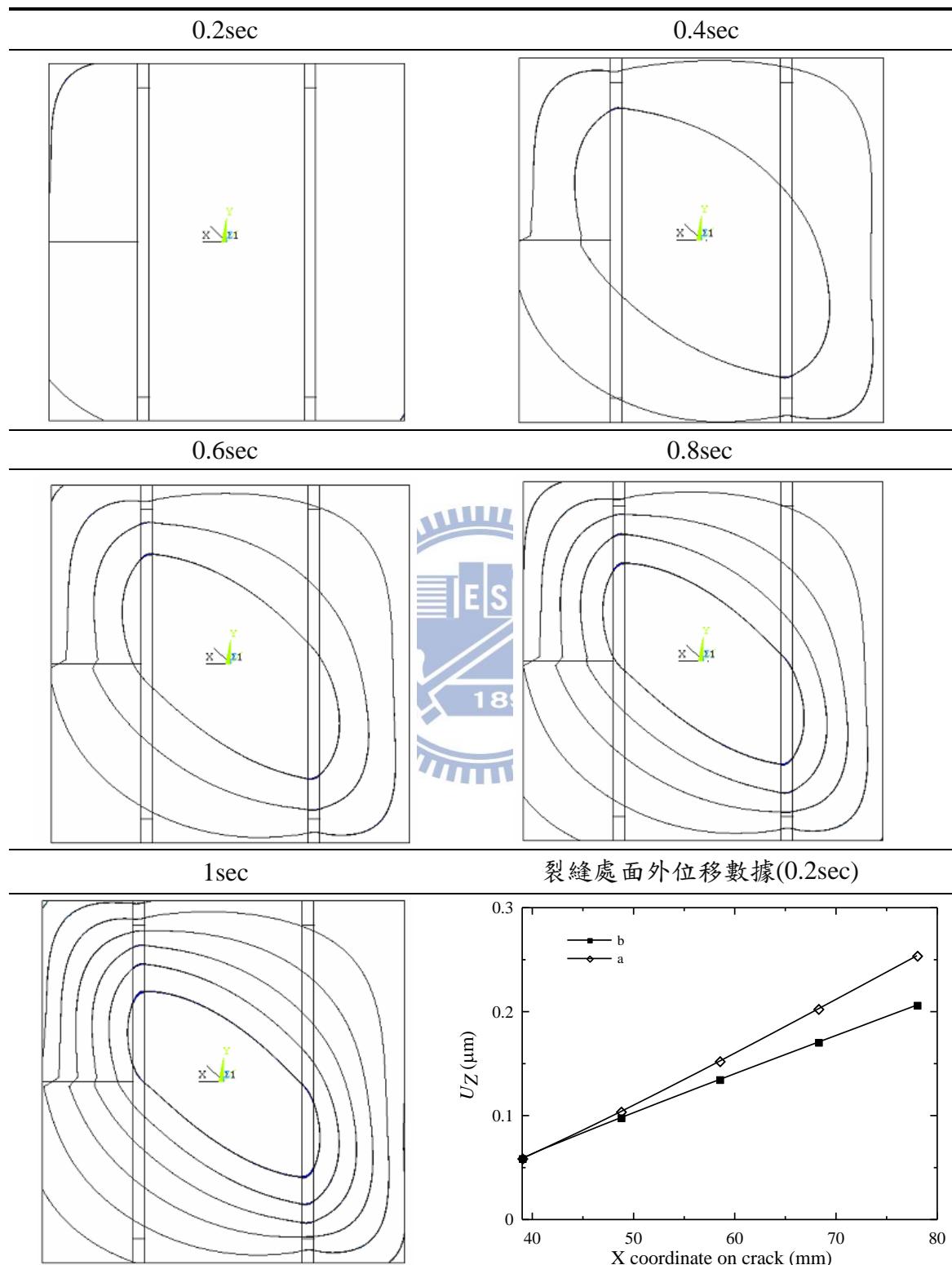


表 3.19-2 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

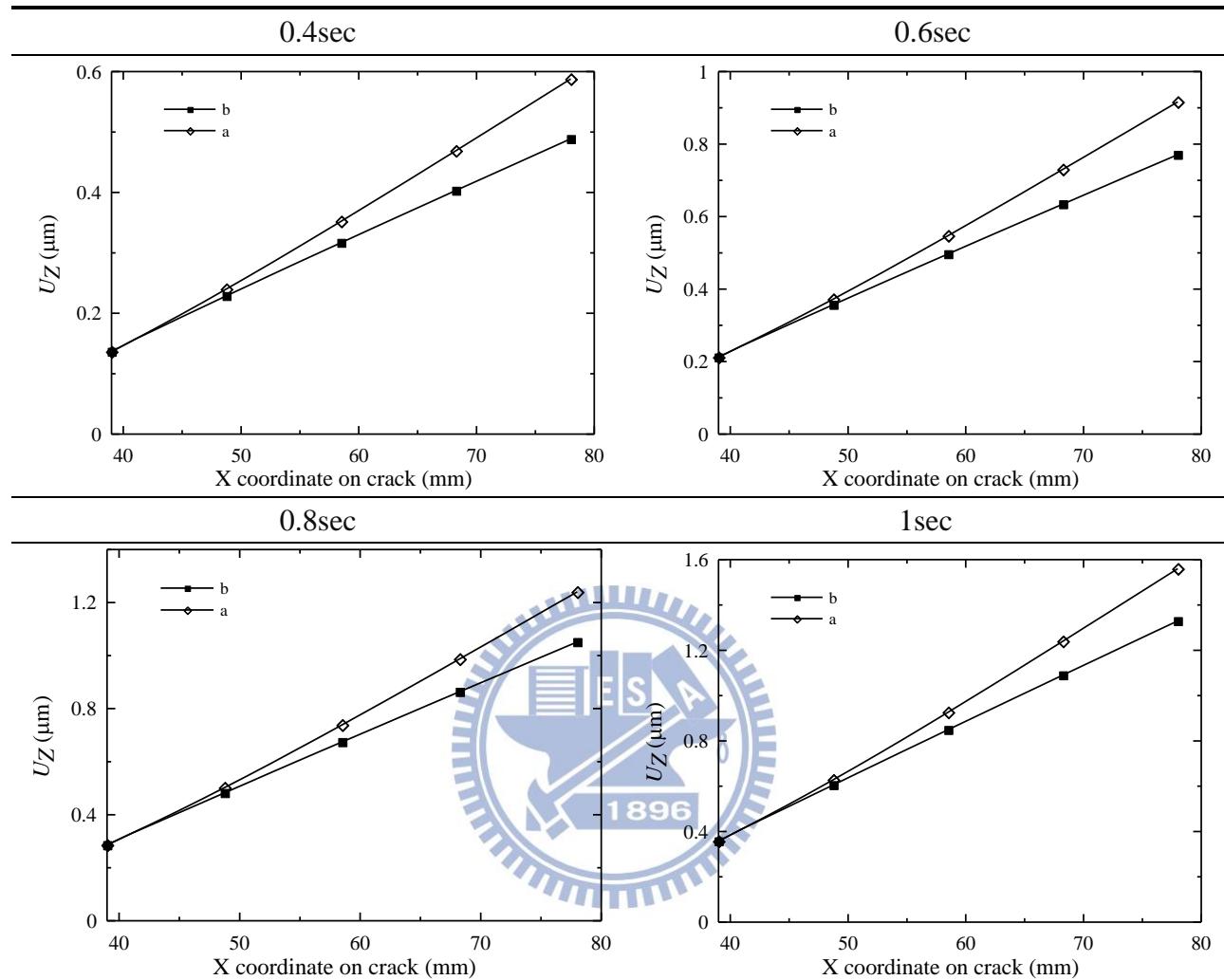


表 3.20-1 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

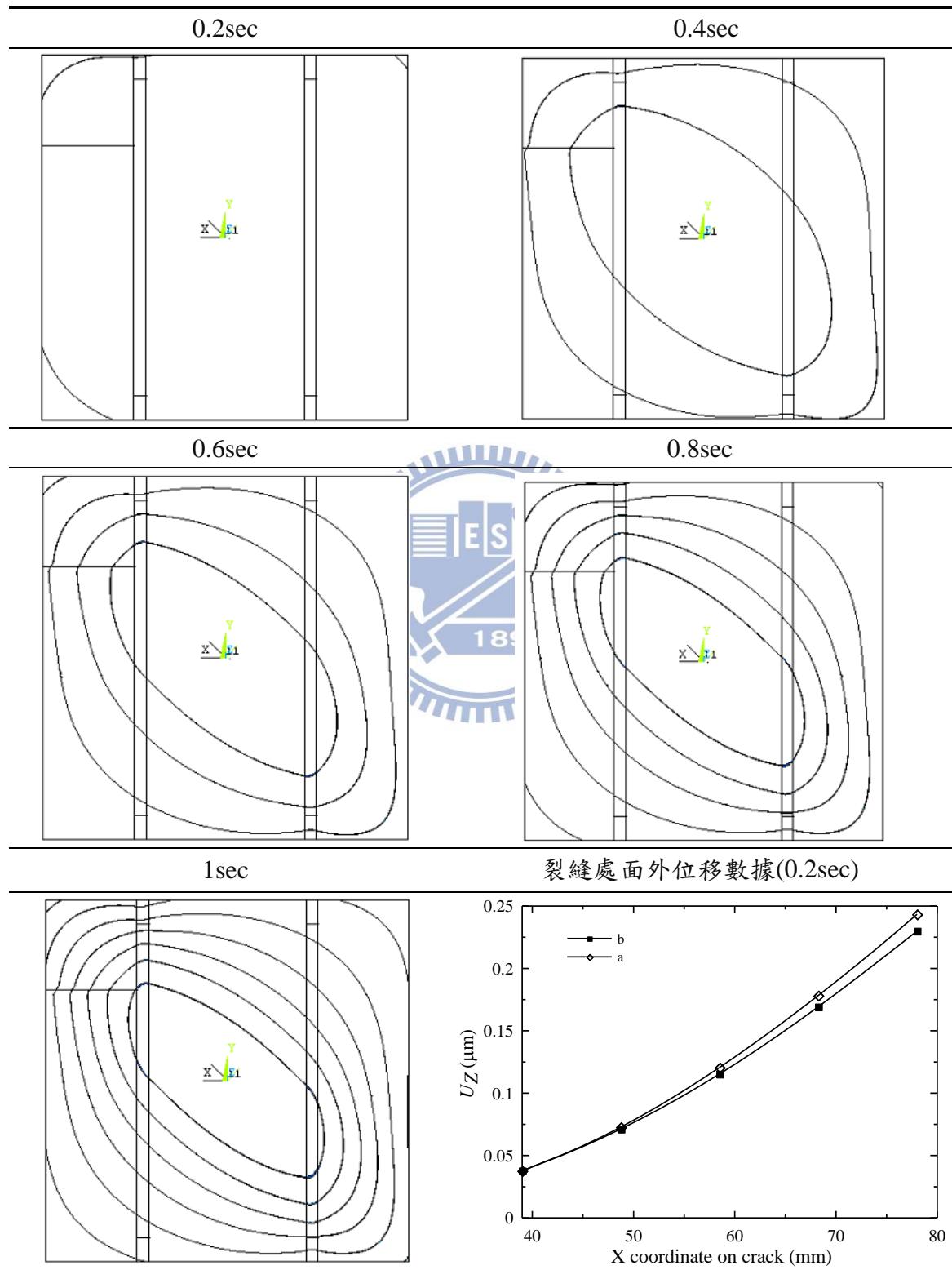


表 3.20-2 單對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

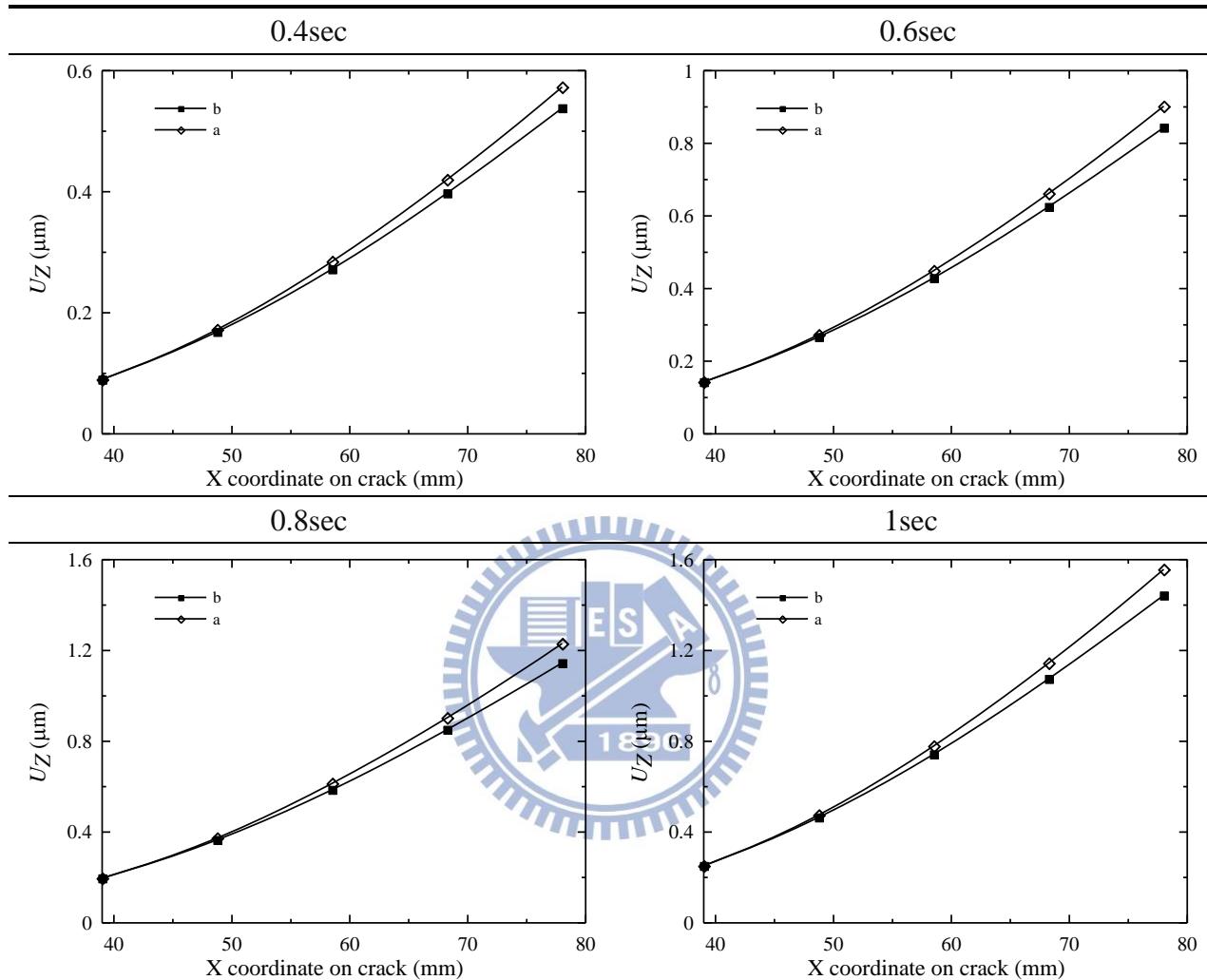


表 3.21 雙對角形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

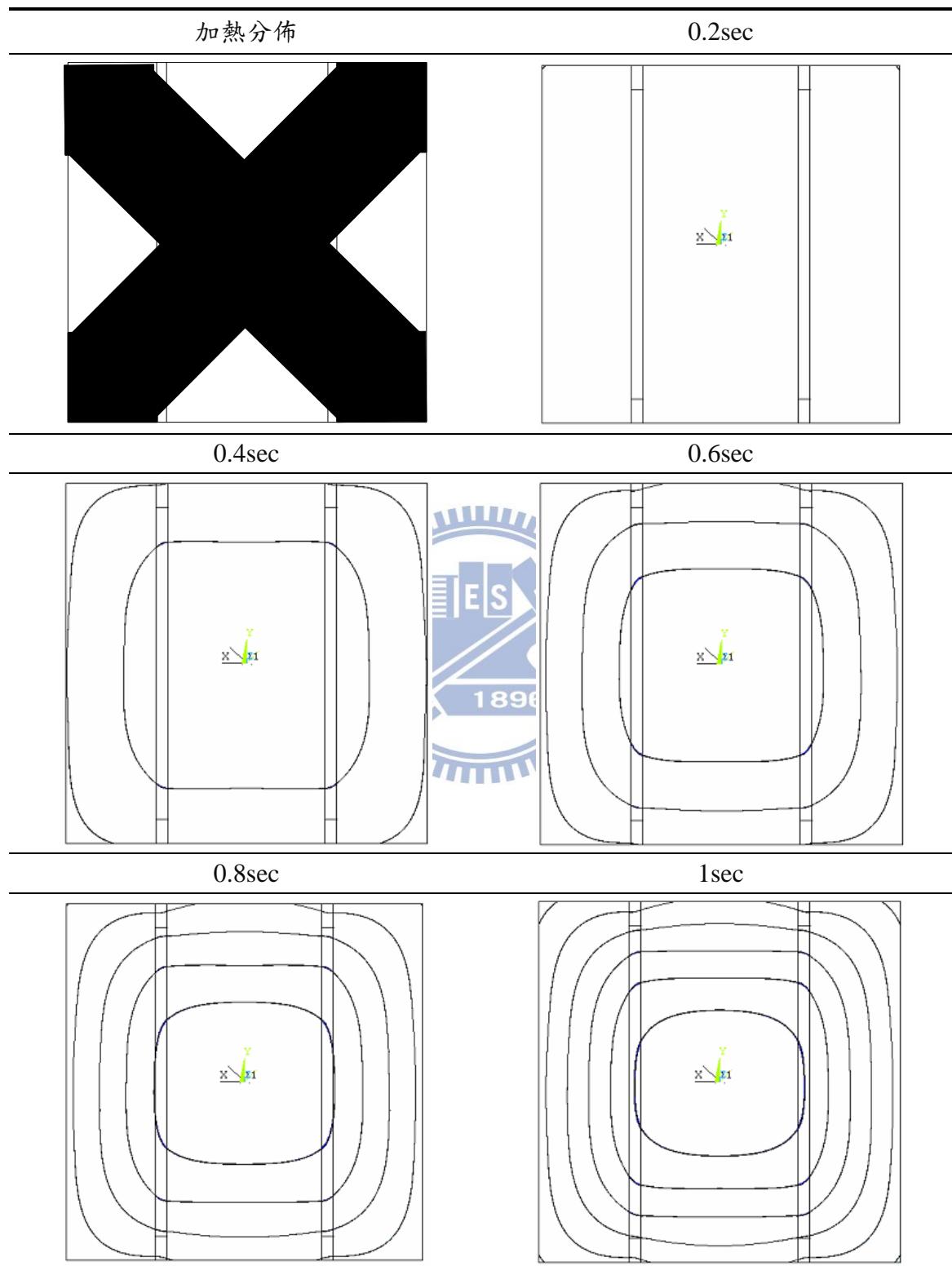


表 3.22 雙對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

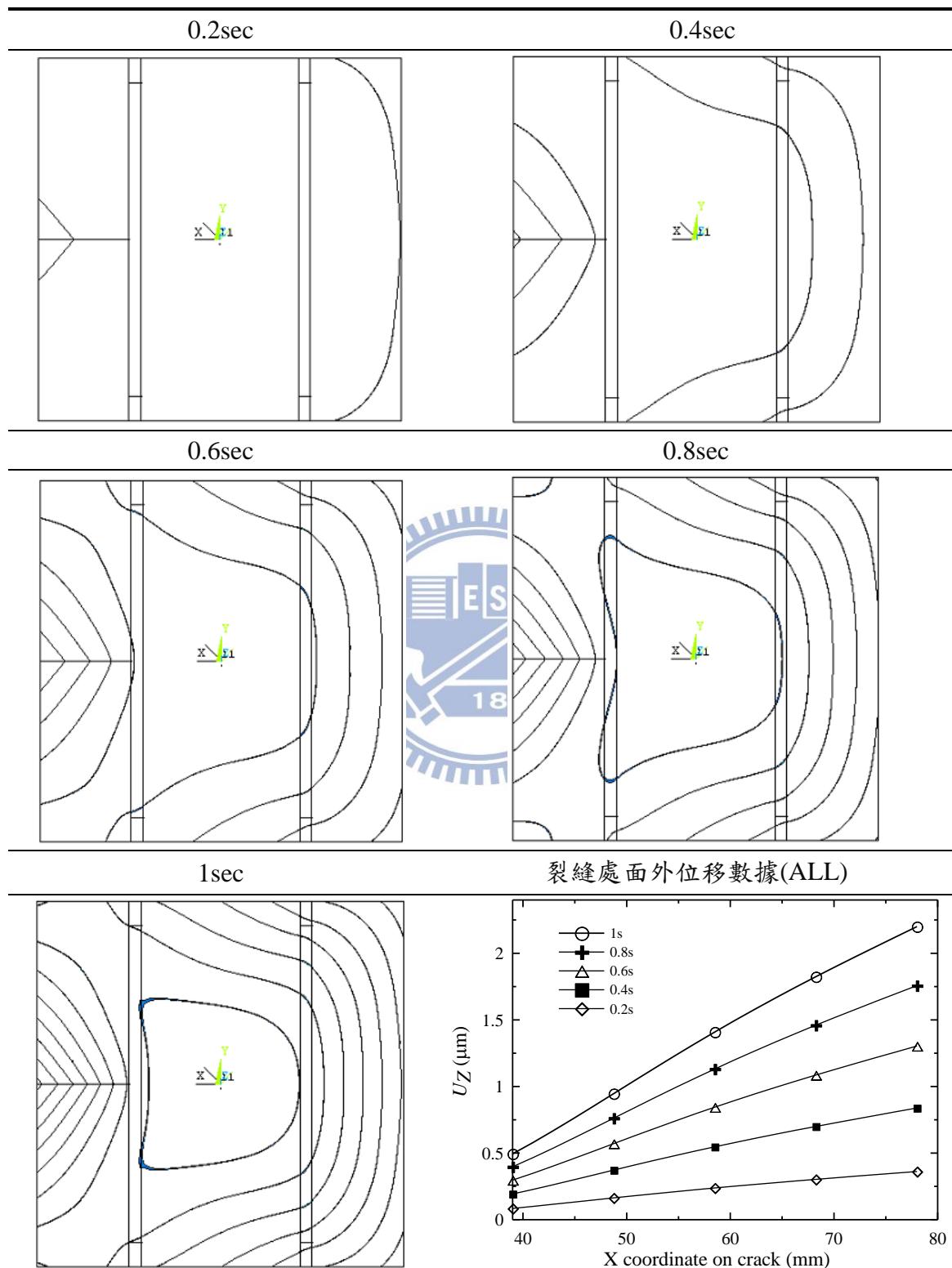


表 3.23 雙對角形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

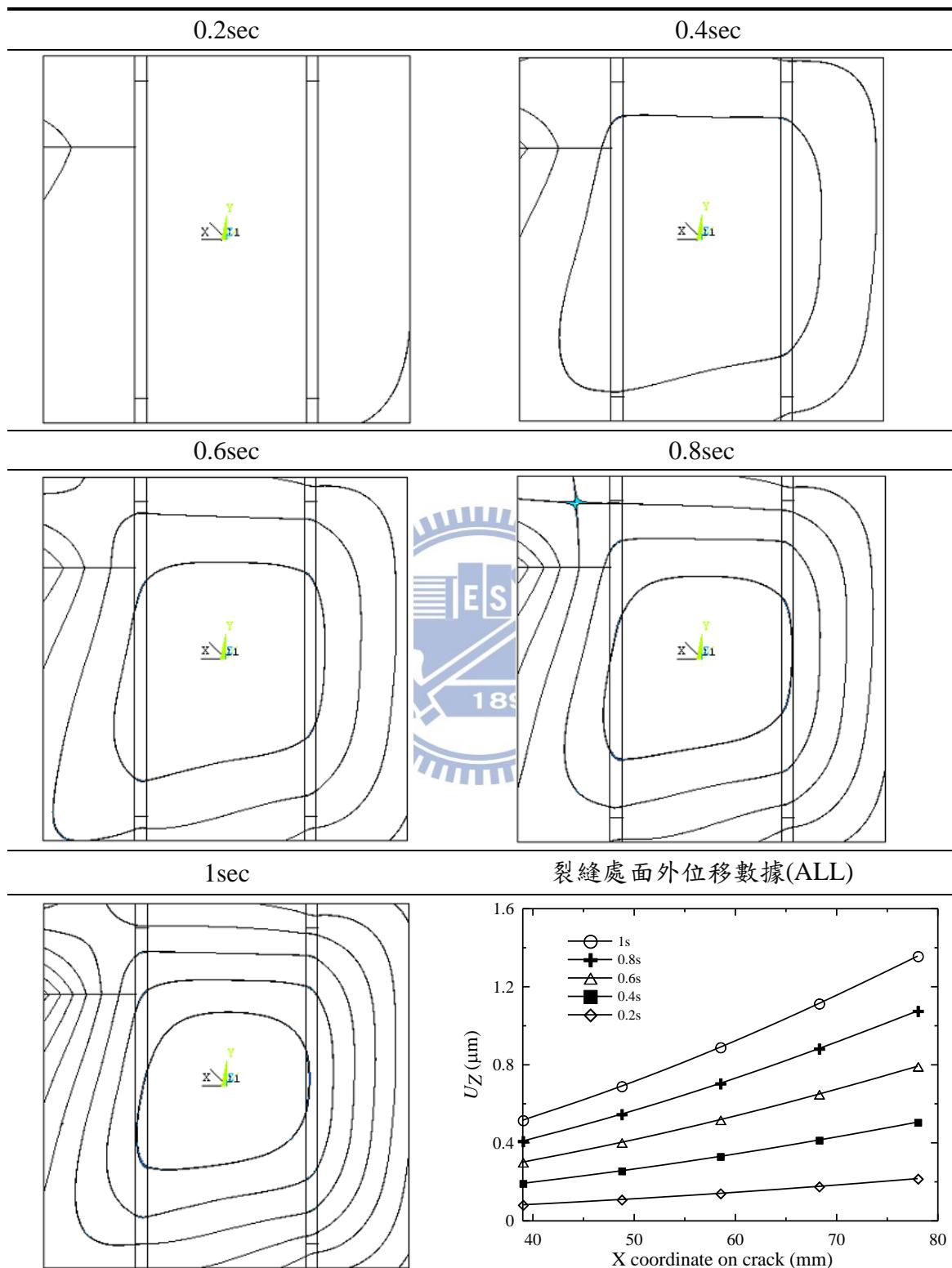


表 3.24 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

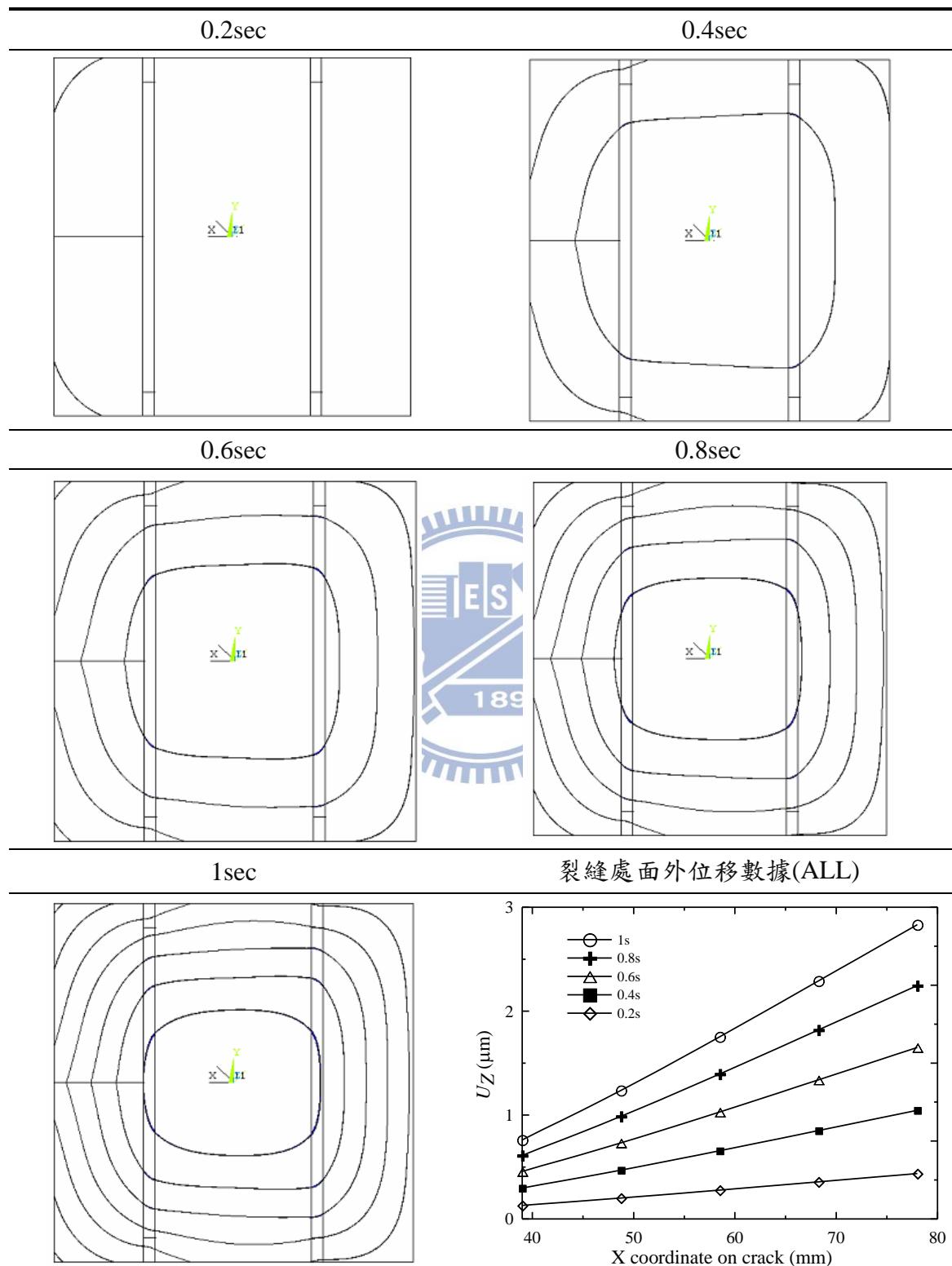


表 3.25-1 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

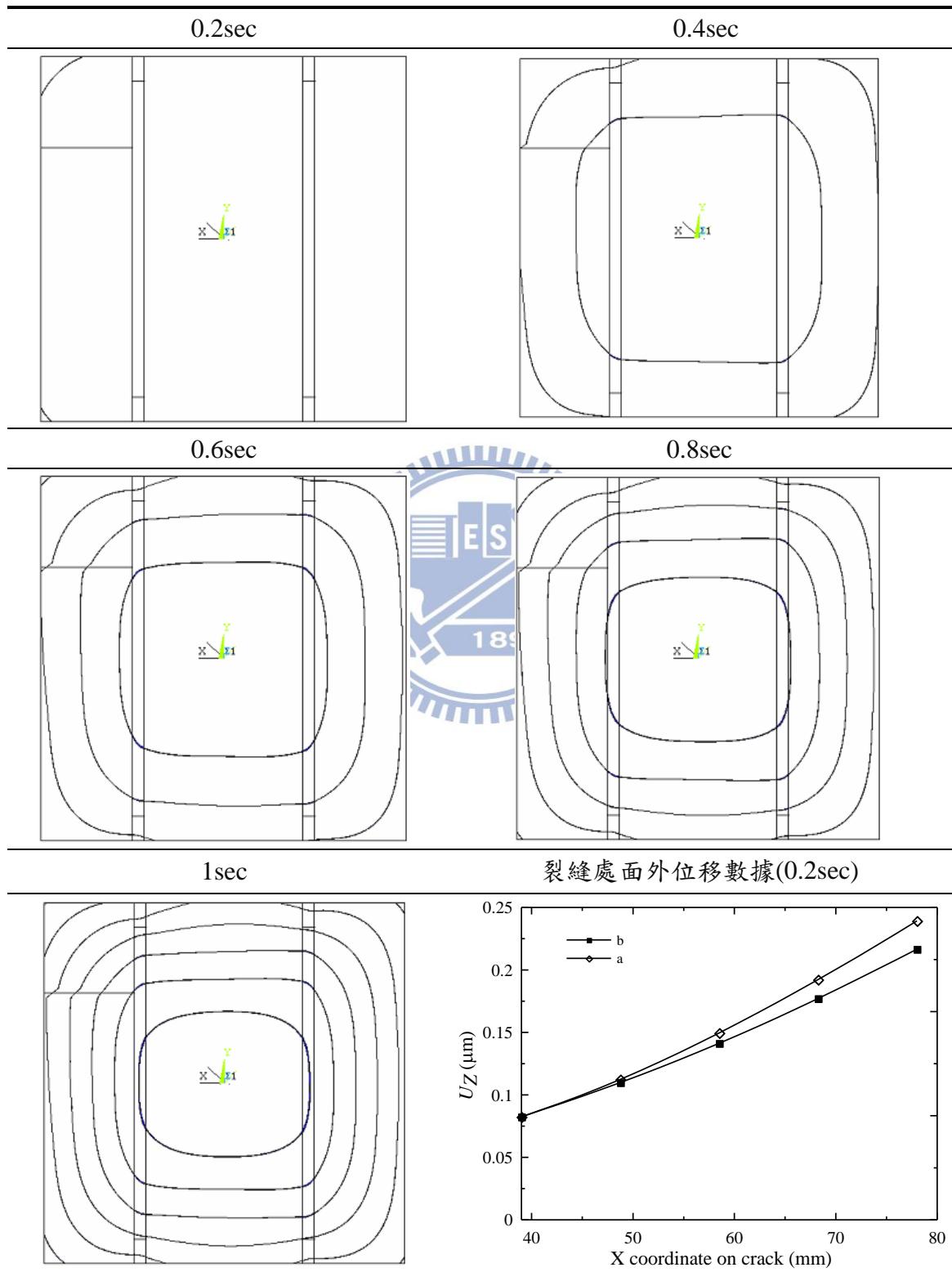


表 3.25-2 雙對角形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

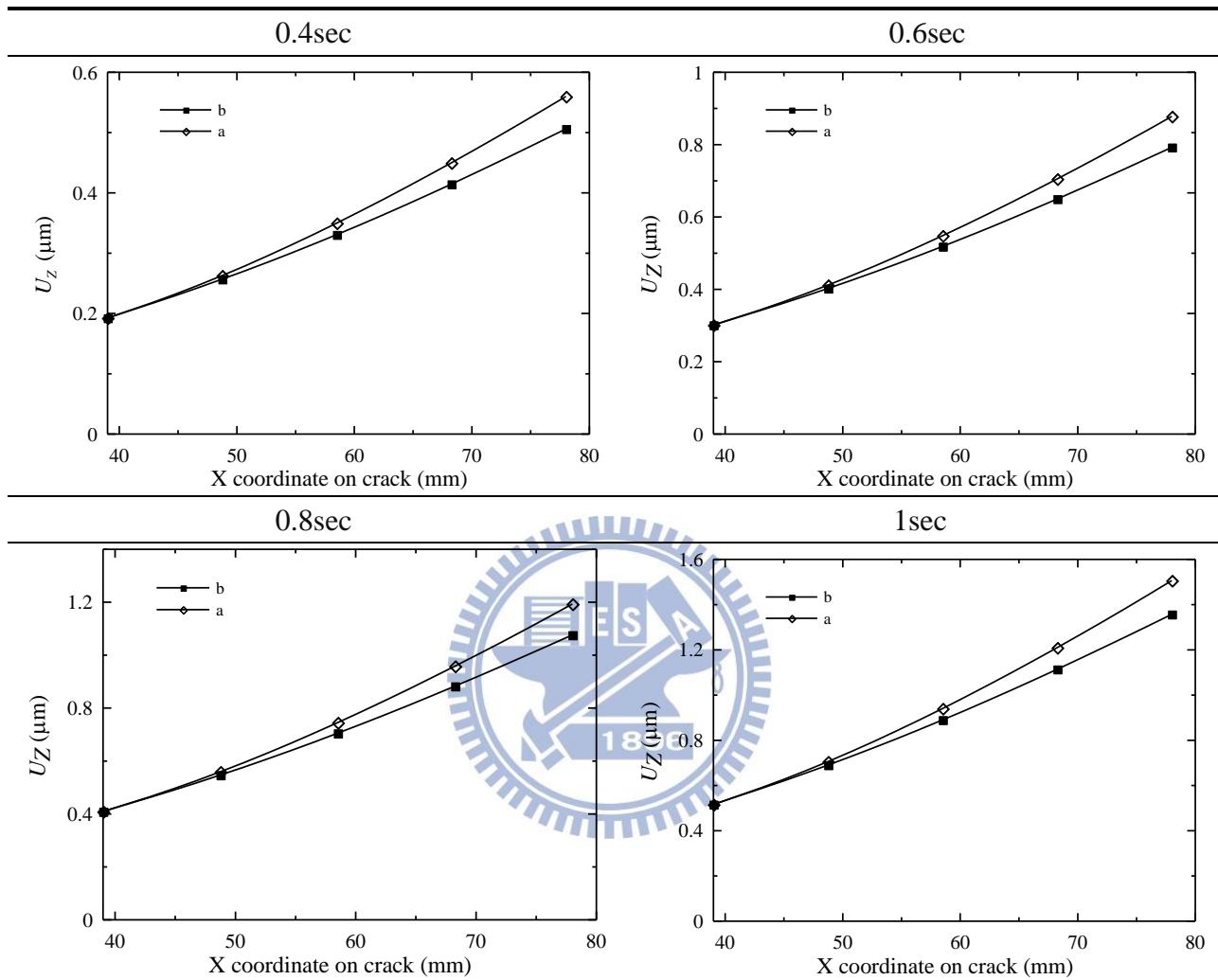


表 3.26 多空心大矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

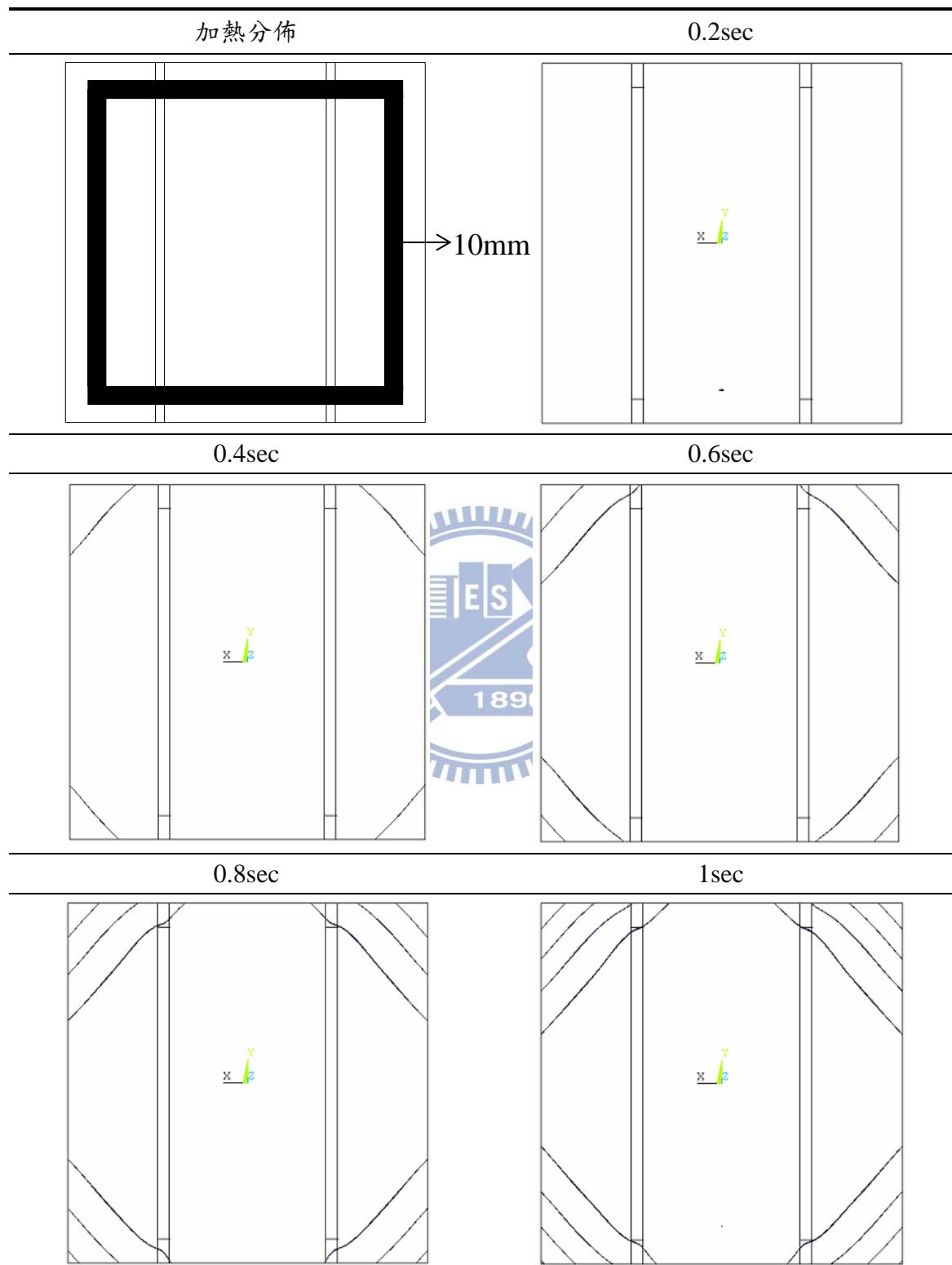


表 3.27 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

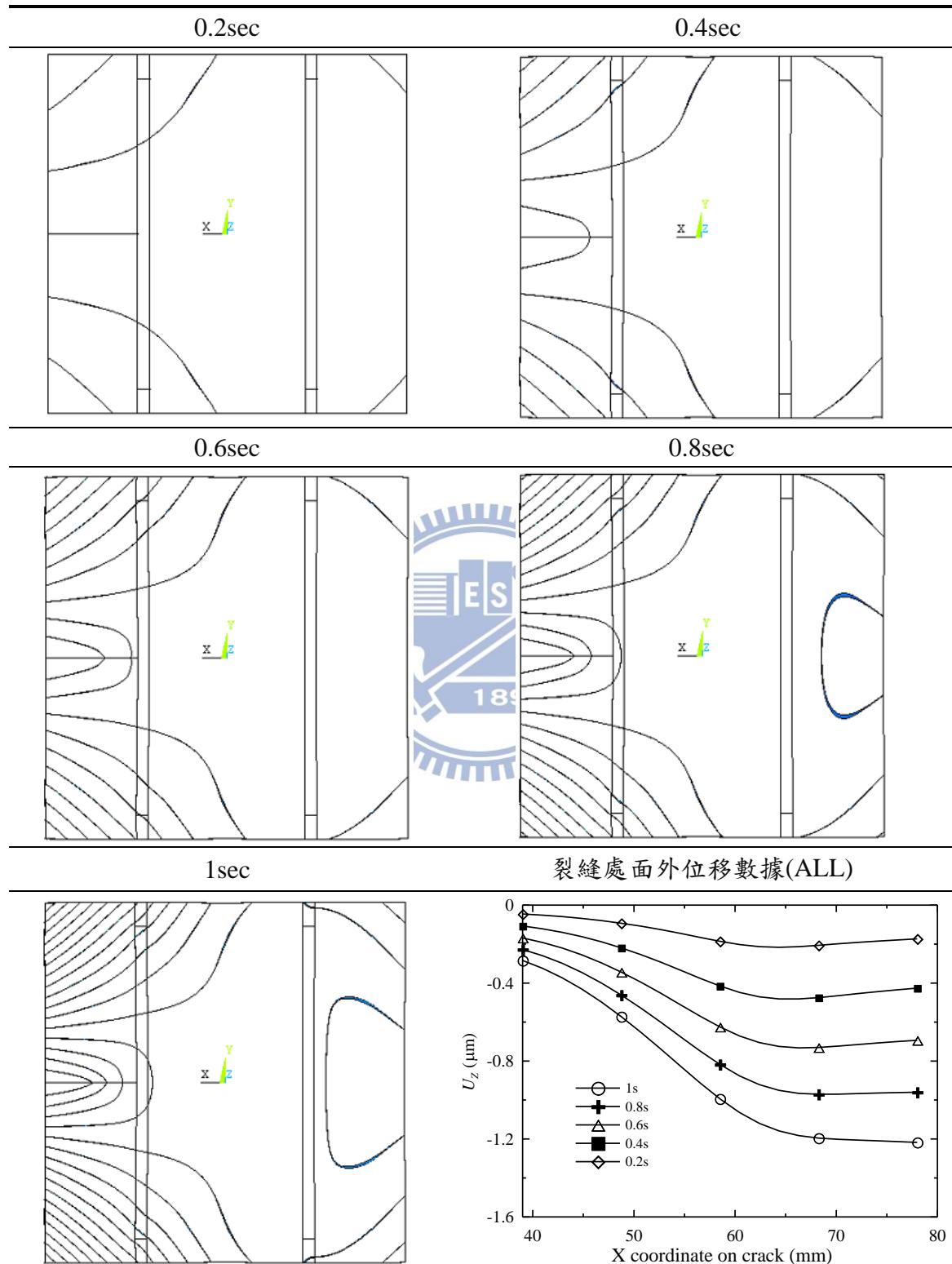


表 3.28 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

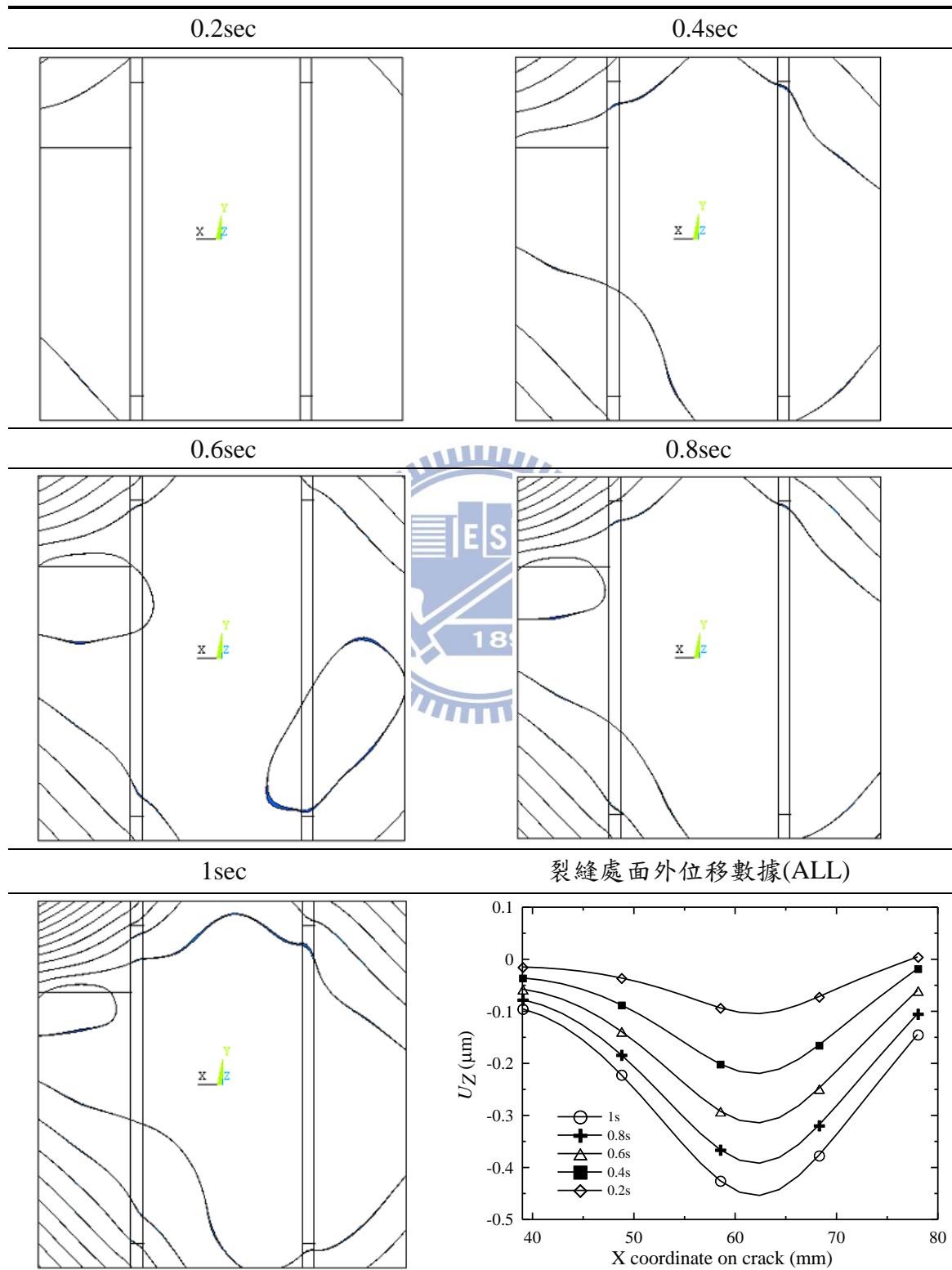


表 3.29 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

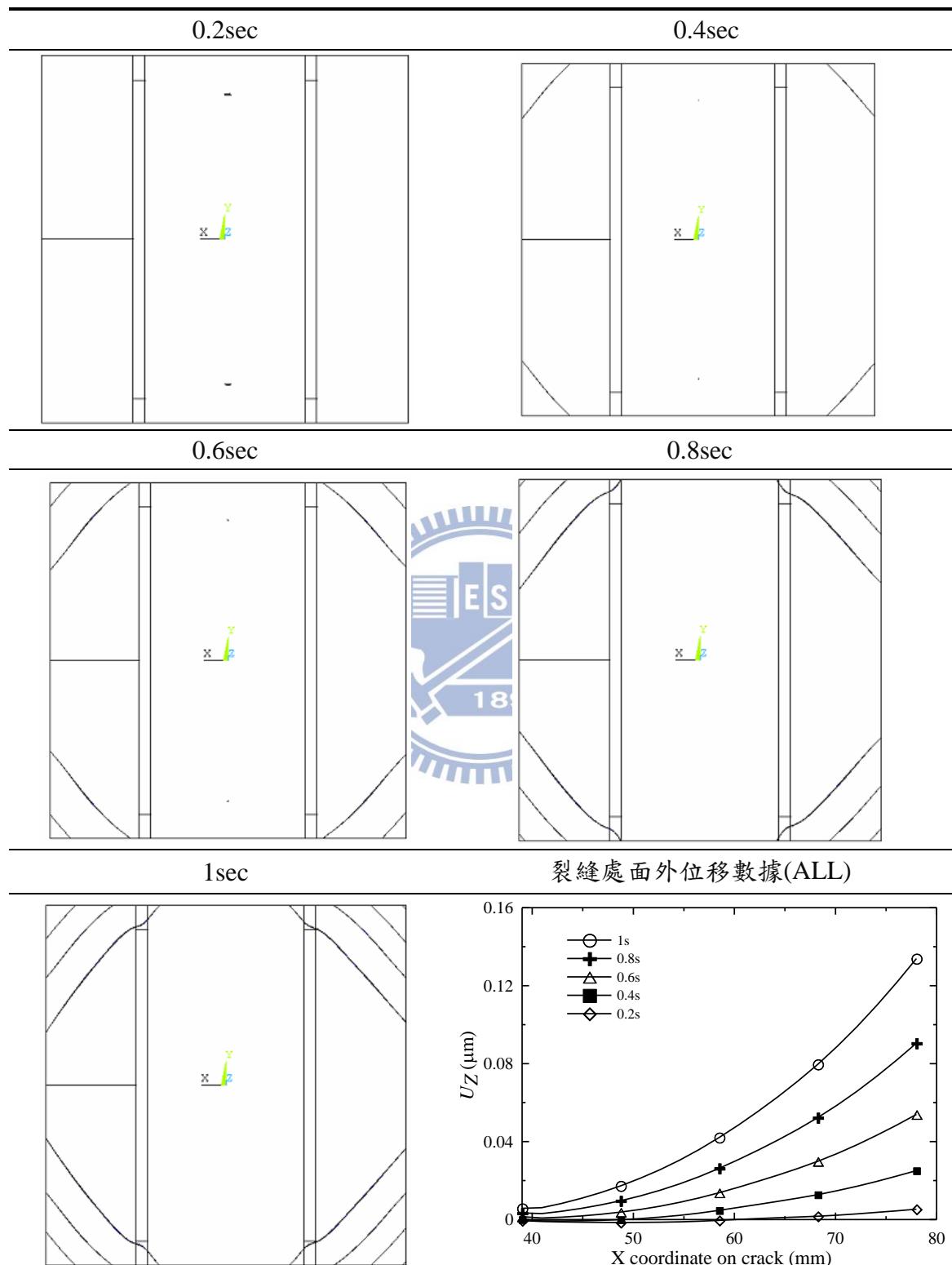


表 3.30-1 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

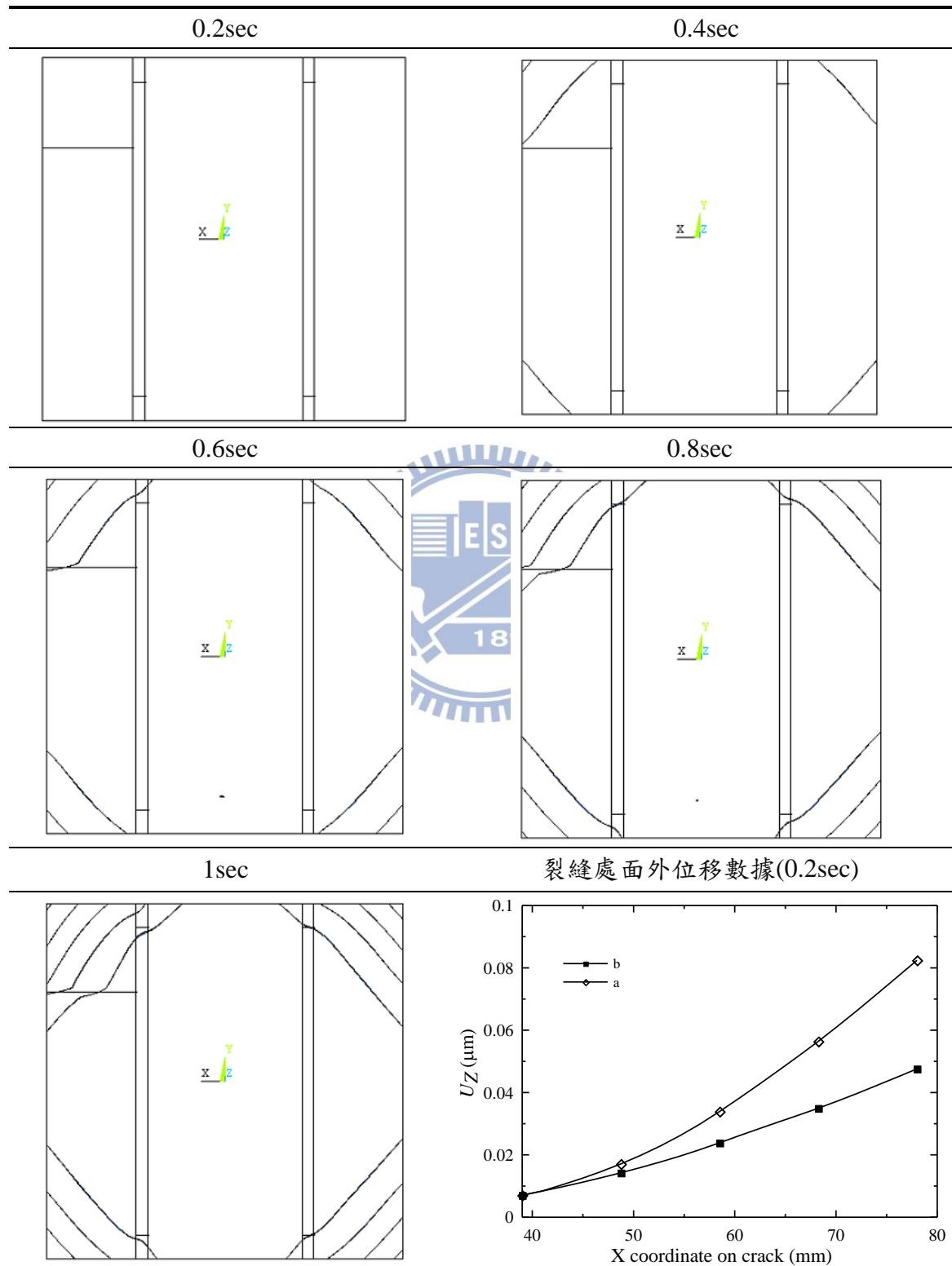


表 3.30-2 空心大矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

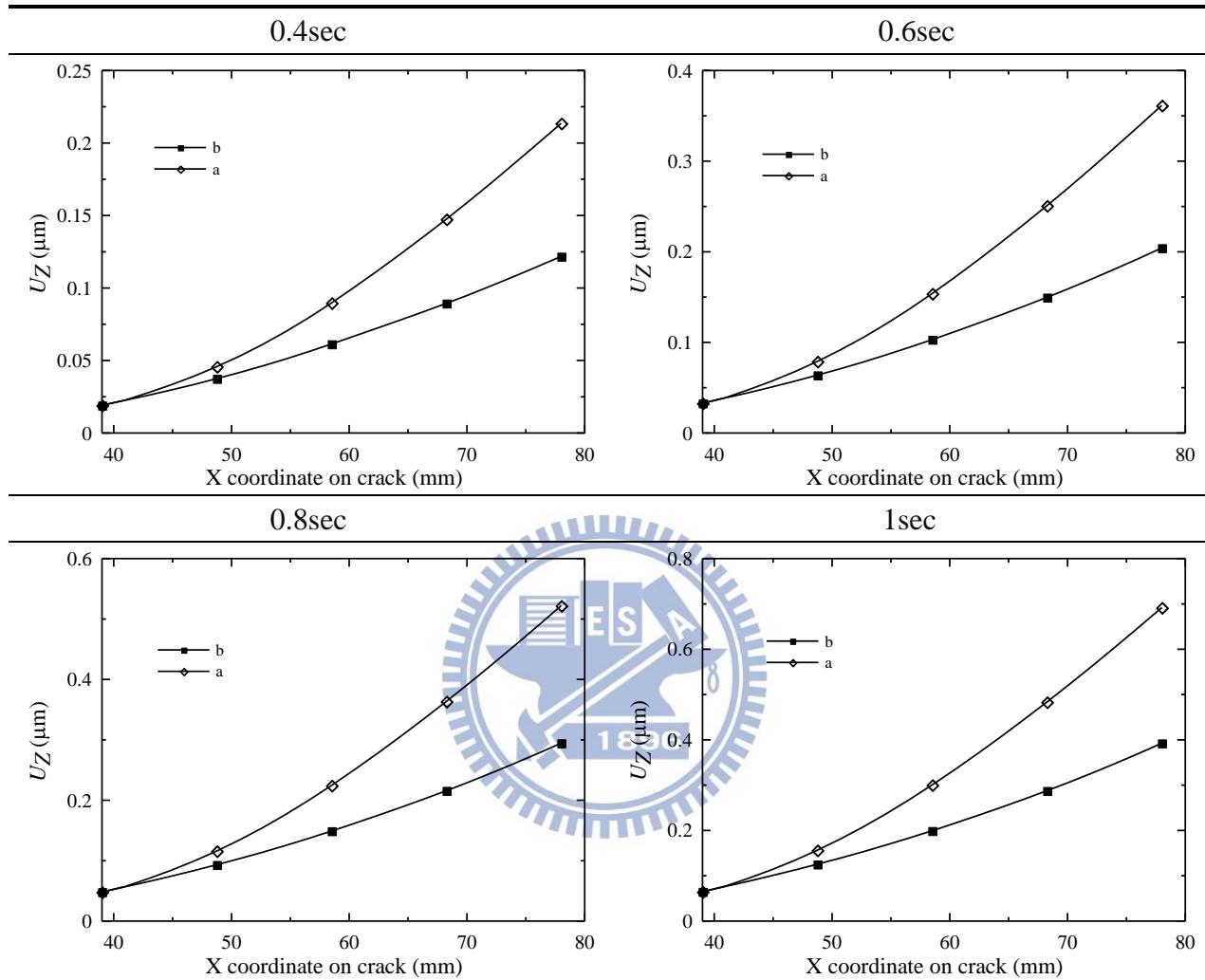


表 3.31 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

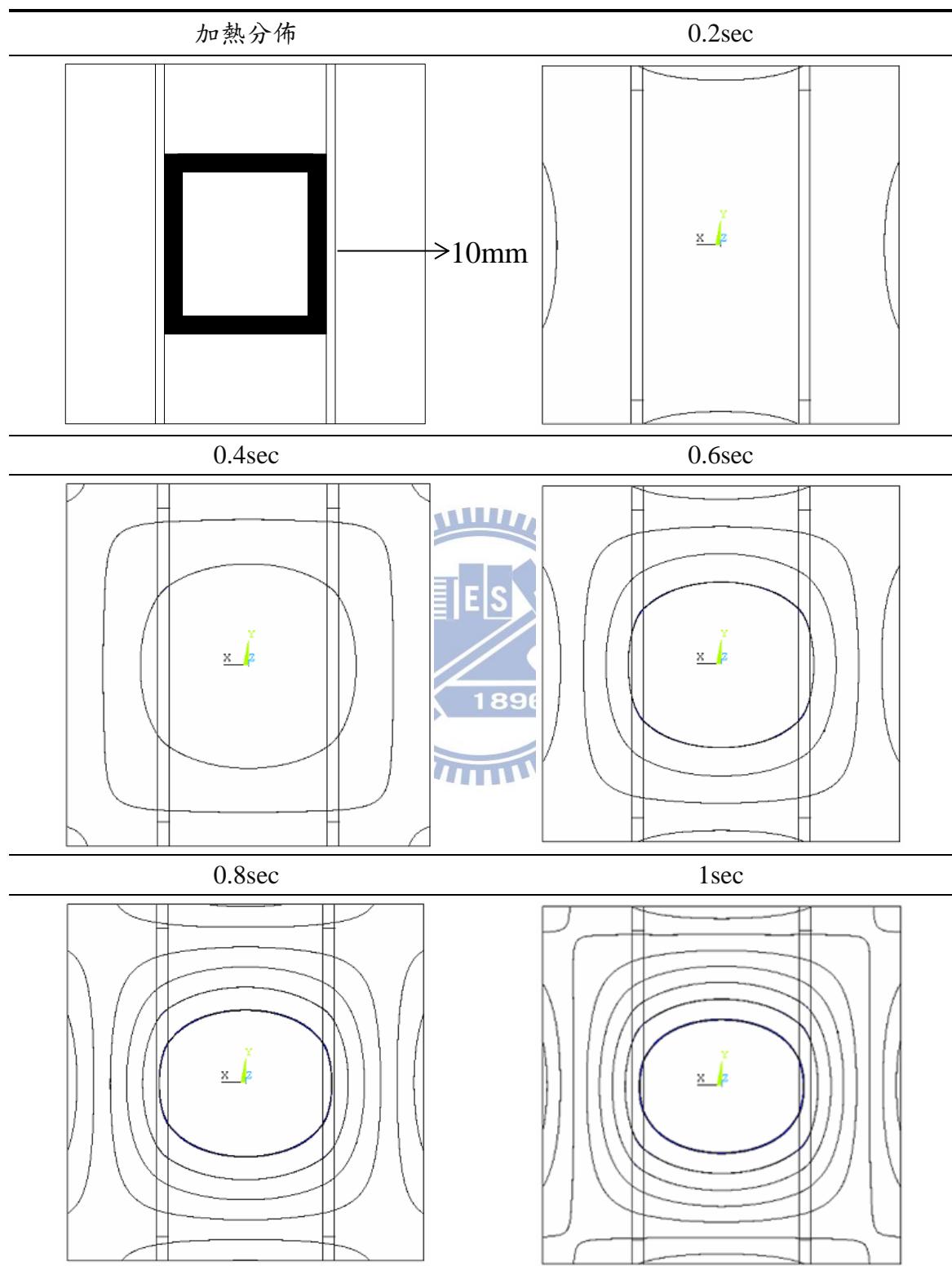


表 3.32 心小矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

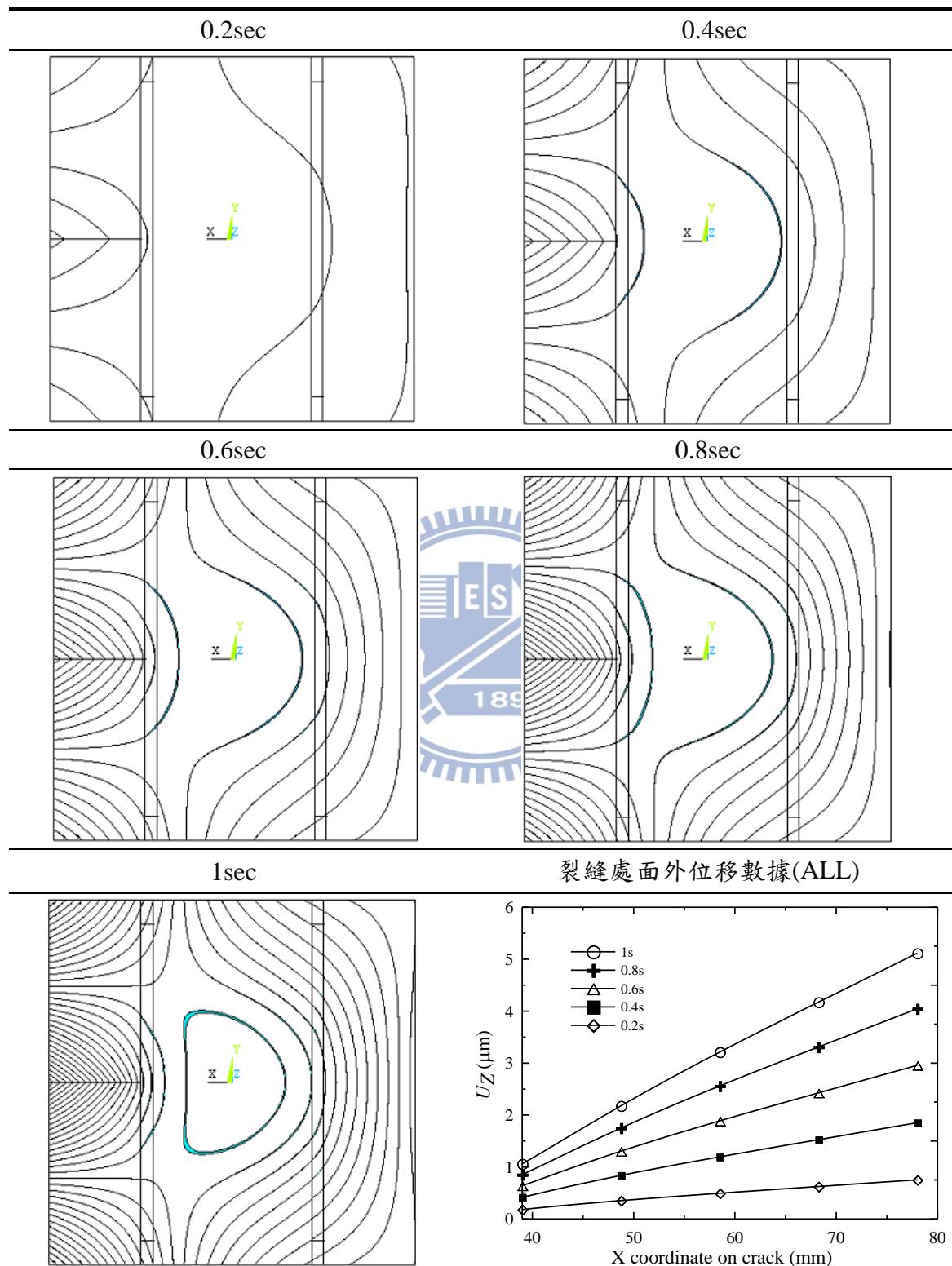


表 3.33 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

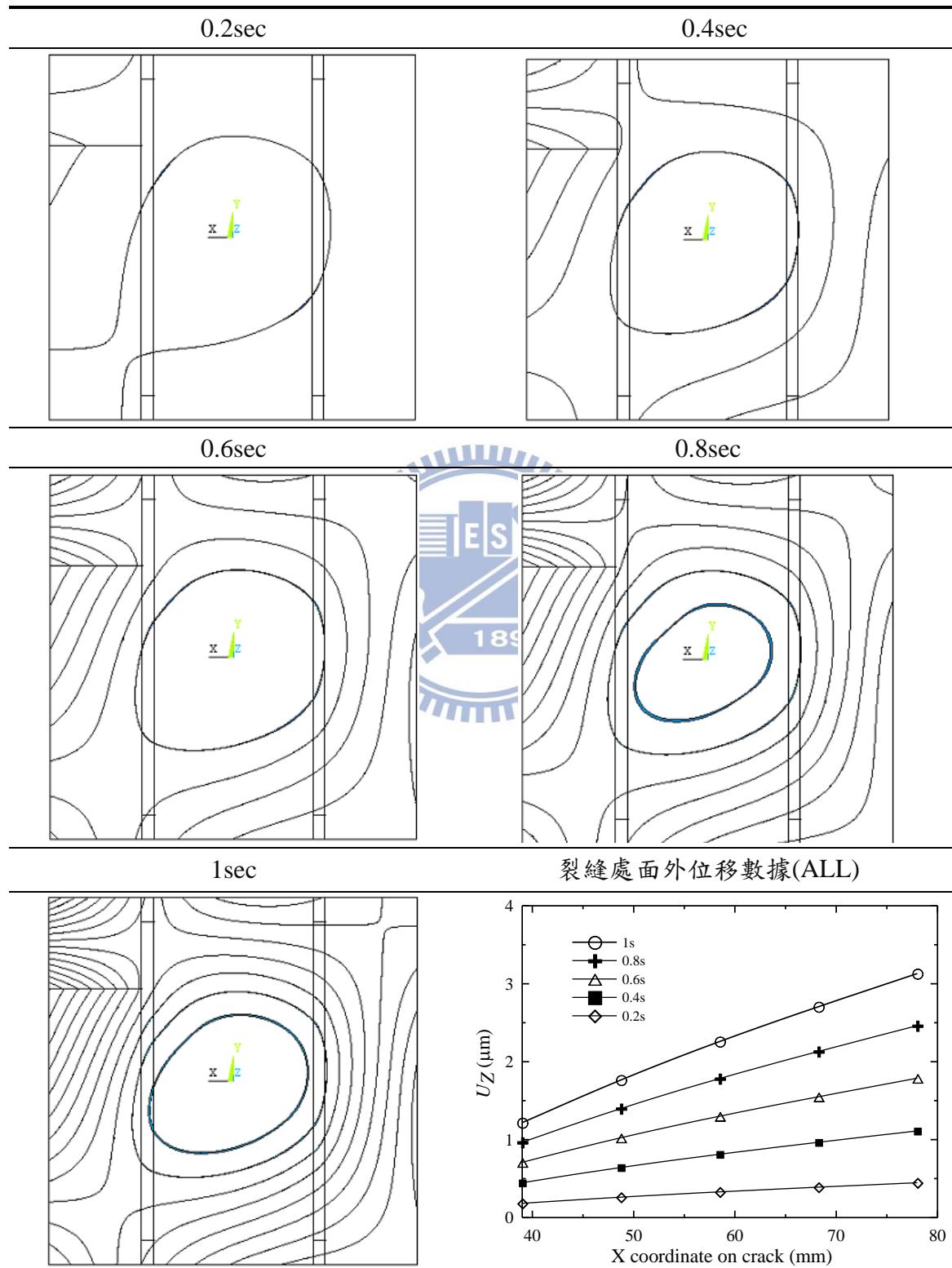


表 3.34 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

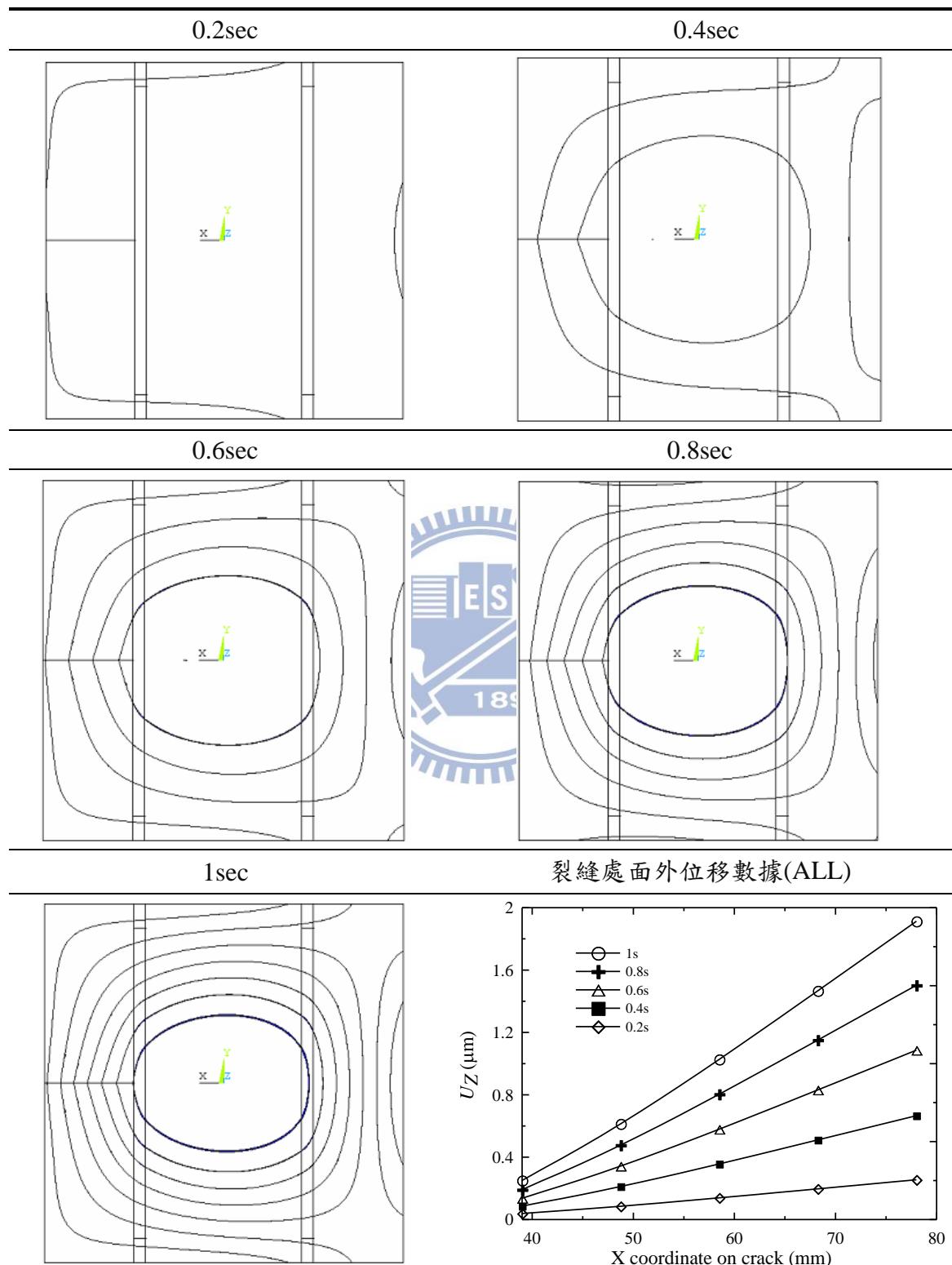


表 3.35-1 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

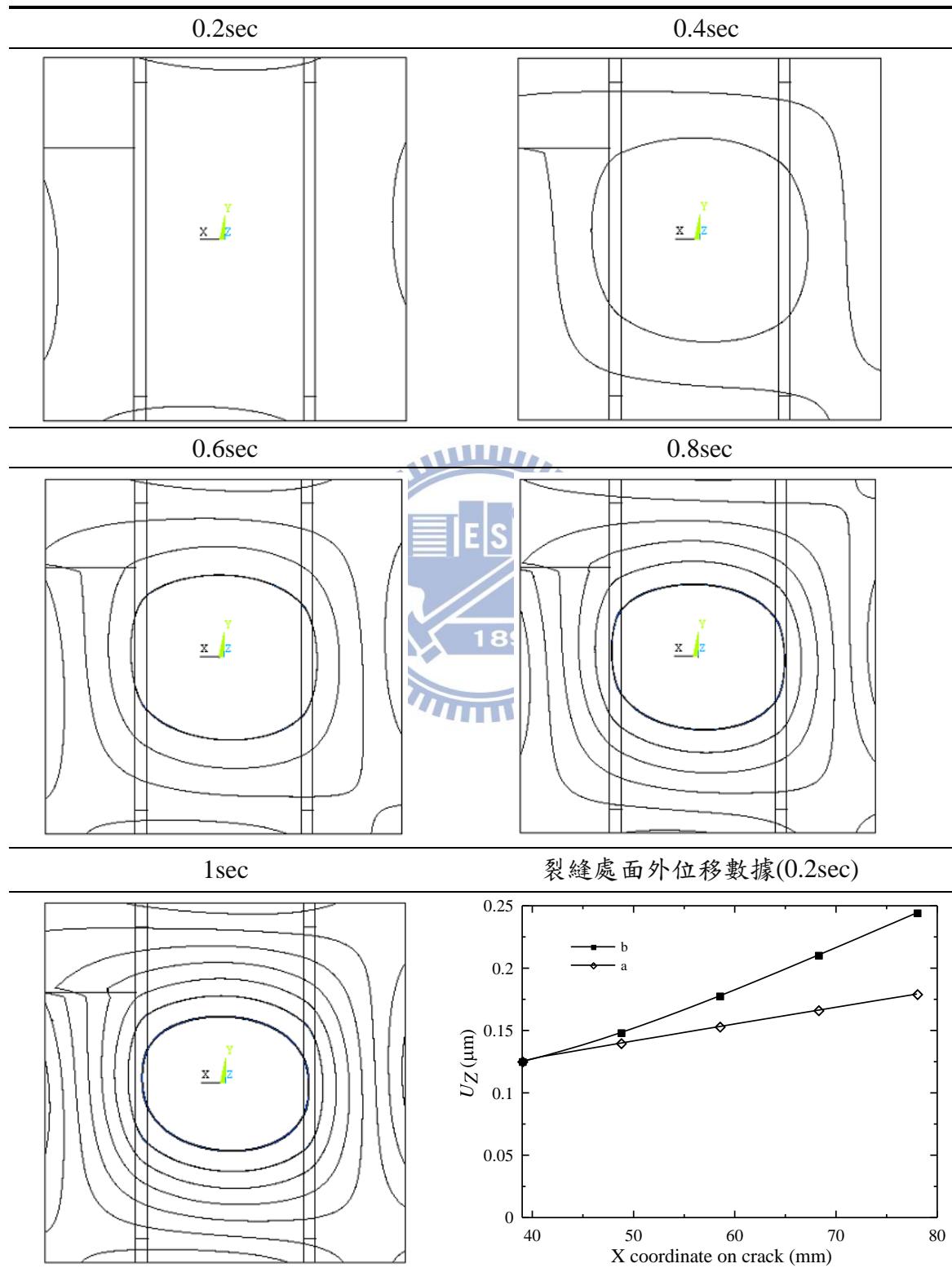


表 3.35-2 空心小矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於緣四分之一處)

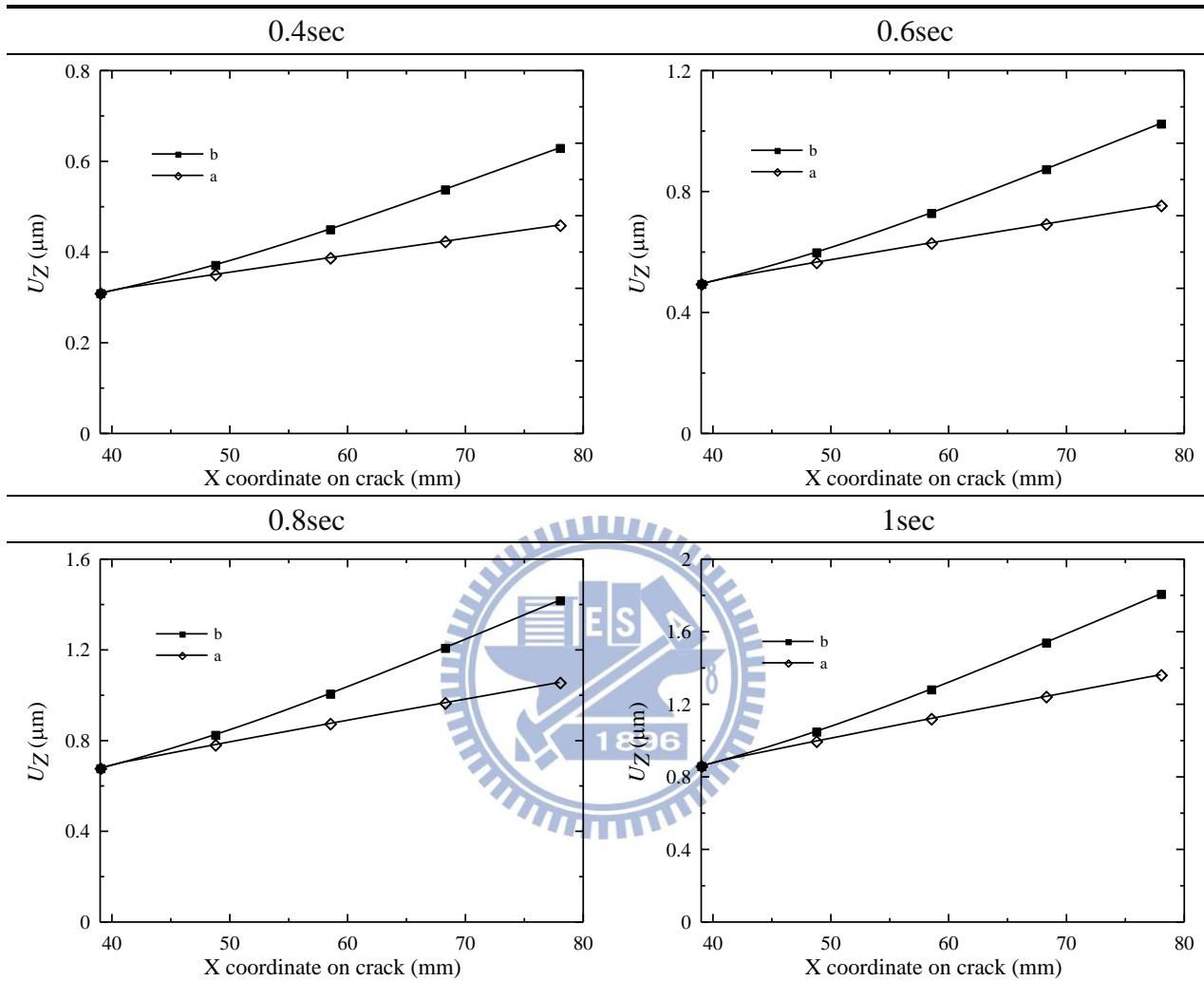


表 3.36 實心矩形分佈之熱通量分析結果(無裂縫)

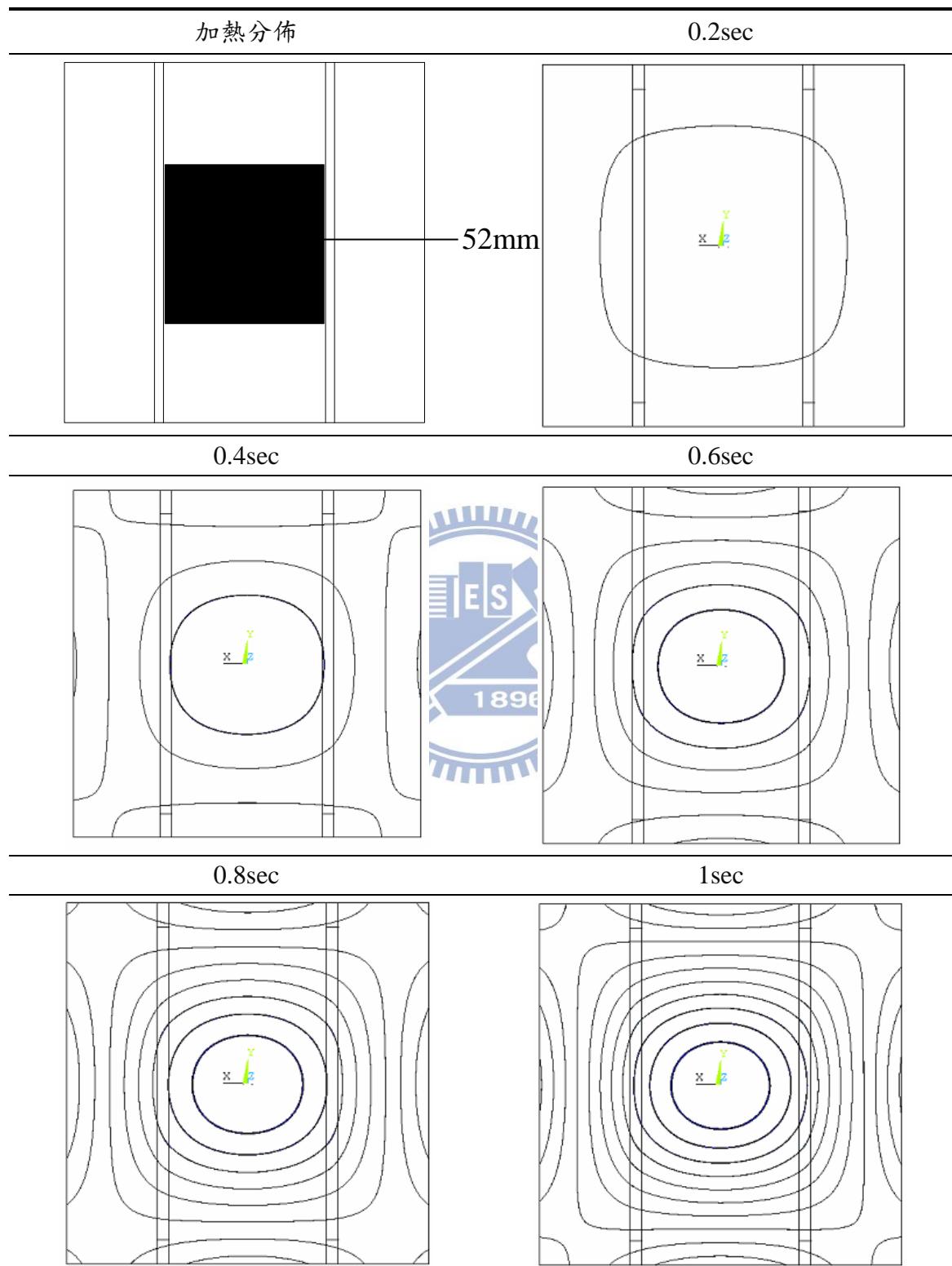


表 3.37 實心矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣中心處)

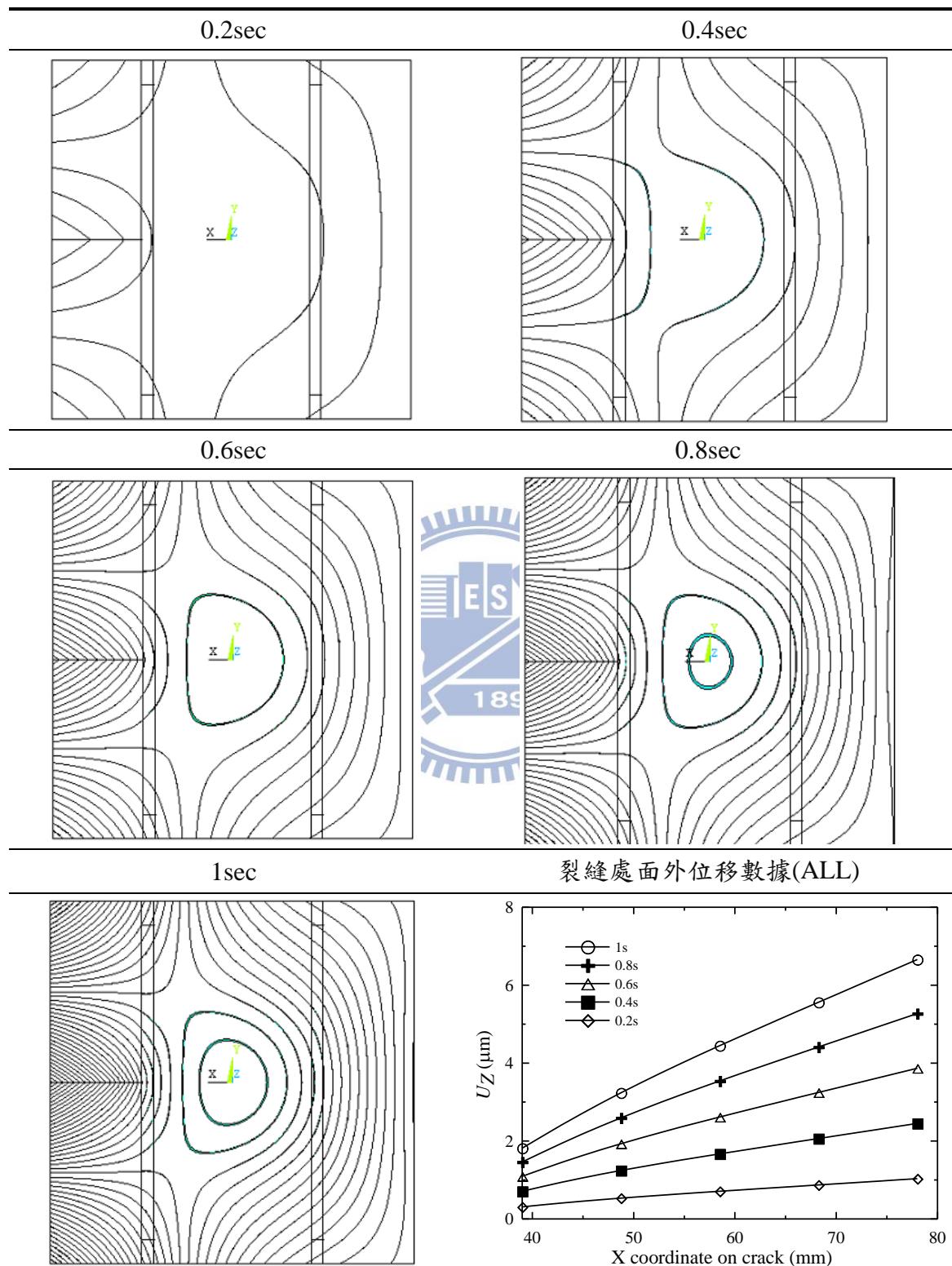


表 3.38 實心矩形分佈之熱通量分析結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

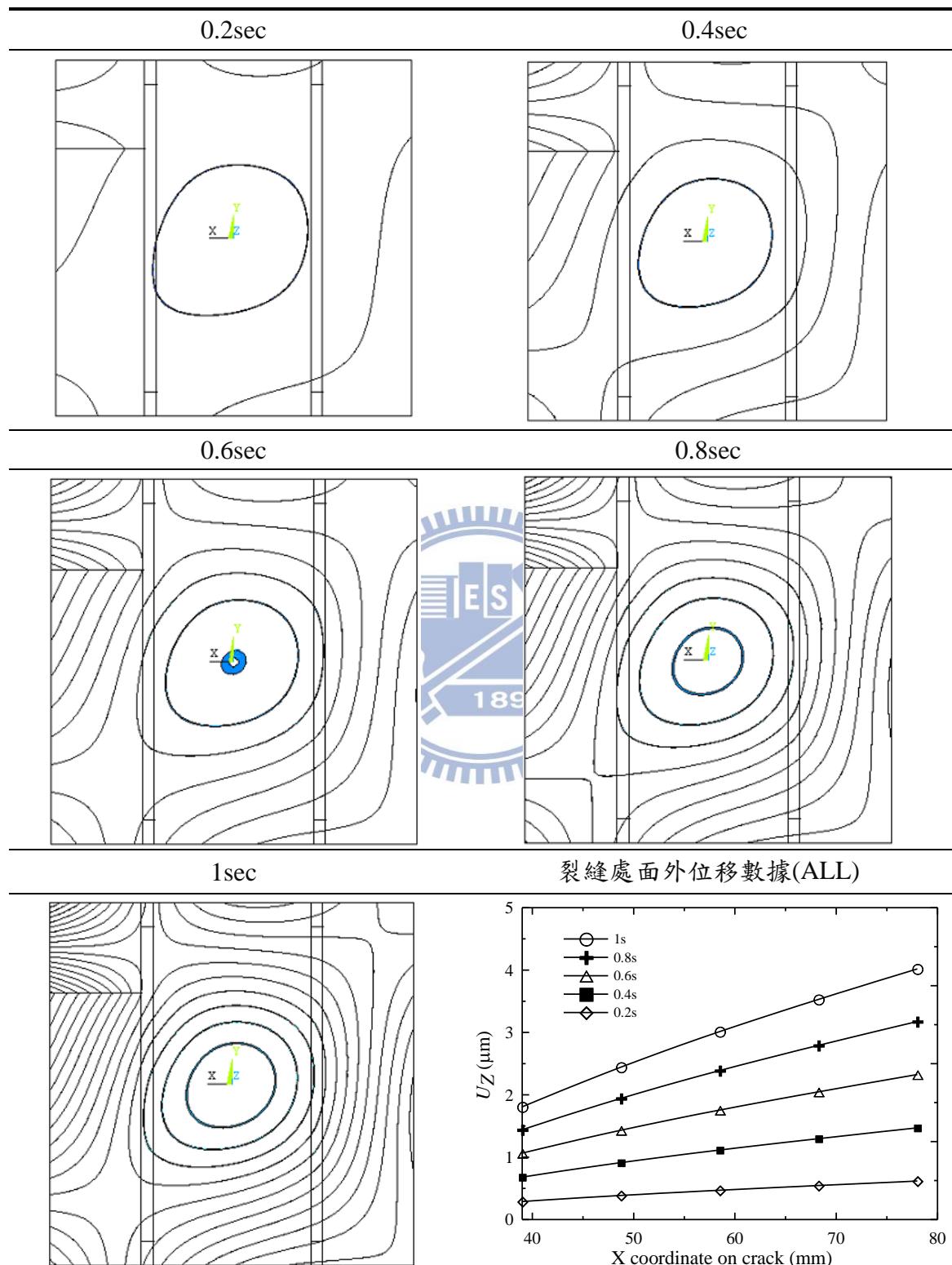


表 3.39 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

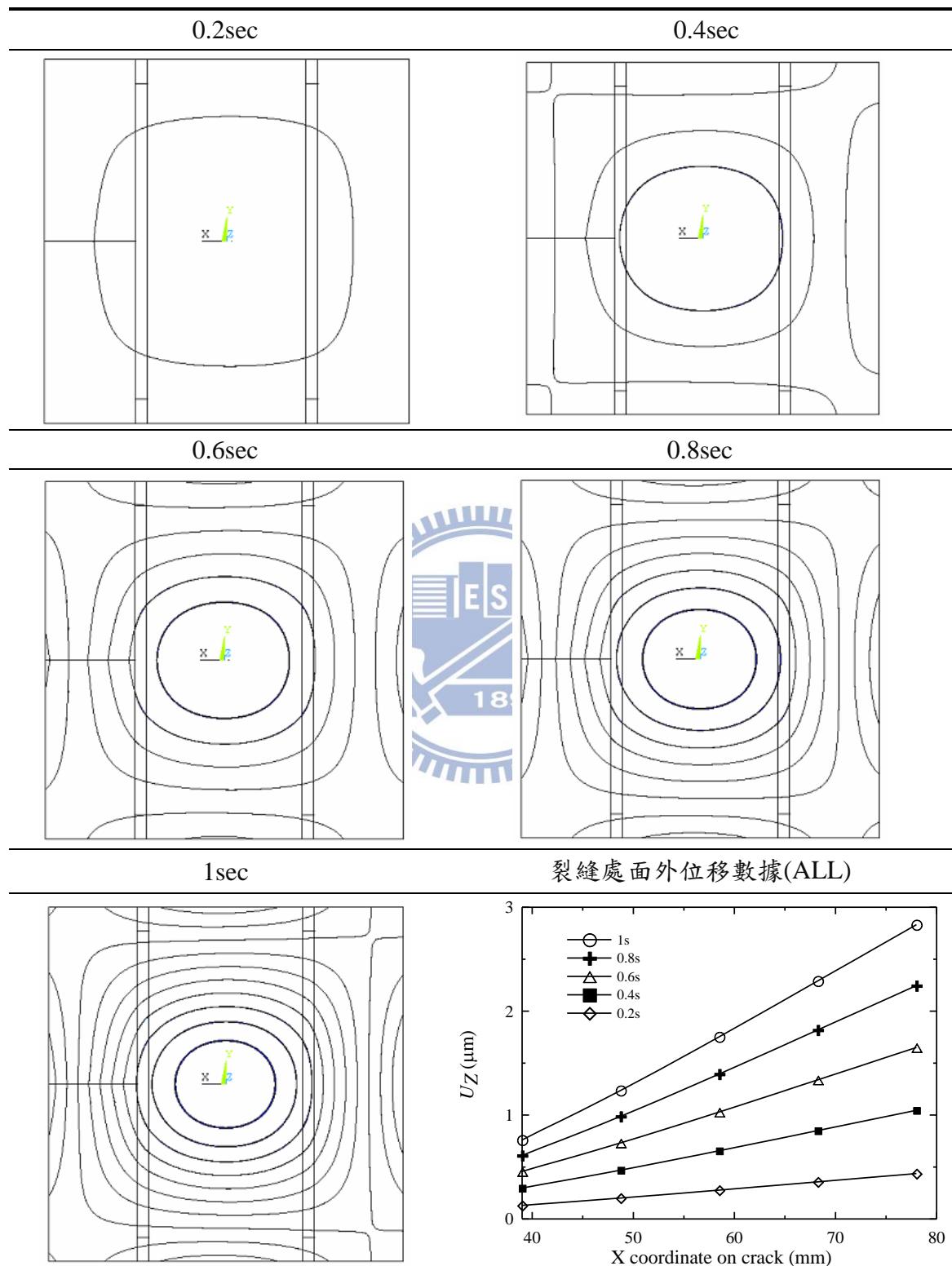


表 3.40-1 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

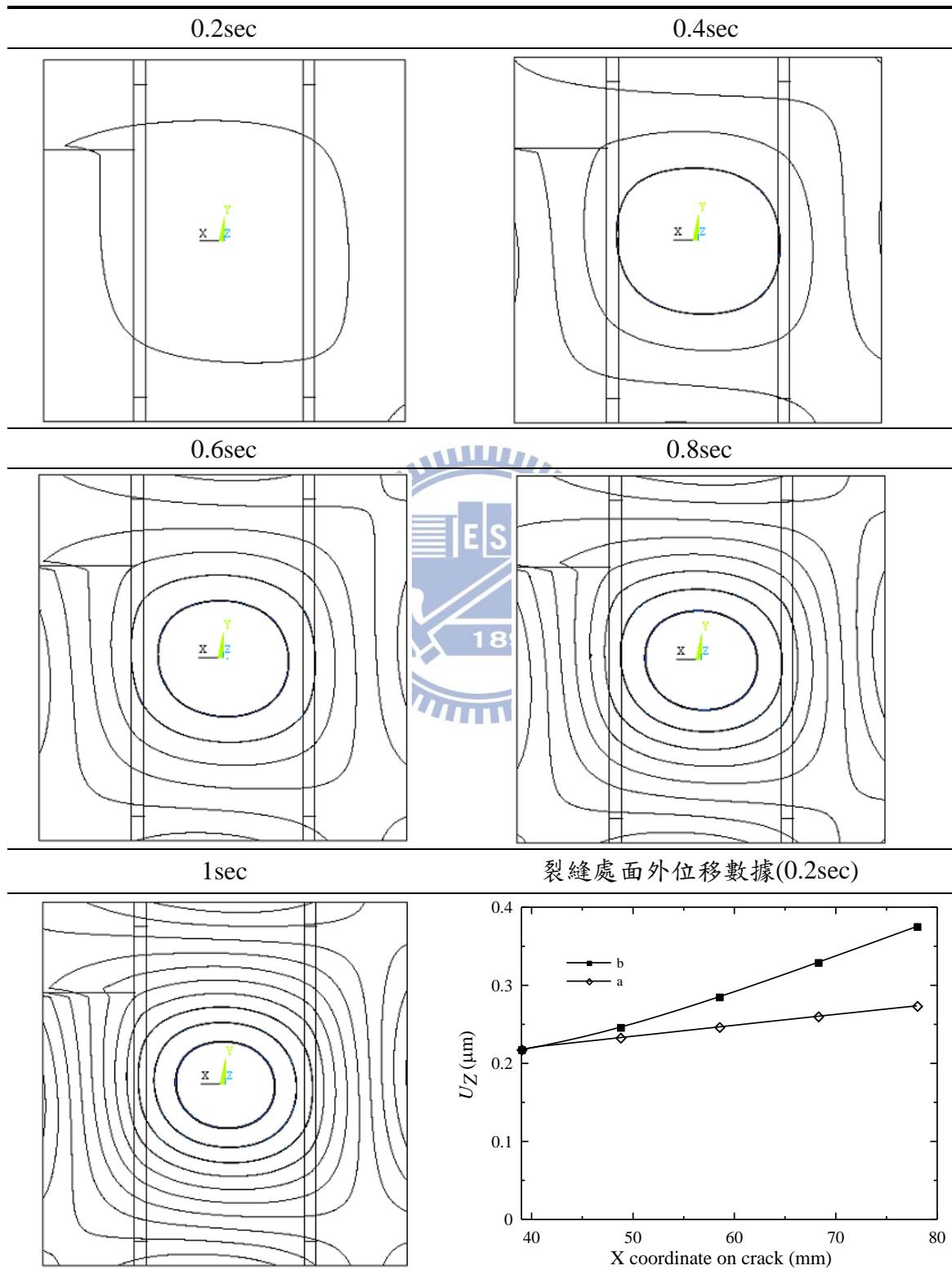


表 3.40-2 實心矩形分佈之熱通量分析結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

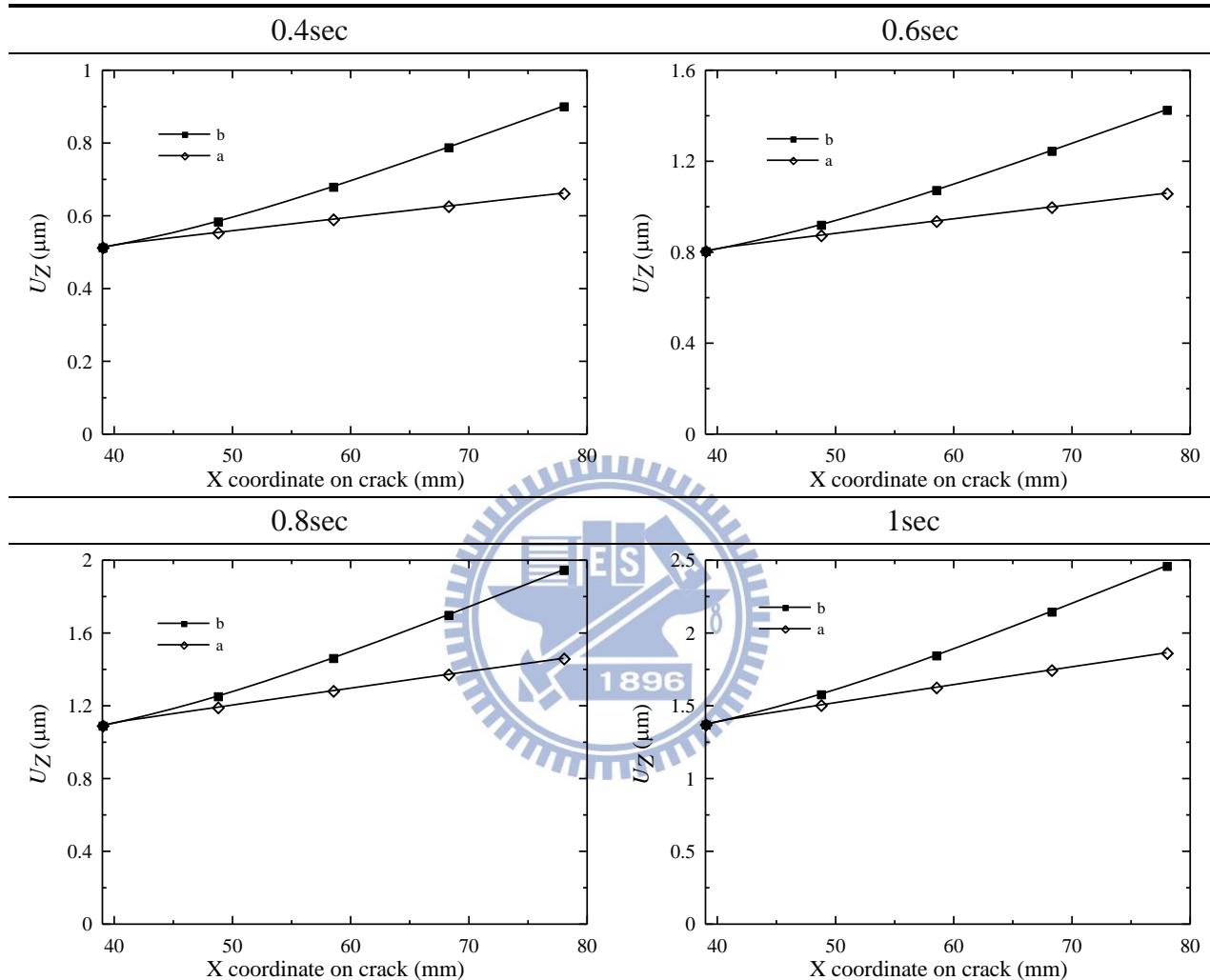


表 3.41 各種分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(表面裂縫於邊緣中心處)

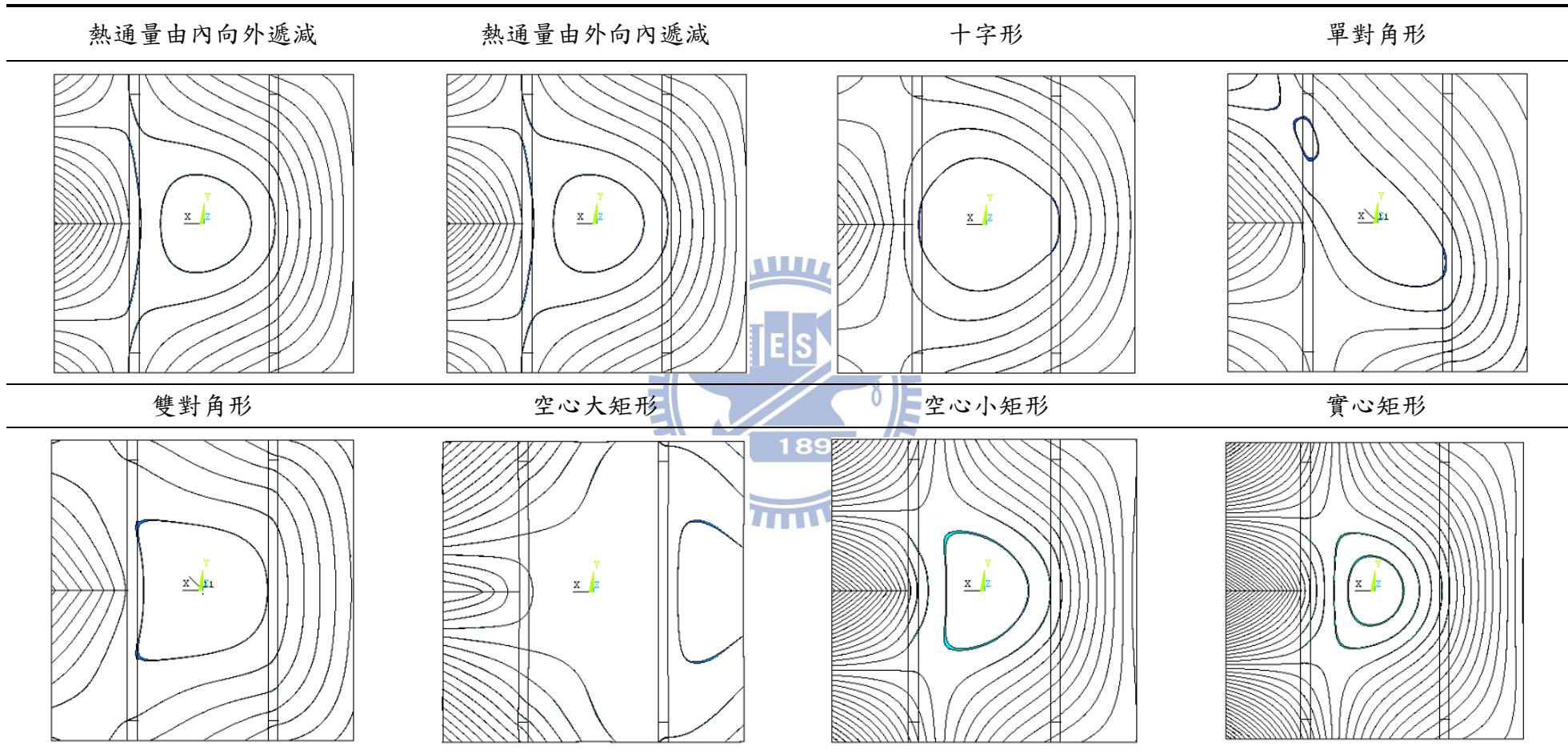


表 3.42 各種分佈之熱通量於 1 秒時之分析結果比較(表面裂縫於邊緣四分之一處)

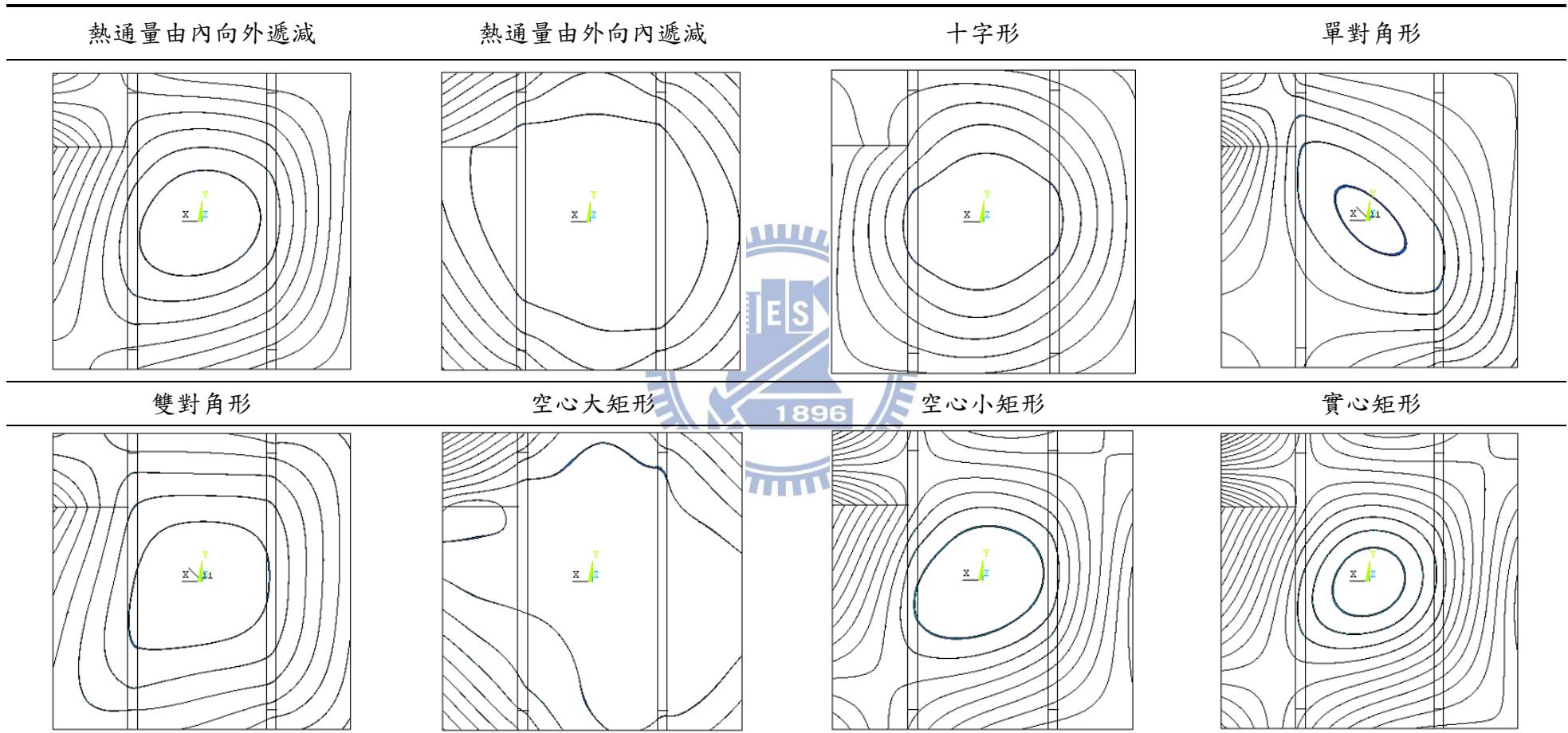


表 3.43 各種分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(貫穿裂縫於邊緣中心處)

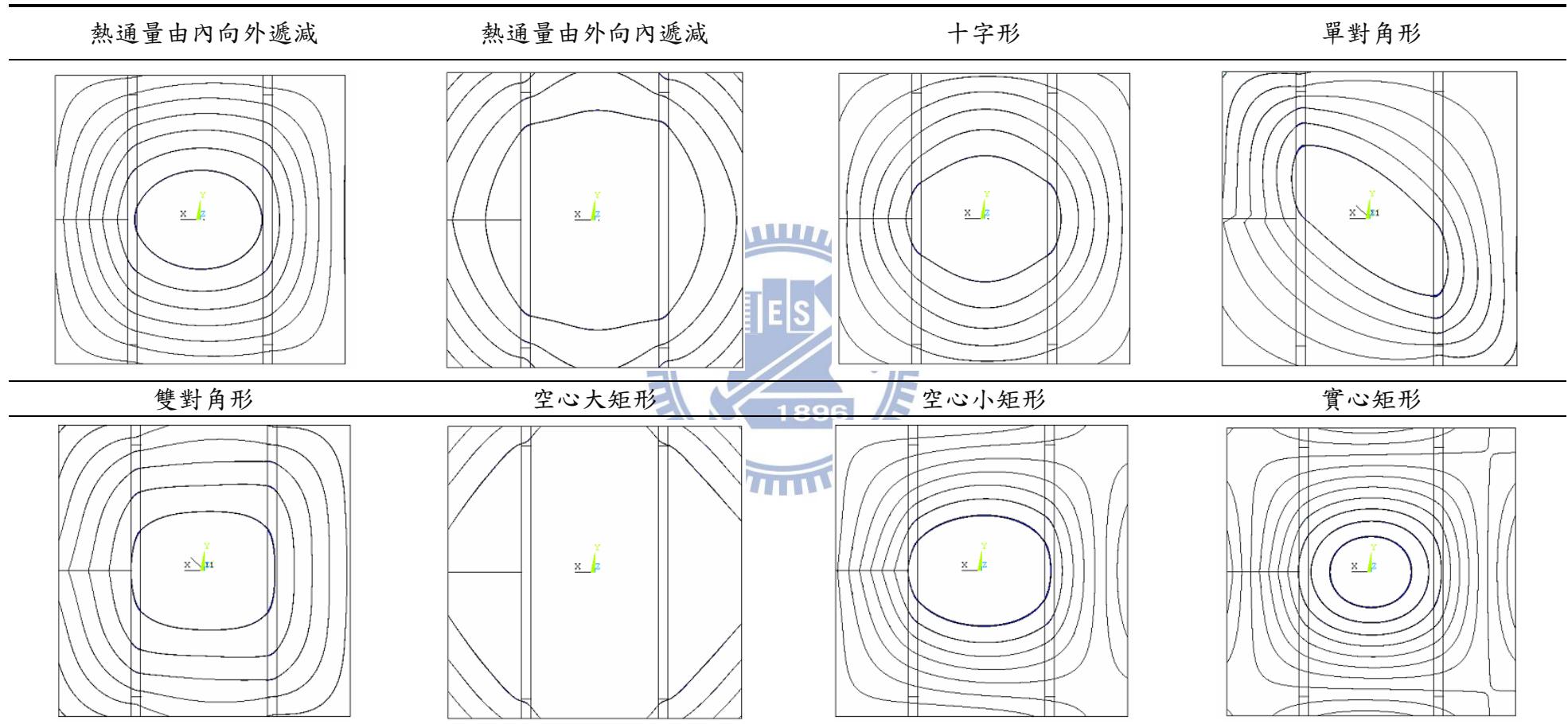


表 3.44 各種加熱分佈之熱通量於 1 秒時分析結果比較(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

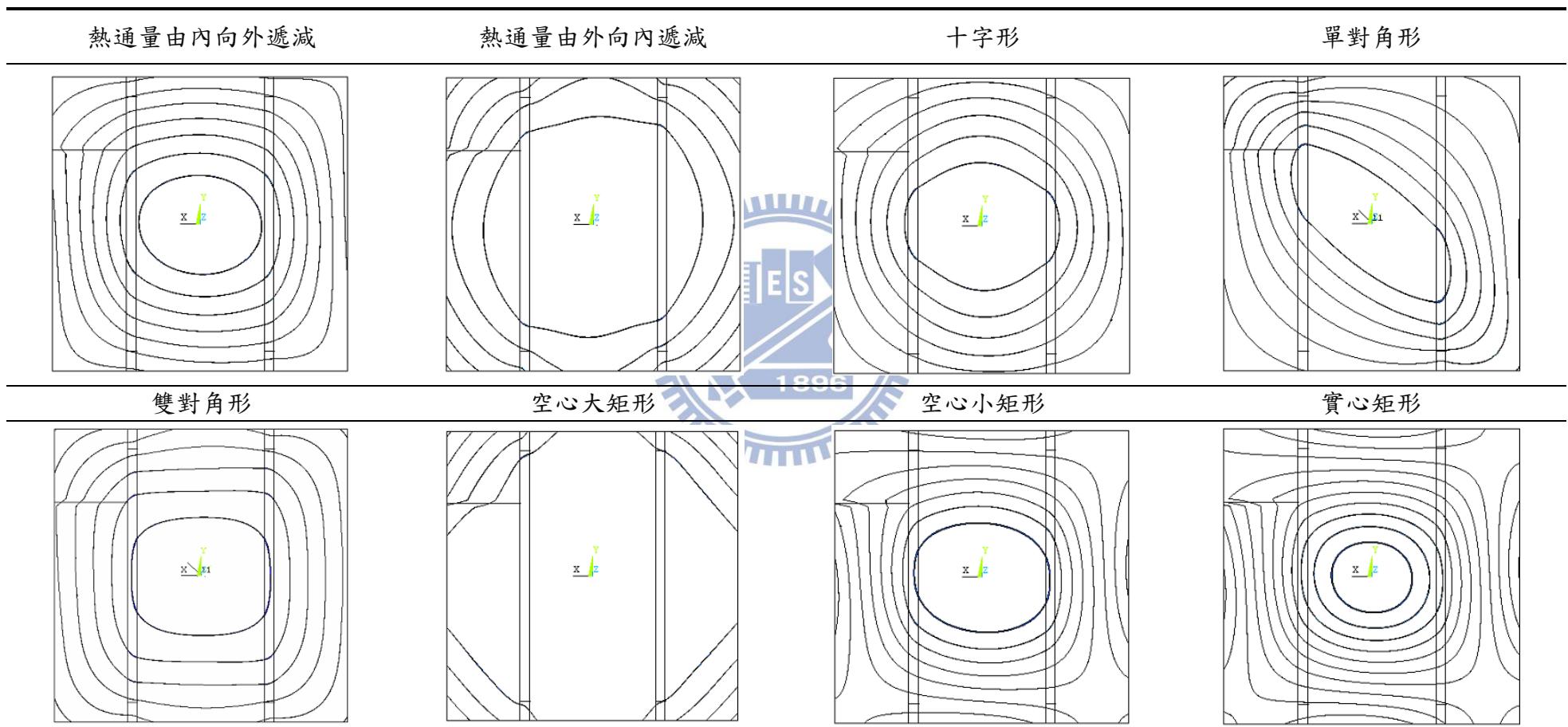


表 3.45 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(表面裂縫於邊緣中心處)

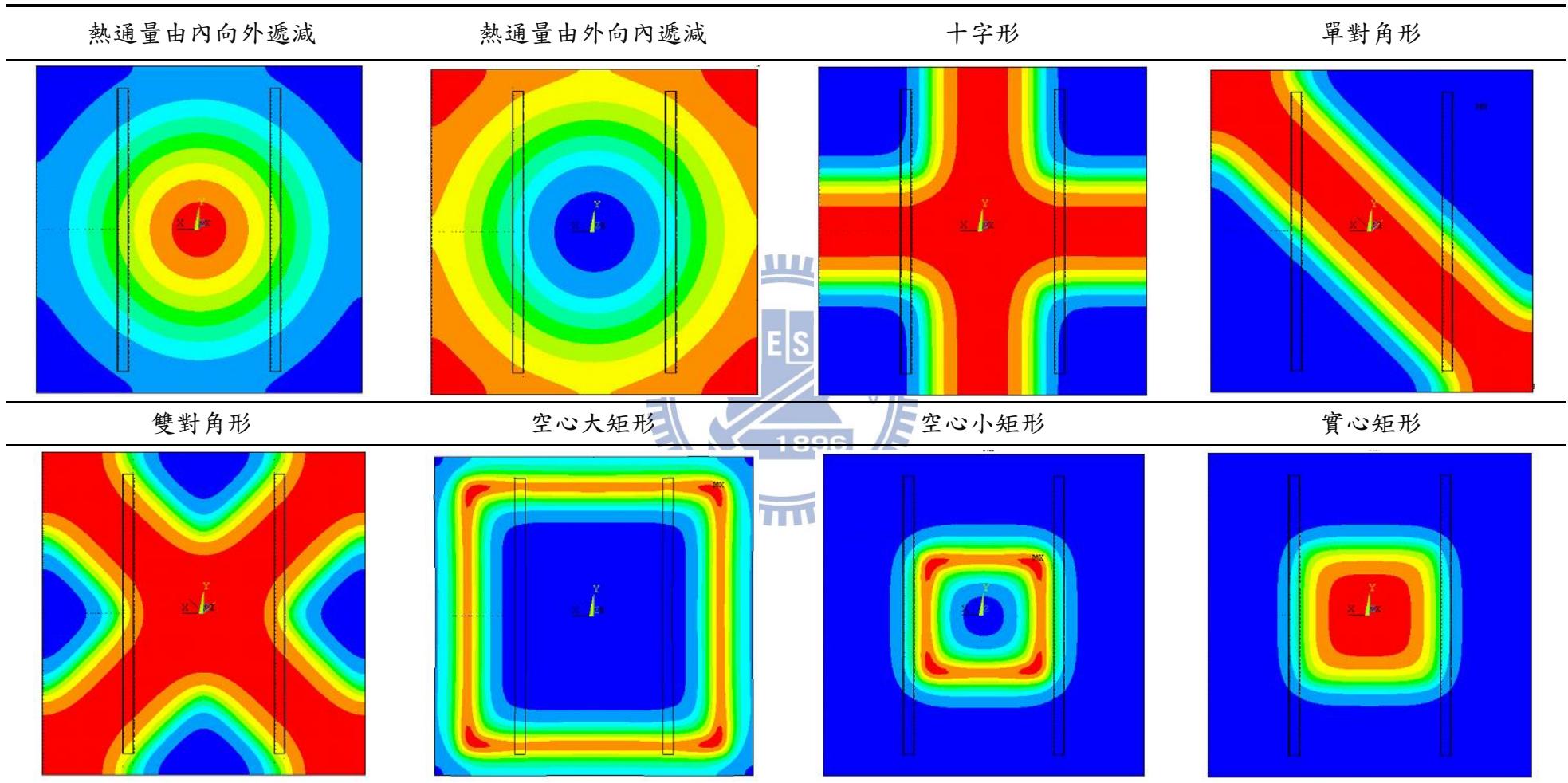


表 3.46 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(表面裂縫於邊緣四分之一處)

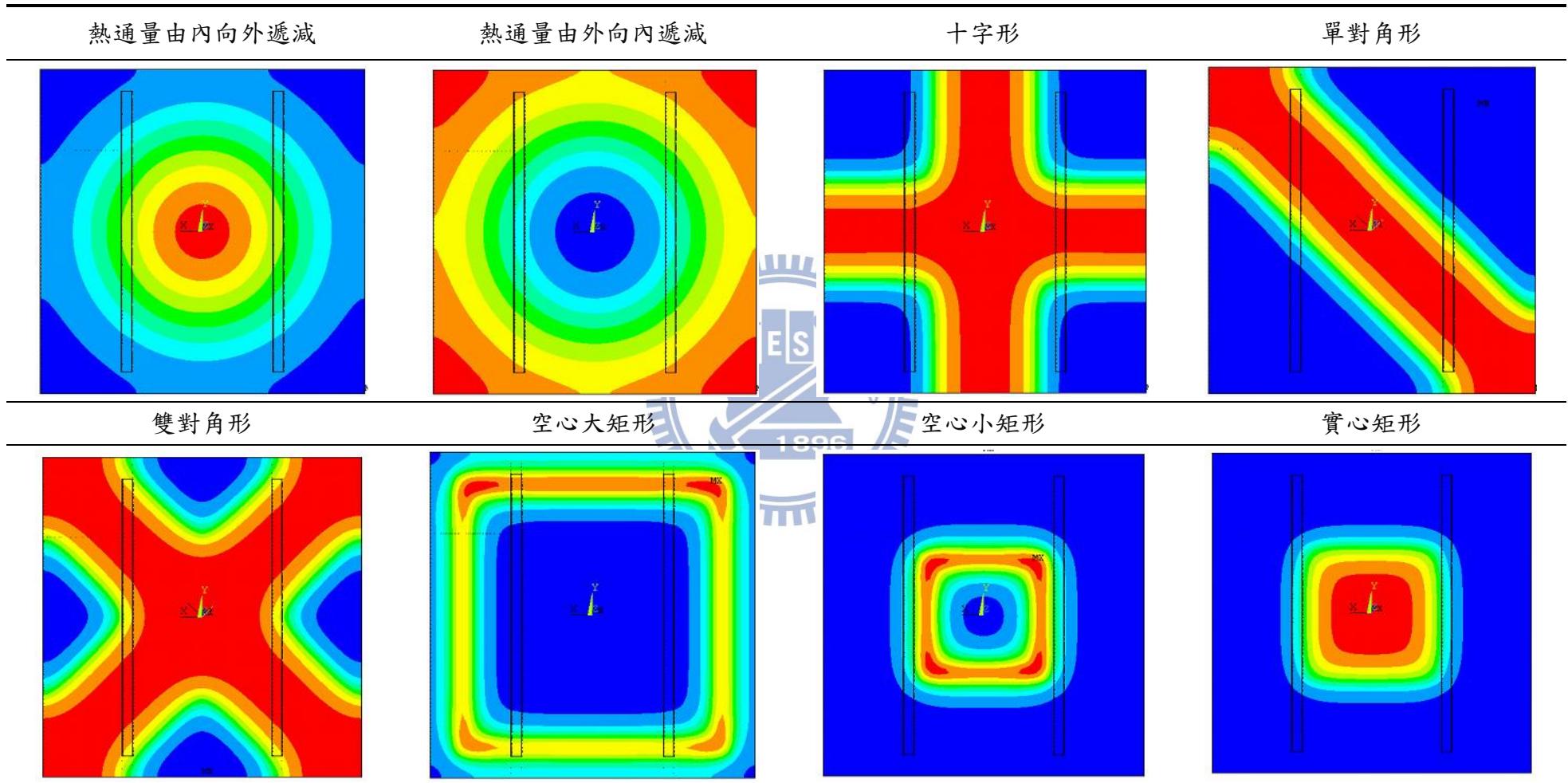


表 3.47 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(貫穿裂縫於邊緣中心處)

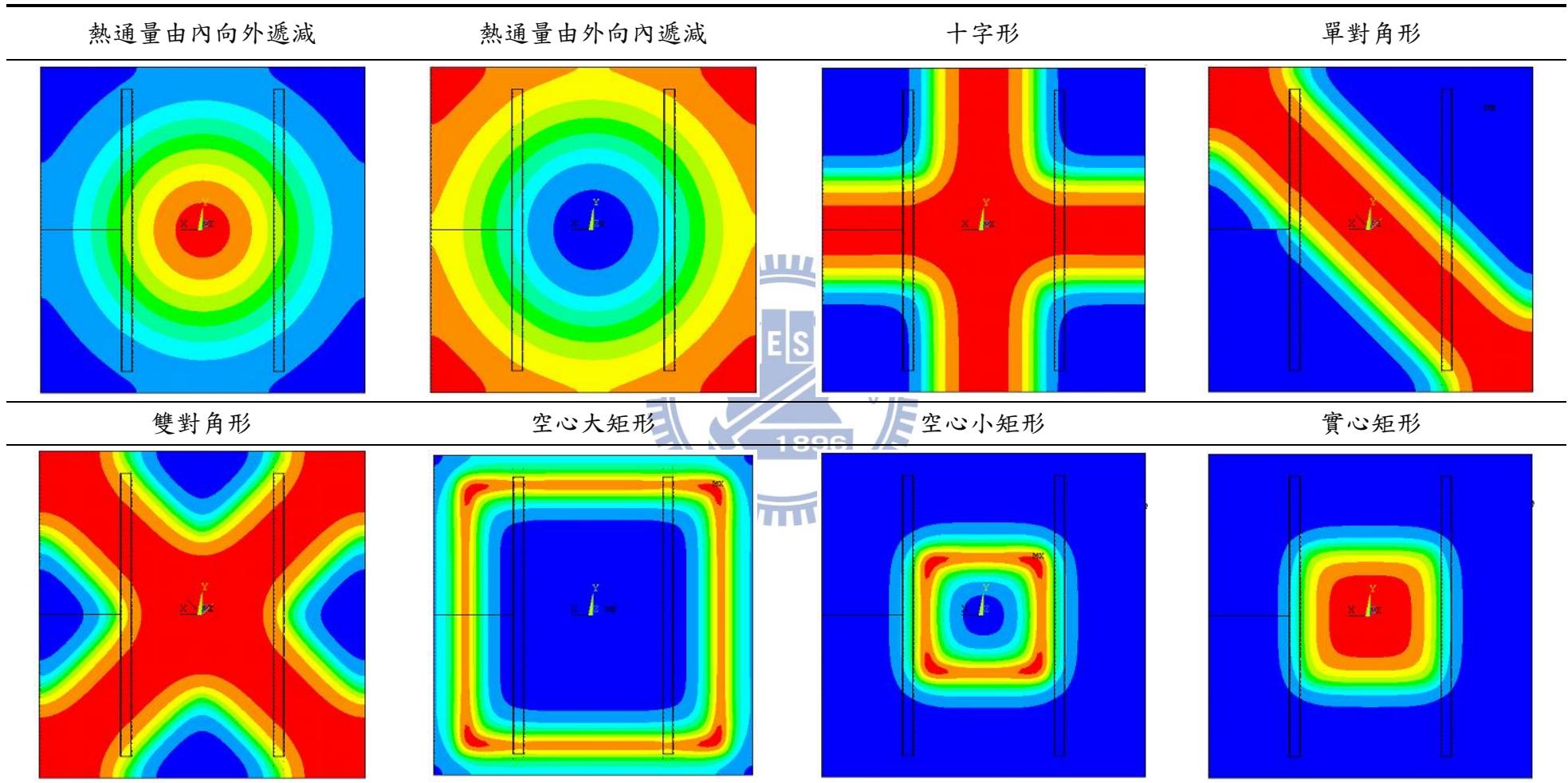


表 3.48 各種分佈之熱通量 1 秒溫度分佈圖(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

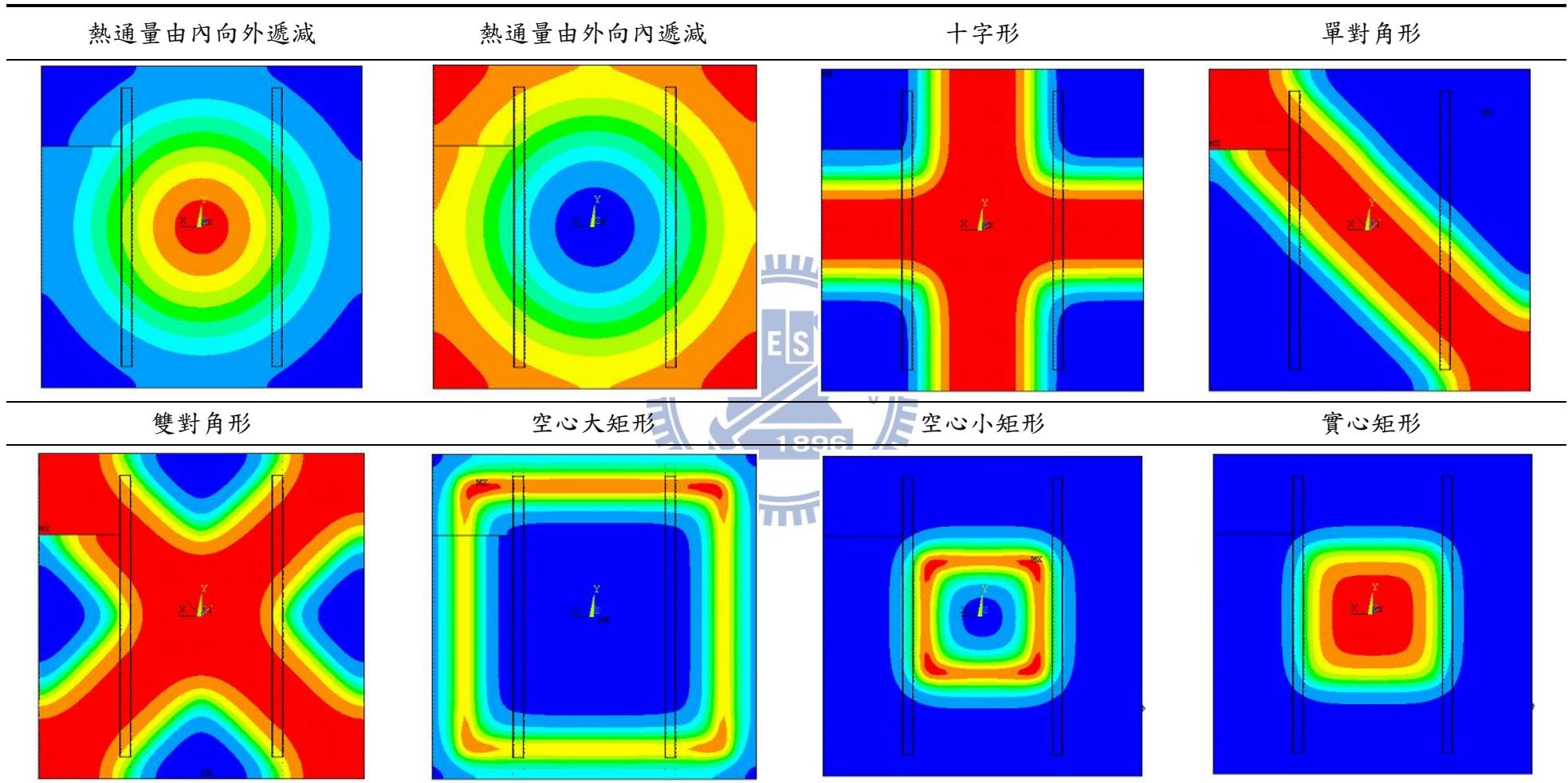


表 3.49 各種分佈之熱通量於 1 秒最低與最高溫度值

加熱分佈	最低溫度值( $^{\circ}\text{C}$ )	最高溫度值( $^{\circ}\text{C}$ )
由內而外遞減之高斯 分佈熱通量	20	30
由外而內遞減之高斯 分佈熱通量	20	26.2
十字形分佈之熱通量	20	27.3
單對角形分佈之 熱通量	20	29.3
雙對角形分佈之 熱通量		25.4
空心大矩形分佈之 熱通量		29.4
空心小矩形分佈之 熱通量	20	41
實心矩形分佈之 熱通量	20	38

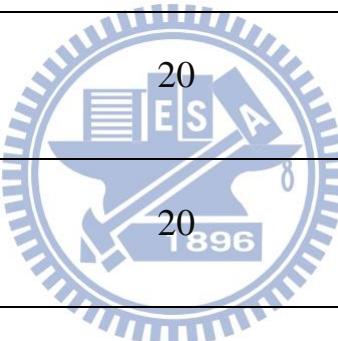


表 4.1 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(無裂縫)

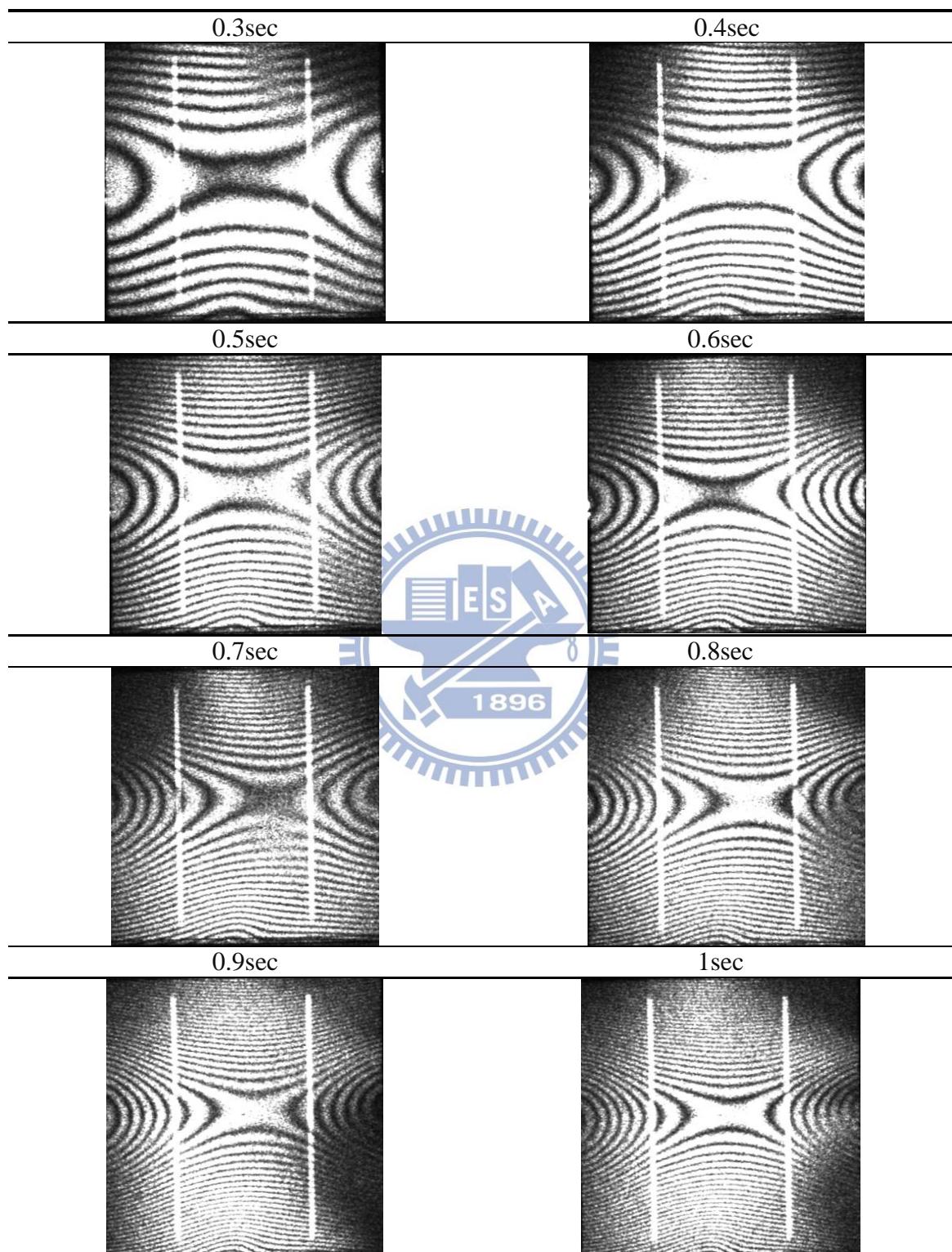


表 4.2 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(表面裂縫於邊緣中心處)

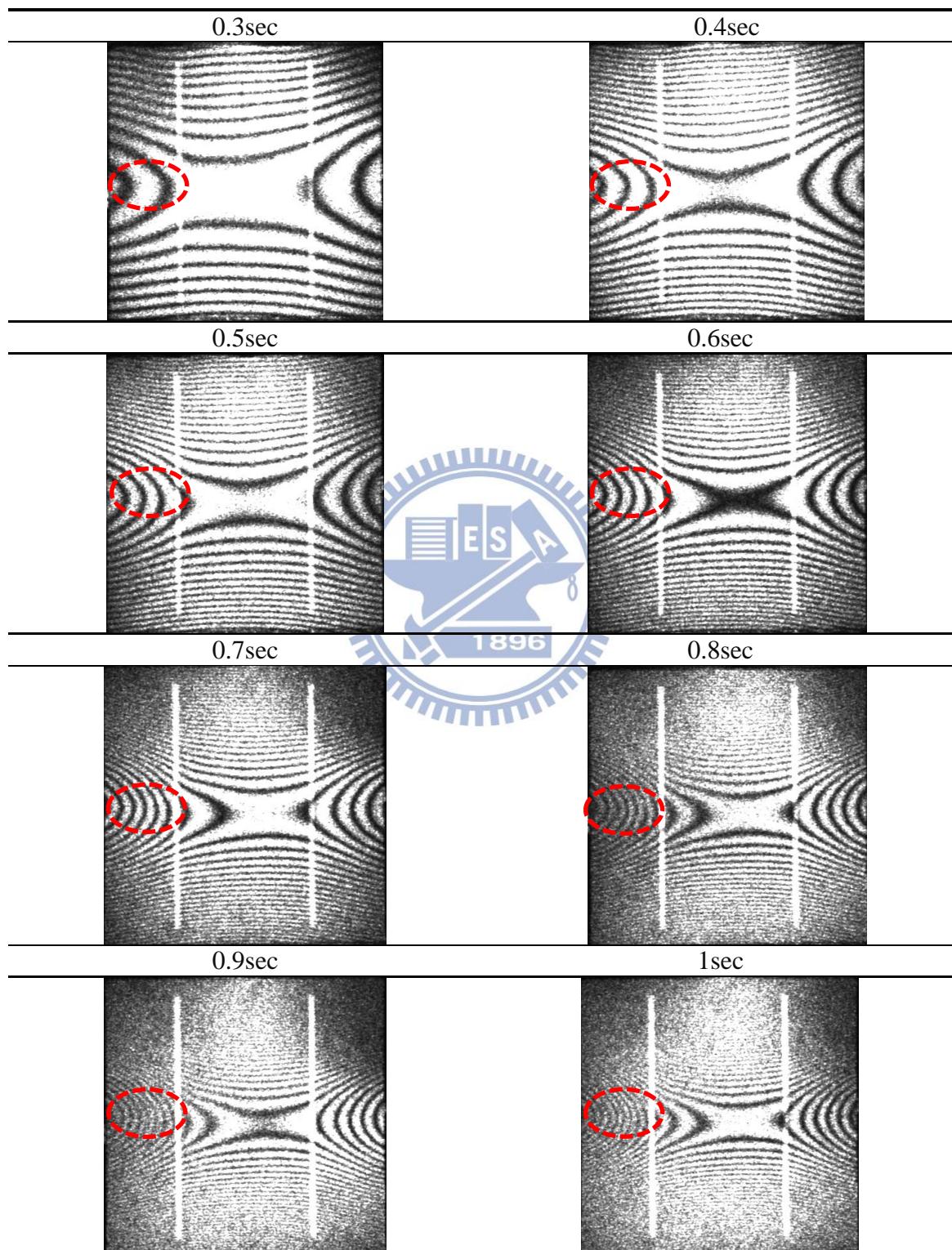


表 4.3 多晶矽太陽能電池無光罩下加熱之實驗結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

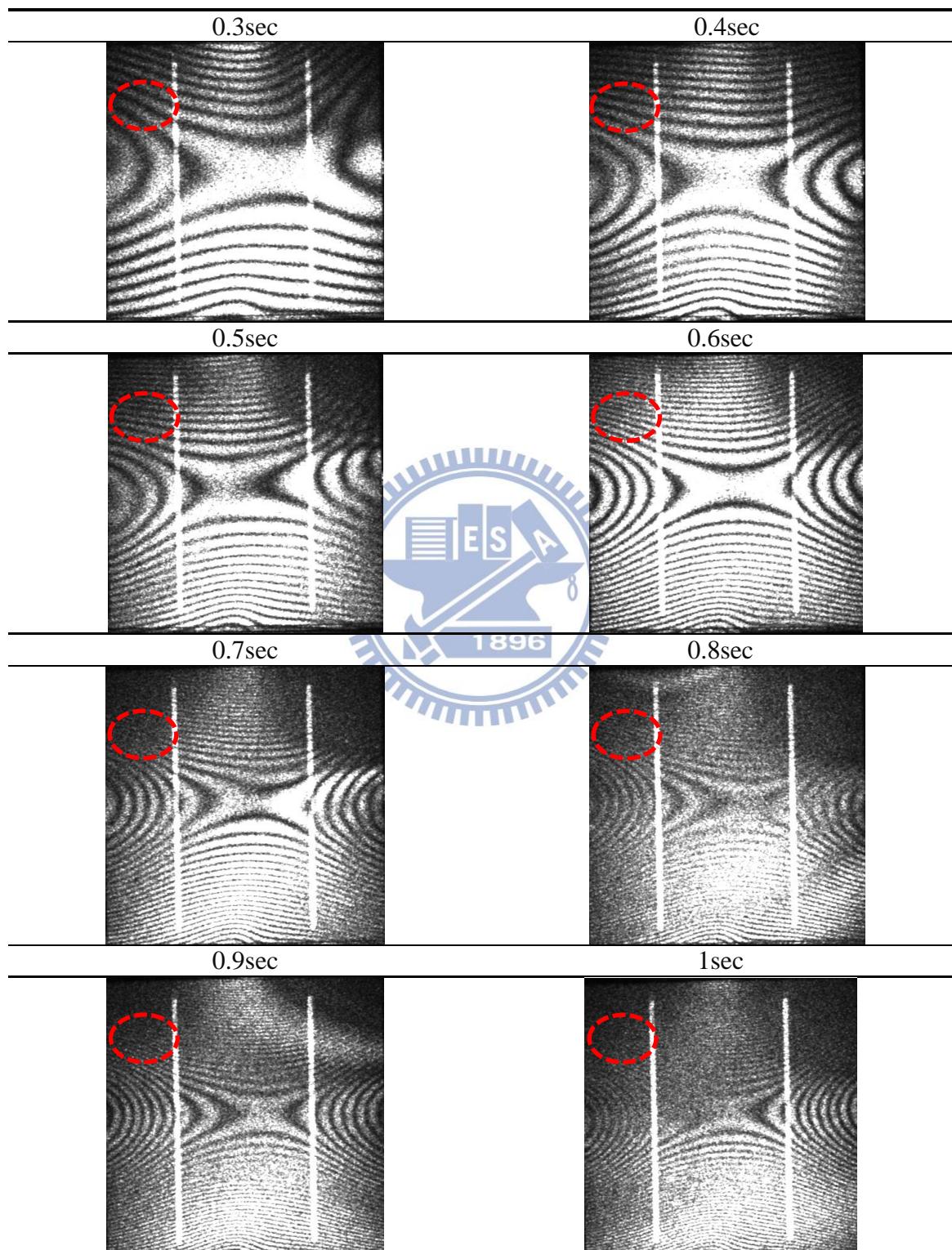


表 4.4 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(表面裂縫於底部中心處)

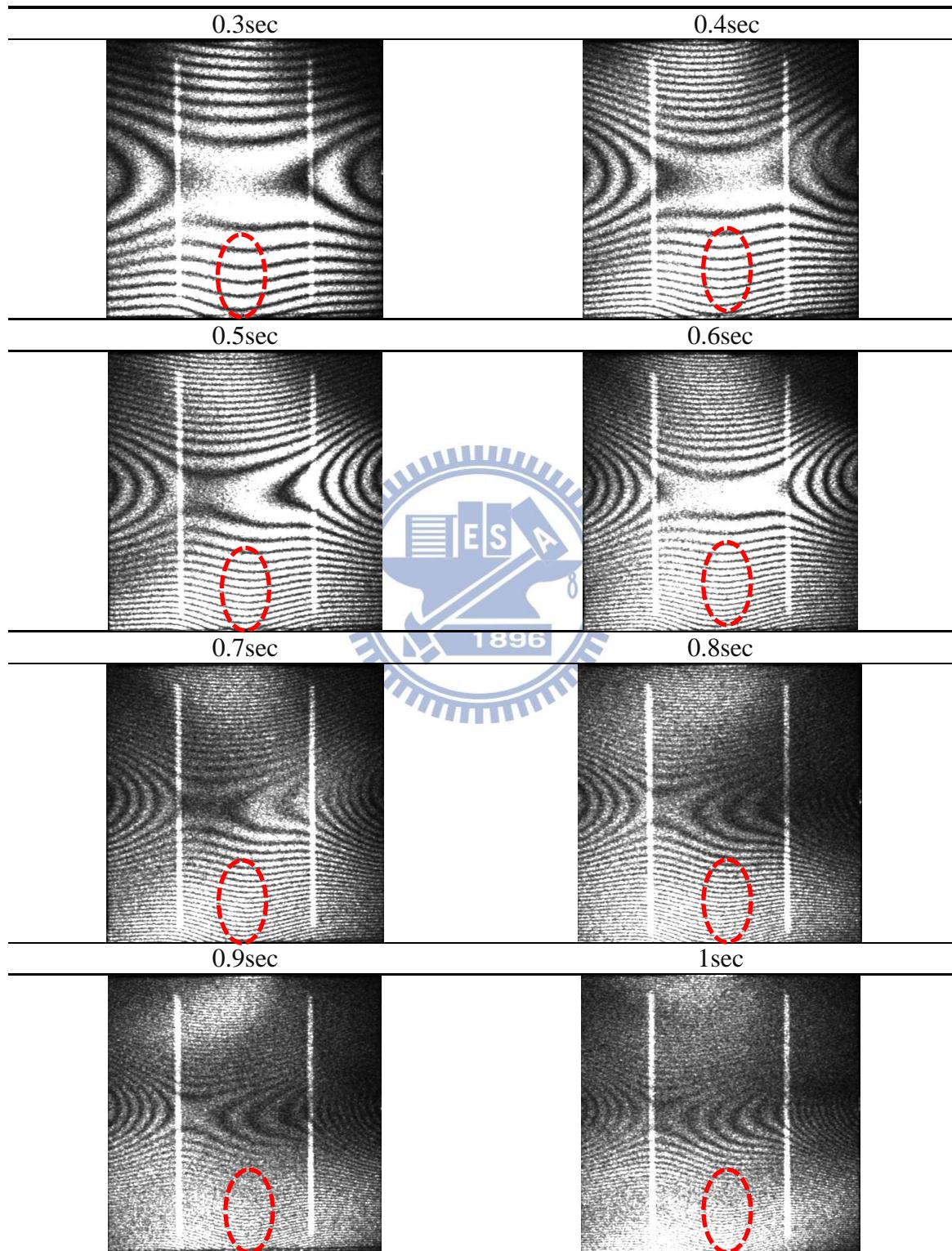


表 4.5 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於邊緣中心處)

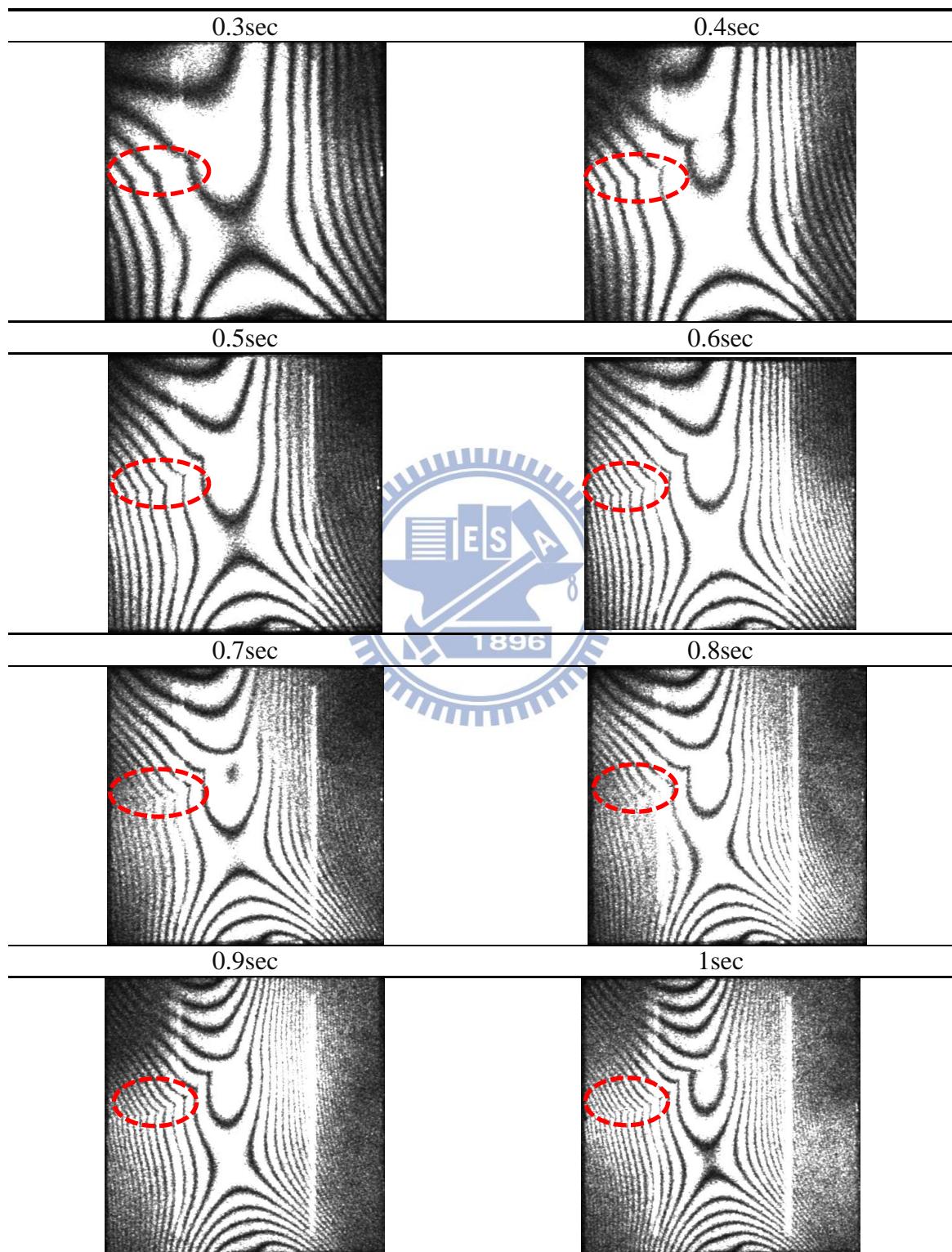


表 4.6 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於邊緣四分之一處)

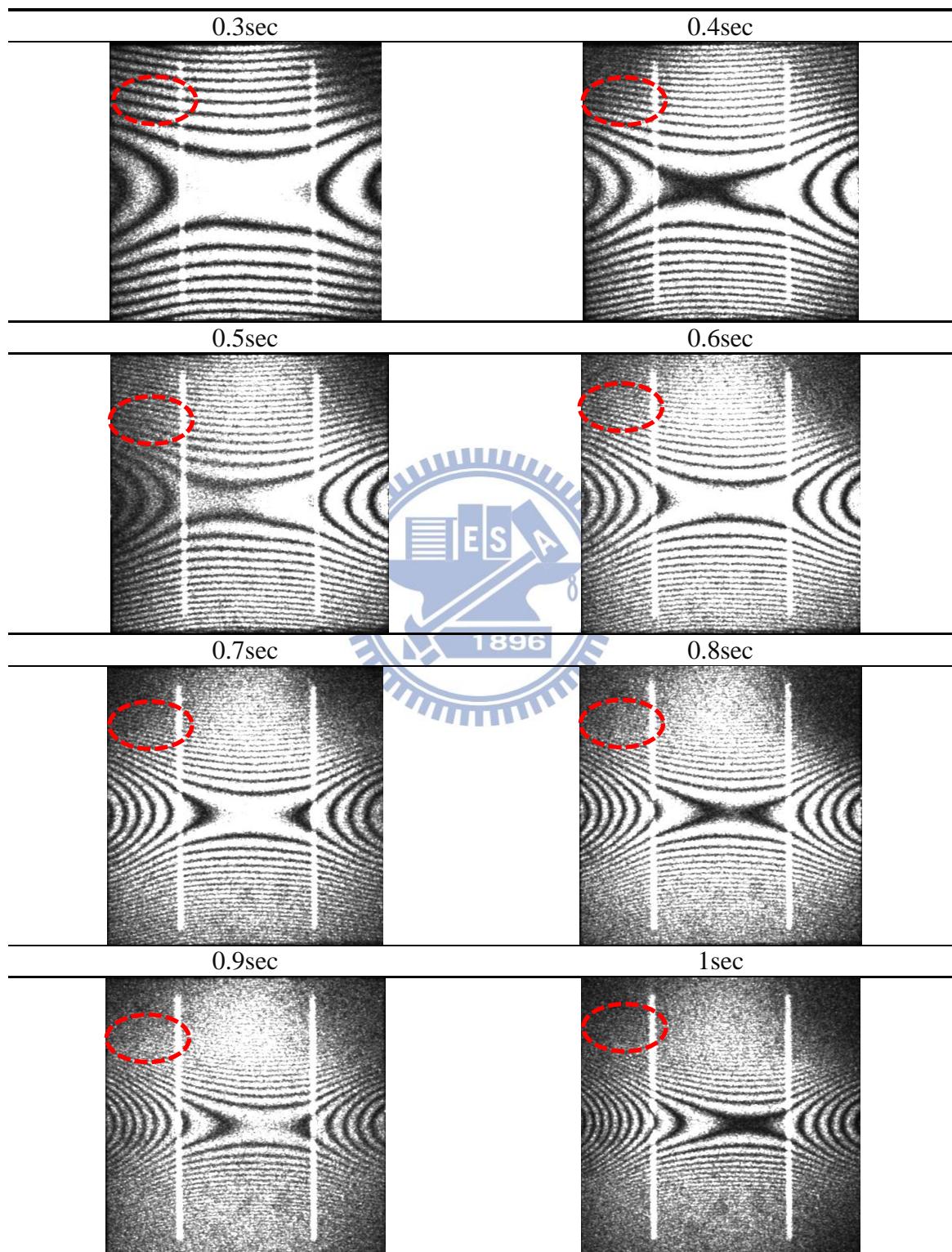


表 4.7 多晶矽太陽能電池無光罩加熱之實驗結果(貫穿裂縫於底部中心處)

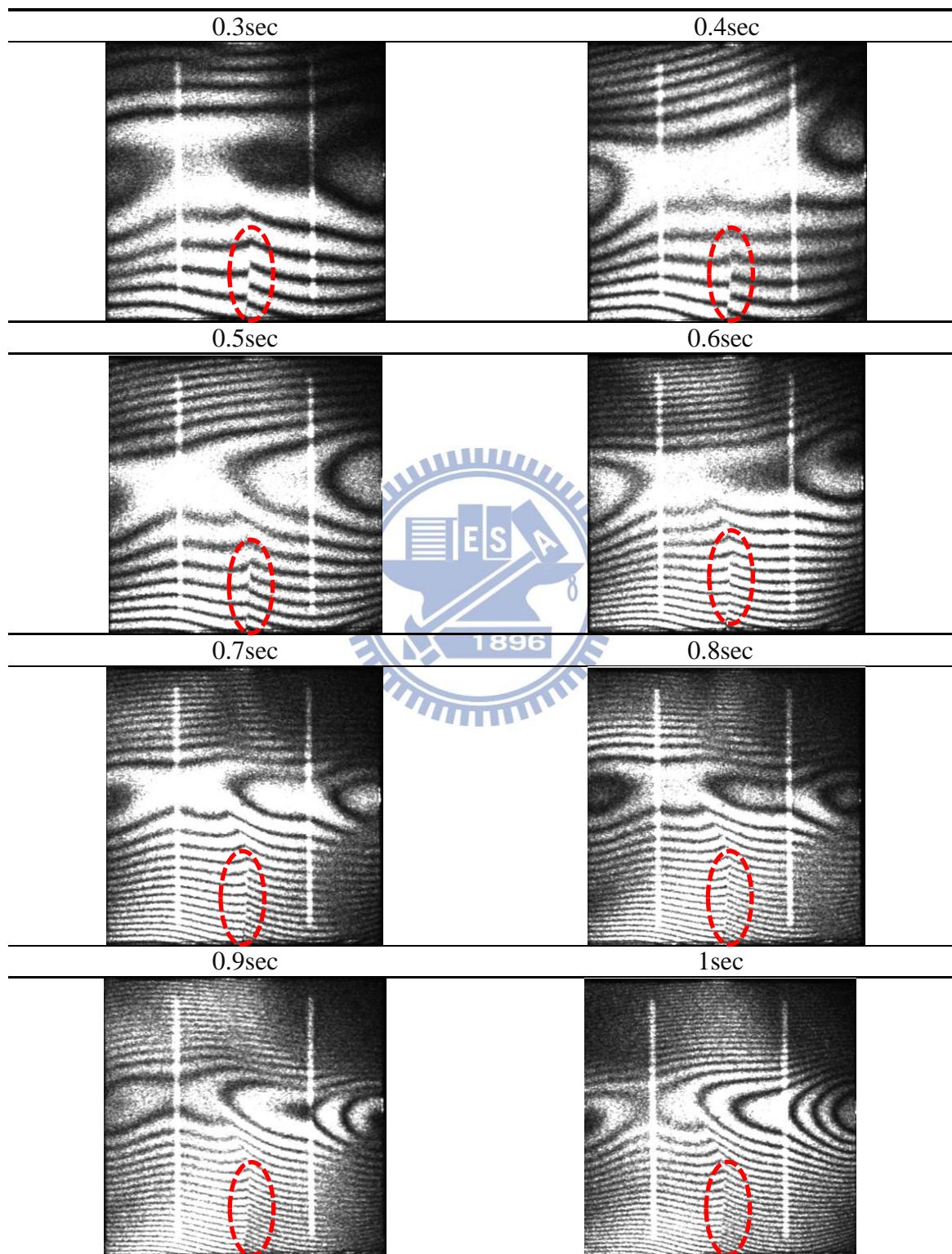


表 4.8 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(無裂縫)

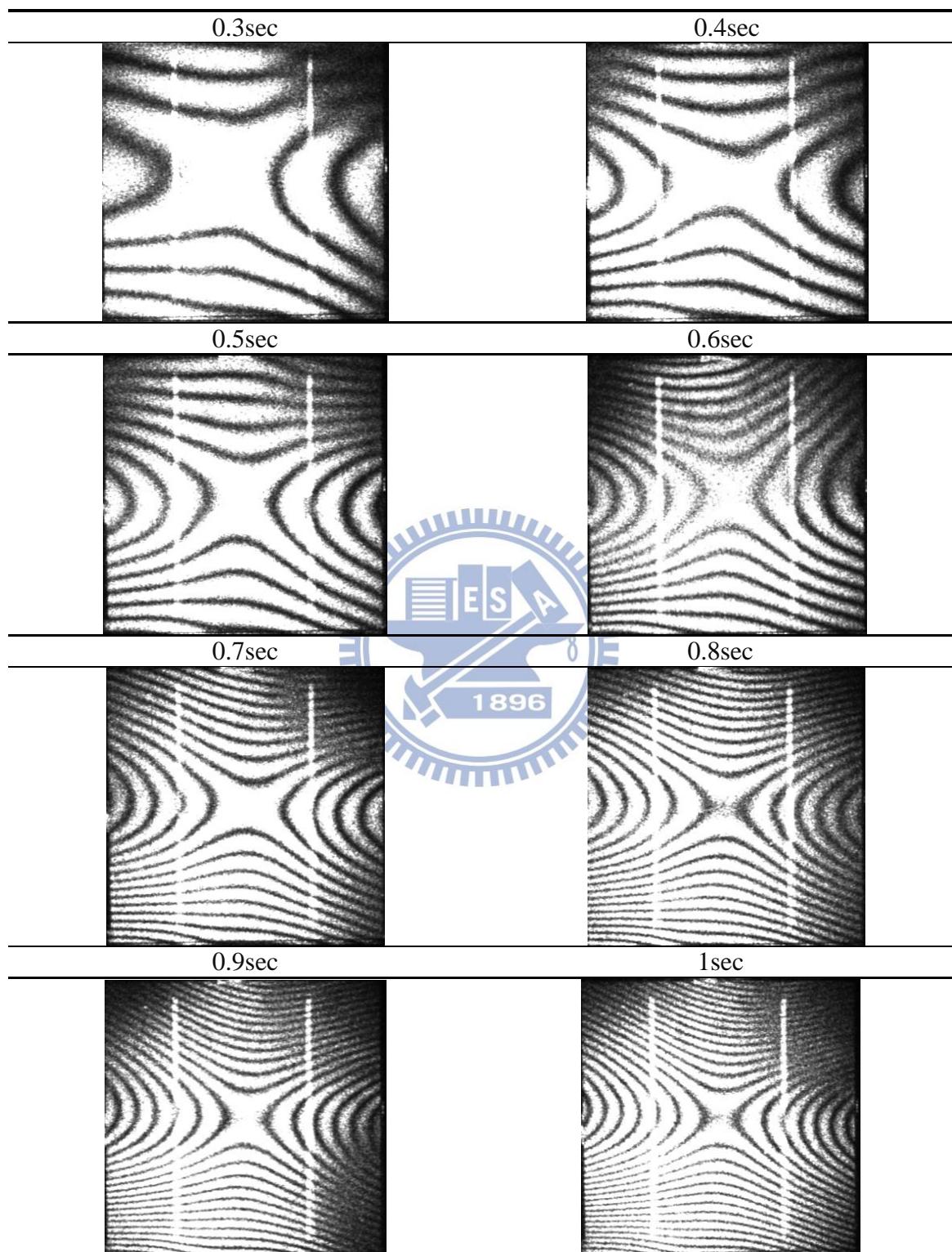


表 4.9 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較(無裂縫)

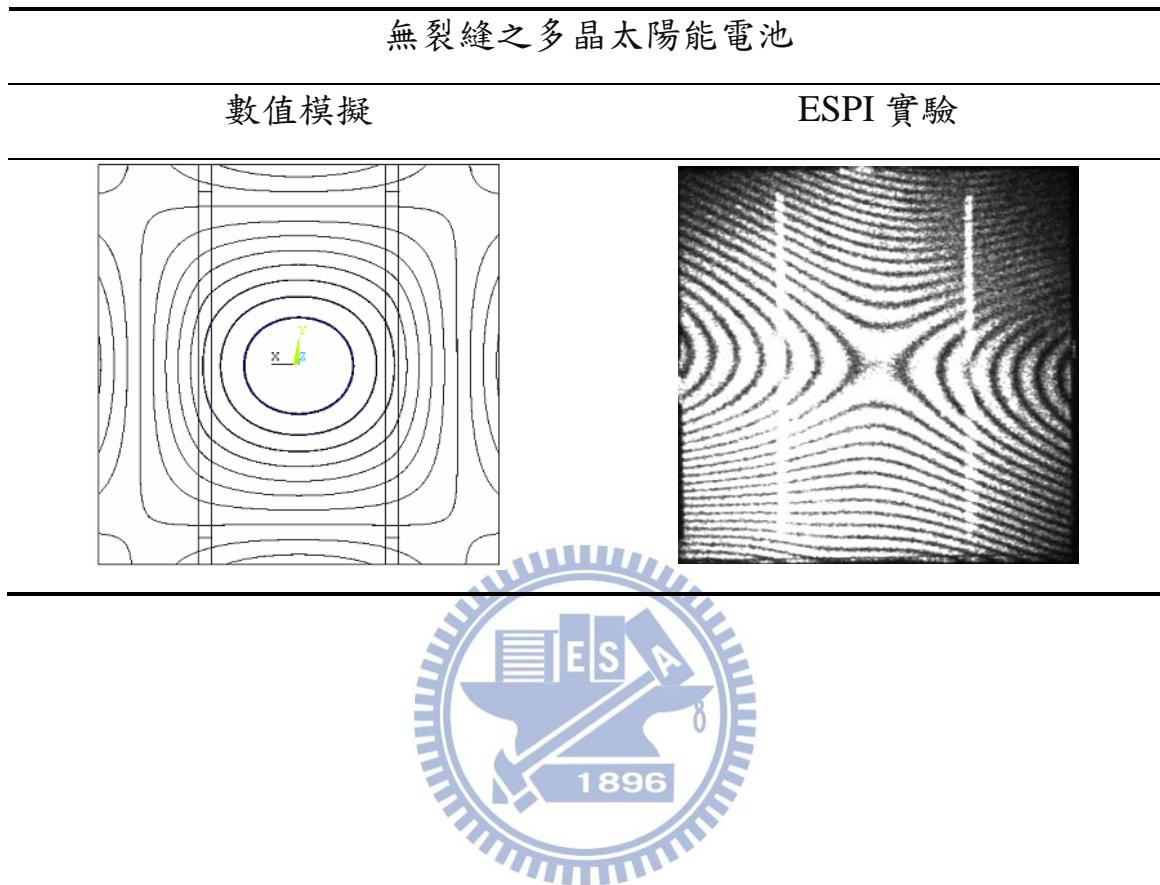


表 4.10 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於

邊緣中心處)

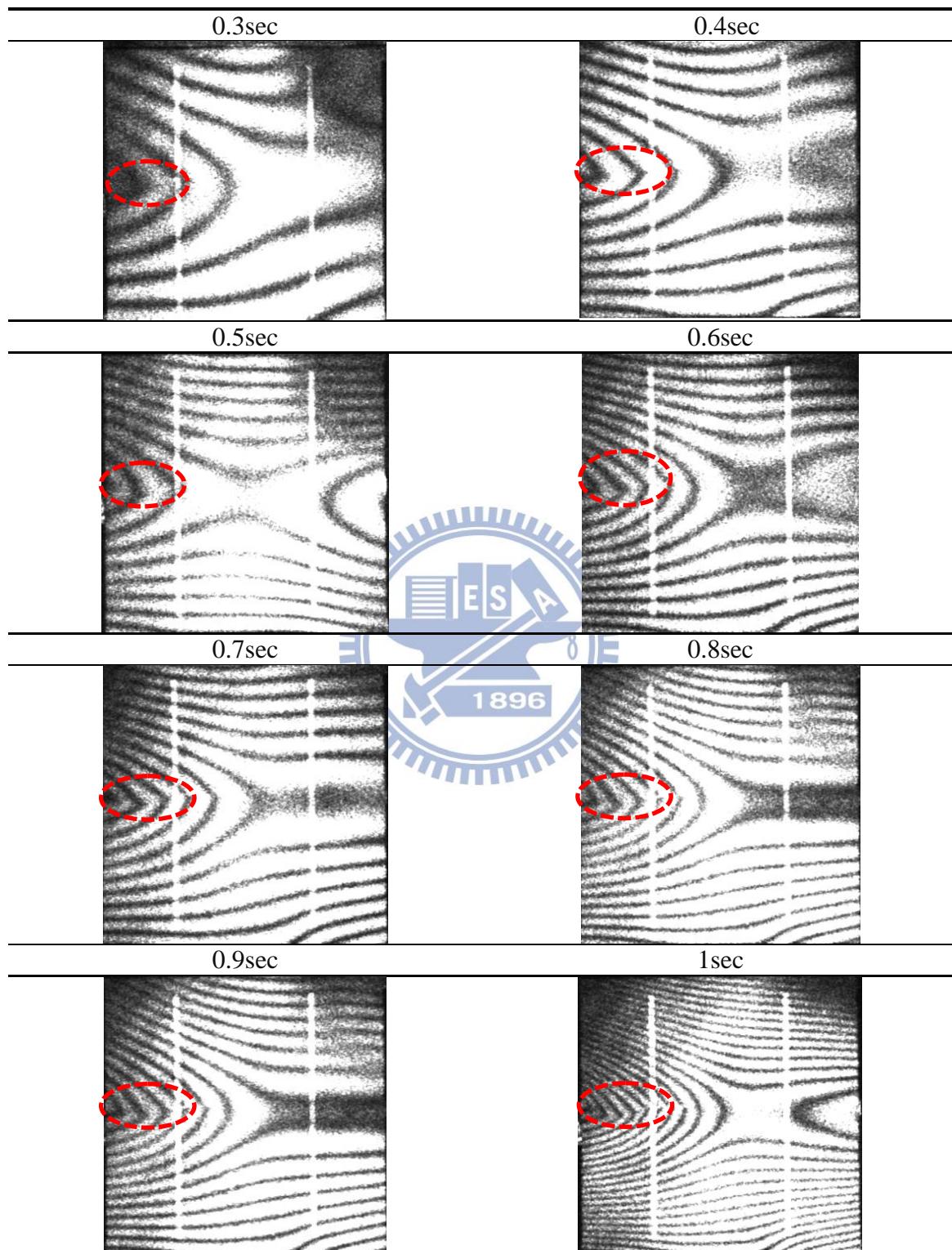


表 4.11 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於

邊緣四分之一處)

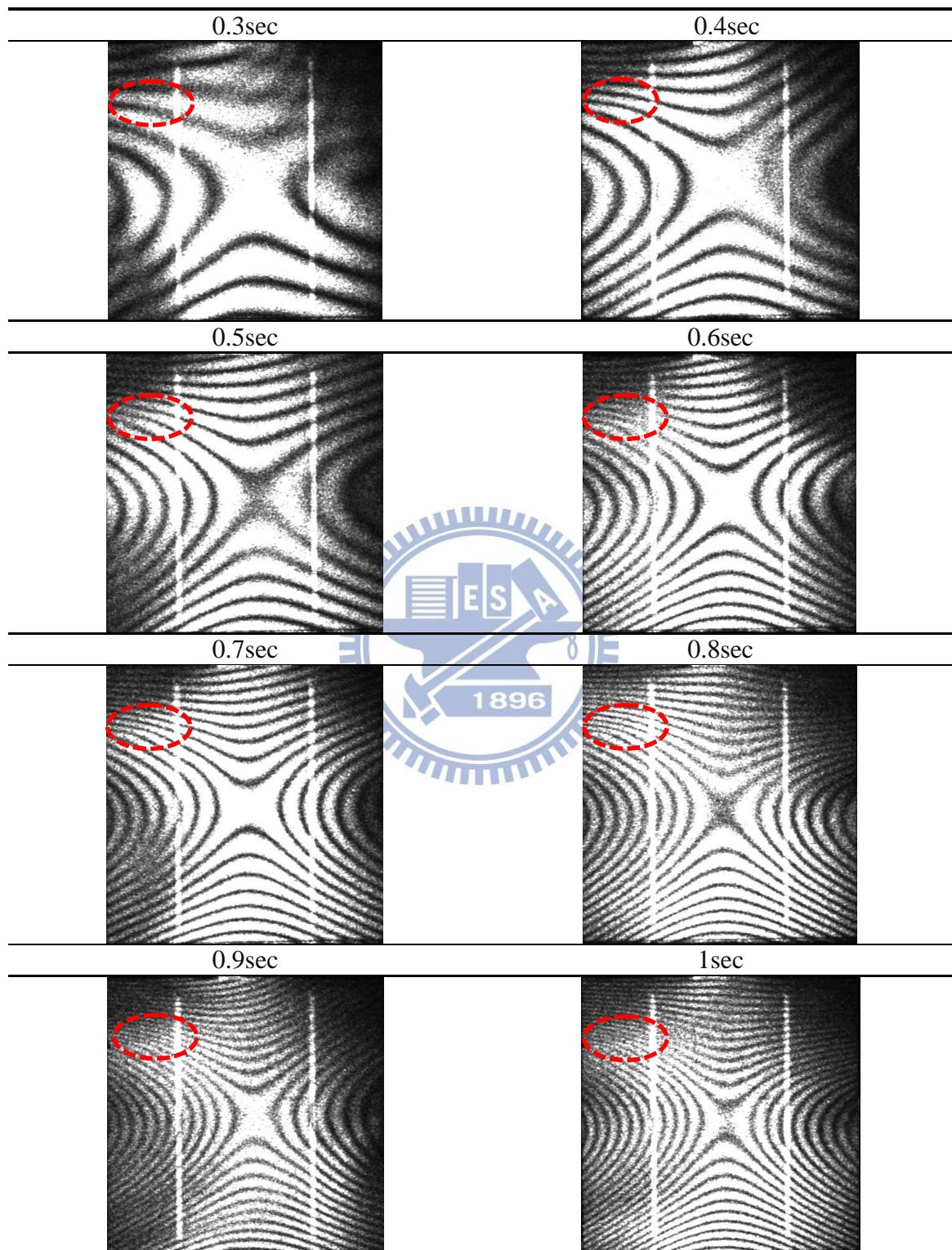


表 4.12 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較(表面裂縫)

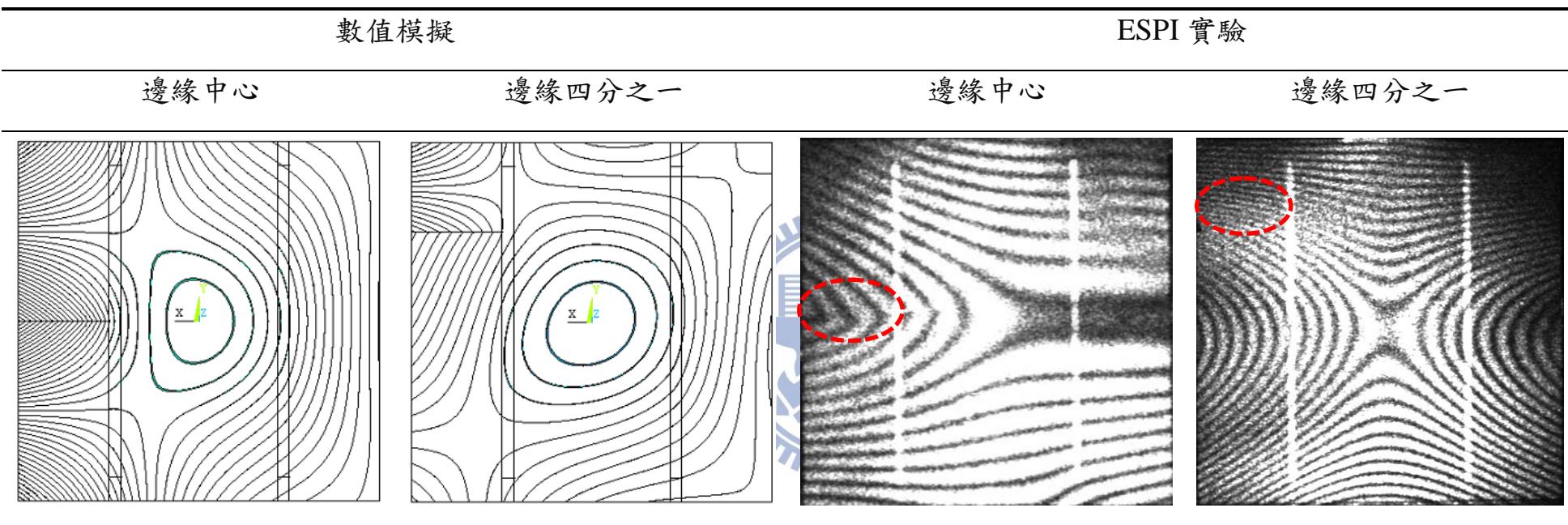


表 4.13 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於底部中心處)

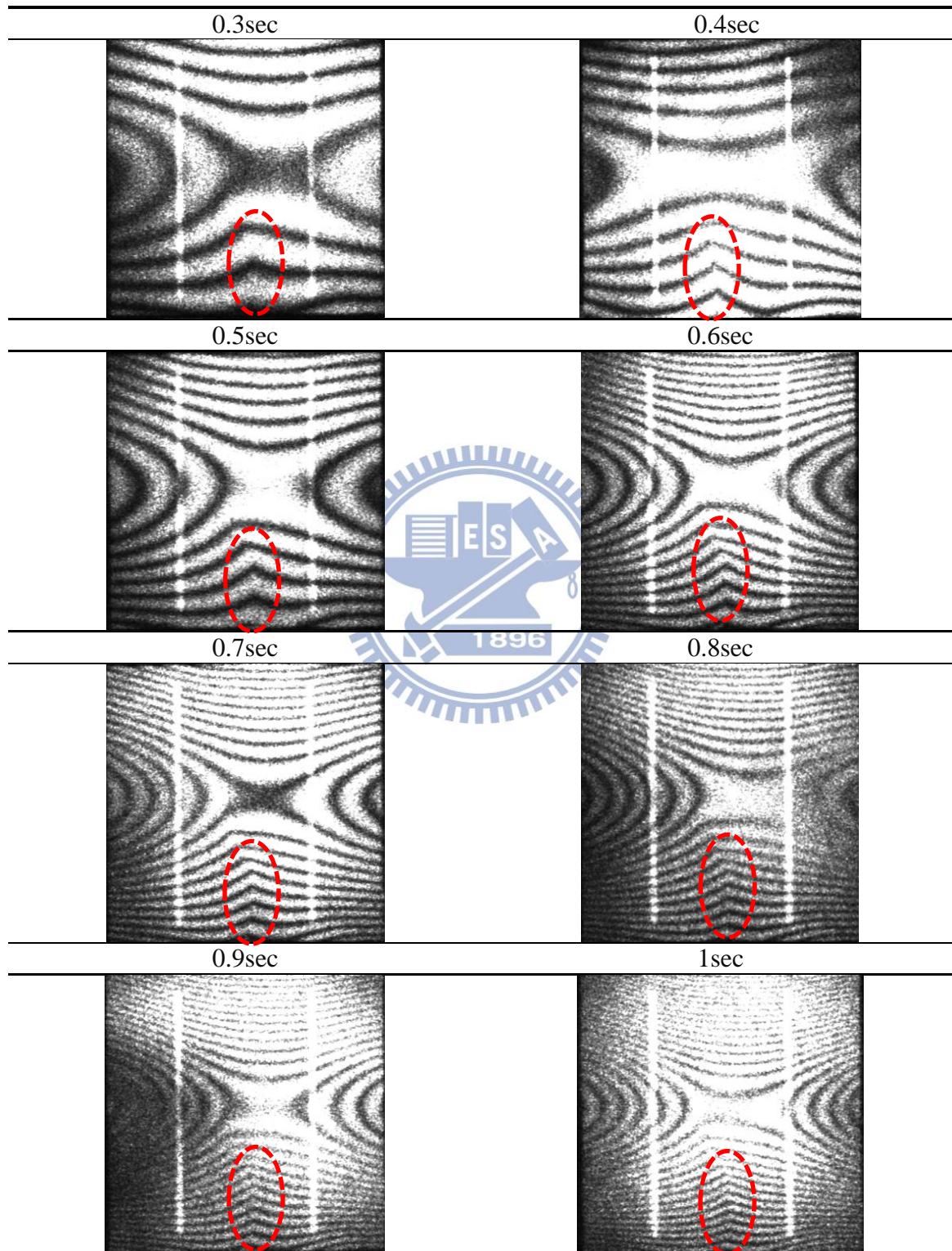


表 4.14 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於  
邊緣中心處)

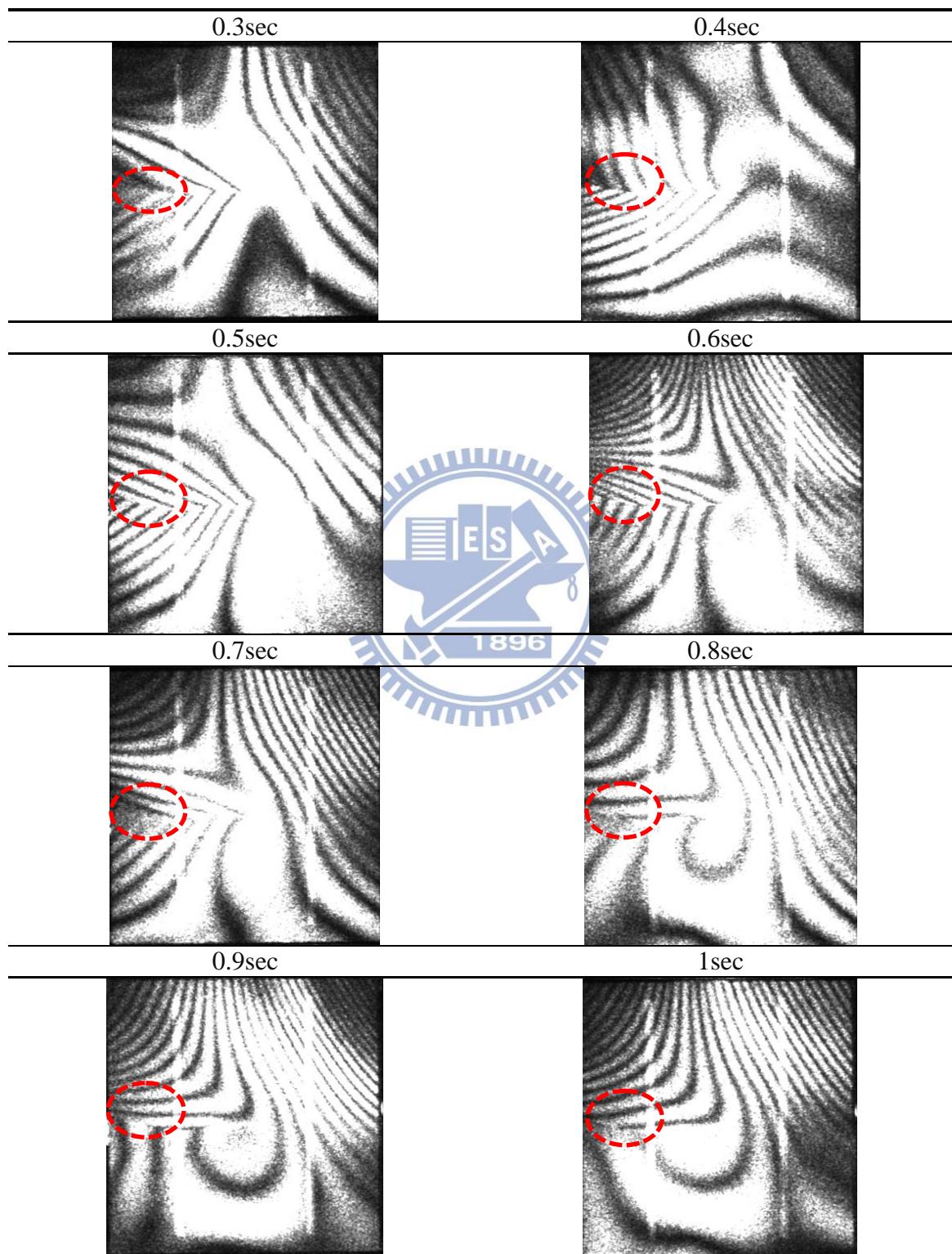


表 4.15 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於  
邊緣四分之一處)

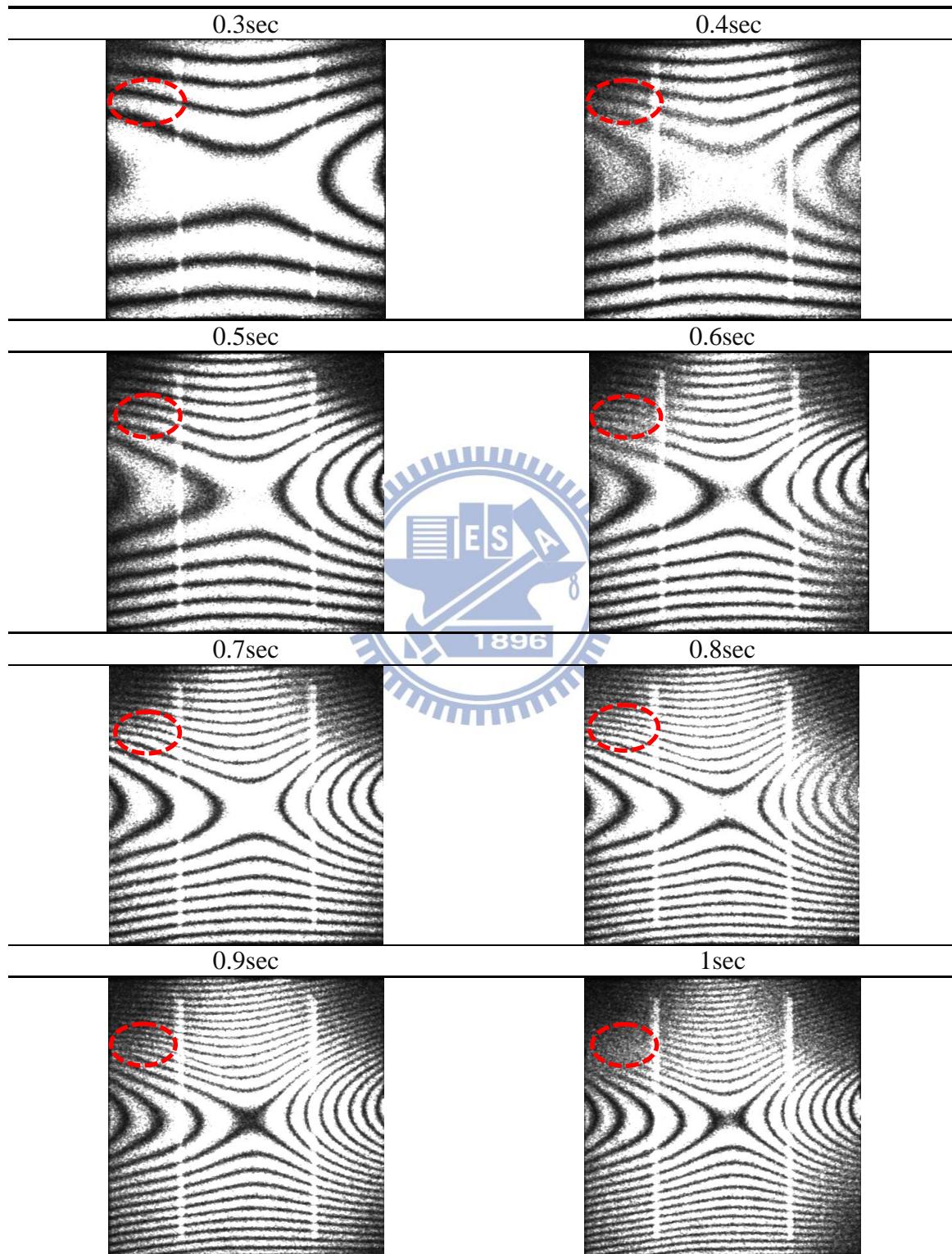


表 4.16 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較(貫穿裂縫)

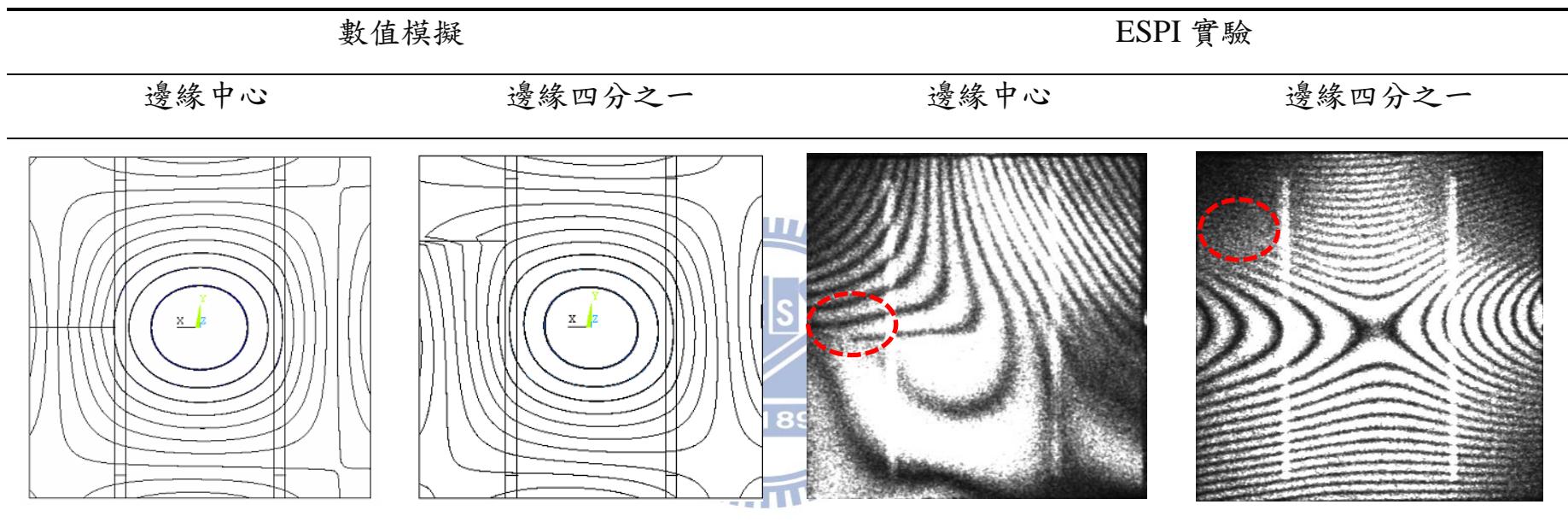


表 4.17 多晶矽太陽能電池於實心矩形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於底部中心處)

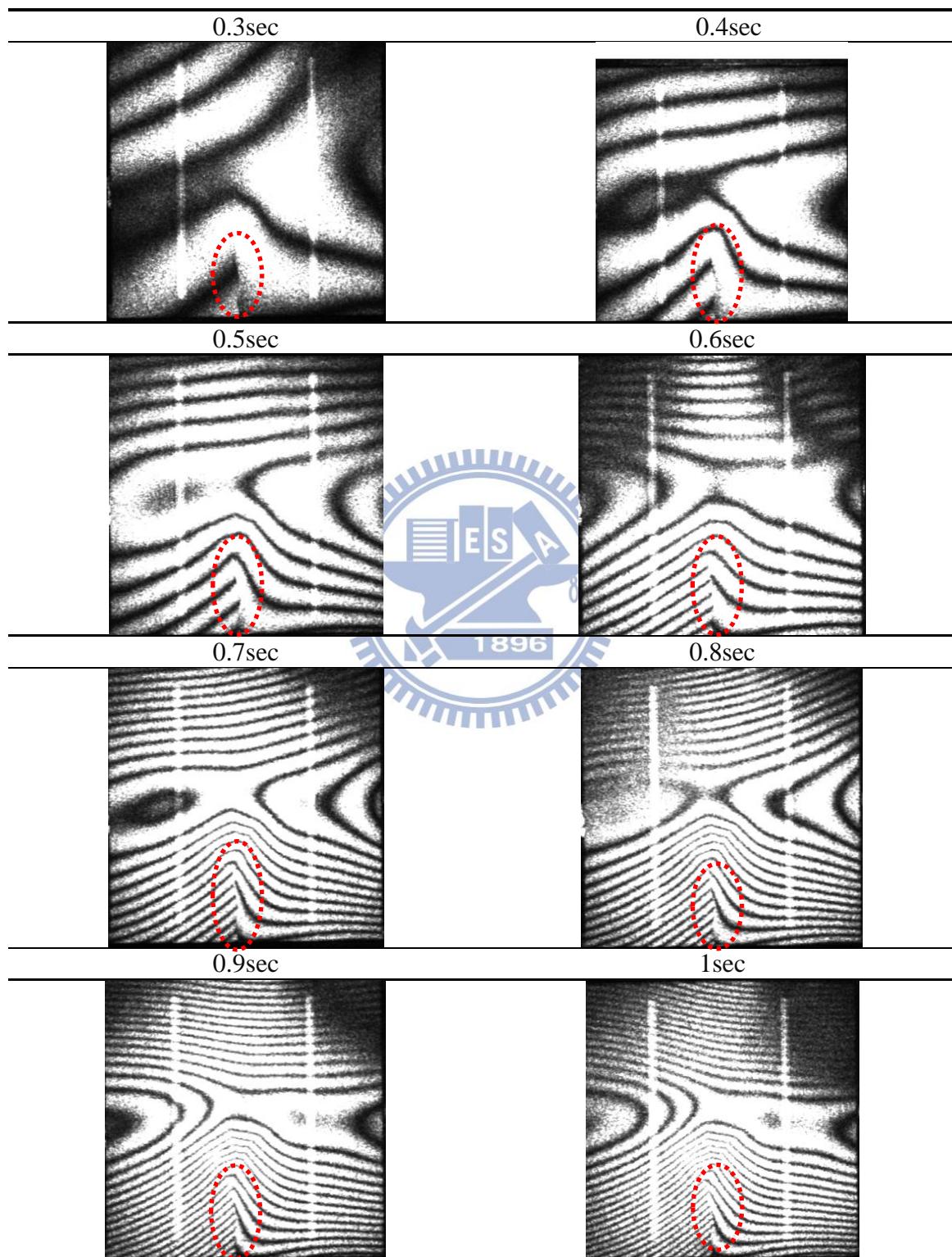


表 4.18 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(無裂縫)

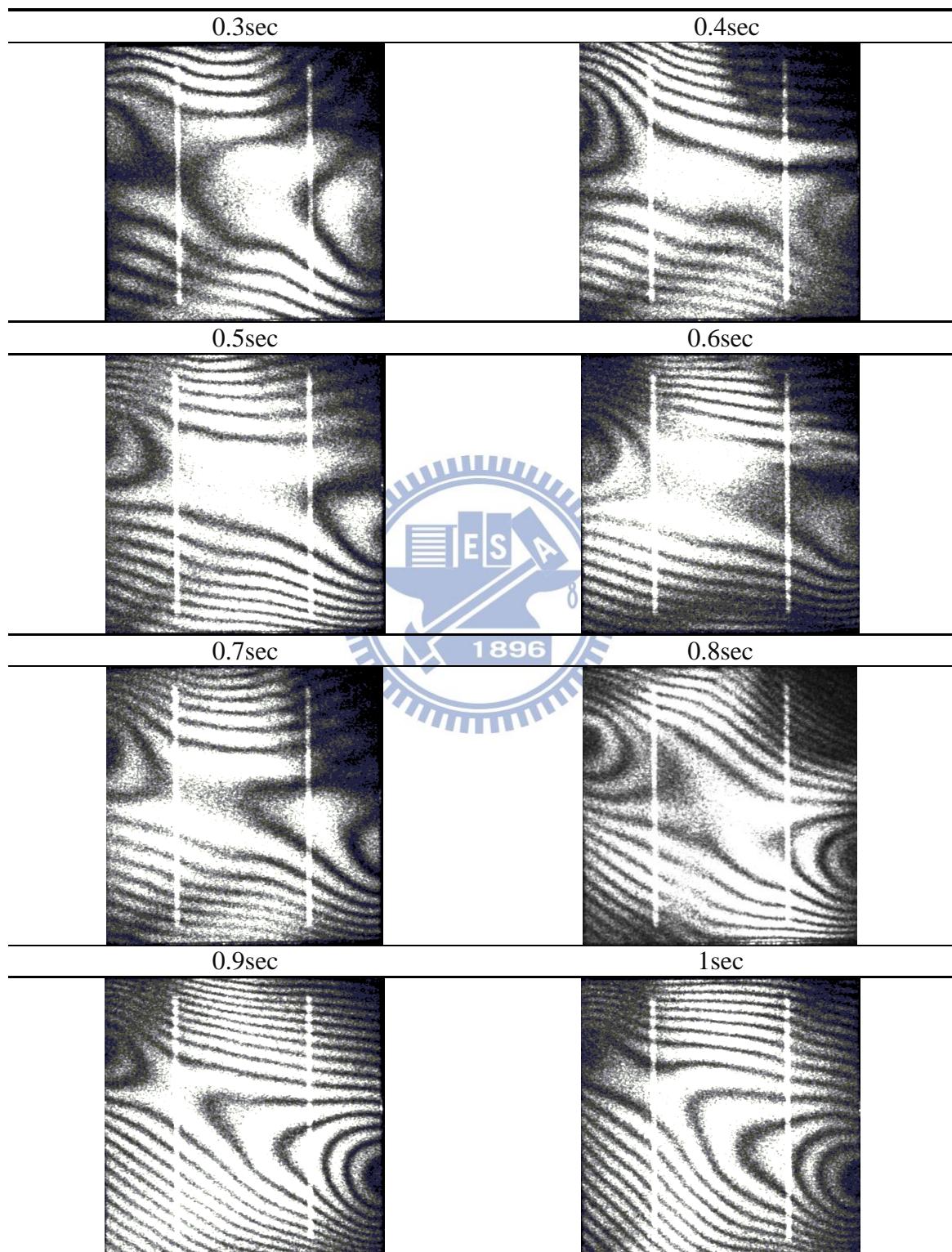


表 4.19 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(表面裂縫於邊緣四分之一處)

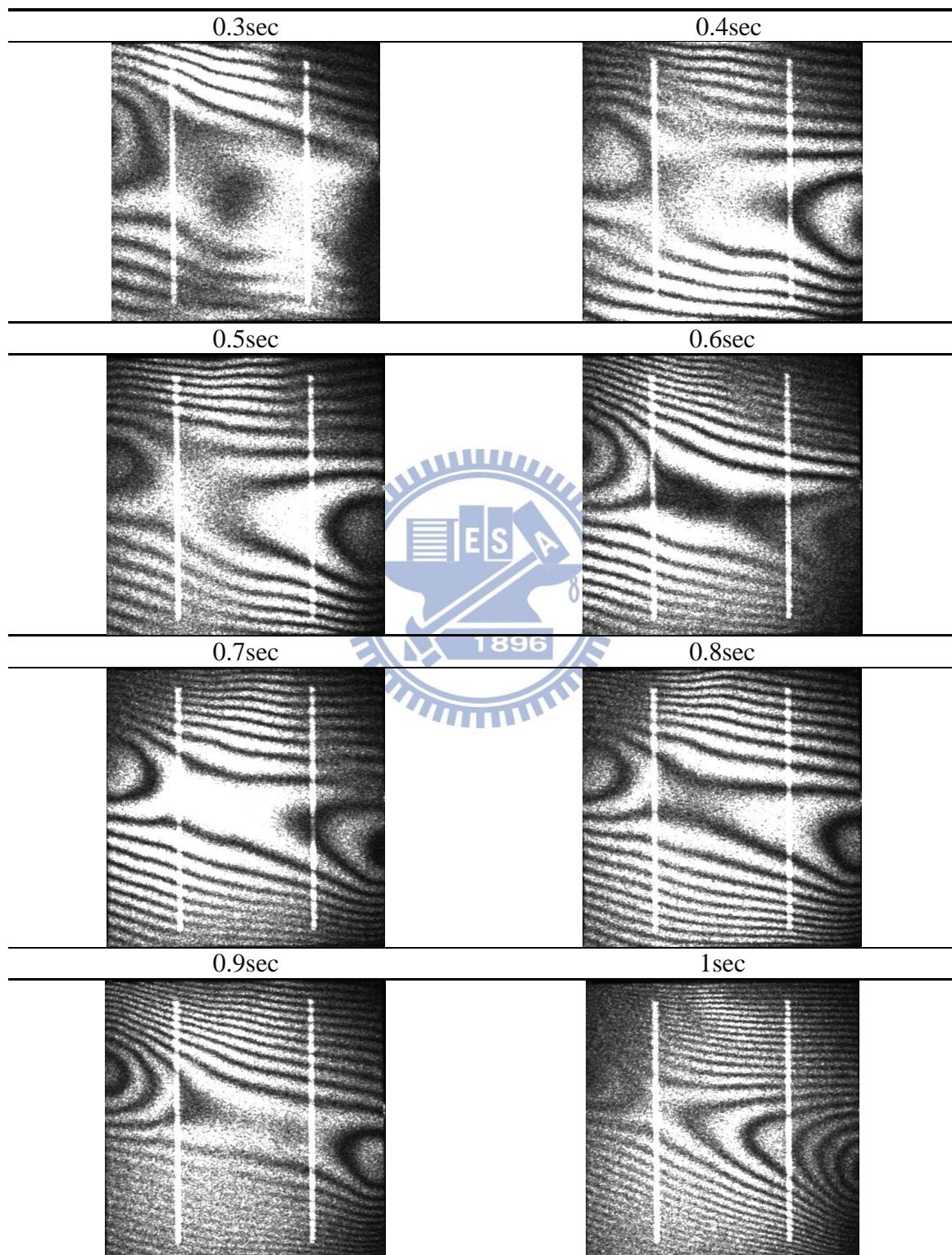


表 4.20 多晶矽太陽能電池於單對角形加熱分佈之實驗結果(貫穿裂縫於  
邊緣四分之一處)

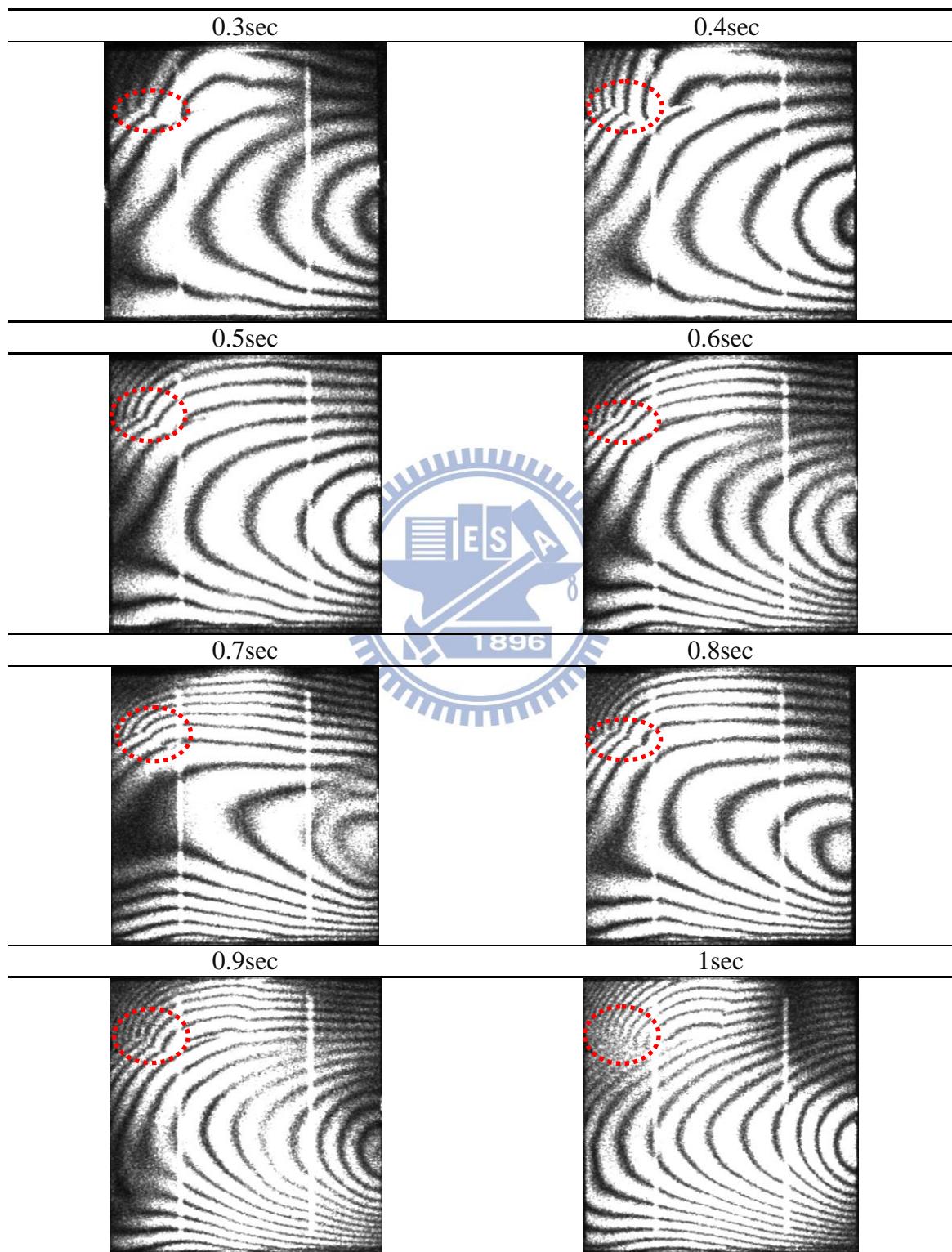
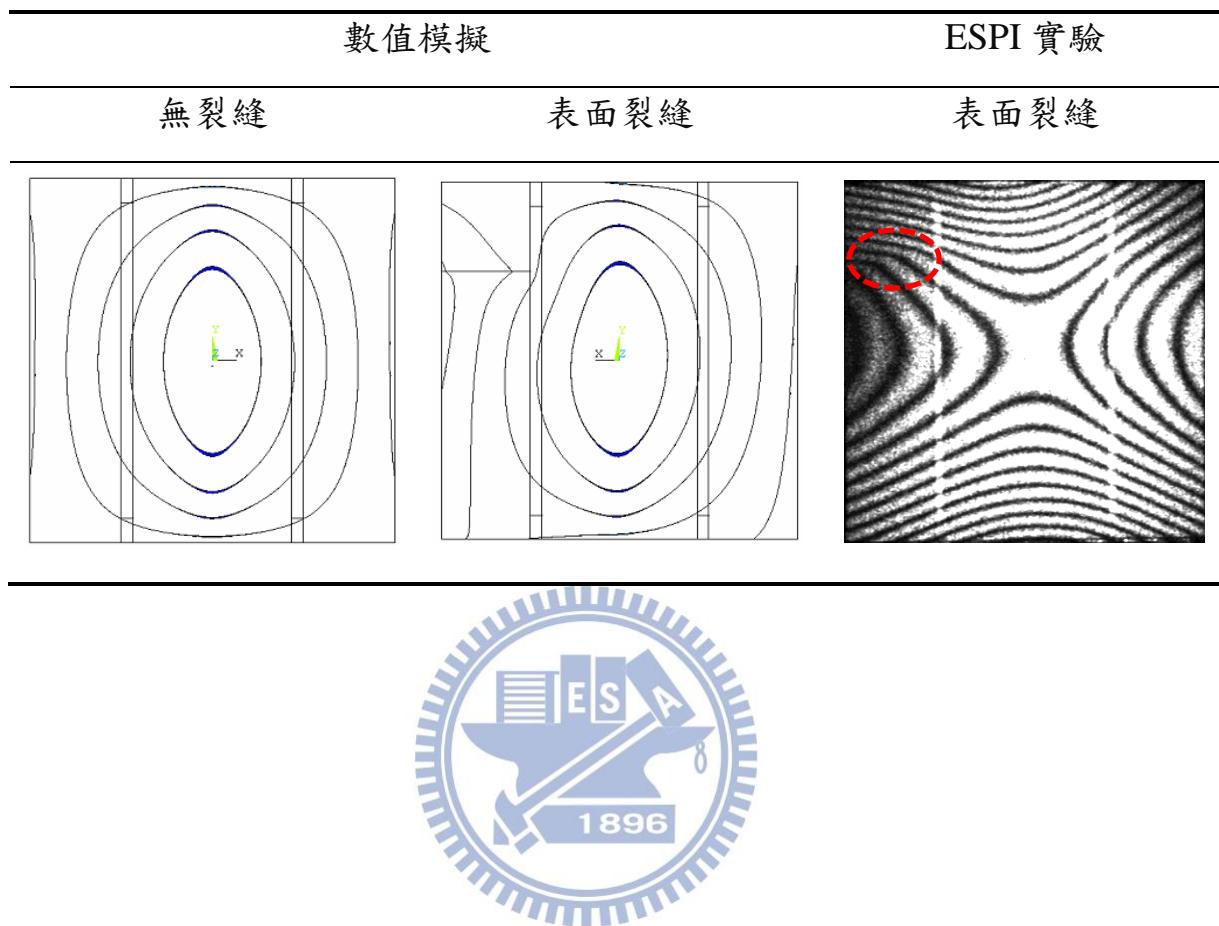


表 4.21 多晶太陽能電池於長條形加熱分佈之數值模擬與實驗結果比較



## 附圖

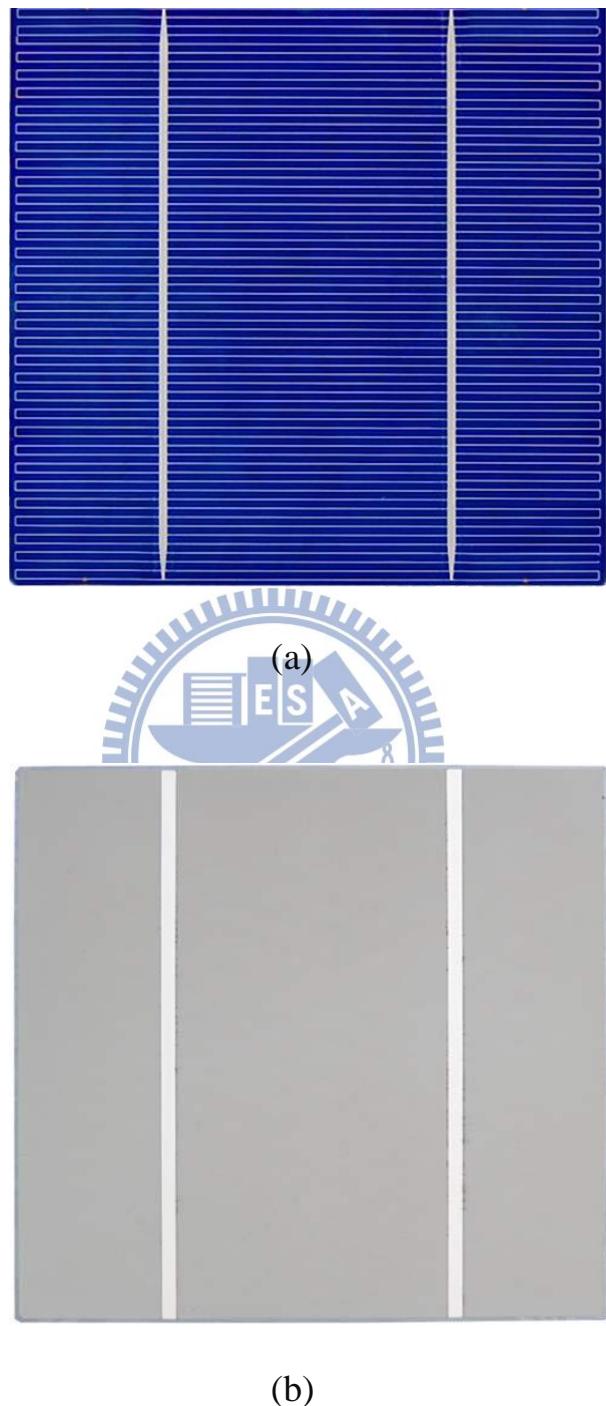
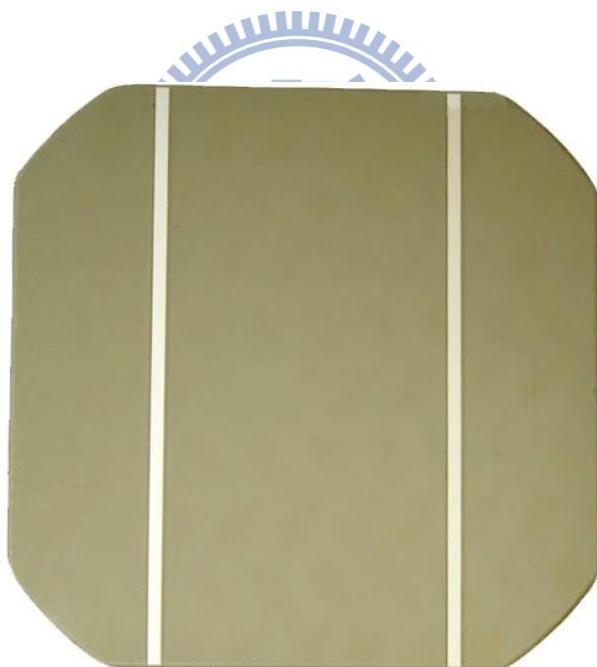


圖 1.1 (a) 多晶矽太陽能電池正面 (b) 多晶矽太陽能電池背面



(a)



(b)

圖 1.2 (a) 單晶矽太陽能電池正面 (b) 單晶矽太陽能電池背面



圖 1.3 太陽能電池模組

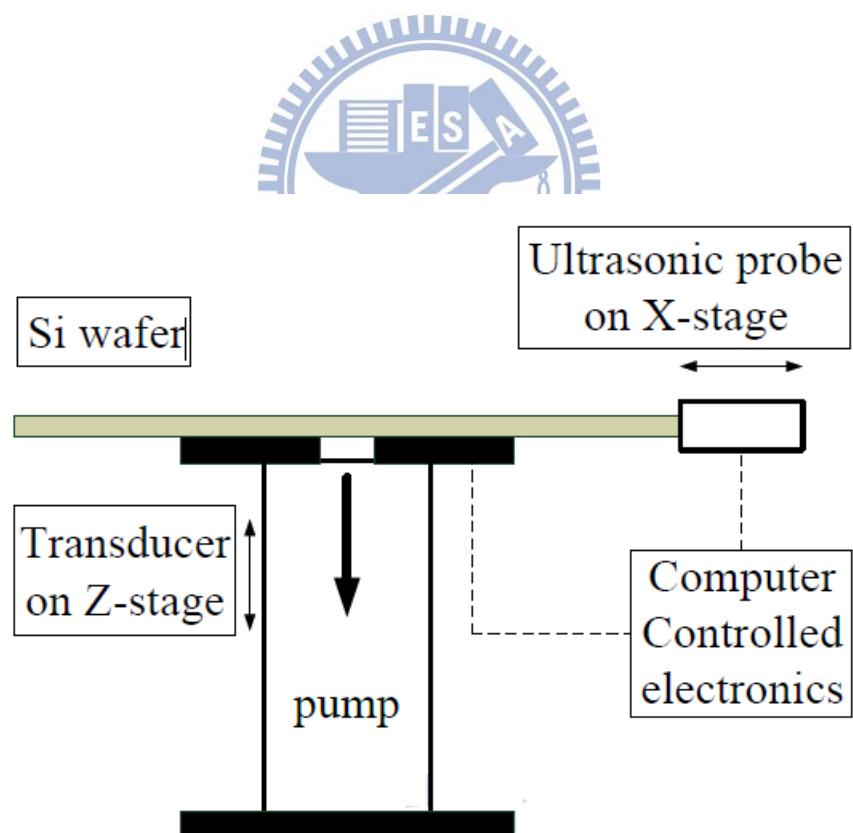


圖 1.4 RUV 量測系統[4]

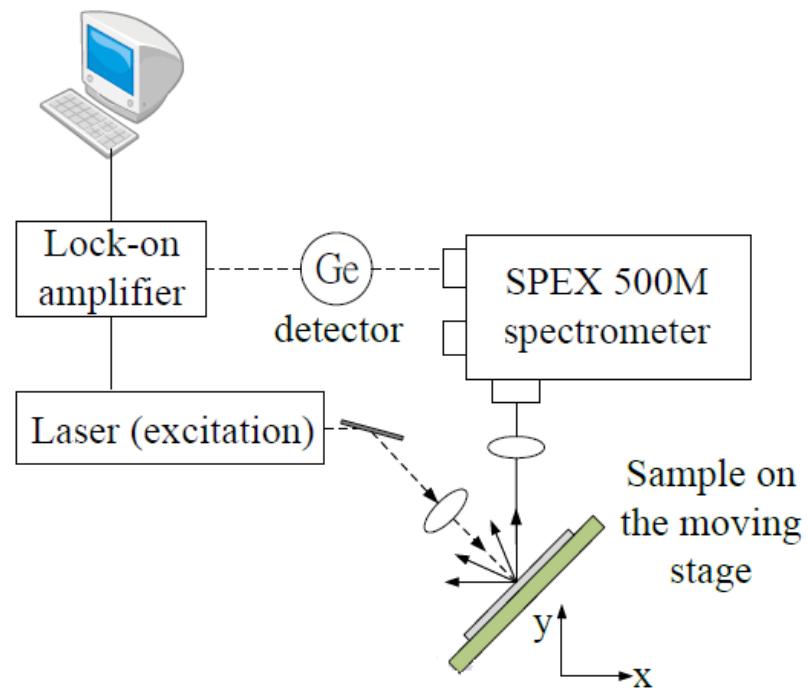


圖 1.5 光激發螢光量測系統[6]

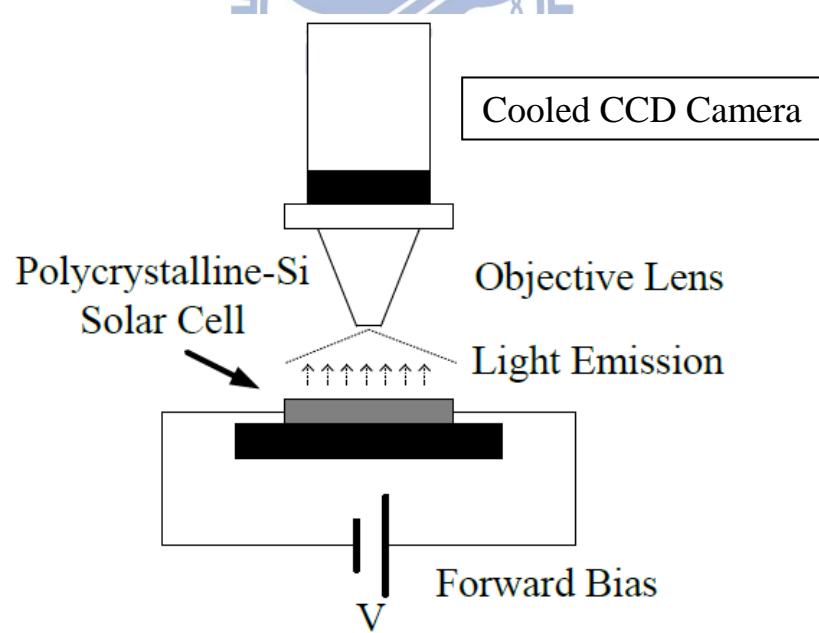


圖 1.6 電致發光量測系統[7]

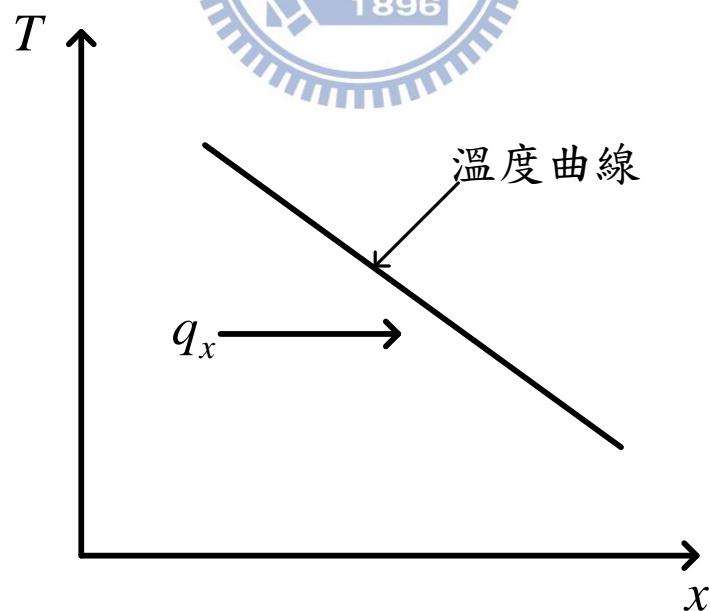
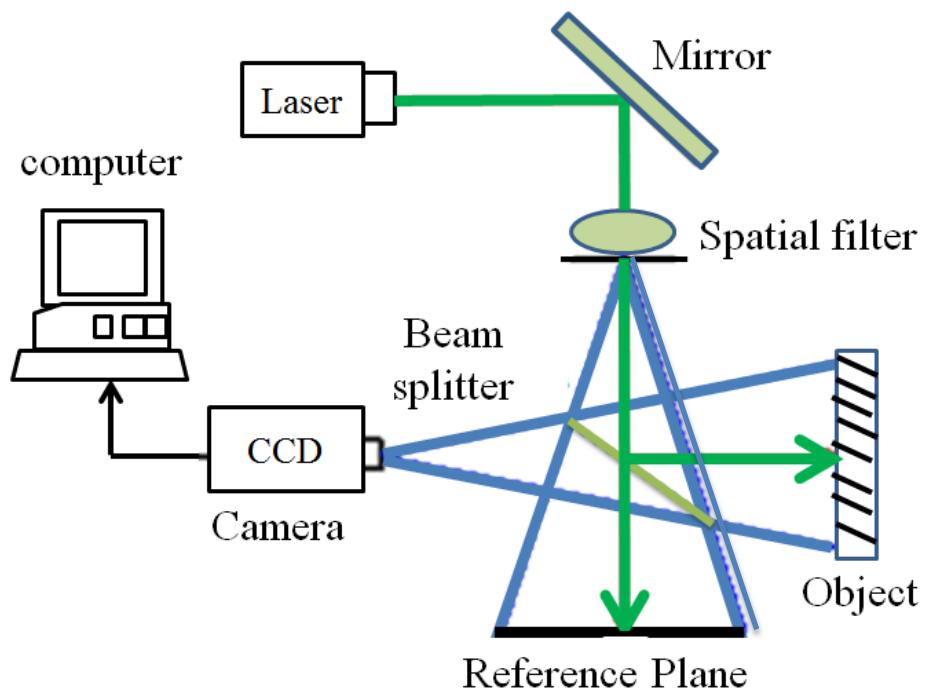


圖 2.2 热流方向示意圖[21]

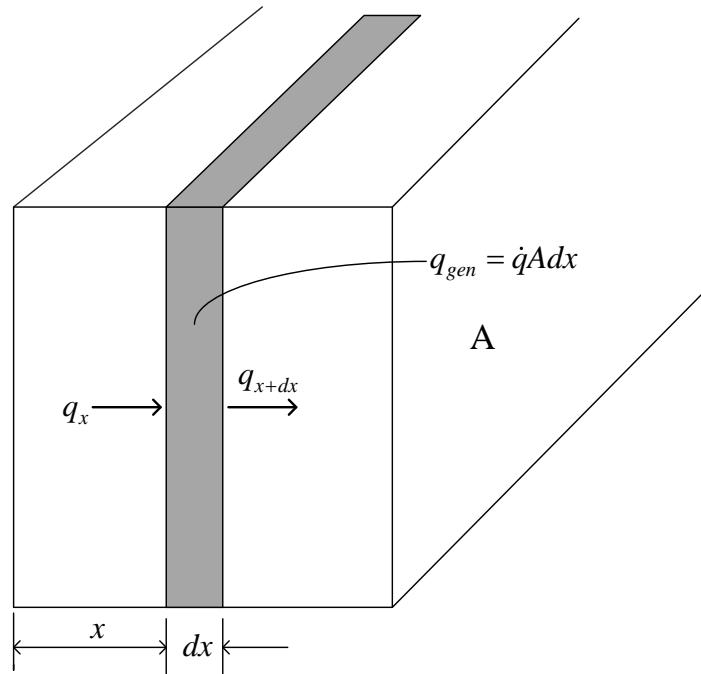


圖 2.3 一維熱傳導分析的體積元素[21]

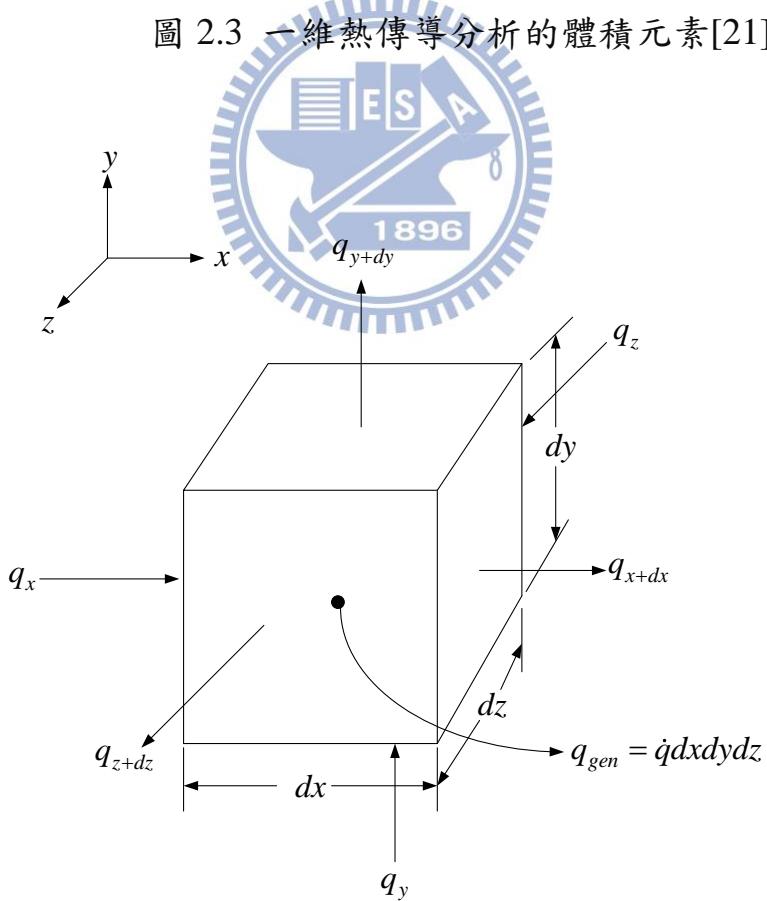


圖 2.4 三維熱傳導分析的體積元素(直角座標) [21]

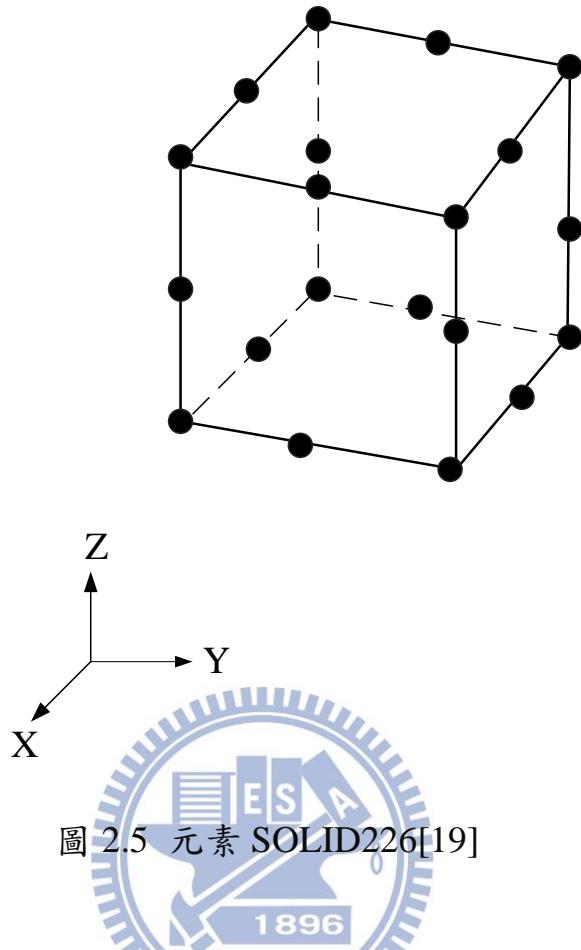


圖 2.5 元素 SOLID226[19]

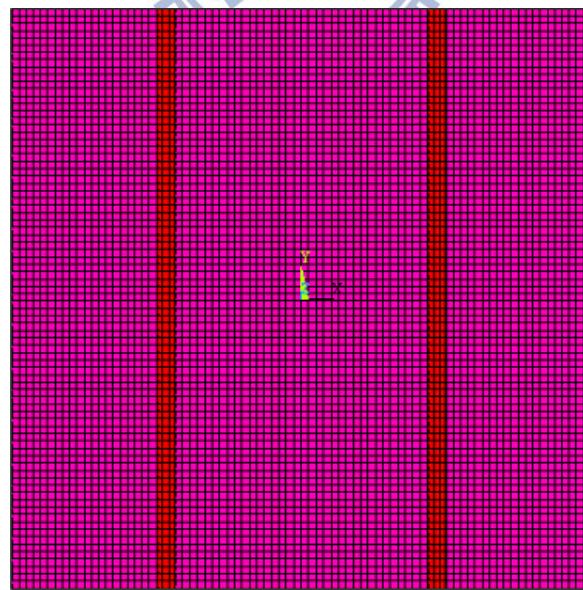


圖 2.6 有限元素法所建立之多晶矽太陽能電池模型

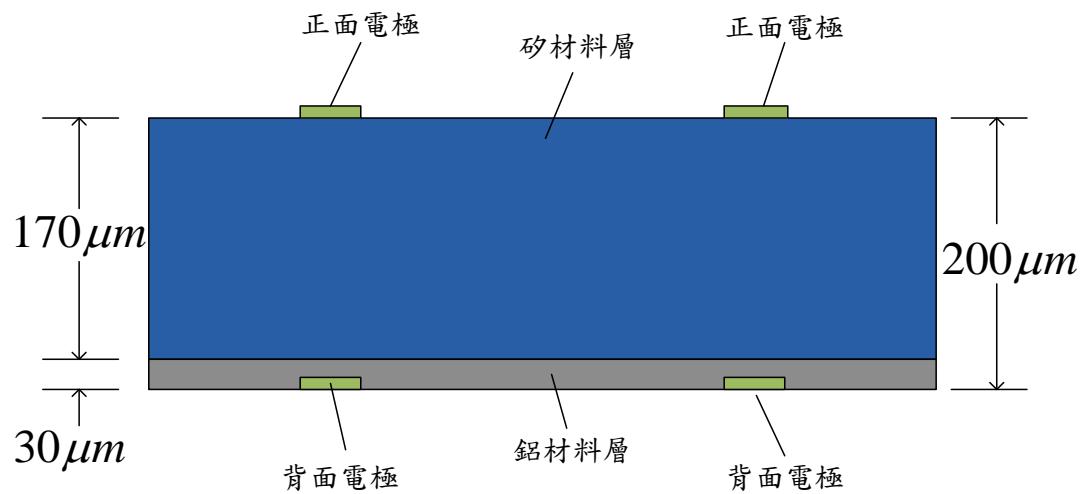


圖 2.7 太陽能電池模型截面積式意圖

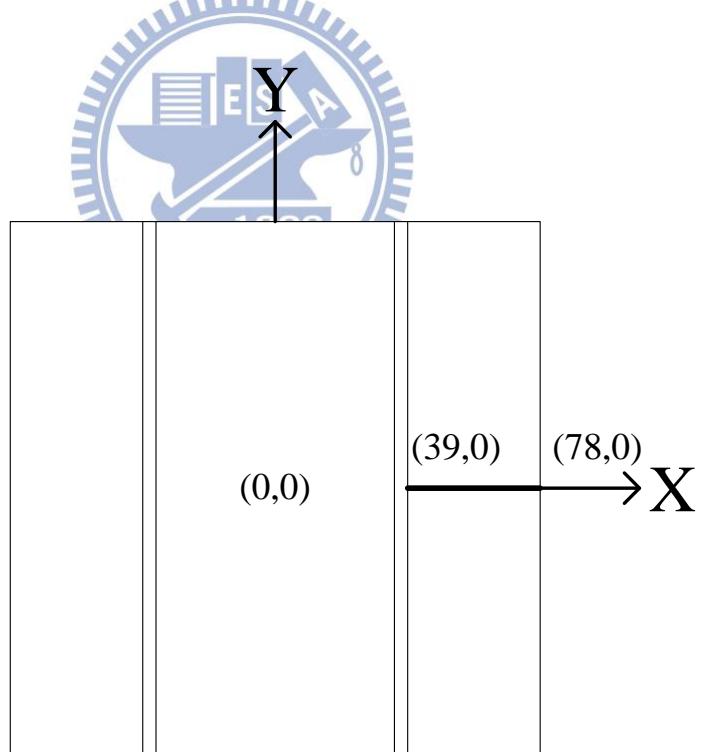


圖 3.1 多晶矽太陽能電池裂縫位置示意圖(邊緣中心處)

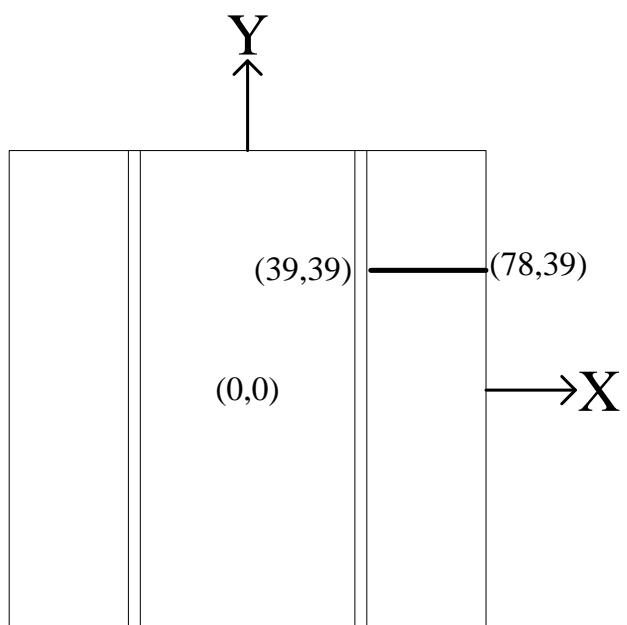


圖 3.2 多晶矽太陽能電池裂縫位置示意圖(邊緣四分之一處)

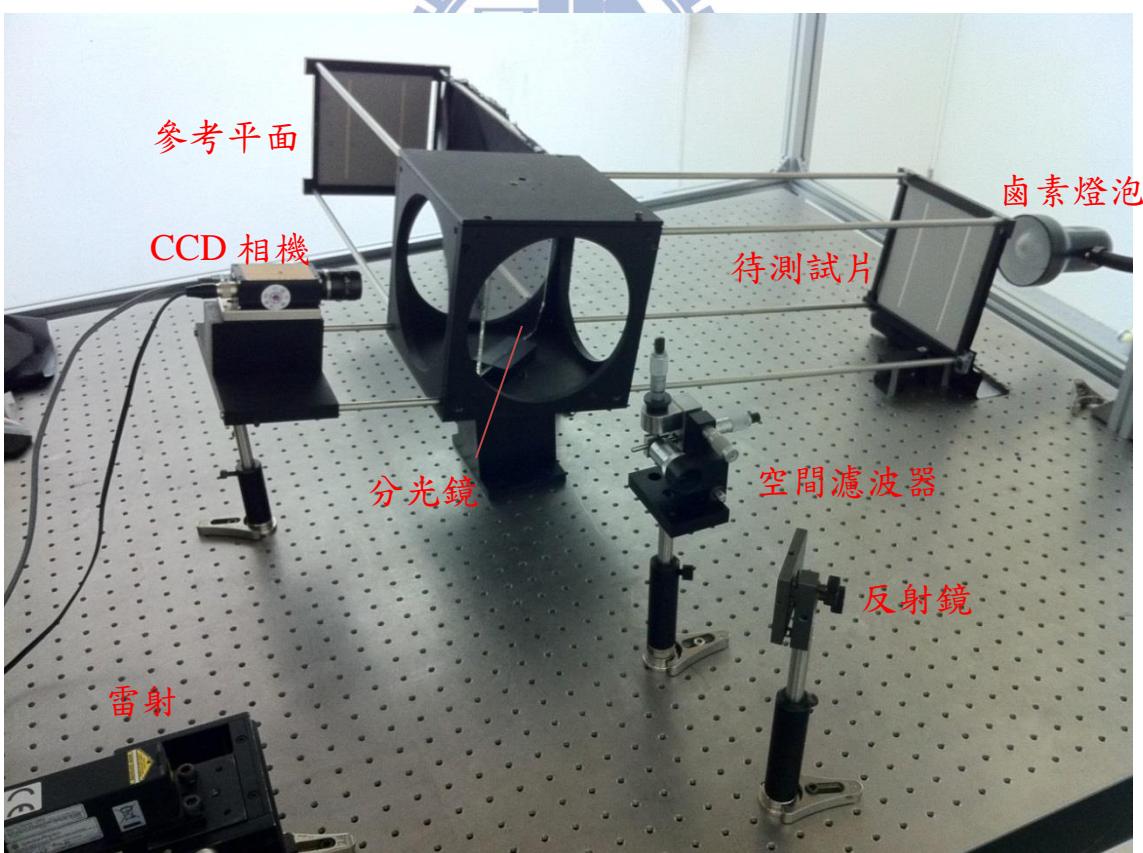


圖 4.1 ESPI 量測系統實體架構圖

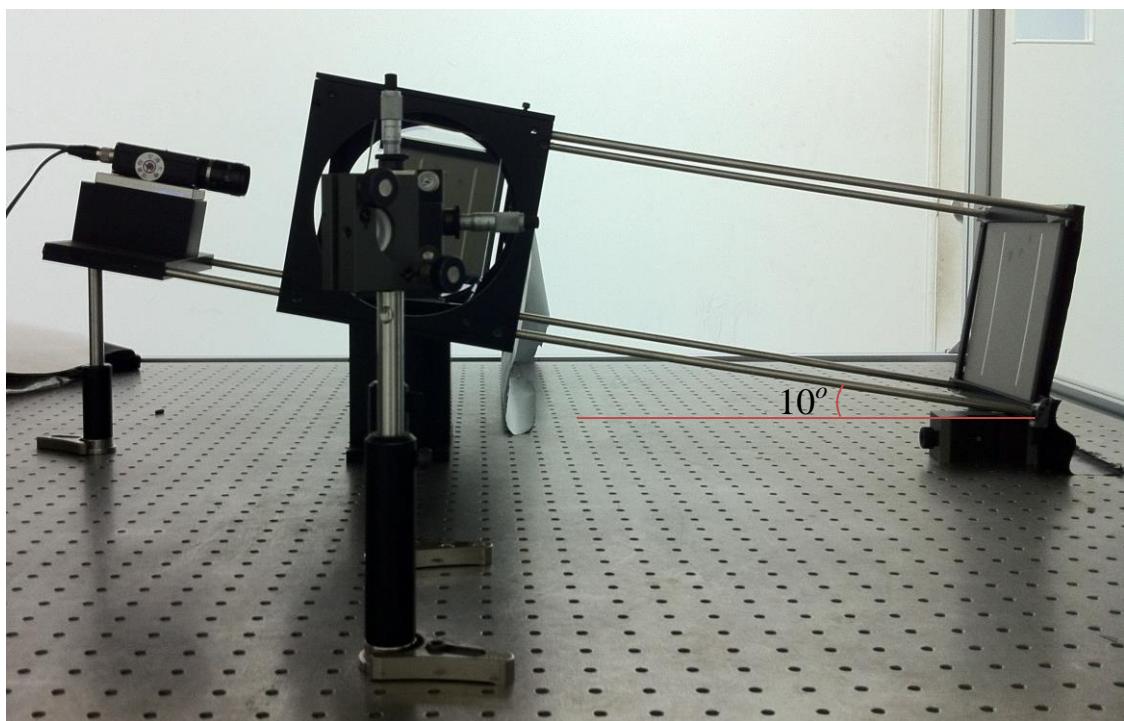


圖 4.2 ESPI 量測系統側面圖

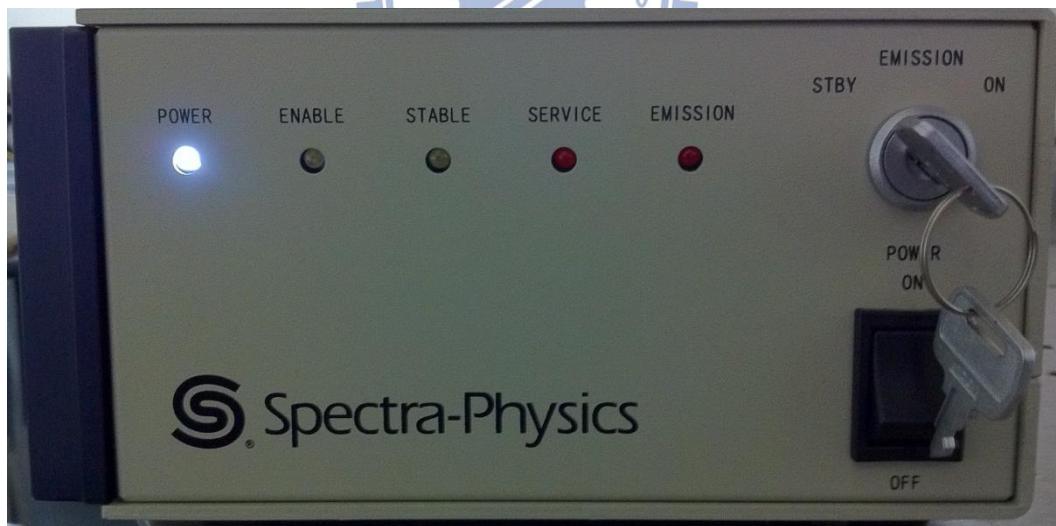


圖 4.3 波長 532nm 綠光半導體雷射

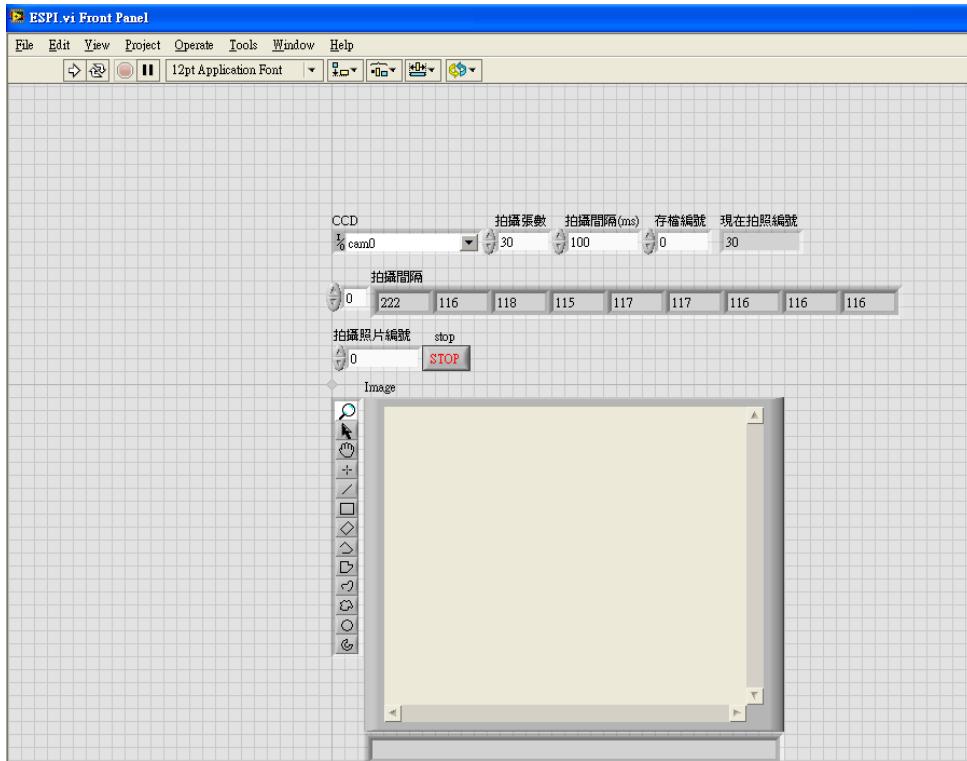


圖 4.4 ESPI 程式介面

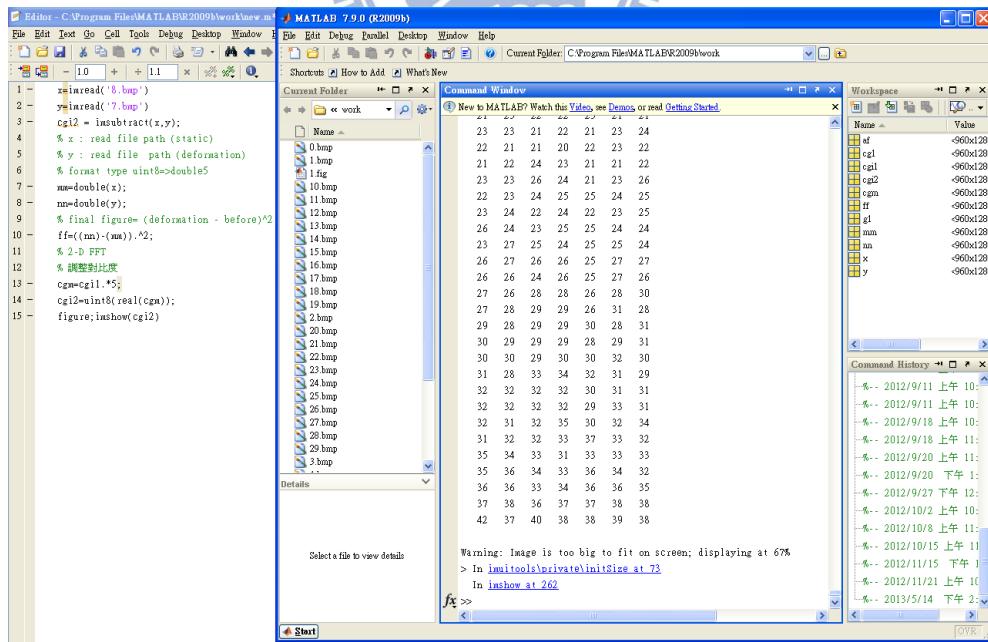


圖 4.5 MATLAB 軟體影像處理介面



圖 4.6 工業鑽石壓頭



圖 4.7 Matsuzawa DXT-3 洛克式硬度測試



圖 4.8 表面裂縫

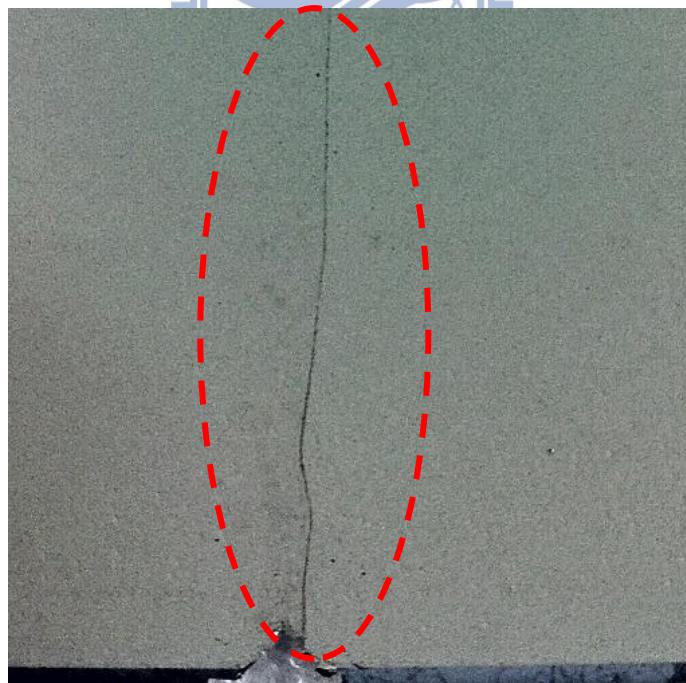


圖 4.9 貫穿裂縫

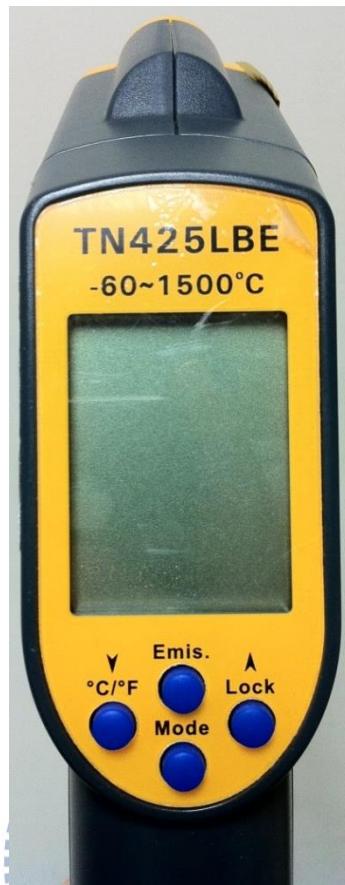


圖 4.10 ZyTemp TN425LBE 紅外線溫度計

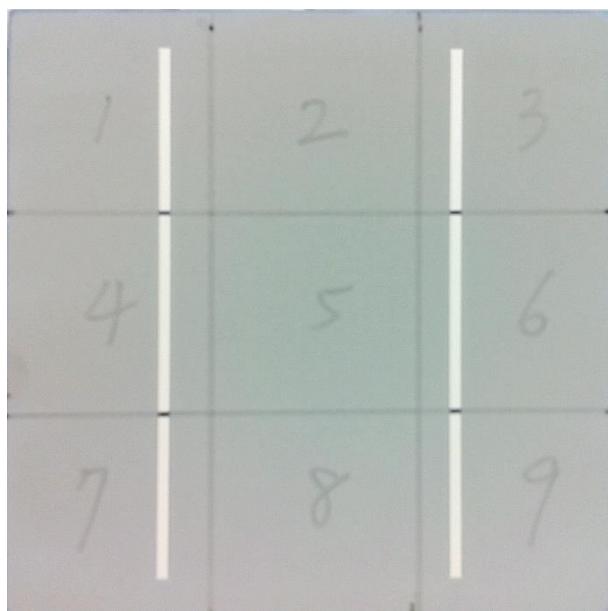


圖 4.11 太陽能電池等距離九宮格示意圖

25.5	25.6	25.4
25.7	25.9	25.6
25.5	25.7	25.6

圖 4.12 太陽能電池等距離九宮格升溫 1 秒結果( $^{\circ}\text{C}$ )

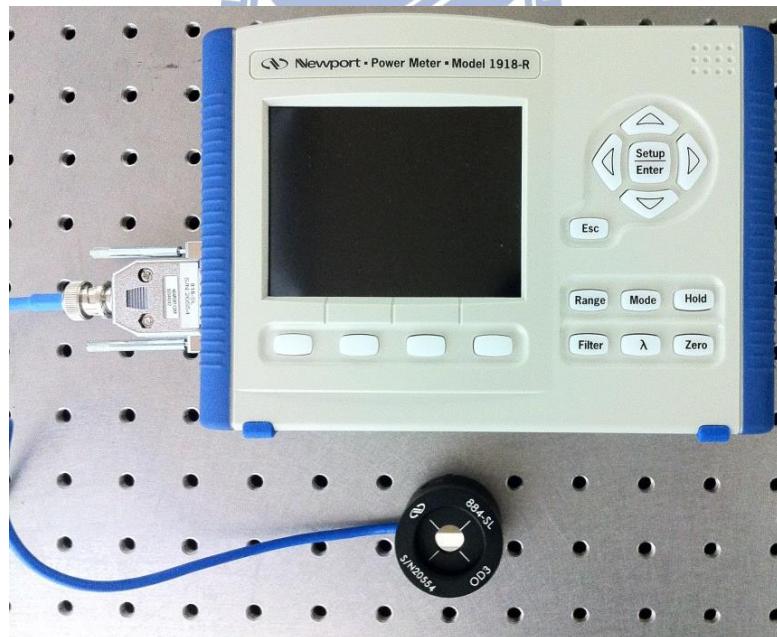


圖 4.13 Newport 1918-R Power Meter



圖 4.14 遮光布

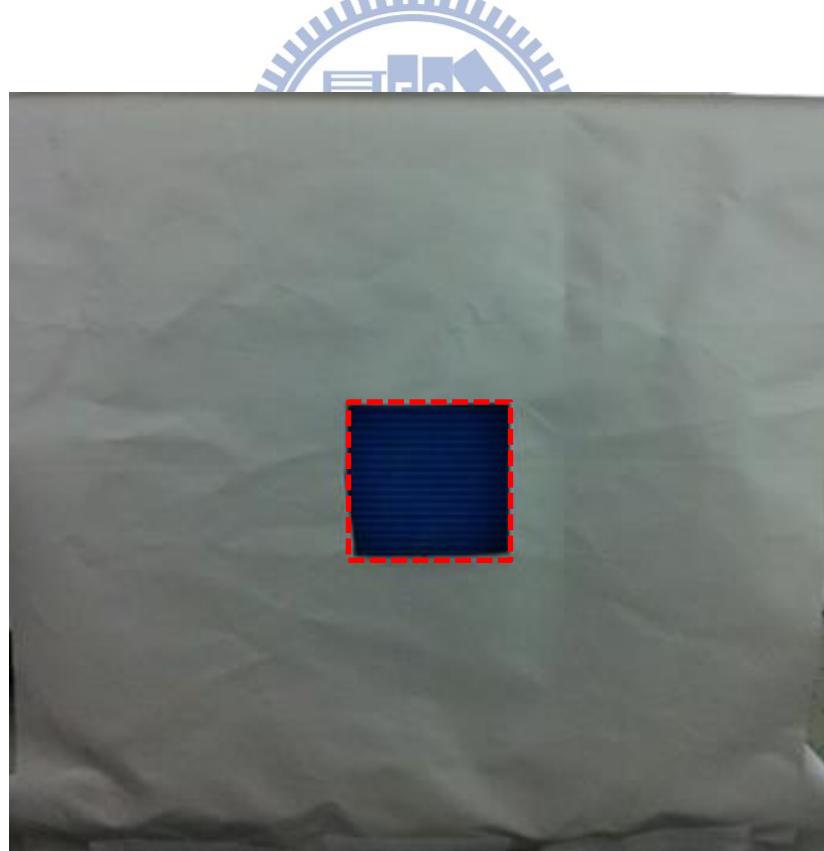


圖 4.15 矩形光罩

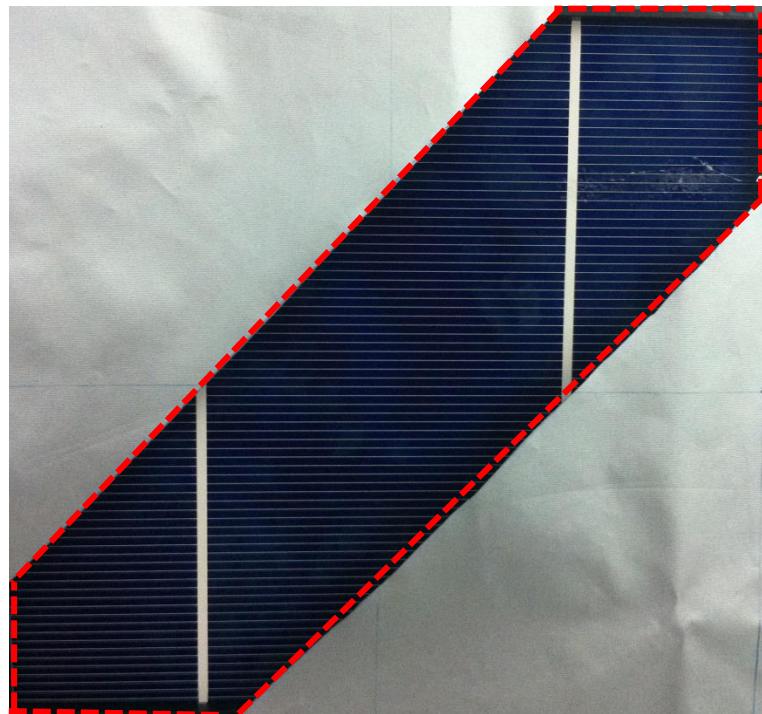


圖 4.16 單對角形光罩

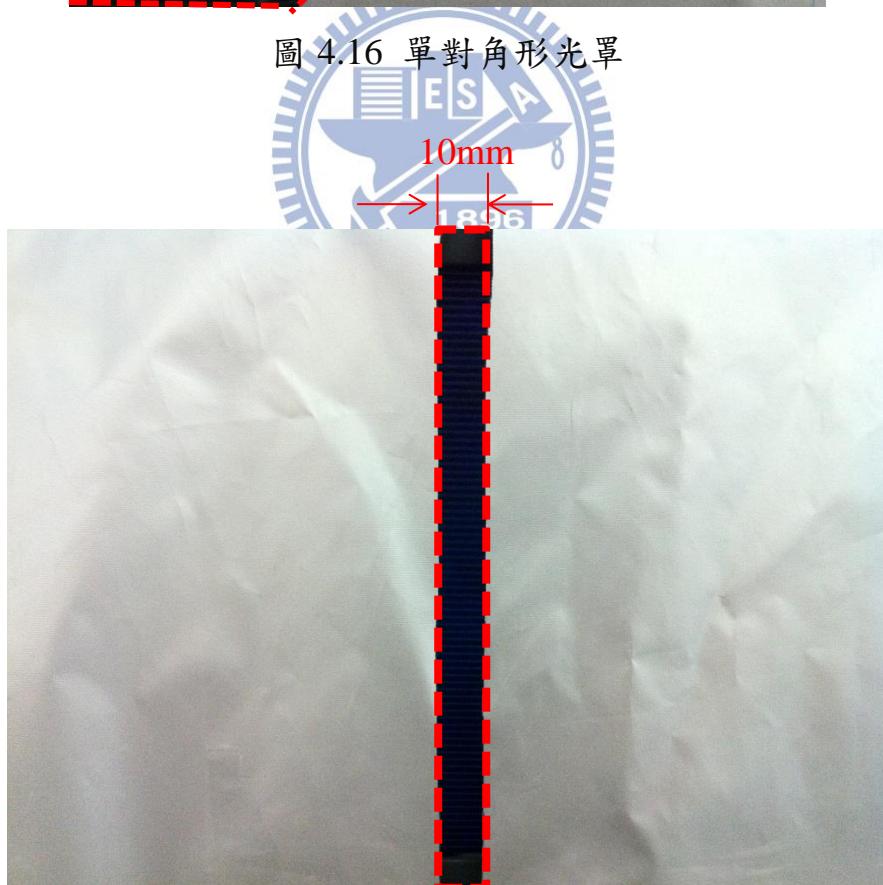


圖 4.17 長條形光罩